

ニューズレター グローバルテクトニクスの新概念



NEWSLETTER *New Concepts in Global Tectonics*

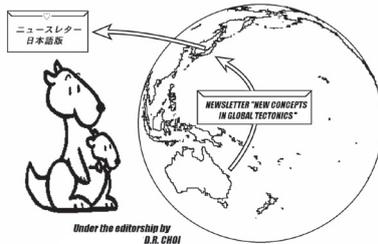
[英語版 No. 61 <<http://www.ncgt.org/>> から翻訳]

日本語版 No. 61 (2012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

■ 会議報告 構造コロキウム 20 周年記念シンポジウム	[久保田喜裕 訳]	2
■ 編集者への手紙	[久保田喜裕 訳]	5
■ 原著論文		
Recent seismic activity in the Japanese Islands Yasumoto SUZUKI and RG=DSIA 地震構造の視点から見た日本列島における最近の地震活動	[赤松 陽 訳]	6
Tectonics of the West Mediterranean and Carpathian Arcs since the Late Cretaceous Jacob SHAHAR 白亜紀以降の西地中海弧とカルパチア弧のテクトニクス	[山内靖喜・小泉 潔・矢野孝雄 訳]	9
Fundamental role of deformations in internal dynamic of the Earth Hatam GULIYEV 地球内部ダイナミクスにおける変形作用の基本的役割	[矢野孝雄 訳]	23
Radio anomalies and variations in the interplanetary magnetic field used as seismic precursors Valentino STRASER 電波異常と惑星間磁場磁場領域変化の全地球規模の地震予兆としての利用	[岩本広志 訳]	32
A potential relationship between the climate, earthquakes and solar cyclicity Valentino STRASER 気候、地震および太陽周期の間に存在する可能性のある関係性	[矢野孝雄 訳]	39
Volcanic and seismic activities during the solar hibernation periods Dong R. CHOI and Fumio TSUNODA 太陽活動停滞期における火山・地震活動	[角田史雄 訳]	45
Some problems of Kimberlite geology and electric discharge hypotheses K. K. KHAZANOVITCH-WULFE キンパーライト地質学における問題点と放電仮説	[宮城晴耕 訳]	53
Catastrophes in the first half of Holocene and their possible dynamic causes Stanislav A. GRIGORIEV 完新世の前半における大災害とそれらの可能な力学的原因	[柴 正博 訳]	58
■ 短報		
Methodology to check correlation between Earth tide and earthquakes Vinayak KOLVANKA 地球潮汐と地震との関連性の検証方法ならびに図化	[矢野 孝雄 訳]	68
■ 随筆		
Facts, theories, blind commitments and socio-dynamics Karsten STORETVEDT 事実、理論、盲目的な追従と社会的動向学	[小坂共栄・小松宏昭・矢野孝雄 訳]	71
■ コメントと回答 [潮汐と地震] / ニュース [IGC] / 財政的支援について / ニュースレターについて / 広告		92

連絡・通信・ニューズ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 TECTONICS

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] このニューズ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と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 0857-32-5113 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

[会議報告] 構造コロキウム 20周年記念シンポジウム 20TH-ANNIVERSARY SYMPOSIUM, COLLOQUIUM FOR STRUCTURAL GEOLOGY, JAPAN

(久保田 喜裕 [訳])

構造コロキウムは、1991年に設立されて以来、徹底したフィールドワークに基づいた独創的な研究を行うことを理念に、年2回の例会を開いてきた。今回20周年を記念し、“新しいグローバルテクトニクスと巨大地震”と題して、特別シンポジウムが2011年12月18日に東京で開催された。豪州から Dong Choi 博士を招聘して、“新しいグローバルテクトニクスの観点からみた東北日本巨大地震”と題した講演を2時間にわたっていただいた。他に7名の研究者からも講演をいただいた。当日は50名を超す熱気に溢れた研究者らで会場が埋め尽くされ

た。それらの講演要旨を以下に示す。つぎの大地震が懸念されている今、今回のシンポジウムは時機を得たもので啓発的であった。すべての参加者は、プレートテクトニクスの時代は終わりつつあり、大地震はならず予知できることを強く感じた次第である。“熱く長い”一日は次の合い言葉で終わった。“34回 IGC ブリスベンで再会しましょう”。

久保田喜裕 (新潟大学)

kubota@env. sc.niigata-u. ac. jp



Masashi Hayakawa, Short-term earthquake prediction



Fumio Tsunoda, VE process of gigantic earthquakes



Audience and a film crew



Dong Choi, Great East Japan Earthquake



Michihei Hoshino (standing) presented a paper "Earthquakes and waters (sedimentary basin)"



Yasumoto Suzuki, Recent successive destructive earthquakes

講演要旨

新しいグローバルテクトニクスの観点からみた東北日本
巨大地震

Great East Japan Earthquake viewed from
a new global tectonic perspective

Dong R. Choi, Australia
raax@ozemail.com.au

2011年3月のM9.0東北日本巨大地震(GEJE)に関する入手できる地質・地球物理データによると、前震、本震、余震は、顕著なNW-SE方向の構造的高まりによって境されている本州北部の沿岸と沖合に位置している；北部は日高隆起帯沖、南部は佐渡-銚子背斜(新称)。その地域は、N-S方向の古生界リッジによる広大な地塊の高まりからなる。この地殻の隆起構造は、太平洋の形成(沈降運動)と中生代以降の島弧の隆起に関連して形成された。

本震は古生界の基盤リッジと日本海の南部から能登半島を通して北西太平洋へ連なるENE-WSW方向の地球断裂系(planetary fracture system)の会合部で生じた。2011年3月9日-10日の大きな前震も同様の地質的背景で発生した。その解釈は、NE-SWの高角断層運動とエネルギー放出パターンを示しているモーメントテンソル解と調和的である。強い余震(M6.0+)はすべて、縁辺やWNW-ESEの大規模な構造線に沿う基盤リッジに位置している。

この途方もない規模の地震は、日本海西部/ロシア極東沿岸、およびSusongchon-琵琶湖構造線(M5.5~6.8; 深度:350~640km, 2005~2008年に発生)に沿う中部日本の陸上や沖合に端を發した地球深部エネルギーが収束した結果である。引き続き熱エネルギーが、角田のVE過程のとおり、MJ(マリアナー日本)ルートを通じて供給された。合流した強烈な熱エネルギーは、広域的な地殻の隆起地塊下の上部マントルに閉じ込められた。熱膨張したマントルは上載地殻を押し上げ、ついには基盤リッジと断層帯に沿って破壊した。強いきっかけは、太陽と月が及ぼす力によってもたらされた；太陽は災害前の七日間にわたり、強いフレア(コロナの大規模噴出)を放出し、その時月は地球に最も接近していた。

深部前兆は2005~2008年に現れた。この期間はまた、太陽周期360年が衰える期間におよそ一致しているマウンダー極小期ないしは小氷期の初期段階に匹敵する。地震や火山噴火、極端な気象など、近年よく発生する自然災害は、地球のコアエネルギーが強力な惑星間力によって、大きな太陽周期の底状態の間、大量に放出されたことに端を發している複合効果の結果とみられる。

GEJEは、本震に先立つ16日前に、蒸気雲や地噴(geoeruption)によって先行されていた。地震予測の全

球ネットワークでは、2011年3月7日から各観測所で記録された強い重力異常に基づいて、本震に先立つ2日前、2011年3月9日に、時刻と規模、位置ともピンポイントの正確さで、クライアントに通知した。電磁気前兆信号も早川によって捉えられていた。これらの事実は、大規模な地震は今日の確立された科学的視点から予測できることを示している。

電磁気効果を用いた短期地震予知
Short-term earthquake prediction by means of
electromagnetic effects

早川正士^{1),2),3)}

secr_haya@gmail.com

- 1) 電気通信大学(UEC)先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター、東京都調布市調布ヶ丘1-5-1
- 2) (株)早川地電磁気研究所、電気通信大学イノベーション研究棟
- 3) 地震解析ラボ、インフォメーションシステムズ(株)、東京

従来型の地震測定方法は地震の短期予知として何年も行われてきたが、そのような力学的測定方法では地震予知は不可能であると結論づけられた。最近20年間、地震予知に対し、我々は電磁気効果を用いた新しい手法で多大な進展を遂げてきた(電場および/ないし磁気場、電磁放射、電離層擾乱などのように)。とくに、亜電離層のVLF/LF伝播にもとづいた電離層擾乱が、長期間の観測によって、統計的に地震に関連することが見つかっている(マグニチュード6以上、深度40km以浅)。最近、我々は地震予知情報を世間に提供するベンチャー企業を設立したが、そのような情報は2012年1月半ばに携帯電話で公開される。

スマトラ島と東日本の超巨大地震のVE過程
VE process of ultra gigantic earthquakes in
Sumatra Island and in Eastern Japan

角田史雄

tsunochan@sky.email.ne.jp

飛び跳ね地震がスマトラ島と東日本の二つの超巨大地震の前兆として確認された。この地震の飛び跳ね現象は、熱膨張層の上に載る板状の岩盤が上方への曲げが始まると顕著になってくる。

南西アイスランド, Thingvellir 地域の地質
-プレートテクトニクスに否定的な見解-

Geology of Thingvellir Area, Southwest Iceland -Negative
concept on plate tectonics-

野村 哲

sattonom@pony.ocn.ne.jp

大西洋中央海嶺や南西アイスランドの Reykjanes 半島, Thingvallavatn 湖は, 拡大軸上に位置し, 約 200 のギャオが Thingvellir 周辺の変動の結果生じた指摘されてきた. 筆者は Thingvellir 周辺の地質を調査した. この地域の層序は, 下位より, 松山逆磁極期 (1.8Ma ~ 1.2Ma) の火山岩類, 溶岩およびハイアロクラスタイト (1.1Ma ~ 0.7Ma), テーブルマウンテン (0.5Ma ~ 0.2Ma?) からなる. Hrafnabjorg の東では, マグマだまりが地表に達し, 火山活動が隆起の頂部から始まった. 約 100 もの Thingvallahraun のシートは, 主に Eldborgir の割れ目状火道に由来する. Thingvellir 地域直下のもうひとつのマグマだまりは, 隆起帯から移動し, 前者の中へ入り込んだ. その変動の後, Thingvellir 地域は約 20m の深さまで沈降し, 巨大な多くのギャオを形成した. したがって, ギャオの起源は, 地殻の拡大ではなく, 地面の沈降によるものである.

近年の日本で次々と発生する破壊的地震

Recent successive occurrence of
destructive earthquakes in Japan

鈴木尉元・島弧深部構造研究グループ

yasu-suzuki@vega.ocn.ne.jp

日本列島の本州南西部は, 1995 年 1 月 15 日兵庫県南部地震 (M7.2) の発生以来, 続いて 2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震 (M7.3), 2001 年 3 月 24 日芸予地震 (M6.7), 2005 年 3 月 20 日福岡県西方沖地震 (M7.0) と地震活動が活発化している. その地域は, 浅発地震の p 波放射パターンから得られた楕円状に配列する断層がいくつか列をなして環状に取り巻いている. 2004 年 10 月 23 日中越地震 (M6.8) が本州北部における 21 世紀の地震活動の前兆となって以来, 続いて 2007 年 3 月 25 日宮城沖地震 (M7.2), 2007 年 3 月 25 日能登半島沖地震 (M6.8), 2008 年 6 月 14 日岩手-宮城内陸地震 (M7.2), 2011 年 3 月 11 日三陸-常磐沖地震 (M9.0), 2011 年 3 月 12 日長野県北部地震 (M6.7) が発生した. これらの地震地域は, 本州の浅・深発地震に伴う断層の環状配列の二つの列によって取り巻かれる. 本州北東の沖合地域には, 浅発地震による環状配列が見られる. 本州北東の浅・深発地震による断層配列は互いに並走している. 浅・深発地震に伴う断層の並走配列は, 環状断層構造が垂直に延びていることに起因すると考えられる. 浅発地震と深発地震の間には, 互いに繰り返す活動がみられる. このような構造は

深発地震帯に沿うプレートサブダクションに矛盾する. また, プレートは沿岸地域や本州中央部の下には描かれるが, 日本海の沿岸地域下では見つかっていないことが示すように, マントルトモグラフィはいつも日本列島下のプレートを示している. とは限らない.

地震と水 -堆積盆地-

Earthquakes and waters -sedimentary basins-

星野道平

シンポジウム当日, 星野博士は次のことを強調した. “地震は完全に地質現象であり, 地球物理現象ではない” と. (次の一文は, Hoshino 2007 「Crustal development and SEA LEVEL」 E. G. SERVICE, Sapporo から久保田が引用し編集したものである, 訳者注: 訳文は星野 2008 「海水準と地殻の発達」から引用した). 星野学説の概要は次のとおりである.

地球の小さな膨張-地球の表層の形成-が, 地殻の隆起と海水準の上昇を通じて, さまざまな地質現象を支配している. 地殻の隆起 (膨張) が先行し, 堆積盆の形成がそれに続く. 地球の膨張は, 地球の発達の根本概念である. かつて, 地層の形成には, 地殻の沈降が必要であるとされたが, 地層の形成は, 隆起陸塊で侵食された碎屑物が堆積盆に供給されることが, もっとも重要なことである. 碎屑物が供給されなければ, 盆地は空のまま, leptobasin である. 堆積盆のうちでもっとも重要なものは地向斜盆である. 原始地向斜は, 汎海洋性の始生代が終わり, 原生代に台地 (陸地) が隆起したとき, 台地と台地の間にとり残された凹地である.

玄武岩時代 (Hoshino, 1981) の火成活動のピークは, 白亜紀後期から古第三紀前半と, ネオテクトニクス期の 2 つの時代であった. 前者の場合, 主に塩基性マグマの熱と, 海進に伴う陸水域の拡大による水の供給によって, 酸性地殻の溶融が行われ, 環太平洋域に広域にわたる酸性火成岩活動が行われた. ネオテクトニクス期には, 旺盛な塩基性マグマの地殻深部への進入から行われ, 全地球的な地殻の隆起がもたらされ, それから派生したラコリスによって地塊隆起が生じた. このような全地球的な同期に生じた大隆起を, プレート仮説によって説明することは困難である. また, 大洋盆中の地磁気静穏帯やモホ面の起源, “付加体”をもつ海溝とそれをもたない海溝や, 大洋盆を構成する多様な岩石の問題なども, この仮説の正当性に疑いをいだかせる.

北部・中部日本における測地的変動に関連する地震活動
Seismicity in relation to geodetic crustal movement of
northeast and central Honshu, Japan

小林和宏, 長野県上田染谷丘高校
kobakazu@nagano-c.ed.jp

一等三角点は、日本列島全域にわたって 40-50km 間隔に設置され、1898, 1962, 1979 年に測定された。著者は、北東・中央本州における近隣する 3つの場所の変異について、歪み解析を行った。膨張域は概して、期間前半では、秋田と仙台を結ぶ直線の北部地域で顕著であり、その南部では逆であった。膨張域は期間後半では逆転したが、期間を通して、その境界は変化しなかった。

一等水準測量のベンチマークは国道沿いの 2 ないし 1km 間隔に設置され、改測は 7-10 年毎に行われてきた。水準点の各期間の隆起・沈降は、三角点の膨張と収縮に調和的である。地震の P 波放出パターンから求められた最大圧縮軸は、歪み楕円の最大収縮軸に並走する。これらの測地学的変動は、地殻と上部マントルのブロック構造を示唆しており、構造運動を引き起こす外力を否定する。

2011 年東北地方太平洋沖地震とその余震に関連した日本列島東北日本のテクトニクス, GPS 観測による上部マントルのトモグラフィと地殻変動
Tectonics of The northeast Japan Arc according from the

2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, its aftershocks, upper mantle tomography and crustal movement by GPS measurements

川辺孝之, 山形大学
kawabe@kescriv.kj.yamagata-u.ac.jp

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震は、東北地方の宮城県沖で発生し、強いゆれと津波が東北から関東地方の沿岸を襲った。しかし、奥羽脊梁山脈の西方に位置する地域のゆれはそれほど強くなかった。S 波は、S 波低速層が存在する奥羽脊梁山脈の下をくぐり抜けている間に減衰してしまったように見える。地震により、東北日本弧は東方へ数 10m 拡がり、弧の中央部はやや沈降した。各地に群発する余震が発生し、その余震群周辺の地質構造が明らかとなった。以上のことは、地殻の圧力が島弧の伸長によって減少し、上部地殻が部分熔融したことを意味する。いくつかのカルデラ火山活動が地質時代にこれらの地域周辺で起こったが、今回は生じていない。日本列島のテクトニクスは、トモグラフィに表れるマントルからの熱プルームに規制されている。熱プルームは現在はそれほど強くないように見え、島弧表層は引張ではなく圧縮におかれている。しかし、カルデラ火山活動が生じていた過去の地質時代には、熱プルームの活動は強く、地殻表層が引張におかれていた。

編集者への手紙 LETTERS TO THE EDITOR

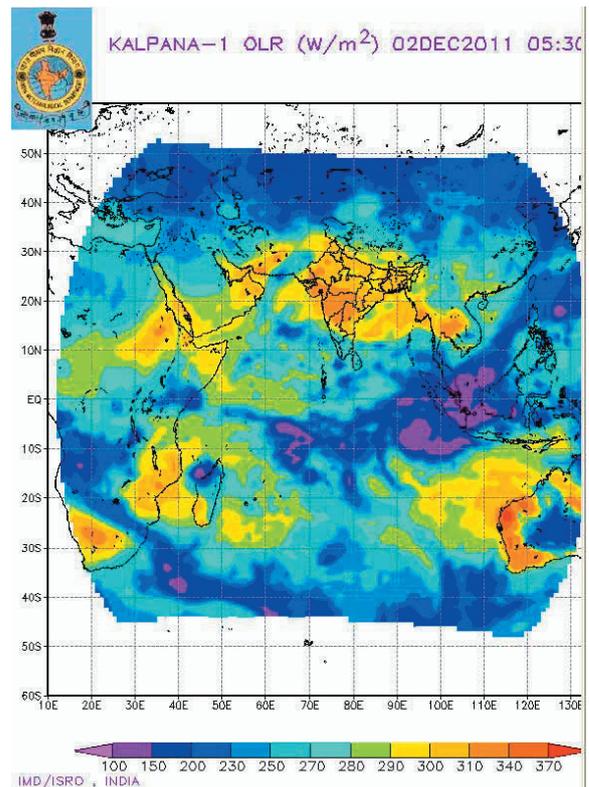
(久保田 喜裕 [訳])

親愛なる編集者様

私は 2011 年 12 月 2 日、オーストラリア北北西の特定の場所で、長波の放射 (OLR) が今まに行われている、ある興味深い現象を偶然見つけました。私は友人の Phil Hollis-Watts 氏 (p.hollis-watts@bigpond.com) に、地震発生の可能性について知らせました。驚いたことに、地震は 2011 年 12 月 5 日に発生しました。Hollis-Watts に送ったメールは以下のとおりです：異常な形態の長波放射 (OLR) の衛星写真を同封します。オーストラリアの西海岸で、かなりの高温部が示されています。私はこのようなパターンはこれまで見たことがありません。どうかこの偶発的な出来事が地震発生のためかどうか検討してください。オーストラリア西海岸の 23 S・115 E 付近に、小さな高温域が見えます。記録に留めるべき前兆なのか、高温部は地震性かどうか、教えてください。

Arun Bapat
arun_bapat@vsnl.com

地震は 2011 年 12 月 5 日に発生した。USGS による詳細は以下のとおりである。



マグニチュード 5.1
 日時 2011年12月5日(月)19:10:03 UTC
 2011年12月6日(火)午前04:10:03 AM 震央
 他の時間帯の地震時刻
 位置 21.660°S, 114.650°E
 深度 9.8 km (6.1 miles)
 地域 西オーストラリア
 距離 370 km (229 miles) Carnarvon の NNE,
 西オーストラリア, オーストラリア

433 km (269 miles) WSW of Port Hedland,
 西オーストラリア, オーストラリア
 556 km (345 miles) Newman の WNW,
 西オーストラリア, オーストラリア
 1144 km (710 miles) PERTH の N,
 西オーストラリア, オーストラリア
 位置誤差 水平 +/- 20.6 km (12.8 miles);
 深度 +/- 5.9 km (3.7 miles)

原著論文 ARTICLES

地震構造論の視点から見た日本列島における最近の地震活動 RECENT SEISMIC ACTIVITY IN THE JAPANESE ISLANDS FROM THE VIEWPOINT OF SEISMOTECTONICS

鈴木尉元・島弧深部構造研究グループ**

〒272-0824 市川市菅野4-4-15 (yasu-suzuki@vega.ocn.ne.jp)

** 足立久男, 赤松 陽, 原田郁夫, 飯川健勝, 川北敏章, 小林和宏, 小林雅弘, 小泉 潔, 久保田喜裕,
 宮川武史, 村山敬真, 小田孝二, 小河靖男, 佐々木拓郎, 鈴木尉元, 山崎興輔

(赤松 陽 [訳])

要旨: ある地震のP波の初動は一般的に節面(交差する2つの平面)によって4象限に分けられ, それらのどちらか一方が断層に一致する. 節面はしばしば互いに平行に伸びており, 断層の走向は明瞭に決められる. 節面の一方が急傾斜でもう一方が緩傾斜の場合, 一般に前者は傾斜ずれの面に平行に伸びており, 断層に一致するものと考えられる. 断層は斜めずれの正断層または逆断層である.

浅発地震および深発地震のP波発震機構から推定できる断層は, およそ200~400km幅の環状配列を示している. 浅発地震に伴う断層の配列は深発地震の配列に平行している. そのために, 環状構造はその根を鉛直に伸ばしており, 深発地震帯に沿うサブダクションはありえない.

一等三角点の改測資料によるひずみの分析データは, 環状配列を伴うそれぞれの単元における脈動を示している.
キーワード: 地震, 初動, 節面, 脈動, 象限, 発散

はじめに

一般的に地震のP波の初動は垂直に交わる2つの平面によって4つの象限に分けられる(本多 1940). 本州中央部で1927年に起こった北丹後地震(M7.8)は, P波の発震機構において4象限型を示すものであった. それは, 2つの節面に平行してNW-SE方向に走る郷村断層とNE-SW方向に走る山田断層を伴っていた.

1930年に本州中央部で発生した北伊豆地震(M7.3)は, 同様に, P波の発震機構が4象限型で, N-S方向およびE-W方向に伸びる節面を示すものであった. 丹那断層は前者の節面に平行して発生した.

このように地震に伴う断層は2つの節面の一方に平行する剪断によるものと思われる.

地震は2つの節面を伴っているため, 2つの節面が互いに平行に伸びているならば, 断層の方向を決めることが

出来る(図1, 図2). 断層は走向・傾斜の成分がわからなくても正断層または逆断層のどちらかである. 1つの節面が急傾斜でもう1つが緩傾斜である場合, それはその付近の傾斜ずれ型の節面に平行に伸びているので前者が断層面であるはずである.

以下の図で, 傾斜ずれ型の正断層は白抜きの紡錘形で, また逆断層は黒い紡錘形で示されている. 斜めにずれ落ちている正断層は楕形で, また, 斜めにずれ落ちている逆断層は矢印付の楕形で示されている.

日本列島とその周辺地域におけるP波の発震機構の図は日本の気象庁によって公表されてきた. 著者は上述の原理に従って, それらの図から地震に伴う断層を描いた.

断層の配列

鈴木・小林(2005)および鈴木ほか(2009)は, 本州中央部で発生した地震に上述の原理をあてはめ, 深発地震と

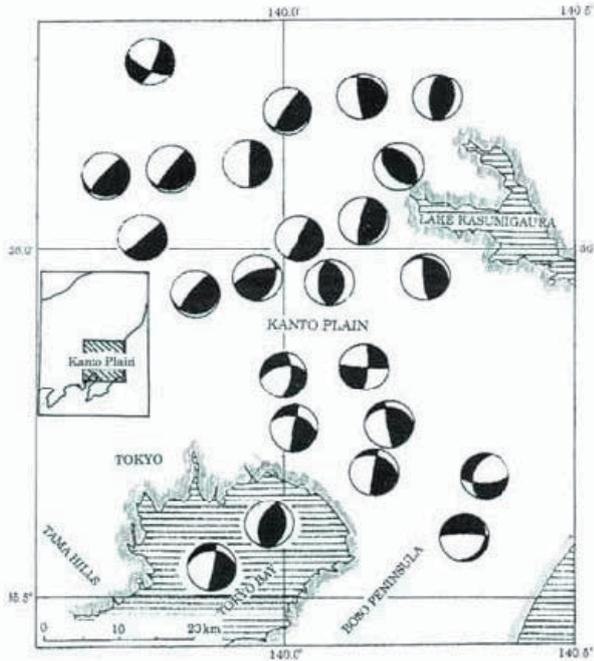


図1 関東平野で発生した地震に伴うP波のステレオネット上半球投影図

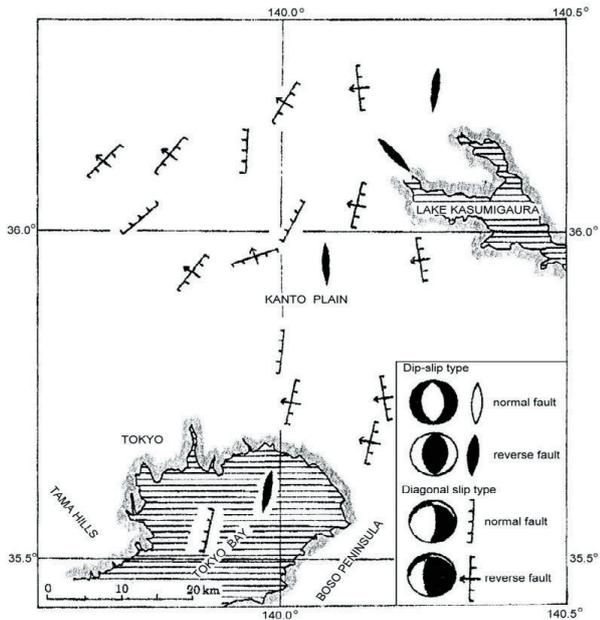


図2 関東平野で発生した地震に伴うP波の発震機構から推定される断層

浅発地震に伴う断層の一般的方向は環状となって平行に伸びていることを示した。

われわれはその原理を日本列島とその周辺地域で発生した地震に当てはめた(図3)。日本列島とその近海付近の浅発地震に伴う断層は環状に伸びている。本州南西部を除く日本列島とその内帯の下に分布する深発地震に伴う断層は、浅発地震の断層に平行な環状配列を示している。著者らは、それは丁度樹の木目のように断層の環状配列の鉛直的な伸びに起因するにちがいないと考えている。

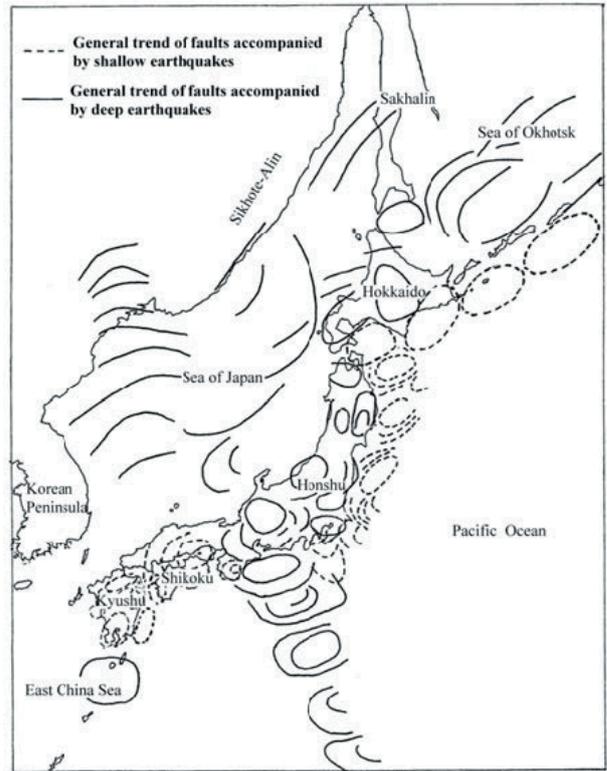


図3 日本列島およびその周辺地域における浅発地震および深発地震に伴う断層の一般的方向

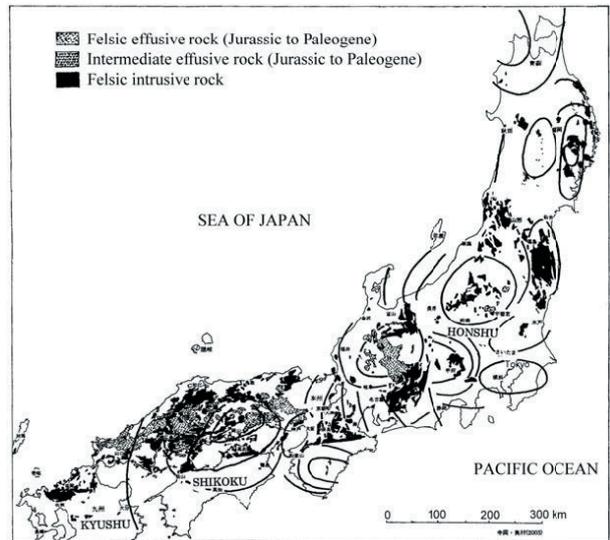


図4 本州および四国における深成岩類の分布に関連した浅発地震による断層の一般的方向

深発地震に伴う断層の環状配列は、オホーツク海盆、日本海盆の北東部や大和海盆などで、海盆の外側の縁に沿って見られる。日本海の南西部では断層のアーチ状配列が見られる。深発地震に伴う断層の環状配列は南方諸島(または伊豆-小笠原諸島)沿いでも見られる。

花崗岩類と関係を持つ断層

浅発地震に伴う断層の環状配列は、図4のように、本州における中生代および新生代の花崗岩類と中生代および古第三紀の中性～酸性の噴出岩類の分布に関係している

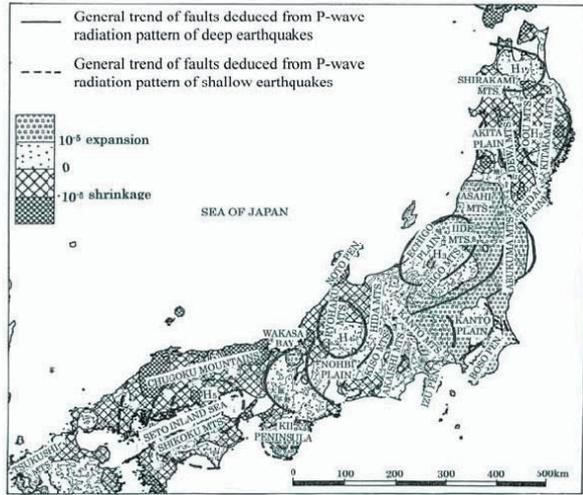


図5 P波の発震機構から推定された断層の一般的方向に関連した本州における1895年頃から1958年までの一等三角点の移動から求められた発散の分布

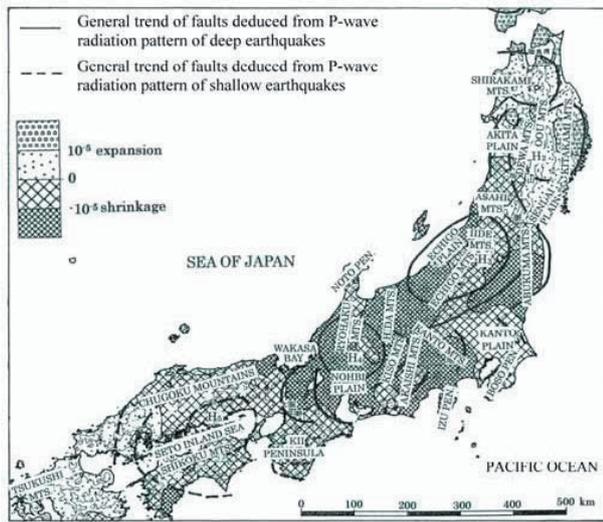


図6 地震のP波発震機構から推定される断層の一般的方向に関連するおよそ1958年から1979年までの本州における一等三角点の変位からみちびかれた変位差の分布

ことが示されている(図4)。断層は、本州東北部において花崗岩類を取り囲んでいるように見え、本州中央部および西部においては花崗岩類を伴う断層の平行配列が観察される。花崗岩類の太い環状配列は本州中央部に見られ、それらは幅ほぼ200kmである。花崗岩類の環状配列は本州西部では二重になっており、それらは水平方向でおよそ300km、垂直方向でおよそ150kmである。花崗岩類は数10kmから200kmほどの深さから運ばれてきたことを示唆しているようである。

脈動

日本では一等三角点は40km～50kmごとに設置されており、それらの変位は1895年、1958年、そして1979年頃にも国土交通省国土地理院(かつての地理調査所)によって測量された。小林(2006)はこれらの三角点の変位に基づいてひずみの分布を分析した。

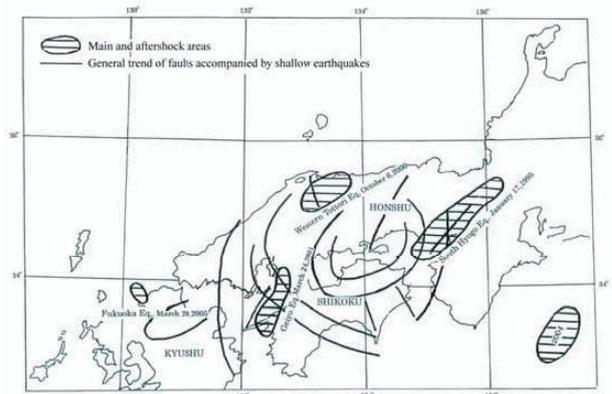


図7 1995年以降の本州西部、四国、九州における破壊地震の連続的な発生

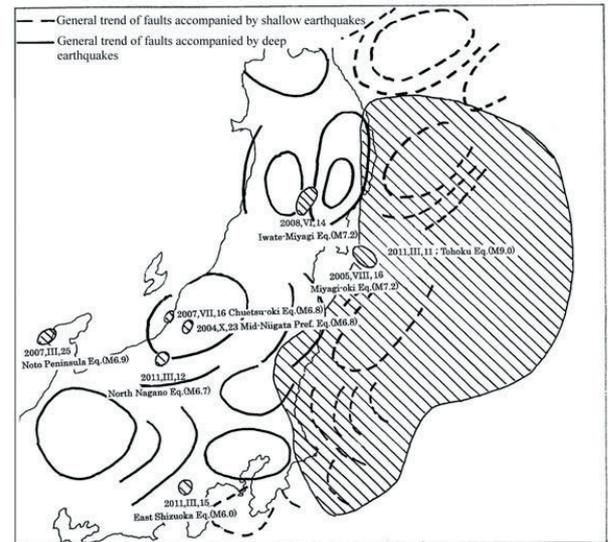


図8 浅発および深発地震に伴う断層の一般的方向に関連した本州東北部およびその周辺地域に発生した最近の破壊地震の分布

この分析は、地域は膨張域と収縮域に分けられること示した。そこでは、一般に2本の主軸の多くは広がるか収縮していた。しかし、これらの動きは次の段階では反転された。前の時期には本州は北端と南端を除きその大部分は拡張した。しかし、本州の南西部を除き運動は反転された。このように本州は、幅200～400kmのそれぞれ脈動している单元に対応して脈動してきている。

脈動の单元は浅発地震と深発地震に伴う断層によって規定される環状单元とおよそ一致している。膨張、収縮の境界とそれらの順序は各段階で規定される。運動の性質は次の段階では反転するが、それらの境界はそれほど変わらない。このような運動は地殻とマンツルのブロック構造を示唆しているようである。

最近の地震活動

日本列島は1995年以来地震が活動的になった。これは、2000年の鳥取県西部地震(M7.3)に続いて、2001年の芸予地震(M6.7)、2005年の福岡県西方沖地震(M7.0)などであった。これらの地震は浅発地震に伴う断層の環状配列の地域に位置していた。

今村 (1947a) は中国地方と四国地方の地震活動を要約した。そして近年と歴史時代における破壊地震の発生のモードを示した。

日本列島における破壊地震の発生は中国、四国、そして九州から本州東北部へとシフトした。最初のそれは2004年の中越地震 (M6.8) であり、本州東北部の地震へと続いた (第8図)。三陸-常磐沖地震 (M9.0) は本州東部の前域にもたらされたそれは長野北部の地震へと続いた (M6.7)。

今村 (1947b) は本州東北部における地震活動を手短かに述べ、本州の両側での破壊地震の同時的発生を指摘した。それは浅発地震と深発地震に伴う断層の環状配列によるものであろう。

結論

2つの節面が互いに平行に伸び、傾斜の急な節面が前者の節面と平行の伸びているとき、地震に伴う断層はP波の初動で決定される。

日本列島とその周辺地域では、断層の一般的な方向は、浅発地震と深発地震について引かれる。それらは幅200~400kmの環状に平行に伸びる。そのような配列は環状の鉛直な深い断層によって囲まれた単元をなしていることように思われる。

地震と同時に起こる断層に示されるそれぞれの環状地域は、膨張と収縮の境界あるいは収縮または膨張の順序の違いに従っている。それは地殻とマンツルのブロック構造を示唆している。

それぞれの環状地域あるいはいくつかの環状地域はそこ独自の地震活動をもっている。それぞれの地域は地球の内部過程によってコントロールされている。

それぞれの環状の単元は、浅発地震と深発地震に伴う断層によって取り囲まれている。

文献

- 本多弘吉, 1940. 地震波動. 岩波書店, 193p.
 Imamura, A., 1947a. On seismic activity in Sikoku and Chugoku. Proc. Imp. Acad., v. 23, p. 1-3.
 Imamura, A., 1947b. On the seismic activity of North-East Japan. Proc. Imp. Acad., v. 23, p. 26-29.
 小林和宏, 2006. 一等三角点の改測資料による日本列島の水平移動の解析. 地球科学, 60巻, p. 213-227.
 Suzuki, Y. and Kobayashi, K., 2005. The occurrence of intermediate and deep earthquakes in relation to geology in central Honshu, Japan. Boll. Soc. Geol. It., volume Speciale, no. 5, p. 149-157.
 鈴木尉元・島弧深部構造研究グループ, 2009. 地震に伴う断層の環状分布について一本州東北部から中央部に至る地域. 地球科学, 63巻, p. 239-247.

白亜紀以降の西地中海弧とカルパチア弧のテクトニクス TECTONICS OF THE WEST MEDITERRANEAN AND CARPATHIAN ARCS SINCE THE LATE CRETACEOUS

Jacob SHAHAR

イスラエル, エルサレム, Marcus St. 10 shahar.jacob@gmail.com

(山内 靖喜・小泉 潔・矢野 孝雄 [訳])

要旨: 西地中海とカルパチア山脈の両者はほぼ完全な島弧であり、今なお現在のテクトニクスの解釈は一方向的な東方への引っ張りというものである。受け入れられている東方へのスラブの後退/引っ張りモデルは両方の島弧において同時におきた西方へのスラスト運動を無視しており、それゆえに釣り合いの重要な点を見落としていることを本研究は主張している。両方の島弧の周りでの放射状に外側へのスラスト運動は明らかにマンツルプリーム構造に適合し、存続できる解釈としてこのテクトニクスの力の再考察を本研究は提案している。現在と過去におけるスラブの方向についての地震トモグラフィーの解釈はスラブ後退の機械的な引っ張る力が誤っていることを示している。この2つの島弧の内側での隆起、沈降、伸張、高い熱流量および変成作用としての特徴はマグマの垂直な循環の過程を示すものであろう。それに対して、古地磁気、古応力及び火山活動の説明はいまいな結果を示している。中新世の2つのマンツルプリームはまったく異なる後期白亜紀の残存を覆ってしまった。すなわち、それはヨーロッパプレートとアフリカ-アラビア間の衝突の北東系と北西系のテクトニックパターンであり、北に湾入した三角形のアドリア海によって引き起こされたことと本論はさらに主張する。北東系構造と北西系構造の間の区別は西地中海周辺の中新世造山運動から後期白亜紀の造山運動を区別するのに役立つであろう。

キーワード: マンツルプリーム, 西地中海, カルパチアン, 後期白亜紀, 構造地質学, 地震トモグラフィー

1. はじめに

西及び中部地中海の現在のテクトニクの構造は、アフリカ-アドリア海-アラビア (AF-AD-AR) プレートとヨーロッパプレート (EU) の南北の収斂の複雑な結果として一般に説明されている。アルプスの東西性前線衝突の南側での結果として生じた山脈の主要な方向は、北東-南西か北西-南東のどちらかの走行をもつかあるいは曲線を描いており (図1), そして過去150年間の地質学的研究において満足される説明は現れなかった。これらの方向性は漸新世後のスラブの後退 (Alvarez et al., 1974; Malinverno and Ryan, 1986; Royden, 1993) で機械的に説明されたり, スラブの引き裂き (Wortel and Spakman, 2000) によって局部的に起きたとされている。そして AF-AR プレートの北方への移動が停止した後でこれは始まった (35-26Ma; Jolivet and Jaccenna, 2000)。下位のプレートの東方へのスラブの後退は西地中海 (WMED) を横切った上位のプレートのスラスト運動によってもたらされたことをこれは示している (図1)。その後, 東方-南東方-南方へのスラスト運動によって中部及び南部アペニン山脈及び Maghreb^{*1} を屈曲させながら, スラブの後退は南方に移った。同じく, カルパチア山脈での東方へのスラブの後退は明らかに南に移り, カルパチア山脈の東-南東縁を曲げた。しかしながら, 東方へのスラブの後退と南方への回転は, Betic 山地^{*2}にある西地中海の西翼あるいはカルパチア山脈の北西のスロバキア翼と南西のスロベニア翼のどちらも説明しない。両方の構造は西方へのスラスト運動を示している。

*1: アフリカ北西部の地域, リビア, チェンジア, アルジェリア, モロッコ, モーリタニアが属する。(訳者注)

*2: 図1からスペイン南東部にある Betic 山地を指すものと判断される。図3参照 (訳者注)

アドリア (Apulia)^{*3} は前期白亜紀-後期白亜紀 (ECT-LCT) のスラスト運動をもたらした (Channell, 1996) といわ

れている AF-AR プレートの北側の "付加した" マイクロプレートである。北部では, それは西のアルプス弧を曲げるのに最も影響した。東方に向かっては, それは北西系の Dinarides-Hellenides を曲げた。アドリアの西の翼 (アペニン山脈, Betic 山地) は後期白亜紀の東または西のスラブとスラストの方向の役割において論争的になっている (図2の2つの対比した図を参照)。中部地中海テレーンが西方の Iberian Betic 翼へあるいは東方の Calabria の上にスラストしたとして説明するには問題がある。北東方向は Betic 山脈とアペニン山脈の両者において後期白亜紀の構造の方向であるが, 中新世の造山運動は曲げられていることを私は主張したい。このように, 2つの異なったテクトニクの体制が後期白亜紀と中新世のそれぞれの造山運動を駆動したのである。曲がっている西地中海を説明するために中新世の東方と西方へのスラブの後退 (Loneragan and White, 1997) に救いを求めることは適切でない。

*3: 図1ではアドリア海の位置に "Adr" の略記号を入れて, そのキャプションでは "Adr:Adria" と書かれている。そのため, "Adria" をアドリア海を指すものと判断されるが, 一般にアドリア海の英語名は Adriatic Sea であり, Adria という町がイタリア北部にある。さらに, 英文のこの位置に "Adria(Apulia)" と書かれている。訳者が調べた限りでは Apulia はイタリア南部のアドリア海沿岸地域の古名で, 現在の Puglia 州が相当するとされている。著者が Adria と Apulia の関連をどのような考えで並記しているのかは不明である。

いくつかの初期の研究は, マントルプリューム (MP) モデルを用いて西中部テーチス (中部及び南部ヨーロッパと北部 Maghreb^{*1}) のテクトニクスの起源を説明している (たとえば, Stegena et al., 1975; Weijermars, 1991; Wezel, 2005)。これは後に多くの数値モデルや実験モデルにおいてスラブの後退によっての水平運動に置き換わった (たとえば, Göğüş et al., 2011)。

マントルプリュームは Ligurian, Provençal 及び

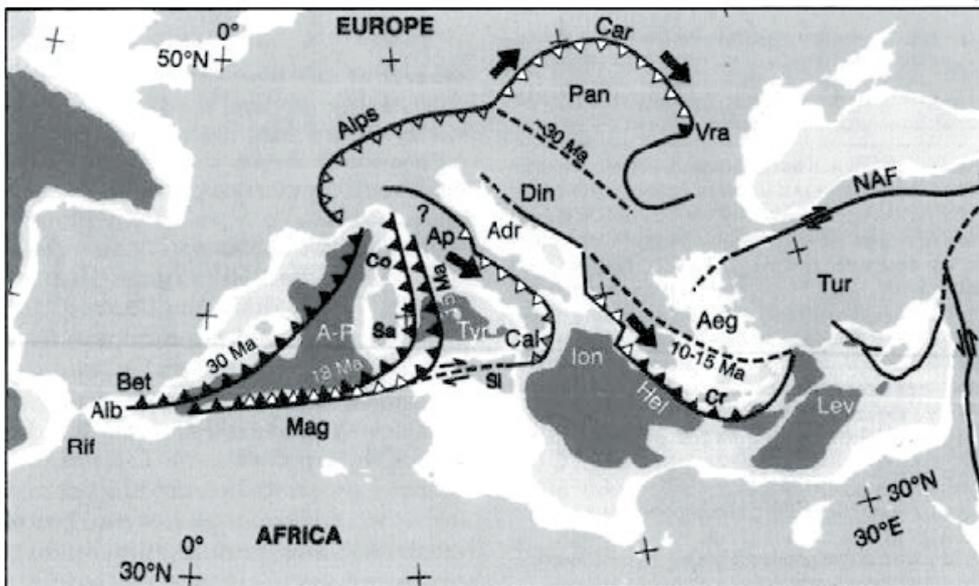


図1 第三紀-第四紀におけるアルプス-地中海-カルパチア地域での沈込み帯の移動とプレート境界の発展 (Wortel and Spakman, 2000 より)。Adr: アドリア^{*3}。Aeg: エーゲ。A-P: Alboran-Provence。Ap: アペニン山脈。Bet: Betic 山地^{*2}。Cal: Calabria。Car: カルパチア山脈。Co: コルシカ。Cr: クレタ。Din: Dinarides。Hel: Hellenides。Ion: Ionian。Lev: Levant。Mag: Maghreb^{*1}。NAF: 北アナトリア断層。Pan: Pannonian。Sa: Sardinia。Tur: トルコ。Vra: Vrancea。

Tyrrhennian の各盆地の起源を説明した 3 つのモデルのまさに一つである (Lustrino et al., 2009). 他のモデルは地殻クサビの横方向への押し出し (Mantovani et al., 2009) とスラブを引っ張る変種 (Royden, 1993), 東方へのマントルによる引きずり (Doglioni et al., 2007) である.

本研究はスラブ後退をプレーム駆動のスラブ前進モデルと比較する. 後期白亜紀と中新世のそれぞれのテクトニックパターンを比較することは, これらを区別するのに役立つし, 2 つの曲がった西地中海プレームとカルパチアンプレームが中部テチスの周りで中新世の造山運動を起こした (西部テチスはカリブ海の方への拡張部分である). 後期白亜紀の北東-南西構造は議論されないで, なお謎と考えられる.

2. 地質学的背景

西部から中部テチスのテクトニクスの研究における混乱は 3 つの造山運動が重なっていることから生じている. すなわち, パリスカン-ヘルシニアン (石炭紀-トリアス紀), エオアルプス (前期白亜紀-後期白亜紀) 及び後期アルプス (中新世) である.

ヘルシニアン造山運動の構造は, 中央ヨーロッパと北アフリカの Maghreb においては後期白亜紀の北東方向と部分的に平行している (Corsini and Rolland, 2009; 図 4). 前期石炭紀 (340Ma) の復元は Gondwana と Euroasia の間の広い古テチス海を提唱している. Stampfli and Borel (2004) は前期古生代に Gondwana と Avalonia-Laurentia の間に一つの長く, 狭い陸地の “リボン” (Hun スーパーテレーン) と, それが後期古生代に北へ移

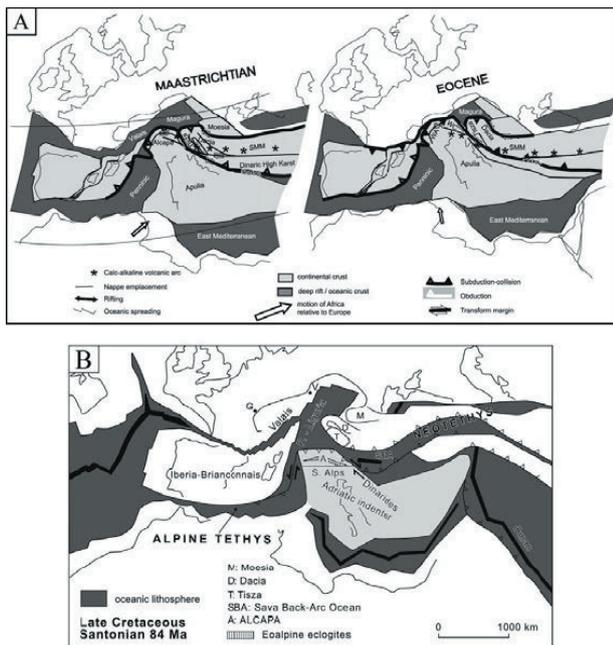


図 2 後期白亜紀の配置図, A は Csontos and Vörös (2004) に, B は Schmid et al. (2008) による. SMM(A 図):Serbo Macedonia. WA: 西アルプス. EA: 東アルプス. WC: 西カルパチア.

動する旅の間にもう一つのリボン (Cimmerian テレーン) を提唱した. これらは北方へ移動して, 2 つの主要なプレート間の距離を狭め, 南ヨーロッパの古生代変成作用をもたらした.

中央テチスのトリアス紀-前期白亜紀のリフティングはアフリカが南東方向に移動している間に生じた (Handy et al., 2010). 前期白亜紀-後期白亜紀の年代 (84Ma: Dewey et al., 1989) からアフリカとアラビアは北へ向かう旅を始めて, 約 2000 ~ 3000km (たとえば, Dewey et al., 1989; Dercourt et al., 2000) の隔たりをふさいだ. Piromallo et al. (2008) は次の疑問をだした: どのようにして後期白亜紀の造山運動はその広い隔たりの至るところで活動することができたのであろう. アドリアは合意の答えであり, それはアルプスの東西走行をへこました北向きの三角形として図示されており, 前期中生代から水中から姿を現した山脈である. アドリアの北西翼と北東翼は細部において非常に異なっており (Schmid et al., 2008; Schettino and Turco, 2011; 図 2), 西部では Penninic-Ligurian-Piemonte 海に, 東部では Vardar-Pindos-SBA 海に面している.

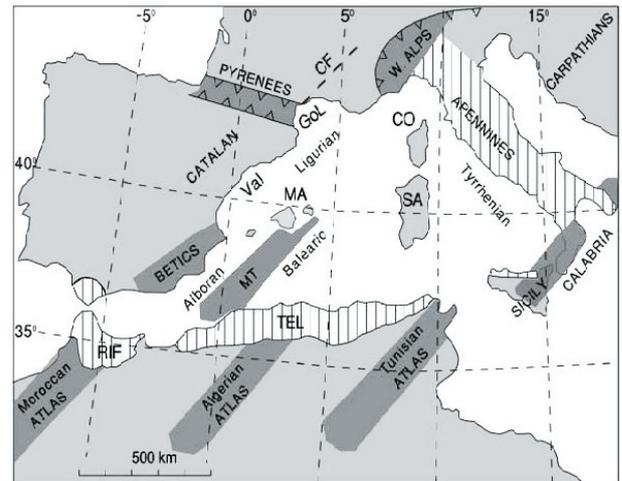


図 3 西地中海における北東-南西の構造方向. CF: Cevenes 断層. Co: コルシカ. Gol: リヨン湾. MA: Majorca. MT: 地中海 (中部) テレーン. SA: Sardinia. Val: Valencia.

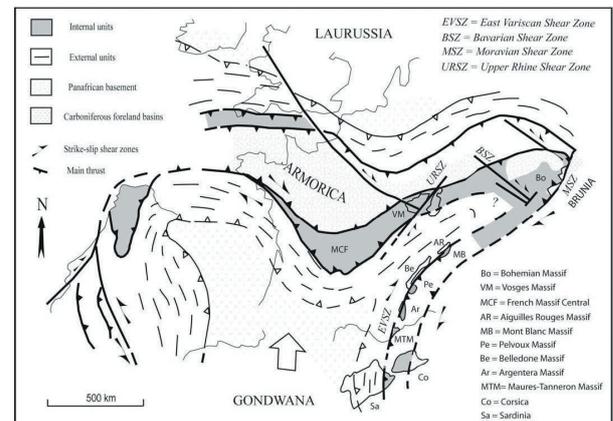


図 4 南部ヨーロッパのパリスカン帯の構造を示すスケッチ的地図, Corsini and Rolland (2009) による.

中新世の変形は部分的には後期白亜紀の方向に重なっている (Betics, Dinarides-Hellenides) が、西地中海の南東翼を曲げてそしてカルパチアン孤を曲げ始めた点で異なっている (30Ma : 図 1). その他の2つの発達には西アルプスの湾曲と Cyclades のスラブの後退であるが、両者は西-南西方向への突き出しの結果である。

3. 放射状外向きスラスト運動とスラブの方向

放射状外向きのスラストは西地中海とカルパチアでは典型的である。この断面はそれらの地域的な産状、同時代の内部の拡張、隆起、陥没及び変成作用を詳細に示している。

地震トモグラフィは深さ 20 ~ 200km の地球内部でのスラブの傾きを記録している。さらに深くなると、スラブはほぼ垂直になる。現在のテクトニクスのパラダイムは外向きのスラスト運動を異なるプレート間での収斂の結果と説明している。スラブは数 100 万年の規模でプレートの移動に対して反応するので (Garfunkel et al., 1986), 過去の移動方向に対しての投影は主観的であり、説明者の目を信頼することである。ここで、私は否定的な意見も含めた全てのモデル報告することを試みる。

3.1) アペニン山脈

アペニン山脈の現在の構造は北西イタリアから南西シシリーまで続き、鋭く、西に開いている (図 1)。すべてのスラストは外側に向いており、地形に平行である。東方の "Adriatic" 圧縮と西方の "Tyrrhenian" 伸張がイタリアの長さに特徴づけた (Pauselli et al., 2010)。浅い地震トモグラフィ (100-200km) は西方へのスラブの傾きを示している。深さ 660km (MTZ: マントル遷移層) までの上部マントルの全体でスラブはほとんど垂直に見えるが (Chiarabba et al., 2009), しかし、それが連続しているのか (Lucenta and Margheriti, 2008) あるいはちぎれているのか (Wortel et al., 2009) に関して論争がある。マントル遷移層の上に相対的に冷たい塊が重なっていることは疑いもない。

時代が経つにつれてスラブが発展することも議論されている。あるものは後期白亜紀以降西方に連続する (Adriatic) スラブを記述している (Jolivet et al., 2008)。他の研究者達は北部及び南部アペニン山脈での後期白亜紀の変成作用説明するために東方への (アルプス) スラブの動きを主張し、その後始新世あるいは中新世に西方へとんぼ返りをしたとした (Molli, 2008)。さらにもう一つの意見は、はっきりした最近の東方へのスラブの動きは上部マントルまで下がっているのを示している (Finetti, 2006)。

西地中海に関する最近のモデルでは、イベリアと南東フランスの東海岸に沿っての東方へのスラブの後退は、Rif, Grand Kabylie, Petit Kabylie, Galite ブロック, Corsica, Sardinia 及び Calabria and Peloritani など

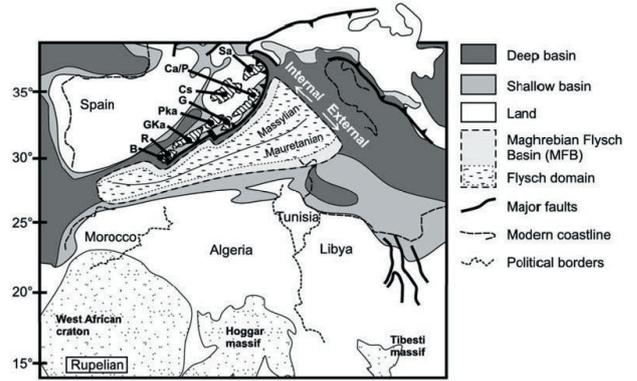


図 5 フリッシュ盆地を目立たせた西地中海の漸新世古地理図。Thomas et al., (2010) による。B: Betic, R: Rif, Gka: Grand Kabylie, Pka: Petit Kabylie, G: Galite block, Cs: Corsica, Ca/P: Calabria and Peloritani, Sa: Sardinia.

のテレーンの後で始まったとされている (図 5)。後退の間にこれらのテレーンはスラブの海溝を飛び越えて (4.4 参照) 島々として残ったか、あるいは南部イタリアと Maghreb の両海岸に付加した (Thomas et al., 2010)。アペニンの西向きスラブの年代は第三紀 Piemont 盆地の約 28Ma に始まって、シシリー沖の 4Ma まで続き、北から南に向かって若くなるように見える (Mazzoli and Heiman, 1994)。しかしながら、これはシシリー沖の後期漸新世-前期中新世の地震層準 B3.3 を考慮していない。この層準は基盤の上に直接重なっている (Sartori et al., 2004)。堆積物の年代とスラスト活動の年代の差違は、スラブは南に向かって若くなっているという主張に対して疑いを投げかけた。

3.1.1 西部アルプス-北部アペニン山脈

アルプスは地球上で最も地質学的に複雑な地域の一つである。ほぼ 150 年間の研究は現在のプレートテクトニクスの環境における理解に導いた (Laubscher, 2010)。曲線を描いて、東に面した西アルプス弧はヨーロッパ-アドリアの南北の衝突の概念を否定している。その代わりに、受け入れられている解答は、中新世のアルプス中央カサビの西方への押し出しと逆時計回りの回転である (Sue et al., 2010)。しかしながら、その島弧の周りでおそらく活動したであろう 3 つのスラブ-南東に傾斜した西アルプススラブ、北西に傾斜したアドリアスラブ及び南西に傾斜したアペニンスラブ-すべては容易に説明されていない。西アルプスの南東への沈み込み (ジュラ紀-後期白亜紀-始新世の時代) に続いて、アペニンの北東のスラブの後退、漸新世-中新世の引張せん断の東方への移動そして最終的に南東への後退が起きた (図 1)。

Maffione et al. (2008) は、漸新世以降にアルプススラブの周りとはアペニンスラブの周りで交替に起きて "螺旋状形" となった 3 段階を図示した。アルプススラブとアペニンスラブの両者の後退は変成作用の後での中央アルプス島弧の最終的引張を可能にした。中心部が結晶質岩と変成岩からなる複合地塊の幾つかがその島弧に沿っての外帯と内帯の中に示されている。それらの一つであ

る Voltri 地塊は、引張あるいは圧縮のどちらによる変形かという最近の論争の主題である (Capponi et al., 2009). すべての解答はアペニンの北東から南東までの外方向へのスラストを頼りにしている. 後述の討論においてこのことに関連性は、スラブの引きなのか、それとも押しなのかということである.

3.1.2 中央アペニン山脈

中生代海洋リソスフェアの大部分は、アルプス造山時相初期に東方へ衝上し、西方へは沈み込んだ. External Ligurides (EL) は、東部褶曲-衝上帯であり、部分ごとに低度変成岩層 (Tuscan unit) あるいは非変成の Sicilid および Liguride 岩層になっている. Internal Ligurides (IL) は西部の堆積岩およびオフィオライト岩層であり、表層覆瓦構造を形成している (Moli, 2008; Morroini et al., 2010 [北部]; Bonardi et al., 2009 [南部]). 衝上運動は東方へ移動し、西部域は軽度変成作用によって後期中新世以降に展張場となった. 本研究は、MP 活動に起因する外部への衝上作用と内部での展張作用が起こった造構時相について考察する.

アペニン山脈の北端部には、北傾斜のスラブが存在する. それは、逆向きの複雑な造構様式をもつアルプスの南東方向への傾斜に対応する (Maffione et al., 2008). Po 平野下で深度約 200km に達する Vp 低速度異常は水和作用とデラミネーション (delamination) に起因し、後ほど、アルプス-アドリア衝突というより広範な視点から議論される (4.3.6 節を参照).

3.1.3 Calabria-Peloritani 弧 (CaP)

CaP (図 1 の CAL) は、アペニン山脈南端に位置し、東西方向の Maghreb 衝上前縁を構成するきつい湾曲を形づくる. それは、さまざまな方向の衝上運動、変成作用、および、幾種類かの火山活動をともなう複雑な地質構造を形成している. いくつかの論点を以下に掲げる.

- 1) CaP スラブの北西傾斜に関するすべての報告とは対照的に、Schellart (2011: fig. d) および Faccenna et al. (2010, figs 4 and 7a) は深度 660km に達するほぼ鉛直のスラブを示した.
- 2) LCT のアルプス時相初期における北東から、中新世における南東への造構移動方向の変化 (Heymes et al., 2010). 他の研究者はこれらの方向は同時に作用したと解釈している.
- 3) CaP は、Cavazza and Barone (2010) にしたがうと、東西あるいは北西-南東方向の走向移動断層によって南東方向へ移動する分離した微小プレートであった. この解は、他の解との間で論議された.
- 4) このスラブの幅は、約 200km にすぎない. 380km に達する短縮、底付け (underplating) および後退といった運動が、Minelli and Faccenna (2010) によって見積もられている. しかし、彼らの論文に掲載された断面図は、このような大きな値を支持しない.
- 5) カルクアルカリ質 (造山性) およびアルカリ質 (非造山性) の火山活動が、アペニン山脈南部と CaP におい

て空間的にたいへん近接して存在する. 最新の研究はいくつかは、イオニア海ほ北西向きスラブ周辺の上部マントルにおける退却後退 (roll-back), トロイダル (水平) 循環および減圧融解に注目している (Schellart, 2010; Faccenna et al., 2010). しかし、2つの後退するスラブの近接性は要注意である.

6) ユーラシアに対するアフリカの北北西方向への運動、ならびに、アペニン山脈の上盤における東西方向の背弧拡大による短縮に対して、最近、Cuffaro et al. (2011) は、圧縮性および引張性造構力の共存を示唆した. アフリカ、アドリア-アペニンおよびイオニアの3つのスラブは、CaP の周辺で相互に接近すると、複雑に相互作用を行う.

3.2) 東西方向の Maghreb 前縁

長さ 2000km におよぶ北アフリカの海岸線は Maghrebian と呼ばれ、その全延長に沿って、スラブは北へ向かって傾斜し、外側のフリッシュ堆積体は南へ向かって衝上し、幅 200km にわたる地帯を形成している (Sami et al., 2010). タービダイト堆積体は、その両端において年代と組成がほぼ解明されていて (Puglisi, 2008), 漸新世後期~中新世中期以降に同時的造山運動をうけた (Thomas et al., 2010). この南向きの衝上運動は、新しく発見された北へ倒れた第四紀逆断層が加わり、新しいスタイルの沈み込みが考案された (Yelles et al., 2009).

3.3) Betics-Ligure-Provence

3.3.1 ジブラルタル弧

ジブラルタル弧の Betic 部分におけるスラブの傾斜方向に関して、研究者たちは合意していない. その傾斜方向は北東、南東あるいは北西であると示唆している. Platt (2007) は、厚化した地殻の重力性沈降と鉛直短縮によって Alboran 海下に球根状の低温物質が形成されたことを示唆した. その他の作用として、リソスフェアのデラミネーションと対流による除去がリソスフェア薄化のメカニズムとして提案されている.

造構モデルは、最近の地球物理学的発見によってさらに複雑化されている. SKS の分裂が観測されたことは、高速偏倚方向がこの弧の周辺で湾曲するが、モロッコ北部の地下で南方へ偏向する (Diaz et al., 2010). 微小規模テクトニクスにもとづく応力図によると、N20° ~ 30° E 方向の幅狭い部分を除くと、スラブ後退の大部分はすでに停止している (Pedrera et al., 2011). Alboran 弧の西側にある大西洋と地中海の漸移帯に、北北東-南南西走向の新しい断層が発達している (Fullea et al., 2011). Rosell et al. (2011) は、震源を伴わない地震波低速度域を説明するために、高温アセノスフェアの貫入によって Ligurian の東向きスラブが破断・充填されたことを示す電磁気学的データを研究した.

3.3.2 Betics

Betics の構造は、アペニン山脈の構造を反映し、西外側

向きの衝上運動と東へ傾斜した浅部スラブをともなう。深度 150 ~ 600km までの地震記録は、解釈するのが困難である。Buforn et al. (2004) にしたがうと、Alboran 海における中深度地震は東西方向の鉛直主要地震面が存在する。超深部地震の震源解は、南北方向の鉛直傾斜ずれに相当する。ここでは、アペニン山脈と同様、スラブが連続的 (Valera et al., 2008) であるか、剥離しているかについては議論されていない。Lonergan and White (1977) は、西向きのアペニンスラブが中新世に分裂して、1 領域は東へ後退し、南の領域は西へ後退したことを示唆した。Michard et al. (2006) と Martin-Algarra et al. (2009) は、アルプス期の西向き衝上と対照なヘルシニア期の東向き衝上運動、ならびに、スラブ傾斜の東から西への転換が 50 ~ 30Ma に起きたことを提案した。Alboran 海下の MT 領域 (ALKAPECA) は、西向きの長距離衝上運動後に陸域での変成岩類が形成された元々の場所である。MT 下のスラブ方向に関する逆向きの 2 方向が Puga et al. (2011) によって図示されていて、連続的な東方向か、逆の北西へのスラブ方向が描かれている。

3.3.3 リグリ-プロバンス海盆 (LPB)

Betics とカタロニアの構造は、WMED の北西翼の重要な部分である。さらに LPB の北西縁はバラバラに漂移したコルシカ-サルジニア (CoSa) 諸島 (第 1 図) の前者の位置に見かけ上留まっている。CoSa 諸島上のいくつかの形態は Betics-カタロニアの北東構造方向に平行である (Oudet et al., 2010)。挟まれている LPB 内の堆積作用は漸新世-前期中新世に始まった。大陸的なプロバンス地方は三つの構造方向に規制されている。すなわちピレネーと南アルプスの東西方向 (Le Pichon et al., 2010)、LPB の北東-南西方向 (Andreani et al., 2010) と TPB の北西-南東方向である。三つの典型的な方向の一つと変形時期の推定との構造的関係を説明しようとする試みが議論されてきた。Bache et al. (2010) はリオン湾内の北東-南西断層に沿った幅広いリフトの代わりに狭いリフトの新解釈を示した。

3.4) カルパチア島弧

中央 WMED の海洋カバーと対照的に、カルパチア島弧の中央は大陸的であり地質調査のためにより接近しやすい。島弧はほとんどが放射状に外方に傾いたスラストよりなっている。浅発地震は内方への傾斜を示している (Alasonati-Tašárová et al., 2009)。深部のトモグラフィ画像はほとんどが垂直傾斜を示すと解釈されている (Sperner et al., 2004)。1970 年代の初期以来、カルパチアの地質屋は地向斜やマントルブルームダイアピル (Stegena et al., 1975 と初期のハンガリーの研究) からプレートテクトニクスモデルに見解を変えた。これは堆積物の堆積相変化・ブロック回転・層面滑りやナップ衝上運動を良く説明している。これは次の 4 つの構造過程を伴う。

- 1) アドリア地方の北方への湾入と CCW 回転 (Channell, 1996)。
- 2) Alcapa の CCW 回転とチサ-ダーチャブロックの時計回り (CW) 回転 (Csontos and Voros, 2004: 第 2 図のチサ-

ダーチャの逆対方向に注目)

- 3) 主応力と衝上方向の東方へのスラブの後退【retreat (roll back)】と CW 回転 (Jiricek, 1979)。
 - 4) 南カルパチアの“コーナー効果”と“ラッピング”に続く Moesia の CW 回転 (Ratschbacher et al., 1993)。
- これら 4 つの過程に伴う問題は、空間と時間が重なり合っていることと矛盾している。

Csontos and Vörös (2004) は、一つの完全な島弧内の二つの主なオロクライン (北西と南東) を曲げる五つの段階を示している。すなわち、三畳紀-ジュラ紀のリフト運動、白亜紀中期のナップ、LCT オロクライン屈曲 (剪断、衝上と正断層運動)、二つの複合テレーンを融合する古第三紀の走向滑りと回転、及び中期中新世の大規模内部背弧引張である。

ふたつの別々な LCT と中新世造山帯の骨格において、曲がっている単一の島弧が水平移動することが如何に困難であるかを次のようなメカニズムが説明している。五つの条件とは：

- 1) 西カルパチアの基盤は見かけ上現地性であり押し出されていない。Oszczypko and Slaczka (1985) によって示されているような押し出し【Extrusion】は、見かけ上、圧縮波の“マイグレーション”によって後退【retreat】する堆積盆内に堆積したフリッシュとモラッセを意味した。それらは地殻全体の後退を意味しているわけではない。
 - 2) Alcapa とチサの逆ブロック回転は、放射状の外方への衝上運動によるような連続的な同心円状の縁を作り出すことは出来ない。
 - 3) 走向滑り、Danubia (南西ルーマニア) と Moesia との間の“コーナー効果”と“ラッピング”は、ほとんど回転していない Moesia ブロックでは生じなかった (13°; van Hinsbergen et al., 2008; Golonka et al., 2009 の Moesia の位置参照)。
 - 4) Alcapa, チサとダーチャの LCT 最初の位置については意見が分かれている：リグリ-ピエモンテ海盆の北東方向の縁沿い (Schmid et al., 2008; 第 2b 図) か、アドリアの北西方向の縁 (Csontos and Vörös, 2004; 第 2a 図) のいずれかである。いずれの場合でも、回転が異なっている。
 - 5) 斜め衝突と out-of-sequence テクトニクス (例えば Matenco et al., 2010) は面白い解決法であるが、ここでは最新のオプションと見なされている。
- それら 5 つの条件の押し出しは、カルパチア島弧の屈曲の造構機構のようなスラブの後退やブロック回転の議論の基礎となる。

スラブの傾斜方向はより注目に値する。Grad et al. (2006) はパンノニア海盆から東ヨーロッパクラトンへの北東断面に沿うリソスフェアの北東外方への傾斜について賛成した。ほかの人たちは深さ 200km まではこの概念を受け入れたとはいうものの、一方、スラブの分離に賛成した。Janik et al. (2011) は北西と北東カルパチ

アをそれぞれ横切る断面について中心方向への南東と南西傾斜という一般的な概念を繰り返したが、すべてはモホ面以下で不連続になっているように見える。そこで議論が解消されていない。

浅部地殻 (20km まで) はパンノニア海盆を象徴しており、アドリアプレートとの接触部はハッキリしている。Sumanovac (2010) は地震学的に、より幅の広い露出を説明し、パンノニア海盆南縁断層 (SMF) 上での浅い (50km までの) 高密度岩体と明確な重力の落ち込みを示した。これは東 Dinarides と西パンノニアスラストを包含している。東方を向いた Dinaric あるいは西方を向いたパンノニアスラブの活動のいずれかによって説明される。

4. 議論

3章のまとめは、200-600km までのスラブは WMED と南東カルパチア島弧の南東と北西部分は別として、垂直のように見えるということである (Vrancea: Neagoa et al., 2010)。しかしながら、スラブの過去の傾斜とさらにプレート運動の方向はせいぜい解釈の問題である。次に二つの島弧を曲げることの出来る二つの有力な造構機構を詳しく述べる。それらはちなみに、押し出しと水平移動あるいは垂直的な外方へのマグマ循環である。後者は中央テーチス海周辺の LCT と中新世造山帯の対照的なスタイルになぞらえられる。

4.1) スラブの後退は、長く議論されてきた論点である。多くの室内実験で確認されているが、現実世界でどのように働くかは明らかではない。深さ 660km (Faccenna et al., 2004 ではアペニンの 1200-1400km) の下部マン托ルのトップに到達するまでその遙かな距離を後退させるのに、スラブを何が駆動しているのか？ 西方で Betics-Alboran スラブの分裂によりチレニア海スラブの幅はどのようにして倍になり得るのか (Lonergan and White, 1997)? それにしても CaP と Maghreb を生産している。WMED とカルパチア両スラブはなぜ南に曲げられたのか？ 屈曲とオロクライン的の曲げは、昔から逆のブロック回転するそれら二つの情報によって説明された (Yonkee and Weil, 2010)。ここで、スラブそれ自身の曲がり、全く別な物語とはいえない (詳細は Gögüs et al., 2011 のサブダクション対層間剝離参照)。実験室内でのその種の後退あるいは同時的な逆方向への後退や、それに加えてある種の水平回転を再現しようという試みは公表されていない。Artyushkov et al. (1996) は、リソスフェアのたわみの原因として、スラブ後退を取らず、地殻とマン托ルにおける密度変化 (“垂直的地殻運動”) の方を好んだ。Doglioni et al. (2007) はスラブ後退の古くからの反対派である。彼らはそれに対し 22 の論拠を示し、その代わりに地球自転によるマン托ルの引きずりを示唆した。論拠のいくつかは、海洋プレートの年代に対するスラブの傾きの相関・上部マン托ルの実際の組成・大陸と海洋スラブの浮力・エクログャイト化作用の深さやリソスフェアのサブダクションの原因を疑問に感じている。

Alvarez (2010) はテーチスなどに沿う長期化した大陸衝突を説明するためにアセノスフェアに至るまでの “基底の静止摩擦” あるいは “大陸底の引き波” を示した。スラブの後退を考えるためには、次の三つの条件がある。1) Jolivet et al. (2008) は、アペニンにおいて、スラブ後退モデルが Dewey et al. (1989) ほかによって描かれようように、安定したユーラシアに対してアフリカやアプリアの変位曲線を当てにしている。しかし、最近の 9Ma の北西に収斂する “方向変換” は LCT 以来の Betic 山地を説明することを目的に出来ず、していない (Viti et al., 2010)。一方、Betic とジブラルタルを横切る運搬と剪断方向との斜交は述べられていない (Platt et al., 1989)。

2) アペニンの東方へのスラブ後退と南方への回転は、引張的なスラスト運動とリフト形成時堆積物が南東方に新しくなっていくという証拠によって実証されている。しかし、より古いリフト形成時堆積物 (Jolivet and Faccenna, 2000) とより古い引張的断層運動がさらに報告されている。

3) カルパチアの東方へのスラブ後退と南方への回転モデルは、活動的なリフト運動に引き続いて、さらに受動的なリフト運動に純化された (Huismans et al., 2001)。しかし、パンノニア海盆の東北東-西南西方向とトランスシルバニア海盆の北-南方向 (Sanders et al., 2002) は、報告されてきた最初のリフト運動の剪断とスラブの方向に一致していない。さらに、Dombrádi et al., (2010) は実験的・数値的及び相似実験的モデル化によって引張から圧縮への最近の鮮新世-現世逆転を解析し、大波長 (300-400km) 褶曲を示した。それらの褶曲 (Styrian, Transdanubian, 大ハンガリー平原, Apuseni とトランスシルバニア) は、前期造山期からの系統を引き継いでおり、それはこれらの解析の中に表されてきている。現在の断面図から推定されるように褶曲は北東に延びており、南東ではないことに注意。

4.2) アセノスフェアの上昇に関連したリフト運動は、MP 活動 (受動的リフト / 活動的リフト : Bada and Horváth, 2001) に先行すると考えられている。リフトは遠距離引張により地殻を開くはずである。MP の働きは後で影響し、リソスフェアを熱して弱め、そして火山物質を供給する (Cloetingh and Ziegler, 2007)。それはリグリアプロバンス海盆に関するモデルと同様に、Huismans et al. (2001) により示唆されたように、カルパチアに関する第一段階モデルである。しかし、MP はどれも予備的リフト運動なしに始まる。Uyeda et al. (2008) は、海洋と大陸のサブダクションを説明するためにいくつかの類似した数値モデルについて議論している。彼らは、後退は数値的には可能であるが、丸いブルームの上部を持つ水平的に幅広いスラブをどのように説明するか、不思議なことを発見した。“小さなブルーム” が Burov and Cloetingh (2010) によって研究された。彼らは線対称放射対象・アフリカ-ヨーロッパプレート境界に近いこと・リソスフェアの熱力学年代及びリフト運動・褶曲作用及び MP 活動 (長さ対丸さ) を識別するのに役立つ

ほかの要素に注意を向けた。それ故、前提条件となるリフトは、マントルプルームとは無関係に活動しているのかもしれない (Huismans and Beaumont, 2011)。もちろん、リフトの造構史はその過程で重要な役割を演じている (Armitage et al., 2010)。

4.3) マントルプルームは、WMED とカルパチア島弧における新生代テクトニクスの起動機構として、ここでは示されている。"WMED (Wortel et al., 2009) とカルパチアの第一次運動学的進化についての一般的コンセンサス"がある。そうは言うものの、2,3の地球科学者はWMEDにおけるMP力学を信じ (Bell et al., 2006; Lavecchia and Creati, 2006; Shahar, 2000)、一般化している (Puchkov, 2009)。この偉大な議論はFoulger (2010)によって長く論議された。外方への放射状スラスト・内方へのリソスフェアの薄化と温度の上昇及びWMEDとカルパチア内部のMCC発生は、最近20年間に広く探求されてきており、テクトニックな垂直循環を支持した。その可能性のある垂直な壁を含めて、上部マントルにおけるMPの形態は、Kogiso (2007)に見られてきた。

4.3.1. カルパチア。東方へのスラブの後退は同じ東南東-西南西方向に走るリフト上では働いていない。Alcapaとリサ-ダーチャの逆回転ブロックは、カルパチアの丸い外縁を説明することは出来ない。南西カルパチア (Hrvatsko-Zagorje 帯) は古第三紀漸新世にCW130o回転し、中新世以降にCCW35o戻ったことが示されている (Tomljenovic et al., 2008)。回転ブロックの形態は見かけ上ハッキリしない (Zumberak 対 Medvednica ブロック)。きわめて類似している議論 (または4.5参照) 以来、ここではすべてのLCT-漸新世PMデータの広域的再磁化が、北部スペインと同様に発生したことが示されている (Osete et al., 2011と文献参照)。西カルパチアと北西Dinaridesとの接触部はハッキリしない。提案されている300-600kmの走向滑りの数kmの部分が知られているのみである (Placer et al., 2010; または4.7参照)。この露頭の南は、二つのプレートの明確な収斂を伴い、流行したDinaride造構論 (Robertson, 2011)を複雑化している: 西とSMMからアプーリア、北東からRhodopeとユーラシア。

4.3.2. 北西WMED。プロバンスからTPBへの地域は、三つの異なったスラブと三つの構造方向が結合している (3.1.1)。北東または南西走向に沿って進むCoSaリフト運動を示す物はあるのか? Sage et al. (2011)は陸上と沖合の北西-南東方向の地震断面を調べ、リフト関連の引張テクトニクスが後期中新世まで続き、それに続いて南アルプスの南北圧縮と上昇があったと結論を出した。アルプス弧の屈曲し回転した南縁の活動は、LPBの北東引張で終了した。リグリ海盆の南西引張はまた、北バレレス断裂帯によって限られている。それ故、LPBのリフト運動は局地的で、全WMEDでは広域的な意味合いはない。

4.3.3. 南東WMED (CaP)。この地域は、最近10Maの間の大陸サブダクションと発掘【exhumation】を通じてHP-

LT変成作用を被った。島弧に沿ったスラブは連続的で、すべての研究では西 (アトラス) と東 (アペニン) 翼の引き裂きが無関係と考える実験を行っている。幅広いスラブから狭いスラブへのジャンプは不自然であり、それが自然を模倣していることは疑わしい。VavilovとMarsiliリフトの一時的な開きは新しい縞状磁気異常によって支持されず (Florio et al., 2011)、その上上部プレートのスラスト運動や反対の下部プレートスラブの作用が引いたりスラブを引き裂いたりすることについて解決するには、さらなる研究が必要である。

4.3.4 トロイダル循環は、ずっと未解明の問題であった。Bercovici (2003)はポロイダル (鉛直方向) およびトロイダル (水平方向) のマグマ循環がおよそ50%ずつであると見積もった。Jadamec and Billen (2010)で議論されているように沈み込みスラブ端の周囲での局所的な水平マグマ循環に関するすべての新しい示唆、ならびに、Wortel et al. (2009)によるそのSTEP解はこの50%という数値を完全に解いた訳ではない。アペニン山脈の東部弧やカルパチア山脈の周囲周辺における時間依存性のある放射状外向きの衝上運動 ("鉛直渦" と "重力不安定": Lorinczi and Houseman, 2010) は、マグマ鉛直循環の水平CW成分の結果であろう。このメカニズムは、スラブ後退につづき南向きの回転を説明するものであろう。

4.3.5 火山活動。アルカリ玄武岩類は、ブリューム物質および同化作用の指示者としての信頼性を失った。つい2,3年前にはマントルダイアピルの地表指示者であったものが、今では、減圧による部分溶融率が小さいことの指示者 (Faenna and Baker, 2010)、不均質なアセノスフェアマントルにおける受動的湧昇 (Seghedi and Downes, 2011)、あるいは、ダイアピル不安定 (Beccaluva et al., 2011)を示すにすぎなくなっている。カルパチア山脈におけるダイアピル上昇は、重力不安定あるいはデタッチメント、そしてスラブ開裂をもたらす後期火山活動の原因である、と考えられた。しかし、沈み込みの後退を証拠づけるタイプの火山活動、あるいは、"プレートテクトニクスによってもたらされた不均質性" (Foulger, 2010)にかわる"新しいタイプのマントルブリューム" (Faccenna et al., 2010)は、依然、論争中の問題である。

4.3.6 深部マントルの上の冷たいスラブ。西ヨーロッパにおける地震波トモグラフィは、観測点が増えるにしたがって常に改良され、上部マントルの構造がより鮮明にとらえられるようになった (Koulakov et al., 2009; Rhine, Eifel および Eger リフトは本論の対象域に含まれない)。WMEDとカルパチアMTZ (深度660km)の上では、比較的低温の層が、後退したスラブのレリックと解釈されている。Dando et al. (2011)は、この層がカルパチアに存在するものの、スラブ後退とは関係しないことを見だし、それに代わって、"下方へ沈降するマントル" (このようなドーナツ型の環状構造は、すでに報告

された鉛直壁を含むMPの構造に適合することに注意) にとってかわることを示唆した. WMEDでは, Chang et al. (2010) がMTZ上の延長1,000kmの冷たい層を, 後退するスラブにむすびつけた. にもかかわらず, 高压・高温・部分熔融といった条件下におけるかんらん石(かんらん岩)の挙動に関する物理学的・鉱物学的解釈は, 含水率の変化(脱水)などのために相転移と格子定向配列(Karato et al., 2008)を飛び越えることを示す. このように, MTZ(上面深度:410km)の上の低温層や高温層は十分には理解されていない. しかしながら, MTZの上の低温層は, スラブを後退および前進させる造構作用に由来しているのである.

4.3.7 放射状のスラブ前進が, スラブ後退メカニズムに代わるものとして, ここで提案される. イエローストンおよびハワイでよく知られているほぼ鉛直の円筒状プリューム様構造の識別基準に加えて, 次の2つの基準が追加される:1) マグマの鉛直循環に起因する外向きの放射状前進(外向き拡大)の水平成分, 2) 鉛直マグマ循環のトロイダル(鉛直)成分. これ以上の具体化はできないが, 両メカニズムはともに, 地震波トモグラフィ記録にもとづいて等しくとってかわるものであることを明らかにである.

4.4) 海溝の後退/前進. 多くの研究はWMEDおよびカルパチアのスラブがともに西から東へ後退したことを想定しているが, 後退か前進かを識別するいかなる証拠も示されていない. 識別にかかわるいくつかの要素は, 沈み込むプレートの速度, 粘性, 層厚, 強度, 幅, 年代, および下位マントル・上盤プレートに対する応答である(たとえばLallemand et al., 2008). 海溝の移動は沈み込みの表層への現れであり(Jolivet et al., 2008), 沈み込みの歴史は地史復元に含まれる. GPSデータは現在の漂移方向を確認するが, それから過去の沈み込み方向への投影は不確実である. Lister and Forster (2009)は, 応力場の時空変化を詳細に明らかにし, とってかわりうる提案を行った. それゆえに, WMED(Betics, LPB)におけるリフティングが西から東へ進行したことは証明されていない. カルパチア山脈北部における突出は, いかほどであっても, リソスフェア上部に限られていた.

エーゲ海スラブの後退メカニズム(Royden and Papanikolaou, 2011)を考慮すると, 後退の証拠は変形時期に依拠している. しかし, こうして後退を認めたとしても, 次の疑問がのこる:1) もし応力が北東-南西方向に働く場合, エーゲ弧はなぜ東西対称(van Hinsbergen et al., 2010)なのか?, 2) 同じように押し込められた, あるいは, 重なり合った地塊(Del Ben et al., 2010)の両側にあって直交して後退する2つのスラブの接合状況をどのように説明すればよいのだろうか?

4.5) 東方突出とブロック回転はカルパチア弧に関する決まりきった説明であり, それはAlcapa地塊の北西傾斜とTisza-Dacia地塊の北東傾斜を示す古地磁気学的解

析にもとづいている. これらの期待される傾斜から想定される事象には, 分解, 走向移動, デタッチメント, あるいは, 単に"軟らかい衝突"(Brückl et al., 2010; Márton et al., 2011)は含まれない. 歪荷重による再帯磁が地磁気フアブリックとして測定された方位の第1の原因である(Borrandaille, 1997)と考えるべき時期になっているのであろう. そして, PM測定結果を過去の地塊回転の指示者と解釈することにはより慎重を期すべきである.

4.6) 水平押しは, Lustrino et al. (2009)によって示唆された代替モデルの1つであり, 地帯に平行な押し込みと突出[belt-parallel indentation-extrusion]とも呼ばれる. Mantvani et al. (2009)は, アペニン弧全体を説明するために, 鮮新世~第四紀におけるHyblean Adventure 岬によるNW-NNE方向の圧縮を提案した(中新世については2007年の先行論文参照). 運動方向が地質構造に適合しない場合について, 彼らはAdria地塊とCoSa地塊との間の斜め拡大を提案している. 焦点になっている湾曲問題は, カリブ断層に沿う東向き突出とカルパチア-パノニア地域の水平絞り出しによって説明される. このモデルでは, 中新世におけるアペニン山脈北部の湾曲やWMED全体の湾曲を説明できない. 断層解析は過去の歪を解明するのにしばしば利用されるが, Sperner and Zweigel(2010)は遠因を原因とすることには注意を払うべきであると述べた.

4.7) アドリア突入. アドリア(またはApulia)は, 三畳紀~後期白亜紀には一種の無定形の地帯であった(図2). アドリアに沿って多重オフィオライト-変成帯がリボン状に露出していて, この時代にいくつかの北西方向の縁海(Severin, Meliata, Vardar, Pindos)が開閉していたことを示す(Csontos and Vörös, 2004; Rosenbaum and Lister, 2004). アドリアは, 西側では北東方向のLigurian海に面していた. 現在, 南北に伸長したアドリアの中核帯はアドリア海の下に没し, 東側はDinarides-Hellenides山脈の下に, 西側はアペニン山脈として一部はアルプス山脈の下に沈み込んでいる. GPS計測は, アドリアの中核帯が北~北北東へ向かって差動的運動をしていることを示唆する(Pinter et al., 2006).

三畳紀~ジュラ紀のリフティング期におけるアドリアの北西漂移は, 実際にはよくわかっていない. 未来のアペニン山脈上への東向き衝突と未来のDinarides山脈への西向き衝突(Robertson, 2011)は, イベリアプレートがMoesia, Serbo-Macedonia(SMM), Rhodopeを向かい合うプレートであるユーラシアに西側から押し付けている. 幅広いテチス海が南北に閉塞したプロセスの分析は, それらのほどんどが, オフィオライトの分布にもとづいて, テチス海の湾入の位置はまったく自在に考えられている(大規模な"Vardar川"走向移動に沿う巨大な海廊). アフリカの漂移にみられる北向きの"ヘアーピン"状の方向転換につづいて, 数100kmに達する走向移動が起こった. その値は600km(Karamata, 2006)とされるが, 造山帯に平行する大規模な隔離を示す確実な証拠

は、未だ見つかっていない。Handy et al. (2010) は、アルプスの三畳紀～現在の歴史（北東への沈み込み）のなかで、アドリアについて記述している。彼らは、北東方向の Ligurian-Piemonte 海盆から記述をはじめ、イベリアの引張と斜め短縮期 (131-84Ma) にはこの海盆が S 次状に湾曲し、明瞭な押し (84-35Ma)、次いで南北方向の収束 (35-0Ma) を経験したことを述べた。この復元にまつわる問題は、アドリアの西側の Dinaric-Hellenic 縁が部分的に無視されているために、三畳紀以降のアドリアをめぐる片側だけの造構運動という印象を読者に与える。

4.8) 後期白亜紀の復元。 後期白亜紀は造山期として広く認識されているが、依然、多くの誤解がある。ここでの私の興味は、WMED とカルパチア弧の両者の変成および非変成基盤中でどのような構造方向が出現したのかという問題である。両弧には北東-南西の卓越方向が明瞭で、それらは中央テチス海西部の全域にも認められる。幾人かの地球科学者は、北西ヨーロッパの Dèzes et al. (2004) や Maghreb の Frizon de Lamotte et al. (2009) のように、後期白亜紀造山運動の重要性を理解していて、始新世-漸新世-中新世の“アルプス造山”に代わるものとして強調している。しかし、ほとんどの研究者は、このことに気づいている（たとえば、Guiraud et al., 2005）。Alboran, Liguria, Provence, Corsica, Sardinia および中央ハンガリー帯における後期白亜紀の衝上運動と変成作用は北東走向に直交して収束し、この方向は漸新世-中新世造山運動にはじまる縫合線 [アペニン山脈では Ortona-Roccamonfina 線と Livorno-Salerno 線、カルパチア山脈では Ceahlau-Severin, Getic, Supergetic 線 (Ciulavu et al., 2008)] を形成した。いっぽう、中央ヨーロッパにおける北東方向の構造の一部 (Eger rift) はバリスカン造山運動の名残であり (図 4)、新生代に再活動した。

5. 結論

WMED とカルパチア弧はともに、MPs のようであり、MPs のように挙動し、それゆえに MPs なのである。本研究は、マントルブリュームを同等の信頼度がある造構機関として、スラブ後退のメカニズムとして採用した。MP 構造を支持する議論は、放射状の外向き衝上運動、内側の高熱流量、および外側の剪断作用である。スラブの後退メカニズムにかかわる問題点は、後退のはじまりと、その後の WMED スラブの逆向き後退に関する説明が欠けていることである。さらに、カルパチア弧南部で回転するスラブが遺されていないことも、問題である。私の解は、簡単にいうと、造構機関をスラブ後退から、活動円を外側へ拡大するスラブの放射状前進に置き換えることにある。本研究は構造地質学にだけ専念し、マントル不均質性に関する歴大な議論 (Don Anderson) を考慮に入れていないことに留意されたい。WMED とカルパチア弧は、アドリア凹部両側に発達した 2 つの中新世造山要素であり、後期白亜紀に形成されていた北東および北西走向の造山帯を完全に塗り替えた。したがって、中新世にはこ

れら 2 つの弧の周辺には、ヨーロッパ-アフリカ収束帯は存在しなかった。これら 2 つの完全に丸い形をした弧は、東西走向のアルプス造山帯の方向性を残していないで、それら自身の放射状あるいは同心円状の構造を発達させている。造構機関としての MP は、チレニアスラブと Alboran スラブの十分な裂開と逆方向への後退を演出した。カルパチア山脈から外側へ向かう放射状の押しは、造山帯の湾曲、地塊回転、突出、斜め衝突、および“Moesian 包有”を解消した。後期中新世以降 MP の活動が衰え、それに代わって、ヨーロッパ-アフリカ収束から予期されるほぼ南北方向の圧縮作用が働くようになった。

謝辞 長年にわたってともに議論をしてきたイスラエル地質調査所 (GSI) の David Neev と Amit Segev に感謝する。機器使用を許可された GSI 管理事務局ならびにエルサレムの Hebrew 大学の地質教室にも感謝する。私の英語原稿をすばらしく編集・改善してくれた Keith James に厚くお礼申し上げる。

文献

- Alasonati Tašárová, Z., Afonso, J.C., Bielik, M., Götze, H.-J. and Hók, J., 2009. The lithospheric structure of the Western Carpathian- Pannonian Basin region based on the CELEBRATION 2000 seismic experiment and gravity modeling. *Tectonophysics*, v. 475, p. 454-469.
- Alvarez, W., Coccozza, T. & Wezel, F.C., 1974. Fragmentation of the Alpine orogenic belt by microplate dispersal. *Nature*, v. 248, p. 309-314.
- Andreani, L., Loget, N., Rangin, C. and Le Pichon, X., 2010. New structural constraints on the southern Provence thrust belt (France): evidences for an Eocene shortening event linked to the Corsica-Sardinia subduction. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, v.181, no. 6, p. 547-563.
- Armitage, J.J., Collier, J.S. and Minshull, T.A., 2010. The importance of rift history for volcanic margin formation. *Nature*, v. 465, doi:10.1038/nature09063, 913-917.
- Artyushkov, E.V., Baer, M.A. and Möerner, N.-A., 1996. The East Carpathians: Indications of phase transitions, lithospheric failure and decoupled evolution of thrust belt and its foreland. *Tectonophysics*, v. 262, no. 101-132.
- Bache, F., Olivet, J.L. and Gorini, C., Aslanian, D., Labails, C. and Rabineau, M., 2010. Evolution of rifted continental margins: The case of the Gulf of Lions (Western Mediterranean Basin). *Earth and Planetary Science Letters*, v. 292, p.345-356.
- Bada, G. and Horváth, F., 2001. On the structure and tectonic evolution of the Pannonian Basin and surrounding orogens. *Acta Geologica Hungarica*, v. 44, nos. 2-3, p. 301-327.
- Beccaluva, L., Bianchini, G., Natali, C. and Siena, F. 2011. Geodynamic control on the orogenic and anorogenic magmatic phases in Sardinia and Southern Spain: inferences for the Cenozoic evolution of the western Mediterranean.

- Lithos, v. 123, nos. 1-4, p. 218-224.
- Bell, K., Castorina, F., Rosatelli, G. and Stoppa, F., 2006. Plume activity, magmatism, and the geodynamic evolution of the Central Mediterranean. *Annals of Geophysics, Supplement*, v. 49, no. 1, p. 357-371.
- Bercovici, D., 2003. The generation of plate tectonics from mantle convection. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 205, p. 107-121.
- Bonardi, G., Ciarcia, S., Di Nocera, S., Matano, F., Sgrosso, I. and Torre, M., 2009. Main kinematic units map of the southern Apennines. Explanatory notes. *Ital. Jour. Geosci.*, v. 128, p. 47-60.
- Borradaile, G.J. 1997. Deformation and paleomagnetism. *Surveys in Geophysics*, v. 18, p. 405-436.
- Brückl, E., Behm, M., Decker, K., Grad, M., Guterch, A., Keller, G.R. and Thybo, H., 2010. Crustal structure and active tectonics in the Eastern Alps. *Tectonics*, v. 29, TC2011, doi:10.1029/2009TC002491, 1-17.
- Bufo, E., Bezzeghoud, M., Udías, A. & Pro, C. 2004. Seismic sources on the Iberia-Africa plate boundary and their tectonic implications. *Pure Appl. Geophys.*, v. 161, p. 623-646.
- Burov, E. & Cloetingh, S. 2010. Plume-like upper mantle instabilities drive subduction initiation. *Geophysical Research Letters*, v. 37, L03309, doi:10.1029/2009GL041535, 6p.
- Capponi, G., Crispini, L. and Scambelluri, M., 2009. Comment on "subduction polarity reversal at the junction between the Western Alps and the Northern Apennines, Italy", by G. Vignaroli, C. Faccenna, L. Jolivet, C. Piromallo, F. Rossetti. *Tectonophysics*, v. 465, p. 221-226.
- Cavazza, W. and Barone, M., 2010. Large-scale sedimentary recycling of tectonic mélange in a forearc setting: The Ionian basin (Oligocene-Quaternary, southern Italy). *GSA Bulletin*, v. 122, nos. 11-12, p. 1932-1949.
- Chang, S.J., van der Lee, S., Flanagan, M.P., Bedle, H., Marone, F., Matzel, E.M., Pasyanos, M.E., Rodgers, A.J., Romanowicz, B. and Schmid, C., 2010. Joint inversion for three-dimensional S velocity mantle structure along the Tethyan margin. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, B08309, doi:10.1029/2009JB007204.
- Channell, J.E.T., 1996. Palaeomagnetism and palaeogeography of Adria. In: Morris, A. and Tarling, D.H. (eds.). *Palaeomagnetism and Tectonics of the Mediterranean Region*. Geological Society Special Publication 105, p. 119-132.
- Chiarabba, C., De Gori, P. and Speranza, F., 2009. Deep geometry and rheology of an orogenic wedge developing above a continental subduction zone: Seismological evidence from the northern-central Apennines (Italy). *Lithosphere*, v. 1, doi:10.1130/L34.1, p. 95-104.
- Ciulavu, M., Mählmann, R.P., Schmid, S.M., Hofmann, H., Seghedi, A. & Frey, M. 2008. Metamorphic evolution of the very low-to-low grade metamorphic core complex Danubian Window) in the South Carpathians. In: Siegesmund, S., Fuegenschuh, B. & Froitzheim, N. (eds.), *Tectonic Aspects of the Alpine-Dinaride-Carpathian System*. Geological Society, London, Special Publication 298, p. 281-315.
- Cloetingh, S. and Ziegler, P.A., 2007. Tectonic Models for the Evolution of Sedimentary Basins. In: Schubert, G. (editor-in-chief) *Treatise on Geophysics*, Volume 6, Chapter 11, p. 486-579.
- Corsini, M. & Rolland, Y. 2009. Late evolution of the southern European Variscan belt: Exhumation of the lower crust in a context of oblique convergence. *C. R. Geoscience*, v. 341, p. 214-223.
- Csontos, L. & Vörös, A. 2004. Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 210, p. 1-56.
- Cuffaro, M., Riguzzi, F., Scrocca, D. and Doglioni, C., 2011. Coexisting tectonic settings: the example of the southern Tyrrhenian Sea. *Int. Jour. Earth Sci.*, v. 100, no. 8, p. 1915-1924.
- Dando, B.D.E., Stuart, G.W., Houseman, G.A., Hegedüs, E., Brückl, E. and Radovanović, S., 2011. Teleseismic tomography of the mantle in the Carpathian-Pannonian region of central Europe. *Geophys. Jour. Int.*, v. 186, p. 11-31.
- Dercourt, J., Gaetani, M., Vrielynck, B., Barrier, E., Biju-Duval, B., Brunet, M.F., Cadet, J.P. Crasquin, S. and Sandulescu, M., 2000. *Atlas Peri-Tethys, Palaeoenvironmental maps*, Gauthier Villars, Paris.
- Dewey, J.F., Helman, M.L., Turco, E., Hutton, D.H.W. & Knott, S.D. 1989. Kinematics of the western Mediterranean. In: Coward, M.P., Dietrich, D. and Park, R.G. (eds.), *Alpine Tectonics*. Geological Society, London, Special Publication 45, p. 265-283.
- Dèzes, P., Schmid, S.M. and Ziegler, P.A., 2004. Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. *Tectonophysics*, v. 389, p. 1-33.
- Díaz, J., Gallart, J., Villaseñor, A., Mancilla, F., Pazos, A., Córdoba, D., Pulgar, J.A., Ibarra, P. and Harnafi, M., 2010. Mantle dynamics beneath the Gibraltar Arc (western Mediterranean) from shear-wave splitting measurements on a dense seismic array. *Geophysical Research Letters*, v. 37, L18304, doi:10.1029/2010GL044201.
- Doglioni, C., Carminati, E., C., Cuffaro, M. and Scrocca, D., 2007. Subduction kinematics and dynamic constraints. *Earth- Science Reviews*, v. 83, p. 125-175.
- Dombrádi, E., Sokoutis, D., Bada, G., Cloetingh, S. & Horváth, F. 2010. Modelling recent deformation of the Pannonian lithosphere: Lithospheric folding and tectonic topography. *Tectonophysics*, v. 484, p. 103-118.
- Faccenna, C. and Becker, T.W., 2010. Shaping mobile belts by small-scale convection. *Nature*, v. 465, doi:10.1038/nature09064, p. 602-605.
- Faccenna, C., Becker, T., Lallemand, S., Lagabrielle, Y.,

- Funiciello, F. and Piromallo, C., 2010. Subduction-triggered magmatic plumes: A new class of plumes? *Earth and Planetary Science Letters*, v. 299, p. 54-68.
- Finetti, I.R. 2006. Basic regional crustal setting and superimposed local pluton-intrusion-related tectonics in the Larderello-M. Amiata geothermal province, from integrated CROP seismic data. *Boll. Soc. Geol. It.*, v. 125, p. 117-146.
- Florio, G., Fedi, M. and Cella, F., 2011. Insights on the spreading of the Tyrrhenian Sea from the magnetic anomaly pattern. *Terra Nova*, v. 23, p. 127-133.
- Foulger, G.R., 2010. *Plates vs Plumes: A Geological Controversy*. Wiley-Blackwell, 978-1-4051-6148-0, 364p.
- Frizon de Lamotte, D., Leturmy, P., Missenard, Y., Khomsi, S., Ruiz, G., Saddiqi, O., Guillocheau, F. & Michard, A. 2009. Mesozoic and Cenozoic vertical movements in the Atlas system (Algeria, Morocco, Tunisia): An overview. *Tectonophysics*, 475, 9-28.
- Fullea, J., Fernández, M., Afonso, J.C., Vergés, J. and Zeyen, H., 2011. The structure and evolution of the lithosphere-asthenosphere boundary beneath the Atlantic-Mediterranean Transition Region. *Lithos*, v. 120, p. 74-95.
- Garfunkel, Z., Anderson, C.A. and Schubert, G., 1986. Mantle circulation and the lateral migration of subducted slabs. *Journal of Geophysical Research*, v. 91/B7, p. 7205-7223.
- Göğüş, O.H., Pysklywec, R.N., Corbi, F. and Faccenna, C., 2011. The surface tectonics of mantle lithosphere delamination following ocean lithosphere subduction: Insights from physical-scaled analogue experiments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 12, no. 5, Q05004, doi:10.1029/2010GC003430.
- Golonka, J., Krobicki, M., Waškowska, A., Matyasik, I., Pauken, R., Bocharova, N.J. Erdich, M. and Wildharber, J., 2009. Source rock prediction value: world provinces during Late Jurassic-Earliest Cretaceous times and position of the west Carpathians in SRPV prediction. *Ann. Soc. Geol. Poloniae, Krakow*, v. 79, p. 195-211.
- Grad, M., Guterch, A., Keller, G.R., Janik, T., Hegedűs, E., Vozár, J., Ślącza, A., Tiira, T. and Yliniemi, J., 2006. Lithospheric structure beneath trans-Carpathian transect from Precambrian platform to Pannonian basin: CELEBRATION 2000 seismic profile CEL05. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, B03301, doi:10.1029/2005JB003647.
- Guiraud, R., Bosworth, W., Thierry, J. and Delplanque, A., 2005. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: An overview. *Journal of African Earth Science*, v. 43, p. 83-143.
- Handy, M.R., Schmid, S.M., Bousquet, R., Kissling, E. & Bernoulli, D. 2010. Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological-geophysical record of spreading and subduction in the Alps. *Earth-Science Reviews*, v. 102, p. 121-158.
- Heymes, T., Monié, P., Arnaud, N., Pêcher, A., Bouillin, J-P. and Compagnoni, R., 2010. Alpine tectonics in the Calabria-Peloritan belt (southern Italy): New ⁴⁰Ar/³⁹Ar data in the Aspromonte Massif area. *Lithos*, v. 114, p. 451-472.
- Huisman, R.S., Podliadchikov, Y.Y. & Cloetingh, S. 2001. Dynamic modeling of the transition from passive to active rifting, application to the Pannonian basin. *Tectonics*, v. 20, no. 6, p. 1021-1039.
- Huisman, R.S. and Beaumont, C., 2011. Depth-dependent extension, two-stage breakup and tectonic underplating at rifted margins. *Nature*, v. 473, p. 74-79.
- Jadamec, M.A. & Billen, M.I. 2010. Reconciling surface plate motions with rapid three-dimensional mantle flow around a slab edge. *Nature*, 465, doi:10.1038/nature09053, 338-342.
- Janik, T., Grad, M., Guterch, A., Vozár, J., Bielik, M., Vozárova, A., Hegedűs, E., Kovác, C.A., Kovác, I., Keller, G.R. and CELEBRATION 2000 Working Group, 2011. Crustal structure of the Western Carpathians and Pannonian Basin: Seismic models from CELEBRATION 2000 data and geological implications. *Journal of Geodynamics*, v. 52, p. 97-113.
- Jiriček, R., 1979. Tectogenetic development of the Carpathian arc in the Oligocene and Neogene. In: Mahel, M. (ed.), *Tectonic Profiles Through the West Carpathians*. Geol. Inst. Dionýz Stúr. Bratislava, p. 205-214.
- Jolivet, L. and Faccenna, C., 2000. Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision. *Tectonics*, v. 19, no. 6, p. 1095-1106.
- Jolivet, L., Augier, R., Faccenna, C., Negro, F., Rimmelé, G., Agard, P., Robin, C., Rossetti, F. and Crespo-Blanc, A., 2008. Subduction, convergence and the mode of backarc extension in the Mediterranean region. *Bull. Soc. Géol. France*, v. 179, no. 6, p. 525-550.
- Karamata, S. 2006. The geological framework of the Balkan Peninsula related to approach, collision and compression of Gondwanian and Eurasian units. In: Robertson, A.H.F. & Montarakis, D. (eds.), *Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region*. Geological Society, London, Special Publication 260, p. 155-178.
- Karato, S.-I., Jung, H., Katayama, I. and Skemer, P., 2008. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New insights from laboratory studies. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 36, p. 59-95.
- Kosigo, T. 2007. A geochemical and petrological view of mantle plume. In: Yuen, D.A., Maruyama, S., Karatu, S.I. and Windley, B. (eds.), *Superplumes: Beyond Plate Tectonics*. Springer, ISBN 978-1-4020-5749-6, Chapter 7, p. 165-186.
- Koulakov, I., Kaban, M.K., Tesauero, M. and Cloetingh, S., 2009. P- and S-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophys. Jour. Int.*, v. 179, p. 345-366.
- Lallemant, S., Heuret, A., Faccenna, C. and Funiciello, C., 2008. Subduction dynamics as revealed by trench migration. *Tectonics*, v. 27, TC3014, doi:10.1029/2007TC002212.
- Laubscher, H., 2010. Jura, Alps and the boundary of the Adria subplate. *Tectonophysics*, v. 483, p. 223-239.

- Lavecchia, G. and Creati, N., 2006. A mantle plume head trapped in the transition zone beneath the Mediterranean: a new idea. *Annals of Geophysics, Supplement*, v. 49, no. 1, p. 373-388.
- Le Pichon, X., Rangin, C., Hamon, Y., Loget, N., Lin, J.Y., Andreani, L. and Flotte, N., 2010. Geodynamics of the France Southeast Basin. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, v. 181, p. 477-501.
- Lister, G. and Forster, M., 2009. Tectonic mode switches and the nature of orogenesis. *Lithos*, v. 113, p. 274-291.
- Lonergan, L. & White, N. 1997. Origin of the Betic-Rif mountain belt. *Tectonics*, v. 16, p. 504-522.
- Lorinczi, P. and Houseman, G., 2010. Geodynamical models of lithospheric deformation, rotation and extension of the Pannonian Basin of Central Europe. *Tectonophysics*, v. 492, p. 73-87.
- Lucente, F.P. and Margheriti, L., 2008. Subduction rollback, slab break off, and induced strain in the uppermost mantle beneath Italy. *Geology*, v. 36, p. 375-378.
- Lustrino, M., Morra, V., Fedele, L. & Franciosi, L. 2009. Beginning of the Apennine subduction system in central western Mediterranean: Constraints from Cenozoic "orogenic" magmatic activity of Sardinia, Italy. *Tectonics*, v. 28, TC5016, doi:10.1029/2008TC002419.
- Maffione, M., Speranza, F., Faccenna, C., Cascella, A., Vignaroli, G. and Sagnotti, L., 2008. A synchronous Alpine and Corsica-Sardinia rotation. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, B03104, doi:10.1029/2007JB005214.
- Malinverno, A. and Ryan, W.B.F., 1986. Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as a result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, v. 5, p. 227-245.
- Mantovani, E., Babbucci, D., Tamburelli, C. and Viti, M., 2009. A review on the driving mechanism of the Tyrrhenian-Apennines system: Implications for the present seismotectonic setting in the Central-Northern Apennines. *Tectonophysics*, v. 476, p. 22-40.
- Marroni, M., Meneghini, F. & Pandolfi, L. 2010. Anatomy of the Ligure-Piemontese subduction system: evidence from Late Cretaceous-middle Eocene convergent margin deposits in the Northern Apennines, Italy. *International Geology Review*, v. 52, p. 1160-1192.
- Martín-Algarra, A., Mazzoli, S., Perrone, V. and Rodríguez-Cañero, R., 2009. Variscan tectonics in the Malaguide Complex (Betic Cordillera, Southern Spain): Stratigraphic and structural Alpine versus Pre-Alpine constraints from the Ardales Area (Province of Malaga). II. Structure. *The Journal of Geology*, v. 117, p. 263-284.
- Márton, E., Tokarski, A.K., Krejčí, O., Rauch, M., Olszewska, B., Tomanova Petrova, P. and Wojcik, A., 2011. 'Non-European' paleomagnetic directions from the Carpathian Foredeep at the southern margin of the European plate. *Terra Nova*, v. 23, p. 134-144.
- Matenco, L., Krézsek, C., Merten, S., Schmid, S., Cloetingh, S. and Andriessen, P., 2010. Characteristics of collisional orogens with low topographic build-up: an example from the Carpathians. *Terra Nova*, v. 22, p. 155-165.
- Mazzoli, & Helman, M. 1994. Neogene patterns of relative plate motion for Africa-Europe: some implications for recent central Mediterranean tectonics. *Geol. Rundsch.*, v. 83, p. 464-468.
- Michard, A., Negro, F., Saddiqi, O., Bouybaouene, M. L., Chalouan, A., Montigny, R. and Goffé, B., 2006. Pressure- temperature-time constraints on the Maghrebide mountain building: evidence from the Rif-Betic transect (Morocco, Spain), Algerian correlations, and geodynamic interpretations. *C.R. Geoscience*, v. 338, p. 92-114.
- Minelli, L. & Faccenna, C. 2010. Evolution of the Calabrian accretionary wedge (central Mediterranean). *Tectonics*, v. 29, TC4004, doi:10.1029/2009TC002562.
- Neagoe, C., Popa, M., diaconescu, M. and Radulescu, M., 2010. Possible deep lithospheric roots beneath south-eastern Carpathians back-arc region. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, v. 4, p. 340-355.
- Osete, M-L., Gómez, J.J., Pavón-Carrasco, F.J., Villalain, J.J., Palencia-Ortas, A., Ruiz-Martinez, V.C. and Heller, F., 2011. The evolution of Iberia during the Jurassic from paleomagnetic data. *Tectonophysics*, v. 502, p. 105-120.
- Oszczypko, N. and Ślącza, A., 1985. An attempt to palinspatic reconstruction of Neogene basins in the Carpathian foredeep. *Ann. Soc. Geol. Poloniae, Krakow*, v. 55, p. 55-75.
- Oudet, J., Münch, P., Borgomano, J., Quillevère, F., Melintodbrinescu, M.C., Demory, F., Viseur, S. and Cornee, J.J., 2010. Land and sea study of the northeastern golfe du Lion rifted margin: the Oligocene-Miocene of southern Provence (Nerthe area, SE France). *Bull. Soc. Geol. Fr.*, v. 181, p. 591-607.
- Pauselli, C., Ranalli, G. and Federico, C., 2010. Rheology of the Northern Apennines: Lateral variations of the lithospheric strength. *Tectonophysics*, v. 484, p. 27-35.
- Pedreira, A., Ruiz-Constán, A., Galindo-Zaldívar, J., Chalouan, A., Sanz de Galdeano, C., Marín-Lechado, C., Ruano, P., Benmakhlof, M., Akil, M., López-Barrido, A.C., Chabli, A., Ahmanou, A. and Lourdes González-Castillo, 2011. Is there an active subduction beneath the Gibraltar orogenic arc? Constraints from Pliocene to present-day stress field. *Journal of Geodynamics*, v. 52, p. 83-96.
- Pinter, N., Grenczy, G., Weber, J., Stein, S. and Medak, D. (eds.), 2006. *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*. Springer, NATO Science Series IV, v. 61. 402p.
- Placer, L., Vrabec, M. and Celarc, B., 2010. The bases for understanding of the NW dinarides and Istria Peninsula tectonics. *Geologija*, v. 53, p. 55-86.
- Platt, J.P., 2007. From orogenic hinterlands to Mediterranean-style back-arc basins: a comparative analysis. *Journal of the Geological Society, London*, v. 164, p. 297-311.

- Platt, J.P., Behrmann, J.H., Cunningham, P.C., Dewey, J.F., Helman, M., Parish, M., Shepley, M.G., Wallis, S. and Weston, P.J., 1989. Kinematics of the Alpine arc and the motion history of Adria. *Nature*, v. 337, p. 158-161.
- Puchkov, V.N. 2009. The Controversy over Plumes: Who Is Actually Right? *Geotectonics*, v. 43, p. 1-17.
- Puga, E., Diaz de Federico, A., Nieto, J.M., Diaz Puga, M.A. and Rodriguez Martinez-Conde, J.A., 2009. The Betic ophiolite association: A very significant geological heritage that needs to be preserved. *Geoheritage*, v. 1, p. 11-31.
- Puglisi, D., 2008. Oligocene-Miocene sandstone suites from the Gibraltar and Calabria-Peloritani Arcs: provenance changes and paleogeographic implications. *Geologica Carpathica*, v. 59, p. 525-535.
- Ratschbacher, L., Linzer, H-G., Mozer, F., Strusievcz, R-O., Bedeleau, H., Har, N. and Mogoş, P-A., 1993. Cretaceous to Miocene thrusting and wrenching along the central south Carpathians due to a corner effect during collision and orocline formation. *Tectonics*, v. 12, p. 855-873.
- Robertson, A.H.F., 2011. Late Palaeozoic-Cenozoic tectonic development of Greece and Albania in the context of alternative reconstructions of Tethys in the Eastern Mediterranean region. *International Geology Review*, DOI: 10.1080/00206814.2010.543791.
- Rosell, O., Marti, A., Marcuello, A., Ledo, J., Queralt, P., Roca, E. and Campanià, J., 2011. Deep electrical resistivity structure of the northern Gibraltar Arc (western Mediterranean): evidence of lithospheric slab break-off. *Terra Nova*, v. 23, p. 179-186.
- Rosenbaum, G. & Lister, G.S. 2004. Neogene and Quaternary rollback evolution of the Tyrrhenian Sea, the Apennines, and the Sicilian Maghrebides. *Tectonics*, 23, TC1013, doi:10.1029/2003TC001518.
- Royden, L.H., 1993. Evolution of retreating subduction boundaries formed during continental collision. *Tectonics*, v. 12, p. 629-638.
- Royden, L.H. and Papanikolaou, D.J., 2011. Slab segmentation and late Cenozoic disruption of the Hellenic arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 12, no.3, 24p.
- Sage, F., Beslier, M.-O., Thimon, I., Larroque, C., Dessa, J.-X., Migeon, S., Angelier, J., Guennoc, P., Schreiber, D., Michaud, F., Stephan, J.-F. and Sonnet, L., 2011. Structure and evolution of a passive margin in a compressive environment: example of the south-western Alps-Ligurian basin junction during the Cenozoic. *Marine and Petroleum Geology*, v. 28, p. 1263-1282.
- Sanders, C., Huisman, R., van Wees, J.D. and Andriessen, P. 2002. The Neogene history of the Transylvanian basin in relation to its surrounding mountains. *EGU Stephan Mueller, Special Publication Series 3*, p. 121-133.
- Sartori, R., Torelli, L., Zitellini, N., Carrara, G., Magaldi, M. and Mussoni, P., 2004. Crustal features along a W-E Tyrrhenian transect from Sardinia to Campania margins (Central Mediterranean). *Tectonophysics*, v. 383, p. 171-192.
- Schellart, W.P. 2010. Mount Etna-Iblean volcanism caused by rollback induced upper mantle upwelling around the Ionian slab edge: An alternative to the plume model. *Geology*, v. 38, p. 691-694.
- Schettino, A. and Turco, E., 2011. Tectonic history of the western Tethys since the Late Triassic. *GSA Bulletin*, v. 123, p. 89-105.
- Schmid, S.M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M. and Ustaszewski, K. 2008. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Jour. Geosci.*, v. 101, p. 139-183.
- Seghedi, I. and Downes, H., 2011. Geochemistry and tectonic development of Cenozoic magmatism in the Carpathian-Pannonian region. *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2011.06.009.
- Shahar, J., 2000. Two different mechanisms for the LCT and Miocene orogens in the W MED. The First Stephan Mueller Conference of the European Geophysical Society (EGS): From Continental Breakup to Collision. Program and Abstracts, p. 74.
- Sperner, B., Ioane, D. and Lillie, R.J., 2004. Slab behaviour and its surface expression: new insights from gravity modelling in the SE-Carpathians. *Tectonophysics*, v. 382, p. 51-84.
- Sperner, B. and Zweigel, P., 2010. A plea for more caution in fault-slip analysis. *Tectonophysics*, v. 482, p. 29-41.
- Stampfli, G.M. and Borel, G.D., 2004. The TRANSMED transects in space and time: constraints on the paleotectonic evolution of the Mediterranean Domain. In: Cavazza, W., Roure, F., Spakman, W., Stampfli, G.M. and Ziegler, P.A. (eds.), *The TRANSMED Atlas, The Mediterranean Region from Crust to Mantle*, Springer Verlag, Germany, Chapter 3, p. 53-80.
- Stegena, L., Géczy, B. and Horváth, F., 1975. Late Cenozoic evolution of the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, v. 26, p. 71-90.
- Sue, C., Calcagno, P., Courrioux, G., Tricart, P., Frechet, J. and Thouvenot, F., 2010. Relationship between inherited crustal structures and seismicity in the western Alps inferred from 3D structural modeling. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, v. 181, p. 583-590.
- Šumanovac, F., 2010. Lithosphere structure at the contact of the Adriatic microplate and the Pannonian segment based on the gravity modelling. *Tectonophysics*, v. 485, p. 94-106.
- Thomas, M.F.H. Bodin, S., Redfern, J. and Irving, D.H.B., 2010. A constrained African craton source for the Cenozoic Numidian Flysch: Implications for the palaeogeography of the western Mediterranean basin. *Earth-Science Reviews*, v. 101, p. 1-23.
- Tomljenović, B., Csontos, L., Márton, E. and Márton, P., 2008. Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica

- Mountains, North Croatia. Geological Society, London, Special Publication 298, p. 145-167.
- Uyeda, K., Gerya, T. and Sobolev, S.V., 2008. Subduction initiation by thermal-chemical plumes: Numerical studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 171, p. 296-312.
- van Hinsbergen, D.J.J., Dupont-Nivet, G., Nakov, R., Oud, K. and Panaiotu, C., 2008. No significant post-Eocene rotation of the Moesian Platform and Rhodope (Bulgaria): Implications for the kinematic evolution of the Carpathian and Aegean arcs. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 273, p. 345-358.
- Viti, M., Mantovani, E., Babbucci, D. and Tamburelli, C., 2010. Plate kinematics and geodynamics in the Central Mediterranean. *Journal of Geodynamics*, v. 51, p. 190-204.
- Wezel, F.C., 2005. Geological evidence on the formation of the Atlantic Ocean. *Boll. Soc. Geol. It., Volume Speciale n. 5*, p. 61-78.
- Weijermars, R., 1991. Geology and tectonics of the Betic Zone, SE Spain. *Earth-Science Reviews*, v. 31, p. 153-236.
- Wortel, M.J.R. and Spakman, W., 2000. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. *Science*, v. 290, p. 1910-1916.
- Wortel, R., Govers, R. and Spakman, W., 2009. Continental Collision and the STEP-wise Evolution of Convergent Plate Boundaries: From Structure to Dynamics. In: Lallemand, S. and Funicicello, F. (eds.), *Subduction Zone Geodynamics*. doi:10.1007/978-3-540-87974-9, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 47-59.
- Yelles, A., Domzig, A., Déverchère, J., Bracène, R., de Lépinay, B.M., Strzeczynski, P., Bertrand, G., Boudiaf, A., Winter, T., Kherroubi, A., Le Roy, P. and Djellit, H., 2009. Plio-Quaternary reactivation of the Neogene margin off NW Algiers, Algeria: The Khayr al Din bank. *Tectonophysics*, v. 475, p. 98-116.
- Yonkee, A. and Weil, A.B., 2010. Quantifying vertical axis rotation in curved orogens: Correlating multiple data sets with a refined weighted least squares strike test. *Tectonics*, v. 29, TC3012, doi:10.1029/2008TC002312.

地球内部ダイナミクスにおける変形作用の基本的役割 FUNDAMENTAL ROLE OF DEFORMATIONS IN INTERNAL DYNAMICS OF THE EARTH

Hatam GULIYEV

Geology Institute of Azerbaijan National Academy of Sciences.
29 A, H. Javid ave., AZ 1143, Baku, Azerbaijan hatam@lan.ab.az

(矢野 孝雄 [訳])

要 旨：変形作用に起因する媒質密度分布の問題が考察され、さまざまな地質媒質において、この依存性が不安定であることが示される。多くの様式の不安定性が識別されることが解明され、これらの作用は物体の幾何学的形状と媒質の構造にしたがって構造形成に関与し、とくに溶融帯の形成に影響する。既報の実験的研究成果と確立された論理的結論を比較して、安定性の喪失過程—弾性的平衡状態が幾何学的形状変化を被る場合と—内部不安定—がさまざまな鉱物系の相転移に先行して起きることが示される。これらの問題が、さまざまな弾性ポテンシャル場における微小および有限初期変形の論理体系のなかで、新しい線形化の手法をもちいて考察される。

キーワード：地球のダイナミクス、変形、固化、融解、安定性、相転移

1. まえがきと研究抄史

媒質密度分布、低剪断抵抗帯、地球の初期構造などにおける物質と大量のエネルギー移動という問題が基本的課題であり、それは地質学や地球物理学におけるさまざまな実践的課題の研究に重要である。この問題は、鉱物学・岩石学・地球熱学・テクトニクス・岩石物理学、および地質学と地球物理学の他の基本的分野においてさまざまな程度にとりあげられる。それらは、地球内部構造の温度・圧力分布の問題にも深くかかわっている。ほぼすべての地球内部の力学過程はこれらの作用に由来し、それらに随伴して変形作用が重要な役割をはたす環境進化の主要な制御メカニズムである。

この研究分野では、よく知られているように、詳細はさておき、これまでに大量の科学的出版物が刊行されてきた。これらの出版物では、根本的問題にしたがって、さまざまな実践的課題が研究されている。最近の研究でとくに注目されるのは、Anderson (2010), Belyakov et al. (2000), Campbell & Kerr (2007), Dean & Gudmundur (2011), Foulger & Jurdy (2007), Green et al. (2010), Holtzman et al. (2010), Korchin (2010), Nettles & Dziewonski (2008), Lee et al. (2009), Pavlenkova (2002), Rusinov (2005), Sokolovsky et al. (2007), Timurziev (2009) などであり、これらの論文の文献欄にはより多くの研究が引用されている。

可変的固体の力学問題における基本システムの根本的特

性にもとづいて、この論は、これらの現象にある共通する地球力学的基礎が存在することを解明する。かた、変形作用の変化による媒質密度の分布問題が検討される。さまざまな地質環境におけるこの依存性は不安定であることが明らかになる。そして、さまざまな不安定性が識別される。

この論理的結論は、圧縮性媒質の固化には一般的機構が存在し、それは諸作用のさまざまな段階における融解に関与する。不安定性の現象形態、物体の幾何学的形状、および媒質の構造によって、これらの作用はそれぞれに特性をもつ。いっぽう、変形作用の不安定性は構造形成に関わっていて、それは溶融帯の形成を大きく左右する。変形が進行すると、これらの溶融帯のいくつかには圧縮性物質が集中し、さまざまな方向へ物質流動をおこす。既知の実験的研究結果と、この研究の論理的結論を比較すると、幾何学形状の形成と "内部" 不安定性にかかわる弾性平衡の不安定化に先行して、いくつかの鉱山地質条件で決定されたさまざまな鉱物系における相転移が発生する。

提案された研究方法は、既知のデータと Green, Ringwood, Akimoto and Liu, Jarkov の実験的研究結果を使ってすすめられた。これらのデータは、彼らの結果を論理的な研究結果と総合して解析するのに、また、新しい研究方法の検証にも有効であろう。うまくいけば、この研究方法は、同様の広域的課題の研究にも適用できるかもしれない。

1. パラメータ化モデル (Jarkov, 1983) では、地球内部構造の主要パラメータには次のものである: 密度分布, Debayev の温度, Grewnayzen のパラメータ, 熱伝導率の関係性, 地球の空間的エントロピー, 断熱温度, 融点とそれらの勾配, サイクル飛躍の有効エントロピーと熱効率, 湾曲した相平衡の傾き, マントルおよびコアの熱的結晶化。これらを決定するには、まず、関与する深度における密度変化を明らかにする必要がある。それゆえに、実際の条件下でこのパラメータをより正確に決定することが重要である。可変性固体の非線形論における既知の比率をもちいて、Guliyev and Asgerov (2007) は変形作用の変化にともなう密度変化を決定する次の比を求めた。

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\sqrt{I_3}} - 1, \Delta\rho = \rho_* - \rho;$$

$$\frac{dV^*}{dV} = \sqrt{I_3}; \tag{1}$$

$$I_3 = 1 + 2A_1 + 2(A_1^2 - A_2) + \frac{4}{3}(2A_3 - 3A_2A_1 + A_1^3);$$

$$A_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3; A_2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2; A_3 = \varepsilon_1^3 + \varepsilon_2^3 + \varepsilon_3^3;$$

ここで、 ε_i は Green の変形作用テンソルの基本値、 ρ_* は自然状態および実際状態での媒質密度、 V, V^* は自然状態および実際状態での媒質容積。

増分密度を決定する最近のモデルに、Adams-Williamson (Jarkov, 1983) の式を適用した。

$$\Delta\rho = \frac{\rho g}{\Phi} \Delta l,$$

ここで、 ρ は問題にしている深度における構造密度、 g は任意の深度における重力加速度、 $\Delta\rho$ は密度変化、 Δl は深度変化、 λ は地震パラメータ、 μ は全体係数、 λ, μ は 2 次の弾性係数である。

有限初期変形論 (Guz, 1989) の体系における線形論 (初期状態座標における) では、

$$\frac{dV^*}{dV} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3,$$

ここで λ_i は伸長 (短縮) 係数である。これらの式を用いて密度を決定し、非古典的線形化理論における微小変形を求めるための式を導くことができる (Guliyev and Asgerov, 2006)。

Adams-Williamson の式による地球深部の密度変化は 670km 以深でうまく求められるということが科学誌に紹介された。この式の主な問題点は、地球内部での相転移がよくわかっていないこと、および、変形状態の不均質性 (670km 以浅の構造により特徴的) である。

式 (1) には、これらの短所がなく、正確であるため、この論文では連続体の力学にもっとも普通に適用される。

この依存性が普遍的であることを指摘しておくことが必要である。変形特性 (造構運動, 重力, 地球化学, 水力学, 熱放射などによってひきおこされる) はここでは任意であり、応力状態や物理 - 力学, 化学, 温度など、場のパラメータは構成要素に含まれない。変形作用が微小あるいは有限の場合、線形あるいは非線形, 弾性, 弾 - 塑性, 塑性, 粘性などの場合があり、等方または非等方, 均質または非均質 (不均質) の媒質に対応する場合もある。これらの要素は、実験研究を設定したり、実施する場合に、直接に観測や測定ができない地球深部の物理データを解釈する場合にたいへん重要である。

とくに、図 1 (Guliyev, 2010) に示された結果は、変形の不均質性が密度の成長に重要な影響をおよぼすことを示す。

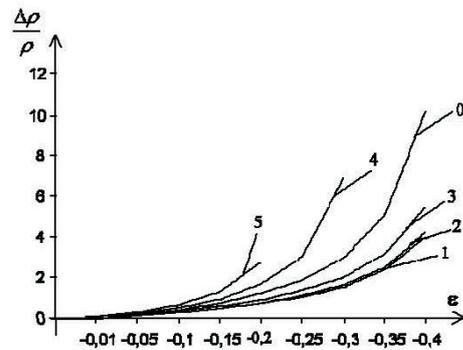


図 1 3次元不均質変形の場合の密度増加グラフ (Guliyev, 2010) line 0: $\alpha=\beta=\gamma=1$, line 1: $\alpha=\beta=1, \gamma=0.01$, line 2: $\alpha=\beta=1, \gamma=0.1$, line 3: $\alpha=\beta=1, \gamma=0.5$, line 4: $\alpha=\beta=1, \gamma=1.5$, line 5: $\alpha=\beta=1, \gamma=2, \varepsilon_1=\alpha\varepsilon_0, \varepsilon_2=\beta\varepsilon_0, \varepsilon_3=\gamma\varepsilon_0$

2. 通常状態に関する相転移における相対的容積減少に関する次の結果が、Jarkov (1983) の著書に示された。MgSiO₃=90%+Al₂O₃=1% という組成 (図7・8: Lin-gun Liuによる) では、斜方輝石→ざくろ石、ざくろ石→イルメナイト、およびイルメナイト→ペロフスカイトの相転移が、それぞれ -7.8%、-8.0%、および -6.9% の相対的容積変化を引き起す。

輝石類の物性に関するデータは、Jarkov (1983) および Ringwood (1982) に示される。エンスタタイトとざくろ石については、表1に示される。

Enstatite	MgSiO ₃	ρ, g/cm ³	K, 10 ¹² dyn/cm ²	V _p , km/s	V _s , km/s	λ, Kbar	μ, Kbar
		3.2	1.212	8.36	4.99	0.662·10 ³	0.796·10 ³
Garnet	(Ca, Mg, Fe ²⁺ , Mn) ₂	3.47	1.65	8.7	4.8	1.02·10 ³	0.8·10 ³

これらのデータと式を用いると、

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\sqrt{I_3}} - 1 \text{ and } \frac{dV^*}{dV} = \sqrt{I_3},$$

が得られる。この場合、密度変化が相対的容積変化において次の値をとる。

Enstatite in normal conditions	- 3,2 g ² /cm ³	} to 8,45%
Garnet	- 3,47 g ² /cm ³	
Ilmenite	- 3,77 g ² /cm ³	
Perovskite	- 4,05 g ² /cm ³	

式(2)を用いると、そのような変形条件で密度変化が起こることがわかる。これらの式で、ε₀は総変形、α、β、γは実数、ρ、ρ^{*}、V、V^{*}は通常および実際状態での媒質の容積である。さまざまな不均質変形状態で計算された数値ρ^{*}/ρが、図2に示される。

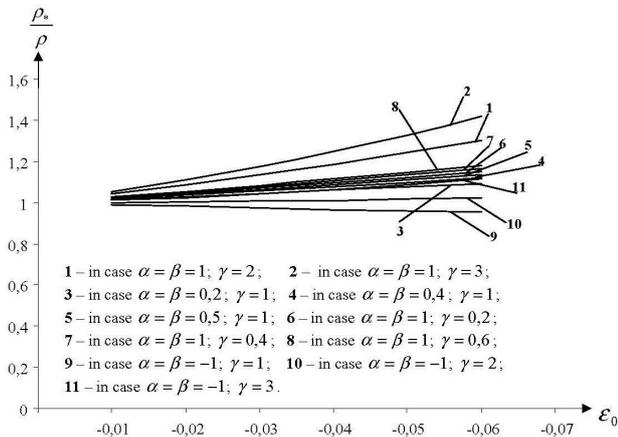


図2 変形値への成長依存性

図2の結果は、密度 3.47g/cm³ のざくろ石に含まれる密度 3.22g/cm³ のエンスタタイトの相転移には、8.45% に達する相対的密度変化がともなわれることを示す。次のような場合の不均質変形は、この例では次のプロセスに相当する：

ε₀=-0.02, α=β=1, γ=2; ε₀=-0.055, α=β=0.2, γ=1; ε₀=-0.045, α=β=0.4, γ=1; ε₀=-0.04, α=β=0.5, γ=1; ε₀=-0.03, α=β=1, γ=0.6.

他の変数は、図2にもとづいて求められる。

同様に、どのような変形条件でざくろ石→イルメナイトおよびイルメナイト→ペロフスカイトの相転移が起きるのかを決定することが可能である。

どのような変形条件で、密度 3.47g/cm³ のざくろ石が密度 3.77g/cm³ のイルメナイトに相転移するか、すなわち、8.7% に達する相対的密度変化が起きるのかがわかる。それは、次のような変化がおきる図2の結果から導かれる。

ε₀=-0.021, α=β=1, γ=2; ε₀=-0.01, α=β=1, γ=3.5; ε₀=-0.05, α=β=0.25, γ=1; ε₀=-0.04, α=β=0.5, γ=1; ε₀=-0.03, α=β=1, γ=0.7.

岩石構成物質は、微小変形をうけた等方弾性体モデルと仮定される。原則として、そのような仮定は妥当である。これは数値計算の結果による。この計算は、問題にしている相転移が 1 ~ 5.5% の変形で起きることを示す。

さらに、問題にしている変形状態の定量的応力特性を規定することができる。

そのために、弾性論における次のような既知の関係をまず把握し、図2のデータを用いる。

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{mm} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

ここで、σ_{ij} (i, j = 1, 2, 3) は応力テンソルの成分で、

$$\epsilon_{mm} = (\alpha + \beta + \gamma) \epsilon_0; \epsilon_{ii} = \alpha \epsilon_0$$

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= [\lambda(\alpha + \beta + \gamma) + 2\alpha\mu] \epsilon_0; \\ \sigma_{22} &= [\lambda(\alpha + \beta + \gamma) + 2\beta\mu] \epsilon_0; \\ \sigma_{33} &= [\lambda(\alpha + \beta + \gamma) + 2\gamma\mu] \epsilon_0. \end{aligned} \tag{3}$$

ここで、λ、μはLameの弾性係数である。

I. エンスタタイト→ざくろ石の相転移の計算。次の確実な変数を検討しよう。

a) ε₀=-0.02, α=β=1, γ=2; 式(3)から α+β+γ=4 の場合、ε₁₁=ε₂₂ が約 2%, ε₃₃ が約 4% の変形状態が、引張応力 σ₁₁=σ₂₂=-84.8Kbar, σ₃₃=-116.64Kbar で発生する。

b) ε₀=-0.055, α=β=0.2, γ=1; 式(2)から α+β+γ=1.4 の場合、ε₁₁=ε₂₂ が約 1.1%, ε₃₃ が約 5.5% の変形状態が、引張応力 σ₁₁=σ₂₂=-68.75 Kbar, σ₃₃=-138.6Kbar で発生する。

c) ε₀=-0.03, α=β=1, γ=0.6; 式(3)から α+β+γ=2.6 の場合、ε₁₁=ε₂₂ が約 3%, ε₃₃ が約 1.8% の変形状態が、引張応力 σ₁₁=σ₂₂=-99.4Kbar, σ₃₃=-80.31Kbar で発生する。

同様な計算が、ざくろ石→イルメナイト、および、イルメナイト→ペロフスカイトの相転移でも行われる。

図2のデータは温度を考慮してえられたことが注目される。同時に、この要素には式(3)が考慮されていない。それらは、応力値の計算に影響する。

式 (1) にもとづいて圧力から密度変化に依存する微小弾性変形の場合、次の式にもとづいて決定される。

$$\frac{\rho_s}{\rho} = (1 - 3x + 3x^2 - x^3)^{\frac{1}{2}}; \quad x = \frac{1 - 2\nu}{\mu(1 + \nu)} P \quad (4)$$

式 (3) と (4) にもとづいて計算された全圧力の増大に起因するさまざまな岩石の値 ρ_s / ρ と ϵ_0 が図3に示される。

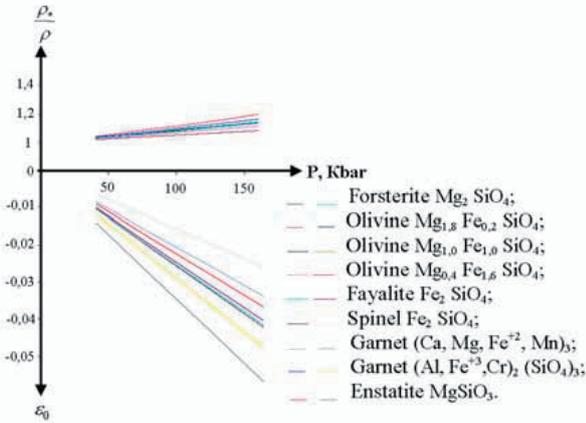


図3 密度増加および変形の圧力値への依存性

図3からは、値 ρ_s / ρ が増分変形を凌ぐことがわかる。この傾向は、圧力範囲 0 ~ 160Kbar のすべての岩石において認められる。

全変形に想定される相転移 (1. エンスタタイト - ざくろ石, 2. ざくろ石 - イルメナイト, 3. イルメナイト - ペロフスカイト) に関する計算結果が、表2に示される。ここで S_{pp} は応力テンソルの物理的成分 (非変形 = 自然状態の単位面積当たりで測定) である。有限初期変形論の体系のなかでの2次元ポテンシャルを適用する場合に、これらの応力は次の式 (Guz, 1989) を用いて計算される。

$$S_{pp} = \frac{\lambda}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + \mu (\lambda_p^2 - 1). \quad (5)$$

Table 2

Numbers of transitions	λ	μ	ϵ_0	λ_1	S_{11}^0	σ_{11}
1	662	796	-0.0264	0.9732	-114.634	-94.4592
2	1020	800	-0.027	0.9726	-146.537	-125.82
3	1512.35	815.29	-0.0235	0.9762	-163.418	-144.939

さまざまな岩石の物理的力学パラメータに関するデータは、表3に示される。

Table 3

Name of rock	Chemical formulae	ρ , g/cm ³	μ , Kbar	λ , Kbar	ν	V_p , km/s	V_s , km/s
Forsterite	Mg ₂ SiO ₄	3,214	808,33	743,3082	0,2395	8,569	5,015
Olivine ₁	Mg _{1.8} Fe _{0.2} SiO ₄	3,34	838,34	708,1635	0,2289	8,45	5,01
Olivine ₂	Mg _{1.0} Fe _{1.0} SiO ₄	3,82	726,17	789,0679	0,2604	7,66	4,36
Olivine ₃	Mg _{0.4} Fe _{1.6} SiO ₄	4,17	558,60	1080,707	0,3296	7,26	3,66
Fayalite	Fe ₂ SiO ₄	4,39	510,47	979,2538	0,3287	6,75	3,41
Spinel	Fe ₂ SiO ₄	4,85	815,28	1512,361	0,3249	8,05	4,1
Garnet ₁	(Ca, Mg, Fe ²⁺ , Mn)	3,5	806,40	1036,35	0,2812	8,7	4,8
Garnet ₂	(Al, Fe ³⁺ , Cr) ₃ (SiO ₄) ₃	3,3	638,88	694,0857	0,2603	7,73	4,4
Enstatite	MgSiO ₃	3,2	796,80	642,8672	0,2232	8,36	4,99

3. Guiliyev and Asgerov (2007) は力学課題の解明にもとづいて、変形の増大にともなう ρ_s / ρ の変化の依存性が連続的ではなく、圧縮場における変形体のさまざまな幾何学的形状にかかわる特定の値を選択する。これらの臨界変形値は、衝撃特性に依存する。

私たちは、変形モデルとしての維持可能性を検討するた

め、微小および有限の線形ならびに非線形変形における弾性媒質の圧縮性あるいは非圧縮性モデルを用いる。上載層の荷重挙動と伏在層の応答挙動は、それらの実際の物性および伝達能にもとづいて、"dead" (非保守的) 荷重あるいは "follower" (従属的) 荷重を用いてモデル化される (図4)。

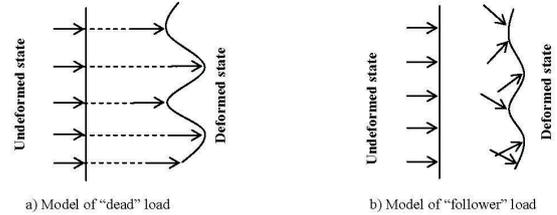


図4 外部面積力の作用特性

臨界変形値は、保守的、非保守的、あるいは複合的な外部荷重によって大きく異なることが経験的に知られている。それは、物体の形状、half-space, 孔隙, 封入媒体の円筒形あるいは別の形状, などによっても著しく異なる。

平衡状態の安定性の喪失状態に関係する相違も存在し、2つの異なる段階が識別される。第1段階は、可変物体の形状にみられる幾何学的変化であり、不安定化の過程で発生する。第2段階では、"初期" 不安定性が発生し、媒質の連続性の喪失と破壊過程のはじまりに相当する。さらに、第1段階は (無条件に) 第2段階に先行する。

応力 - 歪状態の研究は、採鉱, 井戸掘削, 横坑, トンネル, 不均質性などに関連する岩石力学的課題の中心的位置を占める。これらの障害は、媒質の連続性と応力集中を乱す。"Working stability" (有効安定性) という用語は、岩石力学に用いられる。この用語によって、強度論, 塑性流動論, 破壊力学論などの観点からの評価における中心的存在である応力 - 変形が定義される。

安定性については、外部的影響に対して系の本来の状態を保持しようとする特性である、と私たちは直感的に考える。もし系が、そのような特性をもっていない場合には、不安定系になる。実際の状況では、初期的平衡状態が発生しうるなんらかの傾向が常に存在する。しかし、安定系は、常に初期状態に復帰する。したがって、特定の状態では、不安定系における新しい状態に変化する可能性が常に存在している。この場合、安定性が喪失した、と考えられる。中心付近での平衡状態の安定性がそこなわれるという局所的特性は、圧縮応力の局所的集中に由来する。この場合、個々の場所での安定性の喪失が、破壊, 変位, 流動などが出現する1つの理由であると考えられる。安定性が失われると、大きな運動と変形が発生することが知られていて、それらの値は臨界状態以前の変形と運動よりもはるかに大きくなる。応力集中の中心 (坑道や掘削井) の等値線は、線形的な応力 - 変形状態における問題を解決することによっては、決定できない。このような状況のため、破壊的裂罅, 塑性流動, 再変形などの方位を予測することはできない。

次の結論が知られている (Guz, 1989 ; Guliyev, 1988):
 1) もし全表面に "follower" 荷重のかたちで圧力が働く場合には, 任意の幾何学的形態をもつ等方的物体の弾性的平衡状態は安定である (形態変化という点で).

2) もし圧力が, 物体表面の一部に "dead" な状態で, また, 他の部分には "follower" 荷重として加わると, 平衡状態が不安定化する. 物体表面の一部に "follower" 荷重が存在すると, 平衡状態の安定化効果をもたらす.

さらに, 単純化と明快化のために, 弾性媒質の等方的モデルに関する確実な結果を紹介する. 弾性的および弾-塑性複合媒質でできた別のモデルに対しても, 同様な結果が得られる.

とくに, 平面的変形における帯の安定性の課題は, 次のように計算される. 帯が安定 ($0 \leq x_1 \leq l$; $-h \leq x_2 \leq h$) な場合は, この帯が摩擦のない完全剛性壁にこすれるか $x_1=0$, l のところで折れ曲がると考えられる. 上載層の "dead" としての均一な圧力 $\sigma_{22}=kP$ が, 上面 $x_2=h$ に作用し, 等しい "follower" 荷重が底面 $x_2=-h$ に働く. 圧縮性応力 $\sigma_{11}=P$ が, 軸 ox_1 に沿って $x_1=0, l$ に加わる.

横曲げ形状の等方的帯の初期形状の平衡状態が失われるか, くびれが起きると, それは, 作用力にしたがって平衡状態からある程度まで湾曲する.

$$\begin{aligned} (-\sigma_{11})_{cr}^{\delta} &\approx \frac{P_{st}}{1-k} \left\{ 1 - \frac{\chi^2}{15} \left[\frac{2(6-\nu)}{1-\nu} + \frac{5}{1-k} \left[1+k \frac{2-\nu}{(1-\nu)^2} \nu \right] \right] \right\}; \\ (-\sigma_{11})_{cr}^{\delta} &\approx \frac{P_{st}}{1+k} \left\{ 1 - \frac{\chi^2}{15} \left[\frac{2+3\nu}{1-\nu} + \frac{5}{1+k} \left[\frac{1-2\nu}{1-\nu} - k \frac{\nu(1-2\nu)}{(1-\nu)^2} + \frac{1}{1+k} \frac{2}{1-\nu} \right] \right] \right\}; \quad (6) \\ P_{st} &= \frac{\chi^2}{3} \frac{E}{1-\nu^2}; \quad \chi = \frac{\pi m}{\ell} h \end{aligned}$$

ここで, $(\sigma_{11})_{cr}^{\delta}$ は臨界応力値で, この場合の安定性の喪失に相当する. その際には, 末端が固定されていて, 式 (6) において $h \ll l$ の場合には "follower" 荷重は $x_2 = \pm h$; $(\sigma_{11})_{cr}^{\delta}$ で, "dead" 荷重は $x_2 = \pm h$ で与えられる. E は弾性定数, ν は媒質ポアソン比, m は湾曲の半波長数, P_{st} は ox_1 に沿う一軸性圧縮における安定性喪失の臨界荷重値で, Kirchhoff-Love 仮説を応用して決定される. 特徴が異なる外部荷重の $x_2=h$ および $x_2=-h$ の場合, 安定性を喪失する臨界力の値は, 関連する特性方程式 (Guliyev, 1988) から計算される.

等方的帯の屈曲部支持が $x_1=0, l$ である場合, 臨界応力値は次の式から求められる.

$$\begin{aligned} (\sigma_{11})_{cr} &= -2\nu \frac{\sqrt{3}\sqrt{1-2\nu+4\nu}-3\nu}{(1-\nu)^2} P_{st} \left\{ 1 - \frac{2\chi^2}{3\nu} \left[1+4\nu + \frac{1-3\nu}{\nu(1-\nu)^2} (\sqrt{3}\sqrt{1-2\nu+4\nu}-3\nu) \right] \right\}; \quad (7) \\ P_{st} &= \frac{E}{3} \frac{\chi^2}{1-\nu^2}; \quad \chi = \frac{\pi m h}{\ell} \end{aligned}$$

こうして, 帯の平らな初期形状の平衡状態の安定性が失われる場合の共通的形状 (横曲げとくびれが共存する) が生じ, より安定な湾曲した平衡形状に移化する.

破壊の線形力学論では, その方法では真の破壊過程を記

述できない場合がある. これらの場合, 破壊の線形力学を適用して, 応力状態を評価することは不可能である. 破壊の線形力学は, 固体中に 3 種類の裂罅が形成されることを示す. 裂罅の末端における応力集中係数を評価すると, 特定の物質では極端な値を示し, 破壊基準とみなすことができる. 無限弾性空間が 3 軸圧縮均質応力-変形状態におかれ, 平面裂罅が主圧縮応力方向に形成される場合が想定される (図 5).

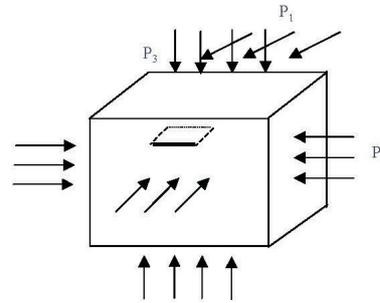


図 5 裂罅をもつ固体の 3 軸圧縮を示す模式図

応力集中係数が 0 であるために, この場合は, 3 つのタイプの判断基準が有効には働かない. しかし, 実際には, 圧縮応力値が一定の値に達すると, 破壊が生じる. このような破壊過程は, 裂罅近傍の安定論を適用して説明可能である. 同時に, 安定性を失った裂罅面にさまざまな形状があらわれ (a. さまざまな波数の波状表面, b. 同一面で逆向きにすすむ変形, c. 同じであるが, 異なる平面), それらは異なる破壊過程をもたらす. 圧縮場での破断面をもつ破壊物体の変形論は, Guz (1983) によって発展させられた. 鉱山力学, 地震, および構造地質学の課題にかかわって, この学説は Guliyev (1983, 1995, 2001, 2010) によって展開された.

面的不安定

自由面および荷重面の近傍における幾何学的形成可能性に関する平衡状態の安定性の喪失は, 塑性変形, 破壊, および相変化のプロセスに先行する.

半空間 (half-space: 課題は, 平面変形として解を得ることにある) 面近傍における平衡状態の安定喪失の臨界荷重損失値を計算するための解析式が, Guliyev (2010) によって示された:

円柱形空隙近傍での安定性の局所的喪失

さまざまな均質および不均質応力状態にある円柱形表面近傍における 3 次元的不安定の課題は, Guliyev (1988) によって研究された.

安定に関する弾性および弾-塑性解は, 等方的および非等方的媒質中の円柱形空隙近傍における不均質応力状態での Guliyev (2010) の可変的方法を適用することによって解くことができる.

均一応力場は, 円柱形空隙近傍での外部的影響の特定の割合で認められる. これらの場合は, 解析的状态 (小さ

な初期変形における努力の臨界値, および, 大きな初期変形における展張臨界値) で解をうることができる。

最終準臨界変形論. 調和的ポテンシャル (Guliyev, 1988; Guliyev and Jabborov, 2010)

$$2\varepsilon_y^0 = 2\delta_y \varepsilon_0; 2\varepsilon_0 = \lambda_1^* - 1$$

$$\lambda_1^* < (\lambda_1)_*, < 1; \lambda_1^* = 1 - \frac{1-2\nu}{2-\nu}$$

$$(\lambda_1)_* = -\frac{(1+\nu)(1+2\nu)}{2(2+\nu-4\nu^2)} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{8(2+\nu-4\nu^2)}{(1+2\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (8)$$

ここで, ε_{ij}^0 : 初期状態の Green 歪テンソルの成分, λ_1 : ox 軸に沿う短縮係数, λ_1^* : 臨界値 λ_1 で, 幾何形状変化における安定性喪失と持続性の "初期" 喪失 (Guliyev, 2010; Guz, 1989) に相当, ν : ポアソン係数。

さまざまなポアソン係数に対する式 (2) および (8) にもとづく数値計算結果が, 表 4 に示される。

Table 4.

ν	:	0,1	0,2	0,3	0,4
$(\lambda_1)_*$:	0,82	0,84	0,89	0,94
$(\varepsilon_0)_*$:	-0.1638	-0.1472	-0.10395	-0.0582
$\left(\frac{\rho_*}{\rho}\right)_*$:	1.8136	1.6871	1.4185	1.2039
λ_1^*	:	0,58	0,67	0,77	0,87
$(\varepsilon_0)^*$:	-0.3318	-0.27555	-0.20355	-0.12155
$\left(\frac{\rho_*}{\rho}\right)^*$:	5.1252	3.3248	2.1904	1.5186

表 3 のデータを用いると, 硬岩石が直線軸をもつ平衡円柱形から湾曲軸の形状に変形する際に平衡状態の安定性喪失に相当する臨界値 $(\varepsilon_0)_*$ と臨界値 $(\rho_0)_*$ も計算される。

$(\varepsilon_0)^*$ と $(\rho_0)^*$: "内部" 安定性に相当する。すなわち, 媒質の連続性喪失も計算され, さまざまな岩石に対応するそれらの値が与えられる (表 5)。

Table 5

Name of rock	ν	λ_1^*	$(\lambda_1)_*$	$(\varepsilon_0)^*$	$(\varepsilon_0)_*$	$\left(\frac{\rho_*}{\rho}\right)^*$	$\left(\frac{\rho_*}{\rho}\right)_*$
Forsterite	0,2395	0,704061	0,861797	-0,25215	-0,12865	2,865289	1,562377
Olivine ₁	0,2289	0,693863	0,85738	-0,25928	-0,13245	2,993502	1,586646
Olivine ₂	0,2604	0,724534	0,870741	-0,23752	-0,12091	2,629196	1,514723
Olivine ₃	0,3296	0,795977	0,902706	-0,18321	-0,09256	1,982889	1,359444
Fayalite	0,3287	0,79501	0,902266	-0,18398	-0,09296	1,990135	1,361435
Spinel	0,3249	0,790938	0,900415	-0,18721	-0,09463	2,021031	1,369847
Garnet ₁	0,2812	0,745404	0,879961	-0,22219	-0,11283	2,414489	1,467608
Garnet ₂	0,2603	0,724435	0,870697	-0,2376	-0,12094	2,630276	1,51495
Enstatite	0,2232	0,688429	0,855038	-0,26303	-0,13446	3,064949	1,59972

大規模初期変形の理論. 2次ポテンシャル

$$\lambda_1^* < (\lambda_1)_*, < 1; \lambda_1^* = \left(\frac{1+\nu}{2-\nu}\right)^{\frac{1}{2}}; (\lambda_1)_* = \sqrt{\frac{3}{3-2\nu}}$$

$$x = -\frac{3\lambda+5\mu}{8\left(\lambda+\frac{2}{3}\mu\right)} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{16\mu(\lambda+\mu)}{(3\lambda+5\mu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} = -\frac{3(5-4\nu)}{16(1+\nu)} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{16(1-2\nu)}{(5-4\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (9)$$

式 (2) および (9) に関する計算結果が, 表 6 および 7 に示される。

応力テンソルの物理要素に対応する数値が, 表 7 に示される。これらの応力は, 2次ポテンシャルに適用される場合の大規模初期変形論において式 (5) を用いて計算される。この結果は, 均一圧縮場, すなわち $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3$ に相当する。

微小初期変形論の第 2 変数. 線形弾性的等方固体のポテンシャル

$$P_* = P_2 = \frac{3\lambda+5\mu}{4} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{16\mu(\lambda+\mu)}{(3\lambda+5\mu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} = \frac{5-4\nu}{8(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{16(1-2\nu)}{(5-4\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (10)$$

式 (10) による計算結果は, 表 8 に示される。

Table 8

ν	:	0,1	0,2	0,3	0,4
$\frac{P_*}{E}$:	0,245	0,236	0,233	0,227
$\left(\frac{\rho_*}{\rho}\right)_*$:	2.1093	1.6478	1.3626	1.1535
$(\varepsilon_0)_*$:	-0.196	-0.1416	-0.0932	-0.0454
$\frac{P^*}{E}$:	0,454	0,416	0,384	0,357
$\left(\frac{\rho_*}{\rho}\right)^*$:	6.9876	2.8216	1.7342	1.2600
$(\varepsilon_0)^*$:	-0.3632	-0.2496	-0.1536	-0.0714

ここで P^* は, 内部不安定に相当する外部媒質の臨界パラメータ値である。

地質媒質中の円柱形固体の形状に含まれる不安定

興味深く、より視覚的な結果が、固体円柱中の媒質に包有物が存在する場合に得られる。3軸圧縮状態にある円柱形固体の安定性喪失強度の臨界値は、Guliyev (1987)の式を使って求められる (Guliyev, 2010)。

線形弾性等方媒質の形をした円柱形固体包有体の変形プロセスのモデリングにおいていくつかの岩石に関する Guliyev (1987) の式で求められた計算結果は、図6に示される。

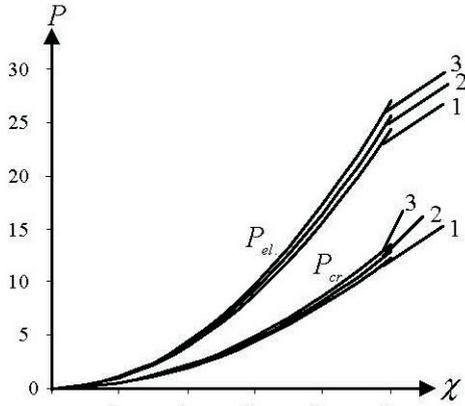


図6 薄さパラメータに対する臨界圧依存性。P_{el}: オイラー臨界荷重 (円柱軸に対する一軸圧縮), P_{cr}: 円柱面への内部衝撃が持続荷重として加えられた場合における均一圧縮場での臨界荷重。

グラフにみられる 1~3 の数字は、表2に示される相変化の数値に相当する。

厚さパラメータ x は、次の式で求められる。

$$\chi = m \frac{\pi R}{l}$$

m: 半波長数, R: 円柱半径, l: 円柱長。

結果に関する考察

1. 図1に示される結果にもとづいて、変形の成長度にもなると密度分布に関する変形の不均一性の影響について考察することが可能である。たとえば、封圧 ($\alpha = \beta = \gamma = 1$: line 0) の場合の密度増加率 $\Delta\rho/\rho = 1.8$ は、変形すると $\epsilon_0 = -0.21$ に達する。変形の鉛直成分 ϵ_3 の値が減少する場合 (変形の水平成分 ϵ_1 と ϵ_2 は一定), 同様な密度増加率が ϵ_0 (lines 1-3) に増大する。こうして、成長の不均一性は、大深度に達するにつれて媒質の密度分布にたいへん大きな (おそらく数倍に達する) 影響をおよぼす。変形の不均一度の変化次第で、変形の成長速度は固化の加速および減速の両方を引き起こすだろう。

2. モル組成によって変化するさまざまな鉱物系の相変化と圧力、温度および深度との関係に関する Ringwood, Mezera, Akimoto および Lin-gun Liu の実験結果 (Jarkov, 1983) は広く知られている。これらの実験は、均質な供試体の連続変形という仮定のもとで行われた。この仮定は、マントル深度での自然状態で検証されてはいな

い。それゆえ、これらの実験結果をマントルにおける自然条件に直接に適応すること、ならびに、それにもとづいて相変化の深度と圧力を解釈することは、まちがった結果を導く可能性がある。上述の結果 (表 4-8 と図 6) は、さまざまな種類の包有物、地質構造における自由境界面、接触面および空隙の存在という条件下では、実験で想定された以外の変形プロセスが起きることを示している。このような条件で発生した応力-変形状態、および、深度増大にともなう密度変化は、その後の変形過程、相転移、およびそれらの相互関係に重大な影響をおよぼす。図3に示されるかんらん石 (Mg, Fe)₂SiO₄-輝石 (Mg, Fe)SiO₃ 系の実験結果は、これらの問題の計算結果と比較された。それらは、図7~図9に示される。

圧力 (縦軸), 変形 (水平軸の赤軸), 密度 (水平軸の緑軸) およびモル組成 (横軸) の値は、それぞれの線に示された各点に相当する。これらの結果と表 4-8 および図6に示された結果を比較すると、変形過程における圧力 P の増大の影響を議論し、さまざまなモル組成におけるかんらん石-輝石系の安定/不安定を識別することができる。とくに、変形および圧力が十分に小さい弾性平衡状態にある包有物は、地質媒質中の直線的円柱が存在すると不安定であることが、図6に示される。薄さパラメータの増加にともなう圧力および変形の臨界値は、非線形的に増加する。その結果、幾何学的形状変化にみられる弾性的平衡状態が安定性を失うことによって、相変化急速に進展する。これは、実験結果の解釈を大きく変えることになる。平衡状態の安定性が失われるために、媒質の構

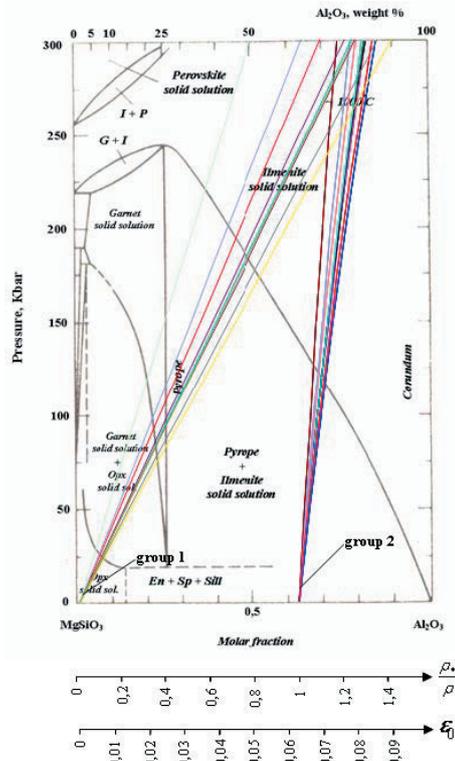


図7 MgSiO₃-Al₂O₃ 相図における等温断面 (温度は約 1,000°C: Jarkov, 1983). Opx: 斜方輝石, En: 頑火輝石, Sill: 珪線石, G: ざくろ石, I: イルメナイト, P: ペロブスカイト, Sp: スピネル (著者: Lin-gun Liu). 図3の結果は、カラー線で示される。

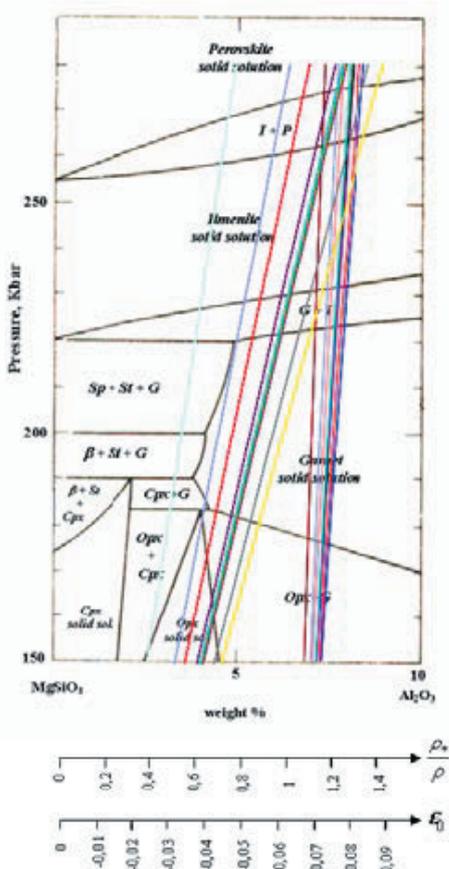


図8 150～290Kbarの圧力領域を拡大したMgSiO₃=90%-Al₂O₃の相図における等温断面(約1,000°C; Jarkov, 1983). β, Sp-β, γ: かんらん石の相, St: スティンヨフ石, Cpx: 単斜輝石(著者はLin-gun Liu). 図3の結果はカラー線で示される.

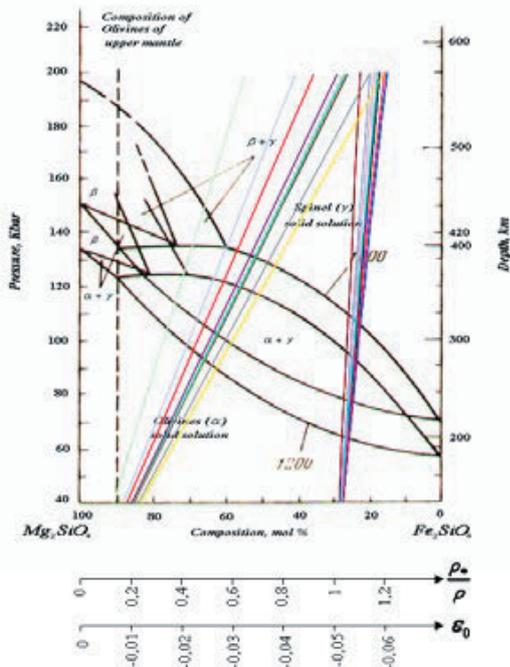


図9 Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄系の相図(Jarkov, 1983). 1200°Cおよび1600°Cの2組の等温断面が示される. 1,600°Cの断面は, 実験でえられた800, 1,000, 1,200°Cの等温断面から外挿された. 横軸はモル%で示される組成を, 縦軸は圧力(kilobars: 左)と相当する地球での深度(右)を示す. α: かんらん石の相, γ: スピネルの相, β: スピネルの変移相(著者はAkimoto). 図3の結果はカラー線で示される.

造は, 相変化応力よりもかなり小さい応力(ϵ_0)^{*}で湾曲する. さらに, 供試体構造の湾曲のために, 内部平衡応力(Guliyev, 2010)が発生する. 外部応力および内部応力(構造湾曲によって出現)の総計は, 相転移に十分であろう. したがって, 提案された深度に達することなく相転移が起こりうる. 他の変数において, 局所域での自己平衡応力は, 静岩圧とは異なる兆候をもつであろう. もし静岩圧が相変化圧に近似していると, 示されたメカニズムのために, 相変化は想定された深度では起こらないであろう. この理由で, より大きな深度に達することが求められる. 表4-8のデータと, 円柱状空隙, および, 自由あるいは縮小表面積を含む実験結果とを比較した結果を解釈することができる. これとともに, 初期変形のさまざまな論理において想定された変形プロセスの値(小規模および大規模)の影響を検討する機会がある.

3. これらの結果からは, 岩石の限界強度 [ϵ_0]^{*}の相当応力]に相当する応力(S_{11}^0)よりもかなり小さい応力(S_{11}^0)^{*}[ϵ_0]^{*}の相当応力]におかれた円柱状空隙の壁に衝突する方法で, 分解作用(deconsolidation)を実現する可能性がでてくる.

このメカニズムは, 弾性的平衡状態が起こり, その構造が媒質の論理的強度限界(ϵ_0)^{*}に達するはるか以前に湾曲するという事実に関係する. この作用の結果として, 円柱形空隙の表面が”衝突”(”衝突作用”)による破壊メカニズムは, 採鉱機構としてよく知られていて, このメカニズムによって多くの炭坑事故が起きる)を受け, 破壊が起こり, 空隙が破碎岩石によって充填される. 同様に, 私たちは, そのような破壊と分解のメカニズムが地表付近でも発生する場合があります, 他にも包有物と空隙を形成することを示すことができる. とくに, 安定性の臨界力はR/l値の増大とともに増大することが, 図8の結果からわかる. 対応するR/l比は, 安定性mの減少の半波長数が増大するにつれて減少する.

その結果, 薄い円柱体は, より小さな圧力の平衡から立体的安定性の欠失の結果として, 平衡状態にある(多くの調和を伴う)湾曲形状に変化する. これとともに, 湾曲に加えられた追加応力と岩石の疎粗化(loosening)による破壊作用が起こりやすい. 円柱面への”無効”衝撃の存在は, P_{el} に比べて P_{cr} を減少させる. これらの結果を図7-9の結果と比較すると, 平衡にある弾性状態の安定性の喪失が, 検討している問題の χ 値に関する相平衡過程に先行する. χ の小さい値に関して, P_{kp} 値は相変化の圧力値よりも1桁以下小さい.

4. 図1の結果と図8の結果との比較は, 変形度の増大にもなう密度の増大が不安定であることを示す. この不安定性の結果として, 密度の増大過程は分解過程に移行するだろう. その結果として, 分解帯(剪断抵抗が小さい地帯, 波の伝播帯)が, さまざまなメカニズム(おこりうるメカニズムの1つは, 上述の議論の第3項に示される)によってマンツルのさまざまな深度の特定の鉱

山地質条件において形成される。

5. 不安定性という概念にしたがうと、円柱状空隙の近傍における λ_1^* と P^* を研究する場合に、大規模および小規模初期変形にともなって脆性破壊がおこることを示す。図4-8に示される結果から、均一応力状態にある円柱状空隙中で起きる小規模および大規模初期変形のように、弾性的平衡状態の安定性の喪失プロセスが破壊過程を進行させる。これらの結果から得られる最も信頼できる結果が、表6と表7に示される。それは、変形規模は大規模変形の大きさに関係するという事実、ならびに、2次元弾性ポテンシャルは研究対象岩石の変形過程に関するより適合的モデルであるという事実に関係する。こうしてみると、等方的媒質の線形弾性モデルは著しく未完成で、それらが変形と固化過程全体に観察される傾向を正しく反映し、小規模変形にうまく適用されたとしても、その使用は湾曲した結果をもたらす。

上述した結果は、平衡の弾性状態における安定性の喪失が進むと、塑性変形、相変化および脆性破壊が起きる可能性があることを物語る。こうして、すべての特定の場合における応力状態を評価する際には、これらの作用につづく現象が実現する可能性を検証する必要がある。弾性的平衡状態の安定性喪失過程からこれらの過程へ進行する場合には、相変化の圧力、破壊力の大きさ、破壊プロセスの特性(破壊のタイプ)が変化するだろう。同時に、上述した簡単な分析記述は、臨界力と短縮係数にも利用される。

得られた数値的結果は、変形作用の結果として地下のさまざまな深度において固化および分解作用が起こっていることを決定づける。これらの作用は、関連する構造変化にともなって圧縮物質に焦点を生じさせている。

このような物体は移動を始め、さまざまなメカニズムによって、内部構造をいっそう進化させるさまざまな物質流動を引き起こす。

文 献

Anderson, D.L. 2010. Hawaii, boundary layers and ambient mantle - Geophysical constraints. *Journal of Petrology*, doi: 10.1093/ptology/egq068.

Belyakov, S.L., Bondarenko, G.E., Ivanyuk, V.V., Smirnov, A.V. 2000. New Data on Late Shear Deformations of Cover of Northern Part of West Siberian Plate (in Russian). *Reports of Academy of Sciences*, v. 372, no. 4, p. 510-513.

Campbell, I.H. and Kerr, A.C. 2007. The Great Plume Debate: Testing the plume theory. *Chemical Geology*, no. 241, p. 149-374.

Dean, C.P. and Gudmundur, H.G. 2011. Oceanic Volcanism from the Low-velocity Zone without Mantle Plumes. *Journal of Petrology*, February 8, p.1-14.

Foulger, G.R. and Jurdy, D.M. 2007. Plates, Plumes and

Planetary Processes. Geological Society of America, Special Papers 430, 998+x pp.

Green, D.H. et al. 2010. Water and its influence on the lithosphere-asthenosphere boundary. *Nature*, 467 (7314), p. 448-451.

Guliyev, H.H. 1983. Destruction and stability of three-dimensional bodies with fractures and some related problems of mining and oil mechanics. *Elm* (in Russian). Baku. 132p.

Guliyev, H.H. 1987. Bars stability at the uneven compression by dead and follower loads (in Russian). *Proceedings of Academy of Sciences of Azerbaijan the USSR, Series of physical technical and mathematical sciences*, no. 5, p. 43-48.

Guliyev, H.H. 1988. Bases of the mathematical theory of wells' stability. *Elm* (in Russian). Baku. 168p.

Guliyev, H.H. 1995. Mechanism of destruction of deformable solid bodies within the concept of instability (in Russian). *Proceedings, the Sciences of the Earth, Azerbaijan National Academy of Sciences*, no. 4-6, p. 102-112.

Guliyev, H.H. 2001. On mechanism of brittle-fracture in "focus" of earthquakes in terms of compression (in Russian). *Proceedings the Sciences of the Earth Azerbaijan National Academy of Sciences*, no. 2, p. 120-133.

Guliyev, H.H. 2010. A new theoretical conception concerning the tectonic processes of the Earth. *New Concepts on Global Tectonics Newsletter*, no. 56, p. 50-74.

Guliyev, H.H. 2011. Deformation accompanying of processes of consolidation, deconsolidation and phase transitions in internal structures of the Earth (in Russian). *Geodynamics. International scientific Conference "Geophysical technologies of prognosis and monitoring of geological medium"*, 10-14 October 2011, Lvov, p. 138-140.

Guliyev, H.H. 2011. Theoretical bases of one mechanism of mass-flow in the Earth inner structures. *International Conference Earth Dynamics - Perceptions and deadlocks, Abstract Volume EDPD, 21-25 September, 2011, Kanyakumari, India*, p.10-11.

Guliyev, H.H. and Asgerov, A.D. 2006. Adams-Williamson's equation the limitation of non classical linearized theory. *Proceedings The Sciences of Earth, Azerbaijan National Academy of Sciences*, no. 1, p. 31-45.

Guliyev, H.H. and Asgerov, M.D. 2007. The solution of nonlinear problem on increase of environment density of the Earth depths and its instability (in Russian). *Proceedings The Science of Earth, Azerbaijan National Academy of Sciences*, no. 1, p. 38-50.

Guliyev, H.H. and Jabbarov, M.D. 2010. Assessment of the stressed state in the lithosphere near the stress concentrators within the non-classical linearized theory. *Materials of International Workshop «The influence of recent geodynamics on the physicommechanical state of the geological environment of the sedimentary cover»*, March 01-07/2010, Baku, Azerbaijan. p. 49-56.

- Guz, A.N. 1983. Brittle-fracture mechanics of materials with initial stress. Naukova Dumka (in Russian). Kiev, 296p.
- Guz, A.N. 1989. Mechanics of destruction the composite materials in compression. Naukova Dumka (in Russian). Kiev, 632p.
- Holtzman, B.K. et al. 2010. Melt segregation and strain partitioning: Implications for seismic anisotropy and mantle flow. *Science*, v. 301, p. 1227-1230.
- Jarkov, V.N. 1983. The Earth Inner structure. Nauka (in Russian). Moscow. 416p.
- Korchin, V.A. 2007. Structural features of mineral environment in PT-conditions of different depths of the Earth crust (in Russian). *Geophysical journal*, v. 29, no. 3, p. 49-77.
- Lee, C.-T.A. et al. 2009. Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, p. 20-33.
- Nettles, M. and Dziewonski, A.M. 2008. Radially anisotropic shear velocity structure of the upper mantle globally and beneath North America. *Journal of Geophysical Research*, 113, B02303, doi:10.1029/2006JB004819.
- Pavlenkova, N.I. 2002. Nature of seismic layering of lithosphere (in Russian). *Materials of XXXV Tectonic Conference, Tectonics and Geophysics of Lithosphere. Moscow. v. II, p. 85-88.*
- Ringvud, A.E. 1982. The origin of the Earth and the Moon. Nedra (in Russian). Moscow. 294p.
- Rusinov, V.L. 2005. Lithospheric shear zones and their role in the endogenic activity of the Earth (in Russian). *Geotectonics*, no. 3, p. 66-79.
- Sokolovsky, A.K., Korsakov, A.K., Fedchuk, V. Ya. 2007. On Some Problems of Recent Geodynamics (in Russian). *Proceedings of Higher Educational Institutions, Geology and Exploration*, no. 6, p. 13-22.
- Timurziev, A.I. 2009. New shear tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluid-dynamic aspects (related with oil and gas content). Auto-abstract of dissertation on competition of scientific degree of doctor of geological-mineralogical sciences (in Russian). Moscow, 40p.

電波異常と惑星間磁場領域変化の全地球規模の地震予兆としての利用 RADIO ANOMALIES AND VARIATIONS IN THE INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD USED AS SEISMIC PRECURSOR ON A GLOBAL SCALE

Valentino STRASER

94, Località Casarola - 43040 Terenzo PR, Italy fifurnio@tiscali.it

(Presented at EDPD 2011 Conference, Kanyakumari, India. September 21-25, 2011)

(岩本 広志 [訳])

要旨：電波異常の観測は、イタリア、ローマの近くの LPTA 基地から 2009 年以来コンスタントに続いていて、惑星間磁場フィールドの変化の結果として比較し、これら 2 つの物理現象の研究にのみならず、それらの関係が地球規模の地震の発生で一般的にマグニチュード 6 を超えるものによって認められている。このフィールドによって得られる経験から、強い地震はどこでも数分か数時間早く電波異常の出現によって普通に先導されることを見出した。地震予兆を伴った電波異常の関係は普遍的に理解されておらず、この理由のためにまだ適正に区分されていない。それゆえに、この研究の目的は、“地球的な地震予兆”と呼んだ、そのカテゴリーは惑星間磁場フィールドにおける“性格上の変化”が電波異常に関連した測定器の指示値によって示されたその仮定的に認識されている。両者の値は、おのこの比較され関係付けられ、地球規模の破壊的な地震の能力的なアプローチを示している。不幸にして、これによって立つこの方法は、それを適用するに肯定的な結果にもかかわらず、まだ我々を震源の場所をピンポイントで与えてくれない。電磁気の地震予兆のカテゴリーにとって、時間的スケールの結果の比較は可能で、それらの確定のために、地球上を巡るほかの場所の基地、遠く離れた場所で記録された磁場異常である。

キーワード：電波異常、惑星間磁場フィールド、全地球規模の地震予兆、地震マーカー、電磁気地震予兆

導入

この仕事の目的は、主にそのポテンシャルがマグニチュード 6 かそれ以上の破壊的な地震の場合、普通どこでも数分か数時間先立った、その明確なシグナルによって代表されている、全地球規模の地震予兆と名付けている、地震予兆の新たなカテゴリーを提案することである。

この研究の手順は、地震の前に頻繁にはっきりと現れた、惑星間磁場領域 (IMF) での性質上変化に沿ったの電波異常の出現を基礎としたものである。そのデータは継続的に、24 時間週 7 日、イタリア、ローマの LPTA 基地で集められてきた (図 1)。

全地球規模の地震予兆は伝統的な予兆と異なり、物理的、化学的ないし他のタイプのシグナルを通じて将来的な震源を必ずしも明確化しないが、単に、やがて破壊的な地



図1 インデックスマップ. 青の丸は、ローマ、イタリア (41° 41' 4.27"N; 12°38' 33.60"E) のLPTAプロジェクトの観測ゾーンを示す。

震が起ころうとすることを示している。しかしながら、もし、一方でその方法が時間的なスケールで発生する結果を満足するものとして使用可能なことが照明されれば、もう一方で確かな震源情報を示さないものとして提供される。代わりに後半部の目的が幾つかの方法を同時に使用することによって成し遂げられるならば、例えば：赤外線の前兆を衛星で探知する (Saraf and Choudhury, 2005), 地爆発と蒸発雲 (Shou, 2007 and 2011), 地球光 (Straser, 2007), 温度異常 (Leybourne et al., 2006), エネルギー移動 (Blot et al., 2007; Choi and Maslov, 2010), ラドンガス放射 (Chyi et al., 2005; Singh et al., 2010)。

測定器具の問題として、電波異常は磁気強度による小規模な色付きの水平線として、バックグラウンドのノイズに関連した最小周波のレンジで図2に示された分光写真によって見る事が可能なものとして、明白に観測される。

電波異常の分光写真の解析はそれに関連した磁場領域での量的な見積りのための比色分析スケールを必要とする (Straser, 2011)。電波異常は期間、延長、強度など何れの性質に関係しない未知の電波放射として定義されるだろう。

- 地磁気波動の IAGA (国際地磁気と超高層大気物理学協会) の分類
- 人工放射
- 既知の自然放射 (ホイッスラー, コーラス, 落雷, 電子楽器のような隕石音, プラズマ等)。地震予兆を伴った電波異常の関係は普遍的に理解されておらず, この理由のためにまだ適正に区分されていない。

主要な電波異常は 32Hz より下 (大体 0.1 ~ 20Hz) で観

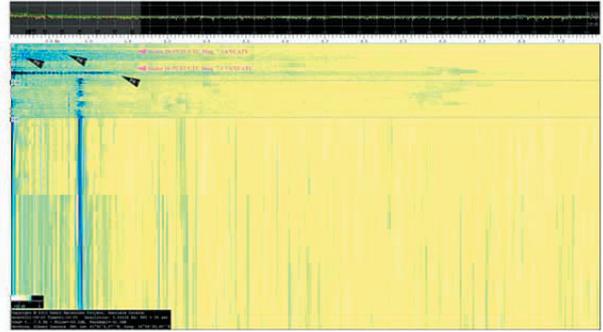


図2 電波異常が左のスペクトログラムにみられ, ESP (電磁的地震先駆現象) という略称と矢印で示される。擾乱は低周波数帯にみられ, 水平方向に鋭く伸長した信号によって他のものと識別される。緑矢印でしめされるように, スペクトログラムにも地震に関連する電波異常が認められる。(Gabriele Cataldi 氏のご好意)

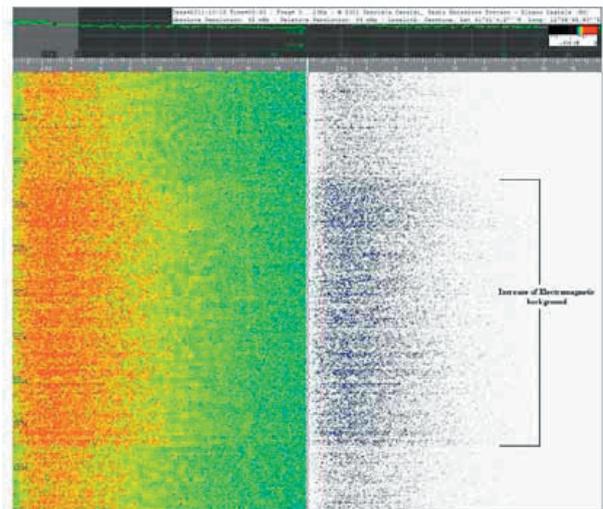


図2a 左のスペクトログラム上のバックグラウンドノイズの上昇を強調, 赤の濃淡で示した。(Gabriele Cataldi 氏のご好意)

測される。唯一知られたことは ELF 帯と SLF 帯が磁気圏かアルベーンタイプであること。正確には, 0.1 と 10Hz の間はアルベーン空洞に関係した放射が観察される可能性があり, このタイプの放射は無線妨害が起こっている場所の周期のレンジに属する。

電磁気自身予兆 (ESPs) の周期は, 電波異常を含んで, 広い波長帯をカバーする。地震の震源における放射は 0.001Hz から数百 MHz の広い波長帯が観察されるだろう。距離の増加を伴って, しかしながら, 高周波放射は徐々に衰え ELF 放射が 0.001 ~ 3Hz でかろうじて見えていえる間完全に見えなくなってしまう。この現象はその波が遭遇した物質による減衰と結びついている。このタイプの研究の間, 見た目のゼロ減衰が存在して依頼 1000Hz より低い放射に従う可能性のみに過ぎず, 結果的に減衰なしに岩石中を数万 km 行き渡る。

ノイズのバックグラウンドは, 0 から 20Hz の間で自然と人工両方の放射より成っている。人工放射は長距離で高電圧の鉄道線で 16Hz の周波数での 8Hz と 32Hz の調和的な (通常は見えない) 電磁気から発生するノイズとして形成される。この周波数以下では 3Hz のソースからラン

ダムに発生し、鉄道によって再度発生し、とはいえ無目的な調査がこのようになされていた。

これらとは別として、その長く伸びた水平形状が他から識別される。そのスペクトrogramは人工的なソースからの地震が示すものは同様な放射の他になく、国内で多く供給される 50Hz からの調和的な共鳴を保存する。これらの調和は同一距離で、50Hz から始まる。これらのシグナルを除外して、残存したバックグラウンドノイズは自然ソースによって形成される。自然ソースによるその意味は：太陽（地磁気脈動を作る太陽風で、磁気圏での相互作用）、電気的な現象（大気圏における雷と嵐）、地球からの縦横方向の共鳴放射 / 電離圏空洞（シュマン共鳴を含む）、アルベーン空洞（電磁気流体力学的な波、磁気圏共鳴）、自然な前 / 周 - 地震放射。

加えて、電磁気的地震予兆は地球表面のいかなる所でも観測可能でその周波数が 0.1 ~ 5Hz, 例えば PC1 タイプの地磁気脈動と同じ周波レンジで検出される。この理由によって、地磁気的地震予兆は地球の磁気圏の空洞によって放射状の部分として形成され観察される。そのうえ、この空洞は地磁気的地震予兆としてこのような自然ソース照射からの変質を条件とすることが可能となり、地磁気脈動の強度の変質として引き起こされる。

地磁気的地震予兆 (ESP) と地磁気脈動は同一ではなく、それは、混乱されるべきものでもない。両者は同一の周波数帯で検知され以下のように見える：地磁気脈動は磁気圏における相互作用の太陽活動の結果としてで、これらの相互作用は大変低い周波数の放射によって形成される。地磁気的地震予兆、別の見方では、非常に広範なスペクトラムを持ちうる放射であり、5Hz 以下の放射も十分に強度を持ち、周波数は惑星の躯体を通過出来、何処でも検出可能となる。その上、幾つかの放射はアルベーン空洞の動揺を作り地磁気脈動の変質の原因で、ボビンアンテナを用いたものと同様な観測が可能となる。

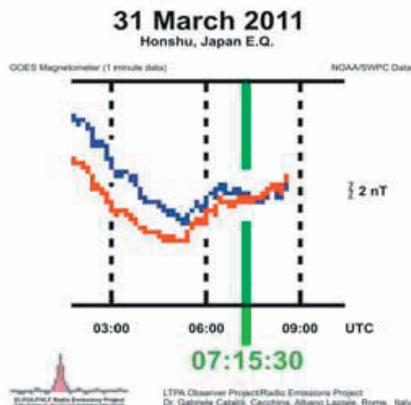


図3 図は GOES13 と GOES15 の衛星からのトレースを示したもので、青と赤、おのおのの色によって区別されている。垂直な緑線は 2011 年 3 月 31 日の日本・本州のケースの地震の出現を示している。2つのグラフ、日本地震の対応と、その上に重ねられたそれらの 2nT の電磁気的な量との対応。この図において σ カurve 形状と地震の間の関係が記録できる。

時間的な見知から、ESP を検知するのみ用いた最初の器具はレーザーで、このタイプの信号の波長が正確に知られていない時期と同時にアンテナの異なった種類のものを用い、周波数の広範なレンジをカバーする異なったアンテナを用いるために不可欠なものとして考えられてきた。現在は電波レーザーとして作られたものを用いて VLF, SLF, ELF と ULF 帯に合わせられる。用いられるアンテナはループかボビンタイプのもので、最近数年では、フラックスゲート磁気探知機が用いられている。

この研究では、電波異常は他の観測所（ローマからの考慮すべき距離が等しく位置しているようないくつか）によって与えられるデータをと両方を比較して行われ、惑星間磁気領域における性質上の変化を伴って、GOES13 と GOES15 衛星による観測が (<http://www.swpc.noaa.gov/Data/goes.html>), そのデータはオンラインで 24 時間 / 週 7 日、閲覧されるだろう。

2009 年から開始された突っ込んだ分析は、マグニチュード 6 を超える地震の直前の記録で、S 字に描かれた IMF グラフはわずかな変形を被って、今後この研究からギリシャ文字の σ に命名された。

図は 2011 年 3 月 31 日の本州地震の IMF トレースの σ の出現を示し、2nT として知られた性質上の変化を見ることができ、マーカーは（図 3）のケーススタディーの大部分として存在する。確かなケースでは、IMF グラフのパターンは興味深い類似事例を提供し、本物の地震マーカー、強い地震に先立つ、例えば、2011 年 8 月 22 ~ 24 日に起こったシーケンスに記録できる（図 4）。

図 4 に示された 3 つのケース、明白な IMF 値が最小での A 字に記された谷部の循環をみることができ。それらのピークは引き続き、ホックによったグラフの上昇フェーズで、B 字を添えて強調した、普通に 5 時間前に、

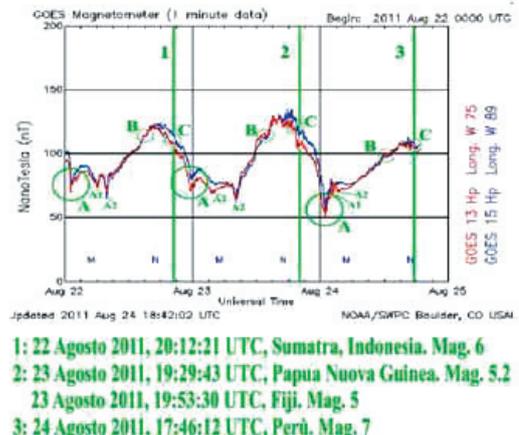
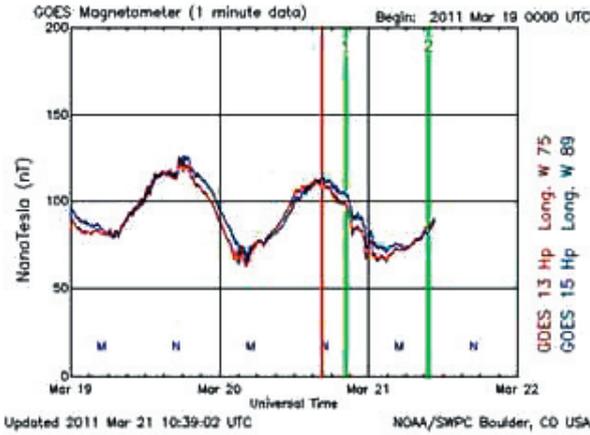


図4 図は地震発生における特殊な形状の繰り返しのトレースを示す。最小の値もまた 3 つの関係した値として出現、A, A1 と A2 と記した部分に記す。グラフの上昇フェーズでは 6 時間後に小波が出現し、これは B で示した、C は地震を示し、 σ 形状に関係している。C 文字は B 文字の 5 時間後に再発している。



1) 20 March 2011, 20:17:58 UTC, Honshu, Japan, Mag. 5,1
 2) 21 March 2011, 09:49:02 UTC, Hindu Kush, Afghanistan, Mag. 5,8
 In RED: Maker of radio-anomaly recorded on 2011 March 20 at 16:43:30 UTC

図5 図は電波異常と2つの地震発生の出現の関係について示している、IMF カーブのσ形状による先立ち。

σが主要振動（地震）の数分前に出現している。

IMF の変化と電波異常の両者は、この研究によって議論されているものとして、お互いに関係しているように思われ、習慣的に見るならば電波異常に先立った、時間的なスケールは、地震前の数分から数時間の IMF グラフ上のσの出現である。解釈の道は、図5の事例を見て、赤く示された地震マーカーがどこで、地震の出現の応答とσがどこかといったこと。

測定機材のチェック

上記のように、EPS は幾つかの観測局によって観察され、時間的なスケールで相互に比較される。多くの場合、しかし全てではなく、自然の磁気のバックグラウンドの中での同様な変質は、このケースでの HAARP プログラム (<http://137.229.36.30/cgi-bin/magnetometer/gak-mag.cgi>) 上の磁気探知機として同時に記録され、強い地震に数時間先立った Kiruna Project (www.lund.irf.se/helioshome/magnetometerdata.html)。この再現は、2011 年もまた最初の3年を通じて繰り返され、地震のケースはこの研究で解析される。

我々の方法に関し、データの比較は全地球規模で実行可能で、EPS を生んだようなメカニズムが与えられて以来、テクトニック・ストレスのあるエリアから遠く離れた所でさえも観測が可能である。事実、幾つかの科学的な研究は、機械的な圧力や崩壊の期間であっても粉々に砕け散る前に一般的な電磁気放射が結晶や岩石中に放出が起こることが指摘されている (<http://www.vlf.it/mognaschi/TERREM3.html>)。例えば、計算された50メガワットのエネルギー放出は、深度数10kmの地下で起こり、電磁気的なバックグラウンドノイズが3Hz(1mVm)で占められていることが可能で、このタイプの放射は多くの観測局によって簡単に記録できる。



図6 NASA INSPIRE VLF3 周波数データ・コレクター。ローマ近傍のLPTAプロジェクト局で取得。

方法とデータ

この研究で用いられた方法は、データの比較より成っている。24時間週7日記録され、IMF の変化、特に、2nT 値に近いトレースのσ形状の識別で、ローマ近郊の観測局でのLPTA 機材によって記録された電波障害の出現によってなされている。

LPTA 局はNASA INSPIRE VLF3 周波数データの採集と3軸磁気検出機によって装備され、図6の24時間週7日記録されたデータがコンピューターにインターフェースされている。IMF トレースはGOES13 とGOES15の衛星によって記録され、オンラインで24時間週7日閲覧され、例えば HAARP Programme や Kiruna Project のような他の磁気探知機との電波異常データの継続的な比較を作成するために。

機器材の使用

a) スペクトログラム

スペクトログラムは10分毎にステーションに記録が得られる；例えば1水平ラインは1,600ミリ秒毎。スペクトラムのデータは以下に記述するがごとく：

FFT セットアップの効果の fs=44,1000kHz:

1FFT-bin の幅 :21.0285mHz

ノイズ帯の幅の等価性 :28.5988mHz

最大周波数レンジ :0.00000Hz から 1.37813kHz

FFT ウィンドウ タイム : 47.554 秒

スクロールインターバルからのオーバーラップ :96.6%

b) 比色分析上のスケール

Gabriele Cataldi の比色分析上のスケールを用いて、スペクトログラムの色は信号が作り出すタイプの関係における特定値を代表する。通常、いわゆる電磁気的な地震予兆 (EPS 若しくは ESS) は10MHz (Fraser-Smith et al., 1990) で平均的60nTに至っていて、しかしながら15Hz (ELF と SLF 帯) より低い周波数のESPの研究は可能で、もし実際的な言い方をすれば、MHz帯をみることなしに30Hzのそれらの信号を研究することは容易であ

る。比色分析スケールは赤で 30nT に至る信号を示し白が 100nT に至る、このような方法で、ほとんどの信号は 20nT より小さいので「青」が表れ他と容易に区別できる。20nT と 30nT の間では青から赤に変わる。青から赤の間のたった 10nT の偏差は一つのスペクトログラム上のどんな信号値すべてを十分に示し得る。比較してみれば、30nT が 1m 離れた場所に置いた電気トースターが作り出す電磁場の 3 倍に等しいという値を想起させ、その意味はその値が ESP の研究に当たって間違いなく重要である。スペクトログラムの電波異常は黄色で示され（全ての黄色の濃淡が白くなって）、そして周りが赤になる。この方法によって我々が以前抱いていた信号強度は 65nT より低いことはないという確信を得ることが出来た（最初の濃淡は黄色、これは 1m 離れた蛍光管から生産される強度よりもはるかに大きい応答）。

c) 衛星

衛星追跡システム (Orbitron) からのデータは以下の通り：
(<http://www.swpc.noaa.gov/Data/goes.html>)

- GOES13 (一次): 軌道径 35,809km; 経度 74.5403°W; 緯度 0.3317°S; 方位角 272.3°; 仰角 -10.7°; 赤経 12 h 26 m 24 s; 偏角 -7°07' 04".
- GOES 15 (二次): 軌道径 35,782 km; 経度 88.9147°W; 緯度 0.0344°N, 方位角 284.2°; 仰角 18.6°; 赤経 11 h 29 m 43 s; 偏角 -6°37' 18".

討論

電波異常の出現と IMF の変化の応答は、マグニチュード 5.5 かそれ以上、しばしば 6 を超える地震の間の、地球を通じ分布する他の観測局からのデータによる機材的な類推により実行された。各々の地震の研究はその仕事で普通のパターンが明らかとなってきた、例えば、地震の前にバックグラウンドノイズが上昇する、バックグラウンドノイズが震動に近い所での減少や周辺での上昇そして地震後の電波異常。

一例として、2011 年 8 月 20 日にバヌアツ島で起きた 2 つの地震の例。

- ① 最初の地震 (see: www.usgs.gov/): M= 7.1
日時: 2011 年 8 月 20 日土曜日 16:55:02 協定世界時間
場所: 18.260°S, 168.069°E
深度: 40.6 km (25.2 マイル)
地域: バヌアツ
- ② 次の地震 (see: www.usgs.gov/): M= 7.0
日時: 2011 年 8 月 20 日土曜日 18:19:24 協定世界時間
場所: 18.287°S, 168.132°E
深度: 28.5 km (17.7 マイル)
地域: バヌアツ

両者の地震に先立って:

- IMF トレースに σ が出現 (図 7a);
- 地震の数分前に電波異常 (図 7b);
- 磁気のバックグラウンドのピーク (0 から 20Hz), ロー

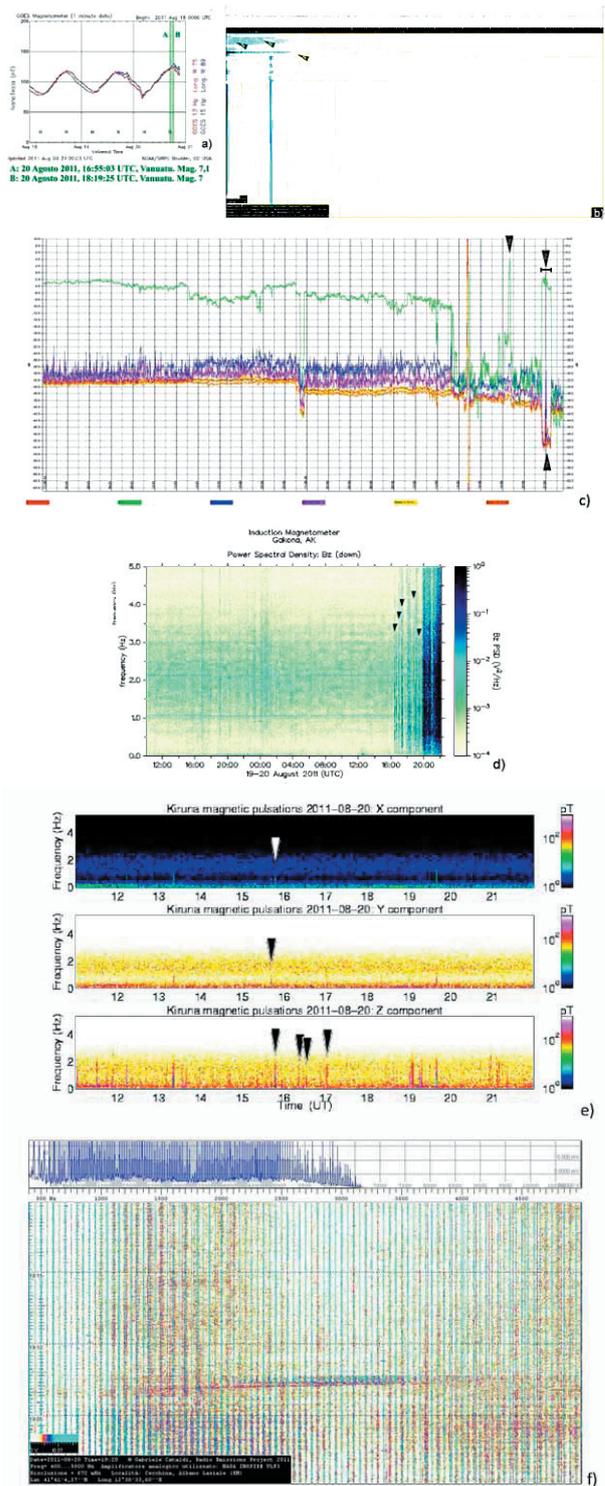


図 7 異常を伴った地震データとの関係。 a) GOES 衛星 13, 15; b) 電波異常; c) 0 ~ 20Hz の前兆信号; d) インダクション磁気探査器。Gakona (AK) と Kiruna; e) 磁気脈動; f) 400~5000Hz の LPTA プロジェクトトレース。

マ近郊の観測局で記録された ESP の時間的なスケールに比較され得る (図 7c);

- HAARP インダクション磁気探査器による異常記録, LPTA トレースの時間的スケールに比較し得る (図 7d);
- Kiruna 磁気探査器, 類推的な時間的応答を示す (図 7e);
- 400-5000Hz での干渉の出現, ローマ近郊の LPTA 局で加えて更に記録 (図 7f);

2009年から進んでこの分野の経験から、はるかに多くの電波干渉が記録され、地震のマグニチュードの大きなIMFトレースの σ の出現に関係できた(Straser, 2011).

この研究の仮説的なメカニズムは地下の応力発生が電磁波を放出し地球表面で機器的に測定可能かということ。それで放出電磁波の検知の可能性は磁気圏のバックグラウンドの中の変化は単独にはリンクせず、地震波に類似した、地球内部からの電磁波の伝播現象に加えなければならない(Palangio, 1993; Palangio et al., 2007). 特別に言えば、電磁場は地震によって作られることはあり得ることで、大陸地殻の中で伝播できるように惑星中の最内部層を反射し確かに光線が励起され、透明物質を横切ったときに反射係数が密度変化によって異なってくる。全ての電磁放出は0から1000Hzの周波数を伴って強度の減少が進むことなしに惑星を正しく通り抜けることができる(Palangio, 1993; Palangio et al., 2007). このレンジは低圧プラズマ放出をも含んでいて、その種を我々は大気中で観測することができる。その結果として、仮説では電磁波の放出は地震の準備段階で電波のレンジの十分な干渉として製造され、IMF量が変形して衛星に記録された σ 型の出現となる。

その上、電磁波は大気か地下かのいずれかを通り抜けるか次第で異なって伝播する。電磁波の伝播速度は空気より地下の方がより遅い。代わりに、地下では電磁波は岩石中の数多くの層や密度レベルのものを反射して伝播可能。それ故に惑星表面で収集されたデータは、違った時間に、震源の近くと同じエリアのゾーンで形成されることは至って明瞭である。その結果として、示されたものは、より大きな電波異常、地下で形成されたより大きな応力強度である。

この研究の場合の分析は、関係した電波異常の磁場における変化とIMFカーブの変形(σ の形成)、が少なくとも3つのクラスにグループできるか、たとえば、関係した地震マグニチュードがM5からM6, M6を超える、M7を超える。各々のケースにおいて確かな性質の要素が繰り返す傾向があるか、いつもではないにしても。

1) このケースではマグニチュード5.1の地震を考慮することができる、これは2011年5月11日にスペインで起こった。このタイプの地震での確かな特徴は:

- 電波異常は主地震の準備段階でより少ない頻度1
- 地震前後1時間の電波異常の消失を伴った時間的ギャップ。
- 電波異常は地震の後に続く
- $\sigma = 2\text{nT}$ の出現を伴ったIMFの変化
- 他の磁場探査器によって記録された弱い異常。

地震: マグニチュード5.1

日時: 2011年5月11日(水曜)16:47:25 協定世界時間

場所: 37.699°N, 1.673°W

深度: 1 km (~0.6 マイル) ロケーションプログラムによりセット

地域: スペイン

2) 代わりに、このケースではフィジー諸島で2011年7月29日に発生したマグニチュード6.7の地震では、このタイプの地震の以下に続く特徴が。

- 電波異常
- $\sigma = 2 \text{ nT}$ の出現を伴ったIMF変化
- 400 ~ 5000 Hzの豊富な信号
- 0 ~ 20 Hzの先駆的な電波信号(地震1'前まで)

他の磁気探査器による記録における異常の頻繁な消失(例えば, HAARPとKiruna)

地震: マグニチュード6.7

日時: 2011年7月29日(金曜)07:42:23 協定世界時間

深度: 521.7km(324.2マイル)

地域: フィジー諸島南部

3) 最後に、日本で2011年3月11日に起こったマグニチュード9.0のケース。このタイプの地震の以下に続く特徴が。

- 主要地震前10日の電波異常の数の明確な上昇、主要地震が起きたその日での電波異常がシャープな落ち込みを伴う。その後に急速に更新された異常が引き続く(Straser, 2011).
- 地磁気場の異常が増加する。
- 地磁気活動のインデックスが増加。
- $\sigma = 2\text{nT}$ の出現を伴ったIMF変化
- 電波異常のこの出方は日本のこの地震の前兆。
- このケースの σ の現れ方はGOESカーブが際立たせる。

今まで議論してきたことから、3つのタイプのケースの分析をベースとして、後に続く解釈モデルが仮説されるだろう、ここにある3つの注目すべきフェーズにまとめられる。

最初のフェーズ: 岩石の応力の結果として、電磁的信号が作られ、地下や衛星の測定機材に記録された様々な種類の干渉として明らかとなる(図8)。

第二フェーズ: 応力が消散し、岩石によって作られた電磁気信号が最終的なケースとして地震の前のしばらくの間に(数分から数時間で)縮小してしまう(図9)。

第三フェーズ: 新しい応力の出現によって決定された岩石の新しい平衡が新鮮な電磁気信号を放出(図10)。

まとめと示唆

この分野で得られた経験から、著者たちは地殻の応力は数多くの電波異常の生産に比例していることを述べる事ができ、この方法は地震の引き金を区別する方法として提案されたものであり、人類を破壊に導く能力を持つ暴力的な地震に特別に全地球規模で適用可能なものと思われる。この方法の適用の一つの限界は震源の位置を決め

ることが困難なことで、数分から数時間という変化の時間的な区間を伴って、地震のエネルギー量と発生時間のデータが与えられることは有望である。震源の場所は他の方法の研究を用いることによって見積られる。この性質の理由は、この研究が他の方法を使用して地震予知

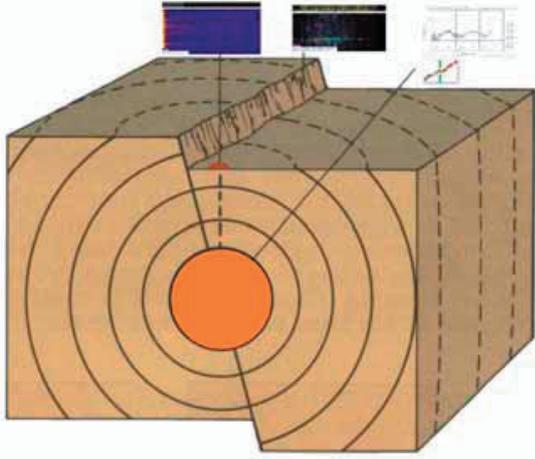


図8 岩石の応力の結果として、電磁的信号が作られ、様々な種類の干渉として明らかとなる。

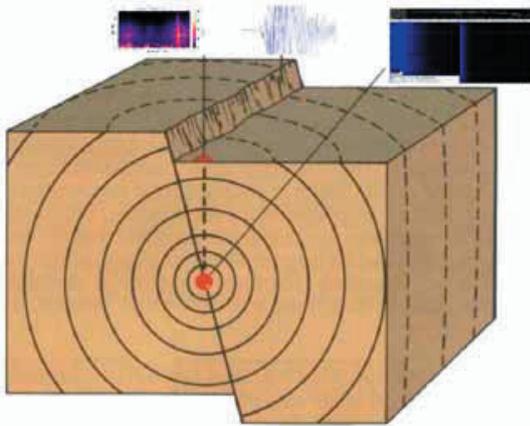


図9 応力が消散し、岩石によって作られた電磁気信号が最終的なケースとして地震の前のしばらくの間に（数分から数時間で）縮小してしまう。

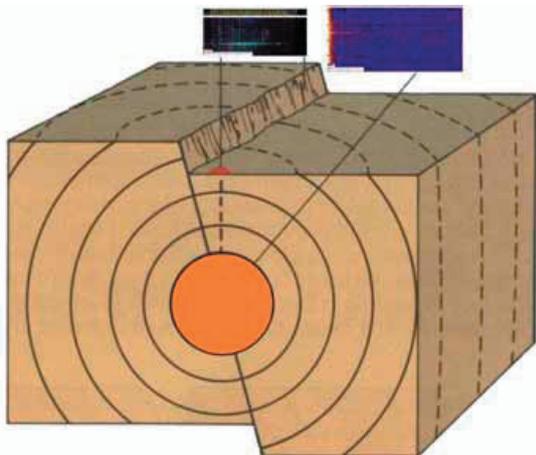


図10 新しい応力の出現によって決定された岩石の新しい平衡が新鮮な電磁気信号を放出。

を調査するシナジーを適用できることにある。事実上、今では大量のデータは、組織された研究グループが様々な境界領域的なスキルでデータをアレンジするのに便利であり、全地球的な規模で地震のリスクがよりもっと標準化された定義に導かれる特定のモデルが使用可能な方法によって試みられるようになってきた。

謝辞：私はこの研究を深化するために Gabriele Cataldi, Daniele Cataldi と彼らのプロジェクト "LTPA Observer Project", これはローマの Cecchina に位置する地震電磁気観測局における、電波異常の連続データを私に送ってくれ、地震予知に関する幾つかの重大な考察を私に与えられ深謝を表明したい。科学的な討論に参加する機会を設け私の論文を改善してくれた Kanyakumari (インド)での EDPD 2011 年 会議に参加した科学者達に更なる感謝を与えたい。

文 献

- Blot, C., Choi, D.R. and Vasiliev, B.I., 2007. The great twin earthquakes in late 2006 to early 2007 in the Kuril Arc: their forerunners and the seismicity-tectonics relationship. *New Concept in Global Tectonics Newsletter*, no. 43, p. 22-33.
- Chyi, L. L., Quick, T. J., Yang, T. F. and Chen, C.-H., 2005. Soil Gas Radon Spectra and Earthquakes. *Terr.Atmos. Ocean. Sci.*, v. 16, no. 4, p. 763-774.
- Choi, D. and Maslov, L. 2010. Earthquakes and solar activity cycles. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 57, p. 84-97.
- 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. *Geophys. Res. Lett.*, v. 17, p. 1465-1468.
- Leybourne, B., Gregori, G., de Hoop, C., 2006. Gulf of California electrical hot-spot hypothesis: climate and wildfire teleconnection. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 38, p. 3-8.
- Palangio, P., 1993. Radioricezione Elf-Vlf. *Annali di Geofisica*, Vol. XXXVI, Suppl. 5-6, p. 99-114.
- Palangio, P., Di Lorenzo, C., Masci, F. and Di Persio, M., 2007. The study of the electromagnetic anomalies linked with the Earth's crustal activity in the frequency band [0.001Hz-100kHz]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 7, p. 507-511.
- Saraf, A.K. and Choudhury, S., 2005. Thermal Remote Sensing Technique in the Study of Pre-earthquake thermal anomalies. *Journal Ind. Geophys. Union*, v. 9, no. 3, p.197-207.
- Shou, Z., 2007. The cloud of the M8.4 Indonesian earthquake on September 12, 2007. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 45, p. 31-33.
- Shou, Z., 2011. Geo-eruption before the Great East Japan Earthquake in March 2011. *New Concepts in Global*

Tectonics Newsletter, no. 58, p. 78.
 Singh, S., Kumar, A., Bajwa, B.S., Mahajan, S., Kumar, V. and Dhar, S., 2010. Radon monitoring in soil gas and ground water for earthquake prediction studies in North West Himalayas, India. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, v. 21, p. 685-695
 Straser, V., 2007. Precursory luminous phenomena used for

earthquake prediction. *The Taro Valley, Northwestern Apennines, Italy. New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 44, p. 17-31.
 Straser, V., 2011. 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.

**アペニン山脈（イタリア）北東部における
 気候、地震および太陽周期の間に存在する可能性のある関連性
 A POTENTIAL RELATIONSHIP BETWEEN THE CLIMATE, EARTHQUAKES AND
 SOLAR CYCLICITY IN THE NORTHWEST APENNINES (ITALY)**

Valentino STRASER

94, Località Casarola - 43040 Terenzo PR, Italy fifurnio@tiscali.it

(2011年9月21-25日にインドで開催されたEDPD 2011Kanyakumari会議で発表)

(矢野 孝雄 [訳])

要旨：地球における気象現象と地震の間、および、太陽周期と地震の間にある関連性は、世界中の多くの文明で語り継がれてきた。Parma地域（イタリアのアペニン山脈北東部）では、物理学的、地球物理学および天文学的現象の間に合致する多くの要素が知られる。本論文では、この地域で研究されてきた歴史時代の局所的地すべりも考慮される。というのは、もし太陽と他の天体が地下の平衡状態に影響することを認めるとすれば、それらの影響が地下重力にかかわる諸現象の間に擾乱をひき起こすことを信ずべき理由になるからである。データを分析すると、重力性運動はランダムに起きるのではなく、太陽活動と同期されているように見える。過去に遡る研究に関連するデータ解析は、現在における予知を可能にした。2011年11月および12月に起こった最近の悲惨な事件は、太陽活動が極大に近づくとつれて、北イタリアを襲う洪水がより頻発することを確信させ、同時に、調査地域における主要地震や地震群は太陽周期に関係していることを証拠づけた。

キーワード：太陽周期、地震、気候変動、歴史地すべり、木星の角運動モーメント

まえがき

自然科学が自ら設定する目的の1つは、自然現象の短期、中期および長期の予測である。それゆえ、たとえば例外的に強烈な大気現象、水理地質的不安定、あるいは地震の際には、人間活動の支援や人的安全性の確保のための科学的貢献が最優先される。

この研究は、太陽周期、大気条件および地震、太陽エネルギーの長期変動、太陽系重力中心 (CM) の変化によってもたらされる影響とともに、太陽の軌道角運動モーメント (OAM) — 主要惑星 (木星, 土星, 天王星および海王星) 質量の空間分布に依存— の変化にみられる関係について述べる。

研究地域は Parma 州の西アペニン山脈北部に位置し、北緯 45° 付近に達する (図 1)。

この研究の分析では、さまざまな要素が検討される。第

1の要素は、1831～2008年に発生した震度6以上、マグニチュード4以上の地震である。対象とする地震の震度とマグニチュードの絶対値はとくに重要ではないが、それらは通常M3を超えないが、毎月あるいは1年に数回という間隔でくりかえし発生するので地元にとっては重大である (Petrucci et al., 1996)。このような理由から、この研究では、局所的地震の視点から重要なものがとりあげられる。

分析した第2の要素はBaganza川の河流との比較であり、この川は研究地域の“中軸”にあると考えられる。年平均流量は、支流からの流入によって増大したり、水理地質的に緩和されたりするものの、ある特定期間における降水量に相関すると考えられる (表 1)。

この研究で検討されるもうひとつの要素は、地すべりの動向である。それは降水量に、それゆえ最終的には水に依存する。さらに、太陽の動きと特定の惑星の配列が地下の岩石の平衡状態に影響するならば、これらの応力が

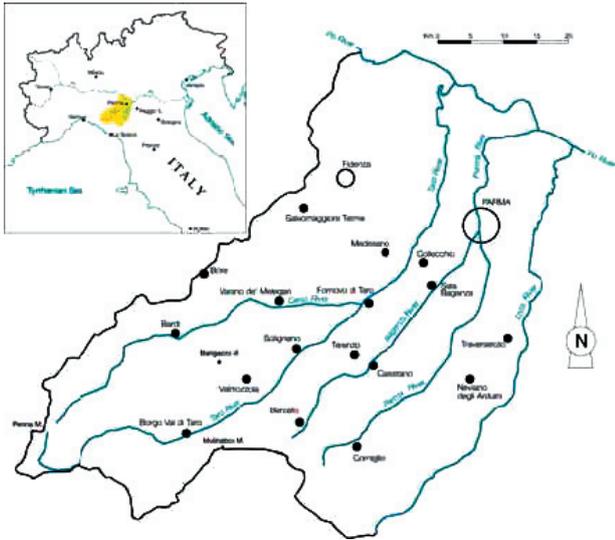


図1 位置図。研究地域はイタリアのParma州に位置し、東アペニン山脈の北部にあたる。

表1 Parma州で1831～2008年に発生した主要地震。

No.	Year	Intensity or Magnitude	Epicentre
1	1831	I=7	Parmense
2	1834	I=7	Parmense Ap.
3	1835	I=6-7	Cisa Pass
4	1849	I=6-7	Val di Taro
5	1857	I=6-7	Parmense
6	1886	I=7	Parma East
7	1897	I=7-8	Langhirano
8	1898	I=7	Calestano
9	1906	I=6	Compiano
10	1927	I=7	Bedonia
11	1934	I=6	Borgo Val di Taro
12	1934	I=6	Corniglio
13	1937	I=6	Parma West
14	1946	I=6	Pione (Bardi)
15	1958	I=6	Collecchio
16	1959	I=5-6	Santa Maria del Taro
17	1965	I=6	Corniglio
18	1971	I=8	Parma West
19	1972	I=6-7	Calestano
20	1983	I=7	Parma South-west
21	1995	M=4,2	Parmense
22	1996	M=4,1	Parmense
23	2007	M=4,2	Parma-Piacenza
24	2008	M=5,1	Parma- Reggio Emilia

地表に反映され、水理地質学的不安定に関与することになる。Parma州には7,000ヶ所の地すべりがあり、そのうちの5つはヨーロッパ大陸で最大規模のものであり、Parma州はこの種の研究にとっても適している。2つの例をあげると、Bardi地区には周囲100kmの範囲に1,656ヶ所の不安定域があり、Neviano地区には周囲60kmの範囲に1,055ヶ所に地すべりが分布する(www.regione.emilia-romagna.it/)。

考察

地震活動

一般的な様式から議論をはじめよう。グラフ(図2)は、全地球の地震数が太陽黒点数の変化からある時間的遅れをともなって発生していることを示す。太陽周期と1973～2010年に発生した地震の数との間に一定の相

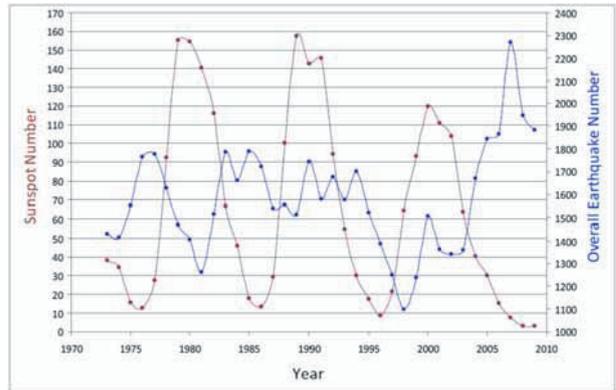


図2 1973～2009年における太陽黒点数と地震総数

関があり、太陽活動の極小と極大に、地球全体の地震活動の活発化が一致する(Straser, 2011)。地震活動と太陽活動の間にみられる他の関係が、Zangh (1988)やGousheva et al. (2003)によって示唆された。それとは別に、M>6.5の地震との関係で太陽黒点活動を検討すると、前述したパターンに適合するものの、地震活動は、地震グラフ(Choi and Maslov, 2010;Straser, 2011)の突出部に示されるように、太陽活動の極大に対応して明瞭に増大する。

全地球から局地域(たとえば、研究地域)に目を転じると、Parma州で1831～2008年に発生した“強い”地震のうち、10個の地震は太陽活動の極小期に、5個は極大期に、9個は太陽活動の衰退期(すなわち、極大とそれに続く極小期の間の7年間)に発生している。ちなみに、このデータはChoi and Maslov (2010)が記載した全地球的模式を反映している。

降水量

降水量に関しても、まずはイタリア全土のパターンが検討され、次に局所的状況と比較される。1861～2001年のイタリアにおける平均降水量の最大値を比べてみると(図3a)、10年ごとに起きる規則的事件を見いだすことができる。とくに強烈な大気現象の周期性は、いくぶんの遅れを除くと、太陽周期に従っていて、極大のほとんどが極小(1901, 1911および1936)に一致している。とくに、最近40年間のなかで2011年をとりあげると、極大降水量は極大太陽活動に一致する。それにかわって、1861, 1871, 1021[1921の間違いか], 1931, 1951, 1961および1971年の極大降水量は、極大太陽活動から1～2年遅れている。Baganza川の年間流量(Alifracco, 2008)の変化をみると、その最大値は、唯一の例外である1991年を除くと、太陽活動の極大に一致する。そして、一般に、このパターンはイタリア全土での平均値に整合する(図4)。

これとは違って、一般の問題として、降水量と太陽黒点数の間の関係は、すでに東アフリカのビクトリア湖の湖水準に関するStager et al. (2005, 2007)の研究に提案されていた。Stagerの場合、太陽活動の周期性とビクトリア湖面の間の相関が十分な信頼性をもつこと

が証明された。本研究域に関するさらなる研究として、Tomashino and Dalla Valle (2000) が、Po 川と太陽系の質量中心との間の関係を示唆している (図 5)。いっぽう、Landscheidt (1990) は、北半球における降雨量と太

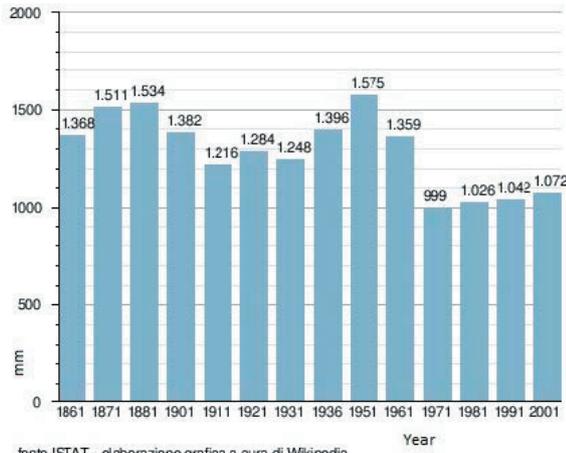


図 3a イタリアにおける 1861 ~ 2001 年の平均降水量

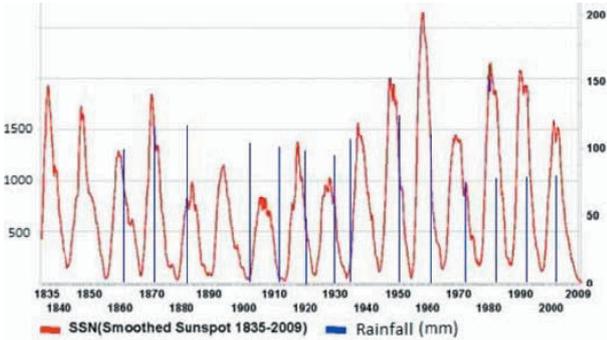


図 3b イタリアにおける 1861 ~ 2001 年の太陽黒点数と降水量

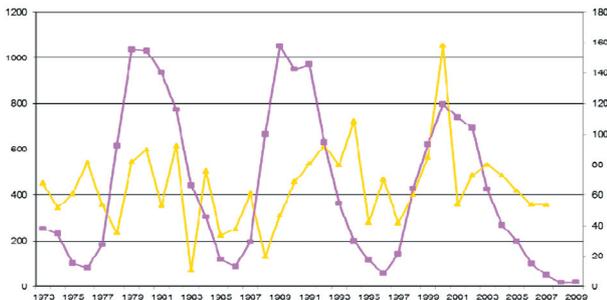


図 4 1973 ~ 2009 年における Baganza 川の流量と太陽黒点

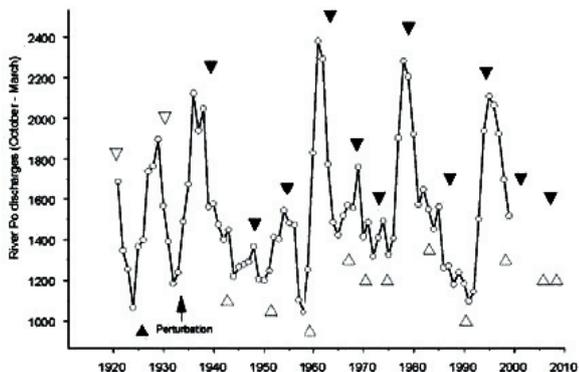


図 5 太陽の軌道角運動モーメントの絶対的変化速度によって示された Po 川の流出量と太陽軌道の周期との比較。

陽の角運動モーメント変化との相関性を提案した。

地すべり

研究地域における歴史地すべりは、長短さまざまな静穏期ののちに活発化する。Parma 地域だけは、すくなくとも 12ヶ所の不安定域が存在する (図 6) たとえば、Corniglio 地すべりは、幅 1.1km, 長さ 3km に達する。

地すべりの主要地形パラメータ: 冠頭部高度 1160m, 末端部高度 550m, 高度差 600m, 滑落域の平均傾斜 23°, 末端隆起部の平均傾斜 8°, 長さ 3150m, 幅 600m.

不安定化した歴史的な主要地域が 16 世紀 ~ 今日までの間に再活性化した年を整理すると、1547, 1612, 1740, 1836, 1879, 1896, 1902, 1906, 1945, 1957, 1960, 1978, 1994, 2000 および 2010 となる。

周期的に活性化する地すべりは一時に 2 ~ 7ヶ所であるが、決して連続して起きるわけではなく、長短の休止期をはさむ。前世紀における地すべりが最活性化した年と太陽周期を比較してみると、太陽活動の極大期および極小期と一定の同期性を示す。

同様に、調査地域で報告された最大のエネルギーをもつ地震も、ある繰り返し期間にしたがっていて、毎年同じ頻度で発生しているわけではない。それゆえ地すべりと地震を発生させる傾向は、ある共通する原因に由来するのだろう。

たとえば、私たちは、太陽活動の極大期に発生したフレアは、地球磁場と相互作用し、地球の角運動モーメント (慣性力?) の変化を引き起こす。いっぽう、この変化は、逆に水理地質学的不安定に向かう傾向のある地帯において、地すべりを活性化させた。

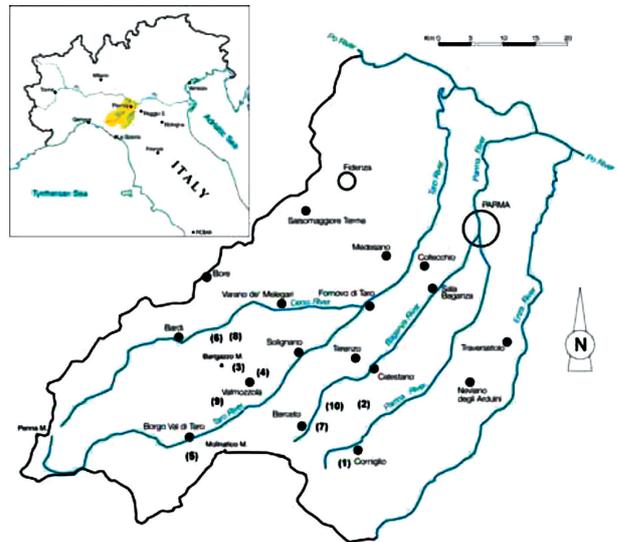


図 6 Parma 州周辺における主要な歴史地すべり. Corniglio (1), Signatico (2), Rovere (3), Valmozzola (4), Borgotaro (5), Tosca (6), Monte Cervellino (7), Pessola (8), Monte Gallo (9), Casaselvatica (10).

表2 2011年8月5・6日に世界中で起きたM5以上の地震リスト (www.usgs.gov/earthquakes/). ちなみに、この磁気嵐の前日および翌日には、全地球の地震活動に影響はみられない。それは、2011年8月4日の2つの地震、ならびに、8月7日の5つの地震に示される (www.usgs.gov/earthquakes/)。

MAG	UTC DATE-TIME y/m/d h:m:s	LAT deg	LONG deg	DEPTH km	Region
5.3	2011/08/05 16:08:49	-30.044	-176.762	24.0	KERMADEC ISLANDS REGION
5.0	2011/08/05 08:04:21	-6.611	147.917	67.5	EASTERN NEW GUINEA REG, PAPUA NEW GUINEA
5.3	2011/08/05 01:13:27	-10.751	165.054	42.3	SANTA CRUZ ISLANDS

MAG	UTC DATE-TIME y/m/d h:m:s	LAT deg	LONG deg	DEPTH km	Region
5.1	2011/08/06 17:17:22	-4.365	152.941	38.9	NEW BRITAIN REGION, PAPUA NEW GUINEA
5.1	2011/08/06 13:22:36	-35.856	-73.027	22.4	OFFSHORE MAULE, CHILE
5.3	2011/08/06 07:14:57	35.242	141.005	42.0	NEAR THE EAST COAST OF HONSHU, JAPAN
5.7	2011/08/06 02:45:55	-2.860	101.174	30.9	SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA

表3 2011年8月4・7日に全世界で発生したM5以上の地震リスト (www.usgs.gov/earthquakes/)。

MAG	UTC DATE-TIME y/m/d h:m:s	LAT deg	LONG deg	DEPTH km	Region
6.3	2011/08/04 13:51:36	48.784	154.835	49.0	KURIL ISLANDS
5.8	2011/08/04 00:16:08	-2.755	101.187	37.8	SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA

MAG	UTC DATE-TIME y/m/d h:m:s	LAT deg	LONG deg	DEPTH km	Region
5.0	2011/08/07 23:05:11	-5.378	133.899	9.2	KEPULAUAN KAI, INDONESIA
5.0	2011/08/07 14:35:35	38.440	21.844	13.1	GREECE
5.4	2011/08/07 07:01:47	-20.132	179.725	41.7	SOUTH OF THE
5.6	2011/08/07 06:22:35	-11.795	168.385	411.9	SANTA CRUZ ISLANDS REGION
5.0	2011/08/07 04:01:11	13.843	-60.309	38.0	SAINT LUCIA REGION, WINDWARD ISLANDS

しかし、このメカニズムはつねに働いているわけではない。事実、太陽爆発や磁気嵐が地球へすぐに影響することはない。

この事象は、2011年8月5・6日に起きた磁気嵐や、日本における猛烈な地震の2日前に起きた2011年3月9日のフレアのように、確実なデータによって確認される。2011年8月5・6日の磁気嵐は、世界中のさまざまな観測所で記録され、時間的に対比される明瞭な異常によってグラフ化された (www.usgs.gov/earthquakes/)。

しかし、8月5・6日(表2)には、磁気嵐にかかわらず、地球の地震活動は増大せず、逆に衰弱した。これは、M5以上の地震数が、8月5日には3個、8月6日には4個であったことで確認される(表3)。

2011年3月9日のフレア (www.space.com) でさえも、日本の猛烈な地震に密接に関係するとは思えない。事実、Shou (2011) によって、震央帯の応力状態が2週間前の衛星画像によって発見され、震央付近に geoeruption と蒸気雲が現れた。

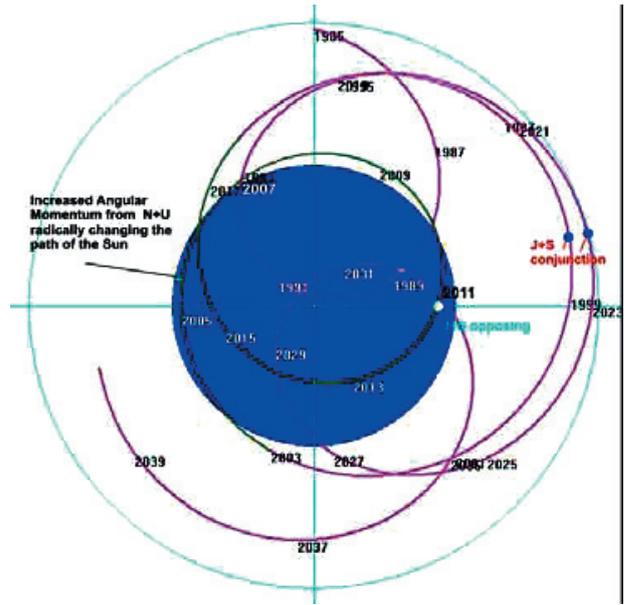


図7 太陽系の質量中心の変化 (www.landscheidt.info)。この図は、太陽系 barycentre (質量中心) と太陽の質量中心の不一致を示し、それは、太陽系惑星の配列によって引き起こされる。

それらがフレアに由来すると仮定すると、猛烈な地震の前兆は、地震発生の数日前に出現したのではないだろう。そうではなくて、太陽爆発そのものが地震発生の引き金になっただろう。フレアは地震を準備するのに歴大なエネルギーを供給したと信じられる。

それゆえに、これらの密接でない関連性からみると、他のどのような現象が太陽周期に関連しているのかよくわからない。太陽周期は、系外宇宙からやってくる素粒子の流れに直接的影響をうけない。

こうしてみると、天体 [複数] と太陽系質量中心の変化との間の相互作用が注目される。ほとんどの期間において、質量中心 (CM) は、太陽という天体の外側にある。太陽中心および太陽系質量中心の間の2.2太陽光線 [solar rays] よりも大きな距離変動には、2つの中心の軌道が近接する場合がある(図7)。太陽の質量中心の変化は、全地球の平衡という点からみて、地球の運動にも影響をおよぼす。

太陽の角運動モーメントが地球の運動を条件づけるという認識は、これまでも知られてきた (Bendandi, 1931; Landscheidt, 1998, 1999)。

太陽変動と黒点周期は、Bendandi にしたがえば、太陽を周回する軌道にある木星、金星および地球という惑星位置の複合された周期的変動に由来するという。

木星は、地球質量の300倍以上の質量をもち、太陽にもっとも大きな変動をあたえる天体である。それに近い影響をおよぼすのは金星であり、その質量は地球よりも小さいが、太陽に近接した位置にあるため、より大きな影響をもたらす。これら2つの惑星の運動に次いで影響する

表4 Raffaele Bendandi (1931) によって計算された惑星の潮汐定数

Planet	Distance (Km)	Distance (U. A.)	Volume	Tidal coefficient
Mercury	58 million	0.38709	0.05	1040
Venus	108 million	0.72330	0.87	2090
Earth	150 million	1.00000	1.00	1000
Mars	228 million	1.52360	0.16	0030
Jupiter	780 million	5.20250	1230.00	2200
Saturn	1,433 million	9.55474	675.00	0106
Uranus	2,882	19.21814	55.00	0019
Neptune	4,516	30.10957	60.00	0002

のは水星と地球であるが、それらは無視されるべきものではなく、太陽潮汐の発生に第2級の影響ももたらしめていることは確実である。以上のことがら、太陽系の個々の天体質量にもとづく、Bendandi の計算に明示されている (表4)。

「金星の合 (583.92 日), 木星の合 (389.98 日) の変化にみられる平均持続期間は平均で 10 年周期であり, その値は 11.070 日となる。」

「金星, 地球および木星という 3 つの天体のさまざまな変化の間に存在する数値的關係からみると, さまざまな強度変化が認められ, その周期は 10 年, あるいはそれ以上 (より正確には 77.442 年と 885 年) である。」 Bendandi にしたがえば, それゆえに, 太陽の 11 年周期 (黒点周期) は, 天体からの影響—木星, 金星および地球の複合効果—に対する周期的応答にほかならない。

議論すべき第2の要素は, 太陽の軌道モーメントの変化である。実際, Landscheidt によると, 太陽の軌道角運動モーメントへの関与は, その全角運動モーメントからみて無視できるものではなく, 自転モーメントの 25% に達するであろう。軌道角運動モーメントは, $0.1 \times 10^{47} \text{ g cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ から $4.3 \times 10^{47} \text{ g cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ に, あるいは, 逆に変化し, 40 倍もの増減を示す (Landscheidt, 1988)。

Landscheidt は, 惑星が合, あるいは対角にあるかによる太陽の変化を決定する候補惑星のなかで, 木星と金星という 2 つの主要惑星の影響を考察した。

2009 年に (www.landscheidt.wordpress.com), Sharp は土星の位置に関する角運動モーメントを計算した (遠日点および近日点における合, 準合, および squaring と対角 opposition)。その結果は, 驚くべきものであった。グラフにみられるパターンは, 木星と土星の間の squaring につねに対応しているが, 極大値は, 太陽系の 2 大惑星の合と oppositions に一致する (図8)。

太陽の角運動モーメントも周期的で, 極大値および極小値の間に収まる 80 年前後の値を示す。この値は, 気候変動をこの周期に関連させる Wolf-Gleissberg 周期の中間値を代表する。実際に, Wolf-Gleissberg 周期の極小および極大と気候の寒冷期と温暖期との間には強い相関がある。

火山活動

太陽周期に関連した地球に対する太陽からのエネルギー伝播と応力に関しては, Stothers (1989) による研究が参考になる。Stothers は, 1500 ~ 1980 年における巨大火山噴火に関する歴史資料に着目した。これらのデータに遡って解析した彼は, 火山噴火に統計的に重要な 2 つの周期を発見した。それらは, 11 年の太陽周期と, より長期的な 80 年の Wolf-Gleissberg 周期に一致する。

特定の火山活動にみられるこれらの周期性のなかで, 氏は火山活動の増大と太陽活動の極小化, そして, 火山活動の衰退と太陽活動の極大化の間に顕著な対応関係があることを見いだした。この歴史的モデルは, 火山噴火によって空気中へもたらされ, 後に, グリーンランド氷床に含まれる酸 [複数] の研究によって確認された (図9)。

本論文の著者の見解では, 太陽活動極大期における太陽フレアは大気循環モデルを変化させ, 地球自転にまで影響をあたえる可能性がある。Stothers によれば, 地殻変動の力学におけるこの種の衝撃は, 断層にかかる圧力を減少させ, 火山性微動をひきおこすだろう。

結論

地球ダイナミクスは, 太陽活動と太陽系の巨大ガス惑星

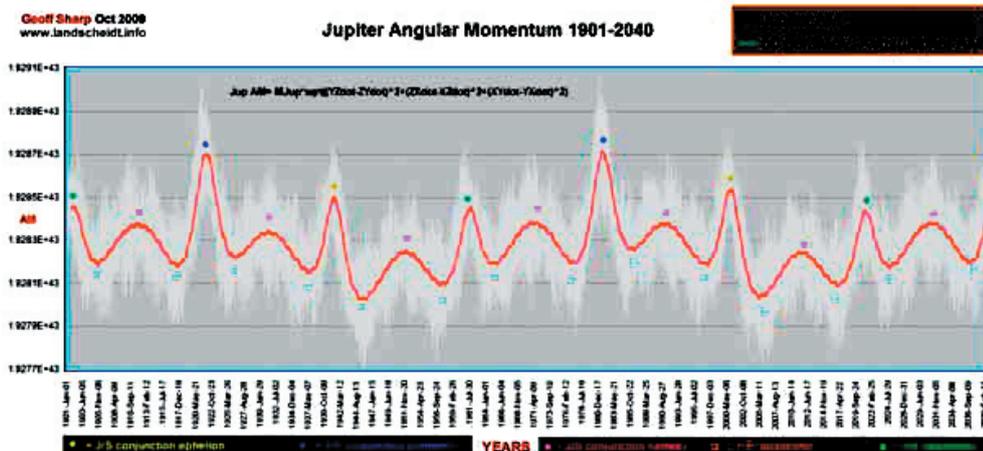


図8 1901 ~ 2040 年における木星の角運動モーメント (www.landscheidt.info)

文 献

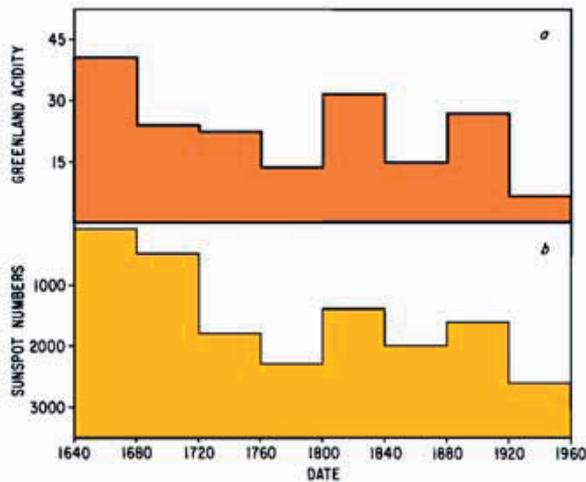


図9 1640～1960年における太陽黒点とグリーンランド氷の酸性度 (Stothers, 1989).

の配置に大きく影響される。本研究の調査範囲は、太陽周期、大気循環、地震発生、強力な重力運動の周期的活性化の間に関連が存在することを明示した。過去2世紀のデータを解析すると、次の結論がみちびかれる。

結論 1

太陽周期は、調査地域の降水量の多寡、歴史地すべりの再活動、および強い地震の発生に関係する。

そのメカニズムは、次のように解釈される。蒸発過程と気象にかかわる大気循環は太陽エネルギーによって制御される。蒸発は降雨をもたらす、さらにそれは地すべりを活性化させる。

太陽輻射→大気循環→蒸発→降雨→歴史的不安定の再活性化

結論 2

太陽黒点の周期的出現は、木星の角運動モーメントと同期している。大型ガス惑星の周期的位置も、ジオイド形状に影響し、地震周期と地球の造構進化にかかわる。

太陽周期→ジオイド変形→全地球地震周期→造構進化

最後に、本論の著者の意見では、学際的研究方法によってのみ、私たちはこの魅力的問題を解決することができる。この問題は、いずれ、人類活動への脅威を減少させるために、気候、地震周期、顕著な重力不安定の再活性化期に関する重要な示唆をもたらすであろう。

謝辞 私は、この研究を支援してくださった会社 AB GLOBAL に、この研究を改善するための親切で建設的に原稿を検討して下さった Leo Maslov 博士に、心より御礼申し上げます。

Aligfraco, G. (editor), 2008. L'acqua che sarà –Costruzione del Piano di tutela delle acque, Provincia di Parma, Assessorato Ambiente e Tutela del territorio. Pitagora Editrice Bologna, p. 236.

Bendandi, R., 1931. Un Principio fondamentale dell'Universo. Osservatorio Bendandi – Faenza, Società Tipografica Editrice in Bagnacavallo, v. 1, p. 322.

Choi, D. and Maslov, L. 2010. Earthquakes and Solar Activity Cycles. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 57, pp. 84-97.

Gousheva, M.N., Georgieva, K.Y., Kirov, B.B. and Atanasov, D., 2003. On the relation between solar activity and seismicity. RAST: Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Space Technologies, held November 20-22, 2003, Istanbul, Turkey.

Landscheidt, T., 1988. Solar rotation, impulses of the torque in the Sun's motion, and climatic variation. Clim. Change, v. 12, p. 265-295.

Landscheidt, T., 1990. Relationship between rainfall in the northern hemisphere and impulses of the torque in the Sun's motion. In: K. H. Schatten and A. Arking, eds.: Climate impact of solar variability. Greenbelt, NASA, p. 259-266.

Landscheidt, T., 1999. Extrema in sunspot cycle linked to Sun's motion. Solar Physics, v. 189, p. 413-424.

Petrucci, F., Careggio, M. and Conti, A., 1996. Dinamica dei versanti e della pianura della Provincia di Parma. Ateneo Parmense, Acta Nauralia, v. 32, p. 1-39.

Shou, Z., 2011. A precursory geoeruption before the disastrous Japanese earthquake. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 58, p. 78.

Stager, J., Cryves, D.B., Cumming, F., Meeker, L.D. and Beer, J., 2005. Solar variability and the levels of Lake Victoria, East Africa, during the last millennium. Jour. Paleolimnol., v. 33, p. 243– 251.

Stager, J.C., Ruzmaikin, A., Conway, D., Verburg, P. and Mason, P.J., 2007. Sunspots, El Nino, and the levels of Lake Victoria, East Africa. Jour. Geophys., v. 112, D15106, doi:10.1029/2006JD008362.

Stothers, R., 1989. Volcanic Eruptions and Solar Activity. Jour. Geophysical Research, v. 94, no. B12, p. 17,371-17,381.

Straser, V., 2011. Solar Cycle and strong earthquakes in the North-Western Apennines, Italy. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 58, p. 3-8.

Tomasino, M. & Dalla Valle, F. (2000). Natural climatic changes and solar cycles: an analysis of hydrological time series. Hydrol. Sci. Jour., v. 45, no. 3, p. 477-490.

Zhang, G-Q., 1998. Relationship between global seismicity and solar activities. Acta Seismologica Sinica, v. 11, p. 495-500.

太陽活動停滞期における火山・地震活動 VOLCANIC AND SEISMIC ACTIVITIES DURING THE SOLAR HIBERNATION PERIODS

Dong R. CHOI* and Fumio TSUNODA**

* Raax Australia Pty Ltd., Australia. raax@ozemail.com.au

** Emer. Prof., Saitama University, Japan. tsunochan@sky.email.ne.jp

(角田 史雄 [訳])

要旨: Maunder 極小期あるいは小氷期 (1645 年～1715 年) には、世界中で、大きな地震や噴火がたくさん発生した。そして、Maunder 期の後で、それらは激減した。Dalton 極小期になると、地域的な違いがめだってきた；つまり、日本やトルコの地震活動は低調だったが、インド、インドネシア、北米大陸、南アメリカ北部などでは地震活動が非常に強かった。インドネシアのタンボラ火山の噴火は、こうした太陽活動の停滞期に起こった。

この Dalton 極小期をすぎると、火山・地震活動は活発化した；この傾向は今日までずっと続いている。とくに、206 年と 361 年の周期で、太陽活動が極端に弱くなってきた 2000 年以降、その傾向が著しい。最近の異常に多い自然災害（地震、火山噴火、異常気象）は、いずれも、この長期にわたる太陽活動の衰退期に発生しており、それは、Maunder 極小期のそれに匹敵する。

この論文は、歴史上、太陽活動がもっとも弱い時期においては、火山と地震の活動がとくに著しくなることを確証するためのものである。このことは、数十年後に太陽活動がもっと弱くなったときには、より激しい自然災害を覚悟しないとといけないことを示している。

キーワード: 地震、噴火、太陽活動極小期、Maunder 極小期、Dalton 極小期

概説

2011 年 6 月 14 日に、ショッキングなニュースが NASA の宇宙観測センターから世界に配信された。そのニュースは、11 年周期の太陽活動のうち、つぎの 25 サイクルが、もっとも停滞、あるいは、ほとんど活動停止状態になる極小期にはいった、というものである (http://www.boulder.swri.edu/~deforest/SPD-sunspot-release/SPD_solar_cycle_release.txt)。これは、地球が、1645 年から 1715 年まで続いた Maunder 極小期と同じような太陽活動極小期に突入したことを意味する。

こうした著しい極小期の来るとは John Casey によって、あらかじめ予告されていた (2010, 2011)。地球温暖化論者にたいして彼は、数十年以内に、Maunder あるいは Dalton 極小期に匹敵する太陽活動極小期が来る、と警告していた。それは、長く続く寒冷気候を招き、そのもっとも寒い時期には作物は育たず、未曾有の食糧危機に見舞われるからである。さらに、Dalton 極小期のときと同じような、太陽活動の停滞によって、大きな噴火や地震が増え、地球の気候、食糧生産や社会紛争などに悪影響を与えると警告している。

Choi and Maslov (2010) が、彼の考えを支持した。かれらは、地震を徹底的に調べ上げ、太陽との対応関係を追及して、地震活動と太陽活動とは逆相関関係にあることを明らかにした；つまり、太陽活動が盛んになり、活動のピークに達すると逆に、活動が停滞する。しかし、太陽活動が衰えて、停滞期にはいると、逆に、地震活動は、その最盛期を迎える。

上記のような研究をベースにして、著者らは、太陽活動の Maunder 期と Dalton 期の両停滞期において、汎地球的な造構的な活動状況を検討した。まず、最近、大きな浅発地震が予想されるモロッカ海とインドネシア (Choi, 2010) を調べた。この調査を、もっと広げた、活用できる古地震記録のある地域に拡大した。この論文は、手短に言えば、われわれの発見した造構活動のしくみと太陽活動との関係について、研究をより促進させるものといえる。

1960 年以降におけるインドネシアの火山活動

モルッカ海

モルッカ海域における火山群は、西のスラウェシ) 島と東のサンギヘ島のそれぞれで、火山列をつくっている。図 1 は、スミソニアン博物館のホームページ「世界の火山作用一覧」(<http://www.volcano.si.edu/world/>) と、NASA のホームページ「太陽活動のサイクル」のうち、その最盛期を青色で示したものとを比較対照したものである。

上の図は、モルッカ海域においては、大きな噴火が Maunder 極小期と Dalton 極小期に発生したことを示している。この地域におけるもっとも規模の大きな火山噴火 (注；スミソニアン博物館の噴火レベル 5[=VEI5] は、Maunder 極小期に、Tongkoko 火山と Gamkonora 火山で発生した。Dalton 極小期は、大まかにみて、今日まで続けて活動している火山の多くが再活動を開始した時期と一致している。スラウェシ-サンギヘ火山島弧では、こ

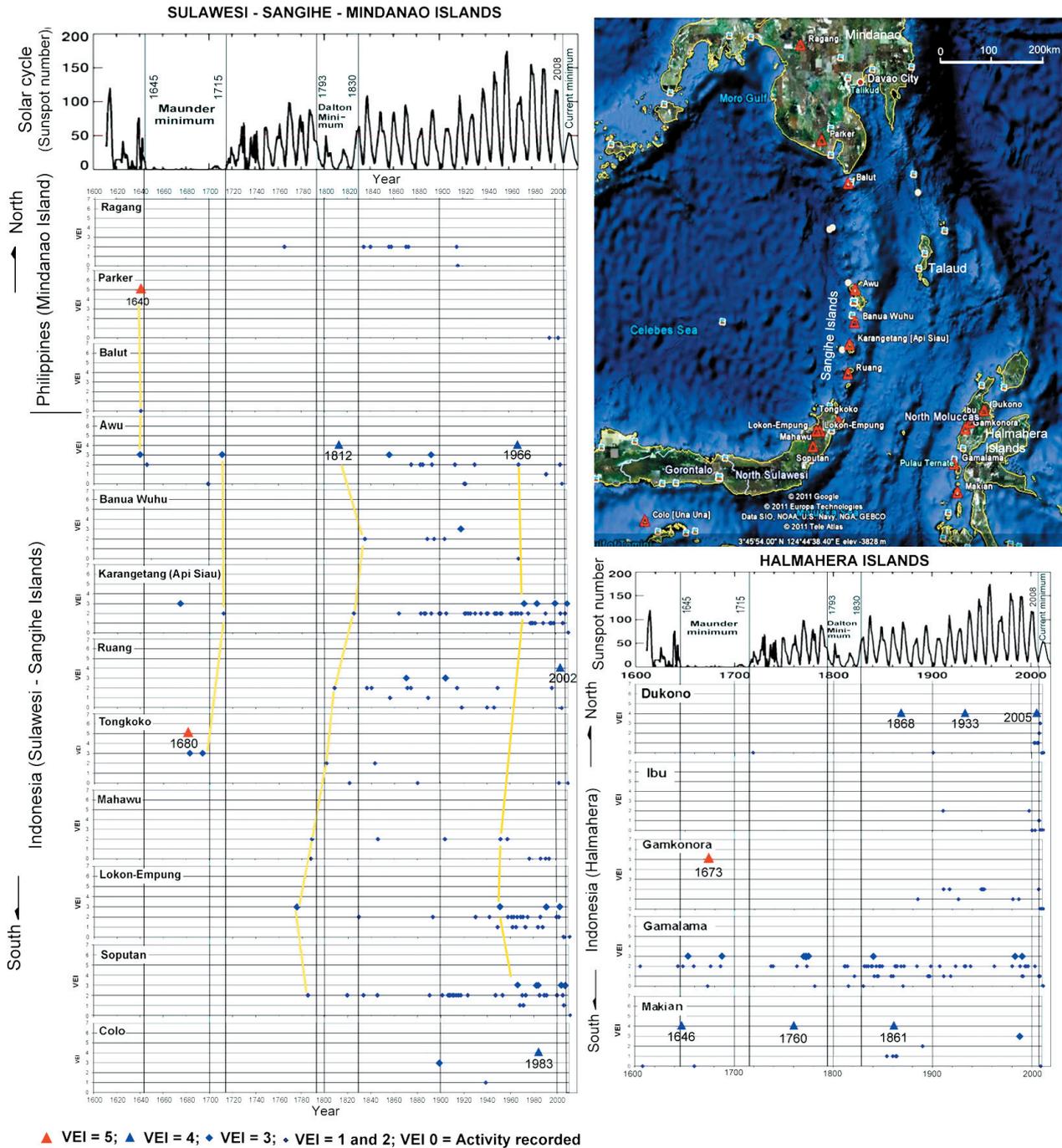


図1 モルッカ海をとりまくスラウェシ-サンギヘ列島とハルマヘラ島における火山噴火史

のときに、Karantetan 火山より南で火山活動の勢いが良かったが、それ以北の Wuhu 火山と Awu 火山の活動は弱かった。Halmahera 島では、最南端の Makian 火山をのぞくすべての火山は、2011 年末までずっと活動が活発だった。

小スンダ列島, ジャワ島, スマトラ島

モルッカ海域と比較・対照するために、小スンダ列島, ジャワ島, スマトラ島の火山史をしらべた(図2-4)。全地域において、ジャワ島の Merapi 火山や Kurakatau 火山など、いくつかの火山は Maunder 極小期には活発だった。Dalton 極小期には、ジャワ島の Merapi, Raung, Tengger Caldera の各火山、小スンダ列島では Tambora

火山 (1815 年レベル 7 の噴火)、Sageang, Api, Agung, Batur の各火山が活動的だった。一方、スマトラ島では、Maunder と Dalton の両極小期の活動が知られていない。面白いことにインドネシアの全地域で、Dalton 極小期の後で火山の活動が活発になった。

セレベス-モルッカ海域における火山・地震活動の定量的な検討

データとして使える資料を定量的に解析して、図5を作成した。この図は、セレベス-モルッカ海域における火山・地震活動レベルを表しており、赤道から北緯10度、東経120度から130度で区切られ、ほぼ図1に相当する

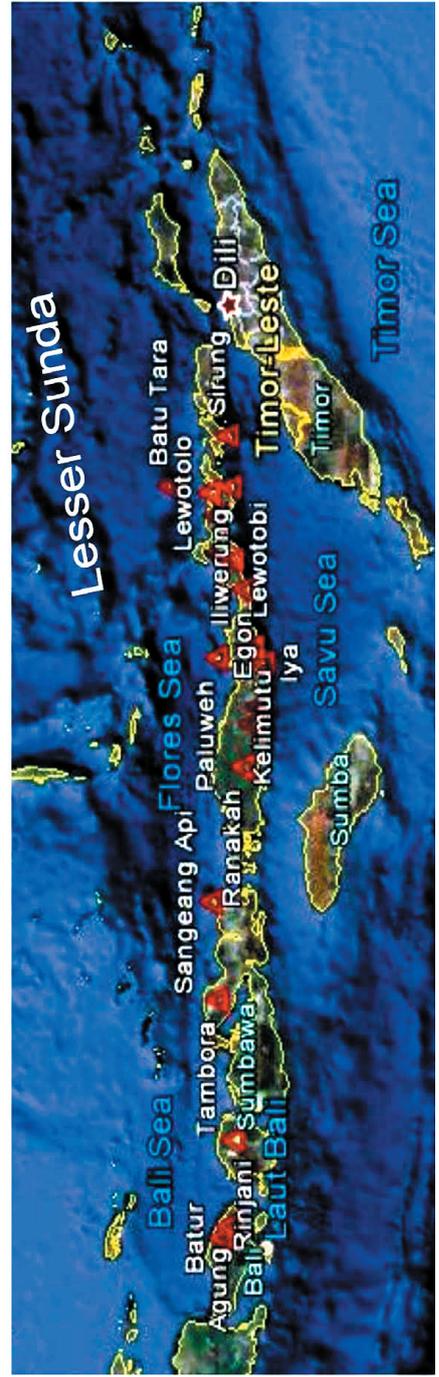
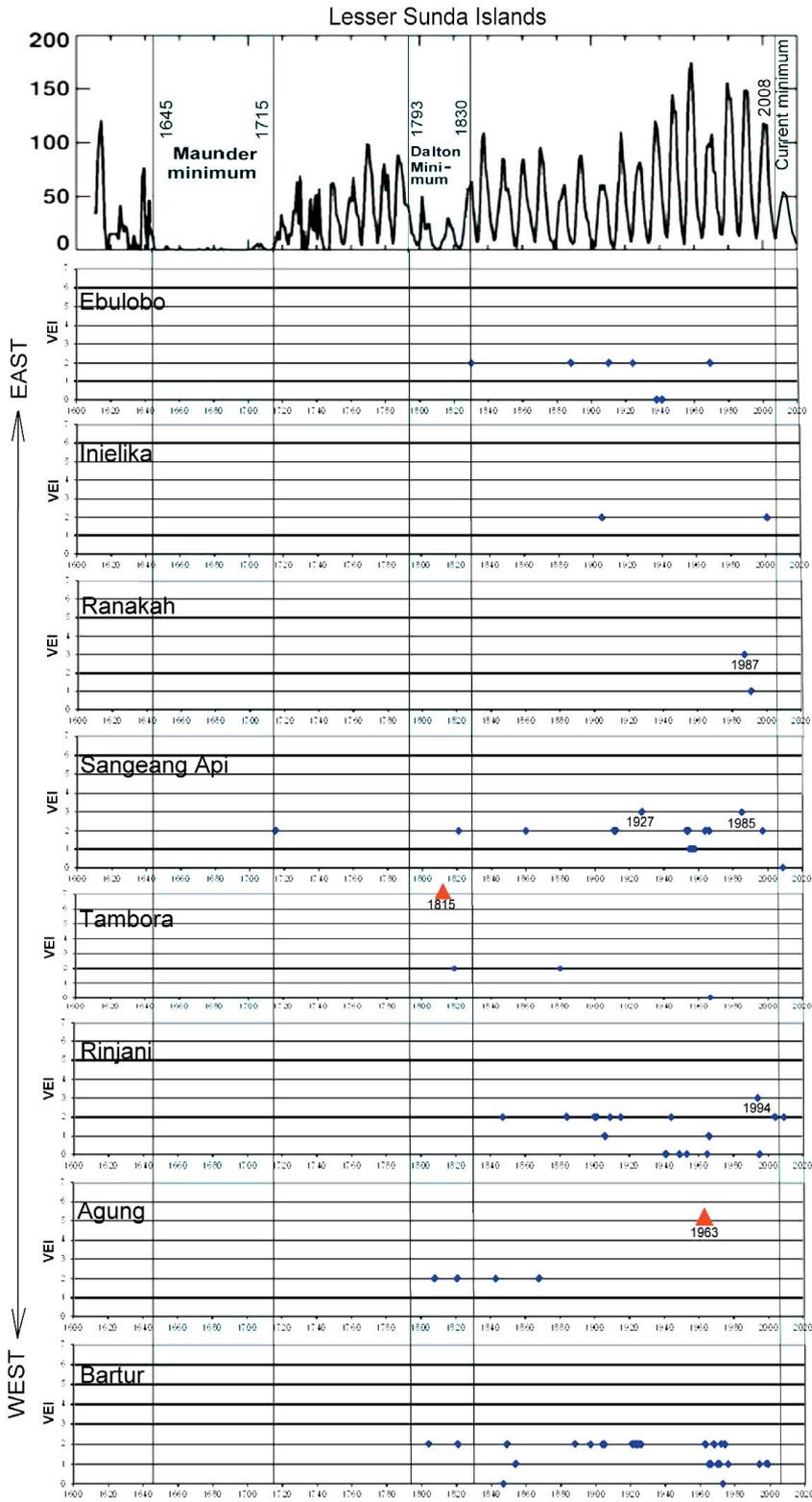


図2 小スンダ列島の火山。世界最大の噴火である Tambora 火山のレベル7の噴火は Dalton 極小期のまんなかで発生した。一方、1963年に発生した Agung 火山のレベル4の噴火は、太陽活動サイクル19という、太陽活動のレベルが衰えていく時期に起こっている点に注意（図6参照）。

地域である。エネルギーレベルは、火山、地震とも、点であらわしてある；その計算方法は、図の説明に記しておいた。Maunder 極小期のまんなかごろ、Gamkonora 火山の噴火で示されるような激しい火山活動のあったことが、はっきりと分かる。Dalton 極小期でもっとも顕著なできごとは、その真ん中ごろの1812年からの Awu 火山

の噴火である。また、この Dalton 極小期の全期間を通して、概して、活動レベルは低い。しかし、極小期を過ぎてから火山活動レベルは上がっていき、1980年以降、非常に高い活動レベルになる。

この地域の古地震は Utsu-WEQ (<http://iisee.kenken>).

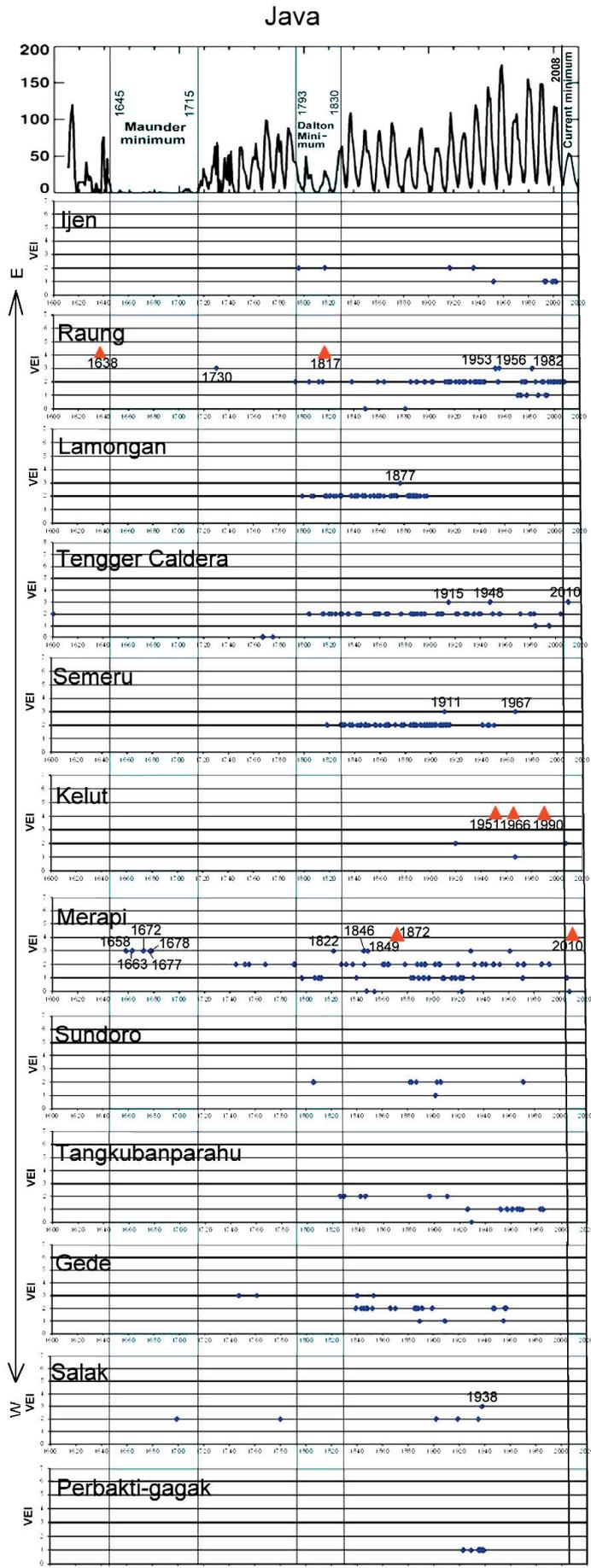


図3 ジャワ島の火山。Merapi 火山の周期的な激しい噴火は、Maunder 極小期の早期に起こり、ジャワ島東部における一連の噴火は、Dalton 極小期に始まっている点に注意。

go.jp/cgi-bin/utsu/result.cgi) で検索できる。しかし、火山のデータに比べて、古地震記録の精度はあまり高くない。とくに、1840年以前は良くない。こうした制約はあるが、5年間ごとの総地震エネルギー量を、M6.0地震の換算個数で表してみた(図5の最下段の表)。この表で興味深いのは、1890年と1930年とに見られるはっきりしたピークである。これらのピークと、小さいが

はっきりした火山活動のピークとが対応している。これは、この時期に外核の活動レベルが高いことを意味している。しかし、1970年以降は、こうした火山と地震の活動とが互いに対応する関係は見られない。この地域の研究は、もっと広い意味での検討が必要のようである。

上で述べたように、インドネシアで観察された火山と地

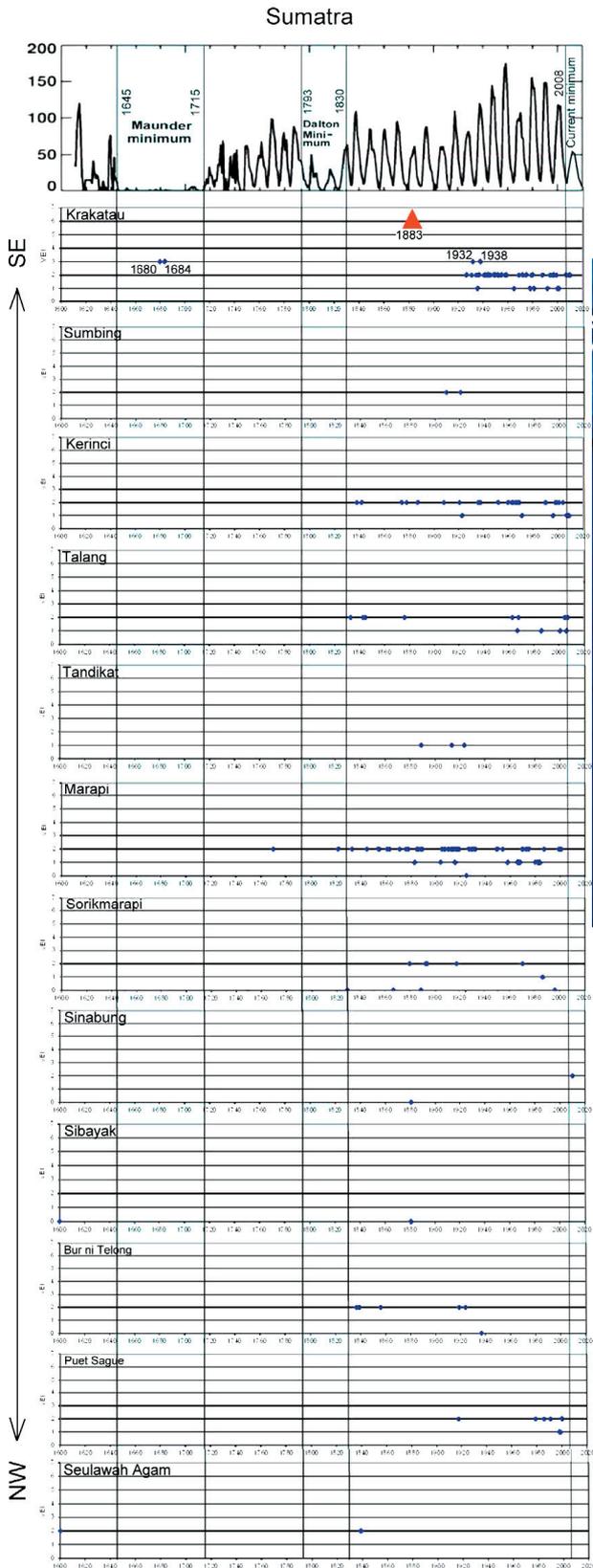


図4 スマトラ島の火山。Maunder 極小期に噴火した Krakatau 以外、スマトラ島において、レベル3以上の規模の噴火は発生しなかった。もう一つの注目点は、Dalton 極小期以降に、小規模な噴火がはじまったように見える点である。

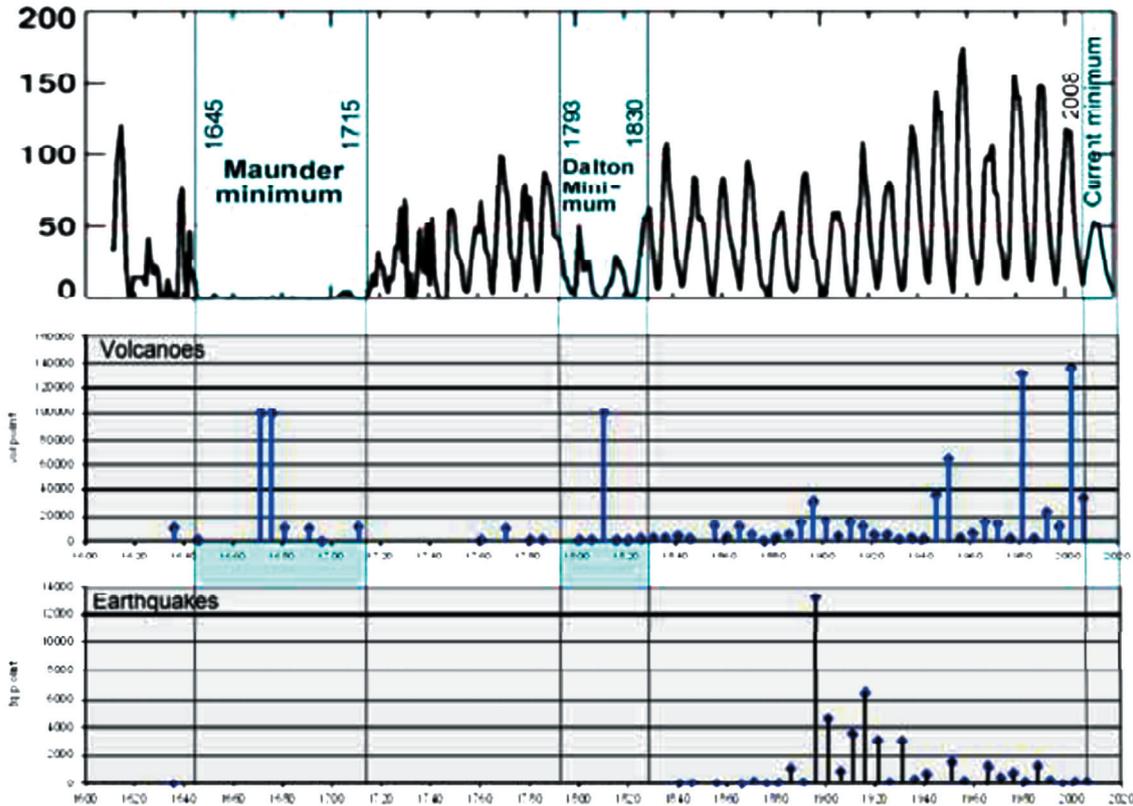


図5 インドネシアにおける火山・地震活動と、セレベス-モルッカ海域の太陽活動との対応関係。火山の点数の数え方；それぞれの活動の点数は、次のようになる；レベル0(VEI0)=1点，レベル1=100点，レベル2=1000点，レベル3=10000点，レベル4とそれ以上=100000点。これらの5年間における総点数は表に示してある。出典はスミソニアン自然史博物館 (http://www.volcano.si.edu/world/find_region.cfm, 2001)。そして火山活動レベルの出典は <http://www.vovo.org/>。太陽活動の極小期における真ん中に当たる時期に大きなピークがきている点が注目される。地震の点数；log 対数で示される地震のマグニチュードに基づいて、 $M \geq 6.0$ 地震をえらんで、その $M6.0$ 地震の換算個数を求める。その総計数を点数化した。たとえば $M7.0$ 地震の換算個数は、 $M6.0$ 地震の 32 個分、 $M8.0=32 \times 32=1024$ 個分、 $M8.7=12 \times 32 \times 32=12,288$ 個分などになる。

震の活動の傾向は以下のようなものである；

- 1)Maunder 極小期においては、非常につよい活動である。
- 2)Dalton 極小期においても、際立ってはいないが、はっきりとした活動である。
- 3)Dalton 極小期が過ぎても、再活動して活動が継続している。
- 4)2000 年以降の活動は著しい。

1900 年代初めの 10 年間における地震活動のピークは、Casey が 2008 年に指摘した、太陽活動が停滞する Centennial Cycle に対応している。そして、彼が予想したように、太陽活動休眠期における地震活動の活発化も認められる。

汎地球規模における、
過去の地震と火山の活動と太陽活動との関係

汎地球的な規模で、過去の地震・火山の活動と太陽活動との対応関係を調べるために、いくつかの地域のそれを検討してみた：つまり、日本、インド、トルコなどの古記録が利用できる地域である。その結果を図 6 に示した。

上に示した図ではっきりしたように、汎世界的に Maunder 極小期の活動がもっともはげしかった。この極小期を過ぎてから、多くの地域で、Dalton 極小期までの

間の静穏な時期にはいった。しかし、南米では、特別に大きな地震が相次いだ。日本やトルコでは火山と地震の活動が弱かった、という地域的な差はあったとしても、一般的にいて、Dalton 極小期における火山・地震活動は活発だった。この極小期を過ぎると、日本とトルコの寺院活動は活発になっていった。こうした活動レベルの高い状態は今日まで続いている。こうした傾向は、すでに紹介したように、インドネシアの火山活動も同じであった。

Maunder と Dalton の両極小期における
汎世界的な地震活動レベルの変動

Maunder 極小期 太陽活動の極小期における汎世界的な地震活動を調べるために、Utsu-WEQ の古地震記録を検索した。Maunde 極小期における結果は下の図 7 のとおりである。この図の定量化の方法は、セレベス-モルッカ海域における場合と同じで、 $M6.0$ より大きな地震を、 $M6.0$ 地震の個数に置き換えた換算値で示してある。

換算個数 7000 以上の地震活動期 (図 7, 図 8) は、1647, 1668, 1700, 1716, 1730 の各年になり、その間隔はそれぞれ 21 年, 32 年, 16 年, 14 年になる。これらの中で 1700 年と 1716 年とが最大で、その値は、 $M6.0$ 地震の

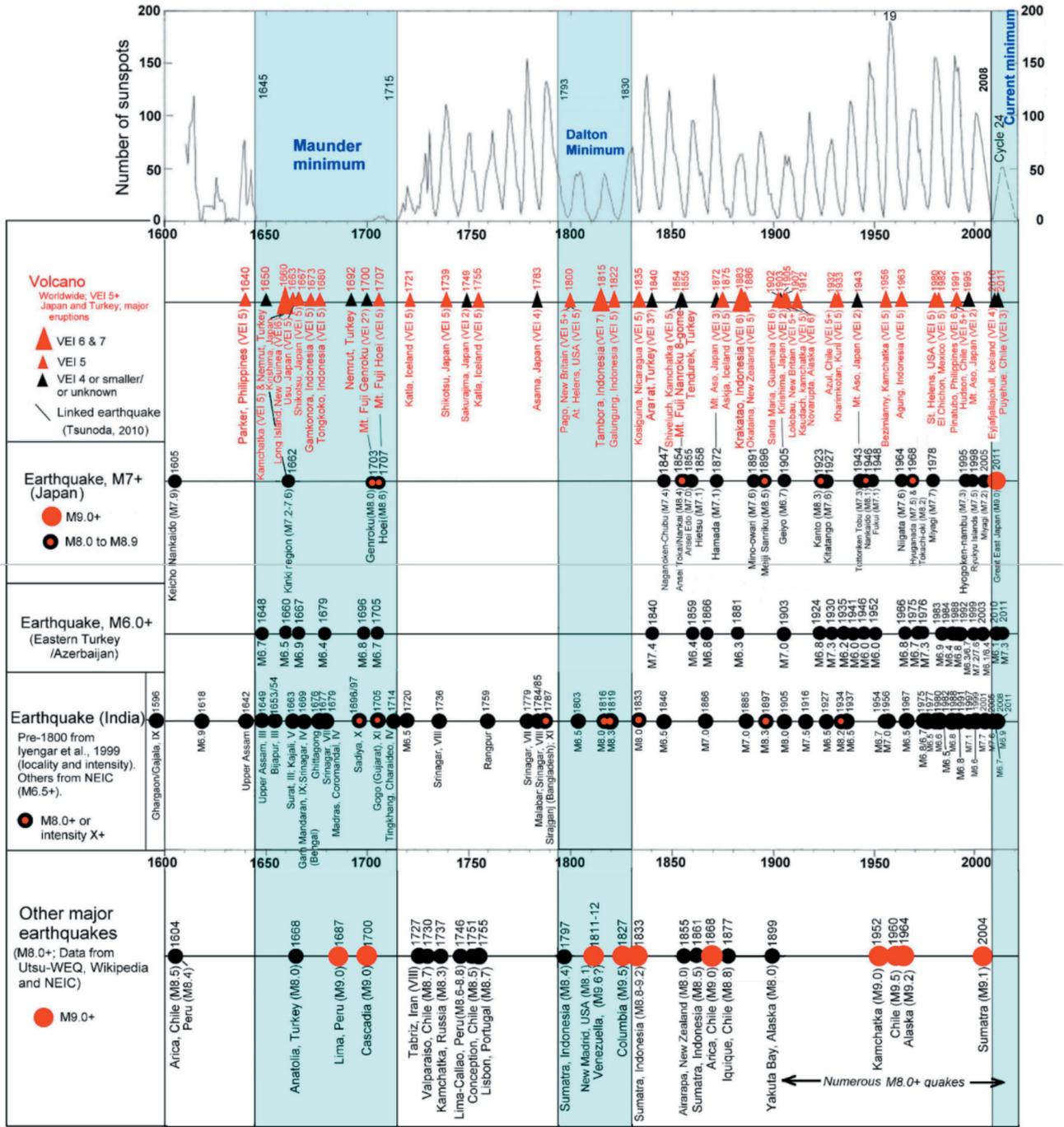


図6 いくつかの地域における1600年以降に発生した主な火山・地震活動表

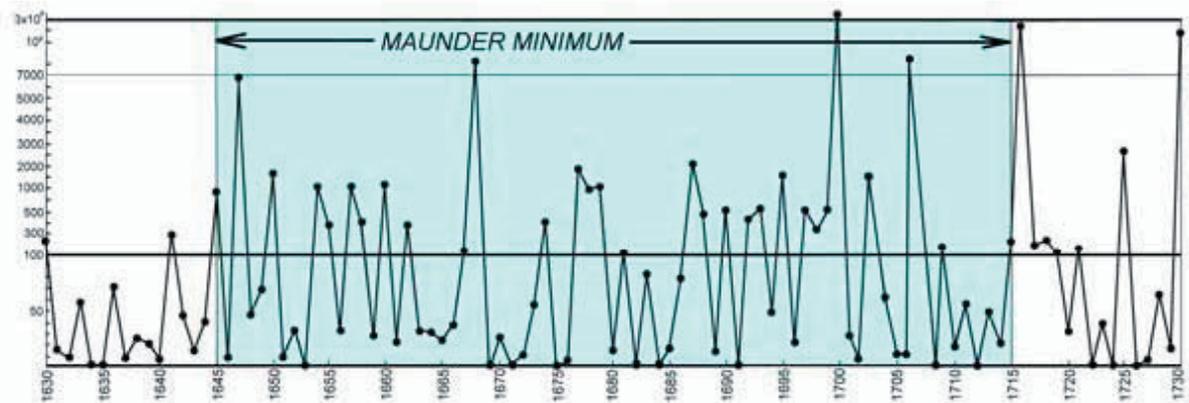


図7 Maunder 極小期における地震エネルギーの変化. 出典はUtsu-WEQ (<http://iisee.kenken.go.jp/cgi-bin/utsu/result.cgi>). 換算については図6の脚注を参照.

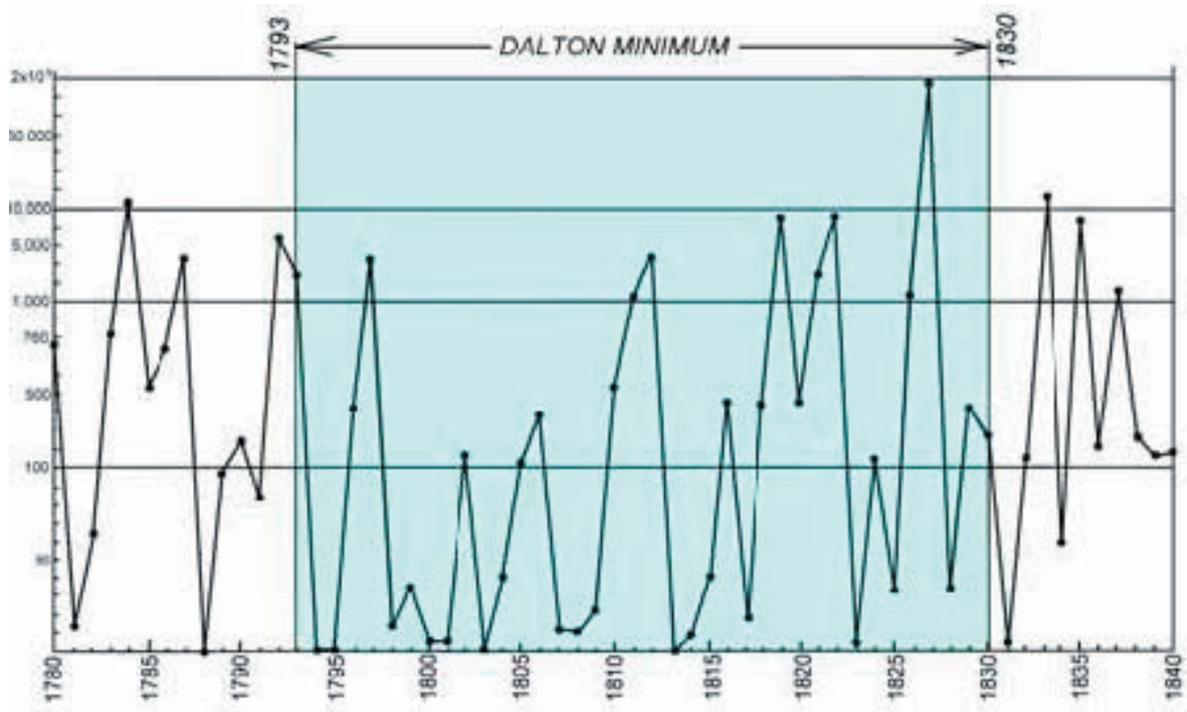


図8 Dalton 極小期における地震エネルギーの変化. 出典は図7と同じ.

25000 個分以上の地震エネルギーにあたる.

Maunder 極小期のはじまりは 1645 年 (Eddy, 1976) とされている. しかし, 最大の地震エネルギーは 1647 年なので, その開始年は 1646 年とした方が良さそうである. 一方, その終わりは 1715 年であるとされる. しかし, Maunder 極小期における最大の地震エネルギーは 1976 年なので, 1976 年をその極小期の最後と考えた方が自然である.

Dalton 極小期

Dalton 極小期における地震エネルギーレベルの変化は図 8 のようになる. 地震エネルギーレベルの変化でみた場合, この極小期のはじまりは, あまりはっきりしない. しかし, 一つの可能性として, カーブは 1796 年から上昇しているのので, 1795 年とすることは考えられる. この極小期の最後については, 急激なレベルダウンが 1828 年にある. この点を考えると, 最後を 1830 年とするよりは, 1828 年と考える方がよい. この年は, 太陽活動が活発化しはじめる年でもある (図 6).

討論

Stothers (1989) は, Simkin ほか (1981) と Newhall and Self (1982) によってコンパイルされた火山年表を幅広く検討した. かれは, 火山噴火と太陽活動とに関するできるだけ多くの文献をまとめた. これに基づいて彼は, 11 年と 80 という 2 つの火山活動停滞期の周期を割り出した; 噴火の発生は, 太陽活動の極小期の近くでは, 他の位相より若干の大きかった. Stothers (1989) と Fairbridge (1980) とはいずれも, Maunder 極小期に, 異常に噴火回数の多いことに注目した; これは, 長期に

わたる太陽活動の極小期の間に, グリーンランドの氷床の掘削資料のうち, 西暦 533 年から 1972 年までの酸性度が異常に高いことで分かったことである (Hammer ほか, 1980).

Casey (2011) の高著で彼は, Dalton 極小期の寒冷気候で人間社会が非常に大きな影響を被ったことを述べ, 20 年から 30 年以内にやってくる, 近未来の寒冷化を警告している. われわれの最近の研究は, 彼のこの結論を支持する結果がでている; つまり, もし, Maunder 極小期がさらに伸びれば, これから数十年以内に, 確実に火山と地震の活動が活発化するであろう.

ここで述べられた, 太陽活動の極小期における造構作用とマグマ活動との活発化は, Choi and Maslov (2010) による地震活動と太陽活動との逆相関関係と良く合う. この問題の処理は急がないといけない. その解決の糸口は Gregori (2002) にある. つまり彼は地球をコンデンサーあるいはバッテリーと考え, 太陽活動が強い時には充電され, 弱い時にはエネルギーが放出されるというものである. しかしながら, この興味深い現象は, 宇宙線の影響やマイクロ波の放射などの研究で, よりはっきりしたイメージにする必要がある.

太陽活動の極小期と地震エネルギーの周期との関係

一般論として, M6.0 地震の 10000 個分に相当する, 非常に強い地震エネルギーピーク (図 6 をふくむ他の公表データ) の周期は約 40 年であり, それより小さいピークのそれは 10 ~ 20 年である (Tsunoda, 2010). これらの周期は太陽活動とは関係なく維持される. しかしながら, もっと詳しく調べると, 太陽活動の弱い時期に, 地震エネルギーのピーク数は増えている. たとえば,

Maunder 極小期の場合がそうである (図 7)。したがって、地球の地震エネルギーレベルは、太陽活動の強い時よりは、弱い時の方が間違いなく高い。また、地震エネルギー総量あるいは VE 過程 (Tsunoda, 2010) という目で見たと時には、Maunder 極小期のはじまりと終わりは非常にはっきりしているが、Dalton 極小期のそれは不明瞭である、ということも考えておく必要がある。

ここで示されたすべてのデータは、2000 年以降の非常に強い火山・地震活動は、Maunder 極小期の早期に対応しているように見える。つまりこの時期は、Casey (2008) の 206 年周期や、Sonnett and Finney (1990) の 361 年周期にあたっていて、太陽活動がはっきりと衰え始めている時期である。

結論

この予備的な論文では、1600 年以降の主な太陽活動の極小期における活発な火山・地震活動について述べた。地球は、Maunder 極小期のような太陽活動の不活発期になっていくため、これからは、異常気象をともなった多くの破壊的な火山活動や地震活動を覚悟しておかなければならない。

謝辞 筆者らは下記の方々にあつく御礼申し上げる：アメリカ航空宇宙局の John Casey 氏にはご高閣と役に立つコメントをいただき、University Colliege の T. E. Girish 氏とインドの Trivandrum 氏、イタリアの Valentino Straser 氏などには文献、David Pratt 氏には文章の体裁、Raax Australia Pty Ltd. の Dongwon Kim 氏にはインドネシアの火山活動記録の編集で、それぞれたいへんお世話になった。

文 献

- Casey, J., 2008. The existence of 'relational cycles' of solar activity on a multi-decadal to centennial scale, as significant models of climate change on Earth. Space and Science Research Center Research Report 1-2008.
- Casey, J., 2010. Correlation of solar activity minimums and large magnitude geophysical events. Space and Science Research Center, Research Report 1-2010 (Preliminary), p. 1-5.
- Casey, J., 2011. Cold Sun. Trafford Publishing, Bloomington, Indiana, USA. 130p.
- Choi, D.R., 2010. Blot's energy transmigration concept applied for forecasting shallow earthquakes: a swarm of strong deep earthquakes in the northern Celebes Sea in July, 2010. NCGT Newsletter, no. 56, p. 75-85.
- Choi, D.R. and Maslov, L., 2010. Earthquakes and solar activity cycles. NCGT Newsletter, no. 57, p. 85-97.
- Eddy, J.A., 1976. The Maunder Minimum. Science, v. 192, no. 4245, p. 1189-1202.
- Fairbridge, R.W., 1980. Prediction of long-term geologic and climatic changes that might affect the isolation of radioactive waste. In, "Underground disposal of radioactive wastes", v. 2, p. 385-405. International Atomic Agency, Vienna.
- 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, geodynamic and climate control, and related items of concern for stars, planets, satellite, 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.
- Hammer, C.U., Clausen, H.B. and Dansgaard, W., 1980. Greenland ice sheet evidence of post-glacial volcanism and its climatic impact. Nature, v. 288, p. 230-235.
- Iyengar, R.N., Sharma, D. and Siddiqui, J.M., 1999. Earthquake history of India in Medieval times. Indian Journal of History of Science, v. 34, no. 3, p. 181-237.
- Simkin, T., Siebert, T., McClelland, L., Bridge, D., Newhall, C. and Latter, J.H., 1981. Volcanoes of the World. 233p., Hutchinson Ross, Stroudsburg, Penn., USA.
- Sonnett, C.P. and Finney, S.A., 1990. The spectrum of radiocarbon. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 30A, p. 413-426.
- Stothers, R.B., 1989. Volcanic eruptions and solar activity. Jour. Geophys. Res., v. 94, no. B12, p. 17,371-17,381.
- Tsunoda, F., 2010. Habits of earthquakes. Part 2. Earthquake corridors in East Asia. NCGT Newsletter, no. 54, p. 45-56.

キンバーライト地質学についてのいくつかの問題点や疑問および放電仮説について SOME PROBLEMS AND QUESTIONS OF KIMBERLITE GEOLOGY AND ELECTRIC DISCHARGE HYPOTHESES

Konstantin K. KHAZANOVITCH-WULFF

Branch of Planetology of Russian Geographical Society, St-Petersburg, Russia ojb37@mail.ru

(宮城 晴耕 [訳])

要旨：地球大気中への小惑星サイズの天体の侵入は、大気の電気攪乱とは比較にならない。それは地球内部の高い電気導電性を持ったゾーンの電場と相互作用をおこない、地殻上部の絶縁破壊という事件をひきおこす。この“任務”を達成するために小惑星状天体は地球へ降り続け、爆発して衝突クレーターをつくる。チューブ状の通路における電気放電によって溶融体が発生し、マントルに近いP-T条件を持つにいたる、そしてそれは数キロメートルの深さでの偽マントル鉱物集合体の形成を引き起こす。このモデルは、キンバーライト地質学の特徴と十分に一致するとともに、多くの疑問（チューブ壁の溶融痕跡、配置の構造的独立、野外におけるキンバーライトパイプのグループ的類似性、マグマの溶融体の証拠の欠如、マントルの岩石の時代錯誤的ゼノリスの存在等々）に答えてくれる。

キーワード：kimberlite, asteroids, electrical discharges, zones of electrical conductivity, pseudomantle minerals.

はじめに

著者の仮説というのは、地質時代を通して小惑星サイズの隕石物体 (MB) が地球大気に進入したり通過したりすると地球の電場の擾乱が起り、それが深部の地質学的プロセスを引き起こし、その結果としてキンバーライトや関連する火成岩の噴出が発生するというものである。

顕生代を通して地球は、最近発見された巨大な隕石痕 (直径 200km に達する) の痕跡によって確認されたような小惑星の衝突に繰り返しさらされていた。このような地球上の大昔の衝突は例外なく、衝突に伴う爆発現象、クレーター形成、爆発にともなう大量の噴出物の大気圏への放出、大気中の過剰物質による気候の一時的寒冷化および大量の生物の消滅などを引き起こす。そのような消滅事件は上部デボン系のフラスニアン統とファメニアン統の間 (3.67 億年前) の境界やペルム系と三畳系の境界 (2.51 億年前) および中生界と新生界の境界 (6500 万年前) などによく研究されている。これらのデータは十分に理解され受け入れられている地質学的学説を形成している。しかしながら、隕石の衝突が、地球表面で観察されている現象を直接的衝突の結果として説明するのに十分であるとする最近の説明がある一方で、すこしずつであるが、宇宙物体の衝突によらず、衝突に先立って発生する地下の効果によって生じることもありうるという考え方もでてきている。

地球表面において流星によって発生する電場

21 世紀世紀のよく知られている流星 (Tunguska, Sikhote-Alin, Chulym および Vitim) を著者が解析したところ、それらは全て地球表面の誘導電場によって発生したものであることがわかった。電子楽器音、地面の下の電磁的励起とそれにとまなわれる地震の影響などは衝突前に流星によって発生した電流と関係していることが示された。これらの効果についてはその後 20 世紀の後半から 21 世紀にかけての間での追加的支持が得られている。

- a) 1947 年、シホターリン隕石の飛行中に、一人の電話オペレーターが接続されていない電話線からの電気ショックを感じた。
- b) 1984 年の Chulym 流星は白熱電球の燃え尽き現象を引き起こした。それは空港における自動滑走路照明の損傷であった。

c) 2002 年の Vitim 流星は二つの居住区 (Mama と Lugovskoye) に影響を与えた。それらは、接続されていない電気システムでの熱された電球の半分からの火の発生や、Mana 居住区における空港フェンス上でのセントエールモの火の発生などである。

このような訳で、電氣的性質やいくつかの流星による表面効果などは体験や観察などから十分確かであるが、科学の本流の中では認められていない。

これらの電氣的効果は直径が 1km 以上の小惑星サイズの物体にまで論理的に広げられ、その場合、地殻中の高導電性のゾーンからの放電をおこなうような 104V/cm を越える高電圧の電流を引き起こす。このような訳で、1970 年代のはじめに述べられたように、キンバーライトパイプが地殻中の放電で生じたようにみえるというアイデア (地質学者の K.M. Alekseevsky や T.T. Nikolaeva および電気物理学者の A.A. Vorob'ev など) はその後も追加的支持を受けている、さらにいうと、それは著者の見解すなわち小惑星状物体の地球大気通過は大気中および地球電場の電気の著しい増加を引き起こし、それによって地殻の放電が開始されるというものである (Khazanovitch-Wulff, 1991, 2007a, 2011)。

火道の地質学的特徴

この仮説は今日まで成因がはっきりしていないかあるいはその成因がひどく矛盾しているような火道の地質学的特徴と相関がある。とりわけキンバーライトフィールドを隕石痕の“車列”とする解釈、それについては著者は異なる大陸で場所と時間が関連している 25 の例 (信頼性についてはいろいろな度合いがあるが) をあげることができる。そのいくつかの例を以下に列記する。

[略号： a) KZ- キンバーライト地域, b) KF- キンバーライトフィールド, c) KP- キンバーライトパイプ, d) DF- 火道フィールド, q) AB- 隕石痕。→ 特定の例の場合における隕石の“車列”の中での次の物件へのベクトル方向]

北アメリカ

1. “38th Parallel” (0-275km) : KF Avon, USA, ミズリー, 79 の火道, 年代 <377Ma → 西へ 125km → AB Crooked Creek, 直径 7km, 地質年代 <320 ± 80Ma → 西へ 100km → AB Decaturville, 直径 6km, 地質年代 <300Ma → 50km 西へ → AB Weaubleau-Osceola, 直径 19km, 地質年

代 310-330Ma.

2. KF Nortris Lake, USA ケンタッキー 2K-body, 地質年代 <286Ma → 北東 35km → AB Middlesboro, USA, ケンタッキー, 直径 6km, 地質年代 <300Ma.
3. KF Elliott County, USA, ケンタッキー, 3KP, abs, 年代 88Ma → 西へ 135km → AB Versailles, USA, ケンタッキー, 直径 1.5km, 地質年代 約 90Ma → 西へ 30km → AB Jephtha Knob, USA, ケンタッキー, 直径 5km, 地質年代 ~ 90Ma.
4. KZ Central Saskatchewan (KF Fort a la Corne, Prince Albert, Candle Lake, Snowden, etc.), Canada, 数十の KP, abs. 年代 95-105Ma → 北東へ 270km → AB Deep Bay, 直径 12km, abs. 年代 99 ± Ma.
5. KF Riley County, USA, カンサス, 13KP, abs. 年代 64-67Ma → 北東へ 320km → AB Manson, USA, アイオワ, 直径 38km, abs. 年代 61.9-73.8Ma.

ブラジル

6. KF Redondao, Fazenda Largo and Bom Jesus, ブラジル, 地質年代 <250Ma → 北東へ 約 100km, AB Santa Marta (Gilbues), 直径 10-12.5km, 地質年代 <65Ma (他の資料では <250Ma).
7. KP Picos, ブラジル, 16KP, 地質年代 <250Ma → 約 80km 北東へ → AB Sao Miguel de Tapuyi (SMT), 直径 20-25km, 地質年代 <D3-C1.

ヨーロッパ

8. DF Urach, ドイツ, Swabian Alb, 直径 40km, 250 火道, abs. 年代 14.7Ma → 北東へ 60km → AB Steinheim Alb, 直径 3.8km, abs. 年代 14.8 ± 0.7Ma → 北東へ 40km → AB Riss, Alb, 直径 24km, abs. 年代 14.8 ± 0.7Ma.
9. KF Kuopio および Kaavi, 東フィンランド, 24KP, abs. 年代 759 ± 15Ma および 756.8 ± 2.1Ma → 南東へ 150km → AB Janisjarvi, Karelia, North Ladoga, 直径 14km, abs. 年代 725 ± 5Ma.
10. Nenokskoe DF, Arhangel'sk 地域, ロシア, 地質年代 D3-C1 → 南東へ 60km → KF Izhmozero → 南東へ 50km → KF Zimniberezhoe, 約 30KP, abs. 年代 約 367Ma → 南東へ 270km → AB? Choshskaya Guba, Arch 地域, 直径 125km, 地質年代 D3?

アジア

11. KZ Marho-Oldenek, 130KP, 7KF (南西から北東): Alakit, Daldyn, Upper-Muna, Chomurdah, 西 Ukukit, 東 Ukukit, Upper Motorchum, Merchimdem これらは北東方向の線状地域にそって分布, abs. 年代, 約 367Ma → 南東へ 50-70km → AB? Olenek Uplift, 直径 約 200km, 地

質年代 D3-C1.

アフリカ

12. DF リビア東部でエジプト国境付近, 数十メートルから 1km のサイズをもった DF, 年代 KZ? → 20km → AB Kebira リビアとエジプト国境, 直径 31km, 地質年代 KZ?
13. DF リビア東部 → ほとんど接している → crater British Petroleum, 直径 2.8km, 地質年代 KZ → 北東へ 80km → crater Oasis, 直径 11.5km, 地質年代 同じ (?).

オーストラリア

14. KF Leonora, オーストラリア西部 Dhilgarn クラトンの東部, 数十の KP, C1 カンブリア紀 (?) → 北東 200km → AB Shoemaker (Teague Ring), 直径 31km, abs. 年代 568 ± 20Ma.
15. DF 西キンバレー, オーストラリア西部, 150 パイプ, abs. 年代 >17.5Ma → 東 50km → AB Goat Peddock, 直径 5.1km, 地質年代 <50Ma.
16. KF 西キンバレー, オーストラリア西部, 約 10 パイプ, 岩脈や知られていない形態の物体, abs. 年代 568 もしくは 752-819 もしくは 804-826Ma → 150km 西 → AB Spider, 直径 13km, 地質年代 >570Ma.

このリストから, これらの例の大部分は信頼できる放射年代に基づいておらず, 本来原因となっている隕石物体の推定された地質年代に基づいていることがはっきりしている (4, 5, 8 のナンバーの例は除く). しかしながら著者の見方では, これらのデータは位置的に準直線上に並んでいる様々の構造を持つ地表面のキンバーライト噴火は隕石様物体が衝突する前に地球大気に入って通過し, その後準線状キンバーライト噴火の街道を生じたようにみえる, まるで衝突の歴史的記録を残すかのように, まるで衝突する隕石物体が地球の表面を通過するとき地球との間に電気的な相互作用を行った結果として生じたように, おそらくこれこそがキンバーライト形成の主要な要因とみなせるのではなかろうか. この推論を支持するものとして, 二つあるいはそれ以上の隕石痕と火道分布域とのつながりがあげられる, 著者の提案した考えの最後尾を形成すると解釈されるものであるが, これは著者の述べた一般的モデルを理解するのに特別重要である (例 1, 3, 8).

フィールドやゾーンの構造的位置

次のようなことが確立している:

- a) キンバーライト (K-) フィールドは基盤やそれを覆っている地層の構造と関係していないこと,
- b) K- フィールドの位置は広域の断層の交差と結びついていないことおよび
- c) K- ゾーンは独立した構造的位置を持ち, 断層のゾーン

とも結びついていないこと。

これらのデータから著者は数多くの結論を提供する：

- a) 割れ目の多いゾーンはK-パイプの形成の結果であり、その地域性が理由ではないこと、
- b) K-パイプの形成とそれにもなされるドーム構造はK-溶融体の貫入力と結びついた典型的過程であること、
- c) 関連するK-フィールドのドーム形構造は、同時の空間的に関連した、キンバーライトマグマ溶融体の貫入の結果形成されたものであること。

このようなわけで、一般にいわれている解釈すなわちK-フィールドとK-ゾーンは構造的に規制されているとする解釈は、地球の地殻のより古い構造と普遍的な空間的関係がないという事実と矛盾している。K-フィールドならびにゾーンは古い構造に関しては実際独立した位置をしめている。とりわけロシア、コラ半島の超苦鉄質アルカリリング岩体は類似の無秩序な構造配置を持っている。

考察

多くの地質学者や地球物理学者たちがK-フィールドやK-ゾーンの下に深部断層、リフトもしくはオーラコゲンなどを見つける努力をしているという事実にもかかわらず、それらの構造的環境はより古い時代の地殻の構造と独立した性格であることがキンバーライト研究者たちによる文献にくわしく述べられている (Khazanovitch-Wulff, 2007)。これらのデータはキンバーライトフィールドが地球外物体による起源をもつという著者の仮説を支持するものである。

したがってキンバーライトの配置やそれらの時間的および空間的つながりが空間的にはじめの隕石痕と結びついていないということは著者の流星仮説を裏付けるものであろう。知られているキンバーライトの構造や火道の形態などもまた放電仮説によって説明できる。

キンバーライト火道形成の適切な説明は第1段階として；構造的な空洞が形成されたとき、キンバーライト火道の形成は下へ渦状に向かって掘るメカニズムが含まれることが知られているにもかかわらずそれは不可能であり、地殻の放電によってこのメカニズムがよく説明できる。結果として生じる激しい放電プラズマは速い速度でズムを生じる (Hissink, 2010)、このようにして典型的クレーターの外観が形成される。著者は小さな場所での地殻溶融メルト（局所的メルト形成）は放電もしくは渦の結果であると推測している。それは上に向かって上昇するが表面にいたる火道を満たすことはクレーターの外見でのキンバーライトマグマ溶融体の著しい欠如から、それがマントル起源によらないことを立証している；さもなくばそれぞれの火道は火山の構造や溶岩を示すはずであり噴出による放出物によって周りを取り囲まれてい

るはずである。しかしキンバーライト地質学においてそのようなものに類似した物質は何も観察されていない。

キンバーライトの溶液に必要な条件 ($T=1200-1300^{\circ}\text{C}$, $P=30-40\text{Kb}$) は、それは静水圧環境で深さ 200-250km に相当するが、またも放電によって達成でき宇宙からくる流星との相互作用結果として地殻の表面付近での地殻溶融がおこる。そのようなわけでキンバーライトは、他の同様の火道の相互作用と同じように地殻の溶融によるとする方がよりよく説明できる。それぞれ個々のキンバーライトパイプの限界の中で、地殻溶融ゾーンは中間のマグマセンターの類似物を代表しているかもしれない。特定フィールドにおけるキンバーライト組成が広い範囲で変化する事を現時点でよく説明できるので、これらの個々の火道の位置は最も高い導電性を持ったゾーンと関連しており、キンバーライトや関係する岩石の構造的な外観をうまく説明できる。しかしながらこれらの過程のメカニズムはいぜんとして謎のままである。

キンバーライトの地殻起源モデルに対する数ある証拠の一つは、キンバーライトの化学組成である、それは疑いもなくこれらの岩石が地殻の堆積岩やもともと堆積岩であったものが変成岩となっているものであることを示している、このことは多くのロシア人研究者（例えば Mikheenko, 1977 ; Sorokhtin et al., 2004）により繰り返し述べられていたことである。それらの説によると、ダイヤモンド構造に含まれる炭素、燐、窒素、大部分の親石元素、炭酸塩、水、そして他の流体などはマントルに由来するものでなく最初の堆積物に由来するものである。このことはキンバーライト中の高い濃度の希土類元素、カリウム/ナトリウム比、トリウム/ウラニウム比、酸素、水素、イオウ、ストロンチウム同位対比やダイヤモンド中の気体-液体包有物 (H_2O , H_2 , CH_4 , CO_2 , CO , N_2 , Ar , C_2 , H_4 および $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) などからも同じように証明される。同じ適応がダイヤモンド結晶中の炭素同位体比にもされている。

ここで提案されているキンバーライト地殻モデルは矛盾も少なくキンバーライト地質学で見られるたくさんの性質をうまく説明できるので最も適していると思われる。しかし例えば Sorokhtin and colleagues (2004) は、いくつかのキンバーライトは堆積岩から形成されたとしつつも、堆積岩は古い時代のサブダクションの結果、後に 200-250km の深さに沈んだものと信じている。これや他のキンバーライト成因のモデルはキンバーライト溶融体の起源についての適切でない説明で苦しんでいる。一方放電仮説は不適切な説明を排除でき、キンバーライトの成因について新しい確固たる地歩を築いている。

著者は以前は電氣的相互作用が行われる深さは 30-40km の地殻とマントルの境界であると推定していた。しかし最近の現代地球物理学の発展によると、著しく低い抵抗を持つ地殻の層 (= 高い導電性) がわずか 10km のところにあることが描き出されたのである、そこにはブラジ

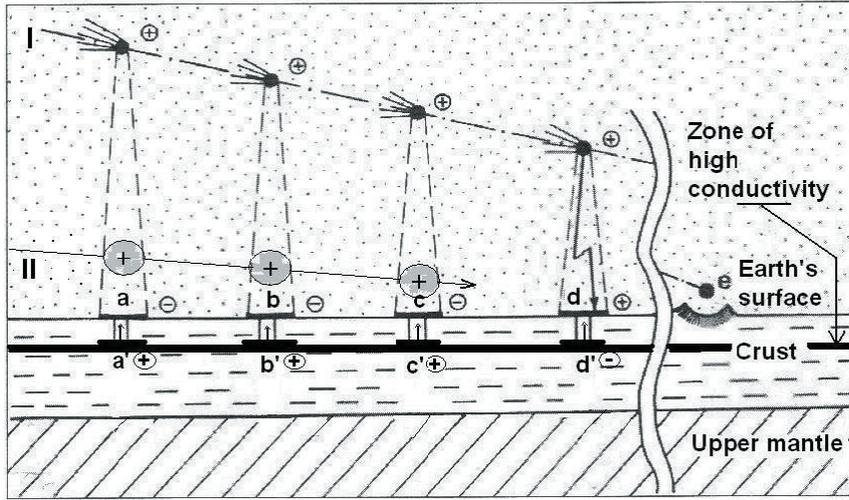


図8 V.Y.Kaznev, 1991 のモデル (Khazanovitch-Wulff, 2011). 著者による修正が加わっている. 深部 (30-40km) に位置する “地殻-マントル” 境界 (モホ面) との相互作用の代わりに, 約 10km の深さの高導電性 (HEC) ゾーンが存在がバルト盾状地, ブラジルやシベリヤ台地の下にあると推定されている, ここに火の玉が地球表面で誘電している. 隕石物体のサイズは 2km (位置 I) と 10km (位置 II); 後者においては隕石物体の地球表面上の高さ, 高導電性ゾーンの深さおよび放電の距離などは隕石物体の直径と等しくなっており, モデルがより妥当であることを示している.

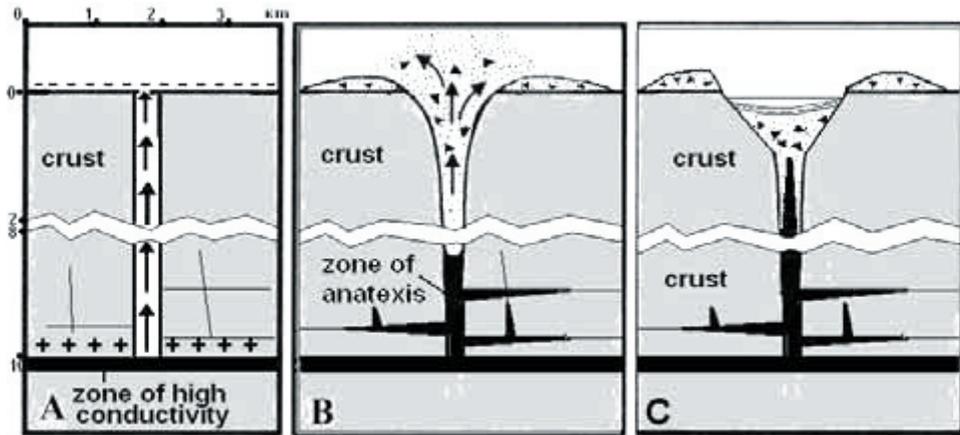


図2 深さ 10km の高導電性ゾーン (HEC) と地球表面との間の放電によって生じた状態. 図では約 2km の長さの直径をもつ火道のもっとも下と上の部分だけ描かれている. 断面図での省略が約 6km ある. この想像図の水平方向のスケールは大きめに誇張してある. A- 地殻上部での放電が起こっている, プラズマに満たされた溶融壁をもつ空洞が形成されている. B- しばらくたって, 底部に溶融体 (地殻溶融ゾーン) が形成される, それがやがて柱を上昇して, 孔隙に岩床 (水平) や岩脈 (垂直) を形成する.

ルやバルチック盾状地およびシベリヤ台地などが含まれている. これらのデータは, 以前 Kemerovo の地球物理学者 V. Ju. Kaznev によって出されていたモデルの本質的修正をもたらした, すなわち放電相互作用の深さを 30-40km から 10km へと減らしたのである. しかしながらこのモデルの物理的-数学的実証は難問として残っている. とりわけ次の疑問を考察する必要がある, すなわち地球表面の流星によって誘導された強力な電場が深部にある高導電性をもつ最も近いゾーンに電流を集め, 表面への放電を引き起こせるか? という問題である.

キンバーライトに対するマントル起源モデルはおびただしい量の矛盾や疑問を抱えている. その主な問題点は以下のようなものである:

a) キンバーライトフィールドやゾーンにおける地殻運動の統制が欠如している条件のもとで, 200-250km の深さからマグマ性溶融体の地表への上昇や貫入のメカニズムを説明することは困難である. マントルで生じた溶融体はその発生場所から地表へ達するまで極端に短い時間

で上がることを必要とする, それはマントルの鉱物相とりわけダイヤモンドなどを地表で固結させるまで保存する必要があるからである. 最小の上昇の遅れでも, それがダイヤモンドを含む場合, キンバーライト溶融体が地表への道すじに沿って上昇するとき (例えばシベリヤ台地もしくは南アフリカカーリーにおける数百メートルもの洪水玄武岩のような厚いドレライト岩床からなる障壁物などがあった場合), マグマだまりを作ることになり, 冷却の割合の低下を招きその結果としてダイヤモンド相から石墨相への転移を起こす, 完全に石墨になったものや部分的に石墨化しているものなどいろいろの程度ものがあるであろうが. しかしながら速い速度で上昇する過程は, 現在は, まったく非現実的であると考えられている. 研究者たちは上部マントルからの溶融体の巨大なスピードを認めるように強いられている, つまり 200-220-180km/h (Sorokhtin et al., 2004); 400km, 下部マントル (Kaminsky et al., 2009), 上昇率は 2 倍になり 360km/h もしくは 100m/s に達する.

b) 同じような関心が溶融体の厳密な量もしくは他のマン

トル起源の火山岩類が欠けていることにも向けられる。キンバーライトの火砕流がないこと、溶岩など他の表面にみられる火山岩相が見あたらないこと、また惑星の表面を形成したり、表面を覆うような流出物を形成したり火山のような地形など形成したりといったマントル起源のマグマの特徴がないことなど別の難問を抱えている。

c) 火道の中にマントルの鉱物や岩石が存在することはキンバーライトがマントル起源であるとする明白な示唆とはならない。昔のマントル岩石が地殻の一部を構成しており、それらはキンバーライトに先立つ数百万年前に貫入していたものであり、その一部がキンバーライト通過時のパイプ形成のときにゼノリス状のサンプルとして持ち上げられたものである、このことは例えば Krushne Gory, チェコ地域における地質学的状態から疑う余地のないほど明らかである (Kopecky, 1971)。

d) キンバーライト形成において、一つには、いろいろな年代の自生鉱物が存在すること、もう一つには、キンバーライト中にマントル岩石や鉱物のなどの他生包有物が存在すること、これらはキンバーライト中の岩石や鉱物とその形成過程で長い時間間隔（しばしば 10 億年あるいはそれ以上）かかっていることを示している。

ダイヤモンド地質学における“キンバーライトマントルモデル”の妥当性は、たくさんの説明できない矛盾を抱えていることからきわめて疑わしくなっている。

キンバーライト形成モデル

形成の状態や関連する地質学的外形などについてこれまでに得られた全ての特徴から、キンバーライトパイプ形成に関する次のようなモデルが提案される。

a) “太陽風”プラズマの中にある太陽系を通過しながら、小惑星サイズの隕石状天体 (MB) は電荷を獲得し、それが地球の磁気圏や地球大気の種類々の導電性のある層に接近するにつれて電荷が増大していく。

b) これらの MB が地球に接近して通過するとき地球の表面上のいわゆる“テンションスポット” (MB が地球大気通過するときこれは MB よりおくられている) に電荷を誘電し、強力で激しく集中した電場 (104V/cm より大き

い) を形成する。

c) この表層部に誘電された電荷は上部地殻（おそらく深さ 10km に達する）高い導電性ゾーンと相互作用をおこさない、この天然のコンデンサーの板の間で絶縁破壊を起こす。この一連の過程の結果、火道の形成やとりわけキンバーライトパイプの形成などが生じる（図 1 と図 2）。

謝辞：著者はこの論文の発表に際して Dr. Louis Hissink よりコメントや援助をいただいたことに謝意を表す。

文献

- Hissink, L., 2010. The electrical origin of kimberlite pipes. <http://www.jennifermarohasy.com>, Jan. 25.
- Kaminskaminsky, F.V., Sablukov, S.M., Sablukova, L.I. and Zakharchenko, O.V., 2009. The fazenda largo off-craton kimberlites of piauí state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 28, p. 288-303.
- Khazanovitch-Wulff, K.K., 1991. Meteorite generated electrical discharges as a possible factor governing the occurrence of diatremes and the metallogeny of kimberlites. *Transactions of the USSR Academy of Sciences, Earth Science section*, v. 320, no. 7, p. 127-131.
- Khazanovitch-Wulff, K.K., 2007a. diatreme' trains of astroblemes or «bolide model» formation of kimberlite pipes. Petrozavodsk: Geomaster, 272p. (in Russian)
- Khazanovitch-Wulff, K.K., 2007b. Geological consequences of large meteoric bodies approaching the Earth - the electrical factor. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 43, p. 18-21. Also *Aig News*, no. 93, August 2008, p. 21-24.
- Khazanovitch-Wulff, K.K., 1971. Asteroids, kimberlites, astroblemes. *Spec. Pub*, 2011, 192p. (in Russian)
- Kopecky, L., 1971. Pirope-bearing diatremes of the Bohemian Massif. - Upper mantle Project Program in Czechoslovakia, 1962-1970. *Geology Final Report*, Praha, p. 18-24.
- Mikheenko, V.I., 1977. About signs for primary-sedimentary nature of the kimberlites. *Reports of AS USSR*, v. 237, no. 5, p. 1179-1182. (in Russian)
- Sorokhtin, O.G., Mitrofanov, F.P. and Sorokhtin, N.O., 2004. *Earth global evolution and diamond's origin*. M.: Nauka, 270p. (in Russian)

完新世の前半における大災害とそれらの可能な力学的な原因 CATASTROPHES IN THE FIRST HALF OF HOLOCENE AND THEIR POSSIBLE DYNAMIC CAUSES

Stanislav A. GRIGORIEV

Institute of History and Archaeology, Chelyabinsk Russia stgrig@mail.ru

(柴 正博 [訳])

要 旨：本ウラル山脈における古代の巨大複合体の研究と、それらの方向性から、我々は強い地震と気候変化の軌跡を発見した。我々はすべてのさまざまな観察が、地軸の傾斜変化の組み合わせと真の極の移動によって引き起こされたという仮説を定式化した。これらのことから、軌跡が世界中の広い範囲に見いだされることから、我々は地球全体の過程について話をする。したがって、氷河のサイクルは地球の軌道の奇行と、地球の黄道面に対するその軸の傾きの変化と、真の極移動のはっきり確定した現象によって引き起こされていると推論される。巨石建築物の方向性から判断して、天文学-力学的な過程は今まで緩やかであるよりむしろ比較的突然であったように思われる。少なくとも説明のいくらかが、膨張している地球の枠組みの中で見いだされるはずであることが仮定される。

キーワード： *megaliths and their orientation, Polar Wander, axial tilt, amphi-Atlantic climatic oscillation, Holocene, earthquakes*

はじめに

一般に、人文科学は自然科学から非常に遠いが、それらの多く、特に考古学は自然科学からの方法と結果を使う。逆の関係はめったに見られない。しかし、古代の巨石の研究が地球物理学と天文学のような分野に関係がある問題を提起する。差し迫った問題のひとつが氷期とそれらの間氷期とのサイクルの原因である。そして、巨石は完新世のより後期に建てられてはいるが、それらの過程のメカニズムについてはそれらの建築様式の情報に保存されている。

古代の地震と気候変化

数年間我々は、Turgoyak 湖 中のヴェラ島（南部ウラル山脈）(図 1) に位置したユニークな複合遺跡を調査した。複合体は多くの古代の巨石建築物と入植地を含んでいた (Grigoriev and Vasina, 2010)。発掘では、ウラル山脈での青銅器時代の最初の段階に対応する紀元前の 4 回目の千年紀中ごろ以降に起きた強い地震の跡を明らかにした。遺跡の残骸は島の中心で最も明らかである。古代人がここで石屋根のシェルターの下に住んでいた；けれども屋根はつぶれてしまい、そしてそれは大きい花崗



図 1 ヴェラ島の考古遺跡の局地的な位置を示すウラル山脈の地図

岩の板の倒壊と新石器時代と青銅器時代の陶磁器 (図 2) の層準を覆っているブロックによって特徴づけられる。

ヴェラ島の巨石 3 の建造はまだ完了していなかった。その壁は大量の巨礫から作られていたが、それらの基礎はすでに水平の位置から現在強く傾いていて、そしてその強い圧力の結果、それらは外側からくずされて大規模に粉々になっていた (図 3)。



図 2 新石器時代の石造りシェルターをつぶされた屋根を写した写真。陥没した屋根は新石器時代と青銅時代の人工作で文化層の中に落ちていた。



図 3 巨石 3 の場所 (上の図) と断面 (下の図) この場所における傾いている (回転されている) 巨礫を示す。赤い矢印は強力な圧力の結果として粉々になったいくつかの打ち切られた岩石を示す。粉々になったものは壊れるべきである所で壊れた一すなわち、それらは急傾斜に傾いた巨礫の元あった場所に対応している。2 つの壊れた岩は、おそらく物理的に接続されていて、地震を示している。

石器と陶磁器が、もうひとつの青銅時代の入植地—ヴェラ島7の基礎をなしている花崗岩板の構造的なひびの中から発見された。もし、ひびが古代の占領より先に起こっていたならば、それらは土壌によって満たされ、そして陶磁器はそれらの中に置かれるはずがない。それ故、構造的なひびが新石器時代の占領の後に形成されたと結論される。

最も興味深い結果がヴェラ島4の入植地の発掘から得られた—そこは、砂と石の浜の高まりが構成する湖岸に位置する。浜の高まりは多くのウラルの湖で典型的な地形的な特徴である；それらは氷河活動（通常考えとして）の結果として通常形成されるが、それらの発達は磯波によって変化する。

高まりの外側面上をおおう最初の土壌は、この場所が長い時間水に浸かっていたことを示唆する葉理のある浜の堆積物である。この氾濫原の上部は鉄の水酸化物で飽和されていて、それは嵐のない暖かい状態で通常存在する鉱物である。これらの堆積は、おそらく局所的な入植地のずっと以前に形成されたものだろう。不幸にも、湖全体の研究が欠けているが、湖南部のコア採取で9.5mの深さにBoreal期の氾濫原土壌があることが明らかになった（Deryagin, 2009）。更新世後に、湖水面の緩やかな上昇と関連がある氾濫原での堆積作用が起った。上昇する水はおそらく、現在のヴェラ島における海岸の水準を超え、少なくともその一部は、葉理のある堆積物を堆積させるのに必要な空間を形成する結果となった。

湖の水面の重要な変動がAtlantic期に起こったと推論される。それで、水中調査¹では、かつて水位が現在のレベルより3m低かったことを実証した。なぜならば、我々は巨石を2mの深さにおいて、そして採石場を3mの深さにおいて発見したからである。水面が下がった時に、新石器時代の陶磁器をとまなう灰色の文化層がこの場所に堆積し、青銅時代の入植地がすぐにそれに続いた。その後、青銅時代になると、水位は再び上昇した。そして、大量の水が鉄の水酸化物の筋と大きい石を含む粗粒砂か

らなる最初の浜の高まり（図4）を押した。高まりの外側は—南と湖の方に向いていて、そしてより多くの太陽熱を受けて—鉄の水酸化物で飽和されている。この観察は、極度の冷却によって形成された層を持つ比較的厚い氷の動きと、それに引き続く温度の急激な増加なしに解釈することが困難に思われる。厚い氷の塊が最初の浜の高まりを押したと考えられるが、もし温度が15°Cに増加したときに1kmごとの氷の線形膨張がたった3/4mであるという点で問題がなくはない；そのために単純な膨張モデルがこのような高まりの形成を説明するには不十分に思われる。

高まりに作用している力は非常に強く、10～15トンの花崗岩の塊が移動した。岩だらけの層の外側境界は、すでに押しつぶされていたが、強い機械力が働いていたことを示す粉々にされた小片からできている。

次の発達ステージにおいて、2番目の高まりは—それは細粒の白い浜の砂でできているが—最初の高まりの外側を覆った。これは、湖の水面が上昇して最初の高まりを形成した後に、波の動きで最初の高まりの前に白い浜の砂がつけられたことを意味する。しかし、この2番目の高まりの形成もまた氷の動きの結果であり、なぜならばいくつかの大きな石がここでもまた見られるからである。全般的に見て、我々は温度の急激な増加を挟む2つの重要な寒冷期があったという結論に達する。しかし、気候の効果にはおそらく地震のような付加的な要因も伴ったと思われる。高まりの中とそれの下で、新石器時代と青銅器時代の人工物が見いだされるが、しかし高まりはもうひとつの青銅器時代の層によって覆われる。

非常に興味深い気候の証拠が、高まり²の上部における8つの調査溝からの花粉学的なデータから明らかにされた。3つの調査溝の、高まりの下の層からと最下部から、Atlantic期の前半（6000～4500 BP）の温かくて乾燥した状態が示された。最上部での3つの調査溝ではAtlantic期の後半期（6000～4500 BP）の暖かく湿った状態が明確になった。そして最後の最上部に位置する2

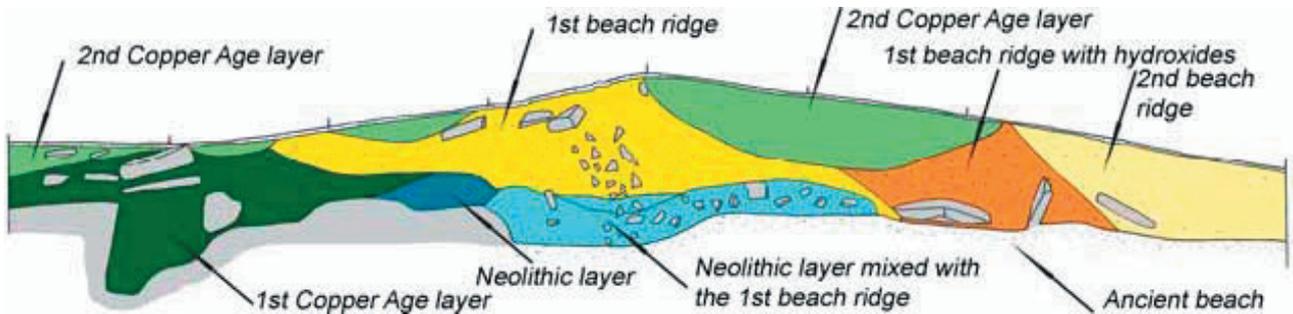


図4 図はヴェラ島4の入植地の層序を示す。水準の降下後に新石器時代の層の局所的な堆積があり、その上に青銅器時代における入植地の最初の層が続く。それで最初の高まりが形成され、考古学的な層を覆って、また部分的に取って代わった。ついに、浜の高まりは青銅器時代の2番目の層によって切られるが、2番目の浜の高まりをもったこの層は層序学的な相互関係は説明できない。しかし、最初の高まりは青銅器時代のものである。

¹ この仕事はダイビングクラブ“Argonaut”のI. A. Fomin部長によって組織化された。水中の物体は考古学者 V. G. Kotov と S. A. Grigoriev によって研究された。
² 花粉分析と結論については、読者は N. K. Panova and T. G. Antipina, 動植物環境研究所 (Ekaterinburg) を参照。

つの調査溝では、現在あるいは亜 Boreal 期のそれに類似した気候状態が示された。高まりからの調査溝が前の期間に堆積した花粉を含んでいなければならないであろうことは理解される。言い替えれば、高まりの形成は Atlantic 期と亜 Boreal 期の間の遷移的な期間の内で行った。同じく他のウラルの湖で見いだされる気候変化は、湖水の水準の変化と関連づけられ、地球全体の原因を持つ可能性が高い。

厚さおよそ 15～40cm の何も遺物の含まれない堆積層は、砂と岩の中礫から構成されている。そして新石器時代と青銅時代の水準の間に位置し、Great Miassovo 湖に沿った Korablik の入植地の上で発見された。Chebarkul 湖の岸の上に、砂あるいは粘土からなる同じ何も遺物の含まれない層準が、Chebarkul 4 と Irtyash 湖の Shatanov 1 の古代の入植地に発見された (Krizhevskaya, 1977, p. 21, 23 and 43-45)。

Plotnikov (1978, p. 15-34) は、古代の Ilmen 湖における泥炭沼の底が今日の湖の底より 6m 高く出現するという事実から、この地域におよそ 7000 年前に起こった大規模な地震の証拠を論じた。古代の地震の跡が Great Terenkul と Chebarkul 湖に接近して位置していることが Deryagin and Zakharov (Deryagin による私信, 2009) によって報告された。

水準の主要な増加は上に論じられた地域だけに限られていない。それで、Berezki (南ウラル山脈に近い Magnitogorsk の Bannoe 湖) の入植地の上に、新石器時代の層が大規模な浜の高まりによって覆われ、青銅時代の住居によって切られている (Matyushin, 1982, p. 55-61)。上に論じられた地質構造の変動の証拠に加えて、Ufimskoe 湖 (南のウラル山脈) の浜の高まりは断層で切れ、数 m 変移させられている (Deryagin, 2009)。

上記の証拠は紀元前 4 回目の千年紀の間に重要な地震活動がウラル山脈において起きたことを明示している；それは水準（とこれの前の振動）の主要な増加、浜の高まりの形成と気候変化を伴っている。しかし、もしヴェラ島の巨石 3 の重いブロックが強い地震によって乱されたなら、同じような石片によって構築された花崗岩の板によって覆われた巨石 1 と 2 の遺跡が比較的損なわれずにどのようにあり続けたのだろうか。最も可能性のあるのは、後者の構築物は地質構造事件の後に構築されたことである。

巨石建築物と天文考古学

世界のさまざまな地域の多くの巨石がいくつかの天空の物体、主に太陽と月に関係していたことは古くから確証されている事実である。それらの方位は、ある特定の事象に向けられた：昼夜平分時（秋分と春分）または冬至と夏至で日の出と日没、特定の月の位相など。そのため、上に述べたヴェラ島の 1 と 2 の巨石 (図 5) は、の夕日

の光線が西では頂点の下を照らして、東壁で特定領域を照らすように方向づけられている。このような例は、その初期段階ではないが、青銅時代の巨石 1 で発見された。

ヴェラ島 9 の宗教的な場所に、昼夜平分時と至における日の出への方向を示すいくつかの立石—高いまっすぐな記念碑のような石がある。けれども、現在の日の出とのずれが昼夜平分時では時計回りに 9° で、冬至では時計回りにおよそ 13° である (図 6)。

それは、ヴェラ島 4 における入植地の上にある浜の高まりの形成に先行する、新石器時代から青銅時代への移行期に対応する材料として注目に値する。そのため、島の状態に基づいて我々は気候変化または日没と日の出の点が置き換わったようなことも含めて、自然の大災害があったかもしれないと結論づけた。したがって、問題は地球の表面と関連した極の変化に関する。しかし、もしそうであるなら、地球全体の力学的な過程であったはずで、これは地球の広範囲にわたる場所で証拠が発見されるべきである。実際、新石器時代と青銅時代には多くの自然の大災害が地球全体で起きた；それらの出来事のリストは、スタンフォード大ウェブサイトを参照 (www.stanford.edu/~meehan/donnellyr/3000bc.html)。ロシアのカレリアで、青銅時代の入植地のいくつかの発掘で紀元前 6 番目と 3 番目の千年紀（目盛りが付けられていない）に強い地震の跡が明らかになった (Zhuravlev, 1993)。揺れている重要な土地の間に、Carnac (ブルターニュ, フランス) での Le Grand 立石がある。それは長さ 21m・重さ 300 トンの建築物であり、倒れて、現在は 4 つの小片に割れて横たわっている (Thom and Thom, 1978, p. 5-6)。強い構造的な変動の証拠は意義深い。

ブルターニュのいくつかの巨石は現在島の上だけにあるが、元来それらは大陸沿岸の設定を持っていた (Daniel, 1960, p. 73)。浅い沿岸の水準あるいは水面下に位置して同じく巨石がある。考古学者は、このような観察を氷河時代の終わりの後に海水面が上昇したことを示すと説明する。しかし、巨石は 5 番目の千年紀の後半にこの地



図 5 巨石 2 - 太陽に向かって開いている。

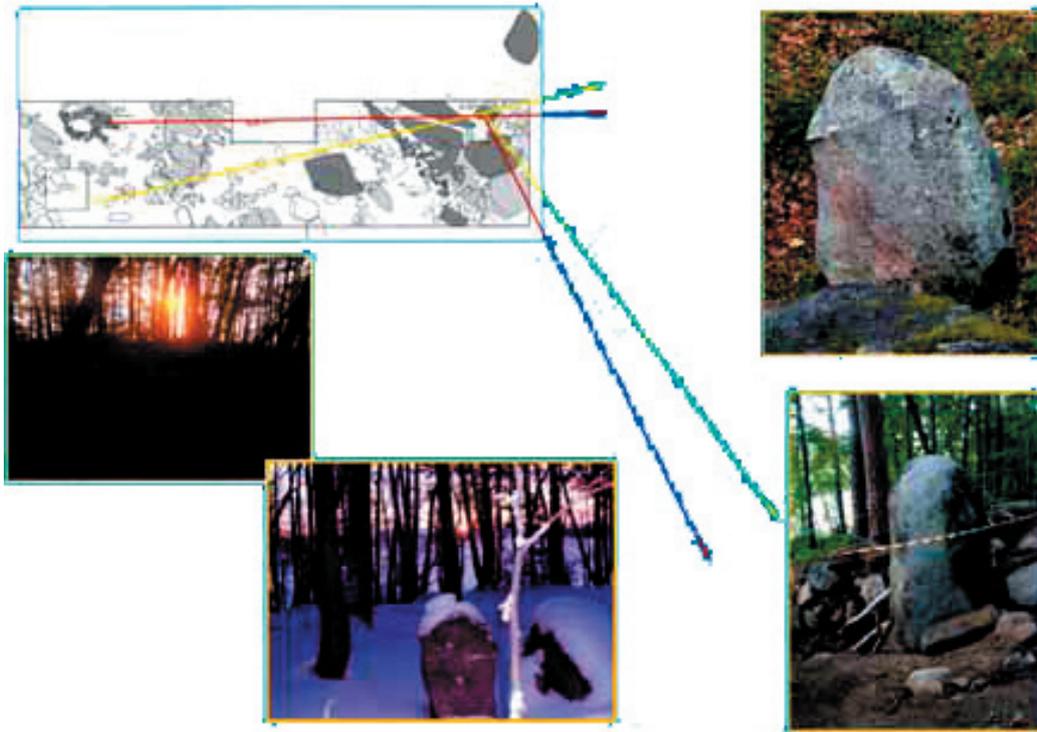


図 6 ヴェラ島 9 の宗教的な場所に関する立石の方位. 赤い矢印が立石間の方向を示す; 黄色の矢印が昼夜平分時と冬至における日の出の地点の方向を示す. 立石間の線は日の出の現在の地点から外れていて一昼夜平分時には時計回りに 13° と冬至で時計回りの 9° である.

域に現れた (Scarre et al., 2003, p. 80). 我々はヴェラ島における水準の上昇が地震の出来事と同時代であったと考えている. そして, 最もおそらく, ブルターニュでの観察もまた同じく地質構造の活動と関係することが, 最も可能性がある一すなわち, それは局地的あるいは地球全体の海水準の海退を暗示している.

上述のとおり, 昼夜平分時と至においての日没と日の出の地点を示す古代の宗教的物体の方位によって, 巨石の建造物が宗教的現象の明確な表明であるということが, 多くの調査者によって報告されている. この研究分野における Alexander Thom と彼の仲間による仕事は最も立派である. しかし, 1) これらの古代の「観測所」が, 本当に, Thom の推論のように, 古代の月食を予測することにおいて正確に観察することが可能だったのか, あるいは 2) それらが聖礼目的を供する太陽と月の周期だけを表わしていたかどうかという疑問が生じる. けれど, 多くの科学者は Thom の太陽かかわる物体のすべてがイギリス島の太陽の方位角に近く, 10° も離れていないことを指摘して, 巨石構造を太陽活動周期と結び付けることに疑いを持っていないように思われる (Schlosser and Cierny, 1996, p. 59 ; Patrick, 1981, p. 215). 古代の巨石建造物の方向性についての強い伝統があったように思われるが, 局所的な地域の中でさえ規則の自差は非常に普通である一建築業者は容易に伝統を無視する. 普通の行動からのこの自差は, 歳差運動の効果が些細であるために歳差運動の過程によって説明することができない; 今日の Munster での夏至の日没の方位角は $23^\circ 44'$ で, 紀元前 3000 年にはそれは $24^\circ 02'$ と推測される.

すでに紀元前 4600 年の, 中央ヨーロッパの環状の溝 (いわゆる rondels) が太陽と月の方位と一現代位置に対応

して関係していたことが普通の見解である. 時々数 100m 以上で最高 5m の深さに掘られた巨大な建築物があり; いくつかの発掘において, それらの方位がすでに不明確な理由で修正されていたことが明らかになっている. それは, 古代の建築業者が実際の天文学の関係を誤っていて, 仕事が完成した後に太陽が不幸にも地平線のもう 1 つの地点から昇ったことが明確になった, と考えられる. もう 1 つの説明は, 何百年もの間に祭日に変化し, それによって構築物の調整が必要になった (Schlosser and Cierny, 1996, p. 77). しかし, 日没と日の出の地点は非常に単純な初期の確定であり, これらの巨大な構築物を継続して建造してきたことと同様に, 基準を誤るという不注意は疑わしい. また, 古代においては主に太陽暦に従っていたので, 祭日の日付が変化するというのは, 良い説明ではない. したがって, 最も可能性のある説明は, 日没と日の出の地点が変化したことだと思われる.

初期の場所に関する真の方位角からの自差の例は, 中期紀元前 5 回目の千年紀の有名な T・etice-Kyovice の環状溝である (図 7). この建築物の門の自差は反時計回りにおよそ 10° である (Weber, 1986, p. 317). もし我々が実際にすべての建築物を時計回りに 10° 回すなら, それはウラル山脈における古代の建造物の自差と正反対であるが一門が正確に基本的な地点に対応するだろう.

オランダと北ドイツの巨石墓の方位にも同じく問題がある. 通常これらの構築物の入口は南に向けられるが, 真南から東へ $14 \sim 19^\circ$ 自差していることは非常に典型的である. このような類似性を特定の地形によって説明されることはできない. なぜなら, これらすべての国は平らである. 古代人はどんな仮説的な線一太陽に向かう線の

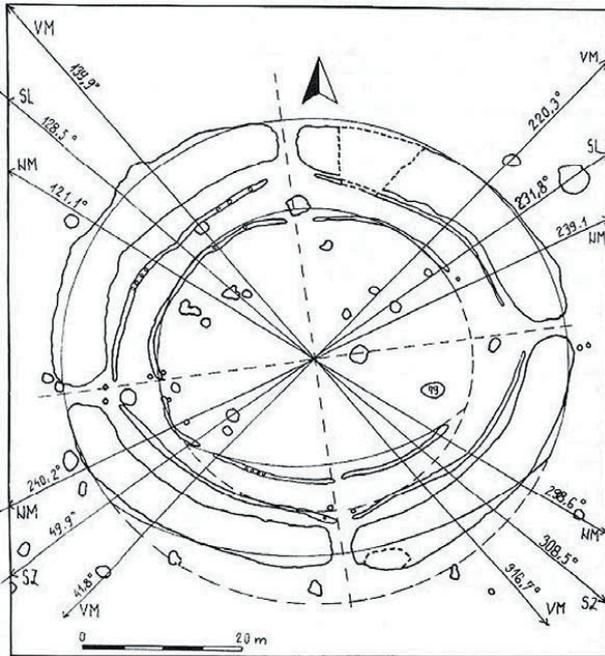


図7 T. etice-Kyovice の環状石の方位 (Weber, 1986, Abb. 5). もし我々がおよそ建築物を時計回りに10°回すなら、門方位の自差が現代基本的な点と一致するであろう。

方向に付加する遠い地域から借りてきた線、に対して宗教的な建築物を建てることを明らかに指示しなかった。この説明はもちろん非常に不確かである。しかし、同じく北ドイツとオランダの巨石建築物が真の方位角からの反時計回りの方位の自差を持っていることは注目に値する。

イギリスにおいても同じ傾向がある。そこで、Alexander Thom は多くの巨石の方位が太陽や月と関連しているのではなく、そして；多分、それらはいずれかの星へ向けられていたのか？ということを示した。何百という巨石とそれらの自差についての Thom による広範囲の仕事から、彼は統計学的に自差が個別のグループに分かれることを示した。昼夜平分時あるいは至と関係したグループに加えて、明らかにどんな天文学的重要性を統計学的にもたない明瞭なグループがあった。しかし、星の方位に関する問題が提起された理由は、それらが夜の時間を決定することの必要があったかもしれないと考えられたからである。

この問題を明確化する試みにおいて、Thom は昼夜平分時と至の間に4つの期間を加えて1年を16の部分（いわゆる「巨石の月」）に分けるために必要な追加の方位を示唆した (Thom, 1967, p. 103-113)。しかし、巨石の方向的グループのいくつかはケルト人の祭日に対応するが、それらは典型的な古代社会の太陽暦の祭日とは異なっている。説明が何であったとしても、疑わしい星の方向づけを持ったいくつかの古代の構築物の炭素14年代測定によれば、それらが太陽かあるいは月と関係を

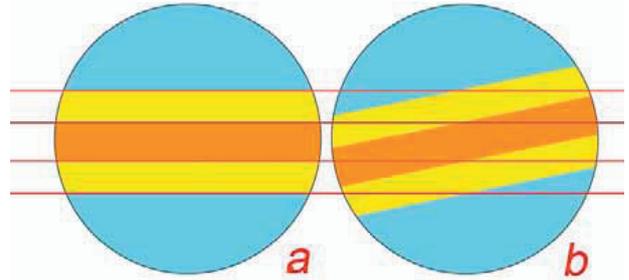


図8 更新世後の地理的な分帯の変化を示す：a 現在，b 更新世。地理的な極（極の迷走）あるいは回転軸の相対的な変化に応じた地球の傾斜変化，地理的 / 気候帯の境界は本質的に変化する。

持っているより古いことが示唆された (Thom and Thom, 1978, p. 179)。

何人かの著者は、巨石の天文学の方位が紀元前3回目の千年紀の後半にだけ現われたと信じている (Startnin and Bradley, 1981, p. 332) のに対して、他の人たちは早期の方位は紀元前2回目の千年紀前期から始まったと考えている (Thom and Thom, 1978, p. 178)。けれど、Stonehenge (紀元前3100年) や Newgrange (紀元前3250年)³ のような太陽方位の初期の巨石がある。これは回転極の相対的な位置の変化が紀元前4番目から3番目の千年紀に起きたことを示すかもしれない。真の極移動の事件を暗示している。地球の周期的な変化の空間方位である (Gold, 1955 を参照) と理解される、このような地球の回転軸の不安定性は、ヴェラ島からの証拠と矛盾しないだろう。代わりに、地球軸の傾きの変化が完全に除外されることができない。

最終氷期間に地球全体の平均の温度は今より5°低く、そして氷床では12~14°も低かった。しかし、熱帯地方では温度は今と同じかあるいは高かったように思われる。驚くべきことに、赤道地帯の大洋における異なった地域の温度は今と同じかあるいは高く、そしてより低かった (Burroughs, 2005, p. 41)。説明は非常に単純である。1) 地球軸が別の角度になったかあるいは 2) 極の場所が別になったことの一つかによって、別の赤道地帯の大部分が熱帯地方になり、熱帯地域の一部の場所が赤道の近くになったのだろう (図8)。

後期更新世の最大氷期には、東半球の氷床はスカンジナビア、バルト地域と北イギリスにだけに限られたが、他方西半球では Laurentian 氷床はさらに南の北緯40°にまで拡張した。そのため、北半球の氷床はそれらの分布が非常に非対称である。もし我々が地理的な北極をグリーンランド北西部かあるいは北極カナダに置いたら、氷床はいっそう「通常の」分布になるだろう (図9)。北米の Laurentian 氷床の融解はヨーロッパの氷床の融解より遅れて起こったこと (Lamb 1982, p. 106-108) も

³ New Grange の場合にそれは同じく反時計回りの自差の状態だと思われる、なぜならば太陽光線が冬至の1週間前と1週間後に巨石を照らすという有名な事実の再考がそれらを実証した。

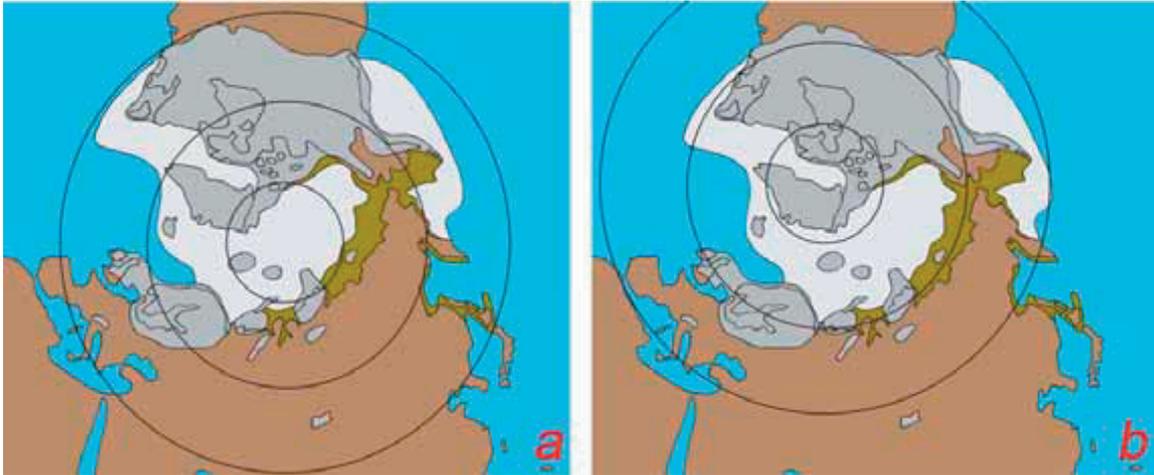


図 9a - 現在の地理的な座標における更新世末期の最大氷床. 北米大陸にある大陸氷床と一団のユーラシアよりも南に存在することに注意を払う (Butzer 1964, 図 9). b- グリーンランド北西部に極があるとときの氷床と地理的な緯度の分布 - 北半球の氷床がもっと理解可能な分布を達成した.

また顕著である. 何年も前に, 時代にアクセス可能な材料を集めていた Ch. Hapgood が, この状況に注意を払って, そして最終氷期に相対的な地理的な極がハドソン湾の中央部あったことを提案した (Hapgood, 1970, p. 124). Hapgood によれば, 極はおよそ 80,000 年前にユーコンの周りにあり, そしておよそ 55,000 年前にはグリーンランドの東に位置していた. グリーンランド北西部の我々の極の場所は Hapgood の提案を否定しない. 本論文で我々は, 氷期の終わりとして完新世, そして時代の進行とともに極が北に移動して, ハドソン湾地域から当然北極のカナダ/グリーンランド北西部を通ったことを論じている. Hapgood によって提案された極の軌跡について (同上), 同じく他の証拠があることを強調することは重要である.

後期鮮新世から第四紀の間に, 氷期が繰り返した出来事として起き; 最初期の出来事の跡が, Huronian で, それは 230 万年前ごろに起きた. 南極大陸の氷床の調査では, 最後の 736,000 年間で 8 つの氷期を明らかにした. 古地磁気学的なデータ (Irving, 1956; Wesson, 1970; Tarling, 1978) の従来の解釈に従って, 古地理学的な極の時代的な変化が, 先カンブリア代と, 中新世, 更新世と第四紀の時代にあったことが提案された. しかし, 同じ著者らによれば, 極はある特定の陸塊についてその位置を移動させただけでなく, 同じくこれらの陸塊と相互に関連して動いた. このような動きの原因は物理的でまた天文学的な性質によると思われる. その一面として, 完新世で我々が見るものは, そのような地磁気-天文学過程の小規模なジャッキー (びくびく動く) 事象だけだろう. 氷期の変動と軸の傾きの変化-たとえば黄道の変動-と, 真の極移動の出来事は自然と気候変化をもたらす. たとえば, 軸の傾斜は $22.1^{\circ} \sim 24.5^{\circ}$ の間に変化し, それが減少した場合夏と冬の温度較差が減少して氷期が次第に開始すると予想される (Gribbin, 1978, p. 140); 逆の過程の間では, 氷床が急速に融けることが予想される. 全般的に見て, 地磁気-天文学的な過程のわずかな変化でさえ, 地質学的大災害を引き起こしたかもしれない.

ない.

なぜならば, 地球の楕円体の形は, 軸の傾きそして/あるいは地球の空間方位の変化 (真の極の移動) によって, 赤道の膨らみがリセットされて, 軟流圏の静水圧の増加と同様に地殻内に強い地質構造の応力を自然ともたらずであろう. その結果は, 地球中に広がった多くの局地的な自然の大災害であろう-たとえば氷期と間氷期間の移行期に起こったように. スマトラの超火山 Toba の噴火は, 71,000 年前に起きた地球全体の冷却と同時に起こった. その事件の間に, 地球全体の温度が平均の 5° 低下し, しかし高緯度では夏季の気温がおよそ 15° 低下したかもしれない (Burroughs, 2005). その逆の現象 (氷期と地球と関連した地球の軸の変化によって導かれて, 冷却が原因となった超火山の噴火) に代わって, この過程の原因と効果がこの連続を持つことを強調することは必要である. 強大な火山活動の事件による冷却効果は短い持続時間 (1 ~ 3 年) である; 火山塵の大部分排出は, 地球のより大きい地域に温度減少を導くかもしれない. しかし, 二酸化炭素やメタンと水蒸気の火山による排出はよりいっそう長続きする温室効果をもたらすことが予想される. そのため, 火山活動は氷期と因果関係がある可能性が高くない (Tarling, 1978). このほかに, 地球上での氷期が他のメカニズムを我々に探させるような周期的な変動を持っている. 同様に, 超火山の噴火が極の重要性やあるいは黄道の変化に取って代わることは想像することが難しい. しかし, より暖かい状態に交代する急激で短い冷却期における火山の効果は興味深い. ヴェラ島の上の高まりにみられる 2 段階形成が同じような性質の冷却によって引き起こされたことはありそうではないことではない.

結論

Milankovitch (1930) は, 氷期の周期が黄道面の軸の傾斜と軌道の奇行によって起こされたという仮説を定式化した. これは今日最も受け入れられた見方であるが,

Milankovitch 理論は氷河時代の非常に稀な事象を説明することができない；たとえば、第三紀最末期 (270 万年前) とヘルシニアンの間には極氷の証拠がない。実際、他の理論では氷期の原因が銀河系塵雲の中を地球が通過したことに関連していることを示唆している (McCrea, 1975)。上に提出された証拠は、Milankovitch 仮説と矛盾しない—考古学的観察が地球の軸傾斜の変化と関係がある限りにおいて。しかし、これらの変化は比較的小さいそして活動的な運動は明らかに一連のものであった。多分、古代の巨石の方位に関する将来の研究は、前期と中期完新世のこの過程の力学を理解できることを可能にするだろう。けれども、今でさえ我々はいくつかの結論を引き出すかもしれない。

パラドックスは氷期後に極の漂流がはっきりと中断したように思われることである—それは巨石方位の Thom の統計上のグループで示されるように。同じく、我々が Toba の噴火のような自然な大災害から知るように、この過程が軌道の奇行の単純な変化として記述されることはできない—地球と真の極の迷走をリセットする空間のように、ふるまう可能性が高い。

地理的な極の位置変化の間に、たとえば種々の巨石建設の間の天文学的な特徴において、示されることができるよう、多くの地域がそれらの緯度を変えた；したがって、ヴェラ島 9 と Turgoyak 湖の地域の宗教的な場所の立石がいつそう北への位置を達したように思われる。最初の緯度は 48.5°N であったが、緯度の位置が変わった後には 55°N になった—それは昼夜平分時と冬至の日の出における方向の角度の相違から判定された。上で論じられたように、早期の宗教的な場所における立石の方位の自差は、日の出の現在の地点と比較して、昼夜平分時で時計回りに 13° で、冬至においては時計回りにおよそ 9° である。巨石 2 の方向は現状に対応する。この相違 (4°) は非常に注目に値する。なぜならそれはより高緯度においてとても大きいからである。緯度の変化の以前にはその地域は南⁴に さらに 400km 以上遠くに位置していた。そして、その地域のこの北向きの緯度の移動は Atlantic 期と亜 Boreal 段階の期間の暖かい条件からの返還を反映している。非常に単純な計算⁵によって、極が紀元前 4 回目の千年紀の中部 (ヴェラ島 9) において Chukchi 半島より近くのどこかにあったことが明らかになった。この地点はヴェラ島 9 の立石によって設定された線によって達成されることができ。極への距離は、こ

の場所がいつそう南へ位置したことを考慮に入れると増加する。紀元前 4 回目の千年紀のこの地点と最終氷期の間の極の間のどこかが、ヨーロッパの新石器と巨石の建造の開始に対応する極であった。これは北欧にける多くの巨石の自差を説明する—すなわち、もう 1 つの方向を持ち、そして西ユーラシアにおける Atlantic 期の暖かい気候の条件の下で作られたということである。ガス/液体に富む岩流圏における静水圧の増加は揮発成分による火山活動 (Storetvedt, 2011) を引き起こした。そして、(上で論じられた) 温度の長期的増加の効果は温室状態をもたらした。このような説明は Hapgood (1970) によって実際に提案された。その時期の最終の相対的な極地の (その現在の場所への) 移動は、亜 Boreal 期のより寒い条件の後に起こった (図 10)。

論議のための問題

Milankovitch 仮説によって示唆されるように、ここで説明された極移動は 2.4° の自差に対応しない。これは考えられた極の変化が何か他の因果関係を持つ可能性が高いことを意味する。変化している軸の傾きと極の漂流

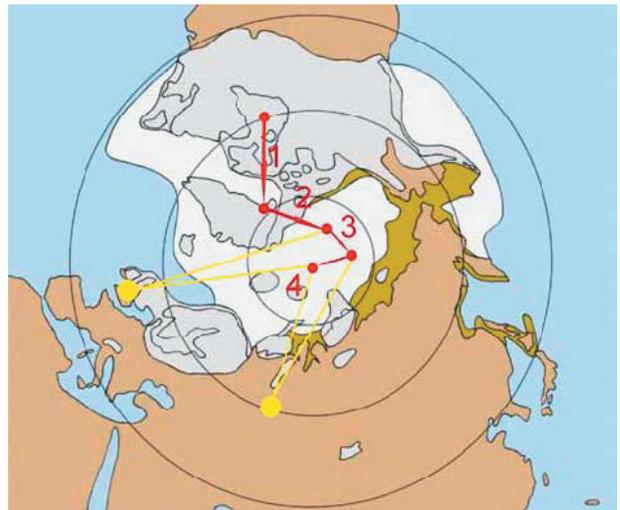


図 10 更新世後期～完新世前半における北極の連続 (赤い点を結んでいる矢印)—地球の表面と関連して。黄色の点がイギリスとウラル山脈におけるそれぞれの巨石の地域意味し、そして黄色の線が種々の極に方向と距離を特徴づける。数は次のような時期におけるにとって極の変化の部分を表す：1—後期 Drias (ヨーロッパと北大西洋での急激な冷却で説明され、北米ではそれほど明確ではない)、Preboreal 期、3—Boreal、前期 Atlantic 期、4—後期 Atlantic 期。しかし、実際の極のパターンはこの図で示すことができないくらい複雑である。

⁴ 緯度の変化は単純な式を使って計算できる： $\cos A = \sin B / \cos C$ 、ここで A—日の出の地点への方位角 (高い地平線のための冬至における日の出の現在の方位角は 130° で、立石の方位角は 139°)、B—所定の緯度における所定の日付・時の太陽の偏差 (冬至の偏差は -23.5°)、C—緯度。上記の式から我々は緯度を計算することができる： $C = \arccos(\sin B / \cos A)$ 。それ故、我々は緯度の変化を受ける： $C1-C2 = \arccos(\sin B/\cos A1) - \arccos(\sin B/\cos A2) = \arccos(\sin -23.5 / \cos 139) - \arccos(\sin -23.5 / \cos 130) = 6.4473344735 = 6.5^\circ$ 。したがって、ヴェラ島 9 の複合体を作る瞬間に Turgoyak 湖の地理的な緯度は 48.5° (現在は代わって 55°) から続けて、北向きの移動を km で計算することが可能： $6.5 \times \cos 55 \times 40000/360 = 414, 25 \text{ km}$

⁵ 時計回りで 13° 曲がる角度は 400 km の追加となる。

が、特定の期間においてそれらがお互いに関係し得たけれど、異なった過程であることを理解することが必要である。この著者の意見において、Milankovitch の仮説はこの論文で論じた事実から当然起きることよりいっそう十分にこれらの過程のメカニズムを記述するかもしれない。しかし、集中的な極の漂流を伴った氷河時代の終わりの偶然の一致は、我々がこれらの過程がどういっわけか関連されていたと想定することを可能にする。次の疑問は生じる：どんなメカニズムが Milankovitch によって記述された軸の変化をさせたか？しかし、後者の著者によれば、統計学的に太陽活動周期と関係がある。地球の膨大な慣性を考慮に入れて、たとえ引き金のメカニズムが宇宙にあるとしても、我々は宇宙だけでなく、我々の惑星の中にその理由を捜し求めなくてはならない。

極移動の力学的な原因に関して、多分、問題は地球の膨張仮説（たとえば Scalera, 2003）の中に見られることができるだろう。なぜなら、可能なメカニズムが Larin の水素化合物 (hydridic) の地球によって提案されたからである。このモデルによれば、主要な水素化合物の地球において金属圏 (metallospere) は水素化合物の分解の後を形成され、水素の脱ガス作用と関連している。これは物質の本質的な減圧と、それに応じた地球の次の膨張を導いた。他方、表面上「不規則な脱ガスと惑星塊の関連づけられた内部の再編成は、地球球体の空間方位の断続的な変化—それによって赤道の膨張を置き直して—と同様に当然回転速度の変化を起こしたであろう」(Storetvedt and Longhinis, 2011)。これは真の極移動についての古典的な現象をすでに説明している — 1 世紀以上前に実証された古気候についての岩石と化石の証拠をもとに地磁気的な過程 (Kreichgauer, 1902; Koppen and Wegener, 1924) である。しかし、地球球体の不規則な膨張の場合には、極の迷走は力学的な結果であったかもしれない。たいていの膨張代案は、しかし、地球の同一の拡大を示唆している。さらに、地球膨張仮説は海底拡大が現実のものであることを当然の事としているが、この考えは海底の地球物理学的なそして地質学の多くの事実によって打ち消される (Storetvedt, 2010 の要約を参照)。

仮定されているブルターニュとウラル山脈の海 / 湖水準の現代の変動を考慮して、Storetvedt and Longhinis (2011) は「海水面変化が上部マントルでの静水圧に付随する高まりを伴った脱ガスを行って発展する地球の直接の結果であり—すなわち、それはより低い大陸地域を覆う海進に関係した海洋性の地殻の隆起が引き起こしている—断続的に加圧された軟流圏のガスとガスによって引き起こされたマグマによる爆発によって中断される」ことを提案した。そのため、極移動の各特定の事件は異なった根本的なまたは二次的な過程の相互作用によって引き起こされる。惑星からの脱ガスはコアとマントルでの化学的な不安定性の結果である可能性が高い；比較的熱いマントル (軟流圏) の最上部は、放射に起因する加熱よりむしろ、化学反応から脱ガスに関連した生産物で

あると思われる。しかし地球の内部状態と過程を解明する話になると、我々は確かにその目的の終わりにいない。

我々は氷期の周期と関係した比較的小さな (力学的な) 移動に気付いて、そして上述のように我々は Milankovitch サイクルとの関連の可能性を論じた。地球を通過するニュートリノの流れは、脱ガスと膨張の可能性の両方を引き起こして、内部の温度を増加させることができるかもしれないと予想される。両方の過程は地球の中心と慣性のその軸に取って代わる傾向がある—そしてそれは、地球全体に渡る気候変化を引き起こした極の迷走 (極の漂流) の力学的な呼び起こした。さらに、太陽活動周期が気候に同じく直接の影響を与える (Perry and Hsu, 2000) ことを忘れてはならない。

そのため、氷河活動と氷河活動でないものの過程は非常に複雑であった。多分、我々は一連の相互に結びついた過程に直面する — それは、太陽輻射の変動、Milankovitch サイクル、地球内部からの脱ガス— それらは、表面のテクトニクス過程のある範囲をもたらした。この論文で記述された巨石の方位に感謝する、それらは我々に紀元前 5 番目から 3 番目の千年紀と同じぐらい最近の地球全体における過程の複雑な相互接続を研究することができるようにあるデータバンクを供給してくれたように思われる。

謝辞：私は上に述べられた問題を議論して、そしてこの考えを支持した私と共に島の上で働いていた人々に非常に感謝している：L. Ivasko, E. Bersenev, and M. Kozlov. ヴェラ島の浜の高まりについての我々の研究において、コンサルタントとして勤めた地理学者 V. Deryagin への特別な感謝をする。同じく、私はこの論文が K. Storetvedt 教授との論議なしで可能ではなかったであろうと言いたい。彼は論文を編集して、そして私が若干の地球全体の地球物理学的な局面を理解するのを助けてくれた。

文 献

- Burroughs, W.J., 2005. Climate change in prehistory. The End of the Reign of Chaos. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 356p.
- Butzer, K.W., 1964. Environment and archaeology. An introduction to Pleistocene geography. Aldine, Chicago, 524p.
- Daniel, G., 1960. The prehistoric chamber tombs of France. A geographical, morphological and chronological survey. Thames and Hudson, London, 282p.
- Deryagin V.V., 2009. Personal communication.
- Flohn, H., 1978. Background of a geophysical model of the initiation of the next glaciation. Climatic change, (Gribbin, J., Ed.) Cambridge Univ. Press, Cambridge, London, New York, Melbourne, p. 249-265.
- Gold, T., 1955. Instability of the earth's axis of rotation. Nature,

- v. 175, p. 526-529.
- Gribbin, J., 1978. *Astronomical influences. Climatic change.* (Gribbin, J. Ed.) Cambridge Univ. Press, Cambridge, London, New York, Melbourne, p. 132-154.
- Grigoriev, S.A. and Vasina, J.V., 2010. Megaliths of the Vera Island in the Southern Urals. Monumental questions: prehistoric megaliths, mounds and enclosures, vol. 2123 of British archaeological report. International series, Calado D., Baldia M. and Boulanger M. (Eds.), p. 179-185.
- Hänel, A., 2008. Die Orientierung von Megalithgräbern in Deutschland. *Durch die Zeiten... Festschrift für Albrecht Jockenhövel zum 65. Geburtstag,* (Verse F. et al., Eds.), Leidorf Verlag, Rahden/Westf., p. 29-43.
- Hapgood, Ch.H., 1958. *Earth's Shifting Crust. A Key to Some Basic Problems of Earth Science.* New York: Pantheon Books, 438 p.
- Hapgood, Ch.H. *The Path of the Pole,* Philadelphia: Chilton Book Co., 1970, 413 p.
- Irving, E., 1956. Paleomagnetic and paleoclimatological aspects of Polar Wandering. *Pure and Applied Geophysics,* v. 33, no. 1, p. 23-41.
- Joussaume, R., 1985. *Dolmens for the dead. Megalith-building throughout of world.* London: Batsford, 320 p.
- Kaelas, L., 1994. *Megalithic monuments of Europe. History of humanity. V. I. Prehistory and the beginnings of civilization,* S.J. De Laet, Ed. (New York: UNESCO), p. 598-615.
- Kreichgauer, P.D., 1902. *Die Äquatorfrage in der Geologie.* Missionsdruckerei, Steyl, 304p.
- Krizhevskaya, L.Y., 1977. *The Early Bronze Age in the Southern Urals (Rannebronzovoe vremya v Yuzhnom Zauralie).* Nauka, Leningrad, 128p. (in Russian).
- Köppen, W. and Wegener, A., 1924. *Die Klimate der geologischen Vorzeit.* Berlin, Gebrüder Bornträger, 256p.
- Lamb, H.H., 1982. *Climate, history and the modern world.* Methuen, London, New York, 387 p.
- Larin, V.N., ed. C. Warren Hunt, 1993. *Hydric Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet.* Polar Publishing, Calgary, Alberta, Canada, 247 p.
- Matyushin, G.N., 1982. *The Copper Age of the Southern Urals.* Nauka, Moscow, 328 p. (in Russian).
- McCrea, W.H., 1975. Ice ages and the galaxy. *Nature,* 255, p. 607-609.
- Milankovitch, M., 1930. *Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen, Handbuch der Klimalogie. Bornträger, Berlin. V. 1. Teil A.*
- Patrick, J., 1981. A reassessment of the solstitial observatories at Kintraw and Ballochroy. *Astronomy and Society in Britain during the period 4000-1500 B.C.,* vol. 88 of British archaeological report, British Series, (Ruggles C.L.N., Whittle A.W.R., Eds.), p. 211-219.
- Perry, Ch.A. and Hsu, K.J. Geophysical, archaeological, and historical evidence support a solar-output model for climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2000, v. 97, no 30, p. 12433–12438.
- Plotnikov V.V., 1978. *Genesis of small lakes of the Ilmeny reserve (forest-steppe Transurals).* Institute of ecology of plants and animals, Sverdlovsk, 169p. (in Russian).
- Scalera, G., 2003. *The expanding Earth: a sound idea for the new millennium. Why expanding Earth? – a book in honour of O.G.Hilgenberg,* G. Scalera, K-H. Jacob, Eds. (Rome, INGV), p. 181-232.
- Scarre, Ch., Arias, P., Burenhult, G., Fano, M., Oosterbeek, L., Schulting, R., Sheridan, A. and Whittle, A., 2003. *Megalithic chronologies. Stones and Bones. Formal disposal of the dead in Atlantic Europe during the Mesolithic-Neolithic interface 6000-3000 BC.* (Burenhult, G., Ed.) Oxford: Archaeopress, p. 65-111.
- Schlosser, W., Cierny, J., 1996. *Sterne und Steine. Eine praktische Astronomie der Vorzeit.* Wiss. Buchges., Darmstadt), 176p.
- Startnin, B. and Bradley, R., 1981. *Dome notes on work organisation and society in prehistoric Wessex. Astronomy and Society in Britain during the period 4000-1500 B.C.,* vol. 88 of British archaeological report. British Series. (Ruggles, C.L.N., Whittle, A.W.R. Eds.), p. 297-342.
- Storetvedt, K.M., 2010. *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., 2011. *Aspects of Planetary Formation and the Precambrian Earth.* *New Concepts of Global Tectonics Newsletter,* no. 59, p. 60-83.
- Storetvedt, K.M. and Longhinos, B., 2011. *Evolution of the North Atlantic: Paradigm Shift in the Offing.* *New Concepts in Global Tectonics Newsletter,* no. 59, p. 9-48.
- Tarling, D.H., 1978. *The geological-geophysical framework of ice ages. Climatic change.* (Gribbin, J., Ed.) Cambridge Univ. Press, Cambridge, London, New York, Melbourne, p. 3-24.
- Thom, A., 1967. *Megalithic sites in Britain.* Oxford Univ. Press, Oxford, 174p.
- Thom, A., Thom, A.S., 1978. *Megalithic remains in Britain and Brittany.* Oxford Univ. Press, Oxford. 192p.
- Weber, Z., 1986. *Astronomische Orientierung des Rondells von Těšetice-Kyovice, bez. Znojmo.* Internationales Symposium über die Lengyel Kultur. Archäologisches Institut der Slowakischen Akademie der Wissenschaft in Nitra, Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Wien, Nitra-Wien, p. 313-321.
- Wesson, P.S., 1970. *The position against continental drift.* *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society,* p. 312-340.
- Zhuravlev, A.P., 1993. *Determination of ancient earthquakes in Karelia on archaeological evidences. Question of archaeology of the Urals,* 21. Ekaterinburg, p. 180-188 (in Russian).

短 報 SHORT NOTES

地球潮汐と地震との関連性の検証方法ならびに図化と GMT 時刻の検証方法 METHODOLOGY TO CHECK CORRELATION BETWEEN EARTH TIDE AND EARTHQUAKES AND FOR PLOTTING [EMD+SEM] VS GMT TIMINGS

Vinayak KOLVANKAR
vkovankar@yahoo.com

(矢野 孝雄 [訳])

(編集者注：この原稿は、NCGT Newsletter, no. 60, p. 50-66 に掲載された Kolvankar 論文「太陽、月および地球」の補足である。)

図化にあたっては、360° で測定された月の位置で示される新月 [NM] および満月 [FM] から地震数が計測される。

地球は 24 時間で自転する。しかし、その時間の間に、月は東へ 12.12° 移動し、地球はより大きい角度を時点しなくてはならないので、月は約 0.842 時間遅れで同じ経度に位置することになる。つまり月は、地球からみて同一経度に達するために 24.842 時間を要する。

新月から満月になるには約 29.5 日 = 708 時間 [29.5 × 24 時間] であり、この時間で月は 708/24.842 = 28.5000 回地球を周回する。

「地球潮汐と地震」論文 (NCGT Newsletter, no. 57, p. 54-75) において、地球を周回する月に関する横軸 [-180° ~ +180°] は、98 区間に分割された。縦軸は地震数であった。[便宜のために、区画数は 4 を因数にして減らしていた。]

横軸は 3 つの異なる方法を代表するので、次の 3 つの範囲を示すことになる。

1. NM-FM-NM に変化することによって、2 回の新月間のいかなる地震発生時に対しても SEM をうることができる。
2. それは、-180° ~ +180° にわたる地球の経度を代表し、さまざまな経度にあるさまざまな地域におけるプロットの開始時 [GMT で 00 時] を明示することができる。
3. それは、最終的には、X 軸の最終計算値を 00 ~ 360° [-180° ~ +180° を変換] で示すことになる。

「太陽、月および地球」論文 (NCGT Newsletter, no. 60, p. 50-66) の横軸も同じであるが、区画に区分されていない。

1973 ~ 2008 年のすべての新月と満月 [すべての新月と満月の期日は、インターネットで入手できる新月・満月・遠地点・近地点計算プログラムで求めた] において、地球上での月の位置 [経度] が計算された。これは、同じプログラム [私たちが開発した POSONLONG] を

使っても計算することができ、カタログ化された個々の地震にとっての月の位置を求めるのに利用された [NM および FM 時刻を地震発生時に置き換えるだけで計算できる]。それとは別に、このデータはプログラム Alcyone Ephemeris OR Home planet から求めることができる。

各地震発生時の月経度 [LE] は、次の 2 つのパラメータから求められる。

1. 月の位置が NM1 から NM2 へ移動するにつれて、月の移動にともなう増加位相 [Tm] は 24 時間に東方へ 12.12° ずつずれる。これは、同時に、SEM [太陽 - 地球 - 月間の角度] として示される。月が東へ [時計回りに] 移動すると、その位置は経度の増大として表現されるので、これは +ve と表現される。
2. 地球の時点のために、月の位置は 1 時間に 15° 変化する。地球は時計回りに自転しているので、月の位置 [同時に、太陽の位置も] は大きな経度値から小さな経度値へ [+180° から -180° へ] と変化し、それ故に、この表示方法では 1 時間に -15° 変化することになる。

計算全般は、次の 4 つの部分で構成されている。

部分 A

この部分では、個々の地震に対する月の移動相が次のとおり計算される：

$$\text{月による相移動 } T_m = 360^\circ * (\text{LE} - \text{NM1}) / (\text{NM2} - \text{NM1})$$

ここで、NM1 および NM2 は、NM1.F1 と NM2.F2 という形で与えられる。

月は地球に対して、約 360°/29.5 日 = 12°/日の角速度で東へ移動する。Tm という項は計算上 +ve と考えられ、度 (degree) という単位で表示された Tm は +ve [Nm と Nm 間の期間は NM2 - NM1 に等しい] と理解される。

この計算は、SEM [太陽 - 地球 - 月がなす角] にも適用され、SEM は、この論文では EMD [地球 - 月間の距離] の計算式に 1 つの項として加えられる。

部分 B

360° の地球自転にかかわる.

NM1, NM2 および LE は, NM1/ NM1.F1, NM2/ NM2.F2 のような分数として表現され, 任意の時刻における地震に対しては Eq.F0 と表示される. 分数計算は, $FC = [F0-F1]*[360]^\circ$ となる.

部分 C

月の位置は, $Moon\ pos = [- (longitude\ of\ Moon\ at\ NM1) - (FC) + Tm]$ であたえられる.

部分 D

この図は $[(地震の経度) - (月の位置) + Tm]$ で与えられる. これは $[EMD + SEM]$ に等しい.

$[EQL - (Le - LNM)]$ が -180° よりも小さい場合には, $[EQL - (Le - LNM)] = [EQL - (Le - LNM)] + 360^\circ$ [LNM は新月の月経度である]

$[EQL - (Le - LNM)]$ が $+180^\circ$ よりも大きい場合には, $[EQL - (Le - LNM)] = [EQL - (Le - LNM)] - 360^\circ$

NM-NM 周期の間に発生する全ての地震に対して, そして, このサイクルの期間中に発生したすべての地震に対して, この手順が繰り返される. 新しい NM-NM 周期に対して, この手順が 2-7 点から繰り返される.

ある特定の地震位置 EQ に対して, $[EMD + SEM]$ 角は, 「太陽, 月および地球」論文に図示されているように, 太陽の位置 [OR GMT 時刻] に直接の関係性をもつ.

表 1 [太陽, 月および地震] は, 世界的にみて地震活動が活発な 42 地域における最初の投影数を示す. 個々の地域として選択された領域は, 典型的には $10^\circ \times 10^\circ$ の範囲である. この表からわかるように, 地震図の最初はさまざまな経度範囲とともに変化する. というのは, 異なる現地時間をもつこれらの地域では太陽位置が異なるからである. さまざまな経度範囲に関するかぎり, 最初の投影数は現地時間における約 $4[15^\circ]$ まで移動する. 地震図のはじまりは, 経度範囲の平均値に相当する.

月の位置および地震 - 月距離 SEM 角, などの計算例を示した図.

Example 1.

Date = 17.01.2000 Time = 19:24:51 = 16.8083, NM1 = 5.7604 NM2-NM1= 29.7841 Elong = -124.64, LNM=-92.50
Moon travel [SEM] = (16.8083-5.7604) = 11.04789/29.7841 = 0.3709 * 360 = 133.520
Fraction Cal. = 0.8033-0.7604 = 0.0429 * 360 = 15.4440

Moon pos. = (-92.50 - 15.44 +133.52) = 25.58
Plot value = (-124.64 +133.52 -25.58) = -16.70 = 343.30 and 343.3/3.75 =91.54 Correct.

Example 2.

Date 24.01.2000, Time = 23:33:56 = 23.9813 NM1 = 5.7604 NM2-NM1= 29.7841 Elong = -125.88, LNM=-92.50
Moon travel = (23.9813 - 5.7604) = 18.2209/29.7841 = 0.6116 * 360 = 220.230
Fraction Cal. = (0.9813 - 0.7604) = 0.2209 * 360 = 79.53

Moon pos. = (-92.50 - 79.52 +223.23) = 48.21.
Plot value = -125.88 -48.21 +220.23 =46.140 and 46.14/3.75 = 12.304 Correct.

Example 3.

Date = 27.01.2000 Time = 18:04:41 = 26.7528 NM1 = 5.7604 NM2-NM1= 29.7841 Elong = -124.4, LNM=-92.50
Moon travel = (26.7528 - 5.7604) = 20.9924/29.7841= 0.7048 *360 = 253.730
Fraction Cal. = (0.7528 - 0.7604) = -0.0076 *360 = -2.7360
Moon Pos. = (-92.5 +2.736 +253.73) = 163.960
Plot value = -124.33 -163.96 +253.73 = -36.110 =3230 and 323/3.75 = 86.37 Correct

Example 4.

Date = 30.01.200 Time = 20:52:28 = 29.98694 NM1 = 5.7604 NM2-NM1= 29.7841 Elong = -120.13, LNM=-92.50
Moon travel = (29.8694 - 5.7604) = 24.109/29.7841 = 0.8094 *360 = 291.400
Fraction Cal. = (0.8694 - 0.7604) = 0.109 *360 = 39.240
Moon pos = (-92.5 -39.24 +291.4) = 159.66
Plot value = (-120.13 -159.66+291.40)=11.610 and 11.61/3.75 = 2.97 Correct.

Example 5

Date = 24.01.2000 Time = 09:58:01= 23.4153. NM1 = 5.7604 NM2-NM1= 29.7841 Elong = -127, LNM=-92.50
Moon travel = (23.4153 - 5.7606) = 17.6549/29.7841 = 0.592 * 360 = 213.12
Fraction cal. = (0.4153- 0.7606) = -0.3453 *360 = -124.30
Moon Pos = (-92.5 +124.3 +213.12) = 244.92 = -115.08
Plot value = (-124.3 + 115.08 +209.83) = 201.20 and 201.2/3.75 = 53.65 Correct. [Moon travel is same as SEM angle]

表1 計算値の詳細を示す事例データ：地震リストごとのデータ。

Table1: Sample data providing the details of calculations values: Data as per the event list																	
eDate	Original Time	dEtime	NT1d	NT2d	Latitude	Longitude	Depth	Magn	Plot	Fract. Calcul	Moon travel [SEM] B	Moon Pos Cal.	Moon PO HP	EQ-MOON DISTA	A+B	X axis [A+B-180]	[A+B]/3.75
1/7/2000	21552	6.0938	5.7604	35.5451	40.48	-125.42	16	3.2	24	-239.97	4.029	151.49	+151.20	83.09	87.12	-92.88	23.23
1/7/2000	64929	6.284	5.7604	35.5451	43.23	-126.56	10	2.7	41	-171.50	13.18	92.18	+85.04	141.26	154.44	-25.56	41.184
1/7/2000	13118	6.0632	5.7604	35.5451	40.68	-124.73	15	3.5	20	-250.99	3.65	162.14	+161.98	73.13	76.78	-103.22	20.47
1/8/2000	21731	7.0951	5.7604	35.5451	40.5	-126.5	25	5.4	24	-239.5	16.13	163.13	+162.54	70.37	86.5	-93.5	23.066
1/9/2000	42147	8.1813	5.7604	35.5451	47.87	-128.99	10	3.1	31	-208.47	29.26	145.23	+144.15	85.78	115.04	-64.96	30.67
1/10/2000	232639	9.9764	5.7604	35.5451	40.52	-124.01	22	2.9	13	77.76	50.95	-119.31	-121.67	355.3	46.25	-133.75	12.33
1/10/2000	123316	9.5229	5.7604	35.5451	43.45	-126.56	10	2.7	65	-85.5	45.47	38.47	+33.68	194.97	240.44	60.44	64.117
1/13/2000	112354	12.4743	5.7604	35.5451	44.13	-128.82	10	3.8	93	-102.99	81.44	91.93	+86.97	139.25	220.69	40.69	58.85*
1/16/2000	150758	15.6299	5.7604	35.5451	47.82	-122.77	17	3	75	-46.98	119.29	73.77	+69.13	163.46	282.75	102.75	75.4
1/16/2000	15132	15.0771	5.7604	35.5451	40.46	-125.71	2	4.3	22	-245.98	112.6	-93.92	-98.92	328.21	80.75	-99.25	21.53
1/17/2000	104345	16.0768	5.7604	35.5451	41.09	-126.08	1	9.3	83	91.94	184.17	10.83	+16.73	914.88	848.14	168.14	89.14
1/17/2000	100001	16.4167	5.7604	35.5451	42.47	-126.51	10	3.8	54	-123.76	128.80	160.06	+156.74	73.43	202.23	42.23	53.928
1/17/2000	192451	16.8083	5.7604	35.5451	40.42	-124.64	15	3.3	92	17.24	133.53	23.79	+21.02	211.57	345.1	165.1	92.02
1/17/2000	175754	16.7479	5.7604	35.5451	44.19	-128.94	10	4	85	-4.5	132.8	44.8	+41.91	186.26	319.06	139.06	85.08
1/18/2000	4047	17.0278	5.7604	35.5451	43.92	-120.86	6	2.8	18	-263.73	136.18	-52.59	-54.83	291.73	67.91	-112.09	18.10
1/19/2000	23652	18.1083	5.7604	35.5451	44.36	-128.71	10	4	23	-234.75	149.24	-68.51	-67.98	299.8	89.04	-90.96	23.744
1/19/2000	202320	18.8493	5.7604	35.5451	43.9	-128.29	10	4.4	95	32.00	158.2	33.7	+36.59	198.01	356.21	176.21	94.98
1/20/2000	94147	19.4035	5.7604	35.5451	43.65	-127.26	10	6.1	52	-128.48	164.9	-159.12	-154.60	31.86	196.76	16.76	52.46
1/20/2000	233313	20.0813	5.7604	35.5451	40.17	-124.1	0	3	12	79.42	171.88	0.14	-06.21	236.74	47.42	132.38	12.69
1/22/2000	31332	21.134	5.7604	35.5451	43.59	-127.78	10	2.8	26	-225.5	185.82	-41.18	-32.07	273.4	99.22	-80.78	26.458
1/24/2000	95801	23.4153	5.7604	35.5451	43.72	-127	10	2.6	53	-124.23	213.39	-114.88	-103.20	947.88	201.27	21.27	53.67
1/24/2000	233356	23.9813	5.7604	35.5451	40.54	-125.88	1	3.4	12	79.52	220.23	48.21	+59.61	185.91	46.16	-133.84	12.30
1/26/2000	82720	25.3521	5.7604	35.5451	43.31	-126.69	10	2.9	48	-146.98	236.80	-68.72	-58.12	302.03	178.83	-1.17	47.68
1/26/2000	82008	25.3472	5.7604	35.5451	43.34	-126.62	10	3	47	-148.72	236.37	-67.4	-56.28	300.78	177.15	-2.85	47.21
1/27/2000	180441	26.7528	5.7604	35.5451	40.78	-124.33	23	2.8	88	-3.04	253.73	164.27	+172.78	71.4	325.13	145.13	86.70
1/27/2000	61636	26.2611	5.7604	35.5451	40.46	-125.43	2	3.8	39	-179.74	247.79	-24.97	-15.50	259.54	147.33	-32.67	39.28
1/30/2000	495820	29.0004	5.7604	35.5451	45.18	-120.31	1	2.0	8	33.24	231.40	139.06	+104.05	89.24	11.04	-108.36	3.104
1/30/2000	43451	29.1903	5.7604	35.5451	43.68	-127.35	10	2.9	32	-205.23	283.19	35.92	+41.55	196.73	119.92	-60.08	31.97
1/30/2000	204607	29.8653	5.7604	35.5451	45.19	-120.1	8	3.4	2	37.76	291.35	161.09	+166.18	78.81	10.16	-169.84	02.70
1/30/2000	191023	29.7986	5.7604	35.5451	45.2	-120.12	0	4.1	92	2.292	290.54	-164.25	-170.62	44.13	334.67	154.67	89.25*

Moon position at NM1 [5.7604] = -92.5 degrees. Moon position at NM2 [34.5451] = -29.29 degrees.

たとえば月の位置, SEM, END など, 赤字表示されたデータは, 先に与えられたものである.

Details of the fields:

- eDate : Date of the event [Source NEIC USGS earthquake catalog]
- original time : time of the event in GMT
- dEtime : Date + Time of the event in decimal format with respect to 01.01.2000 00-00 hrs GMT
- NT1d : New moon 1 Date + Time in decimal format [Source : Program for Apogee, Perigee, New Moon, Full Moon timings]
- NT2d : New moon 2 Date + Time in decimal format
- Latitude : Latitude of the event
- Longitude : Longitude of the event
- Depth : Depth of the event in km.
- Magnitude : Magnitude of the event
- Plot : Plot value calculated by program
- Fract. calculation: Fractal calculation used for obtaining moon position
- Moon travel [B] : [SEM]Moon travel from towards east from NT1d till event date and time [dEtime]
- Moon pos cal. : Moon position calculated for event date and time
- Moon pos HP : Moon position provided by Home planet program for event date and time
- EQ- Moon dist [A] : The distance provided along longitude between earthquake longitude and moon longitude [on Earth] [MEASURED IN ONE DIRECTION]
- [A] +[B] : EQ- Moon dist + Moon travel [SEM angle]
- [[A] +[B]]/3.75 : Plot Value calculated manually. [USED IN PROGRAM FOR EARTH TIDES AND EARTHQUAKES]. In this program the number of columns was reduced to 96 [360/3.75] for convenience.
- X axis [A+B-180] : The X axis values are adjusted for range of -1800 to +1800

随筆 ESSAY

事実, 理論, 盲目的な追従と社会的動向学 FACTS, THEORIES, BLIND COMMITMENTS AND SOCIO-DYNAMICS

Karsten M. STORETVEDT

Institute of Geophysics, University of Bergen, 5014 Bergen, Norway

karsten.storetvedt@gfi.uib.no

(小坂 共栄・小松 宏昭・矢野 孝雄 [訳])

—人というものは、どこにしようとも常にやや心地よい罪の意識に付きまどわれるものだ—

Bertrand Russell, in: Spetial Essays

要旨: 自然科学の歴史というものは、事実の混沌とした集まり、作り話、名声を得ようとするあがきなどからなる物語のようなものである。またそこには、科学とはおよそかけ離れた「故意の無視」、「誤った行動」、「バンドワゴニズム」、「社会-政治的なグループからの圧力」「愛国的な自尊心(うぬぼれ)」その他、もろもろの人間の特性などを含んでいる。そんなわけだから、われわれは、それがどんなに最悪の理論であり、またそれが社会に受け入れられ長命であろうとも、そのこと自体に驚くことはないのである。このエッセイでは、観測結果(事実)が期待したほどに単純ではないために、理論上はまったく確定せず、また混乱の状況にあるグローバルテクトニクス論を具体的に取り上げている。また、古い時期の大陸漂移論の後に続いて現れたプレート論が、地殻構造の形成を理解するうえでは重要な突破的役割を果たしたことに特別な注意を払った。

プレート論は、地球の進化に関する理解にとって、とても頼もしく有望なグローバルテクトニクスだった。にもかかわらず、それは今日ではますます混沌としたものになりつつある。

一般的な考え方に同調させようとする社会的な圧力

—あるグループの中での逸脱した考え方に対しては、それを元に戻そうとする力が作用するものだ—

John C. Turner, in: Social Influence

第二次大戦後の日本において、日本のそれまでの伝統的な価値観の変化にアメリカがどれほどの大きな影響を与えたかを理解するうえで、とりわけ1960年代後半から70年代にかけて日本や西欧からアメリカへ渡った若い地質学者たちが、意図的に単純化されたプレートテクトニクスに関する説明の前で感情的に圧倒され、その後プレート論への忠実な信奉者へとどのように変わったのかを理解するうえで、NCGT ニュースレター no. 57 号の M. Hoshino の論述は興味深い。新しく強固なグローバルテクトニクス論が広がる時というものは、新しいモデルに対する重要な試験が行われていることに注意を向ける必要がある。

1970年代の初めには、すでにこの仮説が当初持っていた輝きはその一部をすでに失っていた。しかし、このモデルの予想外の発展で、仮説のほころびを取り繕うためにまるで雛菊の花輪を次々と作り上げるようにして、このモデルに重要な修正が加えられていった。それはまさに、モデルの周囲を人為的な保護ベルトで固めるような実り

のないゲームであった。忘れてならないのは、プレートテクトニクス論信奉者の急速な増大のためには、出世主義が一番の魅力であり、それがプレート論に都合の悪い事実から目をそらすことになったのである。

1970年代後半には、プレートテクトニクス論はすでに腐敗していた。深海掘削試料による実験結果が多数公表されているにもかかわらず(たとえば Storetvedt, 1997, 2003, 2010)、プレート論モデルは、20世紀で最も偉大な、人間による啓示として宣伝されてきた。しかし、「地球上のさまざまな多様な現象を統一的に説明する」とこのモデルが掲げていた当初の約束は次第に忘れられつつあった。継続的な財政的支援と既得権益によって、プレート論者はそれに対する反論には目を向けなくなっていった。また、若い研究者たちも、身分に対する期待から、その道から外れようとはしなかった。

ありふれた狭量な科学主義と、プレートテクトニクスに関する断片的な知識とで、1960年代初頭に若い地球物理屋であった私は、根っからのプレート論信奉者であった。しかし、プレート論に対する私の過度な信奉心はそう長くは続かなかった。1970年になると、すでに私は Vine-Mattews の海洋底の生成モデルに対して懐疑的になっていた。その当時までには、海洋底の地磁気異常の縞状模様は、Hess (1962) の唱えた海洋底拡大モデルと結び付け

て、地球磁場の変化をテープレコーダーのように記録しているものとみなされていた。このプレート論の核心をなす考えに対する信奉心を失って後、私がプレート論を持ち上げる仲間に戻ることは二度となかった。そこからの20年間、私の止むことのない調査・研究が始まったのだが、地球物理学を学生に講義する一方、私の理論はその間にあちこちと揺れ動き続けた。しかし、1989年の初め、この状況は突然に終わることとなった。私の著作「Global Wrench Tectonics」を読んでいたのだが、この中で主張した「地球の置換理論 (replacement theory of the Earth)」をもって、私はプレートテクトニクス論から完全に縁を切ったのである。その後、自身の研究の進展を振り返るとき、私はしばしば科学哲学者である Thomas Kuhn(1970, p80) の次の言葉を思い出す。

「科学に関する教科書を読んだ人が、そこで掲げられている事例をその理論の証拠として簡単に用いてしまうのはなぜだろうか。理由は簡単である。それを信じ込んでしまうからである。科学を学ぶ学生は、証拠(事実)によってではなく、権威ある先生が述べたり、教科書に書いてある理論だからということでそれを受け入れてしまうのである。それとは別の理論には何があるのだろうか？ その理論にはどんな確信があるのだろうか？ などとは何も考えずにである。」

専門的な分野の人間にありがちな、このような独特のもの考え方は、不幸なことに若い研究者たちだけに限ったことではなく、科学の世界に広く広がっている！ Thomas Kuhn(1970, p47) は、次のようにも述べている。

「多くの科学者たちは、最新の研究に基づいた個々の仮説についてあれこれと気楽に語るものだが、彼らはそれらの仮説の基礎を固めた人々よりもまだたちが悪いといえる。」

一度確立された理論であっても、ひとたび専門的な点で不安定なものに変わるときには、ほかの理由、ないしは理性的かつ科学的な良識によって新しい有力な理論がもてはやされるようになるものである。人間とはそういうものなのである。このような「考え」の変化は世界のファッションの流行の様子とよく似ている。プレート論への過剰なまでの支持の主な理由は、それが唯一、街中で合法的に行われるゲームだからである。プレート論モデルは、基本的に社会や専門の世界の均一性を求める圧力を伴った強固な教義を有しているのである(図1)。

プレートテクトニクスの「imprisonment(監獄)」の中では、その理論に反する事実は、見かけ上ですら存在する場所がない。プレート論に関わる研究者に最初に求められること、それはシステムへの忠誠である。科学的な「成功」とっては、そのことが第一に必要なことだからである。さらに付け加えるなら、この科学の世界に入ったなら、社会的に受け入れてもらうためには流れに乗っていかなければならないのである。したがって、この世界では、それぞれの科学者たちはそこでの支配的なパラダイムを用いなければならないし、その基本的な考



図1 科学的なパラダイムの支配というものは、その世界の中での一貫性を意味している。すでに確立されたと見られている科学の「あやふやさ」は、それに反対する者をその説に従わせようとする試みを伴いながら、たとえどんな反対行動が身近にあっても、それを妨害しようとするところから始まる。

え方の変革に抵抗しなければならないのである(Barber, 1961)。この世界の科学者たちのすべてが、この異様な同盟の中に縛り付けられているかぎり、この特殊なフィールドは、唯一のパラダイムに縛られたままになるであろう。Thomas Kuhn(1970, p24) が次に述べているように：

「科学の世界では、通常ひとつの枠に収まらないものは他のものにも収まらないことがある。新しい理論を創造しようとする科学者は、しばしば他者の理論に不寛容である。」

科学というものの理解のためには、それが知識の総合的な進化であるということ、理論や仮説というものの歴史的・社会的な意義付けに十分な注意を払い評価することが基本だということを認めなければならない。しかし、実際にはある科学的な研究に携わる人物の仕事の貢献が、その人の個人的な専門にこだわったために隠れてしまっておりあまり注目されないことがある。このことは正直なところ地球科学のもっとも大きな弱点である。対立する考えに対しては、間断なく権威主義的な攻撃が加えられるのである。グローバルな地球温暖化論には、科学的にも不確かなこと、その中には気象データのごまかしや誇張なども含まれているのだが、そんな状況に触発されたためか、最近 American Meteorological Society は、やっと「科学の世界では自由でオープンなコミュニケーションが必要だということに気づいたようで、それに関する声明を発表している。その声明は AGU EOS 92-no. 37 2011 に取り上げられた。それは次のような宣言である。

AGU は、科学的な発見に関する自由でオープンなコミュニケーションを支持する。

「科学者、政策立案者、それを支える研究機関は科学的データに関してはどこからも束縛されない自由な情報交換を守り、また発展させなければならない。」

科学や技術の発展、その成果の社会への還元は、ひと

えに科学的データの自由な交換, 自由な討論の上に立った情報のやり取り如何にかかっている。科学者たちが、科学の世界, メディアあるいは政治の世界へ正しい情報を、検閲や脅迫, 政治的妨害なく提供できる能力を持つことが必要である。科学者には、自分が発見したことを、他の科学者が発見したと合わせて具体的にかつ専門的に、もちろんそれはセンセーショナルにはなく伝えることが求められるのである。

基本的なことであるが、それが実際にはひどく難しいということはよく分かっている。しかし、このような科学に於ける常識的なことを明快に語られることを見るのは心地よいことである。例えばであるが、私の所属する大学では、プレートテクトクスにあからさまに反論する科学者は、自動的にといっていいほどトラブル続きなのである。同じようなことであるが、地球温暖化を人為的原因とする考えに懐疑的なノルウェーの科学者は、研究費の援助も受けられずに研究が阻害されているという例もある(図1)。

1963年にノーベル賞を受賞したノルウェーの Jens Bjorneboe(1920-1976)は、詩の形で1つの宣言を出している。それは Ten Commandments for a Young Man with Ambitions というタイトルで英語にも訳されている。この詩は、科学の世界での非論理的振る舞いを抑止するもの、また真実を求めるすべての若者(大学生)たちにとって「aide-memoire 忘れてはならないもの」として読まれている。それは次のような詩である。

功名心を抱く若者たちへの指令

- I 指令の第一は明快だ。多数は正しいと考えよ。
- II 「何を言えば人々が信用するか」を考えよ。そして多数派の側につけ。
- III 不思議に思ったら立ち止まれ。そして誰が一番喝采を浴びているかを見よ。
- IV 君が何かを話すときには、その中身をよく吟味せよ。そしてグループから出るときのリスクを計算せよ。
- V 手ぶらで前に出てはならない。しかし、君に利益をもたらす人にはしがみつけ。
- VI 誰にでも、かれらが崇めているものを与えよ。君のボスの部屋のドアは静かに開けて入れ。
- VII たとえどんな家にもいようと、背中を丸めてこそこそ歩け。
- VIII 人を過度にはめるな。そして彼を君の支配下に置け。
- IX 君が聞いた噂話はすべて覚えておけ。それらは別のところで使えるから。
- X これらの指令を読んだなら、君の将来は保障されたようなものだ。君のずぶとい神経は常に誘惑の魔の手を引き寄せられる。しかし、常に用心深い中庸さが必要だ。君の選んだ探索の道へ勇敢に踏み出すのだ。

事実、仮説そして理論

一家が「石」によって造られているのと同じように、科

学は「事実」によって造られている。しかし、家が単に石の積み重ねでないのと同様に、事実の集積が科学だというわけではない。—

Henri Poincare, in: Science and Hypothesis

科学というものは、ある知的能力の下で作用する理性的な活動である。このことは、科学者たちの間では確立された考えである。科学者たちの仕事は、注意深い観察や実験という手段を用いた事実の集積からなっている。別の言葉で言えば、「科学の進歩は観察に基づいたしっかりした事実の上に成り立っている」ということである。個人的な意見、好み、不確かな想像などというものは科学の世界では存在する場所はない。しかし、実際のところ、正直で熟達した実験屋は、そのような不確かな想像などというものが事実とはまったく一致していないことを最もよく知っているのである。Tomas Kuhn(1962)は、物理学の歴史を語った中で、次のように述べている。「調査段階の研究フィールドでは、それに参加している研究者たちが基本的な事実の集合体に同意しない限り、その研究そのものは科学として確立されたことにならない」。彼(Tomas Kuhn)が normal science と呼んでいるものの範疇では、パラダイム全体の構造や限界などは忘備録にもならない。科学者たちは、そのときの時流に乗ったパラダイムの指示の範囲内で自信をもって自己の仕事をこなすのである。現在でいえばマントル対流とプレートテクトニクスという二つの対をなす仮説の上に成り立つパラダイムである。問題解決に失敗したことを、このパラダイムのせいにする研究者は、仕事がうまくいかないことを道具のせいにする大工さんと同じである。Tomas Kuhnは、いみじくもこう述べている。「科学は心理学的、社会学的要素に強く関係しており、他の人間活動に比べるができる。確立されたパラダイムにあわない困った事実は取るに足らないことなのである。Paul Feyerabend(1975)は、知識の分析という点では Tomas Kuhn よりももっとアナーキーかもしれない。彼はこう述べている。「科学の世界も、ほかの分野の動向と同じように、ほかのブランチへ自分たちを宣伝するための練達者を送り込むものだ。ある観察者が地質学的な現象を見たときに抱く印象、それに対する親近感というものは、その人の経験や知識、期待感などに依存するものだ」。Alan Chalmers(1990, p27)は、このような事実を彼の文章の中で次のように述べている。

「認識できる限りでいえば、観察者が直接的にまた即座に接触できるものといえば、それはその人本人が経験したことである。またその経験というものは、その観察者の知識や、彼が期待するものとは違っていたり、その通りであったりと様ではない。物理的にいえば、その観察者に与えられたものというのは、観察者の網膜に映ったイメージであり、観察者がそのイメージに直接触れたりできるものではない。とはいえ、われわれの網膜上に映っているものがそのものの一部であっても、ほかの重要な部分が自分の心の中に形作られており、その物はその人の知識や期待感などからもたらされるものなのである。」

観察者というものは、それと同一の視覚的経験がたとえ乏しくても、不正確な観察記載を時間とともに何度も繰り返し修正していくものである。そして自然に関して疑問の余地のない事実や真実を作り上げてゆく。しかし、誤った理論に導かれた科学は、短い時間内の視認だと、真実の探求にとっては何の役にも立たない見当違いの実験や記載を行う羽目に陥ったりする。そんな欠陥だらけの経験でも、真実や穢れのないデータからなる手工芸品の貯蔵庫を少しでも豊かにする上では多少は貢献することにはなる(図2)。

このように、研究の環境というものは混乱の増大の影響や情報のストレスを避けるわけにはいかないものである。このNGGT ジャーナルの多くの読者諸君は、このことが現在の地球科学界ではそのとおり、すなわちこの世界がプレートテクトニクス一元化論的なプロパガンダの域に達していることをよく認識されていることであろう。それ故、地球科学の世界で緊急を要する課題は何かといえば、それは今流行のモデルの不完全さをほかの考え方と引き比べてオープンに議論し、次の世代のグローバルテクトニクスに必要なことは何かということについて検討することである。

どんな科学や科学的知識であろうと、それが他の考えと調整なしの単純な観察事項の集まりによって発展するなどというのは陳腐なことである(図3の左を見よ)。なぜなら、自然界の事実は、われわれに、それがなぜそうなったかを語ってくれたりもしない。だから、より高度な考え方の創造のためには常に十分な観察というものが不可欠なのである。十分な観察というものがない理論は、果てのない大海原へ漕ぎ出すのと同じことである。どんな分野の科学であっても、その保存庫には、真の事実が入っているものである(図2)。保管庫の中の混沌とした無秩序な事実は、理論に基づいて整理され秩序ある順序に並べられて初めて役に立つものになる。しかし、残念なことではあるが、そのような賢明な考え方を科学の世界で持つなどというのは、ごくまれなことであ



図2 ひび割れた大きな仮説、当初それは社会-政治的なメカニズムの下では人気があったのだが、混乱した研究環境をもたらした。一般に、観察というものはモデルに合致しないものだ。間違った論文を広めようとする試みをすればするほど、それを正さなくてはならない観察・記載などが広がっていくのである。研究の結果、このようなケースでは真実と、モデルが造り上げた作爲的なものが混在して、真実を追求しようとする科学的な努力はとて厄介な仕事となる。

る。「theoretical tree: 理論の樹」の根、そこから外に向かつてさまざまな枝が伸びていくものであるが、がうまく育ったときはじめてその理論は自然界の状況を表現したことになる。事実の秩序ある連続的な配列を順序良く組み立てられたとき、現象論的にみた事実の内部相関が明らかとなるのである。しかし、そのような物理的な枠組みの構築においては、その場限りの都合の良い取り繕いをしてはならない。このことについてはLarry Laudan(1977, p116) が次のように述べている。

「定説を変えたいという欲望に突き動かされての理論の変化ということに関しては、ある種の疑いが存在するものだ。理論の中の異常な部分のどこが正常なものに変わったのか、たとえその異常が何かが分かったところで、その変りようなどは子供の遊びよりまだ些細なことのため、われわれは、その手術が本当になされたのかどうかさえも気づかないものだ。」

流行の理論を新しく案出するという目的を達成するためには、今流布している理論に適合しているパラメーターをまず否定しなければならない。理論と事実の間にある食い違いを述べ立てなければならないのである。しかし、科学者の集団というものは、ある教義(考え)に実は縛られやすく、またあるパラダイムのルールに傾倒する傾向にあるため、それに属しているメンバーや機関は抑制的である。一方、社会-政治的な力によって動かされているおかしな科学的認識であっても、科学の動きを完全に止めることはない、ということも忘れてはならない。たとえ違ったパラダイムの下での仕事であっても、そこでの科学的な努力そのものは奇妙ではあっても真実を集積するのである。

科学の歴史の過程では、一時的に受け入れられた理論上の教義の多くが役に立たないものとして古物置き場に投げ捨てられてきた。ひとたび一般的にポピュラーになった theoretical tree(図3の右)は、次第にその影響力を失い、評価はゆっくりと低下してゆく。科学というものは、ある種の理論なしには何の実験も実施できない。そのため、好ましい位置を保とうとする科学的集団は常に今あるパラダイムのルールの修正を行おうとする。その結果、新しい基盤から造られた科学的フィールドは、その科学が持っていた基礎的一般性や方法の変化を意味している。そのことについて、Tomas Kuhn(Tomas Kuhn, 1970, p. 85) は、次のように述べている。

「新しい理論の出現というものは、科学的実践と、これまでと異なったルールの導入などを伴うので、それは新しい教義があまり評判が良くないため墮落していくのによく似ている。」

グローバル地質学の歴史から見て

— 新規に台頭してきたものたちは、彼らの先輩たちには激烈にさまざまなことを言うものだ —

Larry Laudan, in: Science and Values



図3 物理学的に正しい理論なくしては、科学の世界は正確な理解から遠ざかってしまう。どんな予測も出来なくなってしまうし、仮に予測できたとしてもそれを検証することはできない。そして、真実も間違いもごちゃまぜの観察事項の山を手に入れるだけになる(左の図)。しかし、理論の樹(右の図)は真実の象徴であり、それはさまざまな自然界を概念的にもあるがままの秩序に置いてくれる。しかし、この理論の樹はまたしばしば終わりのない特別な約束事も持ち合わせている。それ故、その理論の破壊というものも避けられないことである。

収縮モデル、地向斜と安定大陸

過去のグローバル地質学の世界では、その theoretical tree (理論の樹) は、常に世間一般にも受け入れられて来た一理論とは乏しい事実の上に成り立っていた。一それが、理論を考えた当人でさえ計算(予測)できないようなデータの増加によって説明困難になることもある一このような共通の理解のうえに成り立っていたのである。19世紀の中ごろ、この惑星の外殻に対して圧縮力を作用させるような熱的収縮説が流行したことがある。熱力学分野の研究の進展に触発されて、また山脈の形成やさまざまな地質環境について説明しようとの気運から、この収縮説は Elie de Beaumont (1852), G. H. Darwin (1887) の著作の中でも詳しく述べられた。一般的に広まった見方によれば、地球の最外殻は、内部がまだ温度上昇の段階にあっても十分に冷却したとされる。冷却仮説とそれによる内部の容積減少量に従って、すでに冷却し固化していた地球表層部は縦横にひび割れたと考えられた。しかし、この収縮が地球表層部での地質学的現象に与えた影響についての説明に関しては、同調するものがいなかった。また実際に地球が収縮状態に置かれたという証拠を提供できるものもなかった。それゆえ、たがいに矛盾する考えがこの当時いくつも出されたことはうなずけることである。しかし、19世紀後半に、James Dana (1813-1895) と Eduard Süss (1831-1914) の二人による個別の考えが主流となり、それは20世紀の半ばごろまで続いた。

Dana (1873, 1881) は、地球表層部の大陸と海洋の主要な配置がこの惑星の歴史の初期段階での地殻の分化や固化の際にすでに決まったと考えた。また地殻形成の最終の産物は、薄くて重い海洋地殻の内部にモザイク状に散らばって浮いている軽くて厚いシアル質の大陸であると考えた。この考えは、アイソスタシーの考えとも一

致するものであった。しかしこれは、当時まだ一般的であった大陸と海洋は相互に置き換わるとする Charles Lyell (1830-1833) の考えとは対立するものであった。「地殻は、その初期の玄武岩質マグマオーシャンの固化の過程で、そこからシアル質物質の分離によって形成された。この初期段階に形成された大陸地塊は、その周囲へのシアル物質の付加によって次第に大きく成長していった。しかし、プレカンブリア紀以降は全体として大陸と海洋の配置はそれほど大きくは変わらなかったことから、地球の物理学的状況も大きくは変化しなかったものと考えられる。以上のことから、地球は静的であり、地殻の主要な特徴も過去から現在にいたるまで、そこに固定的なものである。」このような Dana の地球に対する見方が象徴的な言葉「ひとたび大陸となれば、それは常に大陸であり続ける」で表現され、permanentism 不変説、または fixism 固定説と呼ばれる。

アメリカにおける Dana の固定説とは異なって、Eduard Süss (1885-1901) は、ヨーロッパにおいて別の収縮説学派を形成した。彼は地球の造講史に関する最初とも言える包括的な解析を行った結果、地球表層部の地殻は軽い物質が上昇することで sial 殻と sima 殻が形成された、という考えを提唱した。海水は、地球形成の初期の脱ガス作用によって吐き出されて表層部に集積した物質である。冷却と収縮の進行は、地殻のワープと破断をもたらした。この過程で、地球表層部での大規模な陥没が生じ、そこへの地表水の排出が起こった。彼はさらに、大規模な海水準の上昇一別の言葉で言えば海進である一とその間の何度も海水準低下とがあったことを述べた。海水準のリズミカルな変動の原因を、Süss はグローバルな地球の動き、それを「地球の脈動」と呼んだ。Süss のいうグローバルシステムによれば、海洋は大陸の消費によって造られたもので、それは古生代前期の地層が大規模な海進に見舞われていることでも明らかだとしている。しかし、大陸と海洋地域の地殻は構成的にもよく似ており、かつ転換的である(そのことは Lyell がすでに述べている)。陸は海になり、逆に海はやがて陸になるのである。Süss は「長期間にわたる収縮の効果は、大陸の表面を消費して海が成長するところにある」と述べた。

Süss のグローバル理論は、本来は褶曲帯の起源一それは山脈の形成と置き換えても良いのだが一を説明するために考えられたものであった。彼は次のように述べている。「構造帯が地球上のさまざまな部分で不規則な分布を見せていることは、地殻が硬い部分と柔らかい部分に分かれているとする仮説を特に元気付ける事実である。」しかしこれは、彼の理論の中ではもっとも大きな弱点でもある。ヨーロッパで広がった収縮論の中では、世界の主要な山脈の方向は、全体が大きな円をなしているということが強調されている。そして Bertrand (1889) は、ヨーロッパ地域を横断して連続的に延びる構造帯、それは南方の方が年代が若くなる傾向にあるのだが、西方の中一北米大陸方向へ延びていくと結論付けている。この結論は、Elie de Beaumont によって最初に示唆され、Süss に

よって支持された「北大西洋大陸が沈降して海洋盆に変わった」とする考えと一致する考えでもある。しかし、この時点ではヨーロッパを東西方向に延びる褶曲帯のうち南のものが若いという事実について、このパラダイムの中ではあまり明瞭に語られていなかった。とはいえ、Süss のグローバルな理論は、同時期の北米学派に比べると、よりグローバルな視点を持っていた。

現在の大陸間で見られる化石の同一性については、現世の動物界に見られる進化の過程で起きた種間の相違と同様に、Süss の論文中でも明瞭に語られている。初期地殻が収縮し、壊れていく過程で、ある部分は沈下して海洋へと変化し、大陸と大陸のある部分は陸橋へと変化した。現在のインド洋周辺の地域に見られる生物地理的な特異性について Süss は、それを説明するためにかつてそこに存在していた Gondwana という大陸を仮想した。この大陸の主要な部分が収縮によって沈下したために、動物たちが持っていた移動経路が破壊された。図 4 は Süss による古生代後期の大陸と海洋の分布を示したものである。

Dana の造講論では、褶曲帯や山脈のグローバルな広がりについての受け入れられそうな考えが含まれていない。その点では Süss モデルは少しましなものといえる。Bertrand(1887) は、地球表層の大規模な褶曲帯を、それが形成された年代に応じて Huronian, Caledonian, Hercynian, それに Alpine の 4 つに区分した。しかし、収縮という考えに基づいた二つの地球に関するモデルにとってこれらの褶曲帯のパターンや相互の関係については相変わらず謎として残された。Süss の提唱したシステムでは、現在深海によって隔てられている大陸間の生物学的な類似性についての説明は可能であったが、一方の Dana の説では生物地理学上の問題についてはなんらの解答も与えていなかった。概していえば、Dana の考えは Süss のそれに比べて問題の解決という点では劣っていた。とはいえ、これらの二つの説は、まさしく当時課題とされていた褶曲帯の起源や形成という問題に挑み、それを解決しようとしたものであった。また時は、化石や岩石が示す事実、すなわち極地方がかつては熱帯または亜熱帯だった等々の気候変動の原因が何かを明らかにすることを求めている。しかし、収縮説ではこの重要な問題に何らの説明も与えていなかったのである。

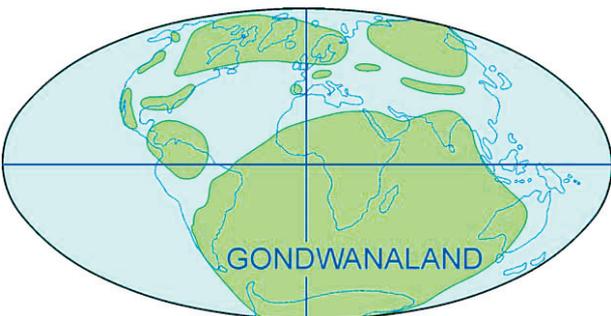


図 4 Eduard Süss の考えに基づく、古生代後期の陸 (緑) と海 (青) の分布。

アメリカで Dana に対抗する者の一人であった James Hall(1882) は、「地向斜 Geosyncline」という考え、すなわち世界の主要な山脈の場所は、かつては大陸縁に沿って存在した細長くてゆっくりと沈降しながらそこに厚い堆積物が集積した地向斜であった、とする考えである。例えば、アパラチア山脈をつくる古生代の浅海に堆積した厚い地層は、堆積作用の進行とともにそれ自身の重さで地殻の深部へと沈降し、そこでの熱膨張の影響を受けたと考えられる。Dana と Hall の間には、長大な堆積盆がどのようにして山脈へと変わったかについて細かい点でさまざまな意見の対立があった。しかし、アパラチア山脈に沿って見られる変形や押しつぶせ構造については理解が共通していた。

当初、Dana-Hall モデルはアパラチア山脈の構造を十分に説明できるものと思われた。しかし、堆積物が大西洋の方向に向けて粗粒化するというフィールドの事実、西方に向かってデルタ堆積物が広がっていること、河川システムによる堆積物が現在の大西洋で占められているかつての隆起域から運ばれていること等々は、Dana-Hall の主張に真っ向から対立することであった。さらに加えて、後に Joseph Barrell(1914) は、アパラチア山脈にはその山脈をつくる物質がデボン紀の厚い堆積物を含んでいることを述べた。Dana-Hall の他の困難さは、アメリカ大陸西部のロッキー山脈が、そのモデルが示しているのとは違って、なぜ大陸深くに位置しているかという問題である。収縮モデルでは、長期間続いた冷却作用のピークは地球史の初期のこととされている。しかし、ロッキー山脈のような主要な山脈が姿を現すのはずっと新しい新生代後期であること (Russel, 1884) などは、そのモデルには合致しない事実である。それ故、この収縮が造構作用の力の基本だとする考えには、何か誤りがあることが示唆されるのである。有名な地球物理学者の O. Fisher (1881, 1882) は、収縮仮説を捨てた。1896 年の放射能の発見は、地球収縮モデルに対しては厳しい一撃であった。

19 世紀の終わりごろまでには、アルキメデスの原理を地球表層の構造にあてはめたアイソスタシーの考えが山地形成の研究に適用されるになり、20 世紀の前半にはその考えは地質学的理論の中では一つの大きな位置を占めるまでになった (下を見よ)。放射能の発見によって弱体化したそれまでの地球の長期間の冷却と収縮という 2 大理論に代わって、アイソスタシーを基本にした考えが次第に打ち立てられてゆく。地球の冷却史に関する基本的な疑問が生ずるとともに、地球上で見られる普遍的な地形や地質学的現象の説明に関してさえ、この収縮説はかなりの程度の混乱やあいまいさを有していたのである。

アイソスタシーによって動かされた地殻形成過程はあり得るのか

山脈は浅い部分の密度が周辺より低いことによる浮き上がりにより、釣り合いが保たれているという学説が 1850 年代に Pratt と Airy によって提唱された。山脈は高い

密度の物質の中に浮いていると信じられてきた。地下の密度の違いにおいて推定される浮き上がりの関係は、ある特定の深さにおける等しい圧力からアイソスタシー (Dutton, 1889) と名付けられた。しかし圧力の補償は密度の変位によって説明されるものなのか (Platt), (地殻の) 厚さによって説明されるものなのか (Airy) ははっきりしないままである。Pratt のモデルは一定のアイソスタティックな補償を推定しているのに対し、Airy は高い山脈の下では密度の低い地殻が厚くなっており、標高の低い地域では地殻が薄くなっていると主張している。Fisher (1881) は、2つの競合するアイソスタシーモデルのうちでは、Airy のモデルが地質学的な観察と符合する唯一のものであると論じた。彼は、側方圧力が上昇する山脈と山脈の下の岩石がつくる細長い地域の地殻を短小化し、厚くしていると主張した。様々な厚さの浮き上がる外側の地殻の埋め合わせには、より高密度の流体あるいは塑性変形する物質の存在が要求される。

Airy 説を受け入れた Dutton (1889) はアイソスタシーの地質学的な価値を理解していた。彼は、大陸縁に沿って上昇した陸地を侵食し、削剥された堆積物を堆積させる過程の露出はアイソスタシーの継続的な混乱を強制するであろうと述べている。彼は堆積物の量の増加により、地殻の沈降は一定の深さの可塑性の物質との置き換わりを保証し、時折火成活動で示されるのと同様に上昇と浸食が起こる大陸の縁に向かって地下の物質の流れが生み出されているのだらうと述べている。Dutton のモデルにおいては、地下に横たわる可塑性の層—地塊の入れ替わりに関連しているものだが—の乱れは、アイソスタティックな平衡を回復する方向における地質学的変化を背景にした動力的な力である。したがって海岸線に平行な山岳地帯は、地下で高粘性の陸の方へ向かう流れの産物と見なされる。それは地殻の体系的な短縮や褶曲を生み出している。しかしながら、Dana の短縮モデルのように Dutton の唱えるシステムの説明能力は非常に限定的であるため、一般的な理論にはなり得ない。そして議論されるものと思われる原則的な問題についての混乱が生じてしまった。

Dutton の褶曲山脈の説明に反対して、Russel (1984) は出現した拡張の条件が盆地や山脈の形成に基本的な役割を演じていると指摘した。そして傾いた地塊は、断層運動が起こる前に占めていたスペースよりも多くの水平的な広がりを含んでおり、それ故 Great Basin における断層運動は側方への拡張を伴っているという提案がおこなわれたと述べている。Russel はまた盆地や山脈の断層運動や地塊の回転は後期第三紀の現象であり、これらの現象が火山活動後に起こっていることに気づいていた。これらの複雑な事象に加え、コロラド高原は伸張に伴う隆起を被っていることが認識されてきている。そのような観察は Fisher と Dutton が彼らの仕事のもとになったアイソスタシーの Airy モデルとは相容れない。Le Conte (1889) は盆地や山脈の一般化されたモデルを提唱した。彼はそれが地殻のアーチングと膨張の結果生じる

破砕によって形成されることを論じ、アーチは側方からの圧力ではなく、下部地殻の液状物質の膨張によって引き起こされたリフティングによる引っ張りによって形成されたことに気づいていた。Le Conte の結論は後述の Joseph Barreil の見解に一致する。

大陸と海洋地殻の密度の相違は事実であり、したがってそれは少なくとも十分に広い地表地域で成立している。アイソスタティックのメカニズムは、いくつかの Pratt のモデルによって導かれている。もし地球がより広い荷重のもとで柔軟であり得るならば、より詳細な地形や推定された密度の相違はどのような均衡に近くなり得るのだろうか。Gilbert (1889) は大陸内部のより詳細な地形の特徴の説明にアイソスタシーを用いなかった。収縮説のように地質学的現象の体現者としてのアイソスタシーの問題は、大きな未解決な問題を抱えている。しかしながら 1900 年代、Hayford と Bowie (他に Hayford, 1911; Hayford and Bowie, 1912; Bowie, 1917) は論点を再吟味した。そして主にアメリカ国内の測地と重力測定を行ってその意味深い数値を分析し、より堅固な質的な基礎を築き、Pratt モデルにしたがったデータを解釈した。一方 Barreil (1914a-1919) は、Hayford と Bowie の得た結果に対し、全く異なった解釈を行った。

Hayford-Bowie-Barreil の再考

Pratt の枠内で働き、地殻の柱 (密度はそれぞれ異なるものとすいていされるが・・・) に伴うアイソスタティックな反応を考慮しながら、測地学者の Hayford と Bowie はアイソスタティックな調和と地表付近の重力異常を計算した。彼らによれば、アイソスタシーによる重力補償は限定された場所でも完全であり、すなわち山脈や谷、島においてもその規模にかかわらずそれは成立する。荷重によるへこみや削剥による上昇はアイソスタシー理論に基づく推定によるものである。補償される深さの異なった価値に符合する垂直かつ重力異常の偏りの地形的なアイソスタティックな修正のための処方やリストを生み出したあとで、彼らは地球上における静水学的な平衡の深さ (それはアイソスタティックな補償が成立する深さ約 110km くらいと思われるが) を推定した。地球は、侵食と再堆積を通じて地表物質の再分布に起因する初生的な弾性法における補償の深さに反応するダイナミックな受け身の物体であるという Hayford と Bowie のモデルに合致するという事に気づく事は重要である。

アイソスタティックな力と平衡は自然の一般的な営みとして考えることができるが、下にある仮定と Hayford と Bowie の結論は、地質学的事実とは合致しない。したがって一連の論文において Barreil (1914a-f と 1919) は、Hayford と Bowie の理由の中で欠点として彼が見た物を議論し始めた。Barreil は、1) 地殻は強靱で測地学者が考えるような脆弱なものではない、そして大きな圧縮力を調整することができる。2) アイソスタシーの原理を説明することを求められた弱い層は、地殻内ではなく、地殻の下に見いだされ、彼はそれをアセノスフェアと名

付けた。Hayford と Bowie のデータベースを見ると、実際アイソスタティックな平衡から大きく逸脱している事を示す地域があり、Barrel はそうした地域はテクトニクス上非常に興味があると述べている。測地学者は地表の荷重の移動に非常な関心を払ってきた。侵食は荷重の軽減や隆起を引き起こし、堆積は荷重がかかることや沈降を引き起こし、そして地震は、侵食堆積が起こっている地域において巨大な物質移動へのアイソスタティックな調整の産物といえる。これらはすべて誤りだと Barrel は論じている。

Hayford/Bowie の結論を鋭く否定して、Barrel は地表の現象に関連する鉛直変動は、まったく逆転していると考えていた。地殻の隆起や沈降は、仮定されたアイソスタティックな補償地帯の下での地殻物質の垂直変動の産物であり、したがって侵食や堆積作用、地震やその他の構造的な運動のような地表で見られる現象は、より深い地球内部から応答である。それゆえ、Barrel は地球内部物質の鉛直方向の再分布は、測地学・地球物理学・地質学的過程を背景にした主要な動的な力の結果であると論じた。実際、Hayford-Bowie のデータは、地殻が圧縮力を支えることができることを示すアイソスタシー平衡から地域的な分離を示した。そしてさらに彼らのデータは、地形学的な領域、構造学的な領域そして地質学的な形成が無視できる事を示している (Barrel, 1914c)。

Barrel によって光が当てられたその事実は、実際 Basin and Range 地域やコロラド高原のようなアメリカ合衆国における鉛直変動のよく知られたケースに合致している。これらの例は、補償箇所流れ込む深部からの不規則な流れの流体がリソスフェアの上部へ流れ込みながらアイソスタシー平衡に擾乱を与えるのではないかということをおぼろげに思わせる。浮き上がる熱い物質は、密度の変化を誘導する広域的な火成活動の原因や広域的なリソスフェアの鉛直変動に関連するものと考えられる (Barrel, 1914d)。Hayford/Bowie による重力データ (図 5) の詳細な研究は、アイソスタティックな異常は不規則な方向を示すのではなく、一定の直交するパターンを示す傾向がある。すなわち合衆国東部の広域的な節理方向と調和する NE-ENE そして NW-WNW 方向である (Engelder1993, 第 2-15 参照)。Barrel は、垂直方向への溶融物質の地球の外側の殻への浸透のために、地殻の下で軟らかい可塑性ゾーン (アセノスフェア) は、境界をはっきりと示すことはできない。したがって Hayford/Bowie の計算において先要条件と見られていたような推定された補償の深度は一樣ではない。Barrel が助言したように不安定なアセノスフェアは、実に近代的な地球物理学的な研究によって支えられているのである。

Barrel は、局地的にも広域的にも沈降を引き起こす下部地殻への玄武岩物質の大きな貫入によって地殻の密度の十分な増加は予測できると主張した。この過程で大陸地殻は - もともとはおそらく全地球的に広がっていたと推測されるが - 割れてかけらになり、そして大洋の底はか



図 5 Barrel (1914b) から提供されたのと同じく William Bowie によってまとめられた明確な残留重力の軸。重力地図は、Barrel (1914b) によって、異常は地表の地形とは何の関係もなく、したがって深部の巨大な異質物質あるいは地球内部へ向かう力によって引き起こされたに違いないということを議論するために再解釈された。

つて陸地が存在したであろうその場所に形成されたものと推定される。沈降は、最終的に大陸縁辺部と深い大洋盆が形成の形成に関与した縁辺正断層によって証拠だてられる。私の知る限りでは、Barrel は大陸と海洋は永続するという Dana の概念に反駁し、かつてすべてをとりまく大陸地殻は、現在の大陸が寄せ集まったものと深い海盆が変わっていく可能性を熟慮する最初の地球科学者であった。

Barrel のアイソスタシーについての再考察は、改定されたモデルが多く地質学的事実を伴っているもので、以前よりもより多くの現実的な結果をもたらした。しかしながら、Barrel が修正した考察でさえ、褶曲帯の分布と年代傾向や上昇地域内の変形時期に関係のない最近の世界中の山脈の驚異的な上昇そして古気候帯の累進的な移動のようなテクトニクス上の重大な問題を説明することは不可能であった。アルキメデスの原理は物理学的な事実である。しかし自然地理学や地質学的な過程を説明するためのその適用は、適切なものではない。アイソスタシーの原理は補助的なメカニズムとして役にたてることができるのである。地質学は、今だに地球の歴史における種々の現象を説明するための本物の理論を待ち続けているのである。

惑星自転における全地球的なテクトニクスの変化への結びつき

19 世紀の終わり頃、収縮とアイソスタシーモデルに直面した状況での議論を活発化させるために、ドイツとオーストリアの地球科学者は、全地球上の地質学における新しい方向性を示した。古気候学と地球物理学の統合によって、磁極移動の考え方が具体化され、大陸移動に関する古い推論の支持に関する議論が詳述された。例えば Wettstein (1880, 参考までに Wegener は 1929 年である) は、大陸が潮汐力のために西向き力を受け、大きな相対的転移を被ると主張した。一方 Löffelholz von Colberg (1895, 参考までに Wegener は 1929 年である) と Kreichgauer (1902) は陸地の相対的な位置を変えることがない地殻全体の西向き回転について議論している。彼

らの移動に関する見解はそれぞれ異なるものの、これらの著者たちは、明らかに Süss の全地球的な総合的見解の影響を受けている。そして特に Wettstein は、大陸が沈んで大洋底ができたと主張している。1902 年にオーストラリアの地質学者 A. Damain Kreichgauer はテクトニクスと地球の自転の間の構造的な関連を初めて提案した。後になって Wegener (1912, 1922 そして 1929) は、Kreichgauer に極を消滅させる力—後になって Eötvösforce (Eötvös, 1913) と命名された地球の回転動力とアイソスター原理が結びついた効果—の発見について賛同した。Eötvös は極移動—Wegener が強く支持した物理概念—に関する Kreichgauer の見解を無視したのだが、

Kreichgauer は 1902 年の本で極から離れつつある地殻を駆動する赤道方向への力は、その当時の赤道に沿って一列に並ぶ褶曲帯を形成すると提案した。一方造構—火成活動帯である第 2 セットは、太陽と月の潮汐力で西方への曳力のために、子午線の設定（対応する古赤道帯に対して高角をなす）に符合する中で進化してきた。時代ごとの古赤道帯の様々な位置を決定する岩石と化石から引き出された古気候の率直な解釈に基づく極の移動は真実のように思える。動力的な理由で、回転軸は一列にならび、慣性に近い、主要な軸を維持している。それは、惑星質量の再分布のために地質時代を通じて変化してきたことが推測される。言い換えると極軸の明らかな移動は、地球球体が宇宙空間で断続的に反転する結果である。

Kreichgauer の動的なモデルの中で、地球の慣性の軸における必要とされる変化は、相対的な大陸移動なしに全体の地殻の赤道方向や西方への移動によってもたらされた。そして古赤道の相対的な位置の中で伴われる変化は、地球を横断する様々な方向のテクトニックベルトを発生させるであろう。したがって異なった地質時代に対して彼の唱えるテクトニックシステムと古気候での観察を結びつけることにより、Kreichgauer は中期古生代を除く極の移動を描き（図 6）、古地磁気の証拠から導かれるものときわめて類似の結果を示すことができた。

Kreichgauer の力学構造地質学の体系において、壮年期の山岳地帯は、地球上の各所で細長く伸びた低地をつくる下方への断層運動と圧縮された赤道地帯に対して直交する裂けた地帯に沿って形成された。このように多くの褶曲帯の変形時相に先行する Hall の細長い堆積盆は、それまでは以前の状況を失うような全地球的な収縮に頼ることのない動力的な説明を与えられる。彼の構造地質学説と共に、Kreichgauer は地球を取り囲む造構—火成活動帯の分布の移動についての動的な説明を与えた最初の人物である。地球に関する他の理論に対する問題には答がない。一方 Kreichgauer の説明の中では違反—逆行の周期は、広域的な相移動や今日では普通に受け入れられている Süss によって強調された海面の世界的同時変化に対する著しい不一致が生じたままである。

もしアイソスタシーとリソスファアの西方移動があるな



図 6 先カンブリア時代以降の地磁気極の試験的な移動経路—Kreichgauer (1902) に基づく。しかしながら、より近代的な古地磁気や古気候の研究は、南大西洋の東縁に沿う古生代の極移動をはっきりさせた。それは中期～後期古生代に中部～南部アフリカで確立された極気候に一致する。前期第三紀の磁極は亜熱帯から温暖な中緯度の気候にヨーロッパがあったこととよく調和する。一方現在の地理的な位置関係は、第三紀後期の前には達していない。Kreichgauer の試験的な極の移動カーブから、古生代中期以来地球の緯度が 70° 移動していることが推定される。この結論は古地磁気の証拠と驚くほど一致する（例えば Storetvedt, 1990）。

ら、なぜ大陸移動は起きないのだろうか

20 世紀初頭には、外側の結晶質球殻（リソスフェア）の下に軟らかく伸びやすい層が存在することが広く受け入れられていた。その層は、表面の水平的な変動の小さな程度の運動力学的な説明と同様に、垂直方向のアイソスタティックな調節の層を生み出している。大陸はもはや堅く固定されたものではなく、むしろ強く限定された移動体とみなされていた。Hayford によれば、Bowie や他の水平論者は Alfred Wegener (1912, 1915 そして 1929) が強く反対している見方、すなわち垂直なアイソスタティックな動きの副作用である。Wegener は磁極移動に関する Kreichgauer の証拠を確立し、この地球力学概念に関する古気候の基礎を普及した (Köppen and Wegener 1924)。Wegener 自身の言葉の中で「この大規模な気候の転換—ヨーロッパにおける熱帯から温帯、スピッツベルゲンでの亜熱帯から極地への転換—は、磁極と赤道の移動と気候全体のシステム転換を示している。事実、この提案は同時期の南アフリカで起こった前述の地域と同じくらいの規模で、しかもヨーロッパとは逆の気候変化によって確かめられている (Wegener, 1929)。さらに彼は Spitsbergen と南アフリカを通る子午線が大規模な気候変化帯を通過し、そしてこの（もっとも大きな気候変化の子午線）90° E と 90° W の子午線の間で同時に起こる気候変化はなかったり、まったく重要でなかった。そしてこれは事実である。極移動（図 6）に関する Kreichgauer の初期の版を更新する Wegener の気候に基づ

いた古赤道システムは図7に示されている。

ある惑星の表面上の Kreichgaur の慣性曳力は、最近の相対的な大陸の移動なしでの西方への移動を表しているが、Wegener はすぐそばに実在する気候の証拠を持つ山脈の配置についてあまり具体化されていない学説に基づいて構造的な仕事の土台を作った彼を非難している。一方 Wegener 自身の全地球的な統合への関心と共に、彼の仮説には相容れない化石のデータ（下を見よ）を無視して選択されたペルム紀～石炭紀の気候のデータにより大陸を無理やり移動させようと試みたことが議論された。異なった大陸における現在と過去の動物相と植物相の比較研究から、古生物学者は観察された生物学的な類似性を説明するために大洋を超えた陸橋説を唱えている。これら大陸間のつながり（陸橋）は後期白亜紀～第三紀初期の間に沈降し、消滅した。実際大陸間の陸橋の沈降は経験的に言えることであり、1960年以後の深海掘削によって繰り返し実証されている。しかしアイソスタシー理論に強く寄りかかっていた Wegener は、花崗岩質層がより重い下の層へ沈むことができない珪質の破片層の頂点をあらわしているという長く信じられた意見を支持している。それにもかかわらず彼は反対の証拠が要求された時にこの厳しい見方を示した。例えば広大なアゾレス諸島海台への関心と共に、彼は1860年代から集中していたこれらの島々からの証拠の岩石が若い火山岩の最上層の下に大陸の下層が存在することを示したと結論した。言い換えると古い大陸は壊れ、沈んだということである。実際彼が以前のアゾレス大陸を沈水させた時、彼は陸橋が沈水したことの地球物理学的不可能さをどのように見なしているのだろうか。この重大な矛盾にもかかわらず、Wegener はアイソスタシーを彼の大陸移動に関する仮説—現在の陸地の物理学的な一体化は以前の大陸間の生物学的なつながりを理解する手がかりになる—とまったく矛盾しないと見なしていた。

Wegener (1929) はかつて2つの平穏な水平面があったと仮定した。そしてそれはわれわれが大陸と海洋に言及するとき地殻の中で2つの異なった水平面を扱うという不可避の演繹であるように思える。Wegener は、原始地球は表面が軽い花こう岩質の物質でできた薄い層で覆われていたと推定した。それは、潮汐摩擦やその他の慣性機構を通して古生代により厚い地殻を持った大陸の集合体—パンゲア—として認識されている。彼は、もしすべての地殻の構造がなめらかであるならば、花こう岩質の最上層は惑星全体の表面をうすく覆うであろうと述べた。しかしながら彼が仮定した超大陸パンゲアは後々分裂・現在の大陸の位置に移動している。古生代以降を占めるこの後者の大陸移動の概念は、再び内部の力に帰される。しかし、正確には同じ動的な効果が根本的には異なった結果—最初の花こう岩質層の超大陸への集結そして分裂・移動—を持ちうるために（移動概念は）未だにきちんとした説明がなされていない。著者は他の場所で（この問題を）詳細に論じてきたが（Stretvedt, 1997, 2003）、Wegener の大陸の再配置と次の移動は、多くの物

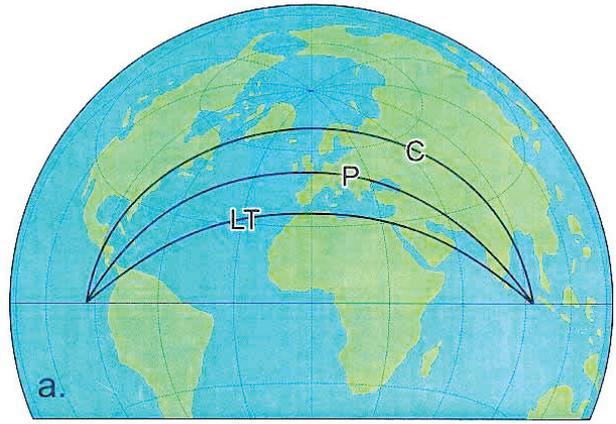


図7 気候による岩石と化石の証拠に基づく古生代中期以降の古赤道の位置の変遷：石炭紀 (C)、ペルム紀 (P)、第三紀下部 (LT)。Wegener (1929) の記述に基づく。赤道の現在の位置への最後の移動は、古第三紀（始新世/漸新世境界付近）に起きた。挿話的な極移動現象は、地球の脈打つ歴史—地質学的な時間境界によって表される動力的構造的な鼓動の立ち上げを与える—の最も重要な引き金のように思える

理学的、地質学的そして古気候学的な問題を提起した。

南アフリカにおける明確な氷河の活動だけでなく、20世紀の最初の10年間で後期古生代の氷河の跡が南アメリカ、オーストラリア、インド、北西シベリア、中央アジア、そして北アメリカから報告された。推定された石炭紀～ペルム紀の後者の氷河の跡は、一見南アフリカにおける氷河の中心よりも小規模のように見える。しかしながらそれは、南半球とインドのすべての氷河地域が、南アフリカ周辺に存在する南極の氷冠を伴って物理的に接しているという Wegener の偉大な前の業績のひとつになっている。図8は、du Toit (1937) に基づき修正された後期古生代の大陸の配置図である。Wegener の大陸合体における弱点は、北半球における氷河の活動を無視していることと、南極大陸から産出する化石が彼のモデルにまったく合わないことである。Wegener の大陸合体が出されたとき、南極大陸は岩石と化石から熱帯～温帯の気候であることは明らかで、パンゲア大陸の極地の気候ではなかった。しかし彼はこの事実を明らかに無視した（要約と議論は Stretvedt, 2003 を見よ）。彼は自分の考えを都合よくするために、煩わしい事実を却下したのだ！もし Wegener が、疑いのない先入観で作り上げた大陸移動というゆがんだ科学的幻想を避けようとしたならば、彼は北極と南極の両地域が、古生代後期から極めて密接に熱帯から極気候へ同時に変化したことを認めるだろう。

彼と同時代の人たちの大多数に反して、Wegener は彼自身議論の先頭の中で、（大陸移動の）メカニズムの問題を取り上げていなかった。彼は、地球内部の動力に関する問題は難問であり、すべての問題の始まりである大陸移動と極の移動の確認は、岩石の証拠と地表地質調査によって明らかにされることを理解していた。したがって、du Toit の大西洋沿岸のアフリカと南アメリカの広域の海岸線の形の一致に大きな信頼を与えていた。しかしながら、du Toit はいくつかの批判的な項目をもとに

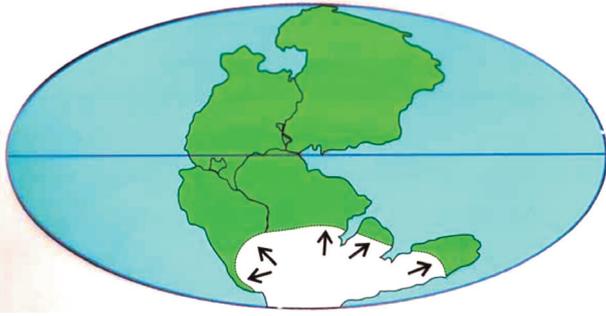


図8 やがて流行となる後期古生代の大陸配置である。Du Toit (1937) は Wegener の Pangea を2つのゆるやかな互いに関連する大陸に分けた。そして南を Gondwana、北をローラシアとした。しかしながら Wegener と Du Toit は共に後の研究者が無視した保留事項、つまり大陸の移動前に大陸を境する大西洋が閉じていたことに反対した議論を展開していたのである。加えてこの大陸配置における最も重大な誤りは、南極大陸が南極の氷原に覆われていることである。その証拠は何もない。すでに一世紀後の化石の証拠から、南極大陸は古生代全体とその後のほとんどの時代を通じて熱帯か亜熱帯の気候であったことが明らかにされている。カンブリア紀以降ほとんどの時代、これまで示されてきたように南極大陸には南の磁極が存在しなかったのである。(南極に磁極があるという彼らの) 希望的観測が先行したのである。

Wegener に追随してはいなかった。例えば彼はテチス海が間に入る2つの超大陸— Gondwana とローラシアを想定していた。この仮説は最近の40年間グローバルテクトニクスを束縛しつづけてきた。加えて彼はアフリカと南アメリカとの間に入る少なくとも400～800kmに渡る移動の前のずれを呼び起こしている。彼はこの分離を、大西洋をはさんで反対側の地質学的な推測されたつながりの変成相における相違を説明するために用いた。これはもちろん以前の2つの大陸の合体を支持する議論がされており、地質学的な類似性がまったく明確に切られていないことを意味している。事実、もしある人が隣接する大陸の縁の地質学的な様式を得るために、数100kmに渡る最初の大陸の分離を支持するならば、求められた大陸の分離に対しての限界をどのように設定するのであろうか。

最近の40年間 Wegener の仮説の最初の提案に従い、公に移動説を擁護する改宗者は、ごくわずかであった。大陸移動説を支える主な地質学者は、Daly (1923, 1926)、Holmes (1928, 1929 そして 1944)、そして du Toit (1927, 1937) である。Daly と Holmes は、古典的な概念すなわち温度収縮・動かない大陸・そして永続する大洋底やアイソスタシーモデルといった問題を解決しようと移動説に転じた。それらに対する特別な関係のいっぽうで、アルプス褶曲帯の形成に関連した地球の熱の集積であるように思われる。しかし、Wegener の移動前の大陸配置が直面する基本的な問題—南極大陸の古気候によって引き起こされた未解決の難問—は完全に無視されているように思える。あらかじめ詳細な観察をする地質学者が、移動に関するメカニズムを棚上げにし、決定的な重要事項—彼らが議論するのに十分なデータの詳細—の地表での観察に何ら関心を払っていないのである。

Daly の大陸移動のメカニズムは重力である。陸地は、最初に温度収縮あるいは地殻下の物質の流れによって変形することが原因となって山のように積み重なる。そして、そのような地形的に上昇した位置から、なめらかな粘性の低い地殻の下層の上層に流れ落ちようとするであろう。Holmes は、地球内部の放射性元素の作用による熱の滞留と、この集積した熱の解放は、膨張収縮を繰り返す脈動する地球を生み出した、と考えた。しかし、マントル対流が最も重要である(ただし、惑星の一般的な収縮なしに)。そして Holmes は仮説的なマントル対流が大陸移動の主要な原動力であり、そしてその関連する構造的な結果—メカニズムは Bull (1921, 1927) が山脈の形成を説明するために提出されたものである—と見なししていた。

本稿の著者の知識では、南極によって持ち出された矛盾する古気候の問題は、移動説に反対する人々によってまったく議論されていないように思える。例えば Wegener の熱心な支持者である Arthur Holmes (1928, 1929, 1944) は北半球のペルム紀～石炭紀の氷河の活動を無視するか、説明を避けている。そして彼は、南極大陸にあてがわれた磁極の位置は必ずしも確かではないと認めているが、大陸移動仮説において第1に考えられなくてはならない磁極の位置と矛盾するこの大陸からの化石の証拠が増え続けていることには言及していない。大陸移動説の信奉者として Holmes は、Bull (1921, 1927) と同時代に大陸移動の原因となり、おそらく山脈の形成に関連した駆動帯としてのマントル固体物質の対流に関する仮説を繰り返した。その仮説は、不規則に浮き上がる熱いマントル物質がモホ面まで上昇してその後横方向に広がり、冷やされるとマントル深部まで戻っていくというものである。実際1920年代初頭に始まった海洋での重力探査は、その提案に沿っているようにみえる。

海域重力異常：伝統的考え方に対する困りごと

オランダ測地委員会による海洋重力測定法の開発 (Vening Meinesz, 1929, 1932) は、多くの海域が想定されるアイソスタシー平衡から大きくずれていることを示した。Pratt-Hayford-Bowie モデルによると、正の重力異常は、大規模な堆積盆地が存在する沿岸域で発見され、完全に平衡状態にあると思われる海洋深海部には存在しないはずである。しかし、重力測定結果は、そうではないことを示した。すなわち、大規模な地震-火山活動が発生する幅広い陸域を境するジャワ海溝に沿って、大きな負の重力異常が観測された。それは、圧縮によって地殻が下方撓曲していることを示唆し、造構的要因としてマントル対流の可能性が高まった(たとえば、Molengraaf, 1921; Holmes, 1928; Pekeris, 1935)。この結果は予測だにされていなかったもので、地質学におけるアイソスタシー原理に衝撃をあたえた。

当時優勢であった考え方では、堆積速度が大きい海岸域はアイソスタシーへの適合に時間的遅れが生じているた

め、(地形によるアイソスタシー補正後の)強い正の重力異常が生じると予想された。しかも、ナイル川デルタやミシシッピー川デルタでは、そのような異常はみられなかった。伝統的な考え方では、海洋のより深部では十分にアイソスタシー平衡に達しているが、ジャワ海溝のような大規模な重力不足が、Bartlett Deep(カリブ海北西部)やNares Deep(大西洋西部)でも発見された。さらに驚いたことに、メキシコ湾はほぼ全域にわたって比較的大きな正の重力異常を示し、正の重力異常はプエルトリコ南方やカリブ海全域でも報告された(Vening Meinesz, 1929の議論と比較せよ)。これらの新しい観測結果は、1) 流行のアイソスタシー原理や、2) Wegenerの漂移モデルにもとづく予測に反し、また、3) 北米で長らく信じられていた恒久的海洋盆にも矛盾していた。

Wegenerの側方への大陸漂移によると、移動する大陸の前縁に沿って一大陸地殻に働く圧力が増大するため—正の重力異常が生じ、それらの背後の空間には負の重力異常が期待される。したがって、Wegenerによる北米の西方漂移は大陸の西縁に正の異常が、東縁に負の異常が存在することを意味する。しかしながら、北米大陸が東西に同時に移動しているかのように、東縁と西縁の両方に正の異常が発見された。少数の漂移支持者にとって、北米周辺の海域重力は、大陸の側方移動という考え方に大きな障害をもたらし、アイソスタシー学派のなかでも、Pratt-Hayford-Bowieシステムは信用を失ったかに思われた。地震研究は、海域と同様に大陸域でも地殻厚度に大きな変化があることを解明しはじめたが、まず問題になることに、地殻構造の大きな変化がどのようにして生じるのであろうか？地殻の沈降はほんとうに表層での堆積物の集積に起因するものであろうか、それとも、何かよくわからない上部マントルの作用が地殻薄化、アイソスタシー沈降、そして、それにもなう堆積盆地の発達をもたらすのであろうか？

海洋地殻が広域的にアイソスタシー均衡から著しくずれているのではないかという最初の発見は、1930年代半ばの海洋探査によって確証された。これにかかわって、Field et al. (1933)とHess (1937)は、Lesser Antilles弧にみられる負の重力異常がカリブブロックの全般的な東方並進によってもたらされる圧縮力に由来し、広域的圧縮域の地殻が下方撓曲することによってもたらされた、と示唆した。Hessは、蛇紋岩化したかんらん岩の貫入によって負の異常を説明した。カリブ海北西部のBartlett Deepにかかわる負の線状異常帯は、カリブブロックの移動にもなう左横ずれプルアパート構造おける非均衡部であるという。彼らの造構的解釈は、図9に図示される。このような実証的データによって、潮流に変化が現れ、地殻の可動性に関する議論がふたたび浮上した。Nares Deep(大西洋北西部)とBartlett Deepにおける大きな負の重力異常が示すアイソスタシー均衡の欠如は、これらの表層凹地が若い地形であることを示唆する。そして、西北西方向のNares Deepの重力異常の長さが、地形的凹地の全長をうわまわるので、そ



図9 Bartlettおよび西インド諸島の重力異常からみたカリブブロックの運動(矢印)。この図は、Field et al. (1933)から編集。Hess (1933)は、カリブ海をとりかこむ負の異常帯は全般的な東方への並進に由来すると提案した。太い矢印は、提案された最大圧縮方位を示す。

れらがDeepの質量欠損に起因するのではなく、重力異常と地表凹地はともに、何か別の原因に由来する複合的現象であると考えるのが適切であった。いいかえると、既存の学説は増大するさまざまな事実を説明することができず、統一的地質学説はより遠のいたと思われた。

統一的学説の欠如

すべての地球の古典的学説が弱体化した1929年代に、Stille (1924)は冷却収縮地球の枠組みで最後の総合的統合という仕事を行った。そのなかで、海水準変動をとまなう地殻の振動的鉛直運動—これは造構作用と火山作用をもたらすと喧伝された—は、惑星収縮に起因する撓曲の産物であるとされた。しかし、以前からもそうであったように、地球にみられる多くの事実—山脈の地形隆起の新しさ、造構帯の地理的方位と相対的位置、古気候の帯状配置の間欠的移動、海水準の海進・海退変化の顕著な相違—を説明することができなかった。地球進化にかかわるさまざまな現象がそれまでの想定よりもはるかに多様であり、引張的および脈動的運動が主流モデルに適合しないことが明白になった。学説という点で地質科学は暗闇に落ち込み、この困惑した状況は第2次世界大戦後までつづいた。全地球的地質をあつかった提案はほとんどなく、地球の起源に関するもっとも基本的な仮定でさえも疑問視された。たとえば、Chamberlin (1897)がLaplaceの星雲説や初期地球は熱い溶融体であったとの共通理解に反論した際に、見解は大きく”後退”した。彼は、地球が岩石塵が集積してできた冷たい天体として誕生し、放射性物質の存在によって次第に加熱されたと提案した。この説明によると、初期の不均一性の少なくとも一部は残存していることになる。それゆえ、地球内部には何らかの化学的不均衡が依然として存在し、惑星脱ガスが現在も作用していることになる。

Chamberlinの説明に関して、主流の仮説の不適切さを指摘したHixon (1920)は、造構作用が内部ガス放出によってひきおこされるダイアピル現象であると提案した。そして、その後の海洋重力測定は、それ以降、地殻下の深

度における予想外の質量異常が存在する可能性を想定する機運をつくりだし、マントル対流への展望をもきり拓いた。収縮説とアイソスタシーモデルが直面していた難問にもかかわらず、これらの流布していた単純化された視点は生きのびた。ヨーロッパで優勢であった権威的視点は Süss の収縮モデルであり、それには、わずかに地殻の可動性がふくまれていた。いっぽう北米での権威的視点は、Dana の固定論や流行のアイソスタシーモデルであった。それらは地質現象の体系を説明できないにもかかわらず、20 世紀半ばをすぎても典型的な“凍結した枠組み”として存続し続けた。地質科学における伝統的な判断基準は、それらの慣習に矛盾する証拠が増大していることよりも、はるかに重視された。古い学説に代わるものとしての Wegener の大陸移動が議論されたが、拒絶された。

Oreskes (1999) は、大陸漂移に関する議論は基本的には 1935 年までには終わっていたと述べ、Runcorn (1981) は、1950 年頃には漂移仮説は間違いで、まったく忘れ去られていたと記述した。第 2 次大戦後の 10 年間は、漂移仮説が脇役であったとしても、それは、伝統的学説がより強く好まれていたためではなかった。すべての学説が不評であったにもかかわらず、伝統的学説が生きながらえていた。たとえば、沈水陸橋という古い考え方が依然議論されたり (Mayr, 1952)、周縁地向斜の隆起によって太古の剛塊のまわりへ地殻が成長するという考え方が勢力をたもっていた (Kay, 1951)。Stille による地球の脈動的造構挙動 (Stille, 1924) — 長期の静穏期間と交互する世界的同時的な変動期 — は、Umbgrove (1947) に基本的に踏襲された。喧伝されていた収縮とそれによる造山帯の全世界的分布に関しては、地球の若い山脈が高角で交わる 2 つの大円 — 1 つは太平洋周縁、もう 1 つはアルプス造構 - 地形軸 — に沿って分布することが再び強調された (Wilson, 1954)。不適合性や矛盾する観察事実が増大していたにもかかわらず、幾人かの研究者は依然として収縮モデルを推進していた (Scheidegger and Wilson, 1950; Landes, 1952; Lees, 1953; Wilson, 1959)。しかし、海洋深海部の岩石と地殻構造に関する知識が急速に増加し、新しい事実を説明する何らかの根本的再考が必要になったことは明らかであった。少なくとも、機能的な地球学説を長期にわたって探求していた海洋地球物理研究者たちは、新しい有望な路線に踏み込んだように思った。海洋底基盤が断層運動と造構変形を受けてきたことを示す証拠が増大した結果、深い深海盆が造構的に安定した構造をもっているという印象から、最終的に決別することが迫られていた。

科学においてはいつもそうであるように、新しい基本的視点が伝統的思考を駆逐する際には、転換への懐疑論者や反対者は、新しい仮説への賛同者に比べて大多数を占める。このような科学における一般則と同様に、実際に論理的討論に加わったのは、ごく少数の地質研究者であった (たとえば、Le Grand, 1988 を参照)。ある特定の科学分野において、新しい基本的考え方は、大勢の科

学者一人らの生涯目標を、当時の学説の枠内における観察と記載に捧げる — の研究対象になることは決してなかった。したがって、脅威となる新しい考え方に対する感情的抵抗はつねに強烈なものになるだろう。しかし、潮流がついに転換すると、問題の専門家集団は一般に何らかの救済仮説を發明し、基本的見解の転換がなぜそれまで起きなかったかを合理的に説明しようと試みる。顧みると、1960 年代後半における漂移モデルとその現代版であるプレートテクトニクスの最終的勝利後に、初期の 2, 3 の漂移支持者を先見性のある理想主義者とみなすために、そして、多くの敵対者を偏見と科学の進歩を妨げたという理由で侮蔑するために、その“勝利”を祝福し、劇化する顕著な傾向が現れた。しかし、19 世紀後半に流布していた地球の造構的問題のほとんどは、当時と同様、今日でも焦眉の課題のままであるのも事実である。

ノルウェー卓状地からの視点 — 1950 年代後半 ~ 1970 年代半ば

1950 年代後半に私がベルゲン大学地質学科の学部生であった頃には、カリキュラムの中に全地球地質学はほぼ皆無であった。地球が“脈動”していること — 造構 - 火成活動の長い静穏期が、地質時代の境界を規定する比較的短い地質の活性期によって途切れた — は、理解されていた。地球は熱的平衡によって十分に理解できる天体であるとの共通の観点のために、内部の駆動メカニズムはほとんど問題視されなかった。たとえば、ノルウェー西部のカレドニア褶曲帯を説明するためには、北西からの“造構圧”によると記述されるだけだった。地球は、その初期に、ほぼ完全に化学的分化を遂げるほど熱く熔融した惑星であった、というのが共通理解であった。全体として、大陸と海洋は定常的な地形と考えられていたが、アイソスタシーと地向斜は、水平圧縮による地殻の厚化とそれに起因する浮揚性隆起 — 運動造山運動とよばれる — による一定の地球収縮を説明する共通概念であった。

ノルウェーの地質学はドイツ — 中央ヨーロッパ — の伝統に強くむすびついてきたが、私たちの先生の幾人かは第二次世界大戦後の合衆国の大学における研究交流計画を経験した後は、北米の考え方に大きく影響されていた。その結果、私たちのカリキュラムには、Harry Hess の下方座屈地向斜概念 (Hess, 1938)、Philip Kuenen の造構モデル (Kuenen, 1936)、David Griggs の地殻テクトニクスの駆動力としての深部対流仮説の実験的再現 (Griggs, 1939)、および Joseph Barrell の有名な“マグマ性ストーピング”機構がとり入れられた。しかし、より近代的な視点に対抗して、Charles Lyell の慣用語「現在は過去の鍵である」や T.C. Chamberlin の「多重作業仮説」が、この研究分野ではより上位のガイドラインとされるのが常であった。全地球学説の重要性はいまいにされたままであり、明瞭な“試合のルール”は必要でないかのようにであった。地質学の学部段階で、私たちは Arthur Holmes の『Principles of Physical Geology』(1944) を読んだ。この著書の最終ページには Wegener の大陸漂移の概括的説明が掲載されていて、マントル対流が想定

されうる駆動メカニズムと考えられていた。しかし、私たちの教授の1人 Andres Kvale は漂移に強く反対していた。大陸 [複数] を動かすのに必要な巨大な力はまったく存在しない、と氏は主張した。にもかかわらず、いかなる種類の全地球学説も地質学の教育では重要視だにされず、それゆえに、寛大に扱われていた。

固体地球物理学の大学院生 [1960 ~ 1962] として、私の関心は局地的な記載地質学の観点から、地球内部構成物質、海洋重力異常、主要地震帯、主要火山帯といった、より全地球規模の地球物理現象に移った。しかし、それらの内部力学 - 造構機構はいままでのままであった。アイソスタシーと造山運動の知識はなんとか続いていたが、それに反する実際的証拠にもある程度関心をもった。こうして、1961 年の昼食時の話題として、局地地震研究者たちは、ノルウェー西部沿岸域のモホ面はじつに平坦であり、海岸山脈地帯の下に期待される地殻の根の証拠はまったくないことを、あれこれ議論していた。他方、海岸山脈の隆起は最近の数 100 万年間のできごとであり、約 4 ~ 5 億年前の古生代褶曲帯の造構変形よりもはるかに若いことが知られていた。ノルウェーを含む当時の [ヨーロッパ] 大陸北部には広く浅海環境がひろがっていたので、造構変形サイクルが山脈の隆起運動をもたらすかどうか? という疑問が当然のこととして湧き上がった (図 10 参照)。地質学におけるアイソスタシー概念は、それほど重要な概念ではないだろうとみられた。さらに、スカンディナヴィア山脈の最近の隆起をひきおこしたメカニズムは何だろうか? 専門的混迷は避けられなかった。

1950 年代の北西太平洋の地球磁場調査によって、正負を交互に示す縞状磁場異常が発見された (Mason, 1958; Mason and Raff, 1961; Raff and Mason, 1961)。500 nano-Tesla 規模の振幅をもつ比較的狭い南北方向の磁気異常が、北米西岸沖のまったく平坦で、厚い堆積物に覆われた深海平原の一般的特徴であることが発見された。しかし、縞模様はひどくちぎれていたり、明らかに造構的にねじれていて、しばしば南北走向の磁気異常帯を横切る剪断帯の存在を示唆していた (図 11)。造構性ねじれを証拠づける主要不連続は、北東太平洋の地殻が比較的強力な構造変形を被ってきたことを示した。これらの 2 次元的地磁気特性の形態と強度から、それらの磁気的原因が結晶質地殻の比較的浅いところに存在することが計算された。Mason (1958) は、推定される変形の広域的意味について、海域特性とサンアンドレアス断層帯に沿う変位は相互に関係している - おそらくは北米の西方への回転をもたらす一現象であろうと示唆した。そうだとすると、これは、北米が北西太平洋のベニオフ帯に乗り上げ、隣接する太平洋の薄い地殻に比較的強い力をおよぼしてきたことを意味するだろう。さらに、地磁気場誘導による磁場異常と磁場強度の解釈は、陸域における地球物理学的探査で長期間にわたって培われてきた伝統である。そうだとすると、海域で観測された正負の縞状異常帯は、想定された北米の運動によってもたらされた磁性鉱物に起因するものであろうか?

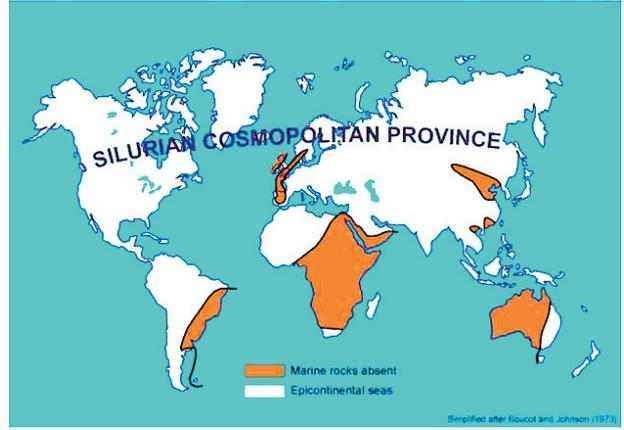


図 10 先カンブリア紀以降のほとんどの期間に、大陸縁辺海が大陸をひろくおおっていたという事実は、19 世紀以降の共通認識である。この図は、大陸をおおうシルル紀の浅海を描いたもので、Boucot and Johnson (1973) を簡略化した。北半球のアパラチア / カレドニア褶曲帯が現在の山脈に類似した隆起地形を形成していた、とのよく知られた見解は疑問視される。

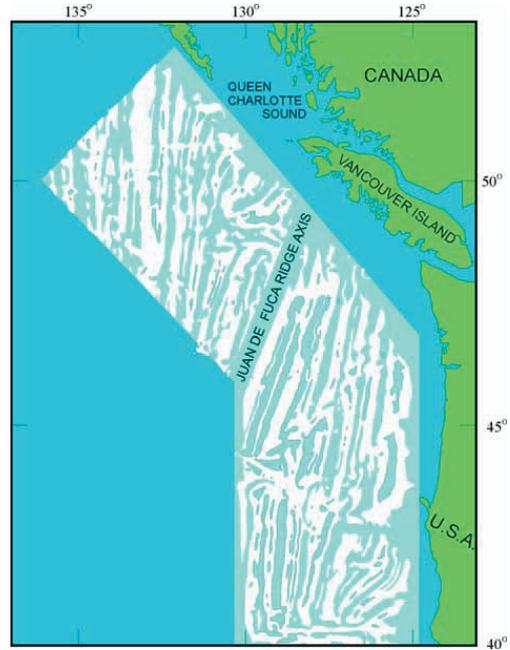


図 11 初めて実施された北米西部沖における系統的海洋磁気調査は、新しいタイプの海洋地球物理学的情報をもたらした。磁場異常縞は、広域的標準磁場よりも振幅が大きい場合 (白色) と小さい場合 (水色) を示し、調査範囲全体を特徴づけている。横断性オフセットや波状構造などの不規則性は、大規模な造構変形 (ねじれ) が起こったことを証拠づける。Raff and Mason (1961) にもとづく。

1961 年 3 月にノルウェー地質学会誌はある論文を出版し、それはベルゲンの地球科学界に興奮をもたらした。著者は、ノルウェーの著名な古生物学者・生層序研究者である Nils Speldnæs である。氏は、おもにヨーロッパ、北米、アフリカ北部および西部のシルル紀 ~ オルドビス紀の化石群集にもとづいて、多くの動物区から古生代前期気候区を復元することが可能になったと結論した。Nils Speldnæs (1961) は、古生物研究者や古気候研究者たちが長期間にわたって主張してきたことがら、すなわち、当時の古赤道は北米大陸中心部を北東 - 南西方向によこ

ぎり、東グリーンランドとバレンツ海域を通過して、北西-南東方向にシベリアを通過するという考え方をふたたび証明した。Speldnaesの動物地理区にしたがえば、古地理極の1つは中央アフリカ西部にあり、もう1つの極は西太平洋の赤道地帯に位置する。この結論は、当時推定されていた古地磁気極に調和的であった。動物地理区を望ましく接合させるためには、北大西洋が完全に閉塞したのでは氏の古気候データに調和しないことが強調された。北大西洋の完全な閉塞は、北米のオルドビス紀の熱帯を北西アフリカの同時期の寒冷な極域環境に近接させることになり、これは信じがたい。Speldnaesによる当時の大陸再配置は、とくにRuncorn (1959)の論文に引用されるように、急速に進展していた古地磁気データに強く影響されていた。Speldnaesの動物地理区と大西洋大陸の復元が図12に示される。氏の閉じかけた大西洋を除くと、このデータは、古生代前期以降、極(自転軸)に関して地表が70~90°ほど緯度方向に移動していたことを示す。いいかえると、古生代前期以降に大規模な再配置—古い力学作用であり、今日では古地磁気によって証明された「極移動」—を被ったわけである。こうして、それまでの伝統的な定常地球が議論の俎上にのぼったのである。

1962年に私は地球物理学研究所へ移動し、そこでは、スカンディナヴィア初の古地磁気研究室の創設を託された。Newcastle州のKing's College物理学教室において1年間にわたる古地磁気学の基礎訓練ののち、私はベルゲンに帰って、この新しい研究分野にひどく熱中した。Newcastleの教室での強い国際的雰囲気強く印象づけられ、また、急速に地歩を固めつつあった動的地球観に日々興奮せざるをえず、私はWegenerの大陸漂移の忠実な支持者となった。地球の新学説は1966~68年にプレートテクトニクスに発達し、長らく論理的停顿状況にあった地球科学を浮揚させることができるかに思えた。私の講義では、相対運動するリソスフェアをその当時は事実として教えた。しかし、ノルウェー地質教室では、教育と研究は伝統的なやり方でつづけられ、1972年頃に卒業した地質家は、その頃までプレートテクトニクスに関して聴いたことがなかったと後々語った。私自身は、1960年代前半における全地球地質学-地球物理学に最低限の視野をもち、大陸漂移を受容したのは、社会心理学的影響であったとの理解に達した。さらに1969年以降には、かつて私がもっとも重要だと思っていたモデルがつつぎと場当たりの修正を受け、予期される結果に関する厳密な検証は行われず、かつての輝かしい上塗りが剥がれはじめたことを理解した。

わが国にけるプレートテクトニクス形式主義への傾倒がはじまったのは、全地球テクトニクスと造山運動をあつかった2つの論文(Dewey and Bird, 1970; Dewey et al., 1973)がきっかけであった。じつに急速で混乱もなく進んだ転換を経て、だれもがプレートテクトニクスを好んで語りはじめた—あたかも、彼らが、このパラダイムとともに生まれ、育ったかのように。地殻の可動性と

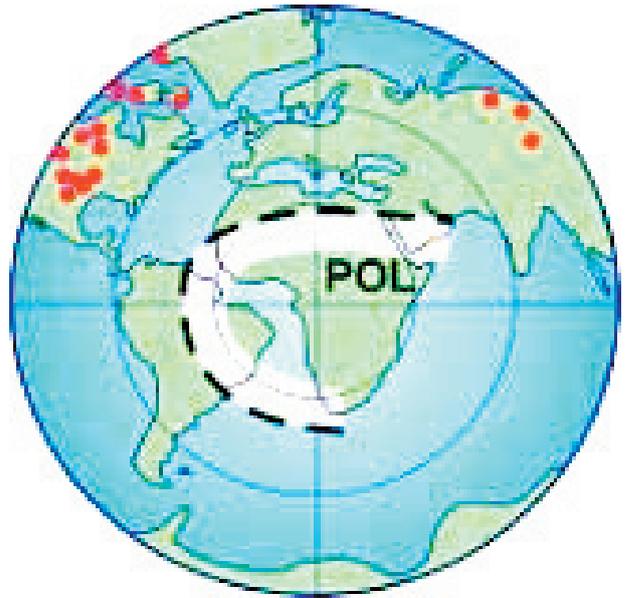


図12 約4.7億年前の動物区にもとづくSpeldnaesの古気候帯。Speldnaes(1961)を簡略化。赤丸は熱帯性動物群。地球全体からみると、古赤道帯が現在のアフリカと南極を通過し、ほぼ同時期の地理極は西アフリカと中央太平洋に位置する。地球天体の長期的な回転は、Kreichgauer/Wegener/Köppenによって入念にしあげられた極移動を確認する。

いう知識が、ノルウェーの地質研究者の想像力ととりこにし、まったく突然に地球科学界は新しい造構運動の色眼鏡をかけた。1975年頃には、ベルゲンおよびオスロの地質博物館はごく単純なプレートテクトニクスの展示を行い、高校の一般地質学の教科書はますますプレートテクトニクスを志向するようになった。しかし、この転換は科学とはまったく別のものであり、その大半は、強く動機づけられた思い込み、一種の流行の変化、あるいは、流行の新意匠による社会現象であった。それは、1960年代前半の私自身の転換によく似ている。論理的混乱や、もっとも主要な地質学的事実が不確実であることを不快に思う地球科学者の数が明らかに増大し、将来の専門家としての喜びを求めて、彼らは約束の地へ向かう列車に飛び乗った。

1970年頃には、“ニューグローバルテクトニクス”が、説明能力が未成熟で、正確さと検証に耐えないことが、明らかになった。そして、1970年代の半ばには、これらの高い望みは、現実と大きくかけ離れた空文句にすぎなくなった。しかし、プレートテクトニクスというパラダイムに欠陥がある可能性について自在に語るのが今になっては、あまりにも手遅れである。人は、勝負の最中には、履歴・将来展望・資金・名声といった人的要素のために、結局のところ、あらゆることがらが最良のものにおきかわることを願うだけである。今日では、地球の理解に革命が起こったと装い、教育システムのすべての段階においてプレートテクトニクスは神から人間への贈り物であるかのようにあつかわれている。色彩豊かで娯楽的ドキュメンタリー番組—それらの内容は科学的空想に近い場合がしばしばである—をとおして、マスメディアによってひどく狡猾に物語がドラマ化されている。

増大する事実に対して、常に補足的仮説群—ねつ造されたり、あるいは、保身のためだけに考案された—に頼っているこのモデルが完全に破綻していることを私が予測しはじめたときに、私は重大な局面にさらされるようになった。多くの概念的の問題に直面すると、すぐれた経歴をもつ地球科学者たちでさえも沈黙したり、滑稽な見解を述べて的外れな発言をした。グローバルテクトニクスにおける芸術的段階とみなされる虚偽の花園とは対照的に、van Andel (1985, p. 138-139) は次のように述べて氏の心情を吐露した：

「厳密な幾何学的方法によって過去1億年にわたるプレート形状を復元する試みは、実在しないプレートをねつ造したり、プレートは内部変形しないという規則を放棄せざるをえないといった、深刻な困難に直面する。……最終的には、定常的な地殻の形成と消滅に反する造山運動の活性化エピソードを説明するために、特異な事件や場当たりの仮定を、私たちはくりかえし想定せざるをえなかった。」

ある講演とそれにつづく動揺

1920年夏に、著名なベルゲン気候学派の指導者であった Wilhelm Bjerknes は、2つの国際会議を組織した。その意図は、会議にさきだつ2年間にわたってベルゲンで開発された理念と方法が、気象予報革命の端緒となることを海外の気象研究者に理解してもらおうということにあった。一人の気象学者として Alfred Wegener が、第2の会議に出席していた。彼がベルゲンに滞在していた間に、Wilhelm Bjerknes (ライプニッツ地球科学研究所教授、1912～1917年) が、彼の漂移説について語る夜話会を催した。ドイツ学派がベルゲンに滞在していた間に、Bjerknes は Sidney Chapman の予期せぬ訪問をうけた。Chapman は Manchester 大学の応用数学の新進気鋭の教授で、ノルウェーでの自転車旅行の途上であった。彼は Wegener の夜話会に招かれた。この夜話会は、ヨーロッパのドイツ語圏以外で、Wegener が自らの学説を発表する最初の機会であった、と考えられている。ベルゲンでの聴衆の反応はわからないが、Sidney Chapman はマンチェスターへ帰着後に、友人であった William L. Bragg (1915年のノーベル物理学賞の受賞者) にベルゲンでの夜話会について語った。

興味をもった Bragg は、Manchester Literary and Philosophical Society を代表して、Wegener に彼の学説を紹介しようと招待講演を依頼した。Wegener は招待に応ずることはできないために、その会議に要旨を提出し、William Bragg が代読した。会議に参加していた地質研究者からの敵意に満ちた反応が、聴衆に大きな驚きをあたえた。Keith Runcorn が私に話したところによると、Bragg は Runcorn にずっと後になって、この会議以前にこのような現象にであったことがないと語ったという。聴衆は、地質学の教授たちの判断が妥当であると思っただろう。Bragg はこのできごとに困惑し、分別のある聴取の前で自らの愚かさを自覚した。晩年、彼はこの事件をたいへん苦痛に感じ、ずっと思い悩んでいたことを

Keith Runcorn に告白した。

科学の一例として、マンチェスターにおけるこのささいな逸話は、私たちに恥ずかしい思いをさせるにすぎない。しかし、それは、科学というものが一般に喧伝されているような理性的活動ではないことを私たちに語っている。新しい基本的アイデアというものは、ややもすると関係する学問分野に悪夢をもたらすことを、科学史はくりかえし経験してきた。その結果もたらされる論争にかかわって私たちに真に衝撃をあたえるものは、それらの衝動的特性と科学的見せかけである。科学者集団の根本的課題に関する認識の浅さは、すぐに痼癩をおこし、勝手な言い訳をしがちで、それらは、真の洞察力を欠いていることを覆い隠すための虚構にすぎない。たとえば、私はプレートテクトニクスから決別したが、それはノルウェー地球科学界でしばらく大騒ぎになり、この混乱は真の科学的論争の装いさえもほぼ完全に脱ぎ捨てていた。ばかげた抵抗活動が2006年に出来た。地元の地球科学研究機関に所属するひとりの研究者が、私の科学自伝 (Storetvedt, 2005b) を読み、電話をよこした。会話のなかで、彼は次のように語った。「あなたの仲間たちは、プレートテクトニクスを十分に理解できていない。それは、大学の教養課程の教科書の簡単な解説にもとる。彼らは、あなたのそれにとってかわる見解を理解していないし、しようともしていない。したがって、それが学説になったときにも、あなたは彼らに、理性的理解を求めることなどはとても期待できないだろう」と。

1960年代に Newcastle で毎年行われた公演と同様、Keith Runcorn が1950年代後半以降ヨーロッパと北米で展開してきた講演旅行が、漂移に関心をもつ地球物理学派の見解に影響をあたえたことは、よく知られた事実である。実際、1961年に Keith がベルゲンを訪れた際に、私は、流布された全地球的地球物理学以外のなんらの知識ももたないまま、軽卒にも、古地磁気とそれに関わる大陸漂移の研究にとびのってしまった。パラダイム転換の潮流のなかで、科学におけるこのように強力な心理-社会的要素を実感し、ある科学分野の健全な発達のためには、科学者集団が科学的に健全で発展的道筋に導かれることがきわめて重要であることを認識した。逆に、パラダイムを構成する規則性や観点が、最終的にまちがっていると、当然の結果として科学的停顿をもたらす。後者の場合、それに巻き込まれた科学は、知的閉塞状況に陥る。……このような停顿がおこらなければ、科学的進展が期待され、ひろく受け入れられるはずであったが、Wegener の大陸漂移を推進する上で決定的な役割をはたした Keith Runcorn の物語の最後に、次の1件はもはや隠す必要はない。晩年、彼は、リソスフェア移動以外に、大陸間での古地磁気の不一致を説明できる方法を絶え間なく研究していた。Runcorn の追悼出版物に、私は Keith が私に宛てた最後の2つの私信を掲載した (Storetvedt, 1998 参照)。それらの私信で、彼はプレートテクトニクスという常識にいくつかの反論を述べていた。私には、それに対して、同業の科学者たちから2, 3

の皮肉が寄せられた。

過去と現在—1つの展望

—最初の前提の有効性を検証するかわりに、面白そうにみえながらも正しくない、あるいは不適切な定式をかぎりなく運用することは、あまりにも容易であるのが常である—

John Ziman『信頼できる知識』から

全地球に関する地質学史を顧みると、数10年間にわたって全地球の地質学的思考を支配する考え方を創出したのは比較的わずかな人々であり、しかも、これらの概念は地球全体を説明することができず、新しい事実はわずかずつしか蓄積されていないことに、衝撃をうけざるをえない。さまざまな仮説が、視野と正確さの両側面できかに限定的なものであるか、を私たちは今さらながら思い知る。地球科学者が正確に認識しえたのは、ほんの2、3の問題にすぎない。多くの観察が予測に適合しないことが判明するいっぽう、現状を保守しようとして、地球科学者の大多数の心理的安定性を攪乱することのない場当たりのパラメータが限りなくつけ加えられてきた。彼らの研究は、最後まで、局所的あるいは広域的な記載—さまざまな様式の事実の収集と記載—に終始してきた。蓄積されている事実の解釈が、地球科学界を悩ませることはいささかもなかった。ほとんどの地質研究者にとって、Chamberlinの“複数の作業仮説”という指摘が1960年代までは一種の理想と理解されていたように思える。1960年頃の私自身の学生時代には、全地球的地質—より高級な“原理にしたがった地質学的観察の統合を意味していた—は昼食時のおしゃべりの域をでることはなかった。全般的な論理的枠組みが欠如しているのにもかかわらず、収縮説は、アイソスタシー原理と同様に、最高潮に達していた。これら2つの概念は、テクトニクスを教える際の基本的真実であった。科学界は、広く浸透した観点—それは、構成員の批判的能力と真の想像力を妨害する—に深く浸りきっていた。

収縮説もアイソスタシーモデルも、造構—火成活動帯の形成とそれらの全地球的配列の時間的変化—このような観点はいかなる全地球造構学説においても基本的目的の1つでありながら—を十分に説明することはできていない。たとえば、地球収縮説の北米版は、北米以外の地域には適用できないにもかかわらず、全地球学説として発達した。これは、科学の国家的威信の好例であろう。にもかかわらず、造構—火成活動帯の形成と全地球的分布の時間的移動に関する長期にわたる未解決問題といった喫緊の問題が解決されると、地球科学界は放っておいても、まぎれもなく興味をいだき、それを真剣に考えるようになる。悲しいかな、狂信的愛国主義科学業界には、このようなことは期待すらできない。1902年にDamian Kreichgauerは自らの学説—褶曲帯の形成は地球自転の変化に密接に関連していて、褶曲帯はもともと各時代の赤道に沿って、そして一部は直交して配列してい

た—を発表した。氏の研究は、ほぼ完全な沈黙で迎えられた。Kreichgauerの提案は、地質学における伝統的思考を大きく破壊するものであり、おそらく、そのような理由だけで氏は無視された。中央ヨーロッパの思考が歴史的に深く根をおろしていたスカンジナビアにおいてさえも、Kreichgauerの研究はよそよそしくみられた。そのため、1990年代に私がKreichgauerの著書(1902年刊行、1926年再刊)に興味をもった際には、コピーのためにInnsbruck大学の図書館へでかけなくてはならなかった。

第2次世界大戦以前には、全地球の地質学はほとんど進歩がなかったことは確実である。1920年代～1930年代に海洋重力測定に黎明期が到来し、アイソスタシーの原理と大陸/海洋の“恒久性”が浸透していた北米学派にも衝撃を与えた。また、新しい重力測定は、側方への大陸漂移の仮説にもとづく予測にある程度矛盾する結果をもたらした。さらなる発展は、第2次世界大戦中の海洋探査によってもたらされた。予期せぬほど詳細な海洋地形が明らかになり、1950年代における古地磁気学的手法がもたらした画期に比肩する成果となった。古地磁気学からの新証拠が大陸の何らかの可動性を正当化し、Wegenerの側方漂移システムは20世紀におけるもっとも偉大な科学的発見の1つと解釈されるようになった。ところが、説明的仮説によるこの基本的変化の背後にある歴史を一瞥しただけでも、強い社会政策的要素によって影響された大量の想像的科学議論であることがすぐに露呈する。今日からみると、1950年代の英国の古地磁気研究者が、極移動経路の不一致の原因として、大陸リソフェアの慣性に駆動された方向変化—比較的大規模な陸塊の中程度の現位置回転—を選択したことは容易に理解される。地球科学の各分野はまったく異なった知的経路をたどったことは、新しい視点および意味づけという観点から注目される。

1960年代には新しいデータ群が急速に現れ、10年あまりで、地球科学は側方漂移とプレートテクトニクス原理を好む傾向に段階的に陥り、流布された論理的体系の犠牲になり、まもなく、現在流行している超可動的見解が正統化された(たとえば、Storetvedt, 1997, 2003, 2010bを参照)。しかしながら、思慮深い地球科学研究者には、ものごとが著しい邪道に陥っていて、この新しい概念的装いは古典的な事実体系にも、より新しい観察体系にも適合せず、当然のことながら、とても認められるものではないことが次第に明白になった。いいかえると、プレートテクトニクス革命は啓蒙的革命にはならず、地質現象の古典的体系の理解はそれまでと同様に達成されなかった。これが、この雑誌—New Concepts in Global Tectonic Newsletter—のまさに存在理由である。しかし、その輝かしい側面についてみると、プレートテクトニクス界の技術的発達と止まる所を知らない研究は、そのパラダイムの予測にしたがった観察事実を確立するために、膨大な量の新しくより詳細な観察をもたらすことになった。それゆえ、今日では、次世代の全地球的学説を創出するために、1960年代にプレートテク

作業仮説”を発想し、有限の現象を説明してきた。しかし、数10年にわたる厄介な観測—基本メカニズム[複数]をその場しのぎで次々と修理するために一にもがきつづけたが、結局、それらは新しい論理体系によって置き換えられることになった。プレートテクトニクスとマントル対流の二重仮説は、モデルにすぎた骨折り損となる思考パターンである。

いかなる全地球地質学説も、その基礎においては何らかの物理-化学的現象を含んでいて、惑星形成や地球の内部構成にかかわる諸機構を駆動する力学をもたらす。成層・分化した地球内部に関する伝統的な考え方は、最近のトモグラフィ画像との調和が困難になっている。たとえば、対流するマントル—プレートテクトニクス作用を駆動するのに必要なゆっくりとしたクリープ運動—という現在の視点は、今のところ解明されていない地球内部の比較的混沌とした状態とは調和しがたい。予測されてきた成層構造とはちがって、マントルの構成はむしろチョコレート・ケーキあるいはサクランボ・プディングに似ていて(たとえば, Tackley, 2008), コアあるいはコア-マントル境界(CMB)から湧昇する物質によって断ち切られていることは明白である。(最近の数10年間に)くりかえし提案されている次の見解が注目される。すなわち、コアはマントルと平衡ではなく、ひどく不規則なCMB領域はエネルギー交換の場と考えられる(Poirier, 2000)。組成的にも構造的にも複雑なマントルを説明するために、実にさまざまな場当たりの説明が多数存在する。そのため、プレートテクトニクスを沈ませない試みとして、下降する冷たいリソスフェアスラブがコア-マントル境界まで達し、そこにスラブの墓場を形成する、といったことが仮説されている(たとえば, Kellogg et al., 1999; Tackley, 2008)。しかしながら、基本的問題は、リソスフェア塊が、高粘性マントルを貫き通すことができるかどうかにある。混沌とした地球内部の状況は、惑星の不完全脱ガスの結果である可能性はるかに大きいように思われ、これは地球が熱く、溶融していた状況から大きくは分化していないことを示す。おそらく、地球深部はこれまで信じられてきたほどは熱くはなく、地球はその生涯にわたって内部的熱-化学的安定性を獲得しようともがいてきたのだろう(Storetvedt, 2011)。

プレートテクトニクスがいんちき学説であることが、そして、それゆえに地質科学には新しい知的基盤が必要であることが、きわめて明白になった。しかし、新しい思考体系への移行は、長期間にわたる非科学的過程—自己目的、特異な味覚、矛盾した先入観を含む—によって、不一致と場当たりの変化の負荷が自らを突然に崩壊させるまで、反作用を被りつづけることを歴史が物語っている。たとえば, Bornholdt (2011)によると、「科学的パラダイムは急に現れ、ゆっくりと消失していく。この非対称性は、ある概念が多数の修正によって浸食される容易さに比べて、真に独創的な考え方を生み出すことの困難さを反映している」という。科学的潮流に反対することは、一般に困難な仕事である。変革者たちが伝統的限

界を破壊して大きく前進しようとする、たとえ、そうすることによって彼らが伝統を改め、将来の科学革命への道を拓くとしても、彼らが不利な立場におかれることがしばしばである。

全地球地質学や固体地球物理学における現在の行き詰まりを打開する試みとして、この15年間にわたって、Global Wrench Tectonics(GWT)学説を適用して多くの主要造構を説明してきた(Storetvedt, 1997, 2003, 2005a, 2007, 2009, 2010a, 2010b, 2011; Storetvedt et al., 2001; Storetvedt and Longhinos, 2011)。GWT学説の体系では、造構運動は内部質量のゆっくりとした連続的再構成の過程であり、惑星の慣性運動とそれゆえに自転特性にときどきの変化をもたらす、地球の力学的造構挙動に脈動的変化をもたらす。将来起きる出来事が何であろうとも、歴大な地表での観察結果を概念化する力量がもっとも重要である。果てしなく資金投入をつづけてより詳細を探求する—それらの多くは、最終的に保管庫の棚で埃をかぶることになるが、その前にプレートテクトニクスを支えるために利用される—のことはなく、この概念化能力が地球科学に前進をもたらさであろう。

謝辞 1970年代以来、献身的に技術的援助をいただいたFrank Clevelandはいつも図面を作成してくれた。氏に心より御礼申し上げる。

文 献

- Barber, B., 1961. Resistance by Scientists to Scientific Discovery. *Science*, v. 134, 596-602.
- Barrell, J., 1914. Upper Devonian delta of the Appalachian geosyncline. *Am. Jour. Sci.*, v. 37, p. 87-109.
- Barrell, J., 1914a. The strength of the Earth's crust: Part I. Geologic tests of the limits of strength. *Jour. Geol.*, v. 22, p. 28-48.
- Barrell, J., 1914b. The strength of the Earth's crust: Part II. Regional distribution of isostatic compensation. *Jour. Geol.*, v. 22, p. 145-165.
- Barrell, J., 1914c. The strength of the Earth's crust: Part III. *Jour. Geol.*, v. 22, p. 209-236.
- Barrell, J., 1914d. The strength of the Earth's crust: Part IV. Heterogeneity and rigidity of the crust as measured by departures from isostasy. *Jour. Geol.*, v. 22, p. 289-314.
- Barrell, J., 1914e. The strength of the Earth's crust: Part V. The depth of masses producing gravity anomalies and deflection residuals. *Jour. Geol.*, v. 22, p. 441-468.
- Barrell, J., 1914f. The strength of the Earth's crust: Part VI. Relations of the isostatic movements to a sphere of weakness—the asthenosphere. *Jour. Geol.*, v. 22, p. 655-683.
- Barrell, J., 1919. The status of the theory of isostasy. *Am. Jour. Sci.*, v. 198, p. 291-338.
- Bertrand, M., 1887. La chaîne des Alpes et la formation du continent européen. *Bull. Soc. Geol. France*, v. 15, p. 423-447.

- Bornholdt, S., Jensen, M.H. and Sneppen, K., 2011. Emergence and Decline of Scientific Paradigms. *Physical Review Letters*, v. 106, DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.058701.
- Boucot, A.J. and Johnson, J.G., 1973. Silurian Brachiopods. In: *Atlas of Palaeogeography*. Amsterdam, Elsevier, Bowie, W., 1917. Investigations of gravity and isostasy. US Coast and Geodetic Survey Special Publ. no 40.
- Bull, A.J., 1921. A hypothesis of mountain building. *Geol. Mag.*, v. 58, p. 364-367.
- Bull, A.J., 1927. Some aspects of mountain building problem. *Proc. Geol. Ass.*, v. 38, p. 144-156.
- Carey, S.W., 1958. The tectonic approach to continental drift. In: *Continental Drift: A Symposium*. Hobart, Univ. of Tasmania.
- Chalmers, A.F., 1982. What is this thing called Science? Milton Keynes, Open University Press, 179p.
- Chamberlin, T.C., 1897. A group of hypotheses bearing on climate changes. *Jour. Geol.*, v. 5, p. 653-683.
- Creer, K.M., 1965. The Expanding Earth? *Nature*, London, v. 205, p. 539-544.
- Creer, K.M., 1975. On the tentative correlation between changes in the 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*. London, John Wiley, p.293-318.
- Dana, J.D. , 1873. On some results of the Earth's contraction from cooling, including a discussion of the origin of mountains, and the nature of the Earth's interior. *Am. Jour. Sci.*, v. 105, p. 432-443.
- Dana, J.D., 1881. The continents always continents. *Nature*, London, v. 23, p. 410.
- Daly, R.A., 1923. A critical view of the Taylor-Wegener hypothesis. *Jour. Wash. Acad. Sci.*, v. 13, p. 445-450.
- Daly, R.A., 1926. *Our Mobile Earth*. New York, C. Schrieber's Sons, 342p.
- Darwin, G.H., 1887. Note on Mr. Davidson's paper on the straining of the earth's crust in cooling. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, v. 170, p. 447-538.
- 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. et al., 1973. Plate tectonics and the evolution of the Alpine system. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 84, p. 3137-3180.
- Du Toit, A.L., 1927. *A Geological Comparison of South America with South Africa*. With a Palaeontological Contribution by F.R. Cowper Reed. Washington DC, Carnegie Institution of Washington, Publ. no. 381.
- Du Toit, A.L., 1937. *Our Wandering Continents*. Edinburgh, Oliver and Boyd, 366p.
- Dutton, C.E., 1889. On some of the greater problems of physical geology. *Bull. Phil. Soc. Washington*, v. 11, p. 51-64.
- Élie De Beaumont, L., 1852. *Notice sur les systèmes des montagnes*, 3 vols. Paris, P. Bertrand.
- Engelder, T., 1993. *Stress Regimes in the Lithosphere*. Princeton NJ, Princeton University Press, 457p.
- Eötvös, R., 1913. In: *Verhandlungen der 17. Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessungen*, Part I., p. 111.
- Fairbridge, R.W., 1964. Thoughts about an expanding globe. In: *Adv. Frontiers in Geology and Geophysics*. Hyderabad (Krishna Volume).
- Feyerabend, P., 1975. *Against Method*. London, Verso, 279p.
- Field, R.M. et al., 1933. *The Navy-Princeton Gravity Expedition to the West Indies in 1932*. Washington DC, US Govt Print. Office.
- Fisher, O., 1881. *Physics of the Earth's Crust*. London, Macmillan, 314p.
- Fisher, O., 1882. On the physical cause of the ocean basins. *Nature*, London. v. 25, p. 242-244.
- Gilbert, G.K., 1889. The strength of the Earth's crust. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 1, p. 23-27.
- Griggs, D., 1939. A theory of mountain building. *Am. Jour. Sci.*, v. 2, p. 611-650.
- Hall, J., 1882. Contributions to the geological history of the North American continent. *Proc. Am. Assoc. Adv. Sci.*, v. 31, p. 29-71.
- Hayford, J.F., 1911. The relations of isostasy to geodesy, geophysics and geology. *Science*, v. 33, p. 199-208.
- Hayford, J.F. and Bowie, W., 1912. The effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity. In: *U.S. Coast and Geodetic Survey Special Publ. No. 10*, Washington D.C., U. S. Govt Print. Office.
- Hess, H.H., 1937. Geological interpretation of data collected on cruise of USS Barracuda, in the West Indies – Preliminary report. *Trans. Am. Geophys. Un.*, v. 18, p. 69-77.
- Hess, H.H., 1938. Gravity anomalies and island arcs structure with particular reference to the West Indies. *Proc. Am. Phil. Soc.*, v. 79, p. 71-96.
- Hess, H.H., 1962. History of ocean basins. In: *Petrologic Studies: a Volume to Honor A.F. Buddington*. New York, Geological Society of America, p. 599-620.
- Hixon, H.W., 1920. Is the Earth expanding or contracting? *Popular Astronomy*, v. 28, p. 1-11.
- Hofmeister, A.M. and Criss, R.E., 2005. Earth's heat flux revised and linked to chemistry. *Tectonophysics*, v. 395, p. 159-177.
- Holmes, A., 1928. Radioactivity and continental drift. *Geol. Mag.*, v. 65, p. 236-238.
- Holmes, A., 1929. Radioactivity and earth movements. *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, v. 18, p. 559-606.
- Holmes, A., 1944. *Principles of Physical Geology*. Edinburgh, Thomas Nelson & Sons Ltd., 532p.
- Holmes, A., 1965. *Principles of Physical Geology*, New and fully revised edition. London, Thomas Nelson & Sons LTD, 1288p.
- Hoshino, M., 2010. A plate tectonics controversy. Book review by M. Shiba. *NCGT Newsletter*, no. 57, p. 118-120.
- Jaupart, C., 2010. *Heat Generation and Transport in the Earth*.

- Cambridge, Cambridge University Press, 476p.
- Jordan, P., 1966. *The Expanding Earth*. Oxford, Pergamon Press, 202p.
- Kay, M., 1951. North American geosynclines. *Mem. Geol. Soc. Am.*, v. 48, 143p.
- Kreichgauer, P.D., 1902. *Die Äquatorfrage in der Geologie*. Steyl, Missionsdruckerei, 304p.
- Kuehnen, Ph.H., 1936. The negative isostatic anomalies in the East Indies (with experiments). *Overdrukt Leidsche Geol. Mededelingen*, v. 8, p. 169-214.
- Kuhn, T.S., 1970. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, University of Chicago Press, 210p.
- Köppen, W. and Wegener, A., 1924. *Die Klimate der geologischen Vorseit*. Berlin, Gebrüder Bornträger, 256p.
- Landes, K.M., 1952. Our shrinking globe. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 63, p. 225-240.
- Laudan, L., 1977. *Progress and its Problems*. Los Angeles, University of California Press, 257p.
- Laudan, L., 1984. *Science and Values*. Los Angeles, University of California Press, 149p.
- Le Conte, J., 1889. On the origin of normal faults and of the structure of the Basin region. *Am. Jour. Sci.*, v. 38, p. 257-263.
- Le Grand, H., 1988. *Drifting Continents and Shifting Theories*. Cambridge, Cambridge University Press, 313p.
- Lees, G.M., 1953. The evolution of a shrinking earth. *Q.J. Geol. Soc. London*, v. 109, p. 217-257.
- Lyell, C., 1830-33. *Principles of Geology, Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface by Reference to Causes now in Operation*. Vols. I-III. London, J. Murray.
- MacDonald, G.J.F., 1964. The deep structure of continents. *Science*, v. 143, p. 921-929.
- Mason, R.G., 1958. A magnetic survey off the west coast of the United States. *Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc.*, v. 1, p. 320-329.
- Mason, R.G. and Raff, A.D., 1961. Magnetic survey off the west coast of North America., 32°N latitude to 42°N latitude. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 72, p. 1259-1266.
- Mayr, E., 1952. The problem of land connections across the South Atlantic, with special reference to the Mesozoic. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.*, v. 99, p. 79-258.
- Menard, H.W., 1986. *The Ocean of Truth. A personal History of Global Tectonics*. Princeton, Princeton University Press, 353p.
- Molengraaf, G.A.F., 1921. Modern deep-sea research in the East Indian Archipelago. *Geogr. Jour.*, v. 57, p. 95-121.
- Munk, W.H and MacDonald, G.J.F., 1960. *The Rotation of the Earth*. Cambridge, Cambridge University Press, 323p.
- Oreskes, N., 1999. *The Rejection of Continental Drift*. New York, Oxford University Press, 420p.
- Pekeris, C.L., 1935. Thermal convection in the interior of the Earth. *Month. Not. Geol. Soc.*, v. 3, p. 343-367.
- Poirier, J-P., 2000. *Introduction to the Physics of the Earth's Interior*. Cambridge, Cambridge University Press, 312p.
- Raff, A.D. and Mason, R.G., 1961. Magnetic survey off the west coast of North America, 40 N latitude to 52 N latitude. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 72, p. 1267-1270.
- Runcorn, S.K., 1959. Rock Magnetism. *Science*, v. 129, p. 1002-1012.
- Runcorn, S.K., 1981. Wegener's Theory: The role of geophysics in its eclipse and triumph. *Geol. Rundschau*, v. 70, p. 784-793.
- Russell, I.C., 1884. A geological reconnaissance in southern Oregon. In: *U.S. Geol. Surv. Fourth Annual Report*, p. 435-464.
- Scheidegger, A.E. and Wilson, J.T., 1950. An investigation into possible methods of failure of the Earth. *Proc. Geol. Ass. Canada*, v. 3, p. 167-190.
- Scrutton, C.T., 1965. Periodicity in Devonian coral growth. *Palaeontology*, v. 7, p. 552-558.
- Spjeldnæs, N., 1961. Ordovician climatic zones. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, v. 41, p. 45-77.
- Stille, H., 1924. *Grundfragen der vergleichenden Tectonik*. Berlin, Gebrüder Bornträger, 443p.
- Storetvedt, K.M., 1990. The Tethys Sea and the Alpine-Himalayan orogenic belt; mega-elements in a new global tectonic system. *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 62, p. 141-184.
- Storetvedt, K.M., 1997. *Our Evolving Planet*, Bergen, Alma Mater (Fagbokforlaget), 456p.
- Storetvedt, K.M., 1998. S.K. Runcorn: Some Personal Recollections of the Man and the Scientist. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 23, p. 841-844.
- Storetvedt, K.M. et al., 1999. Alpine remagnetization and tectonic rotations in the French Pyrenees. *Geol. Rundschau*, v. 87, p. 658-674.
- Storetvedt, K.M., 2003. *Global Wrench Tectonics*, Bergen, Fagbokforlaget, 397p.
- Storetvedt, K.M., Leong, L.S. and Adib, M., 2003. New structural framework for SE. Asia, and its implications for the tectonic evolution of NW Borneo. *Geol. Soc. Malaysia Bull.*, v. 47, p. 7-26.
- Storetvedt, K.M., 2005a. Polar Wander and Global Tectonics. *Boll. Soc. It., Volume Speciale n. 5*, 177-187.
- Storetvedt, K.M., 2005b. *Når Grunnlaget Svikter (Scientific autobiography in Norwegian)*, Oslo, Kolofon, 266p.
- Storetvedt, K.M., 2007. Global Wrench Tectonics and evolution of the Tethys. In: *Proc. The Second Int. Conf. on the Geology of the Tethys, Cairo, Egypt*, p.1-26.
- Storetvedt, K.M., 2009. Caribbean evolution – a new account. *Geoscientist Online 2 December 2009*, <http://www.geolsoc.org.uk/gsl/site/GSL/lang/en/page6816.html>
- Storetvedt, K.M., 2010a. The Caribbean Case: Agitation of ingrained views. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, v. 54, p. 3-9.
- Storetvedt, K.M., 2010b. Falling Plate Tectonics – Rising New Paradigm: Salient Historical Facts and the Current Situation. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, v.

- 55, p. 4-34.
- Storetvedt, K.M., 2010c. World Magnetic Anomaly Map. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, v. 57, p. 27-53.
- Storetvedt, K.M., 2010d. Facts, mistaken beliefs, and the future of global tectonics. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, v. 57, p. 3-10.
- Storetvedt, K.M., 2011. Aspects of Planetary Formation and the Precambrian Earth. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, v. 59, p. 60-83.
- Storetvedt, K.M. et al, 2003. New structural framework for SE. Asia, and its implications for the tectonic evolution of NW Borneo. Bull. Geol. Soc. Malaysia, v. 47, p.7-26.
- Storetvedt, K.M. and Longhinos, B., 2011. Evolution of the North Atlantic: Paradigm Shift in the Offing. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, v. 59, p. 9-48.
- Süss, E., 1875. Die Entstehung der Alpen. Vienna, W. Braumüller, 168p.
- Süss, E., 1885-1901. Das Antlitz der Erde, 3 vols. (1885, 1888 and 1901).
- Vienna, F. Tempsky. Tackley, P.J., 2008. Layer cake or plum pudding? Nature geoscience, v. 1, p. 157-158.
- Turner, J.C., 1991. Social Influence. Milton Keynes, Open University Press, 206p.
- Umbgrove, J.H.F., 1947. The Pulse of the Earth. The Hague, Martinus Nijhoff.
- Van Andel, T., 1985. New Views on an old Planet, Cambridge, Cambridge University Press, 324p.
- Vening Meinesz, F.A., 1929. Gravity expedition of the US Navy. Nature, London, v. 123, p. 473-475.
- Vening Meinesz, F.A., 1932. Gravity Expeditions at Sea, 1923-30 (3 vols). Delft, Netherlands Geodetic Commission.
- Wells, J.W., 1963. Coral growth in geochronometry. Nature, London, v. 197, p. 948-950.
- Wegener, A., 1912. Die Entstehung der Kontinente. Geol. Rundschau, v. 3, p. 276-292.
- Wegener, A., 1922. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Braunschweig, F. Vieweg & Sohn, 144p.
- Wegener, A., 1929. The Origin of Continents and Oceans (English trans. 1966), London, Methuen & Co., 248p.
- Wells, J.W., 1963. Coral growth in geochronometry. Nature, London, v. 197, p. 948-950.
- Wilson, J.T., 1954. The development and structure of the crust. In: The Earth as a Planet. Chicago, Chicago University Press.
- Wilson, J.T., 1959. Geophysics and continental growth. Am. Scientist, v. 47, p. 1-24.
- Wilson, J.T., 1963. Evidence from islands on the spreading of ocean floors. Nature, London, v. 185, p. 880-882.
- Wu, X. et al., 2011. Accuracy of the International Terrestrial Reference Frame origin and Earth expansion. Geophys. Res- Lett., v. 38, doi: 10.1029/2011GL047450.
- Ziman, J., 1978. Reliable Knowledge. Cambridge, Cambridge University Press, 197p.

コメントと回答

COMENTS AND REPLIES

(久保田 喜裕 [訳])

潮汐と地震 TIDES & EARTHQUAKES

- Kolvankar, V., 2011. 太陽, 月および地球. NCGT Newsletter, no. 60, p. 50-66.
- Kolvankar, V., 2011. Sun, moon and earthquakes. NCGT Newsletter, no. 60, p. 50-66.

コメント : Peter James

回答 : Vinayak Kolvankar (斜字)

Vinayak Kolvankar の論文 "Sun, Moon and Earthquakes" (NCGT # 60) における図 3-6 などの意図するものは、潮汐作用に反応する深さ 5-10km の小規模な地震へのほぼ完璧なこだわりを示すものである。

この観点と地震活動 (RIS) によって誘発された貯留層の現象との間にある類似性がみられるであろう。RIS にお

いて、ダムに溜められた水の水位が上昇することは、深度 5-10km の範囲で起きた最初の地震で知られている。この作用は下位の岩塊の有効応力の減少の結果として論理的に説明できる。しかし、2つの条件が必要である。ひとつは、RIS が引き金になる以前に、帯水深度が通常約 30 ~ 50m 超えることである。(それでも、50m 下の有効応力の変化は、深度 5km で 1% 以下である。) 二つめ

の条件は、下位の岩塊へ強い応力がかかる必要があること、および初期破壊状態において、この比較的小さな変化の前に、下位の岩塊が地震を引き起こすことができることを含んでいる。(P. James)

“太陽、月および地球”の論文で、世界の一般的な地震データが議論された。しかし、James 博士が指摘するように、これらの現象が地震を誘発した RIS に応用できるかどうか、検討することは大変興味深いであろう。もし、RIS が地震を誘発するならば、どんな地域から得られたデータは、NEIC USGS カタログ [1973-2008] に現れるはずで、同様のことは [EMD+SEM] Vs GMT 計時で吟味されるだろう。(V. Kolvankar)

潮汐効果が地震活動の原因と言われている場所では、岩石本来の強い応力という同様の条件が、さらに重要な前提条件となって現れるであろう。この状態は地球上の大変活動的な地域において、その論文の焦点によって、活動的な大きく条件を満たすはずだ。潮汐効果はしかし、余り重要でない。2m オーダーの海面変化が起きると、深さ 5km の有効応力はたかだか 0.04% の変化に過ぎない。もちろん、ある者は毎日の潮汐効果は、かなりの深さから、高圧ガスの上方移動を主張するが、しかし我々を別のボールゲームにおく。

潮汐 / 地震の関連をみる前に、“主婦の賛同の証”(“housewife’s seal of approval”) ということわざは、編集者からのより詳細な情報を入手するのに役立つだろう：—

- まず最初に、SEM + ADM の条件 (図の X 軸) をどのようにするか、について詳細な説明が届いた。Y 軸も同様。(P. James)

論文 [太陽、月および地震] の本文で説明したように、x 軸は [EMD+SEM] でできている。我々の初期の論文 “地球潮汐と地震” (Kolvankar et al., 2010, NCGT no. 57, p. 54-75) では、x 軸は同じであるが、y 軸は地震の数になっている。我々は、各々の地震に対し、[x 軸上の] カーソル (滑子) に SEM 値 [太陽・地球・月の角度] をとり、つぎに月の位置 [EMD] に関連した地震 [ないしは増分に相当する欄] を記した。これは単純明白で、地球潮汐効果を探る際には、すべての研究者が同様の考えを用いてくれることを提案したい。初期の論文 [地球潮汐と地震] で、大地震は、マグニチュード 5.0 までの地震ではすべて、満月 [FM] 近くで多く観察され、小規模な浅発地震は新月 [NM] 近くで多数観察された。[EMD+SEM] の数量は各々の地震を記した原図を用いた。

本論で描かれた図と初期の論文 [地球潮汐と地震] のそれとの違いは、y 軸の変数の変更にある [x 軸は両者とも同じ]。我々は、地震が 00-24GMT 時のタイミングで直線に並ぶ時、[EMD+SEM] 量が連続しての変化することを見いだした。このことは世界のどんなに地震活動が活発

な地域でもかなり普遍的にみられる。もちろん、この現象の背後にある物理的過程は研究されることが必要である。(V. Kolvankar)

- 2 番目に、潮汐効果に対する地震活動のこのような執着について、図 3-6 ほかに示されるように、ある人は対応するパターンを他のもっと単純な例や形式を示して説明するかもしれない：たとえば、どれか一つの地域の日ごとの活動日など。最後に、図 5 の 4 番目の図のデータは、2000 年のトンガ海溝の地震であるが、当筆者によって、マグニチュード M2.5 ~ 5 および M≥5 以上の範囲の一日の地変の数として描かれている。

その図で、新月と満月も留意された。地震活動とこれら月の 2 つの時相との関連は、ただ一对の例外を除くと、まったくみられない：1 月 10 日と 12 月 11 日 (新月) および 9 月 2 日と 6 月中旬 (満月)。これは約 15% の一致率である。おそらく、いくつかの遅延形態が提案された関係を見えなくしているのであろう。もしそうであれば、その論文の図 3-6 に示された遅延はどのようになるのだろうか。(P. James)

すべての図はマグニチュード M2.5 かそれ以上の範囲が描かれている。個々の図の上段に描かれた地震の数量は、すでに率直に述べた期間だけである。

この論文の図 11 は、1993 年における緯度 30° ~ 50°、経度 20° ~ 40° の範囲、小さいマグニチュード 2 ~ 3 の範囲において、(EMD+SEM) 対 GMT 計時の典型的な地震の関係を示している。凹んだ三角形は、新月時相に近い縁部 (矢印で示した) における高密度の地震を示すために、ここでも使われている。同様の条件の地震・潮汐図も与えられているが、それは新月時に多数の地震を描いている。

[この図の] 角にある高密度の地震群は、おそらく、NM 期が近づくと、太陽と月ともに引き合うことがきっかけとなり、直接引き起こされるのでであろう。この影響は、ほぼ 10-20% の地震にみられることと比較すると、300-400% を超える [我々の論文、地球潮汐と地震を参照]。これらの図は期待していた者よりもやや遅れていることを示している。(V. Kolvankar)

地震予知はいまや地球科学の主要な目標であり、この Kovankar 論文は大きな展望をもたらすであろう。残念なことに、どんな地震の初期条件も最大潮汐の影響であるならば、そのような影響は 1 月に 2 回 (新月と満月)、一さらに全地球でも起こるはずだ。新月と満月はトリックになってしまうのか、という問題が残される。おそらくその問題は、潮汐パターンを最近の NCGT 論文で議論されている他の地震の前兆に組み込むことによって解くことができるはずだ。このようなやり方にもかわらず、我々はいかなる場所や深度においても、確実にその場の応力状態を知る必要がある：すなわち、地殻のどんな場

所でも初期破壊の状態にあるかどうか、さらにこのような小さな刺激に対しても壊れるかどうか、ということである。微小地震ネットワークの確立は、少なくとも地域の基本として、このことを観測する方法のひとつになるだろう。さらに、あらたな発足は、言ってみれば、過去の微小地震ネットワークが行き詰まったプロジェクトになってしまったと記されるような心配はなくなるであろう。

う。一すなわち、いくつかの研究所がボランティアにその研究を熱心に説得することができるならば。

Peter JAMES
glopmaker75@hotmail.com
2011年12月5日

ニ ュ ー ス NEWS

(矢野 孝雄 [訳])

第 34 回国際地質学会議 34th INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS

オーストラリア Brisbane
2012年8月5～10日
www.34igc.org

重要日程

- 2012年2月17日 要旨の提出〆切。
→要旨提出はこちら。
2012年3月31日 野外見学旅行の予約申込〆切
2012年4月30日 早期登録の〆切
(標準料金での登録開始)
発表者登録の〆切
2012年6月5日 滞在予約完了の目標日
2012年7月1日 標準料金での登録〆切
(遅延料金での登録開始)
2012年7月 第5号サーキュラー — 最終プログラム

NCGT セッション

テーマ 37, とってかわる概念
「新しい地球ダイナミクス・パラダイムの探求」

招聘者

Ismail Bhat, bhatmi@hotmail.com
Karsten Storetvedt: Karsten@gfi.uib.no
Dong Choi: raax@ozemail.com.au

主要トピックス

プレートテクトニクスの批判的検証, とって代わる力学的テクトニクス学説, 地球進化, 気候とその地史的变化, 自然災害と予知の展望, 惑星間相互作用, 炭化水素鉱床の起源と主要油 / ガス田の分布

基調講演者

Boris Vasiliyev: 世界海洋に産出する古期大陸性岩石 (1)
Takao Yano: 世界海洋に産出する古期大陸性岩石 (2)
Karsten Storetvedt: 世界磁気異常図とそれに関連する学説
Ismail Bhat: 全地球気候と新しい全地球ダイナミクス
Dong Choi: 新しいテクトニクス展望からみた地震予知
Louis Hissink: 地球プラズマの集中 (電氣的地球)

NCGT セッションで論文発表を希望する方々は, 招聘者の誰かに連絡をされたい。口頭およびポスターセッションが計画されている。

会議中に, 特定の話題に関する小規模なグループ会議が計画されている。それらは, 次号NCGTで案内予定である。提案, 要望あるいは意見を, 何なりと寄せられたい。

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, Higgins, ACT2615, Australia

■ 現金で銀行送金する際の銀行口座の詳細

銀行名 : Commonwealth Bank (Swift Code: CTBAU25),

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. 組織的準拠を、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や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・生物学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。

[広告面 ADVERTISEMENT PAGE]

Climate-Stat

<http://www.climatestat.com>

■ 地球物理学的予測と G-MagTeLeDyn を使ったモデル化
Climate Stat 社は、大気に加わる電磁氣的・重力的・熱結合パラメータに影響する短期的（時間～月あるいは季節）および長期的（10年および10年単位）な地球物理学的変化を説明する重力/磁力遠隔伝搬ダイナミクス気候モデルを開発した。

■ 天気予報技術

初期段階研究は、ハリケーンと天気の予測モデルを大幅に改良できる中程度の可能性を示唆する。地球物理モデルの結果は、従来のモデルを改良するための歴史的な大気循環によって検証される。

■ 成果物 ジオイドおよび磁場モデリング
気象予兆のための広域的データベース作製
予報のための地球物理学的情報提供
可視化システム

■ 予測される利用者

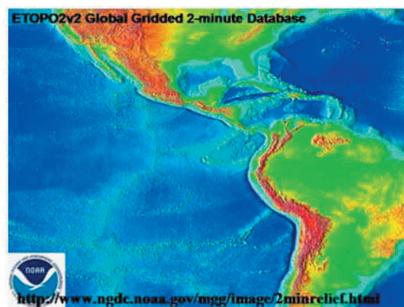
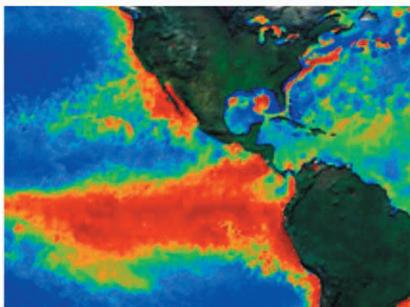
国際情報会社、天気予報者、確率予測会社 (Actuaries)、
商社、軍、および、海運会社

■ カスタマイズ化した可視化および情報システム

関係機関への販売

Bruce Leybourne - CEO/Geophysist

leybourneb@hotmail.com



左図：1998年2月の最大規模のエルニーニョ（表面海水温情報）

右図：伏在海嶺地形を反映するY字構造表面海水温異常