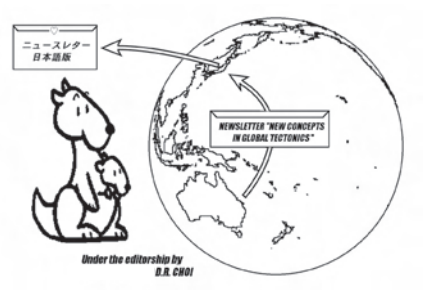
ニュースレター グローバルテクトニクスの新概念

NEWSLETTER New Concepts in Global Tectonics

No. 57 2010年12月 ISSN: 1833-2560 編集：D.R. Choi （日本語版 2011年4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 Don't see the face of your boss but do see the face of the truth ［赤松 陽 訳］…… 2

■ 編集者への手紙 ［赤松 陽・岩本広志 訳］…… 2

■ 原著論文

Observations of new magnetic map from the Commission for the Geological Map of the World **Keith H. JAMES**

世界地質図委員会からの新地磁気図上にみられること ［山内靖喜・小坂共栄 訳］……11

World magnetic anomaly map and global tectonics **Karsten M. STORETVEDT**

世界磁気異常図とグローバルテクトニクス ［杉山 明（支援翻訳者）訳］……22

Earth tides and earthquakes **Vinayak G. KOLVANKAR, Samrudha MORE and Nisha THAKUR**

地球潮汐と地震 ［小泉 潔・川辺孝幸・久保田喜裕 訳］……40

Earthquakes and solar activity cycles **Dong R. CHOI and Leo MASLOV**

地震と太陽の活動サイクル ［小松宏昭・角田史雄 訳］……55

Variations in gravitational field, tidal force, electromagnetic waves and earthquakes **Valentino STRASER**

重力場，潮汐力，電磁波，地震の変化性 ［窪田安打・矢野孝雄 訳］……63

■ 地球科学にかかわる政治政治欄

Why has plate tectonics become popular in the USA and Japan? **星野 通平**

プレートテクトニクスはなぜ合衆国と日本で流行したか？ ［柴 正博 訳］……69

■ 本の紹介

Hoshino, M：A plate tectonics controversy

星野通平著：反プレートテクトニクス論 **柴 正博** ［柴 正博 訳］……76

Foulger, G., Plume tectonics and plate tectonics

Foulger, G. 著 プリュームテクトニクスとプレートテクトニクス **Cliff OLLIER** ［佐々木拓郎 訳］……78

■ 出版物・ニュース ［矢野孝雄 訳］……83

■ 財政的財政的支援・ニュースレターについて ……87

■ NCGT 日本サブグループのコーナー

日本語版バックナンバーインターネット公開のご案内 **川辺 孝幸** ……88

連絡・通信・ニュースレターへの原稿掲載のためには，次の方法の中からお選び下さい：NEW CONCEPTS IN GLOBAL TCTONICS
1）Eメール：editor@ncgt.org, ncgt@ozemail.com.au, または ncgt@hotmail.com; 1ファイルは5 MB（メガバイト）以下，2）ファックス（少量の通信原稿）：+61-2-6254 4409, 3）郵便・速達航空便など：6 Man Place, Higgins, ACT 2615, Australia（ディスクはMS Wordフォーマット，図面はjpgまたはpdfフォーマット），4）電話：+61-2-6254 4409.

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

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

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

あなたのボスの顔色をうかがわずに，真実の顔を見よ
Don’t see the face of your boss but do see the face of the truth

本号は，ほかの興味深い記事とともに，プレートテクトニクスを今日のアメリカと日本に普及させた要因の徹底的分析を行ったHoshino（星野）氏による重要な記事（p.109－117）を掲載しています．氏は，プレートテクトニクスの現在の流行が歴史・文化・宗教・政治，そして権力と金に深い根を持っていると考えています．日本の場合，この流行は，日本の政治・経済・文化―地質科学からは遙か遠く隔たった領域―に対して増大しつづけてきたアメリカ合衆国からの影響に支えられた権勢と財政的恩恵を享受し，流行に乗った日和見主義的な科学者によってつくられてきました．

この記事は，私たちに思考の材料を提供し，幅広く派生するものを持っています．そこで，私はここにHoshino（星野）氏の論文にいくつかのコメントを加えたいと思います．

日本の文化的特色に関してHoshino氏が引用した次の一節は，2009年にTakeshi Umehara（梅原 猛）氏によって発表されたもので，多くの日本の哲学者は，真実を直視することを避け，代わりに西洋の哲学者に盲目的に従おうとする，というものです（p.115-116）．以下の括弧内の引用は，同じことが地質科学に当てはまることを示すために，Hoshino氏がつけ加えたものです．

> 私は，つねに，若い科学者に，あなたのボスの顔色を見ないで真実を直視せよと言っています．しかし，真実を直視する研究者を見つけることはたいへん希なことです．日本の哲学（地質学）界のいわゆるボスの一人は，主に西洋の哲学（プレートテクトニクス）の研究を紹介することによって権威者になり，栄光ある大学教授になるためにうまく梯子をよじ登りました．学生が，偉大な教授に対し，もし「私は，あなたのようなプラトンあるいはカント（プレートテクトニクス）の奴隷にはなりたくない．しかし，私自身の哲学（地球テクトニクスモデル）を創造したい」と言えば，彼が日本の哲学（地質学）界から永久に追放されることは確実でしょう．

これは私たち大部分には，ピンとくるはずです．というのは，それが，40年以上にわたって，現代地質科学に何が起こってきたかということを正確に述べているからです．真実，それは実際の地球から得られるものですが，それを直視する代わりに，プレートテクトニクスの擁護者たちは，彼らのボスたち（あるいは彼らの研究に資金を供給している全米科学財団）が信じていることに盲目的に従ってきたか，あるいはどのような批判的な検証もなしに信じることを要求されてきたのです．

私たちは“我々のボスの顔”の代わりに“真実の顔”を見ようとし続けるでしょう．今までのように，私たちは議論の余地のない確かな証拠を，十分裏付けのある文書で提示し続けるでしょう．これは，地質学的な思考の流れを変化させるための最も効果的で強力な方法です．それは，最も新しい例の一つである，大西洋における古い時代の大陸の岩石に関するYano et al.（矢野氏ほか）の2009年の論文のような，しっかりした裏付けのある大作の論文が発行された後，すぐに私たちのグループへの支持と私たちのウェブサイトへのアクセスの増加に示される力強い流れが起こったという私たちの経験を通じて，繰り返し証明されてきました．Meyerhoff氏は，1993年にHoshino（星野）氏への手紙に（p. 110）「・・・私たちが詳細な真実を報告し始めることによって，彼ら（プレートテクトニクス研究）への資金提供が停止する結果が生まれる時代が来るであろう」と書きました．

Hoshino（星野）氏が適切に表現したように「谷に入ってハンマーで岩石をたたき，地質図を作るというフィールドの経験なしには，新しい地質学のひらめきは何も培われない」のです．地球物理学のデータは，それらが地質データと比較され，支持されてはじめて意味をもつようになり，正確に理解されるはずです．地球表面は，地球の深部構造と関係を持っていて，いかなる地球構造力学の仮説にとっても1つの実験場なのです．地球表面での詳細な地質観察―真実を直視するという方法―の重要性は，決して強調されすぎることはありません．

編集者への手紙　LETTERS TO THE EDITOR

（赤松　陽・岩本 広志［訳］）

親愛なる編集者へ

‘地質科学オーストラリア Geoscience Australia’ が地学教育のために提出した勧告には、いかなる意味をもつものであれ、プレートテクトニクス体系の教育が含まれている。このことを知った私は、以下のコメントを TAG(The Australian Geologist) 宛に送った。当初、このコメントは、キャンベラの ‘地質科学オーストラリア’ の Greg McNamara 氏宛に 2010 年 9 月 22 日付で送られたものである。

親愛なる Greg McNamara 様

私は 60 年にわたる経験をもつ熟練の地質学者であり、グローバルテクトニクスに関心を寄せつづけてきた。プレートテクトニクスの理論の受容と、仲間内（古い仲間）の批評の組織を利用した AJES のような雑誌における、非科学的なその見解による活発な妨害には、ぞっとさせられ続けてきた。原生代にさかのぼって極の位置を決定するための、いわゆる古地磁気測定の利用は、どのような有能で公平な物理学者も有効なものにすることはできないだろう。北大西洋に先二畳紀基盤が存在するという結果は、ウェゲナーの理論が間違っていることを示す。科学教育において、私が最も心配しているのは、次のことがらである。世界は紀元前 4005 年に創造されたと信じている宗教的熱狂者と同じような立場に地質学者を置くという、将来、誤りが証明されるだろう証拠のない体系を私たちが提示しようとしていることである。私たちは、我々の信条を検証し続けなければならない。ところが、分別を持つべき教授を含むひじょうに多くの地質学者たちは、プレートテクトニクス学説を無条件に受容し、NCGT ニュースレターに見られるようなこれに代わる構造理論についての議論を、意識的に妨げているように思える。

Colin LAING
Brisbane, Australia
colinchristine.laing@bigpond.com

真実，誤った信条，そして，グローバル・テクトニクスの将来
Facts, mistaken beliefs, and the future of global tectonics

拝　啓

通俗的意見をしっかりつかんでいることは，不幸にも，確実で順調な学問上の出世のために不可欠である．それゆえ，証拠がまったく異なることがらを示していることを公然と認めることは，厳しい批判にさらされる科学的リスクになるだろう．言い換えると，出世主義と深く染み込んだプレートテクトニクス原理への順応圧力は，現代地球科学における〝目に見えない〟威圧を象徴する．それは，しばしば，規範に従った振る舞いや自らの信念に反する発表として現出する．

型にはまった従来のプレートモデルは，その基本的な無能力さとは関係なく，一種の自己満足的予言としてずっと漂い続け，補助的仮説の永続的流出を支えるための加速度的資金流入によって生きのびている．グローバル地質学には，なんらかの新鮮な再考と真新しい物理－地質的な土台が必要であることは明らかである．しかし，あまりに良く知られているように，新しい画期的な考え方に対しては，伝統的な型にはまった意見の壁が立ちはだかるのが常である．

この雑誌に掲載された私の最近のエッセイ (NCGT no. 54 & no. 55) に，漂移説 / プレートテクトニクスの円形闘技場におけるいくつかの歴史的・社会学的な寸評を記述した．また，私の歴史エッセイ (NCGT no. 54) には，地球についての私自身の理論―グローバル・レンチ・テクトニクス (Global Wrench Tectonics) の概略的基礎を短く記述した．これまでにいただいた反応から，私の話は全体的に好評だったと思われる．この記事が，特に，現在の不道徳な状況を一掃するために強く求められている活発な批判的議論を起こす引き金になったことを知って，私はうれしく思っている．最新の NCGT ニュースレター (no. 55) に掲載された Peter James 氏の編集者への手紙と N.C. Smoot 氏の長文の記事が，追加的コメントとして有益な前進的な見解の提案であることは明らかである．ちなみに，彼らの記述のいくつかにはには修正が必要である．

極移動とリソスフェアの運動

正当な理由にもとづいて，Peter James 氏は，極移動のようによく理解された力学原理が仮想的大陸移動によって出番を奪われている状態を古地磁気学界がどのようにして許容しているのか，について考えをめぐらせている．実は，1960 年代初期の重要な期間に入ると，私たちはすぐに極移動と大陸移動という二重の概念について述べたことがあり，これら 2 つの地球物理学的概念の区別がかなり不明瞭であることをあえて言及した．古地磁気学を（世間に）認められる地球物理学の研究対象にしたのは，誰もが語るように Wegener の大陸移動説であり，大陸移動が単にその答えでなければならなかった．そして，伝統的な大陸固定論に対する制限から解き放たれるにつれて，扉は徐々に制限のない移動論へと開かれていった．しかし MacDonald(1964) は，「大陸の深部構造は大陸移動のどのような学説に対しても厳しい制約を課している．大陸の相対的側方移動は，深度数 100km までのマントルに関わっているに違いない．流体であるマントルの

上を漂う薄い大陸塊を想像することはもはや不可能である」と推論し,大陸および海洋マントルの広域的相違（現在では大陸の根の問題は周知のことで,最新のマントル・トモグラフィによって実証された）について，確定的ではないが最初の証拠を提示した．しかし，MacDonaldの警告は無視されただけであり，すでに移動論の潮流があまりにも強くなっていた．

古気候に関する岩石記録に基づいて，Wegener(1929)と彼以前のKreichgauer(1902)は，地球の本体に関連する軸の変換によると考えられた極移動現象を実証していた．この力学過程は，地球天体に相対する極が移動するというものである．空間的に惑星が〝グルッと回る〟と推測される段階が開始するために必要とされる惑星質量の再配置について，Wegenerは，漂移する大陸という彼の体系に原因を求めた．しかしながら,この漂移時期（中生代～現在）は，彼が主張する極移動に要するひじょうに長い期間には適合しない．彼は，このように極移動に対する力学的説明を実際にはしていないが,それ（漂移）は事実であると考えた．その上，彼が描いた地球の極移動経路は，現在の大陸の配置にもとづいて定義されたものであり，大陸の移動が，地球の古気候のかなり単純なパターンにある程度の混乱をもたらした．それは，あたかも極移動と側方漂移が同時には行われないことを示すようであった．

他方，Kreichgauerは，彼の著作「Die Aquatorfrage in der Geologie(1902)」の中で，大陸の相対的移動を想定しなくても，潮汐力とコリオリ力の統合的効果に起因して，地球慣性軸の変化が〝地殻〟全体を赤道方向および西方向へ移動させると述べた．彼は，地球全体にわたる主要な構造帯の配列と古気候／極移動のパターンを総合して，褶曲帯が地球自転に密接に関係していると結論づけた．地球の空間的方位がときどき変化したために，時代ごとに古赤道に整列した造構帯を形成した．このようにKreichgauerは，始生代後期～アルプス期の地球を転移する巨大規模の構造帯）について申し分ない力学的説明を行なった．したがって，褶曲帯と各時代の赤道との関連性は，Peter James氏が主張しているように，Sam Careyによってではなく，実際は，Damian Kreichgauerによって発見された．1989年の春に，私自身が全世界の古地磁気のデータをいじくっていた時，Kreichgauerの研究については知らないまま，大規模造構運動と極移動の間の興味深い関係を発見した(Storetvedt, 1990).（私は，2000年にインスブルックの地質研究所で初めて彼の著書を読んだ.）私は，Kreichgauerの重要な研究がようやく脚光を浴びる時代になったと思う．革命的な科学者にはよくあることだが，Kreichgauerは彼と同時代の人々からはほとんど無視された．

Kreichgauerは，大規模造構帯の配列に岩石にのこされた古気候データを統合することによって，さまざまな地質時代における極移動曲線を描いた．それは，古地磁気データ（図表と事例は，Storetvedt 2003を参照）から見積もられた地球の極移動経路と，注目に値するほどよく一致する．Kreichgauerのグローバルな体系では，実際に次の２つの古地理学的場で造構帯が形成される．すなわち，1) 各時代の赤道に沿う下方断裂と圧縮によって形成された造構帯（コリオリ効果に関連!)，2) これらの古赤道配置にほぼ直交するリフト帯，の２つである．それゆえ，Kreichgauer氏にとっては，古赤道／子午線の組み合わせで形成された地球規模の造構－火成活動帯の時間的転移が地球の空間方位の移動と調和的に進行したことになる．

Peter Jamesは，古地磁気的な方法とそのグローバルテクトニクスにおける将来的役割に関していささかの疑念を持っているようである.「移動論の戯画化は，最終的にいつ終了するのか?」と述べることによって，彼は，地殻がもつ自らの可動性を無視しているようにみえる．初期段階の古地磁気学は，多くの岩石に残された化石磁気が複雑な要素で構成されているという問題―多成分構造への分解および個々の古地磁気軸（極）の分離―を抱えていた．

しかし，全般的な大陸間古地磁気不一致は決して論争中の問題ではなく，個々の大陸塊からえられた極移動曲線は一致しないが，個々の経路はほぼ同様の形状を示すという事実は，１つの繊細な説明によってのみ理解可能であり，それには，ある種の大陸間移動性が機能したにちがいない．

それは何よりも古地磁気学的証拠を，他のすべてのタイプの地球物理学的・地質学的データとともに，側方への漂移／プレートテクトニクスの枠の中へ押し込めたことであり，そのために，グローバルテクトニクスは現在の混沌とした状態になってしまった．世界的な古地磁気データと最近の宇宙測地学から推論される地殻の可動性は現実のものであり，そして，極移動はもう一つの現実である．多くの論文と著書で，私は，極移動―地質学的に言えば，比較的突然に起こった地球の空間的方位の変化－に重ねあわさって発生したのは，アルプス期（後期白亜紀～前期第三紀）に惑星リソスフェアが機械的に破壊され可動的単元に分解されたことであり，それらは現位置で比較的小規模の回転を被る．この描像は，地球全体の古地磁気体系を解明するものである．コリオリ効果に支配されたこの可動システムにおいて，結果として生じている造構境界は，鮮明な構造的不連続を形成せず，脆性的な薄い海洋地殻の幅広い地帯にわたってひろがっている―そして，後に隆起する海洋中央海嶺の構造的基礎をつくる．このレンチテクトニクス系で，大陸はマントルの根を伴ってとどまっていて，地質学的な観点からより広くみると，地球上の時代とともに変化する褶曲帯の配置は，Kreichgauer体系に従う．言い換えれば，脈動的地球史は，地球自転の変化と密接に結びついているのである．

拡大仮説と地球自転

Peter James は，拡大仮説［複数］と結果として起きる地球の慣性モーメントへの影響，そして，それによる自転速度の間の重大な関係について触れている．膨張地球に関する提案のほとんどは，もう一つの仮説―未だ証明されていない概念である海洋底拡大仮説（本号に掲載された私の別の論文を参照）―に深く根をおろしている．しかし，もし地球本体の大規模な膨張が中生代に実際に起こったとしたら，おおかたのモデルが主張しているように，惑星自転が必然的に大きく減速したはずである．しかし，この予測の検証として，〝化石の時計〟―貝化石の殻成長増分から地質学的過去の１年あたりの日数を見積もる―による地球の回転の研究は，推論された地球膨張から推論される力学効果とは整合しない．Creer(1975) による図 1a は，古生代前期以降の見積もられた日数／月の変化を示す．長期にわたる惑星の全般的減速傾向が認められるが，膨張の必然的結果である中生代における著しい減速は明確ではない．その代わりに，中生代は，回転速度の一定の増加によって特徴づけられ，この結果は他の古生物学のデータ（Williams, 1989）とも整合する．

中生代において推論される惑星の加速は，おそらく，その当時活発に進行していた海洋盆形成の主要な段階の結果と思われる．地殻下でのエクロジャイト化作用と，それに関連した重力作用による地殻のマントルへの消失が，予想通り，推定されている若干の惑星の加速をもたらし，推定されている長期的減速を抑制した．図 1a のグラフは興味深いジグザグのパターンを示し，加速期間と減速期間を分けている折点（数字１～４）が，地球の造構イベント（タコニック，アカディア，アルプスの各造山運動など）や地質年代の主要境界とひじょうに良く対応している．これらの地史的事件は，生命の大異変や汎世界的海水準変動曲線（図 1b）における顕著な海退事件にも関連する．

地球に推定されている自転速度の振動的変化は内部質量再配置に関係すると予測され，移動可能全質量の外側移動と内側移動の間のいずれかで変化する（より詳細は Storetvedt, 2003 参照）．惑星表面の水の大部分は，この 200 ～ 300 万年の間に蒸発したと推定され，地球内部からの排出速度は中生代後期に大きく加速し，この排出は深海底の沈降を誘発した上部マントル作用と同時に進行したであろう．これは，図 1a にみられるように第三紀前期以降に惑星自転がより急速に減速したことが，短時間の慣性的結果をもたらしたのではなく，むしろ月の潮汐トルクになったことを意味する．

結論として，地球史の顕著な側面と地球の自転速度変化との間には，はっきりとした相関関係が存在するといえ

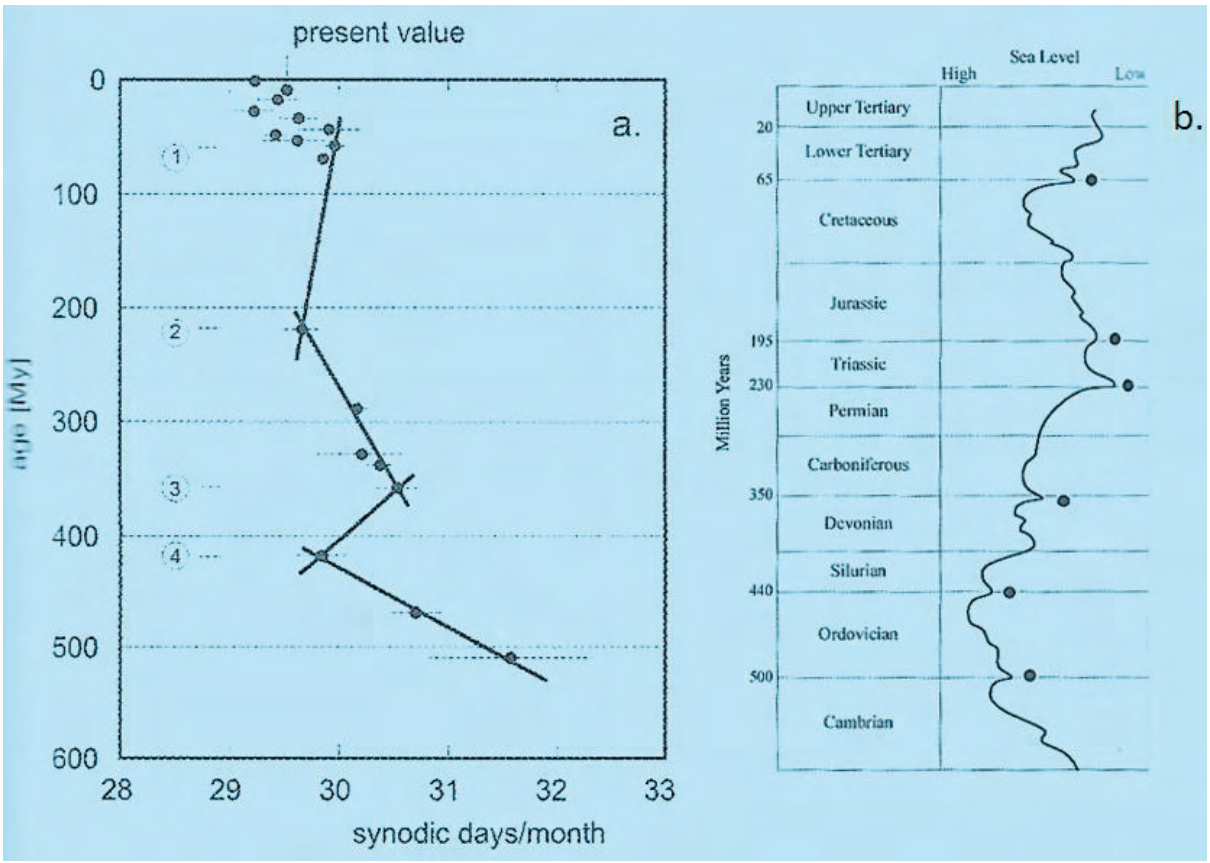


図 1　a) 貝化石の成長線にもとづく日数／月の推定のまとめ：Creer(1975) を簡略化．b) 概括的な顕生代における汎世界的界水準変動曲線（Hallam,1992 にもとづく）．黒丸は６つの主要な大量絶滅を示す．生物界の大異変が海退期に一致することに注意せよ．

る．おそらく，私たちは，〃地球の脈動の〃力学的引き金を発見したのだろう．

レンチテクトニクスについてのChristian Smootの誤解

Christian Smootは最近の論文(no.56)で，基本的には太平洋において，海洋底地形や巨大構造方向についての事実に言及し，グローバルテクトニクスの議論に磨きをかけることを試みている．彼の主な目的は，彼が，海洋底の造構地形的真実に触れていないと彼が考えている私のレンチテクトニクスを無視することにあるように思える．彼は，大陸間の古地磁気比較に基づいた造構的回転に関する私の分析に言及する（ついでながら，海洋のそのような研究を遂行すること容易ではない!)．そして，彼は，私の可動システムは鮮明な海洋－大陸不連続を生み出すだろうと主張し，「これは大陸レンチテクトニクスが間違っていることを示す」と記述して，彼が観察した陸地と海の間の〃ずれのない〃状況を打ち壊してしまう．実際，レンチテクトニクスは基本的に大陸の出来事であり，彼は海から得られた構造的証拠をほとんど無視している．これらの意見は，私の学説に対する根本的な誤解を反映する．彼は，私の著書を読みえなかったか，それらの科学的メッセージを理解しえなかったかである．あるいは，おそらく，私が自分の見解を十分はっきりと伝えることができなかったのだろうか？

いずれにしろ，「地球力学は地球物理学に基礎をおいていて，テクトニクスは，岩石年代，海底地形などいった実際の事実にもとづくべきである」といって，彼は私を本当に当惑させる．観察事実は，もちろん科学の必須の素材である．しかしながら，私たちが機能的な包括的学説（当然それは物理学に基づかなければならない)-その中で，造構的事実はさまざまな他の現象／事実の間に当然あるべき場所を見つける－を持たない限り，私たちの観察はほとんど意味をもたない．無構造の”死んだ”情報を集積することを除くけば，大量生産のための現在の学問上の必要を満たす．

物事をはっきりさせると，レンチテクトニクス学説―それは地球史の様々な側面を統一させる試みである―は，惑星地殻全体の慣性駆動ひねり(wrenching)を含んでいるが，大陸の相対的運動はアルプス時相の現象の１つである．この緯度依存性のあるアルプス時相のねじれ運動の間，より高くせり上がっている大陸はより大きな慣性を持ち，薄い地殻に覆われた海洋の広い地域（深海盆はちょうどアルプス時相の極相の前に安定したことを思い出してほしい）を含めて，古リソスフェア全体に影響がおよんだ．アルプス期の力学－構造革命はリソスフェアを多くの個々の造構単位に分割した．そのために，結果として生じた構造境界は当然のことながら薄い脆性的海洋地殻内に発達し，幅広い造構－変成帯を形成した．こうして，一般的な海洋－大陸の構造的連続性はあまり影響を受けなかった．それ故，彼の議論は地に落ちている．Smootによって提示された海洋の地形テクトニックの構造は，当然ながら，私の理論の枠組みと調和している．そして，私の2003年の著書の中で，私は，彼の太平洋と中部大西洋の収集データ(Smoot, 1999)について繰り返し言及した．更なる実例と議論を知りたい読者は，本号の私の別の記事を参照されたい．

この議論のどこにサージテクトニクスがあるのか？

Chris Smootは，はっきりとそう述べているわけではないが，彼の地球観はArthur Meyerhoff & co-workers(1992)によって提言された地球力学モデルであるサージテクトニクスの理論に依存しているようだ．Peter Jamesは，満足できない，あまりに視野が狭いことを知ったこのモデルについての短いコメントを最近の手紙で述べている．詳らかにいうと，私は，サージテクトニクスを本物の地球学説と考えたことない．というのは，比較的明瞭な多面的な意味をもつ地質年代境界のような地球進化の最も卓越した状況の一つに直裁な説明をするといった，地史についての説明をほとんどできないからである．この仮説は，箱に納まらなかったあまりに多くのデータを（ちょうど,ウェゲナーの漂移説やプレートテクトニクスの場合のように）無視している.私にとって，その議論の多くは曲解されていて，目的のためにわざとらしく造られたように聞こえる．私がプレートテクトニクスを疑い始めた後，1970年頃には，Meyerhoffの公汎にわたる論文(Tests of plate tectonics, 1974年刊）はたいへん有用であったが，私は次第に，彼らの古気候に関する議論に不満を覚えるようになった．南極大陸の長期にわたる熱帯－亜熱帯の状況は，蓄積された化石の証拠から明確であり／あったのに，なぜ，それへの言及がなかったのか？

私がサージ仮説と最も早く出あった時点(1989年のワシントンD.C.でのNCGTの会議）から，私は，そこで提案されたリソスフェア中のサージ・チャンネルの全世界的ネットワークにも懐疑的でした．しかし，自転しているダイナミックな地球において，アセノスフェアの揮発性物質の集積に関しては，少なくとも所によっては，さまざまなサージの影響をうけるのが当然である．地球のいくぶん非定常的自転は，一種の油圧式ポンプ装置として働き,地殻への貫入活動,火山活動,火山ガス噴出（クレーター形成）などの地質作用を引き起こし，こうして，造構帯の形成過程などにおいて調整機能を果たす．にもかかわらず私は，1990年代前半までは，サージテクトニクスを１つの地球進化仮説としては放棄したが，それが地表あるいは地殻の地質作用の第２の調整器として役割を果たす可能性については判断を保留していた．以前に報告したように(NCGT no.55)，これらの側面に関して，私は1993年にArt Meyerhoffと徹底的な議論を行う喜ばしい機会をえた．私たちは終日議論する中で，そしてその後の手紙を通じて，Art Meyerhoffが，全地球テクトニクスに関する私の見解の大半を受け入れ，彼のサージ

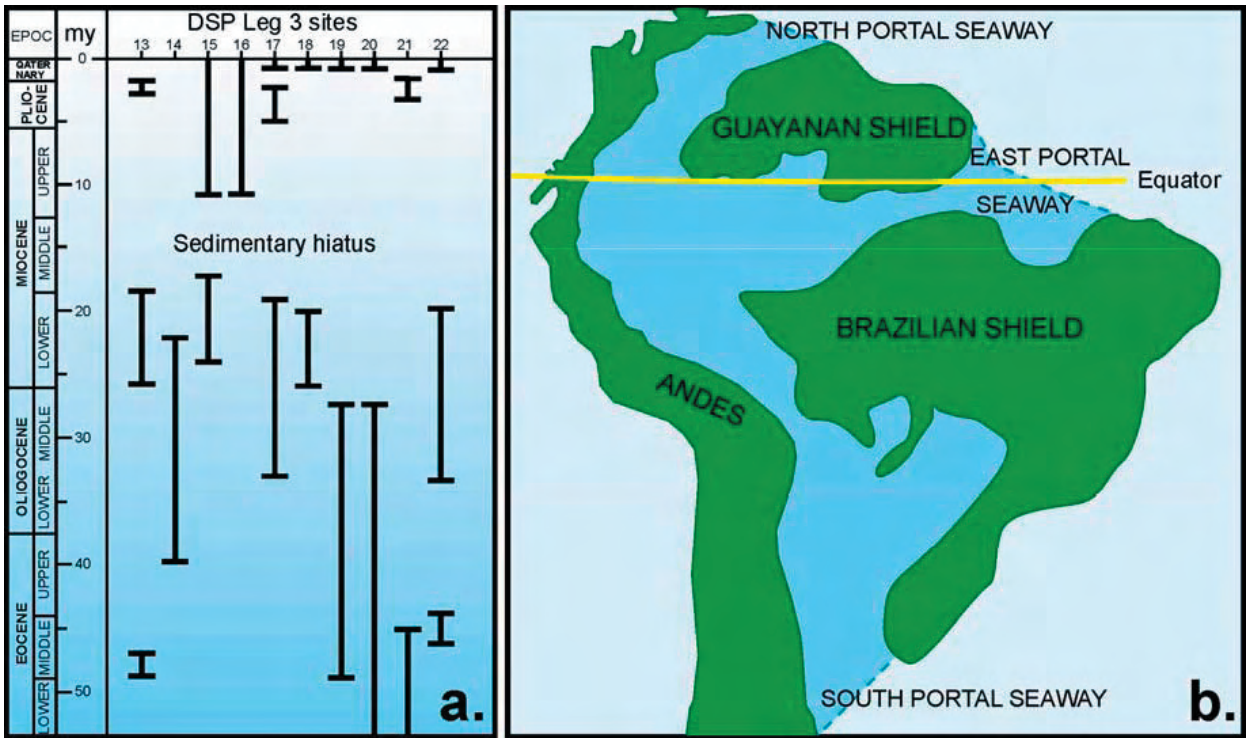


図 2　a）南緯約 30° で南大西洋を横断する DSDP 航海 3 の掘削地点 13 ～ 22 でえられた層序区間．中期中新世層序にみられる顕著な堆積ハイエタスに注意せよ．b）中期中新世（約 1000 万年前）の南アメリカを横切る浅海（水色部分）：Webb(1995) を簡略化．

テクトニクスは第 1 級の地質学説ではなかったことを認めた．そして,私たちは,リソスフェアでのサージ作用が,多くの地域やより小規模な地質特性を説明する能力を持つことに同意した．

しかしながら,その後数年にわたって,私は,〝サージチャネル〟概念―主張されている高熱流量帯や地表の造構作用を引き起こすと仮定された流体 / マグマのレンズ―に反する強力な証拠を見いだしつづけた．たとえば，推定されている海洋のサージチャネルについて，Meyerhoff et al.(1992) は次のように主張する．すなわち，「主要タイプは大洋中央海嶺の巨大な基幹チャネルを構成し，このチャネルには大量のマグマあるいはマグマ〝かゆ〟が存在するに違いない」，と．これは，大洋中央海嶺の中軸帯に沿って必要とされている高熱流量が 1960 年代後半から継続的に問題視されていたので，希望的観測以外の何ものでもなかった．驚くほどの低熱流量，予想されるマグマだまりを見つける課題，活発な火山活動のほとんど完全な欠如，卓越する低温鉱物変質，そして蛇紋岩化した橄欖岩の頻繁な産出などがこれらの海嶺を特徴づけていて，これらの観察は全体として，海洋底拡大説と同様にサージテクトニクスに対しても〝致命的な兵器〟になっている．

大西洋中央海嶺や他の大洋中央帯の下にある異常地殻は，ほとんどの場合，浮揚性の蛇紋岩化した上部マントル物質を象徴しているように見える（本号の私の別記事を参照）．海嶺軸方向の構造単元化―しばしば波打ち，曲がり，雁行状の特徴を示す―は，明らかに，古期の基本的な直交断裂系―小規模な節理～巨大規模の断層からなる汎世界的な岩石不連続網―がアルプス時相に造構的再活性化したことを示す．以上の後半の解釈では，中央海嶺構造帯は変形帯（褶曲帯）を代表し，個々に現位置回転しているリソスフェアブロックの間の，幅広いアルプス期の造構境界を規定する．私はグローバルテクトニクスを展望できるようになったので，現在，Meyerhoff et al. によって定式化されたサージテクトニクスがグローバル地質学の将来に重要な役割を演じるようには思えない．

予想される見通し

最近掲載された彼の「手紙」によれば，Peter James 氏は全地球テクトニクスの未来の進路を熟考している．彼は〝提案されたいかなる概念もが機能するような量的評価〟を求め，〝自然物質の挙動の確立された原理〟に言及する．我々は地表条件で物質がいかに振舞うかを知っているが，内部状態については実際に何を知っているのだろうか？ それは，かなり浅い深度でさえも，地殻 / リソスフェアの挙動を現実的に評価する場合には同様であるといえる．この重大な疑問に対しては，コラ半島や南ドイツにおける最近数 10 年間の大陸深部掘削結果を引用することが妥当で，これらは地球内部の諸条件関する伝統的見解の多くと，地球内部研究を逆さまになるくらい変化させた．

私の見解では，未来に通じる唯一の道は良く確立された事実の適応を通じて，第一には岩石的証拠と他の様々な

地表データに立脚することである．しかしそこから真の理解という観点に進むには，我々は機能的思考―理論！―の建設を必要とする．そして，理論は発明であり，観測と現象の多様性とそれらの相互関係の説明することを目的に発明される．それゆえに，地球の成功した理論は，広範な現象－実証の連続を自動的につくりあげ，少なくとも地球史の大半におよぶだろう．そのようなシステムの能力は一方向のみ進化する能力でなければならない．一方向というのは，始生代の特徴から現在の地球の特徴に向かってという意味で，世界中の山脈の上昇が，おそらくは，もっとも顕著な事象として特筆されるだろう．このような不可逆的な自己形成の発達スキームは，筆者のグローバル・レンチ・テクトニクスが描き出していると考えられる．

過去のもっとも顕著な構造帯が各時代の赤道―極移動事件に調和して地球上でそれらの位置を変える―に沿って形成された，と結論される強い理由がある．しかし，これらの慣性にもとづく剪断帯は，いかなる顕著な地殻の厚化も，そして，その結果としての地殻上昇ももたらさなかった．世界的な山脈上昇はごく最近のことであるようで，中新世末～鮮新世にはじまった．褶曲山地という用語は明らかに誤称で，アイソスタシーが重要な構造現象の主要な駆動要因であると考えられていた 19 世紀後期に由来する．Peter James 氏が指摘するように，全ての大洋から見いだされ，大規模な峡谷に沿って巨大な規模をもつ海底谷には，納得のいく説明が求められている．事実，地殻の海洋化の枠組みと直線的な断裂網（特に大洋域で再活動し拡大した）の中で，海底谷と峡谷の存在はたちどころに説明されうる．

この討論を完成するために，汎世界的海水準変動について少しつけくわえておきたい．海の脈動挙動の原因は何か？ 低地に起きる永続的な海進や海退システムは，（海に比べて）上下運動を行う大陸なのか，あるいは，振動する大洋地殻なのか？ 深海掘削 Leg 3（図 2a）が，おそらく，この問題の糸口になる．Leg 3 のすべてのサイトにおいて，中期中新世の堆積層が欠如している．著者の知るかぎりにおいて，この奇妙な観測に対し十分な説明は与えられない．しかしながら，問題の時代はエクソンの海水準曲線では汎世界的海水準変動の高海水準期にあたり，その期間にける南米の状況（図 2b）によって実証される．南大西洋の横断調査で堆積物が欠如するこの時代には南米に海進があり，この大陸は浅海と島々のモザイクに分割された．もっともありそうなことは，南大西洋における堆積物の欠失は，大洋地殻の上昇時相とそれにともなう海底侵食や無堆積によって引き起こされた，ということである．

地球の脈動の主要原因は，地殻の海洋化作用に由来するであろう．それにともなって上部マントルの静水圧が漸増し（海洋底基盤の間欠的上昇を引き起こす），その後，上部マントルの揮発性物質が解放され（海洋基盤の沈降イベントをもたらす），最終的には現在の深海洋の形成にいたる．少なくとも，これはレンチ・テクトニクス／脱ガス地球論の主張である．将来がどのようになろうと，健全な科学的発展は，次の引用に述べられているような非科学な社会－政治的罠によって著しく破壊されることはないことを望む．

B に反する研究をしようとする A は C の仕事を引用するだろうが，A は（おそらく）C が A に賛同する場合を除いて，何故 B よりも C を信用するかを論じない（出典不明）．

謝辞：作図を援助していただいた Frank Cleveland 氏と私の娘に感謝する．

文　献

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. 293-317.

Hallam, A., 1992. Phanerozoic Sea-Level Changes. Columbia Univ. Press, New York, 266 p.

Kreichgauer, P.D., 1902. Die Äquatorfrage in der Geologie. Steyl, Missionsdruckerei, 304 p.

MacDonald, G.J.F., 1964. The deep structure of continents. Science, v. 143, p. 921-929.

Meyerhoff, A.A. et al., 1992. Surge Tectonics: a new hypothesis of Earth dynamics. In: New Concepts in Global Tectonics. Texas Tech. Univ. Press, Lubbock, p. 309-409.

Storetvedt, K.M., 1990. The Tethys Sea and the Alpine-Himalayan orogenic belt; mega-elements in a new global tectonic systemn. Phys. Earth Planet. Inter., v. 62, p. 141-184.

Storetvedt, K.M., 2003. Global Wrench Tectonics. Fagbokforlaget, Bergen, 397p.

Webb, S.D., 1995. Biological implications of the Middle Miocene Amazon Seaway. Science, v. 269, p. 361-362.

Wegener, A.L., 1929 (translated and reprinted 1966). The Origin of Continents and Oceans. Methuen & Co Ltd, 248 p.

Williams, G.E., 1989. Tidal rhythmites: geochronometres for the ancient Earth-Moon system. Episodes, no. 12, p. 162-171.

Karsten M. STORETVEDT
karsten.storetvedt@gfi.uib.no

大激変の周期性？ Cyclicity in cataclysms?

地震と惑星直列，潮汐，月の位置や太陽活動との間にありうる因果関係を議論したNCGTニュースレターの論文はあまりにも多い．惑星地球に働く主要重力の極大性と考えられる何か―たとえば，木星や土星のような大惑星と太陽が直列する場合―が，何らかの主要効果をもたらしうるかどうか？，それをチェックすることが適切なように思われる．この直列の出現に関する以下の短文はNew Scientist誌に掲載された地球物理学者Michael Ghil (2004) の論文から引用されたものである：

「土星は地球の317倍の質量を持ち，公転周期は12年．土星は地球質量の95倍で，より遠方に位置し，公転周期は30年．したがって,木星は周期的に土星を追い越し，通過点はそれらの公転にしたがってゆっくり移動する．ほぼ千年毎に，両惑星の配列は太陽や地球とともに一直線に並ぶ.」Ghil氏によれば，そのようなときには，地球の挙動に影響する何らかの変動の期が熟した状態が生じる．特にGhil氏が次の重要な直線配列が2012年に起こることが予測されるとアナウンスしているために，このような擾乱の可能性は検討に値するであろう．

惑星周期の効果をチェックする一つの方法は，先史時代における激変のタイミングから与えられるかも知れない．これについて著者は，既にmegalithic alignments(James, 1993)に関するある本にその概略を述べた．ここでは私たちは，約1,000年刻みで過去を訪ねてみよう．今から1,000年前は，その数10年間前後を含めても，顕著な激変はない．北半球の気候は温暖であった．しかし，スカンジナビア人やグリーンランドへ植民し，ノルマン人がイングランドへ侵攻（1066年）し，そこにブドウ園がつくられるほど－園芸学上の問題は前世紀後半以前についてはよくわかっていないが－，温暖であった．当今の北極が一時的にシベリアに位置していた(Vrosub, 1982)という古地磁気研究の結果も知られている．その時期（1,000年前）と現在の間には，もちろん，テムズ川が日常的に凍った小氷期を経験し，ヘンリー8世はある時に50km離れたハンプトン・コート～グリニッジを”そり”で氷上旅行することができた．

イングランドの凍結と同時期に，地球の反対側のパタゴニアでは温暖で穏和であったようだ(Preito, 1993)．この異常は，全地球的凍結状態を示すのはなく，大きな歳差動揺によって引き起こされた自転軸の変化のような地球自転モードのなんらかの変化によってもっと容易に説明し得る．（これらのイベントは，このような問題を研究するために設立されたグリニッジ測候所ができる前のことである．）それに，これらの異常気象の錯綜につけ加わる異常として，記録によると，テムズは紀元923年には既に凍結しており，上述したイギリスでの平穏時が準備されつつあった．言い方を変えれば，なんらかの気候の急変は，北部ヨーロッパにおける伝統的に温暖で穏和な時期に推定される．

次のステップとして，西暦で現在の始まりまで時代を遡ると，幾つかのよりかすかな異常現象がみいだされる．アレクサンドリアでは紀元前130年，50～100年前にEratosthenes(エラトステネス）によって作られたものとは異なる緯度を，Hipparchus(ヒッパルカス：ねばり強い緯度決定者）が見つけていた．HipparchusはMarseille(彼の生誕地）をByzantiumとして同じ緯度を置き，これは結果的に今日の緯度約4°と平行であり，昼夜平分時のいかなる歳差の効果をはるかに越えている．Hipparchusの緯度は，北極はロシア(Bol'shevik島）の北端に位置していた，現在の叢氷限界の外側に位置していた．

古代ギリシャの末期には特異的に多くの皆既日食があった．皆既日食は，期日は正確に起こっているが，場所は間違っていることがあり，時代を遡るほど間違いが多くなる．これらの特異的皆既日食のほとんどは，現在の天文学者には認められていない(Fotheringham, 1921)．それにもかかわらず，特異な皆既日食の一つは，BC136年4月15日にバビロンで観測されて，申し分のない観測証明記録が遺っている．実行された逆算にしめされる全通過経路は，いずれにしてもバビロンを通過せず，4000km西に位置するスペインを通過する．それは明瞭に起こって，ある場合には記録され，この皆既日食はHipparchusが特定した付近の緯度でも同時に起こっていたはずである．

詳細で正確なコペルニクスの仕事によって，何か奇妙なことが起こったことが支持された．アレキサンドリアと中東の両方におけるエラトステネス（紀元前約300年）～紀元約800年の記録を利用して，エラトステネス時代～紀元2世紀の春秋分の歳差速度が6世紀と比較して約30%遅かったことをコペルニクスが発見した．ついでながら，それは，ほんのわずか現在の計測よりも速い．歳差速度の変化が皆既日食の通過を混乱させることは確実であり，このような変化は，地球の求心加速度分布や，それゆえに海の分布に対して影響を及ぼすだろう．

さらにあと1,000年遡ると，トロイ戦争の直後の時期，紀元1150年頃もしくは少し後の時代になる．この時代には，地球のある部分で最古の激変活動のすぐれた記録がある．良く知られた事件は，クレタ島のミノア人[(1)]とギリシャのミュケーナイ人の失踪である．この時期にギリシャの人口は確かに減少し，それに引き続く数世紀は

(1) ミノア人を滅ぼした原因は，一般には，テーラ火山(Thera: サントリニ島）の噴火に帰せられる．しかしこの噴火は，3世紀も前の紀元前1450年頃に発生したもので，ほとんどの火山灰は小アジアへ向かって浮流した．紀元前1200年代のノッソス(Knossos)は依然として文明繁栄の中心地であり，トロイに向かうアガメムノン艦隊の艦船と兵隊の主要な兵站地であった．

考古学的暗黒時代になっていた．より顕著なことは，ギリシャは孤立していなかった，つまり，島々は全て地中海を通じて悪い状態に陥った．レバント海岸は破壊の跡となり，エジプト人が肥沃なデルタ地帯を放棄してナイル川を 400 ～ 500km ほど遡って移動し，デルタ地帯には移動してきた海洋民族が住み着いた．アイルランドの泥炭湿原―過大洪水の現れ―はこの時期から記録され，中国ではこの時に文字歴史が始まる．この時期は紀元前 2 千年期の後期にあたり，北西ヨーロッパの巨石時代の終わりあたり，印象的なストーンヘンジ・ステージ 3 のような太陽崇拝モニュメントの放棄が記される．確かに，エジプトで起こったように，北西ヨーロッパで良く組織された明確な太陽崇拝文化はこの丘陵を去り，後続の集団の文化に入れ替わった．

このような同時的もしくは準同時的事件は破壊を全地球規模にする．さらに 1,000 年遡ると，より大規模で，より広範囲にひろがった激変事件が起きている．それは，エジプトの最初の暗黒時代（紀元前 2181 ～ 2133 年）と同時期で，おそらく世紀を超えて続いたであろう．この暗黒時代以前のエジプト権力の中央はメンフィス（現在のカイロの近く）にあり，高度に組織された中央部の人口は何万人にも達していた．ほとんど説明ことだが，これらのエジプト人は千年後に彼等が再びそうしたように上流のテベスへ逃避したとの記録がある．また，デルタ上の農場が放棄されたために彼等は餓死し，建物や寺は崩壊した．遊牧民の侵入者は，高度に組織された（しかし，堕落していた）エジプト社会を征服した．伝統的には，この征服は大量の民族移住に原因するとされてきたが，より論理的な説明はヘロドトスによってなされていて，遊牧民が支配したのは遺棄後のナイル川デルタであった．この説明は．ヘロドトスが紀元前 5 世紀にエジプトに訪れた時，僧侶達が彼に，南のテーベからはるか遠くのナイル川河口までを覆った洪水が歴史の中で 2 回あったと言った．この地域のあまねく平らな地形から判断すると，通常の洪水に帰することは合理的な主張ではありえなく，地中海の大規模な海水準変動が信憑性のある説明であろう．

くりかえして言うと，この破壊がおよんだのはエジプトだけではなかった．クレタではマリア，ファイストス，ゾロス (Mallia, Phaistos and Zohros) の主要な中央神殿が破壊された．クレタ人あるいはそれを行いえた誰かがこの丘陵へ逃れ，ほぼ 2 世紀もにわたって再来することはなかった．マルタ島 (Malta) の繁栄したコミュニティは滅亡し，島には完全に人が住まなくなった．再び入植した新しい人々はより単純な別の文化をもち，その後 500 ～ 600 年間にわたって貧困な生活をつづけた．レバント (Levantine) 海岸沿いの町が再び被災し，ビブロス (Biblos) には「略奪」と記されている．海抜 1000m のトルコのコンヤ (Konya) 平野は無人となった．

スコットランドのオクネイ (Orkney) 島の海岸で，スカラ・ブラエ (Skara Brae: ストーンヘンジやピラミッドよりも古い新石器時代の遺跡）の石造の村の遺跡は，この村がこの頃に急速に遺棄されたことを明示し，住民たちは持つものもとりあえずに急いで逃避した．サリスバリー (Salisbury) 平野のストーンヘンジ・ステージ 1 は千年紀の直前に見捨てられ，周囲の側溝に土壌断面が発達するほど長く捨てられてきた．アイルランドの神話によると，海からの巨大な波が全ての人々を全滅させ，200 年もの間，土地を荒廃させた．中国でも，洪水と巨大な波が大地を横切って押し流し，その余波のなかで，皇帝が羅針儀の基本点を探すために男たちを派遣した，という民話がある．天体の地理に関して何らかの混乱があった，言いかえると，地球の自転モードに何か大きな変化が起きたという可能性に起因する，ように思われる．上述のように，自転モードの変化，あるいは，歳差の ” 揺らぎ ” は，必然的に，大きな一時的な海水準の変化をもたらすだろう．

主規模な歳差の揺らぎと海水準の大きな変化との関係は，著者の著書「巨石の線状配列」(James, 1993) にもっと詳細に論じられている．これらの太陽崇拝巨石モニュメントの直線配列が夏至の日の出に関係していることを考えると，全地球的災害という特定時期に，巨石配列に顕著な変化―および遺棄された配列―があることが明白になる．

ついでながら，全地球的激変のタイミングは聖書のノアの洪水の時代に近くに，それは勿論単独のイベントではない．洪水神話は世界中の少なくとも 80 の国々に知られている．この時期にエジプトは，我々が探し出した暗黒時代に経験した．インドでは，ハラッパ人たち (Harappans) が突然やってきて，トラウマ的にいなくなる．ハラッパ人はインダス川に沿って 1000 年にもわたって進出していたが，終末には，壁や屋根が突然に崩壊にして人々を閉じ込めてしまう．破壊はあまりにも広範に至っていて，地震活動に起因するとされる．（ハラッパ地域は，その後，サンスクリット人たちが再入植した場所であり，生存者に何が起きたのかよくわからない．というのは，4000 年前の同じ時に，新しい遊牧者がオーストラリアへ到達して，インドのパーリア (pariah) 犬と近縁のディンゴ (dingo) を含むライフスタイルの変化をもたらしたからである）．

このように，エジプトの暗黒時代が全地球的破壊の時代であることはほぼ間違いない．

さらに 1000 年前まで遡ると，4000 年前の紀元前約 3300 年になる．推論できる範囲では，ノアよりも破壊的な洪水が起こっていて，それはギルガメッシュ (Gilgamesh) の時代であった．ギルガメッシュはウルク (Uruk) の 4 代か 5 代目の王で，千年紀の最後に君臨した．ギルガメッシュが行った叙事的遠征は不朽の秘密を発見した．すなわち，めぐり合った先祖から，いかにして洪水から生き

延びたかを語り聞かされた．それは，1000 年後のノアと多かれ少なかれ同様な方法であた．その叙事詩（Heidel 訳）は，ギルガメッシュの洪水を以下のように記述している（Heidel，1949）

一日の暴風雨が吹き荒れる... 戦争のような；彼の仲間は誰もいない... 天と地は揺すぶられている，火と嵐は猛威をふるっている... 神でさえも大洪水の恐怖に打ちひしがれた... 事実，昔の時間が土に返る... 海に満ちた人々（の死体が）があたかも魚の卵のように...

余談ながら中東の神話は，女神のイシュタル（Ishtar）をこの洪水の原因であると非難し，人間性を破壊する企てとした．しかし彼女は結論を覆したと伝えられ，男性が支配する太陽崇拝文化と生け贄の時代の到来を告げた（Heinsohn，1990）．

ギルガメッシュに先立つ千年紀の中頃，すなわち紀元前 4500 年頃（とはいえ，今では年代はあまり信じられなくなりはじめているが）には別の激変が起こっていて，トルコのコンヤ高原に建設された中心を瓦解させ，おそらく最初にビブロスを，多分２番目にジェリコを破壊した．年代決定が困難であるため，その前の破壊年代は信憑性が低い．とはいえ，上述された災難は，紀元前 4 千年紀の後半以来，約 1000 年の周期をもつ傾向にある．もしそうならば，我々は 2012 年に木星と土星が直列することを深刻に考えなくてはならない．とはいえ，先史時代の激変の強度が過去の 4 周期にわたってかなり弱まってきたようにみえることに，希望がつなぎとめられている．この傾向が続いているかどうかが論点になっている．もしそうでなければ，我々はそれに関してなしうることはない．

文　献

Fotheringham, J.K., 1921. Historical Eclipses. Halley Lecture, Oxford (Clarendon Press) .

Ghil, M., 2004. New Scientist, 28 February.

Heidel, A., 1949. The Gilgamesh Epic and Old Testament parallels.

Heinsohn, G., 1990. Destruction layers in archaeological sites. Catastrophism 2000. Univ. of Toronto.

Herodotus. (Year unknown). The Histories. Penguin Classics.

Hibben, F.C., 1946. The Lost Americans. Crowell N.Y.

James, P., 1993. Earth in Chaos. Boolarong Publ., Brisbane

Preito, M.deR., 1993. See: Past Glaciations, Chile & Argentina. USGS Special Paper 1386 – 1.

Sharpton, V.L. and Ward P.D. (eds), 1991. Global catastrophes in world history. Geol. Soc. America, Special Paper, 247.

Verosub, K.L., 1982. A paleomagnetic record from the Tangle Lakes: large amplitude secular variation at high latitude. Geophys Res. Letters, 9:8:823-826

Peter JAMES
glopmaker75@hotmail.com

原著論文　ARTICLES

世界地質図委員会からの新地磁気図上にみられること
OBSERVATIONS ON NEW MAGNETIC MAP FROM THE COMMISSION FOR THE GEOLOGICAL MAP OF THE WORLD

Keith H. JAMES
Institute of Geography and Earth Sciences, Aberystwyth Univ., Wales, UK.　khj@aber.ac.uk
Consultant geologist, Plaza de la Cebada, 3, 09346 Covarrubias, Spain.

（山内 靖喜・小坂 共栄［訳］）

要　旨：海洋上の磁気データは非常に広大な範囲が拡大した大陸地殻が沈降したものであることを示している．それらは大気下の大陸及び著しい磁気の線構造[*1]をもつ大洋中央部とは明瞭な境界をもつ．後者（C 系統磁気クローン）は海洋拡大と磁極の逆転の玄武岩の記録として慣習的にみられてきた．本論の場合，それらは地球が膨張した期間に激しく拡大した大陸からなる．それらは海底地域のちょうど半分を構成する．南太平洋と大西洋の線構造の大半と北方の海域で次第に少なくなっている線構造は，拡大が北方に向かって増えたことを示している．先膨張期の〝パンゲア〟は全球的であった．磁気の線構造は大陸縁に沿っても存在し，大陸縁でのボーリング及び地震探査データはリフティング，拡大，海方向に傾斜したくさび状構造及び蛇紋岩化したマントルを示している．一般に 4000 万年にわたる白亜紀の地磁気〝静穏期〟に形成されたとする〝海洋〟地域は大陸である．それらは猛烈に線構造を発達させている地域となる激しい拡大を経験していない．すべての〝海台〟，〝海洋内〟火山弧及び線状の列島が大陸地殻の地域上にある．火山弧は珪質地殻の上にあるので，〝安山岩問題〟は存在しない．同じように，島弧下の大陸地殻の〝沈み込み工場〟は存在しない．大陸内部－大陸縁間のトリアス紀／ジュラ紀－前期白亜紀にかけての拡大期から非拡大

ないし部分的拡大期（? 中期始新世）と沈降した海底の地殻を経て，そして猛烈に線構造を発達させている地殻までが順番に連続している．最後の線構造を発達させている地殻は？後期白亜紀－新生代に大きく拡大し（$\beta \geqq 5$）そして現在は活動的で高くそそり立つ大洋中央海嶺である．海水準以下の拡大した大陸の広大な地域は炭化水素の探鉱の重要な対象となるであろう．領域紛争がありそうである．

*1: 本論文の〝磁気の線構造 (magnetic lineation)〟は地磁気異常分布図上に現れる直線上の分布でときには数 1000km の長さをもつ．（訳者注）

キーワード：*磁気異常，大陸，スーパークロン，安山岩，製造工場，膨張*

はじめに

この地球は大陸地殻，海洋（玄武岩質）及び縁辺での大雑把な議論と不十分な資料採集／定量からその中間にある引き延ばされた大陸地殻を運んでいるというのは慣習的な理解である．全球的な地図類は一般に世界を青色－海面下－と海岸線またはその近くで切り離された大陸で表現している．青色のものはなんでも〝海洋〟であり，大陸地殻を欠いている．〝海盆はマグマの過程とマントルの組成を研究するための唯一の機会を与えてくれる〟–その理由は–〝汚染の可能性をもつものとしての大陸地殻が欠如することは地球深部の汚れていない標本を提供してくれる〟(Saunder and Norry, 1989)．〝海盆内の火成弧は海洋地殻の上にあり，大陸物質による汚染が起きることができなかったから玄武岩についての地球化学的研究にとって重要であると推定される．〟(Leat and Larter, 2003)．海台と火山脈はプリュームないしはホットスポットの産物であり，海方向に傾斜した反射層 (SDRs) からなるくさびは火山成である．

〝海洋〟地域において回収された多数の大陸地殻の標本はこれまでの慣習とまったく調和していない（例えば，Storetvedt, 2003; Vasiliev and Yano, 2007; Yano et al., 2009）．DSDP 掘削は Site547 の水深 3950m において大陸性岩石類をみつけている (DSDP Shipboard Scientific Party, 2007)．アンデスとグレンビル (Grenvillian) の大陸基盤，Arequipa 地塊中の上部古生界－下部中生界堆積岩類を供給した西方の源はペルー海岸沖に存在する (Nur and Ben-Avraham, 1983)．石油会社はリフト運動を受け沈降し，だんだん水深が深くなっている大陸縁辺沿いで大きな資源をみつけつつある．最新世代のリグ[*2]は水深 4000m までを見積もられている．

*2: 海底掘削のための海上の基地となる装置．甲板昇降型，半潜水型，船上に櫓をもつ船型などの種類がある．（訳者注）

The Carte Géologique du Monde (Bouysse, 2009)（訳：世界の地質図）は世界の地質の描画において大きく改善されている．これは陸上の地質，大陸棚，主要な海底の破砕帯と海嶺，及び判明している磁気による海底の年代を示している（しかし以下を参照）．

磁気図は多数の海底の大陸地殻を示している

Korhonen et al.(2007) の世界磁気異常図は磁気異常データ（模範的な海洋データとともに地表付近と衛星のデータ－使われた手法の詳細に関しては地図を参照のこと）を編集した．著者達はこれらのデータを地殻と上部マントル中の変成岩と火成岩及びそれらの酸化還元状態に因るものとした．Purucker (2007) によって紹介されたこの地図は，北アメリカ，北部ヨーロッパ，インド及び中央／西部オーストラリアの各地を覆う範囲で磁気の高い部分から低い部分までの激しい変化があることを示している．私はこれを NCMS(Northern Continental Magnetic Signature 北部大陸磁気署名）と呼ぶ．NE と NS の方向性は一般的である．これらの多くは古い地殻の領域と一致する（図 1 を北アメリカの基盤の地図 (Wilco, 2008) と比べてみよ）．

別の磁気的特色が南部大陸上に現れている－南アメリカ，ヨーロッパ－アフリカ，インド及び東南アジア，ただし南中央オーストラリアを除く（図 2）．私はこれを SCMS(Southern Continental Magnetic Signature 南部大陸磁気署名）と呼ぶ．同じようなパターンが高緯度地域の上に存在するように見える．その大きさはよりひかえめである．このことは地殻の拡大と堆積物カバーの厚さによるものと私は推定している．例えば，先カンブリア代の Fennoscandinavian 楯状地[*3]の NCMS と Tornquist Line[*3] 南西側のヨーロッパの SCMS との間には強固な境界がある．EW の方向性が南アメリカと北アフリカでは一般的である．

*3: スカンジナビア半島先端から南西方向に延びてベルリンとワルシャワの間を通る構造線で，バルト楯状地とウクライナ地塊の南西側の境をなす（市川浩一郎，1979 より）．Fennoscandinavian 楯状地はバルト楯状地とほぼ同じ（地学事典）．（訳者注）

重要なことには，SCMS は水面上に露出する大陸から〝海洋〟地域内へかなり広がっており，広い地域が沈降した大陸であることを示している．アフリカから西方の大西洋内へと東方のインド洋内への大きな広がりがある．大きくて大陸的なマダガスカル島はこの地殻の水面上に現れた重要な標本である．ここでは，Bemolanga 油田[*4]と Tsimiroro 油田[*4]の両方に 29×10^6 バーレルの石油がある．大陸はベンガル湾からほぼオーストラリア広がっている．インド洋の中央部に広大な大陸がある．

*4: 両方ともマダガスカル島中部西岸付近にある．

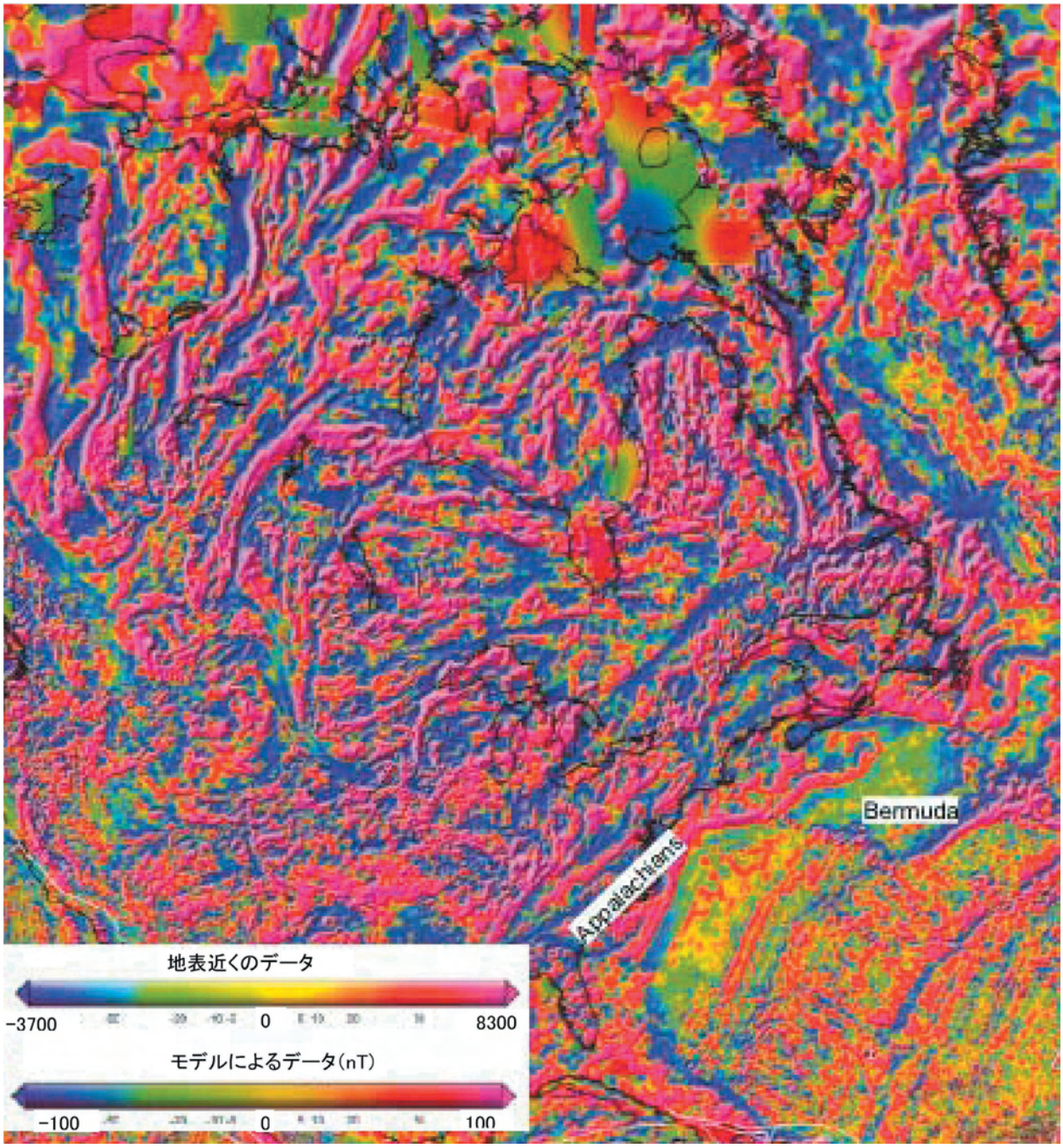


図 1　北アメリカの磁気異常地図．Korhonen et al.(2007) による．

太平洋の西半分（図 2）同じ特徴をもっている．ただし，シャツキー海膨，ヘス海膨，太平洋中部太平洋海山群，及び Ontong Java（大陸起源）の西側でマリアナ島弧の東側の上部ジュラ系－下部白亜系の地殻の磁気の線構造が発達する地域（M 系統）を除く．SCMS の地域は北ニュージランド東方から北に向かってハワイ諸島まで広がっており，そこから北西に向かうように曲がり，島列に従う．

太平洋 SCMS は北部太平洋白亜紀静穏帯（Atwater et al., 1993）とされている地域全体に広がっている．これを磁気極の変動が 4000 万年の間中断したとき（白亜紀長期正磁極あるいは白亜紀正磁スーパークロン）に形成された〝海洋〟地殻として慣習はみている．それよりも，それは沈降した大陸であり－〝静穏帯〟は磁気逆転が欠如しているというよりは記録が欠けているのである．Bouysse(2009) と Korhonen et al. (2007) の両方の地図は白亜紀の海洋地殻として示されているすべての海底は大陸性であることを示している．

SCMS 地殻は海面上の南アメリカから東方の南大西洋内に約 50% まで広がっている（図 3）．現在水深 2200m 海底下 6-7km にあるブラジルの Tupi 油田[*5] 内の下部白亜系浅水性湖沼成炭酸塩はその地域において大陸地殻が著しく沈降したことを示している．さらに南では，フォークランド諸島から South Georgia（島）まで続く北スコチア海嶺上に大陸地殻が存在している．北アメリカも同じく東方の中部大西洋内に広がっている．この SCMS の外側の境界は両地域において非常に明瞭である．

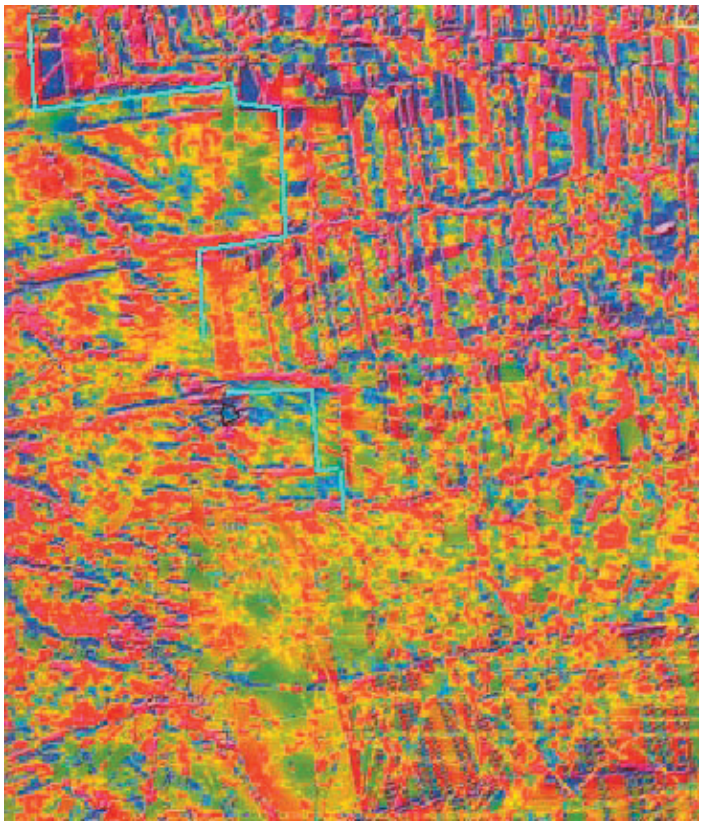


図 2 西部太平洋の磁気異常地図. Korhonen et al. (2007) による. SCMS の地殻の東端を印す青い線は, Atwater et al. (1993, 図 1) によって示された白亜紀静穏帯の縁と一致する.

*5: ブラジル, リオデジャネイロ沖約 250km のサントス海盆中にあり, 80 億バレルのガスと油を埋蔵しているとされている.

高頻度の磁気の線構造

海底拡大は地球磁場の周期的な（平均 :700,000 年）逆転を記録していると慣習は話している. Korhonen et al. (2007) の磁気異常地図は, 高頻度の磁気の線構造によって特徴づけられる海底の地殻からなる周りとは異なる地域を示している（例えば, 図 3 の中央部）. 東部太平洋, 大西洋, インド洋, 及び西部太平洋においてはそれらの地域は一般に北方向の帯として存在する. この北方向の帯は南極大陸を取り囲んでいる一般的な東西性の帯から 90° 離れており, その帯から生じている. 私はこれらを SSMS (Strongly Striped Magnetic Signature 強度に縞模様を示す磁気署名）と呼ぶ.

これら地域のいずれもクロン 33(84Ma) に始まった Campanian- 現在の磁気 C 系統であることを the Carte Géologique du Monde(Bouysse,2009) は示している. 南太平洋の中央海嶺の両側それぞれに約 60 本 (157Ma, キンメリッジアン）の線構造, 北部の海嶺の西側では約 33 の線構造があることを私は観察している. このことは地質年代尺度 2008 (International Commission on Stratigraphy 層序に関する国際委員会）の 33 個の磁気 C 系統クロンが意味することではないかという疑問を私にもたらした.

33 個のクロンからなる C 系統は, 複合された南部大西洋の磁気異常モデルに由来するが, このモデルには太平洋とインド洋の磁気断面図から細かな点が追加されている (Cande and Kent, 1992 ; Ogg, 1995). Curry (1985) は以下のように記述している, ″一般に標準として受け取られている異常の順番は南部大西洋を横切った単一の測線に基づいており, 少なくとも新生代の大半の表示は真剣に疑われることはなかった. ″ 明らかに非常に正確な年代尺度（例えば International Commission on Stratigraphy の地質年代尺度 2008 参照）は一定速度で拡大した海底を仮定していると Curry (1985) は述べている. 各縞の幅が異なることはこの考えを支持しない. Curry (1985) の場合には, 年代尺度の構築において磁気の逆転のパターンの役割を再評価する必要があった.

南部大西洋の南部（図 2) の海嶺の両側のそれぞれに 32 本の線構造があり, ブラジルの緯度ではほぼ 23 本 (60Ma, 暁新世), 中部大西洋で丁度 12 本 (30Ma, 漸新世）そしてアイスランドの南方で 10 本 (26Ma, 漸新世）である. SSMC のこれらの系は明らかに北に向かって伝播しており, Bouysse(2009) の地図によって描写された C 系統の年代は問題がある. 私の説明では, SSMS は南部から前進し始めた地球膨張を記録しているのである. 膨張はかんらん岩から玄武岩への変化あるいは蛇紋岩化作用の両方かそのどちらかによる体積変化を伴うことができた.

″おぼろげな ″SCMS は大西洋と東部太平洋において SSMS の一部を横切って中央海嶺まで広がっている. このことは大西洋中央海嶺で見つけられた大陸性岩石と一致する. SSMS は激しく大陸地殻を拡大したことをこれは暗

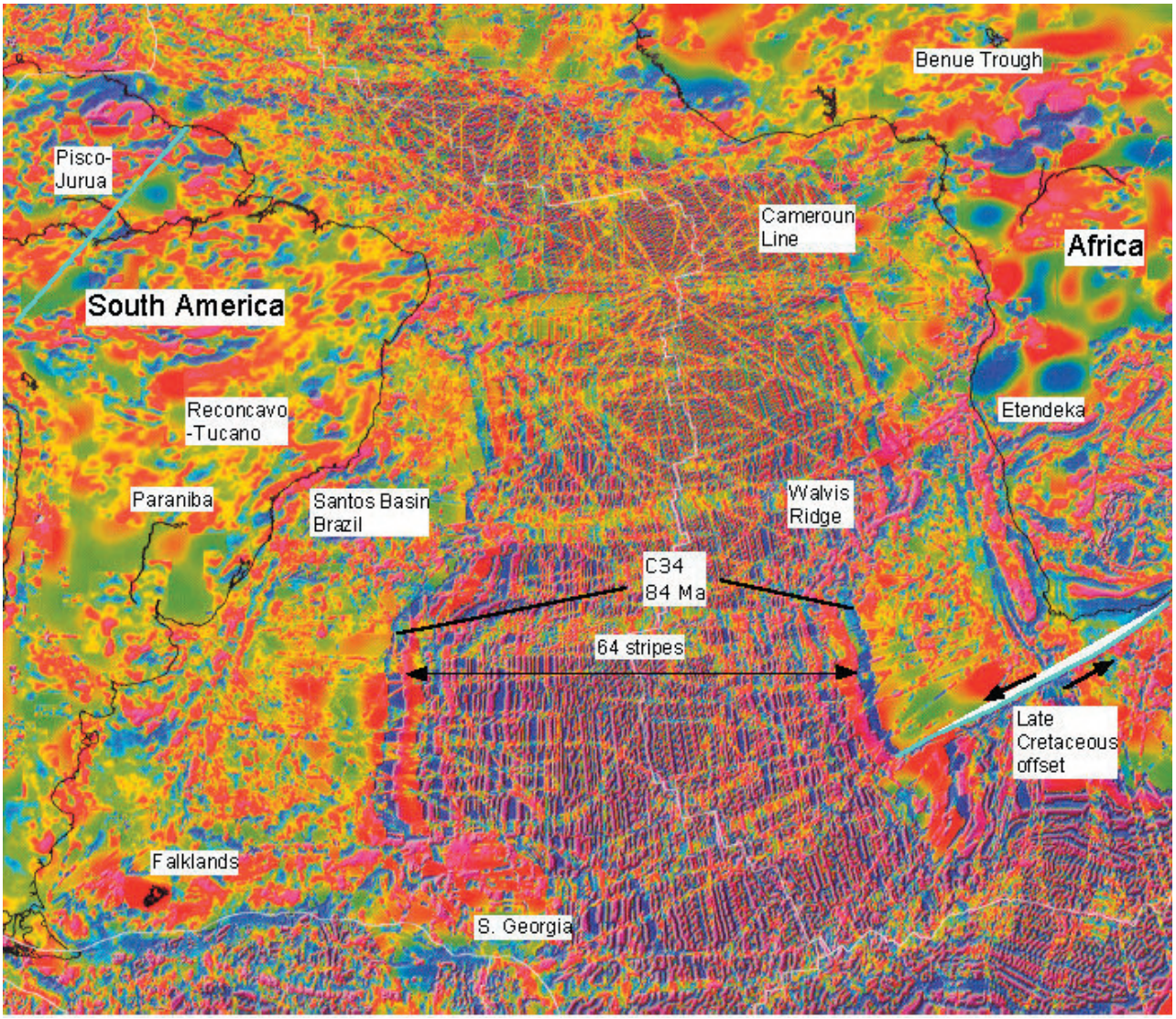


図 3　南部大西洋の磁気異常地図。Korhonen et al.(2007) による。図 1 と比較せよ。南部の大西洋中央海嶺の両側に系統的に分布する約 32 の磁気の線構造があることに注意．ここでは C 系統の磁気クロンが当てはめられている (Cande and Kent, 1992).

示している．南シナ海での研究はそのような地域の場合の伸張因数 $\beta \geqq 5$ であることを示している (Hu et al., 2009)．図 4 はこのような伸張による移動の後の南アメリカ－アフリカの復元図である．Bullard et al.(1965) のコンピューターを用いた有名な地図のような慣習的なパンゲア復元図に激しく挑戦している．膨張前の (? 前期ジュラ紀）地球に関して，〝パンゲア〟は非現実的な非対称な塊よりは全球的であったようである．

磁気の線構造について
私たちはなにを知っているのであろうか？

南北アメリカの両方において，その内部の海岸に平行な磁気の線構造は初期のリフティング／拡大（図 1・図 2）を記録している．恐らく最もよく知られた地域は北アメリカであろう．陸上の古生代アパラチア系のトリアス紀の伸張の再活動は赤色岩層の堆積とシルをもたらした．ジュラ紀には，活動は海域に跳ぶように移動した．ここでは，リフト堆積物の上にジュラ紀堆積物，塩，ジュラ－白亜紀の炭酸塩及び白亜－新第三紀砕屑物からなるくさび体に不整合に重なることを地震探査とボーリングが記録している (James, 2009 の図 6 に要約されている)．ニューファンドランド海盆 Newfoundland Basin とイベリア深海平原の過渡的な地殻内の磁気の線構造は蛇紋岩化したマントルを反映していると Sibuet et al.(2007) は示唆した．

要約すると，SCMS 内の激しい磁気の線構造は地域的に激しい拡大を示す．

陸域の沖合にみられる SCMS 地殻の線構造

北米大陸東部の線構造の方向は，始新世初期の膨大な溶岩流やそれを貫く貫入岩からなる火山体に平行している (Vogt et al., 2007)．ここでのモホ面の上での地震波の反射速度は，大陸地域でのそれの中間的な値を示している (Officer et al., 1952)．火山体に平行するこの線構造は，北西アフリカから隔たった SCMS 地域の Madeira, Canary 諸島へと延びている．また同様に，南アメリカ大陸海岸線にほぼ平行な強い負の磁気異常帯が

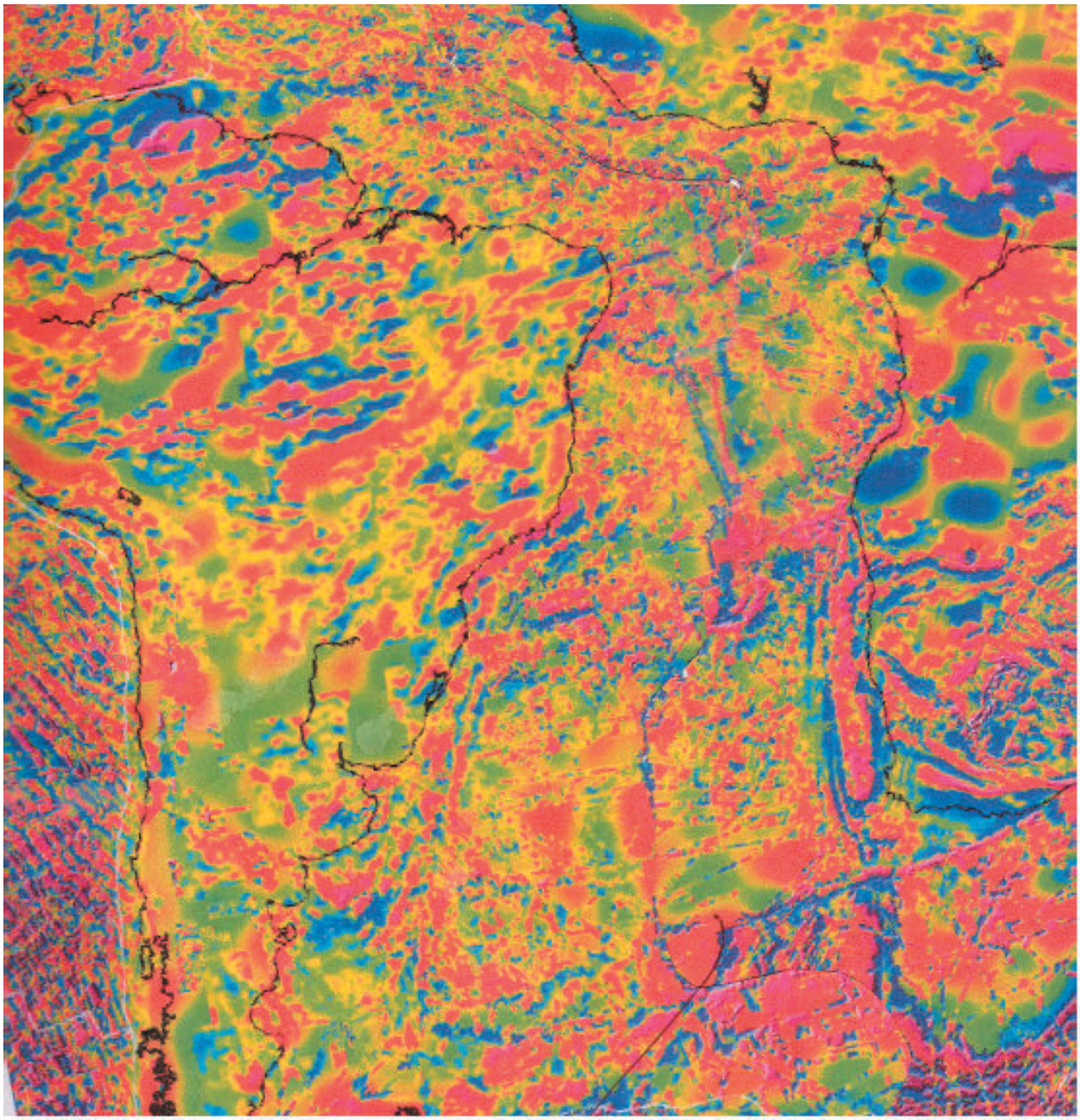


図 4　南アメリカ－アフリカの膨張前の復元．図 3 よりのデータ．大陸縁辺の等深線に基づく Bullard et al., 1965 の復元図のような古典的なパンゲア復元図と比べてみよ．

Falkland トラフの北まで延びている．

Karner(2008) は，海洋と大陸の遷移帯ということを議論している．この遷移帯の幅はおよそ数百キロで，その内部には組織的な負の地磁気異常帯が見られるという．多くの収束縁というのは，大陸域の深部からマントル物質を運びあげている．またそこでは，顕著な断層もなしに大陸地殻の急激な薄化にともなう，マグマ物質の欠如とそれによる引張的な不均衡現象が生じている．

アフリカ大陸西部とオーストラリア大陸北西部における地震波の反射データによれば，そこでは地殻の薄化が 20-40km ないし 10km 程度しかないことを示している．同様のことがアメリカ大陸中部でも生じている (James,2009, Fig.5)．中生代ジュラ紀末の Tithonian(チトン期) 石灰岩の証拠から，現在は深海となっている Iberian 沿岸域は，その堆積盆の初期はごく浅い海域であったことが分かっている．

Brown et al.(2009) は，Nova-Scotia, Morocco, アフリカ大陸沿岸域などで得られた地震探査データについて議論している．深海の形成初期段階では，そこは地磁気的には穏やかな地殻状態で，断層の動きとともに回転する地殻ブロックの集合体をなしていた．それらの各ブロックでは，大陸域，海洋域を問わず，またその形成時期を問わずにリフトが形成された．しかし，それらリフトが breakeup 不整合の下位に存在するということは，ブロックの基盤岩が海洋性ではないことを示唆している．

深海の海水下にある堆積物は，ブロックの回転の際には，活動する断層によって動いてはいない．堆積の中心部は，モホないし下部地殻内でのブロックの分離部分を反映する地点の上に位置している．この部分では，地殻が薄化し，さらには蛇紋岩化したマントルへと変わっていることが示唆されている．

要約すれば，SCMS 地殻の沖合にみられる線構造は，明確に大陸地殻が伸長したことを示しているということである．

海側へ傾くウエッジ

大陸地殻が薄化するところでは，それが海側へ向かって傾いているのが通例である（Hinz, 1983；Rosendahl et al., 1992）．それは，北および南大西洋の地殻では普通に認められることである（Jackson et al., 2000）．そこでは，浅海と海洋地殻の上（Mutter et al., 1992）に火山岩層が認められる（Hinz, 1983）．そこでの堆積物は，大陸側へ傾斜するリストリック断層に伴って形成された半グラーベン内に堆積している．

ノルウエー沖合のウエッジ部（SDRs）は，230 × 60km の大きさを有するが，そこで掘削された DSDP Leg 38 では，玄武岩が得られている（Hinz,1983）．同様の性格のウエッジ部の存在は，グリーンランド南部，南西アフリカの Rockall 台地，アメリカ東部沖の Abutment Plateau や Walvis Ridge，オーストラリア大陸北東沖の Argo Abyssal Plain，アメリカ東部沖の Baltimore Canyon Trough，Georges Bank，インド大陸の Kathiawar Peninsula 沖，等々で確認されている．Argentina-Uruguay 沖合の震探データは，中生代白亜紀の Aptian 期～現生の堆積物の下位に，海側へ傾くウエッジが存在することを明瞭に示している（Franke et al., 2010）．

南大西洋の深海部は，幅 100km，厚さ 7km ほどの SDRs が，長さ 1000km にわたって続いている（Jackson et al.,2000）．そこでの先 Aptian 期の海成堆積層は，隆起する傾動地塊上のプロキシマルな環境下で堆積したことを示している．そこはその後に沈降して，よりディスタルな環境下で堆積した厚い堆積物でおおわれている（Mohriak et al.,2008）．

要約すれば，SDRs は SCMS 地殻の一部をなしており，そこには大陸的な火山岩層や堆積物が認められるということである．

台地，島弧と島弧列

すべての海台（Kerguelen, Ontong Java, Manihiki, Kikurangi, Shatsky, Caribbean, Exmouth, Agulhas, Mascarene, Naturaliste, Vöring など）や海洋島は SCMS の上にある．太平洋の Tuamotu Island, Easter Island -Sala y Gomez Ridge のみが中央海嶺にまで延びている．大西洋では，Azores Plateau が北西に延びて大西洋中央海嶺を横切っており，ここでは大陸性の岩石が採取されている（Yano et al., 2009 によってまとめられている）．Seychelles/Mascarene, Faeroes, Rockall Bank, Jan Mayan - Iceland, Kerguelen, Ontong Java, the Parcel Islands, Agulhas Plateau, Cape Verde and the Cameroon Line などには大陸地殻が存在するとの証拠も報告されている（Charvis et al., 1997；Frey et al., 2002；Gregoire et al., 1994；Ingle et al., 2002；Ishikawa et al., 2007；Laughton et al., 1970；Ramsay et al., 1986；Weis et al., 2001）．

海台

Nur and Ben-Avraham（1983）は，海台についてまとめた中で，″それらは大陸の一部でもなければ火山性島弧，拡大する海嶺でもなく，海洋底から不自然に盛り上がったところだ．それらの多くは地殻部分の厚さが 20-40km で，その上部の地震波速度が，大陸地殻の典型的な花こう岩層のそれと同じ，6.0 ～ 6.3km/sec である″と述べている．

多くの海台について，まだそれほど広範囲にわたって掘削による調査がなされていない段階で，すでにそれらが大きな火成岩の集積体だと考えられていたのは驚きである．海台のうち，掘削調査やドレッジ調査が行われていたのは，地殻の厚さが 20km 程度とされる Caribbean Plateau の最上部についてのみで，そこはジュラ紀に誕生し白亜紀になって噴出した玄武岩によって厚層化した海洋地殻からなっていると考えられていた．しかし，実のところこの地域の構造方向，地殻の厚さ，地震波によって解析された構造，その場の岩石の化学的性質等々，それらのどのデータも北米大陸東部の海岸沿いで得られた震探データや掘削データを外挿して得られたものと一致している．Caribbean Plateau は，ジュラ紀から白亜紀の間に，隔離しつつあったアメリカ大陸の間に誕生したのである（James, 2009）．ここには厚い大陸地殻が存在する．

Kerguelen Plateau の南～西部では，海盆の方向へ傾く反射層が存在する（Coffin et al., 1997; Symonds et al., 1997）．ドレッジによって得られたサンプルは，Plateau の南部が大陸地殻的な岩石からなっていることを示している．Elan Bank の site1137 では，garnet-biotite gneiss などの大陸的な岩石も得られている（Ingle et al., 2002）．Ontong Java Plateau の Malaita 島で見つかった quartz-garnet clinopyroxenite xenolith は，太平洋地域のマントル内に 5 ～ 10 億年前の下部地殻的な岩石が存在することを示唆している（Ishikawa et al., 2007）．

Amundsen et al.(2002) と Paquette et al.(2006) は，Iceland と Mauritius の下の古い地殻由来の zircon を発見している．

要約すると，海台はSCMS地殻の大陸性物質の上にあるということである．

″海洋内″島弧，″安山岩問題″，″サブダクション工場″

Leat and Larter (2003)は，海盆域の火山性島弧は海洋地殻の上に形成されていて，大陸性地殻物質との混合がないため，玄武岩の地球化学的研究にとっては重要だと述べている．彼らは，島弧そのものが海洋域で生まれると述べている．そのような彼らの推論は，海域の火山弧に多量の珪質岩が存在することや，地震波速度的に見てそこに中間的な地殻が存在するというデータに対しては，当然の帰結として″continentalization(大陸化作用)″あるいは，いわゆる″subduction factory(サブダクション工場)″という表現(Tatsumi and Kosigo, 2003)に行き着くのである．

Tatsumi and Kosigo (2003)によれば，サブダクション工場での主要な生産物は，珪質物質と大陸地殻である．彼らは次のように述べている．″大陸地殻の起源に興味のある研究者にとっては，安山岩質地殻の形成というのは最大の悩みである．なぜなら，現在の地球では，安山岩質ではなく玄武岩質の火成作用がどこでも卓越しているからである．″

また，こうも述べている．″安山岩質地殻全体の化学的性質というのは，現在みられるサブダクションゾーンの岩石のそれと同じである．このことは，科学者たちをして，大陸地殻は収束するプレートの縁辺部で形成されるとの考えへと導くことになる(例えばKeleman 1995; Taylor and McLennon, 1995)″. Tatsumi and Kosigo (2003)は，島弧域での玄武岩質マグマと，マントル物質，新期のamphibolite，古い時期のamphibolite，古い時期の玄武岩質～珪質物質など，ありとあらゆる性質のマグマとの混合(magma mixing)という考えに基づいた大陸性地殻形成の複雑なモデルを提唱している．しかし，そもそもの大陸地殻の形成には，はるかにシンプルな説明が必要とされるのである．

Gill (1981)によれば，地球上の火山の80パーセント以上は安山岩質の溶岩や火砕岩を生み出している．大陸地殻は，成分的には安山岩質である(Taylor and McLennan, 1985; Rudnick and Fountain, 1995)．島弧下の岩石の化学的，地震学的データは，そこの岩石が大陸地殻の断片からなっていることを示している(Fig.3) (Szatsmari, 1983)．

要約すれば，″安山岩問題″，″サブダクション工場″などは存在しないということである．

海嶺

太平洋西部におけるホットスポットの軌跡は，北西方向をとっている．太平洋東部(Cocos and Nazca)や大西洋東部(Walvis and Cameroon Volcanic Line)でのそれは北東方向である．それらの方向性は，大陸内部に見られる主要なリニアメント構造に平行している．具体的にいえば，太平洋東部のCocos Ridgeは，北アメリカ大陸東部の古生代の縫合線に平行しているし，Nazca Ridgeは大陸内部のPisco-Jurua断層を超えて南米大陸まで連続しているのである．

大陸地域の主要な断裂系が，なぜ海洋域まで延びているのかを明らかにしなければならない．Walvis RidgeでのDSDP Site 525Aでは，大陸地殻の痕跡とともに玄武岩が得られた(Class and le Roex, 2006)．それらの玄武岩はEtendekaの洪水玄武岩と区別ができないほどよく似ているし，Alto Palanibaの玄武岩にもよく似ている．海域玄武岩に含められるCameroon Lineは，大陸的な特徴を示す(Rankenburg et al., 2004)．これらの結果は，中生代に起きた大陸地殻の崩壊過程で，海洋域にトラップされた大陸の断片であるか，またはそこからもたらされた堆積物であると考えられる．

大陸性の物質が，多くの海洋域の島々や海嶺からドレッジされたり掘削で得られたりしている．このような事実は，海洋の島々の多くが大陸性地殻からなっており，またそれのこわれた断片によっておおわれていることを示している(Amundsen et al., 2002)．

要約すると，大陸的なSCMSでの地殻は，海岸付近の構造の延長部にあたっているということである．

海洋域のSCMS地殻は，いつ大陸的な性格を持つようになったのか？

Hallam (1977)は，南大西洋の始まりは中生代中ごろのToarcian(トアル期)後期ないしAalenian(アーレン期)初期であるとし，そう考えればそれに先だつジュラ紀後期のSinemurian(シネムール期)やPliensbachian(プリンスバック期)のヨーロッパ系の動物相が，Argentina地域に見られることをうまく説明できると述べた．アフリカ大陸のEtendekaに見られるジュラ紀後期の洪水玄武岩中に貫入している岩石は145Ma (Tithonian;チトン期)，白亜紀の127.5Ma (Hautevirian:オーテリーブ期)の年代を示している(Franke et al., 2010)．Benue Troughの玄武岩溶岩は147 ± 7 Maの年代である(Tithonian末，Fairhead, 1988)．Paraná洪水玄武岩の流出は134.7Maである (Thiede and Vasconcelos, 2010)．Brazilの Reconcavo-Tucanoリフト内では，先リフト期の堆積物やその基盤岩を切って北東方向の断層群が発達している(Milani et al., 1988)．Santos盆沖合の大陸性洪水玄武岩の流出はは178Ma (ジュラ紀中期のBajocian)，121Ma(白亜紀のBarremian/Aptian)である(Stone et al., 2008)．南米大陸南部沖合で掘削された坑井では，古生代の岩石の上位から白亜紀～ジュラ紀のリフト内海成堆積物が見つかっている(Geological Map of South America, Schobbenhaus and Bellizia, 2001)．

腕足類や頭足類化石などの発見は，アフリカ大陸の東側に沿ってジュラ紀 Toarcian にはテクトニックな活動によって海域が誕生したことを物語っている（Ager, 1986）．ジュラ紀 Bathonian（バス期）には，Mozambique Channel が誕生した．M シリーズの地磁気線状構造を示す太平洋西部の地殻は，165-125Ma（Bathonian ～ Barremian）に形成された．オーストラリアは，ジュラ紀に南極から分かれ，ジュラ紀末にはその北西部の浅海域で新たにリフティングが生じた（Whittaker et al., 2008）．

要約すると，大西洋中央部～南部，インド洋，太平洋地域での地殻の伸長が，いずれも中生代ジュラ紀に始まっているということである．

海域の SCMS 地殻はいつごろ，現在のような深さまで沈降したのか？

SCMS 地殻の沈降が，いつごろ起きたのかを知ることは重要である．そのことについては，手がかりになることがいくつかある．カリブ海のいくつかの深海部では，石灰岩の下に始新世初期の浅海性堆積物が見られる（James, 2009）．古いタイプの哺乳動物は始新世中期ごろまでにアフリカ大陸を超えて Madagascar 島へ渡っている（McCall, 1997）．Great Australian Bight 地域では始新世中期の石灰岩の急激な沈降が 43Ma に生じている（Li et al., 2003）．Marshall Islands では，初期始新世の礁性石灰岩が 1500m の深さに見られる（Schlager et al.,1987）．Tuamotu Ridge は，始新世の終わりごろに沈降した（Burkle and Saito, 1966）．

要約すると，SCMS 地殻は，始新世中ごろに沈降したと見られるのである．

結　論

1）海洋域の地殻の 50% 以上は大陸性地殻である．それらの地殻は，地域的にみると伸長し，SDRs や蛇紋岩化したマントル物質を伴ったところが見られる．
2）他の 50% の海洋地殻部分は，C シリーズの磁気的線構造を示している．伸長した地殻の部分では，大陸性の地殻物質とともに著しく蛇紋岩化したマントル物質が伴われることが期待される（現に，中央海嶺では大陸性の物質が採取されている）．
3）南極大陸を取り巻いて，C シリーズ地殻のリング，それから生ずる 90° 間隔の N-S 系が存在する．
4）C シリーズは，南部太平洋では 60 の線状模様を，また南部大西洋ではモデル化された 33 クロンが存在する．
5）N-S 系の C シリーズは，南から北に向かって磁気線状模様を減じながら次第に幅が狭くなっている．
6）白亜紀の superchron は存在しない．これに起因した〝海洋性地殻〟は実際は大陸的地殻である．120 ～ 84Ma の間，地磁気構造をとるような顕著な地殻の伸長はなかった．
7）すべての海台は大陸的な基盤をもっている．
8）すべての海洋島は大陸的な基盤をもっている．また，それらの島々が玄武岩質地殻の上に存在するという意味で，intra-oceanic な島は存在しないと言える．
9）大陸地殻の成因にかかわる〝安山岩問題〟や〝サブダクション工場〟というものは存在しない．
10）ホットスポットの軌跡というものは存在しない．海域の島の連鎖は大陸内部の線構造につながっており，NE あるいは NW 方向をとっている．
11）大陸が伸長する前の“パンゲア（超大陸）”はグローバルなものであった．
12）広大な海域における大陸の伸長は，おそらく鉱産資源の探査の機会を提供し，それはまた国々の領域に関する厳しい問題につながるであろう．

謝辞：Karsten Storetvedt 氏は，興味深くまた建設的なアイデアのやり取りのあと，この論文を投稿するよう私を励ましてくれた．彼は，私に彼の個別の論文について解説してくれた．彼の著作である Global Wrench Tectonics（Storetvedt, 2003）は，海洋化やその拡大について議論し，また深海の下に大陸地殻が存在するという多くの証拠について，それらを総合化している．

文　献

Ager, D.V., 1986. Migrating fossils, moving plates and an expanding Earth. Modern Geology, v. 10, p. 377-390.

Amundsen, H.E.F., Schaltegger, U., Jamveit, B., Griffin, W.L., Podladchikov, Y., Torsvik, T. and Gronvold, K., 2002. Reading the LIP's of Iceland and Mauritius. 15th Kongsberg Seminar, Norway, 2002.

Atwater, T., J. Sclater, D. Sandwell, J. Severinghaus and M. S. Marlow, 1993. Fracture Zone Traces across the North Pacific Cretaceous Quiet Zone and their tectonic implications. American Geophysical Union. The Mesozoic Pacific: Geology, Tectonics and Volcanism, Geophysical Monograph 77, p. 137-154.

Bouysse, P., 2009. Geological Map of the World, 3rd edition. Commission for the Geological Map of the World, 77 rue Claude-Bernard, 75005 Paris, France.

Bullard, E.C., Everett, J.E. and Smith, A.G., 1965. The fit of the continents around the Atlantic. Royal Soc. London Phil. Trans., Ser. A., v. 258, p. 41-51.

Brown, D.E., Mohriak, W.U., Jabour, H. and Tari, G.C., 2009. Central and South Atlantic Conjugate Margin Pre- and Post-Salt Successions: Implications to Rift Models and Petroleum Systems. Search and Discovery Article #30081, http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:WL9P4Zoyqz0J:www.searchanddiscovery.net/documents/2009/30081brown/ndx_brown.pdf+south+atlantic+age&hl=en&gl=es&pid=bl&srcid=ADGEESjQSjwSf0EMkNHrPjagkMreju2MD_NDsIImpCJv9Kt2J0c8YdajOfK4inYT7AmVkGAXxI9DuI-2z5Ep73yMnYdH1aLN0DvV8GHHN7v9VE6dnNx4rmgB

NSGuWVQ2uvea69TNLMrV&sig=AHIEtbTaVuHohC_qXhRcgqcttqL2lvG3CQ

Burkle, L.H. and Saito, T., 1966. An Eocene dredge haul from the Tuamoto Ridge. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, v. 13, issue 6, p. 1207-1208.

Cande, S.C. and Kent, D.V., 1992. A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. Jour. Geophysical Res., v. 97, p. 13917-13951.

Charvis, Ph., Operto, S., Lesne, O. and Royer, J.Y., 1997. Velocity structure of the Kerguelen Volcanic Province from wide-angle seismic data: petrological implications. AGU 1997 Fall Meeting, Abstract number T51B-01

Class, C. and le Roex, A.P., 2006. Continental material in the shallow oceanic mantle - How does it get there? GSA Geology, v. 34, no. 3, p. 129-132.

Coffin, M.F. and Eldholm, O., 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. Rev. of Geophs., v. 32, Issue 1, p. 1-36.

Coffin, M. F., Symonds, P.A., Ramsay, D., Bernadel, G., and Gladczenko, T.P., 1997. A deep seismic transect across the Kerguelen Plateau. AGU 1997 Fall Meeting, Abstract number T51B-02.

Curry, D., 1985. Oceanic magnetic lineaments and the calibration of the late Mesozoic - Cenozoic time-scale. Geological Society, London, Memoirs, v. 10, p. 269-272.

Fairhead, J.D., 1988. Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central South Atlantic Ocean: The role of the West and Central African rift system. Tectonophysics, v. 155, p. 181-191.

Franke, D., Hinz, K., Ladage, S., Neben, S, Schnabel, M. and Schreckenberger, B., 2010. Shallow magma sources during continental rifting and breakup of the South Atlantic. http://www.mantleplumes.org/Argentina.html

Frey, F.A., Weis, D., Borisova, A.Yu. and Xu, G., 2002. Involvement of continental crust in the formation of the Cretaceous Kerguelen Plateau: New perspectives from ODP Leg 120 Sites. Jour. Petrology, v. 43, no. 7, p. 1207-1239.

Gill, J.B., 1981. Orogenic andesites and plate tectonics: Springer, Berlin, 390 p.

Gregoire, M., Mattielli, N., Nicollet, C., Cottin, J.Y., Leyrit, H., Weis, D., Shimizu, N. and Giret, A., 1994. Oceanic mafic granulite xenoliths from the Kerguelen archipelago. Nature, v. 367, p. 360-363.

Hallam, A., 1977. Biostratigraphical dating of the early history of the South Atlantic Ocean. R. Soc. Lond. Philos. Trans., Ser. B. 264, p. 55/95.

Hinz, K., 1983. Line BFB (24-fold stack) from the Norwegian continental margin/outer Voring Plateau, In Bally, A.W. (ed.), "Seismic Expression of Structural Styles- A Picture and Work Atlas". AAPG Studies in Geology no. 15, v. 2, section 2, p. 3-39.

Hu, D., Zhou, D., Wu, X., He, M., Pang, X. and Wang, Y., 2009. Crustal structure and extension from slope to deepsea basin in the northern South China Sea. Jour. Earth Sciences, v. 20, no. 1, p. 27-37.

Ingle, S., D. Weis and F. A. Frey, 2002. Indian Continental Crust Recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau (ODP Leg 183, Site 1137). Jour. Petr., v. 43, no. 7, p. 1241-1257.

Ishikawa, A., Kuritani, T., Markishima, A. and Nakamura, E., 2007. Ancient recycled crust beneath the Ontong Java Plateau: Isotopic evidence from the garnet clinopyroxenite xenoliths, Malaita, Solomon Islands. Earth and Planetary Science Letters, v. 259, p. 134-148.

Jackson, M.P. et al., 2000. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: implications for salt tectonics and source rocks: Marine and Petroleum. Geology, v. 17, p. 477-498.

James, K.H., 2009. In-situ origin of the Caribbean: discussion of data. In, James, K.H., Lorente, M.A. and Pindell, J. (eds.), "Origin and evolution of the Caribbean Plate". Geol. Soc. London, Special Publications, v. 328, p. 75-124.

Karner, G.D., 2008. Depth-dependent extension and mantle exhumation: an extreme passive margin end-member or a new paradigm? http://www.conjugatemargins.com/abstracts/by_session/1

Keleman, P.B., 1995. Genesis of high Mg-andesites and the continental crust. Cont. Min. and Petrology, v. 120, p. 1-19.

Kerr, A.C. and Hastie, A.R., 2006. An unequivocal hot mantle plume origin for the thickened oceanic crust of the Caribbean plate and its margins: In, James, K.H. and Lorente, M.A. (convenors), "Geology of the area between North and South America, with focus on the origin of the Caribbean Plate": An International Research Conference, Sigüenza, Spain, Abstracts.

Korhonen, J.V. et al., 2007. Magnetic Anomaly Map of the World. Commission for the Geological Map of the World. Paris.

Laughton, A.S. et al., 1970. The structure of the Indian Ocean. In, Maxwell, A.E. (ed.), "The Sea", v. 4, Part II, New York, Wiley-Interscience, p. 543-586.

Leat, P.T. and Larter, R.D., 2003. Intra-oceanic subduction systems: introduction: In, Larter, R.D. and Leat, P.T. (eds.), "Intra-Oceanic Subduction Systems: Tectonic and Magmatic Processes". Geol. Soc. London Spec. Pub. 219, p. 1-17.

Li., Q., James N.P. and McGowan, B., 2003. Middle and Late Eocene Great Australian Bight lithobiotstratigraphy and stepwise evolution of the southern Australian continental margin. Australian Jour. of Earth Sciences, v. 50, p. 113-128.

McCall, R.A., 1997. Implications of recent geological investigations of the Mozambique Channel for the mammalian colonization of Madagascar. Proc. R. Soc. Lond. B, v. 264, p. 663-665.

McKee, E.H. and Asmus, H.E., 1983. K-Ar ages and the opening of the South Atlantic: Ocean Basaltic rock from the Brazilian margin. Marine Geology, v. 54, issues 1-2, p. M1-M8.

Milani, E.J., Lana. M.C. and Szatmari, P., 1988. Mesozoic rift basins around the northeast Brazilian microplate (Reconcavo - Tucano - Jatobá, Sergipe - Alagoas). In, Manzpeizer, W. (ed.), “Triassic-Jurassic Rifting, Part A”. Elsevier, p. 833-858.

Mohriak, W.U., Brown, D.E. and Tari, R., 2008. Sedimentary basins in the central and south Atlantic conjugate margins: deep structures and salt tectonics: http://www.conjugatemargins.com/abstracts/by_session/1.

Mutter, J.C., M. Talwani and P. Stoffa, 1982. Origin of eastward-dipping reflectors in oceanic crust off the Norwegian margin by subaerial seafloor spreading. Geology, v. 10, p. 353-357.

Nur, A. and Ben-Avraham, Z., 1983. Displaced Terranes and Mountain Building: In, Hsu, K. (ed.), “Mountain Building Processes”, p. 73-84.

Officer, C.B., Ewing, M. and Wuenschel, P.C., 1952. Seismic refraction measurements in the Atlantic Ocean, Part IV, Bermuda, Bermuda Rise, and Nares Basin. GSA Bull., v. 63, no. 8, p. 777-808.

Ogg, J.G., 1995. Magnetic Polarity Time Scale of the Phanerozoic. In, Ahrens, T.J., AGU Reference Shelf 1, Global Earth Physics. A Handbook of Physical Constants, p. 240-270.

Paquette, J., Sigmarsson, O. and Tiepolo, M., 2006. Continental basement under Iceland revealed by old zircons. AGU Fall Meeting. San Francisco, Abstract V33A-0642.

Puruker, M.E., 2007. Magnetic Anomaly Map of the World. EOS, v. 88, no. 25, p. 263

Ramsay, D.C., Colwell, J.B., Coffiin, M.F., Davies, H.L., Pigram, C.J. and Stagg, H.M.J., 1986. New findings from the Kerguelen Plateau. Geology, v. 14, p. 589-593.

Rankenburg, K., Lassiter, J.C. and Brey, G., 2004. The Role of Continental Crust and Lithospheric Mantle in the Genesis of Cameroon Line Lavas: Constraints from Isotopic Variations in Lavas and Megacrysts from the Biu and Jos Plateaux. Jour. Petr., v. 46, p. 169-190.

Rosendahl, B.R., Meyers, J. and Groschel, J., 1992. Nature of the transition from continental to oceanic crust and the meaning of reflection Moho. Geology, v. 20, p. 721-724.

Rudnick, R.L. and Fountain, D.M., 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. Rev. Geophys., v. 33, p. 267-309.

Saunders, A.D. and Norry, M.J., 1989. Introduction. In, Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds.), “Magmatism in the Ocean Basins”. Geol. Soc. London, Special Publication 42, p. vii-viii.

Schlager, S.O., Campbell, J.F. and Jackson, M.W., 1987. Post-Eocene subsidence of the Marshall Islands recorded by drowned atolls on Harrie and Sylvania Guyots. In, Keating, B.H., Fryer, P., Batiza, R. and Boehlert, G.W. (eds.), “Seamounts, islands, and atolls”. AGU Geophysical Monograph 43, p. 168-174.

Schobbenhaus, C. and Bellizia, A., 2001. Geologic Map of South America, 1 - 5,000,000, CMGW-CPRM-DPNM-UNESCO, Brasilia.

Stone, P., Richards, P.C., Kimbell, G.S., Esser, R.P. and Reeves, D., 2008. Cretaceous dykes discovered in the Falkland Islands: implications for regional tectonics in the South Atlantic. Jour. Geol. Soc. London, v. 165, p. 1-4.

Sibuet, J-C., Srivastava, S. and Manatschi, G., 2007. Exhumed mantle-forming transitional crust in the Newfoundland-Iberia rift and associated magnetic anomalies. Jour. Geoph. Res., v. 112, B06105, doi:10.1029/2005JB003856.

Storetvedt, K., 2003. Global Wrench Tectonics. Fagbokforlaget, Poland, 397 p.

Symonds, P.A., Ramsay, D.C., Bernadel, G., Coffin, M.F. and Gladczenko, T.P., 1997, Kerguelen Plateau Law of the Sea Studies. AGU 1997 Fall Meeting, Abstract number T51B-06.

Szatmari, P., 1983. Amazon Rift and Pisco-Jurua fault: their relation to the separation of North America from Gondwana. Geology, v. 11, p. 300-304.

Tatsumi, Y. and Kosigo, T., 2003. The subduction factory: its role in the evolution of the Earth's crust and mantle. In, Larter, R.D. and Leat, P.T. (eds.), “Intra-oceanic subduction systems: tectonic and magmatic processes”. Geol. Soc. London, Spec. Pub. 219, p. 55-80.

Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Rev. of Geoph., v. 33, p. 241-265.

Thiede, D.S. and Vasconcelos, P.M., 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new 0Ar&39AR results. Geology, v. 38, no. 8, p. 747-750.

Vasiliev, B.I. and Yano, T., 2007. Ancient and continental rocks discovered in the ocean floors. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 43, p. 3-17.

Vogt, P.R., Jung, W.Y., Williamson, M.C. and Blasco, S., 2007. Geology and Geophysics of the Bermuda volcanic edifice and Bermuda Rise: synthesis and current research. EGU-GD05 Abstracts, p. 6-7.

Weis, D., Ingle, S., Damasceno, D., Frey, F.R., Nicolaysen, K., Barling, J. and Leg 183 Shipboard Party, 2001. Origin of continental components in Indian Ocean basalts: Evidence from Elan Bank (Kerguelen Plateau, ODP Leg 183, Site 1137). Geology, v. 29, p. 147-150.

Yano, T., Choi, D.R., Gavrilov, A.A., Miyagi, S. and Vasiliev, B.I., 2009. Ancient and continental rocks in the Atlantic Ocean. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 53, p. 4-37.

Whittaker, J.M., Muller, R.D. and Goncharov, A., 2008. Australian-Antarctic rifting. Petroleum Exploration Society of Australia, Eastern Australian Basins Symposium III, p. 271-274.

Wilko, S.E., 2008. http://en.wikipedia.org/wiki/File:North_america_basement_rocks.png

世界磁気異常図とグローバルテクトニクス

WORLD MAGNETIC ANOMALY MAP AND GLOBAL TECTONICS

Karsten M. STORETVEDT
Institute of Geophysics, University of Bergen, Bergen, Norway
karsten.storetvwedt@gfi.uib.no

（杉山　明［訳］）

（訳者注）

著者のK.M. Storetvedt は1935年ノルウェー生まれ．ベルゲン大学で地球電磁気学を学び,英国ニューカッスル大学で特別研究員のとき古地磁気学の分野に踏み入る（1962 ～ 1963年）．ベルゲン大学へ戻り，1973年から同大学地球物理研究所教授．英国・カナダ・オーストラリアの大学で客員教授を勤めたほか，世界15大学で特別講義．1980年代からプレートテクトニクス批判を強め，研究休暇でニューカッスル大学遊学中の1989年に独自のレンチテクトニクス理論を確立（以上,主として本人のウェブページから）．現在は本誌（NCGT Newsletter）編集委員の1人．No. 55の“Falling plate tectonics – rising new paradigm”ではプレートテクトニクスの問題点とレンチテクトニクの概要を述べているが，本号では海底拡大説によらない磁気リニエーションの生成機構と，レンチテクトニクスによる世界磁気異常図の読み方を論じている．なお，本論だけでなく磁気異常図の類はカラーで見ないと十分理解できないので，是非原著に当たっていただきたい．

以下で*1 ～ *12は訳者による注記．

要　旨：最近公表された世界デジタル磁気異常図（Korhonen et al., 2007; Maus etal., 2009）はグローバルテクトニクスを論ずるうえで重要な多くの特徴を示している．しかしながら，世界図（Maus et al., 2009）[*1]では，地域的で小規模な地図との照合が難しいことと，外部磁場[*2]の乱れに起因する問題があることに加えて，大洋域（とくに南半球）におけるデータの少ないことが大きな限界になっている．Maus et al.（2009）の磁気異常図では,十分なデータがないことを補うためにMuller et al.（2008）の大洋地殻モデルにもとづくdirectional griddingを用いて未調査地域にデータを外挿している．このため多くの大洋地域をカバーする磁気異常図は，今日まで確証されていない通俗的な海底拡大モデルにもとづく理論優先なものになっている．事実，これまでに得られている様々な証拠は線状の海洋磁気異常がアイソクロンであるという通俗的な概念が何ら価値のないものであることを示している．それに代わって，大洋だけでなく大陸においても周囲の磁場による誘導が地殻の主要な磁気的特徴を生み出す要因であるという説[*3]が提案されている．これはもともと1960年代に提案されたsusceptibility-contrast modelの復活である．磁気の“縞”は，もともと地球全体に存在している何組かの直線状の断裂（これは新しいグローバルな地質学的理解から指摘されたものであるが）の1つに沿って発達したテクトニックな剪断とそれに関連する磁性鉱物の変質に原因がある．このようなもう1つのテクトニクシステムを作動させるのは慣性に駆動された地球全体のリソスフェアのねじれ運動（wrenching）で，これは極移動のダイナミックなメカニズムと緯度に依存するコリオリの力が引き金となる．中生代後期に地殻の大洋化（地殻下部における剥離もしくは薄化とそれに伴う海盆の沈降）が加速的に進んだ結果，力学的に不安定なアルプス変動期の地球が作り出され，薄くて脆い大洋盆のねじれ変形を含むリソスフェア単位の相対的なゆっくりした動きとなって波及した．顕著な走向移動断層帯に沿って陸側にも連続する海洋磁気リニエーションが存在することと，これらの磁気“縞模様”が直交するネットワークをなすという事実は，汎地球的に発達している直線状の節理･断裂･断層系に調和し，レンチテクトニクス（Wrench Tectonics）の解釈を裏付けている．種々の地球物理学的証拠と海洋の地質データはこの結論を補強している．

*1　原文では（Maus et., al., 2007）となっているが，引用文献からみて（Maus et al., 2009）の間違いであろう．

*2　外部磁場（external field）とは電離層や磁気圏など地表より高いところに起源をもつ磁場．地球磁場の9割以上は地表より下に起源をもつ内部磁場（internal magnetization）によるものである．

*3　磁気異常は実際の地球磁場と標準磁場との差であるが，大陸でも大洋でもこれが帯状または線状に現れる地域がある．海底拡大説では大洋の磁気異常の縞状パターン（リニエーション）はそこに分布する岩体の熱残留磁化の違いを反映した化石磁化であるとしているが，著者は剪断性の地形の起伏に規制されて分布する磁化率の異なる岩体の誘導磁化（induced magnetization）を反映するもの，すなわち現在の周辺磁場に対する感受性（susceptibility）の違いを示すものであると主張している．

***キーワード**：地殻磁化、磁場異常の構造と起源、テクトニック仮説の検証*

はじめに

数10年にわたる海洋と空からの観測，さらには最近の衛星によるデータをとりまとめた地殻磁気信号の全地球的な総括が，デジタル磁気異常図として最近公表されている（Korhonen et al., 2007; Maus et al., 2009）．ここで示されている磁気異常は，地表で観測された磁場から主要な双極子成分と不規則な非双極子成分（どちらも地球のコアにおける過程が原因となっている）[*4]を差し引いて求められる．この相対的に弱い残差磁場は大部分が数100nT以下の様々な値を示し，地表付近に起因するものであることは疑いない．これらの短波長の信号の振幅は計算された標準磁場レベルより一部は正（上），一部は負（下）を示す．多くの大洋地域ではこれらの磁気異常は縞状のパターンを示し，その値は上部地殻内のいずれかの層の磁気的性質とその厚さにより変化する．大陸ではもっと太いパターンが一般的であるが，北米にあるような古い構造帯に沿う線状の異常もしばしば見られる．

*4　地球上の80%程度の地域の磁場は双極子で説明できるが，残り20%の地域はそれ以上あるいは以下の磁場を示す．これを非双極子部分というが，それらは一斉に経度で年0.2°程度（赤道で約20km）ずつ西へ移動している．

十分満足のゆく全地球的な磁気異常図ができるまでにはまだいくつかの問題が残っている（Maus et al., 2009参照）が，公表された磁気異常マトリックスとその大スケールでの分布（これは疑いもなく地球のダイナモテクトニックシステム[*5]に関わるものである）はいくつかの興味ある特徴を示している．しかしながら，大洋（とくに南半球）の未観測地域には特別な問題がある．初版の異常図（Korhonen et al., 2007）では大洋の未観測地域は合成された磁気異常値で埋められていたのに対し，第2版（EMAG2, Maus et al., 2009）では著者らは“Muller et al.（2008）の海洋地殻モデルにもとづくdirectional griddingを用いて未観測地域に外挿した”と述べている．これは言い換えれば，著者らは特定の地域では観測値が少ないことを補うために理論優先のアプローチをとったということであり，海洋磁気リニエーション（今日では年代アイソクロンとみなされている）が大距離にわたって追跡可能ということを当然とみなしている．海底拡大仮説もその他のプレートテクトニクスの基本的な柱も今日まで確証されないままにきており（例えばStoretvedt, 1997 & 2003; Pratt, 2000及びNCGT Newsletterに寄稿された多くの論文を参照），Korhonen et al.（2007）やMaus et al.（2009）に示されているような南の大洋の磁気異常図は大きな留保を付けて取り扱われるべきである．

*5　ダイナモテクトニックシステム（dynamo-tectonic system）：地球の内部磁場の主要因と考えられているコアにおける流体運動とそれを促進する自転運動が地球の大構造を作り出すという造構システムを言っているのであろう．

Keith James（本号掲載論文）は新たに公表された磁気異常図から読みとれることを議論し，大洋内には薄くなった大陸地殻が広く存在し，多くの“十分受け入れられた”プレートテクトニクスが押しつけた様相は不完全なグローバル理論から茎を取り去った実体のないものであると結論づけている．私はこの結論には全く同意するが，大洋の中央に磁気がつけた“縞”の帯が，南半球に中心があって北方へと広がってきた地球の膨張量を示しているという彼の推論を支持するわけにはいかない．決定的な問題は海洋磁気リニエーションが海底拡大と地磁気の極性反転の組合せであるという仮定（確証されていない）とは別な意味を持っているかどうかということである．以下で，私は1）地殻の磁化，2）地表近くの磁気異常の原因　という基本的な2点について簡単な説明をし，3）地殻の磁気信号が大陸対海洋といった広域的な場で相違する点と類似する点を論ずる．新しい地球理論であるレンチテクトニクス（Storetvedt, 1997 & 2003）はこれらの変化に富む磁気異常配列の背後にある地球のダイナミックな仕組を説明することができる．

地殻の磁化の様相

地殻中の磁性物質の大部分は各種岩石中で非磁性珪酸塩の間に散在するわずかな量（数パーセント）の磁鉄鉱（鉄とチタンの酸化物）である．しかしながら，長い地質学的時間にわたって化石（残留）磁化を留めることができるのは，この磁性鉱物のより小さな粒子の一部，すなわちsingle-domain grains[*6]だけである．火成岩は場が冷却して温度が磁鉄鉱のキューリー温度（580℃）以下になると熱残留磁化を獲得する．他方，残留磁化は，火成起源の物質でも堆積起源の物質でも，粒子が化学的な過程を経て成長することによっても（磁性粒子の大きさが磁性的に安定なsingle-domain stateより大きくなるとき）獲得される．最初は冷却磁化がかなり強くても種々の二次的なメカニズム（ゆっくりした冷却後の化学的過程や時間効果）が最初の化石磁化の相当部分を破壊することも多い．このため古い磁化の記録はしばしば多くのベクトルをもった複雑なものとなる．古地磁気学者はこの問題を十分知っており，それ故，しばしば複雑な様相を呈する古地磁気構造を解きほぐすための種々の実験技術が必要となる．岩石あるいは地層が磁化する歴史の間に地球の空間方位は変化し（真の極移動として知られる現象），それによって周囲の磁場の相対的な方位も変化してきた．この過程で磁極も繰り返し位置を変えてきた．したがって，最初はベクトルが1つだけの冷却磁化が複雑な古地磁気記録に代わっている場合が少なからずある．その場合には，多くの岩石に化石磁化を与えた全体的な磁場の効果は著しく弱められるかほとんど失われている．

*6　single-domain grain：結晶には単結晶のように見えても構造や組成が領域ごとに異なる場合がある．このような領域を結晶学ではdomain（分域）といい，単一分域だけでできた粒子（結晶）をsingle domain grainという．

他方，若い大陸性火山岩を源とする磁場が相対的に強い磁場効果を示すこともしばしばある．このことは，大洋中央海嶺に沿ったところでは現在新しい地殻が付加していて，相対的に若い古地磁気場の記録を示す（Dietz, 1961; Hess, 1962），あるいは，変化する地磁気極性が交互する正と負の異常を作り出す（Vine and Mathews, 1963; Vine and Wilson, 1965）という仮定を合理的とみる背景になってきた．この考えによると磁気異常の源は縞状の磁気パターンの下になければならず，海嶺を横断するプロファイルの明瞭さから見て大洋基盤中の比較的浅い深度（数100メートル）から発生していることが予想される．これが正しければ，海底発展の年代を決めるアイソクロンシステムが作られつつあるということになる．この考えはすぐに広まり，1960年代の数年の間に，数1,000kmという長い距離にわたる海洋磁気異常の対比を示す論文が山のように発表された．一旦受け入れられると，種々の確立されたアイソクロンシステムをさらに洗練されたものにすることや確定することが行なわれた．しかし，事実の観察はモデルから期待される値とのはっきりした矛盾を示した．その結果，すべての基本的な原理をその場限りの苦しまぎれの策や“海嶺のジャンプ”のような矛盾を調整できる新しいパラメータを導入することで凌ぐ試みがなされたが（Storetvedt, 1997のレビュー参照），次第に普及してゆくアイソクロン／拡大モデルは基本的に間違っていることが予言された．

海洋の新しい骨組となる基本的な要素の１つ１つについて予期されなかった発見が報告された．Watkins(1968), Watkins and Richardson (1968) は大西洋中央海嶺で得られたデータを検討し，別の磁気的・地質的要因が，Vine-Mathews モデルとは別なモデルで線状の海洋磁気異常を説明できる可能性があると警告した．Watkins and Richardson (1968) は地形的な起伏が調査した地域の理論的モデルを作りあげるうえで重要な役割を果たすことに注目し，“地域的・理論的モデルを作りあげるうえで地形的な起伏は重要な役割を果たしている．したがって,(Vine-Mathews モデルで仮定されているような）一続きの単純で平坦な地殻ブロックは地域的な磁気プロファイルの源とはなりそうにない”と指摘した．大洋中央海嶺から得られたサンプルの多くが低温変質し，相対的に弱い残留強度を示すことは1980年代の後半においてすでに確認されていた問題であった．

拡大モデルがすぐにつまずいた石はDSDP Leg 37の結果で十分例証された（Aumento et al., 1977）．この掘削作戦はアゾレス諸島（Azores Islands）のすぐ南で大西洋中央海嶺の西翼を横断するもので，当初の目的は海底拡大モデルを裏付けることにあったが，その基本的要因のどれについても思わぬ発見が報告された．掘削の結果をレビューしたHall and Robinson (1979) は，サンプリングされた地殻の最上部500mが著しく複雑で，拡大モデルの予測とは大きく異なっているという事実に注意を喚起した．理論と観察結果の間の多くの違いは下記のように要約することができる．

1. 極性が交互する一様に磁化された地殻ブロックという単純なモデルは立証されなかった．
2. 化石磁化が弱過ぎて磁気異常の残留源が見出されなかった．
3. 残留伏角は約30°でモデルにもとづく予測より浅かった．
4. 仮定された拡大パターンに対して主張された岩石学的・層位学的連続性はほとんど完全に欠けていた．
5. シート状の岩脈は見出されず，玄武岩溶岩に挟まれた深成岩複合岩体のみが産出した．
6. 熱流量は驚くほど低く，拡大モデルで予測された理論値を下回るオーダーであった．
7. 岩石の変質はいずれも低温起源のものであった．
8. いくつかの測線から海洋中央海嶺における地殻の生成が連続的であるというよりはむしろ不規則で突発的であることが伺えた．等々！

言いかえると，DSDP 37で得られたデータは，地殻構造の生成には何らの規則性がなく海底拡大仮説に依拠した予測とは著しく異なる結果であったことを示したのである．そしてさらに，Vine-Mathews の仮説を検証しようとしたその他すべての大西洋深海部の掘削は検証に失敗した（要約はStroretvedt, 2003を参照）．海洋地殻にはシート状の岩脈が実際上欠け，入手された玄武岩質物質の磁化強度は磁場特性を説明するには弱すぎたので，海洋磁気リニエーションの本来の源となっているのはどのような種類の基盤岩と磁化特性なのであろうか？

大西洋中央海嶺の代表的な岩石組合せはODP Leg 153 (Cannat et al., 1995) の掘削試料によって明らかにされたように思われる．大洋中央海嶺に沿うその他多数の地点で見出されたように，最も広く認められる岩石は玄武岩ではなく変成したハンレイ岩と蛇紋岩化したカンラン岩であり，後者は固体状態でテクトニックに定置した上部マントル物質であろう．初生的な鉱物はしばしば変質し，一定レベルの変成相を表す二次的なフェーズまで再結晶している．変形の特徴は温度が次第に低下してゆく過程で複雑な歪を受けたことを示しており，破砕帯の周辺が最も強く変質している．ODP Leg 153のサンプルではハンレイ岩がしばしば角閃岩，角閃岩化した変質ハンレイ岩，および暗色鉱物の縞と優白色の斜長石に富む層が互層して片理がよく発達する様々な種類の片麻岩類に変わっていることが明瞭に観察される．Leg 153のハンレイ岩に含まれているジルコンのU-Pb年齢（Pilot et al.,1998）は古いものは1600Maに達した．繰り返し報告されているように（例えばBonatti, 1976; Udintsev et al., 1990; Yano et al., 2009），別種の変成岩も大西洋中央海嶺の全長にわたって豊富に採取されている．

入手された岩石の証拠から海洋の磁気異常はVine-Mathewsが提案したメカニズム以外の何らかの原因で作られると結論せざるをえない．新鮮な玄武岩は海洋盆で

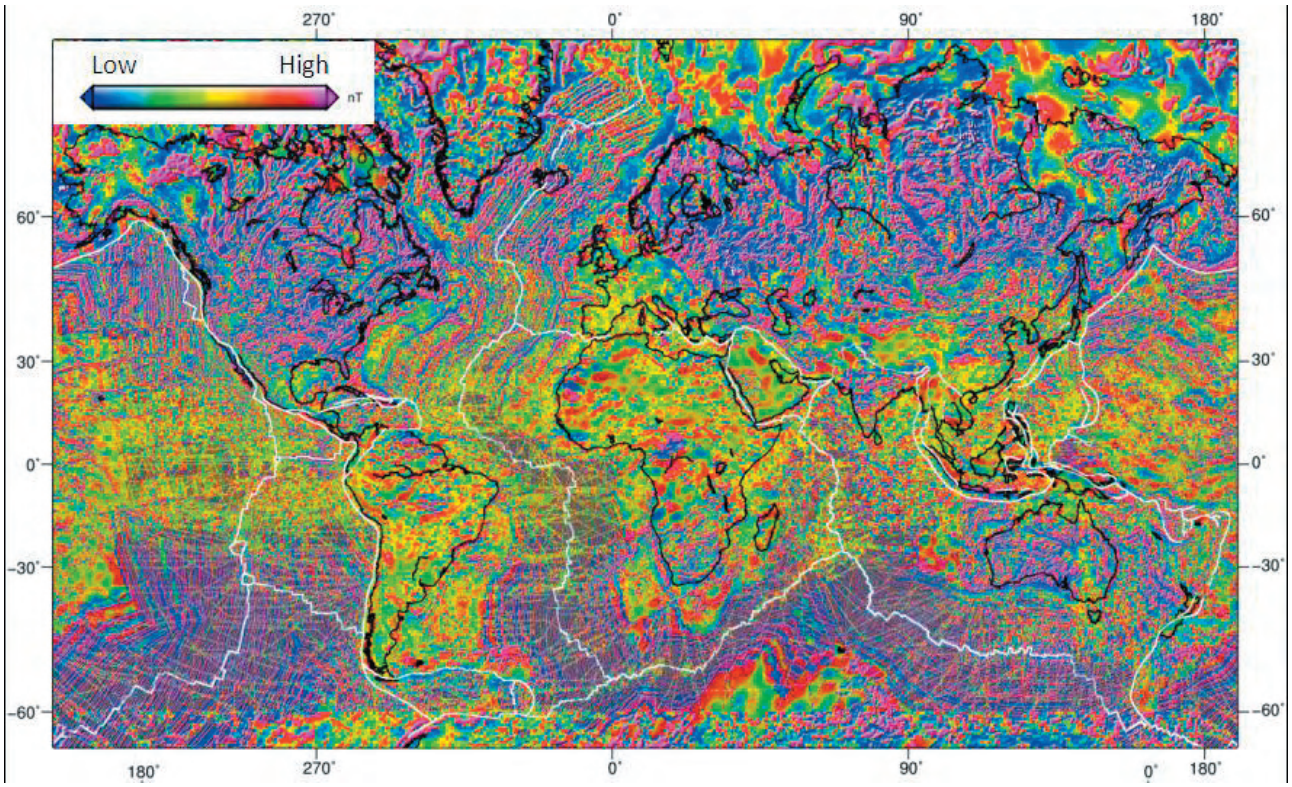


図1 Korhonen et al.（2007）にもとづき，地球磁気異常グリッドをメルカトール図法で投影したもの．赤は場の強さが正（高），青は負（低）を示す．高緯度が全体的に強い場になっているのに対して相対的に弱い異常が赤道に沿った帯になっている点に注目．緯度による明瞭な差異はおそらく磁気異常のグローバルな配列が全体的な磁場（強さは赤道から極へ2倍に増加）による誘導の産物であることを意味しているのであろう．その他詳細は本文参照．

はむしろ稀で，動力変成作用が広範に生じているので，海洋の磁気異常を熱残留（冷却）磁化によるものとすることはできない．明らかにその代わりとなるものは周囲の磁場に誘導された磁気である．もしそうであれば，大陸の異常も海洋の異常も基本的には同じ起源ということになる．赤道での磁場強度（35,000nT）は極地域のそれ（70,000nT）の半分に過ぎないという特徴は，この考えが適切であることを示しており，赤道上のある部分が高緯度でのそれより弱い異常を持っていることをほのめかしている．そのような違いは事実，最近公表された磁気異常図にも表れている（図1参照）．図1に表れているように，やや幅の広い低緯度帯に沿った異常は高緯度のそれに比べて明らかに弱い．他の陸塊に較べて南米とアフリカは全体的に異常が弱いという傾向（それは後述するように海方向へも延長される）もある．しかしながら，アフリカと南米は始生代以後古赤道と多少とも交差することはなかったので，脱ガス - レンチテクトニクスの理論（Storetvedt, 1997 & 2003）に従うと，物質の顕著な貫入がなく，そのため全体的に弱い異常を示すのであろう．しかし，特徴的な海洋の磁気異常リニエーションはどのようにして生まれるのであろうか？

海洋磁気リニエーションとレンチ・テクトニクス

Vine-Mathews 仮説に対しては，海面と海底付近の両レベルでの測定結果を比較した北東太平洋における詳細な磁力計探査でかなり前に警告が出されていた（Luyendyk et al., 1968）．磁気異常場はポテンシャル理論に則って海

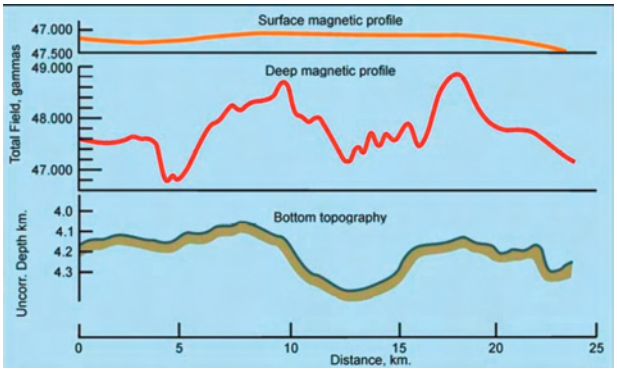


図2 海嶺に直交する方向で行われた北東太平洋海嶺を横断する磁力計探査．海面と海底の両方の深度を同時に探査している．海底レベルでのプロファイルの振幅と海底地形の間に密接な相関性がある点に注目．Luyendyk et al.（1968）を簡略化．

底下の磁力源からの距離が増すにつれて弱まることが示された．どちらのレベルの測定でも，磁気異常のリニエーションは探査地域全体にわたって同じ方向を示し，ナロービーム音響探査は地形的な起伏が線状の磁場パターンに平行していることを明らかにした．さらに，この著者らは海底付近の測定で得られた磁気と海底地形の間にきわめて明瞭な相関性があることを示した（図2）．このような観測結果は見積もられた異常値が構造性地形に起因している，つまり断層で規制された地形的に低いところは磁化も低い可能性があるというヒントを与えた．この点について Luyendyk et al.（前出）は地形的な谷が断層帯に一致することを示した大西洋中央海嶺に関する研究に言及した．

現在入手可能な岩石と構造の証拠を集めたところ，海洋磁気異常はテクトニックな作用で生み出された磁化率の違いと最も密接な関係があるようにみえる．これは Luyendyk and Melson (1967) と Opdyke and Hekinian (1967) によって最初に示唆され，Agocs et al. (1992) によって統計的に検証された susceptibility-contrast model である．潜水艇及び音響探査による観測結果はいずれも，大洋中央海嶺に沿って広範な断裂があり，顕著な構造的異方性を生み出していることを明らかにしている．地震波は海嶺に直交する方向より平行な方向に早く伝播するという事実（例えば Blackman et al., 1993; McDonald et al., 1994）は海嶺に平行した構造的な起伏の重要性を強調するものである．そのような構造環境では，地形的に高いウェッジは断裂の影響をあまり受けず，したがって変質も少なく，鉄 - チタン酸化物（磁鉄鉱）が枯渇していない（非変質）領域が大半を占める．それとは逆に断層で規制された地形的に低いウェッジは断裂の密度が高く，動力変成作用と低温酸化が進み，初生的な鉄 - チタン酸化物（磁鉄鉱）は非磁性的な二次珪酸塩（残留磁気を持たない）に変わる．このようにして変質と酸化の程度が異なった状態にある岩石が交互に配列した帯が現在の磁場に誘導されて様々な程度に極性を帯び，海嶺に平行で顕著な高低のある磁気縞模様を作り出す．

1950 年代の後半においてさえ，北東太平洋の最初の磁気異常マッピングの結果から，Mason (1958) は，大洋の断層運動，広域的に卓越する N-S 方向の磁気異常，サンアンドレアス断層に沿う水平方向の変位という一連の観察結果は，隣接する薄い太平洋地殻のテクトニックな変形を引き金とする北米の西への動きという 1 つの造構仮説で十分説明できる可能性があることを示唆した（図 3 参照）．地殻がねじれ変形をしたという証拠とそれが磁化源を規制している可能性があることは，1) 個々の異常は多少曲がるか波うっている，2) 主要な異常システムに直交して形成された 1 対の異常がある，3) ワシントン州沖では大規模な剪断帯が地殻を斜めに引き裂いているなどの点で初期の図に明瞭に表れている．1960 年代の後半から海洋地殻は比較的強い変成作用と剪断作用を受けたという証拠が増えるにつれて，中部大西洋の中軸谷の翼部から得た岩石を研究していた van Andel and Bowin (1968) は，“多くの薄片に観察される片理は変成作用の間にかなりの剪断作用があったことを意味している” と指摘した．

数 10 の地球物理及び掘削の証拠は（海底）拡大に関連する仮説に衝撃を与えつづけてきた．例えば西大西洋のマルチチャンネル反射法地震探査と屈折法探査（例えば Mutteret al., 1985; McCatthy et al., 1988; White et al, 1990; Morris et al., 1993）の結果は，地殻内部の顕著な反射面がしばしば地殻全体を切って上部マントルにまで伸びていることを明らかにした．拡大に関連したすべての予想を震撼させたもう 1 つの衝撃的な例は，

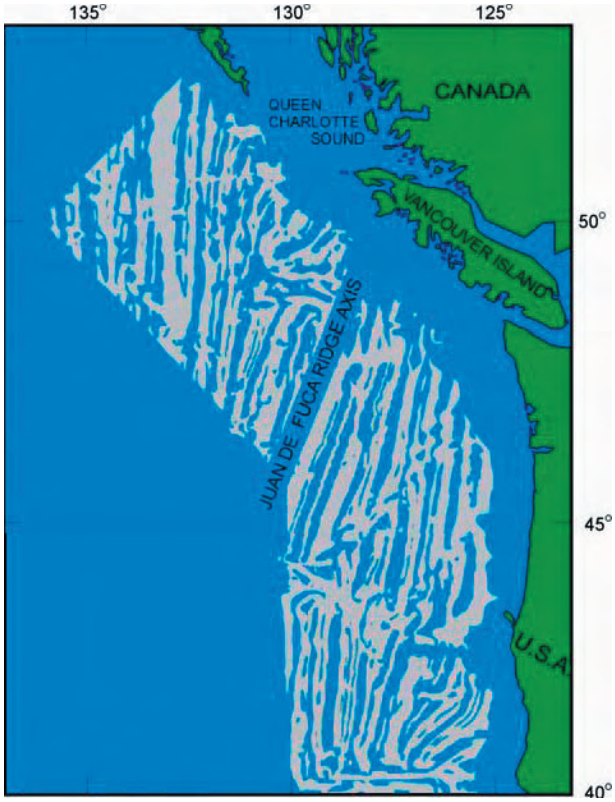


図 3 北東太平洋の海洋磁気異常．正負の異常が白と青の色で識別されている．北東太平洋のこの地域が比較的強い剪断 / ねじれ変形を受けたことを示唆する曲がったり裂けたりしている異常パターンに注目．

ラカディブ - チャゴス海嶺 (Laccadive-Chagos ridge) と東経 90° 海嶺 (Ninety-East ridge) の間に位置し，大きな地震波速度と強い構造変形で特徴づけられた中央インド洋の大規模な構造帯である（例えば Stein and Okal, 1978; Wdeissel et al., 1980; Neprochenov et al., 1988）．そして大洋中央海嶺が海面上に最大規模で現れているアイスランドを忘れるわけにはいかない．この島は 15km 以上 40km までの厚い地殻を有し (Foulger et al., 2003 とその中の参考文献)，火山岩の最上部層は北部大西洋の全幅にわたって広がる幅広く浅い大陸型リッジの上に載っていて（例えば Bott and Gunnarsson, 1980)，少なくとも海洋のその部分は拡大説や膨張説を否定している．最近 Foulger (2006) は少なくともアイスランドの主要部分は大陸性で，ヤンマイエン (Jan Mayen) マイクロコンチネントの南方延長に連続している可能性があると指摘した．拡大仮説にとっての明らかに果てしない悩みの種のリストに加えて，Passerini et al. (1990 & 1991) はアイスランドの中央リフトの軸に平行な走向移動断層に都合のよい証拠として，鏡肌が特徴的な直交する破断 / 節理系のどちらにも観察されることを示した．額面通りに受け取ると，アイスランドに走向移動断層が発達しているのはこの島が広く剪断を受けていることを意味している．そのような見解を支持するものとして Hast (1969 & 1973) による現場測定の結果があり，彼は “アイスランドの基盤岩中の歪は支配的な方向をもった剪断によるもので，島全体を大西洋中央海嶺の方向と平行な方向に剪断するような傾向がある”

と考えた．

このことは大洋中央海嶺の断裂が仮定されているような拡大または膨張の軌跡というものではなさそうだという結論へ導く．そうではなく，大洋中央海嶺系はアルプス変動期の剪断テクトニクスが強く現れた変形帯を表していると推測される（Storetvedt, 1990, 1997 & 2003）．これは慣性で駆動されたリソスフェアの相対的な回転がもとになって，通常は大陸が隣接する海洋地殻と一体になって動くというもので，地球を以前よりはるかに造構的に不安定なものとした広範な大洋化に続いて幅の広い大洋中央海嶺地殻が地球上の新しいタイプの褶曲帯[*7]になるという結果をもたらした．中生代後期にかなりの量の地殻がマントルへと失われたことは地球のリソスフェアに内部からねじれを与え，地球の自転を加速する引き金となった．この過程で主要な大陸はゆっくり回転し，その間に大部分の海洋盆はわずかに形状を変化させた．例えば，北部と南部の大西洋は現在のようにやや扇状に開いた形になり南側の幅が広くなった．太平洋東部や大西洋中央部のように大洋地域のさらに広い範囲でリソスフェアのねじれが以前から存在した直交する断裂系を再活性化させ，その交差を直交からやや斜交する方向に傾けた．とくに，広域的な剪断の主要方向と最も密接に調和した方向の断裂群はメガスケールの断層帯に変わった（Storetvedt, 2003）．中央海嶺の剪断帯の中の地形的に隆起した部分は明らかにそのようなテクトニックな過程とは無関係である．海嶺の隆起はおそらく中新世後期～現世の現象で，それ以前の造構史とは無関係に，大陸の山脈の隆起と歩調を合わせて進行したのであろう（Storetvedt, 2003）．以下では，地殻の磁気場異常の解釈にとって決定的な役割をもち，グローバルテクトニック理論を現実的なものと非現実的なものに識別できるものとなる大洋基盤の構造的な直交性という重要な問題に立ち戻る．

*7　原文では“fold belt”となっているので褶曲帯としたが，大洋中央海嶺を褶曲帯と見る考えには疑問を感じる．

北西太平洋縁辺―レンチテクトニクスが解明した例

北西太平洋[*8]の縁辺区域を調査したCadet et al.（1986）は，種々の地球物理学的技術と深海科学潜水を組み合わせて2組の顕著な構造性リニアメントが存在することを示した．調査された海溝地域に沿って後で行われた地震探査により裏付けられたことであるが，Cande と共同研究者（前出）は付加の証拠をほとんど見出さなかった代わりに，南北方向の海溝軸に平行して走る剪断が分割した断層系が外側縁辺の特徴的な地形に移り変っていることを発見した．縁辺に平行する構造性の起伏を切って縁辺に平行な断層系とオフセットの構造性の組織（走向がN65E で右ずれ）が広く見られる（図4）．これは深い北西太平洋から大陸性の日本まで伸びていて，同じ右ずれセンスの日本で最大規模の剪断性断裂である中央構造線（MTL）（例えば，Ito et al., 1996; Ikeda et al., 2009）の方向に一致している．深海のN65E の剪断性起伏が北西太平洋の磁気リニエーションの軸に平行しているという事実（図5）は，磁気異常がテクトノミネラロジカル[*9]に規制されていて，負の異常帯が最も重要な剪断帯に関連しているという更なる証拠である．この考えはEMAG2 Grid（Maus et al., 2009）を部分的に拡大してみると実体として理解できる：MTL は数100km にわたって負の磁場異常で特徴づけられ，その太平洋への延長部も負の磁気リニエーションに沿っている．言葉を換えれば，susceptibility contrast model は見込みがある解ということである．もう一度強調するが，断層に規制された低温の鉱物変化は，周囲の磁場によって誘導された線状の（断層に平行する）磁気異常を発生することにより磁化の程度が異なる帯を作り出してきた．

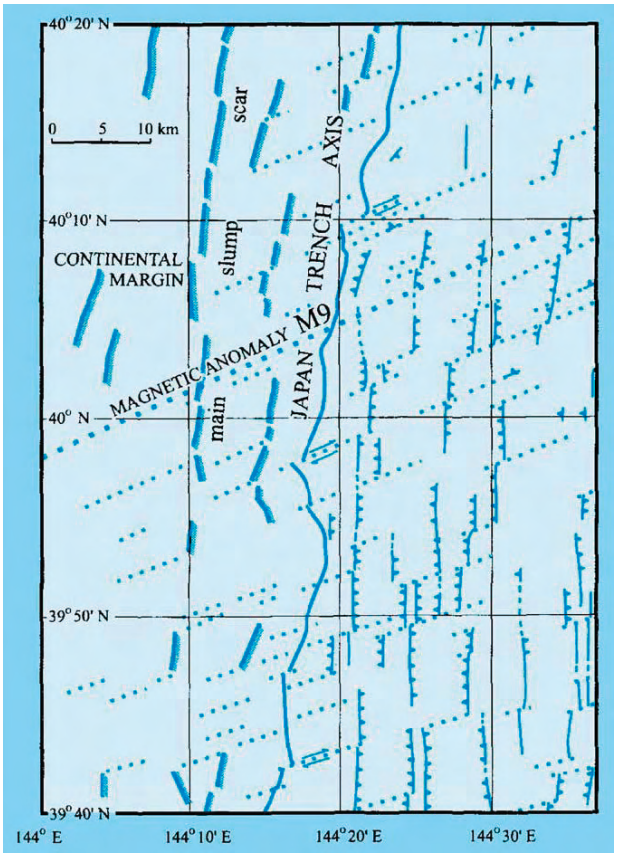


図4　Cadet et al.（1986）を簡略化した東北日本沖の構造図．2組の構造的なリニアメントが顕著．1組の分裂した縁辺断層が地域的な海溝軸に平行に走っている．いっぽう，もう1組の（点線）走向がN65E のセットは隣接する北西太平洋の海底磁気異常にほぼ平行している（図5参照）．後者の構造的な起伏は右ずれのセンスで縁辺に平行な断層を広範に切って構造的なオフセットを作っている．走向がENE で右ずれの大規模剪断である南日本の中央構造線（図5）は明らかに海洋の剪断断層システムが陸域に現れたものである．M9 磁気異常帯は年代アイソクロンの番号とみなされているが，この地域では見当違いあろう．

*8　原文では“northwest Japan”となっているが，副題からして“northwest Pacific”の間違いであろう．

*9　テクトノミネラロジカル（tectono-mineralogical）とは，テクトニックな変形が磁性鉱物を変質させることによって磁化の程度が異なる帯を作るようなメカニズムを言っているのであろう．

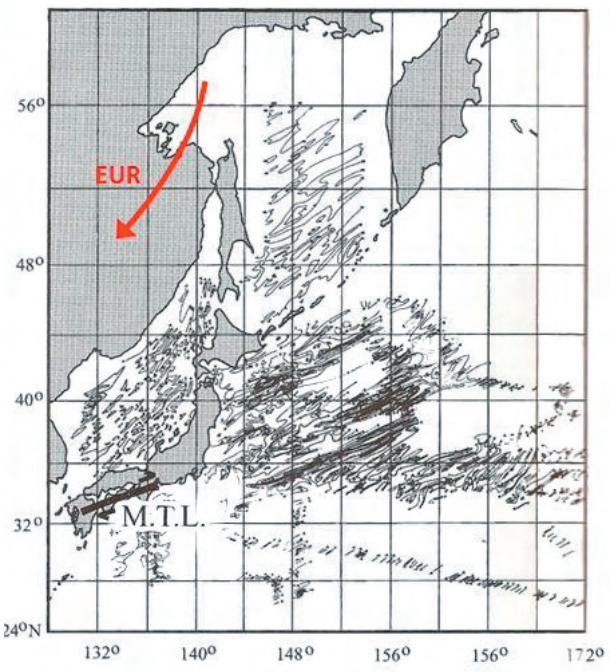


図 5 本州南部にある中央構造線（MTL）は海洋磁気リニエーションの方向と調和的な日本沖の N65E 方向の構造性の起伏に沿っている．顕著な深海の構造性リニエーションの方向が，縁海である日本海とオホーツク海の弱い磁気パターンと非常によく似ていることにも注目．磁気異常は Sugimura and Uyeda（1973）による．曲がった太い矢印はアルプス変動期の最盛期における北西太平洋も巻き込んだユーラシアの回転（慣性駆動）の方向を示す（Storetvedt, 1997 & 2003）．

図 5 から分かるように，日本海及びオホーツク海に及ぶ磁気異常は北西太平洋のそれとほぼ同じ軸を有する．それらの方向性が調和しているにもかかわらず，大洋の磁気異常は縁海のそれより強度が大きく密度が高いという点で際立っている．この違いは地殻の厚さの違い，つまり地殻の脆さの違いということで容易に説明できる．全地球的なねじれの力に対して，薄くて力学的に弱い大洋地殻は，より厚い地殻を有する縁海より強く剪断されやすく，磁気的な表われ方も異なる．両側を著しく薄くなった地殻に挟まれている大陸性の “細長い木切れ” のような日本は，広域的な剪断場の中では構造的変形に対して弱かったと見られる．そのような構造的なねじれを支持する証拠が，アルプス変動期の最盛期の間，列島が現在のような弓形に曲げられたこと示唆する古地磁気データから得られている（Kawai et al., 1961 & 1969）．この大きな構造性の曲げは，変形し断層で画された本州中央部のフォッサマグナ地域（4 ～ 5km の第三紀堆積物で充たされたリフト性の盆地）を作り出した．地震学的研究によると，中央構造線にほぼ直交するフォッサマグナ北部は NW-SE 方向に強く短縮変形している（Takeda et al., 2004）が，これは上述の曲げ仮説に調和している．

中央構造線の太平洋側では，中央構造線が Ar-40/Ar-39 法で決定された鉱物年齢が白亜紀末期 / 古第三紀初期を示す（Dallmeyer and Takasu, 1991）剪断され変成した高圧 / 低温型岩石を切っている．したがって，レンチテクトニクスの理論に従えば，アジアの北東縁に沿う主要な剪断作用はアルプス変動期の最盛期に生じ，その間，古北半球はある程度の地球回転の加速に応じて図 5 の太い矢印で示されるような慣性に駆動された時計回りのねじれを受け，東アジアの太平洋縁辺に沿う多数の剪断性変成帯を作り出した．慣性に駆動された大陸の回転を含む緯度依存の古リソスフェアのねじれ（大部分はゆっくりした）は薄い（そして力学的に弱い）大洋地殻をも構造的に変形させた．その結果，直交するセットをなす地球規模の断裂はどちらも，小規模な局地的曲げや回転を伴いながら，互いに影響を及ぼしあってトランスプレッション（transpression）とトランステンション（transtension）[*10] が組み合わさった過程を経てきたのであろう．この多様な構造変形の効果は，図 6 に示されているように，北西太平洋をカバーする磁気異常図（Quesnel et al., 2009）によく現れている．顕著な特徴は南本州沖の太くて延長性の良い NNW-SSE 方向の異常帯で，これは日本の右ずれ断層である中央構造線（東ないし北東の深海へ延びている）に対して直交し，やや扇状に開いた構造を示している．図 6 に見るように，MTL の方向に配列した磁気リニエーション帯（A）は，南本州沖の直交し相対的に頻度の低い帯（B）より頻度が高い．右ずれの MTL に対するこの違いから，高頻度帯はトランスプレッションの条件下で，他方，低頻度帯は全体的にトランステンションの条件下で形成されたと結論づけることが合理的であろう．

*10 トランスプレッション（transpression）：地学事典では “斜め短縮帯に作用する応力系．地殻変形の過程で短縮と走向移動変動の中間段階に位置する．” と定義されているが，“斜め方向に圧縮が作用する応力系” と言った方が分かりやすい．同様に，トランステンション（transtension）は，“斜め方向に伸長が作用する応力系” と定義できる．このような変形を受けると 2 本の断層で挟まれた部分には断層に斜交した地塁・地溝状の起伏ができる．

北の大陸を取り囲む負の磁気異常の意義

上で検討した少数の例と世界中に見られる無数の例から，薄くて力学的に脆い大洋地殻はアルプス変動期の種々のねじれ変形の場となったことは疑いようがない．高くそびえる大陸は，この慣性に駆動された地球のリソスフェアを構造的に再編成するうえで重要な役割を演じた．ユーラシアと北米は時間的に同等に赤道の北に位置してきたが，最初は緯度依存のコリオリの力に影響されて時計回りの回転をしたものと考えられる．古地磁気解析によると，ユーラシアの回転は最終的には 25° 前後に達した（Storetvedt, 1990, 1997 & 2003）．ユーラシアの回転は，例えば Zemtsov（2007）がまとめた結果で分かるように，近年の GPS 速度に調和している．北東アイスランドの観測点（島を通る大西洋中央リフトの東側）をも含む西ヨーロッパのすべての GPS 速度ベクトルが一貫して北東方向を示すというよく知られた事実はこの動きに調和するものである．ユーラシアの時計回りの回転は Scheidegger（1963）によるサイスモテクトニク的な

とりまとめによりかなり以前に示唆された．アジアは相対的に南ないし南西に向かって動いた（図 7A）．アジアのこの時計回りの動きは北西太平洋のベニオフ帯の再活性化，左横ずれの変位となって現れたであろう．この予測は南日本沖の南海トラフの東部における潜水艇調査結果によって支持される（Le Pichon et al., 1994）．例えばこの著者らは海溝に平行な剪断があることを示した．図 7B はそれらの模式的な断面を示し，図 7C はマルチビーム音響探査で得られた海溝下部斜面域の全体的な構造解釈を示す．2 つの拡張性海盆の形から，Le Pichon と共同研究者は海溝に沿った大規模な左横ずれの走向移動があると推定した．さらにこの剪断が作用したという

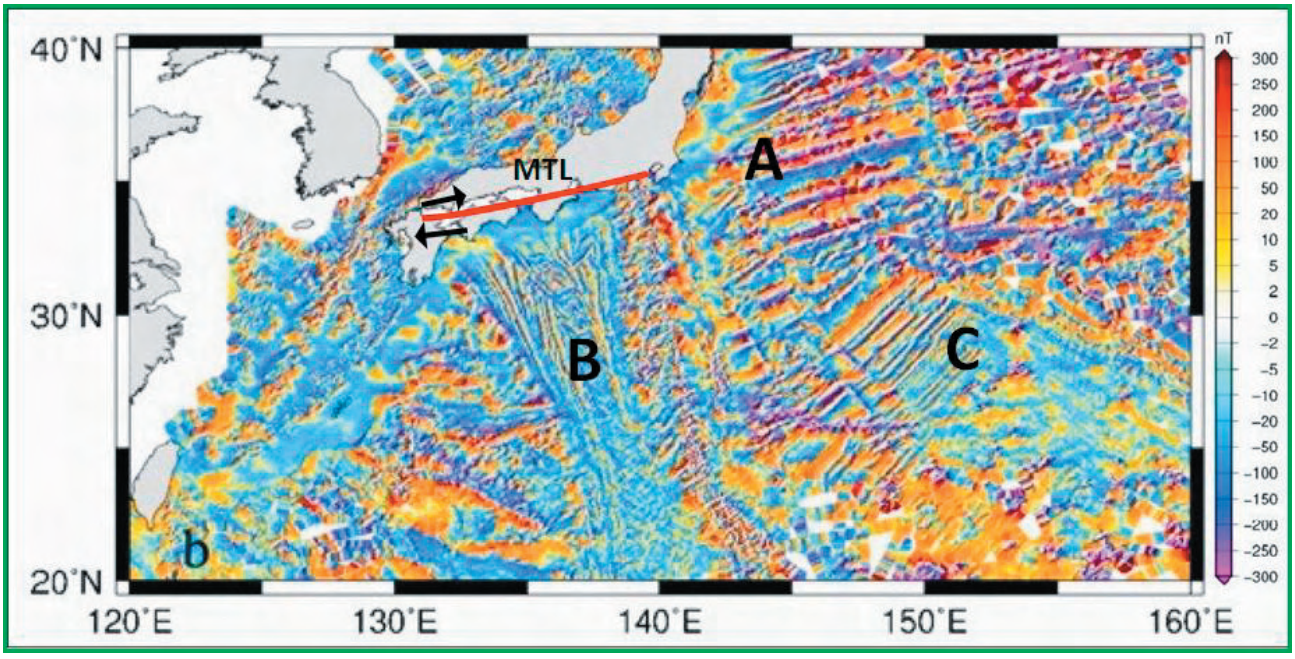


図 6　Quesnel et al.（2009）による磁気異常図．本州の北部沖（A）と南部沖（B）で異常帯が陸に直交している点と，さらに東方の外来ブロック（C）の存在に特に注目．2 つの異常方向を有し，境界部がやや乱れている C ブロックはおそらく大洋内部においてブロックが回転した例で，リソスフェアのねじれシステムの中では予期されないものではない．

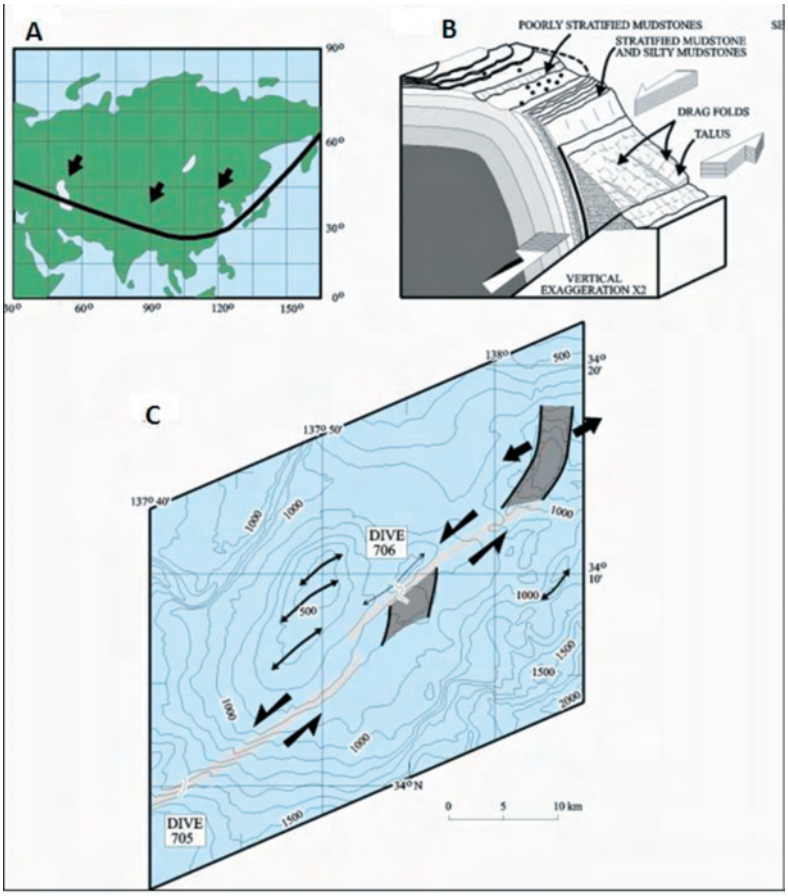


図 7　Le Pichon et al.（1994）の南日本沖の南海トラフ東部での潜水艇調査の結果（B & C）と結びつけて見た Scheidegger（1963）のアジアのテクトニクスを示すスケッチマップ（A）．詳細は本文参照．示唆された東ユーラシアの縁辺に沿った左水平ずりの剪断は古地磁気と空間測地学的証拠に調和し，アルプス変動期と現在のユーラシアの時計回りの回転（図 5 参照）に都合がよい．北日本沖の深海で広範に認められる剪断による起伏は日本の主要な断裂帯とほとんど完全に一直線をなし（図 4・図 5），北部のリソスフェアの全体的な時計回りのねじれの中にあり，広域的なベニオフ帯に沿った長年にわたる左水平ずりの動きは，大洋と大陸の構造的な連続性を著しく弱めはしたが，重要なものではない．

見方を支持する特徴として，斜面に平行な崖で断ち切られたドラッグ褶曲が観察されたことを記載した（図 7B）．

推定されたユーラシアの回転は，南側と北側の負の磁気異常帯で区切られた幅の広い円形の帯によっても証拠づけられている．図 8A から分かるように，この重要な異常帯は北東アジアの縁辺を構成し，中国の中央部と南部の主要な部分，チベットとヒマラヤを通り，アルプス山脈のアジア・ヨーロッパ部分に沿って西へと続いている．北西ヨーロッパでは幅が狭まって 1 本となり，最後はスカンジナビアの西縁に沿ってぐるりと回る．ユーラシアを取り巻く磁気異常帯は北大西洋北部で分岐し，その枝は西ヨーロッパの GPS 速度ベクトルの大部分と完全に整列するということは重要な事実である．回転するユーラシア・リソスフェアの境界帯はマントルから湧きあがる液体の通り道として自然に裂けていく．こうして，この剪断帯に沿った酸化作用と岩石の変質（鉄酸化物は容易に枯渇し，非磁性珪酸塩により置換されたであろう）がユーラシアを取り巻く負の磁気異常帯の背後で最も可能性の高い岩石変化として現れる．そのような大規模な剪断帯に沿って，海盆の形成を伴う小規模なトランステンションの場がところどころに発達するのは避けられない．このような条件下で，延性的な上部マントル物質は，深いが小規模な地殻の断裂を通して上方へ向かう構造的な力（数 100℃の温度で）を受ける．構造的な作用を受けた超塩基性物質（上部マントル起源）は一般に変質して蛇紋岩に富む浮力の大きな岩石になり，しばしば火山岩や堆積岩を伴って出現し，オフィオライトと呼ばれている．この帯に沿うその後の剪断はしばしばこうした外来岩体を絞り出し，ヒマラヤ - アルプスの構造的な起伏に沿う現在の不連続パターンを作り出した．

この慣性に駆動された西方へのスウィングの間，磁気異常図（図 8B）から判断して，高くそびえる北米陸塊

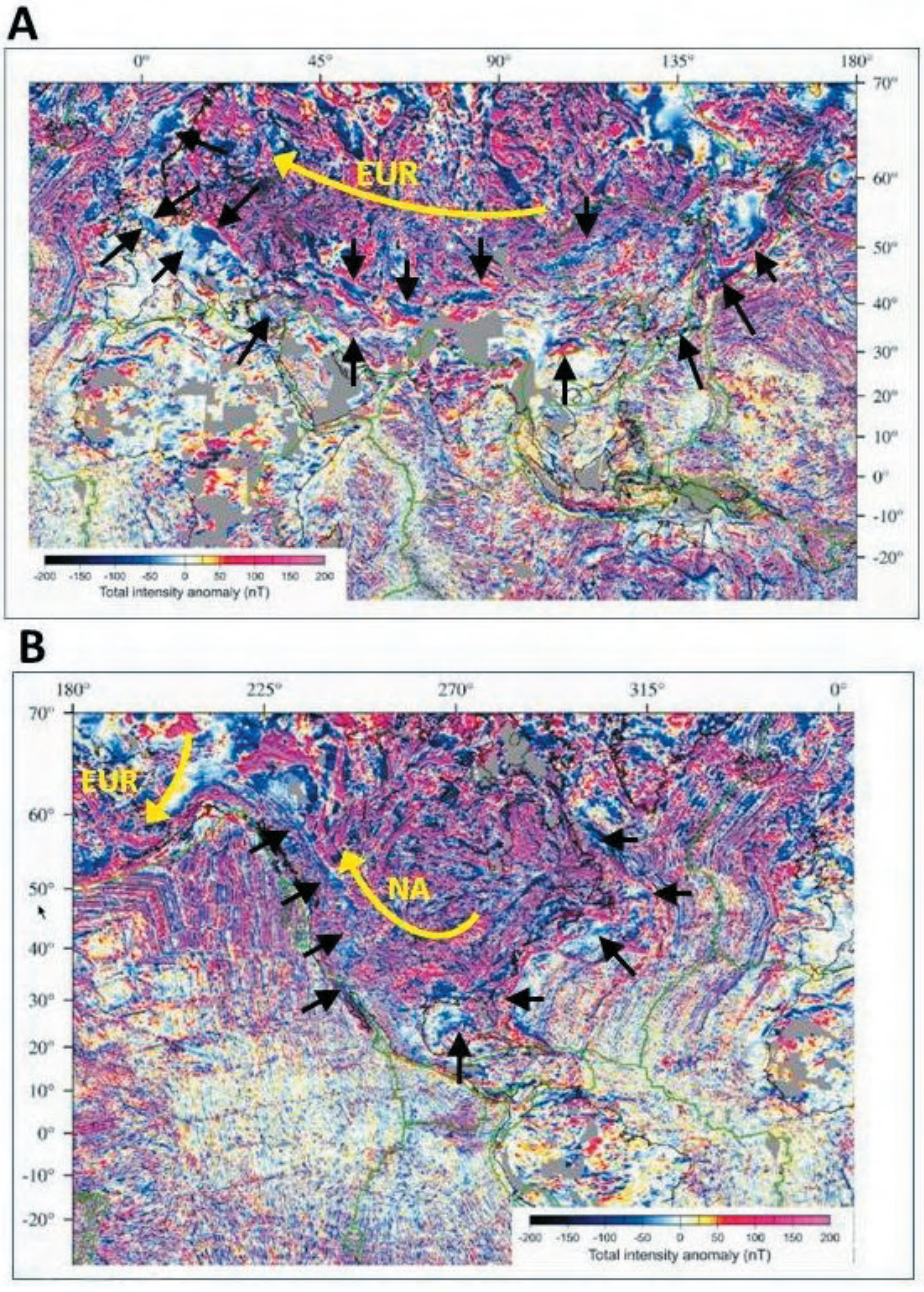


図 8　A 図：世界デジタル磁気異常図（Maus et al., 2009）のユーラシア地域．取り巻いている負の重力異常帯（青）に注目．短い矢印はその境界部．これに類似しているがやや不明瞭な異常帯が北米を取り巻いている（B 図）．これらのメガスケールの磁気異常は，大きな矢印で示したユーラシアと北米という 2 つの陸塊がアルプス変動期にそれぞれゆっくりと時計回りに回転した結果がもたらした磁性鉱物の剪断に伴う変化に関連するものである．この古い地球半球のねじれで，アイスランドと北大西洋の中部海域は主要な剪断境界となった．もう 1 つの構造的な不連続（境界）は，太平洋の北端に見られ，アリューシャン弧のすぐ南におけるテクトニックな剪断性の起伏と海洋磁気パターンの鋭い変化に現れている（B 図の左上）．詳細は本文参照．磁気異常セグメントは Maus et al.(2009)．GMT のモルワイデ投影．

は最も有力な造構要因となったが，北米テクトニックブロックは北大西洋だけでなくアイスランド西部をも明らかに含んでいた．また，その動きの中で北米は北東太平洋のベニオフ帯を踏みつぶし（Storetvedt, 2009 & 2010），周辺大洋における目立った断層の再活動と剪断効果をも引き起こした．首輪状の北米の負の磁気異常帯は北極圏カナダのバフィン湾を通ってアパラチア地域を南下し，この大陸の西縁に沿って北に転じている（カリフォルニア湾を通り，次いでロッキー山脈に沿ってさらに内陸へと向かう）．事実，北米の内部変形は空間に基礎を置く測地学的技術によって繰り返し検出された（例えばFallon and Dillinger, 1992; Argus and Gordon, 1996）．例えば，Argus and Gordon (1996) はコロラド高原の観測地点のVLBI *11 データを検討し，“これらの地点の速度をまとめるとユタ東部付近を極にして時計回りのスウィングが存在する”と結論づけた．この検討で特に重要なことは，北米の時計回りのスウィングが隣接する太平洋に沿って著しい南北方向の剪断をもたらし，その結果，北東太平洋にかなり強い線状の磁場ができるという点である．我々はアリューシャンのすぐ南で磁気異常の方向が突然変化することに注目している．ここではユーラシア・ブロックが明らかに構造規制して太平洋北東端の長年の“謎”である折れ曲がった磁気異常パターンを作り出している．

*11 VLBI:very long baseline interferometry（超長距離基線干渉計）の略．クェーサー（準星）からの電波を地球上の異なる地点に設置されたパラボラアンテナで受信し，電波の到達時刻の微小な差を計測することにより，地点間の距離や相対位置を精密に計測する技術．（地学事典）

中生代後期のリソスフェアの顕著な薄化と深海の発達により，地球を取り巻く元々の厚い地殻は現在の大陸と大洋のモザイクに変わり，推測される地球の回転加速が多様な地球全体に及ぶテクトニックな効果をもたらした．その後のアルプス変動期の最盛期に，ダイナモテクトニックの全貌は緯度依存のコリオリの力に規制された地球リソスフェアの西向きのねじれという観点で描写できる．この過程で，古北半球は一定程度の時計回りのねじれ，古南半球はそれに対する反時計回りのねじれをそれぞれ受けた（Storetvedt, 1997 & 2003）．緯度依存のコリオリの力は，極でゼロ，赤道に向かうにつれて増大するが，古赤道帯に沿う全体的にトランスプレッションな環境と西方へのテクトニックドラッグを生み出した．この過程で，力学的に弱い大洋地殻は特に影響を受け，幅広い中央剪断帯（新しい型の褶曲帯）が形成された．これは中新世後期に隆起して地球を取り巻く海嶺系となった．この緯度依存の変形の中で，介在する大洋盆がある程度の形状変化をしただけでなく，大陸の回転も生じた．古北半球は2つの支配的なテクトニックユニット（北米とユーラシア）に分裂した．小さくて不安定なテクトニックブロックである北米はユーラシアよりやや大きく時計回りに回転し（Storetvedt, 2003参照），中部大西洋の西側は顕著なトランステンションの場に変化した．

相対的な運動の中での大西洋の大陸：大洋のねじれと磁化

アルプス変動期が最盛期を迎える前の白亜紀後期に，大西洋の形状はほぼ図9（Storetvedt, 1997, 2003 & 2009）に示されているようなものになっていたと考えられる．地殻下部の薄化とそれに関連する海盆の形成は中生代の間に促進された．リストリックな断層と海方向へ傾斜する堆積物ウェッジを特徴とする大陸縁辺は，始生代に地球規模で刻印された平行とほぼ垂直の直交断裂系ネットワークが顕在化したものである既存の弱線に沿って発達した．ダイナモテクトニックな変動に駆動され，地球慣性モーメントの変化で相殺されながら，汎地球的な直線状の断裂系は再活動／拡大及び強化という長い歴史を経てより若い表層の各層へ伝わっていった．これらの基本的な断裂系の初生的な方向は，始生代後期の概略の古経度と古緯度に対して，それぞれNNE及びESEに近いものであったと結論づけられる（Storetvedt, 2003）．北及び南大西洋の縁辺は基本的にNNE方向の断裂のセグメントに沿って形成され，他方，相対的に幅の狭い赤道大西洋は初生的には交差する2方向の断裂により形成された．こうような方法で大西洋の全体的なS字型が説明できる．さらに，この大洋の先アルプス変動期の形から，初期の大陸縁辺は現在の状態よりもっと平行性が強かったとい

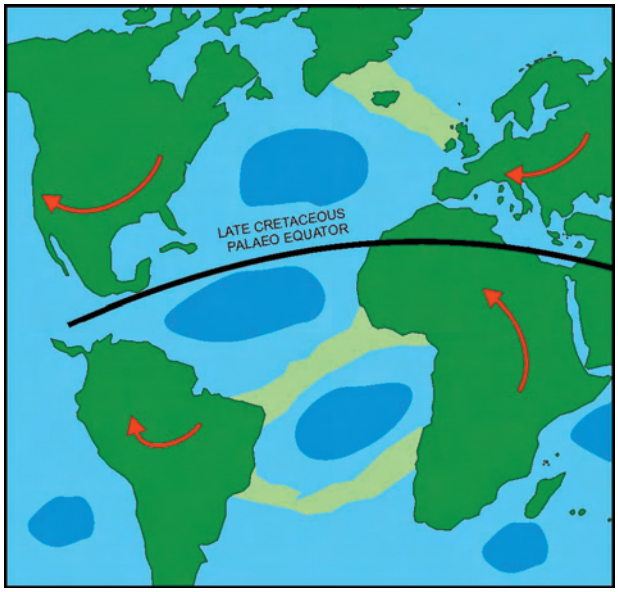


図9　アルプス変動期の慣性に駆動された白亜紀の大西洋を挟む大陸の想定された形（詳細は本文参照）．発達した大陸縁辺は現在のそれよりさらに平行性が強いことと，時間的に同等な赤道が中部大西洋を切っていることに注目．対応する地理上の極は太平洋の最北端と南大西洋の南部にある．大陸の間に介在して発達する大洋は，地殻下の薄化とそれに関連した古い先カンブリア地殻のアイソスタティックな沈降という過程を通して遅くとも白亜紀後期までに形成されたもので，より抵抗性の高い横断海嶺によって区切られている．これらの目立った大陸の残存物は穏やかな大陸の回転を伴う白亜紀後期の剪断過程（曲がった矢印で示す）の後で大部分は分裂し消えてしまったが，大洋を横断する北西ヨーロッパ-グリーンランド海嶺のみは明らかにわずかな大洋化の影響を受けただけで大部分は今日でも無傷で残っている．アルプス変動期の変革の後，世界中の大洋地域は広範な剪断変形を受け，北及び南大西洋海盆は現在の南に開いた形を獲得した．

える．しかしながら，最初の大陸地殻のたくさんの断片はマントル過程を受けても白亜紀中期までは比較的未消化な状態にとどまっていた．すなわち，薄化が進行し玄武岩や蛇紋岩化した上部マントルの超塩基性岩が浸透したにもかかわらず，大洋をまたぐ多数の大陸性障害物はなお存在し続け，古大西洋をいくつかの独立した亜海盆に分けていた．このため，白亜紀中～後期の地域的に閉じた海洋地形は，十分立証されている黒色の（酸化しない）深海堆積物の堆積に関連した淀んだ大洋環境[*12]を作り出した．

*12　海洋低酸素事変または無酸素事変（ocean anoxic event）のこと．一般には生産性の高い海域や富栄養化の起こりやすい内湾・沿海で生じやすい．遠洋域でも海底地形の変化や大陸の分裂などにより，底層流の海洋表層への湧昇によって生じる．この現象は有機炭素濃度の高い黒色泥岩で代表される．（地学事典）

白亜紀の間，地殻がマントルへと次第に失われていったことから地球の回転が一定程度加速された（データと参考文献はStoretvedt，2003参照）．今日までに大陸ブロックは薄くて力学的に弱い大洋地殻で取り巻かれ，それらは地球の歴史で初めて慣性により駆動され，大部分はゆっくりと相対的に回転した．可動性というのは，その場での回転，ほぼ大陸を中心とした運動という意味である点に注意することが重要である．つまり，陸塊はマントルに深く下ろしたその根に関しては安定を保った．テクトニックユニットはそれぞれ大陸リソスフェアと大洋リソスフェアのどちらも含んだ．それ故，構造的な不連続は一般により広い大洋地域で発達し，最も強く剪断を受けた地殻帯は今日の大洋中央海嶺の場であった．これらの海嶺がアルプス変動期の地殻を切る剪断帯の役割を果たしたと見れば，地球についての慣習的な考えは根こそぎになる．

アルプス変動期の慣性効果，別な言葉でいうと個々のテクトニックブロックを壊しそれらをその場で相対的に回転させる力は，古緯度・サイズ・形状・構造的な相互作用に応じて様々であった．この過程で相対的に見て狭い赤道大西洋の地殻は非常に大きな歪を受けて構造的に引き裂かれた．したがって大洋のこの部分には典型的な海洋磁気縞模様の基礎となる顕著な地形造構性のリニアメントが見られない．全体的な剪断を生み出したことに加えて，ねじれの力が幅広い大洋中央帯に沿って現在の北及び南大西洋の扇状に開いた形を作り出した．大西洋をはさむ大陸の動きをhttp://www.youtube.com/watch?v=TFz4dY-pUpQに動画で定性的に示した．

大西洋の大部分では海嶺に平行な線状の磁気異常系が認められることは疑いのない事実であるが，磁気異常図は真実がそれよりさらに複雑であることを示している．図10の磁気異常図で分かるように，中央大西洋の海嶺に平行な磁気異常の起伏は南に向かって不明瞭になる．つまり，中央大西洋の最も幅の広い部分で磁気リニエーションの大洋全幅にわたる垂直のセットが比較的明瞭である．これは大部分がアルプス変動期の北米海盆における超トランステンションな条件に直接関連する顕著な横断

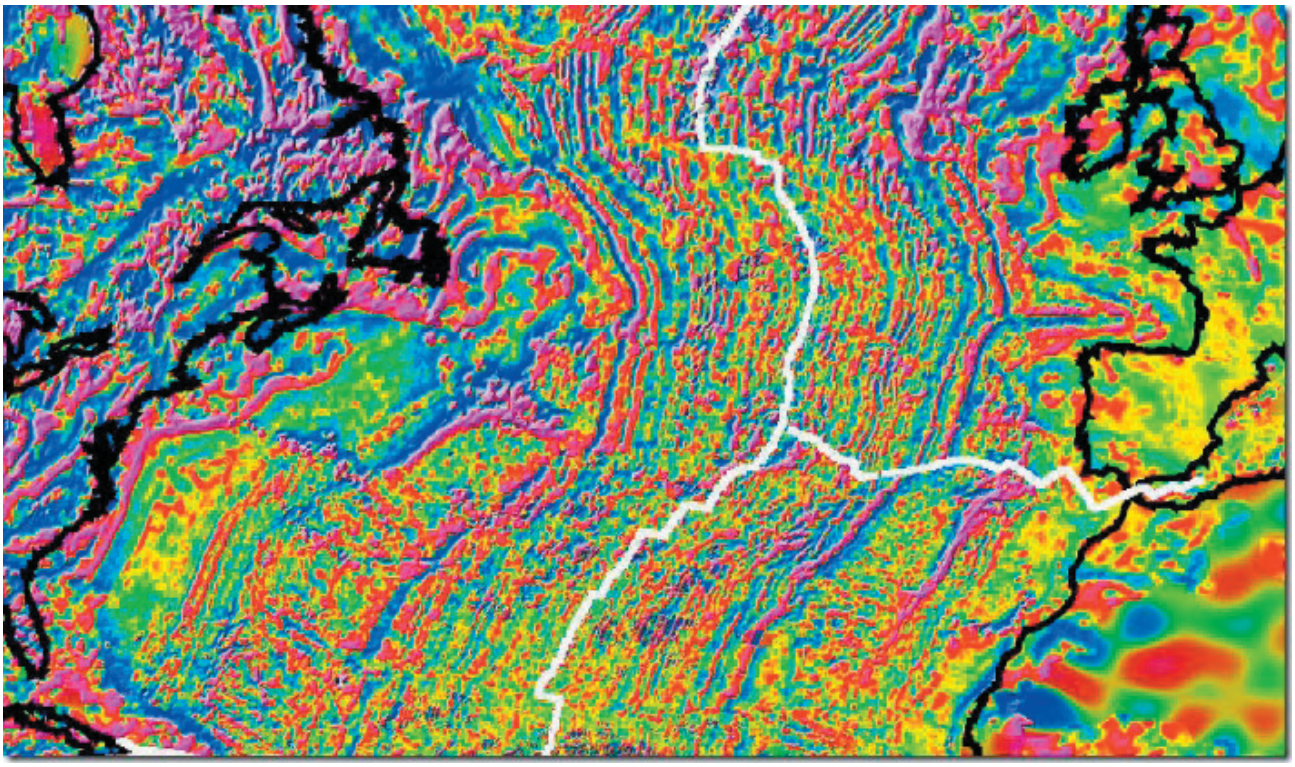


図10　Korhonen et al.（2007）による中部大西洋のデジタル磁気異常図．（大西洋のこの部分では）顕著な横断性の断裂帯に調和して走る大洋を横断する磁気異常がかなり明瞭に現れていることに注目．大西洋中央海嶺の波うったような形，ほぼ垂直な異常パターン，大洋を横断する曲がった断裂帯と磁気リニエーション及びオフセットをなす横断リッジなどすべてがレンチテクトニクスの理論に従った予測と調和的である．

断裂帯やテクトニックな地形で裏打ちされた（大陸の）縁辺と縁辺を結ぶ異常システムである．図 10 から分かるように，地球規模の構造的なねじれは明らかに地殻の薄い中央大西洋の直交する 2 組の断裂 / 断層帯に影響を及ぼし，海嶺に平行及び垂直の磁気異常に対するテクトノミネラロジカルな基礎を作り出している．レンチテクトニクスの枠組みでは，大洋を横断する波型の断裂 / 異常系に伴っているかなり明瞭な直交性の磁気パターンは，関連する各リソスフェアの相対的な回転に起因するものと考えられる．この過程で中央大西洋は全体的にトランステンションな環境になり，直交する断裂のどちらのセットも活性化して直線状の磁気異常系が作りだされた．

磁気リニエーションの直交ネットワークは通俗的な年代アイソクロン概念をはっきりと無価値にする．アイスランドの海嶺に平行及び垂直な断裂のどちらにも見られる鏡肌（Passerini et al., 1900, 1991）はこのような結論と一致する．アルプス変動期のねじれ過程の間，深海の直線状の断裂は，当然ながら大陸上で見られるそれよりはるかに再活性化・拡大しやすかったであろう．このため，中新世後期及びそれ以降，大洋中央海嶺の地形的高まりは，まさにその性質によって著しくジグザグな形になったのであろう．

地殻の海洋化の過程とその後のリソスフェアのねじれは少なくともスポット状の玄武岩質火山活動を伴ったが，基盤から蛇紋岩化したカンラン岩・ミロナイト化した蛇紋岩・角閃岩及び変質ガブロが豊富に採取されたことから（Bonatti, 1976 & 1978; Bonatti and Honnorez, 1976; Cannat et al., 1995; Robinson et al., 1989; Gracia et al., 2000; Beard et al., 2009 その他多数），玄武岩は本当に磁気異常の最も重要な源なのだろうかという疑問が生じている．時々 4km 以上の厚さの蛇紋岩に富むセクションが採取されてきた（Bonatti, 1978）．Bonatti は超塩基性岩を上部マントルから地表レベルまで垂直に運び上げることのできるメカニズムを検討し，他の上部マントル及び地殻下部の岩石に較べて蛇紋岩の大きな可動性を強調した．カンラン岩が蛇紋岩化される間，体積は約 1/3 膨張する．この膨張が上方に向かって貫入する駆動力となり，その過程で岩体は粉々になる．

Raleigh and Paterson（1965）及び Raleigh（1967）による実験結果に従って，Bonatti（1978）は蛇紋岩類は地殻基底に予測される温度では他の地殻構成岩石に較べて弱く，上部マントルのカンラン岩の蛇紋岩化はその密度を同じ深度における他の岩石のそれより低くし，密度の逆転は蛇紋岩体を重力的に上昇させると述べた．さらに，地球全体のねじれは当然ながらアセノスフェア内部の静水圧を増加させ，固体状態の上部マントル物質を地表へと押し出し，可能ならばいつでも大洋の断裂帯に構造的な突出部を作り出す．事実，Bonatti（1976）は蛇紋岩の突出部が線状の磁気異常の源になる可能性があると述べている．彼はさらに，大洋の蛇紋岩類は，大規模な断裂帯に沿って配列する大きな蛇紋岩突出部と海嶺軸に平行な帯に定置したより小さい蛇紋岩体を伴って，直交するパターンで分布すると結論づけた．関連したものとして，大西洋中央海嶺の超塩基性およびハンレイ岩質岩石は地殻が薄くなった地域に多く露出しているという観察報告がある（Tucholke and Lin, 1994）．

磁鉄鉱は蛇紋石と普通に共存する．カンラン石・輝石が（水と）反応してマグネシウムに富む蛇紋石が形成されるとき鉄が放出される（Wenner and Taylor, 1971）．しかしながら，実際の磁鉄鉱と蛇紋石の関係はずっと論争の的になってきた．Wicks and O'Hanley（1988）は磁鉄鉱が蛇紋岩化の過程で別な道筋をたどって反応物にも生成物にもなり，あるいは消極的な媒介物質にもなりうることを観察した．大西洋中央海嶺から得られた変形した蛇紋岩に関する最近の研究で，Ribeiro da Costa et al.（2008）は溶解 - 再結晶の過程はおそらく強い剪断応力のもとで行われたと結論づけた．酸素同位体を用いて推定された温度は 300℃をかなり下まわり，実際の蛇紋石鉱物（アンチゴライト）は高温の累進的な変成作用の結果ではないことが推測された．彼らは，蛇紋岩化は高度の海洋変成環境か，低度で強い変形環境のどちらかで生じると結論づけた．Wenner and Taylor（前出）は，蛇紋石 - 磁鉄鉱地質温度計の研究から大洋で産出する蛇紋石の平衡温度を，リザーダイトで 130℃，クリソタイルで 185℃，アンチゴライトで 235℃と見積もった．

大洋性の蛇紋岩が全体として固体状態で定置すると仮定すると，これらの岩石が熱 - 化学的な化石磁化を効果的に獲得するメカニズムは考えにくい．これに対して，アルプス変動期の大洋リソスフェアの広範なねじれは，種々の磁鉄鉱の枯渇を伴って重要な断層に規制された低温の変質 / 酸化を引き起こし，周囲の磁場による誘導が現在の負と正の縞状の磁気異常に対応したテクトノミネラロジカルな基礎を作り出したに違いない．アルプス変動期の剪断作用が重なって，中新世後期から鮮新世にかけて，世界の大陸の山脈と同時に大洋中央海嶺の地形が形成された（Storetvedt, 2003）．この隆起の後期に現在目立って見える海嶺のジグザグなパターンが生じた．

大洋中央海嶺の頂部（しばしば中軸谷を伴う）に沿う例外的に薄い地殻と驚くほど低い熱流量はそれらが正の磁気異常を示すことをうまく説明する．それ故，源となる岩石（おそらく蛇紋岩化された上部マントルの超塩基性岩）は磁場の観測レベルに近いところに分布しているのであろう．さらに，通常観察される指の形をした頂部の磁気異常（それに対して拡大モデルは何ら適切な説明をしていない）は海嶺に沿った剪断を想起させるに十分であり，それが鉱物の変質と断層に関係し磁場強度の変動も勘定に含めたコントラストのある磁化を作り出した．

レンチテクトニクスによると，赤道大西洋は南大西洋よりはるかに強くアルプス変動期のテクトニックなねじれを受けた．南大西洋のリソスフェアの歪がゆるやかで

あったことは，おそらく磁気異常図でその部分が大西洋の他の部分より滑らかになっている理由であろう．南西アフリカと南米南東部の海側には，大洋の中央部に見られる特徴的なリニエーションを除くとかなり幅の広い磁気的に静穏な帯が容易に認められる．しかしながら，この２つの大陸境界帯のより綿密な調査から，海嶺に平行する磁気異常のセットに垂直に走る異常帯だけでなく大洋を横断する弱い異常帯もまた見られるということが明らかになった（例えば本号の James 論文の Fig. 3)．このように，白亜紀以前に２つの大陸を結んでいた陸橋の残存物であるウォルビス海嶺 (Walvis Ridge) とリオグランデ海膨 (Rio Grande Rise) は磁気的に静穏な区域として未だにその姿をとどめている．

我々は以下のような結論に達する：
大西洋の両側の大陸塊は，常にほぼ現在の相対的な位置を保って存在してきた．これらの大陸はマントル深くまで発達した根によってとどまってきたが，それぞれのリソスフェアの蓋は，北及び南大西洋の南に開いた現在の形を作り出しながら慣性に駆動されたゆるやかな位置変化を行ってきた．この過程で薄くなった大西洋の地殻はねじれ変形を受け，現在のＳ字形の大西洋を形成すると同時に，既存の交差する断裂ネットワークを再活動させた．さらに，大洋基盤の変形は，海洋磁気異常の基礎，言いかえれば現在の磁場による誘導を作り出しながら，断層で規制されたコントラストのある磁化を作り，大西洋中央海嶺に沿うものと垂直なものという両方向性をもった線状のシステムを形成した．この解釈では線状の磁気異常はテクトニックな剪断システムを表しており，トランスプレッションとトランステンションの環境でできた起伏を識別している．このようなことに基づけば，磁気異常を年代アイソクロンとすることは作り話であり，間違っているであろう．

南半球のテクトノマグネティックな様相

アルプス変動期の最盛期には太平洋のリソスフェアのテクトニックなねじれは，何よりもその大きなサイズによってその他の大洋のねじれとは異なっていた．そして，周囲の個別に回転する大陸塊によって引き起こされたねじれ効果は，（大西洋やインド洋の場合のように）その広大な大洋全体にわったっておだやかに作用したと推測される．この推測は太平洋における線状の磁気異常が周囲の大陸の縁辺部に限られているという事実によって支持される．さらに，レンチテクトニックのシナリオに従うと，太平洋地殻の全体的なかなりおだやかな構造的ひずみは磁気異常の空間分布にも反映されたに違いない．例えば，より狭い大西洋における構造的ひずみは東太平洋のそれより全体としてずっと強いものであったろう．それ故，大西洋中央海嶺は東太平洋海膨より海嶺に平行な断裂系の密度が高く，磁気異常帯の幅にもそれに応じた違いがあることが期待される．実際，磁気異常図における２つの大洋の間のそのような違いは観測にもとづく事実である（詳細はStoretvedt, 1997 と参考文献参照）．したがって，磁気異常の波長の違いが遅い拡大速度（大西洋）と速い拡大速度（太平洋）を反映しているという近年の信仰は事実にもとづいたものではない．

アルプス変動期のリソスフェアのねじれの重要な結果は太平洋の東半分（この部分は地殻の薄化が最も進み，それ故大規模な負のジオイド異常帯で特徴づけられている）にメガスケールの構造的なリニアメントを発達させたことである．谷とリッジを構成するこれらのテクトニックな起伏 (Smoot, 1999 参照）は通常ほぼ直交している．さらに重要な構造的に強調された地形は南米に近づくとはっきりする．南東太平洋海溝があまり大きなテクトニックウェッジによって特徴づけられていないので，対応するベニオフ断層は南米のおだやかな時計回りの回転の間，目立って再活性化したようには見えない (Storetvedt, 2009 参照）．南米の南部と隣接する太平洋リソスフェアの一定幅の区域は一体化したテクトニックユニットとして運動したに違いない．その場合，より薄く力学的に弱い太平洋地殻は相対的に強い構造的な変形を受けやすかったであろう．43°S 付近でチリの縁辺にぶつかっている著しく断裂の発達したチリ海嶺 (Chile Ridge) はこの予測を証明している．この大陸がどの程度海側まで目立ったテクトニックな効果を及ぼしたかは推測の域を出ないが，それらの東太平洋海膨との交差点においては，チリ海嶺もイースター島の大規模な断裂も渦巻きのような構造を形成している．それはあたかも剪断応力が２つの交差点でマイクロブロックを引き裂くねじれを生み出し，その後，分離した地殻ブロックがテクトニックな回転を受けたように見える（図 11)．

古地磁気と地質のデータ，放射性年代の証拠によると，アルプス変動期の慣性に駆動されたねじれの力は南の大洋に大規模な雁行状の左ずれ剪断帯を作り出した．その中には南太平洋における非常に大規模な構造的不連続であるエルタニン断裂系 (Eltanin Fracture System)，強くテクトナイズされたドレーク海峡 (Drake Passage) が含まれ，さらに延びて南大西洋の南部を横断し，中央インド海盆 (Central Indian Basin) の幅広い剪断帯につながっている (Storetvedt, 1997 & 2003 の参考文献と考察を参照）．このメガスケールのねじれ過程では，相対的に小さく構造的に不安定だった南極大陸が時計回りにかなり回転した．この大陸の元々の地理的環境では南極半島は南太平洋に向いていた．この時，南極点は現在のグリッドで 55°S の南大西洋に位置し，回転前の南極半島は亜熱帯にあたっていた．この半島が低古緯度に位置していたという推測は化石の証拠と調和する．アレキサンダー島 (Alexander Island) の大きな葉をもつ植物，旺盛に成長する樹木にふさわしい幅広い年輪，恐竜類・海亀類・肺魚を含む動物群，これらはすべて亜熱帯～温帯の気候を示す (Jefferson, 1982; Axelrod, 1984; Francis, 1986 その他多数）．別に議論したように (Storetvedt, 1990, 2003, 2010)，南極大陸（北極も）の現在の極地環境は始新世／漸新世より以前には生じていなかったが，その後に極移動という大きなイベン

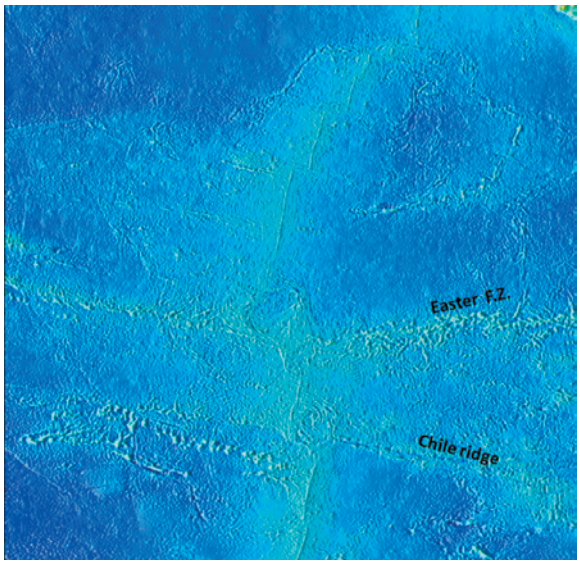


図 11 衛星データにもとづく地球規模の地形図の一断面（System Development, Inc., Boulder）．東太平洋海膨の 2 つの渦巻き状の接合点に焦点を当てている．それらが顕著なテクトニック構造であるチリ海嶺とイースター断裂帯との交差点という位置にあることに注目．

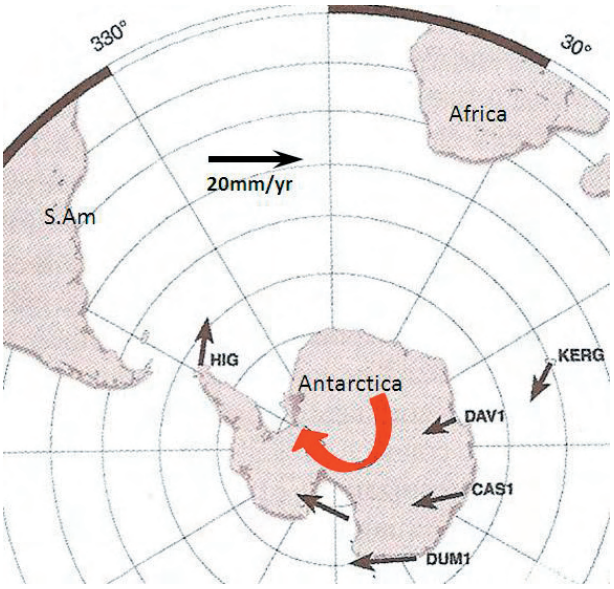


図 12 Bouin and Vigny (2000) による南極大陸の縁辺に沿って位置する観測点の GPS の水平速度ベクトル．時計方向のテクトニックな回転が明瞭で，それ故，この大陸は現在もアルプス変動期の最盛期と同じセンスで回転している．

ト（地球，とくに大洋においての広範な造構火成活動が引き金となった約 35° という地球空間方位の変化）が生じた．南極大陸縁辺に沿う GPS が定める現在の速度ベクトル（図 12）はアルプス変動期の回転がなお有効に働いていることを示している．

南極大陸の大きな回転は，周囲の大洋との間に際立った境界断層を作りださなかったので，隣接する大洋地殻には当然なこととして顕著な構造的引きずりと断裂作用を引き起こし，北向きの基本的な断裂系を高い密度で破壊した．加えて，南極大陸と南米の間の左ずれ変位により，その間に介在するドレーク海峡は，断層で規制された海盆の沈降，縁辺のテクトニックな隆起，動力変成作用（Storetvedt, 1997 & 2003）を伴って広範に剪断作用を受けた．スコチア弧（Scotia Arc）は圧縮フロントになり，このことは白亜紀後期にその地域が種々の貫入変形と広範な深成岩の貫入を特徴としているという事実に調和する．そのほか，白亜紀末期～第三紀前期には褶曲衝上帯の形成だけでなく走向移動断層も発達したことが記載されており（Dalzielb et al., 1989），南シェトランド諸島（South Shetland Islands）に沿っては部分的に緑色片岩，青色片岩，曹長石・緑レン石・角閃石の組合せからなるスコチア変成岩複合岩体が分布する（Tanner et al., 1982）．

白亜紀後期から第三紀後期にわたる鉱物年齢（Tanner et al., 1982; Herve et al., 1987; Grunov et al., 1987; Dalziel et al., 1989）は変成年代を表すと考えられるが，広範に及んだ変形と再結晶を反映するものである．例えば，ブランスフィールド海盆（Bransfield Basin）内に位置するスミス島は，延性変形を繰り返し受けた全体が青色片岩相の変堆積岩と変塩基性岩からなる（Smellie and Clarkson, 1975; Rivano and Codrtes, 1976）．そのような高い変形環境ではドレーク海峡－スコチア海地域の磁気異常図が著しく無秩序で何らの規則性も示さないことは驚くに当たらない（Korhonen et al. の PDF 版参照）．この様子は強くテクトニック化した赤道大西洋と似ていないことはない．しかしながら，裂けたスコチア海の北縁に沿う広範な負の磁気異常帯は，まさに期待通り，主要な剪断境界に沿っている（上述の他の例を参照）．スコチア海地域の地形イメージを図 13 に示す．

インド洋に接する南極大陸は多くの大規模な非地震性（大陸性）のリッジと台地で知られており，それに似た準大洋化した大陸地殻の延長が南アフリカの南部にある．磁気異常図は，このようにアフリカ大陸の南端沖に大陸のような磁気異常パターンをもつ 2 つのよく似た地域が存在することを示している．この地域はまたも左ずれセンスの大規模な（大洋を横断する）アグルハス－フォークランド断裂帯（Agulhas-Falkland Fracture Zone）によって明瞭に分離されていて（本号の James 論文の図 3 参照），これは明らかに南大西洋の南部を横断している延長性のよい剪断帯の北の境界を表している．ここで概略説明したレンチテクトニクスの理論に従えば，南西インド洋海嶺（SW Indian Ridge）は動力変成作用の明瞭な証拠を伴っているはずである．南西インド洋海嶺によって代表されるアフリカと南極大陸の間の構造境界はおそらく南西インド洋の多くの準大陸性ブロックの間で締め付けられてできたものであろう．もしこれが正しいとすると，NOAA の衛星イメージで簡単に証明できる推定であるが，この海嶺はその後顕著な剪断を発達させたに違いない．岩石の証拠はこの見方とよく一致する．

ドレッジされた岩石は，インド洋西部の下部地殻が広域的な変成作用によって複雑に影響を受けた苦鉄質ないし

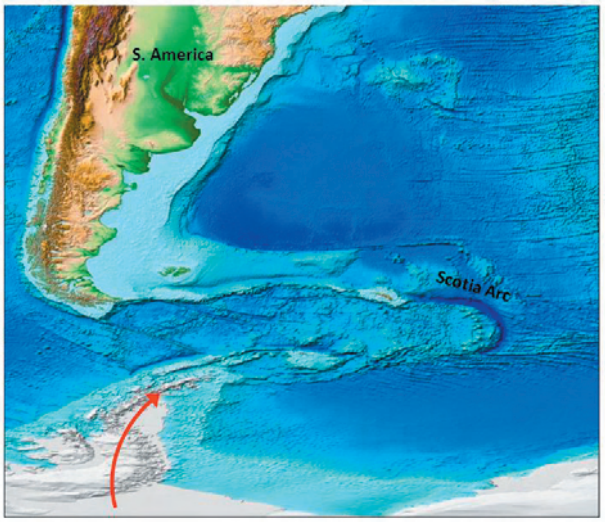


図 13 剪断されたスコチア海の地形イメージ（NOAA Satellites and Information, Boulder より）は，アルプス変動期の慣性に駆動された，南極大陸と周辺大洋の時計回りの顕著なねじれ（曲がった矢印で示す）を含む南のリソスフェアのねじれのテクトニックな産物である．この過程で，スコチア弧はトランスプレッションの前線となり，南極半島に沿った縁辺断層帯はテクトニックな堆積性トラフに発展した．

超苦鉄質の火成岩複合岩体に富んでいることを示している（まとめは Storetvedt, 2003 を参照）が，南西インド洋海嶺上での深海掘削の結果はこのことをさらに十分に実証した．アトランティス II 断裂帯（Atlantis Ⅱ Fracture Zone）に平行して隣接するリッジの下部地殻セクションを掘削した ODP Leg 118（Robinson et al., 1989）は蛇紋岩・マイロナイト化した蛇紋岩・角閃岩・変ハンレイ岩のような基盤岩類を得た．ハンレイ岩は圧砕と交代変質がしばしば観察されることから，ある温度範囲にわたって圧砕性の変質を蒙り，他方，脆性破壊は高い密度で発達する脈に反映されていると記載されている．Site 735 では非変形またはフォリエーションに乏しいハンレイ岩が，極めて高い応力勾配を示唆する眼球片麻岩とマイロナイト化した変ハンレイ岩に直接隣り合って産する．この眼球片麻岩とマイロナイト化した変ハンレイ岩は波動消光を示す斜長石と輝石が互層する縞を伴っていることがしばしばある（Robinson et al., 1989）．

ODP site 735B で掘削されたセクションは 500m を越えるハンレイ岩からなり，将来の掘削に備えて孔は閉じられなかった．後に掘削孔は ODP Leg176 で 1508m まで延伸された（Natland et al., 1998）．Leg 176 セクションの 1004m では 250 以上の珪長質の脈が見られ，高角と低角の両方の剪断帯が多数報告された．Natland et al.（前出）によると変成作用と変質は 2 回あり，最初の段階では動力的な環境でグラニュライト相～角閃岩相の変成岩が形成され，次の段階では別な断裂セットと関連する多くの後生的なスメクタイト，炭酸塩鉱物及び沸石とぶどう石からなる脈を含む低温変質の産物を作りだした．

海洋中央海嶺沿いには予測されたシート状の岩脈はほぼ完全に欠けていたことと，大洋の環境下で大陸性の動力変成岩が豊富に見出されたこと（過去 10 年にわたる NCGT Newsletter の多くの論文を参照）は拡大モデルや膨張モデルにとって謎とされてきた．ODP Legs 118, 176 が南西インド洋海嶺で見出したことは少しも問題になることではない．掘削孔のデータがプレートテクトニクスの予想に合わないというやっかいな例は，不正で“特別な意図をもった解釈”を必要以上に生み出すきっかけとなり，グローバル地質学における風土病となってきた．地球科学が根本的な理論的転換を必要としていることは火を見るより明らかである．

世界デジタル磁気異常図で現在も将来においても果たさなければならない根本的な仕事は，海洋磁気リニエーションが海洋底の発達を示す年代アイソクロンであるという考えを葬り去ることである．このインチキな概念は地球科学の健全な発展にとって損失となってきた．

結論と考察

上述の通り，我々は深海地域とそれらの磁気異常信号の新しいテクトニックな説明に賛成するということを繰り返し論じてきた．中生代の次第に進行する大洋化プロセスに重ねてかなりの地殻がマントルに失われたことにより，角運動量保存の法則に支配された地球は自然とその動きが変わってきた．地球の空間的方位がかなりぎくしゃくと変わること（極移動）に加えて，その回転が全体的にある程度加速することが避けられなかった．これらのダイナミックな変化は次のアルプス変動期の大きな構造変革の主要な原動力であったとみることができる．こうして，白亜紀後期に地球の回転速度が増大したことは，緯度依存のコリオリの力を作用させ，それまでの強くて不均質だった地球リソスフェアをねじり，構造的に引き裂くきっかけとなった．アルプス変動期のリソスフェアのこのようなねじれは，大陸より力学的に弱くて薄い地殻をもつ大洋の領域により強い剪断と構造的な曲げをもたらした．至るところにある直交する断裂のネットワークはとくに再活性化し，メガスケールの（大洋を横断する）断裂帯を解体した．

この過程で著しく不均質なリソスフェアは壊されていくつかの構造単元になり，そびえ立つ大陸ブロックは主要な慣性駆動体として働いた．その結果，陸塊のその場での回転（大部分はゆっくりした）はそれに隣りあう大洋地殻も巻き込んだ．さらに，個々の回転するリソスフェアの間の構造的不連続が広大な大洋地域に波及し，“大洋中央”をアルプス変動期の新しい型の褶曲帯に変えた．方向が基本的な直線状の断裂系に一致している顕著な“大洋中央”の剪断は，その元々の方向がねじれによってしばしば変形されてはいるが，断層で規制されたマグネトミネラロジカルな変化を受けてきた．このようにして磁気感受性が様々に異なる帯を作り出した岩石の変質は，現在の磁場に誘導された特徴的な海洋磁気リニエーションの鉱物学的な基礎とみられる（大陸と同様，

海洋においても）．新しい解釈では，海洋の磁気の縞は支配的な構造性の起伏を反映したものであるとしている点に注目することが重要である．手にした証拠から見て，これらの異常を海底拡大のアイソクロンまたは地球膨張の証拠と考えることは何の価値もない．大洋の磁気リニエーションが大陸の顕著な剪断帯の水平方向への延長であることを示す例は，直交する（断裂の）ネットワークとともにこの結論を補強するであろう．レンチテクトニクスの体系では，構造的不連続は広い大洋地域にわたって発達し，わずかに曲がったメガスケールの構造線をしばしば作り出し，ときには隣接する大陸にまで途切れることなく連続するという点に注目することが重要である．

Keithは，年代アイソクロンを表す大洋地殻の残り50%―線状の磁気異常で特徴づけられる内部（中央部）―は地球膨張に関連するものと考えている．しかしながら，磁極移動の古地磁気学的（玄武岩による）時間記録を表しているという通俗的な年代アイソクロンの概念は，あらゆる決定的な検証によって承認されないままできた．実際に，60～70年代における多くの失敗した試みにより，それらの検証はずっと前にまったくお手上げとなった（例えば，Storetvedt, 1997 & 2003）．拡大仮説は失敗として消え去る代わりに，社会－政治的必要性と出世の道具のためのドグマになって地球科学の健全な発展に混乱をもたらしてきた．線状の海洋磁気異常は事実であり，地磁気極性の逆転はもう1つの事実であるが，この2つの事実は何ら明瞭な結びつきを持っていないと思われる．これらの磁気異常が拡大関連の解釈を信用できないとする決定的な観察事項の中には，1）シート状の岩脈複合体がほとんど欠けている，2）求められる古地磁気特性をもった基盤岩の永続性の問題，3）大洋だけでなく大洋中央海嶺に沿ってさえ産出する多くの大陸性岩石，4）これらの海嶺に沿う一般的には低い熱流量などがあり，これはマントル対流及び水平方向に拡大する玄武岩地殻が何ら働かなかったことを物語っている．私の見るところ，拡大と膨張に関するモデルはそれらが依って立つ地球物理学的な土台が間違っている．

彼の論文からみて，Jamesは大洋中央海嶺も古い大陸と動力変成岩の組合せを持っているという事実に十分気がついているように思われる．したがって，すべての大洋地殻が沈下し化学的に変化した大陸地殻であると勧めることは彼にとっては論理の飛躍にはならないに違いない．大洋中央海嶺に沿って産する大陸性及び動力変成岩の問題を避けるために，彼は“著しく広がった大陸地殻は・・・・・たくさんの蛇紋岩化したマントル（多くの磁気リニエーション）を伴っている”ことについて言及している．また，彼は海洋磁気リニエーションをまだ年代アイソクロンとみなしているように見える．これは私を困惑させる．なぜなら，もし蛇紋岩化した上部マントル物質が磁気異常に寄与しているなら，そのような“注入された”固体状態は冷却磁化を運ぶことはできないからである．私は蛇紋岩化した上部マントルの超苦鉄質岩は海洋磁気リニエーションの原因になるということに賛成する．おそらくその主要な要因となる岩石であろう．しかし，その場合においても多くの深く浸透した意見をひっくり返すことになるsusceptibility contrast modelを避けることは難しいのである．しかしながら，Jamesは大洋拡大と磁気極性の反転の通俗的な概念にもとづいて，南の海では多数認められる磁気リニエーションが北へ向かうにつれて少なくなるのは地球膨張が北へ伝播しているためであると説明している．

私の別な解釈は，北へ向かって消滅する南の大洋における相対的に数の多い磁気リニエーションは基本的にはアルプス変動期の南極大陸の顕著な回転によって基本的に直交する断裂の南北方向のセットが壊れたことにより引き起こされたもので，このような発展の基礎は南半球における地殻の大洋化が北半球より進んだ段階に達し，南の海洋地殻をテクトニックな破壊と再活性化に対してより傷つけやすくしていたという事実にある．かくして，南太平洋はそのはるかに大きなサイズにより必然的に南大西洋よりはるかに多数の磁気リニエーションを持つことになる．Keith Jamesは彼のいう膨張が作り出した南大西洋の再配置では，2つの負の磁気異常帯を，隣りあうアフリカと南米に沿って伸びた“大陸的な”異常域に結びつけている．ただし，かなり重要な分裂前の負の磁気異常に対しては何も物理的な説明をしていない．ここで展開する解釈では中央の縞状の帯を結ぶ2つの負の磁気異常は，線状の磁気異常で特徴づけられる強く剪断された中央大洋帯と南大西洋に隣接するどちらかといえば非変形の地殻帯の間のテクトノミネラロジカルな境界を表す．さらに，Keith Jamsesは，残りの大陸に対するより明瞭で全体的に高い強度の異常と比較すると相対的に弱い南米とアフリカの異常パターンに対しても何ら説明していないが，これはレンチテクトニクスの体系では容易に説明のつくことである．

謝　辞：Keith Jamesには啓発的・友好的な議論をしていただき，感謝している．40年以上にわたって私の熱心な技術助手を勤め図の作成をしてくれたFrank Clevelandと，技術的に行き詰まったときにいつも私を進んで助けてくれた娘のIngel Helenに感謝する．

文　献

Agocs, W.B., Meyerhoff, A.A. and Kis, K., 1992. Reykjanes Ridge: quantitative determinations from magnetic anomalies. In: New Concepts in Global Tectonics, Texas Tech. Univ. Press, Lubbock, p. 221-238.

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.

Aumento, F. et al., 1977. Initial Reports of the DSDP Leg 37. US Govt. Print. Office, Washington D.C.

Axelrod, D.I., 1984. An interpretation of Cretaceous and Tertiary biota in polar regions. Palaeogeog. Palaeoclim.

Palaeoecol., v. 45, p. 105-147.

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.

Blackman, D.K. et al., 1993. Seismic anisotropy in the mantle beneath an oceanic spreading centre. Nature, London, v. 366, p. 675-677.

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

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

Bonatti, E. and Honnorez, J., 1976. Sections of the earth's crust in the equatorial Atlantic. J. Geophys. Res., v. 81, p. 4104-4116.

Bott, M.H.P. and Gunnarsson, K., 1980. Crustal Structure of the Iceland-Faeroe Ridge. Jour. Geophysics, v. 47, p. 221-227.

Bouin, M.-N. and Vigny, C., 2000. New constraints on Antarctica from GPS data. Jour. Geophys. Res., v. 105, p. 28,279-28,293.

Cadet, J.P. et al., 1986. Subduction in the Japan Trench: The Kaiko Results. In: Developments in Geotectonics, v. 21, p. 461-480.

Cannat, M., 1993. Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. Jour. Geophys. Res., v. 98, p. 4163-4172.

Cannat, M. et al., 1995. Initial Reports of the ODP Leg 153. US Govt. Print. Office, Washington D.C.

Dallmeyer, R.D. and Takasu, A., 1991. Middle Paleocene terrane juxtaposition along the Median Tectonic Line, southwest Japan: Evidence from Argon-40/Argon-39 mineral ages. Tectonophysics, v. 200, p. 281-297.

Dalziel, I.W.D. et al., 1989. Tectonics of the Scotia Arc, Antarctica. Field Trip Guidebook T180. Am. Geophys. Un, Washington D.C.

Dietz, R.S., 1961. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. Nature, London, v. 190, p. 854¬857.

Fallon, F.W. And Dillinger, W.H., 1992. Crustal velocities from geodetic very long baseline interferometry. Jour. Geophys. Res., v. 97, p. 7129-7136.

Foulger, G.R., 2006. Older crust underlies Iceland. Geophys. Jour. Int., v. 165, p. 672-676.

Foulger, G.R., Du, Z. and Julian, B.R., 2003. Geophys. Jour. Int., v. 155, p. 567-590.

Francis, J.E., 1986. Growth rings in Cretaceous and Tertiary wood from Antarctica and their palaeoclimatic implications. Palaeontology, v. 23, p. 665-684.

Gràcia, E. et al., 2000. Non-transform offsets along the Mid-Atlantic Ridge south of the Azores (38°N – 34°N): ultramafic exposures and hosting of hydrothermal vents. Earth Planet. Sci. Lett., v. 177, p. 89-103.

Grunov, A.M., Dalziel, I.W.D. and Harrison, T.M., 1987. Structural and Ar-40/Ar-39 constraints on the evolution of blueschists from the Scotia Arc. Geol. Soc. Am. Abstracts with Programs, v. 19, p. 686-687.

Hall, J.M. and Robinson, P.T., 1979. Deep crustal drilling in the North Atlantic Ocean. Science, v. 204, p. 573-586.

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. A 274, p. 409-419.

Hervé, F. et al., 1987. Chronology of provenance, deposition and metamorphism in the southern limb of the Scotia arc. In: Proc. 5th Int. Symp. Antarctic Earth Science. Cambridge Univ. Press.

Hess, H.H., 1962. History of ocean basins. In: Petrologic Studies: A Volume in Honour of A.F. Buddington. Geological Soc. America, p. 599-620.

Ikeda, M., Zhao, D. and Ohno, Y., 2006. Crustal structure, fault segmentation, and activity of the Median Tectonic Line in Shikoku, Japan. Tectonophysics, v. 412, p. 49-60.

Ito, T. et al., 1996. Gently north-dipping Median Tectonic Line (MTL) revealed by recent seismic reflection studies, southwest Japan. Tectonophysics, v. 264, p. 51-63.

Jefferson, T.H., 1982. Fossil forest from the Lower Cretaceous of Alexander Island, Antarctica. Palaeontology, v. 25, p. 681-708.

Kawai, N., Ito, H. and Kume, S., 1961. Deformation of the Japanese islands as inferred from rock magnetism. Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc., v. 6, p. 124-129.

Kawai, N., Hirooka, K. and Nakajina, T., 1969. Palaeomagnetic and potassium-argon age informations supporting Cretaceous-Tertiary hypothetic bending of the main islands of Japan. Palaeogeog. Palaeoclim. Palaeoecol., v. 6, p. 277-282.

Korhonen, J. et.al., 2007. Magnetic anomaly map of the world, scale 1: 50,000,000, 1st ed, Commission for the Geological Map of the World, Paris, France.

Le Pichon, X. et al., 1994. Shear partitioning in eastern Nankai Trough: evidence from submersible dives. Earth Planet. Sci. Lett., v. 128, p. 77-83.

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.

Mason, R.G., 1958. A magnetic survey off the west coast of the United States. Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc., v. 1, p. 320-329.

Maus, S. et al., 2009. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. Geochem. Geophys. Geosyst., 10, Q08005, doi:10.1029/2009GC002471.

McCarthy, J. et al., 1988. Relic magma chamber structures

preserved within Mesozoic North Atlantic crust. Bull. Geol. Soc. Am., v. 100, p. 1423-1436.

Morris, E. et al., 1993. Seismic Structure of Oceanic Crust in the Western North Atlantic. Jour. Geophys. Res., v. 98, p. 13879-13903.

Mutter, J. C. et al., 1985. Multichannel seismic images of the oceanic crust's internal structure: Evidence for a magma chamber beneath the Mesozoic Mid-Atlantic Ridge. Geology, v. 13: p. 169-173.

Müller, R.D., et al., 2008. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. Geochem., Geophys., Geosyst.,9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.

Natland, J.H. et al., 1998. A long gabbro section in the ocean crust: Results of Leg 176 Drilling, Southwest Indian Ridge. Joides Journal, v. 24, p. 11-14.

Neprochnov, Y.P. et al., 1988. The structure and tectonics of the intraplate deformation area in the Indian Ocean. Tectonophysics, v. 156, p. 89-106.

Opdyke, N.D. and Hekinian, R., 1967. Magnetic properties of some igneous rocks from the Mid-Atlantic Ridge. Jour. Geophys. Res., v. 72, p. 2257-2260.

Passerini, P. et al., 1990. Slickensides in western and southern Iceland: data from Langavatn, Burfell and Vördufell. Ofioliti, 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. Terra Nova, v. 3, p. 607-618.

Pilot, J. et al., 1998. Palaeozoic and Proterozoic zircons from the Mid-Atlantic Ridge. Nature, London, v. 393, p. 676¬679.

Pratt, D., 2000. Plate tectonics: A paradigm under threat. Jour. Sci. Expl, v. 14, p. 307-352.

Quesnel, Y., Catalan, M. and Ishihara, T., 2009. A new global marine anomaly data set. Jour. Geophys. Res., v. 114, B04106, doi: 10,1029/2008JB006144.

Raff, A.D. and Mason, R.G., 1961. Magnetic survey off the west coast of North America, 40 N latitude to 52 N latitude. Bull. Geol. Soc. Am., 72, 1267-1270.

Raleigh, C.B., 1967. Tectonic implications of serpentinite weakening. Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc., v. 14, p. 113-118.

Raleigh, C.B. and Paterson, M.S., 1965. Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. Jour. Geophys. Res., v. 70, p. 3965-3985.

Ribeiro da Costa, I. et al., 2008. Antigorite in deformed serpentinites from the Mid-Atlantic Ridge. Eur.. Jour. Mineral., v. 20, p. 563-572.

Rivano, S. and Cortés, R., 1976. Note on the presence of lawsonite-sodic amphibole association on Smith Island, South Shetland Islands, Antarctica. Earth Planet. Sci. Lett., v. 72, p. 34-36.

Robinson, P.T. et al., 1989. Initial Reports ODP Leg 118. College Station, TX, Ocean Drilling Program.

Scheidegger, A.E., 1963. Principles of Geodynamics. Springer-Verlag, Berlin, 362p.

Sugimura, A. and Uyeda, U., 1973. Island Arcs: Japan and Its Environs. Elsevier, Amsterdam, 281p.

Smellie, J.L. and Clarcson, P.D., 1975. Evidence for pre-Jurassic subduction in Western Antarctica. Nature, London, v. 258, p. 701-702.

Smoot, N.C., 1999. Orthogonal intersections of megatrends in the Western Pacific Ocean basin. Geomorphology, v. 30, p. 323-356.

Stein, S. and Okal, E.A., 1978. Seismicity and tectonics of the Ninety-East Ridge area: evidence for internal deformation of Indian plate. Jour. Geophys. Res., v. 83, p. 2233-2245.

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, Norway, 456p.

Storetvedt, K.M., 2003. Global Wrench Tectonics. Fagbokforlaget, Bergen, Norway, 397p.

Storetvedt, K.M., 2009. Caribbean evolution – a new account. Geoscientist Online. The Geological Society of London, http://www.geolsoc.org.uk/gsl/GSL/lang/en/page6816.html

Storetvedt, K.M., 2010. The Caribbean Case: Agitation of ingrained views. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 54, p. 3-9.

Storetvedt, K.M., 2010a. Falling plate tectonics – rising new paradigm: salient historical facts and the current situation. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 55, p. 4-34.

Takeda, T. et al., 2004. Crustal structure in the northern Fossa Magna region, central Japan, modeled from refraction/wide-angle reflection data. Earth, Planets and Space, v. 56, p. 1293-1299.

Tanner, P.W.G, Pankhurst, R.J. and Hyden, G.M., 1982. Radiometric evidence for the age of the subduction complex in the South Orkney and South Shetland Islands, West Antarctica. Jour. Geol. Soc. London, v. 139, p. 683-690.

Tucholke, B.E. and Lin, J. , 1994. A geological model of the structure of ridge segments in the slow spreading ocean crust. Jour. Geophys. Res., v. 99, p. 11,937-11,958.

Udintsev, G.B. et al., 1990. Finds of continental rocks and sediments of anomalous age in the equatorial segment of the Mid-Atlantic Ridge. Trans. USSR Acad. Sci. Earth, v. 312, 111-114.

Van Andel, T.H. and Bowin, C.O., 1968. The Mid-Atlantic ridge between 22° and 23° north latitude and the tectonics at mid-ocean rises. Jour. Geophys. Res., v. 73, p. 1279-1298.

Vine, F.J. and Matthews, D.H., 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. Nature, London, v. 199, p. 947-949.

Vine, F.J. and Wilson, J.T., 1965. Magnetic anomalies over a young ocean ridge off Vancouver Island. Science, v. 150, p. 485-489.

Watkins, N.D., 1968. Comments on the interpretation of

linear magnetic anomalies. Pure Appl. Geophys., v. 69, p. 179-192.

Watkins, N.D. and Richardson, A., 1968. Comments on the relationship between magnetic anomalies, crustal spreading and continental drift. Earth Planet. Sci. Lett., v. 4, p. 257-264.

Weissel, J.K., Anderson, R.N. and Geller, C.A., 1980. Deformation of the Indo-Australian plate. Nature, London, v. 287, p. 284-291.

Wenner, D.B. and Taylor, H.P., 1971. Temperatures of Serpentinization of Ultramafic Rocks Based on O^{18}/O^{16} Fractionation between Coexisting Serpentine and Magnetite. Contr. Mineral. and Petrol., v. 32, p. 165-185.

White, R.S. et al., 1990. New seismic images of oceanic crustal structure. Geology, v. 18, p. 462-465.

Wicks, F.J. and O'Hanley, D., 1988. Serpentines: Structure and petrology. In: Reviews in Mineralogy, v. 19, p. 91-168.

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.

地球潮汐と地震
EARTH TIDES AND EARTHQUAKES

Vinayak G KOLVANKAR*, Samrudha MORE#, and Nisha THAKUR#
*C/O Computer Division, Bhabha Atomic Research Centre. Mumbai 400085, India.
Project Trainees from BVMIT CBD Belapur, Mumbai, India.

（小泉　潔・川辺 孝幸・久保田 喜裕［訳］）

要　旨：地球潮汐が地震を引き起こすことは，既成事実である．本論文では，M2 ～ 10 の地球全体の NEIC-USGS の 50 万以上の地震データを使って，地球潮汐によって引き起こされる地震パターンの特徴を見いだそうとするものである．時期・マグニチュード・深度・緯度・経度の違いによって引き起こされる地震のパターンの違いを調査研究した．地球のさまざまな地域で別のタイプの断層を使って，さまざまな研究者が同様な研究をしてきたが，我々は地球全体で地球潮汐の効果によって引き起こされる地震を研究した．それ故特定のタイプの断層が考慮されているわけではない．2 つの時期（1973 ～ 1989 年と 1990 ～ 2008 年）の地震についてのこの研究は，地球潮汐があらゆる深度における M5.0 までの地震を引き起こすことを示している．満月フェーズに近い地球潮汐の時に働く横方向の応力は，新月フェーズの時の地球潮汐の応力よりも効果があることが発見されている．しかし，新月フェーズに近く，M3.0 までの地震で，震源の深さが 10km までの範囲では，月と太陽の複合した引力によって直接的に引き起こされる．

連続的に取られた地球潮汐によって引き起こされた地震パターンを使って，より地震の多い地域のものについて，研究が行われている．それは，大地震に先立つ周期的な応力についての良いアイデアを提供する．

地震頻度の高い地域において，さまざまなより狭い地域（典型的には 2000 × 2000km）でプロットされた地球潮汐は，極めて速い変化を示している．大地震の前震と余震は，太陽－地球－月（SEM）角が線状に並んでいる範囲に配列しているのが見られた．余震において，大地震を発生する断層の形態と方向の変化によって，この列は余震の列に続くか，あるいは隣接した列あるいはほかのどれかの列に転じる．

***キーワード**：固体地球潮汐，地震の引き金，太陽と月の複合した引力，潮汐力，横方向の応力，太陽－地球－月の角度［SEM］，断層の方向性*

はじめに

これまでに，さまざまな研究者が地球潮汐と地震との関係を見つけようとしたが，賛同を得られなかった．地震の統計的に有意なサンプルが，無作為サンプルと同じ規模の潮汐ポテンシャルと相関関係があることが，統計的研究によって発見された（Knopoff，1964）．

しかし，最近 20 ～ 30 年，多くの研究者が詳細な研究を行った．田中ほか（2002）は，時間と位置，そして M5.5 あるいはそれ以上の世界中に分布する 9350 個の地震の主要な発生機構を使用した．剪断応力と J1（応力テンソル）の両方に，すべての地震について有意な相関関係が地球潮汐と地震発生との間で発見された．地震タイプの分類によって，特に小さい浅発地震が観測された逆断層タイプの剪断応力と高い相関関係にあることが発見された．J1 との高い相関関係はまた，逆断層タイプと正断層タイプの大地震に見られ，横ずれ断層タイプとの相関はない（田中ほか，2002）．Cochran et al.（2004）は，浅いスラスト地震の発生ともっとも強い潮汐の発生との相関関係を示している．地震頻度は潮汐応力の持つ 3 つの要素による背景頻度とは違っている．大きな正断層と横ずれ断層を伴う局地的な地震は，スラストが優勢な地域より，潮汐によって引き起こされることが多いよう

である (Cochran et al., 2004). 全地球的な最大の地震カタログ (NEIC カタログの 442412 地震) を使って, Metievier et al.(2009) は, 個体地球潮汐のフェーズと地震の発生時期との明確な相関関係を観測している. 彼らはこのフェーズの分布異常がより小さく, 浅い地震で大きいことを観測している. 正断層と横ずれ断層の地震は, 逆断層の地震より容易に引き起こされる. 統計的には地震を引き起こす主要な発生機構についての有意な証拠ではない (Metievier et al., 2009).

丹波高原と中央日本の近畿地方の群発地震地域で, 1995 年に隣接地域で発生した神戸地震 (M7.3) の直後に地震活動が活発化した. 丹波高原での微小地震活動は, 月フェーズに対応していた. 1995 年と 1996 年の間ずっと, 新月と満月の後に小地震が増加した. 1995 年以前には, このような相関関係は見られなかった. 研究は兵庫県南部地震による応力変化が, 丹波高原において地震活動を潮汐力に反応しやすくさせた可能性を示唆している (岩田ほか, 2002).

海の潮汐についての研究者はほとんどいない. 微小地震は低潮位と強い相関を示す. それは断層活動が海洋の荷重が最低値の時に, 選択的に断層活動が生じることを示唆するものである (Tolstoy et al., 1971). 太平洋の Juan de Fuca 海嶺からの最近の結果は, 海の潮汐による極めて明確な日変化パターンを示している. Cochran は強い潮汐が浅い断層に地震を引き起こすに十分な応力を与えることを示した. 潮汐が 2m 以上と非常に大きければ, 地震の 4 分の 3 は潮汐応力が引き金を引くことを助長するように働くことによって発生する. 潮汐がこれより小さいときには地震はほとんど発生しない. 海洋下の潮汐応力は, 海の潮汐による荷重の効果のために, 大陸で見られるものより 1 オーダー大きい. 彼女は, 潮汐による引き金について, Juan de Fuca 海嶺のエンデバーセグメント上で 55 日間に記録された 1899 個の微小地震を解析した (http://www.sciencedaily.com/releases/2004/10/041022103948.htm). 引張応力がすべての方向で最小の時, 地震は低潮位, とくにもっとも低い春の潮位の近くでより多く発生した (Wilcock, 2001). 結果は, 干満差が大きくなっていく時期には引き金をひく証拠がないことを示したが, 別のデータは低潮位での地震発生率の有意な増加を示している. 引き金は, Juan de Fuca プレートと Queen Charlotte 断層地域の陸上のデータで特に強い. 最低潮位の 15o 以内で地震活動度に 15% の増加がある (Wilcock, 2009).

田中 (2010) は単純な統計的解析を行った. 地球潮汐がすでにジワジワと応力がかかっている断層上で, 地震を正に誘発させうるという証拠を与えているそれぞれの巨大地震が起きる前の 10 年間に, 著者は地震と地球潮汐フェーズとの強い相関関係を見つけている. 日々の “ 地球潮汐 ” の引力が他の時期より強くなる時に, さらなる地震が発生していた. 彼女は, モニタリングした地球潮汐が地震予知を改良する情報を提供するかもしれないと示唆している. 彼女は, 2004 年 12 月 16 日 (Mw 9.0), 2005 年 4 月 28 日 (Mw 8.6), および 2007 年 9 月 12 日 (Mw 8.5) のスマトラ沖で発生した 3 つの巨大地震に先立つ地震が, 潮汐によって引き起こされたことを観測した. 地球潮汐とそれらの巨大スラスト地震の内部や周辺の主要な地域での地震発生との相関関係を, 彼女は解析した. 統計的解析の結果は, 巨大地震発生に先立つ数～ 10 年間により高い相関関係が表れていることを示している. 巨大地震発生後に相関関係は消失した (田中, 2010).

地震と火山噴火は, そもそもプレートテクトニクスで説明される. しかし, いくつかの最近の研究は, 潮汐力が火山活動に関連する地震に影響を及ぼしている証拠を提供している (笠原, 2009). 爆発的噴火前後の時期の Pavlof 火山やアラスカの火山性群発地震は地球潮汐応力と極めて相関が強い. 1974 年の小噴火シーケンスの進行中に系統的な相関関係が表れた. 群発地震に先だつ噴火は潮汐による圧縮が増加しているときに発生し, さらに群発地震後の噴火は潮汐による引張が増加しているときに発生する (McNutt et al., 2002).

早川ほか (2009) はさまざまな地震発生現象における潮汐の効果を研究し, EQ 発生以前の数ヶ月間に, 岩石圏の ULF 放出が月のフェーズに同調した明確な最大 - 最小 - 最大パターンを示すことを発見した (早川ほか, 2009).

研究方法

本論で, 我々は地球潮汐による地震の発生パターンを研究するために, M2 ～ 10 の範囲で 500 以上, 1000 個の有効な全世界の地震について NEICUSGS 地震カタログを使った. 我々は, さまざまな時期・深度・マグニチュード・緯度および経度で発生した地震のいろいろなパターンを研究した. ほかの研究者がさまざまなタイプの断層を地球のさまざまな地域で利用し, 同様な研究をしてきたが, 我々は地球全体について地球潮汐の効果によって引き起こされた地震を研究した. それ故特定のタイプの断層は考慮しなかった. この研究は, 1973 ～ 1989 年と 1990 ～ 2008 年の 2 つの時期の地震を使って行われた. 最近ますます多くの地震計が世界中に配置されているため, これらの 2 つの時期の地震数は大きく異なっている. それはさらに多くの地震の位置を決め, 識別するのに有効である. カタログの中のそれぞれの地震について, 我々は月の位置を特定し, それについて地震をプロットした. それらの値は, 断続的に次の天文暦プログラムとクロスチェックした : [H- 惑星 (http://www.fourmilab.ch/homeplanet) とアルシオネ天文暦 4.1(http://www.alcyone.de)]. 大きなデータセットは, さまざまな地震図がどの様に地球潮汐に支配されている状況について, 優れたアイデアを提供する.

特に満月と新月フェーズの角度に見られる地震の発生について, 地球潮汐効果の限界を系統的に理解するために, Mod 指標の概念が導入された. こうして Mod 指標は, 期間・

緯度・経度・深度およびマグニチュードなどのようなさまざまなパラメータについて，それらのフェーズでの地震数の増加％を規定する．

大地震に関して，さまざまな前震と余震シーケンスが太陽－地球－月の角度の特定の組合せの時に起こることが注目される．2，3 の大地震に関するいろいろな例が大地震の時期前後における小地震のセットが，いろいろな地震断層について太陽－地球－月の角度のセットでどの様に引き起こされるのかを示すために図示されている．

図示

単純な線グラフを使って，地球潮汐（ET プロット）の効果を示す地震プロットが描かれている．ひと揃いのパラメーターの値の多数のプロットは，いろいろなパラメーターをもつそれらの効果を図示するために単一の図中に示されている．

図 1 は，1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年の時期についての ET とさまざまな深度の地震数との関係を示している．1990 ～ 2008 年の一組のグラフを見ると，より高い EQ 数のところが，11 ～ 700km のすべての深度範囲で，満月に対応するグラフの中央位置に見られる．しかし，00 ～ 10km の非常に浅い深度範囲では，より高い EQ 数のところは，新月フェーズに対応する極端に端っこにあるように見える．同様の傾向は，1973 ～ 1989 年における深度範囲 11 ～ 700km のグラフに見られる．しかし，1990 ～ 2008 年における 00 ～ 10km の非常に浅い深度範囲では，新月フェーズでより高い EQ 数の地震に見られる影響は，1973 ～ 1989 年のグラフに対応するようには見えない．1990 ～ 2008 年のグラフについては，ピークの中心が 00° フェーズの角より +20° フェーズの角にあるように見える．300 ～ 1000km の著しい深部では，ピークは 60° であるように見える．これらのグラフのピーク位置の変化すべては，遅発効果によるものだろう．

図 2 は，1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年のさまざまなマグニチュードの範囲毎の地震数と ET との関係を示す．1990 ～ 2008 年における M3 ～ 5 の範囲の ET との関係は，満月フェーズに対応する中央位置で EQ 数がより高くなっている．M2.0 ～ 2.5 と M2.5 ～ 3.0 の範囲では，グラフは新月フェーズに属する極端に端っこで EQ 数がより高くなっている．対応するグラフが異なったパターンを示す Mb=2 ～ 3 のより小さいマグニチュード範囲を除いて，同様な傾向は 1973 ～ 1989 年の ET グラフに見られ，これが多くのより小さい EQ 数の原因になのかもしれない．

図 3 は 1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年のさまざまな緯度［経度の誤記？，以下同じ：編集者］範囲毎の地震数と ET との関係を示したものである．1973 ～ 1989 年と 1990 ～ 2008 年両方の時期の -90 ～ -50° の緯度範囲を除くと，満月に対応するグラフの中心で EQ 数がより大きいことが，異なった緯度範囲のほとんどのグラフに見られる．これは，これらの緯度範囲で EQ 数がより小さくなっているためである．

図 4 は 1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年のさまざまな経

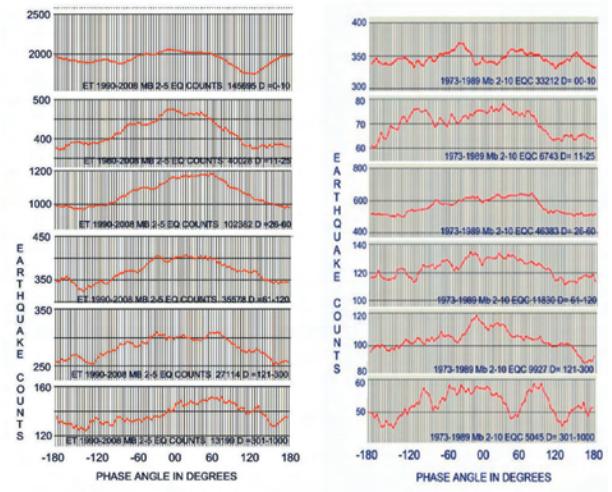


図 1　異なった深度範囲毎の 1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年の ET と地震数との関係を示すグラフ．

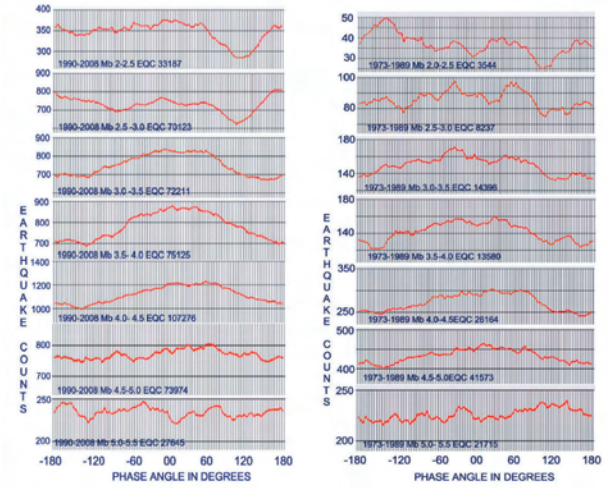


図 2　異なったマグニチュード範囲毎の 1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年の ET と地震数との関係を示すグラフ．

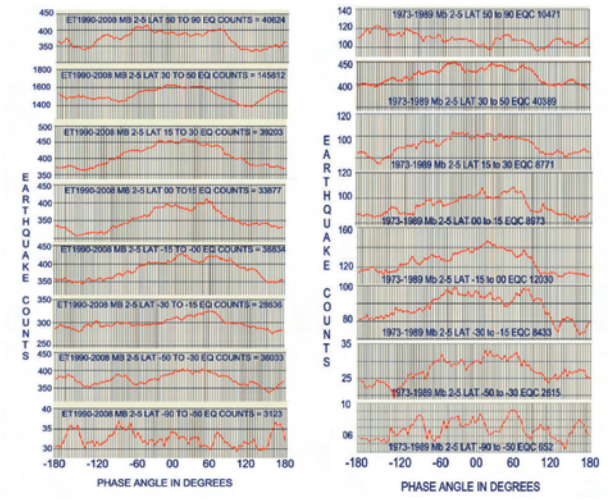


図 3　異なった緯度範囲毎の 1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年の ET と地震数との関係を示すグラフ．

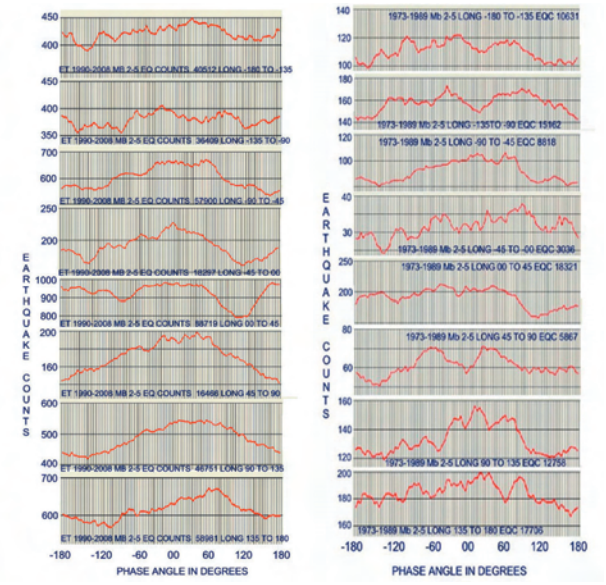


図 4　異なった経度範囲毎の 1990 ～ 2008 年と 1973 ～ 1989 年の ET と地震数との関係を示すグラフ.

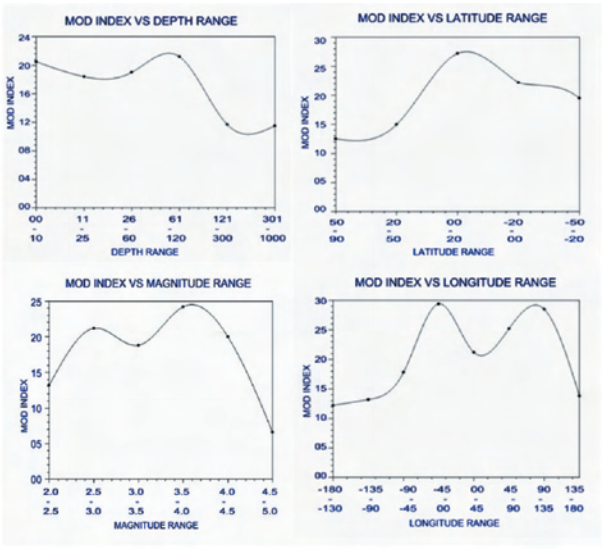


図 5　地震深度・緯度・マグニチュードおよび経度が異なる範囲の Mod 指標の変化についての ET と地震数との関係を示すグラフ.

度範囲毎の ET と地震数との関係を図示したものである. より大きい EQ 数が異さまざまな経度範囲のほとんどで 1973 ～ 1989 年と 1990 ～ 2008 年の両セットの中央位置（満月）に見られる.

満月フェーズおよび時に新月フェーズに近い中央位置に見られる EQ 数の増大を説明するために, Mod 指数が次のように定義された ; Mod =（最大 EQ 数－最少 EQ 数）/ 最小 EQ 数）× 100（最大 EQ 数と最小 EQ 数が, グラフのより高いピークとより低いトラフに対応することを考慮）.

地震マグニチュード・深度・緯度および経度の変数の範囲に対するこれらの Mod 指標のグラフが図 5 に示される. Mod 指標の値は異なった変数のパラメーターに関して 15 ～ 30 以内でいろいろな値をとるように見える. この Mod 指標は 120km までの深さでは約 20, より深いレベルでは約 12 と小さくなる. さまざまな緯度範囲で, 指標が赤道付近で約 25 と大きく, 両側では 15 ～ 20 へ小さくなっている. しかし, 効果はさらに +70° と -50° の両極端の緯度で見られる. M4.5 までの範囲では指標値が約 20 で, M5.0 までの範囲の半分近くに減少している. 赤道から離れた地域の指標値は, 地震地域にもよるが, さまざまな経度範囲で 12 ～ 30 の様々な値をとる.

図 6 は 1990 ～ 2008 年の季節毎の ET と地震数のグラフを示したものである. 第 1 のグラフは, 太陽が南半球にある 11 月・12 月・1 月・2 月（NDJF）のものである. 第 2 は, 太陽が赤道付近にある 3 月・4 月・ 9 月・10 月（MASO）で, 第 3 は太陽が北半球にある 5 月 6 月・7 月・8 月（MJJA）である. 最後のグラフはすべての季節をまとめたものである. すべての 4 つのグラフはほとんど同一の形で, 季節の影響はないようである

図 7 は 1973 ～ 1989 年・1990 ～ 2008 年・1990 ～ 1996 年・1997 ～ 2002 年と 2003 ～ 2008 年のような異なった時期

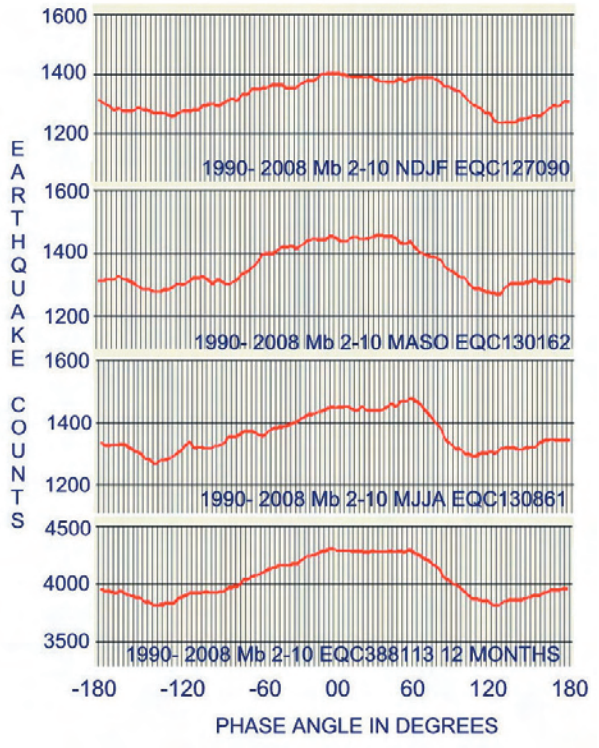


図 6　1990 ～ 2008 年の異なった季節毎の ET と地震数との関係を示すグラフ. 最初のグラフは太陽が南半球にある 11 月・12 月・1 月・2 月（NDJF）についてのもの. 第 2 は太陽が赤道付近にある 3 月・4 月・9 月・10 月（MASO）, 第 3 は太陽が北半球にある 5 月・6 月・7 月・8 月（MJJA）である. 最後のグラフは, 12 ヶ月の総計である.

毎の ET と地震数との関係のグラフを示したものである. 1 つのグラフ（1990 ～ 96 年）を除き, その他のグラフはすべて, 約 60° まで安定した状態を保ち 150° のフェーズ角で基底レベルまで小さくなっていき, -150° から 00° のフェーズ角まで着実に上昇し, 地震数は同一の形を示している. 1990 ～ 1996 年の ET グラフは, 新月フェーズでより大きい EQ 数を示す異なる形態をもっていて, ほかのグラフには見られない. しかし, 同様なパターンは前述した下位のグラフに見られる.

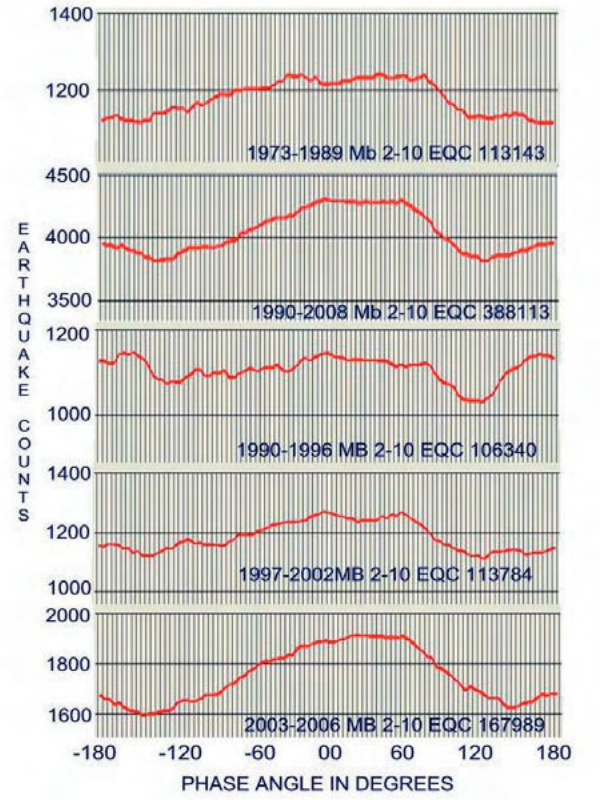


図 7 73 ～ 89 年，90 ～ 08 年，90 ～ 96 年，97 ～ 02 年と 03 ～ 08 年の ET と地震数との関係を示すグラフ．

異なったマグニチュード範囲毎の 1990 ～ 1996 年の地震数と ET との関係のグラフが図 8 に示されている．M2 ～ 3 の範囲では，ET グラフは中央位置で最小の EQ 数を，新月に属する 2 つの両端の部分で非常に大きい EQ 数をといった完全に異なった形を示している．M3 ～ 4 と M4 ～ 5 の 2 つの範囲では，満月フェーズでより大きい EQ 数をもつ標準的な形を示している．

図 9 は，新月位相のより高い地震発生件数の全く同じ特徴をもつ曲線の一群を示す．これは，1990 ～ 2000 年の間の期間で，マグニチュードが 2.0 ～ 2.5 と 2.5 ～ 3.0 で，経度幅 0° ～ 45° と 45° ～ 90°，深さの範囲 0 ～ 10km と緯度幅 30° ～ 50° のものを含んでいる．

図 10 は，特定の地域（緯度 25° ～ 50°，経度範囲 0° ～ 90°，期間 1990 ～ 2000 年）のさまざまなマグニチュード範囲の地球潮汐図である．下の 2 つの図は，同じ期間で，深さ 0 ～ 10km と深さ 11 ～ 700km の別の深さ範囲を示す．これら 2 つの図から，ほとんどの地震が非常に浅い深度で起こっていることがわかる．図 11 はこの地域の地図で，この地域に設置された地震計の非常に密集した観測地点を示す．この密な観測網は，マグニチュード 2 以上のより小さな地震についての大量の記録データをもたらす．

特定地域（緯度 25° ～ 50°/ 経度 0° ～ 90°）の研究

これはトルコ南部とギリシャ東部の範囲である．既述のように，この地域では新月位相に発生した非常に多

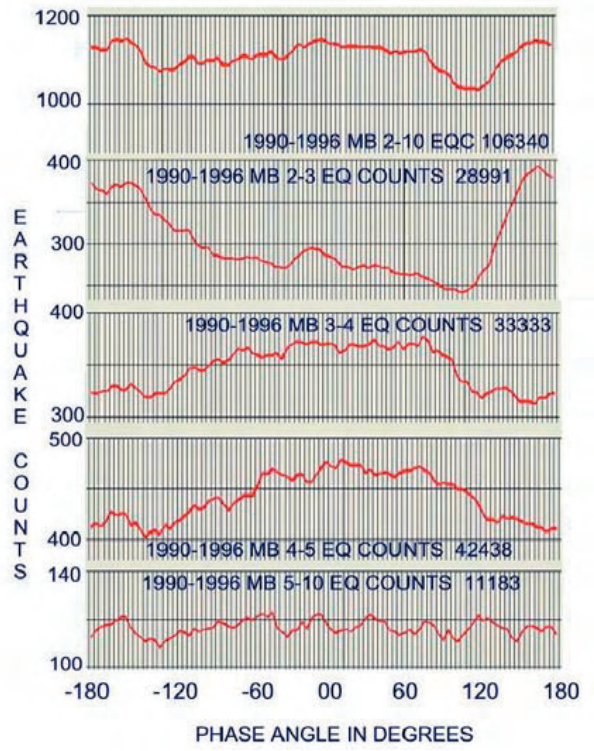


図 8 異なったマグニチュード範囲毎の 1990 ～ 1996 年の ET と地震数との関係を示すグラフ．

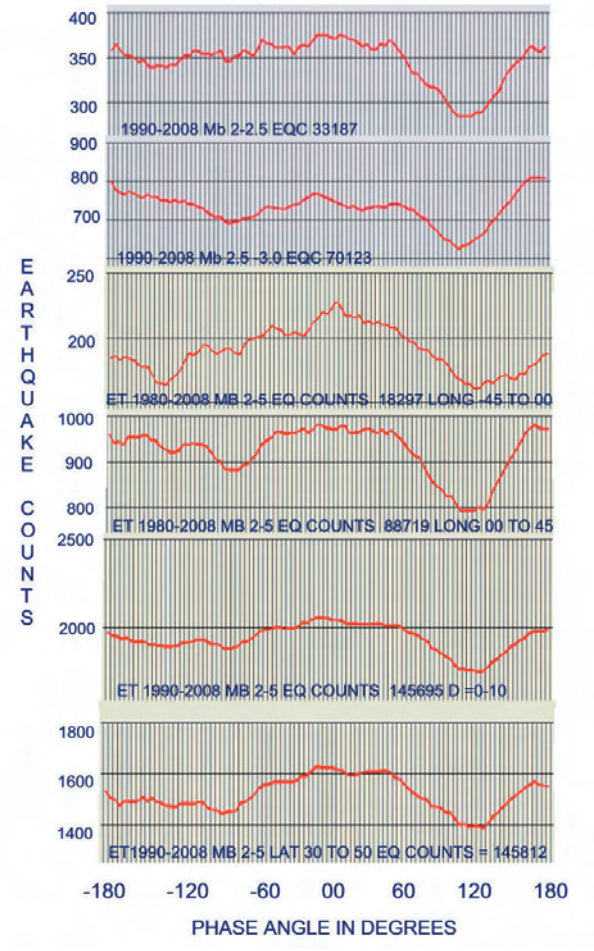


図 9 新月位相におけるより高い地震発生件数をもたらす，異なるパラメータによる地球潮汐プロットのセット．

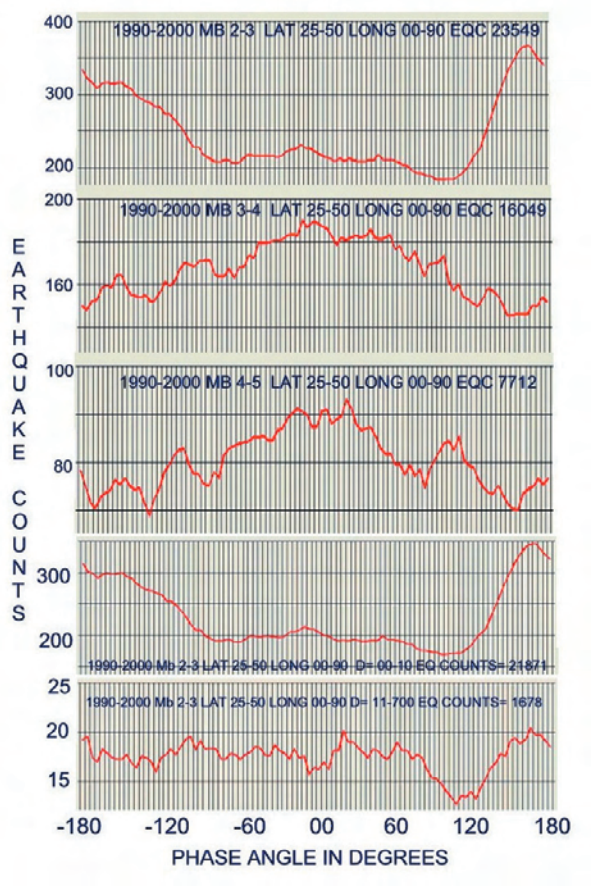


図 10　異なるマグニチュード範囲による，緯度 25° ～ 50°・経度 0° ～ 90°，期間 1990 ～ 2000 年の地球潮汐カウント．下の 2 図は同じ期間で，深さ 0 ～ 10km と深さ 11 ～ 700km の，異なる 2 つの深度範囲をプロットしたものである．

くの地震の地球潮汐図にみられる全く異なるタイプを示す．この地域では，1990 ～ 2008 年の NEIC-USCS カタログにリストされた M2 ～ 3 の 93 および 360 個の以外に，23549 の地震が 1990 ～ 2000 年の間に起きている．図 10 に示す詳細のように，それらの 95% は，1999 年 8 月 17 日の Izmit 地震（M7.6）の前の，1990 ～ 1999 年の間の 0 ～ 10km という浅い深度で発生している．このトルコ地震は，震央から 400 ～ 1000km 離れた調査範囲を超えてギリシャの広範囲の局所的地震活動の引き金となった．小さな地震では，地震波の一時的応力が引き金になったとみられ，本震の表面波の到達直後から始まった（Broadsky et al.，2000）．この現象は，この地域の浅い震源の地震の特徴であろう．この地域とその周辺では，1973 年～ 2000 年に M7+ の地震がおよそ 20 個起きている．それ以来，次の 10 年間（2000 年～ 2009 年）には同様な規模の地震は起こらず，地球潮汐による地震を研究するための良い候補地となっている．

1990 年～ 2000 年の間のうち，この地域に 1990 ～ 1991 年にかけてマグニチュード 7+ の 3 つの EQ がおこり，1995 年～ 1997 年の間に 2 つがおこったが，そのうち 1 つは，経度が 60° の地域とその周辺近くの少し離れた場所で発生した．1999 年 8 月 17 日に M7.6 の Izumit 地震が起こったが，ほとんど同じエリアで，1 ヶ月後に，もう 1 つの M7.2 の地震が続いて起こった．図 12 は緯度 25° ～ 50°，経度 0° ～ 90°，1990 ～ 2002 年と 2000 ～ 2006 年の年ごとと半年ごとの地球潮汐図である．1990 ～ 1999 年の 10 年間わたって，新月位相でのはるかに大きい地震発生数を示している．1995 年と 1997 年に，M7+

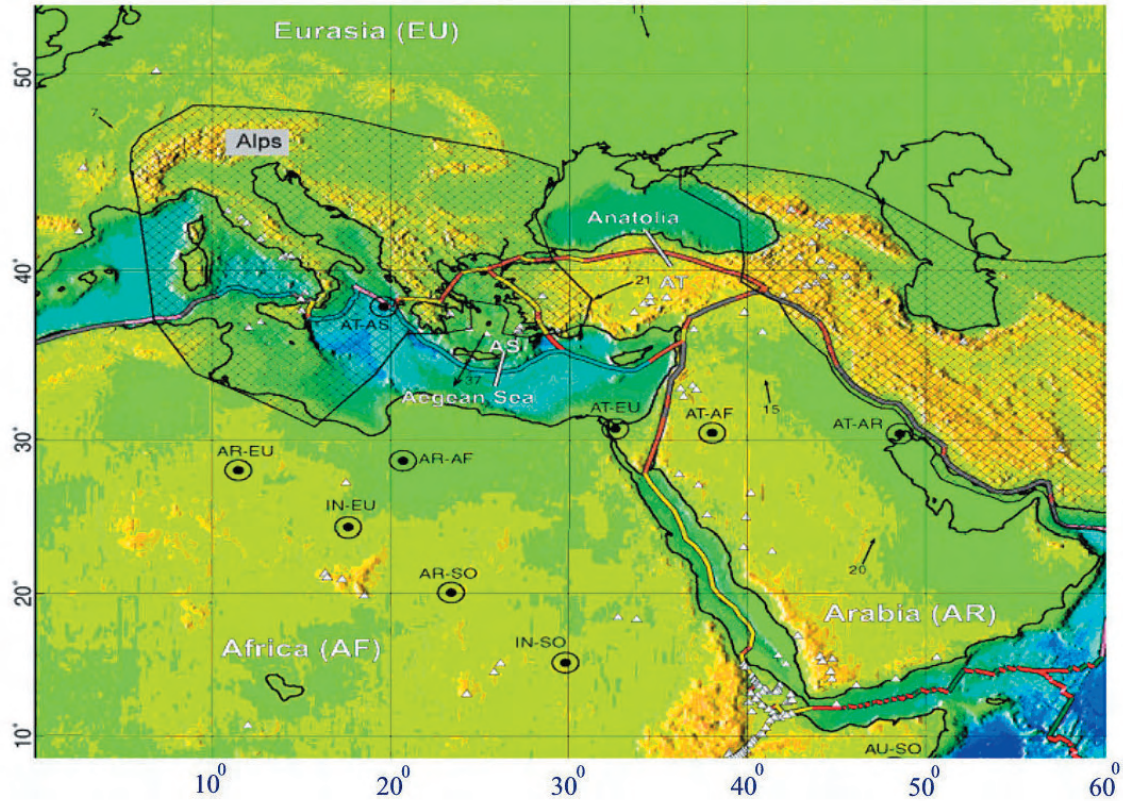


図 11　ギリシャとトルコに隣接した地域の地図（NEIC-USGS の許可を得て）で，この地域に設置された非常に接近した多くの地震計がモニタを始めている．この隣接したネットワークがマグニチュード 2.0 以上の微小なイベントのデータをもたらす．

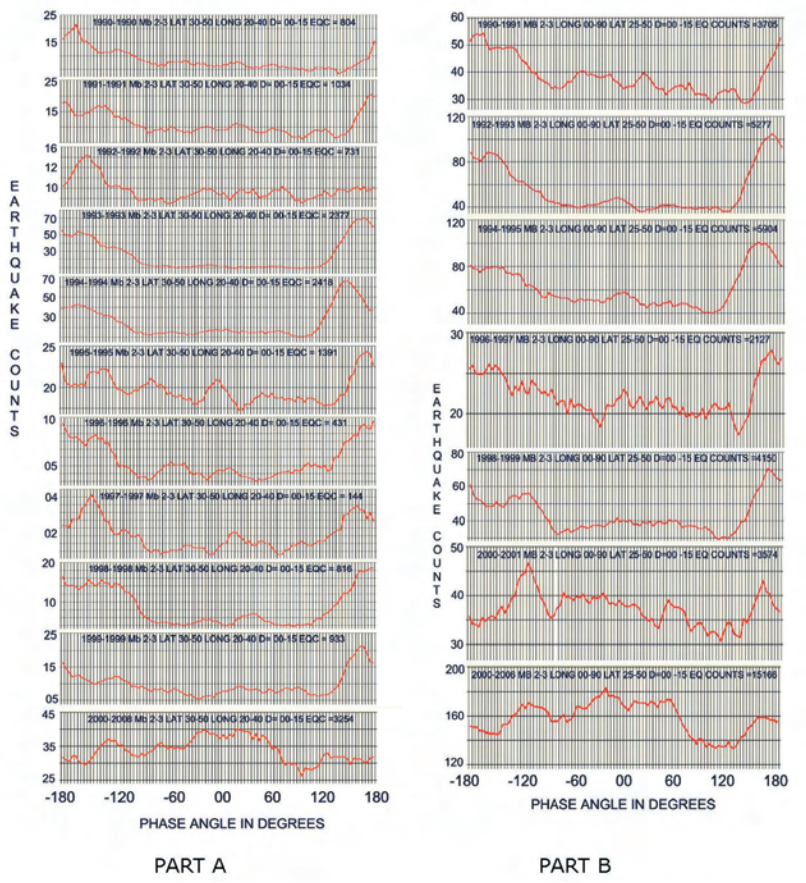


図 12　緯度 25° ～ 50°，経度 20° ～ 40°，M2 ～ 3，深さ 0 ～ 15km における，1999 ～ 2000 年と 2000 ～ 2006 年の 1 年間連続する地球潮汐図（PART A）と、半年ごとの地球潮汐図（PART B）[図 12PART A の最下段の図は 2000-2008 と書かれているが，キャプションと本文は 2000-2006 になっている ..... 図の方が違いか?: 訳者]

の地震後に地震発生件数の落ち込みがいくつかある．パターンは,総じて 1999 年の対の地震の後で変化している．これは，この図 12 の A と B の両方の部分の 2000 ～ 2006 年の図に表現されている．

図 13 は，1999 年 8 月 17 日の M7.6 の Izumit 地震の研究地域（緯度 30° ～ 50°，経度 20° ～ 40°）の地震の前（1990 ～ 2000 年）と後（2000 ～ 2008 年）の異なる深さ範囲での地球潮汐図を示す．先 Izmit 地震期のこのダイアグラムから見えることは，小さい（M2 ～ 3）の地震が 0 ～ 10km の非常に浅い深さでおきたことである．しかし，後 Izmit 地震期には，M2 ～ 4 の地震がより深部に増加している．Izumit 地震は，深さ 17km（NEIC-USGS による）でおこり，これより浅部で起きたすべての小さい地震は，これより深いより大きな地震の指標となった．Izmit 地震の後で，深いレベル（>40km）の小さい地震の増加は，将来の大きいイベントが 40 ～ 80km の深さで起こるであろうことを示唆している．

図 14 は，調査地域における M2 ～ 3 と 3 ～ 4 の 2 つの範囲の 2 組の地球潮汐図を示したものである．これらの図は，2000 ～ 2008 年の半年ごとに起きた地震を示す．4 のファクターによる高い地震発生件数は，M3 ～ 4 の範囲が M2 ～ 3 の範囲のものに比較されることの証拠となる．また，Mod 指標の値は，図の後半部分で着実に増大し，この地域でのストレスの増大を明瞭に示している．

図 15 は,1999 年 8 月 17 日の M7.6 の Izmit 地震後（2000 ～

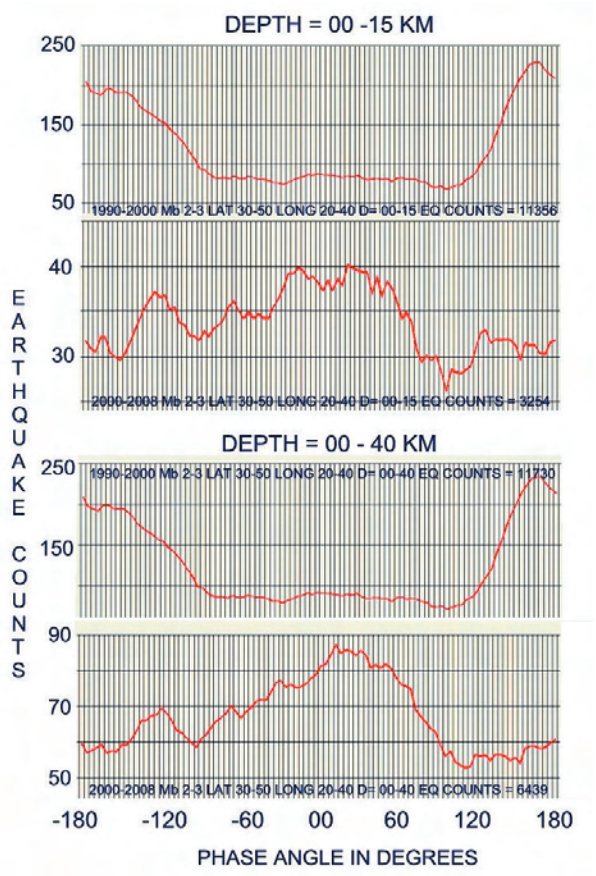


図 13　1999 年 8 月 17 日の M7.6 の Izumit 地震の研究地域（緯度 30° ～ 50°・経度 20° ～ 40°）における地震の前（1990 ～ 2000 年）と後（2000 ～ 2008 年）の異なる深さ範囲でのプロット．

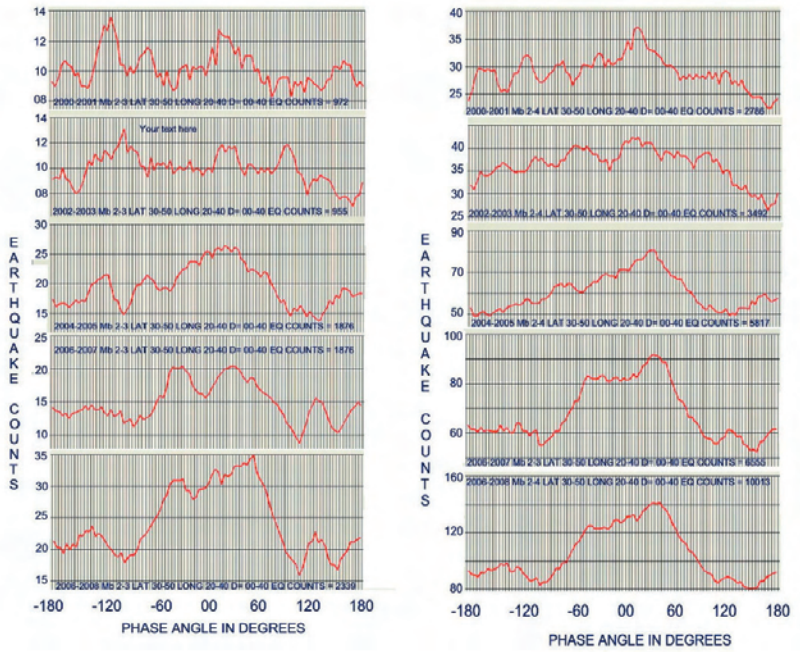


図 14　1999 年 8 月 17 日のマグニチュード 7.6 の Izmit 地震後（2000 ～ 2008 年）の，研究範囲（緯度 30° ～ 50°・経度 20° ～ 40°）における地震図．2 つのセットは、2000 ～ 2008 年の半年ごとの、地球潮汐を引き金とする異なるマグニチュード範囲 2 ～ 3 と 3 ～ 4 の地震図を示す。両図は、累進的な応力増加を示す、Mod 指標と地震発生件数の累進的増加を示している。

2008 年）の研究範囲（緯度 30° ～ 50°，経度 20° ～ 40°）における地震の地球潮汐図である．地球潮汐を引き金とする地震図のセットは，2000 ～ 2008 年の毎年の M2 ～ 4 の地震に示される．図 14 と図 15 の両図は応力増加を示し，その結果がさらなる地震のトリガーになっている．

図 16 は，1999 年 8 月 17 日の Izumit 地震（M7.6）前後の年単位の Mod 指標と地震発生件数のプロットを示す．M7+ の地震は図中の適切な位置に示してある．1999 年の Izmit 地震以前には，Mod 指標と地震発生件数は，1990 年，1997 年と 1999 年の M7+ の地震の後に減少する．これに対して，Izmit 地震の後では，Mod 指標と地震発生件数の両方が，M7+ の地震が起こらない中で，増加する．

地震を発生作用における太陽－地球－月（SEM）角度

地震発生件数のピークの形成における一貫性は，大地震地域で描かれた連続的な期間における地球潮汐図に見られる．わずかなピークが 2 ～ 3 ヶ月にわたって連続的に現れ，そして，ある大規模もしくは中規模の地震後に消えるであろう．図 17 は，3 ヶ月間の移動平均によって，2002 年の東南アジアにおける地震発生件数の典型的な特徴を示したものである．地震発生件数のピークは，連続する何ヶ月かにおける，ある一定の太陽－地球－月（SEM）角度の際に現れる．3 つの黄色半透明部は，大～中規模な地震の発生によって塗色部の終わりに消えるといった連続的な地震発生件数のピークのセットを示す．もう 1 つのこのような緑色半透明部は，連続する 8 ヶ月のピークを示す．このようなブロックでは，地震は，おそらく，確かな形態と方向の断層線に対する SEM 角の小範囲に起こるとみられる．

本震の前震と余震の地球潮汐図

課題は，いくつかの M7+ の大規模地震の前震と余震の筋

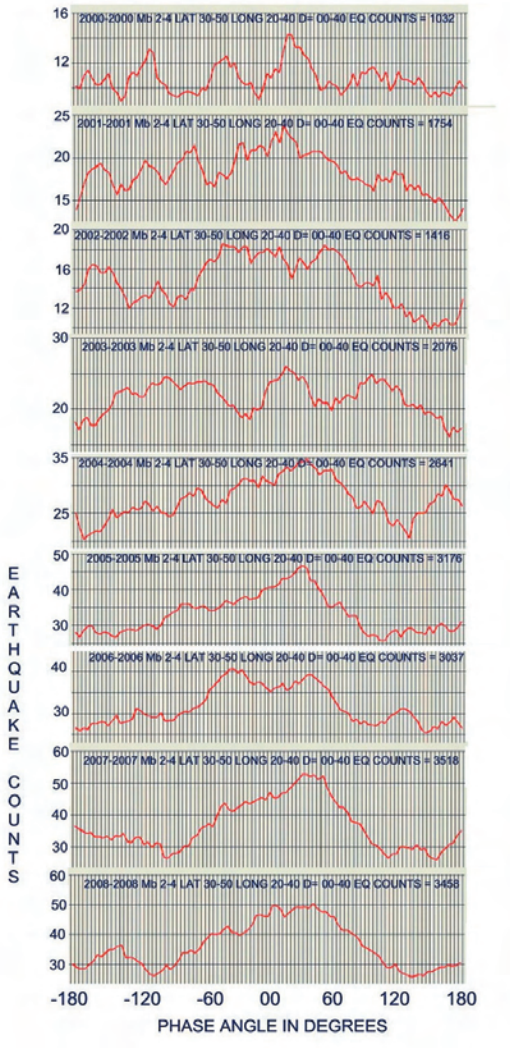


図 15　1999 年 8 月 17 日のマグニチュード 7.6 の Izmit 地震後（2000 ～ 2008 年）の，研究範囲（緯度 30° ～ 50°、経度 20° ～ 40°）における地球潮汐プロットの描画．地球潮汐プロットは，2000 ～ 2008 年の毎年の M2 ～ 4 を示したものである。周期的に増加する応力は後半の年で見られ，地震発生件数と Mod 指標の増加をもたらした．

書きの研究によってもたらされる．図 18 ～ 23 は，このような主要な地震の前震と余震の地球潮汐図である．前震の毎月ごとのプロットは，これらの月に接続する期間および大規模地震の前日までのおよそ 3 ヶ月間を示す．連続 45 ～ 50 日間の余震図も示される．地震パラメータと地震発生件数は，それぞれのサブプロットに示される．地球潮汐図の高さは，およそ，実質的には地震発生件数に対応する，それぞれの相対的強度に調整されている．

6 つのケースのすべてで，地震が本震の前に増加することがわかった．すべてのこれらの地震は，通常，地震発生件数による異なる高さの三角形の形状を持つ地震発生ピークの形の柱状部でみられる．これは，これらの地震が，この範囲の中央部（最も効果的な太陽－地球－月角度）で最大の地震発生件数をもたらす太陽－地球－月角度のある一定領域で発生することを示す．太陽－地球－月角度の両側での反応は，地震発生件数のピークを示す二等辺三角形の形成によって減少する．

本震の後，余震は同じ柱状部（葵色の半透明塗色部）あるいはその近接域で起こる（図 18，図 23）．しかしながら，前震のブロックの下で一般的に見られる範囲は，本震の後，15 ～ 45 日の終わりには，地震発生件数ほとんど零であった．前震の連続の場合のように，この余震の連続もまた，ある一定幅の太陽－地球－月角度範囲で起こる．多くの場合，大規模地震の発生によって，断層線の形態と方向は，わずかに変わるであろうし，そのときには，応力は，図 18 と図 20 のように，これらの隣接する範囲での余震活動の場となる隣の範囲に移る．しかし，もし本震が断層の形態と方向の大きな変化をもたらすとしたら，そのときにの余震の範囲は，図 23 のように，地球潮汐図の離れた範囲に移ってしまうであろう．

図 25 と図 26 は，前震の期間の地震発生件数のピークを示している．これら 2 つの地震発生件数のピークは，おそらく，本震の後に消える普通の断層の複数の構造方向によってもたらされたのであろう．しかしながら，2 つの地震発生件数のピークは，初期の例でわかるように，これらの 2 つのピークの両側とも，よく似た傾斜をもつ．

図 27 は，同じ柱状範囲において，前震と余震のこのような複数のプロットを示す．余震は長い期間で起こり．45 日の最後に，最終的に，この柱状部の中で起こる．幾度も，高地震発生地域の中で，適度の大きさの本震（M6+）が，接地域に応力を伝えながら，矛盾なく起こることが，一時的な現象として見られる．

図 28 は，2007 年 8 月 15 日の大きな地震の，2 組のプロットを示している．プロットの最初のセットは，本震を中心として広い緯度・経度範囲（± 10°）のものであるのに対して，もう 1 つのセットははるかに狭い緯度・経度範囲（± 5°）のものである．余震のプロットは，余震の数（黄色半透明部）が，本震（矢印で示す）の前に増加することを示している．しかしながら，はるかに狭い緯

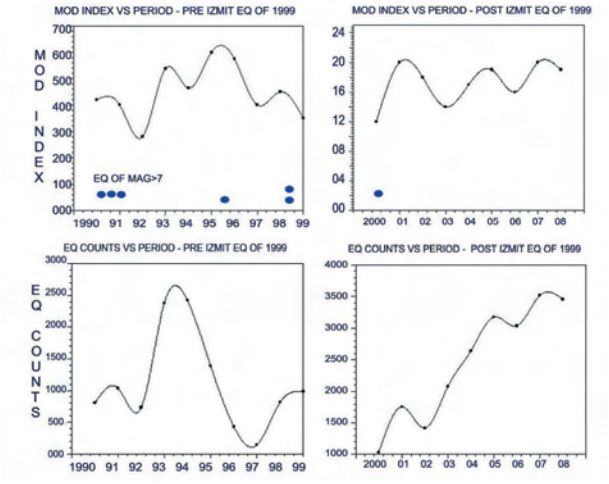


図 16 1999 年 8 月 17 日のマグニチュード 7.6 の Izumit 地震の前後における年単位の Mod 指標と地震発生件数。

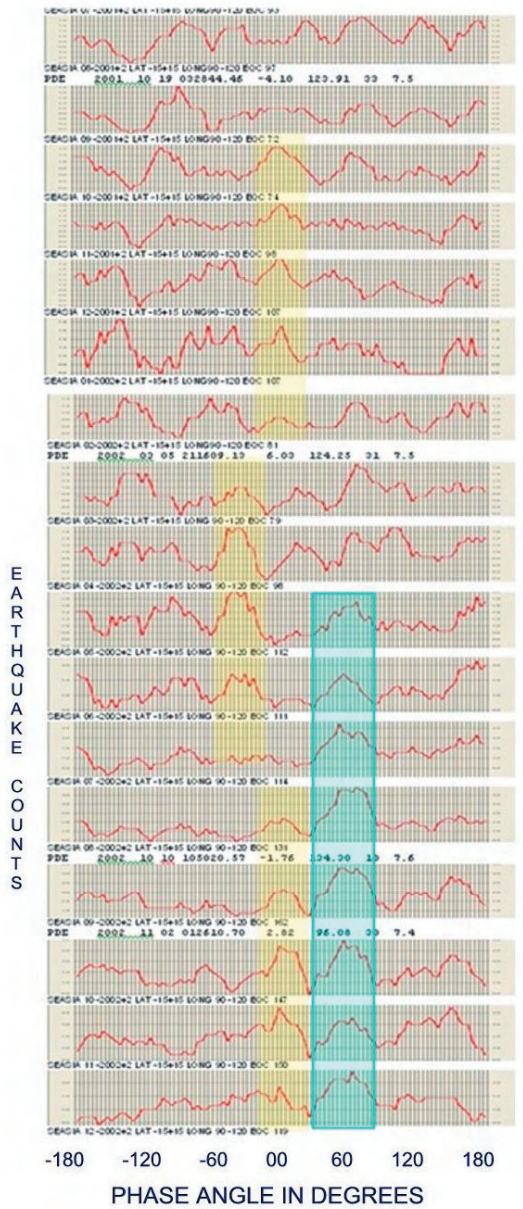


図 17 連続する 3 ヶ月の地球潮汐図で移動ブロックとして用いた典型的なサイン．地震発生件数のピークは，中規模な地震の後で終える，連続する何ヶ月のある一定の太陽－地球－月（SEM）角度の際に現れる．

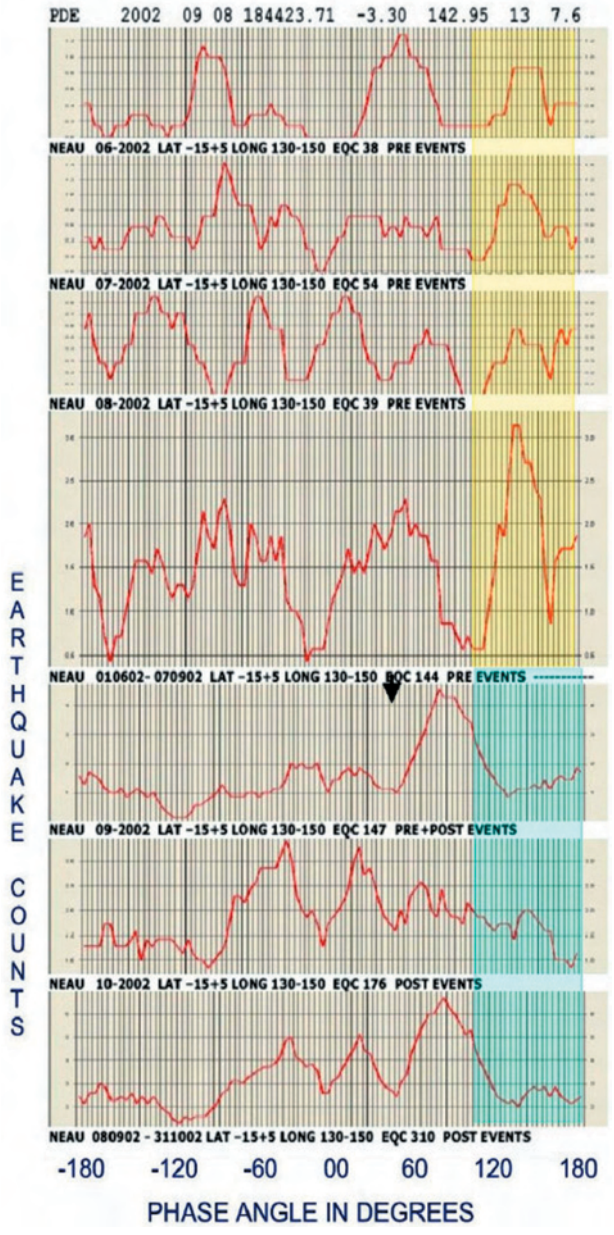


図 18　前兆の期間の間，柱状部の地震発生件数は 2002 年 09 月 08 日の本震まで増加する（黄色半透明部）．余震は，最後の 3 つのプロットの地震発生件数のピークの左辺の近接した地域で起こる．緑色半透明部では，本震の後で地震発生件数が減少する．しかしながら，本震発生のタイミングは，矢印で示すように，この範囲には属さない．

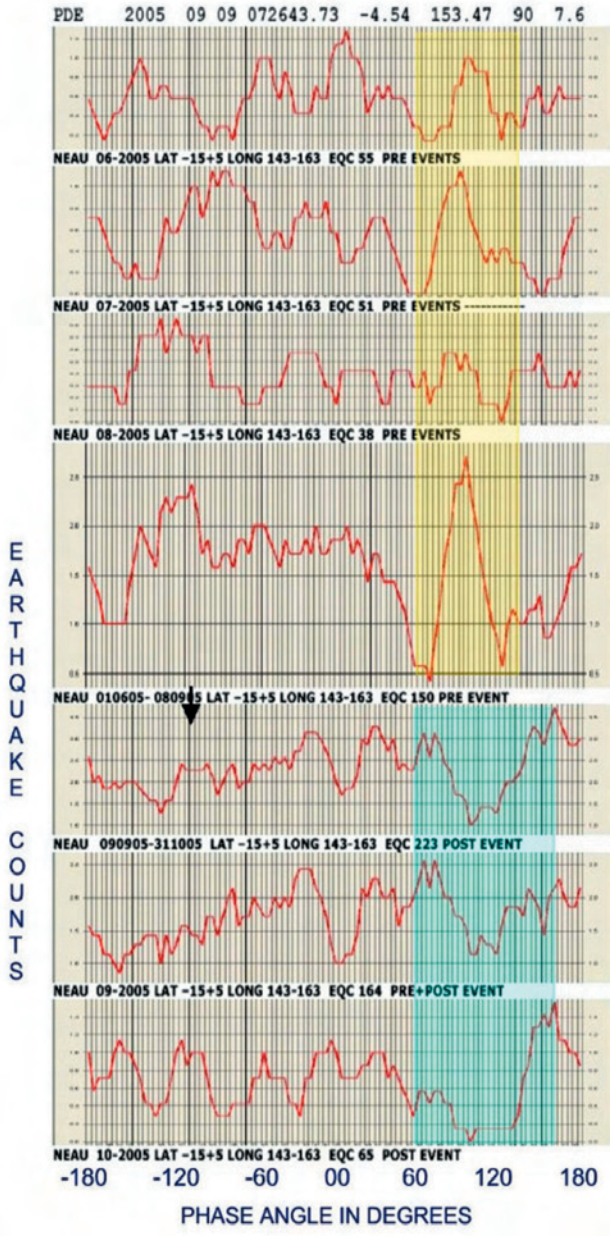


図 19　前兆の期間の間，柱状部の地震発生件数は，2005 年 09 月 09 日の本震まで増加する（黄色半透明部）．余震は，緑色半透明部で起こり，本震の後で地震発生件数は減少している．しかしながら，本震発生のタイミングは，矢印で示すようにこの範囲には属さない．

度範囲をもちいた左辺における二つ目のプロットのセットでは，経度が他の地域の範囲（緑色半透明部の右側に示される）をもたらす．余震が，最初の地域の場所で多数見られるにもかかわらず，緑色のパッチで示す範囲では，余震はわずかしか見られない．前震のグループ（黄色半透明部）は，この大きな地震によって引き起こされ，他の領域（緑色半透明部）の応力を取り除いた．

近地点で引き起こされる地震

Tamrazyan は，新月・満月時だけでなく，近地点－遠地点との深い関係についても，地震発生時の空間分布をみるため，主要な地震（1917-1950）すべてを記す大変個性的な方法を用いた（Tamrazyan, 1968）．この方法は，地震発生が太陽と月の影響を受ける多様な潮汐形成に関係するというひとつの考えをもたらした．そこで我々は，1973 ～ 2006 年間の主要な地震についても，同様の方法をとることにする．しかしながら，Tamrazyan は地震を記すのに，新月 / 満月から月周期の 1/4，3/4 週を横軸にとったが，私たちは彼の方法とは違って，新月から満月を横軸にとった．縦座標は同様の近地点－遠地点のままにした．このことによって，新月と満月の終わりまでそれぞれ独立して，地震を調べることが可能になった．

図 29A は，1973 年 7 月～ 2006 年 6 月における M ≧ M7 の地震を同じ図に記したものである．新月－満月だけでな

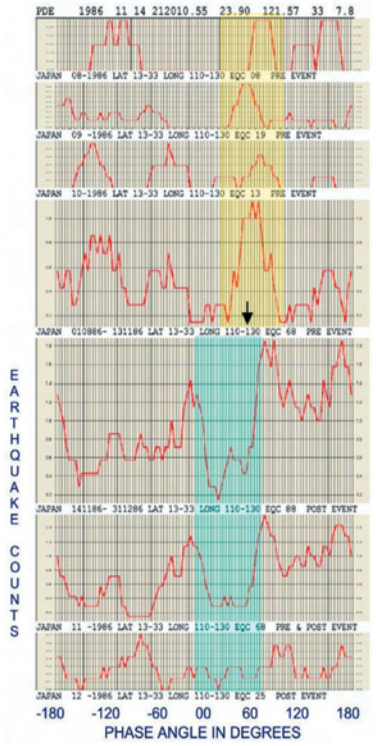


図 20　連続する期間，柱状部の地震発生件数は 1986 年 11 月 14 日の本震まで増加する（黄色半透明部）。余震は，終わりの 3 ヶ月の地震発生件数のピークから見て左辺の範囲でおこっている．緑色半透明部は，本震後の地震発生件数の減少を示す．本震発生のタイミングは，矢印で示すようにこの範囲に属す．

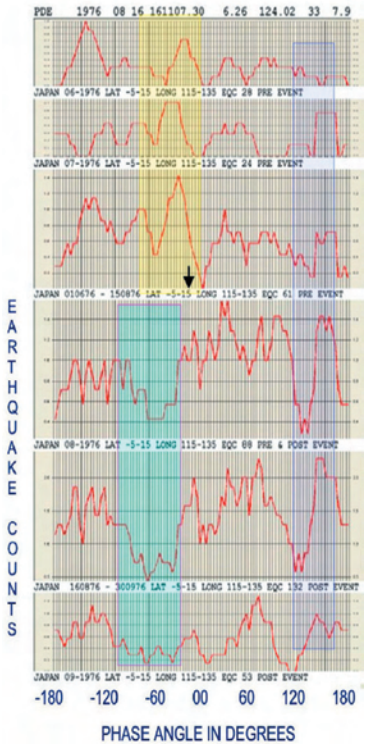


図 21　連続する期間，柱状部の地震発生件数は 1976 年 08 月 16 日の本震まで増加する（黄色半透明部）．余震は，図中央の柱状部（青色半透明部）の縁でおこる．本震のタイミングは領域内の矢印．青色塗色部は，多くの地震が起きるにもかかわらず，1976 年 08 月 16 日の本震の前震と余震に対応しない，もう 1 つの範囲を示す．

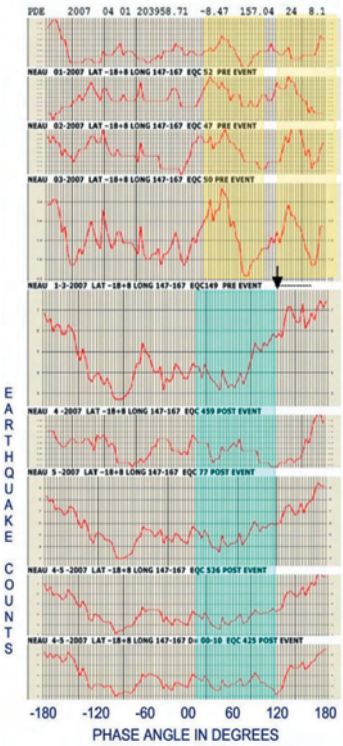
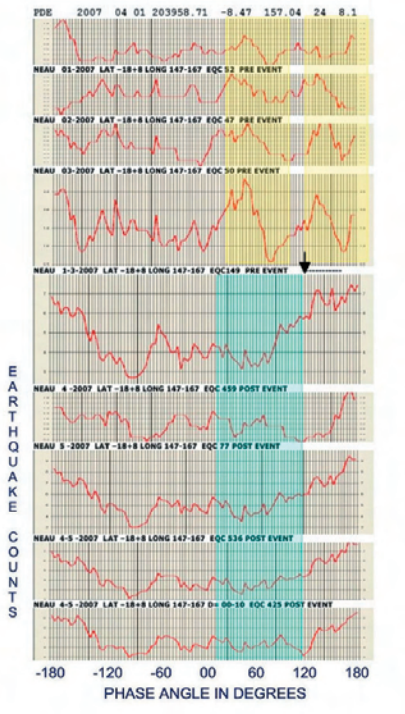


図 22　連続する期間，柱状部の地震発生件数は 2007 年 04 月 01 日の本震まで増加する（黄色半透明部）．本震後，地震発生件数プロットのパターンは，相当変化した．最後の 5 つのプロットは，新月の期間に隣接した敷の高い地震発生数を示すものである．しかしながら，データベースは M2 ～ 3 の地震を含まない．



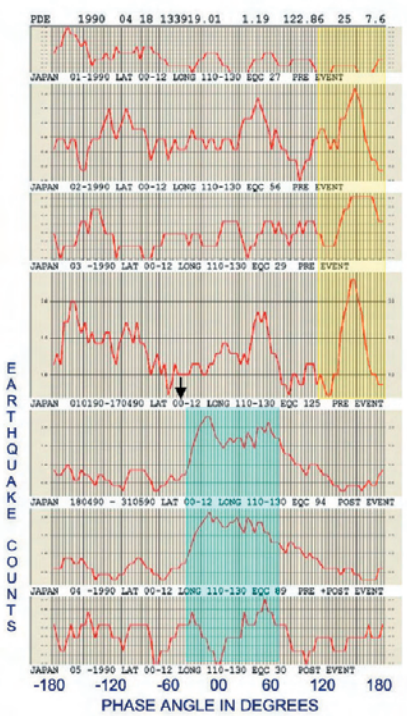


図 24　主要な前震および余震を示す 4 組図．これらすべての図で前震の地震集中域は，それらの領域における余震にとって替わられる．

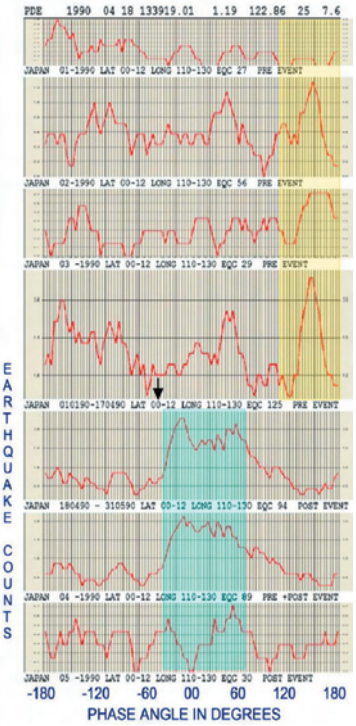


図 23　前震の時期の間，柱状部の地震発生件数は，1990 年 04 月 18 日の本震まで増加する（黄色半透明部）．余震は，図中央部の柱状部（青色半透明部）の縁で起こっている．本震は、矢印で示すように，この範囲に含まれる．

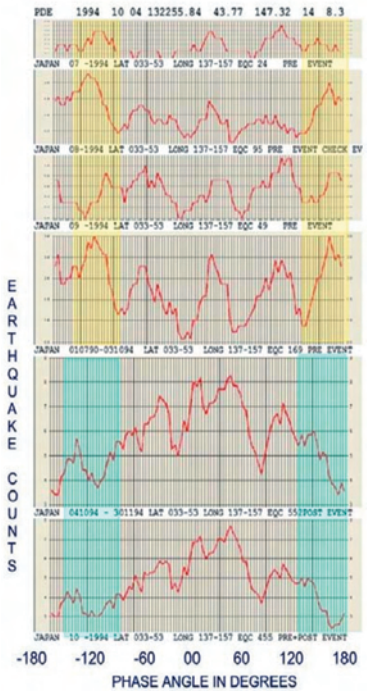


図 25　先駆的期間の間，発生地震数は，1994 年 10 月 4 日の本震まで黄色半透明部のように増加．余震は，同じ青色半透明部で起こる．発生地震数は，1994 年 10 月の最下段の地球潮汐プロットのように最小値まで減少する．

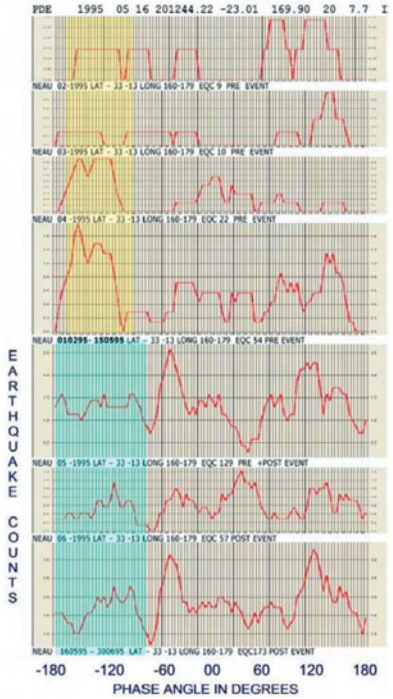


図 26　先駆的期間の間，発生地震数は，1995 年 5 月 16 日の本震まで，黄色透明部のように増加．余震は，別の柱状部で起こる．しかし，前震の範囲（青色半透明部）での地震数は，余震の後半の 3 つの地球潮汐図のように、著しく減少する．

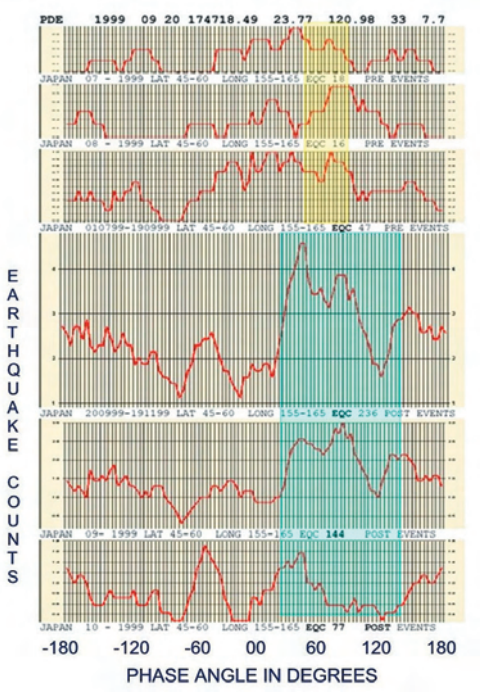


図 27 先駆的期間の間，地震発生件数は，1999 年 9 月 20 日の本震まで，柱状部（黄色の半透明塗色部）のように増加する．地震発生件数は，余震として，柱状部（青色の半透明塗色部）で急激に増加する．余震は，1999 年 10 月の最後の地球潮汐プロットにおいて最小まで減少する．

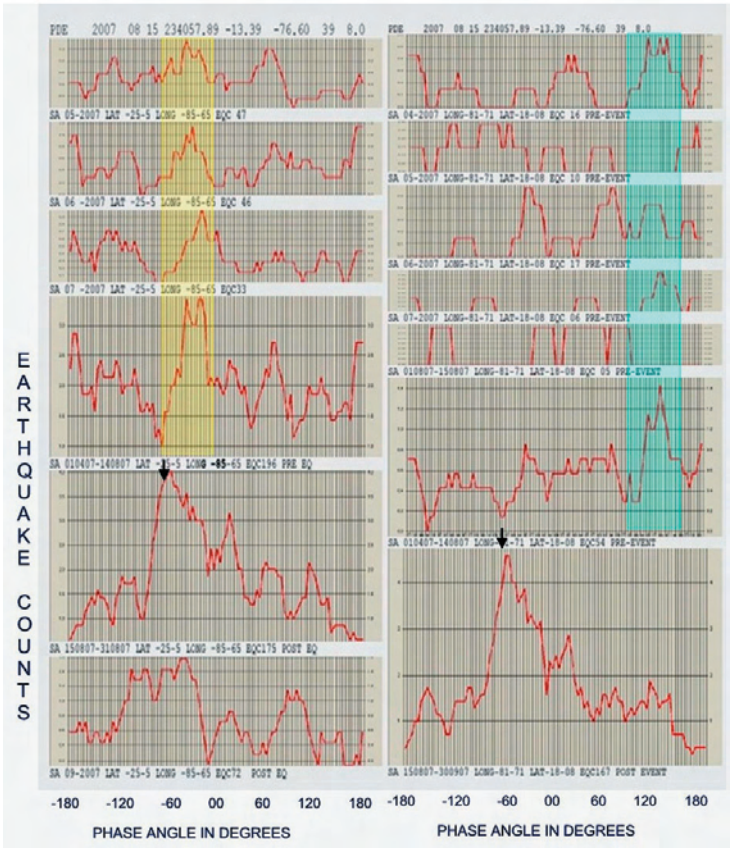


図 28　2007 年 8 月 15 日の 2 つの図の組み合わせ．左図は，本震を中心に広い緯度・経度範囲（± 10°），右図は，狭い緯度・経度範囲（± 5°）を示す．余震図（原文：prevent plots）は，余震数（黄色半透明部）が本震（矢印で示す）前に増加することを示す．しかし，狭い緯度範囲を示す右図では，経度が他の地域の範囲（緑色半透明の右側）をもたらす．いっぽう，余震は左図で多数見られるにもかかわらず，緑色ハッチの範囲では余震はわずかしか見られない。

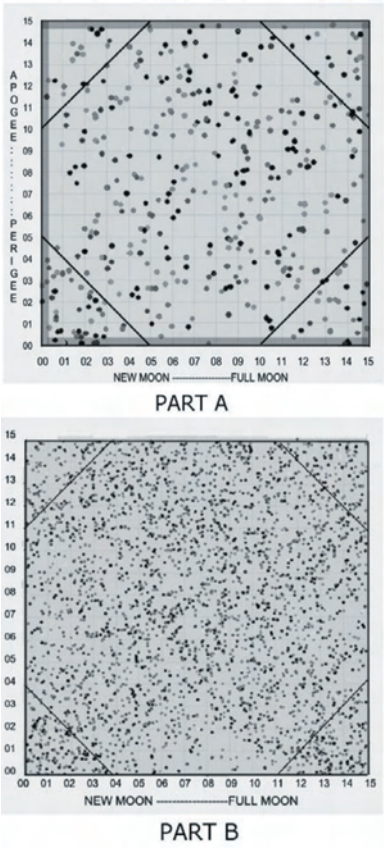


図 29　1973 年 7 月～ 2006 年 6 月における M6 ～ 6.9 および 7<（部分 A）の地震に対する遠地点・近地点－新月・満月（AP-NF）図．遠地点－近地点と新月－満月の両者はともに標準化されている．

く遠地点－近地点も，横軸と縦軸に同じ長さにして標準化した．この図を見ただけでは，いかなるパターンも見つからず，なにかを結論づけることは難しい．しかし，4つの角，すなわち遠地点－新月（左上），遠地点－満月（右上），近地点－新月（左下），近地点－満月（右下）が良い情報を提供してくれる．我々は多くの地震を解析したが，そこでは近地点が共通の要因である．地震の数もかなり異なっている．地震（M≧7）の数が最少になるは，遠地点－新月（19），次いで遠地点－満月（23），近地点－満月（29）さらに近地点－新月（46）であった．4つの角の間では，遠地点より近地点の終わりで，多くの地震を観察した．よって，近地点では重力作用が大きいため，多くの地震が起こると結論される．近地点－新月の角では，遠地点－満月の角よりかなり多くの地震が発生している．近地点－新月の組み合せで，太陽は月の背後にあり，その合成力は同方向に働く．

この角の図は，密集しつつやや空白の領域がある．それは，近地点－遠地点の最後だけでなく，朔望月（新月，満月）の12時間以内に生じた主要な地震の総数も示している．地震の数が最も少ないは遠地点－新月（6回），続いて遠地点－満月（7回），近地点－満月（11回），近地点－新月（19回）である．しかし，それ以外の時に，この空白線上で生じている地震の総数は，四角の境界領域内で生じている地震の数が43回であるのに対し，（これら四角の外側の領域に見られるように）11回だけである．

図29Bは同様の四角に小さい地震（Mb=6.0～6.9）を示したものである．それぞれの角の地震数は先のものほど極端な変化はない．しかし，傾向はほぼ同様である．表1は，以上の四角で起こった異なるM6.0～6.3，6.4～6.9および7.0～10の地震の割合と発生数を示す．四角で生じた大地震（M≧6）では，60%が近地点で，残り40%が遠地点で発生している．

補足事項に関する若干の議論

図1のET指標は，起こりうるすべての深度において，地震発生数が多いことを証明している．しかし，Mod指標は深度120kmまでで約20であるが，より深部では地震数がおおよそ60%まで減少する．位相角00°～60°の最大値はやや平坦である．深度≧300kmの極深発震源では，地震数の最大値は位相角30°～90°にみられる．このことは，この範囲の深度における地震の遅滞効果のように思われる．図2も同様に，ET指標がMod指標範囲20，マグニチュード範囲4.5までで，地震発生数が多いことを証明しているが，M4.5～5.0，Mod指標範囲10では減少している．さまざまな深度とマグニチュードにおける両者の指標の変化は，多くの研究者が地球潮汐はM＜4.0の地震（Cochran et al., 2004; Metivier et al., 2009）や浅発地震の引き金になり得ることが見いだされて以降の非常に重要な発見である．

全球上におけるM2～3の地震数一覧（NEIC-USGS）は約93Kで，M3～4では約136Kである．このことは，この一覧表は小さいマグニチュード領域が不完全であることを示している．幸運にも，1999年 Izmit 地震が起きたギリシャやトルコ周辺地域では，良い連絡網や提供されたデータから効果的な結論が得られるはずであった．しかし，広域的データは，どれも切迫した地震に対して，注意を促すようなものであった．

1990～2000年（Izmit地震前）には，毎年および隔年の地震ET図は，Izmit地震直前の地震発生が折しも地球潮汐の影響を受けつつあることを示す．1995年と1997年に大地震があった．しかし，その図にはIzmit 地震が起きるまで兆候が現れないままだった．この2組の図は，1995年と1997年の大地震の後に，もうひとつ別の大地震が続くことを示していた．1999年Izmit 地震の後，ET図が示す特徴は，1990～1999年に，この地震によるこの地域の地震発生過程が終わりに近づいていることを示すように完全に変化した．

後Izmit地震では，同様の変化が2000～2008年に発生した．この期間には大きなイベントはなく，Mod 指標だけでなく，EQ数も一定間隔で増加した．これは後年の蓄積されつつある応力を示している．Izmit地震の後，その応力は深度40kmまでの深さに到達したが，それは2～3年後にやや深部で，1999年に匹敵するマグニチュードの大地震が起こりうることを示す．

太陽と月によって引き起こされる多様な発震機構の特徴

我々は，太陽と月によって引き起こされる地震の4つの発震過程をずっと研究してきた．それは地震の引き金になるか，もしくは，発震様式を規制する．これらの過程には以下が含まれる；

1. 1日および半日の応力は主に太陽によって引き起こされる（Kolvankar, 2008），
2. 1日の地震活動と地震（Kolvankar et al., 2010a），
3. 月周期と地震（Kolvankar et al., 2010b），さらに，
4. 地球潮汐と地震，これは本論で述べられている．

表1は緯度・経度など，地震のマグニチュード，深度，位置に関する発震機構の特徴が比較されているが，それについては本論の最後で述べる．

主な結論

1. 地球潮汐はすべての深度においてM≦5.0の地震の引き金になる．
2. 満月時期に近くなると，地球潮汐のによって生ずる側方応力は，新月時期の間の地球潮汐よりさらに影響が強いことが分かった．
3. M≦3.0の地震と深度10kmまでの浅発地震は，月と太陽の合成引力が直接の引き金になる．しかしながら，ある地域では，マグニチュードが大きく（概して3～

5)，深度≦ 10km までの浅発地震でさえも，月と太陽の合成引力が直接の引き金になっているようである．

4. 月と太陽の合成引力で生じた小さく浅い地震の Mod 指標は，満月時期近くで側方応力によって引き起こされる地震に比べると，かなり大きくなっている．

5. 地震活動が活発なある地域において，地球潮汐による地震の発生様式を応用した研究を行ったところ，連続した期間で，一定間隔の前震と本震を起こす応力についての有効な考えが提案された．

太陽と月に起因する地震の多様な発震機構

Characteristics of Various Earthquake Triggering Mechanisms Caused By Sun and Moon.

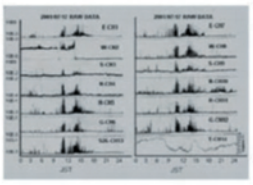
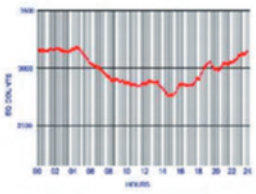
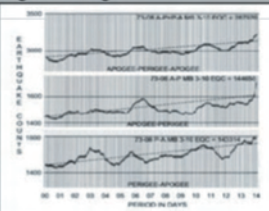
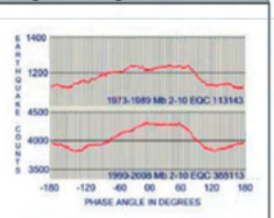
Processes	Diurnal and semidiurnal stresses	Diurnal Seismicity	Lunar Periodicities	Earth Tide
Short notes on the mechanisms **Last three mechanisms were tested utilizing earthquake catalogues (NEIC-USGS) for period 1973-2008.**	Diurnal stresses are witnessed particularly at Sunrise and Sunset timings, primarily caused by the position of the Sun. Semidiurnal type of stresses are caused again by the Sun position, which are equally spaced in the time scale from the noon position. These were consistently found for 8-15 days. Earthquakes and volcanic eruptions have occurred during the timings of the stresses suggest that they are triggered by these stresses.	Primarily caused by the diurnal temperature change caused by the Sun position, which affects the horizontal component of the magnetic field, which governs the earthquake pattern. Though the effect of the temperature is terrestrial, however, effect caused to the horizontal magnetic field, earthquakes deep down are also affected.	Three different periodicities namely 1. Apogee-Perigee-Apogee (APA) 2. New Moon-Full Moon-New moon (NMN) and 3. Ascending nodes to Ascending node (ANAN), are studied. APA cycles provide around 10% more earthquakes at perigee as compared to those at apogee. NMN cycles also provide around 6% more earthquakes at Full Moon as compared when Moon positioned at first and third quarter. ANAN provides unique signature of EQ counts going up from Moon position at AN, to it's declination at around 50^0 and then going down till the next AN. The effect is mostly terrestrial type.	The tides are slight bulges of the ocean's or Earth's surface that face the Moon and the Sun as the Earth rotates on its axis. At new and full moon, the Sun and the Moon are aligned, and the lunar and the solar bulges add together for the greatest tidal range (Spring tide). At first- and third-quarter phases of the moon, lunar and solar tides are in opposition, and the tidal range is at a minimum (Neap tide). The tidal effects on the earth body, trigger earthquakes at all possible depths.
Effects on Magnitude range	Earthquakes of magnitude range of 3-9 had occurred during the timings of these stresses	Earthquake magnitude < 5.0	Earthquake magnitude range 4-6 However, the proxigean tide can trigger earthquakes in entire magnitude range.	Earthquake magnitude < 5.0
Effects on Depth range	Mostly found in the shallow focused earthquakes and in volcanic eruptions	Effects all earthquakes at entire depth range from 00-700 km	Effect earthquakes up to the depth of 35 km	Effects earthquakes at entire depth range from 00- 700 km
Effects on Latitude range	Effects earthquakes for latitude range of $+70^0$ to -70^0	Effects earthquakes for latitude range of $+70^0$ to -70^0	Effects earthquakes for latitude range of $+70^0$ to -70^0	Effects earthquakes for latitude range of $+70^0$ to -70^0
Effects on Longitude range	Effects earthquakes in all longitude range	Effects earthquakes in all longitude range	Effects earthquakes in all longitude range	Effects earthquakes in all longitude range
Specimen record				
Specimen details	EM noise of the atmospherics at the ORSOC (Okayama Ridai Seismic Observatory Center, E 144-55'48.3, N34-41'48.1) and its neighbourhood for 1-13 channel for 17 July 2001. The times of these RF emissions in VHF band fall on either side of the local noon period (in JST.) (This figure is reproduced here (Yamamoto et al., 2002) with prior permission from the first author Dr. Isao Yamamoto.)	The line-graph shows low EQ-counts during the local daytime for the world earthquakes (1973-2008) for total 286,474 events. (Kolvankar et al, 2010a)	Earthquakes for period 1973-2008 aligned to anomalistic months. Three sections provide plots for apogee-perigee-apogee, apogee-perigee & perigee-apogee, which indicate enhancement in EQ counts of nearly 10% at perigee as compared to those at apogee. (Kolvankar et al., 2010b)	Effect of earth tide on the occurrence of earthquakes (Mb 2-10) for two different periods 1973-1989 and 1990-2008.
Remarks	Moon also might be generating similar diurnal and semidiurnal stresses on the earth surface, however it moves much faster (12 time faster than Sun) latitude wise and hence do not provide consistent stresses on day to day basis.	Negative undulation on the diurnal seismicity plot at 15 hours is the time when the temp is at maximum at equatorial places. The positive undulations at around 0530, 1930 and at 1200-1300 are possibly caused by the semidiurnal stresses from the Sun.	Three Lunar periodicities consistently provide effects on earthquakes with magnitude range of 4-6. However the square diagrams of AP-NM show that more earthquakes of magnitude 6 and above are triggered at perigee new/full Moon combination.	The earthquakes with magnitude range up to 5.0 and depth range of 00-700 km are affected. However the published literature put these for earthquakes up to magnitude 4.0 and for shallow focus events.

表1 月周期によってつくられる潮汐，主要な地震が発生した遠地点－近地点－遠地点（APA）および新月－満月－新月（NFN）が示されている．

CORNER	DETAILS	EQs OVER 12 HOURS LINE.		EQs IN FOUR CORNER AREAS							
		MB = 7.0 -10 NOS %		MB = 7.0 -10 NOS %		MB = 6.4-6.9 NOS %		MB = 6.0-6.3 NOS %		MB = 6.0 – 10 NOS %	
TOP LEFT CORNER	APOGEE-NEW MOON	06	13.95	19	16.23	45	22.92	64	17.06	128	18.60
TOP RIGHT CORNER	APOGEE-FULL MOON	07	16.27	23	19.65	38	19.38	83	22.13	144	20.93
BOTTOM LEFT CORNER	PERIGEE-NEW MOON	19	44.18	46	39.31	66	33.67	101	26.93	213	30.95
BOTTOM RIGHT CORNER	PERIGEE FULL MOON	11	25.58	29	24.78	47	23.97	127	33.86	203	29.50
	TOTAL	43		117		196		375		688	

6. 大地震の前震と余震はSEM角で示される範囲に柱（column）に揃うことが発見された．ほとんどの余震は，一般的に，EQ数に応じたさまざまな高さの三角形状のEQピークを形作る．このSEM角のどちらか一方への応答は，結果として，EQ数の山を表す二等辺三角形を形成しにくくする．余震においては，大地震が起こった後，断層の形態や向きの変化に対応して，前震の柱に続くか，近くの柱，あるいは何か他の柱へ移動するであろう．

謝辞：本研究は，関連したプロジェクトを進める上で，Atomic Energy Commission主任である S. Bannerjee 博士，BARC E. & I. Group部長 G.P. Srivastava氏，および BARC Computer 部局長 A.G. Apte氏らの親切なご許可のもとに，筆頭著者の退職後になされたものである．彼らの心からの支援に感謝する．とくに，インドのムンバイ Deharadun IIG WIHG前部長のB.R. Arora博士には，切迫した大地震の観測へのET図の適用に際して，ご指導いただいたことに深く感謝する．また，ご支援とご協力を頂いた Raja Ramanna FellowのP.S. Dhekne氏，BARC Computer 部局の Shir L.S. Rajput氏ら，および原稿を査読頂いたR.S. Chaughule氏にも感謝する．

研究分担：筆頭者は単独で研究計画・方法論の策定，原稿の執筆を行った．他の著者は筆頭者の指示のもとに，MCAのプロジェクト研究を行い，NEIC-USGSの地震データ処理に必要なソフトウェアを開発した．

文　献

Brodsky, E.E., Karakostas, V. and Kanamori, H., 2000. A New Observation of Dynamically Triggered Regional Seismicity: Earthquakes in Greece Following the August, 1999 Izmit, Turkey Earthquake. Geopys. Res. Lett., v. 27, no. 17, p. 2741-2744.

Cochran, E.S., Vidale, J.E. and Tanaka, S., 2004. Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes. Science, v. 306, p. 1164-166.

Hayakawa, M., Sue, Y., and Nakamura, T., 2009. The effect of earth tides as observed in seismo-electromagnetic precursory signals. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., v. 9, p. 1733–1741.

www.nat-hazards-earth-syst sci.net/9/1733/2009/

http://www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html

http://www.sciencedaily.com/releases/2004/10/041022103948.htm

Iwata, T. and Katao, H., 2002. Relation between Moon Phase and Occurrence of Micro-earthquakes in the Tamba, Plateau. Jour. of Geography, v. 111, no. 2, p. 248-255.

Kasahara, J., 2009. Tides, Earthquakes, and Volcanoes. Science, v. 297, no. 5580, p. 348-349.

Knopoff, L., 1964. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes. Bull. of Seismological Society of America, v. 54, no. 6, p. 1865-1870.

Kolvankar, V.G., 2008. Sun induces semidiurnal stresses on the earth surface which trigger earthquakes and volcanic eruption. NCGT Newsletter, no. 47, p. 12-23.

Kolvankar, V., Deshpande, S., Manjre, A., More, S. and Thakur, N., 2010. Diurnal seismicity and temperature. Ind. Geophys. Union, v. 14, no. 3, p. 183-194.

Kolvankar, V., Deshpande, S., Manjre, A., Pansare, S., More, S. and Thakur, N., 2010. Lunar periodicities and earthquakes. NCGT Newsletter, no. 56, p. 32-49.

McNutt, S.R. and Beavan, R.J., 2002. Volcanic earthquakes at Pavlof Volcano correlated with the solid earth tide. Science, v. 297, no. 5580, p. 348-349

Metivier, L., Viron, O., Conrad, C.P., Renault, S., Diament, M. and Patau, G., 2009. Evidence of earthquake triggering by the solid Earth tides. Earth & Planetary Science Lett., v. 278, p. 370-375.

NEIC-USGS earthquake search catalogue, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php.

Tamarazyan, G.P., 1968. Principal regularities in the distribution of major earthquakes relative to the solar and Lunar tides and other cosmetic forces. ICARUS, v. 9, p. 574-592.

Tanaka, S., Ohtake, M. and Sato, H., 2002. Evidence for tidal triggering for earthquakes revealed from statistical analysis of global Data. Jour. of Geophys. Res., v.10, B10,2211,doi:10.1029/2001JB001577.

Tanaka, S., 2010. Tidal triggering of earthquakes precursory to the recent Sumatra mega thrust earthquakes of 26 December 2004 (Mw 9.0), 28 March 2005 (Mw 8.6), and 12 September 2007 (Mw 8.5). Geophys. Res. Lett., v. 37, L02301, 4PP., 2010 doi:10.1029/2009GL041581

Tolstoy, M., Vernon, F.L., Orcutt, J.A. and Wyatt, F.K., 1971. Breathing of the seafloor: Tidal correlations of seismicity at Axial volcano. Science, v. 174, Nov 12, no. 4010, p.

687-692.
Wilcock, W.S.D., 2001. Tidal triggering of micro-earthquakes on the Juan de Fuca Ridge. Geophys. Res. Lett., v. 28, no. 20, p. 3999-4002.
Wilcock, W.S.D., 2009. Tidal triggering of earthquakes in the Northeast Pacific Ocean. Geophys. Jour. Int., v. 179, p. 1055–1070. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04319.x
Yamamoto, I., Kuga, K., Okabayashi, T. and Takashi, A., 2002. System for earthquake prediction research in the region of VHF frequency band. Jour. of Atmospheric Electricity, v. 22, p. 267-275.

地震と太陽の活動サイクル　EARTHQUAKES AND SOLAR ACTIVITY CYCLES

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

Leo MASLOV
Aims College, Greeley, CO, USA/ Computing Center, RAS, Khabarovsk, Russia
Ms_leo@hotmail.com

（小松　宏昭・角田 史雄［訳］）

要　旨：1973 ～ 2010 年の地震活動から，地震発生頻度が太陽活動と密接に関係していることがわかる．すなわち，地震の発生回数は，太陽活動がピークから衰えていく時期に増加し，太陽の活動が活発になる時期に減少する．地震活動のサイクルには 11 年，22 年，44 年の 3 つのサイクルが知られている．1)11 年周期の太陽（黒点）活動は，震源が 300km より浅く，マグニチュードが 6.9 より小さい地震に影響を与えている．2)22 年の周期は，マグニチュード 5.0 ～ 5.9 の浅い地震の活動が著しく停滞している時期にもっともよく見られる．それらは，黒点の活動が勢いを増す 21 ～ 23 年の周期と対応している．3) あらゆる深さで起こるマグニチュード 7.0 以上の最大規模の地震は，より長期の 44 年周期― 1969 ～ 2013 年―に密接に関連している．最初の 22 年間の地震活動は活発ではないが，後半の 22 年間には活発な活動が認められ，それは，太陽活動の 44 年周期の中の停滞期と一致する．4) 地震活動の著しい停滞，あるいは 1996 ～ 2003 年の休止期間は，太陽活動だけにその原因を求めることはできない．惑星の相互作用が加わったことによる力を考える必要がある．5) 1994 年以降のマグニチュード 4.9 以下，震源が 100km よりも浅い地震は 1990 年以降の非常に深く，また非常に強い地震の増加に原因がある．地震と火山の活動がもっとも活発化するのは，太陽活動の 44 年周期のうちの 24 番目の太陽活動周期のなかで，活動が停滞気味になる期間で，もっとも弱い活動期は 2012 ～ 2014 年になるだろう．2012 ～ 2014 年はまた，1928 ～ 2013 年の 86 年間にわたる太陽の活動周期の終わりの時期（または極小ポイント）に符合している．

***キーワード**：地震活動周期，太陽活動周期，太陽と地球の相互作用，地震の 44 年活動周期，地震活動の休止*

まえがき

最近，太陽の活動とその活動が地球の地殻変動へ及ぼす影響に関する研究が，劇的に増加している．ほんのわずかな例をあげただけでも，次のようなものがある：Simpson, 1967；Zhang, 1998；Gregori, 2002；Gbusheva, et al., 2003；Duma and Ruzhin, 2003；Endersbee, 2007；Khain and Khaliov, 2008；Hissink, 2009；Casey, 2010；Quinn, 2010．この論文は，太陽が放射する電磁気・フレア・陽子・重力などを通じて，地震や火山活動といった地球物理学的な活動や地球規模の温暖化に対する太陽の広汎な影響を明らかにしようとするものである．

この論文は，全地球的規模のダイナミックス（地球力学）の観点からの地球上で起こる地震の研究の広がりと 1973 ～ 2010 年の USGS と NEIC で保管されている地震データおよび，NASA のウェブサイトから引用された，太陽の活動周期に連動した地震活動をはっきりさせようというものである．

1 年ごとの地震変動の傾向と太陽か活動周期との関連性

図 1 は，1973 ～ 2010 年の NEIC 資料にファイルされた，地震の全記録―震源の深さが 300km より浅いものと，それより深いもの―とマグニチュード (M=4.0 ～ 4.9，5.0 ～ 5.9，6.0 以上，7 以上のもの）と太陽の黒点活動を比較したものである．

図 2 と図 3 は，さまざまなマグニチュードにおいて年代と深度との相関を示した図である．

これらのグラフでは 3 つの主要な傾向があることを見ることができる．1)300km より浅くて小規模 (M=4.0 ～ 4.9)

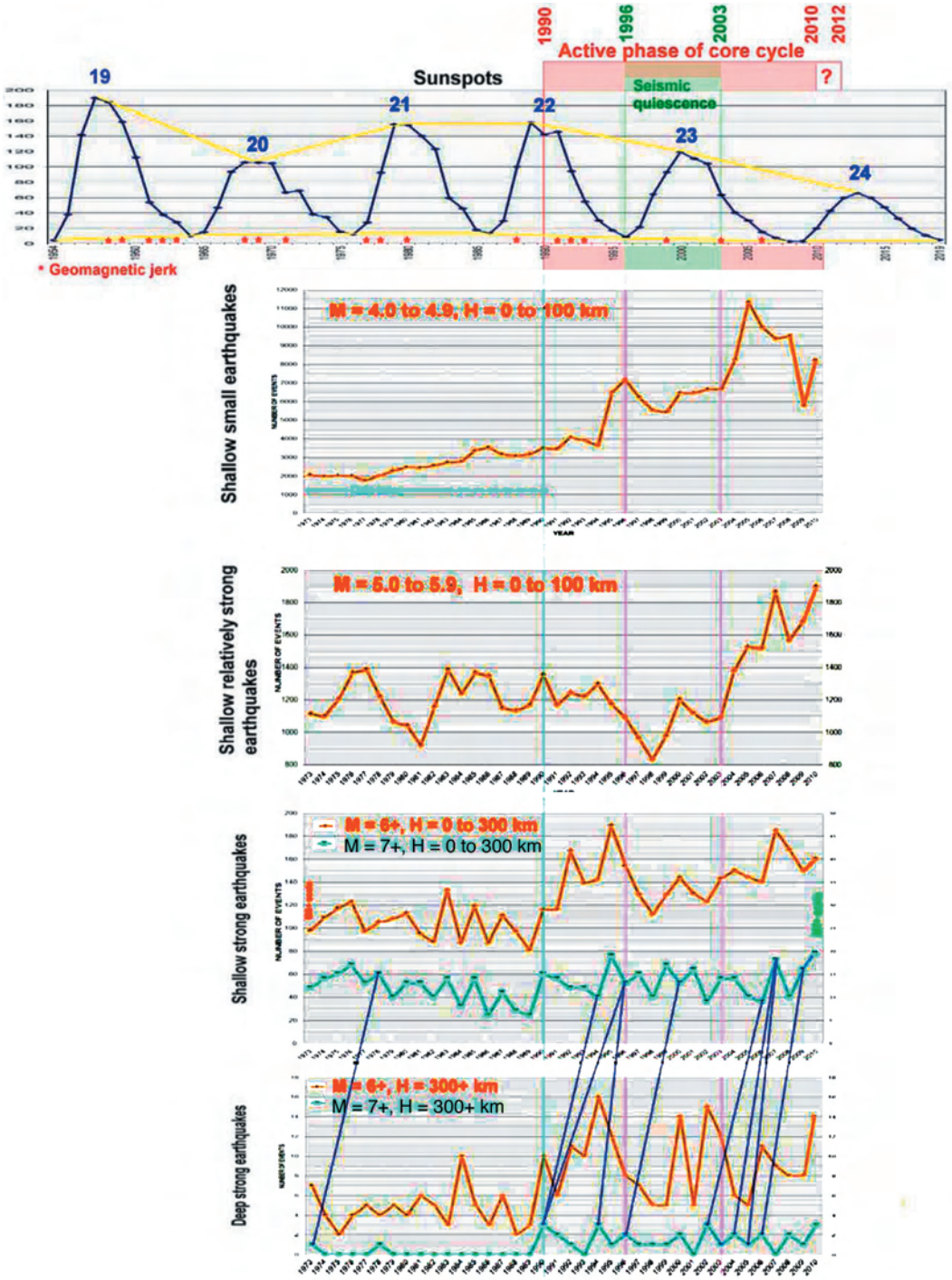


図 1　太陽黒点の活動周期曲線と，各年度における，さまざまな深さとマグニチュードの地震発生件数とを比較したもの．下 2 つの図にある黄色の線は Blot によって打ち立てられた ET 概念（1976）とリンクしている．太陽黒点のデータは NASA によった．核とマントル境界の地磁気の急激な変動は，Quinn(2010) に基づいている．

の地震は 1995 年以降増加しており，太陽活動の 11 年周期に符合している．2）比較的大きな M5.0 ～ 5.9 の地震は，太陽活動の 11 年から 22 年周期に関連性が見られる．3)M6.0 やそれ以上の大きな地震はより長い 44 年周期に影響されている．

1）M4.0 ～ 4.9 の小規模な地震のグループ

この範囲の小規模な地震は，M4.0 かそれより大きな地震のおよそ 80 パーセントの原因となっている．1990 年以前の信頼できるデータを別にして，1991 ～ 2010 年には全体として，活動が活発化していく．つまり，1991 ～ 1994 年はゆっくりとしたテンポで活動が活発化し，1995 ～ 1996 年は急速に活発化した．1997 ～ 2003 年までの小規模な降下期と安定期（地震の全地球的静穏期）を経て，活動のカーブは急激に上昇し，2005 ～ 2008 年にピークを迎える．この傾向は 2010 年になっても高いまま続いている．

1995 ～ 1996 年の鋭いピークは太陽活動の周期 22 と 23 の谷間に符合する．そして次の大きなピークは 2005 ～ 2008 年であり，周期 23 の活動下降期にあたる．1995 年からの小規模な浅い地震の突然の増加は，浅発地震より 3 ～ 5 年前に起こった M7.0 以上の地震からもたらされたエネルギーに由来している．表 1 に示され，Blot(1976)，Choi(20101c) のエネルギー移動の概念によって打ち立て

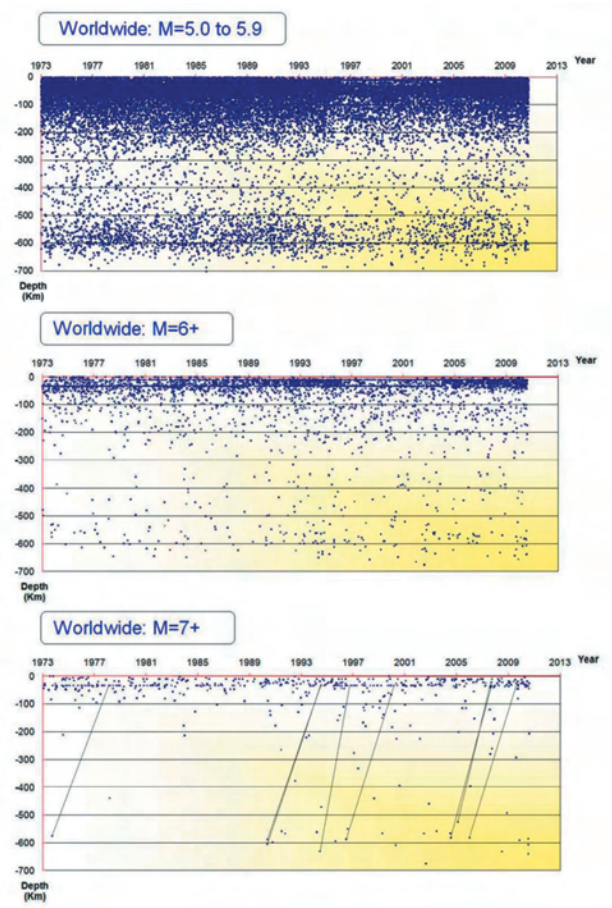


図 2　1973 年 1 月 1 日～ 2010 年 8 月 15 日に世界各地で発生した M5.0 以上の地震の時期－深度別一覧表．Blot の ET 式によって関連づけられた，深発地震と浅発地震とは，一番下の図に示されている．あらゆる深度におけるマグニチュード 7.0 以下の地震の 1996 ～ 2003 年の地震の休止期に注意してほしい．休止期は，M5.0 ～ 5.9 で明瞭に示されている．また M4.0 ～ 4.9 の範囲においても（休止期が）はっきりと示されている（図 3 を見よ）．しかし，M7.0 より大きい最大の地震は，深部においては観測されていない．1990 年以降になると，マグニチュード 7.0 より大きい大地震が，とつぜん現れてきている．M6.0 ～ 6.9 の地震もまた，1990 年以降の発生が顕著である．

られた M7.0 以上の浅発と深発地震の関連性は図 1・図 2 に示されている．

1992 ～ 1996 年の地震活動期は，太陽活動の周期 22 の活動下降期に関係している．1997 ～ 2003 年の活動衰退期は，太陽活動周期 23 の活動上昇期と関係し，2004 ～ 2008 年の地震活動のピーク時は太陽活動周期 23 の活動下降期に関係している．M4.0 ～ 4.9 の地震は太陽活動の 11 年周期に関係している．

2）M5.0 ～ 5.9 の比較的強い地震のグループ

このグループの活動は 1976 ～ 1977 年，1983 ～ 1986 年，2004 ～ 2010 年に活発である（図 1 の中央の図と図 2 の最初の図）．これらはすべて太陽活動が不活発になる年や 20 番目，21 番目 23 番目の 11 年周期の谷間にそれぞれ符合する．

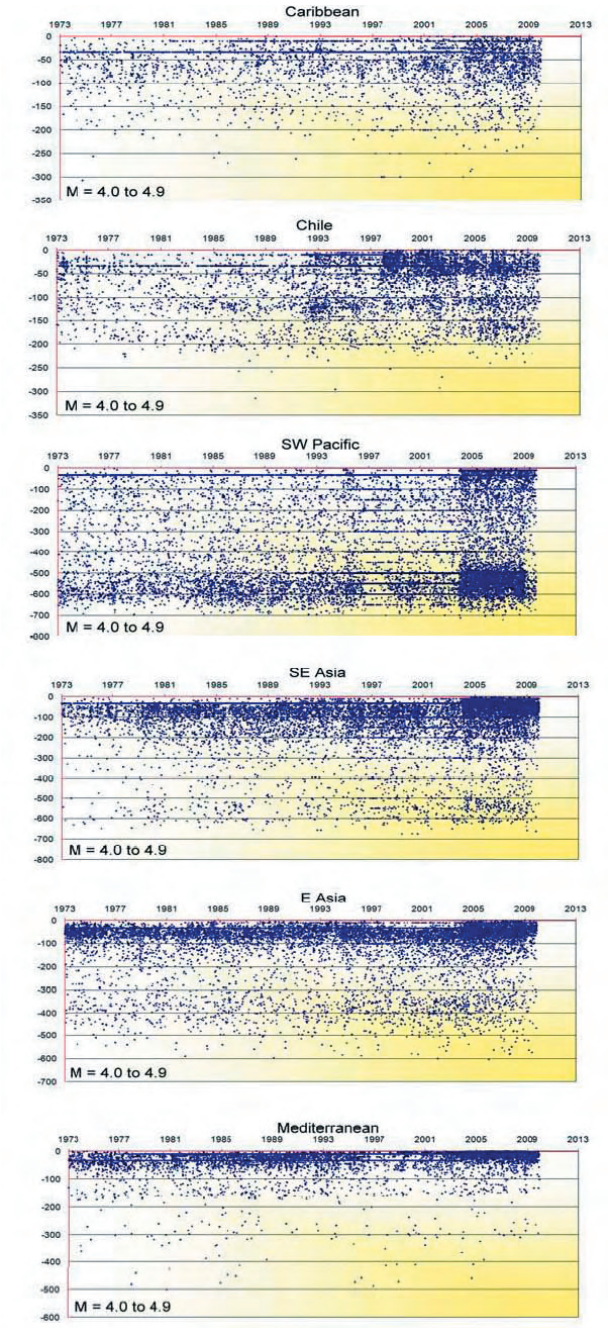


図 3　1997 ～ 2009 年の世界各地で発生したマグニチュード 4.0 ～ 4.9 の地震の年度－深度分布表．いくつかの影響が，このマグニチュードの範囲内の小さな地震におけるデータ中に認められる（1987 年までのカリブ海地域，1991 年のチリ，そして 1978 年の東南アジア地域）．Choi (2010a) の追加データを見てほしい．1996 ～ 2003 年の浅発地震と深発地震の休止はこれらの図でも明確に表現されている．

このグループの地震の活動が不活発な時期についてみると，3 つの谷間がある．最初は 1978 ～ 1982 年の 5 年間，次が 1987 ～ 1989 年の 3 年間，3 番目は 1996 ～ 2003 年の 8 年間である．最後の地震活動の谷間は，図 2 と図 3 の年別―深度別のグラフではっきりと明確に描き出されている．しかし，M6.0 ～ 6.9 の地震においてもある衝撃的な事実が見られる．1996 ～ 1998 年の突然の発生回数の減少は特に衝撃的である．ピークからはおよそ 40% も発生回数が少ない．地震発生回数の衝撃的な減少は，M7.0 より小さい他のすべての地震についても見ることが

Year	Month	Day	Latitude	Longitude	Magnitude	Deph (km)	Note
1973	9	29	41.89	130.87	7	575	Linked to: 23 & 24 Mar/1978. M=7.5-7.6, H=33km. Offshsore Iturup, Russian Far East. New data.
1990	5	12	49.04	141.85	7.2	605	Linked to: 4 & 9 October, 1994, M=8.3 and 7.3, H = 14 and 33 km, respectively. Offshore Iturup, Russian Far East. New data.
1990	5	24	-7.36	120.36	7.1	588	Linked to: 21 February, 1996, M=7.5, H=10 km, Offshore Peru. New data.
1994	6	9	-13.84	-67.55	8.2	631	Linked to 12 Nov. 1996 quake. H=33, M=7.7. 350 km South of Lima (Choi, 2010c)
1996	6	17	-7.14	122.59	7.9	587	Linked to 14 May 2000 quake. M=6.3, H=33. Suva Sea, Indonesia (Choi, 2010c)
2002	8	19	-21.7	-179.51	7.7	580	Linked to 5 May, 2006 M=8.0 quakes (H=11km), 100km north of Tonga (Choi, 2010c)
2002	8	19	-23.88	178.49	7.7	675	Ibid. (H= about 20 km)
2004	7	25	-2.43	103.98	7.3	582	Linked to the Southern Sumatra quake (M=8.4) on 12 Sep. 2007 (Blot and Choi, 2007)
2005	2	5	5.29	123.34	7.1	525	Northern Celebes Sea. Possible link: 26 July, 2007. M6.9, H 25 km (best match 35 km). Molucca Sea (Choi, 2010c).
2006	1	2	-19.93	-178.18	7.2	582	One of 29 Sep. 2009 Samoa quake forerunners (Choi, 2010a)

表 1　エネルギー移動概念によって打ち立てられた深さ 500km 以上で発生した M7.0 以上のいくつかの強い地震と浅い地震との関連性．より深い所の強い地震については Choi(2010c) を見よ．

できる．この特別な期間は太陽の 23 番目の活動サイクルの最初の 3 分の 2 を占めている．それは活動上昇期から活動のピークを過ぎ，活動減少期の初めの半分の時期に当てはまる．それは他の活動の谷間に期間よりも 3 ～ 5 年長い．

地震活動は太陽活動が活発になり始めるときに衰え，その活動がピークを過ぎて下降期に入るまではあまり活動しないという現象は興味あることである．地震活動は太陽活動の下降期の中間で上昇に転ずる．このことは，図 1 に示された太陽の 21 番目と 23 番目の活動サイクルの中の M5.0 ～ 5.9 の範囲でよく認められる．しかしながら 22 番目の活動サイクルでははっきりとは認められない．それゆえ，地震活動の深い谷間は 22 年周期を持っているものと考えられる．また，太陽活動のピークにおいて地震活動の単年度での鋭敏で小規模な増加が見られる．それは 1980 年，1990 年，2000 年のほとんどの地震の中に認められる．

3) M6 あるいはそれ以上の強い地震

M6.0 以上のグループの変動は図 1 の一番最後に示されている．そして時間―深度相関図は図 2 に示されている．

M6.0 以上の変動曲線は，M6.0 以下のグループのそれとは異なっている．M6.0 に属する浅発地震や深発地震両方において 2 つの異なる時期が認められる．活動が不活発な時期は 1973 ～ 1989 年，活発な時期は 1990 ～ 2010 年である．これは特に非常に強く（M7.0 以上），深い（深度 300km 以上）地震において顕著である．このグループは 1996 ～ 2003 年の休止期の影響を受けない．われわれは M6.0 以上で観察される地震の頻度曲線は本来太陽の 44 年周期に関係があると考えている．それは 20 ～ 24 番目の活動周期の頂点（図 2）をカバーしている 1969 ～ 2013 年の長期間の地震頻度曲線の中に見ることができる．1990 年は 44 年の活動サイクルの中のピークの年である．M7.0 以上の深発地震の活動はこの長い周期の中で活動が衰える年に活発になる．1990 年における地震の強いピークは，太陽活動の 44 年周期に符合する．太陽活動の 11 年周期はまた以前に述べたように小規模な地震活動のピークを伴う．

しかしながら M6.0 以上の地震のいくつかは，太陽の 11 年周期に影響を受けている．M6.0 ～ 6.9 の浅発地震も深発地震も，太陽活動の 23 番目の周期で活動が活発になる時期の最初の半期，すなわち 1996 ～ 1998 年に顕著な活動の落ち込みが見られる．これはまた 1996 ～ 2003 年の地震の主要な休止期の最初の半期であり，地球の構造的活動の休止の引き伸ばしを引き起こした非常に強い力が作用しているということを暗示している．

議　論

最近の研究で，きわだった地震活動の静穏期に，11 年，22 年，44 年の各サイクルで，太陽－地球間における密接な交互作用のあることを暗示する，たくさんの興味深

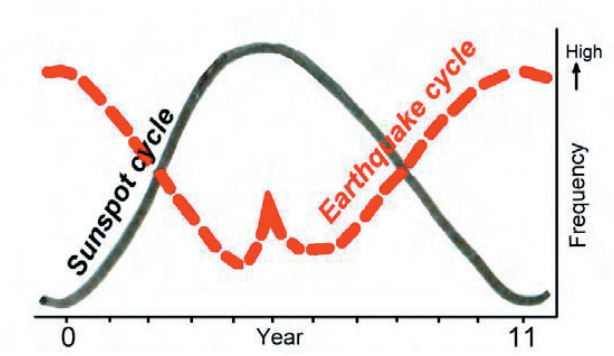


図 4　11 年サイクルにおける，太陽の黒点の数と地球の地震の数との関係をモデル化したダイアグラム．この傾向は，22 年と 44 年のサイクルにも適用できる．

い事実が明らかになってきた．そのうえ，太陽の黒点の数がもっとも多くなるときに，地球の地震の数はほんのわずかにしか増えない，という逆相関がみられるのである．この関係をグラフ化して示したのが図 4 である．

こうした傾向は，火山活動にもあてはまる．Casey（2010）は，北アメリカ大陸における過去 350 年間の火山活動記録と，300 年間にわたる地震活動とを調べた．そして，太陽活動と，最大級の火山活動ならびに巨大地震との間にある非常に密接な関係を発見した．つまり，最大級の火山活動と巨大地震とは，太陽活動が，極小期ではもっとも強いものでさえ低いレベルである時期に発生していたのである．しかしながら，Gregory（2002）の研究では，西暦 1550 年からのエトナ火山ならびにベスビアス火山との噴火履歴は，太陽活動と同調するような関係にあるという．さらに Quinn（2010）は，非常に顕著な火山活動は，地磁気のジャーク現象の現れるころに多くなると指摘している．このジャーク現象は，地球の磁場と太陽風とによって誘発される電磁気誘導で，地核－マントル境界で発生する．

1）11 年と 22 年のサイクル

いままでの多くの研究で，地震活動が，太陽と同じような，およそ 11 年と 22 年のサイクルをもっていることは分かっている（Zang，1998 に引用されている Luo and Li，1978）．この論文では，Gousheva ほか（2003）による観察結果が良いと考えている．つまり，地震は，太陽の活動が下り坂になっていくころに発生しやすいが，太陽活動の活動期には少ない傾向がある．

この他の研究としては Simpson（1967）があり，彼は，1950 ～ 1963 年の M5.5 か，それより大きい地震で同じような結果をえている；つまり，太陽活動が下り坂になっていったり，活動パターンを変えつつある時に，地震活動のピークがあらわれるが，とくに，太陽のフレアと磁気嵐のときに，地震をひき起こす引き金になっている，という結果である．とくにここで注目されるのは，フレアの活動が活発になる期間は，太陽活動が強くなったり，弱くなったり移行期にあたっている．そうした期間のなかで，フレアがもっとも激しくなるのは，11 年サイクルが下り坂になっていく時である（Das Gupta and Basu，1965）．

Khain and Khalilov（2008）がしらべた 1600 ～ 2000 年の火山と地震の活動履歴にも，11 年と 22 年のサイクルがある．しかし，M7.0 より大きい地震は 22 年サイクルに多くみられ，火山では 22 ～ 23 年のサイクルとよく合っている．太陽の変動曲線では，最近における 22 年サイクルは見られないが，1862 ～ 1928 年には，3 回の 22 年サイクルが認められる（図 5）．

Gousheva ほか（2003）は，1）太陽の黒点と 2）太陽活動の衰退期とに対応する，2 つの地震活動期を指摘した．これらの観察結果は，筆者らのデータを完全に支持する（図 4）．1）の結果は 1 年のピークとして現れているが，2）のそれでは 4 ～ 6 年にわたる上昇傾向を示している．地震活動のピークと太陽活動の 44 年サイクルのピークとは，ともに，1990 年にあらわれた．

2）44 年サイクル

すでに述べたように，M ≦ 7.0 深発地震の発生のしかたにはある傾向が認められ，1990 ～ 2010 年には，一定の割合で発生している．しかし 1990 年より前は，ほとんど発生していない（図 1，図 2）．1974 ～ 1989 年には静穏だが，1990 ～ 2010 年は活発という傾向は，11 年サイクルの影響はなんらかの形でありそうだが，大きさが M6.0 ～ 6.9 で，深発あるいは浅発の地震の両方で認められる．しかしながら，11 年あるいは 22 年の太陽活動サイクルと同じ変動サイクルをもつ M6.0 より小さい地震では，この傾向はみられない．

この長い変動パターンを読むために筆者らは，NASS の 1955 年以降からの（太陽活動？；原文では「地震」）データを 2020 年まで敷衍してコンパイルしてみた．これによって，長期にわたる黒点のサイクルを表せるようになり，1970 ～ 2013 年の 44 年サイクルのピークは 1990 年であることが分かった（図 1 と図 5）．この長いサイクルは 1928 ～ 1969 年の 42 年間でも，1947 年のピークが観察できる．1804 ～ 1928 年の 44 年サイクルははっきりしないが，1761 ～ 1804 年では 44 年サイクルを読み取れる．

筆者らは，こうした太陽活動の 44 年サイクルは，大きな深発地震の傾向と対応していると考える．1990 年は 44 年サイクルのピーク同士が重なり合う（図 1）が，これは，大きな深発地震の活動期が，11 年サイクルと同じように，最近の太陽活動の 44 年サイクルが下り坂になるときと対応していることを意味している．

44 年サイクルの地震活動の在ることは，まだ，誰もはっきりと示してはいない．筆者らはこれを，地震のデータを取り扱うことで抽出されてきたものである，と考えて

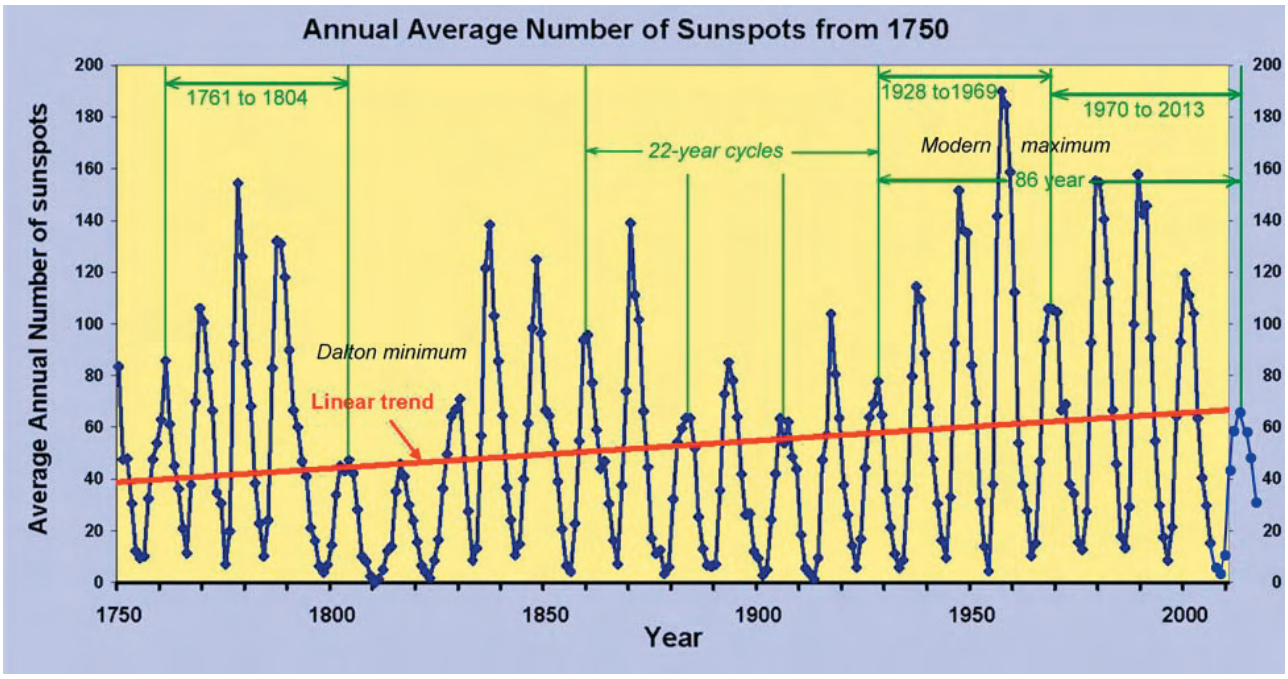


図 5　Endersbee（2007）と NASA のウェブサイトに基づいて作成した黒点のサイクル．22 年と 44 年のサイクルとが分かる．

いる．今までの深発地震と浅発地震に関する研究では，これらを一つのセットとして扱ってきた：つまり，だれもが，それらを別のものとはせず，それらがともに異なる成因をもっているとは考えなかったのである．

筆者らは，M7+ 深発地震によって示される 44 年サイクルの活動期が来るのは，そう遠い未来ではない，と考えている．しかし，アジアにおいては火山・地震活動（VE イベント）のサイクルが 30 ～ 50 年という角田（2010）の研究，ならびに，地球全体での 30 ～ 60 年サイクルを指摘する Quinn（2010）などに基づけば，上記の議論と同じように筆者らは，44 年サイクルの太陽の黒点の活動期がつぎの活動期へはいっていくことに対応した，2013 年をピークとする［深発地震の；訳者加筆］活動期を想定している．一方，大きな浅い地震はさらに 4 ～ 5 年続くとみられる．

44 年の地震サイクルにくわえて，Duma・Vilard（1998）ならびに Gousheva ほか（2003）は 80 年の地震サイクルの存在を示した．Duma・Vilard は世界の M ≦ 7.0 地震，Gousheva ほかは 1893 ～ 1992 年にオーストラリアで発生した M3.1 ～ 5.0 地震（彼らの図 6）をそれぞれ解析した．Gousheva ほかはさらに，地磁気の強弱曲線が，地震の変動曲線とよく対応することも指摘した．1928 年から 2013 年までの 86 年の太陽活動のサイクルは図 5 に示した．しかしなが 1973 年以前の信頼できる地震データがなく，ここでは，意味のある討論を展開することができない．このほかに Quinn は，もっともはっきりした地磁気の活動は 60 年のサイクルをもっていて，30 年という期間はいわば，非常に大きな地震（M7+）活動と関連している，と考えている（2010 年 11 年 20 日私信）．

太陽活動の 24 年サイクルが弱く（Hathaway，2010），つよい地震活動が太陽活動の静穏期であると考えれば，2012 ～ 2014 年の 44 年サイクルの終わり，あるいは，静穏期には，造構（地震）と地磁気とが，もっとも活動的になると想定できる．その時期は太陽活動の 86 年サイクルの終わりの時期と一致する．Casey（2010）も，自らの観察結果に基づいて，そのような意見を述べている：つまり，過去 300 ～ 350 年にわたる北米大陸におけるもっともはげしい火山と地震の活動は，太陽活動がもっとも停滞した時期にあたっている，という．いままでにないほど大きい，2010 年 7 月に起きた北セレベス海の深発地震の衝撃は，2012 年にモルッカ海の地殻浅層へたっするであろう，という想定（Choi，2010）は，こうした指標をつかって解き明かすことができよう．

3）地震活動の静穏期

年上の筆者（Choi，2010b）は，1996 ～ 2003 年の 8 年間を世界的な地震活動の停滞期と考えた．この活動の停滞は，あらゆる深度における M6.9 より小さい，とくに M5.0 以下のあさい地震にきわだっている（図 1 ～ 3）．しかしながら，M7+ の大きな地震に関しては，震源の深さにかかわらずに，こういった静穏期は認められない．この時期はまさに，太陽の黒点の 23 番目の活動期にはじまり，そのピークから 2 年経って終わった．

この深部にまで及び，きわだって長い 1996 ～ 2003 年の静穏期は，太陽の活動の異常だけでは説明できない．これ以外のほかの力，たとえば，一直線上にならんだ地球，月，太陽の重心と他の惑星群との間に生まれる力とか，地球の角速度と関連して生ずるうごきとによる力とかが必要となろう（Quinn との 2010 年 11 月 12 日の私信）．

4）関連する係数

上記の地震と黒点の変動に関する相関関係を科学的に検証するには，関連する係数を算定しなくてはいけない．0 ～ -100km で発生する M5.0 ～ 5.9 地震と黒点の活動から導かれる相関関係を図 6 に示した．この結果は，-5 の値で示される負の相関関係になった．

5) 1996 ～ 2003 年の静穏期に影響をあたえた惑星配列とそれによる交互作用

潮汐力の変化

月が地球へ 1.0 の潮汐力をかけていると仮定すると，太陽が地球へ作用する重力は 0.3 になるが，木星からのそれはたったの 0.01 にすぎない．Avsyuk・Maslov（2010）は，地球－月－太陽の直線配列によって長期間にわたる潮汐力の変動があると，地球での気圏と水圏の潮汐と同様に，地球と月とで，長期間にわたる地震活動が起こることを示した．この力はそんなに強くないが，地球の内部過程をすすめるきっかけの応力にはなれる．図 7 は，

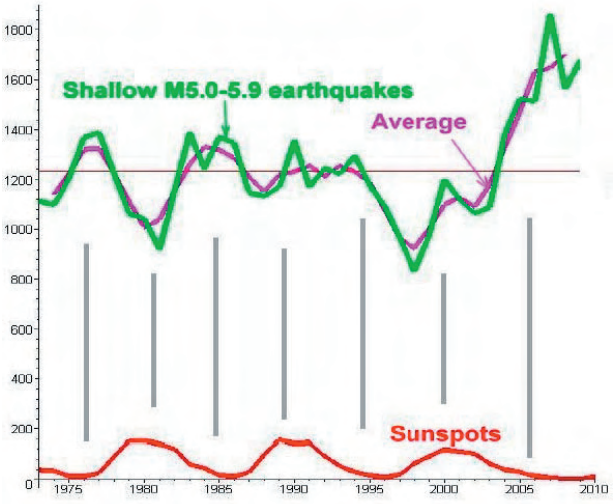


図6 1973～2009年までに発生した浅い（100km以浅）M5.0～5.9 地震と黒点との相関関係．相関係数は -0.5 とする．灰色の線は，太陽の黒点と地球の地震との関係を見やすくするために描いた．

1973 ～ 2009 年における全ての M4.0 ～ 4.9 地震の発生回数である．

23 番サイクルは，太陽活動の極小期から極小期までを示している．このサイクルの中で，その終わりおよびサイクル中ごろの総体的な極小期の両方で，2 つの極大期がある．この総体的な極小期（地震の数は依然として多く，指数関数的なレベルを上回っている時期）があらわれる理由については，地震によってたまっていた応力を開放していく割合が，地中で応力がたまっていく割合より高いためであろう，と説明されよう．静穏な期間にたまった応力は，2 番目のピーク時に解法されるのである．

磁場

木星の 1 年は，地球の 11.86 年に相当する．この期間は，太陽活動の期間とほぼ一致する．その軌道は，かなり大きい離心率もっていて，木星と太陽との距離は，木星が自転する 11.86 年間に非常に大きな変化をする．木星とバランスをとるために，両側にそれぞれ 750000km だけブレルので，それをあわせると 1500000km のブレとなり，結局，その距離は太陽の直径より大きくなる．このできごとは，太陽の対流の乱れといえ，活動が活発化したり，鈍化したりする．

上の図 8 から分かるように，木星が」太陽にもっとも近づいたときには，黒点の活動が弱くなり，もっとも遠ざかったときには，その活動が活発になる．木星が太陽の黒点の活動を活発化するほんとうの原因ではないけれども，その揺らぎが太陽の磁場に影響を与えるのであろう．

この図から木星は，太陽の黒点の活動にはっきりした影響を与えていることが分かる．言いかえれば，地球の磁場や，他の惑星の活動にも影響をあたえていることが分かる．

太陽が地球の地震活動に影響をあたえていることを示すメカニズムは，まだはっきりしない．しかし，本研究から，太陽，地球物理的な場（本質的には磁場），地球の深部

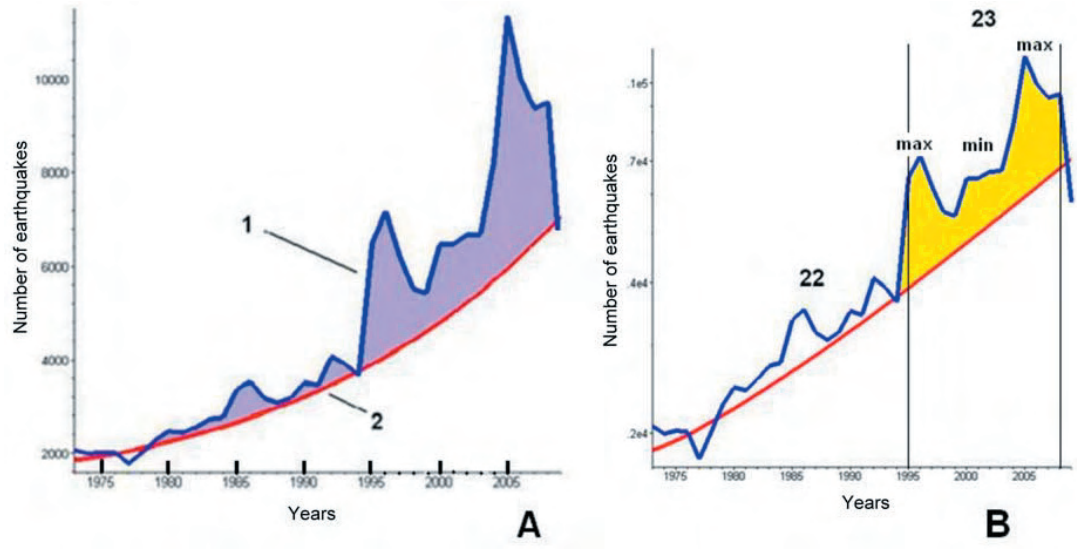


図 7 1973 ～ 2009 年間における全ての M4.0 ～ 4.9 地震の発生回数．
A: 1- 地震数，2- 指数関数的傾向．
B: 同じデータを log で示した；22 と 23 とは黒点のサイクル番号．

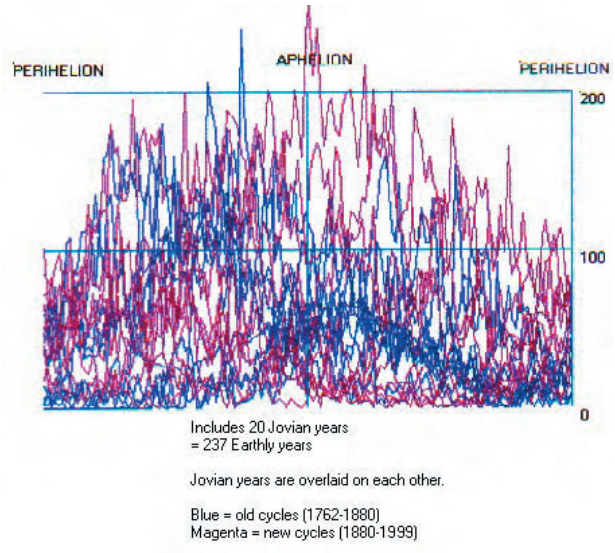


図 8　1772 ～ 1999 年間に発生した黒点数の変化．木星がその軌道上で太陽にもっとも近くなったときから，つぎの最接近まで．

構造とくにその外核の地電流などの間には，重力および電磁気による相互作用がはたらいている，と言えよう．

結　論

1.　地震の数は，太陽活動が衰えていく期間に増える．太陽活動が最盛期のときは，小さくて鋭いピークがあらわれる．一方，地震の数が減っていくときに，太陽活動は盛んになっていく．

2.　太陽の黒点の 11 年サイクルは，300km か，それより浅くて，M6.9 以下の小～中地震に影響を与える．それは，太陽の 11 年サイクルが下り坂になっていくときに発生する太陽のフレア発現時に顕著である．

3.　22 年サイクルは，地震活動の静穏期をふくむ，地震の発生回数の少ないときに現れる．それは，黒点の活動が活発化していく 22 番目と 23 番目のサイクルのときに対応している．これらのサイクルは，規模がすこし大きく，浅い M5.0 ～ 5.9 地震の多いときに，良く観測される．

4.　44 年サイクルは，たいへん大きい M7+ 地震が，深浅をとわずかに発生した 1968 ～ 2013 年によく見られた．この大きな地震のグループは，11 年の太陽活動のサイクルとは関連がない．地震活動の停滞は 1989 年代の前半でみられたが，活動期は 1990 ～ 2013? 年にあったサイクルの第二番目の半分くらいの期間を占めていた．その期間は，44 年サイクルでは下り坂にあたるときだった．

5.　地震活動が停滞したり，静穏だったりする期間には，太陽活動が活発化する．こうした時には地震がよく起こるが，とくに，M7+ のような大きな地震をのぞいた，小さくて浅い地震が多い．1996 ～ 2003 年には地震活動がもっとも不活発だったが，それをもっとも良く説明できそうなのは，惑星が一直線上にならんだり，ほかの惑星との交互作用があったりして生ずる外因的な力がはたらいた可能性がたかい．

6.　1994 年以降，M4.9 より小さく，地下 100km より浅い地震が急に増えた．これは，深発地震の活動レベルが上がって，それが 3 ～ 5 年かかって上昇し，浅くて小さい地震の引き金になったためであろう．

7.　太陽の活動と地球の核の活動との間にある複雑な交互作用をもっとよく理解するには，さらに研究を進めなければならない．その場合，電磁気学的なジャーク現象とか，上位にある下部マントルとのエネルギー収支，さらに深発地震や造構運動を起こす上部マントルへの移動などについての掘り下げが必要である．

謝辞：筆者らは，John Quinn, Giovanni Gregori, Gerald Duma の各氏から貴重なコメントをいただいた．また，David Pratt からは文章を構成していただいた．深謝申し上げる．

文　献

Abarca del Rio, R., Gambis, D., Salstein, D., Nelson, P. and Dai, A., 2003. Solar activity and the earth rotation variability. Journ. Geodynamics, v. 36, p. 423-443.

Avsyuk, Yu.N. and Maslov, L.A., 2010. Tides, seismicity and regularities in orbital motion of the Earth-Moon binary planet system. Earth, Moon and Planets (in press).

Blot, C., 1976. Volcanisme et séismicité dans les arcs insulaires. Prévision de ces phénomènes. Géophysique, v. 13, Orstom, Paris, 206p.

Casey, J.L., 2008. The existence of 'relational cycles' of solar activity on a multi-decadal to centennial scale, as significant models of climate change on Earth. Space and Science Research Center, Research Report 1-2008 – The RC Theory. p. 1-8.

Casey, J.L., 2010. Correlation of solar activity minimums and large magnitude geophysical events. Space and Science Research Center, Research Report 1-2010 (Preliminary), p. 1-5.

Choi, D.R., 2010a. Tectonic significance of the 29 September 2009 Samoa earthquake. NCGT Newsletter, no. 54, p. 23-35.

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

Choi, D.R., 2010c. Blot's energy transmigration concept applied for forecasting shallow earthquakes: a swarm of strong deep earthquakes in the northern Celebes Sea in July, 2010. NCGT Newsletter, no. 56, p. 75-85.

Chown, M., 2004. Chaotic heavens. New Scientist, v. 181, issue 2436, p. 32-35.

Das Gupta, M.K. and Basu, D., 1965. Solar-terrestrial events in relation to the phase of the solar cycle. Jour. Atmosphere, Terr. Phys., v. 27, p. 1029.

Das Gupta, M.K. and Sarkar, S.K., 1971. Spectrum of average

flux of the S-component of solar radio emission. Solar Physics, v. 18, issue 2, p. 276-283. 1971SoPh...18..276D.

Duma, G., 2005. A significant electromagnetic process controls earthquake activity. Geophysical Research Abstracts, v. 7, 02860. European Geosciences Union.

Duma, G. and Ruzhin, Y., 2003. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., v. 3, p. 171-177.

Duma, G. and Vilardo, G., 1998. Seismicity cycles in the Mt. Vesuvius area and their relation to solar flux and the variations of the earth's magnetic field. Phys. Chem. Earth, v. 23, no. 9-10, p. 927-931.

Endersbee, L., 2007. Climate change is nothing new! NCGT Newsletter, no. 42, p. 3-17.

Gousheva, M.N., Georgieva, K.Y., Kirov, B.B and Antanasov, D., 2003. On the relation between solar activity and seismicity. Proceedings of conference on Recent Advances in Space Technologies. RAST '03, p. 236-240.

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

Haigh, J.D., Winning, A.R., Toumi, R. and Harder, J.W., 2010. An influence of solar spectral variations on radioactive forcing of climate. Nature, v. 467, p. 696-699 (7 October 2010). Doi:10.1038/nature09426.

Harris, C. and Mann, R., 2010. Global temperature trends from 2500 BC to 2040 AD. www.longrangeweather.com/global_temperatures.htm.

Hathaway, D.H, 2010. Does the current minimum validate (or invalidate) cycle prediction methods? ASP Conference Series, arXiv:1003.4208v1 [astro-ph.SR].

Hissink, L.A.G., 2009. The Earth in an electric solar system. NCGT Newsletter, no. 51, p. 23-34.

Khain, V.E. and Khalilov, E.N., 2008. About possible influence of solar activity upon seismic and volcanic activities: Long-term forecast. Science Without Borders. Transactions of the International Academy of Science H & E., v. 3, p. 217-240.

Luo, B.R. and Li, W.B., 1978. The stability of sunspot cycle reflected by the records of Chinese ancient aurora and the earthquakes. Chinese Science Bulletin, v. 23, p. 8-13 (in Chinese).

NASA, Marshall Space Flight Center, 2010. The sunspot cycle. http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml.

NASA, Marshall Flight Center, 2010. Solar cycle prediction. http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml.

Quinn, J.M., 2010. Global warming. Geophysical counterpoints to the enhanced greenhouse theory. Dorrance

Publishing Co., Inc., Pittsburgh, USA. 118p. Simpson, J.F., 1967. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. Earth and Planetary Science Letters, v. 3, p. 417-425.

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

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

重力場、潮汐力、電磁波、地震の変化

VARIATIONS IN GRAVITATIONAL FIELD, TIDAL FORCE, ELECTROMAGNETIC WAVES AND EARTHQUAKES

Valentino STRASER
94, Località Casarola - 43040 Terenzo PR, Italy
e-mail: fifurnio@tiscali.it

（窪田 安打・矢野 孝雄［訳］）

要　旨：本論は，2009 年 12 月から 2010 年 4 月において，イタリアのベネチアのラグーンと北部アペニン山脈で実施した実験に関する報告であり，地震と局所的な重力場，月と太陽間の干渉により発生する潮汐力の効果，大気の異常光の効果の出現（“地球光”），地殻の応力による生じる放射波の放出を検討した．研究されたこのケースでは，地球の月と太陽の重力的引力に原因して，海水位の時限的な上下変動と地球の潮汐効果の共存が存在することを示す．実際，局所的な重力の変化は，潮位サイクルの高低と同時に発生しており，ほんの数時間の地震イベントの出来事よりも前に始まる電磁場の変化を伴う．本論の観察は，本論で議論したマグニチュード範囲に限られる．

キーワード：*地震学，潮汐力，重力の変化，磁場，地震のトリガー*

はじめに

最近の悲惨な地震は，地球の様々な地帯で発生しており，犠牲者を生み出し，建造物や経済に巨大なダメージを与えており，地震リスクを軽減する助けとなる方法の緊急の試みを求めている．

月／太陽の重力干渉により引き起こされる地震のトリガーのメカニズムはまだはっきりしないが，様々な研究者がすでに地震のトリガーについて月のサイクルと地球の地震との関係を調査している．Bagby(1973) によると，“地震は月と太陽が反対側（地球の反対側）か,交差（地球の片方へ直線状に）の位置するときにしばしば発生する．”Kolvankar et al.(2010) は，月のサイクルと地震に関係があることを示した．Kokus(2006) はサンアンドレアス断層沿いの地震発生に，月の運動が関係することを示した．一方で，Omori(1908) は，1 世紀前に，潮汐のリズミカルな運動と地震の間に調和があることを発見した．

潮汐は，地球上で月と太陽による運動の影響のマクロな効果を示すものである．地球地殻の固体部分に関する大規模変形を支配するので，我々の惑星上では，月に原因する摂動は，主に液体部分に影響する．

地球上の多くの場所で発生する応力への反応として，“地球光”と呼ばれる惑星の異常発光現象が，地震と同様に記録されている．これは，月が近地点に位置する時，つまり，地球に最も接近する位置の時期である (Kolvankar et al., 2010)．その近地点では，潮汐力の強度が最大であるため，地震と地球光の両方を引き起こす可能性をもち，相互の圧縮場に位置するため，月からの摂動は岩石に効果を及ぼす可能性を排除できない．

反対に，月は我々の惑星の平衡状態に影響していて，地球は月に摂動を生じさせ，潮汐効果と“月震”を引き起こしている (Zhao et al., 2008)．

月の地震は，1969 年 11 月 19 日～1977 年 9 月 30 日に記録されており，月における様々な地震源を明らかにした．隕石の衝突，人工物の衝突に原因するもの，日温度の変動による深部地震 (Nakamura, 2003) は，一般に“月の地震”と呼ばれ，地下 1000km 付近で月の潮汐に起因する (Goulty, 1979)．

その大部分のケースで，月震は約 14 日の周期性で発生しており，すなわち，およそ半月か相合の月 (Lammlein, 1974) である．地球を周る月の軌道が楕円であるので，我々の惑星から最短距離（近地点）において，潮汐力が月の一部に応力を与え，地震を生み出すことができる内部応力を与える傾向がある．反対に,約 14 日後に達した，最も遠い地点（遠地点）では，月の表面は反対の移動が予想され，たとえば，地殻に新しい伸張が生じたり，地震の余震を引き起こす可能性がある．

地球上において，月／太陽の潮力の変動による効果は，地球上の潮力のメカニズムでの活発な役割を果たすことと同様に，地表の微小地震を引き起こす海底の影響をもつ．アメリカ合衆国の北西海岸にあるファンデフーカ海嶺の軸方向の火山噴火が観察された (Tolstoy et al., 2002)．また，地球の他の地域では，重力の局所力の変化の効果への反応として (Tanaka et al., 2004;Zhao et al., 2002)，あるいは岩盤の間隙水の水圧変化の働きにより発生する (Tanaka et al, 2006;Contadakis and Asteriadis, 2001)．

地震イベント期間に計測される局所的な重力値の変動は (Woollard, 1959；Kokus, 2002)，地下密度の変化と地殻の鉛直運動に関係することがわかっており (Imanishi et al., 2004;Hayakawa et al., 2009)，衛星からのデータにより確認された (Han et al., 2006)．

興味深いことに，多くの研究が月におけるこの視線を持っていた (Kawamura et al., 2009)，アポロ 17 号月面重力計 (LSG) を使ったデータにより，表面より遥かに地下の深部月震の発生源の解析が行なわれた．

我々自身の調査の目的は，地球の地殻のダイナミックな均衡の一時的な状況を考察することである．たとえば，天体と地球の間の相互作用が，すでに破壊点に近い岩石に地震イベントを引き起こすことができるかどうかである．つまり，外部の摂動が，岩石のせん断強度か塑性限界を超えるために十分なエネルギーを加える時である (Straser, 2008a & 2008b)．

特にこの文献では，潮力は地震を発生させる重要な役割を果たしているとみられる．

研究地域

研究する地域の選定（図 1）は，すでに 1931 年に，地震学者であり宇宙飛行士の Raffaele Bendandi によって研究されており，イタリアのベネチアラグーンと北方のアペニン山脈間の地帯からなる．この地域の地震は，比較的頻度が高い（www.ingv.it を見よ）ので，それゆえ，潮力の摂動，前兆サインと地震の間の可能性のある関係を確認するためことに適している．事実，地震現象の再発するこの地帯では，”地球光”の存在，磁場の発生，アドリア海では月のサイクルにより生じた効果が，それらの間の現象と可能性の関係の系統的な研究を目指す研究基盤としての全ての機能をもつ．

モニタリングした第 1 の地帯は，ベネチアラグーンの近くのアドリア海岸に相当近くに位置しており，局所的な重力値に関係する潮力効果を評価するために選ばれた．第 2 に，北部アペニン山脈では，テクトニック応力の反応に関する電磁場の測定のために，選択された．また，この地域は地球光の再発が存在するためであり，前兆現

図 1　研究地域（赤丸）の位置図.

象として解釈されている (Straser, 2007). およそ 80km 離れた 2 地点での測定値は，観測地点付近で発生する地震の震央のタイムスケールと相互関係があった.

観測地点 1

重力測定のためには，ベニス付近の地帯は，アドリア海よりも特に適しており，潮力を評価するための理想的な形状の盆地をもっている. 事実，経線沿いに延びる長方形の形状は，海水位の上昇が，月と太陽の経線沿いの通過する運動を伴うことを意味している（図 2）.

観測地点 2

第 2 の地域は，放射線の波長で電磁場を計測するために選択されたものであり，” 地球光 ” の頻発状況が良く知られている. 更に，電場，磁場の変動と地震発生の間の共存の研究がすでに行なわれている (Straser, 2009a). この地域は，300 メートル以内に電話や電線がないため，正確に調査することができた. これは，長波 (VLF) の周辺のマッピングを目的として，そのシグナルを妨害するあらゆる干渉を取り去る可能性を加える.

計　器

電磁波の測定と地球光の調査

連続バンド長の受信能力 (VLF 00.Hz ～ 30kHz) の受信器は，1.5m アンテナと ARGO システムの取得に接続されている. 写真は，Canon Eos 30D であり，Tokina telezoom 24-200mm F2 lens ED, IR Hoya screen を備えている. Nikon Catadioptric lens を備える Canon Eos 30D. Sony Full HD 1024 lines/mm video camera, Intel Centrino Duo PC を使用した.

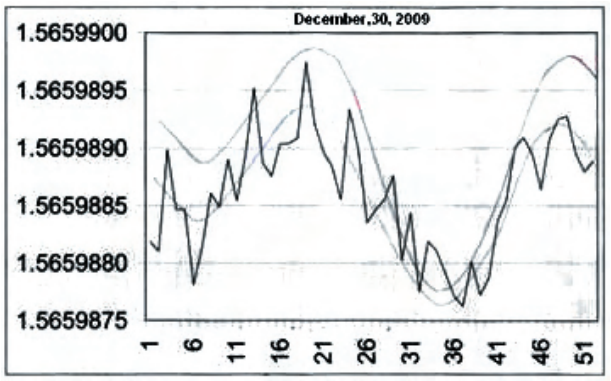


図 2　このグラフは，2009 年 12 月 30 日の重力モニタリングを示している. この枠では，発振時間が示されており（縦座標），グラフの曲線を反転する結果について，mGal で表現される重力ではない. 海水位がこの変化に伴い，重力の低レベルの共存の増加，対して，横座標は，真夜中に得られた測定結果を見ることができる. 約 28 分のズレをもち，1000 振動をつくる発振である. 下側のラインは，そのデータ点の平均推移を示しており，対して，上側のラインは類推であり，2 つの推移の間は明瞭である. 2009 年 12 月 30 日に，地球の重力場を計測した変化は，潮力を引き起こす同じ力により導かれる. (www.45gru.it; www.astrofilipolesani.it).

ソフトウェア

“Spectrum Lab” であり，以下のとおりである.

FS= 22.0500kHz を搭載した FFT の効果
FFT-bin の幅 ;21.0285MHz
等価ノイズバンド長 ;28.5988MHz
最大周波数 ;0000.00Hz - 1378.13Hz
新 FFT のデータ取得時間 ;47.554s
スクロール間隔のオーバーラップ ;97.9 %
分解能 ;0.02Hz
記録場 ;1 line/s (500ms)
天底方向のアンテナ設定

重力計による測定

重力計は，気圧変化に影響を受けない機能をもち，温度膨張の原因となる誤差を制限する低膨張性の棒をもつ振り子を有する. 非常に正確な同期信号を生み出すことができる位置ファインダーをもつ発振器は，電磁気的な干渉を持たず，8 ～ 9 番目の重要な図に正確である電気時計に接続している.

このシステムは計算機により操作され，地球重力場の測定値が 1 日に約 52 個得られる. ある測定とディスクに記録された次の結果の間でデータは収集され続ける. 1000 以上の測定値の相対的誤差は，0.000000089 である.

データ

重力潮汐と電磁気学のデータは，2010 年の第一月の間に測定された. 特に，2010 年 2 月 26,27,28 日（図 3）と，2010 年 2 月 28 日のデータ（図 4）は，2 箇所のモニタリング位置の間で比較された. これは，このデータが満月に一致するためである. 同時期に，研究中の 2 つの地帯は，

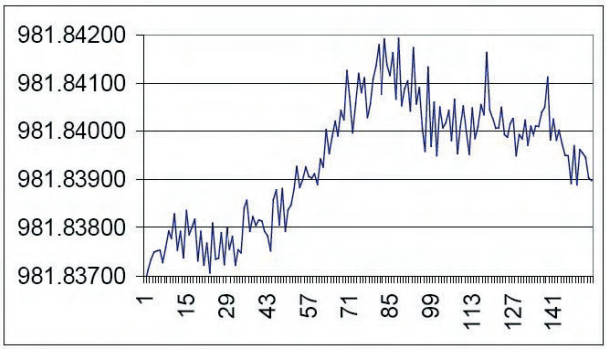


図3　2010年2月26，27，28日の重力の変化を示す．始めの2日間で，2010年2月27日に最大であり，約4mGals（縦座標）の増加があった．横座標では，約28分のズレがあり，測定値の増加が示された．この重力の変化は，複数のピークがある均一な進展がみられ，上下への同じパターンの再発・連続が生じている．2010年2月28日のグラフでは，満月の間に，より明瞭な重力変化が生じている．

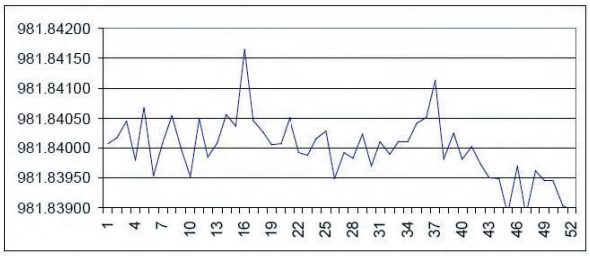


図4　2010年2月28日のグラフであり，2つの潮汐の最小が共存しており，重力（mGal）の重要な増加を示す2つのピークの存在が見られる．水平軸は約28分毎の時間間隔を示す．

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia（イタリア国立地球物理火山研究所〈www.ingv.it/〉）のウェブサイトで報告された地震イベントを証明するためにモニタリングされた．

観測点1（Rovigo，Italy）　45°.05'N；11°.48'E
観測点2（Rosano，Italy）　44°.27'N；10°.20'E

Earthquake .1A

Day	Time (UTC)	Lat.	Long.	Depth	Magnitude	Seismic District
02/03/2010	12:46:34	44.121°N	12.286°E	37.7km	Ml: 2.5	Rimini

Earthquake .2A

Day	Time (UTC)	Lat.	Long.	Depth	Magnitude	Seismic District
03/03/2010	22:00:24	44.322°N	11.41°E	35.7km	Ml: 2.8	Bolognese Apennines

Earthquake.1B

Day	Time (UTC)	Lat.	Long.	Depth	Magnitude	Seismic District
31/03/2010	18:38:37	44.255°N	12.087°E	10km	Ml: 2	Area of Forli

Eearthquake.2B

Day	Time (UTC)	Lat.	Long.	Depth	Magnitude	Seismic District
28/03/2010	21:48:47	44.259°N	10.9°E	6.7km	Ml: 2.2	Modenese Apennines

報告と討論

この場における計測を実施する前に，”地球光”（http://www.astrofilipolesani.it）の出現と月齢（syzygies と quadratures）との間のありうる関連を確かめるために Venetian Lagoon の近傍で予備的研究が実施された．というのは，”地球光”は広域的地殻応力の1つの反映であると解釈されてきた（Straser，2009：Teodorani，2004 & 2008）からである．これらの光は，震央域からかなりの距離で観察されることが時々あるが，通常，それらは震央域から10～60kmのところに出現する．

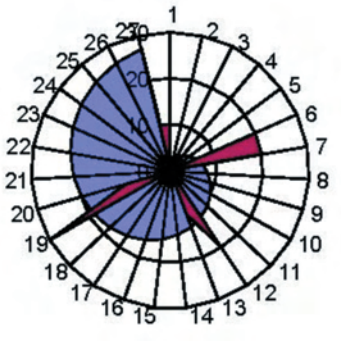


図5　7年間にわたってイタリアのRovigo地域で撮影された”地球光”の分布（www.astrofilipolesani.it）．太陰月における”地球光”をより明瞭に示すために，グラフの値は10倍されている．図の”1”は新月の日に，”7”は第1四半期に，”14”は満月を，”21”は最終四半期に相当する．

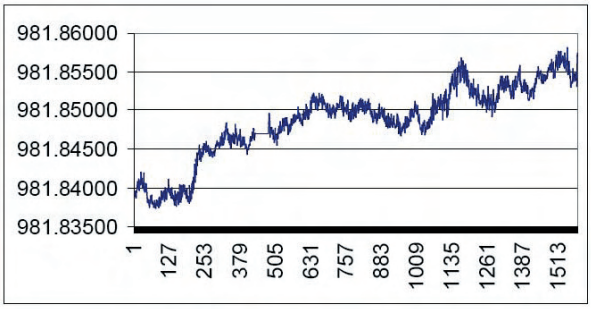


図6　このグラフは2010年3月のもので，451付近に測定された短い直線は停電を示す．このグラフは，重力値（mGal）と約28秒の間隙（横軸）との関係を示す．

北西アペニン山脈における”地球光”と地震の出現の間に経過する時間はほぼ52日であり（Straser，2007），約2太陰月に相当する．Venetian Lagoon と北西アペニン山脈との間の平原では，再来性はより不連続で，時間間隔は約60日である．

図5のように地震分布は偶然とはいえない．というのは，”地球光”は quadrature の期間のうち syzygies と quadratures に集中するからである．この予備実験は，月運動の”周期性”（それゆえ潮汐周期）と伏在岩石に発生する応力の間の関係についての仮設を導く．

地震は満月の頃の数日に，すなわち，潮汐の波状的脈動が最大化するときに，発生する．この論文で考察される地震は，重力と電磁波（ULF と VLF）の変化から2，3時間～3日後に発生した．潮汐力の変化による地殻応力は岩石中に微細割れ目を形成し，やがて，水が侵入して，摩擦を減少させ，数時間～3日後に地震を発生させる（Shou，2006）．ところが，地震の発生は，重力場の緩慢な変化ではなく，突然の変化に関係しているようである．このような事象は，たとえば2010年3月2，3日の地震群（図6）で起こったように，潮汐力にもあてはまる．

観測点 1 での測定値

重力値の日変化図は，顕著な散乱を示す．

重力計を使った測定は，毎日行われていて，0.3 ～ 0.5 mGal の規模で不規則な重力変化を示し，1.0 ～ 0.5 mGal 規模の波状の軌跡を描いて変調している（図 2，3，4）．

3 月のグラフ（図 6）には軌跡深度に明瞭な強調がみられ，新月および満月における最大潮汐に一致する．しかし，重力レベルの通常（上昇）変化が観察され，それらはたいへん顕著で，後に標準状態に再びもどる月の四半期 (quadrature) に一致する．

月の四半期にはじまり，太陽と月の潮汐力が次第に近づいて重なると，波状の軌跡深度が増加する傾向を示す．しかし，すくなくとも，次のような 1 日 (2009 年 12 月 30 日）が存在する．すなわち，重力計グラフが，近接するアドリア海の潮汐グラフによって報告されているものに明瞭に近似する日である（図 2）．

2010 年 4 月 6 日に発見されたことを示すこのグラフには（図 7），重力の増加に一致する平均振幅期間に短縮が認められ，それらは，しばしば月の第 1 および第 2 四半期に近接して起きる．

この重力の増加は一定の前進とともに発生し，その間，上方と下方の両方への同じ挙動をする特定のピークが観察されうる．それらは，最大約 15 時間つづく運動の結果であるように思える．その時間の間に，地面の伸長（あるいは短縮）が，ふたたび均等に起きる．

2010 年 2 月 28 日には，2 つの最大潮汐（満月）に対応して，2 つのピークが重力の顕著な増加の徴候として観察されうる．これらや他の挙動は，日変化グラフの軌跡に含まれ，その解釈には，地球の対蹠点にあたるチリで起きている強烈な地震活動に一致するなど，多くの疑問が生じる．しかし，同じ周期が同じ”modular[基本単位]”の挙動で起きる 28/03/10 での記録であるという観点から，この随伴関係は考察から排除することができる．小さな潮汐力にともなう局所的重力場の増大は，月 / 太陽の相互作用によってもたらされる力に関係していては，地下の物質移動 (resurfacing?[表面の変化]) によって，あるいは，岩石中の孔隙水圧値の変化によって引き起こされる密度変化から，地球の地殻伸長にいたるまで，いくつかの解釈がなりたつ．

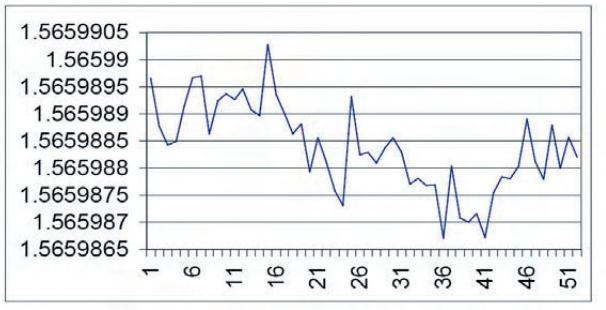


図 7　2010 年 4 月 6 日のグラフで，重力増加に対応した平均振動時間の長さの減少が注目され，このような現象は月の第 1 および第 2 四半期頃にしばしば起きる．この重力増加は規則的に進行し，上下方向とも再発しするその内のいくつかのピークが注目され，これらは約 15 時間にわたって持続する運動に由来するように見える．この持続期間には，地面の均一な伸長（あるいは短縮）が起きる．

観測点 2 での測定値

写真の証拠からは，しばしば” 地球光 ” が出現したり，通過するような場所でさえも，とくに興味が湧くようなことは何も現れなかった．ところが，VLF 受信機での機械記録からは，110Hz と 100Hz の範囲でさまざまな周波数が測定され，公共に供せられている 50Hz のような周波数への妨害はまったくなかった．

2010 年 2 月 27 日の測定後（図 8），同一機器が利用された 2010 年 3 月 28 日には環境観測がくりかえされ，作動原理として同じ環境および気象条件がとらえられた．観測は IR フィルタを用いた画像化にはじまり，VLF 0-30Khz の連続帯域観測器で記録された．以前に記録されたデータにつづいて，環境測定が再び実施され，あらゆる干渉や機器の malfunctioning を排除するための補足的目盛決め試験によって効果を高めた．

VLF 受信機は，周波数の通常的障害に加えて，通常の変調周波数の他に，5Hz と 95Hz の連続的周波数を記録した．2 つの環境的記録の表作成を比較することによって観測されうる第 1 の不調和は，比較的まれなもので，実際には，27/02 の周波数のなかで，50Hz の周波数を欠き，100Hz での余剰としてさえ出現しない．ところが，10 ～ 100Hz にわたる変調的挙動をともなう唯一の周波数が存在する．この周波数は 28/03 の表作成にも見いだされ，そこでは，通常，周波数 50Hz（公共用の主要周波数）も余剰をともなって出現する．

図 8 および図 9 には，2010 年 2 月 27 日と 2010 年 3 月 28 日の周波数スペクトルが，” 変調 ” 記録を付されて示される．低周波数が，観測点 1 での重力変化と同じ日に記録された（図 3・4）．データ比較によると，2 つの事変の間の関連が示されるが，2 つの周波数の形成が地殻の伸長あるいは短縮のいずれに対応するかは検証されるべき課題である．

2 月 27 日には変調周波数が出現したが，3 月 28 日には，これに加えて別の周波数が現れた．5Hz(Schuman の共振）と 95Hz の連続的周波数も，50/100Hz 周波数に随伴して観測された．Rosano 観測所で測定された 2010 年 2 月 27 日からのデータが，Albano Laziale（イタリアのローマ）近くの Cecchina（北緯 41°41’4.27”，東経 12°38’33.60”）の電磁気観測所で午前 03:27:57 ～午前 03:28:47 に観測されたデータに比較された (http://ltpaobserverproject.weebly.com)．

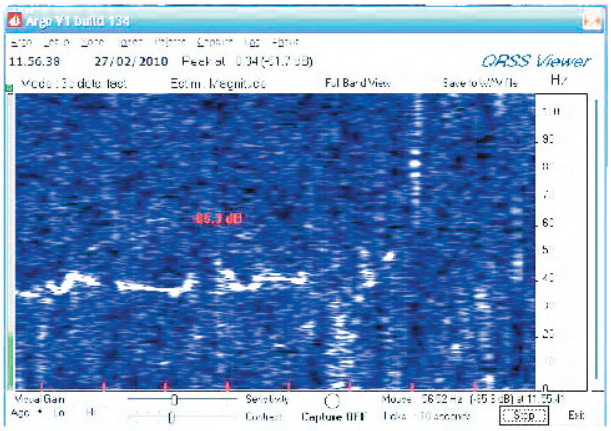


図８　2010 年 2 月 27 日の周波数 0 ～ 40Hz 帯スペクトル記録

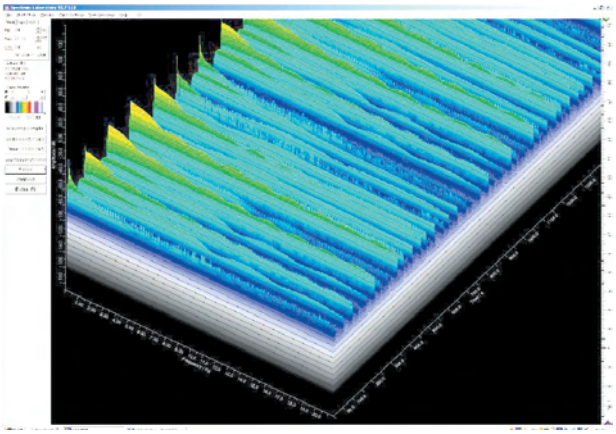


図９　Rosano における 2010 年 3 月 28 日の周波数帯 0 ～ 20Hz の 3D 表示

結　論

この研究は，月 / 太陽系による潮汐力と局所的重力場との間に相互作用メカニズムが存在するか否か，そして，これらと，電磁信号および地震との間に何らかの関連があるか否か，という疑問に答えようとしたものである．

実験を通じて実際に収集されたデータは，物理的および地球物理的なさまざまな要素が関連し，海水準の周期的昇降と地球潮汐が随伴することを示した．

地震が満月の日に，すなわち潮汐の波状振動が最大時に発生し，後者は，重力の増大と無線帯域（ULF-VLF 帯域）における電磁波の形成の両者に対応する．

2 つの地震の震央域はたいへん近接していたが，観測点からは数 km ずれていた．そして，震央，マグニチュード，および震源は相互に比較されることが，強調された．

しかし，研究が行われるにつれて，この研究において提案されたモデルをある確からしさをもって確定することができなくなっている．すなわち，その意味は，地震リスクを軽減する何らかの研究手段を無視する研究者を刺激することができ，そして，刺激するはずの新しい疑問を提出したことにある．

最後に，月の周期的運動によって影響される場合のように，ある特定の地震帯における地震発生の持続性は，地殻の進化要因に影響するであろう（Tanaka et al., 2007）．これは，長年にわたる脆弱域を形成し（Maslov and Anokhin, 2007），この研究で考察された地帯でも起こっているだろう．

謝辞　私は，この原稿の修正段階で貴重な示唆をいただいた Arun Bapat に，この報告に本質的な観測および機器データを処理いただいた Jerry Ercolini，Nicola Tosi, Mario Campion, Daniele and Gabriele Cataldi に，そして，建設的コメントをいただいた匿名査読者に御礼申し上げる．

文　献

Bagby, J., 1973. Further evidence of tidal influence on earthquake incidence. Earth, Moon, and Planets, v. 6, nos. 3-4, p. 398 – 404.

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

Contadakis, M.E. and Asteriadis, G., 2001. Recent results of the research for preseismic phenomena on the underground water and temperature in Pieria, northern Greece. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 1, p. 165–170.

Goulty, N.R., 1979. Tidal triggering of deep moonquakes. Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 19, issue 1, p. 52-58.

Han, S. C., Shum, C. K., Bevis, M., Ji, C. and Kuo, C.Y., 2006. Crustal Dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. Science, v. 313, no. 5787, p. 658 - 662.

Hayakawa, M., Sue, Y. and Nakamura, T., 2009. The effect of earth tides as observed in seismo-electromagnetic precursory signals. Natural Hazards Earth System Sciences, v. 9, p. 1733–1741. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1733/2009/

Kawamura, T., Tanaka, S., Saito, Y., Kobayashi, Y., Horai, K, and Hagermann, A., 2009. Re-determination of deep moonquake sources using the Apollo 17 lunar surface gravimeter. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference, p. 23-27, Houston.

Imanishi, Y., Sato, T., Higashi, T., Sun, W. and Okubo, S., 2004. A network of superconducting gravimeters detects submicrogal coseismic gravity changes. Science, 15 October 2004, v. 306, no. 5695, p. 476–478

Kokus, M., 2002. Alternate theories of geology and gravity in earthquake prediction. Pushing Gravity, Matt Edwards, ed. Apeiron Press, Montreal, p. 285 – 302.

Kokus, M., 2006. Earthquakes on the Parkfield segment of the San Andreas Fault and lunar phase. Proceedings of the Natural Philosophy Alliance, 12th Annual Conference, U of

Connecticut, Storrs, 23-27 May 2005.

Kolvankar, V.G., Deshpande, S.S. Manjre, A. S., Pansare, More, S.S. and Thakur, N., 2010. Lunar periodicities and earthquakes. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 56, p. 32-49

Lammlein, D., 1974. Moonquakes and Tides, Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, v. 5, p. 433.

Maslov, L.A. and Anokhin, V.A., 2007. Solid planetary tides and differential motion of deep layers. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 43, p. 39-45.

Nakamura, Y., 2003. New identification of deep moonquakes in the Apollo lunar seismic data. Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 139, p. 197-205.

Omori, F., 1908. Notes on the secondary causes of earthquakes. Imperial Investigating Committee Bulletin, v. 2, p. 101–135.

Shou, Z., 2006. Precursor of the largest earthquake of the last forty years. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 41, p. 6-15

Straser, V., 2007. Precursory luminous phenomena used for earthquake prediction. The Taro Valley, North-western Apennines, Italy.New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 44, p. 17-31.

Straser, V., 2008a. Planetary perturbations and 'Twin Earthquakes': a model for the long-term prediction of earthquakes. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 46, p. 35-50

Straser, V., 2008b. 300-day seismic cycles in the southern segment of the San Andreas fault, California. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 49, p. 30-53.

Straser, V., 2009a. A "jackpot" for the forecast of earthquakes: The seismic swarm in the north-western Apennines, December 2008. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 50, p. 4-13

Straser, V., 2009b. Luminous Phenomena in the Atmosphere: Signs of Uplift of the Earth's Crust? New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 53, p. 47-56.

Tanaka, S., Ohtake, M. and Sato, H., 2004. Tidal triggering of earthquakes in Japan related to the regional tectonic stress. Earth Planets Space, v. 56, p. 511-515.

Tanaka, T., Salden, W., Martin, A.J., Saegusa, H., Asai, Y., Fujita, Y. and Aoki, H., 2006. Variations of absolute gravity accompanying earthquake-induced changes in subsurface pore water pressure at the Mizunami Underground Research Institute construction site, central Japan. Geochemistry Geophysics Geosystems, v. 7, Q03017, p. 10.

Teodorani, M., 2004. A long-term scientific survey of the Hessdalen phenomenon. Journal of Scientific Exploration, v. 18, no. 2, p. 217-251. http://www.scientificexploration.org/jse/articles/pdf/18.2_teodorani.pdf

Teodorani, M., 2008. Sfere di Luce: Grande Mistero del Pianeta e Nuova frontiera della Fisica. Scienza &Conoscenza, Macro Edizioni, 192p. ISBN 88-6229-008-X.

Tolstoy, M., Vernon, F.L., Orcutt, J.A. and Wyatt, F.K., 2002. Breathing of the seafloor: Tidal correlations of seismicity at Axial volcano. Geology, v. 30, no. 6, p. 503–506

Woollard, G., 1959. Crustal structure from gravity and seismic measurements, Jour. Geophys. Res., v. 64, no. 10, p. 1521-1544.

Zhao, J., Han, Y. and Li, Z., 2002. Variation of lunar-solar tidal force and earthquakes in Taiwan Island of China. Earth, Moon and Planets, v. 88, p.123–129.

Zhao, D.P., Lei, J.S. and Liu L., 2008. Seismic tomography of the Moon. Chinese Science Bulletin, v. 53, no. 24, p. 3897-3907.

WEBSITE CITED

http:// www.ingv.it/

http://www.astrofilipolesani.ithttp://ltpaobserverproject.weebly.com

http://www.sciencedirect.com/science/journal/

http:// www.45gru.it/

http://ltpaobserverproject.weebly.com

地球科学にかかわる政治欄　***GEOPOLITICAL CORNER***

プレートテクトニクスが合衆国と日本で流行したのはなぜか？

WHY HAS PLATE TECTONICS BECOME POPULAR IN THE USA AND JAPAN?

星野　通平

東京都文京区小日向 1-19-4

（柴　正博［訳］）

要　旨：プレートテクトニクスが 1960 年代の米国で始まったことは，重要である．というのは，プレートテクトニクスをはぐくんだ場所と時代が，偶然，その最終的な姿に影響したわけではないからである．著者は，プレートテクトニクス説が内部矛盾をかかえながら，日本とアメリカで普及した原因について歴史的，社会的および政治的な背景を分析する．プレートテクトニクスは両国における文化的，経済的および政治的側面と密接に絡み合っている．新しく創造的な仮説の形成には，批判的な考えが重要である．

__編集者注__：この論説は，日本の札幌にある E.G. Service 株式会社から 2010 年に出版された「反プレートテクトニクス論，4 章」を多少修正して翻訳したものである．日本語から英語への翻訳は，編集者と故 J. Mac Dickins の孫息子の Greg Molineux による．

1. 第二次世界大戦後の米国の社会状況

1-i. 海洋測器の開発

プレートテクトニクスは，第二次世界大戦後の，米ソ冷戦時代の海洋をめぐる軍事科学の発展によってもたらされた，地球科学の一仮説である．この冷戦時代の主要兵器は核爆弾であり，そして，それを運搬する原子力潜水艦であった．米国海軍水路部発行の航海指針が，第二次世界大戦後まもなくして発行された．これは，海山の水深や地形を利用して，電波を使って船位を決めることができない海中の潜水艦にとって航海の道しるべにしようとするものである．音響測深器の海山の記録は，目の不自由な人が杖で道路をまさぐって進むように，海山を道標として航海しようとする方法となった．

同時に，潜水した敵潜水艦を発見するための，磁力計の研究開発が精力的にすすめられた．これは船尾から磁力計を曳いて，船内の記録器に磁力の変化を記録させる装置である．相手国の核実験の様子をさぐるために海底地震計が考案され，また，発射された弾道弾の命中精度を上げるために，地球上の重力値分布調査に用いる海上重力計も重要な計測器となった．

1960 年代に入って冷戦の雪どけをむかえると，このような各分野の計測器が広く海洋観測に応用された．雪どけがさらにすすみ，海洋観測か国際共同事業として取り上げられたとき，各国はきそってこれらの計測器を導入し，膨大な地球物理的資料の収集を積み重ねた．このような資料のうち，プレートテクトニクスの確立に直接貢献したのは，海上磁力計で計測された海域の地磁気縞異常と中央海嶺の詳細な地形であった．

米国における海洋計測器の開発に指導力を発揮したのは，ラモント地質研究所長の M. ユーイングであった．大戦中から海軍の測器開発にかかわっていたかれは，つぎつぎと新しい測器を考案して，ラモント地質研究所を世界最大の海洋研究所に仕上げた．そして，このような技術の進歩を支えたのは，第二次世界大戦中に土台が築かれた米国のエレクトロニクス産業の発達であった．

このような測器による海洋観測は短時間のうちに膨大な資料を集めたが，一方で重大な落し穴を伴っていた．それは集められた物理量（測定値）が，どのような実体を表現しているか，ということである．地震波速度が同じ岩石であっても，変成岩があり火成岩があり，それぞれの岩体に地質時代の違いがある．海上磁力計で測定した磁力の強弱は，海底のどのような岩層の磁性を反映しているのだろうか，様ざまな未解決の問題が横たわっている．

1-ii. 新トマス主義

1960 年代にプレートテクトニクス誕生をもたらした，米国の社会的必要条件は先に述べたようなものであったろう．しかし私は，米国人の心に根強く生きている精神的背景がプレートテクトニクスの流行に強い影響を与えている，と考える．それは，新トマス主義と呼ばれるキリスト教精神であり，ルネサンス時代直前のイタリアの修道士トマス・アクィナスが，神の存在を系統だてて説いた教義である．

19 世紀の産業革命を土台とする物質文明がはびこる世相に対して，トマスの教えをもとにして，唯一の神の存在を主張したのが新トマス主義である．このカソリック教会の公式教義は，北米などのヨーロッパ植民地の新開地でキリスト教の主流となった．すなわち，この一神教は，唯一の神がすべての他の個別的存在の基礎であり，あらゆる存在を産み出したのは神である，と伝道する．

米国南部のいくつかの州では生物進化論を教えるときに，あわせてキリスト教の聖書に述べられている神による生命誕生説の教育が義務づけられている．南カロライナ大学の渡部 (1980) は，次のように述べている．「科学技術が高度に発達し，進歩的と考えられているこのアメリカにおいて，このような現象をみることは予想外なことがらに思える．しかし注意してみると，この国には意外に保守的な面が多いことに気がつく」．

プレートテクトニクスは，（それが様ざまな地質現象のすべてをとりしきることにおいて）神を創造主とする新トマス主義に共通するものがある．プレートテクトニクスにまつわる宗教的話題に次のような米国の地質情報誌にのった小論説 (Kern, 1972) がある．「私はプレートテクトニクスの全能を，地球科学の統一者であることを，そして，そのすべての地質学的および地球物理学的説明を，信じよう．・・・湧き上がり，潜り込むプレートに終わりはない．アーメン！」．投稿者は西ミシガン大学の人である．

わが国にプレートテクトニクスを伝えたのは，東京大学の上田誠也であった．彼は，ラモント地質研究所に留学中，生まれたばかりのこの考えについて，フランス人のル・ピジョンから，熱心に説得されたことを述懐している (Uyeda, 1979)．「1967 年のことだったと思うが，ル・

ピジョンが彼の有名な論文をラモントの学位論文として書いているところに立寄ったことがあった．当時は，それが有名な論文になる保証もなく，ル・ピションも一介の大学院生だった．彼は本当に熱っぽく論文の内容を私に語って聞かせた．私もことの面白さにすっかり感動し，その場でプレートテクトニクスの支持者になったのだった」．

オーストラリアのCarey（in Ollier and Pain, 2000)は，プレートテクトニクスに対する17箇条の反論を述べたあと，次のようなことを書いている．「ニューグローバルテクトニクスの概念は，確実な事実が欠如することから，新しい宗教に結びついている．もし人が信者でないなら，聖職者―海洋学者や地球物理学者―の解釈と多くの説に関して，私たちがまったくその宗教に改宗させられないことは読者に明確でしょう．あなたは，あなたの信じるように生きることができる．しかし，どうか伝道者を送ることはやめてくれ！」．

プレートテクトニクスに最も強く反対していたアーサーメヤホーフからの多く手紙のひとつに，こんなことが書いてあった．

「私は，あなたがプレートテクトニクスの守護者たちに，彼らが信じる前提を再考しなければならない数々の事実を提供していると思います．しかし，彼らはそうしようとはしません．どうしてでしょうか？ その理由は米国科学財団から彼らに多額の金が流れていることに関係している，と思います．・・・・ プレートテクトニクス信者にとっては，莫大な金がもはや支給されなくなるその時まで，そして私達の多くが，詳細な事実を報告しはじめるまで，プレートテクトニクスは今までのように生きながらえるだろう，とおそれています」（私信，1993年9月29日）．

メヤーホフはこういったが，私は研究費を支給する財団の背後にある，米国政府の教育政策，さらには，政治に大きな影響を与える社会思想の変化がないかぎり，この傾向は当分続くだろう，と思っている．

2. 地球科学の新しい発見

自然科学の各分野で新しい発見があるたびに，その解釈をめぐって様ざまな仮説が提案されたことが知られている．レントゲンとキュリーのような業績が達成されたとき，それまで物質の最小単位と考えられていた原子が，現在知られているようにさらにエレクトロンとプロトンに分裂すると修正されなければならないことはよく知られている．出現した仮説の1つはマッハ主義と呼ばれ，”物質は消滅した” と主張する．

マッハ主義を受け入れた私の親しい先輩は，物質は消滅し，物質至上主義を排して精神の重要さを学生たちに紹介した．しかし，物質が消滅したのではなく，古い力学的法則が新しい発見によってそのままでは適用できなくなったのである．そして，これは量子力学的物理学を導いたのである．

20世紀の自然科学はどのように発達し，地球科学にどのような影響を与えたろうか？ 放射性元素の発見は，地質学にも重大な影響を与えた．20世紀のはじめまでに体系づけられた E. ジュースの地質学，あるいは H. スティレの構造地質学は，いずれも，灼熱の地球がしだいに冷却し収縮してきた，というカント・ラプラスの冷却する地球観を土台にしていた．ところが，放射性元素の発見によってこの理論に異議が出され，岩石中のそれらの元素の壊変熱によって地球は暖められている，という考えが生まれた．

ダブリン大学の J. ジョリー（1925）は，元素の壊変によって生まれた熱が岩石を溶かし，体積を膨張させて地表を隆起させると考えた．さらに，溶けたマグマはしだいに冷却して体積を減じ，地表は沈降すると主張した．この考えはジョリーの熱輪廻説と呼ばれた．この考えは，地質現象の解明に重要なヒントを与えたものであった．しかし，放射性元素の寿命や岩石中での分布など，具体的事実の解析がなかったため，地質学に貢献することは少なかった．

放射性元素の問題を最初に地質学に応用した人は，イギリスのエジンバラ大学の A. ホームズであった．彼は，放射性元素の壊変速度を利用して岩石の年代測定をこころみた先駆者であり，この方法は第二次世界大戦後，世界各国に広まり，現在も地質時代の編年に大きな貢献をしている．ホームズの業績の1つは地球内部のマントル対流説で，プレートテクトニクスに結びつくものである．放射性元素による熱はマントル構成岩石を溶かし，対流圏が生れる，と彼は主張した．しかし球体内のマントル対流についてはケンブリッジ大学のジェフェリーなどの強い反対があり，プレート説が誕生するまであまり話題になることはなかった．

第二次世界大戦後の地球科学分野の動向を大きく変えたのは，地球の起源についての隕石集積説である．この仮説は19世紀の最末期に，シカゴ大学のチェンバレンによって，はじめて唱えられた説である．しかし，時代をあまりにも突出していたチェンバレンの考えは，ほとんど顧みられることはなかった．そのため，一般には，ロシアの O.Y. シュミット（1944）が限石集積説の最初の提唱者はであるとされる．

隕石集積説による地球の誕生は，今日では，ほとんどの天文学者・地球科学研究者がこれを支持している．しかし，その詳細は確立されていない．

プレート説に直接結びつく地球科学の新しい発見は，大洋底の時代である．オランダのライデン大学のキューネンの古典的な教科書『海洋地質学』には，大洋底堆積物のうちで一ばん広く分布する赤色粘土層は，2kmの厚さ

をもつと書いてある．一方で，赤色粘土層が堆積する速さは，1,000 年間で 1㎜ であるという．つまり，赤色粘土層の堆積には 20 億年以上の長い年月が必要だった，と考えられた．第二次世界大戦中に海に出られなかったスウェーデンの研究者たちは，戦後を待っていろいろな測器類の考案にはげんでいた．1947 年から翌年にかけてのスウェーデンのアルバトロス号による深海探検の最大の成果は，大洋底堆積層の厚さの測定であった．人工地震波による測定によると，太平洋やインド洋の堆積層の厚さは 100m から 300m にすぎなかった．このことから，大洋底が太古からの存在であるという考えに疑問がもたれるようになった．ギュヨーをつくる玄武岩活動は中生代のものである，と考えられた．これらの資料が積み重なって，太古からの不動の大洋という考えは修正を余儀なくされた．

このように海底が比較的若いということをもとにして，1961 年秋の日本海洋学会 20 周年記念大会の席上，米国海軍電子管研究所の R.S. ディーツは，もともと大洋の位置にあった大陸は移動し，その後に新しい大洋底がつくられたと発表した．このことは，ラモント地質研究所のヒーゼンが，中央海嶺の裂谷帯の成因として，玄武岩マグマが上昇して地殻をわけて新しい海盆が生まれる，と考えたのとほとんど同時期であった．2 人は友人関係にあったから，これらの考え方が関連していたことは納得されるだろう．

しかし，大洋底が大陸にくらべて新しい，というのは事実ではない．大洋底をつくる玄武岩活動が，大陸を特徴づける花崗岩層の形成時代にくらべて，ごく新しい（中生代－新生代）のものであった，というのが真相である．大陸地域では，海洋底玄武岩のような溢流玄武岩の活動は，ほとんどが安定台地にだけみられる．コロラド台地をはじめとする復活台地やすべての造山帯では，中生代以降の玄武岩活動は地殻下部への注入という形で行なわれた．この玄武岩活動は全地球的な規模で起こり，それは石質限石の集積の仕組みに関係している，と私は信じている (Hoshino, 1998).

3. 力学的世界観

プレート説の地球物理学的研究は，力学的世界観にもとづいている．たとえば，プレートの駆動力は，冷却して密度を高めたプレートが海溝で地球内部に潜り込むときの引張力だという．しかし，プレートの先端が海溝に達する前の最初の力はどうなっているのだろうか？

力学的世界観の古典的なひとつ例は，地震についての考え方である．最近，“ 地震の空白域 ” という言葉が流行した．この言葉は，比較的最近，地震が発生した地域に隣接する地震がまだおこっていない地域をさしている．次に地震がおこるのは，この地域だろうというのである．地震空白域の考えには,そこを構成している岩層が,いつの時代のもので，どのような岩相と構造をもっているか，という考慮はまったくない．唯一の推定は，プレートが沈むところに地震がおこるということだけである．

東京大学教授の坪井忠二 (1961) は，その著書の中で，地震は地質運動の表現であると書いた．ところが，　東京の近くの駿河湾にマグニチュード 8 の大地震がおこると予言した若い地震学者は，地震は物理学の対象である，と述べた．もし彼の物理学が力学的物理学であれば，力学と地質学にどのような違いがあるのだろうか？ 力学は，古代の天文学からはじまり，近世にいたるまで，様ざまの分野で研究されてきた．それにまつわる諸法則は技術に応用され，人びとの日々の生活に深くしみ込んでいる．その力学的法則は，時代と場所をかえても，つねに成立するものとされてきた．

一方，地質学では，物理と化学の法則は，ある時間と場所の条件のもとにおいてのみ作用する．高温で二酸化炭素の多い大気の先カンブリア時代の風化作用と，酸素が多くて低温な現在のそれを比較することはできない．また，花崗岩地域と水成岩地域の風化作用も同様である．地震が地質現象であるかぎり，時空の条件を棚上げにした，プレートテクトニクスによる地震予知が日本列島全体に適応できるとは思えない．

プレートテクトニクスを受け入れている岩石学者の多くも，地球物理学者たちと同じような考えをもっている．プレートテクトニクス岩石学の旗頭の一人だった坂野昇平 (1960) は，次のように述べている．「われわれは，自然の歴史を，少なくとも原理的には物質のもっとも要素的な実在の運動からみちびかねばならない．つまり，地殻の発達史を，力学・熱力学等の諸法則からみちびかねばならない」．これは一面的な主張であり，岩石の生成とその後の経過で，時空の地質学的条件がどのように作用したかを考慮しなければ，正しい解答は得られない．かつて坂野から，自らの研究歴を懐古した仮印刷の文書を受け取った．「自分の岩石学の研究は，物理・化学的にはかなりの成果をあげたつもりだが，それらの地質学への適用ではうまくいかなかった」，とあった箇所が私の心に残っている．

日本の実験岩石学者である久城 (1981) は，島弧の火山フロントの問題に関連して，「実験結果はともかくとして，それを適用する場合に如何に不確かなことが多いかを改めて痛切に感じた」と述べている．火山フロントに関連したマグマの発生問題は，様ざまな地質学的な時空の条件を考慮しないと，正しい理解はできないはでないだろう．たとえば，北日本の三陸沖の深海掘削で明らかになった古第三紀末期の酸性火山活動 (von Huene et al., 1980) や現在の火山フロントの位置はネオテクトニクス期のものであることなど．単純な力学的プレートテクトニクスの考え―どの深さまで沈み，どのような温度でマグマが生れたか―では，答えが求められないだろう．

このことについて，先人は次のような警鐘を鳴している．

イギリスの岩石学者のH.H. リード(1948)は，「岩石学は物理化学の一分野であるにとどまらず，地質学の分野である」．また，ドイツの構造地質学のブブノフは，「地質学が不動の地盤を失わないためには，科学の根本法則，たとえば，力学と熱力学などに反してはならない．しかし，地質学は個々の実験によって束縛される必要はない．なぜなら，地質的な空間的・時間的が異なる条件のもとでは，実験には本質的な不確実性がたえずつきまとっているからである．」

一方，プレートテクトニクスの科学評論者のvon Engelhart and Zimmerman(1982)は，「地質学に残る地域主義の考えは，物理学者や化学者にとって理解に苦しむところである」と述べている．法則が作用するとき，時間的・空間的条件が重要な土台となる歴史科学を，力学を基礎におく現在科学的な科学者が理解し難いのは，洋の東西を問わないらしい．量子力学ともなれば，多分，話は違ってくるだろう．もう一人の評論家は，「野外調査は，かつて疑いもなく地質学の背骨であったが，もはやそうではない．・・・・ これからの地質学は実験室の科学になるだろう．」と予測している．しかし，そうはならないだろう．峡谷にわけ入り，露頭で石をハンマーで割り，地質図をつくる作業を経験することなしに，地質学についての新しい発想を，芽生えさせることはできないだろう．

プレートテクトニクスが流行した最大の原因には，古くから確立され，人びとに周知された力学的法則がある．このことは，とくに学校教育において効果的であった．プレートテクトニクスがもつ教育的な強さを，Lowman(1992)は次のように指摘している．

- 単純でたやすく理解できる．
- たやすく視覚化することができる．
- 大学レベルで，その説は首尾一貫していて，一見それを支持しやすい幅広い地質現象がある．

これらの点は，時間的・空間的な条件の変化を伴わない，力学的思考の特徴である．

中央日本の箱根の温泉研究所の入口に，地震のスケール模型があった．それは，ベルト（称されるところではプレート）が回転するとき，金属プレートが称されるところの海溝に押し下げられる．金属プレートが弾性的臨界点に達すると，それは跳ね上がる． この反発が地震である，と説明された．所長は，この模型展示によって素人の人々に地震がどのように起こるかを容易に理解してもらえる，と自慢していた．

前述したLowman(1992)は，同時に，プレートテクトニクス説の教育的欠陥として，1) 虚偽的単純化，2) 間違った過信，3) 視野狭窄，4) 潜在的な根本的虚偽性をあげている．金属ベルト模型は，これらの点にあてはまらないだろうか．

4. 否定的精神

4-i. 10年のおくれ

日本のプレートテクトニクスの受け入れは，米国あるいはヨーロッパの国々にくらべて，10年おくれた，と上田誠也は述べている．そしてこのおくれには，第二次世界大戦後設立された地学団体研究会（JAGC）が影響したと述べている．さらに彼は，とくにそのカリスマ的指導者の地質学者であり哲学者の，井尻正二が強い影響を及ぼしたと述べた．

JAGC は多くの地質研究者の共同研究を採用することによって，科学研究 －創造的な研究，地球科学の普及，研究状態の改良－ を発展させることを目指した．それは非民主的な戦前の日本の地質学界に対する反省にもとづいて出現した．

このような大学の枠をこえた若い研究者の集まりは，第二次世界大戦後の民主化の世相の中で急速に会員をふやしていった．しかし一方では，年代の古い人たちには，とかく敬遠されがちな存在だった．1960年代のプレートテクトニクスの誕生の時代は，日本の大学では，日米安

図1　井尻正二（左），著者（星野通平，左から2番目），ならびに他の人々．1979年に東海大学海洋学部で開催された地学団体研究会のある会合にて．

保条約の修正に対する闘争と大学改革のための学園紛争に起因した大きな混乱の中にあった．1970 年代はじめ，学園紛争はおわりをつげ，文部省の大学諸制度に対する規制はしだいに強まっていった．文部省の意向をそのまま受入れた大学がつくられたり，大学自治を旗じるしにした教授会の権限がしだいに縮小されていった．都道府県の教育委員会の多くは，上意下達の組織になっていった．文部省の検定を必要とする教科書に，プレートテクトニクスが採用されるようになった．

機をみるに敏な人は，この時代の流れにのった．多くの人は，流れに身をまかせて流れとともに泳いでいった．流れにさからった人は溺れていった．このような傾向は，地球科学の研究者だけでなく，政界でも経済界でも，日米安保条約に対して闘った人たちでさえそうであった．その流れは，すべての日本の問題とシステムを米国によってコントロールされた方向に向かわせた．

プレートテクトニクスの受け入れが日本の地質学界で 10 年立ちおくれた原因は，地学団体研究会のためではない，と私は思っている．けれども，その 10 年は，プレートテクトニクスの波に乗った便宜主義の科学者が，日本の地質学界の権力構造を彼らの管理下に置くために必要な時間であったろう．

いまや，プレートテクトニクスが栄えている．プレートテクトニクスに反対した論文を書いたある研究者が大学教員候補者リストから除外された，という話を聞いた．私は現役時代，考えの違う人，分野が異なる人たちの研究集会を何回か主催し，その成果を出版して，お互いの切磋琢磨をはかってきた．魔女狩りのような異端追放の風潮に，おそらく，明るい未来はないだろう．

4-ii. バスの運転手と乗客

日本でプレートテクトニクスが広がりはじめた 1972 年，東京大学教授で地震予知連絡会会長だった浅田 敏 (1972) は，短い論説に次のように書いている．

「後悔が先にたたない話はいっぱいあるけれども，なかでも主なものは，大洋底拡大説の重要性について東京大学の地震研究所の上田誠也が，雑誌 ” 自然 ” に紹介文を書くまで気がつかなかったことである．これは不勉強，怠慢であるといわれてもしかたがない．後からプレートテクトニクスのバスにとびのってわかったことは，上田氏がこのバスを運転していたのではないことである．大洋底拡大説－その運転手はすべて外国人であった」．

私は，これを読んでびっくりした．科学者とは，自らの仮説を追及する人のはずである．つまり，バスを自ら運転するものが真の科学者であり，他人が発想した仮説にのって，その業績をなぞるだけの人は科学者といえない．

私は，日本人の心に深く根付く農耕の民の精神を思い出した．お互いに同調し，自我を押しとおさず，お上に逆らわない．それは，ことわざで最も良く実証されている．6 ～ 7 世紀の摂政で学者だった聖徳太子の唱えた「和をもって尊しとなす」という政治の根本思想にあらわれている．このような日本人の典型は，二宮尊徳である．薪を背に，本を読みながら勤勉に日をおくる尊徳の銅像は，戦前の全国の小学校の庭に立っていた．

かつて週刊誌の『週刊朝日』に，司馬遼太郎とその当時の駐日米国大使ライシャワーの討論がのっていた．2 人のいうところでは，日本人のうちでもっとも日本人離れした人は，13 世紀の仏教の僧である日蓮だという．日蓮は，時の中央政府にたてつき，既成の大宗教に異を唱えて辻説法をつづけ，彼は罰せられて，日本海の孤島である佐渡島へ送られた．

日蓮は，自らの生い立ちを，インドでいえば社会の最下層の，生きものを殺して生活する漁師の子である，と記録している．早稲田大学の民俗学者西村朝日太郎は，日本の縄文時代 (14,000 ～ 300 BC) の狩猟の民の心は，今日わずかに漁民に引き継がれている，と語ったことがある．陸の狩人も海の漁師も，星と風をたよりに獲物を追い求める民である．それは，春に種をまき，秋の収穫までひたすら勤勉に生きる農耕の民の日々とは対照的なものである．日本人に深く養われた農耕民の心と，確立された西洋の学問の体系をひたすら模倣してきた日本人の心が，他人の運転するバスの乗客にあまんじている日本人科学者に染みこんで支配している，と私は思っている．

科学者が，自らの仮説を発想する根本は否定的精神である，と井尻正二 (1982) は一貫して主張した．日本人の否定的精神の欠如は，地球科学の世界だけではなさそうである．哲学者の梅原 猛 (2009) に次のような文章がある．

「私は常々若い学者に，ボスの顔を見ずに真理の顔を見よ，といっている．しかし，ボスの顔より真理の顔をみている学者は甚だ少ない．西洋哲学者の研究紹介を主な仕事としている日本の哲学者の場合，ボスと称される学会の権威は，辛抱強くそのような紹介と研究の仕事をして功績を挙げ，栄光ある大学の教授となった人である．そのような大先生に “ 私は先生のようにプラトンやカントの奴隷になりたくありません．自分の哲学を創りたいのでず，などといったならば，彼は日本の哲学アカデミズムから永久追放の処分を受けねばならないだろう．」

このことは，西洋哲学をプレートテクトニクスに置き換えると，そのまま最近のわが国の地球科学界にあてはまるところがある．強烈な否定的精神にはぐくまれた斬新な仮説をもって，師を乗り越えることを若い科学者へ望む．それは，師への本当の感謝の方法である．

5. 仮説の実証

1984 年にハバロフスクで会議があった．上田誠也が「プレートテクトニクスはファクトである」と発言した直後

に，コスイギンが「プレート説は仮説である」と反論した．

私は上田のファクトとは，どんな意味があるのか興味をもった．彼は，1972 年に書いている．

「（大陸移動や大洋底拡大はすでに証明されているので），プレートテクトニクスにとって固有のことは，“剛体的”にという部分である．そしてこれはむしろ何かを説明するための仮説というよりは，事実そのものの記述に近いのである．マッケンジー，モルガン，ル・ピジョンが行ったのは仮説の提唱ではなく，事実の指摘といった方が当を得ているというのが現在の私の判断である．というわけで，プレートテクトニクスの意味を，（10 個内外の）剛体的なプレートが移動すると限定するかぎり，これを仮説とみなすのは正しくないように見える．」

さらにつけ加えて，「もとより，すべての事実認識には，誤認という可能性があるのだから，プレートテクトニクスの主張も誤りかもしれないのは当然である．だからその事実認識が正しいかどうかについては今後共努力が続けられるであろう」と述べている．

その後，事実認識の検証は，どのように進められているのだろうか．彼は，「純粋にアカデミックな学説は実践的に役立つことによってより確実なものになり，深められる．これは，”新しい地球観”にとっての現代的問題の最たるものであろう」，ときわめて重要な指摘をし，仮説の実証は，最終的には，技術とむすばれた社会生活の実践にかかっていることを認めている．

プレート説と社会生活のかかわりあいといえば，まず地震予知がある．西南日本のどこかで地震がおこると，途端に日本のマスメディア（新聞とテレビ）は「フィリピン海プレートの潜り込みで・・・」と報告する．報道記者は，フィリピン海プレートがどのようなものか，知っているのだろうか．フィリピン海は 3 つの海盆にわかれているが，フィリピン海プレートは，この 3 つの海盆をあわせたものだろうか？ フィリピン海プレートは，どこの中央海嶺で湧き出しているのだろうか？（太平洋プレートの潜り込みによる）フィリピン海プレートの北上に関連した伊豆－小笠原海嶺の運動のメカニズムについて，考えたことがあるだろうか？

古い時代の新聞記者は，社会の木鐸と呼ばれていたという．つまり，人びとに警告を発し，社会をみちびく人の意味である．記者たちが科学者の言い分を，ただおうむ返しに報道するだけでは，科学の進歩に貢献することもない．このような風潮では，いつになっても地震予知は成功しないだろう．

大分以前のことだが，産業廃棄物を海溝に沈めれば，プレートによって地球内部に運ばれ無害になる，という新聞記事があった．もし，この社会的実践が実験され成功すれば，大深度地下埋積法よりはるかに安全で経済的な事業になり，高レベル放射性廃棄物は海溝に投棄することができる．これは確かにプレートテクトニクスの正当性を証明する．その日がきたら，その日のうちにプレート説に転向しようと私は思っている．ただし，その日は永遠にこないだろうと思っている．

文　献

Asada, T., 1972. Earthquakes. Tokyo Univ. Press, p. 257-258 (in Japanese).

Banno, S., 1960. Rebuttal to the M. Hunahashi's paper, “Historical nature of rocks, ores and minerals”. Chikyu Kagaku (Earth Sci.), v. 14, p. 39-41 (in Japanese).

Bubnov, S., 1959. Fundamentals of geology (in Russian). Translated by M. Minato and K. Ogasawara. Iwanami Shoten, 309p.

Hoshino, M., 1998. The expanding Earth. Tokai Univ. Press, 295p.

Ijiri, S., 1982-1983. Collective works of Shoji Ijiri. v. 1-2. Ootsuki Shoten (in Japanese).

Kern, E.L., 1972. Geotimes, v. 17, p. 9-10.

Kuenen, Ph.H., 1950. Marine geology. John Wiley, 568p.

Kushiro, I., 1981. Origin of magmas in island arcs: A discussion based on experimental petrology. Jour. Geol. Soc. Japan, v. 87, p. 769-780 (in Japanese).

Joly, J., 1925. The Surface History of the Earth. Oxford Univ. Press, 192p.

Lowman, P.D.Jr., 1992. Plate tectonics and continental drift in geological education. In, Chatterjee, S. and Hotton, “New Concepts in Global Tectonics”. Texas Tech Univ. Press, p. 3-9.

Ollier, C. and Pain, C., 2010. The origin of mountains. Routledge. 368p.

Read, H.H., 1948. Granites and granites. In, Gilluly, J. (ed.), “Origin of granite”. Geol. Soc. America Mem. 28, p. 1-19.

Schmidt, O.V., 1944. Inseki riron (Meteorite theory) (Ishida, G., Sekai Daihyakka Jiten-World encyclopaedia, Heibonsya) (in Japanese).

Tsuboi, C., 1961. About earthquakes. Iwanami Shinsho, 180p (in Japanese).

Umehara, T., 2009. Tokyo Shinbun, 29 June, 2009 (in Japanese).

Uyeda, S., 1979. New Earth perspective today. Scientific Saloon, no. 9, p. 8-19. Tokai Univ. Press (in Japanese).

Von Engelhart, W. and Zimmerman, J., 1982. Theory of Earth Science. Cambridge Univ. Press., 381p.

Von Huene, Langseth, M., Nasu, N. and Okada, H., 1980. Summary, Japan Trench transect. In, “Initial Reports of the DSDP”, v. 56 and 57. Washington, D.C. (U.S. Government Printing Office), p. 473-488.

Watanabe, T., 1980. Education on evolution in America. Scientific Saloon, no. 14, p. 22. Tokai Univ. Press (in Japanese).

本の紹介　BOOK REVIEW

「反プレートテクトニクス論」
― それでもプレートテクトニクスを信じますか？ ―

A PLATE TECTONICS CONTROVERSY
— Do you still believe plate tectonics? —

著者：星野通平
E.G. Service Press，2010，札幌，日本，英語要約つき日本語

（柴　正博［訳］）

プレートテクトニクス説（プレート説）は，日本において一般の人に対して地震や火山活動の原因だと説明され，学校では教科書で，家庭では新聞やテレビによって普及している．地球科学では，現在のところプレート説が前提とされてテクトニクスや古地理が議論されている．最近，日本では，日本の地質学界におけるプレート説の受入れの遅れを批判したいくつかの書籍やレビューが出版された．

著者は，この批判に関して科学者としての自らの考えを提示すべく本書を出版した．本書の中で，著者はプレート説が実際に地球科学の諸問題を解決しうる唯一の説であるかをその検証を踏まえて疑問を訴えている．そのうえで，独自の地球の歴史についての説とプレート説流行の背景を紹介している．そして，若い人たちがおのおのの仮説をもって，プレート説一辺倒の地球科学の世界から出て，彼らがもっと自由闊達な討論を巻き起こすべきと願っていることを述べている．

第1章の「プレート説の誕生」では，プレート説の誕生とその内容が簡単に述べられている．第2章の「プレート説が主張する観測事実の検証」では，中央海嶺，海溝，大洋底，大陸漂移，プレート運動の原動力についてプレート説とはそぐわない具体的の事実にもとづき多くの疑問を提示し，著者のそれらの形成に関する考え方を加えている．第3章の「地球の歴史」では，著者の地球の歴史の見解が簡単に述べられ，最後の第4章の「プレート説流行の背景」では，プレート説の流行の科学的，思想的，社会的背景を述べている．

本書の中核をなす第2章では，中央海嶺に関して，中央海嶺を構成する岩石がすべて中央海嶺型玄武岩でないことや，古い時代または大陸に起源をもつ岩石も含まれている多くの例があげられている．裂谷帯については，東アフリカ－紅海裂谷帯を例にその地形形成がプレート説では説明できないことが示されている．

海溝については，中央海嶺と対をなさない多くの海溝があることと，海溝の堆積物は陸から供給されていること，その表層は一般に乱されていないこと，海溝の基盤に玄武岩層がないことが示されている．海側海溝斜面から縁辺海膨にかけて地域は展張場の構造に支配され，アルカリ玄武岩が分布し，縁辺海膨では高い地殻熱流量と正の重力異常値が観測されていることを指摘している．海溝に沿う地震帯の勾配はさまざまで，深度によってその勾配が変化することも述べられている．

大洋底については，大洋地殻が3層構造をもっていて，それがどのように形成されるかという問題が議論されている．プレート説は大洋底地殻の成因と，プレート内玄武岩活動，大洋底のモホ面深度が11kmにあることを説明できないとしている．大洋地殻の第2層の玄武岩が地磁気の縞異常の年代を示していないことと，地磁気静穏帯についてプレート説では説明できないことを指摘している．また，大陸性岩石が大洋盆と大洋域の火山島で発見されることがあり，その年代が原生代後期を示していることを述べている．そして，西太平洋と東太平洋の岩石圏の厚さの違いは原生代末期の台地化のレベルの違いで説明している．

大陸移動については，ヒマラヤ－チベットの隆起と生物地理をとりあげて，インド大陸のユーラシア大陸との衝突とヒマラヤ山脈の隆起の時代とは一致しないことを指摘している．そして，世界の生物地理パターンは大陸漂移が原因ではなく，むしろ中生代以降の陸上生物の分布は海水準上昇による陸橋の沈水によって支配されていると述べている．

プレート運動の原動力については，プレート説を信じる研究者はプレートの冷却によって高密度になった岩層が後続のものを引っ張り込むとするが，プレートがなぜ生まれたか，最初のプレート運動の原動力は何だったのかを説明しなければ真相は解明されないと述べている．

著者は，世界中に同時に侵食基準面を形成する海水準をもとに地殻の形成とその歴史を研究してきた．1962 年に著者によって著された「太平洋」の中では，彼は中新世末期以降海水準が 2000m 上昇したことを述べ，1975 年の「Eustacy in relation to Orogenic Stage」では白亜紀中期の海水準が現在にくらべて 4000m 低い位置にあったことを述べた．1991 年の「玄武岩時代」では，地球の歴史を花崗岩時代，漸移時代，玄武岩時代に区分し，1998 年の「The Expanding Earth」と「Crustal Development and Sea Level」において，地殻の形成と発展を総括した彼の地球膨張論が完成された．

「玄武岩時代」以降の彼の著書では，原生代から古生代の世界中の台地と地向斜造山帯の形成に関する詳細な記載やそれらの造講史の議論が展開されている．私たちは狭い島弧の新しい時代の地質の一部しか知らないため，数 10 億年にわたる壮大でグローバルな彼の構造発達史を理解することが困難であった．また，私たちは現在の海面近くに住んでいるため，海面下 4km の中期白亜紀の準平原面やまたは海面下 11km の原生代末期グレンビル時代の準平原面のレベルに立って，それぞれの時代のダイナミクスや，陸地と海底の隆起，さらに海面の上昇を理解することも困難な作業であった．

本書では，プレート説で説明できない中央海嶺や海溝，大洋底などに見られる地質学的な諸問題についてやさしく解説されている．私たちはそれを読むうちに，これらの地形や地質構造の形成がどのように行われてきたかを考える機会を多く与えられた．また，彼のいう原生代から古生代（漸移時代）の台地形成と地向斜造山帯の形成，さらにそれに引き続く残留盆地と島弧・海溝系，海嶺の形成過程について，少なくとも理解することができた．

すなわち，彼の言う地球の歴史を概観すれば，地殻は次のように形成された．

地球の誕生の早期にユークライト隕石が集まり，その後にエンスタタイト隕石が原始地球の表層を形成した．前者は岩流圏を後者は最上部マントル（岩石圏下部層）を形成した．花崗岩時代または始生代に,前者は大気･水圏･花崗岩地殻を分化し，後者は原生代以降，特には中生代以降より活発に未分化マグマとして地殻下部に上昇してきている．このマグマは，超塩基性岩と混合して性質のさまざまな種類の玄武岩をつくり，迸入によって地殻上部を隆起させた．

漸移時代（原生代から古生代）には，マグネシウムの多い超塩基性マグマとカルシウムの多い塩基性マグマが混合して形成した層状火成岩体の活動により，隆起した台地が形成された．二酸化炭素や水蒸気を含んだ原生代の高温の大気は，隆起した台地を激しく侵食し，広大な準平原をつくった．そしてさらに，台地のまわりの海は堆積物で埋め立てられて，海面は上昇して，台地域は浅海となった．ストロマトライトはその浅海に発達して，苦灰岩を形成し，同時に大量の酸素を大気に放出した．

台地の間の海は地向斜の始まりで，そこには高く隆起した台地から大量の堆積物が運ばれた．多くの地向斜帯の底は現在の海面下 50km ほどの深さにあり，この深さは始生代末期の海底であった．原生代末期（グレンビル時代）の 10 億年ほど前に，海面は現在にくらべて 11km ほど低い位置まで上昇し，そのとき地球上のいたるところに準平原が形成された．この面の大部分が現在の太洋底のモホ面である．その後にこの準平原面は周辺の地向斜造山帯が隆起したために，現在では古期残留盆地の底となっている．

幅の広い地向斜盆の場合，古期・新期台地である中央台地が隆起したときに，双方向の花弁状の逆断層を生じた．その逆断層は，その後も引き続き活動して，地向斜の岩層を台地の輪郭にあわせて外側の台地準平原面（大洋底モホ面）上に押し出した．このような過程で，縁海（中央台地）－島弧（周辺地向斜－造山帯）－海溝（圧縮帯）が形成された．中央台地をもたない幅の狭い地向斜盆の場合，地向斜帯の隆起は逆断層をともなう岩層の押し出しはない．大洋底の海嶺はこのような地向斜造山帯から構成されている．

中生代から現在までの地球の最も新しい時代（玄武岩時代）は，カルシウムの多い玄武岩質火成岩マグマの活動によって特徴づけられる．それによって，海面上昇をともなう陸地と太洋低の隆起（造陸運動）とが起こった．この玄武岩質火成岩は，主に岩流圏起源の高温・高圧マグマで,体積を増大して岩石圏の弱線（始生代の線構造）に沿って線状の深部断層を生じ，台地域では基盤の下に水平に広がった．陸上に噴出したものは大陸溢流玄武岩となり，海洋域に上昇したマグマは原生代末期の準平原を一面におおって海洋底地殻をなした．地向斜帯では，堆積層を押し上げて地下に広がり，押し上がった堆積層は島弧や海嶺を形成した．中生代以降の海洋底玄武岩層による急激な海底の上げ底作用によって，海面は中生代以降から 6km 上昇した．

著者の地球の歴史の考え方は，プレート説のような単純な循環論でなく，地殻の興味深い発展を描いている．この説では，地球の誕生から現在までに，花崗岩時代，漸移時代，玄武岩時代という時代ごとに異なった火成活動や地殻変動があり，またそれらが起こった地球表面の位置がそれぞれの時代の地殻形成とともにより上位へと隆起して重なり，地球表層の姿が変化させたことが語られている．本書を通じて，大陸の下や海底の下に隠されている地球の歴史の一部を垣間見ることができ，プレート説のような軽薄な仮説では味わえない，地球科学の奥深さとテーマの魅力を再認識することができた．

柴 正博
東海大学自然史博物館
shiba@dino.or.jp

随筆的書評　ESSAY BOOK REVIEW

グローバルテクトニクス：プレート，プリューム，および，パラダイム

GLOBAL TECTONICS:PLATES, PLUMES AND PARADIGMS

Cliff OLLIER
School of Earth and Environment, University of Western Australia, Crawley, Western Australia 6009　Cliff.ollier@uwa.edu.an

（佐々木 拓郎［訳］）

プレート対プリューム：地質論争
PLATES VS PLUMES:A GEOLOGICAL CONTROVERSY

Gillian R. Foulger.　Wiley-Blackwell. 2010. Paperback 328p. Price US$ 89.95.

NCGT 読者には，地球収縮，地球膨張，サージテクトニクス，レンチテクトニクスやその他多くの，幅広いグローバルテクトニクスの概念が承知されている．Gillian Foulger はこの広がりを 2 つの概念―プレートテクトニクスとプリュームテクトニクス―に減らし，これらの 1 つは，プレートテクトニクスの中で同様に信じられているプリューム概念のその他の多くのプリューム支持者たちがプレートテクトニクスを信じているので，それらの 1 つはもうひとつに包含される概念群と考えられている．

おそらく 20 年間にわたって，プリューム概念はテクトニクスと火山活動の論点の一部であった．アンチ－プリュームギャングと呼ばれる集団のリーダーの一人が，Gillian Foulger である．彼女は同僚と共に，研究を刺激し，2003 年に参考となる重要なウェブサイト www.mantleplumes.org を始めた．そして彼女は 2 つの主要報告書（Foulger et al., 2005a；2005b）を編集し，そして現在，彼女が見たような状況の概要を単独で記述した．

プレート境界の火山活動とは違って，プレート内もしくは “ホットスポット” 火山活動は，一般的に深部マントルプリュームによって説明される．次のいくつかの特徴は，プリュームに特徴的であると考えられた：高温，伏在マントル中の地震波低速度部，上載プレートに対する不動性，年代が連続的に変化する火山配列，海底地形隆起，高熱流量，非 MORB(Mid-Ocean Ridge Basalt) 的地球化学特性，マグマの高 $^{3}He/^{4}He$ 比．しかし，プリューム概念は洪水玄武岩域から小火山まで拡大され，おそらく，本来の概念の崩壊点に至っているかもしれない．

いくつかの観察はこのアイディアを支持せず，Foulger は世界のホットスポットは固定した基準枠にはならないだろう，と述べている；多くの島や海山列は年代の系統的変化を示さず，（ハワイ－天皇海山列のような）事例にも問題がある．幅広い研究によっても，アイスランド下の深部マントルプリュームを発見できず，そこでの地震波低速度異常は上部マントルに限られている．実験岩石学によると，ホットスポットマグマは MORB マグマよりも熱くはない．

そこで今，「マントルプリュームはほんとに存在するのか？」考えてみよう，というのが本書のねらいである．

順次，本の内容を見てみよう．

序論で Foulger 博士は，異常溶融は深部マントルからのホットダイアピルによって涵養されているか，あるいは，それらは究極的にプレートテクトニクスに関連する浅部過程に由来するのかを議論している．「私は，・・・・・異常溶融が深部マントルプリュームからではなく，浅部マントルに由来する作用によって生じることを納得する．これらのデータによると，この事実はたいへん声高に，そして明確に否定されることを求める」，と．

第 1 章では，ヴェゲナーの大陸移動説について簡潔に紹介し，この説が最初に発表された時の反応は圧倒的に乏しいものであった．彼女は，1929 年に対流（convection currents）によって「Arthur Holmes が問題になったメカニズムを急速に解明した」とのべ，大陸移動説は Holmes（ホームズ）によって攻撃から救出された，と主張する．しかし，多くの地質学者が未だに対流に同意していないことに彼女は触れていない．

彼女はプレートテクトニクスの出現につづいて，「ある仮説が既存のものを一掃し，検証されて説得力のあるものとして確認されると，最も興味深いことがらは一般

的なルールの例外となった．というのは，そこに次の大きな発見であるからである」と記述している．彼女が心にとめた例外に，一般的描像に適合しない「いくつかの火山地帯」が含まれる．Tuzo Wilsonはハワイ諸島に付随する‘ホットスポット’を提案し，その8年後，Morganによってプリューム学説，それは1つのホットスポットでなく約20の相互に位置的に固定されたものとして提案された．彼の提案によると，それらは活発に対流するアセノスフェアの下から供給されるという．ホットスポット溶岩は中央海嶺のものとは異なる組成を示す，と予測された．彼女は，プリューム支持者と懐疑論者の間での論争を記述する．1990年代はプリューム人気の10年であり，粗悪な懐疑の10年でもあった．

多くの章に，プレート仮説の予測，証拠に基づく考察，そしていくつかの結論が含まれている．この章では，Morganが考えたプリュームがプレートテクトニクスを駆動する，言い換えると，当時は全く軋轢が無かったプリューム仮説の予測を見いだすことができる．この章にはプリュームまたはホットスポットに関する表が5ページにわたって提示され，この本の骨格の大きな基礎となっている．

26ページには，「簡潔にいうと，異常溶融はリソスフェアが引張しているところでの浸透的火山活動によって生じる」というプレート仮説の直裁的説明がされる．さらに，27ページに，次のように詳しく記述される．「地殻とマントルで構成されるリソスフェアスラブの循環は沈み込み帯でマントルに帰還し，多様な岩石種からなる濃縮パッケージとして，表層からマントル中へ可融性物質を再導入する」．これは単純な説明だが，30～34ページには，その場しのぎのプレートテクトニクスの特徴が見いだされる．たとえば，浅部マントル対流，スラブ破断，海洋プレート内部の伸張，突然の応力側方変化，壊滅的なリソスフェア薄化，リソスフェア下の溶融物集積などのように，最終的な仮説はまるっきり複雑である．

35ページにはプレート仮説の予想が示され，「メルトの抽出は，リソスフェアが局所的引張場におかれたところで発生する」と述べる．これは,35ページ以降における「プレート仮説は，火山活動が伸張的枠組みで発生すると予測する」という記述によって，より明確になる．しかし，太平洋の火の輪はどうだろう？ プレート仮説は，そこがプレートの衝突帯および沈み込み帯といった圧縮領域であると言っている．

プレート仮説の検証という章では，おもに，既述の内容が繰り返される．プレートテクトニクスの正当性についての疑問を全く欠き，Pratt (2000) やOllier (2006a) のようなプレートテクトニクスの限界を指摘した多くの論文や，たとえばCarey (1976), Chatterjee and Hotton (1992), Storetvedt (2003) のような著書も引用されていない．37ページでは「プリューム仮説に対する懐疑論が最近爆発的に増加したことは，以前には決着したと思われていた多くの問題が，実際には，依然として未解明であることが実感されるにともなって現れた」と述べる．まったく同じことがプレート仮説にもいえる，と多くの人は確信するだろう．

第2章は「鉛直運動」と題される．地向斜のような古い考えを簡略に紹介した後，「観察される大きな鉛直運動が地殻の伸張と大陸衝突に起因することが最終的に理解されることは，大陸移動とプレートテクトニクスの出現以前にはありえなかった」（下線はOllier）．私たちが鉛直運動の原因を理解するにはほど遠い状況にある，と私は信じていて，この課題に1冊の著書を費やした (Ollier and Pain, 2000)．

望まれない情報は拒絶される．39ページでは「浸食面のような地形は，しばしば，隆起によるものと解釈されるが，そのような地形は単純に気候変動によって形成されたものである」と言っている．それは，ありえない！ 公平にみても，彼女は「ものごとをより複雑にさせる地殻の大規模な鉛直運動が起きることは，場当たり的説明ではなく，現在も実在する」と是認している．

41ページ付近では，リフトバレーの単純な記述とそれらに関連する鉛直運動が述べられる．鉛直運動の章では，多少場違いであるが，火山列と洪水玄武岩がとりあげられる．これらが関連していることは，しばしばである．ブラジルのパラナ (Parana) 洪水玄武岩とナミビアのエテンデカ (Etendeka) 洪水玄武岩は，リオグランデ (Rio Grande) およびウォルビス (Walvis) 海嶺の火山跡に関連する：中央大西洋海嶺より200～300km離れたトリスタン･デ･クーニャ島 (Tristan de Cunha) やゴウ島 (Gough) は，おそらくトリスタンプリュームの最新のあらわれである．しかし，鉛直隆起は単純に火山活動に関係するわけではなく，パラナには隆起時相があるという (p. 50)．一方で (p. 56)，通常の玄武岩台地シークエンスとは逆に，天皇海山－ハワイ火山列は，現在，その新期端に洪水玄武岩を形成している．火山列を形成しないいくつかの洪水玄武岩地帯もあり，コロラド高原は洪水玄武岩をともなわないで鉛直に隆起した．この章の要約 (p.71) では，「プリュームとプレートの両仮説は，隆起運動が異常溶融に関連する」，とのかなり均等（公平）な表現が示される．

火山活動は第2章の主要なトピックとして取り上げられながら，**第3章**は火山活動に充てられている．この本の肝心なところは，p.78の「プリューム仮説をもたらした基本的観察は，プレートテクトニクスの文脈では異常と思われる地球表層部の火山活動の観察である」ことである．

この章の残りは，「異常」とは何か，そして，それはどのように説明されるか，に費やされる．非信者にとって，この説明のいくつかは，特異な弁解と思われる．たとえば「沈み込み帯付近の火山活動も，背弧海盆で発生する．

これらは，スラブ後退（slab rollback）によって引き起こされる伸張応力の結果として考えられる．それらはプレートテクトニクス仮説によって予想されたものではないが，それらは予測ではなく，プレートテクトニクスと首尾一貫していて，扱いにくい修正を必要としない．この章の残りは，プリューム仮説の一般的な予想と，観察，議論からなりたっている．

第 4 章は，“融解異常の時間変化と相対的固定性”と題される．ホットスポットとプリュームとの違いがp.118で説明され，次に使用された方法，とくに放射年代測定と古地磁気的手法を説明する節が設けられている．その予想の節で，私たちは「プリューム仮説は，異常溶融がそれらの生涯を通して相互に固定されつづけてきたことを予測する」ことを学ぶ．にもかかわらず，「プレート仮説の予想は，異常溶融の形成メカニズムに依存し」(p. 122)，「プレート仮説は全地球リストに掲げられた数十の異常溶融のうち，わずかに 2，3 のものだけが相互に相対的に固定されていて，これらは同一プレート内に位置する傾向がありそうだ」(p. 123)．トリスタン - ウォルビス海嶺や天皇 - ハワイ海山列のような多くの想定された火山列が，観察の節で詳細に記述される．後者について言えば，「この屈曲はプレート運動の変化によるものであり，おそらくインドとアジアの衝突の結果として広く想定され，長年にわたって教育されてきた．これはしばしば永続的な神話 ... とされてきた」(p.133) ことを学ぶ．彼女は，なぜそうなのかを説明し続ける．「[そのデータは] 反語的に，天皇 - ハワイ火山列システムを，論じられているように，異常溶融の全地球配置のなかでもっとも悪い相対的に固定されたプリューム仮説に適合する火山列システムにさせる」と結論する．

ホットスポットの基準的枠組みについて，ページ 135-137 で議論される．“結論として，分析方法のさまざまな多様性と得られた結果がさまざまであるにも関わらず，相対的位置の固定性仮説は，多くの一次的観察に一致しないことは明白である．” 次に「マントル風 Mantle wind」(p.137) が議論される．「... 深部マントルプリュームの表層への出現形態は，たとえそれらに根があったとしても，相互に相対的に固定されていることは期待できない．なぜならば，それらが上昇してくる通り道のマントルが対流しているからである．」彼女は，プリュームとプレートの双方の説明において何か極度の一時しのぎであるかに私には見えることがらを描写し，議論では，かなりしどろもどろに「異常溶融の移動に関するプレート仮説の予測には，いっそうのモデル研究が必要である」と結論する．

第 5 章は，著者の専門分野である地震学をあつかう．基本的な紹介は，私にはよくできているように思える．それにつづいて，なぜ地震学は温度計ではないか，そしてトモグラフィが紹介されている．プリュームとプレート仮説の対照的な予測が述べられ，次にいくつかの観察が記述される．「プリュームの探索についての驚くべきことは，地震学を使って徹底的に研究された地域はほとんどない，ということである．」彼女はよく研究された 3 つの異常溶融といくつかのあまりよく研究されていない異常溶融について記述し，いくつかの消失した異常溶融（Ontong Java Plateau, Parana Basalts, Deccan Traps）の構造について述べている．考察の項では，「今日までに，現在も活動的な異常溶融としてはわずか 3 つ -Iceland, Eifel および Yellowstone―しか研究されていない．これらの地域はいくつかの共通の特徴を持っている．」ことを，私たちは学ぶ．それらは，

それらの下にある低地震波速度異常
下方へ湾曲した 410km 不連続面
起伏をもたない 650km 不連続面　である．

第 6 章では，主として岩石の溶解に関連する温度と熱があつかわれる．いくつかの方法で，地震学，岩石学，地球化学という側面が記述される．とくに現水深と加熱 / 冷却期間における隆起 / 沈降パターンと現水深の考察に関連して，海洋水深が記述される (p.201)．私たちが見つけたところでは (p.225)，再びプリュームとプレートの予測，次いで観察と考察が次のように提示される．「”Hot spots” は熱いのか？ そうであることの・・・・信頼できる証拠はない．”Hot Spot” という用語は，それゆえ誤った名称である．」これは実質的には物語の終わりである．なぜならば私たちはすでに (p.203)，プリューム仮説の最初の予測として，「高温はマントルプユームに必須の特徴である」と説明されているからである．

第 7 章は岩石学と地球化学をあつかい，紹介になっている．私達は中央海嶺玄武岩の多様性 (p.229)，循環している大陸物質 (p.239)，そして，マントル動物園 “mantle zoo”(p.239) について学ぶ．微量元素，希土類元素および放射性同位体比について，幅広く議論される．プリュームおよびプレート仮説の予測が行われる．245 ページで，両者を結合するメカニズムを学ぶことができる：「結果として，プリューム仮説が見直される．この新しいモデルでは，沈み込むスラブは下部マントルの底部へ沈み，そこで” スラブの墓場 (slabs graveyard)” として蓄積すると仮定される．」最後の考察では，私たちは「上部マントルの不均質性は対流によって維持され，プレートテクトニクスがこの対流に不可欠な役割を果たす」と告げられる．

第 8 章は最後の総括であるが，その大半は誰もが防御の為だと思わないことがらの遂行のためのように，私には読める．267 ページでは「原因あるいは結果を予め想定した用語法は自由な考えを妨害する」と述べられる．これはプリュームという用語を攻撃するために使われるが，プレートという用語は検討されない．この本を通して用語法が，ホットスポットからプリュームへ，そして最終的に “異常溶融” へとの変化する．著者は，この用語にさえ満足せず，267 ページではさらにそれを考察することを承知している．これにつづく記述内容は次の

小見出しに示される：プリュームの昇降，プリュームの発生と消失，体積；その時と場所；” ホットスポット” は熱いのか?; 化学物質の運搬である．275 ページから始まるのはマントル対流の議論であり，この本では，プリューム仮説の限界を示すためにプレート仮説の重要な要素がしばしば使われ，その使われ方はときどき時々疑わしいことがある．例えば，64 ページでは，Anatolia に関して，「ここでのプリュームモデルは，この種の設定では半信半疑である．テチス海底の最後の残りを消費しながら，最近までこの領域の下へスラブが沈み込んでいだ．プリュームはこのスラブを貫かなくてはならなかっただろう」と語られる．これは，一種の循環論法ではないだろうか？ プリュームが存在するため，ここでは沈み込みが不可能である，と私たちは同じように言うことができるのではないだろうか？

この本のたいへん重要な内容が，277 ページ以降に「論破できない仮説 (unfalsifiable hypothesis)」と題されて，記述される．その冒頭に，「仮説は論破されうるものであるはずで，それが科学的なものになるためには，質問や検証を経て意味をもつ (Kuhn, 1962; Popper, 1959)．この点で，現代のプリューム仮説は混乱している.」 これこそが，この本の偏見がもっとも明瞭にあらわれるところである．なぜならば，プレート仮説は虚偽性という観点でまったく議論されていないからである！ しかし，そのような議論が必要である．私は，数年前に以下のように書いた．

「プレートテクトニクスは，拡大域で新しい海洋底が創出され，プレートが衝突し，地殻が消失するところで沈み込む，という．この衝突は隆起（山脈の形成），または沈降（深部海溝の形成）を説明するために，引き合いにだされることもある．圧縮によって褶曲を形成するが，伸張によって背後盆地が形成される．沈み込み仮説は隆起と沈降，圧縮と伸張を説明しうるという事実は，それがあまりにも大きな自由度をもつことを意味する．それは逆の効果を説明することができ，検証しうるものではない.」

この章には 5 ページにわたる表が掲載されていて，問題視され，プリューム仮説によって説明のできない観察結果がリストアップされる．「..... プレートテクトニクスは，これまでの考えよりも強力な，表層地質作用を説明する統一理論として，実際に機能しないか，どうか.」 事実，この本の全体は，プレートテクトニクスの信条への賞揚である．その賞揚はとても励みになるが，科学の進歩を創造する可能性あるかどうかは，疑問である．

ところが，彼女は少し前に (p. 287)，次のように書いている．「真実への前進は，新しいデータと発見が既存の仮説へ自然に包含される時に，容認される.」 これで良いが，そのキーワードは ” 自然に (naturally)” である．プレートの信者には自然であると思われることがらは，他の科学者にはある先入観にデータを押し込めているようにみえるかもしれない．そのデータは快適な ‘ 正当派の ’ 温床にほんとうに適合しているのか，あるいは，私たちは強引に基準に合わせているのだろうか？

あらゆることがらが支配的学説に適合することが良いことだ，と一般的にはみなされるかもしれない．しかし，プレートテクトニクス枠の外で私たちが考えることができれば，もっと面白い結果がえられるかもしれない．次の 3 例―ヘリウム，プリューム固定性，鉛直運動―が，そのような新しいアイディアを描き出すかもしれない．

ヘリウム (Helium)

ヘリウムは他の気体とは結合しない不活性ガスであり，その脱出速度にしたがって最終的には宇宙へ失われる．それは循環しないので，地質循環や生物循環に関与しない．固体地球からのヘリウムの放出速度と大気から宇宙へのヘリウム放出速度に従って，大気中のヘリウム含有量が決まる．新しいヘリウムは，世界中に広がる拡大域である中央海嶺やリフトバレー，そして，プリュームとみなされる場から供給される．Foulger はこのヘリウム循環の欠如には同意してないようで，次のように書いている (p.250).「異常溶融の一般的な地球化学に関する説明に加えて，マントル中を回遊している海洋性リソスフェア (recycled oceanic lithosphere) も，長期間をとってみれば $^{3}He/^{4}He$ を多少なりとも変化させる原因となっている.」（下線は Ollier）

一定の組成範囲をもつ MORB 玄武岩からもたらされる最も明確な結論，そして，新しいヘリウムの供給は，それらがともに初めての噴出であることである．それらが循環しているという結論を導く対流によって全地球的循環に適合することが，唯一必要なことである．その上，ヘリウムには 2 つの同位体がある．^{4}He はウランとトリウムの放射壊変で生成されるので驚くことはない．^{3}He は地球では生成されないので，はるかに神秘的である．一般に，そして Foulger によって想定されているように，それは初生的であり，4500Ma の地球誕生時からずっと残存しつづけてきた (Holland, 1984 ; Gold, 1987).

ところが，Herndon(2003) は，ひどく過剰な ^{3}He が存在しつづけたと信じ，それが地球深部における核生成に由来すると信じている．いずれにしても，なぜ ^{3}He の最高値が拡大帯，リフトバレー，および ‘ プリューム ’ に位置するのか，その理由が説明される必要がある．

プリュームの固定性

Foulger は何回かプリューム固定性について言及しているが，それらが何に対して相対的に固定されているかが常に明確にされない．局所的あるいは広域的視野でみて，プリュームは，その頂部の上を通過するプレートに対して固定されていると考えられるだろう．しかし，より想像力に富む解釈も可能である．

Stewart(1976) は，ホットスポットのさまざまな対の間

の大円距離が時間とともに増大することを明らかにした．彼はさまざまなマントルプリュームの相対的隔離が地球膨張を示すかのように解釈した．すなわち，「プリュームのほとんどはお互いに離れるように運動すると見られるので，一定の表面積をもつ地球とは調和しそうにない．このアイディアは当時，広く議論された．たとえばSmith(1976) はこの概念をとても単純に説明し，「それゆえ，Stewart の証拠の基づくと，地球膨張が表層におけるホットスポットの位置を拡散させたにもかかわらず，想定されるマントルプリューム間の地球中心角がほぼ一定であるようだ.」Koziar(1994) は，膨張地球の上に固定されたプリュームの詳細を数学的に記述している．Cwojdzinski(2004) は，Foulger と同様の基礎をもつ短報の中で，地球膨張はプリュームの相対的固定性にもっとも単純な解をもたらす，と結論した．

ネオテクトニクス

テクトニックな隆起は後期中新世からとくに活発化したことを示す膨大な証拠がある（e.g., Morner, 1992；Ollier, 2006b）．プレートテクトニクスの方法では，これは，活動的大陸縁や衝突地帯，そして，受動的大陸縁や内陸部でも，アルプス変動期の山脈に適用される．恐らく，隆起の原因はマントルに由来し，それはプレートとプリュームの方法でそれが何を意味するのか推測することは興味深いことだろう．もちろんそれを否定することは可能であろう．たいへん多くの著名な地質研究者たちが彼らのデータをまちがって解釈したことを示すことも可能だが，Molnar(2007) が試みたように，多くの著名な地質学者がそれらのデータを誤解していることを示すことが必要になる．Foulger はこのような話題が存在し，それが彼女の議論に光明をもたらすことに気づいていないようにみえる．

この本は，鮮明な図解と 2009 年～最近までの 700 以上の引用文献を備えた非常に魅力的な著書である．本文中のいくつかの図は幾分ぼやけているが，明瞭な 25 ページにわたるカラー図版の中に再版されている．

この評論で私が Gillian Foulgr に感心し，プリューム学説の過剰さに反駁する信念をもった研究を彼女は成し遂げたと思っているとは，読者は誰も実感しないであろう．動機に対する彼女の誠実さにいささかの疑いを感じているわけではなく，彼女が信じていることが間違っていることの誤りを証明するために，ポッパー原理（popper principles）を使ってもっとも正直にふるまったと確信している．他の多くの仮説がある中で，彼女が，2 つの仮説間の対立だけをとりあげる形でこの本を出版したことは，とても残念である．この本には豊富なデータが含まれていて，異なったテクトニックパラダイムをもつ人々の全てがこの情報を自らの思考にどのように適合させるか，私は楽しみにしている．

文　献

Carey, S.W., 1976. The Expanding Earth. Elsevier, Amsterdam. 488p.

Chatterjee, S. and Hotton, N. (eds.), 1992. New Concepts in Global Tectonics. Texas Tech. University Press, Lubbock.

Cwojdzinski, S., 2004. Mantle plumes and dynamics of the Earth interior – towards a new model. Geological Review, v. 52, p. 817-826.

Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C., Anderson, D.L. (eds.), 2005a. Plates, plumes, and paradigms. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 388, 880p.

Foulger, G. R. and Jurdy, D. M., (eds.) 2005b. Plates, Plumes, and Planetary Processes. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 430, 997p.

Gold, T., 1987. Power from the Earth (Dent, London), 208p.

Herndon, J.M., 2003. Nuclear georeactor origin of oceanic basalt, 3He/4He, evidence, and implications. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 100, 3047-3050.

Holland, H.D., 1984. The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans (Princeton University Press, Princeton), pp. 598.

Koziar, J., 1994. Principles of Plate movement on the expanding Earth. In, Frontiers of Fundamental Physics (eds. Barone, M. and Selleri, F.), Plenum Press, London.

Meyerhoff, A.A., Taner, I., Morris, A.E.L., Agocs, B., Kamen-Kaye, M., Bhat, M.I., Smoot, N.C. and Choi, D.R., 1996. Surge tectonics: a New Hypothesis of Global Geodynamics. Kluwer Academic Publishers, Solid Earth Sciences Library 9, 323p.

Molnar, P. 2007. An examination of evidence used to infer Late Cenozoic “uplift” of mountain belts and other high terrain: what scientific question does such evidence pose? Jour. Geological Soc. India, v. 70, p. 395-410.

Mörner, N.A., 1992. Neotectonics and Palaeoclimate. In, Neotectonics Recent Advances (Abstract Volume. Eds. Mörner, N.A., Owen, L.A., Stewart, I. and Finzi, C.V.) Quaternary Research Association, Cambridge, 39.

Ollier, C.D., 2006a. A plate tectonics failure: the geological cycle and conservation of continents and oceans. Annals of Geophysics, Supplement to Vol. 49, no. 1, Chapter 8, p. 427-436.

Ollier, C.D. 2006b. Mountain uplift and the Neotectonic Period. Annals of Geophysics, Supplement to v. 49, no. 1, Chapter 9, p. 437-450.

Ollier, C.D. and Pain, C.F. 2000. The Origin of Mountains. Routledge, London.

Pratt, D., 2000. Plate tectonics: A paradigm under threat. Jour. Scient. Exploration, v. 14, p. 307-352.

Smith, P.J., 1976. Plumes in an expanding Earth. Nature, v. 264, p. 606-607.

Stewart, I.C.F., 1976. “Mantle Plume Separation and the Expanding Earth” Geophys. Jour. R. Astr. Soc., v. 46, p. 505-511.

Storetvedt, K.M., 2003. Global Wrench Tectonics: theory of Earth Evolution. Fagbokfortaget, Bergen.

出 版 物　PUBLICATIONS

（矢野 孝雄［訳］）

玄武岩の新しい起源：よりシアル質な上部マントル

NEW ORIGIN OF BASALTS: A MORE SIALIC UPPER MANTLE

著　者：Vincente SANCHEZ CELA. vscela@unizar.es
出版社：Mira Editores, S.A., Zaragoza, Spain. First edition, June 1999. ISBN, 84-89859-54-X. 269p.

結　論

■ 地質現象（たとえば火成活動）の主要メカニズムは，シアル質地殻の起源と成長〈シアル質厚化〉である．

■ シアル質成長とは既存地殻基底へ若いシアル質物質の付加を意味し，この現象は海嶺系や付加帯にも起きる．

■ 超苦鉄質上部マントルから厖大なシアル質物質（たとえば，花崗岩質物質）を抽出することは，絞り出し機を使わずに１個のオレンジから幾リットルものオレンジジュースをつくろうとするように，ほぼ不可能である．

■ 海嶺は初期造山帯と定義され，そこでは地殻物質の容積が上部マントルの容積よりも増大するため，圧縮環境でシアル質地殻が形成される．シアル質地殻の上に，”玄武岩－オフィオライト－海洋地殻” が形成される．

■ 超苦鉄質上部マントルは，さまざま地質現象とそれらの関係をより容易に理解すること大きく妨げ，そして，妨げつづけてきた．

■ 地表に露出する花崗岩や片麻岩を貫いて玄武岩が噴出することは，起きたことがなく，今後も起きえないだろう．というのは，玄武岩はつねにそれらの上に形成される，という単純な理由のゆえに．

■ 玄武岩類は，マグマだまりの下の上部マントル－地殻中に導管をもつことはなかった．これらの ” 導管 ” は，マイロナイト化の軋轢をうけた花崗岩－片麻岩質岩石によって形成されるのが常である．

■ 玄武岩類の組み合わせ，一般的にいうと，苦鉄質－超苦鉄質岩類が，力学的［dynamic］シアル質基盤をもち，厚い炭酸塩－マール質堆積物に覆われたすべての大陸に

存在することは明らかである．

■ 海洋域の玄武岩類はつねに厚さ 10km 以上の ” 異常海洋地殻 ” に関係する．これらはすべて（Azores 諸島，Canary 諸島，など），厚い海成層（炭酸塩－マール質蒸発岩）に覆われた薄く活動的なシアル質基盤をもつ．

■ 地殻上部での玄武岩の形成には，それに先だつ ” baking place［加熱域］” の形成が必要である．多くの場合，減圧（流体の急速な逸失）による部分溶融が起きると，そのような場が ” マグマだまり ” に変化する．

火星の Tithonium Chasma 東部の蒸発岩ドームの形態と起源

Morphology and origin of an evaporitic dome in the eastern Tithonium Chasma, Mars

著者：Baioni, D. and Wezel, F.C., 2010　出版物：Planetary and Space Science, v. 58, p. 847-857.

要旨：OMEGA の画像スペクトル計による同定にしたがうと，Tithonium Chasma 東部の高さ 3．4km のドーム状高地は，硫化鉱物 kiersite の高濃度地表分布域に一致する．このドームの頂上，側面，および基部には，氷の融解で放出された液体の水によって形成されたことが明らかな地表地形がみられる．これらの地形には，浸食および堆積地形のほか，さまざまなカルスト地形が含まれる．ドーム表面には衝突クレータがほとんどなく，ドームが比較的新しい時期に形成されたことを示唆する．ドーム中の岩層は側方へ連続していて，いくつかの場所では変形していることが観察される．このドームの鉱物的・構造的特徴は，地球に存在する多くの岩塩ドームに類似していて，ダイアピル状に上昇・定置したことを示唆する．

火星における水中で再堆積した硫化物蒸発岩

Evidence for subaqueously resedimented sulphate evaporites on Mars

著者：Wezel, F.C. and Baioni, D., 2010　出版物：Planetary and Space Science, v. 58, p. 1500-1505.

要旨：論文は，火星のValles Marineris地域のTithonium Chasmaにある硫化物蒸発岩層が砕屑性であることを記述する．これらの地層は成層構造を示し，たいへん厚い谷埋め成層角礫岩体によって特徴づけられる．巨礫質谷埋め堆積物は，比較的深い水中環境で発生した大容積のマスフロー[mass-flow]作用によって堆積した，と私たちは推論する．問題の粗粒蒸発岩の再堆積は，急速に隆起する後背地における削剥速度が増大時相に対応した事象であろう．造構運動は，Valles Marinerisの Chasmata内部におけるダイアピル上昇と蒸発岩ダイアピルの開析・露出をひきおこした．そこでは，おそらく後期Aazonian時代に，明らかに新しい，よく発達したカルスト地形が形成された．これらの最新のデータは，初生的蒸発岩および再堆積蒸発岩の両者が盆地縁辺域に堆積したことを強く示唆し，それは，「”原始Valles Marineris海峡”による海洋への連絡」という提唱中の考え方に，新しい拘束を加える．それが連絡していた海洋は，後期Noahian～前期Hesperianの”Ocean Borealis”であろう．

地震とそれらの予知　EARTHQUAKES AND THEIR PREDICTION

Peter Michael JAMES　glopmaker75@hotmail.com

編集者注：編集者は，2010年7月録音，”Ockhom's Razor”で11月14日放送されたこのPeter Jamesの談話の刊行に合意されたABC Radio National科学部に，厚く御礼申し上げる．

あなたが地震の問題について地球科学者から得るであろう回答は，「あなたはそれらを予知できない！」である．ところが，逆の証拠があることを紹介しよう．

私は，絶え間ないchooks，それらの物置から現れる中国の蛇について，さらに，より高い地面へ移動することを論じて世を騒がせるスリランカの象について，ここで論じようとしているわけではない．メディアが好むこのような項目は，とても確かな兆候であるかもしれない．しかし，残念ながら，後知恵である場合を除くと，認識されることは稀である．

最近，それらとは別に，蒸気雲や発光現象と地震の切迫とを結びつける可能性が提案された．発光現象は，特定の大気条件下でみられる不思議な光球であり，それらは静止している場合もあれば，一定速度で移動していることもある．北イタリアのTaro谷で地震との因果関係がとりざたされたのは，ローマ時代まで遡る．オーストラリアのBoulia郊外でみられるMin Min光は好例であるが，そこでは過去40年間いかなる地震活動も知られていない．地震が遍在するにもかかわらず，世界的にみても，発光現象の予知能力は残念ながら限定的である．

地震予知に関する最近の他の研究では，天体の線状配列が地球に共振応答を引き起こす可能性がとりあげられている．このような研究は，依然，揺籃期にあり，1912年に木星と土星が線状配列する時に，2，3の厄介な驚愕が発生することを予期した．

より基本的問題として，楽観的見通しにもとづいて，San Andreas断層の詳細な観察がはじめられたが，今日にいたるまで，注目されるべきいかなる成功も収められていない．San Andreas断層は特殊な事例であり，そこで発生する地震の深度はしばしば15kmを超える．

いなかる予知方法も，それが有効であるためには，浅発および深発地震のいずれも，それらの発生場所を説明し，しかも早期に予測することが必要である．地震発生の基本的メカニズムが理解されるまでは，私たちがそれに成功することはないだろう．間違ったメカニズムにもとづく場合には，それらから導かれた結論も誤ったものになるだろう．この警告は，地球の地殻が弾性板であるかのように下方撓曲あるいは湾曲するといったプレートテクトニクス概念にもとづいた今日の説明にあてはまる．それは，最後には”ねずみとり”が跳ねるような突然の反発によって解放される，という．しかし，地球の地殻は弾性的でなく，脆性的岩石で形成され，多数の断層や他の弱面によって切断されている．それは，テレビ画面に示されるような変形をすることはできず，これだけで従来のプレートテクトニクスは否定される．

それでは，地震発生に必要な要素は何であろうか？ごく単純なことだが，浅発～中発地震は，現位置剪断応力が剪断強度をうわまわって発生する局所的破壊にほかならない．これにかかわる要素は，次のように整理される．

1）現位置剪断応力は，当該震源における水平および鉛直方向の応力差に関係する．地球の地殻中での鉛直応力は，上載荷重にほぼ等しい．圧縮応力場での水平応力は，そ

れを最大で８～９倍もうわまわる．引張応力場では，鉛直応力の半分になるだろう．

2) 地震破壊にかかわる現位置剪断強度は，塊状岩石のそれではなく，岩石中のなんらかの既存の弱面あるいは断層によってもたらされる，かなり小さな値をとる．

3) 破壊に関与する揮発性物質圧や孔隙圧も考慮される必要がある．ごく浅所では，孔隙圧の値は当該深度における水頭圧に近似するであろう．ところが深部掘削では，このような静水圧をはるかにうわまわる流体圧がしばしば感知される．これらの高圧力の効果は，岩石中の既存弱面とは別の重要な役割をはたし，ある一組の剪断応力が加わることをより容易にする．

次に，これらの揮発性物質圧に関して，もう少し述べておきたい．これらのすべてのパラメータの現実的限界値は地震活動の論理的分析に従っていて，高いダムの湛水時に発生する地震からいくつかの初歩的考察が抽出される．この場合，貯水池における水位上昇が準同時的に周囲の岩体に伝わり，それによって，有効摩擦強度が減少する．ここで重要な点は，相対的に無害な［innocuous］間隙圧の増大が”最上のストロー”として働くことである．いいかえると，岩体はすでに強い応力をうけていて，そのままの状態で破壊しはじめるのである．地球の地殻が実際に，そのような初期破壊の状態におかれていることがしばしば認められる．

地殻の下では水平応力の相対的影響が減少することが予測されるが，地震は依然として発生し，ベニオフ帯とよばれる主要弱面に完全に封じこまれる．ベニオフ帯浅部は30°以下の角度で深度100～150kmに達する―この角度は，圧縮場での破壊に特徴的である．ベニオフ帯深部は，より急な60°の傾斜で深度300～350kmまで連続し，引張破壊条件に特徴づけられる．これら2つのベニオフ帯は太平洋周縁に典型的で，通常は隣接せず，その起源は地質学的過去に遡るようである．最後に，ベニオフ帯深部の下には，およそ深度600～700kmに突如現れる別の超深発地震帯が存在する．これらはすべて連結されているのだろうか，もしそうならば，どのように？

この点に関して，私はClaude Blotという名のフランス人地球物理研究者を紹介したい．氏は姓を”blow”と発音し，1960年代に南西太平洋で勤務した．Lopevi島が約20年の休止期間の後に突然に噴火し，英国およびフランス居住者弁務官たちが危機に遭遇したために，この地域にいたBoltと他の地球科学者たちが招聘された．当時この地域に新立された地震観測所に，このような巨大災害の前歴がなぜなかったのかを弁務官たちはとくに知りたがった．Claude Blotはこの問題に挑戦し，それに助力したのは，局所的指揮をとった英国地質調査所のオーストラリア人John Groverであった．

要約すると，Blotは，自らの記録にもとづいて，休止していた火山［複数］の噴火には通常M≧6の浅発大地震が先行することを認識した．氏は，次に，これらの大地震に先行して，より早期の地震がベニオフ帯に明確に発生することを発見した．最終的には，これらの地震と，深度600km前後の超深発地震の間に地理的関係が存在することも認定された．より重要なことは，超深度から地表付近にいたる地震発生の上方移動速度がすこぶる一定であることを認識したことである．これにもとづいて，氏は浅発地震や火山噴火を予報し，驚くべき成功を収めた．予報は数ヶ月あるいは1～2年前に行われ，しばしば，数週間あるいは数日の精度で行われた．

このような早期警戒には，次のような意義がある．脅威にさらされた島民たちは，別の島へ避難し，もとの島への安全な帰還が可能になるまで耕作をつづける新しい農園をつくることができる．

Blotは，氏のモデルを地震エネルギーの上方移動と呼んだ．この現象は，私自身の見解では，地球の下部マントルからの高温・高圧の揮発性物質の発現，と記述したほうがより良いと思われる．しかし，用語法にかかわず，Claude Blotによる画期的発見は，地震過程を理解する―それゆえ地震予知への―道筋をひらいた．

科学の他の分野であれば，Blotはノーベル賞候補になっただろう．フランス政府の命によって，氏は，火山も地震も起こらない西アフリカのギニアへ転勤した．また，英国からの指示によって，同僚のJohn Groverも氏の地震研究を止めさせられた．

そして，そこですべてが終わったが，John Groverは退職後，Claude Blotによる諸分析と地震予知の歴史のすべてを詳述した．この無比のデータを含む氏の原稿は，驚くまでもないが主流出版社からは無視され，もう1つの失われた事例になりかけた．幸いにも，ある独立系の出版社（Copyright Publ.，ブリスベン）が，1998年に1冊の印象的な本「Volcanic Eruption and Great Earthquakes」を出版した．この一連の事態のなかで，私が関わった些細なことがらは，この著書の書評を書いたことである．そして，それがキャンベラのコンサルタント地球物理学者Dong Choi博士の目にとまった．Blot，GroverそしてChoiは協力して，地震の関連性を刷新し，予知不能性の予知は不可能であることを示した．残念ながら，氏らの連携は，Groverの逝去とBlotの健康上の理由によって，長くはつづかなかった．しかし，この研究は継承され，この問題をとりあげた出版物の大半はNew Concepts in Global Tectonicsに掲載された．

要約すると，地震に関して私たちが知りうる最初の事象は，それらが深度550～700kmに突如として現れることである．このような深部での破壊メカニズムは，現在のところ謎に包まれている．この地震発生様式は，地球マントルから高温高圧の揮発性物質が発現すること強く示唆する．これらの”爆発”の到達を予測することは，

現在のところ私たちの能力を超えている．しかし，Blotの研究は，より破壊的な浅部地震と火山噴火の場所と時刻を予知する拠り所になることを示した．

未だ私たちの記憶に新しいチリで発生した巨大地震に伴って，あまり知られていない1965年にサンチアゴを襲った同様の地震には再考の価値がある．当時，Claude Blotは，チリ～ペルーの海岸地帯に地震発生の高い危険性をはらむ4つの地域があることを予測した．氏は，それぞれの地域における浅発大地震が，その年の末，あるいは，翌年の1966年までに発生することを予知した．この事実は，John Groverによって1965年8月に開催されたANZAS会議に報告されたが，当然ながら，ほんのわずかな反対派を興奮させたにすぎなかった．しかし，これら4地域がすべて，1966年4月～12月に予知された地震被害を被ったことは，いかなる形でも，ほとんど公表されることはなかった．

これは，歴史を通じて，同じ事象をくりかえすように思える．アルゼンチンとチリ中部における最近の地震活動のパターンは，さらなる地震の到来を示し，私は次のような予測を提案する．

- ■ 今年前半か，少し後に，サンチアゴの北約500kmのCoquimbo付近の海岸で浅発大地震
- ■ おそらく今年あるは2011年中に，再び，サンチアゴのごく近郊で浅発大地震
- ■ ごく最近，破壊的地震が発生したConception地域に存在するいくつかの火山のうちの1つでの噴火，あるいは，噴火の切迫

これらの予測が的中するとすれば，それは，地震のメカニズムと予知という課題にかんして，主流の地球科学研究者に大きな影響をあたえるであろう．

ニュース　NEWS

（矢野 孝雄［訳］）

Ettore Majorana Foundation and Centre for Science(Erice，シシリー島，イタリア）で開催される国際地球物理学研究会第36回ワークショップの理事は，地球膨張問題に関する学際会議が2011年秋に計画されていることをお知らせできることを喜ばしく思う．

国際地球物理学研究会（理事：Enzo BOSCHI）
第36回ワークショップ　地球膨張の証拠―地質学，地球物理学および天文学ための挑戦
理事：Stefan CWOJDZINSKJ-Giancrlo SCALERA
2011年10月4～9日

地球膨張の確定的原因は，解明されていない．そこで，この学際会議には，ゆるぎない証拠にささえられた枠組みにおいて顕著な問題群を解決するのにふさわしい研究成果―口頭およびポスター：いかなる科学分野であろうと―が集積されるだろう．地質学，地球化学，地球物理学，古地理学，古生物地理学に関する演題に加えて，とくに天文学，太陽系天文学，天文学，および基礎物理学分野からも，地球膨張に関わる研究成果が期待される．申し込み講演数しだいでは，地球膨張の研究者と考え方の歴史に関する1つのセッションが，追加企画されるであろう．私たちは，膨張地球のさまざまな考え方がこの会議にうまく集約されるように努めたい．

ワークショップ理事によって編集される，会議前には拡張要旨集が用意され，会議後には会議録単行本が出版される予定である．

すべての会議参加希望者は（純粋な聴講参加を含めて，いかなる形の参加も可能である），メールアドレスgiancarlo. scalera@ingv. itへEメイルで次の項目を，申し込まれたい：口頭あるいはポスター発表の仮題と完全な郵便住所．これは，私たちが会議の規模と時間の概要を見積もるのにたいへん有用である．会議と宿泊にかかる個人負担費用のより詳細は，2011年1月末に，第1サーキュラーと登録用紙とともに公表される．

NCGTインドワークショップ
地球力学―認知と停頓［EDPD-2011］国際会議

期日：2011年9月7日～9月11日
会場：Vivekanada Kendra，Kanyakuari [Cape of Comorin]

重要日程
- 11月30日：詳細プログラム公開〈www.transect.in〉
- 1月15日：オンライン登録の開始．銀行振替送金．
- 2月15日：拡張要旨の提出開始
- 4月15日：登録終了
- 4月30日：拡張要旨の提出終了
- 5月30日：受理論文の確認／完了

個人的連絡先
- Dr. Biju Longhinos Convener EDPD-2011
  edpd2011@transect.in　or　ncgt2011@gmail.com
  Ph:（+91).47.12.49.07.45
- Prof. M. Ramasarma Chairman-Transect
  mramasarma@gmail.com,　Ph:(+91).94.19.09.36.90
- Prof. M. I. Bhat NCGT-India
  bhatmi@hotmail.com,　Ph:(+91).90.20.60.87.27

追悼　OBITUARY

（矢野 孝雄［訳］）

Ratmir F. CHERKASOV

(1936-2010)

Ratmir F. Cherkasov 博士（地質学鉱物学）は，ロシア科学アカデミー極東支部のテクトニクス－地球物理学研究所のテクトニクス部門長であり，同研究所の研究の父の１人である．氏は2010年４月22日に亡くなった．氏は，下部始生界の層序とテクトニクス，地球テクトニクスの構造的諸問題，および鉱床形成学のすぐれた研究者であり，経済的成功展で銅賞メダルを受賞した「テクトニクス，層序および鉱物生成に関する用語索引本」の出版に大きく貢献した．Cherkasov 博士は，ロシア部門間層序委員会の下部先カンブリア系常任委員会の委員で，230以上の出版物と 30 の報告書の著者・共著者である．

氏の生涯は，科学的および社会的事業に捧げられた．氏の関心は，地質の枠や地質学の枠をはるかに超えた地球を包括するものであった．氏は独創的思考力の持ち主で，百科事典的知識の人物であった．Ratmir Cherkasov は，すぐれた仲間であり，すぐれた運営者でもあった．氏の人柄は，沈着・慈善・思いやり・純真・賢明そして謙遜と表現される．氏は，すこぶる研究熱心な献身的で無私な科学者であり，科学の発展に奉仕した．氏は常に，新しい科学的真実を求め，忘我の境地で生きた．氏の業績は，それらの真価でもって認識され，評価された．Cherkasov 氏は，偉大な精神的遺産―地球に生きる一人の人間として他の人々に遺しうる最良のもの―を遺した．それは，生前に発揮された氏の根気づよい，丹精を込めた，勤勉で，止むことのない精神労働，そして，鮮やかで深遠な発想によって得られた新しい知識である．それらは，地球と太陽系惑星の次世代の研究者たちが科学の簡便な道，名誉，賞，および学位を追い求めることをしないように,そして,Cherkasov 博士が行ったように，彼らの公正な研究によって真実の輝かしい嶺々に自らの足跡を残す科学者として成長するように，茨の道を末永く照らしつづけるであろう．

傑出した人物，苦労人，科学に光明をもたらした卓抜した地質研究者，百科辞典的知識の持ち主，私たちの仲間・同僚としての Ratmir F. Cherkasov の大切な記憶は，私たちの心の中にいつまでも消えることはない．

ロシア科学アカデミー極東支部 Yu. A. Kosygin
テクトニクス－地球物理学研究所 職員一同

財政的支援について　FINANCIAL SUPPORT

新購読料システム　NEW SUBSCRIPTION FEE STRUCTURE

（赤松　陽［訳］）

私たちは，オンライン購読の場合，個人で可能な方からは 30 米ドル（45 豪ドル）あるいは相当額以上の，また，図書館に対しては 50 米ドル（75 豪ドル）あるいは相当額の財政援助をお願いしております．印刷物での購読の場合には，図書館では 70 米ドル（95 豪ドル），個人では 50 米ドル（75 豪ドル）を設定させていただきました．

少額ですので，ばかにならない銀行手数料の支払いを避けるために，**私たちは，銀行為替手形か，New Concepts in Global Tectonics 宛ての支払い可能な個人小切手を発行してもらうことをお願いします．あて先は** 6 Mann Place, Higgins, ACT2615, Australia. **銀行を通じて送金する方のための銀行預金口座細目：銀行名ー** Commonwealth Bank, Belconnen Mall ACT Branch (BSB

06 2913)10524718. 口座加入者名 ー New Concepts in Global Tectonics.

自国通貨が国際的に流通する国の方は，個人小切手の場合，自国の通貨立てで発行してください．たとえば，カナダからの送金の場合は，カナダドル立てでというように．というのは，もし，カナダから米ドル立てで発行されると 40 ドル，豪州ドル立てで発行されるとそれ以上の手数料がかかってしまうからです．また，銀行為替手形の場合は，豪州ドル立てで発行してください．もし米ドル立てで発行されると，同じように，それらには 40 豪州ドルあるいはそれ以上の手数料がかかってしまいます．

もし領収書が必要な場合には，ご送金の際に一言，お知らせ下さい．

ニュースレターについて　ABOUT THE NEWS LETTER

このニュースレターは，1996 年 8 月に北京で開催された第 30 回万国地質学会のシンポジウム "Alternative Theories to Plate Tectonics" の後でおこなわれた討論にもとづいて生まれた．New Concepts in Global Tectonics というニュースレターのタイトルは，1989 年のワシントンにおける第 28 回万国地質学会に連携して開催された，それ以前のシンポジウムにちなんでいる．

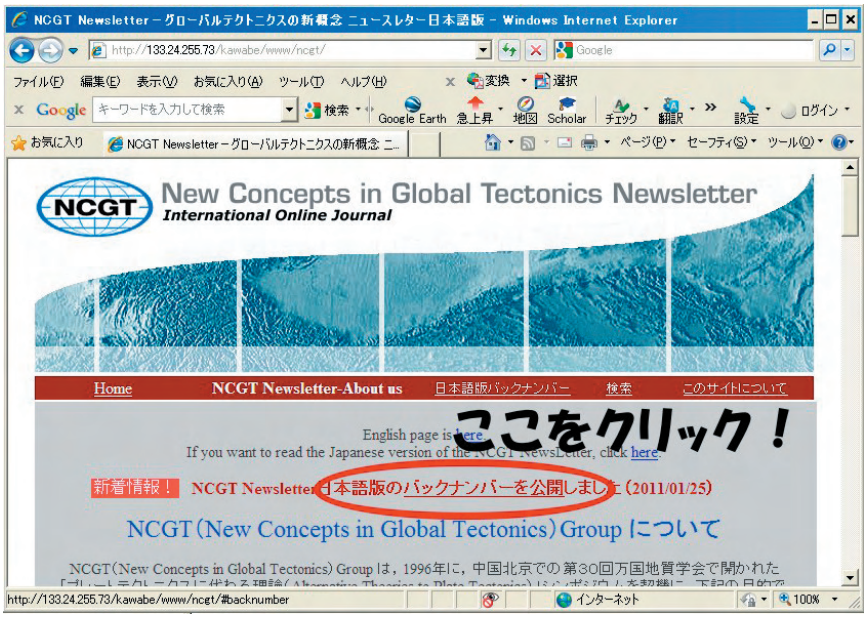
目的は次の事項を含む：

1．組織的照準を，プレートテクトニクスの観点に即座には適合しない創造的な考え方にあわせる．
2．そのような研究成果の転載および出版を行う．とくに検閲と差別の行われている領域において．
3．既存の通信網では疎外されているそのような考え方と研究成果に関する討論のためのフォーラム．それは，地球の自転や惑星・銀河の影響，地球の発達に関する主要学説，リニアメント，地震データの解釈，造構的・生物的変遷の主要ステージ，などの視点から，たいへん広い分野をカバーするべきものである．
4．シンポジウム，集会，および会議の組織．
5．検閲，差別および犠牲があった場合の広報と援助．

NCGT 日本サブグループのコーナー

日本語版バックナンバーインターネット公開のご案内

■ 日本語版ニュースレターの全バックナンバー（最新２号を除く）が，下記サイトでダウンロードできるようになりました．
URL http://kei.kj.yamagata-u.ac.jp/ncgt/

■ 印刷版下をそのまま PDF 化してありますので，英語版カラー化後の号では図がカラーになっています．同時に ,Google サイト内検索機能によって, 初期の号を除くと Google からバックナンバーのキーワード検索が可能になっています．

ホームページでのバックナンバーの表示方法 →