

海洋掘削によるプレートテクトニクスの証明

Verification of the Plate Tectonics theory by deep sea drilling

斎藤 常正*

*Tsunemasa Saito**

1997年9月29日受付.

1998年1月8日受理.

* 東北大学大学院理学研究科地圏環境科学科.

Institute of Geology and Paleontology, Graduate School of Science, Tohoku University
Sendai 980-0845, Japan

E-mail: tsaito@dges.tohoku.ac.jp

Abstract

In the history of Earth sciences, the third leg of *D/V Glomar Challenger* through the South Atlantic is recorded to be the cruise which confirmed beyond any reasonable doubt that the Atlantic Ocean had formed by sea-floor spreading. This leg traversed the mid-Atlantic Ridge along 30° South latitude and recovered sediments from eight drilling sites. Abundant calcareous planktonic microfossils were used to assign geological ages to the sediments in the core. When the distances of each drilling site to the ridge axis are compared with the paleontological ages of the sediment lying immediately above the basalt basement at each site, a clearly linear relationship did emerge, corresponding to a spreading half-rate of 2 cm/year. The resulted agreement between the paleontological and magnetic estimates of sea-floor spreading is regarded as strong support for the hypothesis of sea-floor spreading and the concept of magnetic stratigraphy. The present author's personal experiences during the course of formulating planktonic foraminiferal biochronologies are also chronicled in order to give younger generations of earth scientists some feelings about the excitement that engulfed the ocean science community when the ocean drilling project was launched in the year 1968.

Key word: DSDP Leg 3, South Atlantic, sea-floor spreading, planktonic foraminifera, and biochronology.

はじめに

“グローマー・チャレンジャー号 (*Glomar Challenger*) による最初の18カ月の大西洋における掘削航海は、セネガールのダカールからブラジルのリオデジャネイロへの第3次の航海 (Leg 3) を頂点にして、科学的な意味での黄金のありかを探りあてた。この第3次航海の成果は、いかなる論理的な疑問をも挟む余地がないほどに、大西洋は海洋底拡大 (sea-floor spreading) の結果つくられた事実を証明してくれた”は、Cox (1973) が「プレート・テクトニクスと地磁気逆転」という表題の教科書の中で、“プレート・テクトニクスと地質学”の章の序論に選んだ言葉である。地球科学の新しいパラダイムとして、1960年代の後半に誕生したプレート・テクトニクス説は、海洋底は中央海嶺で生産され、海溝で沈み込むと説明する。この説明が正しいとすると、大西洋の海底地殻は、海嶺の中軸でもっとも若く中央海嶺から離れるにしたがって古くなるはずである。

深海掘削 (DSDP) 第3次航海は、プレート・テクトニクス説の検証対象として、南大西洋の掘削を行い、Coxの言葉にあるような十分な成果をおさめて、この新しいパラダイムを地球科学の重要な理論に高めるのに大きな役割を果たした。筆者は、この第3次航海に参加し、浮遊性有孔虫層序による

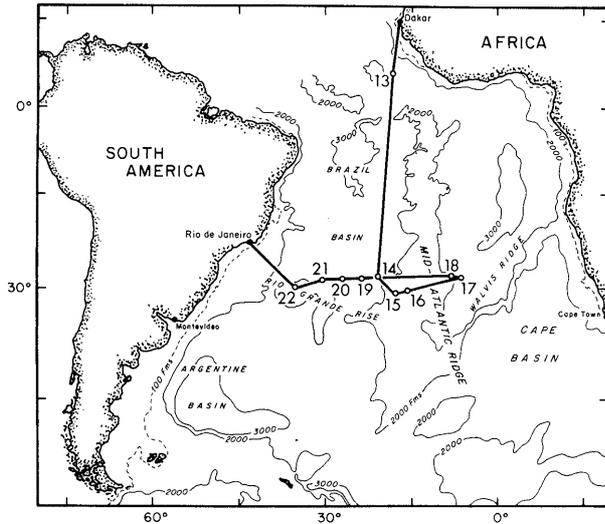
堆積物の年代決定に従事したが、当時を振り返って、この実地検証の過程を述べてみたい。

大西洋をまたぐ第3次航海

アフリカ大陸が、もっとも西方に張り出した位置に、セネガル国の首都ダカールがある (第1図)。1968年12月1日の午前8時、海洋掘削船グローマー・チャレンジャー号は、ダカール港をあとにして55日にわたる大西洋の掘削航海に出発した。行き先はブラジル国のリオデジャネイロで、航海のハイライトは、南緯30度線にそって大西洋中央海嶺を横断するように掘削を行い、プレート・テクトニクス説が言うように、大西洋の海底地殻が海嶺中央から離れるにしたがって古くなっているかを検証することであった。掘削船は、1万1千キロを航行して、1969年1月28日、リオデジャネイロに入港し、その任務を完了したが、その間35日を掘削に費やし、10カ所の地点で、計17坑を掘削した。掘削地点 (Site 13 から 22) の位置と掘削船の航路を第1図に示してある (Maxwell et al., 1970 b)。

掘削の概要と目的

第3次航海の初期の目的では、Sierra Leon Rise (Site 13) の歴史をさぐる最初の掘削を行ってから、掘削船は南緯30



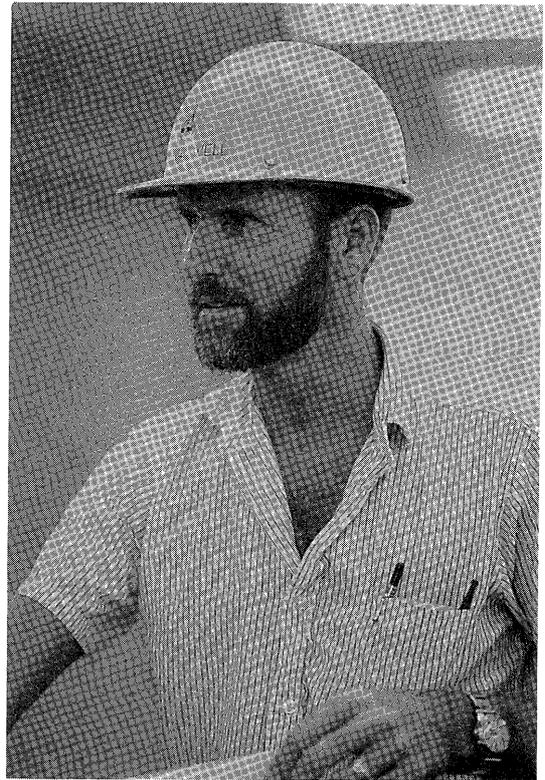
第1図 南大西洋における第3次航海の掘削地点 (Site 13-22) とグローマー・チャレンジャー号の航路。

度まで南下し、その緯度によって、中部大西洋海嶺の西斜面を海嶺を横断するように西進しながら掘削する予定であった。しかしながら、Site 14, 15, 16 と掘り進んだ段階で、首席研究員の Arthur E. Maxwell [“アート” の愛称で呼ばれる] (第2図) が「西斜面だけを掘削しても、中軸を中心に海嶺が対称的に拡大しているかどうかの直接的な証明は得られない。中軸の反対側の東斜面でも掘削を行って、拡大が本当に対称的かどうかを確かめるべきだ」と考えて、乗船の研究者全員に同意を求め、Site 16 の掘削の後、船は急遽東方に大きくループを描いて進み、Site 17, 18 の掘削が付け加えられた。結果的に、この Maxwell の決断が、“海洋底拡大説一ひいてはプレート・テクトニクス説の実証” というもっとも大きな学術的貢献を生み出すものになった、少し、話が筋道からそれるが、深海掘削計画の初期の段階では、このように、乗船している研究者の総意で掘削計画の一部を変更するような自由度が与えられていたのである。

第3次航海は、南大西洋に9地点の掘削を行い、4地点では複数の掘削孔が掘られた(第1表)。ちなみに、Site 13 と 21 で2坑、Site 17 で3坑、Site 20 では4坑である。そして、ほとんど全ての地点が、海洋底拡大説に準拠した地磁気縞模様様の当時行われていた番号と対比された (Heirtzler et al., 1968 ; Pitman and Heirtzler, 1966)。航海中、105回のコア採集が試みられて、103のコアが回収された(第3図)。回収された堆積物の総延長は765mで、回収率は92%という、初期の航海にしては驚異的な結果が得られた。ちなみに、グローマー・チャレンジャー号の第1次航海におけるコアの回収率は約40%で、北大西洋の海嶺を横切った第2次航海では、約33%であった。

南大西洋海嶺上の堆積物の層序

大西洋海嶺上の掘削は、海洋底拡大説 (Hess, 1962 ; Dietz, 1961-注記1) の検証が主要な目的ではあったが、海嶺斜面をおおう堆積物がどのようなものであるかにも大きな関



第2図 第3次航海の正首席研究員の Arthur E. Maxwell。当時、彼はウッズホール海洋研究所に勤めていたが、その後テキサス州にある University of Austin に移り、国際深海掘削計画 (ODP) のアメリカを代表する Executive Committee の一員として、深海掘削計画の継続に大きな指導力を発揮している。

心が寄せられていた。Bramlette (1961) は、太平洋底から採取されたピストン・コア中の堆積物を分析し、 CaCO_3 を成分とするアラゴナイトとカルサイトは、深海では溶解してしまい、炭酸カルシウムに富む堆積物とそれをほとんど含まないものが驚くほど明瞭な深度で境されて海洋底に分布することを明らかにした。深海底に堆積するアラゴナイトは、浮遊性腹足類のテロポーダ (翼足類) の殻として生産され、カルサイトは浮遊性有孔虫と植物性プランクトンのココリスによってつくられる。そして、Riedel and Funnell (1964) は、深海で炭酸カルシウムに富む堆積物の分布が限られる境界深度を、炭酸カルシウム補償深度 (Calcium Carbonate Compensation Depth-CCD) と呼んだ。Peterson (1966) は、この炭酸カルシウムが海水中で実際に溶解する様子を実験によって確かめている。彼は、貝殻で球をつくり、それをブイから、100mほどの水深間隔で中部太平洋の水中に保留し、一定期間放置したのち回収して、球の重さの減少量から溶解量を求めた。その結果、太平洋の水は、表層数百mをのぞいて、炭酸カルシウムに不飽和で、急速な溶解量の増加が水深約3,700mを境に起こっていることを明らかにした。彼は、その様子を、海山の頂きは、あたかも雪をかぶった陸上の山のように炭酸カルシウムで白くなり、水深4,000から5,000mの深度にカルシウムが溶解して全く堆積しなくなる“雪線”のような現象が起こっているであろうと述べている。

第1表 第3次航海による南大西洋の掘削データ。コラム6の地磁気異常番号は、Heirtzler et al. (1968) の命名法にしたがい、コラム7とRemarksに示された各Siteの海底地殻上の堆積物の厚さは、容量10立方インチのエアー・ガンで測定した音響的厚さ。0.1秒が堆積物の厚さにして約100mに相当するとされる。

Site No.	Latitude (S)	Longitude (W)	Water depth (m)	Maximum sub-bottom penetration (m)	Magnetic anomaly (No.)	Acoustic reflection time (sec)	Remarks
14	28°20'	20°56'	4343	107	Negative 25 km West of 13	0.13	Upper flank of small hill in topography of 40- to 200-m amplitude; acoustic reflection time, 0 to 0.15 sec
15	30°53'	17°59'	3927	142	6	0.15	Lineated N-S topography, sediment thickness, and magnetic anomalies; 40- to 200 m topographic amplitude; acoustic reflection time, 0.10 to 0.15 sec
16	30°20'	15°43'	3527	192	5	0.15	Eastern flank of 1 km high, N-S lineated, 10 km wide topographic rise; acoustic reflection time, 0 to 0.30 sec. Site on small hill 50 m high
17	28°03'	6°36'	4360	127	West of 13	0.18	Lineated N-S topography, sediment thickness, and magnetic anomalies; hills locally 10- to 200-m amplitude. Site at base of hill
18	27°59'	8°01'	4018	178	Between 6 and 13	0.16-0.32	Hills locally 20- to 80-m amplitude; 4800-m deep depression, 50 to 60 km wide in E-W direction, about 100 km east of site
19	28°32'	23°41'	4677	145	21		On east flank of N-S trending ridge, 400-m high; locally irregular topography with diffuse bottom reflections (12 kilohertz)
20	28°31'	26°51'	4506	72	30	0.15(?)	East side of a valley 10 km wide, 4850 m deep. Site on slope extending 600 m above valley floor with uniform sediment thickness
21	28°35'	30°36'	2113	131		0.20-0.25	Northeast slope of Rio Grande Rise. Strong acoustic reflector at 0.1 sec, probably a middle Eocene chalk layer
22	30°01'	35°15'	2134	242		0.52	Small hills (20- to 40-m amplitude); intermediate acoustic reflector at 0.31 and 0.52 sec; higher reflector probably <i>Braarudosphaera</i> chalk layer (see Fig. 5)

第3次航海で採取された海嶺上の堆積物の組成は、まさしく、このような研究結果を反映するものであった。つまり、海嶺上に沈積する炭酸カルシウムの溶解は、海嶺の水深にしたがって増大するから、究極的には水深が海嶺上の堆積物の岩相を支配すると考えて矛盾の無い結果が得られた。したがって、ほとんど無化石の“Red clay (赤粘土層)”は、炭酸カルシウム包含層の溶けカスを意味し、はるかに遅い速度で海嶺のより深い斜面に堆積していることが明らかになった。また、南大西洋の掘削地域では、ココリス軟泥中に一般に浮遊性有孔虫の混在量が他の海洋域よりも少なく、これも浮遊性有孔虫の殻がココリスよりも溶解し易いと考えたと説明のつく特徴であった。興味があるのは、Oligoceneの地層の中に、ただ1種のコクリス *Braarudosphaera bigelowi* の殻のみが集まった、数cmの厚さの単一種骨格殻石灰層が南大西洋に広範囲に分布しており、しかもそれが幾つかの異なった層準に出現することであった。このことは、Oligoceneの時代の大西洋に、1種のコクリスのブルーム、つまり異常繁殖をもたらすような環境がひろがったことを示しており、それが何であったかについて、乗船した研究者のあいだでいろいろ議論されたが、現在でも満足の行く説明は見出されていない。

ほとんど無化石の“赤粘土層”と浮遊性有孔虫がかなり豊富に混在するココリス軟泥を両極端にして、南大西洋から掘削された堆積相は、深度の増加にともなう炭酸カルシウムの溶解度に支配された、次の5つに分けることができた。

(a) 溶解をほとんど受けていないと判断される Chalk oozes (チョーク軟泥) で、Rio Grande Rise 上の Site 21 と 22 で掘削されたような浮遊性有孔虫を顕著に含む第四紀堆

積物。

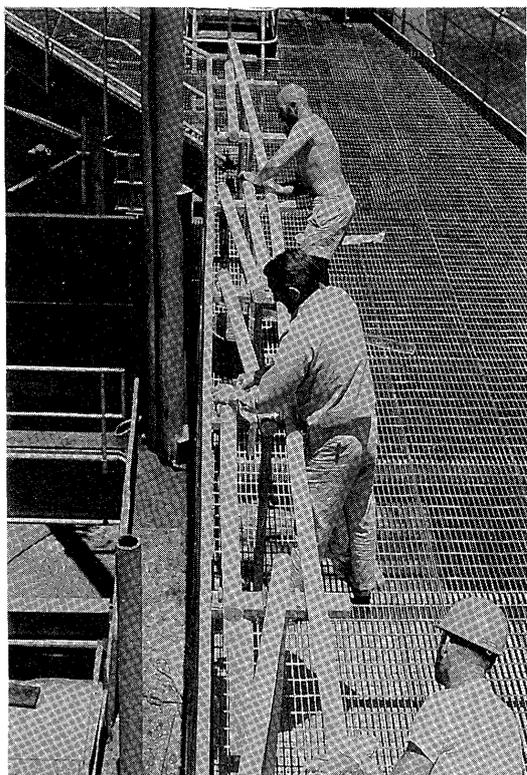
(b) 溶解の兆候をしめす Chalk oozes で、全体の10%以下の陸源性堆積物と10%以上浮遊性有孔虫を含む。

(c) 中程度の溶解の兆候をしめす Chalk oozes で、全体の10から30%の陸源性堆積物と10%以下の浮遊性有孔虫を含む。

(d) 顕著な溶解の兆候をしめす Marl oozes (マール軟泥) で、ココリスと浮遊性有孔虫種でも殻が厚く溶解し難い種のみを含むもので、全体の30から70%の陸源性堆積物と3%以下の浮遊性有孔虫を含む。

(e) “赤粘土層”でほとんどの炭酸カルシウム骨格が溶解してしまった堆積相。

第3次航海には、堆積物の研究者として Kenneth J. Hsü (注記2) が乗船していた。彼は、陸上の堆積相は、国際地層命名規約にしたがい、Formation (累層) に区分してその分布を地質図化し、柱状図に記載されるという慣例を海底下の堆積相にも適用しようとして、上記のように識別された堆積相を累層の名で呼ぼうと主張した。ところが、海底には、陸上の累層の命名に用いられるような適当な地理名がなかったので、歴史に残る有名な海洋観測船の名を捜して、アルバトロス、ブレイク、チャレンジャーなどの累層名を堆積相に与えた。第4図はこのようにして作られた大西洋海嶺上の堆積相の柱状図で、地層名、地層の相対的な厚さ、地層の堆積年代などが示されている。さらに、微化石年代をもとにこれらの累層の堆積速度も求められた。これらの結果から、大西洋中部海嶺上の地層の堆積史を、1) 海嶺中軸部における炭酸カルシウムに富む地層の形成と、中軸部から離れるにつれてカ



第3図 グローマー・チャレンジャー号の甲板上に回収されたコア。透明なプラスチック・ライナーに入った、一本9.5 mのコアを6等分する作業をしている。コアには真っ白な Chalk ooze がつまっている。右下が Arthur E. Maxwell で、中央が副首席研究員の Richard P. Von Herzen。このように、初期の掘削航海では、首席研究員もすべての作業を手伝った。

ルシウム乏しい岩相への移行、2) 海嶺西側で掘削された第三紀層全体の岩相は Paleocene から Eocene/Oligocene の境界にむかって、炭酸カルシウムに富む岩相から乏しい岩相へと変化し、Eocene 最末期から Oligocene 最初期にかけて“Discovery Clay”と名付けられた赤粘土層が堆積した。3) さらに赤粘土層の上位には、海嶺の上部斜面にかけて、再び Miocene 以降の炭酸カルシウムに富む岩相が堆積した(第5図)。このように、第3次航海では、海底下の地層を累層に区分するという画期的な試みがなされたが、このような用法がその後の深海掘削計画の航海で再び採用されることは無かった。多分、海底には適当な地理名がないという理由のほかに、岩相をじっさいに観察できるのは野外ではなく、コアが保管されているコア・ラボだけであること、将来このような地層が多く海域で提唱された時に、地層の分布範囲を画定するのが困難であることなどの判断があったためであろう。

大西洋中部海嶺の拡大速度は年2センチ

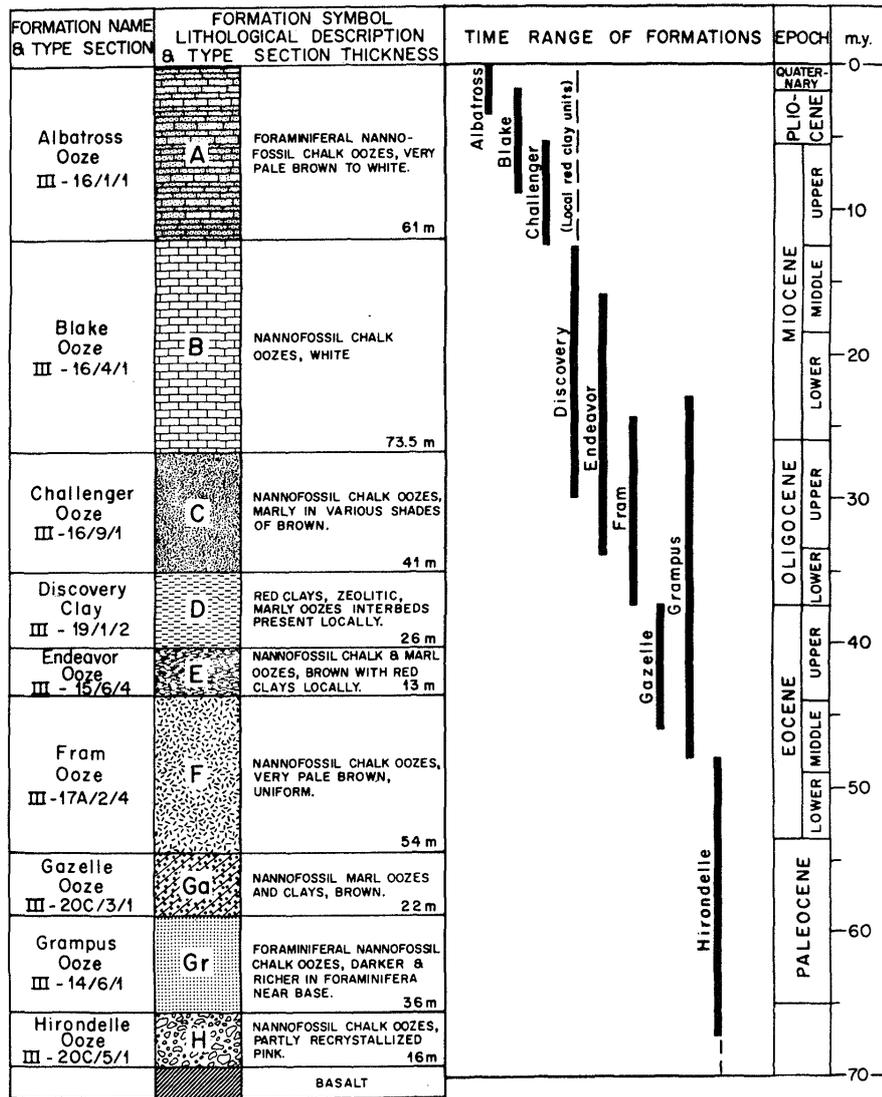
1968年のクリスマスは、ことのほかにぎにぎしい雰囲気だが、グローマー・チャレンジャー号内に満ちあふれていた。掘削船では、アルコール飲料は禁止されているのだが、このクリスマスの夕べだけ、首席研究員の Maxwell の特別のほからいで缶ビールが研究者全員に配られた(第6図)。という

のも、それまでの掘削で、南大西洋の海嶺の地殻は、中軸からの距離とその生成年代とが一定の割合を保ちながら増加しているという確かな予想が得られたからである。12月21・22日に Site 14 を掘削し、Site 15 の掘削がクリスマスの日に完了した。この2サイトの掘削結果を、海嶺中軸からの距離と地殻の年代の座標にプロットすると、海嶺西斜面の2点は、年に2 cm の海洋底拡大を示す直線ではほぼ結ばれることが分かったのである(第7図、右)。そしてジングル・ベルの音楽を背景に、グローマー・チャレンジャー号は、海嶺中軸にもっとも近い Site 16 に向かって進んだ。12月27・28日、Site 16 が掘削されたが、この地点の地殻の年代も第7図の直線上に見事にプロットされる結果となった。この結果を踏まえて、海洋底拡大は海嶺中軸を中心にして両翼に対称であるかどうかを探ることが、もっとも興味のある課題として浮上し、中軸を越えた海嶺東斜面の掘削が実施されることになった。

DSDP 第3次航海の海嶺上の掘削結果を第7図のように整理すると、それぞれの掘削地点の基盤玄武岩の直上から得られた堆積物の年代は、海嶺中軸から離れるにつれて増加することが分かる。これらの事実から南大西洋における海洋拡大史を構築するためには、それぞれの掘削地点が海嶺上で誕生した場所からの正確な距離を求める必要がある。この作業は、長く南北方向にのびる大西洋中部海嶺をたくさんの断列帯(Fracture Zone)が横切っていることで、海嶺中軸がしばしば東西方向に小さなずれを起こしている(Heezen and Tharp, 1965)ため、そう簡単な作業ではなかった。

南緯30度付近の海嶺中軸の位置は、海嶺に付随して観測される顕著な地磁気異常と、頂上域を特徴づける独特な海嶺地形、たとえば地溝などを用いてかなりの精度で確定されていた(Vacquier and Von Herzen, 1964)。さらに正確を期すために、海嶺で起きる浅発地震の震源地の位置の資料も考慮された(Stover, 1964)。こうして得られた資料を総合して得られたのが第7図(左)で、これによると、すべての掘削地点の海嶺中軸からの距離を知ることができる。この付近の海嶺は、二つの大きな断列帯で、北から南に、A、B、Cの3節に区分されているが、Site 15 と 16 はC節に、Site 17 と 18 はB節に、その他のより離れた掘削地点は、B、Cのどちらの節にもほぼ等量の位置関係を想定して海嶺からの距離が求められた。そして、海嶺からの距離を横軸に、縦軸に年代をとった座標中に、すべての掘削点をプロットして得られたのが第7図(右)である。図の中の直線は大西洋中部海嶺が1年間に2 cm の速度で拡大したとする線で、僅かのバラつきはあるが、すべての掘削地点がこの線上に見事に載ることが示されている。このバラつきの意味については、Maxwell et al. (1970 a, p. 1054-55)において詳細な検討が行われているので、議論についてはそちらを参照されたい。

海嶺中軸から東に700 km、西方に2,000 kmという南大西洋の広大な海域で、海底が年に2 cm の速度で拡大したとする直線に全ての掘削地点がプロットされる事実は、すでに Dickson et al. (1968) が、海嶺斜面に観測される地磁気異常の縞模様を、海洋底拡大の結果であると想定して求めた値と



第4図 第3次航海で掘削された堆積物の岩相・層序を示す柱状図。堆積物には、Kenneth Hsüの発案で地層名が付されている。地層名は、有名な海洋観測船の名をつけている。

も完全に一致するもので、まさに室内における科学実験の精度にも比肩する驚異的な結果であった。このようにして、この掘削の成果は、プレート・テクトニクスという一つのパラダイムをもって、海洋底拡大と大陸の移動とを統一的に説明しようとした地球科学者にとって、はじめて実証による説の正しさの裏付けを与えてくれたものとして、海洋史研究のもっとも重要な業績の一つに位置づけられるようになった。

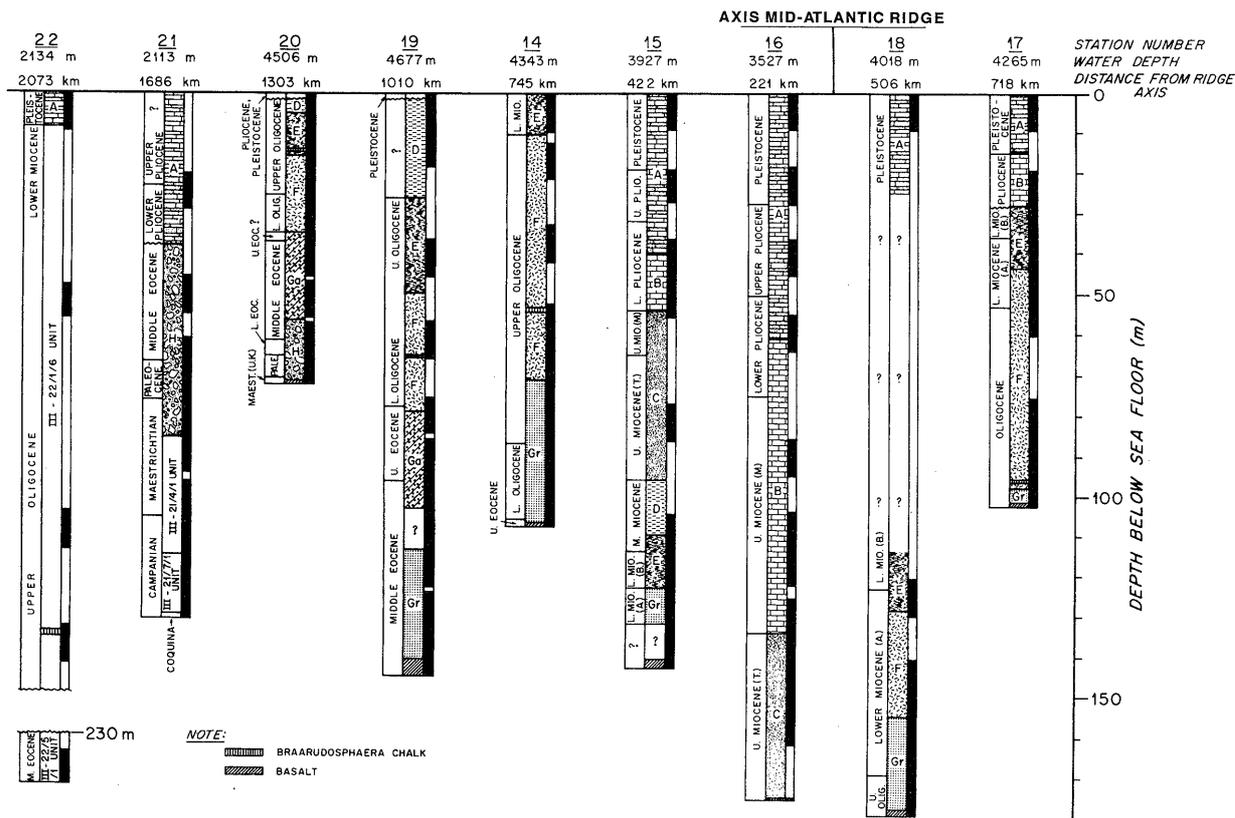
掘削にいたる背景と幾つかの科学分野への波及効果

1. 掘削にいたる背景

筆者は、1963年の6月から、コロンビア大学のラモント地質学研究所〔現在 Lamont-Doherty Earth Observatory の名で知られる海洋研究所の当時の名称〕で研究生活を送る機会を与えられたが、到着直後からときどき異様な爆発音に驚かされることになった。ラモント地質学研究所は、ニューヨークのマンハッタン島の北西約 35 km、ハドソン川の西岸の玄

武岩台地の高台にあり、深い緑の間に、3階建ての高さを越えない民家風の建物が数棟点在するような、いわば別荘地のような環境にあった。じっさいこの研究所は、ある財産家の遺言でコロンビア大学に寄付された 100 エーカーほどの別荘地を、初代所長となった Maurice Ewing が海洋研究所に転用した歴史をもっている。実りの秋の田圃や果樹園で良く耳にするような、この空砲のような大きな音は、静かな別荘地の雰囲気とは実に不釣り合いで人々に違和感を与えるものであった。じつはこの音は、開発中のエアー・ガン〔空気銃〕のテスト発射音で、開発に成功すると、観測船に曳航されて音は深海にむかって発射され、海底からの反射波をハイドロフォンで受信することによって、海底下の堆積物の厚さ、堆積物の成層の様子、岩盤表面の地形などを連続的に記録するためのものであった。この装置は、いわば、からだの内部のようすをさぐる CT スキャナーのようなものである。

このエアー・ガンが開発される以前は、TNT 火薬が音源



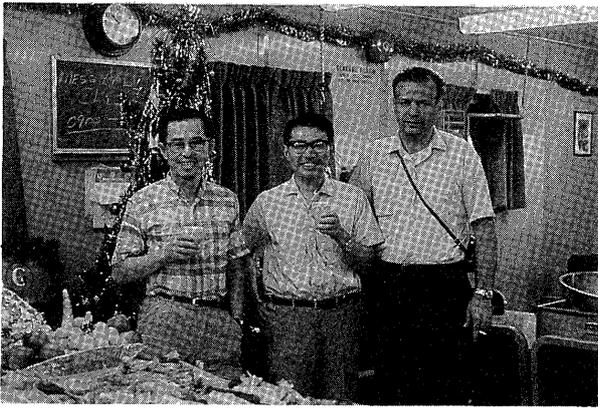
第5図 南緯 30°線に沿う大西洋中央海嶺上の堆積物の層相の側方変化と地質年代. 各 Site の水深および海嶺中軸からの距離のほか、掘削深度と堆積物の年代を縦軸に示してある. 岩相のシンボルは第4図と同じ.

として使われていた。ラモントの海洋観測船 Vema 号上で火薬が爆発し、2名の技術者を失った事故のようすを、同じ観測船に乗船した際に、Ewing から聞かされたことがある。このような、音波を地震の波のように用いて、地震探査法で海底をさぐる研究は、大西洋の東と西に横たわる大陸のほぼ中間の位置に、南北に延々とつらなる中央海嶺の発見へと導いた。よく知られているように、その後の研究は、この大西洋の中央海嶺も、じつは地球をふたまわりもするような海底の大山脈のほんの一部であることを明らかにした (Heezen, 1960).

さらにラモントの研究者達は、この大山脈の頂上には割れ目があり、それが中央海嶺にそって観測される浅発地震の分布と密接に関連していることも明らかにした (Oliver and Isacks, 1967; Sykes, 1967). ラモント研究所の海洋観測船 Vema 号の主席研究員として、何回も海洋観測を行ったコロンビア大学の Bruce Heezen 準教授は、この割れ目の発見の興奮を、Scientific American 誌上につぎのように述べている (Heezen, 1960, p. 100). 「1953 年、ラモント地質研究所のマリー・サーブと私は、数多くの音響測深の資料をもとに、大西洋の海底の詳しい地形図をつくっていた。予備的なスケッチができたところで、大西洋中央海嶺の頂上に深い谷が描かれているのを見て、サーブ嬢はびっくりしてしまった。中央部に割れ目、正確には地溝、をもったこの海底大山脈上の堆積物は、もしあったとしてもその厚さはごく僅かであり、したがって、この大地形は地質学的にもたいへん若いも

のであることも明らかになった。

1966 年の 11 月、ニューヨークの Goddard 研究所 (正確には Goddard Institute for Space Studies) で、大西洋の深海掘削が不可欠であることを全世界にアピールするような公開討論会が、11 日と 12 日の両日にわたって開催された。コロンビア大学の地質学教室、とくにラモント研究所が中心となって主催したこの討論会は、A.J. Boucot, E.C. Bullard, Allan Cox, J.R. Heirtzler, E. Irving, Marshall Kay, X. Le Pichon, Dan McKenzie, F.G. Stehli, L. Sykes, F.J. Vine など、当時の中心的な海洋研究者がつぎつぎに基調講演をおこなって、総合討論ののち、海洋の地殻の生成と運動についてのつぎのような一般則が明確になってきた。「海嶺の峰あるいは頂上には、割れ目あるいは地溝がある。そして、この部分の海底に、たえず新しい玄武岩がつけ加えられる。地震の震央と高い熱流量が集中し、上をおおう堆積物が欠けていること、そして頻繁な火山作用がすべてこの事実を支持している。そして、その理由についてはまだ白熱した議論がかわされているけれども、割れ目の両側は、たえず離れ去っている。割れ目の両側の岩盤は、離れるにつれて冷却し、その温度がキューリー点をよぎった瞬間に、そこを走る地磁気の磁線の方向を記録する。長い地質時代の中に、地磁気は何回も逆転するが海嶺斜面の岩石に記録された磁化の方向は、そのままに保存され、それらは磁気計を用いると観測することができる」。この会議の Proceedings Volume は、プリントン大学の出版会から “The history of the Earth's crust” の表題で



第6図 グローマー・チャレンジャー号の食堂で、クリスマスと海洋底拡大の証明が得られた成果を祝う、左から Kenneth Hsü, 筆者, およびココリスの専門家の Stephen Percival.

出版された (Phinney, R. A., 1968). 海嶺で新しい海洋地殻が誕生し、それが海嶺の両側にひろがって行く過程は、すでに R. S. Dietz により “Sea-floor spreading” となづけられていたが、このニューヨークの会議の2年後、海洋の拡大を大陸の移動と関連づけた、より総合的なプレート・テクトニクス仮説が Morgan (1969) と Le Pichon (1969) によって提唱されることになった。

余談になるが、「大陸に地向斜が生まれ、そこに積み重なる厚い堆積物が深く地殻内へと沈降して、玄武岩化作用により大陸地殻が海洋地殻へと転移し、海洋がつくられる」という独特の仮説を展開して注目をあつめたソヴィエトの V. V. Belousov は、この会議に招待され、その後ラモントにしばらく滞在した。彼は、ラモント研究所のセミナーで講演したが、その時には、セミナー会場のラモント・ホールが聴衆で一杯になり、そこに所長の Ewing の愛犬のスネフィーが開いたままのドアのすき間から入って来たので、「ラモントでは犬まで講演を聞くのか」と彼がつぶやいたので、会場が爆笑の渦で満たされたのを筆者は昨日のここのように思い出す。しかし、Belousov のアイデアは、彼の説くような地球物理学的なプロセスが現在世界のどこにも見られないことなどの批判があつて、当時圧倒的に海洋底拡大説へと傾倒しつつあったコロンビア大学の院生などに、強いインパクトを与えるには至らなかった。

2. 他分野の地球科学者による古生物学の重要性の認識

第3次掘削航海の成功は、乗船していた研究者のみならず、ひろく他分野の地球科学者に、古生物学、とくに生層序学の重要性を宣伝する大きな効果があつた。第7図(左)に示された、浮遊性有孔虫と石灰質ナノプランクトンの生層序学をもとに得られた岩盤直上の堆積物の年代と、地磁気異常の縞模様解析から求められた海洋地殻の年代との驚くほどの一致は、地球物理学者にとって「化石」というものを再認識するきっかけを与えた。その当時、微化石を含めて、古生物学の研究は化石の記載に重点が置かれており、化石によって年代決定が可能であるというような事実は、他分野の科学者には全く知られていなかったからである。

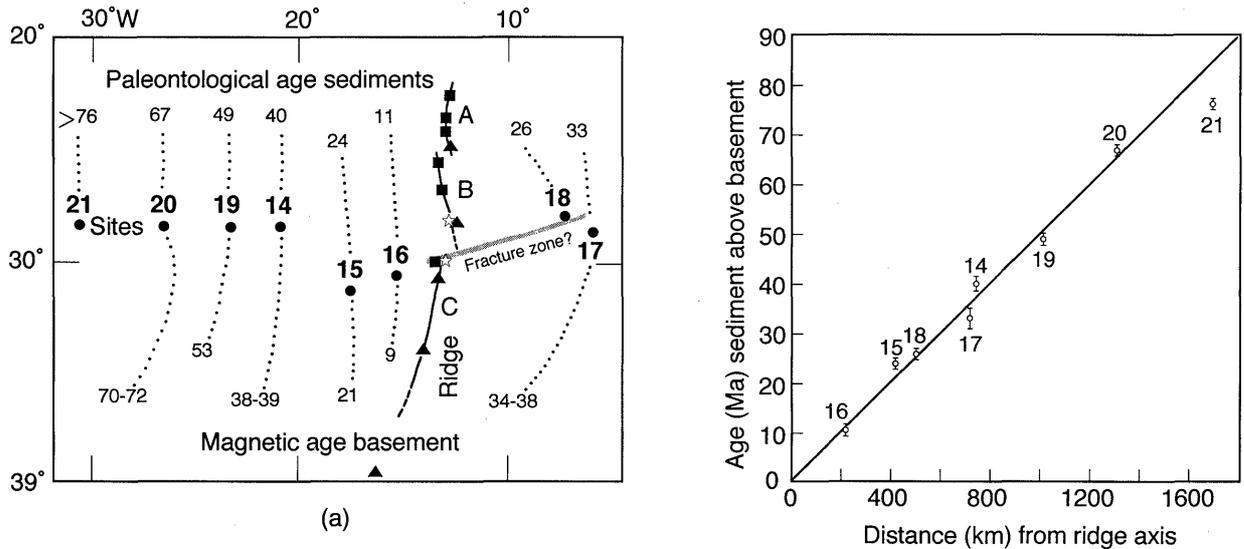
その後の深海掘削計画では、古生物、とくに浮遊性微化石の研究者は、乗船研究者の重要な構成員を占めるようになり、上記2種類の化石に限らず、のちには放射虫と珪藻の研究者も乗船し、4種類の微化石による相互年代比較が定期的に行われることになった。

浮遊性微化石が海洋堆積物の年代決定に重要であることが、はじめて海洋の研究者に知られるようになったきっかけは、カリフォルニアの石油掘削船 Caldrill I 号をチャーターして行われた、フロリダ沖の Blake Plateau の掘削であった (Bunce et al., 1965). この計画は、深海掘削を目的にアメリカの四大海洋研究所、ウッズ・ホール、ラモント、スクリップス、マイアミ、が組織した JOIDES 計画によって実施され、深海掘削が開始されるとその研究費を負担することになるアメリカ科学財団に、1960年代後半の時点で、海洋の定点に掘削船を留め深海底を掘削することが可能であることを示すことであつた。この掘削計画は、フロリダ沖の水深25mから1,032mの海底に計6本の掘削坑をおろし、海底下277mまでの掘削をおこなった。筆者は、この航海に、浮遊性有孔虫による年代決定を行うために乗船し、暁新世にさかのぼる堆積物の層序を明らかにすることができた。それまで、浮遊性有孔虫の研究は、ラモントの D. B. Ericson らによる第四紀の氷期-間氷期の層序学の研究や、マイアミの C. Emiliani による有孔虫殻の酸素同位体比の測定による第四紀の古気温変動の解析などが主流であつて、第三紀以前の化石群の研究はほとんど行われていなかった。この掘削計画の後、ウッズ・ホール研究所では、その頃、リビアのトリポリの石油会社で微化石の専門家として働いていた W. A. Berggren を雇い入れたり、スクリップス研究所では石灰質ナノプランクトンの専門家の David Bukry を雇用するなど、第三紀・白亜紀の微化石の専門家が海洋研究所の重要な一員になることになった。Berggren は、DSDP 第1次航海に乗船し、その後も数次の海底掘削計画に参加し、微化石による海洋堆積物の年代基準をつくるなど、大きな業績を残したことは良く知られているところである (たとえば Berggren et al., 1995).

回顧的 Odyssey : 日本人は何をしたか

第3次航海において、「海洋底拡大説」の実証に重要な役割をはたしたのは浮遊性の微化石、とくに浮遊性有孔虫と石灰質ナノプランクトン、による堆積物の正確な年代決定の成功であつた。

石油掘削の現場では、すでに1930年代に、石油包含層に随伴する底生有孔虫化石群集を試掘坑井の資料から特定することによって、つづいて掘削される多くの坑井がどの深度で石油包含層に到達するかを、坑井から回収されるカッティングやコア中の有孔虫を分析して予知する作業が定期的に行われるようになった。しかし、底生有孔虫の場合、油田が異なると組成の全く違った群集が出現し、油田開発では、つねに、石油包含層を特徴づける有孔虫群集を新たに認定する作業が要求された。一方、浮遊性の生物であるグラブトライトを用いると、スウェーデンからオーストラリアという世界の遠く



第7図 海洋底拡大を実証した南大西洋の掘削結果。左 (a), 各 Site の海嶺中軸との位置関係と海洋地殻直上の堆積物の微化石年代 (paleontological age), および地磁気異常の縞模様解析から求められた海洋地殻の年代 (magnetic age) を、それぞれ等年代線で示す。海嶺はこの地域で、地形的に3区分 (A, B, C) で、B と C の間に断裂帯が走ると考えられる。海嶺中軸の位置決定は、四角が Vacquier and Von Herzen (1964), 星印は Maxwell et al. (1970 b), 三角はラモント研究所の震央の位置データによる。右, (a) 図の各 Site の微化石年代と、海嶺中軸からの距離との相関図。誤差バーを付して示した各 Site の年代は、中軸から年に 2cm 海洋底が拡大していることを示す直線上に見事に並んでいる。

離れた地域間の古生代層の詳細な年代比較が可能であることが、すでに前世紀末から知られていた (Linnarsson, 1876; Hall, 1899)。

有孔虫には、ジュラ紀以降、多くの浮遊性種が知られているが、この浮遊性有孔虫を年代決定に用いたらと考えたのは油田に働く技術者達で、1950年代に入ってからのものである。とくに、スイス人の Hans M. Bolli は、その頃トリニダドの油田で働いていたが、このアイデアを持って共同研究者をさがし求めた。浮遊性有孔虫の多くは、ゴルフボールを単純につないだような、一見何の特徴も無い形をしていて、そのなかのどのような形質を重視して分類の基準をつくるかが大きな課題であったからである。その頃米国のワシントン市にあるスミソニアン自然史博物館には、のちに有孔虫の分類学では世界的な権威となった Alfred Loeblich, Jr. がおり、Bolli はカリブ海地域の坑井から得られた浮遊性有孔虫化石をスミソニアンに持ち込んだ。こうして、Loeblich 夫人の Helen Tappan を巻き込んだ3人の共同研究がはじまり、彼らの労作“Studies in Foraminifera”が、1957年博物館の出版物として刊行された。そこには、浮遊性有孔虫の分類の基礎論と、Paleocene-Eocene に亘る古第三紀層と、Miocene を中心とした新第三紀油田層の浮遊性有孔虫による生層序が記載されている。

筆者は、1958年、修士論文のテーマとして、静岡県掛川市から、西方の天竜市にかけての第三系の地質と有孔虫化石の研究を与えられた。東北大学の定年をまじかにひかえた半沢正四郎の示唆であった。当時、掛川地方の新第三紀層中には、大型有孔虫 *Lepidocyclina* の産出が5層もの異なった層準に知られていて、日本列島の産出層準は一つで、群集も南から北まで単一であると考えた半沢の考えに合わなかったからで

あった。その頃、東京教育大学の博士課程在学中の氏家宏と、のちに石油資源開発株式会社の技術研究所で有孔虫を研究するようになった井上洋子が、同じ掛川地方の新第三紀層の研究を続けていた。有孔虫の研究の現状や文献などについて、フィールドで多くのことを、筆者は氏家から教えられた。ところが最初の夏の調査の無理がたたって、その年の秋から筆者は病院に6カ月入院をよぎなくされることになった。肺浸潤を結核と誤診されたのが原因であったが、病院でひまをまかせて読みふけた地質・古生物学関係の論文のなかに、たまたま上記の Bolli らの論文があった。掛川の岩石を処理してみると、なんと Bolli らが記載した、暖温海の浮遊性有孔虫がたくさん含まれていて、それを契機に浮遊性有孔虫の生層序に取り組むことになった。指導教官は、半沢から浅野清にかわっていたが、“浅野先生”は細かいことには拘泥しない方で、あっさりこの方向転換を認めてくれた。こうして、日本の Miocene のはじめての浮遊性有孔虫生層序がつくられ、日本の地層を、帯 (Zone) 単位でカリブ海地域の地層と直接対比することが可能となった (齋藤, 1959)。

筆者は、さらに古第三紀層の国際的な年代決定を試すために、小笠原列島母島の浮遊性有孔虫を検討した (Saito, 1962)。母島から新種として記載した *Orbulinoides beckmanni* は、その後 Late Middle Eocene の P13 帯の指準化石として国際的に名が知られるようになったばかりか、この論文は Karig (1975) のフィリピン海の成因論の構築に大変参考になったと、本人から言われたことがある。

すでに記したように、筆者は1963年、ラモントで研究を続けることになった。ラモントには、すでに3千本を越す世界の海から採集されたピストン・コアが保管されていたが、第四紀以前の堆積物は、ほとんど手つかずのままであった。そ

の頃、アメリカの海洋学界は、地殻とマントルの境界に達する一本の長い坑井を掘ろうとする「モホール計画」派から、たくさんの坑井で海洋地殻上の堆積物を貫き、海洋の歴史を探ろうとするグループに勢力が移る過渡期にあった。「モホール計画」派は、1961年4月、カリフォルニア半島西方にあるメキシコのGuadalupe Island 沖水深948mの海底で掘削を行い、堆積層を200m貫いたほか、もう一つのSiteでは玄武岩層を13.4m掘り抜いた。掘削に成功したCUSS 1号が、ロスアンゼルスに帰って来たときKennedy大統領はメッセージを送り「歴史的な偉業」と讃えたと伝えられる。

堆積物中の有孔虫は、スクリップス海洋研究所のFrances Parkerが担当し、結果は1964年に出版された(Parker, 1964)。しかし堆積物の年代・層序はカリフォルニアの地域的なStageと比較されただけで、とくに坑井深部の層が中新世のどの部分に相当するのか全く不明のままであった。そこで筆者は、まず浮遊性有孔虫の出現・絶滅の層準を世界的に認められた標準年代層序、たとえば白亜紀ではCampanian階、第三紀ではYpresian, Burdigalian階など、と比較しそれに絶対年代を付す作業を始めた。絶対年代は、当時もっとも信頼性のある放射年代が得られた層準をさぐり、その層準に出現する有孔虫群集から、種の出現・絶滅の年代を求めて行った。また、年代の若い中新世後期のピストン・コアについてはコアに記録された地磁気極性逆転層序と浮遊性有孔虫の層序と直接比較して、年代を求めた(Hays et al., 1969; Saito et al., 1975)。このような浮遊性有孔虫層序を標準年代層序と比較した初期の研究成果は、Saito and Funnell (1971, fig. 1)に出版されている。

1965年、フロリダ沖で深海掘削計画の実行に向けたCaldrill I号による海底掘削はそれまでに完成していた浮遊性有孔虫による年代層序を確かめる絶好の機会であった。この航海には、はじめアメリカ地質調査所ワシントン局のThomas Gibson (e.g. Gibson, 1967)に乗船の打診があったと航海に参加したSedimentologistsの一人から聞かされた。ところが、彼は乗船の条件として、1冊が電話帳のタウン情報誌の倍の厚さはある“Catalogue of Foraminifera”100巻分をのせるように要求したため断られたと聞かされた。じっさい、この船の有孔虫研究室は、一人用の前部トイレの瀬戸の部分をとりはずしただけというもので、3分の2坪ほどの大きさしかなかった。この掘削の結果を、筆者は、オタワで1965年9月に開催されたUpper Mantle Projectの“Drilling for Scientific Purposes”で報告し(Saito, 1966)、正式の報告はBunce et al. (1965)でなされた。この掘削により、浮遊性有孔虫による年代決定の価値が高く評価されるようになり、その後アメリカ国内の海洋研究所に浮遊性微化石の研究者が常勤するようになったことは、すでに述べたとおりである。

余談になるが、深海掘削計画の第1次航海(Leg 1)には、このフロリダ沖の実績が考慮されて、筆者が乗船するように招待された。しかし、2名の首席研究員が、ラモントの所長のM. Ewingと副所長のJoe Worzelという組み合わせでは、当時ラモントの研究員であった筆者を含めるとあまりに一つ

の研究所に偏るという反対があり、ウッズホール研究所のW. Berggrenが急遽参加することになったと聞かされた。おかげで、筆者はこの論文の主題である第3次航海の乗員として、プレート・テクトニクスの実証という晴れがましい舞台に参加することができた。

第3次航海のグローマー・チャレンジャー号の船上では、奇妙な光景が展開されていた。それは、掘削技師達が、掘削も仕上がりに近づく、古生物実験室に直行するようになったことである。その理由は、筆者とPercivalが作った岩盤到着予知表にあった。これは、現在国際深海掘削計画のどの報告書を見ても掲載されている表で、座標軸の一つに年代ともう一方に掘削深度をとった堆積速度のグラフである。掘削の進行とともに、各コアについて、浮遊性微化石による地質年代と掘削深度の相関点をプロットして行く。一方、その掘削地点の地殻の年代は事前の海底地磁気縞模様の解析によって分かっているから、堆積速度線と予想海底地殻年代線との交点を求めると、あと何メートル掘削すると岩盤に着くかが分かるのである。第3次航海では、この予想が面白いほどに的中した。それで、筆者と同僚のココリスの専門家のPercivalに与えられたアダ名が“Moving Mass Spectrometer”であった。深海掘削船には、エアー・ガンが搭載されているから、音響的に岩盤上の堆積物の厚さを知ることができる。しかし、当時は、堆積物中を走る音波の速度が良く分かっていなかったため、音響的な厚さを実際の堆積物層に換算するときには誤りが出て、掘削技師達はこの近代機器よりも微化石を信頼するようになったのである。

注

注記 1. 海洋底拡大説を最初に論文として公表したのはDietz (1961)であるが、このアイデアを最初に提唱したのはH. H. Hessであった。しかし、Hessの論文は1962年まで印刷されなかった。前者もこのことを認めているので、文献引用は年号順ではなく、後者を先に記載する慣例となっている。

注記 2. Kenneth J. Hsüは、テキサス州ヒューストンのShell Oil Companyに勤めていたが、第3次航海が始まる前に、スイスのチューリッヒにあるFederal Institute of Technology, Zürich (ETH)の教授となった。彼はDSDP第13次航海では首席研究員となり、中新世末期に地中海はほとんど干上がり鹹湖となったという説を出して一躍有名になった。

文 献

- Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M.-P. and Hardenbol, J., 1995 eds., *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation*. SEPM Special Publication, no. 54, 386 p.
- Bramlette, M. N., 1961, Pelagic sediments. In Sears, M., ed., *Oceanography*. Amer. Assoc. Advanc. Sci., Washington, D. C., 345-366.
- Bunce, E. T., Emery, K. O., Gerard, R. D., Knott, S. T., Lidz, L., Saito, T. and Schlee, J., 1965, Ocean drilling on the continental margin. *Science*, **150**, 709-716.
- Cox, A., ed., 1973, *Plate tectonics and geomagnetic reversals*. W. H.

- Freeman & Co., San Francisco, 702 p.
- Dickson, G. O., Pitman, W. C. III and Heirtzler, J. R., 1968, Magnetic anomalies in the South Atlantic and ocean floor-spreading. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 2087-2100.
- Dietz, R. S., 1961, Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, **190**, 854-857.
- Gibson, T. G., 1967, Stratigraphy and paleoenvironment of the phosphatic Miocene strata of North Carolina. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **78**, 631-650.
- Hall, T. S., 1899, The graptolite-bearing rocks of Victoria, Australia. *Geol. Mag.*, decade IV, **6**, 438-451.
- Hays, J. D., Saito, T., Opdyke, N. D. and Burckle, L. H., 1969, Pliocene-Pleistocene sediments of the Equatorial Pacific: Their paleomagnetic, biostratigraphic, and climatic record. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 1481-1514.
- Heezen, B. C., 1960, The rift in the ocean floor. *Scientific American*, **203**, 98-110.
- Heezen, B. C. and Tharp, M., 1965, Tectonic fabric of the Atlantic and Indian Oceans and continental drift. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, ser. A., **258**, 90-106.
- Heirtzler, J. R., Dickson, G. O., Herron, E. M., Pitman, W. C., III, Le Pichon, X., 1968, Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motions of the ocean floor and continents. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 2119-2136.
- Karig, D. E., 1975, Basin genesis in the Philippine Sea. In Karig, D. E., Ingle, J. C., Jr., et al., *Initial Reports Deep Sea Drilling Project*, **31**, 857-879.
- Le Pichon, X., 1968, Sea-floor spreading and continental drift. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 3611-3697.
- Linnarsson, G., 1876, On the vertical range of the graptolite types in Sweden. *Geol. Mag.*, decade II, **3**, 241-245.
- Loeblich, A. R., Jr., Tappan, Helen, Beckmann, J. P., Bolli, H. M., Galitelli, E. M. and Troelsen, J. C., 1957, Studies in Foraminifera. *Bull. U. S. Nat. Mus.*, **215**, 1-323.
- Maxwell, A. E., Von Herzen, R. P., Hsu, K. J., Andrews, J. E., Saito, T., Percival, S. F., Jr., Milow, E. D. and Boyce, R. E., 1970 a, Deep sea drilling in the South Atlantic. *Science*, **168**, 1047-1059.
- Maxwell, A. E., *Science*, Von Herzen, R. P., Andrews, J. E., Boyce, R. E., Milow, E. D., Hsu, K. J., Percival, S. F., Jr. and Saito, T., 1970 b, *Initial Reports Deep Sea Drilling Project*, **3**, 806 p.
- Morgan, W. J., 1968, Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 1959-1982.
- Oliver, J. and Isacks, B., 1967, Deep earthquake zones, anomalous structures in the upper mantle, and the lithosphere. *Jour. Geophys. Res.*, **72**, 4259-4275.
- Parker, F. L., 1964, Foraminifera from the Experimental Mohole Drilling near Guadalupe Island, Mexico. *Jour. Paleont.*, **38**, 617-640.
- Peterson, M. N. A., 1966, Calcite, Rates of dissolution in a vertical profile in the Central Pacific. *Science*, **154**, 1542-1544.
- Phinney, R. A., 1968 ed., *The history of the Earth's crust*. Princeton Univ. Press, Princeton, 244 p.
- Pitman, W. C., III and Heirtzler, J. R., 1966, Magnetic anomalies over the Pacific-Antarctic ridge. *Science*, **154**, 1164-1171.
- Riedel, W. P. and Funnell, B. M., 1964, Tertiary sediment cores and microfossils from the Pacific Ocean floor. *Geol. Soc. London, Quart.*, **120**, 305-368.
- 斎藤常正, 1959: 静岡県島田・掛川市付近の第三系とその浮遊性有孔虫化石群. 東北大地質古生物邦文報告, no. 51, 1-45.
- Saito, T., 1962, Eocene planktonic foraminifera from Hahajima (Hillsborough Island). *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N. S.*, no. 45, 209-225.
- Saito, T., 1966, Ocean drilling off the coast of eastern Florida. In Findlay, D. C. and Smith, C. H., eds., *Drilling for Scientific Purposes*. Paper, Geol. Surv. Canada, Ottawa, no. 66-13, 52-54.
- Saito, T., Burckle, L. H. and Hays, J. D., 1975, Late Miocene to Pleistocene biostratigraphy of equatorial Pacific sediments. In Saito, T. and Burckle, L. H., eds., *Amer. Mus. Nat. Hist.*, New York, 226-244.
- Saito, T. and Funnell, B. M., 1971, Pre-Quaternary sediments and microfossils in the Oceans. In Maxwell, A. E., ed., *The Sea*, Volume 4. John Wiley & Sons, New York, 183-204.
- Stover, C. W., 1968, Seismicity of the South Atlantic Ocean. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 3807-3820.
- Sykes, L. R., 1967, Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-ocean ridges. *Jour. Geophys. Res.*, **72**, 2131-2153.
- Vacquier, V. and Von Herzen, R. P., 1964, Evidence for connection between heat flow and the Mid-Atlantic Ridge magnetic anomaly. *Jour. Geophys. Res.*, **69**, 1093-1102.

(要旨)

斎藤常正, 1998, 海洋掘削によるプレートテクトニクス証明. 第49号, 33-42. (Saito, T., 1998, Verification of the Plate Tectonics theory by deep sea drilling. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 49, 33-42.)

1960年代後半, 地球科学の新しいパラダイムとして誕生したプレート・テクトニクス説は, 海洋底は中央海嶺で生産され, 海溝で沈み込むと説明する. この説が正しければ, 大西洋の海底地殻は海嶺の中軸でもっとも若く, 中央海嶺から離れるにしたがって古くなるはずである. 1968年アフリカのセネガールを出港し, ブラジルのリオディジャネイロに向かったグローマー・チャレンジャー号の第3次航海は, 南緯30°線にそって大西洋中央海嶺の東西斜面の掘削を行い, いかなる論理的な疑問をはさむ余地が無いほどに大西洋は海洋底拡大の結果生まれたことを証明した. 海嶺中軸をはさんで, 東斜面の2地点, 西斜面の7地点で掘削された堆積物中の石灰質浮遊性微化石による年代決定は, 大西洋の海嶺が, それぞれの方向に年に2cmの速度で拡大していることを示した. 筆者は, この歴史的な航海に参加して浮遊性微化石の年代決定にあたったが, 微化石年代法の成立までの筆者の体験を回顧しながら, ささまざまな研究が一つの仮説を理論へと高めて行った過程を論じている.