

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

超高压変成岩とキンバーライト捕獲物質から読み解く  
地球深部の水の挙動とマントル交代作用

Water behavior and mantle metasomatism in the deep Earth  
decoded from ultrahigh-pressure metamorphic rocks and  
kimberlite-derived xenocrysts

申 請 者

坂卷	邦彦
Kunihiko	SAKAMAKI

地球・環境資源理工学専攻 岩石学研究

2017年2月

本研究は、地球物質大循環の観点から地球深部における水の挙動とその循環、マントルへの貯留および水を介したマントル交代作用の解明を大局的な目的として、世界で最も深部まで沈み込んだことが明らかになっている **Kokchetav** 超高压変成岩と最も低温なキンバーライトとして知られる米国コロラド高原のキンバーライト中の捕獲物質を用いて行った実証的研究である。地球深部の情報源は超高压変成岩とキンバーライトの捕獲岩・捕獲結晶であり、本研究はこれら 2 つの情報源のなかで、最も効果的な試料を用いて行われた研究として位置付けることができる。本論文は全 8 章からなっている。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景とおもな目的、特に、実証研究として選択した 2 つの地域、カザフ共和国 **Kokchetav** 超高压変成帯および米国コロラド高原ナバホ火山地域の地質の詳細とそこに産出する超高压変成岩およびキンバーライト捕獲物質を最適試料として用いた背景が述べられている。

第 2 章はカザフ共和国 **Kokchetav** 超高压変成帯産のダイヤモンドを含まないザクロ石-単斜輝石岩についての研究成果をまとめている。本岩に含まれる減圧後の離溶コーサイトを伴うチタン石は Si 過剰チタン石の証拠であり、**Ogasawara et al. (2002)** に次ぐ世界で 2 例目のきわめて貴重な報告である。離溶コーサイトが超高压の実証データであることのみならず、超高压条件下で生成したチタン石中の一部の Si が 6 配位席を占めていたという、変成鉱物としてはメジャーライトに次いで 2 例目の実証報告としても高く評価される。また、このチタン石には OH 基として水が含まれていることが顕微 FTIR 法により確認されている。本岩の主要鉱物であるザクロ石と単斜輝石にも構造水および微細流体包有物として、それぞれ最大約 1850ppm(wt.) および約 4600ppm(wt.) の総 H<sub>2</sub>O (OH 基と分子 H<sub>2</sub>O の合計) が含まれることが明らかにされている。これは本岩形成時に H<sub>2</sub>O 流体が存在していたことの実証データである。更に、単斜輝石中で離溶した含 K 鉱物であるフェンジャイトとカリ長石の分布パターンから、本岩形成時の H<sub>2</sub>O 流体環境について数 mm から数 cm オーダーの空間的不均質と鉱物生成の時間経過に伴う不均質が存在したことが明らかにされた。本岩の全岩化学組成から原岩は含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ケイ質石灰岩であると結論付けている。更に、これらの結果は本来無水鉱物であるザクロ石と単斜輝石が OH 基や微細流体包有物として H<sub>2</sub>O を含み、更なるマントル深部に H<sub>2</sub>O を運搬するキャリアーであることを明らかにした。

第 3 章は **Kokchetav** 超高压変成帯産のダイヤモンドを含むザクロ石-単斜輝石岩についての研究成果をまとめている。本岩石は変成ダイヤモンドの世界初の報告である **Sobolev and Shatsky (1990)** の論文で紹介された含ダイヤモンド変成岩のひとつであるが、本章はその成因を明確にした世界で初めての論述として高く評価できる。本岩の主要鉱物のザクロ石と単斜輝石にも、構造水と微細流体包有物を合わせてそれぞれ最大約 2400ppm (wt.) および約 2500ppm (wt.) の総 H<sub>2</sub>O が含まれることを明らかにした。また、本岩に含まれる粗大ダイヤモンドから H<sub>2</sub>O 分子に帰属する赤外吸収スペクトルのバン

ドを確認した。これはダイヤモンドが  $H_2O$  流体環境下で結晶化したことを示す直接的証拠となっている。また、全岩化学組成に基づいて本岩の原岩を含  $Al_2O_3$  ケイ質ドロマイト質石灰岩と結論付けている。第 2 章で扱ったダイヤモンドを含まない同岩と本岩の成因論的類似点と相違点を明確にしている。

第 4 章は 2 つのザクロ石－単斜輝石岩の研究結果を総合し、これらの岩石が、 $Al_2O_3$  を含むケイ質石灰岩とケイ質ドロマイト質石灰岩を原岩として、超高压下での交代作用により生成したと結論付けている。その説明のなかで、大陸表層物質のマントルへの深部沈み込み過程で起こる変化を総合的に説明するモデルとして既に提唱されていた **Intraslab UHP Metasomatism** (Ogasawara 2004; 2014) モデルの精密化を行い、改良モデルを提示している。この改良モデルでは、超高压変成作用の全沈み込み過程で炭酸塩岩がマントルへの  $CO_2$  キャリアーとして機能する一方、ザクロ石－単斜輝石岩のような石灰ケイ酸塩岩は沈み込み初期の原岩に近い状態では  $CO_2$  のキャリアーとして機能し、その後、超高压下で周辺岩石の脱水による  $H_2O$  流体の浸透を受けることで交代作用が起こりザクロ石－単斜輝石岩が生成し、更なる沈み込み過程ではザクロ石－単斜輝石岩がマントル深部への  $H_2O$  キャリアーの役割を果たすことが指摘されている。この結論は地球表層からマントル遷移層に至る  $H_2O$  の大循環の新たな可能性を示唆したものであり、世界の超高压変成作用の研究分野に一石を投じる重要な成果になったと評価できる。

第 5 章は米国コロラド高原 **Garnet Ridge** のキンバーライトの捕獲結晶として発見された含水 Na ザクロ石に関する研究である。このザクロ石は主晶の主成分組成としてはパイロープに相当するが、粒子中にパーガス閃石 (Na 角閃石) の離溶ラメラを含む。ザクロ石中のパーガス閃石の離溶はコロラド高原からは初めての報告である。離溶前のザクロ石に OH と Na が固溶されていたこと示している。ザクロ石への Na 成分の固溶には高い圧力が必要で、その産出報告は極めて稀である。本研究では離溶前の化学組成を基にこのザクロ石が深さ 200~300 km で生成したことを明らかにした。また、コロラド高原下に沈み込んだファラロンプレート起源のエクロジャイトのザクロ石とは大きく異なる組成であることから、含水 Na ザクロ石は、ファラロンプレート沈み込みよりかなり前の海洋プレート沈み込みに伴う海洋地殻起源の Na を含む  $H_2O$  流体によるザクロ石カンラン岩のマントル交代作用の産物であると結論付けられた。また、コロラド高原下のマントル深部の本来無水鉱物に水が含まれることの実証データであり、Na の起源と合わせ、コロラド高原下のマントル交代作用の議論に一石を投じる重要な研究成果である。

第 6 章は米国コロラド高原 **Green Knobs** と **Buell Park** のキンバーライト中のカンラン石捕獲結晶中に発見されたカンラン石中に含まれるディオプサイドと磁鉄鉱ラメラの成因に関する研究である。カンラン石中のラメラの産出は世界的に極めて稀であるが、その成因は遷移層に近いマントル深部物質の上昇に伴う生成の可能性が示唆されている。本研究のカンラン石中のディオ

オプサイドと磁鉄鉱のラメラはコロラド高原での初めての発見である。ディオプサイドラメラの存在は母晶に Ca が固溶されていたことを示すものであり、磁鉄鉱の Fe<sup>3+</sup>成分は母晶に固溶されていた OH 基による母晶の Fe<sup>2+</sup>の酸化による生成であることが指摘されている。組織情報とラメラ形成前の化学組成から考察した結果として、ラメラ形成前の物質がカンラン石（ $\alpha$ 相）主晶と含水リングウッドイト（ $\gamma$ 相）客晶の連晶であり、ラメラは減圧過程での含水リングウッドイト客晶の  $\gamma \rightarrow \alpha$  転移に伴う分解生成物としている。更に、ラメラ形成前の連晶は 300 km 以深の上部マントル由来であると結論付けている。カンラン石中のディオプサイドと磁鉄鉱ラメラの発見およびその起源が含水リングウッドイトであったとする結論は極めてインパクトがあり、マントル岩石学の最先端研究分野の進展に大きく貢献する結果として位置付けられる。本結果から当該試料がマントル遷移層に近い上部マントル深部から上昇プルームにより運ばれ、最終的にキンバーライトマグマにより地表にもたらされたことが分かった。また、このようなマントル深部において主要鉱物中に水が含まれていることの直接的証拠となり、コロラド高原下の上部マントル深部に相当量の水が蓄えられている可能性が指摘されている。

第 7 章はプレート収束帯深部における水の挙動と貯留、更にそれに引き続くマントル交代作用を地球物質大循環の観点から議論している。

第 8 章は本論文のまとめであり、地球深部の水の挙動とマントル交代作用について、本研究で取り上げた実証的研究成果に基づいて結論を述べている。

以上を要約すると、本研究は地球深部解明の情報源の 2 つである超高压変成岩とキンバーライト捕獲物質の両者を用いて、地球深部の水の挙動とマントル交代作用の解明にチャレンジした実証的研究であり、これまでの世界の同分野で未だなされていなかった成因論的側面に大きな進展をもたらす研究成果であり、超高压変成作用、マントル岩石学、更には地球表層からマントル遷移層に至る地球物質大循環の研究分野に多大な貢献をするものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

2017年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学） 小笠原 義秀

副査 早稲田大学教授 理学博士（名古屋大学） 高木 秀雄

早稲田大学教授 Ph. D (カリフォルニア大学デービス校)

フェイガン ティモシー・ジェイ

早稲田大学教授 理学博士（東京大学） 内田 悦生