

氏名	かわ 河 上 哲 生
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2466 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 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	理学研究科地球惑星科学専攻
学位論文題目	Boron depletion controlled by the breakdown of tourmaline in the migmatite zones of the Ryoke metamorphic belt, SW Japan 西南日本領家変成帯ミグマタイト帯における電気石分解によるホウ素の枯渇
論文調査委員	(主 査) 教授 小畑 正明 教授 北村 雅夫 助教授 平島 崇男

### 論 文 内 容 の 要 旨

西南日本領家変成帯青山高原地域には砂泥質変成岩は広く分布する。その岩相は北から南へ変成度の上昇に伴い、片岩からミグマタイトに移行する。この岩相境界付近において、重要なホウ素鉱物である電気石が分解することを見出した。即ち、片岩中には電気石が存在するが、ミグマタイト中には存在しない。この電気石の分布から、「電気石消滅アイソグラッド」を世界で初めて定義した。このアイソグラッド付近では、電気石が珪線石と堇青石の集合体に分解する組織が見つかり、かつ、同アイソグラッドが広域変成作用で形成されたザクロ石—堇青石アイソグラッドと平行であることから、電気石消滅アイソグラッドは、電気石が昇温変成作用の過程で分解することにより形成されたと考えられる。青山高原地域における電気石消滅反応の温度圧力条件は 725°C, 4.5kbar 程度であり、これは泥質岩の部分熔融が十分可能な条件である。

電気石消滅アイソグラッド付近では 2 種類の電気石の産状が認められる。黒雲母や堇青石、珪線石などからなるメラノゾーム中に産する分解組織を示す電気石と、自形の斜長石や半自形の紅柱石を含むリューコゾーム中に産する自形の電気石である。これらは同じ岩石中の近傍に産する。リューコゾームはブーディンネック中に閉じた形で存在することから、ほぼその場でメルトとして形成されたと考えられる。このリューコゾーム中に電気石が産することから、メルトにはホウ素が含まれていたと考えられ、その起源は、メラノゾーム中で分解組織を呈する電気石に求めることが出来る。すなわち、電気石消滅アイソグラッドは電気石が脱水溶融反応で分解することで形成されたと考えられる。

即発ガンマ線放射化分析により全岩ホウ素濃度を決定したところ、電気石消滅アイソグラッドより低温側では、電気石が全岩ホウ素の重要なキャリアとなっているが、電気石を含まない高温側の岩石では、電気石の安定性に支配されて全岩ホウ素の枯渇が起こっていることがわかった。

ホウ素は安定なホウ素鉱物が存在しない場合、不適合に振る舞う。従って、電気石の分解に伴い放出されたホウ素は、メルトに取り込まれたと考えられる。ミグマタイト帯をホウ素に枯渇させるためには、そこからホウ素を取り除く機構が必要である。主要元素について全岩組成はミグマタイトと片岩とで大きな差異は見られないことから、大量のメルトがミグマタイト帯から抜けたとは考えにくい。ミグマタイト帯をホウ素に枯渇させる機構として次の 3 つが考えられる。

まず、電気石の分解が部分熔融の初期に起きた場合、ホウ素を含むメルトは、浮力とその低い粘性のために、容易にミグマタイト帯の岩石中から抜け出たであろう。この反応によって生じるメルト量は電気石の量に依存するため、少量であり、主要元素の全岩化学組成には大きな影響は与えなかったであろう。これは分別熔融に相当する。

2 つ目は、ホウ素が H<sub>2</sub>O 流体に入って抜けた場合である。ミグマタイト中では、メルトが集積したと考えられる組織(ブーディンネック中のリューコゾーム等)が見つかる。また、マグマ起源紅柱石の発見に伴う解析から、温度圧力履歴が昇温期と降温期で異なることがわかった。これらのことから、ミグマタイト帯で起きた含水鉱物の脱水溶融反応の逆反応はほとんど進行せず、リューコゾームメルトの固結時に H<sub>2</sub>O 流体が放出されたと考えられる。メルトと H<sub>2</sub>O 流体共存下では、ホウ素は H<sub>2</sub>O 流体に多く分配される。従ってこの場合、ホウ素は H<sub>2</sub>O 流体に入ってミグマタイト帯から抜けたであ

ろう。その一部が、電気石消滅アイソグラッドより低温側地域に見られる含電気石ペグマタイトを生じたと考えられる。

3つ目は、超臨界流体の不混和現象によるものである。青山高原地域程度の温度圧力条件でもホウ素やフッ素、リン等が多く含まれる場合、5kbar程度の低圧でも超臨界流体の不混和が観察されている。本地域でこのソルバスを切る反応が進行し、流体の2相分離が起きた場合、ホウ素はH<sub>2</sub>Oに富む流体側に濃集し、ミグマタイト帯から抜け出たと考えられる。

このような電気石分解は柳井地域でも観察された。柳井地域ではKfs-Crd帯高温部に電気石消滅アイソグラッドが定義でき、同アイソグラッドより高温側では全岩ホウ素の枯渇が観察された。青山高原地域に比べ、柳井地域では広い温度圧力範囲が露出しているため、変成度の上昇に伴う電気石の組成変化と挙動を明らかにするのに適している。このような組成変化を解析することにより、地質学的に有用な高温高压実験の実験系を化学的に制約することが出来る。

Bt帯やMs-Crd帯の電気石の組成累帯構造は $X\text{AlNa}_{-1}\text{Mg}_{-1}$ 及び $\text{MgTi}^Y\text{Al}_{-2}$ のような置換関係に支配されている。一方、Kfs-Crd帯やGrt-Crd帯は $\text{CaMgO}^X\text{Al}_{-1}(\text{OH})_{-1}$ 及び $\text{Mg}(\text{OH})^Y\text{Al}_{-1}\text{O}_{-1}$ と $\text{MgTi}^Y\text{Al}_{-2}$ のような置換関係に支配されている。Kfs-Crd帯の堇青石斑状変晶中には丸い30 $\mu\text{m}$ 程度の電気石が包有されており、その組成はマトリクス中の電気石のリムと同じである。従って、包有される電気石とマトリクスに産する電気石のリムは堇青石斑状変晶と共に、白雲母の分解に伴って生じたと考えられる。

電気石消滅アイソグラッドより高温側でも電気石は産するが、これらは電気石分解反応のレリックもしくはホウ素を含むメルトかH<sub>2</sub>O流体から降温期に生じた2次的な電気石であることがわかった。2次的な電気石は昇温期に形成された電気石に比べ、低いX<sub>Mg</sub>値と高いAl値を持つ。Grt-Crd帯に局所的に産するデュモルティエ石も、結晶粒界にのみ産することから、降温期のものであると考えられる。降温期に形成されたホウ素鉱物が存在することから、柳井地域では青山高原地域に比べ、アイソグラッド高温側でのホウ素の除去が局所的に完全ではなかったと考えられる。

高温低圧型変成帯における、電気石の分解に支配された全岩ホウ素の枯渇が明らかになったことで、野外における電気石の分布を調べることは、天然における電気石の高温限界を明らかにするだけでなく、広域的な物質移動を検出するためのツールとして有用であることが明らかとなった。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は日本の代表的な高温低圧型変成帯である領家変成帯に属する、三重県青山高原に分布する変成岩と山口県柳井地域の変成岩をフィールドに取り上げ、変成岩、ミグマタイトの野外と室内での観察、定量化学分析、特にボロンを含む重要な含水鉱物である電気石の分布パターンと全岩のボロン含有量の地域的变化に着目して、地殻下部の変成作用と部分融解およびそれに伴う物質移動を論じたものである。

第1章では、青山高原地域の砂泥質変成岩の岩相分帯と変成分帯、及び変成鉱物の反応組織の記載を行い、北から南に向かって変成度が上昇していることを示した。加えて、地質温度圧力計を用いて、最高変成温度圧力見積もりを行い、青山高原地域で泥質岩の部分溶融が可能であったことを示した。更に、電気石の分布を野外で詳細に観察し、電気石が消滅するフロントを“電気石消滅アイソグラッド”として世界ではじめて定義することに成功した。また、このアイソグラッド付近で電気石の分解反応組織を観察し、電気石の消滅が、累進変成作用に伴う電気石の脱水分解溶解によることを示した。

第2章では、青山高原地域における電気石の産状の違いに伴う組成変化をX線プローブマイクロアナライザーを用いて記載し、過去の高温実験の結果と比較した。また、同地域の変成岩とミグマタイトについて、即発ガンマ線放射化分析により全岩ホウ素濃度を決定し、同アイソグラッドより高温側では電気石の分解に伴い、全岩のホウ素濃度が著しく低くなっていることを見出し、電気石の分解に伴って、岩石に含まれていたホウ素の大部分が岩石から抜け去ったことを明らかにした。また全岩化学組成とモード分析の比較からホウ素は電気石ほぼ全て含まれることも示した。また電気石分解を経験した岩石の履歴を温度圧力図上で解釈し、ミグマタイト帯からホウ素が抜けるメカニズムを考察した。

第3章では、青山高原地域のざくろ石コーディエライト帯低温部のミグマタイトからマグマ起源紅柱石を見出し記載した。そしてこれによって変成帯の温度圧力履歴を制約し、変成帯の温度圧力履歴がヘアピン型でないことを示し、ミグマタイト形成過程におけるホウ素枯渇過程、ホウ素がメルトによって運ばれる場合と流体によって運ばれる場合にわけて詳細に論じた。

第4章では、山口県柳井地域変成帯における変成度の上昇に伴う電気石の組成変化、及び、各分帯における電気石の組成累帯構造の記載と分析を行い、組成変化をもたらす元素の置換様式を明らかにした。この地域でも青山高原地域と同様に、電気石の地域的分布を調べ、電気石消滅アイソグラッドを定義し、同アイソグラッドより高温側のざくろ石コーディエライト帯では全岩はホウ素に著しく枯渇していることを見出した。しかし柳井地域では青山高原地域と異なり、ざくろ石コーディエライト帯において後退変成期に形成された電気石と別種のホウ素鉱物—デユモルティエ石が見つかることを明らかにし、後退変成期に形成されたホウ素鉱物が柳井地域に見られることの意義を考察した。このように柳井地域では電気石消滅アイソグラッドより高温側でも電気石は産するが、これらは電気石分解反応のレリックもしくはホウ素を含むメルトが $H_2O$ 流体から降温期に生じた2次的な電気石であること、2次的な電気石は昇温期に形成された電気石に比べ、低い $X_{Mg}$ 値と高いAl値を持つことがわかった。ざくろ石コーディエライト帯に局所的に産するデユモルティエ石も、結晶粒界にのみ産するなどの産状から、降温期のものであると考えられる。降温期に形成されたホウ素鉱物が存在することから、柳井地域では青山高原地域に比べ、アイソグラッド高温側でのホウ素の除去が完全に進まなかったことが示された。

高温変成岩やミグマタイトに電気石が少なくなる傾向があることはこれまでも世界の他の地域の研究で知られていたが、野外で電気石の消滅するフロントを押さえられたのは本研究が最初である。また全岩ボロン量が電気石の消滅に伴って明瞭に減少していることを示せたのも最初の報告である。以上のように、本研究は変成作用におけるホウ素とホウ素鉱物の挙動について新知見をもたらし、変成作用に伴う物質移動の野外地質学的研究に貢献した。このことにより本審査委員会は本論文を博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。なお主論文に報告されている研究業績を中心として関連する研究分野について口頭試問を行った結果、これについても合格と認めた。