

氏名・（本籍）	いし　　かわ　　まさ　　ひろ 石　川　正　弘
学位の種類	博　士（理　学）
学位記番号	理博第1436号
学位授与年月日	平成7年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科 （博士課程）地学専攻
学位論文題目	Structural and metamorphic evolution of granulite to amphibolite facies terrane along Lützow-Holm Bay and Prince Olav Coast, East Antarctica : implications for deep crustal deformation and uplift （東南極リュツォホルム湾とプリンスオラフ海岸に分布するグラニュライト～角閃岩相テレーンの構造と変性作用の進化：地殻深部での変形と上昇に関する意義）
論文審査委員	（主査） 教　授　大　槻　憲四郎 教　授　白　石　和　行 （国立極地研究所） 教　授　斎　藤　常　正 教　授　森　　　啓 教　授　蟹　沢　聰　史

論　文　目　次

1. Introduction
2. General Geology
 2. 1. Geological setting
 2. 2. Metamorphic rocks and metamorphism
 2. 3. Geochronology
 2. 4. Deformation
3. Geology and Structure of the Ongul Islands

3. 1. Introduction
 3. 2. General Geology
 3. 3. Metamorphic rocks
 3. 4. Pegmatites
 3. 5. Geologic structures
 3. 6. Structural evolution of the Ongul Islands
 4. Geology and Structure of Rundvågshetta
 4. 1. Introduction
 4. 2. General Geology
 4. 3. Metamorphic rocks
 4. 4. Fabrics and reaction textures
 4. 5. Geologic structures
 4. 6. Structural and metamorphic evolution
 5. Geologic structures along Lützow-Holm Bay and Prince Olav Coast
 5. 1. Introduction
 5. 2. Mineral lineation
 5. 3. Foliation
 5. 4. Ductile boudinage
 5. 5. Folding
 5. 6. Emplacement of pegmatites
 5. 7. Summary and discussion
 6. Rheological Constraints on P-T-d Path
 6. 1. Introduction
 6. 2. Procedure
 6. 3. Rheological implications
 6. 4. Structural, metamorphic and rheological evolution of Rundvågshetta
 7. Conclusions
- References

論文内容要旨

序論

東南極リュツォホルム湾からプリンスオラフ海岸沿いには東南極楕状地の一部を構成するグラニュライト相～角閃岩相変成岩類が分布する。ピーク変成作用時の圧力温度条件は角閃岩相で約680–750°C, 0.6–0.7GPa, グラニュライト相で760–850°C, 0.7–0.9GPaと見積もられた (Hiroi et al., 1983, 1991; Motoyoshi, 1986).

この変成岩類は、過去約40年にわたり日本南極観測隊により調査されたが、2つの地質体とする見解 (Yoshida, 1978) と1つの地質体 (リュツォホルム岩体) とする見解 (Hiroi et al., 1991; Shiraishi et al., 1987) とがある。Yoshida (1978) の根拠は、リュツォホルム湾の露岩域の地質構造が isoclinal 褶曲で特徴づけられる一方、プリンスオラフ海岸の奥岩は isoclinal 褶曲が発達しないことである。一方、1つの地質体とする根拠は、変成相がプリンスオラフ海岸からリュツォホルム湾へ向かい漸移的に上昇すること (Hiroi et al., 1986; Motoyoshi, 1986) や珪線石安定領域に向かう累進変成経路を示唆する藍晶石や十字石の残晶や減圧経路を示唆する超苦鉄質岩中の反応組織がリュツォホルム湾からプリンスオラフ海岸の地域で確認されることである (Hiroi et al., 1983; Motoyoshi, 1986)。さらに SHRIMP によるジルコンの U-Pb 年代 (Shiraishi et al., 1994) が約520–550 Ma を示すことも一つの地質体であることを示唆した。

本研究ではまず、リュツォホルム湾沿いのグラニュライト相露岩域のオングル諸島・ボツンヌーテン・ルンドボックスヘッタ、プリンスオラフ海岸沿いの角閃岩相のかすみ岩および漸移相の明るい岬の詳細な地質図および断面図を作成し、この地域の構造地質的意義を明確にした。

特にルンドボックスヘッタでは詳細な地質構造発達史が編まれた。さらに、ほとんどの露岩域では有効な変成反応が産しないために詳細な圧力–温度–変形経路を復元することが難しいが、幸運にもルンドボックスヘッタでは新たにざくろ石+斜方輝石+珪線石+石英共生関係や董青石を含む反応組織が発見され、変成条件との対応を与えることができた。

本研究の目的のもう一つはルンドボックスヘッタで圧力–温度–変形経路を復元することである。さらに本研究では圧力–温度–変形経路に対しレオロジー的制約を与えた。

これらの解析からリュツォホルム湾からプリンスオラフ海岸沿いに分布する変成岩類の上昇過程を考察した。

地質構造

地質図作成および小構造解析からリュツォホルム湾からプリンスオラフ海岸沿いの露岩域には5ステージの褶曲 (形成順にFn-2, Fn-1, Fn, Fn+1, Fn+2) で特徴づけられることが明らかになった。

Fn 褶曲: Fn 褶曲は isoclinal な転倒褶曲もしくは横臥褶曲であり、リュツォホルム湾のボツンヌーテン・ルンドボックスヘッタ・ベロッデン・スカーレン・アウストホブデ・パツダ・スカ

ルブスネス・オングル諸島およびプリンスオラフ海岸沿いの明るい岬・かすみ岩・日の出岬では顕著に発達する。一般にその褶曲軸は輝石片麻岩中の斜方輝石、角閃石片麻岩や角閃岩中の角閃石、ザクロ石-珪線石片麻岩中の珪線石の鉱物線構造 (L_n) に平行である。ザクロ石-黒雲母片麻岩中の黒雲母は一般にその褶曲軸面に平行である (ルンドボークスヘッタを除く)。

数百 m にまで達する長波はコピーテント層の厚さに依存するので、 F_n 褶曲は座屈褶曲である。この F_n 褶曲は後期の gentle~open 褶曲によって重複変形を被っている。

F_{n+1} 褶曲および F_{n+2} 褶曲: F_n 褶曲が発達する上記地域には 1 ステージもしくは 2 ステージの gentle~open 褶曲が普遍的に発達する。この gentle~open 褶曲はほぼ垂直な褶曲軸面とほぼ水平な褶曲軸を持つ。褶曲波長は約 5 km に達する。ボツンテーン・ルンドボークスヘッタ・スカーレン・アウストホブデ・パツダ・スカルブスネス・オングル諸島・明るい岬・かすみ岩・日の出岬では F_n 褶曲の褶曲軸にほぼ平行な褶曲軸を持つ gentle~open 褶曲が発達する。また、ベロッデン・スカーレン・スカルブスネス・オングル諸島・明るい岬・かすみ岩では F_n 褶曲の褶曲軸に斜交する褶曲軸を持つ gentle~open 褶曲が発達する。

F_{n-1} 褶曲および F_{n-2} 褶曲: ルンドボークスヘッタ・ベロッデン・スカルブスネス・オングル諸島・かすみ岩・日の出岬には F_n 褶曲によって変形された波長数 m の isoclinal 褶曲 (F_{n-1}) が発達する。 F_{n-1} 褶曲と F_n 褶曲の褶曲軸はほぼ平行である。ルンドボークスヘッタでは F_{n-1} 褶曲により変形された isoclinal 褶曲 (F_{n-2}) が発達する。

したがって、リュツォホルム湾からプリンスオラフ海岸沿いの露岩域の褶曲構造は主に早期の isoclinal 褶曲 (F_n) と後期の gentle~open 褶曲 (F_{n+1} , F_{n+2}) で特徴づけられることが明らかになった。かすみ岩および明るい岬における転倒褶曲もしくは横臥褶曲 (F_n) の発達は、リュツォホルム湾からプリンスオラフ海岸沿いの変成岩類が一つの地質体であることを構造的に初めて支持するものである。

圧力-温度-変形史

ルンドボークスヘッタの構造発達史および変成反応と地質構造との対応関係に関する新知見が以下のように得られた。

構造発達史は、発達順に D_n 変形 (F_n : isoclinal 褶曲, B_n : 塑性的ブーディン), D_{n+1} 変形 (F_{n+1} : gentle 褶曲, E_{n+1} : 単斜輝石ベグマタイトおよび塩基性岩の貫入), D_{n+2} 変形 (局所的塑性・脆性剪断帯形成, スラスト形成), D_{n+3} 変形 (ベグマタイトの貫入) で特徴付けられる。

ざくろ石+斜方輝石+珪線石+石英共生関係が見い出され、約 1000°C, 1 GPa の温度圧力条件が見積られる (Motoyoshi et al., 1993)。さらにその斜方輝石、珪線石、石英の鉱物線構造 (L_n) は F_n 褶曲の褶曲軸や B_n ブーディンの伸張方向に平行なので、その温度圧力条件は D_n 変形時と見なせる。

さらに堇青石+サフィリン, 堇青石+斜方輝石, 堇青石+斜方輝石+サフィリンからなるシン

プレタクトが見い出され、圧力低下に伴う変成反応(1)斜方輝石+珪線石+石英=堇青石、(2)斜方輝石+珪線石=堇青石+サフィリン、(3)ざくろ石=堇青石+斜方輝石+サフィリン、(4)ざくろ石+石英=堇青石+斜方輝石、が起こったと推測される。これらの反応組織は非変形であることから、これらの反応は高歪を反映するDn変形後に起こったと結論される。

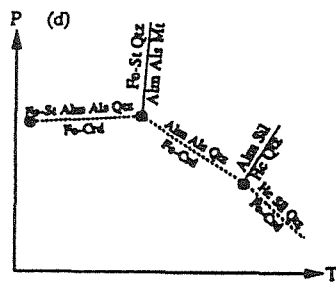
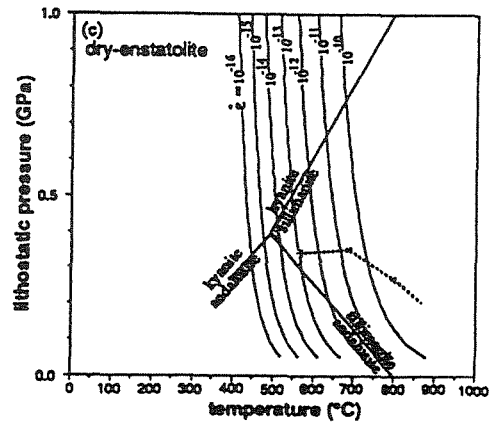
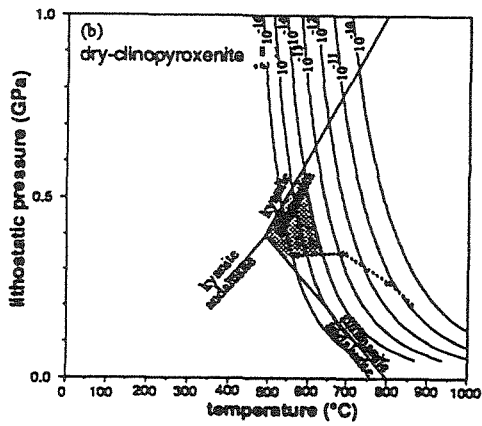
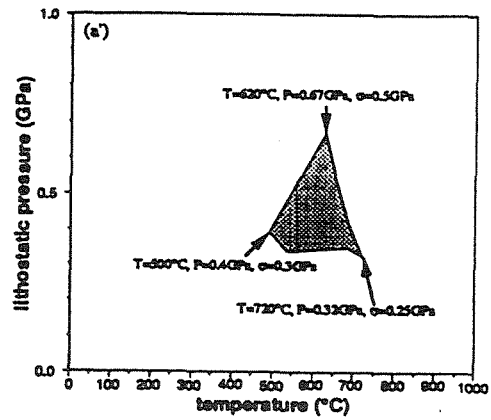
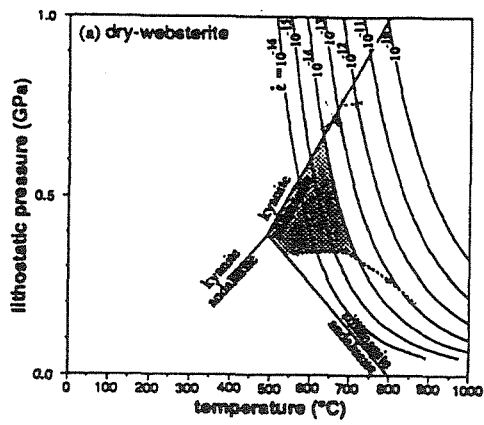
珪線石の新たな線構造(Ln+2)の観察から、Dn+2変形に伴う局所的塑性・脆性剪断帯形成は珪線石安定領域における変形であると推測される。また一般にざくろ石+珪線石+石英共生関係が見い出されるざくろ石-黒雲母片麻岩には後退変成作用による堇青石が形成しないので、最高温度後の圧力温度経路はFe-堇青石安定領域を通過していないと推測される。

レオロジー的制約

さらに地殻進化過程を把握するために、地殻レオロジーを応用した構造解析を行った。ここでの目的はDn+2ステージ時に輝石に富む岩石が横ずれ剪断破壊した圧力温度条件を見積もることである。本論では輝石に富む岩石の塑性レオロジーとしてウェブステライト(AveLallemant, 1978)やクリノパイロキシナイト(Kirby & Kronenberg, 1984)の転位クリープの流動則を、また脆性レオロジーを支配する変形機構としてSibson(1974)の摩擦則を用いることにより、輝石に富む岩石の脆性塑性遷移圧力温度を見積もった。Dn+2ステージ時の歪速度を 10^{-14} S^{-1} 以下と仮定した場合、珪線石安定領域内かつFe-堇青石安定領域外を満たす脆性領域は図1に示した圧力温度領域(500~720°C, 0.32~0.67GPa)と見積もられる。その際の応力は0.25~0.5GPaである。したがって、Dn+1ステージ時の塩基性岩貫入の圧力温度条件は約1GPa, 1000°C以下かつ0.32~0.67GPa, 500~720°C以上と見積もられる(図2)。

結論

ルンドボークスヘッタの変成岩類では、1GPa・1000°CでのDn変形以降の0.32~0.67GPa・500~720°Cに至る冷却減圧過程はDn+1のgentle褶曲やDn+2など局所的横ずれ・スラスト剪断帯の形成で特徴づけられる。つまりルンドボークスヘッタの変成岩類の下部地殻からの上昇過程は大規模な地殻流動を伴わないことで特徴付けられ、地表の侵食による上昇過程を反映するものと結論される。さらにHiroi et al. (1986)によりアウストホブデ・オングル諸島・明るい岬から報告された圧力低下を示唆する変成反応組織は非変形であるので、侵食による上昇過程はリュツォホルム岩体に適用されると結論される。



⊠ 1
 Field boundary between the frictional sliding and dislocation creep for (a) websterite, (b) clinopyroxenite and (c) enstatite at various strain rates. Parameter β of Sibson's law is 1.2 (strike-slip faulting). (d) A part of petrogenetic P - T grid of interest (after Richardson, 1968). Stability relations of Fe-Crd (dashed line) are overlaid on (a), (b) and (c). St: staurolite, Alm: almandine, Als: Al₂SiO₅, Qtz: quartz, Crd: cordierite, Hc: hercynite, Sil: sillimanite, Mt: magnetite. The shaded area denotes the P - T conditions where ductile/brittle transition of pyroxenite occurred. The physical constants of dislocation creep are taken from Kirby & Kronenberg (1984), Avelallemant (1978) and Raleigh et al. (1971).

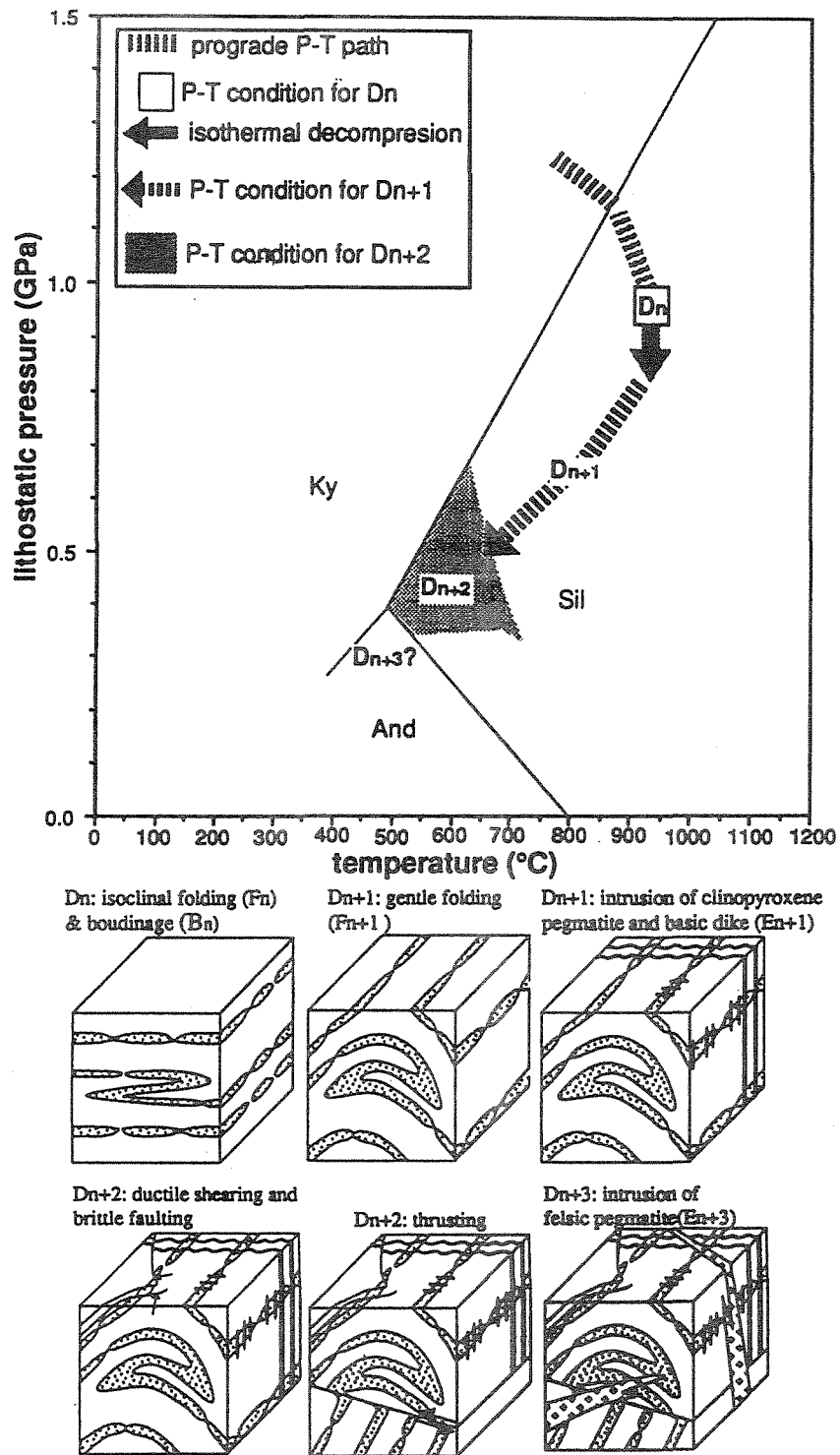


图2 P-T-d path of Rundvågshetta

論文審査の結果の要旨

石川君の博士論文は、第33次と第34次南極地域観測隊地学部門に参加し、調査・研究した結果をとりまとめたものである。

東南極のリュツォホルム湾とプリンスオラフ海岸には角閃岩～グラユライト相の変成を受けたリュツォホルム岩体がある。本論文は精査したオングル島とルンドボークスヘッタ地域を含む11地域での研究結果を総括したもので、とくに地殻深部での変成作用と変形との統一的理解を目指したものである。研究結果の概要は以下のようなものである。

1) 第1ステージ：2回の等斜褶曲を受けた。ただし、その後の変成作用によって、変形フェブリックや変成条件を示唆する鉱物は消失している。

2) 第2ステージ：著しい流動変形が起き、片麻状組成縞、斜方輝石や角閃石などの鉱物線構造、等斜褶曲、ブーディン構造が形成された。この時期は変成作用のピーク（石榴石+斜方輝石+珪線石+石英が安定的なグラニュライト相）にあたり、温度・圧力は900°C以上、1.0 GPaに達した。

3) 第3ステージ：この時期にはまず等温減圧が進行し、珪線石や斜方輝石の周囲に堇青石±サフィリン±スピネルのシンプレクタイトが、石榴石の周囲に斜方輝石+堇青石±サフィリンなどのシンプレクタイトが形成された。その後、石榴石-珪線石-石英の安定領域内（600°C、0.5 GPa程度）を通り、徐々に温度・圧力が低下した。変形は少ないものの、南北圧縮・東西引張応力場の下で、開いた座屈褶曲の形成、脆性破壊を伴う単斜輝石-角閃石ペグマタイトとメタベイスサイトの貫入、延性剪断帯の形成、珪長質ペグマタイトの貫入などが起こった。

4) べき乗流動則と摩擦則からリュツォホルム複合岩体の変形挙動を検討した。第2ステージの温度・圧力下では、期待通りに全ての岩石が延性変形する。第3ステージ初期の脆性破壊を伴うペグマタイトの貫入は、異常に高い孔隙圧を想定しなければ説明できない。第3ステージ後期において輝石含有量の高い岩石のみが選択的に脆性変形したが、これは期待と調和的である。

5) リュツォホルム岩体の地下数十kmからの上昇は、約5億年前に起こった大陸衝突によるものと考えられていたが、上昇過程は大きな変形を伴わなかったため、それはexhumationによるものと考えられる。

以上のように、石川君の研究成果は詳細な野外観察を基礎とし、変成岩体を変成作用・変形構造・岩石のレオロジーの三方面から統一的に明らかにしたものであり、自立して研究行動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、石川正弘提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。