

## パンアフリカン造山帯の構造と衝突テクトニクス — Gondwana 超大陸トランセクトの意義 —

石川正弘<sup>1)</sup>・金尾政紀<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup> 横浜国立大学大学院環境情報研究院

<sup>2)</sup> 国立極地研究所

## Structure and collision tectonics of Pan-African orogenic belt

### —Scientific significance of the geotranssect for a supercontinent: Gondwanaland—

Masahiro Ishikawa<sup>1)</sup> and Masaki Kanao<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

<sup>2)</sup> National Institute of Polar Research

#### Abstract

A combination of rock velocities with seismic structures have presented clues to understanding the structure and the evolution of the continental crust. However, most works addressed continental crusts of the northern hemisphere such as North America and Europe. Only a few studies focused on Gondwanaland. Here, we present a tectonic model of the Pan-African orogeny by comparing the laboratory velocities of granulite/gneiss with geophysical data of the Lützow-Holm region, East Antarctica. The "Structure and Evolution of the East Antarctic Lithosphere (SEAL)" project has been carried out under the framework of the Japanese Antarctic Research Expedition in recent years. Several geophysical studies including deep seismic refraction/wide angle reflection surveys have been conducted at the Lützow-Holm region. Velocity models and reflection sections of the crust are given by both active source seismic surveys and passive analyses for teleseismic receiver functions. From laboratory measurements, rock velocities revealed that the lower crust (6.9 km/s) consists of pyroxene granulite. Moreover, middle crustal velocity is equivalent to the velocity of mixture of pyroxene granulite (20%) and felsic gneiss (80%). The ratio of pyroxene granulite is similar to that geologically observed as meta-mafic sills, which were probably related to mafic magma underplating at Archean. The idea is also supported by model calculations of acoustic impedance, which show middle and lower crustal laminations. This evidence demonstrates that the East Gondwanaland (Napier Complex) lies under the Pan-African orogenic belt (Lützow-Holm Complex) and was subducted westward. Because it is pointed out that West Gondwanaland descended eastward under the Pan-African belt, the coalescence of both Gondwanalands, i.e. formation process of Gondwana supercontinent is regarded as collision tectonics along with symmetrical subductions where late Proterozoic island arcs and ophiolites were put between East Gondwanaland and West Gondwanaland.

The lithospheric structure of the Pan-African belt will be clarified by making deep seismic surveys to cross over the continental segments in the southern hemisphere that once were fragments of Gondwanaland. Deep seismic profiling in the LEGENDS (Lithospheric Evolution of Gondwana East iNterdisciplinary Deep Surveys) project will reveal the architecture and the evolution of the lithosphere of these regions. The "SEAL" transect has also been carried out as the

---

\*e-mail: kanao@nipr.sc.jp (〒173-8515 東京都板橋区加賀)

chief contribution to LEGENDS, to delineate a whole crustal section in different geological terrains from Western Enderby Land to Eastern Dronning Maud Land, East Antarctica.

**Key words:** lithospheric structure, laboratory rock velocities, Lützow-Holm Complex, Pan-African orogeny, collision tectonics of Gondwanaland

## 1. はじめに

大陸地殻構造研究は、1970年代以降人工地震手法により世界各国で組織的に進められ、多数の人工地震実験の結果から、大陸地殻はテクトニックセッティングに対応したP波地震波速度構造で特徴づけられることが明らかになってきた (e.g., Christensen and Mooney, 1995; Rudnick and Fountain, 1995). しかし、これまでの地震探査は北米大陸およびヨーロッパ大陸などの北半球の大陸が中心であり、南極大陸をはじめ南半球における探査は少なく、構造探査の未開の地である。南半球にはかつての Gondwana 超大陸を構成していた南極大陸・アフリカ大陸・インド亜大陸などが集中しており (図 1a; Lawver *et al.*, 1998), 地球史の視点から Gondwana 超大陸形成のダイナミクスを考える上でその構造探査は重要である。特に南極大陸では、酷寒の気象環境やアクセス

の不便さによりデータ不足であるが、日本の南極観測事業 (Japanese Antarctic Research Expedition: JARE) における「東南極リソスフェアの進化研究計画 (Structure and Evolution of East Antarctic Lithosphere: SEAL)」により、西エンダービーランド～東ドロンニングモードランドにかけての総延長約 1,000 km の地震探査が現在、実施中である (金尾, 2001). さらに現在、Gondwana 超大陸を構成していた南極・アフリカ・インドなどの複数の大陸にまたがる地震探査トランセクトを目的とした「学際的深部探査による東 Gondwana リソスフェア進化研究計画 (Lithospheric Evolution of Gondwana East iNterdisciplinary Deep Surveys: LEGENDS)」が提唱されている (Brown *et al.*, 2001). 本稿では、特に Gondwana 超大陸の形成と密接に関連するパンアフリカン造山帯の地球科学的意義を踏まえつつ、南極大陸 SEAL 計画におけるジオトランセクトの位置づけと、Gondwana 超大陸形成の視点からみた大陸地殻の進化形成史について議論し、今後の調査での問題点を明らかにする。

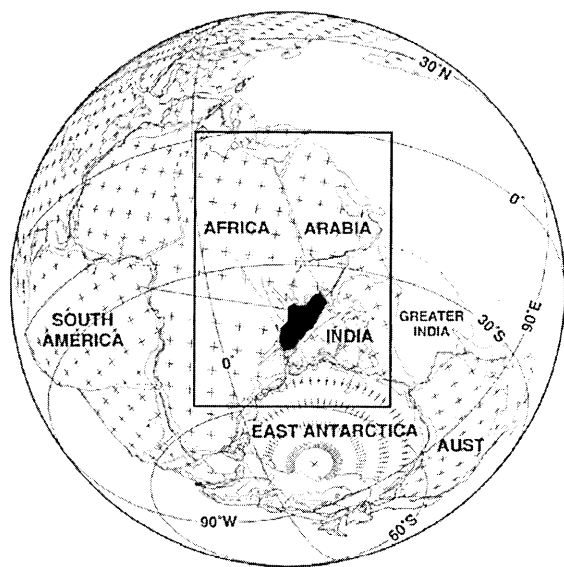


Fig. 1a. Gondwanaland (reproduced from Lawver *et al.*, 1998). This supercontinent represents the largest expanse of continental lithosphere yet to be explored by modern deep seismic profiling. The black area indicates Madagascar, which is a keystone in such reconstructions and one of the focuses of future deep seismic surveys. The solid square approximately corresponds to the area shown in Fig. 1b.

## 2. パンアフリカン造山帯の地球史的意義

現在、SEAL 計画による地震探査が実施されている南極大陸ドロンニングモードランドのリュツォ・ホルム湾周辺地域には、グラニュライト相ないしは角閃岩相の変成岩類から成るリュツォ・ホルム岩体が分布する (Hiroi *et al.*, 1991; Shiraishi *et al.*, 1989a; 1989b; 図 2). この岩体は、5.5～5.3 億年の SHRIMP ウラン-鉛ジルコン年代を示すことから (Shiraishi *et al.*, 1994; 1997), パンアフリカン造山帯の一部であると考えられており、スリランカ・インド南端・マダガスカル・東アフリカ・アラビアに続くかつての東西 Gondwana 大陸が衝突合体した縫合帯として分布している (図 1b). パンアフリカン造山帯はアフリカを取り巻くように分布するが、この地域の最大幅が約 2,000 km に及ぶことは特筆すべきである。これほどの幅を持つ造山帯は、地球史上稀であり、単純な大陸-大陸衝突テクトニクスでは説明がつかない。この造山帯の北部 (アラビア～アフリカ北東部) を占めるアラビア-ヌビア盾状地には原生代後期のオフィオラ

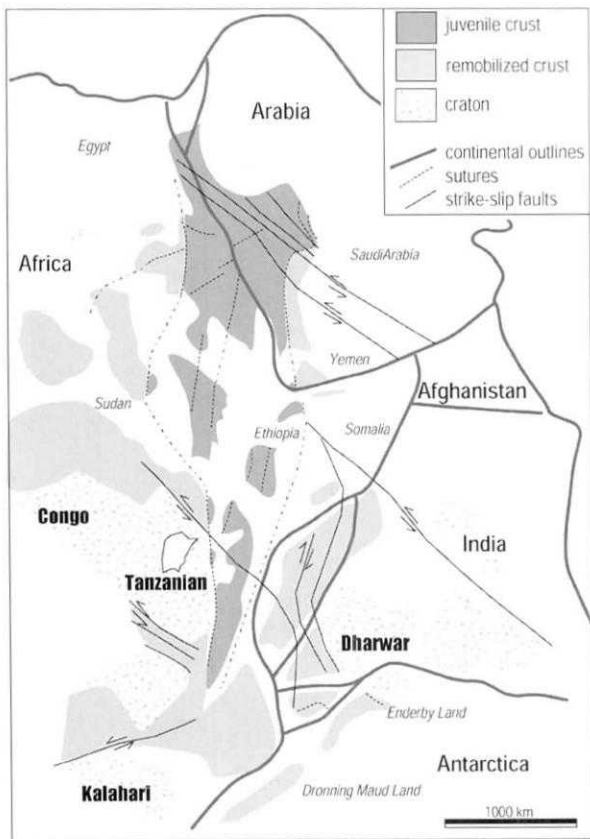


Fig. 1b. Simplified geological map showing the Pan-African Belt between the East and the West Gondwanaland (modified after Stern, 1994). Names of main cratons are shown by bold letters.

イトや島弧地殻が挟在することが地質学的に報告されており、少なくとも北部モザンビーク帯では、西 Gondwana 大陸と東 Gondwana 大陸が衝突合体する前に島弧などの地質体の衝突付加が起こっていたと考えられる (Stern 1994)。つまり、異常に幅広いこの造山帯は西 Gondwana 大陸と東 Gondwana 大陸の間に存在した多数の原生代後期の地質体が約 5.5 億年前の最終的な大陸衝突によって再変動したものではないかと予想される。この造山帯の地球史的意義は島弧・オフィオライトなどの地質体の衝突付加による大規模な大陸成長 (幅 2,000 km, 総延長 6,000 km) が原生代/顕生代境界付近で起こったことであり、この時期の地球環境の激変と関連があるかもしれない。原生代後期のオフィオライトや島弧地殻がアラビア・ヌビア盾状地以外の南方に続く地帯 (東アフリカのモザンビーク帯・マダガスカル・スリランカ・インド南端・南極大陸ドロンニングモードランド) にも存在するのか、もしくは、どのような地質体が付加成長したのかを探る上では地質学的研究は重要である。また、各地質体の規模と構造関係を明らかにする上でこれらの

地域の地殻構造探査は不可欠であり、南極大陸の SEAL 計画や南半球大陸間の LEGENDS 計画における地震探査の果たす役割は大きい。

### 3. JARE 地球物理探査概要

SEAL 計画における地球物理学的探査では、人工震源により地殻及び最上部マントルの地震波速度構造と反射断面を得ることがその中心課題である。人工地震探査計画 ("SEAL geotranssect") の最終目的としては、西エンダービーランド～東ドロンニングモードランドにかけての東西総延長約 1,000 km に及ぶ探査により、リュツォ・ホルム岩体および隣接地質体のナビア岩体 (太古代)、レイナー岩体 (後期原生代～初期古生代)、やまと・ベルジカ岩体 (初期古生代)、さらにセル・ロンダーネ山地 (後期原生代) に及ぶ、地質年代の異なる広範囲の地殻断面を取得し、さらに、探査データの屈折法・広角反射法的解析と合わせ、各種地球物理学的及び地質学的研究により上記パンアフリカン造山帯のテクトニクスを解明することである (図 2)。

SEAL 計画開始以前にも、JARE では人工地震による地殻構造探査が行われている。1978～1980 年に第 21 次日本南極地域観測隊 (JARE-21) では、リュツォ・ホルム岩体の一部であり、みずほ高原での内陸旅行ルートの一つである、みずほ基地-昭和基地間 (みずほルート) において屈折法概査を実施した (Ikami *et al.*, 1984; Ito and Ikami, 1984; Ikami and Ito, 1986)。また、同時に地磁気測量 (Shibuya *et al.*, 1984) や重力測定 (Ito and Ikami, 1986) が行われ、地震探査データとの相関が調べられた (図 3)。

人工地震探査以外の自然地震 (グローバルに分布する遠地震) を利用して、最近では昭和基地を中心に広帯域地震計データの解析が重点的に行われている (Kubo *et al.*, 1995; Kanao *et al.*, 1997; 久保・金尾, 1997; 等)。さらに 1996 年の JARE-37 以降は、リュツォ・ホルム湾周辺の沿岸露岩域に可搬型広帯域地震計を設置し、地殻構造を面的に探る試みが開始された (Negishi and Kanao, 1998; Kanao *et al.*, 2002)。また、リュツォ・ホルム湾地域の微小地震コーダ波から減衰ファクターが解析されている (Akamatsu, 1991; Kanao and Akamatsu, 1995)。さらに、みずほ高原より南の大陸氷床でも重力測定が行われ、モホ面の深さ分布についてブーゲー異常と関係付けた解析が行われた (神山ほか, 1994; 金尾・東, 1999; Higashi *et al.*, 2001)。

### 4. リュツォ・ホルム湾周辺地域の地震学的構造

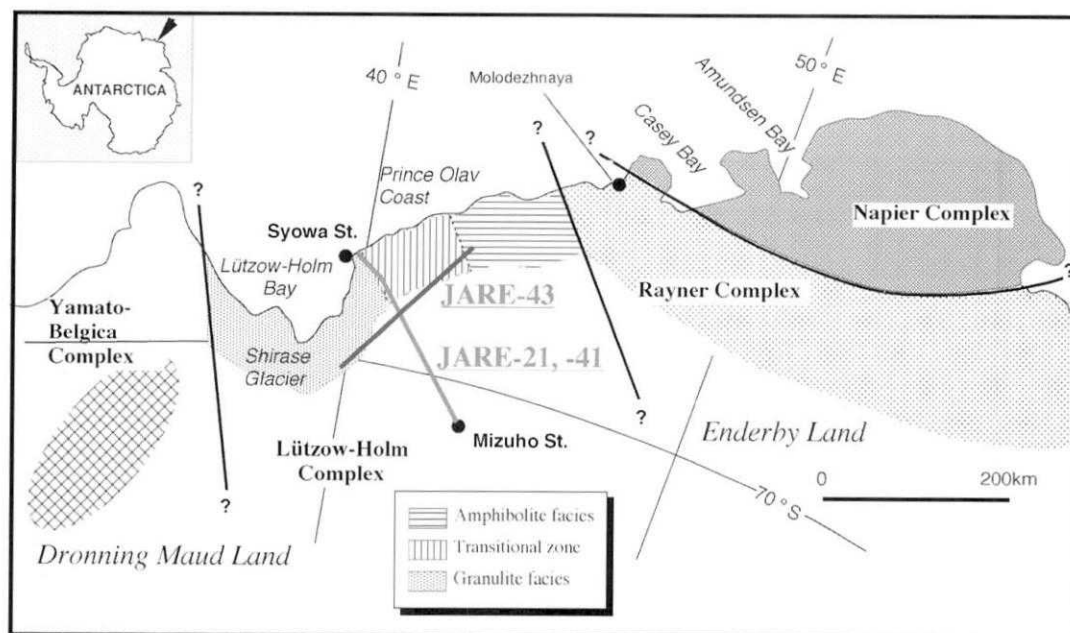


Fig. 2a. Geological setting in Eastern Dronning Maud Land and Western Enderby Land, East Antarctica, showing the distribution of the four distinct metamorphic complexes: Napier Complex (Archean), Rayner Complex (late-Preterozoic), Lützow-Holm Complex and Yamato-Belgica Complex (early-Paleozoic) (modified after Motoyoshi *et al.*, 1989). Metamorphic grade in the Lützow-Holm Complex increases progressively along the Prince Olav Coast to the Shirase Glacier. Transitional zone between amphibolite facies and granulite facies is defined as the first appearance of orthopyroxene in ordinary basic to intermediate gneisses through various reactions. Refraction/wide-angle reflection seismic lines by JARE-21, -41 and -43 are indicated.

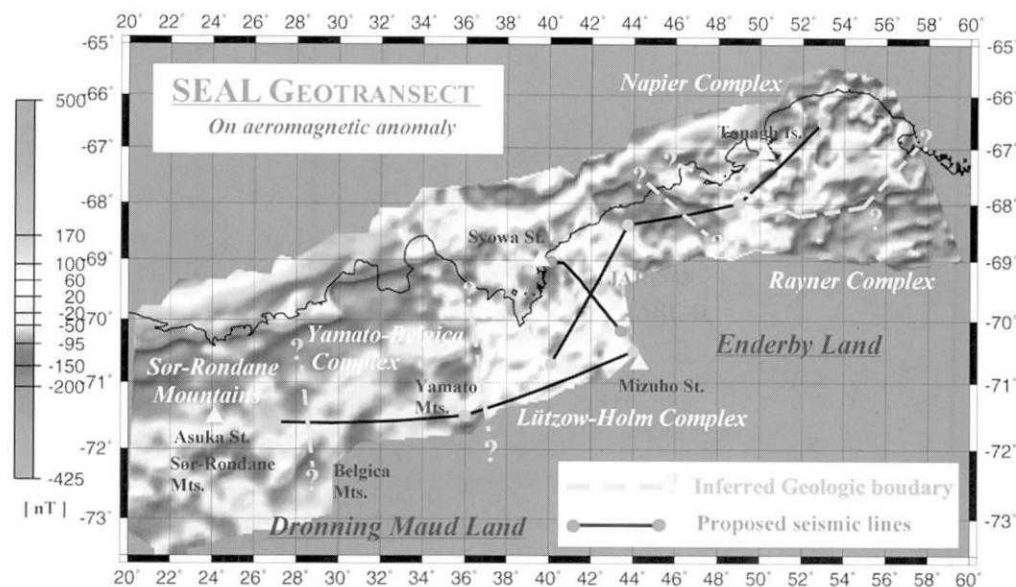


Fig. 2b. Geological setting and refraction/wide-angle reflection seismic lines proposed by the "SEAL geotranssect" in Eastern Dronning Maud Land and Western Enderby Land, plotted on aeromagnetic anomalies (Golynsky *et al.*, 1996).

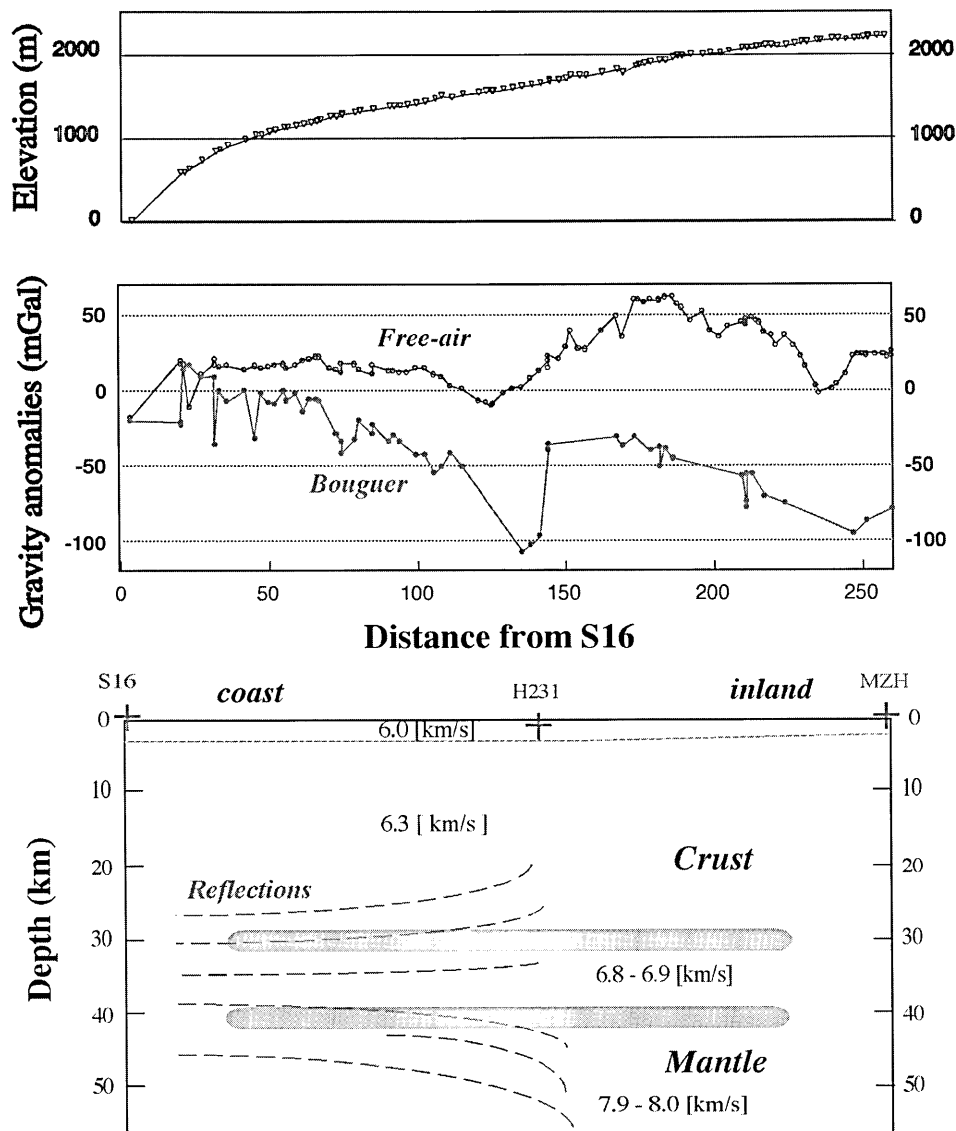


Fig. 3. Schematic illustration of the crustal structure along the Mizuho route. The depths of representative reflective layers (dashed lines in the lower figure) are superposed in the P-wave velocity model by the JARE-21 explosive experiments along the routes (Ikami *et al.*, 1984). Numerals in layers indicate P-wave velocities in km/s. Surface elevation, free-air, and Bouguer gravity anomalies along the routes are after Kamiyama *et al.* (1994).

地震学的研究からみたリュツォ・ホルム岩体の地殻深部構造を以下にまとめて示す。リュツォ・ホルム岩体の内陸部みずほ高原においては、JARE-21 で実施した人工地震データから、大陸氷床直下の表層での P 波速度が 6.0 km/s、上部～中部地殻が約 6.3 km/s、さらに下部地殻が 6.8-6.9 km/s の高速度であることが得られた。また、モホ面の深さが約 40 km、最上部マントルの P 波として 7.9-8.0 km/s として求められた (Ikami *et al.*, 1984; Ito and Ikami, 1984; Ikami and Ito, 1986)。さらに NMO 反射解析により、探査測線に沿って沿岸部から内陸部 150 km 長にかけて、深さ 24~45 km の下部地殻

領域に反射層群が複数捉えられていることが示された (Ito and Kanao, 1996) (図 3)。

また、遠地震の P 波コーダ部分のレーバ関数解析により、昭和基地を中心とする半径 100 km 域での地殻・上部マントルの S 波速度モデルが調べられている (Kanao, 1997)。昭和基地を中心とした数 10 km の領域において、地殻内の地震波速度に水平方向の不均質があることが確認された。ここで使用した波形データは、昭和基地の広帯域地震計記録計 63 個であり、観測点への入射角が 5° 以内になるようにグローバルに分布する深発地震を選別した。その結果 S 波速度構造が得られた大

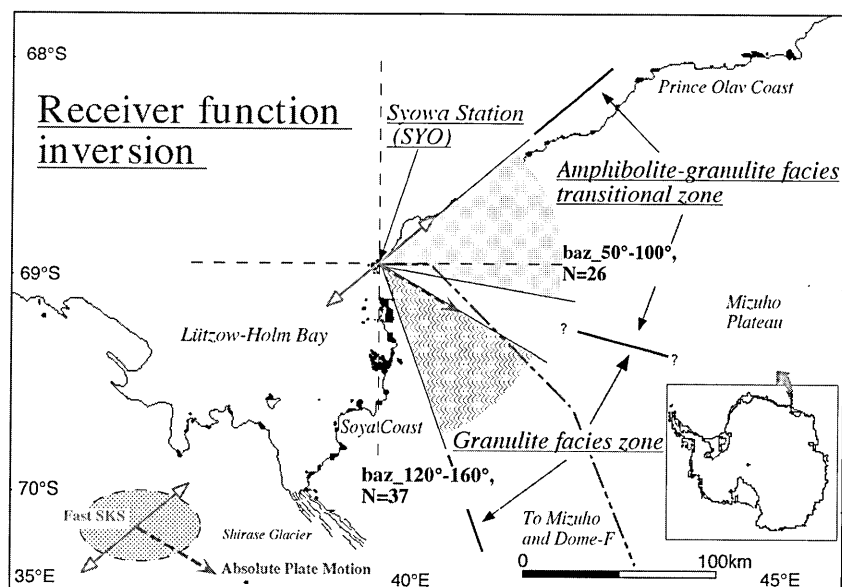


Fig. 4a. Map showing the area studied by teleseismic events in the Lützow-Holm Bay Region around Syowa Station (SYO). Two meshed areas of its center at SYO indicate the regions surveyed by receiver function inversion divided into two continental backazimuth groups. The group of backazimuth 50°–100° mainly belongs to the transitional zone between amphibolite facies and granulite facies. On the contrary, the 120°–160° backazimuth group is within the granulite facies zone. The bold dashed line shows the Mizuho route for the refraction experiments by JARE-21, and -41. The fastest direction for shear wave splitting by SKS phases at SYO (after Kubo *et al.*, 1995) is indicated on the lower-left side of this figure, together with the absolute plate motion estimated by the HS2-NUVEL1 model (Gripp and Gordon, 1990).

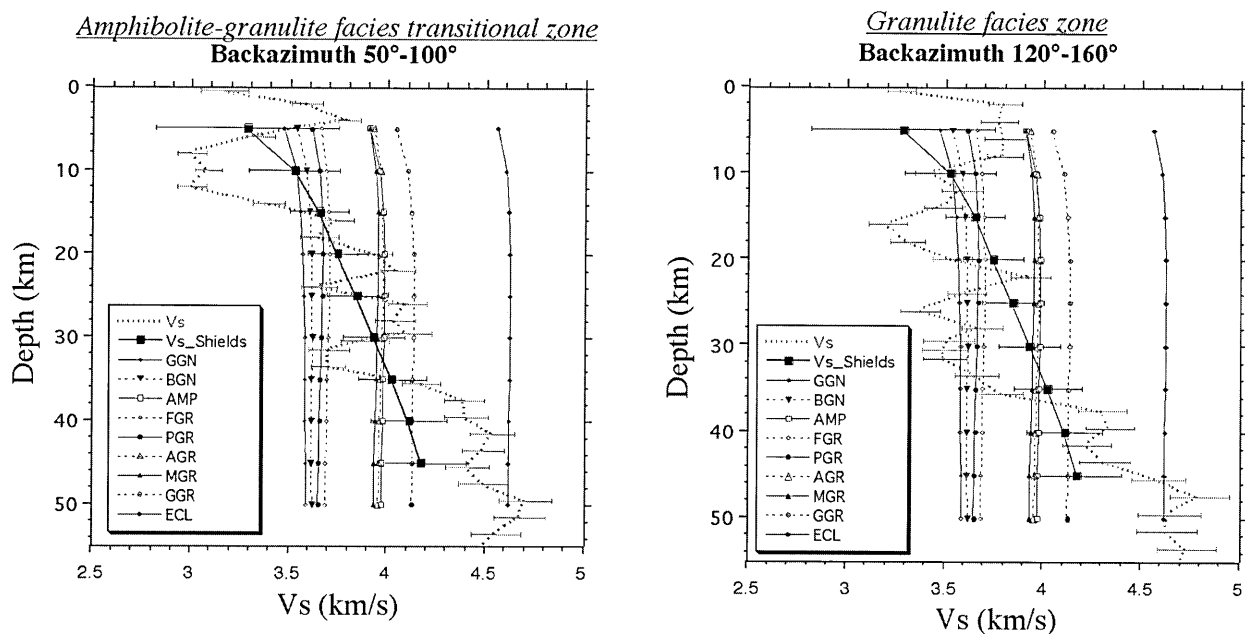


Fig. 4b. Shear wave velocity models by receiver function inversion in two continental backazimuth groups of 50°–100° and 120°–160° ( $V_s$ ; bold broken lines; after Kanao, 1997), average velocity model for shields and platforms ( $V_s$  Shields; solid squares with lines) compared to averaged laboratory measured velocities in metamorphic rocks (after Christensen and Mooney, 1995). Rock abbreviations are as follows. GGN: Granite Gneiss; BGN: Biotite (Tonalite) Gneiss; AMP: Amphibolite; FGR: Felsic Granulite; PGR: Paragranulite; AGR: Anorthositic Granulite; MGR: Mafic Granulite; GGR: Mafic Garnet Granulite; ECL: Mafic Eclogite.

陸上の領域を、沿岸露岩の表層地質が主にグラニュライト相～角閃岩相漸移帯に対応する方位 (backazimuth 50-100, プリンス・オラフ海岸域) と、グラニュライト相に対応する方位 (backazimuth 120-160, 宗谷海岸域) とに分けて解析した (図 4a). 水平方向の速度不均質の影響を減じるため、各グループについて、中心方位がそれぞれ 80-90, 140-150 となるように、方位の重みをつけレシーバ関数のスラント・スタッキングを行った. スタッキングした波形に対して、線形時系列インバージョンにより深さ 60 km までの S 波速度モデルを求めた (図 4b). 初期パラメータとしては屈折法探査 (Ikami *et al.*, 1984) による速度モデルを採用している.

地殻を構成する代表的な岩石速度の深さ分布と対応つけるために、パルス透過法による結果 (Christensen and Mooney, 1995) を参照し、レシーバ関数インバージョンによる結果と比較した (Kanao, 1997). インバージョンからは S 波構造が得られるため、Christensen and Mooney (1995) の P 波速度の結果に対して、地殻内及び最上部マントルの  $V_p/V_s$  比をそれぞれ 1.73, 1.80 として S 波速度に換算したものを比較の対象とした. リュツォ・ホルム湾周辺地域は中圧・高温の変成岩が露出するが、図 4b では地殻を主に構成すると考えられる 10 種類の岩石について速度-深さ分布を表示した. また盾状地のグローバル平均速度モデル ( $V_s$ -Shields) との比較から、レシーバ関数より求めた S 波モデルは、10 km 以浅の表層付近と 40 km 以深の上部マントルの部分を除き、盾状地における平均的速度モデルを中心に速度のゆらぎとして確認される. 表層がグラニュライト相変成相である地域に対応する方位 (backazimuth 120-160) では、2-10 km の深さに S 波速度で約 3.8 km/s の領域が見られ、酸性～中性の変成岩類から成ると予想される. また 35 km 以深の約 4.3 km/s の速度を持つ下部地殻に相当する部分では、苦鉄質岩類の組成 (Fig. 4b の GGR, AMP, MGR, AGR 等) が増加していると考えられる. 表層がグラニュライト相～角閃岩相の変成相漸移帯である地域に対応する方位 (backazimuth 50-100) では、5-15 km の深さに低速度領域が見られ、中部地殻 (15～35 km) において盾状地の平均モデル ( $V_s$ -Shields) に近い. また 33 km 以深で急激に速度が増加しており、JARE-21 の屈折法より求めた初期モデルに近い.

これら 2 つの大陸沿岸部の変成相地域に対応する方位における、インバージョンによる S 波速度構造の差が大きいことの原因の可能性として、グラニュライト相と角閃岩相の同一化学組成の変成岩の間で、岩石物性が大き

く異なるとは考えにくい. 従って、両地域の地殻のそれぞれの深さの部分構成している岩石の化学組成の違いを主に反映していると考えられる. 両地域における上部～中部地殻の速度分布からは、表層がグラニュライト相変成相である地域に対応する方位 (backazimuth 120-160) における上部地殻の高速度域が、表層がグラニュライト相～角閃岩相の変成相漸移帯である地域に対応する方位 (backazimuth 50-100) の中部地殻の高速度域に繋がっていると仮定すれば、現在の地殻において前者地域の方が後者地域よりも、より深部の岩石が地表まで存在すること、すなわち変成作用以後の地殻の隆起量として、宗谷海岸南部域の方が北部域よりも大きいことを示唆しているといえる. また、これら 2 つの大陸氷床部の方位ではモホ面及び地殻内境界が比較的明瞭であるが、リュツォ・ホルム湾内の地殻を波線が通過する方位では、地殻内 S 波速度が深さと共に漸次増加し、遷移的な地殻マントル境界をもつことが示されている.

さらに、昭和基地及び宗谷海岸露岩域の SKS 波の速度異方性解析によると、S 波速度の速い方向として北東-南西が示された (Kubo *et al.*, 1995, 図 4). この結果は、ホットスポットを固定点と仮定した HS2-NUVEL1 モデル (Gripp and Gordon, 1990) による、現在の最上部マントルにおけるアセノスフェアの流れ方向とは 120°程度外れている. 従ってこの異方性は、過去のテクトニクス場 (主に広域変成作用) により地殻内に残された異方性の影響が主な原因として考えられている (久保・金尾, 1997).

## 5. 高圧下における岩石速度測定

西エンダービーランド～東ドロニンングモードランド地域を構成する岩石の弾性波速度測定は、まず、Yukutake and Ito (1984) によって 440 MPa まで測定されたが、この圧力は中部地殻深度相当の圧力であり、モホ面に至る地殻全体を議論する上では不十分である. 最近、横浜国立大学において高圧岩石弾性波速度測定装置が開発され (有馬ほか, 2000; Ishikawa and Arima, 2000; Kitamura *et al.*, 2000; Nishimoto *et al.*, 2000), リュツォ・ホルム岩体および近隣の地質体であるナピア岩体の主要構成岩石の弾性波速度測定が報告されはじめた (石川ほか, 2001; Kitamura *et al.*, 2001; Shingai *et al.*, 2001). ナピア岩体産岩石の P 波速度測定はピストンシリンドラー装置を用いて圧力 0.05～1.0 GPa および温度 25～400°C の範囲で実施した (Shingai *et al.*, 2001). 岩石試料は直径 14 mm および長さ 12 mm の岩石コアである. P 波速度はパルス透過法 (岩石コアの端から端まで

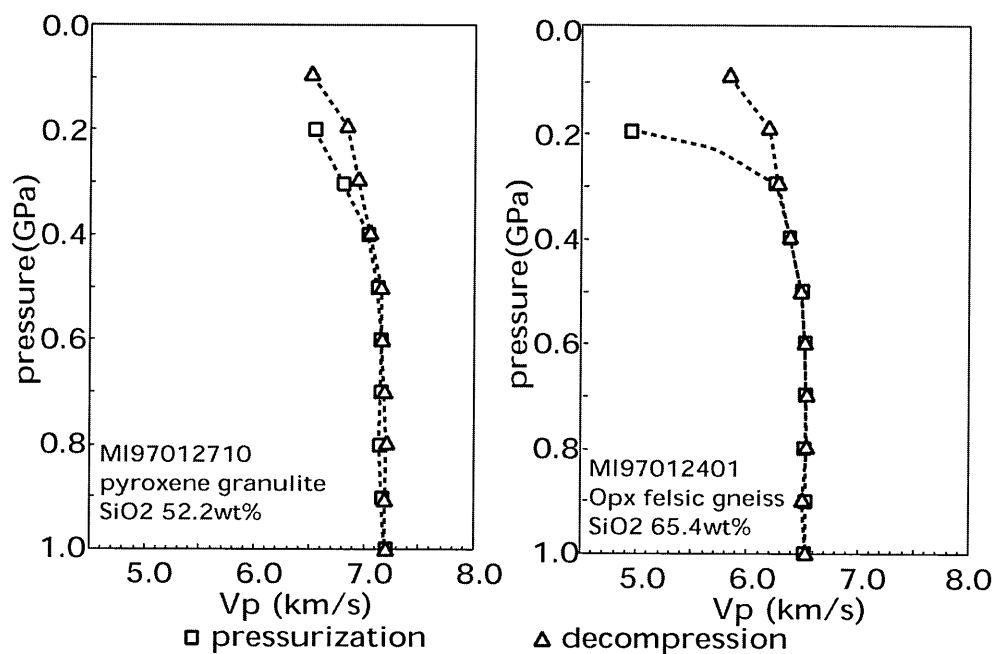


Fig. 5. Ultrasonic compressional-wave velocity ( $V_p$ ) of felsic gneiss and pyroxene granulite as a function of pressure (Shingai *et al.*, 2001; Ishikawa *et al.*, 2001).  $V_p$  was determined from the zero-pressure core length and the measured travel time of the pulse under various pressures at 0.1 GPa interval during pressurization (open squares) and decompression (open triangles) between 0.1 GPa to 1.0 GPa.

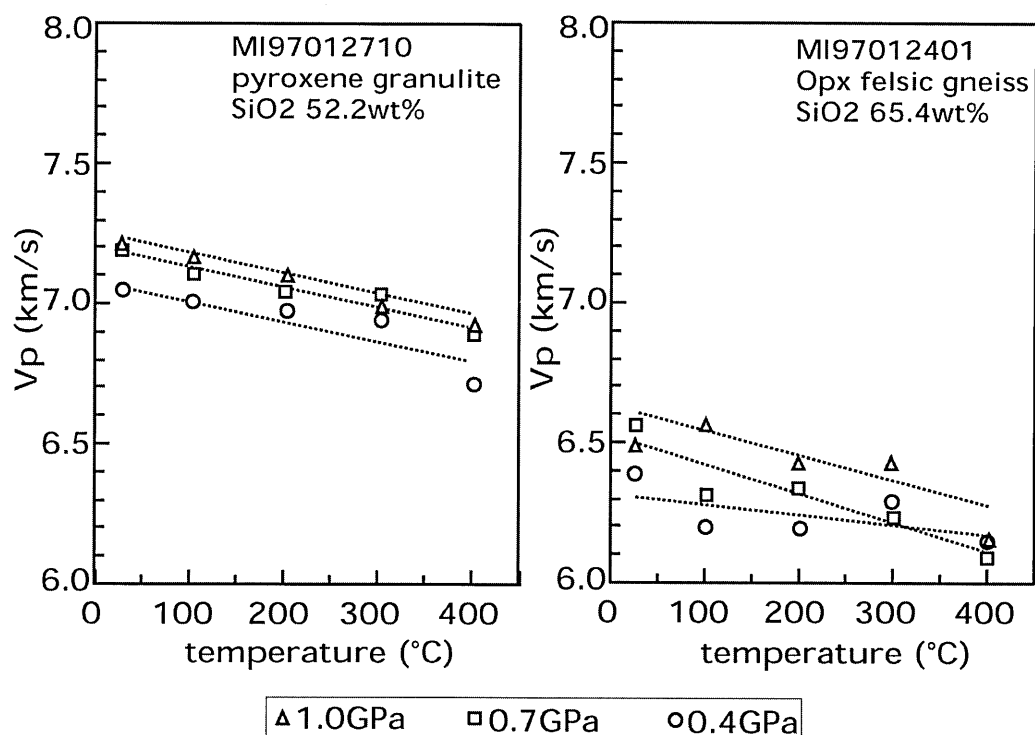


Fig. 6. Ultrasonic compressional-wave velocity ( $V_p$ ) of felsic gneiss and pyroxene granulite as a function of temperature at 0.4 GPa (open circles), 0.7 GPa (open squares) and 1.0 GPa (open triangles) (Shingai *et al.*, 2001; Ishikawa *et al.*, 2001).  $V_p$  was determined under various temperatures at about 100°C intervals between 25°C and 400°C.



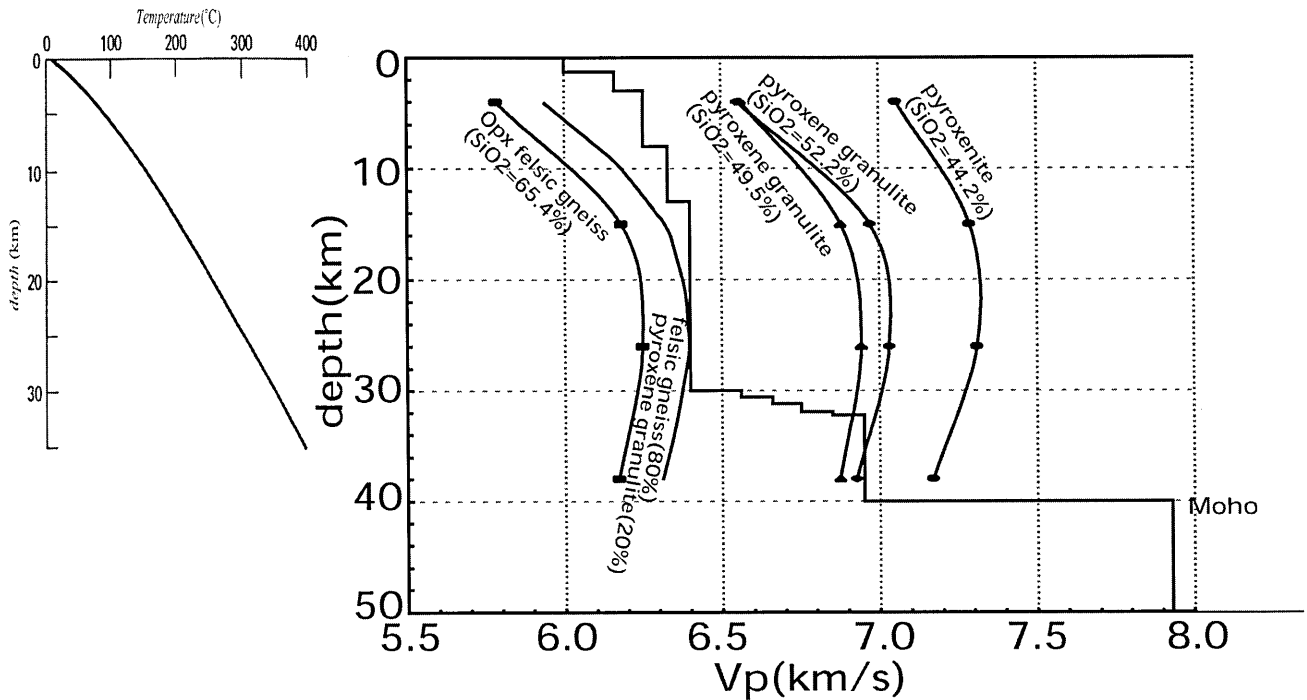


Fig. 7. Ultrasonic compressional-wave velocity for felsic gneiss, pyroxene granulites, pyroxenite and mixture of felsic gneiss (80 vol.%) and pyroxene granulite (20%) assuming cold geotherm of Turcotte and Schubert (1982). Seismic P-wave profile of Mizuho Plateau is also shown as a broken line.

を超音波が伝搬する時間を測定する)で測定した。決定した速度は同一温度圧力条件で4,096回測定した平均値である。図5は25°Cでの昇圧および減圧過程で測定したP波速度である。まず、0.6 GPa以上での $dV_p/dP$  ( $8.81 \times 10^{-4} \sim 1.46 \times 10^{-2}$  km/s/GPa)はより低圧条件と比べ著しく小さい。低圧での大きな $dV_p/dP$ 値は一般に岩石中の間隙が閉じることで説明されている。つまり、この測定結果は、0.6 GPaまで間隙が閉じ続けることを反映していると解釈される。つぎに、減圧過程における0.6 GPa以下での $dV_p/dP$ は昇圧過程における0.6 GPa以下での $dV_p/dP$ より小さい。この昇圧と減圧との違いは、高圧で閉じた間隙が減圧過程で全てもと通りに開ききっていないことを意味する。図6にはP波速度と温度の関係を示した。また、参考のために最小二乗法近似直線も記した。25°Cから400°Cへ温度を上昇させた場合、0.1~0.3 km/sの速度減少がみられた。圧力1.0 GPa 温度400°Cでの測定結果をまとめると、パイロキシナイト7.17 km/s、輝石グラニュライト(苦鉄質グラニュライト)6.93 km/s、6.88 km/s、輝石フェルシッ片麻岩6.17 km/sである。それぞれの音響インピーダンス ( $\times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)はパイロキシナイト26.0、輝石グラニュイト21.8、20.8、輝石フェルシッ片麻岩17.5である。

## 6. 地殻速度モデルと岩石物性

本章では、リュツォ・ホルム湾地域で行われたJARE-21地震波探査で得られたP波速度構造モデルと、東側に隣接する太古代ナピア岩体変成岩の実験室データによるP波速度を比較し、テクトニクスに関する議論を行う。

パンアフリカン造山帯に属するリュツォ・ホルム岩体は大陸衝突で形成された可能性が高く、その下に太古代地殻(その東に隣接するナピア岩体)が沈み込んでいる可能性がある。図7の黒い折線は、JARE-21(1979~1981)に行われた昭和基地-みずほ基地の地震波探査の結果である(Ikami *et al.*, 1984)。リュツォ・ホルム湾地域は典型的な盾状地で低熱流量( $\sim 40$  mW/m<sup>2</sup>)を持つため、Turcotte and Schubert (1982)の低地温勾配モデルを採用した。地震波探査のデータに、本研究の結果に地殻の平均密度を2.7 g/cm<sup>3</sup>とした際のP波速度を実線でプロットしていくと、圧力1.0 GPa、温度400°Cの条件下での輝石グラニュライト(SiO<sub>2</sub> wt% = 49.50%, 52.23%)のP波速度が6.87, 6.93 km/sとなり、下部地殻の速度とよく調和している。このことは、東クイーンモードランドの下部地殻は輝石グラニュライトで構成されていることを示している(石川ほか2001; Shingai *et al.*, 2001)。

リュツォ・ホルム岩体の圧力温度経路は時計回りを示す (Motoyoshi *et al.*, 1989; Motoyoshi and Ishikawa, 1996). England and Thompson (1984) の熱伝導モデルでは、地殻層厚が二倍になった大陸衝突帯が地表浸食されることによって時計回りの圧力温度経路を説明し、多くグラニュライト相変成岩類の時計回りの圧力温度変成経路はこの地殻層厚二重化モデルにもとづき説明されてきた (Ellis, 1987; Harley and Hensen, 1990). つまり、グラニュライト相変成岩類が露出するリュツォ・ホルム湾地域の下部地殻はより高压相であるザクロ石グラニュライトもしくはエクロジャイトで構成されることを地殻層厚二重化モデルは示唆する。しかし岩石速度データは、リュツォ・ホルム湾地域の下部地殻が輝石グラニュライト (ザクロ石グラニュライトやエクロジャイトではない) で構成されることを示しており、リュツォ・ホルム岩体 (一部はザクロ石グラニュライト) と比較し低圧相の岩石 (輝石グラニュライト) が下に位置することを意味する。また、図 7 には中部地殻速度は輝石グラニュライト (20%) とフェルシッ片麻岩 (80%) とし仮定した場合の仮想的 P 波速度を示した。この値は中部地殻速度と調和的であり、ナピア岩体の地質で確認された比率と調和的である (Ishikawa *et al.*, 2000; Ishikawa *et al.*, 2001). したがって、リュツォ・ホルム岩体はリュツォ・ホルム湾地域の上部地殻のみを構成し、その中・下部地殻には太古代ナピア岩体が存在する可能性が高い (石川ほか 2001; Ishikawa *et al.* 2001; Shingai *et al.*, 2001). また、リュツォ・ホルム岩体 (上部地殻) および太古代ナピア岩体 (中・下部地殻) の境界は大剪断帯になっていると予想され、反射法探査によって強い反射面 (低角な西傾斜) として認識されると期待される。今後の東西側線における地震探査に期待したい (2002 年 2 月現在, JARE-43 で実施中)。

## 7. 反射構造とテクトニクス

この章では最初に、地殻内反射層を形成すると考えられる岩相ラミネーションのモデル計算により、地殻内に音響インピーダンスのコントラストを与えて、それにより生成されるレシーバ関数の P 波コーダ部分の多重反射波励起のシュミレーションを行い、リュツォ・ホルム岩体における地殻内ラミネーション構造について議論する。次に、4 章で得られた遠地地震のレシーバ関数による S 波速度モデルに注目し、昭和基地を中心とする半径 100 km 域での地殻・最上部マントルの水平方向の不均質について議論する。

JARE-21 データの NMO 解析による再検討 (Ito and

Kanao, 1996) や、JARE-41 地震探査データの反射解析 (Tsutsui, *et al.*, 2001) からは、沿岸から内陸 150 km にかけて深さ 24~45 km の中・下部地殻領域に反射層群が確認されており (図 3), この深さの地殻においては複数の岩石の層構造を仮定することが重要と思われる。ここでは、みずほ高原における JARE-21, -41 探査測線の一部と、昭和基地沿岸部で重なり合う領域をもつ、レシーバ関数解析における昭和基地からみた方位 (backazimuth 90-100) において岩相のモデリング計算を行った。線形時系列インバージョンにより得られた速度構造について、中・下部地殻に相当する深さ (20-35 km) において S 波速度で約 0.3 km/s の速度コントラストを持つラミネーション構造を与え、理論合成波形と観測波形とを対比させた。それにより実際にレシーバ関数解析に影響を与える岩相ラミネーションの厚さを推定した。ラミネーションの厚さをそれぞれ 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 km, およびラミネーションの無い場合の 5 通りの構造について、理論合成レシーバ関数波形を計算した (図 8)。遠地地震の卓越周波数が 1, 2 Hz 程度であることから、観測波形の P 波コーダ 10-15 秒付近にみられる強い振幅を説明するのは、ラミネーションの厚さが 0.5~1.0 km 程度のものが一番よい対応を示すことが分かった。

野外における詳細な地質マッピングによれば、太古代ナピア岩体では露頭規模でもフェルシッ片麻岩を主体とする石英長石質岩石にシル状の輝石グラニュライト (層厚数十 cm~数十 m) が多くに貫入している産状が見られ、苦鉄質マグマのアンダープレーティングに伴うフェルシッ片麻岩への苦鉄質マグマの貫入モデルが考えられている (Ishikawa *et al.*, 2001). したがって、中・下部地殻に観測された反射構造は苦鉄質マグマのアンダープレーティングに伴ってフェルシッ片麻岩へ貫入した輝石グラニュライトを捕らえていると推測される。圧力 1.0 GPa 温度 25°C での輝石グラニュライトと輝石フェルシッ片麻岩間の反射係数は 0.11~0.86 となり、人工地震探査によって反射面として十分観測されうる値である。つまり、地殻内部に存在すると思われる岩相ラミネーションは、数 m~数 10 m 程度に空間スケールの小さいものが多数存在することが地質学的に予想される。今後、発破による人工地震データによる反射断面が得られれば、発破震源の卓越周波数が 10 数 Hz であるため、100-200 m 程度のラミネーションの存在を検知できる可能性がある。

なお、本研究の遠地地震データで示されるラミネーションの空間分解能 (0.5~1.0 km) のスケールは、ナピ

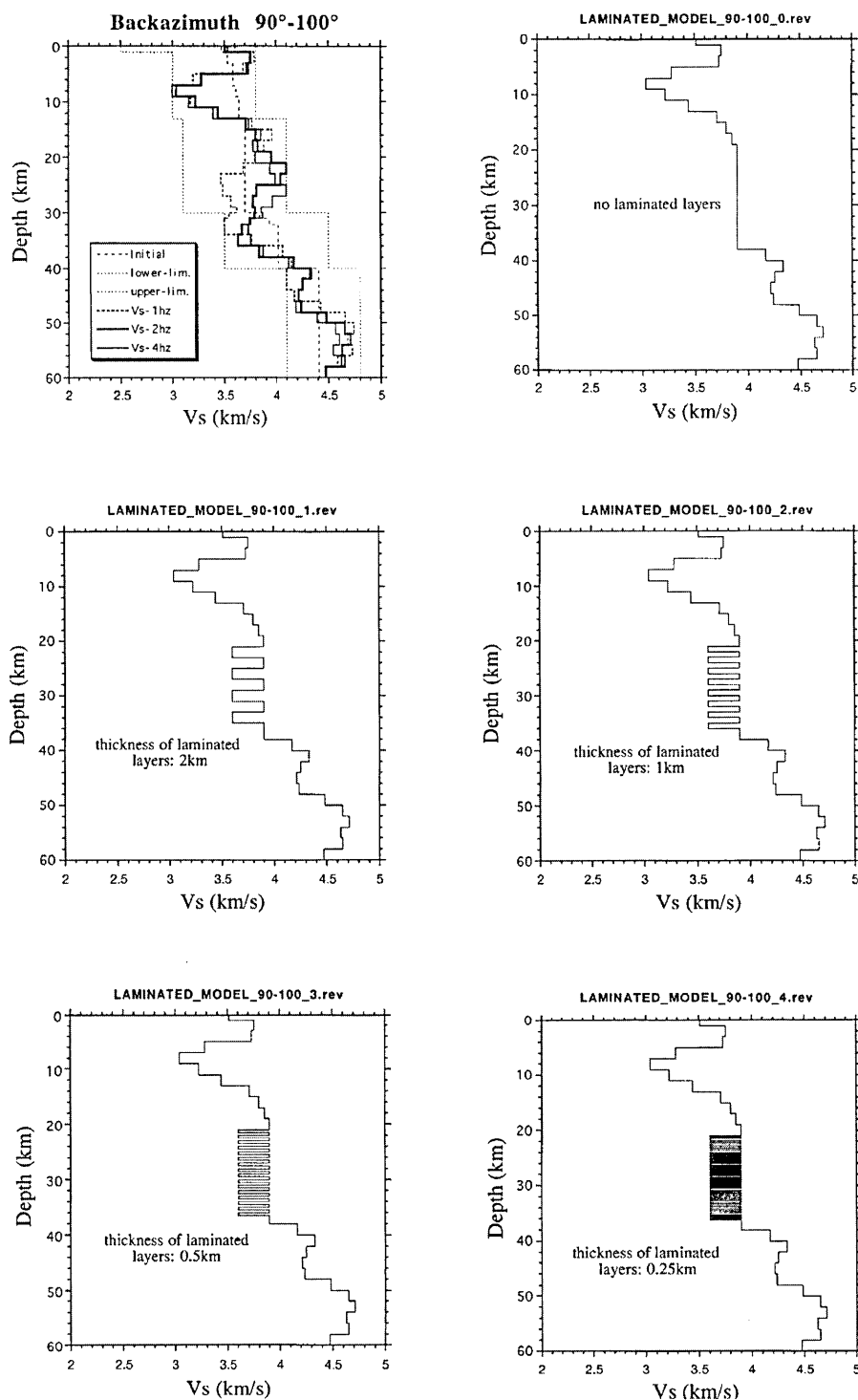


Fig. 8a. (upper left): Shear velocity models by receiver function inversion in the 90°-100° backazimuth for three distinct quality factor models of 1 Hz, 2 Hz, and 4 Hz around the Lützow-Holm Bay region (after Kanao and Akamatsu, 1995). The initial velocity model for the inversion was adopted by the refraction result after Ikami and Ito (1984). The lower and the upper limits in determining shear velocities vs. depth during the inversion procedure are represented by two broken lines (lower-lim. and upper-lim.), respectively. (other five figures): Velocity laminated models in the forward simulation to produce the synthetic receiver functions in Fig. 8b. Laminated layers are assumed in the middle and the lower crustal depth with 2.0, 1.0, 0.5, 0.25, and 0.0 (no laminated model) km thickness.

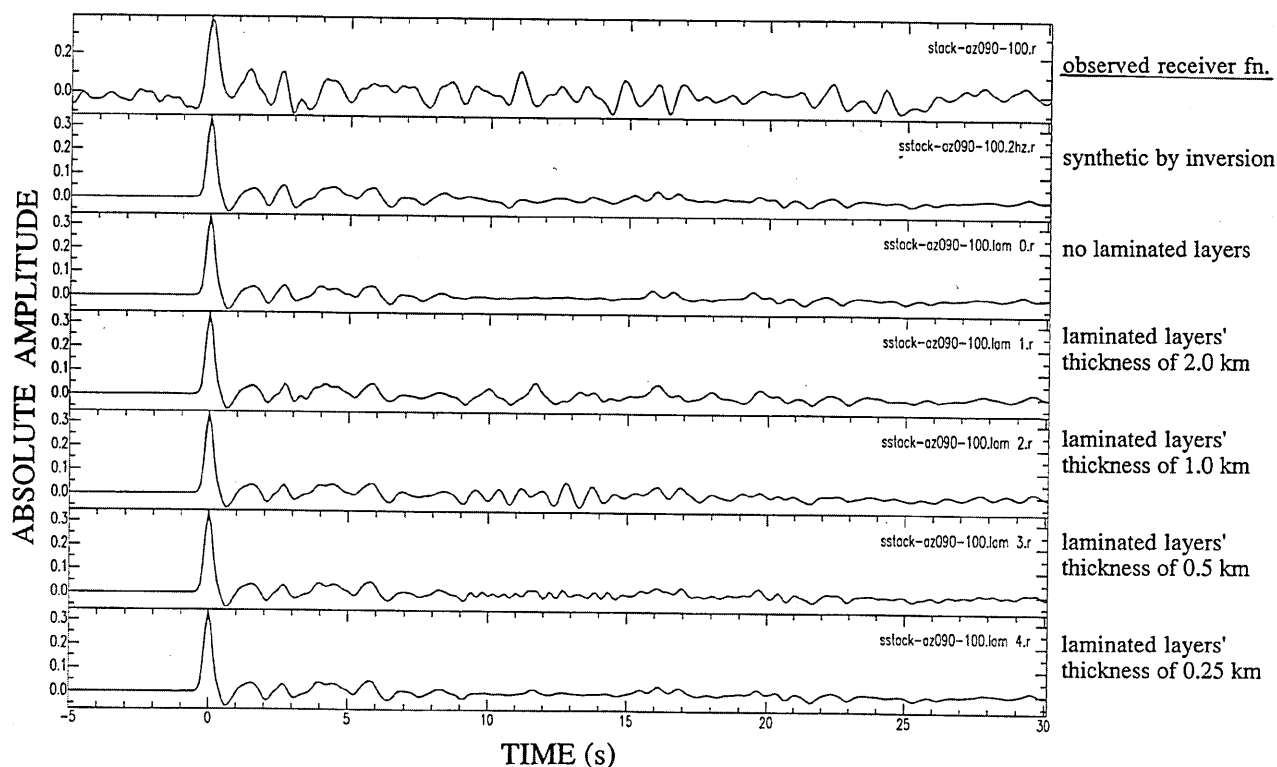


Fig. 8b. (from the upper to the lower traces) Observed radial receiver function, synthetic receiver function computed using the 1Hz quality factor model, together with five synthetic receiver functions by assuming various depth-intervals for laminated layers within the crust as shown in Fig. 8a.

ア岩体等の野外で観察されるラミネーションのスケールと2, 3桁異なっている。これは今回の遠地震解析では主に1, 2 Hzの波が卓越するため、それに対応した空間分解能の構造を得ているからである。ダイナマイト等の人工震源を利用した場合、震源からの卓越周波数が10 Hz以上となるため、上に述べたようにさらに一桁小さい空間分解能で構造が得られる。本研究により得られた空間分解能(0.5~1.0 km)に対応する野外の産状としては、ナピア岩体における同スケールの層構造が対応するものと思われる。また長い波長により速度構造をみた場合には、それよりも小さなスケールの速度構造の不均質を平均化したものを見ることになり、例えば野外で観察されるラミネーション(層厚数十cm~数十m)における全岩層について、平均化した速度を結果として与えている。

反射構造のもう一つの解釈を述べる。みずほ高原でのこれまでの探査結果では、内陸へ向かうにつれて反射層の上面が浅く下面が深くなる。これはみずほルート上で測定された重力異常と矛盾しない(Ito and Ikami, 1986)(図3)。また、大陸氷床部ではモホ面及び地殻内境界が比較的明瞭であるが、湾内では地殻内速度が深さと

共に漸次増加し遷移的な地殻マントル境界をもつ特徴もある(Kanao, 1997)。これらの特徴は約1.5億年前にスリランカが分離した際の張力場によって、特に顕生代の拡大テクトニクス場でみられるような、下部地殻の反射層がさらに顕在化したことを反映しているかもしれない。

4章でも述べたように、表層がグラニュライト相および角閃岩相-グラニュライト相漸移帯の変成度を持つ岩石が分布すると思われる2つの方位領域で、S波速度の違いが確認されている。レシーバ関数より求めたS波モデルによれば、下部地殻の35 km以深部では、漸移帯に対応する方位で、より高速度領域が認められる。 Gondwana 超大陸の分裂に伴い北西-南東方向の張力場が卓越した。レシーバ関数で解析した、昭和基地を中心とする大陸氷床部側の方位とリュツォ・ホルム湾内の方位との速度モデルの違いは、この時期に形成された大陸縁辺部の構造を呈している可能性もある。ただしレシーバ関数によるS波構造を用いて、地殻内部の岩石組成をさらに正確に決めるためには、地殻内及び最上部マントルでのポアソン比を詳細に求める必要がある。そのためには、まず岩石高圧実験よりP波速度、およびS波速度の

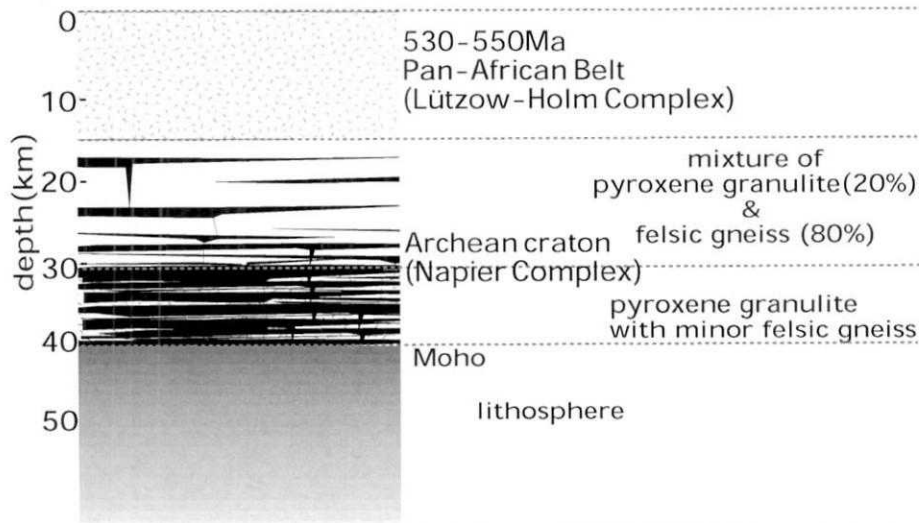


Fig. 9. Crustal model of the Lützow-Holm Bay region according to a comparison of rock velocity with seismic studies. Lützow-Holm Complex occupies only the upper crust of the Lützow-Holm Bay region. The middle and lower crusts are interpreted to be the Archean crust: felsic gneiss (including metasedimentary quartzofeldspathic rocks) together with pyroxene granulite (middle crust), and pyroxene granulite with minor amounts of felsic rocks (lower crust).

両者を決める必要がある。また、みずほ高原での JARE-41 人工震源でも S 波の励起が顕著に確認されているため、今後は S 波の屈折波・反射波に焦点を当てた解析を行うことで、S 波の地殻構造モデルが得られ、さらにポアソン比の地殻断面が得られると期待できる。こうした、人工震源、自然地震、さらに岩石高压実験を併用して、今後は地殻内部物性についてさらに具体的な推定が可能になるであろう。

## 8. まとめ

本稿では、パンアフリカン造山運動における衝突帯の例として、東南極リュツォ・ホルム岩体の地殻構造について、これまでに得られた地震探査構造および高压岩石速度測定実験に結果に基づき現段階での地殻モデルを整理した (図 9)。まとめると、東クイーンモードランドのパンアフリカン造山帯の下に太古代地殻 (その東に隣接するナピア岩体) が存在する可能性が考えられる。つまり、リュツォ・ホルム岩体はリュツォ・ホルム湾地域の上部地殻のみを構成し、その中・下部地殻は太古代ナピア岩体が存在すると予想される。リュツォ・ホルム岩体が幅広いパンアフリカン造山帯の中で東端に位置することを考慮すると、東 Gondwana 大陸の一部を占めていた太古代地殻 (ナピア岩体) が現在の方で西側に沈み込んだことを意味する (図 10)。この運動は廣井・白石 (1986) が岩石学的特徴から示唆したテクトニックモデルと調和的である。すなわち、リュツォ・ホルム岩体は

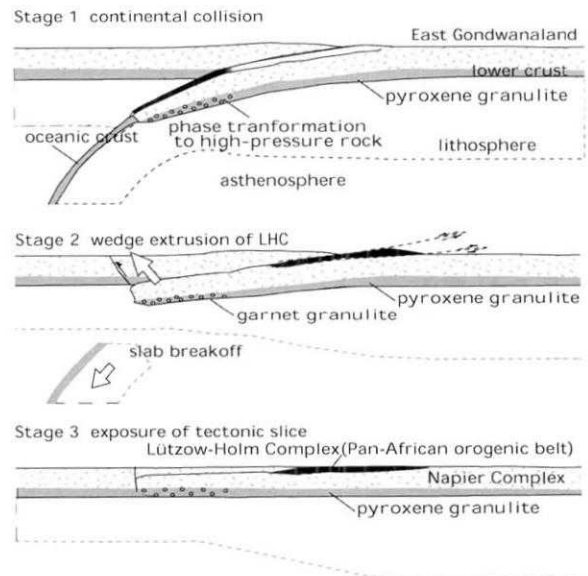


Fig. 10. Tectonic evolution of Pan-African orogeny in East Antarctica. Tectonic evolution is divided into three stages: (1) Collision of East Gondwanaland (Archean craton), (2) The Lützow-Holm Complex was exhumed by wedge extrusion, and extruded onto the Archean Napier Complex. (3) The Lützow-Holm Complex was exposed due to surface erosion.

パンアフリカン変動時に東 Gondwana 大陸が西側に沈み込むような運動センスをもった大陸-大陸衝突帯であることを指摘できる。一方、西 Gondwana 大陸が東側に沈



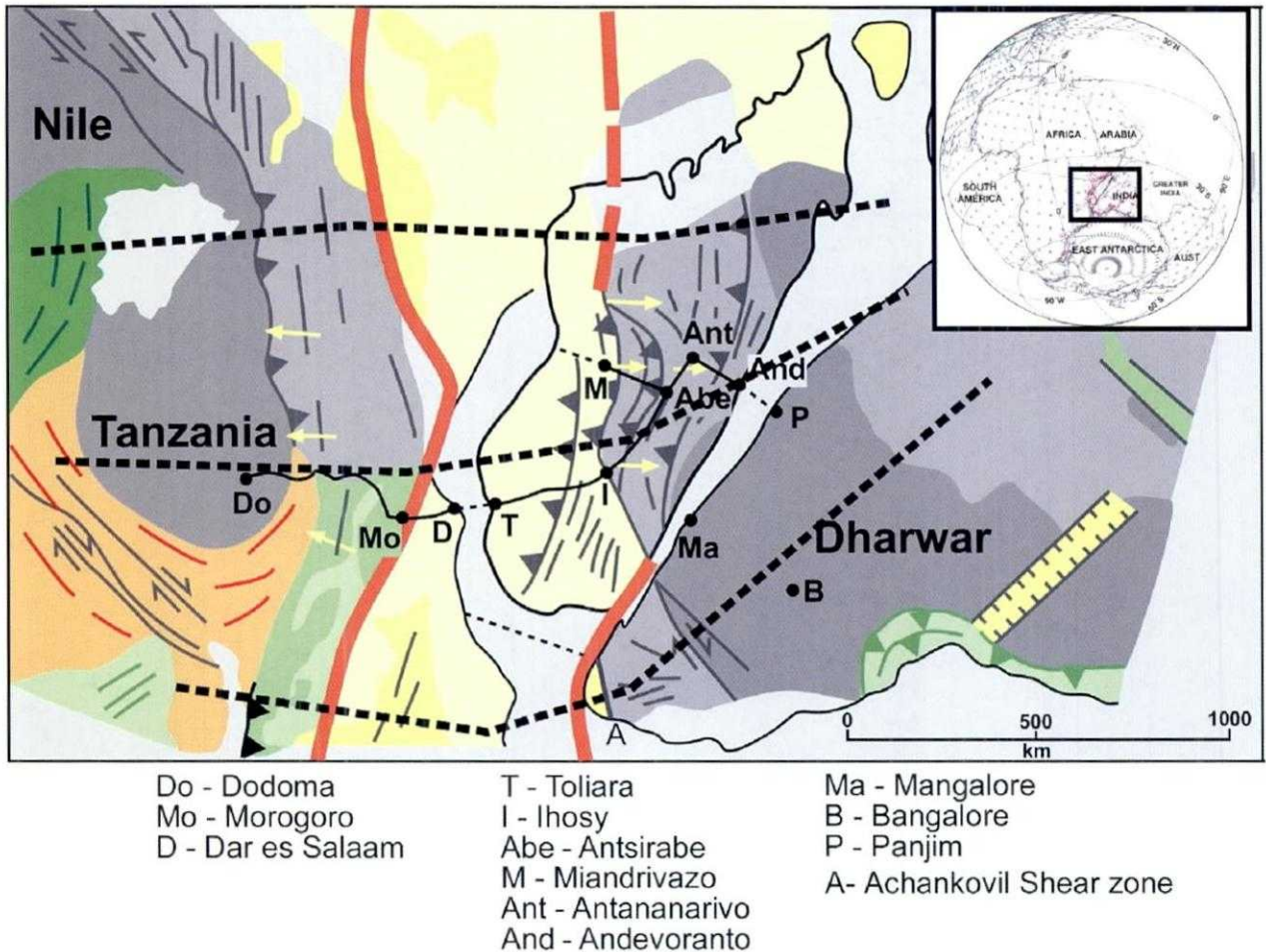


Fig. 11. Tectonic elements of Gondwanaland (India-Madagascar-Congo; courtesy of C. Powell) together with LEMURS proposed seismic lines (after Brown *et al.*, 2001). Archaean cratons are shown in dark grey; Palaeoproterozoic crust (commonly reactivated in the Neoproterozoic) in light gray; green represents areas of late Mesoproterozoic-earliest Neoproterozoic deformation and magmatism; yellow represents areas of Neoproterozoic magmatism, deformation and, in parts, juvenile crust. Together with coordinated surveys across Sri Lanka and East Antarctica under the SEAL project, a systematic program of deep seismic profiling would reveal critical elements of lithospheric architecture in this critical nexus. Dashed lines are intended only to indicate the possible scale of seismic profiling. Solid line is an example of how an actual land survey route might look. Inset shows location of map relative to Gondwanaland fit of Lawver *et al.* (1998).

み込むような運動センスを持っていたことが地質学的に指摘されている (Mosley, 1993). つまり、パンアフリカン造山帯に向かって東・西 Gondwana 両大陸が沈み込んだことを示唆する。この東・西 Gondwana 大陸の縫合、すなわち Gondwana 超大陸の形成プロセスは、原生代後期の島弧やオフィオライトなどの複数の地質体を東西から挟みこむテクトニクスであり、約 5.5 億年前の最終的な東・西 Gondwana 大陸の合体によって原生代後期地質体が再変動したものと予想される。リュツォ・ホルム岩体はこのテクトニクスの最終段階の東 Gondwana 大陸の衝突で形成されたものである。

リュツォ・ホルム湾地域の西方に位置するセール・ロンドンネ山地においても、最近の SHRIMP 年代により

後期原生代～古生代初期の重複変成作用が確認されており (Shiraishi *et al.*, 2001), リュツォ・ホルム岩体との関係をはじめ後期原生代～初期古生代の地質体間の構造が注目される。また図 2b には、探査測線を航空磁気異常データ (Golynsky, *et al.*, 1996) に重ねたものを示す。地表の地質調査からは海岸線に沿った露岩域においてのみ各岩体間の境界を把握できるにすぎないが、それは大陸氷床の上の内陸域まで明瞭な磁気異常境界として認識される。これらの複数の岩体を探査する SEAL 計画は 2001 年度現在も継続中であり、このトランセクトは国際地震学及び地球内部物理学連合 (International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior; IASPEI) の下部組織である国際リソースフェア・プログ

ラム (International Lithosphere Program; ILP) の下に位置する, グローバル深部構造探査のための国際協力推進組織 (Committee On Interdisciplinary Lithospheric Surveys; COILS)) から, 多大な支持を得て実験が行われている。さらに関連する多くの国々の協力により, かつての Gondwana 超大陸を形成していた, アフリカ・インド・南アメリカ・オーストラリア大陸を含めた, より大規模な Gondwana・トランセクトの実施が現在提唱されている (LEGENDS) (Brown *et al.*, 2001)。この中で, 東南極における SEAL 計画とマダガスカルを中心とした Lithospheric Evolution from MULTIdisciplinary suRveys of a Supercontinent (LEMURS) 計画 (図 11) がその中心として期待される。

## 謝 辞

南極観測における SEAL 計画は, 国立極地研究所地学グループを中心に立案され, 外部評価組織である南極観測専門委員会で審議された後に実施されてきた。また, 実施計画を検討するためのワーキンググループを平成 5 年度以降開催し, 地震学・地質学の関係研究者を交えオペレーション上の問題解決と詳細な計画作成等の準備を行ってきた。JARE-21, -41 における南極での地震探査オペレーションは, 人工地震担当隊員をはじめ多数の観測隊員の協力を得て実施された。こうした過程で直接・間接にご支援・ご協力を頂いた数多くの関係者の皆様に記してお礼を申し上げる。

今後は, 地球史初期の大陸形成ダイナミクスおよび地球史を通した大陸成長過程を明確化することを目標とした研究を進めたい。大陸縁辺部との対比という意味で, Gondwana における LEGENDS 計画は日本列島をはじめ島弧形成過程とも密接に関連する。この計画遂行のために, 現在約 20 カ国総計数十名の関連研究者が協力して準備中である。その中で, マダガスカルを中心とした LEMURS 部分の探査の実現に向けても日本の貢献が期待され, 改めて国内関係者皆様の協力をお願い申し上げます。次第である。

## 文 献

- Akamatsu, J., 1991, Coda attenuation in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **67**, 65-75.
- 有馬 眞・石川正弘・北村圭吾, 2000, 海洋性島弧地殻構造と花崗岩質マグマの起源, 月刊地球, 号外 No. 30, 52-56.
- Brown, L.D., A. Kroner, C. Powell, B. Windley and M. Kanao, 2001, Deep Seismic Exploration of East Gondwana: the LEGENDS Initiative, *Gondwana Research*, **4**, 846-850.
- Christensen, N.I. and W.D. Mooney, 1995, Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view, *J. Geophys. Res.*, **100**, 9761-9788.
- Ellis, D.J., 1987, Origin and evolution of granulites in normal and thickened crusts, *Geology*, **15**, 167-170.
- England, P.C. and A.B. Thompson, 1984, Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, Part I: Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust, *J. Petrol.*, **25**, 894-928.
- Golynsky, A.V., V.N. Masolov, Y. Nogi, K. Shibuya, C. Tarlow and P. Wellman, 1996, Magnetic anomalies of Precambrian terranes of the East Antarctic shield coastal region (20E-50E), *Polar Geosci.*, **9**, 24-39.
- Gripp, A.E. and R. Gordon, 1990, Current plate velocities relative to the hot spots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model, *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 1109-1112.
- Harley, S. and B.J. Hensen, 1990, Archean and Proterozoic high-grade terranes of East Antarctica (40°-80°E): a case study of diversity in granulite facies, *High Temperature Metamorphism and Crustal Anatexis*, 320-370.
- Higashi, T., M. Kanao, H. Motoyama and T. Yamanouchi, 2001, Gravity observations along the traverse routes from Syowa Station to Dome Fuji Station, East Antarctica, *Polar Geosci.*, **14**, 226-234.
- 廣井美邦・白石和行 1986, 昭和基地周辺の地質と岩石, 南極の科学 5 地学, 45-84.
- Hiroi, Y., K. Shiraishi and Y. Motoyoshi, 1991, Late Proterozoic paired metamorphic complexes in East Antarctica, with special reference to the tectonic significance of ultramafic rocks, *Geological evolution of Antarctica*, 83-87.
- Ikami, A., K. Ito, K. Shibuya and K. Kaminuma, 1984, Deep crustal structure along the profile between Syowa and Mizuho Stations, East Antarctica, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Ser. C (Earth Sci.)*, **15**, 19-28.
- Ikami, A. and K. Ito, 1986, Crustal structure in the Mizuho Plateau, East Antarctica, by a Two-Dimensional Ray Approximation, *Jour. Geod.*, **6**, 271-283.
- Ito, K. and A. Ikami, 1984, Upper crustal structure of the Prince Olav Coast, East Antarctica, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Ser. C (Earth Sci.)*, **15**, 13-18.
- Ito, K. and A. Ikami, 1986, Crustal structure of the Mizuho Plateau, East Antarctica from geophysical data, *Jour. Geod.*, **6**, 285-296.
- Ito, K. and M. Kanao, 1996, Detection of reflected waves from the lower crust on Mizuho Plateau, East Antarctica, *Antarct. Rec.*, **39**, 233-242.
- Ishikawa, M. and M. Arima, 2000, Crustal structures of Island arcs; high pressure measurements of P-wave velocities, *Eos, Trans.*, **80** (22), 179.
- Ishikawa, M., T. Hokada, H. Ishizuka, H. Miura, S. Suzuki, M. Takada, and D.P. Zwart, 2000, *Antarctic geological map series sheet 37 Mount Riiser-Larsen*, 1-23.
- Ishikawa, M., E. Shingai, and M. Arima, 2001, Archean continental crust under the Pan-African orogenic belt, East Antarctica, *Eos, Trans.*, **82** (47), 1182.
- 石川正弘・新開英介・有馬 眞, 2001, 南極大陸地殻物質の高圧地震波速度測定実験; 月刊地球, 号外 No. 35, 70-76.
- 神山孝吉・金尾政紀・前野英生・古川晶雄, 1994, 1992 年に実施したドーム F 周辺部の重力測定, 南極資料, **38**, 41-53.
- Kanao, M. and J. Akamatsu, 1995, Shear Wave Q Structure for the Lithosphere in the Lützow-Holm Bay Region, East Antarctica, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **8**, 1-

- 14.
- Kanao, M., 1997, Variations in the crust structure of the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica using shear wave velocity, *Tectonophysics*, **270**, 43-72.
- Kanao, M., A. Kubo, Y. Hiramatsu and T. Shibutani, 1997, Crustal heterogeneity and anisotropy for shear waves in the Lützow-Holm Bay Region, East Antarctica by the broadband teleseismic waveforms, *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, 1135-1141.
- Kanao, M., A. Kubo, T. Shibutani, H. Negishi and Y. Tono, 2002, Crustal structure around the Antarctic margin by teleseismic receiver function analyses, *Proc. VIII Inter. Symp. Antarct. Earth Sci., Wellington, New Zealand*, (in press).
- 金尾政紀・東 敏博, 1999, 第38次南極地域観測隊地学部門の野外観測における地球物理学的研究 (1996-1998), 南極資料, **43**, 375-405.
- 金尾政紀, 2001, 東南極盾状地からみた大陸進化形成史—「SEAL 計画」におけるジオトランセクトの概要と意義—, 東京大学地震研究所彙報, **76**, 3-12.
- Kitamura, K., M. Ishikawa, and M. Arima, 2000, High pressure measurements of P-wave velocities of Tanzawa Plutonic rocks: implication for the properties of felsic mid-crust of the Izu arc, *Eos, Trans.*, **80** (22), 128.
- Kitamura, K., M. Ishikawa, M. Arima, and K. Shiraishi, 2001, Laboratory measurements of P-wave velocity of granulites from Lützow-Holm Complex, East Antarctica: Preliminary report, *Polar Geoscience*, **14**, 180-194.
- Kubo, A., Y. Hiramatsu, M. Kanao, M. Ando and T. Terashima, 1995, Analysis of SKS Splitting at Syowa Station in Antarctica, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **8**, 25-34.
- 久保篤規・金尾政紀, 1997, 地震波速度異方性からみた南極昭和基地下の地殻-マントルのデカップリング, 南極資料, **41**, 497-512.
- Lawver, L.A., L.M. Gahagan and I.W.D. Dalziel, 1998, A tight fit-early Mesozoic Gondwana, a plate reconstruction perspective, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **53**, 214-229.
- Mosley, P.N., 1993, Geological evolution of the late Proterozoic Mozambique belt of Kenya, *Tectonophysics*, **233**, 223-250.
- Motoyoshi, Y., S. Matsubara and H. Matsueda, 1989, P-T evolution of the granulite-facies of the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica, *Evolution of Metamorphic belts, Geol. Soc. Spec. Iss.*, **43**, 325-329.
- Motoyoshi, Y. and M. Ishikawa, 1997, Metamorphic and structural evolution of granulites from Rundvågshetta, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *The Antarctic region: Geological evolution and processes*, 65-72.
- Negishi, H. and M. Kanao, 1998, Field seismic observations by portable broadband seismometers in the Lützow-Holm Bay Region, East Antarctica, *Antarct. Rec.*, **42**, 179-189.
- Nishimoto, S., M. Ishikawa, M. Arima, and T. Yoshida, 2000, P-wave velocities in ultrabasic xenoliths from Ichinomegata, NE Japan: Implications for low velocity lower crust of the NE Honshu arc, *EOS, Trans.*, **80** (22), 128.
- Rudnick, R.L. and D.M. Fountain, 1995, Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective, *Rev. Geophys.*, **33**, 267-309.
- Sheraton, J.W., R.J. Tingey, L.P. Balck, L.A. Offe and D.J. Ellis, 1987, Geology of Enderby Land and Western Kemp Land, Antarctica, *Aust. Bur. Mineral. Resour. Bull.*, **223**, 1-51.
- Shibuya, K., K. Kaminuma, A. Ikami and K. Ito, 1984, Magnetic anomalies along the traverse route from Syowa to Mizuho Stations, East Antarctica, *Antarctic Rec.*, **83**, 51-61.
- Shingai, E., M. Ishikawa and M. Arima, 2001, P-wave velocity in ultrahigh temperature granulites from the Archean Napier Complex, East Antarctica, *Polar Geoscience*, **14**, 165-179.
- Shiraishi, K., Y. Hiroi, and Y. Motoyoshi, 1989a, *Antarctic geological map series sheet 12: Lützow-Holm Bay*.
- Shiraishi, K., Y. Hiroi, and Y. Motoyoshi, 1989b, *Antarctic geological map series sheet 13: Prince Olav Coast*.
- Shiraishi, K., D.J. Ellis, Y. Hiroi, C.M. Fanning, Y. Motoyoshi and Y. Nakai, 1994, Cambrian orogenic belt in East Antarctica and Sri Lanka: implication for Gondwana assembly, *J. Geol.*, **102**, 47-65.
- Shiraishi, K., D.J. Ellis, C.M. Fanning, Y. Hiroi, H. Kagami and Y. Motoyoshi, 1997, Re-examination of the metamorphic and protolith ages of the Rayner Complex, Antarctica: evidence for the Cambrian (Pan-African) regional metamorphic event, *The Antarctic region: Geological evolution and processes*, 79-88.
- Shiraishi, K., T. Hokada, K. Misawa and H. Kaiden, 2001, Metamorphic ages of the Yamato-Belgica Complex: revisited, 第21回南極地学シンポジウム プログラム・講演要旨 34-35.
- Stern, R., 1994, Arc assembly and continental collision in the Neoproterozoic East African Orogen: Implications for the consolidation of Gondwanaland, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **22**, 319-351.
- Turcotte, D.L. and G. Schubert, 1982, *Geodynamics applications of continuum physics to geological problem*, 1-450.
- Tsutsui, T., M. Yamashita, H. Murakami, H. Miyamachi, S. Toda and M. Kanao, 2001, Reflection profiling and velocity structure beneath Mizuho traverse route, East Antarctica, *Polar Geosci.*, **14**, 212-225.
- Yukutake, H. and K. Ito, 1984, Velocities of P and S waves for drilling core rocks at Syowa station, Antarctica, *Mem. Nat. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **33**, 17-27.

(Received March 18, 2002)

(Accepted June 30, 2002)