

日本の海底地震計を使ったアイスランド周辺の海底地震観測

北海道大学理学部海底地震観測施設 島村英紀

1. アイスランドは典型的な大西洋中央海嶺ではない

アイスランドは海嶺の上に位置する特異な島だ。大西洋中央海嶺がアイスランドをほぼ南北に縦断しており、それゆえ地震と火山の島でもある。海嶺の西側では北米プレートが、また東側ではユーラシアプレートが造られている。

海底にあって観測の手が届きにくかった海嶺というものを陸上で研究できる、というのでアイスランドについての地球科学的な研究は数多く行われてきた。このためアイスランドは地球科学者にとってのメッカになっているのである。私はアイスランドに9回ほど行ったが、そのたびに違う国々の科学者と会ったほどだ。

しかし、最近の研究では、アイスランドは典型的な大西洋中央海嶺ではないということが分かりつつある。たとえばアイスランドは中央海嶺としての活動のほかに、その地下にアイスランド・ホットスポットというものがあることや、地震活動の下限の深さなど、地下から出てきたマグマが海水による冷却を受けにくいことによる影響(1)が無視できないことも分かっている。つまり、アイスランドだけを調べても大西洋中央海嶺が分かるわけではないのである。

なお、このホットスポットの活動は最近数千年はその活動が衰えてきていることが北大理学部がノルウェー沖の大西洋で行ってきた海底地震観測(たとえば2, 3, 4)などでわかってきている。

2. 海底地震計にしか見えないもの

一方、最近では海底の表面、あるいはごく浅いところは陸上並み、あるいはそれ以上に分かる手段が出来てきた。マルチナロービーム測深、大型サイドスキャンソナーといったものである。アイスランド付近の大西洋中央海嶺(北部沖のコルペインセイ海嶺と南部沖のレイキャネス海嶺)についてもこれらの調査が行われるようになり、まだ全域をカバーするには遠いが、アイスランドからやや離れた大西洋中央海嶺のいくつかの場所では、かなりのことが分かっている(たとえば5, 6)。また、マルチチャンネル反射法も石油地震探査がらみではあるが、アイスランド北部沖などで行われるようになった。

しかし、大西洋中央海嶺の微小地震活動や海底下1~2km以深の地下構造については、詳しいことはほとんどわかっていなかった。プレートの動きを海底で測ることはまだ不可能で、微小地震活動は、その場所でのプレートの動きをいまのところもっとも直接に反映するデータである。それゆえ微小地震活動は現在のテクトニクスを研究するためのもっともいい指標であり、地下構造は地球科学研究の根幹である。こういったことを研究するには海底地震計が必要だが、欧米では、海底で使える地震計、つまり海底地震計が、数も性能も限られていたからだった。

大西洋中央海嶺にかぎらず海嶺に起きる地震は、陸にある地震観測点から何千kmも離れているために、世界のどの海嶺や断

裂帯で起きる地震でもいままでは特別に大きなものしか捉えることができず、しかもその震源位置の精度などのごく悪かった。とくに震源の深さについては、観測点が遠いせいで、ほとんどまったく分からなかった。震源の深さは、その場所のプレート(リソスフェア)がどの深さまで地震を起こせるほど「硬い」のか、とか地下のマグマ溜まりがどの深さまで上がってきているかの大事な指標である。

そのほか、こういった特別に大きな地震が、その地域で日常的に起きてはいるが小さすぎて陸の観測点からは捉えられない地震を代表しているかどうかにも疑問がある。このため、海嶺のすぐ近くに10~50台という比較的多数の海底地震計を展開して行う海底地震観測が必要なのである。

また海底地震計は地下構造を探るための精密な道具でもある。エアガンなどを使った人工地震をはじめ、自然に起きる地震を使っても、地球トモグラフィーの手法で地下数十kmまでの地下構造を詳しく研究することができる。

3. 北大西洋での北大理学部の海底地震観測

このため私たち北大理学部では海底地震計を持ち込んで、1990年以来5回の海底地震観測をアイスランドの南部や北部の大西洋中央海嶺で行ってきた。これらの研究は、私たち北大理学部と、年度によるが、アイスランド気象庁、アイスランド大学、アイスランドエネルギー庁、ベルゲン大学(ノルウェー)、ケンブリッジ大学(英国)などとの共同研究である。

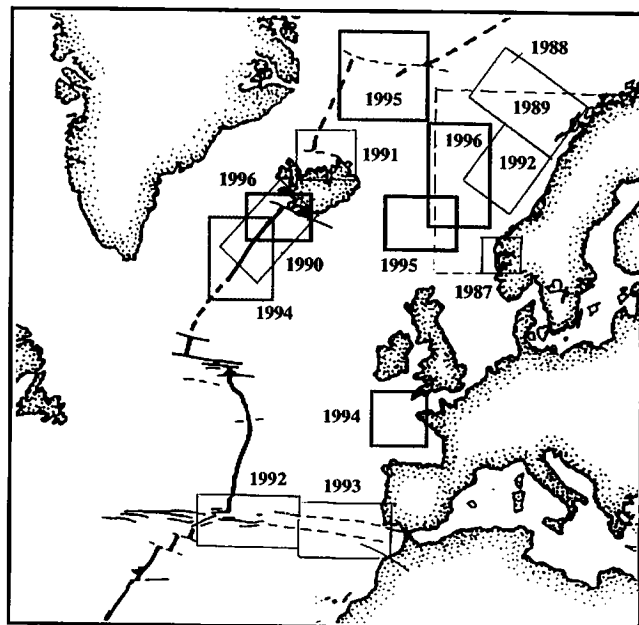


図1. 私たちが大西洋の中央を這っている大西洋中央海嶺で行っている海底地震観測。数字は観測を行った年度。

観測の場所は、アイスランドの南北両方にわたっている。

- 1) 1990年にアイスランドから南西に延びる大西洋中央海嶺の一部であるレイキャネス海嶺の北端部で18台の海底地震計を使って微小地震観測をした。
- 2) 1991年にはアイスランド北部沖のティヨルネス断裂帯で21台の海底地震計と21台の陸上地震計を使って地震観測と地震探査をした。
- 3) 1994年にはレイキャネス海嶺の中央部（1990年の観測地の隣接海域）で28台の海底地震計を使って地震観測と地震探査を行った。
- 4) 1995年には大西洋中央海嶺の一部でありアイスランド北部はるか沖のコルベインセイ海嶺で30台の海底地震計を使って地震探査を行った。
- 5) 1996年にはレイキャネス海嶺の北端部（1990年に微小地震観測を行った海域を含む）からレイキャネス半島（アイスランド南西部に突き出した半島）にかけて海陸共同で大規模な制御震源地震学実験を行って、海から陸にかけての精密な地下構造を求めた。これには海底地震計のほか、英国とアイスランドなどの陸上地震計、合計74台を使った。

このほか、ここでは述べないがアゾレス諸島(1992)、ポルトガル沖(1993)、ノルウェー沖の受動的境界(1988, 1989, 1992, 1994, 1995, 1996)、フランス沖の受動的境界(1995)でも北大理学部の海底地震計を使った自然地震と制御震源地震学の実験を行っている。いずれも欧州側との共同研究であり、相手はリスボン大学（ポルトガル）、ベルゲン大学（ノルウェー）、IFREMER（フランス）、パリ大学（フランス）である。

4. なぜ震源の深さが重要か

このうちいくつかの観測の結果について述べる。1990年にアイスランドの南西沖の大西洋中央海嶺（部分としての名前はレイキャネス海嶺）で18台の海底地震計を運び、精密な海底地震観測を行った。これは当時としては大西洋中央海嶺で行われた海底地震観測としてはもっとも大規模なものだった。国際学術研究の科学研究費補助金を得て行った研究である。

1ヶ月ほどの観測の結果、海底地震計で観測されて震源が決められた地震は400個あまりあった。観測海域に発生した地震でアイスランド気象庁の地震観測網で震源決定された地震は全期間でわずかに3つだったから、陸上の地震観測と海底地震計とは、これほど地震観測能力が違う。観測の結果、海嶺では中央にある「拡大軸」の部分だけに地震が発生していて、その外では全く起きていないのが分かった。また、きわめて興味深い震源の深さ分布が得られた。震源分布は海底付近から板を立てたように、まったく鉛直に立っていたのである。これほど薄い震源面が得られたことは世界中でも珍しい。

また震源は海底面から深さ10~12kmまで分布していた。じつは世界の海嶺で、地震が最も深いところで10km程度まで発生していることが発見されたのは、これが初めてである。

震源の深さの精度は、観測点（この場合は海底地震計）を展開してある各点間の間隔で決まる。つまり深さ10kmまでの震源

の深さや位置を正確に知るためには、観測点間の距離は、10kmほどであることが好ましい。1990年の観測では、観測点間の距離は15~20kmであり、0~10kmの震源の深さを論じるには必ずしも十分ではなかった。もちろんこういった間隔を選んだのは、18台の海底地震計全体で、ほとんど未知だった地震活動になるべく広い範囲でカバーしようとしたこととの妥協である。

1994年の海底地震観測は、1990年の海底地震観測で大西洋中央海嶺付近の地震活動が海嶺軸のごく近傍に限られることが分かり、また上記の理由もあって、観測点の間隔を狭めて6~15kmとした。海底地震計を設置した海底は、その年齢が0~2Maのところで、使った海底地震計は28台であった。またこの海底地震観測では、人工地震も行って地殻と上部マントルの精密な地下構造も求めた。

この結果、約1ヶ月間の海底地震観測期間中に海底地震計で観測されて震源が決められた地震は1700個あまり、うち512個は1km以内の震源誤差で震源が決定できた。観測された地震のマグニチュードは-1.8~2.5であった。

この1994年の海底地震観測の結果、震源の深さの深いものは前回と同じく10~12km程度まではあったものの、深さ3~7kmに集中していることが分かった(図2)。深さ3kmとは海底地殻の第二層(2A)の底である。つまり海底地殻の第二層(2A)は、破砕度が高くて、つまり「ぐさぐさ」で、地震を起こすだけのエネルギーが溜められないのであろう。

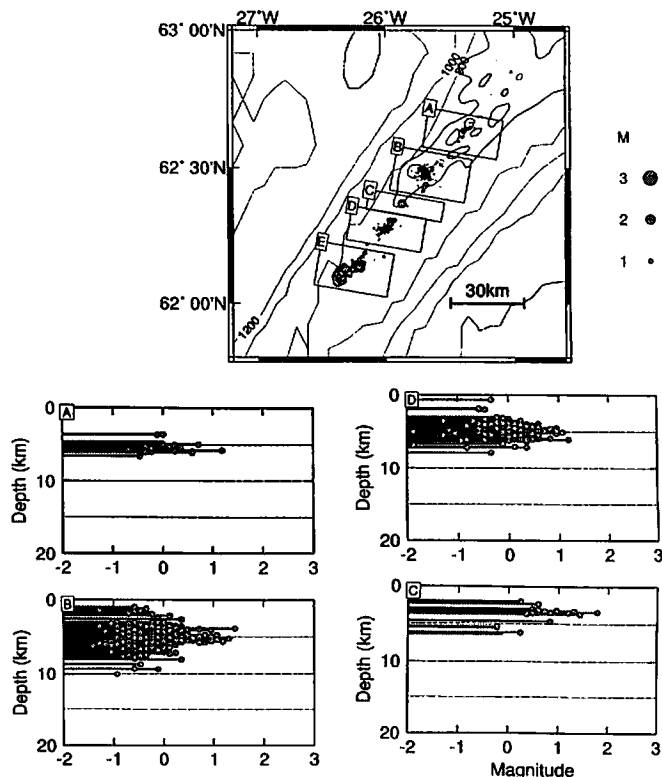


図2. アイスランドから南方の大西洋中央海嶺にかけての微小地震の震源とその深さ分布。微小地震は海嶺に沿って連続的に起きているのではなくグループをなしていることと、震源の深さは3~7kmに集中していることが分かった。

一方、深いほうの限度は、温度と関係している。つまり、どのくらい深くまで、リソスフェアが地震を起こせるほど硬いか、を表しているのである。ただし注意すべきことは、たとえば私たちが震源の深さとして見出した、例えば10kmという深さは「物質としての地殻」の厚さを表しているとは限らないことである。げんに、ここで私たちが求めた地殻の厚さは11~12kmであった。地震を起こせるかどうかは「物性として」の話であり、実際の地殻の厚さとは異なる可能性があるからである。また、私たちが観測した震源の深さがここまで達していることから、マグマ溜まりは少なくとも地殻内にはないことも分かった。

5. 大西洋中央海嶺からアイスランドまでの遷移地帯のナゾ

私たちが1990年と1994年に海底地震観測を行ったレイキャネス海嶺はそのすぐ北側でアイスランドの陸上に這い登ってレイキャネス半島になっている。しかし標高が違うだけで地形的にはほとんど連続しているレイキャネス海嶺とレイキャネス半島は、その地殻の厚さも、またそこで起きる地震の震源の深さも違っていることが分かった。つまりレイキャネス半島では、地殻はより厚いのに、震源の下限はより浅いのである。

私たちは、この違いは、海底からしみ込んでいった海水の冷却のせいだと考えている。つまり同じ深さでも海底下のほうが温度が低く、それゆえ地震を起こせる深さが深いのであろう。

なお、レイキャネス海嶺で観測した震源のメカニズムは正断層であったが、震源の地理的なグループ毎に微妙に異なっていた。

述べてきたようにレイキャネス海嶺はアイスランドの陸上に這い登ってレイキャネス半島になっている。しかしレイキャネス海嶺とレイキャネス半島は、その地殻の厚さも、またそこで起きる地震の震源の深さも違っている。

この地殻の厚さの違いが、たとえば連続的なものか、あるいは非連続的なものかは、海嶺やアイスランドの成り立ちを研究するうえで重要であるが、いままでは知るべくもなかった。このため、1996年夏に、北大理学部海底地震計27台とケンブリッジ大学(英国)、アイスランド大学、コロンビア大学(米国)の陸上地震計47台を投入して、大規模な人工地震と自然地震の観測が行われた。観測の結果はまだ解析中だが、解析が終われば大西洋中央海嶺からアイスランドにかけての詳細な三次元的な地下構造が初めて明らかになる。

文献

1) Shimamura, H., Stefansson, R., Mochizuki, M., Watanabe, T., Shiobara, H., Gudmundsson, G., Einarsson, P., 1996, Northern Reykjanes Ridge microseismicity revealed by dense OBS arrays, in *Seismology in Europe*, edited and published by European Seismological Commission, 701pp., 491-497.

2) Kodaira, S., Bellenberg, M., Iwasaki, T., Kanazawa, T., Hirschleber, H.B., and Shimamura, H., 1996, Vp/Vs ratio structure of the Lofoten continental margin, N. Norway, and its geological implications, *Geophysical Journal International*, 124, 724-740.

3) Mjelde, R., Kodaira, S., Hassan, R.K., Goldschmidt-Rokita, Tomita, N., Sellevoll, M.A., Hirschleber, H.B., Shimamura, H., Iwasaki, T., and Kanazawa, 1996, The continent/ocean transition of the Lofoten volcanic margin, N. Norway, *Journal of Geodynamics*, 22 (3/4), 189-206.

4) Kodaira, S., Mjelde, R., Sellevoll, M.A., Hirschleber, H.B., Iwasaki, T., Kanazawa, T., and Shimamura, H., 1995, Crustal transect across the Lofoten volcanic passive continental margin, N. Norway, obtained by use of oceanbottom seismographs, and implications for its evolution, *Journal of Physics of the Earth*, 43, 729-745.

5) Appelgate, B., and N.S. Shor, 1994a, The northern Mid-Atlantic and Reykjanes Ridges: Spreading center morphology between 55°30'N and 63°00'N, *J.G.R.*, 99, 17935-17956.

6) Appelgate, B., and N.S. Shor, 1994b, Correction to "The northern Mid Atlantic and Reykjanes Ridges: Spreading center morphology between 55°30'N and 63°00'N", *J.G.R.*, 99, 24207-24208.

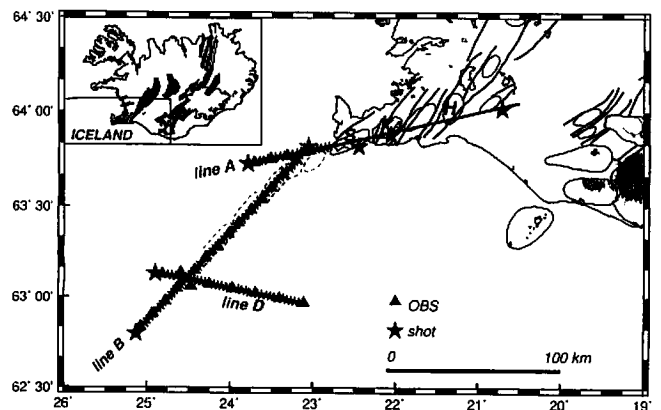


図3. 1996年の夏に行ったRISE1996実験。地殻の厚さについては、私たちが海嶺の下で求めた12kmから、アイスランドの地下での22kmまでどうつながっているのかがナゾで、アイスランド南西部(Southwest Lowland)から海嶺にかけての地下構造を精密に研究するために、27台の海底地震計(北大理学部)と47台の陸上携帯型地震計(英国ケンブリッジ大学、米国コロンビア大学、アイスランド大学)が展開されて約2ヶ月の観測を行った。▲は地震計、★は人工地震、陸上の太い実線の上に1-3kmの間隔で地震計を置いた。細線はギャオ(引っ張り割れ目)、長円は解析に使われる微小地震群。