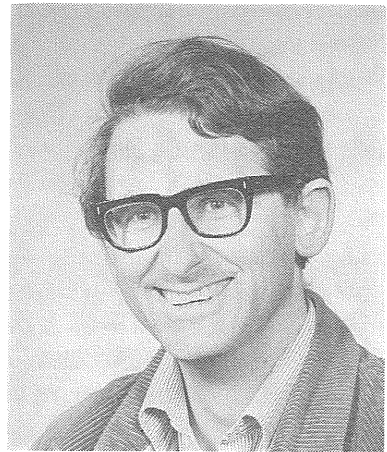


7. Hey, R., Duennbier, F. K., & Morgan, W. J. (1980): Propagating rifts on mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, **85**, 3647-3658.
8. Crough, S. T., Hargraves, R. B., & Morgan, W. J. (1980): Kimberlites: their relation to mantle hot-spots. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **50**, 260-274.
9. Morgan, W. J. (1981): Hotspot tracks and the opening of the Atlantic and Indian oceans. In "The Sea, vol. 7, The Oceanic Lithosphere," C. Emiliani (Ed.), John Wiley & Sons, New York, 443-487.
10. Morgan, W. J. (1983): Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, **94**, 123-139.
11. Vink, G. E., Morgan, W. J., & Zhao, W.-L. (1984): Preferential rifting of continents: a source of displaced terranes. *J. Geophys. Res.*, **89**, 10072-10076.
12. Zhao, W.-L., & Morgan, W. J. (1985): Uplift of Tibetan Plateau. *Tectonics*, **4**, 359-369.

プレート境界下での溶融

Dan Peter McKENZIE



Dr. Dan Peter McKENZIE

1942年イギリスのチェルトナム生まれ。1963年ケンブリッジ大学卒業、1966年同大学より博士号取得。1969年よりケンブリッジ大学地球科学科の助手・講師等歴任、1985年より教授。

嶺同士が離れるのとちょうど同じスピードで離れることができるのでしょうか？ 1965年、ケンブリッジ大学の院生だった私はこの問題を、ウイルソン (Tuzo Wilson) にもちかけた記憶があります(当時の彼は、後でプレートテクトニクス全体にとって中心的重要性を持つことになったトランスフォーム断層のアイデアと取り組んでいました)。私たちには、この問題をどう解決したらいいかわかりませんでした。現在では、海嶺はマンテル対流渦の上昇部を表わすものではなく、単にプレートが離れていくところだと思っています。プレート下のマンテル物質は、プレートとプレートのすき間を受動的に登ってくるのです。こう考えれば、アフリカを取り巻き、互いに離れていく多くの海嶺を簡単に理解することができます。

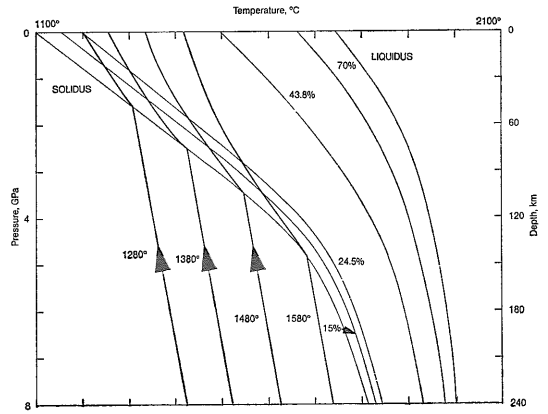
ウイルソンはこの考えについては論じましたが、それが意味するところは詳しくは研究しませんでした。そのような研究は、私、ルピジョン、スクラーター (John

皆さんのようにプレート境界のそばに住む人々は、地震や火山が同じ地域で起こることを知っています。ここ日本では、地震の足下の太平洋プレートの運動によって起こり、詳しいことはよくわからないにせよ、溶融(マグマ生成)もおなじプレート運動によって起こるものと信じられています。目には見えませんが、溶融はプレートが分かれていく境界つまり中央海嶺でも起こっています。事実、すべての海洋底は、海嶺軸で生成された溶融物(メルト)が固まってできた厚さ約7kmの地殻で覆われています。海底の年齢を決めるのに使う地磁気異常は、この火山性の地殻が生成時の地磁気の方向に磁化されることによって生じたものです。日本のようにプレートが破壊される島弧の下では、年間約1km³のメルトが生産されるのに対して、海嶺では年間約20km³が生産されています。海嶺が海底にあるため、それによる被害がほとんどないのは幸運というべきでしょう。海嶺が海上に顔を出している数少ない場所、たとえばアイスランドのようなどころでは、大量の高温低粘性の溶岩が住民にとって大変な問題となっています。

プレートテクトニクス以前には、地質学者たちは、海嶺でこのように大量のメルトが生産されるのは、海嶺がマンテル深部の対流渦の上昇部の上にあるためだと考えていました。海底からの熱流量が海嶺付近で高いこと、また海嶺が地形的な高まりであることも対流の結果であるとされていました。今でも、地質学の教科書には、海嶺の下にマンテル対流の上昇部を描いた図が載っていることもあります。私は大学院生の頃、そのような図を見て、海嶺は移動するのにマンテル対流の上昇部がどうしていつもその下にいられるのか不思議に思いました。たとえばアフリカはいくつかの海嶺によって取り囲まれています。それらの海嶺は互いに遠ざからなければなりません。しかし、その場合、大西洋中央海嶺下の対流渦は、5,000kmも離れたインド洋海嶺下の対流渦から、海

Sclater), パーソンズ (Barry Parsons) たちがしました。海嶺の地形や熱流量がプレート年代によってどう変わるかについて、計算と実際を注意深く比較したのです。その結果、理論からの予言と観測が見事に一致することがわかりました。この一致は、海嶺がまさに受動的なマンテル上昇によって作られることを意味します。海洋底の大地形に関するこの説明は、プレートテクトニクスのもたらした大成功の1つだと思います。それは私がダーウィンの『ビートル号航海記』を呼んだ少年時代以来の謎の1つを解決したのです。この本は地球に興味をもつ人の必読書です。それは、かつて地質学を学んだ最高の科学者の目で見ただけなら素晴らしい自然観だからです。しかしその中で私が最も不思議に思ったのは、彼の珊瑚礁についての説明でした。ダーウィンは、珊瑚礁は火山島が沈むにつれて珊瑚が上向きに成長して生まれた、としました。この考えは、すべての観察事実を見事に説明しましたが、私がわからなかったのは、いったいなぜすべての海洋火山が沈むのか、ということでした。そのため水はどこからくるのでしょうか？ 仮に未知の水源があったとしても、どうして陸地を浸水することなしに、海だけを深くすることができるのでしょうか？ ダーウィンは、ある地域の海底は沈降し、別な地域の海底は上昇しているのだろう、と言いました。しかし、彼の地図を見ると、太平洋やインド洋の広大な地域が沈降を示しており、上昇しているのは海洋の端の部分にすぎないのです。プレートテクトニクスは、今やこの謎の答えを明確に教えてくれます。すべての海底は海嶺で生まれ、年とともに冷却され沈降します。この沈降は、海底が日本のような島弧の下へ沈み込み、マンテルに戻っていくまで続きます。つまり、すべての火山島は、まわりの海底とともに沈降するのです。このプロセスでは、海洋の平均水深が増大する必要はありません。沈降は海底のもつ一般的な性質であり、ダーウィンの珊瑚礁はその1つの現われなのです。

こうしたアイデアはすべて地質学者に広く受け入れられ、最近の学部レベルの講義にも必ず入っています。プレートテクトニクスでは、もうあまり新しいことはなさそうに見えたので、私の研究上の興味は、プレートテクトニクスからマンテル対流へと変わっていきました。しかし、私は海嶺下での熔融過程がよくわかっていないこと、したがって海底地殻を作るメルトがどうして生まれるかについての明快な物理学ないことがいつも気になっていました。私はマンテル対流渦の進化の手がかりとして、火山島で噴出したメルトの成分を利用したいと思いました。しかし、いかにしてそれらのメルトが生まれ、まわりの結晶質残査から分離したかがわからないのが難点で



第1図 固体のマンテル物質が矢印で示した線に沿って上昇してくると、ソリダスにぶつかり、熔融する。ソリダスとリキダスとの間の線には、熔融度(%)を示してある。生成されるメルトの総量は初期温度による。

した。しかし7年ほど前、それを理解するには、海嶺での熔融現象、つまりメルト生成を理解するのが先決だと思ふようになったのです。火山島下の熔融現象は、海嶺下でのそれよりも複雑だろうと考えたからです。島弧下での熔融もなかなか難題でした。元来は物理学者なので、私はまずメルトと残りの結晶の運動を規制する方程式群を求めるところから出発すべきだと考えました。求めた方程式群はかなり複雑でしたが、非常に有用なものでした。方程式を解いて分かったのですが、メルトが残査から分離するのは驚くほど容易なのです。5%の熔融成分があれば、厚さ50kmもの熔融域が数百万年で作られてしまいます。ある種の火山性メルトは、熔融成分がわずか0.1%でも分離できます。これらの結果は、私だけでなく多くの人々を驚かせたようですが、実はそれには及ばなかったのです。ガスト (Gast) とケイ (Robert Kay) の2人の地球科学者が、すでに、メルトの成分から、熔融成分がわずか0.5%でもメルトが分離できることを主張していたからです。

私は次に、これらの方程式が海嶺でのメルト生成の説明に利用できないと考えました。しかしそれにはいくつか必配な面もありました。著名な多くの火成岩岩石学者たちがこの問題と取り組んでおり、しかも互いに意見が一致せず、しばしば公の場ですら激論をたたかわせてきたのを知っていたからです。私が初めて熔融に取り組んだときには、私はほとんど火成岩岩石学を知りませんでした。そこで、ケンブリッジ大学の本職の岩石学者ビッケル (Mike Bickle) を説得して共同研究を始めたのですが、それはとてもよい結果になりました。彼は、私がある方向に向かうのを何回もどめてくれたからです。私たちはまず、海底の沈降や熱流量分布を見事に説明し

第1表

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
平均的海底地殻	51.1	0.60	16.6	7.2	9.2	12.8	2.3	0.12
溶融モデルからの計算値	50.93	1.03	15.33	7.90	10.61	11.36	2.16	0.27
希土類からの計算値	50.48	1.23	15.40	8.27	10.76	11.29	2.30	0.27

た受動的な海嶺モデルでは、どのような成分メルトがどのくらい生成されるべきかを当たってみました。海嶺下で溶融が起こるのは、溶融温度が圧力によって変わるからです。プレート下の固体マントルが十分に高温であれば、それが分かれていく2つのプレートのすき間に上昇してくると溶融を始めます(第1図)。驚いたことに、このような計算は誰もしたことがないようでした。しかし始めてみると、それがなぜだかわかりました。予想したよりも難問だったのです。しかし私たちは困難を切り抜けるうまい方法を考え出しました。もう一つ驚いたのは、解釈については議論沸騰なのに、ほとんどすべての溶融実験の結果がきわめてよく一致していることでした。私たちの簡単な計算によると、ちょうどよい成分のメルト(第1表)が、ちょうどよい量だけできることがすぐにわかりました。しかし、私たちのこのような考え方に対する否定論をすべて理解し、それらが不当であることを示さなければなりません。私はほんのわずかな岩石学の知識をもって出発したのですが、この過程でなかなかの大家になってしまいました! おかげで、今のところ私のまったく知らない議論を仕掛けられたことはありませんし、これからまあ大丈夫でしょう。

最近3カ月、オニオンズ(Keith O'Nions)と私は、「インバース理論」というやや複雑な数学的方法によって、微量元素、特に希土類元素の溶融現象を調べています。私たちは、希土類元素を用いると、海嶺下での溶融度を深さの関数として求めることができ、それによって生産されるメルトの量と成分を計算できることを示しました。第1表はその結果ですが、観測値とも、またマイクと私が前に行なった計算ともよく一致しています。希土類元素のよいところは、その挙動が予測できる点で、物理学者が地質過程を研究するのに適しているのです。つまり、主要元素の挙動がよくわからない状況下での、溶融現象を調べるのに役立つのです。私たちは、希土類元素を用いて、地球史の前半に生成されたコマチアイトと呼ぶ稀にしか見られないマグネシウムに富んだメルトが、マントルのほぼ全溶融の産物であること、また、アルカリや炭酸塩に富むメルトは、ザクロ石に富むマントルがわずか0.1%溶融して分離したものであることを示しました。私たちの足元で生まれているメルトは、全ての大陸性の頁岩(けつがん)と同じく、角閃石(かくせんせき)の存在する状況の下で溶融していることを示して

います。キースと私はいま、月、火星、小惑星からのメルトを調べようとしています。プレートテクトニクスの簡単なモデルを使って、地球科学での大きな新分野を開けていくように思えます。

ヘス(Harry Hess)が亡くなる前に、プレートテクトニクスの成功について話し合ったことを思い出します。彼は、「地球科学の主要な問題は解決してしまったので、これからは退屈で細かいことばかりやることになるだろう」と言って寂しそうで。彼の死後しばらくは私もそう感じていました。新理論(プレートテクトニクス)によって何がわかり、何かがわからないかを確かめなければなりません。新理論はきわめてよくできていたので、そのころの研究からはあまり新しいアイデアは生まれませんでした。しかし、新理論は「簡単なアイデアによって、地球の振る舞いを驚くほどうまく記述することができるのだ」という信念を与えてくれました。いま私たちの前には新しいアイデアを必要とする問題があります。しかし、そのプロセスを的確にモデル化し、そこで何が起きているかを正確に理解することができるはずです。このことはより大きな自信を持って言えるのです。確かに、プレートテクトニクスの発見に続いたような大きな変化は期待できないでしょう。いま地球科学に入ってくる若い有能な地質学者や物理学者は、今世紀前半に大陸移動説をめぐって極端な争いを演じた人々ほどはドグマティックではないし、科学者としてもより優秀だということもその理由の1つです。しかしヘスとは違って私は、なにかエキサイティングな分野で研究をしたいと志す人にとって、現在の地球科学は私が研究を始めた1963年当時よりも、ずっと魅力的だと思っています。私たちはいま石油会社と緊密な関係を持っていますが、それは私たちの研究が内向的で狭いアカデミズムにかたよるのを食い止めてくれています。このようなわけで、私はいま、かつてない最高の大学院生のグループを持っており、成長する彼ら(私のほうは老化!)とともに今後20年間研究を進めていくことを非常に楽しみにしています。

P. D. マッケンジー博士の主要著書および論文

1. McKenzie, D. (1967): Some remarks on heat flow and gravity anomalies. *J. Geophys. Res.*, **72**, 6261-6271.
2. McKenzie, D. & Parker, R. L. (1967): The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature*,

- 216, 1276-1280.
3. McKenzie, D. & Morgan, W. J. (1969): The evolution of triple junctions. *Nature*, **224**, 125-133.
 4. McKenzie, D. (1969): Speculations on the consequences and causes of plate motions. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **18**, 1-32.
 5. McKenzie, D. (1972): Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **30**, 109-185.
 6. McKenzie, D., Roberts, J. & Weiss, N. O. (1974): Convection in the Earth's Mantle: towards a numerical simulation. *J. Fluid Mech.*, **62**, 465-538.
 7. McKenzie, D. (1978): Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **40**, 25-32.
 8. McKenzie, D. & Richter, F. M. (1981): Parameterized thermal convection in a layered region and the thermal history of the Earth. *J. Geophys. Res.*, **86**, 11667-11680.
 9. McKenzie, D. & O'Nions, R. K. (1983): Mantle reservoirs and ocean island basalts. *Nature*, **301**, 229-231.
 10. Mackenzie, A. S. & McKenzie, D. (1983): Isomerization and aromatization of hydrocarbons in sedimentary basins formed by extension. *Geol. Mag.*, **120**, 417-470.
 11. McKenzie, D. (1984): The generation and compaction of partially molten rock. *J. Petrol.*, **25**, 713-765.
 12. McKenzie, D. (1988): The symmetry of convective transitions in space and time. *J. Fluid Mech.* **191**, 287-339.
 13. McKenzie, D. & Bickle, M. J. (1988): The volume and composition of melt generated by adiabatic upwelling. *J. Petrol.* **29**, 625-679.
 14. McKenzie, D. (1989): Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* **94**, 53-72.

海溝プロジェクトとプレートテクトニクス

Xavier LE PICHON

地球上では、長さ6万mに及ぶ中央海嶺系で毎年3.5kmの新しい海底が生産されています。そこで、同じだけの海底が毎年消滅しなければなりません。さもないと、地球は1000万年もたつと2倍にも膨れ上がってしまうことになるからです！ 海底の消滅は、おもに太平洋の周縁に分布する合計35,000kmにおよぶ深海溝で起こります。1967年、私は日本海溝で日本列島の下に海底が沈み込むスピードが年間8~9cm、100万年で約100kmであると計算しました。つまりパンゲア超大陸の時代（2億年前）以来、2万kmもの海底が沈み込んだこととなります！ 最近の宇宙測地技術によって、日本とハワイがまさに毎年8cmずつ近づいていることが明らかになりましたが、このことは、私たちが1967年当時想像した以上に、プレートが剛体であることを証明しています。

海底の沈み込みは、島弧の地震、津波、火山活動の原因になることがわかっています。また、日本列島が2億年におよぶ活発な沈み込みの結果であることもわかっています。しかし沈み込み現象の研究は簡単ではありません。一言でいえば、沈み込みとは、海洋の地殻とリソフェアが、地球内部つまりマントルの中に消え去ることです。しかし、死体のなくなってしまう犯罪をどうやって調べたらよいのでしょうか？ 沈み込みが実在し、しかも地球上で起こる最も激しいプロセスであることが、なかなか地球科学者にわかりにくかったのはこのためです。そのうえ、沈み込みは水深4~11kmの幅の狭い海溝で起こるので、海面上からの観測では、沈み込み



Dr. Xavier LE PICHON

1937年ヴェトナム Quinhon 生まれ。1959年カン大学物理学科卒業、1966年ストラスブルグ大学より博士号取得。以後コロンビア大学・パリ大学等を経て、現在エコール・ノルマル・シューベリエール地質学科教授。

が海底に残した痕跡を精度よく判別できません。海底近くに無人機や潜水艇を降ろし、できれば掘削も行なって調べる必要があるわけですから。

「深海潜水艇を使って高精度の海溝研究をしよう」というのが1975年に奈須紀幸教授と私たちが考えた海溝計画のミソでした。日仏のチームによる日本周辺の海溝の研究が実際に行われるまでには、9年間もの日時を要しました。1984年と1985年、私たちは小林和男教授らと、