ニュースレター グローバルテクトニクスの新概念

NEWSLETTER New Concepts in Global Tectonics

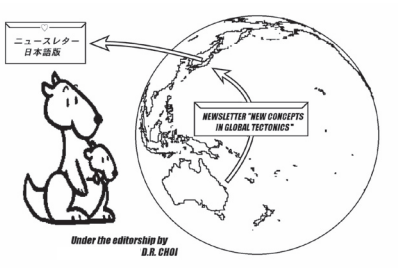
［英語版 No. 65 <http://www.ncgt.org/> から翻訳］

日本語版 No. 65（2013 年 4 月）

■ **Print edition ISSN 2186-9693**

多数のカラー図面は，下記のオンライン版をご覧ください

■ **Online edition** <http://kei.kj.yamagata-u.ac.jp/ncgt/>



編集長：**Dong CHOI**，編集委員会：**Peter JAMES, Australia (PO Box 95, Dunalley, Tasmania 7177); Leo MASLOV, USA (maslovlev@yandex.ru); Cliff OLLIER, Australia (cliffol@cyllene.uwa.edu.au); Nina PAVLENKOVA, Russia (ninapav@ifz.ru); David PRATT, Netherlands (dpratt@xs4all.nl); Giancarlo SCALERA, Italy (scalera@ingv.it); Karsten STORETVEDT, Norway (Karsten@gfi.uib.no); Boris I. VASSILIEV, Russia (boris@poi.dvo.ru); Takao YANO (yano@rstu.jp)**

も く じ

■ 編集者から ［小松宏昭 訳］…… 2

■ 編集者への手紙 ［小松宏明 訳］…… 4

■ 原著論文

Solar activity linked to high-magnitude earthquakes, Stephen A. REYNOLDS

大規模地震に関係した太陽活動 ［川辺孝幸 訳］…… 5

9/56 year cycle: 18th & 19th century world earthquakes, David McMINN

9/56 年周期 :18 および 19 世紀における世界の地震 ［矢野孝雄 訳］…… 10

Can IMF and the electromagnetic coupling between the Sun and the Earth Valentino STRASER

太陽と地球の間の IMF と電磁気のカップリングは破壊地震の原因となりうるのか？ ［赤松　陽 訳］…… 15

Intervals of pulsation of diminishing periods and radio anomalies before M6+ Valentino STRASER

脈動インターバルの減少区間と M6+ の地震の発生前に発見された電波異常 ［岩本広志 訳］…… 19

The Raffaele Bendandi earthquake warnings based on planetary positions, Cristiano FIDAN

天体の位置にもとづく、地震に対する Raffaele Bendandi の警告 ［小坂共栄 訳］…… 24

■ 随筆

Earthquake and volcano “predictability vs crustal diagnosis”, Giovanni P. GREGORI

地震と火山の “予測可能性” 対地殻診断 ［山内靖喜・小泉　潔・久保田喜裕・矢野孝雄 訳］…… 29

The Tethys configuration and principal tectonic features Karsten STORETVEDT and Soheila BOUZARI

テチス海の輪郭と中東の主要な造構的特徴：レンチテクトニクスによる概観 ［杉山　明（支援翻訳者）訳］…… 61

■ 地球科学における政治コーナー

Bad vibrations: Lessons from l’Aquila, Michael KILE

悪感 : ラクイラからの教訓 ［柴　正博 訳］…… 88

■ 出版物

The tsunami threat: Research and Technology, Nils-Axel MÖRNER

津波脅威 : 研究と技術 ［佐々木拓郎 訳］…… 93

■ ニュース　IEVPC press release　地震予知センターは成功裏のテストプログラム終了 ［角田史雄 訳］…… 94

■ 財政的支援について / ニュースレターについて …… 96

連絡・通信・ニュースレターへの原稿掲載のためには，　次の方法の中からお選び下さい：NEW CONCEPTS IN GLOBAL TCTONICS

1) E メール：editor@ncgt.org, ncgt@ozemail.com.au, または ncgt@hotmail.com; 1 ファイルは 5 MB（メガバイト）以下，2) ファックス（少量の通信原稿）：+61-2-6254 4409，3) 郵便・速達航空便など：6 Man Place, Higgins, ACT 2615, Australia (ディスクは MS Word フォーマット，図面は jpg または pdf フォーマット)，4) 電話：+61-2-6254 4409.

放棄 [DISCLAIMER]　このニュースレターに掲載された意見，記載およびアイデアは投稿者に責任があり，当然のことながら編集者と編集部の責任ではありません.

NCGT NEWSLETTER　季刊国際オンラインジャーナルです（発行：3 月，6 月，9 月，12 月）.

日本語版発行：New Concepts in Global Tectonics Group 日本サブグループ

連絡先　〒 680-8551 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学地域学部地域環境学科 矢野孝雄 Phone/Fax 0857-31-5113 EM yano@rstu.jp

翻訳・編集：NCGT ニュースレター翻訳グループ

赤松　陽　岩本広志　川辺孝幸　国末彰司　窪田安打　久保田喜裕　小泉　潔　小坂共栄

小松宏昭　佐々木拓郎　柴　正博　角田史雄　宮川武史　宮城晴耕　山内靖喜・輝子　矢野孝雄

編集者から　FROM THE EDITOR

（小松　宏昭［訳］）

正しい地震発生モデルと複数の学問的な研究方法：巨大地震の予知を成功させるための鍵

Right earthquake model and a multidisciplinary approach: keys for successfully forecasting major earthquakes

よく知られているように，地震の予知は公式には不可能であるとされている．2012 年 10 月に開催された日本地震学会特別シンポジウムの 50 周年記念誌―地震学の歴史とその将来―のレポートの中で，地震学者は社会にうそをついていると非難された．彼らは地震の予知は不可能であることを知っていながら，自らの研究費を守るために彼らの予知 (あるいは予知の可能性) を―彼らの研究は実際の予知とは何の関連性ももたないにかかわらず―利用してきたからである (2012 年 11 月 9 日発行の『週間ポスト』)．2009 年 4 月イタリアの l’ Aquila 地震後に始まった裁判で，地震学者を守るために「地震は予知できない」ことが宣言された．その裁判では，6 人の科学者と 1 人の行政官が懲役 6 年の刑を言い渡された．l’ Aquila の事件は，NCGT 本号の”地球科学における政治コーナー”で詳しく報告されている．

皮肉なことに地震予知科学に関する悲観的で混沌とした現在の状況は，プレートの沈み込みが地震の原因であるというテクトニクス上の支配的モデルによって引き起こされた自業自得の産物である．しかしながら，われわれの研究によって，地球表面での造構運動や火成活動が地球深部のエネルギーに起因することが明らかになりつつある．この新しいモデルは，地球の構造や変動―外核から地表へのエネルギー移動，地震の発生，石油・天然ガスの貯留構造―を規制する断裂構造や海洋底を含む地表地質のより正確な理解に基づいている．さらにわれわれは，地球と太陽や他の惑星との相互作用 , および , それらと造構運動との関係についての研究を始めている．

新しいテクトニックモデルや概念に基づいて，最近結成された国際地震火山予知センター (IEVPC：ここには多くの NCGT メンバーが参加している) は，大地震を発生の数ケ月から数週間前に予知できることを実証してきた．本号ならびに別途公表された最新の報告では，(IEVPC が）3 件の地震予知に成功したことが報じられている．われわれは，地震発生機構とその予知に関する長く続いてきた考え方を転換する歴史的転機に到達している．そこで，私は読者に（新しいテクトニックモデルや概念を）より詳細に解説しようと思う．

最初の例は，カムチャツカの地震である．それは Blot のエネルギー移動概念に基づいて予知された (Geophyque, v.13，Orstom，Paris，206p.)．2008 年オホーツク海北部で起こった 2 つの深発地震が浅部へどのように伝わっていくか，が調べられた．地質構造と過去の地震のデータから，震央はカムチュツカ沖の海溝につながる大陸斜面に特定され，地震の発生は 2012 年の上半期，マグニチュードは 7.4 以上と予測された．われわれとは別にペトロパブロフスクからカムチャツキーやカムチャツカ在住のロシア人地震研究者は，彼ら自身の研究にもとづいて，2 月にマグニチュード 6 ～ 7 の地震がおこる可能性を地域住民に警告した．このニュースは，われわれを IEVPC の設立に駆り立てた．予測された通り，千島～カムチャツカ～アリューシャン (カムチャツカ・トライアングル) の広い地域の沖合の大陸斜面に想定された震央域では，3 月から特に 5 月以降，中規模地震とともに地震雲やガス噴出，地熱上昇を含む様々な種類の前兆現象が始まった．その活動は，10 月下旬～ 12 月初旬に頂点に達した．その時期に，短時間に繰り返す強力な信号― VLF 電磁波の伝達異常―がシアトル - 日本間の通信に IEVPC 会員である早川博士によって発見された．異常は 10 月 1 ～ 3 日, 11 月 3 ～ 3 日, 11 月 16 日の 3 回にわたって出現した．そして VLF 異常の 12 ～ 14 日後に起きた各々の前兆現象の後に，カムチャツカトライアングルの大陸斜面でマグニチュード 6.8（11 月 16 日発生，のち USGS によって 6.5 に訂正された）を含む強い地震が発生した．最初の VLF 異常サイクルが以下のような興味深い事実―日本の観測点が 2011 年の東北地震 (M=9.0) 直前に観測したものを超える異常を観測した―を含むことは注目に値する．われわれは，まさにこれが予知された地震エネルギーを表していると断言できる．ロシアの地震学者が発表した 11 月後半の地中ラドンガスに関するさらなるデータは，その時にラドン放出が非常に盛んだったことを示している．

われわれは，10 ～ 12 月にカムチャツカトライアングルで起こった地震は，もともと大地震の先駆地震であると考えていた．しかしそれらの地震は，北西太平洋と震央域の広い地域において多くの前兆現象を示しているにも拘らず，本震の引き金とはならなかった．以前に発表した論文で述べたように，本震は約 1500km の線に沿って分布しており, 10 月 14 ～ 22 日にマグニチュード 4.6 ～ 5.8 の地震が 10 回発生し, 本震のエネルギーを放出した．そのうちのいくつかは，想定された震央付近で発生した．したがってわれわれは，幸運にも，マグニチュード 7.4 以上の単一の地震―太平洋の広大な地域に押し寄せる多

くの命を奪う津波を伴う―の代わりに，予想された時空の範囲内に予知された多くの地震を見てきたというわけである．

われわれは，海面温度 (SST) と長波長放射線 (OLR) について綿密に研究してきた．放射線のエネルギーはオホーツク海の深いところで発生し，9 月初めに最高値となり，その後，震央域では弱まった．しかし，北西太平洋深海における強力な熱源は，この区域に熱を供給し続けていた．9 月～ 12 月初めには，地震予知域で顕著な熱ピークがみられ，12 月後半に急激におとろた．熱源の活動がおとろえていく期間に，コールドロンを形成する火山活動がこの地域に始まった．その地域の熱史は Kubota (Boll. Soc. Geol. It., spec. no.5, p.159-168) に記載されているような陸地のコールドロンの発達史に比較される．このことは，強い地震が起こらなかったことを説明する．すなわち，地球深部からのエネルギーは 10 月下旬の一連の地震と活発な火山活動のもととなったが，エネルギーを封じ込める構造はこの地域の海洋化ために不完全で漏れやすかったのである．

第 2 の例は，2012 年 11 月 11 日に起こったミャンマーの地震 (M=6.8) である．IEVPC 会員のひとりである Bapat 博士は，2012 年 9 月 21 日～ 11 月 5 日の 1 ヶ月間以上にわたってインド東部～ミャンマーで異常に高い電子密度を記録した．海面温度も，北 (または陸側) から南 (ベンガル湾) に向かって強い発熱を示した．彼は私に，その他のデータの提供を要請してきた．私は，東インドからミャンマーでヒマラヤ山麓からのびてくる NW-SE 方向の大断層 (N-S 方向のシャン高原境界断層に斜交) に沿った広い地域で，本震の 58 日前の 9 月 14 日に多くの地震雲が発生したことを衛星画像で見ていた．その後，2 つ地塊境界断層の交差部で地震が発生した．もう一つ注目すべきは，11 月 11 日の地震の震央近くで，9 月 15 日，10 月 3 日および 10 月 20 日に放射状・同心円状の雲 (晴れ間) 分布が出現したことである．とくに最後に出現した雲は，まさに震央に一致していた．Bapat 博士は彼の観察記録を 11 月 8 日 (それは地震の 3 日前であったが) 付でインドの学術誌 Current Science に投稿し , 合わせて , 11 月 6 日 (地震の 5 日前) にニューデリーにあるインド国家災害研究所 (NDMA) に以下のような地震の予兆現象を報告した．― 1) 震央上空には集中的な雲が出現する (結果は正しかった). 2) 地震の規模は M=6.5 ～ 7.0 である (それは M=6.8 で正しかった). 3) 地震の起こる時期は 11 月 5 日から 2 ～ 4 週間後である (1 週間のずれがあったがほぼ正確であった).

Bapat 博士とは別に日本の早川博士は 10 月 31 日にオーストラリアと日本の間の VLF 電磁波の異常な伝播を見出し，彼の弟子たちにフィリピン～インドネシアのどこかの地域で M=6.0 以上の地震が起こるだろうとの警告を発していた．彼は，2012 年の 10 月 31 日付の手紙で私に「ミャンマーはフレネル * ゾーンの外にあるけれども，もしあなたの推定した地震のマグニチュードが 6 より大幅に大きいとしたら，われわれの出した予報は 2004 年の一連のスマトラ地震の中のミャンマーの地震と符合する」と述べている．彼の見出した VLF 波の異常は，通常は地震発生の 1 ～ 2 週間前に現れる．したがって，そのことはミャンマーで起きた地震と一致する．というのは，それ以外に，この地域でこの時期に M=6.0 以上の地震は起こっていないからである．

第 3 の事例は，インドネシアのモルッカ海である．IEVPC(国際地震火山予知センター) は，初期の発行物でモルッカ海に関しての警告を発した．それは，2010 年 7 月に起きたセレベス海北部の非常に強い群発型深発地震 (Choi, NCGT no. 56, p. 75-85, 2010) に基づいている．試験的な地震予知は，本震の 2 ～ 3 週間前に，副次的現象のような特異な広域集中パターン (おそらくそれはイオン化されたラドンの放出で形成されるものと考えられる) に基づいて行われた．それは，われわれが主要な歴史地震を研究している間に学んだことである．予想通りマグニチュード 6.0 の地震がセレベス海の予想された区域で発生した．この試みにも拘らず，モルッカ海域は，すでに象徴的な先駆として 8 月 31 日にフィリピンのサマー島で起きたマグニチュード 7.6 の地震を機に，活動的段階に突入していた．この区域ではほぼ毎日，中程度～強い揺れの地震が起きている．

すでに述べられたカムチャツカ，ミャンマー，そしてインドネシアにおける IEVPC の包括的研究は，これから起こりそうな大地震を探知するのに間違いなく有効な前兆現象が存在することを証明している．それは，1) 長期的には規模の大きな深発地震 (ET 概念)，2) 中期的には SST，OLR そして TEC のような地震雲と電磁気 / 熱現象，3) 短期的には VLF 波伝達と電磁気的な現象である．これらのデータが地質学と結びついたとき，われわれはこれから起きるであろうマグニチュード 6.5 以上の地震を十分に予知できるようになる．

加えて権威ある地震学者の組織には未だに認められてはいないが，2011 年 3 月に起きた日本の東北地震は，全世界地震予知ネットワーク (GNFE) によって正確に予知されていたのである．彼らは急激で強力な超長距離重力異常を地震の 4 日前に見出し，2 日前にはウェブサイトに地震の起こる場所，時間そしてマグニチュードをピンポイントで正確に公開した (http://www.seismonet.org/page.html? node=130&id file=129)．他に地震予知に成功した例としてよく知られているのは，1975 年の中国の海城地震である (EOS, 58, p. 236-272, 1977).

これらすべての地震予知の成功例という (希望の) 光があるのに，あなたはまだ地震予知は不可能と考えるのだろうか．もしわれわれに意志と決意があるならば，われわれは地震のメカニズムを理解し，多角的な研究方法を採用することで地震の前兆現象を解読することができる．これにより多くの命が救われるであろう．

編集者への手紙　LETTERS TO THE EDITOR

（小松　宏昭 [訳]）

全地球的造構運動の新概念ニュースレターの編集者へ

次号 NCGT ニュースレター掲載予定論文について B. Ericson との再調整をいただき , ありがとうございました．私は，あなたに Geoscientist との通信に関するより多くの情報を送りました．それによって，あなたが望むように，より多くの人々が関心を持つようになると考えられます．

私は，プレートテクトニクスを否定する海洋底岩石の証拠を指摘した私の小論文を掲載しないとの手紙を (Geoscientist 誌から) 受け取りました．そして NCGT 62 号にそれを公開しました．その後，私は議論の余地のないより詳しい意見を付した改訂版を投稿しました．私は , 次のような返事を受け取りました．

「プレートテクトニクスの標準的なモデル，そして特に沈み込みモデルと合致しないと思われる海底重力異常について論述したあなたの論文を書きなおしていただき感謝いたします．

編集会議での広範な議論の後で，私は次の点において残念な気持ちを持っています．すなわち，あなたが多くの明白な異常を確認しているにも拘らず，多くの現象はあなたが彼らに提示したのと同じくらいに異常ではないかもしれないということ , 多くは , その位置がおよそわかっているだけの疑問の多い記録のままであること，これらは精密に調べる価値があるのに，「面白そうなことではあるが特殊な例である」として片づけられ，つまらない説明がなされてしまうこと，そしてもしそれらがそうでないとしても，かれらはサブダクション (沈み込み) に賛成する圧倒的な証拠に対して十分に対抗する論陣を張ろうとしないということです．

端的にいうと，会議は，沈み込みという概念が，" 専門家査読という腐敗した力の効果によって，反証による破綻を回避しようとしている怪しげな論理モデル " という範疇にはいるとは感じませんでした．この概念は，マントルプリュームの実在性や，チュクシュルーブ・クレーターと白亜紀末期の隕石衝突との関係といった問題がもちあがったときに，ある妥当性をもって，それらの合理性がみとめられたのと同等に担保された概念なのです．それゆえ，私たちは (あなたの原稿を) 印刷しないことに決めました．J. McCall(編集責任者) が，あなたに手紙を出すでしょう .」

私は , 私の小論の中で，「沈み込み」という考え方が誤りであることを証明する重要で実在する事例を指摘しています．小論の主な目的は，海洋底拡大説が誤りであることを示す大洋底岩石の証拠に読者の関心を向けることです．この指摘は，私が Geoscientist から受け取ったいかなる書簡にも述べられていません．読者は，上に引用されたコメントの残りから，深海掘削やドレッジを広範囲に実施した人たちは彼らの調査船の位置を漠然としか知らず，得られた岩石サンプルを鑑定できず，正確な年代を決められないとの意味から，自らの結論を導くことができます．３番目の段落は，私に何もコメントを要求しませんでした．2012 年 4 月に私は，より詳細と海洋底拡大が誤りであることを証明する決定的な証拠に関する文献を記した私的な手紙を J. McCall に送りました．返事はありませんでしたし，私もそれを期待はしていませんでした．私は，「沈み込み」を支持する圧倒的な証拠も，あるいは，ある想定された科学雑誌に掲載されたときに違和感をもつだろうという情報もあたえられていません．私は何か過ちを犯しているのでしょうか．

Geoscientist の 10 月号で W. Jacoby が，ウェゲナーと彼の考え方を紹介しています．氏の結論的な文章は，「・・・・われわれはウェゲナーを真の『大陸移動のニュートン』―われわれ移動説信奉者を作った科学者―と考えるべきである」と書いています．私は，この主張に挑戦する短い手紙を編集者宛に送りました．

「W. Jakoby 教授のウェゲナーについての興味深くて有益な論文 (Geoscientist 2012 年 10 月号) には，重大な欠点があります．私たちは全員が移動説論者ではありません．私の知るところでは移動論者ではないメンバーは，私たちの学会では非常に少数です．加えて，大部分のロシアと日本の地質学者は移動説の論者ではなく，オーストラリアとニュージーランド，そして世界の他の国の実践的および非実践的な地質研究者の多くはこの考え方を支持していません．理由は簡単です．過去 60 年にわたって，海洋底拡大と沈み込みが誤りであることを証明する重要な (幾人かは議論の余地のないものだと言う) 地質学的・地球物理的な証拠があるからです．もっとも，これらの証拠のほとんどはこれまでに Geoscientist や Journal of the Society には掲載されことはありませんが．その結果，この惑星の歴史に関連して活発で高度な議論がこれまでも，そして現在も行われ，成果をあげてきました．こうして，地震や火山噴火の正確な長期予報や金属鉱床の形成場所，石油や天然ガスの貯留場所をはじめ，多くの地質学的に重要な事項に関するモデルが提示されてきました．移動論者は，それらを取り上げようとしません．なぜなら，彼らの仮説にとってそれらが必

要ないからです．ウェゲナーは知識に対して重要な貢献をした真に著名な科学者ですが，その貢献は地質学に対してはあまり重要ではありません―われわれは，そのように彼を記憶すべきでしょう．」

4 日後，私の e-mail は待ち時間が消滅したため送り返されてきました．すなわち，Geoscientist 誌は，現在，彼らと私の電子通信を遮断しているのです．彼らのウェブサイトが「強固な意見を歓迎する」と主張しているにも拘らず，専門家査読よる腐敗が現在のドグマを論破する反対意見や証拠を阻害するために使われたのではないかと疑う私は偏執病者であるのでしょうか．なぜ私が，かなりすぐれた図書館を併設する非常に高価な晩餐クラブになっているロンドン地質学会が，その初志から逸脱していないということをいったい誰が私にいえるのでしょうか (由緒ある学会はもはや変質してしまっているのです).

親愛なるあなたへ
Stephen Foster
hero5.premiere@blueyonder.co.uk

* 訳者注 [ウィキペディア (Wikipedia) にもとづく]: フレネルの式・・・光は屈折率が異なる物質間の界面に入射すると一部は反射し，一部は透過 (屈折) する．このふるまいを記述するのがフレネルの式である．電場の振幅反射率・振幅透過率をフレネルの式と呼ぶことが多いが，エネルギー反射・透過率を表す式をフレネルの式と呼ぶこともある．

予告　ANNOUNCEMENT

NCGT 編集委員会は，現行の NCGT Newsletter を 2013 年 3 月発行の次号から NCGT Journal に変更することを決定した．これは，世界の地球科学界における NCGT の現状と NCGT グループの将来の活動を考慮するとより適切な名称である．

原著論文　ARTICLES

大規模地震に関係した太陽活動
SOLAR ACTIVITY LINKED TO HIGH-MAGNITUDE EARTHQUAKES

Stephen A. REYNOLDS
Independent Earthquake Researcher / Amateur Astronomer, Christchurch, New Zealand
sareynolds@xtra.co.nz

（川辺　孝幸 [訳]）

要旨：このレポートでは，現在の調査をもとに，強い太陽活動が大規模地震のトリガーのポテンシャルとなり得るかどうかを研究する．2001 ～ 2011 年の GOES（[静止] 環境観測衛星）による磁力計データが世界中の M7.0 以上の地震に対して評価され，これらの地震は強い太陽活動期に集中発生するという結果がえられた．すなわち，地磁気によって励起された電流と同様な方法で増加した電気エネルギーが断層線に供給される，という仮説は有意な統計的相関性を示す．Alaska の Gokona に基づく HAARP（High frequency Active Auroral Research Program）による地表データは，地電流の現在の理解に沿ったこの仮説を支持した．調査された同様な研究は，それによって，強い太陽活動と大規模地震のトリガーとの間に統計的に正の相関を示す地電流と磁力場の大規模な増加が地震の増加をもたらした，可能性のある同様な過程を示した．
キーワード：Solar, earthquakes, geomagnetic-induced current, GOES, magnetometer

はじめに

通常の太陽活動調査のなかで，多くの大規模地震の前に強い太陽活動が起きることが注目された．たとえば，2011 年 3 月の Mw9.0 の日本巨大地震のちょっと前に，いくつかの強い太陽フレアーが現れている．地震活動に対する強い太陽活動との一致が最初に考えられたが，その成否を確かめるさらになる研究が必要になった．

地磁気による誘導電流と同様な方法で，増加する電気的エネルギーが断層線に供給されたとの仮説が提唱された．この仮説は，大規模地震に先立って，地表では磁力計と地電流と地磁気場がどのように変化するかを，現在の知識を用いて検証された．太陽活動が地震に影響を持

つという標準的パラダイムに替わって，観測された強い太陽活動と地震との間に高い相関がある可能性を信じて，この調査研究の目的は活発な太陽活動が大規模地震のトリガーになり得るかどうかを調査することである．もし，リンクが存在すれば，トリガーメカニズムに対する我々がよりよく理解することによって，将来の正確に予想される地震に対する信頼性を高めることになる．

太陽活動の測定

太陽活動は，多くの場合，コロナホールやフレヤー，磁力フィラメント噴出などが起こるような強い太陽活動の後で地球上で観測される．強い太陽活動イベントは，しばしば，太陽風嵐によって地球へ荷電粒子を送りつける．強い太陽活動が機器類にダメージを与えるため，人工衛星と汎世界的通信に対するリスク評価を目的に，いくつかの人工衛星と観測所で太陽活動が観測・測定されている．送電や他の機器に対してダメージを与える地磁誘導電流によって，まれに，地上における電力供給が停止することもある (Marusek, 2007).

太陽活動測定のための 1 つのパラメータは GOES 磁力計データであり，磁力計データは 2 つの衛星からもたらされる．何年もの間に，いくつかの GEOS が打ち上げられ，現時点では GEOS13 と 15 が運用中である．これらの衛星は，静止軌道を維持している．” 静止軌道” という語は，” 地球” を意味するギリシャ語” geo” と” 同時 (at the same time)” を意味する” syn chromos” にちなんでいて，それ故，静止軌道衛星は同じ距離と同じ経度を保って地球を周回し，衛星は地球に対して止まっている．

人工衛星は，それぞれの軌道で地球磁場を測定している．地球の磁力場は，磁気圏として知られる” 半球形のもの (bubble)” の中に含まれている．基本的には，強い太陽イベントによる荷電粒子を含む太陽風嵐にみられる太陽活動変化は，GEOS 衛星に対して，下方向もしくは上方向に磁気圏を押すか引き延ばす．太陽風は，磁気圏の半球を押して圧縮し，衛星の軌道に対して磁気場を低める．荷電粒子は，結局，磁気圏半球を突破して満たし，それによって，磁気圏半球は衛星軌道から伸張して遠ざかる．この際の圧縮もしくは伸張のレベルが，太陽活動強度の指標となる．地場レベルの変化は，衛星の軌道ごとに，時間 (標準時，UTC) 対磁気場の変化として 1 分間の平均時間間隔で 1 日を通して測定される (Russell and McPherron, 1973; Lakhina et al., 2006).

相関関係解析の方法

GEOS による磁力計データは，地場強度データの時間変化を記録しているために，強い太陽活動と大規模地震との間に相関関係が存在するかどうかを，適正な方法で評価することを可能にする．

地場強度は，ナノテスラ (nT) という単位で測定される．基準線は 50nT または 50nT 近傍に設定され，磁場強度変化の両方向への変化，すなわち，下方 (衛星軌道の下方移動 : グラフ上では谷) と上方 (衛星軌道から外側に離れる : グラフ上では山) に対応して，それぞれ大きくなる．50nT からの上下変化は，強い太陽活動を適切に示していて，より容易な評価の基準となる．

静穏な場合，1 日分の曲線は 100nT を中心としたサイン曲線になる (図 1). 上昇のスパイクまたは 50nT 以上の磁気圏半球の拡張は，グラフを 150nT かそれ以上に押し上げるであろう．下方のスパイクまたは 50nT かそれ以上の縮小は，グラフを 50nT またはそれ以下に押し下げるであろう (図 2).

太陽サイクルはおよそ 11 年周期であり，太陽活動が活発な極大期と太陽活動が低調な極小期を含む．それゆえ，極大期は極小期に比べて，GOES 磁力計グラフのサイン曲線からさまざま程度に外れた追加的変化が生じる．強い太陽活動が大規模地震のトリガーになり得るかどうかの真の指標を得るために，GOES の磁力データを解析す

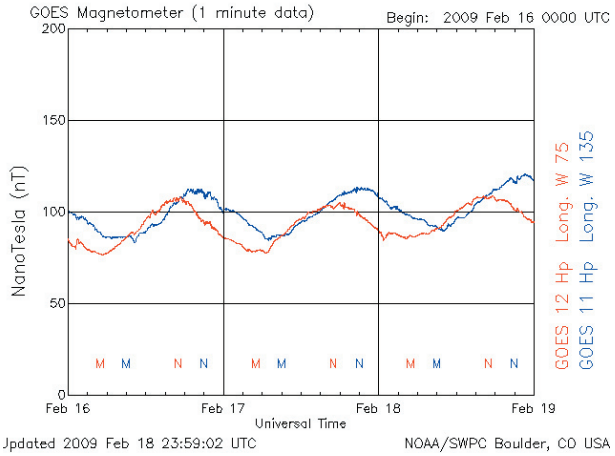


図 1 静穏日の曲線を示す GOES 磁力計グラフ．M：衛星の下の地球が夜間，N：衛星の下の地球が昼 (National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2009).

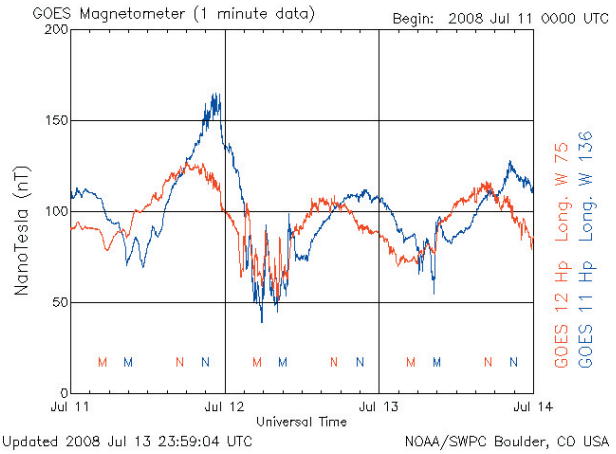


図 2　強い太陽活動期間中の磁力変化を示す GOES 磁力計グラフ (National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2008).

るのに用いた 2001 ～ 2011 年のデータには，太陽活動の極小期と極大期を含む 11 年間が含まれている．

米国地質調査所 (USGS) のデータベースは，2001 ～ 2011 年のマグニチュード 7.0 以上の世界中の地震に対する，必要な期間をカバーする最新データファイルである．データベースでは，必要な世界標準時 (UTC) とマグニチュードをリストすることができる．

まず，必要なデータ量を減らすために，2001 ～ 2011 年におけるマグニチュード 7.0 以上の地震 (計 173 個) が GOES の磁気変化に対してプロットされた．次に，2009 ～ 2011 年に対する高解像度解析のために，マグニチュード 6.0 以上の地震をプロットした．

解析結果

地震は，磁気変化と同じ日に，その日の変化の最中 (図 3) か，その日の変化の終了後 (図 4) のいずれか，そして，後者の場合には磁気変化の 9 日後までに起こっていることがわかった．

マグニチュード 7.0 以上の地震の大多数は，磁気変化と同じ日に (41.6%)，次いで翌日 (24.8%) に起こっていて，翌々日以降には大きく減少する (図 5).

同様な結果は，2009 ～ 2011 年のマグニチュード 6.0 以上の地震でも，31.4% が磁気変化と同じ日に，15.8% が翌日に起きている．翌々日は 14.3%，3 日後は 13.8%，4 日後は 7.6% で，その後減少した．

太陽サイクルの全期間中におけるマグニチュード 7.0 以上の地震の評価において，同日と翌日に地震の起きる割合は，年ごとに増加した．これは，2011 年のパーセンテージは，2009 年の磁気変化の同日と翌日に発生する地震よりも増加しているので，マグニチュード 6.0 以上の地震の評価を行えば，ほとんど同様の傾向を示すであろう．

誘導電流に関する議論

これらの結果を有効にし，統計的偶然の一致を排除するために，このパターンをつくるメカニズムと，このプロセスの駆動要因を解明することが必要である．検証は，他の地震トリガーの一部となりうる太陽活動または磁気変化を示すあらゆる他の研究を含む．

50nT 以上の磁気変化が地震群をひきおこすという仮説は，非常に強い太陽活動による停電を引き起こす地磁気誘導電流の作用に類似している．

非常に強い太陽活動の間，荷電粒子が磁場に捕らえられることによって，地球の周囲に赤道環電流が生成される．赤道環電流は，地球の地表面磁場との干渉によって生じ，それを減少させること (これは，地上磁力計で検出可能) が知られている．赤道環電流が十分に強ければ，地球磁場の動きが速く，大きな変化または動きをもたらすであろう．それによって，地球磁場は跳ね返されるであろう．この運動の中にあるいかなる振舞いの物質でも，それに

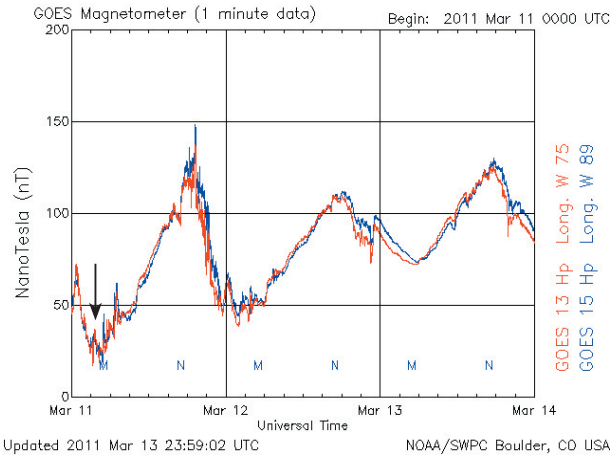


図 3 磁力変化中のマグニチュード 9.0 の地震を含む GOES 磁力計のグラフ．地震（矢印）は，2011 年 3 且 11 日 05:46UTC に起こった (National Earthquake Information Centre United States Geological Survey, 2011). (National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2011).

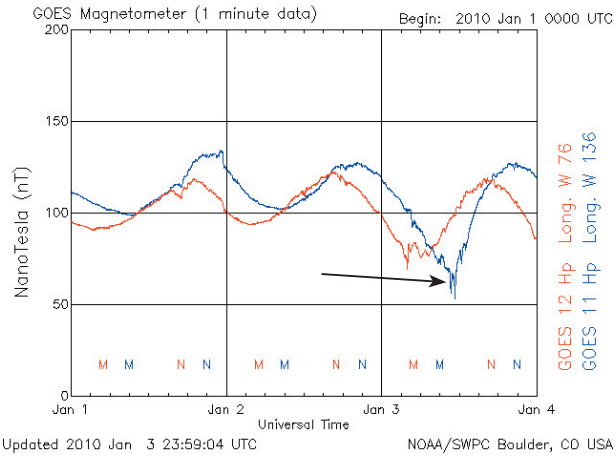


図 4 磁力変化後，同じ日におこったのマグニチュード 7.1 の地震を含む GOES 磁力計のグラフ．地震（矢印）は，2010 年 1 月 3 日 22:36UTC に起こった (National Earthquake Information Centre United States Geological Survey, 2010). (National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2010).

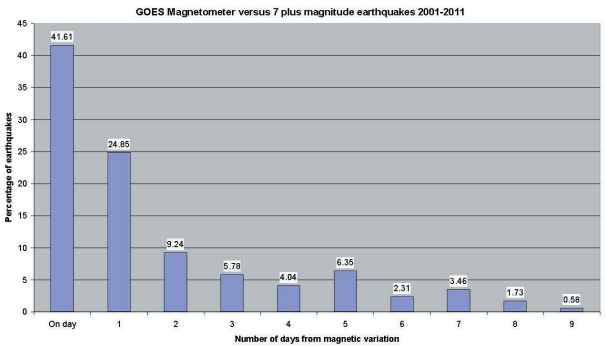


図 5 2001 ～ 2011 年の GOES 磁気変化の最中と後に起こったマグニチュード 7.0 以上の地震の割合．

よって，地磁気誘導電流と呼ばれる電流が生じて電圧が上昇するだろう．停電は，それによる変圧器と他の機器のダメージによって引き起こされうる．地磁気誘導電流は，また，地下のパイプラインでも起きることが知られている (Marusek, 2007).

断層線は水を含むことができ，岩石中には金属や石英が含まれているため，大まかに見ると，大きな導電体である．理論的には，(停電をもたらすのに必要な変動より小さい) いかなる妥当なサイズの変動も，地電流を増加させ，それによって断層線にエネルギーを与えるのに十分であろう．停電を起すものに比べてより小さい変化は，その増加に応じて導電体に必要なサイズの断層線が選ばれる．それによって数日先かその先に，発生前のどんな地震でも GOES の磁気変化をもたらし，地震群がひきおこされるであろう．

HAARP データによる有効性の検討

さらなる検討を進めるには，GOES 磁力計の 50nT かそれ以上の変化が地球地場の地表レベルにおける降下を引き起こすのに十分であるかどうか，を検証することが必要になる．地表レベルでの降下は，もしかすると断層線にエネルギーを加えながら，その地球を回る回転によって形成される赤道環電流の直下に起こるであろう．

地表レベルにおける地磁気変化は，GOES 磁気変化のすぐ後に，または数時間後に，赤道環電流と自転に依存して，地震に先行して起こるはずである (図 6，図 7).

高周波活性オーロラ調査プログラム (HAARP;The High frequency Active Auroral Research Program) は，UTC で示される地表ベースのフラックスゲート磁力計グラフに関するアーカイブを含むデータへのアクセスの利便性のために選ばれた．地震については，アラスカの HAARP に近い地震が検討された．それゆえ検討された地震は，太平洋を横切って日本を含む東経 130°までの，経度幅で 100 度の北半球からのものである．この範疇にあてはまる GOES 磁気変化後 3 日以内の地震が，余剰電流によって最も誘発されそうであることから選ばれた．読み取りは，地磁気場の鉛直変化を示す Z 要素 (グラフの青線) を使っておこなわれた (図 7).

地表における磁気変化は，それによって，その組み合わせが他のいかなる要素でもなく太陽活動に影響を受けそうな変化のサイズと期間という点で，GOES 磁気変化に類似する．GOES 磁気変化の経過は，地表の経時的 HAARP 変化にもしばしば見られた．

GOES 磁気変化による緯度経度と時間の枠内に発生した 35 の地震を検討すると，すべての地震は GOES 磁気変化後 - 地震前に，地表における谷 (dip) を示した．

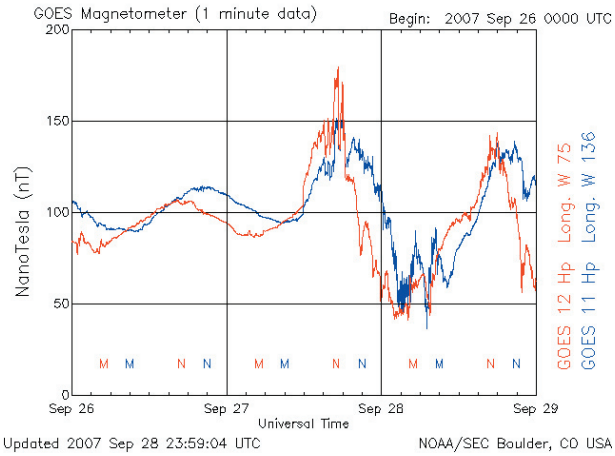


図 6 HAARP 磁気変化の前に起こった GOES 磁力計の磁気変化のグラフ (National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2007).

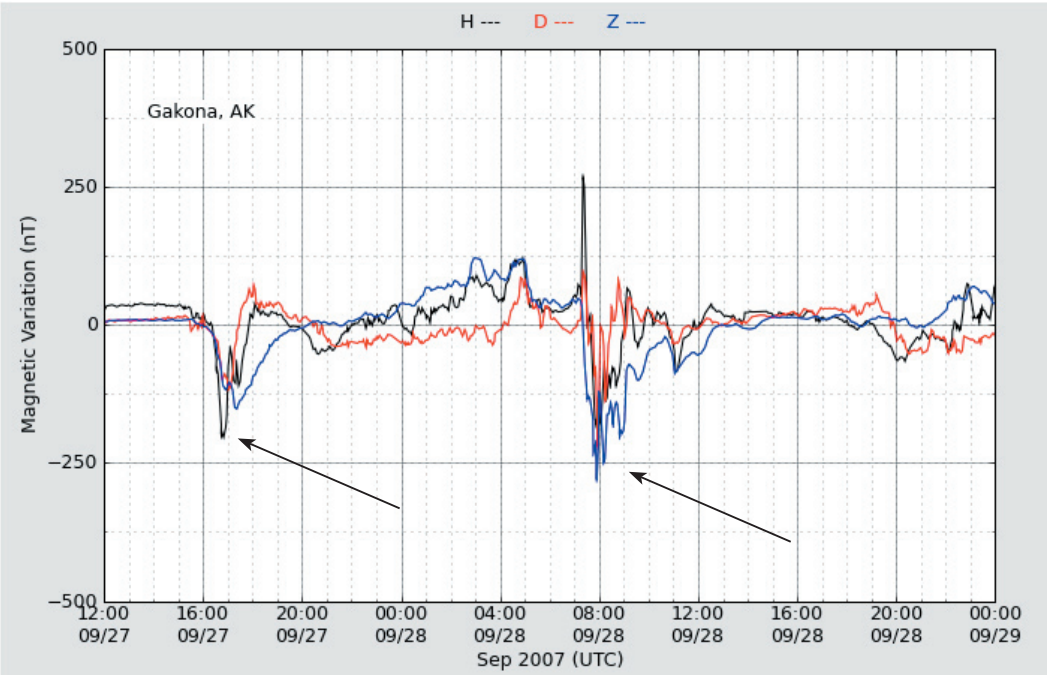


図 7 西南日本のマグニチュード 7.5 の地震に先立っておこった HAARP 磁気変化 (National Earthquake Information Centre United States Geological Survey, 2007). (The High Frequency Active Auroral Research Program, 2007).

HAARP における地表磁気変化が，日本の地震と同じ日ではなくその２日前に起こったことから，最初の GOES 磁気変化の検討とともに，GOES 磁力計のグラフデータの１つの組み合わせを再検討する必要がある．太陽活動が２日前から活発になっていて，その上，強い太陽活動の初日には，地震に先立って，地表レベルでの降下が HAARP のみで起こっていたことが明らかになった．地震に先立って震央の上に赤道環電流が生成されていなかったが，最初の GOES 時期変化 (検証前の) は太陽活動の初日のみであった．サイズと継続時間を比較されたこの地震に対して再検討された GOES 対 HAARP のサイズと継続期間は良く対応し，そして，それゆえ，これは地震のトリガーであった可能性がある．わずかに上昇する磁気変化の”２日”後と”その日”に起こるわずかな降下に起こる地震に対して，統計的変化は重要でなかった．その結果，地震の大多数は，依然として強い太陽活動に向かって群れをなす．強い太陽活動の間，もしくは少し後に起こる地震の大多数において，この出来事に対する統計的結果には検討の余地がある．

地電流に対する現在の理解

地球の内部磁場 (磁気ダイナモ) と電離圏からの電磁誘導は，地球の外層 (リソスフェアとマントル) に恒常的な地電流を生成する．通常の太陽活動は電離圏において粒子をイオン化し，電離圏に電流を生成する．電離圏の電流による電磁誘導は，地球内部の磁気場中の揺らぎ (GOES グラフにおけるサインカーブの出現) を引き起こす (Yazdi and Elam，n.d.; Wood，1986).

地電流が強くなれば，伝導による温度上昇によって，地球内のより深部まで到達するが，他の要素の影響をうけて一様にはならない．地電流の潜在的深度と強度は，有意な地震を起こす能力ともつすべての断層線に影響する．地殻を構成する多くの鉱物は，断層線中にもたくさん存在し，圧電性の電気特性を示す (たとえば石英). 物理的応力もしくは熱によって応力が加わって帯電すると，電流が発生する (Chavalier，2007; Wood，1986).

地電流は強い大規模電流であり，容易に測定できる．たとえば，磁気による地電流は，深度 300 ～ 10,000m で鉱物ごとにそれぞれの伝導率を持つことから，さまざまな探鉱のための地球表面イメージングに用いられる．電離圏における電流が急速に変化する時 (太陽活動が強い時がしばしば) には，地球の地殻内部に向かって電圧が増加するため，それらの地球物理探査を撹乱することがある (Chavalier，2007; Duma，n.d.; Wikipedia，n.d.). 内部磁場の変化は主要な誘導メカニズムであるため，太陽は地殻中の地電流を変化させる主要な原因になっている (Yazdi and Elam，n.d.).

地震対磁場ならびに電流変化

多くの調査によって，大規模地震に先立つ数時間前に，磁場と地電流が大きく変化することが観測されている．Parkfield-Hollister Electromagnetic Monitoring Array in California のような，モニタリングシステムがあれば，ある程度の距離まで離れていたとしても，結果的に，あらゆる変化パターンを観測することができる．これらの変化のメカニズムはよくわかっていないが，強い太陽活動によってしばしば発生している可能性がある (Boyd and Morrison，n.d.; Wood，1986).

Central Institute for Meteorology and Geodynamics in Vienna，Austria の研究は，太陽 (電離層からの日中の効果による) の日周的，季節的，および長期的な磁場強度変化が地震数の増加に対応することを明らかにし，それは「Magneto-seismic effect; 磁気 - 地震効果」と呼ばれている (Duma，n.d.)．この研究結果は，それに起因する磁場強度の増加が断層線における地電流の増加をもたらすことがあり，誘導電流と同様な役割をはたしている．電流の発生も同じであり，電流強度の増加は，発電機により強い磁石をとりつけることによる磁場強度の増加と同じ効果をもたらす (Duma，n.d.).

カリフォルニアでの研究は，Pc1 拍動 ("Pc" は，不規則に対する "pulsation continuous; 連続する拍動 ") が，低緯度地帯における磁気嵐後に２～７日間増加することを確かめた．Pc1 拍動とは 0.2 ～ 0.5Hz の連続的磁気的パルスで，しばしば，電離圏ににおける分～時間の単位の寿命をもつものである．この研究は，1 回の Pc1 拍動ではなく，Pc1 拍動に続く最初の週に Pc1 拍動の出現数が増加する場合には，地震の発生確率が３～５倍に高まることを示した．

もし，このような地震に対する統計的相関が正しいとすると，それが電流によって地球内部で生成される場合もありうる (Bortnik et al.，2008)．このような示唆加え，電離圏の Pc1 変化については２つの仮説が知られている．

もし，電流が Pc1 拍動を発生させ，電流が断層内部において拍動が震央を覆う場合には，地震は 1 回起こるだけであり，それゆえに地震はいつも起こるわけではない．

結　論

この研究は，GOES 磁力計による磁場変化データを用いて，強い太陽活動と大規模地震との間に，統計的に正の相関が存在することを明らかにした．HAARP による地上の磁力計のデータの変化は，断層線中に地電流が励起されるという仮説を確かめた．

地電流と他の磁場変化，ならびに，大規模な地震に先立って増加する地電流に関する本研究での理解は，断層線に励起される電流という仮説と，それによって，強い太陽活動と大規模地震との間に相関性がある可能性をより確実なものにした．

文　献

Bortnik, J., Cutler, J.W., Dunson, C. and Bleier, T.E., 2008. The Possible statistical relation of Pc1 to earthquake occurrence at low latitudes. Retrieved March 2, 2011, from http://www.quakefinder.com/research/pdf/Pc1_EQ_v2.pdf

Boyd, H., and Morrison, F. (n.d.). Parkfield-Hollister electromagnetic monitoring array. Retrieved March 1, 2012, from http://earthquake.usgs.gov/research/parkfield/electromag.php

Chavalier, G., 2007. The earth's electrical surface potential a summary of present understanding. Retrieved March 10, 2012, from http://www.earthinginstitute.net /commentaries/gaetan_electrical_surface.pdf.

Duma, G. (n.d.). Earthquake activity controlled by the regular induced telluric currents. Retrieved March 11, 2012, from http://www.isfep.com/website% 2014_013-G.Duma.pdf.

Lakhina, G.S., Alex, S., Mukherjee, S. and Vichare, G., 2006. On magnetic storms and substorms. Retrieved March 4, 2012, from http//cdaw.gsfc.nasa.gov/publications/ilws_goa2006/320_Lakhina.pdf.

Marusek, J.A., 2007. Solar storm analysis. Retrieved March 2, 2012, from http://www.breadandbutterscience.com/SSTA.pdf National Earthquake Information Centre United States Geological Survey. (2007). Earthquake database. Retrieved October 3, 2011, from http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php.

National Earthquake Information Centre United States Geological Survey. (2010). Earthquake database. Retrieved October 8, 2011, from http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php.

National Earthquake Information Centre United States Geological Survey. (2011). Earthquake database. Retrieved January 1, 2012, from http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php.

National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2007. GOES magnetometer archive. Retrieved October 3, 2011, from http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse/2007/2007_plots.html.

National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2008. GOES magnetometer archive. Retrieved October 4, 2011, from http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse/2008/2008_plots.html

National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2009. GOES magnetometer archive. Retrieved October 8, 2011, from http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse/2009/2009_plots.html. National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2010. GOES magnetometer archive. Retrieved October 8, 2011, from http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse/2010/2010_plots.html.

National Oceanic and Atmosphere Administration Space Weather Prediction Centre, 2011. GOES magnetometer archive. Retrieved January 1, 2012, from http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse/2011/2011_plots.html.

Russell, C.T., McPherron, R.L., 1973. The Magnetotail and substorms. Retrieved March 2, 2012, from http://www-ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/magsub/

The High Frequency Active Auroral Research Program, 2007. Fluxgate magnetometer. Retrieved March 1, 2012, from http://www.haarp.alaska.edu/

Wikipedia (n.d.). Magnetotellurics. Retrieved March 10, 2012, from http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetotellurics.

Wood. (1986). Prediction of seismic activity. Earthquake cycles. In Natural hazards (2nd ed.) Cambridge University Press: New York. Bryant, E. Retrieved March 11, 2012, from http://books.google.co.nz.

Yazdi, A.A. and Elam, J.G. (n.d.). Electrotelluric geophysical exploration. Retrieved March 10, 2012, from http://geophysicsinternational.com/gidoc/techpapers/ege.pdf.

9/56 年周期 :18 および 19 世紀における世界の地震
9/56 YEAR CYCLE: 18th & 19th CENTURY WORLD EARTHQUAKES

David MCMINN
Independent Cycle Researcher　　Mcminn56@yahoo.com
Twin Palms, Blue Knob, NSW 2480, Australia

（矢野　孝雄 [訳]）

要旨：9/56 年周期は，さまざまな国と地域における地震発生時に関して確立されている．本論では，18 ～ 19 世紀における世界の地震の発生時期について，この周期の妥当性が評価される．とくに注目されるのは，1765 ～ 1885 年のほとんどの地震 (M≥7.9) が 9/56 年格子の半分にあてはまり，大地震の 2 つのリストにくりかえし発生したという発見である．1900 年以降，世界の巨大地震 (M≥8.5) も 54/56 年格子に選択的に発生していて，それは，ぞれ以前の数世紀にも何らかの関連をもつ．これらの研究は，地震周期の長期的傾向を明らかにするうえで重要である．世界的おならび合衆国における地震被害も，9/56 年周期に関係してまとめられた．

キーワード：9/56 年周期，18 世紀，19 世紀，世界の地震，地震被害

まえがき

18 ～ 19 世紀の世界の地震の発生時期が，9/56 年地震周期との関係性という観点から評価される．評価に利用された資料は，Wikipedia，Fujita および合衆国地質調査所 (USGS) による．長期的カタログでは，いずれの場合も，若い年代の地震ほど多くなる．時代を遡るほど，さまざまなリストは正確さと網羅性の両面でより多くの問題をかかえるようになる．とくに，推定されたマグニチュードは，出典ごとに著しく変化する．アラスカの巨大歴史地震に関する情報は，1890 年以前には実質的に皆無で，入手できる生データにはどうしようもない欠損がある．そのような明白な制約にもかかわらず，入手できるもののなかではこれらの 3 つのデータが最良であるために，本論で利用された．さらに，国立地球物理学データセンター (National Geophysical Data Center:NGDC) のデータベースが，1900 年以前の地震に関するもう 1 の重要な出典となった．

1765 ～ 1885 年に発生した大地震 (M≥7.9) のほとんどは，9/56 年周期全体の 50% を満たし (表 1)，NGDC を含めて，Wikipedia-Fujita-USGS からのリストときわめてうまく適応する．この発見の大きな重要性と再現性は，古い時代に関するデータの信頼性の欠陥を補う．さらに，1900 年以降の巨大地震について 54/56 年格子がつくられ (McMinn，2011b，2012b)，その一部はそれ以前の世紀に敷衍できる可能性をもっている．

9/56 年周期は地震発生時の基本であり (McMinn，2011a，2011b，2011c)，横軸に 9 年間隔 (副次周期とよばれる) と縦軸に 56 年間隔 (系列) をもつ格子で構成される．56 年系列は，McMinn(付録 2, 2002) にしたがって番号がつけられていて，系列 01 には 1817，1873，1929，1985 年が，系列 02 には 1818，1974，1930，1986 年が，というふうに配置される．最適年は，この論文に掲載されたさまざまな表に示されている．同一の国または地域で数日以内に発生した地震は，1 つの地震事件としてとりあつかわれた (たとえば，1811 年 12 月 New Madrid 地震，1819 年 4 月チリ地震，1854 年の日本の地震).

Table 1
9/56 YEAR CYCLE: MAJOR WORLD EARTHQUAKES (M => 7.9) 1700–1899
Wikipedia, Fujita and USGS
Year ending September 30

Sq 18	Sq 27	Sq 36	Sq 45	Sq 54	Sq 07	Sq 16	Sq 25	Sq 34	Sq 43	Sq 52	Sq 05	Sq 14	Sq 23
										1700 0126	1709	1718	1727
				1702	1711	1720	1729	1738 1737 1017	1747 1746 1023	1756 1755 1101	1765	1774	1783
1722	1731	1740	1749	1758	1767 1766 1021	1776	1785	1794	1803 1802 1026	1812 0207 1811 1216	1821 0710	1830	1839
1778	1787	1796	1805	1814	1823 1822 1119	1832	1841	1850	1859	1868 0403 1868 0813	1877	1886	1895
1834 1833 1125	1843	1852	1861 0216	1870	1879	1888	1897 0612 1897 0921						
1890	1899 0904 1899 0910												
Continued……..													
Sq 32	**Sq 41**	**Sq 50**	**Sq 03**	**Sq 12**	**Sq 21**	**Sq 30**	**Sq 39**	**Sq 48**	**Sq 01**	**Sq 10**	**Sq 19**	**Sq 28**	**Sq 37**
									1705	1714	1723	1732	1741
			1707	1716	1725 0203	1734	1743	1752	1761	1770	1779	1788	1797 0204 1797 0210
1736	1745	1754	1763	1772	1781	1790	1799	1808	1817	1826	1835 0202	1844	1853
1792 0822	1801	1810	1819 0616	1828	1837	1846	1855 0125 1854 1223 1854 1224	1864	1873	1882 1881 1231	1891	1900	
1848	1857 0109	1866	1875	1884	1893								

Events in red appeared in the Wikipedia listing.
Events in **blue** did not appear in the Wikipedia listing, but were listed by the USGS and/or Fujita.
Sources of Raw Data: Wikipedia, Fujita and USGS.

18-19 世紀の地震

Wikipedia には，1700 ～ 1899 年の約 31 の大地震 (M≥ 7.9) がリストされている (付録 1)．このリストは拡張され，Fujita および USGS のカタログに示された他の古い地震も収録されている (付録 2)．1700 ～ 1900 年に発生した総数 42 の地震には，これら 3 つの資料のデータが含まれ，それらのうちの 33 の地震は 9/56 年周期全体の 50% に達する (表 1: 確率 p<.01)．1765 ～ 1885 年に関しては 24 の地震が例外なく表 1 に含まれ，確率を大きく押し上げている (確率 $<10^{-6}$)．1900 年以前のいくつかの巨大地震は，9/56 年格子全体の残り半分にあてはまる．

1765-1885 年の大地震は，9/56 年周期全体の 50% に含まれる傾向がある．このような顕著なパターンは，なんらかの理由のために，20 世紀には継続しなかった．

54/56 年および 9-45/56 年格子は，Fujita のリストにもとづく 1900 年以降の巨大地震の発生時に対応する (McMinn，2011b，2012b)．これらの 54/56 年格子は，18 および 19 世紀に対応するとの仮説がえらえる．表 2 では，付録 2 にリストされているように，格子 A は 1900 年以前の 14 の地震を含んでいて，この期待値は 5.3(確率 p<.001) に対応する．対照的に，3 つの古期の地震だけは格子 A に含まれ，なんらかの偶然なのかもしれない．不思議なことに，1900 年以前の地震は格子 B ではなく，格子 A のなかに選択的にみられる．

18/56 年周期が，古期の地震の発生時にみられる．付録 2 に示される 1700 ～ 1899 年に発生した 42 の地震のうち，19 は付録 4 に示された 18/56 年格子に配置される (確率 p<.01).

Wikipedia，Fujita および USGS のカタログにもとづくと，1765 ～ 1885 年の期間は極端に重要であった．NGDC は 1765 ～ 1885 年に発生した 50 の地震に関するデータとなり (付録 5)，たいへん重要な役割をはたした．約 39 の地震が，表 1 に示されるように，9/56 年周期全体のおよそ半分にあてはまる (確率 $p<10^{-6}$，付録 6).

地震にみられる傾向

USGS は合衆国 (アラスカを除く) における死者 30 名

Table 2
54/56 YEAR CYCLE: WORLD EARTHQUAKES 1700 TO 2012
1900-2012 Quakes M => 8.5 - Year ending October 30
1700-1899 Quakes M => 6.9 - Year ending November 25

Grid A						
Sq 29	**Sq 27**	**Sq 25**	**Sq 23**	**Sq 21**	**Sq 19**	**Sq 17**
						1721
					1723	1777
				1725 0201	1779	1833 1125
			1727 1118	1781	1835 0220	1889 0711
		1729	1783	1837	1891 0227	1945
	1731	1785	1839	1893	1947	2001
1733	1787 0502	1841 0517	1895	1949	2003	
1789	1843 0208 1843 0425	1897 0612 1897 0921	1951	2005 0328 2004 1226		
1845	1899 0904 1899 0910	1953 1952 1103	2007 0921			
1901	1955	2009				
1957 0309	2011 0311					
2013						
Grid B						
Sq 36	**Sq 34**	**Sq 32**	**Sq 30**	**Sq 28**	**Sq 26**	**Sq 24**
						1728
					1730 0708	1784
				1732	1786	1840
			1734	1788 (a)	1842	1896 0615
		1736	1790	1844	1898	1952
	1738	1792 0822	1846	1900	1954	2008
1740	1794	1848	1902	1956	2010 0227	
1796	1850	1904	1958	2012 0411		
1852	1906 0131 1906 0820	1960 0522	2014			
1908	1962	2016				
1964 0328	2018					

Pre 1900 events in red appeared in the Wikipedia Fujita USGS listing in **Appendix 2**.
Post 1900 events in blue appeared in Fujita's catalog (M => 8.5).
In Grid A, Sqs 21, 23, 25, 27, 29 showed up in the 54/56 year grids for world mega quakes in Appendix 4, McMinn (2012b).
In Grid B, Sqs 28, 30, 32, 34, 36 fell in the 54/56 year grids for world mega quakes in Appendix 4, McMinn (2012b).
(a) Major Alaskan earthquakes (M 8.0) occurred on July 21 and August 6.
Sources of Raw Data: Wikipedia, Fujita and USGS.

以上の 11 の地震のリストを提示し (付録 7)，そのうちの 9 地震が系列 34 ～ 32 に配置される (表 3)．これは，9/56 年格子全体の約 13% を占め，死者 30 名以上の地震の 81% にあたる．異常なのは，ハワイで 165 名の死者をだした 1946 年アラスカ津波と 1994 年の Northbridge 地震である．このような合衆国でみられる災害パターンは，系列 34，43 および 05(たとえば，1812，1868[10 月 21 日]，1906，1989 年の地震) で発生したカリフォルニア大地震 (M≥6.9) の傾向に部分的にしたがっている．

USGS は，多くの人命をうばった 1900 年以降の世界各地の地震のリストを提示した．死者 6,000 名以上の 39 の地震 (付録 8) は，9/56 年格子に対応しない．しかし，確率は，死者がいる 15 の地震を含む 9-27/56 年の傾向 (表 4) にもとづいて求められた (確率 p<.01). この格子は，横軸が 9，27，9，27，9，27..... 年の繰り返し周期で，縦軸が 56 年周期でできている．

議論と結論

Table 3
EARTHQUAKES CAUSING OVER 30 FATALITIES IN THE USA (a)
Calendar Years

Sq 34	**Sq 43**	**Sq 52**	**Sq 05**	**Sq 14**	**Sq 23**	**Sq 32**
	1803	1812 1208	1821	1830	1839	1848
1850	1859	1868 0403 1868 1021	1877	1886 0901	1895	1904
1906 0418	1915	1924	1933 0311	1942	1951	1960 0527
1962	1971 0209	1980	1989 1018	1998	2007	2016

(a) Excludes Alaskan earthquakes.
Source of Raw Data: USGS

Table 4
WORLD QUAKES CAUSING 6000 OR MORE DEATHS POST 1900
Year ending August 30

Sq 52		**Sq 05**		**Sq 32**		**Sq 41**		**Sq 12**	
				1904	+9	1913	+27	1940 1939 1226	+9
1924 1923 0901	+9	1933 0825	+27	1960 0229	+9	1969 1968 0831	+27	1996	+9
1980	+9	1989 1988 1207	+27	2016					
Continued.....									
Sq 21		**Sq 48**		**Sq 01**		**Sq 28**		**Sq 37**	
						1900	+9	1909 0119 1908 1228	
		1920	+9	1929	+27	1956	+9	1965	
1949 0710 1948 1005	+27	1976 0204 1976 0727 1976 0816	+9	1985 0919	+27	2012		2021	
2005 2004 1226									

Source of Raw Data: USGS.

科学的発見は，それのもとになった生データと同様に大切である．残念ながら，18 ～ 19 世紀の世界中の地震リストは不完全で，不正確な傾向にある．このような限界をのりこえるために，Wikipedia，Fjita および USGS という 3 つのデータが利用された．3 つのリストのいずれにも示された地震は 9 しかなく，これらのデータはいずれも完全ではないことを示した．1765 ～ 1885 年には，Wikipedia，Fujita および USGS にリストされた 24 の地震 (M≥7.9) のすべてが，9/56 年周期全体の半分にあてはまる (確率 $p<10^{-6}$)．同じ期間に，NGDC データベースには約 50 の大規模地震 (M≥7.9) が記録されていて，そのうち 39 が顕著なパターンを示す (確率 $p<10^{-6}$)．この対応関係はきわめて重要で，古い地震データの質の悪さとは対照的である．9/56 年周期全体の半分に関する顕著な傾向は 1765 ～ 1885 年の期間にだけみられ，20 世紀には認められない．

54/56 年格子は，20 世紀の世界中の巨大地震 (M≥8.7) の発生時について確立された (McMinn，2011b，2012b)．表 2 の格子 A は，18 ～ 19 世紀についてはかなり敷衍されるが，格子 B には古い地震がほとんど含まれない．54/56 年格子は，このように，過去 3 世紀にわたる世界の大規模地震パターンに重要である．

McMinn(2011b) は，Cascadia(M9.0，1700 年 1 月 26 日)，Lisbon(M8.7，1755 年 11 月 1 日) および Arica(M9.0，1868 年 8 月 26 日) という 3 つの古い巨大地震が系列

Sq 52	Event	Record
1700	Great Cascadia quake M 9.0. Jan 26, 1700	Record for western USA (ex Alaska).
1756	Great Lisbon quake M 8.7. Nov 01, 1755 Katla volcano VEI 5 Oct 17, 1755	Record for Western Europe. Equal 1st rank eruption for Iceland
1812	New Madrid quakes	Records for eastern USA.
1868	Great Arica quake M 9.0 Aug 13, 1868	19th century record for South America.
1924	Tokyo quake M 8.7. Sep 01, 1923	3rd rank Japanese quake for the 20th century.
1980	Mt St Helens volcano VEI 5. May 22, 1980.	Record US eruption (ex Alaska).

52 に含まれることを指摘した．他の 1900 年以前の巨大地震 (M≥8.7) は，1727，1730，1762 および 1833 年に発生した (付録 2).

大規模地震は 9/56 年パターンで発生する傾向にあり，これらの配列では死亡率も高い．結論づけるにはいずれの場合にもさらなる研究が必要であり，ここでは，それについて議論しない．USGS データにもとづく 2 つの例がこの論文に示されたが，いっそうの研究が必要である．

9/56 年地震周期は，月 - 太陽潮汐の調和によって発生し，それが地震活動のひきがねになると信じられた．この話題は McMinn(付録 5，2011a) によってすでに論じられていて，ここではこれ以上の議論はおこなわない．地震活動を数世紀にわたって評価することは重要であり，長期間でみた場合に地震周期がどのようにかわるかを理解するのに役立つ．月 - 太陽周期の時間的変化は，地震発生時にかかわる長期的傾向にかかわっていることが仮説される．残念ながら，この推測を支持する見解は提出されず，この推測は未解明の大問題の 1 つに止まっている．

謝辞：著者は，本論の刊行に助言をいただいた編集者 Dong Choi 氏ならびに査読者たちに感謝し，厚く御礼申し上げる．

文　献

Fujita, K., Magnitudes of the Largest Events of the 20th Century. www.msu.edu/□fujita/earthquake/bigquake.html

McMinn, D., 2011a. 9/56 Year Cycle: Californian Earthquakes. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 58. p. 33-44.

McMinn, D., 2011b. 9/56 Year Cycle: Record Earthquakes. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 59, p. 88-104.

McMinn, D., 2011c. 9/56 Year Cycle: Earthquakes in Selected Countries. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no 60, p. 9-37.

McMinn, D., 2012a. 9/56 Year Cycle: Earthquakes in Peru, the Philippines and Selected US States. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 62, p. 23-30.

McMinn, D. 2012b. Financial Cycles: A Key to Deciphering Seismic Cycles. New Concepts in Global TectonicsNewsletter, no. 63, p 15-36.

US Geological Survey, Historic World Earthquakes. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php

US Geological Survey, Deaths from US Earthquakes. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/us_deaths.php

US Geological Survey, Earthquakes With 1000 or More Deaths. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world_deaths.php

Wikipedia, Historical Earthquakes. http://en.wikipedia.org/wiki/Historical_earthquakes

Wikipedia, Largest Earthquakes by Magnitude. http://en.wikipedia.org/wiki/Lists_of_earthquakes

Appendix 1
PRE 1900 MAJOR WORLD EARTHQUAKES (M => 7.9)
Wikipedia

Date	Location	M
Jan 26, 1700	Cascadia	9.0
Dec 31, 1703	Kanto, Japan	8.2
Oct 28, 1707	Japan	8.6
Jul 08, 1730	Valparaiso, Chile	8.7
Oct 16, 1737	Kamchatka, Russia	8.3
Oct 28, 1746	Lima & Callao, Peru	8.6–8.8
May 25, 1751	Concepción, Chile	8.5
Nov 01, 1755	Lisbon, Portugal	8.7
Apr 02, 1762	Northeastern Bay of Bengal	up to 8.8
Oct 21, 1766	Saint Joseph, Trinidad and Tobago	7.9
Feb 10, 1797	Sumatra, Indonesia	8.4
Oct 26, 1802	Romania	7.9
Dec16, 1811	New Madrid, USA	8.1
Feb 07, 1812	New Madrid, USA	8.0
Jun 16, 1819	Gujurat, India	7.7–8.2
Nov 19, 1822	Valparaiso, Chile	8.5
Nov 25, 1833	Sumatra, Indonesia	8.8-9.2
Feb 20, 1835	Concepcion, Chile	8.5
Dec 23 1854	Honshu, Japan	8.4
Dec 24 1854	Honshu, Japan	8.4
Jan 23, 1855	Wairarapa, New Zealand	8.0
Jan 09, 1857	Fort Tejon, California	7.9
Feb 16, 1861	Sumatra, Indonesia	8.5
Apr 03, 1868	Hawaii, USA	7.9
Aug 13, 1868	Arica, Chile	9.0
May 10, 1877	Iquique, Chile	8.8
Dec 31, 1881	Andaman & Nicobar Is, India	7.9
Oct 27, 1891	Mino-Owari, Japan	8.0
Jun 15, 1896	Offshore Sanriku, Japan	8.0-8.1
Jun 12, 1897	Assam, India	8.3
Sep 04, 1899	Alaska, USA	7.9
Sep 10, 1899	Alaska, USA	8.0

Events in red appeared in 9/56 year grid in **Table 1**.
Sources: Wikipedia. Historical Earthquakes. Wikipedia. Largest Earthquakes by Magnitude.

Appendix 2
PRE 1900 WORLD EARTHQUAKES (M => 7.9)
Wikipedia, Fujita & USGS

Date UT	M	Location	Wiki	Fujita	USGS
18990910	8.0	Alaska, USA	Y		Y
18990904	7.9	Alaska, USA	Y		Y
18970921	8.0	Philippines		Y	
18970612	8.3	Assam, India	Y	Y	Y
18960615	8.5	Sanriku, Japan	Y	Y	Y
18911027	8.0	Mino-Owari, Japan	Y	Y	Y
18890711	8.3	Chilik, Kazakhstan		Y	
18811231	7.9	Andaman & Nicobar Is, India	Y		
18770510	8.3	Iquique, Chile	Y	Y	Y
18680813	9.0	Arica, Chile	Y	Y	Y
18680403	7.9	Hawaii, USA	Y		Y
18610216	8.5	Sumatra, Indonesia	Y		
18570109	7.9	Fort Tejon, California	Y		Y
18550123	8.0	Wellington, New Zealand	Y		Y
18541223	8.4	Honshu, Japan	Y	Y	
18541224	8.4	Honshu, Japan	Y	Y	
18430425	8.3	Kuriles		Y	
18430208	8.3	Leeward Is		Y	Y
18410517	8.4	Kamchatka		Y	
18350220	8.2	Concepcion, Chile	Y		Y
18331125	9.0	Sumatra, Indonesia	Y		
18221119	8.5	Valparaiso, Chile	Y		
18210710	8.2	Camana, Peru			Y
18190616	8.3	Gujarat India	Y	Y	Y
18120207	8.0	New Madrid, USA	Y		(a)
18111216	8.1	New Madrid, USA	Y		(a)
18021026	7.9	Romania	Y		Y
17970204	8.3	Ecuador	Y	Y	
17970210	8.4	Sumatra, Indonesia	Y		
17920822	8.4	Kamchatka		Y	
17870502	8.0	Puerto Rico			Y
17661021	7.9	Trinidad & Tobago	Y		
17620402	8.8	Bay of Bengal	Y		
17551101	8.7	Lisbon, Portugal	Y	Y	Y
17510525	8.5	Concepcion, Chile	Y	Y	
17461028	8.7	Lima, Peru	Y		Y
17371017	8.3	Kamchatka	Y	Y	
17300708	8.7	Valparaiso, Chile	Y	Y	Y
17271118	8.7	Lima, Peru	Y		Y
17250201	8.2	Eastern Siberia, Russia		Y	
17071028	8.4	Tosa, Japan	Y	Y	
17031231	8.2	Kanto, Japan	Y	Y	
17000126	9.0	Cascadia	Y	Y	Y

(a) The USGS gave lower magnitudes (M =< 7.8) for theses events and were not included in the appendix.
Events in red appeared in the 9/56 year grid in **Table 1**.
Wikilpedia earthquakes were compiled from two listings – Historical Earthquakes and Largest Earthquakes by Magnitude,
Sources: Wikipedia, Fujita and USGS.

Appendix 3
9/56 YEAR GRID WITH FEW PRE 1900 QUAKES (M => 7.9)
Wikipedia, Fujita and USGS
Year ending September 30

Sq 46	Sq 55	Sq 08	Sq 17	Sq 26	Sq 35	Sq 44	Sq 53	Sq 06	Sq 15	Sq 24	Sq 33	Sq 42	Sq 51
							1701	1710	1719	1728 **1727** **1118**	1737	1746	1755
	1703	1712	1721	**1730** **0708**	1739	1748	1757	1766	1775	1784	1793	1802	1811
1750	1759	1768	1777	1786	1795	1804	1813	1822	1831	1840	1849	1858	1867
1806	1815	1824	1833	1842	1851	1860	1869	1878	1887	**1896** **0615**	1905	1914	1923
1862	1871	1880	1889	1898									

Continued…….

Sq 04	Sq 13	Sq 22	Sq 31	Sq 40	Sq 49	Sq 02	Sq 11	Sq 20	Sq 29	Sq 38	Sq 47	Sq 56	Sq 09
												1704 **1703** **1231**	1713
						1706	1715	1724	1733	1742	**1751** **0525**	1760	1769
1708 **1707** **1028**	1717	1726	1735	1744	1753	**1762** **0402**	1771	1780	1789	1798	1807	1816	1825
1764	1773	1782	1791	1800	1809	1818	1827	1836	1845	1854	1863	1872	1881
1820	1829	1838	1847	1856	1865	1874	1883	1892 **1891** **1027**					
1876	1885	1894											

Events in red appeared in the Wikipedia listing.
Events in **blue** did not appear in the Wikipedia listing, but were listed by the USGS and/or Fujita.
Sources of Raw Data: Wikipedia, Fujita and USGS.

Appendix 4
18/56 YEAR CYCLE: MAJOR WORLD EARTHQUAKES (M => 7.9) 1700–1899
Wikipedia, Fujita and USGS
Year ending September 30

Sq 27	Sq 45	Sq 07	Sq 25	Sq 43	Sq 05	Sq 23	Sq 41	Sq 03	Sq 21	Sq 39	Sq 01	Sq 19	Sq 37
											1705	1723	1741
								1707	**1725** **0203**	1743	1761	1779	**1797** **0204** **1797** **0210**
					1709	1727	1745	1763	1781	1799	1817	**1835** **0202**	1853
		1711	1729	1747 **1746** **1023**	1765	1783	1801 **1800** **1122**	**1819** **0616**	1837	**1855** **0125** **1854** **1223** **1854** **1224**	1873	1891	
1731	1749	1767 **1766** **1021**	1785	1803 **1802** **1026**	**1821** **0710**	1839	**1857** **0109**	1875	1893				
1787 **0502**	1805	1823	1841	1859	1877	1895							
1843	**1861** **0216**	1879	**1897** **0612** **1897** **0921**	1915									
1899 **0904** **1899** **0910**													

Events in red appeared in the Wikipedia listing in **Appendix 1**.
Events in **blue** did not appear in the Wikipedia listing, but were listed by the USGS and/or Fujita in **Appendix 2**.
Sources of Raw Data: Wikipedia, Fujita and USGS.

Appendix 5
MAJOR WORLD EARTHQUAKES (M => 7.9) 1765 – 1885
National Geophysical Data Center

YYYY	MM	DD	Location	M
1784	5	13	PERU: AREQUIPA,CAMANA	8.0
1787	3	28	MEXICO: SAN MARCOS, OAXACA	8.3
1788	7	21	ALASKA PENINSULA: UNGA ISLAND	8.0
1788	8	6	ALASKA PENINSULA	8.0
1792	8	22	RUSSIA: NEAR KAMCHATKA	8.4
1793	2	17	JAPAN: SANRIKU, RIKUZEN, RIKUCHU	8.3
1797	2	4	ECUADOR: RIOBAMBA	8.3
1797	2	10	SW. SUMATRA	8.0
1811	12	16	ARKANSAS: NORTHEAST	8.5
1811	12	16	ARKANSAS: NORTHEAST	8.0
1812	1	23	MISSOURI: NEW MADRID	8.4
1812	2	7	MISSOURI: NEW MADRID	8.8
1812	3	8	CHINA: XINJIANG	8.0
1817	3	11	FRANCE: CHAMONIX VALLEY	8.0
1818	11	8	INDONESIA: SUMBAWA ISLAND: BIMA	8.5
1819	4	3	CHILE: COPIAPO	8.0
1819	4	4	CHILE: COPIAPO	8.0
1819	4	12	CHILE: COPIAPO	8.5
1822	11	20	CHILE: VALPARAISO	8.5
1826	6	18	COLOMBIA: ENGATIVA, BOGOTA	8.2
1826	(a)		NEW ZEALAND: FJORDLAND	8.0
1828	3	30	PERU: LIMA, CALLAO	8.3
1833	8	26	NEPAL: KATHMANDU; INDIA: BIHAR	8.0
1833	9	6	CHINA: YUNNAN PROVINCE	8.0
1833	11	24	INDONESIA: SUMATRA: BENGKULU	8.3
1835	2	20	CHILE: CONCEPCION	8.2
1837	11	7	CHILE: VALDIVIA	8.5
1841	5	17	RUSSIA: OFF KAMCHATKA	8.4
1842	5	7	HAITI: CAP-HAITIEN	8.1
1843	2	8	GUADELOUPE: POINTE-A-PITRE	8.3
1843	4	25	JAPAN: HOKKAIDO: YEZO, KUSHIRO	8.4
1845	4	7	MEXICO: MEXICO CITY	8.0
1852	11	25	INDONESIA: MALUKU: BANDANAIRA	8.3
1854	12	23	JAPAN: ENSHUNADA SEA	8.3
1854	12	24	JAPAN: NANKAIDO	8.4
1855	1	23	NEW ZEALAND: WELLINGTON	8.0
1855	7	25	SWITZERLAND: HAUT-VALAIS	8.5
1856	8	23	JAPAN: OSHIMA	8.0
1857	1	9	CALIFORNIA: FORT TEJON	8.3
1857	4	17	BISMARCK SEA	8.0
1861	2	16	INDONESIA: LAGUNDI, SIMUK, TELLO	8.5
1865	11	18	TONGA ISLANDS	8.0
1867	2	4	GREECE: CEPHALONIA	7.9
1868	4	3	HAWAII: SE OF	7.9
1868	8	13	CHILE: ARICA	8.5
1868	8	15	ECUADOR: EL ANGEL, CONCEPCION	8.0
1870	5	11	MEXICO: OAXACA	7.9
1873	(a)		MACLAY COAST	8.0
1875	3	28	NEW CALEDONIA: LOYALTY ISLANDS	8.0
1877	5	10	CHILE: OFF NORTH COAST	8.3
1878	1	23	CHILE: TARAPACA	7.9
1878	2	11	VANUATU ISLANDS	8.0
1879	7	1	CHINA: GANSU PROVINCE	8.0
1881	12	31	INDIA: ANDAMAN & NICOBAR ISLANDS	7.9
1882	9	7	PANAMA: SAN BLAS ARCHIPELAGO	8.3

(a) The 1826 New Zealand and 1873 Maclay Coast quakes were not included in the assessment as no date was given for these events. If they occurred in the 9 months to September 30, then they would have appeared in **Appendix 6**.
Events highlighted in **red** fall in the 9/56 year grid as presented in **Table 1** & **Appendix 6.**
Source: National Geophysical Data Center. Database parameters: 1700 –1899. M => 7.9

Appendix 6
THE 9/56 YEAR CYCLE: MAJOR WORLD EARTHQUAKES (M => 7.9) 1765 – 1885
National Geophysical Data Center
Year ending September 30

Sq 18	Sq 27	Sq 36	Sq 45	Sq 54	Sq 07	Sq 16	Sq 25	Sq 34	Sq 43	Sq 52	Sq 05	Sq 14	Sq 23
											1765	1774	1783
					1767	1776	1785	1794	1803	**1812** **0123** **1812** **0207** **1812** **0308** **1811** **1216**	**1828** **0328**	1830	1839
1778	**1787** **0328**	1796	1805	1814	1823 **1822** **1120**	1832	**1841** **0517**	1850	1859	**1868** **0403** **1868** **0813** **1868** **0815**	**1877** **0510**	1886	
1834 **1833** **1125**	**1843** **0208** **1843** **0425**	1852	**1861** **0216**	**1870** **0511**	**1879** **0701**								

Continued…….

Sq 32	Sq 41	Sq 50	Sq 03	Sq 12	Sq 21	Sq 30	Sq 39	Sq 48	Sq 01	Sq 10	Sq 19	Sq 28	Sq 37
													1741
										1770	1779	**1788** **0721** **1788** **0806**	**1797** **0204** **1797** **0210**
			1763 **0129**	1772	1781	1790	1799	1808	**1817** **0311**	**1826** **0618**	**1835** **0202**	1844	1853 **1852** **1125**
1792 **0822**	1801	1810	**1819** **0403** **1819** **0412** **1819** **1108**	**1828** **0330**	1837	1846	**1855** **0125** **1855** **0725** **1854** **1223** **1854** **1224**	1864	1873	**1882** **0907** **1881** **1231**			
1848	**1857** **0109** **1857** **0417**	1866 **1865** **1118**	**1875** **0328**	1884									

Events in red appeared in the NGDC listing of 1765-1885 world earthquakes in **Appendix 5**.
Source of Raw Data: National Geophysical Data Center. Database parameters: 1700 –18991700 . M => 7.9

Appendix 7
EARTHQUAKES CAUSING 30 OR MORE DEATHS IN THE USA

Date	Location	Fatalities
1812 12 08	San Juan Capistrano, CA	40
1868 04 03	Hawaiian Island, HI	77
1868 10 21	Hayward Fault, CA	30
1886 09 01	Charleston, SC	60
1906 04 18	San Francisco, CA	3000
1933 03 11	Long Beach, CA	110
1946 04 01	Hawaii, HI (a)	165
1960 05 22	Hawaii, HI (a)	61
1971 02 09	San Fernando, CA	65
1989 10 18	Santa Cruz County, CA	63
1994 01 17	Northbridge, CA	60

(a) Deaths caused by tsunamis originating from Alaska in 1946 and Chile in 1960.
The table does not include Alaskan earthquakes.
Earthquakes in red appeared in the 9/56 year grid in **Table 3**.
Source: USGS.

Appendix 8
POST 1900 WORLD EARTHQUAKES CAUSING DEATHS OF 6000 OR MORE
Year ending August 30

Date UTC	Location	Deaths	Magnitude
2010/01/12	Haiti	316000	7.0
1976/07/27	Tangshan, China	242769	7.5
2004/12/26	Sumatra	227898	9.1
1920/12/16	Ningxia, China	200000	7.8
1923/09/01	Kanto, Japan	142800	7.9
1948/10/05	Turkmenistan	110000	7.3
2008/05/12	Eastern Sichuan, China	87587	7.9
2005/10/08	Pakistan	86000	7.6
1908/12/28	Messina, Italy	72000	7.2
1970/05/31	Chimbote, Peru	70000	7.9
1990/06/20	Western Iran	50000	7.4
1927/05/22	Gulang & Gansu, China	40900	7.6
1939/12/26	Erzincan, Turkey	32700	7.8
1915/01/13	Avezzano, Italy	32610	7.0
2003/12/26	Southeastern Iran	31000	6.6
1935/05/30	Quetta, Pakistan (Baluchistan, India)	30000	7.6
1939/01/25	Chillan, Chile	28000	7.8
1988/12/07	Spitak, Armenia	25000	6.8
1976/02/04	Guatemala	23000	7.5
2011/03/11	Japan	20896	9.0
2001/01/26	Gujarat, India	20085	7.6
1974/05/10	China	20000	6.8
1905/04/04	Kangra, India	19000	7.5
1999/08/17	Turkey	17118	7.6
1960/02/29	Agadir, Morocco	15000	5.7
1978/09/16	Iran	15000	7.8
1962/09/01	Qazvin, Iran	12225	7.1
1907/10/21	Tajikistan, Turkestan	12000	8.0
1949/07/10	Khait, Tajikistan	12000	7.5
1968/08/31	Dasht-e Bayaz, Iran	12000	7.3
1934/01/15	India-Nepal border	10700	8.1
1931/08/10	Fuyun & Koktokay, China	10000	8.0
1970/01/04	Yunnan Province, China	10000	7.5
1993/09/29	Latur-Killari, India	9748	6.2
1985/09/19	Mexico, Michoacan	9500	8.0
1933/08/25	Sichuan , China	9300	7.5
1944/01/15	San Juan, Argentina	8000	7.4
1976/08/16	Mindanao, Philippines	8000	7.9
1909/01/23	Silakhor, Iran	6000	7.3

Events in red appeared in the 9-27/56 year grid presented in **Table 4**.
Source: USGS.

太陽 - 地球間の IMF と電磁気カップリングは, 破壊的地震をお起こしうるか？

CAN IMF AND THE ELECTROMAGNETIC COUPLING BETWEEN THE SUN AND THE EARTH CAUSE POTENTIALLY DESTRUCTIVE EARTHQUAKES?

Valentino STRASER vstraser@ievpc.org Parma, Italy

（赤松　陽 [訳]）

要旨：人工衛星 GOES13 号および 15 号によって検出された太陽系内の磁場 (IMF) は，マグニチュード M6+ の地震の前に検出される特徴的な“σ”のかぎ型のような形のいくつかの繰り返しをグラフの中に示す．2009 年に LTPA プロジェクトによって着手された研究は，1500 個以上のデータをとらえ，グローバルな潜在的破壊地震を示している IMF のグラフの形の中に特徴的な配置を明らかにした．GOES のグラフで，周期的に起こる異常は，マグニチュード M6+ の地震の発生の 5 時間前に先立って現れる．“σ”の“リッジ”と地震から計算された 8 分あるいはその倍数の時間差から，私たちは，David Sibeck によって提案されている“Flux Transfer Event”(流動移動現象) を考慮して，太陽と地球の間の“電磁気的カップリング”の仮説を立てた．この仮説によれば，この電磁気的カップリングは，造構力の下で岩石中に存在する地震の原因となっている微妙なバランスを変えることが出来るかもしれない．ほとんどの強い地震の前に常に“σ”型の現象の繰り返しがあることによって，この方法は，潜在的な破壊地震が地球の体系全体に影響を与えるので，グローバルな性質をもつ地震前兆の学際的研究へ貢献する．

キーワード：太陽系内磁場，太陽と地球間の電磁気的相互作用，地球規模の地震の前兆，潜在的破壊地震，流動移動現象

はじめに

地震前兆の研究は，近年，強震がひきおこす悲劇的結果にあらかじめ対応するために，さまざまな分野で取り組まれてきた．実際には建物やインフラの倒壊が人々の死亡の原因になるのであって，地震は人々の死亡の直接原因とはならない単なる自然災害である．分析の対象となりうる要素の中から，宇宙の広大な現象，とりわけ太陽系内の電磁場と太陽からの荷電粒子の流れの相互作用が研究されてきた (Kalinin, 2009; Khazaradze et al., 2007; Zatopek et al., 1976 など).

マグニチュード M5.5+ やさらに通例 M6+ の潜在的な破壊地震に関係する太陽系内の磁場の分析は，最近，2011 年 3 月 11 日の破壊的な日本の地震によって確かめられ (Straser, 2011a)，その研究結果は 2011 年に Kanyakumari での EDPD 会議で発表された (Straser, 2011b)．研究は 2 つの前提にもとづいており，まず，“循環周期”の概念，つまり，計算が可能で器械による検出可能な時間の繰り返しを伴って，惑星スケールで周期的に起こる自然現象である，重力作用と電磁気作用による地球や他の惑星と太陽とのカップリングが存在することである．研究は 2 つの段階に分けられる．まず最初は，マグニチュード M6+ の地震の発震の数時間～数分前の IMF グラフのパターンに起こりうる繰り返しを研究するための人工衛星 (GOES 13 および 15) からのデータの解析である．例として，図 1 は，2011 年 7 月 6 日にケルマデック島地域に発生した M7.8 と M7.6 の 2 つの地震についての IMF の方向とモーメントを示している．LTPA プロジェクトチームによって GOES 人工衛星 13 と 15 から 2009 年から 2012 年の夏までに送られてきた 24/7 データ解析では，その作業の途上で，ギリシャ文字“σ”と名付けられた特徴的な“S”字形に描かれている IMF グラフ (図 2) は，地球スケールにおける強震の前にわずかな変形を受けることが示された (Straser, 2011b)．さらに，しばしば 2011 年 3 月 11 日の本州に言及した事柄について，記録が示しているように，曲線の始めと終わりの値の間の隔たりには 2nT ～ 5nT の差異があった．すなわち，後者の値は，この研究事例の最高値が表されている．

IMF グラフは，見てわかるように，例えば 2011 年 8 月 22 日～24 日の地震のシーケンスにおいて, マグニチュード M5+，さらに通例 M6+ の地震の前段階で別の類似点を示している．分析された 3 つのケースの全てにおいて，私たちは，地震の前にみられる前述した曲線の“σ”状鈎型に加えて，いくつかの繰り返しを確認することが出来る．図 3 は，IMF の最小値を示す時の曲線の尖点での反復を示している．尖点は，図において，文字“A”で示されており，A1，A2，A3，・・・・An として反復が示さ

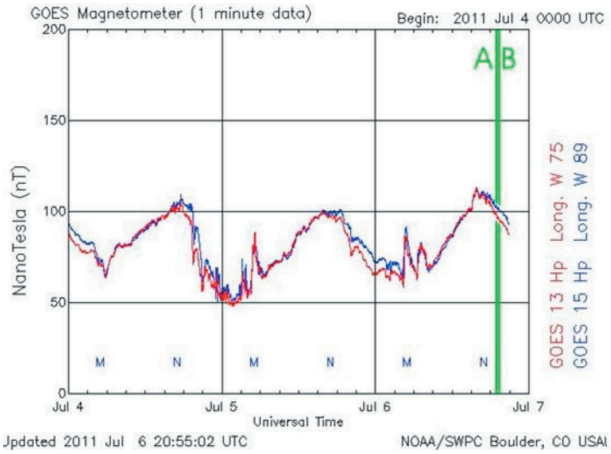


図 1 GOES 衛星 13 と 15 によって検知された IMF の方向は，グローバルスケールの地震リスト (USGS) としてオンラインの 24/7 で調べられる．この場合，緑色の線は 2011 年 7 月 6 日にケルマデック島地域で発生した地震で，マグニチュード M7.8(A) と M7.6(B) を示している．“M”と“N”はそれぞれ“Midnight”“Noon”のイニシアルである．

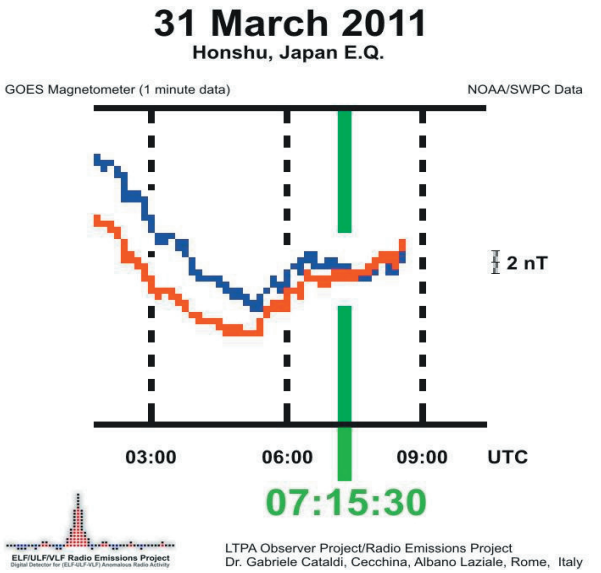


図 2 太陽系内磁場のグラフにおける “σ” の状態，そして GOES 衛星 13 号と 15 号からのそれぞれの色によって区別された航跡記録の概略図. 例は 2011 年 3 月 31 日の本州における地震であり，2nT の典型的な変化が強調されている．

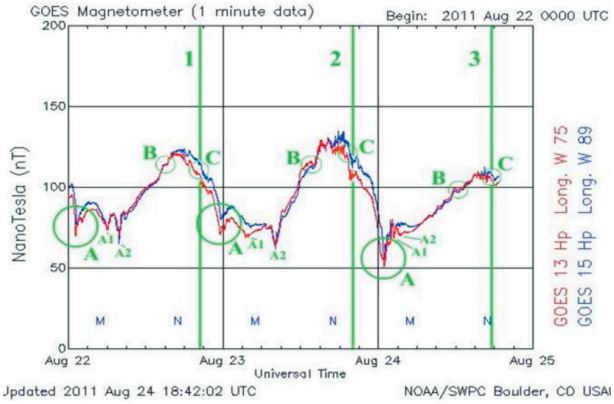


図 3　3 つの全ての場合においてあなたは，マグニチュード M5+ の地震への準備段階の間の，太陽系内磁場の尖点の繰り返しに気づくはずである．地震のシーケンスは 2011 年 8 月 22 日と 24 日の間の期間を表している．“A” は IMF が最小の時の値を示し，“B” の文字のついた図形は “σ” の出現とその後の地震に通常 5 時間ほど先立って表れる上昇期間の鉤を示している．

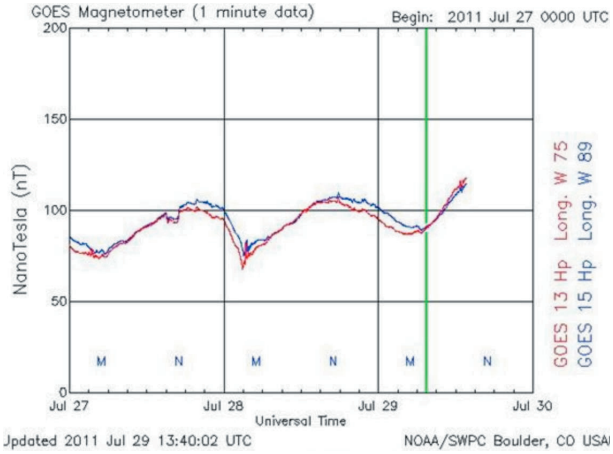


図 4　GOES13 号・15 号の航跡における強い地震の前の “σ” の繰り返し．この場合，グラフは，2011 年 7 月 29 日にフィジー諸島で起こったマグニチュード M6.7 の地震を表し緑の線で示している．

れている．タイプ “A” の尖点に続く 2 番目の特徴は，グラフにおける鉤である．それは “B” の文字に相当するところに表されている．普通は，この “B” タイプの鉤の出現は，“σ” の出現に先立つおよそ 5 時間前に現れ，それから地震がそれに伴った．その 3 つの反復の特徴は，異なる地震帯すなわちスマトラ (M6)，パプアニューギニア (M5.2)，ペルー (M7.0) で発生した地震を記録していた．

しかし，精密に示されているシーケンスそれ自体が，すべての潜在的な破壊地震に対して常にはっきりした方法で証明しているとはかぎらない．だが一方，2011 年 7 月 29 日にフィジー諸島で起こった M6.7 の場合に，は強い地震の前に繰り返しみられる “σ” が存在した (図 4).

方法とデータ

この研究で使われた方法は，本来 IMF における変化量に関して記録された 24/7 比較データに本質があり，とりわけ 2-5nT の値に近い線の “σ” 型と同じ形に本質がある．

人口衛星

人工衛星のトラッキングシステム (オービトロン 訳者註：受信機の同調回路が同調ダイアル周波数に正確に追随できるしくみ) からのデータは次のとおりである：http://www.swpc.noaa.gov/Data/Goes.html.

Goes 13 (Primary): orbiting at 35,809km; Long 74.5403° W; Lat 0.3317° S;Azim 272.3° ; Elev -10.7° ; RA 12h 26m 24s; Decl. -7° 07′ 04″ /

Goes 15 (Secondary): orbiting at 35,782km; Long 88.9147° W; Lat 0.0344° N;Azim 284.2° ; Elev -18.6° ; RA 11h 29m 43s; Decl. -6° 37′ 18″

討　論

この研究は特に “σ” の出現に焦点を当てている．というのは，これは，常に，潜在的破壊地震の前に太陽系内電磁場 (IMF) グラフの中に存在するからである．図 5 のグラフで，“σ” は 5 つの異なるステージにおいて，図式的に表されている．

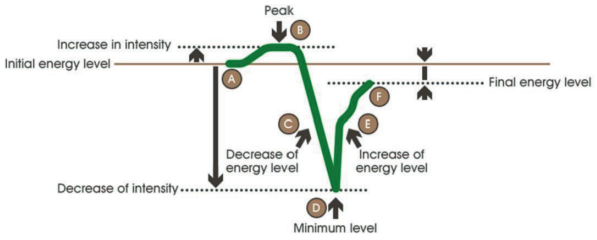


図 5 地震に先立つ人工衛星 GOES 13 号と 15 号の記録における “σ” の形の概略図．“σ” は最初のエネルギーレベルが概略的な方法で表されている．さらに強さの減少，最小レベルそして勾配が，最終エネルギーレベルに達するまで表されている．

Location	Date	UTC Time	Magnitude (Mw)	Interval (minute) from Italic-S peak to earthquake	Magnetic variation (nT) from Italic-S peak to earthquake	Magnetic variazion (nT/min) from Italic-S peak to earthquake	Depth (Km)	Magnetic variation (pT/min) of IMF between Italic-S peak and Earthquake	Deph (Km/10)
Aleutian Islands	14/09/2011	18:10:07	6,1	16	2,6	0,1625	1	162,5	0,1
Jujuy, Argentina	06/10/2011	11:12:29	6,2	32	2,08	0,065	9,5	65	0,95
Banda Sea	30/09/2011	06:57:41	6,8	16	0,52	0,65	465	650	46,5
Canada	09/09/2011	19:41:35	6,7	16	10,4	0,65	25,9	650	2,59
Honshu, Japan	16/09/2011	19:26:42	6,6	32	1,04	0,0325	36,3	32,5	3,63
Bali, Indonesia	13/10/2011	03:16:30	6,1	8	0,52	0,065	35,1	65	3,51
Fiji Region	15/09/2011	19:31:03	7,3	32	4,68	0,14625	626,1	146,25	62,61
Kermadec Islands	06/07/2011	19:03:16	7,8	16	3,12	0,195	125	195	12,5
Kermadec Islands	06/07/2011	19:22:10	7,6	32	1,56	0,04875	20	48,75	2
Kermadec Islands	07/10/2011	08:58:30	6,5	16	9,36	0,585	34,6	585	3,46
Hokkaido, Japan	21/10/2011	08:02:38	6,1	8	0,52	0,065	185	65	18,5
Kermadec Islands	21/10/2011	17:57:18	7,4	56	1,04	0,018571429	32,9	18,57142857	3,29
Papua N.G.	14/10/2011	03:35:15	6,7	8	0,52	0,065	45,4	65	4,54
Papua N.G.	18/10/2011	05:05:06	6	56	8,32	0,148571429	21	148,5714286	2,1
Perù	24/08/2011	17:46:12	7	8	0,52	0,065	145,1	65	14,51
Perù	28/10/2011	18:54:34	6,9	24	2,08	0,086666667	23,9	86,66666667	2,39
Russia	14/10/2011	06:10:15	6,1	8	0,52	0,065	15,3	65	1,53
Sandwich Islands	03/09/2011	04:49:01	6,2	16	22,88	1,43	106	1430	10,6
Est Turkey	23/10/2011	10:41:21	7,2	8	0,52	0,065	20	65	2
Est Turkey	23/10/2011	20:45:37	6	32	2,6	0,08125	9,8	81,25	0,98
Vanuatu	03/09/2011	22:55:36	7	8	0,52	0,065	132,4	65	13,24
Vanuatu	04/09/2011	21:44:21	6,1	32	4,68	0,14625	59,4	146,25	5,94
Vanuatu	20/08/2011	16:55:03	7,1	48	2,6	0,054166667	40,6	54,16666667	4,06
Vanuatu	20/08/2011	18:19:25	7	56	2,6	0,046428571	28,5	46,42857143	2,85
Honshu, Japan	11/03/2011	05:46:24	8,9	24	2,6	0,108333333	29	108,3333333	2,9
Pacific	02/11/2011	14:59:26	6,2	48	2,6	0,054166667	1,1	54,16666667	0,11
Revilla Gigedo Islands	01/11/2011	12:32:00	6,3	24	1,04	0,043333333	5	43,33333333	0,5
Taiwan	08/11/2011	02:59:07	6,9	16	5,72	0,3575	209,5	357,5	20,95
Bolivia	22/11/2011	18:48:15	6,2	8	1,56	0,195	533,3	195	53,33
New Zeland	18/11/2011	07:51:27	6	8	1,04	0,13	26,8	130	2,68
Honshu, Japan	23/11/2011	19:24:32	6,1	8	2,08	0,26	33,3	260	3,33
Hokkaido, Japan	24/11/2011	10:25:35	6,2	16	3,12	0,195	42,3	195	4,23
Atacama, Chile	07/12/2011	22:23:09	6,1	32	1,56	0,04875	15,6	48,75	1,56
Mexico	11/12/2011	01:47:26	6,5	48	8,84	0,184166667	64,9	184,1666667	6,49
Sandwich Islands	11/12/2011	09:54:55	6,2	88	1,04	0,011818182	115,5	11,81818182	11,55
Sulawesi	13/12/2011	7:52:12	6,1	16	0,52	0,0325	160,9	32,5	16,09
Papua N.G.	14/12/2011	05:04:57	7,1	16	1,04	0,065	121,2	65	12,12
Kermadec Islands	15/12/2011	10:10:08	6,3	32	3,12	0,0975	34,1	97,5	3,41
Russia	27/12/2011	15:21:56	6,6				6,9		0,69
Izu, Japan	01/01/2012	05:27:55	6,8	112	4,16	0,037142857	348,5	37,14285714	34,85
Santa Cruz Islands	09/01/2012	04:07:17	6,6	80	16,64	0,208	38,9	208	3,89

図 6 “σ” の頂点と地震の間の時間の間隔は 8 分から 112 分まで変化している．そしてさらに一般的に 8 分の倍数の間隔で，ご覧のように例えば，2011 年 9 月 14 日～ 2012 年 1 月 9 日にグローバルスケールで起こったマグニチュード M>6 の地震に見られる．

図 7 地球上の脱ガスのために無作為に配置された上に向かう斜面の流れにより運ばれた強磁性の物質によって発生した局部的な磁場の総体としてこの研究で仮定された地球の磁場の磁力線．

それは最初のエネルギーレベルをもって始まる．それはエネルギーが最小レベルに達するまで強度の減少が続く．その時点でグラフは上昇に転じ，最終エネルギーレベルへ到達するまで上昇する．最初と最後の間の値の差は一般的に 2nT あるいは 5nT である．この研究の中で考えられる 2 番目のパラメーターは，“σ” の頂点とそれに関連した地震の間の時間差である．研究を続けるために，Gabriel and Daniel Cataldi の支援を得て，グローバルスケールの地震は，2011 年 9 月 14 日から 2012 年 1 月 9 日までのマグニチュード M6+(図 6) について考慮された．図 6 は，IMF(地震での曲線) の頂点と地震そのものとの間の，繰り返し起こる 8 分の間隔あるいはその集合を示している．このメカニズムは，Sibeck による研究の観点から，太陽と地球の間の磁気的関係として解釈されるはずである (Phillips, 2008).

2008 年刊の研究論文の著者である Dr. David Sibeck(ゴダード宇宙飛行センター：Goddard Space Flight Center) によれば，磁気の関係は連続的ではなく，しばしば短時間，突発的で，そしてひじょうにダイナミックである．およそ 8 分ごとに，その中を通って微粒子が流れるような入り口を形成しながら，2 つのフィールドは一時的に合併あるいは再びつながる．入り口は，ほとんど地球と同じ幅の磁気の円筒の形をとっている．そのメカニズムは “流動移動現象” (flux transfer event) あるいは FTE として知られている．であるから，どんな磁気的関係においても，8 分ごとに，ストレスは地震と結合して “効果的な” 状態に達する．

FTE はどのようにして地震を発生させうるのか？

もし私たちが，地域の磁場の総体として，例えば，地球上の脱ガス作用の影響によって，無作為に配列された斜面を上昇する流れによって運ばれた強磁性の物質によっ

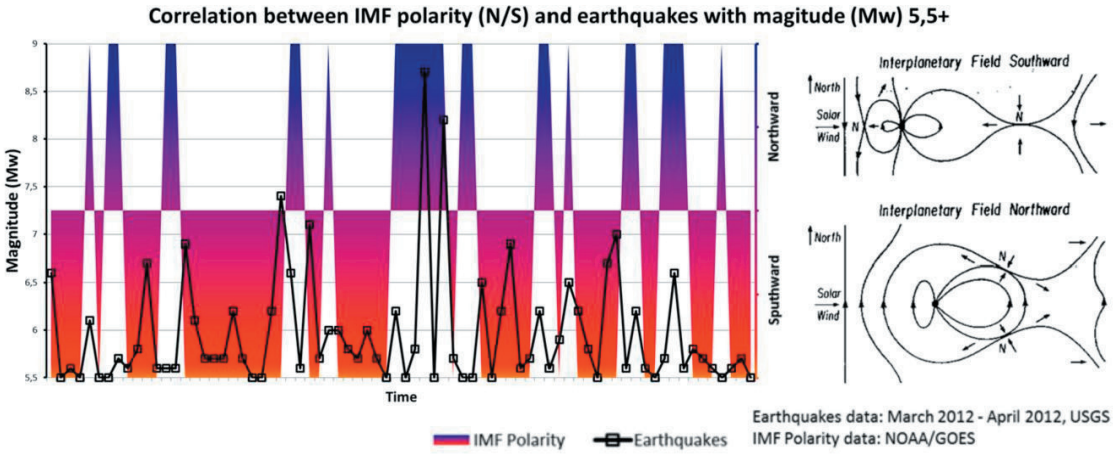


図 8　IMF の極性．分析は USGS によって記録された 2012 年 3 月と 4 月における M5+ の地震に基づいている．地震の大部分は IMF のマイナスの極性，つまり南方太陽系内磁場にともなって起こったことに気づくはずである．ピーク (プラスの極性の IMF) は 2012 年 4 月 11 日にスマトラで起こったマグニチュード M8.9 の地震の表している．

て生み出された地球の磁力線を想像すると (図 7)，その場合，IMF の方向は，磁場の磁力線やその結果の値，言い換えれば，地下から出現するそれが，増加するか減少するはずである．このメカニズムは，その破壊する重さに近い岩石の中に応力変化を引き起こすと思われる．

この仮説の鍵になる要素は IMF の極性である．この分析は，USGS によって記録された 2012 年 3 月と 4 月の両月における M5+ の地震を基礎にしている．地震の大部分は，IMF の負の極性，すなわち南方の太陽系内磁場にともなって発生した．ピーク (正の極性を伴う IMF) は，2012 年 4 月 11 日に発生したマグニチュード M8.9 のスマトラ地震に当てはまる (図 8).

しかしながら，太陽と地球の間の電磁気的性質の仮定された相互関係に加えて，地球と太陽間の重力的な関係は，光速でおよそ 8 分という両天体間の距離から，IMF の尖点と地震の間を経過する列と丁度ぴったりと一致している時間が除外されることはありえない．

まとめ

研究の方法は，ぴったり一致する近似，地震の時間差，“σ” の出現，そして一般的にはマグニチュード M6+ の地震などを伴う将来起ろうとする地震の震央地域を，具体的に特定できないという限界をもっている．IMF グラフの中 “σ” の出現は，実際には重力作用のあるいは電磁気作用の混乱の始まりを表しており，それは 8 分のあるいはその倍数の時間間隔で地震に先立って起こっている，と推論された．この研究方法は，グローバルな地震の前兆であり (Straser, 2011b)，潜在的な破壊地震は私たちの惑星にとって，グローバルな重要性をもつ出来事である．この方法は，それ自身で 100% 信頼できる予測を準備することは出来ないし，このような理由によって，地震の前兆の解明を目指した学際的な研究のための徹底的な研究の基本要素としてそれ自体が役に立っている．この方法の先駆的な面を考慮すると，その研究の適用は，地震の前兆シグナルの調査のための分析的な面においていくつかの注意を必要とする．

謝辞 : 著者は，この研究の完成達成のために必要な情報を提供してくださった Daniel and Gabriele Cataldi と LTPA プロジェクトチーム，そして研究をサポートしてくださった AB Global に対し，感謝を申し上げる．

文　献

Kalinin, Yu.D., 2009. Interplanetary magnetic field and seismic activity. Geomagnetism and Aeronomy (USSR) (Engl. Transl.), v. 14, no. 3, p. 422-424

Khazaradze, N.G., Metskhvarishvili, R. Ya., Elizbarashvili, M.A., Mininoshvili, Z.N., Metskhvarishvili, I.R., Nekrasova, V., Metskhvarishvili, M.R., and Khorbalazde, L.R., 2007. Anomalous solar-diurnal variations in cosmic rays related to crossing of the IMF sector boundaries by the Earth and the problem of earthquake. Geomagnetism and Aeronomy, v. 47, no.3, p. 395-398.

Phillips, T., 2008. Magnetic Portals Connect Earth to the Sun. http://science.nasa.gov/headlines/y2008/30oct_ftes.htm

Straser, V., 2011a. Radio wave anomalies, ULF geomagnetic changes and variations in the interplanetary magnetic field preceding the Japanese M9.0 earthquake. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 59, p. 78-88.

Straser, V., 2011b. Radio anomalies accompanied with “characteristic variations” in the Interplanetary Magnetic Field can be used as an indicator of approaching destructive earthquake events. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 61, p. 52-65.

Zátopek, A., Krivský, L. and Laštovička, J., 1976. Correlations between solar, interplanetary, geomagnetic, ionospheric, atmospheric circulation and microseismic phenomena. Journal of Interdisciplinary Cycle Research, v. 7, Issue 1, p. 9-13.

脈動インターバルの減少区間と M6+ 地震発生前に発見された電波異常

INTERVALS OF PULSATION OF DIMINISHING PERIODS AND RADIO ANOMALIES FOUND BEFORE THE OCCURRENCE OF M6+ EARTHQUAKES

Valentino STRASER　vstraser@ievpc.org Parma, Italy

（岩本　広志［訳］）

要旨：350 以上の地震のスペクトル解析から，マイクロ波脈動と電波障害が検知され，それぞれ，665mHz と 0.1 ～ 20Hz の周波数帯で，M6+ の地震の発生の数時間に先立って発生したことが明らかになった．この解析は，LTPA プロジェクトローマ基地 (イタリア) で 2009 年から 24/7 の機器で実施された．データの全体量は 1,900 以上の地震の研究から収集され，特にそれらに関係する破壊的な能力を有する地震，2011 年の日本もしくは 2012 年のスマトラでの強烈な地震に地磁気のマイクロ波脈動が関係したと規定され，特にマグニチュード 6+ の地震では，地震の直前の準備期間を伴っている．周期が減少した脈動間隔と電波異常は地磁気バックグラウンドの上昇を伴っていて，それらは経験的に 4 つの異なったタイプに区分され，主要動から 15 ～ 2 時間前に発生している．これらの 4 つの変化の収斂点は IPDP，PC1，電波障害と地震断層の運動力学であり，岩石 (フラクチャー境界粒子) の粒径の累進的減少と地震前兆期の流体循環に起因する．

キーワード：電波異常，PC1，IPDP，地震，全地球規模の地震の前兆

(注：この論説は第 34 回万国地質学会，ブリスベーン，2012 にて発表)

はじめに

自然界には，他と全く同じ地震は存在しない．それ故に，地震前兆の反復信号と異常は” Global Seismic Precursors”（全地球規模の地震前兆) と規定され，観測機器による検知と比較が可能である．岩石が造構応力をうける可能性は，強い地震の前に地磁気シグナルを放出することによってそれらの状態を示す可能性は，現在の地震学界ではよく知られた概念である (Hattori, 2004; Fraser-Smith et al., 1990; Hayakawa et al., 2007).

全地球規模の地震前兆 (Straser, 2011a and 2011b) は，伝統的な前兆とは区別される．というのは，それは地震が実際に起きているだろう場所での証拠ではなく，震央域と正確なマグニチュードが明記されるのではなく，一般には，M6+ と計測された地球規模でのさしせまった地震を示している．

この研究で選択された前兆現象は，2 つの前提にもとづいている．

a) 応力下に置かれた岩石は電磁波を放出する
b) 太陽と地球の間には地磁気的結合が存在する

全地球規模の地震の前兆の第 1 のタイプは電波異常の解析にもとづくのに対して，第 2 のものは脈動周期の減衰 (IPDP) 解析にもとづく．両者の電波障害と IPDP は，ローマ (イタリア) の例では，観測局 24/7 によって，LTPA プロジェクトで図 1 のスペクトル写真で捉えられている．

Intervals of Pulsations of Diminishing Periods IPDP は高緯度地方では 1Hz 以下，一般には 0.1 ～ 0.6Hz (図 2) の周波数領域で微小振動として観測される．一方，低緯度地域では数 Hz で観測される．イタリアでは位置的に極と赤道の中間に最適値として観測され，通常は 665mHz(0.65Hz) である．

電波異常

電波放出としての電波異常は，その性質 (継続期間，延長，強度等) が不明である．対応するのは次のとおりである：

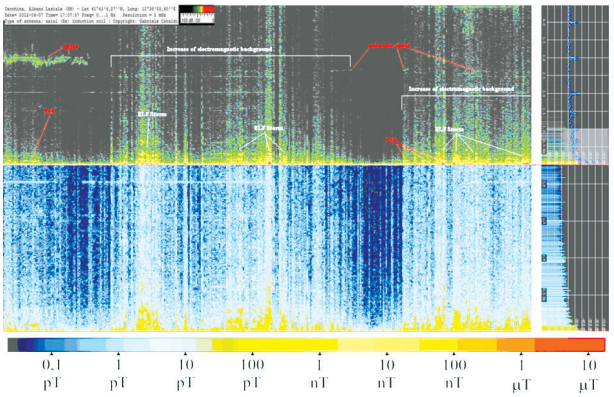


図 1　ローマ LTPA 局のスペクトル研究所で捉えられた信号．様々な周波数帯 Pc1，Pc3，極極極超長波嵐，電波異常，IPDP と地磁気バックグラウンドの上昇 (ガブリエラ・カタルディの厚意による).

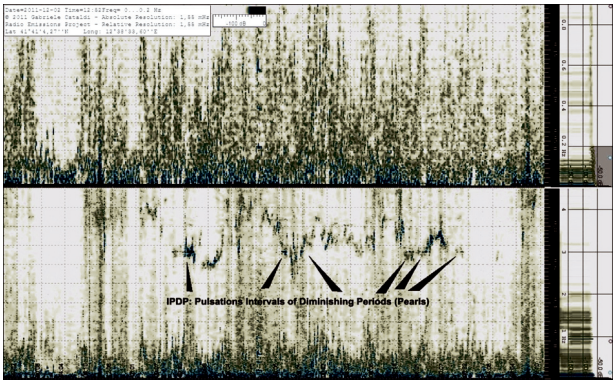


図 2　ローマでの LTPA スクリーン IPDP の例．周波数 0.65Hz，地磁気バックグラウンドの上昇が重なっている．

・地磁気脈動の IAGA(世界地磁気・超高層大気物理学学会) による分類
・節動タイプの放出
・既知の自然放出 (ホイッスラー波，コーラス，雷，電気流星音，プラズマ等)

そのため，電波異常は，地震の前兆の候補としてこの研究で考慮している既知の現象に関係していない．この分野での研究によって得られる電波異常の概念は，地磁気バックグラウンドの上昇に伴って現在識別されることで，IAGA の地磁気脈動の分類にはリストされていない．しかし，この実験の初期段階では，電波異常は IAGA 放出には分類できないものとして単純に考慮されている．

ほとんどの電波異常は 32Hz 以下で，普通は 0.1 Hz と 20Hz の間で，地震イベントが起きる前兆として著しく増加する地磁気バックグラウンドに関係して起きる．観測機器の視点からいえば，この地磁気バックグラウンドの増加は 0 ～ 150Hz の周波数帯で簡単に見分けることができる (図 3).

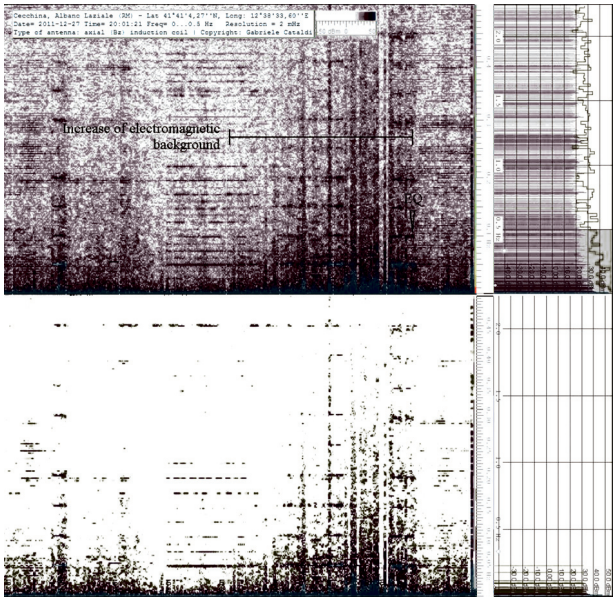


図 3 垂直の黄色線部示した増加する地磁気バックグラウンドが最高に，地震に先立って起きる電波障害 (赤).

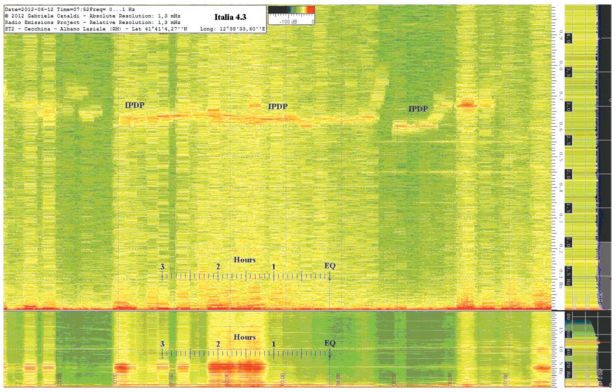


図 4　エミリアン・ポ・バレー, IPDP が出現する地震 4 時間前 (イタリア，2012 年 6 月 6 日), EQ の略号で示された．同様なスペクトルは (黄色の線で示された) 地磁気異常の増加で記録されている．

電波異常, IDPD と Pc1 は, マグニチュード >6+ の地震 (図 4) の発生前に機器的に観測することが可能である．その理由は，それらの関係が地震にまで持続すると推定されるからである．

電波異常と Pc1 に関する幾つかの考察

1- 機器的に検出されるシグナル強度は，100nT(ナノテスラ) 以上である．事実 100nT という値は，地方住民によって 50Hz (220V) で発電される国内住居における電磁気的汚染の強度に等しい．いくつかの研究によれは，約 60nT の超長波帯電波シグナルが，地震前に出現することが観測されている．それ故に，少なくとも 100nT のシグナルは，もっともらしい地震前の状態に関係した信号の数をより劇的に減少させる．

観測される電波異常の周波数のほとんどは 32Hz より低く (通常 0.1 ～ 20Hz の間)，与えられた強度は，磁気圏タイプの 0.1 ～ 20Hz の放射源との互換性は完全ではなく，放射源の最大強度は 3nT と目される．

IAGA の地磁気脈動の区分によれば，1nT 量は 0.2 ～ 5Hz，0.1 ～ 0.2Hz，22mHz ～ 0.1Hz の周波数領域に応答している．高い磁気強度は 22mHz 以下の周波数でのみ観測可能である．このような低周波数が観測されないという事実は，0.1Hz ～約 45Hz が妥当なシグナルと確認された近年の実験結果によって決定づけられた．

“不規則な地磁気脈動” の代わりは，25mHz ～ 1Hz の周波数帯の最大強度 10nT の出現と考えられる．これは，この場合，電波障害と両立しないデータである．

これは，シューマン共鳴として，8，14.1，20.3，26.4，32.5 Hz などの領域で観察される．これらの共鳴は電波信号が完全に低強度領域で調和的で，この例として，1.8pT(ピコテスラ) は電波障害の検知とは両立しない．

2- 周波数 : 磁気圏では ELF(3 ～ 30 Hz，極超長波) と SLF(30 ～ 300 Hz，極極超長波) 帯として知られている放出，それとアルヴェーン波である．正確には 0.1 ～ 10Hz のアルヴェーン空洞に関係した放出が観測される可能性があり，このタイプの放出は電波障害が出現した周波数帯で減衰する．

3- バンド幅 : これは地磁気脈動のバンド幅と比較した極広の PC1 を除いて，5Hz に延長する．しかし地磁気脈動の強度のこの後者のケースは 1nT と推定され，5 ～ 0.2Hz の信号きわめて低い値を代表する．

4- 調和的共鳴 : 人工的なタイプの放出と異なり，電波異常は調和的な共鳴を持たない．

5- トレンド : 異常は太陽活動や地震の前に出現する多くのケースに直接的に釣り合った方法に影響されて出現

し，地震は通常マグニチュード 6+ の場合が多い．

まとめ：EPS と地磁気脈動は同一のものではない

両者は同一の周波数帯で発見され，地磁気脈動が地磁気圏における太陽活動の結果から，それらの相互作用が非常に低い周波数の放出を作る．代わりに EPS は非常に広い領域にスペクトルを持つように放出されるばかりか，放出は 5Hz 以下に下がり，惑星体を通過することができる高い強度と周波数でどこでも観察される．それ故に，これらの放出の幾つかはアルヴェーン空洞の変動を引き起こし，コイルアンテナを用いて観測される地磁気脈動に変質を生じる．

方法とデータ

この研究で用いられる方法は，データ比較，24/7 記録，IMF のバリエーション，および特に 2 ～ 5nT に近い σ 型のトレースで構成され，電波障害の出現を伴ってローマ近傍の観測基地における LPTA 機器による記録である．

LPTA 基地では NASA INSPIRE VLF3 周波数データ収集装置とコンピューターと連動した 3 軸磁力計が 24/7 装置を用いた記録計に装備されている．

使用機器

a) スペクトログラム
観測局でえられたスペクトグラムは 10 分毎の記録，すなわち，1 水平線は 1,600 ミリ秒である．スペクトラム Lab 装置のデータは以下のようになっている：

fs をともなう高速フーリエ変換効果 = 44.1000 kHz:
1 高速フーリエ変換 -bin 幅 : 21.0285 mHz
等値ノイズバンド幅 : 28.5988 mHz
最大周波数レンジ : 0.00000 Hz ～ 1.37813 kHz
フーリエ変換 window time: 47.554 s
スクロール間隔からの重複 : 96.6 %

討論とまとめ

IPDP と Pc1 は黒点の 10 年パターンを伴った逆相関を見出した後，この研究で考慮された．最大地震は数時間前に先行し，地震それ自身が地磁気バックグラウンドが上昇するのに伴って IPDP に記録された (図 4)．太陽活動パターンの Pc1 と IPDP の間の逆関係のデータは，ソダンキュラ観測所でカンガスとその同僚たちによって 1974 ～ 95 年に記録された (図 5・図 6).

Pc1 と IPDP 脈動の両波は，プラズマ圏とプラズマ圏界面で増幅され，地球プラズマの変化の兆候を示し，通常，Pc1 は磁気嵐の後に出現し，IPDP は磁気圏の小規模擾乱に密接に関係して現れ，故にその Pc1 と地震破壊力との関係に関する表現の不足は存在しない (ボーテュニックほか，2008，ギュグリルミほか，2010)．地震もここ 11 年の頻度でチョイとマスロフ (2010) が述べた IDPD パターンと黒点数の関係 (図 7) に従っている．

与えられた IDPD と Pc1 の間の平行性，ならびに，黒点パターンと世界的規模の地震の発生回数は，この研究では地震の前兆現象の候補として考察される．

2009 年以降に得た実験から，電波異常は高エネルギーの地震に先立った地磁気バックグラウンドの増加に関連していて，異なった継続時間とタイプを伴った 4 つの道筋で発生しうる．地震が発生する時まで続いたものが，タイプ A では 12 ～ 15 時間，タイプ B では 6 ～ 8 時間，タイプ C とタイプ D では 4 時間，地磁気バックグラウンドが正常化する 2 時間を先行して突然に減少してしまう (図 8)．操作上の観点から言えば，地磁気バックグラウンドの増加を記録する電波異常の出現は，圧倒的に優

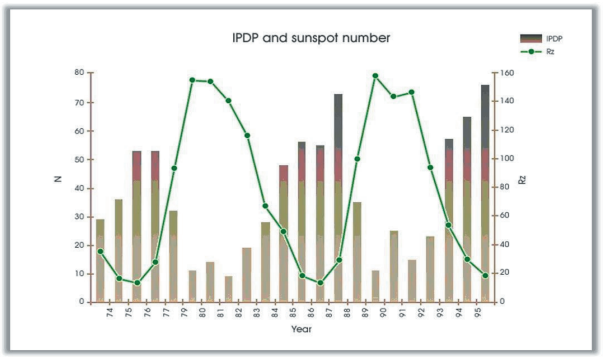


図 5 IDPD(濃淡ある茶色) と太陽サイクルパターン (緑色の線) との比較．1973 ～ 1995 年にソダンキュラ観測所におけるカンガスとその同僚たちによる (1999).

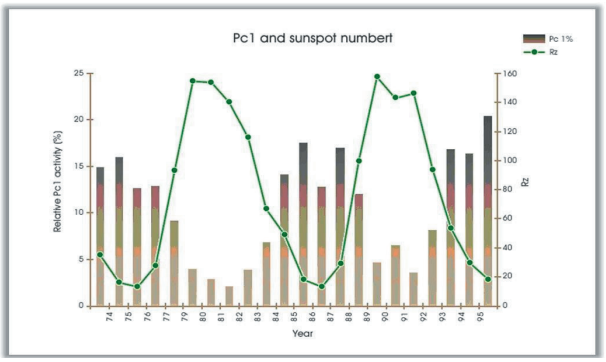


図 6 Pc1(濃淡の茶色) と太陽サイクルパターン (緑色の線) との比較．1973 ～ 1995 年にソダンキュラ観測所におけるカンガスとその同僚たちによって (1999).

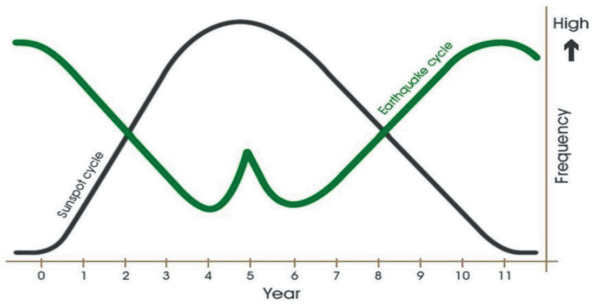


図 7 太陽活動 (黒線) と関係する地球規模の地震発生回数 (緑線). チョイとマスロフの仮説 (2010).

勢なケーススタディーによって地震イベントの前兆の正常化に常に従っている (図 9).

地磁気バックグラウンドと地震発生の関係の再現性に関する調査を実施した後，正反対の操作の実験が実施された : 例えば電磁気バックグラウンドの増加が, 電磁気バックグラウンドが安定する 15 時間区間のマグニチュード 6+ の世界規模の地震が発生したものが尊重されるかどうかを見るために待ち受けられる．結果は有望な材料となり，地磁気バックグラウンドの正常化とマグニチュード 6+ の地震との間隔がきちんとまとめられた (図 10).

実験は遠方に延長したマグニチュード 5 より小さい地震の確認では，エミリアン・ポ・バレーの地震系列からは，観測基地の場所は約 500km 離れた震央距離．焦点群の表層，表層から 10km，観測基地の相対的近接性は信号の増幅 (それとポリノ系列の中) を伴うのであろう．同じような考察が 2012 年 10 月のポリノ地震群でなされ，エミリアン地震群 (同様にイタリア) として同じ情報が提供された.

信号の輻輳にもかかわらず，それらの関係は尊重され，それ自身現存する困難性は地磁気バックグラウンド量でエミリアン・ポ・バレーとポリノ地震群の主要地震から地球規模の地震を識別することにある．後者では，この研究で提案された調査方法の適用性の限界の一つとして代表される.

もし, 1 つのバンドで, 地磁気バックグラウンドの上昇と，電波異常，IDPD ，Pc1 の間の 2 通りの関係が主要地震について尊重される場合，実際の地磁気異常の発生メカニズムに関する問題はいまだに解き明かされていない.

最初の解釈メカニズムの考察は，電波異常，岩石破断機構，断層ブロックの運動の結果として起きる．この件に関しては，次のメカニズムが推量される.

最初のフェーズでは岩石破壊は直交する破断によって開始し (図 11)，応力が増大し，断層の熱によって (ストルティほか，2003)，岩石 (岩盤) の破断部分は角が取れて丸くなり，大きさ (径) が小さくなる (図 12)．摩擦力が減った時，その作用によって 2 つのブロックが移動し地震が起きる．このステージでは岩石の細粒化作用，鉱物圧電性，電磁場や電波障害が発生する．応力が解放されると，変位に先立って，摩擦力が失われ，電気 (磁) 場は急激に降下し安定する．地震に先立って, 最初のフェーズで岩石破壊による断層熱が関係し，次に地磁気場の降下と観測機器の静止状態は同時に起こる電磁気バックグラウンドの変化に代表される.

電波異常と衛星計測の相互作用に関するもう 1 つの仮説 : 仮説されたメカニズムは，地下で発生した応力が電磁波を放出しうるということである．電磁波放出の可能性は，単独では磁気圏の変化に結びついておらず，地震波に起こったように (パランジオ，1993) 地球内部の電磁波の伝播現象を追加しなくてはならない．課題は, 地震によって形成された電磁場は，陸上の地殻の内部に伝播し，あたかも密度を異にする屈折ファクターの透明素材を通過する光線のように，地球の最深部層で屈折する．それ故

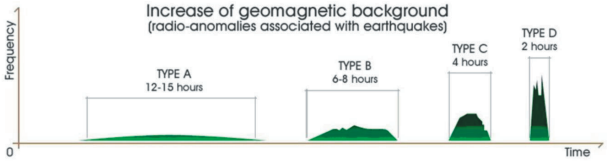


図 8 破壊的な能力を持ったマグニチュード 6+ 地震の前の地磁気バックグラウンドの出現を示す 4 つのモデル．それぞれ主要地震に先立ってタイプ”A”は 12 ～ 15 時間前, ”B”は 6 ～ 8 時間前, ” C” は 4 時間, ” D” は 2 時間．地震がより切迫し放たれたものとしてタイプに依存した頻度が増加する.

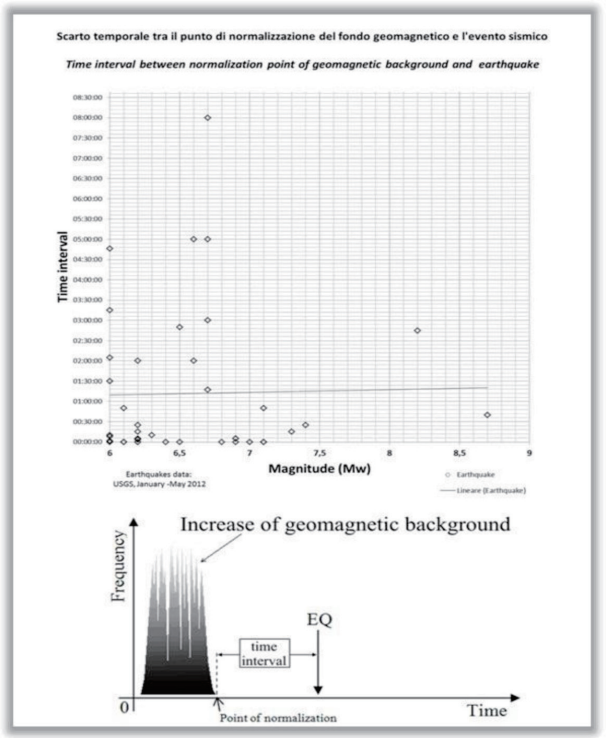


図 9 地磁気バックグラウンドの正常化点とマグニチュード 6+ 地震との間のタイムラグ．正常化点は "A", "B", "C" と "D" の地磁気圏のシャープな減少を伴った時間帯の意味.

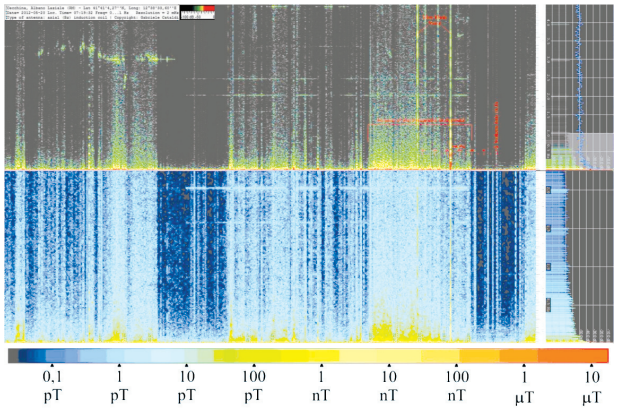


図 10 2012 年 6 月 6 日の北部イタリアでの地震の前に現れた IDPD の出現と電波異常．スペクトルには地震の前に地磁気バックグラウンドが増加し，そのポイントが正常化したことに気付くことができる (ガブリエレ・カタルディのご厚意による).

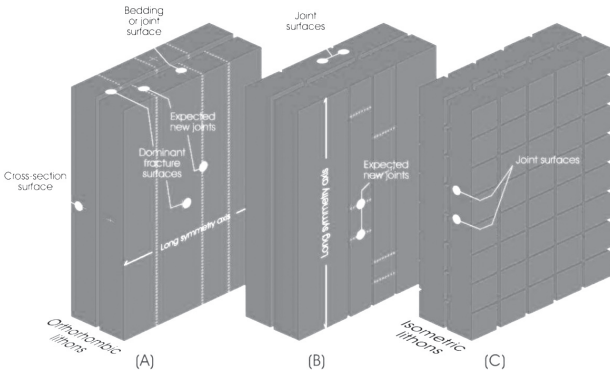


図 11 テクトニック応力下の岩盤の細片化の進行．直交する亀裂の断絶，岩石のフラクチャリングが開始，時間とともに，岩石複合体に変位が起きる．ファブリツィオ・ストリ教授のご厚意 (図の修正).

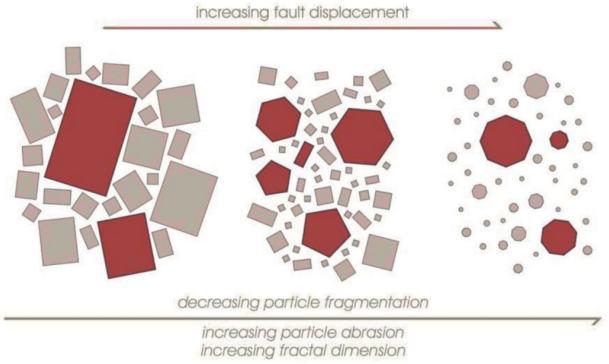


図 12 断層の熱によってテクトニック応力下では岩石の組成サイズが減少．岩石サイズ組成の減少の進行は流体の循環と断層ブロックの変位によって行われる．IPDP が示す地上波のプラズマが変化してから，高エネルギー地震の発生開始で電磁気バックグラウンドが増加することとプラズマ圏とプラズマ圏界面の IPDP の間の相互作用が消滅するだろうと信じられるようになった．

に，この現象は電波放出がこのタイプの伝播からの運搬が放棄されない観測の可能性として知られている．全ての電磁気放出は 0 ～ 1.000Hz の周波数を伴っていて，強度減少を伴わないまま地球を正確にすり抜けることができる (パランジオ，1993). この周波数帯に伴う低圧プラズマも放出され，我々はこのタイプを大気中で観測することが可能である．

極超長波帯の異常な物理的本性についてのより詳細は，ドラガノフ (1991) やフェノグリノ (1995) によってな説明されている．現在では，このタイプの放出は，確かに深度約 10km で形成されたとしても顕著な減衰が起きないので，地球上ではいかなる場所でも記録可能である．

謝辞：ガブリエリ氏とダニエル・カタルディ氏，それと LTPA プロジェクト・ローマにはこの研究に有益で欠くことのできないデータの提供を賜ったことに深謝します．

文　献

Bortnik, J., Cutler, J.W., Dunson, C. and Bleier T. E., 2008. The possible statistical relation of Pc1 pulsations to Earthquake occurrence at low latitudes. http://www.quakefinder.com/research/pdf/Pc1_EQ_v2.pdf

Choi, D. and Maslov, L. 2010. Earthquakes and solar activity cycles. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 57, p. 84-97.

Draganov, A.B., Inan, U.S. and Taranenko, Yu.N., 1991. Ulf magnetic signatures at the earth surface due to ground water flow. A possible precursor to earthquake. Geophysics research Letters, v. 18, p. 1127-1130.

Fenoglio, M.A., Johnston, M.J.S., and Byerlee, J.D., 1995. Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones; application to the Loma Prieta ULF emissions. Journal of Geophysical Research, v. 100, p. 12.951-12.958.

Fraser-Smith, A.C., Bernardi, A., McGill, P.R., Ladd, M.E., Helliwell, R.A. and Villard, O.G.Jr., 1990. Low Frequency magnetic measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta Earthquake. Geophysic Research Letters, v. 17, p. 1465-1468.

Guglielmi, A.V. and Zotov, O.D., 2010. Correlation between Pc1 electromagnetic activity and earthquakes. Physics of the Solid Earth, v. 46, no. 6, p. 486-492.

Hattori, K., 2004. ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, v. 15, no. 3, p. 329-360.

Hayakawa, M., Hattori, K. and Otha, K., 2007. Monitoring of ULF (ultralow-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. Sensors, v. 7, p. 1108-1122.

Kangas, J., Kultima, J., Pikkarainen, T., Kerttula, R. and Mursula, K., 1999. Solar Cycle Variation in the Occurrence Rate of Pc 1 and IPDP Type Magnetic Pulsations at Sodankylä. Geophysica, v. 35(1-2), p. 23-31.

Palangio, P., 1993. Radioricezione ELF – VLF. Annali di Geofisica, v. XXXXVI, Suppl. n. 5-6, p. 99 -114.

Storti, F., Billi, A.; Salvini, F., 2003. Particle size distributions in natural carbonate fault rocks: insights for non self-similar cataclasis. Earth and Planetary Science Letters, v. 206, v. 173-186.

Straser, V., 2011a. Radio wave anomalies, ULF geomagnetic changes and variations in the interplanetary magnetic field preceding the Japanese M9.0 earthquake. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 59, p. 78-88.

Straser, V., 2011b. Radio anomalies accompanied with “characteristic variations” in the Interplanetary Magnetic Field can be used as an indicator of approaching destructive earthquake events. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 61, p. 52-65.

天体の位置にもとづく，地震に対する Raffaele Bendandi の警告
THE RAFFAELE BENDANDI EARTHQUAKE WARNINGS BASED ON PLANETARY POSITIONS

Cristiano FIDANI
Central Italy Electromagnetic Network, 63900, Fermo, Italy　c.fidani@virgilio.it

（小坂　共栄 [訳]）

要旨：Raffaele Bendandi は，地震が襲来すると警告したことで 20 世紀前半ごろにはよく知られていた人物である．しかし今日では彼の名前はあまり知られていないし，むしろ彼が注目した手法はミステリアスなものだということだけが残されているにすぎない．しかし最近になって，2011 年 5 月にイタリアのローマで発生した地震を Bendandi がすでに予告していたとする誤った主張によって，彼の地震発生に対する警告が再び注目されることになっている．この論説では，彼の警告の本質についてまとめ，彼に対する評価が新聞や宣伝紙などによって作り上げられたものであることを示す．彼の地震発生に対する警告がどうであったかは，唯一その後に起きた地震やそれらに対する歴史的データと比較することによってのみ可能である．
キーワード：planetary configurations, moon tides, earthquake predictions, historical catalogues, Raffaele Bendandi

はじめに

Raffaele Bendandi (図 1) は，1893 年 1 月 7 日に Italy の Faenza というところの中産階級の家庭に誕生した．彼は 5 歳になるまでに小学校に通うようになり，その後は製図作成の特別コースへと進学したが，そのことが天文や地震のもつ神秘さに興味をもつきっかけをつくった．1905 年 8 月 30 日に起きた金環日食が，彼をそのような天体の現象を一人で追求しようとする気持ちにさせ，彼がその後に木彫師になったことがさらに天文の研究に集中することを許すことにつながった (Fidani, 2009).

1908 年 12 月 28 日発生の Messina 地震について，月と太陽の位置関係にもとづく Perret の予告について読んでみると (New York Times, 1909)，Bendandi の地震に関する天文学的な研究はすでに始まっていた．彼 (Bendandi) は，天体の基礎的な知識によってすでに月と太陽の位置関係で潮の満ち引きが起こるという原理を用いていた．また，時計作りに打ち込んだ間に身に付けた精巧な仕掛けをつくる腕は，世界的に販売された地震計をつくることにつながった (Lagorio, 2009)．彼は 1920 年に，Italy Seismological Society のメンバーになっている (Lagorio et al., 1992)．1914 年 10 月 14 日，彼は彼にとっては初めてといえる 1915 年 1 月 13 日発生の地震に対して，予知という視点から注意を向けている．

彼は，彼自身のノートブック上でこの地震に対する予知を行っている．イタリアの Avezzano で発生した 1915 年 1 月 15 日の地震というものは，彼の地震研究への意欲をさらに掻き立てるものとなった．彼は，過去の約 20,000 個の地震の解析を行っている．1923 年 12 月 20 日，彼は正式に記録されたものとしては初めてとなる地震に対する警告を行っている (Bendandi, 1924).

図 1 1960 年ごろの Raffaele Bendandi

ここでは，Bendandi がまとめた地震に関する警告をまとめておく．それらの多くは，新聞紙上で確認できるものだが，彼の最初と最後の警告だけは詳しく述べてみることにする．

Bendandi の地震に対する警告の特徴

私は，差し迫っている地震への Bendandi による

警告の特徴を理解するために，イタリアFaenzaのVia Manara街道沿いにあるRaffaele Bendandi Observatory Archives (Raffaele Bendandi観測資料館)を調べた．そこに保存されている地震の警告に関する彼の資料は，1914年10月から1977年4月までのものである(Fidani, 2009)．それらのうちの143件は地中海地域のもの，167件はその他の世界各地のものである．リストアップされた地震は，63年間のもので，それを超えてはいない．1924～1927年の間，彼の地震に関する予告記事は毎週ごと，毎月ごとに掲載されていた．しかし，1927年の終わりごろまでには，新聞の多くは彼の記事を次第に載せなくなっていった．1928年の初めごろ，時のイタリア政府がBendandiに対して地震の警告禁止令を出したことで，彼の記事はついに新聞紙上からは消えてしまった．この禁止令が出されたきっかけは，彼の警告がイタリアの観光に対してダメージを与えるという判断，またイタリア国民が国外へ出て行ってしまうとの判断であった(Castelli, 1927)．1939～1940年には数編の論説が出されている．1950～1964年までの間，Bendandiはそれまでの活動のまとめを継続的に進めている．さらに1971～1977年の間にも，彼は地震に関する警告を出している．Bendandi観測資料館には，多くの資料が保存されているが，その中には2011年5月10日発生の地震に関するものは何もない．Bendandiがこの地震(2011年5月10日のイタリアの地震)について警告していたという根拠のないいいがかりはここから始まっている(Cartlidge, 2011)．保存されている資料の中には，実際，地震発生の場所がローマであることを示しているものは何もない．むしろそれらは天体の運動にかかわることを扱っており，地震活動に関するものはないと言ったほうがよい．これらのデータからは将来の地震発生を予測することはできない．したがって，Bendandiの手法は正しく理解されてはいないのである．

多くの新聞が取り上げたBendandiによる地震に関する警告には，多彩な地震にかかわる現象が含まれていた．それらは13に及んでいる．地震の起きる時期や場所などの時空的なことがらは非常に価値のあるものである．一般的に言えば，1940年までに起こると予想された地震に関するデータは，それ以降のデータよりも豊富であった．1940年までのBendandiによる地震に関する警告は，時期と場所，地震の強さなどに関して非常に詳細であった．たとえば，ほとんどの地震について1日以内に，または数時間以内に起こるというように具体的であった．地震の揺れの強さを表現するために，mild(微弱)，moderate(中程度)，minor(小さい)，strong(強い)，violent(激しい)，parossisma(きわめて激しい)などの用語を用いている．また時にはMercalli scaleを参考にしている．彼は，地震発生の場所を正確に決めることは不可能だと明確に述べている．地震発生の場所を述べる際，彼は数百キロを超える領域を考えている．彼が新聞紙上で1940年までに発表した論説は，2つの領域に分けられる．1つは強い地震の震央に関する過去の議論の歴史についてであり，他の1つは今後，発生が予想される地震についてである．Bendandiが考慮していたのは，地震計のペン先を数時間にわたって揺り動かす大きな地震のことであった．彼は，地震計の記録紙上の波形のピークの高さが，地殻にかかるストレスの指標になるということを用いて，地震発生に関する警告を行ったのである．つまるところBendandiは，差し迫っている地震の発生に対する注意喚起(警告)を，科学的な検証の結果として述べているのであり，それは天文学的な予測の1つのタイプであるともいえる．

Bendandiの研究

Bendandiの地震に関する研究については，彼と一緒に論説を著した科学者たちの研究の中に記録として残されている．それらはイタリアのFaenaのManara街道17号線沿いにある彼の家に残されている．さらにそこには，彼の宇宙物理学や地球物理学に関する造詣の深さを証明するさまざまなものとともに，地震の予知に関する新聞紙上に掲載された膨大な論説などが残されている．Faenzaでは，それらの彼の業績を残すために地球上の地震に関する月と太陽の影響について扱ったFather Alesandro Serpieri の Seismological writings (1888)というテキストまでをも復刊している．しかし，これに先立ってBendandiは，Perret (1908)のSicily島の火山噴火の予告について読まなければならなかった．しかし，Perretの噴火予想が失敗に終わり，彼の手法に対する世間の科学的な興味は力を失ってしまった．だが，Bendandiの場合には，それが天文学に基礎を置いていることからPerretのようにはならなかった．Bendandiの地震研究の基本的アプローチの方法は，今日では広く知られ受け入れられている天体の力による潮汐力に基礎を置くものであった(Fedani, 2006; Straser, 2008; Straser, 2010)．このことがBendandiをして，この分野でのパイオニアであることを確固たるものにした(Bendandi, 1924)．1930年代以降，これらは他の研究の基礎となった．特にBendandiの太陽に関する研究は，天体の11年周期仮説をはじめとして，さまざまな星の成因のなぞを明らかにする方向へ向かっていく．Bendandiは，天文学での2つの領域において2つの著作を著している．1つは“宇宙の基本法則 A fundamental principle of the Universe: 天体の11年周期の成因 Genesis eleven-year solar cycle (1930)”，他の1つは“宇宙の基本法則：星の多様性(1932)”である．後者は最近，再刊された(Bendandi, 2006)．この2つの出版物の中で明らかにされている天体に関する基本法則は，彼の地震予知の背景になっているものと同じである．しかしBendandiは，この天体の基本法則と地震との間の関係を明らかにしているわけではない．なぜなら，彼にとっては，地震の発生する場所を詳しく予告することはできなかったからである．彼は，天体の動きと地震との関係を明らかにすることが，純粋な科学者らをこの地震予知の点で有利にさせることをやや恐れたからである(Bendandi, 1924)．Bendandiは，基本法則に関して次のように記している．“地震などの変動と，星な

どからのエネルギー放射との間の相関は，地球以外の大きな星によって引き起こされる重力性の潮力環境のアンバランスによってもたらされる (Bendandi, 1924, 1931, 2006)”．この法則による結果は主として３つある．地震予知の方法，大陸の位置予測，他の星の光度変化の表し方，の３つである．この一つの法則は，固体からなる地殻とガスからなる天体に適用でき，それぞれ見かけ上は無関係に見える現象を統一的に説明できる．地球上の潮汐現象は，地殻全体または地球というガス球全体の同時的な現象なのである．これこそが地殻の摂動現象 (Bendandi, 2006) であり，彼をして地震予知を行いえた基本的な考えなのである．

Bendandi によって記載された手法

たとえ Bendandi が彼の地震予知の手法を何もまとめて書き表していないとしても，その手法の第１ステップについて，彼はイタリアのさまざまな新聞紙上で述べている．実際，第二次世界大戦以前には，重力の効果に関係して地震に関する詳しい警告が，その発生の場所，時間，強さに関してなされている．Bendandi は，地震というものは地球という天体に関して興味を掻き立てる現象であると繰り返し述べている (Bendandi, 2006)．また，地震の予知にはこのようなグローバルな視点が欠かせないとも述べている．1950 年代に入ると，彼の地震発生に対する警告は，地球と太陽の関係に関する，より限定的なものになった．それは，彼の警告の手法が，地球と太陽の関係に限定したものであることの反映であった．太陽の効果という点で，Bendandi の研究には地球上におけるさまざまな現象が含まれていた．たとえば気温の異常な上昇，地磁気の異常，飛行機事故，はては犯罪の増加に至るまでといった具合にである．これらは，個別的には潮汐作用の効果であったり太陽風による電磁気的な影響なのであるが，すべて地震と一緒くたにして“cosmic crisis”と呼ばれたりもした．Bendandi は，“それらはすべて，太陽活動から生まれる電磁気的な流れである”と述べている (Bendandi, 1962).

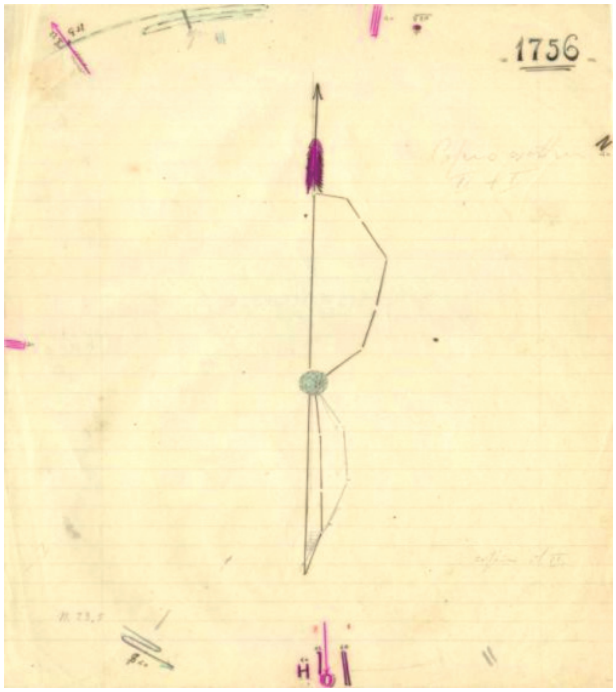


図２ Bendandi による 1756 年の２日に対する parallelogram rule

Bendandi (1924) の示唆に続いて，ある事象に関して，その時の星の位置を計算する方法の研究が始められる．地震発生の危険の程度は，Bendandi の parallelogram rule (図 2) に従って並べられた天体の位置によって推定された．各天体の効果は，過去に起きた地震に関する研究から得られたデータによる Bendandi の経験に基づくものであった．ここから幾何学的なベクトルが計算される．次にその値が最大値になる時期が決定される．その時期，地球に対する月の重力効果が考慮されるのである．月が地球と太陽の間のある位置を通過するとき，重力効果のベクトルが足しあわされる．その結果，地球上での地震発生の危険度が最大となる．Bendandi にとって，地震の強さや発生時期は，この重力効果の強さとその最大時期に関係しているものであった．その一方で，地震発生の場所は潮汐作用の起こる場での地殻へのストレス効果の最大値を考慮して決められるのである．

地震への最初の警告

ここでは，地震の発生に関する Bendandi の最初の警告がどのようなものであったかについて，実証的に検討してみる．Bendandi のオフィシャルな地震の警告は，1923 年２月 23 日である (LA NAZIONE, 1924; 図 3).

注目すべき主張
≪Italy 王 Vittolio EmanueleIII 世に神のご加護を≫
≪Italy の Faenza における 1923 年 12 月 20 日，水曜日という日，私の部屋には Dr. Domenico Savini, Olimpia Careli, Querzola Edward, それに Raffaele Bendandi (彼は木彫師の Angelo の息子として Faenza に生まれた人物であるが) らが居て，以下のようなことを実証したうえで，私にそれを公表してくれるよう依頼した≫

≪今日から 1924 年１月 10 日までの間に，２つの大きな地震が起こる≫
≪その１つは 12 月 21 日，明日のことであるが中央アメリカで起こる≫
≪２つ目は，より大きなものでバルカン半島あるいはエーゲ海を震央とする地震で，来年１月２日に発生する≫
≪私は，この２つの地震が起こるとの Bendandi の主張を保障しようと思う．そしてこれを公的な新聞紙２ページを使って公表したい≫

IL MESSAGGERO - 11 Gennaio 1924 -
Un'altra grande scoperta del genio italico
La esatta previsione dei terremoti

図３　1923 年１月のある新聞に掲載された記事の表題

最初の警告に関する確証

Bendandi による，これらの地震に関する警告が確かめられるのはイタリアの 1924 年 1 月初めの新聞紙上である．図 4 をみると，1923 年 12 月 21 日に Mexico の Granados Sonora 地方を地震が襲った．また，1924 年 1 月 2 日には Senigallia 海岸を地震が襲った (Cavara, 1924).

その当時は，今日のように観測機器がなかったこともあり，警告された地震を確かめることは難しいことであった．この場合，地震の揺れが最初に Mexican seismic network でキャッチされたという情報がなかった．さらに，中央アメリカでの地震に関する最初の報告 (第 1 報) は，アリゾナ州 Douglas City からのものであった．現在では，この時期の 2 つの重要な地震についての科学的な検証データがある．1 つは，1923 年 12 月 18 日，午前 5 時に Sonora の北東に位置する Huasabas 州 Granados City を襲った M5.7 の地震である．翌日 19 日午前 6 時には，少し小さな地震も起きている (Suter, 2001)．Arizona 州の住民は，1923 年 12 月 19 日の朝 9 時にメキシコの地震の揺れを感じている．ヨーロッパではこれは12月20日である．フランスのパリにこのニュースが届いたのは 12 月 21 日であり，これがこの地震の発生日時になっていて，実際はこの 2 日前に起きたものであった．イタリアにこのニュースが届いたのは 12 月 21 日だったため，Bendandi はこの事実を知らなかった (La Nazone, 1924).

2 つ目の地震は Italy で発生したが，そこではこの地震を記録する上では十分な性能の機器が設置されていた．地震は, Bendandi の警告のとおり 1924 年 1 月 2 日朝 8:55 に Senigallia で発生した M5.6 のものであった (CPTI04, 2004)．しかし震源地は Bendandi の示した位置からは数百キロも離れていた．Bendandi は，この地震の数か月後に自分の地震発生の予告に関して，その発生場所の特定については未解決なのだと述べている (Bendandi, 1924)．この 2 つ目の地震は，第 1 のものより揺れが小さいことに注意すべきである．しかし，この 2 つについては時間と空間との間に相関があり，Bendandi にとっても非常に重要な地震であった．

ヨーロッパのバルカン地域では，1924 年 1 月 2 日以前はもちろん，以後においても 1 週間の間に同じ規模の地震が発生したことはなかった (Catalogue, 1990)．ギリシアの Chalkidiki Balkan 地方で，1924 年 1 月 2 日の地震に近接して 1923 年 12 月 5 日の朝 8:57 に M6.4 の地震が発生している (Catalogue, 1990)．そして 1924 年 1 月 29 日の朝 8:39 に Croatia の Sibenik において M5.3 の地震が発生している (Catalogue, 1990; Herak et al., 1996)．Mexico に関しては，1923 年以前・以後とも数年間にわたって大きな地震は記録されていない (Suter, 2001)．しかし，Colombia 地方では，1923 年 12 月 14 日朝 10:31 に M7.1，1923 年 12 月 22 日の朝

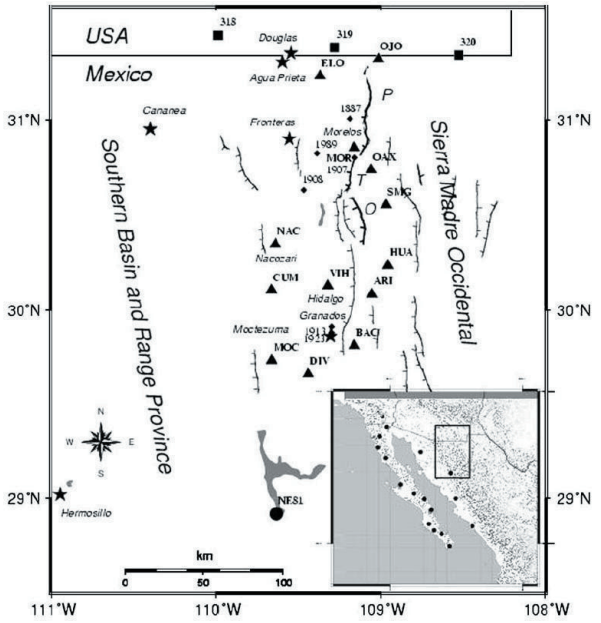


図 4 1887 年の大きな地震以降に起きたメキシコ地方の地震．1923 年には Granados 付近でも地震が起きている (Suter, 2001 による).

9:55 に M5.5 の地震がそれぞれ発生している (Espinosa et al., 2004).

最新の地震の警告

筆者は，2011 年 5 月の地震が，Bendandi によって予告されていたという誤った認識についても調べてみた．なぜなら，この予告そのものは 1977 年にすでにメディアに取り上げられていたからである．

この警告は，データに乏しいものであった．この地震は 1977 年 3 月 3, 9, 12 日に限られている (Bendandi, 1977a)．Bendandi は，1977 年 3 月 3 日の地震については“地震のような何か危機が訪れる”と述べている．また“3 月 9 日には Romania で破滅的な地震が起きるだろう．その揺れはエーゲ海イオニア諸島の地下を震源として，バルカン地方を近々襲うだろう．Smyrna, Asia Minor, Ochrid, Catalonia 島 , Romania の Gallipoli では二次的な揺れに襲われる”．3 月 12 日のことについては“Romania 地方ではさほど重大な揺れにはならないが，フィリピン諸島では大きなものになる．バルカン半島では，8 月の終わりころまでは Zakyntos 島と Katalonia 島との間のイオニア海地域で深部での揺れが続く”と述べている．これらの予告に関する資料は，イタリアのローマとフローレンス国立図書館にあるものと同様に，Manara 街道 17 号線沿いの館に保存され，閲覧できる．

Bendandi による地震への警告の確証

1977 年 3 月 4 日には，Romania の Vrancea で M7.2 という大きな地震が発生した (図 5)．この地震で，Romania の Vrancea 地方 Bucharest 市では数千人の

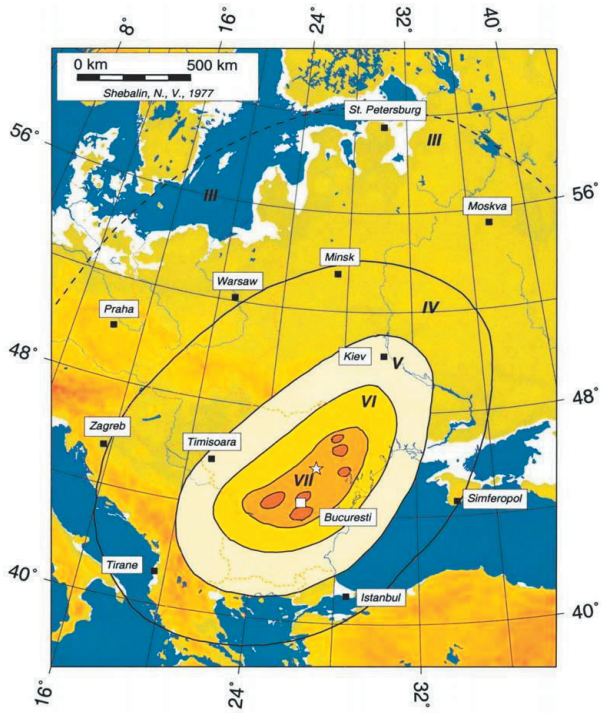


図 5 Vrancea 地方ではかなり深い震源による地震が発生した．その影響はヨーロッパ地方の半分のエリアに及んだ．1977 年 3 月 18 日には，フィリピンを M7 の大きな地震が襲い，また多くの新聞が取り上げたようにそこでは同年 7 月 21 日にも M6.9 の大きな地震に襲われている．(http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/).

犠牲者が出た．この地震は，Romania では災害史上最も大きなものの 1 つとされている．しかし，American Geological Institute のレポートでは，Romania ではこれとは別の強い地震に襲われたとしている (Bendandi, 1977c)．イタリアでもその 1 年前に Friuli 地方で大きな地震があった．それにおくれて 1 か月後にも大きな地震があった (Pondrelli et al., 2001)．また，それに先立つこと 4 か月前，Bendandi はこの地震に関する警告を発している (IIResto del Carlino, 1976)．これに関して彼は，1975 年 12 月に次のよう述べている．“北部イタリアでは，1976 年 5 月の初め以降，地震活動が活発化する”．実際，イタリア Friuli 地方で 1976 年 5 月 6 日午前 9 時に M6.5 の大きな地震が発生し，965 名の死者を出した．また同年同月の 11 日に M5.1 と 5.6，15 日に 5.8 と 6.1 の地震がそれぞれ発生し，12 名の死者が出た．このことから，Bendandi は，Romania ではその年の秋までは地震が起こらないという保証は何もないと考えた．ヨーロッパ中央〜南東部の地震カタログ (Shebalin et al., 1990) をみれば，1978 年 1 月 1 日にこの同じところで次に M5.1 の地震が起こること，さらに 1986 年 8 月 30 日に M7.1 の地震が起こることを予測できたと証明することができる．1977 年の 7 月中旬から 9 月中旬までの間で，この地域では 3 つの大きな地震が発生した．Albania では，1977 年 9 月 20 日の 20:28 に M4.8 の地震，Bosnia-Herzegovina では 9 月 23 日の 02:58:02 に M4.6 の地震，Albania では M4.6 の地震がそれぞれ発生している．しかし実際のところ，地震活動がより強まったのは Aegean Sea と Ionian Sea の間の地域であった．ギリシャの地震カタログ (Catalogue, 1999) によれば，Creta 島の近くでは，この年の 8 月 18 日に M5.4，9 月 11 日に M5.8，10 月 22 日に M5.1 と，大きな地震が発生している．Zante 諸島と Cafalonia 諸島付近の Ionian Sea では，7 月 30 日，8 月 31 日に M4.5 〜 4.9 の中程度の規模の地震が計 4 回発生している．最後に，トルコの海岸部を襲ったさまざまな地震が知られている；10 月 5 日 と 27 日の M=5.3，5.0，11 月 28 日と 12 月 16 日の M=5.4, 5.3（Catlogue, 1999；Tan et al., 2008)．

謝辞：私は，Tiziano Cantalupi と Paola Lagorio に，また，Raffaele Bendandi のデータの広めるのに協力いただき，この科学者の自宅天文台に保管された文書を検討する機会を与えられた "Bendandiana" 協会に，深謝する．

文　献

Bendandi, R., 1923. Autunno Eccezionale, Il Nuovo Piccolo, N.8, November 4.

Bendandi, R., 1924. IL CORRIERE DELLA SERA, February 7.

Bendandi, R., 1931. Un Principio Fondamentale dell'Universo, Volume Primo, S.T.E. In Bagnacavallo, July, p.323.

Bendandi, R., 1962. IL GLOBO, September 9.

Bendandi, R., 1977a. Seismic forecasts, Comunicato diramato dall'agenzia ANSA, March 9.

Bendandi, R., 1977b. Le previsioni di Bendandi per il 1977, LA NAZIONE – FIRENZE, March 12.

Bendandi, R., 1977c. Forse la Romania Sarà Colpita da un altro Disastroso Terremoto, LA GAZZETTA DEL MEZZOGIORNO, March 10.

Bendandi, R., 2006. Un Principio Fondamentale dell'Universo, Volume Secondo, curated by C. Fidani, EDIT Faenza, May, pp. 272.

Cartlidge, E., Scientists Try to Counter Rome Earthquake Fear, Science Insider, 10 May 2011, 2:30 PM, http://news.sciencemag.org/scienceinsider/2011/05/scientists-try-to-counter-rome-e.html

Castelli, G., 1927. Una definitiva disposizione di Mussolini sull'attività di Bendandi, LA NAZIONE, May 30.

Catalogue of earthquakes for the countries of the EU (as of 1990), Austria and Switzerland, http://www.bgr.bund.de/cln_109/nn_336522/EN/Themen/Seismologie/Erdbeben/historisch/historische erd beben node en.html? nnn=true

Catalogue of earthquakes in Greece, periods 1900-1963 e 1964-1999, http://www.geophysics.geol.uoa.gr/frame_en/catal/menucatal_en.html

Cavara, O., 1924. IL CORRIERE DELLA SERA, Colui che prevede i terremoti, January 4.

Espinosa, A., Gomez, A. and Salcedo, E., 2004. State-of-the-art of the historical seismology in Colombia, Annals of Geophysics, v. 47, no. 2/3, p. 437-449, http://www.ceresis.org/portal/catal_inten.php

Fidani, C., 2004. Sei relazioni sulle previsioni di Raffaele Bendandi, Comune di Faenza, pp. 84.

Fidani, C., 2006. On electromagnetic precursors of earthquakes: models and instruments, IPHW, Bologna, p. 25-41, June 17.

Fidani, C., 2009. The Raffaele Bendandi forecastings inspired by the great earthquake, CIPH EQL, p. 1-4.

Herak, M., Herak, D. and Markusic, S., 1996. Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992, Terra Nova, v. 8, p. 86-94.

Il Resto del Carlino, 1976. Bendandi prevede altre scosse, May 7.

LA NAZIONE, 1924. Il sismologo faentino a colloquio con Padre Alfani e Padre Stiattesi, February 1.

Lagorio, P. and Dolcini, A., 1992. L'uomo dei terremoti, Raffaele Bendandi, EDIT Faenza, pp. 320.

Lagorio, P., 2009. The epistolary archive of Raffaele Bendandi, a seismologist standing outside the institutions, Annals of Geophysics, v. 52, no. 6, p. 651-656.

Perret, F. A., 1908. Some conditions affecting volcanic eruptions. Science, p. 277-287, August 28.

Pondrelli S., Ekström G. and Morelli A., 2001. Seismotectonic re-evaluation of the 1976 Friuli, Italy, seismic sequence. Journal of Seismology, 5, p. 73-83.

Serpieri, A., 1888. Dell'influenza Luni-Solare sui terremoti, in Scritti di Sismologia, Parte II, p. 203-206, Casalanziana Ed., Oss. Ximeniano, Firenze.

Shebalin N. V., et al., Earthquake Catalogue for Central and Southeastern Europe 342 BC - 1990 AD, on http://www.bgr.de/quakecat/SE-EUROPE-CAT-GV.ZIP

Straser, V., 2008. Plaetary perturbations and “twin earthquakes”: a model for the long-term prediction of earthquakes, New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 46, p. 35 – 50.

Straser, V., 2010. Twin earthquakes and planetary configurations: height of planets used for earthquake prediction, New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 54, p. 57 - 64.

Tan, O., Tapirdamaz, M.C. and Yoruk, A., 2008. The Earthquake Catalogues for Turkey, Turkish Jour. Earth Sci., v. 17, p. 405–418.

The New York Time, 1909. March 13.

随　筆　ESSAY

地震と火山の“予測可能性”対地殻診断

空間 - 時間の縮尺の大きさと誤差範囲，ならびに，社会情報と道徳的責任の問題

EARTHQUAKE AND VOLCANO “PREDICTABILITY” VS. CRUSTAL DIAGNOSIS

Space-time scale sizes & error bars　Societal information and moral responsibility issues

Giovanni P. GREGORI

giovanni.gregori@idac.rm.cnr.it; giovanni.gregori@sme-ae-it

S.M.E. (Security, Materials, Environment) s.r.l., 経由 C. Colombo 112, 00147 Roma (Italy), info@sme-ae-it .

IEVPC – 国際地震・火山予報センター [http://ievpc.org/index.html]

IDASC(CNR), 経由 Fosso del Cavaliere, 100, 00131 Roma (Italy)

ICES (地球科学国際センター) – イタリア部門

（ 山内 靖喜・小泉　潔・久保田 喜裕・矢野 孝雄 [訳]）

要旨と序文：幾つかの現象がその後に起こる大地震と恐らく関連しているであろうことが報告されてきた．とはいえ，啓発しているように思われる単純な編集物はまったくない．加えて，その機構の大部分は理解されてないため，もし少しでも可能だとしても，この明らかに解くことのできない問題のなんらかの組み立てられた報告を作ることはやっかいなことに思える．他方，ほとんど毎年のように大多数の人々に影響を及ぼす恐ろしい悲劇であるがため，すべての単なる学術的論争がナンセンスで論理的に受け入れがたいに思える．明確あるいは“単純”あるいは簡潔の目的のいずれかのため，それ故に私が従った基準はなにか基本的な現象群を査定することであった．そして，基本的な現象群はそのあとに続く具体的な議論を始めるための信頼できる基準として考えることができるものである．従って，私はまず第一に候補となるすべての前兆についてその強さと誤差範囲の点から考慮する．もしそれを信頼するならば出されるべき間違った警報の量と強さは関係している．誤差範囲はむしろ，前兆が観察された場合に任意の地震に先立つ空間と時間の領域を扱う．実に，この領域は社会の要求を実際に満足させなければならない．

従って，幾つかの表面上有望で興味ある前兆は現在権威のある地球科学者達によって研究されており，本論に含めることはできない．その理由は，それら各自の強さと誤差範囲を評価するために，それらは現在未だ追加の履歴を集

める必要があるからである．

とくに，読者は最近の印象的な試みを参照しなければならない．そして，その試みは本誌の幾つかの号に報告されている．この点に関して，現在は極端に分散的に思えるこの分野において順序を定めることを目指して，ある似たような基準によって示唆を受けた研究者による追加の研究が，おそらく本論に続くであろうと考えられる．

要約すれば，本論の結論は地震と火山の“予想 (prediction)”の実用的な取り扱いのための簡潔な“ハンドブック”のように多分思えるであろう．しかしながら，本研究は最初の研究記録としてのみ考えられているが，文献中に追加の発見が現れるやいなや改良される．

現在，この分野は混乱しているようにみえ，しばしば過度に論争された．この漠然と定義された論題において地球科学者が順序を定めることは道徳的義務である．相当厳しい考察が確かに要求されるている．実施中で概念上の順序は，方法と議論の選考を適用し，それに続く段階的な方法論上で重要な改良によってのみ成し遂げられる．

本論において“予報 (forecast)”の意味が初めて明確にされた．それはある基本的—そして大変不運な—誤解が根源であり，おもに科学者，社会，法律制定者及び政策決定者の間でのコミニケーションに関することが理由である．

さらに，すべての地震は異なる履歴をもち，それはすべて別の地震から独立していると考えなければならないから，地震を“予報”できるなんらかの“魔法のような”現象の存在という神話は打破しなければならない．どんな２つの出来事も決してお互いをきちんと比較できることはない．

本論の構成は３部からなり，(1) マグニチュード，(2) 震央位置，(3) 発生時刻のそれぞれの“予報”を別々に扱う．付録ではすべての種類の“予報”にあずかっている幾つかの一般的な方法の種目が別個に取り上げられている．

頭字語と定義

AE—音響放射
d.o.f—自由度
義務論 (deontology)—“徳の倫理学の一つの研究法．最近，徳の倫理学は規範的倫理学の３つの主要な研究法の一つである．それはまず美徳をあるいは道徳的高潔さを強調したものとしてみることができる．これとは対照的に，義務と規則を強調した研究法 (義務論) あるいは行為の結果を強調した研究法 (帰結主義) がある．”[スタンフォード哲学事典，2012 年３月８日].
e.m.—電磁気
ETS—ときおり起こる小地震とすべり
GPS—全地球測位システム
HF—高周波
InSAR—干渉合成開口レーダー [*1]
LF—低周波
LFE—低周波地震 [*2]
LLR—月レーザー測距 [*3]
LY—光年
rms—二乗平均平方根
SFO—地震による地球の自由振動
SG—超伝導重力計 [*4]
SSE—スロースリップイベント [*5]，ゆっくり地震，サレント地震ともよばれている．
SST—海面温度
VLBI—超長基線電波干渉法
VLF—超低周波地震 [*6]

*1: 同じ地点を２ヵ所から，または２時期に観測し，データ処理することによって，地表の標高やその変化の映像を得るものである．現在では地震による地殻変動の観測などに使われている．(訳者注，ウィキペディアより)
*2: 低周波地震は 1Hz から 2Hz 程度の地震のことである (通常の地震は 10 から 20Hz 程度)．地震の規模は M1 ～２程度である．低周波領域の地震は規模に比して震動がゆっくりしているのが特徴で，震動の周期が長いため長周期地震とも呼ばれる．(訳者注)
*3: レーザーを用いて地球と月の距離を測ること．(訳者注)
*4: 地球表面の重力の約 980Gal のおよそ１兆分の１の大きさの重力の変化も測れる高性能重力計．(訳者注)
*5: 地下の岩盤中での高速破壊を伴わないで，すなわち通常の地震波を発生させないで数日以上かけて断層に沿った変位が生じる現象．(訳者注)
*6: 低周波地震より継続時間が長く，地震の規模が M3 ～４と少し大きな低周波領域の地震．(訳者注)

1. はじめに

本論は地震と火山の予報に関する一般的な方策の簡明な議論を行う．その議論には，科学的手法，実行可能性と費用，社会的報道，立法上の必要性及び関係あるすべての人々の義務に関する条項 (すなわち，かれらの義務論に関して) が含まれる．本論は独創的な研究上の寄与は含んでいないが，一つの具体的な焦点の問題についての多分野にわたる総合物である．本論の目的はそのやり方の状態の常識的で現実的な評価である．評価は実際的に実行可能で，適度に単純で良く評価された手段であるかということに基づき，完全であることについての推定は行わないで，将来に追加的手順と方法が生じたときにはいつでも包括するための余地を残しておいた．これは地震と火山の予報のレビューではない (これに関しては，たとえば Cicerone et al., 2009 を参照).

本論で述べるいろいろな話題，方法，関心事，学問分野及び技術は非常に幅広いため，すべての項目について広範な引用文献を載せることは不可能である．関連した引用文と参考文献は非常に長い研究の枠内で出てきたものであり，その研究は最近公表の準備に入った [*7]．本論はそ

の非常に長い研究の結論の要約である．

*7：それは私が数年前から行ってきた文献による研究である．全草稿が完成しており，現在それは最終推敲の段階にある．そのタイトルは，“気候と大気の電気回路—太陽風と地球の間での電磁気的連結”である．それは 6000 頁以上に相当し，8 巻にわけて出版する計画である．第 1 巻は磁気圏と上部大気圏を扱う．第 2 巻，第 3 巻は内部電圧発生器を扱い，内因的作用と地球力学を含めてある．第 4 巻は大気の電気回路と下部大気圏を含めて大気凝縮器を扱う．第 5 巻と第 6 巻はいくつかの特殊な気候問題を扱う．第 7 巻 (付録) は若干の数学上及び物理学上の専門的事項に当てる．第 8 巻は文献，事項索引及び著者索引にあてる．

研究に対して充分な謝意を払われなかった著者達に対して私は謝罪する．私はかなり力強く思える手法，従って頼りになるように思える手法に焦点を当てるように選択的にならざるを得なかった．ここに示した非常に単純化した枠組みに新しい手法を加えることが将来確かに可能で (そして必要で) ある．

とりわけて，New Concept Global Tectonics の最近の幾つかに掲載されているように，現在とくに活発な発展が進行しつつある．しかしながら，これらの新しい手法は現在発展途上にあり，それらの力強さと誤差範囲についてなんらかの最終評価を行う前にその履歴からの統計値を集めなければならない．

この大いに論争され，何度も物議をかもした分野を整理したいと私達が思うなら，私達は“単純な”選抜から始めなければならない．その選抜は全部を含み，非常に長くて，そして学習したレビューの検索とはなんの関係もなく行う．私達は外見上信頼できるまさに少しの方法から始めて，基本的な枠組みを組み立てなければならない．この枠組みは科学者と政策決定者の国際的集団によって共有されることもありうる．

初めに，2，3 のまったく一般的な事項を明確に述べる—はっきりさせるため，または基本的な考え違いを避けるために，そして幾つかの決定的に重要な事項に焦点を当てるために述べる．私は議論好きであろうとは思わない．謙虚で，現実的で，建設的でそして具体的でありたい．

■“究極の真実”は人類の手の届かないところにある．自然現象による危険と危機の挑戦は潜在的な多数の死亡を意味するが，すべての学術的な論争とは関係なく，常に主要な関心事に違いない．だれも“絶対的な真実”の保管人ではないため，別の推定，モデルあるいは解釈の余地を認めることは，まさに義務論 (すなわち，道徳的責任) の問題である．

■実行可能性と費用は考慮されなければならない．加えて，社会的報道 (また正しい科学的大衆化) は基本的である．大衆化は平均的な人間に関係しているだけでなく，立法府議員と政策決定者に大変重く関係している．

■すべての種類の現象を扱ったとき，地震や火山を予報することを含めて，厳密な意味での“予想”は決して可能ではない [*8]．確率論の立場においてさえ，アドバンスタイム advance time[*9] が長ければ長いほど物理系はその“合理的に予測できる”方向を最後には変えてしまう可能性が高くなる．

*8: 月相などのような天文学的動きは正確に予報されている．その理由は幾つかの物理学的媒介変数 (地球あるいは月の質量または慣性モーメントなどのような) はすべての予報できない摂動に比べて極めて大きいからである．しかし，地球の天文運動の小さな摂動 (すなわち回転速度あるいは極移動) を考える場合には，それらを予報することはできない．そしてこれらの外見上無視しても良いような現象は大災害の取り扱いのための最も関連した含みをもっている．以下を参照．

*9：予報や警報が出されてからその事象が起こるまでの時間．(訳者注)

■私達は確実な“予想”を発することができないのであるから，物理系の確実な診断書を発することができると主張することがより適切である [*10]．たとえば，どんな医者でも自分の患者の死去の瞬間の正確な時刻を“予報”することができない．しかし，患者の年齢，予後，環境の状況，食物，その他の診断項目などいくつかを入力することによって患者の健康が良くなるか，悪化するか診断することができる．私達は大災害を予想できない．しかし，しばしば公言されてこととは違って，私達は地球の地殻の状態を診断することはできる．

*10：“診断書”という用語は一般的な医学用語である．ここでは地震学と医学の間の幾つかの比喩を使う．この目的のためになにか別の用語の使用に関心をもつかもしれない (Martin Hovland の個人的談話)．用語“分解”はよく知られているように幾つかの意味をもつ：それはなんらかの物質としての存在を構成要素に分離することである．それは“総合”の逆である．“予後” (文字通りに“前もって知ること”) は通常患者とその家族の健康のこの先の見通し考えることを意味し，統計に基づいて患者の将来的な進展および生存の期待値またはその一方を評価するために行う．従って，ある意味では，“予後”は“予報”と同意語である．しかし，もし地震学で用語の“予報”あるいは“予測”の誤用を強調したいと思うならば，“診断書”ほどこの目的のために適切な用語はないであろう．

■診断書の信頼度は常にはっきりと述べられなければならない．たとえば，火山の挙動を予報することは破壊的地震の予報より大変容易であることを社会は知らなければいけない．

■すべての予報はつねに不正確な場合もあることを社会は充分によく知っておくべきである．たとえば，豪雨が

予想されたため国立の国内保安機関が水文地質学的警報を出したが，予報が間違った場合，誰も実際に気にしない．しかし，火山爆発や激しい地震に関しての間違った警報は，厳しい法律上の結果などをもたらすきっかけとなる．しかし，それは非常に大きな社会的影響と関連しているので，予報の間違いを起訴することはできない：現在，法律上の厳しい大きな相違はすべての国での重要な偏見であることはよく知られている．

■最終的な分析において，すべての予報の決定的な項目はその媒介変数が多いという特性と誤差範囲 [(i) 大災害の区域，(ii) 時間，(iii) 激しさの各々について] を扱う．

■科学的文献においてあまりにも強調されてきたこと (そしていまもってときどき強調されていること) に反して，大災害の信頼できそして確かな予報を与えることができる“魔法の”要因または現象がまったく存在しないことは，はっきりと強調されるべきである．

本当の専門家で良心に駆り立てられた地球科学者は“すべての”可能な診断項目を監視する必要性があることをよく知っているに違いない．この系は莫大な数の自由度をもっている．私達はそれらのごく僅かだけを観察できる．そのため，この系の状態と発展は，現実的に観察され，客観的に理解されうることをすべて考慮することによって診断されるに違いない．

■一般に，すべての分野の科学者は“単純”，すなわち単純な法則，おおざっぱなやり方，直感的な議論とモデルなどを扱うことを好む (たとえば，アインシュタイン，ディラック) ．これらの法則は自然の現実の複雑さを人間の精神の限られた能力に私達が釣り合わせることができるようにしている．しかしながら，このやり方においては，科学が発展する間に幾つかの神話と模範が生み出された．これは，思想の異なる学派間での非常に厳しい論争をしばしば引き起こした．現在においても，この議論好きなことは心理的傾向であり，この欠点は素朴であり，—自然大災害の社会的衝撃の厳しさを考える立場に立つならば—それは義務論的に無責任でさえある．

■加えるに，いろいろな媒介変数を考えるけれども，それらの本質的な強さは常に考慮されるに違いない．

すべての量は直接にあるいは間接的に測られたり，評価されたりするが，ある本質的な誤差範囲と最終的にはある程度の避けられない散らばりをもっている．たとえば，大地の電気的係数，土壌蒸発測定，水文学のデータなどは，流体の流れを支配する土層の組織についての知識の不確実なことに由来した大きな空間的散らばりを受けている．そのため，他の測定された量と比べると，一般的にそれらの信号対雑音比は相対的に小さいことが期待されるべきである．すなわち，それらは比較のできるほどに力強くない．従って，この種のすべての前ぶれは，それだけを検討する場合にはいつでも充分な注意をもって行わなければならない．

従って，これらの力強くない前ぶれはこの系の物理的及び化学的状態を一般的に評価するのに確かに役に立つけれども，信頼できる情報源としてそれらだけを考えることはできない．

■観測の解釈のためにあるモデルを実行したのに対して，スケーリング scaling[*11] 不変性の仮定を信頼することはときには便利であり，やむえない場合さえある (フラクタルアルゴリズムあるいは多重フラクタルアルゴリズムを取り扱っているときにそれは典型的に生じやすい．しかしながら，そのアルゴリズムははっきり定義され，限られた空間 - 時間領域内においてのみ適合する) ．

これらの場合，警告は幾何学的スケーリング (すなわち，その系の異なる空間規模で同じ動きを繰り返すことを扱う) と構造的スケーリング (すなわち，すべての単純で直感的モデルは大変多くの場合均質な材料で作られているという事実を扱うが，そのことは地球の地殻あるいは火山体の不均質な構造とは大いに異なる)[*12] ．

*11: ある物体のスケール (尺度) を大きくしたり，小さくしたりすること (website 福島孝治「スケーリング理論とはなにか？」より) ．たとえば，自然現象のモデルを作るときに対象の大きさや時間の長さを変えることもスケーリングという．(訳者注)

*12: 注意，時間のスケーリング (地質現象の短い時間間隙後の発生のシミュレーションを行う場合のように) を取り扱う場合，自然の法則固有の本質的な時間速度が加速されることはないため，スケーリングの種類は必然的に幾何学的属性よりも構造的属性に多くなる．

従って，その他の効果を比較して，自然の現実と異なる空間スケールのモデル (すなわち，幾何学的スケーリングに由来する) がそれぞれ関わる物理法則の性質のもつ単純な結果だけの間で違いを作るべきである．その他の効果はむしろその系の本質的特質，構成と構造 (すなわち，構造スケーリングに由来する) と関係する．この構造スケーリングはその系の規模だけよりは物理的性質に焦点を当てているので，結局最も重要な診断情報である．

■近いうちに起ころうとしている大災害の過程の物理的性質を扱う場合，よく知られているように，厳密にある一つの“点”でのみ発生する現象はない．むしろ，火山体の体積が内因性の高温流体の圧力を支配するのに重要な役割をはたしているように，また，起こりうる地すべりの体積，あるいは洪水を起こす水量などと同じように，震源体積は地震の発生にとって重要である．すなわち，任意の量のエネルギーの貯蔵は，後に放出されるエネルギーをその内部に貯めるために，物理的に分離しており，無にならない体積を必然的に意味する．これは，“質量にエネルギーを加えた最大密度容量の原則 principle of maximum density content of mass plus energy”とし

て表現することができる大変一般的な原則のまさに一例である．すなわち，決して克服されることのない物理的入口が存在する [*13]．

*13: この項目についてはもと多くの討論の価値があるのは当然であり，それは思いもよらない結果へと導く．しかし，簡潔に述べるため，これについてここでは述べることができない．

■現在ほとんどすべての地球科学者に忘れられているように思える重要な項目は，前兆現象 (たとえば，大災害の前におこること) についての基本的で比較的多くのいろいろな発見的示唆を扱っており，大災害 (地震またはその他) の発生によって，あるいは地震時や地震後の現象 (これは大災害の後に起きる) のどれかによって与えられる情報と比較される．

すなわち，死体の解剖によって与えられる情報と死亡率の統計による情報を当てにするだけでは医学は発展することはできないのと同じ理由から，地震目録によって地震の“予知”研究をすることは，厳密にいえば稚拙で逆説的である．むしろ，それらは病気だが生きている患者の診断の考察を厳しく要求している．

■地球力学モデルについてしばしば起きる厳しい論争は，真の科学的討論あるいは有効な科学的関心というよりは，思想が異なる学派間の対抗の問題のように思える．

本当に，自然の現実の固有の複雑さに比べて，すべてのモデルあるいは解釈は人間精神の本質的に限界のある能力に合わせられ, それらは過剰に単純化されている．従って，自然の現実の膨大な数の自由度を減らすために，すべてのモデルは近似値の実質的な大きさをあてにしなければならない．そのために，いろいろなモデルが同時に受け入れられうるのであり，それらが矛盾しているように思える場合でさえ受け入れられるのである．その理由は，それらは異なる仮説に依存しており，多くの側面をもつ現実の異なる面を述べているからである．

どんな場合でも，激しい自然の大災害によって人々が死亡しているときに，科学者の社会がこれらの (しばしば偽 -) 科学的学問上の対立について論争することは，義務論的に受け入れがたい．

■非常にしばしば起きる誤解—これはまさに地球科学者の間と科学者と社会の間とにおけるコミュニケーションに関連しており—地殻現象の全地球的伝播と局地的影響の間での混乱によって生じさせられている．

たとえば，地震波は惑星規模で地球全体を伝わることはよく知られている．対照的に，地面の高周波振動は大地の組成的・構造的不均一性によって急激に減衰する．

とはいえ，より高周波の振動は診断のための非常に重要な道具であり，石灰岩や花崗岩の巨大なブロック，あるいは深成岩の露頭，あるいは固化した溶岩の反応のように偶然的で局地的で非常に大きな地殻中の構造を観察するのに適している．

本当に，このような大きな物体の内部の静力学と応力場は，結局は時間と共に変化する．そのため，これらの巨大な物体は大きく拡大された現実の自然探査針のように行動する．それらは人間が作った監視装置と直接連結された長距離の“探査針”であるため，それらは完全な機械的監視装置の本質的構成要素と考えられる．

たとえば，溶岩の露頭は火山体全体の未知の (非常に大きい) 部分を監視する自然の探査針である．

高周波振動は地球の研究には役に立たないと何人かの著者が主張していることは全くナンセンスである．

■連続体と量子効果の区別の欠如は，地球科学界における幾つかの現行の議論が関与する不幸な偏見である．

古典物理学と標準の工学はライプニッツとニュートンによって始められたが，それらは微分学をよりどころにしている．1920 年代以降量子力学が評価されてきた．そして，分子または結晶の大きさにおいて私たちは分離した不連続な現象をよりどころとしなければならないことをそれ以来知っている. 連続した関数のアルゴリズム (算法) はもはや適用しない．地球科学の幾つかの分野において現在よく知られているこの事実が考慮されていないことはほとんど信じがたいようである．

詳細にいうならば，固体物理学に従うと , もはや結晶の劈開面は連続した理論的基礎によっては解釈することはできない．むしろ，私たちは結晶の結合，それらの形態，異なる面での異なる強度などに頼らなければならない．これらの項目は地球地殻内で生じるすべての破砕現象，地震，あるいは地すべり，あるいは火山の崩壊などのどれかを理解するための基礎的なものである．これらの現象を微分学によって取り扱うことは , あらゆる実際の物理的理解に関して幾つかの限界に帰着する．

ほとんど同じ考えで，技術者は物質のマクロレオロジー (ヤング率，破壊点など) を取り扱うが，ところがそれらの現象の物理学は固体物理学のみが説明できる結果を含んでいる．“連続性”仮説は工学の問題においてのみ適応し，本当に大変効果的である．しかし，それらは地球科学において旧式であり，ときには誤った方向に導く．

■自然の大災害 (地震発生，火山噴火，地すべりなど) を取り扱うとき，非常に僅かの自由度が目立っている：強さ，位置，発生時刻 (それぞれ誤差範囲をもって)．すべての予報はこれらの自由度のいずれか，別のものに関したものかをはっきりと区別しなければならない．

自然の現実はなんらかの物理系と関係し，その系は大変多くの自由度によって不可避的に特徴づけられている．従って，いかなる２つの現実の履歴も全く同じであることはない：そして２つの前兆がかりにも同じであることはない．ここに有名なヘラクレイトス Heraclitus の格言がある：“だれも同じ川に二度はいることはできない．その理由は同じ川はなく，彼は同じ人間ではないから”．これは，時間の矢は絶え間なくある方向に向かって動いているという言葉，またはエントロピーは絶え間なく増加しているという言葉[*14]と同じである．

*14: 基本的な「認識形而上学」に関する時間の役割は理論物理学の古典的で多くの議論がなされてきた問題である．多方面にわたる文献が存在する．たとえば，Gregori (2010) あるいは Gregori (2005) 及び Gregori et al. (2006) とそれらに載せてある文献を参照のこと．
訳者注：認識形而上学はドイツの哲学者ニコライ・ハルトマン (1882 年〜 1950 年) が使った用語 gnoseology の訳語である．認識論もしくは科学で用いられる基礎的方法論は，認識形而上学のほぼ全領域をカバーしている．これに対立する用語は唯物論であるとのこと．

たとえば，どんな２つの地震について，それらの震央が互いに異なる地域に位置するか，あるいは—もしそれらが同じ地点に打撃を与えたならば—異なる出来事が異なる地殻環境と引き金を有するかのどちらかであるので，その２つは常に異なる現象である．

この統計学的不都合を回避することはできない．厳密にいえば，データーベースが物理学的にお互いを比べられる要素からなる場合—地震のデータデータのシリーズにおいてはありそうもない—にのみ統計学は意味をなす．

膨大な数の未知の自由度について私たちが無知であることを追い払うための“偉大なる母”(Neumann, 1949) あるいは“Linus のカバー”[*15]のように統計学を考えることはできない．平均あるいは二乗平均平方根偏差の形式的な計算は常に形式的に行われている．けれども，このような計算 (たとえば，ときには中央値が平均の替わりに使われなければならない) の真の論理的意味に人は気付かなければならない．

*15: Linus は人気のある Charles M. Schulz の連載まんがピーナツの登場人物で，彼の“Linus のカバー”は彼のいたずらを隠すとされている．

■すべての種類の警報を出している間—それは地球地殻の“診断”あるいは予知と連携していれば—これはアドバンスタイムが適当に長く，それが社会の要求に適合しているときのみに実際的に役に立つことができる．しかし，警報のアドバンスタイムが長ければ長いほど，物理系が結果的に変化する可能性 (あるいは“蓋然性”[*16]) は高くなる．このことから，前者の外挿的推定はもはや適用しない—このことは警報を出す動機づけであった．これは事実の物理的な問題であり，まさに，すべての科学者 (及び同じくすべての良心的な立法者) が考慮しなければならない難しい問題である．

*16:“蓋然性”は厳密にいえば，ゲーム (カード，福引きなど) に典型的にみられるように，均質な成分の統計学的母集団に対してのみ適用する．対照的に，自然現象を扱う場合，一般に全体の構成成分は均質ではない．そのため，確率論のアルゴリズムによってそれらを扱うことは，データーベースの性質による容赦ない恣意的な仮定を伴う．そして，この仮定は結局間違った方に導く．この基本的で認識論的な注意は幾つかの分野において明らかに一般的に無視されており，地球科学以外でさえそうである．その結果として，普通の人，政策決定者及び立法者による“蓋然性”の概念の間違った使い方がしばしばみられる．

おそらくすぐに起ころうとしているなんらかの自然大災害を扱うときに，ここでの議論は強さ，空間的位置及び時間的位置を別々に扱っている．

すべての種類の監視も含めた幾つかの方法論的事項が付録に図を使って説明されており，それが本論文の非常に重要な構成要素である．

2. マグニチュード

私が知る限り，３つの異なるアプローチが将来起こるであろう地震“予測”の公開に適している．さらに厳密な時空の定義を提供する第４番目とより古いアプローチがたまには役にたち，おそらくまた改良されるだろう．

地すべり・洪水や雪崩などの別の自然災害については，それらの引き金や土壌形態・降雨・気温・風などを当てにすべきである．土壌発散物など (3.1.2 節参照) の時間—空間変化によって決まる大気伝導率に加えて，大きく違うのは土壌と電離圏との電磁気的 (e.m.) な連結を考慮することを必要とする自然発火した森林火災の場合である．しかし，これらの事象は本論で扱われる議論と比較して，非常に異なった議論を必要とするはずである[*17]．

*17: これらの事象の議論は電離圏あるいは大気圏の地震前兆の物理に密接に関係している (例えば，超低周波地震電磁気伝播・大気光異常あるいは地震雲などのいずれか). すなわち，それらの現象は上層大気と地下現象を繋ぐ非常に複雑な性質をもつ．しかしこれらの現象を理解することは，今のところ異なった分野を定義し区別することを狙った単なる伝統的な思い込みにすぎず，異なった専門家や学派の領域のようである，いくつかの未確認のパラダイムによって，先入観にとらわれすぎている．この嘆かわしい伝統的な選択は，我々の知識の本質的限界の結果である．しかし，刊行予定の８巻にわたる広汎な議論がおこなわれたこれらの事象は，厳密には個々に長い論文を必要としている．それらを本論に含めることはできない．いくらかの関連事象が，3.1.1 節に部分的に議論されているにすぎない．

マグニチュードを示す地震の前兆は，(i) ゆっくり (サイレント) 地震；(ii) 地震の休止期；(iii)(地球表面で観察される) “Cello 解析” と簡潔に呼ばれる断層の (空間的な) フラクタル解析；および (iv) 本震に先行する最大の “地震活動” の 4 つである．

2.1 ゆっくり (サイレント) 地震

サイレントあるいはゆっくり地震・余震・走向滑りとクリープ過程・一時的な余震と滑り (ETS)・ゆっくり滑り事象 (SSE)・非火山性微動・低周波地震 (LFE)・超低周波地震 (VLF) などはほぼ同じ現象で，それぞれの起源あるいは発生機構のいくらかの微妙な差異を考慮して，観測方法の違いに帰されているにすぎない．それらの個々の定義の最も有効な差異は，文献等に詳細な表を示した Ide et al. (2007) から引用した図 1 におそらく示される．

いわゆる “ゆっくり地震” は，不連続に起きる．それは，典型的な地震のように秒〜分単位というより，むしろ時間〜月単位以上 (標準的地震のエネルギーとして同規模) のエネルギーを放出する．“ゆっくり” 地震は歪計で観測できる場合や，流体流もしくは 1 〜 5 ヘルツ帯に特性をもつ微震に付随して発生する場合がある．それらは，もともと “サイレント” 地震と名付けられたものである．

それらは，おそらく，いくつかの種類の挿話的 [episodic] 機構—走向滑りやクリープ作用といった” 沈み込み” 域，” 多孔質” 岩石に浸透するある種の流体に関連する火山噴火をともなわない活動，あるいは，氷床融解やそれと対応した荷重の解放—に関連している．

それらは一時的なものであり，この場合の現象はたまに “挿話的微震 [tremor] と滑り” (ETS) と呼ばれる．それらは前兆現象か余震のどちらかである．

公表論文の着実な増加にもかかわらず，この現象に関する分野の研究は散発的に行われてきたにすぎない．

音響放出装置で観測する AE 基地 (3.1.2 節と 4 節及び索引参照) に恒久的な惑星配列が使用できるようになると，地震による自由震動 (SFO) や地球震動を含む，ゆっくり地震をより系統的・容易に研究できるようになるだろう．

1 節において強調されているように，超音波 AE での観測は全地球的高頻度現象の直接的観測方法ではない．むしろ，AE 観測は巨大な固体地殻本体にわたる，一般に未知の深部応力に関係している．それは地球地殻に組み込まれたリアルな “自然探査機” のように作動する．これらの “自然探査機” はリアルで非常に効果的な拡張機構—この巨大な自然探査機を通すと，電子工学より成る合成探査装置は個々の AE 基地の不可欠な要素—になる．

図 1 に説明は無用である：ゆっくり地震の持続時間は，その地域を襲う将来の地震の地震モーメントと明らかな

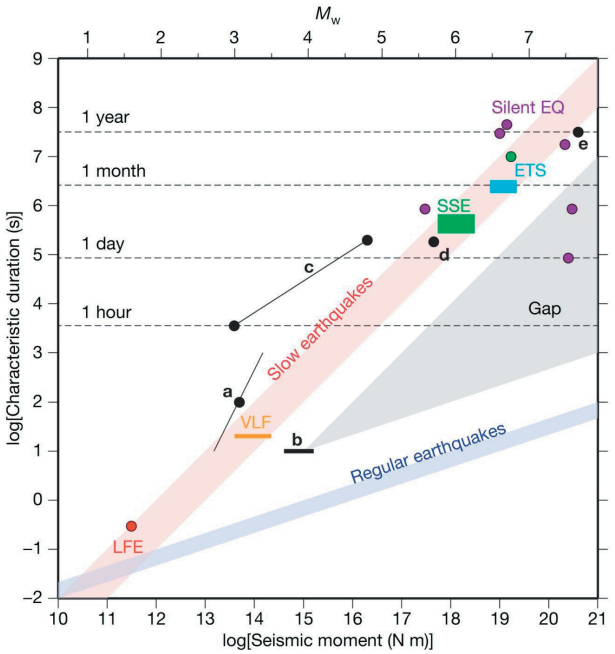


図 1 “いろいろなゆっくり地震の地震モーメントと特有の持続時間との比較検討 ... 低周波地震 (赤)，超低周波地震 (橙) とゆっくり滑り事象 (緑) は南海トラフで発生したもの，一時的微震と滑り (水色) はカスケード沈み込み帯で発生したもの．それらは，ゆっくり地震は $M_0 \propto t$ の相関関係に従っている．紫の丸はサイレント地震．黒丸はゆっくり地震．(a) イタリアのゆっくり地震 ... 典型的な地震 (丸) と誤差範囲 (線) を示す．(b) 南海トラフの付加帯における超低周波地震．(c) サンアンドレアス断層におけるゆっくり滑りとクリープ．(d) キラウエア火山の下のゆっくり滑り．(e) 三陸地震 (1992) のアフタースリップ．浅いプレート内地震の典型的な相関関係はまた，太い青線で示されている．” また文献 (ここでは省略) を示した Ide et al. (2007) による図とキャプション．“M_0” は地震モーメント．

関係がある．これらの非常に興味深く未だ研究が不完全な現象は，発生する可能性の大きい地震の発生についての特定の地域の地震危険性を評価することを目標とした信頼できる診断用手段である．

多少違ったきめ細かい法則が，違った地域に適用されることは起こりうる．ゆえに，さらなる研究が必要である．

おそらく，AE 基地の適切な配置によって，ゆっくり地震を観測に十分な性能が確保されるようになれば，地震マグニチュード” 予想” の誤差範囲は減少するだろう．

ゆっくり地震は，確かに将来性が有望であるように見え，それらはまた AE 基地配備 (3.1.2 節と 4 節及び索引参照) によってえられた有用な副産物である．

2.2 地震休止期

いわゆる “地震空白域” 手法は，古風でよく知られた概念である．それは，特定の地域の弾性エネルギーの推定される保存量の統計を当てにしている．それは比較的小規模のものであるはずである．より小さな見かけ上意味のない地震活動が，時に，ある特定の地域や比較的広域に発生することが観測される．時々 “興味深く” 小さ

な空白域がこの広域内に観測される．しばらくの間，小さな活動もその地震空白域と呼ばれる小地域内に観測されないことがある．これは，弾性エネルギーの集積が進行中で，次の関連する地震がその地域内に位置する震源を持とうとしていることを意味している．この“法則”は，この数十年にわたって知られていた (たとえば，McNally, 1983)．これは，いくつかの事例史で観測されてきたことが報告されている．

“地震空白域”の概念は，空間と時間のどちらかに適用される．空間的には，いくぶん広域内の小さな地域が地震活動の空白を示すことがある．時間的には，特定の地域内で，ある種の地殻活動が進行中だが，それが衰える時である．この場合，空白は”地震休止期”と呼ばれる．

いくつかの最近の論文が，地震活動の時空分布の一般的な統計的特徴を議論している．これらは，パターン認識・多重フラクタル解析 (索引参照) などのような，関連する巧妙なアルゴリズムを使っている．しかし，この事象は本論の単純な枠組外である．本論は，いくぶんか明らかで規則正しく，しかもよく評価されている地震の前兆につながり，すでに事実上証明されているほとんど直感的な操作方法に焦点を当てている．これは，ほかの方法に対する反論ではない．確かに，実用的で有効な最終な評価以前に，より厳密で“単純”な直感的方法は，さらに厳密な考察を必要としている．特に，違った試料を使った室内実験での研究として，空間的空白域に関する Chen et al. (2002) と時間的空白，すなわち休止期に関する Botvina et al. (2001) が知られているが，ここで詳しく論評することはできない．

Botvina et al. (2001) は，地震休止期と地震の最大マグニチュードとの関係も研究した．それらを図２に示す．それはいくつかの地震 (すなわり，地震休止期 TS) データを用いて自然地殻環境中か，あるいはまた notch mouth【刻み目 ?，刻み口 ?】，すなわち，それらは AE 頻度に実際には関係していないが，AE 観測を当てにするような，音響的休止期 TAE によって応力を加えられた鋼鉄試料で行われたいくつかの類似の観察のいずれかを観測した２つの現象をプロットしたものである．

鋼鉄試料について，彼らはグーテンベルク - リヒター関係に類似した関係を用いて M* の値を計算した．

$1.5M^* = 11.8 - \log E$　エネルギー E の単位はエルグ．

これによって，彼らは特定地域に発生が予想される地震のマグニチュードが，地震休止期の持続期間の対数に対して線形関係にあることを示した．この場合に，AE 基地の配置がリアルタイムで地震休止期，ひいては誤差範囲と最終的な“予測”の信頼性を高める観測をするための将来性を確実に向上させたことを指摘しなくてはならない．

2.3 断層のフラクタル解析― Cello の解析

数カ国で使用されている既存の詳細な標準的地質図に描かれた地表断層分布のフラクタル解析 (空間的) を用いて，地震空白域 (空間的) の可能性が非常によく研究されたが，地震空白域 (空間的) は間接的なものである．この方法は，中央イタリアの大地震地域と南部イタリアのより小さな地震地帯の両方で，Cello (1997，2000)・Cello et al. (2000，2002)[*18] によって実際に適用された．

*18: 私は，故 Giuseppe Cello 教授に，生前に議論と別刷をご提供いただいたことに感謝する．

彼は既知の “box counting method” を直接応用した．すなわち，彼は前もって選ばれ，特定の大きさのいくつかのより小さな重なり合っていない四角形を用いて，個々の特定の研究地域 (地理的に緯線と経線に囲まれた 2D 長方形と規定) を完全にカバーした．次に，彼は少なくとも１つの断層を含む四角形の数を数えた．四角形の数と四角形の大きさの両対数グラフ (Richardson のグラフ) の傾斜角によって，彼はフラクタル次元 (空間的)D_s を計算し，最終的に，その地域と D_s を決める地震の最大マグニチュード M との関係を示すグラフを作った (図 3)．１つの点が顕著な配列から外れているのが見られる．しかし，歴史的データベースを最終調査した上で，彼はより古い地震が，この明らかなパラドックスを解決する一般的な傾向と一致しうることを発見した．

Cello (前記) は，見積もられたパラメータや誤差範囲などの構造安定性の広範囲な議論 (ここでは報告しない) を利用している．しかし，この巧妙で非常に有効なデータ処理の限界は，詳細な地質図と豊富な歴史地震のデータベースを必要とすることにある．しかしあいにく，こ

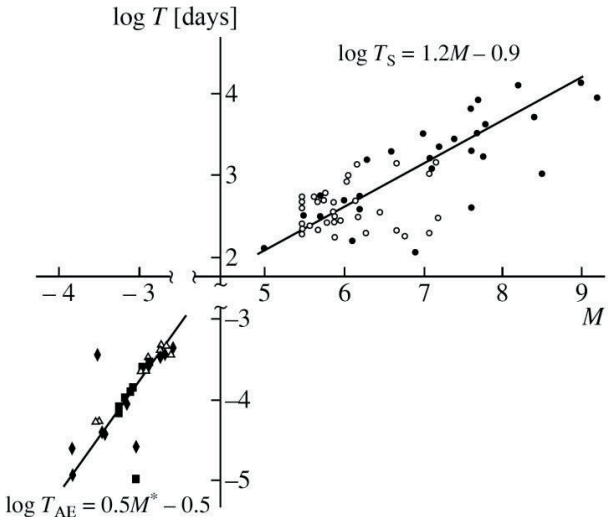


図２ “地震のマグニチュード (M) 及び金属標本の破壊 (M*) の関数としての地震 TS と音響的な TAE 休止期の継続時間 (それぞれ第１と第３象限) との関係．●力武 (1975) のデータ ; ○北カリフォルニアの地震で Botvina et al. (2001) によって得られたデータ ; ■鋼 45; △鋼 U8; ◆鋼 17KhG2SAF” 図とキャプションは Botvina et al. (2001) による．

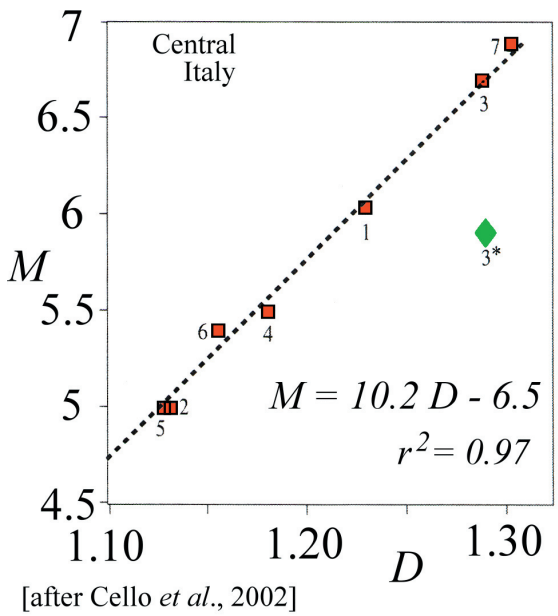


図 3 アペニン山脈中軸部の歴史地震に関する M と D_s の最大値との関係．番号は異なった地震帯を意味する．1 つの点 (no. 3, Norcia の町に対応する) は，1979 年に M=5.9 と報告されたものと 1703 年に同地域を襲った M>6.5 のもう 1 つの地震の 2 つが重なっている．Cello et al. (2002) によって書き直された Gregori and Paparo (2004) による図．僅かに異なる同様な図がまた，Cello (2000) に示されている．

の情報はどこでも利用できるわけではない．

2.4 本震に先立つ最大の“地震活動”

Keilis-Borok and Malinovskaya (1964) は，先行するより弱い地震について，大地震の準備過程を研究した．地震の総数は単に最も弱い揺れを示しているだけで，その上それらの全エネルギーは単に最も強い揺れを示しているにすぎない．それ故，彼らはいろいろな地震がそれらのエネルギーに応じて適切な荷重の重み付きの和 μ (t) を導入した．μ (t) の定義の長い議論は本論には関係ない．

彼らは，中央アジア・東地中海とヒマラヤに発生する異なった事例の歴史を示すグラフを示した．それらを利用した地震カタログは，特により少ない大地震については未完成である．しかし彼らは顕著な規則性を発見した．

彼らは，マグニチュード M の地震の前―前のみ―に，μ (t) が近似的に振幅 PM が鋭いピークを示すことを発見した．完全な規則性からの 2，3 の小さなズレは，彼らの一様でないカタログには当然の結果であろう．しかし彼らの解析の意義は次の証拠によって示される．

μ (t) のピークの左側が (1/2)PM に達する時のモーメントと本震発生時との間の時間間隔は，そのマグニチュード M とともに増加する (図 4)．本震が起きたまさにその時と μ (t) ピークの最大の時間との間の違いには厳密な規則性はないが，常に正の相関がある．

彼らはより小さな地震が発生する“準備面積”Q を計算した．Q は本震のマグニチュード M とともに増加する (図 5)．さらに，特定の地帯に可能性のある最大マグニチュード M_{max} は，この地帯 D によっておおよそ決まる (図 6：Gutenberg and Richter, 1954 のデータに基づく)．

まとめると，恣意的な仮定が特定の地域での地震活動の有意で定量的な測定を見積もることを目標としているとはいえ，彼らの解析はいくらかの“合理性”に基づいている．彼らは数年前に前もって観測され集積された地震活動とその地域を襲った地震のマグニチュードとの間の明確な相関関係を発見した．

これは，ある適切な広い範囲であればどこでも，大地震発生に準備時間が必要なことを示す．それは，本震に先立つ数年以内に観測される地震活動の増加である．

すなわち，大地震は弾性エネルギーの局所的な集積の結果ではない．むしろ大きな地殻地域の反応を示している．特定の場所の震源位置は，活断層の局地的な存在によって決められる．それは弾性エネルギーの解放によって起こるが，実際には非常に広域にわたって集積している．

これは地震の前兆についてのそれぞれの研究は，二重の見方で扱うべきであることを不可避的に意味している．一方は，我々は地殻応力に作用し地球全体にわたる大規模な心配事に焦点を当てるべきである．もう一つは，我々が明確な活断層の危険性に関心がある時はいつでも，巨大な空間 - 時間のあらゆる点で，それを横切る地殻応力の増大に最終的に反応する局所的過程が何であるかを予想するために，その地域を観測することである．

3. 位置

実際のところ，まず最初に，地殻中のある巨大な“地殻擾乱 (crustal storm)”の伝播，すなわち，ある地域に通常何年も続く地殻応力の大規模擾乱を地球規模で“予測”することを検討する必要がある (3.1 章)．“地殻擾乱”は後の“静寂”期に取って代わる (詳細は補遺参照)．

地震発生の可能性がある地域をより詳細に判断するためには，観測地点の配置とデータ処理方法を変更することが必要である (3.2 章)．

3.1 ―空間的位置―地球規模の現象

いくつかの大規模な地震活動が起こりそうな地域に関するおおよその位置は，合致したすべての種類の情報と，あらゆる種類の前兆によって評価することができる．

潜在的な予測可能事象をすべて挙げることは本来不可能であり，別の地域の別の地震の際には，結果は常に大きく異なる (例えば Cicerone et al., 2009)．

例えば，地震空白域 (2.2 章参照) は，おそらく最も古く

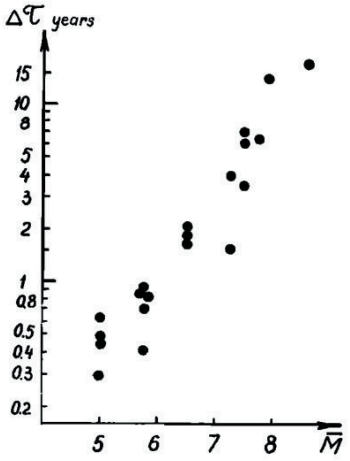


図 4 本震発生時と μ (t) ピークの左側が (1/2)PM に達する時間との間の時間間隔との関係．Keilis-Borok and Malinovskaya (1964) による．

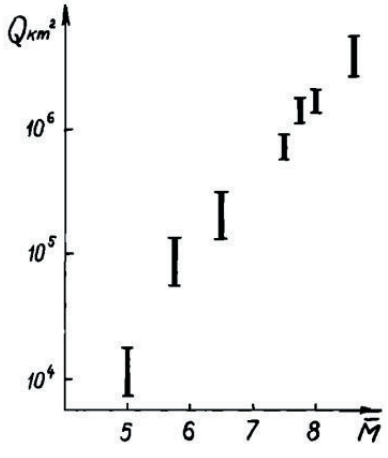


図 5 “準備地域” Q と M との関係．Keilis-Borok and Malinovskaya (1964) による．

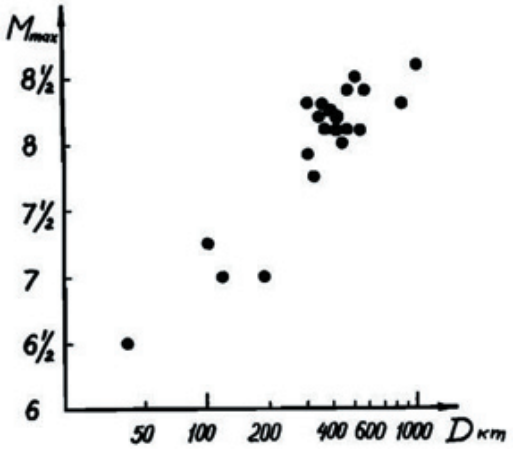


図 6 “世界のいろいろな地震帯において可能性のある最大マグニチュード M_{max} と D= 地帯の幅との関係” 図とキャプションは Keilis-Borok and Malinovskaya (1964) による．

から良く知られている方法論の 1 つである．地震静穏域 (the seismic lull) も同様で，通常は，直線的に数 100km を超える領域内において，先行選択技術 (pre-chosen technique) によって観測される．例えば，静穏域の範囲は利用可能な観測点の配置密度に依存する．

もうひとつの例は地下水異常 (water wells anomalies) に現される．1 章で述べたように，通常はそれらの情報 (水位や水温，濁度，気泡などの異常) はそれ自体充分ではないが．しかし，特殊な環境では，これはまったくの偏見とは見なせない：きわめて重要なのは井戸の密度間隔で，しっかりとした観測がなされることである．

例えば，この情報は中国の地震“予知”で以前に成功した歴史事例のひとつに利用された．その興味深い地域は水道がなく人口密度が高かったが，日々の水利用のため，地域の住民による継続的な観測が行われていた井戸がいくつかあった．彼らはまた，井戸で観測された異常事象はどんなものでも，しかるべきところへ連絡するよう指示されていた．この観測 (専門的とはいえないが，観測数が大変多く，しっかりしている) を検討から，統計上，震央域には前兆が数日前にきわめて限られた空間的範囲に識別できることがわかった．異常な井戸の図 (黒点で表示) はヒョウの毛皮のようで，震央が黒点の密度の高い箇所に位置している．同様の対応関係が他のすべての歴史事例にも予想されそうだとはいえないことに注意．さらに，たったひとつの井戸では結局，信頼に足りる観測情報に適さない結果となってしまうので，さらに多くの異常帯水層を加えなければならないだろう．きわめて多くの数の井戸だけが有効なのである．ここで前兆に関する 2 つの広範囲の範疇—(i) 電磁 (e.m.) 現象, および (ii) 地殻応力現象—を識別してみよう．

3.1.1 －空間的位置－電磁現象

磁気歪や電気歪についての根拠が要求される．それらは地震の前兆源として，しばしば文献に登場してきた．しかし，それらはきわめて局所的に分散している．

実際，ある場所で，関連のある出来事が観察されたとしても，類似の出来事がきわめて近い場所で観察されないのは，地下地殻構造が異なっているためである．

したがって，これらの現象は決定的に限られたものであり，それゆえ実用に使えることはきわめて少ない (ただし，非現実的ではあるが，観測点がかなり高密度で配置されていれば利用可能である).

より一般的な視点から鍵となるのは，電離層と大地の電磁的結合に関連する．この問題の議論には，地球規模の現象と局所的な特性の両者が関わっている．

我々が生活している環境 (すなわち我々を取り巻く“気象”，外形上は生命が発展し生き延びる“環境”の時空領域に限定される) は，このことと，以下に記す他のいくつかの概念に関するある種の蓄電器である [Gregori (2002, 2006 および 2009) を参照].

上板は電離圏である．そこは，太陽風から電流発生装置によってエネルギーを得ている．

1 つのパラダイム—一般に電離圏物理学者に受け入れられているが，彼らはその誤りを認めている—は，電離層が電気的等位面であることである．電離層はむしろ，かなり悪い電気伝導体か，穏やかな絶縁体である．そのため，電離層には，吹き付ける太陽風の急速な組成変化に対応して (たとえば, 電気極オーロラに対して陽子極オーロラの位置がかなり異なることや，個々バラバラに散在した測定によって試される)，静電気蓄積量が異なるさまざまな亜容量帯が，電離層内に一時的に存在する．

下板は通常地下である．しかし，土壌は水平層をつくってはいない．地球は，例えばタマネギのような，同心状の層構造を呈してはいない．地球表層のようなところで

はさらに，電気伝導度σの示す地下構造がいくつかの突起をもつウニのようなパターンであることを連想させる (噴気や火山などに典型的なように) いくつかの大きな異常が観察されることがある．このような突起状のσ構造内の電流は，深部の地球発電機によって供給されている (Gregori, 2002, 2006 および 2009 を参照)．“気象”現象は，この“大気圏”蓄電器内部で発生する．個々の突起の頂部はジュール熱が放電される場所である．概して，突起頂部の位置は地下の適当な深さで終わっている．すなわち，効果的な電磁結合は大気圏蓄電器の上板とすべての突起間に発生しており，そのため，ほとんどがアンテナ，ないしは避雷針のように振る舞っている．

Caronia (訳者注：イタリアのシシリー島内の地名) 現象 (ある家の中で電気ソケットや送水管などから拡がった劇的な自然発火) は，σ突起頂部のセントエルモの火 (St. Elmo fires) が原因である．

ごくまれに突起が地下から上昇することがあり，通常，火山性プリューム内部で発生する．稲光の放電を伴う火山性プリュームのすぐれた写真にみられるように，それは火山性プリュームが陽子や陽イオン，陰イオンを含んでいると考えることで説明される．

電子はすばやく電離層へ移動してしまうが，その結果，常にプリュームの外から放たれる稲光の放電をつくりだす (しかし，プリュームは良導物質であるため，内側へは放電しない)．この稲光放電は，電離層の静電気がオーロラの高層電流に強く影響されるアイスランドを除くと，ふつうはプリューム上部へ向かって鉛直に発生する．

陽イオンは大地へ高速で降り注ぎ，広域へ拡散する．それは肉眼で見える放電を引き起こさない．

対照的に，陰イオンは，重力やもともとは電離層の陽イオン放電で形成された静電場にさらされ，空中を“漂う”．それらは風とともに移動し，ついには非常に強い稲光放電を引き起こすが，火山体 (volcanic edifice) からは遠く離れている．それらは非常に強烈で，時として人を殺す．これらの特種な稲光放電は，しばしば火山性プリュームの個々の写真とは明瞭に区分される [*19]．

*19 火山性のプリュームにおけるこの稲光放電の解釈は独創的で，前述した準備中の８巻で詳細に議論される．

しかし，電離層と大地の電磁結合は偏在的現象であり，結局は肉眼で見えない放電を引き起こす．

それにもかかわらず，文献によると，これらの現象の解釈全般に対して，いわゆる空地電流 (air-earth currents) の議論にはかなりの先入観がみられる．次に示す１世紀前の予察的マグニチュード見積もりでは，結局，空地電流は無視され，最後は地球規模に平均化されたものとして理解された．これには重要な意味が含まれている．球面調和膨張 (spherical harmonic expansion) による古典的なガウスの電位解析を用いて，地球磁場を扱うことを認めた結果．このように内部と外部の発生場などを区分することを可能にした．

しかし，この仮定は，地磁気場に大変有効ではあるが，実際には十分な証拠によって支持されてはいない．

このように，等電位電離層の誤った仮説が地磁気圏と大気圏間の非現実的ファラーデー法則をしばしば引き合いに出していることと同様，空地電流が無視されたこの仮説は地球表層の上部と下部間の電磁現象に対して，非現実的ファラーデー則を依拠している．

これらの“パラダイム”は，結局はいくつかの的外れの誤った理解に根ざしている．すなわち，電離圏での夜光前兆は，以前は非現実的で信頼のおけないものと考えられており，さらに議論の中には時々，ある人は観察されない間に，ある人はそれらを観察したという事実が浮上したことによる．実際には，すべての事例は他と切り離して考えられなければならないし，すべての結果は重要で等しく信頼に足るものであるはずだ．

電磁結合は電離圏と下位の土層の間に実在する．したがって，地震の前兆段階で，いくつかの異常がいずれ観察されることはそれほど驚くにはあたらない．このことは，異なる電磁現象，あるいは空地電流 (ある種の電離層擾乱の現れ) に関するいくらかの事例でよく知られている．DEMETER 衛星の結果を思い起こすべきだ，等．

にもかかわらず，一般的には，２つの異なる地震はどれでも，震央が近いか遠いかにかかわらず，結局はかなり異なった電磁作用に関連していると思われがちだ．その理由は，通常は太陽風などその時々の状態に依存する電磁環境が，これまでのさまざまな事例では本質的に異なっていたことにある．

しかしながら，関連することがらは，電離層や夜光前兆の空間的分解能である．ある事象を見いだす可能性は，大気の蓄電器の (i) 下板および (ii) 上板の形状，(iii) 板間物質の形態，加えて (iv) 観測点配置密度の如何による．

それにもかかわらず，電離圏現象が観測されて以来，下板の幾何学的配置はあまり問題にされていない．もう１つの問題点は，電離層や夜光の観測が少ないことである．

数 100km 以上の電離層の高度順位 (the order of magnitude) では，電離層の異常形態がより空間的細部 (spatial detail) に見られないことがよくある (図７参照)．

電荷 ρdτ は，地表の A 地点にいる観測者の上の高度 h に位置している．もうひとりの観測者は，距離 L ～ A にある平坦地 C に位置している．図に明示された記号，VA と VC と呼ぶ A と C におけるそれぞれの電位，および

VC/VA の割合 p の正式に計算すると，VC/VA=h/r=h $(h_2+D_2)^{1/2}$=p と表される．ゆえに，L= h{$(1/p)^2$-1}$^{1/2}$．したがって，もし h ～ L ならば，p ～ $1/2^{1/2}$ ～ 70% である．

したがって，電離層信号の一定の変化のなかには，電離圏の高さ h，電離層の高度順位の距離 L を超えた場合にのみ，地表で観察される場合もある．

以上のことから，電離圏の前兆は確かに重要な直感である．なぜなら，地球表層の広大な地域を観測することができるからである (すなわち，それらは数が多く，空間へはほとんど分散せず，電離層観測の位置は重要ではない)．しかしながら，空間的詳細は不明でも，予想される震央地域を特定することはできる．

異なる観点から，地殻応力ないしはその伝播の地球規模の様式はおそらく，その成果や太陽風が抜ける地殻の老化を観測するために重要なてがかりになるはずだ．これは“予測”ではない．しかし，広範囲で長期にわたる時空領域の災害要因の重要な示唆を与えてくれる．これらの事項は 3.1.2 章で議論される．

誘因メカニズムに関する限り，地球 (あるいは大規模な) の電磁現象に結びつけて考えることができるが，関連現象や未だ観測されていない現象は，岩圏内部の迷子電流 (stray currents：あるいは，“フーコー”流や誘発地電流) によって生じた異常応力に関係するが，これは太陽風によって時間とともに変化する電磁場を生ずる．

結果として生ずるすべての力と 3D ねじれモーメント (torque) が地球に適応され，地磁気記録に一体化された潜水艦通信ケーブルの全地球網内の誘電電位 (Lanzerotti and Gregori, 1986) を用いて，ほぼ同時に観測でき，地磁気観測所の国際ネットワークによって永続的に収録されている．

原則的には，この同一の情報も，海洋横断通信ケーブルではなく，地磁気記録のみから得られたことに注意が必要である．まばらで不規則な観測網では，誤差がとても大きくなってしまう．遠距離海洋横断ケーブルはかなりの距離の出来事を記録でき，この情報は計算上の誤差が大きくなることを抑えるために決定的な影響を与える．

この通信ケーブル網は，そのため簡単な施設であり，太陽風とその結果生ずる地球の自転速度と極移動の間の電磁相互作用によって，惑星地球におよんだモーメントとトルクを観測できる．

しかし，地球の天文学的運動—自転速度や極移動など—の異常を簡単な設備で観測できることが重要である．

現在，この観測は次のようないくつかの技術を利用することによって大きな成果を上げている：天文測量，VLBI(超長基線電波干渉計)，LLR (月レーザー測距)，そして時々行われる特殊宇宙測地実験．

最も古くからある古典的手法は天体測量である．夜空の天頂写真は，同じ天体測定施設で，同じ瞬時に，毎日撮られている．時刻は電子時計によって測定されている．それは最も安定していると考えられていて，最も信頼できる時間記録となる：それは，解像度次第では，他のすべての観測現象に関連した速度になる．さらに，位置変位は，予想される位置についての観測星の測定によって求められる．献身的な天体観測者らの組織が，曖昧な状況を一掃し，誤差範囲を調整するために利用されてきた．

数十年前まで，天文学者たちは 5 日移動平均データを公表し，多少の異なる特性を明らかにした．彼らは観察した分散対時間を扱いやすくしているために，多くの規則的で順調で多様な観測を扱うことに慣れている天文学者たちには受け入れがたいように思われた．しかし，おそらく分散が最も興味ある情報と考えている地球物理学者の強い不満もあったため，天文学者たちは後にデータを毎日公表することを始めた．

VLBI 技術は，天空の電波源 (a celestial radio source) のドップラー効果を利用するが，それは経度方向の間隔が比較的離れたふたりの観測者に同時に観察される．

LLR は，宇宙飛行士によって月面に配置された反射鏡と地表との間を脈状レーザーの往復時間に基づいている．

これらの 3 つの技術は，現在ではさまざまなグループによって不変原理として適応されている．それらの結果は個々に誤差範囲を生じるが，他との間に充分な相関関係が認められる．しかし，主眼は常に日々の観測値におかれている．

私の全知識を導入しても，地球の天文学的運動の観測によって短期間で解決するかどうかは予想が難しいし，ましてや簡易観測局ではなおさらである．

さらに基本的には，今の地球潮汐は，月と太陽との相対的位置次第では，異なる大陸ではさまざまなはずだ (たとえば，ユーラシア陸棚上の太平洋負荷潮汐［the Pacific loading tide］の効果参照 ; 図 14 参照)．

ある新しい技術は，—それがどんな特別な地球の天文観測においても—実行されてこなかったにもかかわらず，

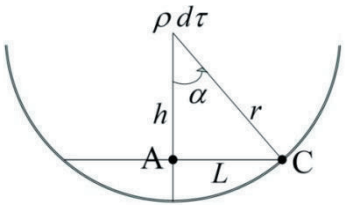


図 7　電離層の信号が著しく変化している地表における直線距離 L の見積もり．本文参照．

どんなに異なる場所でも同時に，瞬時の事象を観測できるジョセフソン効果に基づいている．

さまざまな構造と地形に基づく，次項に示す地殻の弾性 / 塑性応答を考慮すれば，原則的には，観測事象は地球表層の異なる場所では非常に多様である．この情報はそれゆえ (おそらく)，さまざまな時刻に発生する地震災害の効果的で厳密な評価を下すのに重要である．

地電流から導かれた邪道な“フーコー”に端を発する全体の力とトルクに関する前述の観測との相関におけるいかなる場合も，地球の天文学的観測の即時観測が最も重要である．これらは，地球規模の海洋横断通信ケーブル網における自然電位に，国際組織の地磁気記録の追加などと連携して，永続的に観測されるべきである．

地殻応力に関連した摂動の誘因を知ることは，地殻に通常より強い応力が働いているか，大陸あるいは地域スケールの問題なのか，地震の起こりやすい局所“予測”なのか，を瞬時に評価するために大変重要なことである．

地球の天文学的運動異常に関するよく知られている現象がときどき観測されるが，大地震発生に関わる事象はまれにしか観測されない．この説明できない問題の研究と解釈についての提案は 3.1.2.3 章に述べらる．

これと同様の点で，Poscolieri et al. (2006) による，イタリア中部とギリシャ (Ionian 島) で観測された地殻応力作用はいっせいに起こった，との報告は撤回されるべきだ．彼らは，ユーラシアの太平洋陸棚において，太平洋の海水の負荷潮汐が多様に押し上げることによって生じた一定時間に変化する地殻応力についてだけ，この観測結果を一時的に解釈することができた．

この発見は中国と地中海地域間の中間経度地帯で起こった記録によって検証されるべきだが，地殻は“地殻擾乱”の時期が通り過ぎると，その応力や他の特性が観測され，次の“静穏”期になる，ということは当を得た事象と思われる．詳細は本論の補遺を参照．

3.1.2 －空間的位置－地殻応力観測

3 つの技術がここで述べられる．うち 2 つは人目を引く観測 (永続的か一時的か，地球規模か局所的か) にふさわしい配置の問題で，それらは AE と浅部地熱にかかわっている．

もうひとつの技術は，つい最近実施されたばかりだが，超伝導重力計 (SG) を取り扱っている．それらはかなり高価なため，限られた配置での測定に適しているが，適切で重要な地球物理的情報を提供する．

GPS と InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar: 干渉合成開口レーダー) 技術もよく知られてた効率的手法で，土壌変形の時間変化に適した観測が可能であり，火山地域や造構運動が活動的な地域にも応用されている．InSAR は GPS 観測に比べ，より感度がよいように思われる (Furuya et al., 2010).

概して，InSAR のような衛星方式は限られた時間分解能という短所があるが，それは与えられた地域に役立つ観測は時間および / ないし空間範囲で連続しないためである．さらに，これらの方法は，一瞬の異なる時間で実施され，短時間後に同じ地域で比較できる観測に有効である．同一衛星の高価なコンピュータ群を，時間をおいて有効に利用することで，この欠点がやや緩和される．

これらの技術は，将来震央になり得る地域の空間領域においても，ある重要で間接的な予測をもたらす．目的が簡潔であり，これらの大変重要な事項についてこれ以上述べる述べる必要はないだろう．関心のある読者はいくつかの関連論文を簡単に見つけるであろう．

3.1.2.1 音響放射 (AE) の観測と配列

結晶結合 (原子あるいは分子の間の) が他の力を凌駕している場合，あらゆる物質は”固体”様の挙動を示す．

しかし，“弾性”あるいは”塑性”という概念は，人間の心情によって定義された抽象にすぎない (付録参照). このような概念は，ユークリッド幾何学における”点”,”線”,”面”などの概念のように，厳密には実在しない抽象的定義である［たとえば，直径 20 ～ 30 万光年，厚さ 200 ～ 300 光年 (除く：中央部) の天の川でさえも平面に近似される］．すなわち，現実の自然界におけるあらゆる”面”は，厚さがないことはありえないのである．

同様に, 完全な”塑性”あるは”粘性”物質と同様, 完全”弾性”物質は存在しない．たとえば,”ニュートン流体”は存在しない．それゆえ，あらゆる実在する”固体”物質は，応力を受けると常に，その結晶結合の 2，3 の破壊を被るはずである [*20].

*20 これはエントロピーの単調増大あるいは時間の等速的進行と同じである．前脚注を参照．

後続するいかなる時刻にあっても，同一物質に新しい応力が作用すると結晶結合がさらに破壊され，破断の確率が大きくなる．以前の破壊領域の近傍で，別の結合が破壊されて物質が脆弱化するため，連鎖的破壊が進行する．

結合の破断は,”固体”物質の振動をひき起す．この振動は，最終的には”固体”媒質に伝達され，基本音波［infrasound］—“音響放射 acoustic emission (AE) とよばれる一定の周波数をもつ”—として検出される．

媒質の微小流動のサイズが小さいほど，AE 周波数が高くなる．任意の振動数はいずれも，実際にはある典型的な平均サイズ—ある特定の振動数に関係した”流動領域

flow domain”とよばれる—の微小流動に相関している．

一般に，この流動領域の実際の物理的サイズは不明であるが，合理的に予想される値であることに留意せよ．

したがって，ある一定の周波数の AE が観測された媒質において，何らかの異常な挙動を観察するのが合理的である．簡単のために，それらを”高周波”AE，あるいは HF AE と略記することにしよう．

しかし，HF AE にかかわる比較的小さな流動領域は，いくつかの小さな流動領域が 1 つのより大きな流動領域に内破し，しだいに大きなサイズの流動領域に合体することが予測される．これは，結晶構造がしだいに劣化し，そのために媒質の力学的性能が衰えること意味する．

こうして，小さな流動領域がしだいにより大きいものに合体するにつれて，先行して発生していた HF AE 放射が消失する．したがって，低周波 AE(LF AE と略記) がより強くなり, HF AE によって観測された異常が, 替わって LF AE などによって観測されるようになる．

これらの媒質の力学的振動を検出できるかどうかは，AE 振源と観測装置の間での AE 信号の伝播が十分であるか否かによる．第 1 章で述べたように，超音波は，締まりのない (ルーズな)，あるいは水を含んでいない不均質な物質中を伝わる場合には急速に減衰するために，一般に地球内部を伝わらない．しかし，いかなる場合にも，大きな”固体”物質 (たとえば，石灰岩，花崗岩，ドロマイトなどの単一岩相岩体) が地下に存在すると，この岩体は”天然の探針”として働く．それは，受信器あるいは天然探針として，すなわち電子記録機器として天与の感知器として機能する．［感知器は,”天然探針”の露頭に置かれる．］

AE 記録の物理的解析という観点からみると，対数正規分布，フラクタル性，および”キズ階層法則”という 3 項目が考慮されるべきである (付録で詳述される)．

対数正規分布はあらゆる現象に内在し，あるできごとの発生がすでに発生した類似現象の数に比例するというもので，あらゆる歴史事例にみられる特性である．たとえば, それは典型的には公共サービスに適用され, ラッシュアワー (混雑時間) を正しく説明する．

この種の現象は対数正規分布を示し，それゆえに，そうよばれる．

AE の歴史事例において，結晶結合が破壊される数は，すでに破壊されている結合の数に比例する．同じ概念あるいは抽象は，いくつかの他の現象にも適用される．

それは，古典的な砂の堆積問題に適用される．すなわち，砂粒子の位置はその高さにすでに存在する砂粒子の数に比例する (というのは，砂粒子は新しく加わった粒子を支持しなくてはならないからである)．それゆえに，ある惑星の高度分布曲線，あるいは，多少なりとも広域にわたる地形などにも適用される．

また，商業，財政などのような精神的要素によって支配されているあらゆる現象，あるいは，いくつかの生物学的現象にも適用される．たとえば，泌尿力学試験において，泌尿流動学は尿の流速と量を測定し，時間軸にグラフ化される．この図は，まさに対数正規分布を示す．尿の流量は，すでに流れた尿に比例し，膀胱が枯渇するとこのプロセスが停止する．

この例は，地磁気擾乱の形態を説明するのにきわめて適切であろう．というのは，磁気擾乱は，太陽風の”プラズマ空洞 (plasma cavity)”という大規模構造の結果であるからだ (Gregori, 1998 参照)．すなわち，荷電粒子流の時間的減少 (”プラズマ空洞”) が，ときどき太陽風内部に発生し，磁気圏が反応する．ところが，太陽から供給される荷電粒子の欠損量は，進行中の荷電粒子の流れの減少に比例する．それゆえ，この現象は対数正規分布を示し,”プラズマ空洞”が維持されるかぎり持続する．その持続期間 (通常は 2，3 日) は，太陽からの太陽風の放出に影響を与えている物理的駆動要因に依存する．実際，地球磁場の H 成分によって代表される地磁気擾乱の典型的形態は，通常，伝統的に逆座標軸で表現され，対数正規分布するようにみえる (Campbell, 1996).

対数正規分布は，別の物理的取り扱いが必要であるが，磁気圏擾乱にも適用される．実際，太陽風内部の”プラズマ空洞”は，磁気圏の典型的電流系に電流供給欠如をひきおこす．太陽風から供給される荷電粒子にみられるこのような間隙は磁気圏尾部に沿って伝播し，プラズマシート内部に蓄積された荷電粒子が太陽風欠損という効果をもたらし，それをできるかぎり減少させるようにふるまう．この時に (典型的には 2 ～ 3 時間)，磁気嵐が発達する．磁気嵐は，プラズマシートへの荷電粒子の激しい流入, ならびに, 壮大な”オーロラ嵐”の発達によって特徴づけられる．2 ～ 3 時間という持続期間は，磁気圏尾部の長さに依存する．プラズマシートから供給されるその時々の荷電粒子量は，すでに供給された荷電粒子量に比例するので，その典型的パターンは，磁気圏嵐をとらえた地球磁気圏記録 (逆座標軸表示) に対数正規分布をもたらす．(ただし磁気圏嵐は，極圏オーロラによってよりよく認識される．)

それゆえ，太陽風内部に観察される”プラズマ空洞”が長時間になればなるほど，磁気圏小規模擾乱が誘発されやすくなる．しかし，プラズマシート中への荷電粒子が長時間にわたって供給されてはじめて，磁気圏小規模擾乱が十分に発達する．したがって，(2，3 日間続く) 擾乱は，プラズマシート内部の荷電粒子の蓄積量が減少するにつれて，いくつもの小規模擾乱 (いずれも 2，3 時間持続する) が無秩序にかさなりあって発生するように

みえる．このように，ある擾乱は，太陽風中の”プラズマ空洞”の効果による大規模パターンの現れである．

対数正規分布が，余震や大森 - 宇津法則 [*21] を含む様々な現象を理解するために効果的である理由を解明するのはむつかしい．対数正規分布は，あらゆる現象にさまざまな程度に現れるきわめて一般的な数学現象であり，20 世紀初期に発見された．

*21: 大森 - 宇津法則は，大地震後の余震群がほぼ指数的に減少することを示す．この事象は，実際には，地殻の力学的振動にみられる対数正規分布の尾部である．同じ理論的論拠は，地震の振動数 (～ 0.5-1 Hz) から最小振動数にいたる HF AE あるいは LF AE のいずれにも妥当する (Paparo and Gregori, 2003)．対数正規分布傾向の上昇段階は，先駆現象が起こる時間間隔に対応する．ところが，地震研究者は，対数正規分布の減少傾向にのみ関心をもっているようである．彼らはそれを指数的減少と表現し，地震の先駆段階については忘れている．

対照的に，フラクタル性の数学的発見は対数正規分布に比べてかなり遅れ，20 世紀の最後の数 10 年間であった．しかし，すでにいくつかの現象においてうまく評価されている．それは，いくつかの現象が重なりあり，さまざまな時空スケールで表わされた同じ形状パターンにしたがって発生する (しかし，この規則性は，物理的制約によって規定された時空領域内部にのみ適用される) という事実に関係している．この特性は，”自己同一性”としてひろく知られている．

破断現象に関するかぎり，自己同一性は，原子サイズよりも小さくはなく，また，破壊しつつある物体サイズよりも大きくはなりえない．

自己同一性 (第 1 章で既述) には，二重の信頼性がある．それは幾何学的特徴にかかわって，同様の現象がさまざまな空間的規模で発生する．あるいは，それは，地殻などの挙動を模擬することをめざした金属材料 (あるいは他の素材) 実験の構造的側面に関与するだろう．

幾何学的類似性は，さまざまな素材に適用される同一法則に支配された固有の特性を記述するものである．構造的類似性は，素材の構造と組成に関係した物理特性を記述する．

素材のフラクタル性は，いわゆる”フラクタル次元”によって記述される．

(ある特定周波数の)AE 記録の場合，生の信号はまず事前に選択された基本的時間間隙にわたる rms 平均手法で処理される．次に，これらの AE 値の時系列は点状過程 (point-like process：たとえば，一連の yes は振幅に関わらない) を選抜するためになんらかの方法で束ねられる．この時系列は，フラクタル・アルゴリズム (典型的には”box counting 法”: 付録参照) によって解析される．こうしてフラクタル次元 D_t が計算され，指標”t”は，2.3 節で記述した Cello 議論に使用されたように空間領域におけるフラクタル次元 Ds からそれを識別するために，時間領域において計算される．

一般に，単純で理想的で完全にランダムな一連のできごとは，定義によって普通 D_t=1 となる．あらゆる任意のできごとが他のできごと—それ以前に起きた場合も，発生後も継続している場合も—について何らかの”記憶”をもつ場合はいつも D_t<1 となり，D_t が小さくなればなるほど”記憶”が大きくなる．”全体の記憶”という極端な場合，すなわち，すべてのできごとが同時に起こった場合には，D_t=0 となる．より詳細は付録参照．

観測された D_t の解釈は，推論された物理情報が観測された現象の契機になるのか，それとも，応力を被った新しい平衡についての解析期間中に起きるある応答に関係するかという，二重の物理的原理にしたがう．

まずは，第 2 の場合の物質の応答について考えよう．物質の内部応答が，ある比較的弱い効果—物質からいくぶんの AE を放散させる—をひきおこす．物質効果の漸次的減少が，D_t の減少によって，”固体”の最終的破断まで観測される．これは，たとえば，最終破断にいたるまで応力を加えられた鋼鉄製試料棒あるいはコンクリート製立方体試料の実験において観察される．それは，結晶の劈開面についてよく知られた古典的物理現象を説明する原理でもある．

代わって，しだいに増大する主要ひきがね作用によって応力をくわえられた物質の歴史事例を考えてみよう．その典型として，内因的高温流体による経時変化 (増加あるいは減少) する圧力を被った火山を考えてみる．

内因的圧力の増加は，火山体の孔隙性媒質を介して高温流体を 3 次元的に拡散させる．すなわち，AE 観測は，物体に加わる外的偏倚の時間変化を観測するのである．

したがって，これは D_t ～ 1 になるだろう．D_t の増大はいつも火山の”膨張”を示し，減少はいつも火山の”収縮”を示す (Paparo et al., 2004).

“膨張”期には，標準地震計によって多数の機器観測地震が記録される．対照的に，”収縮”期には，このような地震の数が減少する．これは，火山体がかつての内因的流体圧の支持力を失うと，孤立裂罅が存在する間は，重力によってかつての幾何学的形態へと”回復”するという事実と調和的である．これらの裂罅サイズは比較的大きく，それらは劈開面に沿って形成される．対照的に，上述した”膨張”期には，内因的高温流体の拡散によって，かなり多数の微小裂罅が発生する．ベスビアス火山は，2，3 週間の収縮につづいて，2，3 ヶ月にわたって膨張する．

かなり注目された事例は，2002 年末の数ヶ月間に起こったストロンボリ噴火である．ストロンボリ火山体は，海底からは 3,000m 近い高さをもつが，海面上の高さは 1,000m 足らずにすぎない．この島にある私達の AE 局は，未知の環境事故のために 9 月 23 日に停止した．そして，ストロンボリ火山が 2002 年 12 月 28 日に異常に激しく噴火して，局地的津波も発生した (図 8).

噴火期間中，内因的流体圧が増加しつづけ，AE 信号記録はある不規則な変化を示した．対照的に，D_t は単調に増加した．それは，厳密に周期的ではないものの，典型的には約 5 〜 7 日間 (この期間は，大気圧の時間変化に関係し，この推定は気象データによって証明されるだろう) でいくぶんの振動的変化を示した．

図 8b の D_t に示される振動最大値の定常的増加に注目せよ．この傾向は 9 月 23 日以降もつづき，12 月 28 日に D_t =1 となったと合理的にの推論される．その後，この測定線は止り，陸上火山斜面の低位置に新火口が開いた．

その後の数日間に津波が観測され，この現象は，噴火後の火山観測のためにこの島にいた専門家によってビデオ画像として記録された．Gregori and Paparo (2006) は，新火口形成に類似した事件—海面下の火山体斜面に急激な大規模地すべりが起こり，それによる津波がこの島の海岸部を襲ったと解釈した．

この津波事件は，立方体コンクリートの圧縮と最終破壊に相似した現象であることは確実だろう (図 8c).

図 8 の左側に示された b と c の間の相似性は，重要である．立方体コンクリート実験を示す図 8a に類似した図 (ここには示されていない) は，図 8 左側の c と比べるとかなり違っているようにみえる (実際，新しい荷重がくわえられると AE の観測信号は急増するが，図 8 左側の c に示されるように 2，3 分間は高い値を保つ D_t とは違って，それは直ちに減少する).

立方体コンクリート実験は，それゆえ，ストロンボリ噴火の室内規模の実験であると考えられる．これは，”構造的”自己相似律の歴史事例であろう．

このストロンボリ噴火は，D_t の hueristic な可能性 (図 8b) が観測データの線形基準となることを示す (図 8a).

全地球的 AE 観測局が整備されたと仮定する．既存の測定結果にしたがうと，2 つの周波数—約 200 kHz および約 25 kHz—が適当であろう．ただし，他の 2，3 の周波数も最終的には有用であり，厳密に限定されるわけではない．

要は，HF AE と LF AE の両方の同時記録の基準になるように応力を加えることである．

こうして，地球規模での地殻応力—そして，その時空的変化と地殻への伝播 (第 4 節で議論される)—が効果的にほぼ同時観測されるだろう (これは，地球規模の気象テータからえられた境界条件をふまえて，局所的気象情報が各域で利用されている状況に類似する).

“階層的ヒビ構造”はより一般的概念で，数人の著者が強調している (特定の名称はあたえられていない).すべての破断過程になんらかの階層性が存在し，それによって，まずある種の現象が，つづいて別のタイプの現象を，といったぐあいに観測がなされることが予期される．

この効果の実証的確認と観測が，さまざまな供試体 (鋼鉄，花崗岩，コンクリートなど) に関するいくつかの室内実験として実施され，文献に報告されてきた．簡単のために，ここでは 2 つの結果だけを再録する．

最初に紹介するのは，観測され識別されうる階層レベルの数に関するものである．この数は，(i) 対象とした自然系の固有な構造と組成に，そして (ii) 結果とそれらの誤差範囲の種類と時空的解像度に依存する．

たとえば，Lei et al. (1993) は中国の地震活動にマルチフラクタル手法 (付録参照) で 3 段階の階層性を認定した．彼らが示した階層性は，中国に固有な構造特性と地殻形状に密接に対応することがわかった．

花崗岩試料に関する実験 (たとえば，Lei et al., 1992, 1993) では，細粒花崗岩に 1 段階の効果しか現れないのに対して，粗粒花崗岩には 2 段階の階層性があることが解明された．観測装置の時間的解像度が増すと，これらの相違が消失することが十分に期待される．

2 番目は，前述の花崗岩試料実験で発見された証拠の簡単なとりあつかいに関するものである．しかし，それはコンクリート供試体にも適用される (Xu et al., 1997). 3 軸圧縮下で完全に破断する際の花崗岩では，まずは，結晶粒界の結合が最初に降伏する．結晶粒が破壊されると，後続の段階では花崗岩全体が急速に崩壊する．コンクリートの場合には，いくつかの堅固な包有物を含んでいて，すべての堅固な包有物の周囲に孔隙が形成されるまで，微小裂罅が帯状に発達する．

これは，粒子間結合 (あるいは，セメント / 包有物結合) が比較的脆弱であることを意味する．花崗岩 (あるいは，コンクリート試料) は，高圧下におかれると，まずは，あまり”弾性的”ではなく，むしろ”塑性的”な挙動を示す．これによって，粒子間結合 (あるいは，セメント / 包有物結合) が降伏し，花崗岩 (あるいは，コンクリート) は新しい構造形態を示す．それは，何らかの方法で，加えられた応力に適合する．しかし，個々の結晶粒子 (あるいは，堅固な包有物) が壊れ，また，それらのより強い結合が降伏すると，試料全体のすべての構造が急速に崩壊し，性能のすべてが急激に失われる．

セメントが関与するかぎり，それはいつかの異なる要素の複合体である．隣接する別の要素の間のあらゆる境界がそれぞれ，代表的強度をもつ．そのため，これらの違いが，なんらかの代表的な”ヒビ”階層法則を示すことになる．しかし，さまざまな要素の化学特性は，ひじょうにゆっくりとした拡散によって，時間とともに変化する．これはセメントの加齢を説明するものであり，この現象には，現在多くの関心が集まっている．

AE 観測は，他のいずれの方法よりも”ヒビ階層法則”を適確に評価できる．重要な長所は，それが HF AE と LF AE の区分をもたらすことであり，これらの結果は観測期間中における時間の矢の方向を知るためにはとても効果的方法である (第 1 節，そして第 4 節も参照).

この観点からみて，文献にみいだされ，地球物理学あるいは室内実験のいずれかで実施された AE 測定を扱った先行論文が重要である．

一般に，実験家は 感振装置 [a piezoelectric transducer] を用い，しばしば，それらが機能する周波数を特定することをしない．あるいは，もし彼らが周波数帯を特定したとしても，異なる周波数 *22 において同時に観測される効果への依存性に注意を払うことはない．

*22: 私の知るかぎりでは，HF AE と LF AE という 2 つの異なった同時記録の識別は，Gabriele Paparo による Gran Sasso 実験によってなされ，その後の解釈のための協力を私に求め，私たちの AE 測定研究の端緒となった．

対照的に，ここで予想される理論的解釈の鍵と基本的目的は，現象の周波数依存性に関する関与である．実際，この特性は媒質内部の時間の矢の方向に関するもっとも重要な情報をもたらす (第 1 節参照). 物理的議論を検討することによって，同じ現象がまずはより小さな”ヒビ”領域 (すなわち，HF AE) において観測されるはずであり，その後になってはじめて，同様な現象がより大きい”ヒビ”領域 (すなわち，LF AE) に起きるはずであることを，私たちは知っている．この特徴は，前震と余震の区分という，よく知られているが，未解明なジレンマを脱するための基礎となる．

すなわち，ここで適用された前述の議論—小さな”ヒビ”領域が合体してより大きな”ヒビ”領域になるなど—は物理モデルに依存する．この議論は，劈開面などの説明をもたらし，D_t 値などの物理学的重要性に関わっている．

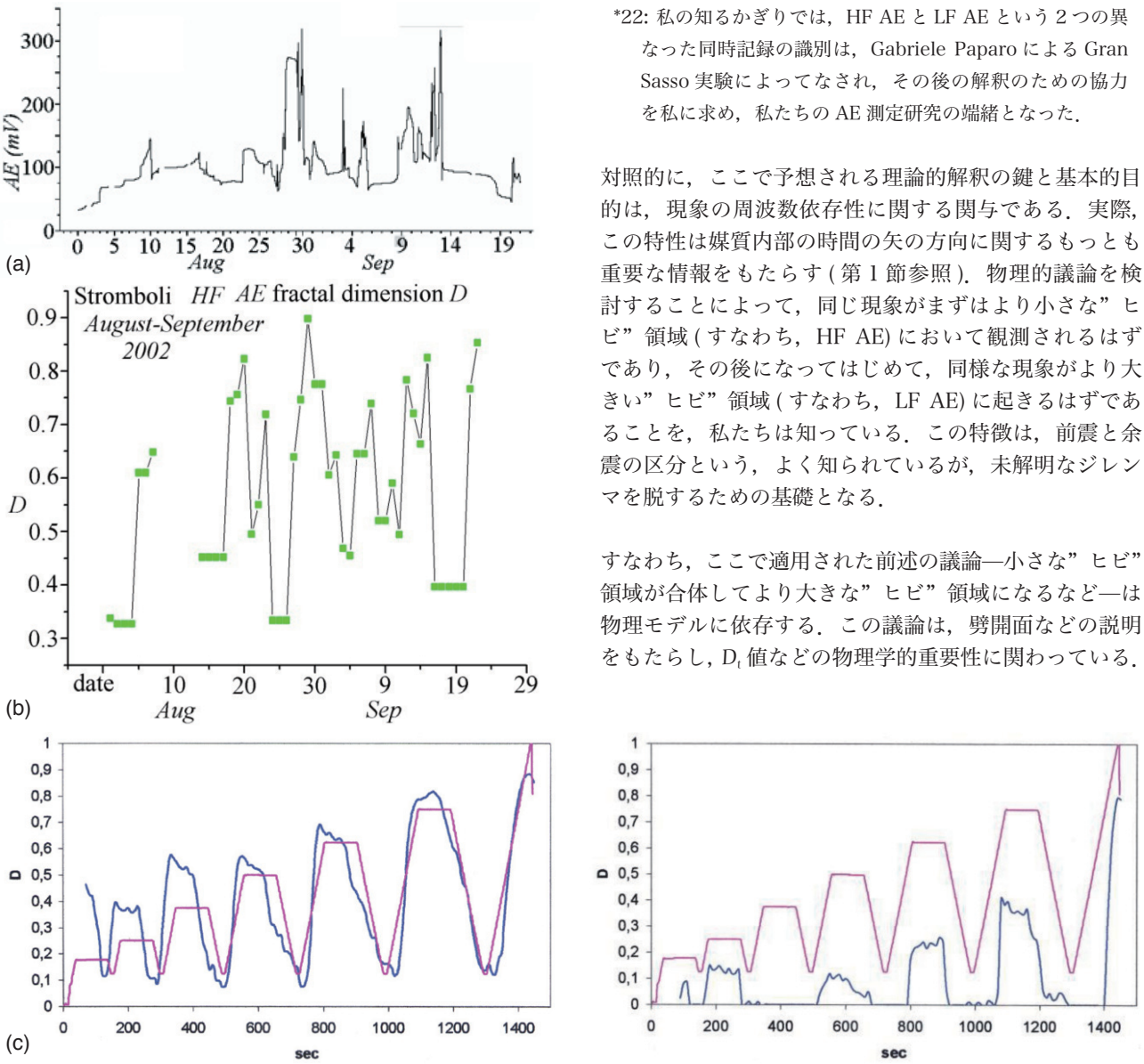


図 8　(a) HF AE の観測記録，24 時間にわたる荷重平均 (三角荷重)：Gregori and Paparo (2006) による．(b) スムージングを行っていない観測データセット (いずれの観測データも，15 分以上にわたる平均値である) である．(c) はいずれも，1 日当たりに換算されている．しかし，データが不十分である場合にはどこでも，それに続く数日間が考慮に入れられ，同じ D_t をもつ数日間として図示されている．火山体が”収縮”し，D_t が低い時には，火山に供給されるいずれの初生的エネルギーも時間的に，遅れたり，欠如したりするために AE 事象がより頻繁に発生する．以上は，Paparo et al. (2004) による．(c) コンクリート立方体 (1 辺 15cm) についてそれぞれ 10 要素について 2 回ずつ測定した平均 D_t(青). すべての供試体が判定可能で，判定可能なコンクリートでできている．増大荷重によってすべての供試体に応力が加えられた (赤線, 供試体はいずれも 50kg で, 封圧のない一軸圧縮). 最終的に破断するまで, 供試体に応力が加えられた．左図および右図は，それぞれ，HF AE (200 kHz) と LF AE (25 kHz) を示す．HF AE は，構造的劣化の開始を示す．Guarniere (2003) による．

地球の地殻の場合,”地殻擾乱 [crustal storms]”とそれらの間の”静穏期 [quiet periods]”という期間を明瞭に認識できる可能性 (付録参照) が示された.”地殻擾乱”は，激しい地殻応力活動によって特徴づけられ，この活動は強い AE 信号によって観測される．イタリア半島では,”地殻擾乱”が数年間にわたって継続するようであり,”静穏期”も数年つづく．地震は”地殻擾乱”の期間に限って発生するが,”地殻擾乱”の規則的な対数正規分布傾向は認められないようだ.

しかし，あらゆる”地殻擾乱”の中に”小規模地殻擾乱 [crustal substorms]”を認識でき，小規模擾乱は２週間ほどつづく．大きな地震は”地殻擾乱”が完了する時に起きるようである.”地殻擾乱”は，およそ対数正規分布する傾向を示す．仮定的解釈によると,”地殻の小規模擾乱”は,地殻の破断過程を示す周期である．しかし，一般には，この周期的過程は中断され，最終的な”大変動”，すなわち全破断が起きることはない．考えられる理由は，境界条件の連続的変化である.

現在のところ，いくつかの追加的歴史事例が収集された段階であるので，そのすべてが試験的な憶測にすぎない．にもかかわらず，明らかなまちがいである可能性をもつ短命の”地殻小規模擾乱”を組み合わせた”地殻擾乱”に対する疑問の余地のない観測的評価は,”ヒビ”の階層法則の一例であることが示唆される．というのは,”小規模擾乱”が”地殻擾乱”の縮小版であるからである.

観測記録に対する私たちの詳細な認識能力は，私たちの観測機器と解析能力に依存する．すなわち，それは経験的制約に懸かっている．データベースがより充実し，より有効になると，この能力は改良するだろうが，付録での議論は学術的現状に焦点をあてている.

いくつかの研究は，完全性をめざして，より精確で賢明な数学的手法 (典型はマルチフラクタル解析など，付録参照) に依拠するために，大きく異なっていることにも注意が必要である．それらは，密接に関連し，相互依存の関係にある．しかし，物理学的な理解と説明には未だに困難をともなっていて，さまざまな歴史事例に適用される公認の”定式”は存在しない．すなわち，それらの実践的適用に関しては最終合意に至っていない．それらが手引書に掲載されるまでには，何らかのより確実な思考が求められている.

3.1.2.2 浅層地熱

“地熱”とは地下深度に対する温度断面であり,”浅層”は深度約 3.5km までをさす．中国の気象観測網には浅層地熱観測局が配備され，半世紀以上にわたって機能してきた (観測局数は，時代とともに増加).しかし，中国の科学者たちのあいだでは,”地熱”という用語が使われていないことに注意が必要である.

この注目すべき研究は，蘭州 (中華人民共和国甘粛省) にある高原大気物理研究所［Institute of Plateau Atmospheric Physics］の Tang Maocang 教授と仲間たちによって実施されてきた．彼らは，毎年の，そして経年的な基礎データを中国政府に提供しつづけてきた．すなわち，中規模な時空規模の—数 10km から 200 ～ 300km の範囲における 2, 3 週間～数週間の—天気 (降水) 予報を 65 ～ 70% の確率でもたらしたのである [*23].

*23 後続の情報は，中国語の論文 (時に，英訳が付されていない) の英文要旨だけという簡単なデータにもとづいている．私は，Tang Maocang 教授の学生であった２人の貴重な科学者 Dong Wenjie と Gao Xiaoqing の協力を得るという恩恵にあずかった．彼らとの討論と提供されたデータに感謝するとともに，より詳細な情報は，先の脚注に述べられた８巻の研究に含まれている.

いずれの観測局も地下掘削観測孔を備え，複数深度 (すなわち，0，40，80，160 および 320 cm) の温度が同時観測されている．地表における突発的変動のために深度 40cm でのデータは基本的に信頼できないようであるが，以深のデータは地温勾配の見積りに利用できる.

得られたデータのうち，降雨や降雪による影響をうけた期日のものは除外される．残りの期間のデータが，供給された地熱とその時間変化の見積りに利用される.

前者の理論的解釈が地震の先駆現象として注目されるようである．というのは，内部熱放出の時間的変化が内部流体力学に関係する熱伝導に合理的に連動しているからである．地殻の微小裂罅は地球気体 [geogas] の放散に利用されるため，地温などに影響をあたえ，それがおそらく地震の先駆現象になりうるのであろう.

実際にも，彼らの記録は造構的に重要であるとともに，気象学的応用にも著しく有効であった (以下を参照).

他の観測機器に比べて，この技術はかなり安価である．データの大部分は，１日に２回，定刻に計測される．現在の設備はデータを自動取得するのでより廉価で，必要な時刻にいつでも観測することができる.

しかし，彼らの研究は中国の地球科学者に知られているだけで，西側世界ではほとんど認知されていない [*24]．これはさまざまな理由によるが，ここでは (私の個人的評価にしたがって) 簡潔に述べることにする.

*24: たとえば，カナダの農業 / 農業 - 食糧研究部門は，1997 年以降，ABEKC (Arctic Borderlands Ecological Knowledge Co-op: 北極圏境界地帯の生態共同研究) によって実施されている環境観測計画を Northwest Territories (北西部領土) で進めていて，２つの観測局 (Eagle Plains と Old Crow) では 20 および 50cm の深度で土壌温度を観測している．しかし，これらの観測局は，

Tang グループによって類似研究が行われ，大量の記録データが存在することに，気づいていないようだ．

第 1 の関心は，測定の重要性に関するものだ．この点では，地熱をかなり異なった，明らかに間違った方法で理解している 3 つの学派があることである．

地熱研究者の標準的観点では，測定された温度勾配は，深部熱源からの熱伝導にのみ由来すると想定されている．すなわち，地下での流体水平対流 [advection] は，不要で，おそらくはほとんど無視しうるゆらぎにすぎないと考えられる．それゆえ，観測になんらかの一貫性がないときはいつも異常データは排除される．

そうではなく，気象研究者は，観測された温度勾配が，測定以前の土壌 / 大気との熱交換 (伝導, 放射, あるいは，地下に流入する水や空気による熱水平対流のいずれによるものであっても) に由来すると考えている．無視できると信じられている内因的熱源は考慮されていない．

水文農学研究者または水文研究者は，むしろ，流体力学にしたがって水平熱対流だけを考えている．それゆえ，地熱は地下での水流の効果を観測する方法であるとするいっぽうで，地熱供給や気象的影響の時間変化は無視できると想定されている．

さらに，後者の研究者たちは，温度を観測するために地下に埋設された観測装置によって環境中に導入されたゆらぎが，かなりの，あるいは，しばしば重大な影響を与えていることに注意を払っている．より特別な場合には，彼らは，土壌中にさしこまれた観測装置に沿って起きる浸透水をかなり重視する．

いずれの場合においても，土壌中に穿孔した観測装置を利用する手法では，避けがたい揺らぎを環境中にもたらすことになる．それは，溝を掘って観測装置を水平に挿入した場合なども，同様である．

さまざまな記録をうることによって，この欠点を回避することができる．それらは，別の方法で地下に設置された観測装置を利用することによって，厳密に同一位置でとられた記録となりうる．たとえば，浸透水の影響は，図 9 に示される方法などで検証することが可能である．

この議論の多い課題は，浅部地熱をめぐって専門家たちを懐疑的にするという役割を果たしている．にもかかわらず，単一の地熱記録は最終的に信頼できないと推測することは，かなり合理的である．しかし，膨大な数の地熱記録を扱う場合はいつでも，統計的には，それらの大半が物理学的にたいへん重要であり，浸透水や他の望まないゆらぎに影響されることはあまりない．

Tang グループの発見の紹介はかなり長大になり，ここで，2，3 を述べることも不可能である [*25]．これらの記録に影響している未知の環境条件の変動に由来する不確実性にも配慮する必要がある．Tang の共同研究者たちは，雨後の記録や降雪による影響などを除外している．それゆえに，これらの未知の環境変動を比較してみると，おそらくは，浸透水の影響は少なくとも関与している．一般に，いかなる場合でも同様な欠点は，いくつかの他の方法による環境観測によって分散させられる．したがって，多くのパラメータによる最終的検証が，重要な結果と重要でない結果を峻別するのに有効である．

*25 明らかな言語的困難性のために私にわかる限りで，前述した 8 巻セットをまとめ，議論している．

実際，Tang ならびに共同研究者たちは，たいへん重要であると思われる信頼できる結果を見いだしている．2，3 の追加的環境が，Tang グループの研究に貢献した (他の国々では，同等の成功をおさめることは不可能であろう).

彼らの観測網は亜大陸規模に展開されていて，それに国内向けの国家的気象サービスが依存している．したがって，異なる機関が運用している観測網相互の連携にも不都合は生じていない．彼らは数 10 年間にわたって記録を収集しつづけ，重要な研究に利用できるデータベースが構築されている．

絶対的な長所は，彼らが，チベット高原を含む著しくさまざまな地域に関する観測を実施してきたことである．この高原は，気象的に (そして，予期しない) たいへん興味深い結果をもたらした．それは高原の海抜高度によるものだけではなく，実際に，地熱流量の妥当な異常が発見された．私の解釈によると，この異常は大量の摩擦熱に由来し，それはヒマラヤ山脈下で現在進行中の造山作用に起因する [*26]．

*26 標準的地磁気測定という方法で評価されたジュール熱分布 (リソスフェア / アセノスフェア境界で起きていると予測される) は，まさにチベット高原の下で最大値を示す (私が予測した方式にもとづいて，Xiaoqing Gao が描出した

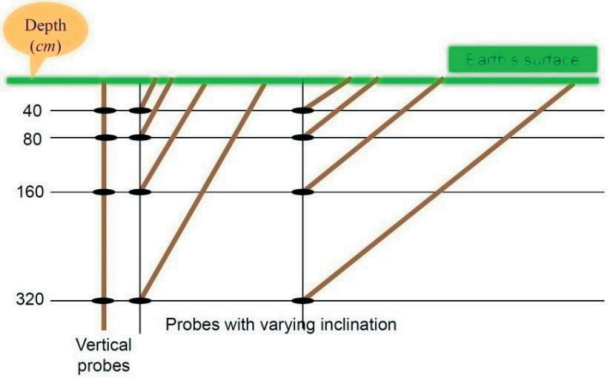


図 9 鉛直方向に対して傾斜をつけて配置された観測装置で同時観測することによって，浸透水の影響を評価することができる．本文参照．

未公表地図）．その理由は，局所的な摩擦熱による加熱物質は高電気伝導度を示し，惑星規模での telluric 誘導電流の高度集中とチャネル化を意味する．

すなわち，チベット高原は，時々刻々と変化する”ストーブ”のような役割をはたしていて，時間的に変化する熱量を大気中へ供給し，大気活動とエネルギー均衡に一定程度かかわっている．

中国の地球科学者たちは，チベット高原を地球の”第３の極”と呼ぶ．というのは，この高原は北極と南極に類似した１つの特有な地形であると考えられるからである．

このように，Tang グループの成功は，彼らの偉大な技術と先見性，ならびに，観測が実施された環境と条件の特別な幸運さに由来する．

しかしながら，一般に，同じ方法が他の地域に適用された場合，同等の成功をおさめるとはかならずしもいえない．いずれの地域も特有の地形環境と異なる気候要因をもつために，較正が必要になる．

いずれの場合にも，AE，浅層地熱，および局地気象パラメータを含む多パラメータ観測局の密なネットワークが，地殻状態ならびに土壌 / 大気の相互作用の直接観測記録を矛盾なくチェックするのに必要な複合的データセットを提供できるのである．

ちなみに，この情報は，大気と土壌との相互作用 (大気圏あるいは電離圏における地震前兆を含む) のメカニズムを検証するうえでも重要であろう．

実際にも，AE 記録は，土壌間隙の時間的変化を反映している．したがって，地球内部からの流体水平対流のために，熱的制御が AE 変化に関連することになる．それとは対照的に，土壌 / 大気の熱的相互作用は，気象パラメータと浅層地熱記録の間に観測された関係などを利用して把握することができる．

要約すると，地殻応力の変化とその地球全体への時空的伝播，ならびに，土壌 - 大気間でのエネルギー交換を把握するための直接的で長期的データベースをつくるために，私は，複合的観測局 (気象，AE，浅層地熱) の全世界観測網を設置することを薦めたい．

3.1.2.3 超伝導重力計 (SG)

現在，25 ヶ所の SG 施設が世界中に展開されている．それらは，きわめて鋭敏な (そして，高価な) 重力計であり，それらの運用には厳密な管理と注意が必要である．それらの稼働期間は，比較的最近だけである．

数少ない公表論文によると，現在のところ，それらは，降雨後の土壌水分量の変化に関して，依存性を評価し，時間的重力変化を計測している段階にある．しかし，不必要な効果を除去したとしても，それらは，いまだ物理学的に解釈できないいくつかの信号変化を示す (Iginio Marson[*27] 私信).

*27 SG 技術の役割を重視されている Iginio Marson 教授に感謝する．

SG 観測局がもっとも密に配置されている西ヨーロッパでは，SG 群が一斉に上下変動する (ドラムが薄膜でできていることに留意せよ) が，ウクライナに設置された１つの観測局ではそのような変化が認められない．つまり，大陸規模の地域が振動している可能性があるのである．

これらの観測は，先例のないたいへん精密な観測を可能にする非常に有力な道具になろう．それらによって，固定局における重力場の時間的変化の高精度観測は，他の技術ではもたらされない情報をあたえてくれるだろう．

2002 年 3 月以来，衛星群 GRACE20 が運用されていて，それらは，惑星規模での重力の時間変化を把握している．いっぽう，SG は，固定点におけるきわめて高精度の地上信号をもたらしてくれる．

20 GRACE は，NASA とドイツ航空宇宙センターの共同による Gravity Recovery And Climate Experiment である．GRACE は一組の衛星で，高度約 500km の地球周回軌道—1 機の軌道は背後のもう 1 機より低い—にある．両機はつねにマイクロ波を交換していて，それらの間の距離をきわめて精密に測定している．引力の違いによって，主導および補足衛星との間の距離変化には常にわずかな相違が生じる．このようにして生じるわずかな不一致が，重力図の計算に利用される．質量が移動するにつれて，重力図も変化する．Knudesn et al. (2001) および記載文献を参照．

SG 観測と局地的 AE 記録網あるいは浅層地熱との組み合わせは，現段階では予想できない SG 観測結果を解釈するためにきわめて重要である．

この点に関しては，ある強い地震 (あらゆる強い地震ではないけれども) と同時に観測された地球自転速度や極運動の突発的変化にみられる明らかに異常な関係を研究し，解釈するための１つの推論を述べることにする．

よく知られている困難さは，地球の慣性モーメントの劇的変化が発生することである．それは，地球内部で実際実際に起こりうる十分な質量移動が起きたとしても，決しておこりえない変化である．

１つの可能性は，次のようなものである．2004 年 12 月 26 日のスマトラ - アンダマン地震による巨大津波を考えてみよう．巨大な津波の波がインド洋をよこぎり，その後，アフリカを襲った．アフリカは，マントルにもっとも強力に根をおろした大陸であること，そして，その結

果として現れた反動が地球の天体運動に影響をあたえたことが知られている [*28].

*28 これは，地殻応力に顕著な衝撃をあたえたことを意味する．それは，3.1.1 節で述べたように，太平洋のユーラシア側大陸棚に引き起こされた潮汐に由来する効果に調和的である．そして，後にイタリア中部とイオニア諸島 (ギリシア) で観測された HF AE によって感知された．

これは推測であるが，観測結果でチェック可能である．事実，地表の形状を記述するために測地学で用いられているアルゴリズムに完璧に類似した球面調和膨張 (SHE) によって内核の形状を描くことができる．いくつかの大きな地震の一群，ならびに，地球の天体的運動として観測される個々の応答を考慮して最小二乗法を用いると，前述した SHE の係数を算出できる．

こうして，内核の形状と，地表を基準にした場合の未知の運動が精確に測定される．

この点について，地表におけるいくつかの地点 (現在は 25 地点) できわめて精確に測定された SG 記録は，内核の高まりの時間変化と，地表にたいする相対的位置を把握・チェックすることができる．

3.2 空間的位置—局所的”予測”

地震は，臨界地殻応力に対する応答として，ある活断層におけるきわめて局所的な応力解放現象であり，はるかに広い範囲が関与しているのが常である．したがって，なんらかの現実的予報をしたい場合には，私たちは地殻の局所的な形態特性に注目しなければならない．

基本的に，局地的”予報”は，広域的”予報”に使われる方法と同様な情報によって発信される．誤差，確率および情報管理に加えて，それぞれに関与した観測手法によって決まる詳細さと空間的解像度が注目される．

現実的には，局所的な地震災害に関する最良でもっとも詳細な空間情報は，任意の地点に関する地質的・造構的知識と地震活動史からえられる．すなわち，詳細な知識は，任意の災害域におけるさまざまな小規模地殻ブロックの識別を可能にする．たとえば，たいへん広域的規模ではあるが, Wang et al. (2011) は, 中国の地殻について，いくつかの異なるブロックで構成されたモデルを構築することに成功した．彼らは，どの地域に大規模災害が派生するかを正確に予測することができた．

より小規模な範囲の場合には，適切な局所的観測網が展開されなくてはならない．

そのためのに便利な方法は，全地球観測システムから発信される予備的予報を信頼することである．次に，万一の地震活動がより起こりやすい傾向にあると信じられている特定の地域に関する局地的関心にもとづいて，地方行政は問題の領域とその周辺に稠密な観測網を配備する．この局所的観測網は，もっとも可能性のある震央位置を特定するために，局所地殻応力の変化を観測する．

観測技術に関して選択する必要があり，その際に考慮されるべきは費用，正確さ，および運用方法 (迅速な設置，データベース取得，および，同時進行的データ解析) である．加えて，一定の追加的出費によって，浅層地熱観測が AE と組み合わされれば，追加情報が得られる．この情報は，進行中の諸現象の物理学的解釈を改善する．

最終的な解析において，この種の観測は，同種の情報—間接的ではあるが，まれにしか起きない水文学的流体枯渇現象を示す—の管理にかなり有効である．

4. 時刻

原理的には，地震の発生時刻の”予測”は，いくつかの異なる技術—それらは，信頼度はさまざまであるが，全地球的観測にも利用される—によって行われる．

全地球的 AE 観測は，惑星地殻における応力伝播に関する情報をもたらす可能性があり，地殻擾乱 (付録参照) がある広範囲に発生する場合には警報が発信される．

地方行政が地震災害に関心をもち，”地殻擾乱”(3.2 節および付録を参照) の観測が可能な局地的 AE 観測網を展開すれば，局地的でより正確な地震発生時刻を特定するための必要な情報提供が可能となる．

これは，地震発生の可能性がある地域にも，また火山にも，ともに適用することができる．しかし，火山は，(i) 起こりうる大きな地温変化 (衛星リモートセンシングで観測可能), または, (ii) 関連する”急速な”地形変化 (GPS か衛星高度測量のいずれかによって，あるいは，InSAR によって観測可能) にかかわる先駆現象によって効果的に監視される．

しかし，”簡単で”，そして，おそらくはとても信頼できる情報は，微小破壊発光による地面から放出される光子にもとづいて得ることができる．

破壊発光，すなわち，固体構造が破壊されるときの光子放出は，ロシアのセントペテルスブルグにあるロシア科学アカデミーの A.F. Ioffe 物理 - 技術研究所の V.I. Vettegren と共同研究者たちによって，成功裏に室内研究が進められてきた．Vettegren et al. (2012) は，次のように述べている．衝撃が起きると，Si-O-Si 結合が破壊され，SiO 自由基 [free radicals] と SiO 核 [center] が形成される．破壊発光は持続時間 10 nsc ほどの閃光の連続として発生する．各閃光は，微小裂罅形成のはじまりに相当するとみられる．微小裂罅の線サイズは，閃光強度から見積もられ，弾性波速度は 7 〜 40μm ほど (平均

10 μm) である．微小裂罅は集合して，持続期間 8 μsec の微小系 [microseries] を形成する．約 30 μm の線サイズをもつ微小裂罅の形成は e.m.[emission] の時間依存における不連続性をもたらす．

関連する地殻観測が，Persinger et al. (2012) によって報告された．彼らは，土壌からもたらされた光子放射を全暗環境で観測するために光増幅装置をもちいた．彼らは，カナダのサドベリーにある Laurentian 大学の暗室基地で装置を運用し，2 つのとても強い遠隔地地震と光子放射の増加との対応を発見した (図 10).

彼らのコメントによると，最高値はバックグラウンド光子密度の約 350 倍に相当し，本震前 7 〜 11 日前に記録された．基準値への復帰は，15 〜 16 日後であった．

彼らは，地震前数日の間に，連続的光子放射の顕著な先行増加が，チリおよび日本の地震からそれぞれ約 9,200km および約 9,700km 離れたところ (地表距離) で起きた．これは，世界規模の光子放出につづいて強力な地震が発生したことを意味する．

しかしながら，彼らが強調しているように，”新しい” 法則が発見されたと主張するには，いくつかの追加的歴史事例が研究される必要がある．

2，3 のことがらが，指摘される．

たいへん強い地震の前であろうと，後であろうと，前述した典型的な時間的遅延は記録位置によるもので，地殻のレオロジーが場所ごとに異なるためであろう．

そのような惑星現象が確かめられれば，巨大な地殻応力の発作が巨大地震の約 7 〜 11 日 (または，他の適切な時間的遅延) 前に地球全体を包み込んだことを意味する．

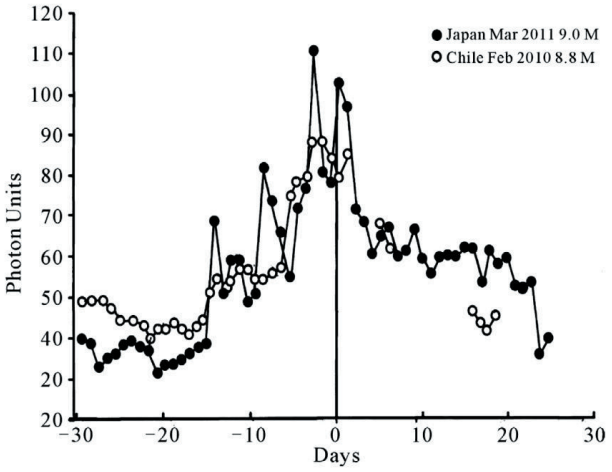


図 10 日本 (黒丸) とチリ (白丸) のたいへん強い地震の発生前，発生時および発生後に，私たちの光子増幅管システム (1 試料 min-1，24 hours day-1) によって記録された光子単位 (1 unit = 5 x 10^{-11} Wm^{-2}，24 hours day^{-1}) の 1 日当たりの平均数．

“予知” が大地震の発生時を問題にするかぎり，図 10 の最大値 (すなわち，約 80 〜 110 光子単位) は，記録位置と時刻によって異なることになる．したがって，時刻予測には，それに応じた不確実性が含まれる．

いかなる場合にも，図 10 の歴史事例における不確定性は大地震の前後の時間的遅延の総量よりも少なく，約 22 〜 37 日よりも短い．それは，警報を発するためや，明らかな課題を設定するために実践的に有用である．

いかなる場合にも，局所的な AE(および時々の浅層地熱) 観測局の適切な稠密配置は，地震活動の災害対策に有効ことが知られていて，局所的に進行しつつある地殻発作の時間進化を効果的に観測することができる．こうして，地方行政は地殻応力が事前に設定されたある閾値に最終的に近づいているかどうかを判定することが可能になり，さらには，警報を発することが必要になる．

分別的発光［fractoluminescence］(どこかで全惑星にわたって測定される) と地殻擾乱および / あるいは地殻小規模擾乱の局所的観測は，警報を解除する時刻を決定するのにたいへん有用であろう．

現在のことろ，これは，現実的措置としては，科学的理解の誤差をもつ社会的必要性に対応するための最良の方法であろう．科学者ちたは，正しい科学的情報を政策決定者に伝える責任をもっている．しかし，依然もっとも深刻な問題は法体系にあるようだ．というのは，いずれの国でも，それが決定的に不適切であるからである．

この巨大災害の深刻さを考慮すると，このような法体系の遅れが重大な義務として改善される必要があることが強調されなければならない．

5. 結 論

より豊富な観測データベースの集積と，局所的および惑星規模の地殻現象の改良された理解とにもとづいて，現在のいくつかの予想がよりよく理解されれるようになれば，この論文に示された総合的判断は，急速に進化するであろう．そして，さまざまな研究分野が，かなり部分的で，一時的評価にすぎないことがわかるだろう．

いっぽうで，この論文は膨大な混乱に影響されていることもしばしばで，そのために，いくつかのたいへん困難な探求が方法論的な相互連携をとりえていない．それらは，それぞれの解釈や，将来的有用性および効率性に明快さを欠くという深刻な問題をかかえている．

この論文は，これらのかなり無秩序な課題にたいして何らかの秩序をもたらそうという試みにすぎない．

太陽 - 地球関係性への太陽の影響が，土壌と大気圏 / 電離圏との間の相互作用に関わる現象（地震活動にいくぶ

ん関与している気候的効果を含む）に影響することも考慮される必要がある．

たとえば，SST(海面温度) と地震活動との関連性を思い出してみよう．幾人かの著者は，これは地殻から海へ放出された摩擦熱の現れであると示唆している．同様な関心は，地震雲にも払われている．他の注目される研究は，衛星搭載輻射測定機器によって観測される土壌温度変化に関して行われている．しかし，輻射測定記録は，植生などに起因する撹乱の問題を解決しなければならない．ここでは，これ以上の言及を行わない．

一般に，大気圏 (下層と上層大気ともに) と地下土壌と相互関係があまり理解されていない現状のために，これらすべての課題が困難に直面している．この理解は，パラダイム [複数] 全体にとって，ひどく歪んだものになっている．この課題には，いずれ得られるであろう独立した長期にわたる批判的議論が必要である．
しかしながら，これらの現象は，いかなる場合においても，個々の生物的先駆をひき起すなど，かなり間接的効果をもたらす．それゆえに，それらの観察された関係を理解することは困難であることが多い．それらの検出は，さまざまな適切な条件がそろった時に限られるために，一般には，かなり偶然的にしか行われない．他のものは，類似しているにしても，まったく関連を示さないことは明らかであり，どの歴史事例が実際の関連性を示すかを評価することはしばしば困難である．それゆえに，学術的現状では，これらの課題は，実践的適用のための真に有用な道具というよりも，依然，考察や探求が困難な話題である．しかし，将来的には，いずれの話題も，重要な実践的考察にふさわしい価値をもつだろう．

それに代わって，2，3 の重要な義務的課題が，ここでは重視されるべきである．

深刻な悲劇が多数の人々と国々を襲ういっぽう，科学界は，より深い分析のために，まったく無意味とも思われる討論や抵抗に明け暮れていることは，まったく容認できない．以下に，2，3 の重要事項を明快に記述する．

■ 地震予知が”できる”か”できない”との対立した主張をしている徒党の間での議論は，1 つの無意味なものである．何も”予知”されえないとしても，地殻状態を診断できることは，誰しも認めざるをえない．これを否定すること (しばしば，そのようにされる) は，患者の死亡時刻を誰も予見できないからと言って，医学における研究が無用であると主張するに等しい．

■ 多くのパラメータの適切な観測は，信頼しうる診断を行うのに必須である．これは，信頼できる地震”予知”に用いる”魔法”の経験則・指標・量といったものは存在しえないことを意味する．

■ 地震発生時あるいは発生後の被害を考慮して，地震の前兆研究のふりをすることは，無意味である．これは，地震計は現象発生後の統計的解析には有用であるが，地殻の診断や先駆現象に対しては有用でないことを意味する．医学は，死体の解剖学的分析，あるいは死亡の統計学といった方法だけで進歩することはない．観察と診断には，死亡前の患者の観察がどうしても必要になる．

■ プレートテクトニクスが膨張論や他のいかなるモデルよりも " 正しい " モデルであるか否か，という議論は無意味である．あらゆるモデルは，著しく過度に単純化した仮定に依拠している．著しく異なった地球力学モデルが，たとえ相互に矛盾しているとしても，共存する．それらは，まったく異なった，しばしば非現実的な，仮定にもとづいているからある．そして，それらは，良く知られた公汎な研究から派生している．ゆえに，いずれのモデルも困難な思考と探求にもとづくものであり，十分に敬意がはらわれるに値する．

■ 優勢な学説は，一般に，" パラダイム " に高められる．しかし，いかなるパラダイムも存在すべきではない．" パラダイム " をめぐる議論は，学術的で，実りがなく，そして，多大な社会的需要がない場合には無責任になることもしばしばである．

科学界は，いずれかで巨大な悲劇が起こっているときに，無意味な対立をめぐる猛烈な競争的議論をつづけることの倫理的意味に気づく必要がある．

自然現象を説明するさいには，" 謙遜 " が必須である．私たちが予め選択した " 単純な " パラダイムを自然におしつけることを避けなければならない (Showstack, 2011).

科学者は，正しい情報をマスメディア，政策立案者，立法者および行政に伝えなければならない．そうすれば，彼らは，自然災害に効果的に対応できる適切な法律をつくることができる．現時点では，いずれの国にも，大きな法律的ギャップが存在する．間違った警報を発した場合には，今日では，いずれの公的行政も民法および刑法上の虚偽のかどでたいへん深刻な法律的責任を問われる危険がある．それゆえ，警報が最終的に " 予測された " 大災害にならないたいへん小さな可能性にさえも，あえて挑戦を試みる人はいない．したがって，決定することに責任が生じないように，ある行政は知らされないことを好むのではないかという懸念もある．

付録

あらゆる種類の観測に備わる方法論的課題

以下では，(i) 抽象とアルゴリズム，(ii) フラクタルおよびマルチフラクタル解析，(iii) " 擾乱 " と " 小規模擾乱 " という概念，を取り扱う際に鍵となる 3 つの項目が簡潔にまとめられる．

A.1 抽象とアルゴリズム

人の心の容量には限りがあるため，" 単純な " あるいは " 美しい "(Einstein のような) モデル，枠組み，理論などが求められる．これは，すべての認識過程の前提になる．

単純化のためには，提案するモデルを簡単化する抽象が，そして，抽象によって観察の理論的解釈を開発するために適切なアルゴリズムが，求められる．

初歩的でよく知られた抽象は，たとえば，可算性 [numerability]，ユークリッド幾何学 (あるいは，非ユークリッド幾何学) における " 点 "," 線 "," 平面 ", あるいは，抽象代数学における特定空間，などである．

古典力学におけるニュートンの基本法則は，抽象そのものである．これは，もっとも進歩した理論物理学の仮説，その定式化に含まれる一般相対性理論，量子力学などすべての物理学説における公理的定式化にもあてはまる．

地殻のレオロジーについて言えば，適切な抽象として，" 固体 " 物質，理想的 " 弾性 "，理想的 " 塑性 "(つまり，いわゆる " ニュートン流体 ")，などがあげられる．

しかし，現実の自然では，いかなる抽象にも厳密に一致するものは何もない．それゆえ，完全な " 弾性 " を示す " 固体 " や，完全な " 塑性 " を示す物体は存在せず，完全な " 伝導 " 物質や完全な " 絶縁 " 物質なども然りである．

この論文で論述したアルゴリズムに関しては，次の 3 つの項目が思い出される．

1) 対数正規分布 : この特性は，3.1.2.1 節で説明されたように，ほとんどすべてのシステムに備わっている．1900 年代初頭に明快に評価され，自然科学 (生物学や医学を含む) から財政学や心理学にいたるさまざまな研究分野で応用された．この概念が基礎的抽象や探求に効果的特性をもつアルゴリズムとして明確に評価されたことがないのは，ほとんど信じがたいことである．

その原理的定義は，それがいわゆる Kapteyn クラス分布 [Kapteyn class distribution](当時の著名なドイツ人天文研究者にちなむ) の歴史事例である．詳細は，Kapteyn (1903)，Kapeyn and van Uven (1916)，Arley and Buch (1950)，Paparo and Gregori (2003) を参照．

2) フラクタル性 : この特性は，ほとんどすべての種類の現象に備わっている．あるいは，すくなくとも，フラクタル様の挙動を示す現象を扱うあらゆる分野に適用される．他の現象は，そうではない．それは，1970 年代以降にフラクタル性が一般的抽象性として明確に評価され，現在ではいくつかの研究分野で，それに関連したアルゴリズムとともに，広く利用されている．

実際，あらゆる抽象，すなわちアルゴリズムの開発は，基本的な論理的必要性に応えるものであり，いくつかの観察に適用し，説明するものである．フラクタル解析の背景をなすもっとも主要な考え方は，さまざまなスケールでの自然特性の繰り返しである．この特性は，伝統的に " 自己相似律 " とよばれ，任意の有限的時空領域内に限られて適用される．たとえば，ローマン・ブロッコリー (フラクタル性のもっともみごとな自然界の事例として，フラクタル理論のあらゆる教科書に示される) は，ブロッコリーの幾何学的容積から分子レベルにわたる自己相似性を備えている．しかし，その空間領域の外側に自己相似性は存在しない．簡単な初歩的フラクタル・アルゴリズムについて簡潔に述べた A.2 節を参照．

3) " ヒビ " 階層法則 : これは，すでに 3.1.2.1 節で定義されたもので，かなり一般的な特性と考えられる．あらゆる観測された歴史事例におけるこの定義の重要な役割は，さまざまな経験的事実に示される．また，詳細さと鋭敏さは十分ではないものの，このシステムのかなり少ない d.o.f セットだけを私たちは観察・観測することができるという事実にも示される．これは，私たちがある種の現象だけを識別することができ，他の現象は識別できないことを意味している．

この論理的に制約された「知識の科学 - 哲学的研究 gnoseology」のシナリオの中で，物理学的システムの進化にさまざまな一連の段階性を識別することができる．たとえば，破壊作用の進化の場合，さまざまな大きさの " ヒビ " の進化などを把握し，認識できるのである．

A.2 フラクタルおよびマルチフラクタル解析

フラクタル解析は今日では古典的で標準的な研究方法になり，いくつもの教科書を容易に入手することができる．フラクタルを熟知していない読者のためにのみ，ここでは 1 つのたんへん簡単なアルゴリズムを紹介する．それは，いずれの地球科学者にも知られていることであり，"box counting 法 [method]" よばれる．

できごとの大きさとは関係なく，"yes" event（できごとがおきるかどうか）の時系列からはじめる．その時間軸だけが問題になる (すなわち，これは 1 次元の変数であるが，1 次元変数であれば何にでも適用できる)．この種の "yes" event のデータ系列は，数学では，"point-like process" とよばれる．この時刻系を，持続時間 L に拡げてみよう．

長さ μ の " 定規 " を任意に選び，経過時間を一連の連続的で重複することのない定規 μ で覆い尽くす．計数 $N(\mu)$ を定義すると，$N(\mu)$ は定規 μ の数であり，任意の pint-like process には少なくとも 1 つのできごと "yes" が含まれる．

別の μ についても，同じ手続きをくりかえす．log $N(\mu)$

- log μ 図とこれは "Richerdson 図 " とよばれ，減少する図が得られる．もし，それが線形になれば (横座標に何らかの内部間隙があれば，$\mu_1 \le \mu \le \mu_2$ と表示する)，この間隙において変数はフラクタルとなる．

線の傾斜 (逆の符号をもつ) は，" フラクタル次元 D_t" とよばれる (ここで t は，できごと "yes" の時間系列が考慮されたことを示す．同じ手続きがすべての系列のできごとに適用されるが，誰もが同一のパラメータに関わるので，それは一般に t と表示される).

読者は，できごと "yes" の完全にランダムな時系列が厳密に D_t=1 になることを確認した．これは，実際には 1 つの厳格な方法であり，理想的に完全 " ランダム " な時系列が規定され，" ランダム " と同義となる．

もし分布がランダムでないとすると，それは，いずれのできごとも，前後に発生した他のできごとに関するなんらかの " 記憶 " をもっていることを意味する．この " 記憶 " が大きくなればなるほど，D_t<1 が小さくなる．あらゆるできごとが他のすべての全 " 記憶 " をもっているとすると，すべてのできごとが同時に発生する．この場合は，D_t=0 になる．

同じ手続きが, 地質図に描かれた断層の Cello の解析 (2.3 節参照) などのような, 2 次元空間に適用される．これは，緯度軸と経度軸で構成された Cartesian 座標平面に代表される．" 定規 "μ は，予め選択された固定四角形のようなものである．Richardson 図は，常に，log $N(\mu)$ -log μ 座標などをもつ．直線の傾斜 (逆符号) は，フラクタル次元 D_s を与える (ここで，s という指標は，フラクタル解析が，D_t のような 1 次元ではなく，2 次元で行われたことを示す).

断層の理想的な完全ランダム分布の場合には D_s=2 であり，理想的な往復 " 記憶 " の場合には D_s=1 になる．

すなわち，この簡単で直観的な議論は，観測された系のなんらかの既定の物理特性に直接に関わっていて，かなり特殊な定量的定規をもたらすことになる．この定規は，適切な時空領域内で観察された現象の自己相似性，すなわち，フラクタル性を測定することができる．

フラクタル理論は，今日ではよく確立された " 数学的 " 学説になっていて，さまざまな分野で研究されているが，同じフラクタル次元を見積もることにに変わりはない．

しかし，次の点は強調されるべきである．すなわち，古典的な数学公式のいずれともちがって，フラクタル学説は，後続の論理的意味に関するなんらかの公理的意義の定義からはじめることがない，という事実においていくぶん異常であろう (その定義はまったく厳密であるにもかかわらず)．それは，むしろ，なんらかの観察に関するデータ系についての論述である．その目的は，与えられたデータ系に内在するある種の先例のない " 統計的 " 特性をみいだすことを目的としている．それゆえ，標準的な数学的解析と比較すると，その方法と理論はいくぶん " 異常 " にみえる．

完全性のために，" マルチフラクタル解析 " と呼ばれる顕著な一般化が重視され，論文にしばしば適用されてきた．フラクタル次元は，マルチフラクタル・アルゴリズムによって定義されたパラメータ [複数] の 1 つの歴史事例である．この解析は，観察の内に含まれる情報をフラクタル解析が論じ尽くしていない場合でも，歴史事例に適用される．

しかしながら，マルチフラクタル解析のさまざまな適用は，アルゴリズムが同じであっても，しばしば著しく異なった応答を示す．パラメータの最終的組み合わせは，かなり特定の仮定 (たとえば，asymptotic［非兆候的］近似などをつかった近似的取り扱い) にしたがって，最終的に評価される．使用すべきもっとも信頼されるアルゴリズムについては，未だ一般的な合意がえられていないため，あらゆる計算されたパラメータはその物理的意味という観点から”直感的に”解釈される．

それゆえ，この注目される学説の本当の発見的［heuristic］可能性に関する何らかの最終評価をうる前に，なんらかの確定的思考が求められる．簡単のために，ここでは，さらなる詳細を省略する．

“擾乱”という概念は，任意の物理システムが，静穏期にくらべて強いゆらぎを示す期間をさす．

しかし，このような定義は，かなりあいまいであることは確実である．実際，ある系の”擾乱”は，その境界条件によって，あるいは，内的作用によって，特定の入力や誘因に応答する．その一般的パターンは，対数正規分布にしたがって進化するだろう．

それゆえ，地磁気においては，擾乱と小規模擾乱はともに，対数正規分布の論理的意味に応答する．小規模擾乱は，粒子欠如の伝播時期が磁気圏尾部を流れる電流系の内部に及んだことを反映する．その結果として生じる電流間隙が磁気圏に影響をあたえる．しかし，これは電流供給の欠如が磁気圏尾部に沿う電流内部を流れる場合 (通常は 2 ～ 3 時間) に限って出現する．

同様の議論にもとづくと，擾乱は太陽風の中の大規模なプラズマ空隙として長時間 (およそ 2，3 日間) にわたって持続する．

それゆえ，一般に，強いゆらぎを示す期間と静穏な期間の明瞭で顕著なくりかえしにもとづいて系の”擾乱”が認識される．くわえて，多少概算的であるにしても，最終的に対数正規分布が観察され，対数正規分布という抽象化に応じた作用を想定できるだろう．しかし，この追

加的要請は，ときどき観察される特殊な特性であるために，常時的条件になっているわけではない．

さらに，1 つの”擾乱”の中では，時々，何らかの内部作用の現れと解釈される可能性をもつ何らかの分散が認識され，このようにして進行中の”擾乱”の概略的プロセスの部分的詳細を説明する．観測された分散がより詳細な物理的メカニズムを想定することができる兆候を示すかぎり，このプロセスが持続して,”極小擾乱”などが想定されることもある．

破壊現象の場合には，これは，まさに”ヒビ階層法則”に相当する．すなわち，小規模擾乱，特小擾乱，などが，この作用を記述する観測の階層性の下位の段階をなす．これらの詳細は，進行中の現象の進化の時期を感知し，認識する人間の能力を反映しているので，経験的拘束性に依拠している．

最終的解析において，1 つの中心的論理基準は，(あまり分散していない上位の階層における) ほぼ対数正規分布傾向の評価にある．これは, ある種の (未知でさえある) 作用が進行していることを意味し，いくつかのできごとの総体となる．いずれのできごとも，すでに発生した同じできごとの数に比例した確実性をもって発生する．

しかし，これは，この種の (未知の) できごとが最終的に枯渇しつつあることを意味する．すなわち，この物理系は平衡に達することなく，なんらかの究極的な状態やできごとへ向かって常に進化する．したがって，磁気圏の擾乱あるいは小規模擾乱は，磁気圏によって求められる物理時間の遅延を示す．こうして，太陽風の流れの変化に代表される環境の境界条件の変化へ応答し，新しい平衡状態に達する．

破断過程の場合，最終目標は，新しい平衡状態の達成にある．すなわち，物理システムは，新しい平衡状態に到達するために有限の時間的遅延を必要とし，進化する．それは，目標に向かって進化するはずで，この目標は，最終的には”固体”構造を崩壊させる (あるいは，別の場合には，目標はおそらく崩壊にはならないだろう).

言いかえれば，私たちは,”固体”物質内部における微小裂罅の形成の進行状況を反映するいくつかのパラメータの中の対数正規分布を認識することになる．しかし，私たちが観測している任意の空間パラメータ—一般に，1 つの特定の (最終的には未知の)”固体”構造の内部微小作用を示す—が，最終的に，物理システムの激的崩壊をもたらすかどうかは不明である．

地殻プロセスを考えよう．概念を説明する最良の方法は，実際の歴史事例を記述することである．これらの概念をある特定の地震に実際に適用した例として (Gregori et al., 2010，2012 参照)，l’ Aquila 地震について述べる．この地震は 2009 年 4 月 6 日に発生，Richter スケールマグニチュード 5.8，モーメントマグニチュード 6.3 で，歴史的古都 Abruzzo を壊滅させ，297 名の犠牲者をだした．

図 11 は Orchi（しばしば地下から音が伝わってくるので,”Ogres[人食い鬼 (複数)]” を意味する）の一部である Raponi で 2002-2009 年に得られた LF AE 記録を示す．それは，イタリア中部，Umbria 地方の Foligno の町の近くに位置する [*29]．この場所は，1997 年 9 ～ 10 月に Nocera-Umbra 村と Sellano 村の間の中部イタリアを襲った Colfiorito 地震の震央にごく近い．それは，3 つの本震 (9 月 26 日の Mw=5.6，5.9 および 10 月 14 日の Ms=5.5) からなる一連の地震であった．

*29 親切にもこの実験のために場所を提供して下さった Raponi 御一家に共同研究者と私は深く感謝する．

図 11 に見られる印象的な突起, 要するに” 地殻衝撃” は，機器の故障によるものではない．それは，図 12 に詳細が示されるように，ほんものである (ただし，図 11 は 1

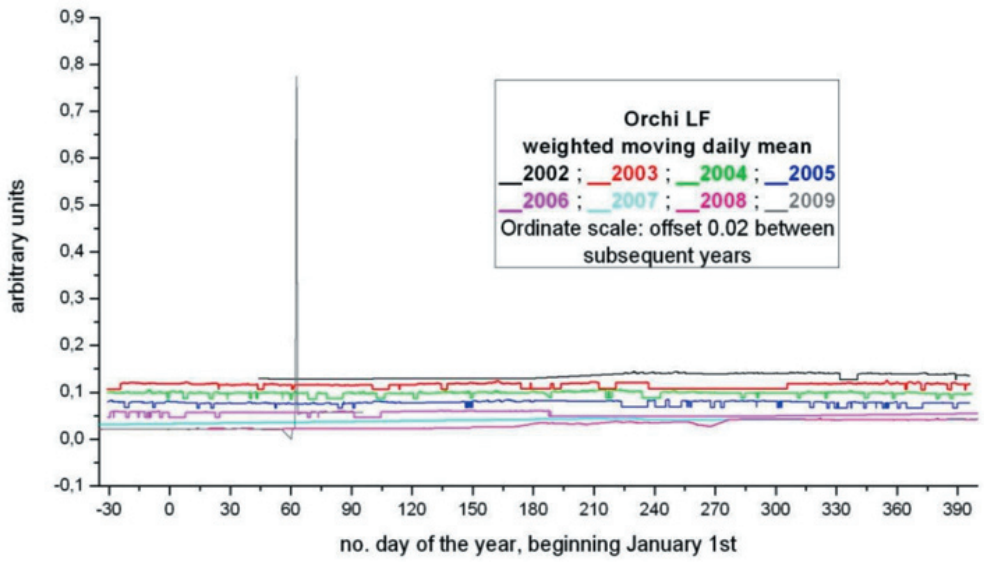


図 11 “Orchi における LF AE 記録の重ね合わせ．重複を避けるために年ごとにわずかにずらして表示されたすべてのデータ線は，各年の 1 月 1 日に始まる．本文参照 “．図とキャプションは，Gregori et al. (2010) による．

日の重点平均”F”であるが，図 12 は LF AE そのもののデータであることに留意）．このたいへん大きな異常は，最強の l’Aquila 地震に 32 日ほど先行している．これは，たいへん信頼できる前兆である．しかし，約 32 日という時間差は，かならずしも”普遍的”法則ではない．

事実，かつてイタリア半島あるいはイオニア諸島（ギリシア）を研究した際に，私たちは共同研究者とともに，2，3 日～ 10 ヶ月のさまざまな時間範囲で先行する HF AE あるいは LF AE のいずれかを観測した（図 15 も参照）．それゆえ，先行時間差は地域ごとにかなり異なるようで，同じ場所に発生した地震でも，それぞれによってかなり異なる場合さえある．それゆえ，経験法則はえられない．

図 13 は図 11 の詳細を示し，生データを別の軸単位で表示したものである．”擾乱”の出現が明瞭に示され，それは図 14—Orchi の記録（座標軸の単位が異なることに注意せよ）に加えて，Valsinni での記録を示している（以下参照）—にさらに明確に示される．Valsinni はイオニア海岸の近く—イタリアの長靴の”底”の中点付近—にあり，この観測所は Basilicata 地方 (Potenza の首都）市民安全部局に管理されている．

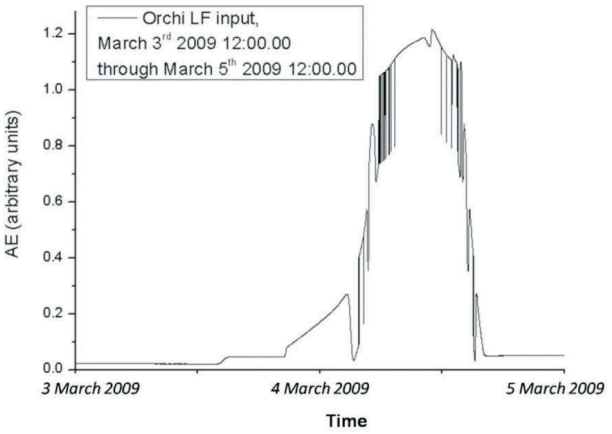


図 12 “図 11 の詳細で（しかし，AE データそのものであり，”F”ではない），l’ Aquila 地震の約 32 日前にほぼ 12 時間継続した”地殻衝撃”の内部構造を示す .....”．図とキャプションは，Gregori et al. (2010) による．

緩やかな季節変化（この縮尺単位でみて）に注目せよ．この変化は，座標軸に適切な単位を用いるとたいへん明瞭で規則的なものになり，それは，太平洋海水がユーラシア大陸棚におよぼす潮汐荷重に由来する経時的応力に由来すると解釈される (3.1.1 節を参照）．

地磁気擾乱は，地球磁場の水平成分 H によりよく表示される．しかし，磁気圏の小規模擾乱は，極におけるオーロラの消失によってよりよく検出される．同様に，地殻応力の場合は，”地殻擾乱”がフラクタル次元 D_t によってよりよく解明される．図 15 は，HF AE と LF AE の両方の D_t を示し，小規模擾乱がバックグラウンド分散から識別されうることを表す．そして，この”地殻小規模擾乱”が，まずは（予測どおり）HF AE 信号に，少し後に LF AE 信号に観測される．図 16 は同じもので，横座標の時間間隔を縮小している．この図では，2 つの HF AE および LF AE 小規模擾乱が 2 つの楕円によって表示されている．

図 17 は，小規模擾乱が終了したときに発生した破壊的本震の 2，3 日前の詳細を示す．これは正規分布し，断裂作用が進行中であることを意味する．この作用の終了時に地殻が最終的な平衡状態に到達したことは確実である．こうして最終結果が，劇的な地殻断裂となった．

さまざまな箇所で記述されたように，地殻小規模擾乱が観測される場合，最終結果が地殻の劇的断裂となるか否かを私たちは知り得ない．しかし，いずれの場合に

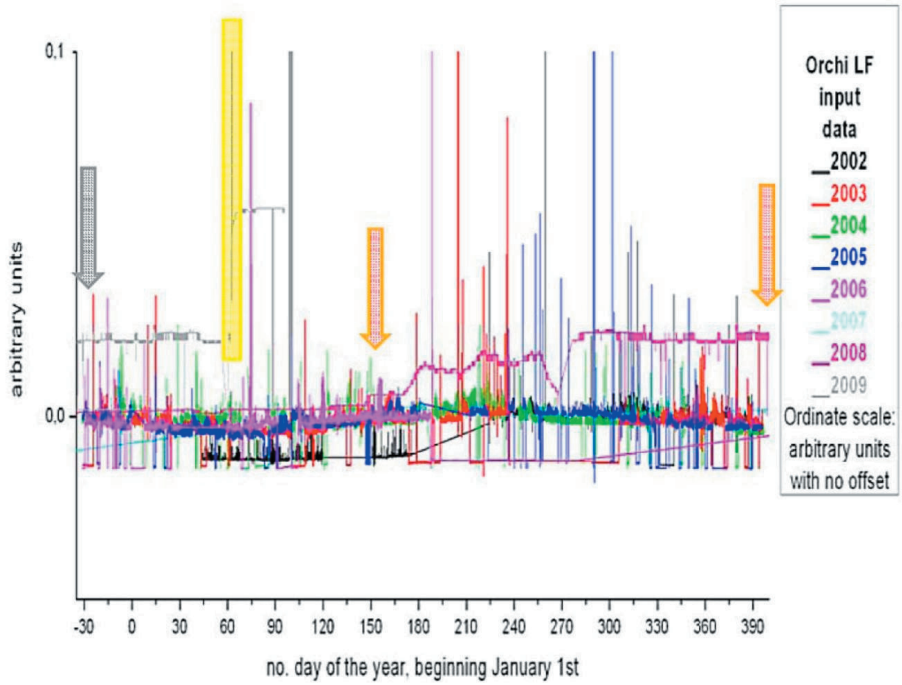


図 13 “図 11 の詳細であるが，周辺消去や平滑化をおこなっていない生データである．緩やかな季節変化と”地殻衝撃”(黄色の長方形）.... に注意せよ”．図とキャプションは，Gregori et al. (2010) による．

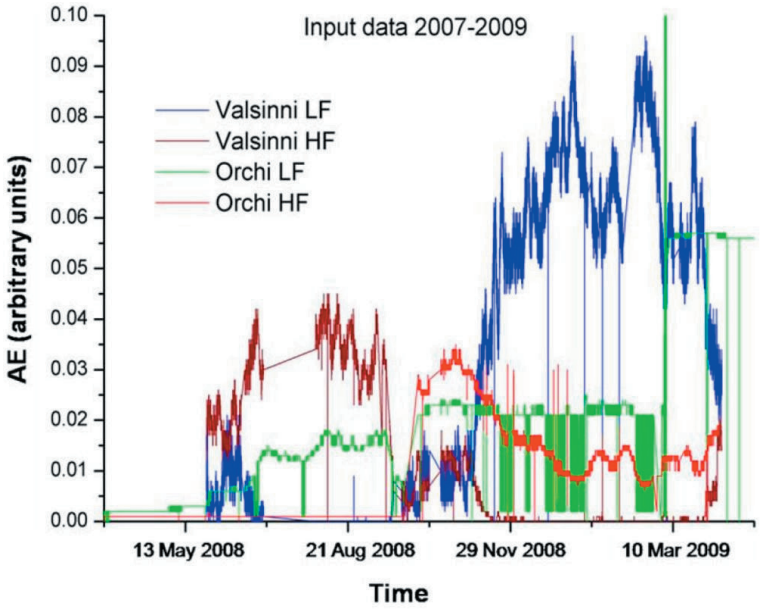


図 14 “Orchi および Valsinni における AE の生記録で，l’ Aquila 地震に先行する” 地殻擾乱” のはじまりを示す.” 地殻衝撃” (緑線) も明瞭に示されている”. 図とキャプションは，Gregori et al. (2010) による.

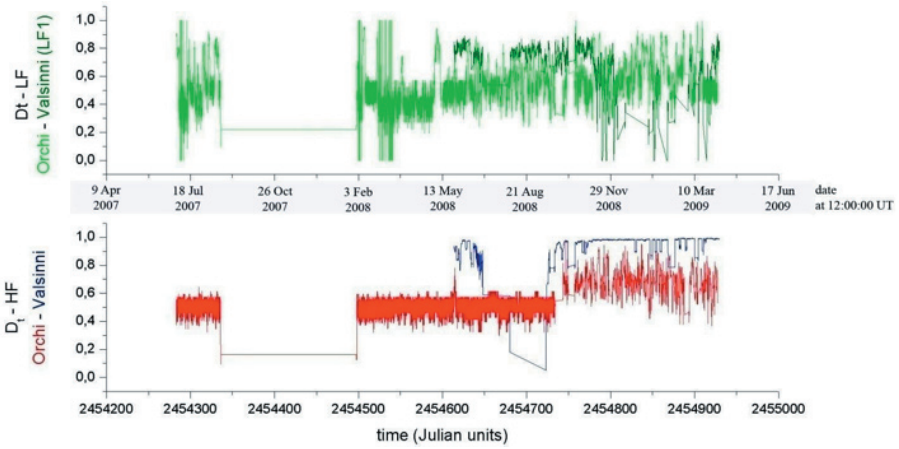


図 15 2009 年の Orchi と Valsinni におけるフラクタル次元 D_t 図 (HF AE: 約 200 kHz，LF AE: 約 25 kHz). 本震は，この図の右端にあたる 2009 年 4 月 6 日に発生した．1 つの” 地殻小規模擾乱” が Valsinni に表示され，予想どおり，それは，最初は HF AE(青線，2008 年 6 月上旬にはじまる) に，その後も LF AE 信号 (黒線，2008 年 10 月末にはじまる) に発生した. 本文参照.

も，小規模擾乱が進行中であるかぎり，私たちは，その系が” 静穏期” に到達したと主張することはできない. 図 17 の下図では，本震に先行する地震群が注目される. 幾人かの地元住民は危険を感じ，彼らは車列をつくって眠ることにした．いっぽう，専門家の審査会—常に変化していて，国家市民保護局とよばれる—は，その後に強い地震が発生する可能性について警告することができる科学的根拠はないと報じた.

ところが，マスメディアの報告によると，審査会のある専門家は，不都合にも，そして，不幸にも，それを明確に再確認する談話を発表した，という．にもかかわらず地震が発生し，専門審査会は告訴された.

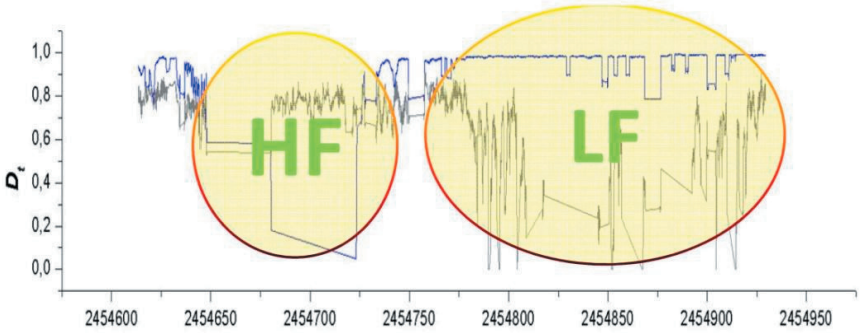
しかし，この数日間の AE 観測が同時的に入手できていたなら，図 17 の上図の傾向が地殻の状態が新しい平衡状態に向かって急速に進化していたことを効果的に知ることができたであろう．おそらく，これは，その系の劇的結末を意味したであろう．これは，確かに” 予知” ではない．それにもかかわらず，何らかの激変が観察された進行中の地殻小規模擾乱の最後に発生するという事実を知らせている．すなわち，地殻小規模擾乱が終了したときに初めて，人はすべてを知ることができるのである.

図 15 には，いくつかの解説が必要である．2007 年の最後の数ヶ月におけるデータ欠損は，記録がえられなかったことに由来する．HF AE 小規模擾乱は本震のおよそ 300 ～ 200 日前に発生し，LF AE 小規模擾乱は本震の約 200 ～ 0 日前に発生した．HF AE 小規模擾乱と同時に，LF AE の Dt 変動も発生した.

地震が l’ Aquila 市を襲ったが，この市は，Valsinni よりも Orchi にかなり近接している．しかし，イタリア半島の地殻は均質” 固体” ではない．地質研究者の解明によってよく知られているように，Anzio ～ Ancon には全半島を縦走する右横ずれ深部断裂が存在する．しかし，その証拠は十分に信頼できるものではない．L’ Aquila は断裂の南側にあり，Valsinni 地殻スラブ上に位置している.

地殻小規模擾乱は，Orchi ではなく，Valsinni で観測された．しかし，D_t は LF AE(緑色表示) でかなり分散的傾向を示したが，HF AE(赤色表示) の D_t は 2008 年 8 月末に，大きく分散しながらその傾向を変化させた．イタリア半島全体にわたる AE 観測網が整備されさえすれば，これらの特徴を解釈する取り組みが可能になろう.

イタリア半島の地震活動に関するいくつかの研究から導



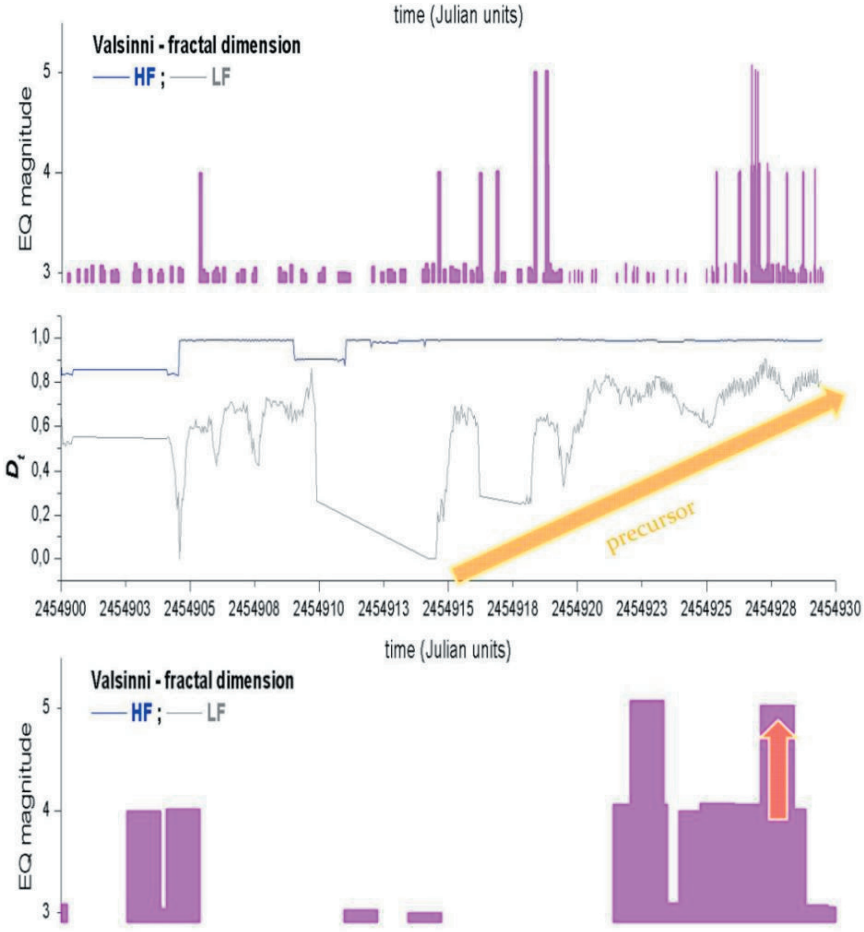


図 16 “HF AE と LF AE 記録の両者のフラクタル次元は，l’ Aquila 地震の震央から約 354km のところにある Valsinni で求められた．HF AE あるいは LF AE のいずれかの’ 小規模応力擾乱’ が，長楕円によって示される．一般に，地震がちがえば時間的進化速度も異なるが，l’ Aquila 地震は LF AE’ 小規模擾乱’ の終了時に発生した ....”．図とキャプションは，Gregori et al. (2010) による．

図 17　図 15 に楕円” LF” と表示された大きな” 逆” 対数正規分布傾向をもつ最後の 2，3 日の詳細．より少ない振動は，潮汐の効果である．下図は地震を示し，赤色矢印は l’ Aquila 地震の本震である．上図のオレンジ色矢印は，先駆現象と推測される：本震は，LF AE 小規模地殻擾乱が完全に回復した時に発生した．本文参照．Gregori et al. (2009) による．

かれた論考を要約すると，観測結果にもとづいて次のような事実が提示される．ただし，信頼できる結論はいずれも単一の観測局の記録ではなく，少なくとも 2，3 の AE 観測局によるものであることに留意されたい．

1996 ～ 1997 年に，ある地殻小規模擾乱がつづいていた．この期間中に，次の 2 つの強い地震が発生した．それらは，1996 年 4 月 3 日の Potenza(M=4.9) および 1997 年 11 月 26 日の Calfiorito (M=5.7) の地震であり，いくつかの強い地震が後続した．

1998 ～ 2001 年にえられた AE 記録は，いかなる暫定的評価を行うにも不十分である．

2002 年には，Molise 地震 (10 月 31 日，M=5.8) が発生した．今になって，それが 1996 ～ 1997 年の地殻擾乱に連続して発生したか否かは知る由もない．2002 年 5 月 35 日～ 2008 年は静穏期であった．

2008 年 5 月 26 日以降，新しい地殻擾乱が始まった (図 13，14)．2009 年 4 月 6 日に，l’ Aquila 地震 (M=6.3) が発生した．2009 年 4 月 4 日に HF AE 擾乱が，2009 年 8 月 23 日には LF AE 擾乱が強まった．2009 年 12 月以降は，AE 記録が全く得られなくなった．

ところで，AE および *Dt* の利用は間違いをもたらす可能性もある．2009 年 9 ～ 12 月には，系統的 AE の記録が Orchi および Valsinni で収集された．データは，2 日ごとに規則的に解析された．紙数の都合でこれらの図を掲載しないで，それらの証拠だけを記述する．

Orchi および Valsinni における同時的な *Dt* の挙動は，補正されていない．

HF AE *Dt* は，LF AE *Dt* に比べて分散が少ない．おそらく，これは，これらの月に地殻擾乱期間が LF AE 周波数帯に示されているという事実の結果であろう．しかるに，HF AE はすでに静穏期になっていた．しかし，この推測は，より長期にわたる AE 記録を取得することによってのみ確証される可能性があるが，2009 年 12 月以後はデータ収集が中断した．

各々の”小規模擾乱”はぞれぞれの傾向を完全に遂行することはないが，HF AE Dt はさまざまな持続期間をもつみかけ上の”地殻擾乱”のほぼ定常的連続を示す．図 15，16，17 の小規模擾乱が l’Aquila 本震の " 正しい " 前兆であると考えて同じ判断基準を適用すると，いくつかの場面で警報が出される必要があった (毎週あるいはより頻繁に).

しかし，いずれの場合にも，２つの AE 観測局の記録だけにもとづいていたのでは，震央の位置は不明であった．いずれの地殻 " 小規模擾乱 " も Valsinni で観測されたものであり，発生しうる地震は Anzio-Ancona 断層の南側のいずれかでイタリア半島を縦走するはずである，ということだけは判明していた．

これは，推測である．合理的で現実的な基準にもとづくと，" 地殻擾乱 " 期が進行はありうる，あるいは，おそらくそうだったとみられる．イタリア半島，―そして，おそらくは Anzio-Ancona 断層の南側―では，永続的に地震が発生してきた．したがって，いくつかの地殻要素が破断作用によって被害を被ってきた．地殻構造の老化が進むにつれて LF AE がより先行し，HF AE よりも LF AE によってこの現象がより良く観測されたのである．

幸いなことに，いずれも破壊的地震を発生させるほどの閾値には達してはいないが，破断作用はさまざまな場所で進行していた．この場合，社会的な関心をよばなかったが，LF AE *Dt* はこの種の破断作用を " 予知 " するのに適していることは明らかである．

強調されるべきことに，このような観測データだけにもとづくのであれば，これらすべては，自然の実態とはなんら現実的な関係をもたない単なる推測になるだろう．

この窮地は，２つだけの観測局の同時観測 AE 記録に依拠していたのでは，基本的に解決されえない．

双方 (HF AE と LF AE) の観測局の適正配置によって，全般的地質枠組みの中でえられた診断情報を，対象地域の造構場と断層運動の知識に整合させるべきである．

したがって，任意の地域の災害と危険度の現実的な最終評価は，すべての診断情報がその地域における実際の地殻モデルに適用される場合にかぎって可能になろう．この見通しからは，AE 観測が主導的手法になるだろう．

多くの場合，震央になる可能性がある特定の活断層を見いだすことができ，AE 観測局などを稠密配備できる (3.2 節参照).

要するに，これは，個別の歴史事例の先駆現象は決して同一ではなく，地殻の十分に信頼できる診断がなされるまできわめて注意深く検討する必要があることを示す．

病理学の知識が歴史事例を解析する豊富な統計データによって改善されていく医学にも似て，同じ地域を襲った地震に関する多数の歴史事例を (願わくは，地震発生に至らなかった " 地殻擾乱 " や " 地殻小規模擾乱 " の事例をも) 収集することが根本的に重要であろう．

その目的は，警告した前兆がより信頼できるか否か，そして，それがどのような頻度でくりかえされるかを評価することにある．すなわち，前兆の信頼度の評価は，対象地域における " 地震 " 挙動様式，地質構造の流れ学に関する専門的研究に依拠している．

単一のパラメータだけにもとづいていたのでは，有意な見通しは得られない．多パラメータ観測が基本であり，それはできだけ詳細であるべきだ．

謝辞： この長文の初稿を苦心して読んでいただき，権威のある示唆とコメントをいただいた Cliff Ollier 教授に深謝する．また，Karsten Storetvedt 教授の権威ある示唆，ならびに，Dong Choi 博士・Martin Hovland 博士の懇切で権威ある示唆に感謝する．私の共同研究者たち，とくに，この研究の前段階と発達に技術的・直観的示唆をいただいた Gabriele Paparo に感謝する．ハードウェアの設計・製作および観測に技術支援をいただいた Giuliano Ventrice にも特段に感謝する．いくつかのシミュレーションに関して議論いただいた Iginio Marson 教授にお礼申し上げる．Valsinni での AE 観測に便宜をはかって下さった Potenza 防災局の Ing. Guido Loperte と氏の部下に厚く感謝する．アルゼンチン / チリ国境の Peteroa 火山というたいへん困難な環境で重要な AE 記録を取得された José Ruzzante 教授と氏の熱心な共同研究者 (所属：the National Agency for Scientific and Technological Promotion，アルゼンチン，ANPCy，PICT，2007-001769："Emisión Acústica y Precursores Símicos") に感謝したい．私たちの研究と理解は，Orchi データセットによってのみ可能になった．Foligno ("Orchi") 近郊での数年間にわたる AE 観測局を親切に支えて下さった Arch. Alfredo Raponi 夫妻に深く感謝する次第である．

文　献

Arley, N. and Buch, K.R., 1950. Introduction to the theory of probability and statistics. 240p., Science Editions, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Bondevik, S., 2008. Earth science: the sands of tsunami t ime,

Nature, Lond., v. 455, p. 1183-1184; doi:10.1038/4551183a.

Botvina, L.R., Shebalin, P.N. and Oparina, I.B., 2001. A mechanism of temporal variation of seismicity and acoustic emission prior to macrofailure. Doklady Phys., v. 46, no. 2, p. 119-123. Original Russian text Doklady Akad. Nauk, v. 376, no. 4, p. 480–484.

Campbell, W.H., 1996. Geomagnetic storms, the Dst ring-current myth and lognormal distributions. Jour. Atmos. Terr. Phys., v. 58, no. 10, p. 1171-1187.

Cello, G., 1997. Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy. Jour. Struct. Geol., v. 19, no. 7, p. 945-953.

Cello, G., 2000. A quantitative structural approach to the study of active fault zones in the Apennines (peninsular Italy). Jour. Geodyn., v. 29, p. 265-292.

Cello, G., Gambini, R., Mazzoli, S., Read, A., Tondi, E. and Zucconi, V., 2000. Fault zone characteristics and scalingproperties of the Val d'Agri fault system (Southern Apennines, Italy). Jour. Geodyn., v. 29, p. 293-307.

Cello, G., Marchegiani, L. and Tondi, E., 2002. Can we assess earthquake size by measuring the fractal dimension of active faults? Studi Geologici Camerti, Nuova Serie, v. 1, p. 73-76.

Chen, Shun-yun, Zhao-yong Xu, Run-hai Yang, Jin-ming Zhao, Jin-qi Hao, Yun-yun Wang, Bing-heng Xiong and Zheng-rong Wang, 2002. A study on relation between acoustic emission and characteristic displacement field on the sample with multi en echelon structures - The theoretic and experimental explorations of strain gap. Acta Seismol. Sinica, v. 15, no. 6, 656-666; doi: 10.1007/s11589-002-0090-2.

Cicerone, R.D., Ebel, J.E. and Britton, J., 2009. A systematic compilation of earthquake precursors. Tectonophysics, v. 476, no. 3/4, 25, p. 371-396; doi: 10.1016/j.tecto.2009.06.008.

Crossley, D.J., Hinderer, J., Casula, G., Francis, O., Hsu, H.-T., Imanishi, Y., Meurers, B., Neumeyer, J., Richter, B., Shibuya, K., Sato and van Dam, T., 1999. Network of superconducting gravimeters benefits several disciplines. EOS, Trans. Am. geophys. Un., v. 80, p. 121–126.

Furuya, M., Takada, Y. and Aoki, Y., 2010. PALSAR InSAR observation and modeling of crustal deformation due to the 2007 Chuetsu-Oki earthquake in Niigata, Japan. IAG Symp., v. 135, Part 9, 679-687; doi: 10.1007/978-3-642-10634-7_89.

Gregori, G.P. and Paparo, G., 2004. Acoustic emission (AE). A diagnostic tool for environmental sciences and for non destructive tests (with a potential application to gravitational antennas). In: Meteorological and geophysical fluid dynamics (A book to commemorate the centenary of the birth of Hans Ertel), ed. by W. Schröder, AKGGKP, Wilfried Schröder/Science, Bremen. p. 166-204.

Gregori, G.P. and Paparo, G., 2006. The Stromboli crisis of 28-30 December 2002. Acta Geod. Geophys. Hung., v. 41, no. 2, p. 273-287.

Gregori, G.P., 1998. The magnetosphere of the Earth. A theory of magnetospheric substorms and of geomagnetic storms. In: From Newton to Einstein - A Festschrift in honour of the 70th birthday of Hans-Jürgen Treder, ed. by W. Schröder, Mitteilungen des Arbeitskreises Geschichte der Geophysik der DDG, v. 17, no. 3/4, Science Edition/ IDCH-IAGA / AKGGKP, Bremen-Roennebeck and Potsdam. p. 68-106.

Gregori, G.P., 2002. Galaxy – Sun – Earth relations. The origin of the magnetic field and of the endogenous energy of the Earth, with implications for volcanism, geodynamics and climate control, and related items of concern for stars, planets, satellites, and other planetary objects. A discussion in a prologue and two parts. Beiträge zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik, Band 3, Heft 3, 471p.

Gregori, G.P., 2005. Relativity, quanta, gravitation and cosmology. A discussion on the cognitive process in theoretical Physics. Sonderband Beitr. Gesch. Geophy. Kosm. Physik, Science Edition. 219p.

Gregori, G.P., 2006h. Galaxy-Sun-Earth relations: the origin of the magnetic field and of the endogenous energy of the Earth, with implications for volcanism, geodynamics and climate control and related items of concern for stars, planets, satellites, and other planetary objects. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 38, p. 34-36.

Gregori, G.P., 2009. The Earth's interior – Myth and science. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 53, p. 57-75.

Gregori, G.P., 2010. On the Pioneer anomaly and the Doppler effect. Galilean Electrodynamics, v. 21, no. 3, p. 43-52.

Gregori, G.P., Accornero, N., Gregori, B.G. and Capozza, M., 2006. The foundations of physics, and the Bible. The thought and the brain. In Natural science, philosophy and religion (Naturwissenschaft, Philosophie und Religion), ed. by W. Schröder, Science Editions, Bremen-Roennebeck. p. 53-126.

Gregori, G.P., Paparo, G., Poscolieri, M., Rafanelli, C. and Ventrice, G., 2012. Acoustic emission (AE) for monitoring stress and ageing in materials, composing either manmade or natural structures, and their precursors. In Acoustic emission, ed. by W. Sikorski, InTech; http://www.intechopen.com/articles/show/title/acoustic-emission-ae-for- monitoring-stress-and-ageing-in-materials-including-either-manmade-or-natur; ISBN 978-953-51-0056-0. p. 365-398.

Gregori, G.P., Paparo, G., Poscolieri, M., Rafanelli, C., de Simone, S. and Ventrice, G., 2009. I dati di emissione acustica (AE), registrati ad Orchi (Foligno-Umbria) e Valsinni (Basilicata): correlazioni con il terremoto de L'Aquila. Presented at the Workshop "Il terremoto Aquilano dell'aprile 2009: primi risultati e strategie future", Chieti, 4 giugno 2009 - Università "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara.

Gregori, G.P., Poscolieri, M., Paparo, G., De Simone, S.,

Rafanelli, C. and Ventrice, G., 2010. “Storms of crustal stress” and AE earthquake precursors. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., v. 10, p. 319–337.

Guarniere, S., 2003. L’emissione acustica come strumento diagnostico di strutture a varia scala. 144p., unpublished PhD Thesis, University of Messina.

Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1954. Seismicity of the Earth, II ed., 310p., Princeton University Press, Princeton.

Ide, S., Shelly, D.R. and Beroza, G.C., 2007. The mechanism of deep low frequency earthquakes: further evidence that deep non-volcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface. Geophys. Res. Lett., v. 34; doi:10.1029/2006GL028890.

Kapteyn, J.C. and van Uven, M.J., 1916. Skew frequency-curves in biology and statistics, 69p., Hoitsema Brothers, Groningen.

Kapteyn, J.C., 1903. Skew frequency curves in biology and statistics, Astronomical Laboratory, Noordhoff, Groningen.

Keĭlis-Borok, V.I. and Malinovskaya, L.N., 1964. One regularity in the occurrence of strong earthquakes. Jour. Geophys. Res., v. 69, no. 14, p. 3019-3024; doi: 10.1029/JZ069i014p03019.

Knudsen, P., Andersen, O., Khan, S.A. and Høyer, J., 2001. Ocean tide effects on GRACE gravimetry, 8 pages. In: Gravity, geoid and geodynamics 2000, ed. by M.G. Sideris, IAG Symposia, v. 123, Springer-Verlag, New York.

Lanzerotti, L.J. and Gregori, G.P., 1986. Telluric currents: the natural environment and interactions with man-made systems. In: The Earth's electrical environment, ed. by E.P. Krider and R.G. Roble, National Academy Press, Washington, D. C., p. 232-257.

Lei, Xinglin, Nishizawa, O. , Kusunose, K. and Satoh, T., 1992. Fractal structure of the hypocenter distribution and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain size. Jour. Phys. Earth, v. 40, p. 617-634.

Lei, Xinglin, Nishizawa, O. and Kusunose, K., 1993. Band-limited heterogeneous fractal structure of earthquakes and acoustic-emission events. Geophys. Jour. Int., v. 115, p. 79-84.

McNally, K.C., 1983. Seismic gaps in space and time. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., v. 11, 359-369; doi: 10.1146/annurev.ea.11.050183.002043.

Neumann, E., 1949. Ursprungsgeschichte des Bewusstseins, Rascher Verlag, Zürich, Italian translation, 416p., published in 1978 by Casa Editrice Astrolabio-Ubaldini Editore, Roma.

Paparo, G. and Gregori, G.P., 2003. Multifrequency acoustic emissions (AE) for monitoring the time evolution of microprocesses within solids. Reviews of Quantitative Nondestructive Evaluation, v. 22, (AIP Conference Proceedings ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti), p. 1423-1430.

Paparo, G., Gregori, G.P., Taloni, A. and Coppa, U., 2004. Acoustic emissions (AE) and the energy supply to Vesuvius – ‘Inflation’ and ‘deflation’ times. Acta Geod. Geophys. Hung., v. 40, no. 4, p. 471-480.

Pearce, F. and Holmes, B., 2005. Tsunami: the impact will last for decades. New Scientist, no. 1, p. 14-15, 185:24822482.

Persinger, M.A., Lafreniere, G.F. and Dotta, B.T., 2012. Marked increases in background photon emissions in Sudbury Ontario more than one week before the magnitude > 8.0 earthquakes in Japan and Chile. Int. Jour. Geosci., v. 3, p. 627-629; doi: 10.4236/ijg.2012.33062.

Poscolieri, M., Lagios, E., Gregori, G.P., Paparo, G., Sakkas, V.A., Parcharidis, I., Marson, I., Soukis, K., Vassilakis, E., Angelucci, F. and Vassilopoulou, S., 2006. Crustal stress and seismic activity in the Ionian archipelago as inferred by combined satellite and ground based observations on the Kefallinìa Island (Greece). In: Fractal analysis for natural hazards, ed. by G. Cello and B.D. Malamud, Geol. Soc. Lond., Spec. Publ., v. 261, p. 63-78.

Rikitake, T., 1975. Earthquake precursors, Bull. Seismol. Soc. Am., v. 65, no. 5, 1133-1162.

Rosat, S., Boy, J.-P., Ferhat, G., Hinderer, J., Amalvict, M., Gegout, P. and Luck, B., 2009. Analysis of a ten-year (1997-2007) record of time-varying gravity in Strasbourg using absolute and superconducting gravimeters: new results on the calibration and comparison with GPS height changes and hydrology. Jour. Geodyn., v. 48, nos. 3-5. p. 360-365.

Showstack, R., 2011. Scientists examine challenges and lessons from Japan’s earthquake and tsunami. EOS, Trans. Am. Geophys. Un., v. 92, no. 12, p. 97-99.

Vettegren‘, V.I., Kuksenko, V.S., Mamalimov, R.I. and Shcherbakov, I.P., 2012. Dynamics of fractoluminescence, electromagnetic and acoustic emissions upon impact on a granite surface, Izvest. Phys. Solid Earth, v. 48, no. 5, p. 415-420; doi: 10.1134/S1069351312040118. Original Russian text Fizika Zemli, no. 5, p. 58–63.

Virtanen, H., 2006. Studies of Earth dynamics with superconducting gravimeter. 41p., Thesis, Univ. of Helsinki. Also published as no. 133 in the series of Publ. of the Finnish Geodetic Inst.

Wang, Hui, Mian Liu, Jianling Cao, Xuhui Shen and Guomin Zhang, 2011. Slip rates and se ismic moment deficits on major active faults in mainland China. Jour. Geophys. Res., v. 116, B02405 [17p.]; doi: 10.1029/2010JB007821.

Xu, Zhao-yong, Bin Wang and Jin-ming Zhao, 1997. Experimental studies on the evolution process of micro crack patterns in concrete samples containing hard inclusions. Acta Seismologica Sinica, v. 10, no. 3, 317-332.

テチス海の輪郭と中東の主要な造構的特徴 : レンチテクトニクスによる概観
THE TETHYS CONFIGURATION AND PRINCIPAL TECTONIC FEATURES OF THE MIDDLE EAST: A WRENCH TECTONIC SURVEY

Karsten M. STORETVEDT
Institute of Geophysics, University of Bergen, 5014 Bergen, Norway
karsten.storetvedt@gfi.uib.no

Soheila BOUZARI
Department of Geology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran
S_tectonic@yahoo.com

（杉山　明［訳］）

“研究において真に価値あることを成し遂げるためには仲間の意見に逆らうことが必要である.”
Sir Fred Hoyle* の「家は風が吹くところにある」から

* Sir Fred Hoyle (1915-2001): 英国の天文学者・数学者で，科学小説家としても知られている．彼自身が初めて唱えた“ビッグバン”理論を後に拒絶するなど，宇宙や科学一般に関して度々論争を巻き起こした.

* 本論は Newsletter, no. 64 (p. 30-68) の同じ著者による Essay の続編というべきものであるから，それを併せ読んだ方が用語や概念を理解しやすい．なお，* を付けた注記は訳者による.

要　約：プレートテクトニクスが君臨している間，中東の造構発達論は，信頼できる現象学的首尾一貫性を欠いた際限のないその場限りの状態に変わった．この行き詰まりを打開する試みとして，東はインドから西はトルコまで延びるこの地域の地質発達を新しい地球発達理論であるグローバルレンチテクトニクスで解釈する．新たな地質発達パターンを練り上げるために，話をプレートテクトニクス概念以前のテチス，すなわち中東を含むユーラシア南縁を東西に延びる縁海状の水路から始める．アルプス期の造構変動の間，テチス海の軸は当時の古赤道に近接していた．古赤道帯は慣性に基礎を置いたリソスフェアの捩れ変形に対して極めて敏感な地理的位置にあるから，中東のテチスセクターは縁海状のテチス海が完全に消滅するまでの間，造構的な大変動を蒙った．アルプス期のリソスフェアの捩れによりテチス海の基盤全体は著しい横ずれ圧縮*状態となり，縁辺衝上断層帯，走向移動断層，内外に位置する大陸ブロックの造構的回転が生じた．例えば, 古地磁気の証拠, 断層面解析, GPS 速度ベクトルは構造的なデータとともに，ルート (Lut) ブロックを含むイラン中央の微小大陸集合体が，白亜紀後期～第三紀前期の横ずれ圧縮変形に応じて著しい反時計回りの回転を蒙ったことを示唆している．さらに，大規模なホルムズ (Hormuz) シーケンス，イランの新第三紀盆地，紅海と死海の凹地を含むインフラカンブリア期の中東の数 km にも及ぶ厚い塩類の集積は，蒸発の産物ではなく，上部マントルからの高濃度塩水の断続的な噴出物が沈殿したものと見る方がずっと確からしいという証拠がある. マグマ, 固体状態のマントル物質 (地表のオフィオライトを構築), 種々の金属複合体の移送など, アセノスフェア物質の上方への噴出は地球の回転の変化と密接に結びついている.

* 横ずれ圧縮（transpression）：横ずれ引張（transtension）と対をなす.
横ずれ断層系にはしばしば主断層と斜交する副断層が伴い，断層の屈曲部には圧縮領域や引張領域が生じる．これらの領域（domain/zone）を横ずれ圧縮領域，横ずれ引張領域という．前者では逆断層が卓越してリッジ（pressure ridge）が形成され，後者では正断層が卓越して盆地（pull-apart basin）が形成されることが多い.

キーワード：中東のテチス，アルプス造構変動，横ずれ圧縮変形，造構的回転，大規模な塩類盆地の形成

古典的なテチス水路；力学造構的・環境的影響

地球の他の顕著な山脈と同様，アルプス・ヒマラヤ山脈も，長い間，造構的な力で地殻が厚くなり，それに関連する浮力で高くなった ‘造山帯 (orogenic belt)’ とみなされてきた．しかしながら，すべての山脈は，それらの下位にある地殻の造構史にかかわらず，明らかに地球史の新しい時期，基本的には最近の 500 万年間に隆起したものである (例えば，Sonnenfeld, 1981; Stoneley, 1981; Gansser, 1991; Ollier, 1992; Ollier and Pain, 2000). したがって，アイソスタシーの原理にもとづく古くてまだ通俗的な用語である ‘造山運動 (mountain building)’

は，もはや明らかに事実に根ざしてはいない．他方，地殻隆起の原因となる浮力は，リソスフェア深部の断層帯と，異常で浮力のある上部マントルの特定のセグメントが相まって関連していると見るのが最も確からしい．地球の動き方に関する多くの当たり前と思っている見解を急進的に変える必要のある事実が次第に増加しているのである (Storetvedt, 2003 and 2011).

アルプス・ヒマラヤ軸に沿った白亜紀後期～第三紀前期の造構的な隆起よりずっと前に，この地殻帯が広く東西に延びた浅い縁海状の水路であるテチス海—最初 Neumayr (1885) により着想され，その後 Sűss (1893 and 1901) が造構用語として仕上げた概念—に位置したということは古来の認識である．この古典的な概念では，テチス海の北岸はヨーロッパ中央部～アジア西部にまたがる広い地域をカバーするもう 1 つの広大な縁海であるパラテチス海 (広範な参考文献については Sonnenfeld, 1981 を参照) と浅いリッジで隔てられている (**図 1** 参照). 世界の水塊から度々孤立したために，パラテチス海の層序は他のどの地域の堆積記録とも対比することが困難である．テチス海についても似たような状況だったことは明らかである．Sonnenfeld (1981) は広範なレビューを行った著作の中で，古生代と中生代を通じてテチス海の南岸と北岸は同じ気候帯にあり，化石記録は水域の横断方向より縦断方向ではるかに変化に富むことを示した．研究の初期段階ですでにテチス海はしばしば動物化石の強い局地性 (endemic)—パラテチス海のそれとは明らかに異なって記載された—で特徴づけられた古地理に長期にわたって封じ込められて発達したことが認められた．パラテチス海と同様，テチス海の性格が極めて強い局地性を有するということは，恐らく盆地内を横断する浅いリッジが断続的に発達したためであろう (Sonnenfeld, 1981). 長期にわたって 2 つの縁海はユーラシアの大部分をカバーした．

古生代後期及びジュラ紀～白亜紀の苦鉄質～超苦鉄質変成岩が所々に存在し，テチス地域内でしばしば不連続な捩れた帯を形成している (Ernst, 1972; Ghazi et al., 2004; Shirdashtzadeh et al., 2010; Torabi, 2011). このことは，テチス海の軸に沿った先アルプス期の造構活動でも低密度の蛇紋岩化された上部マントル物質がテチス軸に沿ってダイヤピル状に再可動化し，地表付近でオフィオライト・メランジを形成したことを示唆している．ジュラ紀には，例えばテチス盆地は造構的に分裂し，種々の水深を示すことになる地塁 / 地溝地形が生じた (Trümpy, 1965 and 1971; Falcon, 1967; Stöcklin, 1968). 当時，この海ははるか西方ではカリブ海となり，中米と合衆国南部では広範な塩類層を堆積し (Aubouin et al., 1977)，その後，基盤の断裂と頁岩及びタービダイトで充填された急速に沈降する凹地に取って代わられた (Schmidt- Effing, 1977). 堆積条件は停滞水塊と局地性の強い動物相の発達に左右されたが，太平洋に通じる水路が時たま開かれたと思われる (Hallam, 1977). 例えば，提案されたカリブ・テチスの中生代盆地はスケール

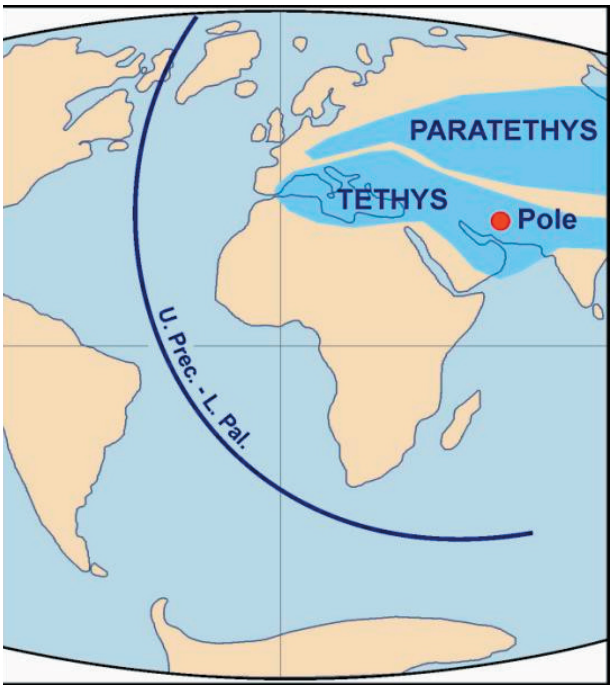


図 1　現在の地理上でのテチス海とパラテチス海の西の分枝 (やや濃い青色) を示す．テチス海が存在した古生代と中生代の間，地球は何度も空間方位を変えた (黄道に対する相対的な位置をリセットした，図 3 参照). この図は，古赤道が北極圏カナダを横断し，中央～南大西洋に連続していたインフラカンブリア期の古地理状況を示す．赤道に対応する地理的な 2 つの極は それぞれパキスタンと南東太平洋地域にあった (Storetvvedt 2003, 2005 参照). 言い換えると，中東のインフラカンブリア期の大規模な一連の塩類堆積物は極地条件 (赤丸がほぼ極の位置) で形成され，それ故，蒸発によって形成されたものとは全く異なる．

が巨大なユーラシア区とよく対比できるように見える．しかしながら，テチス盆地は，始生代後期までに脆性的な地殻にすでに刻み込まれていた基本的断裂帯に沿って長い時間をかけて発展した地向斜の形成という中生代以前の長い歴史を有していた．

伝統的には，最初に放射性元素がこの惑星の初生表面に濃縮することによって熱せられた一定の外層が始生代後期までに脆性化するほど十分に冷えたと考えられている (Storetvedt, 2011 を参照). こうして一定の表層 (リソスフェア) はわずかな程度収縮せざるをえなかった，そしてその収縮によって 2 つの比較的深いほぼ垂直な大円収縮断裂が生じたと仮定された (Wilson, 1954 とその中の参考文献を参照). これらの深部転位の 1 つは現在の太平洋を取り囲み，他方，第 2 の大スケール断裂は現在のアルプス・ヒマラヤ軸に沿っていると推断される．第 2 の深部断裂 (ベニオフ帯) の大西洋と太平洋を横断する分枝は，中生代後期の地殻の分裂過程によって水面下に沈み，何らかの方法で分断されたと考えられる．Wilson は明らかに，比較的狭い東西に延びたテチス地向斜という古典的な見方に従い，彼の全地球造構論から，この縁海状の海は初生的な世界を取り囲む (大円) 盆地で，最終的には先アルプス期に分解したと考えた．現在の岩石の証拠から，重要な深海はどれも白亜紀より前には存在せず，縁海的なテチス海はその生涯にわたって，仮定された東西方向の収縮性断裂に沿って途切れること

なく大西洋を横断して広がっていた．現在の太平洋のベニオフ帯断面で代表される Wilson の最も顕著な大円転位に関していえば，初生的な大円断裂は，アルプス期の捩れの力によってとくに南西太平洋で造構的な変形を受けた (Storetvedt, 1997 and 2003).

始生代と原生代の境界 (約 25 億年前) に深く関わりのある動力学的な不安定の結果，内部質量が再配分され，地球は (黄道に対して) 最終的に安定な位置に落着いたものと推定される (Storetvedt, 2003)．惑星の新しい方位を**図 1** に示す．おそらく原生代の大部分と古生代前期には，古赤道は図に示されているような位置にあったと推定される．この古赤道 (Storetvedt 1997, 2003, 2005 and 2011 参照) と調和して，古地磁気の極が，それぞれほぼ 65˚E, 25˚N と 115˚W, 25˚S という対蹠的な位置に合理的な群をなして決定されている．事実，Kreichgauer (1902) の原生代の古赤道は，化石から推定された古気候の証拠と先カンブリアの地球規模の造構的配置を組み合わせて決定されたもので，近代の古地磁気データにもとづくそれと驚くほどよく一致している．

図 1 の古地磁気学的環境によると，先カンブリア紀後期と古生代前期にはテチス海に沿って大きな緯度の変化があったに違いない．つまり，イベリアと北西アフリカは亜熱帯に位置し，他方，古緯度は東へ，イラン・パキスタン地域の極に向かって高くなっていた. Wolfart (1967) によると，中東の古テチス海は全期間を通して浅海陸棚性の堆積環境にあった．しかし，その地域が当時の極地にあったにも拘わらず，インフラカンブリア期にはかなりの厚さのハロゲン堆積物がペルシャ湾地域から西パキスタンのソルトレンジ (Salt Range) にまで広がるホルムズ (Hormuz) 塩類盆地に溜まった．パキスタンでは石膏・無水物・赤色マール・岩塩の互層からなるこの高緯度の塩類シリーズが層厚 1,000m を越えると見積もられた (Zharkov, 1981 とその中の参考資料)．しかし，ペルシャ湾盆地では新原生代のホルムズ塩類シリーズの厚さは 1.5 〜 4km である (Edgell, 1996)．現在の塩類堆積物が厚さ 20m を越えることは滅多にないと (Schmaltz, 1969) いう事実にもかかわらず，塩類堆積物は，その厚さがどうあろうと，伝統的に蒸発物とみなされている．Sonnenfeld (1984) によると，蒸発起源とされる層状の塩類堆積物がそれほど厚くなるためにはたくさんの環境条件を満足させる必要があり，そのような状況を予想するのは困難 (もしくは不可能) である．厚いホルムズ塩類シーケンスの場合のように，それが極環境の場合はさらに問題がある (以下を参照).

一般的に，大規模な塩類盆地はしばしば線状の輪郭を示すが，これはそれらが断層で規制されていることを示唆している．Sonnenfeld (1984, p. 398) を引用すると，“造構的な不安定は，しばしば玄武岩溶岩の通路となり，非常にしばしば厚い塩類シーケンスを随伴する正断層に規制される．広い地域にわたって特にこれといった変形なしに層相が連続しているということは，広域ブロックの垂直的沈降を裏付けている”．この一連の証拠に従えば，大規模なアラビア・イラン・パキスタンの塩類盆地は惑星の脱ガスの産物として発達した．言い換えれば，塩類は地表での蒸発の産物ではなく，地球の内部から絞り出された高濃度の塩水から沈殿したと考えられる．したがって，脱ガスが関連する地殻下部のマントルへの消失によって引き起こされた沈降は，揮発性成分に富む上部マントルの静水圧の増大を自然に引き起したであろう．これは，各種火山性ガス，高濃度の塩水，ときにはマグマの地表における‘発散’を周期的に引き起す (Storetvedt, 2003, 2010a and 2011 を参照)．それ故，中東テチス海の大規模な塩類堆積物は地球内部の脱ガスにより取り除かれたもので，古気候的な意義は何もないと結論づけるのが合理的であろう．

潮の干満によってひきおこされる堆積リズムの評価及び化石貝殻の成長リングの数による 1 日の長さの研究から，地質学的に遠い過去において，地球は現在よりもかなり早く回転していたと推測されている (例えば Wells, 1963; Creer, 1975; Rosenberg, 1997)．例えば，Rosenberg (1997) は潮汐性堆積リズムにもとづく化石時計を検討し，オルドビス紀には 1 年が約 420 日，デボン紀には約 400 日であったと見積もられるのに対し，先カンブリアの末期 (9 億年前前後) には 440 日程度であったと結論した．このことから少なくとも先カンブリア後期以来，地球の回転速度は全体的に遅くなったように思われる．しかしながら，真の極移動* (赤道の膨らみの調整を伴う惑星の空間的方位の再決定) だけでなく回転速度の変化にもよる地球の回転の変化は不規則な間欠的現象であった．こうした地球の慣性モーメントの変化はアセノスフェアにおける静水圧変化の引き金となり，地球史上の変動に密接に伴ったように思われる．従って，惑星回転の変化は緯度に依存するリソスフェアの捩れの引き金となり，造構帯の形成を引き起したことに加えて，比較的明瞭な地質年代境界の原因となる力学的理論的根拠である (Storetvedt, 2003 参照).

* 真の極移動（true polar wander）：大陸と極とはいずれも移動しているが，大陸移動を補正した後に残った地殻全体に対する極の移動を真の極移動という．

100 年以上前，Kreichgauer (1902) は造構帯の形成と地球の回転変化の間の密接な関連を論じ，グローバルレンチテクトニクスは，Kreichgauer とは全く別種の観察を通して同じ結論に達した．このことから，造構帯は 2 つの古地理的環境，すなわち，(1) 当時の古赤道に沿って，もしくは (2) 相当する赤道に大きな角度をもつリフト帯の内部のいずれかで，慣性が原動力となって形成された剪断帯として発達したといえる．例えば，アカディア・ヘルシニア・アルプスの褶曲帯が次第に南へ移動したということは当時の古赤道の移動と調和的であり，カテゴリーの (1) に当たる．他方，オスロ (Oslo) リフトとウラル帯は古生代の比較的後期の赤道にほぼ垂直な方位で発達したのに対し，ライン (Rhine) グラーベンやブレス

(Bress) グラーベンのような構造はアルプス期の赤道 (地中海地域に沿っていた．以下を参照) に垂直なリフト盆地として形成された．この単純な慣性原理は，テチス帯のとくにその北岸が，なぜアルプス期の強い変形に加えてヘルシニア造構運動のセグメントを示すのかを説明できる．捩れの力は赤道帯に沿って最も強く作用するので，この造構強度の違いは，ヘルシニア期の赤道がテチス盆地主要部とアルプス期の赤道の少し北にあったという事実によって容易に説明がつく．

インフラカンブリア期には回転速度が比較的速かったために，地球は当時の赤道に対して垂直に近い方位で大規模なリフト構造が発達する傾向にあった (**図 1**)．例えば，グレンビル帯 (北米)，パンアフリカ帯，東アフリカ / 紅海リフトシステムのような大規模な造構構造が，原生代〜古生代前期の赤道から分離した大規模な裂け目の例である．また，ペルシャ湾地域の主要な構造線 (その中の初生的な南北方向，以下を参照) は同じリフト化の過程で形成された可能性が高く，この構造線はインフラカンブリア期の地域的な塩類シーケンスを沈殿させた高濃度マントル塩水の噴出通路となった．ペルシャ湾を横断する地質断面 (結晶質基盤を被覆するホルムズ塩類シーケンスを含む) を**図 2** に示す．塩のプラグはペルシャ湾に極めて広く分布し，多くの地域的なダイヤピル状の島々は厚いインフラカンブリア期の塩類層の絞り出しと再可動化によって形成されたものである．これらの細長い塩類ドームは明らかに先カンブリア基盤中の再活動化した造構的不連続を利用した (例えば，Edgell, 1991; Nasir et al., 2008).

Ala (1974) によると，インフラカンブリア期の塩類は白亜紀後期に動き始めたが，深部のインフラカンブリア期複合体から地表レベルへ岩石を運んだペルシャ湾表層ドームの大部分は，明らかに始新世後期〜漸新世前期と中新世のものである．実際，これらの結果は地球規模の重要な造構マグマパルスを表わしている．そのような観察から，イランのすべての大規模な始新世〜漸新世と中新世の塩類層は，1) 下位の厚いインフラカンブリア期の塩類層からのダイヤピル状の絞り出し，2) 地球深部から排出された高濃度の塩水から沈殿した層のいずれかで最も容易に説明がつくように思われる ; メカニズムがどうであれ，上方へ向かっての排出は，明らかに，上部マントル起源の超臨界的な含水流体の浮力及び溶解力と相まった地球の動力造構パルスが作用した結果である．超臨界水が (その極めて低い密度により) 結晶質の地殻を通って上方へ移動して固い岩石を泥に分解する能力は，多くのイランの塩類盆地内で単調な泥岩が発達することを説明できる．絞り出しモデルに関連し，Schléder and Urai (2006) は始新世〜漸新世の岩塩中のミロナイト化した剪断帯を研究し，絞り出された中央イランの始新世〜漸新世盆地における変形と再結晶の過程を記載した．さらに，Jackson et al. (1990) 及び Talbot and Aftabi (2004) のような研究者は，中央イランのすべての塩類盆地は同じ 2 つの塩類シーケンス，すなわち比較的純粋な始新世上部〜漸新世下部の堆積物とより変化に富み不純な中新世のシーケンスを含んでいるということを強調した．

地球の脱ガスとそれに関連する内部質量の再配分の結果である大規模な地質力学的イベントは，自然に惑星の回転特性を変え，それによって緯度に応じたリソスフェアの捩れ変形を引き起す．地球全体が不安定となるそのようなイベントの間，当時の赤道帯はとくに造構的な変形を蒙りやすく，アルプス期のクライマックスではとくにそれが激しかった．当時 (白亜紀後期〜始新世)，深海が地球史で初めて常在するようになり，その時までに揮発性成分に富む上部マントルの集積 (アセノスフェア) が比較的進んだ段階に達したことが考えられる．これらの理由で，白亜紀末までに地球はそれ以前よりさらに造構的に不安定となり，アルプス期の激変への道が整ったと結論できる (Storetvedt, 2003)．このようにして，慣性を原動力とした惑星回転の変化を引き金とし，コリオリ効果に規制されたリソスフェアの原地性の捩れが地球規模の造構変動を招いた．この過程で，古南半球は反時計回りの捩れを，他方，北半球の古リソスフェアの表層は時計回りの捩れを蒙り，全体として古赤道帯に沿った西向きの横ずれ圧縮変形が生じた (**図 3** 参照)．これは，最も激しいアルプス期の造構変形が，古い先カンブリア期の冷却収縮転位—それに沿って縁海性のテチス水路が長期にわたって発達してきた—を

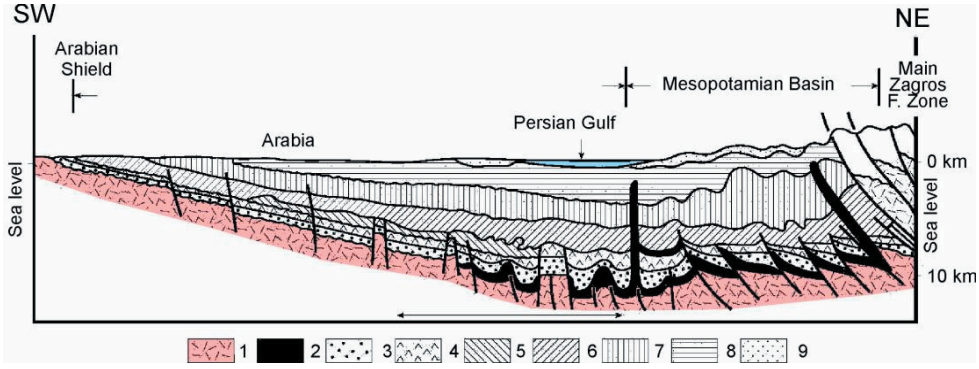


図 2 アラビア東部からイラン西部までのペルシャ湾地向斜の地質断面を示す．先カンブリアの結晶質基盤を覆っている浮力のあるホルムズ塩類シリーズが明らかに上位の顕生代堆積物中に注入している．多くの場合，ホルムズ塩類コアは表層ではダイアピル構造で露出し，おそらくペルシャ湾〜イラン地域におけるすべての大規模な中生代〜新生代の塩類層の主要な供給源である．凡例は 1，先カンブリアの基盤 ; 2，インフラカンブリアの塩類 ; 3 〜 9，それぞれ，古生代前〜中期，ペルム紀，三畳紀，ジュラ紀，白亜紀，第三紀及び第四紀の堆積物．図は Beydoun (1998) が編集したものにもとづく．

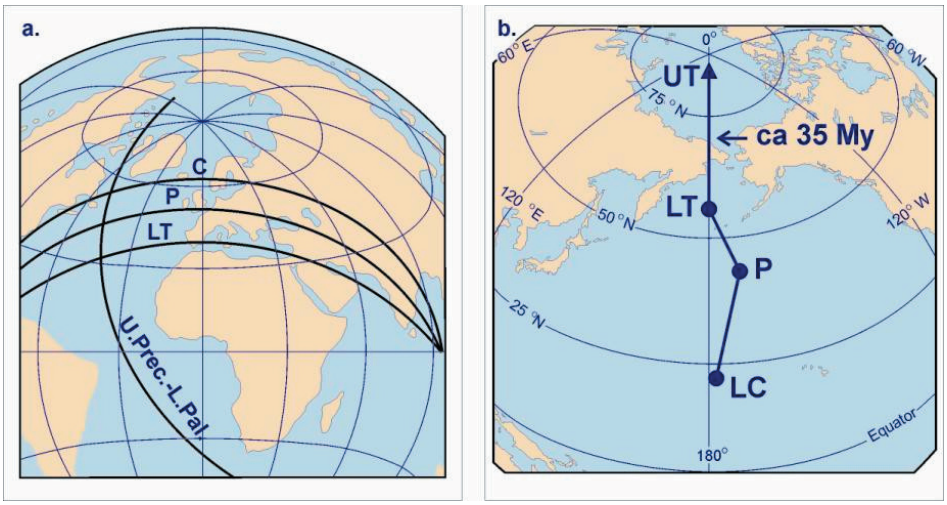


図 3 (a) 先カンブリア後期からアルプス期までの地球体の空間変化を示す．相対的な赤道が時たま変化することにより規定され，古気候と古地磁気を組み合わせた証拠に基礎を置いている．(b) 古地磁気学的証拠にもとづく古地理極の位置で表現した古生代中期以後の地球の時代を追った空間変化．記号は LC，石炭紀前期；P，ペルム紀；LT，第三紀前期；UT，第三紀後期

再活性化させたことを意味する．高圧 / 低温の青色片岩変成作用が白亜紀後期～第三紀前期の時期に集中し，とくにアルプス・ヒマラヤ帯に発達するという事実 (Ernst, 1972 による総括を参照) は，レンチテクトニクシステムが適切であることを明白に物語る．

中東はアルプス期の古赤道帯の内部に位置したので，慣性を引き金とした比較的強い変形に対して傷つきやすかった．中東の大部分は古南半球に位置したので，少なくとも紅海・ペルシャ湾地域は一定の反時計回りの造構的スウィングの影響を受けた．これはおそらく紅海リフトとペルシャ湾の顕著な構造性リニアメントがなぜ主東アフリカリフトシステムに対して全体的に 25°前後の反時計回りの方向を示すのかという動力造構的な理由である (主東アフリカリフトシステムの方が高緯度にあったので，アルプス期クライマックスの間，反時計回りの捩れの力の影響を受けることが少なかった)．以下に議論されるように，イランとトルコも含む中東を横断する観測点の GPS 速度 (Reilinger et al., 2006) は，アルプス期の反時計回りの造構的捩れがまだ作用していることを明白に示している．

テチス海が存続した間，地球は何度も真の極移動イベントを経験し，そのすべては十分確立された地質時代の境界に対応している (Storetvedt, 2003 参照)．テチス海の西ヨーロッパ分枝では相対的な赤道の位置が変化する度に著しい環境変化が生じた．例えば，インフラカンブリア期の中東の亜極地環境は次第に低緯度方向へ移り，古生代後期～第三紀前期には亜熱帯から熱帯になった (**図 3** 参照)．この図と十分調和するのは，最近の Muttoni et al. (2009) によるイラン北部・西カラコルム・パキスタンのペルム紀のラテライト風化断面の古地磁気学的研究である．彼らは“安定的な低伏角の古地磁気成分は，基本的には塊状・細粒・均質なフェリクリート * 相の中に隔離された化学起源の赤鉄鉱によって保持された．これらのラテライトは，温暖湿潤な気候条件のもとでの激しい風化過程が特徴である古赤道に当たる緯度で作られた“と報告した．そのような観察事実は，上に見たようなかなり安定的ではあるが活動的なグローバルシステムによく適合する．漂移する大陸片という推論に過ぎない主張 (以下を参照) は整然とした動力造構システムをあいまいにするゲテモノに過ぎない．**図 1** と合わせて見ると，中東の古緯度のゆっくりした変化―インフラカンブリア期の高緯度亜極地環境から古生代後期～第三紀前期の熱帯環境へ―が注目される．この地球の空間方位のゆっくりした変化によりアルプス・ヒマラヤ帯はアルプス期にとくに捩れ造構過程を受けやすかった．テチス海の発達に関して我々は地球力学的，造構的，環境的，古気候学的問題を併せて大いに論じ，不確かなプレートテクトニクス理論に頼ることなしに，それらに対して容易かつ単純な説明を与えた．

* フェリクリート (ferricrete): SiO_2，Al_2O_3，Fe_2O_3 を種々の割合で含む地表に分布する硬い土壌層．

プレートテクトニクスが強要したテチス海の消滅；再解釈された事実の多様性

事態の現状

大スケールで経度方向に伸びた比較的幅の狭い縁海性で局地性の強い水路というテチス海の伝統的な見方は，1960 年代後半におけるプレートテクトニクス革命で押しつけられた大陸の再配置によって大きく覆された．例えば，すべての大陸地殻の集合体と仮定されたパンゲアは北のローレンシアと南のゴンドワナに分離され，先中生代のテチス海は東に広がった外洋性の湾のような形になった；長期にわたる地域性の強い水路という見方は古いとみなされ，必然性のないものとして放置された．こうして，現在では，かつての大洋性のパレオテチス海はペルム紀～三畳紀 (シンメリア *) のユーラシアの古海岸 (現在のイラン北部を含む) に想定された海溝に沿うサブダクションにより完全に失われたものと広く容認されている．この想定されたサブダクションの原動力は仮定的なゴンドワナの北縁から大陸片がリフテフィングにより分離し，(その間の海が) 北方へ拡大したことにあるとされている．パレオテチス海の議論で重要な要素は，疑いもなくテチス海北縁に沿ったペルム紀後期のオフィオライト・メランジの点在である．これは種々の海成堆積物を伴う蛇紋

岩化した上部マントルの苦鉄質～超苦鉄質岩石の混在したものからなり，今日ではパレオテチス海が閉じる最後の時にオブダクトした大洋地殻の残存物と考えられている．しかしながら，上で触れたような別のグローバルシステムでは，テチス海北縁に沿う古生代後期のオフィオライトの産出は古赤道に伴う岩層である；新しい解釈では，これらの苦鉄質～超苦鉄質岩石の一部は固体状態の上部マントル起源で，火砕物・石灰岩・チャートに伴っている．上部マントル物質は，全体的には横ずれ圧縮性の古赤道に整列した褶曲帯の横ずれ引張セグメント内に注入された．したがって，オフィオライトが産出する理由として大陸片の漂移と衝突を仮定する必要はない．

*シンメリア (Cimmeria): リフト化によりゴンドワナからシンメリア・プレート（図４の紫色の部分）が分離したことで特徴づけられる地質時代．300-270m.y. とされ，ほぼペルム紀に相当．

通俗的なプレートテクトニクスに汚染されたストーリーでは，パレオテチス海が閉じる一方でネオテチス海が拡大するとされている．いくつかの考えがあるが (最近の要約は Muttoni et al., 2009 を参照)，この新しい拡大フェーズの間，大洋性テチス海の南部から分離した先カンブリア後期と古生代の地殻ブロック (仮定的なゴンドワナの一部) の大きいが比較的幅の狭い大陸片が北へ移動し，最終的には三畳紀にユーラシアと衝突・合体した．しかしながら，テチスの曲線状オフィオライト帯の複雑性のために，初生的な‘シンメリアのスーパーテレーン’は現在のトルコ・イラン・アフガニスタン・チベット・東南アジア (一部) の重要な部分を作るマイクロブロックのモザイクに分解したと考えられている (例えば Desmons, 1982 参照)．**図４**は仮定されたネオテチス (リッジ) の漂移モデルを簡略化して示している．

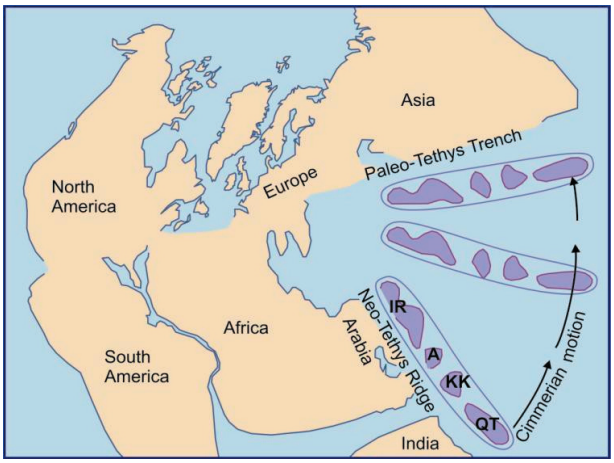


図４　Van der Voo (1993), Scotese (2001) のような研究者が支持する思弁的なプレートテクトニクスが描いたペルム紀～三畳紀の大陸の配列を示す．東方に開いたとされる大洋性のテチス海の中で拡大とサブダクションが進行する．大陸片は南 (ゴンドワナ) の縁辺から分離して徐々に北へ移動し，三畳紀に最終的にユーラシアと衝突する前に細かく分裂すると推測されている．記号は，IR，北西及び中央イラン；KK，カラコルム，パキスタン；QT，Quintang (チベット)．Muttoni et al. (2009) を簡略化．

プレートテクトニクスを基礎とした古地理モデルにもとづくと，タイミング，大陸ブロックのリフティング・分離・衝突の研究は様々な提案になっている (レビューとしては Gaetani et al., 2003; Stampfli et al., 2002 を参照)．多数の研究プロジェクトと数百の論文が，テチス海縁辺部の古地磁気学的・堆積学的・造構発達的な様相の研究，すなわち，北縁及び南縁のプラットフォームがどのようにして想定された深海性テチスの疑わしい開口と閉鎖に応答したかを解明するために捧げられてきた．単一のテチス海盆という初期の考えから，Metcalf (1996 and 1998) によるパレオテチス，メソテチス，ネオテチスという３つのテチス海盆が提案されるに至った．しかしながら，長年の研究努力にもかかわらず，満足のいく科学的結論は明らかに存在しない．ただし，植物相の問題だけは不確かなプレートテクトニクス理論が当たり前と考えている．現在の状況をレビューする中で，Dickins (1994) はプレートテクトニクスが強いた提案にはほとんど或いは全く地質学的根拠がないことに気付いた．彼は，最近の数 10 年間，先中生代の大陸の基本的形状は基本的前提を何ら批判的に検証することなしに，主として細部の修正のみで受け入れられてきたと主張した．

テチス研究の最近の流れは，有名な心理学理論である確証バイアス (Confirmation Bias) *1 に強く支配されてきたように見える．換言すると，科学的な‘knit-picking’(Kuhn, 1962) *2 とその場限りの理論の修復の際限ない流れによって，早急な解決の見通しは立っていないといえる．ユーラシアを東西に横断している古生代中期・バリスカン・アルプスの褶曲帯は時代とともに南へ移動したが，現在では大陸衝突の産物—真偽のほどは分からないが，山脈の褶曲と隆起の両方をもたらした—とみなされていて，それがテチス海問題の多様性をもたらしている．種々の漂移シナリオでは大小の大陸塊が長い距離を北方に向かって移動し，様々な段階でヨーロッパとアジアに衝突しながら中国から西ヨーロッパまでを含むユーラシア陸塊に付加した．アルプス期の大変動が進む過程で，インドは白亜紀前期にオーストラリア・南極から分裂したと考えられている．すべての重要な観察事実をはるかに単純な造構的枠組みに適合させることができ，洗練されたプレートテクトニクスが押しつけたその場限りの対策をおそらく不要にするという可能性が見逃されてきた．

*1 確証バイアス (Confirmation Bias): 社会心理学用語．個人の先入観に基づいて他者を観察し，自分に都合のいい情報だけを集めて，それにより自己の先入観を補強するという心理．

*2 knit-picking: ‘髪から knit (シラミの卵) を除去する’ことから‘つまらない細部にこだわること’，あるいは‘あら探し’の意味．

インド：グローバルテクトニクスにおける重要な要素

最近の見方では，インドは白亜紀と第三紀の境界 (約 6,500 万年前) 辺りでアジアと衝突する前の中生代後期

に数 1,000km も北方へ漂移した島大陸であった．古地磁気学が，その間一定の反時計回りの回転を伴うこの大スケールの漂移が行なわれたということに必要な証拠を提供してきたということがしばしば本当だと思われてきた．**図 5** は通俗的な漂移モデルを模式的に示したものである．しかしながら，古地磁気場の 2 極構造は，例えば北西インドのデカントラップによって示されるように，造構上の解釈に対しては不確かな基礎しか提供しない．亜大陸が北方へ大規模に移動したと仮定する代わりに，半島が原位置で造構性の回転をした (時計回りに約 130°) というもう 1 つの考えがユーラシアの古地磁気基準枠に適合する (Storetvedt, 1990, 1997 and 2003)．同様に，ヨーロッパとアフリカの間の古地磁気の不一致は，扇形の大洋性テチス海に頼ることなしに，2 つの陸塊が原位置で穏やかに相対的回転をすることで容易に説明できる．(上で議論した) 地球回転の変化に規制された (PT とは) 相いれない可動的システムに変えることによって，一群の事実の観察結果の真の意味もまた変化するのである．

もう 1 つの古地磁気解釈によると，インドの初生的な方位は今日のそれとは著しく異なり，南インドは現在の東パキスタン地域に位置した．白亜紀末に向かってインドは造構的には不安定な位置にあった：1) 亜大陸は当時の古赤道地域内に位置し，最大の捩れ / 慣性的影響を受けた (コリオリ効果に支配された)，2) その北部境界はおそらくテチス海盆と断層で接していた，3) インドはインド洋中央部の大規模な南北方向の剪断帯の北端に位置していた．そして，白亜紀のアルプス変動のクライマックスが近づくにつれて惑星加速による一定の力を与えられ，インドブロックは造構的に不安定化した．当時のイベリアでは状況が異なっていた．南はジブラルタル・アゾレス断裂帯に，北はピレネー北部剪断帯に接し，イベリアは造構的に顕著なこれら 2 つの断層帯の間から絞り出され，白亜紀後期に大規模な回転をした (Storetvedt et al., 1990, 1999 参照)．このように，どちらもアルプス期の古赤道帯の内部に位置したインドとイベリアの造構史は，大規模な造構応力という点で明らかに密接に結びついていた．事実，テチス水路はインドの北から地中海地域まで古赤道帯の中にあり (**図 3** 参照)，それ故，内部が捩れ変形しやすかった．古地磁気関連の文献は，中央イランの微小大陸ブロックについて示しているように (Soffel et al., 1996)，アルプス・ヒマラヤ地域内の微小ブロックの回転例を多数提示している．

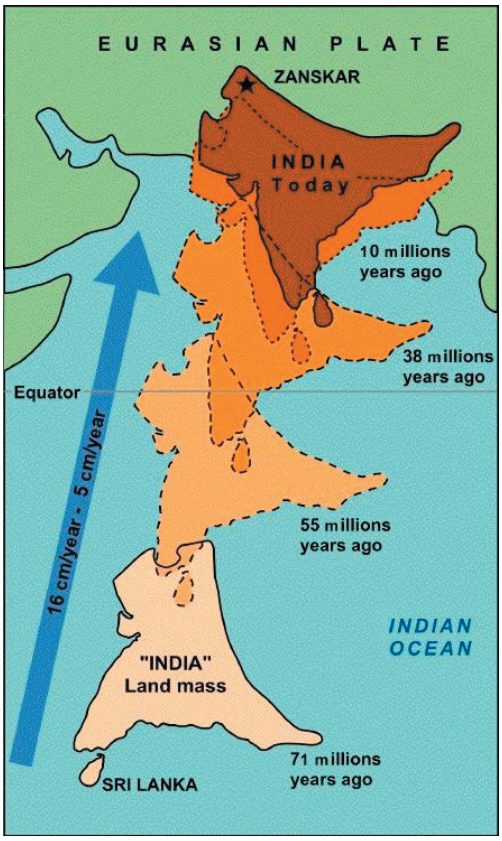


図 5 白亜紀と第三紀の境界頃にアジア大陸と衝突するとされている極めて通俗的なインド亜大陸の北方への移動 (白亜紀後期～第三紀前期) を示す．このモデルは，しかしながら，事実との矛盾が多い．www.usgs.org から簡略化．

提案されたインドの大規模な漂移がないとすれば，インドの陸上動物相における局地性の欠如を説明することができるだろう (Chatterjee and Hotton, 1986 とその中の参考文献)．この問題に関して, Chatterjee (1992) は “中生代の間のインドの古位置とその移動経路は従来のプレートテクトニクスでは謎のままである” と書いている．大多数の復元は，ゴンドワナからそれ自身を分離したインド半島と，1 億年以上にもわたってアジア本土との衝突に向かって北へ漂移した島大陸を示している．しかしながら，インドの白亜紀の陸上生物相中に局地性が欠けていることは島大陸仮説と明らかに矛盾する．反対に，これらの化石はローレンシア及びアフリカのそれと著しい類縁性を示し，インド主部がこれらの陸塊と地続きであったことを示唆している．言い換えると，古生物学的証拠はもう 1 つの古地磁気解である白亜紀と第三紀の境界頃に応力がインド陸塊を原位置回転させたとする考えに一致する．インドブロックの回転の初期段階で，インドブロックの北側に接するテチス水路の海岸沿いの横ずれ引張条件が上部マントルのカンラン岩を蛇紋岩化したと思われる．変質し浮力を得たこれらの固体の超苦鉄質岩類は必然的に深部断層に沿って，密度と静水圧を原動力としたダイヤピル状の流れに従い，時には種々の組成のマグマと共に表層の盆地に侵入した．これらの岩石組合せはアルプス・ヒマラヤ / チベット帯に沿って点在するオフィオライトを形成した．もう 1 つの理論によれば，一連のデカン溶岩はインドがテチス海盆から北へ向かって分離する初期時階からの年代を示す (Storetvedt, 1990, 1997 and 2003).

その他の地球物理学的及び造構的様相

仮定されたインドの原位置での回転は当然ながらかなりの造構運動を復活させ，その境界帯と基底に沿った剪断運動を引き起した．影響を受けた岩石の断裂空間が広がり，それによって下方から流体が浸透しやすくなった．さらに，オフィオライトが定置し，初生的な境界帯に沿って地殻の大洋化が進行した．結果としての地震学的効果

は，可動的なブロックの境界地域の速度低下として現れ，それは造構的に影響を受けることが少なかった高速度地域を分断して，浅部から 200km の深さにあるとされるさらに重要な低速度帯にまで及んだ．このような推論に従うと，回転したインドのリソスフェアの幅広い地域は (造構性断裂の発達で) より低い地震波速度を示すべきであり，他方，比較的早い速度をもつ中心部は可動的なユニットの‘底’に向かって先細りになっただろう．そのような予想は観察事実と一致する．

Kennett and Widiyantoro (1999) はこの地域の P 波トモグラフィーの研究で，予想された形状に見掛け上よく一致するいろいろな深度レベルでの上部マントルの速度イメージを得た．彼らによって得られた相対的速度分布によると，かなり大きな引き伸ばされた高速度の中心部が深度 100km では存在するが，250km ではほとんど見られない．インド北部ではクラトン内部のより大きな地震波速度が下方に向かって狭まり，規模の小さな少数の中心に分かれる．さらに，インド北部の下では，高速度部が約 250km の深度で 2 つの直交する枝を形成し，それぞれがほぼ南北と東西の方向になることが注目される．深部のこの直交する構造方向は，始生代後期に脆性化した地球外層に刻印されたと推定される先アルプス期の地球規模のほぼ直交する断裂パターンのそれに対応する (Storetvedt 2003 及び Storetvedt and Longhinos, 2012 の**図 3** を参照)．

インドクラトンを取り囲む低速度の‘首輪’は，それ故，推定される造構回転によって生じたリソスフェアの圧砕帯と見られる．この動きは，下部地殻のデラミネーション，アイソスタティックな沈降，盆地の形成を加速するとともに，増大した流体によるエクロジャイト化を促進したであろう．それ故，インドクラトンを取り巻く大洋性の湾である現在のベンガル湾とアラビア海は，元は大インド造構ユニットの一部であった．推測では，2 つの大洋地域は造構性の回転が止むと間もなく，おそらく始新世前期に形成が始まった．これは，一連の地球物理学的・地質学的事実によって証明された予言である (Storetvedt, 2003, p. 267-279 参照)．例えば，曲線状のオーエン (Owen) 断裂帯 (OFZ) は，大インドの時計回りの回転の最も顕著な西の造構境界—左横ずれ剪断帯を作り出したと推定される—を表していると思われる．しかし，アラビアの東海岸に沿った，地殻は薄いが準大陸性盆地であるオーエン盆地 (Whitmarsh, 1979 参照) もまた，この変形イベントに参加した明確な痕跡を留めている．

周辺の大規模な時計回りの回転と地殻のかなりの部分の大洋化に続いて，インドクラトンは現在の相対的位置関係でアジアと再び結合した．回転は明らかにインドの推定された時計回りの動きと矛盾しない多くの造構地理的特徴を残した．例えば，北西アラビア海では，その北部セグメントがオーエン・マレー (Owen-Murray) 海嶺 / 断裂帯と結びついて著しく東にスウィングし，曲線状で地震の多い極めて活動的な断裂帯を形成している．インドの北では，大陸性の造構地理的特徴が亜大陸を取り囲む首飾りを形成している (**図 6**)：地震活動度の高い剪断帯が時計回りでパキスタン東部から大規模な東西方向のヒマラヤ・チベット走向移動断層群の幅広い帯に沿って続き，ついには (チベット東部で) 鋭く SE-SSE 方向に曲がる造構性リニアメントの束になり，推定された時計回りの回転とほぼ調和する造構パターンを確定している．インドが回転する間に形成されたリソスフェアを深部まで切る断裂は，中新世後期の浮力のあるマントル流体の上昇とそれに伴う山脈翼部に沿うチベット高原の隆起にとって極めて重要であったと考えられる (Storetvedt, 2003)．ヒマラヤ・チベット地域における多数の GPS 速度についての研究 (Taylor and Yin, 2009 のよる編集を参照，一般的なパターンを**図 6** に示す) によって示されたように，アルプス変動のクライマックスの間に生じた回転性造構運動は明らかにまだユーラシアに対して作用している．さらに，マーストリヒチアン～暁新生に生じたインドの大規模な回転を考慮に入れると，顕著な広域断層帯を横断する著しいモホオフセットが発見されるものと期待される．それはちょうど，ピレネー北部断裂帯 (Daigniers, 1982) のような顕著な地殻の不連続を横断して観察されるようなものである．事実，チベット高原の最近の地震学的研究で，Yue et al. (2012) は崑崙山脈の北縁下で 20km のマントルオフセットと，金沙江 (Jinsha River) 断裂帯を横断する 10km のオフセットを発見した．このことは，異なる厚さをもった地殻断面が並列していることを意味する．

テチス海のヒマラヤセクターが古生代後期～第三紀の堆積物のほぼ完全な連続体からなり，アラビア湾地域 (図 2) に似た長期にわたる地向斜の発達を示しているということは一般に受け入れられている．幅が 100km にも及ぶ堆積盆地は強く褶曲し，いくつかの断層で仕切られた造構単元が覆瓦状になったり区切られたりしている (例えば，Steck et al., 1993; Dezes, 1999)．Dewey and Bird (1970) や Dewey and Burke (1973) によると，広域的

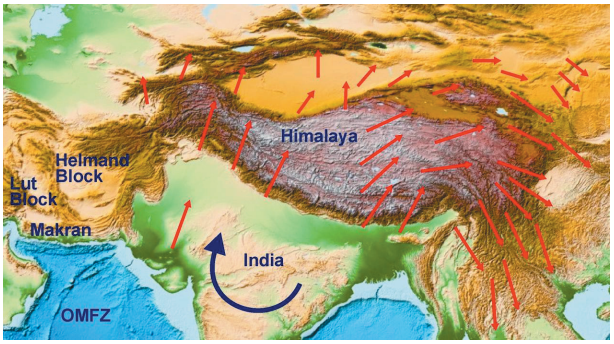


図 6 ヒマラヤ～インド北部地域の彩色起伏図 (noa_world_topo_bathymetric_lg.jpg. による) に GPS 観測地点の速度パターン (Zhang et al., 2004; Taylor and Yin, 2009 の編集結果にもとづく) を重ねた図．GPS 速度パターンが，西パキスタンと北東インド～ミャンマー西部の曲線的造構帯とともに，どのように大インドの大規模な時計回りの回転に適合しているかに注目．主として白亜紀と第三紀の境界頃に生じたこの大陸の回転は，ヘルマンと中央～東イランを反時計回りの回転に引きずり込んで重要な造構効果を及ぼしたと見られる．詳しい議論は本文を参照．

なオフィオライトはかつてのテチスの海洋地殻がオブダクトしたものと解釈されている．後者は，インダス縫合線はサブダクション帯の名残りで，それに沿ってテチスの大洋地殻が消滅し，オブダクトしたオフィオライト複合体が残されたとする．しかしながら，その場合には想定された海溝とそれに伴うオフィオライト帯はヒマラヤ山脈の南翼に位置しなければならない．インダス縫合線が山脈の北に位置するという事実は，サブダクションモデルにとって問題であり，その認識を脅かすものである (Crawford, 1974).

白亜紀後期の海成堆積物に挟在されたオフィオライト物質と巨大な外来ブロックを伴うスラストを含むインダス縫合線は，Gansser (1964 and 1974) や Le Fort (1975) により，盆地内部に絞り出された地質体，つまりマントルの深部に伸びる寿命の短い断裂帯が開口した後で深部に存在した物質が注入したもの (Gansser, 1966) と解釈されている．この解釈はインドの造構性回転モデルと矛盾しない；回転の初期段階で横ずれ引張条件が延性的な上部マントルの超苦鉄質岩類を造構的に上方へ絞り出すための通路を開き，それは時にマグマを伴って最後は表層の盆地に達した．さらに，インダス縫合線の北には，北のものほど古い３本の中生代と古生代のオフィオライト帯が描かれている (Chan and Pan, 1984; Tingdong et al., 1986)．どのような地球物理学的理論もそのような頻発する現象を説明できなければならない．アジアに対して次第に地殻片を付加しながら想定されたゴンドワナの北岸に沿って大洋が開口と閉鎖 (古生代からアルプス変動時まで) を繰り返したというのは，明らかにあまりにもわざとらしく，ありそうには思えない．レンチテクトニクスではもっと簡単な説明をする；オフィオライトの産出が時代とともに南へ移るということは，オフィオライトの注入を伴った地域的な横ずれ引張性の剪断が生じやすかった当時の古赤道が次第に移動することと関連がある．

レンチテクトニクスによると，アルプス期にはテチス水路は全体的に横ずれ圧縮帯に転じた．古北半球は適度な時計回りの回転を受けたのに対し，古南半球は反時計回りに同じ程度の適度な動きをした (以下参照)．現実の古赤道は NW-SE 方向でインド中央部を横断していたが，古半球間の慣性に規制された実際の造構境界は，断層で規制されたテチス盆地に向かって明らかに北へ移動した．慣性による全地球的な捩れに加えて，インドの回転はヒマラヤ・チベットのテクトニクスに特別強い力を及ぼした．テチス全体としては，厚い地殻をもった北部メガブロック (ユーラシア) が全体として薄い地殻をもった南部ブロックより大きな慣性を有していた．長く伸びた水路は分裂し，いくつかの南に凸の弧状の枝に変形した．ユーラシアテチス海の伸長方向に沿ってこれらの弧の半径は東ほど大きくなっているように見え，それらのうち最大のインドネシア弧は，かなりの距離，南へ押し出された．言い換えると，推定された E-W 方向に走るベニオフ型の変位の初生的な方向はアルプス期に強くゆがめられたようである．古北半球がより大きな慣性エネルギーを持っていたために，ヒマラヤとインドネシアの弧が南に凸の圧縮された (スラストした) 前線セグメントになった理由が推察できる．したがって，Jade et al. (2004) が定めたインドを固定した枠組みでの GPS にもとづく速度ベクトルはインドとチベット南部の間で著しい正の弧に収斂している．

オマーン縁辺とマクラーンフロント

地震活動が活発なオーエン・マレー断裂帯 (OMFZ) の北分枝はパキスタン東部のより複雑で地震活動が極めて活発な帯に接続する寸前で著しく東へ曲がっている．どちらの造構分枝も大インドの推測された時計回りの回転と調和的な凸面を有している．インド洋北部における推測された暁新世前期の造構再編成の間，現在のアラビア海の初生的リソスフェアの岩体 (大インドの一部) は造構的に圧砕され，効果的な流体によって促進された地殻下のエクロジャイト化に関連する地殻の大洋化を容易にした (Storetvedt, 2003)．インドの大回転の北西造構境界に当たる OMFZ について見ると，その運動のセンスは明らかに左横ずれであったろう (**図 7** 参照)．このような事態の推移のもとでは，オマーン沖の幅が 250 ～ 400km のオマーン盆地は第三紀前期の剪断性盆地として形成され，マシーラ (Masirah) 島 (オマーン南東沿岸)

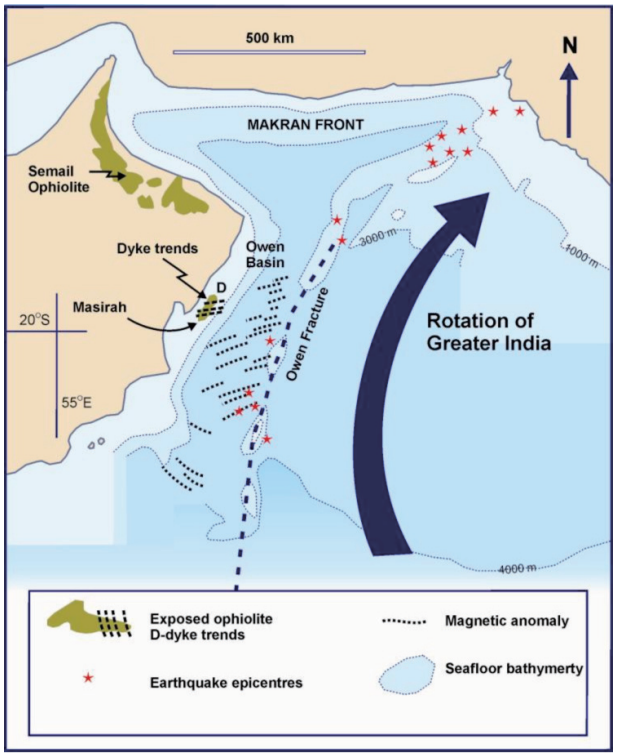


図 7 曲線的で地震活動が活発なオーエン・マレー断裂帯 (OMFZ) を示すアラビア海北西部の地図．白亜紀最末期～暁新世前期の大インドの大規模な時計回りの回転から生じた OMFZ は大規模な左横ずれの剪断帯と見られる．弱い線状の磁気異常で証明される陸側の (オーエン) 盆地の造構粒子はその結果であり，オーエン断裂に沿った左横ずれの剪断性の動きと一致する．交差する岩脈複合体を伴う海岸のマシーラオフィオライト複合体は，明らかに同じ剪断作用が働いた時期に形成された．対照的に，オマーン北海岸のはるかに大きなセマイルオフィオライトはアルプス期の剪断環境の中で横ずれ引張条件を獲得した基本的断裂 (これは，マントル物質の注入通路を用意した) の垂直的なセットの中で定置した．詳しい議論は本文を参照．図は Moseley and Abbots (1979) にもとづく．

のオフィオライトメランジの定置に密接に伴った可能性があると思われる．地球物理学的研究から，Whitmarsh (1979) は，オーエン断裂帯もオーエン盆地も地殻の厚さは中程度 (モホの深度は 15 ～ 20km) で，隣接する大陸縁の形成に関係しているらしいと結論した．レンチテクトニクス理論が到達した通り，アラビア海が初生的な大陸環境から薄化したものとすると，この地域は暁新世に沈降したという歴史がなければならない．OMFZ における深海掘削データはこの推測に調和的であるようにみえる (Storetvedt, 2003, p. 269-272 参照).

別なところで概略述べたように (Storetvedt, 2003 and 2010b)，線状の海洋の磁気異常は連続的な地磁気極の逆転とは矛盾する．しかし，それらが基本的に捩れ変形の産物であり，薄くて機械的に弱い大洋地殻における鉱物学的変質と関係したものであるという強力な証拠が蓄積されてきた．それ故，海洋の磁気異常は明らかに地球磁場全体による誘導と組み合わされた帯磁率のコントラストが原因である．このことは，これらの異常が実際には下にある地殻の剪断をうけた粒子を反映したものであることを意味する．オーエン盆地のように力学的に比較的強い準大陸地域では，そのような異常はあまり強くは発現しない (振幅が小さい) ことが予測され，これは実際の観察と一致する (Whitmarsh, 1979)．オマーン北東沖に予測される剪断帯の内部では，**図 7** に示された磁気方向で特定される斜めの造構性粒子が形成されたようである．したがって，問題は，マシーラ島のオフィオライト複合体もインド洋の回転によって顕在化した剪断過程の同じ段階で形成されたものかどうかということである．

マシーラオフィオライトは主として多量の蛇紋岩化したカンラン岩・キュームレイトガブロ・岩床状岩脈・枕状溶岩からなり，石灰岩を挟在している (Abbotts, 1978; Moseley and Abbotts, 1979)．複合岩体は走向が NNE で幅が 5 km の垂直のメランジによって鋭く断ち切られている．このメランジは上記のすべての岩相を含む長さ 2 km までのブロックからなる大角礫岩で，そのマトリックス中にはほぼ垂直の NNE 方向の剪断面が発達している．Moseley and Abbotts (1979) は“メランジと擾乱されていないオフィオライトの接合部はほぼ垂直で，しばしば接合部に平行な NNE 方向のフォリエーションが見られる幅広い剪断帯 (オーエン断裂帯の一般的な方向に一致) を形成している”と主張している．オフィオライトの定置機構に関する議論で彼らは，それが NNE 方向のほぼ垂直の深部断層に沿って大陸縁へダイヤピル状にアップスラストするという考えに傾いている．水が存在する場合，マントルカンラン岩は蛇紋岩化しやすく，とくに高角度断層帯の横ずれ圧縮性セグメントでは，変形した固体状態のダイヤピル状物質として浮力により上昇する．レンチテクトニクスの環境では，剪断粒子に沿った局地的な横ずれ引張条件が容易に生まれ，それに沿って岩脈が繰り返し貫入することになる．事実，後から定置した岩床状岩脈複合体は ENE 方向が卓越している．つまり，マシーラ岩脈複合体はオーエン盆地の弱い線状磁気異常に平行で (**図 7**)，広域的な NNE 方向の断裂システムを切っている．

オマーン東部のマシーラオフィオライトがおそらく白亜紀最末期～暁新世最初期のインドの大回転に伴ったのに対し，世界で最大のオフィオライト岩体であるオマーン北部のセマイル (Semail) オフィオライトは，いくらか早期のおそらくアルプス造構変動の開始時に，古南半球の反時計回りの捩れの産物として定置したように思われる．セマイル複合岩体は，白亜紀後期の過程で，堆積シーケンスの間に大規模なナップとして絞り出されたと記述されている (Glennie et al., 1974)．層序学的研究は，セマイル複合岩体が下位のマントルとは物理的接触を欠いた根無しスラブであることを示唆している (例えば，Gealey,1977; Searle et al., 1980)．オフィオライトを覆う擾乱されていないマーストリヒチアンの堆積物が証明しているように，同岩体の定置後の擾乱は最小だった．この状況は，ずっと北で向き合い，マーストリヒチアンに向かって造構的に活発となったザグロス衝上前線とは際立って対照的である．しかしながら，マシーラとセマイルのオフィオライトは異なった造構環境の中で発達した．2 つの複合体はほぼ直交し，それぞれ NNE と WNW の一般走向方向を有しているので，著者らはそれが古いほぼ直交する平行な断裂のネットワークが異なった時期に再活動したものとみている (Storetvedt, 2003 参照)．オマーンがアルプス期に捩れ変形が最大となる古赤道帯の中にあり (**図 3** 参照)，地域的な応力環境が一組みの基本的断裂からほぼ直角をなすセットへと一時的に変化したという事実は十分ありうると考えられる．

弧状のマクラーン変形帯はパキスタン南部の海岸に沿って伸び，イラン南東のホルムズ海峡地域で終わっている．付加ウェッジはそこで断層に接し，ザグロス褶曲衝上帯へと移行している (例えば，Molinaro et al., 2005; Regard et al., 2010)．内陸へ 100km 前後延びているマクラーン複合体は，同時代のヒマラヤ収束フロントの西方延長と見なされてきた (Burgh et al., 2013)．当の研究者によると，内陸のマクラーン (イラン南東部) は白亜紀後期～暁新世に定置したオフィオライトを含み，セマイルオフィオライト複合体と同時代の上部マントル物質がアップスラストしたものである．内陸のマクラーンでは浅海成の上部白亜系石灰岩が，火成岩と白亜系海成堆積物を含む白亜紀のメランジを覆っている (Dolati, 2010)．したがって，マクラーンウェッジは白亜紀後期に時間とともに海側に集積しつつ作られた．マクラーンの外側は，堆積物が圧縮性褶曲衝上断層と覆瓦構造を示す中新世～現世の前線ウェッジである (**図 8**)．つまり，マクラーン複合体はザグロス複合体と極めて似たものになる．幅広い大陸縁辺を作りあげている一群の捩れた堆積物はほとんど水平な結晶質基盤の上に載っているように見える．Grando and Mcclay (2007) によると，ウェッジの未固結の部分は，正断層運動と延性流動によって隆起し引き伸ばされた．大規模な頁岩のダイアピルと泥火山はすべて流体とガスの圧力を受けやすいウェッジの外

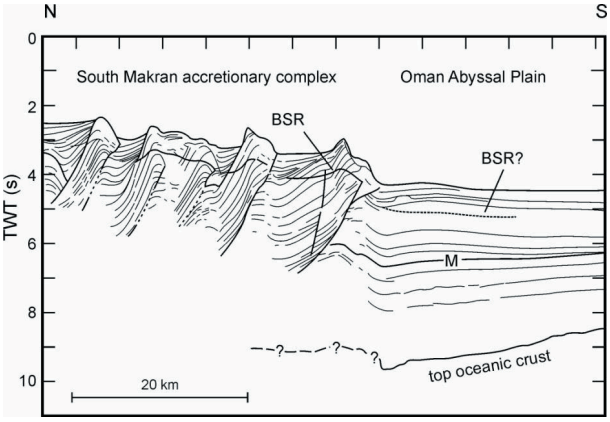


図 8 パキスタン南部のマクラーン圧縮フロントを横断する南北方向のマルチチャンネル地震探査プロファイルにもとづく線画．位置は図 7 を参照．BSR は地域的なガスハイドレート帯の基底とみなされる底部に似た反射面を示す．結晶質地殻の上面は極めて平坦に見え，地殻深部を切っている不連続面またはスラブは存在しないので，サブダクションは否定される．von Rad et al. (2000) を簡略化．

側に沿って分布する．これは我々に，造構圧力が下位の結晶質地殻に断裂を生じさせ，マントルからの流体に通路を開いたと思わせる．このように，上昇する超臨界性水溶液の作用 (を想定すること) により，大きな浮力をもった腐食性の物質，それに伴う内部の隆起するウェッジ，頁岩のダイヤピル，泥火山は容易に説明がつく．

マクラーンサブダクション帯はしばしば (その存在が) 事実のようにみなされているが，地震活動は深部で陸側に傾斜する大洋スラブの存在を支持しない (White and Klitgord, 1976; White, 1982 参照). したがって，地震活動が少ないマクラーン複合体はサブダクション・シナリオでは解決することが難しい．しかし，下位の大陸性上部マントルからの地震シグナルが欠如しているにもかかわらず，マクラーンの下でなお活動的なサブダクションが行なわれていると信じている研究者もいる (Maggi et al., 2000)．しかしながら，海底擬似反射面 * は厚いガスと水和物に富んだ層準が比較的浅所に存在することを示している．つまり，活動的な広域的断層に沿って漏出することで発見されるメタン及び硫化水素に富む流体の上方への流れを明らかに密封しているのである (von Rad et al., 2000)．重要な発見は，第三紀後期の造構性ウェッジが，第三紀後期の前線複合体と斜交しているソンネ (Sonne) 走向移動断層によって切られていることである．その北方延長はペルシャ湾とザグロス主衝上断層の方向に一致し，その海側への連続はマレー海嶺 / 断裂と交差している (Kukowski et al., 2000)．我々はおそらく再び，アルプス期の古赤道帯内部での比較的強い捩れ変形に関連する基本的断裂の造構的再活動の問題に向き合うことになるだろう．

* 海底擬似反射面 (bottom simulating reflector): 反射法地震探査の記録で海底面の起伏にほぼ平行し，しばしば地層の構造を切って連続している反射面．メタンハイドレートの相転移などを反映している．

イランセクター

イランは明らかに中東で最も複雑で多様化した造構体である．多くの研究 (少しだけ取り上げると，例えば Le Pichon 1968; McKenzie, 1970; Dewey et al., 1973 and 1986; Sengör, 1984) は，南大西洋における海洋底拡大がアフリカ (想定されたゴンドワナの一部) の北東方向への移動を促し，最後にはネオテチス盆地に干渉してこれを造構的に消滅させるという結果をもたらしたということを当然と考えている．ネオテチス海が最終的に閉じたのはイラン及び小アジアとの衝突時で，それは関連する山脈の地形的及び構造的複雑性を強めたと考えられている．しかしながら，プレートテクトニクスの枠内で新旧の事実を適合させることを目的として進められた微小大陸の動き，島弧の収束，大陸と大陸の衝突等を含むモデルの提示という流れはずっと昔に一種の背理法 (reductio ad absurdum)* で終わっている．**図 9** はイランの (**a**) 地形学図，(**b**) 簡略化した地質図である．この国の多くの部分に見られる多数の円形もしくは楕円形の塩類盆地，オフィオライト複合体のセグメントに囲まれた大陸性ブロック，弧状の山脈は，最も非現実的なプレートテクトニク的推理をもってしても調和させることがむずかしい．40 年続いたプレートテクトニクスに牽引された細心の研究の後でさえ，信頼に足る解決ははるかか遠いように見える．プレートテクトニクスは，常に複雑でその場限りの手の込んだ推測が自然の真の因果関係を解明することを不可能にしているということを思い起こすべきである．

* 背理法 (reductio ad absurdum =reduction to absurdity): 帰謬法，ユニコーン証明 (俗) などともいう．「ユニコーンが存在するとしたら～」などとあり得ない仮定をし，続けてその夢想から導き出される現実との矛盾を指摘し，最終的に「ユニコーンは初めから存在しなかった」と結論付ける．つまり，最初の仮定が間違っている証明法のこと．

南はオマーン湾から北はトルコの国境まで延びる NW-SE 方向のザグロス造構帯の西部地域は褶曲した陸棚地域を形成し，その北東に接する区域はオフィオライト・放散虫岩複合体を含む著しい覆瓦構造を示す (Berberian, 1995)．陸棚地域の褶曲は，おそらく最初は中新世後期～鮮新世前期に行なわれた (Stöcklin, 1968; Kassler, 1973) であろうが，現在は仮説的なネオテチス海がアラビアとユーラシアの間で収束して閉じたことに関連づけられている．ザグロス山脈は激しい地震活動を伴っているが，国全体での震源深度の大部分は浅～中深度の地殻内イベントである (Engdahl, 1998 and 2006)．ザグロス地域の上部マントルでの地震活動は他の研究者には認められていないが，地殻下の地震を示唆した研究者もいる (例えば Moores and Twiss, 1995)．ただし，公表された上部マントルでの震源深度は，実際には上部地殻で生じているイベントの位置を誤ったことから生まれたと断言されている (例えば，Maggi et al., 2000; Engdahl et al., 2006)．そういうわけで，ザグロス・サブダクション帯は地震学的定義では存在しないと考えられる．

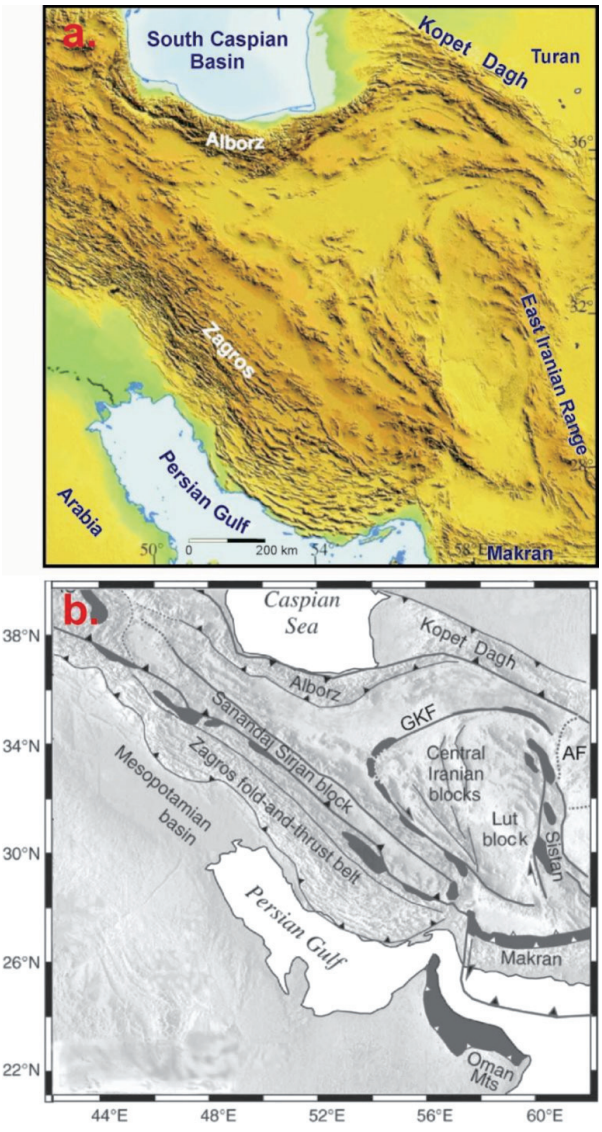


図 9 (a) カスピ南部・イラン・ペルシャ湾地域の地形的特徴を示す図 (地形は NASA Shuttle Rader Topography Mission で得られた SRTM30 数値標高モデル．角度 30 秒のグリッドのモザイク)．南で幅が広く僅かに曲がったザグロス山脈と北のずっと幅が狭く大きく曲がったアルボルツ・コペットダグ山脈が，山脈に取り巻かれた中央イラン微小大陸ブロックの集合体を表している円～楕円形のモザイク状凹地とどのように接しているかに注目．(b) 簡略化した構造図．略号は，AF，アフガニスタン；GKF，大カビール（Great Kavir）断層．

先カンブリア期後期以後のザグロスの堆積体は，合計の厚さが 10 ～ 14km に達すると見積られるが，それは種々の造構イベントの間に積み重なったものである．しかし，記録された不整合と相変化が満足に説明されたとは言い難い．例えば，ザグロスの圧縮史は，無堆積もしくは浅海成炭酸塩岩の集積時期を挟む白亜紀後期～第三紀初期と中新 - 鮮新世という 2 つの主要な造構砕屑性ウェッジを示している (Homke et al., 2004, 2009; Saura et al., 2011; Verges et al., 2011 参照)．これらの造構イベントは地球史におけるよく知られた大変動に対応しているが，プレートテクトニクスは惑星のパルス的挙動の他のすべての面について，その背後にある地球規模の力学的仕組みに対して信ずるに足る説明を与えることはできなかった．ほとんどの研究者は差し迫った問題に率直に立ち向かわなかった．しかしながら，Kashfi (1992) はいくつかの事実が支配的な理論とは矛盾すると考えた．

一連の矛盾した観察結果の中から Kashufi は以下の疑問を提示した．1) イランに点在するオフィオライト / 方散虫岩は，主張されている縫合帯とは一致しない．2) 中生代～新生代の火山岩類は想定されているザグロス・サブダクション帯に接する地域からは知られていない．3) いくつかの消滅した第三紀後期～第四紀の火山は整列せず，無秩序に散在する (断言された縫合帯から離れて)．4) ザグロス褶曲・衝上帯の多くの基盤の特徴はその下に大陸起源の火成岩・変成岩複合体が伏在していることを示唆している．5) 大陸基盤岩類の露頭はイランの多くの地域に露出している．6) 地震の大部分は地殻内で発生し，推定されるプレートの境界に関しては何ら徴候がない．例えば，現在の地震活動は褶曲した陸棚地域に集中していて，ザグロス北東の主張されているサブダクション帯と地表の交線より後ろではない．Kashfi は，仮説的なネオテチス海の閉鎖とはかかわりのない単純な圧縮によって形成されたザグロスを支持する証拠を提示した．同じ考え方で，Brunn (1976) はイランが常にユーラシアの不可欠な一部であったと主張した．Amidi et al. (1984) は，プレートテクトニクスの期待に対しては困惑する観察事実を並べたロングリストに加えて，イラン中央の始新世火山岩類を岩石学的及び地球化学的に検討し，それらが想定されたサブダクションに関連する火山活動とはまったく一致しないことを見出した．

外側の覆瓦した褶曲衝上帯は，前面の複合体から，北方は古生代～中生代後期の変成岩・火成岩・堆積岩類を含む幅が 150 ～ 200km の衝上複合体 (例えば，Alavi, 1994 and 2007) であるサナンダージュ・シールジャーン帯 (Sanandaj-Sirjan Zone) を画する右横ずれの主ザグロス断層に接している．正面の褶曲衝上帯は内側及び外側のオフィオライト帯—これは現在，白亜紀後期のネオテチス・サブダクションの早期段階に形成されたと考えられている (例えば，Shafaii Moghadam et al., 2010)—を含んでいる．しかしながら，中生代後期のオフィオライトは，しばしば反対されているにもかかわらず想定されたサブダクション帯とはいかなる自然な結びつきもなく，弧状の巨大スケールの断層帯に沿って，また，ルート (Lut)・タバス (Tabas)・ヤズド (Yazd) の各ブロックからなる中央の大陸性ブロックを取り囲んで，中央～東イランに広く産する (Stöcklin, 1968)．例えば，ルートブロックの北の境界である 600 km 近い長さのグレートカビール・ドルネ (Great Kavir-Dorneh) 断層はオフィオライト岩体の露出が極めて限られている．ルートブロックの西部境界に沿うナーイーン (Nain)・バーフト (Baft)・その他の産地の超苦鉄質岩の組み合わせは，密着した岩体を形成せず (Desmons, 1982)，マクラーン地域から北方に枝分かれしているシスターン (Sistan) オフィオライト複合体も不連続なセグメントとして産し，中央イラン (Central Iranian) ブロックの北の境界に沿ったサブゼバール (Sabzevar) オフィオライト帯とはつなが

らない．実際，不規則で不連続なオフィオライト複合体を豊富に含む円形の大陸ブロックの存在はプレートテクトニクスが強要した解釈では解決がつかない問題を提出する．他方，もし我々がイラン地域を穏やかなアルプス期のレンチテクトニクスの影響を受けた場所と考えるなら，相対的な回転と不連続なオフィオライトシーケンス内に縁辺スラスト帯・塩類盆地・大陸内ブロックのようなものが観察されるということは十分予測できることである．なぜなら，オフィオライトは相対的に回転する南北の古リソスフェア (時計回りに捩れる古北半球と反時計回りのセンスで動く古南半球) の覆いの間に絞り出されたと考えられるからである (以下参照).

イラン北部の曲線的なアルボルズ (Alborz) 山脈は，想定されたパレオテチス海の閉鎖に反応して三畳紀後期頃，ユーラシアの南縁と結合したゴンドワナ起源の大陸片に始まったと考えられている (Brunet et al., 2007)．しかし，広域変形の主要な時階は中新世かそれより後で，おそらく紅海で想定された海洋底拡大を原動力とした仮定的なアラビアとユーラシアの収束 (Zanchi et al., 2006) に関係している．褶曲及び断層軸はアルボルズ西部では NW-SE 方向，山脈の東部では NE-SW 方向に伸び，構造的・地震学的証拠から変形は山脈に平行な衝上断層と左横ずれの走向移動断層に沿って分離したことが分かる (Jackson et al. 2002)．世間一般の考えとは異なり，Allen et al. (2003) は右ずれで ESE-WNW 方向の走向移動断層を伴う地殻短縮を報告し，Ritz et al. (2006) は“アルボルズ中央の内部は，更新世後期に，横ずれ圧縮場ではなく WNW-ESE 方向の伸張軸をもつ活動的な横ずれ引張場の影響を受けた”と主張した．目を引くような地域的様相はどれも問題が多い．例えば，最近 Motavalli-Anbaran et al. (2011) は，未解決の一次オーダーの地域的問題のショートリストを以下のように示した．“重要な疑問はリソスフェアの構造だけでなく，カスピ盆地南部の極端に厚い被覆堆積物の下の地殻構造，カスピ海でコーカサスの起伏が消える理由，アルボルズ山脈とその地殻の起源に関するものである”．支配的な左横ずれ走向移動の動きと，北側だけでなく南側の造構境界に沿った陸方向に面した衝上断層帯の存在から判断して，イランは内部変形に加えて全体的な西向きの横ずれ圧縮を受けた (おそらく今も) と信じる人が多い．中新世前期以後の中央と東部の微小大陸ブロックの南東境界帯における火山活動 (Boccaletti et al., 1976; Hassanzadeh, 1994) は，イランの内部可動性が若い時階のものであることを支持する．

構造的に複雑な中央〜東部イランは，大規模な断層で隔てられた 4 つの主要な微小大陸ブロックからなる ; このブロック集合体の外側境界は白亜紀後期〜始新世前期の不連続なオフィオライト岩体によって特徴づけられている．岩相層序でいうと，これらのブロックの下部の岩石シーケンスは先カンブリア後期〜古生代の変成岩・火山岩・堆積岩であり，よく発達した厚い中生代の堆積シーケンスに覆われている．Soffel et al. (1996) は，中央〜東部の微小大陸複合体内の 3 地区と微小大陸集積域の西に位置する 1 地区 (ナタンツ：Natanz) から採取した中生代の堆積物と火山岩の特徴的な化石磁化方位を研究した．結果は極めてはっきりしている．ナタンツ地域での結論は隣接するユーラシア (ツラン地域) のそれと調和的であり，他方，中央ブロックからの化石磁化ベクトルは，イランの内部が三畳紀後にかなりの回転 (合計で 90°以上) をしたことを示唆している．古地磁気の観察と一致して，中央〜東イランとアフガンブロックの間の右ずれ剪断は，非地震性のルートブロックに接する N-S 走向の断層に載っており (Walker and Jackson, 2004)，この地域の走向移動断層の方向性を研究している Wellman (1966) も，まったく非地震性のルートブロックが反時計回りに動いたという結論に至った．造構的な捩れの力は中央〜東イラン地域の全体的な反時計回りの回転を促進し，この動きはおそらくアルボルズ・コペットダグ (Kopet Dagh) 山脈東部の顕著な北向きの曲がりにも関連している (**図 9a**, **b** 参照).

中央イラン大陸ブロック集合体とは別の回転を受け入れると，盆地の形成を伴ったより小規模な横ずれ引張環境がこれらのブロックの外縁に沿って必然的に発達したであろう．イラン東部ではやや大きなオフィオライトメランジ帯が白亜紀後期と始新世の間の時代に位置付けられ (例えば，Vialon et al., 1972; Stöcklin, 1974)，種々のテクトナイト化された苦鉄質〜超苦鉄質の岩石を含む (中央イランの) デシャール (Dehshir) オフィオライト岩体は白亜紀後期の石灰岩シーケンスに覆われていると報告されている (Shafaii Moghadam et al., 2010)．これらの観察事実は，大規模な変形がアルプス期クライマックス (白亜紀後期〜第三紀前期の間) に当てはまるに違いないというレンチテクトニクス理論と調和的である．さらに，ここの好適な造構条件のもとで，延性的な上部マントルカンラン岩は圧力増加 (温度はほぼ 500° C) の環境に置かれ，それは自然に固体状態のカンラン岩質物質を深部断裂を通して造構的に絞り出し，随伴する火山岩類とともに表層の盆地内に定置させる結果となった．しかしながら，想定された剪断を伴う“注入”機構により，これらの縁辺複合体は周辺の岩石とともに，中〜高度の広域変成作用を蒙りやすかった．実際，イラン北東部のサブゼバール (Sabzevar) オフィオライトからは角閃岩相の変成作用が報告され (Tehrani, 1975)，大規模な大理石岩体 (イランオフィオライト複合体と密接に伴っている) は接触変成作用の産物と解釈されてきた (Ricou, 1970 and 1971; Haynes and McQuillan, 1974)．この発達パターンは Brookfield (1977) の主張である“オフィオライトは剛性の台地の間の狭い造構帯に見出され，複雑な高角の水平移動断層運動中に定置した”と一致する．

ザグロス帯を横断するトモグラフィーのプロファイル

北東に傾斜する主ザグロス衝上断層とサナンダージュ・シールジャーン (Sanandaj-Sirjan) 変成帯の下へ潜りこむ地殻スラブの証拠を探して，Shomali et al. (2011) はペルシャ湾から中央イラン微小大陸地域 (CIMC) に至る断

面の遠隔地震トモグラフィー調査を実施した. 彼らは, “イメージでは，主ザグロス衝上断層の位置での深度 100km と 250km の間で南のアラビア楯状地内の P 波速度が約 3% 速いという鮮明なリソスフェア境界を示す．ザグロス衝突帯を横断するリソスフェアの厚さが階段状に厚くなっているということは，(それが) アラビア (南側) とユーラシア (北側) という 2 つの異なるマントル構造を隔てていることを予想させる．明らかになった最も目を引く特徴は北に傾斜するスラブ状の正の速度異常である” と報告している．**図 10** は得られた遠隔地震 P 相のトモグラフィー・インバージョンの結果を示している．

図 10c に示した Shomali et al. の極めて複雑な上部マントル速度モデルは，(当然ながら) サブダクションモデルに関連づけることが試みられた．多くのベニオフ帯のマントル部分は地震活動を伴わないという初期の説をかたくなに支持して，観測された深い非地震性かつ高速度の構造は断ち切られた非地震性スラブの断片に違いないと主張された．しかし，その場限りのさらなる推定を避けるために，海底拡大とサブダクションという 2 つのメカニズムが存在せず，作り話に過ぎないという簡単な理由で，多くの造構フロント / 弧には深部地震活動が伴わないということを率直に言うべき時がやってきたのではなかろうか？いずれにせよ，レンチテクトニクスの枠内では，**図 10a, c** に示された主ザグロス褶曲衝上帯の下の複雑なリソスフェア構造だけでなくモホが深まっていることは，完全に異なった解釈ができることを示唆するものである．

まず，CIMC の下に当たるこのプロファイルの北部断面での低速度上部マントルを検討してみよう．それは南部断面 (アラビア楯状地) の高速度上部マントルとははっきりと異なっている．CIMC は楯状地のようなリソスフェアをほとんど欠いていることに加えて，Shomali et al. が信じている特徴は正常より暖かい上部マントルによって引き起こされたもので，事実に基づく証拠でその主張を支えたのではない．しかしながら，アラビア楯状地の上部マントルの熱的状態がなぜ CIMC のそれと著しく異なっているかを考察することは難しい．CIMC の低速度上部マントルのより妥当な説明は，(上で議論された) ジュラ紀後のこの大陸複合体の大規模な回転に関する古地磁気学的証拠と結びつけられるかもしれない．回転の間の CIMC の機械的ゆがみは，おそらく新しくて不規則な岩石の不連続をバラバラにしただけでなく，(CIMC 地殻と脆性的な上部マントルの) どこにでもある断裂ネットワークの顕著な再活動を自然に引き起した．この変形は当然ながら断裂空間を著しく広げ，それによって増大した流体 / ガスが下のマントルから浸透するための通路となった．揮発性物質の高い含有率に加えて想定される断裂容積の増大は，おそらく CIMC の上部マントルが低速度であること—変形の少ないアラビア楯状地に対して観測されたような負の速度コントラストを創り出すことになったこと—の実際的な理由だろう．中央断面では, 想定されるモホがかなり深くなっている (**図 10a**) ことに加えて，主ザグロス衝上帯の下のリソスフェアが極めて複雑な速度構造を持っている (**図 10c**)．プロファイルのこの部分は，明らかに北に傾斜した構造の幅広いウェッジ（ある程度の異方性をもつ）からなる最も広域的に断裂化したリソスフェアセグメントである．しかしながら，スラスト化した帯の下の数 % のほぼ垂直な P 相の不連続は少なくとも深度 500km に達し，リソスフェアの異方性とすることが難しい高速度と低速度の領域のモザイクからなる．

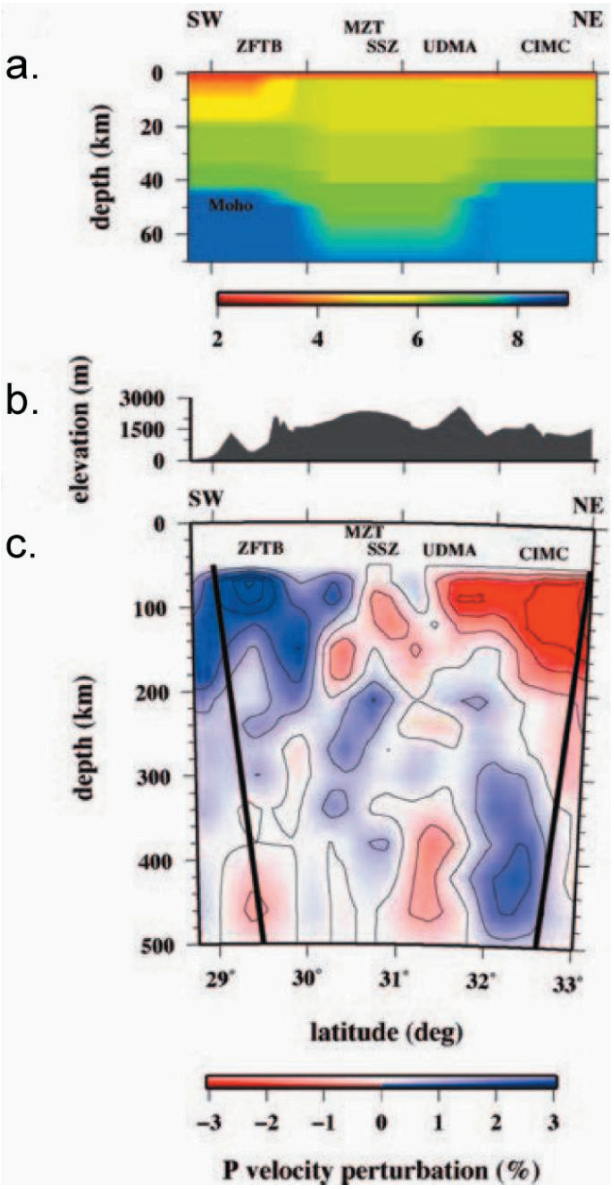


図 10 (a) Shomali et al. (2011) によるザグロスの地殻モデル断面図を示す．(b) プロファイルに沿った標高変化を示す．(c) P 相遠隔トモグラフィーから得られた上部マントルの速度構造を示す．相対的に速度が高い地域と低い地域がそれぞれ青と赤で示されている．斜めの線はインバージョンが最もよく解明された区域の限界を示す．Shomali et al. (2011) による．

最も印象的な特徴は，見掛けでは中央イランの低速度上部マントルの下に潜っている北傾斜のパスに続く北に急傾斜する大きな高速度のかたまりである．深部の地震活動が完全に欠けている中で，これは沈み込んでいるスラブの断片のように見える．もう 1 つの解釈は，高速度のかたまりは，密度の高いエクロジャイト化したかたまり

がリソスフェアから剥がれたもので，重力不安定によりカンラン岩質上部マントルから分離し，より深いところで安定化する途上にあるというものである．マントルのエクロジャイトにはいろいろな起源のものがあり，しばしば高圧下で結晶化することにより作り出されるが，エクロジャイトへの移行は水溶液の存在によって強く促進されるという研究がある．例えば，変成反応が進むためには，温度や圧力よりも水に富む流体がはるかに重要であるように見えるし (Austrheim, 1998)，Leech (2001) はエクロジャイトのかたまりのデラミネーションは実際の変成作用に規制された密度変化とともに，変形の際に得られる水の量に左右されると結論づけた．ザグロス衝上帯のように断裂の発達したリソスフェアでは，ガスと水溶液が豊富に存在しやすく，それ故，エクロジャイトへの効果的な転移や関連する重力的な不安定 (リソスフェア断面の剥離) が生じやすい．エクロジャイトは密度が相対的に高いために，(組成に応じて) 一定の深さまで沈む．しかし，沈んだエクロジャイトのかたまりは熱くなり浮力を得て上昇し，おそらく 1 種の‘ヨーヨーテクトニクス’を作り出す (Anderson, 2005)．これはおそらく，**図 10c** に示された低速度と高速度のかたまりの複雑なモザイクを説明できるだろう．いずれにせよ，急傾斜の内部速度構造をもったほぼ垂直のマントル・スライスからなる主ザグロス衝上帯の下の異常な上部マントル断面はプレートテクトニクス仮説と矛盾する．脱ガス地球モデルは，はるかにしっかりした説明を与えるように思われる．このモデルでは，強く造構変動したリソスフェアに水溶液が浸透し，初生のカンラン岩質上部マントル断片のエクロジャイト化と重力不安定，下部地殻とカンラン岩質層の非変成部分の蛇紋岩化，とくに極めて密度が低いために強い浮力ももった超臨界水 (水溶液) の強い腐食効果といった過程を経ることになる．

ザグロスのプロファイルの中央部に示された厚過ぎると思われる地殻は，異常な (蛇紋岩化された) 上部マントル物質の可能性が最も高いと示唆された．地殻構造の綿密な調査は，そうではなく，最後は北米西部のシェラネバダ山脈での状態 (Wernicke et al., 1996 とその中の参考文献を参照) に至るような一定の薄化であることを明らかにした．Wernicke et al. は，シェラネバダ南部が，主として上部マントルにおける水平方向の密度変化によって支えられた大陸性山脈，すなわち，エアリー型の地殻よりはむしろプラット型のマントルの根によって支えられた山脈の例であると結論づけた．ザグロスのプロファイルに関する議論を締めくくるに当たって，Shomali et al. は最も高い山がその想定される地殻の根より北にあるという事実に当惑した (**図 10b**)．しかしながら，最も高い山の高さは，低速度の中央イランと高速度マントルの大きな‘かたまり’の間で下方へ (急) 傾斜している最も深い地域的な断裂帯を表していると予想される苦鉄質〜超苦鉄質の UDMA 弧に対応している．それ故，この想定されるリソスフェアの深部断裂は，強い浮力が原因でその地域で最も高い山を作る出す超臨界流体に対して効果的な通路として働いているように思われる．Mouthereau et al. (2006) はザグロスの地域的な隆起がなぜ主要な造構的変形が生じたずっと後に生じ，後中新世より前に起こらなかったのか，不思議に思った．脱ガス地球モデルではそのような遅れた隆起には当然の理由があり，古典的なアイソスタシーとプレートテクトニクモデルの文脈ではただ謎である．したがって，中新世後期から後中新世の隆起は，それ以前のテクトニクスの時代とは無関係な地球上のすべての山脈の特徴であり (Ollier and Pain, 2000)，それ以外の地球史とともに新しいグローバルな理論の枠組みの中で考察すべきことである．

先アルプス期のダイナミックな地球

パラダイムが変化するとき

先に我々はプレートテクトニクス (PT) で束縛されたテチス海にとっては不都合な種々の事実と論争をとりあげた．PT が強要した大西洋の閉鎖により，古生代後期のテチス海が，南を仮説的なゴンドワナ大陸集合体，北をローレンシアに接した東に幅の広い大洋性の湾となった．この通俗的な古地理にもとづいて，種々の大陸片とさらに不規則な大陸塊がゴンドワナから分裂して北へ漂移し，最後はユーラシアと融合したということが考えられている．テチス動物相の局地性が長い期間にわたったという証拠は脇に置かれてきた．種々の漂移説 (確立されていない海底拡大とサブダクションの見解を誰もが当然のこととみなした) において，最近の 40 〜 50 年の間，テチス問題は事実の無秩序な混合体とその場限りの理論的複雑さに向かった．現象学的な相互の関連という点からの予測を見出すことは難しい．例えば，イラン地域では三畳紀初期と第三紀初期という 2 段階のテチス海の拡大と閉鎖 (パレオテチス海とネオテチス海) が完全にサブダクションのえじきになった．現在，このような方法でシンメリア初期と主アルプス造構時階は説明されている．しかしながら，推定されたサブダクション帯を地球物理学的証拠から解明することはできず，想定された沈み込んだスラブからの地震活動は明らかに欠如し，元来陸棚堆積物からなる大規模な褶曲衝上帯，一般的な意見に従うとかつての大洋地殻の残骸であるオフィオライトの岩体 (海成堆積物と混在する断片化した塩基性及び超塩基性岩体) は彼らが見出せると期待したところには産しなかった．PT にとって謎で重要なことは，中央イランの大陸ブロックを取り囲む不連続のオフィオライト複合体である．

残念ながら PT のイデオロギーは，地球科学が矛盾する事実の重要さを受け入れることに反対するという予防接種をしてしまった．相当程度に楽観的な無知と制度化された不寛容が明らかに真の地球科学的探究に取って代わった．

我々はユーラシア南部を横断して東西に伸びる比較的狭い縁海性の水路という伝統的なテチス海の概念が，どのように一連の重要な事実を説明するための多くの簡潔でより真実味のある舞台を与えるかをすでに見てきた．例えば，この水路の長期にわたる局地性の強い動物相は永

続的な閉じた古地理を必要とする．これらは PT が押しつける大洋性の内湾モデルが配慮していない，もしくは説明を放棄した (Hsu and Bernoulli, 1978 を参照) 重要な観察事実である．テチス海の中生代前〜中期の長期にわたる比較的静かな堆積史は多様性に富む水深をもった地塁 / 地溝地形 (Trűmpy, 1971) をもたらした断層運動により中断された．しかしながら，褶曲・剪断・衝上などを伴うテチス造構変動の最も重要な段階は，白亜紀後期〜第三紀前期，始新世後期〜漸新世前期，新第三紀にそれぞれ活動のピークをもつアルプス期の現象である．この一連の造構イベント，すなわち長期にわたる比較的静かな堆積盆地から強く褶曲した地殻帯へのテチス地域の変化は，中新世後期〜現世のアルプス - ヒマラヤ山脈の隆起によって最高潮に達し，このことは疑いもなく理論的革命を必要とする．より幅広く展望すると，テチス水路を終わらせた動力造構的仕組みは地球の不規則で間欠的な歴史の終わりを表している．そのパルス状のダイナミックな挙動は地質記録に不連続 (時代境界) を書き込むための刺激であったように思われる (Storetvedt, 2003)．当然，テチス海の発展的な面は惑星の動力造構システムと密接に結ばれている．このエッセーにおいて我々はプレートテクトニクス以前の縁海状のテチス海を再度組み込み，レンチテクトニクスの理論を適用することにより，中東の造構発達の新たな理解に達し，解決しがたいと思われるその場限りの状況を打開する．

中生代の助走

地球の歴史がガス状の原始惑星で始まり，元素の分離によって熱力学的に著しく不安定な内部をもった厚い原始地殻へと移行したということは出発点としては合理的と思われる (Storetvedt, 2011)．結果的には，地質時代を経過する間，連続的な惑星の脱ガスとそれに関連する内部質量の再構成は，地殻と上部マントルを明らかに連続的に変えてきた．その後の，カンラン岩質上部マントル・異常なガスと流体が浸透したアセノスフェア・モホ不連続面・大陸地殻の花崗岩化・薄く塑性的に複雑な大洋地殻の形成を含む現在の地球の構造は，この果てしない過程の暫定的な最終生成物である．上部マントルでの静水圧が徐々に高まったことで，主としてエクロジャイト化と蛇紋岩化による種々の変成反応が生じた．これは地殻と上部マントルの変化で最も決定的な役割を演じたと考えられるプロセスである (Storetvedt, 2003 とその中の参考文献).

最上部マントルで増大した静水圧が臨界レベルに達したとき，マグマポケットとともに揮発性成分に富む不均質なアセノスフェアが徐々に形成され，密度の高いエクロジャイトが発達した．これらの変成反応がさらに進んだ段階で，強く変形した岩塊は，重力を原動力としたデラミネーションと，最終的には中立的な浮力レベルで止まる深部に向かう運動を蒙ってきた (Anderson, 2005)．このような方法で，エクロジャイト化の進行は，初期の厚い汎地球的な大陸型の地殻を (底から上方へ) 次第に薄化させた．地殻がマントルへ徐々に失われたことと，それに関連するより薄い深海地殻のアイソスタティックな沈降は，最終的には白亜紀の間に地球の歴史で初めて広大な大洋性凹地を作り出した．ガス / 液体を原動力とした変成岩の変形は，強くテクトナイト化したリソスフェアの断面で最も効果的に行われた．上述したように, 我々はこれらの原理を，主ザグロス衝上帯の下の上部マントルの P 波速度が不安定な理由を説明するために用いた．

長期にわたる惑星の脱ガスの間，地球の表面には，とくに中生代，初生水が加速度的に蓄積された．しかしながら，それに伴った深海盆の成長は表層水の容積の増大に見合わなかっただけでなく，以前から広がっていた縁海を収容する容量もなかったので，陸域が次第に浸水を蒙った．加えて，引き続く脱ガスとそれに関連する内部質量の再構成が地球の慣性モーメントを周期的に変えたに違いない．これはまた，惑星回転速度の比較的明瞭な変化と真の極移動の断続的なイベントによって表現されたダイナミックな変化を促した．すなわち，惑星の空間的方位を変え，それによる赤道の膨らみをリセットした．これらのダイナミックな変化は，アセノスフェアからの揮発性物質の噴出を含む慣性を原動力とした一連の造構マグマ過程, すなわち平静な状態から力強い表面爆発 (クレーターの形成) へという変化を引き起し，それはさらに著しい気候的・生物的変化を引き起した．ジュラ紀後期から第三紀前期まで，かつての大陸地殻の薄化と塩基性化がそれ以前より急速に進み，深い大洋凹地が現在の地球上での分布に近づいていった．

上部マントルの揮発性物質の圧力が過度に高くなったことは，それに関連する一連の断続的な過程の引き金となった．加速的な大洋化の過程を経験した地殻のこれらの部分—その下には揮発性成分の圧力が最も効果的に増大したアセノスフェアが存在する—は，当然のこととして長期にわたる隆起を蒙り，他方，残りの地表部分 (大陸ブロック) はアセノスフェアからの浮力の影響をほとんど受けなかった．このようにして，発達する大洋地殻の隆起を伴う段階では大陸の低い部分が海進を受けた．大洋アセノスフェア内の揮発性成分の圧力の増加と解放に応じて，発達する大洋地殻は，低い陸地を横断する周期的な海水面変化 (海進と海退) を引き起しつつ，隆起したり沈降したりした．したがって，一連の海退的な海面イベントは深海盆の発達に関係している．先カンブリア期より後の概略的な地球規模の海面変化曲線を**図 11a** に，他方，過去 2500 万年間 (新第三紀) の詳細な海面変動を**図 11b** に示す．

地球史の特徴的なパルス状の経過，すなわち地質時代境界を区切るマグマ・造構造・生物・環境などの過程のよく知られた激変—は，慣性にもとづくレンチテクトニクス理論によって容易に説明がつく．しかし，地球回転を伴うグローバルなテクトニクスが全く新しいアイデアではないことで思い出すのは，造構帯が地球回転と密接に結びついていると述べたオーストラリアの地質学者である Damian Kreichgauer (1902) である．彼は慣性効果

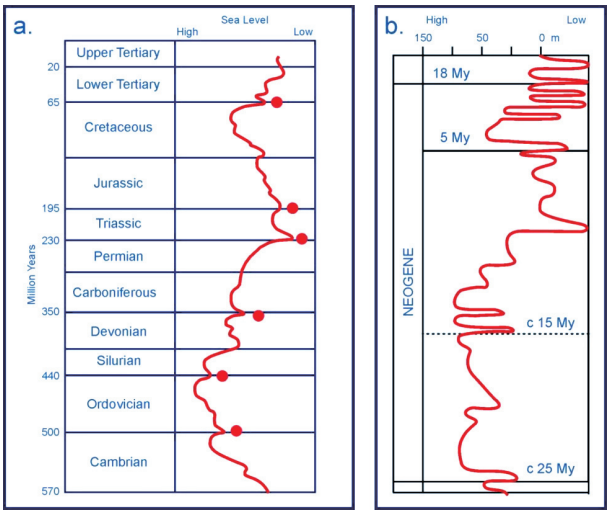


図 11 (a) 先カンブリア以降の概略的な海水準曲線を示す．赤丸は，その後で鋭い低海水準 (海退) となる主要な 6 回の海水減少事件．生物の大異変が海水準の比較的鋭い低下の時期に対応することに注目．レンチテクトニク理論によると，地球海水面の低下は大洋地殻の沈降イベントを反映し，地殻が断続的にマントルへ失われた結果である．この大洋化の過程では惑星はリソスフェアの捩れイベントの始まりと，生物危機という結果を招く地表での毒性ガスの噴出を断続的に引き起すアセノスフェアの圧力を増大させる．(b) 第三紀後期 (新第三紀) の地球海水面変動についてのエクソン (Exxon) の提案を示す．(a) は Hallam (1992) にもとづき，(b) は Haq et al. (1987) を簡略化したもの．

により褶曲帯は 2 つの異なる古地理的位置，すなわち当時の赤道か，それにほぼ直交する古子午線に沿ったリフト帯のどちらかで発達したと主張した．Kreichgauer は岩石中の古気候の証拠にもとづいて，古地磁気データにもとづく現代の極移動曲線に極めてよく似た極移動経路を描いた (**図 3b** 参照)．このようにして古赤道と主要な造構帯の組み合わせが，古生代中期からアルプス期にかけて，ヨーロッパを横断して南へ移動したことを容易に説明することができる．例えば，ヨーロッパ中央〜南部の大陸内で東西に伸びるペルム紀〜三畳紀 (シンメリア早期) の造構帯—これはさらに延びて南部カスピ地域も横断している（岩石の証拠は Eftekharnezhad and Behroozi, 1991 参照）—はレンチテクトニクシステムに極めてよく適合する．想定されたパレオテチス海のシンメリア期の閉鎖はイラン北部の古生代後期〜三畳紀のテクトニクスを説明するにはまったく必要ない．

古生代前〜中期の間，大陸は広く水浸しになり，その間，相対的に浅いユーラシアテチスとパラテチスの海は分布が最も広がったと思われる (Boucot and Johnson, 1973 参照)．ペルム紀後期〜三畳紀前期の揮発性成分の放出とそれに関連する生物の大異変の後，中生代前期から新たなアセノスフェア起源のガスと流体の集積が始まった．中生代の大洋マントル最上部における静水圧の増大は，発達途上の深海地殻を隆起させる力となり，三畳紀とジュラ紀，ジュラ紀と白亜紀の境界付近での海退イベントによってのみ中断された長期にわたる海進を引き起した．セノマニアン (1 億年ほど前) で頂点に達した中生代の海進は，アルプス造構変動がやってくる兆しであった (**図 11a**)．セノマニアンの高い海水準の後には大規模な海退が続いた．海退に関連した大洋の深化は，デラミネートした地殻が内部へ向かう運動とともに，アセノスフェアに影響を及ぼした水圧と一緒になって惑星の回転をある程度加速させ，造構マグマ・気候・生物に関わる一連の結果を招来した．例えば，大規模なデカンの洪水溶岩区とメキシコのチクシュルブ (Chixculub) 構造は，地球を横断する多数の他のクレーターとマグマ性のイベント (Storetvedt, 2003; Storetvedt and Longhinos, 2012 参照) とともに，白亜紀のダイナミックな大変動の産物である．とりわけ，その時期 (白亜紀後期〜第三紀前期) に，地球は，まとめてアルプス期クライマックスとされる一連の強い造構パルスの中に投げ込まれた．

アルプス期の中東のレンチテクトニクス

可動的システム

白亜紀末までに，地球史では最初の広大な深い大洋地域が作り上げられた．一旦厚い汎地球的な地殻が徐々に発達して残りの部分がモザイク状になると，種々の規模の大陸ブロックは薄くて力学的にずっと脆弱な大洋地殻によって取り囲まれた．加えて，脱ガスが関係した地殻の大洋化もまた現在までに流体とガスが浸透したアセノスフェアを作り上げた．言い換えると，白亜紀末までにリソスフェアは地球史におけるそれ以前より造構的にはるかに不安定になった．地質時代の早期には造構活動は大部分が特定の地殻帯の内部に集約された．これらの地域は全体的に横ずれ圧縮的か横ずれ引張的に変形された古赤道に整列した地向斜で構成されたか，さもなければ，当時の古赤道と大きな角度をなす剪断されたリフト帯を形成した．しかし，白亜紀後期までに地球回転の変化に対する地殻とリソスフェアの反応は別のコースを辿った；一定の惑星加速により，グローバルな造構過程のかなりの部分は大陸から弱くて変形しやすい大洋地殻へと移った．この地球規模の造構的変遷で，広くて薄い地殻をもった大洋地域は，地球上で以前には見られなかった新しいタイプのメガスケールの造構帯になった．この慣性が活性化させた構造的隆起は白亜紀後期から第三紀前期にかけて地球に影響を及ぼし，当然ながら中東のテチス海に対しても，イランにおける著しい造構マグマ活動を含む重大な造構的影響を及ぼした．この激変の間，地殻のデラミネーションは，多くの極移動エピソードを引き起しながら，先ず大洋地域で継続して起こり，最も重要なものは始新世と漸新世の境界付近 (3500 万年前頃) で生じた (**図 3b** 参照)．

白亜紀後期に地球の回転が加速されたことにより，緯度に依存するリソスフェアの捩れが生じ，地中海及び中東を通る古赤道帯に沿った西向きの一定程度の引きずりを生み出した (**図 3a**)．北の古リソスフェアの時計回りの捩れとそれに対応する南の古リソスフェアの反時計回りの捩れで構成された力学系 (大陸と大洋のどちらのリソスフェアも含む) がこの地球規模の捩れ過程に参加した．例えば，相対的な緯度に依存した回転は，ヨーロッパとアフリカの間のよく知られた古地磁気偏角の不一致

の原因をうまく説明する (これらの大陸は実際の古赤道の反対側に位置したことに注意). **図 12** はユーラシアとアフリカの相対的な回転を示している．慣性効果は古赤道帯に沿った造構力を生み出し，それはアルプス・ヒマラヤ山脈の新第三紀後期における隆起の構造的基礎となった．相対的な動きの間，アフリカとユーラシアは全体として似たような縁辺速度を経験したに違いない (Storetvedt, 1997)．しかし，それらの瞬間的な回転速度の違いにより，左ずれと右ずれの変位がともに，発達しつつある長い造構地域に沿った個々の断層上に生じた．このレンチシステムのもう一つの自然な結果は，全体的に横ずれ圧縮状態にあったアルプス・ヒマラヤ褶曲帯内の微小大陸ブロック (例えば，イベリア・イタリー・インド・中央イランの微小大陸) の複雑な回転運動となった．さらに，コリオリ効果によって規定されるような緯度に依存した捩れの力により力学的に捩れた大陸塊は，その効果が古赤道帯に向かって増大するような内部変形を蒙った．これは中東のような地域がアルプス期の複雑な造構運動に対してとくに弱かったことを暗示する．

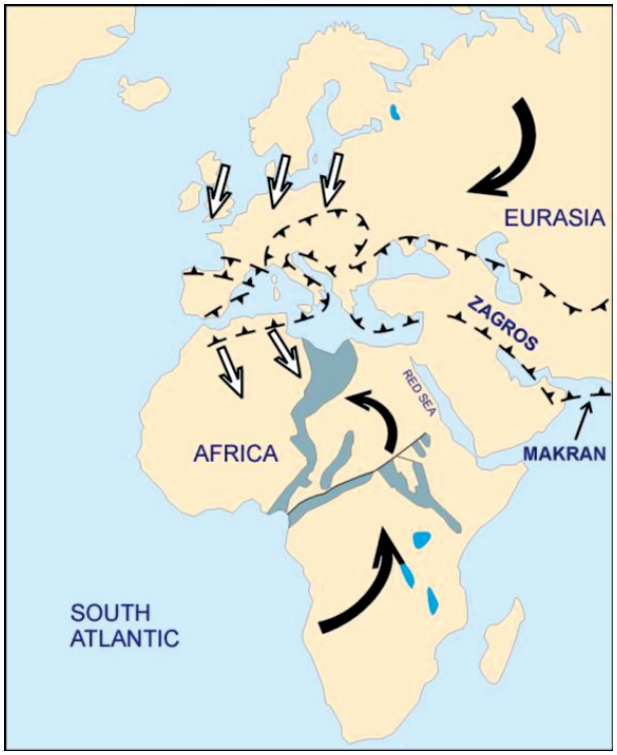


図 12 白亜紀後期～第三紀前期 (アルプス変動のクライマックス) における慣性が引き金となったアフリカとユーラシアの相対的な回転 (太い矢印) を示す図．併せて，介在するテチス帯に対する概略的な造構効果を示している．慣性的な動きは緯度に依存する (古赤道に向かって効果が増大する) ので，アフリカの内部におけるアルプス期の様々な回転を曲率の異なる 2 つの矢印で示している．GPS 速度の研究は，これらの動きが現在もなお進行していることを示唆している (図 13 参照)．基本的にはかつてのテチス水路の軸に追随し，(アフリカとユーラシアに) 挟まれた地殻帯は，アルプス・ヒマラヤ可動帯を表す全体的な横ずれ圧縮帯を構成する．このような力学系の中でアフリカとユーラシアは古リソスフェアが全体として西向きに捩れるセグメントである．2 つのリソスフェアの共通の境界である古赤道が本来のアルプス帯になった．図 13 に見るように，アフリカの反時計回りの回転は中東をも巻き込んだ．ザグロス断層は右ずれの走向移動を行い，他方，ユーラシアの時計回りの動きの影響を受けたカスピ海地域はもっと多様な造構性の構造を得た．2 つの古半球の西向きの捩れは地殻の薄い大洋地域の著しい造構的再活性化と変形をも招き，線状の海底磁気異常の造構鉱物学的基礎を作った (Storetvvedt, 2010b)．地球規模の捩れ過程は，インド洋を横断する巨大剪断帯の分裂とインドの原位置での著しい時計回りの回転を含んだ．緯度に依存したアフリカの回転は，大陸の内部変形を招いた．この過程で，古い断裂ネットワークは再活動し，直交環境における大陸性盆地が形成される要因になった．よく知られた先アルプス期のアフリカとユーラシアの間の古地磁気編角の不一致は，それらの相対的な回転によって引き起こされたもので，図中に白抜きの矢印で示されている．

アルプス期の造構運動のクライマックス

造構的枠組みの中で剪断作用は種々のスケールで生じ，アルプス・ヒマラヤ地域に沿って分布する青色片岩とマグマ起源の岩体が示唆する高圧低温条件はレンチテクトニクスが整える環境と容易に共存できる (Storetvedt, 2003 参照)．盆地の形成を伴う地域的な横ずれ引張の環境がところどころで必然的に発達する．それ故，固体状態の延性的な上部マントル物質は，静水圧の増大により深部断裂を通じて (しばしばマグマを伴って) 容易に上方へ絞り出される．これらのいわゆるオフィオライトの古典的な層序は，超苦鉄質～苦鉄質複合体・堆積岩グループ・変成岩ユニットからなる．褶曲帯に沿った後生的な剪断作用は，しばしばこれらの超苦鉄質岩体を絞り出し，その深い根との連続性を断った現在の不連続的パターンを作った．Lippard et al. (1986) はイランの大部分のオフィオライトが白亜紀後期 (暁新世以前) であることを示唆した．しかしながら，これらの複合体が定置する間，マントルからの流体の供給ルート—それは，アルプス・ヒマラヤ帯に沿った多くの地域において最終的には鉱体として沈殿した金属集合体を運搬した—が開かれたであろう．イラン・パキスタン・アフガニスタンは金属鉱物鉱床に特に富んでいるとみなされている (Kamitani et al., 2012)．さらに，アルプス変形帯における造構剪断環境を考慮すると，藍閃石を含む青色片岩を伴う高圧造構帯が基本的に白亜紀後期～第三紀の変成領域に限定されることは驚くに当たらない．

縁海性のテチス海はアルプス期の造構変動が始まるまで，少なくとも数億年にわたって存在した．しかし，その軸は白亜紀後期～第三紀前期の赤道地域の緯度にして 10°前後北に位置し，当時の横ずれ圧縮変形は少し北へ移った．しかしながら，水路に沿った慣性的変形により，テチスの大円トレンドは多くの小規模な弧に分割され，造構変動を受けた帯に沿ってごく僅かな地殻短縮が生じたように思われる．白亜紀後期までにインド洋の地殻は目立って薄くなり，力学的に弱くなった．このため，古南半球の反時計回りの捩れでインド洋のリソスフェアは大規模な浸透性のある剪断作用を蒙った．すなわち，基本的には初生的な直交断裂システムを再活動させ，曲げ，拡大したのである．結果として，大部分が NNE-SSW 走向の弧状の構造パターンが衛星高度計のデータによく現れている．このリソスフェアの捩れから生じたものは，ラカディブ - チャゴス (Laccadive-Chagos) 海嶺と東経 90 度海嶺の間に位置する顕著な中央インド洋剪断帯で

あり，その北方延長にインドが位置している．インドは北を断層に規制され弱められたテチス海の地殻に接していたことに加えて，来るべきアルプス変動のクライマックスには高い剪断応力下にある古赤道の接合部に位置した．この不安定な状況の中でインド亜大陸は造構的な再回転をしやすかった．広域にわたる古地磁気方位の解析から，(インドの)時計回りの回転は130°前後(Storetvedt, 1990) という数字が得られた．これは種々の地質学的・地球物理学的証拠と一致する結論である (Storetvedt, 2003 と上記の議論を参照).

大インドの大規模な回転は自然に，とくに北西縁に沿った顕著な造構結果をもたらした．例えば，パキスタン東部ではテチス盆地が弧状の造構境界を伴って北方へ鋭く絞り出された．ユーラシアの時計回りの回転，インド洋リソスフェアの反時計回りの捩れによって束縛され，インドの大規模回転によって限界に至った広域的な応力環境により，中東東部 (イラン，パキスタン，アフガニスタン) のテチス盆地は比較的地震活動が弱い凹地に見える卵型の大陸ブロックのやや混沌とした混合体に変わった．これは傾斜の大きな境界断層を通じて注入された大小のオフィオライト岩体によって取り囲まれている．周囲を取り巻く造構帯に沿った新第三紀後期の山地隆起により，現在，大陸ブロックは凹地のように見える．しかしながら，アルプス期の絞り出し過程の結果，パミール (Pamir)・ヘルマン (Helmand)・中央イランのような大陸ブロックは，かなり予測しがたい回転に対して敏感であった．例えば，古地磁気方位の研究 (Soffel et al., 1996) による結論であるが，中央イランは，イランにおける白亜紀後期～始新世の広範な火山活動によって明らかに大規模な反時計回りの回転運動を強いられた．

カスピ地域からトルコにかけての中東西部の造構パターンは，幅においても盆地が整列する地質構造においても極めて大きな規則性を呈している．しかし，全体的な横ずれ圧縮環境の中に多数の局地的な横ずれ引張地域—その内部では上部マントル物質が表層の盆地に注入されオフィオライト複合体を形成している—が形成されていたように見える．しかしながら，後の造構剪断作用の間に，これら表層の複合体は，オマーン北部のオフィオライトについて報告されたもの (Gealey, 1977; Searle et al., 1980) に似て，その深部マントルの根から断ち切られるに至ったように思われる．オマーン北東のセマイルオフィオライト複合体は，広域的な剪断場に対してほぼ垂直にセットされたが，造構剪断を示す粒に沿って配置されたマシーラ複合体よりも明らかにずっと横ずれ引張の条件下にあった．造構体制におけるこの違いはおそらくセマイルオフィオライト岩体がずっと大きいことに理由がある．アルプス期のクライマックスの間，当時の赤道帯内に位置した中東のテチス海は，その縁辺に沿って断層・スラスト・覆瓦などの造構造運動を伴う西向きの捩れを蒙った．後の地球規模の捩れイベントの間，とくに始新世後期～漸新世前期と中新世中～後期に，褶曲し覆瓦した浅海成の堆積物が外側の造構境界に追加的に加わった．

新第三紀の中東

白亜紀後期の海進がピークに達した後，第三紀前期の大部分の間，地球の相対的な海水準は海退傾向になった．しかし，始新世と漸新世の境界あたり (3500 万年前後) では海退フェーズが逆転して海進フェーズが始まり，中新世後期を特徴づける比較的高い海水準に達した．ユースタチックな海面変動のグラフ (**図 11**) から読みとれるように，第三紀後期の全体的な海水準の上昇は多くの明瞭な海退イベントを挟んでいる．上述の議論にもとづくと，地球の回転とそれに関連する地球規模の造構パルスの変化が生じたのであろう．もし我々が古生物時計のデータを額面通りに受け取るなら，第三紀の間の地球 (回転) の全体的な遅れは，おそらく多くの顕著な力学造構パルスに直接伴って繰り返し生じた減速の 1 つである (Storetvedt, 2003)．どんな事情であろうと，極移動が鋭い線を描くイベントは始新世と漸新世の境界付近 (約 3500 万年前) で生じ，その間，地球の形を変えながら相対的な赤道を地中海地域から現在の地理的位置まで変位させた (**図 3b**)．このイベントの間，亜熱帯のヨーロッパでさえ今日に似た気候状況に向かってかなりの冷涼化を経験した．この赤道の膨らみの大きな角度変化は，明らかに回転する地球が 1 種の水力ポンプ機のように作用してアセノスフェア内の静水圧を増大させることに顕著な効果があった．多くの面で 3500 万年前の極移動イベントはアルプス期クライマックスの最終的な発作であり，当時の広範な造構マグマ活動を招いたと見られる．

大陸環境では，始新世～漸新世のダイナミックなイベントは，明らかにエチオピアの洪水溶岩の噴出 (37 ± 1m.y.) の引き金となり，イラン地域ではかなりのマグマ活動が生じた．圧力をかけられた上部マントルの揮発性成分は，例えばロシアのポピガイ (Pppigai) クレーター (35 m.y.) の形成のように表面へ向かう通路を見出した．北米では慣性による (北半球の) 大陸の一定の時計回りのスウィングがその北極と大西洋の縁辺に沿う地域に横ずれ引張条件を作り出した．結果として流体の通路が開き，ホートン・ミスタンティン・ワナピティ湖・モンタグナス・チェサピーク湾のようなガス噴出クレーターができた (Storetvedt and Longhinos, 2012 の図 17 参照)．この時期に生じた多様な地質過程に加えて，イタリアのマシグナノ (Massignano) 層序断面の始新世 / 漸新世の火山灰は，35m.y. と測定された衝撃石英とともに，明瞭な Ir (イリジウム) のピークを含んでいる (Montanari et al., 1993)．35m.y. ほど前の赤道の膨らみの大きな相対的変位は，中東のアセノスフェアの静水圧システムにも明らかに影響を及ぼした．例えば，圧力をかけられた超臨界性水溶液，種々の化学成分を含む高濃度の塩水，種々の金属成分を運搬する軽い炭化水素，種々の化学成分に富むマグマが予想されるように地表へと向かった．始新世のアルカリ火山岩のような岩石 (Amidi et al., 1984) 及び中央イランの厚い塩類盆地 (例えば，Rahimpour-Bonab and Alijani, 2003; Rahimpour-Bonab et al., 2007; Vaziri and Majidifard, 2010) は，始新世後期～漸新世の上部マントルからのダイナミックな注入物として形成さ

れたように思われる．Vaziri and Majidifard (2010) に従うと，岩塩・石膏・赤色マール・火山岩類の組み合わせからなる巨大なダイヤピルを形成しているガルムサール (Garmsar) 塩類構造は始新世〜漸新世のものである．

漸新世の大部分の間，地球全体の海水準は後退的で，Khalili et al. (2007) によると，中央イランは当時，強い造構運動による影響—ここで提示された力学造構システムに一致する観察事実—を受けた．しかし，漸新世後期の初め，海岸線はもう一度低平な陸地に侵入し，中新世前〜中期の広範な海進で頂点に達した (**図 11b**)．しかしながら，中新世の高い海水準は少数の明瞭な海退パルス，とくに約 15 m.y. 年前とその後の約 8 m.y. 年前の 2 つの連続した低海水準によって中断された．これらの海水準イベントは，地殻のマントルへの消失，すなわち地球の回転及び / 又は極移動のイベントを加速させ，リソスフェアの捩れ運動が新たなフェーズを開く造構パルスに点火した要因と結びついているように思われる．これを基礎とすると，テチス海縁辺に沿った早期 (白亜紀後期〜第三紀前期) の造構ウェッジに加えて，中東の外側の中新世堆積覆瓦体の原因を説明することができる．さらに，ダイナミックな地球は，水圧ポンプの能力を活発化させて表層盆地内にダイヤピル構造を形成する．この構造は横ずれ引張環境で発達し，以下のような地質物質の複雑な混合体として出現する．

1) 上部マントルからダイナミックに湧き上がった高濃度塩水のパルス状のサージは表層盆地で沈殿し，化学的組成が時間とともに変化する岩塩その他の塩類 (石膏や硬石膏) の厚い塊状または層状の集積体を形成する．
2) 上向きのサージは，途中で岩泥 (rock mud) を作り出す超臨界的な状態 (固体物質を溶かす能力) にある水溶液を原動力としたものであろう．
3) 大きな浮力をもったダイヤピル状の流れ—水力学的な力を地域的に平穏状態から爆発的状態に変えることができる—の中で，古い岩石の断片は流れに乗って表面へ向かい，
4) 上部マントルで始まった上向きのサージ (ダイヤピル状の流れ) はアセノスフェアのマグマポケットの栓を抜き，地表の火山活動として終わった．

さらに，中新世中期の海水準イベントはコロンビア川玄武岩の始まり (16 ± 1 m.y.) とドイツ南部のよく保全されたリエス (Ries) 及びスタインハイム (Steinheim) クレーターに関連している (ここでは，14.8 ± 0.7 m.y. の爆裂構造と解釈)．マカロネシア (Macaronesia)* の島嶼地域では，中新世前〜中期とそれより若い沿岸成の層準が海面上 400 〜 500m の高さまで隆起し (Mitchell-Thomé, 1976)，新第三紀の火山活動が大西洋で広範に見られる (Storetvedt, 1997 とその中の参考文献を参照)．相対的な赤道が地中海からアフリカ中央部を横断する現在の位置へと動いたとされる 35 m.y. の極移動イベントによってもたらされた気候・地理状況は中新世の間に逆転した．このダイナミックな過程で，ヨーロッパの温度は中新世中期に新たな最高温度に達し (Buchardt, 1978 参照)，地中海東部は再び亜熱帯の緯度に典型的な比較的平坦な古地磁気伏角を示すに至った (Atzemoglou et al., 1994 参照)．言い換えると，古気候と古地磁気の証拠の組み合わせは中新世中期の相対的な赤道がアラビア中央部を横断して明確に北方へ移動したという考えを支持する．赤道の膨らみが戻り中東地域全体をせり出させたと示唆される第三紀後期の地球の空間的な転換は，**図 11b** の海退パルスの時期であったと推定される．地球の回転の変化から生じたアセノスフェアの圧力変化により，惑星体は水力学装置のように働き，マントルの揮発性成分を地表に向かって噴出させた．

* マカロネシア (Macaronesia): 原文では Makaronesia となっている．ヨーロッパ〜アフリカの沖に分布するアゾレス (Azoress)・カナリア (Canary)・ケープヴェルデ (Cape Verde)・マデイラ (Madeira) などの諸島の総称．太平洋のミクロネシア (Micronesia) に対応して名づけられた．

相対的な赤道の膨らみの地質学的効果は，造構性の不整合とマグマ性の層準として識別される．これは，古赤道地域で目立つが，例えばシナイ半島の新第三紀の一連の堆積層中で容易に見つけられる特徴である．この議論を敷衍すると，相対的赤道の最終的な中新世の移動—アフリカ中央部でその現在の環境へ—は，5 m.y. 前後のメッシナ期に生じたと仮定してもよかろう．当時，地球は断裂の再活動とリソスフェアの分裂を繰り返す長い力学造構史を経てアルプス期のクライマックスで頂点に達した．アセノスフェアの揮発性成分の噴出に続いてアルプス期の造構変動が起こり，中新世前〜中期には上部マントルの揮発性成分の圧力が再び増大した．これは大洋地殻の隆起とそれに関連する当時の高海水準の背後にあった内部メカニズムである．中新世後期の比較的長い海進の後は海退期になり，それは大洋地殻の薄化と盆地の沈降というイベントを伴ったと考えられる．地球回転の変化と地殻下のデラミネーションにより引き起こされたアセノスフェアの圧力の増大が組み合わさって，圧力がかかり大きな浮力を得た超臨界性の流体は，それまでの地球の歴史にはなかった地殻の高いレベルまで侵入することができた．それ以降，歴史は現在の山脈の出現に向かう明確な経過を辿った．

新旧両方の褶曲帯に沿って，とくにリソスフェアの深部断裂帯地域では，持続的な地表の侵食と下刻作用を伴った地形の隆起が顕著になり，現在の山脈が明瞭に出現し始めた．このような考えで地球の歴史に新登場する地形的な山脈を説明することができる (Ollier and Pain, 2000 を参照)．地球の歴史は，内部的に結ばれた一連の過程を構築しながら，明らかに 1 方向へのみ発展し (Storetvedt, 2003)，暫定的な最終産物の 1 つである非常に高い山脈を出現させた．したがって，ザグロス及びアルボルズ (Alburz) 山脈の第三紀後期の隆起は少しも不思議な出来事ではなく，まさに発達途上の地質学的イベントの自然な連鎖の最近における効果である．現在は山脈によって

分離された多数の独立した盆地のように見える中央〜東イランとヘルマン微小大陸ブロックの構造は，容易に説明がつく．アルプス期のクライマックスの間，パキスタン・アフガニスタン・イランの幅広い褶曲帯の内部は独立した大陸ブロックのモザイクになり，そのすべてが様々な程度に反時計回りの回転を蒙った可能性がある．この回転性のリソスフェアの分裂は，間違いなく個々の大陸ブロックを取り巻く深部断層帯を作り出した．このようにして，周囲を取り巻く造構的セクションの揮発性物質を原動力とした中新世と鮮新世の隆起を伴い，造構的に活発な山脈によって分離された非地震性の盆地からなる現在の地形学的パターンが出現するに至る．

古赤道地域に向かって慣性的変形が増大するという法則は，アルプス期の古リソスフェアの不可欠な部分である中東によく現れている．そこは，アフリカに似て反時計回りの回転もしくは内部変形を蒙った．**図 13** に示されているように，GPS の速度ベクトルはヌビア (Nubia) からアラビア・イランへ向かって大きくなり，強く造構作用を受けた (それ故により変形が可能な) アルプス褶曲帯に沿って顕著に西へスウィングする手前まで同じ傾向が見られる．このように，古赤道地域における GPS データに示された造構性回転もしくは変形の程度は，アフリカ全体の古地磁気データから見積もられた値 (20°) より著しく大きい．GPS パターンから得られる興味深い結論は，キプロス (Cyprus)・エーゲ (Aegean) の両弧が横ずれ圧縮性の造構フロントになったということである．これらの弧は古い先カンブリアの大円短縮断裂の遺物—造構的に変形し，主としてメッシナ期以後の時代に小さい弧になった—である可能性が高いと思われる (Storetvedt and Longhinos, 2012 による議論も参照). **図 13** から，紅海リフト中央部をオフセットする構造とアデン湾とアラビア海北東部の大洋海嶺を横断する斜めの断裂帯は，GPS 速度場として同じ一般的方位を有しているということも注目される．また，アラビア南東部の再活動した基盤構造は GPS のスキームと広く一致する．広域的な塩類盆地は，新期原生代のホルムズ (Hormoz) 塩類層，あるいは上部マントルからダイナミックに絞り出された高濃度の塩水のいずれかから養分を与えられたという先の議論を支持して，Edgell (1996) は大規模な基盤断層方向がアラビア南部〜ペルシャ湾盆地における塩類テクトニクスを規制していると主張した．

紅海の両側は露出した先カンブリア楯状地に接している．地震波の研究は，幅の狭い軸部破砕帯を例外として，その下に伏在する地殻が準大陸性もしくは移行的な性質のものであることを示唆している (例えば，Makris et al., 1991，Rihm et al., 1991). 19° N の北の紅海内の先カンブリア基盤岩類についての極めて多くの観察事実 (主として検層孔からであるが，島の露頭からもまた) に基づいて，何人かの研究者は，新第三紀の間の玄武岩の注入により様々な程度に汚染された薄くなった大陸地殻が存在することを予言した (例えば，Cochran, 1983 and Bonatti, 1985). 紅海の起源は長い間論争の的になっていたが，根深いプレートテクトニクス的思考の枠内では，海底拡大のドグマによって論点が大いに混乱し，一群の興味深い観察事実と現象を結びつけることに結着がつけられていなかった．しかしながら，アファー (Afar) と紅海が大陸型地殻から大洋型地殻への移行の中間段階にある大規模なリフトであるということは広く受け入れられているように見える．このリフトシステムは，漸新世後期〜中新世以降，ヌビア (アフリカ) とアラビアの間に割って入ったもの (例えば，Sultan et al., 1993; Ghebreab, 1998; Ligi et al., 2012) であるが，この地殻の不連続が垂直の陥没構造 (境界帯の顕著な分離なしに部分的に薄化した大陸地殻) であるという可能性は，最近の数 10 年では真剣な議論の対象になってこなかった．しかし，種々の観察事実は後者のモデルと調和する．

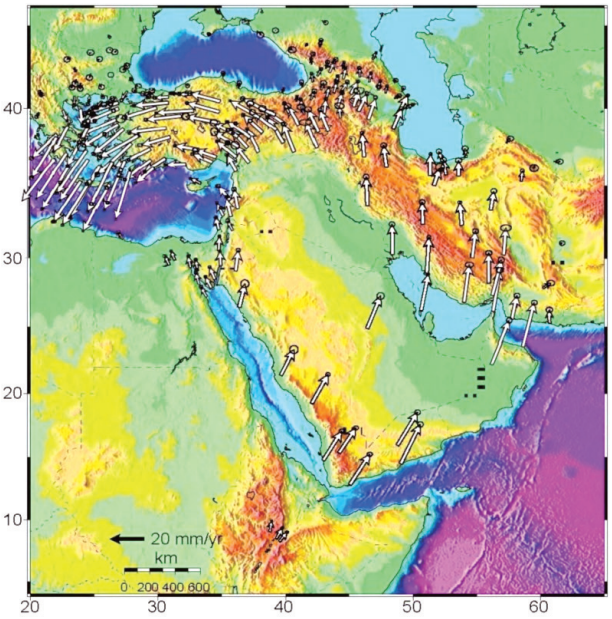


図 13 ユーラシアに対する中東の相対的な動きを取り除いた GPS 速度を 1 σ の誤差楕円で示す地図. 速度場の反時計回りの回転が，ヌビア (アフリカ) から延びてアラビアを横断し，イランとトルコを通過するときに顕著な反時計回りのスウィングをし，キプロスとエーゲ弧の造構フロントで終わることに注目．紅海・アデン湾・アラビア海北西部の NNE-NE 方向の剪断パターンは GPS 速度システムと調和している．Reilinger et al. (2006) より．

紅海・アデン湾・死海リフト

紅海地域では厚さが 7 km にも達する塩類シーケンスを伴う中新世およびそれより若い堆積物が伏在し，塩類ダイヤピルは反射法地震プロファイル上にも示されている (例えば，Girdler and Styles, 1974; Searle and Ross, 1975; Izzeldin, 1987). 15° N から 18° N までは連続し，24° N までは断続的に，24° N より北では欠如している軸部の狭い谷は多量の塩類で充填された無酸素の深みを有し，その塩分はほぼ飽和した主として NaCl である (例えば，Miller, 1964; Hartmann et al., 1998). 上で述べた我々の考察にゆだねると，紅海は中央リフト帯での平均的なモホの深度が 7 〜 8 km という地殻大洋化の中間段階にある．これは，古くて深い断裂帯に沿って発達したもので，おそらく **図 11b** に示された海退イベントに関連して，漸新世後期〜中新世にその発達がとくに促進さ

れたように見える．白亜紀後期〜第三紀早期に古赤道に近かったために，紅海地域では捩れが相対的に強かったことが推測される．結果として生まれた剪断環境—これは，GPS 速度データによるとまだ作用していて，横ずれ引張環境が発達しやすかった—では，それに沿って高濃度の塩水がアセノスフェアのレベルから上昇したであろう．同様に，紅海中央リフトに沿った熱水プールにおける豊富な金属鉱床は，地球力学的なパルスでマントルから入り込んだとみなされてきた．

紅海がレンチテクトニクス起源であるとするうえでさらに都合のよい証拠は 23.5° N に位置するザバルガード (Zabargad) 島 * の地質である．例えば，先カンブリアの基盤岩類も白亜紀後期の被覆堆積物も，共に上部マントルの超苦鉄質岩と高角で構造的に接触している．堆積物は強く変形し，上部マントルのカンラン岩は広く褶曲とフォリエーションを示している (例えば，Piccardo et al., 1988; Seyler and Bonatti, 1988; Agrinier et al., 1993)．Agrinier et al. によると，マントル由来の水溶液が，カンラン岩の変形前のダイヤピル状の隆起の間に，その中を通って滲み出した．中央ザバルガードカンラン岩体と直接接する珪長質片麻岩中のジルコンの U-Pb 年代は 23.2 ± 5.9 m.y. と 22.4 ± 1.3 m.y. である (Bosch and Bruguier, 1998)．著者らは紅海形成の初期段階に薄くなった地殻にダイヤピル状に貫入したカンラン岩が実際に定置した年代が 22.4 m.y. とみている．これらの U-Pb 年代を受け入れると，ザバルガードのアセノスフェアの延性 / 固体ダイヤピルは全体的に高海水準にあった中新世前期における海退イベントの 1 つとしてダイナミックに注入されたと結論づけるのが合理的と思われる．

* ザバルガード島 (Zabargad I.)：セント・ジョンズ島 (St. John's I.) ともいう．紅海の西海岸近くにある面積 450km^2 の島．第四紀の火山島ではなく，3 つの塊状のカンラン岩体からなり，一般には上部マントル物質がアップスラストしたものと解釈されている．

造構力学的に考察すると，東アフリカリフトシステム (EARS) が，アフリカのちょうど南を東西に通過する先カンブリア後期〜古生代初期の古赤道から大きな角度で枝分かれしたという主張が支持される (Storetvedt, 2003 と**図 1**)．その後，地球規模の造構パルスが出現する度に，この古い断裂帯は繰り返し再活動し，アルプス期に加速されたこの造構再活動史の最も重要な段階である先カンブリア初期の基本的直交断裂システム (Storetvedt and Longhinos, 2012 の図 3 を参照) の 'N-S' セットに従って北へ向かって伸びた (Storetvedt, 1997 参照)．大陸におけるリフトの形成と洪水玄武岩のイベントはエチオピアとイエメンでは 30 m.y. 前後に始まった (Hofmann et al., 1997; Ukstins et al., 2002)．漸新世後期の間，ユースタチックな海水準 (**図 11b** を参照) は低く，紅海とアデン湾で地殻の薄化が始まったと推測される．アファー凹地の玄武岩区は紅海とアデン湾の間の交差部にあるが，この地域が準大陸地殻—モホ面深度は 16km と 32km の間と見積もられている (Dugda et al., 2005; Hammond et al., 2011)—であることは，地殻下のデラミネーションが隣接する紅海やアデン湾でははるかに進んでいたことを示唆している．しかしながら，広域的な造構マグマ活動の始まりは 30 m.y. 前後で，紅海とアデン湾の大部分はほぼ海面かその付近にあった (Bosworth et al., 2005 参照).

当初，紅海とアデン湾のリフトの方向はそれぞれ本来の 'N-S' と 'E-W' であったが, 白亜紀後期〜第三紀前期の間に，実際の古赤道のちょうど南の造構的に比較的不安定な場所に位置したこれらの地域は，反時計回りに約 25°の捩れを蒙った．**図 13** によると，慣性的回転と地域的剪断—紅海中央部とアデン湾のリフトを斜めに横断する後者 (地域的剪断) と GPS 速度ベクトル方向で方位づけられた—は明らかにまだ作用している．その北端では，紅海は NNE に枝分かれし，その枝はアカバ湾と死海のリフトに沿って 1,000 km 以上延びている．GPS 速度ベクトルの方向は，この巨大な断裂が左横ずれの剪断帯であることを示唆している．実際，死海リフトに沿い内陸へ 100km 以上の規模での変位を伴う大規模な走向移動の歴史は古くから提案されている．しかしながら，このメガスケールの走向移動は，断裂帯を横断するプラットフォームの被覆堆積物といくつかの先カンブリア基盤複合体のユニットをマッチさせることによって得られたもので，不確かである (最近の要約としては，Garfunkel and Ben-Avraham, 1996 を参照)．我々の解釈では，死海リフトはメガスケールの東アフリカリフトの北端でスプレー断層になっている．文献で紅海とアデン湾の盆地の新第三紀の沈降史を見ると，アラビアはアルプス期の捩れの力を容易に受けやすく，死海リフトに沿った走向移動の動きは主として中新世であったように思われる．これまで頑なに支持されていた造構理論によると，死海リフトは自然に，深部断層に接した地殻内盆地—長さが 150km の死海盆地のような—の発達を伴う横ずれ引張条件を獲得した．もしこの理由づけが正しいなら，我々は紅海のそれとそっくりな死海盆地 (DSB) の沈降と堆積の歴史を見ることであろう．

種々の地震学的研究 (Mechie et al., 2009; Mohsen et al., 2011) から死海内の充填堆積物の厚さは 11km 以上にも達すると見積もられた．Garfunkel and Ben-Avraham (1996 及びその中の参考文献) は，その盆地が中新世前〜後期の 1 〜 2.5km の厚さの砕屑性の地層で始まることを示している．Ben-Avraham によると，盆地の歴史の初期には，堆積作用は沈降と歩調を合わせていた—すなわち，盆地はその段階では凹地を形成しなかった．それ以来，沈降は堆積作用より早く，それによって深い地形的トラフが発達した．それ故，メッシナ期 (6-4 m.y. 前) に，盆地は最も深い凹地に限って数 km の厚さの塩類シーケンスによって充填された．Garfunkel and Ben-Avraham は Zak (1967) の図 3 を参照して，大規模なセドム (Sedom) ダイヤピルを "深いトラフの西側の断層に沿って上昇した 12km の長さの塩類の壁" と表現している．この盆地

が発展を続けて深い凹地になったという事実にもかかわらず，メッシナ期の塩類シーケンスの後に砕屑性の堆積物が続いているという事実は，蒸発起源モデルへの反論となる．再び我々はマントルから絞り出された高濃度の塩水というもう1つの注入メカニズムに相対する．さらに，メッシナ期の死海塩類の大量の集積は，顕著な海退に現れている当時の力学造構パルスと一致する．

結　論

我々が中東の白亜紀後期～第三紀の造構発達を新しい見方で，つまり，グローバルレンチテクトニクスという新しい理論を適用して論じたのが本論文である．多くの‘その場限り’と実用性のないプレートテクトニクスモデルを無視し，我々は再考察の基礎を，アルプス期に造構的に強く分裂し，最後は新第三紀後期にアルプス・ヒマラヤ山脈にとって代わられた縁海性のテチス海という伝統的な概念に置いた．我々の再評価の背後にある理論的根拠は，惑星の回転特性の変化，すなわち，a) 地球の回転速度の変化と b) 地球体の空間方位の変化 (真の極移動現象) のどちらかのイベントの地質学的及び造構的結果である．地球回転のこれらの変化の結果は，1) 慣性により規定されたリソスフェアの時たまの変形 (古緯度に依存するコリオリ効果はこの変形に対して大スケールの構造では抑制因子として作用する) と，2) アセノスフェア内の静水圧の変化 (これは，表層における一連の地質・環境過程を引き起す原動力となったことに加えて，断裂の発達する地殻に重要な変化を引き起してきた) である．言い換えると，我々は‘地球のパルス’という伝統的な概念を新たな視点で見てきた．その新たなダイナミックな理解でこれが中東のいくつかの主要な造構的局面を結び合わせる際にも適用される．

レンチテクトニクス理論では，古赤道帯がとくに全体的な横ずれ引張変形を起こしやすくなる．そして，そうなるにつれて，テチスの大陸内盆地の軸は，地中海とペルシャ湾地域を通っていた白亜紀後期～第三紀前期の古赤道とほぼ一致した．というわけで，この時，中東のテチス地域は著しい横ずれ圧縮変形を蒙り，縁辺圧縮フロント，盆地内の造構回転，走向移動断層帯が発達した．顕著な造構境界に沿って不連続な大小の岩体として産するオフィオライトは，局地化された横ずれ引張条件のもとで発達した表層盆地へ上部マントル物質が注入されたことにより形成されたとものと解釈できる．このようにして，テチス帯の外部及び内部の大陸塊はブロック回転と内部変形を蒙った．例えば，東部地域では，ヒマラヤ・チベットテチス海の南縁に隣接するインドが原位置での著しい造構回転を蒙った．これは，古地磁気データ，断層面の解析，GPS 速度ベクトル，造構地形的証拠によって支持される結論である．同様に，中央イランの微小大陸ブロックの著しい反時計回りの回転は多くの独立した地球物理学的・地質学的証拠によって支持される．新たな力学造構シナリオでは，大規模な塩類盆地は，地球力学的なイベントの間に上部マントルから湧き上がった高濃度の塩水からの沈殿物と解釈される．例えば，大規模なインフラカンブリア期のホルムズ塩類層はイラン・パキスタン地域が当時の極地域に位置した間に形成されたが，地球の空間方位が顕著に変化した時期に出現した．このときには，赤道の膨らみの大規模な変位とそれに関連する静水圧の増大が生じた．同じ過程で，イラン・紅海・死海の第三紀後期の大規模な塩類盆地は，中新世の地球力学的イベントを契機としてマントルから注入された塊状の塩類と解釈できる．これらの高濃度の塩水の放出時期はユースタチックな海面変動の低海水準エピソードに関連し，地殻が地球規模でマントルへ失われ大洋盆の容量の増大を招いた時期に当たる．アルプス期の間，地球のリソスフェアは断裂が増加し，限界に達した上部マントルの揮発性成分の圧力が開放された．そこで，静水圧の再建が始まると，マントル流体はかつてないほどリソスフェアの高いレベルまで浸透し，とくに深部断裂造構帯その他の深部断層に沿ってリソスフェアは，強く引き裂かれた．このようにして，すべてに先駆けて超臨界性の水溶液の強力な揚力（lifting power）で山脈の隆起が加速され，かつての縁海性の中東テチス海の大部分が山地に転換した．

謝辞

Frank Cleveland 氏は 40 年前にベルゲンの地球物理研究所に来られて以来，KS (Karsten Storetvedt) の信頼できる技術助手であった．Frank の退任間際で，本論文は彼の長年にわたる多方面での学術的なサービスの最後のものになるだろう．膨大な量の図を作成するに当たっての彼の尽きることのない情熱とやる気なしには KS はプレートテクトニクスに対する長い闘い—最後には地球の新たな理論を創建することとなった厄介な旅—に形を与えることはできなかったと固く信じている．Frank の細心で長期にわたる仕事に深甚の謝意を表する．また，KS は，公式の退任後も長年にわたって部門の施設と技術的援助を私に与えて下さったベルゲン地球物理研究所に深く感謝する．

文　献

Abbotts, I.L., 1978. High-potassium granites in the Masirah Ophiolite of Oman. Geol. Mag., v. 115, p. 415-425.

Agrinier, P. et al., 1993. Metasomatic hydrous fluids in amphibole peridotites from Zabargad Island (Red Sea). Earth Planet. Sci. Lett., v. 120, p. 187-205.

Ala, M.A., 1974. Salt diapirism in southern Iran. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., v. 58, p. 1758-1770.

Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics, v. 229, p. 211-238.

Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. Am. Jour. Sci., v. 307, p. 1064-1095.

Allen, M.B. et al., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. Jour. Struct. Geol., v. 25, p. 659-672.

Amidi, S.M. et al., 1984. Alkaline Character of Eocene Volcanism in the Middle Part of Central Iran and its Geodynamic Situation. Geologische Rundschau, v. 73, p. 917-932.

Anderson, D.L., 2005. Eclogite in the mantle. In: www.MantlePlumes.org.

Aubouin, J. et al., 1977. Téthys (Mésogée) et Atlantique: données de la géologie. C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D., v. 285, p. 1025-1028.

Atzemaglou, A. et al., 1994. Palaeomagnetic evidence for block rotations in the western Greek Rhodope. Geophys. Jour. Int., v. 118, p. 221-230.

Austrheim, H., 1998. Influence of fluid and deformation on metamorphism of the deep crust and consequences for the geodynamics of collision zones. In: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks, Kluwer Academic, Dordrecht, p. 297-323.

Berberian, M., 1995. Master “blind” thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. Tectonophysics, v. 241, p. 193-224.

Beydoun, Z.R., 1998. Arabian Plate Oil and Gas: Why so Rich and so Prolific? Episodes, v. 21, p. 74-81.

Boccaletti, M. et al., 1976. Neogene and Quaternary volcanism of Bijar area (western Iran). Bull. Volcanologique, v. 40, p. 121-132.

Bonatti, E., 1985. Punctiform initiation of seafloor spreading in the Red Sea during transition from a continental to an oceanic rift. Nature, v. 316, p. 33-37.

Bosch, D. and Bruguier, O., 1998. An early Miocene age for a high-temperature event in gneisses from Zabargad Island (Red Sea, Egypt): mantle diapirism? Terra Nova, v. 10, p. 274-279.

Bosworth, W. et al., 2005. The Red Sea and Gulf of Aden Basins. J. Afr. Earth Sci., v. 43, p. 334-378.

Boucot, A.J. and Johnson, J.G., 1973. Silurian Brachiopods. In: Atlas of Palaeobiography. Elsevier, Amsterdam, p.

Brunn, J.H., 1976. über die Entstehung gefalterer Ketten: Kollisions-Tektonik und induzierte Bögen. Z. Deutsch. Geol. Geshellsch., v. 127, p. 323-335.

Buchardt, B., 1978. Oxygen isotope palaeo-temperatures from the Tertiary period in the North Sea area. Nature, v. 275, p. 121-123.

Burgh, J.-P. et al., 2013. Structural style of the Makran Tertiary accretionary complex in SE Iran. In: Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins: The Arabian Plate and Analogues, Springer, Berlin, p. 239-259.

Chan, C. and Pan, Y., 1984. A preliminary synthesis of the tectonic evolution of the Quinhai-Xizang (Tibet) Plateau. In: Tectonics of Asia, Int. Geological Congress, Moscow.

Chatterjee, S., 1992. A kinematic model for the evolution of the Indian plate since the Late Jurassic. In: New Concepts in Global Tectonics. Texas Tech. Univ. Press, Lubbock TX, p. 33-62.

Cochran, J.R., 1983. A model for the development of the Red Sea. Am. Assoc. Petrol Geol. Bull., v. 67, p. 41-69.

Crawford, A.R., 1974. The Indus Suture Line, the Himalaya, Tibet and Gondwanaland. Geol. Mag., v. 111, p. 369-383.

Creer, K.M., 1975. On a tentative correlation between changes in geomagnetic polarity bias and reversal frequency and the Earth’s rotation through Phanerozoic time. In: Growth Rhythms and The History of the Earth’s rotation. John Wiley, London, p. 293-318.

Daigniers, M. et al., 1982. Implications of the seismic structure for the orogenic evolution of the Pyrenean range. Earth Planet. Sci. Lett., v. 57, p. 88-100.

Desmons, J., 1982. Meso-Cainozoic palaeogeography of the Middle East: constraints from the Iranian sutures. Géologie Alpine, v. 58, p. 21-30.

Dèzes, P., 1999. Tectonic and Metamorphic Evolution of the Central Himalayan Domain in Southeast Zanskar (Kashmir, India). Mémoires de Géologie, v. 32, 149 p.

Dewey, J.F. and Bird, J.M., 1970. Mountain belts and the new global tectonics. Jour. Geophys. Res., v. 75, p. 2625-2647.

Dewey, J.F. and Burke, K.C.A., 1973. Tibetan, Variscan and Precambrian basement reactivation: Products of continental collision. Jour. Geophys. Res., v. 81, p. 683-692.

Dewey, J.F. et al., 1973. Plate tectonics and the evolution of the Alpine System. Geol. Soc. Am. Bull., v. 84, p. 3137-3180.

Dewey, J.F. et al., 1986. Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of Eastern Anatolia – a young collision zone. Geol. Soc. London Spec. Publ., v. 19, p. 3-36.

Dickins, J.M., 1994. What is Pangaea? In: Pangaea: Global environments and resources. Can. Soc Petrol. Geologists, Memoir 17, p. 67-80.

Dolati, A., 2010. Stratigraphy, structural geology and low-temperature thermochronology across the Makran accretionary wedge in Iran (abstract). D. Sc. Thesis, ETH, Zűrich.

Dugda, M.T. et al., 2005. Crustal structure in Ethiopia and Kenya from receiver function analysis: Implications for rift development in eastern Africa. Jour. Geophys. Res., v. 110, B01303, doi:10.1029/2004JB003065.

Edgell, H.S., 1991. Proterozoic salt basins of the Persian Gulf area and their role in hydrocarbon generation. Precambrian Research, v. 54, p. 1-14.

Edgell, H.S., 1996. Salt tectonism in the Persian Gulf Basin. In: Salt Tectonics, Geol. Soc. London Special Publ., v. 100, p. 129-151.

Eftekharnezhad, : and Behroozi, A., 1991. Geodynamic Significance of Recent Discoveries of Ophiolites and Late Palaeozoic Rocks in NE-Iran (including Kopet Dagh). Abh. Geol. B.-A., v. 38, p. 89-100.

Engdahl, E.R. et al., 1998. Global teleseismic relocation with improved travel times and procedures for depth determination. Bull. Seism. Soc. Am., v. 88, p. 722-743.

Engdahl, E.R. et al., 2006. Relocation and assessment of seismicity in the Iran region. Geophys. J. Int., v. 167, p. 761-778.

Ernst, W.G., 1972. Occurrence and mineralogic evolution of blueschist belts with time. Am. Jour. Sci., v. 272, p. 657-668.

Falcon, N.L., 1967. The geology of the northwest margin of the Arabian basement shield. Adv. Sci., v. 24, p. 1-12.

Gaetani, J. et al., 2003. The Peri-Tethys Programme: achievements and results. Episodes, v. 26, 79-93.

Gansser, A., 1964. Geology of the Himalayas. Interscience, New York, 289p.

Gansser, A., 1966. The Indian Ocean and the Himalayas – a geological interpretation. Eclo. Geol. Helv., v. 59, p. 831-848.

Gansser, A., 1974. The ophiolite mélange, a world-wide problem on Tethyan examples. Eclo. Geol. Helv., v. 67, p. 429-507.

Gansser, A., 1991. Facts and theories on the Himalayas. Eclog. Geol. Helv., v. 84, p. 33-59.

Garfunkel, Z. and Ben-Avraham, Z., 1996. The structure of the Dead Sea basin. Tectonophysics, v. 266, p. 155-176.

Gealey, W.K., 1977. Ophiolite obduction and geologic evolution of the Oman Mountains and adjacent areas. Geol. Soc. Am. Bull., v. 88, p. 1183-1191.

Ghebreab, W., 1998. Tectonics of the Red Sea region reassessed. Earth Sci. Rev., v. 45, p. 1-44.

Girdler, R.W. and Styles, P., 1974. Two stage seafloor spreading. Nature, v. 247, p. 7-11.

Glennie, K.W. et al., 1974. Late Cretaceous nappes in Oman Mountains and their geologic significance. Am. Assoc. Petrol. Geol., v. 57, p. 5-27.

Grando, G. and Macclay, K., 2007. Morphotectonic domains and structural styles in the Makran accretionary prism, offshore Iran. Sedimentary Geology, v. 196, p. 157-179.

Hallam, A., 1977. Biogeographic evidence bearing on the creation of Atlantic seaways in the Jurassic. In: Paleontology and Plate Tectonics. Milwaukee Mus. Publ. Geol., v. 2, p. 23-39.

Hallam, A., 1992. Phanerozoic Sea-Level Changes. Columbia Univ. Press, New York, 266p.

Hallam, A. and Wignall, P.G., 1997. Mass Extinctions and Their Aftermath. Oxford Univ. Press, Oxford, 320 p.

Hallam, A. and Wignall, P.G., 1999. Mass extinctions and sea-level changes. Earth-Science Reviews, v. 48, p. 217-250.

Hammond, J.O.S. et al., 2011. The nature of the crust beneath the Afar triple junction: Evidence from receiver functions. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, v. 12, Q12004, doi: 10.1029/2011GC003738.

Hartmann, M. et al., 1998. Hydrographic structure of brine-filled deeps in the Red Sea – new results from the Shaban, Kerbit, Atlantis II, and Discovery Deep. Marine Geology, v. 144, p. 311-330.

Hassanzadeh, J., 1994. Consequences of the Zagros continental collision on the evolution of the central Iranian plateau. Jour. Earth Space Phys., v. 21, p. 27-38.

Haq, B.U. et al., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. Science, v. 235, p. 1156-1167.

Haynes, S.J. and McQuillan, H., 1974. Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran. Geol. Soc. Am. Bull., v. 85, p. 739-744.

Hoffman, V. et al., 1997. Timing of the Ethiopian flood basalt event: implications for plume birth and global change. Nature, v. 389, p. 838-841.

Homke, S., 2004. Magneto-stratigraphy of Miocene-Pliocene Zagros foreland deposits in the front of the Push-e Kush Arc (Lurestan Province, Iran). Earth Planet. Sci. Lett., v. 225, p. 397-410.

Homke, S. et al., 2009. Late Cretaceous-Paleocene formation of the proto-Zagros foreland basin, Lurestan Province, SW Iran. Geol. Soc. Am. Bull., v. 121, p. 963-978.

Hoyle, F., 1997. Home Is Where the Wind Blows. Oxford Univ. Press, Oxford, 443p.

Hsu, K.J. and Bernoulli, D., 1978. Genesis of the Tethys and the Mediterranean. In: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, v. 42, p. 951-984.

Izzeldin, A.Y., 1987. Seismic, gravity and magnetic surveys in the central part of the Red Sea: Their interpretation and implications for the structure and evolution of the Red Sea. Tectonophysics, v. 143, p. 269-306.

Jackson, M.P.A. et al., 1990. Salt Diapirs of the Great Kavir, Central Iran. Geol. Soc- Am., Boulder, Memoir 177, 139p.

Jackson, J. et al., 2002. Active tectonics of the South Caspian Basin. Geophys. Jour. Int., v. 148, p. 214-245.

Jade, S. et al., 2004. GPS measurements from the Ladakh Himalaya, India: Preliminary tests of plate-like or continuous deformation in Tibet. Geol. Soc. Am. Bull., v. 116, p. 1385-1391.

Kamitani, M. et al., 2012. Explanatory notes for the mineral resources map of Central Asia. Geol. Surv. Japan, AIST, 30p.

Kashfi, M.S., 1992. Geological evidence for a simple horizontal compression of the crust in the Zagros Crush Zone. In: New Concepts in Global Tectonics, Texas Tech. Univ. Press, p. 119-130.

Kassler, P., 1973. The structural and geomorphic evolution of the Persian Gulf. In: The Persian Gulf, B, Springer-Verlag, New York, p. 11-32.

Kennett, B.L.N. and Widiyantoro, S., 1999. A low seismic wavespeed anomaly beneath northwestern India: a seismic signature of the Deccan plume? Earth Planet. Sci. Lett., v. 165, p. 145-155.

Khalili, M. et al., 2007. Depositional environment of the evaporate unit (D-member) of the Qom Formation (Central Iran). Carbonates and Evaporates, v. 22, p. 101-112.

Kreichgauer, P.D., 1902. Die Äquatorfrage in der Geologie. Missionsdruckerei, Steyl, 304p.

Kuhn, T.S. 1970, 2nd Edition. The Structure of Scientific Revolutions. Univ. of Chicago Press, Chicago, 210p.

Kukowski, N. et al., 2000. Newly identified strike-slip plate boundary in the northeastern Arabian Sea. Geology, v. 28, p.

355-358

Leech, M.L., 2001. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse. Earth Planet. Sci. Lett., v. 185, p. 149-159.

Le Fort, P., 1975. Himalayas – the collided ranges: present knowledge of the continental arc. Am. Jour. Sci., v. 275A, p. 1-44.

Le Pichon, X., 1968. Sea floor spreading and continental drift. J. Geophys. Res., v. 73, p. 3661-3697.

Ligi, M. et al., 2012. Birth of an ocean in the Red Sea: Initial pangs. Geochemistry, Geophysics, Geosystem, v. 13, Q08009, doi: 10.1029/2012GC004155.

Lippard, S.J. et al., 1986. The ophiolites of northern Oman. Mem. Geol. Soc. London, v. 11, 178 p.

Maggi, A. et al., 2000. A re-assessment of focal depth distribution in southern Iran, the Tien Shan and northern India: do earthquakes really occur in the continental mantle? Geophys. Jour. Int., v. 143, p. 629-661.

Makris, J. et al., 1991. The gravity field of the Red Sea and East Africa. Tectonophysics, v. 198, p. 369-381.

McKenzie, D.P., 1970. Plate tectonics of the Mediterranean region. Nature, v. 226, p. 239-243.

Mechie, J. et al., 2009. Crustal structure of the southern Dead Sea basin derived from project DESIRE wide-angle seismic data. Geophys. Jour. Int., v. 178, p. 457-478.

Metcalf, I., 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of Eastern Tethys. Austral. Jour. Earth Sci., v. 6, p. 605-623.

Metcalf, I., 1998. Palaeozoic and Mesozoic geological evolution of the SE Asian region: multidisciplinary constraints and implications for biogeography. In: Biogeography and Geological Evolution of SE Asia. Backhuys Publishers, Amsterdam, p. 25-41.

Miller, A.R., 1964. Highest salinity in the world ocean? Nature, v. 203, p. 590.

Mitchell-Thomé, R.C., 1976. Geology of the Middle Atlantic Islands. Gebrűder Bornträger, Berlin, 382p.

Molinaro, M. et al., 2005. The structure and kinematics of the southeastern Zagros fold-thrust belt, Iran: From thin-skinned to thick-skinned tectonics. Tectonics, v. 24, doi: 10. 1029/2004TC001633.

Montanari, A. et al., 1993. Iridium anomalies of Late Eocene age at Massignano (Italy), and ODP Site 689 (Maud Rise, Antarctica). Palaios, v. 8, p. 420-437.

Moseley, F. and Abbotts, I.L., 1979. The ophiolite mélange of Masirah, Oman. Jour. Geol. Soc., London, v. 136, p. 713-724.

Mohsen, A. et al., 2011. Crustal structure of the Dead Sea Basin (DSB) from a receiver function analysis. Geophys. Jour. Int., v. 184, p. 463-476.

Motavalli-Anbaran, S.-H. et al., 2011. Crustal and lithospheric structure of the Alborz Mountains, Iran, and surrounding areas from integrated geophysical modeling. Tectonics, v. 30, doi: 10,1029/2011TC002934.

Mouthereau, F. et al., 2006. The Zagros folded belt (Fars, Iran): constrains from topography and critical wedge modeling. Geophys. Jour. Int., v. 165, p. 336-356.

Muttoni, G. et al., 2009. Opening of the Neo-Tethys Ocean and the Pangea B to Pangea A transformation during the Permian. GeoArabia, v. 14, p. 17-48.

Nasir, S. et al., 2008. Geology and petrology of the Hormuz dolomite, Infra-Cambrian: Implications for the formation of the salt-cored Halul and Shraouh islands, Offshore, State of Quatar. Jour. Asian Earth Sci., v. 33, p. 353-365.

Neumayr, M., 1885. Die geographische Verbreitung der Jurafotmation. Hof- und Staatsdruckerei, Wien, 88p.

Ollier, C.D., 1992. A hypothesis about antecedent and reversed drainage. Geogr. Fisica e Dinamica Quarternaria, v. 14, p. 243-246.

Ollier, C.D. and Pain, C., 2000. The Origin of Mountains. Routledge, London, 345p.

Piccardo, G.B. et al., 1988. The Zabargad peridotite-pyroxinite association: petrological constraints on its evolution. Tectonophysics, v. 150, p. 210.

Rahimpour-Bonab, H. and Alijani, N., 2003. Petrography, diagenesis and depositional model for potash depositsof the north Central Iran, and use of bromine geochemistry as a prospecting tool. Carbonates and Evaporites, v. 18, p. 19-28.

Rahimpour-Bonab, H. et al., 2007. Role of rifting in evaporate deposition in the Great Kavir Basin, central Iran. Geol. Soc. London, Special Publ., v. 285, p. 69-85.

Regard, V. et al., 2010. The transition between Makran subduction and the Zagros collision: recent advances in its structure and active deformation. Geol. Soc. London Special Pub., v. 330, p. 41-64.

Reilinger, R. et al., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. J. Geophys. Res., v. 111, doi: 10.1029/2005/ JB004051.

Ricou, L.E., 1970. Comments on radiolarites and ophiolite nappes in the Iranian Zagros Mountains. Geol. Mag., v. 107, p. 479-480.

Ricou, L.E., 1971. Le metamorphism au contact des peridotites de Neyriz (Zagros interne, Iran): development de skarus a pyroxene. Bull. Société Géologique de France, v. XIII, p. 146-155.

Rihm, R. et al., 1991. Seismic survey in the northern Red Sea: asymmetric crustal structure. Tectonophysics, v. 198, p. 279-295.

Ritz, J.-F. et al., 2006. Active transtension inside central Alborz: A new insight into norther Iran-southern Caspian geodynamics. Geology, v. 34, p. 477-480.

Rosenberg, G.D., 1997. How long was the day of the dinosaur? And why does it matter? In: Dinofest International: Proceedings of a Symposium Sponsored by Arizona State University. The Academy of Sciences, Philadelphia.

Saura, E. et al., 2011. Basin architecture and growth folding of the MW Zagros early foreland basin during the Late Cretaceous and early Tertiary. Jour. Geol. Soc. London, v. 168, p. 235-250.

Schléder, Z. and Urai, J.L., 2006. Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive Eocene-Oligocene rochsalt from Eyvanekey plateau and Garmsar hills (central Iran). Jour. Struct. Geol., doi: 10. 1016/j.jsg.2006.08.014.

Schmalz, R., 1969. Deep-water evaporate deposition: A genetic model. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., v. 53, p. 798-823.

Schmidt-Effing, R., 1977. Das marine Unterjura Mexicos und seine Beziehung zur Entsthehung des Golfes von Mexico. Deutsch. Geol. Gesell. Nachr., v. 17, p. 59-62.

Scotese, C.R., 2001. Atlas of Earth History; Paleogeography, PALEOMAP Project. Arlington Texas, v. 1, 52 p.

Searle, R.C. and Ross, D.A., 1975. A geophysical study of the Red Sea axial trough between 20.5° and 22°N. Geophys. Jour. Royal Astron. Soc., v. 43, p. 555-572.

Searle, M.P. et al., 1980. Volcanic rocks beneath the Semail ophiolite nappe in the northern Oman mountains and their significance in the Mesozoic evolution of Tethys. J. Geol. Soc. London, v. 137, p. 589-604.

Sengör, A.M.C., 1984. The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia. Geol. Soc. Am., Special Paper 195, 82 p.

Seyler, M. and Bonatti, E., 1988. Petrology of gneiss-amphibolite lower crustal unit from Zabargad Island, Red Sea. Tectonophysics, v. 150, p. 177-207.

Shafaii Moghadam, H. et al., 2010. The Dehshir ophiolite (Central Iran); geochemical constraints on the origin and evolution of the Inner Zagros Ophiolite Belt. Geol. Soc. Am. Bull., v. 122, p. 1516-1547.

Shirdashtzadeh, N. et al., 2010. Metamorphic Rocks in Ophiolite Mélange of Nain (Isfahan, Iran). In: 1st Intern. Appl. Geol. Congress, Tehran, 26-28 April, 2010, p. 1254-1259.

Shomali, Z.H. et al., 2011. Lithospheric structure beneath the Zagros collision zone resolved by non-linear teleseismic to tomography. Geophys. Jour. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05150.x

Soffel, H.C. et al., 1996. Ne palaeomagnetic data from Central Iran and a Triassic palaeoreconstruction. Geol. Rundsch., v. 85, p. 293-302.

Sonnenfeld, P., 1981. The Phanerozoic Tethys Sea. In: Tethys – The Ancestral Mediterranean. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg (USA), p. 18-53.

Sonnenfeld, P., 1984. Brines and Evaporites. Academic Press, New York, 613 p.

Stampfli, G.M. et al., 2002. Paleozoic evolution of pre-Variscan terranes: from Gondwana to the Variscan collision. Geol. Soc. Am. Special paper, v. 364, 263 p.

Steck, A. et al., 1993. Geological Transect across the Northwestern Himalaya in eastern Ladakh and Lahul (A Model for the Continental Collision of India and Asia. Eclo. Geol. Helv., v. 86, p. 219-263.

Stoneley, R., 1981. The geology of the Kuh-e Dalneshin area of southern Iran, and its bearing on the evolution of southern Tethys. Jour. Geol. Soc. Lond., v. 138, p. 509-526.

Storetvedt, K.M., 1990. The Tethys Sea and the Alpine-Himalayan orogenic belt; mega-elements in a new global tectonic system. Phys. Earth Planet. Int., v. 62, p. 141-184.

Storetvedt, K.M., 1997. Our Evolving Planet. Alma Mater (Fagbokforlaget), Bergen, 456 p.

Storetvedt, K.M., 2003. Global Wrench Tectonics. Fagbokforlaget, Bergen, 397 p.

Storetvedt, K.M., 2005. Polar Wander and Global Tectonics. Boll. Soc. Geol. It., Volume Speciale no. 5, p. 177-187.

Storetvedt, K.M., 2010a. Falling Plate Tectonics – Rising new Paradigm: Salient Historical Facts and the Current Situation. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 55, p. 4-34.

Storetvedt, K.M., 2010b. World Magnetic Anomaly Map and Global Tectonics. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 57, p. 22-46.

Storetvedt, K.M., 2011. Aspects of Planetary Formation and the Precambrian Earth. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 59, p. 60-83.

Storetvedt, K.M. et al., 1990. A new kinematic model for Iberia; further palaeomagnetic and isotopic age evidence. Phys. Earth Planet. Inter., v. 62, p. 109-125.

Storetvedt, K.M. et al., 1999. Alpine remagnetization and tectonic rotations in the French Pyrenees. Geol. Rundsch., v. 87, p. 658-674.

Storetvedt, K.M. and Longhinos, B., 2012. The Atlantic and its Bordering Continents – a Wrench Tectonic Analysis: Lithospheric Deformation, Basin Histories and Major Hydrocarbon Provinces. New Concepts in Global Tectonics, no. 64, p. 30-69.

Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., v. 52, p. 1228-1258.

Stöcklin, J., 1974. Possible ancient continental margins in Iran. In: The geology of continental margins. Springer-Verlag, New York, p. 873-887.

Sultan, M. et al., 1993. New constraints on Red Sea rifting from correlations of Arabian and Nubian Neoproterozoic outcrops. Tectonics, v. 12, p. 1303-1319.

Sűss, E., 1893. Are great ocean depths permanent? Nat. Sci., v. 2, p. 180-187.

Sűss, E., 1901. Das Antlitz der Erde, Vol. 3/II. Tempsky, Wien, 508 p.

Talbot, C.J. and Aftabi, P., 2004. Geology and models of salt extrusion at Qom Kuh, central Iran. Jour. Geol. Soc., v. 161, p. 321-334.

Taylor, M. and Yin, A., 2009. Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism. Geosphere, v. 5, p. 19-214.

Tehrani, N.A., 1975. On the metamorphism in the ophiolitic rocks in the Sabzevar region, northeast Iran. Special publication of the Geological Survey of Iran (International Geodynamics Proceedings), p. 25-52.

Tingdong, L. et al., 1986. The crustal evolution and uplift mechanism of Qinghai-Tibet plateau. Tectonophysics, v. 127, p. 279-289.

Torabi, G., 2011. Late Permian blueschist from Anarak ophiolite (Central Iran, Isfahan province), a mark of multi-suture closure of the Paleo-Tethys ocean. Revista Mexicana de Ciencias Geológias, v. 28, p. 544-554.

Trümpy, R. 1965. Zur geosynclinalen Vorgeschichte der Schweizer Alpen. Umschau, v. 18, p. 573-577.

Trümpy, R., 1971. Stratigraphy in mountain belts. Quart. J. Geol. Soc. London, v. 126, p. 293-318.

Ukstins, P. et al., 2002. Matching conjugate volcanic rifted margins: Ar-40/Ar-39 chrono-stratigraphy of pre- and syn-rift bimodal flood volcanism in Ethiopia and Yemen. Earth Planet. Sci. Lett., v. 198, p. 289-306.

Van der Voo, R., 1993. Palaeomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus oceans. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 411 p.

Vaziri, H. and Majidifard, 2010. New data on stratigraphy of the salt deposits in Garmsar area, Central Iran. 1st Intern. Appl. Geol. Congress, Islamic Azad University – Mashad Branch, p. 1650-1654.

Verges, J. et al., 2011. Crustal-scale cross-sections across the NW Zagros belt: implications for the Arabian margin reconstruction. Geol. Mag., v. 148, p. 739-761. doi: 10.1017/S0016756811000331.

Vialon, P. et al., 1972. Propositions d'un modèle de l'évo lution pétro-structurale de quelques montagnes iraniennes, comme une consequence de la tectonique de plaques. 24th International Geological Congress, Montreal, Section 3, p. 196-208.

Von Rad, U. et al., 2000. Gas and fluid venting at The Makran accretionar y wedge off Pakistan. GeoMarine Letters, v. 20, p. 1019.

Wellman, H.W., 1966. Active wrench faults of Iran, Afghanistan and Pakistan. Geol. Rundsch., v. 55, p. 716-735.

Wells, J.W., 1963. Coral growth and geochronometry. Nature, Lond., v. 197, p. 948-950.

Wernicke, B. et al., 1996. Origin of HighMountains in the Continents: The Southern Sierra Nevada. Science, v. 271, p. 190-193.

White, R.S., 1982. Deformation of the Makran accretionary sediment prism in the Gulf of Oman (north-west Indian Ocean). In: Geol. Soc. London, Special Publ., v. 10, p. 357-372.

White, R.S. and Klitgord, K., 1976. Sediment deformation and plate tectonics in the Gulf of Oman. Earth Planet. Sci. Lett., v. 32, p. 199-209.

Wilson, J.T., 1954. The development and structure of the crust. In: The Earth as a Planet. Chicago Univ. Press, Chicago, p. 138-214.

Wolfart, R., 1967. Entwicklung der paläozoischen Tethys in Vorderasien. Erdöl u. Kohle, Erdgas u. Petrochemie, v. 20, p. 168-180.

Yue, H. et al., 2012. Lithospheric and upper mantle structure of the northeastern Tibetan Plateau. Jour. Geophys. Res., v. 117, B05307, doi: 10.1029/2011JB008545, p.1-18

Zanchi, A. et al., 2006. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. Jour. Struct. Geol., v. 28, p. 2023-2037.

Zhang, P. et al., 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global position system data. Geology, v. 32, p. 809-812.

Zharkov, M.A., 1981. History of Palaeozoic Salt Accumulation. Springer-Verlag, Berlin, 308 p.

地球科学における政治コーナー　***GEOPOLITICAL CORNER***

悪感：ラクイラからの教訓

6 人の地球科学者が不本意な殺意なき殺人に関して有罪であることを裁決した去る 10 月イタリアの法廷判決についてのより密接した見方は，いくつかの興味をそそる事実―と作り話を明らかにする．

BAD VIBRATIONS: LESSONS FROM L'AQUILA

A closer look at last October's Italian court verdict that found six earth scientists guilty of involuntary manslaughter reveals some intriguing facts – and fictions.

Michael KILE　Perth, Australia

（柴　正博［訳］）

（編集者注：この論文は「地震，コンセンサス．および結果」として，Quadrant Online の 2012 年 11 月 3 日に掲載されたオリジナル版 http://www.quadrant.org.au/blogs/doomed-planet/2012/11/quakes-consensus-and-consequence. から少し修正されている．著者著の許可をえて再録．）

2009 年 4 月 5 日の日曜日．聖大金曜日の 5 日前に．中央イタリアのアペニン山地の中にあるラクイラ (「鷲」の意味．人口およそ 70,000 人) の住民は 2 回の震動を感じた．最初は現地時間午後 11 時の直前に襲った．それはマグニチュードで 3.9 の大きさで, 2 番目は 3.5 だった．それらはいくつかの物を動かすには十分強いけれど，あなたを目覚めさせるほどではなかった．

にもかかわらず．多くの心配があった．低レベルの群発地震—少なくともマグニチュード 3 の 8 回の震動がすでに前の週に起こっていた．大きい地震—マグニチュード 6.3 がおよそ 4 時間後の現地時間午前 3 時 32 分に中央イタリアを襲った．300 人以上の住民が死亡し，1,500 人が負傷し，65,000 人が家を失い，約 150 億ドルの損害が推定された．

ラクイラは地震の歴史を持っている．1315 年にはそのサンフランチェスコ教会に損害を与えた．他の地震は，1349 年 (1 月 22 日，800 人死亡)，1452 年，1461 年，1501 年，1646 年，1703 年 (2 月 3 日，3,000 人死亡)，1706 年と 1786 年 (7 月 31 日, 6,000 人死亡) に襲われた．

その後．1958 年 6 月 26 日にマグニチュード 5 の地震が襲うまで，約 2 世紀の間，静穏な期間があった．2009 年の地震はこれより 75 倍強く，そして 4 月 5 日の地震より 3,000 倍も強力だった．

3 年後の 2012 年 10 月 22 日の月曜日に，大規模な危険の予測と防止のためのイタリア国家委員会 (NCFPMR) の 7 人の委員が，2 年間の裁判の後に，6 年の服役期間を与えられて公職に就くことを禁止され，法廷費用と損害賠償金を支払うことを強いられた．ラクイラの 7 人は, 重大な危険委員会の委員長である Franco Barberi 氏，地球物理学国立研究所の前所長の Enzo Boschi 氏，国立地震センター部長の Giulio Lorenzo Selvaggi 氏，地震工学ヨーロッパセンター部長の Gian Michele Calvi 氏，物理学者の Claudio Eva 氏，市民保険庁地震危険事務所部長の Mauro Dolce 氏，市民保険庁技術部の前副所長の Bernardo De Bernardinis 氏である．

中央イタリアのラクイラでの 7 人の公聴会で議長を務める Marco Billi. (写真 :Claudio Lattanzio/EPA).

検察側は彼らが初期の震動について「不正確で，不完全で，そして矛盾した」声明を広めていたと論じた．また，彼らは「間違って安心を与えた」ことを批判された．Boschi は大きい地震が「ありそうもない」と述べたが，完全にその可能性を除外せず，他方 De Bernardinis は公式に「危険」がないと述べた．

最初の震動が大きな激震の前震活動の典型であったことを論じた科学的な見解が提出された．それでも被告らは，それを「通常の地質学の現象」に分類した．そのため, いっそう重い罰が Marco Billi 裁判官の結論であった：彼らの危険評価は「不完全で，不適切で，不適当で，そして刑事上の過失」とされた．

「私は私が無罪になるだろうと思った．私はまだそれを理解できない」とぼう然として Boschi が言った．共同被告の Claudio Eva (74 歳) は，「非常にイタリア的で中世の判決」と記述した．「地震は数世紀の後に犯罪の現場に戻る暗殺者のようであるが，あなたは決してそれがいつかを言うことはできない」と同じく彼は指摘した．

この訴訟は上訴裁判所によって裁決されるまで，結審しないだあろう．ラクイラの 7 人は，明らかにこれから何年も要する控訴過程の完成まで自由のままでいる．

彼らの被告側弁護士は，地震は予測することができなかったことと，たとえできても彼らがそれらを妨げるためにできることは何もなかったと論じた．「もしあるイベントが予測されることができなくて，そしてその点についていっそう避けられることができないなら，危険を予測する失敗についてのどのような示唆があり得るかを理解することは難しい」と被告側弁護士 Franco Coppi が判決が行われる前に言った．

裁判が始まったときにそうだったように，判決についてのショックが世界中に反響を呼んだ．これはガリレオ式のイタリア裁判か？と多くの人が感じ — そしてまだ感じている — 科学自身が (再び) 裁判にかけられていると．

2010 年に，4000 人以上の科学者がイタリアの Giorgio Napolitano 大統領への公開質問状に署名した．彼らは，

Giampaolo Giuliani と 2009 年 4 月の地震の後のラクイラの惨状 . (写真 : John Dollar and Getty Images)

NCFPMR は地震を予測する方法がなかったとして「理由がない」という主張を宣言した．他の人たちは「不公平で世間知らずである」という起訴を行った．

伝えられるところによれば，英国の科学者 Malcolm Sperrin が以下のように言った：「もし科学界が正しくないことが分かる予測をすることに対して，あるいは正確にその後起こるイベントを予測しないことに対して罰せられるなら，その時の科学的な努力は確信のみに限られ，そして関連づけられる調査結果を伴った成果は医学から物理学まで停滞させられるであろう」．

しかし，ラクイラの 7 人は，表面的な危険評価を行なうことと，大衆に不完全で間違った安心を与えるような調査結果を紹介したが (著者が斜体にした)，地震を予測し損ねることで告訴されはしなかった．

オーストラリアの国立大学の地震学と地球物理学の教授の Brian Kennett は，「イタリアのグループは過度に安心させるようなことをしたかもしれない」と感じた．結果が何であれ判決は，「将来のリスクについて宣言を作っている世界中のどんなグループに対しても大きな禁止の効果を与えるだろう」．

環境機構部門地震調査センターの上級地震学者である Wayne Peck は同じ意見を示した：「ある方向での誤りは「過度に安心させた」という責任が課されるが，しかしそれ以外の方向での誤りは騒がせたことを非難される．いずれの方法でも，使われた言語における小さなニュアンスが，勝算がない状況の専門家からは離れて，さまざまな聴衆によってさまざまに解釈されるだろう．」

ケンブリッジの大学の危険の公共的理解の Winton 教授である David Spiegelhalter 教授は．それを科学的な助言を与える誰でもぞっとさせる「奇異な判決で，私は彼らが控訴で自由になることを望む．」「私にとっての教訓は，科学的助言者が彼らの仕事がどのように伝えられるかについての管理をつづけなくてはならず，そして適切に大衆に関わりを持つように訓練されなければならないということである．」と主張した．

ロンドン大学の地球物理学と気候災害の教授である Bill McGuire は，この判決が極めて驚くべきことであったと言った：「もしこれが先例とされれば．国家政府がどんな科学者にでも自然の危険災害評価パネルの一員になってもらうよう説得することが不可能になるだろう．それからより長期に，この判決は生命を犠牲にしてもそれらを救わないであろう．」

ひとりの卓越したオーストラリアのコラムニストが「少数のイタリアの裁判官」は多分「永久の干ばつ，空のダム，たくさんのハリケーンと危険な海水面上昇を予測した我々にとっての気候の人騒がせな問題を解決する」ことができることを示唆した．

しかし，ラクイラでは裁判は十分に評価して潜在的な危険を伝えるための政府によって任命された委員会の失敗については，よりいっそうである．

罪状が検事 Fabio Picuti によって 2010 年 6 月に提出されたとき，ある者は国の最も尊敬されている地球物理学者を犠牲にする試みだと記述した．

「私は彼らが地震を予測することができないことを知っている」と Picuti が言った．「告訴の基礎は彼らが地震を予測しなかったことではない．国家の役人として彼らは法律によってある特定の義務がある：それは．ラクイラに存在していた危険を評価して特徴づけことである．」

「彼らがある特定のものと問題であることを知らなかったか；彼らが知っていることや，どれが問題であり，伝えるべきか方法を知らなかったか，のいずれかである．」

判決の文脈はどうだろうか？　シャーロック・ホームズの公理を適用して —「小さいことは非常に最も重要である」— といくつかの面白い事実と作り話が明らかにされた．

執心をともなう彼の偶然の一致に対する原因となる拘禁と詭弁は，コナン・ドイルの熟練した探偵から逃れなかったであろう 2 つの興味をそそるイベントを示した — そのひとつはラドン男としても知られる Giampaolo Giuliani に関するものと他はヒキガエル集落である (下の教訓 9 を参照)— ．見たところでは両方とも，地震の直前にラクイアから離れた山道のオービットの故郷の近くの Sulmona (人口 25,000 人) で前兆現象を示した．

Giuliani は，2010 年に彼が引退するまで Gran Sasso 国立研究所のそばにいた 20 年間を含めて，イタリア国立核物理学研究所で研究員として 40 年間働いた．

彼はラドンガスの放出が地震の前日かそこらに際立って揺れ動くと信じている．科学的事業において，短期の予測因子としては同じぐらい方法の信頼性に強い懐疑心があるにもかかわらず，彼は地域全体に 4 つの自家製のラドン探知器を据え付けた．

ラドン男の田舎くさい実験は劇的な結果をもたらし，究極的に裁判を導くイベントの連続を引き起こした．

彼はこの地域で異常に高いラドンレベルを検出したと主張した．それらが差し迫った地震を示すと信じて，彼は Sulmona の市長に彼の (非公式な) 予測を告げた：あるものは 3 月 29 日の午後を起こるだろうと．市長は，拡声器を積んだバンに町を通って住民に警告するようにきちんと命じた．

地震は 3 月 29 日に Sulmona を襲わなかった．次の日，国家民間保護局が公共の警告を起こさせたラドン男について procurato allarme あるいは Codice penale

italiano Art. 658-Procurato allarme presso l'Autorita で言及した．彼はそれ以上警告を公開 (またオンライン化) することを禁止された．

2009 年 4 月の地震の後に，彼はイタリアのタブロイド紙で，科学事業に切り札で勝っていたアマチュアとして，「かなりの学者と殉教者」になった．The Guardian は彼を「地震を予言した男」と記した．しかし，Marcello Melandri と Boschi の弁護士は異なった考えを持っていた．Giuliani は，はばかげたことでそれまで地元住民を怖がらせていたと．

イタリアの民間保護課 (DCP) 課長の Guido Bertolaso は，Sulmona のパニックがラクイラに広がることを「非常に心配していた」．致命的な地震の 6 日前の 3 月 31 日に，DCP の課長代理の De Bernardinis と 6 人の科学者―大規模危険委員会のすべてのメンバー―- は町で公式のミーティングとメディア会議を予定していた．

裁判の途中で公表された電話での会話記録で，それが地震の短期的危険について大衆を安心させるためのはっきりした目的で召集されたことが示唆された．科学者は使われたか― あるいは彼らは彼ら自身承知の上で ― 住民をなだめる DCP の試みで使われることを許したか？

メディアの会議は，不幸にも地震の可能性を軽視した．De Bernardinis は，最近の震動が実際に地震の危険を減らしたと主張した：「科学界は実際それが好ましい状態であることを確認し続ける」と彼が言った．また「それはエネルギーの放出が絶え間ないということである」と．

大衆が避難すべきかを直接尋ねたときに，地震を心配するよりも 1 杯のワインを楽しもうと，De Bernardinis が返事した：「絶対に，絶対に モンテプリチアーノのワイ　ン［Montepulciano d'Abruzzo Denominazione di origine controllata(原産地統制認定のモンテプルチャーノ・ダブルッツォ)］は重要に思える．」

検察側の論拠の一部として，Picuti は地震の夜に地元住民によってされた決定的な決断がこれらの言明によって影響を与えられたと論じた．

「あなたはほとんど安堵のため息が町全体に起こったのを聞くことができた」と．寄宿舎が崩壊したときに死んだラクイラ大学の 8 人の学生のいく人かの家族の代理を務めている弁護士 Simona Giannangeli が言った．「それはほとんどマントラ (呪文) のように繰り返された：震動が大きければ大きいほど，危険はより小さい．」「この句」は，ラクイラの住民のひとりの意見で，「ここでは多くの人たちにとって致命的だった」．

(家族のメンバーを失った) ひとりの取り乱した住民が Picuti に委員会が会合から発せられたメッセージを告げた．「いずれかの方法で我々は地震の恐れから逃れられるかもしれない．科学は，この時に，劇的に皮相的で，そしてそれは慎重の文化と我々の親が経験を基礎にしてそして前の世代の賢明さについて我々に教えた良識を暴露した」(著者がイタリックにした)．言い替えれば，彼らは (この場合) 科学的な意見を無視して，彼らの直観力を信頼する方がより良かった．

Stephen Hall の記述によれば，多くの人々には「ミーティングは，信頼できる地震予測［そしてラドン男をほのめかして］の考えの信用を失墜させて，それによって地元住民を安心させるために，［皮肉っぽく］本質的に広報活動として開催されたものと見えた」．

Molise の隣接する地域の DCP 地震学者である Christian Del Pinto は，そのミーティングの一部に出席した．彼は後に検察官にその進行が「グロテスクなパントマイム」であったと言った．Boschi さえ「ミーティングのポイントは住民をなだめることであった．我々［科学者］は後になるまでそれを理解しなかった」と今では言っている．

地震の危険を大衆にはっきりと伝えることはすでに難しいことではない．米国地質調査局は強調している：「USGS，カリフォルニア工科大，そして他のいずれでもない科学者が今までに大地震を予言したことはない．彼らはどのようにも知ることができないことと，近い将来にどんな時にも知ることを期待していない．USGS は，短期予測を達成しようとするよりむしろ，建築物の安全性の改善に役立つことによって，地震の危険の長期的緩和にその努力を集中している．」

たいていの地震学者は地震の位置とタイミングについての決定的な声明を作ることに抵抗するのに対して，多くが可能性を声明する用意を整えている．ニュージーランドのカンタベリー大学で活構造と地形学の上級講師をしている Mark Quigley もそのひとりである．

彼は最近これまでの 60 年間のイタリアの 26 の大きな地震のうち，小規模な前震が先に起こったのは，わずか 6 つであることを指摘した．実際，群発の中の中規模地震は，それらのわずか約 2% だけが数日以内に大規模地震を伴った．それでラクイラの 7 人は「大地震が迫っていることが間違っている可能性は，98% であろうという具体的な警告を発表した．」

けれども，Quigley が指摘したように，それが「科学者にとってもし特にこれらのコメントが人騒がせの理由で非難するために使われるなら，公然と低い可能性のシナリオについて話す 1 トンの勇気」をもつなら，この種類の可能な危険評価がどのようにいつか共同体を「守る」であろうかは不明確である．

それはそうとして，Nature は，科学者が 1 時間の会議で次の声明をだしたと報告した：「大地震はこの地域に

ありそうもないが，それを除外することはできない」．そして「最近のいくつかの地震には，数日かあるいは何週間か前に小さな地震が先行したが，いっぽうで，多くの群発地震は大きい地震イベントをもたらさなかった」．同じく「ラクイラは危険性が高いゾーンにあることから，将来に大きな地震がないとは確からしさをもって言うことは不可能である．」

もしラクイラの７人が公的に地震予知の不可能さを強調していたなら；もし彼らが不安な市民に，意図的にあるいは意図的でなく，このような専門家の権限で「安心させるような」イメージを伝えていなかったなら，結果は異なっていたかもしれない—被告と少なくとも犠牲者の何人かの双方にとって．

皮肉にも，ラクイラの黒い鷲のとさか— Immota manent —はラテン語の献呈の辞で「心を動かされないままでいる (あるいはそうであってください)」を意味する．上訴裁判所はラクイラの７人の苦境—例えば，彼らがどのように何百万ドルもの損害賠償金を支払って—そして彼らの刑務所判決を無効にすることを期待されることができたかによって十分に動かされるであろうか？

教訓１：人騒がせな声明は予測である．
教訓２：安心させるような声明は予測である．
教訓３：群発地震の間にリラックスして１杯のワインを飲むように勧めることは安心させるような声明である．(Montepulciano のグラスを持つという De Bernardinis's の提案は，ひとりの弁護士によれば，「冗談でした！冗談をおよそ１杯のワインにして，そして次に有罪判決に直面することはばかばかしい．それは中世からの何かである．」
教訓４：パニックを起こす (そして，気候変動がわずかな時に，あなたの生活，文明，地球から炭素を取り除く) 勧誘は人騒がせな声明である．
教訓５：チョークはチーズではないように，憶測は科学ではない．
教訓６：不確実の滝の下で歩くときは傘を持っていけ．
教訓７：「低い可能性のイベント」と自然の現象の複合体 (地震．気候変動など)，ノア複合体をともなう「荒れた天気」の 大惨事についての予報官にとって予測は「現実が常に最後に笑う」．
教訓８：「危険防止」の専門家 (と行政機関) のために，マントラ：「私 (我々) は知らない」がある．2009 年４月の地震の５日前にラクイラ から 74km の場所で普通のヒキガエル群集が生殖活動中に地震の前兆行動をしたと主張されているものについては；それは—ホームズが結論した—「ロングショット，ワトソンくん，非常に勝ち目がない馬だね！」(もしヒキガエルの不安が差し迫った地震を示唆するなら，おそらく *homo sapiens* においても不安が「予測される」?)．
教訓９：地震が活動的な地域にいる競馬の賭け人は，トラックからのひとつの示唆として，「話や震えあるいは鳴き声の何かに決して賭けるな」という．

文　献

Dollar, J., 2010．http://www.guardian.co.uk/world/2010/apr/05/laquila-earthquake-prediction-giampaolo-giuliani

Grant, R.A. and Halliday, T., 2010. Predicting the unpredictable: Evidence of pre-seismic anticipatory behaviour in the common toad. Journal of Zoology, v. 281, p. 263-271.

Hall, S., 2011. Scientists on trial – At fault? Nature, v. 477, p. 264-269. http://www.nature.com/news/2011/110914/full/477264a.html

Johnston, A., 2012. BBC News - L'Aquila quake: Italy scientists guilty of manslaughter. bbc.co.uk. http://www.bbc.co.uk/news/world-europe-20025626

Nature (editorial), 2012. Shock and law: The Italian system's contempt for its scientists is made plain by the guilty verdict in L'Aquila. v. 490, no. 7421. http://www.nature.com/news/shock-and-law-1.11643

Nosengo, N., 2012. L'Aquila verdict row grows: Global backlash greets sentencing of Italian scientists who assessed earthquake risk. Nature, v. 491, no. 7422. http://www.nature.com/news/l-aquila-verdict-row-grows- 1.11683?WT.ec_id=NATURE-20121101

Pappas, S., 2012. Italian scientists get 6 years for earthquake statements | LiveScience. http://www.livescience.com/24164-italian-scientists-earthquake-verdict.html.

Pielke, R. Jr., 2012. Lessons of the L'Aquila Lawsuit. http://sciencepolicy.colorado.edu/admin/publication_files/2011.36.pdf

Quigley, M., 2012. http://theconversation.edu.au/laquila-charges-leave-earthquake-scientists-on-shaky-ground-10301

Silver, N., 2012. The Signal and the Noise: The art and science of prediction. Allen Lane, Penguin Group; Chapter 5, desperately seeking Signal, p.142-175.

Sisto, A., 2012. Italian scientists convicted over earthquake warning. Reuters (London). http://www.reuters.com/article/2012/10/22/us-italy-earthquake-court-idUSBRE89L13V20121022.

Smithson, M., 2011. Scientists on Trial: Risk communication becomes riskier". 29 September. http://shapingtomorrowsworld.org/Smithson_scientists_on_trial.html

著者について：Michael Kile はロンドン大学の科学技術帝国カレッジから理学修士を取得し，タスマニアの大学からの BSc (名誉) 学位 (地質学 / 地球物理学) と西オーストラリア大学からの BA 賞を受けた．彼は通常のオンラインの寄稿者ではなく，自然の強力な饗宴には余地がない：人類の発展への見返り；ISBN 0-646-23550-8. (1995); http://popindex.princeton.edu/browse/v62/n3/a.html#62:30002. と 気 候変動に対するアステカ族の解決の著者であり，彼の最近の研究計画は気候変動の悪魔の辞書である．

出版物　PUBLICATIONS

（佐々木　拓郎 [訳]）

津波脅威 : 研究と技術
The Tsunami Threat: Research and Technology

Edited by: Nils-Axel Mörner, Stockholm, Sweden
The book (ISBN 978-953-307-552-5) is printed by Intech (www.intechopen.com).
The book can be ordered via orders@intechweb.org. Every single chapter can be downloaded free of charge.

裏表紙

海底地震と海底地すべりとその影響は，大量の水に，長波長でたいへん高速の側方移動を特徴とする運動をもたらすだろう．それが浅海に達すると，波は陸上で砕波し，しばしば災害をもたらす．この自然現象は，津波という出来事として知られている．2004 年 12 月 26 日のインド洋津波によって，この言葉は，急に一般的に知られるようになった．結果は実に悲惨で，約 227,898 人が亡くなった．津波という出来事は , 地球の地球物理システムの自然現象である．過去に多数の津波があり，そのため，沿岸地域に多くの人間活動や多くの人々が居住している場合には，今日でもなお，津波は人類に対する脅威となりつづけるであろう．したがって，津波は人類に対して非常に深刻な脅威を生み出す．私たちが効率的な警戒システムおよび支援組織によって将来の津波を予測できることのように，私たちがこの脅威に対応する唯一の方法は知識の増加による．この本は，津波に関する広範囲で新しい情報，起源，歴史，結果，モニタリング，災害性評価，および警戒に関する取り組みについて提示する．知識によってのみ，私たちは，賢明なやり方で対応する方法を理解することができる．この本が今後の津波知識のひとつになることを，私たちは望む．

序文

1755 年 11 月 1 日 (キリスト教の祭日) の日曜日，午前 9 時 30 分を回った直後に，リスボンは大地震に襲われた．ビルは轟音とともに崩壊し，その粉塵が大気中に上昇して太陽光を遮り，出火し，そして巨大な津波が陸に押し寄せた．「リスボンの災害」として知られている大惨事が発生したのである．都市の大部分は廃墟となり，恐らく 100,000 人以上が亡くなった．後にこの悲劇的事件における真の英雄のひとりとして知られるようになる Marquis de Pombal から，彼の代理人である Sebastião José Carvalho e Melo への「生存者の世話をし , そして死者を埋葬する」という簡素な助言について，King José は唖然となった．最も被害の大きい地域はポルトガル，スペインおよびモロッコの海岸部であった．津波はブラジルやより西方でも記録された．またこの災害は , 幅広く知的衝撃をもたらした．哲学者 Leibniz (1714) は「これは世界最大である」と主張した．Candide (1759) の中で，Voltaire は Leibniz に対する最後の証拠として「リスボンの破壊」を使用し，そのアイディアからかけ離れたものとして世界に浸透させられ，それはむしろひどいものであった．災害は神による仕業であり，それゆえにリスボンが再建することができないといわれたその考えに対し，Voltaire は強く反論した．リスボンはもちろん，再建された．

リスボンの 1755 年の出来事は，恐らく津波研究の歴史の中で，初めてよく記録されたものであった．今日，この出来事から 250 年以上が経過した．それにもかかわらず，私たちが学んだことはほんの少しであるように思われる．新しい地震は，同じ場所で「いつでも」再発するだろう．今日，私たちは，巨大災害には非常に脆弱であり，しかしながら，人口は時間とともに増加し，建物は沿岸に非常に接近していて，人々は海岸にあふれている．効果的な警戒システムが導入されるべきであり，また防災計画が構築されるべきである．それは津波予防のために重要課題となるべきである．それにもかかわらず，未だにそのようになっていない．

2004 年 12 月 26 日 (ボクシング・デー) に，インド洋は津波災害に総なめにされ，少なくとも 227,898 人が亡くなった．それは，リヒタースケールでマグニチュード 9.3 のスマトラ - アンダマン島地震によって発生した．この地震によって，約 700km/h の速度で震央から進む，一連の津波波が発生した．接近する津波の最初の兆候は，海岸の水が引いたことであった．この過程は数分間続き，その時，反転波で満たされた破壊的な砕波が押し寄せてきた．世界は衝撃を受けて驚嘆した．この時，私たちは，津波について学んだように思われる (この本をちょうど読んだように).

今日，この地域には，新たな津波に対する予知と支援のために , インド洋津波警報システムと機関が設立された．上記の 2 つの異例な大規模津波はともに海底地震によって発生した．火山活動や海底地すべりやその影響もまた , 津波を発生させる．1883 年 8 月 26 日～ 27 日にはクラカトア火山の大噴火がくりかえし発生した．8 月 27 日の 10 時 2 分の 4 回目の爆発は，40,000 人程の死亡者数を伴った非常に集中的で破壊的な津波を発生させた．最大津波高は 35m で，それが 2.5 時間後にジャカルタに

到着したときでさえ，まだ 2.4m の高さがあった．

Storegga 海底地すべりは紀元前約 7,000 前に津波をノルウェー沿岸に発生させ (例えば Bondevik et al., 1997), スコットランド (例えば Dawson et al., 1988) でも記録されている．陸域の地すべりでさえも，湖または海に流入すると広域的な津波を発生させる．

白亜紀と第三紀の (C/T) 境界で地球に打撃を与えた非常に大きな隕石衝突は，白亜紀末 (例えば Bourgeous et al., 1988) に動物相と植物相に致命的な影響を与える非常に大きな津波を発生させた．最近，津波は火星でも大きな影響をもたらす要因であると主張されている (Mahaney et al., 2010).

鉛直の崖から海 (あるいは湖) へ落ちる巨石さえ，局地的な小規模津波を発生させるかもしれない．1832 年 1 月 20 日にはチャールス・ダーウィンと彼のグループは，ビーグル・チャネルの対岸の氷河を見ていた時，大きな氷山が海に落ちた．それは大規模で，高速で移動する波を発生させ，それは彼らのボートを陸上におしあげ，危うく死亡するところであった (Darwin, 1839)．今日，私たちは，これが局所的津波だったことを知っている．

この本は，地球力学の自然作用としての津波現象に関する新しい認識として，もう 1 つの証拠であると言ってもよい (Mörner, 2010)．津波は地球力学の一部であり，常にそのように存在し続けるだろう．私たち人間ができることは，警戒システムと有効な防災対策機関の設置などの予防の努力を試みることである．そして , その現象に関する基礎知識を広く普及することが，この本が今日出版される正当な理由である．

本のタイトルは，過去に多くの損害および多くの苦痛を引き起こした津波と呼ばれる現象を形容する中で，人間に対する「脅威」に関係した直接的メッセージを提供するために選ばれた．229,866 人の犠牲者を数えた 2004 年のインド洋津波は，悲惨なことに，自然災害による死者数リストで 13 位あるいは 12 位となっている (Mörner, 2010).

文　献

Bondevik, S., Svensen, J.I. and Mangerud, J., 1997. Tsunami sedimentary facies deposited by the Storegga tsunami in shallow marine basins and coastal lakes, western Norway. Sedimentology, v. 44, p. 1115-1131.

Bourgeois, J., Hansen, T.A., Wiberg, P.L. and Kauffman, E.G., 1988. A tsunami deposit at the Cretaceous–Tertiary boundary in Texas. Science, v. 241, p. 567-570.

Darwin, C., 1839. Voyage with H.M.S. Beagle (with later editions, 1845 and 1860).

Dawson, A.G., Long, D. and Smith, D.E. 1988. The Storegga Slide: Evidence from eastern Scotland for a possible tsunami. Marine Geology, v. 82, p. 271-276.

Mahaney,W.C., Dohm, J.M., Costa, P. and Krinsley, D.H., 2010. Tsunamis on Mars: Earth analogues of projected Martian sediment. Planetary and Space Science, v. 58, p. 1823-1831.

Mörner, N.-A., 2010. Natural, man-made and imagined disaster. From the Editor's desk, Disaster Advances, v. 3, no. 1, p. 3-5.

Nils-Axel Mörner (Stockholm)　morner@pog.nu

ニュース　NEWS

（角田 史雄 [訳]）

ヨーロッパ地圏科学連合 (EGU) 総会における地震の会期
オーストリア，Viena，2012 年 4 月 7 ～ 12 日
Earthquake sessions at the European Geosciences Union (EGU) General Assembly
7 to 12 April, 2012, Vienna, Austria

EGU 総会における自然災害 (NH.4) と地震 (SM.3) についての討議では，地震災害と地震予知について検討する 2 つの集会を予定することになった．これらの集会を盛り上げるのに，委員長 Valentino Straser 博士は，より多くの報告を望んでいる．詳しくは vstraser@ievpc.org へ至急ご連絡願いたい．要旨の締め切りは 2013 年 1 月 9 日．お問い合わせは www.egu2012.eu/ までご連絡ください．

国際地震・火山予知センター
地震予知センターは成功裏に早期テストプログラムを終了

International Earthquake and Volcano Prediction Center P.O. Box 607147 * Orlando, Fl 32860 (407) 985-3509 * mail@ievpc.org

Earthquake Prediction Center Ends Successful Test Program Early

2012 年 12 月 17 日（月曜日）午前 8 時
03-12-17-12 発信

国際地震・火山予知センター (IEVPC) が組織されたのは最近であるが，進めてきた地震のテストプログラムを今日終えることにしたい．それは，テストプログラムで得られた記録をほぼ完全に保存し，命と暮らしを守る取り組みをすぐにでも始めなければならないからである．

IEVPC は，破壊的な地球物理学的現象 (CGE) の観測モニタリングと警告システムに関する第一段階の 3 つのテスト，つまり，地震を予知するためのテストを，まさにほぼ完ぺきなレベルで成し遂げた．この結果を得て IEVPC は，それ以上の検討は止めて，甚大な被害をもたらす大地震を，高精度で確実な予知が可能になったことを世界の各国政府へすぐに知らせるべきだと決断した．

委員長 (CEO) の J.L. Casey 氏は，以下のようにコメントした；「われわれは，地震にたいして後ろ向きの姿勢で，もたついている場合ではない．大地震にたいして，非常に信頼性の高い予知の方法が存在することを，各国の人々に知ってもらうべきである．毎年, 何千人もの人々が命を落とし，家や仕事が失われるだけではなく，何万という人々の生活そのものが奪われる自然災害が起こる．ほぼ 20 個もの地震を検討してきたわれわれのテストプログラムはすぐに終える必要がある．われわれはいまや，信頼性の高い地震予知をもつに至り，それは，リスクを抱えたどんな場所でも使えるものである．われわれの専売特許であるテストプログラムを終える決断をしたのと，医薬品の認定テストとは，似たところがある．医薬品なしで毎日人が死んでいく状況なのに，結果を恐れるあまり，新しい薬品の開発を急に止められるだろうか．これと同じようにわれわれは，待つ姿勢を止めて，積極的に打って出ることにしたのである．

世界の国々の人々にとって，われわれが今なすべきことは，「地震は予知できない」というのは風評であり，事実ではないことをはっきりさせ，かつ，いわゆる地震危険地帯についての情報ネットワークをつくり，モニター設備を設けることである．他の国際組織も，最近の技術を応用した地震用の探査機器を発明し，われわれと同じように，多くの予知技術を統合したり，一連の現象のなかでの前兆を探したりしている．ところで，われわれは，そうした災害を予告された人々が最大，何か月，何週間，何日前から準備しなければいけないかも割り出せる．そして，われわれが地震を予知するプロセスをつねに改良している間は，それに対応するテストプログラムも続行されるのである．しかし，その間に耐えきれないほどの人道上の問題が起これば，それを止めることもある．

昨年 9 月私は，地震予知の分野で世界の優秀な地震学者を集めて，技術・方法・優れた経験を結集した新しい組織を立ち上げた．彼らは，気候変動の予測で成功した私の下へ，とくに，気候変動と地震ならびに火山の活動とを関連づけるために参集してくれた．そのなかでの研究担当のリーダーである Dong Choi 氏は ” 私たちは忙しいが，地震予知に良い結果と光明をもたらすために，一つ屋根の下に集まった” と言ってくれた」．

過去 2 ヶ月の間，IEVPC は世界の異なった地域で，3 ケ所に分けて，大地震の時間･場所･マグニチュードなどを，ほぼ完全に予知する，という結果をえた．それらは以下のようにまとめられる；

1. カムチャッカ半島とロシア：このテストでは，大きな地震の日時と場所を正確に予知できたが，きわめて短期間の 3 日間に，驚いたことに，M4.6 ～ M5.8 の 9 つの地震が起こった．これらの連動した地震群は，IEVPC が予想した単一の M7.5 ～ M8.8 の地震と対応するものである．カムッチャッカや太平洋沿岸の人々に幸いだったのは，最終的な実効エネルギーが地表近くで放出され，2012 年 10 月 14 ～ 18 日の間に，カムッチャッカ東岸沖の数本の断層沿いで分散したことである．この群発性の地震による死者は知られていない．仮に単一の地震から全エネルギーが放出されたとしたら，太平洋沿岸域の津波で何千という人命が失われていただろう．このテストに参加した科学者は，IEVPC の研究班班長の Dong Choi 博士をはじめ, IEVPC の Z.Shou 博士, M.Hayakawa 博士，A.Bapat 博士，V.Straser 氏などの方々であった．

2. セレベスと北インドネシア：IEVPC 研究班班長・Choi 博士の先駆的な研究の結果，2012 年 10 月 17 日にあらかじめ予想していた場所と時間に，M6.0 の海域地震が発生した．深海部の深発地震であったので，死者は出なかった．

3. ミャンマー；IEVPC が予想していた大きさの地震が，想定していた日時と場所で起こったが，それは，ミャンマー中央部における 2012 年 11 月 11 日の M6.8 地震であった．

このうちミャンマーの地震の兆候を最初に指摘したのはインドの地震学者である Arun Bapat 博士だった．Choi 博士は，その Bapat 博士の発表した結論に，他の兆候も加えて解析を行った．そして，最終的に予想した破壊地震 (CGE) は，発生場所がミャンマー中央部で，2012 年 11 月 6 日以後の 2 週間以内，大きさは M6.5 ～ M7.0, と予想された．この地震が起こった後，Bapat 博士の評価が確固たるものになった．彼は, この分野におけるもっとも傑出したリーダーの一人になったのである．また，ミャンマーの地震を予知した彼の仕事は，IEVPC のなかでも，もっとも傑出しているものの 1 つである．

Bapat 博士は次のように述べている；「IEVPC がまだ，内陸の地震の性質を掴み切れてなかったころには，ミャンマーの地震が起こるか否かの判断はできなかった．しかし，その間にも，セレベス海とカムッチャッカ半島での地震は発生していたのである．この事実は，早く早期

のテストプログラムを終わらせて，世界の人々に地震の危険性を知らせるのが正しい判断であることを示してくれた．Casey さんと Choi 博士とは，地震予知の分野において，“破壊的な地震の予知はできない”という迷信を終わらせるのに何年にもわたって多大な貢献をしてきた．私は，人類史のうえで，こうした時代に生きている，と確信している．」

Choi 博士は，これに加えて，「われわれは，まったく初めての３つのテストで顕著な成果を挙げられた．のみならず，それらのもつ地球物理的な意味はそれぞれことなっている；つまり，カムチャッカの地震は，太平洋沿岸域の海溝の断層によるものであり，セレベス海の地震は，単発性の深海域の地震であった．また，ミャンマーの地震は，内陸性・群発性の地震だった．つまり，われわれのテストプログラムは，３つのそれぞれ異なったタイプの地震を予知したといえる．これが，このテストを早く切り上げた，もう一つの理由である．もし，これがたった１つだけのタイプの結果だったら，終了と言う選択肢はとらずに，テストを継続していただろう．これ以外の道はないのである．いまこそ，プログラムを終わらせて，人々の救済をはじめるべき時である．」

Casey 氏は Choi 博士に同調して，次のように述べている；「カムッチャッカ，セレベス海，ミャンマーでの予知程度のことが，もっとずっと安い予算で行えるようになれば，はるかに意義深いものになる．毎年，何千人もの命が救えるようになることが実現するのである．今週から，スタート時からの活動をより広げる能力を高め，CGE の脅威にさらされるすべての国々の人々を救うための力強いプログラムを展開するつもりである．IEVPC は，ほんとうに地震を予知できる，新しい時代の幕を開けたことを実践して示していくのである．」

国際地震・火山予知センター (IEVPC；訳者加筆) は USA のフロリダ州 Orlando に本部があります．研究部門はオーストラリアの Canberra にあり，そこは，USA，インド，中国，日本などの研究者の共同研究をすすめる支局になっています．IEVPC は，早期の予測によって，地震，地震津波，火山の噴火などの破壊的な地球物理現象 (CGE) から人々を守る活動を行う非利益団体の研究組織で，ウエッブサイトは www.ievpc.org です．

財政的支援について　***FINANCIAL SUPPORT***

多くの読者からの示唆にしたがって，NCGT Newsletter は公開雑誌になった．今や，登録することなく，誰でもすべての号にアクセス可能である．これは，この雑誌の発行費用を賄うために，私たちは読者からの善意・無償の寄付と広告収入に頼らなければならないことを意味する．私たちは読者の寛大な財政支援を歓迎する．印刷版の購読費は，US$140/ 年 (あるいはユーロ相当額)+ 郵送費である．広告費は，裏表紙 (Premium position) 半ページで US$60/ 号，US$220/ 年，全ページで US$100/ 号，US$360/ 年 (あるいはユーロ相当額) である．他のページでは，10% 割引．詳細は editor@ncgt.org. へ．

■ もしあなたが PayPal 口座をお持ちであれば，下記口座へ送金されたい (PayPal はクレジットカード Visa・MasterCard で支払い可能．この方法の利用を推奨する．
http://paypal.com/cgi-bin/
口座名 :New Concepts in Global Tectonics
E-mail:ncgt@ozemail.com.au (editor@ncgt.orgではない)

■ 銀行振替あるいは小切手でお支払いの場合は
宛名：New Concepts in Global Tectonics
郵送先：6 Mann Place,Higginns,ACT2615,Australia

■ 現金で銀行送金する際の銀行口座の詳細
銀 行 名 :Commonwalth Bank (Swift Code: CTBAAU25), Belconnen Mall ACT Branch (BSB 06 2913)
口座番号 :06 2913 10524718
口座名義 :New Concepts in Global Tectonics

ニュースレターについて　***ABOUT THE NEWS LETTER***

このニュースレターは，1996 年 8 月に北京で開催された第 30 回万国地質学会のシンポジウム "Alternative Theories to Plate Tectonics" の後でおこなわれた討論にもとづいて生まれた．New Concepts in Global Tectonics というニュースレターのタイトルは，1989 年のワシントンにおける第 28 回万国地質学会に連携して開催された，それ以前のシンポジウムにちなんでいる．

目的は次の事項を含む：

１．組織的照準を，プレートテクトニクスの観点に即座には適合しない創造的な考え方にあわせる．
２．そのような研究成果の転載および出版を行う．とくに検閲と差別の行われている領域において．
３．既存の通信網では疎外されているそのような考え方と研究成果に関する討論のためのフォーラム．それは，地球の自転や惑星・銀河の影響，地球の発達に関する主要学説，リニアメント，地震データの解釈，造構的・生物的変遷の主要ステージ，などの視点から，たいへん広い分野をカバーするべきものである．
４．シンポジウム，集会，および会議の組織．
５．検閲，差別および犠牲があった場合の広報と援助．