

## 共通教育科目における進取の精神の養成 —「地球をつくった人々」講義録—

根建 心具（鹿児島大学名誉教授）

### Training for Enterprising Spirit through the Liberal Arts Education, Kagoshima University -Lecture Report of “Creating the Earth’s History”-

NEDACHI Munetomo (Emeritus Professor, Kagoshima University)

キーワード：進取の精神、教養教育、大陸移動説、プレートテクトニクス、地球史解説

はじめに

第1回：「地球をつくった人々」の趣旨紹介

「想定外」という言葉 / 進取の精神 / 授業の概要 / 学生の目標

第2回：大陸海岸線の不思議と空想の時代

不思議発見：大陸の海岸線 / フランシス・ベーコン / 原因を巡って自由な空想 / 空想から科学へ

第3回：大陸移動説をめぐる常識と非常識

ウエゲナーの大陸移動説 / 「地球収縮説」や「陸橋説」からの反論 / 常識と非常識

第4回：マリー・キュリーとマンテル対流説

学問の壁を越えて / M. キュリーの生きる哲学 / 放射性元素 / アーサー・ホームズのマンテル対流説

第5回：あるノーベル物理学賞受賞者の失敗

キュリー点の発見 / 自転する星は磁石 / 岩石の残留磁気と大陸移動説 / ブラケットの教訓

第6回：地磁気の逆転を提唱した日本人

世界大恐慌と満州事変勃発の頃 / 松山という科学者

第7回：第二次世界大戦と海洋底拡大説

戦争と科学 / 地磁気異常の縞

第8回：海洋底拡大説の傍証

海底の年令 / 海嶺付近の地震 / 地殻熱流量 / 火山島の形成年代

第9回：海洋底更新説と日本の重要性

太平洋の特徴 / 海洋底更新説 / 日本の社会状況と日本の科学者

第10回：プレートテクトニクス

地球の層構造 / 低速度層 / プレートテクトニクス

第11回：拡大する背弧海と肥大する島弧

付加体の重要な意味 / 川井直人の日本列島の屈曲 / 日本海掘削

第12回：何度も消えた太平洋 —日本のコンピューター—

ホットスポット / 丸山茂徳と深尾良夫 / 地震波トモグラフィー / プルームテクトニクス

第13回：3次元の地球から4次元の地球をつくる —全地球史解説—

丸山の描いた地球史

第14回：国境を越え地球を越えて —学界は白熱の渦—

第15回：地球を考える現代の動機—人類の未来—

人間圏 / ザビエルの言葉

## はじめに

稲盛アカデミーは鹿児島大学が掲げる教育理念「進取の精神の養成」を目指して各種の授業を開講している。筆者はその一環として平成27年度後期に「地球をつくった人々」を開講したので、授業内容をまとめ講義録として報告する。

この授業は平成5年から同22年まで開講していた。当時は漠然とながら授業目標を「Boys, be ambitious」の精神の養成や「フロンティア精神」の養成に置いて講義をしていたが、授業の趣旨は現在使われている「進取の精神」の養成と同じであると考えたため再開した。

筆者は「進取の精神」を養成するためには、その基盤として人間が本来持ち、また望んでいる「奇麗な（醜い）ものを奇麗だ（醜い）と感じる感性を豊かに育て、不思議なことに興味をもち、真理や正義を見つけようとする真摯な態度」が重要と考えており、この姿勢があれば進取の精神は自然に高揚するとのコンセプトで授業を進めてきた。ここに記載するのは授業内容の記録であり、それに加えて、毎回提出させた「ミニッツペーパー」と呼んでいる200字程度のレポートを引用して学生の代表的な感想や意見も載せた。毎回全員に提出させたが、無作為に数人を選んで紹介する。

学生に示した授業内容を以下に述べる。

「46億年前に誕生した地球は、海ができ生物が登場して発展を続けているという点で、太陽系の他の星と異なる特異な進化を遂げた星である。この地球の歴史を多くの科学者が解き明かしはじめた。

現在の地球表層は10枚程度に別れたプレートと呼ぶ厚さ100~200km程度のリソスフェアで覆われている。これらのプレートは固体地球物質の中では軽いため表面に浮んでおり、マントル対流でそれぞれ違う方向に動く。そのためプレートの境界では伸張や圧縮の応力が働いて地震や火山、津波など様々な地球の変動の原因となっている。プレートが動く理由、マントル対流の理由もよく解析され、地球が冷却する過程での変動と考えられる。このような地球変動に関する学説は一朝一夕にできた訳ではない。人間が自然現象に不思議を発見し、その原因を解明しようと様々に空想し、それを科学の世界に持ちこんで誰もが納得する学説を構築してきた結果であり、そのエネルギーが「進取の精神」である。そして進取の精神はひとつの不思議を解決するとすぐに次の不思議を見つけ出す。進取の精神とは人間が本来持っている真理を知りたいという欲望であり本能であろう。」

鹿児島大学の教育センターでは「Moodle」というコンピュータを使った学習管理システムを利用し教育効果を上げている。授業の予習復習ができるように、Moodleには授業の要点を書き資料を張付けて興味に応じて学習できるようにした。さらに学生の理解度を把握するために200字程度の小レポートを「ミニッツペーパー」と呼んで、学校からでも家からでもパソコンを使って提出できるようにした。授業の2日後を提出の締め切りとし、教員からのコメントで追加・修正して再提出できるようにした。

授業効果は相当上がったと思うが、しかし問題もあった。授業で基礎的な地質学や地学がわからないという不安や不満が出てきたので、Moodleでの解説を少し丁寧にした。ところが、授業に出席しないでMoodleの資料を読んでミニッツペーパーを出す学生が増えてきた。最初はそのような融通も進取の精神の一部と容認していたが、ミニッツペーパーの質が下がり、出席を大切にしている学生から不満が出てきた。そこでミニッツペーパーは授業終了10分前から教室で書かせるようにした。幸い対処が早く大事には至らなかったが、進取の精神の養成を目標にしている観点からは矛盾が多く、責任を強く感じた。

## 第1回：「地球をつくった人々」の趣旨紹介

### 「想定外」という言葉

2011年3月11日、日本は未曾有の大地震と津波に襲われ、福島県の原子力発電所は大打撃を受けた。大惨事の最中、私にとってちょっと気になる報道があった。当時のテレビや新聞の多くは、この地震や津波を「想定外」と捉えていた。例えば、次はそれを報じたある新聞記事である。

「今回の事故の最大の原因は耐震設計よりも津波の想定である。福島第1発電所の周囲には高さ7mの防波堤が建設されているが、今回の津波は14mだった。これは1000年に1度ぐらいのブラック・スワン（ほとんどありえない事象、誰も予想しなかった事象）で「想定しろ」というのが酷だろう。よく言われるように『隕石に当たって死ぬ』ぐらいの確率だろう。それを織り込んだ設計はできないと言うことだ。」

私にはこの人は地震や津波を知っているのだろうかといへん違和感を持った。右図の小さな黒点はいままでに発生した地震である。地球上には無数の地震が発生しているが、特に環太平洋地域やヒマラヤ・アルプス地域などに集中している。環太平洋地域とは太平洋の海洋プレートがまわりの大陸プレートの下に沈み込む地殻変動の激しい地域である。その代表的地域が日本である。

この図に理科年表から最近数十年に起こった3.11と同程度のマグニチュードの巨大地震を記入すると「10年に1回」ぐらいの頻度で起こっていることがよくわかる。「想定外」なんてとんでもない。

日本は環太平洋地域の特別な場所ではなく、同じ頻度でごく普通に火山や地震、津波が起こる地域であることをこの図は示している。環太平洋地域の長さはおおよそ4万kmで、そのうち日本は北海道から沖縄までおおよそ3千kmである。環太平洋全域で10年に1回巨大地震が起こるから、日本でも同じ割合で起こるとすると狭い分だけ頻度は少なく、計算上は130年に1回ぐらいになる。日本人は誰でも国の内外をはっきり分ける習性がある。日本以外で起こった地震はよそ事で、すぐ忘れてしまい私たちが感じるのは130年に1回である。しかし、そんなに頻繁とは感じない。最近面白いことがわかってきた。地震予知という学問では、何時何処で地震が発生するか予測しようと研究者は懸命である。ところが、この学問にカオス（不確定）科学が導入され、これを突き詰めていった結果、何時何処で地震が起こるか予知不可能という結論が出てしまった。私には難解で論理に踏み込めないが、連立方程式で未知数が方程式の数より多い状態に似ていると理解している。前述の130年に1度という頻度も、カオス科学では意味が薄れる。カオス科学を一義的に信じる必要はないけれど、しかし非常に重要なことは、この自然科学の成果を社会的に表現すれば「日本では何時何処で地震や津波が発生してもおかしくない」という意味になる。決して「想定外」ではない。そして「地震が起こっても驚くな。うろたえず自らの命を守れ。すぐ人命を救助せよ。物資を直に送り込んで避難生活を支援せよ。風評被害を食い止めよ」と訴えるのが地球科学者の社会的責任だと思う。このアドバイスを信頼して受け入れるのが社会の責任だと思う。もちろん、日本の海岸すべてに高さ20mの防波堤で造って備えるのはナンセンスである。科学を軽視し、人の尊厳よりも行政を弁護する言葉が「想定外」という言葉であると私には思える。

### 進取の精神

「進取の精神」はとても重要である。学びとは何か。社会生活を送る上で最小限必要な知識や考え方、

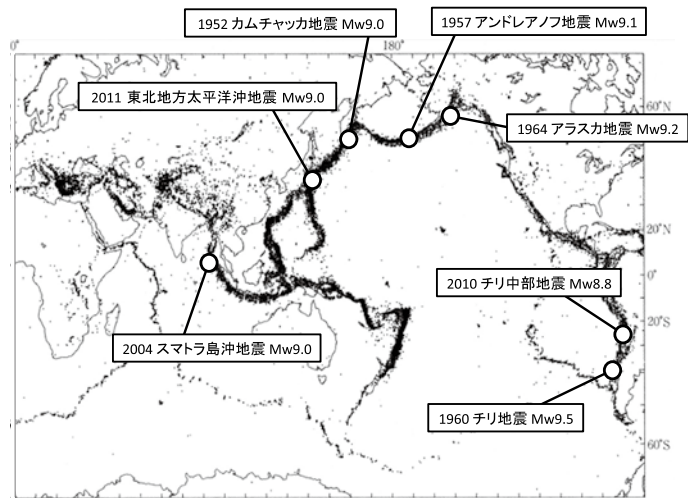


図1 世界の地震分布 (石橋克彦、1994; 理科年表、2014)

あるいは態度を私たちは教養と呼んでいるが、私にはそれと「進取の精神」がダブる。

前節の「想定外」という言葉が安易に飛び出すのは、科学的成果、特に自然科学の成果が理解できない、成果に期待しない、加えて科学者の社会的責任の不履行がこのような言葉をつくってきたのではないかとさえ思う。ここでは「進取の精神」とはなにかを少し考えたい。

鹿児島大学は進取の精神を養成すると謳っている。「進取の精神」というと「多くの困難に果敢に挑戦する精神」とか「為せば成る・・・」的な悲壮な覚悟を連想する。しかし、進取の精神の発露とは、「奇麗なもの奇麗だと感じる感性と、不思議だと受け止め、どうしてと考え、真実を求める真摯な姿勢」ではないかと思う。だから「進取の精神」というのは人間として最も素朴な希望に満ちたもので歓迎すべき姿勢、嬉しい精神活動だと思う。そんなことを言ったって、奇麗や不思議を感じなかったらどうすればいいのかと不安に思って反論したくなる人もいるだろう。そんなとき私が勧めたいのは、とびっきり優れた人と接することである。この上もなく成熟した社会に身を置くことである。神秘に満ちた大自然にどっぷり浸ることである。無条件に奇麗や不思議を感じとれるようになると確信する。優れた人にはすぐ会えないかも知れない。しかし、その人の本は読める。遠い過去の人にも会える。この授業ではそんな人々を紹介するつもりである。

科学では、不思議の発見にはじまり、全知全能を駆使し自由奔放にその原因を空想し、そのうち一番気に入った考えを皆が納得して共有できる学説を作るために、正確な実験・調査と厳密な理論構築をくりかえす。こうして科学が発展してきたが、特に大切な活動は今述べた不思議発見と自由奔放に空想することではないだろうか。

人々の夢とロマンが、想像を絶する地球の歴史を解き明かしてきた。そこでこれらの人々の活動を「人々が地球をつくったドラマ」と呼びたい。

## 授業の概要

46億年前に誕生した地球は、海ができ生物が登場して発展を続けているという点で、太陽系の他の星と異なる進化を遂げている星である。太陽系星雲が凝縮してできた地球は中心部に金属の鉄を、周辺部に分厚い岩石をもっている。地球に蓄積した熱は宇宙空間に放出されて冷却している。放射性元素からの熱や惑星衝突の熱は加わるが、地球の冷却の大勢は変わらない。この地球が今まで何をしてきたか、想像を絶する歴史を解き明かしはじめた。それを推進したのが「進取の精神」である。人間が地球に不思議を発見し原因を解明しようと様々に空想し、それを科学の世界に持ちこんで誰もが納得する学説を構築してきた。進取の精神はひとつの不思議が解決するとすぐに次の不思議を見つけ出した。

この授業に登場する人々は、最初不思議発見の驚きや喜び、さらにその原因を空想することがとても好きで、それが科学的に証明するために過酷な仕事も克服していった。

具体的な授業の進め方は次の講義テーマに沿って、大陸が移動したという発想からその集大成とも言える「プレートテクトニクス」、それをさらに発展させた学説について、それらを創り上げてきた地球科学者達の育った環境や生き様という視点から近代地球科学史を紹介したい。

第1回：「地球をつくった人々」の趣旨紹介 / 第2回：大陸海岸線の不思議と空想の時代 / 第3回：大陸移動説をめぐる常識と非常識 / 第4回：マリー・キュリーとマンテル対流説 / 第5回：あるノーベル物理学賞受賞者の失敗 / 第6回：地磁気の逆転を提唱した日本人 / 第7回：第二次世界大戦と海洋底拡大説 / 第8回：海洋底拡大説の傍証 / 第9回：海洋底更新説と日本の重要性 / 第10回：プレートテクトニクス / 第11回：拡大する背弧海と肥大する島弧 / 第12回：何度も消えた太平洋—日本のコンピューター / 第13回：3次元の地球から4次元の地球をつくる—全地球史解説— / 第14回：国境を越え地球を越えて—学界は白熱の渦— / 第15回：地球を考える現代の動機—人類の未来—

## 学生の目標

学生のみなさんには学習目標として以下のことを要望する。

1. 科学の出発点は不思議発見であり、その解明の意欲が様々な空想を創り、進取の精神を高揚させ

ることを理解する。

2. 科学の発展は天才ではなく普通の人々の真理探究のエネルギーによることを理解する。
3. 学問の発展には、社会全体の理解と支援が必要であることを理解する。
4. 地球科学の基礎的な知識を身につける。

#### ミニッツペーパー

- ・ 純粋に「地球をつくった人々」という講義名にとても興味をそそられ、再登録もできるので試しに受講してみたいと思いました。(今日は) 根建先生のお話は最近の話題や、それに関連したご自身の過去の体験や価値観を語ってくださって興味深かったです。
- ・ 現代の「試験第一主義」の教育批判をおっしゃっていました。そして、「不思議発見」や「真理探究のエネルギー」が科学の発展に繋がり、世界を変えていくこともおっしゃっていました。まさにその通りだと思います。(作業仮説・空想が大切)
- ・ 私が一番印象に残ったのは、福島原子力発電所に関する話です。女性作業員の方の言葉に対する非難の言葉は、あまりにも心のないものばかりでした。叩かれている東電をかばって、また少し理解してもらおうと行動した女性作業員の方を、私は尊敬します。
- ・ この講義をとった理由ですが、単純ですが「講義の名前をみてから」です。「地球をつくった人々」と言われているような想像をしました。科学的なのか宇宙的なのか、それとも歴史的なものがななのか、どのような授業かはわかりませんでした。がなんだかワクワクする名前だったのでこの講義をとってみました。そのあとシラバスをみて、「あ、こんなことするんだ」といい意味で驚きました。とても面白そうで、これから毎回主席することを目標に頑張りたいと思います。また、「地球をつくった人々」の講義を受けた感想ですが、プリントがカラーでとてもわかりやすいなということです。そして先生の授業には共感できる場所や驚くことが多くありました。僕の勝手な見解ですが先生の今の日本に対する少し辛口なコメントが特になるほどと思った部分です。そして大学生のうちにバカになれというのにも心に残りました。自分がしようか迷っていることがあるので、それ今度実践してみようかなと思いました。

## 第2回：大陸海岸線の不思議と空想の時代

### 不思議発見：大陸の海岸線

1880年生まれのドイツ人、アルフレッド・ウエゲナーは当時の新大陸グリーンランドの探検に夢中だった。探検家に地図は不可欠である。世界地図を見ているうちに、隣り合う2つの大陸の海岸線が似ている不思議に気づいた。グリーンランドの探検家には、流氷が壊れ別れていく様子と海岸線の一致が重なったという逸話が残っている。真偽のほどは定かではないが、この不思議発見と原因を空想するエネルギーが気象学者ウエゲナーの心に火をつけ、2年間という短期間で地質学や古生物学などの膨大な文献を調べた結果、大陸移動説にたどり着いた。

海岸線が似ていることに気づいた人はそれまでいなかったのだろうか。私が小学校のとき、地球儀を造りながらそれに気づいた友人が何人もいた。その程度だから、海岸線の一致に気づいた人は世界地図の作成中から出現した。

### フランシス・ベーコン

海岸線の一致に気付いた最初の方は、イギリスのフランシス・ベーコン(1561-1626)と言われている。哲学者で神学者であるベーコンは「知識は力なり」の言葉を残し、学問は自分の立身出世や金儲けのためではなく、ましてや知識そのもののためでなく、もっと質の高い人類全体の利益に結びつくものだと主張した。それだけ価値のある学問の成果を上げるためには、人類全体が協力しあっていかなければならない。世代を超えて協力し共同作業をしなければ達成できない学問もあり、研究結果を誰もが読める公の記録に残すことを提案した。

ベーコンの時代は大航海の時代である。世界地図の重要性が認識され正確な世界地図が必要になってきた。ベーコンは自身の主張に沿って世界地図作成に参画・協力した。そして「隣り合う2つの大陸の海岸線がよく似ている」ことと「大陸の南端はとがっている」ことを書き記した。なぜこのような現象が存在するのか、単なる偶然かそれとも重要な自然の理なのか、ベーコンは結論を将来に託し「自然の理解が重要で、認識が充分進めば、いつかはその原因が分る」と記録に留めた。

### 原因を巡って自由な空想

ベーコンの後、多くの人々が海岸線の不思議に注目し、ベーコンの慎重な警告を越えて、その原因を様々に空想して語り継いだ。その幾つかを紹介し、空想することの重要さと楽しさを紹介したい。

○**大洪水説**：ベーコンが海岸線の一致を指摘したのは16世紀であるが、17世紀には「大洪水説」が提唱された。海には海流が存在するが、その昔、大西洋の海流が激しく大きくて、巨視的には大河のようであったと空想する人が現れた。河川は基本的には対岸の形が同じになるが、人類が経験したことのない大西洋の大洪水によって両岸が平行にえぐり取られ、南北アメリカの東海岸とアフリカ・ヨーロッパの西海岸が似た形になっていると説明した。確かに、大西洋を北上すると川幅は狭くなりカナダとグリーンランド間は支流のように見える。

○**アトランティス大陸の沈降説**：18世紀になると、アトランティス大陸の沈降という学説が提唱された。古代ギリシアの哲学者プラトンは、彼の著書の中でその昔、はるか西の海には大陸と呼べるほどの大きな島と、そこに繁栄した王国があったと述べている。強大な軍事力を背景に世界の覇権を握ろうとしたものの、ゼウスという神様の怒りに触れて海中に沈められたという。この伝説を是とするキリスト教会に守られて、大陸の沈没説は長く信じられた。

18世紀に始まった産業革命とも呼応し、アトランティス大陸の沈降説はあらゆる地質現象の説明と対立するはずであるが、むしろ発展する（断層）地質学によって信憑性の高い説となった。後述の地球収縮説はウェゲナーの大陸移動説を強く批判した考えである。

それは後で紹介することにして、その前にジョージ・ダーウィン（1845-1912）の月の太平洋起源説を紹介し、不思議発見と空想の重要さと楽しさを紹介したい。

○**月の太平洋起源説**：かの有名な進化論のチャールズ・ダーウィンの次男ジョージ・ダーウィンは、ケンブリッジ大学で天文学と物理学の教授として潮汐論や天体形状論で貢献したが、1879年、その専門的立場から月の太平洋起源説を提唱した。地球儀を見て大西洋を大河だと空想した人がいたのに対し、太平洋が丸に見え、月が飛び出した跡だと空想した人もいた。それがダーウィンである。太陽から分離した灼熱の地球が冷却して少し硬くなった頃、他の彗星が接近して強い引力が働き、地球から挽れてできたのが月であるとダーウィンは空想した。軟らかいお餅のような地球から月が抜けた跡が大太平洋である。ダーウィンは、月が抜けた後の太平洋の穴に南北アメリカ大陸がヨーロッパ・アフリカ大陸から別れてずり落ちてきた。そのため大西洋の両側の大陸の海岸線が似ているのだと主張した。ダーウィンはそれを証明する現象を示さなかったが、天体運動論の計算から納得していた。地球と月（一部の研究者は火星も）はもともと一つの星であり、それから太陽や他の星との潮汐と、地球自身の固有運動が共鳴すると、潮汐はどんどん高まり、これらが分離したと考えた人は多かった。

○**地球収縮説**：地球に関する科学は文明誕生の早い段階から発展した。それは人類が生存をかけての戦いでもあった。例えば、中世の時代には地下資源の利用と地質・鉱床・鉱物の認識が高揚し、産業革命を成功させていくが、その中で地質学が着実に進歩した。産業革命時、地層累重の法則（地層は下から上に向かって堆積する）が発見される。これによって石炭の探査、発見と採掘、活用が飛躍的に増大し産業革命の原動力となった。産業革命後も地質学や古生物学はダーウィンの進化論と相乗効果を起こして、地球の歴史と言う概念に繋がってゆく。断層のモデルが出来上がったのもこの頃である。張力や圧縮力が地殻に働き限界を越えると断層形成という破壊で解消される。一般に断層は平行に何本も発達し、張力が働いた場合その間が陥没する。このようにして大西洋ができたと考えれば、アトランティス大陸の沈降も矛盾なく理解できる。教会にも保護され、大陸の沈没説は長く信じられた。さらに進んで次のような理論も発展した。

○陸橋説：海を挟んだ2つの大陸に、陸地にしか住めない同じ生物が存在するのは、昔その間に陸地があり、橋の役割を果たしていた。つまり、今の海が昔陸地だった証拠であると考えた。堆積岩は土砂が水で運ばれて溜まってできたものであり、その昔そこは海だった。堆積岩がなければがその時はそこが陸だったと考えられる。このように考え詳細に分析していけば、昔の海と陸地が何処にあったかがわかる。古世界地図ができる。このようにして、解析の結果見つけ出された「テーチス海」と二つの原始大陸は約2億年前～2億3000万年前の地形であると考えた。日本でも陸橋説は重宝され、いろいろの地質現象を説明していた。南西諸島はすべて陸地で繋がっていた。およそ200万年前、そこへアマミノクロウサギが大陸から移動して来たが陸橋が沈み奄美大島で孤立したと理解した。このような研究成果は地球規模で調査され、次々と新しい地史が提案されていた。

### 空想から科学へ

科学は常に不思議が出発点である。不思議に興味を駆り立てられて因果関係を明らかにしてきた。海岸線類似の原因にしても根拠がまったくない状態で空想した訳ではない。

17世紀に海流が発見され、大西洋大河説の根拠となった。月の太平洋起源説にしても、星間に働く引力や自転と遠心力の発見が、月分離説の根拠になっている。17世紀の海流の発見、18世紀の断層形成の力学の確立、19世紀の星間の潮汐力の理解が進んだことが新説誕生のきっかけになった。

海岸線について、300年間多くは奇抜で自由な発想が続いた。それを科学の世界に持ち込んで真実を追求するのにまた長い道のりを歩む。科学的に考察したのはウエゲナーが初めてと言われているが、そのウエゲナーも発表後30年以上にわたって、空想の中を模索するエセ科学者と呼ばれた。

#### ミニッツペーパー

- ・ 大陸の海岸線がほぼ一致しているその原因とは、ヴェゲナーが唱えた大陸移動説ではないかと私は考えます。そう考える理由は、ある大陸にしか生息していない陸上動物の大昔の化石などが別の大陸で見つかったという情報を得たことがあるからです。大昔の陸上動物が海を渡るとは考えにくいので、大陸はもともと1つでそれが分裂して今の形が成っているという大陸移動説が有力だと考えます。
- ・ 現在では否定されている大洪水説やアトランティス大陸の沈没や陸橋説、月の起源説はいずれもとても自由でよい発想だと思う。大洪水説は世界地図をただの地図としてみるのではなく、身近にあるような川に見立てて考えていて、とても遊び心のあるものだと感じた。アトランティス大陸の話も夢があるものであり、月の起源説も壮大なスケールで考えられていて、研究者達の純粋な好奇心のようなものをかんじることができた。これらから、遊び心をもって発想を豊かにすることは大切なことであると感じた。
- ・ 16世紀から19世紀にかけて提唱された大陸の海岸線の一致についての様々な学説は、どの説も確かに科学的根拠に欠けますが、その考えに至るまでの思考回路は明示されており、突拍子のない考えだとは言いがたい説が多くありました。特に、海を渡ることができない動物が異なる大陸に分布していることから提唱された陸橋説には思わず頷いてしまいました。動物の分布域と大陸の海岸線の一致とをつなぎ合わせる鋭い着眼点に感銘を受けたためです。たとえ最初は空想であったとしても、着眼点を変え、研究を重ねることで空想が新説となり得ることを学びました。

### 第3回：大陸移動説をめぐる常識と非常識

ベーコンの「科学が学問が発展すれば、何れその原因がわかる」との提言は、我こそは海岸線一致の原因を見つけようという刺激になり、いろいろな空想をした。空想はそれだけで人間を活性化する。大河「大西洋」説、アトランティス大陸の沈没説、月の太平洋起源説、等々、どの説もロマンに満ちた実に楽しい学説である。残念ながら、これらの諸説は空想の段階にとどまり、科学とは呼べないものであ



た。しかし、これらの空想こそ科学を誕生させ発展させた原動力であると言いたい。空想と科学の境界が何処にあるのか、最初は漠としている。20世紀後半になってウエゲナーの大陸移動説は空想の世界の問題を科学の世界に持ちこんだと高く評価されたが、発表した頃は空想だけに溺れる似非科学と酷評された。本日の授業では「空想と科学」を「非常識と常識」という視点で考えてみたい。

### ウエゲナーの大陸移動説

気象学者のウエゲナーは、「隣り合う大陸の海岸線がよく似ている」ことに不思議を感じ、その原因は流水と同じで大陸が漂流したからだと言った。

空想を仮説として科学の世界に持ちこみ、誰もが納得する論理と証拠を揃え、1912年に「今からおよそ1億年以上前、世界のすべての大陸はまとまって超大陸（パンゲア）をつくっていたが、それが分裂し、水平方向に移動して現在の位置まで来た」と発表した。

その最初の根拠は図2に示した「アイソスタシーの原理」である。比較的軽い地殻が、重く流動性のあるマントルに浮かんでおり、地殻の荷重と地殻に働く浮力が釣りあっているとする説が、1855年から1889年にかけてイギリスの天文学者ジョージ・B・エアリー、イギリスの数学者ジョン・H・プラット、それに米国の地質学者クラレンス・E・ダットンらによって完成された。ウエゲナーはこのアイソスタシーの原理が隣り合う大陸の海岸線の形がよく似ている理由だと考えた。まさに流水と同じである。いろいろ検討しているうちに、海岸線よりもっと沖合にある大陸斜面の方はもっと一致すると説明した。地殻の厚さの変化に注目すると大陸と海洋の境界は大陸斜面だからである。

ウエゲナーはさらに多くの科学的根拠を示した。ウエゲナーの2つ目の根拠は、図3に示したように、大陸をその大陸斜面で接合すると2つの大陸に刻まれた地質構造は連続するということである。大陸で観察される古い地塊の分布や広域的にできる断層や褶曲構造等の地質構造が連続する。

3つ目の根拠は気候の化石の分布である。大陸に残る化石から3億年前の熱帯・温帯・寒帯などの気候分布を調べると、すべての大陸が集まっていたことがわかる。大陸の位置が現在と同じであれば昔の気候分布は説明できない。これをウエゲナーは図4で示した。

さらに続く。地球の標高を調べると、それらは2つの高さに偏在する。これを極言すれば、地球には2つの高さしかなく、本質的に大陸と海洋の2種類しか存在しないことを意味する。大陸と海洋は本質的に違う物質で構成されていることを意味し、大陸が海洋になることもその逆も起こりえない。基本的には海が陸になったり、陸が海になることはない。つまり、陸橋説は誤りで海に棲めない同じ生物の化石が2つの陸地に分布することは、それらの陸地がもと接合していた証拠になる。

さらに続く。地球の標高を調べると、それらは2つの高さに偏在する。これを極言すれば、地球には2つの高さしかなく、本質的に大陸と海洋の2種類しか存在しないことを意味する。大陸と海洋は本質的に違う物質で構成されていることを意味し、大陸が海洋になることもその逆も起こりえない。基本的には海が陸になったり、陸が海になることはない。つまり、陸橋説は誤りで海に棲めない同じ生物の化石が2つの陸地に分布することは、それらの陸地がもと接合していた証拠になる。

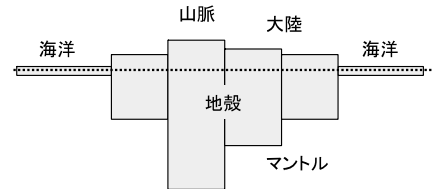


図2 アイソスタシーの原理  
軽くて固い地殻は重くて柔らかいマントルの上に浮かんでいる

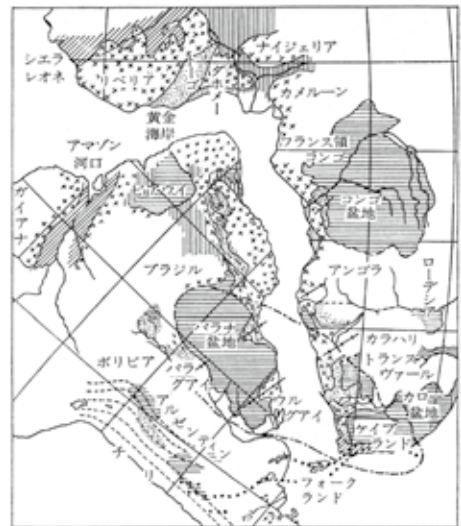


図3 移動前の南アメリカとアフリカ大陸  
様々な地質構造が連続する (Wegenar, 1928; 翻訳/竹内, 1975)



E=水の陸 K=石炭 S=岩塩 G=石こう W=砂漠の砂岩 〇=乾燥帯  
ケッペンおよびウエゲナーによる。

図4 石炭紀(3億6000万年前～3億年前)における水、沼地(ジャングル)、砂漠の分布  
(Wegenar, 1928; 翻訳/竹内, 1975)



### 「地球収縮説」や「陸橋説」からの反論

当時の人々は、本質的に海が陸地に隆起し、また陸地が沈降して海域になると考えていた。海底隆起の単純で動かぬ証拠は陸地に海洋で棲息していた魚の化石が存在することである。

図5左(a)にオルトケラス(直角貝)の写真を示すが、モロッコの古生代(約5億年前)の地層中の化石である。この生物は「たこ」や「いか」と同じ軟体動物であるが、オウム貝の仲間で固い殻を持つ。約5億年前には海だったこの地域は現在アフリカ大地を構成している。この場所が昔海だった証拠である。

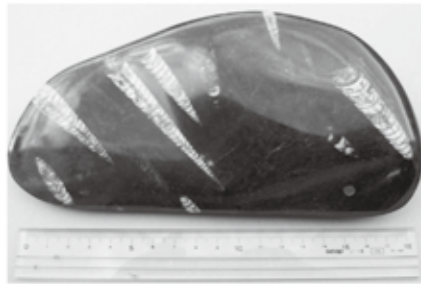


図5 陸上で見つかる海洋生物の化石

(a) オルトケラスの化石:約5億年前に海で棲息していたが今は化石となってアフリカ大陸モロッコの内陸で見つかる。

(b) 三葉虫の化石:4億年前の海の生物の化石は今標高4200mのアンデス山脈の山頂で観察される。

図5右(b)は三葉虫の写真である。ボリビアのアンデス山脈の

古生代(約4億年前)の地層中には三葉虫の化石がたくさん普遍的に存在する。三葉虫は海に棲む節足動物で硬い殻を持つ。約4億年前には海だったこの地層は現在標高4200mの山脈に存在する。

これらは基本的な地球表層部の変動は垂直方向で、海が隆起して陸地になり、逆に沈降して海になる地向斜運動によって地球の歴史は刻まれたことを明瞭に示している。大陸移動説を否定する証拠はさらに次のようにたくさんあると言う。

- 陸地には、海に棲息していた魚など海生生物の化石は至る所にある。海底が隆起して陸地になった証拠である。
- アルプスやヒマラヤは地球の代表的な造山帯の山脈であり、そこには広範囲に海底でできた堆積岩が分布する。やはり、そこが昔海だった証拠である(図6も同様)。
- 陸地沈降の証拠:世界中至る所で見られるリアス式海岸は、地殻沈降の証拠である。
- 海岸段丘や河岸段丘は隆起してできた地形で、地殻隆起の証拠である。沖永良部島では水面下にあった珊瑚礁が隆起し、石灰岩の台地状の島になった。徳之島や与論島等も同じである。
- 離れた2つの陸地に海に棲めない同じ生物の化石があることは、その間にある海が昔陸であったことを意味する。これを陸橋説と呼んだ。
- 地球収縮説:地球は太陽から分離した。太陽ほどの高温の原始地球が現在の温度まで冷却し収縮をつづけた。海洋や陸、海溝や山脈は収縮の結果できた、いわば皺のようなものである。



図6 アンデス山脈を構成する3~5億年前に海底に堆積してできた地層(ボリヴィア、イリマニから南東を望む)

### 常識と非常識

これらの論争でウェゲナーは非常識と誹謗された。当時の人々には大陸は海洋になり、海洋が陸地になる垂直方向の変動が常識である。上に述べた地球収縮説や陸橋説が常識である。ウェゲナーの大陸は浮かんだままで沈むことはなく水平に移動するだけという考えは、魚の化石1つとっても非常識極まりない考えである。ウェゲナーにすればまったく逆で、海底が隆起して陸地になり、またその逆も起こることは認めるが、それは地球で起こっている変動の中では特殊なケースであり、大陸が基本的には沈まない、それが常識的な考えであると考えた。

こうした論争は人間社会に常に起こる。常識とはそう思った多数の人の考えであって、反対の意見があれば、どちらかが正しい。正しい方が常識になる。しかし常識が正しいとは言えない。常識に反する非常識であっても、それが正しければいずれその考えはいずれ常識になる。このロジックの結論はだか

ら非常識を恐れてはならない、となる。真実か否かだけが重要なのである。

関連してウエゲナーは、無知を恐れるな。さらに知らないことを知らないと言える勇気が必要であると教えている。地質学を知らなかったからこそ真実を明らかにできた。人の知識よりも自然現象を優先し大切に扱うことが重要なのである。

ともあれ、ウエゲナーが話を聞いてもらえたのは最初の3年だけで、その後は笑われ、無視され、迫害され、弟子がつかなくなった。ウエゲナーは大陸移動説を発表して17年後の1929年にグリーンランドで遭難して死んだ。大陸移動説がすっかり忘れ去られて25年、まったく別の分野の科学によって、ウエゲナーの根拠とは独立して、大陸が動いたと考えざるを得ない自然現象が発見された。

最初に進取の精神を身につけるために必要なことは何かを提言した。不思議発見の感性とそれを真摯に考え夢いっぱい空想することだと言った。ウエゲナーからの教訓はそれに加えて、常識は非常識から生まれるのであって、非常識に論理的に正しければ、いずれ常識になる、ということではないだろうか。

#### ミニッツペーパー

- ・ 今日の授業でウエゲナーの大陸移動説がなぜ受け入れられなかったのか分かった気がした。確かに、化石や氷河の分布など、ウエゲナーは大陸が移動したことについて多くの証拠を示している。しかし、彼には、一つ大きなミスがあったのではないか。それは、(陸に) 元々海底だった証拠のある地層が数多く存在するのに、海⇄陸の変換について説明できていなかったことだ。大陸が移動する、という突拍子もない仮説を受け入れることは、しっかりした証拠がなければ難しい。当時の人々は、ウエゲナーの説にわずかな抜けを見つけ、そこを攻撃したのだろう。もし、ウエゲナーが陸地の隆起について説明できていればどうなったのだろう、非常に気になる。
- ・ 大陸移動説について証拠に基づき、様々な根拠が述べられていた。特に海底隆起の証拠としてヒマラヤ山脈のような高地での海洋生物の化石の発見、海底沈降の証拠としてのリアス式海岸など非常識的な考え方もしれないが私はこの発見はすばらしいことだと感じた。他にも地球収縮説についてもウエゲナーなりの根拠を述べており、・・・、時には非常識的な考えを持つようにしたいと思った。
- ・ 今回の授業で一番に残っているのは、「常識はもともと非常識なのだ」というお言葉です。ウエゲナーの大陸移動説も科学的根拠をもちながらも当時の人々にとってはあり得ない説、非常識であったわけです。しかし、彼の没後、その説の真価が評価されたのはウエゲナーが笑われても迫害されても真摯にこの主張と向き合い、貫いたからこそだと思います。人間は多数の意見、いわゆる「常識」に流されてしまいがちですが、時代の流れとともに常識というのは変化するものであり、常識と向き合った上で疑う姿勢を忘れず、真理を追究しようとする進取の精神こそが大切だなどと強く思いました。今回の講義で感じたことは、世間では常識とされている知識でさえも、クリティカルシンキング (批判的思考) を持って考えなければならないということである。現在では、科学技術も発達し、教科書に載っているような知識も、昔ほどの誤りはなくなってきたが、過去に教科書で証明されている知識の誤りに気付いた小学生が新聞で取り上げられているの思い出した。このように、どれだけ科学技術が発達しても、人間が行うことに完璧を求めるのは非常に難しいので、何に対しても批判的に物事を捉えなければならないと感じた。

## 第4回：マリー・キュリーとマントル対流説

### 学問の壁を越えて

イギリスのアーサー・ホームズは学問の境界を越えて、マリー・キュリーの放射性元素に関する物理学の成果を地質学に取り込んだ。

「鳥の目」という言葉がある。鳥は空高く舞い上がり広い景色を眺め何処に何があるか位置関係を確認することができるように、人間も広い視点で俯瞰することが重要である。いろいろな専門分野に不思議を見つけ、何故だろうといろいろな想像や空想をして自分の問題として理解し、楽しむことが重要である。勉強、勉強で追われる日本文化の中では困難を伴うが是非心がけてほしい。自分のやりたいこと以外の関連学問も進取の精神を高揚させる。

この授業の最初に地球をつくった人々は天才ではなく、進取の精神に富んだ普通の人たちだと申し上げた。でもさすがに M. キュリーは天才だと思う。天才は日常生活の中で何をしてきたのかを考えてもらうために紹介したい。彼女の人と生き方は、次女エーヴ・キュリーが遺した感動的な伝記「キュリー夫人伝」に詳しい。天才も凡人もやることは同じと考えるか、天才の真似はできないと考えるか、皆さんに考えてほしい。

### M. キュリーの生きる哲学

当時ポーランドは東ヨーロッパの貧困な国で、キュリー一家も貧窮を極めたようだ。マリーは5人兄弟の末っ子で使命感が強く、17才から23才まで姉のパリ留学を支えるため家庭教師をしながら仕送りをつづけたという。姉が卒業し結婚してから、その姉の支援で留學生活を始めたようだ。苦難続きの中を努力で放射性元素ラジウムを発見した。この発見は、新たな科学と哲学を生みだただけでなく病気を治療するために役立つものでもあった。ラジウムを薬として特許を取得するよう勧められたが、科学は金でなく真理を明らかにするものだと考えて、研究成果をあますところなく公表した。彼女の人格が現れている。そして当時、放射能の危険性がわからず、共同で作業した研究者が何人も死亡、マリーも白血病で命を落とす。66才だった。

キュリーの素晴らしさは純粹に科学する姿勢にある。「私は科学が大きな美をもっていると思うものの一人です。研究室にいる学者はたんなる技術者ではありません。それは、おとぎ話のような感動を与える自然現象にむかっている子どもでもあります」と述べている。何という素晴らしい進取の精神であろうか。また、彼女は教育も熱心で、同僚と一緒に学習塾をつくり全人教育を行なった。当時のフランスでは、現在の日本同様詰め込み教育が蔓延していたらしい。彼女は、積極的に行動する心、人を思いやる心が重要で、それは自然に触れることや芸術によって育まれると信じていた。そして「子供の教育について言えば、私は体育を主とし、ほんの少しの時間を学科のために残しておけばそれで十分だ」という意見を持っておりました」と回顧している。彼女はとてもスケールの大きな人で、どの逸話も聞いて気持ちがいい。

### 放射性元素

彼女の研究した放射性元素について触れよう。ある鉱石を机にしまっておいたところ、同じ机にしまった乾板が感光していることを不思議に思い、鉱石を研究することになった。顔料に使うこの鉱石の中に乾板を感光させるエネルギーがあることをつきとめ、それを放射能と名付けた。この放射能が新しく発見したラジウムという元素から放出していることを明らかにした。これが放射性元素の発見である。放射性元素は壊変して別の元素（ラドン）になる。

キュリーはラジウムを詳しく調べて、放射性元素の壊変の速度は残っている放射性元素の量に比例し、壊変常数は元素固有であることを明らかにした。壊変に伴って膨大なエネルギー（放射能と熱）を放出する。前者の他の元素に変わる性質から、後に地球や鉱物の年代測定が可能となった。また後者のエネルギーの放出については、地球に存在する放射性元素の量から総発熱量を求めると地球は発熱している可能性がある」と指摘されるようになった。

地球を構成する放射性元素が熱を放出している。これはそれまで多くの人々が信じていた地球収縮説にとって大変重要な問題である。いったいどんな放射性元素がどれくらい入っているのか、正確に調べる必要がある。地球は地殻、マントル、核等と層状構造をなしている。化学組成も違うからそれぞれの放射性元素の種類や含有量を調べなくてはならない。

地球の深部にある核を取り出して調べることはできないが、太陽系星雲の進化について理解が進み、地球の核は空から落ちてくる隕鉄と同じだと推定することができるようになった。マントルも同様に石質隕石に相当し、それに含まれる放射性元素をマントルに当てはめることが可能である。こんな方法はベストでないが、科学的には妥当な類推である。地球の主要な放射性元素は単純に考えるとカリウム ( $^{40}\text{K}$ )、ウラニウム (U)、トリウム (Th) の3元素で、放出される熱の総量も推定可能である。地球がどのようにして誕生し現在に至ったかを含め、隕石の研究、太陽系惑星の研究、太陽系外の恒星の研究などが互いに空想を共有しながら科学として少しずつわかってきた。

地球は太陽系星雲を構成していた塵や微粒子が集積して、ほぼ46億年前の比較的短時間の間に誕生した。その頃の熱は主に運動エネルギーから蓄積された。それに放射性元素から放出される熱が加わって地球の熱源となっている。熱は宇宙空間に逃げていくために地球全体としては冷却するであろうが、放射性元素からの発熱や重力のエネルギーは地球を暖めている。全体として、冷却していくのか昇温していくかは慎重に検討しなくてはならない。少なくともそれまでの地球収縮説、地球は太陽から分離し、分離当時は太陽と同じ灼熱した星であったが宇宙空間に熱を放出して冷却し現在のようになったという説は考え直す必要があるという点で衆目の一致するところとなった。地球収縮説はすっかり色があせていった。

地球収縮説が誤りであれば、隆起や沈降という地殻変動を起こす理由を別に考えなければならない。

隆起や沈降という地殻変動は、もっと具体的には地向斜運動や造山運動と呼ばれている。この当時、すでにこれらの地殻変動は地球史上繰り返してきたことが明らかになってきており、繰り返しも説明しなくてはならない。難解を極めた。多くの人々は沈黙せざるを得なくなった。

### アーサー・ホームズのマントル対流説

イギリスのアーサー・ホームズ (1890-1965) は、学生時代に物理学を学び、後に地質学に転じた。大学に在学中、放射性元素ウラニウムの鉛への壊変現象を使って、岩石の年代測定を行った。このときカンブリア紀初頭の岩石の年代を測定し5.9億年という値を得た。この値は現在の測定結果からも極めて高い精度で、最新の原子核物理学の地質学への導入に成功したホームズはその素晴らしさを高く評価された。

1924年にはイギリスのダラム大学に地質学教室を創設したが、この時最大の研究課題は暖まる地球でなぜ隆起や沈降という地殻変動、具体的に地向斜運動や造山運動が繰り返し起こるかであった。

これを説明するために1929年には、地球内部(マントル)の熱による対流が重要というマントル対流説を発表した。地球内部の熱は宇宙空間に散逸していく。マントルと地殻は岩石で構成されていて熱伝導率は極めて低い。そのような地球で熱が移動するためにマントルで対流が起こっている。ホームズの偉大なところは、あの固い岩石が流動的で対流を起こして熱を宇宙空間に送り出しているという発想である。ウェゲナーの大陸移動説同様に当時の人々には受け入れ難い非常識だったろう。

このマントル対流には重要な魅力があった。熱が蓄積するのはマントルの下部に限られ、高温になったマントル下部は比重が小さくなって上昇する。地球表層部にあつて熱を放出し終えた上部マントルは重くなって沈降する。このマントル内の温度差によって対流が起こる。この対流は恒常的でなく、マントル下部が放射性元素の熱で加熱され、比重減少を起こすまであるいはマントル上部が冷えて重くなるまで、対流が停止する。

この基本運動の中で、大陸周辺の対流沈降地域で「地向斜」と呼ばれる沈降地形ができて大陸の軽い物質が蓄積し、マントルの大きな対流が止むと「地向斜」地域にアイソスタシーの原理が働いて隆起する。この隆起運動が世界各地で見られる「造山運動」である。造山運動でできた巨大山脈は何れ浸食作用で消滅しているといったストーリーがつけられた。

このマンテル対流説は当時振り向かれなかったヴェゲナーの大陸移動説までも支持するもので、マンテル対流が大陸を移動させるとホームズは考えた。ウエゲナーは大陸移動の原動力がわからず苦慮していたが、それを見事に説明したのがマンテル対流の考えである。しかし、マンテル対流説にも限界があった。マンテル対流を直接証明する現象を見出せず、また手段も見出せなかった。そのためホームズ自身マンテル対流説を仮説と呼んだ。

「鳥の目、虫の目」という言葉がある。学問の修得に必要な素養で、一つは虫が地面を這い回るように微に入り細に入りコツコツと納得しながら修得することであり、もう一つは鳥のように空高くから学問全体を俯瞰することである。本日は、鳥になって原子核物理学を見たホームズという科学者が地質学に重要だと考えてそれを取り入れ、地質学を一段と飛躍させたという話を紹介した。

#### ミニッツペーパー

- ・ 私は、M. キュリーの教育の考えにとっても共感しました。当時のフランスでは、現在の日本のように専門科目偏重や詰め込み教育が蔓延していた。彼女は、積極的に行動する心、人を思いやる心が重要で、それは自然に触れることや芸術によって育まれると信じていた。そして、何よりも大切なのは健康であると考えていた。この文は今の日本人全員に読んでもらいたいと思える文でした。自殺、人間関係で問題が起こっている今、世界のテストの日本のランキングが落ちてしまったなどではなく、子供たちにとって大切なもの、感じる心を育てるのが今一番大切な教育なのではないかと改めて考えさせられる講義でした。
- ・ 大陸移動説から始まり、いろいろな説が述べられてきたようですが、これらは現在では有力なのでしょうか。私は地理や科学的なものが苦手で、理解するのに苦勞するため、たくさんの説が出るとそれぞれの説が混ざって覚えてしまいます。そして、すべてが正解のようにも間違いのようにも思えてしまいます。なので、現在ではそれらの説が正しいとされているのかいないのかを知りたいなと思いました。
- ・ キュリー夫人は計算や読み書きの訓練は必要であるが積極的に行動する心、人を思いやる心は自然に触れることや芸術によって育まれるという教育論や科学者が発見したものはすべての人が利用できるにすべきだと考え、研究の成果はすべて公表するという学問論を知り、人としてすばらしい方であると尊敬した。キュリー夫人やアーサー・ホームズの話から自分の専門を高めるにはまわりの学問も含め考えていくことが大切であると学んだ。様々な分野が進展していくことで大きな謎が解明されていくのだと感じた。
- ・ 私は今回の講義を聞き、キュリーの学問観や教育論に非常に感銘を受けました。アーサー・ホームズのマンテル対流仮説が難しく理解できなかったので、ぜひ次回の講義でもう一度、説明してもらいたいです。
- ・ 私は工学部で電気専攻なので今日の話は大変興味深かったです。疑問があります。P キュリー氏が地球の中に永久磁石はないと言っていることに関してです。磁石はバラバラの時、磁石ではないとありますが、確かに我々が使う磁石はそうですが、地球規模の話なのでそれはあくまでミクロの話であって、マクロな目線で考えたら、一つの磁石と考えられませんか？キュリー一点で核は磁石になりえないとしても、核から離れ、キュリー一点に達しない場所の磁石化合物はどうでしょうか。それらは地球で1個の磁石とみなしてはいけなのではないでしょうか。そう思ったので私はガウスの説のほうがしっくりきます。



## 第5回：あるノーベル物理学賞受賞者の失敗

### キュリー点の発見

本日の主人公はパトリック・ブラケットであるが、彼を紹介するために、事前に紹介したい人がいる。それはピエール・キュリーである。P.キュリーはマリー・キュリーの夫であり、研究の理解者であり、指導者であり、協力者であった。そして2人の共同研究の成果「放射性元素の発見」にノーベル賞が授与された。しかし、P.キュリーは独自に磁性体の研究も続けていた。彼の業績は「キュリー温度」の発見である。磁石（他と識別して永久磁石と呼ぶ）になる能力のある物質を強磁性体と呼ぶが、強磁性体はどれも高温にするとこの性質を失ってしまい、磁石になれない。

ちょっと基本的な話になるが、物質は原子からできている。1個1個の原子は原子核と周りをまわる電子から構成されている。原子核はプラス、電子はマイナスの電気を帯びているが、電子がスピン運動をしているので磁石になっている。これを原子磁石と呼んでいる。強磁性体とは原子磁石の方向が揃う物質のことである。すべてが同じ方向に揃わなくても、磁場を与えると原子磁石が規則正しく並び、全体としても磁石になる物質である。しかし、このような物質でも高温にすると原子の運動が激しくなってすべての原子磁石がバラバラの方向になり物質全体として磁石ではなくなる。この境界、磁石になる能力を保有するか消失するかの境界を「キュリー温度」と呼び、物質科学の本質的な性質のひとつとされている。

キュリー温度の発見は地球科学にとっても非常に重要であった。ガウスは地球の中心に小さい強力な磁石が1個あると考えると地表で観測されるほとんどの地球磁場は説明できると「双極子磁場」の考えを提案した。地球の核は鉄から構成されているから、もう地球磁場が何故存在するかについて悩む人はいなくなった。核の鉄が磁石になっていると考えたのである。ところが、P.キュリーはそれを否定した。地球の核は5000℃を越える高温で、鉄のキュリー温度は770℃である。磁石になっているはずがない。地磁気原因論の世界はまた闇に覆われた。困りきった人の中には高圧になるとキュリー温度も上がるのではないかと考えた人がいた。確かに地球深部は高圧で、原子の運動も規制される可能性はある。しかし実験してみると圧力効果はそれほど大きくなく、地球の中心にはやはり永久磁石はないと考えざるを得ない。名案がないまま50年が経ってしまった。

### 自転する星は磁石

パトリック・ブラケットは1897年生まれの子イギリスの物理学者である。第一次世界大戦では海軍将校として出兵し退役した後、23才で原子核物理学の大家ラザフォードに師事し、核物理学の研究や宇宙線の研究で1948年のノーベル物理学賞に輝いた。

受賞のあとブラケットは研究対象を変え、地球磁場の原因に興味を持った。既に説明したように地球の磁場の原因は難解で現在でも未解決と考える人がいるくらい難しい現象である。これにブラケットは挑戦した。

磁場の存在する理由は2つある。近くに永久磁石が存在するか、電流が存在するかである。地球磁場の原因はいずれでもない。それならば第三の法則があるはずだ。ブラケットは単純に豪快に発想した。彼はどんな物質でも回転すれば磁石になると考え、これを磁場発生の第三の法則と名付けた(1947)。根拠は太陽系のいろいろな星の磁場強度が、それぞれの星の質量と自転速度に相関していることだった。但し地球の磁場ですら実生活にあまり影響のないくらいの強さである。太陽の磁場も月の磁場もとても小さく誤差も大きかった。しかし近い将来宇宙開発が進むにつれ人工衛星が正確で納得のいく数値を送ってくれるはずだとブラケットは考えた。な



図7 まったく独立した方法で求めた移動前(2億年前)の大陸配置

(a) ウェゲナーの結論、(b) 古地磁気的手法による



お、発生する磁場がとても小さく、実験室で回転装置と測定装置を作成して証明することも諦めていた。いずれにせよ P. キュリーが永久磁石説を否定した以来50年間解決できなかった問題が漸く解けたと皆喜んだ。

ところが人工衛星の時代にはいり、他の星に接近して様々な観測結果を地球に送ってくるようになったが、星の磁場強度についてはどうも期待通りの値ではない。

皆がおかしいと感じ始めた頃、既にブラケットは深刻な覚悟で超高感度磁力計を作成し始めていた。地球磁場の $1/10^{10}$ の非常に弱い磁場も測定できる実験装置が遂に完成し、理論を確認できる感度になった時、ブラケットは自分が考えた第3の法則が間違いであることがわかった。すぐにブラケットは自分の失敗を認め、自己否定の論文を発表した（1954）。ノーベル賞受賞者が自らの非を認める正義感も賞賛に値するが、彼はその後失敗に余りある素晴らしい仕事をやった。それは、開発した測定装置を使って岩石の磁化の様子を調べたことである。

一部の岩石は強い磁石になっていて測定もされていたがほとんどの岩石は大変弱い。けれどほとんどの岩石は磁石になっている。そして岩石は地球の磁場「地磁気」の化石なのだ。ブラケットはそれを測定し始めた。

### 岩石の残留磁気と大陸移動説

岩石には磁鉄鉱（ $Fe_3O_4$ 、砂鉄としてよく知られる鉱物）などの磁石になった鉱物がわずかに含まれている。そのため岩石は非常に弱い磁石である。

1. 岩石はそれができた時の地球の磁場の方向に磁化する。そのため、岩石は地磁気の化石である。岩石の生成年代がわかればその時の地球磁場がわかる。
2. 過去の地磁気の研究を古地磁気学と呼んで、ブラケットは世界に呼びかけ古地磁気学を推進した。
3. 古地磁気は変動している。採集した岩石のできた年代を調べ、磁化の方向と強さを調べると、その年代のその場所の磁場がわかる。地球上の任意の場所の磁場の方向がわかれば、その時の地球の磁極の位置を決めることができる。磁極は時代と共に移動しており、その移動の軌跡は大陸毎に違うことがわかった。

地球の磁場はベクトル量と呼ばれる物理量である。それを考えると、この古地磁気の測定結果は大陸が動いたと考えない限り説明ができない。どのように動いたか古地磁気のデータに矛盾が起きないように過去の大陸の位置を復元すると、その位置はなんと驚くべきことにウエゲナーの提案した通りになった（図7）。ウエゲナーの言う通り、大陸が動いたのだ！大陸移動説は正しいと大騒ぎになった。これが古地磁気学の成果である。

ブラケットのノーベル賞に次ぐ、大きな成果はウエゲナーの大陸移動説を復活させたことである。なお、ブラケットの挑戦した地球磁場の原因は、後の時代になって「地球ダイナモ理論」で説明される。

### ブラケットの教訓

人間は誰でも失敗する。「失敗は成功の元」、「転んでもただでは起きない」ということを実行することも進取の精神ではないだろうか。不思議の原因、真実を知りたい一心で人間はどんな困難も克服してしまう生物なのだ。

ブラケットは地磁気の第3の法則が間違いであることを証明した。提案者自身が否定するとは、恥・外聞を越えた並外れた正義感である。真理探究の飽くなき欲望である。ブラケットは失敗を認め、それを公表した後、さらに素晴らしい仕事をやった。それは、古地磁気学を創ったことである。岩石には地磁気の歴史が詰まっている、それを明らかにしようとした。普通の人はいくらだけ大恥を搔いたら立ち上がれなくなるくらいであろう。受賞の対象になった研究に間違いがあればノーベル賞返還で責任を果たせるがそれもできない。ブラケットの正義を愛する進取の精神が岩石の磁性を測定するという好奇心を産み出しバカになれた。これが偉人と呼ばれる人たちの共通した点であろうか。

ミニッツペーパー

- ・ 地球の磁場は何から生じているのか気になって調べたりしていたのですが、今回授業を聞いて磁極の移動と大陸移動がちょうど重なったことに驚きました。また、ブラケットは自分の提言が間違っていたとしても「失敗は成功の元」と考え、それを活用して次の研究に繋げていました。先生もおっしゃっていた、「転んでもただでは起きない」という言葉は、私たちの人生にも大きく影響すると思います。失敗をどう次に生かすか。私たちがいい社会を作るために、未来を変えていく偉人になるために必要な思考だと思います。
- ・ 今回の講義の最初に紹介された前回のミニッツペーパーの内容で、結局どの説が正しいのか分からないというものがある、自分も同じことを考えていたので共感しました。それに対して先生は知識を覚えるのではなく進取の精神を学んでもらいたいと説明されていました。確かにこの講義の方向からズレた質問だったかもしれませんが、今の真実が本当の意味での真実であるとは限りません。しかし、今現在正しいとされていることを知っておくことは無駄にはならないと思うし、質問した方も知識を覚えようと思ったわけではなく諸説紹介された講義での区切りの一つとして今の説を知りたかったのだと思います。
- ・ 知識を覚えることが講義の目的ではないことを理解した上で、「ちなみに今はこれが有力です」ということを補足程度にちょこっと教えていただければ嬉しいです。今後の授業内容のネタバレになってしまうようなことだったらすみません。
- ・ 今回、ブラケットについて学び、このような偉大な人々にも失敗はあるということを学ぶことができました。なので、このような偉大な成功を収めた人々にも失敗はあるということを知り、私達も失敗を恐れず、思いきりやるということが大切なのだと思いました。空想をするように自由な発想が、いつか役に立つかもしれないのではないかと思います、自分自身にも可能性があるかもしれないと思いました。
- ・ 私は今回の講義でブラケットの生き方に興味を惹かれた。自分の研究の成果を人工衛星が証明してくれるはずだったが、期待通りの結果に至らずに自分で発見を否定する形になった。しかし、そこからの更なる研究により新たな発見をしたという彼の姿はとても賞賛すべきものであったと言えるだろう。ただでは起き上がらない、失敗を糧にして努力を続ける、この進取の精神ともいえる気持ち、姿というものを私も身に付けていきたいと思った。

## 第6回：地磁気の逆転を提唱した日本人

### 世界大恐慌と満州事変勃発の頃

ブラケットの精力的な古地磁気学的研究の30年ほど前、岩石の磁化を測定し、それから地磁気の逆転説を提唱した日本人がいた。

昭和に入ってまもなく、1929年京都大学の松山基範は、兵庫県の観光名所「玄武洞」の岩石が現在の地球磁場とは真逆の磁石になっていることを見出し、他の地域の岩石も調べた。当時は強い磁石になっている岩石しか調べられなかったが日本や朝鮮、中国東北部から採取された岩石の測定から、ある時代にできた岩石に限ってそんな現象があることから「地磁気のN S極がひっくりかえって真逆だった時代がある」という地磁気逆転説を唱えた。

現在の地磁気は地球の北極がS極で南極がN極になっている（だから我々が使う磁石のN極は北極を指す）。ところがある時代には、地球の北極がN極で、南極がS極だった時代があった。その時できた岩石のN極は南を向いている。しかもそんな時期が何度もあったという。

松山の提言はしばらく注目されなかった。1929年（昭和4年）といえば、世界恐慌が起こって日本の経済も混乱し、そこから満州事変へ突き進んだ時代である。湯川英樹が1935年に中間子論を発表した（1949年ノーベル賞）ものの、発展途上で研究費のない日本では国際貢献がまだ少ない時代で、松山の

提言に注目する人はいなかった。しかし実験事実は誰が見つけようと、実験ミスがなく誰がやっても同じ結果になれば、それを認めざるを得ない。そこには国力の差も貧富の差もない。「地球の磁場とは真逆に磁化した石がある。」このこと自身は大変面白い不思議な実験結果である。科学は常に不思議から始まり空想が科学へのエネルギーを高める。国力も貧富も関係がない。

松山は逆方向の磁石になった岩石があるのは地磁気が逆転したからだと言ったが、それが間違いなら別の科学的理由を考えなければならない。それを考える人々が現れた。フランスの物理学者ルイ・ネールは、与えた磁場とは逆向きの磁石ができるという「自己反転機構」が存在することを理論的に証明し、そのような岩石が存在することを予言した。松山の発表から20年以上経った1951年のことである。

松山が見つけた岩石はネールの理論で説明できるのか、これもまた大変だった。顕微鏡で磁性鉱物（磁石になる能力のある鉱物）の産状を調べても証明できない。そんな時東京大学の永田武は面白いことを見つけた。栃木県の榛名山の岩石を加熱して磁化を一旦消し去り、新しい磁場の中で磁石にしてみたら、与えた磁場とは真逆の磁石になることを発見したのだ。詳しく調べると、特定の化学成分を持つ磁性鉱物の仕業で自己反転が起こる。但しそのメカニズムはネールの予言通りではないこともわかった。いずれにせよ地磁気と逆向きに磁化した岩石ができることが明らかになった。1953年である。1969年に著者はネールの予言どおりの岩石を見つけた。すっかり後の時代なので価値はないが、学生時代サークルに夢中になりすぎ卒業論文を必死にやらざるを得なかった著者に指導教官は大いに期待した。しかし、出てきた膨大なデータはめちゃくちゃであった。自信喪失の大学院時代とそれを支えてくれた若い教員との絆は今の学生諸君のために紹介する価値がある。

いずれにせよ、自己反転機構が発見されたが、それが松山の地磁気逆転説を否定することも出来なかった。ブラケットの提唱で世界中に岩石磁気や古地磁気に興味を持つ人々が現れ、大量の岩石の磁化が調べられた。

地磁気の逆転があったとすれば、それは地球規模の現象である。同じ時にできた岩石は地球上の何処にあっても皆同じ極性（現在の地磁気の方か、逆の方向）になるはずである。

世界の科学者が協力して、岩石が磁石になった時代を調べ、磁性鉱物の化学成分を調べ、その極性を調べた。それを比較したのが図8である。左側のひとつの点が一カ所の測定結果で、縦軸は岩石ができた（磁石になった）時代で、横は地域毎にまとめてある。黒丸は岩石のN極が北極を向くもの（現在と同じという意味で「正帯磁」という）で、白丸は岩石のN極が南極を向くもの（現在と逆方向という意味で「逆帯磁」という）である。図から明瞭に、正帯磁か逆帯磁かは時代によって区別される。ネールや永田（加えて筆者）のような岩石はあるにはあるが、非常に稀ということもわかった。このようにして、松山の地磁気の逆転説は正しいことがわかった。

図8を見ると、およそ400万年前から10回ほど逆転している。これを使って地質年代を古地磁気学的に区別することも提案された。現在の地磁気の方か、逆の方向は70万年前から続いており、この時代をブルンヌ正常期と呼ぶことにした。その前250万年前までは現在とは逆方向の地磁気の時代が長く、松山逆転期と呼ぶことにした。この時期には短期間だがさらに逆転した時期があり「イベント」と呼んで「期」と区別している。松山逆転期の前は Gauss 正常期、その前は Gilbert 逆転期と呼ぶことにした。すべてこの分野で貢献のあった人々の名前がつけられている。Gilbert はエリザベス一世の主治医で「地磁気の方と水平面との角度（伏角）は地球の高緯度ほど大きい」ことを発見し、天才数学者といわれる Gauss はそれを俯瞰して「地球の磁場は、地球の中心に磁石があるモデルを提案した。ブルンヌは20世紀始めに逆方向に磁化した岩石を見つけた人である。昭和の初めに活躍した松山がこれらの人々と肩を並べて評価されていることに誇りを感じる。

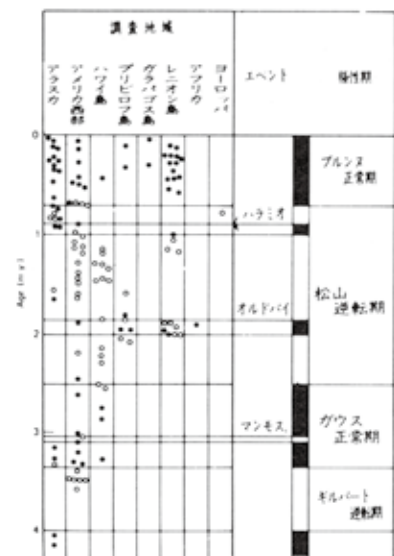


図8 世界各地の岩石の年代と磁極の方向  
黒(白)丸は岩石のN極が北(南)極を向いている

(Bullard, 1968 ほかによる)

## 松山という科学者

松山はまだ日本が世界から注目されていない頃に素晴らしい研究貢献をした。松山は1910年（明治43年）に京都大学を卒業し、同大学の教授として地磁気の逆転説を提案した。戦後1949年に新制の山口大学ができるのと初代学長に就任した。

松山の母親が素晴らしい人だったようである。彼女は、江戸末期の激動と父の病弱で寺子屋にすらいけず「ひらかな」がやっと読める程度だったという。その母親が基範に対して「千里の道も一歩から」を繰り返し、松山の言動の愚鈍さを気にするなど奨励した。「学問でも処世の道でも、ともすれば進歩の遅さに挫ける心を励まし、たゆまぬ努力を続けられたのは、母のこの言葉のおかげ」と後に松山は懐古している。日本人は西欧のまねしかできないと思われていた時代に、松山の朴訥とした真面目さが進取の精神を高揚させたのではないだろうか。日本に西欧の物まねではなく、真の科学者が育っていた。

松山は京都大学の定年退職後、山口大学の学長になるが、「新設の国立大学は、学問の研究と学生の指導が使命であるが、地域社会の文化・学術・産業の振興にも寄与すべき責務があり、そうしてこそ学生への支援も得られる」との認識から、山口県と連携して学術調査を行った。特に秋吉台の学術的価値を示すことで米軍の軍事利用計画を阻止し、自然を保護したエピソードは有名である。地方大学こそ、のどかさを堅持し学問の醍醐味を伝承していく責務があるように思う。松山は謡曲を生涯唯一の趣味とし、大学や地域で謡曲を指導し文化の発展に貢献した。

### ミニッツペーパー

- ・ 松山基範は地球の磁場が逆転するというを発見したということでしたが、彼が寺子屋にもいくことができず、ひらがなを読むのがやっとであったということにとっても驚きました。（コメント：「江戸時代に寺子屋に通った人間が戦後の学長？」「ひらかなが読めないからと幼児を叱らない。ひらがなを読めない大人が学長になれるか？」「この教員はデタラメだ！」と虚心坦懐に感じ考えることをお勧めします。真摯な姿勢、進取の精神の中には、批判力も含まれます。）
- ・ 松山基範さんが地磁気逆転を提唱した当時、日本はあまり他の国々に比べると発展していないがためにこの説が否定されたことが非常に残念に思いました。結果としてはこの説は正しかったことが証明されたが、もし提唱したときにこの説が認められ、研究していれば今はもっといろんなことがわかっていただかもしれないし松山さんも嫌な思いをしなくて済んだはずである。
- ・ 前の授業であったように提唱した説を何も考えずに否定するのはおかしいと思う。世界的に進歩するのであればどのような説であっても一旦検証や研究をすべきだと思う。そうすれば松山さんのような人もうまれないし科学の発展にもつながると思う。あと当時そこまで発展していない日本でこのような正しい説を提唱した松山さんも非常に素晴らしい人だと思いました。自分もこのような人になりたいと思いました。
- ・ 私は今回の講義を聞いてみて、松山基範がなしたことの偉大さにとても驚かされた。1929年は昭和4年で、日本では関東大震災、アメリカでは経済の空前の大繁栄と世界恐慌が起こったころということもあって、科学の世界では西洋を真似ることしかできないと思われていた時代であったそうだ。そのような環境、周りの雰囲気、定石に流されることなく、たゆまぬ努力の上に「新たな発見」という素晴らしい功績を日本人の彼が残したことは素晴らしく、賞賛に値するものであると思う。この姿から私も、たゆまぬ努力の上によりしっかりと結果を残すことができるような人物になりたいと思う。
- ・ 松山氏が発見したことは素晴らしいことだと思ったが、同時に周りの人に恵まれた方だとも思った。母や指導員の言葉を見る限り、彼を心から応援してくれたり、見守ってくれたりしている。とても温かい人たちだと感じる。また色々な人との交流も積極的にしていた。私は、その姿を知り見習わなければならないと思った。今回の授業で、先生の学生時代、卒論の予想結果と実験結果がどうしてあまりに違いすぎたのかが分からなかった。

## 第7回：第二次世界大戦と海洋底拡大説

### 戦争と科学

個人の殺人は重罪であるが、国家規模の殺人は誉である。しかも大規模な戦争ほど過酷になる。第二次世界大戦は科学戦争の様相を呈し、殺戮兵器の性能を飛躍させた。第二次世界大戦を早く終わらせるためには例えば次のような軍事関連科学技術研究開発を急げと進言した善良な科学者が何人もいたと聞く。恐ろしいことである。

マンハッタン計画（原子爆弾）、戦闘爆撃機、Uボート（潜水艦）、  
レーダー、音響測探、磁気測探、ロケット、コンピュータ

戦争の後、これらの開発の成果は国民の科学全般の発展に利用された。

ここでは磁場の測定技術を取り上げる。潜水艦はこっそり敵艦に接近して破壊する武器である。空気も一緒に詰め込んで潜水するために船体に鉄を使って重くするが、鉄はある程度の磁石になるから、磁場の変動で敵は探知できる。戦争では材質を改良して磁性を弱める努力と、磁場の検出感度を上げる努力の競争である。精密磁場測定装置の性能が上がるにつれ、潜水艦以外からの磁場も感知してしまう。雑音としての地球磁場の特性を充分に知っておくことも重要である。戦争が終わって、潜水艦探知のために邪魔だった地球磁場の変動は不思議がいっぱい詰まった自然現象だと多くの科学者に映った。

### 地磁気異常の縞

ガウスは地球の中心に小さな磁石が一個あると仮定して任意の地球表面の地球磁場を算出すると、実際に観測される磁場とだいたい一致する。この計算されたガウスの磁場を双極子磁場、双極子磁場と実測値のズレを地磁気異常成分と呼んでいたが、第二次世界大戦の技術の向上で地磁気異常成分が精度よく観測できるようになった。

図9に示したように、大洋には見事に縞状になった「地磁気異常」が認められる。この地磁気異常の研究が飛躍して、ウエゲナーの大陸移動説は海底が移動するからだというエキサイティングな学説が誕生した。

地磁気異常の縞には大きな特徴がある。図9のように海嶺を中心に、もっと正確には海嶺の山頂を裂いて延々と続く谷（リフトバレー）を中心に左右対照に分布している。ハリー・ヘスは、リフトバレーからは玄武岩が沸き出し、海嶺の両側に広がっていく結果、海底が拡大しているという学説に到達した。バインとマッシュューズは地磁気異常の縞の原因を探って、それが海洋底拡大の証拠であると提言した。

海底を構成する玄武岩は海嶺のリフトバレーから噴出してきたマグマが冷却したものである。1000℃を越える玄武岩質マグマが海底に噴出し、800℃以下まで冷却すると玄武岩はこの場所における地球の磁場と同じ方向の磁石になる。リフトバレーは長く伸びる海嶺の裂け目であり、そこに噴出してきた溶岩は一様に同じ方向の磁石になりリフトバレーに沿って延々と帯のように分布することになる。松山が提言したように地磁気は逆転を繰り返すので、その度に玄武岩という磁石の極性も変り、玄武岩は正逆の磁化を縞状に残す。図9に示したように海洋上で観測される地磁気異常の縞模様は、地磁気の逆転を

海底の玄武岩がテープレコーダのように記録し、その玄武岩の磁場が現在の地球の磁場に加算されて観測される。言い換えれば地磁気異常の縞模様は海底拡大の明瞭な証拠である。ヘスの考えはヴァインとマッシュューズによって証明された。ウエゲナーは大陸移動の原動力を説明できなかったが、海底拡大説はマンデル対流説を前提

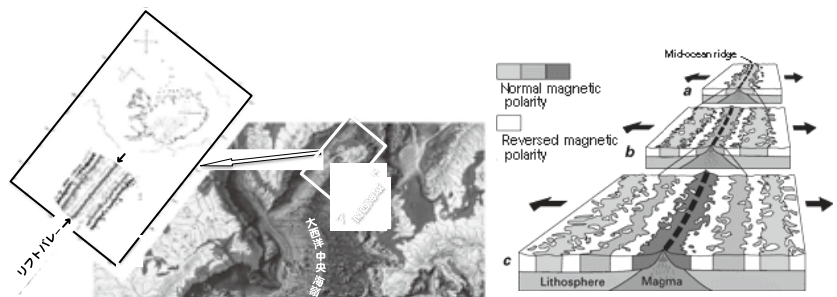


図9 地磁気異常の縞

海嶺のリフトバレーを軸に左右対称となって強い地球磁場と弱い地球磁場が帯状に観測される。有色部で地球磁場は強く白色部で弱い。(Mathews, 1964)



に構築されている。

大陸が動くのではなく、マントルが対流を起こしてマントル上部を動かす。例えば活発な対流は大西洋中央海嶺で沸き上がり、表層部は海嶺の両側に拡大していく。南北アメリカもヨーロッパもアフリカもその上に乗っているのので運搬される。大陸がないところには海洋が広がる。海底拡大説で世界の研究者は沸き上がった。

海底拡大説の歴史的意義はたいへん大きい。ウエゲナーは大陸移動説を提案した。大陸移動の原動力についてウエゲナー自身いろいろ提案したが、衆目を納得させられるものではなかった。ホームズはマントル対流説を提案したが、その証拠を示すことができなかった。ブラケットは各大陸に残っているできた年代のわかった岩石からその時の磁場を求めた結果、大陸が動いている証拠を掴んだ。これはウエゲナーの地質学的データとは違って、大陸が動いたと考える以外には説明できない。ウエゲナーを歴史の奥から引き出した効果は大きかった。海洋で観測される地磁気異常の縞模様こそ、海洋が移動し、その上に乗っている大陸が運ばれることを証明したものである。

#### ミニッツペーパー

- ・ 戦争のおかげで科学が発展してきたことは、とても残念なことだと思った。現在こんなにも科学が発展し、便利な世の中になっているのは戦争があったおかげだと言っているようで心が痛い。海洋底拡大説のように学問的な発展はもちろん、コンピュータや車、携帯電話など、いろいろな身近なものにも、戦争の後の科学の発展が大きく関わってきていると思うと複雑な気持ちである。今後、科学の発展が、戦争のおかげということにはならないように願い、自分も世の中のために科学の発展にたずさわられるような人になりたい。
- ・ 今回は第二次世界大戦の科学技術によってうまくいった例だが、今後、科学技術が発展すれば第二次世界大戦よりも激しい大戦が起こりうることも考えなければならない。科学技術の発展と世界の平和のつりあいをしっかりとらなければならないと思った。
- ・ 今回の授業では海底でどのようなことが起きているのかを知ることができました。今までの授業で大陸移動や磁場の話など様々な説を学んできましたが、今回の内容とも関係してくるなと思いました。海底にも地形があるなんて知りませんでした。海嶺という言葉は聞いたことはあったのですが、実際はどのようなものなのか知りませんでした。この海嶺付近でも地震が発生しているというのは知りませんでした。というよりも、そのようなことを考えたこともありませんでした。この授業は知らなかったことや、今まで興味を示してこなかったことに視点をむけているのでとても面白いです。今回の授業もとても面白かったです。
- ・ 今回の授業では海洋底の地下マグマによる拡大移動のところが理解に苦しく難しかった。拡大する地表はどこかで歪みにならないのか不思議に思った。
- ・ 松山基範が明らかにした地磁気の逆転説を元にすると、海洋上の測定結果がうまく説明でき、海底が動いているという海洋底拡大説と矛盾がないことが分かり、成立しました。戦争により科学技術が進歩し、新たな発見があったようですが、これは果たして素晴らしい発見と言えるのか思いました。
- ・ 前回のミニッツペーパーで、先生が返したコメントで、「教えられたことを何でもかんでも受け入れるのでは無く、おかしいと感じたところはしっかり否定できる人になってほしい」と言われたのをきっかけに、今までの行動を振り返ってみました。今思うと、私は他人の言うことに流されていたように思いました。今回の講義で、地磁気異常の縞の原因が海嶺の働きによるものだというのを聞いて納得しました。高校の時の知識とつながりを見つけると嬉しい気持ちになりました。聞いたことがない名称が出ると理解するのが大変ですが、楽しんで学んでいきたいです。



## 第8回：海洋底拡大説の傍証

ブラケットが測定した古地磁気学的データの科学的意義は、大陸が動いたと考える以外他の説明ができないことである。ひとつの大陸から古地磁気の磁極移動の現象が得られただけであれば、その大陸が動いたか地球の磁極の位置が動いた、あるいはその両方が起こったかのいずれかとなってしまう。ところが、別々の大陸から得られた古地磁気の磁極移動の軌跡が違うという測定結果から導かれる結論は「大陸がそれぞれ違う方向に動いた。地球の磁極は動いたかも知れない」になる。これが古地磁気学的実験結果の凄いところで、別の解釈が不可能なのである。このようにしてウエゲナーの大陸が移動したという説は完全に復帰し、学界は興奮の渦に包まれた。

そして発表されたのが「海洋底拡大説」である。海底は海嶺で生産され、海嶺の両側に拡大してゆく。動いたのは大陸ではなく、もっと深部までのリソスフェアが動いたという画期的な考えである。但し、この頃のリソスフェアの定義は現在と違っていた。この頃は、地球の層構造を、外側から気圏、水圏、岩圏（リソスフェア）、重圏（バリスフェア）と定義し、重圏は鉄やニッケルなどを主成分とする重鉱物で構成された岩石の層と理解され、その上にリソスフェアがあると考えられていた。ともあれ、世界は一斉に海底拡大説を検証しようと、あいまいな定義のリソスフェアも含めていろいろな観測と検討が進められた。

この時の最も大きな実験は、アメリカ合衆国の国家規模の予算を使って海洋調査船、グローマーチャレンジャー号をつかって海底堆積物を直接採集したことである。当初は「モホール計画」と名付けられ、マントルと地殻の境界、モホロビチッチ不連続面まで掘削し、マントル物質を直接採ってきて調べようというプロジェクトだった。残念ながらベトナム戦争でアメリカは経済的ゆとりがなくなってしまった。掘削目標は変更になり、マントルまでではなく海底玄武岩まで掘削して海底堆積物を採集することになった。プロジェクトは縮小したが、掘削は1960年代に始まり様々な新知見が得られた。

### 海底の年令

まず海底堆積物とそれから海底の年令が調べられた。海底堆積物は、マントル対流による深部由来の海底玄武岩の上に積もった海水から降ってきた碎屑物である。もし海洋底拡大説が正しければ海嶺近くには最近の堆積物しかなく、海溝から離れるにつれてより古い時代の堆積物から現在の堆積物まで存在するはずである。大洋は広く陸地から離れているため陸上からの碎屑物がわずかししか堆積しない。そのうえ、薄いことが幸いして堆積物の固化が進まず、海底玄武岩まで容易に掘削できる。

地磁気異常の縞模様と海底堆積物の年令を合わせると大洋全域にわたって海底の年令が精度よく求まる。図10はそのようにしてつくった「海底の年令」である。これはまさに海底拡大説の明瞭な証拠である。地磁気異常の縞の説明と違って、単純に理解できる。科学にとって単純明快な証拠はそれだけで価値がある。



図10 海底堆積物と地磁気の縞模様から求めた海底の年令

### 海嶺付近の地震

海嶺付近の地震の震源地が正確に求められた。海嶺は横ずれ断層で寸断されている。その横ずれはリフトバレーの間だけで、リフトバレーをすぎて海嶺の外側に出ると、断層の両側は同じ速度で同じ方向に移動するため断層間の変位はなく、地震の発生はリフトバレーとリフトバレーの間に限られる。この特異性から普通の断層と区別して「トランスフォーム断層」と呼んでいる。もちろんリフトバレーでも地震が発生するので、海嶺付近の地震はこの二種類だけである (図11)。

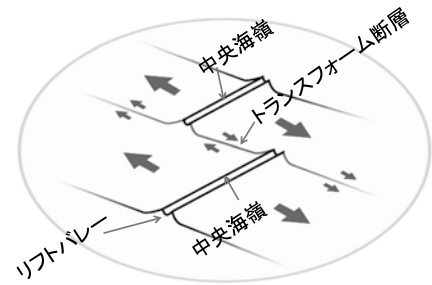


図11 海嶺付近の地震はリフトバレーか、トランスフォーム断層だけで発生する

図に示したように、この現象も海底が海嶺のリフトバレーで生産され両側に拡大・移動して行く証拠になる。

なお、トランスフォーム断層の跡だけは大洋中に延々と数千 km にわたって残っている。海底には陸上のような浸食作用はない。さらに陸地から遠く離れているため厚い堆積物に覆われることもないため、断層だった時の地形をそのままとどめているためである。大洋の特徴とも言ってよいくらい長い断層跡は、しかし地震とは無縁の場所である。

### 地殻熱流量

地殻熱流量とは、地球深部から宇宙空間に流れ出ている熱量で、垂直にある2つの地点の温度とその間に存在する物質の熱伝導率から求めることができる。それは、[熱流量 = (熱伝導率 × 二点間の温度差) / 二点間の距離] と定義される。海底面からパイプを打ち込み、深さの違う二カ所の温度を測定し、その間の海底堆積物を採集する。採集した海底堆積物の熱伝導率を測定すれば、この方程式の解は求まる。この測定によって壮大な地球内部で起こっている熱移動の一端を知ることが出来る。図12に測定結果と理論値を示す。

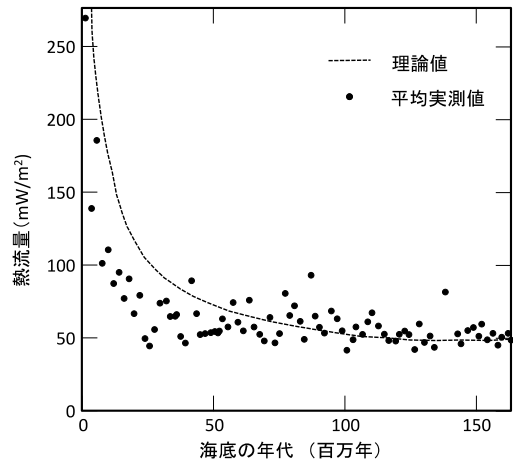


図12 地殻熱流量 (左端はリフトバレー)

海嶺はマントル対流の沸き出し口であるため、高温のマントルがここで迫り上がっており、新しく熱いため他の地域よりも熱の宇宙空間への移動量も大きい。

図12に示したように、地殻熱流量は海嶺 (左端) で高く、離れるにつれて低くなる。横軸は海底の年齢が表示されている。熱の放出現象を考えれば合理的で、こうすれば地球上の海底すべての熱流量を1枚の図にプロットできる。

図12中の点線は理論値である。実測値とほぼ一致しているが、よく見ると海嶺近くでは実測値が理論値より低くなっている。海嶺ではリフトバレーからマグマが噴出し固化した玄武岩がリフトバレーの両側に拡大していく。そのため出来たばかりのリソスフェアはこの変動のため破碎されて割れ目が多い。破碎帯では深くまで海水が通りやすい。そのため地球深部からの熱は海水によって運び出され、熱伝導の悪い岩石を移動する熱流量は計算値よりはるかに低くなる。海嶺から離れると海底堆積物が割れ目を埋め海水を遮断する。地殻熱流量もまた見事な海底拡大の証拠である。

### 火山島の形成年代

太平洋にはハワイ諸島やグアム諸島など多数の島があり、そのほとんどが火山島である。さらに海山と呼ぶ海面下の火山がまた大変多い。これらの火山島や海山の形成時代も海底拡大の証拠になった。

図13に示したように、ハワイ諸島や天皇海山列を例に考える。火山島や海山が直線状に並び、このふたつは折れ線状につながっている。

不思議なことに、現在活動している活火山はただひとつ、ハワイ諸島の東端のハワイ島だけである。西

側に並んでいる火山島あるいは海山はすべて活動を終えた火山である。さらに興味ある現象は火山活動をしていた時代が西北西あるいは北北西ほど古い。火山活動をしていた年代とハワイ島からの距離が見事な直線関係にある。この関係はこれらの火山はひとつの原因で出来上がったことを示唆する。ハワイ島の下にあるマグマ溜まりを「ホットスポット」と呼んで不動点だとすると、次のように解釈できる。

海嶺付近で海底玄武岩を噴出してリソスフェアが形成され海嶺の両側に別れて拡大していく。リソスフェアの随所に裂罅ができるが、しばらくすると堆積物に覆われ海水は循環しなくなることは既に説明したが、地下深所からのマグマだったら壊れて火道になる裂罅もある。ホットスポットの上を火道になれる裂罅が通過するとマグマが噴出し火山をつくる。マグマの噴火は裂罅がマグマ溜りの上を通過している時だけであり、裂罅が通過してしまうと火山活動は終結する。

従ってこの配列（位置と形成年代）はリソスフェアが海嶺から拡大・移動してくる様子を記録している。ハワイ諸島から天皇海山列を見ると、活火山のハワイ島から4300万年前に噴火した雄略海山までが西北西方向に1列に並び、そこから天皇海山列が北北西方向に続き一番北には8200万年前に噴火した明治海山がある。火山の形成年代とハワイ島までの距離を調べるとすべての火山島と海山は見事に規則的であり、ホットスポットが動かないとすると太平洋のリソスフェアは8200万年から4300万年までは北北西方向に6cm/年の速度で進み、それからリソスフェアは西北西に方向を換えて8cm/年の速度で移動していると計算できる。これもまた海底拡大の見事な証拠である。

1960年代に入り、このような研究結果が矢継ぎ早に発表され、海底拡大説は動かし難い学説となった。人々の最大の関心事は「それでは海底は何処まで広がってくのか」に注がれ、さらに進化を遂げる。

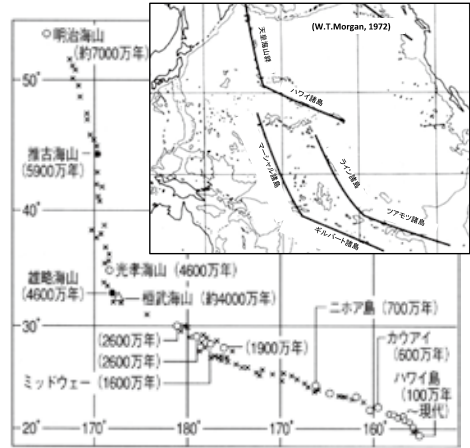


図13 ハワイ諸島と天皇海山の直線的配列

マグマの噴火は裂罅がマグマ溜りの上を通過している時だけであり、裂罅が通過してしまうと火山活動は終結する。

従ってこの配列（位置と形成年代）はリソスフェアが海嶺から拡大・移動してくる様子を記録している。ハワイ諸島から天皇海山列を見ると、活火山のハワイ島から4300万年前に噴火した雄略海山までが西北西方向に1列に並び、そこから天皇海山列が北北西方向に続き一番北には8200万年前に噴火した明治海山がある。火山の形成年代とハワイ島までの距離を調べるとすべての火山島と海山は見事に規則的であり、ホットスポットが動かないとすると太平洋のリソスフェアは8200万年から4300万年までは北北西方向に6cm/年の速度で進み、それからリソスフェアは西北西に方向を換えて8cm/年の速度で移動していると計算できる。これもまた海底拡大の見事な証拠である。

1960年代に入り、このような研究結果が矢継ぎ早に発表され、海底拡大説は動かし難い学説となった。人々の最大の関心事は「それでは海底は何処まで広がってくのか」に注がれ、さらに進化を遂げる。

#### ミニッツペーパー

- ・ 僕は「戦争が科学を発展させる」という言葉を聞いたことがあります。実際に、日本では、その当時、最先端の科学技術で作られた原子爆弾が投下されました。その技術によって、たくさんの命が失われました。そして、許せないことに、世界の中には、原子爆弾を使ったことが正しかったという人たちがいます。たくさんの命が失われているのに、なぜ、それが正しいのか。人の研究の努力によって、人を殺すなんて、間違ってると思います。この講義の中で、人は、知的好奇心によって、分からないことを自由に楽しみながら想像し、研究し、答えを導き出してきたことを知ることが出来ました。科学とは、このように楽しく、自由なものであってほしいです。人が幸せになれるような科学が素敵だと思いました。
- ・ 鹿児島と北海道では地場が違うというのには驚きました。地球の中心に磁石があるとしても、球状なのだから地場は変わらないものだと思っていました。ひとつのことが分かると、『あ、じゃあ、あれはこういうことだ。じゃあ、それはこうなるのでは?』となっていくのはとても面白いことです。いままで地理や物理などで軽くは習っていたことですが、地球の内部のことをこんなに詳しく学べるとは思っていなくてとても楽しいです。他の共通の授業では学べないことですよね。
- ・ 各国が戦争で最先端の科学技術を使うのはとても悲しいことだと思います。いまでさえ、科学技術が戦いの武器として使われている以上平和な世界というのはつくれないと思います。しかし、戦争の影響で科学技術は向上し、戦争終了後は新たな発見（海洋底拡大説）をすることができたのはすごいなおもいました。海底の年齢かわかるのには驚きました。
- ・ 海嶺に亀裂が発生して減圧すると高温によりマグマが溶け、マントルとは異なる海嶺地殻（玄武岩）が構築され、それが両側に広がっていくという理解の仕方は正しいでしょうか。この辺りは理解できたという自信がないので、誤った理解の仕方をしている箇所を指摘していただければありがたいです。戦争のあと GPS など私たちの生活に役立っているものもありますが、戦争から生まれたと思うとなんか皮肉だなと感じました。しかし戦争から生まれたものは良い方向に活用されているものだけではないのでそれは悲しい事実だなと思いました。

## 第9回：海洋底更新説と日本の重要性

ウエゲナーはパンゲア大陸が分裂して現在の位置まで漂流してきたと考えたが、1960年代には、海底は海嶺で生産され両側に拡大していく。海洋のリソスフェアが両側に拡大していく。大陸はその上に乗って運ばれるだけという考えまで発展してきた。

大西洋は、ウエゲナーの指摘通り、元あったパンゲア大陸の中央やや北側でマントル対流の沸き出しが始まり大西洋が誕生・拡大していった、海底の年齢は海嶺から離れるほど古くなり、大陸に接する海底が最も古い。それが1.5～2億年前ということは、大陸は海洋のリソスフェアの上に乗って1.5～2億年で現在の位置まで移動してきた。

ウエゲナーは大陸移動の原動力をうまく説明できなかったが、海洋拡大説は動くのはもっと下のリソスフェアであり、マントル対流がその原動力であると考えられるようになってきた。見事な学説である。このように大西洋は矛盾なく説明できるようになったが、もう1つの大洋の太平洋には大西洋にない地形が多く複雑である。

### 太平洋の特徴

最初に大西洋とは違う太平洋の幾つの特徴を列挙する。

太平洋の海嶺は、東部に偏り、なおかつ大西洋の海嶺にくらべると「嶺 (ridge)」というより「膨らみ (rise)」と言った方がよい。そのため太平洋の海嶺は「東太平洋海膨」と呼ばれる。

また、太平洋には火山島や海山が多い。前節で述べた通り、一連のマグマ活動で形成された火山島のうち東端だけが活火山で、西側に連なる火山島はすべて死火山である。火山が活動した年齢は西側ほど古い。

なお、太平洋で最も古い海底は約2億年で、その点では大西洋と似ている。

大西洋と根本的に違うのは海溝が存在することである。海溝は水深10,000mにも達する地球の溝で南極大陸沿いを除いて太平洋の海底を囲むように存在する。さらに、海溝から大陸側に向かって巨大深発地震が多発する地帯で、震源の深さは海溝から大陸側にかけて深くなる。これを最初に見つけたのは日本の和達清夫で、1927年（昭和2年）のことだった。

それから27年後、アメリカのヒューゴー・ベニオフは地震発生の原因である応力を調べ、海洋と大陸の間に押し合う力が働き、衝上断層が発生するためだと解析した。海洋地殻は大陸地殻より少し重い。そのために地球上では海洋地殻が常に下に沈み込む衝上断層が発生する。

海溝と大陸の間の地形は太平洋の東側の地域と、太平洋の北～西側の地域では異なる。前者の太平洋からアメリカ大陸に向かって海底地形は大洋底から、海溝、大陸斜面、大陸棚、大陸と続くが、後者の地域では大洋底から、海溝、大陸斜面、大陸棚、弧状列島、縁海、大陸と続く。上空から見ると後者の地域では、弧状に島が並び常に海洋側に膨らんだ配列で、それぞれ千島弧、東北日本弧、伊豆マリアナ弧、琉球弧などと呼ばれている。さらに、島弧と大陸の間は小さな海になって、オホーツク海、日本海、東シナ海、南シナ海等と呼ばれている。総称して大陸の縁に連なる小さな海という意味で「縁海」と呼ばれている。

### 海洋底更新説

このような太平洋の地形と年齢、さらに海溝の地震などをどのように説明するか、上述の自然現象をすべて矛盾なく説明するために、海底拡大説はさらに新しい「海底更新説」に更新されることになる。すなわち、太平洋では東太平洋海膨で生産された海底は海膨の両側に拡大していく。ここまでは大西洋と同じである。大陸の近くまでくると大陸のリソスフェアと衝突し、熱を充分放出し重くなった海洋のリソスフェアがその下に沈み込んでいく。この沈み込みは地球深部まで続き、マントル深部に沈降した海洋リソスフェアは核からの熱で加熱され他のマントル物質と混合すると共に軽くなって、再び海嶺から沸き出してくる。これが海底は生産と消滅を繰り返す常に更新されるという「海底更新説」である。

海底更新説の最も重要な証拠は海溝から大陸深部に向かって発達する衝上断層の形成である。世界の



人々が大洋周辺に注目した時、最もよく調査されていたのが日本近海であった。和達の地震観測結果は地震多発面として1927年に発表されていた。それが特に注目されたのは1954年のベニオフによる応力の解析だった。彼は海洋と大陸の間に押し合う応力が衝上断層を発生させていると解析した。衝上断層によって比重の大きい海洋のリソスフェアが軽い大陸や島弧を持つリソスフェアの下に沈み込んでゆくモデルが出来上がった。

海嶺で生産された海洋リソスフェアは拡大を続け海溝にまで達する。そこで反対側から、あるいは別の方向に移動しているリソスフェアと衝突すると衝上断層をつくってリソスフェアは重なり合う。この衝突の境界に出来るのが海溝である。この時比重の違いが、衝突したリソスフェアの下に沈み込むか、上に乗り上げるかを定める。一般に海洋の古いリソスフェアが重いので、新しい海洋リソスフェアあるいは大陸を持つリソスフェアの下に潜り込んでゆく。東京大学の久野久や久城育夫らによって島弧の火山の特徴も明瞭になっていった。

### 日本の社会状況と日本の科学者

驚くべき地球史が明らかになり世界中が興奮しているとき、日本人は何をしていたのだろうか。20世紀の後半からは日本人の貢献が注目されているが、それまでは地道な研究しかなかったように見える。大陸移動説に興味したり、逆に軽蔑したりすることもなかったようだ。戦後ウェゲナーが再評価された後も日本人はあまり登場しない。鎖国を止め、西欧に追いつき追い越すための政策を始めた時、多くは「西欧をものまねする」ことから始まった。だいたい真似ができた段階で、それでよしとし、さらに本質に迫らない空気も強かったのではないだろうか。ウェゲナーが大陸移動説を唱えたのは明治の最後の年であった。明治維新から45年、日本の科学も追いつき追い越すための「ものまね」「模倣」の時代だったのだろうか。富国強兵・殖産興業政策がいびつに進行していったように感じる。

学問には進取の精神が必要である。進取の精神は真摯に学ぶことがベースである。不思議を大切にし、原因を空想し、何人も納得する科学的証明をすることに尽きる。

脱線するが明治5年の出来事は重要だったように思う。政府は「学事奨励ニ関スル被仰出書」を發布し文盲撲滅作戦を開始した。識字率は伸びたが「修学は立身出世、商売繁盛に不可欠」という言葉があまりにも強く残り、明治の中頃にはそれまで商人が使っていた「勉強」という言葉が教育界に普及・浸透した。「学問は人類が産み出した最高の贅沢」というのが歴史を通して世界の趨勢であった中で、勉強強い「勉強」という言葉が現在まで一人歩きしている。

大正デモクラシーとはどういう時代だったのだろうか。あるいは1929年に地磁気の逆転説を発表した松山基範や、リソスフェアの沈み込みに伴う地震多発面を1927年の発見した和達清夫が育った時代だったのかも知れない。

昭和時代になるとまもなく軍国主義や帝国主義が蔓延し、思想統制が進んで進取の精神の高揚どころではなかったと聞いている。敗戦の時アメリカは戦前の教育を試験中心主義と呼んで痛烈に批判し日本の教育体制を抜本的に変えさせた。その効果なのか、第二次世界大戦が終わると反動的に、今度は共産主義国家あるいは科学者の模倣が横行した。ブラケットが大陸移動説を復活させグローマーチャレンジャー号が海底探査に活躍しても、日本人の多くは無批判に指を銜えて多額の研究費を集める術を知らなかった。逆にソ連に学んで、学問の低迷を克服・飛躍するためには「団体研究」の重要性が叫ばれ、個人の進取の精神発露より組織の成果を重視する活動が続いた。これは将にソ連の影響だと理解している。井尻正二や牛来正男など非常に能力のある研究者がソ連学派を結集し研究を推進した。但し、共産主義への傾倒は日本全体の動きではなく、それに批判的な一部の研究者は別の学会をつくって新しい地球科学を模索した。学会には同士の集まりという要素がある。ソ連から脱却できたのは戦争が終わって30年も経ってからだと思う。

筆者がウェゲナーの大陸移動説を聞いたのは大学一年生、1963年である。生出慶司という革新的な先生の情熱と受け止めただけで、今から思えば昔ながらの研究結果や知識を無批判に憶えただけのように思う。大学院生や教員になってもグローバルテクトニクスは他の研究分野の研究課題と位置づけていた。私と同じ専門分野の富山大学の堀越叡がこの問題を取り上げたのが1970年代の後半である。羨まし

いと思った。その頃優秀な学生達がプレートテクトニクスの考えで地下資源の形成を論じたいと言ったが上司と相談して指導できないからと言ってテーマを換えさせた。自分の浅学を恥じる。

確かにソ連の影響を受けた人々の貢献は大きく、地学団体研究会は数多くの書籍を出版した。1954には「地球進化論—ソヴェト科学アカデミーの成果」(三一書房)が出版され、1956年には「地球の起源」(岩崎新書)が出版されている。その頃のソ連を中心とした地球科学の成果をまとめてある。

ビートたけしは日本の文化全体を「赤信号、皆で渡れば怖くない」と風刺した。最近、立花隆は2005年に「戦後60年、日本人は本当に古い日本精神を捨てて、新たな国民精神を想像し得たであろうか。世界の前に恥なき国民になっているだろうか」と問いかけた。

しかし信じたい。450年前「真摯な姿勢が最も誇れる民族だ」「これほど進取の気風に富んだ国民を見たことがない」と、フランシスコ・ザビエルに言わせた日本人の体質は残っていると私は信じたい。

#### ミニッツペーパー

- ・ 講義の舞台は海底へと移ったが、海底はどこまで広がってゆくのか、海底地形はどのようになっているのかというのは、スケールの大きな話でロマンを感じた。また、大西洋は2億年には存在しなかったというのも衝撃的であったし、海洋が形成される過程を知ること、地球科学の凄さを感じた。また、戦前と戦後の日本の地質学の様相を学んだが、政治体制や社会思想が科学の世界にも大いに影響を与えているというのは意外に思った。そして、今の自分も政治のあり方や日本人としてのあり方にもっと関心を持たなければならないと思った。大学で学ぶことにおいても、社会についても与えられるものだけでなく、自分から考え知識としていくことが重要だと感じた。
- ・ 海底拡大説について詳しく知れて良かった。地学に触れたことがない私からしてみれば、地殻や海嶺などの熱の移動という自然現象の解釈も目から鱗で面白い。ただ、私の理解は非常に表面的でしかないのが申し訳ないと思う。海底更新説にしても、原理はよく分からないため「古い海底はマントル対流とかそんな自然現象で沈む」くらいの認識でしかないが、それでも私はこの授業が楽しい。学者は、真相のために努力をしているのだと毎回感心せられる。当時は視野の限られていた日本の研究者でも、それが歯がゆいと感じた人もいたのではないかと思う。(コメント:「古い海底はマントル対流とかそんな自然現象で沈む」がわかれば90%この説を理解していると思います。)
- ・ 現在の日本では安全保障法制をめぐって論議されているが、果たして国民すべてが本気で内閣の考えていることを理解しようとしているのだろうか、と考えてしまう。先週の第二次世界大戦の感想の続きのようになってしまいが、マザーテレサの言葉を聞いた学生が少しでも、日本、世界の平和のために考えてくれればいいなと思った講義であった。
- ・ マントル対流や海底更新説が提唱されたり、研究されているなか、その頃日本は戦争の真っ只中だった。日本は戦争を通していくなかで、文化が変わっていった。それがビートたけしの「赤信号、みんなで渡れば怖くない」といった言葉に表れている。またマザー・テレサは「平和の反対は、戦争ではなく無関心」といった。私もこの言葉を聞いて、その通りだとおもった。異文化に関心を持ち、自国主義では無くなれば戦争というものは起こらない。文化は違うけれど、上手に共存していくことが戦争を無くしていくために必要のことです。他国への無関心が生む結果が戦争なのです。(戦後のドサクサのときもです)

## 第10回：プレートテクトニクス

### 地球の層構造

海底が海嶺で生まれ海溝で消えていく。マントル対流で再び海嶺に上昇してくる。人々の関心は、地



球の層構造がどうなっているのか、地殻やマントル、あるいはリソスフェアがどんな形で動いているのか、マントル対流の実態がどうなっているのかに向けられた。

19世紀末の頃、地球は層構造をなし、外側から気圏 (atmosphere)、水圏 (hydrosphere)、岩圏 (lithosphere)、重圏 (barysphere) に分けられると理解していた (坪井誠太郎, 1938)。重圏は現在使われていない用語であり、岩圏を含め深部ほど理解が進んでいなかった。重圏は1950年頃まで使われていた用語で、地球の中心にあって鉄やニッケルなどを主成分とする重鉱物で構成された岩石の層を指した。現在でいう下部マントルと核を一体に考えていたようだ。

リソスフェア (岩圏、あるいは岩石圏) は昔から使われていたが、これも実態がよくわからなかった。一連の研究で、大陸が動くのではなくリソスフェアが動くからだとして理解が変わってきたが、リソスフェアがどんな厚さでどのように水平方向に動くのかはよくわからなかった。

この頃威力を発揮したのが地震学である。ここでは少し基本から説明する。地震波は地球深部の構造を反映しており構造解析に欠かせない自然現象である。1909年、アンドリア・モホロビッチは地震波の研究で大きな貢献をした。彼は震源までの距離と地震の伝播時間をもって走時曲線を描いた。どの観測点でも振動は何度も伝わってくるが、最初の振動に隠されて2番目以降の振動がわかりにくい。ここでは2番目までの振動に注目し、いろいろな地点で同じ地震を観測すると、図14のように交差する二本の直線が得られる。地球内部では地震は速度の違う層構造があり、それぞれ地震の伝播速度が違うからである。

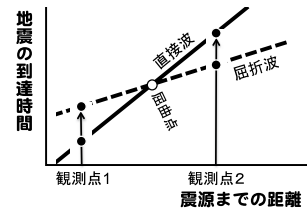


図14 走時曲線

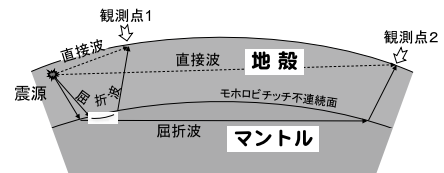


図15 地殻とマントル

ここでは表層に近い地殻とマントルについて考える。マントルの伝播速度は地殻のそれより早く、振動がマントルに入った所で振動方向が屈折し、遠距離に設置した観測点2にはこの屈折波の方が早く伝わる。しかし、近くの磁針計には地殻を伝わる直接波の到着が早く観測点1の結果が得られる。モホロビッチはこれを解析して地震波の不連続面までの厚さを求めた (図15)。これが地殻とマントルの境界の発見であり、モホロビッチ不連続面 (略してモホ面、あるいはM面) と呼んだ。地震波の解析はその後も続き、地球深部の構造解析は進んだ。

図16はこのようにして求めた地球中心部までの地震波の伝播速度である。図のPとSとは地震波の主要な種類、P波とS波である。2つの違いは速度と震動方向で、P波 (Primary Wave) がS波 (Secondary Wave) より速い。さらにP波は縦波でS波は横波であり、液体は後者の媒体にならない。地震波には他にもいろいろあり、地球内部には大きな物性の違いがあることがわかる。

S波はマントルまでしか到達しない。液体はS波を伝えないため、地球の核は液体であることがこれでわかる。マントルでのP波の変化も大きい。S波同様、しかし大きな変化でマントルでは深部に行くほど伝播速度が漸次早くなる。マントルの深度による物質の変化がないが高圧で物性が変わることが想定できる。

マントルと核のP波の違いも大きい。液体の核に入ると速度は半分以下に下がる。さらに深部、5000mあたりにP波の変極点が見られる。核は金属で出来ているが、液体は外核だけでそれより高圧の内核では固体の金属になっていると解釈された。

### 低速度層

図16は20世紀始めに発表されたマントル上部の地震波の伝播速度である。Jeffreysの結果にはないが、Gutenbergのそれには、100kmから200kmの伝播速度が60kmのそれよりも、もちろん下部の値よりわずかに低い。これが発表された1930年頃には特に注意が払われなかった。

ところが講義の最初に紹介したように、リソスフェアは何処までか、どんな動きをするのかを考えて

いる人々は1960年代に入って30年も前のデータに驚いた。

マントル上部の一部は伝播速度が低い！ 図17はさらに拡大したものである。右図で深さ120~320kmでは、上下のマントルに比べて地震波速度の低い。

マントル物質は地殻とは物質が異なるため、地震波の伝播速度は不連続に速くなっているが、マントル内の物質はほぼ同じと考えられている。マントルの中になぜ地震波の伝播速度の低い層（「低速度層」と呼んだ）があるのか。伝播速度の違いの別の要因は岩石の物性の違いである。

地震の伝速度は、その媒体が硬いと速く伝わり、軟らかいと遅い。低速度層の存在はマントルの上部近くではマントルが少し軟らかくなっているということである。

地表から120kmまでは硬い岩石があり、この地球表層部を従来の言葉を使ってリソスフェア（岩石圏）と呼び、120~320kmの少し軟らかい層をアセノスフェア（岩流圏）と呼ぶことにした。岩石が軟らかく、流動性があるという意味である。リソスフェアは地球全体を調べるとだいたい100kmから200kmほどある。そしていままで述べてきたように地球表層部の変動の立役者である。リソスフェアの厚さは地球の半径6400kmに比べると大変薄く、それが地球表面を覆っていることから、リソスフェアを「プレート（板）」と呼ぶことにした。欧米には、その特性を強調してニックネームのように呼び方を変える習慣がある。リソスフェアよりプレートの方が一般の人にはわかりやすい。

アセノスフェアの下には漸移層を挟んで、メソスフェアがマントル下部に相当する。現在では、固体地球の層構造を上から、大陸地殻、海洋地殻、上部マントル、アセノスフェア、漸移層、メソスフェア、外核、内核に分け、前三者を合わせてリソスフェアと呼んでいる。

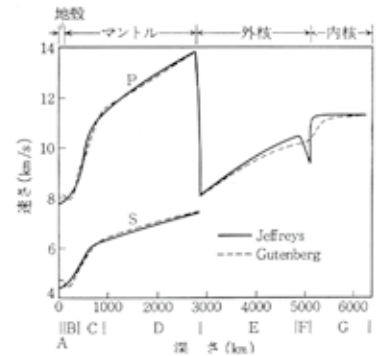


図16 地球深部の地震波速度 (Jeffreys と Gutenberg のモデル)

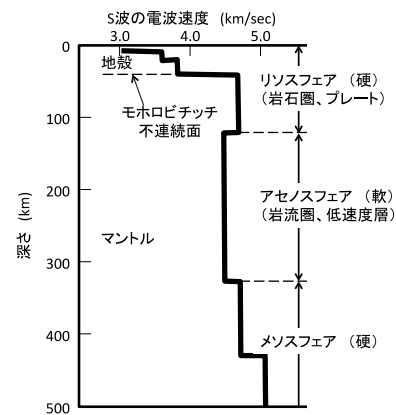


図17 楯状地の下を伝わるS波に速さ

### プレートテクトニクス

図18はプレートの動きを説明するためのベルトコンベアーである。ベルトがリソスフェアに相当し、その下のキャリアローラがアセノスフェアに相当する。このコンベアーの動力は右端から沸き上がってくるマントル対流で、キャリアローラは潤滑剤の役割しかない。

固い板状の表層部リソスフェアの動きをその下のベルトコンベアーのキャリアローラ（アセノスフェア）が支えている。そのように考えると大洋に形成される火山島とプレートの直下にあるホットスポットも理解しやすい。

プレートの境界では地球表層部のさまざまな地質構造をつくる地殻運動を起こしていると考えれば極めて理解しやすい。学説の名称変更の必要がまた起こった。

ウェゲナーの大陸移動説は海洋の地磁気異常の縞の発見で海洋底拡大説に生まれ変わり、海溝とそこから地下に続く地震多発面の存在意義がわかって海底更新説に進化した。

いま地球表面に浮かび、水平方向に移動する実態が明らかになってリソスフェアの運動の様子が明らかになってきた。

厚さ100~200kmのリソスフェアが流動性のあるアセノスフェアの上を滑って諸々の地殻変動を起こしている。リソスフェアの厚さ100~200kmは地球の半径6400kmに比べれば、板のように薄く「プレート」と呼ぶ。プレートが地球上の諸々の地殻変動を引き起こすと考えるのが新しい学説「プレートテクトニクス」である。

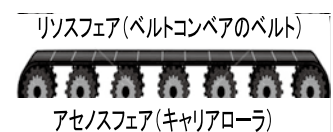


図18 アセノスフェアの上を滑るリソスフェアの例え

#### ミニッツペーパー

- ・ 明治時代には、テーチス海が陸地に変わったことや、陸地には海でできた地層が多いから「地球収縮説」が唱えられた。しかし、ウエゲナーはそれを批判する「大陸移動説」を唱えた。ウエゲナーは「大陸が沈んで海洋になったり海洋が隆起して大陸になることはない。」とのべた。また大陸移動説は、地層や、生物などの化石の分布からもわかると述べている。
- ・ ウエゲナーの大陸移動説は約30年ぶりに復活したのであるが、その後、1960年代に提唱された「海洋底拡大説」（マントル対流が上昇する中央海嶺部に新しく海洋の地殻が形成され、マントル対流が沈む側では海洋の地殻も沈むという考え）がさらに1970年代になり、「プレートテクトニクス」なる仮説へと発展し、大陸移動に関する研究は新局面を迎えることになる。
- ・ 以前、地球収縮説を根拠に説明されていた地向斜理論もマントル対流説に取って代わられた。また、その後松山基範が発見した地磁気の逆転説も提唱されるが、その後、古地磁気学分野での研究が進展し、海洋底の磁気異常の縞が明らかになったことや、海底堆積物、地殻熱流量、トランスホーム断層の地震などを証拠に、1960年代にロバート・ディーツが海洋底拡大説を唱える。その後、海溝付近の和達ベニオフ帯や太平洋周辺の安山岩の火山の研究により、中央海嶺で地球内部から物質が上昇し、新しく海底の岩盤を作るため、海底が中央海嶺の両側へ拡大するという仮説である海底更新説がヘスとディーツによって提唱され、それら全てをまとめたツゾー・ウィルソンによって、1968年にプレートテクトニクスとして完成した。
- ・ 戦争後、日本はロシアの説についていくばかりで独自の発展をできずにいた。大きい声に引っ張られ、自分の考えを主張できないことはとても恥ずかしいことだと思う。周囲に流されず自分の疑問や探求心に正直に生きていくべきだということを学んだ。海底更新説とは海底が海嶺で形成され両端に広がっていくという説である。アセノスフェアとリソスフェアの発見から学説の名称変更の必要が起こる。ここで名づけられたのが、プレートテクトニクスである。地震の伝播速度の違いから発見された。比較的やわらかい層であるリソスフェアの下に固い層のアセノスフェアがある。リソスフェアの部分をプレートという。地球を覆うプレートはいまだたくさんあり探求できる点はまだまだたくさんありそうである。

### 第11回：拡大する背弧海と肥大する島弧

20世紀に入ってもその前半は日本人が世界の地球科学の中でリーダーシップを取ることがあまりなかったと思う。鎖国を止め開国して以来、長らくは「ものまね」の時代だったかも知れない。その中には日本人の粘り強さや精密さが成果に繋げ、観測結果を整理し規則性を見出す研究や実験は注目されることもあった。

20世紀の後半になると、平朝彦と丸山茂徳などの有能な人々が登場してきた。「ものまね」の時代の終了を告げるもので、進取の精神を世界に開花させたと位置づけられると筆者は考える。

ご当人の話から想像すると2人とも学生時代は野外調査に明け暮れ、地質の不思議の世界にのめり込んでいたようだ。そして日本の大学を卒業した後若い時代にアメリカで学んでいる。平朝彦は東北大学を卒業してすぐにアメリカに渡って数年を過ごし、丸山は徳島大学から名古屋大学大学院で学び、富山大学に就職した後すぐにアメリカに渡っている。彼らは共通して巨大科学の意義と研究者の役割について西欧に学んだように私は理解している。共に強い世界のリーダーの役割を果たしたが、ここではまず平朝彦の貢献を振り返る。

20世紀の後半、完成度の高いプレートテクトニクスが提唱され、この学説の検証の時代に入っていた。プレートテクトニクスは完全な理論なのか、すべての地球の変動が説明できるのか。しかし、この学説には完成のためにまだ解決しなくてはならない問題が多々あった。平はアメリカから帰国して高知大学で教鞭をとり始めるが、四国の地質学的特徴を正確に掴み、付加体という概念をつくり初めていた。海

溝付近での地質現象はプレートテクトニクスではまだ十分に説明されておらず、さらに詳しく補強する必要があった。

海溝は大陸（又は海洋）プレートの下に海洋プレートが沈み込むためにできる海底の溝であるが、海溝が大陸や島弧など陸地が近いと、陸地からの碎屑物（泥や砂）が頻繁に堆積する。この堆積物は砂と泥が交互に繰り返す特徴を持ち、陸上から運ばれ大陸斜面に一度堆積した細かい碎屑物（砂や泥）が海溝に再堆積したものと理解できる。大陸斜面は不安定な場所で、堆積した碎屑物が地震などによって崩れ落ち、混濁流となって最終的には海溝の底にたまる。最初に砂が、次に泥が積もる様子は規則的で混濁流発生度にこれを繰り返す。これは海溝に特徴的な堆積物で「タービダイト」と呼ばれる。

タービダイトは形成直後からいろいろな作用を受ける。海溝とは海洋プレートと大陸プレートの境界で、圧縮の場である。海溝に堆積したタービダイトはこの圧縮によって変形していく。堆積したタービダイトが圧縮すると衝上断層ができ積み重なっていくが、その時には海洋側の若いタービダイトが大陸側の古いタービダイトの下に潜り込んでゆく。潜り込むといってもプレートやマントルに比べれば圧倒的に軽い物質であるため、地球深部まで沈まず、古いタービダイトが若いタービダイトに海洋の下側から押し上げられ大陸側に盛り上がっていく。これを「付加体」と呼んでいる。

### 付加体の重要な意味

- ・付加体は海溝の堆積物が日本列島に打ち上げられたもので、付加体はタービダイトを主体に、少量の海洋玄武岩や海底堆積物から構成される。

- ・ウエゲナーの時代の混乱（大陸に海洋堆積物が存在するのは海が陸になった証拠）は付加体で説明できる。

- ・付加体は日本だけでなく、沈み込み帯であれば世界各地に存在する。

- ・現在の海洋は2億年前にできたものが最古であるが、それ以前の海底は陸上に打ち上げられた付加体に残されている。付加体のタービダイトの中に海洋プレーにあった海洋地殻が一部混入するからである。海が出来たのは40億年前とは陸上に付加した海洋地殻から判明した。

20世紀の初め、隆起・沈降機能を重視する地球収縮説の信者は、大陸が漂流するという大陸移動説を徹底的に攻撃した。彼らの明瞭な証拠は海生生物の化石が陸上に存在することである。付加体の概念は大陸移動説が進化したプレートテクトニクス理論で説明できる。その付加体の概念は、海溝の堆積物が大陸側に押し上げていくと、地球収縮説の信者達を論破する。

日本列島の調査が明らかになるに連れ、四国海岸、紀伊半島、さらには日本アルプスまでの陸や山脈はすべて海溝堆積物が付加したものであることがわかってくる。日本だけではない。ヒマラヤ山脈、アンデス山脈、ロッキー山脈等、海溝に対面する大陸側の山脈の構成物がすべて付加体の海で堆積した堆積岩なのである。付加体とはウエゲナーが苦しめられた地球収縮説の本髄、魚の化石が陸上に存在する現象を解決したものであり、その意義は大きい。これが平の貢献である。

平はこの付加体地質学を提唱するだけでなく、日本海や東シナ海、鹿児島湾など縁海や背弧海は拡大し、島弧が海溝と共に太平洋側に移動していることを明らかにした。海洋プレートと対面する大陸プレートの縁辺部で何が起きているか、ドラマチックな変動を解明している。

このようなアイデアの源は、古い話になるが大阪大学の川井直人の研究に端をなすと筆者は考えている。それほど当時大学生だった筆者には衝撃的であった。

### 川井直人の日本列島の屈曲

ブラケットの古地磁気学的研究は世界を動かした。日本での古地磁気学も進歩をとげ、大陸移動の復元と同じ解析を日本列島でもやった人が大阪大学の川井直人で、1961年に日本列島の屈曲を明らかにした。

図19bに示したように、日本列島の1億年前の古い岩石から求めた、東北地方の磁北は西方向に傾いているが、西南日本のそれは東方向に傾いている。一方、5000万年より新しい岩石の測定結果（図19a）



では、日本全土同じ方向になっている。この解釈は今の北海道・東北日本の全体的な方向は北北東方向で西南日本は西南西方向だが、昔の日本列島はまっすぐ直線状だった。その時磁化した岩石が1億年前に形成した岩石で、その後東北日本と西南日本が個別に動いて今の姿に屈曲した。そのことを5000万年よりも新しい岩石が記録している。納得のいく解釈である。

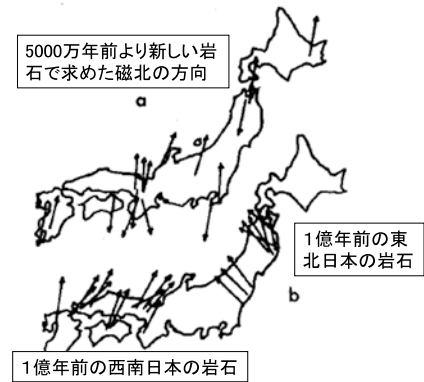


図19 古地磁気から得られた日本列島の曲折(川井、1961)

### 日本海掘削

平はこれを念頭にユーラシア大陸や朝鮮半島の地質を比べて、その連続性から日本列島は昔まっすぐユーラシア大陸に接合し、いまのロシアのウラジオストク—北海道—九州—朝鮮半島が一直線であったと考えた。それを確かめるため日本海底の堆積物を掘削し、昔の環境を解析した。その結果、昔は日本海がなく徐々に深く広がっていったことが明らかになった。さらに同じことが縁海と呼ばれる東シナ海でも約300万年前から同様なことが起こり、100万～200万年前には鹿児島湾が拡大し始めたことも多くの研究者によってわかってきた。

縁海あるいは背弧海は何故拡大するのか、付加体の形成と一体になって海洋プレートと大陸プレートの境界の理解が進んだ。海洋プレートが熱を宇宙に放出して古くなってくると冷たくなり、比重が大きくなって沈みやすくなる。その結果海溝で大陸プレートと海洋プレートが押し合いの結果後者が沈み込んでいくのではなく、冷たく重くなった海洋プレートが自重で沈んでゆく。そこには軽い大陸プレートが対面し、乗っているのがそれが沈降することになりそうだが、アイソスタシーが働いてそうはならない。大陸プレートの下に大陸側から海溝に向かってアセノスフェアが入り込んでくる。そのためにこのような地域では大陸の周辺部が海溝側に引き出され、その後に縁海ができることと理解される。島弧や海溝には現在も不思議が多く、それに挑戦している人が多い。

#### ミニッツペーパー

- ・ 今回はプレートテクトニクスは完全な理論であるのか、またホットスポットの存在は何を意味するのかという点が印象に残った講義であった。プレートテクトニクスはこれまで様々な説で理論付けられてきたが、それが時代や研究者によって様々であり、進歩を重ねていっているのはとても面白いことだと感じた。また、これからの研究でも地球について解明されていくのは楽しみであると思った。そして、プレートテクトニクスを提唱した丸山茂徳についてである。彼も恵まれた環境で育ったわけではないが、自分の熱中できる分野を見出し、地質学会に衝撃を与えるような発表を成し遂げており素晴らしいと思った。
- ・ 日本はプレートが動くことで様々な影響を受けている。例えば頻繁に地震にが起きたり、火山活動に襲われたりすることなどこれらは日本の特色ともいえるだろう。これだけ聞くと悪い面しか見えてこないが、反面良いこともある。海溝が近いことで地震は多いが、そもそもプレートが動いたおかげで日本列島が生まれたのではないだろうか。火山活動は発電などにも利用でき、経済に影響を与えることができる。そしてこのような日本列島の特殊性はそこに住む我々日本人の国民性にも少なからず影響を与えているのではないだろうかと思はれる。
- ・ 丸山茂徳がプレートテクトニクスの論文の発表者だと知って、日本人の中にもまだ自分が知らないだけすごい人がたくさんいるのだと素直に感心した。また、あとで調べたが、このプレートテクトニクスの発想は、深尾良夫の内部マンツルの温度分布のデータからマンツルが熱対流している証拠だと思いついたというわけだから、丸山茂徳はいい知り合いを持ったんだなと思った。一つ気になったのは、日本ではなぜプレートテクトニクスのみが知名度が高く、プレートテクトニクスが浸透していないのだろうか、と思った。今日の授業では世界を先導して活躍した日本人のこと、また日本付近の海溝などの地形のことについて学んだ。平朝彦は馬鹿だと言われている現象を証明する証拠を見つけ出したことは日本人としてとても誇らしく感じた。また日本付近の海溝や地層の調査によって日本列島が昔はどのような形をしていたのか、どのようにして現在の形になったのかをなんとなく理解できた。日本の海洋調査の技術も日々発達しているのでこれからも日本の研究が世界に貢献することを期待したいと思った。



第12回：何度も消えた太平洋 —日本のコンピューター—

ホットスポット

プレートテクトニクスの完成に向けて多くの人々が厳密な議論をし始めたのが20世紀の後半である。今までわからなかった不思議な地球現象がひとつ解決すると、さらにいろいろ不思議が出てくる。例えばホットスポットである。大洋上の一連の火山島は動かないホットスポットでうまく説明できるが、ホットスポットがどうしてそこに、何故動かずに存在するのか、わからないことが増えていく。

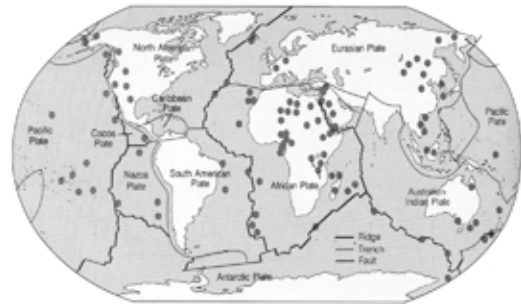


図20 地球上のホットスポット (Skinner & Porter, 1989)

ホットスポットは希少な存在ではない。図20のように地球上には数多くのホットスポットが存在し、その分布はマントル対流ともプレートのそれとも無関係のように見える。

人々はこの不思議に興味をそそられ原因をいろいろ空想していた。こんなに多いからにはマントルの温度分布はかなり複雑で、ホームズが描いたマントル対流説のような単純なものではないのか。それが正確に分かれれば地球の姿が一段と鮮明になる。

しかし、マントル対流やプレートの移動の速度は高々10cm/年である。東京工業大学の丸山茂徳は、マントルの動きを測定することは不可能であれば、温度を測定し、温度勾配が推定できればホットスポットの位置はもちろんマントル対流の方向性が確認できると考えた。

丸山茂徳と深尾良夫

マントルの温度を直接測定できないので間接的に求めるしかない。間接的に求める手法はあるのか。地球の深部からくる情報も限られているなかで比重や密度、粘性などを配慮して地震波を解析すれば温度が推定できるかも知れない。

丸山は名古屋大学の深尾良夫を尋ねた。名古屋大学では伝統的に地球を物理学的手法で解明しようという機運が強く、多くの成果を上げてきていた。丸山はそれに期待した。

ここで簡単に丸山の略歴を紹介する。徳島県の自然の中で幼少期を過ごしていたが父親が早くに亡くなり農作業を手伝いながら学校に通う。1972年徳島大学時代は好きな山歩きに没頭したようで地球科学の基本的姿勢ができていったようだ。卒業後、仕事は教諭と思っていたが、高度経済成長期の恩恵もあって学生支援体制が充実し、金沢大学大学院を経て名古屋大学で博士課程を修了。富山大学助手になった1981年から10年間米スタンフォード大学客員研究員を兼任し世界の歩ける地球科学者になったようだ。自由に研究できたのが何よりも良かったとの感想を聞いたことがある。その後、東大や東工大の教授や海外の大学の招聘研究員、それに招待教授・客員教授を併任して世界を引っ張った。

一方、深尾良夫は1943年東京に生まれ、都立日比谷高・東大を卒業した後、1971年に名古屋大学に20年ほど勤務し地震学を駆使してグローバルテクトニクスを考えてきた。1993年に東大に移りさらに平朝彦らと研究を続けた。『地震・プレート・陸と海 - 地学入門』は地球科学の名著と評価されている。

地震波トモグラフィー

丸山と深尾は地震波を使って温度や粘性の推定ができないか挑戦した。

地震波の伝播速度：硬い物質で早く、軟らかい物質で遅い。

マントルの温度：硬い物質は低温、軟らかい物質は高温。

ということは、

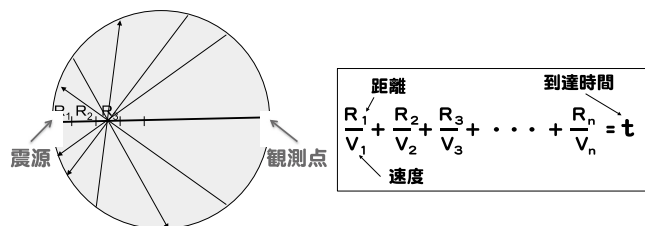


図21 地震波トモグラフィーの原理

地震波の伝播速度が早ければ、その物質は硬く、硬ければ低温。

地震波の伝播速度が遅ければ、その物質は軟らかで、軟らかなら高温。

と近似できる

彼らは、マントルを細かく分割しそれぞれの温度を求めるために、地震波を使った断層撮影方法「地震波トモグラフィー」に成功した。

図21に示したように、ひとつの地震波からは震源から観測点までの距離と時間しかわからない。しかし、地球を細分して右の方程式の  $R_1 \sim R_n$  を3次的に決めておき、多数の地震を多数の観測点でとらえてそれぞれの到達時間  $t$  を入力すればCT (Computed Tomography) スキャンが可能である。もちろん、膨大な数の地震情報を計算処理するにはスーパーコンピュータが不可欠である。深尾はそれをやってのけた。

計算結果はそれまでの常識から驚くほど離れた図を描き出した。結果を図22に示したが、マントル対流の沸き出し口である東太平洋海嶺の地下深部は高温ではない。それに対しホットスポットであるハワイ島の下上部マントルには高温域は広く存在する。この図は地球の断面図でわかりにくい側面もあるが、それにしてもこれらは予想をはるかに越えるものであった。理解できるのは、太平洋プレートが冷えて日本付近からユーラシア大陸の下に冷沈み込んでいく様子が見える程度である。しかしそれ以外については今までの考えを改めざるを得ない。

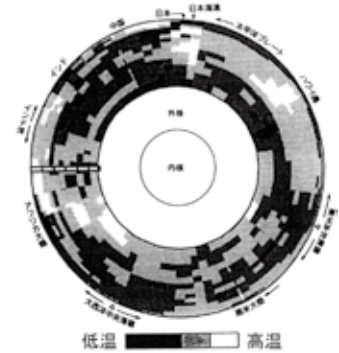


図22 マントルの温度の不均質性 (深尾、2011)

### プルームテクトニクス

丸山はこの観測結果から練りに練った新しい学説「プルームテクトニクス」をつくりあげた。彼が単純化したマントルの様子を図23に示した。

プレートテクトニクスやマントル対流説など今まで提唱された諸説にマントル内の温度分布を4次的に導入して解析したうえで、

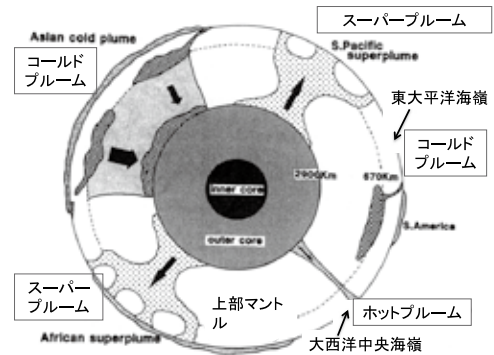


図23 プルームテクトニクス (丸山、2011)

- ・ マントル内には高温と低温部が存在し、前者は隆起し、後者は沈降する傾向にある。
- ・ 大西洋中央海嶺（およびインド洋海嶺も）には下部マントルから細く鋭い高温のマントルが沸き出している。高温のマントルの形から、これをプルームと呼ぶ。語源は「原爆雲」、その元は「インディアンの酋長が冠る羽毛のかんむり」で、それらに似ているためである。高温のプルームをホットプルームと呼び、巨大なものをスーパープルーム、低温の部分の形はプルームに似ていないが、ホットプルームに対比させて「コールドプルーム」と名付けた。
- ・ 南太平洋やアフリカ・インド洋には巨大なスーパープルームが存在する。大西洋のホットプルームのようなものが熱を拡散させて出来たと解釈できる。下部はキノコのように太く、上部はキノコの傘のようになってその上に枝状に地球表層部に達している。そこがホットスポットになったり、アフリカ地溝帯のリフトバレーのつながっている。
- ・ コールドプルームは海溝から沈み込んだプレートはおおよそ地下700kmで動かなくなったように溜り冷えた大きな塊となる。巨大で古い大陸、ユーラシア大陸などの深部では冷えた塊のさらに下、時にはマントル底部にやはり冷えた大きな塊があり、海洋プレートが宇宙に熱を放出し冷えて重く

なって大陸の下に溜まる。しばらく（2億年程度）して構成している鉱物が高圧型高密度構造に転移したところでさらに沈降する。これが冷たくなったコールドプルームの進化の経緯である。

このようにマントル対流は複雑な形でゆっくりと動いているがまとめると図24のようになる。すなわちホットプルームが巨大大陸の中央に沸き上がり、大陸を分裂させ新しい海洋をつくって拡大してゆく。大陸の移動の先端部では、対面の海洋プレートが沈み込み、海洋が小さくなっていく。最終的には地球上の大陸がすべて地球の反対側に集まることになり接合部の海溝、沈み込み帯、海洋が消滅してゆく。この地域のマントル底部では冷たいプルームのかけら「メガリス」が加熱し始めたマントル底を刺激し新しいホットプルームを産み出す（図25）。マントルの動きは逆の動きをとって元に戻ってゆく。地表に残された大陸移動や海底拡大の記録を整理すると、このような変動は約20億年前から始まり、その周期は7～9億年と見積もられた。

これがプルームテクトニクスの概要である。

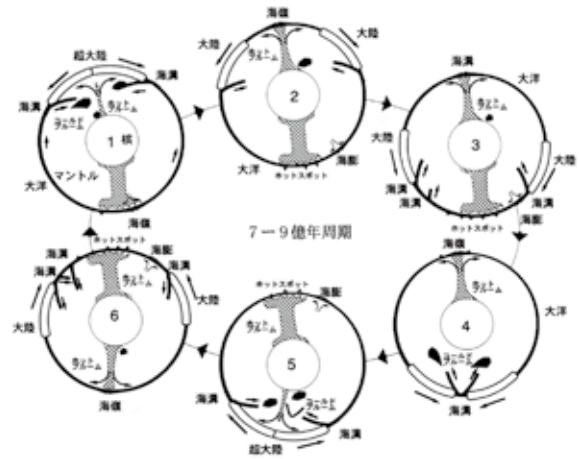


図24 プルームテクトニクスの発達

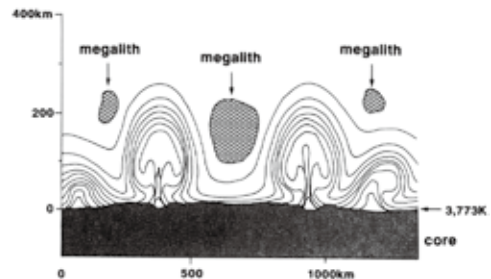


図25 コールドプルーム (冷たいメガリス) の落下で誕生するホットプルーム (丸山、2002)

ミニツツペーパー

- ・ 今まで講義を受けてきて、プレートテクトニクスという私にしてみれば完璧に思われる説でも問題が提起されて、別の考えがあるのではないかと否定されるのだと知り、学問の道に進む人の偉大さを思い知らされた。丸山先生は全地球史解説を主張されているということだったが現在ではどのような問題や疑問について研究されているのか知りたいと思った。世界には私が思うより多くの謎があるのだと毎回実感させてもらっている。
- ・ プルームテクトニクスについては高校の地学で習ったので知っていたのですが、それを発表した人が日本人でしかも比較的最近の出来事だったのでとても驚きました。もし丸山さんの講義を受けることが出来るのなら、プルームテクトニクスという考えに至るまでの過程と、その過程における困難等があれば詳しく聞きたいと思いました。また電子レンジの仕組みを初めて知り、分子運動によって暖めているなんて画期的だと感じました。そしてそれを利用して地球をCTスキャンしようと考えた丸山さんの発想には驚きましたが、それを実際にやり遂げてしまったのでとても尊敬します。
- ・ 丸山先生がもし鹿児島に来てくれたら、本当にプルームテクトニクスが正しいか聞いてみたいと思いました。いろいろな考えが今まで出てきていろいろな矛盾が発見され、ことごとくダメになってきたのでそこを聞いてみたいと思いました。また今日の授業で出たCTは自分も使ったことがあり、このような構造になっているんだと思い、とても興味深かったです。また電波の特性にもいろいろ知らない点があり、とても驚きました。

- ・ 今回の授業ではホットプルームについて、地震波トモグラフィーからからのマンツルの温度分布についての講義であった。少し遅れてきてしまい、前半の話は少しわからなかったが、丸山さんの描いたマンツルの温度構造の図が神秘的に思えた。もし丸山さんが鹿児島に来てくれたら、研究者として必要なこと、また地方大学の人が具体的にどうしたら立派な研究者になれるかを聞きたい。
- ・ 丸山茂徳先生は、なぜ深さ約100kmのプレートではなく深さ2900kmに達するマンツルに注目しようと思ったのか。また先生について調べてみたところ、地球温暖化についてもいろいろと言及されているみたいなので地球温暖化についてもいろいろなことを聞いてみたいです。地球には地震があり、そこに着目して地震波を使ってマンツルの温度を調べるということは、一般人にはとても思いつかないことでとても驚きました。また海嶺に注目すると、地下170kmでは高温だが深くなればなるほど低温となり、マンツル底面付近ではプレートの分布と温度は無関係ということが推定されることに気づいたことはとても凄いいことだなと思いました。高校で地理を習っていましたがプルームという言葉始めて聞きました。多くのことを学び進取の精神をしっかり汲み取っていきたいです。

### 第13回：3次元の地球から4次元の地球をつくる—全地球史解説—

丸山茂徳は「プルームテクトニクス」を提案した後、全地球史解説、地球進化の必然性を追及しようと呼びかけている。丸山の主張は地球の歴史はその冷却の歴史である。進化には必然性が存在し地球変動の因果関係が連綿とつながっている。地球の歴史は偶然によって出来上がっているのではないと考えている。根拠は彼のプルームテクトニクスが数億年周期で繰返していること、それを地球上で追うことが出来ることにある。

ここで見逃してはいけないことは2億年よりも古い海底が「陸地」に残っていて現在観察できることである。もちろん大半の海洋プレートは海溝から沈み込んで消滅しているが、極一部は海溝でメランジェとしてタービダイト等と一体になって大陸に付加している。一端大陸プレートに付加されると、陸上で浸食を受けない限り40億年前のものであっても保存される。丸山はこれを完成させて地球誕生からの必然性をまとめはじめた。

地球は太陽系星雲から誕生した。最初は素粒子同士が、続いて元素同士が、さらに分子が、塵が、岩石片が、ついには岩塊が、衝突を繰り返し、地球が出来上がった。物質が衝突するため、運動エネルギーが熱エネルギーになる、重力エネルギーが熱エネルギーになる。従って、現在と同じ大きさになったばかりの地球は相当熱かったはずである。

まもなくして太陽系は集積を終えて晴れ上がり、その後の地球はわずかに変化する重力のエネルギーから変わった熱と内部に含まれる放射性元素の壊変に伴う熱、それに稀におこる星屑衝突に伴う熱が蓄積される程度で、宇宙空間に熱を放出する冷却の時代に入る。地球史の大半が冷却史なのである。

#### 丸山の描いた地球史

以下丸山の地球史を載せる。彼の著書「46億年地球は何をしてきたか？」(2002)を使って紹介するので、詳細は彼の著書を読んでほしい。

- 45.6億年前：地球の誕生 太陽系星雲を構成する物質が互いに衝突し、地球が誕生した。重力エネルギーや運動エネルギーが熱に変わり、集積した地球は高温となる。地球内部が還元的であるために存在する金属鉄と岩石中の一部の鉱物が熔融する。金属鉄は地球中心部に移動して核を、後者は地球上層部に移動した。地球表層はマグマの海に、さらに気体成分が分離して原始大気となった。
- 45.4億年前：ジャイアントインパクト 太陽系星雲の凝縮が終わって各惑星の原形が出来上がっ



た後、まれにある程度大きな星が衝突する場合がある。まさに地球が誕生した直後の45.4億年前、火星程度の微惑星が衝突してマントル部を大きくえぐった。その時飛散した地球のかけらが集積して月となったと考えられている。月には金属鉄の核がないかあっても非常に小さいことと、月の岩石の化学成分から、月の誕生に関する経緯がわかってきた。

- **43億年前：マグマオーシャン** 地球の原形ができた早期に集積した熱によって地球表層部は液体の状態であったと推定されている。地球表面は液体であったことを強調するために「マグマオーシャン」と呼んでいる。地球表面からは揮発性分が噴出し原始的大気がさらに濃くなった。巨大隕石は時折落下していた。
- **40億年前：プレートテクトニクスの開始** マントルは冷却して固体になり、中心部の熱を宇宙空間に放出するために、マントルは固体でありながら対流を継続した。液体の頃に比べ極めてゆっくりしたものになった。マントル対流に関して、マントルの下部には大きな、上部には小さい対流の渦ができ地表にはプレートの衝突と沈み込みが始まって島弧が出来た。この頃の陸地はせいぜい100km だったろう。陸地の大きさは表層部のプレートの大きさに影響され、プレートは対流の大きさに相関する。小さな対流をマントルの中に位置づけるために2層構造が必要である。この頃海が誕生し、まもなく生命が誕生した。
- **27億年前：強い磁場の発生** 冷却が進んでこの頃核の一部が固体になった。固体の金属鉄は沈降して内核が形成された。外核は液体の状態である。金星（太陽に近くやや大きいため、核はまだ熱く、すべてが液体と考えられる）と火星（核は冷却してすべて固体になっていると考えられる）の磁場が非常に弱い。比較惑星学から、核の2層構造が強い地球磁場の原因と考えられている。この磁場に保護され、これ以降生物の進化が顕著になっていった。
- **17.4億年前：最初の超大陸** 冷却が進んでマントル対流が一層構造となった。その対流の規模はマントル底部からマントル上部にわたって大きくなる。その結果、地殻物質、特に大陸地殻の集積の範囲が広くなり、それぞれの大陸が大きくなった。さらに集積して最初の超大陸が形成された。それが超大陸ヌーサである。
- **5.5億年前：ゴンドワナ超大陸** アフリカ・南米・オーストラリア・南極が接合し、さらに北米・ユーラシアが接合したローレンシア大陸を合わせた超大陸が出来た。超大陸の誕生は同時に、広大な海洋が1つできることを意味する。地球の歴史とは、超大陸ができ、それが分裂して地球の反対側に集積してそこに新しい超大陸を形成し、次の分裂に繋がる歴史である。
- **2.4億年前：パンゲア大陸の分裂** ゴンドワナ大陸とローレンシア大陸が一体となったパンゲア大陸はこの頃から分裂し、そこに大西洋ができた。ウエゲナーが気づいた超大陸である。
- **現在の地球** パンゲア大陸が分裂して、その反対に、すべての大陸が移動中である。太平洋を構成するプレートが海溝に沈み込んで太平洋がどんどん小さくなり、大西洋は周辺の大陸を押しつけ、地球上ひとつしかない超海洋に成長しつつある。生命進化の結果、人類が登場した。

ミニッツペーパー

- ・ 毎度のことなのですが、いろいろな科学者の説を聞く度に、それが仮説に過ぎないのか、それとも真実であるのかわからなくなります。もちろん、真実とされてきたことが覆されたり、注目されなかった理論が急に注目され始めることもあるのは、十分わかってきたつもりですが…。沈み込むプレート・コールドプルーム・ホットプルーム・ホットスポットの でき方、関係性の話を聞いて、なるほど!と思います。その根拠も納得がいきます。しかしどこか欠点があるかもしれないと思いつつ、何も見つからないのは、自分の理解が足りないからなのかと不安になります。(一番私が望んでいることです。観測や実験はどんどん蓄積され、そのすべてを説明するために理論が常に更新されます。真実を求める人間の心がここまで科学を進歩させたのです。だから、「何を根拠に、そんなとんでもないことを主張しているのだ」と思って人の話を聞くのが大切ですし、先人たちのこの習性をよく見てください。そのうち、あなたにもできるようになります。)



- ・ 今回の講義では古代からの地球史について学んだ。地球が誕生してからでは様々な遍歴を起しており、大陸分布も現在とはまったく違うことに驚いた。また金星と火星と地球はよく似ていると聞いたことがあったが、核の状態が違うということは初めて知った。金星はまだ液体の状態で熱く、火星はすべて固体の状態で冷えており、地球はその2つの中間であるということも驚いた。地球史はスケールが大きく、億単位の年数で変化があるので、とても魅力的だと感じた。今後ミニツペーパーは紙媒体となるが、しっかり真面目に出席し、少しでも自分の糧となるような学習をしていきたいと思う。
- ・ ミニツペーパー提出方法の変更には賛成（60名）：提出し忘れない。授業には本来出席すべき。内容を忘れずにその場で書ける。手書きの方が平等。しっかり授業を受けて自分の考えを出したい。ムードルだけで書いたこともあり今は賛成。
- ・ ミニツペーパー提出方法の変更には反対（12名）：評価されるのでゆっくりまとめたい。授業中では雑になる。個々人のやり方を尊重せよ。途中で寝てしまっても後で勉強してレポート出せる。最初の方針をコロコロ変えると混乱する。授業に出席してればそれでよしと考えていると、後でしっぺ返しを受ける。
- ・ ミニツペーパー提出方法の変更について（19名）：損するのは本人だから放っておけ。有効利用も悪用も本人次第。授業が大事でレポートはどちらでもよい。寝坊したときは便利だったが、これからはしない。授業中にやるなら課題を早く。
- ・ 私の周囲の人、学科や部活の友人や先輩方のことですが、その多くが「共通教育は単位さえとれば何でもよい」と考えていることを聞いています。そう書くと、まるで私は違う、とでも言いたいのかとでも思われてしまうかもしれませんが、残念ながら私もその大多数の人と同じような考えを持ってしまっています。ただ、単位が取れるだけでなく“おもしろい”授業を受けられたら良いなあ、という欲がある分、私の方がタチが悪いのかもしれませんが。今後、まだまだ共通教育を学ぶ機会があるので、「単位を取るため」という悲しい目的のみで受けることは避けたいと思います。

#### 第14回：国境を越え地球を越えて—学界は白熱の渦—

地球は誕生以来、原因と結果が連綿と連なって進化してきた。丸山は、プレートテクトニクスの長い周期の地質現象を追えるようになって地球の歴史全体を自然科学的に俯瞰できる時代になったと考えた。もう一步の努力で地球の歴史を全貌することができ、地球の進化を1本の糸を辿るように因果関係を明らかにできる可能性があるとして主張して「全地球史解説」の推進を提言した。今日まで様々な研究者がこれに賛同し、地球の過去を追跡し様々な成果を上げてきた。

全地球史の解説にはより古い時代を如何に明らかにするかが最大の焦点である。地球史のうち最近の出来事は比較的解明しやすい。ところが、古い時代ほど解説が困難で因果関係まで明らかにすることは至難の業である。

地球の地質年代表は生物の進化を基準にして、「代」という言葉を使って大きく三つに分け、古生代、中生代、新生代と名付けた。さらに「代」を細分して「紀」に分け、例えば古生代を、カンブリア紀、オルドビス紀、シルル紀、デボン紀、石炭紀、二畳紀に分けた。この時の理解は古生代のカンブリア紀の始まりが地球の始まりである。しかし研究が進み、地球誕生はカンブリア紀より早いらしいとわかった。でもそれは短時間なのでカンブリア紀の前のわずかな期間として「先カンブリア紀」と名付けた。

20世紀に入り放射性元素を使って年代を数字で表示できるようになった。これを「絶対年代」と呼んで測定・算出したところ、先カンブリア紀と古生代、中生代、新生代の始まりは、それぞれ40億年前、5億7千万年前、2億5千万年前、7千万年前とわかった。驚くべきは先カンブリア紀開始の絶対年代

で、この時代のことはまったくわかっていなかったと皆愕然とした。この時代は原始生物の進化の速度が遅いことに加えて情報は不足していた。「先カンブリア紀」はさすがに不適切で「先カンブリア時代」と変更したが、21世紀の果敢な人々は地球史の中で最も長く、ほとんどわかっていないこの時代を明らかにすることに挑戦している。

突然話題が変わるが、この先カンブリア時代の研究の意義は「宇宙科学的に」たいへん重要である。宇宙生物学の最も基礎的な研究は我々が知っている生命の棲むただひとつの星、地球の研究である。何故地球に生命が誕生したか、進化し発展させてきた地球とはどんな特徴を持っているかの研究が成果を上げれば地球外生命は必然的に見つかると考えて世界の学会は動いている。この研究のためにも進化が繰り返された現代よりも原始地球の情報は大切である。これが筆者の先カンブリア時代の地球環境と生物進化を研究する動機であり、その成果を紹介する。

この研究の先駆者の一人はアメリカのヘインリッチ・D・ホランドである。ホランドは1984年に「大気と海洋の化学的進化」という著書を発表し、最も活動的な化学種である遊離酸素（酸素ガス）の挙動を議論した。原始地球には古細菌が棲息していたが遊離酸素は存在しなかった。古細菌が進化した末に登場した光合成生物シアノバクテリアが炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）と水（H<sub>2</sub>O）を吸収して有機物をつくり、余った酸素を体外に放出した。その結果地球環境を酸化的にした。海水中には地球誕生以来大量の鉄が溶解していたが、シアノバクテリアが放出する遊離酸素が海水中の鉄をすべて沈殿させ膨大な鉄鉱層をつくった。海水中に酸化するものがなくなって海水中の遊離酸素はやがて大気に放出された。鉄鉱層形成の年代を放射性元素で調べると30～20億年前になる。ホランドはさらに検討を加え、地球大気の遊離酸素が現在の1%になるのは19.5億年前と計算した。さらに先カンブリア時代の末期には現在とほぼ同じレベルになったと考えた。

地球の環境と生命の共進化をいろいろと空想していた人々は古環境を観測・解析・確認できる手法を提供したホランドを高く評価した。特に教え子のペンシルヴァニア州立大学の大本洋は、ホランドの実験を強化し空白の時代を埋める研究を推進した。ところが研究の結果恩師とは逆の結論を得てしまい意見が対立することになった。

大本は地球に海ができ生物が登場してまもなく地球大気には現在とほぼ同じ20%程度の遊離酸素が存在し、地球史の大半は酸素ガスの含有量がほぼ一定値を保ったと考えた。鉄鋼層の形成が30～20億年前に限られるのは地球内部の鉄の進化の過程であると考えた。遊離酸素が十分存在している海に、30～20億年前に突然地球深部からの火山の活動で鉄を溶かし込んだ熱水が沸き上がってきたためだと考えた。生物の進化速度から考えると大変な違いで、国際学会では激しい議論が続いた。

ホランドと大本は師弟の関係にあり冠婚葬祭では共に喜怒哀楽を分かち合う関係にある。しかし研究のことになると激しいバトルの応酬で、特に大本の発表のときはヤジで講演者の声が聞こえないほどになる。恐ろしい光景であるが、これが真理の探究に燃えている人々のひとつの姿だと感じる。日本の文化にはないとても刺激的な光景で、考えさせられる。

筆者がこの問題に拘わるようになったのはカナダのシアノバクテリアの化石や鉄鉱層の下にある熱水の通った跡を観察してからである。遊離酸素を生産するシアノバクテリアは無数の個体が集合してストロマイトと呼ぶ大きな建造物を造る。そのストロマイトが鉄で覆われていない！ ホランドによれば、元々海水中に鉄が溶けており、シアノバクテリアによって酸素が生産された時に鉄錆になったという。それならば、酸素を生産中のストロマトライの頭は鉄錆がびっちり冠っているはずである。もちろん観察しているのは20～30億年前のストロマトライトの化石である。その後の変化で鉄が溶脱したのかも知れない。いろいろ調べたがそんな証拠は見つからなかった。

一方、大本は鉄鉱層の鉄は地球深部から噴出してきたと考えた。遊離酸素に飽和した海水の中に鉄を含む熱水が噴出し鉄鉱層ができたと説明した。遊離酸素は鉄鉱層形成のはるか前に海水に充満していたと考える根拠である。筆者の観測結果は大本説と矛盾しない。さらに、鉄鉱層下部には鉄が地下から噴出してきた跡が確認できた。

争点は遊離酸素と鉄の沈殿のどちらが先かである。鉄が沈殿した時期はわかっているので、問題は酸素が登場した時期である。古い過去の酸素に関する証拠（物理的・化学的化石）を探することは大変である。

筆者は宇宙生物学発展のための基礎的研究として宇宙で生命の棲む星、地球を調べる重要性を訴えて研究環境をつくった。

文部科学省は大学から申請された研究計画を審査して研究費を支給する。申請した「太古代生物圏掘削計画」が認められ、アメリカの大本他の研究者と共に、カナダ、アフリカ、オーストラリアなどを調査し、研究に適した20～36億年前の地層がオーストラリアに分布していることを確認し、西オーストラリア大学とオーストラリア地質調査所の研究者に呼びかけて国際共同研究を始めた。

調査場所がオーストラリアなのでオーストラリアの研究者には調査が順調に進むよう責任を持ってもらい、アメリカの大本からは筆者とほぼ同額の研究費を出してもらった。これでは予算が足りないのでアメリカ航空宇宙局 NASA の宇宙生物研究所に出かけて研究の重要性を訴え資金援助を申請した。

この研究体制確立の途中で大変なハプニングが起きた。アメリカの研究グループが同じことを考えていたことがわかり、オリジナリティの帰属で論争になった。NASA のアドバイスで、宇宙生物研究所が企画したプロジェクトの傘下に全員が属し、資金の融通と研究のオリジナリティを尊重した国際研究協定を結んだ。予算は最初文部科学省から支給された金額の10倍になっていた。

オーストラリアの研究対象は27～35億年前にできた岩石であったが、筆者らは以前から、もう少し新しい（後の）時代の岩石から研究しはじめていた。

南アフリカの22.2億年前の古土壌は500km<sup>2</sup>の広い範囲に渡って点々と分布している。それぞれの場所では深部から地表に向かって Fe<sup>2+</sup> が Fe<sup>3+</sup> に変わったりその逆であったりする。しかし、すべての時代を正確に測定し正確に地層を比較すると当時の風化が地表直下の地下水に影響されており地表では既に大気中に酸素があったことを意味していた。

次に調べたのはさらに古いカナダ花崗岩上に発達した24.5億年前の古土壌である。ここも同様に風化の進行を、順序よく整理し直すとやはり酸素の存在が明瞭になった。

さらに本プロジェクトで太古代の中期の27億年前の地層に形成した土壌があると言われており、そこでは Fe<sup>3+</sup> が Fe<sup>2+</sup> に変化している。しかしこれを良く調べると土壌ではなく地表近くで発達した熱水の変質帯であったことがわかった。さらにそこに住む微生物の化石に硫酸還元バクテリアの棲息が推定される。これは当時既に海水が酸化的で硫酸イオンに卓越していたと推定できる。最後は30億年前の金鉱床を求めて南アフリカへ、ナミビアへと調査を進めた。世界のほとんどの人々が地球に酸素ガスはなかったろうと考えていた時代である。ここには陸上から河川で流されて出来た堆積岩がある。この中に黄鉄鉱と呼ばれる酸化されやすい鉱物が堆積しているから遊離酸素はなかったと言われていたが、その間違いを指摘して遊離酸素が存在していたことを証明した。世界の常識を打ち破ったこの研究成果に多くの人々が反対し、批判的で異様な雰囲気学会は開催された。しかしこのような活動を通じ、間違えだとする人の意見を恐れずに仕事を進めることが重要であることを学んだ。今回はその時の様子をスライドで紹介し、進取の精神とは何かを振り返る。

#### ミニッツペーパー

- ・ 私の周囲の人、学科や部活の友人や先輩方のことですが、その多くが「共通教育は単位さえとれば何でもよい」と考えていることを聞いています。そう書くと、まるで私は違う、とでも言いたいのかとでも思われてしまうかもしれませんが、残念ながら私もその大多数の人と同じような考えを持ってしまっています。ただ、単位が取れるだけでなく“おもしろい”授業を受けられたら良いなあ、という欲がある分、私の方がタチが悪いのかもしれませんが。今後、まだまだ共通教育を学ぶ機会があるので、「単位を取るため」という悲しい目的のみで受けることは避けたいと思います。

- ・ 今日の授業の「宇宙人はいるか」という疑問と解説も興味深かったです。私はいないと思いつつも、実際には存在するだろうなあと思っている派です。地球人も宇宙人であることゴキブリを例に挙げた確率論の話から、先生は宇宙人は存在するとおっしゃっていましたが、ちゃんと目に見える証拠がないと信じられないと思ったのが本音です。またこの時おっしゃっていた「学問は楽しむことが大切」というのはその通りだと思ったし、進取の精神には欠かせないことだと思いました。自分が興味がないことを無理に学んだところで身につかないし、まったく自分の役になりません。「もっと学びたい」という探究心を沸き上がらせるには。まず楽しむ気持ちが必要だと思いました。今日の宇宙の話も「楽しい。知りたい」と思えたので。聞いていて、もっと知りたいと思いました。
- ・ 今日の授業で、宇宙生物学の誕生が進取の精神の養成に役立ったと思います。“火星に生物がいた”とNASAが間違っって発表したことで、みんなの夢が広がり宇宙生物学が誕生したからです。間違いのお陰で新たに学習意欲がわき、新たな学問が出来た凄いと思いました。
- ・ 先生の「宇宙人はいる！ 地球人は宇宙人！」というのを聞いて、単純なことだけど、このように発想を転換することは大切だと思ったし、そのようにすることで今まで持てなかった考えを産み出せるのではないかと思う。私は今日の講義の中で、先生がおっしゃった「学問を楽しく学ぶ」ということが進取の精神を養っていく上で一番重要だと思いました。先生自身も地学の学者だけれど、宇宙人や地球外生命体に興味を持ったり、学問を学問としてとらえるのではなく、自分の興味のあることの真実を知りたいと自らの探究心のままに進むことで、視野が広がり、あらゆる面から考える力がつくと思います。たとえば宇宙ゴキブリの原理も数学的思考を用いたり、様々な考え方ができる方がさらなる疑問や謎が浮かび、学びが深まると感じました。私自身、大人になるにつれ、自ら行動することが減りました。しかし、このままでは私の人生浅くなってしまう気がして、進取の精神を取り戻さなければならないと思いました。

### 第15回：地球を考える現代の動機—人類の未来—

この授業も今日が最後になった。振り返ると大陸移動説からの進取の精神の高揚の軌跡をめぐり、21世紀になったところで、地球のダイナミクスは46億年間、一貫した方向で進化してきたことがわかってきた。それは地球の冷却史と捉え、その必然性を考えてきた。本日は最後の講義になるので、地球進化の七大事件の最後、人類の出現について考える。

復習も含めて、丸山が強調している地球史七大事件をまとめて振り返ろう (図26)。それは、

①最初の重大事件は言うまでもなく「地球誕生」である。②続いて地球を特徴づける「海と生物の誕生」が起こった。水があれば何処でも生きるといのが「生命」の特徴かも知れない。③次の重要な事件は「強い地磁気」が発生したことである。宇宙線を絡めとり生命に穏やかな環境を作った。同じ頃進化の産物「光合成生物」が登場し環境を激変させた。④「最初の超大陸」が誕生するのは20億年前でそれ以降大陸は分裂と合体を繰り返す。⑤生物進化も関係して大気組成の変動から全球凍結が起こりこれを契機に生物のコラーゲン作成能力が向上し「大型生物」が出現する。この頃から「海の地下への染込み」が始まり海水は減り始めた。⑥その後は大局的には進化を遂げながら生命体の限界や環境の激変に寄る「大量絶滅」が時々起こる

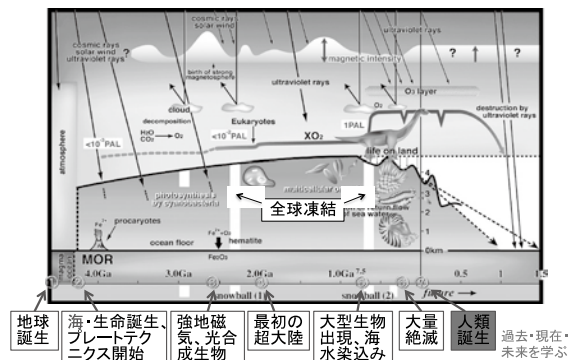


図26 全地球史と近未来 (丸山 (2011) に加筆)

ようになり、⑦最近になって「人類誕生」が地球上に刻まれた。

なぜ「人類誕生」が大事件のひとつなのか、それは進取の精神を持った生物が出現したことと言ってもいいだろう。人が自由に考えた空想を大切に、それを作業仮説として科学の世界に導入し、着実な実験と調査で検証する。人類は現在を過去の変化の結果として捉え、未来を予測することも出来る。あるいは地球を破壊してしまうかも知れない存在という意味で、人類の出現は大事件なのである。

## 人間圏

千葉工業大学の松井孝典は生物圏から高度に進化した人類を切り離して「人間圏」を設定すべきであると提唱している。松井は人間圏の必要性を以下のように述べる。

人類はむかし他の動物と共通の狩猟採集の生き方だったが、農耕牧畜の生活形態を発見し繁栄を極めている。その結果、女性の生態に革新的な変化をもたらせた。それは、子供の出産と育児の仕方を「娘に教える時間ができた」という変化だという。他の動物の雌は自分の出産を終えればそのまま生を終える。出産を終えた後自分の子供に教育出来るようになったことは極めて大きな変化である。この時育児の教育や手助け以外にも「考える」という特徴を発揮するようになったと松井は言う。人類が2本の足で直立できたことに相まって、進取の精神を高騰させることが出来た。自然現象に不思議を発見し、あれこれと自由に原因を空想する時間を確保出来るようになった。人間だけに与えられた恩恵である。この発展的な感性が、厳密な科学の世界をつくる原動力になり辛い壁を乗り越えさせた。別な表現では、現在の地球を過去の地球からの進化として捉え、それを延長して未来を予測する能力を身につけた。

最大の関心は人類はこの先どうなるかということである。恐竜は隕石の衝突で滅亡した。生物には寿命がある。固体毎に寿命があるのと同様に、種の寿命が存在するという。人間個人の寿命は百年ぐらいだが、人類に寿命が存在するのか、もし存在するならばそれはいつ頃なのか。多くの人が計算している。

図27はMeadows (1998) のデータを使って松井がまとめたものであるが、現在食糧や資源、工業生産などが減少している一方で人口が増加している。しかしこのアンバランスは共存できず、最後は人類の減少を産み出す。問題はいつそのような事態になるかについて正解を得るのは難しいが、松井は2050年を可能性の高い時期だと考えている。恐ろしく近未来である。この人口減の意義は大変深刻で、人類の衰退に直結する要素もある。

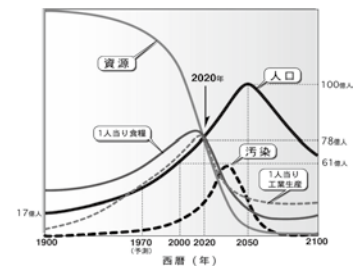


図27 地球に限界がやってくる (松井、2002)

2050年という未来をどのように位置づけるか。恐怖すら感じる。しかし、ここでも進取の精神を思い、次世代の人々への期待は大きい。

## ザビエルの言葉

450年前、フランシスコ・ザビエルは日本人の素晴らしさを本国に送った手紙で次のように報告している。

「私たちが交際することによって知りえた限りでは、この国の人びとは今までに知った国民のなかで最高であり、日本人より優れている人びとは、異教徒のあいだでは見つけれないだろう。彼らは親しみやすく、一般に善良で、悪意がない。驚くほど名誉心の強い人びとで、他の何ものよりも名誉を重んじる。大部分の人びとは貧しいが、武士も、そうでない人びとも、貧しいことを不名誉とは思っていない。(中略) 大部分の人は読み書きができ、祈りや教理を(中略)学ぶ。彼らは1人の妻しか持たない。(中略) 盗人は少なく、盗みについてこんなに信用すべき国民を見たことがない。彼らの間に行われた邪悪は自然の理性に反するがゆえに罪だと断ずれば、彼らはこの判断に諸手を挙げて賛成し、誰でも死刑にする。彼らはたいへん善良な人びとで、社交性があり、また知識欲はきわめて旺盛である。彼らはみな理性的な話を喜んで聞く。」(河野純徳、1985)

ザビエルの後、日本は江戸の鎖国時代に入った。そして今から150年前、開国を強いられ欧米からの圧力と遅れを痛感する。この危機に薩摩藩士は明治維新を率先して敢行し「進取の精神」を高揚させて新しい日本をつくった。その後、富国強兵・殖産興業を成功させ瞬くうちに列強に肩を並べた。おごり



の時代に入り第二次世界大戦を敗戦で迎えるが、真理探究の自由な発想ができる限り克服の道は見出せるだろう。期待したい。

#### 参考図書

- 浜野洋三「入門ビジュアルサイエンス 地球のしくみ」日本実業出版、1995
- A.Holmes (上田誠也ほか訳)「一般地質学 I、II、III」東京大学出版会、1983
- 石井健一ほか「躍動する地球—その大陸と海洋底—第3版」共立出版、2007
- 掛川武・海保邦夫「現代地球科学入門シリーズ15 地球と生命—地球環境と生命圏進化」共立出版、2011
- 川上紳一・東條文治「図解入門最新地球史がよくわかる本」(株)秀和システム、2006
- L.Kump, J.Kasting & R.Crane “The Earth System” Pearson Ed, Inc., 1999
- 丸山茂徳「46億年、地球は何をしてきたのか? 地球を丸ごと考える2」岩波書店、1994
- 丸山茂徳・磯崎行雄「生命と地球の歴史」岩波新書、1999
- 大谷栄治・掛川武「地球・生命 その起源と進化」共立出版、2005
- M.Redfern (川上紳一訳)「地球 ダイナミックな惑星」丸善出版、2013
- 新生出版(編)「徹底図解 地球のしくみ」新生出版、2014
- B.Skinner & S.Porter “The Dynamic Earth”, John Wiley & Sons, Inc., 1989
- 立花隆「南原繁の言葉」東大出版会、2007
- 竹内均・上田誠也「地球の科学 大陸は移動する」NHK ブックス、1964
- 泊次郎「プレートテクトニクスの拒絶と受容 戦後日本の地球科学史」東京大学出版会、2008
- 坪井誠太郎「岩石学 I」岩波全書91, 1938
- A.Wegener (竹内均訳)「大陸と海洋の起源」講談社、1975