

氏 名 足立 達朗

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1336 号

学位授与の日付 平成 22 年 3 月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Metamorphic evolution and its implication for
the tectonic process in the central Sør Rondane
Mountains, East Antarctica.

論文審査委員 主 査 教授 白石 和行
教授 澁谷 和雄
准教授 外田 智千
教授 廣井 美邦（千葉大学）
教授 小山内 康人（九州大学）

論文内容の要旨

はじめに

超大陸の形成は地球誕生以来数回しか起きてないと考えられており、また超大陸形成と時期と同じくして、超高温変成岩 (Harley, 1984) や超高压変成岩 (Chopin, 1984) の形成, 全球凍結 (Hoffman, 1998), カンプリア大爆発 (例えば Gould, 1990) などが起きている. このことは大陸の集合・分散のプロセスは, 地球内部および表層環境の劇的な変化に大きく関わっていることを示しており, 惑星地球の進化を明らかにする上で, 大きな役割を果たすと考えられる.

Gondwana 超大陸はパンゲア (約 2 億 5 千万年前) の次に新しい超大陸であり, 現在のアフリカ, 南米, オーストラリア, インドそして南極が集合して形成されたと考えられている. 南極大陸は現在周囲をプレート拡大境界である海嶺に囲まれており, 他の Gondwana 構成要素と比較して新しい時代の地殻変動の影響が小さい. このことは, 南極大陸の地質学的研究によって, 超大陸の集合・分離過程をより精密に解析することが可能である.

日本における南極大陸の地質学的研究は, 日本南極地域観測隊によって昭和基地を中心とした地域を対象に実施されてきた. これらの地域は, Gondwana 超大陸形成時の衝突境界であったと考えられており (例えば Jacobs & Thomas, 2004), 超大陸形成の素過程が保存されていることが期待できる. そういった露岩域のひとつであるセールロンダーネ山地は, 1960 年前後のベルギー隊による先駆的調査, 1985~1992 年の日本南極地域観測隊の全域調査の結果, 構成岩石種, 地質構造, 年代などの基礎データが提示された (例えば Shiraishi et al., 1997). またそれに基づき, この地域は 2 つの地質体が高角境界で接する大陸衝突帯であると説明された (Osanai et al., 1992). しかしながら, 研究者が提示してきた多数のデータは, 統一的に解釈されておらず, 地域全体の地史を十分に説明するテクトニックモデルは提唱されてこなかった. そこで本研究では, 第 49 次日本南極地域観測隊で行った野外調査と, そこで採取した岩石の変成岩岩石学的, 年代学的解析結果に基づいて, セールロンダーネ山地のテクトニクスを明らかにすることを目的とした.

解析項目・結果

1. 変成経路

鉱物組織, 各種地質温度圧力計およびザクロ石の累帯構造パターンなどの解析を行い, 各地域に分布する変成岩の変成履歴を解析した. その結果, セールロンダーネ山地に産する変成岩類は少なくとも, 主にアウストカンパーネ地域に産出し, ピーク変成条件付近で減圧することを特徴とする A-type, 主にブラットニーパネ地域に産出し, ピーク変成条件付近で加圧することが特徴である B-type, 主にルンケリッゲン地域に産出し, 他のタイプとは異なり昇温期の情報を保持している L-type の 3 タイプに分類できることが分かった. A-type にはザクロ石が堇青石に分解するような減圧過程を示す. ピーク変成条件は約 800 °C, 0.4-0.5 GPa が見積もられ, その後の冷却過程で加水後退変成作用を受けている. B-type は, ザクロ石, 珪線石からスピネル, コランダムが形成される反応が見られ, ザクロ石は縁辺部で Ca が増加する組成変化を示すなど, 加圧過程を示す組織が観察される. ピーク変成条件は約 800 °C, 0.7-0.8 GPa であり, その後の冷却過程で加水後退変成作用を受けている. 一方, L-type には初生的な緑簾石, 石英の共生が認められる. またピーク変成条件は約 600-700 °C, 0.5-0.8 GPa が見積もられ, A, B-type と比較して相対的に低温条件を示す. またザクロ石は核部から縁辺部にかけて Mn が減少するような昇温過程を示唆する組成変

化を示すなど, A-, B-type とは異なる岩石学的特徴を保持している.

2. Ti-in-Qtz 温度計

岩石学的な解析によって, 地域ごとに変成経路が異なることが示されたが, 変成条件が見積もり可能な鉱物共生を含む岩石が限定されていること, 加水後退変成作用の影響で情報が改変されていること, などの理由で変成条件の空間分布の把握は困難である.

そこで岩石中に一般的に含まれる石英に Ti-in-Qtz 温度計 (Wark & Watson, 2006) を適用して, 変成条件の空間分布を補完した. 特に, セールロンダーネ山地の広域で, 後退変成作用を受けた岩石の石英中にルチル離溶組織が認められる. 離溶ルチルの存在は, かつて高温条件を経験していたことを示し, ピーク温度条件の復元が可能であることを示唆する.

Ti-in-Qtz 温度計の結果, A-, B-type の岩石からは約 800 °C の温度条件が見積もられた一方, L-type の岩石からは 600 °C 以下しか見積もられず, 変成条件の地域性が確認された. また Ti-in-Qtz 温度の分布から復元される各 type の空間分布からは, 各 type が低角境界で接合する, ナップ構造を形成していることが明らかとなった.

3. 変成年代

各 type に記録された変成作用の時間的前後関係を把握するため, SHRIMP ジルコン U-Pb 年代測定, EPMA モナザイト U-Th-Pb 年代測定を行った.

A-, B-type のピーク変成年代は, 640-600 Ma で, 後退変成作用の時期は 570-550 Ma であると考えられる. 一方で, L-type では約 550 Ma がピーク変成作用のタイミングであると考えられる. L-type には 640-600 Ma の年代が欠如していることから, 少なくとも 640-600 Ma には A-, B-type とは活動を共にしておらず, 異なる地質体であったことが明らかとなった.

テクトニクスの復元

A-type と B-type はピーク変成温度, 変成年代の一致などから, 両者はかつてひとつの地殻をなしていたと考えられる. そして 640-600 Ma の変成イベントの際に A-type が B-type が衝上することで A-type は減圧, B-type は加圧するような, 異なる圧力変化を生じたと解釈できる. 約 550 Ma 前後には L-type と A-, B-type が, ナップ構造を形成しながら接合し, 最終的に約 500 Ma に全体を貫く花崗岩の活動があったと考えられる.

このように明瞭に異なる履歴を保持する岩体同士が, ナップ構造をなして接合するモデルは, ゴンドワナ超大陸形成時にセールロンダーネ山地の対岸にあったと想定されている中央ドロンニングモードランド地方や, モザンビークにおいても提案されている (e.g. Grantham et al. 2008). これは, ゴンドワナ超大陸形成時の造山活動において, ナップ構造を形成するようなテクトニクスが支配的であった可能性を示す.

博士論文の審査結果の要旨

本論文は著者が第49次日本南極地域観測隊の同行者として、東南極大陸セール・ロンダーネ山地中央部で実施した野外調査と、そこで採取した岩石の変成岩岩石学的、地質年代学的解析結果に基づいて、同山地地域のテクトニクス（地球変動史）を明らかにすることを目的としたものである。南極の当該地域は、約5億年前の Gondwana 超大陸形成の鍵となる地域として近年注目されている。しかし、地理的にアクセスが困難なことから、16年ぶりに著者とその共同研究者らによって3カ月間に及ぶ現地調査がおこなわれた。本学位論文はその研究成果の中核をなすものである。

本論文では、イントロダクションと地質概説に続き、1) 変成作用の解析、2) 石英中のチタン含有量を利用した地質温度計、3) U-Pb系の地質年代学の三つの主要なテーマについての研究結果を述べている。そして最後に、その結果導かれた同山地のテクトニクスを考察し、従来のものを大きく改変した新しいモデルを提唱した。

変成作用の解析では、同地域で採取した多量の岩石試料を処理し、丹念な鏡下観察に基づいて変成条件の見積もりが可能な鉱物組合せを含む岩石を厳選して鉱物間の平衡関係を解析するとともに、各種地質温度圧力計を駆使するなどの作業を行い、各山塊に分布する変成岩の温度・圧力経路を解析した。その結果、セール・ロンダーネ山地に産する変成岩類は地域ごとに、次のような特徴的な温度・圧力経路を持つ三つのタイプに分類できることが分かった。

- ・ A-type : 最高変成条件 (約 800 °C, 0.4-0.5 GPa) 付近で減圧することを特徴とし、その後の冷却過程で加水後退変成作用を受けている。
- ・ B-type : 最高変成条件 (約 800 °C, 0.7-0.8 GPa) 付近で加圧することが特徴で、その後の冷却過程で加水後退変成作用を受けている。
- ・ L-type : 昇温期の情報を保持しており、最高変成条件 (約 600-700 °C, 0.5-0.8 GP) が他のタイプと比べて低温である。

異なる温度・圧力経路を持つ三タイプの岩石の同山地地域における空間分布は、広範な温度下降時期の加水作用の影響で情報が改変されているために把握が困難である。しかし、セール・ロンダーネ山地の後退変成作用を受けた岩石の石英中に、かつて高温条件を経験していたことを示唆するルチルの離溶組織が、広い範囲にわたって認められることを見いだした。そこで、変成条件、特に温度条件の空間分布を補完するために、普遍的な造岩鉱物である石英の中のチタンの含有量を利用した地質温度計 (Ti-in-Qtz 温度計) (Wark & Watson, 2006) を応用して最高温度条件とその空間分布の復元を試みた。その結果、A-type および B-type の岩石が分布する地域からは約 800 °C の温度条件が、また L-type の岩石が分布する地域からは 600 °C 以下の温度条件が得られ、岩石学的な解析によって示された変成温度情報を補完するとともに、各タイプの岩石の分布地域を明らかにした。こうした各ユニットを構成する岩石の空間分布に基づいて A, B, L の3つの地質ユニットの配置を検討した結果、各ユニットが低角の境界で接合するというこの地域から初めて見だし、ナップ構造モデルを提唱した。

こうした各 type に記録された変成作用の時間的前後関係を把握するため、SHRIMP によるジルコンの U-Pb 年代測定及び EPMA による モナザイトの U-Th-Pb 年代測定を行った。その結果、A-type および B-type ユニットのピーク変成年代は 640-600 Ma (百万年) で、さらに 570-550 Ma に後退変成作用の影響が認められることを示した。一方、L-type ユニットのピーク変成年代は

約 550 Ma で、640-600 Ma の変成年代はこのユニットには欠如していることが明らかとなった。

以上の解析結果を基に、A, B, L の 3 ユニットの形成プロセスを復元すると、A-type と B-type のユニットは変成年代が一致することから、かつて一連の造山帯内に位置していたと考えられる。そして 640-600 Ma の変成作用に伴った変形運動の際に A-type の岩体が B-type の岩体に衝突することで A-type は減圧、B-type は加圧するような、対照的な圧力変化を生じたと解釈した。その後、約 550 Ma 前後には L-type ユニットの主変成作用と A-, B-両 type のユニットの加水後退変成作用がおこり、最終的に約 500Ma に全体を貫く花崗岩の活動があったと考察した。すなわち、640-600 Ma に形成した A-type および B-type ユニットの形成後に、その後 550Ma の L-type ユニットの形成時にナップ構造を形成しながら現在の地質構造に接合したと考えられる。想定されたナップ構造はこの地域の東西性の軸を持つ緩い褶曲を示すメガスコピックな地質構造からも支持される。

このように明瞭に異なる履歴を保持する岩体同士が、ナップ構造をなして接合するモデルは、 Gondwana 超大陸形成時にセール・ロンダーネ山地地域と近接していたと想定される中央ドロニングモードランド地方や、東アフリカのモザンビーク北部地域における観察事実とも調和的である。そこで、筆者は原生代末期～古生代初期の Gondwana 超大陸形成時の造山活動においても、アルプスやヒマラヤのような新生代の衝突型造山帯に見られるナップ形成テクトニクスが支配的であったと結論づけた。

本論文の成果として、南極での野外調査を通じて得た資試料をもとに、短期間に多量のデータを処理し、総合的に解析して、地質構造の解釈に新たな視点を与えたことが高く評価された。

また、これまでの先行研究では必ずしも明らかではなかった変成条件や年代値の地域的特性を見いだしたことや、二次的改変の著しい岩石にも適用できる新たな地質温度計を導入したこと、調査地域を一つのモデルとして大陸衝突の際の具体的なテクトニクスのイメージを提唱できたことは、Gondwana 超大陸形成を含めた世界各地の衝突型造山帯の研究の進展に大きく寄与することが認められた。特に、著者が調査地域で発見したペグマタイトの貫入により局所的に後退変成作用を受けた高温変成岩に着目し、Ti-in-Quartz 地質温度計の天然の岩石への適用方法を確立して、二次的改変の著しい変成岩においても、最高変成温度の信頼できる地理的分布を復元し得たことは、精度をさらに高めることができないかという指摘があったものの、筆者のオリジナルな仕事として高く評価された。

以上のことから、本論文は極域科学専攻の学位論文に値するものと認められた。