

—レビュー—

Review

東南極ナピア及びレイナー岩体における日本南極地域観測隊 地質グループの活動: 成果の総括と今後の課題

石塚英男*

Activities of the JARE geology group for the Napier and Rayner Complexes, East Antarctica: an overview and perspective

Hideo Ishizuka*

(2003年7月14日受付; 2003年8月25日受理)

Abstract: Scientific activities and results of the JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) geology group for the Napier and Rayner Complexes in Enderby Land, East Antarctica, are reviewed in relation to 1) publications of two detailed geologic maps as a result of field work, 2) characterization of protoliths, and determinations of their formation ages, 3) precise analyses of metamorphic conditions, and age determinations of ultra-high temperature (UHT) metamorphism, and 4) classification of mafic dike swarms, and specification of their activities. On the basis of these activities and results, recommendations are made for research localities to make clear 1) the tectonics of the Napier and Rayner Complexes, 2) formation processes of Archaean continental crusts, 3) roles of UHT metamorphism of Archaean to Proterozoic ages, 4) dynamics of enriched-mantle type of source materials, and implications for related super-plume tectonics, and 5) growth histories of continental crusts, and processes of their amalgamation and separation.

要旨: 東南極エンダビーランドに分布するナピア及びレイナー岩体を対象とした, 日本南極地域観測隊地質グループによるこれまでの調査研究の成果として, 1) 野外調査による詳細な地質図の公表, 2) ナピア岩体の原岩構成と形成年代の特定, 3) 超高温変成作用の変成条件と年代の精密解析, 及び 4) 苦鉄質岩脈群の区分と活動時期の特定, の 4 項目について紹介した. これらの成果を踏まえた今後の同岩体の調査研究課題として, 1) ナピア及びレイナー岩体のテクトニクスの解明: 新しい視点による広域調査の重要性, 2) 太古代大陸地殻の形成過程の解明, 3) 太古代後期~原生代初期の超高温変成作用のテクトニクスの解明, 4) EM 型の起源物質のダイナミクスとスーパーブルームのテクトニクスの解明, 及び 5) 大陸地殻の成長と離合集散プロセスの解明: 船上地磁気・重力観測, の 5 項目について具体的な調査地域をリストアップして提言した.

1. はじめに

東南極エンダビーランドに分布するナピア及びレイナー岩体 (図 1) の地質について, 旧ソ

* 高知大学理学部地質学教室. Department of Geology, Kochi University, Kochi 780-8520.

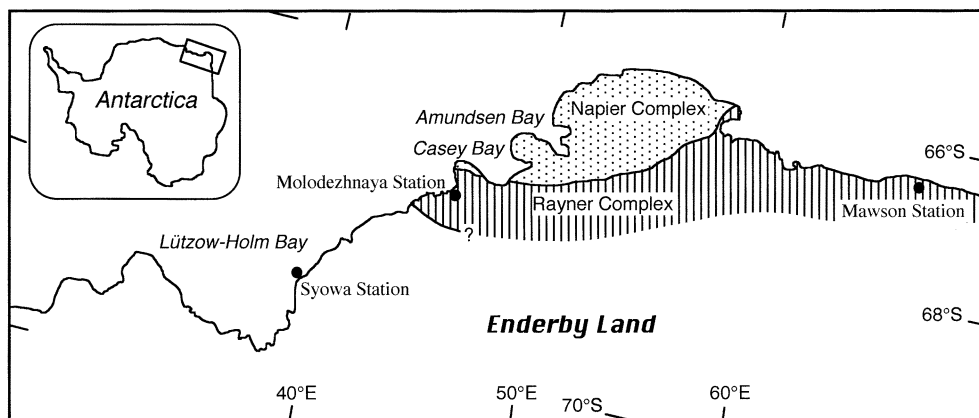


図 1 東南極エンダビーランド・ナピア及びレイナー岩体の位置図

Fig. 1. Locality map of the Napier and Rayner Complexes, Enderby Land, East Antarctica.

連邦の研究者によるパイオニア的調査研究 (Kamenev, 1975; Ravich and Kamenev, 1975; Sobotovich *et al.*, 1976) に引き続く, 最初の本格的な調査研究は米国隊とオーストラリア隊により 1970–80 年代に行われ, その成果は Grew and Manton (1979), Sheraton *et al.* (1980, 1987), Grew (1982), 及び Harley and Hensen (1990) により以下のようにまとめられた:

- 1) ナピア岩体は世界でも極めて稀な高い温度の変成作用 (1000°C 以上と推定され, 今日では超高温変成作用と呼ばれている) を約 31–29 億年前に受けている.
- 2) ナピア岩体の超高温変成作用を受けた変成岩の原岩には一部で約 40 億年前に形成された火成岩が存在し, 地球上で最も古い大陸地殻に属する.
- 3) レイナー岩体は角閃岩相からグラニュライト相の変成作用を受けているが, その温度 ($700\text{--}800^{\circ}\text{C}$) はナピア岩体より明らかに低く, また原岩の形成時期は 20–15 億年前で, 一部にナピア岩体から供給されたより古い原岩を含む.

これら米国隊とオーストラリア隊の成果は, 地球初期における大陸地殻の形成過程や変成作用により大陸地殻が安定化するプロセスの解明には, ナピア及びレイナー岩体が極めて重要な研究対象であることを世界に周知させることとなった.

一方, 日本南極地域観測隊 (以下, 日本隊と呼ぶ) 地質グループは, 1990 年前後よりナピア及びレイナー岩体の約 600 km 西南西に位置するリュツォ・ホルム湾沿岸域から同岩体にかけての広域的地質特性の解明を目指した調査研究に着手していた. そして, この広域的地質特性の解明と米国とオーストラリア隊以降の更なる研究の展開を目指したナピア岩体の調査研究が, 1996 年から始まった南極地域観測第 V 期 5 か年計画「東南極リソスフェアの構造と進化研究計画 (Structure and Evolution of East Antarctic Lithosphere: SEAL 計画)」の一環として, 第 38, 39, 40 次隊 (1996–1999 年) の延べ 15 名の地質隊員によって実施された.

本報の目的は、これら日本隊地質グループの調査研究によってもたらされた成果を総括し、そのことから導き出される今後の研究課題を提言することにある。

2. ナピア及びレイナー岩体の調査研究における科学目標

2.1. 初期地球地殻の形成過程の解明

地球の表層部を構成する固体物質である地殻について、地球科学は以下の点を明らかにしてきた。すなわち、1) 地球地殻は大陸地殻と海洋地殻から構成されており、その現在の面積比率はほぼ 2:3 であること、2) 大陸地殻は厚さ 30-60 km 程で、上層の花崗岩質岩と下層の玄武岩質岩で主に構成され、その形成年代は約 40 億年前まで遡れること、3) 海洋地殻は厚さ 10 km 前後で、全体が玄武岩質岩で構成され、その年代は古い海洋地殻のほとんどがプレート運動により消滅してしまうことから約 2 億年前までしか遡れないこと、などである。しかし、冥王代 (46-40 億年前)、太古代 (40-25 億年前)、原生代 (25-5.7 億年前)、及び顕生代 (5.7 億年前-現在) と区分される地球史 46 億年の中で、地質記録が残っていない冥王代を別として、初期太古代における地球地殻の形成過程と、その後の変遷過程についてはまだ十分には解明されていない。初期地球地殻の形成過程の解明は、以後の地球活動史を考える上での出発点とも言えるものである。特に、地球に見られる珪長質な (花崗岩質な) 大陸地殻に相当するものは、太陽系惑星の始原物質である隕石母天体の地殻に相当する石質隕石からも、あるいは地球以外の太陽系惑星からも、今のところ発見されていない。すなわち、大陸地殻は地球という惑星が 46 億年間に渡って独自に活動してきたその結果として形成されたものであり、その研究は惑星地球の謎を解く糸口であるとも言える。

2.2. 地球活動史の性格とその成因の解明

地球は 46 億年前に誕生して以来、常に冷え続けてきたという認識から、地球史とは地球冷却史であり、地球活動史は地球の熱放出過程によって引き起こされた地学現象 (例えば、マントルから上方への高温物質移動に起因する火成活動やそれに関連した地殻の形成・移動・分裂活動など) の歴史としてとらえることができる。最近の地球活動史の研究結果は、地球は誕生以来の 46 億年間、決して平穏であったのではなく、様々な変動を経てきたことを明らかにした。更に、それらの変動は定常的に起きたのではなく、ある種の周期性、あるいはパルスを持ったものであることが明らかになった。例えば、約 25 億年前、20-18 億年前、14-12 億年前、及び 5.5 億年前に大陸の移動という大変動があり、約 18 億年前にヌーナ大陸、約 10 億年前にロディニア大陸、及び約 5 億年前に Gondwana 大陸という超大陸 (地球上の大陸が一カ所に集合して形成された単一の巨大な大陸) が形成されたことなどである。これらの大変動は地球環境にも大きな変化を引き起こし、生物の大量絶滅や新生物種の発生などの要因となったと考えられている。しかし、これらの大変動の具体的な進行プロセスとその原因に

については依然として不明な部分が多い。このことを解明するには地球活動史を記録している地質や岩石を研究し、その謎を丁寧にひも解くことが不可欠である。

2.3. ナピア及びレイナー岩体の重要性

東南極エンダビーランド及びケンプランドにかけて東西約 450 km×南北約 200 km の面積で分布するナピア岩体は、一部で最高変成温度部が 1100°C を越える超高温変成作用を受けた岩体であり、その原岩構成は多様性に富んでいる。各種の放射年代測定によると、同岩体の原岩形成年代、すなわち大陸地殻の形成年代は 39–30 億年前であり、その後の変成作用は 29–22 億年前で、以後は 20 億年前と 12 億年前に苦鉄質岩脈群形成の活動があったことが明らかになっている。また、ナピア岩体の南方に、正確な分布域は不明だが、少なくとも東西約 450 km×南北約 150 km 以上の面積で分布するレイナー岩体も、同様に多様な岩石種から構成されており、ナピア岩体より若い 20 億年前以降の活動履歴を持つ大陸地殻である。このように、これらの岩体は初期地球の大陸地殻形成と、その後の 40 億年にわたる地球活動史の地質記録を留めている極めて希有な岩体としてとらえることができる。また、両岩体は植生に乏しいという南極の自然環境ゆえに、岩石の露出条件が極めて良いという地質研究上の優位性を持っている。すなわち、上述した初期地球地殻の形成過程及びその後の地球活動史の解明は、その年代、規模、岩相の多様性、及び岩石の露出条件などから、ナピア及びレイナー岩体の調査研究によってのみ成し遂げられると言っても過言ではない。

3. 今までの成果

ナピア及びレイナー岩体に於ける日本隊の活動は、1982 年 2 月の第 23 次夏隊での偵察的調査から第 42 次夏隊の調査まで 12 回に及んでいる。この間に、野外調査が実施された隊次と地域、及び「しらせ」搭載のヘリコプターによる偵察飛行で着陸可能と判断された地域を表 1 と図 2 にまとめて示す。

3.1. 野外調査による詳細な地質図の公表

最初に述べたように、ナピア及びレイナー岩体の地質調査は旧ソ連邦、米国隊、及びオーストラリア隊によって過去に行われた。しかし、これらの調査は航空機を駆使した短期滞在型の広域地質調査であり、両岩体の全体像を描くことには成功したが、各岩相の相互関係や地質構造などは依然不明の状況であった。これらの状況の解決を目指した日本隊のナピア及びレイナー岩体の地質調査は、予察的調査 (Makimoto *et al.*, 1989; Ishikawa *et al.*, 1994) を経て、長期滞在型の精密地質調査として、第 38 次隊のリーセル・ラルセン山地域 (石塚ら, 1997a, b) と第 39–40 次隊のトナー島地域 (森脇, 1998; 本吉ら, 1999) で実施された。その結果、精密な地質図が完成し (Ishizuka *et al.*, 1998; Osanai *et al.*, 1999)、国立極地研究所発行

表1 ナピア及びレイナー岩体において、日本隊により野外調査が実施された隊次と地域、及び「しらせ」搭載ヘリコプターによる偵察で着陸可能と判断された地域

Table 1. List of the localities where JARE parties have surveyed, and localities where Shirase helicopter reconnaissance flights have landed in the Napier and Rayner Complexes.

隊次	年月	行動地域
第23次隊	1982.2	Mt. Riiser-Larsen
第29次隊	1988.2	Mt. Riiser-Larsen
第31次隊	1990.2	Mt. Riiser-Larsen, Edward Is., Mt. Oldfield, Tonagh Is., Mt. Pardoe, Hydrographer Is., McIntyer Is.
第34次隊	1993.2	Hydrographer Is., McIntyer Is., Mt. Riiser-Larsen, Forefinger Point, Raggatt Mts. <u>Dick Peaks, Mt. Humble, Mt. Maslen, Mt. Bergin</u>
第35次隊	1994.2	Mt. Riiser-Larsen
第36次隊	1995.2	Mt. Riiser-Larsen
第37次隊	1996.2	Mt. Riiser-Larsen
第38次隊	1996.12–1997.2	Mt. Riiser-Larsen, Tonagh Is.
第39次隊	1998.1–1998.2	Tonagh Is., Bunt Is., Priestley Peak, Beaver Is., Bowl Is., Mt. Trail, Mt. Tod
第40次隊	1998.12–1999.1	Mt. Riiser-Larsen, Tonagh Is., Mt. Pardoe, Howard Hills, Edward Is., Christmas Point
第41次隊	2000.2	Tonagh Is.
第42次隊	2000.12–2001.2	Mt. Riiser-Larsen, Tonagh Is.

下線は「しらせ」搭載ヘリコプターによる偵察により着陸可能と判断された地域

の2編の地質図幅(英文説明書付き)が公表された(Ishikawa *et al.*, 2000; Osanai *et al.*, 2001a). また、詳細な野外調査に基づいた地質構造の解析も行われ、調査地域内の構造区分が明らかになった。特に、トナー島においては、地質構造発達史が提唱された(Toyoshima *et al.*, 1999). これら精密地質図の完成及び地質構造の解析により、ナピア岩体を構成する岩相の特徴やその形成過程、更には超高温変成作用の解明という課題に真正面から取り組める条件が整ったことになり、以後の研究の方向づけがなされたと言える。

3.2. ナピア岩体の原岩構成と形成年代の特定

ナピア岩体を構成する超高温変成岩類は、上述したアムンゼン湾のリーセル・ラルセン山とトナー島の両地域の詳細な地質調査によって、層状構造が顕著に発達する層状片麻岩系と層状構造の発達が弱い塊状片麻岩系で構成されることが明らかになった。層状片麻岩系は砂質～泥質の堆積岩、石英や磁鉄鉱に著しく富む縞状鉄鉱層に類似する堆積岩、塩基性岩、及び石英長石質岩などを原岩とする多種の片麻岩の様々な厚さの層により構成されている。一方、塊状片麻岩系は主として石英長石質岩を原岩とする片麻岩から成る。また、両岩系の境界部には特徴的に超塩基性岩や斜長岩を原岩とする変成岩類がレンズ状あるいは薄いシート状に分布する。これらの岩石類の化学組成の分析から、1) 堆積岩類は太古代でしばしば報告されているマグネシウム、クロム、ニッケルなどに富むタイプであること、2) 石英長石質岩は太古代を特徴づけるトータル岩系に類似していること、3) 塩基性岩類は軽希土類元素に富

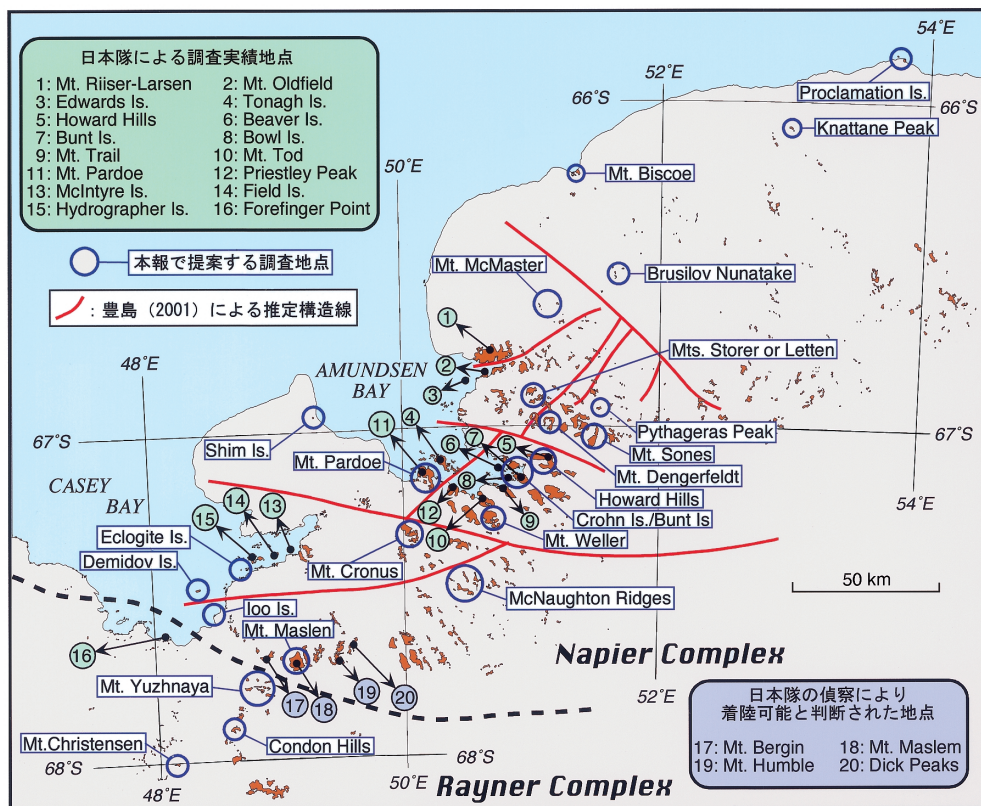


図2 ナビア及びレイナー岩体北西部地域の位置図。日本隊による野外調査の実績のある地域、「しらせ」搭載ヘリコプターによる偵察で着陸可能と判断された地域、本報で提案する調査地域、及び同岩体の構造区分線（豊島ら，2001）も示してある。

Fig. 2. Locality map of the north-western part of the Napier and Rayner Complexes. Green circles: the localities where JARE parties have already visited, Blue circles: localities where Shirase helicopters have landed, Open circles: localities to be surveyed in the future, Red lines: structural boundaries proposed by Toyoshima et al. (2001).

むものと乏しいもののが識別され、両者は別々の起源物質から形成されたものであること、4) 超塩基性岩は太古代の緑色岩帯にしばしば産出するコマチアイトとそれに関連した枯渇マントルに相当すること、などが明らかになった (Suzuki et al., 1999; Owada et al., 1999, 2000). このような原岩構成は、今日の海洋性島弧との類似性を示唆しており、初期地球の大陸地殻形成場について重要な束縛条件を与えることになった。その他、剪断帯にしばしば見出されるシュードタキライトについて、その産状や岩石記載と、それらに基づく形成過程の考察が行われた (Motoyoshi, 1996; Ishizuka et al., 1998; 豊島ら，2001)。

変成岩の原岩の形成年代は、Sm-Nd 系全岩と SHRIMP による U-Pb 系鉱物の同位体年代測定と CHIME 法による U-Th-Pb 系鉱物の化学年代測定により検討された (表2)。その結

表 2 日本隊地質グループによるナピア岩体の原岩年代と解釈されている放射年代値
 Table 2. List of radiometric ages interpreted as igneous ages of the Napier Complex, measured by the JARE geology group.

文献	試料採取地	測定法	岩相	年代(億年)
Owada <i>et al.</i> (1994)	トナー島	Sm-Nd 系全岩	苦鉄質片麻岩	37.1
			珪長質片麻岩	24.6
Shiraishi <i>et al.</i> (1997)	トナー島	U-Pb 系鉱物 (ジルコン中心部)	珪長質片麻岩	32.8-32.3
Asami <i>et al.</i> (1998)	クローナス山	U-Th-Pb 系鉱物 (ジルコン中心部)	珪長質片麻岩	36.5
Suzuki(2000MS)	リーセル・ラルセン山 地域	Sm-Nd 系全岩	苦鉄質片麻岩	29.2
			珪長質片麻岩	30.2
			超苦鉄質岩	26.3
Carson <i>et al.</i> (2002)	トナー島	U-Pb 系鉱物 (ジルコン中心部)	珪長質片麻岩	26.3
Crowe <i>et al.</i> (2002)	トナー島	U-Pb 系鉱物 (ジルコン中心~周縁部)	珪長質マイロナイト	26.8

果, 日本隊が検討した三つの地域だけでも, その原岩が太古代中期~最後期の長い期間に渡って形成されたことが明らかになり, ナピア岩体の形成史解明に新たな議論を提供することとなった。一方, 原岩の中で一次地殻(マントルの部分溶融物質で構成される地殻)として形成されたと考えられる岩石は, 同位体組成の特徴から EM (enriched mantle) 型の起源物質に起因することが示唆され (Suzuki, 2000MS), 地球史におけるマントル物質の変遷の議論に新たな視点を導入した。

3.3. 超高温変成作用の変成条件と年代の精密解析

ナピア岩体は原岩形成後に超高温変成作用を受けており, サフィリンと石英の共生, スピネルと石英の共生, 斜方輝石と珪線石と石英の共生, 大隅石の出現, 及び転移したピジョン輝石の出現などからその最高変成温度は 1000°C 以上であることが報告されていた (Sheraton *et al.*, 1987)。また, ナピア岩体の変成温度は, 広域的にはアムンゼン湾の奥の露岩地域が最も高く, 変成圧力は南部ほど高くなることが提唱されていた (Harley and Hensen, 1990)。このように, 主としてオーストラリア隊により報告され, 提唱された超高温変成作用の変成条件は, 予察的に実施された日本隊の調査でも確認されていた (Motoyoshi and Matsueda, 1984, 1987; Motoyoshi and Hensen, 1989; Motoyoshi *et al.*, 1990)。これら超高温変成作用の地質学的意義は, 日本隊による本格的な調査に先だって本吉 (1998) により総説としてまとめられた。一方, Sheraton *et al.* (1987) によるレイナー岩体の変成作用の研究結果についても, 予察的な調査ではあったが, Motoyoshi *et al.* (1994, 1995) によって追試が行われ, より詳細な温度-圧力変化経路が提唱された。

これらオーストラリア隊や日本隊の予察調査で得られた成果を更に明確にするために, 日

本隊は、まず、リーセル・ラルセン山地域 (Ishizuka *et al.*, 1998; Hokada, 1999MS; Ishikawa *et al.*, 2000), トナー島 (Hokada *et al.*, 1999; Osanai *et al.*, 1999, 2001a; Owada *et al.*, 1999; Toyoshima *et al.*, 1999; Tsunogae *et al.*, 1999), ハワードヒルズ地域 (Yoshimura *et al.*, 2000), 及びクリスマスポイント地域 (Yoshimura *et al.*, 2001) の変成作用について、鉱物組合せや鉱物化学組成,あるいは地質構造の解析からその一般的な特徴を明らかにした。次に, 変成条件の精密温度推定の新たな指標として, 珪長質片麻岩とザクロ石+斜方輝石±サフィリン片麻岩の長石の化学組成 (Hokada, 1999MS, 2001), サフィリン+石英+斜方輝石片麻岩中の斜方輝石ポーフィロブラストのアルミニウム含有量 (Harley and Motoyoshi, 2000), 磁鉄鉱—石英岩の転移したビジョン輝石の組成と全岩化学組成 (石塚ら, 1999), 及び変成超塩基性岩の組織の異なる輝石の化学組成 (Ishizuka *et al.*, 2002) の検討を行い, 最高変成温度は 1150°C 近くまで達することを明らかにした。

変成条件の推定に関連して, 雲母鉱物のフッ素の測定と関連する室内実験を行い, 超高温部でのフッ素を含む雲母の安定特性を明らかにし, 通常の大陸地殻であれば熔融する温度でも, ナピア岩体では熔融が極めて小規模だったことの原因として, 揮発性成分の H_2O がフッ素 (一部, 二酸化炭素) に何らかの過程で置き換えられたためであるとの可能性を提唱した (Hensen and Osanai, 1994; Motoyoshi and Hensen, 2001)。同様に, 角閃石のフッ素及び塩素の測定も行い, 超高温変成作用の条件下ではハロゲン元素を含む角閃石も安定に存在できることを明らかにした (Tsunogae *et al.*, 2000)。更に, 様々な産状を示すサフィリンを詳細に記載し, それぞれの形成過程が原岩の化学組成の多様性で説明できることを示した (Osanai *et al.*, 2001b)。また, 流体包有物の詳細な検討から超高温変成作用における流体相の挙動を明らかにした (Tsunogae *et al.*, 2001, 2002)。その他, 全岩分析やスリナム石を含む構成鉱物の分析から, 変成岩中のベリリウムの起源と変成作用の各ステージにおけるその挙動を明らかにした (Grew *et al.*, 2000)。

日本隊は, サフィリン+石英±斜方輝石のシンプレクタイト (Motoyoshi and Hensen, 1989), サフィリンと石英の共生 (Osanai *et al.*, 2001b), 及び流体包有物 (Tsunogae *et al.*, 2001, 2002) などの詳細な検討から, 変成条件の温度—圧力変化経路 (「等圧降温」あるいは「等温降圧」, 及び「時計回り」あるいは「反時計回り」) の検証も試みた。また, サフィリンと石英の降温期の分解生成物の検討から, 超高温変成作用の降温期の圧力条件がリーセル・ラルセン山地域西部に位置する大きな構造線を境として西部—東部地域で異なる (Hokada, 1999MS) ことを見いだした。これらのことは, Harley and Hensen (1990) により提唱された変成条件の広域的な分布様式や温度—圧力変化経路の見直しを迫るものである。

鉱物組合せと鉱物組成により推定された変成条件に対して, 日本隊が採取した試料を出発物質とした実験岩石学 (Kawasaki and Motoyoshi, 2000), あるいは代表的な 3–4 成分の化学組成系についての実験岩石学 (Motoyoshi *et al.*, 1993; Sakai and Kawasaki, 1997; Sato and

Kawasaki, 2002) も行われ、より定量的な変成条件、特に降温期の温度－圧力経路の推定がなされた。また、リーセル・ラルセン山地域の珪長質片麻岩から分離された斜長石（アンチパーサイト）、石英、及び少量の斜方輝石の混合物を出発物質とした熔融実験も行われ、超高温変成作用の条件下での花崗岩（特に、A-タイプ花崗岩）マグマの形成の可能性が指摘された（Hokada and Arima, 2001）。

変成岩の変成年代は、多くの地域で採取された試料について、Sm-Nd 系全岩及び全岩－鉱物、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 系全岩、及び SHRIMP による U-Pb 系鉱物の同位体年代測定と CHIME 法による U-Th-Pb 系鉱物の化学年代測定により検討された（表 3）。その結果、非常に広い幅に渡る

表 3 日本隊地質グループによるナビア岩体の変成年代と解釈されている放射年代値
Table 3. List of radiometric ages interpreted as metamorphic ages of the Napier Complex, measured by the JARE geology group.

文献	試料採取地	測定法	岩相	年代(億年)
Tainosho <i>et al.</i> (1994, 1997)	バドー山	Sm-Nd 系全岩	珪長質片麻岩	25.6
			苦鉄質片麻岩	26.0
Shiraishi <i>et al.</i> (1997)	トナー島	U-Pb 系鉱物 (ジルコン周縁部)	珪長質片麻岩	26.6
			同上	25.5–24.4
Takigami <i>et al.</i> (1998)	リーセル・ラルセン山地域	^{40}Ar - ^{39}Ar 系全岩	珪長質片麻岩	約 20
Asami <i>et al.</i> (1998)	リーセル・ラルセン山地域	U-Th-Pb 系鉱物 (ジルコン)	珪長質片麻岩	24.1
		U-Th-Pb 系鉱物 (モナザイト)	同上	24.4
Hokada (1999MS)	リーセル・ラルセン山地域	U-Th-Pb 系鉱物 (ジルコン)	珪長質片麻岩	約 26–23
		U-Th-Pb 系鉱物 (モナザイト)	同上	約 26–21
		U-Th-Pb 系鉱物 (ジルコン)	珪質岩	約 26–24
		U-Th-Pb 系鉱物 (モナザイト)	同上	約 25–24
Suzuki (2000MS)	リーセル・ラルセン山地域	Sm-Nd 系全岩－鉱物	珪長質片麻岩	23.8
			苦鉄質片麻岩	23.8, 23.0
			ザクロ石片麻岩	23.6
		U-Pb 系鉱物 (ジルコン)	珪長質片麻岩	28.3–28.0, 26.4–24.4
		U-Pb 系鉱物 (モナザイト)	同上	24.6–23.9
		U-Th-Pb 系鉱物 (ジルコン)	珪長質片麻岩	約 29–28, 約 26–23
Owada <i>et al.</i> (2001, 2003)	トナー島	Sm-Nd 系全岩－鉱物	アルミナス片麻岩	18.7
			珪長質片麻岩	19.0
			ザクロ石片麻岩	15.6
Suzuki <i>et al.</i> (2001)	リーセル・ラルセン山地域	Sm-Nd 系全岩－鉱物	珪質片麻岩	22.0
Grew <i>et al.</i> (2002)	クリスマスポイント地域	U-Th-Pb 系鉱物 (ゼノタイム)	ペグマタイト	21.7
Carson <i>et al.</i> (2002)	トナー島	U-Pb 系鉱物 (ジルコン周縁部)	珪長質片麻岩	24.7–24.5
Crowe <i>et al.</i> (2002)	トナー島	U-Pb 系鉱物 (ジルコン周縁部)	珪長質マイロナイト	25.5–24.7

年代値が得られることとなったが、多くの文献は 25–24 億年の年代を超高温変成作用の年代として解釈した。しかし、Suzuki *et al.* (2001) は超高温変成作用の指標となる石英と共存するサフィリンを使った Sm-Nd 系全岩—鉱物年代測定で得た 22.0 億年を超高温変成作用の年代と解釈した。このことは、前述したリーセル・ラルセン山地域の西部—東部地域での降温期の圧力経路の違いに関連しており、変成条件に加えて変成年代も構造線を境にして異なることを示唆したものである。これらの年代値は、オーストラリア隊の Harley and Black (1997) による SHRIMP によるジルコンの年代測定に基づく約 28 億年というナピア岩体の超高温変成作用の年代とは明らかに異なっている。表 3 中のその他の若い年代は、その後の局所的な貫入岩やペグマタイトの活動による熱の影響や剪断などの構造運動による年代のリセットであると解釈された。特に、約 19 億年の年代値を報告した Owada *et al.* (2003) は、ナピア、レイナー、及びインドのイースタンガーツ岩体がこの時代にはすでに東 Gondwana 超大陸の一部として存在し、それらの年代はコロンビア超大陸の形成 (約 14–20 億年前: Rogers and Santosh, 2002) に関連した構造運動でリセットされたと解釈した。

3.4. 苦鉄質岩脈群の区分と活動時期の特定

ナピア及びレイナー岩体には、超高温変成作用終了後に活動した苦鉄質岩脈類が多数分布する。これらは、従来、アムンゼン貫入岩類として一括して記載され、その活動時期は 19–18 億年前、14–12 億年前、及び約 10 億年前の多時相に渡っていた。日本隊によるナピア岩体リーセル・ラルセン山地域の野外調査と岩石学的な研究により、これらの岩脈類は少なくとも 4 つのグループに区分され、そのうちの 2 つのグループ (非アルカリ岩系とアルカリ岩系) について新たに Sm-Nd 系全岩及び Rb-Sr 系全岩の放射年代測定が行われ、約 20 億年前 (非アルカリ岩系、貫入方向: 北東—南西) と約 12 億年前 (アルカリ岩系、貫入方向: 南—北) に活動したことが明らかになった (石塚・鈴木, 1999, 2000; 鈴木ら, 2000)。同貫入岩については、 ^{40}Ar – ^{39}Ar 全岩の放射年代測定も実施され、約 8–11 億年 (Takigami *et al.*, 1998)、及び約 7–7.5 億年と約 10–11 億年 (Takigami *et al.*, 2002) の年代値が報告された。これらの岩脈類はその規模から岩脈群 (dike swarms) と呼べるものであり、同位体組成の特徴から EM 起源であることが明らかになった (鈴木ら, 2000)。EM 起源の岩脈群の存在は、汎世界的な規模のマントル内での地殻物質の再循環活動の表われであり、現象としてはマントル上昇流 (スーパープルーム) の過去における活動を示すものとして、今日、注目されているものである (Condie, 2001)。今回の成果は、このような地球内部の活動の解析に重要な証拠がナピア岩体からも得られたことを意味する。その他、ナピア岩体には、より若い貫入岩 (ランプロアイト) やペグマタイトが分布しており、これらの記載岩石学及び活動時期の特定 (476, 466 Ma: Rb-Sr 全岩—鉱物年代) から、東西 Gondwana 大陸の合体過程の影響の存否が議論された (Miyamoto *et al.*, 2000)。

4. 今後の課題

上述した今までの成果を受けて、今後のナピア及びレイナー岩体の調査研究課題を以下に提言したい。

4.1. ナピア及びレイナー岩体のテクトニクスの解明: 新しい視点による広域調査の重要性

最初に述べたように太古代ナピア岩体と原生代レイナー岩体は、それぞれの地質時代の大
陸形成過程と地球活動史の性格を明らかにするための重要な研究対象である。この課題の解
決には、ナピア及びレイナー岩体の地質構造、岩相分布、及びそれらの相互関係の系統的な
把握が必要である。しかし、このことを推進するに際して基本となる両岩体の地質と構造、特
に大構造とその相互関係の理解は、オーストラリア隊の成果をまとめた *Sheraton et al.* (1987)
の初期の研究以降、ほとんど進展していない。日本隊による 2 地域（リーセル・ラルセン山
地域とトナー島地域）の詳細な地質図作成によって、局所的ではあるもののナピア岩体をあ
る意味で特徴づける地質や構造が明らかになり、原岩構成や変成作用、更には年代に関して
いくつかの重要な新知見を得ることに成功した。しかし、岩体総体としての地質学的イ
メージに結びつくところまでには至っていない。特に、日本隊によるレイナー岩体の調査研
究、更にはナピア及びレイナー岩体の境界部付近の調査研究は、ナピア岩体のそれに比べる
とはるかに遅れており、依然として不明なことが多い。

このような状況は、新たな視点と新たな調査方法を持つことによって初めて打破できると
考えられる。ここで言う新たな視点（例えば、豊島私信, 2001）とは、1) 第 38-40 次隊で得
られた詳細な地質学的情報をナピア及びレイナー岩体全体の中であらえ、その広域的テクト
ニクスの一般則を見出すことであり、2) 調査計画の立案や調査地の選定において、ナピア及
びレイナー岩体の大構造論を念頭に置くことである。また、新たな調査方法とは、1) 従来の
1 地域に数十日間かける長期滞在型の調査ではなく、ナピア及びレイナー岩体全域を対象と
した多地域について、1 地域を日帰らないし数日程度の調査で終了させる短期滞在型のヘリ
コプターを駆使した広域地質調査であり、2) ナピア及びレイナー岩体のテクトニクスに関連
する他の大陸地殻を調査研究した経験を豊富に持つ研究者を投入することである。そして、
調査の主眼を広域的テクトニクスの解明に置き、1) 火成作用と変成作用並びに地質構造形成
の時間的及び成因的關係、2) 構造的な不連続を生ずる構造地質学的及び大構造論の意味、を明
らかにすることを目指す。

このことに関連して、豊島 (2001) は、オーストラリア隊によって公表されたナピア及び
レイナー岩体の広域地質図 (*Sheraton et al.*, 1987) と日本隊によって公表されたリー
セル・ラルセン山地域とトナー島地域の精密地質図 (*Ishizuka et al.*, 1988; *Ishikawa et al.*,
2000; *Osanai et al.*, 1999, 2001a) の検討を行い、以下の構造的な特徴を見出した。

1) ナピア岩体は構造的に異なるいくつかのユニットに区分され得る。

- 2) ナピア岩体では、西部から東部へ向かって、一般走向が東—西系から北北東—南南西ないし北東—南西系へと変化する。
- 3) レイナー岩体では、西部・東部を通じて、一般走向が北東—南西系である。
- 4) 東—西あるいは北東—南西系の褶曲が発達し、一部に南—北系の褶曲が認められる。
- 5) 東—西ないし北東—南西走向の構造的連続（断層？）が発達する。
- 6) 東—西系および北東—南西系の褶曲によって乱されていない地域を見ると、ナピア岩体の大構造は東—西走向で、レイナー岩体の大構造は北東—南西走向である。
- 7) 構造的区分と変成作用のタイプとに関連性があるらしい。

これらの構造的特徴は、大まかな岩石の分布と走向・傾斜データのみから作成したものであるため、必ずしもナピア及びレイナー岩体の大構造・岩石分布を正確に表現したものとは云い難いが、調査地域の選定の参考にはなると考えられる。これらの作業と以下に述べる今後の研究課題の要請より選定した調査候補地を表 4 と図 2 に示す。

表 4 本報で提言するナピア～レイナー岩体における今後の研究項目と関連する調査候補地域(岩相)
Table 4. List of research objectives in the Napier and Rayner Complexes proposed for a future program, along with related research localities and major lithology.

ナ ピ ア 岩 体	
研究項目	調査候補地域（岩相）
超高温変成作用の低変成度部(堇青石安定領域)の解析	Proclamation Is. (orthogneiss), Mt. Biscoe (metagabbro, layered gneiss), Mt. McMaster (layered gneiss), Brusilov Nunatake (layered gneiss, orthogneiss)
従来と異なる温度—圧力経路（等温減圧）の検証	Crohn Is./Bunt Is. (layered gneiss)
ナピア岩体最古の年代値の再検討	Mt. Sones (layered gneiss)
Mt. Sones の最古年代値（約 39 億年）との比較検討	Pythagoras Peak (orthogneiss), Mt. Storer or Mt. Letten (orthogneiss)
溶融過程と関連するレスタイトの検討	Knattane Peak (granite), Howard Hills (layered gneiss)
ナピア岩体の層状片麻岩系と orthogneisses の比較検討	McNaughton Ridges (layered and orthogneisses)
エクログャイト組み合わせの検証	Eclogite Is. (layered gneiss, orthogneiss)
ナピア岩体中心部の性格付け	Mt. Cronus (layered gneiss, orthogneiss)
ナピア岩体北西部の性格付け	Shim Is. (layered gneiss)
Tonagh Is. と Mt. Riiser-Larsen の中間地域の性格付け	Mt. Dengerfeldt (layered gneiss)
Bunt Is. と Tonagh Is. の中間地域の性格付け	Mt. Weller (layered gneiss, orthogneiss)
多様な岩相が分布する地域の再調査	Mt. Pardoe (layered gneiss, orthogneiss)
レイナー岩体近傍のナピア岩体の性格付け	Mt. Maslen (orthogneiss), Demidov Is. (layered gneiss), Ioo Is. (layered gneiss)
レ イ ナ ー 岩 体	
研究項目	調査候補地域（岩相）
レイナー岩体の地質、構造、及び変成作用の性格付け	Condon Hills (layered gneiss), Mt. Yuzhnaya (layered gneiss), Mt. Christensen (layered gneiss)

4.2. 太古代大陸地殻の形成過程の解明

今日、大陸地殻の形成には、海洋性島弧（現在の伊豆、小笠原、マリアナなどの海洋地殻内に形成された火山弧）の役割りが重要であるということが多くの研究者によって提唱されている（有馬，1998）。このことの主たる理由は、大陸地殻の中～下部を構成する物質は多くの場合 **TTG**（トータル岩，トロニウム岩，花こう閃緑岩）と呼ばれる岩石類であり，これと類似する岩石類が海洋性島弧の中～下部地殻に存在することが弾性波構造の解析から推定されていることにある。また，陸上に露出する過去の海洋性島弧と考えられる地域（例えば，丹沢山地）の岩石類に **TTG** 相当のものが見いだされていることも一つの理由である。更には，初期地球地殻には海洋地殻だけがあり，大陸地殻はまだ存在しておらず，海洋地殻から海洋性島弧が形成され，集合して初期大陸地殻が形成されたとの推論もなされている。そして，これら一連の活動の現在進行形が前述した海洋性島弧の活動であろうと考えられている。

しかし，太古代の大陸地殻に分布する **TTG** は現在の海洋性島弧のもの（例えば，丹沢山地の **TTG**）とは化学組成が少し異なっている（Martin, 1994）。この違いはナビア岩体の研究でも見いだされており（Suzuki *et al.*, 1999），地球初期の大陸地殻の形成過程の解明にある種の束縛条件を与えている。すなわち，この違いは **TTG** マグマを生じる物理条件（例えば，深さ）や起源物質（例えば，マントル物質）の地球史を通じての変遷過程の反映としてとらえることができるが，その詳細は不明である。更に，日本隊により明らかにされたナビア岩体の **EM** 起源の岩石についても，その大陸地殻の形成過程での役割りについては不明の部分が多い。

一方，ナビア岩体には小規模であるが花こう岩，正確には **A-type** 花こう岩が分布している。**A-type** 花こう岩は一般に大陸成長の末期に地殻下部を構成する岩石の再溶融により形成されると考えられているが（Hokada and Arima, 2001），周囲との地質学的な関係が不明確で，その成因については不明な部分が多い。

これらの太古代大陸地殻の形成に関わる未解決の問題に対処するには，化学組成のみから論ずることにはおのずと限界があり，問題となる **TTG** や **A-type** 花こう岩と近接する他の岩相との野外における相互関係の解析と，形成年代の解明が決定的に重要である。前述した広域野外調査は正しくこの課題解決に沿ったものである。

4.3. 太古代後期～原生代初期の超高温変成作用のテクトニクスの解明

ナビア超高温変成作用のピーク期の変成条件の解析は，オーストラリア隊と日本隊の成果によって，その高変成度部については大いに進展した。しかし，変成作用の全体像，例えば岩体全域での温度—圧力構造は依然として未解明である。従って，変成作用の成因（例えば，熱源）や，そのことが果たしたテクトニクスの解明は全く進んでいないと言える。大陸地殻

が形成され、安定するためには、地殻物質が高温で再結晶する変成作用のプロセスが重要な役割を果たす、との認識が今日広く受け入れられていることから、これらの未解明な課題の克服は、太古代の大陸地殻が形成され安定化する過程を解明する上で極めて重要である。特に、今日の大陸地殻の下部で達成される温度条件は 800–900°C 程度と考えられているのに対して、「ナピア岩体の場合は 1100°C 前後まで高くなっているのにほとんど溶融が生じていない」という事実は、太古代の大陸地殻の温度構造や揮発性成分の挙動を議論する上で大きな束縛条件となる。この点でも、熱源やテクトニクスの解明は重要である。これらの未解明な課題に対しては、広域地質調査に基づく、高変成度から低変成度へかけてのピーク期及び降温期における鉱物組み合わせの変化、すなわち変成反応の解析が不可欠である。一方、太古代~原生代における地球活動史の解明には、レイナー岩体の変成作用の解析と、その変成作用がナピア岩体に与えた影響の解明が重要であり、このためにも広域地質調査は必要である。

超高温変成作用のテクトニクス解明には更なる放射年代測定も重要であろう。合わせて、今まで報告されている非常に広い幅を示す変成年代値の再考察も必要であろう。ジルコンに代表される鉱物年代は、機器の進展とともにその精度の向上には著しいものがある。しかし、これら鉱物が超高温変成作用で形成されたとの保証、例えばジルコン形成の変成化学反応は残念ながら今だ定義されていない。他の鉱物との関係を組織的に考察できる場合もあるが、鉱物分離をする場合はこのような考察は困難である。Fraser *et al.* (1997) や Degeling *et al.* (2001) が果敢に取り組んだ構成鉱物のジルコニウムの定量分析とジルコン形成化学反応の考察などは、鉱物年代測定に関連したこれからの重要な研究課題であろう。鉱物のジルコニウムの定量分析に今日では最も有効な手段であるレーザーアブレーション ICP-MS の導入が強く望まれる。

4.4. EM 型の起源物質のダイナミックスとスーパーブルームのテクトニクス解明

地球上の太古代~原生代の大陸地殻には、苦鉄質岩脈群 (mafic dike swarms) がしばしば分布しており、その活動時期は約 24 億年前、20–18 億年前、14–12 億年前、及び約 10 億年前であることが知られている (Condie, 2001)。これら岩脈群を構成する岩脈の多くは、幅数 m から数 10 m で、長さは 100 km 前後であるが、時として幅 150 m で長さ 1500 km (カナダ・マッケンジー岩脈群) に及ぶことがある。いずれにしてもその貫入体積から推定される火成活動の規模は壮大である。これら岩脈群は化学組成から、多くはソレライト質玄武岩であるが、アルカリ玄武岩も存在する。特に、Rb-Sr や Sm-Nd 同位体組成の特徴から、これら岩脈群の起源物質 (マントル物質) の多くは EM 型であることが推定されている (Condie, 2001)。

今日、汎世界的に上部マントルの上部に広く分布していると推定されている物質は、中央海嶺玄武岩の起源物質と考えられている DM (depleted mantle) 型であり、その地球史の変遷は、中央海嶺玄武岩や太古代のコマチアイトなどの同位体組成の研究から、比較的詳しく解

析されている (Zindler and Hart, 1986; Hart *et al.*, 1992; Hofmann, 1997). しかし, EM 型の起源物質については, 現在活動する EM 型を起源物質とする玄武岩の産出場所や化学組成に大きな多様性があるため, DM 型ほどには形成プロセスや分布域は理解されておらず, また, 化学組成の地球史の変遷についてはほとんど不明である (Hauri *et al.*, 1994; Douglass *et al.*, 1999; Kamber and Collerson, 1999). 更に, EM 型の物質を起源とする苦鉄質岩脈群のような大量のマグマ供給メカニズムとして, 大陸分裂あるいは大陸移動の原動力であるマントル下部からの上昇流 (スーパーブルーム) の活動が提唱されているが (Condie, 2001), その詳細も不明である.

日本隊によって明らかにされた, ナビア岩体の苦鉄質岩脈群は, 上述した岩脈群と規模, 化学組成, 及び活動年代が極めて類似している (石塚・鈴木, 1999, 2000; 鈴木ら, 2000). このことは, ナビア及びレイナー岩体に分布する苦鉄質岩脈群の研究は, EM 型の起源物質の分布とその成り立ち, 地球史的な化学組成の変遷, すなわち, EM 型の起源物質のダイナミックスの解明と, スーパーブルームのテクトニクス解明に大いに貢献することは疑いない. この課題の解明にも, 広域地質調査による苦鉄質岩脈群の分布の把握と, 多様性の解析は重要な研究内容である.

4.5. 大陸地殻の成長と離合集散プロセスの解明: 船上地磁気・重力観測

東南極大陸の太古代ナビア岩体と原生代レイナー岩体は, ギンドワナ超大陸が分裂を始める 5.5 億年前には, インド大陸の太古代ダルワル岩体と原生代イースタンガーツ岩体にそれぞれ隣接していたと考えられている (Shaw *et al.*, 1997). 5.5 億年前以降, インド大陸は約 1.2 億年前からプレート運動により北方へ約 6000 km 移動したが, 東南極大陸はその間も極域からほとんど移動しなかったとされている (Storey, 1995).

しかし, 5.5 億年前から 1.2 億年前の間のギンドワナ超大陸の分裂と移動についての詳細は不明である. 東南極大陸は他の大陸と異なり, その大陸縁のすべてが非活動縁であるため, 東南極とその周辺海域は, 大陸地殻の成長と離合集散や海洋底の形成といった地球科学の重要な研究テーマの解明にとって絶好のフィールドである. すなわち, 5.5 億年前の大陸分裂の後, 東南極周辺は海洋底の沈み込みや大陸の衝突といったプレート運動を経験していない可能性が高く, 大陸縁の海底に 5.5 億年前から 1.2 億年前に活動した海洋地殻の活動史が保存されている可能性がある.

このような研究テーマの解明を目指して, ナビア及びレイナー岩体の広域地質調査に加えて, その期間に並行して実施する, 東南極エンダービーランド沖の船上地磁気・重力観測を提言する. 地磁気や重力等の地球物理学的マッピング観測のデータは氷下および海水下の地質学的構造を反映しており, 露岩地域での地質調査の結果の外挿に大きな威力を発揮する. また, これまで不明であったナビア岩体とレイナー岩体の地質学的関係の推定が可能とな

り、両岩体の形成史の解明に大きな制約条件を与える。更に、98%が氷に覆われている南極大陸域とアクセスに難がある海水域に関しては、航空機による地磁気・重力の広域マッピング観測が大きな効力を発揮する。現在、地磁気・重力観測を含む日独航空機共同観測がリュツォ・ホルム湾方面で計画されており（野木，2003 私信）、今後、リュツォ・ホルム湾方面からナピア及びレイナー岩体への観測地域の拡大や、自律型航空機による地磁気観測の可能性も視野に入れた、航空機による地磁気・重力観測計画を模索すべきであろう。

5. ま と め

東南極エンダビーランドに分布するナピア及びレイナー岩体を対象とした、日本隊地質グループによるこれまでの調査研究の成果として、1) 野外調査による詳細な地質図の公表、2) ナピア岩体の原岩構成と形成年代の特定、3) 超高温変成作用の変成条件と年代の精密解析、及び 4) 苦鉄質岩脈群の区分と活動時期の特定、の 4 項目について紹介した。これらの成果を踏まえた今後の同岩体の調査研究課題として、1) ナピア及びレイナー岩体のテクトニクスの解明: 新しい視点による広域調査の重要性、2) 太古代大陸地殻の形成過程の解明、3) 太古代後期~原生代初期の超高温変成作用のテクトニクスの解明、4) EM 型の起源物質のダイナミックスとスーパーブルームのテクトニクス解明、及び 5) 大陸地殻の成長と離合集散プロセスの解明: 船上地磁気・重力観測、の 5 項目について具体的な調査地域をリストアップして提言した。

これからの日本の南極観測事業を取り巻く状況を正確に見極めることは、法人化による国立極地研究所を含めた国立研究機関の再編成や国立大学の研究教育体制の変化などで、難しいと言わざるを得ない。そのような状況にあっても、各種国家事業に対する社会への説明責任は従来にも増してその要請は強くなると予想される。南極観測事業も然りであり、節目ごとの各研究分野の成果の総括と問題点の洗い出しは従前にも増して真剣に取り組まなければならない事柄であろう。本報が、この様な要請に少しでも応えられるものであり、また、日本隊地質グループの今後の南極研究計画に幾ばくかでも役に立つのであれば幸いである。

謝 辞

本報は日本隊地質グループの数回に渡る集会で話し合われたこと、あるいは個人的に地形グループや地球物理グループの方々と話し合ったことをまとめたものである。その過程において、これらグループの多くの方々から様々な提言や具体的な計画案を提示していただき、更に、一部の方々には本報の原稿を読んでいただき、建設的な助言をいただいた。これらの方々にお礼申し上げる。また、航空写真の CD-ROM 化をしていただき、作業効率の向上にご尽力いただいた、国立極地研究所の瀬野公美子さんにお礼申し上げる。

文 献

- 有馬 眞 (1998) : 4—火成作用の変遷と大陸地殻の進化. 地球進化論, 平 朝彦ら編. 東京, 岩波書店, 259–302 (岩波講座地球惑星科学, 13).
- Asami, M., Suzuki, K., Grew, E.S. and Adachi, M. (1998): CHIME ages for granulite from the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **11**, 172–199.
- Carson, C.J., Ague, J.J. and Coath, C.D. (2002): U-Pb geochronology from Tonagh Island, East Antarctica: implications for the timing of ultra-high temperature metamorphism of the Napier Complex. *Precamb. Res.*, **116**, 237–263.
- Condie, K.C. (2001): *Mantle Plumes and Their Record in Earth History*. Cambridge, Cambridge University Press, 306 p.
- Crowe, W.A., Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T. and Hokada, T. (2002): SHRIMP geochronology of a mylonite zone on Tonagh Island: characterization of the last high-grade tectonothermal event in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **15**, 17–36.
- Degeling, H., Eggins, S. and Ellis, D.J. (2001): Zr budgets for metamorphic reactions, and the formation of zircon from garnet breakdown. *Mineral. Mag.*, **65**, 749–758.
- Douglass, J., Schilling, J.G. and Fontignie, D. (1999): Plume-ridge interactions of the Discovery and Shona mantle plumes with the southern Mid-Atlantic Ridge (40–55°S). *J. Geophys. Res.*, **104**, 2941–2962.
- Fraser, G., Ellis, D.J. and Eggins, S. (1997): Zirconium abundance in granulite-facies minerals, with implications for zircon geochronology in high-grade rocks. *Geology*, **25**, 607–610.
- Grew, E.S. (1982): The Antarctic Margin. The Ocean Basins and Margins, Vol. 6, ed. by A.E.M. Nairn and F.G. Stehli. New York, Plenum, 679–755.
- Grew, E.S. and Manton, W.I. (1979): Archean rocks in Antarctica: 2.5 billion-year uranium-lead ages of pegmatites in Enderby Land. *Science*, **206**, 443–445.
- Grew, E.S., Yates, M.G., Barbier, J., Shearer, C.K., Sheraton, J.W., Shiraishi, K. and Motoyoshi, Y. (2000): Granulite-facies beryllium pegmatites in the Napier complex in Khmara and Amundsen Bays, western Enderby Land, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **13**, 1–40.
- Grew, E.S., Suzuki, K. and Asami, M. (2002): CHIME ages of xenotime, monazite and zircon from beryllium pegmatites in the Napier Complex, Khmara Bay, Enderby Land, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **14**, 99–118.
- Harley, S.L. and Black, L.P. (1997): A revised Archean chronology for the Napier Complex, Enderby Land, from SHRIMP ion-microprobe studies. *Antarct. Sci.*, **9**, 74–91.
- Harley, S.L. and Hensen, B.J. (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, ed. by J.R. Ashworth and M. Brown. London, Unwin Hyman, 320–370.
- Harley, S.L. and Motoyoshi, Y. (2000): Al zoning in orthopyroxene in a sapphirine quartzite: evidence for >1120°C UHT metamorphism in the Napier Complex, Antarctica, and implications for the entropy of sapphirine. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **138**, 293–307.
- Hart, S.R., Hauri, E.H., Oschmann, J.A. and Whitehead, J.A. (1992): Mantle plumes and entrainment: Isotopic evidence. *Science*, **256**, 517–519.
- Hauri, E.H., Whitehead, J.A. and Hart, S.R. (1994): Fluid dynamic and geochemical aspects of entrainment in mantle plumes. *J. Geophys. Res.*, **99**, 275–300.
- Hensen, B.J. and Osanai, Y. (1994): Experimental study of dehydration melting of F-bearing biotite in model pelitic compositions. *Mineral. Mag.*, **58A**, 410–411.
- Hofmann, A.W. (1997): Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*, **385**, 219–229.
- Hokada, T. (1999MS): Thermal Evolution of the Ultrahigh-temperature Metamorphic Rocks in the Archean Napier Complex, East Antarctica. Ph. D. Thesis of the Graduate University for Advanced Studies, 126 p.
- Hokada, T. (2001): Feldspar thermometry in ultrahigh-temperature metamorphic rocks: evidence of crustal metamorphism attaining ~1100°C in the Archean Napier Complex, East Antarctica. *Am. Mineral.*, **86**, 932–938.
- Hokada, T. and Arima, M. (2001): Experimental constraints on partial melting under UHT and dry conditions of quartzo-feldspathic rock in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **14**, 39–52.

- Hokada, T., Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T. and Crowe, A.W. (1999): Geology and metamorphism of sapphirine-bearing aluminous gneisses from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **12**, 49–70.
- Ishikawa, M., Motoyoshi, Y. and Fraser, G.L. (1994): Preliminary report of structures of Forefinger Point, Enderby Land, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 90–100.
- Ishikawa, M., Hokada, T., Ishizuka, H., Miura, H., Suzuki, S., Takada, M. and Zwart, D.P. (2000): Antarctic Geological Map Series, Sheet 37, Mount Riiser-Larsen, with explanatory text (23 p). Tokyo, National Institute of Polar Research.
- 石塚英男・鈴木里子 (1999): アムンゼン貫入岩類の多様性と起源, その 1: 全岩主要及び微量化学組成と鉱物組成. 第 19 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 国立極地研究所, 70.
- 石塚英男・鈴木里子 (2000): アムンゼン貫入岩類の多様性と起源, その 2: 希土類元素組成. 第 20 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 国立極地研究所, 25.
- 石塚英男・三浦英樹・高田将志・石川正弘・Zwart, D.P.・鈴木里子・外田智千 (1997a): エンダビーランド・リーセルラルセン山地域地学調査隊報告 1996–97 (JARE-38). 南極資料, **41**, 743–777.
- 石塚英男・石川正弘・鈴木里子・外田智千 (1997b): 東南極ナピア岩体—地球最古のクラトンと超高温変成作用. *地質学雑誌*, **103** (9), XXIX–XXX.
- Ishizuka, H., Ishikawa, M., Hokada, T. and Suzuki, S. (1998): Geology of the Mt. Riiser-Larsen area of the Napier Complex, Enderby Land, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **11**, 154–171.
- 石塚英男・吉田知久・鈴木里子 (1999): 石英—磁鉄鉱岩の全岩化学組成と輝石組成から推定されるナピア岩体の最高変成温度. 第 19 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 国立極地研究所, 41.
- Ishizuka, H., Suzuki, S. and Nakamura, A. (2002): Peak temperatures of ultra-high temperature metamorphism of the Napier Complex, Enderby Land, East Antarctica, as deduced from porphyroclastic pyroxenes of meta-ultramafic rocks. *Polar Geosci.*, **15**, 1–16.
- Kamber, B.S. and Collerson, K.D. (1999): Origin of ocean island basalts: A new model based on lead and helium isotope systematics. *J. Geophys. Res.*, **104**, 479–491.
- Kamenev, E.N. (1975): Geology of Enderby Land. *Antarktika; doklady komissii*, **14**, 34–58 (in Russian).
- Kawasaki, T. and Motoyoshi, Y. (2000): High-pressure and high-temperature phase relations of an orthopyroxene granulite from McIntyre Island, Enderby Land, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **13**, 114–134.
- Makimoto, H., Asami, M. and Grew, E.S. (1989): Some geological observations on the Archean Napier Complex at Mt. Riiser-Larsen, Amundsen Bay, Enderby Land. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **3**, 128–141.
- Martin, H. (1994): The Archean gray gneisses and the genesis of continental crust. *Archean Crustal Evolution*, ed. by K.C. Condie. New York, Elsevier, 205–259.
- Miyamoto, T., Grew, E.S., Sheraton, J.W., Yates, M.G., Dunkley, D.J., Carson, C.J., Yoshimura, Y. and Motoyoshi, Y. (2000): Lamproite dykes in the Napier Complex at Tonagh Island, Enderby Land, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **13**, 41–59.
- 森脇喜一 (1998): 第 39 次南極地域観測隊夏期行動報告 1997–1998. 南極資料, **42**, 300–320.
- Motoyoshi, Y. (1996): Pseudotachylite from McIntyre Island, Enderby Land, East Antarctica: evidence for a rapid crystallization. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **9**, 65–75.
- 本吉洋一 (1998): 東南極ナピア岩体の超高温変成作用: 総説. *地質学雑誌*, **104**, 794–807.
- Motoyoshi, Y. and Hensen, B.J. (1989): Sapphirine-quartz-orthopyroxene symplectites after cordierite in the Archean Napier Complex, Antarctica: evidence for a counterclockwise *P-T* path? *Eur. J. Mineral.*, **1**, 467–471.
- Motoyoshi, Y. and Hensen, B.J. (2001): F-rich phlogopite stability in ultra-high-temperature metapelites from the Napier complex, East Antarctica. *Am. Mineral.*, **86**, 1404–1413.
- Motoyoshi, Y. and Matsueda, H. (1984): Archean granulites from Mt. Riiser-Larsen in Enderby Land, East Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **33**, 103–125.
- Motoyoshi, Y. and Matsueda, H. (1987): Corundum + quartz association in Archean granulite-facies rock from Enderby Land, East Antarctica: preliminary interpretation. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **1**, 107–112.
- Motoyoshi, Y., Hensen, B.J. and Matsueda, H. (1990): Metastable growth of corundum adjacent to quartz in a spinel-bearing quartzite from the Archean Napier Complex, Antarctica. *J. Metamorph. Geol.*, **8**,

- 125–130.
- Motoyoshi, Y., Hensen, B.J. and Arima, M. (1993): Experimental study of the high-pressure stability limit of osumilite in the system K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 : implications for high-temperature granulites. *Eur. J. Mineral.*, **5**, 439–445.
- Motoyoshi, Y., Ishikawa, M. and Fraser, G.L. (1994): Reaction textures in granulites from Forefinger Point, Enderby Land, East Antarctica: an alternative interpretation on the metamorphic evolution of the Rayner Complex. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 101–114.
- Motoyoshi, Y., Ishikawa, M. and Fraser, G.L. (1995): Sapphirine-bearing silica-undersaturated granulites from Forefinger Point, Enderby Land, East Antarctica: evidence for a clockwise P - T Path? *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **8**, 121–129.
- 本吉洋一・三浦英樹・山内 肇・吉村康隆・宮本知治・吉永秀一郎・大橋康弘・真木賢一・針貝伸次・武井忠昭 (1999): ウェンダービーランド、アムンゼン湾周辺地学調査隊報告 1998–1999. 南極資料, **43**, 534–570.
- Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T., Hokada, T. and Crowe, A.W. (1999): Geology of ultrahigh-temperature metamorphic rocks from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **12**, 1–28.
- Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T., Hokada, T., Yoshimura, Y., Miyamoto, T., Motoyoshi, Y., Crowe, A.W., Harley, S.L., Kanao, M. and Iwate, M. (2001a): Antarctic Geological Map Series, Sheet 38, Tonagh Islands, with explanatory text (42 p). Tokyo, National Institute of Polar Research.
- Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T., Hokada, T., Crowe, A.W. and Kusachi, I. (2001b): Ultrahigh temperature sapphirine-osumilite and sapphirine-quartz granulites from Bunt Island in the Napier complex, East Antarctica—Reconnaissance estimation of P - T evolution. *Polar Geosci.*, **14**, 1–24.
- Owada, M., Osanai, Y. and Kagami, H. (1994): Isotopic equilibration age of Sm-Nd whole-rock system in the Napier Complex (Tonagh Island), East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 122–132.
- Owada, M., Osanai, Y., Toyoshima, T., Tsunogae, T., Hokada, T. and Crowe, A.W. (1999): Petrography and geochemistry of mafic and ultramafic rocks from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica: a preliminary report. *Polar Geosci.*, **12**, 87–100.
- Owada, M., Osanai, Y., Tsunogae, T., Toyoshima, T., Hokada, T. and Crowe, A.W. (2000): LREE-enriched mafic gneiss and meta-ultramafic rock from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **13**, 86–102.
- Owada, M., Osanai, Y., Tsunogae, T., Hamamoto, T., Kagami, H., Toyoshima, T. and Hokada, T. (2001): Sm-Nd garnet ages of retrograde garnet bearing granulites from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica: A preliminary study. *Polar Geosci.*, **14**, 75–87.
- Owada, M., Osanai, Y., Toyoshima, T., Tsunogae, T., Hokada, T., Crowe, A.W. and Kagami, H. (2003): Early Proterozoic tectonothermal events in the Napier Complex, East Antarctica: Implications for the formation of East Gondwana. *Gondwana Res.*, **6**, 231–240.
- Ravich, M.G. and Kamenev, E.N. (1975): Crystalline Basement of the Antarctic Platform. New York, J. Wiley, 582 p.
- Rogers, J.W. and Santosh, M. (2002): Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Res.*, **5**, 5–22.
- Sakai, S. and Kawasaki, T. (1997): An experimental study of Fe-Mg partitionings between orthopyroxene and cordierite in the Mg-rich portion of the $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ - $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ system at atmospheric pressure: Calibration of its geothermometer for high-temperature granulite and igneous rocks. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **10**, 165–177.
- Sato, K. and Kawasaki, T. (2002): High-pressure and high-temperature experiments on the phase relations in the system of Mg-rich garnet composition ($Prp_{75}Alm_{25}$): Implication for the Fe-Mg partitioning between garnet and orthopyroxene. *Polar Geosci.*, **15**, 66–79.
- Shaw, R.K., Arima, M., Kagami, H., Fanning, C.M., Shiraishi, K. and Motoyoshi, Y. (1997): Proterozoic events on the Eastern Ghats Granulite Belt, India: evidence from Rb-Sr, Sm-Nd systematics, and SHRIMP dating. *J. Geol.*, **105**, 645–656.
- Sheraton, J.W., Offe, L.A., Tingey, R.J. and Ellis, D.J. (1980): Enderby Land, Antarctica - an unusual Precambrian high-grade metamorphic terrain. *J. Geol. Soc. Aust.*, **27**, 1–19.
- Sheraton, J.W., Tingey, R.J., Black, L.P., Offe, L.A. and Ellis, D.J. (1987): Geology of Enderby Land and

- Western Kemp Land, Antarctica. *Aust. Bur. Miner. Resour. Geol. Geophys., Bull.*, **223**, 51 p.
- Shiraishi, K., Ellis, D.J., Fanning, C.M., Hiroi, K., Kagami, H. and Motoyoshi, Y. (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*, ed. by C.A. Ricci. Siena, Terra Antarctica Publication, 79–88.
- Sobotovitch, E.V., Kamenev, Y.N., Komaristyy, A.A. and Rudnik, N.A. (1976): The oldest rocks of Antarctica (Enderby Land). *Int. Geol. Rev.*, **18**, 371–388.
- Storey, B.C. (1995): The role of mantle plumes in continental breakup: Case histories from Gondwanaland. *Nature*, **377**, 301–308.
- Suzuki, S. (2000MS): Geochemistry and Geochronology of Ultra-high Temperature Metamorphic Rocks from the Mt. Riiser-Larsen Area in the Archaean Napier Complex, East Antarctica. Ph. D. Thesis of the Graduate University for Advanced Studies, 109 p.
- Suzuki, S., Hokada, T., Ishikawa, M. and Ishizuka, H. (1999): Geochemical study of granulites from Mt. Riiser-Larsen, Enderby Land, East Antarctica: Implication for protoliths of the Archaean Napier Complex. *Polar Geosci.*, **12**, 101–125.
- 鈴木里子・石塚英男・加々美寛雄 (2000): アムンゼン貫入岩類の多様性と起源, その 3: Rb-Sr および Sm-Nd 同位体分析. 第 20 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 国立極地研究所, 26.
- Suzuki, S., Kagami, H., Ishizuka, H. and Hokada, T. (2001): Sm-Nd mineral isochron age of sapphirine-quartz gneiss from the Mt. Riiser-Larsen area in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **14**, 88–98.
- Tainosho, Y., Kagami, H., Takahashi, Y., Iizumi, S., Osanai, Y. and Tsuchiya, N. (1994): Preliminary result for the Sm-Nd whole-rock age of the metamorphic rocks from Mount Pardoe in the Napier Complex, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 115–121.
- Tainosho, Y., Kagami, H., Hamamoto, T. and Takahashi, Y. (1997): Preliminary result for the Nd and Sr isotope characteristics of the Archaean gneisses from Mount Pardoe, Napier Complex, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **10**, 92–101.
- Takigami, Y., Ishikawa, N. and Funaki, M. (1998): Preliminary ^{40}Ar - ^{39}Ar analyses of igneous and metamorphic rocks from the Napier Complex. *Polar Geosci.*, **11**, 200–207.
- Takigami, Y., Ishikawa, N. and Funaki, M. (2002): ^{40}Ar - ^{39}Ar analyses of some intruded rocks from Mt. Riiser-Larsen in the Napier Complex. *Polar Geosci.*, **15**, 37–45.
- 豊島剛志 (2001): 走向線図から見たナビア・レイナー岩体の地質構造. 第 21 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 国立極地研究所, 77–78.
- Toyoshima, T., Osanai, Y., Owada, M., Tsunogae, T., Hokada, T. and Crowe, A.W. (1999): Deformation of ultrahigh-temperature metamorphic rocks from Tonagh island in the Napier complex, east Antarctica. *Polar Geosci.*, **12**, 29–48.
- 豊島剛志・山本和美・小山内康人・大和田正明・角替俊昭・外田智千・Crowe, W.A. (2001): 東南極ナビア岩体トナー島産グラニュライト相シュードタキライトの組織と変形条件. 第 21 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 国立極地研究所, 75–76.
- Tsunogae, T., Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Hokada, T. and Crowe, W. A. (1999): Metamorphic reactions and preliminary *P-T* estimates of ultrahigh-temperature mafic granulite from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **12**, 71–86.
- Tsunogae, T., Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Hokada, T. and Crowe, W.A. (2000): Fluorine-rich calcic amphiboles in ultrahigh-temperature mafic granulite from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica: preliminary report. *Polar Geosci.*, **13**, 103–113.
- Tsunogae, T., Santosh, M., Osanai, Y., Owada, M., Toyoshima, T., Hokada, T., Crowe, W.A. and Miyano, T. (2001): Carbonic fluid inclusions in ultrahigh-temperature metamorphic rocks from Tonagh Island in the Archaean Napier Complex, East Antarctica: A preliminary report. *Polar Geosci.*, **14**, 25–38.
- Tsunogae, T., Santosh, M., Osanai, Y., Owada, M., Toyoshima, T. and Hokada, T. (2002): Very high-density carbonic fluid inclusions in sapphirine-bearing granulites from Tonagh Island in the Archaean Napier Complex, East Antarctica: implications for CO_2 infiltration during ultrahigh-temperature ($T > 1,000^\circ\text{C}$) metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **43**, 279–299.
- Yoshimura, Y., Motoyoshi, Y., Grew, E.D., Miyamoto, T., Carson, C.J. and Dunkley, D.J. (2000):

- Ultrahigh-temperature metamorphic rocks from Howard Hills in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **13**, 60–85.
- Yoshimura, Y., Miyamoto, T., Grew, E.D., Carson, C.J., Dunkley, D.J. and Motoyoshi, Y. (2001): High-grade metamorphic rocks from Christmas Point in the Napier complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **14**, 53–74.
- Zindler, A. and Hart, S.R. (1986): Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493–571.