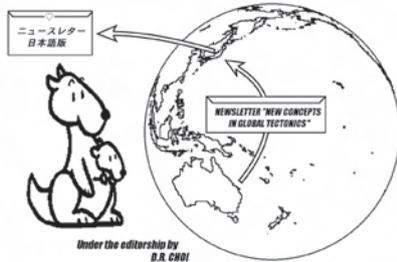


# ニュースレター グローバルテクトニクスの新概念



**NEWSLETTER** *New Concepts in Global Tectonics*

No. 59 2011年6月 ISSN: 1833-2560 編集: D.R. Choi (日本語版 2011年10月)



編集部: 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); Yasumoto SUZUKI (yasu-suzuki@vega.ocn.ne.jp); Boris I. VASSILIEV, Russia (boris@poi.dvo.ru)

## も く じ

■ 編集者から	[赤松 陽 訳]	2
■ 編集者への手紙	[赤松 陽 訳]	3
■ 原著論文		
Evolution of the North Atlantic: Paradigm shift in the offing Karsten STORETVT and Biju LONGHINOS 北大西洋の進化: パラダイムはやがて変わる [山内靖喜・小坂共栄・小泉 潔・窪田安打・矢野孝雄 訳]		7
Dykes, global tectonics and crustal extension Cliff OLLIER 岩脈, グローバルテクトニクスと地殻拡張 [柴 正博 訳]		34
Geological analysis of the Great East Japan Earthquake Dong R. CHOI 2011年3月11日 東北日本巨大地震の地質学的解析 [久保田喜裕 訳]		39
March 2011 Great Offshore Tohoku-Pacific Earthquake from the perspective of the VE process 角田史雄 熱移送説に基づく2011年3月の東北太平洋沖地震の解析 [角田史雄 訳]		48
Radio wave anomalies, ULF geomagnetic changes and variations in the interplanetary magnetic field preceding the Japanese M9.0 earthquake Valentino STRASER 日本M9.0地震に先行する無線電波異常, 超低周波地磁気変化, および惑星空間磁場変動 [矢野孝雄 訳]		53
9/56 year cycle: Record earthquakes David McMINN 9/56年サイクル: 記録された地震 [岩本広志 訳]		59
9/56 year cycle: Hurricane David McMINN 9/56年周期: ハリケーン [矢野孝雄 訳]		66
■ 評論		
Aspects of planetary formation and the Precambrian Earth Karsten STORETVEDT 惑星形成の光景と先カンブリアの地球 [(支援翻訳者) 杉山 明 訳]		70
■ 出版物・ニュース	[矢野孝雄 訳]	88
■ 訃報 Claude BLOT (1924-2011)	[矢野孝雄 訳]	90
■ 財政的支援・ニュースレターについて		
■ 広告		92

連絡・通信・ニュースレターへの原稿掲載のためには、次の方法の中からお選び下さい: NEW CONCEPTS IN GLOBAL 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] このニュースレターに掲載された意見, 記載およびアイデアは投稿者に責任があり, 当然のことながら編集部と編集部の責任ではありません.

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

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

翻訳・編集: NCGT ニュースレター翻訳グループ

赤松 陽 岩本広志 川辺孝幸 国末彰司 窪田安打 久保田喜裕 小泉 潔 小坂共栄  
小松宏昭 佐々木拓郎 柴 正博 角田史雄 宮川武史 宮城晴耕 山内靖喜・輝子 矢野孝雄

# 編集者から FROM THE EDITOR

( 赤松 陽 [ 訳 ] )

## プレートテクトニクス—日本の大地震と津波とともに Plate tectonics – gone with the great Japanese earthquake and tsunami

さる3月に北日本で起こった歴史的なM9.0の地震と津波(東日本大地震—GEJE)は、生命や財産、経済への損失に加えて、プレートテクトニクスに深く蝕まれている日本の地震学者の間に大混乱をひき起しました。彼らは“予知された”が、この40年間決して起こることのなかった東海(西日本)大地震に、莫大な金をつぎ込んでしまった。しかし、その後のこの大災害への警告を、日本の人々に予報することに失敗しました(Geller, 2011; Uyeda, 2011)。彼らは現在、人々が地震学の権威に対してその怒りをぶちまけるといふ納税者の反乱に直面しています。さらに厳しいことには、地震学者たちは巷に流行しているプレートテクトニクス学説では東日本大地震を説明できないということを公に認めなければならなくなりました。2011年4月10日付けの日本の大新聞の一つ(読売新聞)に掲載された伊藤氏の記事をもとに、東日本大地震についての彼ら自身の問題を考えようではありませんか。

地震学者は、驚異的なマグニチュードに当惑させられている。M9.0クラスの海溝型地震は、数万年以降の時代の比較的若い海洋地殻でのみ発生すると信じられている。新しいプレートは密度が小さいので、低角でもぐり込み、大きな摩擦を発生させる。この摩擦こそが、このようなより強い応力の蓄積とより大きなマグニチュードの地震の引き金になっている。これとは逆に、古いプレート(1億年以上も古い北西太平洋プレートのような)は大きな密度を持ち、高角度にもぐり込んでいる。それ故、より少ない摩擦とより小さいマグニチュードの地震を引き起す原因になる。プレートスラブは、日本海溝では、10°から30°の角度で潜り込んでおり、予想されるマグニチュードはM7.0であった。

彼らの2つ目の困惑は、450×200km(実際は700×200km)にわたる広い範囲の地殻変動である。地殻の破壊は一連のできごととして起こる。次々に起こる破壊は強い摩擦をもったプレートの結合(アスペリティー)を伴う地域で起こると信じられていた。—そこではより強い応力が広い地域に構築されているはずである。しかし、弱い摩擦結合が介在する地域はより小さな応力でも容易に滑るはずである。それならばなぜ、弱い摩擦の介在域はこの地震の発生時には応力吸収として作用しないのだろうか？

さらにもう一つの問題がある。普通の大きな地盤の変動は、水平的に20～30m(ある程度元の位置での測定によって

示されている)と見積もられている。太平洋プレートは日本海溝で年8cmの割合で沈み込んでいる。従って、蓄積したひずみが、年あたり3cmだとすると、20～30mという移動に十分なエネルギーを蓄えるためにはほとんど1000年もかかってしまうことになる。それで、どのようにして陸側のプレートは1000年以上もの間、跳ね返ることなくそのままの状態を保つことができるのだろうか。

NCGT 本号(p. 55-68)の私の論文で論じているように、これらの問題は地質学のデータにより容易に解決されるものです。強いマグニチュードを持った広範にわたるこの地震は、上部マントルでの強いエネルギーの集中と蓄積、そして、より強いエネルギーが地球の外殻から放出される間、太陽サイクルの一定時に北日本の広い沿海地域の下で起こる局所的な構造の高まりに起因するのです。これは、世界中で起こっている最近の強い地震、マグマの活動、そして異常気象などの事象の頻発をより適切に説明しています。地殻変動の量は地質構造に直接関連しています。摩擦の強いプレート結合域は、地殻ブロックの発達と符号しています。日本の地震学者を不安に陥れている問題のすべては、確かな情報に基づいた議論の余地のない地質データの無視(軽視)から生まれているのです。北日本とその沿海地域は日本の数多くの地質学者や地理学者によって徹底的に研究されてきています。そして、それらの結果は容易に利用できます。しかし、私が知っている限り、私たち(NCGTグループ)以外、誰も東日本大地震の分析に地質データを参照していません。また、これは過去の世界中の地震の大部分についても当てはまることです。Hoshino氏(NCGT Newsletter, no. 57, p. 118-119, 2010)がはっきりと指摘したように、地震は地質現象です。地震学者は地質学者と一緒に研究を進めるべきです。プレートテクトニクスは東日本大地震によって粉碎されました。そして、津波の引き波によって太平洋へと一掃されました。プレートテクトニクスよ、さらば！

### 文 献

- Geller, R.J., 2011. Shake-up time for Japanese seismology. Nature online. DOI:doi:10.1038/nature 10105.13 April.  
Ito, T., 2011. Commonly-accepted seismological theory does not work. Yomiuri Shinbun (Newspaper). 10 April, 2011 (in Japanese).  
Uyeda, S., 2011. Japanese earthquake prediction, what should



## NORDIC GEO SOLUTIONS

### 【広告】ノルディック ジオロジカル ソリューションズ

Nordic Geological Solutions 有限責任会社 (NGS) は、私たちの依頼主の解決のために格安料金で地質学の助言と協力を提供する、新しく統合した国際的な専門的助言業務を行います。NGS は次のような各種サービスを幅広く提供します：プロジェクトの創出、完成品受け渡し方式のプロジェクト業務、ドリルコアとチップサンプルによる情報収集、JORC に対応した探査管理、不動産自由保有権法律遵守アドバイスと報告書作成、資源の数理モデル化と評価、探査企画、安全配慮のための技術、リモートセンシング、埋積物調査、さらにフィールドキャンプ設備と配膳業など。

NGS は、革新的な解決法と最高品質のサービスを提供するために、非常に経験豊かな技術的専門家（プロ）を使います。訓練された優秀な専門家からなるコンサルタン

トによる多分野の専門チームと多種第一次産品のチームは、探査と鉱業において顧客のために数多くのプロジェクトに取り組んできました。私たちの蓄積された世界的な経験は、モンゴル、デンマーク、ノルウェー、スウェーデン、オーストラリア、アラスカ、カメルーン、中国、コンゴ、インドネシア、そしてロシアなどで、広範なプロジェクトの仕事を構築しています。

ウランバートル (Ulaanbaatar) とダランザジャド (Dalanzadgad) を基地にして、私たちは現在、非常に強力な活動の中心をモンゴルに持っています。しかし、私たちはオーストララシアとそれを越える地域にもサービスを提供しています。プロジェクト創生の最初の段階からサービスと助言の提供の能力は、現場の調査、地質図作成、探査設計、JORC 対応の探査管理、QA/QC、不動産自由保有権法律遵守と報告書作成、資源数理モデル化と評価など記載の最後までを通して、Nordic Geo Solutions を真に多角化された諮問会社にします。

## NORDIC GEOLOGICAL SOLUTIONS

Amarsaana Street, House 38, 12<sup>th</sup> floor, 1208  
17 Horoo, Bayangol District, Ulan Bator, Mongolia  
T: + 976 9999 2908



<http://ngs.mn>

SKYPE:dr.per.michaelsen

E:per.mich@yahoo.com.au

## 編集者への手紙 LETTERS TO THE EDITOR

( 赤松 陽 [ 訳 ] )

### 地震とサージテクトニクス

NCGT 最新号 No. 58 に掲載されたいくつかの投稿には、賞賛に値すると思われるコメントに次のようなことがらが含まれています。

- ・地震の発生における惑星 / 月 / 太陽の変化について、根拠なく主張されている影響。

- ・地震の 9/56 サイクル。
- ・サージテクトニクスの根拠。

これらを順に取り上げましょう。

### 惑星 / 月 / 太陽の影響

地震と太陽黒点の活動の間の関連についての確証が、V. Straser 氏によって主張されています (Solar cycles

and earthquakes in the NW Apennines, Italy, p.3-8).  
 しかしながら、図2, 3図および図4の中で彼が仮定しているその方向性は、確証としては受け入れ難いものです。それは、黒点の低活動と高活動が共に同じ数の地震に関連づけられて示されていることです。

この論文の著者によって指摘されているように、アペニン地震は一般的に浅く、低～中程度のマグニチュードです。そのような地震は、不連続(大きなジョイント、断層など)に沿う剪断破壊の結果として典型的に起こります。機械的な剪断応力が太陽黒点の活動によってどのようにして変化するかを理解することは困難です。それとは逆に、電磁気効果が、マントルからの高温高压の不安定物質の振る舞いや上方への移動に影響を与えるであろう挙動は、(Claude Blot によって予測されたように)別の要素です。

もう一つの(地震活動に対する)原因となる要因は、最近、1つの発表によってもたらされています。それは、近日点、遠日点における惑星あるいは月の位置の影響です。惑星効果と呼ばれているようなものの定量的な評価は不幸にも見つかりません。以下は、その(惑星や月の位置の)影響をこれらの貯水池によって誘発された地震活動度(RIS)と比較することによって、浅い地震への月の軌道の変化の有為な効果を見る試みです。

貯水池によって誘発された地震活動度(RIS)は、多かれ少なかれ満水のダムと関連した周囲の岩石内の水圧の上昇の結果として起こる地球上の現象です。この(水圧の)上昇は、岩塊内の不連続部に沿う有効応力を弱めます。岩塊がすでに垂直(過加重の)応力とは大きく異なる水平応力下にある時、この水(孔隙水)の圧力変化は剪断破砕を起こすのに十分です(James, 2000)。

貯水池によって誘発された地震活動(RIS)は、一般的には深さ4~5kmの範囲にあり、高さ50m以上のダムに典型的です。高さおよそ20~30m以下のダムではほとんど知られていません。これは、低い限界が、高い応力を受けている地域においてさえ、地震の人為的な引き金として存在しているであろうことを示しています。深さ4~5kmあたりの地震の原因となっている高さおよそ30mのダムに対する貯水の影響は、結局は地震深度が同じ場所の応力の0.4~0.5%より多くないことがわかります。明らかに、そのような比較的小さな変化のために、周りの岩塊の中に脆弱部を含む可能性があることは、岩塊はすでに初期の破損の状態にあることをほのめかしています。(もちろん、数多くの巨大ダムはRISを誘発することなく首尾良く造られてきています。しかしこれはより安定した岩塊によって、つまりどのような先行する微小地震の活動もないことで説明できるはずです。)

それで、上記の“最小応力変化”は、どのようにして天文学的に、たとえば月の軌道の大きな変化によって生み出された重力の変化と、比較できるのでしょうか。遠

日点と近日点での月に起因する重力の変化の単純化された見積もりは、月の平均重力の0.001%のオーダーのものとして出てきます。これはたいへん小さい値ですが、上述のRISの変化との量的比較は、現在の著者の評価能力を越えています。いくつかの間接的な証拠は、しかしながら、例証となるに違いありません。たとえば、タスマニア南部の牡蠣養殖者は、最近、月が近日点にある間の潮の干満の高低が、潮の干満予測表よりおよそ20cmも増減していることを見つけました。

また、地下水のモニタリングからの証拠もあります。また、著者が知っている限り、月のいっそう極端な(中心から離れた)軌道に対応した水位の大きな変化に関するデータは公表されていません。そればかりか、著者はグリーンランド中央部での30年にわたるそのようなモニタリング計画による観測は一切承知していません。直感的には、そのとき、人は、月一あるいは個々の惑星の動きが地殻における地震の発生を可能にするであろうということについては確信を持たないでしょう。2012年に予想されている月、木星、土星そして太陽が一列に並ぶというめったにない直列は、おそらく別の事件となるでしょう。しかしながら、月震(すべてM<2)の頻度は、月が近日点に位置するの間に、月の決まったある地域で増加することは知られています。

**想定された9/56年周期：カリフォルニア地震の場合**

上記の問題に関するD. MacMinn氏の論文では、カリフォルニアとその周辺における地震の9/56年サイクル周期と過去の経済的なパニックとを関連づける試みが行われています。カリフォルニアにおける地震の大部分は浅いもので、著者自身、(M)6.5よりも大きい地震に限定しています。しかしながら、著者のデータが、それぞれの年の地震の数としてグラフにプロットされる時、地震の活動と提案されている周期の間に、時間の一致は見られませんでした。おそらく人は、もし著者の言うサイクルシステムが起こったとしたら、より多くのM4.5以下の小さい地震も含まれるに違いないと予想したでしょう。さらに、著者のサイクルとDong Choi氏とLeo Maslov氏によって提案されたサイクル(Earthquakes and solar activity cycles, NCGT no.57)の比較は、今後、有効なものとなるはずです。

**サージテクトニクス**

Ismail Bhat氏他による論文(Scientific logic behind the surge tectonics hypothesis, NCGT no.58)は、私がサージテクトニクスを読んでいないことをほのめかしています。(同じような非難はStoretvedt教授に対してもほのめかされています。もし両方の非難が正しものならば、それは、良い仲間のお付き合いに私も入れてもらっていることになります。) 事実上、私は、およそ19年前にテキサス工科大学刊行のMeyerhoff氏他によるオリジナルのサージテクトニクスの博士論文(New Concepts in Global Tectonics, Eds Chatterjee & Hotton, 1992)を読んだということです。サージテクトニクス仮説は、仮

定されているメカニズムを生み出すのに必要な応力の定量的な追跡分析なしに、基本的に形態・構造学的様式の解釈に依拠している、という私のオリジナルな意見 (NCGT no. 56) を変える理由が見つからなかった時には少なくとも今までは一その話題に対して切り返す理由は見つかりませんでした。

上に述べた著者の論文は、51 ページの最後の段落で、サージテクトニクスは主に地球本体の冷却と収縮に基づいていると述べています。しかし、地球は、少なくとも先カンブリア時代以降、今日と同じ程度の冷えた地殻と表面温度をもった固体であったことは明らかです。そのとき以来、地球内部でどの程度の冷却が行われたのかは推測に過ぎません。一方、地球内部は、可塑であろうと液状であろうと非圧縮的であり、そのような固体が収縮するための唯一の方法は、土壌の圧密過程に似た、表面からの揮発性物質 / 液体の排除を通してです。それ故、地球の有効な収縮のいくつかの兆候は、世界中の火山活動、地震、熱気孔、等々によって放出されたガス / 液体の量の見積もりから得られるに違いありません。(玄武岩流と海山生産物もまた、地表面の沈降をもたらすでしょう。しかし、このようなところでは、沈降は、地表面への溶岩の付加によって部分的に相殺されるでしょう。)

そのような地球収縮過程の分析への指針は、M. A. Biot の研究に見い出せます。彼は球状の多孔性をもつ本体の圧密作用を分析しました (Jnl. Appl. Phys., v. 12, 1941; Jnl. Appl. Mech., v. 23, 1956)。また、その外側の表面を横切る流体に対して、地球本体の変形に関係しているガウスの主題は、有効であるに違いありません。(不運にもこの手紙の執筆者は、最早これらに対する言及は、すぐ手の届くところにはもっておりません。しかし、上述したような課題は、若い研究者にはよりふさわしく、受け入れられるに違いありません。)

もう一つの点は、サージテクトニクスも、マグマの流れがコリオリの力、おそらく有効な最も弱い地球の力、に強く影響されるということ仮定していることです。また、きっと、これは、コリオリの力の大きさが、仮定されたサージチャンネルの中の、マグマの流れへの摩擦抵抗に対してバランスをとっているということが分析されるであろう問題です。

Peter M. JAMES  
glomaker@hotmail.com

### サブダクションの妄想 マラッカ海からの例

移動するプレートテクトニクスのサブダクションの概念は、ベニオフゾーンを通して上部マントルへ落ち込んでいくその過程において、リソスフェアプレートの連続性が要求されます。この過程が開始される場所は深い海溝であると断言されています。

この概念の欺瞞性は、多くの著者によって指摘されてきています。すなわち、海溝はしばしば浅いベニオフゾーンから全く隔てられていること、浅いベニオフゾーンと深いベニオフゾーンの間にはしばしばギャップがあること、後者のゾーン(深いベニオフゾーン)は時に非地震性のゾーンによって深発地震相から分け隔てられていること、言い換えると潜り込むプレートの連続性の証拠はほとんど見られないこと、などです。さらに、太平洋の周囲をとりまく活動的な縁辺を横切る地震の輪郭像の解釈から、NCGT 編集者や他の著者等によって、どのようなサブダクションも確実な証拠がないことが暴露されました。しかしながら、現在の著者(NCGT ニュースレターにみられる)によって主張された過程の分析は、サブダクションのメカニズムは、連続の可能性があるままにして物理的にスタートさせることはできないであろうということを明らかにしました。

この証拠の重さにもかかわらず、この概念は移動論者の信念としてしっかりと定着したままです。ですから、以下の例は、サブダクションゾーンを確認するための基準が不合理(ばかばかしいこと)へとつながるもう一つの事例として提供されています。

マラッカ海域は図 1 に示されています。その地域の西の腹部の下の方は、ミンダナオ島からスラウェシ島北西端まで走っている深発地震(およそ 600km)の最もよく知られた線です。東へおよそ 200 ~ 300km は、深発地震に連なって部分的にはほぼ平行して曲がりくねったコースをたどる浅い地震の複合体です。浅い地震帯は北緯 5°あたりからちょうど赤道の南まで延びています。これら 2 つの地震帯の間で中程度の深さの地震は典型的なベニオフゾーンで発生しています。ちょうど浅発地震帯の北東にフィリピン海溝の南の端が位置しています。この図には、この地域を横切っている東西の 3 つの断面図、図 2, 3, 4 が示されています。

移動論者の教養の内部では、そのような配列は、はっきり規定されたサブダクションとして受け入れられています。とはいえ、たわまない堅い岩石質のプレートが、断言されている過程に含まれる非直線性や非平行性に適応する性質に、払われるべき注意がほとんど何も見られません。しかし、より重要な対立がここにあります。

浅発地震帯の東側に、東方向に傾斜したベニオフゾーンに沿って起こっている地震活動を伴ったもう一つの明白な沈み込み帯があります。このゾーンはおおよそ 200km の深さで終わっています。そして、北方向の断面では、それは直接海溝の下で終わっています。このことから生まれる現下の疑問は以下の通りです。

- 沈み込み帯に対して、表面の 1 点の震源から、同時に反対向きの 2 つの方向に進んでいくことが、物理的にどうして可能なのだろうか。

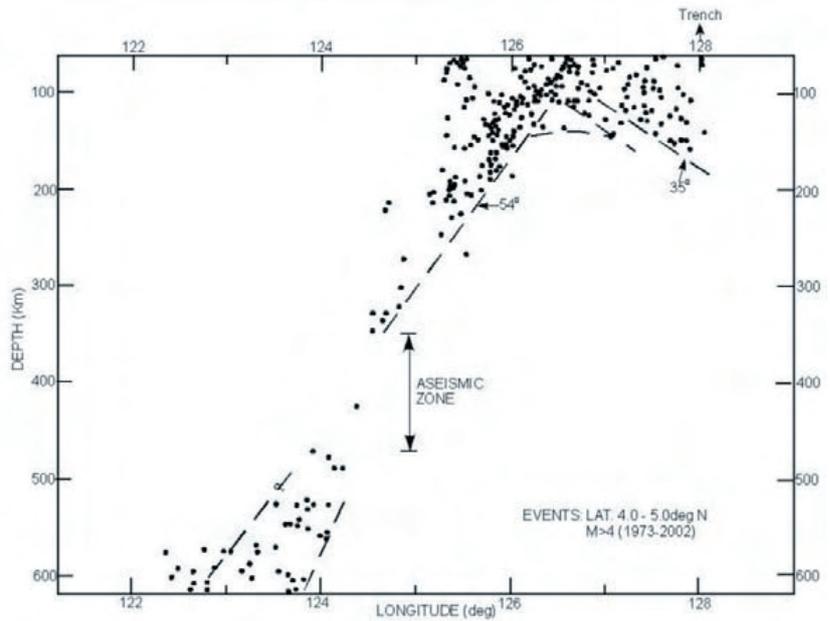
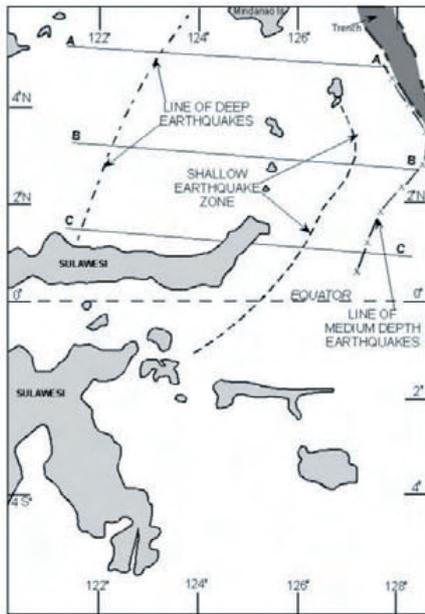


図1(左). 地震イベントと図2, 図3, 図4にプロットされた断面の線を示すミンダナオとスラウェシの間のマラッカ海.  
 図2(右). 北緯4°~5°の東西断面における断面A-Aのイベント. M>4 (1973-2002).

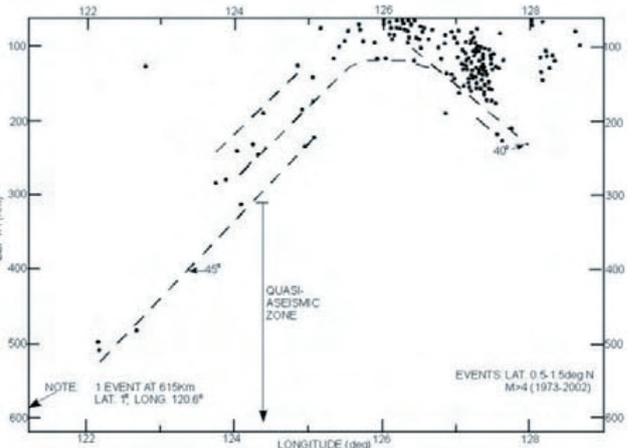
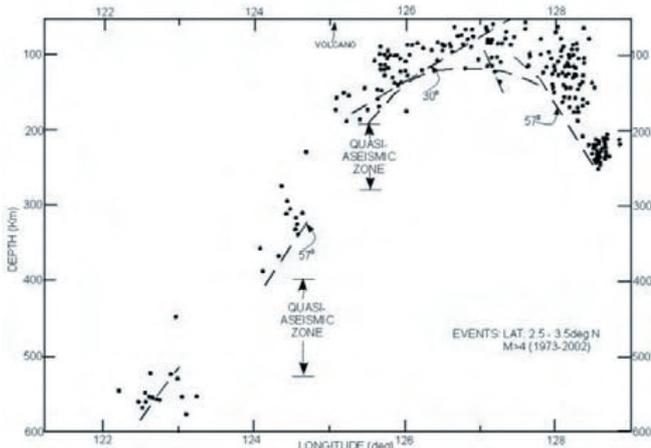


図3(左). 北緯2.5°~3.5°の東西断面における断面B-Bのイベント. M>4 (1973-2002).  
 図4(右). 北緯0.5°~1.5°の東西断面における断面C-Cのイベント. M>4 (1973-2002).

- その行く手が東方向に下がっているベニオフゾーンによって上部が切られている時、フィリピン海溝が、どのようにして、仮定されている西方向への大きな沈み込みの過程の一部でありえるのだろうか。

その答えは、ベニオフゾーンと海溝が 移動論者の枠組みの中で仮定されたこととは著しく異なる起源を持っているという事実の中にあります。

Peter JAMES : Geotechnical Engineer/Engineering Geologist  
 glopmaker75@hotmail.com

36日の太陽 - 極の回転は MADDEN-JULIAN 振動を御する

極をまわる太陽の自転周期が36日であるとするいくつかの報告をみつけた。この数値を、太陽が完全に1回自転する、つまり、太陽自転の同じ sweep 子午線あるいは点で地球に追いつくのかにかかる時間の計算に用いると、

次のようになる。

$$36 \text{ 日} + [36 \text{ 日} / 365 \text{ 日} \times 36 \text{ 日}] = 39.55 \text{ 日}$$

太陽が1回自転した後に地球に追いつき、太陽が同じ子午線に達するには、余分に3.55日が必要である。

太陽の1回の自転 + [(太陽自転1回の期間における地球年軌道の弧度%) × 1日の太陽自転] = 合計日数..... すなわち太陽が追いつく日数を実数で表現すると、この計算は次のようになる：

$$36 \text{ 日} + [(39.55 \text{ 日} / 365 \text{ 日}) \times 39.55] = 40.29$$

いずれにしても、この値はMadden-Julian Oscillation (MJO) の40日振動に十分に近く、ある興味深い仮説をもたらす。これまでに、誰かがこのような可能性を考えたことがあるだろうか？

私はこれらが一致しているとは考えない。そして、MJO に関係している理由を私は知っている！ Krishnamurti et al. (2009) [Space-time structure of Earthquakes. Meteorology and Atmospheric Physics, v. 105, no. 1-2, p. 69-83.] は、それを描出するのに必要な手がかりをもたらす。彼らの分析とこの仮説が正しければ、振り子運動によって電気エネルギーを北から南へ移動させるもの、そして地震が、太陽磁気と太陽 sweep の極性振動によって醸成されるものであることを意味する。

これは、なぜそうなるのかを簡明に示す。太陽が自転するにつれて、強度と極性が地球の回りをゆっくりと移動する。こうして、コア-マントル境界からの荷電の時期と地理的分布を制御している極のプラズマ流動と伝導度が、地震の醸成に連動して変化する。いっそう研究が進めば、これの正しさが証明されるだろう。

Bruce LEYBOURNE leybourne@hotmail.com

2011年6月20日

## 原著論文 ARTICLES

北大西洋の進化：パラダイムはやがて変わる

EVOLUTION OF THE NORTH ATLANTIC: PARADIGM SHIFT IN THE OFFING

Karsten M. STORETVEDT

ベルゲン大学地球物理学教室, ベルゲン, ノルウエー karsten.storetvedt@gfi.uib.no

Biju LONGHINOS

大学学部, トリバンドラム市, ケララ州, インド biju.longhinos@gmail.com

( 山内 靖喜・小坂 共栄・小泉 潔・窪田 安打・矢野孝雄 [ 訳 ] )

— 20年後においても、…… プレートテクトニクスはその単純性と優雅さを失う恐れがあるように思える。故 Norman D. Watkins が “最小の驚きの原理” といつも呼んでいたことからの逸脱は全く一般的になりつつある…… 2つの主要な出版物が理論としてのその本源的な限界を予示している。すなわち、地球の内部過程の少なくともいくつかのはっきりした波動状の挙動と特別な仮説に必要な成長すること、その理論が新しい全地球的テクトニクスになると約束を守り続けることができないという印である。 — T. Van Andel (1985, p. 138 & 141)

**要旨：**地球物理学的及び地質学的証拠の範囲内での厳密な検討から、北大西洋の地質学的発展を説明するのにプレートテクトニクスは不適であることが示された。現在の行き詰まりを避ける試みとして、この地域の自然地理学的及び構造-火成活動の歴史、とくに後期白亜紀-第三紀の発展を説明するために、全地球的走向移動テクトニクス (Global Wrench Tectonics, Storetvedt, 1997 & 2003) が適用された。この新しい理論によれば、地球は最初に厚い全地球的大陸性外殻を獲得していた。その外殻はその後不規則な地殻下の希薄化及び海洋的モードに次第に変化する関連した化学的変化を長期間にわたって受けてきたのである。この過程は上部中生界においてピークに達した。大西洋中央海嶺に沿った調査地点で発見された非常に多様な大陸性岩石の存在と同じように、アイスランドとシェットランド・グリーンランド海嶺の一部を含めた北大西洋のさまざまな程度に水没した小さな大陸塊の群は、これに基づけば簡単に説明される。後期白亜紀において地殻物質がマントルに取り込まれて減少することが加速されたことが、適度な真の極移動 (赤道ふくらみの相対的な位置の変化) と地球の自転速度の増加という出来事を引き起こした—アルプス構造大変革 Alpine tectonic revolution) の主な力学的引き金として本論ではみなしている。緯度に依存する慣性機構は根本的にはコリオリ効果によって支配されており、全球的古リソスフェアの西方への走向移動作用 (wrenching) をもたらした。この過程において、薄くなりそして力学的に弱化した北大西洋リソスフェアは海洋中央の位置でバラバラにくずれ、左横ずれのせん断作用と中央海嶺に沿って観測される一般的な構造を生じさせた。アルプス期のリソスフェアの横ずれ運動の構成部分として、ヨーロッパと北アメリカは存在した場所で相対的な時計回りの回転を受け、両者それぞれの極の経路は別々になった。そのため、この2つの大陸に関する極移動の軌跡の現在の分離は大陸の側方移動を必要としない—ただそれらの方位が相対的に変化しただけである。現在信じられているような、地磁気の両極の変化と海洋底進化のアイソクロンが結びついていることを線状の磁場異常が示すということの事実に基づく証拠はなにもない。その代わりに、いろいろな証拠は海洋磁気の直線性は、帯磁率の著しい相違と周囲を取り巻く地磁気の磁場からの誘導を引き起こした断層で—列に並んだ磁気鉱物学的 (magneto-mineralogical) 変化の組み合わせから発生したことをいろいろな証拠は示している。新しい全地球的なテクトニクスの基礎の上に北大西洋の自然地理学的及び構造運動的特徴の範囲を再検討する。

**キーワード：**古地磁気, 北大西洋, リソスフェアの可動性の見解, 海洋底拡大の退去, 走向移動テクトニクス (wrench tectonics), 新発展パターン

## はじめに

1950年代後半までに、古地磁気学の研究は次の結論に達していた。その結論とは、極は大陸に関してのその位置を移動させただけでなく、陸塊もまたお互いに関連しあって移動したというものである。ヨーロッパと北アメリカの両者の極の軌跡間において経度で25°に達する系統的な違いが明らかにされた一すぐに、アルフレッド・ウェーゲナーの長い間除隊させられてきた移動仮説を支持する一応の証拠\*1と考えられた。言われているように北アメリカ大陸を単一化することは長い間議論されてきた問題に直面してきたけれども、なんら別の可動的な案は一物理的適合問題を潜在的に避けて一不幸にも真剣に考慮されなかった (Storetvedt, 2003, p.72 & 75)。例えば、平らな頂上をもち、相対的に平凡な海洋横断性のシェットランド (諸島) - フェロー (諸島) - アイスランド - グリーンランド海嶺は一北大西洋の大陸間の動物群と植物群の交流を説明するための陸橋として伝統的にみられてきた一ある程度の関心事であった。しかしながら、1950年代後半に移動説は発展段階にあって、20年以内に地球科学は今日の理論体系へとそれてしまったのである一水平方向への大陸移動を支持する方向に突き進み、1968年からプレート・テクトニクス原理となった。固定した大陸から移動する大陸へというこの改変過程において、前者の反対論は都合良く賛成論とねじ曲げられた (詳しくは Storetvedt, 1997, 2003 & 2010b)。

\*1: 一応の証拠とは相手方が反証によって覆えささない限り、ある事実の証明のために一応十分であるとされる証拠

今日、海洋横断性のシェットランド - グリーンランド海嶺は厚さ30-40kmの (大陸型) 地殻をもつことは十分に立証されている。そして、この大洋横断性の連結は大陸を特徴づける容積的異常の特徴をもつことを地殻磁場の記号の最近の編集物は示している (Korhonen et al., 2007; Maus et al., 2009)。本論において、この北大西洋の陸橋は以前に存在した広範囲にわたる北大西洋の大陸地殻の片割れであり、後期中新世まで周期的に離水したリッジとして存在したことを示す証拠を私たちは開示している一水平方向への大陸移動と海洋底拡大の仮説の下部を切り取っている。従って、このリッジは離水した海底の拡大あるいは浅海での海底の拡大を受けてきたという最近の特別な主張は、理論に群がる加工品として排除する。

世界で唯一大洋中央海嶺の位置にあって顕著な火山活動を伴うアイスランドもまた海洋底拡大の証拠と見なすことはできない。アイスランドにおける新第三紀の火山活動の始まりと同時に、中央大西洋のほぼ全体を横切るように無数の位置でマグマの活動が起きた。これに反して、アイスランドより北での中新世とそれ以降の火山活動はほとんど欠如している一これは重要な見方であり、それに対してプレートテクトニクスは何の答えをもっていない。一連のいろいろと特別な主張を伴う多くの難局に

遭遇することは一これらの主張において、海底拡大の確認されていない動きは他の仮説の装飾からなる安定した成長の頂点にあり、装飾に関して北大西洋は古典的な事例である一真の科学的繁栄の印ではない。後思案の恩恵をもって次のことを知るのに多くの想像力を必要としなかった。それは、1950年代の指導的古地磁気学者達がアルプス期の慣性駆動で、緯度依存のその場所での大陸の回転を水平方向の移動 (下記参照) の代わりに選択したならば、地球上の地球物理学者はまったく異なった知的進路を取ったであろうことは十分に考えられる。

不幸にも、繰り返されている人気のあるモデルの特性一モデルを否定する証拠を無視すること一は科学界に極めて広く行きわたっている (Brown, 1977; Feyerabend, 1988; Kuhn, 1970 & 1977; Lakatos, 1978を参照)。例えば、プレートテクトニクスの主要な機構を確認するすべての試みは失敗してきたけれども (例えば、Storetvedt, 1997, 2003 & 2010b, 及び NCGT ニュースレター中の数多くの論文)、世界の海洋のうわさによる拡大の歴史は根拠のない特別な改善と関わった補助的な仮説の絶え間ない流れと関連して一地球科学の文献を支配し続けている。従って、現在の議論において、過去数十年間にわたって大部分が無視されてきた観察も含めて、北大西洋のいくつかの重要なデータ / 現象を私たちは新鮮な目でみるであろう。明らかにプレートテクトニクスは異なった現象の範囲間に論理的関連を容易に確立できないので、プレートテクトニクスはグローバルなテクトニクスにおける理論上の広場の一つの位置にもどるのが適切のように思える。

熱くて、対流しているマントルという伝統的なアイデアはプレートテクトニクスを動かすために現在必要であるが、地質の歴史を組み立てている鼓動のような過程と現象からなるもつれた蜘蛛の巣を説明していない。他方、ダイヤモンド中の包有物として酸化していない炭化水素が含まれ、それらが下部マントル起源であることが示唆される。メタンとその他の炭化水素が、結晶質基盤を通り抜けて連続して噴出しているという事実 (たとえば、Melton and Giardini, 1974; Gold, 1985 & 1987; Welham and Craig, 1983; McLaughlin-West et al., 1999) は、地球内部の温度が全体としては伝統的に考えられているよりだいぶ低いことを示している。従って、地球はその歴史を通して熱化学的平衡ではなかったと結論できるのである。このような安定に達する自然の過程において、内部の大半の改造 - 浮揚性の揮発物の助力を得て - はこの惑星の始まり以来恐らく活動してきたのであり、間欠的な地質活動の漸進的發展過程を順番に歩み始めさせた惑星自転におけるとぎれとぎれの変化をもたらした。これは脱ガス作用と関連した全球的走向移動テクトニクス (Global Wrench Tectonics, 以下ではGWT) の根本的な基礎を形成している一GWT (Storetvedt, 1997 & 2003) は本研究で使用される。

惑星のかたまりの不規則なガス抜き作用とそれに結合し

た内部改造は、地球物体の空間方位の時折の変化の他に回転速度の変化も自然に起こしてきたであろう—それゆえに、赤道のふくらみは再配置された(真の極移動として知られている現象)。GWTを支配する原理は、惑星の力学の時折おこる変化が表面の自然地理学的、環境上の及び火山-構造運動の各プロセスの主要な運転手を供給するということである。言い換えるならば、地質学的歴史は地球自転における脈動のような変化と直接に結びつくようになる。化学反応と熱生産—溶解物の溜まりをつくる—を含んでのマンテル最上部での揮発物の累積は、不規則な低速度アセノスフェアを次第に築いたのである。中生代において、浮揚性揮発物の累積は、グラニュライト質岩石とはんれい岩質岩石を相対的により重いエクロジャイトへの有効的転換を引き起こすのに十分なレベルの静水圧を発生させ、地殻下の薄層化を加速し、付帯的なアイソスタシーによる盆地形成を可能にした。従って、地殻の“海洋化”(薄くて化学的に変質した海洋地殻を次第に作る)の発展した段階が地球の歴史に新たに加わった—これは末期白亜紀以来のみ存在した。中生代末には、現在の大陸のモザイクは力学的により弱く、より容易に変形しやすい海洋地域に囲まれて、基本的にあるべき場所にあった。その時まで、地球は構造運動的にかかってないほど不安定な状態であった。従って、アルプス大変革—恐らく、地球の歴史において最も広範で激しい造構的隆起の一つである—は途上にあった。

推論上、海洋地殻の分裂と薄化は地球の慣性モーメントの変化とつながっている—角運動量保存の原理に従っている (<http://www.youtube.com/watch?v=yAWLlo5cyfE>)。推論上、後期白亜紀において増加した地殻薄化は、薄層化した物質の内部への移動を伴い、地球の軸回転に加速を導いた (Creer, 1975 参照)。地球の自転におけるこの変化は惑星外殻の緯度依存の走向移動作用を導いた (Storetvedt, 2003)。この全球的ねじれに応じて、リソスフェアの構造運動単位への分裂はその場での適度の内部駆動の回転を含んでいた。その結果として生じた構造運動的境界は大洋中央リフト帯によって表されている。アルプス大変革はいくつもの明瞭な力学-構造運動の脈動を起こし、下部第三系中に入ってからかなり経つまで地球に作用した。外核と下部マンテルからのガス抜き作用の不規則な分布(どうにかして海洋-大陸の形状を反映している)は大陸下の深いマンテルの根の起源であると考えられている。構造運動的可動性をもつGWT系によって、大陸ブロックは常にそれぞれ各自のマンテルの根と共にとどまってきた。

GWTの力学-構造運動の原理に従って、当然、北大西洋の発展は南から北へと広がってきた。そして、同じように構造運動と自然地理学的特徴は始生代の地球全体の地殻に植え付けられた基本的な直交する断裂帯パターンによって支配されてきたのであろう。大陸のリフティング、縁辺部での火山活動、縁辺の沈降および地殻の海方向への薄化は、議論の余地のない事実である。しかし、これらの観察を仮定された地殻の“伸張”に関連づけるこ

とは、モデルが要求する推測として棄却される。

### 古地磁気と大陸移動

1950年代後半に、固定された大陸の配列は全世界的な古地磁気のデータベースを満足させなかった。現在の地磁気の磁場の重要な部分は、地球の軸回転と密接に結びついた内部の機構から発生していることが認識された (Elsasser, 1946)。加えて、磁場がその方向において小さいが系統的な変化を受けていることは数世紀間にわたって知られている—地磁気の経年変動として知られている。しばらくして、これらの事実が続いて、数1000年間にわたる平均的な磁場の方向は、惑星の自転軸と同軸になるように並んでいる地球の核内の双極子の方向を表していると推量することができることを Runcorn (1954 & 1955) が提案した。明らかに数1000年間にわたる時間内に磁場の極性は全体的な磁化軸の傾きを変えることなしに繰り返し反転してきたという古地磁気の証拠は、地球磁場の方向性はある基本的な方法で自転軸に固定されているということ (Hospers, 1955) を信ずるさらなる基礎を与えた。古地磁気の証拠を集めた結果から、2つの重要な地球物理学上の示唆が現れた:

- 1) 特別の岩石層(この岩石層の場合、多分、経年変動効果が平均化されたであろう)の特徴的な全体的古地磁気の偏角は、化石磁化が刻印されたときの古子午線面に整列したであろう。
- 2) 平均残留分極(化石)伏角はそれの相当する古緯度と単純な幾何学上の関係をもったであろう。

地質時代を通して地球中心の双極子仮説は有効であると仮定し、経年変動の広がりや平均化されたということを条件にすると、見積もられる古地磁気の極位置は、問題となっている時代の古地理学的軸/極の相対的方位に相当する。従って、現在の地学的座標中に年代と共に進展する極位置を記入することは、遠く離れた地域間において磁化の平均方位を対照するのに最良で可能な方法とみなされてきた (Creer et al., 1954)。この理論的な台を基礎にして、現代から後期先カンブリア代までの岩石層に関する連続する極と関連させて極移動の軌跡が率先して求められたのは、イギリスにおいてである。この曲線を作図するに当たって、黄道面に対する法線の歳差はさておいて、自転軸の空間での方位は地質時代を通して変わらなかったということが当然の前提とされた。イギリスに関する極の軌跡がウェーゲナー (1929) が古気候から求めたヨーロッパの極移動曲線—最初は Kreichgauer (1902) によって提案された—と適度に一致したという事実は、古地磁気的解釈にさらなる実を与えた。極移動の現象についてアルフレッド・ウェーゲナーは疑いもなく正しかったが、そうだからといって、彼は大陸移動についても同じく正しいであろうか?

別の大陸における古地磁気測定データの集積が始まるにつれて、古地磁気の手法の可能性が極移動の研究に限られないことが明らかになった。このように、いろいろな

大陸における先第三紀に岩石に関する古地磁気の極の推定はお互いに一致しなかった。すなわち、個々の先第三紀の極移動の軌跡は現在の地理座標において食い違った方位をもっていた。1957年頃から、相対的な大陸の動きの問題は古地磁気研究においてなくてはならないものになった。突然に、数10年間除隊させられていたウェーゲナーの移動仮説が古地磁気を地球物理学の有望な方法にした。若い古地磁気学の社会において支配的であった楽天的な雰囲気の中で、ウェーゲナーの大西洋の大陸の再配列に反対する伝統的な地質学上の議論は“古くさい”とみられ、それ以前の反論は単に無視された (Storetvedt, 1997, 2003 & 2010b 参照)。

長い間続いた物理学上及び地質学上の適合問題は明らかに仮説の問題であった—ウェーゲナーの移動モデルと関連した無理矢理適合させる作戦の産物である。それにもかかわらず、ヨーロッパと北アメリカの互いに異なる極移動の軌跡 (図1) は、なにか相対的な運動が起きたという強い一応の証拠であった。しかし、それは議論されていた水平移動からなるウェーゲナーのモデルであるか、それとも恐らく古地磁気データがさらにより良く適合するであろう—そして、同時に大陸をくっつける問題を避けた—別の可動系があったであろうか。南に向かって扇状に広がる北大西洋の形は、緯度に依存するコリオリ効果と連携しているようであるが、古地磁気社会に向いていた物理学にとって根本的な興味の問題であるべきであった。しかしながら、水平移動のウェーゲナーのモデルは急速に人気を得つつあった—誰もなにか代わりの解答を探すことさえしなかったように思える (Storetvedt, 2003, p. 72 & 75 参照)。

用いられた古地磁気データの大多数は北アメリカとヨーロッパからのものであったため、2つの極軌跡間の食い違いは論争の最前線にあった。2つの極軌跡が分離した時代について不確定であったが、Runcorn (1962) は古地磁気の証拠はウェーゲナーの概要と広く一致していることに確信していたようであった。そして、より精密な研究が実施されたときに、いくつかの互いに矛盾したデータは消えるであろうと彼は疑いもなく論じた。しかし、Runcornの見込みは確かめられなかった。例えば、10年後にオタワのJean Royはヨーロッパと北アメリカ間での古地磁気の比較を出版して、彼が到達した古緯度の明らかな移動 (~20°) は2つの陸塊の間で起きたのであった (Roy, 1972)。すなわち、北アメリカがヨーロッパに対して相対的に時計方向に回転するとともに、北大西洋に沿っての著しい左横ずれは、水平移動という単純なモデルとは両立しがたい。

Royの結果は多くの古地磁気研究者に対して驚きもたらしたが、しかし、すでに確立していた偏った解釈と多数に支持されている明白な理解にしがみつくと人間の性質によって、繁栄している移動・拡大社会はいらだたせる事実を論じる用意を明らかにしていなかった (Storetvedt, 2003)。経線方向の相対的な大陸移動は—

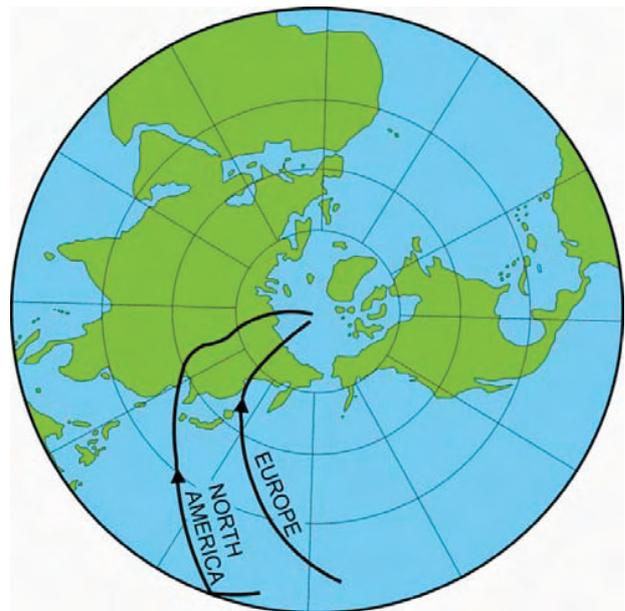


図1 ヨーロッパと北アメリカに関する初期の古地磁気に基づいた極移動軌跡—Runcorn (1962) による。2つの極の曲線の一般的な北に向かうコースはウェーゲナーの古気候に基づく極軌跡を支持する強力な証拠とみられた—真の極移動という力学的現象を支持していた。言い換えると、地球は地質時代において、空間におけるその方位 (自転軸に関連して) を変化させることをときおり繰り返して受けてきた。2つの極移動曲線の経度の違いは水平方向 (東西) の大陸分離によってもたらされたということは当然のこととして受け取られた。これからは、ウェーゲナーの移動仮説は次第に目立った。

北大西洋の水平な閉鎖の上に重なった。このことを Jean Roy は当たり前のことと考えていた—でも当時の多くの古地磁気研究者にとってとっぴな考えに見えた。しかしながら、後から考えてみると、Royの分析は代わりの可動系の可能性を開いたことを知るのとは難しくなかった。事実、2つの極軌跡の経度上のずれは水平移動をまったく条件としない—不一致な極曲線を2つの陸塊の内部からの駆動による相対的な時計方向の回転によって十分に説明することができた—その2つの陸塊は現在の地理的な距離を保持してである。ヨーロッパに関連して、大陸の重心の周りを約25°までの大きさでの、北アメリカの僅かな時計回りの回転が必要とされる。この代わりの可動系は大陸と海洋それぞれの上部マントル間の広域的な違いの成長する証拠と一致したであろう (MacDonald, 1964)—大陸はマントル深くに根をもつという見地は今やマントル・トモグラフィーによって十分に確定されている。マントル・トモグラフィーは水平移動と海洋底拡大の深刻な障害物であったし、今でもそうである。しかし、この代わりの可動系は、少なくとも相対的に小さな構造運動による変形と大西洋海盆の再構築が期待されると合図した。しかしながら、1970年代初期までは、新しいグローバルテクトニクスと共に多くの重要な見地は問題なるように思えたが、移動・拡大仮説の慣性は大変強かった。現状を変えることを進んでやる気持ちは明らかになかった (下記及び Storetvedt, 1997, 2003 & 2010b 参照)。

不思議に思えることだが、古地磁気研究において結合し

た大陸棚の物理的調整問題はもはや決定的な見地ではなかった。どちらかといえばアルフレッド・ウェーゲナーが欲した適合を初めから排除していた重要な大陸の破片を操り、歪めたと、地球科学の社会は伝統的に彼を告発してきたのであった。その大陸の破片は彼が欲した適合を初めから排除していた。しかし、水平移動の仮説が発展しているときに始められた Bullard et al. (1965) のコンピューター版は実際上少しも良くなかった (Le Grand, 1988 参照)。Bullard et al. は多くの隆起した北大西洋海底構造のうち、うまくはめ込むことができたという唯一の理由で Rockall 海台を大陸結合に含めた。しかし、海洋を横断しているシェットランド (諸島)-フェロー Faeroe (諸島)-アイスランド-グリーンランド海嶺は、北西ヨーロッパとグリーンランド間のほぼ完全に浅いつなぎとなっており、大陸間の生物学的移動のための海洋を横断する陸橋として長い間考えられてきたが、排除されている。不幸にして、ご都合主義的取り上げ方と願望的思考は厳密な科学的手法よりも重要になったのであった (例えば, Le Grand, 1988)。

ウェーゲナーはある程度極端に地殻を勝手に変えたと告発されたけれども、アゾレス諸島のように彼のモデルが引き起こした多くの適合問題を彼は明らかに気づいていた。事実、大きなアゾレス地塊を彼が仮定した移動前の北大西洋の完全な閉鎖にとって重要な障害として彼は見なしていた。Hartung (1860) の研究から、非常に多くの種類の大陸の岩石—花崗岩、雲母片岩、コーツァイト、砂岩及び石灰岩を含む—の礫がアゾレス群島一帯に散在していることが数十年間知られていた—それらの礫は捕獲岩として含まれており、対照的に暗い色の溶岩中から容易に観察できた。このように、これらの島々から入手できた地質学的情報はそれらが大陸性の土台をもつことを示していることを、Wegener (1929) は甘受していた。アゾレス群島は火山岩からなる表層の下に大陸性の基盤をもつことを示唆している Hartung の最初の観察は、

1883 年の Talisman 探検隊によって強化された—この探検隊によってコーツァイト、珪質石灰岩、三葉虫化石をもつ片岩などの大陸のかけらがドレッジで採集された。その後、下部古生界の堆積物がこの海域の海山から繰り返し発見された (例えば, Furon, 1949)。Schneck (1974) は Talisman 隊採集物を検討して、発見された大陸性物質は多少もともとあった場所にあるようだと結論した。従って、標本が採集された地域は比較的新しい時代に水没した大洋中央の大陸帯を喚起しているようである。しかしながら、より重い下位層の上に浮いている活性のない花崗岩層からなるシアル質地殻は、アイソスタシーの原理から下位層中に沈み込むことはできないという長い間保持されてきた考えにこの観点は反していた—ウェーゲナーが強く支持していた考えである。たとえそうでも、アゾレス群島からの岩石の証拠はアイソスタシーの考えと妥協するのに十分強固なものであると考えていたようである。

沈降した大陸塊の証拠対アイソスタシーの明らかな否認を解決するため、初期の花崗岩質の殻にマグマが均質に注入して、アイソスタシーによる沈降が起きる程度まで地殻密度を大きくしたであろうと Barrell (1927) は考えた。Barrell の海洋化モデルによれば、現在の陸地—海洋の形は可変的な地殻の高密度化とアイソスタシーによる沈降の産物である。Barrell は地球に面した月面の自然地理学的特徴との類似を指摘して、すべての海洋地域をかつての大陸としてみなしていた—相当量の“未消化の”大陸塊が深海に沈んでいることをこのことは暗示している。例えば、可変的な地殻の塩基性化という彼のモデルはバフフィン島 Baffin Land からグリーンランド、アイスランド、フェロー諸島、ヘブリジーズ Hebrides (諸島) を経由してスコットランドまでの地表断面を説明している (図 2)。

地殻の進化についての Barrell モデルは現在の地球物

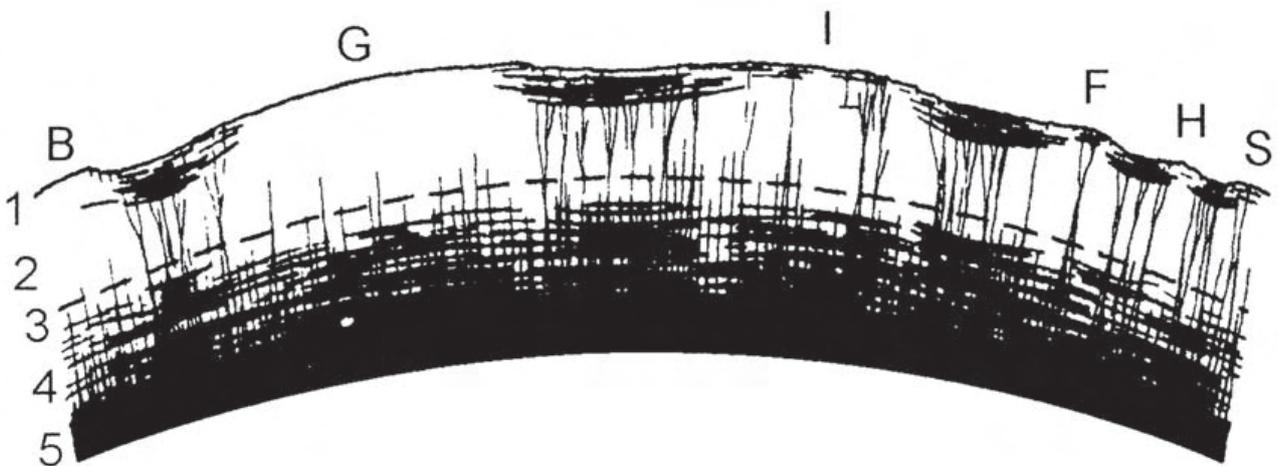


図 2 Joseph Barrell (1927) による地殻の海洋化モデル。最初の海洋横断性大陸地殻の破片は、玄武岩質マグマの注入と噴出活動によって可変的な (広域的) リソスフェアの高密度化の過程を経た後、アイソスタシーによる沈降をもたらす。例示された地表断面は、バフフィン島 (B) からグリーンランド (G)、アイスランド (I)、フェロー諸島 (F)、ヘブリジーズ (諸島) (H) を経由してスコットランド (S) に至る。図左側の数字は以下のものを示す: 1, 地殻; 2, 花崗岩質-閃緑岩質リソスフェア; 3, アイソスタシー補償面の平均深度; 4, 深部からマグマの注入を受けたアセノスフェアの上部; 5, アセノスフェアの深部, ポケット状にマグマをもつ塩基性物質からなる厚い固体層。

理学と地質学の証拠と矛盾しているが、可変的な地殻下のエクログャイト化の過程及びそれと関連した重力駆動による薄化は一アイススタシーによる沈降と関連して一大陸と海洋の両方の設定における地殻の厚さの変化性を理解するための現実的な基礎に思える(下記及び Storetvedt, 2003 参照). そして、およそ北緯 45° の大西洋中央海嶺西翼の巨大で不毛な海山である Bald 山からいろいろな砂岩、石灰岩、片麻岩、花崗岩、花崗岩、花崗閃緑岩、グラニューライト及び角閃岩が採集されたが (Aumento and Loncarevic, 1969), このような多くの事例は単純な説明がなされた. Bald 山の均質な性質は一そこでドレッジで採集された岩石の放射年代値は 1,550Ma まで及んでいる (Wanless et al., 1968) —それは強く同化した大陸地殻の遺物であり、恐らく比較的新しい地質時代に水没したであろうということを示している. この観点と関連した少し珍しいことは、Beier et al. (2007) は Nordeste 地域 (サンミゲル島<sup>\*2</sup>) の溶岩からアイソトープ比が異例なほど高い放射起源の鉛とストロンチウムを発見した—容易に大陸地殻の混入にその原因を帰することができた結果であり、地殻下での薄化というモデルを支持している. しかし、これらの事例は明らかに氷山の一角を表しているだけである; 実際大西洋中央海嶺全長に渡って古い大陸性の岩石が数多く発見されている (例えば、Udintsev et al., 1989–90; Yano et al., 2009) —激しくやせ細った大陸地殻の残存物が大洋中央海嶺玄武岩の可変的な覆いの下に存在することを示している.

\*2: アゾレス諸島最大の島 (訳者注).

### Iceland — 中央海嶺のもう一つのパズル

Azorean 地域が、かつてそこに実際に存在した大陸であり、その後大西洋中央海嶺によって断片化し、さらに第三紀後期の溶岩によっておおわれた後に水没した大陸の残存域だとすると、Iceland の位置はどこになるのだろうか? また、Iceland が Shetland-Greenland 間を横断する形で存在する厚い地殻を有した部分であるということを見逃すことができるだろうか? 1960 年代後半、大陸の水平移動や海洋底拡大という考えが流布するようになったが、すでにそれよりはるか以前、火山岩中からは思いもかけない珍しい捕獲岩が得られていた. Iceland における 1963 年の Surtsey 火山の噴火をきっかけとして、暗色の溶岩や火山灰中にはそれと対照的に明るい色をした捕獲岩が点々と含まれていることが認められており、Sigurdsson (1968) はこの捕獲岩についてさらに詳しい研究を行った. その結果では、花こう岩質の捕獲岩が卓越していることが明らかとなった. そして、結晶分化作用から、元の塩基性マグマからのどれくらいの割合で酸性の岩石が生じたのか、深部の granite/granulite 的な岩石の熔融によるのか、捕獲岩は地殻深部の花こう岩が噴火の過程で引きはがされたものなのか、等々の疑問が新たに生じた. Sigurdsson (1968) は、このような酸性物質は塩基性物質の分化作用によるものだと結論した. しかしこの結論は、Iceland 東部では酸性岩の量が全体の

10% を超えていることから、やや疑問ではあるとされた. さらに彼は、花こう岩質の捕獲岩のあるものは、結晶分化作用の結果生ずるものとは異なった成分を持っていることを指摘した. またこのことに関連して Sigurdsson は、Surtsey 火山の火山灰中から完全に再結晶したドロマイトの成分を有した捕獲岩を発見したと述べている. Bredadalcheidi の玄武岩溶岩中からは quartzite 成分の石英粒の捕獲岩も見つかっている. これらの特徴からすると、他所由来的なこれらの岩石は、Iceland の地下深部の地殻—もちろんそれらは第三紀か、もっと若い時代の岩石におおわれているのだが—には、古い時代の変成作用を受けた堆積岩が存在することを示唆している.

Iceland の地殻が、40km 以上もの厚さだということは明らかである (たとえば Darbyshire et al., 2000; Allen et al., 2002; Faulger et al., 2003; Gudmundsson, 2003; Bjornsson et al., 2005; Foulger, 2006). 図 3 は、地震波から求められた Iceland 地域の地殻の厚さを示したものである. 中心部分が最も厚くて、ボール状の形態を示す地殻だということ. このような特徴は、Iceland の地殻の進化を理解するうえで重要なことである. Foulger (2006) は、この厚い地殻は大陸の一部とみなせると考え、Jan Mayen はマイクロコンチネントの南方への延長部にあたりと述べた. Iceland の地殻の、このような厚さの変化に関して言えば、それには、これまで地球が繰り返してきた脈動的な造構過程には地殻下部のエクログャイト化作用と、それに伴う重力の一部のマンテル方向への遷移ということが関与していることを理解することが重要である (Storetvedt, 2003). このことに符合するように、Anderson (2005) は、次のように述べている. “下部地殻は、ある条件下では断片化し、より重いエクログャイトへと変わる. その際、その断片は浮力的に釣り合いのとれる深さ、おそらく 300 ~ 650km ほどの深さまで沈下する. そこでのエクログャイトがマンテル内の低速度帯を示している”. 我々はこのような Anderson の考えに全く賛成である. さまざまな場所での下部地殻の断片化とそのエクログャイト化作用という考えは、1) 深海盆の形成 2) 大陸地殻が深海域では薄いこと 3) 陸域の主要な堆積盆地域では地殻が厚いことなどの事実によって支持される. 具体的なことで言えば、大

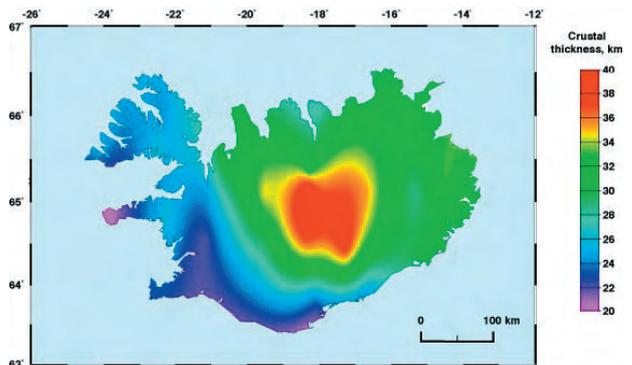


図 3 Foulger et al. (2003) による地震波解析から求められた Iceland の地殻の厚さ. ボール状の形態で、その中央部が最も厚くなっていることに注意.

西洋北部の aseismic で浅い Shetland-Faeroe-Iceland-Greenland 間のリッジは、中程度に薄くなった地殻の断片と見られ (同じように、図3を見よ)、海洋底拡大という仮説が成り立たないことを示すものである。

マントル由来のホットスポットからあふれ出すマグマによって厚くなり、エシェロン状に拡大しているとされる大西洋中央海嶺だというのに、海嶺そのものは Iceland を横切って走っている。それに対し上部マントルの地震トモグラフィの結果は、Iceland が浅部にマントルがあるにもかかわらず比較的冷たいという Foulger and Anderson (2005) のデータと矛盾する。Gillian Foulger は、今日では最も強力なホットスポット論者の一人である (Foulger, 2006 & 2007; Foulger et al., 2005)。しかし、彼は大胆に “もし我々が偏見をなくし進歩を望むなら、ホットスポットという言葉を用いることを止めなければならぬ” と述べている。またさらに、こうも述べている。 “今や新しいアイデアが必要である。居間の中のゾウについて話すような荒唐無稽なモデルであることも分からないような委員会 (学会) ではなくて、問題が何かを正しく議論するような学会が必要である” (Foulger, 2007)。Foulger (2007) は、マントルが成分的にも不均質であり、下部地殻が薄いという事実、あるいは北大西洋が多様な厚さのマイクロコンチネントの集まりからなるという事実など多数の重要な問題を列挙して、次のようにも述べている。 “もし我々が、この地

域の造構史や現在の動きを理解しようとするなら、塑性的で均質なアセノスフェア上を固いリソスフェアがまるでコルクの板のように浮遊するというような単純なモデルは捨て去るべきである。” これらの賢明な言葉の後に、海洋底拡大の仮説に関する数々のテストの失敗についての “労作” が蓄積されていることに注意を払わずに、海洋底拡大の考えをまだ使えるものとみなしている (Foulger, 2010) というのは解せないことだ。我々のみるところ、科学を真に進展させるためには “居室の中のゾウ” なるものをもっと広々とした場所に引き出し、 “彼らの偏屈な考え” を明確にさせることが必要である。そうすれば、検証のために数々の観測事実がプレートテクトニクスという “偏狭なジャケット” にも適用されるであろう。

### Iceland を横切るレンチング

海洋底拡大説とそれによる水平移動の考えの広がりと呼応するように、Einarson (1968) は、Iceland のテクトニックな位置はこの考えとよく適合すると述べた。彼は、Reykjanes リッジの軸は、サイドステッピングして細長くエシェロン状に伸びた海山列として示されており、その構造の東方への延長は Reykjanes 半島の tectono-volcanic sequence の中に見出すことができると述べている (図4)。彼はまた、拡大論上は期待される NE-SW 方向にのびている火山帯に直交する断裂系は存在しない

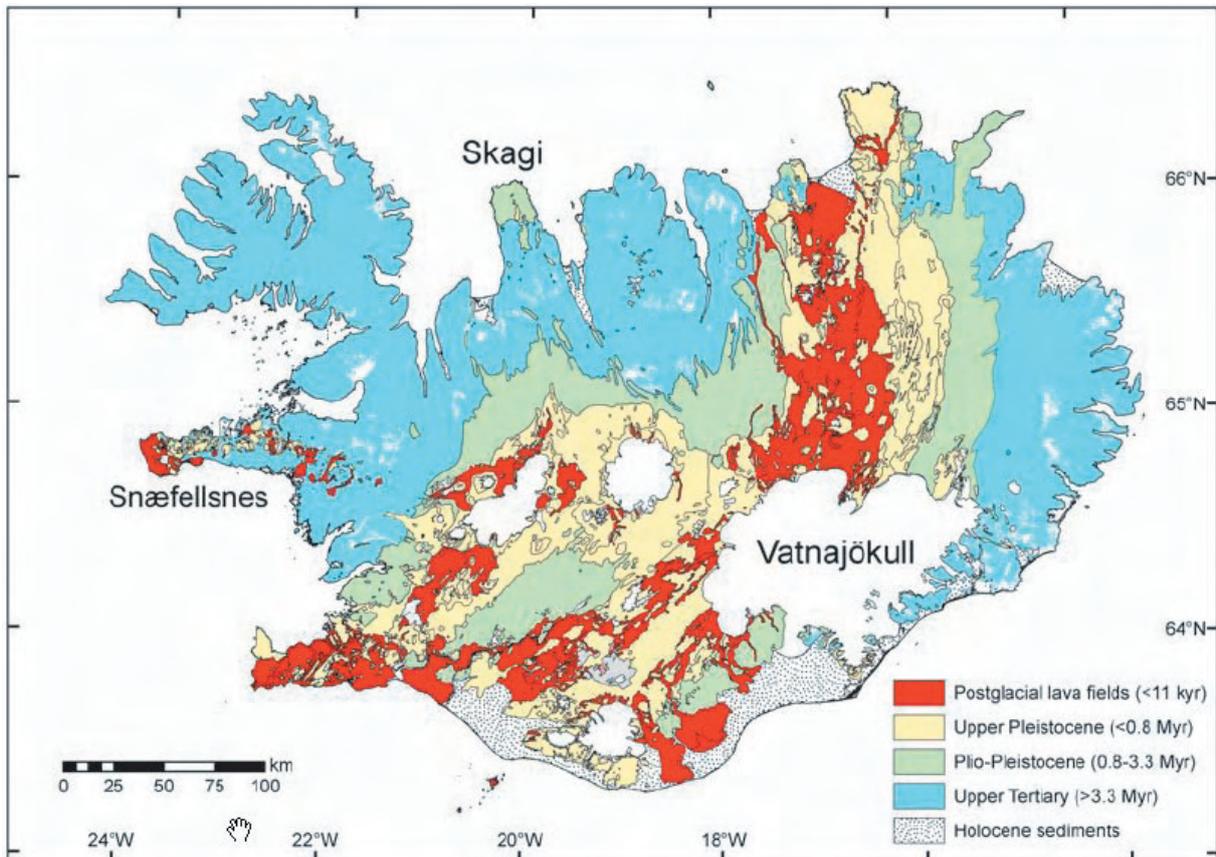


図4 Icelandの地質図。後氷期の4つの火山帯は赤色。3つの主要な火山帯は、Reykjanes Ridge/Peninsulaに沿ってサイドステッピングしながら帯状をなして東方へ延びており、その東端で消滅している。これらの主要な火山帯を結ぶような断層は認められない。Snafellsnes Peninsulaでは、他の火山帯に高角で交わる方向の火山帯が存在することにも注意が必要である。このマップは、Sigmundsson and Samundsson (2008) による。

とも述べている。図4からは、西端部の Snafellsnes 半島の火山帯が、主たる火山帯に直交しているようすが認められる。

多量の火山噴出物によっておおわれ、その下位の先鮮新世台地玄武岩の構造はよくわからない。しかし、上に述べたような急傾斜した特徴的な構造は、後氷期に噴出した溶岩フィールドの外側に局部的によく露出している。図5では、Iceland 南西部の Langavatn 地域での典型的な構造が示されている。このような、岩石中の直線的な断裂系は、汎世界的にどこでも認められることである（たとえば Scheidegger, 1985; 1995）。しかしそのことはプレート論からは無視されてきた。Iceland 島にみられるたがい直交する火山帯や断層群の存在から、Einarsson (1968) は、それらは地殻内の一般的な応力場の下で、互いに共役関係にある破断面の存在を示唆していると考えた。また、よく知られているレンチテクトニクスに関する事実をあげ、彼は“これら火山帯と断裂帯によって示される共役的な破断面の繰り返しは、極めて正常な現象だ。一つの断層活動においては一つの方向の断層系が、他の断層運動ではまた別の方向の断層系が作られる”と述べた。Reykjanes Ridge に関して、彼は次のように結論付けている。“Reykjanes 半島の北東-南西方向の断裂が、その方向のせん断面の存在を示していることから、このリッジの方向はまさにこの地域の主要なせん断面の方向である。中央海嶺に沿って海洋底が拡大するという地球科学的な考えに固執するならば、この Reykjanes Ridge の方向はその考えに明らかに挑戦的であり、それゆえこのことは無視されてきた。”Reykjanes Ridge についての事実認識の誤りにもかかわらず、Roy (1972) が行った Europe と北アメリカとの古地磁気学的な比較結果は、Einarsson (1968) のデータと調和的である。しかしそのことには今まで誰も注目してこなかった。

Einarsson (1968) の Iceland のテクトニクスに関するレビューによれば、最近の活火山の活動が西海岸の Snafellsnes ゾーンから東海岸の Myvatn ゾーンの方へと、緩やかな地向斜的な沈降を伴いながら移動している。また、この二つのゾーンの間では、60~100km もの長さの背斜構造の中にかつての火山活動の痕跡が残されている。これらの褶曲構造の軸方向は Iceland 全体を横断して伸びているが、傾斜は平均的には 5~20°、ところによっては 45° に達するほど傾いている (Einarsson, 1965; 1967)。このような大規模な褶曲構造は、この島の起源を海洋底拡大に求める最近の考えに合致しないという Einarsson の考えを強く支持するものである。

Passerini et al. (1990 & 1991) によるせん断テクトニクスに目を向けてみよう。Iceland 南~西部地域 (Langavata 地域を含む。図5を参照) での断層面上の条線に関する彼らの主要な研究によれば、Iceland は広域的なレンチテクトニクスの状況下にあった。さら

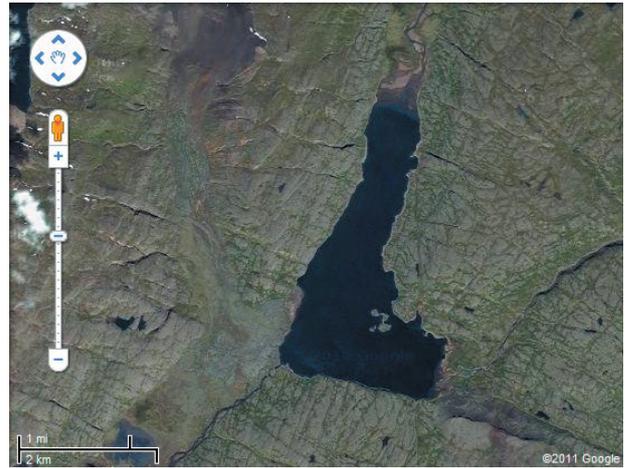


図5 Iceland 南西部, Langavatn 地域の Google Earth 写真。互いに直交する断裂系に注意。その一つは NNE 方向で、主要な火山帯の伸びの方向にやや並行している。Einarsson (1968) や Passerini et al. (1991), 特に後者はこの割れ目の面上の条線に注目して、それらがレンチ運動によって形成された線構造であることを強調した。

にせん断テクトニクスの観察の延長線上でみると、Hast (1969&1973) は、in situ な応力解析の結果にもとづいて、現在の Iceland が水平的なせん断応力場に置かれているとみなし、そこにおける岩盤の応力場はせん断的であり、その方向は大西洋中央海嶺の伸びの方向に直交していると結論付けた。Hast のデータにもとづけば、北大西洋地域は現在、それぞれ北東-南西、北西-南東方向で垂直な面にせん断応力が作用する状況にある。Iceland のこの二つの方向の割れ目系に関して、Einarsson (1968) は、それぞれを Reykjanes 方向、Faeroe 方向と呼んだ。この Faeroe 方向というのは、Shetland-Greenland Ridge の方向そのものである。

人工衛星を用いた測地学的手法による観測点の動きは、Iceland の現在のテクトニックな動き、たとえば現在の火山造構的な動きが 1) 東西方向の引張の結果なのか 2) 局地的に生じている、リッジに平行な引張場によるのかなどを明らかにするものと期待される。しかし、不幸なことにそれらの研究から得られる測地学的な速度データは、NUVEL-1A (DeMets et al., 1994) や REVEL (Sella et al., 2002) などのように、不確かな海洋底拡大仮説にもとづくプレートモデルに結び付けられている。言葉をかえていうなら、この生のデータはまさにプレートテクトニクス的に強力な動き方をしているというわけである。Iceland における GPS を用いた最近の研究、たとえば Geirsson et al. (2006) は、Reykjavic 観測点のデータが 10.5mm/yr の速さで東へ移動しているとする REVEL モデルに合致しているとしている。彼らのデータは、現在の拡大モデルを強力に推し進めているものである。しかし他の研究、たとえば Heindottir et al. (2001) の研究がある。彼らのデータでは NUVEL が以前指摘した Reykjavic 地点の動きが小さくなると、Reykjanes リフトの北西端の観測点は南西方向、すなわちこの地域の中央海嶺に平行に動く (彼らの論文中の fig. 3c を参照)。Heindottir らは、この現象は、Reykjanes 半島の

地震帯でその帯に平行するせん断応力が蓄積したためだと述べた。このことから、Iceland 南西部、すなわち Reykjanes リフト系の北端部は、Reykjanes Ridge に平行する南西方向へ動いているということである。

プレートテクトニクスが、生の測地データや公表された Caltech/NASA などのデータをどう扱っているかが不明瞭であったり、多くの重要なデータが意図的に除外されているため、それにくみしない研究(者)にとっては実にやっかいなことである (Storetvedt, 2003)。ブロック化した大陸は、北米大陸について示されているように内部で変形が進んでいる。コロラド台地で得られた VLBI データを総合すると、Utha 東部を中心として、ここはゆっくりと時計回りに回転している。アルプス造山期のユーラシア、北米大陸地域でもこれと同様の時計回りの回転が認められている (Storetvedt, 2003 & 2010c)。GWT モデルで予測されていたように、古北半球に存在した大きな大陸は、その場においてコリオリの効果によって時計回りの回転を起こしたと考えられる。

ユーラシア大陸に関してみると、最近の GPS 観測データのまとめによっても時計回りの回転があることが立証されている (Zemtsov, 2007)。この時計回りの回転に調和的にヨーロッパ各地の観測点の水平方向ベクトルが NNE ~ NE 方向を向いている事実が確かめられている。Caltech/NASA によるヨーロッパ地域の北 ~ 北東方向への明確な動きとその速さの GPS データは、北大西洋北東部の Faeroe Island, Iceland 北東部, Svalbard の三つの地域のデータをふくんでいる。ヨーロッパ地域や大西洋中央海嶺東側の海域での NNE-NE 方向の動きは海洋底拡大仮説によって言われている ESE-SE 方向の動きとは異なっている。北大西洋北部のリッジ-リフト帯のせん断作用の起源はよく似ている。上に述べた Iceland 南東部の Heindottir et al. (2001) の、この島の一部が南西方向へ動いているとのデータを考慮すると、Iceland は左横ずれのせん断作用の下にあると言える (図 6)。この結論は、これまで述べてきた in situ な応力についての議論に合致している。



地球内部の力によるレンチテクトニクスの考えによれば、大陸縁辺や深海盆におけるアルプス造山期の大規模な造構変形が期待される。そのような予想に合致するように、ヨーロッパ大陸の北西縁に沿う地帯では白亜紀後期から第三紀にかけての多数の向斜・背斜・逆断層などを有した堆積盆が認められる (Gabrielson et al., 1997; Vagenes et al., 1998)。これら、圧縮応力場で形成された変形構造には NE や NW 方向のせん断作用によって作られた断裂が発達している (Brekke and Riis, 1987; Dore et al., 1997)。これらの事実はプレートテクトニクスにとっては不可解なことかもしれないが、レンチテクトニクスにとっては当然期待されていたことである。

### 大西洋中央部とその海底磁気異常パターン

中 ~ 後期白亜紀に先立つ時期に深海盆が存在したことを示す証拠は何もない。ガス採掘に関するレンチテクトニクスの考えに基づけば、堆積盆の沈降は、上部マントルにおける長期間にわたる静水圧の上昇がトリガーとなり、それに伴う重力の断片化の発生とサブ地殻のエクロジャイト化によって引き起こされる。この過程で、後期白亜紀の厚い堆積物からなる大陸棚は、大陸とリッジとの間に露出する薄い堆積物からなる海洋盆へと変化した。地殻物質がマントル物質へと変わることによって地球の慣性モーメントが変化した。そしてこのことは逆に、リソスフェアの各ユニットのその位置での回転を引き起こすきっかけとなった。この過程で、緯度に依存するコリオリの力が赤道地域に対して最も大きなせん断応力の効果をもたらした。大西洋中央部でそこを横断するせん断帯が出現したのはこの効果によるものである。第一義的に重要なテクトニックなせん断帯の境界は海域で形成された。その部分は、中新世後期になって上昇をはじめ、のちに中央海嶺となるのである。このようなグローバルな考えに立つと、大西洋中央海嶺はそもそも白亜紀最末期にせん断帯として誕生したといえる。推論的にいえば、中新世になってからの大規模なレンチ運動の再活動とそれに引き続く中央海嶺部分の隆起は、大西洋中央部を特徴づける多数の横断断層を生んだ。この説明に基づけば、

図 6 Caltech/NASA に基づく、GPS 観測から得られた北大西洋地域の定性的な動き。ヨーロッパ西部, Faeroe Island, Iceland 北西部は、いずれも大西洋中央海嶺に平行な方向に動いている。現在 Iceland は左横ずれのせん断作用下で置かれている。黄色の太い矢印は地殻の動きを示す。中央部東寄りの反時計回りの矢印は McClusky (2000) のデータによる。

トランスフォーム断層という概念は誤りということになる。

現在はやり (流行) の見方に対して、最近公表された世界磁気異常図 (Korhonen et al., 2007; Maus et al., 2009) に対する厳密な評価 (Storetvedt, 2010c) では、海洋域にみられる磁気の線構造は、その周辺の磁気フィールドによって刻印されたものである。正・負の磁気異常の繰り返しは、断層運動に規制された水平方向の動きや、鉄酸化鉱物の変質による帯磁率の変化などに起因すると結論付けられた。この帯磁率のコントラストモデルは、最初 Luyendyk and Melson (1967), Luyendyk (1968) によって示唆された。Luyendyk (1968) は、海域の磁気の帯はテクトニックなせん断帯の広がりのため、そこでは断層運動に規制されて地形的に低くなっており、鉄-チタン酸化物が残留磁気を持たないケイ酸塩鉱物へと変化するような動力変成作用も伴われていると述べた。海洋域の磁気異常は、海洋底の進化に関する年代論と結び付けて磁極の移動の繰り返しを示すものなどの主張を裏付ける証拠は、今では何もないのである。

図7からも分かるように、北大西洋地域では、磁気異常帯が不連続的に方向を変えるところや、磁気の線構造がないところがたくさん存在する。たとえば、Shetland-Faeroe-Iceland Ridge は、大陸域においては正常でない形態をなしている典型である。ここでは、地質構造の不連続がみられる。北大西洋海域の異常なシステムはその東方域で消滅している。これらのことに合致するテクトニックなシナリオに従えば、アルプス造山期において大西洋中央部から古赤道域に向かって、緯度に依存するレンチ運動の力が大きくなった。リソスフェア内のレンチ運動は、ヨーロッパやユーラシア大陸に対して約25°の時計回りの回転運動を引き起こした (Storetvedt, 1997, 2003 & 2010c)。この過程は、かつて大西洋中央海盆に存在していた互いに直交する断裂系の再活動をもたらした。

新しいテクトニックなシナリオに沿うなら、大西洋中央部の西部地域はアルプス造山期には互いに逆向きの引張応力場におかれた。そしてそれは、マントル物質への変化による地殻物質の減少と、北アメリカ東部での負の重力異常やジオイド異常をもたらした (Grace Gravity Experiment-Model: Storetvedt, 2010 の Fig.2 を見よ)。北アメリカ大陸沖の大西洋海盆沿いにおける互いに逆向きの引張応力状態は、上部マントルの流体の上方への移動経路を生むとともに、下部地殻物質の移動やそこでの化学的な変化をもたらした。このようにして、熔融マントル物質の上昇による高い静水圧は、地殻物質のエクロジャイト化をもたらすと同時に地殻の薄化や盆地の沈降などををもたらした。大西洋中央部のリフト帯での最近の研究でも、ここでは地殻が存在せず、リフトバレー内にマントルが露出しているように見える (www.sciencedaily.com/2007/03/07.0301112.htm)。

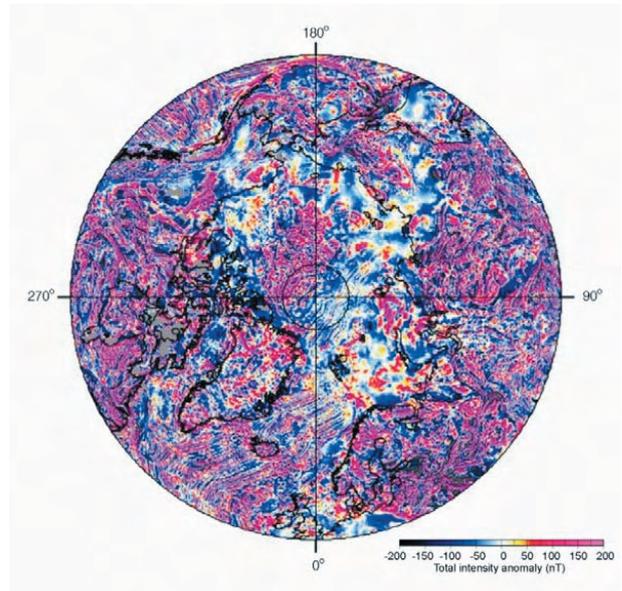


図7 Maus et al. (2008) による NCDC World Digital Magnetic Anomaly Map にもとづく極北緯40°の地域の磁気異常ステレオ投影図。Shetland-Greenland間の不規則で、まるで大陸のような形の磁気異常に注意。それはまた南方へ向かって線状になって広がっている。大西洋中央部の動きは、コリオリ力の効果に起因するアルプス造山期の古赤道域のレンチ運動に依存している。

脱ガス地球モデルでは、最上部マントルの超塩基性岩は広く蛇紋岩化作用を被りやすいとしているようだ。ちなみにそれは固体状態で (アセノスフェアに作用する走向移動テクトニクス力の助けにより、体積膨張や浮力の増加に応じて)、地表面に貫入する傾向がある。この指摘は、横断断層沿いと同様に、大西洋中央海嶺沿いに蛇紋岩化された上部マントル物質が広く産出することで支持される (Bonatti, 1978; Cannat, 1993; Gracia et al., 2000; Beard et al., 2009 など)。断層帯では、玄武岩と同様に掘り出されたマントル物質は広域的に低温変質を示している (例えば, Schroeder and John, 2004; Karson et al., 2006)。このように、大西洋中央海嶺 (ODP Leg158) の TAG の活動的な熱水マウンドの深さ116m海底からの広域的に変質した玄武岩が、硫化鉄脈と石英膠結物を伴う強く緑泥石化された岩石として記載されている。北緯26°でのTAGの活動的な熱水マウンドには、中央ブラックスモーカーコンプレックスがある (Rona et al., 1986)。同様なスモーカーは、多かれ少なかれ偶然に、大西洋中央海嶺に沿って観察されてきた (まともめは Koschinsky et al., 2006 参照)。完全に予想外の発見—未発見の熱水場—は、2000カ所あった (<http://earthguide.ucsd.edu/mar/>);そこは北緯30°で、大西洋中央海嶺のほぼ15km西で、アトランティス大陸 (水深約780m)の頂上に近く、南をアトランティス破砕帯に境され、分解された水素・メタンや軽い炭化水素が濃集し、塩基性で40~91°Cの金属の乏しい熱水溶液の低温噴出口が観測されている (Kelly et al., 2001; Ludwig et al., 2006)。激しく変形・変質した岩石の厚さ100mの領域は、海洋の形成にとって地殻の薄化作用や長期間にわたる断層活動の重要性を証明するものであり、壁の上部に沿って3km以上のところに生じている (Boschi et al., 2006; Karson et al., 2006) が、火山活動は

欠けている。走向移動テクトニクスモデルの予想によると、西方の中央大西洋で同様な観察以上に、次のような未発見の噴出口の予期せぬ発見がなされることが予想される。

推定される若く拡大する地殻の冷却について、予想される値より有意に低い多くの観測があり、大西洋中央海嶺の相対的に低くばらばらな値をとる熱流量値は、1960年代以来の難問だった。しかし、脱ガスに関する地球モデルでは、マンテル対流や海洋底拡大のような制約のあるメカニズムを除くと、中央海嶺に沿うばらばらで一般的に低熱流量値は同時に予想されてきた。中央大西洋では、推定されるアルプス時代のリソスフェアの変形や斜め引張 [transtensive] 状態は、急傾斜の共役断層の広域的なセットに沿って広がるばかりでなく、リソスフェアの不連続面に直交する (ESE 方向) 断層群を再活動させた。それ故、中央大西洋の海洋磁気異常は海嶺に平行な形態 (海嶺に沿った剪断による) を示すばかりでなく、むしろ直線的な異常のネットワークを示している (Storetvedt, 2010c)。図8はこの予測を裏付けている。

磁鉄鉱は、おそらく強い剪断応力による溶解-再結晶作用プロセスのような、蛇紋岩化作用の二次的な産物として形成され (Ribeiro da Costa et al., 2008), 蛇紋岩の地殻への貫入が線状の磁気異常を生み出しているのだろう。それ故、大西洋中央海嶺に沿う彼の研究から、Bonatti (1976) は特徴的に大破碎帯に沿った蛇紋岩の貫入が線状の磁気異常を生み出し、さらにそれらが線状パターンを構成していると主張した。海洋蛇紋岩は見かけ上、固体状態で定置されるので、それらの岩石中に

化石磁化の形成を熱化学的に獲得するメカニズムを、想定することは実際には難しい。さらに、縞状の正負場の異常の元となるコントラストは、断層に制御された低温鉬物変質や関連した磁気の影響の受けやすさであることが、もっともあり得ることである。すなわち、それは直交する異常パターンを説明している (また Storetvedt, 2010c 参照)。

地球進化における脱ガス走向移動テクトニクスのシナリオでは、線状の地形的な低地が地殻/リソスフェアの‘縞模様’の断層に制御されたより効果的に層間剥離が調和的に生じる。それはアイソスタシー的な地表面の沈下地帯を作り出している。断層帯に沿う進行性の剪断や鉬物変質は、その結果酸化鉄含有量がより効果的に失われがちになる。そのため、今度は負の磁気場異常を導く磁気の影響の受けやすさを低下させる。逆に言えば、より小さな破碎帯とそれ故減らされた地殻の薄化を伴う線状の地形的な高まりは、鉬物変質の程度がより低い縞模様との関連で、より強く磁気の影響を受け、正の磁気場異常を作り出す条件となるだろう。

### V型レイキャネス海嶺

1960年代半ばから、レイキャネス海嶺に沿う線状の磁気異常は、ヴァイン-マッシュューズ-モーリーの地殻メカニズム-地磁気極の逆転と海洋底拡大のヘス-ディーツの概念との統合-の古典的な例として注目された；正しいなら、海嶺に平行な異常軸の一部は海洋底の歴史の過去数百万年以上にわたる地殻の拡大の速度を示すことになる (Heirtzler et al., 1966)。しかし、いろいろな意味でレイキャネス海嶺は中央海嶺の古典的なイメージ

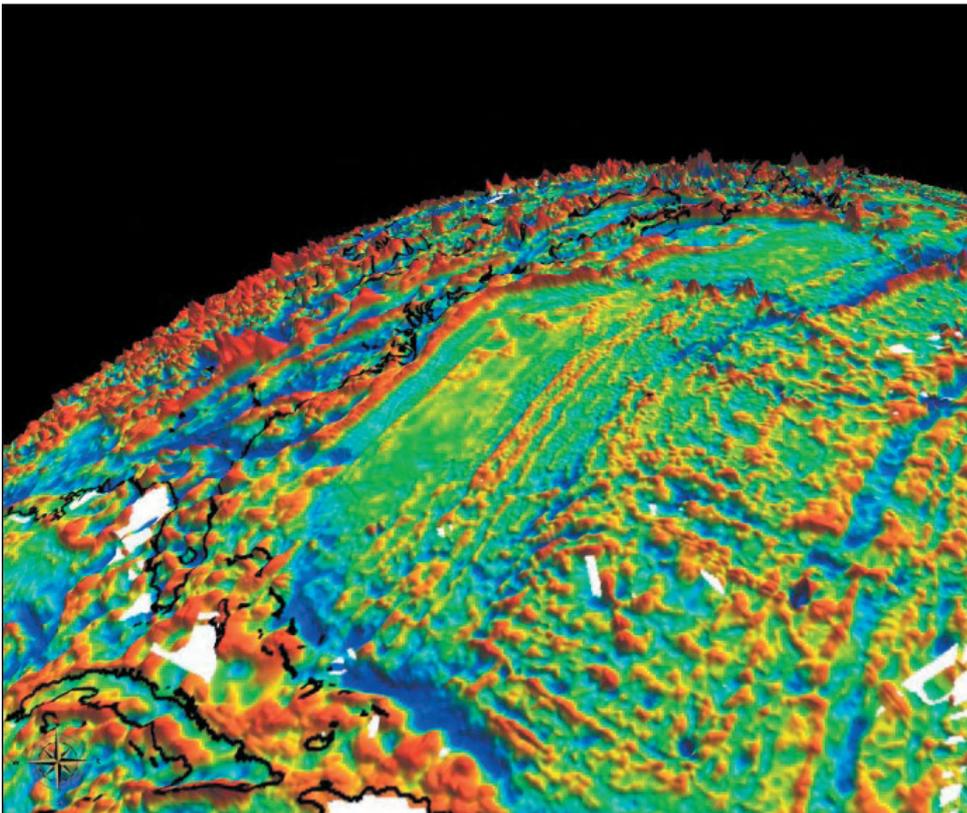


図8 NGDCの世界デジタル磁気異常図 (EMAG3) からの切り取り。中央大西洋西部に関する海洋磁気異常に直交するネットワークを示す。線状の海洋磁気異常と矛盾する観測が海洋底進化 (ヴァイン-マッシュューズモデル) のアイソクロン年代に示されている。

とは逸脱していることにすぐに気づかされる。中央リフトバレーの代わりに、中央にホルストを持ち、地殻の厚さが南アイスランドの海岸で約22kmから、さらに約500km南方で8kmへと次第に減少していくような、準海洋である (Smallwood and White, 1998; Weir et al., 2001; Foulger, 2006; Jacoby et al., 2007)。700km以上にわたって、海嶺が中央海嶺の横断断層によるズレがなく、すでに40年前にもともと予想され、‘完全に’対称的な構造や地球物理学的パターンには問題があることがわかっていた (Vogt, 1971)。V型地形と海面下の海嶺・急斜面やトラフの北方へ扇状に広がった型のレイキャネス海嶺の現実の重力構造は、長年の難問だった。図9はV型海嶺を図示したものである。そのような構造の秘密を明らかにしようとする試みに対し、アイスランド南方の大西洋中央海嶺はたくさんの調査努力を刺激してきた。それはおそらく、即時に正解に迫る努力をしていない。Hey et al. (2010) による最近の投稿論文は積年の議論をまとめており、参考文献とたくさんの予備的な提案がこの論文に引用されている。

Hey et al. (2010) によって示されたように、その詳細なテクトニックな構造が斜めの雁行状構造を構成していることを考慮すると、海嶺軸の正確な位置はいくぶん曖昧である (Hey et al., 2010による図4よりも小スケールの構造の例を参照のこと)。スケールの違いはさておき、これは南部アイスランドにおける構造と火山活動の形態に強い関連を与えている。それは東方に移動するクレーター列・隆起する海嶺と火山帯によって示されている。海嶺の等深線の高低間の厚さ1~2kmについての証拠 (White et al., 1995; Smallwood and White, 1998) — 海溝に沿う地殻領域では普通以上により薄く、重力の

低さと関連して—は、走向移動テクトニクスの予測と調和している (Storetvedt, 2003)。そのモデルについて、海嶺のもっとも強く剪断を受けた部分が、含水マントル流体によってより大きな浸透の影響を受けやすいだろう。次のようなプロセスをあげることができる; a) より深いリソフェアの实在部分のより効果的なエクロジャイト化作用、次にはb) さらに進行した重力層間剥離、c) アイススタシーによる盆地の沈降、および可能性のあるのはd) ペリドタイト的な最上部マントルの進行性蛇紋岩化作用。さらに、地殻の剪断は鉱物変質を促進し、減少した磁気の影響の受けやすさと関連して、それは負の磁気異常を引き起こしやすくなる (Storetvedt, 2010c)。そのため、地形的に低いところは重力と磁気の両方に関連していると予測される。逆に言えば、地形的に高いところは正の磁気および重力異常に関連し、潜在的に剪断をあまり受けてないリソフェアの部分に相当する。

北極地域の重力研究などに示されているように、北大西洋の大陸縁は正の(フリーエア)重力異常地域によって取り囲まれている。その部分が図9に描かれている。本論で、もう一つの大陸塊(以下参照)として注目されるアイスランドは、正の重力帯によって同様に取り囲まれている。隣接した縁辺盆地の薄化した地殻に部分的に覆われた一連の細長い重力の高い地域は、大西洋型の大陸縁に沿うきわめて普遍的な特徴であり、プレートテクトニクスが納得のいく説明を提供してきていない。下部地殻/上部マントル内の高密度の結晶質物質が、変則的にそれらの重力の高い位置の地下に存在しているはずであるとほめかしているにすぎない。それどころか、進行的なエクロジャイト化作用のモデルは、観測される縁辺異常に合致する説明を与える (Neugebauer & Spohn 1981

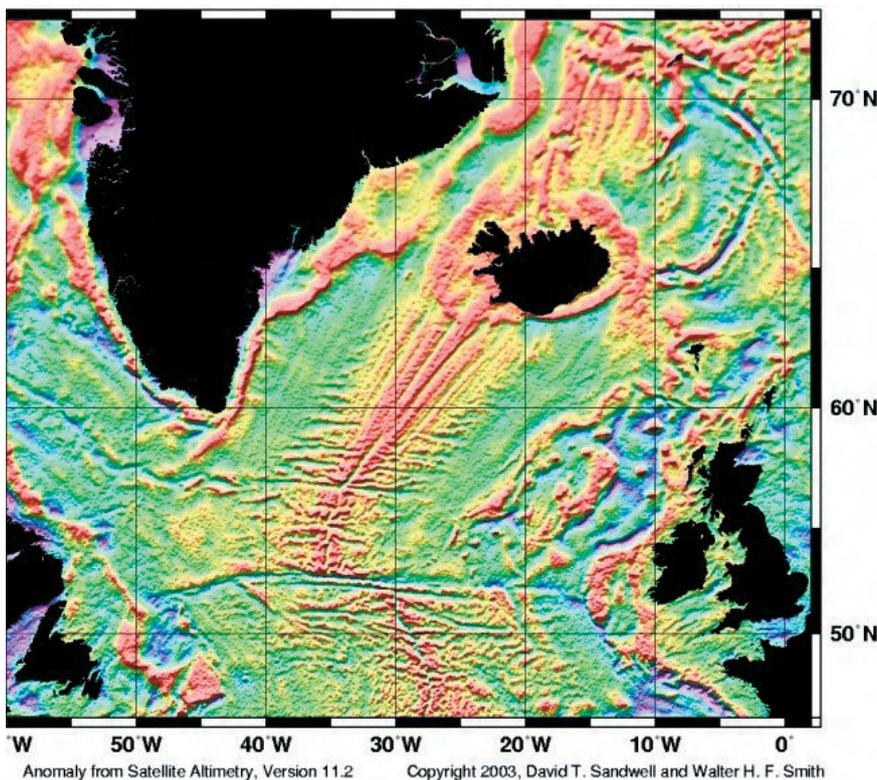


図9 図はアイスランド付近の衛星からの重力と構造地形学的境界を描いている。レイキャネス海嶺のV型重力‘縞模様’とアイスランドとグリーンランドを縁どる正の重力地帯に注目。議論は本文を参照。ノルウェー海盆の薄い地殻を持つアエジル海嶺は、負の重力異常で示される明確な湾曲帯として表現されている。そこでは北の海洋を横断するヤンマイエン島で途切れている(右上)。図はSandwell and Smith (2009) から。

参照)。走向移動テクトニクス理論では、大陸縁は突出したリソスフェアを切る断層帯に沿って発達し、そこには高圧マントル流体が自然に逸れるルートがあり、エクロジヤイト産物を上昇させている。グラニュライトからエクロジヤイトへの転移の自然な発生は、含水流体が欠けているとき、強く妨げられる(例えば Austrheim, 1987; Walther, 1994; Leech, 2001); この文脈で、Austrheim (1998) は、それらの変成反応が整然と進行すると、水分の多い流体が温度や圧力以上に重要であると主張した。

同様な論調で、Leech (2001) は関連した重力によってもたらされた地殻層間剥離は、実際の変成作用—制限された重力変化—に利用できる水の量によって制御されていると提起した。Leech によって提起されたモデルでは、エクロジヤイト化作用・地殻の層間剥離や地殻の究極的なテクトニックな陥没をもたらすものとして、温度よりむしろ含水流体に求めているのは興味深いことである。マントル流体に脱ガスしやすいルートを提供している深部まで達する大破砕帯は、堆積性の海溝を作る傾向がある。それが明白な場合、例えば東グリーンランドや北西ヨーロッパの大西洋縁に沿って示されているように、有意な火山活動と関連しているだろう。北大西洋縁に沿う広大な海盆の方向へ傾斜したおよそ 6000 ~ 5500 万年前の玄武岩集合体 (分布については White and McKenzie, 1989 参照) は、海洋化作用モデルと一致している。その結果：

相対的に発達中の大陸縁に沿う目立った地殻の薄化と関連した盆地を形成する断層運動に加えて、境界断層帯はマントル流体の強化されたマイグレーションについての道を必然的に開いており、それがガス水合物・進行性断層帯のエクロジヤイト化作用や火山活動の外側縁での発生の成因である。

広大な海盆は、高度な破砕作用と内部変形によって特徴づけられるように見えるだろう。特に、そのような状態はアルプス変動期の中央大西洋におけるような古赤道の位置に行き渡っているはずである。そこはコリオリの力(とほかの内部にあるメカニズム)によって引き起こされた捻れがもっとも効果的に働くところである。また、大陸側にある地帯は必然的に影響されてきた。それは様々な範囲の現象を引き起こした：それは穏やかな地殻の薄化・縁辺部の沈降・リストラクチャーな盆地を形成するような断層運動や海方向に傾斜する火山—堆積層である。縁辺断層帯の大陸側で、断層で移動したエクロジヤイトの部分は当然損なわれていないようだ。それは外縁の重力の高いところの説明とよく合致している。アイスランド—グリーンランド海峡沿いのような穏やかで狭い断層で境された地殻の層間剥離の場合は、重力の高いところは線状で断層に規定され、そしてアイソスタシー的な沈降盆地の両側に現れる(図9)。この議論の重要な側面として、縁辺部の発達を通じて、変成作用は必然的に約 10 ~ 15% 近い粒径の減少となる (Austrheim et al., 1996)。それは縁辺断層に沿って進行するエクロ

ジヤイト化作用の過程をさらに強化するように割れ目を広げる原因となり、加圧されたガスや地震活動に同調した活動に関連したテクトニックな再活動が、さらなるマイグレーションを引き起こすと推論される (Austrheim and Boundy, 1994; Hacker, 1997)。このように、大西洋型の縁に沿って記録された地震活動 (Stein et al., 1989; Fujita et al., 1990) は、断層移動エクロジヤイト化によって容易に説明されるだろう。

### 厚い地殻のシェトランド—アイスランド—グリーンランド海嶺を横切る造構的剪断作用

中生代を通じての海盆の漸進的な深海化によって、潮汐摩擦の増加が惑星の自転速度の決定的な減速を引き起こした。しかし、同時に海洋の深海化に伴って、厚い‘原始的な’地殻の相当な量がマントルへ失われた。そこでは自転速度の増加で慣性を生じさせる。その結果、地球の軸の回転の加速が予測されるだろう。その可能性は化石‘時計’データによって支持される (Creer, 1975)。白亜紀—第三紀境界前後でピークを迎えた東方への惑星の加速の結果、全地球的な古リソスフェアの西方への走向移動(ねじれ)を引き起こした。それはアルプス造構変動の始まりを示している。慣性による最大の剪断は、必然的に後期白亜紀—前期第三紀の赤道地帯に沿って起こった。そこはアフリカの北縁沿いから中央大西洋を横切りカリブ海地域へ走っている(例えば Storetvedt, 2010b の Fig. 3b 参照)。このように、その時までには中央大西洋リソスフェアの強い造構運動の再活動は、効果的に脱ガスをもたらす地殻の薄化を引き起こした。そこには、おそらく消化されなかった残存物としての Bald 海山や多分アズレスの基盤のような、先カンブリア紀の表層の最小の破片を残している。慣性に突き動かされたリソスフェアの相対的な回転によって、中央大西洋の中央海嶺が破壊された；それ故、進行方向は前期第三紀に漸進的に北方へと移動していった。

古中緯度に位置し、慣性による造構運動の再活動や関連した地殻の薄化過程について可能性が減少し、相対的に厚いが全体的には浅い後期白亜紀の盆地に組み入れられている北大西洋は、より大きな大陸地殻で特徴づけられるはずである。このように白亜紀の貯蔵庫(堆積盆地)は、主要構造の走向方向にあらかじめ配置されていた NE 方向に発達した。例えば、部分的に薄化された地殻に立脚すると、構造的な高まりの間に組み込まれた厚い断層に境された白亜紀の盆地は、北緯 62 ~ 68° の間のノルウェーの大西洋縁に沿って発達した(例えば, Olafsson et al., 1992; Brekke, 2000; Roberts et al., 2009)。

海底地形図(図10)は、イギリス諸島とグリーンランドとの間に三つの細長い NE 方向の深海盆があることを示している。それらは大陸のロックオール海台と比較的厚い地殻からなるレイキャネス海嶺によって分けられている：それらはロックオール、アイスランド、そしてイルミンガー海盆である。以上に議論してきたよう

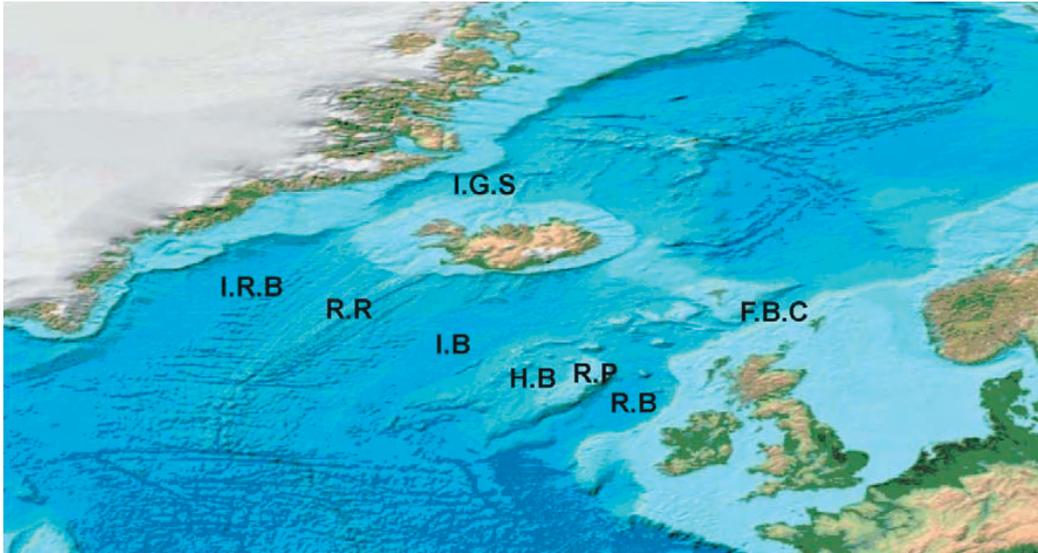


図 10 ETOPO-1 北大西洋の海底地形図。深海盆と浅く相対的に厚い地殻を持った大陸片の分布の関係を示す。スコットランド-グリーンランド海嶺の南の3つの細長い海盆に注目せよ。それらはより浅いロックオール海台とレイキャネス海嶺に平行に走っている。これらの海底構造はすべて、リソスフェアの直線的な裂か/断層の卓越したNE走向の構造系に沿って続いている。東から西に、これらの地形構造は、R.B.-ロックオール海盆; R.P.-ロックオール海台(厚くNEに方向付けられてハットン盆地H.B. よりも高い); I.B.-アイスランド海盆; R.R.-レイキャネス海嶺; I.R.B.-イルミンガー盆地。大陸性のロックオール海台の北方延長が大陸性のフェロー諸島海台に密接に接合していることに注目せよ(本文参照)。同様に、シェトランド諸島-フェロー諸島-アイスランド-グリーンランドを横切る断層に境されたロックオールとイルミンガー盆地の割れ目が、それぞれフェロー諸島堆積チャンネル(F.B.C.)とアイスランド-グリーンランド(デンマーク)海峡(I.G.S)の深海回廊を形成していることにも注目せよ。

に、レイキャネス海嶺は準大陸状態の一種である。それはアイスランドからはるか南方へ地殻が薄化している。ロックオール海台は大陸性海台として長い間認められてきた(例えば, Scrutton, 1970; Robert, 1975; Bunch, 1979; Vogt et al., 1998)。それらの地殻の厚さは30kmのオーダーと見積もられている。ロックオール海台の上部にさらにNE方向のハットン盆地が位置する。それは堆積物が約4kmの厚さで、モホ面までの深さは約19kmと計算されてきた(Smith et al., 2005)。また、イルミンガー・アイスランドとロックオール盆地の堆積層は、変化しやすく急に薄化する大陸地殻の上にあるように見える。それは、南方に薄くなっていく。一般的に、大陸縁の地殻はほぼ中央断層帯の方へ次第に薄くなっていく。そこは東グリーンランド-イルミンガー盆地を横断しているように見える(Hopper et al., 2003)。堆積層の基底で地形的な不規則性は多面的に盆地の配列したリフトに関連するものと解釈されているが(Morewood et al., 2005)、ロックオール盆地について、モホ面は局所的に東縁沿いでより急傾斜で、明らかに非対称になっている。断層沿いに配列した盆地の発達と関連した地殻の薄化はまた、厚い地殻を持つシェトランド諸島-フェロー諸島-グリーンランド海嶺に切り込んでいる。後期白亜紀のはじめに、厚い堆積物がNE方向のシェトランド諸島-フェロー諸島盆地に沿って堆積した。そこは深さ10kmまでの間にある海盆にほぼ平行な非対称な基盤の海嶺よりなっている(Mudge and Rashid, 1987)。モホ面での反射は、ほぼ18kmの地殻の厚さを示し、盆地の下にはより激しく薄化された大陸地殻があることを暗示している。

中央大西洋リフトの後期中生代の分裂と前期第三紀の漸

進的な北方への広がり、隣接しているリソスフェアユニットの相対的な回転の産物であった(それぞれは大陸と周りの海洋地域をとともに含んでいる)。古北半球に位置していた北大西洋で、ユーラシアと北アメリカ構造ユニットはともに、時計方向に回転した。そこでは北大西洋リフト帯の一般的な境界に沿って左ズレの剪断を引き起こしている。それ故、北大西洋海嶺に沿って同時代に起こったと推定される左ズレ運動は、上述したように、おそらくほぼK/T境界(アルプス極相期)から始まる。後期白亜紀に、マントルガスの大規模な集積が海盆の上昇を引き起こした。それが低い土地を覆った広域的な海進の原因である。その次に、マントルへの地殻の喪失の主な段階は、世界中のたくさんの造構-マグマ事件と関係し、相対的に明確な海退で始まった。関連した大きなガスの噴出(噴出口形成)や海水の有毒化は約6500万年前のK/T境界で生物学的な大変動を引き起こした(Storetvedt, 2003)。

発達する剪断型に応じて、中央大西洋リフトの北方への進行は決して単純な移動ではなかった: リフトの北方への延長はむしろコンパクトな大陸から準大陸地殻(以下参照)へとその道を見つけた。突然厚い地殻を持ったアイスランド的な地域に作用した第三紀前期の造構運動は、いくつかの裂かに沿って発生したようだ。そしてそこでは厚い台地玄武岩層が集積したようであり、現在のアイスランド以上に広い地域を覆っていたと推定されるが、新第三紀~現在の火山関係の地層や周りの大陸棚の堆積物で隠されている。南アイスランドの造構-火山帯の東方への雁行状のズレと同様に、レイキャネス海嶺のV型地形学的-重力計測的な構造は、必須の力学的な転換のように見える。それは造構応力が島の深部地殻の中

心部の周りの逃げ道をバラバラに壊しているところである。その南西へ凸のノルウェー盆地の深く湾曲したアエギル海嶺が、この造構過程の起源であるためであることはありそうなことである。事実、Breivik et al. (2006) は、アエギル海嶺に沿って記載している V 型重力海嶺において、海嶺は斜めの剪断応力下で形成されたことを示唆した。比較的是っきりしているが、構造的に西方へ振られて拡散する前に、北アイスランドで、面白い造構応力が造構-マグマ帯の南北方向の複雑な関係を示している。その構造要素は、その次に Kolbeinsey 海嶺に沿って明確なリフト構造に再度表れている。プレートテクトニクスの考え方内では、北アイスランドの複雑な造構-マグマ構造は依然として混乱したままであり、今日でも未決着である (例えば Bergerat et al., 2000; Garcia et al., 2002)。混乱させるような造構的な概念にさらに付け加えると、重力場における V 型海嶺は、Kolbeinsey 海嶺地域からも報告された (Jones et al., 2002)。

アイスランドを経て中央大西洋リフトをバラバラに壊すことに加えて、第三紀前期の剪断は多くの別な顕著な影響を与えた。それから、西ヨーロッパとグリーンランドの縁に沿って、玄武岩の流れと岩床の厚い層が、発達する大陸縁のセクターに沿って形成された、徐々に突き出て海の方へ傾斜する反射物系列を生じた。(例えば White et al., 1987; Planke and Eldholm 1994; Barton and White, 1997; Spitzer et al., 2008)。浅いヨーロッパ-グリーンランド大陸バリアーに沿う重要なリフトが数カ所に現れた。それは顕著にフェロー諸島堆チャネルとデンマーク海峡に沿って、それぞれ 850m と 620m の深度を持っている。フェロー諸島の玄武岩層はもう一つのこの剪断事件の顕著な結果である。また、北大

西洋リフトに沿うアイスランドで、前期第三紀玄武岩の厚い地層が中新世と新規火山に覆われて伏在することが大いに期待できる。23 の明確な構造的考察はさておき、この浅発地震のない海嶺は、より高密度な剪断の証拠をほとんど示していない。この結論は海嶺に沿う線状の磁気場異常の発達が非常に弱いという事実によって支持される (Smallwood and White, 2002 参照)。これは、磁場の直線性が十分に進行した剪断変成作用によってもたらされたという仮説に合致する観察である (Storetvedt, 2010c)。

多彩なノルウェー-グリーンランド海盆

うわべでは絶賛されたプレートテクトニクス仮説の中で、ノルウェー-グリーンランド海の喧伝された海洋底拡大史の解明が、多くの研究によって試みられてきたが (例えば Talwani and Eldholm 1977; Nunns 1983; Lundin & Doré 2002; Scott et al. 2005; Olesen et al., 2007; Mjelde et al., 2008, 他多数)、意味のある答えに達していない。長年にわたってしだいに洗練されてきたマッピングは、非常に詳細な構造やその他の情報を追加した。しかし、比較的複雑な磁場画像が海洋底拡大の証拠とみなされる限り、このモデルが必要とされる海域ではどこにでも不当な海嶺ジャンプが導入され、我々に盲信を強いてきた。その場限りの決着と相反する解釈が繁栄し続けている今日、新鮮な目で事実を再考すべき時代が到来したことは明らかである。

図 11 の海底地形画像が示すように、ノルウェー、グリーンランド海は 3 つの円形~楕円形の小規模海盆で構成されている; ノルウェー、ロフォーテンおよびグリーンラ

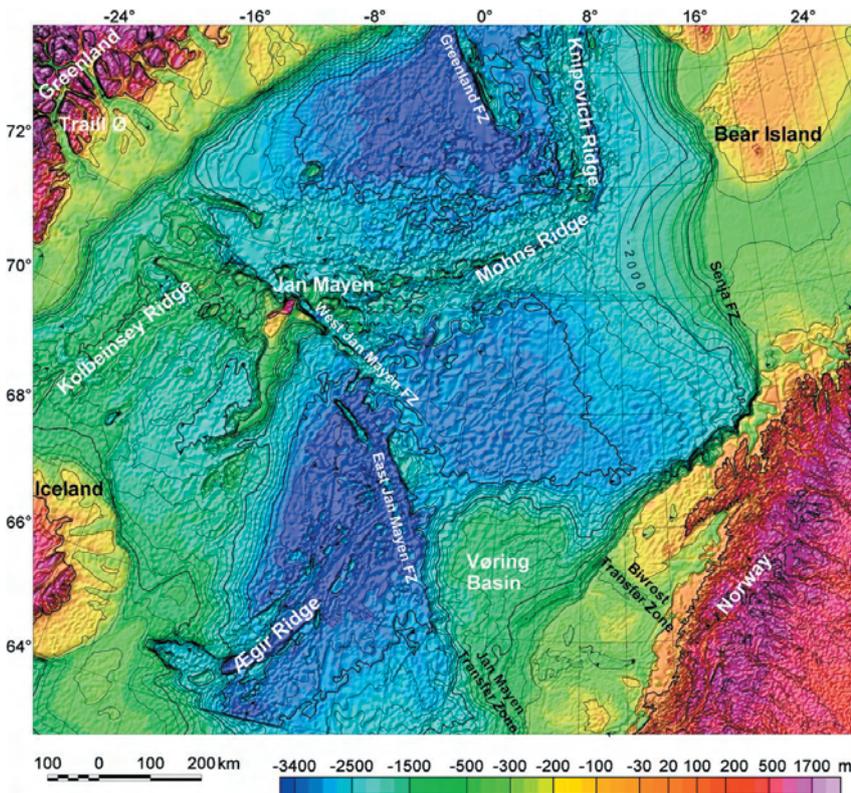


図 11 北大西洋北部の海底地形—Olesen et al. (2007) を修正。その西側に沿って Jan Mayen 島から南に伸びる大陸性 Jan Mayen 海嶺、そして深い Jan Mayen 海盆に注目せよ。

ンド海盆は、中央海嶺と大陸縁の間を占める。大陸縁の海側傾斜層に基づくと、ノルウェー、グリーンランド海盆の沈降は前期第三紀の間に加速したと推測される—それは、しだいに激化する(しかし変化に富む)地殻の海洋化作用の反映である。Shetland~Faeroes~アイスランド~グリーンランド海嶺沿いに、後期中新世後半までは北西ヨーロッパとグリーンランドの間に陸橋が存在した(以下をみよ)。そして、少なくとも先前期第三紀には、Vøring~Jan Mayen 島~グリーンランドの海嶺/断裂帯システムは、もうひとつの海洋を横断する大陸性架け橋になっていた可能性がある。Vøring 海底半島は、白亜紀のVøring 海盆に突き出した大きな海台で、海洋底に隆起部を形成している。この海底半島は、南西縁を東 Jan Mayen 断裂帯に境され、ブーゲー重力異常が明瞭に低く、16~17kmの地殻厚度によって特徴づけられる(Gernigon et al., 2009)。プレートテクトニクスの哲学の中ではいつも、このような地形の解釈は、たとえば、不特定のマグマ生成の結果であるとか、あるいは、単に好奇心をそそると形容することによって、非典型的海洋とよばれ、問題が雲散霧消する。Gernigon らの成果が示すように、北西方向の Jan Mayen 断裂帯は、負のブーゲー異常を示す多くの狭長な地殻ブロックを伴う横断層帯であると解釈される。これらのブロックの低重力値を最も単純で直裁に説明するとすると、それらは、かつての大陸地殻のなごりであると考えられる。

Vøring 海盆はモホ面の深さが約 20km に達する厚い地殻をもち、地震や重力データによると、その基盤は大陸性である(Mjelde et al., 1997 & 1998)。Vøring 海底半島からその先端のV字型をした海底地形を示す漸移帯(断層が発達)を通る地震探査断面によると、地殻厚度は断層帯を横切ると著しく薄化し、モホ面深度はわずかに12kmになる(Gernigon et al., 2009)。このような観察はレンチテクトニクスの予測に合致し、揮発性物質による下からの地殻薄化が深部断層地帯では特に効果的であったことを示す。さらに、Vøring 隆起とVøring 海底半島の間断層帯は強力な鉍物変質を被っていて、初生の鉄チタン酸化物が分解され、それによって帯磁率が低下し、負の磁場異常を示すことが予測される。この予測は、実際に空中磁気データによって裏付けられる(Olesen et al., 2007; Gernigon et al., 2009)。すなわち、造構的区分でみると Jan Mayen 断裂帯システムに沿って、断層にともなう磁場強度の低い地帯が配列している。

東 Jan Mayen 断裂帯に沿う海底地形の低下部が地磁気およびフリーエア重力ともに低異常を示すことは注目に値し、前述したV字型のレイキャネスの海嶺の地形、地磁気、重力的特性に関する我々の観測と合致する。Jan Mayen 断裂帯システムは、断裂帯に沿う顕著な低磁力異常—南縁部でとくに顕著である—のみならず、この目立った地磁気縞に直交する低磁力異常—断層に沿う多数の低磁力異常が相対的に幅広い Jan Mayen 断裂帯を横切っている—にも表現されている。これは、レンチテクトニクスの過程が作用してきたことを示す強力な推定的証拠であ

り、地磁気縞模様に対する断層に関連した地磁気異常や鉍物学的データにもとづいている。

幅約 50km の Jan Mayen 海嶺は、Jan Mayen 島から南に延びており、40 年以上にわたって多様な地球物理学的研究が行われてきた(Eldholm and Windisch, 1974; Talwani and Eldholm, 1977; Gairaud et al., 1978; Johansen et al., 1988; Kodaira et al., 1998, 他多数)。そこが大陸起源であることは、すでに調査の初期段階で認められた。ところが、海洋底拡大による解釈にとって、いくつもの未解決の地殻問題が邪魔者になってきた。例えば、この“微小大陸”には明確な外縁が無く、下部地殻の厚さは大きく変化し、南方延長は明確な端部が無い。こうして、多数の場合当たりの提案がされてきたのが事実である(例えば Kimbell et al., 2005; Fedorova et al., 2005)。おそらく、Jan Mayen 海嶺とその周辺の薄い結晶質基盤の間の構造的・組成的区別は全くの人為的であって、様々な地殻の“コンパートメント”はともに大陸起源であり、地殻下におけるデラミネーションやそれにもなう化学的変化が違っているだけではないか?

磁氣的に静穏な Jan Mayen 大陸ブロックのテクトニクスをめぐる複数の未解決問題を解明しようと、Kodaira et al. (1998) は OBS プロファイルを利用した詳細な地震探査を実施して、この海嶺とその西縁縁に沿う海盆の地殻構造、さらにはアイスランド海台を研究した。調査海域は約 69.5°N で、Jan Mayen ブロックには、海嶺中央部に最大厚約 20km の竜骨状の地殻構造が分布する。海嶺の西側に沿って最大層厚 5km の深い堆積凹地—Jan Mayen 海盆があり、そこは幅 100km 以下の地磁気静穏帯と非常に薄い結晶質地殻(深さ 3km)に特徴づけられる。海嶺下の下部地殻層は約 12km の厚さをもつが、それは Jan Mayen 海盆下にほとんど存在しない。この南北方向の海盆は明らかに断層の影響を受けていて、下部地殻がほぼ完全に除去されていて、北ピレネー山脈断層帯を横断してビスケー湾の奥につづく Parentis 盆地の深層構造に全般的によく似ている。Parentis 盆地下の下部地殻の薄化を説明するために、Pinet et al. (1987) は、深部反射法地震探査断面に基づいて、エクロジャイト化した斑れい岩—グラニュライト質下部地殻が重力的に不安定化した結果、上部マントル中に失われた(デラミネーションした)とする、質量非保存モデルを提案した。

Kodaira et al. (1998) は、Jan Mayen 海盆下の結晶質基盤が薄化した大陸地殻で構成されていて、隣接する Jan Mayen 海嶺の著しく破断された縁部帯は非火山性大陸縁部であることを示唆した。しかしながら、西部の Jan Mayen 海嶺西部に沿う断層構造は、現地性の造構作用の結果である可能性が高い。地殻下の物質の効果的除去やそれに由来する盆地の沈下が進むことによって、海嶺/海盆遷移帯に沿う海盆側沈下の断層運動が自然に発生する。これらの側面に加えて、Jan Mayen 海盆西部の地殻は、これまで信じられてきた“通常”の海洋地殻に比

べて異常に厚く、アイスランド陸棚では地殻の厚さが約12kmと推定され、さらに Kolbeinsey 海嶺に隣接する広大な範囲での厚さは9.5kmで比較的一定である (Kodaira et al. 1997; Hoofst et al., 2006). Kolbeinsey 海嶺は、海洋中央リフティングが準大陸性地殻を横断するような別個の造構環境を代表しており、Kolbeinsey 海嶺海域におけるV字型の重力構造の証拠 (Jones et al., 2002) はさらに当惑した現状を表している。Kolbeinsey 海嶺に沿う前期第三紀のリフティングが、中生代以前の比較的厚い古期浅海性堆積物によって覆われた小大陸を横切っていることは明らかにである。前期第三紀に部分的に薄化した大陸地殻が造構的に破壊されて以降、Kolbeinsey 海嶺 / Jan Mayen 海域はさらに薄化し、第三紀～現世堆積物によって様々な程度に被覆された。

ノルウェー～グリーンランド海の地形特性 (図 11) と地磁気異常画像 (図 12) をより広くみると、北大西洋のこの海域に存在する多数の湾曲や波状の地殻構造に衝撃を受けざるをえない。この比較的狭い海洋路に広く認められる造構的ねじれは、さまざまな地磁気異常模様で顕著である。その中で、Jan Mayen 断裂帯は、海洋を横断する比較的連続的な正の異常帯を形成している。我々は、Jan Mayen 海嶺を中心とした、幅広い地磁気静穏帯を見出すことができる。Jan Mayen 島の破碎帯は、明らかに造構的不連続を表していて、この造構境界の北側では、湾曲したしたモーネ海嶺を中心とする地磁気異常システムがより東寄りの方向性を示す。Jan Mayen 断裂帯に沿う海洋中央リフトの顕著な東方オフセット～南側の Kolbeinsey 異常系に比べて、北東側のモーネ海嶺を中心とする地磁気縞模様の対応する縞のオフセットは、

Kolbeinsey 海嶺の顕著な東方ステップ構造に“表象”されている。

全地球レンチテクトニクス系では、相対的に薄い海洋地殻が造構的せん断運動をより強く受けるため、それに誘導されて海底の地磁気異常縞模様が生じる。しかし、せん断とその磁気的影響が大陸縁で完全に途切れることを説明する理由は不明である。そのため、Olesen et al. (2007) は、Mohns 海嶺に並走する線状の磁気異常が東グリーンランドの大陸棚に連続し、ノルウェー側では Vøring 海台の斜面を駆けあがると提案した。

図 11・図 12 が示すように、バレンツ海の縁辺近くで南へ湾曲した Mohns 海嶺東部は、北方へ大きく振って NNW 方向の Knipovich 海嶺へ連続する。この海嶺は、Svalbard 諸島とグリーンランドの間の狭い海域における主要せん断帯である。海洋中央リフト帯に沿う現在の左横ずれせん断運動は、前述のように GPS 観測点の変位速度に示され、おそらくアルプス時相の極大期に前後して形成された。しかし、地殻薄化の程度が広域的に変化し、多数の隆起した大陸断片が含まれていて抵抗になるために、任意の海域におけるレンチテクトニクスへの応答を予測することは困難である。それにもかかわらず、斜め引張応力帯では、マントルからの含水流体が比較的容易に脱出路をみいだしうるために、地殻は極めて薄いと予測される。この状況は、Mohns 海嶺と同様、Aegir 海嶺や南西ノルウェー盆地でも起きている。いずれの場合も、地殻の厚さはわずか4kmと推定されている (参照、Klingelhöfer et al., 2000; Greehalgh and Kusznir, 2007)。

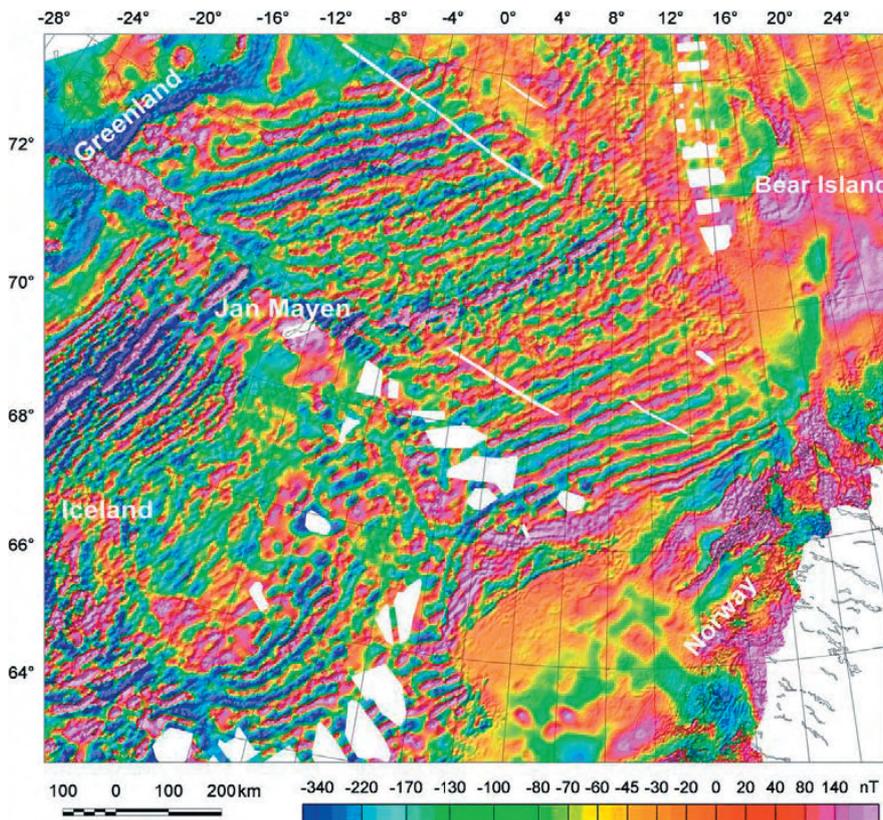


図 12 Olesen et al. (2007) による、ノルウェー～グリーンランド海域の空中磁気データのコンパイル。大西洋のこの部分における、著しいせん断と地殻変動を示す曲線と複雑な磁気異常に注目せよ。

Mohns 海嶺がレンチテクトニクス起源であることと調和して, Dauteuil and Brun (1996) と Crane et al. (1999) が記載した著しく分節化したリフト谷—谷壁には横ずれ断層の変位が卓越—は、雁行断層で境された狭長な凹地が変形によって分断されてでき上がったものである。中軸谷の内部では、地塁や傾動地塊が等間隔に配置されている。中央地溝盆地のテクトニックな斜め運動とみなされ、Crane らは “Mohns-Knipovich の屈曲部の付近では、非線形の程度がわずかに増加する” と結論づけた。それにつづいて Mohns 海嶺を研究した Klingelhoefer et al. (2000 a & b) は、前述の Jan Mayen 海盆の観測に適合するコメントとして、異常に薄い地殻〜ごく普通の下部地殻層について言及している。

### 北極海嶺

狭いスバルバル諸島〜グリーンランド海域における強くせん断された地殻は、プレートテクトニクスによる地球力学的解釈の基礎をなしているが (Chamov et al., 2010 および文献を参照せよ), その進化には議論の余地が残る。ほぼ子午線方向に伸びる Knipovich 地溝では、集中的なせん断作用が認められる。そこは水深約 3000m にある幅 15km の明瞭な谷地形で、谷底は多くの雁行状の窪みによって構成されていて、それら北東方向の高まりで区切られている (Chamov et al., 2010)。著者たちによると、“リフト谷は V 字型の横断面によって特徴づけられ、東西の斜面の傾斜角は谷の軸方向に変化する”。したがって、Knipovich 構造のテクトニックな地形の起源は、Reykjanes 海嶺に近いと考えられる。図 13 は Knipovich 海域の構造地形を示すものであり、Knipovich 軸の斜交性が主要な要素となっている。海底地形調査の結果から Chamov らは、構造パターンがそれぞれ NNW と NNE 方向の主に 2 つの歪み系に支配されていることを示した。NNE 方向 (025°) の構造は調査海域全体を横切る主

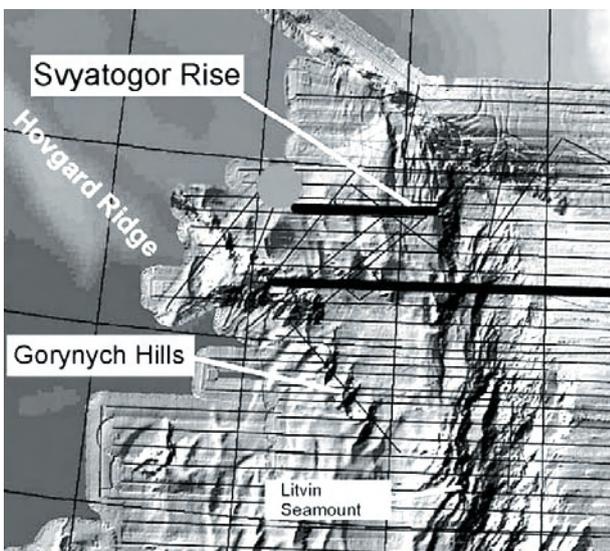


図 13 Chamov et al. (2010) を編集したものであり、Knipovich 地溝谷の陰影海底地形。雁行状のテクトニック構造は、中央地溝帯自体よりもはるかに広い領域に広がることを注視せよ。

要な破砕帯を形成しているが、NNW 方向 (約 335°) の構造は西方の Svalbard 諸島沿いのアルプス期構造帯にほぼ並列することが特筆されている。彼らは、“この海域の構造パターンが Knipovich 地溝を形成したせん断作用に影響を与えた” と結論づけている。海底調査によって図示されたプルアパート型盆地の雁行配列は、“単純せん断メカニズム” によって形成された大陸地溝と同じ特徴を示す。したがって、彼らは、少なくとも中新世以降の海洋底拡大によって Knipovich 地溝が形成されたという起源論を疑問視した。

Chamov らは、Knipovich リフトの NNE 走向の破砕帯システムが広域的磁場異常に一致するという事実に当惑した。しかしながら、支配的な造構せん断システムと線状地磁気縞模様との間の密接な関係は、Vine-Matthews-Morley モデルの文脈に唯一不可解な問題である。別の説明では、せん断変形による鉱物変質が磁化率の異なるバンドを形成する、つまり地磁気異常縞模様は周囲の磁場から導かれたとされる。地磁気縞模様に関連して、Mohns 海嶺の北方への転移は、このもう一つのテクトニクスのシナリオに良く適合する。

子午線方向の Knipovich リフトは、Molloy 深淵 (図 14) — Molloy 断裂帯と Lena 海溝 / 海嶺の交点に形成された深い節状の盆地—の南方延長にあたる Molloy 破砕帯によって明瞭にオフセットされている。長さ 300km の Lena 海溝は Fram 海峡—Svalbard およびグリーンランド大陸縁の間の比較的狭い水路—に沿って延びている (Tiede et al., 1990)。予想されるように、この強くせん断 / 破砕された海底回廊では、地磁気縞模様は発見されていない。広域的な海嶺 / 海溝複合体が西 Spitsbergen (Svalbard 諸島の主要な島) に近接して通過するため、その西縁部は大きな横ずれ成分を含む前期第三紀の斜め圧縮作用を被ってきた (Harland, 1969)。Lowell (1972) によると、西 Svalbard 島の海陸にわたる顕著な断層帯は、横ずれ圧縮場で形成された Spitsbergen 褶曲とスラスト帯になっていて、その変形は最大の造構歪を受けた暁新世に始まり、始新世までつづいた (Steel et al., 1981; Braathen and Bergh, 1995)。

Lena 凹地から採取された物質中に、玄武岩はめったに存在しない。その代わりに、最も一般的にサンプリングされた物質は、塊状硫化物鉱床、熱水堆積物、塊状の繊維状石綿化した蛇紋岩の断片、及びマントルかんらん岩の組み合わせである (Snow et al., 2001)。実際には、後者の著者は、Lena 凹地内のすべてのドレッジ地点で、後生の炭酸塩脈が貫入した変質したかんらん岩を発見している。長年にわたって Molloy 凹地で行われてきた 7 回の成功したドレッジのなかで、かんらん岩だけが得られることはあっても、玄武岩や斑れい岩だけが採集されることはなかった (Snow et al., 2001)。岩石学および地球化学的証拠から、彼らは Lena 凹地での部分部溶融度は非常に低く、それ故、また、他の理由で、海洋底拡大の文脈においては謎めいた事例であると結論づけた。

Molloy 深淵—中央海嶺系の最深部：水深約 5,900m—は、高い海嶺や傾斜 20° ~ 30° の斜面に囲まれる (図 14 ; Chamov et al. 2010). 平面的には平行四辺形の外形は、幅狭いスバルバード—グリーンランド海域に影響したと見られる強い剪断変形と調和的である。Molloy 深淵域が”局所的な”斜め引張 (transtensive) 環境を経験したことは明らかである。マントル熱水流体にとっての高圧条件と既存脱出路に関して、私たちは地殻デラミネーションにもっとも重要な前提状況を満足させた。事実、スバルバード—グリーンランド海域の全海洋リフト系は、応力および流体に起因するリソスフェアのエクロジャイト化ならびにマントル中への地殻損失によって形成された海洋谷であるに違いない。この過程で、この海洋リフト谷の最深部—Molloy 深淵—で地殻デラミネーションが完了したため、今日では海洋底に超塩基性上部マントルが露出しているのである。

Lena トラフの北端では、大西洋中央リフトは東へ急に屈曲し、Gakkel 海嶺として 1,800km 以上にわたって東方へ伸びてシベリア大陸縁に達する。そこでは、Laptev 大陸棚上にみられる幅広い大陸リフト帯で消失する (Grachev, 1982)。Gakkel 海嶺は、北極海盆をアムンゼンおよびナンセンサブ海盆に分け、現行の海洋地殻形成モデルでは説明できないいくつもの異常を示す (Snow and Edmonds, 2007)。たとえば、北大西洋のどこにもみられないほど多数の熱水口 (vent) が高密度に集中している。この違いを示すために、図 15 に Mohns 海嶺、Knipovich-Lena トラフ剪断帯、および西部北極海における既知の熱水活動地点がまとめて示される (Snow and Edmonds, 2007)。事実、Gakkel 海嶺の全長にわたって、思いがけないほど活発な熱水活動が見られ (Edmonds et al., 2003)、海洋底拡大モデルが予測する熱水口がまれな状況にはなっていない。このリフトはマントル熱水流体の中軸通路の役割を果たしていることは明らかで、広域変成作用によってエクロジャイトへの相転移をもたら

し、Wrench テクトニクスの力学的必要条件である重力駆動による地殻薄化を地殻底に引き起こしている。もしこの説明が妥当であるとする、第 1 級の予測として、Gakkel 中央リフトの地殻は例外的に薄く、リフト谷は通常に比べて深く、そして、伏在するアセノスフェアから供給される玄武岩は吸収された地殻同化物を含んでいるだろう。

ところどころで水深 5,000m を超える Gakkel リフトには、約 1,800km におよぶ全長にわたってどこにも横断断層がない。このリフト谷は、両側を高角正断層に境され、リフトに平行する海嶺とトラフの比高は 2km に達する。火山噴火活動の証拠はリフトに沿ってわずか 2, 3 の特定の領域にのみ認められ、それらによって 3 つの造構—火成活動領域に区分される (Michael et al., 2003; Dick et al., 2003)。長さ 300km の中央無火成活動区では、Molloy 深淵と同様、まさにマントルかんらん岩が直接、海嶺軸に露出している。その西側では多量の連続的な火山活動が、東側には幅広い間隔で大規模な中心噴火火山群が、それぞれ認められる。図 16 は、AMORE2001 航海による Gakkel 海嶺西部の海底地形を示す。3°E には、小規模ながら明瞭な東西オフセットがみられ、そこでリフト谷底は 1km 深くなっている、80km 東方ではかんらん岩だけがドレッジされた (Michael et al., 2003)。30° E では火山岩類とかんらん岩が散在する混合物が、さらに東ではドレッジ採取物は玄武岩だけになる。図 16 からすぐに判ることは、海嶺を数多くの海底隆起帯が横切っていることであり、これらの地形は側方へはナンセンおよびアムンゼン海盆へ向かってしだいに消失している。リフト谷壁は、高角正断層に沿う著しい造構隆起に関係する (Dick et al., 2003)。「火山中心の間には、長くつづく深いリフト谷 (水深 4,600-5,400m) が存在し、やや負—わずかに正の MBA [マントルブーゲー異常] と弱い磁場強度を示す。ここのリフト壁は、長くつづく直線的

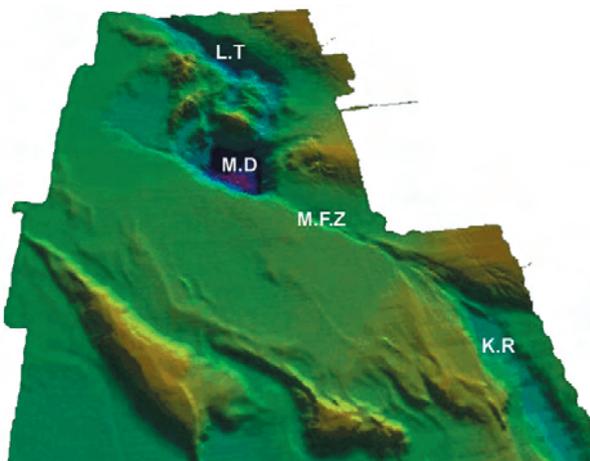


図 14 ノルウェー—グリーンランド海北部と Fram 海峡の大洋中央海嶺の透視図。さまざまな海嶺群は、南から北へ、Knipovich リフト (K.R.), Molly 断裂帯 (M.F.Z.), Molloy 深淵 (長方形の概形, M.D.) および Lena トラフ (L.T.)

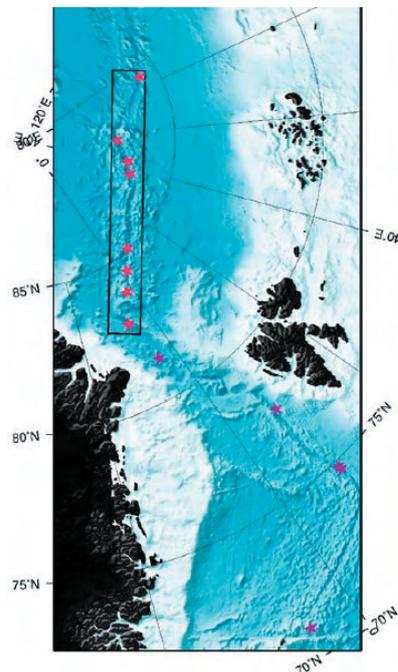


図 15 Mohns および西部北極海嶺における既知の熱水口の分布。Snow and Edmonds (2007) を改変引用。四角形は、Gakkel 海嶺に沿った AMORE2001 航海の調査範囲を示す。

な稜線,あるいは、より不規則な大規模隆起ブロックで構成され、多量のかんらん岩が露出している (Dick et al., 2003). 点在する磁気異常中心 (図7参照)を含めて、このような観測から、Gakkel リフト中心部の地殻はたいへん薄く、ところどころでは欠けていて、結晶質海洋底基盤は蛇紋岩化した上部マントルで構成されていると結論することができるかもしれない。

現在採取されているドレッジ岩石試料によると、Gakkel 海嶺に沿うマグマ供給は、連続的火山軸を維持するには驚くほど少なく、不十分であるという。噴出活動は、2, 3 の特定の場所に限られていて、海嶺軸は海洋地殻を形成する火山軸というよりは、全体的には構造谷というべきである (Cochran et al., 2003). これらの事実に加えて、Coackley and Cochran (1998) および Jokat et al. (2003) は、地震および重力探査にもとづいて、すくなくとも 60°E 以西では結晶質地殻は消失するほど薄だろうと述べた。そうだとすれば、大量の地殻物質が上部マントルに吸収され、Gakkel 海嶺火山岩に大陸的な地球化学特性をもたらした、と考えられる。このような観点から特筆されることに、海嶺軸で採取された玄武岩類の Sr-Nd-Pb 同位体比および微量元素を研究した Goldstein et al. (2008) は、無火成活動帯 (中央帯) の西側の玄武岩類が南半球 Dupal 同位体地帯に類似した特性を示すことを発見した。多数の可能な説明を検討したうえで、これらの著者たちは、Gakkel 海嶺の疎らな西側火山区は、もともとは大陸下リソスフェアマントルに由来するもので、それはデラミネーションによってやがては広域的アセノスフェアのメルトと融合した、と結論した。

この造構作用を慣性力にもとづく緯度依存性ねじり力に関係づけると、それによって、地殻が薄い海洋域における剪断強度は、古緯度が増すにつれて減少するだろう [アルプス変動期には、相対的地理北極はベーリング海北部に位置していた: Støretvedt, 1997 および 2003 参照]. これは、北大西洋の他のほとんどの海域に比べて、北極海盆に沿う線状の磁気異常が弱く、つぎはぎであることを説明する。Gakkel 海盆中央部は異常に深く、それは、逆に、地殻が異常に薄いか、欠けている (マントル岩石が海洋底に露出する) ことと調和的である。この現象は、このリフトの実質的には全長にわたって観察される多数の熱水口という事実完全に適合する。

リフト軸は、中程度の剪断作用による斜め引張 (transtention) 状態を経験していることは明らかである。3°E における東西方向の海嶺オフセットや 20°E 付近における顕著な変形地形 (図 16) に明示されるように、このような造構変形は、北大西洋海嶺に沿う海嶺に沿う剪断場 - おそらくは左横ずれセンス - を例示するものであろう。しかしながら、多数の隆起地形が Gakkel 海嶺軸を顕著に変位させることなく横切っている事実、および、これらの地形隆起が Fram 海峡の Molloy 断層や Lena トラフとほぼ平行であるという事実は、これらの北方海域におけるアルプス期の全般的な中程度の剪断変形を示

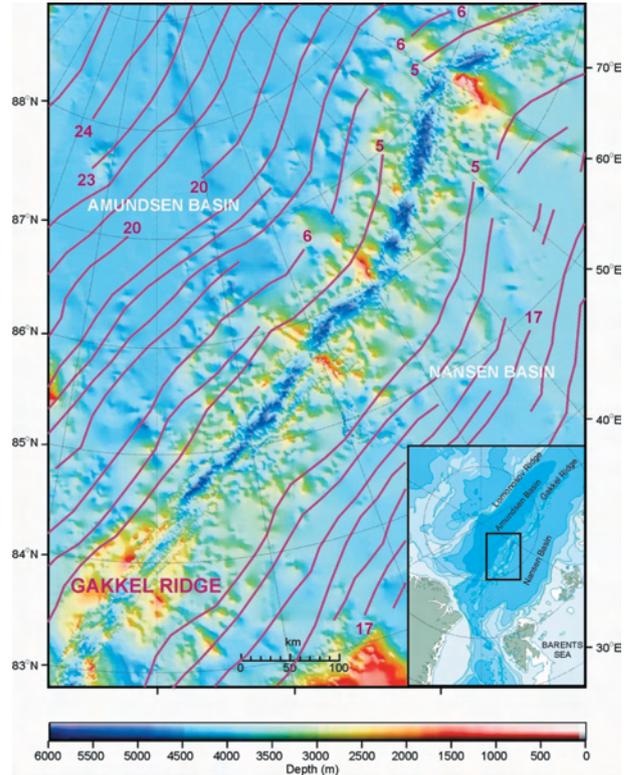


図 16 AMORE2001 データにもとづく Gakkel 海嶺の海底地形 (Snow and Edmonds, 2007 を簡略化). 3°E にみられる明瞭な東西構造オフセット、ならびに、20°E 付近における波状地形 (海嶺に沿う剪断変形の指標) に注意せよ. 数字が付された赤色線は、上述の著者らによって示された喧伝される拡大速度を示す—本論の評価に矛盾すると思われる。

唆している。これらの地形は、北極海盆に発達する弱い海洋磁気異常をも説明するかもしれない。このような多数の熱水口や海底に露出するマントル岩石を伴う特有の発達様式にしたがうと、蛇紋岩化したかんらん岩による浮力性隆起運動が、この不可思議な海嶺地形の少なくとも一部を説明しうるだろう。このような見解と整合して、重力データは Gakkel 海嶺にみられる多くの不可思議な海底地形が火成活動起源ではなく、造構運動起源であろうと結論づけられている (Cochran et al., 2003)。

### 北大西洋陸橋

Schotland-Faeroe-Iceland 海嶺は、北西方向に伸びる幅広い平頂性の非地震性海嶺で、水深は約 400m である。グリーンランド側およびヨーロッパ側の縁辺は、それぞれ、2つの北東方向の浅い縁辺トラフに境されている。この海嶺は、これまで、ヨーロッパと北アメリカの間の生物地理的陸繋域とみなされてきた。それは、これら2つの大陸間での先中期第三紀の動物群および植物群の強い関連性を説明するためであった (たとえば、McKenna, 1975; Briggs, 1987). この仮説を支持すべく、Faeroe-Iceland 海嶺の北斜面での深海掘削 (DSDP Leg 38 site 336) では層厚 10m の鉄質ラテライト古土壌層が掘削され、始新世中～後期の厚い陸上風化断面であると解釈された (Nilsen and Kerr, 1976; Perry et al., 1976). この地点の古土壌層は水深 500 ~ 1,000m の海底の下約

470mに発見されたものであり、この海嶺がラテライト層形成後に著しく沈降したことは明らかである。しかるに、DSDP site 336の第三紀亜熱帯風化層準は、北大西洋玄武岩岩石区の他の地点のそれらと同様に、第三紀前期(3,500万年前以前)の古気候(Wegener, 1929; Pomeroy, 1982), 古気温見積り(Burchardt, 1978), ならびに古地磁気(Storetvedt, 1990, 1997)の証拠に調和的であり、古赤道はアフリカ北縁に位置していたのである。

高緯度に位置するFaeroe-Iceland海台を想定される北大西洋の拡大史に適合させようと、Talwani and Eldholm(1977)は、浅海～陸上での海洋底拡大を示唆した。それにもかかわらず、すでに1970年代には、Faeroe-Iceland海嶺の基盤岩研究は地殻が異常に厚いという結論に達して、Faeroe海台玄武岩層の下位には大陸性基盤が存在することが想定された(Bott et al., 1974; Bott and Gunnarsson, 1980)。Faeroe-Iceland海嶺に沿う後の地殻研究は(たとえば, Staples et al., 1997; Richardson et al., 1998; Fedorova et al., 2005), もともとの結論を基本的に追証した。Artemieva and Thybo(2008)は北ヨーロッパ, アイスランド, およびグリーンランドのリソスフェア特性をまとめ、これらの地域の補正された地殻厚度情報(図17)は、多数の輝かしい観点を提示した。第1に、大陸地殻が隣接する海洋域へ向かってわずかながら薄化していることに誰もが気づく。すなわち、地殻が厚いバルト楕状地から北大西洋へ向かって、そして、グリーンランド内陸部の厚い地殻から周辺の準海洋性領域(ラブラドル海/バフィン湾および北大西洋)をとりまく、より著しく薄い地殻へ向かって顕著に薄化する。私たちはこれらの事象は地殻デラミネーション作用が側方へ拡大した結果であると解釈した。すなわち、脱ガスにはじまるエクロジャイト化と、それに関連する重力駆動デラミネーションが加速された結果は、成熟した海洋地域にかぎらず、活力を減少させながらも、大陸縁を越えて側方へ拡大した。この発達様式は、中央の竜骨に示されるようにグリーンランド地殻のボート様の形状に適切な説明を与える。同様の仕組みがアイスランドの地殻に適用されることは明白である(図3)。ここでは、この島のもともとの厚い(明瞭に大陸性の)地殻が、ほぼ全縁にわたって地殻デラミネーション作用を受け、今日みられる椀状の(再深部が中央に位置する)地殻を遺した。

図17に示されるように、ノルウェー-グリーンランド海の最薄(準”海洋性”)地殻が四辺形を示し、その辺はそれぞれ北西および北東方向を指す。この形状は、単純な造構-高度則:地殻底の薄化とそれに関連する地殻層の変化に対応する盆地の形成、表面形状および構造線は、当然のことながら古期の直交断裂系に強く規制され、より新規の表層部に遺されるだろう。アイスランド北方の薄い海洋地殻の北西延長部はShetland-Faeroe-Iceland-Greenland海嶺に平行することも注目される。この海嶺は、たとえばFaeroe諸島の個々の島嶼の分割や配列に示されるように、海嶺に平行な断層帯によって、

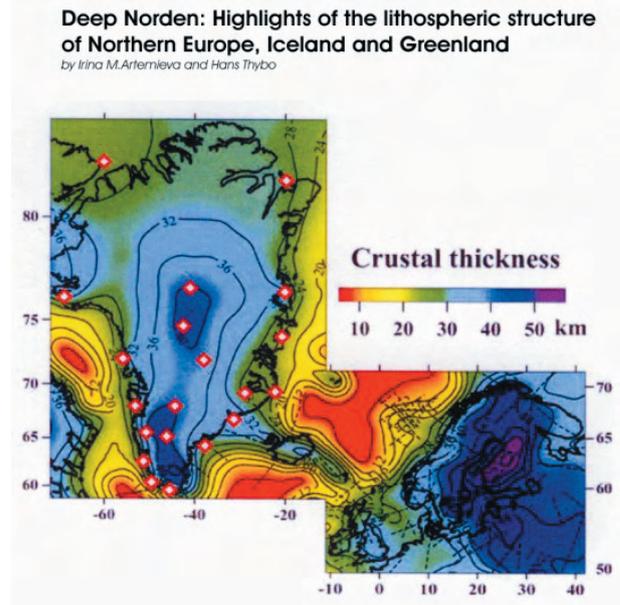


図17 北部ヨーロッパ, アイスランドおよびグリーンランドの地殻厚度分布(Artemieva and Thybo, 2008から編集)。赤色ダイヤモンド型はグリーンランドの地震観測所であるが、ここでは議論されていない。グリーンランドの竜骨状の形状-隣接海洋域へ向かって顕著になる地殻薄化による-, ならびに、アイスランド北方のノルウェー-グリーンランド海の薄化地殻の全般的な四辺形形状に注意せよ。

さらに細分される。それにもかかわらず、この簡素な平頂性の海洋横断海台の厚度30~40kmの地殻は、厚度約18kmの北東方向の直交するShetland-Faeroe海盆(前述)によってとぎれているものの、長期間にわたって北アメリカとヨーロッパの間の生物移動のための陸繋路として、もともとは高い高度にあった大陸性障壁のなごりであることはまったく確からしい。陸上あるいは浅海における地殻拡大のような提案は、プレートテクトニクスに要請されたつくりごと以外の何物でもない。

第三紀前半には、北アメリカ北部とヨーロッパは亜熱帯的気候にあり、温暖湿潤林にひろく覆われていた(McKenna, 1983; Tiffney, 1985; Tiffney and Manchester, 2001)。これは、地中海南縁に沿って伸び、中央大西洋を横切ってカリブ海南部に達していた当時の赤道(Storetvedt, 2010bの図3参照)の位置と調和的である。北ヨーロッパ, アイスランドおよびグリーンランドの温暖気候は、約35Maの始新世-漸新世境界のまぎわまで続き、この境界では劇的な寒冷化が起きた。この大規模な環境変化は地球の大規模な空間方位変化に対応するもので、先カンブリア紀以降、地球が初めて現在の空間方位をとることになった(Storetvedt, 1997, 2003参照)。この主要な地球回転は、アルプス変動極相期に対応する最終的急変とみられ、古生物学および古気温データによく記録されている。さらに、赤道方向へ地球のふくらみが再設定されたため、アセノスフェアの静水圧的条件の変化が地球全体の、とくに海洋域での造構-火成活動を広く変化させた。大陸域では、始新世-漸新世境界にエチオピア洪水玄武岩が噴出し、北アメリカとロシアではこの時以降に多数の大規模噴火火山クレータ

が、そして、北アメリカ東岸沖では Chesapeake 湾クレータ (直径 85km) が形成された (Storetvedt, 2003 および本論の文献欄参照)。

約 35Ma に発生し、前期～中期漸新世にも継続したヨーロッパでの劇的な寒冷化は、図 18 の上図に示されるように、北海の堆積物の古気温研究によって詳細に解明されている。これは、北大西洋陸橋を通る生物移動にとってはもっとも重要な要素をなすに違いない気候悪化であった。漸新世の低海水準は (図 18 の下図の Exxon 曲線を参照)、確かに、Greenland-Shetland 移動路の保持に役立ったが、漸新世の大半にわたるヨーロッパ、アイスランドおよびグリーンランドの比較的冷涼な気候は大陸間移動をより限定的にする要素となっただろう。

漸新世末以降、とくに前期中新世には、地球は新期の力学-造構的不安定期に突入し、海水準はふたたび上昇をはじめた。長期間にわたる全般的海進は、2 回の明瞭な海退事件に区分され、その後、図 18 の上図に示されるように 7～8Ma の頃になって、より本格的な海退が起こった。レンチテクトニクスによれば、海水準変動は進行しつつある地球脱ガス-上部マントルにおける静水圧の変動をもたらし、海洋地殻の隆起とそれに連動して大陸域の沿岸部における海進や被圧されたアセノスフェアガスとガスに駆動されたマグマの間欠的な噴出をもたらすの直接の結果である。北大西洋周辺の大陸では、中新世中頃の海退事件はコロンビア川玄武岩の溢流やドイツ南部の Ries および Steinheim 火山の噴火に対応し、それらはいずれも 15Ma の年代値を示す。中新世中頃の造構-火成活動は北大西洋の広範囲に影響を及ぼし、Cape Verde 諸島、カナリー諸島、Madeira 島、アゾレス諸島およびアイスランドにおける新第三紀火山活動を開始させた。Macaronesia 群島域 (カナリー諸島、アゾレス諸島、など) では、火山活動に先行する造構性隆起運動によって海拔 400～500m まで隆起した (Mitchell-Thomé, 1976)。新生代の火山活動/貫入活動が中央大西洋のあらゆるところで起こった (Storetvedt, 1997)。

レンチテクトニクスの説明では、脈動的地球史を制御する基本メカニズムは、鉛直方向の物質移動とマントル/地殻変換作用であり、それらは惑星の慣性モーメントの変化をもたらす。それゆえに、中新世中頃の地球は慣性的不安定の期間におかれ、それによって相対的赤道はサハラ中央部とアラビア半島南部を横切って変動した (Storetvedt, 1997, 2003)。このような力学的変動の地質的影響は、古赤道地帯に顕著にあらわれる造構的不調和および/あるいは火成活動度として認識することができる。これらの特徴は、たとえば、シナイ半島の新第三紀堆積岩層にすぐに反映される。中新世中頃の緯度配置をみると、驚くほど低角の古地磁気伏角が地中海地域の亜熱帯環境を支持する (たとえば、Atzemoglou et al., 1994)。それに伴う温度上昇傾向は、北ヨーロッパでは、北海堆積物中の中新世中頃の温度ピークによって明示される (図 18 の上図)。

アイスランドにおける中新世大型植物化石、ならびに、北大西洋周辺の大陸の間での経時的移動に関するデータにしたがうと、海洋横断移動路は、この時代の末までは、間欠的であるにせよ保持されていた。すなわち、アイスランドにおける化石植生に関する最近の研究では、中期～後期中新世の 4 つの溶岩層に挟まれる含植物化石層が調査され、実際の時間経過にしたがった温暖から寒冷への気温変化を反映して、湿潤温暖な広葉樹 (落葉性) から針葉樹混交林へ植物群集が変化した、と結論された (Denk et al., 2005)。氏らの結論によると、12Ma までは植物が北アメリカおよびヨーロッパからアイスランドへ移動したことに信頼に足る証拠があるが、より新期の堆積物中の植物化石は主にヨーロッパから移動したとみられる。それ故に、得られた証拠は、上に要約した力学-造構史に調和的であり、北大西洋陸橋はおそらく第三紀末まで存在し、プレートテクトニクスの基礎をなす海洋底拡大概念の論拠を失わせる。

アイスランドにおける中新世火山活動のはじまりは、それ自体が大洋中央海嶺起源ではなく、その頃には、北大西洋中央部のほぼ全幅にわたって多数の箇所でもマグマ活動が活発になった。それに比べて、北大西洋北部 (アイスランド以北) では中新世以降の火山活動は実質的には発生していない。この緯度方向での違いはレンチテクトニクスでは簡単に説明されるが、拡大関連仮説 (プレートテクトニクスあるいは地球膨張モデル) では説明できない。アイスランドや、はるかに小規模な Jan Mayen

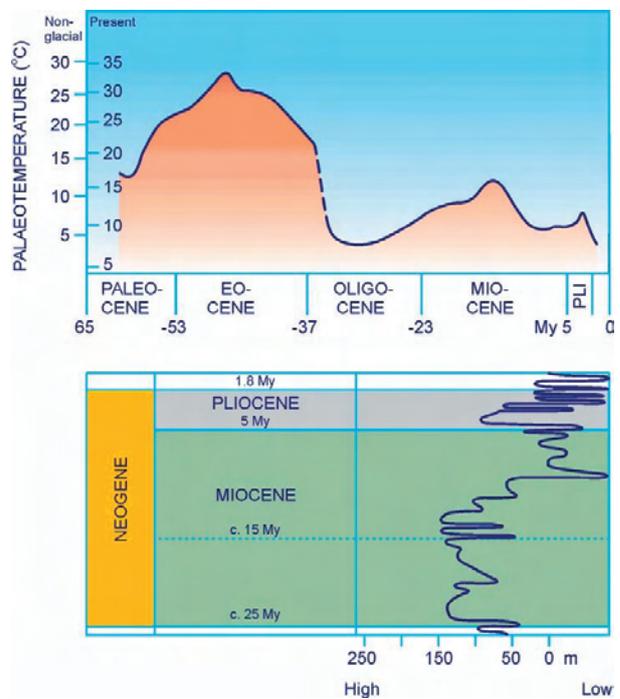


図 18 上図: 北海堆積物中の化石殻の酸素同位体研究にもとづく第三紀の古気温。2つの温度縮尺は、南極 (今日の) における氷床集積の後と前 (無氷床期) における海水の平均同位体組成の変化を示す。Büchardt (1978) を簡略化。始新世および中新世の高温化、および、漸新世におけるヨーロッパの寒冷化に注意せよ。下図: 前期中新世以降の Exxon 社による (世界的) 海水準変化。Haq et al. (1987) から簡略化。

島,そしてアゾレス諸島を除くと,地球をとりまく海洋中央海嶺系の他の領域においては,現世火山活動が実質的には発生していない.北大西洋における3つの火山活動の現れは特殊であり,海洋中央リフト帯が大規模な造構性構造要素(ジブラルタル断裂帯,Shetland-Faeroes-Iceland断裂規制海嶺,およびJan Mayen断裂帯)を横切るところに発生している.

### 結 論

北大西洋が海洋底拡大に由来するという想定は,そのあらゆる側面で,実際にはそのモデルの期待とは不調和であることが,しだいに,ありあまるほど明白になっている.大洋を横断し,浅く,厚い地殻をもつShetland-Faeroe-Iceland-Greenland海嶺が中程度に薄化した大陸地殻層を代表するものであり,このような地殻特性は海洋底拡大作用を物理的に不可能なものにしている.さらに,中央海嶺に沿って広く分布する古期大陸性岩石は,今日では複雑な構成となっている大西洋の地殻が薄化し,化学的に改変された大陸性被覆層の現時点での最終生成物であることを示唆する.今日みられるように,連綿と増え続けてきた一連の場当たりの提案—それらの中で,未証明の海洋底拡大という概念はずっと続いてきた仮説的装飾の増大の頂点におかれてきた—に対する多くの挑戦に Ause 会うことは,ほんとうの科学的成功の徴候であるとは思えない.中央海嶺の起源,そして,それに関わるすべての他の全地球的地質に関する批判的レビューに乗り出すべき時が到来したことは明らかである.新しい全地球的地質学説が必要とされていることは明白であり,地球の確証された脈動的地質史が説明されるべきである.北大西洋についていえば,得られた証拠は,白亜紀~第三紀前期に基本的に形成された断層に制御された地殻変位と薄化構造に適合する.この多彩な地殻の”海洋化”には慣性力に始動されたアルプス期のリソスフェアねじれ運動が加わっていて,大西洋と他の中央海嶺を特徴づける造構的斜交性をもたらしている.

**謝辞** 私たちは,この論文の旧版を読んで訂正して下さったChris Argent(ロンドン),建設的コメントを寄せて下さったMartin Hovland,いくつかの図面を用意して下さったFrank Cleveland,ならびに種々の援助をいただいたRune Andre Storetvedtに厚く御礼申し上げます.

### 文 献

Allen, R.M.G. et al., 2002. Plume driven plumbing and crustal formation in Iceland. *Jour. Geophys. Res.*, v. 107, doi: 10.1029/2001JB000584.

Anderson, D.L., 2005. Eclogite in the mantle. [www.MantlePlumes.org](http://www.MantlePlumes.org)

Argus, D.F. and Gordon, R.G., 1996. Tests of the rigid-plate hypothesis and bounds on intraplate deformation using geodetic data from very long baseline interferometry. *Jour. Geophys. Res.*, v. 101, p. 13,555-13,572.

Artemieva, I.M. and Thybo, H., 2008. Deep Norden: Highlights of the lithospheric structure of Northern Europe, Iceland, and Greenland. *Episodes*, v. 31, p. 98-106.

Atzemoglou, A. et al., 1994. Palaeomagnetic evidence for block rotations in the western Greek Rhodope. *Geophys. Jour. Int.*, v. 118, p. 221-230.

Aumento, F. and Loncarevic, B.D., The Mid-Atlantic Ridge near 45 N. III Bald Mountain. *Can. Jour. Earth Sci.*, v. 6, p. 11-23.

Austrheim, H., 1987. Eclogitization of lower crustal granulites by fluid migration through shear zones. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 81, p. 221-232.

Austrheim, H., 1998. Influence of fluid and deformation on metamorphism of the deep crust and consequences for the geodynamics of collision zones. In: *Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*, Kluwer, Dordrecht, p. 297-323.

Austrheim, H. and Boundy, T.M., 1994. Pseudotachylytes generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust. *Science*, v. 265, p. 82-83.

Austrheim, H., Erambert, M. and Bundy, T.M., 1996. Garnets recording deep crustal earthquakes. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 139, p. 223-238.

Barrell, J., 1927. On continental fragmentation and the geologic bearing of the Moon's surface features. *Am. Jour. Sci.*, v. 213, p. 283-314.

Barton, A.J. and White, R.S., 1997. Crustal structure of Edoras Bank continental margin and mantle thermal anomalies beneath the North Atlantic. *Jour. Geophys. Res.*, v. 102, p. 3109-3129.

Beard, S.B. et al., 2009. Onset and Progression of Serpentinization and Magnetite Formation in Olivine-rich Troctolite from IODP Hole U1309D. *Jour. Petrology*, v. 50, p. 387-403.

Beier, C., Stracke, A., and Haase, K.M., 2007. The peculiar geochemical signatures of São Miguel (Azores) lavas: Metasomatized or recycled mantle sources? *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 259, p. 186-199.

Bergerat, F., Angelier, J. & Homberg, C., 2000. Tectonic analysis of the Húsavík-Flatey (northern Iceland) and mechanisms of an oceanic transform zone, the Tjörnes Fracture Zone. *Tectonics*, v. 19, p. 1161-1177.

Björnsson, A., Eysteinnsson, H. and Beblo, M., 2005. Crustal formation and magma genesis beneath Iceland: magnetotelluric constraints. In: *Plates, Plumes, and Paradigms*. *Geol. Soc. Am.*, p. 665-686.

Bonatti, E., 1976. Serpentinite protrusions in the oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 32, p. 107-113.

Bonatti, E., 1978. Vertical tectonism in oceanic fracture zones. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 37, p. 369-379.

Boschi, C.G.L. et al., 2006. Mass transfer and fluid flow during detachment faulting and development of an oceanic core complex, Atlantis Massif (30°N). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 7(1): Q01004, doi:

- 10.1029/2005GC001074.
- Bott, M.H.P. and Gunnarsson, K., 1980. Crustal structure of the Iceland-Faeroe Ridge. *Jour. Geophys.*, v. p. 221-227.
- Bott, M.H.P. et al., 1974. Evidence for continental crust beneath the Faeroe Islands. *Nature*, London, v. 248, p. 202-204.
- Braathen, A. and Bergh, S.G., 1995. Kinematics of Tertiary deformation in the basement – implications based on fault-slip data analysis. *Tectonophysics*, v. 249, p. 1-29.
- Breivik, A.J. et al., 2006. Rates of continental breakup magmatism and seafloor spreading in the Norway Basin – Iceland Plume interaction. *Jour. Geophys. Res.*, v. 111, doi: 10.1029/2005JB004004.
- Brekke, H., 2000. The tectonic evolution of the Norwegian Sea continental margin with emphasis on the Vøring and Møre Basins. In: *Dynamics of the Norwegian Margin*, Geol. Soc. London, Special Publications, v. 167, p. 327-378.
- Brekke, H. and Riis, F., 1987. Mesozoic tectonics and basin evolution of the Norwegian Shelf between 60°N and 72°N. *Nor. Geol. Tidsskr.*, v. 67, p. 295-322.
- Brown, H.I., 1977. *Perception, Theory and Commitment*. The University of Chicago Press, Chicago, 203p.
- Briggs, J.C., 1987. *Biogeography and Plate Tectonics*, Elsevier, Amsterdam, 204p.
- Buchardt, B., 1978. Oxygen isotope palaeotemperatures from the Tertiary period in the North Sea area. *Nature*, London, v. 275, p. 121-123.
- Bullard, E.C., Everett, J. and Smith, A.G., 1965. The fit of the continents around the Atlantic. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, v. A258, p. 41-51.
- Bunch, A.W.H., 1979. A detailed seismic structure of Rockall Bank (55°N, 15°W): A synthetic seismogram analysis. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 45, p. 453-463.
- Cannat, M., 1993. Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *Jour. Geophys. Res.*, v. 98, p. 4163-4172
- Chamov, N.P. et al., 2010. Structure and Composition of the Sedimentary Cover in the Knipovich Rift Valley and Molloy Deep (Norwegian–Greenland Basin). *Lithology and Mineral Resources*, v. 45, p. 532-554.
- Coakley, B.J. and Cochran, J.R., 1998. Gravity evidence of very thin crust at the Gakkel Ridge (Arctic Ocean). *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 162, p. 81-95.
- Cochran, J.R. et al., 2003. The Gakkel Ridge: Bathymetry, gravity anomalies, and crustal accretions at extremely slow spreading rates. *Jour. Geophys. Res.*, v. 108, no. B2, doi: 10.1029/2002JB001830.
- Crane, K. et al., 1999. Morphology of the north-western Mohns Ridge; results from Sea MARK II surveys in the Norwegian-Greenland Sea. *Exploration and Mining Geology*, v. 8, p. 323-339.
- Creer, K.M., 1975. On a 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*, John Wiley, London, p. 293-318.
- Creer, K.M., Irving, E. and Runcorn, S.K., 1954. The direction of the geomagnetic field in remote epochs in Great Britain. *Jour. Geomag. Geoelec.*, v. 6, p. 163-168.
- Darbyshire, F.A., White, R.S. and Priestley, K.F., 2000. Structure of the crust and uppermost mantle of Iceland from combined seismic and gravity study. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 181, p. 409-428.
- Dauteuil, O. and Brun, J.-P., 1996. Deformation partitioning in a slow spreading ridge undergoing oblique extension: Mohns Ridge, Norwegian Sea. *Tectonics*, v. 15, p. 870-884.
- DeMets, C. et al., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Letters*, v. 21, p. 2191-2194.
- Denk, T. et al., 2005. The Miocene floras of Iceland and their significance for late Cainozoic North Atlantic biogeography. *Bot. Jour. Linnean Soc.*, v. 149, p. 369-417.
- Dick, H.J.B., Lin, J. and Schouten, H., 2003. An ultraslow-spreading class of ocean ridge. *Nature*, v. 426, p. 405-412.
- Doré, A.G. et al., 1997. Patterns of basement structure reactivation along the NE Atlantic margin. *Jour. Geol. Soc. London*, v. 154, p. 85-92.
- Edmonds, H.N. et al., 2003. Discovery of abundant hydrothermal venting on the ultraslow-spreading Gakkel ridge in the Arctic Ocean. *Nature*, v. 421, p. 252-256.
- Einarsson, Th., 1967. The extent of the Tertiary basalt formation and the structure of Iceland. *Soc. Sci. Islandica*, v. 38, p. 170-178.
- Einarsson, Tr., 1965. Remarks on crustal structure in Iceland. *Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc.*, v. 10, p. 283-288.
- Einarsson, Tr., 1968. Submarine Ridges as an Effect of Stress Fields. *Jour. Geophys. Res.*, v. 73, p. 7561-7576.
- Eldholm, O. and Windisch, C.C., 1974. Sediment distribution in the Norwegian-Greenland Sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 85, p. 1661-1676.
- Elsasser, W.M., 1946. Induction effects in terrestrial magnetism. *Phys. Review*, v. 69, p. 106-116.
- Fedorova, T., Jacoby, W.R. and Wallner, H., 2005. Crust-mantle transition and Moho model for Iceland and surroundings from seismic, topography and gravity data. *Tectonophysics*, v. 396, p. 119-140.
- Feyerabend, P., 1988. *Against Method*. Verso, London, 296p.
- Foulger, G.R., 2006. Older crust underlies Iceland. *Geophys. Jour. Int.*, v. 165, p.672-676.
- Foulger, G.R., 2007. Iceland: What we know and what we don't. Rift to Ridge '07 workshop, Abstract, Southampton 28-29 Sept.
- Foulger, G.R., 2010. *Plates vs. Plumes: A Geological Controversy*. Wiley-Blackwell, London, 328p.
- Foulger, G.R., Du, Z. and Julian, B.R., 2003. Icelandic-type crust. *Geophys. Jour. Int.*, v. 155, p.567-590.
- Foulger, G.R. and Anderson, D.L., 2005. A cool model for the Iceland hot spot. *Jour. Volc., Geotherm. Res.*, v. 141, p.

- 1-22.
- Fujita, K. et al., 1990. Seismicity and focal mechanisms of the Arctic region and the North American plate boundary in Asia. In: *The Arctic Ocean Region*, v. L, Geol. Soc. Am., Boulder, p. 79-100.
- Furon, R., 1949. Sur les trilobites draguées à 4255 m de profondeur par le "Talisman" (1883). *C.R. Acad. Sci. Paris*, v. 228, p. 1509-1510.
- Gabrielsen, R.H., Gunnaleite, I. and Rasmussen, E., 1997. Cretaceous and Tertiary inversion in the Bjönöyrenna Fault Complex, south-western Barents Sea. *Mar. Petrol. Geol.*, v. 14, p. 165-178.
- Gairaud, H. et al., 1978. The Jan Mayen Ridge synthesis of geological knowledge and new data. *Oceanologica Acta*, v. 1, p. 335-358.
- Garcia, S. et al., 2002. Tectonic analysis of an oceanic transform fault zone based on fault-plane data and earthquake focal mechanisms: the Húsavík–Flatey Fault zone, Iceland. *Tectonophysics*, v. 344, p. 157-174.
- Geirsson, H. et al., 2006. Current plate movements across the Mid-Atlantic ridge determined from 5 years of continuous GPS measurements in Iceland. *Jour. Geophys. Res.*, v. 111, doi: 10.1029/2005JB003717.
- Gernigon, L. et al., 2009. Geophysical insight and early spreading history in the vicinity of the Jan Mayen Fracture Zone, Norwegian-Greenland Sea. *Tectonophysics*, v. 468, p. 185-205.
- Gold, T., 1985. The origin of natural gas and petroleum, and the prognosis for future supplies. *Annual Reviews of Energy*, v. 10, p. 53-77.
- Gold, T., 1987. *Power from the Earth: Deep Earth Gas – Energy for the Future*. J.M. Dent & Sons, 208p.
- Goldstein, S.L. et al., 2008. Origin of a 'Southern Hemisphere' geochemical signature in the Arctic upper mantle. *Nature*, v. 453, p. 89-93.
- Grachev, A.F., 1982. Geodynamics of the transitional zone from the Morna Rift to the Gakkel Ridge. In: *Studies in Continental Margin Geology*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem., Tulsa OK, 103-113p.
- Gràcia, E. et al., 2000. Non-transform offsets along the Mid-Atlantic Ridge south of the Azores (38oN– 34oN); ultramafic exposures and hosting of hydrothermal vents. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 177, p. 89-103.
- Greenhalgh, E.E. and Kusznir, N.J., 2007. Evidence for thin oceanic crust on the extinct Aegir Ridge, Norwegian Basin, NE Atlantic derived from satellite gravity inversion. *Geophys. Res. Letters*, v. 34, doi: 10.1029/2007GL029440.
- Gudmundsson, O., 2003. The dense root of the Iceland crust. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 206, p. 427-440.
- Hacker, B.R., 1997. Diagenesis and fault-valve seismicity of crustal faults. *Jour. Geophys. Res.*, v. 102, p. 24,459-24,467.
- Harland, W.B., 1969. Contribution of Spitsbergen to understanding of tectonic evolution of North Atlantic region. *Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, v. 12, p. 817-851.
- Hartung, G., 1860. *Die Azoren in der ausseren Erscheinung und nach ihrer geognostischer Natur*. Engelmann, Leipzig, 350p.
- Hast, N., 1969. The state of stress in the upper part of the Earth's crust. *Tectonophysics*, v. 52, p. 469-478.
- Hast, N., 1973. Global measurements of absolute stress. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, v. A274, p. 409-419.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, v. 235, p. 1156-1167.
- Heirtzler, J.R., Le Pichon, X. and Baron, J.G., 1966. Magnetic anomalies over the Reykjanes Ridge. *Deep Sea Res.*, v. 13, p. 427-443.
- Hey, R. et al., 2010. Propagating rift model for the V-shaped ridges south of Iceland. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 11, doi: 10.1029/2009GC002865.
- Hopper, J.R. et al., 2003. Structure of the SE. Greenland margin from seismic reflection and refraction data: Implications for nascent spreading center subsidence and asymmetric crustal accretion during North Atlantic opening. *Jour. Geophys. Res.*, v. 108, doi: 10.1029/2002JB001996.
- Hospers, J., 1955. Rock magnetism and polar wandering. *Jour. Geol.*, v. 63, p. 59-74.
- Hreinsdóttir, S. and Einarsson, P., 2001. Crustal deformation at the oblique spreading Reykjanes Peninsula. *Jour. Geophys. Res.*, v. 106, no. B7, p. 13,803-13,816.
- Hughes, S., Barton, P.J. and Harrison, D., 1998. Exploration in the Shetland-Faeroe Basin using densely spaced arrays of ocean-bottom seismometers. *Geophysics*, v. 63, p. 490-501.
- Jacoby, W.R., Weigel, W. and Fedorova, T., 2007. Crustal structure of the Reykjanes Ridge near 62oN, on the basis of seismic refraction and gravity data. *J. Geodynamics*, v. 43, p. 55-72.
- Johansen, B. et al., 1988. Expanding spread profile at the northern Jan Mayen Ridge. *Polar Res.*, v. 6, p. 95-104.
- Jokat, W. et al., 2003. Geophysical evidence for reduced melt production on the Arctic ultraslow Gakkel mid-ocean ridge. *Nature*, v. 423, p. 962-965.
- Jones, S.M, White, N. and MacLennan, J., 2002. V-shaped ridges around Iceland: Implications for spatial and temporal pattern of mantle convection. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 3, doi: 10.1029/2002GC000361.
- Karson, J.A. et al., 2006. Detachment shear zone of the Atlantis Massif core complex, Mid-Atlantic Ridge, 30oN. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 7(6), doi: 10.1029/2005GC001109.
- Kelly, D.S. et al., 2001. An off-axis hydrothermal vent field discovered near the Mid-Atlantic Ridge at 30oN. *Nature*, v. 412, p. 145-149.
- Kimbell, G.S. et al., 2005. Controls on the structure and evolution of the NE Atlantic margin revealed by regional 3D gravity modelling. In: *Petroleum Geology: North-west Europe and Global Perspectives – Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, Geol. Soc. London, p.

- 933-947.
- Kodaira, S. et al., 1998. Structure of the Jan Mayen microcontinent and implications for its evolution. *Geophys. Jour. Int.*, v. 132, p. 383-400.
- Korhonen, J. et al., 2007. Magnetic anomaly map of the world, scale 1: 50,000,000, 1st Ed, Commission for the Geologic Map of the World, Paris, France.
- Koschinsky, A.A. et al., 2006. Discovery of new hydrothermal vents on the southern Mid-Atlantic Ridge (4oS-10oS) during cruise M68/1. *InterRidge News*, v. 15, p. 9-15.
- Klingelhöfer, F., Geli, L. and White, R.S., 2000a. Geophysical and geochemical constraints on crustal accretion at the very-slow spreading Mohs Ridge. *Geophys. Res. Letters*, v. 27, p. 1547-1550.
- Klingelhöfer, F. et al., 2000b. Crustal structure of a super-slow spreading centre: a seismic refraction study of Mohs Ridge, 72oS. *Geophys. Jour. Int.*, v. 141, p. 509-526.
- Kreichgauer, P.D., 1902. *Die Äquatorfrage in der Geologie*. Missionsdruckerei, Steyl, 304p.
- Kuhn, T.S., 1970. *Structure of Scientific Revolution*. The University of Chicago Press, Chicago, 210p.
- Kuhn, T.S., 1977. *The Essential Tension*. The University of Chicago Press, Chicago, 365p.
- Lakatos, I., 1978. *The methodology of scientific research programmes*. Cambridge University Press, Cambridge, 250p.
- Leech, M.L., 2001. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 185, p. 149-159.
- Le Grand, H.E., 1988. *Drifting continents and shifting theories*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 313p.
- Lowell, J.D., 1972. Spitsbergen Tertiary orogenic belt and Spitsbergen Fracture Zone. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 83, p. 3091-3102.
- Ludwig, K.A. et al., 2006. Formation and evolution of carbonate chimneys at the Lost City Hydrothermal Field. *Geochemica Cosmochemica Acta*, v. 70, p. 3625-3645.
- Lundin, E. and Doré, A.G., 2002. The Mid-Cenozoic post-breakup deformation in the 'passive' margins bordering the Norwegian-Greenland Sea. *Marine and Petroleum Geology*, v. 19, p. 79-93.
- Lupton, J. et al., 1999. Anomalous helium and heat signatures associated with the 1998 axial volcano event, Juan de Fuca Ridge. *Geophys. Res. Letters*, v. 26, p. 3449-3452.
- Luyendyk, B.P. and Melson, W.G., 1967. Magnetic properties and petrology of rocks near the crest of the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, London, v. 215, p. 147-149.
- Luyendyk, B.P., Mudie, J.D. and Harrison, C.G.A., 1968. Lineations of magnetic anomalies in the Northeast Pacific observed near the ocean floor. *Jour. Geophys. Res.*, v. 73, p. 5951-5957.
- MacDonald, G.J.F., 1964. The deep structure of continents. *Science*, v. 143, p. 921-929.
- Maus, S., Fairhead, J.D. and Mogren, S., 2008. EMAG3: A 3-arc-minute resolution global magnetic anomaly grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic data. *SEG Expanded Abstracts 27*, doi: 10.1190/1.3063758.
- Maus, S. et al., 2009. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 10, Q08005, doi: 10.1029/2009GC002471.
- McKenna, M.C., 1975. Fossil mammals and early Eocene North Atlantic land continuity. *Ann. Miss. Bot. Gard.*, v. 62, p. 335-353.
- McKenna, M.C., 1983. Cenozoic paleogeography of North Atlantic land bridges. In: *Structure and development of the Greenland-Scotland Bridge*. Plenum, New York, p. 351-395.
- McLaughlin-West, E.A. et al., 1999. Variations in hydrothermal methane and hydrogen concentrations following the 1998 eruption at Axial Volcano. *Geophys. Res. Letters*, v. 26, p. 3453-3456.
- McKlusky, S. et al. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Jour. Geophys. Res.*, v. 105, p. 5695-5719.
- Michael, P.J. et al., 2003. Magmatic and amagmatic generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean. *Nature*, v. 423, p. 956-962.
- Melton, C.E. and Giardini, A.A., 1974. The composition and significance of gas released from natural diamonds from Africa and Brazil. *Am. Mineralogist*, v. 59, p. 775-782.
- Mitchell-Thomé, R.C., 1976. *Geology of the Middle Atlantic Islands*. Gebrüder Bornträger, Berlin, 382p.
- Mjelde, R. et al., 1997. Crustal structure of the central part of the Vøring Basin, mid-Norway margin, from ocean bottom seismographs. *Tectonophysics*, v. 227, p. 235-257.
- Mjelde, R. et al., 1998. Crustal structure of the northern part of the Vøring Basin, mid-Norway margin, from wide-angle seismic and gravity data. *Tectonophysics*, v. 293, p. 175-205.
- Mjelde, R. et al., 2008. Magmatic and tectonic evolution of the North Atlantic. *Jour. Geol. Soc. London*, v. 165, p. 31-42.
- Morewood, N.C. et al., 2005. The crustal structure and regional development of the Irish Atlantic margin region. *Geol. Soc. London, Petroleum Conference series*, v. 6, p. 1023-1033.
- Mudge, D. and Rashid, B., 1987. The geology of the Faeroe Basin area. In: *Petroleum geology of northwest Europe*, Graham and Trotman, London, p. 751-763.
- Nilsen, T.H. and Kerr, D.R., 1976. Turbidites, redbeds, sedimentary structures, and trace fossils observed in DSDP Leg 38 cores and the sedimentary history of the Norwegian-Greenland Sea. In: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Leg 38*, US Government Printing Office, Washington D.C., p. 259-288.
- Neugebauer, H.J. and Spohn, T., 1981. Metastable phase transition and progressive decline of gravitational energy: aspects of Atlantic type margin dynamics. In: *Geodynamics*

- Monograph Series, No. 6, Amer. Geophys. Un., Washington D.C.
- Nunns, A.G., 1983. The structure and evolution of the Jan Mayen Ridge and surrounding regions. *Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, v. 34, p. 193-208.
- Olafsson, I. et al., 1992. Møre Margin: Crustal Structure from Analysis of Expanded Spread Profiles. *Marine Geophysical Researches*, v. 14, p. 137-162.
- Olesen, O. et al., 2007. An improved tectonic model for the Eocene opening of the Norwegian-Greenland Sea: Use of modern magnetic data. *Marine and Petrol. Geol.*, v. 24, p. 53-66.
- Passerini, P. et al., 1990. Slickensides in western and southern Iceland: data from Langavatn, Burfell and Vördufell. *Ophioliti*, v. 15, p. 191-196.
- Passerini, P. et al., 1991. Strike-slip faults parallel to crustal spreading axes: data from Iceland and the Afar Depression.
- Perry, E.A. et al., 1976. Mineralogic studies of sediments from the Norwegian-Greenland Sea (sites 336, 343, 345, and 348). In: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Leg 38*, US. Government Printing Office, Washington D.C., p. 135-139.
- Pinet, B.L. et al., 1987. Crustal thinning on the Aquitaine shelf, Bay of Biscay, from deep seismic data. *Nature (London)*, v. 325, p. 513-516.
- Planke, S. and Eldholm, O., 1994. Seismic response and construction of seaward dipping reflections in flood basalts: Vøring volcanic margin. *Jour. Geophys. Res.*, v. 99, p. 9263-9278.
- Pomerol, C., 1982. *The Cenozoic Era*, Ellis Harwood, Chichester UK, 272p.
- Ribeiro da Costa, I. et al., 2008. Antigorite in deformed serpentinites from the Mid-Atlantic Ridge. *Eur. Jour. Mineral.*, v. 20, p. 563-572.
- Richardson, K.R. et al., 1998. Crustal structure beneath the Faeroe Islands and the Faeroe-Iceland Ridge. *Tectonophysics*, v. 300, p. 159-180.
- Roberts, A.M. et al., 2009. Mapping palaeostructure and palaeobathymetry along the Norwegian Atlantic continental margin: Møre and Vøring basins. *Petroleum Geoscience*, v. 15, p. 27-43.
- Roberts, D.G., 1975. Marine geology of the Rockall Plateau and Trough. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A278, p. 447-509.
- Rona, P.A. et al., 1986. Black smokers, massive sulfides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge. *Nature, London*, v. 321, p. 33-37.
- Roy, J.L., 1972. A pattern of rupture of the eastern North American-western European palaeoblock. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 14, p. 103-114.
- Runcorn, S.K., 1954. The Earth's core. *Trans. Am. Geophys. Un.*, v. 35, p. 49-63.
- Runcorn, S.K., 1955. Rock magnetism – geophysical aspects. *Adv. in Physics*, v. 4, p. 244-291.
- Runcorn, S.K., 1962. Palaeomagnetic Evidence for Continental Drift and its geophysical Cause. In: *Continental Drift* (ed. S.K. Runcorn), Academic Press, London, p. 1-40.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.T., 2009. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. *Jour. Geophys. Res.*, v. 114, doi: 10.1029/2008JB006008.
- Scheidegger, A.E., 1985. The significance of surface joints. *Geophys. Survey*, v. 70, p. 259-271.
- Scheidegger, A.E., 1995. Geojoints and geostresses. In: *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Balkema, Rotterdam, p. 3-35.
- Schmeck, M.C., 1974. Mid-Atlantic trilobites. *Geotimes*, v. 19, p. 16.
- Schroeder, T. and John, B.E., 2004. Strain localization on an oceanic detachment fault system, Atlantis Massif, 30oN, Mid-Atlantic Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 5(11), doi: 10.1029/2004GC000728.
- Scott, R.A. et al., 2005. Development of the Jan Mayen microcontinent by linked propagation and retreat of spreading ridges. In: *Onshore-offshore relationships on the North Atlantic margins*, Elsevier Spec. Publ., v. 12, p. 69-82.
- Scrutton, R.A., 1970. Results of a seismic refraction experiment on Rockall Bank. *Nature*, v. 227, p. 826-827.
- Sella, G.F., Dixon, T. & Mao, A., 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Jour. Geophys. Res.*, v. 107, doi: 10.1029/2000JB00033.
- Sigurdsson, H., 1968. Petrology of acidic xenoliths from Surtsey. *Geol. Mag.*, v. 105, p. 440-453.
- Sigmundsson, F. and Sæmundsson, K., 2008. Iceland: a window on North-Atlantic divergent plate tectonics and geologic processes. *Episodes*, v. 31, No. 1, 1-6.
- Smallwood, J.R. and White, R.S., 1998. Crustal accretion at the Reykjanes Ridge, 61o-62oN. *Jour. Geophys. Res.*, v. 103, p. 5185-5201.
- Smallwood, J.R. and White, R.S., 2002. Ridge-plume interaction in the North Atlantic and its influence on continental breakup and seafloor spreading. In: *The North Atlantic Igneous Province: Stratigraphy, Tectonic, Volcanic and Magmatic Processes*, Special Publications, Geol. Soc. London, v. 197, p. 15-37.
- Smith, L.K. et al., 2005. Structure of the Hatton Bank and adjacent continental margin. In: *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives – Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, Geol. Soc. London, p. 947-956.
- Snow, J.E. and Edmonds, H., 2007. Ultraslow-Spreading Ridges. *Rapid Paradigm Changes. Oceanography*, v. 20, p. 90-101.
- Snow, J.E. et al., 2001. Magmatic and Hydrothermal Activity in Lena Trough, Arctic Ocean. *EOS – Trans. Am. Geophys. Un.*, v. 82, p.193
- Spitzer, R. et al., 2008. Seismic characterization of basalt flows

- from the Faeroes margin and the Faeroe-Shetland basin. *Geophysical Prospecting*, v. 56, p. 21-31.
- Staples, R.K. et al., 1997. Faeroe-Iceland Ridge Experiment; Crustal structure of northeastern Iceland. *Jour. Geophys. Res.*, v. 102, p. 7849-7866.
- Steel, R.J. et al., 1981. The central Tertiary basin of Spitsbergen – sedimentary development of a sheared-margin basin. *Mem. Can. Soc. Petrol. Geol.*, v. 7, p. 647-664.
- Stein, S. et al., 1989. Passive margin earthquakes, stresses, and rheology. In: *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*. Kluwer, Dordrecht, p.231-259.
- 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*. Alma Mater (Fagbokforlaget), Bergen, 456p.
- Storetvedt, K.M., 2003. *Global Wrench Tectonics*. Fagbokforlaget, Bergen, 397p.
- Storetvedt, K.M., 2010a. The Caribbean Case: Agitation of ingrained views. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 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*, no 55, p. 4-34.
- Storetvedt, K.M., 2010c. World Magnetic Anomaly Map and Global Tectonics. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 57, p. 27-52.
- Talwani, M. and Eldholm, O., 1977. Evolution of the Norwegian-Greenland Sea. *Am. Geol. Soc. Bull.*, v. 88, p. 969-999.
- Thiede, J. et al., 1990. Bathymetry of Molloy Deep: Fram Strait between Svalbard and Greenland. *Marine Geophys. Res.*, v. 12, p. 197-214.
- Tiffney, B.H., 1985. The Eocene North Atlantic land bridge: its importance in Tertiary and modern phylogeography of the Northern Hemisphere. *Jour. of the Arnold Arboretum*, v. 66, p. 243-273.
- Tiffney, B.H. and Manchester, S.R., 2001. The use of geological and paleontological evidence in evaluating plant phylogeographic hypotheses in the northern hemisphere tertiary. *Intern. Jour. of Planet Sciences*, v. 162, p. S3-S17.
- Udintsev, G.B et al. 1989-90. *International Geological-Geophysical Atlas of the Atlantic Ocean*. International Oceanographic Commission, Moscow, 158p.
- Van Andel, T., 1985. *New Views on an Old Planet*. Cambridge University Press, Cambridge, 324p.
- Vogt, P.R., 1971. Asthenosphere motion recorded by the ocean floor south of Iceland. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 13, p. 153-160.
- Vogt, U. et al., 1998. The Hatton Basin and continental margin: Crustal structure from wide-angle seismic and gravity data. *Jour. Geophys. Res.*, v. 103, p. 12,545-12,566.
- Vågenes, E., Gabrielsen, R.H. and Haremo, P., 1998. Late Cretaceous-Cenozoic intraplate contractional deformation at the Norwegian continental shelf: timing, magnitude and regional implications. *Tectonophysics*, v. 300, p. 29-46.
- Walther, J.V., 1994. Fluid-rock reactions during metamorphism at mid-crustal conditions. *Jour. Geol.*, v. 102, p. 559-570.
- Wanless, R.K. et al., 1968. Age determinations and geological studies, K-Ar isotope ages. *Rep. B, Geol. Surv. Canada, Paper 67-2, Part A*.
- Weir, N.R.W. et al., 2001. Crustal structure of the northern Reykjanes Ridge and Reykjanes Peninsula, southwest Iceland. *Jour. Geophys. Res.*, v. 106, p. 6347-6368.
- Wegener, A., 1929. *The Origin of Continents and Oceans*. Engl. Trans. 1966. Methuen & Co, London, 248p.
- Welhan, J.A. and Craig, H., 1983. Methane, hydrogen and helium in hydrothermal fluids at 210N on the East Pacific Rise. In: *Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centres*, Plenum Press, New York.
- White, R.S. and McKenzie, D.P., 1989. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Jour. Geophys. Res.*, v. 94, p. 7685-7729.
- White, R.S. et al., 1987. Magmatism at rifted continental margins. *Nature*, v. 330, p. 439-444.
- White, R.S., Brown, J.W. and Smallwood, J.R., 1995. The temperature of the Iceland plume and the origin of outward-propagating V-shaped ridges. *Jour. Geol. Soc. London*, v. 152, p. 1039-1045.
- Yano, T. et al., 2009. Ancient and continental rocks in the Atlantic Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 53, p. 4-35.
- Zemtsov, V., 2007. Influence of Earth rotation on continental motions. *Gondwana Research*, v. 12, p. 242-251.

---

岩脈，グローバルテクトニクスと地殻拡張  
**DYKES, GLOBAL TECTONICS AND CRUSTAL EXTENSION**

**Cliff OLLIER**

School of Earth and Environment, The University of Western Australia,  
 Crawley, WA 6009, Australia cliff.ollier@uwa.edu.au

(柴 正博 [訳])

---

**要旨:** 岩脈は地球の地殻の拡張的な特徴であり、そして火山の支脈である。いくつかの場所で地殻の拡張を数量化することができる。火山活動は圧縮の地域では行なわれない。それでもなお火山と岩脈は太平洋の「火の輪」の中で、そして島弧で広範囲にわたっている。これはサブダクションと主張されているこれらの地域において、常識的に圧縮と仮定されていることについていくつかの間違ひがあることを示唆している。岩脈は始生代から地殻の拡張に伴って活動した。

**キーワード:** dykes, extension, tectonics, volcanoes

はじめに

地球の表面の火山活動は溶岩の噴出に起因するが、それは主に岩脈(またはひとつづきの岩脈)によって地球の中の深所からもたらされた。岩脈はマントルと地球表面をつなげているもので、そして岩脈が地球の地殻の拡張を必要とすることは一般に受け入れられている。最近の例として、Srivastava(2011)の岩脈群についての彼の本のための宣伝文に、このように書かれていた:「岩脈が地殻の拡張を意味し、そして地殻の安定化イベントの重要な指標である・・・」。Ji'an et al. (2004) はこう書いている:「岩脈群は一般に拡張の結果によるマントル起源マグマの進入に帰される。」

いっそう明確に星野(1998)は書いた:「火山活動は圧縮的な地殻で起きない。」この自明の理はもっと大きな重要な視点を述べている。

岩脈と火山

ほとんどの溶岩は、岩脈として割り込んできたものであるとこれまで長い間知られている。それらは表面において個別の出口に分かれるかもしれない。ハワイでは、噴火が線形の「火のカーテン」に沿ってしばしば始まり、何日かで縮小して噴火の点になる。他の場所では、岩脈が地表に届く個別のパイプに道を譲ると考えられている。しかし、浸食によって表面近い火山形状が引き下げられた古い岩石では、岩脈はパイプよりずっと普通である。それらは押し寄せる火山活動の優勢的な支脈である。岩脈は一般に「岩脈群」(図1)で起こり、そこには多くの岩脈が進入し、普通の拡張領域を示すようにそれらは通常およそ平行している。

岩脈は空間を満たしたことを示している。壁が離れて動くことと、溶岩がその空間を満たすことはつりあっている。これは多くの本で記述されていて、たとえば非常に読みやすい説明がHolmes(1965)にある。

いくつかの場所で拡張は数量化することができる。Holmes(1965, p. 250)では記録している:「たとえば、Arran 海岸の伸びに沿って15マイル[24, 140m]に、525の岩脈群を見ることができ、その岩脈の全体の厚さは5, 400フィート[1, 647m]である。ここで地殻の局地的な拡張は15分の1マイル[6. 8%]以上である。」(スコットランドの)Mull 岩脈群は1, 000m以上の全体の厚さを持ち、そして影響を受けた3. 8%の地域で地殻が引き伸ば

されたことを示している。

主要な岩脈が表面の線状配列から推定されるかもしれない。南アメリカの大きい火山は明瞭な線に沿って出現している。南アメリカ南部の一つの鎖状配列が緯度30°Sで二重の鎖状配列に分かれる理由は明確ではないが、深いところにおいてこれらの巨大な中央火山の場所を支配する確かな線があるように思われる。メキシコの火山も同じく2つの線状配列をする。ひとつは東-西方向で、Popocatepetl, Colima と Barcena(1952年に誕生)を含む。2つ目は北北東方向の線状配列で、Jurillo と Paricutin (1943年誕生)を含む。このような線状配列は深いところにおいて主要な岩脈を示唆する。

私たちは、割れ目の中に押し入って数千kmも横切るプレートをしきりに押しやるような、たった1m幅の薄い岩脈を想像するべきではない。熱くて液体かあるいは粘性のある岩脈にとって、このような巨大で固体の厚板をしきりに押しやることはできない。数mの厚さをもつ岩脈から加えられた圧力が、厚板のもう一方の終端での摩擦や障害にもかかわらず、数km厚い厚板を押すことは不可能に思われる。むしろばらばらにプレートを引っ張って

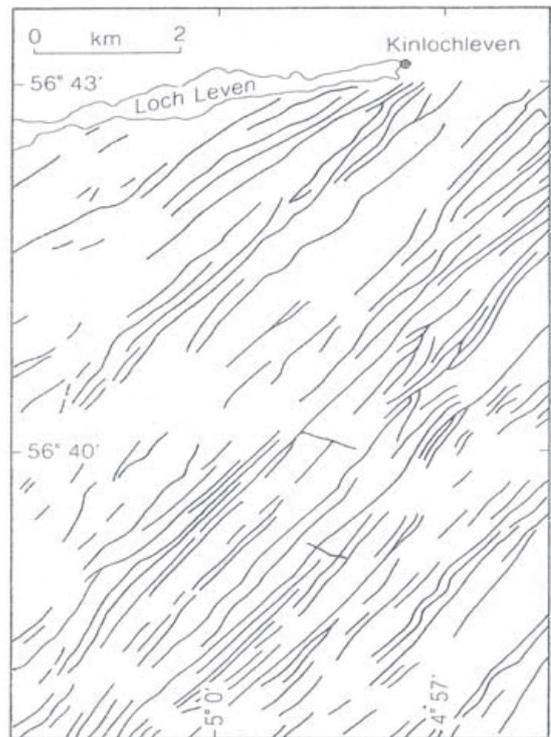


図1 スコットランドのLoch Leven近くの岩脈群(Ollier, 1988から)

いるいくつかの力があり、割れ目が現れたときにできた空間を満たすように岩脈が入っていく。

アイスランドにおける、中央リフトにおける広がりと同時に起きている沈降は、島がばらばらに引かれるときに岩脈が任意に割れ目を埋めたことを示唆する (Decker and Einarsson, 1971)。岩脈は駆動力ではない。また、岩脈の進入は時々周期的であることが発見される。北アイスランドの一部で 80km 幅の亀裂群が 1975 年から 1985 年の間に 5km の拡張を経験した (Steinhorsson and Thoraninsson, 1997)。

**膨張的岩脈進入の重要性**

地殻の岩脈進入と膨張はリフト谷と中央海嶺の周辺と、アイスランドや (より以前の地質時代の) スコットランドのようなところで共通している。これらの拡張の地域と推測されるところでは問題はない。

しかし、多くの火山がプレートテクトニクスの仮説で圧縮の地域と見なされる地域に見いだされる。最も明白なひとつは太平洋「火の輪」である—その分布はプレートテクトニクスの発明 (図 2) よりずっと以前に認識されていた。太平洋の周りすべてに火山があり、それは太平洋沿岸が圧縮ではなく、拡張の地域であることを示唆している。

太平洋沿岸における拡張の証拠は多くの科学者によって提出されている。南アメリカの西縁の優勢な地形的特徴はアンデスであり、Gansser (1973) はこう書いた: 「とりわけ私たちは海洋性と大陸性の地殻境界に沿った圧縮

の兆候に欠けている。沿岸帯に沿って、地塊断層運動が中生代以降、最も重要なテクトニクス過程であった...」。チリのテクトニクス型に関する一般的な論文で、Katz (1971) はこう書いた: 「地質学の証拠が...少なくとも中新世からこの地域で拡張を示す...拡張的応力が上部地殻の上の幅 200 ~ 400km の地域を支配している」。北アメリカにおいて、Basin and Range 地域はリフトよりもむしろ主に傾動した地塊で構成され、最後の 40 万年で 850km の拡張を伴っている。中国での拡張については Teng and Lin (2004) によって報告された: 「概略すれば新生代の中国縁辺は、新生代中国衝突地域を除外して、偏在するリフト盆によって表現された拡張的テクトニクスによって支配されたように思われる」。

「異常な」火山の第 2 セットは多くの火山を持っている島弧である。プレートテクトニクスにおいて、これらはサブダクションに帰される。しかしもし星野が正しく、火山が圧縮の領域で噴出ししないならば、私たちはそれに代って拡張について考えなくてはならない。実際に、島弧に拡張の多くの証拠がある。次の例で示されるように、それらはたくさんのリフト、地溝、半地溝をもっている。

アリューシャン弧には地溝が沿岸の内と外の両方にある。日本に大きな地溝あるいはリフトのいくつかの例がある。中央九州の別府-島原地溝と中部日本のフォッサマグナは広範囲にわたる火山活動で関連づけられ、そして大きいカルデラを含んでいる。フォッサマグナは日本海から太平洋まで本州の最も広い部分を横断する大きいリフト低地である。フィリピンでは、Oas 地溝と Mayon 火山は地溝の北部断層の上にその中央が位置している。ルソン島では、Cagayan 谷盆地は長さ 200km・幅 40km の

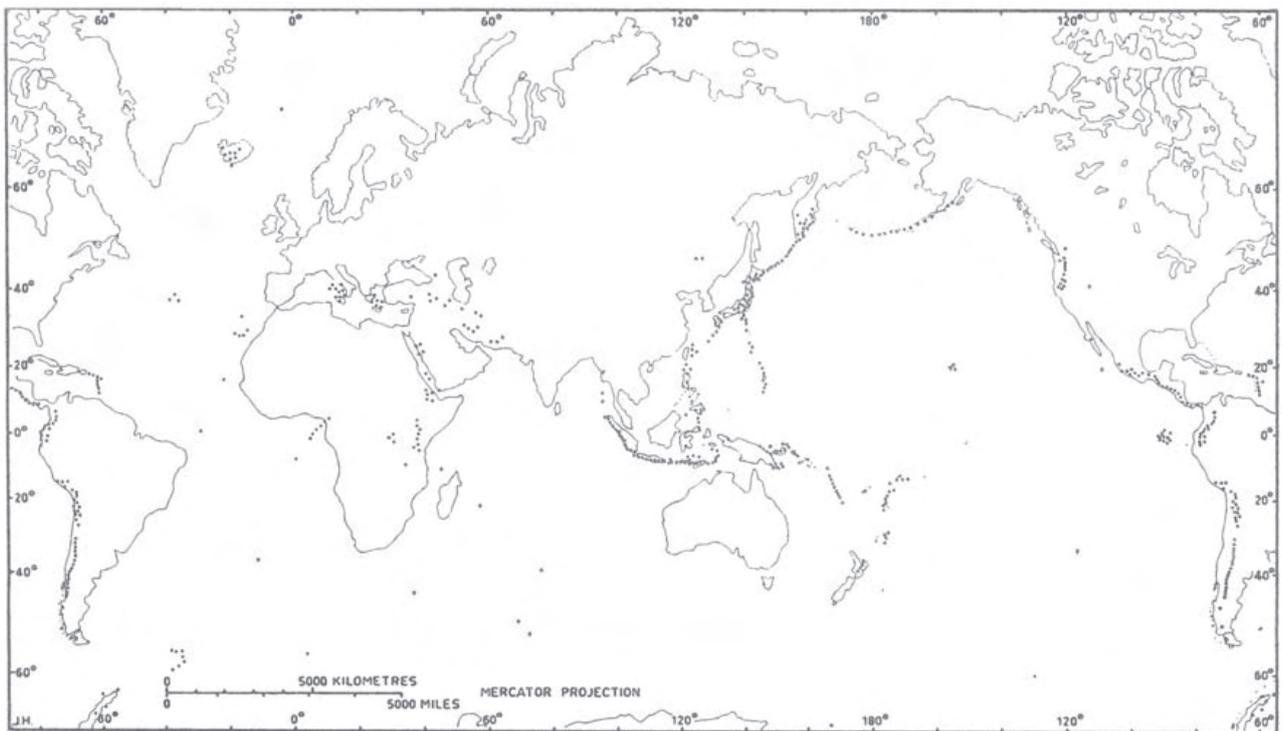


図 2 活動中の火山の世界分布 (Ollier, 1988 から)。太平洋の周りに集中しているのに気付く。

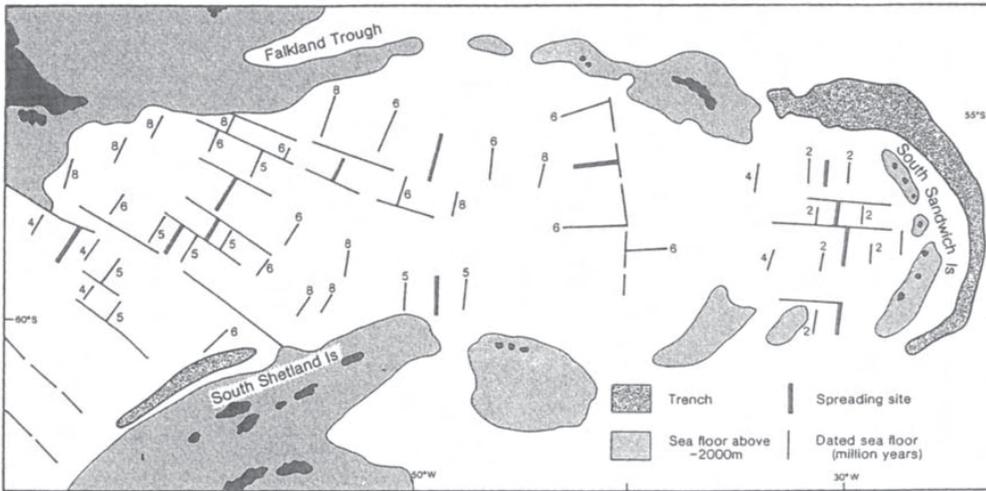


図3 背弧盆地— Scotia 弧地域 (Ollier, 1981 による). 最も若い広がりには南サンドウィッチ諸島の後ろにあり、そして異なった方向を持つより古い拡大の場所はさらに後にある。線形の拡大がどのように曲がった弧を作り出すかは謎である。

地溝である。Williams and Eubank (1995) は以下のように書いた「中央スマトラの構造的なスタイルは拡張領域によって作りだされた・・・圧縮が支配的な力であったようには思われぬ。」ジャワは地塁と地溝の構造的な形状を持っている。ボルネオは同じく Mukah 地溝と Igan - Oya 地溝のような半地溝と地溝をもつ。

多くの島弧がそれらの後ろに背弧盆地を持っている。そしてそれは拡張的な地域である (図3)。広がっているパターンはしばしば複雑で、そして島弧の湾曲を説明できないで、謎のままになっている。しかし、島弧は拡大する背弧盆地と拡大する大洋との間に位置しているので、もし島弧が同じく拡張の地域であってもそれは驚くべきものではない。

### 昔の岩脈

記載された岩脈と岩脈群はこれまでのところ主に新生代であった。しかし岩脈は地質時代の大部分を通して侵入した。最も古いものはグリーンランドから知られていて、それは3,510Maにまで遡る (Nutman et al., 2004)。地球の上の最も大きい岩脈群はカナダ盾状地の中のマッケンジー岩脈群で、長さ3,000km、幅500km、およそ1270Maである。同じくカナダにおよそ2,500MaのMatachewan と Mistassini 岩脈群がある。Buchan and Ernst (2004) によって編集されたカナダの国全体の岩脈群図では453の岩脈群が明らかになり、その年代分布は始生代が35、古原生代が76、中生代が60、新原生代が31で、顕生代が162(古生代が97、中生代が27、新生代が38)である。ロシアの岩脈群図の提案においては、「このようなロシアと隣接した地域の地図が多分700以上の群(先カンブリア代で200以上と顕生代が500以上)を含んでいるであろうと私たちは推定する」と言われた。

Ji'an et al. (2004) は、北中国クラトンの北部の岩脈群が同位体年代測定により5つの年代グループ、すなわち1800-1700 Ma, 800-700 Ma, 230 Ma, 140-120 Ma, and 50-40 Ma., に区分できることに気がついた。岩脈

群の5つのグループの拡張的な活動は、同時期に起こった世界中での重要な地質構造イベントに対応される。Wang and Jin (2006) は北中国クラトンの一部の後期古原生代 (1,800Ma) の岩脈群を記載して、彼らはその時代の地殻の拡張を0.43%と計算した。

類似の岩脈群は全世界に見いだされ、そしてそのすべては拡張の指標と見なされるように思われる。例えば Luchia and Rapalinib (2002) はアルゼンチンのパゴニアの発展における中期ジュラ紀の火山活動の役割を記述した。「広域的で、構造的で、そしてある広がりをもつ、Sierra de Mamil Choique の中期ジュラ紀の岩脈群の岩石学的証拠は、より古い地質構造の中での拡張的な大陸内の地質構造の環境にあることを示す」。

そして、地殻の拡張は始生代から起こっていて、岩脈の侵入は地殻の成育した方法であるかもしれない。クラトン中への岩脈侵入は中生代まで優勢であったように思われるが、いくつかの段階において海底の拡大が新しい拡張メカニズムとして現われた。異なった大洋は異なった時代に作られた。海底拡大の出現はいくつかの著者によって主張された地球膨張率の増加に対応するかもしれない。

ウィキペディアによれば、地球の巨大な岩脈群の数は少なく、たった約25である。しかし彼らは続けて述べている「ほとんどの巨大な岩脈群の主要な幾何学[多分意味は最初の数]は不完全に、プレートテクトニクスがそれらを破壊すると思われるが故にあまり知られていない」。

そのため、岩脈が絶え間がない拡張(そしてそのために膨張する地球)か、あるいは圧縮の領域でのサブダクションに由来するか、を決定するのは極めて重要な要因になる。

### 「圧縮」の場で岩脈を説明する方法

プレートテクトニクスの文献では、一般に岩脈を圧縮の場に入らせることについての問題を無視するが、それに

は問題があり、直面している課題である。伝えられるところでは圧縮場の多くの火山はどのように説明されているのだろうか？ 圧縮場の火山活動を説明するには、2つの可能な方法があるように思われる：すなわち、非膨張的な噴火、あるいは、手が込んだプレートテクトニクスのシナリオ。

Holmes (1965, p. 263) は「わきに押しやられたわけではなく、そして決して接触があったはずがない壁あるいは他の境界表面」をもつ火山の進入や主要な地峡と山頂に言及して、拡張を示す一致する壁をもつ岩脈の膨張的な進入と対照させて、それらを非膨張的な進入として記載した。いくつかのマグマはパイプとして表面に到達し、そのほとんどは明らかにダイヤモンド・パイプである。それらの上昇はガスに富んだ液状のマグマによって上まで達し、そしてそれらは実際にそれらの進路に穴を開けて上がってきた。このような進入は本稿の主題ではないが、それはごく普通の岩脈によって供給された火山活動に関係している。

このような非膨張的な噴火が太平洋の火の輪あるいは島弧の火山を作り出したと訴えることは合理的ではない。そして実際にも、これらの地域全体でも岩脈の発達をよく知られている。非膨張的な仮説は太平洋の境界と島弧での多くの火山と多数の岩脈の露出の線形配列を説明するのに失敗している。

2番目の可能性は、複雑なプレートテクトニクスのシナリオを發明することである。ひとつの例として、ブリティッシュ・コロンビアで始新世の岩脈群を記載した Adams et al. (2005) によって提供される。彼らの要約では、彼らは最初に「これらの岩脈は、推測される始新世の地殻の拡張と同時に起こり、ほぼ垂直で北傾斜の方向に進入した・・・」と言ったが、後ではこのように書いた：「そのために、それほどサブダクトする海洋プレートがその地域の地殻の下のマントルくさびに交代変成作用を与えた」と推論した。

この交代変成作用をうけた岩石圏マントルの減圧→部分融解によって、合体した速い屋根を取り去ったような、広域的な、横方向の圧力、スラブの引き下げ、そして南へのスラブ窓の発達によって始められた。私は、これを本当には理解できていないことを告白する。しかし私には、それが手前勝手な陳述のように聞こえる。これは、太平洋と島弧の周りに一般に適用できる説明ではなく、このような間に合わせをするために、無数の説明が必要とされるだろう。

## 結 論

火山の世界分布は、太平洋あるいは島弧の周りでのサブダクションと圧縮の考えを支持しない。火山が圧縮の地域で噴出することができるという見方を主張することは、「火山活動が圧縮的な地殻で起きない」という星野

の見解に対する信念を捨ててはならない。

プレートテクトニクス仮説は、「活動的」大陸縁と島弧において完全にサブダクションに依存している。このようなサブダクションは巨大な圧縮 — 変成作用や「褶曲山地」の中に岩を押しつぶさせることを起こすに十分な圧縮力 — を起こすと推測される。

しかし、岩脈によって供給された火山の分布は実際にこれらの縁辺に集中し、それらが拡張の地域でなくてはならないことを示唆する。そのため、私はプレートテクトニクスが不可能であると結論する。

## 文 献

- Adams, M.G., Lentz, D.R., Cliff S.J., Shaw, C.S.J., Williams, P.F., Archibald, D.A. and Cousens, B., 2005. Eocene shoshonitic mafic dykes intruding the Monashee Complex, British Columbia: a petrogenetic relationship with the Kamloops Group volcanic sequence? *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 42, p. 11-24.
- Buchan, K.L., and Ernst, R.E., 2004. Diabase dyke swarms and related units in Canada and adjacent regions. *Geological Survey of Canada Map 2022A*. scale 1:5,000,000, accompanying 39 page report.
- Decker, R.W. and Einarsson, P., 1971. Rifting in Iceland. *Trans. Am. Geophysical Union*, 52, p. 352.
- Elston, W.E., 1978. Rifting and Volcanism in the New Mexico segment of the of the Basin and Range Province, Southwestern USA. In, Neumann, E.B. and Ramberg, I.B. (eds.) *Petrology and Geochemistry of Continental Rifts*. Reidel, Dordrecht. p. 79-86.
- Gansser, A., 1973. Facts and theories on the Andes. *Jour. Geol. Soc. Lond.*, 129, p. 93-131.
- Holmes, A., 1965. *Principles of Physical Geology*. Nelson, London. 1288p.
- Hoshino, M., 1998. *The Expanding Earth: Evidence, Causes and Effects*. Tokai University Press. 291p.
- Ji'an, S., Mingguo, Z., Lüqiao, Z. and Daming, L., 2004. Identification of Five Stages of Dike Swarms in the Shanxi- Hebei- Inner Mongolia Border Area and Its Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, v. 78, p. 320-330.
- Katz, H.R., 1971. Continental margin in Chile – is tectonic style compressional or extensional? *Bull. American Assoc. Petr. Geologists*, v. 55, p. 1753-1758.
- Luchia, M.G.L. and Rapalini, A.E., 2002. Middle Jurassic dyke swarms in the North Patagonian Massif: the Lonco Trapial Formation in the Sierra de Mamil Choique, Río Negro province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 625-641.
- Nutman, A.P., Clark R. L., Friend, C.R.L., Bennett, V.C. and McGregor, V.C., 2004. Dating of the Ameralik dyke swarms of the Nuuk district, southern West Greenland: mafic

- intrusion events starting from c. 3510 Ma. *Journal of the Geological Society*, 161, p. 421-430; DOI: 10.1144/0016-764903-043.
- Ollier, C.D., 1981. *Tectonics and Landforms*, Longman, Harlow, 324p.
- Ollier, C.D., 1988. *Volcanoes*, Blackwell, Oxford, 2nd ed. 228p.
- Srivastava, R.K., 2011. *Dyke Swarms: Keys for Geodynamic Interpretation*. Springer, London, 605p.
- Teng, L.S. and Lin, A.T., 2004. Cenozoic tectonics of the China continental margin: insights from Taiwan. In, Malpas, J., Fletcher, C.J.N., Ali, J.R. and Aitchison, J.C. (eds.) *Tectonic Evolution of China*. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 226, p. 313-332.
- Wang, C. and Jin, A., 2006. Mechanism of the Mafic Dyke Swarms Emplacement in the Eastern Block of the North China Craton. In, Hou, G. and Li, J., eds., *Precambrian Geology of the North China Craton*, *Journal of the Virtual Explorer*, Electronic Edition, ISSN 1441-8142, volume 24, paper 3, doi:10.3809/jvirtex.2006.00161
- Williams, H.H. and Eubank, R.T., 1995. Hydrocarbon habitat in the rift graben the Central Sumatra Basin, Indonesia. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 80, p. 331-371.

## 2011年3月11日 東北日本巨大地震の地質学的解析

### GEOLOGICAL ANALYSIS OF THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE IN MARCH 2011

Dong R. CHOI

Raax Australia Pty Ltd, 6 Mann Place, Higgins, ACT 2615, Australia. raax@ozemail.com.au;  
www.raax.com.au

(久保田 喜裕 [訳])

**要旨**：2011年3月11日に激しい地震とその後の津波（東北日本巨大地震 - GEJE）が、次の2つの先カンブリア紀の造構システムによって引き起こされた：1) 本震域を走る ENE-WSW 地球断裂系 (= 震源断層, その運動により津波が発生), 2) 大陸棚と大陸斜面の N-S 方向の海嶺系. 震源断層に沿う最初の破壊は北東から南西へ進行した. 前震と本震はこれら2つの方向の会合部で発生した. 引き続き余震は新期岩層（白亜系～新生界）で発生した. 本州北部とその沖合の NW-SE 方向の地塊の高まりは、北部では日高隆起帯により、また南部（中部日本）では佐渡と銚子を結ぶ背斜幅約 700km によって境される. 震源域のほとんどは基盤のリッジやその縁ないしは断層帯に沿って位置しており、広範囲に地塊運動が生じてきたことを示している. 利用できる地殻変動データは限られているが、基盤岩の起伏が変動によってさらに顕著になったことを示している; リッジは隆起し、低地は沈降し、このような地殻変動は太平洋海盆と島弧を形成した、白亜紀以来進行してきた造構過程と調和的である.

この広域にわたる恐るべき地震は、地球深部に端を発したエネルギーが太平洋北部の大陸斜面や海溝、海洋底を含む広範囲にわたる本州北部沖直下に熱的に収束した結果である. 深部の前兆現象は、2005年と2007年（太陽周期23期が終わりに近づいている期間）に、日本海/極東ロシア西部や本州西部の直下で太平洋の南方へ広がるように現れた. 次々と加わるエネルギーは、角田のいう MJ・PJ ルートを通じて、南と西から供給された. 潜り込む太平洋プレートが突然、東北日本巨大地震を引き起こしたことを示唆する証拠は何もない.

**キーワード**：2011年 東北日本巨大地震, 先カンブリア系の海嶺, 地球断裂系, 地殻ブロック変動, 震源断層

#### はじめに

2011年3月11日、壊滅的な東北巨大地震（東北沖地震）と続いて津波が起こると、世界の地震学者らやマスメディアは直ちに慌てふためいて、詳細な広域的・局所的な地質学的/構造地質学的データを全く示さず、おそらく沈み込む太平洋プレートがこの地震を引き起こした、という考えをまき散らした.

しかし、著者による入手できた地質学的・地球物理学的データの解析では、全く異なった様相が指摘できる：深

部へ及ぶ地殻のブロック運動は、再活動した基盤リッジと、新期の構造運動に関連した断裂系に規制された. この研究—地質的・構造地質的に規制された地震活動—のあらたな視点は、巨大地震のより深い理解へ貢献できる有効な洞察力を提供することにある. ここに著者はこの途方もなく悲劇的な地震に関する地質学者からの視点を表すものである.

#### 東北日本とその沖合地域の広域的地質と地質構造

北上山地や阿武隈山地で代表される日本の北部本州は

(図1)は、先カンブリア界と古生界が墨重する典型的なフィールドである。陸域と海域の両方とも、多くの地質家や地球物理家によって、とくに第二次世界大戦後、精力的に研究されてきた。その研究は歴史的な大著“日本列島地質構造発達史”(湊ほか, 1965)に記されており、さらに“北日本のパリスカン変動-阿部族造山運動”(湊ほか, 1979)で詳細に報告された。北日本の先カンブリア界の存在が確たるものとして確立し、北日本の古生界の層序・構造ならびに地史を解明した、これらの研究と他の多くの研究に敬意を表する。

1960年代後半と70年代前半には、北海道大学チームのメンバーのひとりとして、著者は、南部北上山地において、フィールドマッピングに重点をおいた層序、構造、古生物、堆積、古地理の研究を含む上部古生界の包括的な調査研究に従事した(Choi, 1973・1976)。古生界~ジュラ系層序に挟まれる礫岩の研究は、堆積盆地の両側一現在の太平洋と中部日本一にかつての古陸が存在したとの結論を導いた(図2; Choi, 1972, 1984・1987; Choi ほか, 1992)。同様の給源域がIchikawa (1951), Kano (1958), Kamata (1979)によっても示唆されてきた。これらの礫岩は、他の多くの岩片(花崗閃緑岩、火山岩、変成岩、堆積岩など)にまじって、原生代の正珪岩の岩片(Shibata, 1979)を含んでおり、古生代後期~ジュラ紀には、古生代の岩石とともに原生代の岩石が今日の北日本地域の後背地として露出していたことを示している。東部の給源域は今日の高重力域に一致しているが(図2)、この高重力は先カンブリア紀~古生代岩石に由来する。

これらのあらたな知見は、ロシアの科学者、Vasiliyev (1986) や Vasiliyev・Evlanov (1982) が日本海溝付近の太平洋深海底で行った海山周辺のドレッジ調査によって、より明白になった; 彼らは大陸性岩石の産出を報告した一それらは花崗岩や変成岩で、新期の玄武岩や堆積岩だけでなく、いくつかは先カンブリア紀を示した。

広域的な地球物理学的データに関して、Okada (1978) は北部日本の爆破地震調査を行い、図3に示される東西方向の地殻-上部マントルの断面を作成した。彼はモホ面深度が本州弧下で25-28km、太平洋と日本海では13-15kmへ浅くなることを示した。一方、地質調査所(2004)は日本と周辺の重力異常図を発行した(図1)。彼らは、北部日本の沖合に、顕著なN-S方向の基盤隆起を描いた。そのリッジは、東北日本巨大地震の本震付近を顕著なENE-WSW方向の線に沿って、南側のブロックが大きく落ち込むように、分断されている。前述のように、これらの重力性リッジは先カンブリア紀と古生代の岩石からなり、古生代~中生代の大半は陸化していた。そして、本州弧が今日ある場所の西側に発達した古生代~ジュラ紀の堆積盆地に碎屑物を供給した。

北部本州の沖合地域は、太平洋の沈降に関連して、白亜紀後期~古第三紀/中新世に沈降を開始した。この事実は多くの海底の研究によって立証されている; 地質調査所の本州最北端沖の鉱物探査研究によると、上部白亜系~古第三系の堆積物が基盤の高まりへ向かってオンラップしたり、今日の太平洋の深海や大陸斜面内側のトラフに前進平衡作用がみられる。Yoshida et al. (1981) によ

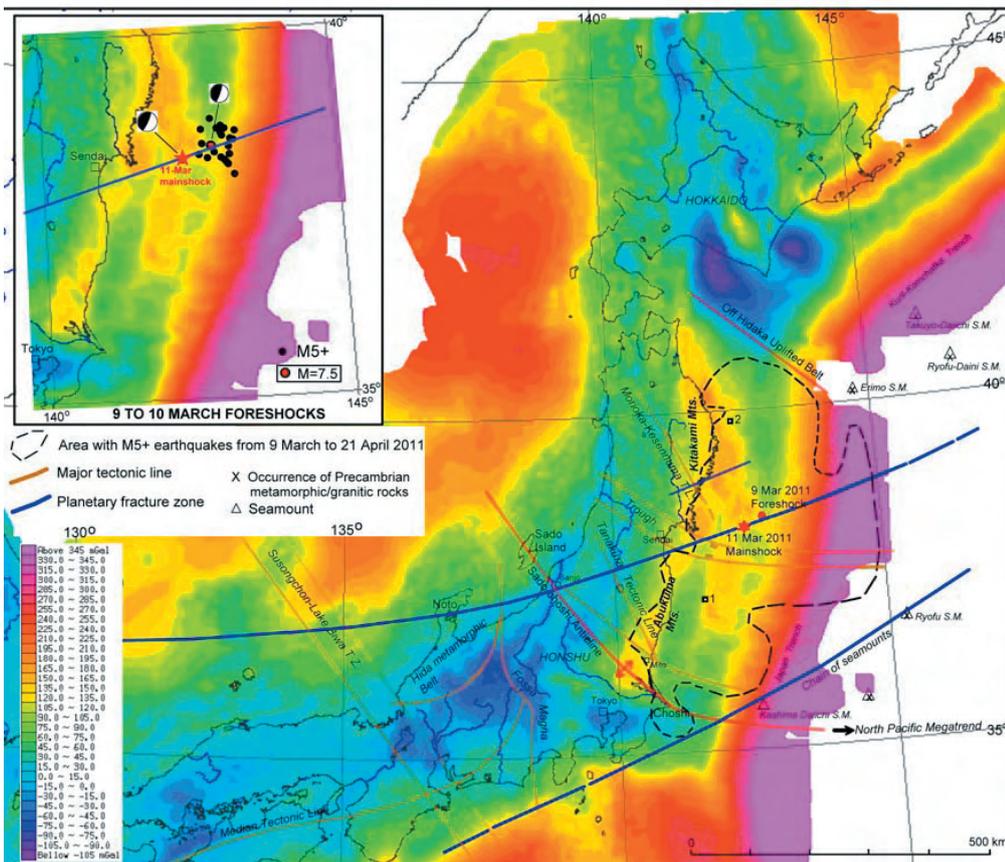


図1. 日本周辺の重力異常図(地質調査所, 2004)。主要な構造要素、東北日本巨大地震の前震、本震、余震(M5+)分布が重ねられている(震央はNEICによる)。挿入図: Ide ほか(2011)によるモーメント・テンソル解とNEICによる前震の震央。2011年3月9日~4月21日のM5+地震の領域は黒破線で囲まれている。その範囲は北部本州の沖合を占める全般的な高重力域に一致する。壊滅的なM9.0地震は基盤リッジの会合部(古生界/先カンブリア界)、およびENE-WSWの地球規模断裂帯で発生している。2010年4月18日の蒸気雲が前兆として現れた地震: 2010年1月1-13日。M5.9, H=27km; 2010年7月2-4日。M=6.3, H=27km。注: 1) 多くの先カンブリア紀の変成岩や花崗岩類が北西太平洋の海山や海嶺からドレッジされている、2) 佐渡-銚子背斜は北太平洋メガトレンドへ連続している。

る日本列島沖の造構マップには、上部白亜系（後ネオコミアン, post-Neocomian）の浅海堆積物の分布域が北部本州沖の大陸斜面に記されている。さらに, Shiba (1993) による第一鹿島海山を形成する中部白亜系（アルビアン）の浅海性炭酸塩堆の報告は、このことをさらに支持している。それは現在、約 3600-4000m の深度に沈水している。本州最北端沖の大陸斜面で掘削された DSDP データのひとつ（サイト 439）は、完全な新生界～古第三系層序を貫いた。それらは後期白亜紀の急斜した珪化粘土岩を著しい不整合で覆っていて、この白亜系は漸新統および下部中新統へ碎屑物や岩片の供給源になっていた

(von Huene et al., 1980)。この特別の海域は、中新世初期まで陸域として残った。

上記を要約すると、層序や古地理のデータに支持された陸域の地質や沖合の重力、地殻/マントル断面、海底ドレッジの有力なデータは、沖合の N-S 方向の重力の高まりを示しているが (図 1)、それは Okada のいう 6.6 ~ 7.0/km 層 (図 3) に対応している；それらは先カンブリア紀の初生構造である。さらに、次のことに留意すべきである：1) 先カンブリア紀（下部地殻）の地表面の起伏はモホ面に現れており、重力異常分布全体と良く一致し

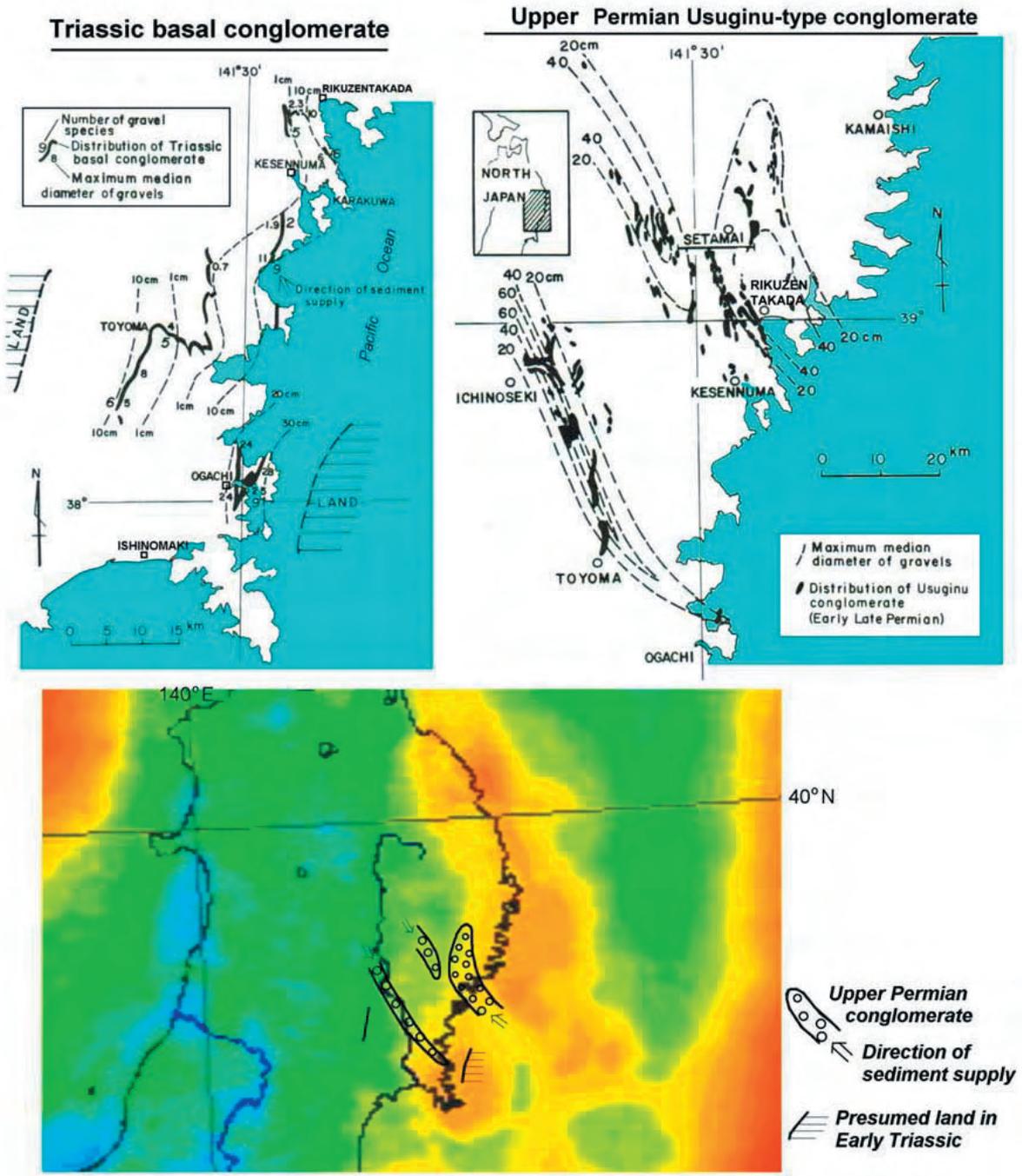


図2. 上図：北上山地における上部二畳系の薄衣礫岩と三畳系の基底礫岩の分布—碎屑物の粒径を併記 (Choi, 1984)。下図：上部二畳系薄衣礫岩の分布とその供給方向、および三畳系基底礫岩の由来。両者は重力異常図 (Geol. Survey of Japan, 2004) に重ねられている。東方の給源は東の高重力域（先カンブリア系リッジ）に一致しているが、西方の給源は今日では第三系堆積物の下に深く埋積され、重力図では容易に識別できない。

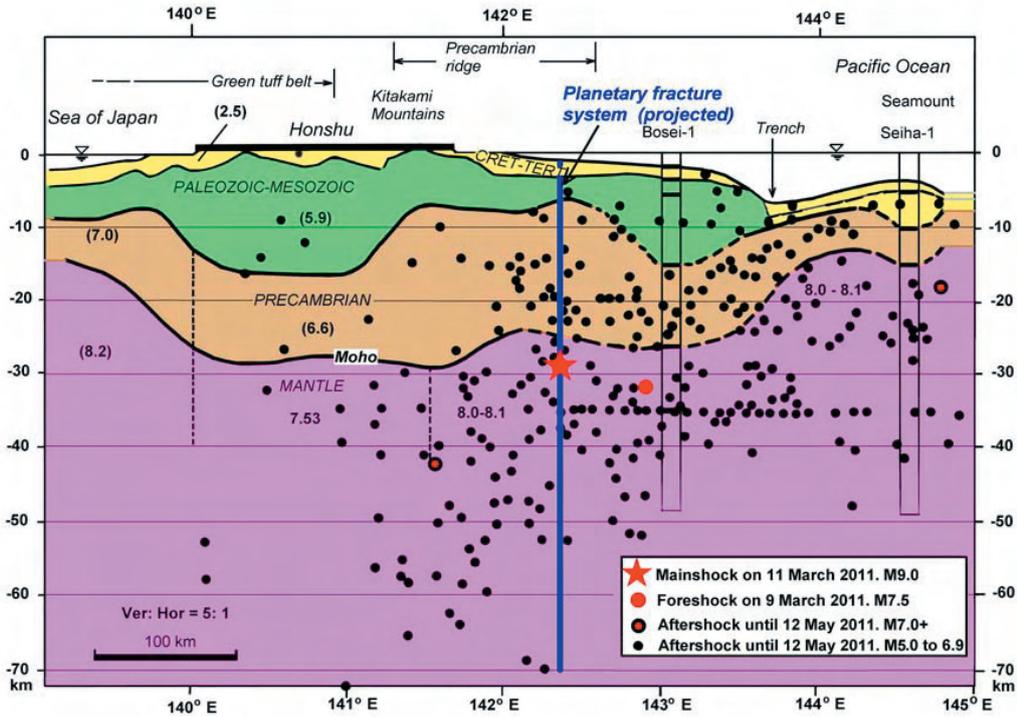


図3. 本州北部, 北上山地を横断する地殻断面および東北日本巨大地震における2011年3月9-12日の震央位置の投影. 経度 139° Eおよび145° E, and 緯度 37° Nおよび39° Nの四角の輪郭で示されたNEIC登録のマグニチュード5.0以上の地震. Okada (1978)によるP波速度断面. 著者によって, 北上・阿武隈山地の地質 (Minato et al., 1979)と比較して示された地質年代. さらに海底地質データ (Vasiliyev, 1986; Vasiliyev and Evlanov, 1982) および大陸斜面を横断する地震波断面の解釈 (Choi et al., 1992)も示した.

ている. 2) 比較的低速なマントル/下部地殻は, 中部本州の下で発達した一活動的な新生代造構帯ーグリーンタフ地域で表される (Fujita, 1972). 重力と下部地殻面が良く対応することは, ジャワ島南端沖でもみられた (Choi, 2006).

基盤構造は北部日本に引き続いて起こった構造発達史に大きな影響を与えてきた. 東日本巨大地震は, 北部本州と北西太平洋の基盤構造ならびに新生代の全造構史を考慮することなしに, 理解することができない.

地震と地質構造との関係

1. 本震の震央位置

下記のように, さまざまな地震学の方法で決定された本震の震央位置には大きな不一致がある: 日本の2つの機関 (東大と気象庁) は, 本震の震央位置を海溝寄りに求めたが, 西洋の機関 (EMSCとNEIC) は陸寄りに求めた. それらは約50km離れていた (図5). 続いてなされた多くの研究は, ハーバード大学 (Kiser, 2011), Ide et

表1. さまざまな地震研究機関が特定した東北日本巨大地震の震央の比較.

Organization	Longitude	Latitude	Depth (km)	M
Univ. of Tokyo	143.15 E	38.03 N	10	9
JMA	142.9 E	38.1 N	24	9
EMSC	142.50 E	38.30 N	21.9	9
NEIC	142.373 E	38.297 N	29	9

al. (2011), 海上保安庁 (Sato et al., 2011) などのように, 日本の震央位置を採用した. 3月9-10日に起きた前震も大きな不一致を示した. NEICの震央位置は, 図1・4・5に見られるように, 地質構造やエネルギー放出パターンに完全に一致しているので, 私はこの研究にNEIC公文書データを使用するーこのことはデータの一貫性を統一することでもある. JMA (海上保安庁) の震央位置は, この場所の近くで, 構造的擾乱のない所である. 大規模な地殻変動が起こっていないこのような地域で, 大規模な構造的擾乱が発生することを想定するのは難しい.

2. ENE-WSWの地球断裂系ー震源断層

地質調査所の重力異常図を見た後, 私はこの断裂帯に注目した (図2). すべての地質的・構造地質的データは, 東北日本巨大地震の最初の破壊がこの地球断裂系の変動であることを示している. 前震 (本震から約45km北東に位置) は主要震動の1~2日前に発生し, これもこの断裂系に沿って起こった (図1の挿入図参照). 本震は完全にこの線上に落とされる. これが東北日本巨大地震の震源断層であることは疑う余地がない. Ideほか (2011)による前震と本震のモーメント・テンソル解は, 南東側のブロックが下がった高角NE-SW断層の活動を示唆している. これは, Ideほか (2011)の低角スラストという解釈よりも, 地質構造に調和的・合理的な解釈である.

この方向の西方延長は, Shevaldin (1978)によって, 東西性の伏在する先新生代の深部断裂系の1つとして日本海南海端に描かれた. それは能登半島・新潟南部・仙台へ経由し, その方向はしだいにENE-WSWに変化している. これらの地域はグリーンタフ地域に属し, そこには新生代第三紀の堆積岩や火山岩が厚く発達している (Fujita, 1972); 厚い堆積岩の下には深部断裂系が隠され

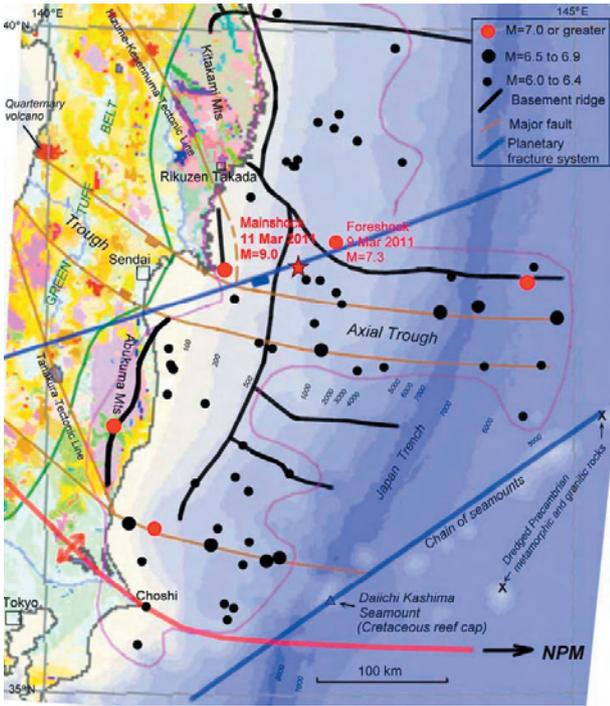


図4. 地質図(地質調査所, 2007)に重ねられた主要な構造要素および東北日本巨大地震群の震央(2011年3月9-21日, M6.0以上). M6.0+地震の分布範囲を, 色線で囲った. 図1の重力データから描いた基盤リッジ. すべての大地震が海溝を越えて太平洋へ広がる基盤リッジ上やその縁辺部, 主要な断層帯, E-W軸状トラフに位置していることに注意. Shiba(1993)による第一鹿島海山のデータ, Vasiliyev(1986)およびVasiliyev and Evlanov (1982)によるドレッジ岩石, Smoot and Choi (2003)によるNPM = North Pacific Megatrend (北太平洋メガトレンド)にもとづく. 水深はm.

ている. しかも, この断裂は重力図の高異常の南端として追跡可能である. その断裂系はさらに東日本巨大地震の本震と余震域を通過する; そこでは, N-S方向の基盤リッジが著しく分断されている(図1). それは, さらに北太平洋の深海底へ延び, Googleマップではおびただしい数の並走する低起伏断裂群として表されている.

中部本州の南には, もうひとつのきわめて明瞭な平行断裂系が見られる—銚子半島の東方, 第一鹿島海山や呂布海山を含む一連の海山列を貫く断裂(図1). 後者には先カンブリア紀花崗岩類・変成岩類が分布すること(Vasiliyev, 1986)が注目される. この断裂帯はGoogleマップに顕著で, 海底地形に明瞭に現れている. それは本州南部の西方へ延びていて, 本州の中部~南西部の地質発達史に影響されていることは明らかである.

要約すると, 震源域のENE-WSW断裂系は, 地球史の初期に形成された初生的な断裂系である. それは, 過去の地質時代に繰り返し活動し, 2011年3月には, 東北日本巨大地震の震源断層として最新期の活動を行った.

### 3. 新期構造方向と地震活動

本研究域における新期構造方向はNW-SE方向が典型であるが, 太平洋地区ではESE-WNW/E-W方向へ変化する. 上述のように, 新期構造方向は白亜紀後期~新生代に太平

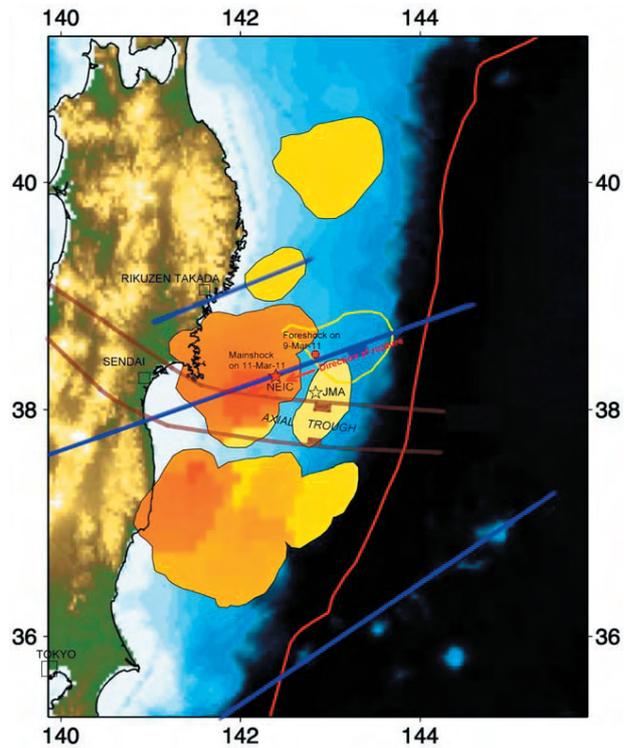


図5. Kiser (2011)による最初の25分間で放出された個々の地点における放出エネルギー相対量(濃橙色はより高いエネルギー放出を示す). 主要な構造方向を投影. 前震(2011.3.9)はNEICによるとM7.3およびH=32 km. 破壊方向は断裂帯に沿って南西へ移動. 青線—深部断層帯, 茶—中生代-新生代トラフ; 両者とも明らかにエネルギー放出パターンに影響した. Kiserが最初に示した本震位置は, JMAによって確定された座標に落とし直された(表1). NEICとJMAでは決定された本震の震源がかなり異なること(約50km離れている)に注意. NEICの震央は地質構造とエネルギー放出パターンに調和的である.

洋海盆の沈降に伴って形成された. ブロック運動に規制された余震活動は, 地殻ブロックの広い高まりに位置しているが, それは北部は日高沖隆起帯(Yoshidaほか, 1981)に, また南部は中部日本の佐渡と銚子を結ぶ背斜構造(図1)—幅約700km—で境されている. ついでながら後者に関して, Suzukiほか(2009)は, 佐渡-銚子背斜にほぼ一致する線を境に, 東西日本列島では構造方向が顕著に異なることを示した; それは太平洋底へ連続し, 北部太平洋メガトレンド(Smoot and Choi, 2003)の西の腕部を形成している.

軸状トラフ(axial trough: 訳者注, 狭長な軸状のトラフか)を伴う背斜構造も顕著であるが, とくに, 日本海溝を越えて太平洋深海底にまで発達した; 軸状トラフは仙台の西を走っている. このトラフは陸域地質図(図4)や他の公表されている地質図によって確認されており, 両側を古生代の山地, 北側は北上山地, 南側は阿武隈山地に挟まれた全体的な地形的低所として表されている. このトラフの境界断層には陸側に第四紀火山を伴っており, トラフの形成が新期であることを証明している. このトラフは明らかに, Kiser(2011; 図5)による地震エネルギーの解放パターンに影響されている.

### 4. 地震と地質構造

図4は研究地域の強地震の位置 (2011年3月9日~4月21日, M6.0以上) と地質構造を比較したものである。この図は地震が基盤リッジ上およびその縁辺部や断層帯に沿って分布していることを示している。とくに興味深いのは、仙台東方へ延びている軸状トラフの役割である: 地震活動は水深2000m以浅の大陸斜面浅部のほぼ全域に及んでいるが、あるグループは日本海溝を越えて太平洋の深海で発生している。これは、軸状トラフとE-W方向の基盤リッジの分岐の両者が拮抗している地域にあたる。ここでM6.5以上の強地震が背斜の北翼に位置していることに留意すべきである。これらの事実は東北日本巨大地震のプレート潜り込みモデルを完全に否定する。

5. エネルギー解放パターンと地震時の地殻変動

Kiser (2011) は、USArray Transportable Array を使って、本震の後、一連のエネルギーが解放される様子を描いた。次の図 (図5) は、本震後、最初の25分間のエネルギー解放の相対量を示している。ここに、我々はエネルギー解放パターンに対する構造規制をみることができ; 最大の解放は本震域の南西で起こった-2つの断層層が会う背斜の北翼。震源断層沿いの破壊は、北東 (3月9-10日の前震) から南西 (本震と25分以内に直ちに発生した余震) に発生した。もう1つ別のトラフの強靱な一画がある。両者の高まりは重力の高い地域に一致している (図1)。一連のエネルギー解放はトラフの両側や、さらに北部と南部で起きているが、トラフは東日本巨大地震が続いている間はほぼ静穏のままであった。引き続きエネルギーの解放はトラフの両側で起こったが、そのトラフは東北日本巨大地震が続いた間は比較的穏やかであった (図1)。

地震時の興味深い地殻変動の研究が、Sato et al. (2011) によって、北部日本沖5ヶ所の現位置海底測地観測システムを利用して行われた (図6)。彼らは、軸状トラフの北方で、5-24mにおよぶESE方向への水平な地震時地殻変動と-0.8+3mの垂直変動を見いだした。低重力異常域に位置した観測地点 (MYGW) のひとつは沈降したが、高重力域に位置した他のすべての地点は隆起した結果、東北日本巨大地震によって基盤構造 / 起伏が強調された (図6)。仙台東方の牡鹿半島にある陸の観測地点では、同様の方向を示した-ESE方向へ5m, 下方へ約1m (国土地理院, 2011; Sato et al., 2011が引用)。概して、最大の変動は、軸状トラフの北方、大陸斜面外側の深度2000mで生じたが、沿岸域と海岸付近は沈降した (国土地理院, 2011)。

しかし、これらの数値を文字通りに解釈し適応する際には注意しなければならない。それは大地の変動は、膨張と圧縮を交互に繰り返す時期があるように一振幅しているからである (Iikawa and Kobayashi, 2004)。変動量というものは (重要なのは確かであるが)、それなら何でも次のことを思い起こすべきである; 変動は地質構造に直接関係していること-南より北のトラフの変動が大きいこと-研究地域にプレートサブダクションモデルを適

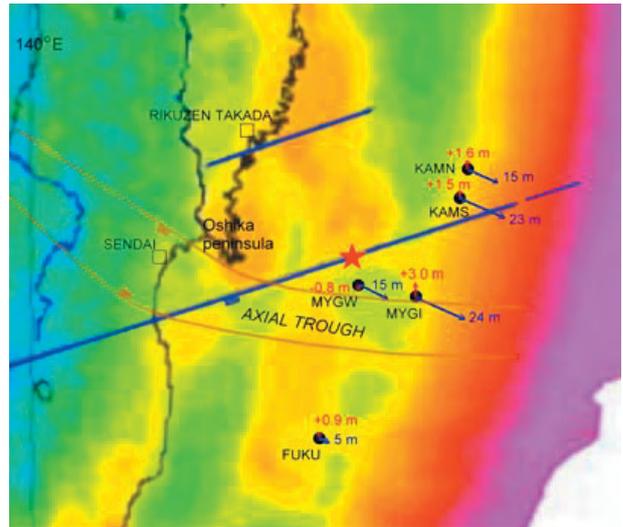


図6. 直接測定された東北日本巨大地震の間の海底変動 (Sato et al., 2011)。赤星一本震 (NEIC), 青矢印-水平変位, 赤矢印-垂直変位。より大きな水平変位が軸状トラフの北部地域で見られる。沈降したMYGW地点は低重力域に位置しているが、隆起した他の地点はすべて高重力域にある。

応することは不可能であること。このことは、他でも述べたように、他の地質学的データによって支持される。

討 論

上述の地質 / 構造地質の情報と地震データは、我々に巨大地震と地質との深い内的関係を示唆してくれ、さらに巨大地震のメカニズムへの理解を提供してくれる。

1. 東北日本巨大地震の原因に対するプレートテクトニクスの非適応性および地震の発生における構造規制

本研究は地震がどのような地質構造に規制されているかを明らかにした:

- 1) 強い地震は基盤リッジ縁辺部と断層帯に沿って発生した (図4)。
- 2) 東北日本巨大地震の影響が及んだ地域は北部本州沖の広い範囲を占めた。そこは広く基盤が高いブロックに一致している (図1・3)。
- 3) 震源断層沿いの最初の破壊は北東から南西へ及んだ (図5)。
- 4) ブロック運動は基盤リッジの上昇と盆地の沈降に現れた。
- 5) 初期のエネルギー解放は主要な断層系と背斜構造に影響された (図5)。
- 6) 軸状トラフに伴う背斜構造は海溝を越えて深海にまで拮抗しているが、そこは強い地震活動が集中している (図4)。

以上の事実は、東北日本巨大地震の原因として、北部本州沖の沿岸域直下の下部地殻と上部マントルにおける広域的なエネルギー集中を示唆している。

2. 地震発生のメカニズム

もうひとつの興味深い事実は、地殻変動の異常な拡がりである—本州中部から最北端まで—延長約700km。その領域は概して、比較的浅い先カンブリア系基盤からなる地殻ブロックの高まりを形成している。Blow et al. (2007) は、2006-2007年の千島海溝地震で、マントルの高まりに閉じ込められた地震エネルギーを見いだしたが、それは巨大地震が次の4つの要因に関連して差し迫っていることを導き出した: 1) 大断層帯, 2) 構造的高まり, 3) 活発な上昇と沈降の造構形式, 4) 深部エネルギーの上昇運動。以上の結論は、2004年スマトラ Boxing Day 地震 (Blot and Choi, 2004), 2006年7月17日 Great Southern Java 地震 (Blot and Choi, 2006), および現在の東北日本巨大地震はじめ、他の多くの地震にも適用できる。これらの事実は加熱された (そして、恐らくは電磁的負荷もつ) ガスと液体が地震発生メカニズムに関係したことを暗示している。トラップ構造は幾分、炭化水素のそれと類似しているようである—それらの間の最も大きな相違は、前者は上部マントル~下部地殻での蓄積であるのに対し、後者は上部地殻の高まりに蓄積される (しかも大規模な活断層を伴わないで)。エネルギー移動と蓄積の過程は、Tsunoda (2010 & 2011) によって、議論されている。

### 3. 深部エネルギー連関, 熱エネルギー流, 太陽周期, 惑星効果, 前兆現象

**深部エネルギー連関:** この異常に強い規模の地震は、日本海西部 / ロシア極東沿岸ならびに Susongchon- 琵琶湖造構帯に沿う中部日本~その沖合に由来する深部地球エネルギーの収束の結果であると考えられる。これらの先駆地震は2005~2007年に出現し (M5.5~6.8; 深度350~640km; 図7), Blot (1976) のET式にしたがうと、2010年後半~2011年前半に本州北部沖に伝播された。角田 (NCGT 本号, P.69-77 および2001) は、このエネルギーの流れは南方と西方を経て、本州北部沖の地下で集結したと考察した。氏のMJおよびPJルートは、追加的熱エネルギーを供給したに違いない。

**太陽周期:** 上述のように、深部前兆は2005~2007年—太陽周期23期が終わりに近づいた時期—に現れた。これらの時期は、1970年に始まった44年周期の底にもほぼ対応している—さらに大きい周期—100年, 200年, 400年周期だけでなく。近年の異常に強大な自然災害、地震、火山噴火、異常気象などは、主要な太陽周期の底の期間 (Casey, 2010; Choi and Maslov, 2011) に由来するもので、最初は地球コアのエネルギーの過度な放出に端を発していて、複合的現象の結果と考えられる。

**惑星効果:** 深く考察するに足る他の要因は惑星効果である—とくに太陽と月で、それは東北日本巨大地震の引き金をつくったか、あるいは地震の規模を一様に増大させるように作用した: 太陽が震災数日前に強大なフレアを放出したこと (コロナの多量噴出), および月がその時に最も地球に接近していたことはよく知られている。

(Kolvankar et al., 2010のような) 最近の研究では、地震のきっかけとして、月の果たす役割が明らかにされた。地球の動力学的過程に影響を与えるこれらの作用と実際のメカニズムを十分に理解するには、さらに詳細な研究が必要である。

**前兆現象と予知:** 他の多くの破壊的な地震と同様に、東北日本巨大地震では、2月23日—本震に先立つ16日前に、震央付近で生じた独特の蒸気雲や地噴 (geoeruption) が先行していた (Shou, 2011)。さらに、東北日本巨大地震の約8ヶ月前には、本州北部沖直下のマントル内部に発生した熱活動の兆候があった: Shouは彼のウェブサイト ([http://www.earthquakesignals.com/zhonghao296/images\\_2008\\_1.htm](http://www.earthquakesignals.com/zhonghao296/images_2008_1.htm)) で、2010年4月18日に2つの地域で蒸気雲が発生したことを報告している (図1)。実際、比較的強い地震が2ヶ月後に両地域で発生した。これらの事実は、マントル~下部地殻における熱の集積過程を考える上で重要である。

もうひとつの主要な兆候は、2011年3月7日—本震の4日前に、非常に強い超長周期の重力波異常が突然出現した—地震予知地球ネットワークの地震観測点のあるトルコ、アゼルバイジャン、パキスタン、インドネシアにおいて (GNFE, 2011)。この兆候に基づいて、彼らは2011年3月9日、東北日本巨大地震の本震2日前に、彼らの予知をクライアントに通知し、ウェブサイトアップロードした。彼らの予知は、時刻、マグニチュード、位置に関して、まさにピンポイントの正確さであった ([http://www.seismonet.org/page.html?id\\_node=130&id\\_file=129](http://www.seismonet.org/page.html?id_node=130&id_file=129))。Straserは、NCGT 本号 (p.77-87) で、東北日本巨大地震前の重力と地磁気場における前兆的变化を報告している。これらの事実は、大規模地震は今日の確たる科学的基盤にもとづいて予知可能なことを示す。

### 結 論

1. 東北日本巨大地震は先カンブリア界基盤 (あるいは下部地殻) のブロック運動として発生した。震源断層はENE-WSWの地球断裂系である。前震—本震ともこの断裂系とN-Sに延びる先カンブリア界のリッジ構造の交差部に発生した。最初の破壊は北東から南西へ震源断層に沿って進行した。
2. 余震は、本州北部の沖合を占める幅700kmのNW-SEに拡がった地殻ブロックの高まりで生じた。その場所には本州北部中央の仙台を通る中央軸状トラフがあるが、それは海溝を横切り、東方の太平洋の深海底へ拡がっている。とりわけ、その北縁では強震動が発生した。そこは、後期白亜紀から形成されてきた新期の活構造地帯である。
3. 強震動のほとんどは、基盤リッジの縁辺や断層帯で発生した。このことは深部に達するブロック運動が起こったことを示している。
4. 今回の地震は、北部日本の東岸沖合直下に広く構造的高まりを形成している上部マントル~下部地殻におけ

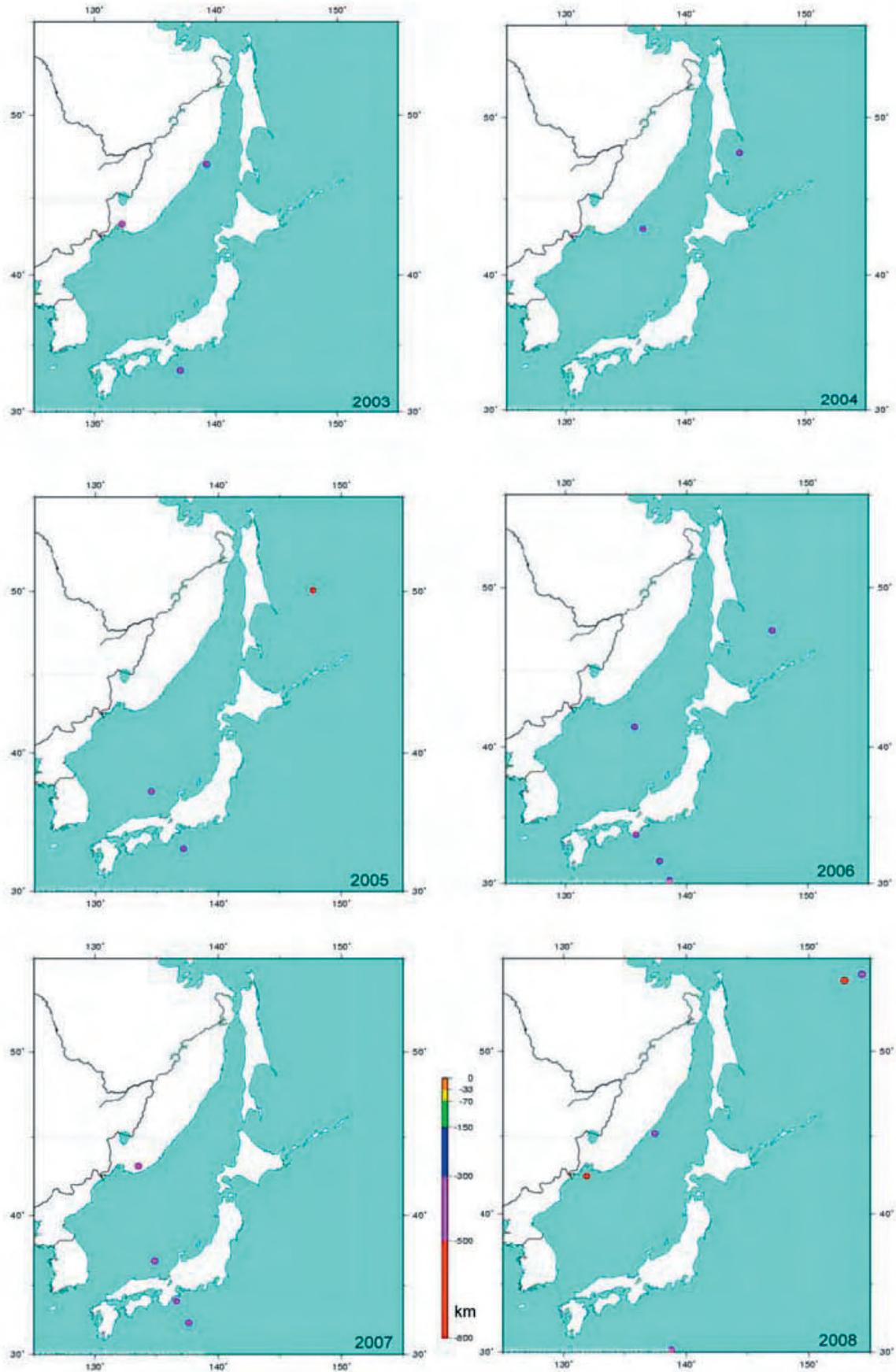


図7. 2003～2008年の日本周辺におけるやや強い～強い (M5.5+) 深発地震 (300km+)。地図はNEJCウェブサイトより作成。2005～2007年の強い深発地震のいくつかは、西日本の深部に位置する断裂帯 (Susongchon-Lake Biwa Tectonic Zone, Choi, 2003; 図1) と極東ロシア / 日本海西部で発生している。これらの地震によって放出されたエネルギーは、Blot (1976) のエネルギー遷移方程式によれば、2010年後半～2011年初頭に北部本州の東岸沖合に到達した。

る広域的な熱集積によって説明することができる。次の3つの熱供給源が存在する：日本海西部 / 極東ロシアにおける2005～2007年の深発地震にみられる深部供給源；西南日本 (Susongchon-琵琶湖深部構造帯)；そして比較的浅いマントル起源-伊豆-ボニン弧列および西日本からくるエネルギー (角田のいうMJ・PJルート)。

5. 上で吟味した地質的・地球物理的データ (マントルと下部地殻の高まりにおける広域的熱集積, 震源断層帯としての地球断裂系, 先カンブリア界リッジ, 海溝を横切るWNW-ESEの軸状トラフ中央の地殻ブロック運動) は, 東北日本巨大地震へプレートサブダクションモデルを適応することに否定的である。

6. 東北日本巨大地震は, 蒸気雲や本震に先立つ重力異常変化のような顕著な前兆現象を伴った。これらの事実は将来の大地震の予知への根拠となる。

**謝辞：**建設的な意見および技術的支援と情報をいただいた角田史雄氏, 鈴木尉元氏に感謝する。次の方々には謝意を表す；海上保安庁のMariko Sato氏からは地震時の地盤変位データを提供していただいた。ハーバード大学のEric Kiser氏には図の引用許可をいただいた。東北大学の長谷川明氏には引用文献をいただいた。読売新聞 (記者) のTakashi Ito氏には記事の引用許可をいただいた。David Pratt氏からは文章の支援をいただいた。この他, 本論は日本の多くの友人による援助で可能になった。とくに, Heonrok Oh氏 (ドキュメンタリーフィルム作成者) からは公共メディアに報じられた地震や津波, 火山活動に関する貴重な情報を提供いただいた。

## 文 献

- Blot, C., 1976. Volcanisme et sismicité dans les arcs insulaires. Prévision de ces phénomènes. Géophysique, v. 13, Orstom, Paris, 206p.
- Blot, C. and Choi, D.R., 2004. Recent devastating earthquakes in Japan and Indonesia viewed from the seismic energy transmigration concept. NCGT Newsletter, no. 33, p. 3-12.
- Blot, C. and Choi, D.R., 2006. The great southern Java earthquake on July 17, 2006 and its tectonic perspective. NCGT Newsletter, no. 40, p. 19-26.
- 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. NCGT Newsletter, no. 43, p. 22-33.
- Casey, J.L., 2010. Correlation of solar activity minima and large magnitude geophysical events. Space and Science Research Center, Research Report 1-2010 (Preliminary), p. 1-5.
- Choi, D.R., 1972. Discovery of Uralian fusulinids from the Upper Permian conglomerates in the southern Kitakami Mountains, Japan. Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ., ser. IV, v. 15, p. 479-492.
- Choi, D.R., 1973. Permian fusulinids from the Setamai-Yahagi district, southern Kitakami Mountains, N.E. Japan. Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ., ser. IV, v. 16, p. 1-132.
- Choi, D.R., 1976. Distribution of the Upper Permian fusulinids with relation to limestone lithofacies in the southern Kitakami Mountains, N.E. Japan. Jour. Geol. Soc. Japan, v. 82, p. 113-125.
- Choi, D.R., 1984. Late Permian-Early Triassic paleogeography of northern Japan: Did Pacific microplates accrete to Japan? Geology, v. 12, p. 728-731.
- Choi, D.R., 1987. Continental crust under the northwestern Pacific. Jour. Petrol. Geology, v. 10, p. 425-440.
- Choi, D.R., 2005. Deep earthquakes and deep-seated tectonic zones: a new interpretation of the Wadati-Benioff Zone. Boll. Soc. Geol. It., Volume Speciale no. 5, p. 79-118.
- Choi, D.R., 2006. Where is the subduction under the Indonesian arc? NCGT Newsletter, no. 56, p. 2-11.
- Choi, D.R. and Maslov, L., 2010. Earthquakes and solar activity cycles. NCGT Newsletter, no. 57, p. 85-97.
- Choi, D.R., Vasiliev, B.I. and Bhat, M.I., 1992. Paleoland, crustal structure, and composition under the northwestern Pacific Ocean. In: Chatterjee, S. and Hotton, N. III., eds., New Concepts in Global Tectonics. Texas Tech Univ. Press, Lubbock, p. 179-191.
- EMSC, 2011. Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku, Japan Earthquake, on March 11th, 2011 at 5:46 UTC. <http://www.emsc-csem.org/Page/index.php?id=196>
- Fujita, Y., 1972. On the law of Green-tuff orogenic movement and geosynclines. Pacific Geology, v. 5, p. 89-116.
- Geological Survey of Japan, AIST, 2004. Gravity CD-ROM of Japan, Ver. 2. Geological Survey of Japan, AIST, 2005. Fuel resource geology map "Off Sanriku". Digital Geoscience Map FR-1.
- Geological Survey of Japan, AIST, 2007. Geological Maps of Japan. 1:200,000 (Images). Ver. 3.0
- Geological Survey of Japan, AIST, 2009. Seamless geological map of Japan at a scale of 1:200,000. DVD edition.
- Geospatial Information Authority of Japan (GSI), 2011. Crustal deformation and fault model obtained from GEONET data analysis. 21 April, 2011. <http://www.gsi.go.jp/cais/topic11042-index-e.html>.
- Global Network for Forecasting Earthquakes, 2011. Forecast provided by GNFE for strong Japan Earthquake M8.9 of 11.03.2011 has been confirmed. [www.seismonet.org](http://www.seismonet.org).
- Ichikawa, K., 1951. Note on the basal conglomerate of Triassic Inai Group in the Okatzu district, Miyagi Prefecture, NE Japan. Kobutsu-to-Chishitsu (Minerals and Geology), v. 4, p. 17-19 (in Japanese).
- Ide, S., Baltay, A. and Beroza, G.C., 2011. Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake. Sciencexpress, 19 May 2011. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org). [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1207020/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1207020/DC1).
- Iikawa, K. and Kobayashi, K., 2004. Recent pulsating crustal movement in the Japanese islands and its relation to seismicity. NCGT Newsletter, no. 30, p. 21.

- Kamata, K., 1979. The Triassic Inai Group in the Kanokura area, southern Kitakami Mountains, Japan (part 1). *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 85, p. 737-751.
- Kano, H., 1958. On a basal conglomerates of the Inai Formation (Lower Triassic) in the Toyoma district, southern Kitakami Mountainland. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 64, p. 464-473.
- Kiser, E., 2011. Preliminary rupture modelling of the March 11, 2011 Tohoku-Chiho Taiheiyo-Oki Earthquake and sequence of events using the USArray Transportable Array. [http://seismology.harvard.edu/research\\_japan.html](http://seismology.harvard.edu/research_japan.html)
- Kolvankar, V.G., More, S. and Thakur, N., 2010. Earth tides and earthquakes. *NCGT Newsletter*, no. 57, p. 54-84.
- Minato, M., Gorai, M. and Hunahashi, M. (eds.), 1965. The geological development of the Japanese Islands. Tsukiji Shokan, Co., Ltd., Tokyo, 442p.
- Minato, M., Hunahashi, M., Watanabe, J. and Kato, M. (eds.), 1979. Variscan geohistory of northern Japan. Tokai Univ. Press, 427p.
- Okada, H., 1978. Anomalous structure in the uppermost mantle around Northeast Japan as derived from explosion seismic observation. *Mongr. Assoc. Geol. Collab. Japan*, v. 21, p. 181-191.
- Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M. Mochizuki, M. and Asada, A., 2011. Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Sciencexpress*. 19 May, 2011. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org). [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1207401/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1207401/DC1).
- Shevaldin, Yu.V., 1978. Magnetic anomaly fields and some characteristics of deep structures under the Japan Sea. In, "Structure and geodynamics of lithosphere in Northwest Pacific Ocean based on geophysical data" (Proceedings of Third Soviet-Japan Symposium. Yuzhuno Sakhalinsk, 1976), p. 65-70.
- Shiba, M., 1993. Middle Cretaceous carbonate bank on the Daiichi-Kashima Seamount at the junction of the Japan and Izu-Bonin Trenches. In, Simo, T, Scott, B. and Masse, J.O., eds., "Cretaceous carbonate platforms". AAPG Memoir 56, p. 465-471.
- Shibata, K., 1979. Geochronology of pre-Silurian rocks in the Japanese Islands, with special reference to age determination of orthoquartzite clasts. In, "The basement of Japanese Islands: Prof. Hiroshi Kano Memorial Volume", p. 625-639. Akita Univ., Japan.
- Shou, Z., 2011. A precursory geoeruption before the disastrous Japanese earthquake. *NCGT Newsletter*, no. 58, p. 78.
- Smoot, N.C. and Choi, D.R., 2003. The North Pacific Megatrend. *Intern. Geology Review*, v. 45, p. 346-370.
- Straser, V., 2011. Radio wave anomalies, ULF geomagnetic changes and variations in the interplanetary magnetic field preceding the Japanese M9.0 earthquake. *NCGT Newsletter*, no. 59, p. 78-88.
- Suzuki, Y. and Research Group of Deep Structure of Island Arcs, 2009. The minute investigation of seismicity beneath the Japanese Islands and surrounding regions. *NCGT Newsletter*, no. 51, p. 14-22.
- Tsunoda, F., 2010. Habits of earthquakes. Part 3: Earthquakes in the Japanese Islands. *NCGT Newsletter*, no. 55, p. 35-65.
- Tsunoda, F., 2011. The offshore Tohoku-Pacific Earthquake from the perspective of the VE process. *NCGT Newsletter*, v. 59, p. 69-77.
- Vasiliyev, B.I., 1986. The results of dredging of some submarine mountains in Japan marginal oceanic rampart. *Tihookeyankaya Geologiya (Pacific Geology)*, no. 5, p. 35-42 (in Russian).
- Vasiliyev, B.I. and Evlanov, Y.B., 1982. Geologic structure of submarine mountains in the region near Kuril -Kamchatka and Japan Trenches. *Tihookeyankaya Geologiya (Pacific Geology)*, no. 4, p. 37-44 (in Russian).
- Von Huene, Langseth, R., Nasu, N. and Okada, H., 1980. Summary, Japan Trench Transect. Initial Reports of the DSDP, v. 56 & 57. US Government Printing Office, p. 473-488.
- Yoshida, T., Hoshino, M. and Nagahama, H., 1981. Tectonic map of the Japanese Islands and their environs. Scale 1:3,000,000. Naigaichizu Co. Ltd., Tokyo.

---

熱移送説に基づく 2011 年 3 月の東北太平洋沖地震の解析

**THE MARCH 2011 GREAT OFFSHORE TOHOKU-PACIFIC EARTHQUAKE FROM THE PERSPECTIVE OF THE VE PROCESS**

角田 史雄

日本, 埼玉県富士見野市上福岡 1-11-25

(角田 史雄 [ 訳 ])

---

**要旨:** この論文は、最近発生した歴史に残る 2011 年 3 月の東北太平洋沖地震を、わたし自身の熱移送説に基づいて、新しく解析した。まず、20 世紀末から 21 世紀初頭にかけては、南太平洋のスーパープリュームから大量の熱エネルギーが移送された。これによって確実に地下の圧力は増大した。大きな噴火やたくさんの地震が発生すれば、このエネルギーは消化される。しかし、三宅島の噴火だけでは、効果的に地圧を下げることはできなかった。このため、東日本の広い地域にわたって、下部地殻とマントルとが熱膨張によって押し曲げられ、最初にたくさんの「跳ねとび地震」が起こり、最後に M9.0 の東北太平洋沖地震が発生した。

**キーワード:** VE 過程, スーパープリューム, 東北太平洋沖地震, 熱エネルギーの北上, VE カルテ, 後(余)震

はじめに

プレート説は、東北太平洋沖では M8.0 より大きい地震は発生しない、という重要な主張をしてきたが、これは間違いである。筆者は、地下深部の構造圏においては取るに足らない量であろうが、外核で産み出された熱エネルギーは、南太平洋のスーパープリューム (以下, SP) を通って上昇している、と指摘してきた。熱エネルギー流 (Blot and Choi, 2004) に起因する火山と地震の活動 (VE 過程; Tsunoda, 2009) は、東アジアでは、環太平洋火山・地震帯ぞいを移動する。

大きな地震の再来周期は 30 ~ 50 年である (Tsunoda, 2009b)。マグマ活動のピークであった 1994 年においては、SP からの熱移送でスマトラ島の活動が活発化した。熱エネルギーが貯まってくるにつれて、岩層は広い地域

にわたって膨らみ、各地で巨大地震の前触れとなる「跳びはね地震」を発生させた (Tsunoda, 2010a)。1995 年に兵庫県南部地震が発生したときにも、不安定な岩層に載る板状の岩層がシーソー運動したことによって、跳びはね地震が起きた。さらに、M9.0 地震のときにも、大量の熱エネルギーが東北地方 (東日本北部) へ移送された (Tsunoda, 2010b)。熱移送は、巨大地震の発生を説明するには欠かせない概念である。

東日本大震災前における中部 ~ 北部本州の VE 過程

大量の熱エネルギー移送

外核からの熱エネルギーは、SP を通って、環太平洋ぞいに、PJ ルートと MJ ルート経由で、日本列島へ移送される (Tsunoda, 2009b, 2010a, 2010b)。マグニチュードは熱エネルギーに換算できるから、M8.0 地震の個数の変化

で、エネルギー総量の変化を表すことができる (図 1)。この場合、熱エネルギーは南太平洋の SP (P-3) から北半球 (P-1 と P-2) および南半球 (P-4) へ移送される。この熱エネルギーはたっぷりと在って、何回にもわたる VE 過程を遠方にまで移動させるのに十分な量である (Tsunoda, 2009b)。一方、A-1 のアフリカ SP から A-2 (図 1 の下図) への北上も認められる。しかしながら、ここでの南下は認められない。顕著な北上は 70 年間に 2 回あるので、つよい火山・地震活動はおおよそ 40 年ごとにくり返しているであろう。

PJ ルートにおける VE 過程の北上とそのくり返し

東アジアの環太平洋火山帯は火山群とカルデラ群とで特徴づけられるが、それらは、多くの島弧の主軸にそって並んでいる。熱流の多くは、この火山帯を通過していくが、そこには PJ と MJ という 2 つのルートがある (図

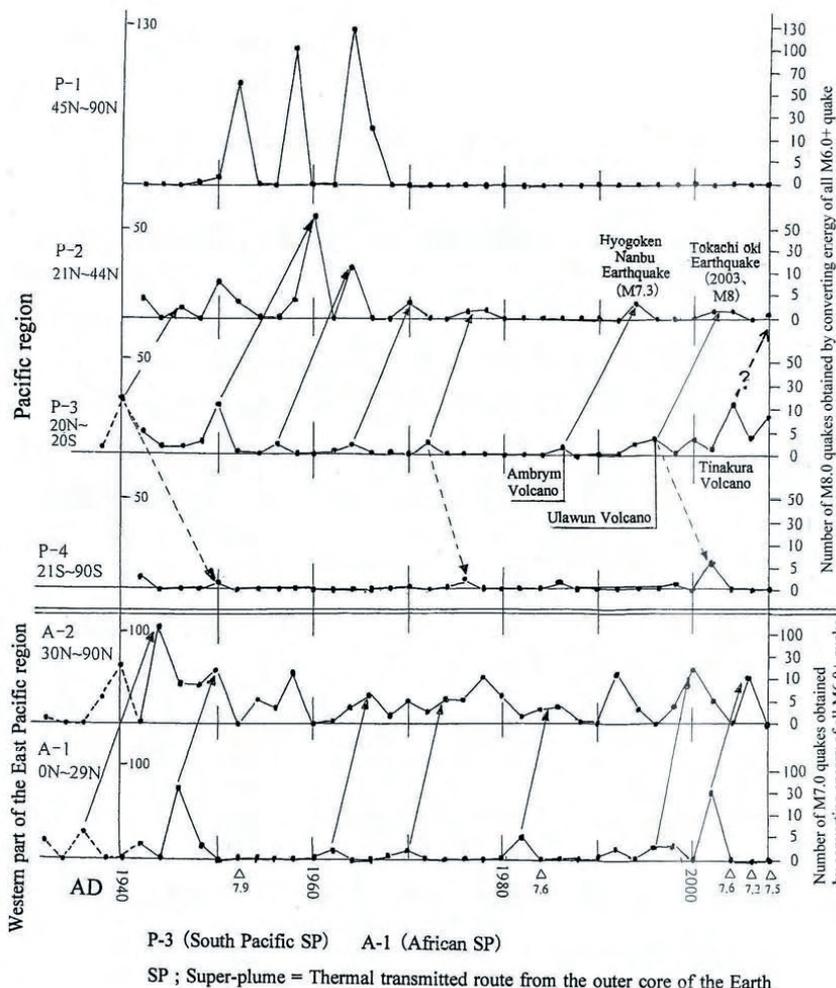


図 1 熱伝達の北上。P-4 はタスマニア海、ニュージーランド、南太平洋、南大西洋の地域。アフリカ SP からの A-1 と A-2 の熱流の向きについては角田 (2010a) の図 11 参照。

2). たとえばPJルートにおいては、2007年12月09日にM5.9地震が発生した(図2のE31; 2007/12/09). それから発生時間順に地震をたどると、北へ移っていく(図2のE31からE37). この北上をE3とすると、VEカルテでは、それは直線状のラインとして表せる(図3). E4の北上も、これと同じようにして表せる. こうしたVEイベントは高温化の過程で発生して、噴火の移動も伴ってくる(図3のV2). こうした、くり返されるVE過程は、VEカルテにおいては、平行な直線群として表される. E4の北上速度は、一日におよそ4kmである.

VE過程の北上のあらまはは次の通りである: まず最初に、外核からの熱放射で、地下の高温部の温度が上がる. そこから熱伝達が始まる. 地震の発生する熱膨張域の前縁がHTライン(高温化線)である(Tsunoda, 2009b). その後でFTライン(溶融化線)が、温度上昇の大きなところに現れる(Tsunoda, 2010b). 熱膨張域が拡大することは、その前縁であるHTとFTの両ラインが移動することを意味する. それらのラインの移動速度は、温度が上がれば速くなる.

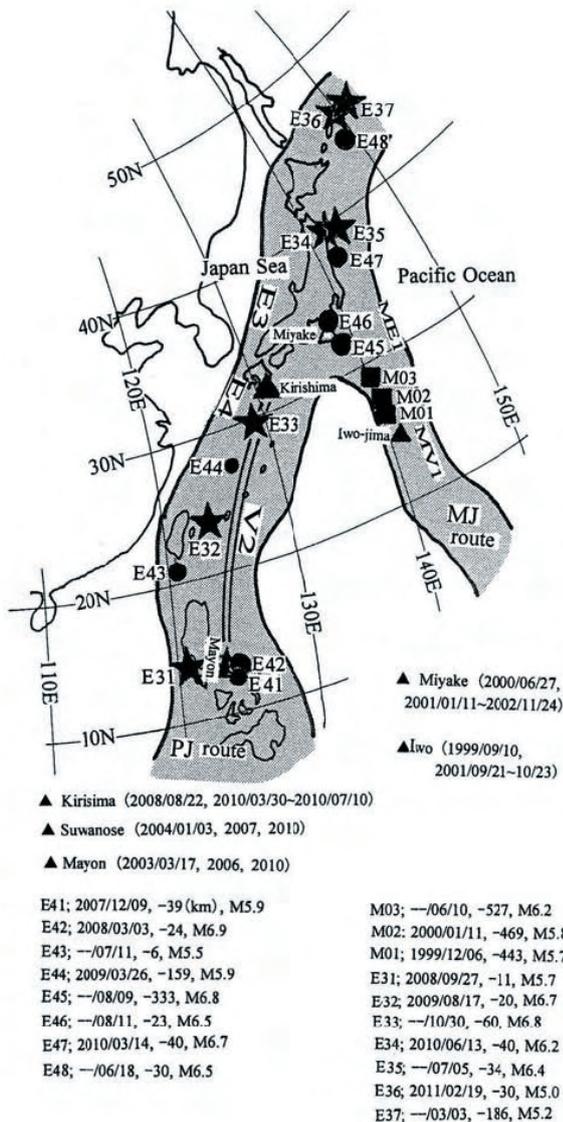


図2 地震(●と■)および噴火(★)の北上

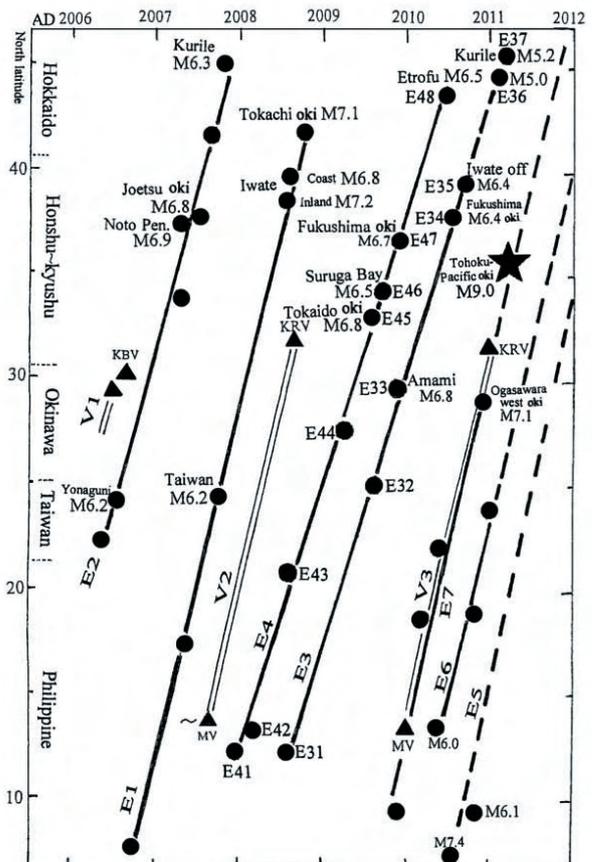
MJルートにおけるVE過程の北上とそのくり返し

MJコースでは1999年12月06日にM5.7の深発地震が発生した(図2のME1・VEイベントのM0). そのM0からM3までの移動については、VEカルテの中で、左下がりの太い線で示した(図4の右側). VEイベントの北上は、熱エネルギーの北への移送を意味する. したがって日本列島へは、1960年以降、もっともつよいVE過程によるエネルギー移送が5回あったことになる.

超巨大な東日本大震災を起こした地震の前に発生したVE過程

第一次段階-熱エネルギーの蓄積

2000年以降、PJルートとMJルートを通じて、関東・東北への熱エネルギー移送があった(図3および図4). この間、東日本では、くりかえし地震が発生した. 1995年以降、東日本の15の火山で、噴気、火山体の膨張、低周波地震、火口での高温化などの活動が認められたが、12の活火山での噴火活動はきわめて弱かった. これらの事実から、東北地域の地殻と最上部マントルとは熱せられて、同地域の地下は、熱および地震のエネルギーに満ちていたと考えられる. このエネルギーは、地震や弱い火山活動だけではうまく消費できない. この結果、地圧



Data are based on the JMA (2011), Smithsonian Institute (2011) and USGS (2011)  
 PV: Pinatubo MV: Mayon BV: Bulusan KRV: Kirishima  
 AV: Aso KBV: Kuchierabu KJV: Kuju V: active volcano

図3 PJルートにおけるVEカルテ

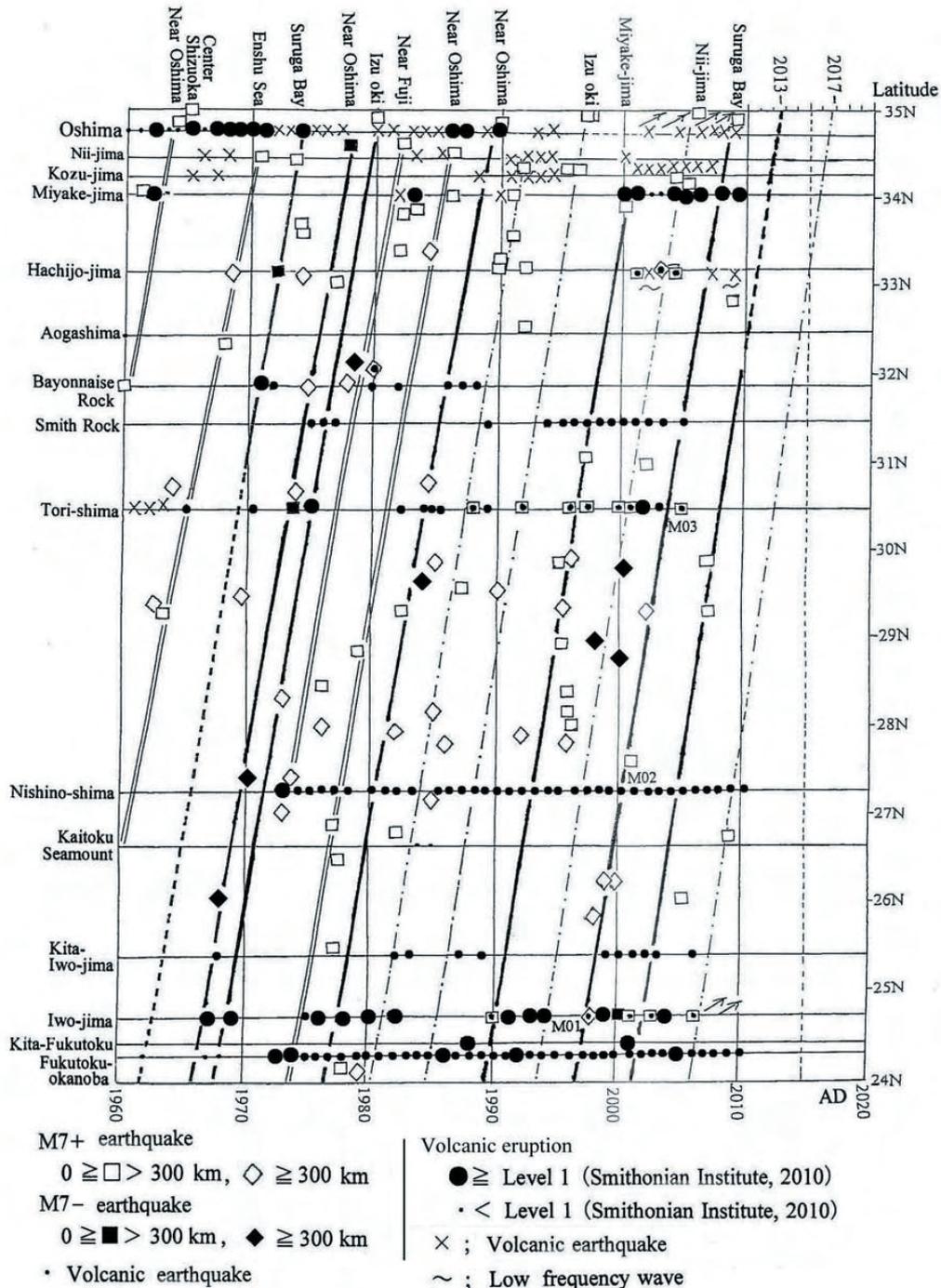


図4 MJルートにおけるVEカルテ

はほとんど減圧されずに、温度・圧力とも、急速に増大した。

**第二次段階 - 超巨大地震の兆候**

東北地方の花崗岩質岩層は、内陸部で厚く、沿岸部で薄い(図5)。とくに、海岸付近から急速に薄くなる。2000年以後に発生したM6.0より大きな極浅発地震のほとんどは、この硬いがもろい岩層とその近くに震源をもつ(Choi, 2010)。この花崗岩質岩層の下位にある岩層は、度重なる熱流にさらされて、断熱的に膨張した。この間に東北地方の活火山群(秋田焼山, 岩手, 秋田駒ヶ岳, 吾妻, 安達太良, 磐梯の各火山)は、噴気, 低周波地震, 火山体の膨張, 火口の高温化などの火山活動をく

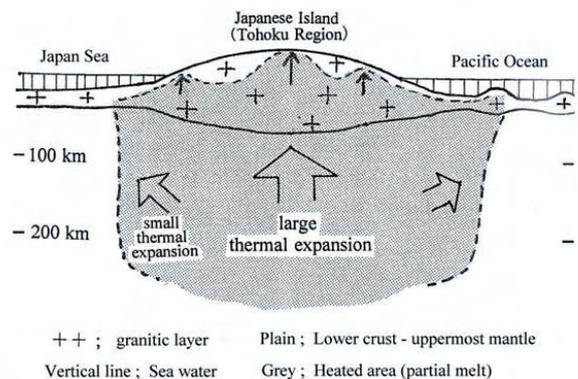


図5 東北地方の地下構造

り返していた。1997年にただ一つ、秋田焼山火山の水蒸気爆発があった。この断熱的な膨張によって、この岩層は上への押し上げを受け、上向きの応力にさらされた(図5)。こうした圧力をうけた岩層では、割れ目ができる。こうしたヒビ割れ群は、跳ねとぶような形であちこちに、つぎつぎと発生する。これらは、いわゆる「跳びはね」地震とそっくりである：つまり、図6に示したような、2000年以降に東日本と東北沿岸とで発生したM6.0以上の地震群がそれにあたる。東北沖(原文の東日本は誤り)の場合は、図6のAに示したような沿岸部で発生した「跳びはね」地震群がそれにあたる。図6のBに示したような関東-東北地方の場合は、破線で囲ってある、その地域の縁辺部で大きな地震が発生した。その特徴をあげると、それらの震源は、内陸側のブロックで花崗岩質岩層の層厚が急に変わる場所に集中している。一方、東北沖の岩層ブロックの場合、震源は、上部地殻の底あたりに群がっている。

**第三段階 - 震源における地震過程**

名古屋大学の震源解析によれば、2011年のM9.0地震の震源断層は12度で東傾斜である(名古屋大学, 2011)。しかし、これは巨大な破壊過程のはじまりの段階のものである。岩層ブロックBにおける余震のほとんどは、下部地殻と最上部マントルに集中している(図7)。地殻

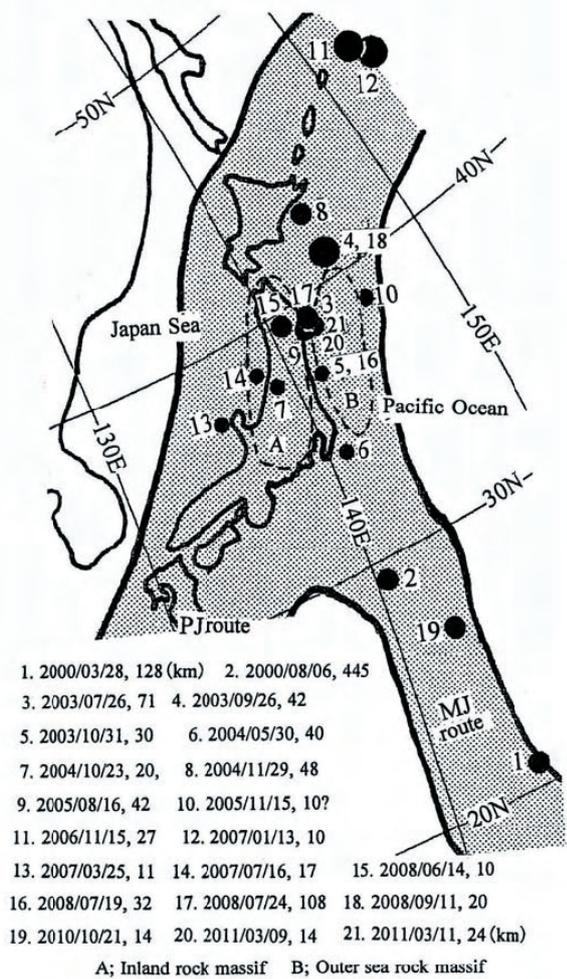


図6 東日本のM9.0地震の前に発生した前震

とマントルとの境界面は不均質な物性の上、脆性的な岩層と弾力のある岩層とが重なり合っている(Pavlenkova, 1997)。この境界面には、多くの弱面が在り、地殻が上向きに撓んだときには、簡単に剥がれてしまう。巨大地震で、この広域にわたる剥離が起こったに違いない。つぎのデータがそのことを裏付けている。つまり、東北地方の地面はもり上がった(国土地理院, 2011)し、また、沿岸域のGPS付きのブイは、海底も隆起したことを示している(港湾技術研究所, 2011)。このように、常識的に言われていることとは違って、この地域の岩層ブロックは、もり上がったのである(図5)。したがって、M9.0地震では、岩層の上向きの撓みによって、急激に震源断層が形成されたことになる(図7)。44億兆(京)トンの重さをもつ、巨大な岩層は、突き上げられるように跳ね上げられたのである。事実、震源域を占めるこの岩層Bの揺れ動きで、ほとんどの余震が発生している(図8)。結論的にいえば、広域にわたる熱膨張が引き起こした広い上向きの撓曲によって、この巨大地震の破壊が発生したといえる(図8)。

**第四段階 - 後震過程**

不安定な岩層の上に、板状の岩層ブロックが載っている。そのときに、上の岩層が揺れ動く、「跳びはね」地震が起こる(Tsunoda, 2010b)。余震をふくむ後震過程は1年かそれ以上続くが、それは、非常に広くて重い岩層ブロックの揺れ動きは、なかなか止まらないだろう(図9のB)。これからの後震過程は、こうした不安定な花崗岩質岩層(図9B)の縁辺部で発生すると思われる(Tsunoda, 2010b: 南北海道, 北陸, 南関東; いずれも図9のAブロックの縁辺部)。

**結論**

熱エネルギーの蓄積によって東日本では、広域にわたる岩層の膨張が発生し、関東-東北地域一帯に中規模の「跳ねとび」地震が発生した。それから程なくして、地殻とマントルの境界面が剥がれ、ズレ動いて、M9.0地震が発

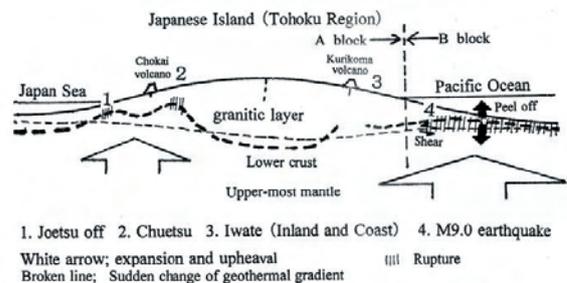


図7 膨張による花崗岩質岩層の押し上げに起因する「跳びはね」地震

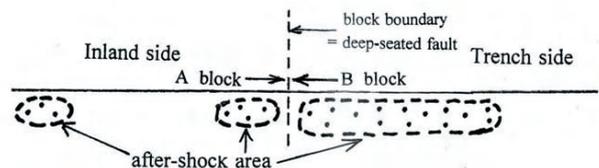


図8 関東と東北におけるM9.0地震による2つの余震集中域

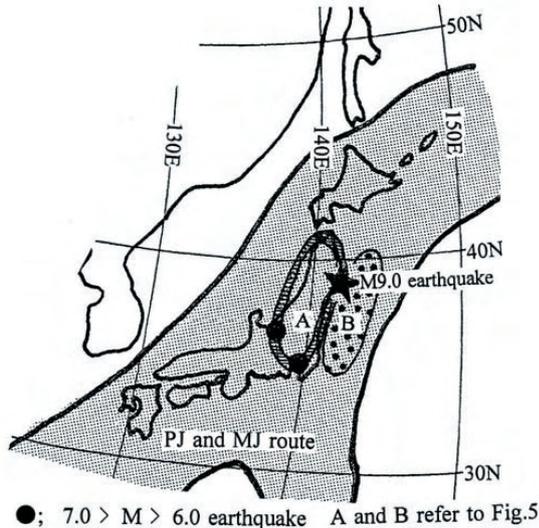


図9 M9.0地震に起因する余震域Aブロックと余震域Bブロック

生じた。巨大な岩層の揺れ動きは急には止まらない。そのため、地震活動の終息にはあと2年ほどかかるであろう。

**謝辞** 筆者は、2009年に講談社から出版した「地震の癖」の読者から、多くの賛意と励ましをいただいた。また、NCGT Newsの多くの執筆者による報告が励みになった。さらに、D.R. Choi 博士には、建設的で鋭いコメントおよび激励をいただき、D. Pratt 氏には、論文の改良でたいへんお世話になった。深甚の御礼を申し上げる。

文 献

Blot, C. and Choi, D.R., 2004. Recent devastating earthquakes

in Japan and Indonesia viewed from the seismic energy transmigration concept. NCGT Newsletter, no. 33, p. 3-12.

Choi, D.R., 2010, Global seismic synchronicity. NCGT Newsletter, no. 55, p. 66-73.

Geospatial Information Authority of Japan (GIAJ), 2011. <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/level/KENSOKUSYUROKU/zenkokuzu.htm>

Nagoya University, 2011. [http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/](http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/)

Pavlenkova, N.I., 1997. General features of the upper mantle structure from seismic data. Upper mantle heterogeneities from active and passive seismology (Karl Fuchs, ed.). Kluwer Academic Publishers, p. 225-236.

Port and Airport Research Institute (PARI), 2011. GPS-mounted buoys in deep water. <http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/results.pdf>

Smithsonian Institute, 2011. Global Volcanism Program (Volcanoes of the world). <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cmf>

Tsunoda, 2009a. Habits of earthquakes. Kodansha, Tokyo. 190p. (in Japanese)

Tsunoda, 2009b. Habits of earthquakes – Part 1: Mechanism of earthquakes and lateral thermal seismic energy transmigration. NCGT Newsletter, no. 53, p. 38–46.

Tsunoda, F., 2010a. Habits of earthquakes – Part 2: Earthquake corridors in East Asia. NCGT Newsletter, no. 54, p. 45–56.

Tsunoda, F., 2010b. Habits of earthquakes – Part 3: Earthquakes in the Japanese Islands. NCGT Newsletter, no. 55, p. 35–65.

United States Geological Survey (USGS), 2011. Earthquake Research (Global research). <http://neic.usgs.gov/neic/epic/global.html>

日本の M9.0 地震に先行する無線電波異常，超低周波地磁気変化，および惑星空間磁場変動  
**RADIO WAVE ANOMALIES, ULF GEOMAGNETIC CHANGES AND VARIATIONS IN THE INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD PRECEDING THE JAPANESE M9.0 EARTHQUAKE**

**Valentino STRASER**  
 94, Località Casarola - 43040 Terenzo PR, Italy [fifurnio@tiscali.it](mailto:fifurnio@tiscali.it)

(矢野 孝雄 [ 訳 ])

**要 旨** : イタリアでの観測の結果から、2011年3月11日の日本におけるM9.0地震に先行して、10Hzよりも低周波で、55 microGauss ~ 0.3 milliGauss の間にいくつかの最大強度をもつ電波異常が解析された。3月1日以降、早くも一連の障害が顕著に増加し、その前月である2011年2月の109に比べて、実に179もの無線電波異常が測定された。高頻度傾向にあったこの一連のデータは、地震発生日にはわずかに66まで急減し、翌日(2011年3月12日)には再び246まで急増した。衛星によって観測された磁場は、地震前と地震発生中とも、地上で観測された電波異常の数に類似した変化パターンを示した。衛星観測磁場にも、地震発生時の劇的減少と、その後の急激な増加がみられた。イタリアでは、本震の2,3分後に重力場が顕著に減少したことが重力計で記録された。この減少は、地震によって解放されたエネルギーのために地殻が一次的に膨らんだことによると解釈される。

**キーワード** : 短期的地震予知, 超低周波地磁気変化, IMF 変化, 強大地震による重力変化, 電波異常

まえがき

2011年3月11日に日本で発生した猛烈な地震は、最近の20～30年にわたって地球を荒廃させてきた一連の破壊的地震の最新のものにすぎない。数万人の犠牲者と経済・社会基盤に膨大な損害をもたらした日本の地震の劇的結末は、課題からみると、地震の先駆現象を解析する方法を発見するための何らの手がかりも発見できていないことを示す顕著な警告である。

この研究は、破壊的地震の発生前と発生期の両期間に、地上（電波帯の周波数および地球重力の異常）ならびに衛星（惑星空間における磁場変化-IMF）の両方で観測されたデータを提示して、考察する。

地震発生前の現象のうち電磁異常を検証すると、何らかの電磁気信号が、地震記録に報告されたほとんどすべての地震に先行していることが証明された (Fenoglio et al., 1993; Fraser-Smith, 1990; Straser, 2010)。同時に、衛星データも、日本の地震群の際に見出された変動と同様に解析されてきた。これらは、他のM6以上の地震の際に記録されたこれらの事象に類似する (Bhattacharya et al., 2009; Zhang et al., 2009)。

Pulinets and Boyarcuk(2004) と Fidani et al. (2010) が報告しているように、ほどなく地震に襲われる地域の上空で地震の直前と地震発生時に強い電離圏異常が観測されたのは、GPS衛星情報にもとづく技術によるものである。M6以上の地震発生時の観測では、しばしば、震央域で、大気中での電離作用のために空中で顕著な変動が起こり、地殻応力によって解放されたエネルギーによって作りだされた凝縮雲が発生する。

事実、リソスフェア/アセノスフェア境界において、多くの場合、大きなマグニチュードの地震の発生に関連して電磁場の変動が起こり、その影響は少なくとも磁気圏にまでおよぶことがある。電磁氣的障害はバンアレン帯の安定性にも影響することがあり、人工衛星で観測されるより遠方の異常をもたらす陽子や電子を放出する引き金になる。地震発生過程でひどく顕著に変動する太陽風の速度、物質流、および、惑星空間磁場をリアルタイムで観測することができるようになったのは、人工衛星データのおかげである。

強い地震ともなう顕著な電場と磁場の変化は地上でも観測することができる。これには、地球の“背景ノイズ”として示される電波帯での障害が含まれ、それは大規模地震の発生過程に観測される (Villante et al., 2001; Molchanov et al., 1992; Hayakawa et al., 2007; Karakelian et al., 2002)。

イタリアで観測されたELFおよびSLF帯電磁波の混入によって引き起こされる電波障害（地球内部現象によって発生するSchumann共振）は、地球規模の破壊的地震の

発生前2, 3分～数時間前にどこかで観測されてきた。

2009年以降の発見によると、多くの場合（すべての場合ではない）、M6以上の地震にともなうELF帯での電波異常が観測されることがあり、M4程度の地震でも、いくつかの場合には異常が地球全体におよぶことがある。野外や実験室におけるデータ解析において得られる経験によると、地震の規模が大きくなるほど、電波異常の数が多くなる。

このような場合、記録された電磁気データは、図1に示されるように、主観測点 (Roma—イタリア 41° 41' 4.27"N; 12° 38' 33.60"E) から約500kmの距離にある第2の観測点 (Rovigo—イタリア 45°.05' N; 11°.48' E) で測定された重力値の変動と比較される。地震動にともなう重力場変化の測定から、地震応力によって励起された地球地殻の挙動とみなす1つの仮説が導かれる。

2011年3月初旬に観測された一連の電波障害

2011年3月初旬に観測された一連の電波異常は前月に比べて顕著に増えている、それらが、日本における一連の地震発生に同定される重要な要素であることは明白である (図2)。



図1 位置図. 1: 重力観測点 (Rovigo), 2: 電波異常観測点

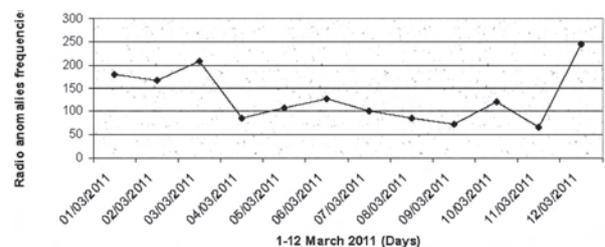


図2 横軸は2011年3月の最初の12日、縦軸はイタリアのローマにあるCecchina観測点で記録された電波異常の変化パターン。

2010年10月のスペクトル図は542回の異常を示し、11月には657回、12月には304回であった。2011年になると、2011年1月に記録された異常は472回、2月には109回であった。これらとは対照的に、3月の最初の3日間には、552回まで電波異常が急増し、その後も高い数値がつづいた。詳細にみると、電波異常の回数は、2011年3月1日=179、3月2日=166(前日比べて個々の異常強度の増大が著しい)、3月3日=207(いつかの異常の持続時間が、約2~10倍に達した)。

2009年以來の機器観測によると、電波帯における障害の数が増えると、その時の地震はより強くなる。10Hz以下の周波数で観測される電波障害の回数が増加すると、それは、地下でのエネルギー蓄積の先駆現象であると解釈されてきた。このような周波数での異常の出現はこれまでに科学的文献に記録され、また、最近の20~30年間では、強い地震の発生にともなうことが知られるようになってきた(Hayakawa et al., 1996; Hattori, 2004)。

日本における地震の観測結果の場合、観測された単一あるいは一群の信号は55 microGauss ~ 0.3 milliGaussの間の強度を示すが、一般には比較的長周期である。この事実も、地下でエネルギーが集積した兆候を示す。

地上機器の観測結果と調和して、GOES磁気計からのデータ(IMF活動度は通常の帯域に収まるが)も、2011年3月の最初の数日間に漸増を示す(図3)。これらは、磁場に連動するピークから解釈しうるように、以前のものに比べて強度がわずかながら大きい。

日本における一連の印象的な地震は、わずか3日間に、約100個のM5以上の地震を含み、M9.0の猛烈な地震(日本の本州東岸近く:www.usgs.gov/)になった。この地震の前に記録された異常も、下表のとおり、M6以上の強い地震群の発生に先行していた。

Date/Time	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Seismic Area
2011/03/06 12:31:58	-18.115	-69.391	101.3	6.2	Tarapaca, Chile
2011/03/06 14:32:36	-56.387	-27.019	84.2	6.5	South Sandwich Islands Region
2011/03/07 00:09:39	-10.334	160.739	37.9	6.6	Solomon Islands
2011/03/09 02:45:20	38.424	142.836	32.0	7.2	Near the East Coast of Honshu, Japan

**スペクトログラム Spectrograms:** 観測点で利用されたスペクトログラムは10分ごとに記録されるもので、1,600ミリ秒ごとに1本の水平線が描かれる。Spectrum研究室に関するデータは以下のとおりである:

- Effect of FFT settings with fs = 44.1000 kHz:
- Width of one FFT-bin: 21.0285 mHz
- Equiv. noise bandwidth: 28.5988 mHz
- Max freq range: 0.00000 Hz to 1.37813 kHz
- FFT window time: 47.554s
- Overlap from scroll interval: 96.6%

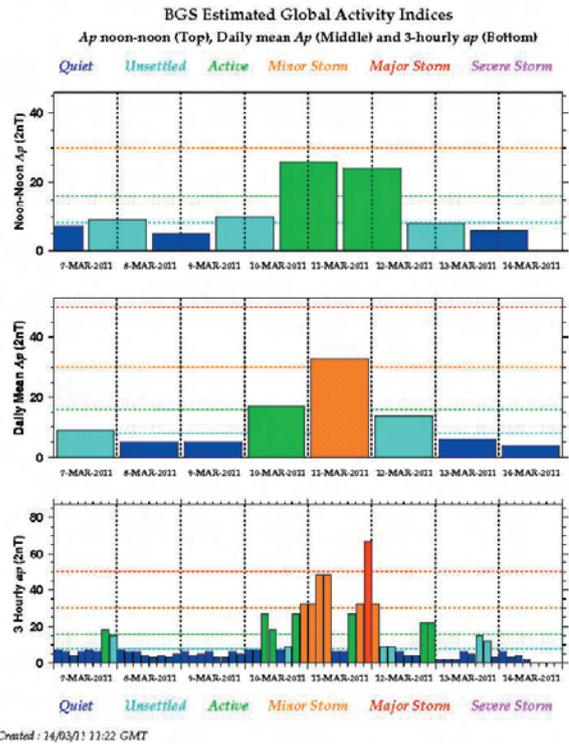


図3 BGS 宇宙天気観測センターで記録された2011年3月7~11日の磁場変動(www.geomag.bgs.ac.uk/research/)。

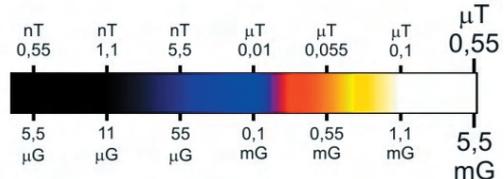


図4 色彩スケール (Gabriele Cataldiの好意による)

**色彩スケール:** Gabriele Cataldiによって開発された色彩スケール(図4)を用いると、スペクトログラムの色は、発生する信号のタイプに関係する特定の値を示す。通常、いわゆる地震の電磁気的前兆(ESPあるいはESS)は10MHzでは平均で60nTに達するが(Fraser-Smith et al., 1990)、15Hz(ELFおよびSLF帯)におよぶ低周波帯でESPを研究することが可能であり、特別な方法を使えば“MHz”の波を探さなくても、30Hzでこれらの信号を容易に研究することができる。色彩スケールは30nTに達する信号を赤色で、100nTに達する信号を白色で表示する。青色と赤色とのあいだのわずか10nTの偏倚は、1つのスペクトログラム上でいかなる重要な値の変化も表示することが可能である。比較のためには、次のようなことがらを思い出すのがよい。30nTという値は、電気トースターによる磁場を1m離れたところで測定した値の3倍に相当する。これは、この値がESPの研究に重要であることは否定できないことを意味する。スペクトログラムにみられる電波異常は黄色(黄色の投影はすべて白色になる)で表示され、赤色に隣接する。このようにして、強度信号は65nT以下になることはないことを確認することができる(黄色の投影は、1m離れたところにある蛍光管よりも大きい強度に相当する)。

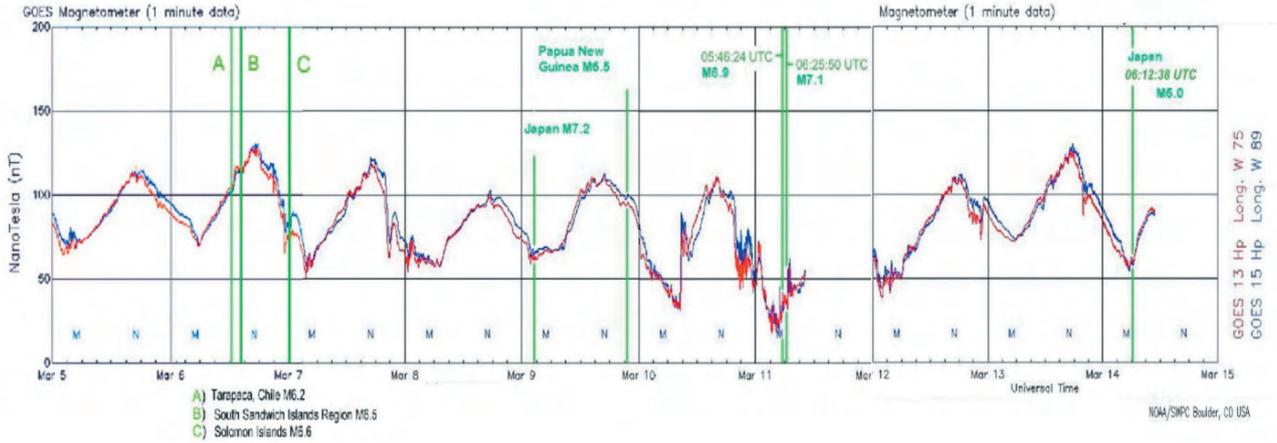


図5 2011年3月8～14日における日本での一連の地震に関して、GOES衛星13および15によって観測された電磁場。

衛星：衛星運行システム (Orbitron) からデータは次のとおり：<http://www.swpc.noaa.gov/Data/goes.html>

GOES 13 (Primary): orbiting at 35,809km; Long 74.5403° O; Lat 0.3317° S; Ht (km) 35 809.730; Azim 272.3°; Elev -10.7°; RA 12h 26m 24s; Decl. -7° 07' 04".

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

重力計：重力計は、気圧の影響を受けない計器であり、温度膨張による限界誤差のない低膨張材でできた振り子をもつ。位置認識機能をもつ発振器は、電磁氣的干渉を受けないたいへん詳細な同期信号を発生させることができ、8～9桁の精度をもつ電子時計と連動している。

この測定系は計算機によって制御される。1日に約52個の地球重力場の測定値が得られていて、このデータはある一つの測定値と次の測定値の間で補正されつづけ、ディスクに記録される。1,000回の測定で生じる相対誤差は0.000000089である。

考 察

衛星データの解析によると、M6以上の地震が近づくと磁場に全般的な変化が現れ、値が劇的に小さくなる。この傾向は、Loma Prieta(合衆国)で1989年に発生したM7地震で観測されたデータにもあてはまる。そこでは、地震発生前の2週間にわたって通常の低い値が変化(上昇)し、そして、地震発生前の2,3時間前に急減した(Molchanov et al., 1992)。

衛星のグラフは3月6日～14日の地震発生に対応する顕著な磁場変化を示し、それらはCecchina(ローマ)の観測点で測定された電波異常の増加に一致する。日本の本州の東海岸付近で発生したM9.0の破壊的地震([www.usgs.gov/](http://www.usgs.gov/)参照)の際にGOES13およびGOES15が観測し

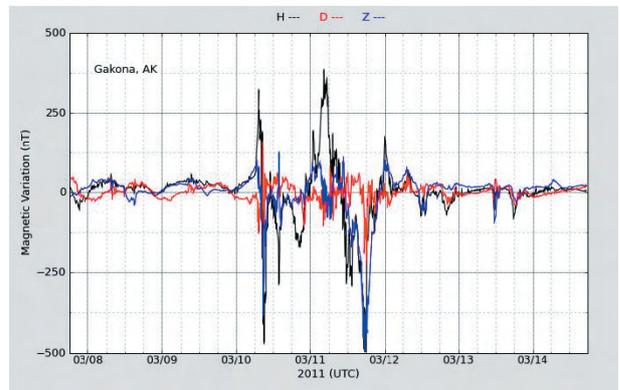


図6 HAARPによって観測された2011年3月3～14日の磁場 (<http://137.229.36.30/cgi-bin/magnetometer/gak-mag.cgi>)

た磁場は、電波干渉速度における急減に一致する(図5)。同様のパターンは、日本の本州東海岸近くで発生した2011年3月14日のM6.0地震([www.usgs.gov/](http://www.usgs.gov/)参照)時にも顕著である。同様の変化は、2011年3月6, 7, 9日に発生した次の地震にもみられる：チリのTarapaca, 南サンドウィッチ諸島地域, ソロモン諸島, 日本の本州東海岸近く, ニューブリテン地域, パプアニューギニア (<http://www.swpc.noaa.gov/Data/goes.html>)。

日本での一連の地震の際に衛星および地上で観測された変化パターンが、HAARP観測点からのデータ(図6)と比較された。こうして、本震と後続したM7.1の地震の際に顕著な異常があらわれたことが、確認された (<http://137.229.36.30/cgi-bin/magnetometer/gak-mag.cgi>)。

磁場変動にかかわる一層のデータは、BGS宇宙天気観測センター(BGS' Space Weather Monitoring Centre: [www.geomag.bgs.ac.uk/research/](http://www.geomag.bgs.ac.uk/research/))によって検証された。これらのデータも(図3)、2011年3月11日の地震に先行した電波異常の周期とパターンに一致する。

それゆえ、要約すると、強い地震の発生時には次の事象が観測される：

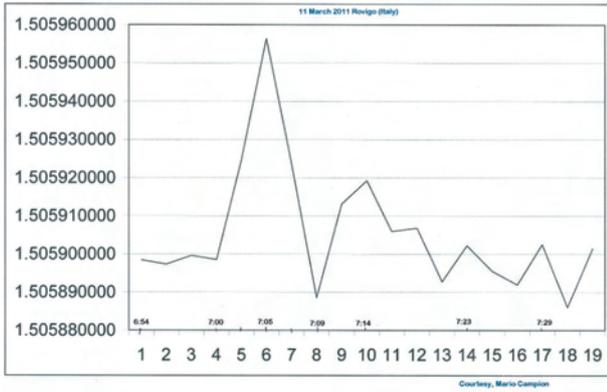


図7 重力場変動のグラフ (www.astrofilipolesani.it 参照). これは、2011年3月11日のM9.0地震後のデータである (6:50a.m. はイタリア時間. Mario Campion の好意による). 横軸は、発見された変動を中心にして、全42.75分間に135秒間隔で測定された19回の測定を示す. 縦軸は、観測計の周期(秒)の値を示す. グラフの最高値は、イタリア時間で07.05 a.m. (世界標準時06:05) に起きた重力場の減少に一致する.

- 1) 太陽活動がより活発である.
- 2) IMF 活動が変化を被る (強度の増加あるいは急減)
- 3) 一般に、地震に先行して自然磁気バックグラウンドが減少する. 明らかに、これも不安定化する.

他方、重力計による測定は、電磁気型異常と低周波数帯での電波干渉数異常を伴うデータの比較することができる.

これは、地震計によって記録されたデータ (振動する物質の複雑な変化の結果) ではなく、約9分間にわたって持続したある物体中に均等に発生した1つの現象 (実際には、重力減少による semi-wave [半波]) であり、その後、収束した (図7).

これは、semi-wave が、対称的な尖端を描く135秒毎の3回の測定によって記録され、改めて確認された事実によって証拠づけられる. この図は、イタリア時間で07:05 a.m. に最大値に達する規則的なパターンをもつ現象を測定した機器データとして重要である.

この変動は、それゆえ、地球の地殻の外側へ向かって膨らみが発生し、その後の緩和期には収縮したことを示すのであろう. このデータはこのような解釈を示すが、この現象はより複雑で、上昇に加えて適度の加速も伴っていたであろう.

重力計での発見に関してさらに注目されるのは、変動の対称性である. 発見された数値にもとづいて、時間帯を考慮すると、日本とイタリアとの距離にわたって変動は2時間16分にわたっていたのである.

**結 論**

少なくとも2つのタイプの結論が導かれる: 1つ目は、この地震に対応して発生した電波異常と惑星空間磁場に

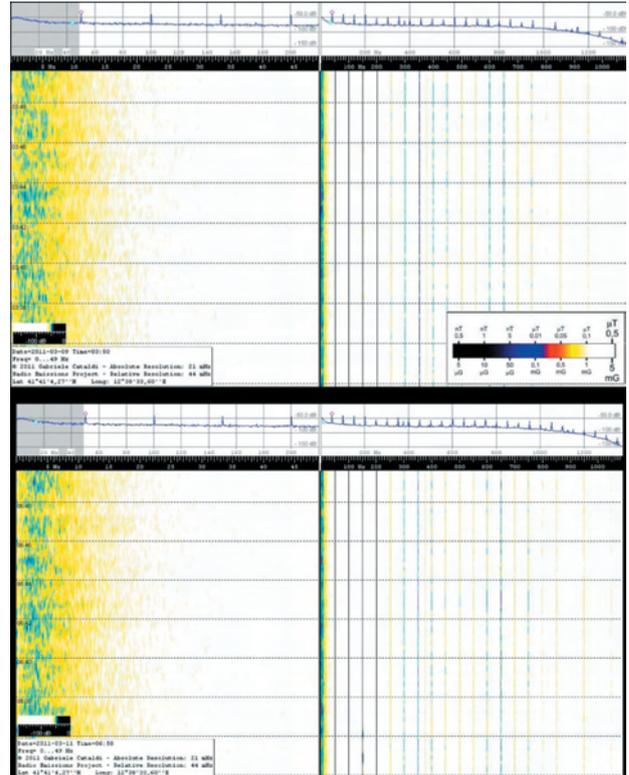


図8 Cecchina 観測所 (イタリアのローマ) で作成された電波異常図. 電波異常は、日本の本州東海岸近くで発生した2011年3月9日 (M7.2, イタリア時間03:45) と3月11日 (M9.0, イタリア時間06:50) の両地震に先行する. www.usgs.gov/ 参照.

出現した前地震信号である (図8). 2つ目は、猛烈な地震によって地殻力学にもたらされた効果である.

第1の場合、"一連の干渉" が地震発生に先行して常に発見され、これらの異常が大きいほど、地震のエネルギーが大きい. 単一あるいは一群の信号強度は55 microGauss ~ 0.3 milliGauss で、周期は10Hz 以下である. この研究で考察された地震はいずれも、IMF の低下後に、そして、衛星によって観測された突然の干渉の直後に発生している.

第2の結論は、重力計を利用して、本震直後の期間における地震エネルギーの伝播の力学を解釈したものである. この場合、地震の発生と重力場異常 (減少) の出現の間には時間的遅延があり、それは、地球の地殻の一時的な上昇として解釈されるだろう.

したがって、地震の前に現れる電磁氣的異常は、地震の前兆現象の観測をめざす境界領域の研究に有効であることが証明された. というのは、電波異常と重力場の鮮明な減少は、地震計によって記録された地震の機械的效果につねに先行して発生してきたからである.

電波異常は、磁場に関する衛星データと組み合わせると、M6.0 以上の強い地震の短期的予知に有効であることが証明された.

謝辞 私は、ご援助、ならびに Cecchina (ローマ) 観測所での電波異常に関する同時観測データと GOES データをご提供下さった Gabriele Cataldi と氏のチームに感謝する。さらに、建設的な議論と 2011 年 3 月 11 日に日本で発生した地震に関する重力変化グラフの提供をいただいた Mario Campion と Jerry Ercolini に、そして、この論文のいっそうの意義を見出すこと、そして、正しい科学的対話によって、この原稿の改良を促して下さいました匿名査読者のみなさまに感謝する。最後に、地震発生後 2、3 日で書き上げたこの報告を受け付けてくださった Dong Choi に感謝と御礼を申し上げる。

## 文 献

- Bhattacharya, S., Sarker, S., Gwal, A.K. and Parrot, M., 2009. Electric and magnetic field perturbations recorded by DEMETER satellite before seismic events of the 17th July 2006 M 7.7 earthquake in Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 34, p. 634-644.
- Fenoglio, M.A., Fraser-Smith, A.C., Beroza, G.C. and Johnston, M.J.S., 1993. Comparison of ultra-low frequency electromagnetic signals with aftershock activity during the 1989 Loma Prieta earthquake sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 83, no. 2, p. 347-357.
- Fidani, C., Battiston, R. and Burger, W.J., 2010. A study of the correlation between earthquakes and NOAA satellite energetic particle bursts. *Remote Sensing*, v. 2, p. 2170-2184.
- 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.
- Hayakawa, M., Hattori, K., and Ohta, K., 2007. Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. *Sensors*, v. 7, p. 1108-1122.
- Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O.A. and Yumoto, K., 1996. Results of ultra-low frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993. *Geophys. Res. Lett.*, v. 23, p. 241-244.
- Hattori, K., 2004. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes. *TAO*, v. 15, no. 3, p. 329-360.
- Karakelian, D., Klemperer, S.L., Fraser-Smith, A.C. and Thompson, G.A., 2002. Ultra-low frequency electromagnetic measurements associated with the 1998 Mw 5.1 San Juan Bautista, California earthquake and implications for mechanisms of electromagnetic earthquake precursors. *Tectonophysics*, v. 359, p. 65-79.
- Molchanov, O.A., Kopytenko, Yu. A., Voronov, P.M., Kopytenko, E.A., Matiashvili, T.G., Fraser-Smith, A.C., and Bernardi, A., 1992. Results of ULF Magnetic field measurements near the epicentres of the Spitak (Ms=6.9) and Loma Prieta (Ms=7.1) earthquakes: comparative analysis. *Geophys. Res. Lett.*, v. 19, p. 1495-1498.
- Pulinets, S. and Boyarchuk, K., 2004. *Ionospheric precursors of earthquakes*. Springer, 315p.
- Rodger, C.J., Thomson, N.R. and Dowden, R.L., 1996. A search for ELF/VLF activity associated with earthquakes using ISIS satellite data. *Jour. Geophys. Res.*, v. 101(A6), p. 369-378.
- Straser, V., 2010. Variations in gravitational field, tidal force, electromagnetic waves and earthquakes. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 57, p. 98-108.
- Villante, U., Vellante, M. and Piancatelli, A., 2001. Ultra low frequency geomagnetic field measurements during earthquake activity in Italy (September-October 1997). *Annali Di Geofisica*, v. 44, p. 229-237.
- Zhang, X., Quian, J., Ouyang, X., Shen, X., Cai, J. and Zhao, S., 2009. Ionospheric electromagnetic perturbations observed on Demeter satellite before Chile M7.9 earthquake. *Earthquake Science*, v. 22, no. 3, p. 251-255.

## あとがき：地震予知

前兆信号 (物理的, 化学的, あるいは, 他の種類のいずれであれ) は, 地震がおよそ起きる場所に出現するのが典型である。いっぽう, 私がこの研究で示唆したいことは, 私は "全地球的地震前兆" と定義したいと思う新しい類いの前兆についてである。このタイプの地震前兆は, "直近" の地球規模の強い地震が発生しつつあることを示すが, 発生するであろう震央を特定することはない。ある地震を予知し, 震央位置を決定するために現実的効果を得るには, これらの指標を他の予知方法と組み合わせることが必要であり, 科学者集団によってすでに試験され, 検証されている。

2011 年 3 月 11 日に極大化した日本の地震の経緯を, 一例としてとりあげてみよう。

1—最近の NCGT Newsletter no. 58 には, Zhonghao SHOU から送られてきた衛星写真が掲載されている。それは, その後におきる地震の震央付近に発生した "地震雲" あるいは "geo-eruption" をとらえていて, 2011 年 3 月 11 日の猛烈な日本の地震の 16 日前に現れた。

2—それに代わって, この研究では電波障害の異常な増加が, M9.0 の本震の 11 日前にはじまったことが指摘された。

第 1 の前兆データは, その後におきる地震の震央に関わるものであるが, 地震が発生するであろう正確な期日には関わらない。しかし, 第 2 のものは, 強い地震が地球規模で発生するであろうことを示すが, その震央位置が特定されるわけではない。

両データを組み合わせることによって, 「北日本の沖合で猛烈な地震が起きそうだ」ということができる。Shou(2007) によって実施された実験にしたがえば, 「地

震規模はかなり大きく、震央は” geo-eruption” の発生場所の近傍に出現するだろう」と言うことはかなり妥当であろう。

正確には、いつ？

3—衛星 (GOES) のグラフデータ (図 5) は、線が”S” 字型の”リップル”をかたちづくった時に 6.0 以上の地震が発生することを示し、後者には電波障害を伴う。その代わりに、さまざまな磁力計は M9.0 の地震が差し迫った場合や地震が発生した場合に磁場の著しい変化を示す。

もしこれら 3 つの方法を組み合わせると、私たちは次のことがらを想定することができる。”日本の近くの地震帯のうち、Shou (2011) が示した geo-eruption の近傍で猛烈な地震が 2, 3 日中に発生するだろう。そして、磁場の大きな変化を伴って、とくに 1, 2 の電波障害と一致するところで、この猛烈な地震が発生することが想像される。”

これは、3 つの研究方法を統合したほんの 1 例にすぎない。より正確な仮説を定式化するためには、ラドンガス、

気温、あるいは、大気中でのガス濃縮、あるいは他の現象によってこの方法が補完されていくだろう。

## 文 献

- 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.
- Khalilov, E., N., 2007. About the possibility of creating an international global system for forecasting earthquakes – “Atropatena”. *Natural cataclysm and global problems of the modern civilization*, Special edition of *Transaction of the International Academy of Science*, p. 51-69. H&E. ICSD/IAS, Baku-Innsbruck, 2007.
- Khalilov, E., N., 2008. Forecasting of earthquakes: the reasons for failures and the new philosophy. *Science Without Borders*, *Transaction of the International Academy of Science*, v. 3 2007/2008. H&E, SWB, Innsbruck, p. 300-315.

---

## 9/56 年サイクル：記録された地震 9/56 YEAR CYCLE: RECORD EARTHQUAKES

**David McMinn**

サイクル研究者

Twin Palms, Blue Knob, NSW2480, オーストラリア mcminn@yahoo.com

(岩本 広志 [訳])

**要 旨：**ハワイ、北米南西域で今まで記録されてきた巨大地震は 9/56 年グリッド (マクミン, 2011) で生起する傾向がある。このような珍しい発見は、他の地域で記録された地震は 9/56 年サイクル効果によって表されそうなことも仮説となることが与えられる。北米、西ヨーロッパ、日本の歴史上の多くの資料がこのような結果として評価される。驚くべきことに、記録された地震エピソードはしばしば完全に 9/56 グリッドの同一セクターにはまってしまい、シーケンス 25, 34, 43, 52 と 5 でほとんど顕著である。シーケンス 52 は断然、米国と西ヨーロッパの多くの記録が含まれるものとして最も重要な 56 年シーケンスであった。なぜそれらのパターンが明瞭に地震記録として残されているのかが非常に困惑と予期せぬことである。それは多分何かが太陽-月の潮汐が引き金となったものとしてマクミン (2011) によって提案されている、しかしそれはすべて定まったものとしてとらえることが可能である。周期性に関するこれらの発見も射的を射たもので、太陽の経路位置が地震のタイミングとの関連性があるかもしれないということを示唆している。

**キーワード：**記録、地震、9/56 年、サイクル、米国、西ヨーロッパ、日本

## 序 論

北米南西域とハワイで記録された地震が 9/56 年パターン群の傾向がある (マクミン, 2011)。他の地域での地震記録も 9/56 年グリッドを呈するのかもしれないかまたはカリフォルニアとハワイでのユニークなものなのかが顕著な疑問が湧いてくる。この論文は 9/56 年サイクルとアメリカと西ヨーロッパそれに日本の地震記録エピソードのタイミングを考察したものである。驚くべきことに、これら

の記録はしばしば完全な 9/56 年グリッドのシーケンス 25, 34, 43, 52 と 5 の 1 つのセクター上に起こっている。これはこの評価から引き出された発見の共通のテーマであった。

歴史上の地震のタイミングと規模の見積は時間が過去に向かうほどより信頼性に欠けるようになる。さらに、規模の見積は随分参照元によって変えることができ、個々の国や地域によって記録の変動が与えられるだろう。こ

これらの問題は、特にラテンアメリカでは初期の生データを正確に評価することを困難にしている。不幸にしてわずかながらこれらの難しさを計算できるのみで、評判な参照元を用いることは隔たっている。それでも幾つかのサンプリングにおける歪が容易に生起しうるだろう。

9/56年サイクルは、縦(垂直に)56年、横(水平に)9年間隔の繰り返しグリッドにより構成されている。56年行はシーケンス、9年列はサブ-サイクルと呼ばれている。56年シーケンスはマクミン(1993)に従って番号が付けられ、1817年、1873年、1929年、1985年がシーケンス01、1818年、1874年、1930年、1986年がシーケンス02、その他同様に選定される。マクミン(付録2, 2002)は全ての番号を与えた。幾つかの表に日付を年月日(YMMDD)として表示。国立地球物理データセンターはNGDCと、米国地質調査所はUSGSと略号で示す。これらの2つの主要参照元をこの論文で用いた。

北米南西域での記録

マクミン(2011)は9/56年サイクルを北米南西域での地震記録のタイミングで確立した。重要なことに、多くの記録イベントとして経験した3つの56年シーケンスを表1(シーケンス34, 43と52)に示した。

- \* Sq 34 - 北部カリフォルニア地震の記録 (サンフランシスコ。1906年4月18日, M8.25)。
- \* Sq 34 - 1906年7月16日と11月15日に起きたニューメキシコ地震 (共に M5.8)。
- \* Sq 34 - 第1ランクのアリゾナ地震と等値 (フラグスタッフ, 1906年1月25日。M6.2)。
- \* Sq 43 - ネバダ地震記録 (プリザント谷, 1915年10月3日。M7.7)。
- \* Sq 43 - パハ カリフォルニアでの20世紀記録地震 (1915年11月21日。M7.1)。
- \* Sq 52 - 米国西部地震記録 (グレート カスケーディア。1700年1月26日。M9.0)。
- \* Sq 52 - ハワイの地震記録 (1868年4月2日。M7.9)。
- \* Sq 52 - 米国火山噴火記録 (アラスカ州外) (セントヘレンズ山, 1980年5月18日)。

特筆すべき例外が南部カリフォルニアでの最大地震 (フォート テジオン, 1857年1月9日)。

合衆国による地震記録

米国地質調査所が提供した記録地震のリストは全米50州(付録1参照)個々では、19週が4月1日から年が開始、それらの年を表2に(比率<.01)。(注記: カリフォルニア, イリノイ, ネブラスカ, ニューハンプシャー, オレゴンでは等価の2つの地震記録がある)表2では大きく重要な5つの56年シーケンス(34, 43, 52, 05と14シーケンス)が12州での記録地震で(比率<.01)。

表 1 9/56年サイクル: 北米南西域での記録  
1年は1月1日から(12月31日までの1年間に生起)

Sq34		Sq43		Sq52
				<b>1700</b> <b>01.26</b>
1738	+9	1747	+9	1756
1794	+9	1803	+9	1812
1850	+9	1859	+9	<b>1868</b> <b>04.02</b>
<b>1906</b> <b>01.25(a)</b> <b>04.18</b> <b>07.16</b> <b>11.15</b>	+9	<b>1915</b> <b>10.03</b> <b>11.21(b)</b>	+9	1924
1962	+9	1971	+9	<b>1980</b> <b>05.18</b>

(a)アリゾナ地震はセンターから与えられたアリゾナ地震 M6.2 の2つの記録, 1906年1月25日と1912年8月18日による。  
(b)これは Baja California の地震記録。最近の2010年4月4日地震(M7.2)以来の。  
太字で示された年はハワイと北米南西域の記録イベントを含む。記録地震は米国による

表 2 9/56年サイクル: 全米州の記録地震  
1年は4月1日から(3月31日までの1年間に生起)

Sq34	Sq43	Se52	Sq05	Sq14	Sq23	Sq32	Sq41	Sq50	Sq03	Sq12
		1756	1765	1774	<b>1784</b> <b>11.30</b>	1792	1801	1810	1819	1828
1794	1803	1812	1821	1830	1839	1848	1857	1866	1875	1884
1850	1859	<b>1868</b> <b>04.03</b>	<b>1877</b> <b>11.15</b>	<b>1886</b> <b>09.01</b>	1895	1904	1913	1922	<b>1931</b> <b>08.06</b>	<b>1940</b> <b>12.20</b> <b>12.17</b> <b>12.24</b>
<b>1906</b> <b>04.18</b> <b>11.15</b>	<b>1915</b> <b>1916</b> <b>02.21</b>	1924	1933 1934 0312	1942	1951	1960	<b>1969</b> <b>11.20</b>	1978	1987	1996
<b>1962</b> <b>04.10</b>	1971	<b>1980</b> <b>07.27</b>	1989 <b>1990</b> <b>01.13</b>	<b>1998</b> <b>09.25</b>	2007					

年の太字は全米の記録地震で4月1日を年初とする年を表中に示す。  
生データは USGS より。州ごとの最大地震

表 3 18/56年サイクル: 北米地域の記録地震  
9月1日までの12.5ヶ月間に生起

Sq34		Se52		Sq14		Sq32
		1756 <b>1755</b> <b>11.18</b>		1774		1792
1794	+18	<b>1812</b> <b>02.16</b>	+18	1830	+18	1848
1850	+18	<b>1868</b> <b>04.03</b>	+18	<b>1886</b> <b>09.01</b>	+18	1904
<b>1906</b> <b>04.18</b>	+18	1924	+18	1942	+18	1960 <b>1959</b> <b>08.18</b>
1962	+18	1980	+18	1998	+18	2016

北米地域の記録地震は太字で表示。  
生データ元は USGS とカナダ地質調査所による

表 4 36/56年サイクル: 北米地域の記録地震  
11月20日までの1年間に生起

Sq05		Sq41		Sq21		Sq01		Sq37
1765	+36	1801	+36	1781 1837	+36	1817 1873 <b>1872</b> <b>12.15</b>	+36	1853 <b>1909</b> <b>05.15</b>
1821	+36	<b>1857</b> <b>01.09</b>	+36	1893	+36	<b>1929</b> <b>11.18</b>	+36	1965
1877	+36	1913	+36	<b>1949</b> <b>08.22</b>	+36	1985		
<b>1933</b> <b>11.20</b>	+36	1969	+36	2005				
1989	+36	2025						

北米地域の記録地震は太字で表示。  
生データ元は USGS とカナダ地質調査所による

北米域の記録地震

北米地域の記録地震はUSGSとカナダ地質調査所がソース(付録2参照)(注記: 同じマグニチュードに関する2つの地震はカリフォルニアとネバダで与えられた同じもの)。米国-カナダ地域での13の記録, 6地震がシーケンス34, 43, 52, 05と14で起きている(付録3を参照), それゆえに約1.2地震が5つのシーケンスに遭遇している。これら13の記録のほとんどが表3と表4に示すように18/56年と36/56年グリッドとして与えられるだろう。不思議なことに4つの記録全てが表4のようにカナダで起こっている。

USGSによれば、20世紀のメキシコ地震 (M8.2) が1932年6月3日に起こっているが、表3や4に落とされていない。しかしながら2番目のランクのエピソード (1985年9月19日, M8.1) が表4にシーケンス01で示される。

西部ヨーロッパの地震記録

表2で示した米国記録の9/56年レイアウトは西部ヨーロッパの地震 (表5参照) との関係で既に評価されている、西ヨーロッパの主要国の記録イベントはUSGSとNGDCがソースとなっている (付録4参照)。

表5の9/56年グリッドは幾つかの西ヨーロッパの1900年からの記録。

- \* 第1ランクと同じ記録のギリシャ地震 (1903年8月11日, M8.3)。
- \* 第1, 第2ランク イタリア地震 (カラブリア, 1905年9月8日, M7.9; アバザノ, 1915年1月13日, M7.5)。
- \* 2つの第1ランク記録のトルコ地震 (1939年12月26日, M7.8; 1912年8月9日, M7.8)。
- \* イギリス地震記録 (北海 1931年6月7日, M6.1)。
- \* ポルトガル-モロッコ地震記録 (1969年2月28日, M7.8)。
- \* アゾレス諸島の記録地震 (1980年1月1日, M7.8)。
- \* 北大西洋記録地震 (1941年11月25日, M8.3)。
- \* 第2ランクドイツ地震 (1951年3月14日, M5.8)

重要, 大リスボン地震はシーケンス52に属し1700年以降の西ヨーロッパの記録地震イベント (リスボン, 1755年11月1日, M9.0)

シーケンス52の記録

シーケンス52は全ての56年シーケンスの中で最も特筆すべきもので、多くの米国と西ヨーロッパ (表6参照) の多くの記録, その内の幾つかは歴史上の最も有名な地震イベントといつて経験されてきた。1700年, 1756年, 1812年これらの地震は2月28日に至る4ヶ月の間に起こっていた。セントヘレンズ山の噴火は5月18日に起こり, 1980年は米国の陸続きの48州で起こった最大の火山イベントであった。

19世紀の記録地震は南米 (アrika, 1868年8月13日, M9.0) とプエルトリコ (1867年11月18日, M7.5) このシーケンスで示され, 同様にベネズエラの (カラカス, 1812年3月26日, M7.7)。アルジェリアの20世紀の記録 (エルアスナム, 1980年10月10日, M7.3) もシーケンス52で起こっていた。

日本の地震記録

1890年以降の日本の主要地震のリストはNGDC (付録5参照) をソースとした。M8.3以上の日本の地震のトップ

表5 9/56年サイクル: 北西ヨーロッパの地震 1900-2011  
6月15日までの1年間に生起

Sq34	Sq43	Sq52	Sq05	Sq14	Sq23	Sq32	Sq41	Sq50	Sq03	Sq12
						1904 1903 08.11	1913 1912 08.09	1922	1931 0607	1940 1939 12.26
1906 1905 09.08	1915	1924	1933	1942 1941 11.25	1951	1960	1969 02.28	1978	1987	1996
1962	1971	1980 01.01	1989	1998	2007					

太字で示した年は6月15日を1年の終わりとして示されたもの  
生データの主要ソースはUSGS

表6 米国と西ヨーロッパでのシーケンス52に属する地震記録  
8月15日までの1年間に生起

シーケンス 52	M	イベント (事件)	記録
01.26, 1700	9.0	グレートカスケディア	北米の記録 (アラスカ以外)
11.01, 1755	9.0	大リスボン地震	西部ヨーロッパの記録
11.18, 1755	6.3	ボストン地震	北東米国の記録
02.18, 1756	6.3	デュレン地震	ドイツ地震記録
02.12, 1812	7.9	新マドリッド地震	中央米国の記録地震
04.03, 1868	7.9	ハワイ	ハワイ地震の記録
08.13, 1868	9.0	大アメリカ地震	19世紀の南米の記録
09.01, 1923	8.4	東京地震 (関東地震)	日本で最大の死者数T
01.01, 1980	7.3	アゾレス地震	アゾレス諸島の20世紀の記録
05.18, 1980	na	セントヘレンズ山の噴火	米国の噴火記録 (アラスカ以外)

原典: マクミン2006

表7 9/56年サイクル: 日本の巨大地震 1890年 - 2011年 (M => 8.3)  
3月5日までの3.3ヶ月間に生起

Sq 25	Sq 34	Sq 43	Sq 52	Sq 05
1897	1906	1915	1924	1933
02.07 02.19	01.21	1914 11.24		03.02
1953	1962	1971	1980	1989
2009				

太字はM8.3を超える日本の巨大地震で3月5日までの3.3ヶ月に生起したもので、  
生データソースはNGDC. 調査パラメーター: 日本の1890年□2010年, M: 8.3□9.5.

表8 9年サブサイクルと日本の地震  
3月2日までの半年間に生起

9 YSC	Date	Location	M
1897	02.07, 1897	日本	8.3
	02.17, 1897	日本 (宮城県沖?)	8.3
+9			
1906	01.21, 1906	本州南岸	8.4
+9			
1915	11.24, 1914	火山島	8.7
+9			
1924	09.01, 1923	東京 (関東地震)	7.9 (a)
+9			
1933	03.02, 1933	本州東岸 (昭和三陸地震)	8.4
+9			
1942	11.18, 1941	四国 (日向灘)	7.9

(a) 藤田によるマグニチュードは8.3.  
ソース: NGDC. 調査パラメーター: 日本の1890年□2010年, M: 8.3□9.5. ( ) 内は訳者が追記 ? : 日付がズレ

テン, 表7に記された5地震のみが56年シーケンスに表れた。これらの5つのエピソードは期待頻度の約0.3と比較して3月5日までに至る3.3ヶ月に生起した。日本での記録地震 (2011年3月11日, M9.0, 東北地方太平洋沖地震) はこの9/56年パターンに落ちていなかった。1890年以降の3つの同じ第2ランクに属する地震 (M8.7) は, 1つがこの表のシーケンス43に起こった (1914年11月24日, M8.7)。藤田和也 (ミシガ州立大) がリスト化した20世紀の日本の地震で, 1933年3月2日 (M8.6) はシーケンス05に, 1923年9月1日 (シーケンス52, M8.3) の第3ランクの地震, 両者は表7に示したように3月5日までの6.2ヶ月期間中に落された。

特筆すべき9年サブサイクルは, その6つの全てのイベントが3月2日までの半年に起こったことを伴った明瞭な証拠となっていた。(表8参照)

ラテンアメリカの地震記録

NGDC からコンパイルしたラテンアメリカ諸国の 1900 年以降の記録地震 (付録 6 参照). 以下の記録は 18/56 年グリッドとして表 9 に表された.

- \* 第 1 ランクと同じコロンビア地震 (1904 年 1 月 20 日, M7.9).
- \* 中央アメリカ地震記録 (1904 年 12 月 20 日, M8.3).
- \* 2 つの第 1 ランクのエクアドル地震 (1906 年 9 月 29 日, M7.9. 1942 年 5 月 14 日, M7.9).
- \* 第 1 ランクと同じカリブ海地震 (1906 年 12 月 6 日, M7.9).
- \* 第 1 ランクと同じアルゼンチン地震 (1944 年 1 月 15 日, M7.8).
- \* チリ地震記録 (1960 年 5 月 22 日, M9.5).
- \* 第 2 ランクのペルー地震 (1942 年 8 月 24 日, M8.2).

表 9 の 18/56 年形状は NGDC データを用いて作成できたのみであり, 他の歴史上のリストによってこの傾向が間違いに陥っていた.

残念なことに, ラテンアメリカ地震の引用元リストは与えられたマグニチュードとこのような記録イベントがかなり変化に富んでいた (付録 6 参照). 藤田によれば, 1900 年以前の南米のイベントはいくつかのカタログでリストされたマグニチュードが “過大見積” のように思われ, 彼の編集物からは省略された. 当てにならない初期のデータは評価問題を生じ, ラテンアメリカの記録地震から引き出すことができる結論には至らなかった.

主要な世界の地震

ミシガン州立大学の藤田和也は世界中で 1900 年から 2010 年 (付録 7 参照) に至るマグニチュード 8.2 以上の巨大地震のカタログを提供した. 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震 (記者) を彼のリストに挿入. 1900 年以降の総計 50 イベントは藤田によってリスト化され, 19 イベントは表 10 (比率 < .05) として 10 月 31 日までの 1 年間に生じた. 1900 年以前に含まれるものもより高い比率も藤田によってリストが成し遂げられた. 1700 年以降の 73 の主要地震の内の 31 がこの表に示されている (比率 < .001).

世界の巨大地震

藤田のカタログでは, マグニチュード 8.5 以上の巨大地震も評価されている. 表 11a は 900 年以降の 5 つの巨大地震のうち 3 つを 54/56 年サイクルを示している. 1952 年カムチャツカ (M9.0), 2004 年インドネシア (M9.0) それと 2011 年日本 (M9.0). 表 11b は 1960 年チリー (M9.5) と 1964 年アラスカ (M9.2) の巨大地震を 54/56 年グリッドに示している. 他の主要地震 (M8.5 以上) は藤田によって両方の表に盛り込まれている.

これらの 54/56 年パターンは表 12 に示したように 9 年, 45 年, 56 年間隔をベースとしたグリッドで作られたも

表 9 18/56 年サイクル: 1900 年 - 2011 年のラテンアメリカの地震記録  
1 年は 1 月 1 日から (12 月 31 日までの 1 年間に生起)

Sq16		Sq34		Sq52		Sq14		Sq32
								1904 01.20 12.20
		1906 01.31 12.02	+18	1924	+18	1942 05.14	+18	1960 05.22
1944 01.15 2000	+18	1962	+18	1980	+18	1998	+18	2016

ラテンアメリカの地震記録で太字は 1 年が 1 月 1 日から始まるものを示す  
生データは NGDC. 調査パラメーター: 関係諸国 1900 年, M8.2, M9.5.

表 10 9/56 年サイクル: 藤田による 1700 年以降の主要地震  
10 月 31 日までの 1 年間に生起

Sq25	Sq34	Sq43	Sq52	Sq05	Sq14	Sq23	Sq32	Sq41	Sq90	Sq03	Sq12	Sq21
			1700 01.26	1709	1718	1727	1736	1745	1754	1763	1772	1781
1719	1728	1737	1756 1755 11.01	1765	1774	1783	1792 08.22	1801	1810	1819 06.16	1828	1837
1785	1794	1803	1812	1821	1830	1839	1848	1857	1866	1875	1884	1893
1841 05.17	1850	1859	1868 08.13	1877 05.10	1886	1895	1904	1913	1922	1931	1940 05.24	1949 08.22
1897 06.12 09.21	1906 01.31 08.17	1915	1924 04.14 06.26	1933 03.02	1942	1951 1950 12.09	1960 05.22 05.21	1969 08.11	1978	1987	1996 02.18	2005 03.28 12.26
1953	1962	1971	1980 1979 12.12	1989 05.23	1998	2007 09.12 2006 11.15						
2009												

Dates expressed as YYYYMMDD.  
The 56 year sequences are separated by an interval of 9 years.  
Source of Raw Data: Kazuya FUJITA

表 11a 54/56 年サイクル: 1900 年以降の世界巨大地震 (M => 8.5)  
8 月 17 日までの 1 年間に生起

Sq29		Sq27		Sq25		Sq23		Sq21
				1897	+54	1895	+54	1949
						1951	+54	2005
						1950 08.15		03.28 2004 12.26
		1899	+54	1953 1952 11.04	+54	2007		
1901	+54	1955	+54	2009				
1957 03.09	+54	2011 03.11						

表 11b 54/56 年サイクル: 1900 年以降の世界巨大地震 (M => 8.5)  
8 月 17 日までの 1 年間に生起

Sq36		Sq34		Sq32
				1904
		1906 01.31 08.17		+54 1960 05.22
1908	+54	1962		+54 2016
1964 03.28 1963 10.13	+54	2018		

56 年サイクルは 54 年間隔によって区別されている.  
太字のイベントは 1900 年以降の (M => 8.5) 首位記録地震.  
生データのソース: 藤田和也

表 12 9-45/56 年サイクル: 1900 年以降の世界巨大地震 (M => 8.5)  
8 月 17 日までの 1 年間に生起

Sq29		Sq38		Sq27		Sq36		Sq25
						1908	+45	1953 1952 11.04
1901	+9	1910	+45	1955	+9	1964 03.28 1963 10.13	+45	2009
1957 03.09	+9	1966	+45	2011 03.11	+9	2020		
		Sq34		Sq23		Sq32		Sq21
						1904	+45	1949
		1906 01.31 08.17	+45	1951 1950 08.15	+9	1960 05.22		2005 03.28 2004 12.26
+9	1962	+45	2007	+9	2016			
+9								

太字のイベントは 1900 年以降の (M => 8.5) 首位記録地震.  
生データのソース: 藤田和也

のとして統合することが可能. この構成は水平的に 9 年, 45 年, 9 年, 45 年... が繰り返され, 垂直に 56 年 (9-45 年サイクルと表示). それは単に 9/56 年シーケンスの構成とはいえ, マグニチュード 9.0 以上の世界の巨大地震 5 個が全てこのパターンに落ちる. それ故に, 藤田の

首位 17 の主要地震リスト ( $M \geq 8.5$ ) は驚くべきことに 11 個が表 12 のこのパターンに落ちていて、多分 2.7 が機会として期待されるだろう。興味深いことに、マグニチュード 8.7 以上の 2 つの巨大地震が表 12 に記されていないことで、これは 1965 年 2 月 4 日 ( $M8.7$ ) と 2010 年 2 月 27 日 ( $M8.8$ ) の 45 年間隔に分かれていた。

USGS がリスト化したのマグニチュード 8.7 以上の 1900 年以前の時代の 4 つの主要地震は、その 3 つが戦略的なシーケンス 52 に表れた -1700 年カスケーディア、1755 年リスボン、1868 年アリカ地震 (表 6 参照)。しかしながら、シーケンス 52 は表 12 に表した 9-45・56 年パターンに統合しなかった。

地方での地震記録

藤田のリストの中には地方での 17 の記録地震が示されていて、付録 7 の中に番号が記されている (注記: 1905 年の 2 つのモンゴル地震は 1 つのイベントとしてまとめられる)。いくつかの 9 個の記録は表 13a のように 9/56 年シーケンスとして生起し、そこでは 2.4 が期待されるだろう。引き続き 6 つのエピソードは表 13b で 6 つのシーケンスに落ちこれは重要な巨大地震のアラスカ (1964 年) と日本 (2011 年) を含んでいる。

議 論

興味深い対比が記録地震とその 9/56 年グリッド、特別にシーケンス 25, 34, 43, 52 と 05 のクラスターの傾向との間に確立された。この北米地域、西ヨーロッパ、日本での適用に関し、多分、月 - 太陽潮汐の影響によって引き起こされたものとは別に、小さなことがこの観察を説明するために提案できる。マクミン (2011) はこの効果のバックグラウンド情報を提供し、如何に月 - 太陽サイクルが密接にその 9/56 年形状とリンクしているかを示した。9/56 年パターンのどんなイベントグループでも 2 つの制限された区切り位置での月の昇交点を持っていて、それがおおよそ  $180^\circ$  反対の黄道上のサイクル上であることが例外ないということ。遠地点もまた例外なく  $120^\circ$  離れた 3 つの黄道上に仕切られた場所であること。如何にしてその 9/56 年地震サイクルがイベントを記録する関係上の実際の機能であることは完全には未知なままになっている。他の人々に望むらくはこの月 - 太陽潮汐の調和性に必須なスキルがこの著者がこの謎を解くよりもはるかに継続的であろう。

記録された地震の特別な地域 / 地方は地震強度よりもより重要。このように北東米国での 1755 年のボストン地震 ( $M6.5$ ) は 1906 年のカリフォルニアでのサンフランシスコ地震 ( $M7.7$ )、ネバダ、西カナダの 1949 年のクイーンキャロッティー島地震 ( $M8.1$ ) との関連性が与えられた。特別な地域で記録されたイベントは何が関連していると思われるのか、その相対的なマグニチュードを考えないで。

表 13a 9/56 年サイクル: 地方による記録 1900 年-2011 年 ( $M \geq 8.2$ )							
6 月 30 日までの 1 年間に生起							
Sq25	Sq34	Sq43	Sq52	Sq05	Sq14	Sq23	Sq32
	1906 01.31 1905 07.09 07.23	1915	1924 06.26	1933 03.02	1942	1951 1950 08.15 12.09	1960 05.22
1953 1952 11.04	1962	1971	1980 1979 12.12	1989	1998	2007	
2009							

表 13b 9/56 年サイクル: 地方による記録 1900 年-2011 年 ( $M \geq 8.2$ )					
6 月 30 日までの 12.2 ヶ月間に生起					
Sq47	Sq56	Sq09	Sq18	Sq29	Sq38
1919 04.30 1918 08.15	1928 06.17	1937	1946	1955	1964 03.28
1975	1984	1993	2002 2001 06.23	2011 03.11	2020

9/56 年グリッドは著者によって正確な時間ユニット - 水平に 9 年と垂直に 56 年より構成されている地震サイクルとしてのみ知られている。それゆえに、もし年代順にリスト化された、特別な 9/56 年パターンのイベントがはっきり数学的な構造を呈していないランダムな印象を与えてしまう。例えば米国南西の記録が表 1 に 1700 年、1868 年、1906 年、1915 年、1980 年と 2010 年に落ちている。西ヨーロッパの記録が表 5 に 1903 年、1905 年、1912 年、1939 年、1941 年、1969 年と 1980 年に起こっている。9/56 年グリッドは毎長年に起こったイベントというような伝統的なセンスではサイクルと考えることはできず、しかし何かずつとはるかに難解になる。

著者の調査によれば金融と地震学の両者は良い関係を成し遂げていたが、しばしば評価のために生のデータを実行可能なサブセットに分解することも多い。例えばこの論文の中の記録地震は 9/56 年サイクルの点で非常に意義深い、もし大規模地震のサンプルのみが考慮されたならば、その効果は看過されるだろう。そのうえ、カリフォルニアの  $M6.9$  以上の大規模地震、ネバダ、バジャカリフォルニアはましてや完全に 9/56 年グリッドの 1 つのセクターで生起したらしい (マクミン, 2004, 2009)。対照的に、中規模地震 (マグニチュード 6.5~6.8) は 18/56 年パターンで生起しそれに完全に 9/56 年グリッドのセクターとは異なっている。もし大規模と中規模の地震が一つのサンプルとして評価されたならば、このことが観察され得ない。他の多くの事例は金融に与えられ得るだろう (マクミン, 2004, 2009)。

1760 年以降、米国と西ヨーロッパの大金融パニックは付録 8 の表 A に示したように 9/56 年パターンで最も通常に起きていた。表の 10 シーケンス (シーケンス 52, 05, 14, 23, 32, 41, 50, 03, 12 と 21) もまた表 10 の世界大規模地震が 9/56 年グリッドで表されている。米国州による記録 (表 2 参照) と西ヨーロッパ諸国 (表 5 参照) の何か類似したものが繰り返されているだろう。大金融危機の 9/56 年グリッドが大規模地震のグリッドと重なっているようである。

幾つかの発見における季節的な重要性は黄道サイクルに

おける太陽の位置として示され、地震のタイミングと関係があるだろう。類似した状態は黄道の月の位置にも適用でき、しかしながらこの論文ではこれを支持しない証拠が提案されている。

いかにその9/56年サイクルの機能がそのままになっているのかは大変困ったこと。もっと先の調査の最良の道は月と太陽の間に横たわっている様々な角度、月の昇交点、春分の遠地点(000E°)。上昇点は月と太陽の推定された昼間のサイクルに含まれるかも知れない。(注記:地球表面の特別な場所は、その上昇場所は特別な時間における西の水平地点)。これら全ての月-太陽ファクターは個別にというよりはむしろ集成的に評価されるだろう、しかしながらこれは着手するには困難なことのように思われる。それで黒点のサイクルも考慮に入れる必要がある。チョイとマスロフ(2010)によれば、1973年から2010年の期間の地震の頻度は“厳密に太陽(黒点)サイクルに関して:多くの地震は衰えた/谷期間に増加している”。最近、黒点サイクルと地震活動の間の関連についての多くの論文が出版されている。再び、如何に9/56年月-太陽効果が黒点サイクルに関連して地震活動に影響していることは完全に不可解なことであることか。

結 論

表2に記した米国50州の記録地震として、北米南西域の地震記録は表1に示した如く選択的に9/56年サイクルに落ちる。両者のケースにおいて5つの56年シーケンス、25, 34, 43, 52, 05の記録されたエピソードに強い嗜好性が存在する。このことは1890年以降の日本のマグニチュード8.3以上の地震にも適用可能である。幾つかのサンプルについて、この重要性は完全な9/56グリッドのより大きなセクションでも、西ヨーロッパの記録地震(表5参照)と1900年以降の世界巨大地震(表10参照)として明白である。他の興味深いことは、世界巨大地震(表12参照)の9-45/56年サイクルと同様に、北米の地域的なイベントの記録では18/56と36/56年サブサイクル(表3・表4参照)が生起していた。ラテンアメリカでは初期の地震記録のリストの信頼性がそれぞれの国がソースとなっておらず、結論を引き出せない。

なぜそれほど多くのシーケンスが多く記録地震に含まれているままになっていることは大変困ったことで、しかしながら、月-太陽潮汐効果はマクミン(2011)によって明確に含蓄された。総体的に、発見された記録地震と9/56年サイクルは確かに非常に興味深く、しかし非常に初期的である。多くの調査がこのエリアで保障される。

謝辞: 編集者のドン チョイ氏には彼の9/56年概念に関するサポートに関しお礼し、感謝申し上げます。

文 献

Appendix 1 RECORD EARTHQUAKE BY US STATE TO 2010 - USGS						
State	Date	UTC	Lat	Long	M	Intensity
Alabama	1916 10 18	22:04	33.5N	86.5W		VII
Alaska	1964 03 28	36:14.0	61.0N	147.7W	9.2	X
Arizona	1959 07 21	17:39:29	36.8N	112.4W		VI
Arkansas	1811 12 16	8:15	35.6N	90.4W	7.7	XI
California	1857 01 09	16:24	35.7N	120.3W	7.9	IX
	<b>1906 04 18</b>	<b>13:12:21</b>	<b>37.7N</b>	<b>122.5W</b>	<b>7.7</b>	<b>XI</b>
Colorado	1882 11 08	1:30	40.5N	105.5W		VII
Connecticut	1791 05 16	13:00	41.5N	72.5W		VII
Delaware	1871 10 09	14:40	39.7N	75.5W		VII
Florida	1780 02 06		30.4N	87.2W		VI
Florida	1879 01 13	4:45	29.5N	82.0W		VI
Georgia	<b>1914 03 05</b>	<b>20:05</b>	<b>33.5N</b>	<b>83.5W</b>		<b>V</b>
Hawaii	<b>1868 04 03</b>	<b>2:25</b>	<b>19.0N</b>	<b>155.5W</b>		<b>X</b>
Idaho	1983 10 28	06:06.5	44.0N	113.9W	7.0	IX
Illinois	1968 11 09	01:40.5	37.9N	88.4W	5.3	VII
	2008 04 18	09:36:59.1	38.452N	87.886W	5.4	VII
Indiana	1909 09 27	9:45	39.8N	87.2W		VII
Iowa	1905 04 13	16:30	40.4N	91.4W		V
Kansas	1867 04 24	20:22	39.2N	96.3W		VII
Kentucky	<b>1980 07 27</b>	<b>52:21.4</b>	<b>38.2N</b>	<b>83.9W</b>	<b>5.0</b>	<b>VII</b>
Louisiana	1930 10 19	12:17	30.0N	91.0W		VI
Maine	1904 03 21	6:04	45.0N	67.2W		VII
Maryland	<b>1990 01 13</b>	<b>47:55.3</b>	<b>39.4N</b>	<b>76.9W</b>		<b>V</b>
Massachusetts	1755 11 18	9:11:35	42.7N	70.3W		VIII
Michigan	1947 08 10	46:41.3	41.9N	85.0W		VI
Minnesota	1975 07 09	54:21.3	45.5N	96.1W	4.3	VI
Mississippi	<b>1931 12 17</b>	<b>3:36</b>	<b>33.8N</b>	<b>90.1W</b>		<b>VI</b>
Missouri	1812 02 07	9:45	36.5N	89.6W	7.9	XII
Montana	1959 08 18	37:13.5	44.7N	111.2W	7.3	X
Nebraska	<b>1877 11 15</b>	<b>17:45</b>	<b>41.0N</b>	<b>97.0W</b>		<b>VII</b>
	1964 03 28	08:46.5	43.0N	101.8W		VII
Nevada	<b>1915 10 03</b>	<b>52:48.0</b>	<b>40.5N</b>	<b>117.5W</b>	<b>7.1</b>	<b>X</b>
New Hamp	<b>1940 12 20</b>	<b>27:26.2</b>	<b>43.9N</b>	<b>71.4W</b>	<b>5.3</b>	<b>VII</b>
	<b>1940 12 24</b>	<b>43:45.0</b>	<b>43.9N</b>	<b>71.3W</b>	<b>5.6</b>	<b>VII</b>
New Jersey	1783 11 30	3:50	41.0N	74.5W		VI
New Mexico	<b>1906 11 15</b>	<b>12:15</b>	<b>34.0N</b>	<b>107.0W</b>		<b>VII</b>
New York	1944 09 05	38:45.7	45.0N	74.7W	5.5	VIII
N Carolina	<b>1916 02 21</b>	<b>23:39</b>	<b>35.5N</b>	<b>82.5W</b>		<b>VII</b>
North Dakota	1909 05 16	4:15	49.0N	104.0W		VI
Ohio	1937 03 09	44:35.5	40.5N	84.3W		VIII
Oklahoma	1952 04 09	29:28.4	35.5N	97.9W		VII
Oregon	1910 08 05	1:31:36	42.0N	127.0W		Felt
	1993 09 21	28:55.4	42.3N	122.0W	6	VII
Pennsylvania	<b>1998 09 25</b>	<b>52:52.1</b>	<b>41.5N</b>	<b>80.4W</b>		<b>VI</b>
Rhode Island	1976 03 11	29:32.2	41.6N	71.2W	2.1	VI
S Carolina	<b>1886 09 01</b>	<b>2:51</b>	<b>32.9N</b>	<b>80.0W</b>	<b>7.0</b>	<b>X</b>
South Dakota	1911 06 02	22:34	44.2N	98.2W		V
Tennessee	1865 08 17	15:00	36.0N	89.5W		VII

Appendix 2 RECORD QUAKE BY NORTH AMERICAN REGION			
Country	Record Quake	M	Location
US REGIONS			
Alaska	Mar 28, 1964	9.2	Anchorage AK
California - Nevada	Jan 09, 1857 Apr 18, 1906	7.9 7.7	Fort Tejon CA San Francisco CA
Central	Feb 12, 1812	7.9	New Madrid MO
Hawaii	Apr 03, 1868	7.9	Hawaii HA
North East	Nov 18, 1755	6.5	Boston MA
Pacific North West	Dec 15, 1872	7.2	Lake Chelan WA
South East	Sep 01, 1886	7.0	Charleston SC
Western Mountains	Aug 18, 1959	7.5	Hebgen Lake MT
CANADIAN REGIONS			
Central Canada (a)	May 15, 1909	5.5	Saskatchewan
Eastern Canada	Nov 18, 1929	7.2	Offshore Newfoundland
Northern Canada	Nov 20, 1933	7.3	Baffin Bay
Western Canada	Aug 22, 1949	8.1	Queen Charlotte Island
MEXICO			
Mexico (b)	Jun 03, 1932	8.2	Jalisco
Events in bold occurred in the year ending November 20 of those years in Appendix 3. (a) Source: Gendzwil (2006). (b) Record event for the 20th century. Sources: USGS. <i>Historic United States Earthquakes</i> . <a href="http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/historical.php">http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/historical.php</a> Geological Survey of Canada. <i>Historic Earthquakes in Canada</i> . <a href="http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/history/index-eng.php">http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/history/index-eng.php</a>			

Choi, D.R. and Maslov, L., 2010. Earthquakes and solar activity cycles. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 57, p. 85-97.

Gendzwill, D., 2006. Earthquakes in Saskatchewan and Canada. University of Saskatchewan. [www.usask.ca/geology/labs/seismo/quakenat.html](http://www.usask.ca/geology/labs/seismo/quakenat.html)

Geological Survey of Canada, Historic earthquakes in Canada. <http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/histor/index-eng.php>

Fujita, K., Magnitudes of the largest events of the 20th Century. [www.msu.edu/~fujita/earthquake/bigquake.html](http://www.msu.edu/~fujita/earthquake/bigquake.html)

Instituto Nacional De Prevencion Sismica, <http://www.inpres.gov.ar/seismology/linkppal.htm>

Kindleberger, C. P., 1996. *Manias, Panics & Crashes*. John Wiley & Sons. 3rd edition.

McMinn, D., 1993. Financial Crises & The Number 56. The Australian Technical Analysts Association Newsletter. p. 21-25. September.

McMinn, D., 1995. *Financial Crises & The 56 Year Cycle*. Twin Palms Publishing. 103p.

McMinn, D., 2002. 9/56 Year Cycle: Financial Crises. [www.davidmcminn.com/pages/fcnum56.htm](http://www.davidmcminn.com/pages/fcnum56.htm)

McMinn, D., 2004. *Market Timing By The Number 56*. Twin Palms Publishing. 134p.

McMinn, D., 2006. *Market Timing By The Moon and The Sun*. Twin Palms Publishing. 158p.

McMinn, D., 2011. 9/56 Year Cycle: Californian earthquakes. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 58, <http://www.sismologia.cl/seismo.html>

US Geological Survey, The Largest Earthquakes, State by State. [http://neic.usgs.gov/neis/states/state\\_largest.html](http://neic.usgs.gov/neis/states/state_largest.html)

Appendix 3 9/56 YEAR CYCLE: RECORD QUAKE BY NORTH AMERICAN REGION Year ending November 20							
Sq 34	Sq 43	Sq 52	Sq 05	Sq 14	Sq 23	Sq 32	Sq 41
		1756 1755 Nov 18	1765	1774	1783	1792	1801
1794	1803	<b>1812 Feb 16</b>	1821	1830	1839	1848	<b>1857 Jan 09</b>
1850	1859	<b>1868 Apr 03</b>	1877	<b>1886 Sep 01</b>	1895	1904	1913
<b>1906 Apr 18</b>	1915	1924	<b>1933 Nov 20</b>	1942	1951	1960	1969
1962	1971	1980	1989	1998	2007		
Sq 50	Sq 03	Sq 12	Sq 21	Sq 30	Sq 39	Sq 48	Sq 01
1754	1763	1772	1781	1790	1799	1808	1817
1810	1819	1828	1837	1846	1855	1864	1873 <b>1972 Dec 15</b>
1866	1875	1884	1893	1902	1911	1920	<b>1929 Nov 18</b>
1922	1931	1940	<b>1949 Aug 22</b>	1958	1967	1976	1985
1978	1987	1996	2005				

56 year sequences were separated from each other by an interval of 9 years. Quakes in **bold** happened in years ending November 20 within the table. **Sources of Raw Data:** USGS, Geological Survey of Canada.

Appendix 4 RECORD WESTERN EUROPEAN QUAKE SINCE 1900			
WESTERN EUROPE	Date	M	Location
France	19090611	6.2	Vernegues
Germany	19920413	5.9	Roermond
<b>Greece</b>	<b>19030611</b> 19260826	<b>8.3</b> 8.3	<b>Kythera Rhodes Island</b>
<b>Italy</b>	<b>19050908</b>	<b>7.9</b>	<b>Calabria</b>
<b>North Atlantic</b>	<b>19411125</b>	<b>8.3</b>	<b>Atlantic Ocean</b>
<b>Portugal - Morocco</b>	<b>19690228</b>	<b>7.8</b>	na
<b>Azores (Portugal)</b>	<b>19800101</b>	<b>7.2</b>	<b>Azores Islands</b>
Spain	19540329	7.9	Durcal
<b>Turkey</b>	<b>19120809</b> <b>19391226</b>	<b>7.8</b> 7.8	<b>Murefte Erizincan</b>
<b>UK</b>	<b>19310607</b>	<b>6.1</b>	<b>North Sea</b>

Years in **bold** experienced record earthquakes during June 15 ended years in Table 5. **Main Sources:** USGS, *Historic World Earthquakes*. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php> NGDC. Search parameters: Relevant country. 1900 to 2010. M: 7.0 to 9.0 <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1>

Appendix 5 HISTORIC JAPANESE EARTHQUAKES 1890 - 2011 (M => 8.3)						
Year ending December 15						
Year	Month	Day	Location	Lat	Long	M
1891	10	28	Japan	35.5	137	8.4
<b>1897</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>Japan</b>	<b>40</b>	<b>140</b>	<b>8.3</b>
<b>1897</b>	<b>2</b>	<b>19</b>	<b>Japan</b>	<b>38</b>	<b>142</b>	<b>8.3</b>
1898	6	5	Offshore east coast Honshu	38	143	8.7
<b>1906</b>	<b>1</b>	<b>21</b>	<b>Off south coast Honshu</b>	<b>34</b>	<b>138</b>	<b>8.4</b>
1911	6	15	Ryukyu Islands	29	129	8.7
<b>1914</b>	<b>11</b>	<b>24</b>	<b>Volcano Islands</b>	<b>22</b>	<b>143</b>	<b>8.7</b>
<b>1933</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>Honshu: East Coast</b>	<b>39.2</b>	<b>144.5</b>	<b>8.4</b>
2003	9	25	Hokkaido	41.8	143.9	8.3
2011	3	11	Offshore north east Honshu			9.0

Years in **bold** contained the Japanese quakes in the 3.5 months ending March 5 in Table 7. **Source:** NGDC. Search parameters: Japan. 1890 to 2011. M: 8.0 to 9.5. <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1>

Appendix 6 RECORD QUAKE BY LATIN AMERICAN COUNTRY 1900 - 2010								
Country	NGDC		USGS		Fujita		Other	
	Date	M	Date	M	Date	M	Date	M
<b>Argentina</b>	<b>19440115</b>	7.8	<b>19440115</b>	7.4	19501209	8.3	19491217	7.8
	19491217	7.8	19771123	7.4			(a)	
<b>Brazil</b>	19500307	8.6	20030620	7.1	na	na		
<b>Bolivia</b>	19571129	7.8	19940609	8.2	19940609	8.3		
<b>Chile</b>	<b>19600522</b>	9.5	<b>19600522</b>	9.5	<b>19600522</b>	9.6	20100227	8.8
							(b)	
<b>Colombia</b>	19000918	7.9	19700731	8.0	19791212	8.3		
	<b>19040120</b>	7.9						
<b>Ecuador</b>	<b>19060131</b>	8.8	<b>19060131</b>	8.8	<b>19060131</b>	8.6		
<b>Peru</b>	19071116	8.7	20010623	8.4	20010623	8.4		
<b>Venezuela</b>	19001029	8.4	19970709	7.0	na	na		
<b>Central America</b>	<b>19041220</b>	8.3	19420806	7.9	na	na		
<b>Caribbean</b>	19000621	7.9	19460804	8.0	na	na		
	<b>19061203</b>	7.9						
<b>Mexico</b>	19020923	8.4	19320303	8.1	19280617	8.2		

(a) Source: Instituto Nacional De Prevencion Sismica. (b) Source: Universidad de Chile, Dept de Geofisica. Earthquakes in **bold** contained record Latin American quakes in Table 9. **Main Sources:** NGDC. Search parameters: Relevant country. 1900 to 2010. M: 7.0 to 9.0 <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1> USGS, *Historic World Earthquakes*. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php> Fujita, K., *Magnitudes of the Largest Events of*

付録 7 巨大地震イベントのマグニチュード: 1900年-2011年  
藤田和也(2010年3月1日に改良)

ランク	年月日	位置	Mw
1a	1960.05.22#	Chile Mainshock	9.6
1b	1960.05.22	Chile "Precursor"	9.5
1c	1960.05.22	Chile "Afterslip"	9.0
2	1964.03.28#	Prince William Sound, Alaska	9.2
3	2004.12.26#	Offshore Northern Sumatra	9.0
4	1952.11.04#	Kamchatka (Russia)	9.0
	2011.03.11#	Offshore Honshu Japan	9.0
5	2010.02.27	Bio Bio, Chile	8.8
6	1965.02.04	Aleutian Islands, Alaska	8.7
7	1950.08.15#	Assam, India	8.7
8	2005.03.28	Offshore Northern Sumatra	8.6
9	1933.03.02	Sanriku, Japan	8.6
10	1957.03.09	Aleutian Islands Alaska	8.6
11	1906.01.31#	Ecuador-Colombia	8.6
12	1963.10.13	Etorofu, Kurile Islands	8.5
13	1938.02.01	Banda Sea, Indonesia	8.5
14	2007.09.12	Offshore southern Sumatra	8.5
15	1906.08.17	Valparaiso, Chile	8.5
16	1923.02.03	Kamchatka	8.5
17	2001.06.23#	Offshore Peru	8.4
18	1958.11.06	Etorofu, Kurile Islands	8.4
19	1922.11.11	Atacama, Chile	8.4
20	1952.03.04	Tokachi-oki, Japan	8.4
21	1977.08.19	Sumbawa, Indonesia	8.3
22	2006.11.15	Kuril Islands	8.3
23	2003.09.25	Hokkaido, Japan	8.3
24	1924.06.26#	Macquarie Ridge	8.3
25	1920.12.16#	Kansu, China	8.3
26	1994.10.04	Etorofu, Kuriles	8.3
27	1905.07.09#	Mongolia	8.3
28	1905.07.23#	Mongolia	8.3
29	1946.04.01	Aleutian Islands, Alaska	8.3
30	1979.12.12#	Colombia-Ecuador	8.3
31	1923.09.01	Kanto (Tokyo), Japan	8.3
32	1968.05.16	Tokachi-oki, Japan	8.3
33	1938.11.10	Alaska	8.3
34	1919.04.30#	Tonga	8.3
35	1994.06.09#	Bolivia	8.3
36	1950.12.09#	Argentina	8.3
37	1959.05.04	Kamchatka, Russia	8.2
38	1940.05.24	Peru	8.2
39	1918.08.15#	Mindanao, Philippines	8.2
40	1996.02.18	West Irian, Indonesia	8.2
41	1989.05.23	Macquarie Ridge	8.2
42	1949.08.22	Queen Charlotte Is, Canada	8.2
43	1928.06.17#	Oaxaca, Mexico	8.2
44	1918.09.07	Urup, Kurile Islands	8.2
45	1969.08.11	Shikotan, Kurile Islands	8.2
46	1960.05.21	Chile Foreshock	8.2
48	1966.10.17	Northern Peru	8.2
49	1970.07.31	Colombia	8.2
50	1924.04.14	Philippines	8.2
LARGE PRE 20TH CENTURY EVENTS - Fujita			
	1700.01.26	Great Cascadia	9.0
	1703.12.31	Kanto, Japan	8.2
	1707.10.28	Tosa, Japan	8.4

1725.02.01	Eastern Siberia, Russia	8.2
1730.07.08	Valparaiso, Chile	8.6
1737.10.17	Kamchatka, Russia	8.3
1751.05.25	Concepcion, Chile	8.5?
1755.11.01	Lisbon, Portugal	8.7
1792.08.22	Kamchatka, Russia	8.4
1797.02.04	Ecuador	8.3
1819.06.16	Rann of Kutch, India	8.3
1841.05.17	Kamchatka	8.4
1843.02.08	Guadalupe, Caribbean	8.3
1843.04.25	Etorofu, Kuriles	8.3
1854.12.23	Tokaido, Japan	8.4
1854.12.24	Nankaido, Japan	8.4
1868.08.13	Chile - Peru border	8.5
1877.05.10	Iquique, Chile	8.3
1889.07.11	Chilik, Kazakhstan	8.3
1891.10.28	Mino-Owari, Japan	8.3
1896.06.15	Sanriku, Japan	7.0
1897.06.12	Assam, India	8.0
1897.09.21	Philippines	7.9

#20世紀の国による記録地震。  
表10の10月31日までの1年間に生じたもので、年の太字は(M=>8.2)の巨大地震。  
出展:藤田和也 20世紀の巨大地震イベントのマグニチュード  
[www.msu.edu/~fujita/earthquake/bigquake.html](http://www.msu.edu/~fujita/earthquake/bigquake.html)

付録 8 9/56年周期: 財政的危機

Kindleberger(付録B, 1996)は、1760~1940年の期間に合衆国と西ヨーロッパで約30回の主要な財政恐慌を記録し、そのうちの16回は表Aに示される9/56年格子の中で発生している(比率  $p < .001$ : McMinn, 2004). 1940~1996年の期間には、多数の国際通貨危機がKindlebergerのリストに記録され、それらのうちの1回だけが9/56年配列に含まれる。通貨投機を含むにしても、Kindlebergerの44回の危機年(1760~1989年)は9/56年パターンにあてはまり、依然として重要である(比率  $p < .01$ ).

表 A 9/56年サイクル: 金融危機 1760年~1996年  
3月1日より1年が開始

Sq52	Sq05	Sq14	Sq23	Sq32	Sq41	Sq50	Sq03	Sq12	Sq21	Sq30	Sq39	Sq48	Sq01
													1761
							<b>1763</b>	<b>1772</b>	1781	1790	<b>1799</b>	1808	1817
1812	1821	1830	1839	<b>1848</b>	<b>1857</b>	<b>1866</b>	1875	1884	<b>1893</b>	1902	1911	1920	<b>1929</b>
<b>1868</b>	1877	1886	1895	1904	1913	1922	<b>1931</b>	1940	1949	<b>1958</b>	1967	1976	<b>1985</b>
1924	<b>1933</b>	1942	1951	1960	1969	1978	<b>1987</b>	1996	2005				
<b>1980</b>	<b>1989</b>	1998	2007										

56年シーケンスは9年間隔によって区切られている。  
Kindleberger(付録B, 1996年)によるリストとして太字の年は大金融パニックと危機。  
出展: マクミン, 1995, 2004.

9/56年周期: ハリケーン 9/56 YEAR CYCLE: HURRICANES

David McMinn  
独立周期研究者

Twin Palms, Blue Knob, NSW2480, オーストラリア McMinn56@yahoo.com

(矢野 孝雄 [訳])

要旨: 大西洋および東太平洋における主要ハリケーンの発生時期が、9/56年周期にかかわって評価される。これらの重要な気象事象は、偶然として予期されるよりもはるかに多くが9/56年格子の特有の区画に群がる傾向を示す。これは、予想外のことで、重大な意義をもつ。大西洋に関する生データは2つの期間(1851-1928年と1929-2009年)に分けられるが、北東太平洋については1945-2009年の期間が評価される。これら3つの期間のいずれにおいても、ハリケーン事象は9/56年区画に対応する。このハリケーン周期は、ほとんど知られていないが、月-太陽の潮汐効果に起因すると仮定された。もっとも重要だと思えるのは、月と太陽の食の位置、昇月点と月の遠地点であった。これは、これらの要素と春の昼夜平分点とのあいだの角度が、9/56年ハリケーン効果がどのようにして実際に作用するのかについての手がかりをもたらすだろう、ことを意味する。黒点周期は気候変動とハリケーンの発生に強く影響する。黒点周期が9/56年ハリケーン周期とどのように関連しているかは、まったく未知の課題である。

キーワード: 9/56年, 周期, ハリケーン, 大西洋, 太平洋, 月, 太陽, 太陽黒点

まえがき

9/56年周期が、カリフォルニアの地震 (McMinn, 2011) と同様、合衆国と西ヨーロッパの財政危機 (Funk, 1932; McMinn, 1986, 1993 & 1995) のパターンに確認された。この論文は、大西洋と東太平洋の両域におけるハリケーンの発生に9/56年周期が認められるとの予測を検証する。ハリケーンの生データはUNISYSから入手され、それは本評価の基礎になっている。大西洋に関しては1851-1928年と1929-2009年、東太平洋に関しては1949-2009年の3つの期間が検討された。

9/56年周期とは何か？それは、9年間毎の横軸および56年間毎の縦軸からなる格子で構成され、その中の特定の区画にハリケーンが集中することを意味する。9年間隔はサブサイクル、56年間隔はシーケンスとそれぞれ呼ばれる。9/56年効果は、月-太陽の潮汐効果に直接起因すると仮定された。月の相とハリケーンの発生とのあいだの関連性を支持する研究は、20世紀半ば以降実施されてきた (Yaukey, 2009)。残念ながら、月-太陽周期が極端な気候事象にどのようにかかわっているのかはほとんど未解明であるため、正確な予測能力は限定されている。関連する月-太陽周期とこの論文で使われるさまざまな用語についての基本的基礎情報に関してはMcMinn (2011の付録) を参照されたい。

太陽をめぐる地球の公転面は360°の楕円によって表され、00°Eは春の昼夜平分点に設定される。略号E°は楕円上の経度角を示すのに用いられ、春の昼夜平分点とのなす角に相当する。McMinn (1995) にしたがって、56年シーケンスは次のように番号を付される。すなわち、1817, 1873, 1929および1986年はシーケンス01; 1818, 1874, 1930および1986年はシーケンス02; というように。全体の番号は、McMinn (2002の付録2) に示される。

大西洋のハリケーン

■ 1851-1928年

表1に示された9/56年格子全体では、14の56年シーケンスがそれぞれ4つの4分割区画に区分されている。これらの4分割区画は、区画A, B, CおよびDと名付けられた。重要なことに、カテゴリ4および5のハリケーン全27個のうち12個が区画Dに含まれる (確率  $p < .05$ )。

区画BとDには、全27個のハリケーンのうち、合計20個が含まれる (確率  $p < .01$ )。これら2つの区画に含まれる年は、例外なく、(7月1日のように) 昇月点が055°~145E°ならびに235°~325E°に位置する。昇月点にみられるこれらの2つの90°区画は楕円上では180°隔たっている。

■ 1929-2009年

9/56年格子全体について、再び14の56年シーケンスの

Table 1  
THE COMPLETE 9/56 YEAR CYCLE:  
1851 - 1928 ATLANTIC HURRICANES Categories 4 & 5

Grid A														
Sq 52	Sq 05	Sq 14	Sq 23	Sq 32	Sq 41	Sq 50	Sq 03	Sq 12	Sq 21	Sq 30	Sq 39	Sq 48	Sq 01	
						1857	1866	1875	1884	1893	1902	1855	1864	1873
1868	1877	1886	1895	1904	1913	1922							1920	1929
1924														
Grid B														
Sq 10	Sq 19	Sq 28	Sq 37	Sq 46	Sq 55	Sq 08	Sq 17	Sq 26	Sq 35	Sq 44	Sq 53	Sq 06	Sq 15	
		1844	1853	1862	1871	1880	1889	1898	1907	1916	1860	1869	1878	1887
		1882	1891	1900	1909	1918	1927							
Grid C														
Sq 24	Sq 33	Sq 42	Sq 51	Sq 04	Sq 13	Sq 22	Sq 31	Sq 40	Sq 49	Sq 02	Sq 11	Sq 20	Sq 29	
		1858	1867	1876	1885	1894	1903	1856	1865	1874	1883	1892	1901	
1896	1905	1914	1923					1912	1921	1930	1939	1948	1957	
Grid D														
Sq 38	Sq 47	Sq 56	Sq 09	Sq 18	Sq 27	Sq 36	Sq 45	Sq 54	Sq 07	Sq 16	Sq 25	Sq 34	Sq 43	
						1852	1861	1870	1879	1888	1897	1850	1859	
1854	1863	1872	1881	1890	1899	1908	1917	1926	1935	1944	1953	1962	1971	
1910	1919	1928						****					**	

Years in bold contained at least one Category 4 or 5 hurricane.  
\* These years experienced more than one major hurricane.  
Source of Raw Data: UNISYS, Atlantic Tropical Storm Tracking By Year.  
<http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.html>

それぞれが4分割区画に区分され (付録2参照)、つづいて、カテゴリ4および5の大西洋のハリケーンとの関係性が評価される。その結果は表1にたいへん類似したパターンを示し、違いはほんのわずかである (すなわち、表1の区画A, B, CおよびDは、付録2の区画E, F, GおよびHに著しくうまく対応する)。驚くことに、付録2の区画Eには、全30個のハリケーンのうちカテゴリ5が16個含まれる (確率  $p < .001$ )。さらに、区画Gには、全78個のうちカテゴリ4のハリケーンが31個も含まれる (確率  $p < .01$ )。不思議なことに、カテゴリ5のハリケーンは区画Eでもっとも発生しやすく、いっぽうカテゴリ4は区画Gで最も発生しやすい。約69個のカテゴリ4と5の異常気象が、区画EとGで発生しているのである (確率  $p < .01$ )。

表1にみられるように、1851~1928年には、カテゴリ4と5のハリケーンは区画AとCでもっとも少ない。これらの区画は付録2の区画EとG (1929~2009年の期間では、カテゴリ4と5のハリケーンがもっとも頻発した) にそれぞれ密接に対応する。1920年代後半頃にハリケーンの発生パターンに大きな変化が起きた理由は、まったく不明である (注意: 区画Aに含まれる14の56年シーケンスのうち13は区画Eに示され、同様な状況は区画Cと区画Gとの間にも存在する)。

付録2の区画EとGに含まれる年には、135°~215E°ならびに325°~045E°の間に (7月1日のような) 昇月点が位置している。

東太平洋のハリケーン

■ 1949-2009年

UNISYSは1949年以降の東太平洋のハリケーンに関するデータを提供していて、9/56年効果の可能性についてこのデータが評価された (付録3)。もっとも顕著なことから、全109個のうち、カテゴリ4と5の主要ハリケーン

ン 40 個が区画 K で発生していることである (確率  $p < .01$ ).

考 察

月 - 太陽周期は, 過去 160 年間にわたる主要ハリケーンの発生時期に 9/56 年周期を活性化させることが仮設される. いくつかの月 - 太陽食周期が, 9.0 および 56.0 太陽年にたいへん密接に整合している. これは McMinn(2011) に十分に記述されているので, ここでは議論しない. 9/56 年周期の 1 つの区画に分類されるいかなる事象も, 昇月点が楕円軌道上で約 180° 隔たった 2 つの区間に位置することに例外はない. 遠地点が 120° 隔たった 3 つの区間に位置することにも, 例外はない (McMinn2011 の付録 4・付録 5). これは, 9/56 年格子の全般的特性である. 昇月点と遠地点は, 地表に対する月 - 太陽の潮汐効果に密接に関与している可能性がある.

月 - 太陽周期が上陸ハリケーンに関係しうるかどうかは, とりあげられるべき重要問題である. 上陸はハリケーンの生命に起こりうる最も重要な事象であり, 人々にとってもたいへん重要な影響をもたらすことは必至である. 多分に推測的であるが, それは, この仮説の有効性を検証するために興味深い研究になるだろう. 9/56 年の月 - 太陽効果が実際にどのように作用するのかについては何もわかっていない. この状況は, 研究のさらなる進展によって改善されるしない.

Yaukey(2009) によると, 「1950 ~ 2007 年に観測された大西洋のすぐれた軌跡研究は, ハリケーンの発生とサイクロンの平均風速は新月と満月の中間に最大になることが明らかである」という. さらに, ハリケーンが急速に発達するのは「新月の頃に集中し, それに次ぐ集中は満月の頃である.」このような研究はたいへん有用であるが, 重大な気象事象に関わる 1 つの月 - 太陽要素を考慮したにすぎない. すぐれた研究方法はいくつもの月 - 太陽の影響 - 月, 太陽, 昇点, 遠地点, 春の昼夜平分点, および上昇点 - を同時に評価することになる. これは, 極端な気象現象の発生時にたいへんよく適合することができる.

北米では過去 1 世紀にわたってハリケーン活動の頻度と強度が全体に増大していて, おそらくは地球温暖化によるものであろう. 1924 年までは, 大西洋ではカテゴリー 5 のハリケーンは観測されていなかったが (UNISYS データにもとづく), 2000 年代にはすでに 8 個発生している.

太陽谷底周期は地球の気候周期に影響することは, 古くから知られていた. ごく最近, Hodges and Elsner(2010) は, 3 個以上のハリケーンが合衆国海岸部に襲来する確率は, 11 年の太陽周期の不活発な時期に顕著に増大することを示した. 太陽活動の低下は, 上層大気がより寒冷で, それために熱帯の嵐の上空で大きな温度差ができることを意味する. これらの研究者たちによると, 合衆

Appendix 1							
ATLANTIC HURRICANES: 1851 - 1928 Categories 4 & 5							
Year	Active	Rank (a)	Cat	Year	Active	Rank (a)	Cat
1853	Aug 30 - Sep 10	3	4	1915	Aug 05 - Aug 23	2	4
1856	Aug 19 - Sep 12	1	4		Sep 20 - Oct 01	6	4
1866	Sep 24 - Oct 05	6	4	1916	Aug 12 - Aug 20	6	4
1878	Sep 24 - Oct 08	7	4	1917	Sep 20 - Sep 30	4	4
1880	Aug 04 - Aug 14	2	4	1919	Sep 02 - Sep 16	2	4
	Sep 27 - Oct 04	8	4	1921	Oct 20 - Oct 30	6	4
1882	Oct 05 - Oct 15	6	4	1924	Oct 14 - Oct 23	10	5
1886	Aug 12 - Aug 21	5	4	1926	Jul 22 - Aug 02	1	4
1893	Sep 27 - Oct 05	10	4		Sep 02 - Sep 24	4	4
1894	Oct 11 - Oct 20	6	4		Sep 11 - Sep 22	6	4
1898	Sep 25 - Oct 06	7	4		Oct 14 - Oct 24	10	4
1899	Aug 03 - Sep 04	3	4	1928	Sep 06 - Sep 20	4	5
1900	Aug 27 - Sep 15	1	4				
1906	Aug 25 - Sep 12	4	4				
1910	Oct 09 - Oct 23	5	4				
ATLANTIC HURRICANES: 1929 - 2009 Categories 4 & 5							
1929	Sep 22 - Oct 04	2	4	1979	Aug 25 - Sep 08	4	5
1930	Aug 31 - Sep 17	2	4		Aug 29 - Sep 15	6	4
1932	Aug 12 - Aug 15	2	4	1980	Jul 31 - Aug 11	1	5
	Aug 30 - Sep 13	4	5	1981	Sep 11 - Sep 20	8	4
	Oct 30 - Nov 14	10	4	1982	Sep 13 - Sep 20	5	4
1933	Aug 31 - Sep 07	12	4	1984	Sep 08 - Sep 16	5	4
	Oct 01 - Oct 09	18	4	1985	Sep 16 - Oct 02	7	4
1935	Aug 29 - Sep 10	2	5	1988	Sep 08 - Sep 20	8	5
1938	Sep 10 - Sep 22	4	5		Sep 19 - Sep 30 Oct 10 - Oct 23	9	4
1939	Oct 12 - Oct 18	4	4	1989	Aug 30 - Sep 13 Sep 10 - Sep 25	7	4
1943	Aug 19 - Aug 27	3	4			8	5
1944	Sep 09 - Sep 16	7	4	1991	Sep 04 - Sep 14	3	4
1945	Aug 24 - Aug 29	5	4	1992	Aug 16 - Aug 28	2	5
	Sep 12 - Sep 20	9	4	1995	Aug 08 - Aug 25	6	4
1946	Oct 05 - Oct 14	5	4		Aug 27 - Sep 12	12	4
1947	Sep 04 - Sep 21	4	5		Sep 27 - Oct 06	15	4
1948	Sep 04 - Sep 16	6	4	1996	Aug 19 - Sep 06	5	4
	Oct 03 - Oct 16	8	4		Sep 08 - Sep 16	8	4
1949	Aug 23 - Aug 31	2	4	1998	Sep 15 - Oct 01	7	4
	Sep 27 - Oct 06	10	4		Oct 22 - Nov 09	13	5
1950	Aug 12 - Aug 22	1	4	1999	Aug 18 - Aug 25	2	4
	Aug 30 - Sep 17	4	5		Aug 19 - Aug 31	3	4
	Sep 08 - Sep 17	6	4		Sep 07 - Sep 19	6	4
1951	Aug 12 - Aug 23	3	4		Sep 11 - Sep 23	7	4
	Sep 02 - Sep 13	5	5		Nov 13 - Nov 23	12	4
1952	Oct 20 - Oct 28	7	4	2000	Sep 21 - Oct 04	9	4
1953	Aug 28 - Sep 09	4	4		Sep 28 - Oct 06	11	4
1954	Oct 05 - Oct 18	9	4	2001	Oct 04 - Oct 09	9	4
1955	Aug 03 - Aug 15	2	4		Oct 29 - Nov 06	13	4
	Sep 21 - Sep 30	10	5	2002	Sep 21 - Oct 04	12	4
1956	Oct 30 - Nov 07	8	4	2003	Aug 27 - Sep 09	6	4
1957	Jun 25 - Jun 29	2	4		Sep 06 - Sep 20	9	5
	Sep 02 - Sep 24	4	4	2004	Aug 09 - Aug 15	3	4
1958	Aug 11 - Aug 22	3	5		Aug 25 - Sep 10	6	4
	Sep 21 - Oct 04	8	4		Sep 02 - Sep 24	9	5
	Sep 24 - Sep 30	9	4		Sep 16 - Sep 28	11	4
1959	Sep 20 - Oct 02	8	4	2005	Jul 04 - Jul 18	4	4
1960	Aug 29 - Sep 14	5	5		Jul 11 - Jul 21	5	5
	Sep 14 - Sep 17	6	5		Aug 23 - Aug 31	11	5
1961	Sep 02 - Sep 12	2	4		Sep 18 - Sep 26	17	5
	Sep 03 - Sep 16	3	5		Oct 15 - Oct 26	22	5
	Sep 10 - Sep 27	5	4	2007	Aug 13 - Aug 23	4	5
	Oct 27 - Nov 01	9	5		Aug 31 - Sep 06	6	5
1963	Sep 26 - Oct 13	7	4	2008	Aug 25 - Sep 05	7	4
1964	Aug 20 - Sep 05	5	4		Sep 01 - Sep 15	9	4
	Aug 28 - Sep 16	6	4		Oct 13 - Oct 21	15	4
	Sep 13 - Sep 25	9	4		Nov 05 - Nov 14	16	4
	Sep 28 - Oct 05	10	4	2009	Aug 15 - Aug 26	2	4
1965	Aug 27 - Sep 13	3	4				
1966	Sep 21 - Oct 11	9	4				
1967	Sep 05 - Sep 22	2	5				
1969	Aug 14 - Aug 22	3	5				
1971	Sep 05 - Sep 18	6	5				
1974	Aug 29 - Sep 10	6	4				
1975	Sep 22 - Oct 04	7	4				
1977	Aug 29 - Sep 03	1	5				
1978	Aug 30 - Sep 05	6	4				
	Sep 13 - Sep 20	8	4				

(a) In a given year, the first hurricane of the season is numbered 1, the second 2, the third 3, the fourth 4 and so forth.  
 Source of Raw Data: UNISYS Atlantic Tropical Storm Tracking By Year.  
<http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.html>

国海岸部を 3 個以上のハリケーンが襲う確率は, 太陽黒点をもっとも活発な 25% の時期に比べて, もっとも不活発な 25% の時期に, 20 ~ 40% も大きくなる. 太陽黒点の最大活動年には, 1 個以上のハリケーンが合衆国に襲来する確率は 25% しかなく, この数字は太陽黒点のもっとも不活発な実記の 64% にすぎない.

太陽黒点活動によって決定されるハリケーン頻度と 9/56 年月 - 太陽周期によって決定されるハリケーン頻度との間に何らかの関連があることは明らかである. この問題への解答は, 気象学の現行パラダイムにはおさまりに足りないところにある.



# 評論 ESSAY

## 惑星形成の光景と先カンブリアの地球 ASPECT OF PLANETARY FORMATION AND THE PRECAMBRIAN EARTH

Karsten M. STORETVEDT

Institute of Geophysics, University of Bergen, Bergen, Norway karsten.storetvedt@gfi.uib.no

(杉山 明 [訳])

(訳者注)

K. M. Storetvedt はノルウェー・ベルゲン大学の地球物理研究所教授 (略歴は本誌 No. 57, p. 22 に紹介). 岩石磁気の研究からグローバルテクトニクスの分野へ進み, 1999 年に Global Wrench Tectonics (Memoir Geological Society of India, Vol. 43) を公表, 2003 年には同名の単行本を出版した. レンチテクトニクスの概要は氏自身のホームページ ([www.storetvedt.com/karsten/index.htm](http://www.storetvedt.com/karsten/index.htm)) で読むことができる. また, 氏がプレートテクトニクスに疑問を抱き, それとは全く異なるレンチテクトニクスを提唱するに至った経緯については本誌 No. 55 のエッセーに詳しく述べられている. 本稿では, 惑星としての地球が誕生するまでの経緯と, その後の始生代~原生代を中心としたグローバルな現象の背景が新しい視点から考察されている. 訳者は地球を太陽系惑星の 1 つとみてその進化を論じた書物としては, 東京大学地球惑星システム科学講座 (編) (2004) 「進化する地球惑星システム」 (東京大学出版会) くらいしか読んだことがないが, そこに書かれていること (通説) とはまるで異なる見解が示されていることに驚いた. 以下で \*1 ~ \*18 は訳者による注記.

**要旨:** 現在得られている証拠にもとづくと, 初期地球溶融説だけでなく伝統的な微惑星説もとって替わられるべき時がきているように思われる. 1906 年, 地球にコアが発見されて以来ずっと, コアの基準深度に想定される圧力で期待される密度は純粋な鉄のそれよりも小さいという証拠が蓄積されてきた. コアを通過する地震波の速度異常はコアが (鉄) より軽い元素を相当程度含んでいることを暗示し, 現在では水素・硫黄・炭素・珪素・酸素のような元素が存在することによる密度不足であると説明されている. 鉄がコアの主成分であるという理由は十分あるが, 最近の地震学的研究はこの中心体 (コア) が異方性をもっているだけでなく化学的に不均質であることを示している. それに加えて, コアは下部マントルと平衡に達していない. 地震トモグラフィはマントルの組成と構造の不規則性に関して次々と驚きをもたらし, 相当量の水が存在することさえ報告されている. 途方に暮れるような芸術的状态からその場限りの仮説が次々と生み出される状態に移行してきた. 今や液状の岩石からなる原始の熱い球が, 鉄に富むコア, 高密度珪酸塩マントルからなる中間部, より軽い花崗岩質の地殻に分化してきたという古い考えは疑わしい. 地球は明らかにまだ脱ガスが十分終わっていない状態にあり, それがまさにダイナモテクトニックな活動が絶え間なく行なわれている理由である. さらに, 内部平衡へと向かう物理化学的過程が, 多彩な地史に合致した原始的表層の時たまの改造を引き起こしてきたものと思われる.

現在の行き詰まり状態を脱する試みとして, Alistair Cameron (1962 & 1978) による代案は歓迎すべきものである. Cameron は, 渦巻き状星雲の円盤から微惑星が成長するという疑問の多い説の代わりに, 相対的に濃集してはいるが組成的には多様な原始惑星が太陽の回転面に近い軌道に差し込まれるように母雲 (source cloud) が別々に吐きだされてきたという考えを示した. さて, 地球は種々の岩石と氷を伴う冷たいガス (水素が主体) がある程度分離した球として始まり, 温度は高くても 500K (-223°C) 程度であったという前提を受け入れて, 現在流行しているものとは一致しない (地球あるいは惑星の) 発展のパターンを考察してみよう. 例えば, 回転する粒状集合体には粒度に関して遠心的な分離が生じるであろう. この過程でウラニウムやトリウムのような大きな元素は原始地球の表面に濃集し, そこは放射性加熱をかなり受けるだろう. いっぽう, 冷たいガスの割合が大きいと思われる深部は放射性壊変による顕著な温度上昇を経験することはなかったであろう. それ故, 初期の地球は深部が相対的に冷たく外側が熱いという逆の温度分布を持つにいたったと思われる. そのような先行条件に導かれて, 表層部の地史に調和的な全く新しい地球発展のパターンの輪郭を描くことができる. 初期の地球の外皮は斜長岩~石英閃緑岩の組成で, その後, 脱ガスに関連した花崗岩化作用と鉍化作用の過程を経て強く変質したと推測される. ガスで充満した原始惑星の内部では強磁性粒子が次第に合体してより重い凝固体となり, 遠心効果より重力的影響が勝って中心の鉄に富むコアが次第に形成された. 内部物質の再構成は, バルス状のテクトノマグネティックな歴史の原因となっている地球の慣性モーメントの周期的変化をもたらした. この新しい地球形成の素描は, 始生代初期 (このとき地球は現在よりもはるかに速く回転していた) に地球から放り出された塊として始まったという月の分裂起源説を支持する.

キーワード: 惑星の形成, 原始地球, 先カンブリアの歴史, 月の起源

はじめに

しっかりした物理的基礎を欠いた仮説は科学的には無意味である。そのようなものは自然現象間を結びつけたり具体的な予測をしたりすることはできず、理論的枠組みは一般的には検証不可能なその場限りの条項で充たされる。これに対して、機能本位の科学的理論は具体的な予測能力があることを特徴としている。つまり、同じ重要性がある既知の現象を容易に結びつけ、これまでに知られていなかった、あるいは理解されていなかった自然の様相を明らかにする能力がある。地球の満足すべき理論は、いかなるものでも、連綿としたその発展の様相（これはテクトニック、火山、地形、古気候、空間測地、生物地理などの現象を包含する一貫的なシステムといえる）を説明できなければならず、広範囲にわたる予測と確認の連鎖となる。1つ1つを見ると、どのような特定の見方（テクトニックな構造のような）でも可能性のある様々な説明（それは我々の想像次第でいろいろな‘呪文’になりうるのであるが）をつけることができる。しかし、よくても数ある理論的提案の1つだけが自然に適用できる。

我々にとって現実的な理論となるものは様々な現象が概念的に首尾一貫した配列をとることができる場合のみである。地球発展の諸相とパルス状のダイナモテクトニックな過程に対する内部原動力を論ずる前に、我々は最も少ない仮定をもった最も単純で最もストレートな前向き説明が最も適切な答を与えるという意味の、いわゆるオッカムのかみそり (Occams Razor)<sup>\*1</sup>、あるいは“我々は自然現象を説明するために真実でもあり十分でもある以上の理由づけを許すべきではない。この目的のために・・・自然は単純さを喜び、過剰な理由づけを好まない”というニュートンの言葉を思い起すべきである。

\*1 オッカムとは14世紀の哲学者・神学者である William of Ockham のこと。彼の著作に「必要が無いなら多くのものを定立してはならない」とか「少数の論理でよい場合は多数の論理を定立してはならない」という言葉が多用されていて、不要とみられる新たな仮定や仮説を切り捨てる際に引用されたので、この言い方を“オッカムのかみそり”と言うようになった。(ウィキペディアにもとづく)

地球の内部過程はそのダイナミクス、地表の地形、地質変化のエネルギー源となるに違いない。しかし、結局のところ、惑星内部の詳細な物理化学的状態の解明は容易な事柄になってはおらず、反復の原理によってのみ生きながらえている多くの古典的な見解に対して現代の地球物理的観測が疑問符を付けている。19世紀の後半には地球が熱い球であり冷却によって外層が固化してきたという考えが一般的に受け入れられていた。内部密度と圧力が全体的に高いと推定されることから、中心部のコアは鉄に富む固体であるが地球の大部分は液体のまま、化学的分化作用により外側ほど密度の低い成層構

造が作り出されたに違いないと理解されていた。この不自然で単純な地球観に対して弓から放たれた最初の一矢は Oldham のコア/マントル境界、すなわち Gutenberg (1913) がその深度を約 2900km とした地震学的な不連続面の発見 (Oldham, 1906) であった。しかしながら、中心部の大きなコアは、一般に信じられているように濃縮された鉄とニッケル合金からなるとした場合に期待されるよりも軽かった。もう1つの謎は地質からもたらされた (Heier, 1965 とその中の参考文献を参照)。すなわち、地質学的な観察が示すようにウランやトリウムのような重たい元素がどのようにして上部地殻に濃縮したのかということである。密度にしたがって元素の選別が進行している初期の熱い溶融球という平凡な見方を否定する観測事実が増加するにつれて、軽い元素が中心部のコアに存在し、他方いくつかの重い元素が地殻の最上部に濃縮していると考えられるようになった。これらの謎は膨らみ続け、現代の地球物理的研究は熱化学的平衡からかなり外れた地球という見方に到達した。

地球物理学的テクニックは惑星の深い内部を探る唯一の手段であるが、地表での観測という制約があるので、我々が内部過程について考えていること、知っていることの大部分は唯一の解を与えないインバージョンテクニックにもとづくものである。それ故、内部過程についての推論はどうしてもモデルに強く依存する仮定の質量/エネルギー転換過程に頼った思弁的な原始惑星集積シナリオ (以下を参照) となる。その結果、表層の地質現象を説明するうえで役に立つ仮説であれば何でも、その時の必要性に従って惑星の運動像がかなりの程度変化してきたことは驚くに当たらない。残念ながら時折怪しげなアイデアが科学では問題にすることのできない制約条件としての事実になり、それが地球全体の地質と惑星の進化に関して野放しになってきた。それにもかかわらず、解釈可能な未決定の一連の事項はさておき、数10年間のマントルトモグラフィーが極めて複雑な地球の内部状態 (マントルとコアのいずれをも特徴づけている不均質性と異方性) を解明してきた。究極の重要な問題は、最近では流体と推定されている外側コア (外核) の内部における自己励起ダイナモ<sup>\*2</sup> に類似した過程に関連する地磁気双極子磁場のメカニズムである。1960年代以降、太陽系を探索する衛星は、地球が磁場を持った現世で唯一の地球型惑星 (岩石惑星<sup>\*3</sup>) であり、この物理的な性質は、水素に富む大型のガス惑星の基本的な特徴であることを明らかにしてきた。したがって、金属状態 (おそらく固体) にある水素もまた地球の双極子磁場の源であるとしたらどうであろうか。もしそうであれば、それはコアの中にかかなりの量の軽い元素があるという長年続いている地震学的主張 (例えば Poirier, 2000)、あるいは地球が大量の水素を貯めこんでいるという Okuchi (1997) の提案を支持することになるだろう。いずれにせよ、惑星のコアの分離 (その他の内惑星もそうである) を再検討することは喫緊の課題であるように思われる。

\*2 電流が作る磁場が元からあった磁場を強める成分を持って

いと、磁場はだんだん強まっていく。このような磁場の生成過程はダイナモ作用と呼ばれるが、それがここで言う自己励起ダイナモ (self exciting dynamo) であろう。地球磁場は双極子磁場で近似できるが、数値シミュレーションによりダイナモ作用が双極子磁場を生成・維持できることが明らかにされている (東京大学地球惑星システム科学講座編 (2004) 進化する地球惑星システム, p. 129-130)。

- \*3 地球型惑星 (terrestrial planet) は岩石惑星ともいう。ガス惑星 (gas planet) と対比する場合は岩石惑星 (rocky planet) と言った方が分かりやすいので ( ) 内に表示した。地球は岩石惑星の中では唯一磁場をもっているのに対し、ガス惑星である木星・土星・天王星・海王星にはすべて磁場があることが分かっている。

3次元の不均質性が最も高度なレベルで見られるのは地球の表層近くとコア/マントル境界付近である。例えば、マントルの基底では、様々なスケールで広く認められる不均質性の証拠、種々の特性の不連続、横波の異方性を伴う複雑なゾーンが明らかにされている (要約的なものとしては例えば、Kennett & Tkalčić, 2008)。それ故、コア/マントル境界での過程と地殻及び最上部マントルの非常に多彩な組成及び構造の間には緊密な関係があるのではないかという疑念がわく。とくに、地殻の長期にわたる薄化は究極的に重要な問題である。さて、ここ数10年の間、現在の世界の大洋が以前は陸ないし浅海であったという証拠が次第に増えてきた (要約としては、Choi et al., 1992; Dickins et al., 1992; Storetvedt, 1997 & 2003; Yano et al., 2009 & 2011 を参照)。地殻は明らかに基底から上方に向かって薄くなるか剥がされ、化学的に変質してきた。それに加えて、大量の変質岩 (動力変成作用の様々な段階にある)、深海の環境では驚くほど少ない新鮮な玄武岩、大洋中央海嶺に沿って普通に見られる斜め剪断地形、全体的に低い熱流量、大洋でも大陸でも少ない火山活動等々は、地球の包括的な理論の中で系統的な説明が与えられるのをじれったそうに待っている事実である。残念ながら多くの時代遅れの古いアイデアが補強により生き長らえ、新たな科学的事実あるいは識見が成長したにもかかわらず修正されることなく無傷で生き残ってきた。これは文字通り太陽系の起源に関するあの通俗的な仮説にも言えることである。

#### 地球の内部構成 - 充満する矛盾

20世紀の中頃までは地球 (を構成する原始物質) の集積が液状物質の熱い球を形成し、それが後に密度に従って鉄に富むコア、高密度の珪酸塩からなる中間のマントル、より軽い花崗岩質の地殻に分化したという説が当然のこととして一般に受け入れられていた。しかし、19世紀後半以来、地殻が不均質で複雑な集合体であるということが関心事となった。20世紀の前半には地質学的な証拠から未知のメカニズムが重たい放射性元素を薄い表層殻の中に濃集させたことが明らかにされたが、全体としては内部の化学的分化作用は事実上完了したと認められて

いた。熱収縮を受けながらほぼ一人前の体になった地球という見方は、それが動かない大陸という伝統的な見解と調和していたために少なからず動揺した。この見方に反対して Chamberlin (1887, Brush, 1987 も参照) と、後には Urey (1952) も、地球と他の岩石惑星が太陽をとりまく平らな星雲状の円盤からの物質が集積することによって形成され、水素に富むガスと様々な粒状物質の冷たい混合体ができるという Pierre-Simon Laplace と Immanuel Kant (1700年代後半) の古い見方を繰り返し主張した。推定された冷たい初期状態という基礎に立って、Urey は地球の化学的分化作用が金属のコアと珪酸塩の殻を分け、その作用はまだ不完全で進行中であると論じた。

結果として内部の脱ガスは完了したという初期の溶融球の見方に対して、地表での観察は別の可能性を示した。19世紀における莫大な火山灰とガスの噴出、すなわち1815年のタンボラ火山、1883年のクラカトア火山がこの点を思い出させたのであろう。例えば、Ampferer (1942 & 1944) は地下のガスの圧力が垂直方向の造構現象に加担している可能性を論じ、Hixon (1920) は多くの重要な地質イベントを説明するための収縮説には何ら不適切なところはなく、テクトニックな過程は惑星の脱ガスによって引き起こされるダイヤピル現象であると結論づけた。鉄がコアの主成分であるとする十分な理由はあるが、内側コア (内核) も外側コア (外核) も典型的なコア深度に想定される圧力で期待される純粋な鉄の密度より小さい密度であるということが数10年の間に知られてきた。コアを通る地震波の速度異常はそれが硫黄・炭素・酸素・水素のような軽い元素を相当量含んでいることを示唆している。そして、Okuchi (1997) は水-鉄-珪酸塩混合物の高圧実験にもとづいて、水素はコアにおける最も優勢な軽元素であり、おそらく地球の水素の大部分を含んでいると述べた。

高圧では水素は容易に金属の格子構造に入る。そこでは金属-水素の組み合わせが水素化物として知られ、金属は水素化されているとみなされている (例えば Hunt, 1992)。いずれにせよ、コアのより軽い成分の正体と相対的な量 (全体の10~15%に達する) は地球がどのように始まったかというモデルにとっての重要な拘束条件となり、加えて地球磁場の起源から惑星のエネルギーバランスまでの様々な現象を理解するうえで重要となる。

数100kmより深いところから直接やってきた岩石の証拠は欠けているので、地球内部の組成と物理的状态に関する現代の研究は基本的に地震及び測地観測にもとづく地球物理学的なインバージョンテクニックに頼らざるをえず、これを高圧の鉱物物理化学実験が補うことになる。それにもかかわらず、内部の状態と構造についての推理はモデルに強く依存したものとならざるをえず、それは発展する地球内部の仮定の質量/エネルギー変換だけでなく原始惑星形成シナリオに頼るものとなる。それでも地震マントルトモグラフィーからの証拠は地球の下

部マントルとコアが、内部ほど密度が増加する均質な層という単純な古典的図式(現在のところ教育システムのすべてのレベルで花開いている見方)から著しく隔たっていることを明らかにした。例えば、内側コアの地震波速度の研究で Shearer and Toy (1991) は異方性と不均質性のいずれもが存在することを示唆し、Creager (1999) はコアには平均 2~4% までの異方性があり、体積で 60~90% の部分では南北軸に沿ってきれいに配列した結晶を含むであろうと結論付けた。複雑なコア/マントル境界層(CMB)は地球力学的には極めて重要であるということは長い間受け入れられてきたが、このマントルとコアの間の化学反応とエネルギー結合の場合は、かなりの振幅をもった凹凸のある“地形”を示す(Morelli and Dziewonski, 1987)。コアがマントルと平衡になく、遷移帯は化学的に活発で不均質な地域であるということは一般に受け入れられているように思われる(例えば Stevenson 1981; Vidale and Benz 1993; Poirier 2000)。Morelli and Dziewonski (1987) の結果に従うと、コア/マントル境界層の隆起した地域は地表に投影すると深海盆地に対応する(図1)。これは外側コア及び/又はマントル最下部での過程が、地球の表層部で地殻を薄化させ変形させて大洋型にする浮揚性物質を放出している可能性があるということに対する手がかりとな

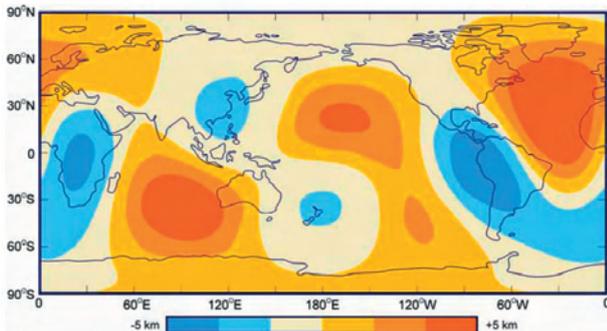


図1 Morelli and Dziewonski (1987) が示した図。この図はPKP 残差とインバートしたPcP 残差を組合せて描かれ、コア/マントル境界層(CMB)の‘地形’を初めて示したものである。CMBが隆起している地域の分布と世界の大洋盆地の配置がよく一致していることに注目。

るかもしれない。全体として、地球内部に関する情報は増加しつつあり、それは地球が熱化学的平衡にないという方向を指し示している。地球は明らかに比較的脱ガスしていない状態にあり、深部の温度は伝統的に認められているよりずっと低いかもしれないことを示唆している。図1によると、大洋と大陸の下のマントルは組成と地震波速度に系統的な差があると見るべきである。事実、内部の三次元的な地球規模のイメージを与える地震トモグラフィーのデータ(例えば Dziewonski, 1984; Dziewonski and Woodhouse, 1987; Forte et al., 1995)は、大陸と大洋のマントルに数100kmの深部まで相対的に明瞭な地震学的違いがあるという初期の指摘(MacDonald, 1964)を支持している。

図2に描かれているような大陸下の上部マントルの相対的に速い速度とそれに対応する大洋下のマントルの遅い速度という図式は現在までに十分確立されており、大陸の根という概念を強調している。地震トモグラフィーのデータは通常水平方向に平均化された深度プロファイルからのずれという形で示され、地震波速度の変化の大部分は深度にとまらぬ圧力の増加によって引き起こされるというよく知られた仮定に従っている。したがって、水平方向の速度変化は基本的には温度の違い(真偽のほどは分からないが対流によってもたらされるといわれている)の結果、すなわち地震波の低速度は高い温度に、高速度は低い温度に結びつけて考えられている。しかしながら、地球はこのような推定には従っていないと信ずべき確かな理由がある。つまり、不規則に分布する垂直方向の脱ガス作用を受けている惑星では封圧の水平方向の変化が地震波の速度変化を生み出している可能性がある。このことは水平方向の地震波速度異常は組成と温度の両方の違いとその他の物理的特性から生じるかもしれないことを意味している。従って、脱ガス状態にある地球の場合は、例えば発展しつつある大陸と大洋のマントルでの裂罅密度の違いが水平方向の速度変化を引き起しているかもしれない。大洋の上部マントルは裂罅の占める容積が大きいことが期待され、それらは内部静水圧によって開いたままになっている(後述)。言い換えると、

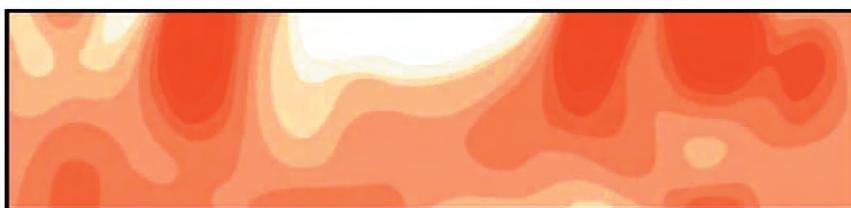
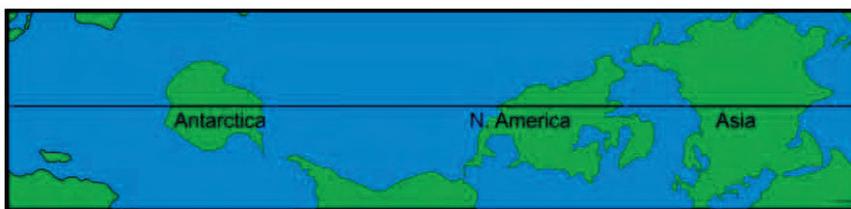


図2 大陸のマントルの根の概念を示す図。Dziewonski and Woodhouse (1987) によるもので、上図の中央の線で示される110°W経線に沿ったモホ面から深度670kmまでの上部マントルのS波速度の違いを示している。上部マントル断面(下の図)は大陸下の相対的に速い速度と大洋盆地下の遅い速度を明らかにしている。垂直:水平は20:1。

それが上部マントルの断面における地震波速度を低下させる主な要因となっているに違いない。しかし、内部状態と質量移送の過程に関する問題に触れる前に、太陽系の発展の様相についてのいくつかの欠くことのできない初歩的な点を概観しておこう。

### 太陽系の起源に関する疑問

一緒になって回転するガスと鉱物の屑と氷からなる均質な星雲（これらはくっつきあって惑星系の本体になる）を伴う原始太陽という 200 年前の古いアイデアはまだ一般に受け入れられているモデルである。星雲の内側では発達する太陽が発する高温が、軽いガスを吹き飛ばし氷の成分を蒸発させる強い太陽風を放っているということが仮定されている。残ったものは大量の固体の岩石質物質の混合物で、それらはある程度溶融して 4 つの地球型惑星（水星・金星・火星・地球とその衛星）と彗星と小惑星になる。これは通俗的な理論である。しかしながら、太陽系が形成される間の星雲のダイナミックな状態について、さらには原始惑星系円盤<sup>\*4</sup>の存在については様々な議論が行なわれてきた (Levy, 1987; Levy and Araki, 1989)。内惑星と外惑星の組成の基本的な違いと外側の巨大なガス惑星の存在が、従来の微惑星説が惑星の形成に対して現実的な基礎を与えるかどうかについて決定的な疑問を投げかけている。太陽系の進化に関する多くの未解決な問題を議論する中で、Boss (1990) は、大部分の惑星学者は“地球の起源について一般に受け入れられているモデルに群がっているように見える。木星の形成が微惑星集積説では未解決のままになっていることに留意しなければならない。我々は自分たちが木星の起源を理解したと信じるまでは地球の形成に関する今の理解についていくらかは不安を感じるべきである”と書いた。太陽系の進化に関するこのような見識の不足を認めるところに惑星形成の新たな解を考える十分な根拠がある。

\*4 原始惑星系円盤 (proto-planetary disk) とは遠心力で扁平になったガスとダストからなる雲で、密度の大きなダストは円盤の赤道面に濃集して薄い層を形成し惑星の原材料になると考えられてきた。

通俗的な集積シナリオは、密度の大きな地球型惑星の軌道が混んでいて太陽に近く、他方、質量ははるかに大きいにもかかわらず密度がずっと小さい外側のガス惑星は広い空間に散らばり太陽系の重心から大きく離れているという事実について満足のゆく説明を与えてこなかった。火星と木星の間に位置する主小惑星帯<sup>\*5</sup>の内側は石鉄物質からなり、はるか外側の小惑星は炭素が多いという傾向がある (Asphaug, 2000)。このことは主帯の小惑星の全体的な密度が外側に向かって減少することを予測させ、一般に太陽から外側方向に内惑星の密度が減少し、それらが外側の巨大惑星と比較して軽いガス状の元素に不足していることと調和している。この密度傾向は惑星体が別々の星雲片から形成されたことを思わせる。

\*5 小惑星 (asteroid) とは彗星活動を示さず、又海王星よりも内側の軌道を公転する惑星以外の天体と定義され、その多くは火星軌道と木星軌道の間に分布しているので、この部分を主小惑星帯 (main asteroid belt) という。

予測されていたようには合体しなかった炭素質・金属質・珪質組成の 10 万個オーダーの様々な大きさの物体でできた主小惑星帯 (図 3) が存在するという事は、惑星が微惑星の衝突と融合を通して成長するという長い間支持されてきた見方に疑問を抱かせる。小惑星帯の合体しなかった物体が提起した問題に説明をつけようという試みの中で、Asphaug (2000) は“火星の外側では大きな木星に伴う重力的な共振が鍋をかき回し、どの物体も直径が 1000km 以上に成長することを妨げ、合体しなかった残滓が現在の小惑星となって残った”と書いた。この説明は通俗的であるが問題の多い惑星集積モデルに対して複雑さを避けるためのほとんどその場限りの言い逃れにすぎない。そして、Gaffey (1990) によって輪郭が描かれた小惑星帯の熱史は伝統的な集積シナリオに対して別な問題を提起した。ともかく、もし内側の岩石惑星に対してはあるモデルを持ち、外側のガス惑星に対しては別な相いれない実物大の模型を持つということであれば、成熟した科学とはいえない。このような問題は、我々が代わりとなる“すべてを包括した”惑星の形成メカニズムを必要としていることを示しているのであろう。

惑星が多彩な組成のある程度独立した塊から発展したとすると、何が原始太陽星雲から分離・放出されたのであろうか？ もしそうであれば、それは Cameron (1962, 1978 & 1985) and Cameron et al. (1982) によって検討されたガス状原始惑星説の変形ともいえるべきものかも

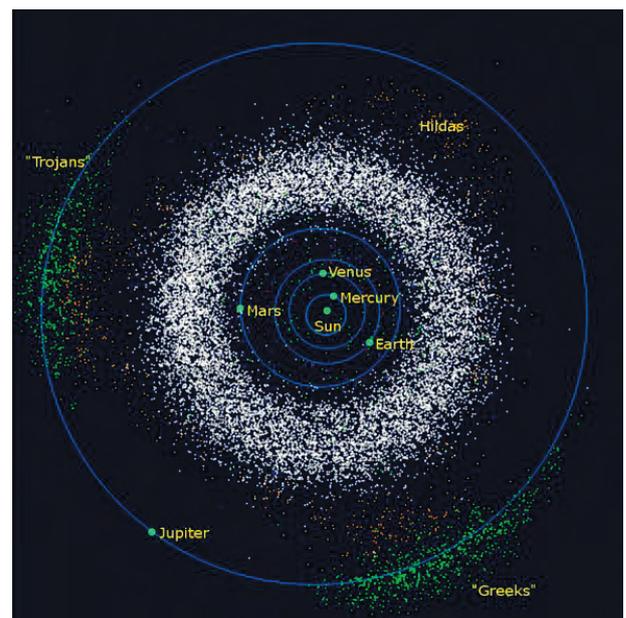


図 3 地球型惑星と協力しているように見える主小惑星帯と大きなガス惑星である木星。この図はスケールを考慮していない。  
<http://www.orderoftheplanets.org/asteroid-belt.html> から引用。

しれない。後者の見方では太陽星雲の薄片は組成的な分裂を経験し、回転、重力的不安定、及び/又は磁気流体力学的乱れが絡みあって励起され、相対的に濃集してはいるが組成的には多様な原始惑星として放出され、太陽の回転面に近い軌道に差し込まれたに違いない。この説に従って考察を続けると、放出する力は様々な大きさの角運動量を与え、後にその塊の一部を失って共存する衛星(月)にしたのは最も早く回転する原始惑星体であったと考えられる。ガスが主体の原始惑星の中では氷と岩の成分の遠心分離は容易に起こり、これはほとんどすべての太陽系の月(衛星)がなぜガス状(木星型)惑星に伴っているかが説明できるだろう。地球型惑星の中で地球だけが意味ありげな衛星を持っていることは、その最初の回転速度が他の内惑星のそれよりはるかに大きかったことを示唆している。事実、Alfven and Arrhenius (1976) は地球の原始時代の回転速度は5~6時間だったろうと考えている。

惑星形成に関する従来の円盤モデルでは種々の惑星の回転軸は軌道面に対して直角の方向とされていた。そのように単純な動力学系は、軸が軌道面に対して傾いていて、水星は0°、地球は23°、天王星は98°と大きく異なるという観測事実と矛盾する。しかしながら、別のシナリオでは惑星間の観測された動力学的多様性が当然のこととして期待できる。つまり、イオン化されたガスの存在下で強く曲げられた磁場は、(放出された星雲片の)質量と角運動量の配分を極度に不安定にする複雑な方法で回転する星間雲と影響を及ぼしあうことが示唆された(Cameron 1962; Stevenson 1989)。それ故、原始地球が各種のガス及び揮発性物質と混じった鉱物の濃密なダストの凝縮回転球から進化したということは大いに可能性があるのであると思われる。水素とヘリウム(硫黄、炭素、珪素などの他の軽い元素に加えて宇宙では最も大量にある2つの元素)は地球及びその他の地球型惑星の進化の過程で、その初期の凝縮状態からその後の内部集合体の再構成の歴史を通して重要な役割を演じてきたようである。

太陽になる前の星雲が最高でも500 K (Kaufmann, 1988)までという温度の全く冷たい星雲であったということが一般に想定されている。これは水・二酸化炭素・メタン・アンモニアのような物質の凝結温度以下である。そして、これらの物質の氷はその初期段階に太陽星雲全体に広く分布していたであろう。したがって、原始地球は冷たい状態から発展したのか、熱い状態からかという問題が生じる。従来の初期地球に関する集積・衝突シナリオ(ついにはマグマオーシャン<sup>\*6</sup>)を作り出す)はまだ一般に信じられているが、熔融した地球上で形成されたものであれば最初の地殻中で著しく変質したに違いない元素の数が相対的に多いことに注目したRingwood (1989)は、古い鉱物(4200 Maのジルコン)中にはそのような変質の証拠がまったくないことを見出した。そこで、Ringwoodは温度上昇と熔融を作り出す地球のマグマオーシャンも巨大衝突<sup>\*7</sup>もなかったと結論付けた。

\*6 マグマオーシャン(magma ocean)とは原始惑星の表面が熔融した岩石で覆われた状態。微惑星が多数集積したり、惑星同士が衝突した場合に解放される重力エネルギーにより惑星全体が加熱されて生じると考えられている。

\*7 巨大衝突(giant impact)とは原始惑星同士の衝突。もともとは月の成因を説明するために考えられたメカニズムで、地球に火星サイズの天体が斜めに衝突し、地球の周囲に飛び散った物質から月ができたとする(東京大学地球惑星システム科学講座編(2004) 進化する地球惑星システム, p. 36-37)。

コアが(従来の期待値と比較して)密度不足にあるという事実は、鉄に富むコアが硫黄・水素・珪素・酸素・炭素のような軽い元素を含んでいることを意味し、コアがその上位の珪酸塩マントルとは平衡にないことを暗示している。また、明らかになった下部マントルの不均質性は低温でゆっくりした反応速度と矛盾せず、下部マントルがコアと同様、その形成時から顕著な脱ガス作用を蒙ってこなかったことを意味している。今日、惑星内部が熱いという伝統的な概念を守るべき確たる理由は何もない。事実、手に入る証拠は一般的な冷たい星雲環境から出発した惑星という見方を支持するだけでなく、その後もコアと下部マントルの温度は深部を化学的平衡に至らしめるほど十分なレベルには達しなかったというさらに重要な見方をも支持している。

既存の事実からは原始地球には大異変がなかったとするシナリオが支持できるように思われる。さて、惑星は閉じ込められた高速で回転する鉱物成分に富む星雲球から成長し、基本的にはサイズの小さな凝縮物が次第に集積する過程を経て初期の地球型惑星体へと変化したものと推測される。そこで問題は、どのようにしてそのような回転する鉱物の雲が水素に富むガスの中に浸かって凝縮過程の初期段階に‘落ち着く’ことができたかということになる。一群の粒子が集積しつつある塊の中である位置から別の位置へ移動するには、疑いもなく力学的・磁氣的・電氣的・重力的な力を含む多くの要因に影響されたであろう。しかし、我々はまず水素の役割を少しばかり考えることにしよう。

### 惑星の磁場：水素の役割

太陽系では量の点で他の元素よりはるかに多く存在している水素が低密度のガス惑星の主要な成分となっている。木星と土星の強力な双極子磁場は金属状態下にあると予想される内部と結びついた比較的速い回転速度(約10時間)に関連していると信じられている(Hartmann, 1983)。これに関連することとして、Livermore National Laboratory では水素が1原子の金属流体に変換されるという興味深い実験が行われた(Weir et al., 1996; Nellis, 2000)。ガス銃を用いることにより圧縮された水素の液体金属状態がその物質の電気伝導度の上昇を測

定できるほど十分長い時間保たれた。図4は圧力の増加に伴う電気抵抗 $\sigma$ の低下を示している。140GPa前後で水素は金属状態になる (Nellis, 2000)。古典的な見方ではこの臨界圧力はコア/マントル境界付近で達成される。このことは、コアの水素が鉄や炭素のような他の元素と独占的に結合しないならば、金属水素がコアの内部に存在できるということを示唆する。しかしながら、必要な高い圧力が衝撃波より'穏やかな'やり方で得られるならば、固体状態の金属が作り出されたかどうかについては想像してみるべきであろう。

軸対称は地球磁場の特徴であり、双極子軸は回転軸に対して11°傾いているにすぎない。木星の場合、双極子の傾きはこれと似たような値であるが、土星は双極子の軸と回転軸の間の角度がほとんどゼロである。地球は磁場をもつ唯一の地球型惑星である。比較すると木星の双極子磁場は地球のその15~20倍ほど強く、惑星の磁場が水素と密接に関連している強力な証拠である。しかし、その場合は地球の磁場に関する通俗的なダイナモ理論<sup>\*8</sup>はどうなるのであろうか？それは反復原理によって宣伝され慣習的になったが故に広まったのではないか？天王星の磁場も第1近似的にはかなり強い双極子であるが、その軸は回転軸に対して約60°傾いていて、観測される大きく高いオーダーの変動は、双極子が(惑星の中心から)半径の約1/3ほど太陽に面した側から遠方へずれていることによって説明される。同様に、海王星の磁場は回転軸から47°傾いた双極子で表されるが、惑星の中心からのずれは半径の半分以上である (Jacobs, 1993)。双極子軸が回転軸に対して整列せず、中心がずれているという後二者(天王星と海王星)のケースは通常ダイナモ説の妥当性に疑問をいだかせるものである。液体(真偽のほどはよく分からないが)とされる外側コアにおける磁気流体力学的運動と結びつけた地球のダイナモ理論

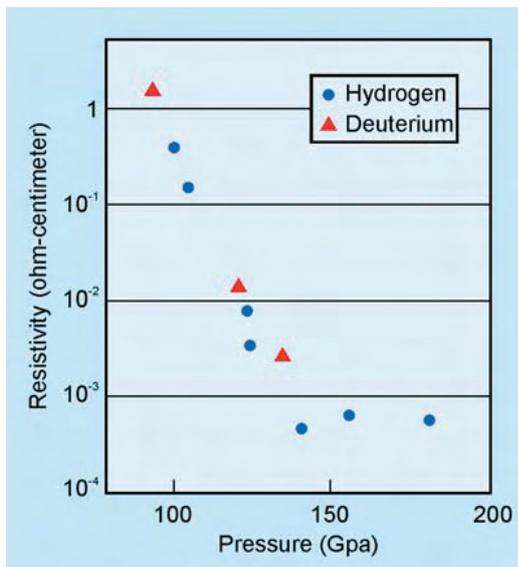


図4 Lawrence Livermore National Laboratoryでのガス銃実験の結果 (Nellis, 2000を簡略化)。水素と重水素の電気抵抗は圧力が增大するにつれて低下し、従来の見方ではコア/マントル境界の深度に相当する約140 GPa以上の圧力では金属状態になる。

は、人工衛星が外側のガス惑星の磁場について知識を得るよりずっと前に考え出されたものである。

\*8 ダイナモ理論 (Dynamo theory) とは、地球磁場の原因を説明する理論の1つ。一般に地球内部は高温と推定されているので、内部そのものが磁化されているとは考えにくいことから、コアの外側(外核)を構成する流体が運動することによって電流が発生し、その電流の作る磁場が地磁気の原因になると考える。(地学事典など)

惑星の双極子磁場の原因が中心部のコアを構成する鉄合金または/及び固体状の金属水素のどちらかの永久磁化によるとすれば、惑星形成の初期段階で何が獲得されたのであろうか？もしそうであれば、双極子軸と惑星の回転軸の間の角度は中心体と隣接部分の電磁気的な結合の程度に依存するのかもしれない。もう1つの可能性として、海王星の回転軸と磁気双極子軸の異常な向き(軌道面に対する赤道の傾斜が約98°、回転軸が60°前後)は、太陽系発展の初期段階での惑星の'跳ね飛ばし'によると説明されてきた (Kaufmann, 1988)。いずれにせよ、古地磁気学的研究は地球の双極子磁場が先カンブリア時代から存在したことを示唆しているが、その長い時間の間、地球は明らかに慣性効果である'真の極移動'として知られる現象によって繰り返しその空間的方位を変えてきたのである(後述)。

地球はなぜ地球型惑星としては唯一、双極子磁場をもっているのかという疑問がわく。Gregori (2001)はこの問題を、磁場をもつ惑星が少なくとも1つの衛星(我々の月)を持っている(ガス惑星は多数の衛星を持つ)ことに結びつけた。そして、Gregoriは惑星の磁場は潮汐が引き起す現象、すなわち潮汐加熱<sup>\*9</sup>が主要なエネルギー源であるかもしれないと考えた。しかし、かなりの量の軽い元素を含む不均質なコアという証拠は、コアがそれほど脱ガスしてはいないことを暗示し、地球の深部には相当量の熱エネルギーがあるとする説に反論する。かくして、Tassos (2001)は物理的・地震学的考察に立って、イオン化された水素ガスである地球深部の初生的プラズマの一部が初期の冷たい状態を維持し、地球の温度プロファイルは深度とともに減少、コア/マントル境界ではわずか100°Cになると考えた。したがって、おそらく、潮汐摩擦<sup>\*10</sup>は結局重要な内部エネルギー源ではなく、惑星の磁場が何らかの方法で金属水素と関連していて、それは何よりも内部圧力に依存しているということである。地球は、地球型惑星では最大であり双極子磁場をもつ唯一の内惑星(地球よりわずかに小さい金星は磁場をもたない)であるから、その深部にたまたま双極子磁場の基礎となりうるに十分な規模の金属水素を形成するに至ったか否かについて我々は思いをめぐらせるべきだろう。

\*9 潮汐加熱 (tidal heating) とは、衛星の軌道が円からずれている場合に母惑星が衛星に及ぼす潮汐力が時々刻々と変化することで衛星が周期的に揉まれて加熱される作用のこ

と、木星に最も近い軌道にある衛星イオ (Io) には太陽系で最も激しい火山活動が認められるが、そのエネルギー源は木星から受ける潮汐力であるといわれている (宮本英昭ほか編 (2008) 惑星地質学, p.195-196). なお, 本誌 No.55 (日本語版) の p.18 では 'tidal heating' を '潮流の熱' と訳しているが, これは誤り.

\*10 Wikipedia の tidal heating の解説に, " The friction or tidal dissipation . . . . . " という記述があることから 'tidal dissipation' を '潮汐摩擦' とした. 「月との比較」の章の第2パラグラフでも同じ術語が使われている.

**地球の原始地殻の構造と先カンブリアの歴史**

地球が鉱物成分に富む閉じ込められた球状のガス状雲から出発したと考えると, 次の段階はどのようにしてこの原始の塊が徐々に, より成熟した惑星体へと発展したかということである. 回転するガス状の塊の中では, 初期段階で, サイズ・密度・形その他の粒子特性によって構成成分が分離する過程が生じたであろう. さて, 粒子の分離に関する多数の実験は, 回転する粒子からなる塊の中では粒子サイズで分離が生じることを示した (Donald and Roseman, 1962; Cook et al., 1976; Fan et al., 1990; Hill et al., 1997). 速く回転する冷たい原始惑星体は, 岩石及び氷を形成する成分に加えて, おそらくかなりの量のガス混合物を含んでいたであろう. そのようにして始まり, 回転の遠心力は放射性元素を含むダストと粒子の混合物をサイズに従って全体的に分離し, それらは原始惑星体の外側に凝縮するに至ったと思われる.

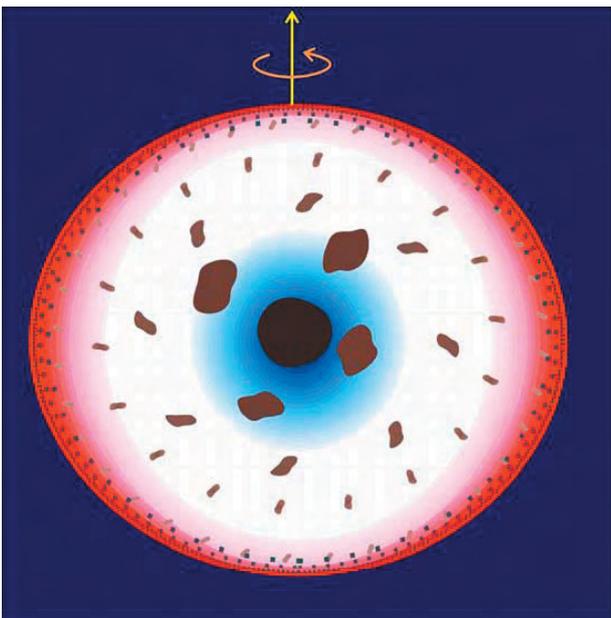


図5 初期の地球の発展モデル. 冷たいガスと粒状物質の集合体とその動力-重力的な分離へと変化する. 回転の遠心力によりウランやトリウムのような大きな粒子は惑星の外側に集まり, そこで放射性壊変による加熱が行なわれる. いっぽう, 深部は初めの冷たい状態が保たれる. 鉄に富む磁性粒子は集まって大きな重い塊を形成し, 重力による沈降で中心のコアを形成する.

る. それ故, かなりの量の放射性加熱が始生代の地球の表層に影響を及ぼし, 他方, 深い内部はそうした熱源からは目立った温度の上昇を受けなかったと推測される. 軽いガス状元素のかなりの部分が中心域にトラップされたということはいえぬことではない. 原始地球がどのように進化したかというスケッチを図5に示した.

この考えを進めると, 始生代の地殻と上部マントルは高い放射性壊変/加熱 (結局はポケット状にメルトができる) と比較的大きな地温勾配によって特徴づけられた. ただし, 当時, 地殻とマントルの間に組成の差が存在したということはいえぬ. オーストラリアのクラトンを研究した Glickson and Lambert (1973) は, 深度に伴って放射性元素が減少し変成度は上昇することを見出し, 同様の結果は他の始生代の地域からも記載された (例えば, Eade and Fahrig 1972; Richter, 1985). コマチアイト (超苦鉄質低粘性の Mg に富むメルトから生じた溶岩で, グリーンストーン帯の主要な構成物. 35~25 億年前に噴出した) から推測できるように, 始生代の上部マントルの温度は現在より 200°~300°C 高かったと思われる (Nisbet et al., 1993; Abbott et al., 1994). 放射性壊変と化学反応による熱と潮汐性の曲げ (後述) が共に作用することによって生み出された高温条件下で, 惑星表層の殻を形成する岩石物質はかなり延性的になり, 容易に変形した. というわけで, 部分的に冷やされた外側の層に強い慣性力 (これは推定された高速で回転する始生代の地球が生み出す) が作用するという環境では, なぜ古い先カンブリアテレーンの多くに著しくねじれた岩石と岩石構造が存在するかを説明することは容易である.

始生代は大規模な線状の造構帯もしくは低温高圧 (青色片岩) 変成作用によっては特徴づけられていない. それ故, 始生代岩石には強いテクトニックな圧縮の証拠はない (Hamilton, 1998) が, 外殻の高い地温勾配はグラニュライト相の岩石の広範な形成を促した (Bohlen, 1987). しかしながら, 始生代後期までに地球の外殻は自然に冷却し, 熱的平衡に達した脆性の表面は (その後も続いた冷却により) 圧縮とねじれを蒙ったに違いない. その結果, '表層の' 応力場は大円の形状に近いベニオフ帯と呼ばれるほぼ直角に交差する2本の大規模な深いずれ (1本は現在の太平洋をとりまき, もう1本はアルプス/ヒマラヤの造構軸に沿う) を作り出した (Wilson, 1954). 今日, 地域レベルではこれらの深部断裂は大円からかなりずれていて, それらは今ではしばしば弧と呼ばれる小円にまで曲げられている. しかし, 大円の輪郭から最も大きく隔たっているのはひぎ型になって断片化している南西太平洋の Kermadec-Tonga-Vityaz 海溝に沿うベニオフ帯である.

結局のところ, アルプス期に慣性にもとづくリソスフェアのねじれ (Storetvedt, 1997 & 2003) で修正されたとき, 大円構造からの著しいずれは解消され, その後, 環太平洋のベニオフ帯は地球を明瞭な2つの古半球に区

分するものとなった。同様に、Benioff (1954) により最初に注目されたインドネシア弧とボニン弧のリソスフェアの水平的なオフセットは、予測された慣性が原因のアルプス期のテクトニックなねじれによって容易に説明がつく。さらに回転している地球ということ言えば、太平洋の東西のベニオフ帯の間に見られる傾斜角、テクトニックスタイル、対照的な外見の違いは地球の回転によってコントロールされてきたように思われる (Storetvedt, 1997 & 2003)。リソスフェアの圧縮応力と、惑星の回転方向に形成されたベニオフ面の異常に浅い角度は、現在では南米の縁辺に例示されている。地球の反対側では、さらに大きく傾斜したベニオフ面を伴う引張/中立の造構条件 (日本列島沖の相対的に乱されていない縁辺によって今最もよく例証されている) が地球の回転により目ざめて発展した。

始生代のグリーンストーン帯の主要な構成要素を形成している高温のコマチアイトマグマは 25 億年ほど前の始生代と原生代の境界付近で出現した。それまでに相対的に薄い表層は脆性的な状態となり、造構応力に対する反応の仕方は変化した。脆性物質に広く認められる応力の刻印は汎地球的な共役断裂系の形になって残っており (要約したものは Scheidegger 1963 を参照)、全体で見ると 2 組の急傾斜でほとんど垂直の地殻断裂系である。グリーンストーン帯の全体的に伸びた形は、基本的には断層で境されたトラフに沿って形成されたもので、惑星の外皮が始生代/原生代境界より後で脆性化したことを示している。図 6 は始生代後期のグリーンストーン帯のブロックダイアグラムで、直交する断裂ネットワークの重要性を示しているが、大部分の地域では正断層で、どちらか一方の断裂が支配的である。比較的熱い始生代地球の外皮では表層の数 100m が顕著な脱ガスを蒙り、地表でのガス/揮発成分の圧力の高まりが自然に一定範囲の地表を隆起させ、発達しつつある脆性外皮に引張性断裂を生じさせたものと推測される。

それ故、至る所にある地殻断裂の直交ネットワークが広大な始生界上部表面に刻まれ、全地球的な造構過程の長い歴史を通して増拡大され、後にはもっと若い地表の岩石にもことごとく力強く刻まれたと結論づけることができる (Storetvedt, 2003 を参照)。直線状の断裂ネット

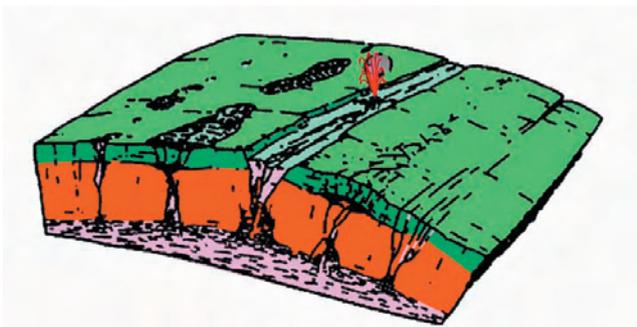


図 6 始生代のグリーンストーン帯のような大陸のリフト性盆地の発展を示すブロックダイアグラム。既存の直交する断裂ネットワークの役割が描かれている。Cloos (1939) にもとづく。

トワークは地球の表面を特徴づけるだけでなく月・火星・水星の表面にも容易に認められるという事実 (例えば, Hast, 1973; Fielder et al., 1976; Phillips and Hansen, 1994; Cattermole and Moore, 1997) は、地球型惑星の発達におけるその基本的な重要性を強調するものである。この基本的な断裂系 (地球上で最も重要な造構的地形) がグローバルテクトニクスの理論化では完全に無視されているのは全く不思議である。

惑星になる前のガス状球体の内部での動力的・重力的分別というアイデアが受け入れられるならば、地球の原始地殻の全体的な化学的組成について定性的だが詳しい推定をすることは可能である。原子の重さが増加する順番に主要な造岩元素を並べるとナトリウム (Na)、マグネシウム (Mg)、アルミニウム (Al)、珪素 (Si)、カリウム (K)、カルシウム (Ca)、チタン (Ti)、鉄 (Fe) となる。これらの元素は少数の特別に多い鉱物グループ、すなわち表層の岩石の大部分を構成している長石 (K, Na, Ca の種々の混合物を伴うアルミナ珪酸塩)、石英、輝石 (Mg, Fe, Ca, Na, Al, Ti の珪酸塩) の中に見出される。示唆された遠心的な分離メカニズムに従って、大きくて重いイオンのダストはより軽い珪素のそれよりも目立って特徴づけられると思われる。そして成長する長石は K に富む (正長石) よりむしろ Ca に富む (斜長石) ので、地球の最初の結晶質カバーは組成的に花崗岩よりはむしろ斜長岩ないし石英閃緑岩であったと結論づけられるであろう。輝石と相対的に密度の高いチタン鉄鉱 - 含チタン鉄鉱及び磁鉄鉱 - 赤鉄鉱の組み合わせは世界の斜長岩に普通に産する (例えば, Gross, 1967; Geiss, 1971; Windley, 1995)。

ある程度の量の鉄粒子は力学的に外側へ押し出され、斜長岩質の表層の鉄に富む鉱物に寄与して輝石・角閃石・鉄チタン酸化物を形成する。一方、鉄合金のより大きな塊は外側に向かう遠心効果に勝る内側に向かう重力により原始惑星の中心に向かって移動し、その慣性モーメントを変え、回転加速度を増大させ、初期にすでに獲得していたと考えられる速い回転速度をさらに高める。その結果である原始惑星体の極めて速い回転は惑星史の初期に地球から月を飛び出させる原因になったのであろう。しかしながら、相対的に密度の高い鉄に富むコアが成長した結果、分離した珪酸塩マントルは (コアより) かなり軽くなった。内部物質の再配分という観点では (おそらく現在の大陸の根の '問題' の初期段階を準備しながら) その慣性軸の大きな変化が引き金となって地球は力学的に不安定な状態にもたらされた (Storetvedt, 2003 とその中の参考文献を参照)。回転の安定性を取り戻すために、かなりの空間的な方位の再定位 (地球の赤道の膨らみを相当程度変えることになった真の極移動) が生じ、これはおそらく地球に影響を及ぼした相対的な極移動の主要時階であり、地史における基本的な変化を促したものであった。この力学的な変化は 25 億年前の始生代/原生代境界に対応する。この変化で地質過程は徐々に新しいコースをとる (例えば Windley, 1977)。

コマチアイトの噴出が相対的に多い、化石の記録が極めて乏しい、赤色層と炭酸塩が相対的に少ないというような様相で特徴づけられる始生代の次には地質記録が多様化する原生代が続いた。その後、地表地質は縞状鉄鉱層に富む大きな堆積盆、顕著な造構磁気帯、生物（これまでに地表に残されている炭酸塩中に極めて多量に記録された）によって累進的に識別され、徐々に現代的な様相を獲得する (Nisbet, 1991)。レンチテクトニクのシナリオでは、地表地質の大きな変化は放射性元素で熱せられた地球の上部数 100km の効果的な脱ガスに関連し、多様な地質過程と岩石・鉱物の分離という結果をもたらした。こうして、水と種々の炭化水素を含み、いわゆる有機金属類の荷重が加わった外側のジオスフィアから加熱により解放されたガスと液体が地表付近のレベルで静水圧を増大させた。25 億ほど前に地球を一掃した動力造構不安定に力を得て原始アセノスフェアは地球上部の脱ガス生成物を石灰岩堆積物・堆積性鉄鉱層・深成作用・鉱化作用・大規模なクレーターを形成するイベントなどの形で地表に段階的に解放することを始めた。例えば約 20 億年前には強力な内部ガス圧が Sudbury (カナダ) や Vredefort (南アフリカ) のような構造<sup>\*11</sup>を形成する大規模な噴出を引き起した。これらのクレーターは原生代前期の古赤道にほぼ垂直に走る斜め伸長帯に位置し、高圧のマントルガスはその内部に脱出しやすいルートを見出した (Storetvedt, 2003)。

\*11 ここでいう 'Sudbury の構造' とは、カナダ東部の長径 62km、短径 30km の楕円形盆地。また、'Vredefort の構造' とは南アフリカ東部の直径約 300km の円形凹地。いずれも原生代に直径 10km 前後の小天体が高速で衝突してできた衝突クレーター (impact crater) とみなされている。

Hunt (1992b) は原生代の純粋な石英砂とクォーツアイトの不可解な表層堆積物について、これを局地的な花崗岩の表面削剥作用と篩分けによる自然的産物とするにはしばしば大きすぎ純粋すぎるという点を強調し、内生的脱ガス作用起源に都合のよい一連の主張を発表している。彼は “水が生成されるサイレン反応<sup>\*12</sup>は水素ガスに富む圧縮された蒸気の中でスラリー化された石英砂を作り出すことができる。これは溶解したガスの容積と充填の度合いに応じて、静かに、あるいは発作的に、あるいは爆発的に地表に流出するであろう。'内生的な砂' という言葉はサイレン燃焼の後で粒として最初に結晶化し排出された特殊な石英を適切に描写している”と述べている。他方でスラリー化した石英粒は導管を充たし、不規則な（偽堆積性の）岩枝を形成しながらクォーツアイトあるいは砂岩脈になる。さらに、Gold (1999) は、珪素は炭化水素系の油に似た油を生成し、これら 2 種の油はおそらく互いに溶けあうことができると主張している。本当なら、これは時々地殻の至るところにある直線状の断裂ネットワークに注入され時には数 10m 規模の幅を有する純粋な石英岩脈の内生的産出を説明する巧みな方法となるであろう（例えば、Roday et al., 1995）。

\*12 サイレン反応のサイレン (silane) とは、珪素と水素の化合物 (SiH<sub>4</sub>)。常温では気体だが -185°C で液化し、420°C で Si と H に分解する。メタン (CH<sub>4</sub>) と同じ構造で、融点もほぼ同じ。(Wikipedia)

酸化物 - 炭酸塩 - 珪酸塩 - 硫化物型で約 20 億年前（原生代初期）に最も大量に生成された縞状鉄鉱層は大部分のグリーンストーン帯に産する。これらの縞状鉄床堆積物は赤鉄鉱鉄 / 磁鉄鉱と互層する鉄に富むチャート、鉄とマグネシウムの炭酸塩、そして第一鉄の珪酸塩を含んでいる。互層中のこれらの鉄鉱床の集積は河川の運搬 / 浸食作用で形成されたようには見えないが、起源は依然として謎のままである（例えば Windley, 1977）。他方、Collins and Hunt (1992) はこれらの鉄床が火山岩片の包有物を有し、変火山岩類と共存しながらトラフのような凹地に局在しているという事実を強調し、“トラフ鉄床（縞状鉄鉱床）は断裂システムに沿って配列した火道（ここではサイレンを含んだガスが二酸化炭素・鉄・マグネシウムを含む含水溶液と共にでてくる）からの火山性発散物と考えるのがもっとも無理がない”と結論付けている。

炭素は脱ガス過程の中で容易に他の元素と結びついていわゆる有機性金属を形成する '粘性' の元素で、有機性金属は加熱された上部マントルの大部分を金属性元素に枯渇させる。金属の沈殿に関する古典的な熱水仮説は全く非現実的と見なされ (Krauskopf, 1982), Gold (1985, 1987 & 1999; Gold and Soter, 1982) は上昇するマントルの炭化水素溶液は溶液中に金属を保持する能力の点でも、エネルギーを集中的に取り除く過程で必要とされる汲み出し能力の点でも水に勝ることを強調している。このように、Thomas Gold は金のような金属は深部の岩石から浸出して、炭化水素の上向きの流れによって有機性金属として運ばれたと主張した。通路に沿って圧力及び他の条件が変化するために、金属はいくつの地点で炭化水素分子から解離する。そして石炭層についていえば、結局は水素もまたその運搬分子から解離し、その後には炭素または煤が残り、それがさらに流水によりある程度の距離を運ばれて “黒い指導者” が形成される。Gold (1999, p. 136-137) は液体の炭化水素と結びついた金属鉱山の多数の例と、Newfoundland における鉄鉱山がメタンの噴出により休止されたことを示した。この文脈では、19 世紀後半の Dmitrij Mendelejev (1837-1907) による有名な仮説（大部分の天然の石油とガスは地球深部から湧昇する鉄の炭化物が水和することによって生じるというロシア - ウクライナで有力だった無機起源炭化水素仮説<sup>\*13</sup>の基礎を築いた人）に言及することは適切である (Dott and Reynolds, 1969 を参照)。

\*13 無機起源炭化水素説 (hypothesis of abiogenic hydrocarbons) とは、石油や天然ガスの主成分である炭化水素が惑星誕生の際に取り込まれたものに由来するという説で、ロシアの化学者 D. Mendelejev が最初に唱え、旧東

側諸国では定説となった。生物起源説が主流の旧西側諸国では無視されてきたが、その旧西側の天文物理学者 T. Gold が取り上げたことで西側諸国でも脚光を浴びることになった。(ウィキペディア)

金の鉱化作用と炭化水素の組み合わせは、世界の主要な金産地である南アフリカの Witwatersrand 盆地<sup>\*14</sup> で典型的に見られる。この盆地は 31 億年前の花崗岩 - グリーンストーン基盤の上に不整合で載っていて (Robb and Meyer, 1995), 初めは現在よりはるかに大きな堆積盆地であったが、Vredefort ドームと呼ばれる中央隆起により現在見る円形の盆地に縮小された。シャッターコーン、条線のある岩石断裂、圧力が作った平たい変形、塊状のシュードタキライト様角礫などの種々の岩石構造の組み合わせは、引き金となった内部の激しいガス噴出と巨大衝突によるものと考えられてきた。しかしながら、Vredefort ドームを形成した実際の衝撃イベントの後で Witwatersrand 盆地は広範な流体の活動が生じた。例えば、この盆地のいくつかのシュードタキライト様角礫はそれらの母岩に較べて金その他の再流動化した金属に富んでいる (Reimold, 2001)。この問題に関して Barnicoat et al. (1997) は “金 (及びそれに伴うウランウム) の鉱化作用は初め熱水性で、その後、広域的な高温変質のイベントがあった。小さなスケールで見られる変質過程は、はるか盆地の内部にまで及ぶ酸性交代作用のほぼ層準規制帯<sup>\*15</sup> として広域的に地図上に描くことができる: この変質に関わった流体の流れは岩相境界に沿って局所化された小スケールの構造の中に凝集している” と結論づけている。Barnicoat et al. はさらに、 “フィロナイトで特徴づけられた広範に見られる低変位のスラストシステムと閃ウラン鉱・炭化水素・金を含む鉱化作用を受けた断裂システムは、そこが著しく構造規制を受けた流体の移動通路であった証拠を残している。・・・堆積後に金・黄鉄鉱・閃ウラン鉱・炭化水素が結晶化した証拠とそれらが溶液起源であることは否定できない” と主張している。Witwatersrand 盆地を全体的に見ると、大規模な内部ガスの噴出がマントルからの移動通路を開きつつ Vredefort ドームを作り出し、移動通路に沿って炭化水素をベースにした流体の移動が生じ、表層の地層中に金その他の金属を堆積させた。

\*14 Witwatersrand 盆地は南アフリカ東部の始生代花崗岩地域にあり、北西 - 南東に伸びた長さ約 350km、幅約 200km の大きな向斜地。盆地内に堆積する Witwatersrand 系は始生代後期 (30 ~ 27 億年前) の珪岩・礫岩・砂泥互層・火山岩などからなり、全層厚 10,000m 以上。世界的な金の産地。また、\*11 で注記した Vredefort クレーターはこの盆地内にある。(主として地学事典)

\*15 層準規制帯 (strata-bound zone) とは、ある現象が特定の層準に限って見られる場合、その層準をいう。例えば、特定の層準に胚胎する鉱床は層準規制鉱床 (strata-bound deposit) という。

原生代には加熱され脱ガスの進んだ外側のジオスフェア

から浮上した塊が、本来の位置で鉱物を変質させ、元の斜長岩質地殻を著しく改変したに違いない。どのくらい古い岩石が交代作用と再結晶作用により花崗岩質なものに変質したのかという長年の課題を検討した Hunt (1992b) は、苦鉄質の陽イオンが珪素と珪酸塩によって置換され、石英閃緑岩やハンレイ岩が珪長質で石英に富むようになるサイレーン (SiH<sub>4</sub> で脱ガスの産物) の活動を提唱している。この反応ではカリウムと水 (その他の脱ガスの産物) が得られ、先カンブリア地殻の花崗岩化は下から進行する早期の交代的な変質の産物であろう。この考えを受け入れるならば、地殻を掘削すると、深部に向かうほど花崗岩化作用が顕著になるという状況に出くわすに違いない。この予測通り、コラの超深度掘削によって貫通されたより苦鉄質な楯状地の岩石は掘削断面の深部で明るい色の花崗岩質岩石に移行したが、浅い部分でさえ原生代の断面は深度が増すにつれて花崗岩化作用が強まり、表層のわずかな黒雲母化から深度 6.8km におけるミグマタイト化まで大きく変化することが注目された (Russ. Acad. Sci., 1988)。

先カンブリアの地球 (レビューとしては Windley, 1995 を参照) に関してプレートテクトニクスを悩ませている推測のうち、現在の植物相を無視すると、火山活動・深成活動・変成作用・既存基盤岩類の地殻変質・鉱化作用などの激しい過程は大部分が原生代の後期 (約 10 億年前) までに終わったように思われる。続いて、大規模な造構帯、大陸盆地の形成、広域的な塩基性岩脈群が地質発達を特長づける。ここで提案している地球の起源と初期の発達に従うと、先カンブリア時代においては、脱ガスにより多くの元素に枯渇したのは基本的には熱い外側の数 100km であり、そこでは広範な鉱化作用と初期の斜長岩〜石英閃緑岩質の外皮の著しい変質が生じ、玄武岩マグマのポケットと全体的にはペリドタイトからなる上部マントルが作り出されたことが推測される。現在のモホと超苦鉄質の上部マントルが発達してきたのは惑星の持続的な脱ガス (元素の上方への移送とグラニュライト質の下部地殻のエクロジャイト化を伴った) によると考えることは合理的であろう。事実、Ito and Kennedy (1970) はモホがこの方法で形成されたことを示唆した。

地球の表層水は脱ガスと化学反応の結果として放出されてきた内部起源のものであるということに信ぜべき多くの理由がある。先カンブリア時代に地表では盆地が発達を始めたが、深い海が存在したという証拠はなく、当時は控えめな量の表層水が比較的浅い緑海を形成していたに過ぎない。上に述べた推論に従えば、地球の水 (水素) の大部分はまだ比較的冷たいマントルとコアの深いところに蓄えられていると考えられ、先カンブリア時代には著しい脱ガスはなかった。地球の外側部分への含水流体の供給が限られていたということが、なぜ先カンブリアの地球が地殻の薄化とそれに伴う盆地のアイソスタティックな沈降の段階へと進まなかったのか (Storetvedt, 2003 を参照)、あるいは、なぜ広く深い盆地の形成にふさわしい条件もそのような盆地を充たす

だけの十分な水もなかったのかという疑問に対する主な理由と考えられる。

### 月との比較

月はしばしば原始地球の外側層のある部分から飛び出した塊と考えられてきた。この仮説を受け入れ、原始地球が斜長岩質の外殻を獲得したという理解を合わせると、似たような化学的性質が月の最も古い表層の岩石を特徴づけるに違いないと推測することができよう。事実、アポロミッション<sup>\*16</sup>が持ち帰ったサンプルは、月の表面で最も原始的な部分である月の高地ではAl含有率が比較的高い低密度でCaに富む斜長石が支配的で、特徴的な輝石-斜長石岩を作り出していることを明らかにした(Hargraves and Buddington, 1971; Guest and Greeley, 1977; Spudis, 1996)。さらに、月の高地のサンプルのほとんど全ては部分的に溶けて破砕された角礫である。もし月が実際に原始地球の地殻/マントル部分から飛び出したとするなら、飛び出したときに少なくともその外側部分はある程度まで固化していたであろう。月物質の放出は、おそらく鉄に富む原始コアの重力が増大したことが引き金となって加速度が増すという状況のもとで生じた。この論理に従うと、月の本体は地球よりわずかに若いに違いない。ただし、現在のところ、まだ両者の本体には45億年前後という暫定的な値を与えられている。ともかく、月の高地のサンプルの大部分は、ここで地球の原始外殻に対して推定した組成と調和的な斜長岩もしくは斜長岩類縁の岩石に分類される。しかし、地球の原始地殻/マントルから飛び出した特別に無秩序な塊がどのようにして地球のそれと似た月の地殻とマントルの分離を果たしたのであろうか？

\*16 アポロ計画 (Apolo program) は1961年から1972年まで米国によって実行された月探査計画。1961～1968年は無人ミッションであったが、1969年のアポロ11号以降は有人ミッションとなった。人が月面着陸に成功したのは11号を含めて計6回で、合計約400kgの月の石を持ち帰った。(ウィキペディアほかによる)

分裂モデルを採用し、地球の密度(5.5g/cm<sup>3</sup>)と月の密度(3.3g/cm<sup>3</sup>前後、地球のマントルに対して推定される密度と一致)の全体的な違いを考慮すると、飛び出した塊は原始地球の地殻/マントル部分からやってきたと推測できる。この見方と調和して、Ringwood(1979)は月に小さなコアが存在する可能性が問題として残っているが、月の材料が地球のマントルから生じたという強力な証拠があると主張した。しかしながら、月の分裂過程で、'固化した'地殻は、あまり脱ガスしなかった原始マントルより多量の岩石片を月に与えたものと思われる。したがって、固化する前の回転する月の本体の中では、地球の地殻に由来する材料が未発達の衛星の外側部分に力学的に押し付けられた。その上、分裂過程では地球の表層の一部に濃集していた放射性物質が固化しつつある月本体の至る所にばらまかれた。加えて、潮汐摩擦が月の歴

史の初期における重要な熱源であったと推測される。それ故、初期の月本体の至る所にばらまかれた放射性物質の化合物が潮汐摩擦による熱と一緒にあって、地球のそれに較べてはるかに速い脱ガスの歴史を辿ることになったと推定するのは合理的であろう。力強い脱ガスとクレーターの生産で始まり玄武岩が被覆するメガスケールの海の凹地の形成で終わる月の地殻の連続的な変化が生じたものと思われる(後述)。

一見すると、地球と月はおおよそ似ていないように見えるが、月の表面地形の多様性は、地球よりはるかに短く効率的な脱ガスの歴史の結果である。月の大きな面積/体積比は、ずっと大きな地球よりはるかに効率的な脱ガスを促したと推測される。それ故、内部の脱ガスを持続させることが地球の地質活動を持続させる基本的エネルギー源になり(後述)、月のはるかに効率的な脱ガス(したがって短命)は、始生代後期にその地史が早くも終わってしまったことを説明できる。

いく度かのアポロミッションにより得られた岩石は、月の表面の凹地(海の平原)が塩基性の溶岩で覆われ、その同位体年代測定値が30～38億年の間であることを明らかにした。海の控えめなクレーター密度に較べて39億年より古い表面はクレーターで飽和していることが分かっている。月の年齢とその斜長岩質の高地地殻の形成が概略約45億年前であるとし、上述した海の玄武岩の同位体年代を受け入れると、特徴的な高密度の月面クレーターを作り出した過程は月の歴史の最初の8億年の間に生じたということになる(Guest and Greeley, 1977)。次いで玄武岩質洪水平原火山活動を伴う海の凹地が形成され、その後、脱ガスに関連したクレーターの形成は徐々に治まった。脱ガスと月本体の固化は見かけ上完成した。月は地質活動の面では最後の30億年は'実際に'死んで'いた。

上述したところから従えば、クレーターの形成は基本的に地球型惑星の進化に固有の過程であり、一般に信じられているように偶発的な衝突イベントの結果ではない。その比較的小さなサイズと高い熱ポテンシャルにより、月の脱ガス速度はかなり速かった。目立った浸食営力が欠けている中で夥しいクレーターのある見かけはまさに期待される場所である。また、そのように相対的に小さな本体では、激しいガスの噴出頻度は先カンブリアの地球よりもずっと早く低下した。クレーターを作る過程は、本体のガスが出切った、あるいは内部の熱化学平衡が達成された時期までに終わった。この発達スキームに調和して、月の地史は、大きなクレーターと放出物の大部分が古い岩石システム(高地)の中に見出され、他方、クレーターの全体頻度が相対的に低だけでなく大きなクレーターが極めて少ないことが若い海の平原を特徴づけていることを示している。脱ガスシナリオを固守すると、少なくともいくつかの大規模な脱ガスの噴気孔では周期的な噴出があったと考えるのは自然であろう。この周期的な噴出は多重の地形的リングを形成し、それに対

して中心のピークで特徴づけられた最も内側の構造は (その特定の噴気孔における) 最後で最も小規模な内部ガスの噴出を示すものであろう。月の多重リングである **Oriental**(図7) と **Schrödinger** の両盆地はこのカテゴリーの典型的な例である。

月のクレーターが内部の脱ガス現象であるという見方に都合のよい別な証拠は、構造線に沿って分布するクレーターの鎖の例である。Hyginus Rille は適切な例として役立つ。図8に示されている2本の独立した枝からなるこのリフト状の構造に沿ってそれぞれが直径が数kmの一連のクレーターが存在する。そのようなクレーターの線状配列からはそれらが衝突の産物であるようには見えない (Guest and Greeley, 1977)。もう1つの重要な特徴は、さらに小規模な'背景'クレーターが直交するパターンを形成する傾向にあることである。上述したように、線状の断裂システムは大きな地球型惑星上では明らかに最もありふれたテクトニックな構造であるが、Hyginus Rille の主要な枝の場合のように、一般的な線状の配列に対して断裂が対角線的に発達した例が時に見られる。Hyginus Rille クレーターの脱ガス起源説を採用すると、一連の大きなクレーターが2本の枝リフトの交差する地点に位置することはとくに驚くことではなくなる。そのようなテクトニックな交差点は自然と内部ガスが脱出するための効果的な通路になったはずである。

放射性物質も濃集した初期の斜長岩の外皮と、形成の初期段階で予想される潮汐加熱により、原始の月は、始生代の地球の状態と同じように外側の温度が相対的に高くなったであろう。これは表層物質をどちらかという延性の状態に変え、初めの表層地形を不明瞭にしたであろう。月のクレーターの研究はこの推測と調和的である。というのは、クレーターは年代が古くなるほど地形の劣化の程度が増大し、ついには初期の地形のほとんどすべてが消失するからである (Guest and Greeley, 1977)。地球では、始生代初期と推測されたクレーターはそれ(延性化)に加えて、水と大気的作用による表面浸食が強く重なって消滅してゆく過程を辿ったのであろう。構造的にも化学的にも月の高地と海の平原は地球の大陸と大洋盆地に類似していると見ることができ(例えば, Mason and Melson, 1970; Guest and Greeley, 1977), それらの地史にも著しい類似性があると思われる。さて、地球の広範な苦鉄質~超苦鉄質火山活動の最初の大規模な現れであるグリーンストーン帯は(月の)海に広く分布する粘性の低い玄武岩層とほぼ同じ年齢である。地球も月も地殻の固化から最初の溶岩の出現までにほぼ1億年を要した。言い換えると、温度の上昇とメルトの生産はきわめてゆっくりしたものであった。海の地域は月の表面の広い範囲にわたって形成されたが、それが最も広範に発達したのは地球に向けた面であった。

月の地殻は比較的厚いが、面白いことに半球によって異なっている<sup>\*17</sup>。Meissner(1986)は裏側の高地地殻の厚

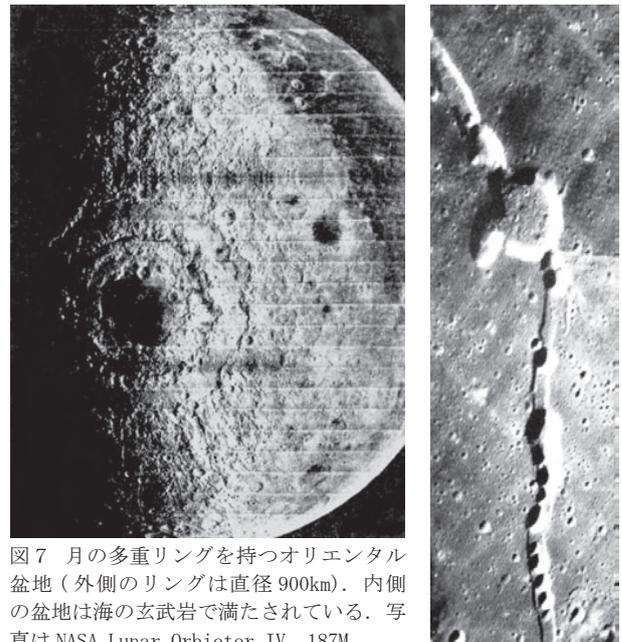


図7 月の多重リングを持つオリエンタル盆地(外側のリングは直径900km)。内側の盆地は海の玄武岩で満たされている。写真は NASA Lunar Orbiter IV, 187M。

図8 小さなクレーターの連鎖が重なる月のリフト構造である Hyginus Rille。直径が約10kmの最も大きなクレーターは2本の枝状のリフトの交点に位置していることに注目。さらに、リフトの構造的背景が直線状のパターンを形成するより小さなスケールのクレーターによって特徴づけられていることにも注目。このような観察はクレーターシステムが脱ガス作用でできたという十分な証拠とみなされる。写真は NASA Lunar Orbiter V 96 M。

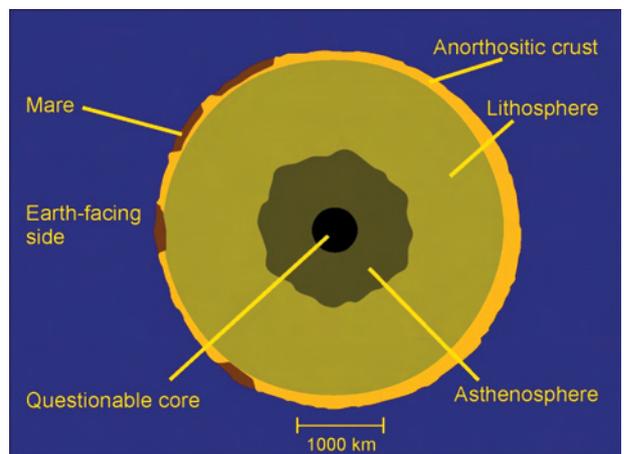


図9 月の暫定的な断面。玄武岩が覆っている海の凹地(地球に向いている面)と反対側の地殻の厚さの違い(60km対100km)に注意。"前"側の相対的に薄い地殻は海の構造形成に直接にかかわっていて、これらの凹地はおそらく地球の大洋盆地と起源を同じくするものであろう。図は Kaufmann (1988) にもとづく。

さは80~100km、地球に面した低地(海)地殻のそれは50~60kmと見積もった。模式断面図を図9に示す。それ故、月の末期の脱ガスが、アイソスタティックな沈降と広範な海の玄武岩の流出に伴ってその下の斜長岩地殻の著しい薄化を伴った(これは中生代後期の地球の深い大洋盆地の形成に相当するとみなすことができる)と結論づけることは理に適っているであろう。地球表面のはるかに若い両極端の地形(大陸と大洋)は、月よりずっと大きなサイズ、内部の低温、それに応じたおおい脱ガス

速度が原因で生まれ、エクロジャイト化とそれに伴う重力が引き起す地殻下のデラミネーションに加えて超臨界の水素溶液 (後述) の分解作用により規制されたといえる。

\*17 月は地球に向けている面 (表) と地球からは見えない面 (裏) で地形・重力異常・トリウム濃度などに大きな違いがある。これを月の二分性 (dichotomy) といい、月の地殻構造の不均質性に原因があると考えられている。(宮本英昭ほか編 (2008) 惑星地質学, p. 102-106)

月の海の凹地の多くでよく知られている階段状および地溝状のへり (Spudis, 1996) は、沈降に関連する引張性の地形に相当し、地球の現在の大陸縁辺に沿うリシック断層に対応するように思われる。脱ガスに関連した月の歴史に関して究極的に重要な観測は、月に水からできた氷が存在することを見出したことである (例えば、Spudis et al., 2010; Colaprete et al., 2010)。最近、月の極近くの高いクレーター (そこは永久的に影になっていて極めて寒い地域であり、水からできた氷は昇華せず、それ故おそらく数億年にわたって存在する) の中に広範かつ相当量の氷が存在することが報告されている。水に加えて軽い炭化水素・二酸化硫黄・炭酸ガスのような他の多くの揮発性成分のスペクトル帯も観測される。これらの合成物は地球のマントルからの現在の脱ガスの産物に相当する。

### 地球の歴史への道

上述の議論の中で我々は惑星がガスと微粒物質からなる原始惑星の円盤から進化したという古い考え (微惑星説) に伴う基本的な問題のいくつかに焦点を当てた。より妥当な仮説は、太陽系の惑星は、太陽が収縮する過程で個別に放出された母雲 (種々の回転特性をもった組成的にも多様な塊) が太陽の回転面に近い軌道に挿入されて形成されたという Cameron (1962, 1978 & 1985) の代表的な主張であろう。Cameron の説にもとづくと、初期の塊の一部が失われて共存する衛星を形成したのは最も早く回転する原始惑星体であったということが予測される。衛星の放出はガスに富む外側の惑星にとって特に効果的であったと思われる。さらに、地球型惑星が熱い溶融した塊として始まるか、もしくはかつてそのような状態にあったと考える理由は何もない。個々の母雲は全く冷たく、外部空間と同じ極低温にあり、それ故、その力学的状態と内部構成は極めてゆっくり発達したという考えが現実的であると思われる。

地球の冷たい原始的塊の力学的分離は、遠心的な篩わけという方法で原始惑星の表面近くに放射性元素を集積させる結果となった。いっぽう、鉄粒子間の磁性による引力は徐々に大きな鉄に富む塊へと集積し、重力による沈降のもとで次第に密度の大きな鉄に富むコアを形成した (Tunyi et al., 2001)。比較的不均質な苦鉄質で珪酸塩に富むマントルが残ったが、Anderson (1989) によると

下部マントルは上部マントルよりも珪素及び / 又は鉄に富むことができる。いずれにせよ、地球の不安定な物理化学状態とゆっくりした内部物質の再構成という基礎に立って、月の進化過程だけでなく先カンブリアの主要な地史上の諸相と矛盾しない発展過程、すなわち一連の明確な予測ができる。

比較的薄い外側の層は放射性壊変・化学反応・潮汐摩擦の組み合わせと脱ガスによって加熱されたと考えることができる。この '甲羅' はその後、始生代に冷却し、2つのほぼ直交する大円上の変位 (傾斜角は地球の回転に規制されて様々) を生み出した。原生代初期までに地球の外側部分は熱化学的平衡状態に達し、他方、初期の比較的冷たい状態を維持し枯渇していない軽い元素を相当量含む深部 (現在の下部マントルとコア) は平衡からほど遠かった。このような地球の深部からの相対的にゆっくりしたガスの放出は、地球がなぜ今日までダイナモテクトニクスに活動的であったかという理由になる。言い換えると、その化学物理的バランス状態を確立するために絶え間なく塊を再構成してきた結果である。地球深部が脱ガスしていないという可能性は地球科学関連の資料の中で度々主張されてきた。例えば Urey (1952) は初期の冷たい原始地球が長期にわたって分化と脱ガスを経験し、その結果、次第に原始コアが成長したと考えた。

化学的分化を受けた初期の溶融した地球という旧来のモデルとは対照的に、現代の実験的研究はコアが不均質で異方性をもっていることを示唆している。コアが発見 (1906) されて以来、その密度不足は謎であった。しかしながら、今では硫黄・炭素・珪素・酸素のような軽い元素が容易に高圧の金属混合物になることが知られている (Stevenson, 1981; Gottfried, 1990; Okuchi, 1997 その他多数)。これらの軽い成分はそれが重力によってコアへ沈降する過程で鉄合金になるであろう。重力的な圧力が増すにつれて自由水素はすべて金属状態となり、重力不足が立証されたコアへさらなる物質を付け加える。Gottfried (1990) に従うと、コアはかなりの量の水素化金属化合物の宿主になりうる。他方、珪酸塩に富む下部マントルはかなりの容積のシリサイド<sup>\*18</sup>、すなわちよく知られた炭化珪素 (SiC) を含むに違いない。

\*18 シリサイド (silicide) とは珪素とそれより帯電率の高い元素 (Ni, Na, Mg, Pt, Ti, W など) の化合物。炭素は珪素より帯電率が低いので、炭化珪素は通常シリサイドには含まれない。(Wikipedia)

今日では地球深部に存在可能な成分として認められている軽い元素とともに、地球のコアから下部マントルへ逃れる浮力のある揮発性物質の地球力学的・地質学的重要性を考えることは極めて重要である。もしマントルの全体的な組成が現在広く信じられているように平均的な炭素に富むコンドライトと一致するならば、かつて多量に含まれていた水はどこへいったのかという疑問が湧く。Turekian (1977) は、初期の地球が溶融し炭素コンドラ

イト質の物質が初生的な成分である場合、現在の地表の水の量はすべての水が逸出したとして期待されるよりもかなり少ないと主張した。それ故、彼は、惑星の水の大部分は放出されてガスになったのではなく、まだ深部にとどまっていると考えた。

もしある段階にある惑星が溶融したら、低密度の揮発成分は脱ガスしたであろう。他方、初期の冷たい惑星体はゆっくり加熱され、脱ガス過程は内部の温度が増加する余地のある限り続くであろう (Gold, 1985)。それ故、結晶質地殻を通して (マンツルの深部断裂に沿って) 上昇する酸化していない炭化水素ガスの永続的な流れがあることは、地球深部が全体として一般に信じられているよりはるかに低い温度にあることを示唆している (Gold, 1999)。下部マンツル起源と考えられる天然ダイヤモンドの諸相を研究している Melton and Giardini (1974) は、ダイヤモンドがしばしば炭素を含む液体包有物 (大部分はメタンと二酸化炭素) を含んでいることを見出した。脱ガスとの関連で、Hunt et al. (1992) は珪素をその存在率の高さからコアの金属水素化物の潜在的に重要な元素の1つとして認めている。

図1は、コア/マンツル境界地域から出現する浮揚性の相がどのようなものであれ、それらの広がりのあるダイアピルの湧昇が、途中で相変化と化学反応はあるものの、最終的には地殻の薄化と大洋盆の形成をもたらすと信ずべき基礎を与えるものである。かくして、浮上する塊が付着後に消失する場合、コアのサイズは始生代後成長せずに小さくなったが、コアの密度は浮揚する塊が噴出することで地質時代を通じて増加してきたと思われる。珪素に富むマンツルと外側コアの間の境界面は一般に地球の最も顕著な物理化学的境界であるとみなされている (例えば、Young and Lay, 1990; Kendall and Shearer, 1995; Williams and Garnero, 1996)。しかし、下部マンツルの高い圧力を認めるなら、表層の重さが空隙をすべて閉塞させてしまうと考えるのは賢明とはいえないのではなかろうか? 伝統的には、ごく表層部を除いて地球の内部での流体の浸透は不可能であると認められてきた。しかしながら、ゆっくり加熱され脱ガスする初め冷たい地球の場合は、状況は全く異なる (Hoyle, 1955, Gold の間隙理論に関する章を参照)。つまり、それぞれのレベルで岩石と流体は、低圧力下の地表付近の岩石におけるように開口裂罅空間により同じ圧力を受ける (一種の pressure bath のようなもの)。この原理は2本の超深度大陸試錐 (コラとドイツ南部) で明瞭に確認された。従来の地質の考え方とは矛盾する観測であるが、どちらの地点でも含水流体の自由な流れを伴う予測しなかったほど多くの裂罅空間が深度数 km のところに見出された。

Hoyle (1955) 及び Gold (1999) に従うと、深部において既存の断裂ネットワーク空間を充たす浮揚性の流体は、周囲の岩石の対抗圧力が大きいほど外向きの圧力を及ぼすので、既存の流体の流れはどんなものでも維持さ

れるであろう。つまり、深部での裂罅の運命を決定するのは圧力の差ではなく絶対的な大きさである。このような理由で岩石中の裂罅は極めて高い静水圧下でも維持されるが、少なくとも地球の表層に近い部分では岩石は上載荷重より大きな圧力を伴って上昇する流体に耐えることはできない。その結果は表層へ流体が逸出するという激しいイベントだけでなく、様々な静かなイベントとなる。すなわち、本誌でも繰り返して報告されているような深発地震、地震エネルギーの上方への伝播、地震性のガスなどは、脱ガスが進行している比較的冷たい地球深部という見方で容易に説明がつく。水圏の水と大気圏の構成物の大部分はこのような方法で集積し、地殻及び上部マンツル深度に深部裂罅 (表層への容易な脱出ルートとして役立つ) と高いガス圧がある場合には、非マグマ性のガスの噴出だけでなく火山活動が時々発生することになる。これらのプロセスは明らかに始生代後半に活動的であった。当時における地殻と上部マンツルの比較的高い温度が地球のこれら上部レベルでの広範なガス放出を促し、高温の火山活動、広範な鉱化作用、クレーターの形成などが生じた。

図1で見ると、コア/マンツル境界層が隆起している地域は地表へ投影すると地球の深い大洋盆地に対応する。さて、マンツルを通過して浮上する水素化物・シリサイド・(いわゆる)有機金属などの塊 (Gold, 1985 & 1999; Hunt et al., 1992) は、途中で相変化と化学反応を経験する。それらがマンツルを通過して浮上するにつれて、揮発性の水素化物は金属と造岩金属類を沈殿させ、上部マンツルでは種々の化学過程を通して水が発生する (例えば、Hunt et al., 1992)。これらの深度では水は固体物質が作り出す泥を運ぶ能力のある超臨界状態となるであろう。火山地域や大規模な炭化水素地域では泥がマンツルからの未熟な揮発分・水蒸気・可燃性の炭化水素ガスによって押し流されて火山のような構造を作り上げている例がしばしば観察される。さて、水が加わった地殻下のエクログジャイト化の過程では地殻は基底から上方に向かって容易に薄化される。この関連で、グラニュライトからエクログジャイトへ移行する部分の野外における産状は、含水流体が欠けている場合、この過程が強く阻害されることを示している (例えば、Austrheim, 1990; Walther, 1994; Leech, 2001) Austrheim (1998) は、これらの変成反応を進めるためには温度や圧力よりも裂罅の発達した岩石を通して濾過された含水流体が最も重要であると主張し (図10 参照)、Leech (2001) は地殻の薄化 (地殻下で重力によって引き起こされる薄化) は、現実の変成作用が調整する密度変化に伴う変形に利用可能な水の量によって規制されるということを見出した。

要約すると、脱ガスに関連した内部物質の再構成は地球の慣性モーメントを周期的に変え、間欠的な極移動のイベントだけでなく惑星の回転変化にも関与するのである。これらの力学的な変化は地質時間の境界となる広範囲の隆起を引き起すであろう。このようにして先カンブリア時代の中期には極移動の最も重要なイベントが上部

マントルと表層の諸過程を解放し、始生代と原生代の境界を規定した。もう一つの重要なダイナモテクトニックの変革は先カンブリアとカンブリアの境界となる場面を設定した (Storetvedt, 2003 参照)。

### 結 論

惑星の連続的な脱ガスとそれに関連する内部の塊の再構成は、始生代初期以来、地球の外側地域を改変してきたと推測することができる。具体的には、最初の厚い原始地殻を薄化させ、化学的に変化させて次第に現在の地殻/マントル境界を作り、さらに地表水の量を連続的に増加させた。外側のジオスフェアにおける漸進的な静水圧の増大は、エクロジャイト化、重力が引き起す地殻下の薄化、関連するアイソスタティックな沈降、そして最後には (中生代後期における) 大洋盆地の形成などにつながった。深い大洋は、次第に増加する若い地表水だけでなく、かつての広大な大陸上の海 (結局は現在の乾陸となる) をも受け入れられるだけの容量となった。脱ガスに伴う内部物質の再構成は地球の慣性モーメントを周期的に変え、惑星の回転及び/又は地球の空間的な転位 (真の極移動) という間欠的なイベントをも引き起こした。これらの顕著な変化は、古地磁氣的・生物地理的变化だけでなく、テクトノマグマティックな現象、地殻の鉍化作用を含めた幅広い事象を引き起す原動力となる。本論の図1に従って地球の現在の地殻鉍化作用を予想すると、それは現在の深海底に広く分布する豊富な多金属凝固体によって確認されているように、主として大洋盆内に見出されるはずである。脱ガスを駆動力とした地球の歴史は、予測と確認の壮大な連鎖を導く。それは連続的に変化する物理的世界の際立った '最終' 産物 (一方向にのみ進んできた進化の '頂点') として高い山脈と大洋中央海嶺が発達する現在の世界で終わる (Storetvedt, 2003)。数ある方法の中で、この新しい地球理論は、多くの古典的であるが未確認の理論的された一般概念を変えるこれまでにない新しい表現である。我々は以前と同じ一群の観測結果を扱いながら、原始地球に関する新しい物理的な出発点を適用することにより、現象論的な新しい相互連結システムを確立することができる。

謝 辞: 40年以上にわたって熱心に私の技術助手を勤め、図の作成をしてくれた Frank Cleveland に感謝する。

### 文 献

Abbott, D. et al., 1994. An imperical thermal history of the Earth's upper mantle. *Jour. Geophys. Res.*, v. 99, p. 13.835-13.850.  
 Alfven, H. and Arrhenius, G., 1976. *Evolution of the Solar System*. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, 599p.  
 Ampferer, O., 1944. *Über die Möglichkeit einer Gasdruck-Tectonik*. Akademie der Wissenschaften in Wien, Math.-Naturw. Klasse, Abteilung Ia, Bind 1-10, Heft 1944/45.



図10 ノルウェー西部 Holsnoy の露頭。斜長岩 (明るい色の部分) 中の断裂に沿って20cmほどの幅がエクロジャイト化している (緑色の部分)。写真は H. Austrheim による。

Anderson, D.L., 1989. *Theory of the Earth*, Blackwell, Boston MA, 366p. Asphaug, E., 2000. *The Small Planets*. Scientific American, v. May issue, p. 28-37.  
 Austrheim, H., 1990. The granulite-eclogite facies transition: A comparison of experimental work and a natural occurrence in the Bergen Arcs, western Norway. *Lithos*, v. 25, p. 163-169.  
 Austrheim, H., 1998. Influence of fluid and deformation on metamorphism of the deep crust and consequences for the geodynamics of collision zones. In: *Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*, Kluwer Academic, Dordrecht, p. 297-323.  
 Barnicoat, A.C. et al., 1997. Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature*, London, v. 386, p. 820-824. Benioff, H., 1954. Orogenesis and deep crustal structures: additional evidence from seismology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 65, p. 385-400.  
 Bohlen, S.R., 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *Jour. Geol.*, 617-632.  
 Boss, A.P., 1990. Solar Nebula Models: Implications for Earth Origin. In: *Origin of the Earth*. Oxford University Press, Oxford, p. 3-15. Brush, S.G., 1978. A geologist among astronomers: The rise and fall of the Chamberlin-Moulton cosmogony. *J. Hist. Astron.*, v. 9, p. 1-41.  
 Cameron, A.G.W., 1962. The formation of the Sun and Planets. *Icarus*, v. 1, p. 13-69.  
 Cameron, A.G.W., 1978. Physics of primitive solar nebula and giant gaseous protoplanets. In: *Protostars and Planets*, University of Arizona Press, Tucson, p. 5-40.  
 Cameron, A.G.W., 1982. Stellar Evolution. In: *Essays in Nuclear Astrophysics*, Cambridge University Press, p. 23-43.  
 Cameron, A.G.W., 1985. Formation and evolution of the primitive solar nebula. In: *Protostars and Planets II*, University of Arizona Press, Tucson.  
 Choi, D.R., Vasil'yev, B.I. and Bhat, M.I., 1992. Paleoland, crustal structure, and composition under the northwestern

- Pacific Ocean. In: *New Concepts in Global Tectonics*, Texas Tech. University Press, Lubbock TX, p. 179-192.
- Cloos, H., 1939. Hebung-Spaltung-Vulkanismus. *Geologische Rundschau*, v. 30, 405-427.
- Colaprete, A. et al., 2010. Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume. *Science*, v. 330, p. 463-467.
- Collins, L.G. and Hunt, C.W., 1992. Silane systematics: interpretations of granitization in situ. In: *Expanding Geospheres: Energy and Mass Transfers from Earth's Interior*. Polar Publishing, Calgary, p. 43-85.
- Cooke, M.H., Stephens, D.J. and Bridgewater, J., 1976. Powder Mixing – A Literature Study. *Powder Technology*, v. 15, p. 1-20.
- Creager, K.C., 1999. Large-scale variations in inner core anisotropy. *Jour. Geophys. Res.*, v. 104, p. 23.127-23.139.
- Dickins, J.M., Choi, D.R. and Yeates, A.N., 1992. Past distribution of oceans and continents. In: *New Concepts in Global Tectonics*, Texas Tech. University Press, p. 193-202.
- Donald, M.B. and Roseman, B., 1962. Mechanisms in a horizontal drum mixer. *British Chem. Eng.*, v. 7, p. 749-753.
- Dziewonski, A.M., 1984. Mapping the lower mantle: determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6. *Jour. Geophys. Res.*, v. 89, p. 5929-5952.
- Dziewonski, A.M. and Woodhouse, J.H., 1987. Global images of the Earth's interior. *Science*, v. 236, p. 37-48.
- Eade, K.E. and Fahrig, W.F., 1971. Geochemical evolutionary trends of continental plate – a preliminary study of the Canadian Shield. *Bull. Can. Geol. Surv.*, v. 179, p. 1-51.
- Fan, L.T., Chen, Y.-M. and Lai, F.S., 1990. Recent Developments in Solids Mixing. *Powder Technology*, v. 61, p. 255-287.
- Forte, A.M., Dziewonski, A.M. and O'Connell, R.J., 1995. Continent-ocean chemical heterogeneity in the mantle based on seismic tomography. *Science*, v. 268, p. 386-388.
- Gaffey, M.J., 1990. Thermal history of the asteroid belt: implications for accretion of the terrestrial planets. In: *Origin of the Earth*. Oxford University Press, Oxford, p. 17-28.
- Glickson, A.Y. and Lambert, I.B., 1973. Relations in space and time between major Precambrian Shield units: an interpretation of Western Australian data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 20, p. 395-403.
- Gold, T., 1985. The origin of natural gas and petroleum, and the prognosis for future supplies. *Annual Review of Energy*, v. 10, p. 53-77.
- Gold, T., 1987. *Power from the Earth: Deep Earth Gas – Energy for the Future*. J.M. Dent & Sons, London, 197p.
- Gold, T., 1999. *The Deep Hot Biosphere*, Springer, New York, 235p.
- Gold, T. and Soter, S., 1982. Abiogenic methane and the origin of petroleum. *Energy Exploration and Exploitation*, v. 1, p. 89-104.
- Gottfried, R., 1990. Origin and evolution of the Earth – Chemical and physical verifications. In: *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory II*, Theophrastus Publ., Athens (Greece), p. 115-140.
- Gregori, G., 2001. The origin of the magnetic field and the endogeneous energy of the Earth and planetary objects (extended abstract). *International Workshop on Global Wrench Tectonics*, Oslo 9-11 May 2001.
- Guest, J.E. and Greeley, R., 1977. *Geology on the Moon*. The Wykeham Science Series, New York, 235p.
- Gutenberg, B., 1913. Über die Konstitution de Erdinnern erschlossen aus Erdbeben. *Phys. Zeitsch.*, v. 14, p. 1217-1218.
- Hamilton, W.B., 1998. Archean magmatism and deformation were not products of plate tectonics. *Precambrian Research*, v. 91, p. 143-179.
- Hartmann, W.K., 1983. *Moons and Planets*. Wadsworth, Belmont, 509p.
- Head, J.W., 1976. Lunar volcanism in space and time. *Rev. Geophys. Space Phys.*, v. 14, p. 265-300.
- Heier, K.S., 1965. Radioactive elements in the continental crust. *Nature Lond.*, v. 208, p. 479-480.
- Hill, K.M., Caprihan, A. and Kakalios, J., 1997. Bulk segregation in rotated granular material by magnetic resonance imaging. *Phys. Rev. Lett.*, v. 78, p. 50-53.
- Hixon, H.W., 1920. Is the Earth expanding or contracting? *Popular Astronomy*, v. 28, p. 1-11.
- Hoyle, F., 1955. *Frontiers in Astronomy*, Heinemann, Melbourne, 376p.
- Hunt, C.W., 1992. Endogenic quartz sands and quartzites. In: *Expanding Geospheres. Energy and Mass Transfers from Earth's Interior*, Polar Publishing, Calgary, p. 291-330.
- Ito, K. and Kennedy, G.C., 1970. The fine structure of the basalt-eclogite transition. *Mineral. Soc. Am. Special Paper 3*, p. 77-83.
- Jacobs, J.A., 1992. *Deep Interior of the Earth*. Chapman and Hall, London.
- Kaufmann, W.J., 1988. *Universe*. Freeman and Co, New York, 634p.
- Kendall, J.-M. and Shearer, P.M., 1995. On the structure of the lowermost mantle beneath the southwest Pacific, southeast Asia and Australia. *Phys. Earth Planet. Int.*, v. 92, p. 85-98.
- Kennett, B.L.N. and Tkalčić, H., 2008. Dynamic Earth: crustal and mantle heterogeneity. *Austral. Jour. Earth Sci.*, v. 55, p. 265-279.
- Krauskopf, K.B., 1982. *Introduction to Geochemistry*, McGraw-Hill, London, 617p.
- Leech, M.L., 2001. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 185, p. 149-159.
- Levy, E.H., 1987. Energetics of chondrule formation. In: *Meteorites*. University of Arizona Press, Tucson.
- Levy, E.H. and Araki, S., 1989. Magnetic reconnection flares in the protoplanetary nebula and the possible origin of meteorite chondrules. *Icarus*, v. 81, p. 74-91.
- MacDonald, G.J.F., 1964. The deep structure of continents.

- Science, v. 143, p. 921-929.
- Mason, B. and Melson, Wg., 1970. Comparison of lunar rocks with basalts and stony meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 1, p. 661-671.
- Meissner, R., 1986. *The Continental Crust*, Academic Press, London, 426p.
- Melton, C.E. and Giardini, A.A., 1974. The composition and significance of gas released from natural diamonds from Africa and Brazil. *Am. Mineralogist*, v. 59, p. 775-782.
- Morelli, A. and Dziewonski, A.M., 1987. Topography of the core-mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core. *Nature Lond.*, v. 325, p. 678-683.
- Nellis, W.J., 2000. Making metallic hydrogen. *Scientific American*, v. 282, p. 60-66.
- Nisbet, E.G., 1991. Of clocks and rocks – The four aeons of Earth. *Episodes*, v. 14, p. 235-238.
- Nisbet, E.G. et al., 1993. Constraining the potential temperature of the Archaean mantle – a review of the evidence from komatiites. *Lithos*, v. 30, p. 291-307.
- Okuchi, T., 1997. Hydrogen partitioning into molten iron at high pressures: implications for Earth's core. *Science*, v. 278, p. 1781-1784.
- Oldham, R.D., 1906. Constitution of the earth revealed by earthquakes. *Q. Jour. Geol. Soc. Lond.*, v. 62, p. 456-475
- Poirier, J.-P., 2000. *Introduction to the Physics of the Earth's Interior*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 312p.
- Reimold, U., 2001. The Vredefort saga. *Geotimes*, March issue, p. 20-23.
- Richter, F.M., 1985. Models of the Archean thermal regime. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 73, p. 350-360.
- Ringwood, A.E., 1979. *Origin of the Earth and Moon*, Springer-Verlag, New York, 295p.
- Ringwood, A.E., 1989. Flaws in the giant impact hypothesis of lunar origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 95, p. 208-214.
- Robb, L.J. and Meyer, F.M., 1995. The Witwatersrand Basin, South Africa: Geological framework and mineralization processes. *Ore Geol. Rev.*, v. 10, p. 67-94.
- Roday, P.P., Diwan, D. and Singh, S., 1995. A kinematic model of emplacement of quartz reefs and subsequent deformation patterns in the central Indian Bundelkhand batholite. *J. Earth System Sci.*, v. 104, p. 465-488.
- Russ. Acad. Sci., 1998. Homologues of rocks in the Kola Superdeep Borehole (KSDB) and on the surface. In: *Proc. Apatity Workshop*, 13-14 May 1998.
- Scheidegger, A.E., 1963. *Principles of Geodynamics*. Springer-Verlag, Berlin, 362.
- Shearer, P.M. and Toy, K.M., 1991. PKP(BC) versus PKP(DF) differential travel times and aspherical structure in the Earth's inner core. *Jour. Geophys. Res.*, v. 96, p. 2233-2247.
- Spudis, P.D., Reisse, R.A. and Gillis, J.J., 1994. Ancient multiring basins on the Moon revealed by Clementine laser altimetry. *Science*, v. 266, p. 1848-1851.
- Spudis, P.D., 1996. *The Once and Future Moon*, Smithsonian Institution, Washington DC, 308p.
- Spudis, P.D. et al., 2010. Initial results for the north pole of the Moon from Mini-SAR, Chandrayaan-1 mission. *Geophys. Res. Lett.*, v. 37, L06204, doi: 10.1029/2009GL042259.
- Stevenson, D.J., 1981. Models of the Earth's core. *Science*, v. 214, p. 611-619.
- Stevenson, D.J., 1989. Formation and early evolution of the Earth. In: *Mantle Convection*, Gordon and Breach, New York, p. 817-873.
- Storetvedt, K.M., 1997. *Our Evolving Planet*. Alma Mater (Fagbokforlaget), Bergen, 456p.
- Storetvedt, K.M., 2003. *Global Wrench Tectonics*, Fagbokforlaget, Bergen, 397p.
- Tassos, S.T., 2001. Earthquake generation and ophiolite suites in the context of Excess Mass Stress Tectonics (extended abstract). *International Workshop on Global Wrench Tectonics*, Oslo 9-11 May 2001.
- Tunyi, M. et al., 2001. Shock magnetic field and origin of the Earth and the planets (extended abstract). *Int. Workshop on Global Wrench Tectonics*, Oslo 9-11 May 2001.
- Turekian, K.K., 1977. *Oceans* (2nd Ed), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 120p.
- Urey, H., 1952. *The Origin of the Earth and the Planets*. Oxford University Press, Oxford, 309p.
- Vidal, J.E. and Benz, H.M., 1993. Seismological mapping of fine structure near the base of the Earth's mantle. *Nature Lond.* v. 361, p. 529-532.
- Walther, J.V., 1994. Fluid-rock reactions during metamorphism at mid-crustal conditions. *Jour. Geol.*, v. 102, p. 559-570.
- Weir, S.T., Mitchell, A.C. and Nellis, W.J., 1996. Metallization and fluid molecular hydrogen at 140 Gpa (1.4 Mbar). *Phys. Rev. Lett.*, v. 76, p. 1860-1863.
- Williams, O. and Garnero, E.J., 1996. Seismic evidence for partial melt at the base of Earth's mantle. *Science*, v. 273, p. 1528-1530.
- Wilson, J.T., 1954. The development and structure of the crust. In: *The Earth as a Planet*. Chicago University Press, Chicago, p. 138-214.
- Windley, B.F., 1977. *The Evolving Continents*. John Wiley & Sons, London, 385p.
- Windley, B.F., 1995. *The Evolving Continents*. John Wiley & Sons, Chichester (UK), 526p.
- Yano, T. et al., 2009. Ancient and continental rocks in the Atlantic Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 53, p. 4-37.
- Yano, T. et al., 2011. Continental rocks in the Indian Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 58, p. 9-28.
- Young, C.J. and Lay, T., 1990. Multiple phase analysis of the shear velocity structure in the D'' region beneath Alaska. *Jour. Geophys. Res.*, v. 95, p. 17.385-17.402.

# 出版物 PUBLICATIONS

(矢野 孝雄 [訳])

## 冷たい太陽 Cold Sun

John L. CASEY

mail@spaceandscience.net

出版: 2011年5月, 184 p.,

ISBN: 9781426967917.

出版社: Trafford Publishing.

良質製本ソフトカバー (B/W) =

US\$14.50,

箱入製本ハードカバー (B/W) =

US\$24.50.

書籍発注: [www.trafford.com](http://www.trafford.com)



ホワイトハウス宇宙計画アドバイザー、スペースシャトル工学研究者、NASA 司令部および代議員会コンサルタントを務めた John L. Casey 氏は、この画期的著作において、今まさに、氏の命がけの探求を私たちに告げる。氏は、次なる気候変動について世界中に警告しようとしている。その気候変動は、この惑星に住むすべての人々にとっての結末を警告する意義をもつだろう。2007年4月に、Casey 氏は独自に、地球の気候を司る重要な太陽周期を発見した。つづいて氏は、気候科学史における最も重要ないくつかの出来事を正確に予測した米国で最初の科学者となり、次の気候変動の危険性について、人々、合衆国政府、および報道機関に周知させる高度に公共的な運動を展開した。彼の予測には、全地球的温暖化の終焉、地球の気温の長期的低落、太陽輻射の歴史的減少—彼は「太陽冬眠」と名づけた—、歴史上世界最悪の物質的危機をもたらす30年間にわたる寒冷気候のはじまり、が含まれる。2010年5月に彼は、太陽のこのたびの冬眠の悪影響について、記録的な地震や火山噴火に関しても予測をおこなった。これは、氏の驚異的な発見を告げるだけではなく、むしろ、すべての人々が今後の困難な時代に耐えなくてはならない将来を予測したものである。氏の緊急メッセージは、「準備せよ!」である。

\*\*\*\*\*

## 地球 - 月二重惑星系の軌道運動にみられる長期的潮汐力と規則性

### Long period tidal force variations and regularities in orbital motion of the Earth-Moon binary planet system

Yu. N. AVSYUK and L. A. MASLOV

Earth, Moon and Planets, v. 108, no. 1, p. 77-85, 2011. DOI: 10.1007/s11038-011-9381-8Online First™

要旨 私たちは、さまざまな月相に対応する潮汐性海面変動にみられる 206 日および 412 日という長周期変動を、北および南半球の 5 つの検潮所のデータにもとづいて研究した。206 日および 412 日の変動周期を示すカナダ東海岸の Fundy 湾における海水準変化は、Desplanque and Mossman (Proceedings of the 4th Bay of Fundy workshop Saint John, New Brunswick 2001, Atlantic Geol., v. 40, no. 1, 2004) によって発見され、慎重に研究された。この論文は、歴大な海水準潮汐観測結果に解析に、そして同時に、太陽-地球-月系における潮汐力の厳密な数学的解析に焦点をあてる。私たちは、観測された周期性を説明するために、太陽-地球-月系における天体周期に関する概念的・数学的な二重モデルを開発した。潮汐力変化の変動成分が計算され、潮汐力が 2 つの成分 (Keplerian および Perturbed 成分) に分解されることが示された。潮汐力変化の Perturbed 成分が計算され、大気および水圏の潮汐にみられる 206 日と 412 日という観測された大気周期性が、潮汐力の Perturbed 成分の変化に由来することが示された。潮汐力の Perturbed 成分の振幅は、 $19 \times 10^{-8} \text{N/kg}$  である。これは、潮汐力の Keplerian 成分の振幅 ( $58 \times 10^{-8} \text{N/kg}$ ) と同規模である。したがって、潮汐を含む地球力学構造においては、Keplerian 成分とともに、潮汐力変化の Perturbed 成分が常に考慮されるべきである。

\*\*\*\*\*

## ビデオ: とって代わる地質学ドキュメンタリー: 予告編 1

### Video: Alternative Geology Documentary - Trailer 1

Alan HAYMAN

yankie18@hotmail.com

このドキュメンタリー (<http://www.video.com/25116857>) は、とって代わる地質学 (非プレートテクトニクス概念を含む) の世界をみつめるものになるだろう。それには、とって代わる考え方を探求する科学者の生き方と、そのような考え方を教科課程に組み込もうとする教育者が直面する苦闘が含まれる。それは、「私たちは地震をいずれは予知することができるのか?」という究極の疑問にも答えるよう試みる。

この映画をつくりあげるために、私たちはあなたがたの協力を必要とする。そして、協力いただく場合の方法はたくさんある。より詳細は [www.altgeologydoc.blogspot.com](http://www.altgeologydoc.blogspot.com) を参照されたい。

**興奮すべきことが、今まさに起こりつつある**

私たちは、この数週間忙しく働き、課題が順調に進行していることをお伝えすることができるのを嬉しく思う。私たちは1編の予告編を完成させ、本格撮影の準備ができています。本格撮影のページで基金援助すれば、映画完成時に無用で映画が提供される。これらのことがらは数日うちに郵送されるので、受け取られたい。

インド会議に参加するための書類を申請いただいた会議組織者である Biju 氏に、御礼申し上げます。私たちは、会議につづく週に行われた会議後野外見学会に参加するよう招待された。この見学会では、会議開催地 Kanyakumari のすぐ北にあるいくつかの先カンブリア系を見学した。これは、世界中から集まったさまざまな経歴をもつ科学者に同行する希少な機会になるだろう。

New Concepts in Global Tectonics 誌 (現在では雑誌になっている) の編集長 Dong Choi 氏をはじめ、映画製作に支援を下さった科学者集団の他の多くのメンバーにも感謝申し上げます。会議後にノルウェーに同行・招待して下さった Karsten Storetvedt 氏に深く感謝する。

私たちは、著名な John Taylor Gatto 氏からの支援も蓄積している。アメリカの公立学校システムにおけるさまざまな問題の研究と探索への氏の努力はきわめて貴重で、私たちの映画の教育にかかわる部分で大きな役割を果たすであろう。

私たちは、地震予知に関わって、かつて想像しえたこ

とよりもはるかに多くの情報を学ぶことができた。私たちが学習すればするほど、この映画がいっそう重要に思えてくる。地震予知には、2つの方法が有効であった。すなわち、1つは“蒸気雲”、もうひとつは重力異常”である。地震予報全世界ネットワーク [the Global Network for the Forecasting of Earthquakes (GNFE)] は、後者の方法を使って、日本の仙台地震の予知に成功した。これらのいずれの方法も、プレートテクトニクス学説を利用していない。そして、仙台地震以後に、少なくとも1人の著名な日本人プレートテクトニクス支持者は、一般に受容されているプレートテクトニクスモデルはこの地震に適用できないと述べたことが報道された。

この映画は重要であろう、との私たちの直感は、仙台地震の発生によって明白になった。

しかし、この良いニュースのすべてにもかかわらず、この会議はわずか3ヶ月あまり前のことで、時間はどんどん経っている。私は私たちがそれを打ち負かすことができると考えるが、それにはあなた方の援助が必要である。

話替わって、John Sears と私はここ Tucson でいくつかのインタビューを行おうとしている。最初インタビューしたのは、アリゾナ大学の水文学部の地球科学の Regent (摂政) 教授および教授を務める Victor Baker 博士であり、大きな成功を収めた。プレートテクトニクスの信奉者であるが、にもかかわらず氏は新しい考え方に愛着をもち、異常を無視するのではなく、それらを研究することによって最良の画期が生まれると信じている。

---

# ニ ュ ー ス      NEWS

(矢野 孝雄 [ 訳 ])

---

**EDPD-2011 インドワークショップ  
EDPD-2011 INDIAN WORKSHOP**

2011 年 9 月 21-25 日  
[www.transect.in/edpd/](http://www.transect.in/edpd/)

Vivekananda Kedra, Kanyakumaari,  
Tamil nadu, India

国際会議“地球ダイナミクス-知覚と行き詰まり”が、2011年9月21日(夕刻)-25日(夜)に開催される。会場は、インド Kanyakumari の YMCA 国際ゲストハウスである。1週間の地質野外見学会が、9月25日~9月30日に実施され、インド南部の主要な地質露頭のいくつかを巡る。

この会議の案内は大きな注目を集め、さまざまな国々か

らの参加者が登録を済ませ、インド政府国家省のビザ発給を待っている。

これまでに受理された要旨は、事前許可を得てオンラインブログに投稿され、2011年7月1日から審査のために公開される予定である。参加登録者は、会議で発表が予定されている研究を検討するために、このブログを利用することができる。

私たちは、すべての会議参加者を歓迎する。みなさまの旅計画を組織委員会へ知らせていただきたい。そうされれば、組織委員会は、みなさま旅程を追跡して、インドでのすばらしい旅行と快適な滞在のお手伝いをさせていただきます。

Prof. Biju Longhinos (Transect 招聘者)  
edpd-2011@transect.in  
Prof. Ismail Bhat (NCGT-India 共同招聘者)  
bhatmi@hotmail.com

## IGC34 BRISBANE オーストラリア

### IGC34 BRISBANE, AUSTRALIA

2012年8月5-10日

招聘者 : M. Ismail Bhat, Dong R. Choi and Karsten Storetvedt

NCGT セッション「全地球ジオダイナミクスの新しいパラダイムの研究 Pursuit of a new global geodynamic paradigm」が、「テーマ37として代わる概念」に割り当てられた。

私たちは提案された計画を、ここで短く紹介し、つづいて、次のNCGT 9月号 (no. 60) に投稿する予定である。セカンドサーキュラーおよび会議全体の詳細は、www.34igc.orgを参照されたい。

\*\*\*\*\*

### 第37回国際地球物理学課程「地球膨張の証拠」地質学、地球物理学および天文学への挑戦

#### 37th COURSE OF THE INTERNATIONAL SCHOOL OF GEOPHYSICS:

#### "THE EARTH EXPANSION EVIDENCE"

#### A Challenge for Geology, Geophysics and Astronomy

イタリア シシリー島 Erice, 2011年10月4-9日  
'Ettore Majorana' 基金および科学文化センター

このワークショップの計画は順調に進んでいる。物理学分野から幾人かの重要な参加登録があり、それらは、古

地理学、古生物学、生命進化学、気象学などから得られた手がかりと適切に関連づけられる。

物性-物理分野へのこれらの物理学の進歩が、Ettore Majorana センターで発表されることに、特別の重要性があるだろう。というのは、Ettore Majoranaの叔父であり、よき助言者が Quirino Majorana であり、氏は重力の物質の根源を解明する観点からいくつもの実験を行った物理研究者であるからだ。

測地学、海洋学および地震学分野の非膨張論者たちへ私たちの仲間に対する意見交換発表を依頼したところ、招待を了解された。これは、限界を明らかにし、膨張論者たちが新しい解釈を創出するうえで考慮すべき新しい道筋を示すために意図されたものである。ポスターセッションでは多数の良質の発表が準備され、Ericeを訪問できない著名な科学者の論文要旨も多数寄せられた。

機運は盛り上がりつつあり、私たちはこのワークショップをすぐれた意見交換の場にして、目的を達成するために最善を尽くすだろう。そしてまた、私たちが地球科学のいわゆる「異端」であるならば、新しい独創的な考え方の生誕地において、将来受容されるであろうパラダイムになることを運命づける可能性がある。

必要なすべての情報は、INGV ウェブページ (<http://www.ingv.it/eng/>) の '会議とセミナー' セクションに掲載されている。

Stefan CWOJDZINSKI (Stefan.cwojdzinski@pgi.gov.pl)  
Giancarlo SCALERA (Giancarlo.scalera@ingv.it)

## 追悼 OBITUARY

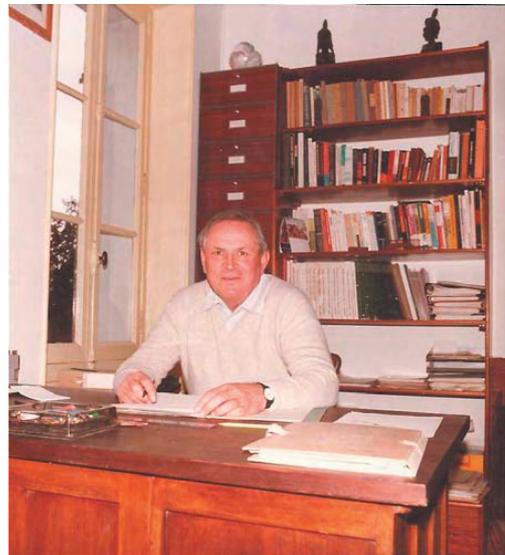
(矢野 孝雄 [訳])

### CLAUDE BLOT

1924-2011

Claude Blot 氏は1924年4月3日にベトナムで生まれ、勉学を続けるために1938年にフランスへ渡った。第2次世界大戦の困難の中、1942年にマルセイユで大学での勉学を始め、理学部に所属して数学と力学を専攻した。

1948年にはパリで、フランス国家気象局の気象学の専門家として勤務し、続いて、1949年に地球物理学研究所 (I. P. G.) で氏の実質的研究履歴が始まる。1950年に地球物理学研究者としてアフリカのTogoのLoméに赴任し、氏の最初の研究が開始した。これはフランス本国を離れて、海外科学技術研究部 (the Office for Overseas Scientific and Technical Research = O.R.S.T.O.M) を代表する長い履歴のはじまりで、この研究部は、現在、フランス開発



Claude Blot 氏 (退職後の自宅書斎にて、1983年撮影)

研究所 (the French Institute of Research for Development = I.R.D) として知られている。

Claude Blot が地震研究の傍ら火山学研究者として真の天分を發揮したのは 1957 ~ 1965 年の太平洋勤務のときである。この地域では解明済のものは何もなく、当時は何の機器も存在しなかった。そこで氏は、太平洋諸島の火山に関する最初の監視システムの設備に邁進した。

Noumea に、氏は世界地震ネットワークのための地震観測所を設立した。つづいて、タヒチに永続的な地球物理観測所を設立し、次にバヌアツ (かつてのニューヘブリディーズ) にも設立し、さらに、Espiritu Santo 島の Port-Vila および Luganville ならびに Malakula 島の Lamap に設置した地震観測点網を稼働させて利用した。氏はシシリー島の火山群について研究を進め、そこでは、Catania 大学に勤務 (1966-1969) する傍ら、Lipari 島に最初の観測所を設立して、Vulcano, Stromboli, Vesuvius および Etna 火山を含むこの島弧のすべての火山群の監視を可能にした。

これらの近代的観測施設を設立することによって、氏は、火山学に新しい優れたエネルギーを供給した。この業績は、次のような事情を説明することによって、野外観察科学として継承された。すなわち、その事情とは、近寄りた活火山の現地研究を実施することは困難であるために、火山研究は、他の研究分野よりもかなりゆっくりと進展することである。地質学-火山学ならびに地球物理学-地震学の研究者たちは、さまざまな手法を利用するために、火山関係事象と地震事象とは乖離したまま

であった。研究者たちは、それらが断裂帯や造山帯では共存することを認識することはあっても、これら 2 つの自然災害が同時に発生することがないために、地震と火山噴火の間のいかなる関連性も否定しつづけてきた。

Claude Blot 氏は、これらの広大な島弧域で火山噴火が地震事象と密接に関連していることを証明するために、研究に邁進した。氏は研究を展開して、1976 年に氏の博士号のための学位論文 "Volcanisme et sismicité dans les arcs insulaires...Prévision de ces phénomènes" (島弧における火山および地震活動：これらの現象の予知) として自らの研究の概要をまとめた。それは、氏の能力を上述した学問分野にわたって拡大し、既存の常識を揺るがすことによって創出された。氏は、こうして、この学位論文において、周知のエネルギー伝搬 (ET) 概念を確立したのである。

ニュージーランドでの勤務を最後に、氏は 1979 年に自ら退職したが、インターネットを通じて研究をつづけた。この研究は、いくつかの主要な研究所や研究者たちと共同して論文を出版することによって、氏の情熱を保持しつづけた。氏は病魔によって研究ができなくなるまで情熱をもちつづけた。それは、南フランス Var 地方の La Farlede の自宅で 2011 年 7 月 12 日に 87 歳でなくなる 2, 3 ヶ月前までつづけた。遺族は 5 人の子供たちと多くの孫で、2007 年に亡くなった氏の妻 Hélène は氏の生涯にわたる誠実な援助者であった。

Jean-Pierre Blot, Toulon, France  
(原文はフランス語)

## 訂正 CORRIGENDUM

2011 年に刊行された NCGT 最新号 no. 58 (p. 50-63) に掲載された Bhat, Smoot and Choi 論文には、図 10 (p. 62) の上の文章の最後 2 つの段落に間違いがあった。次のように訂正されたい (訂正版は、2011 年 4 月 14 日に NCGT ウェブサイトに掲載済) :

A problem exists because expansion apparently does not occur in continental crust. At this latitude the only oceanic crust available for expansion is the Pacific. The Indian Ocean does

not exist at this latitude, the northern limit being about 25oN. The East Pacific Rise stops at about 22oN with only the Juan de Fuca Ridge, a relatively minuscule center, to the north of that. Therefore, for the expansion idea to work, the Pacific Basin must be growing by some other means.

One has to ask: "how did the earlier, in fact, all of the expansionists come up with that growth size in the first place?" Someone please take the time to give us a reasonable explanation based on some kind of scientific facts please.

## 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、ハリケーンと天気予報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

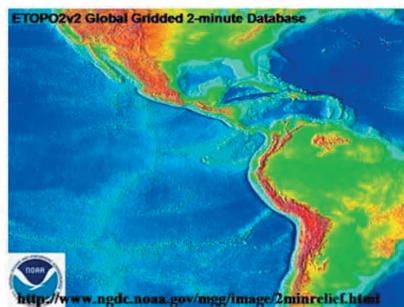
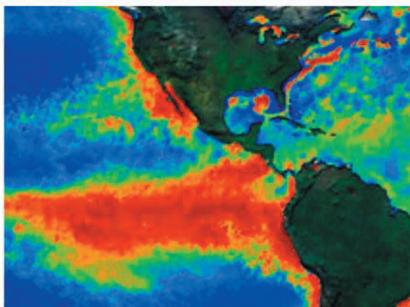
■ 予測される利用者

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