

学位論文題名

The crust and uppermost mantle structure
in the Lofoten passive continental margin, off Norway,
by OBS refraction profiles

(海底地震計を用いた屈折法探査による
ノルウェー沖ロフォーテン受動的海陸境界の地殻、
及び最上部マントル構造)

学位論文内容の要旨

ノルウェー沖の海陸境界は地震、火山活動が低い、受動的海陸境界、或いは非活動的海陸境界と呼ばれている。この領域は大陸の分裂と、それに続く海洋底拡大により海洋性地殻が大陸地殻縁辺部に付加することによって形成されたと考えられている。従って、この領域の地殻全体の構造を明らかにすることは、大陸の分裂から海洋性地殻形成の過程を明らかにする上で非常に重要である。しかしながら、本研究の対象領域である Lofoten margin ではこれまでに詳細な地殻構造は得られておらず、形成過程に関する十分な議論はできなかった。

そこで、本研究の目的は Lofoten margin で行なわれた海底地震計を用いた屈折法探査の記録を解析することにより、今まで明らかにされていなかった大陸から海洋にかけての地殻全体の構造を明らかにすること、そして、その結果からこの領域での地殻の形成過程を考察することである。

本研究で用いたデータは、1988年に Lofoten margin で行なわれた大規模な地球物理学的観測によって得られた。観測は、地殻全体の構造を明らかにするための海底地震計と大容量エアガンを組み合わせた屈折法探査、詳細な堆積層構造を明らかにするための反射法探査、更に重力、地磁気の観測から成る。屈折法探査の測線は地磁気異常の縞と平行に5本(海洋側より、測線6、5、4、1、3)、それらと直交する1本(測線2)からなる。測線長は130 - 280 kmである。それらの測線上に43台の海底地震計を20 - 25 km 間隔に設置した。震源としては8 lのエアガンを4台用い、150 m 間隔で発震した。本研究では、海底地震計を用いた屈折法探査の記録、及び重力データの解析から

地殻、及び最上部マントルのP波速度構造、P波速度とS波速度の比の構造(V_p/V_s 構造)、密度構造を決定した。

P波速度構造の決定には主に上下動地震記録を用いた。解析には二次元波線追跡法を用いて、初動、及び後続波の走時、距離に対する振幅変化を全て説明する地下構造モデルを決定した。

決定した構造から、Lofoten maginの地殻は厚い下部地殻によって特徴付けられる。P波速度構造は以下の通りである。

地殻最上部は堆積層二層から成る。その速度は1.9 - 2.6 km/sであり、観測領域全体で北東側に向かって厚くなる。最大で2.5 kmに達する。堆積層下には速度4.4 - 5.8 km/sを示す上部地殻が存在する。その厚さは、観測領域の南西側を除いて2 kmである。南西側では4 kmまで厚くなる。上部地殻の下には三層から成る下部地殻が存在する。その速度は、上層で6.3 - 6.7 km/s、中層で6.8 - 7.2 km/s、下層で7.3 - 7.4 km/sを示し、中層、下層は海洋側から大陸側に向かって顕著に厚くなる。最も海洋側の測線6では、その二層の厚さは2.5 kmであるのに対し、最も大陸よりの測線3では10 kmに及んでいる。更に、この二層は測線に沿う方向でも南西側に向かって顕著に厚くなる。例えば、測線1の南西端では11 kmであるのに対し、北東端では6 kmである。最上部マントルの速度は、海洋側の二測線で7.9 km/s、大陸側の三測線で8.0 - 8.1 km/sを示す。また、海洋側から大陸側に横切る測線2では、大陸側の部分に速度3.8、6.0 km/sの層が存在している。これら二層は、より大陸側で行なわれた屈折法探査からも決定されており、大陸地殻上に存在していた堆積層と大陸の上部地殻と解釈される。

次に、上下動地震記録によって決定した構造を重力データを用いて検証し、地下の密度構造を推定した。その際、地震波速度と密度の関係を示す室内実験の結果を参照した。また、解析では、先に決定したP波速度構造の境界面の形状は固定し、計算値が観測値を十分説明できるかに着目した。

決定した密度構造は、堆積層2.0 - 2.6 g/cm³、上部地殻2.5 g/cm³、下部地殻三層は、2.75、2.90、3.15 g/cm³、最上部マントル3.28 - 3.30 g/cm³である。この構造によって、観測された重力異常値は5 - 10 mgalの範囲で非常によく説明できる。これは、地震記録によって決定した地下構造モデルが非常に精度よく決定されていることを示す。

本研究では、従来の海域での屈折法探査ではほとんど着目されていなかった水平動成分の記録を解析することによって、堆積層下面でP波からS波に変換した波を見いだした。そして、それを用いて地下の V_p/V_s 構造を決定した。本研究は受動的海洋境界において地殻全体のS波情報を得た初めての研究である。

解析は二次元波線追跡法を用いて行なった。また、解析の際は、上下動地震記録によって決定した境界面の形状は固定し、堆積層以外での V_p/V_s 値は各層内で一定であると仮定した。決定した V_p/V_s 構造は以下の通りである。

堆積層内の V_p/V_s 値は、観測領域内で大きく変化している。その値は、3.00 - 5.50である。上部地殻は、海洋側の測線6、5、4では1.86を示すのに対し、大陸よりの測線1、3では1.76を示す。下部地殻は上層で1.76 - 1.78、中、下層で1.80である。

上部地殻の V_p/V_s が急変する領域は、地磁気異常の縞が消える部分に対応する。測線1より大陸側では地磁気異常の縞が確認できないことから、上部地殻はかつての大陸地殻上にbasaltが流出したlandward flood basaltであると考えられる。これに対し、測線1より海洋側では地磁気異常の縞が確認できることから、上部地殻は海面下でのbasaltの噴出と海洋底拡大によって形成されたpillow lavaから成ると考えられる。従って、本研究によって明らかになった V_p/V_s の変化は岩石が固化した環境の違いによる、岩石の物理的性質の違いを反映していると考えられる。

最後に、本研究で決定した地殻構造と、観測領域の南に隣接するVoring marginの地殻構造との比較を行なった。それによって、Lofoten marginからVoring marginにかけて領域では、より大陸側、より南西側に向かって、速度7 km/s以上の下部地殻が厚くなる事が初めて明らかになった。その厚さは海洋底拡大開始時に形成された部分では、観測領域北部で6 km、南部で10 km、更に南のVoring marginでは15 kmとなる。

海洋性地殻形成に関する岩石学的研究は、海嶺部分に上昇するマントル物質が高温であるほど、形成される海洋性地殻が厚くなるという理論的結果を示している。この結果と本研究によって得られた観測事実から、ノルウェー沖の海洋性地殻は南部ほどより高温の物質により形成され、そして、その熱源は現在でも北大西洋の中央部にあるIceland hot spotであると考えられる。また、本研究によって決定した地殻構造と地磁気異常のデータから、hot spotの影響は海洋底拡大開始時にはLofoten margin北部にまで及んでいが、その後徐々に弱まり、地磁気異常番号21の年代(50 Ma)にはLofoten marginにはほとんど影響を及ぼさなくなったと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 島 村 英 紀
副 査 助 教 授 笠 原 稔
副 査 助 教 授 森 谷 武 男
副 査 助 教 授 西 田 泰 典
副 査 助 教 授 中 西 一 郎

学 位 論 文 題 名

The crust and uppermost mantle structure in the Lofoten passive
continental margin, off Norway, by OBS refraction profiles

(海底地震計を用いた屈折法探査によるノルウェー沖
ロフォーテン受動的な海陸境界の地殻、及び最上部マントル構造)

受動的な海陸境界とは大陸の分裂後、海洋底拡大によって新しく生成された海洋性地殻が、大陸性地殻を割り、それに付加し、成長することによって形成された海陸境界である。従って、受動的な海陸境界の地殻全体の構造を明かにすることは大陸の分裂から、海洋性地殻形成に至るプレート・テクトニクスの過程を解明する上で非常に重要である。申請者の研究対象領域であるノルウェー沖の海陸境界は典型的な受動的な海陸境界と考えられており、過去20年の間に多くの地球物理学的研究が行なわれている。しかしながら、地殻全体の詳細な構造を求めた研究はまだなく、受動的な海陸境界形成に関する考察も地殻のうちでもごく浅い構造に基づく研究がほとんどであった。

申請者は、北大理・海底地震施設が1988年に行ったノルウェー沖 Lofoten margin で行われた大規模な地球物理的観測に参加して得たデータを解析して、今まで明らかにされていなかった観測領域全体の詳細な地下構造を決定した。さらに決定した構造から北大西洋北部での海洋性地殻の形成過程について重要な知見を得た。

研究の第一章は序論である。受動的な海陸境界とは何か、ノルウェー沖の受動的な海陸境界の地下構造は、どこまで解明されていて何が問題点かをまとめている。

第二章は、海底地震計とエアガンを用いた屈折法探査の概要、データ処理、解析方法について述べている。この観測は43台の海底地震計を投入したもので、今までに世界でも例を見ない大規模な観測であった。そのデータを詳細に解析することによって、地下構造の決定が非常に高い分解能で可能となった。

第三章は、観測領域全体の詳細なP波速度構造について述べている。解析は、海底地震計の上下動成分に記録されたエアガンからの信号の初動、及び後続波の走時、振幅を二次元波線追跡法を用いて行っている。その結果、Lofoten marginの地殻は、

海洋側から大陸側に向かって、厚さ7 kmから20 kmと次第に厚くなることを明らかにした。そして、それはP波速度7 km/s以上を示す下部地殻が顕著に厚くなる為に地殻が厚くなることを明らかにした。また、この下部地殻の厚さは海陸境界に沿う方向でも変化しており、観測領域の南部ほど厚くなることを示した。地磁気異常の縞の走行と等しいこの方向で地下構造が顕著に変化することを見いだしたのは非常に興味深い。

さらに、この章では地震学的に決定した地下構造を、地震とは独立な観測量である重力データを用いて検証している。その結果、決定した地下構造モデルは重力異常データをも、5 - 10 mgal以内という十分の精度で説明することを示した。これは、先に地震学的に決定した地下構造が非常に精度よく決定できていることを示している。

第四章では、水平動成分の記録を解析し観測領域のVp/Vs値構造を決定している。今までに、受動的な海陸境界での地殻深部までのS波速度の情報はほとんど得られておらず、本研究によって初めて明らかにされた。解析には二次元波線追跡法を用い、堆積層と上部地殻の境界面でP - S変換した波の走時を説明するように地下のVp/Vs値構造を決定している。その結果、上部地殻のVp/Vs値はLofoten marginのより海洋側では1.86を示すのに対し、大陸側では1.76であることを示した。また、地殻下部では1.76 - 1.80であることを示した。通常、S波の情報がない場合はVp/Vs値1.73を仮定するが、この研究の結果、Lofoten marginでは地殻全体にわたってそれより顕著に大きい値を示すことが明らかになった。さらに、上部地殻のVp/Vs値が変化する場所は地磁気異常の縞が消えるところに対応することを明らかにした。これは、海洋性の地殻と大陸性の地殻の境界部を決定する上で重要な観測事実である。

第五章は決定した地下構造とLofoten marginの南に隣接するVoring marginの地下構造を比較することによって北大西洋北部で海洋性地殻の形成過程について考察を行っている。本研究はLofoten marginからVoring marginにかけての領域では、より大陸側、より南西側に向かって、下部地殻が厚くなることを明らかにした。この結果と、海洋性地殻形成に関する岩石学的研究の成果から、Norway沖の海洋性地殻は、南部になるほど、より高温のマントル物質が固化することにより形成され、そして、その熱源はIceland hot spotであると考察した。又、その影響は海洋底拡大の開始時にはLofoten margin北部にまで及んでいたが、50MaにはLofoten marginにはほとんど影響を及ぼさなくなったとした。

これらはプレート・テクトニクスにとっても重要な結果である。以上の様に申請者は、海底地震計を用いた屈折法探査の記録を中心に典型的な受動的な海陸境界であるノルウェー沖Lofoten marginの詳細な地下構造を決定し、さらに、重力異常、地磁気異常のデータをも用いて観測領域の地球科学的構造モデルを提出した。また、その構造から、北大西洋北部海洋性地殻はIceland hot spotの影響を強く受けて形成されたことと明らかにした。これらの結果は、北大西洋形成過程に関する重要な見地を与えた。この成果から、審査員一同は申請者が博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認定する。