

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—

金 尾 政 紀

国立極地研究所

Crustal Evolution and Deep Structure Viewed from East Antarctic Shield

“Structure and Evolution of the East Antarctic Lithosphere ‘Geotransect Project’”

—Outline and Scientific Significance—

Masaki Kanao

National Institute of Polar Research

Abstract

Crustal evolution and deep structure viewed from East Antarctic Shield are summarized relating to the continental growth process in the Earth's evolution. First, the crustal structure of Antarctica is discussed by comparing deep seismic probings of the other Precambrian continents. Next, seismic reflection/refraction carried out in Antarctica in recent few years are reviewed to obtain an insight into the technological development. In the latter chapters, we focused on the subsurface structure and the crustal evolution of the Lützow-Holm Complex (LHC), around Syowa Station (39°E, 69°S), East Antarctica. The “Structure and Evolution of the East Antarctic Lithosphere (SEAL)” project has been carried out from 1996-1997 austral summer season within the framework of the Japanese Antarctic Research Expedition (JARE). The main target of the “SEAL geotransect” is to obtain a whole crustal section in the different geological terrains from the Archean to the early-Paleozoic ages from Western Enderby Land to Eastern Queen Maud Land. In the austral summer season of 2000, deep seismic refraction/wide-angle reflection probing was conducted on an ice sheet in the northern Mizuho Plateau, of the LHC by JARE-41. More than 160 plant-type 2 Hz geophones were set along the Mizuho route 190 km in length. A total of 3,300 kg dynamite charge at seven sites along the route gave information concerning the deep structure of a continental margin of the LHC. Continental evolution from the Archean ages to the present are clarified by combining the geoscientific results from East Antarctic shield and those from the other cratonic terrains of the Earth's continent in future.

Key words: crustal structure, evolution of continents, East Antarctic Shield, explosive seismic surveys, geological and geophysical interpretation

1. はじめに

地球上の様々なテクトニクス帯の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た。大陸地殻は、その内陸部のクラトン周辺ほど、また形成年代が古くなるほど一般的に厚くなる。

そして多数の人工地震実験の結果から、固有のP波地震波速度で特徴づけられるいくつかの領域に区分される(e.g., Christensen and Mooney, 1995; Rudnick and Fountain, 1995)。しかし46億年に及ぶ地球形成史において、先カンブリア時代は顕生代に比べて研究が少な

い。特に南北両極域は、酷寒な気象環境や交通の不便さにより特筆すべき成果はさらに希少である。近年北極域では、北米やヨーロッパ各国により太古代クラトンを中心に構造探査が進められている (e.g., Clowes, *et al.*, 1999; Thybo, *et al.*, 1999)。しかし同様な古い地質年代を有する東南極は、未だ大陸構造探査のフロンティア領域に相当する。これら両極の盾状地の深部構造を求め地殻進化過程を比較することは、数億年周期で起こった大陸の分裂・再編成という大きな環境変動の、現在の極域リソスフェアの構造形成への寄与を評価し、地球史における大陸成長の役割をグローバルな視点でひもとくことができる。

本稿では、特に最近のグローバルな深部構造探査の現状を踏まえつつ、東南極盾状地における構造探査の位置づけと、南極大陸からみた大陸地殻の進化形成史について議論する。

2. 先カンブリア地殻の特徴

これまでにグローバルに知られている先カンブリア地殻の速度構造の特徴としては、太古代クラトンの地殻の平均の厚さは約 35 km であり、原生代地殻における下部地殻の高速層 ($V_p=7.0\sim 7.6$ km/s) が欠落しており (Durrheim and Mooney, 1991)、太古代には玄武岩マグマのアンダープレATINGは少なかったと考えられること、並びに盾状地や卓状地では比較的低いポアソン比を持ち、地殻を構成する岩石組成としては、主に石英に富む堆積性変成岩類や輝石で主に説明される (Fountain *et al.*, 1992) こと、等が挙げられる。

また地殻及び最上部マントルの地震波反射面の特徴については、1970 年代初期の構造探査研究では特に地殻深部の解像度が良くなかったが、最近の深部探査からは下部地殻及びモホ面からの強い反射が確認されている。15 km 以深で傾いた反射面群が存在し (e.g., Goleby *et al.*, 1998)、先カンブリア時代のテクトニクスが、衝突型造山帯をはじめとする現在の大陸地殻形成過程と共通していたことが分る。多くの大陸のクラトン周辺部で原生代の圧縮帯が確認され、当時のプレートテクトニクスの存在を強く示唆している。現在の構造探査で確認されるこれらの構造は、過去のテクトニック反射パターンが凍結した状態で、10~20 億年にわたり熱的に安定であったことを意味する。

しかも最近では、カナダ・ローレンシア盾状地をはじめとし、太古代・原生代地殻の衝突によるデラミネーション構造も数多く報告されており (e.g., Cook *et al.*, 1999; Eaton *et al.*, 1999; Bogdanova *et al.*, 2000)、また

太古代の大陸一島弧衝突過程における島弧付加プリズムの重要性も指摘されている (Velden and Cook, 2000)。

3. 南極大陸の構造探査

最近の南極大陸における人工地震探査の実施状況を Table 1 にまとめた (e.g., Sroda *et al.*, 1997; Jarvis and King, 1993; King *et al.*, 1993; King and Bell, 1996 b; Jarvis and King, 1995; King and Bell, 1997; Jokat *et al.*, 1997; Vedova *et al.*, 1997; SCAR Meeting, 1996; 1998)。日本以外ではイギリス (UK) がほぼ毎年実施しているのが注目される。他にもイタリア・アルゼンチン共同観測、ニュージーランド地質核科学研究所・西オーストラリア大学・アメリカ地質調査所の共同観測等により、南極半島や南極横断山脈、棚氷上での浅部探査が行われているが、東南極盾状地での深部探査はほとんどないのが実状である。

Table 1 より、大陸氷床上の実験はほぼダイナマイト震源を使用している。他には一部でエアガンが使われ始めている (King *et al.*, 1993) が、ガン容量も小規模なもので深部探査に必要なエネルギーを得るには至っていない。モホ面以下の深度を探査するためには、現段階ではやはり爆薬量として最低 100 kg 程度が必要である。また、震源用の氷床掘削孔を開けるため、これまでメカニカルドリルや熱水ドリルが使用されてきた (伊神他, 1980; 伊藤他, 1983)。特に 5 m 以浅の孔の場合、手動ドリルを用いて簡易作業的に掘削した。日本南極地域観測隊 (Japanese Antarctic Research Expedition; 以下 JARE と呼ぶ) における平成 11 年度 (JARE-41) の実験では、新たにスチーム式浅層掘削ドリルを開発し、30~50 m 深の孔を掘削した (村上他, 2000)。

一方観測装置は、操作上の簡易さから単独設置収録型が主であり、JARE でもそれに従っている (田中・金尾, 1996)。しかし最近では、ストリーマー式のケーブルを用いた地震計も試験運用されている (e.g., King and Bell, 1996 a, 1996 b; Jarvis and King, 1995; Jokat *et al.*, 1997; Smith and King, 1989)。特に、氷床内陸域では雪上車で牽引できるため機動性がよい。その反面地震計が地表に確実に固定できず、風浪等の影響でノイズレベルが高い欠点がある。しかも現段階での延長距離は最大 5 km 程度であり、長距離の屈折法探査には向かない。氷床上でのケーブル牽引式により南極大陸での大規模探査を行うためには、こうした欠点を補う開発が今後望まれる。

4. 'SEAL 計画' におけるジオトランセクト

Table 1. Summary of seismic experiments on the Antarctic continent. This includes published studies after 1990 and reports at the Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) meetings in 1996 and 1998.

Reference	Country	Region	Year	Experiment line / recorder pt.	Analysis	Target depth	Seismic source	Explosive charge	Shot hole / depth
(Published)									
[previous JARE experiments]									
Itami et al. (1980)	Japan	S route	1979	50km / 10pt.	refraction	testing measurement	explosive	560kg (ice sheet) 100kg (sea)	mechanical drill / 63m 110m (sea)
Ito et al. (1983)	Japan	Ongul Is.	1980	1km / 8pt. 5km / 11pt.	refraction	surface layer	explosive	0.1-0.7kg (rocks) 80-100kg (sea)	mechanical drill / 0.5-0.9m 55m (sea)
Ito et al. (1983)	Japan	Soya Coast	1980	10km / 10pt.	refraction	upper crust	explosive	20-100kg (ice sheet)	mechanical drill / 5-30m
Ito et al. (1983)	Japan	Miruzho Plateau	1980 / 81	300km / 27pt.	refraction	deep crust and Moho	explosive	1000, 1400kg (ice sheet) 2577kg (sea)	mechanical drill / 100, 143m 160m (sea)
[Published after 1990]									
Sroda et al. (1997)	Poland	Antarctic Peninsula shelf	1984 / 85	total; 1000km (7lines) / 7 st., 5ch.	refraction	deep crust and Moho	explosive	50-100kg of TNT (sea) / 6km int.	80m (sea)
Jarvis and King (1993)	UK	Larsen Ice Shelf	1989	2km / 5.2m interval	reflection / shallow refraction	fin and ice layers	explosive	2.27kg / 250m int.	hot-water drill / 9m
King et al. (1993)	UK	Near Rothera Station	1991	test of airgun	reflection	ice shelf thickness	airgun	25kg weight / 100kg compressor	0.5m
King and Bell (1996)	UK	Ronne Ice Shelf	1991 / 92 / 93	total; 158 km (6 lines) / 300m cable	reflection	sub-seabed (1.5s TWT)	explosive	2kg ammonium nitrate / fuel oil	hot-water drill / 10-15m
Jarvis and King (1995)	UK	Larsen Ice Shelf	1993	24km / 48ch., 2.4km cable	reflection / shallow refraction	sedimentary sequences	explosive	up to 8kg / up to 64kg	hot-water drill / up to 9m
King and Bell (1997)	UK	George VI Sound	1994 / 95	23 km / 50m int., 48ch.	reflection	sediments beneath ice shelf	explosive	5-200kg / 50m-2.4km int. ammonium nitrate / fuel oil	hot-water drill / hand-dug pits
Jokat et al. (1997)	Germany	Fischer-Ronne Ice Shelf	1994 / 95	150 km / 12 st. + 2.6km cable	reflection / refraction	sediments and upper crust (3.5s TWT)	airgun (sea)	/ 150m int.	10-20m (sea)
Vedova et al. (1997)	Italy, Germany USA	Transantarctic Mountains	1993 / 94	300 km / 58 st.	reflection / refraction	deep crustal structure	explosive	80-530kg (ice sheet)	hot-water drill / 9-39m multiple shot pattern / 4-20
(SCAR reported)									
Bannister et al. (1996)	NZ USA	Ross Ice Shelf	1990/91	140 km / streamer cable + pt. 96 km /	reflection reflection / refraction	ice shelf and crust	(oversnow)		
Bannister and Brink (1996)	NZ USA	Wilkes Basin	1993/94		multi-channel array	fin layers	(oversnow)		
Nixdorf (1996)	Germany	Ekstrom Ice Shelf	1993/94	20km /	reflection	ice thickness	explosive	500m int.	
Nixdorf (1996)	Germany	Foundation Ice Stream	1994/95	70km /	reflection	ice thickness	explosive	500m int.	
King (1998)	UK	Orville Coast	1996/97		refraction	rock velocity	explosive	(rock outcrops)	
King (1998)	UK	Candlemas and Thule Is.	1996/97		reflection / refraction	crust	explosive	(oversnow)	
King (1998)	UK	Evans Ice Stream	1998/99		reflection / refraction	crust	explosive	(oversnow)	
(SEAL)									
JARE-41	Japan	Miruzho Plateau	1999 / 2000	190km / 170pt.	refraction	deep crust and Moho	explosive	300-600kg (ice sheet)	steam drill / 30-50m

Crustal structure and evolution of the Lützow-Holm Complex

(Geological time scale)

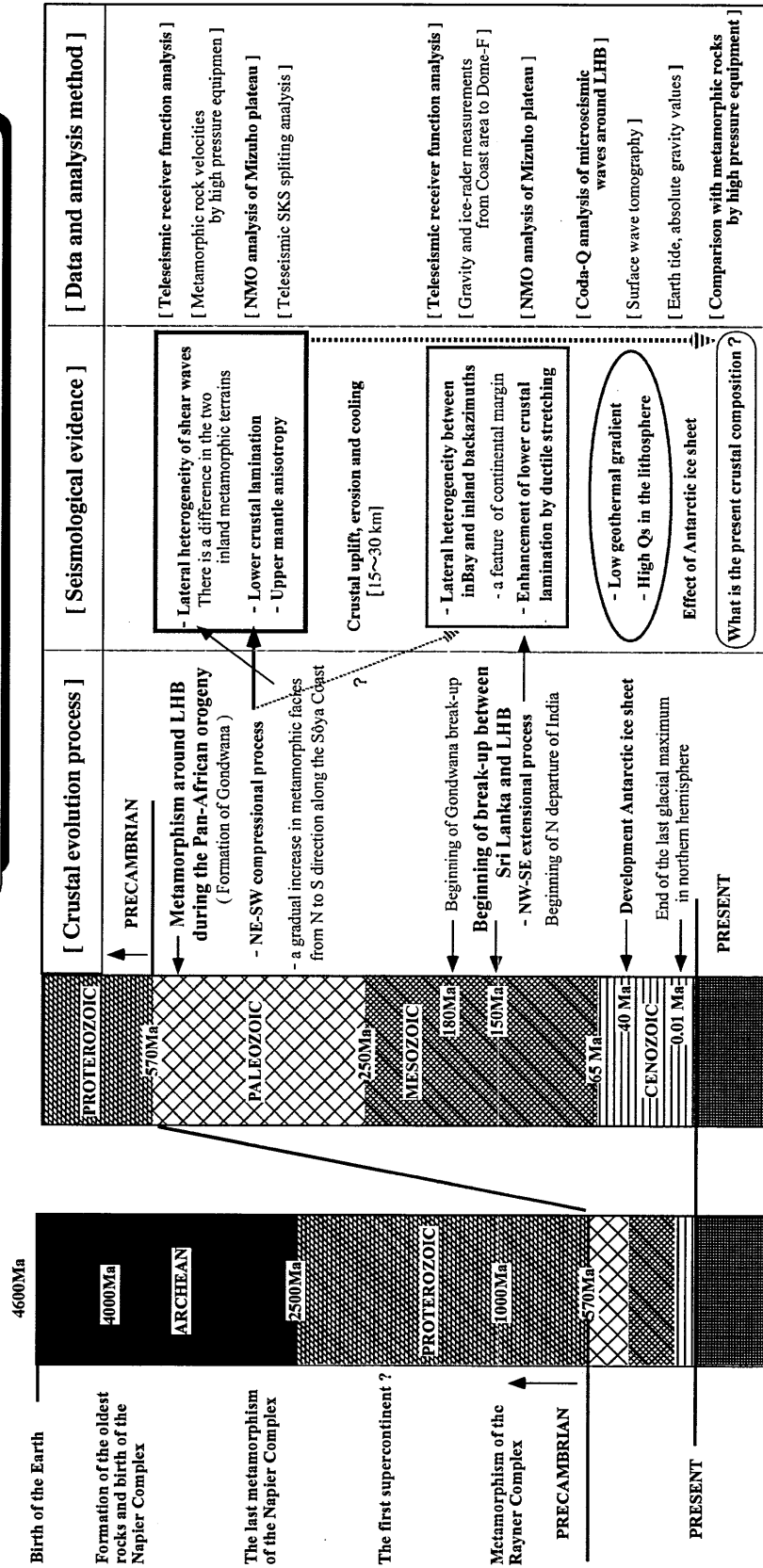


Fig. 1. Summary of the relationship between crustal structure and evolution of the Lützow-Holm Complex, East Antarctica. The crustal evolution process was inferred from several pieces of seismological evidence by both active and passive source analyses.

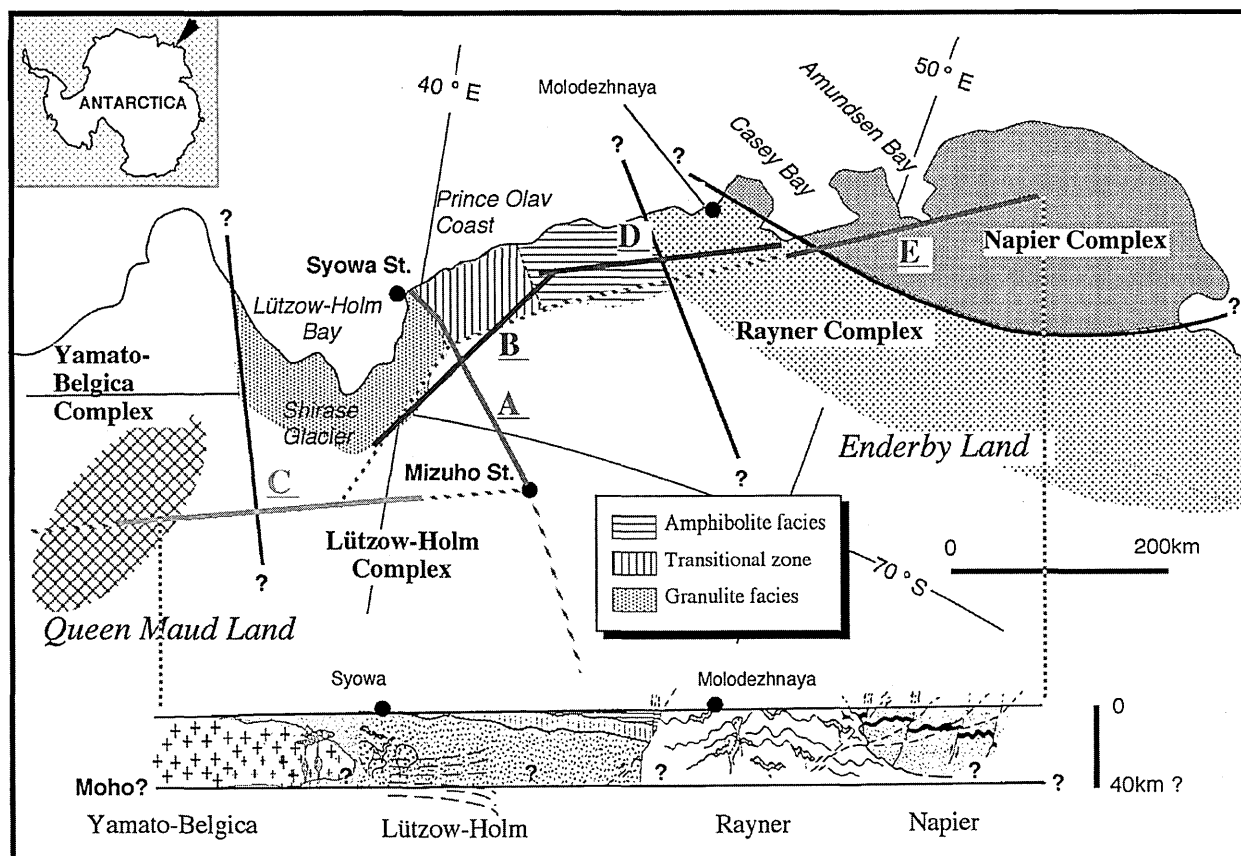


Fig. 2. Geological setting and proposed refraction seismic lines in Eastern Queen Maud Land and Western Enderby Land, East Antarctica, showing a distribution of the four distinct metamorphic complexes (modified after Motoyoshi *et al.*, 1989). Schematic NEE-SWW cross-section by Harley and Hensen (1990) presents relationships between the Napier Complex (Archean), the Rayner Complex (late-Proterozoic) and the Lützow-Holm Complex (LHC: early-Paleozoic). Late Proterozoic structures are interpreted to have caused initial uplift and exhumation of the Napier Complex; Cambrian and perhaps more recent faultings are believed to have resulted in sufficient thickening to cause later exposure through erosion. Metamorphic grade in the LHC increases progressively along the Prince Olav Coast to the Shirase Glacier. Transitional zone between amphibolite facies and granulite facies is defined as a first appearance of orthopyroxene in ordinary basic to intermediate gneisses through various reactions. Syowa and Mizuho Stations are situated on the LHC. (Proposed refraction lines: A, Mizuho Plateau; 1999–2000 austral summer, B, Mizuho Plateau; 2001–2002 austral summer, C, Yamato Mountains; 2005–2006 austral summer, D, Prince Olav Coast; E, Casey Bay–Amundsen Bay, future plan.)

現在グローバルに分布する大陸地塊の中で、東南極大陸は先カンブリア時代の盾状地が多く、特に JARE で対象とするエンダービーランドは、39 億年前までの原岩年代を持つナピア岩体を核に原生代・古生代の岩体が分布する。また昭和基地の位置するリュツォ・ホルム岩体では 5 億年前の広域変成作用が知られており、この付近一帯は幅広い時間スケールの地殻活動史を持つ (Shiraishi *et al.*, 1994). Figure 1 には、リュツォ・ホルム岩体を中心とした地殻進化過程を地球史の時間軸上に示す。これまで地質学的手法により主に 10～5 億年前のグレンビル及びパン・アフリカン変動が調べられてきたが、最近では太古代ナピア岩体の調査研究が精力的に行

われ、超高温変成作用の成因と変成履歴が詳細に解明されつつある (e.g., Osanai, *et al.*, 1999). 従って JARE で対象とする地域は、現在日本が主体で「先カンブリア時代に始まり現在まで継続している大陸形成史を解明」できる唯一の場所であるといえる。

地震予知計画と同様に、JARE は 5 カ年計画を基本に進められており、上記地域の地質学的・地球物理学的調査により太古代以来の大陸地殻構造と進化過程を研究する「東南極リソスフェアの進化研究計画」(“Structure and Evolution of the East Antarctic Lithosphere: SEAL”) が継続中である。このうち、人工地震を中心とした地殻深部探査計画 (“SEAL geotranssect project”)

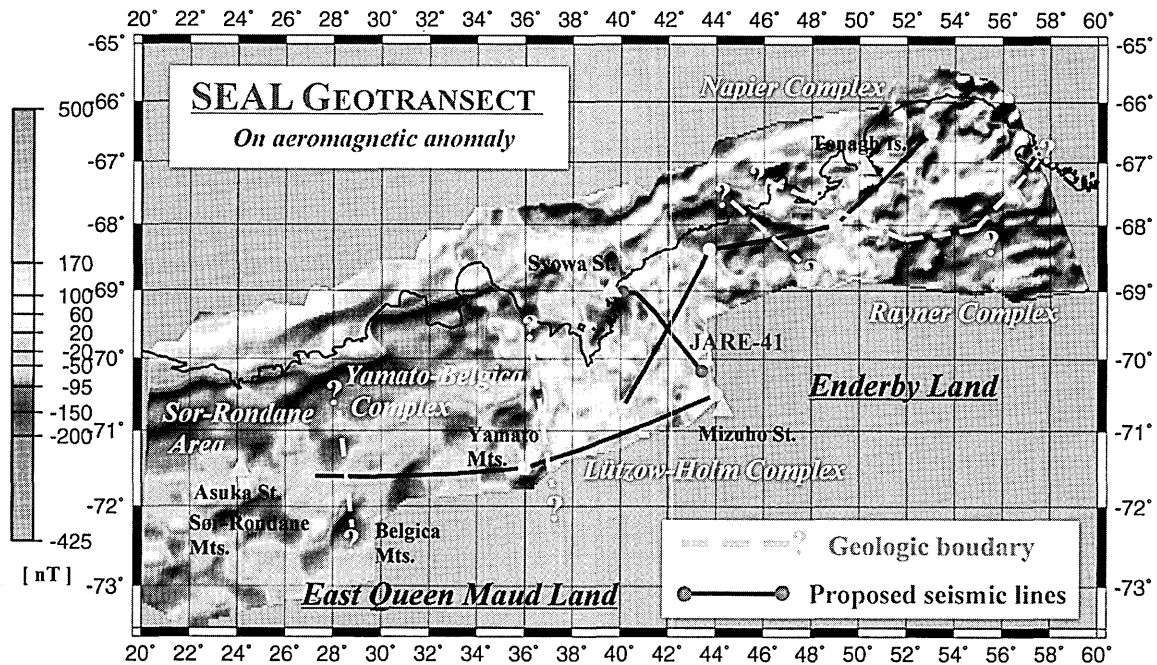


Fig. 3. Geological setting and refraction seismic lines proposed by the "SEAL geotransect project" in Eastern Queen Maud Land and Western Enderby Land, East Antarctica, together with aeromagnetic anomalies (Golynsky *et al.*, 1996). Seismic refraction lines conducted in 2000 austral summer operation (JARE-41) are indicated in the Mizuho Plateau area.

の最終目的は、西エンダービーランド～東クイーンモードランドにかけての東西総延長約 1,500 km に及ぶ探査により、太古代のナピア岩体からレイナー岩体（後期原生代）、リュツォ・ホルム岩体（初期古生代）、やまと・ベルジカ岩体（初期古生代）、さらにセール・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現在の地殻断面を取得することである（Fig. 2）。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太古代以降のテクトニクスを解明する。Figure 3 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、それは大陸氷床上の内陸域まで明瞭な磁気異常境界として認識される。

また、地球史におけるプレートテクトニクスの始まりの時期を明確化し、大陸の成長過程を解明するという意味で、“SEAL geotransect project” は日本列島をはじめとする島弧形成研究とも関連する。

5. リュツォ・ホルム岩体

この章では、昭和基地の位置するリュツォ・ホルム岩体を中心に、これまでの地質学的・地震学的研究成果をまとめた。

リュツォ・ホルム岩体は、JARE を中心に地質学的調査研究が精力的になされ、東南極で最も地殻進化過程が解明されている地域である。5 億年前に広域変成作用を受けた結果、北東から南西に向かって角閃岩相、角閃岩相—グラニュライト相漸移帯、さらにグラニュライト相と表層片麻岩の変成度が次第に上昇し、最高変成度を示す岩石が宗谷海岸南部に露出する（Hiroi *et al.*, 1991）。また地震学的データも、昭和基地をはじめこの地域を中心に蓄積されている。地震波による深部構造探査に適した場所として（1）地殻熱流量が小さく、減衰ファクター（ Q^{-1} ）が小さい、（2）第三紀以降の堆積物がないかあるいは薄い、（3）断層など探査を乱す要因が少ない、等が望ましい（横倉・宮崎, 1989）。東南極大陸は堆積層のかわりに氷床が存在し、その影響を考慮しなければならないが、他の条件は満たし好都合といえる。例えば（1）については、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（Akamatsu, 1991; Kanao and Akamatsu, 1995）、また、昭和基地の表層片麻岩の室内高圧実験による地震波速度は、典型的な盾状地の値（表層の $V_p=6.0$ km/s）として得られている（Yukitake and Ito, 1984）。

JARE-21, -22 では、JARE-41 と同じみずほ基地—昭和基地間（みずほルート）において屈折法概査を実施し、約 40 km の深さにモホ面が求められた（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。人工地震探査以外にも、最近では昭和基地を中心に広帯域データ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)。また、南極大陸は微小地震活動が少ないため、日本に比べて遠地地震解析には有利である。さらに 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)。また、みずほ高原に目を向ければ、過去の内陸旅行で大陸氷床上で重力測定が繰り返さされており、モホ面の深さ分布をブーゲー異常と絡めて、大陸内部ドーム基地まで拡張する試みもある (神山他, 1994; 金尾・東, 1999)。

6. 地殻進化と深部構造

地殻進化と現在の構造とを結びつけて議論することは SEAL 計画の重要な柱である。地震学的アプローチからみた深部構造と地殻形成過程との関係について、リュツォ・ホルム岩体を中心に以下に示す (Kanao, 1997; Fig. 1)。

- ・約 5 億年前の Gondwana 超大陸形成に伴うパン・アフリカン変動で、リュツォ・ホルム岩体は北東—南西方向の圧縮場を伴う広域変成作用を受けた。その結果地殻内部に水平方向の不均質が生じ、遠地地震の P 波コード部分のレーバ関数解析により、地殻内地震波速度が昭和基地を中心とした方位によりかなり差異が生じることが確認された。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。

特に大陸氷床下ではあるが、表面片麻岩地質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と思われる 2 つの領域では、S 波速度の違いが確認され、さらに高圧岩石実験による変成岩速度との対応から、現在の地殻を構成する岩石を推定した。その結果、5 億年前の中部～下部地殻が現われていると考えられる表層付近では、両領域とも酸性・塩基性岩が、ある程度の体積割合で混在する速度をもつと考えられる。現在の中部地殻では、角閃岩相—グラニュライト相漸移帯の領域がより高速度で盾状地の平均モデルに近いが、グラニュライト相の領域では酸性岩が主組成と思われる。また下部地殻に相当する深さは、両領域とも高速度領域でガーネットを含む塩基性組成が支配的である。

さらに内部部では、JARE-21 データの再検討から沿岸から内陸 150 km にかけて深さ 24～45 km の下部地殻領域に反射層群を捉えた (Ito and Kanao, 1996)。この反射層形成の原因としては、広域変成作用による圧縮場に伴い、地殻が厚くなると同時に変成岩の層構造化が最も考えられる。内陸へ向かって反射層の上面が浅く下面が深くなり、みずほルート上で測定されたブーゲー重力異常と矛盾しない (Kanao *et al.*, 1994)。さらに SKS 波の速度異方性の解析によると、上部マントルにおいて速い S 波速度を持つ方向が現在のプレート運動方向とは一致せず、むしろこの時期の北東—南西方向のアセノスフェアの流れと合うことが指摘されている (Kubo *et al.*, 1995)。

- ・その後の Gondwana 大陸の分裂に伴い、リュツォ・ホルム岩体は約 1.5 億年前にスリランカと分離を開始した。このとき広域変成作用時と斜行する、北西—南東方向の張力場が卓越した。遠地地震の P 波コード部分のレーバ関数解析による内陸部と湾内との領域における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。また、リュツォ・ホルム湾沿岸から内陸 900 km のドーム基地に至るまでの、大局的なブーゲー重力異常からも、海岸から内陸に向けてモホ面が約 10 km 程度深くなるという、当該地域の大陸縁辺部の構造が示唆される。さらにこの時期の張力場によって、特に顕生代の拡大テクトニクス場でみられるように、下部地殻の反射層がさらに顕在化したと考えられる。しかし、顕生代の拡大テクトニクス場のように強い反射層のラミネーション構造としては、現在のところ検知されていないため、今後の詳細な反射法探査が必要である。

- ・変成作用時以降は特別な火成活動を受けずに地殻が約 15～30 km 程度上昇および冷却過程を経て現在に至った。この 5 億年に及ぶ長い地殻形成史は、低い地殻熱流量 ($\sim 40 \text{ mW/m}^2$) や上面が 25 km 深以上の深い地殻内反射面として現われていると共に、厚くて固いリソスフェアとして示唆される。昭和基地近辺の微小地震波形を用いたコード Q の解析から、リソスフェア内の S 波減衰の深さ分布を求めた (Akamatsu, 1991; Kanao and Akamatsu, 1995) が、その結果表層付近を含めて 1～24 Hz のどの周波数帯域においても、島弧などに比べて減衰が小さい構造が示された。

7. JARE における探査の実施

6 章の考察の妥当性をさらに検討するため、平成 11 年度 (JARE-41) では、リュツォ・ホルム岩体の大陸氷

床・みずほルートにおいて、測線長約 190 km の屈折法・広角反射法地震探査を実施した（宮井他，2000；宮町他，2000）。平成 13 年度（JARE-43）には，JARE-41 の測線と直交する約 300 km 長の探査を予定し，リュツォ・ホルム岩体の 2 つの大きな表層変成岩相である角閃岩相（プリンス・オラフ海岸），およびグラニュライト相（宗谷海岸）に対応する速度構造を比較する。小型ヘリコプターを用いてペネトレーター型地震計（澁谷他，1992）による観測も予定している。さらに地球科学的諸データと合わせリュツォ・ホルム岩体の地殻深部構造と進化過程を総合的に解明する。大陸氷床上的オペレーション候補地としては，1) 過去に JARE で探査実績があり概査結果がすでに得られ，精査との比較で地殻内部反射面等の科学的な検証が十分に期待できる，2) 昭和基地に近く輸送・人員交代等のオペレーションが比較的容易である等の理由により，JARE-41，-43 では内陸旅行の起点（S16）—みずほ基地までを中心に実施する。

JARE-41 まで約 20 年余り人工地震探査が実施されなかった理由は，1) 設営・観測の両面ともに大掛かりなオペレーションで一時期に多人数が必要，2) 観測器材が時代と共に進展し，かつ 1 台当たりが高価である地震探査用の器材を 1 実験で 100 式以上を用意するには多額の予算獲得が必要，3) 安全面，特に火薬の扱いや小型ヘリコプターを使用する場合十分な安全対策が必要，4) さらに最近では，南極の環境保護の面から環境影響評価を十分に行う必要，等の理由による。特に 4) に関して詳しく述べると，南極域では「環境保護に関する南極条約議定書」が平成 3 年に採択され，国内では平成 9 年に「南極地域の環境保護に関する法律」が締結された。そのため南極地域における諸活動実施に当たり，平成 11 年度から必要な行為については事前に環境影響評価を十分に行い，環境庁での内容確認と実施報告が義務付けられた。JARE-41 実施のために，詳細な初期環境影響評価書（Initial Environmental Evaluation: IEE）を作成し，環境庁下の専門委員会で IEE としての評価を受け実験許可を得た。この環境への対応は，今後の極域における科学調査研究推進にあたっては特に重要である。

8. おわりに

これまで東南極盾状地を中心に，先カンブリア期以降の地殻構造と進化過程について考察してきたが，それ以外の大陸に目を向けることも重要である。エンダービーランドや西オーストラリアをはじめとする現在南半球に存在する大陸は，かつて超大陸ゴンドワナを形成していた。また LITHOPROBE によるローレンシア盾状地の

結果等と対比し，南北両半球に存在した超大陸の形成分裂史の解明が期待される。大陸形成と地球のダイナミクスを議論する上で，各大陸に分布するクラトン及びその縁辺部の構造を比較研究することは今後ますます重要な意義がある。

謝 辞

SEAL 計画は国立極地研究所の地学グループを中心に立案され，南極観測の外部評価組織である専門委員会で内容が審議された後に実施されている。また，その科学的研究目的を遂行するためのワーキンググループを平成 5 年度から継続して開催し，地震学・地質学に関係する研究者を交えオペレーション実施上の問題解決と詳細な計画作成等の準備を行ってきた。また南極の現場では，人工地震担当隊員のみならず多数の設営系の観測隊員，また海上自衛隊「しらせ」乗員の多大なご協力を得て，JARE での人工地震探査が実施されている。こうしたこれまで直接・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ます。また，本原稿の作成に当り大変貴重なご助言を頂いた，千葉大学の伊藤谷生教授ならびにもう一名のレフリーの方にお礼を申し上げます。

参考文献

- Akamatsu, J., 1991, Coda attenuation in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **67**, 65–75.
- Bogdanova, S. and EUROBRIDGE Seismic Working Group, 2000, The multidisciplinary EUROBRIDGE: A seismic record of 2000 million years of crustal history, *The 9th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins*, Ulvic, Norway, 49.
- Christensen, N.I. and Mooney, W.D., 1995, Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view, *J. Geophys. Res.*, **100**, 9761–9788.
- Clowes, R.M., F.A. Cook, Z. Hajnal, J. Hall, J. Lewry, S. Lucas and R. Wardle, 1999, Canada's LITHOPROBE Project (Collaborative multidisciplinary geoscience research leads to new understanding of continental evolution), *Episodes*, **22**, 3–20.
- Cook, F.A., A.J. Velden and K.W. Hall, 1999, Frozen subduction in Canada's Northwest Territories: Lithoprobe deep lithospheric reflection profiling of the western Canadian Shield, *Tectonics*, **18**, 1–24.
- Durrheim, R. and Mooney, W.D., 1991, Archean and Proterozoic crustal evolution: evidence from crustal seismology, *Geology*, **19**, 606–609.
- Eaton, D.W., G.M. Ross and R.M. Clowes, 1999, Seismic-reflection and potential-field studies of the Vulcan structure, western Canada: A Paleoproterozoic Pyrenees?, *J. Geophys. Res.*, **104**, 23255–23269.
- Fountain, D.M., Arculus, R. and Kay, R.W., 1992, Continental lower crust, *Elsevier Science Publishers*, Amsterdam,

- Netherlands, 485.
- Goleby, B.R., T. MacCready, B.J. Drummond and A. Goncharov, 1998, The Mount Isa Geodynamic Transect-Crustal Implications, *Structure and Evolution of the Australian Continent, Geodynamics*, **26**, 109-117.
- Golynsky, A.V., V.N. Masolov, Y. Nogi, K. Shibuya, C. Tarlowsky and P. Wellman, 1996, Magnetic anomalies of Precambrian terranes of the East Antarctic shield coastal region (20E-50E), *Polar Geosci.*, **9**, 24-39.
- 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 metamorphism, *High Temperature Metamorphism and Crustal Anatexis*, London, Unwin-Hyman, 320-370.
- 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*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 83-87.
- 伊神 輝・一ノ瀬洋一郎・原田道昭・神沼克伊, 1980, 南極における人工地震観測の概要, 南極資料, **70**, 158-182.
- 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.
- 伊藤 潔・伊神 輝・渋谷和雄・神沼克伊・片岡信一, 1983, 南極における人工地震観測の概要(続), 南極資料, **79**, 107-133.
- Ito, K. and A. Ikami, 1984, Upper crustal structure of the Prince Olav Coast, East Antarctica, *Mem. Nat. 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.
- Jarvis, E.P. and E.C. King, 1993, The Seismic wavefield recorded on an Antarctic Ice Shelf, *Journal of Seismic Exploration*, **2**, 69-86.
- Jarvis, E.P. and E.C. King, 1995, Seismic investigation of the Larsen Ice Shelf, Antarctica: in search of the Larsen Basin, *Antarctic Science*, **7**, 181-190.
- Jokat, W., N. Fechner and M. Studinger, 1997, Geodynamic Models of the Weddell Sea Embayment in View of New Geophysical Data, *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, 453-459.
- 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., K. Kamiyama and K. Ito, 1994, Crustal density structure of the Mizuho Plateau, East Antarctica from gravity survey in 1992, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 23-36.
- 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.
- 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.
- King, E.C., E.P. Jarvis and E.A. Mowse, 1993, Seismic characteristics of an airgun fired over snow, *Cold Regions Science and Technology*, **21**, 201-207.
- King, E.C. and A.C. Bell, 1996a, New seismic data from the Ronne Ice Shelf, Antarctica, *Geological Society special Publication*, **108**, 213-226.
- King, E.C. and A.C. Bell, 1996b, A towed geophone system for use in snow-covered terrain, *Geophys. J. Int.*, **126**, 54-62.
- King, E.C. and A.C. Bell, 1997, Seismic Reflection Investigation of George VI Sound, Antarctic Peninsula, *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, 697-703.
- 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.
- 宮町宏樹・村上寛史・筒井智樹・戸田 茂・民田利明・柳沢盛雄・下田泰義・今柴直也・野本新太郎・山下秀則・松永重年・SEAL人工地震グループ, 2000, 東南極みずほ高原における屈折法地震探査実験, 第20回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 19.
- 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, Geological Society Special Publication*, **43**, 325-329.
- 村上寛史・下田泰義・宮町宏樹・民田利明・金尾政紀・柳沢盛雄・神沼克伊・高橋昭好, 2000, 人工地震探査用ボーリング装置の開発とJARE-41実施結果, 第20回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 29.
- 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.
- Osanai, Y., T. Toyoshima, M. Owada, T. Tsunogae, T. Hokada and W.A. Crowe, 1999, Geology of ultrahigh-temperature metamorphic rocks from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica, *Polar Geosci.*, **12**, 1-28.
- Rudnick, R.L. and D.M. Fountain, 1995, Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective, *Rev. Geophys.*, **33**, 267-309.
- SCAR Meeting XXIV, 1996, *Solid Earth Geophysics Working Group Report*, Cambridge.
- SCAR Meeting XXV, 1998, *Solid Earth Geophysics Working Group Report*, Conception.
- 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.
- 渋谷和雄・神沼克伊・早川雅彦・藤村彰夫・塚本茂樹・水谷仁・山田功夫・小山順二・笠原 稔・伊藤 潔・金沢敏彦, 1992, 南極人工地震観測用ペネトレーターの開発(2) 1990年度経過報告, 南極資料, **36**, 310-340.
- 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; Implications for Gondwana assembly, *J. Geology*, **102**, 47-65.
- Smith, A.M. and E.C. King, 1989, An Investigation into the Forces Required to tow cables and sledges over antarctic snow, *Cold Regions Science and Technology*, **17**, 77-82.
- Sroda, P., M. Grad and A. Guterch, 1997, Seismic Models of the Earth's Crustal Structure between the South Pacific and the Antarctic Peninsula, *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, Siena, 685-689.
- 田中俊行・金尾政紀, 1996, 構造探査用地震波形収録装置の南極における動作特性, 南極資料, **40**, 333-346.
- Thybo, H., T. Pharaoh and A. Guterch, 1999, Geophysical Investigations of the Trans-European Suture Zone, *Tectonophysics (Special Issue)*, **314**, 1-350.
- 筒井智樹・SEAL人工地震グループ, 2000, 東南極・リュツォ・ホルム岩体の地殻構造探査—SEAL計画: 第41次南極観測隊初期結果—, 地球惑星科学関連学会 2000年合同大会予稿集 Se-002.
- Vedova, B.D., G. Pellis, H. Trey, J. Zhang, A.K. Cooper, J. Makris and the ACRUP Working Group, 1997, Crustal Structure of the Transantarctic mountains, Western Ross Sea, *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, 609-618.
- Velden, A.J. and F.A. Cook, 2000, Archean arc-continent collision in the Slave Province, northern Canada: A reinterpretation of LITHOPROBE SNORCLE LINE 1, *The 9th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins*, Ulvic, Norway, 33.
- 横倉隆伸・宮崎光旗, 1989, 反射法地震探査による深部地殻探査, 地質ニュース, **398**, 29-47.
- Yukutake, H. and K. Ito, 1984, Velocities of P and S waves for drilling core rocks at Syowa Station, Antarctica, *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, **33**, 17-27.

(Received September 26, 2000)

(Accepted March 12, 2001)