



日本語版 Vol. 5, No. 4 (2018年4月) ■ Print edition ISSN 2186-9693

多数のカラー図面は→ ■ Online edition <<http://kei.kj.yamagata-u.ac.jp/ncgt/>>



編集長：Dong CHOI, 編集委員会：Ismail BHAT, India (bhatmi@hotmail.com); John L. CASEY, USA (jcasey@ievpc.org); Giovanni P. GREGORI, Italy (giovanni.gregori@idasc.cnr.it); Louis HISSINK, Australia (louis.hissink@bigpond.com); Yoshihiro KUBOTA, Japan (kubota@env.sc.niigata-u.ac.jp); Leo MASLOV, USA (lev.maslov@cccs.edu); Per MICHAELSEN, Vietnam (per.michaelsen@tdt.edu.vn); Nina PAVLENKOVA, Russia (ninapav@mail.ru); David PRATT, Netherlands (dp@davidpratt.info); Karsten STORETVEDT, Norway (karsten.storetvedt@uib.no)

も く じ

■ 編集者から	In this issue… 本号には・・・	[小松宏昭 訳] ……………	2
■ 編集者への手紙	The origin of rocks and mineral deposits; using current physical chemistry of small particle systems, <i>Henry Broadbent</i> 岩石と鉱床の起源 – 微粒子システムへの現代物理化学の適用	[矢野孝雄 訳] ……………	3
	Abnormal animal behavior before earthquakes, <i>Eva Dust</i> 地震の前の動物の異常行動	[赤松 陽 訳] ……………	3
	A successful earthquake prediction in northern Italy, November 2017, <i>Valentino Straser</i> 2017年11月イタリア北部における地震の予知の成功	[赤松 陽 訳] ……………	4
■ 原著論文	Preface for Boris I. Vasiliev Special Edition papers: “Geological structure of the Pacific Ocean and its evolution” <i>Yoshihiro Kubota and Dong R. Choi</i> Boris I. Vasiliev 特集; “太平洋の地質構造とその発展” 序文	[久保田喜裕 訳] ……………	5
	“Geological structure and the origin of the Pacific Ocean” (Japanese edition): its frame and essentials, <i>Akira Sugiyama</i> B. I. ワシリエフ著『太平洋の地質構造と起源』- その構成と要点	[杉山 明 訳] ……………	7
	Deep structure of continents and oceans and their origin, <i>Nina I. Pavlenkova</i> 大陸と海洋の深部構造とそれらの起源	[小泉 潔 訳] ……………	17
	Geology of oceans and continents and the possibility of creating the universal geodynamic concept, <i>Boris Blyuman</i> 海洋・大陸の地質と普遍的地球力学概念を創造する可能性	[矢野孝雄 訳] ……………	27
	Thermal structure of the Earth’s mantle: Part 1. Pacific Ocean sector, <i>Dong R. Choi, Fumio Tsunoda and Takayuki Kawabe</i> 地球マントルの熱構造: 第1部 太平洋地域	[村山敬真 訳] ……………	35
	Island arc junctions and calderas/cauldrons as the promised areas of the Quaternary gold deposits and its geological significance in the Pacific Ocean, <i>Yoshihiro Kubota</i> 太平洋における第四紀金鉱床有望地域としての島弧会合部・カルデラ / コールドロンおよびその地質学的意義	[久保田喜裕 訳] ……………	43
	Geology of the Island arcs in the northwestern margin of the Pacific Ocean and their formation by a large-scale uplift of the arcs and sea level rise – the formation of Suruga Bay, <i>Masahiro Shiba</i> 太平洋北西縁の島弧の地質と、大規模隆起と海水準上昇によるそれらの形成	[柴 正博 訳] ……………	50
	Sea level changes and altimetric stability in the Central Mediterranean during the late Pleistocene, with reference to Sardinia: Discrepancy between field data and current global sea level curves, <i>Roberto Mortari</i> 更新世後期の中部地中海における海面変動と高度測定の実定定性, サルデーニャを参照して: 現地データと現在の海面水準曲線との間の相違<要旨>	[岩本広志 訳] ……………	61
	Formation of geothermal energy resources, <i>Vadim Gordienko, Ivan Gordienko and Olga Zavgorodnyaya</i> 地熱エネルギー資源の形成<要旨>	[岩本広志 訳] ……………	62
	Seismotectonics of the Nanga Parbat - Haramosh Massif, Gilgit Baltistan, Pakistan, Haleem Zaman Magsi パキスタン, パルチスタン州キルギットのナンガバルバット - ハラモシ地塊の地震テクトニクス<要旨>	[矢野孝雄 訳] ……………	62
	Solar and electromagnetic signal before the Mexican Earthquake M8.1, September 2017, <i>Valentino Straser, Gabriele Cataldi and Daniele Cataldi</i> 2017年9月に発生したM8.1メキシコ地震における事前の太陽と電磁気の予兆について<要旨>	[宮城晴耕 訳] ……………	62
	The geodynamic legacy of Damian Kreichgauer, Karsten M. Storetvedt ダミアン・クライヒガウアーの地球力学上の遺産	[杉山 明 訳] ……………	63
■ ニュースレターについて			70
■ NCGT ジャーナル (英文版) のインターネット購読について			70

連絡・通信・原稿掲載には、次の方法の中からお選び下さい: NEW CONCEPTS IN GLOBAL TECTONICS 1) Eメール: research@ncgtjournal.org; admin@ncgtjournal.com, 2) 郵便・速達航空便など: 6 Man Place, Higgins, ACT 2615, Australia (ファイルはMS Wordフォーマット、図面はjpg, bmp, またはtif フォーマット), 3) 電話: +61-2-6254 4409. 免責 [DISCLAIMER] このジャーナルに掲載された意見、観察およびアイデアは投稿者に責任があり、編集者と編集委員会に責任はありません。NCGT Journalは季刊国際オンライン査読雑誌で、3月、6月、9月、12月に発行されます。Mac 機利用者は、pdf フォーマットの本誌を Acrobat または Acrobat Reader で表示してください。ISSN 番号: ISSN 2202-0039.

New Concepts in Global Tectonics ジャーナル 日本語版発行チーム

連絡先 〒399-8301 安曇野市穂高有明 126-9 矢野孝雄 Phone 0263-87-2538 EM yano.azumino@g-mail.com

[翻訳メンバー] 赤松 陽・岩本広志・川辺孝幸・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・杉山 明・角田史雄・宮城晴耕・村山敬真・矢野孝雄

[事務局メンバー] 赤松 陽・足立久男 (発送)・金井克明 (会計)・川辺孝幸 (HP)・佐瀬和義・宮城晴耕・矢野孝雄 (代表)

編集者から FROM THE EDITOR

(小松 宏昭 [訳])

本号には・・・

本号には、13の最先端の論文が掲載されている。NCGT Newsletter/Journalの21年の歴史において1つの号としては最も多くの論文が掲載されている。今回の号はまた、2017年6月に東京で開催されたBoris I. Wasilev氏の著書『太平洋の起源と地質構造』の日本語版の出版を記念するシンポジウムで計画された特集号となっている。ここには日本、ロシア、オーストラリアからの6つの論文が含まれている。このほかに、さまざまな地質学的そして地震学的な観点にもとづいた5つの論文や人為的sea level上昇の主張を批判的に分析した2つの論文が掲載されている。

杉山氏はNCGTの読者のためにロシア語で書かれたワシリエフ氏の著書のあらましを紹介している。ワシリエフ氏の著書は2017年に日本語に翻訳された。読者は、海洋底地質学に関してワシリエフ氏が打ち立てた考えにもとづいて収集された圧倒的なデータを知ることができる。彼の現場重視の地質学は、NCGTが設立されたときの精神そのものである。

数編の論文は、大陸や海洋の形成に影響を与えたマンツルの構造に焦点をあてている。Pavlenkova氏は2つの洞察力に富んだ結論に達した。それは、(1)すべての地殻のタイプ(海洋・大陸そして両者の漸移的タイプ)の起源は大部分が初生的なものであり、それらのさまざまな組成は深部の隙間を移動する液状体の不規則性に由来するものであり、(2)大陸は枯渇したリソスフェアの低密度によるアイソスタティックな上昇の結果形成された、というものである。もう一人のロシア人科学者 Boris Blyuman氏の論文は、海洋と大陸の地質に基づく哲学的-歴史的議論を刺激する思索に満ちている。かれは、その論文の中でわれわれの不十分な知識に基づく「全地球変動概念」の進展に警鐘を鳴らしている。

Choi, 角田そして川辺の諸氏によって明らかにされた太平洋地域のマンツルの温度構造は、トモグラフィー画像を活用することによって得られたものである。彼らはマンツル内の地震波の遅い部分の3次元的な分布を鮮やかに描き出した。その部分は多孔性で周囲より温度が高く、液体やガスで満たされていると考えられている。そして、そこはトモグラフィー画像が大きく変化する上部マンツルと下部マンツルの境界である深さ700kmの付近である。低速度層は中部太平洋南部の外核に由来し、そこから上部マンツルの大陸周辺部に向かって広がっている。(彼らの研究から)低速度層の分布は、深部地質構造によって制御されていることが見出された。そして彼らによってなされた発見は、地球の変動

In this issue...

を理解するうえで、幅広い分野に適応することができる。

久保田氏によって寄稿された論文は非常に重要である。彼は、島弧の接続部は異なる構造方向の交差部であり、さらに、深部の破碎帯はマンツルか外核に起源を持つと結論している。そうした場所はマンツルのエネルギーが地表まで上昇してくる場所であり、潜在的に鉱物資源胚胎場が形成される。久保田氏はその例として、島弧交差部は超臨界流体によって注入された第四紀金鉱床の高ポテンシャル域であると述べている。

本号には更新世の海面変動に関する論文が2つ含まれている。そのうちの1つである柴氏の論文は、中部日本の駿河湾での地質調査に基づくものである。氏は日本列島の急速な隆起に伴ない、中期更新世以降約1,000mにも及ぶ大規模な海面上昇があったことを提起している。彼はVail氏、Haq氏や他の研究者によって提唱された海面上昇曲線の定式化に戦いを挑んでいる。彼のデータは星野氏によって提起された小規模な地球膨張を支持するものである。もう1つの論文は、Roberto Mortari氏の後期更新世における海面変動に関するものである。氏は地中海のサルジニア島での詳細な研究により、128,000年前は現在より海水面が59m高く、4,800年前は7m、そして27万年前の海水面は(現在より)ずっと高かったと述べている。彼はチレニア階を特徴づける大海進は、ゆるやかな膨張の前の急速な地球の収縮で説明できると考えた。柴氏もMortari氏も海面変動を再検討する場合は、構造的な変動を考慮に入れるべきであると強調している。

Albert Parkerは、人為的温暖化に関連する海面上昇を議論している。氏はイタリアのベニスやパキスタン-インド-バングラデシュ沿岸地帯で人々を不安に陥れる急速な海面上昇についての誤った考えを暴いた。

本号には上に紹介した論文以外にもデータに裏打ちされた(優れた)論文や議論が掲載されている。これらのなかにはGordienko氏ほかによるウクライナの地熱エネルギー資源の興味ある評価、Magsi氏によるパキスタンの地震変動、Straser氏ほかによる2017年のメキシコでの地震に先立つ太陽と地磁気の前兆現象、そしてKreichgauer氏の地球変動論文に関するよく研究されたStoretvedt氏の議論などが含まれている。

読者のみなさま、どうかこれら珠玉の論文がつまったNCGT今号をお楽しみください。

編集者への手紙 LETTERS TO THE EDITOR

岩石と鉱床の起源 – 微粒子システムへの現代物理化学の適用

The origin of rocks and mineral deposits -using current physical chemistry of small particle systems

Henry Broadbent 2017年11月16日 henryngb@bigpond.com

(矢野 孝雄 [訳])

数週間前に John Elliston は、友人や同僚のグループへ電子メールを送った。電子メールは、彼の最近の著書『岩石と鉱床の起源 – 微粒子システムへの現代物理化学の適用』(57 頁の小型本) を刊行するために彼らの援助を依頼するものであった。ジョンは、今年の初めに出版された主要著書が「根本的に新しいアプローチであり、現在の信条と教育とはまったく異なっているがゆえに、おそらくは読まれたり、利用されたりしていない」ので、できるだけ多くのウェブサイトでも小さな本を再出版することを望んだというわけである。

この著書の新しい洞察は、「内容の要約と性質」が示されて以降の 50 年以上にわたる研究結果である。最初の部分は、とくに注目した 19 人の人物と、他の多くの人々の成果を参考している。つづいて、コロイド形態の物質から固体が生じる付着物およびコンクリーションの形成に関わるプロセスに関する新しい洞察が詳述される。花崗岩の起源をめぐる長期間の論争は、「花崗岩が拡散性ゼラチン状前駆体から結晶化したという明確な証拠」によって解決される。これまで火成岩と考えられてきた多くの鉱物は、「水微粒子前駆物質からの化学的脱水反応によって結晶化したか、または単に硬化した」ことが示される。

私はジョンに、この小さな本を NCGT ジャーナルに投稿するように勧めた。しかし、彼は、この本はすでに査読雑誌にオープンアクセス文書として公開されているために、NCGT 誌の編集者からは掲載を断られるかもしれないと述べた。この著書は重要な科学的進歩をもたらすもので、できるだけ多くのウェブサイトでも再版できればと希望する。あなたの読者が利用できるように、私宛

の pdf ファイルを転送させていただく。退職した電気技術者である私と同様に、あなたの読者にとっても、それが興味深く、非常に有益であると私は予測している。

1960 年代後半、Peko 鉱山を運営する Geopeko 社を運営していた N. John は、主任技術者として雇用した John Elliston と初めて会った。この新たな洞察は、Tennant Creek 地域に 3 つの鉱山子会社を創立した結果であった。地表での兆候はほとんど見られなかったが、酸化鉄の巨大鉱体は磁気コンパスで検知・発見された。つづいて開発された Warrego 鉱山でも、地表兆候は実際に皆無であった。

当時は、驚くほど高品位であるが小規模なジュノ鉱山が探査されていた。一般には鉱体を特定するのに 1 本のボーリングで十分である。ジュノの場合、被覆層が急傾斜していたために、掘削ロッドが鉱体から外れた。5 回目の試掘では、鉱石の層構造に垂直になるようにリグが側方遠方に置かれた。私には、予測以上の 2 フィートもの鉱石が掘削されることがわかっていた。

Peko 鉱山取締役たちは、採掘可能期間にわたって Juno 鉱床を「銀行」として使用した。Frank Hamilton は銀行の支店長に翌月の必要資金を伝えた。フランクは作業指示を与え、技術者は彼に鉱石サンプルを提供した。それらのサンプルは乳鉢で粉末化され、彼は選鉱鍋の金痕跡の長さにもとづいて掘進場所を指示することができた。

編集者注：この著書の要旨は、出版物欄に掲載（英語版 p.630）

地震の前の動物の異常行動

Abnormal animal behaviour before earthquakes

Eva Dust 地質学士, ドイツ evadust@aol.com

(赤松 陽 [訳])

数千年の間、地震災害にみまわれた地域の人びとは、地震の前のある時期に、動物たちが奇妙な行動を見せて地震を警告したというような報告をおこなってきた。飼いなされたペットはパニックに陥り野生的になった。しかし一方、野生の動物は、しばしば村にやってくるこれらの臆病さを失っている。このことはいつも、動物の異常行動が地震の警告として使えるかどうか考えることを研究者に仕

向けた。1975 年に中国で、動物園の動物が常軌を逸した行動を取った時に、大都市は空になった（避難させられた）。大きな地震がやってきて、多くの命が救われた。

地震の前の動物の異常行動については、Tributsch 教授による書物がある。その本は数 10 年前のものであるが、彼は自身で研究を行ったのではなく、ただ、徹底して考

え、大気中のエアゾールに原因を負わせたのである。また、Ikeya 教授の新しい書物もある。その中で、彼は電磁波 (EM 波) を使って自ら実験を行い、実験室の中で、動物の異常行動を誘発している。しかし、観察された動物の反応は、地球物理研究者が地震について測った電磁波よりも高い値で始められた電磁波の増加によるものである。この研究に基づいて、私は私自身の研究方法を発展させた。

好天での魚群の遠隔探査による地震予知は、誰かがそれを行なおうとするかもしれないが、すでに可能である。これは、私からのメールにより、研究所や専門家に訊ねることによって多分可能である。しかし、もし天気が良い時に限れば書かれている通りということである。そして、地震の前に水面に大きな魚群があらわれることは、Ikeya 教授の書物に書かれている成果である。

Ikeya 氏によれば、地震からの電磁波は岩石中の石英鉱物からやってくる。これはまず最初の研究上の疑問へと導く。増加する電磁波の強さとより深い岩層内の石英の含有量の間に相関関係はあるのだろうか？

これは、おそらく地球物理研究者がより弱い電磁波が発生した地域で測定したために、地震の前に地球物理研究者が測定してきた電磁波よりも、Ikeya 教授が地震の間の実験室内での動物の異常行動に対する電磁波の強さの方がより強いことを発見した Ikeya 教授の測定の違いを説明しているのだろうか？

3 つ目の疑問は、Tributsch 教授の書物によると、動物は大都市の至る所で地震の前兆の兆候を感じ、反応できるのだろうか？という点である。Tributsch 教授は、大都市の動物は地震に反応し、多くの破壊で生じた臭い、音、光や電磁波には無頓着であると述べている。

研究方法：動物は特定の紫外線、超音波、特定の電磁波に反応だろうか？研究 (対象) の動物はより大きな都市のまわりのさまざまな距離に生息しているはずであり、干渉する信号の影響は測定されているはずである。かなりの動物たちは、弱い強さで干渉している信号の組み合わせに本当に反応するのだろうか？動物たちは他の動物たちの異常行動に異常なほど反応するのだろうか？地震のない地域に生息している動物たちは地震の起こる地域の動物たちと同様に反応するのだろうか？

Ikeya 教授によって実験室で発見された地震前の動物の異常行動に対する電磁波の強度は、地震の前に測定された強度に比較してあまりに大きい。これはさらなる研究の取組みの高まりを生み出す。例えば、紫外線-可視光線の変化 (赤外線) の下で鳥の羽の中にさまざまな線描が見つかった紫外線も地震の前に観察された。さらには、エアゾールかどうかについての疑問は、Tributsch 教授が地震の前の大気中のそれらについて述べているように、電磁波への強さと反応に影響を及ぼしている。オゾンには、地震によってもたらされている

ことがしばしば報告されており、それはまた、電磁波への動物たちの反応性を弱めているにちがいない。

また動物の異常行動による警告がみられない地震もある。ここでの疑問は前兆の兆候との関連があったのかなかったのかである。そしてさらに、それが起こった年のどのような時の間にホルモンが動物に影響したかどうか、そしてそれらは反応したかしなかったかである。

申し訳ないが、ここでネイティブスピーカーによる翻訳の助けを終える。私自身の翻訳が私を理解するのに十分であることを望む。私はずっと仕事がなく (失業者)、わたしにとって翻訳は余りに高価である。それでどうぞ、私とこの研究に援助を頂けないでしょうか？

動物たちは他に干渉する要因ある種の関連にだけ反応するのであろう。震動は、高感度な地球物理の測定器が地震の前に震動を測定しなかったために、震動は去ってしまったのである。

互いに影響を及ぼし合う動物たちの間には動物たちの集団というものはあるのだろうか？ある種の野生動物が彼らの恐怖感を失ったこともまた観察されてきた。Ikeya 教授は、動物の生存における揺れの延長への依存についての5つのホルモンを研究し、通常不安のホルモンの中でたった1つのホルモンの増加が観察された。

もしある人がある日に避難目的のために地震の前の動物の行動を利用したいと欲するならば、ヒトは、研究のためには昆虫と哺乳動物の調査に限定すべきである。それは、哺乳動物は地震の前数時間だけ反応するが、昆虫は地震の1週間も前に反応するからである。そのような時間が避難には必要なのである。

鳥にとっては単純に飛び去ることができるので、彼らが地震の前になぜパニックになるかは疑問である。そして、紫外線の変化という問題は、この背景としては興味深いことかも知れない。電磁波と紫外線の結合に関する研究は興味深いものがある。さらには、赤外線データとの結合についての研究も興味深い。軍隊は可聴下音響データ (約 16Hz 以下) のデータベースを持っており、それはあいにく公開されていない。

興味をお持ちの方は、以下の私のウェブページをご覧ください。 <https://evadust.wixsite.com/earthquake>

ウェブページには公開討論の場 (フォーラム) もあり、あなたはコメントやアイデアを記すことができます。この研究や警戒態勢-あらゆる場合において私の希望と要望である-を向上させる意見や援助を寄せて下さい。

文 献

Tributsch, Helmut, 1982. When the snakes awake: Animals and

earthquake prediction. Publisher company: MIT Press, ASIN: B01K0STQMY

Ikeya, von Motoji, 2004. Earthquakes and Animals, from folk legend to science. Publisher company: World Scientific Pub Co. Inc., ASIN: B017R36QDM

Sheldrake, R., 2004. The sense of being stared at: And other aspects of

the extended mind. Publisher Company: Arrow Books Ltd. ASIN: B01K3PPQMS

Orey, Cal, 2005. Jim Berkland, the man who predict earthquakes. Publisher company: Sentient; edition: 1st Sentient Publications Ed (30. October 2012), ISBN-10: 1591810361; ISBN-13: 978-1591810360

2017年11月イタリア北部における地震の予知の成功

A successful prediction of an earthquake in northern Italy, November 2017

Valentino Straser 2017年11月26日, valentino.straser@gmail.com

(赤松 陽 [訳])

編集者殿

2017年11月19日日曜日に、M4.4の地震が、イタリア北部、Taro地震線(Taro Seismic Line)に沿う私の家の近くで発生しました。そこは、私たちが何年もの間、警戒して観測してきた所です。地震は、断層に沿って一列に並んだ小さい地震線で始まっています。地震構造と電磁気的な分析に基づいて、私は地方新聞『Gazzetta di Parma』紙に新たな“強い”地震の可能性を警告しました。

Gazzetta紙に警告が送られたおよそ2時間後にM4.4の地震が発生しました。新聞は、翌日、私のeメールと地震の分析結果を報道しました。このニュースはイタリア中のマスメディアで大きな反響をよびおこしました。

以下はM4.4の地震の翌日にGazzetta紙に掲載された抜粋です。

我々へのSolignanoからの投稿者valentino Straser氏は、イタリア全土で名の知れた地質家、そして地震の専門家である。2012年以来、彼は、国際地震・火山予知センター(米)と共同研究を行ってきた。そして、2017年12月にニューオーリンズで行われる重要な会議に参加する予定になっている。長年にわたって彼はいわゆる「地震発光」や電磁気異常をとまなう地震の前兆を通じて地震予知の可能性を研究してきた。科学界を二分するテーマである。昨日、午前11時50分、彼は、地震の激化の心配と新たな強い地震の到来の可能性を知らせるために、一通のeメールをGazzettaの記者に送った。我々は、上記のeメールを再掲し、昨日の地震の分析についての論説を公表する。

原著論文

ARTICLES

NCGT ジャーナル Boris I. Vasiliev 特集; “太平洋の地質構造とその発展” 序文
Preface for the NCGT Journal Boris I. Vasiliev Special Edition;
“Geological structure of the Pacific Ocean and its evolution”s

久保田喜裕¹・Dong R. Choi²

¹新潟大学理学部, 日本. kubota@env.sc.niigata-u.ac.jp

²国際地震・火山予知センター, キャンベラ, オーストラリア. dchoi@ievpc.org

(久保田 喜裕 [訳])

はじめに

本特集は Boris I. Vasiliev 著 “太平洋の地質構造と起源” の日本語版出版記念シンポジウム (2017年6月24日, 東京) の後に独自に企画されたものであるが、我々の視野を広げるために、太平洋のさらに広範囲におよぶ包括的な様相を補完するような国際フォーラムが必要となった (Hoshino and Yano, 2017)。本特集号 “太平洋の地質構造とその発展” は、そのような目的を達成するために企画さ

れたものである。

日本における太平洋の地質研究

日本は、膨大な活火山や地震を伴うきわめて複雑な地質構造のため、フィールドの事実にもとづいた地質研究を進展させる肥沃な土壤が育まれてきた。この背景のもと、第一級のフィールドを指向する多数の地質家が育った。第二次世界大戦後、そのような地質家が “地団研” (地学団体研究会) をつくり、

団体研究を組織し、地質学的成果を国民へ普及してきた。井尻 (1958, 1960) は、地団研から出版されたニューズレター (“そくほう” 日本語版) と学術雑誌 “地球科学” の中で、次のような “太平洋問題” をはじめて提起した：

“グリーンタフ造山 (変動)” (井尻, 1960) は、外国の教科書に書かれた公式と全然あわなくなっているわけです。グリーンタフ造山帯は太平洋が陥没したときの割れ目ではないでしょうか... これまでは大陸を中心にして、その周辺としての日本列島を考えていたようですが、逆に太平洋 (海) の周りとしての日本や太平洋自体の動きをみつめていたい... 今までの外国の受け売り、しかも形式的な、静止的な見方に対し、動的な見方を、地団研では、すでにはじめているわけです。これが地団研 10 年の成果であり、将来の方向だと思います。

井尻の主張は星野に引き継がれた。彼は 1962 年に次のように述べた：“海洋地質学の主要な課題は、大陸と大洋の対立のもとにおける、海水の発展の歴史の解明にある” と。近年 (2014 年)、彼は次のような結論に到達した：

“地球の歴史はその半径の微小増であり、この現象は地殻の厚化と海水準の上昇に表現されている。この問題を解く鍵は海水準である... 地球の水圏は、エンスタタイトマントルに由来し、花崗岩の活動に伴っている。地球の水圏における水の量は、始生代以降、ずっと一定のままである... 顕著な海水準の上昇が、玄武岩時代 (中生代～新生代) の後期ジュラ紀～初期白亜紀、後期白亜紀～ネオテクトニス期に生じた。いずれの時期も地圏の大規模な地殻の上昇に関連している... 地球の歴史は、斉一説の循環概念 (チャールズ・ライエル) でもなければ、弁証法的進化過程 (張文祐) でもなく、誕生から死に至る展開過程であろう。”

藤田 (1972) は、井尻のその先見的な提案を受け、日本の中新世堆積盆地の造構特性について、とくに発生期に焦点を当てた組織的な研究を行った。彼はあらたな仮説 “火山性陥没盆地” を提案した。それは “マグマ性隆起→陥没→火山活動” という一連の発達過程に言及したものである。彼はまた、鮮新-更新世の造構運動の特性を地球規模の深部物質の大規模な上昇によると規定し、“島弧変動” (藤田, 1970) と命名した。彼はさらに、グリーンタフ変動と島弧変動が太平洋縁に特徴的に発現していることから、“環太平洋変動” を提唱した。

このようなフィールド地質をきわめて重要視する日本特有の研究は、世界の地質家集団、とくに多くのロシアの地質家の注目を集めた。そのひとりボリス・ワシリエフは、ウラジミール・ペロウソフのような多くの傑出した地質家である。ワシリエフは、以下に述べる 2006 年の提言のように、海洋地質学研究

における地質学的事実の重要性を強く主張し続けてきた：

“海洋地質学の近年の急速な進展にもかかわらず、海洋底に関する我々の知識は、陸域のそれと比較すると、約 200 年前のそれと同じ段階のままである... 海洋底の研究では、地球物理学的方法が主導的立場にあるが... 地球物理学的方法は、地表下の複雑な地質を物理学的特性の平均値に求めているだけである；したがって、取得されたデータは地質学的方法で検証することなく解釈してはならない... 海洋地質学では、地質図を作成することが主要な緊急の課題である。”

NCGT は地団研やワシリエフのこのような精神を継承している。読者は、以下の日本、ロシア、オーストラリアの地質家による先鋭的な 6 論文のなかに、その真実を鮮明に見出すであろう。我々はこの、偉大な先人であり同志である故 Boris I. Vasiliev を記念したこの特集号を、誇りをもって刊行する。

文 献

- Fujita, Y. 1970. Crustal movements around island-arcs in northwest Pacific since Late Cretaceous. Island Arc and Ocean, Tokai Univ. Press, Tokyo, p. 1-30. (in Japanese)
- Fujita, Y. 1972. On the law of the Green-tuff Orogenic Movement and geosynclines. Pacific Geology, v. 5, 89-116, Tsukiji-Shokan, Tokyo.
- Fujita, Y., 1986. Uplift and depression –Circum-Pacific Disturbance. A Symposium on “Depression and Uplift” – Dialogues between structural geology and applied geology on two hypotheses, Preparation Office for “Research Center of Geo-science”, p. 1-32. (in Japanese)
- Hoshino, M., 1962. Pacific Ocean. Earth Science library 18. The Association for the Geological Collaboration in Japan, Tokyo, 136p. (in Japanese)
- Hoshino, M., 2014. The history of micro-expanding Earth: History of the Earth from viewpoint of sea level rise. E. G. Service, Sapporo, 234p.
- Hoshino, M. and Yano, T., 2017. Call for papers. New Concepts in Global Tectonics Journal, v. 5, no. 3, p. 464.
- Ijiri, S., 1958. On the future study method of geology and the issues of the Pacific Ocean proposed as the 10-year theme of the “Chidanken”. Newsletter, n. 100. Association for the geological collaboration in Japan, p. 1-8. (in Japanese)
- Ijiri S., 1960. “Green Tuff Movement” - Problems with the development of the Japanese Island. Earth Science (Chikyu Kagaku), v. 50-51, p. 1-5. (in Japanese)
- Vasiliev, B.I., 2006. Geological structure and origin of the Pacific Ocean. Earth Science (Chikyu Kagaku), v. 60, p. 185-196. (in Japanese. Translated by Yugov, I.V.)
- Vasiliev, B.I., 2017. Geological structure and the origin of the Pacific Ocean. (Translation under the supervision of Hoshino, M.), Tokai Univ. Press, Tokyo, 413p. (in Japanese)

B.I. ワシリエフ著 『太平洋の地質構造と起源』 - その構成と要点
 “Geological structure and the origin of the Pacific Ocean”
 by Boris I. Vasiliev (Japanese edition): its frame and essentials

Akira SUGIYAMA

4-36-16, Nishihara-cho, Fuchu City, Tokyo, Japan
 a.sugiyama2@outlook.com

(杉山 明 [訳])

まえがき：ロシアの海洋地質学者 B.I. Vasiliev による "ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ТИХОГО ОКЕАНА (Geological Structure and Origin of the Pacific Ocean)" の日本語版が、『太平洋の地質構造と起源』刊行会（代表：星野通平）により 2017 年 6 月に刊行された。この本の英語版はまだ出版されていないので、この機会に、原書の構成と要点を英語で紹介することは意味があると信じる。

キーワード：Pacific Ocean, mega-basin, transition zone, submarine rocks, submarine sediments, geologic development
 (2016 年 8 月 9 日受付, 2016 年 8 月 24 日受理)

1. 原書と著者

原書は 2009 年にウラジオストクの Dal'nauka 社から出版された変形 B5 判, ハードカバー, ロシア語で書かれた 559 ページ (47 表, 168 図を含む) の大著である。

著者の B. I. Vasiliev (1929-2016) は, モスクワの地質研究所を卒業し, ロシアやモンゴル各地で陸上地質調査に従事した後, イリチェフ太平洋海洋研究所 (ウラジオストク) に転じた。そこで, 彼は北西太平洋を中心として太平洋を広く調査し, その地質構造の解明に取り組んだ。

彼は, すでに 1988 年 (日本語版は 1991 年) に『太平洋北西部地質構造の主な特徴』を出版しており, 今回の著作は, その対象範囲を太平洋全域に拡大するとともに, 太平洋の起源に関する考察をさらに深めたものである。残念なことに, 彼は日本語版への序文を書いた後, 87 才で亡くなった。

彼の業績については, A. A. Gavrilov et al. (2016) による追悼文を参照されたい。

2. 原書の構成

本書は, 第 I 部：太平洋巨大海盆の概要, 第 II 部：太平洋漸移帯の内部, 第 III 部：太平洋の起源に関する諸問題の 3 部からなる (巨大海盆と漸移帯の定義については後述)。ページ数で見ると, 第 I 部が 36%, 第 II 部が 58%, 第 III 部が 6% である。また, ワシリエフの主要な調査・研究の対象が北西太平洋と極東ロシアであることから, 第 I 部では第 I 節・第 1 章の北西太平洋海盆とその周辺域に, 第 II 部では第 I 節・第 1 章の東アジア地域に多くのペー

ジが割かれていて, 両地域を合わせると本文全体の 36% を占める。また, 本文の 85% は, 各地形単元の形態的・地質構造的特徴, ドレッジで得られた岩石の記載岩石学的・岩石化学的特徴や同位体年代, 深海掘削で採取された堆積物の層相や地質時代などの記載に当てられている。

なお, ワシリエフのいう‘太平洋区’ (巨大海盆と漸移帯を合わせた区域) に含まれる黄海, 東シナ海, 南シナ海, スールー海, セレベス海, バンダ海とそれらの周辺陸域については触れられていない。

3. ワシリエフの調査解析手法

ワシリエフが太平洋の地形・地質構造を記載・解析するために利用したデータは次の 5 種である。

- 1) ドレッジ調査の結果
- 2) 深海掘削調査の報告書
- 3) 反射法音波探査のプロファイル
- 4) その他の物理探査結果 (屈折法で得られた速度構造, 重力・磁気・熱流量の測定結果など)
- 5) 大陸の漸移帯, 島弧・海洋島の地質・岩石に関する既存資料

このうち, 彼自身が最も力を入れて実施したのはドレッジ調査である。この調査では, 特別の大型ドレッジにより深海底に露出する岩石が掻き取られ, 得られた岩石が鑑定・分析・分類された。彼と共同研究者が太平洋で実施したドレッジ調査は, 80 地区, 数 100 地点に達した。

図 1 は, 最もよく調査された海域の 1 つである千島・カムチャツカ海溝とゼンケビッチスウェル周辺の調査地点を示す。図中で詳細調査地区とされている区域内では, この図に表現できないほどの高い密度で

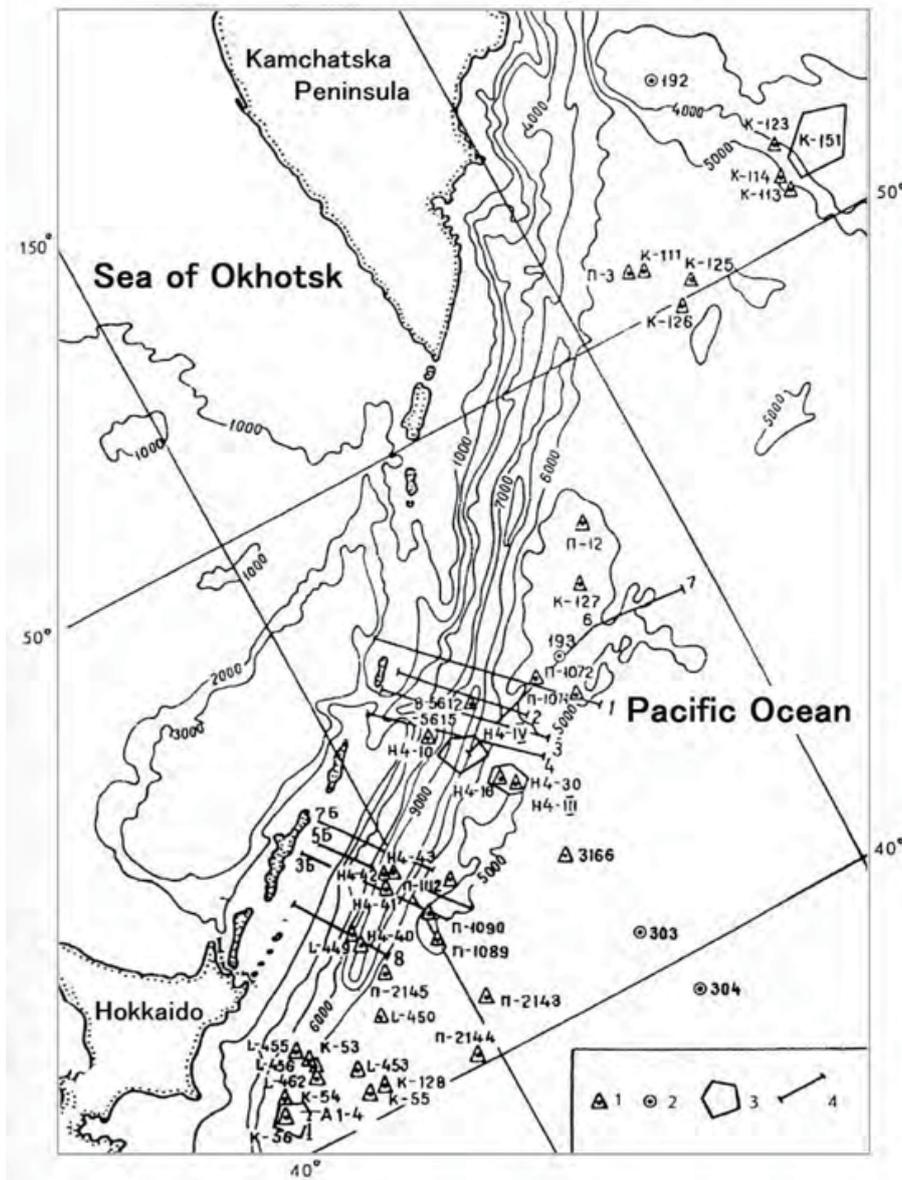


図1 千島・カムチャツカ海溝とゼンケビッチスウェル周辺の調査地点 (原書の図 82 に加筆)

(凡例) 1: ドレッジ地点 2: 深海掘削地点 3: 詳細調査区域 4: 連続反射法地震探査測線

ドレッジが実施された。このドレッジ調査に、反射法音波探査や深海掘削調査の結果も合わせて、地質平面図と断面図が作成された。図2はその一例である。ワシリエフは、このように、陸上の地質調査で採用されているマッピングの手法を海域に適用し、主要な地形構造単元の地質図を作成することによりその発達過程を考察した。

ワシリエフが地質構造解析に利用した深海掘削調査の成果は、1969～1983年に実施されたDSDP (Deep Sea Drilling Project) と、1986～2002年に実施されたODP (Ocean Drilling Program) で得られたものである。太平洋では両プロジェクトで合計567地点が掘削され (図3)、本書ではそのうち251地点のデータが引用されている。

なお、この深海掘削調査は海洋底拡大説を証明することを目的に実施されたので、掘削孔が堆積層 (海洋の第1層) を貫通して最初の玄武岩に達すると、それを基盤 (海洋の第2層) の表面とみな

して掘り止めにされた。太平洋の深海掘削で採取された最も古い堆積物はジュラ紀中期 (Leg 129, Site 801, 東マリアナ海盆) であった。これに対して、ワシリエフらが実施したドレッジ調査では、ジュラ紀以前と考えられる変成岩類が、マッサウトラフ、千島・カムチャツカ海溝、クラリオン断裂帯などの水深6,000～8,000mの海底から採取されている (原書の表33)。

4. 太平洋の独自性

ワシリエフは、他の海洋と比較して太平洋が以下のような独自性を有している点を重視し、太平洋の成因論はこれらの独自性を説明できるものでなければならないと考えている。

- 1) 地球表面の1/3以上を占める特別に大きな構造である。
- 2) 地球の非対称性 (彼のいう太平洋 - アフリカ非対称性) を作り出している。
- 3) 輪郭が対称的 (ほぼ円形) である。

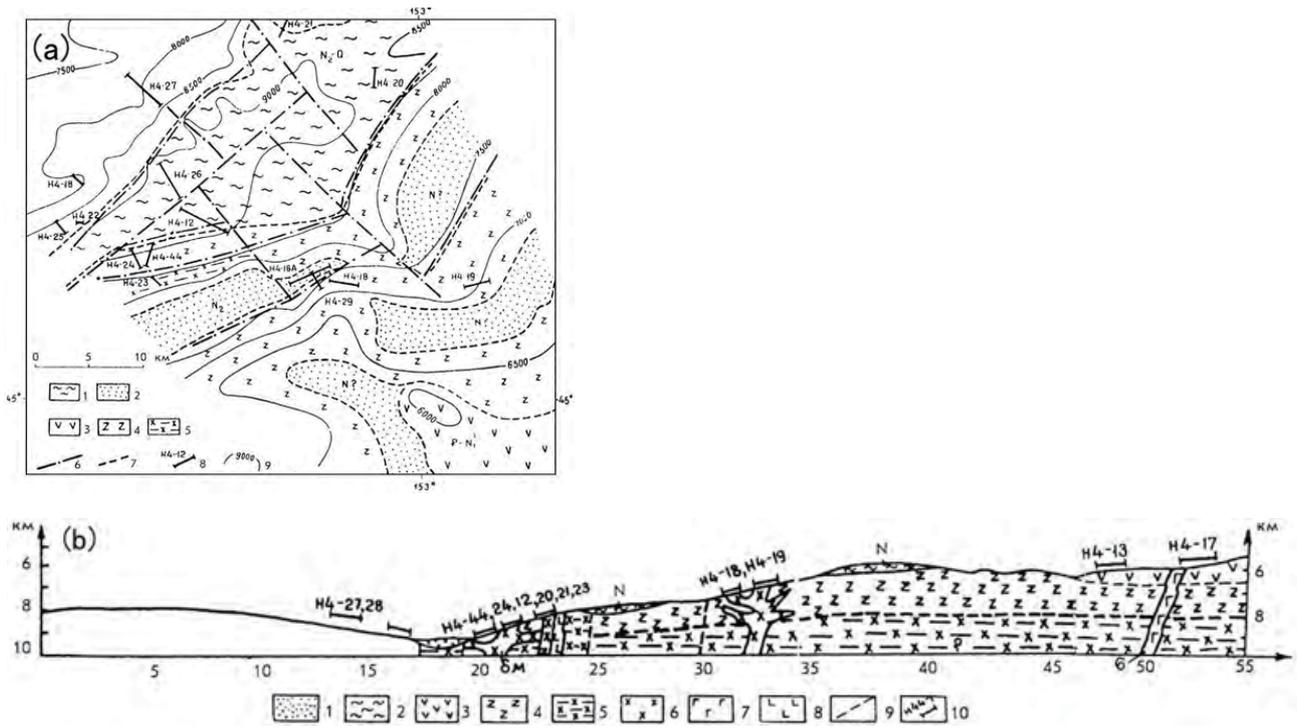


図2 原書に挿入されている地質図と断面図の一例
 (a) 千島・カムチャツカ海溝の海側斜面の地質図 (原書の図 83) (凡例は省略)
 (b) 千島・カムチャツカ海溝の海側斜面の断面図 (原書の図 84) (凡例は省略)

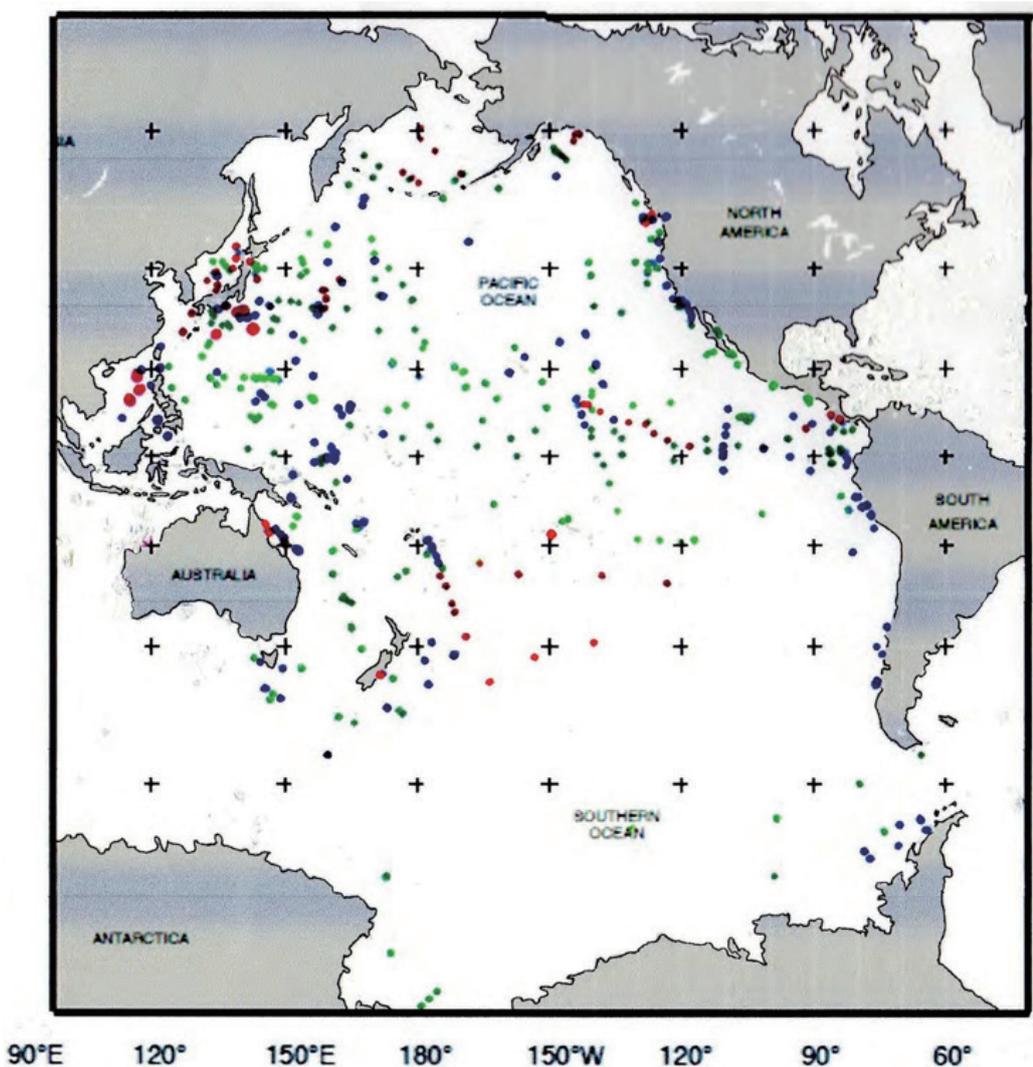


図3 太平洋の深海掘削地点 (http://www-odp.tamu.edu/nav_cru.gif)
 (凡例) 緑色の丸: DSDP
 青色および赤色の丸: ODP

- 4) 陸域の多輪廻式変動帯が太平洋を環状に取り巻いている。
- 5) 放射状および同心円状の大断裂帯が発達している。
- 6) 長期にわたって造構マグマ活動が続いている。
- 7) 海洋地殻を構成するソレアイトの組成が他の大洋とは異なる。
- 8) 海洋地殻下部は超苦鉄質（同位体的に枯渇したハルツバージャイト）である。
- 9) 大洋中央海嶺に属する東太平洋海膨と太平洋・南極海膨が太平洋の中央に位置していない。
- 10) 西太平洋には島弧 - 海溝 - 縁海系が発達している。

5. 太平洋区の構成

本書でワシリエフは、太平洋区を巨大海盆 (megabasin) と漸移帯 (transition zone) に分けて論じている (図 4)。彼のいう巨大海盆とは海溝の内側地域 (海溝を欠く部分では大陸棚の縁) を指す。巨大海盆では地球創成以来、造構マグマ活動が止むことはなかったから、その意味では全体が変動帯であるが、彼は地殻下部に、剛体としてふるまう超苦鉄質層が存在すると考えているので、巨大海盆をタラソクラトン (海のクラトン) と呼んでいる。

いっぽう、漸移帯は、この海のクラトンと陸のクラトン (先カンブリア界の台地) に挟まれた地帯を指し、変動帯とも呼ばれている。漸移帯 / 変動帯は、多輪廻造山帯、縁海、島弧で構成され、南西部 (オーストラリア周辺) では、太平洋区に属する漸移帯 (内帯) とインド・オーストラリア区に属する漸移帯 (外帯) が隣り合って共存しているとみている。

プレートテクトニクスでは、大洋中央海嶺を海洋地殻が誕生する場、海溝をそれが沈み込む場と想定している。太平洋は、東太平洋海膨と太平洋・南極海膨で生まれ、それぞれが独自に水平移動する4枚のプレートからなると考えられている。しかし、ワシリエフは、前述した太平洋の独自性からみて、巨大海盆が一次オーダーの単一の汎地球的地形構造であり、東太平洋海膨、太平洋・南極海膨はその内部に後から生じた大規模な隆起地形とみている。この考えでは両海膨が太平洋の中央にないことは不思議ではない。

ワシリエフは太平洋の概略海底地形を図 5 のように表現している。この図から、巨大海盆の西部には規模の大きな高地 (海膨・海台・海嶺・海山列など) が発達し、東部では地球規模の大洋中央海嶺 (東太平洋海膨、太平洋・南極海膨) と多くの長大な断裂帯が発達していることが分かる。

Smoot (1998) と Choi (2002) は、衛星に搭載されたマイクロ波アルチメータが取得したデータのもと

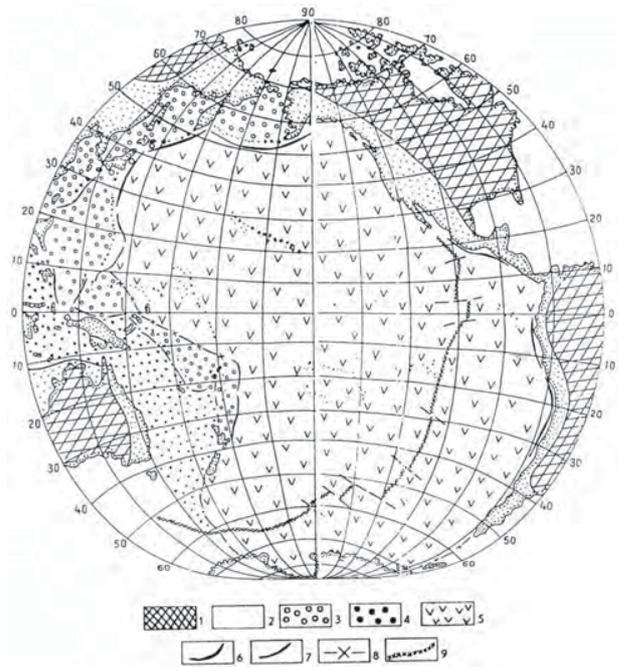


図 4 太平洋区の構造図 (原書の図 162)
 (凡例) 1: 先カンブリアの台地 2: 大陸の漸移帯 3: 太平洋区の漸移帯 4: インド・オーストラリア区の漸移帯 5: 太平洋巨大海盆 6, 7: 海溝 8: 太平洋巨大海盆の受動的縁辺 9: 大洋中央海嶺の中軸

づいて描いた太平洋のリニアメント図を示している (原書の図 10, 11)。ワシリエフは、そこに描かれたリニアメントがプレートの境界を越えて連続していることも、巨大海盆が一次オーダーの単一の汎地球的地形構造であることを支持すると主張している。

巨大海盆はこのような地形だけでなく、地殻の厚さ、地球物理学的特徴、堆積層の時代などにも東西で顕著な違いがあり、その境界の位置は、何を指標とするかにより異なる (図 6)。ワシリエフは、多くの研究者と同様、東部と西部の違いを生み出した根本的な要因は、下部マントルとコアの境界面の起伏 (Morelli and Dziewonski, 1987) と地球の深部過程にあると考えている。

6. 巨大海盆の地殻断面

ワシリエフは上述のようなドレッジを中心とした調査の結果にもとづいて、太平洋巨大海盆の地殻構造は、図 7 に示すように、大別すると3段階の地質発達ステージを経て形成されたと考えている。この図は彼の考えを的確に表現しているが、どういうわけか、ここで取り上げている2009年の著書には掲載されていない。

第1ステージの岩石は、超塩基性岩類とその上位の塑性流動の痕跡がある変成岩類からなり、始生代～原生代に形成されたと考えられている。第2ステージの岩石は、下位サブステージの層状塩基性貫入岩体と上位サブステージの噴出・貫入岩類に分けられ

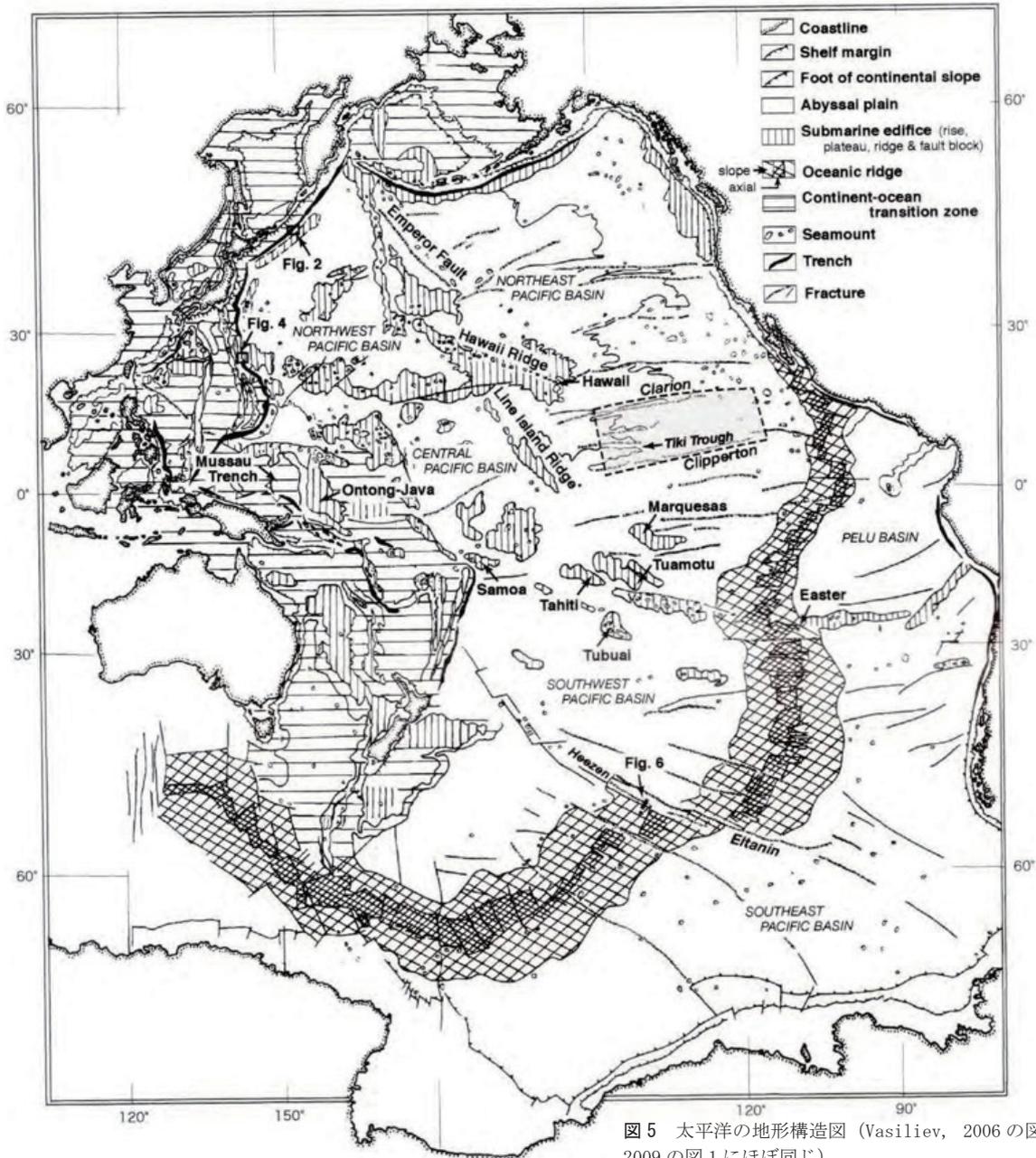


図5 太平洋の地形構造図 (Vasiliev, 2006 の図1) (Vasiliev, 2009 の図1にほぼ同じ)

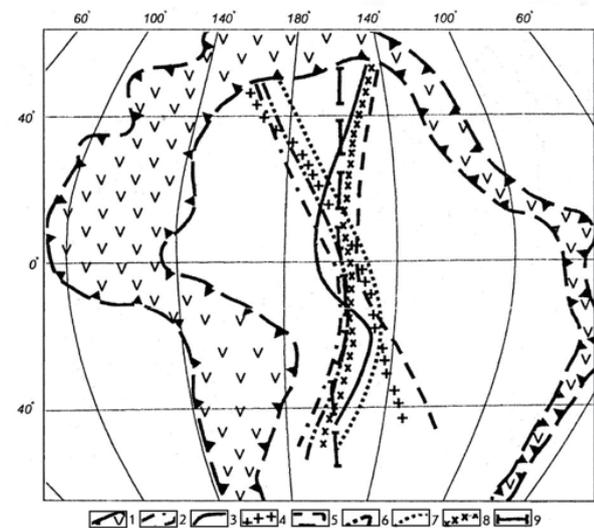


図6 太平洋海盆の西部と東部を分ける種々の境界 (原書の図6)
 (凡例) 1: 太平洋区の漸移帯 2-9: 異なる指標による東太平洋と西太平洋の境界

るが、両者は岩石学的に見て同源である。いずれも分布範囲が極めて広く、組成・構造・組織がどこでもよく似ていることから、陸上のトラップ層に倣ってタラソトランプ層（海洋のトラップ層）と呼んでいる。その形成時代は、陸上のトラップ層と同様、古生代～三畳紀と考えられている。なお、上位サブステージの噴出岩類は、その構造や組織から、主に浅海環境（ところによっては陸上環境）で形成されたとみなされている。第3ステージの岩石は、組成も噴出様式も様々な火山岩類と堆積物からなり、深海掘削でも明らかにされているように、ジュラ紀以降に形成された。

図8は海洋地殻の構成についての従来の解釈を示している。この中の第1層と第2A層がワシリエフの第3ステージに、それ以下（第2B層と第3層）が

Geological-structural stage	Geologic age	Lithologic structure	Constituent	Component rocks	Remarks	
THIRD	Cenozoic	reef limestone	sea water		forming the present topographic-geologic structure of the mega-basin block subsidence of the Pacific mega-basin (≒6 km)	
		seamount, plateau & rise				
		horst-graben	sediments	pillow basalt, hyaloclastite, tuff		
SECOND	Jurassic		volcanics & intrusives	pillow basalt, tuff, breccia, tuffaceous sediments, intrusions	accumulated in shallow marine environments	
			massive plutonics	olivine gabbro-norite, gabbro, gabbro-diabase, metagabbro, epidote amphibolite (originated from diabase)		underlying most part of the Pacific mega-basin
			cumulates	plagioclase wehrlite, websterite, orthopyroxenite, troctolite		
FIRST	Triassic		layered basic intrusions		structural unconformity	
			acidic rocks	epidote-amphibolite schist, amphibolite schist, epidote amphibolite, pyroxene-plagioclase metamorphic rock, chlorite-talc rock, serpentinite (garnite, gneiss, granulite)		occurring as nodules in volcanic rocks on oceanic islands
			metamorphics			
FIRST	Archean (3.5 Ga)		ultrabasics	dunite, lherzolite, wehrlite, garnet peridotite, garnet pyroxenite	oceanic trap formation	
			plastic flow			

図7 太平洋巨大海盆の基本構造 (Vasiliev, 2006 の図8)

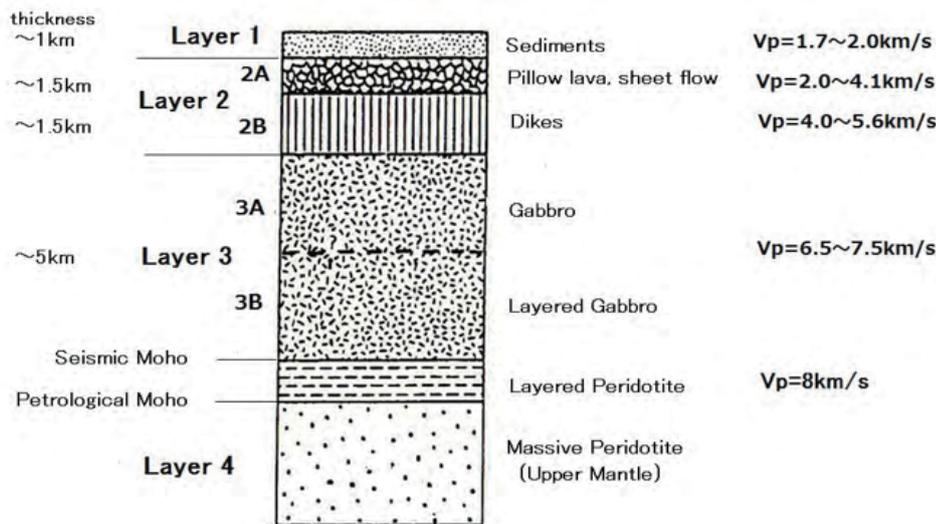


図8 海洋地殻の構成についての従来の考え (Kennett, 1982 を改変)

第2ステージと第1ステージに対応する。深海掘削が到達したのは第2A層の表面までであり、第2B層以下は地震波速度からハンレイ岩と推定されていたが、ワシリエフは、それがタラソトラップ層と変成岩類からなることを実証した。

ワシリエフのいう第1ステージと第2ステージの岩石がドレッジされた地点を図9および図10に示す。第1ステージの変成岩類は、海溝（またはトラフ）の海側斜面や大規模な断裂帯の基部からドレッジされている。それらの変成相はザクロ石角閃岩相、リョクレン石角閃岩相、緑色片岩相など様々で、微褶曲した縞状組織を有するものもある。ザクロ石の成分から変成時の温度・圧力条件が推定されている試料もある。図11は第1ステージと第2ステージの岩石が露出する代表的な断面を示している。

第1ステージおよび第2ステージに形成されたとされる岩石試料の採取地点がまだ少ないことはワシリエフ自身も認めているが、太平洋だけでなく、大西洋やインド洋からも原地性の古い深成岩や変成岩が報告されている (Vasiliev et al., 2012) ことから、海洋地殻の第2B層と第3層を構成する岩石がハンレイ岩だけではないことは確実である。

第3ステージの岩石は、ドレッジによってだけでなく、深海掘削によっても多くの地点から採取されている。

7. 巨大海盆と漸移帯の境界

巨大海盆と漸移帯の境界について、ワシリエフは、海溝を伴う部分と伴わない部分、現在の地震・火山活動が活発な部分と不活発な部分を識別し、それぞれ

れの長さを算出している. その結果 (表 1) によると, 海溝を伴う部分は境界全長の約 50%, 活動的な部分は約 60% で, 海溝を伴わない部分, 非活動的な部分もかなりあることが分かる. これは, 海溝をプレートが沈み込む活動的な場所とみなす考えには不都合な事実である.

8. 漸移帯の地区ごとの特徴

太平洋漸移帯の内部は, 西部と東部で大きく異なる. 西部では陸域の多輪廻造山帯に接して縁海と島弧 -

海溝系が幅広く分布するのに対し, 東部では一部を除いて縁海と島弧を欠き, 多輪廻造山帯が直接巨大海盆に接している. 多輪廻造山帯と巨大海盆の間には海溝を欠く部分もある (図 4).

ワシリエフは, 漸移帯を 23 の区に分け, それぞれの区のシステム構成, 造山帯の構造, 現在の造構活動レベル, 地球物理的特徴, 縁海および海溝でドレッジされた岩石, 深海掘削の成果を詳しく記載し, 太平洋漸移帯の構造が多様で, 類型化が難しいことを示している.

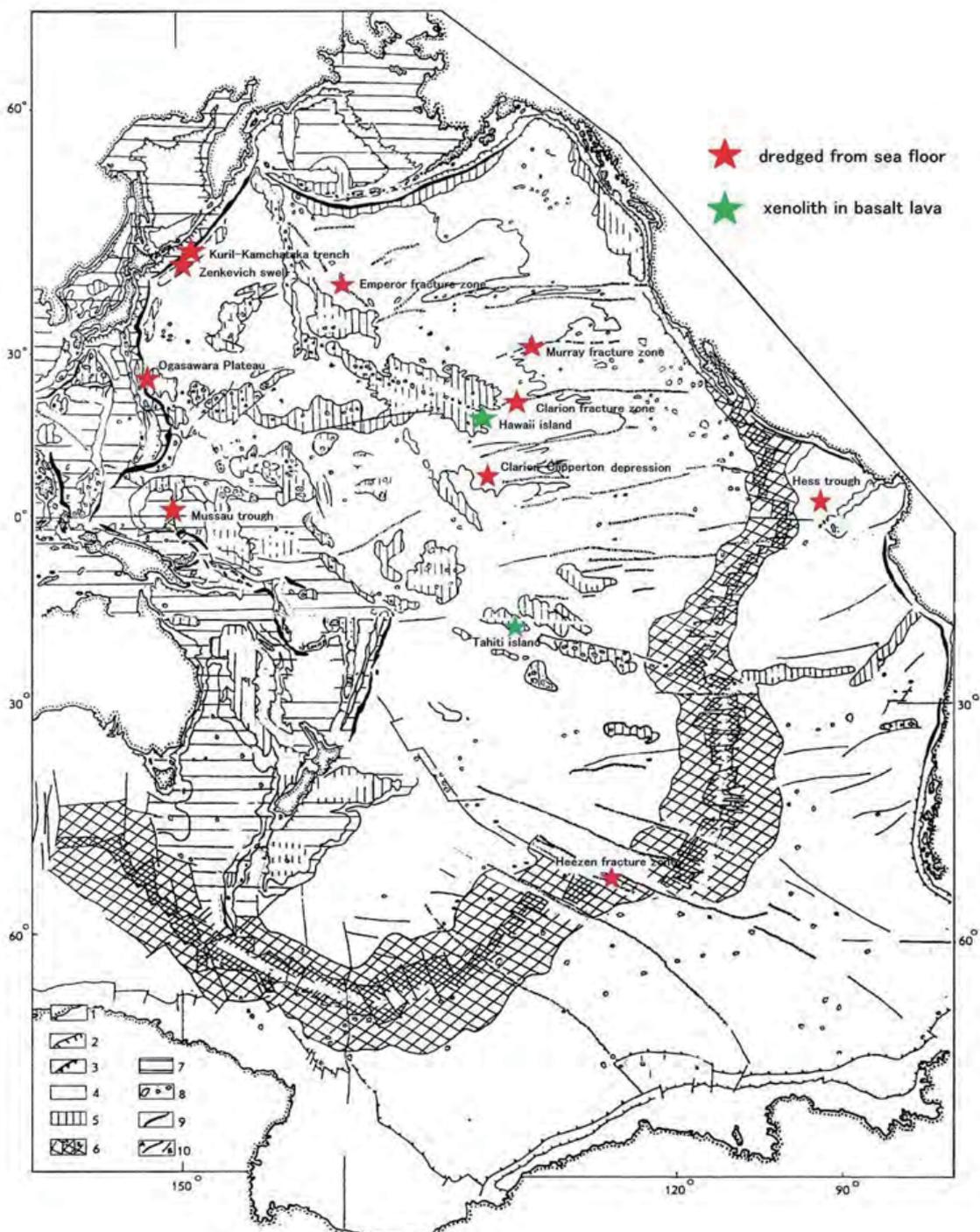


図 9 第 1 ステージの岩石がドレッジされた地点 (原書の表 33 にもとづいて筆者が作成)
 (凡例) 赤の星: 海底からドレッジされた地点 緑の星: 陸上の玄武岩溶岩中の捕獲岩として採取された地点

しかし、海溝については、断面形状と両側の地質構造の差異から3つのタイプ（島弧を伴わない縁海の海溝を含めると4つのタイプ）に分類できるとしている。また、海溝は内部に分布する堆積物から新生代後期（鮮新世～更新世）になって初めて形成されたもので、プレートテクトニクスが想定している海洋地殻の沈み込みを裏付ける事実はなく、むしろそれを否定する証拠が多いと主張している。島弧も地質構造の発達過程から3つのタイプに分類できるが、島弧-海溝系の起源については諸説があり、定まっていないとしている。

縁海についても、ワシリエフは、基盤と形成時期の違いから3つのタイプに分類している。そして、地質構造発達の過程、地球物理的特徴から、それが内陸の盆地と類似し、地殻の差別的ブロック沈降により形成されたもので、地殻の海洋化を示唆している可能性が高いと考えている。

9. 太平洋の起源

太平洋の起源を考察するに当たってワシリエフが重要と考えたのは、先に述べた太平洋区の独自性である。

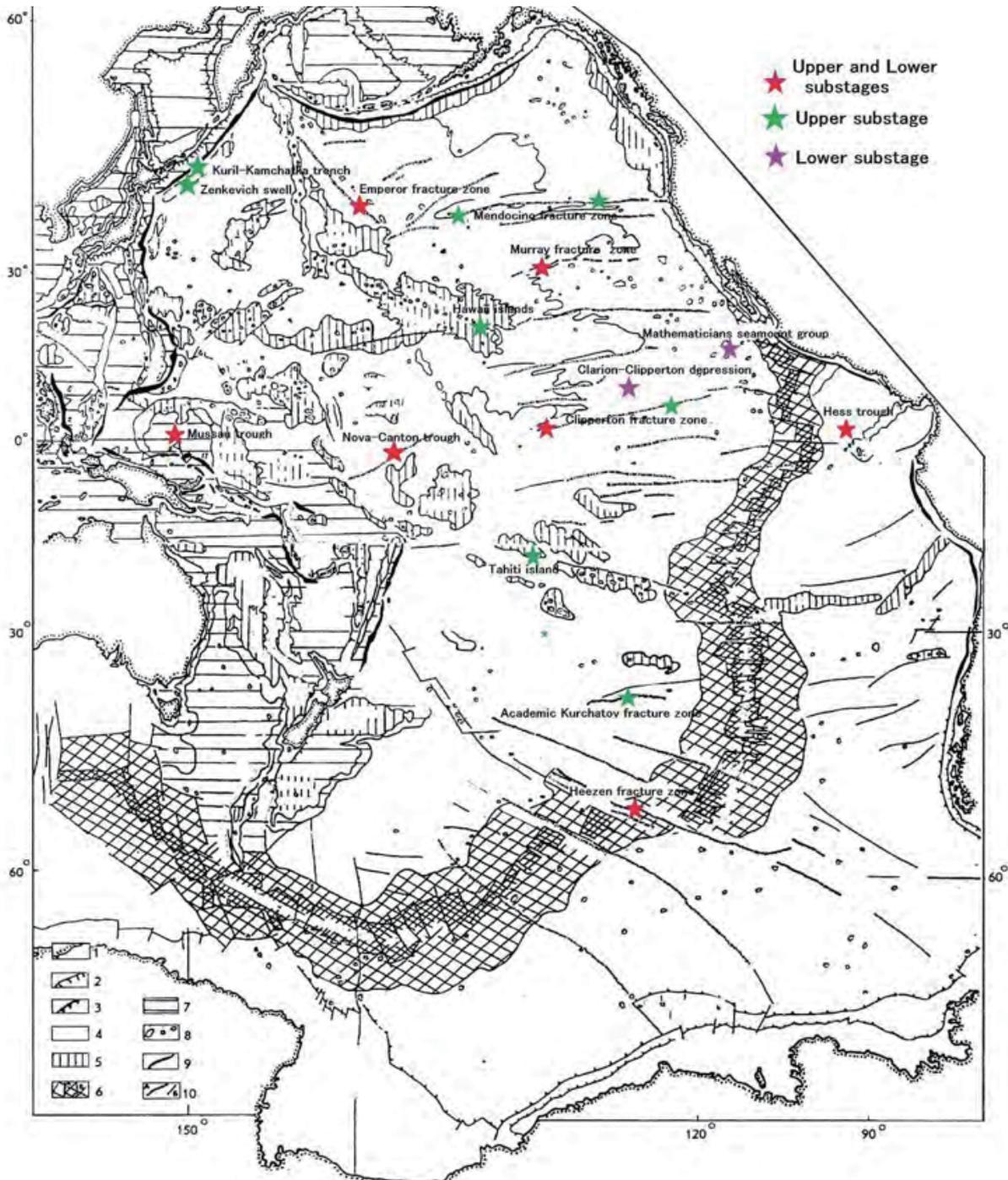


図10 第2ステージの岩石がドレッジされた地点（原書の表34にもとづいて筆者が作成）
 (凡例) 赤の星：上位サブステージと下位サブステージの岩石が共に採取された地点 緑の星：上位サブステージに属する岩石のみが採取された地点 紫の星：下位サブステージの岩石のみが採取された地点

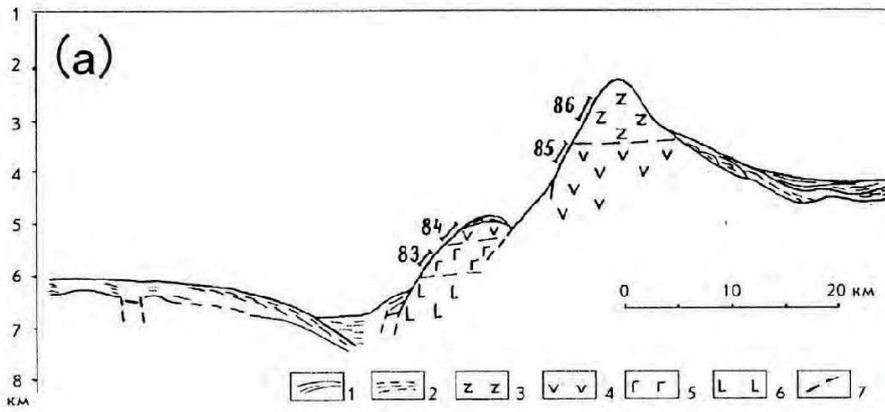
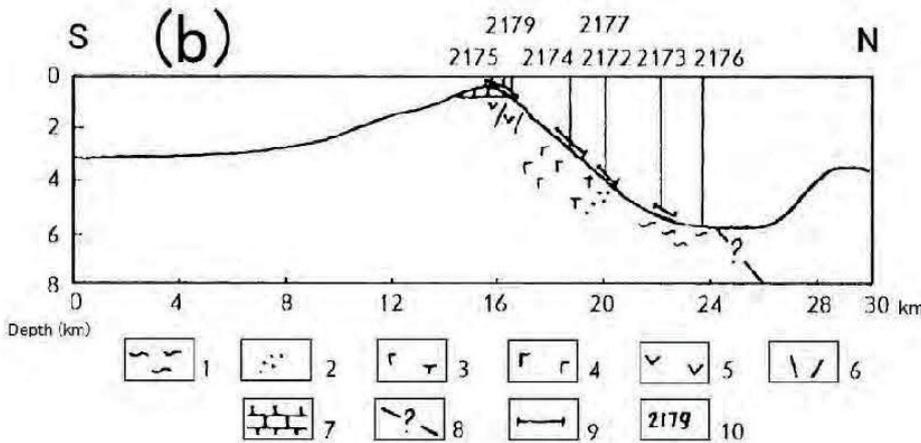


図11 第1ステージと第2ステージの岩石が露出する代表的な断面

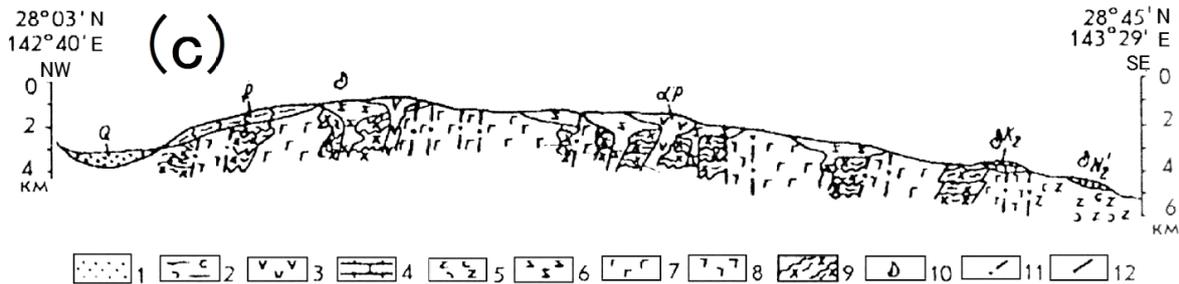
(a) マッサウトラフ (原書の図41)

(凡例) 1: 鮮新 - 更新世の未固結堆積物 2: 古第三紀 - 中新世の炭酸塩堆積物と陸源堆積物 3: 新第三紀の玄武岩 4: 第2ステージの上位サブステージに属する岩石 (ジュラ紀～前期白亜紀のハンレイ岩 - ドレライト - 玄武岩複合岩体) 5: 第2ステージの下位サブステージに属する岩石 (塩基性～超塩基性の層状貫入岩類) 6: 第1ステージに属する岩石 (変成岩類)



(b) ヒーゼン/エレターニン断裂帯 (原書の図58)

(凡例) 1: 角閃石片岩 2: 輝石斜長石変成岩 3: ペリドタイト 4: ハンレイ岩 5: 玄武岩 6: ドレライト 7: 石灰岩 8: 推定断層 9: ドレッジ地点



(c) 伊豆・小笠原海溝の南部 (原書の図109)

(凡例) 1: 堆積物 (Q) 2: 凝灰質堆積物 (P) 3: 火山岩層 (V) 4: 炭酸塩堆積物 (K_2, N_{2-1}) 5: 非アルカリ玄武岩の枕状溶岩 6: 玄武岩溶岩, タフラバー, 珪質堆積物 (K_2, N_{2-1}) 7: 層状貫入岩類 (超塩基性岩, ハンレイ岩, 石英閃緑岩) 8: ハルツバージャイト起源の蛇紋岩 9: リョクレン石角閃岩相の変成岩類 10: 有機性残存物の産出地点 11: 推定断層 12: 推定地質境界

表1 太平洋巨大海盆と漸移帯の境界

境界総延長	海溝を伴う部分		海溝を伴わない部分		海洋同士が接する部分
	活動的	非活動的	活動的	非活動的	
66,400km	34,200km (51.5%)		27,000km (40.7%)		5,200km (7.8%)
内訳	活動的	非活動的	活動的	非活動的	非活動的
	29,600km (86.5%)	4,600km (13.5%)	8,600km (31.9%)	18,400km (68.1%)	5,200km (100%)

*この表は訳本 p.332 の記述にもとづいて筆者が作成した。

とくに、彼は、太平洋を中心とした半球がアフリカ大陸を中心とした半球と対になって汎地球的な非対称性 (いわゆる惑星の二分性のようなもの) を作り出している点を重視し、太平洋は、後に月となる大きな塊が原始地球から分離した跡である可能性が最も高いと結論づけた。この結論に至る過程で、彼は、地球 - 月系の形成に関する諸説を比較検討し、天体

の衝突を再現したコンピュータシミュレーションの結果に注目している。

この非対称性を作り出している構造として、ワシリエフは、原本の「あとがき」を書いているアブラモフが提示した「巨大漏斗状構造」という概念を支持しているが、その概念は理解しにくい。

10. 太平洋の地質構造発達史

おわりに

太平洋の地殻断面と太平洋の起源に関する考察から、ワシリエフは太平洋の地質構造発達史を以下のように考えている。

1) 冥王代

- ・45億年前、宇宙空間での稀で特異なイベント(天体の衝突など)により、後に月となる物質が地球から飛び出し、その跡が太平洋巨大海盆の原型となった。
- ・重いが塑性的な地球のマントル物質は、一旦押し込まれた後に反転して巨大な円錐形の膨らみとなり、巨大海盆の超苦鉄質基盤(タラソクラトン)が形成された。
- ・そのエネルギーは周辺に波及し、太平洋-アフリカ非対称が作り出された。

2) 太古代～原生代

- ・巨大海盆の外側にはシアル質地殻(最古の岩石:40億年)が形成され、安定台地(陸のクラトン)となった。
- ・巨大海盆には周辺の台地から大量の陸源物質・火山物質が流入・堆積し、第1ステージの変成岩が形成された。
- ・シアル質の安定台地の縁辺部は、剛体である海洋地殻との相互作用で破碎され、漸移帯としての原始地向斜の形成が始まった。

3) 古生代～中生代前期

- ・第2ステージの造構火成活動の結果、巨大海盆内には下位サブステージの苦鉄質岩(層状ハンレイ岩)と上位サブステージの玄武岩からなるタラソトラップ層が形成され、その末期には、太平洋全体が浅海性環境(一部は陸上環境)になった。

4) 中生代～新生代

- ・第3ステージの造構マグマ活動と著しいブロック沈降により、巨大海盆は高地(海膨、海台、海山列、海山群)と個々の海盆に分化した。新生代にはさらに地殻の沈降が進み、現在見る起伏に富む大水深の海底地形が形成された。
- ・東太平洋海膨と太平洋・南極海膨のアーチ状地形は、'稀なイベント'の結果、異常に熱いマントル物質が上昇したことにより、中生代になって古い海洋地殻の上に構築された。これらの海膨もジュラ紀には浅海環境にあったが、白亜紀以降に沈降し、現在の水深になったと見られる。
- ・縁海盆は、主として新生代における地殻の差別的ブロック沈降によって形成された。この沈降は大陸地殻の加熱・変質による海洋化の結果である可能性がある。
- ・海溝はすべて新生代後期(鮮新世～更新世)に形成されたもので、過去に類似したものはなく、地球の発展の質的に新しい段階のあらわれである。

本書の要点は上述のとおりであるが、巨大海盆の先ジュラ紀の地史を裏づける証拠はまだ極めて乏しいし、太平洋-アフリカ非対称性を作り出したメカニズムも推測の域を出ていない。ワシリエフは太平洋がジュラ紀末に全体的に浅海化したというが、他の大洋でその分の海水量が増大した証拠はあるのだろうか?また、太平洋以外の海洋の起源はどう考えたらよいのだろうか?等々、様々な疑問が残る。ワシリエフも述べているように、太平洋の成因についての最終的結論はまだ遠く、さらなる研究が必要であることは間違いない。

謝辞 ロシア語で書かれた原書を日本語に翻訳してくださった石田光男博士と宮城晴耕氏に深く感謝いたします。また、GSPOP 翻訳委員会を牽引してくださった矢野孝雄博士、私のつたない原稿をまともな英文に改善してくださったチョイ博士にも感謝いたします。

文 献

- Choi, D.R., 2002. Deep earthquakes and deep-seated tectonic zones. Part 2, South America. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, n. 24, p. 2-7.
- Gavrilov, A.A., Maslov, L., Yano, T. and Choi, D.R., 2016. Obituary: Vasiliev, B.I. *New Concept in Global Tectonics, Journal*, v. 4, n. 2, p. 348-349.
- Kennett, J.P., 1982. *Marine Geology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 813p.
- Morelli, A. and Dziewonski, A.M., 1987. Topography of the core-mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core. *Nature*, v. 325, p. 678-683.
- Smoot, N.C., 1998. WNW-ESE Pacific lineations. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, n. 9, p. 7-11
- Vasilliev, B.I., 1991. Main characteristics of geologic structure in the Northwestern Pacific Ocean (in Japanese). Research Center of Earth Science, Saitama Pre., Japan, 204p.
- Vasilliev, B.I., 2006. Geological Structure and Origin of the Pacific Ocean (in Japanese). *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, v. 60, n. 3, p. 185-196.
- Vasilliev, B.I., 2009. Geological Structure and Origin of the Pacific Ocean (in Russian). *Dal'nauka, Vladivostok, USSR*, 559p.
- Vasilliev, B.I., Yano, T. and Choi, D.R., 2012. Progress report of the study of ancient continental rocks in the Pacific Ocean. *New Concept in Global Tectonics Newsletter*, n. 63, p. 80-81.
- Vasilliev, B.I., 2017. Geological Structure and Origin of the Pacific Ocean (in Japanese), Tokai Univ. Press, Japan, 423p.

大陸と海洋の深部構造とそれらの起源

Deep structure of continents and oceans and their origin

Nina I. Pavlenkova

Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia ninapav@mail.ru

(小泉 潔 [訳])

要旨: 深海底掘削の結果・マントルゼノリスの実験的研究および深部流体は、次のようなことを示している。

- (1) 海洋地殻は、古い(始生代)地殻の破片を含み、組成と年代が著しく不均質である。
- (2) 大陸のリソスフェアは 250 ~ 300km の厚さがあり、枯渇した低密度物質よりなる。
- (3) 高圧高温下での岩石の化学的研究は、それらの岩石 - 物理的相変化に深部流体が重要な役割を示している。

これらのデータにより、大陸と海洋の形成に関するモデルが、深部流体の無秩序な移流に基づいて提案されている。すなわち、大陸地殻は強い深部流体の流れのある地域に形成され、それに対し、弱い流れの地域には異なった亜大陸と海洋地殻が発達した。深部流体はまた、マントル物質の枯渇と低密度の厚いリソスフェアの形成をもたらした。低密度リソスフェアの成長が、海洋リソスフェアと大陸の形成の出現させた。

キーワード: 地殻・上部マントル・深部流体・地球の脱ガス・地震研究・ゼノリス

(2017年11月15日受付。2017年11月21日受理)

はじめに

大陸と海洋の起源は、グローバルな地球力学の主要な問題の一つである。プレートテクトニクスと多くのほかの地球力学的概念が、この問題に単純な解答を与えている。まず、全地球表面は厚い大陸(カコウ岩 - 片麻岩)地殻に覆われていたが、中生代にリソスフェアがバラバラなプレートに分けられ、それらの拡大地帯で、海洋が薄い海洋地殻と共に形成されたと提案されている。最近の数10年で、新しい地質学および地球物理学的数据が、地球の上部(地殻と上部マントル)の構造と組成やそれらの発達史について得られてきた。これらのデータは大陸と海洋の起源が、そのように単純な形成では説明できないことを示している。表面地形・地殻の構造と上部マントルの関係に、多くの明確に定義された新しい秩序が明らかにされてきた。これらの多くのデータは、現代の地球力学的概念では明確な説明が見つからない。

大陸と海洋の形成の問題の解決について最も重要なデータは、次のようなものである。

- 海洋における地殻は、年代と組成が異なっている。それは、古い(始生代)地殻の残存物と広大な亜大陸地殻の地域で識別される。海洋にはまた、古い大陸リソスフェアのいくつかの破片が存在する。
- 大陸は地殻の厚さや組成ばかりでなく、マントルリソスフェアの組成も海洋と異なっている。
- 海洋はその構造が異なっている。すなわち大西洋とインド洋には不活発な大陸縁があり、それらの中央海嶺は、まさにその海洋の中央に位置している。太平洋は、地震の多い造構的な活動帯(ベニオフ帯)の輪に囲まれている。

- 地球は、異なった地殻と上部マントルの構造を持つ二つの半球に明確に分かれている。すなわち、低く凹んだ太平洋半球(海洋半球)と大陸優勢なインド - 大西洋半球(大陸半球)である。
- それらの間のほぼ等しい90°の距離にある中央海嶺系は、南極点に対して対称である。
- 高圧高温下での地殻と上部マントルの岩石 - 物理的性質に関する実験的データ・深部ゼノリスに関するデータ・天然ガスの地球化学的研究や地球の脱ガスが、リソスフェアの形成・その組成および物理的性質に、強い深部エネルギーの流体が大きな役割があることを示している。

本論では、先行研究と共にこれらのデータの解析がなされ、大陸と海洋の形成を結びつけたモデルが説明される。このモデルはすでに提案されてきている(Pavlenkova, 2015)。本論ではデータをさらに付け加えている。

主な注目点は、次のような主要な問題である。

- (1) 異なった地殻のタイプ(大陸・海洋とその中間)がどのように創られたのか?
- (2) 大陸はどのように形成されたのか?
- (3) 太平洋(太平洋半球)の特有な構造の起源は何か?
- (4) 中央海嶺系を持つほかの海洋の起源は何か?
- (5) リソスフェアのすべての相変化に関係する共通のエネルギー供給源は何か? そして原因と結果の関係の単純なシステムでそれらに関係づけることが出来るか?

大陸と海洋地殻とその起源

地震研究が、地殻タイプの三つの有力なグループを

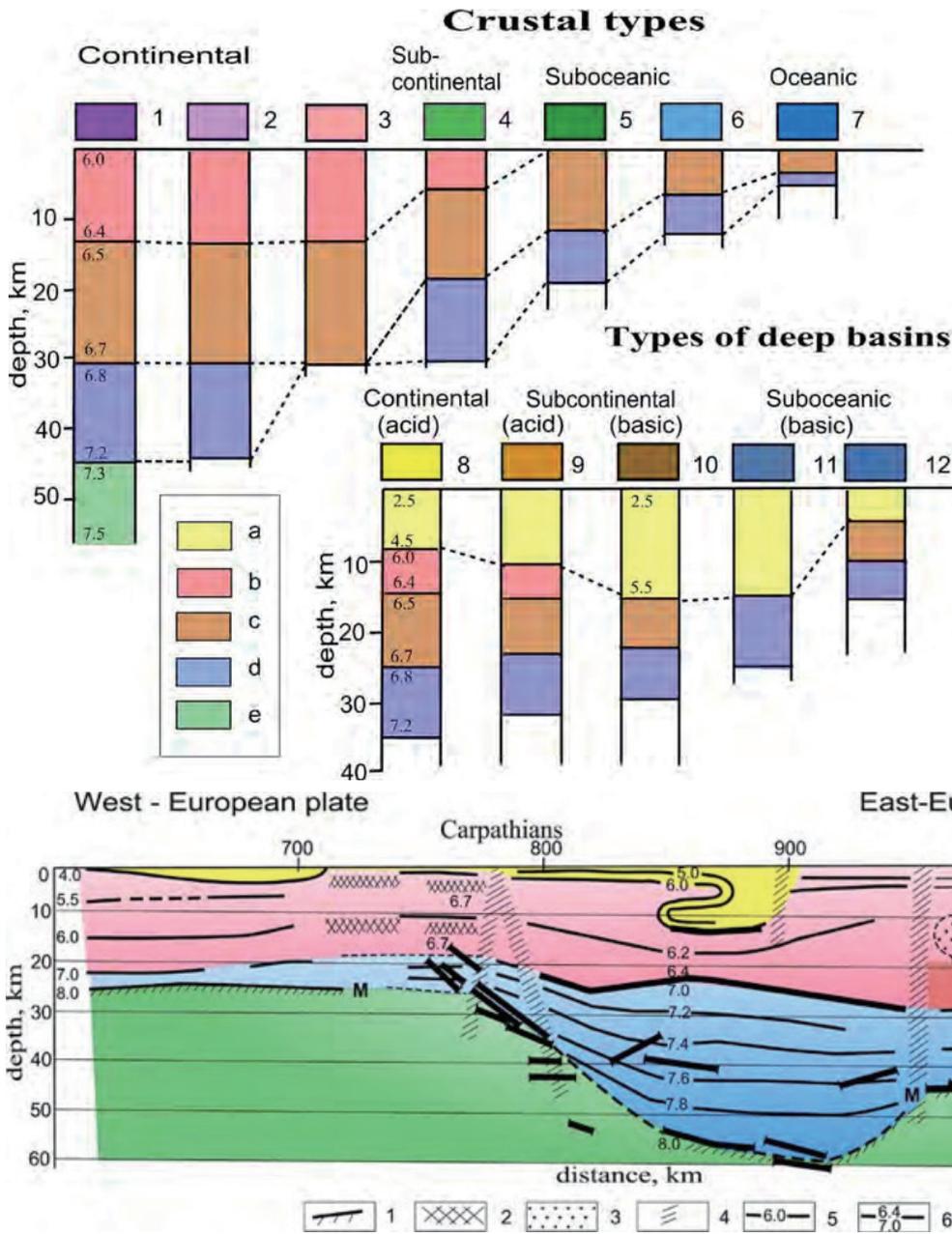


図1 Belousov and Pavlenkova (1984)による地殻のタイプ. 主な地殻; (a) 堆積物; (b) 上部地殻 (カコウ岩 - 片麻岩); (c) 中部地殻 (グラニュライト - 片麻岩); (d) 下部地殻 (グラニュライト - basite*); (e) 地殻 - マントルレイヤー. 数字はそれぞれのレイヤーのP波速度を示す.

* 訳者注; 現在は廃止されたすべての塩基性火成岩の名前. (<https://www.mindat.org/min-50490.html>)

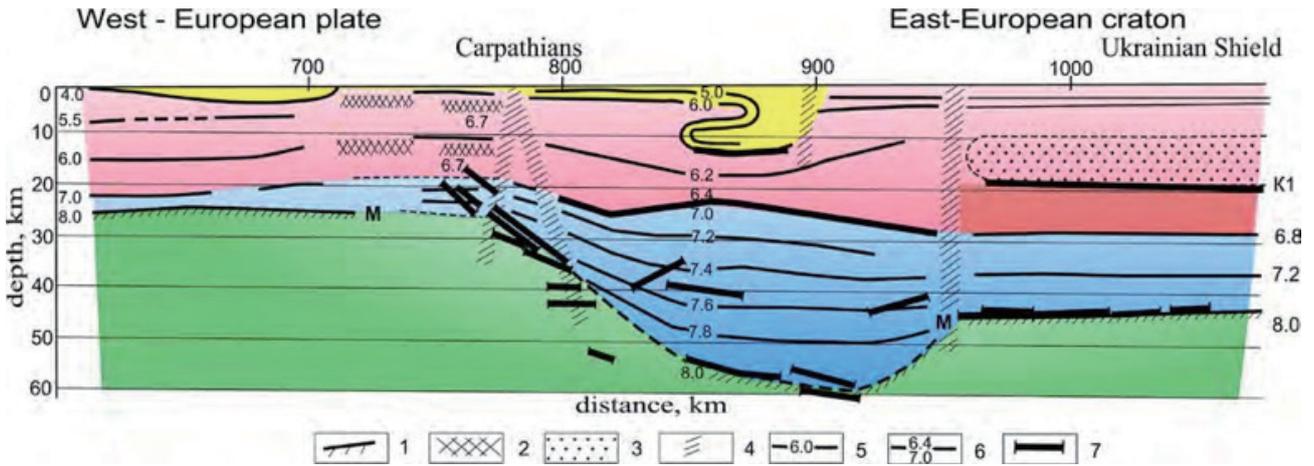


図2 東ヨーロッパクラトンと西ヨーロッパプレート境界帯を切る地殻速度断面 (Pavlenkova, 1996). 数字はP波速度を示す. 凡例: 1-モホ面 (M), 2-高速度層**, 3-低速度帯, 4-等速度線, 6-地震境界, 7-強い反射境界

** 訳者注; 英文では, hither velocityとなっているが, higher velocityの間違いか?

明らかにした (図1; Belousov and Pavlenkova, 1984). すなわち, 三つの大陸地殻タイプ・二つの海洋地殻タイプと二つの漸移タイプのグループである. 大陸地殻は, 厚さ 25-30 ~ 50-60km で, その固結した部分は地震速度が 6.0 ~ 6.4km/s (上部地殻)・6.5 ~ 6.7km/s (中部地殻) および 6.8 ~ 7.2km/s (下部地殻) から構成されている. 深海掘削・ゼノリスの研究および地震データから, それらのレイヤーの平均組成と変成の程度を識別できる. すなわち, それらはカコウ岩 - 片麻岩の上部地殻・グラニュライト - 片麻岩の中部地殻およびグラニュライト - 塩基性岩の下部地殻である.

三つの大陸タイプは, 主に地殻の厚さが異なっている. すなわち, 最も厚い地殻は古い領域と大陸の内

部に典型的である. 地殻の厚さは通常大陸縁へ減少する. 異なった地殻のタイプを持つブロックは, 深部褶曲により頻繁に分割されている. その例は, 東西ヨーロッパの地殻である (図2). 重要な新データは, 大陸タイプである大部分の大陸縁である. 例えば, 厚い (30km 以上) 大陸地殻が, ユーラシアと北アメリカ縁の大部分をカバーしているが, 平均約 25 ~ 35km と厚さがわずかに薄くなっている (図4, Pavlenkova, 2015)

大陸では, 漸移地殻タイプがまた, 15 ~ 30km の厚さで観測される. すなわち, “亜大陸” と “亜海洋” である (図1). “亜大陸” 地殻は, 大陸地殻の三つの主要レイヤーを持っているが, 上部のカコウ岩 - 片麻岩層は薄く (3 ~ 5km), 速度 6.8 ~ 7.2km/s の

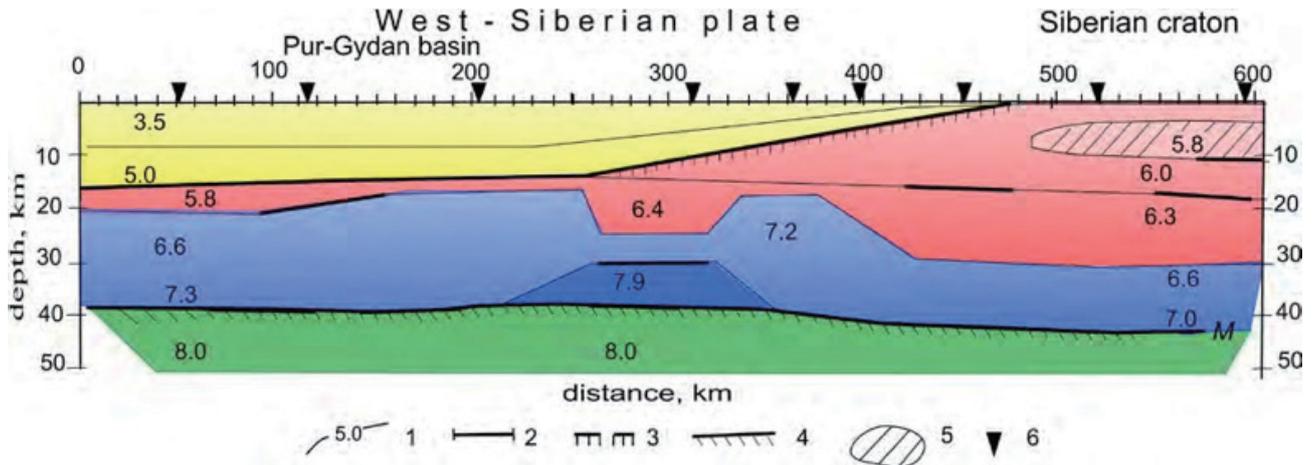


図3 西シベリア北部 Pur-Gydan 盆地の地殻速度断面 (Pavlenkova and Pavlenkova, 2015). 凡例:1- 等速度線, 2- 反射境界, 3- 基盤面, 4- モホ面 (M), 5- 低速度帯, 6- 爆破点

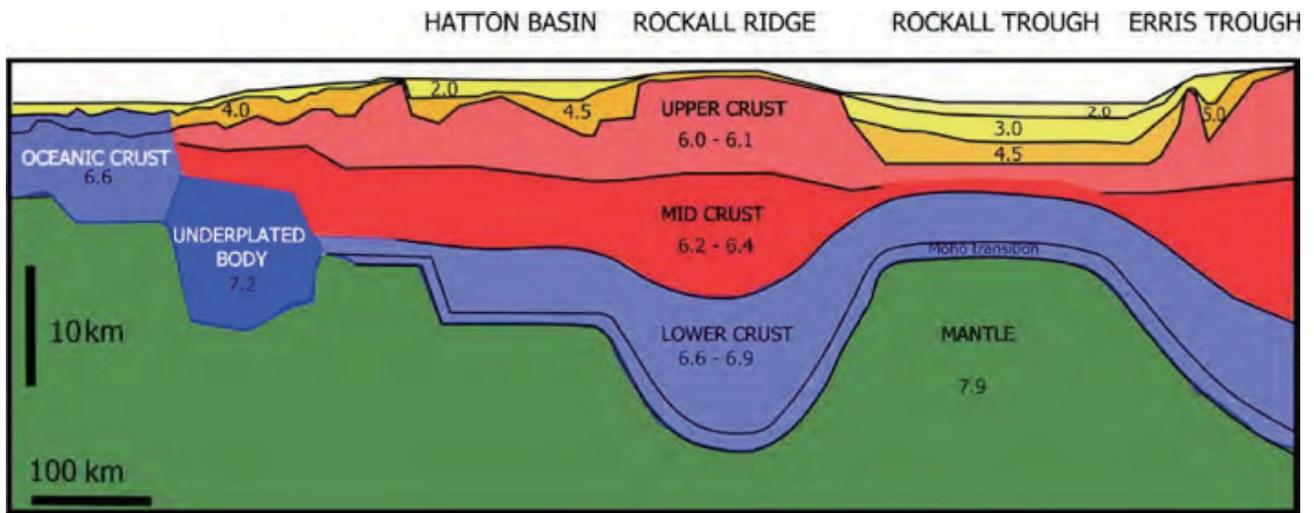


図4 Rockall 海嶺 (北部大西洋) 地域の地殻速度断面. すべての地殻タイプが北部大西洋のこの部分に観測される.

下部塩基性レイヤーが地殻の大部分を形成している。“亜海洋”地殻は、カウ岩-片麻岩レイヤーを持たない。両方の漸移タイプは、通常、リフト帯と深部堆積盆地に観察される (図7, Pavlenkova, 2015)。亜海洋地殻の例として、西シベリヤ卓状地北部の非常に深い Pur-Gydan 盆地のものが図3に示されている。

海洋では、地殻のすべてのタイプが観察される (図4・5)。漸移地殻は島嶼と海台に特有である (Pratt, 2000)。その例は、Kerguelen 海台 (Operto and Charvis, 1996)・Argentine Puna 海台 (Schurr et al., 1999) およびそのほかのもの (Pavlenkova, 2015) である。大陸地殻の広大な地域が、ユーラシア北縁と中央北極圏に見られる。すなわち、Mendeleev と Alpha 海嶺は平均の厚さが 30km で、厚さ 5km のカウ岩-片麻岩レイヤーのみを持っている (Funk et al, 2011; Kashubin et al., 2013; 図5・6, Pavlenkova, 2015)。北大西洋では、亜大陸地殻が Farrero-Iceland と Rockall 海嶺の下と Rockall 盆地・Baffin 湾および Davis 海峡の下に見られる。グリーンランドと共に、それらはヨーロッパ

パと北アメリカ大陸との間の亜大陸橋を形成している (図5)。同様な橋は、アジアとオーストラリアにも推定される。オーストラリアの北西縁のすべての島嶼と広大な地域は、大陸地殻と亜大陸地殻をもっている (Ray et al., 2008)。太平洋では、“亜大陸”地殻の破片が海洋の東部のほとんどをカバーしている (Choi, 2007; Vasiliev et al., 2012)。大陸縁の深海堆積盆は、しばしば大陸の Pur-Gydan 盆地に類似した亜大陸地殻を持っている (図3)。それらはベンガル湾の下 (Brune and Singh, 1986; Dibakar Ghosul, 2008) とカリブ海地域の下 (Brune and Singh, 1986; Dibakar Ghosul, 2008) に見られる。同様な例は多くの地域にあるだろう、そして、それらは大陸の真の大きさが、それらの地理的等高線より重要な意味があることを示している (図5)。

海洋のほとんどの部分をカバーする典型的な海洋地殻は薄く (10~15km まで)、平均速度が 6.7~7.0km である (図1)。さて、地震研究と深海掘削が、この地殻のより詳細な構造を明らかにした (Blyuman, 2011)。それは主要な三つのレイヤーである。すなわち、第一のものは堆積物レイヤー、第二のものは

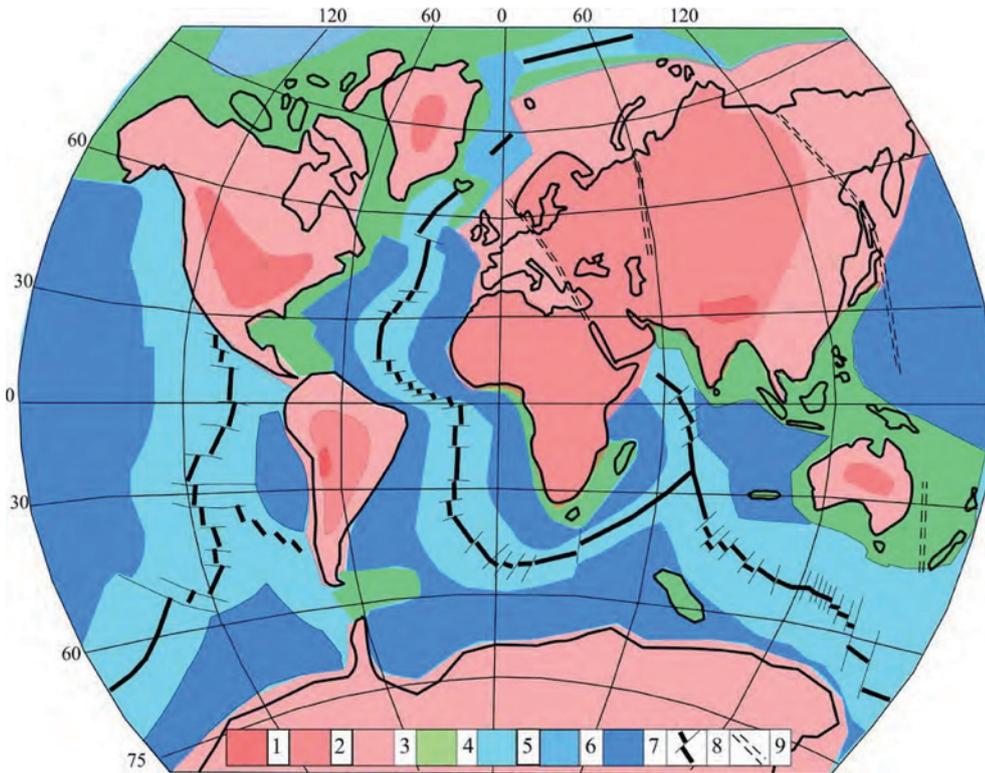


図5 地殻の異なったタイプとインド-大西洋半球地域の概略図。1～3-大陸地殻：1-厚さ50km以上，2-厚さ35～50km，3厚さ25～35km；4-地殻（亜大陸と亜海洋）の主要な漸移タイプ地域，5-中央海嶺の新しい海洋地殻，6-起源不明な薄い海洋地殻，7-主要な古い海洋地殻，8-中央海嶺，9-グローバルな断層帯

枕状玄武岩 ($V_p=2.5 \sim 3.8\text{km/s}$) と岩脈複合体 ($4.0 \sim 6.0\text{km/s}$) からなり，第三のものでより厚いレイヤーはハンレイ岩である ($V_p=6.5 \sim 6.8\text{km/s}$)。

海洋の岩石の詳細な研究が，海洋地殻の年代と組成についてのいくつかの発見をもたらした。予期せぬ重要な発見は，海洋地殻の年代が古いことである (Blyuman, 2011; Yano et al., 2009, 2011)。例えば，大西洋で地殻のある部分は，中新世の玄武岩で覆われた先カンブリア時代の片麻岩よりなっている。インド洋の西部では，中央海嶺内を掘削した ODP Leg 176 井で，1.5km の古い海洋地殻があらわれた (Dick et al., 2000)。Bortnikov et al. (2008) は，中央大西洋海嶺の軸部で発見されたジルコンの古い年代 (22 億 3000 万年まで) についてのデータを提供している。Gakkel 海嶺 (大西洋中央海嶺) の下で，古いマントルの岩石が発見された (Liu et al., 2008)。

古い海洋地殻の異常な組成がまた，発見された。典型的なハンレイ岩の化学組成を持つ等方性ハンレイ岩はしばしば泡状あるいは斑岩 (ポイント) 的構造を持っており，片麻岩的塩基性組成の変成岩と同定されている (Gaggero and Cortesogno, 1997)。グラニュライト相の変成作用は，圧力 $6 \sim 10\text{kbar}$ で温度 $700 \sim 1000^\circ\text{C}$ に相当する。これらの岩石は，貫入岩として，あるいは薄い海洋地殻中に生じたものではないことを意味している。これらは，マグマの状態に適合しない triktole 【??】 結晶化作用のほぼコンスタントな存在が見られる (Blyuman, 2011) ので，マグマ起源の累積したハンレイ岩としてのこれらの岩石の分類がまた重要である。これら

の結晶質優黒色超塩基性岩の年代は古く，16～37 億年である。

古い海洋地殻は通常，異なったサインと無秩序な形態の広域な異常を持つ複雑な磁場の海洋地域に集中している (Korhonen et al., 2007)。若い海洋地殻はリフト帯で作られてる。そこは，主に細長い線状の磁気異常を持つ中央海嶺地域である (図5)。

このように，年代と組成の不均質で複雑な組み合わせの海洋地殻がすべての海洋に見られる。そのような組み合わせは，大陸拡大の結果によるものとしてのみ，海洋の形成の説明が可能である。すなわち，海洋地殻は全地史を通じて大陸地殻と共に発展してきたことは明らかである。問題は，異なったタイプの地殻がどのように形成され，なぜそれらが地球表面に無秩序に分布したのかを究明することである。異なった地殻タイプの形成に関するいくつかのモデルが，議論された。ほとんどのモデルは，リフティングと塩基性化作用による大陸地殻の転換の過程を考えている。リフティングは海洋地殻の形成に関してまさに重要な過程である。大陸地殻の塩基性化作用と変成作用の多様な過程による相変化が，とくに大陸縁と深海堆積盆で，“亜大陸”地殻形成の主な過程として考えられるかもしれない (Frolova et al., 1992; Pavlenkova et al., 2016)。しかし，大陸地殻の相変化が，海洋において非常にランダムに識別される大量のアルカリやその他の元素を形成するはず (Lutz, 1980, 1994) なので，それらの過程は広大な海洋における漸移地殻の形成を説明することはできない。

さまざまな地殻は全地史を通じて、さまざまな内因によって形成された初生的な地殻なのだろうか？、疑問が生じる。Pavlenkova(2015)で、肯定的な解答がこの問題に与えられ、異なった地殻の形成に関する内因が提案された。そのような内因の主な源は、空間的・時間的にマントル物質の分化を引き起こす深部流体の移流（地球の脱ガス）の無秩序性であり、したがって地殻の異なるタイプの生成である可能性がある。この提案は、大陸地殻が深部流体を染み込ませたマントル物質から形成されたことを示すLutzの研究(1980, 1994)に基づいている。後者は、大陸地殻を発達させるために、より深いところからの高いエネルギーとより重要な元素をもたらしている。これは、強い流体移流地域で、マントル物質の相変化とそれに続く結晶化作用による地殻のカコウ岩化作用の漸進的な過程である。弱い流体の流れの地域では、漸移（亜大陸または亜海洋）タイプが形成されるだけである。そのような地域では、初生的な海洋地殻の相変化は同様に強くならず、いくつかの古い（始生代）岩石が地殻中に保存された。したがって、様々なタイプの地殻は、規模の無秩序性と強い流体移流に関連している可能性がある。

マントルリソスフェアの構造と大陸の起源

大陸と海洋の上部マントルの組成が異なっているということは、地質データから知られていた。それはそれらの火成活動から得られる。すなわち、アルカリマグマは大陸に典型的で、ソレアイトマグマは海洋に典型的である(Lutz, 1980)。地球物理的デー

タはまた、大陸と海洋の上部マントルでのいくつかの基本的違いを示している。地震学と地震研究が、厚さ250～350kmの大陸の下により大きな高速度異常を明らかにしている。すなわち、それらは大陸の根あるいは竜骨(keel)と呼ばれてきた(Jordan, 1979)。その異常は、大陸の下の低温と関係し、それに基づいて、高密度の“根”と考えられた。

しかしながら、ゼノリスと高压高温でのマントル岩石の物理的性質に関する実験的データは、それらの地震異常がさらに複雑な起源を持っていることを示している。まず、地震速度は異なった組成のマントル岩石にほぼ共通し、温度と圧力のみで決まるという結果になった。同時に、異なった組成の岩石は密度が大きく異なる(図6)(Boyd et al., 1997; James et al., 2004)。これは、上部マントルに関して、地震および重力データを統合した解釈の可能性を完全に変更する。しかし、熱流データから考えられるものより、より信頼性の高い地震速度による上部マントル温度を決定するには、有利な条件を与えている。そのような決定は、シベリアとアフリカクラトンでなされ(Kuskov and Kronrod, 2007; Kuskov et al., 2014)、それらの大陸の中央部で、深度250～300kmに達するリソスフェア-アセノスフェア境界(温度1300°Cのレベル)を示している。大陸地殻のリソスフェア下底の同様な深度は、地震データから決定された(Pavlenkova, 2011)。それは、地震によって判明した大陸の“根”が、低温起源を持つことを裏付けている。

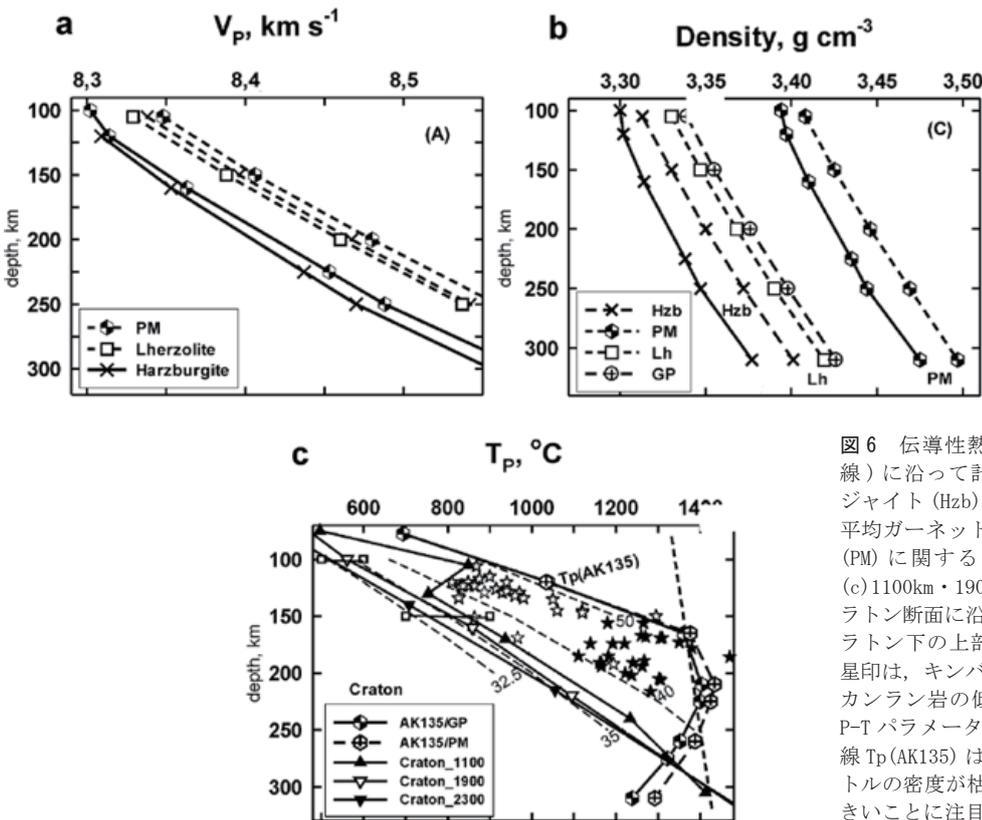


図6 伝導性熱量 35mW/m²(破線)と 40mW/m²(実線)に沿って計算されたガーネットハルツバージャイト(Hzb)・ガーネットレルゾライト(Lh)・平均ガーネットカンラン岩(GP)と原始マントル(PM)に関するP波速度(a)と密度(b)の比較。(c)1100km・1900kmおよび2300kmの距離でのクラトン断面に沿ったP波から導かれたシベリアクラトン下の上部マントルの温度(T_p)。白と黒の星印は、キンバーライトパイプからのガーネットカンラン岩の低温および高温ゼノリスに関するP-Tパラメータ。滑らかな線は1300°C断熱曲線。線 $T_p(AK135)$ は、大陸の平均地熱曲線。原始マントルの密度が枯渇した岩石のものより2～3%大きいことに注目(Kuskov et al., 2014)。

マンツルのゼノリス研究のもう一つの重要な発見が、上部マンツルの組成と密度を考える上で重要である。すなわち、それらは、大陸のリソスフェアが、原始マンツルに比べて密度の低い枯渴した物質から主に構成されることを示している。例えば、シベリアクラトンでは、サンプルしたゼノリスのほとんどはCaO・Al₂O₃やFeOが、(原始マンツルに比べて)有意に枯渴したハルツバージャイトやレルズライトのようなカンラン岩であり(Walter, 1998; Griffin et al., 2008; Ionov et al., 2010), それらは低密度である。図6に示すように、深度と共に増加する密度は、岩石組成によってそのような低い値となっているわけではない。このように、枯渴し冷たい大陸の“根”は、初期の上部マンツルより低密度である。

それは、上部マンツルにおける力学的過程や大陸の起源の問題の解決に重要な結果である。しかし、まずは枯渴した物質がどのように形成されたのかを理解する必要がある。高温高压状態でマンツルの岩石の物理的相変化に関する大規模な室内実験データを使って、Letnikov(2000, 2006)はマンツル物質の枯渴は深部流体の移流の結果である可能性を提案した。マンツルから地殻中へ移動したシリカ・アルカリ・流体および不適合元素の長期間にわたる作用が、マンツル岩石の枯渴・それらの結晶化作用および厚いリソスフェアの形成をもたらした。この作用は同時に、地殻物質の相を変化させた。すなわち、付け加わったシリカ・アルカリ・流体および不適合元素が、上部地殻中にカコウ岩-片麻岩を構成する物質の形成を促進した。マンツルと地殻の相変化と結びついたこの過程が、観察された構造の秩序性を説明している。すなわち、より厚いリソスフェアは通常、より厚いカコウ岩-片麻岩地殻と調和している。リソスフェアの厚さの減少が見られる大陸縁で、地殻は通常、亜大陸タイプである。

記載されたデータからの最も重要な結論は、マンツル物質の枯渴とその密度の減少が大陸形成の主因である可能性があることである。すなわち、低密度のリソスフェアの厚さが厚いことが、もともとのリソスフェアに、隆起(出現)を引き起こした。

大陸リソスフェアの成長過程は、深部流体の流れの強さによる長期間の過程だった。まず、厚い地殻といくらか枯渴したマンツルを持った始生代の楕状地が、小さな大陸として出現した。それから、長い古生代を通じて、低密度リソスフェアが若い卓状地地域中にゆっくりと発達した。惑星の内部エネルギーが強く増加してきた古生代後期と中生代前期には、増加する上部マンツルの可塑性が全低密度大陸リソスフェアのアイソスタシーによる隆起を促進した。

すべての記載された過程のエネルギー源には、地球

脱ガスの役割が明らかである。ほかの惑星と異なる地球の重要な特徴は、地核に流体(とくに水素とヘリウム)の含有量が多いことである。それらの脱ガスは、異なった地質学と地球物理学の方法で研究され、今でも見られる過程である(Larin, 1995; Williams and Hemley, 2001; Porcelli, Turekian, 2003; Gilat and Vol, 2005)。深部流体は、カコウ岩-片麻岩地殻と低密度の枯渴したリソスフェアの成長を起動し、その結果リソスフェアの減圧がそのアイソスタシー的“浮き上がり”を引き起こした。それが大陸形成の主な原因であった(Pavlenkova, 2015)。

しかしながら、問題はなぜ流体の流れが空間的に無秩序で、すべての大陸が一つの半球に集中しているのかを明らかにすることである。なぜ、それらは太平洋半球に形成されなかったのだろうか?

地球の太平洋とインド-大西洋半球

太平洋は、地球表面の大きな地域(明らかにほぼ半球近く)を占めている。これは、地球に偶然できた形態ではなく、同様な構造はほかの惑星、例えば月と火星(図7)、にも特有で、顕著な高地と低地を持つ半球に分けられている(Araki et al, 2009)。太平洋はまた、深部構造においてもほかの海洋と異なっている。中央海嶺は海洋の真ん中に位置しておらず、その南東隅に位置している。太平洋は深発地震帯であるベニオフ帯の輪に周囲を囲まれている(Benioff, 1954)。これらの帯は無秩序ではなく、完全な弧を形成している(図8)。

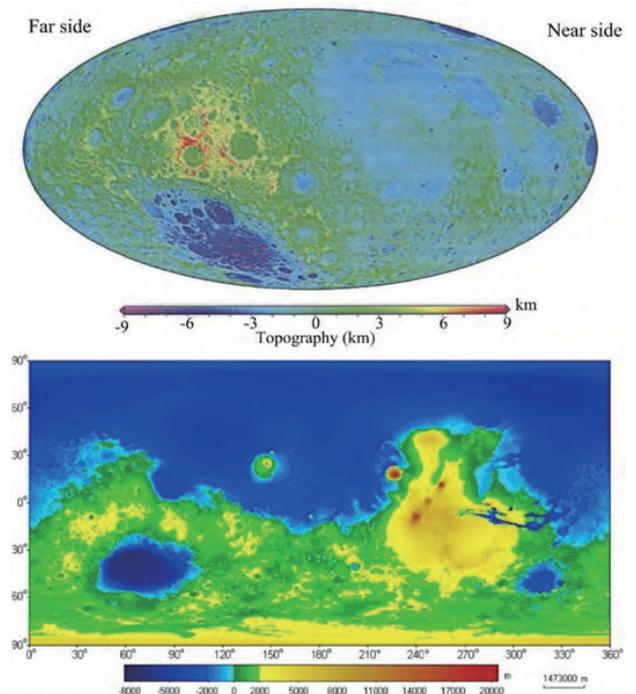


図7 月と火星表面は、主に高い半球と低い半球に分かれる(Araki, 2009)

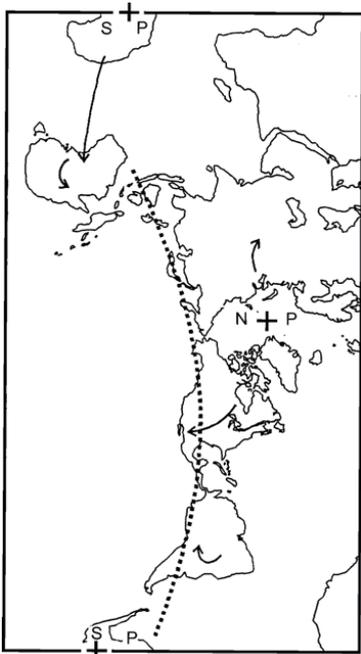


図8 正に丸い形の太平洋の輪 (Wilson, 1954)

ベニオフ帯は、全マントルの中に地震速度の速い異常として追跡され、時に 2000km 以上の深さに達している (図 9; Bijwaard et al., 1998). それらの異常と深部残存物の性質は未だに明らかになっていない. そのような深度で、それらは“沈み込み帯”ではあり得ない. すなわち、異常な地震速度は、より大きな応力または速度の異方性である可能性がある. 地震活動が活発な太平洋の輪の深部の根は、重力場によって確認されている (図 10). 太平洋の周囲で、正と負の二つの丸い重力異常が見られる (Choi and Pavlenkova, 2009). このようなグローバルな異常は、下部マントルにおける深部不均質性と関連している可能性がある.

太平洋形成の古さはまた、その地震活動の活発な輪の年代により証明されている. この輪は、ジュラ紀以来、活火山活動帯 (しばしば“火の輪”と呼ばれる) の構造が存在していたことが示されている (Yano,

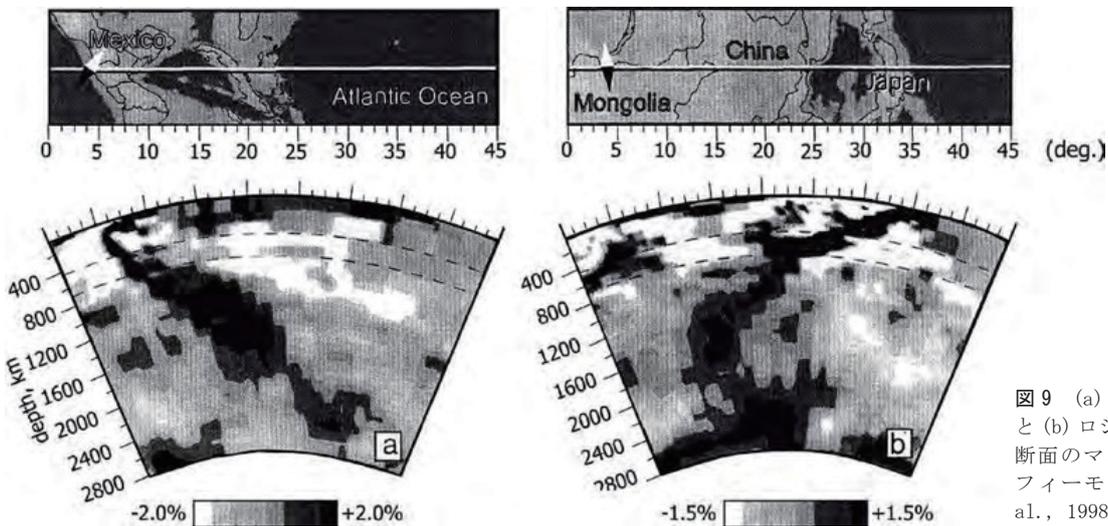


図9 (a) メキシコ-大西洋と (b) ロシア-カムチャッカ断面のマントルのトモグラフィーマデル (Bijwaard et al., 1998).

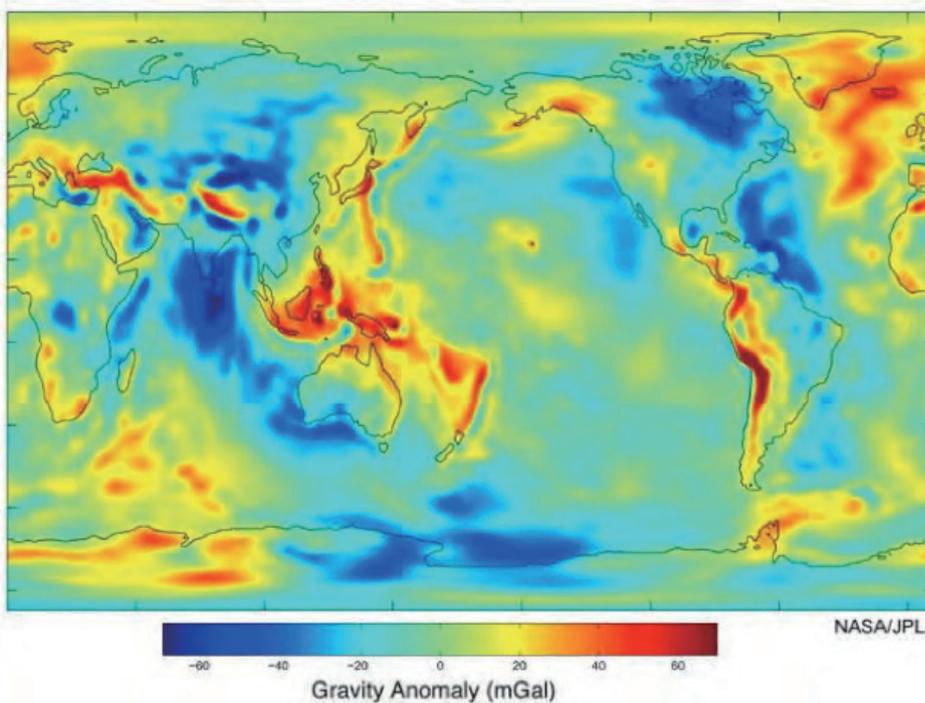


図10 Choi and Pavlenkova(2009)により公表された太平洋のGRACE重力異常図.

2014). この輪の正確な構造は、長い中生代の安定性と同様に、地球規模の深部の不均質性との繋がりを際立たせている。すなわち、地球上部レイヤーの主要な変形によって特徴付けられたこの造構的に活発な時代を通じて、この弧はその正確な円弧の構造を保持してきたということである。

インド-大西洋半球には、別な構造がある。すなわち、すべての大陸がこの半球に集中し、大西洋とインド洋は太平洋とは構造が異なる。すなわち、中央海嶺は海洋中央部にあり、大陸縁は活動的ではない。

未解決な問題は、異なったリソスフェアの構造を持つ半球がどのように形成されたのかということである。いくつかの仮説が、二つの半球に分かれているという惑星の性質について、近年示された。Kochemasov (2016) は、惑星の公転(主に軌道の構造)のパラメータと上部圏の構造とに強い関係があることを示した。この関係の起源は、惑星の加速・交代や減速の周期的変化を引き起こす楕円軌道である可能性がある。それは、二つの一様でない半球に惑星の球表面の分離を引き起こす可能性がある。このような分離は半球の異なった地形に限らないことが重要である。惑星公転の加速と減速の系統的な交代の結果、その半球の一つがより安定になる。惑星の半球の形成は、異なった内部構造と異なった発達史を持つ半球に分離する造構的に活発な輪の正確な構造を説明している。惑星公転の加速の周期的変化はまた、それらの半球に地球脱ガスの強度の違いを引き起こす可能性がある。すなわち、インド-大西洋半球では強く、硬い太平洋では弱い流れということである。結果的に、厚い大陸リソスフェアの形成は、インド-大西洋半球のみに起きた。

インド-大西洋半球においてのみに厚い大陸リソスフェアが形成されたことは、太平洋の輪の地殻の構造に影響を与えた。大陸リソスフェアの体積の増加は、それが押し被せる海洋リソスフェアと太平洋半球境界に沿ったスラスト(沈み込みではない)と断層帯の形成の結果である。このような縁辺スラストは西太平洋のいくつかの地域で地質データに実際に見られる(Hoshino, 2014)。

インド-大西洋半球の固有な未来はまた、それらの間のほぼ等しい90°の距離にある経線方向に伸びる中央海嶺系の秩序ある構造である。この系の明確な対称性は、南極点に見られる。これらの地球の構造要素の秩序ある系は、大きさと形に顕著な類似性があるが、外形が反対な南極に対する北極海の対称性によって際だっている。この中央海嶺系のもう一つの特長がある。すなわち、水素の脱ガス計測が、これらの海嶺が地球脱ガスの主要な経路であることを示している(Syvorotkin, 2002; 図3, Pavlenkova, 2015)。

惑星の極に対するこのグローバルな海嶺系の構造的対称性は、惑星の膨張により、その起源を説明することができる。南極に関するこの系の明確な対称性と、この極の周囲の輪状の中央海嶺の存在は、南半球のより強い膨張によって説明することができる。中央海嶺および線状の磁気異常の隣接する地域の形成に、地球の膨張の規模は軽微(10%未満)である。このような膨張は、それらの減圧に伴う惑星物質の内部の相変化で説明できるかもしれない。

南北半球の起伏の拡大が、現在の天文データにより確認されている。それは、地球が洋なしの形をしており、北半球より南半球の半径がやや大きいと認められている。そしてこの違いは大きくなり続けている。この現象の考えられる理由は(Barkin, 2002), 南半球のより大きい膨張が、地球-月回転系の特徴と関係しているということである。地球の周りを回る月の公転は、地球の核を南極点に絶えずシフトしようとしており、その結果洋なしの惑星を形成する。南半球の構造の違いは、数インチと計測されているが、南半球全体の安定性は、惑星の形状について重力を補正したとしても、南半球における引張応力の増加が生じている。重力は、惑星のより深部の物質の再分配により、地球の適切な形を調整している。しかし、リソスフェアでは深部の場と共に膨張していない。最大張力(最大膨張)の地域で壊れて広がっており、その広がりの大きさは、通常の膨張の強度を特徴づけている。現在の惑星の変形はセンチメートルのオーダーで測定されているが、南半球における中央海嶺帯の広い幅は、この半球の烈しい膨張を記録してきた。

地球の南半球のさらに烈しい膨張は、ある程度、古地磁気データを説明している。そのような膨張で、惑星の赤道は南方向に移動し、北方向ではすべての大陸の見かけ上のオフセットを引き起こしている。大陸のこのような運動は、古地磁気データによって提案されている(Storetvedt, 1997)。

結 論

このように、大量の地質学的地球物理学的データは、大陸と海洋の考えられる形成史を記述することのできる地球の上部圏の構造に、いくつかの客観的な秩序を明らかにしてきた。この問題の解決に最も重要なデータは、次のようなデータである。

- 深海掘削によると、海洋の地殻は組成と年代に有意な不均質性がある。すなわち、亜大陸地殻の大きなブロックと古い(始生代)岩石の破片が、すべての海洋で明らかとなっている(Blyuman, 2011)。そのような地殻は、大陸の拡大によってのみで形成されることはあり得ない。
- 大陸は厚いリソスフェアで特徴づけられ、低密度の枯渇した物質からなる(Kuskov et al., 2014)。

– 地質学と実験的研究は、シアル地殻と枯渇したマントル岩石の形成に深部流体の重要な役割を示している (Lutz, 1980 and 1994 ; Letnikov, 2000, 2006).

それらのデータは、大陸と海洋の起源を説明する可能性を与えている (Pavlenkova, 2015). 空間的な無秩序性は、地球脱ガスによる異なったリソスフェアタイプの形成の結果である。すなわち、厚いカコウ岩 – 片麻岩地殻と大陸の低密度で枯渇したマントルは、より深い深部の流体の流れのある地域で作れた。より低い流体移流地域では、原始海洋地殻が保存され、漸移地殻のいくつかの分離した場所があらわれているに過ぎない。

200km 以上の厚さと厚い大陸地殻のある大陸の“根”の低密度は、大陸形成の重要な要素の一つである。低密度リソスフェアの厚さの増加が、海洋地殻にその出現を引き起こした。

より難しい問題は、なぜ流体移流がそのように無秩序なのか、地球はリソスフェアの異なった構造を持つ二つの半球に分けられるのかを説明することである。すなわち、薄い地殻 (“海洋半球”) が優勢な太平洋半球と、すべての大陸が集中している (“大陸半球”) 反対のインド – 大西洋半球である。地球の自転特性で説明されるかもしれない (Kochemasov, 2015). 後者は惑星構造を変え、それ故、異なった半球において、流体の流れの強さと移流の方向を変えると推定できる。

従って、上述したような大陸と海洋の深部構造は、それらの起源を一つのみのモデルで説明することができるかもしれない。大陸形成の提案されているモデルの最も重要なポイントは、(1) すべての地殻のタイプ (海洋・大陸および漸移帯) は、主に最初からのものであり、それらの異なった組成は空間的に深部流体の移流によるものである。(2) 大陸はそれらの低密度の枯渇したリソスフェアのアイソスタシーによる隆起によって形成された。

すべてのそれらのデータは、惑星としての地球の二つの特定な特徴の重要な役割を示している。すなわち、異なった表面地形と内部構造を持つ二つの半球に分割されることと、それらの活動的な脱ガスを伴う深部流体の大きな含量である。

謝辞 : David Pratt と Dong Choi に批評と激励に感謝し、グローバルな造構運動問題に関する私の以前のすべての出版物に対する批判的なコメントに感謝する。私は、ロシアの同僚である F. A. Letnikov, O. L. Kuskov, E. B. Lebedev, L. I. Ioganson および他の多くの方々とこれらの問題の可能な解答についての非常に重要な協力と議論を非常にうれしく思います。

文 献

- Araki, H., Tazawa, S., Noda, H., Ishihara, Y., Goossens, S., Sasaki, S., Kawano, N., Kamiya, I., Otake, H., Oberst, J. and Shum, C., 2009. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. *Science*, v. 323, p. 5-8.
- Barkin, Yu.V., 2002. To explanation of endogenous activity of planets and satellites and of its cycling. *Isvestija of Earth's Science, Russian Academy of Sciences*, v. 9, p. 45-97.
- Belousov, V.V. and Pavlenkova, N.I., 1984. Types of the Earth's crust of Europe. *J. of Geodynamics*, v. 1, p. 3-14.
- Benioff, E., 1954. Orogenesis and deep crustal structure – Additional evidence from seismology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 65, p. 385-400.
- Bijwaard, H., Spakman, W. and Engdahl, E.R., 1998. Closing the gap between regional and global travel time tomography. *J. Geoph. Res.*, v. 103, B12, p. 30055-30078.
- Blyuman, B.A., 2011. The Earth's crust of the oceans. Data of the International programs of the deep-water drilling in the World Ocean. S. Peterburg. VSEGEI. 344p (in Russian).
- Bortnikov N.S., Sharkov U.V., Bogatkov O.A., Singer T.F., Lepechina E.N., Antonov A.V. and Sergeev S.A., 2008.
- Findings of young and ancient zircons in the gabroid of the Makarov Basin, Mid-Atlantic Ridge (Shrimp-II results U- PB-Dating). The value for understanding the deep geodynamics of modern oceans. *DAN*, v. 421, n. 2, p. 1-9
- Boyd, F.R., Pokhilenko, N.P., Pearson, D.G., Mertzman, S.A., Sobolev, N.V. and Finger, L.W., 1997. Composition of the Siberian cratonic mantle: evidence from Udachnaya peridotite xenoliths. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 128, p. 228-246.
- Brune, J.N. and Singh, D.D., 1986. Continent-like crustal thickness beneath the Bay of Bengal sediments. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 76, no. 1, p. 191-203.
- Choi, D.R., 2007. Continental crust under the NW Pacific Ocean. *Journal of Petroleum Geology*, v. 10, p. 425-440.
- Choi, D.R. and Pavlenkova, N.I., 2009. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean. Part 5. Outer low gravity belt of the Great Pacific Ring structure. *NCGT Newsletter*, no. 50, p. 46-54. www.ncgtjournal.com
- Dibakar Ghosul, 2008. Evaluation of crustal structure beneath the central part of the “Bay of Bengal” from surface wave dispersion study. 7th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, p. 250-256

- Dick, H.J., Natland, J.H., Alt, J.C. et al, 2000. A long in situ section of the lower ocean crust: results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, v. 179, p. 31-51.
- Frolova, T.I., Perchuk, L.L. and Burjakova, I.A., 1992. Magmatism and transformation of active areas of the Earth's crust. Oxford & IBH Publishing CO. PVT. LTD., New Delhi, 271p.
- Funk, T., Jackson, H.R. and Shimelt, J., 2011. The crustal structure of the Alpha Ridge at the transition to the Canadian Polar Margin, results from a seismic refraction experiment. *J. Geophys. Res.*, v. 116, B12101, doi.10.1029/2011JB008411.
- Gaggero, L. and Cortesogno, L., 1997. Metamorphic evolution of oceanic gabbro: recrystallisation from subsolidus to hydrothermal condition in the MARK area (ODP LEG 153). *Lithos*, v. 4, p. 105-131
- Gilat, A. and Vol, A., 2005. Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIT Journal of Science and Engineering, B*, v. 2, Issues 1-2, p. 125-167.
- Griffin, W.L., O'Reilly, S., Afonso, J.C. and Begg, G.C., 2008. The composition and evolution of lithospheric mantle, a reevaluation and its tectonic implication. *J. of Petrology*, v. 50, p. 1185-1204
- Hoshino, M., 2014. The history of micro-expanding Earth. *History of the Earth from viewpoint of Sea Level Rise*. E.G.SERVICE, Japan. 234 p. ISBN 978-4-9903950-5-6
- Ionov, D.A., Doucet, L.S. and Ashchepkov, I.V., 2010. Composition of the lithospheric mantle in the Siberian Craton: new constraints from fresh peridotites in the Udachnaya-East kimberlite. *J. Petrol.*, v. 51, p. 2177–2210.
- James, K.H., 2009. In-situ origin of the Caribbean: discussion of data. James, K.H., Lorente, M.A. and Pindell, J. (eds.), *Origin and evolution of the Caribbean Plate*. Geological Society of London, Special Publications, v. 328, p. 75-124.
- James, D.E., Boyd, F.R., Schutt, D., Bell, D.R. and Carlson, R.W., 2004. Xenolith constraints on seismic velocities in the upper mantle beneath southern Africa. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 5, doi: 10.1029/2003GC000551.
- Jordan, T.H., 1979. The deep structure of the continents. *Scientific American*, v. 240, p. 70-82
- Kashubin, S.N., Pavlenkova, N.I., Petrov, O.V., Milshtein, E.D., Shokalsky, S.P. and Erinchik Yu.M., 2013. The crustal types in the Circumpolar Arctics. *Regional geology and Metallogeny*, no. 55, p. 5-20 (in Russian).
- Kochemasov, G.G., 2015. Celestial bodies: relation between ubiquitous tectonic dichotomy and universal rotation. *NCGT Journal*, v. 3, n. 2, p. 155-15. www.ncgtjournal.com
- Korhonen, J.V., Fairhead, J.D., Hamoudi, M., Hemant, K., Lesus, V., Mandea, M., Maus, S., Purucker, M., Ravat, D., Sazonova, T. and Thebault, E., 2007. Magnetic Anomaly Map of the World. Commission for the Geological Map of the World, Paris.
- Kuskov, O.L. and Kronrod, V.A., 2007. Composition, temperature, and thickness of the lithosphere beneath the Archean Kaapvaal craton. *Izv. Phys. Solid Earth*, v. 43, p. 42–62.
- Kuskov, O.L., Kronrod, V.A., Prokofyev, A.A. and Pavlenkova, N.I., 2014. Thermal and density structure of the Siberian craton lithospheric mantle inferred from long-range seismic profiles Craton, Kimberlite, Rift and Meteorite. *Tectonophysics*, v. 615-616, p. 154-166.
- Larin, V.N., 1995. Hypothesis of the original hydride Earth (new global conception). Moscow, Nedra. 101p (in Russian).
- Letnikov, F.A., 2000. Fluids regime of endogenous processes in the continental lithosphere and problems of metallogeny. D.V.Runkvist (Ed.) *Problems of Global Geodynamics*, GEOS, Moscow, p. 204-224 (in Russ.).
- Letnikov, F.A., 2006. Fluids regime of endogenous processes and problems of metallogeny. *Geology and Geophysics*, v. 47, no. 12, p. 1296-1307.
- Liu, C.-Ch, Snow, J.E., Hellebrand, E. et. al., 2008. Ancient highly heterogeneous mantle beneath Gakkel Ridge. *Arctic Ocean. Nature*, v. 452, p. 311-316
- Lutz, B.G., 1980. *Geochemistry of continental and oceanic magmatism*. Moscow, Nedra. 125p (in Russian).
- Lutz, B.G., 1994. Magmatic geotectonics and the problems of the Earth's continental and oceanic crust formation. *Regional Geology and Metallogeny*, no. 3, p. 5-14 (in Russian).
- Operto, S. and Charvis, P., 1996. Deep structure of the southern Kerguelen Plateau (southern Indian Ocean) from ocean- bottom seismometer wide- angle seismic data. *J. Geophys. Res.*, v. 101, p. 25077-25103.
- Pavlenkova, N.I., 1996. Crust and upper mantle structure in Northern Eurasia from seismic data. *Advances in Geophysics*, Academic Press, Inc. (eds. Dmowska, R. and Saltzman, B.), v. 37, p. 1-134.
- Pavlenkova, N.I., 2011. Seismic structure of the upper mantle along the long-range PNE profiles – rheological implication. *Tectonophysics*, v. 508, p.85-95.
- Pavlenkova, N.I., 2015. Degassing and expanding Earth: new model of global tectonics. *NCGT Journal*, v. 3, n. 4, p. 489-515. www.ncgtjournal.com
- Pavlenkova, N.I., Kashubin, S.N. and Pavlenkova, G.A., 2016. The Earth's Crust of the Deep Platform Basins in the Northern Eurasia and their Origin. *Izvestiya*,

- Physics of the Solid Earth, v. 52, no. 5, p. 770–784.
- Poupinet, G., Arndt, N. and Vacher, P., 2003. Seismic tomography beneath stable tectonic regions and the origin and composition of the continental lithospheric mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 212, p. 89-101.
- Pratt, D., 2000. Plate tectonics: a paradigm under threat. *J. of Scientific Exploration*, v. 14, no. 3, p. 307-352.
- Porcelli, D. and Turekian, K.K., 2003. The history of planetary degassing as recorded by noble gases. Keeling, R.F. (Ed.), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, v. 4, p. 281-318.
- Ray, S.S., Planke, S., Simonds, P. and Faleide, J.I., 2008. Seismic volcanostratigraphy of the Gasconge margin, Western Australia. *J. of Volcanology and Geothermal Res.*, v. 172, no. 1-2, p. 112-131.
- Schurr, B., Asch, G., Rietbroek, A., Kind, R., Pardo, M., Heit, B. and Monfret, N., 1999. Seismicity and average velocity beneath the Argentine Puna Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, v. 26, no. 19, p. 3025-3028
- Shen, E.L., 1984. Earth expansion as a result of its global structure formation. Milanovskiy (ed.). *Problems of the Earth's expansion and pulsation*. Moscow, Nauka, p.180-185 (in Russian).
- Storretvedt, K.M., 1997. *Our evolving planet: Earth history in new perspective*. Bergen, Norway: Alma Mater, 456p. Syvorotkin, V.M., 2002. Deep degassing of the Earth and global catastrophes. Moscow, OOO Geoinformcentre. 250p (in Russian).
- Vasiliev, B.I., Yano, T. and Choi, D.R., 2012. Progress report of the study of ancient continental rocks from the Pacific Ocean. *NCGT Newsletter*, no. 63, p. 80-81. www.ncgtjournal.com
- Walter, M.J., 1998. Melting of Garnet Peridotite and the Origin of Komatiite and Depleted Lithosphere. *J. Petrol.*, v. 39, p. 29-60.
- Williams, Q. and Hemley, R.J., 2001. Hydrogen in the deep Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 29, p. 365-418.
- Yano, T., 2014. Tectonic development of the Pacific Ocean and its periphery: a constraint on large-scale rotations of lithospheric blocks. *NCGT Journal*, v. 2, no. 2, p. 54- 68. www.ncgtjournal.com
- Yano, T., Choi, D.R., Gavrilov, A.A., Miyagi, S. and Vasiliev, B.I., 2009. Ancient and continental rocks in the Atlantic Ocean. *NCGT Newsletter*, no. 53, p. 3-17. www.ncgtjournal.com
- Yano, T., Vasiliev, B.I., Choi, D.R., Miyagi, S., Gavrilov, A.A. and Adachi, H., 2011. Continental rocks in the Indian Ocean. *NCGT Newsletter*, no. 58, p. 9-28. www.ncgtjournal.com

海洋・大陸の地質と普遍的地球力学概念を創造する可能性 Geology of oceans and continents and the possibility of creating the universal geodynamic concept

Boris Blyuman

A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.
Boris_Blyuman@vsegei.ru

(矢野 孝雄 [訳])

要旨 : 現代地質学 (地質図作成, 鉱床学) の応用という観点から, 著者は, この論文でリソスフェアプレートのテクトニクスにもとづいて大陸と海洋の普遍的地球力学概念を創出する可能性を考察した。その際には, 個々の大陸と海洋と同様に, 大陸と海洋それぞれの地球力学的構造概念の創造を試み, それらの本質的テーマと研究方法を用いて地球の全発展の非線形性・非平衡性・不可逆性を検討した。その結果, 普遍的地球力学的概念の創造はほとんど不可能であると推測される。

キーワード : 地球力学, 概念, 大陸, 海洋, 地質図作成, 金属鉱床生成, 非線形性, 不可逆性, 非平衡性

(2017年11月2日受付. 2017年11月20日受理)

まず, 大陸と海洋の地殻・マンツルの組成と構造についての一般的に受け入れられている基本的相違を確認する。次に (大陸と海洋に共通する) 普遍的地球力学概念を創出できる可能性とその時期を検討する。大陸とは対照的に, 現代海洋では, おもに玄武岩質被覆層が巨大な分量を占めていて, それは地球

の地殻すべての約 1/3 に相当する。海洋地殻の第3層は, 大陸地殻とは対照的に, もっぱら苦鉄質岩石で構成されている。海洋性マンツルはおもにスピネルかんらん岩でできている。大陸性マンツルの主体をなすざくろ石かんらん岩は, 海洋では発見されていない。

さまざまな時代にさまざまな国で、科学者たちは、(全地球にかかわる) さまざまな「一般地質学」の著書を出版した。その系統的総説が「テクトニクスと地球力学」に掲載されている。それは、Krasny, L. I. (ロシア科学アカデミー準会員) が編纂した百科事典的集成書 "Planet Earth" (2004 年刊) のうちの 1 巻で、筆者も執筆に加わった。いろいろな時代に多くの概念が提唱されたにもかかわらず、歴史的検証に耐えたのは、明らかに 2 つの概念 - "固定論" (地向斜 - 卓状地造構説) と "移動論" (リソスフェアプレート造構説) だけである。前者とその先駆的概念は大陸研究のなかでつくられ、後者のプレートテクトニクス概念は現在の海洋の研究にもとづくことが注目される。実際にも、第 1 概念は大陸の地質を表現し、第 2 概念は海洋地質を反映する。地向斜 - 卓状地概念の支持者たちは、その概念を現在の海洋の歴史を研究するために用いようとしなかったことに留意すべきである。これとは対照的に、リソスフェアプレートテクトニクスを支持する内外の地質研究者は、何の懸念もなく、この概念の主要命題を大陸の地質に導入しはじめ、その進歩的發展を数十年も遅らせた。その結果は、いずれ評価されるだろう。この点では、B. I. ワシリエフは新刊書「太平洋の地質構造と起源」(2009 年) の中で、かなり果敢に、そして、筆者の意見に適合して次のように述べている。「プレートテクトニクスがなければ、地球科学はどのように発展するだろうか？それが存在しなければ、科学のおよび技術的進歩は、プレート・テクトニクスの仮定に明白に反するものを含めて、すべての研究成果を篩別することなく、また教義に制約されることもないので、より迅速に発展したであろう。しかしながら、プレートテクトニクスが地球科学におよぼした最大の害悪は、それを前提命題として全面的に信じ込み、地質学 - 地球物理学的データに関する別の解釈があることを知らず、認識していない地質研究者の世代を育てたという事実にある。この機械的概念は、海洋地質学を支配した地球物理学的方法からもたらされ、現在は大陸地質学を支配しようとしている。プレートテクトニクスの方法論は、わが国の鉱物資源開発を根こそぎ損なう恐れがあり、とくに地質調査と地質探査が実施されなくなる危険性をもたらしている。首尾一貫した地球テクトニクス理論の創造に時間がかかることは明らかだろう。しかし、その理論は、プレートテクトニクスにもとづく伝統的概念とはまったく違った概念の上に成り立つことはもはや明らかである」(Vasiliev, 2009, p. 508)。

筆者は、Belousov V. V. (1989) の指摘のとおり、大陸・大洋・惑星の全発展を解釈できる統一概念の創造には時期尚早と考えている (詳細は後述)。地質の一般概念が創造されるとすれば、それは、歴史原理にもとづいて、地球の集積段階から現代の大洋・大陸にいたる不可逆的な地球進化史を説明するものであ

るに違いない。現代海洋の地球力学的条件は先カンブリア紀前半まで遡ることが多く、歴史原理の重要性を十分に認識する必要がある。この問題は地史学にもとづく地向斜 - 卓状地概念とは異なっていて、歴史原理は依然として地質調査の基本命題の 1 つである、という段階にある。それにもかかわらず、地向斜 - 卓状地概念の多くの命題は、深部地質学、堆積盆形成力学、多様な規模・深度の断層形成力学、およびネオテクトニクスの成果にもとづいて実証される必要がある。1930 ~ 50 年代の地球科学では、"固定論" 的考え方が基本になっていた。1950 年代以降、活発な海底研究がはじまった。海洋底堆積物の分布、海洋中央海嶺および線形磁気異常にかかわる規則性が発見された。これらの発見は、大陸地殻と海洋地殻の相違を解明し、とくに海洋の起源にかんする "固定" 論の不備を明らかにした。1960 年代半ば以降、リソスフェアプレートテクトニクスの "移動" 概念がひろく認められるようになり、この考え方は地質学における支配的地位を占めるようになった。しかし、この段階でも、国内の有力な地質研究者は、大陸地質学の主要な基本命題を順守しつづけていた。その 1 人が、著名なロシア人地質家 V. V. Belousov (1907-1990) であり、生涯にわたって "固定論" に固執した。ここでは、とくに "移動論" と "固定論" における経験的要素と論理的要素の相関性に注意を払う必要がある。その必要性を明確にするために、過激な "移動論" 者たちの著作 (Modern..., 1984) から一部を引用しておこう。すなわち、「科学の論理的構成要素は、誘導モデルを構築するための事実資料の取得、処理、多様なパターンの確立を含む経験的知識の領域に反する。今世紀の 60 年代後半までの経験的・記載的研究方法が明確に地質学を支配していることに留意すべきである。地向斜概念にもとづく研究成果はすべて、経験的一般化や見せかけだけの場当たりの仮説の帰結であり」、さらには「実際の分析では、他の条件が同等であれば、論理的成果を選択すべきである」という。

この論述とは対照的に、適切なのは V. I. Vernadsky の言葉を、彼の著書『自然主義の反省』第 1 巻「恒常的で無生物の自然における空間と時間」(1957 年) の記述であろう。「1926 年に、自然科学は、科学的経験的事実と科学的経験的一般化だけにもとづいていると正当化しようとした。私は科学的仮説をそれらから除外した。科学仮説は一時的な存在であり、科学的事実や科学的経験的一般化よりも信頼性が低い。時間とともに科学が発展すると、経験的事実と経験的一般化の領域が広がる。そして科学的仮説の領域は減少する」(Vernadsky, 1957. 69 頁)。

これらの論述を比較すると、「理論構築」の状況が「科学的事実と科学的経験的一般化」をもたらす「アイデア」への接近方法の違いが浮き彫りになる。

上記の定義に従った歴史主義は、著者の3つの否定 (NOT), すなわち、地球進化における地質作用の指向性、非可逆性、および非線形性—に相当する (Blyuman, 2001). 進化の非線形性の原理は、相乗的な「時間の矢印」(Prigogine, 2001) に対応する。しかし、おそらく、歴史主義の中で最も重要なのは、地質調査の基礎をなす歴史的な地質学原理であり、層序学、生序学、岩石学、テクトニクス (守備一貫し、飛躍のない)、火成作用、変成作用、鉱物資源は伝統的に地史的順序にしたがって調査データに組み込まれる。地質図の編集は経験的作業であり、基本的な概念構造は不変であり、ほぼ一世紀半の間に大陸地質学でつくりあげられた地質学的または固別的調査の規則によってのみ制約されている。ここでは地質学的調査についてだけ述べ、概念にもとづく、あるいは編集者の嗜好に基づいて概念的に編集された構造的鉱床図については記述しないことに留意されたい。20世紀の60年代における「移動論」概念 (リソスフェア・プレート・テクトニクス) の急速な普及の時代に、大陸地質学における地質図作成学はすでに1世紀半の地質調査の経験に立脚していたことは注目すべきである。その時、大陸に匹敵する海洋地質図作成学はできあがっていなかった。Geolcom-VSEGEI に始まる国立地質図書館は、中小規模調査の地質図を作成する過程で、地質図作成のための膨大は経験を蓄積した。ここでは、V.V. Belousov の言葉の引用が有効である。次の文章は、“Geolkom” published in the section “About Me” in the book “Vladimir Vladimirovich Belousov” という著作の中の「About Me」のセクションに掲載された注記「Geolkom」の一部である。「地質学研究の拡大に伴い、その本質も変わりました。専門家が、地球との対話の中から心底公正な結果を得るまで地質調査する方法から、提示と規範に日常的に従属する技法に変わりました。大部分の地質研究者の個人研究は、調査からテーマ別研究 (岩石学、層序学、構造論) に移行し始めました。主な事実上の根拠は、一般化から分離され、アイデアに求められました。それにもかかわらず、地質図は地殻構造、歴史、そして最終的にはその進化の法則についての信頼できる結論を導くための実際上の主な物質源で、必須です。地質図は、地質研究者を訓練し、すべてを見て、後で彼が結論に使用するもの、後では使用しないものを含めて記載されている。彼は使わない資料をこの時点では認識していないので、後で必要となるものを失うリスクは最小限に抑えられます。テーマ別の研究では、状況はまったく異なります。地質学者がどれほど客観的であっても、主題研究を開始するとき、彼は無意識であっても、少なくとも彼の将来の解決方法の輪郭をあらかじめ予見しています。もし彼が明確な解決策を期待していなければ、彼が当該のテーマをとりあげることはなかったでしょう。この予見の段階では、自発的にまたは無意識のうちに、自分がどのような種類の資料を収集し、有用で

あると考え、あるいは注意を払わないまま除外する資料が決定されます。ここに、理論的課題についての地質研究者間の非常に頻繁な意見の不一致の源泉の大半があり、それらはずっと前に解決されるべき問題です。同じ現象を研究する際にも、地質研究者は地質構造の個別の特徴を重視します。地質環境は非常に複雑で、少し見方を変えれば全く違う形に見えます。それでも、旧来の方法は、最初に地図を描き、理論化するための合理的な基礎を持っていました。地質学的実践と地質学的理論との関係は、科学技術革命 (逆説的表現ですが) の結果として、最近の10年間でとくに危うくなっています。この問題についてはさらなる議論が必要です」(Belousov, 1999, p. 250-251)

今日の状況は、歴史のおよび地質学的原理にもとづく様々な縮尺の地質図から、造構図、鉱物資源分布パターン図、予測鉱床図など、多数の派生図が編集されることによって複雑化している。それらは、地質図を編集する際の歴史的・地質的・経験的原則から大きく乖離した原則にもとづいて作成されている。著者の見解では、ここに、大陸地質学における地質学的研究の経験的方法の支持者と誘導モデルの構築と様々なタイプのパターン論の支持者 (いいかえれば、“固定論者”と“移動論者”) の調査を峻別する境界線がある。

「1:15M (百万) 世界地質鉱床図」(2000年) (編集長 Krasny) の編集に参加した筆者の経験に基づく、大陸および海洋の造構帯区分に地角斜-卓状地概念やプレートテクトニクス概念を適用することは不可能であった。地質ブロック区分の可能性概念 (Krasny, 1984; Krasny and Blyuman, 1998) を用いれば、他の概念と複合させる必要のない地帯区分の原則となり、それは地角斜-卓状地とプレートテクトニクスの両概念を統合することができる。これらの事実、地球規模および超大規模スケールの地質学的・鉱床学的地帯区分という課題にあつては、これら2つの既存概念が十分な情報資源を有していないことを証明するものである。多くの鉱床地域において、さまざまな年齢のさまざまなタイプの鉱化作用によって特徴づけられる同一鉱床 (鉱化場) 内の組み合わせが、固定された地質空間 (特定位置) における鉱床の長期的形成の必然性を決定づけていることを示す。これは、地殻断片の水平変位に矛盾する。すでに述べた地質学の一般的な非線形性、とく金属資源に関する A.Ch. Shcheglov (1995) の研究をここで引用することが重要である。

Shcheglov (1995) は次のように述べている。「地質学における鉱化作用の進化の非線形性に関する主な規定は、地球の地殻における鉱化作用が一つの発達段階から他の段階へと連続して発生し、地殻中での鉱床生成の時空的進化プロセスは特有で、常に線形

規則に従っているという古い考え方によって分断されている。非線形鉱床形成を考える際に確実に障壁になるのは、地質科学を変形させたプレートテクトニクス仮説の知識であり、それは高尚ではあるが、最近の創造力を高めた手工芸にすぎない。そのため「の型紙や調色板は、主に科学的知識の主要手段として価値がある」、そして「... Yu. A. の地図があり、それは地向斜褶曲帯における内因的鉱化作用の特徴を説明し、特定の鉱床群は特定の段階に関係して形成されることを示す。それは線形関係で表現されているが、自然界ではより複雑な形で現れる。後者は、地質過程の非線形性を理解する上で非常に重要であり、非線形システムの発展にみられる最も重要な特徴の1つに合致する。それは別のものの存在下での効果が、他の効果が存在しない場合には生じないという“重畳原理”に反している。この非線形システムの特徴は、鉱化プロセスと鉱床生成に典型に見られる」(1995年 A.D. Shcheglov 著、選択された研究の重要な金属問題選集。St. Petersburg, VSEGEI Publishing House, 2007. p.296 を参照)。

ここでは、Morozov, Karpuzov and Petrov (2003) の論文「National Geology and Russia Geological Mapping」の次の言葉を引用することができる：「固定論者と移動論者の間の際限のない論争は、とくに鉱床生成に関していうと、「ソ連および隣接水域の地質力学図」(縮尺 1:2,500,000, 編集: Zonenshain, Mezhelovsky and Natapov) の出版後の1980年代後半にいつそう熱を帯びた。このジャーナルの編集委員会は、この紛争において非常にバランスのとれた立場をとり、両当事者に彼らの理論を防衛する機会を与えた。リソスフェア・プレートテクトニクスにもとづく図は、より多数の鉱床記号を掲載して、その著者たちは地質条件や特定の鉱床の形成条件を表現しようとした。一般的な地層分析や鉱床分析は、地域の地質発達史の中で、複合地質岩体の研究、地質構造の相互関係の問題の解明、場と機能の決定に重要な役割を果たしたことが注目される。この問題は現在にも通用する。これは、2001年に出版された Egorov and Rodnov 編集「ロシアと隣接地域の鉱床図」—地質力学にもとづく FGUNPP Aerogeologia の集団的地質研究—によって確認された。この図は、鉱石形成の鉱床生成に関するシリーズ本「Mezhelovsky and Morozov 編集 地球力学的設定」の1冊に収められている (Morozov, Karpuzov and Petrov, 2003, p.25)。

1963年から今日まで DSDP, ODP, IODP として継続実施された国際深海掘削計画のデータを体系的にまとめた結果によると、世界の海洋地質学の知識は大陸のそれと比較してかなり乏しい。部分的には、新しい坑井のすべて、そして、ほぼすべての航海と掘削が、海洋地質に関する新しいデータをもたらしたのも事実である。公平に見て、これらのデータはイ

ンターネット上で利用が可能であるにもかかわらず、何らかの理由で、ロシアと西洋の地質学文献に必ずしも十分に引用されていないことが注目される。これらのデータ (Blyuman, 2011, 2013) に関する著者の知人たちの体系的経験は、世界海洋の様々な構造区で掘削された坑井コアの記述が与える情報が多くの点でリソスフェア・プレートテクトニクスの基本的立場に矛盾していることを示す。これらのすべての事実から、再び、次の疑問が生じる。すなわち「固定論」がめざす代替仮説が存在しないため、「移動論」支持者の主張がどれほど正当化されているか、という問題である。代替仮説の欠如は著者の誇張ではない。この記述を支持する事例として、Abramovich (著名なプレートテクトニクスのロシア人専門家) の論文タイトル「代替仮説は存在しない! (科学論文「地球の海洋化 - 新移動論に変わるもの」を正す意味で)」を引用しておこう。この記述へのコメントについては、著名なロシア科学アカデミー準会員の Belousov (1989) と Udintsev (1987) を参照されたい。矛盾する概念に関しては、著しく制約された定式化に注意を払う必要がある。

Belousov は、氏の単行本「Principles of Geotectonics」(1989年)で、新グローバルテクトニクスに言及した。「新グローバルテクトニクスについて否定的な結論を述べるとともに、それは地球科学的課題の最終解答ではなく、他の一般的な地球力学的観点を示した先行仮説群とほぼ同じランクの1つの作業仮説であることを指摘する。いずれにしても、他の仮説もまだすべての課題に対処できておらず、テクトニアの構造発達に完全かつ決定的な解答は与えられていない」(Belousov, 1989, p.386)。

Udintsev (1987) が地質学の概念原理の将来の発展をどのように見ているかを以下に示す。「現存する概念の合理的核心が将来も間違いなく利用され、観察事実と仮説との間の明らかな矛盾は、そのような概念の新版によって解決されるだろう。認識のプロセスは無限であり、すべての科学研究の段階で真理に近づくことは、ある仮説や他の仮説の正しさの証拠となるばかりではなく、他の仮説と確認された仮説の一部の両方を否定することになる。研究のある段階で、仮説が観察事実を説明するのに役立つと、次の段階では必然的に事実と仮説の役割が変わる。事実は仮説を改善し、それを棄却して新しい仮説を創出する助けとなる。このプロセスにおける仮説の役割は、事実を一般化し、自然現象の法則を明らかにし、その後の研究の方向性を見通す機会を与えることにある。研究者の仕事は、現象間にある自然のつながりを発見し、自然のプロセスの本質を理解し、これらのパターンを実践に応用することある。事実と仮説との間の不一致を明らかにした後、新しい仮説を探し始めるためには、教義を古いものに帰し、作業概念と観察事実の間に矛盾が生じるのを防ぐ必

要である」(Udintsev, 1987, p.215).

並存する概念の妥当性を評価する基準の1つとして、地質図作成の問題に話をもどそう。大陸での地質図作成には、およそ1世紀半を遡る歴史がある。この期間に地質作成の基本原則は改善・洗練され、大陸水平移動と「拡大コンペア」の概念が初めて論理的に正当化された20世紀中頃に、複合的および全般的な大陸の地質図作成が完了した。当時も今も、世界の大洋地質図作成の主要原則は、あまり発展していない。それは、世界の海洋地図では地質構造の詳細が大陸地図よりもひどく具体的でないことから明らかである。今日でも、ある海域の中～大縮尺地質図の作成は未だ不可能である。この段階は、大陸の地質図作成においてはすでに「過去の歴史」になっている。同時に、この目標を達成するために大陸における地質学者がどのような努力をしたのが念頭に置かれるべきである。海洋における深海掘削計画の実施中に得られた海洋地質に関する情報は、我々の見解には近似しないが、リソスフェアプレートテクトニクス概念にもとづく海洋地質調査の基本方針には海洋地質学が除外されている。現時点では、そのような状況のために、プレートテクトニクスの基本的な位置、あるいは現代海洋の地質学と地球力学は、多くの点で、様々なタイプや年代の変動帯や、大陸の新期および古期卓状地における地質図作成や、金属鉱床探査には利用できない、と著者は信じている(他の研究者も同様であろう)。同時に、前世紀の中頃に確立されたプレートテクトニクスの基本原則は、海洋で得られた情報全般にもとづいて国際深海掘削計画を実施する過程で徹底的に修正される必要である。この事実を、とくに今後の海洋掘削計画では念頭におおくことが必要である。くりかえすと、これは、海洋地質学と大陸地質学との関係についての著者の意見であり、一部は世界の海洋掘削結果に関する情報や、多くの点で完全ではないプレートテクトニクスの基本的な位置づけにもとづいている。海洋における地質とテクトニクスの全世界的一般化は、E. Zuess, J. Hall, A. P. Karpinsky, G. E. Haug, V. A. Obruchev, H. Stille, E. Argand, L. Kober, S. N. Bubnov, V. E. Hain, N. S. Shatsky, Yu. M. Sheinmann, V. V. Belousov, N. P. Kheraskov, L. I. Salop, L. I. Krasny, T. N. Spizharskyをはじめ多くのコリュパイオス(古代ギリシャ劇の合唱隊の首席歌手)によって前世紀に行われた大陸の地質とテクトニクスの全世界的一般化に匹敵する時期には到達していない、と著者は考えている。同時に、当然のことながら、大陸と海洋の地質学の創始者 - H. Hess, J. Wilson, R. Dietz, B. Hizen, I. S. Gramberg, J. M. Pushcharovsky, G. B. Udintsev, A. P. Lisitsyn, L. P. Zonnenshain に言及しておくべきである。

筆者の見解では、大洋の地質学と大陸の地質学との

間の相互関係における矛盾した状況を議論し、この状況の非革命的<相互協力による>解決方を模索することは非常に緊要である。その中から、大陸と海洋のテクトニクスにかかわる最新の課題に向けた第一歩が生まれるかもしれない。著者の見解では、大洋の地質学と大陸の地質学の道がおそらく初めて交差し、地質発達の指向性、非線形性、不可逆性に関する規定によって地球地質学がより深く進展するだろう(Blyuman, 2001 and 2015)。現在、プレートテクトニクスの基本原則が海洋地質学と大陸地質学の双方で実際には支配的であるが、著者の意見ではこれら2つの「地質学」は、地球科学における別個の科学分野として独立した存在であり、それぞれに固有の研究対象と方法論をもっている。歴史的な理由から、これらの科学分野の概念的基礎である大陸の地質学や海洋の地質学の議論の大半が、「固定論、移動論」などとラベルづけされた本質を反映しない専門用語によって閉塞しており、大陸および海洋の地質学の基本規定はそのような議論には収まるものではない。現在、海洋地質と大陸地質の双方を説明する普遍的モデルを作成することは不可能であると著者は考えている。その理由は、前世紀中頃に現れた海洋構造に関する初めての仮説に相容れないことを理由に、地質的卓状地概念が不公平に評価されたことにある。今世紀の初めに生まれた基本的予測が、長期間にわたる世界中の海洋における深海掘削計画の結果にもとづく海洋地質情報と大きく矛盾するという経緯は、今日では、プレートテクトニクスもあてはまるだろうと、筆者は考えている。

乖離した海洋地質の大陸地質について、筆者なりのビジョンは次のとおりである。これまでに蓄積された地質学的観測データにもとづいているという事実で構成されている双方の「地質」が、まずは地質図として統合され、その後、層序学、テクトニクス(実用的・個別的な)、火成作用、変成作用、岩石学、岩相、鉱物学など系統的な分野で統合されることになるだろう。大陸地質学および海洋地質学におけるこれらの分野はいずれも、組成的および構造的要素の数や、現代の海洋および大陸の様々な構造にさまざまに現れている時空的関係性において異なっている。海洋(現在の海洋)では、層序・テクトニクス・火成作用などの個別的特徴が、海洋中の特定の構造(中央海嶺、島弧、受動的大陸縁、活動的大陸縁、島弧系、海洋内部および海洋縁の隆起帯)において確認されている。それらの固有の組成と構造は、世界の海洋での深海掘削データによって確認され、現在の北極海、太平洋、大西洋およびインド洋の起源に関するGramberg(2002)の考え方に合致する。

大陸の変動帯と卓状地の地質図作成のプロセスは、連続した地質系統の層序・テクトニクス・火成作用に関する地質図と凡例に統合されるだろう。つづいて、地質図が作成された地域に時空的に分布する堆

積作用・火成作用・鉱床生成などの連続事象が、同じ地質史的観点から解析されることになる。

海洋の地質学に関しては、現時点でも、多くの理由で地質図作成のための海底地形図が未整備であることは大きな問題である。これまでにできているのは、世界の海洋と周辺海域の全般的な地形図だけである。また、このような地形図凡例の原則は未だ開発途上にある。世界の海底地質図作成は、大陸地質図でいえば、おそらく前世紀初期の知識レベルにある。筆者の知るかぎり、個別海域の地質図はない。海洋の全般的な地質図は、大陸の古期および新期卓状地にとってもよく似ている。それらは様々な年代のプレート複合岩類と被覆玄武岩層でできていて、伏在層の構造と年代はほとんどわかっていない。

大陸の地質構造については、若い卓状地と、それらの基盤岩類の複雑な組成-構造パターンは古くに確立された。世界の海洋の受動的な大陸縁の構造は、多くの点で大陸の若い卓状地に似ているが、深海平原と中央海嶺斜面における玄武岩第3層に覆われた基盤岩類の組成-構造はほとんど解っていない。海洋構造に関する構造的・地質的情報の不足は地球物理学手法で得られた多量の間接データで補完されていて、大陸のように明確ではない。世界の海洋における深海掘削データは、すでにかかなりの量に達している。にもかかわらず、それらは地質データとして、層序学的枠組みの解明、地質断面の対比（海洋内および海洋間）、統一した凡例の作成、造構時相の対比、火成活動の復元などに利用できない。これは、変動帯や大陸卓状地における多様な構造マッピングに比べると、現代の海洋地質調査が明らかに遅れていることの客観的証拠である。大陸の地質的分析とは対照的に、海洋学および古海洋地質学では、海洋の発達段階ごとの地質力学的分析が行われている。筆者は、未だに、地球力学の歴史的解析が大陸地質の歴史的解析によってほぼ完全に依存している理由がわからない（私だけではないことを願っている）。大陸の地質学におけるプレートテクトニクス（いいかえると、現代海洋の地球力学）の基本条項（換言すれば、現代海洋の地球力学）をそのまま用いようとすることに、ほとんど合理性はない。著者は、この課題の議論を、できれば幅広い地質関係者の参加のもとではじめるのが妥当であると考えている。

大陸地質学と海洋地質学が“乖離”した存在であることへの見方を、あらかじめ考察しておこう。歴史的地球力学ではなく、歴史的な地質学の原理に基づいて各海洋の層序・テクトニクス・火成活動などの諸特性を総合し、それぞれの海洋に特有な堆積作用、構造形成、火成作用および鉱床形成の歴史的変遷を復元すれば、海洋の進化をより深く理解できるだろう。このような海洋の歴史的な地質学は、現代海洋の地質構造と歴史の情報や特質と矛盾してはいるが、すでに伝統になっ

ている海洋の場合、進化的進化論から決別する基礎となる。海洋の開口、海洋底拡大、沈み込み、そして象徴的な（現代の海洋の）閉塞といったモデルを、いくつもの海洋（大西洋、北極、インド洋）に強引に適用することはできない。

無論、予察的かつ個人的見解であるが、これは次のように結論できるだろう。「固定論」と「移動論」という用語が多用されるが、その使用を制限したり完全に排除することが望ましい。筆者の見解では、地球科学界における思考の自由を獲得することによって、大陸地質学や海洋地質学は事実をもとづいて互いに豊かになり、単純な概念の拡張を回避できる。双方の“地質学”は歴史主義原則にもとづくことが可能で、I. S. Gramberg (2002) によると、それは海洋地質学においても可能であり、大陸地質学ではかなり伝統的になっている。海洋地質学における主要事象と大陸地質学が互いに接近する領域は最新のテクトニクスであり、この研究領域では、海洋地質学と大陸地質学との間で相互理解を進めることができる。筆者ら (Blyuman, 2015) によれば、年代を遡るにつれて、大陸と海洋の地質学の基本規定がより乖離する。さらに、これらの相違は地球規模のみならず、地域的でもあり、個々の大陸および個々の海洋の地質発達史に表現されている。このように、筆者によれば、地球全体、ならびに海洋と大陸において指向性のある不可逆的発展の原理は、大陸と海洋双方の地質史を認識する一般的かつ基本的な原則である。金属資源においても時間的指向性と不可逆的な発展問題が相乗効果の基本規定の1つになっている（「時間の矢」Prigogine, 2001）。指向性、非平衡、鉱化作用などのあらゆる探索過程で、鉱化環境の類似性に関する同一主義的で決定論的な考えを放棄することは、金属資源探索の場合と同様、きわめて適切である。したがって、現在の海洋地殻構造を先カンブリア紀以降の鉱床形成に直接適用することは不可能である。「既存の海洋地殻は、その小片を除くと新しく、大陸地殻ははるかに古い地質学的な事象の痕跡を遺している。したがって、より早期の地質学的な事象の証拠は、大陸地殻内にしか見出せない」(Taylor, McLennan, 1988)。先リーフェイ紀 (pre-Riphean) のテクトニクスと鉱化作用の時空的特徴を考察すれば、4.5～0.9 Gaの期間におけるこれらのプロセスの発展の指向性と不可逆性にかかわる規制を解明できる (Blyuman, 2015)。

それに劣らず重要な本論のもう1つの結果は、研究対象とする時代におけるテクトニクスと鉱化作用の双方が時空的発現に独自性をもっていることである。言い換えれば、同じ時代でも、さまざまな地質事象と鉱化現象が別の場所に現れる可能性がある、ということである。さらに、地質学および鉱床学的な「停滞」期間の存在が明らかにされ、その後、汎地球的あるいは広域的な造構-鉱化作用が活発期

間が到来した。同時に、全体として、そのような活動は時間の経過とともに増加し、世界的にもますますひろがりつつある。時間が経つにつれて、鉍化作用の多発性・多様性がより顕著になり、多様性の増大には先在する鉍化作用の再活性化 (Rundqvist, 1993) がより重要な役割を果たすことになった。

同時に、前述の全てのことがらから、鉍床形成における斉一的構造観は妥当ではなく、同時代の海洋に固有な地質力学的環境へ大陸構造における鉍化作用 (鉍床形成学的分析) が利用された。さまざまな地質学的概念に顕著な差異があるにもかかわらず、地質学的事象の本質の解釈の全てが、ある決定論から導かれている。比較的最近 (50～60年代)、我国では、変動系 (地向斜) の段階的進化の概念 - 一貫性があり、厳密に決定された進化の段階的発達 - が精緻化され、最終的に "完成" された。その後、A. D. Shcheglov (1983) は、変動帯の決定論的な段階的進化モデルを打破し、以前には知られていなかった「構造 - 火成活動の活性化」概念を正当化し、後に、非線形性概念である非線形鉍化作用 (Shcheglov, 1983)、非線形地質学 (Shcheglov, 1995) を導入した。

このような広範な非線形地質学は、線形性 - 地質過程の決定論 - に由来する大きな不当性を強調するなかで生まれ、その累積的・協同的性格がますますはっきりと理解されるようになった。このような地質作用の特徴は非線形性 - 地質学および他の物理的システムにおける重ね合わせの原則に違反し、別のものの存在下での各挙動の結果は、他の影響がない場合の結果と同じではない - を決定づける。さまざまなスケール、さまざまなレベル、カオス性、無秩序性、ランダム性、そして決定論からの大きな偏差などを示す非線形の鉍化作用 (Shcheglov, 1983) と地球力学 (Nonlinear Geodynamics, 1994) は、線形性の問題を次のように強調した。「後続の現象は、同時的かつ集合的に作用する複数のプロセスのアンサンブルが存在するため、以前の現象から必ず継続するとは限らない」 (Shcheglov, 1995, p. 7) と。「非線形地球力学の客観的目的は、私たちの心の中であらかじめ決められている標準化された計画に適合しない造構作用、火成作用などの諸現象や諸作用の研究方法を開拓することである」 (非線形地球力学, 1994, p. 74)。

Shcheglov (1995) は、地球圏のさまざまな進化による同時並行的な発現によって引き起こされる地質過程の発達の多因子性および多型性を探求する方向として「非線形地質学」という一般概念を定義している。Shcheglov と Pushcharovsky によると、一般に、非線形性の基本的特徴は、多型地質過程と無秩序で、さまざまな階層の混沌とした相互作用、および、それらの相互作用の非決定論的性質に由来する。

上記のことがらを考慮した上で、非線形特性が地質システムの進化において支配的であり、最も重要な要素であるのか? という質問に答える必要がある。第一に、物理システムの進化における非線形性は重ね合わせ原理に反して、この点で、多因子 - 多成分自然系は事実上すべて非線形である。しかも、このようなシステムの非線形性は、非線形性に加えて、不可逆性と非平衡性をともなう。そして、「振動」の特性振幅にしたがって、非可逆性および非平衡性などの多数の他の特徴と同等な挙動を示す。

非平衡 (熱力学 [物理] 系の状態) は、その微視的パラメータの分布の不均一性によって特徴づけられる。あるシステムの非平衡はまた、出力またはエネルギーまたは物質のシステムへの入力防止要因が存在しない場合、システムを熱力学的 (統計的) 平衡状態に戻そうとする不可逆プロセスとなる。自然系 (構造) における平衡の問題 (Prigogine, 2001) を考慮すると、自然構造における平衡の可能性に関する答えは否である場合が存在することも注目される。同時に、「地球レベルでの平衡システムは不活性であるが、環境との相互作用がない場合には無期限に隔離され、自然システムが開放系になるばかりではなく、環境との相互作用によって維持されている」 (Prigogine, 2001 年, 181 頁)。

地質過程、すなわち時空物理系に関連して、それらの非線形性と非平衡性にしたがうと、それらの不可逆性がきわめて重要になる。不可逆過程は、物質・熱などの均一分布に向かって一方方向のみ自発的に進行する過程であり、正のエントロピーをもたらす。これに関連して重要なのは I. Prigogine (2001) の次の記述である。すなわち、古典的熱力学は、永遠の可逆軌道科学としての非線形熱力学、不可逆過程の熱力学、それらの進化過程に矛盾する。この観点からは、すべての地質システムは非線形領域に位置し、その非可逆性は開放系非平衡システムに例外なく内在する無視できない特性である。この点に関して、N. S. Shatsky (1965) は、「ソビエト地質学の最も重要な成果の 1 つは、地表と地殻で起きるすべての地質過程の不可逆的な質的進化を認定したことである」と考察した。堆積作用の進化の不可逆性はよく知られている。しかし、造構過程、地形形成、風化削剥の実態、火山岩と関連鉍化作用などの特性、および、地球発達史における不可逆的変化を主張するのに十分な数の事実が蓄積されているわけではない。・・・地球の歴史は、海進と海退、山脈の形成と破壊のいずれかだけでなく、これらすべての現象を支配するプロセスの質的变化の中にある」 (Shatsky, 1965, 54-55 頁)。こうして、非平衡、非線形性および不可逆性のような地質システム (過程) の特性の相互関係および相互条件が確立され、これらのシステムの進化特性は、非平衡、非線形熱力学および相乗効果の観点から解析することが好ま

しい (Prigogine, 2001)。

Khain (2003) は、地質発達過程の指向性と非線形性に関して、次のように述べている。「上記に関連して、我々は一般的な方法論の問題に取り組むべきである。この章では、地球進化を決定する2つの基本パターン、すなわち、方向性と周期性について議論した。それらは直線（“Prigogine”による“時間の矢”）と曲線で表すことができる。しかし、第3のパターンも存在し、これはすでに著者が別の著作 (Khain, 1964) で述べた：すなわち、それは発達の不均等性であり、現在ではより厳密な用語—非線形性を用いることが適切であろう。実際、非線形性は重要であり、無視することはできない。多くの方向づけられた因子が同時にその挙動に影響を与えるので、ほとんどの地質過程は非線形である。とくに、これは、造山帯と海洋といった巨大構造の発達と同様、上述した造山時相の不均質性と二極性をもたらす。しかし、地球進化の法則の階層構造の中では、非線形性は第3位を占め、第1位は指向性に、第2位は周期性に関わっている。地質過程の非線形性という考え方は実際の物質を理解する必要性への当然の対応であり、（線形性の原理を用いて）より多様で、普遍的な地質力学および鉱床形論を導くことができるだろう。

地質過程の不可逆性には、とくに注意が払われるべきである。今日では、さまざまな地質力学および鉱床形成論では、（地質学的観点から見た）最近の過去に遺された地質過程の主要な特徴がさまざまな地質時代に線形的に敷衍されている。地質分野の構造化、その断片化や分解、そして、それらの中で、個別的研究分野が概念的にはばらばらに発展してきたために、「理論的記述をできるだけ可能にするシナリオの中では」それらが非生産的になってしまっている。研究された現象は予察的に準備され、個別であるため、状況の近似として機能するだけで、物理学的には不十分ではある。しかし、それらは採用された概念的スキームに適合する。

以上のとおり、構造化、概念主義および決定論が相互に関連していることが判明した。それらは科学的見解に重大な影響を及ぼしてきて、その結果、それらの非合理性と相互関係を解明するために多大な時間と労力が不当に費やされてきた。

謝辞：励ましのコメントをいただいた David Pratt に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Abramovich, I.I., Gruza, V.V., Klushin, I.G. et al., 1984. Modern Ideas of Theoretical Geology. L., Nedra, 280p.
- Abramovich, I.I., 2005. There is no alternative! (In context of publishing the collection of scientific articles “Oceanization of the Earth – an alternative to neomobilism”). Regional Geology and Metallogeny, no. 23, p. 163- 168.
- Belousov, V.V., 1989. Fundamentals of Geotectonics. - M.: Nedra, 382p.
- Blyuman, B.A., 2001. About three NON – nonlinearity, nonreversibility, nonequilibrium – in geological processes. National Geology, no. 6, 64p.
- Blyuman, B.A., 2011. Earth’s Crust of Oceans (based on international deep-sea drilling programs in the world ocean). St. Petersburg. VSEGEI Publishing House. 344p.
- Blyuman, B.A., 2013. Urgent Issues in Geology of Oceans and Geology of Continents. SPb. VSEGEI Publishing House. 400p.
- Blyuman, B.A., 2015. Evolution of Events in the Geological History of the Earth from 4.5 to 0.9 Ga. SPb. VSEGEI Publishing House. 312p.
- Belousov, V.V., Sholpo V. N. et al. (eds.), 1999. RAS. O.Yu. Shmidt United Institute of Physics of the Earth. M. UIPE RAS: University Publishing House.
- Krasny, L.I., Blyuman, B.A. and S.I. Andreev, S.I. (eds.), 2000. Geological Mineragenic Map of the World. 2000. Scale 1:15,000,000. Explanatory note. Part 1. Geology and Minerageny of Continents, Transitals and the World Ocean. St. Petersburg. VSEGEI Publishing House. 295p.
- Gramberg, I.S., 2002. Comparative geology and minerageny of oceans and their continental margins in terms of stage- by-stage development of the oceans. Russian Arctic: Geological History, Mineralogy, Geoecology. Dodin, D.A. and Surkov, V.S. (eds.). St. Petersburg. VNIIOkeangeologia Publishing House, p. 17-34.
- Krasny, L.I., 1984. Global Geoblock System. - L.: Nedra, 224p.
- Krasny, L.I. and Blyuman, B.A., 1998. Geoblock divisibility and inhomogeneities of the Earth’s lithosphere. National Geology, no 1, p. 17-25.
- Morozov, A.F., Karpuzov, A.F. and Petrov, O.V., 2003. National geology and Russian geological mapping. National Geology, no. 2, p. 24-26.
- Pushcharovsky, Yu.M. (ed.), 1994. Nonlinear Geodynamics. - Moscow: Nauka,
- Krasny, L.I., Petrov, O.V. and Blyuman, B.A. (eds.), 2004. Planet Earth. Encyclopedic Reference Book. Volume: Tectonics and Geodynamics. St. Petersburg. VSEGEI Publishing House. 652p.
- Prigogine, I. and Stengers, I., 2001. Order out of Chaos: Man’s new dialogue with nature. Under the general editorship of Arshinova, V.I. et al.; Trans. from English by Danilov, Yu.A. - 3rd edition. - Moscow:

- URSS Editorial, 310p.
- Rundqvist, D.V., 1993. Epochs of Rejuvenation of the Precambrian Crust and their Metallogenic Significance. *Geology of Ore Deposits*, v. 35, no 6, p.467-480.
- Taylor, S. and McLennan, S., 1988. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. M., Mir Publishers, 38p.
- Udintsev, G.B., 1987. The Relief and Structure of the Ocean Floor. 239p.
- Khain, V.E., 2003. Main Problems of Modern Geology. *M. Scientific World*. 248p.
- Shatsky, N.S., 1965. *Selectas*. v. 4. M.
- Shcheglov, A.D., 1983. *Nonlinear Metallogeny*. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, v. 271, no. 6, p. 1471-1474.
- Shcheglov, A.D., 1995. Some problems of nonlinear geology. *Regional Geology and Metallogeny*, no. 4, p. 5-16.
- Shcheglov, A.D., 2007. *Main Problems of Metallogeny*. *Selectas*. St. Petersburg. VSEGEI Publishing House.
- Vasiliev, B.I., 2009. *Geological Structure and Origin of the Pacific Ocean*. Dal'nauka Publishing House. 560p.
- Vernadsky, V.I., 1957. *Reflections of Naturalist*. Book 1: Space and Time in the Animate and Inanimate Nature. M. Nauka.

地球マントルの熱構造：第1部 太平洋地域

Thermal structure of the Earth's mantle: Part 1. Pacific Ocean sector

Dong R. Choi¹, Fumio Tsunoda² and Takayuki Kawabe³

¹ International Earthquake and Volcano Prediction Center, Australia. dchoi@ievpc.org

² Prof. (Emer.), Saitama University, Japan. agatsuma.terao@gmail.com

³ Prof., Yamagata University, Japan. kawabe@kescriv.kj.yamagata-u.ac.jp

(村山 敬真 [訳])

要旨：地質学および地球物理学的情報と比較して、低速度マントルが外核から生じる流体および/または気体で満たされた多孔質であると考えられることを、利用可能なマントルトモグラフィ・データが示唆している。一方、高速度マントルは、深部断裂帯を介して地球表面に連結された開放系であり、多孔性は少なく、比較的乾燥している [dry] と考えられる。この関連から、低速マントルは高速マントルと比べて比較的高温であり、外核から表面へのエネルギーは主として低速マントルを流れると仮定される。

低速マントルの側方分布は、それぞれが独特の分布パターンを有する4つの深度群を示す：1) マントル最深度、2900～1700km, 2) 下部マントルの上部、1600～700km, 3) 上部マントルの下部、600～400km, および4) 上部マントルの上部、300～50km。最初のグループ(2900～1700 km)は、ソロモン諸島からイースター島までのWNW-ESE伸張を伴う低速マントルの大きな塊(スーパーブルーム)で特徴づけられ、そこではスーパーブルームが外核から上昇する。2番目のグループ(1600～700 km)は、低速マントルが南北両方向への広がり、中米、カナダ、カムチャッカ、アラスカ、フィリピン、東南アジア、南極海岸を含む現在の太平洋縁辺部に達することを示している。ハワイ、南極、カーネギー海嶺などの大きな火山列の下には、深さ900～700kmに低速度層が横たわる。上部マントルの下部では伸展傾向が加速する。最後のグループは、今日の火山と地震が最も活発な太平洋縁辺部のエネルギー集中によって特徴づけられる。

上部/下部マントル境界が太平洋全体に配置されている約700kmのところ、トモグラフィ断面に大きな変化がある。高速マントルは太平洋全体でこの境界よりも上で卓越し、低速レンズは境界の直下を占める。

太平洋におけるマントルの熱構造の上記の大きな姿は、主に地球の極めて重要な深部構造に支配されている。下部マントルのエネルギー流動体制に対する、始生代の超背斜構造による一次制御が明らかである。

キーワード：低速度マントル、エネルギー流動、火山、地震、深部構造、地震波トモグラフィ

(2017年11月15日受付, 2017年11月30日受理)

序 論

地震動、火山噴火、気候変動などの自然災害の根本的な原因やプロセスの見いだすには、地球の地球学的プロセスを正しく理解することが不可欠であ

る。鉱物探査にも同じことが当てはまる。私達は研究を通して、地球の表面上で激しい運動を起こす際の、外核に由来する電磁気熱エネルギーの重要な役割を認識した。その活動はその他惑星系と密接に相互作用する。したがって、国際地震火山予知セン

ター (IEVPC) および他の NCGT 科学者の最近の努力は、この特定の課題、マントル内部のエネルギー流動プロセス、に焦点が当てられている。

我々は、上部マントルの熱エネルギーが主要な地質構造によって支配される一定のパターンで移動することを見出した。一方、トモグラフィーと地質学の比較は、トモグラフィー画像における相対的な高低パターンとして表現された速度構造の最もよい解釈が、主としてマントルの多孔性の度合いを反映することであると想定することができた。低速度はより多孔性であり、流体 / 気体で満たされる。一方、より高速度のマントルは、流体 / 気体の有無にかかわらず、より多孔性は少なく比較的乾燥していると考えられる。中核的な深部断裂系に関連してしばしば発生し、地球表面で観測される高速度マントルは、地球表面に連結された開放系と解釈される。一方、低速度マントルは効果的に密封されており、外核エネルギーは蓄積し(従って熱くなり)上方に移転し、激しいじょう乱のない自然放電または地震、火山として地球表面に最終的に放出される。

このような背景から、Fukao(1992), van der Hilst(1995), Romanowicz(2003) などの発表された他の画像と共に、Kawakami et al.(1994) および

Ohbayashi (2009) を中心にした全マントルトモグラフィーを分析した。この研究は、地質学的および地球物理学的データで観測された地球構造と調和するマントルの熱構造について、多くの重要な洞察を明らかにした。本稿では、太平洋地域の低速度マントルに焦点を当てて、これらの知見を述べる(図1)。この地域外、すなわち大西洋 - インド洋 - アフリカ - ヨーロッパ地域は、次の論文で紹介される。第3部では、地球の熱構造、移動、およびその周期性について包括的に説明する。

2. 下部マントルの低速マントル分布

以下の図1は、主に Ohbayashi (2009) のトモグラフィー画像から作成された図である。2800km の最深部では、非常に低速の塊が2つの領域でWNW-ESE方向に整列している。西部の塊はパプアニューギニア - ソロモン諸島地域の下にあり、東部はトゥアモツ諸島 - イースター島地域に位置している。西側の塊は多くの孤立した小さな“煙突”や“ウニのトゲ”(Gregori, 2009) の上昇をもたらし、その大部分は2000kmの深さに達する前に消える。一方、東部の塊はサモアとソサエティ諸島に向かって2000kmの深さまで上昇する間に、西に約3000km移動する。下部マントルのこれらの低速塊は、し

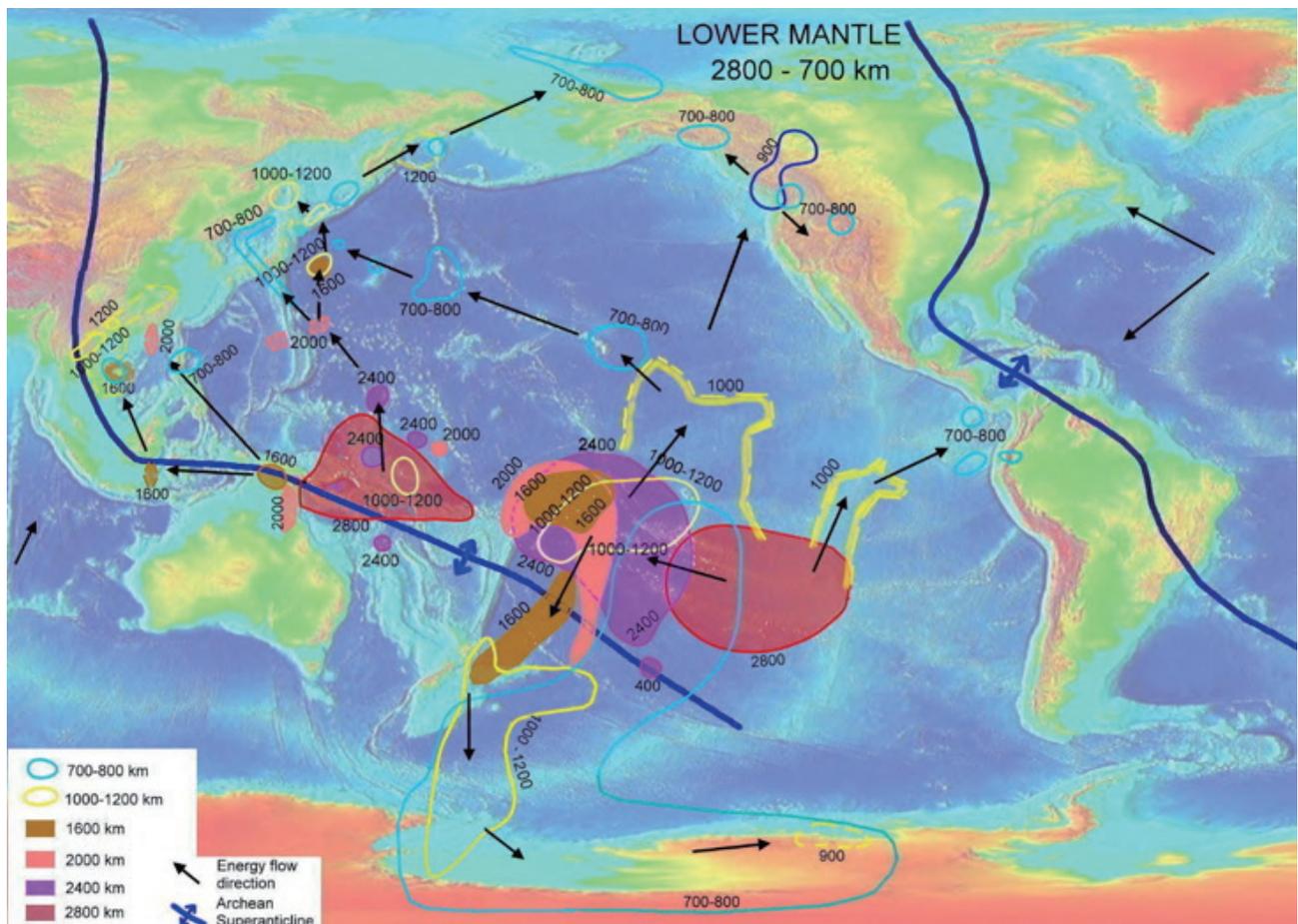


図1 下部マントルの低速域の模式図。2つの深い(2800-2400km)低速ゾーンに注意せよ。1) サモア - ソサエティ - トゥアモツ諸島, 2) パプアニューギニア - ソロモン諸島。それらは、下部マントルの上縁を、南極海岸を含む太平洋縁辺に向かって広がった。

しばしばスーパーブルームと呼ばれる (Foulger,2010; https://en.wikipedia.org/wiki/Mantle_plume#The_lower_mantle_and_the_core). Burkes(2011) は、それらを Jason に紹介した。

東部低速塊は、主に N-S 方向に水平拡散が始まる 1600km で拡散方向を変化させる (図 1)。その北部の延長は現在のカナダ太平洋岸、アラスカと北極海 (チュクチ海) に達し、南側の腕はロス海、南極海岸、さらに東へ南極半島に向かっており、火山が今日活発である (van Wyk de Vries et al., 2017)。別の腕、北東の腕はガラパゴス諸島 - ココス海嶺地域に及ぶ。

一方、西側の深い低速塊は、北側と西側に広がるだけでなく、より小さな孤立した小塊を生じさせる。それらは現在の大陸縁辺に達する。インドシナ、フィリピン、日本である。これらの腕は、現在の太平洋縁辺の火山 - 地震帯を形成した下部マンツルの幹線である。

3. 上部マンツルの低速マンツル

上部 / 下部マンツル境界, 660-710km

マンツル熱構造の最も重要な変化は、深度約 660 ~ 710km に見られる。これは上部 / 下部マン

ツル境界 (ULM 境界) であり、その下では低速レンズがしばしば発達するが、その境界の上ではより速いマンツルが取って代わる。それはこの深度範囲で物理化学的性質の重要な変化を示唆している (Press and Siever, 1982; Gregori, 2009; Gordienko, 2017)。この論文の著者の 1 人は、トンガ - ニュージーランド (Choi, 2017a) とカムチャッカ地域 (Choi, 2017b) の 660-710 km の深さのトモグラフィ画像において同じ傾向を認識した。他のマンツルトモグラフィ (van der Hilst, 1995 and Romanowicz, 2003) も同様の傾向を示している。これは液体 / 気体で満たされた部分熔融したマンツルが、ULM 境界の上のより透過性の少ない層によって覆われていることを示唆するだろう。本論文の他の部分で述べたように、日本海の 600 ~ 800km の深度域で、直交深部断裂系に沿って発達した薄い線状部分熔融物が検出された。それらの分布は深発地震帯と完全に一致する (図 5)。

400 から 600km

この深度セクションは、ハワイから発した低速マンツルの北および北西方向の広がりを特徴とする。北側の腕はカナダと完全に接触し、北西側の腕は日本とカムチャッカに達する (図 2)。

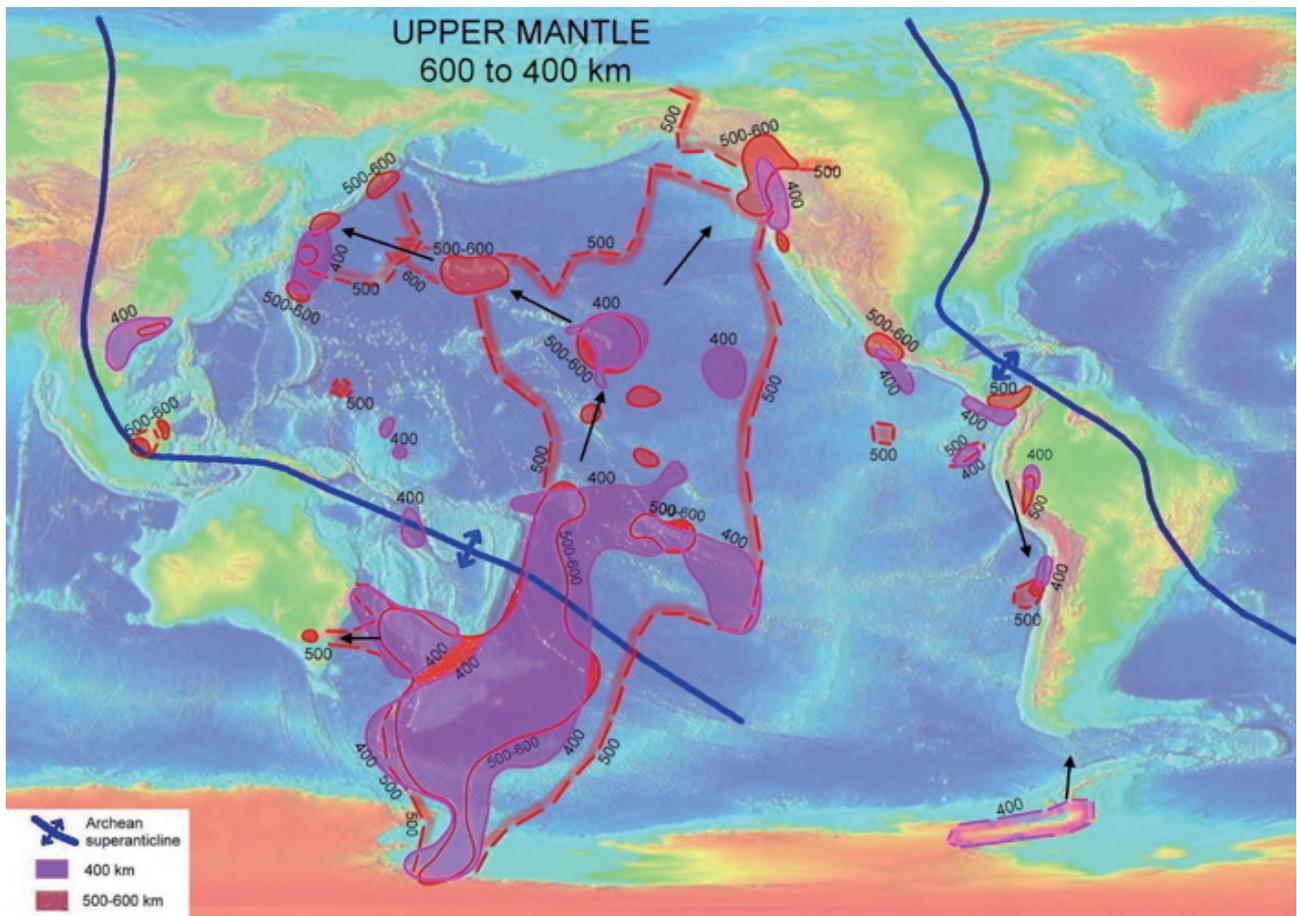


図 2 Ohbayashi データから得られた 600 ~ 400km 深度帯の上部マンツル低速域の概略図。主な流れの傾向は下部マンツルのものから継承され、より小さく孤立した断片をもってさらに遠くに達する。500km の深さの線に見られるように、南極からニュージーランドおよびハワイの東を通してカナダに至る中央太平洋の幅広い NNE-SSW 低速域に注目。

300km 以浅

この浅い深度範囲では、低速マントル分布は、今日の火山と地震が最も活発である太平洋縁辺のより広い地域にさらに移動する(図3)。ソサエティ諸島からカナダ海岸へのN-S方向の中央太平洋の連結は、徐々に切断されていく。

238 ~ 348 km 深度の低速マントル分布は大部分が海洋域に限定されていることが注目される(右図, 図3)。それらは、中生代後期以降に起こっている海洋化(上層のマントルと地殻を変化させた熱放出の増加)のまさしくその地域である。より上の範囲78 ~ 148km(左図)の場合、低速マントル地域は大陸縁辺へと広がる。

4. 太平洋全体の低速マントルプロファイル

図4は、インドシナから南太平洋中央部を通って南米に至るマントルのWNW-ESE断面図であり、低速マントルの分布を示している。大部分の低速マントル

が 南中央太平洋(ソサエティ諸島とトゥアモツ諸島)を除いて消滅する約700kmの深度帯に境された2つのグループがある。これらの領域は、外核から発するスーパーブルームの最上部のすぐ上にある。

下部群(下部マントル)は、外核からのスーパーブルームの上昇およびその横方向への膨張によって特徴付けられる。上部群(上部マントル)は急速な横方向への広がりを示す。浅い低速マントルが下に位置する領域が、新生代後期の活発な沈降によって特徴付けられる活発な火山地域に共通している(Choi and Vasiliev, 2008b)。火山/地震活動と沈降が並行して発生している。

5. 議論

1) 深部中核構造(向斜および断裂帯)およびトモグラフィ画像

深発地震とマントル部分熔融に関連した日本海における直交断裂系

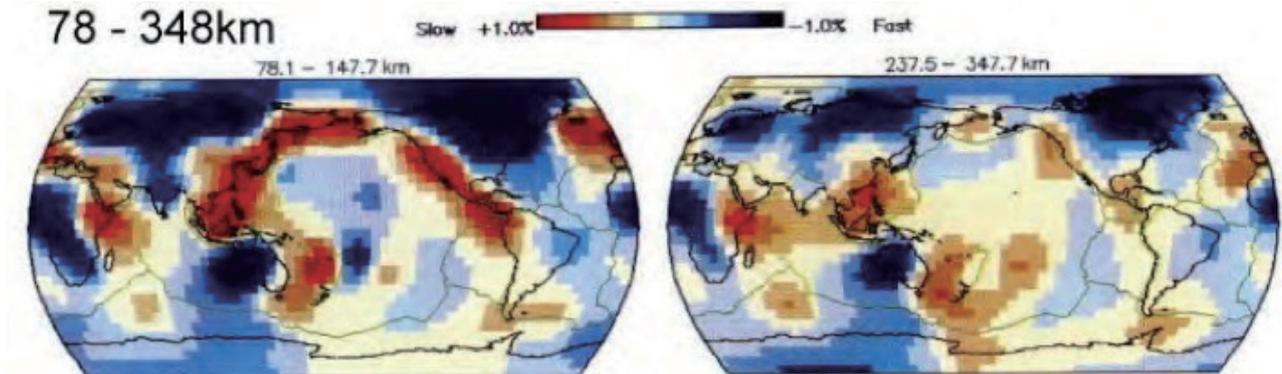


図3 最上部のマントルトモグラフィ。Kawakami et alより、148kmより上で太平洋縁辺を占め環太平洋変動帯を形成する低速域に注目。N-S方向の連結は徐々に切断される。238 ~ 348 kmの深度帯での低速マントル分布に注目 - 中生代後期から海洋化が起こっている地域と一致する。

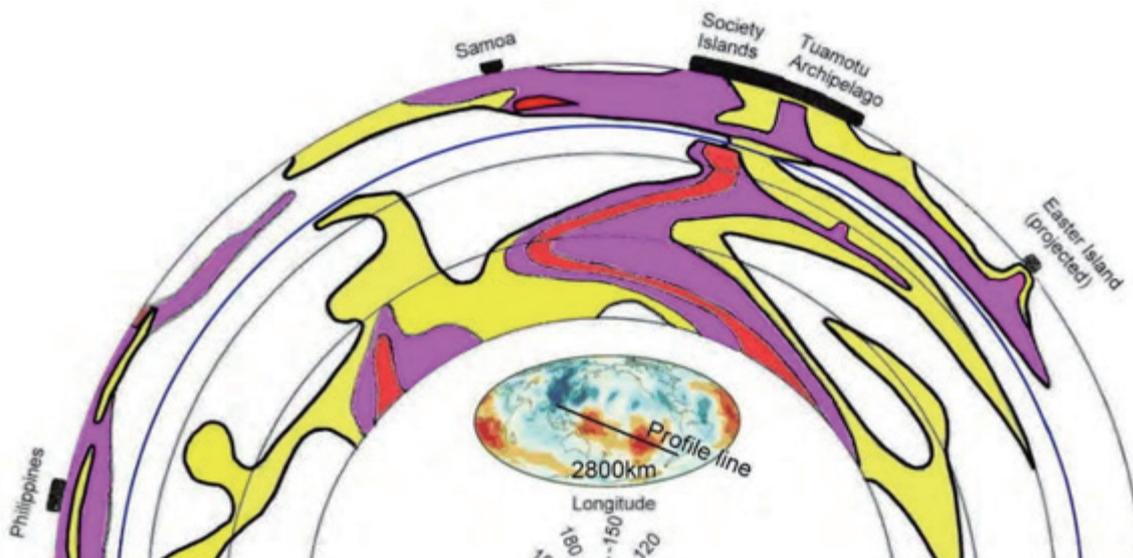


図4 東南アジアから南米へのトモグラフィープロファイルは、低速マントル分布を示している。2つの明確な群は、上部マントルと下部マントルの境界である約700kmの高速マントルゾーンによって境され識別される。

日本海地域で、深部断裂と深発地震、地震トモグラフィ画像の間の一致を示す興味深い事実が発見された(図5)。日本海で、直交する2本の線状低速マンテルスラブが、600~800kmの深さのOhbayashi(2009)の画像で描かれている(図5)。これらの交差線は、同じ地域で描かれている深発地震帯でもある深部断裂帯と、完全に一致している(Choi, 2005)。

上記の事実は、深発地震発生プロセス、特に下部マンテルの上部に含まれる流体/ガスの性質を理解する興味深いヒントを提示する。この論文の著者の1人は、トンガ - ニュージーランド地域(Choi, 2017a)とカムチャツカ地区(Choi, 2017b)において、これとまったく同じ関係を見出した。

先カンブリア紀の超巨大向斜

図1および図2によく見られるように、対蹠的な先カンブリア超巨大向斜は、低速マンテルの分布によって表されるマンテル構造に明らかに影響を与える。両方の地背斜は障壁として働き、主要なエネルギー流動パターンに影響を与えた。インド洋

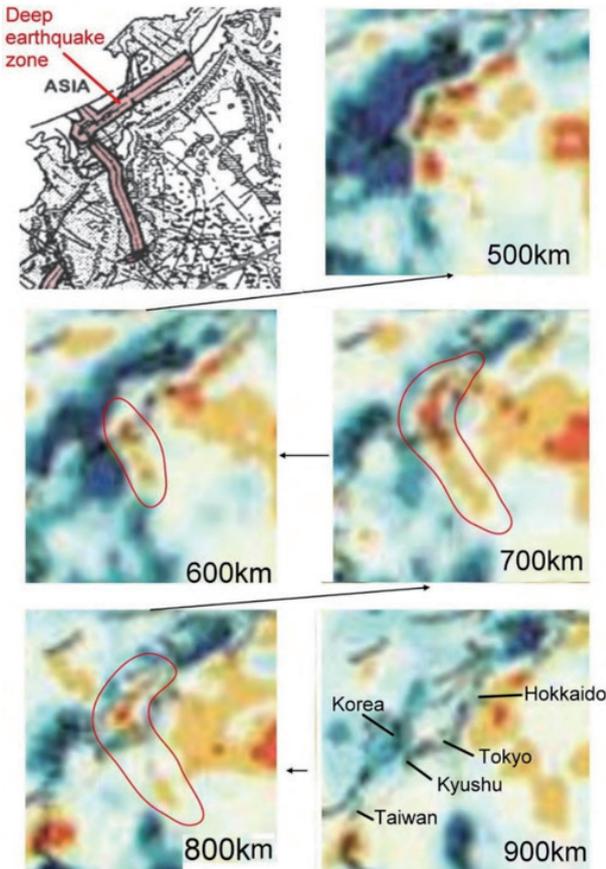


図5 900から400kmタイムスライスにおける日本周辺のOhbayashi(2009)トモグラフィの抜粋。比較のために、左上には深発地震をともなう深部断裂系を示す地質学的データ(Choi, 2005)がある。地質構造と800~600kmの低速マンテル分布との完璧な一致に注意(丸で囲まれた線状のパターン)。800~600kmの深さの線状低速マンテルは、地震の発生に関連した流体やガスを反映していると考えられる。

と大西洋の両方で、エネルギー流動のパターンは、Tsunoda(2009a)によって提唱されているアフリカのスーパーブルームからの供給源を示す。次の論文では、この流動パターンについて詳述する。

太平洋の直交構造と低速マンテル

この研究は、様々なレベルで働く直交構造によって制御される低速ゾーンを明らかにした。

ソロモン諸島からトンガ - ソサエティ諸島 - トウアモツ諸島 - チャレンジャー断裂帯を経て南米沿岸にかけての2000km以下の最深部では、低速マンテル(スーパーブルーム)がWNW-ESE線上に整列している(図6)。巨大構造はまた北方へ日本と韓国(ススンソン - 琵琶湖 - マリアナ諸島構造帯, Choi, 2005)へと延び、そしてそれはこの断裂帯が本当に深いことを証明し、地球の外核まで到達する深発地震帯でもある。ここでは、この深部巨大断裂帯を“太平洋横断超巨大断裂帯[Trans Pacific Super Fracture Zone](TPSFZ)”と名づける。

TPSFZは、太平洋の中生代盆地の発展に影響を与えた。盆地は、沈下するギョー(Choi and Vasiliev, 2008bの図2参照)とよく一致する断裂線(西太平洋深海変動帯, Choi and Vasiliev, 2008b 図1)の北部地域に配列している。これらの事実は、地球のテクトニクス、熱構造、および鉱物堆積物の形成過程を理解する上で、幅広い派生効果をもたらす(Choi et al., 2008)。この方向が、天皇海山 - ハワイ諸島と平行していることは注目値する。Smoot(1999 and 2005)もこの巨大線状構造に注目した。

下部マンテル(700-1000km)の上部レベルでは、中央太平洋全体で幅広いNNE-SWSの方向が支配的である。ロス海(南極) - ニュージーランド東方沖 - ソサエティ諸島 - ハワイ - カナダである。それは南太平洋中部の約4000~5000kmの幅である。

このほぼN-Sの地帯は、より深いE-W方向に対して直交する。地球上の最大のブルーム(サモア - ツアモツ諸島)は、これらの2つの方向の交差部に位置している。それらは地球形成の初期段階で形成された地球の最も根源的な構造である。外核から放出されたエネルギーは、表面に浮上するのに、接合部に形成されたこれらの構造的に弱化したゾーンを利用した。

図6で観察されるように、いくつかの直交構造の組が識別され、オーストラリア大陸で典型的に特定される(O'Driscoll, 1986)。読者は、地球の直交構造の徹底的な解説についてDe Kalbの研究(1990 and 2007)を参照するよう求められる。

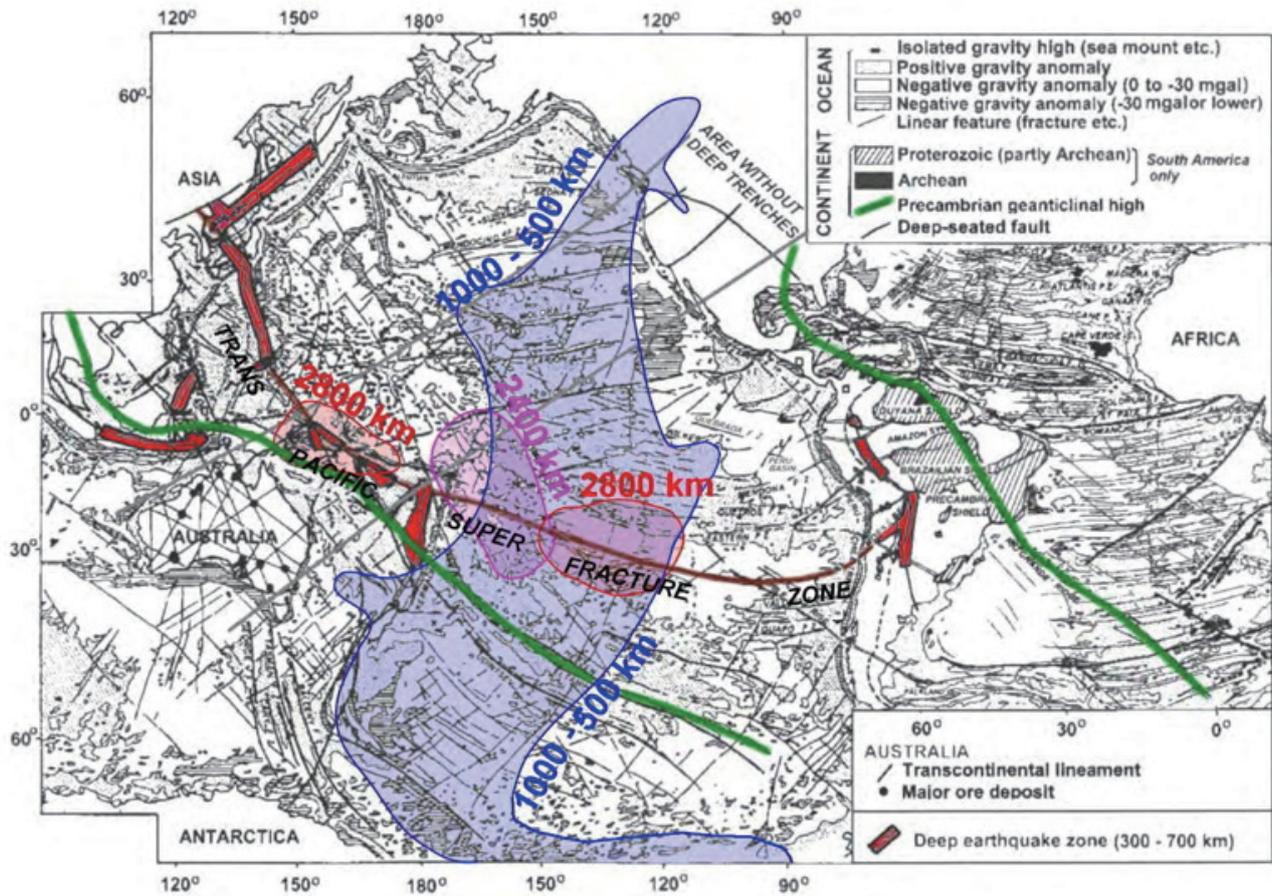


図6. 主要な傾向を強調した Choi (2002 and 2005) の構造図に重ねられた深部低速マントル分布の模式図。明瞭性のために、大陸縁辺部の 500 ~ 1000 km の軽微なパッチは除外されている。

2) 700-900 km の低速度帯と大陸火山

本研究では、深部 700 ~ 900km, すなわち下部マントル上部の低速マントル分布と主要な大陸火山帯との密接な関係が明らかになった。主要な火山のいくつか (図 1) は、

- ハワイ火山列
- 南極の火山。
- 北アメリカ, イエローストーン火山

この密接な関係を示す例の 1 つ, 南極の火山帯が下に示される (図 7)。

明らかに見られるように、南極の火山は、700 ~ 900 km の深さの低速マントルが下にある。火山の大部分は 500km より浅い低速度層が横たわっていないことに注意。これは、大きな大陸の火山の少なくともいくつかがこの深度の範囲に根を持つ証拠である。太平洋地域の火山 - それらは深さ 300km かそれ以浅に根ざしている - とは著しく対照的である (図 3)。

この点に関して、最新の情報が NASA^{*1} によって提供された。彼らは、「ロス棚氷とロス海の間にある

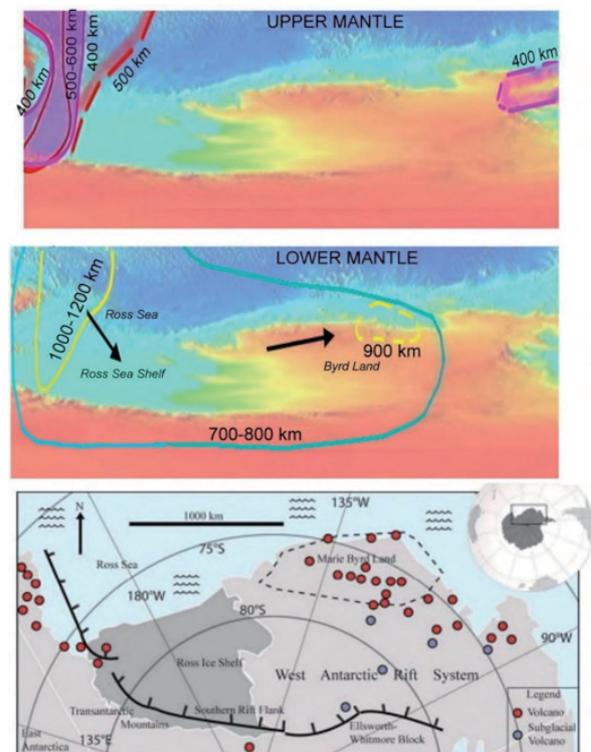


図7 van Wyk de Vries et al. (2017) による南極の火山と、上部マントルと下部マントルのトモグラフィデータ。図1と2を参照。

*1 <http://www.msn.com/en-au/news/world/nasa-discovers-mantle-plume-almost-as-hot-as-yellowstone-supervolcano-thats-melting-antarctica-from-below/ar-BBEKbku?li=AAgFLCP&ocid=iehp>

マリーバードランドの下で巨大な熱い岩石の湧き上がりを発見し、氷床の下に広大な湖と川を作り出している。巨大なマントルプルームが存在することで、今日その地域がなぜそんなに不安定で、なぜ11,000年前の最後の氷河期にそんなに急速に崩壊したのかを説明することができる。明らかに、マントルプルームは700~900kmに根ざしており、プルームは今日非常に活動的になっている。この事実は、太陽活動極小期または冬眠の到来に関連して地球気候を理解することに幅広い影響を与えている。

6. 結論

地質学的 / 地球物理学的データと比較したマントルトモグラフィーは、以下のことを明らかにした。

1) マントルトモグラフィーにおける低速度ゾーンは、流体および / またはガスで満たされた多孔質ゾーンとみなされ、従って熱いと考えられる。それらは、外核からの熱エネルギーが地球表面に上がるための動脈または導管である。一方、高速度帯は、より多孔性でなく、乾燥し、化学的に枯渇し、しばしば表面に開いた深い断裂系と関連する。

2) マントル断面の低速層には2つの主要なグループがある。それは上部と下部で、研究エリア全体にわたって上下マントル境界である約700kmの深さで高速度層によって境される。下部のグループは外核から発するスーパープルームによって表され、上部グループは主に大陸縁辺部での急速側方拡散によって表される。

3) 低速マントルの発達は、地球の表面で観測される地球の基本的な深部構造によって制約される。始生代地背斜構造が一次制約を与える。太平洋のスーパープルームは、韓国 - 琵琶湖 - マリアナ諸島からパプアニューギニア - ソロモン - フィジー - トアモトを経てチリに至る、地球の最も深い断裂系の一つと密接に関連しており、それはまた深発地震帯としても特徴づけられる。

4) 下部マントルの深部は、南太平洋中央部でおおよそE-W方向をとるスーパープルームによって特徴づけられる。下部マントルの上部では、低速層は主にN-S方向で横方向に広がっており、一部は南極大陸を含む太平洋縁辺に達している。

5) 上部マントルの熱活動（火山活動と地震活動）は大陸縁辺に集中している。しかし、スーパープルームが下にある南太平洋中央部は、構造的に活発である。これらの地域は、通常、若い火山活動と、沈降または海洋化によって特徴づけられる。

6) 日本海の深さ600~900kmで直交して発達した

直線的な低速度スラブは、深部断裂に伴う部分溶融と深発地震が密接に関連していることを証明する議論の余地のない証拠である。トンガ - ニューゼalandとカムチャッカでも同様の事実が発見されている。

7) 調査地域の大陸火山では、一般的に700~900kmの深さの低速度マントルが下にあり、火山の根の深さを意味する。

この研究は、地球表面におけるマントルのエネルギー流動パターンと構造的擾乱についての貴重な洞察を提供した。我々の将来の研究の深化は、地震や火山噴火を含む地球のジオダイナミクスのより良い理解に大きく寄与し、このゆえそれらの予測に寄与するであろう。

謝辞：論文の質を向上させるために大きな恩恵を与えた論文についての丁寧なコメントについて、Giovanni GregoriとChris Smootに心から感謝する。

文献

- Blot, C., 1976. Volcanisme et sismicité dans les arcs insulaires. Préviation de ces phénomènes. Géophysique, v. 13, Orstom, Paris, 206p.
- Burke, K., 2011. Plate tectonics, the Wilson cycle, and mantle plumes: geodynamics from the top. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 139, p. 1-29. doi: 10.1146/annurev-earth-040809-152521.
- Casey, J.L., Choi, D.R., Tsunoda, F. and Humlum, O., 2016. Upheaval - Why catastrophic earthquakes will soon strike the United States. Trafford Publishing.
- Choi, D.R., 2002. Deep earthquakes and deep-seated tectonic zones. Part 3. Southeast Asia. NCGT Newsletter, no. 25, p. 9-21.
- Choi, D.R., 2005. Deep earthquakes and deep-seated tectonic zones: A new interpretation of the Wadati- Benioff zone. *Boll. Soc. Geo. It.*, vol. spec., no. 5, p. 79-118.
- Choi, D.R., 2017a. Low velocity lenses at the top of lower mantle and a new earthquake model for the Fiji-Tonga-New Zealand region. *NCGT Journal*, v. 5, no. 2, p. 244-254.
- Choi, D.R., 2017b. The great 17 July 2017 offshore Kamchatka earthquake, its link to deep energy source, and geological significance. *NCGT Journal*, v. 5, no. 3, p. 379-390.
- Choi, D.R. and Casey, J.L., 2016. Great deep earthquakes and solar cycles. *NCGT Journal*, v. 4, no. 4, p. 582-595.
- Choi, D.R., Casey, J.L., Maslov, L. and Tsunoda, F., 2013. Earthquake/volcanic activities and solar cycles: Increased Earth core activity since 1990. Space and Science Research Corporation, Global Climate Status Report, September 13, 2013.
- Choi, D.R. and Maslov, L., 2010. Earthquakes and solar activity cycles. *NCGT Newsletter*, no. 57, p. 85-97.

- Choi, D.R. and Pavlenkova, N.I., 2009. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean. Part 5. Global low-gravity belt: an outer ring of the Great Pacific ring structure. NCGT Newsletter, no. 50, p. 46-54.
- Choi, D.R., Rodriguez, R. and Vasiliev, B.I., 2008. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean. Part 2. Regional structural control on the auriferous Tabar-Feni volcanic arc, Papua New Guinea. NCGT Newsletter, no. 4, p. 31-44.
- Choi, D.R. and Vasiliev, B.V., 2008a. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean. Part 1. Mesozoic basins and deep-seated tectonic zones. NCGT Newsletter, no. 46, p. 28-34.
- Choi, D.R. and Vasiliev, B.V., 2008b. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean. Part 4. Geological interpretation of seismic tomography NCGT Newsletter, no. 48, p. 52-60.
- DeKalb, H. F., 1990. *The Twisted Earth*. Lytel Eorthe Press, Hilo, HI, USA. 156p. (See also NCGT Newsletter no. 40, p. 39-41)
- DeKalb, H.F., 2007. Global shear deformations. NCGT Newsletter, no. 43, p. 56-58.
- Foulger, G.R., 2010. Plates vs. plumes. A geological controversy. Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-4051-6148-0.
- Fukao, Y., 1992. Seismic tomogram of the Earth's mantle: geodynamic implications. *Science*, v. 258, no. 5082, p. 625-630.
- Gordienko, V., 2017. Deep-seated processes and seismicity. NCGT Journal, v. 5, no. 2, p. 179-204.
- Gregori, G., 2009. The Earth's interior – myth and science. NCGT Newsletter, no. 53, p. 57-75.
- Gregori, G., 2013. Crustal storms of continental/planetary scale: Earth's battery and Earth's electrocardiogram, internal state, structure, and time variation, endogenous energy production and release, the role of solar modulation, and the "French Revolution" jerk. NCGT Journal, v. 1, no. 2, p. 40-64.
- Harriet, C., Lau, P., Mitrovica, J.X., Davis, J.L., Tromp, J., Yang, H-Y. and Al-Attar, D., 2017. Tidal tomography constrains Earth's deep-mantle buoyancy. *Nature*, <http://www.nature.com/articles/nature24452>
- Kawakami, S., Fujii, N. and Fukao, Y., 1994, *Frontiers of the earth and planetary science*. Jour. Geol. Soc. Japan, v.100, p. I-VIII.
- Meyerhoff, A.A., Taner, I., Morris, A.E.L., Agocs, W.B., Kamenkaye, M., Bhat, M.I., Smoot, N.C. and Choi, D.R., (Ed., Meyerhoff-Hull, D.), 1996. *Surge tectonics: a new hypothesis of global geodynamics*. Kluwer Academic Publishers, 323p.
- O'Driscoll, E.S.T., 1986. Observations of the lineament-ore relation. *Phil. Trans. Royal Soc. London (A317)*, p. 195-218.
- Ohbayashi, M., 2009. Mantle tomographic images. Cited in the frontispiece of Tsunoda, 2009a. Press, F. and Siever, R., 1982. *Earth*, 3rd ed., W.H. Freeman and Company, San Francisco, 613p.
- Pushcharovskiy, Yu.M. and Udintzev, G.B. [ed.], 1970. *Tectonic Map of the Pacific Segment of the Earth*. Scale 1:10,000,000. Compiled by Oceanological Institute and Institute of Oceanology of the Academy of Sciences of the USSR.
- Romanowicz, B., 2003. Global mantle tomography: progress status in the past 10 years. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 31, p. 303-328. doi:10.1146/annurev.earth.31.091602.113555.
- Smoot, N.C., 1999. Orthogonal intersections of megatrends in the Western Pacific ocean basin: a case study of the Mid-Pacific mountains. *Geomorphology*, v. 30, no. 4, p. 323-356.
- Smoot, N.C., 2005. Seamount chains, fracture zones, and oceanic megatrends. *Boll. Soc. It., spec. vol. no. 5*, p. 23-52. (www.uniurb.it/ISDA/guestdata/Volume_speciale_2.zip)
- Tsunoda, F., 2009a. Habits of earthquakes, Part 1. NCGT Newsletter, no. 53, p. 38-46. (Originally published by Kodansha, α -Shinsho, 480-1 C, Y876, 190p., Tokyo, 2009. Jishin-no Kuse, in Japanese)
- Tsunoda, F., 2009b. Quest of habits of earthquakes – Earthquake area of Tokyo and Saitama. In Japanese, no. 62, p. 41- 47.
- Tsunoda, F., 2010a. Habits of earthquakes, Part 2: Earthquake corridors in East Asia. NCGT Newsletter, v. 54, p. 45-56.
- Tsunoda, F., 2011b, Habits of earthquakes, Part 3: Earthquakes in the Japanese Islands. NCGT Newsletter, no. 55, p. 35-65.
- Tsunoda, F., 2016. Origin of the Central Honshu Arc and the Izu Ridge. NCGT Journal, v. 4, no. 2, p. 174-193. Tsunoda, F., Choi, D.R. and Kawabe, T., 2013. Thermal energy transmigration and fluctuation. NCGT Journal, v. 1, no. 2, p. 65-80.
- Udintzev, G.B., Scott, D.P.D., Grnberg, I.S, Lewis, B.T.R., Suyehiro, K, Talwani, M., Uyeda, S. and Zhiv, D.I. (eds.), 2003, *International Geological-Geophysical Atlas of the Pacific Ocean*. Head Department of Navigation and Oceanography, Ministry of Defence of Russian Federation, Moscow/Snkt-Petersburg, 192p.
- Van der Hilst, R.D., 1995. Complex morphology of subducted lithosphere in the mantle beneath the Tonga Trench. *Nature*, v. 374, p. 154-157.
- van Wyk de Vries, M., Bingham, R.G. and Hein, A.S., 2017. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica. Jamieson, S.S.R. and White, D.A (eds.), "Exploration of subsurface Antarctica: Uncovering past changes and modern processes. Geological Society of London, Special Publications, no. 464. <http://doi.org/10.1144/SP461.7>.
- Vasiliev, B.V. and Choi, D.R., 2008. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean, Part 3: structure and composition of the basement. NCGT Newsletter, no. 48, p. 23-51.

太平洋における第四紀金鉱床有望地域としての島弧会合部・ カルデラ／コールドロンおよびその地質学的意義

Island arc junctions and calderas/cauldrons as the promised areas of the Quaternary gold deposits and its geological significance in the Pacific Ocean

Yoshihiro Kubota

Faculty of Science, Niigata University, Japan kubota@env.sc.niigata-u.ac.jp

(久保田 喜裕 [訳])

要旨:“島弧会合部”は複数の島弧や隆起帯／地背斜帯からなる地域である。日本列島の島弧会合部は、北部、中央部、南部の3つの地域に位置しており、本州孤に対して、それぞれ千島（クリル）弧、伊豆－マリアナ弧、琉球弧が交差している。そこでは、鮮新－更新世にかけて、猛烈な火山活動が繰り返し生じ、金鉱脈裂か系を伴うカルデラ／コールドロンが形成されてきた。そのような地帯は、現在も活火山－地熱地帯であり、地震活動が続いている。このような地質現象は、すべてが個々バラバラに生じているのではなく、互いに関連しあっている。

地震波トモグラフィ画像によれば、高異常帯と低異常帯からなる垂直の構造が、‘もぐり込む’リソスフェアプレートである震源面を切って、少なくとも深さ 100–200km にまで根を下ろしている。深さ約 20–50km には、ソーセージやブーディン構造様の低速度レンズが 200km 以上にわたって側方に広がっている。地表下のごく浅部の低速度地点は活火山の直下へ直接連続していることから、マグマないしは溶融層と考えられる。

これらの地質学的特徴は、島弧会合部が異なる構造方向／地背斜の交差部、すなわち、マントルないしは核にまで根を下ろした深部断裂帯であることを示唆している。その地域はマントルのエネルギーが地球表層へ上昇する煙突のような導管部 (conduits) となっている。このメカニズムは、島弧とそれらの会合部はもぐり込みによる圧縮場になるはずのプレートテクトニクスとは矛盾する。

環太平洋における第四紀金鉱床有望地域としての島弧会合部の位置は、太平洋の東西両側に指摘される。それらの場合は、西太平洋の島弧会合部だけでなく、東太平洋の海底断裂帯／海嶺や陸弧の交差部、あるいは陸弧の屈曲部がそれである。

近年、金鉱脈は地震によって形成され、さらに地震の発生は“超臨界水（流体）”の貫入（注入）に関係するという興味ある議論がなされている。“超臨界流体”はこの問題を解く鍵となるであろう。

キーワード: 島弧会合部, 第四紀金鉱床, 深部断裂帯, 激しい鮮新－更新世火成活動, カルデラ, コールドロン, 地震波トモグラフィ

(2017年11月15日受付, 2017年11月23日受理)

1. はじめに

“島弧会合部”は複数の島弧、換言すれば、複数の隆起帯／地背斜帯からなる地域である。日本列島における島弧会合部は、北海道、中部日本、九州において、千島（クリル）弧、伊豆－マリアナ弧、琉球弧がそれぞれ本州孤と交差している（図1；Kubota, 2016）。

鮮新－更新世の高品位金鉱脈は、ここでは“第四紀金鉱床”という、西南日本の南九州、菱刈金山で代表される。鉱脈の生成年代は約 1Ma、産出した金の平均品位は 40g/t、産金量は 1985年～2015年3月で 216.7t である（住友金属鉱山株式会社：<http://www.smm.co.jp/E/>）。

Kubota (1994, 2016) は、第四紀金鉱床の有望胚胎場は環太平洋の島弧会合部におけるカルデラ／コールドロンの縁辺断層系であると指摘した。Choi et

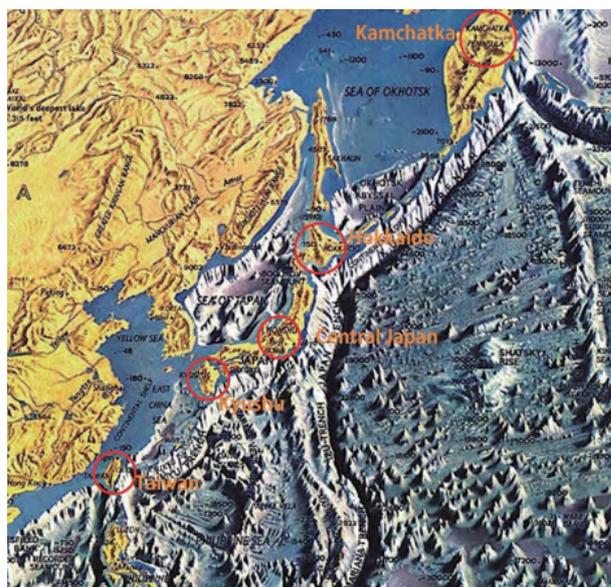


図1. 日本列島および周辺の島弧会合部の位置（赤丸）。Marie Tharp ウェブサイト (http://www.codex99.com/cartography/images/berann/pacific_lg.jpg) の海底地形図による。

al. (2008) は, Tabar-Lihir-Tanga-Feni 火山弧に沿う世界有数の金鉱化地帯, とくにリヒール (Lihir) 島が二つの主要な構造方向の交差部であることを指摘した; Tabar-Lihir-Tanga-Feni 火山弧付近で直交するように走る NE-SW の Cape York-Bismarck Sea 地背斜と NW-SE の深部断裂帯 (Solomon-Fiji 構造帯)。

それでは, なぜ第四紀金鉱床は島弧会合部に胚胎するのであろうか. 本論では, 島弧会合部の地質学的意義について検討する。

2. 日本列島における島弧会合部の地質学的特徴

図2は日本列島における中新世～鮮新世の金鉱床と火山活動場の分布を示している。

中新世を通して, 日本列島は“グリーンタフ”変動と呼ばれる強い海底火山活動の場となり (Ijiri, 1960), 酸性～塩基性噴出物は全体的に緑色に変わるような顕著な変質作用を受けた。

鮮新～更新世の金鉱床胚胎場は, 中新世の金鉱床が分布する“グリーンタフ”地域から, 北海道, 中部日本, 九州といった島弧会合部へ遷移した (Kubota, 2016)。後期鮮新世～前期更新世には, 島弧会合部で安山岩～石英安山岩質の猛烈な火山活動が発生した。安山岩質火山活動は, 溶岩流の表面に平坦面が形成されるもので, とくに“平坦面溶岩”と呼ばれ

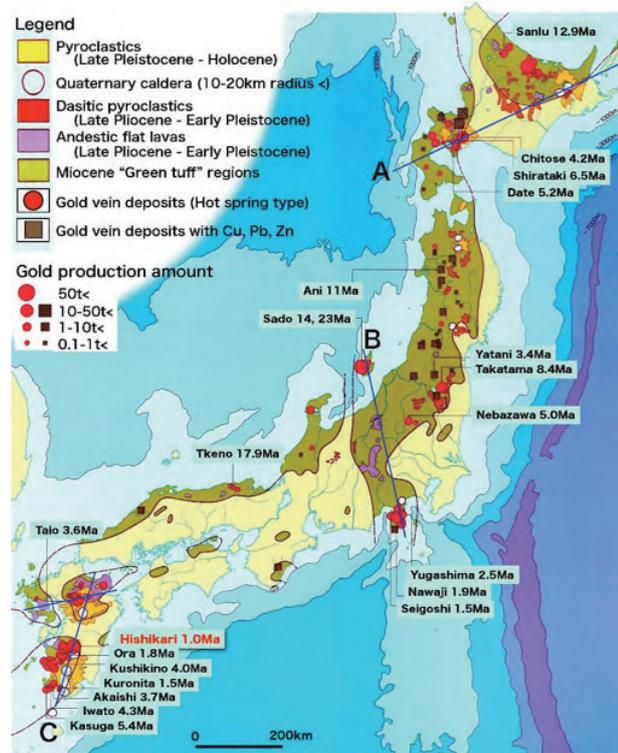


図2. 日本列島における中新世～鮮新世金鉱床の分布. Fujita and Kaseno (eds.) (1988) および Kubota (1994, 2016) から改変. 紫細線は図5の断面線の位置を示す。

ている (Shimazu, 1969)。石英安山岩質の火山活動は直径 10-20km の巨大カルデラを形成した。この一大事変は日本列島の北東部と南西部に集中しており, 中新世のコールドロンが本州弧に集中しているのに対して, きわめて対照的である (図3, 4)。

図3, 4は, 第四紀の地殻垂直変動量とブーゲー異常図に, 鮮新～更新世金鉱床, 活火山 (成層火山), 第四紀カルデラ, 中新世コールドロンの分布をそれぞれ重ねたものである。鮮新～更新世金鉱床と第四紀カルデラは, 主に島弧会合部の弱い隆起域で, かつ強い低異常域に分布している。それとは対照的に, 中新世コールドロンと成層活火山は, 主に強い隆起域で, かつ弱い低異常域に分布している。

3. 討論

1) 島弧会合部と深部断裂帯の地質学的特徴

中新世の火山活動は, “グリーンタフ”地域, コールドロンおよび金鉱床の分布に示されるように, 日本弧の縦走性構造方向, すなわち地背斜軸の方向に沿って発生した (図2)。活火山 (成層火山) も日本弧に沿って直線状に配列している (図3, 4)。このことは, 火山活動の場は, 島弧ないしは地背斜に沿う上部マントルの深さ 100-200km に達する深部断裂帯によって規制されていることを意味している (Suzuki, 1970; Oide, 1989)。

Gorai (1973) は, 安定大陸における新生代の火成作用は, 海嶺と大陸が交差する断裂帯の会合部に発生したと指摘した。

Choi (2002) は, 日本列島を NW-SE 方向に横切る “Susongchon-Lake Biwa-Mariana Islands Tectonic Zone” と名づけたマントルに根を下ろす深部断裂帯を指摘した。その理由として, 日本列島の周辺地域の深さ 450km を超える極深発地震は, 地殻の沈降量が最も顕著である二つの構造方向の会合部で多く発生しているからである。

Choi and Kubota (2015) は次のように指摘した: “二つの直交する断裂方向の会合部は物性的に脆弱な場所になっている。その地域は, 煙突のように, マントルのエネルギーが地球表層へ上昇する導管部を提供している。捕捉・凝集された熱は, 上層の地殻へ上昇し, 構造的鞍部 (カルミネーション: culmination) を形成する。この作用が繰り返し続いた場合には, カルミネーションが形成された地域は陥没しはじめ, リフトや堆積盆地を形成する... マントルにまで発達した深部断裂は, エネルギー遷移の導管部となる。そのエネルギーは, 圧力が解放される地点を見出すまで, 構造的な高所へ移動する。二つないしはそれ以上の断裂系の会合部が発達するような場所では, エネルギー

が捕捉され、煙突状に上昇する。したがって、火成-造構作用によって、鉱床や温泉、地震、火山などが、地背斜軸部やその周辺のあらゆる規模に発達したカルミネーションに集中した。”

Choi et al. (2008) は、パプアニューギニアの Tabar-Lihir-Tanga-Feni 弧 (T-F 弧) に沿う世界有数の金鉱化作用、なかでもリヒール (Lihir) 島について記した。彼らは次のように結論づけた：リヒール島の金鉱化作用は、特徴的な火成活動 (高 K, Mg アダカイト質マグマ) によるとされる。その火成活動は、Cape York-Bismarck Sea 背斜 (C-B 背斜) の

会合部と、それに直交して T-F 弧に隣接して走る NW-SE 方向の地球規模の深部断裂帯 (西太平洋深部構造帯) で生じている。T-F 弧における金鉱床と火成活動の究極の起源はコアに求められるはずだ。

Nagao et al. (1995) は、上述の島弧会合部のひとつ、九州に分布する“平坦面溶岩”と呼ばれる鮮新-更新世の膨大な安山岩質火山活動に対し、“洪水安山岩”の用語を提唱した。彼らはその地質学的な特徴を以下のように述べている：“マグマの連続的な噴出で表わされる厚さ 100-200m の輝石安山岩溶岩。これらの溶岩流は切り立った崖で取り囲まれ

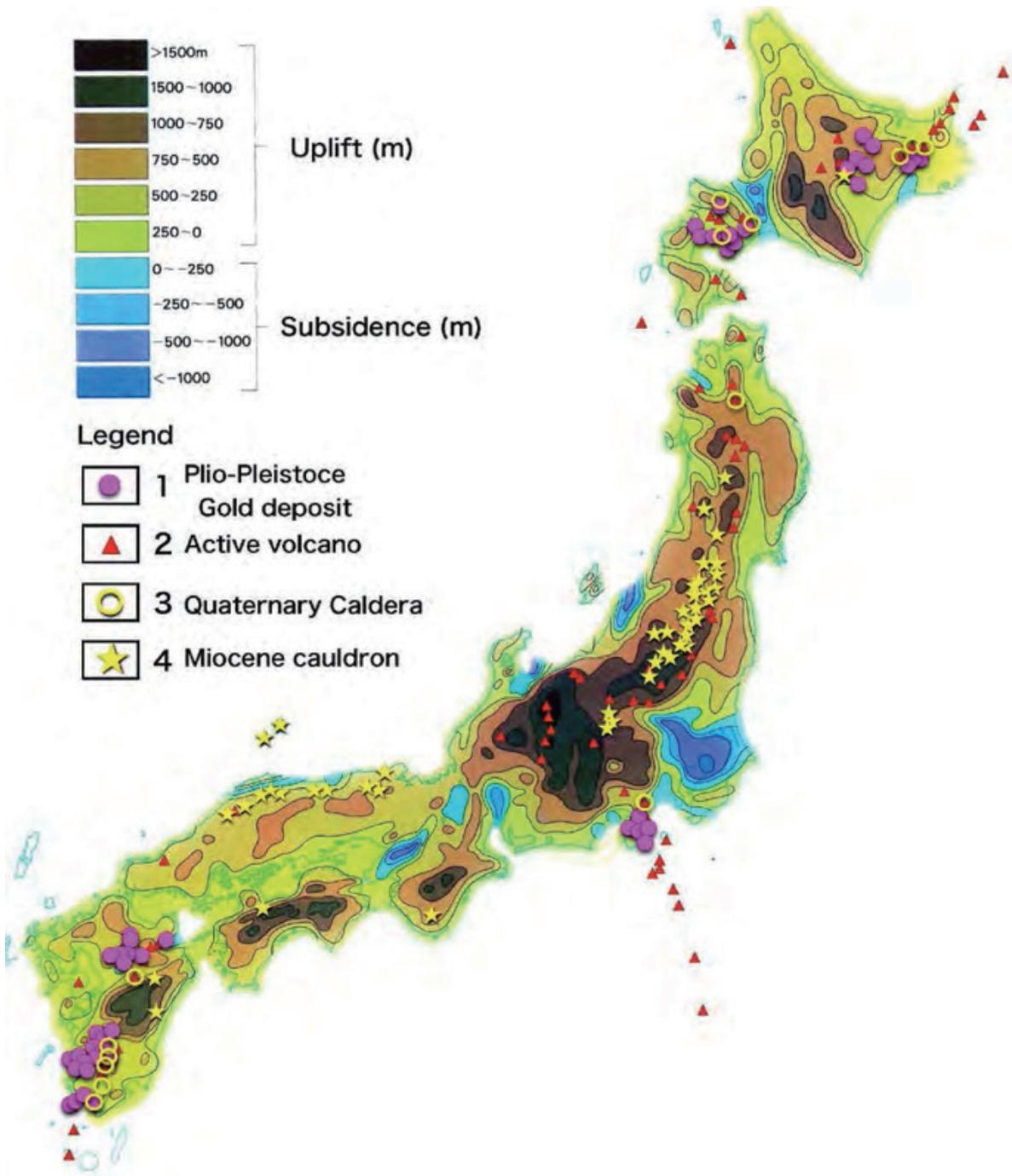


図 3. 日本列島における第四紀の地殻垂直変動量 (鮮新-更新世金鉱床および活火山, カルデラ, 中新世コールドロンを附記). Minato (ed.) (1977), Shilo and Murakami (eds.) (1992), および Kubota (1994, 2016) より改作.

た台地を形成する。溶岩流全体に板状節理がよく発達する。そのアスペクト比、すなわち平均的な厚さと水平の伸びの割合は小さく、溶岩流の頂部と底部はガラス質安山岩からなる。そのような溶岩流は、短期間に割れ目ないしは多くの火口から繰り返し噴火してきたものであろう... 初生安山岩の貫入岩の岩石学・地球化学によれば、これらの安山岩の本源マグマはおそらく上部マントルで生成した高 Mg 安山岩であろう。” また、Nagao et al. (1999) は、西南日本、南九州における鮮新世の肥薩系火山岩類について次のように述べている：高 K 安山岩は、深さ 100km の不均質マントルを上昇してきた 高 K, Mg

安山岩質の本源マグマに由来する。

上述の島弧会合部の地質学特性は、異なる構造方向／地背斜の交差／会合部、すなわちマントルないしは核にまで根を下ろした深部断裂帯を示唆している。そのため、一般的に、第四紀の火成-造構活動によって生成された金鉱床や温泉、活火山-地熱地帯が島弧会合部に集中している。

2) 日本列島の島弧会合部における深部断裂

図 5 は日本列島の三つの島弧会合部—北海道、中部

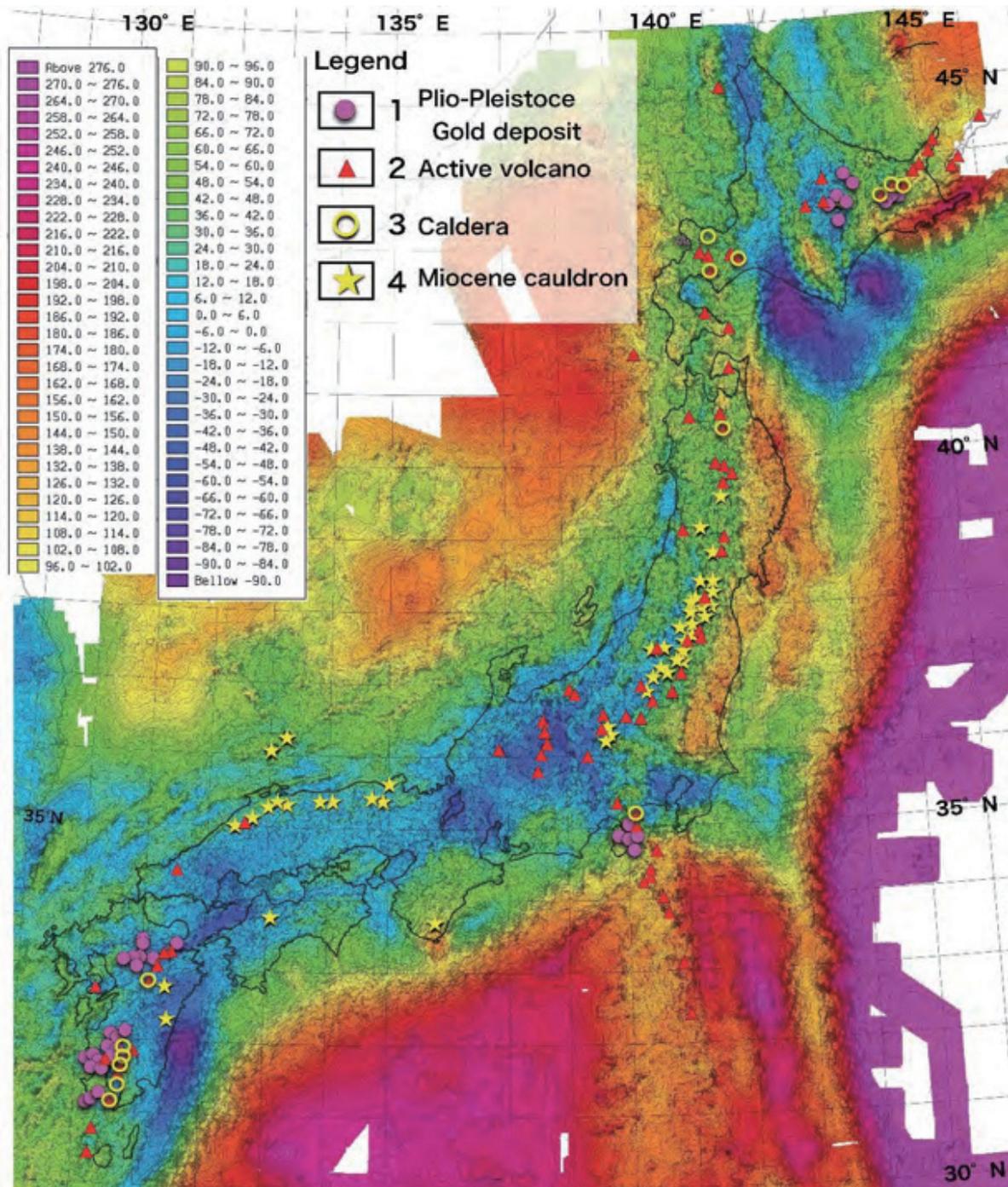


図 4. 日本列島における重力図（ブーゲー異常，推定密度：2.30 g/cm³，鮮新-更新世金鉱床および活火山，カルデラ，中新世コールドロンを附記）. Geological Survey of Japan, AIST (2013), Shilo and Murakami (eds.) (1992) および Kubota (1994, 2016) より改作.

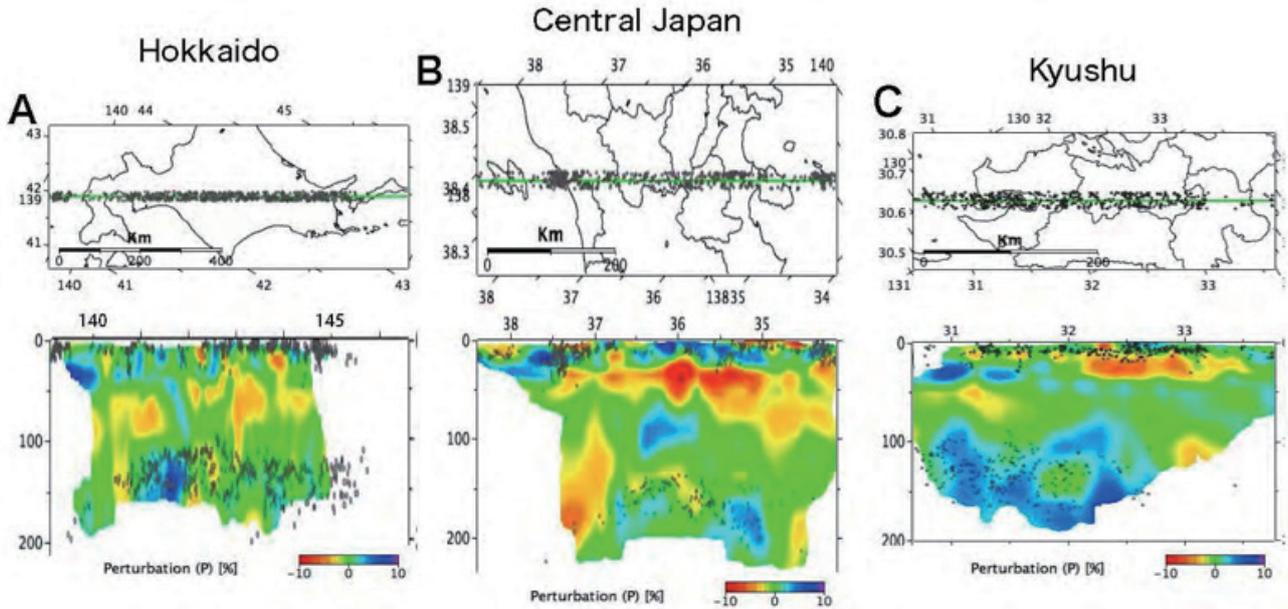


図5. 日本列島の島弧会合部における P 波地震波トモグラフィー, 日本列島下の標準三次元速度構造 (Matsubara and Obara, 2011; http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/sokudo_kozo/software.php?LANG=en). A: 北海道, B: 中部日本, C: 九州. 各画像の縮尺は同一. 断面線の位置は図2に示されている.

日本, 九州における P 波地震波トモグラフィー画像を示している (図2).

高異常域 (青色系) と低異常域 (赤色系) からなる垂直構造は, 'もぐり込む' リソスフェアプレートを切って, 少なくとも深さ 100-200km にまで根を下ろしている. とくに北海道 (図5-A) と中部日本北部 (図5-B) では, 柱状の低速度異常帯が顕著にみられる. なお, 新潟・長野県境の M6.7 地震は, まさに図5-B 左側の深さ 200km から延びる角状の低速度異常帯の直上で発生した (Kubota et al., 2014).

図5-B, C の深さ約 20-50km には (Kubota et al., 2014), ウィンナーソーセージやブーディン構造のような層状の低速度帯あるいは低速度レンズ (Choi, 2017) が 200km ないしそれ以上に側方に広がっている. 地表下の最浅部の低速度異常地点は, マグマないしは溶融体と考えられる.

トモグラフィの速度偏差 (velocity perturbation) の変化は, 熱の変化よりむしろ, マントル中の化学成分の枯渇度に対応しているであろう (Choi, 2004). 高角高速度帯-高速度マントルは, マントルから分化した物質が通る導管の役割としての大規模な深部断裂系と考えられる (Choi, 2004; Choi et al., 2008).

3) 第四紀金鉱床胚胎場からみた島弧会合部の地質学的意義

金鉱床を伴う中新世コールドロンは, 日本弧の縦走方向に沿った深部断裂帯に規制され形成されている (図2, 3). 鮮新-更新世を通して, 安山岩質・閃緑岩質マグマが地殻の中部と下部に貫入し, 貫入され熱せられた中部地殻は肥厚化し, 地殻と大地を隆

起させた; 活火山を伴う帯状隆起部が形成されるが, それは上部地殻中の深部断裂の封圧が解放されることによる (Tsunoda, 2016).

中部本州は東北日本弧, 西南日本弧および伊豆-小笠原弧の三重弧の会合部に位置している (図1). Tsunoda (2016) はまた, 中部本州は原生代のグレンビル変動によって形成された同心円状と放射状の断裂系が交差する地域と述べた. そこでは花崗岩層 (6.0 km/sec) が異常に厚く, 肥厚化した中部地殻が花崗岩層を押し上げている. それは深く切り込まれた深部断裂のため, 大量の花崗岩マグマが上部地殻へなだれ込み, その後モホ面を破壊した.

この地殻変動は, 地殻を肥厚化し, モホ面を押し下げた. 活成層火山が強い低ブーゲー異常域 (図4) になっている大隆起域に位置していること (図3) は, このことが原因である. 第四紀の巨大カルデラは, 島弧会合部の強く隆起した地域から離れた, やや高度の低い地帯に形成された (図3). 第四紀金鉱床は, これらのカルデラの縁辺断層系に形成された. 成層火山体が鉱床をほとんど伴わないのは, 断裂系の形成が少ないためであると判断される. 第四紀金鉱床が伊豆半島を除き, 中部本州にあまり分布していない理由は, 強い隆起のため, 鉱脈が侵食されたからであろう.

4. おわりに

- 環太平洋における第四紀金鉱床の胚胎有望地域に向けて -

上記の討論から, 島弧会合部の地質学的意義は, マントルないしコアにまで根を下ろした深部断裂帯が交差する地域である, と提起される. それのために, 島弧会合部では膨大な火山活動が繰り返し発生し,

火山-地熱地域での金鉱脈裂か系が発達するカルデラ/コールドロンが形成された。これらのすべての地質現象は、個々バラバラに生じたものではなく、すべてが互いに関連しあっている。その意味において、鮮新-更新世のこれらの造構的事象は、“環太平洋変動帯” (Fujita, 1986) に発現した“島弧変動” (Fujita, 1970) が具現化したものである。

環太平洋地域は、“環太平洋地震帯”，“環太平洋火山帯”あるいは“火の輪”とも呼ばれている。近年，Nature / News (2013) は，“地震は金鉱脈を簡単につくる”と題した論文のなかで，金鉱脈と地震との関連について紹介した。この論文によれば，流体中に溶解した金は，地震時の高圧流体の急激な気化（蒸発），“フラッシュ蒸発（flash vaporization）”により，沈殿定着することができる（Weatherley and Henley, 2013）。

このことは，地震と金鉱脈は同様のメカニズムで形成されることを意味している。しかしながら，彼らが指摘したような“地震が金鉱脈をつくる”のではなく，“金を溶解した高圧流体の貫入が地震を引き起こし，裂かを開口させた後の急激な蒸発により，金鉱脈が形成される”とみられる。Tsunoda (2016) および

Choi (2017) は，地震発生の要因として，“超臨界水（流体）”が熱エネルギー遷移に関係していると述べている。このことは非常に重要な指摘である。

“超臨界流体”は，“ブラックスモーカー”，熱水噴出孔のひとつで金属鉱床生成の場所で確認されている：“大洋中央海嶺では，この循環は‘ブラックスモーカー’として知られている熱水噴出孔の出現によってかなり明らかにされている”。これらは，温度 400℃ の流体が噴出し，硫化物や硫酸塩鉱物からなる大きな煙突（高さ数 m）である。この流体は，流体中の熔融金属が沈殿するため，大きな黒煙が立ちのぼる雲のようである。これらの熱水噴出孔地点の多くは深所で超臨界状態に達するようであるが，超臨界流体が海洋底に達し亜臨界（subcritical）になると，十分に冷却されるようである。特殊な噴出孔地点のひとつ Turtle Pits は，噴出孔で短時間に超臨界になることを示している。ほかの地点，Cayman トラフの Beebe では，噴出孔の出口で超臨界を保っていることを示していると思われる（ウィキペディア，https://en.wikipedia.org/wiki/Supercritical_fluid）。

金鉱床と“超臨界流体”との関係について，査読者

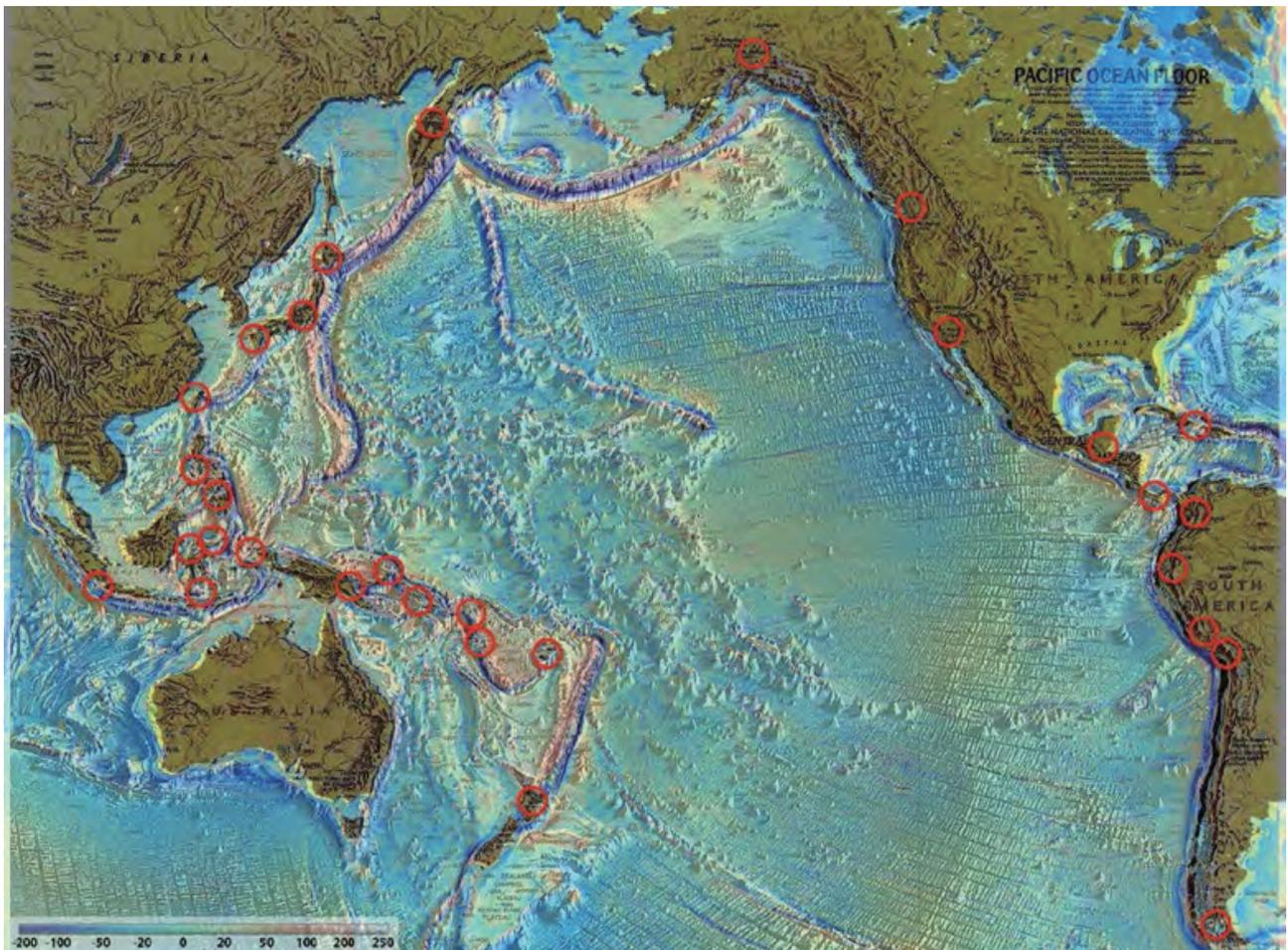


図6. 環太平洋における島弧会合部の位置（赤色円）。NOAA ウェブサイト (http://topex.ucsd.edu/grav_outreach/index.html#natlantiano) の重力画像 (increasing transparency) ならびに Marie Tharp ウェブサイト (図1と同じ) に重ねて表示。

の Louis Hissink 氏から次のような示唆に富んだコメントをいただいた (2017 年 11 月 23 日, 私信): “鉍脈の生成がローカルな膨張などの封圧を解放するドーム隆起を引き起こすような広範囲の応力環境や、鉍化した高温高压流体がほとんど瞬間的に気化 (蒸発) する環境で行われるとしても、実際のところ、その生成メカニズムには疑問が残る。それにはおそらく、プラズマ物理学が鍵となろう。もし地球内部の電氣的蓄積が徐々に起こり、モホ面あるいはその付近で、電氣的反作用によりローカルなドーム隆起が引き起こされるならば、(超臨界鉍化流体は本質的にはプラズマである)、電氣的ローレンツ力が封圧を超え、電氣的末端部 (an electrical tipping point) へ到達すると、過度電流放電が起こる結果となる。それは、さらにドーム隆起と脆性破壊を促進させ、直後に超臨界鉍化流体があらたに形成された裂かを伝って噴出する。それから急激な圧力降下が起こり、金属鉍脈としての溶解物を沈殿するような“瞬間的な”気化 (蒸発) がつづいて起こるのであろう。”

環太平洋地域における第四紀金鉍床胚胎場の有望地域としての島弧会合部は、海底地形図と重力図を手がかりにみると、図 6 に示すように、東西太平洋の両縁が指摘される。そのような場合は、西太平洋の島弧会合部だけでなく、東太平洋の海底断裂帯/海嶺の交差部や陸弧の屈曲域がある。

第四紀金鉍床は、今も大地の下に眠り、我々の探査を待っているにちがいない。

謝辞: 前職の金属鉍業事業団のメンバー、また有益なご助言とご支援をいただいている D. R. Choi 氏、角田史雄氏、矢野孝雄氏ほか、構造コロキウムのメンバーに感謝申し上げます。査読をいただいた Louis Hissink 氏にも併せて御礼申し上げます。

文 献

- Choi, D.R., 2002. Deep-seated faults and deep earthquakes in the northern Pacific. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 23, p. 7-14.
- Choi, D.R., 2004. Deep tectonic zones and structure of the Earth's interior revealed by seismic tomography. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 30, p. 6-13.
- Choi, D.R., Rodriguez R. and Vasiliev B.I., 2008. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean Part 2: Regional structural control on the auriferous Tabar-Feni volcanic arc, Papua New Guinea. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 47, p. 31-44.
- Choi, D.R. and Kubota, Y., 2015. North-south American super anticline. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, v. 3, no. 3, p. 367-377.
- Choi, D.R., 2017. Low velocity lenses at the top of lower mantle and a new earthquake model for the Fiji-Tonga-New Zealand Region. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, v. 5, no. 2, p. 244-254.
- Fujita, Y., 1970. Crustal movements around island-arcs in northwest Pacific since Late Cretaceous. *Island Arc and Ocean*, Tokai Univ. Press, Tokyo, p. 1-30. (in Japanese)
- Fujita, Y., 1986. Uplift and depression –Circum-Pacific disturbance. A Symposium on “Depression and Uplift” – Dialogues between structural geology and applied geology on two hypotheses, Preparation Office for “Research Center of Geo-science”, p. 1-32. (in Japanese)
- Fujita, Y. and Kaseno, Y. (eds.), 1988. Tectonic history in the Japanese Islands. *Japan and its nature*, Heibonsha Co., Ltd., Tokyo, v. 9, p. 67. (in Japanese)
- Gorai, M., 1973. Kasei-sayo (Magmatism). *Kyoritsu Shuppan Co., Ltd.*, Tokyo, 345p. (in Japanese)
- Geological Survey of Japan, AIST, 2013. Gravity map, Gravity database of Japan, DVD Edition.
- Ijiri, S., 1960. “Green Tuff Movement” -Problems of the development of the Japanese Island. *Earth Science*, v. 50-51, p. 6-8. (in Japanese)
- Kubota, Y., 1994. Temporal and spatial relationship and significant of island arc junctions on the late Cenozoic gold deposits in the Japanese Islands. *Mining Geology*, v. 44, no. 1, p. 17-24. (in Japanese with English abstract)
- Kubota, Y., Yoshikoshi, M., Harada I. and Kobayashi, K., 2014. Sagging land form and its formation factor in the southern foot of the Sekita Mountains, Niigata-Nagano border area, central Japan. *Monograph, The Association for the Geological Collaboration in Japan*, v. 60, 143-160. (in Japanese with English abstract)
- Kubota, Y., 2016. Spatial distribution of high grade epithermal Quaternary gold deposits at Japanese island arc junctions and their global implications. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, v. 4, no. 2, p. 194-203.
- Matsubara, M. and Obara, K., 2011. The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate. *Earth Planets Space*, v. 63, p. 663-667.
- Minato, M. ed., 1977. *Japan and its nature*, Heibonsha Co., Ltd., Tokyo, p. 112. (in Japanese)
- Nagao, T., Hase, Y., Ikawa, T., Nagamine, S., Sakaguchi, K., Yamamoto, Shuto, K. and Hayashida, K., 1995. Characteristics of andesites forming lava plateau in Kyushu, SW Japan: proposal of “flood andesite”. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 44, p. 155-164. (in Japanese with English abstract)
- Nagao, T., Hase, Y., Nagamine S., Kakubuchi, S. and Sakaguchi, K., 1999. Late Miocene to middle Pleistocene Hisatsu volcanic rocks generated from heterogeneous magma sources: Evidence from temporal-spatial variation of distribution and chemistry of the rocks. *Jour. of Mineralogical and Petrological Sciences*, v. 92, no. 12, 461-481. (in Japanese with English abstract)

- Nature / News, 2013. <https://www.nature.com/news/earthquakes-make-gold-veins-in-an-instant-1.12615>
- Oide, K., 1989. Kazan to kiban (Volcanoes and its basements). Tsukiji Shokan Publishing Co., Ltd., Tokyo, 204p. (in Japanese)
- Shimazu, M., 1969. Cenozoic crustal movement and development of island arcs. Marine Sciences / Monthly, Tokyo, v. 7, no. 10, p. 14-19. (in Japanese with English abstract)
- Shilo, N. and Murakami, N. (eds.), 1992. Volcanic belts and volcano-tectonic structures of the East Asia (Scale 1:3,000,000). Geological Committee for Mineral resources use of Russian Federation Government Far Eastern Research Institute of Raw Materials (DVIMS); Japan Committee for the compilation of the map of the volcano- tectonic structures in the East Asia; Institute of Geotectonics, Chagsha, China.
- Suzuki, Y., 1970. Seismic evidence of the crust and upper mantle structures in the Japanese Islands and their vicinities. Island Arc and Ocean (Hoshino, M. and H Aoki, H., eds.), Tokai University Press, Tokyo, p. 115-127. (in Japanese with English abstract)
- Tsunoda, F., 2016. Origin of the central Honshu Arc and the Izu Ridge, Japan. New Concepts in Global Tectonics Journal, v. 4, no. 2, p. 174-193.
- Weatherley, D.K. and Henley, R.W., 2013. Flash vaporization during earthquakes evidenced by gold deposits. Nature Geosci. 6, p. 294-298. (<http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1759>)

太平洋北西縁の島弧の地質と、大規模隆起と海水準上昇によるそれらの形成 —駿河湾の形成—

Geology of the island arcs in the northwestern margin of the Pacific Ocean and their formation by a large-scale uplift and sea level rise – the formation of Suruga Bay

Masahiro Shiba

Natural History Museum, Tokai University, 2389, Miho, Shimizu, Shizuoka, Shizuoka, 424-8620, Japan
shiba@dino.or.jp

(柴 正博 [訳])

要旨：駿河湾は、日本で最も深い湾で、40 万年以降に衝上断層をともなう大規模な隆起と海水準の絶対的な上昇によって形成された。地層の形成するためには、地殻の隆起と海水準の絶対的な上昇が必要であり、それは地球の微膨張を意味する。ジュラには海水準は現在より 5,000 ~ 6,000 m 低かった。その後には地殻の隆起と大洋底での洪水玄武岩の噴出による海水準上昇によって地層と地形が形成された。白亜紀から、深成火成活動と環太平洋の大陸縁辺の隆起が始まった。中新世後期には、地殻の隆起によって島弧が形成され始め、現在の地形のほとんどは 40 万年以降の大規模隆起と海水準の約 1,000 m の上昇によって形成された。

キーワード : *large-scale uplift of the crust, sea level rise, expanding Earth, Japanese Islands, the formation of the present topography*
(2017 年 11 月 15 日受付, 2017 年 11 月 23 日受理)

はじめに

私は最近『駿河湾の形成—島弧の大規模隆起と海水準上昇』(Shiba, 2017) という本を出版した。この本は、私の地質学研究の集大成でもあり、本稿はこの本の内容を要約したものである。

駿河湾は太平洋北西縁の日本列島という島弧の中央に位置する (図 1)。駿河湾は日本一深い湾であり、その最大水深は湾口で約 2,500 m で、静岡市の三保半島東沖で 1,500 m の水深がある。駿河湾には、その中央に南北方向に直線的にのびる深く幅の狭い溝地形がある (図 2)。この谷は一般には駿河トラフと呼ばれるが、この谷の地形はトラフではないので、駿河湾中央水道と呼ぶ (星野ほか, 1982)。

駿河湾は、本州の中央を縦断する“フォッサマグナ”の西縁部にある。伊豆半島は東側に、富士山は北側に、日本最大の隆起量をほこる赤石山脈 (南アルプス) は北西側にある。駿河湾の位置は、一般にはいわゆるフィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界と言われ、駿河湾がどのようにできたかを解明することは、地質学の第一級の研究テーマとなっている。

“駿河湾とその周辺の山地がどのように形成されたか?” ということは、駿河湾だけの話ではなく、太平洋の北西縁の島弧全体、すなわち日本列島の形成過程にかかわることである。その解明は、地球全体の大陸と海底がどのように形成されたかを示唆する。

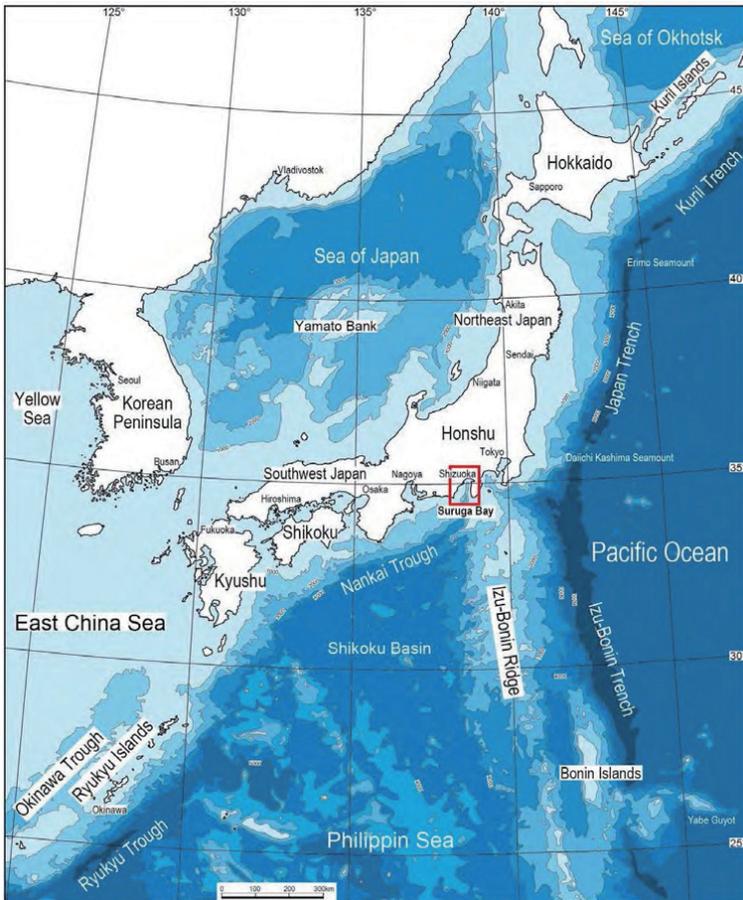


図 1 駿河湾の位置を示す太平洋の北西縁の海底地形図。赤い枠は図 2 の地域を示す。



図 2 駿河湾とその周辺地域の詳細な地形図。この地域は図 1 の赤枠に示される。アジア航測株式会社より提供される。

駿河湾の形成

駿河湾の伊豆側の海底（図2）は、内浦湾をのぞいて駿河湾中央水道に向って傾斜するほぼ一様な陸側斜面からなる。中央水道の西側には石花海堆があり、石花海堆と西岸の大陸斜面との間に約900mの深さの石花海盆がある。赤石山脈から流れる富士川、安倍川、大井川は、駿河湾の中央から西側に注いでいる。

静岡平野の南側に位置する有度丘陵は、30万年前以降に形成されたファンデルタである。このファンデルタは安倍川河口に形成され、そしてそれは大規模な隆起と6回海水準上昇によって形成された（図3）。有度丘陵のファンデルタは大規模な隆起によって形成されたことから、絶対的な海水準降下ではなく、海水準降下は隆起量に相当する。そのため、その時の絶対的な海水準上昇の累積は約900mになる（柴，2016a）。

駿河湾の中の石花海堆の頂上にも安倍川のファンデルタの礫層（下部焼津沖層群）が分布し、その頂上の礫層は約40万年前のものである（図4-A）。このことから、石花海盆は約40万年前以降に海水準に対して相対的に900m沈降したと考えられる。他方、伊豆半島の大陸斜面（水深1,650m）には侵食不整合があり、そしてそれは鮮新世後期から更新世前期の間にそこが陸上であった（図4-Bの侵食面）。駿河湾の大陸斜面の両側は、40万年前以降に約1000m相対的に沈降したと考えられる。

これらの事実から、石花海堆と駿河湾の両岸は40万年前以降に隆起し、そして同時に海水準は約1000m段階的に上昇したと考えられる。その結果、石花海盆は沈水し、石花海堆は孤立した。すなわち、駿河湾は約40万年前から起こった島弧の大規模な隆起運動と約1000mの絶対的な海水準上昇によって形成された。この変動を“有度変動”と呼ぶ（柴，2016a）。

石花海堆の本体は、約180万年前から40万年前に安倍川から供給されたファンデルタ堆積物からなり、それは石花海層群と呼ばれる（図4-A）。石花海堆に石花海層群が堆積していた時代に、庵原層群は富士川の河口のファンデルタとして形成され、小笠層群は大井川の河口のファンデルタとして形成された。この時代にも、赤石山脈が大規模に隆起し、島弧の大陸斜面は埋積されて沖合に陸地が拡大した。また、この時代の最後には日本列島が中国と朝鮮大陸と陸続きになり、そのため日本列島の現在の生物がその間に移住した。この大規模な隆起の時代を“小笠変動”とよぶ（柴，2016a）。

今から約600万年前の中新世末期に海水準は現在より2,000m低く（星野，1962），駿河湾の北部は陸

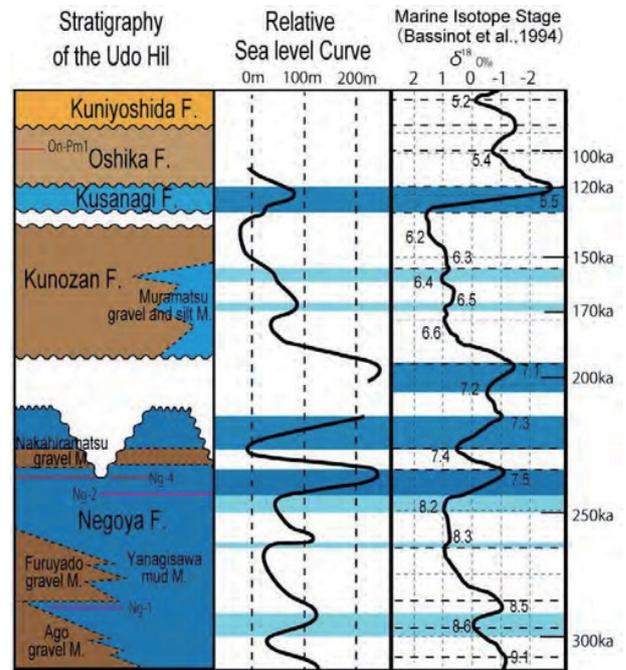


図3 有度丘陵の層序の堆積過程から推定した相対的の海水準曲線と、Bassinot et al. (1994) による酸素同位体比曲線。層序図は柴ほか（2012）を一部改変。Ng-1などは火山灰層。海洋酸素同位体曲線の番号は海洋酸素同位体ステージ（MIS）の番号。Ka:1000年前。F:層群，とM:部層。

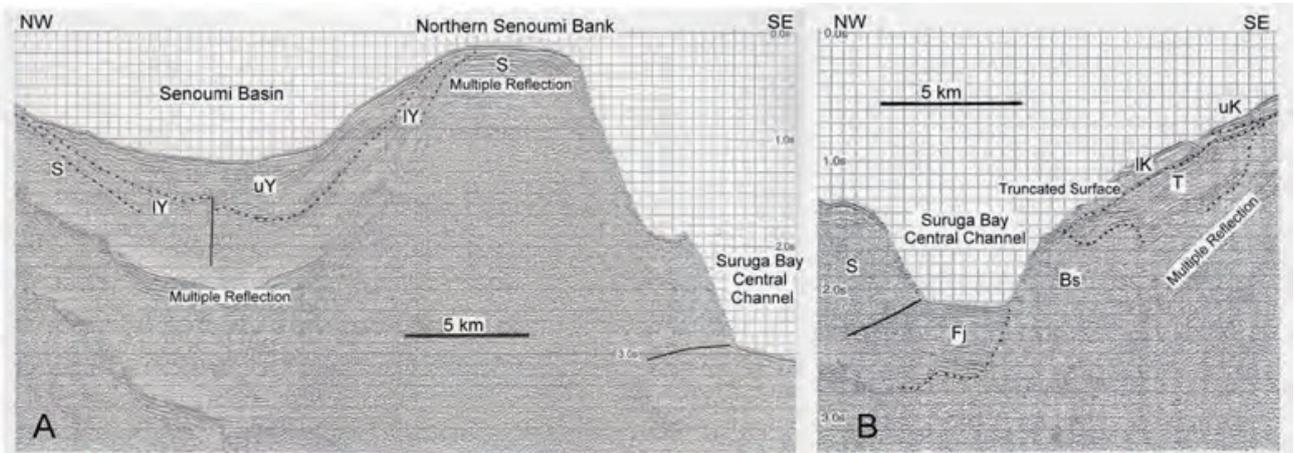


図4 北東から南西の駿河湾の震探断面（岡村ほか，1999）。A:駿河湾の西部，B:駿河湾の東部または伊豆半島の大陸斜面，Bs:基盤，T:土肥層群，S:石花海層群，IY:下部焼津沖層群，uY:上部焼津層群，IK:下部賀茂層群，uK:上部かも層群，Fj:富士沖層群。

上だった(図 5-a). 約500万年前の鮮新世になると、伊豆半島と駿河湾の西岸の陸塊は隆起したが、海水準も上昇した。伊豆半島では浅海に白浜層群が堆積し、駿河湾の北西地域には浜石岳層群が南北に幅のせまく長いトラフに堆積した(図 5-b)。鮮新世後期から更新世前期にかけて、駿河湾西岸と伊豆半島の隆起していて、駿河湾の両岸には陸地が広がっていた。

約180万年前に伊豆半島の北部に海が侵入したが、伊豆半島とその海底斜面のほとんどは陸地だった。そのとき、駿河湾の西側は海底であり、大規模に隆起した赤石山脈から安倍川によって運ばれた砂と礫によってファンデルタが形成された；そして、今から約40数万年前には駿河湾西部の海底は広く埋め立てられた(図 5-c)。その海底を埋め立てられた堆積物が石花海層群にあたる。同じ時期に、駿河湾奥部では庵原層群のファンデルタが形成された。

そして、約40万年前から30万年前の間、安倍川のファンデルタの礫層は石花海堆の山頂に達していた(図 5-d)。石花海海盆は海水準上昇とともに隆起によって東側から西側に段階的に沈水した。その結果、石花海堆は孤立した。約30万年前には、安倍川のファンデルタは現在の有度丘陵に礫層と泥層を堆積させた。その堆積後に、有度丘陵の南側が高まり、北側に傾斜する丘陵が形成された。石花海海盆と駿河湾中央水道は、駿河湾の両岸と石花海堆の隆起にともなう海水準上昇により深い海底となった(図 5-e)。

地層の形成と海水準上昇

私たちは地層から過去の地質時代の記録を知ることができるが、地層はどのように形成されたのであろうか。また、地層はなぜ現在も存在し、そして海底で形成されたものが陸上でも観察できるのであろうか。

地層が形成されるためには、それが陸源性の地層であれば、まずその地層を構成する泥や砂、礫などの(1) 碎屑物の供給が必要である。そして、それが堆積するための(2) 堆積空間が用意される必要があり、そしてそれが(3) 保存され累積されて地層が形成される。

(1) の碎屑物の供給には、後背地の相対的隆起(または海水準の相対的下降)が必要である。加えて、(2) の堆積空間の形成と(3) の地層の累積には地殻の相対的沈降(または海水準の相対的上昇)が必要である。すなわち、地層が形成するには、地殻の相対的隆起と沈降、または海水準の相対的下降と上昇のどちらかが、ほぼ同時に起こらなくてはならないことになる。

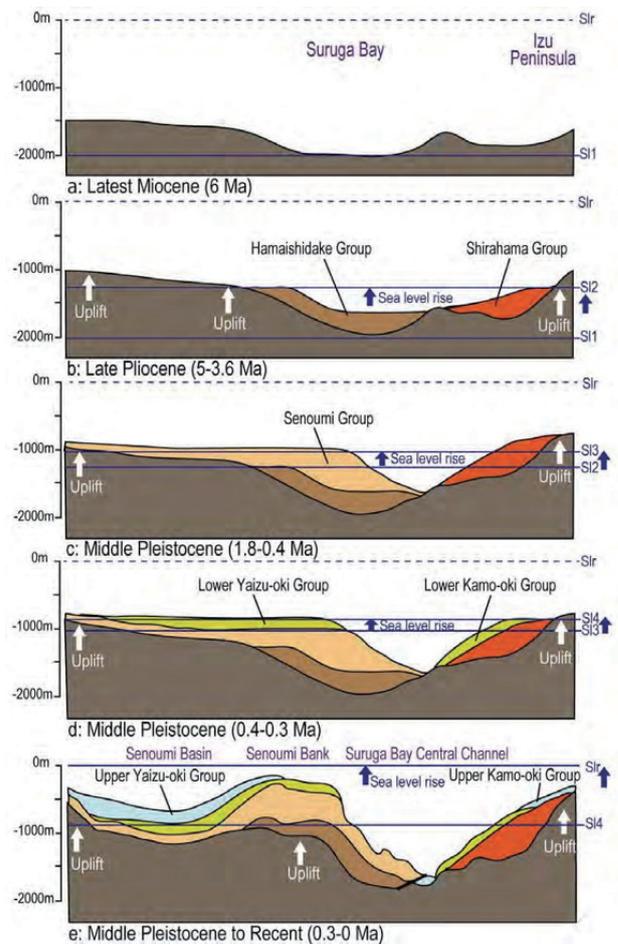


図5 各段階における東西地形断面による駿河湾の形成を示す図。S1は海水準で、S1rは現在の海水準(柴, 2017)。

従来、地質学者は、それを陸側が隆起して海側が沈降するという単純なモデルで説明していた。しかし、海水準は上下に変化するため、陸地と海水準の接合部がつねに地殻の上下変動の境界とはなりえない。また、海底に堆積した地層が陸上にも分布しているが、これは海側の地殻も隆起することを示している。すなわち、陸側が隆起して海側が沈降するという単純なモデルは成立しない。同様に、海水準が陸側では下降し、海側では上昇するというのも矛盾する。

したがって、地層が形成するには、海水準が上昇する間に地殻が隆起するか、または海水準が下降する間に沈降するかはなくてはならない。海水量が一定であれば、海洋底を含む地殻が隆起して海洋底が上昇すれば海水準が上昇して、地球は多少膨張する。反対に、地殻と海洋底の両方が沈降すれば、海洋底も沈降して海水準は下降し、地球は収縮する(図6)。私は、地殻が隆起して海水準が上昇すると信じていて、地球は微膨張(星野, 2014)のように膨張している。

Haq et al. (1987) は、地層がどのように形成したかを一般化した試みを提案した。世界中の大陸棚や大陸斜面での石油探査記録をもとに、彼らは海底の地層の重なりと分布をこまかく調べ、ある地層の連続

した重なるの単位が連続する三つの特徴的な堆積体 (Tracts) から構成されていることを明らかにした。

地層の重なるの一つの単位を、彼らは「シーケンス」、正確には「第三オーダーシーケンス」とよんだ (図7)。そして、それが海水準変動と地殻の沈降によって形成されたと説明した。そして、彼らはそれぞれの第三オーダーシーケンスの海水準の変動量を推定し、それをもとに中生代以降の海水準の変化曲線を提案した (Haq et al., 1987)。このシーケンスによる地層形成モデルは、地殻がほぼ同じ速さで沈降するということが前提条件になっている。地殻が海水準に対して沈降しなければ、海水準変動で形成された地層も削剥されてしまうため、このモデルは地殻の沈降を前提としている。その点でこのモデルは問題があるが、地層の形成を海水準の変化というメカニズムで明確な形で説明したものとして非常に重要である。

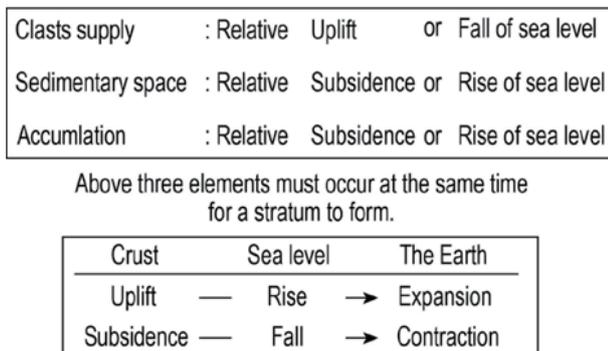


図6 地層を形成させるための隆起と沈降と海水準の変化の関係 (柴, 2016b)。

地層がなぜ存在するのかという謎は、このシーケンスセットによる地層の形成だけではなく、ひとつの海水準変動によって形成された地層の単位 (第三オーダーシーケンスセット) が保存され、さらにその上に新しいシーケンスセットが次々に重なっているという事実があることである。ひとつの海水準変動によって地層が形成されても、それらが保存、すなわち相対的に地殻が沈降しなければ、形成された地層は削剥されて残らないからである。

Haq et al. (1987) は、地層を保存した相対的な沈降をプレートの沈降によるとした。しかし、私は地層を保存した相対的な沈降は、地殻の沈降ではなく、海水準上昇による沈水と考えている。そして、Haq et al. (1987) が海水準降下としたものは、海水準の降下ではなく地殻の上昇であると信じている。Haq et al. (1987) と Vail et al. (1977) の海水準の変化曲線で特徴的なことは、シーケンス境界の海水準降下が曲線ではなく直線になっていることである。このことは地殻の急激な隆起を示すものと考えられる。

私は、Haq et al. (1987) の研究の基礎となった Vail et al. (1977) の海水準変化曲線を用いて、海水準上昇曲線と隆起曲線 (図8) (Shiba, 1992) を作成した。私の海水準上昇曲線は、Vail 曲線の海水準上昇量を累積させることにより作成した。また、私の隆起曲線は、Vail 曲線の海水準降下を隆起として累積することにより作成した。図8によると、ジュラ紀以降の海水準上昇量は約 5.6 km となり、鮮新世以降のそれは約 1,500 m となる。なお、Haq 曲線で同じことを行っても海水準の上昇量は同じだった (図8)。

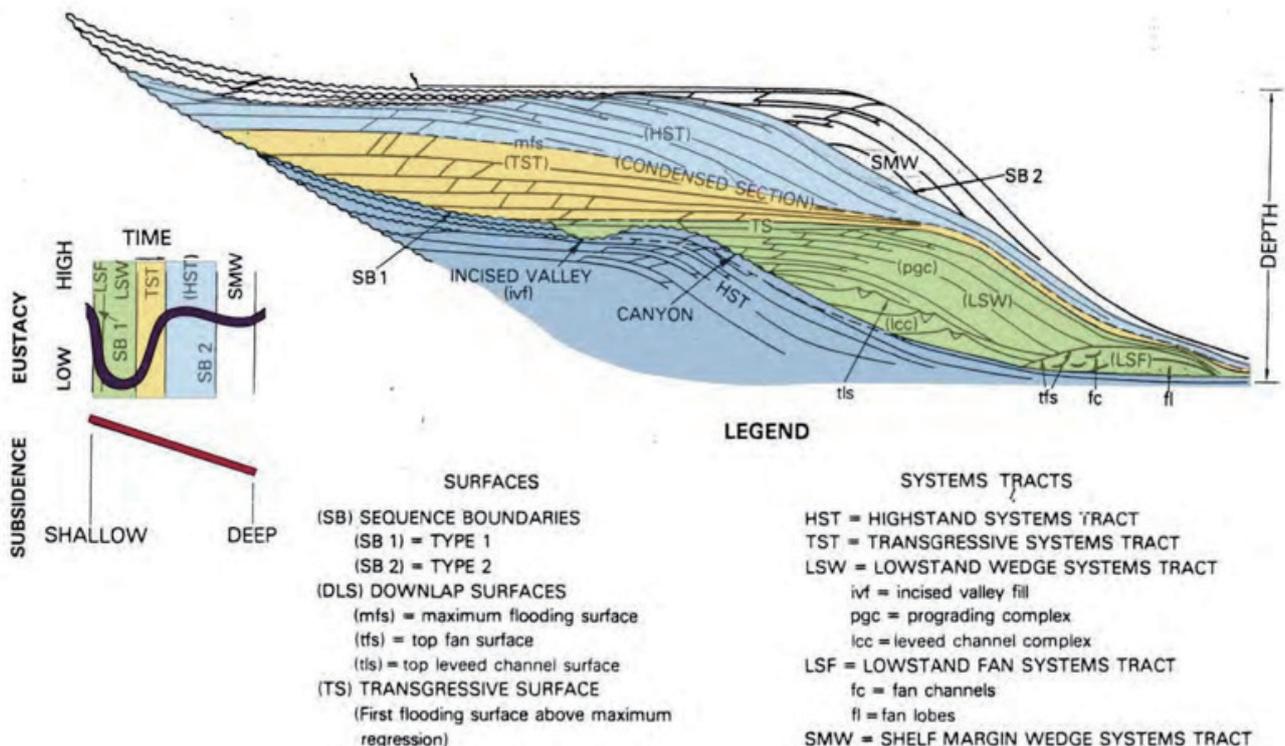


図7 Haq et al. (1987) による第3オーダー堆積シーケンスモデル。

図8で特徴的なことは、鮮新世以降に海水準上昇量が急激に大きくなり、隆起量は中新世末期以降にそれを超えるほどに大きくなっていることである。この隆起量とは、Vail et al. (1977) の調査が大陸や島弧の縁辺の地層を対象としたことから、その地域での隆起量である。もちろん、現在の陸上域では隆起量はより大きかったと思われる、そのために過去に海底で堆積した地層を、私たちは現在、陸上で見ることができる。

堆積シーケンスを研究する多くの堆積学者は、海水準変化の原因を氷期と間氷期のような気候変動に求めている。しかし、世界各地の過去の気候の推定か

ら、更新世前期を含めてそれ以前の中生代以降の地質時代に、更新世後期と同様の規模の大陸氷床が発達した可能性については疑わしい。特に約250万年前の鮮新世以前に、海水準の大規模な変化をとまらぬ氷期を考えることはできない。したがって、更新世前期以前の第三オーダーシーケンスを形成した海水準変化を、気候変動による氷床の拡大と縮小に原因を帰することはできない。

それでは、海水準の上昇がどのようにして起こったのだろうか。中生代以降、地球の表面を構成する地殻の多くの部分が隆起をしている。隆起は、大陸や島弧だけでなく、海嶺や大洋底でも起こった。その

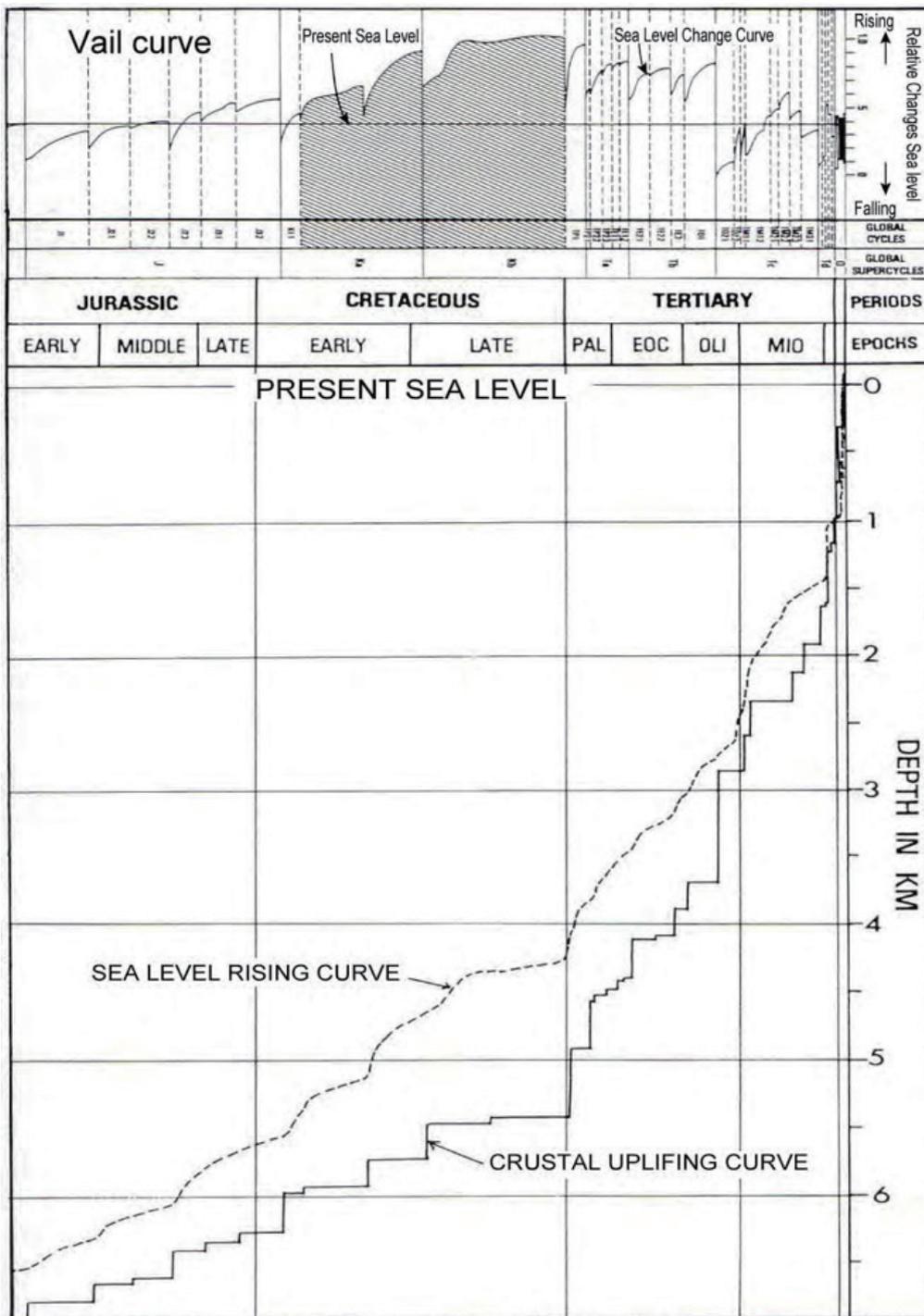


図8 Vail 曲線を用いた海水準上昇曲線と地殻の隆起曲線 (Shiba, 1992). 図の頂部は Vail et al. (1977) の海水準変化曲線である Vail 曲線である。Vail 曲線は、海水準上昇曲線と海水準降下曲線に分けられる。海水準降下曲線は、海水準の下降量を累積して隆起量として地殻の隆起曲線 (折れ線) に置き換えられ、一方海水準上昇曲線は、海水準上昇量だけを累積して作成する。中新世末期以降に隆起量が增大して、海水準上昇曲線を上まわる。

隆起を起こしたものは、アセノスフェア（岩流圏）の上部から由来した玄武岩マグマの活動である。マグマは上部マントルを通して上昇して、マグマはモホ面の上の地殻の中に進入し、または大洋底の上に溶岩として噴出した。大洋底の大洋地殻の厚さが約5 kmあり、ジュラ紀以降の海水準上昇は5 kmと考えられる（星野，1991）。

私は、白亜紀中期（約1億年前）の海水準は現在のそれより約4,000 m低いところにあり、始新世前期（約5000万年前）には約2,500～3,000 m低いところ、中新世末期（約600万年前）には約2,000 m低いところ、そして更新世中期の今から約40万年前には約1,000 m低いところにあったと考える（図9）。

白亜紀中期の海水準の位置は、日本海溝の南端にある第一鹿島海山の現在の山頂水深であり（Shiba, 1993）、始新世前期の海水準の位置は東北日本の大陸棚の古陸の水深（蝦夷堆積盆）であり（安藤, 2005）、ココス海嶺とモザンビーク海峡の海底と同じ水深である。また、中新世後期の海水準の位置は地中海の海底に分布する蒸発岩層の水深にあたる（Hsü et al., 1977）。更新世中期の今から約40万年前の海水準の位置は、駿河湾の石花海盆の水深にあたる。メキシコ湾の深海底は3,600 mの深さがあるが、現在の海水準から約5,000 m下にはジュラ紀後期の岩塩層がある（Uchupi, 1975）。このことから、ジュラ紀後期の海水準は現在より約5,000 mも下にあったと考えられる。

ジュラ紀以降に、海底の底上げ作用によって海水準が上昇し、現在の地形も形成された。海溝は、大陸側と大洋側の上昇からとり残されたところである。大洋底のギョーの山頂水深が、海溝のギョーのそれよりも浅いのは、海溝のギョーが海溝に沈んだのではなく、大洋底のギョーが大洋底ごと隆起したためである。そのため、大洋底のギョーの山頂水深は、場所によって深さが異なっている（図10）。

島弧 - 海溝系の形成

島弧の特徴として、大洋側の前面が海溝で縁どられて、大陸側にあたる背面には縁海または背弧海盆がある。例えば、日本列島の縁海は日本海である。海溝付近から陸の下へ向って斜めに深発地震面（和達—ベニオフ面）があり、島弧の地殻内には活火山列をとまなう浅い地震がある。

駿河湾の中央部から西部にかけての地域は、南海トラフの北側への延長に相当する。このトラフまたは海溝は駿河湾中央水道に相当し、この海溝の外縁隆起帯は石花海堆に、前弧海盆は石花海盆に相当する。南海トラフのさらに北への延長は、駿河湾北部の陸上になるだろう。石花海堆と有度丘陵は南北方向の複背斜構造をもち、有度丘陵は外縁隆起帯の陸上延長部にあたり、有度丘陵の内側にある静岡平野は前弧海盆に相当する。

小笠原群と石花海層群が堆積した時に、それは180万年前から40万年前の時代の間であるが、地殻は

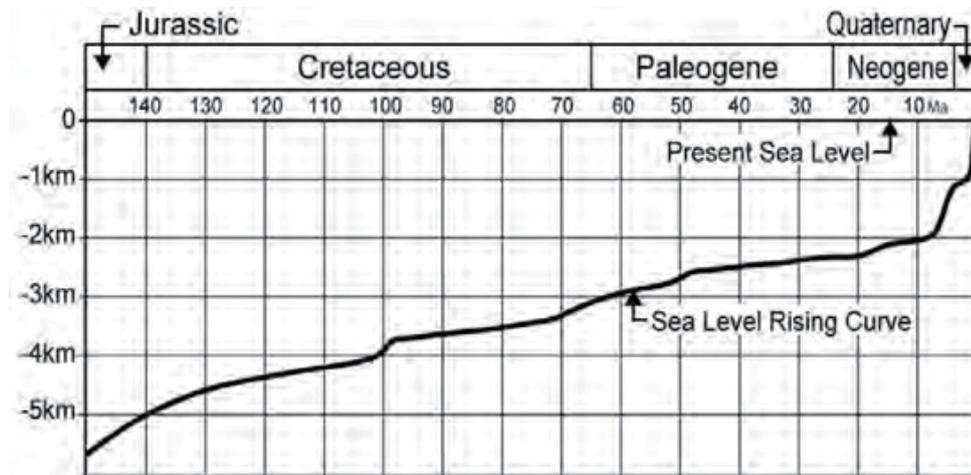


図9 ジュラ紀以降の海水準上昇曲線（星野，1980を参考に作成）。

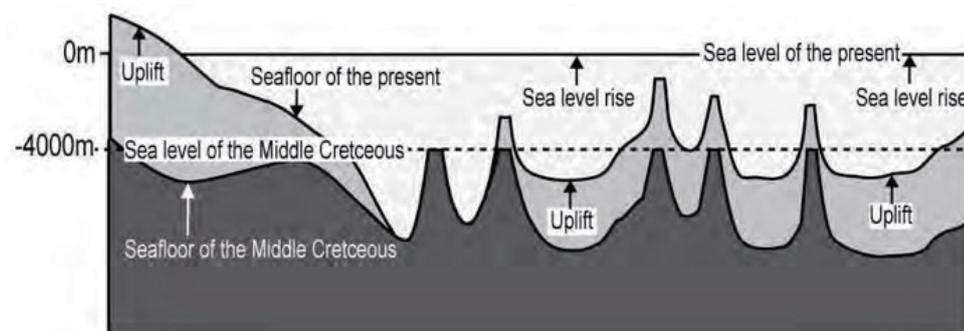


図10 日本海溝から太平洋底にかけての白亜紀中期と現在のモデル化した地形断面（Shiba, 1988）。白亜紀後期以降、島弧と大洋底の隆起は海水準を上昇させ、その結果、白亜紀中期のサンゴ礁はいろいろな深さの頂上のギョーとなって沈んでいる。

大規模に隆起して、陸上では山地や山脈が形成された。そして、川によって山脈を侵食した大量の砂礫が流下して扇状地を形成し、大陸斜面を埋積して陸地を広げた。その時の河口や入江、海岸は、現在の大陸斜面の前面まで達し、そのようなところでは海溝付近まで大量の土砂が堆積した。

その後、今から約 40 万年前以降の時代に地殻の大規模な上昇は起こった。その同じ時に海水準の上昇が起こり、陸地の海側は沈水し、海岸から海溝にかけての地域には急傾斜な大陸斜面が形成された。

井内ほか (1978) は、すでに現在の上部大陸斜面は更新世中期以降に形成されたと述べている。その理由は、更新世中期以降に大陸斜面に堆積した最上部層が現在の地形に調和的であるのに対して、それ以下の地層は不調和に分布しているということである。

プレートが生まれるという中央海嶺や、プレートテクトニクスで説明される島弧や海溝の形成は、地球の長い年月にわたって同じような運動が循環して起こることにより説明ができる。しかし、大陸斜面は更新世中期の今から約 40 万年前以降に現在の地形が形成され始めた。この新しい地殻変動は約 40 万年前以前までの地殻変動とは異なったものである。

ワシリエフ (1991) は、すべての海溝は新しく更新世に形成されたものであると結論している。大陸斜面や海溝など海底の地形を含む現在の山脈や陸上の地形、さらに火山活動は、40 万年前以前には存在せず、またその活動は活発でなかった。最終的にはそれらは 40 万年前以降から形成され、活動を開始したものである。これは地殻の一連の隆起運動と関連したもので、中新世 (約 2300 万年前) から始まった島弧や台地など、特に中新世後期 (約 1100 万年前) に起こった大規模な地殻の隆起運動、そして更新世前期～中期 (180 万～40 万年前) の隆起運動 (小笠変動) の後に起こった、地殻の最も新しい構造運動 (有度変動) である。

海溝の大陸斜面はプレートテクトニクスによれば、大洋底からの付加体によって構成されているとされる。しかし、南海トラフに沿った付加体とよばれる変形した堆積物からなる地層のほとんどは、現在の陸地から運ばれてきた堆積物であり、それらは中新世後期や更新世前期など隆起の時代に顕著である。そして、その付加体の主要な変形は、プレートの海溝に沈みこむ動きに合わせて常に形成されているのではなく、それぞれの地層が堆積している時、またはその直後に形成されている。すなわち、「付加体」とよばれる海溝に沿った変形した地層は、つねに連続して海溝に沈みこむような大洋底のプレートの運動によって形成されたものでなく、島弧の隆起のある限られた時代に形成されたものである。

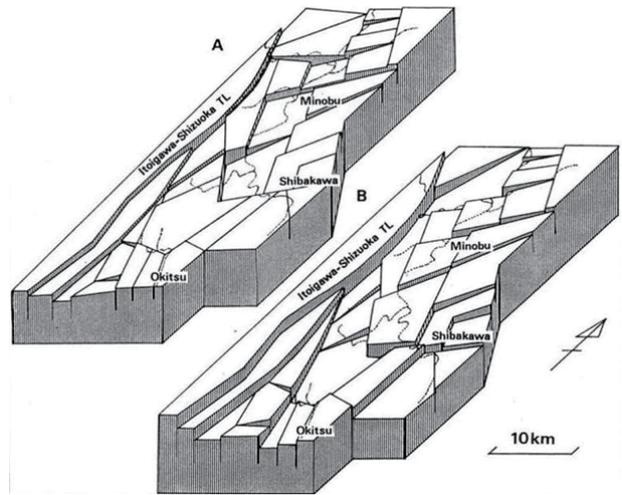


図 11 新生界の褶曲構造から推定した富士川谷新生界の地下の基盤ブロックを南東方向から鳥瞰した図 (角田ほか, 1990)。A は富士川層群の身延層の堆積期 (中新世後期の 850 万年前) のもので、B は富士川層群の飯富層の後期のもの (850 万年前以降)。

さらに、駿河湾奥部の陸側地域は南海トラフの北側陸上延長である。私たちは、陸上の上でその付加体の内部とみられる富士川谷の上部中新統と鮮新統である富士川層群と浜石岳層群を実際に観察し調査した。これらの層群の堆積物は、岩相の変化と複雑な褶曲により特徴づけられ、それは細分された基盤ブロックのそれぞれの隆起により形成された (図 11)。富士川谷の新生界の地質構造は基盤ブロックの隆起運動に支配されている (柴, 1991)。駿河湾奥部の陸側の地質構造が南側の南海トラフに延長しているとすると、付加体の地質構造は基盤ブロックの隆起運動によって形成されていると考えられる。

プレートテクトニクスでは、海溝はプレートが沈み込むところとされている。しかし、島弧などの陸側が大規模に隆起することが明かであることから、むしろ陸側の地殻が大洋側に押し出したと考えるべきである。また、島弧と海溝が対をなして形成し、それにともない現在の地震や火山が発生していることは、島弧と海溝は現在の活動によって形成されたものであることをあらわしている。すなわち、島弧は中新世後期 (今から約 1100 万年前) から形成され始めたことから、海溝も同じようにその頃から形成され始めたものであり、さらに島弧-海溝系にともなう現在の地震や火山活動も中新世後期から始まったことになる。したがって、もしプレートテクトニクスによる地殻変動があるとしても、それは中新世後期から始まったもので、それ以前にはなかったと考えられる。

日本列島の形成と海水準上昇

西南日本弧の地質構造帯をみると、大きく A 帯～D 帯の 4 つに区分できる。それらは、古い時代のものから、A から D 帯である (図 12)。A 帯は、原生累代の岩体と古生代の地層 (①飛驒帯) と石炭紀に

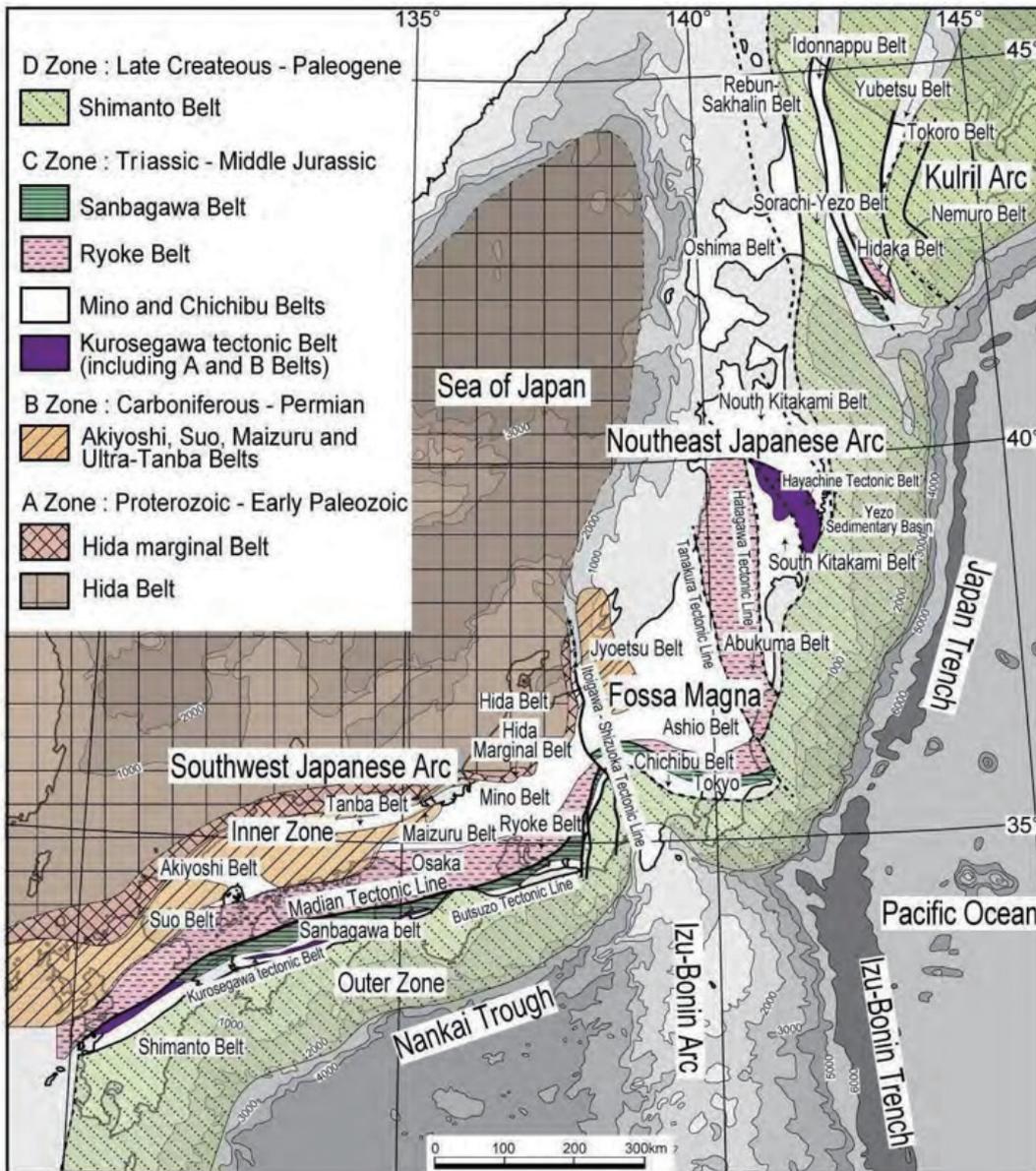


図12 日本列島の地質構造帯（柴, 2017）。日本列島はAからDの4つの地質構造帯から構成される。

変成作用を受けた変成岩（②飛騨外縁帯）からなる。B帯は、③秋吉帯、④周防帯、⑤舞鶴帯、⑥超丹波帯からなる古生代後期の地層からなる。C帯は三疊紀～ジュラ紀中期の地層からなり、内帯（⑦美濃帯）から外帯（⑩秩父帯）に広く分布する。C帯の⑧領家帯と⑨三波川帯は、美濃帯と秩父帯の地層が変成作用を受けた変成岩であり、それぞれ美濃帯と秩父帯に含まれる。D帯は白亜紀後期以降の碎屑岩層からなる⑪四万十帯からなり、外帯に分布する。

西南日本弧と東北日本弧の地質構造帯は、基本的に同じであると私は考える。西南日本弧において、A帯（飛騨帯・飛騨外縁帯）、B帯（秋吉帯など）、C帯（美濃帯・秩父帯など）、D帯（四万十帯）は日本海側から太平洋側に向かって配列している。しかし、東北日本弧においては、三波川帯は不明瞭だが、C帯の領家帯からD帯まで分布する。西南日本において、D帯は現在の陸域に分布するが、東北日本弧においてD帯は太平洋側の大陸斜面に分布する。

西南日本弧でD帯、すなわち四万十帯の北部は、九州南東部から赤石山脈まで、四国南部や紀伊半島南部、赤石山脈から関東山地を含んで連続して分布する。西南日本弧では、中新世中期以降にD帯の北部が隆起して陸域となったが、東北日本弧では陸域とはならず、そのほとんどが海底に横たわったままだった。

東北日本弧のD帯は、蝦夷堆積盆（安藤, 2005）に相当し、そのほとんどは現在の海水準より2,500～3,000 m低いところに分布する。蝦夷堆積盆は、白亜紀後期から古第三紀に沼沢地や蛇行河川が発達した広大な陸地であった。それに対して西南日本弧の四万十帯の堆積物は、海底斜面や海底扇状地に堆積した。すなわち、白亜紀後期から古第三紀のD帯において、東北日本弧が西南日本弧より相対的に隆起していたことになる。しかし、中新世以降には、西南日本弧のD帯は隆起に転じた。東北日本弧では海水準上昇に対して隆起量が小さかったために、東北日本弧のD帯は海中に沈んでしまった。

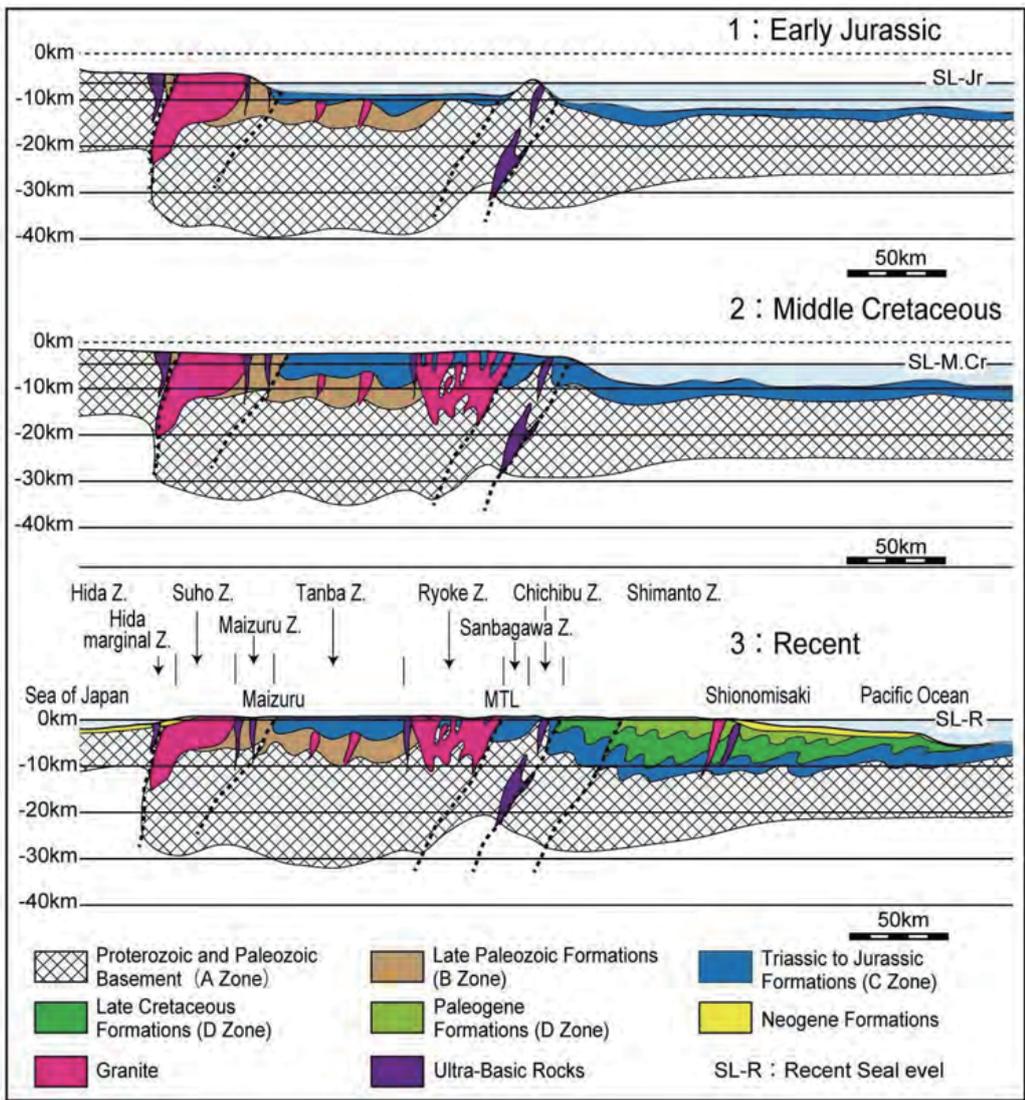


図 13 西南日本弧の地質断面とその形成過程 (柴, 2017). "3: Recent" は, 市川ほか (1970) を参考した. 三畳紀からジュラ紀の地層 (砂岩, 泥岩, チャートと玄武岩溶岩) は, ジュラ紀の付加体とされているが, それらは日本列島から太平洋の大洋底に運ばれたものとそこの堆積物である.

日本海から西南日本弧の隆起は A 帯から D 帯の地質構造に起因している. より若い時代の地層が順番に太平洋側に分布する. 日本海周辺に分布する主に原生累代の岩体からなる A 帯の周辺にシルル紀から石炭紀の古生代前期に浅海があった. A 帯は, 石炭紀の間に起こったバリスカン変動によって隆起した. その後, A 帯の隆起により, 石炭紀からペルム紀の B 帯のサンゴ礁石灰岩のような地層が, A 帯の外側に堆積した. B 帯はペルム紀後期から三畳紀前期に隆起した. 隆起した B 帯に沿って変成岩と火成岩が分布し, 周防帯 (または三郡帯) が形成された.

隆起した B 帯の太平洋側には三畳紀からジュラ紀中期のチャートや泥岩, 砂岩, 玄武岩溶岩 (緑色岩とよばれる) などからなる C 帯がある. この岩石は, 丹波帯, 美濃帯, 秩父帯北帯, 秩父帯南帯などを形成した. C 帯の地層は, 西南日本弧 (図 13-1) と東北日本弧の太平洋側の地質断面における D 帯の白亜紀層群の下におそらく広く分布する. C 帯の堆積物は, 海溝を越えて太平洋の海底に広く分布すると考えられる.

日本海溝の東側の海底はジュラ紀のチャートや玄武岩

からなり, それはプレートテクトニクスでは日本列島からはるかに南東にある東太平洋海嶺で堆積または噴出して日本海溝の東側に移動して来たと考えられている. しかし, 日本海溝の東側の海底の地層は C 帯と同じ時代の地層であり, C 帯の地層はチャートや深海底で噴出した玄武岩溶岩を含んでいる. それ故に, C 帯の地層は付加体ではなく, 日本列島にもともと堆積したものである. ジュラ紀には海水準が今よりも 5,000 ~ 6,000 m 低かったと考えられ, さらに海水準はそこから 1,000 m 以上上昇したと考えられる. ジュラ紀の海進期には陸域からの碎屑物の供給が少なく深海底には赤色軟泥 (赤色チャート) などが堆積した.

白亜紀前期~後期にかけて, 中央構造線 (MTL) に沿った内帯側で花崗岩を形成したマグマ活動が活発になり, それにより中央構造線の内帯側が大規模に隆起した. MTL の内帯側には低圧型の変成岩帯 (領家帯) が形成され, MTL の外帯側には押し出す隆起の圧力により低温 / 高圧型の変成岩帯 (三波川帯) が形成された. 白亜紀前期にも海水準は約 1,000 m 上昇したために, 外帯側は相対的に深い海底となり, 大きな堆積空間が形成された (図 13-2).

白亜紀後期と古第三紀に海水準の上昇量が低下したとき、陸域からの大量の堆積物はその前面の堆積盆地を埋積した。西南日本弧の四万十帯は海底斜面や海底扇状地に形成し、東北日本弧の四万十帯（蝦夷堆積盆）は河川や浅海を含む広大な陸地を覆う堆積物によって形成された。

中新世には、西南日本弧は全体に隆起し始めたが、東北日本弧はほとんど隆起しなかった。その結果、上昇する海水準に対して東北日本弧の太平洋側の陸地は沈水して海底となったが、西南日本弧の太平洋側は隆起して山脈を形成した。また、日本海のお底（日本海盆）は白亜紀後期以降にほとんど隆起しなかったために、その南部を残して沈水して深海底となった。

中新世後期から、島弧の大規模隆起が顕在化して、現在の日本列島のような島弧が出現した。島弧の背骨にあたる脊梁山地が形成され、そしてそれは日本海側と太平洋側を分けた。砕屑物は両側の海域に供給された。太平洋側では海溝斜面までそれらの堆積物が供給された。そのときの海水準は現在より2,000 m低いところにあった。なお、フォッサマグナ南部における西南日本弧の東部の地質構造帯は北側に弯曲しているが、これは南北方向の伊豆—小笠原弧の隆起帯による曲隆のためと考えられる。西南日本弧の北部の北側への弯曲は白亜紀以降には形成されていたと考えられる。

日本列島には大規模な隆起運動は、更新世前期（180万年前）に起こった。すなわち、山脈は隆起して、海岸から大陸斜面にかけて沖積扇状地が形成され、堆積物は大陸斜面下部まで供給された。さらにその後の更新世中期の40万年前以降には、衝上断層が太平洋側に押し出す活動を始めた。それは大規模で急激な隆起活動と、同時に海水準が1,000 m上昇をとめない、現在の島弧—海溝系の地形を形成した（図 13-3）。そして、その活動は継続している。

結 論

駿河湾は、約40万年前以降の衝上断層をともなう大規模隆起と、絶対的な海水準上昇（約1,000 m）の両方の要因によって形成された。結果として、駿河湾中央水道と石花海盆が隆起と海水準上昇からとり残されて沈水した。約40万年前以降から起こった地殻の隆起と海水準上昇により現在の世界の地形は形成された。現在の陸地は海水準上昇よりも隆起しているところで、海底は海水準上昇により沈水したところである。

地層の形成には、地殻の隆起と絶対的な海水準上昇が必要で、それは地球の微膨張を意味する。ジュラ紀には海水準は現在よりも5,000～6,000 mも低いところであり、大陸と海洋の分布は現在のそれとは相当に異なるものだった。その後、地殻の隆起と海底での洪

水玄武岩の噴出による海水準上昇により、地層と地形の形成がおこなわれた。白亜紀から、環太平洋の深成活動により大陸縁辺の隆起が始まった。中新世後期には、地殻の隆起によって島弧が形成され始め、最終的には現在の地形は40万年前以降の大規模隆起と約1,000 mにおよぶ海水準上昇で形成された。

謝辞：本稿の作成にあたり、Dr. Dong R. Choiには出版形式と整えるのに対して支援していただいた。私は、東海大学名誉教授の星野通平博士と、2017年6月24日に東京で開催したB. I. Vasiliev'sの『太平洋の地質構造と起源』の日本語版出版記念シンポジウムの主催者である矢野孝雄博士に勇気づけられた。図2について、その図を作成した千葉達朗氏と特別な使用許可をいただいたアジア航測株式会社に感謝する。

文 献

- Ando, H., 2005. Geologic setting and stratigraphic correlation of the Cretaceous to Paleocene Yezo fore-arc basin in Northeast Japan. *Jour. Japan. Assoc. Petrol. Technol.*, v. 70, p. 24-39. (In Japanese with English abstract).
- Bassinot, F.C., Labeyrie, L.D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackleton, N.J. and Lancelot, Y., 1994. The astronomical theory of climate and age of the Brunhes Matsuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Letter*, v. 126, p. 91-108.
- Haq, B. U., Hardenbol, J. and Vail, P. R., 1987. Chronology of the fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, v. 235, 1156-1166.
- Hoshino, M., 1962. The Pacific Ocean. *Assoc. Geol. Collab. Japan*, 136p. (In Japanese).
- Hoshino, M., 1981. Basaltic stage. *Jour. Marine Sci. Technol., Tokai Univ.*, v. 16, p. 65-68. (In Japanese with English abstract).
- Hoshino, M., Izu, S., Hanada, M. and Anma, K., 1982. Geology of the Senoumi-bank, Suruga Bay. *Jour. Marine Sci. Technol., Tokai Univ.*, v. 15, p. 109-121. (In Japanese with English abstract).
- Hoshino, M., 1991. The Basaltic Stage. *Basic Concept of Geological Science. Tokai Univ. Press*, 456p. (In Japanese with English abstract).
- Hoshino, M., 2014. The History of Micro-Expanding Earth -History of the Earth from viewpoint of Sea Level Rise-. E. G. Service Press, 234p.
- Hsü, K. J., Montadert, L., Bernoulli, D., Cita, M. B., Erickson, A., Carrison, R. E., Kide, R. B., Melieres, F., Muller, C. and Wright, R., 1977. History of the Mediterranean salinity crisis. *Nature*, v. 267, p. 399-403.
- Ichikawa, K., Fujita, Y. and Shimazu, M., 1970. History of Geological Structure Development in the Japanese Islands. *Tsukiji Shokan*, 232p. (In Japanese).
- Inouchi, Y., Okuda, Y. and Yoshida, F., 1978. On the age of

- formation of upper continental slope configuration in the south of the Kii Straits. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 84, p. 91-93. (In Japanese with English abstract).
- Okamura, Y., Yuasa, M. and Kuramoto, S., 1999. Explanatory notes of Geological map Suruga Wan. *Marine Geology Map Series*, 52, Geological Survey of Japan, 44p. (In Japanese with English abstract).
- Shiba, M., 1988. Geohistory of the Daiichi-Kashima seamount and the Middle Cretaceous Eustasy. *Sci. Rept. Nat. Hist. Mus., Tokai Univ.*, no. 2, 69p., 10pls.
- Shiba, M., 1991. The Geological structure of the southwestern part of the south Fossa Magna area – Geology of the Shimizu and Ihara districts in Shizuoka Prefecture, central part of Japan, *Monogr. Asso. Geol. Collab. Japan*, no. 40, 98p., 3maps, 5pls. (In Japanese with English abstract).
- Shiba, M., 1992. Eustatic rise of sea-level since Jurassic modified from Vail's curve. *Abst. 29th IGC (Kyoto)*, v. 1-3, p. 95.
- Shiba, M., 1993. Middle Cretaceous Carbonate Bank on the Daiichi-Kashima Seamount at the junction of the Japan and Izu-Bonin Trenches. *Simo, T., Scott, B. and Masse, J-P., Eds. Cretaceous Carbonate Platform, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, no. 56, p. 465-471.
- Shiba, M., 2016a. How was the Suruga Bay formed? *Jour. Fossil Research*, v. 49, p. 3-12. (In Japanese). Shiba, M., 2016b. The First Study of Paleontology. *Tokai Univ. Press*, 190p. (In Japanese).
- Shiba, M., 2017. Formation of Suruga Bay - Large-scale uplift of arc and sea level rise. *Tokai Univ. Press*, 406p. (In Japanese).
- Shiba, M., Hisamatsu, Y., Okazaki, H., Watanabe, T. and Shiba, H., 2012. Fossil foraminiferal assemblages and the transition of depositional environment of the Middle Pleistocene Negoya Formation in the Udo Hill, Shizuoka City, central Japan. *Sci. Rep. Mus. Tokai Univ.*, no. 11, p. 23-41. (In Japanese with English abstract).
- Tsunoda, F., Shiba, M. and Suzuki, K., 1990. Deformation of the shallow seated crust in the south Fossa Magna - Formation of the non-symmetrical anticlines in the Fuji River Valley -. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 34, p. 171-196. (In Japanese with English abstract).
- Uchupi, E., 1975. Physiography of the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Nairn, A. E. M. and F. G. Stehli, Eds. The Gulf of Mexico and Caribbean*, Prenum Press, p. 1-64.
- Vail, P. R., Michum, R.M.Jr. and Thompson, III S., 1977. Global cycle of relative changes of sea level. In: *Payton, C. E., Ed. Seismic Stratigraphy -Application to Hydrocarbon Exploration. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, no. 26, p. 83-97.
- Vasiliev, B. I., 1991. Main features of the geological structure of the northwest Pacific. Translated by K. Oshide, M. Hanada and M. Ishida, *Earth Science Research Center*, 204p. (In Japanese). [Translated from Васильев, 1988. Основные черты геологического строения север-западной части Тихого океана. Владивосток: ДВО АН СССР, 192с.]

更新世後期の中部地中海における海面変動と高度測定の安定性, サルデーニャを参照して: 現地データと現在の海面水準曲線との間の相違

Sea level changes and altimetric stability in the Central Mediterranean during the Late Pleistocene, with reference to Sardinia: Discrepancy between field data and current global sea level curves

Roberto Mortari

Dipartimento di Scienze della Terra - Università La Sapienza, Roma. roberto.mortari@alice.it

(岩本 広志 [訳])

要旨: 地質学の文献で確立された肯定とは対照的に, 約 125,000 年前の海水準は現在より約 6m 高く, 後に 0m を超える水準はなかったが, 過去の地球では約 128,000 年前の海面は実際には 59m の高さであり, 4,800 年前の 7m であったのに対し, 27 万年前の巨大海進のクライマックスに至ってやや高いという考えが支持されている。一般的な考え方とは異なり、不規則な方法で海面の変化が起こり、約 2,500 年のサイクルに従って、それぞれが急速に下降または上昇する長い停止が起こるのであろう。後期更新世のサルデーニャでは現在の海水準よりも少なくとも 347m 上位に位置し; これらの標高値のトレースは、他の地域では普通に安定的と考えられ、合理性のある垂直方向の動きの影響を受けないという考えを確認する。

地球の各地域の標高値はお互いに非常に遠く離れていても、それは中央海嶺やホットスポットに沿っても、海水準変動の考えを導き、初生的には変形性起源で、副次的には氷河と関係している。

最初の点については、地球の体積変化が原因で、特にティレニア時代を特徴付ける巨大海進が惑星の急速な収縮として説明され、引き続き緩慢な拡張が起こると推定される。

キーワード: チレニアン・ステージ, サルデーニャ, 古海水準, 海底段丘, 海進, 海水準変動, 造山運動の安定性, 地球の堆積変化

(2017 年 10 月 28 日受付, 2017 年 12 月 16 日受理)

地熱エネルギー資源の形成 Formation of geothermal energy resources

Vadim Gordienko, Ivan Gordienko, and Olga Zavgorodnyaya

Institute of Geophysics, National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine tectonos@igph.kiev.ua or
gordienkovadim39@gmail.com

(岩本 広志 [訳])

要旨 : ウクライナの地熱資源の評価手法が、地球の熱流量の強さに関して論じられる。主要な造構領域における熱資源の利用可能性 (密度) が推定される。その埋蔵量は、すべての化石燃料埋蔵量の既知量より 25 倍大きいことが示されている。ウクライナの 3 つの地域は、地熱発電所の建設に適していると分類されている。他の分野では、暖房目的のための費用対効果の高いエネルギー生産が実現可能である。

キーワード : 地球の熱流量, 地熱エネルギー, 地熱資源のアセスメント

(2017 年 10 月 28 日受付, 2017 年 11 月 12 日受理)

パキスタン, バルチスタン州キルギットのナンガパルバット - ハラモシ地塊の地震テクトニクス Seismotectonics of Nanga Parbat - Haramosh Massif, Gilgit, Baltistan, Pakistan

Haleem Zaman Magsi

Department of Mining Engineering, Karakoram International University, Gilgit 15100, Pakistan
dr.magsi@kiu.edu.pk

(矢野 孝雄 [訳])

要旨 : 造構作用は、地殻内部のさまざまな深度層と地表構造の形成要因である。変形強度や流体の有無は、地殻各層内の運動エネルギーの蓄積に影響する。運動エネルギー貯蔵体積 (地震造構容積 [焦点]) と地震爆発の規模は比例する。Nanga Parbat Haramosh Massif の構造運動、深部構造および地震活動の評価は、強変形した地塊は大規模地震の発生に十分な量の運動エネルギーの蓄積には不向きであることを示唆する。したがって、Nanga Parbat - Haramosh Massif の地震活動は低～中程度である。このブロックは、運動エネルギーを放出する深部断層の活動によって制御される。また、Nanga Parbat Haramosh Massif は、地域内の別の地向斜構造を反映する独立した構造单元であると推定される。

キーワード : 地震テクトニクス, 運動エネルギー, 地震発生, 深部構造, 地震造構体積, 物理化学層

(2017 年 6 月 11 日受付, 2017 年 12 月 9 日受理)

2017 年 9 月に発生した M8.1 メキシコ地震における事前の太陽と電磁気の予兆について Solar and electromagnetic signal before Mexican Earthquake M8.1, September 2017

Valentino Straser¹, Gabriele Cataldi², Daniele Cataldi³

¹Department of Science and Environment UPKL Brussels (B). valentino.straser@gmail.com

²Radio Emissions Project, Rome (I). ltpaobserverproject@gmail.com

³Radio Emissions Project, Rome (I). daniele77c@gmail.com

(宮城 晴耕 [訳])

要旨 : 2017 年 9 月 7 日にメキシコのテフアンテペック湾を震央として発生した M8.1 の巨大地震において進行した電磁気と太陽現象について解析した。このデータ解析は、地球規模で発生する巨大地震に先行する地磁気や太陽の予兆を、地震予知の候補としての新しい知識を追加したり、地殻診断のための新しい基礎観測方法を見つけ出すために役立つ狙いがある。地震帯において、地震発生に先行して起こる地殻の運動によるストレス性の岩石変形は、地球表面で地震前に生じた影響を調査できる最も適切な測定可能な変化量である。このメキシコ地震は、最近の地球物理学の歴史においても、また衛星や各国に設置されている追跡ステーションが観測した著しい太陽活動のあとに発生した地震としても最も強いものである。このデータは 2012 年に開始され今日に至る 900 を超える地震活動記録のある M 6+ の他の地震データとも調和している。

本震の前に、3 ヘルツ以下の電波異常がとらえられており、それは著者たちによって、ひどい破壊をとまなう地震の前にいつも現れる現象であることが述べられている。

キーワード : *Earthquakes precursors, Mexican earthquake M8.1, geomagnetic variations, radio anomalies, solar activity*

(2017 年 10 月 10 日受付, 2017 年 11 月 8 日受理)

ダミアン・クライヒガウアーの地球力学上の遺産

The Geodynamic Legacy of Damian Kreichgauer

Karsten M. Storetvedt

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

(杉山 明 [訳])

慣性は自然の基本的な‘法則’の中に位置づけるのがふさわしいが、この慣性の1つの不思議な結果は、ある発見がやっと最終的に認められたときに、しばしば、説得力のある理由で、かつ詳細に、それが通常予想されたことだったと分かることである。

F. C. S. Schiller [1864-1937] - ドイツ生まれの英国の哲学者

要旨:ダミアン・クライヒガウアー (Damian Kreichgauer) 博士 [1859-1940] は、ドイツ生まれの有能なオーストリア人物理学者で、ベルリンの有名なヘルマン・フォン・ヘルムホルツ (Hermann von Helmholtz) 研究所で仕事をした。しかし、わずか33歳のとき、彼は輝かしい学歴を捨てて、オーストリアの聖ガブリエル修道院のステイル宣教師学校の牧師と科学担当教師になることを決意した。彼はそこで、自然科学の教師として広範囲な学科を教えたが、その名は何よりもまず、物理地質学とテクトニクスにおける独自の業績に結びつけられる、例えば1900年の短い論文で、彼は、地球の遠心的加速度の水平成分によって生じるリソスフェアの歪みに関係がある極から遠ざかる力 (pole-fleeing force)、つまり、低速度の上部マントルに浮かんでいると考えられている陸塊が被る (古) 赤道帯に向う正味の力を支持する証拠を初めて示した。クライヒガウアーは真の極移動 (true pole-shift) という現象の科学的基礎を最初に確立した人でもあり、それは‘リソスフェア’が慣性により惑星の回転軸に対して空間的にゆっくり回転する現象であると説明した。彼は、1902年の著書『Die Äquatorfrage in der Geologie (地質学における赤道問題)』で、地球の歴史の特定の時期に、赤道に向かう力が、西に向かう‘地殻の’トルク (ねじりの強さ) を合わせて、実際古赤道に対して、1) それに沿った方向と2) それとは垂直の方向に向かう造構的な配列 (山脈) を作り出したと述べた。このように、彼は物理地質学的パターンを地球の回転の変化に結びつけて考えた。伝統的な地質学的思考では、これは論理的ではあるが、まったく聞いたことのない考えであった。現代では、漂移に靈感を受けた通俗的なプレートテクトニクスモデルが明らかに今後の展望を見失っているため、次世代のグローバルテクトニクスの基礎としてクライヒガウアーの業績を検討する機が熟していると思われる。

キーワード: 造構圏、深部作用、上部マントルにおける熱と物質の移送、活性化の周期性

(2017年10月26日受付, 2017年11月22日受理)

背景

この記事の冒頭の引用文は、新しい発見に対する科学者たちの伝統的な強い抵抗を思い出させるのにふさわしいものであろう; どの時代も、数10年間、ときにはもっと長く科学的進歩を遅らせるほど強力な特定の概念と思考方法にしばしば支配される。古典的な例は、オーストリアの牧師/修道士であり、ブルンの聖トマス修道院のアウグスティノ僧院で科学教師をしていたメンデル (Gregor Johann Mendel [1822-1884]) が行なった植物学的な実験である。修道院の庭で、メンデルは、今では有名な遺伝の法則を導いた豆科植物の特徴の遺伝を研究した。彼の論文“植物交配に関する実験”は、1866年に *Proceedings of the Natural History Society of Brünn* に公表された。 *New World Encyclopedia* によると、メンデルは彼の論文の別刷を40部請求し、その多くを、チャールス・ダーウィン (Charles Darwin) を含むヨーロッパの著名な自然科学者に郵送したが、それに対する手応えはほとんどなく、その後の35年間に、わずか3回しか引用されなかった。メンデルの研究の重要性は、3人の他のヨーロッパの植物学者が1900年に同様な結果を得た後の20世紀前半まで認められなかった。メンデルの遺伝の割合はす

ぐに再現され、今日、科学史における彼の地位は十分確立されている。今日ではメンデルは、一般に“発生の父”と呼ばれている。

もう一人の牧師兼学者が、有能なドイツ生まれのオーストリア人物理学者のダミアン・クライヒガウアー [1859-1940] である。彼はヴェルツブルグとミュンヘンで、数学と物理学を中心とした自然科学を勉強し、1885年に主席で博士号を授与された; 彼の博士論文は、振動する磁石の慣性モーメントを決定する実験的研究に関するものであった (Kraus, 1962 参照)。彼は次の4年間を、パリ



図1. ダミアンの1890年 (31才) の写真。当時、彼は、有名なヘルムホルツ (Hermann von Helmholtz) に率いられたベルリン物理学学校の助教授で副所長だった。

でドイツ委員会の補佐役として過ごし、地球物理 - 測地問題に関する仕事をした。1989年、彼はベルリンのPhysikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR)で研究者のポストを得た。ヴュルツブルグのコールラッシュ (Kohlrausch) 教授が強力に推薦してくれたおかげで、PTRの所長であり当時の指導的な物理学者であったヘルムホルツ (Hermann von Helmholtz) が彼をベルリンのこの新しい権威ある研究所の助教授として雇い入れた。

ベルリンでは、ダミアン・クライヒガウアーは、ヘルムホルツ教授自身をトップとする電気部門に配属された。しかし、僅か1年後にダミアンはPTRの副所長に指名され、それは若い科学者にとっては異常に早い昇進であった。フランス語の知識が優れていたために、彼はすぐにフォーレ (J. Volle) によるフランス語の物理学教科書のドイツ語版の、とくに振り子、秤、万有引力、電気、毛細管現象に関する分野の編集責任者となった。彼は、水銀の電気抵抗の温度係数に関するPTRの出版物にも関わっている。しかし、驚いたことに、ベルリンでのわずか3年後に、彼は前途有望な学歴を捨てて、メーリング (ウィーンの近く) の聖ガブリエル修道院のステイル修道士学校で牧師兼科学教師になった。

彼の伝記作家であるクラウス (Kraus, 1962) によると、ダミアンはメーリング (ウィーンの近く) の聖ガブリエル修道院にとっては幸運な選択となったに違いない自然科学の教授に指名された。ガブリエル修道院でのダミアンの主要な責務は自然科学を教えることであった。学生たちは、神学のカリキュラムに進む前に、自然科学と哲学の2年間のコースを履修しなければならなかった。ダミアン神父は、幅広い関心から、数学、物理学、化学だけでなく、彼がしっかりした学問的背景を持っていた農学、物理地質学、天文学、気象学の課程も教えた。彼のお気に入りの教授題目が、正規の背景を持っていなかったのに彼の生涯の大半にわたって科学的関心の対象となった物理地質学であったことは実に驚くべきことである。

クライヒガウアーの時代のグローバル地質学の状況

19世紀が終わろうとする頃、地質科学は方法と理論にわたる論争にとらわれていた；つまり、テクトニク現象とそれらの関係をつなぐ機能的な理論が明らかに存在しなかったのである。専門職らしい活動は、伝統的には、データの収集、正確なフィールドマッピングと地域的踏査の組み合わせであった。地質学者の大部分にとって、グローバルな理論はほとんど関心を引かなかったが、Chamberlin (1890) はこの姿勢に対して、広い科学的視野を欠いた“無色の観察”と呼んで警告した。原始地球は溶融体として始まり、その後、少なくとも外側は、化学的分化、冷却、固化を被ったと長い間信じられてきた。Elie de Beaumont (1852),

Davison (1887), G. H. Darwin (1887) によると、地球の外殻は、深部がまだ熱を失いつつ、体積が縮小しつつある間、可能な限り冷却した。したがって、熱収縮は表層の造構地形的な特徴を複雑化したが、脆性変形をしている50～100kmの厚さの硬い外殻は別にして、より深い内部は塑性状態もしくは溶融状態にあると考えられた。

この見方に反して、18世紀末に、フランクリン (Benjamin Franklin) は、地球は気体に富んだ内部を有する、つまり、気体は金属より圧縮可能なので、中心の一部には高密度で存在しようと主張し、1世紀後にはGünther (1897) が同様の考えを説いた。地球の歴史に関する混乱に加えてさらに、高い揮発性を有する内部という見方は、天文学的基盤に立ち、高い剛性をもつ全体的に硬い地球という見方を支持する主張を展開したケルビン卿 (William Thomson) により攻撃された。しかしながら、表層の地形は比較的浅いところでの密度変化に対応していることを示唆した1850年代前半のプラット (Pratt) とエアリー (Airy) により考えられたアイソスタシーの原理 (Dutton, 1889) は、伝統的な冷却する地球という仮説に調和的な、固化した地殻の下の極めて浅い深度での液体、もしくは、少なくとも塑性的な層の存在を要求した。いわば高密度の土台に浮かんでいる山脈が信じられていたが、アイソスタシーによる相殺が正確にどの程度達成されているのかは不明のままであった。

19世紀後半の数10年の間、収縮論争の鍵となった人物は、オーストリアの地質学者であるエドアルド・ジュース (Süss, 1885, 1888 and 1901) と米国のジェームズ・デーナ (Dana, 1873, 1881) であったが、地域地質とグローバル地質への2人の基本的アプローチの間には大きな違いがあった。デーナもジュースも、山脈は収縮が作りだした褶曲と地殻の厚化によってもたらされる浮力の産物であると考えたが、19世紀末までに、2つの主要な異形の収縮論は、解決すべきと考えられた問題、すなわち造構帯の起源という難問に遭遇した。顕著な山脈のなかには、ごく最近の地質時代に高くなったものが知られていて (例えば、Russell, 1884), その場合は、前から存在する堆積性トラフ (地向斜) の構造的変形過程が、実際に山脈の隆起に関連している。Bertrand (1887) は地球を横断する褶曲帯を、ヒューロン (先カンブリア), カレドニア, ヘルシニア, アルプスのように、時代によって分類した。しかし、収縮に基礎をおく理論にとって、地球全体にわたる配列とそれらの動力学的関係は謎として残った。もっと正確に言えば、ヨーロッパを横断するカレドニア, ヘルシニア, アルプスの構造帯が、なぜ時代の推移に伴って南に向かって出現したのだろうか? 他の喫緊の課題とともに、収縮に基礎をおく理論は適切に答えることができなかった。

19世紀が終わる頃の放射能の発見は早期の地球が全く冷却しなかったのではないかという疑問を生じさせ、最も重要な地形学的・地質学的問題に対してさえ、さらなる混乱をもたらした。その代わり、アイソスタシーの原理は19世紀末までには山脈を作る理論に発展し、数10年にわたってそれは地質理論の大きな分野の1つであった。山脈をつくるという点では、アイソスタシーを基礎にしたモデルは、機能的なグローバル理論に求められる説明能力がないという事実にもかかわらず、もっと根強い収縮を基礎にした理論に対する真の競争相手になった。垂直方向の動きは疑いもない事実であったが、山脈形成において期待された過程に関連する小さな水平方向の動きは別にして、アイソスタシーモデルと異形の地球収縮モデルのどちらも、何らかの重大な地殻の水平方向の変位の可能性は否定した。

比較的薄い地殻がその下に流動的または塑性的な層を有することは一般に受け入れられたが、主として月の潮汐性トルクによって引き起こされる地殻の慣性的な西向きの変位を認めるほどの想像力の劇的変化はなかった。同様に、天体の回転軸に対して地殻全体が空間的に変位するという意味での古い極移動の概念は、本気で再検討する必要がある。結局、現在の極地域がかつては熱帯～亜熱帯その他であったことを暗示する化石や岩石のデータを証拠とした古気候帯の顕著な変化は、19世紀後半を支配した理論の中では解決されなかった。しかしながら、地殻の‘固定’という根深い考えに反対して、ドイツの地球物理学者が可動的なグローバルテクトニクスで新しい方向を開いた。Löffelholz von Colberg (1895) と Damian Kreichgauer (1902) は、陸塊の相対的な位置を変えることなく脆性の地殻全体が慣性により西向きに変位すると主張した。

極めて不均質な表層の推定される西向きの変位は地球の慣性モーメントの変化を生み出し、それによって惑星体の空間的方位を再配置させようとするであろう。このように、クライヒガウアーは段階的な極移動という観点から、蓄積された古気候の証拠を説明することができた。19世紀の後半には、これは、ヨーロッパでは著名なオーストリアの地質学者であるエドアルド・ジュース - 彼は *Das Antlitz der Erde* (Süss; 1885, 1888, 1901) と題した3冊の大著で、いかなる目立った地殻変位も伴わない地球の熱的収縮を詳細に説明している - に支配されていたグローバル地質学の主流と大きく断絶するものであった。コルベルグ (Löffelholz von Colberg) とクライヒガウアーの可動的な考えにもかかわらず、2人は海洋盆を沈降した大陸地殻とみなしたジュースのグローバルな統合によって少しも影響されることがなかった。

ダミアン・クライヒガウアーの業績

クライヒガウアーの時代のすでに1世紀前に、ドイツの哲学者エルダー (Johann Friedrich Herder) は、彼の著書 *Ideen zur Philosophie der Geschichte der Menschheit* (人間の歴史哲学の考え方) (1784-1791) で極移動の可能性をほのめかし、19世紀後半のLöffelholz von Colberg (1886) やNeumayr (1887) のような何人かの研究者も同様であった。初期の思考はクライヒガウアーの『*Die Äquatorfrage in der Geologie* (地質学における赤道問題)』(1902) に概要が述べられているグローバルな古気候システム (大部分はユーラシアのデータにもとづく) を評価することにより裏付けられた。クライヒガウアーの極移動の古い概念の最初の土台は、20年後にアルフレッド・ウェゲナーと彼の義父であるヴラジミール・ケッペン (Vladimir Köppen) の研究によりさらに実証された (Köppen & Wegener, 1924; Wegeener, 1924/29)。地球の地殻が可動的であるという現在のウェゲナーの見方 - その中で彼は極移動が卓越した概念であることも認めている - が一般的な人気を得ているために、極移動の考えはウェゲナーの創作であるということが広く信じられているが、これは全くの間違いである。ウェゲナーはクライヒガウアーの業績の上に大部分を築いたと言っても過言ではないから、極移動概念を科学的に確証したことに対する栄誉が与えられるとすれば、それはダミアン・クライヒガウアーに対してでなければならぬ。

剛性の地殻に影響を及ぼす (地球の回転によって引き起こされる) 慣性効果と、種々の空間的な方向を含む造構帯の混乱したパターンの中の可能な関係を考えることは、物理学者としてのダミアンにとっては自然だったに違いない。このように、クライヒガウアーは、彼の短い論文 (Kreichgauer, 1900) で、極から遠ざかる力 - 地球回転の動力学とアイソスタシーの原理が組み合わさった効果で、後にエトヴェシュの力と名付けられ (Eötvös, 1913) - を提唱し、それは地球の遠心加速度の水平成分によって引き起こされるとした。この動力的枠組みの中で、低粘性の上部マントルに浮かぶ孤立した大陸は、その時々古赤道帯の方向に正味の造構的な力を受けよう。このように、彼の動力的造構観は、運動が回転と重なる場合には常に生じるコリオリ効果 (Coriolis, 1835) と密接に結びつけられた; この偏向力は回転体の速度に鉛直で、かつ、それに比例した大きさとなる。フーコーの振り子の垂直面におけるゆっくりした回転は、偏向コリオリ効果の項のもう1つの産物である。

硬い地殻にとっては、最も重要な偏向コリオリ項は、南向きの力を生み出す東向きの惑星回転と、西向きの力を生み出す (脆い表層の) 垂直上方への速度変

化に関連するものである。言いかえると、造構的な歪みは古赤道へ、そして西へ向かうであろう。赤道地域で最大の造構効果を有する西向きのコリオリ項は、緯度のコサインに比例するので、北半球の表層地殻は時計回りに、南半球の表層地殻は反時計回りにねじられるであろう。このように、クライヒガウアーの物理的推論では、グローバルな造構的不安定の期間中、運動の赤道方向の力が、当時の赤道帯に沿った褶曲帯（横ずれ圧縮帯として表われる）の配列だけでなく、古子午線方向に沿った褶曲帯（西向きの引張性せん断によって生じる）をもつくりだす。さらに、子午線方向の大規模な剪断帯は、太陽と月による東西方向の潮汐性ねじれから追加的な運動量を受けるであろう。クライヒガウアーの造構スキームでは、子午線方向の‘山脈’は、断層で落ち込み圧縮された赤道方向にほぼ直交する方向のリフト化した剪断帯であり、地球を取り巻く地殻の凹地を構成する。このようにして細長い堆積性トラフ - Hall (1882) の地向斜 - は、1895年の放射能の発見後という時代に、かつての地位をまったく失った地球収縮説に頼ることなしに、多くの褶曲帯の造構変形に先立って、合理的な動力的説明を与えられた。

クライヒガウアーの地質システムでは、（極移動の過程を促すための）地球の慣性軸に求められる変化は、不均質な惑星地殻の赤道方向と西向きの運動によってもたらされ、それは、硬い表層でのゆっくりした西方向への引きずりを生み出す。それに伴った古赤道の相対的な位置の気まぐれな変化は、地球を横切る様々な方向での造構帯をつくりだしてきたであろう。このようにして彼は、観測された惑星の造構システムに伴う様々な時代の古気候学的証拠により、古地磁気データにもとづく現代の極移動曲線に極めてよく似た極移動軌跡を描くことができた。図2は現在の地球（大陸半球）に関連したクライヒガウアーの極の移動を示している。1) 古生代の極は

インド洋の西縁に沿って位置し、当時アフリカでは冷涼な気候であったとする広く知られた事実と調和しており、2) 先カンブリア時代の極移動量は合計すると90度以上の緯度変化になる。

公表された岩石と化石の証拠による古気候のまともな解釈にもとづく、極移動は不可避に見える。動力的理由により、回転軸は慣性の主軸に沿って、もしくはその近辺にとどまって配置されなければならない。ダミアン・クライヒガウアーにとって、正当に固定された回転軸の向きに対する地殻の空間的な再配置が地球の歴史の間に間欠的に生じたということは不可避的な結論となった。言いかえると、推定された地表面上の極の軌跡は、空間に対して周期的に変位してきた地殻がつくりだしたものであった。極移動を支持するさらに新しいデータ - 古赤道を決定する岩石と化石（左図, Wegener, 1929）および古地理的極の位置に関する古地磁気情報（右図, Storetvedt, 1997） - を図3に示す。提示したこれ

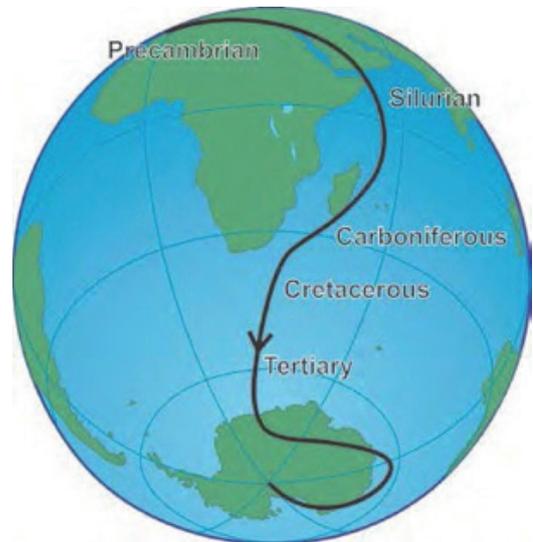


図2. クライヒガウアー (1902). による大陸半球に対する先カンブリア以降の極軌跡を示すダイアグラム.

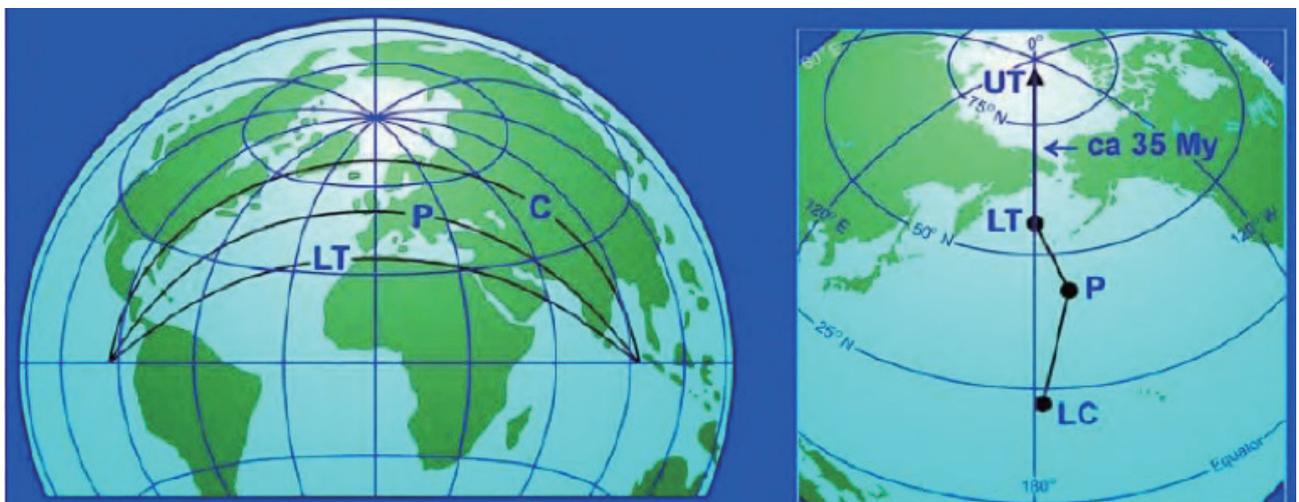


図3. ダイアグラムは現代の古地磁気データにもとづく異なる4時期（石炭紀前期 (LT), ペルム紀 (P), 第三紀前期 (LT), 第三紀後期 (UT)）の極移動軌跡（大洋半球）を示す（右図は Storetvedt, 1997 から）。Wegener (1929) の記述に従った関連のある古気候にもとづく3つの異なる時代の古赤道は：石炭紀 (C), ペルム紀 (P), 第三紀前期 (LT)。

らのデータは、古生代中期以降、地球（もしくはそのソスフェア）が、グリニッジ子午面内の近くでのその極軌跡に応じて、太平洋の方向に段階的に空間的变化を果たしてきたことを示している。

クライヒガウアーの極軌跡（図2）を最近の証拠（図3）にもとづいたそれと比較すると、2つの極軌跡の間での系統的な経度の違いに気が付く；クライヒガウアーは彼の極軌跡をアフリカの東のはずれに置いたのに対し、もっと新しいデータはアフリカの西のはずれに置いている。この不一致の理由は、基本的にユーラシアの古気候データにもとづいたクライヒガウアーのややいい加減な古赤道の位置にある；彼が北米の古気候の証拠に関して明らかに無知であった原因は、彼の明らかな英語力の不足にあると思われる。例えば、彼が南米を横断する石炭紀の古赤道を設定した位置（図4）は、北米が古生代の間に古赤道の気候条件下にあったということが十分確立されているので、理解しがたい。古赤道方向の誤りが、彼の石炭紀の赤道が、自身のグローバルな造構システムにおける基本的な前提である古生代中期の赤道方向に配列する造構帯に沿っていない基本的理由である（図4の石炭紀の赤道と石炭紀のリングの不一致に注目）。彼の古赤道システムの系統的な方位上の間違い（反時計回りに35°前後まで）は、彼の造構システムをシルル紀（の古赤道）に対応させるのをいっそう難しくしている。他方、第三紀の山脈は彼の造構スキームによく適合する。私が見たように、クライヒガウアーが北アメリカに関する古気候の証拠を勘定に入れたなら、極移動現象をより適切に評価する中で、地球回転とテクトニクスを結びつける彼の考えが支持される強力な証拠を得たであろう。

地球内部の不均質な構成に関する現在の知識ともつてすると、極移動を惑星の球体全体の段階的な空間変化と関連づけるのが最も合理的であろう。しかし、クライヒガウアーの時代には、地球深部の理解は全く異なっていたので、地殻の可動性は、その形態がどのようなものでも、外側の硬い層が変形することに原因が求められがちであった。グローバルな造構システムにとっては障害であるということが主張された。いっぽう、クライヒガウアーは、ゆっくりした慣性力は蓄積されたひずみが造構帯で解放されるまで生じると考えた；グローバルな造構的不安定の特別な時期に、力学的な引張が、互いにほぼ垂直な2つの大円上の造構帯 - 圧縮帯としてのそのときの古赤道に沿って走っている - に沿ってそれぞれの縦断面内で解放される。事実、クライヒガウアーは長年の問題、すなわち、1) 造構帯が時間とともに前進すること（古赤道方向に配置されたセット）と、2) 同じ時代の長く伸びた造構帯が直交するという規則性に挑んだ最初の人であった。現代においては、プレートテクトニクスの保護のもとで、褶曲帯のパターンの理解は増々遠ざかってしまった。

クライヒガウアーの業績に対するウェゲナーの反応

造構運動を促すメカニズムに関して、アルフレッド・ウェゲナーのその後の研究は、明らかにクライヒガウアーの1902年の著作に影響を受けた - 彼の大規模の古気候変化とその極移動現象への密接な関連づけに加えて、太陽と月による潮汐性のねじれ、極から遠ざかる力、およびコリオリ効果を考慮したのである。極から遠ざかる力を発見し、極移動を支えるに十分な量の古気候と化石の議論を示したこと

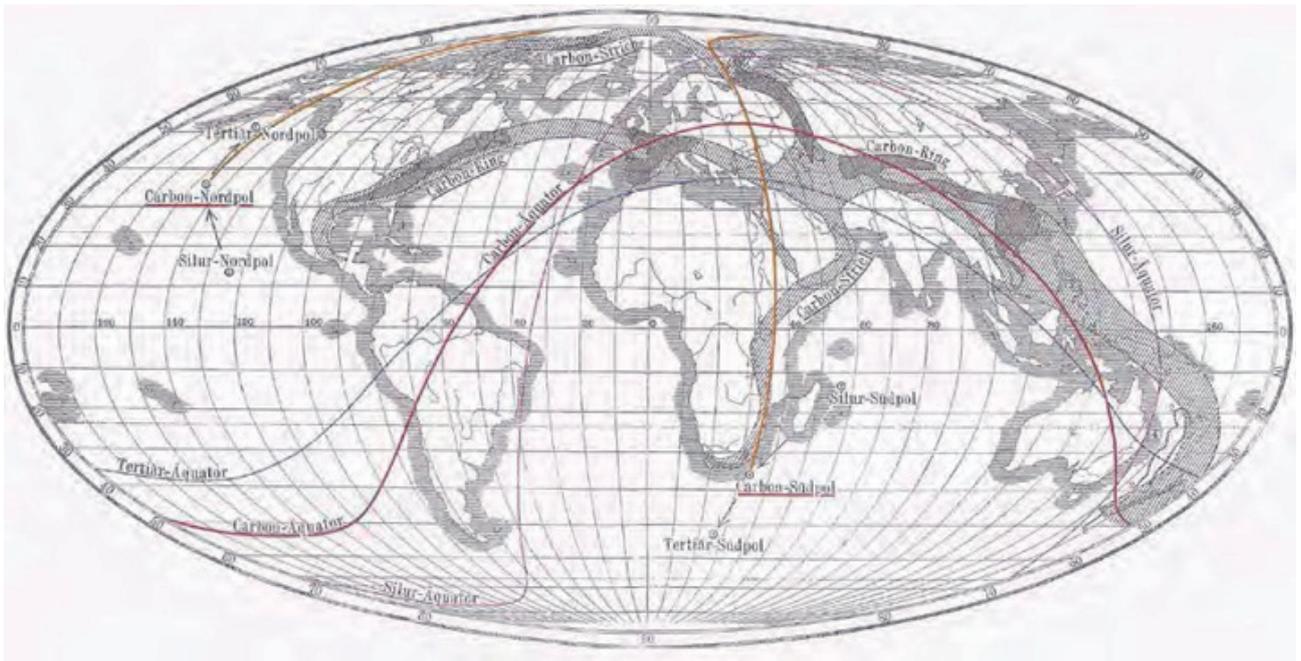


図4. クライヒガウアーの石炭紀の赤道（赤の太線で描き直してある）と褶曲帯に平行すると推定される赤道（石炭紀のリング）；両者の不一致は古気候にもとづく赤道の誤った方向に原因がある。大陸半球と大洋半球のそれぞれに対する推定された極移動のセグメントは薄い赤色で示されている。図は Kreichgauer (1902) による。

に対してウェゲナーがクライヒガウアーの功績を称えたことをウェゲナーは誇ってよい (Wegener, 1924, 1929). 他方, ウェゲナーの大陸移動という考えはクライヒガウアーの大陸固定とはまったく異なる; 彼ら2人は塑性的/形状の上部マントルの上に載る結晶質地殻という共通の見方を打ち立てたが, クライヒガウアーは脆い地殻全体が西向きにねじれに従うと考えたのに対し, ウェゲナーは個々の大陸ユニットが分裂し, 独立して動くことを主張した.

クライヒガウアーが古生代前期以降のテクトニクスに対して広い見方をしたのに対し, ウェゲナーのモデルはアルプス時代の地球 (白亜紀後期~第三紀前期) だけに限られるものであった. ウェゲナーは, グローバルな造構史の残りの部分を軽視し, それにふさわしい地質背景を抜きにして, クライヒガウアーの主要な関心であった幅広い文脈でのグローバルテクトニクスには疎くなったように思われる. それにもかかわらず, Wegener (1929, p. 129) は, クライヒガウアーを, 彼の研究が“気候に対する実際の証拠だけでなく, 山脈の輪郭についても十分実証されていないドグマにもとづいている”と非難した. 私は, この主張に対しては, いかなる正当な科学的根拠も見出すことができない. しかし, ウェゲナー自身の総合については, 彼が, 自分の思い描いたスキームに適合しない重要な観察結果を無視して, 自分の高度に仮定的な大陸移動シナリオを, 選択された古気候データに無理に調和させようと試みたということは議論されて当然である. なぜウェゲナーがクライヒガウアーのグローバルな動力学的造構システムを無視したのかという理由の重要な部分は, 明らかに先入観であった. 事実, ウェゲナーの‘無理に一致’させた結果は, とくに南半球に問題を集中させる結果となり, そこでは南極が気候的な予想を侵害される最前線の地域になった (Storetvedt, 2003, p. 50-56).

おわりに

クライヒガウアーとウェゲナーという2人の独立した地球科学者が, 明らかにお互いに個人的な付き合いをすることが全くなかったということは少々奇妙である. というのは, ウェゲナーは1924年からグラーツ大学の気象・地球物理の教授であり, そこはクライヒガウアーが勤めていたウィーンに近いメーリングの聖ガブリエル修道院からあまり離れていなかったのである. 2人の科学者の間に個人的接触がなかったことは, 年齢の違い (約20才) に加えて, 個性の顕著な違いによるものだったのかもしれない; クライヒガウアーは, できるだけ衆目を避ける静かでどちらかという内向的な人物であった (Kraus, 1962) のに対し, ウェゲナーは自分の考えを公式の講義だけでなくドイツ語を話すヨーロッパの外にも進んで開陳する外向的な人物であった. 例えば, 1920年に, 彼はベルゲンの国際気象

学会に招待され, その間に, 夜, ベルゲン地球物理研究所で自分の大陸移動論について講演をし, その理論に関する自分の最初の本の写しを献呈している (Wegener, 1915).

1912~1929年の間に出版されたウェゲナーの著作は, 主流のグローバル地質学を打ち破るものであり, クライヒガウアーの1902年の著作 (1926年に25%削減されたものが再版された) もそうであった. しかし, ウェゲナーの本が英語その他の国の言語に翻訳され (英語版は1924, 1929, 1966年に出版された), 広く知られるようになったのに対し, クライヒガウアーの本はドイツ語を話すヨーロッパ以外では実質上知られることがなかった. 私に関していえば, ダミアン・クライヒガウアーの業績を知ったのは自分の経歴のどちらかといえば後半であった; 年とともに, 私は, ウェゲナーの本 (1966年の英語版) をざっと読んでいるとき, また, 他の本 (たとえば, Hallam, 1983) をたまたま参照したとき, ついでに彼の名前に出くわしたが, その本の非常に変わったタイトルにはまったく注意を払わなかった.

しかし, 1989年の前半, 私がニューカッスル大学で研究休暇を過ごしている間に, グローバルな古地磁気データベースを再評価し, 地球の回転の特徴を見出し, 極移動イベントおよび/または地球の回転速度の変化がグローバルテクトニクスの重要な引き金になりそうだとすることに気づいた. そして, 何よりも, 大陸間の古地磁気の不一致を説明するにウェゲナーの大陸の水平移動システムは必要とされなかった. 新たなグローバルテクトニクス論へと導いた自分の予期せぬ発見により, 私は以前よりもっと丁寧にウェゲナーの本を読み直すこととなり, この過程でクライヒガウアーの1902年の本のタイトルである *Die Äquatorfrage in der Geologie* (地質学における赤道問題) がすぐに私の注意を引いた; グローバルテクトニクスと地球の回転の密接な関係が私の時代のずっと前に注目を集めていたようだった.

クライヒガウアーの本はニューカッスルや他の地方大学では手に入らず, 後に, 私はそれが伝統的にドイツの学術的世界と密接な関係をもっているスキャンディナビアでさえ入手できないことを知った. しかし, 2001年にインスブルック大学を訪問したときに, 1902年版のコピーをその大学の図書館で入手することができた. 明らかに, クライヒガウアーの研究は彼の生存中は注目を集めなかったが, 私は彼のグローバルな地球物理的考察が自分の考えに密接に関わっていることに気が付いた.

クライヒガウアーの1902年の本は, ウェゲナーが後の彼の古気候と極移動に関するより広範な考察にとって基礎となるテキストの1つであった. クライヒガウアーのグローバルな造構スキームが彼自身の

大陸移動というお気に入りの考えとは調和しないと分かるほど（ウエゲナー側での）深い認識を必要とはしなかったが、ウエゲナーは地質とテクトニクスにおける真の洞察に明らかに欠けていた。このように、明らかに先入観が、ウエゲナーにクライヒガウアーの業績のテクトニックな部分を見捨てさせ、地球の歴史を混乱して理解してしまった理由のたしかな一部であった。

物理地質学に関しては、ウエゲナーの研究はクライヒガウアーのそれより明らかにずっと狭い視野しか持っていなかったが、移動する大陸は明らかにもっと‘ドラマチック’で面白い物語を提供した。おそらく、それだけの理由でウエゲナーの本はいくつかの国の言葉に翻訳され、他方、クライヒガウアーの研究はドイツ語を話す世界を越えて広がることがなかったのであろう。クライヒガウアーの本よりウエゲナーの本が英語に翻訳され、1950年代中頃の英国の古地磁気学者の手に入るという結果になったのはなぜか、不思議に思う人がいるかもしれない。例えば、スコットランドの先カンブリアのトリドニアン砂岩 (Torridonian Sandstone) は、近代古地磁気学研究のごく初期に研究され、半世紀も前に全く異なった証拠にもとづいてクライヒガウアーが確立した当時の古赤道にほぼ一致する場所にあったという結果を出している。事実、これは当時の指導的な古地磁気学者であったランコーン (Keith Runcorn) にとって、極移動の概念を支持するための必要な‘弾薬’となりうるものであった - というのは、初め彼はウエゲナーの大陸の水平移動に賛成していなかったからである。

謝辞：私にダミアン・クライヒガウアーの生涯と業績を裏付ける資料を提供して下さった彼の大叔父であるハノーバーのクルツ・クライヒガウアーに深甚の謝意を表す。また、技術的に助けて下さったクリーヴランド (Frank Cleveland) と孫のマキシム (Maxim) にも感謝する。

文 献

Bertrand, M., 1887. La Chaîne des Alpes et la formation du continent européen. Bull. Soc. Geol. France, 3rd series, v. 15, p. 423-447.
 Coriolis, G., 1835. Sur les équations du mouvement relative des systèmes de corps. J. Éc. Polytech. Paris. Cahier XXIV, Tome XV, 142.
 Chamberlin, T.C., 1890. The method of multiple working hypotheses. Science, v. 15, p. 92-96.
 Dana, J.D., 1873. On some results of the earth's contraction from cooling, including a discussion of the origin of mountains and the nature of the earth's interior. Am. J. Sci., 3rd series, v. 5, p. 423-443.
 Dana, J.D., 1881. The continents always continents.

Nature, v. 23, p. 410.
 Darwin, G.H., 1887. Note on Mr. Davison's paper on the straining of the earth's crust in cooling. Phil. Trans. Roy. Soc. London, v. A178, p. 242-249.
 Davison, C., 1887. On the distribution of strain in the earth's crust resulting from secular cooling, with special reference to the growth of continents and the formation of mountain chains. Phil. Trans. Roy. Soc. London, v. A178, p. 231-242.
 Dutton, C.E., 1889. On some of the greater problems in physical geology. Bull. Philos. Soc. Washington, v. 11, p. 51-64.
 Elie de Beaumont, L., 1852. Notice sur les Systemes des Montagnes. Paris, P. Bertrand, Vols. I-III.
 Eötvös, R., 1913. Verhandlungen der 17th Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung, part 1, p. 111.
 Günther, E., 1897. In: Handbuch der Geophysik. Stuttgart. Paper not seen – referred to in Kreichgauer (1902).
 Hall, J., 1882. Contributions to the geological history of the North American continent. Proc. Am. Ass. Adv. Sci., v. 31, p. 29-71.
 Hallam, A., 1983. Great Geological Controversies. Oxford, Oxford Univ. Press, 182p.
 Kraus, P.J., 1962. Siegburg, Veröffentlichungen des Missionspriesterseminars St. Augustin, no. 9, 120p.
 Kreichgauer, D., 1900. Water and Earth. Natur und Offenbarung, v. 46, p. 30-31.
 Kreichgauer, D., 1902. Die Äquatorfrage in der Geologie. Steyl, Missionsdruckerei, 394p.
 Köppen, W. and Wegener, A., 1924. Die Klimate der geologischen Vorzeit. Berlin, Gebrüder Bornträger, 256p.
 Löffelholz von Colberg, C., 1895. Die Drehung der Erdkruste in geologischen Zeiträumen. Munich, book not seen. Referred to in Wegener (1929).
 Neumayr, V.K.U.M., 1897. Erdgeschichte, 2nd Ed., Leipzig, Bibliographisches Institute (book not seen).
 Russel, I.C., 1884. A geological reconnaissance in southern Oregon. U.S. Geol. Surv., Forth Annual Report, 435-464.
 Storetvedt, K.M., 1997. Our Evolving Planet. Bergen, Alma Mater (Fagbokforlaget), 457p.
 Storetvedt, K.M., 2003. Global Wrench Tectonics. Bergen, Fagbokforlaget, 397p.
 Söss, E., 1885, 1888, 1901. Das Antlitz der Erde. 3 vols. Vienna, F. Tempsky.
 Wegener, A., 1915. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 144p.
 Wegener, A., 1924/1929 (1966). The Origins of Continents and Oceans. London, Methuen, 248p. (1966 issue).

NCG ジャーナルについて ABOUT THE NCGT Journal

グローバルテクトニクスの新概念ニュースレター（現在の NCGT ジャーナルの前身）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" 後の討論にもとづいて生まれた。その名称は、1989 年にワシントンで開催された第 28 回万国地質学会に連携してワシントンのスミソニアン研究所でひらかれた先行するシンポジウムにちなむ。NCGT ニュースレターは、2013 年に NCGT ジャーナルに改称された。2017 年 3 月には、NCGT ジャーナルの発行が商業化された。

目的は次のとおりである：

1. 地質学, 地球物理学, 太陽・惑星物理学, 電子宇宙学,
- 天文学, 気象学, 海洋学, ならびに, コアから大気圏外縁までの地球にかかわる物理的諸作用に密接に関係しているその他の研究分野における新しい考え方と研究を自由に交流する国際的な討論の場を提供する。
2. 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独創的な考え方にあわせる。
3. そのような研究成果を掲載・出版するための学術基盤を設ける。とくに検閲と排除が行われている領域において。
4. 破局的地震の予知に予知に貢献する優れた方法と概念の交流を進めるための出版の場を創造する。既存の通信網では疎外されてきたそのような考え方と研究成果を討論するためのフォーラム。

NCGT ジャーナル (英文版) のインターネット購読について

NCGT Journal (英文) は ONLINE Journal で, インターネット上で自由に閲覧できました。現在は有料となっており, Abstracts だけ自由に閲覧できます。英文版各号をインターネットでご購読希望の方は, 下記ウェブサイトからお申し込み下さい。3 種類のメニューがあり, いずれもクレジットカード払いになります。

NCGT ジャーナルのインターネット購読のお申し込み → <http://www.ncgtjournal.com/subscriptions.html>

- | | |
|---|-------------|
| ■ 1-year subscription for 2018 with a bonus of December 2017 issue (total five issues). | \$30 |
| 2018 年の 1 年間購読料 (2017 年 12 月号が無料で, 全 5 号分) | 購読料 30 米ドル |
| ■ 3-year subscription from 2018 to 2020. 13 issues including December 2017 issue. | \$81 |
| 2018 ~ 2020 年の 3 年間購読料 (2017 年 12 月号が無料で, 全 13 号分) | 購読料 81 米ドル |
| ■ 5-year subscription from 2018 to 2022. 21 issues including December 2017 issue. | \$120 |
| 2018 ~ 2022 年の 5 年間購読料 (2017 年 12 月号が無料で, 全 21 号分) | 購読料 120 米ドル |

ご不明の点などは, 日本語版発行チームの連絡先へおたずねください。