

## 論文の内容の要旨

論文題目：**Mechanism of thermal and chemical evolution of a sheet-like magmabody:  
constraints from the Nosappu-misaki intrusion, Northern Japan**

板状マグマ溜まりの熱化学進化過程：納沙布岬貫入岩体からの制約

氏名：志村玲子

地殻内マグマ溜まりの熱的・組成的な進化は、地表にもたらされるマグマの化学的多様性をもたらす重要な機構の一つである。この進化は、熱が周囲に奪われる事によって生じる温度・組成・相分率のような状態変数の空間構造変化とそれに起因する結晶化やその結晶と液の運動等のマグマ溜まり内ダイナミックスとの相互作用に支配されている。その中でも、閉鎖系マグマ溜まりの化学組成の時間・空間的变化を特に支配しているのは、液の化学組成と温度構造によって決まる結晶化の場と、その結晶と残液との相対運動の機構である。本研究の目的は、閉鎖系板状マグマ溜まりにおける結晶化の場と境界層における結晶と液の輸送情報を、納沙布岬貫入岩体を中心として、根室半島の4つの板状貫入岩体から抽出することである。本岩体の野外観察・全岩と鉱物の化学分析・組織解析・モデリングにより抽出された主要な知見は、第一に、急速に成長した沈積層の下部境界層で生じた分化液が中央部の液と交換される分化機構(境界層分化)が実際に起きている事を示した事である。さらにその液の具体的な輸送機構について制約を行ったことが第二の知見である。以下、その概要についてまとめる。

納沙布岬貫入岩体、マヨマイ岩体、トーサムポロ岩体、キナトイシ岩体は、北海道根室半島に位置し、白亜

紀末期に白亜系根室層群の層理に平行に貫入した水平板状岩体である。これらの岩体の基本的な構造は類似しており、その厚さはそれぞれ 120m, 100m, 80m, 60m である。本研究では最も露頭条件の良い納沙布岬貫入岩体を主な研究対象とした。

納沙布岬貫入岩体に観測される結晶は、貫入時から存在していたもの（以後、斑晶と呼ぶ）と貫入後にその場で形成したものにその化学組成や形態等に基づいて明瞭に分けることができる。それらの分布と組織から納沙布岬岩体は7岩相に分けられる。これらは下部から上部へ向かって、下部急冷部、下部周縁部、集積部（斑晶が濃集している）、中央部（斑晶が存在しない）、上部周縁部 II、上部周縁部 I、上部急冷部である。

貫入時の圧力条件は、周囲の堆積岩の埋没深度から  $0.15 \pm 0.03 \text{ GPa}$  と推定される。岩体の上下の急冷部の石基組成で求めた貫入時の液組成と急冷部の斑晶との平衡から、斑晶が生成した条件は圧力  $0.3 \text{ GPa}$  以下、初期温度  $1125(\pm 25) \text{ 度 C}$ 、 $\text{H}_2\text{O} \sim 1 \text{ wt}\%$ 、 $f\text{O}_2 = \text{NNO}$  と求められる。

岩体の上下の急冷部の総斑晶量はほぼ等しく約  $20 \text{ vol}\%$  であり、下部の集積部には斑晶は  $55 \text{ vol}\%$  存在し、中央部では  $0 \text{ vol}\%$  である。岩体の上下の急冷部の平均値で求めた初期斑晶と現在観測される岩体中の平均斑晶量は統計的に優位な差はなく、求めた初期斑晶量を均質に分布させたマグマが貫入し、その後、斑晶が成長する間もなく沈積することにより、現在の斑晶分布が形成された事を示唆している。斑晶の大部分を占める普通輝石の沈積の時間スケールは、球形を仮定したストークス沈降モデルを用いて、岩体の熱伝導冷却による周囲からの固化と、粒子の形状やその存在量を考慮して、数年から 20 年程度と推定される。他の岩体の集積部の厚さは岩体の厚さと関係しており、岩体の厚みが  $70 \text{ m}$  以上であれば、集積層の占める割合はほぼ一定であるが、それ以下では減少し、 $20 \text{ m}$  以下では、 $0$  になる。この関係は熱伝導と結晶沈積の競争でほぼ説明がつく。したがって、前記の納沙布岬貫入岩体の沈積時間の推定は妥当である。

上部周縁部 I の斜長石斑晶の存在量が初期斑晶量より多いこと、液の密度 ( $2.5 \text{ g/cm}^3$ ) が斜長石の密度 ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) より軽い事、上部周縁部に観察される級化成層構造の中で斜長石を含む斑晶はすべて沈んだ構造を示す事などから、このマグマでは斜長石は密度的には沈む条件であったにも関わらず浮上が起きていることが示唆される。上部周縁部中の水平方向で斜長石の局所的濃集が見られる部分がないことから、均質な上昇流が起きていた事が示唆される。この上昇流は普通輝石の沈積によって生じたと考えられる。この浮上・濃集は、上部の固化前線と斑晶の移動が支配的な岩体固化の初期の現象である。

全岩化学組成の高さ方向の変化は、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、固相濃集微量元素では S 字形を示し、 $\text{SiO}_2$  やアルカリ、液相濃集微量元素では逆 S 字を示していて、斑晶の移動に大きく影響されている。もし斑晶の沈積後、その場での岩体スケールの分化作用がないならば、斑晶を除いた部分（粒間部）は均質なはずである。ところが、粒間部組成の垂直方向変化は全岩組成の場合と同様に、岩体の高さに対して S 字ないし逆 S 字状を示している。すなわち、岩体上部の粒間組成は、初期組成より  $\text{SiO}_2$  やアルカリ、液相濃集微量元素に富み、岩体下部は  $\text{FeO}$  や固相濃集

微量元素に富んでいる。SiO<sub>2</sub> や液相濃集微量元素に最も富んでいる領域は集積部の直上、下部から 3分の1 の高さにある。この領域の輝石や斜長石は岩体内で最も粗く、本岩体の最終固結地点と考えられる。求められた粒間組成の S 字トレンドの平均粒間化学組成と急冷部から推定される初期組成とは統計的に優位な差がないため、集積部と中央部との間の結晶または液の物質輸送が示唆される。

この物質輸送は液の輸送が支配的である。貫入後に形成した結晶の沈積構造は観察されないため、中央部での結晶の沈積や集積部の結晶の移動は起きなかったものと考えられる。上部の周縁部の粒間化学組成が初期組成より分化している事を説明するためには、その場で形成された結晶の取り去りあるいは分化液の流入が必要であるが、取り去られた結晶は集積部直上には観察されていない。これらのことから、粒間部の組成変化を作った物質輸送は、集積部でできた分化液が中央部へ流入することによって進行したと考えられる。

この集積部から中央部への分化液の輸送は、集積部に観察される鉛直方向に延びる優白質なパイプ状構造により示唆される。このパイプ構造は下部から上部へ向かって組成が分化し、径が大きくなりかつ存在頻度が減っており、ポジティブフィードバックのかかった上方への分化液輸送を示唆する。集積部内部の斑晶の周囲には、局所的に部分溶蝕組織と成長組織が認められ、その形成位置は、斑晶のセクター累帯構造に依存しており、粒間液との反応が示唆される。両者の組織は共に、集積層の下部から上部へ量が増加している。両組織の分布は集積部内に偏りがなく存在していることから、粒間部を通過していた液は初期組成から変化しており、かつ、浸透流で移動したことが示唆される。集積部の斑晶量は高さで変化していないため、パイプによる上方への輸送が起きてれば、逆流が必要であり、この普通輝石のリムを形成した浸透流は中央部からの下降流であると考えられる。

この普通輝石斑晶と斜長石斑晶のリム組成には、粒間液との反応が記録されていると考えられる。普通輝石のリムはコアの組成より Wo 成分に富んでおり、周辺の液が CaO か水に富んでいる事が示唆される。パイプの組成は上部に向かって CaO が減少しているため、この Wo 値の変化は水の増加によるものである。また、集積部の斜長石斑晶のリムの鉱物組成は内側から外側へ Ab 成分と Or 成分に富むようになる。その斜長石 3 成分三角図上での組成変化は、An<sub>50</sub> 付近の屈曲によって特徴づけられる。この屈曲はアルカリ長石が晶出に対応していると考えられる。粒間液の化学組成が反映されていると思われる屈曲点より An に富む側の平均 Or 値は、集積部の下部から上部に向かって約 2mol% 程度上昇している。これと液と斜長石の平衡について高温・高圧平衡実験の結果より、K<sub>2</sub>O 量が約 2wt % 上昇したと推定される。

以上の液の輸送過程と結晶化の場を考慮して、斑晶の急速沈積が終了した後の固化過程についてのマスバランスモデルを構築し、中央部の液の輸送について検討した。このモデルでは岩体を斑晶濃集部と液層部に分け、上下から固化が進行し下部から 3分の1 の地点で終了することを想定する。結晶化は液層部の最上部と集積部の下部のみで起き、集積部下部で生じた分化液はパイプを伝って集積部を突き抜け中央部に流入し、中央部で混合し、液層部上部からその情報が凍結されていく。流入した液と中央部の攪拌について、中央部で均質に混ざる場

合と、分化液が直接天井に到達する場合に分けて、岩体に観察される粒間組成のS字カーブを再現するようにパラメータを最適化した。その結果中央部の均質攪拌を仮定すると、固結初期に上部からの固結速度が下部の固結速度に比べて著しく遅い必要がある。他方、分化液が直接天井に到達するケースを考察すると、固化は上下からほぼ同程度の速度で進行すれば良い。上下の境界の条件が大幅に変らない限り上下の熱輸送の効率がさほど変わらないはずであるので、不均質攪拌の方がより妥当であると考えられる。

これまで火山噴出物や貫入岩の化学組成のトレンドなどからその存在可能性が指摘され、アナログ実験によってその機構が提案されていたマグマ溜まりにおける境界層分化が、実際に天然のマグマ溜まりの下部の固液共存層と液層部との間の組成対流として起きていることが示された。特に重要な点は、下部の境界層で形成された分化液の移動機構が集中した経路で上昇し、粒間流で下降していることと、液層部を上昇する組成プルームは直接天井に達し、液層部全体を攪拌する対流は効果的でない事、その組成対流は岩体全体に渡る液の化学組成変化をもたらしているという点である。