

兵庫県姫路市に分布する花崗岩類の角閃石から波状累帯構造を発見

— マグマ残液循環の記録 —

兵庫県立姫路東高等学校 科学部
高瀬健斗 赤瀬彩香 岩本滯治 奥見啓史

要 旨

変成岩の角閃石の波状累帯構造研究の歴史は古く、マグマから角閃石が結晶化した後の変成環境を克明に記録していることが知られている。一方、火成岩の角閃石の波状累帯構造研究の歴史は浅く、マグマ分化末期の環境についてはまだよくわかっていない。筆者らは、角閃石の微細構造を発見することができれば、そこからマグマ分化過程末期の環境を推定することができる考えた。

兵庫県南西部姫路市—加古川市に点々と分布する花崗岩類や、兵庫県南東部神戸市に広く分布する花崗岩類の露頭調査を行い、採取した花崗閃緑岩の薄片（厚さ 0.03mm）を作成して偏光顕微鏡で詳細に観察した。その結果、姫路市—加古川市に点々と分布する半径 4 km 程度の島状の花崗閃緑岩体の角閃石から、微弱な波状累帯構造を発見した。本地域から初めての報告である。この微細構造は幅数 μm 程度の細かい縞模様をなすもので、高倍率でなければ観察することができない。一方、神戸市に広く分布する花崗岩類の岩体からはひとつも発見することができなかった。

姫路市—加古川市の角閃石の波状累帯構造は、角閃石が結晶化した後マグマ残液の循環によって二次的にイオン置換が行われた結果形成されたことを示している。周囲の凝灰岩に熱変成の影響を与えていることから、姫路市—加古川市の小岩体は、地下に広がりをもっており、花崗閃緑岩体の周縁部にマグマ残液の循環が起こっていたと考えられる。一方、神戸市の花崗閃緑岩は、巨大な岩体の、少なくとも周縁部ではないと考えられ、マグマ残液の循環がおこなわれず、波状累帯構造を形成することができなかったと考えられる。

キーワード

角閃石：火成岩を構成する主要ケイ酸塩造岩鉱物。単斜晶系または斜方晶系の有色鉱物で、自形結晶は長柱状。鏡下では、120度で交わるへき開で輝石（90度）と区別できる。

波状累帯構造：鉱物のイオン配列に沿って（多くの場合へき開面に沿って）組成が交互に繰り返す、幅数 μm 程度の細かい縞模様が生じたもの。二次的に形成されたものと結晶の成長過程で形成される場合がある。

マグマ残液：本源マグマが次第に冷却していく過程で、その凝固点に応じて数々の鉱物を結晶化させ、最後に残ったおもに H_2O からなる熱水。

変成作用：既に形成された岩石あるいは鉱物が、二次的に温度や圧力が変化したり流体による化学反応に伴って、鉱物が再結晶化したり岩石の組織が変化すること。

火成作用：マグマが発生してから、上昇して次第に冷却され、鉱物を結晶化させながら岩石が固結するまでにおこる現象のこと。マグマが地表または地表近くで引き起こされる現象（火山作用）と、地下

深くのマグマが地殻中に貫入して引き起こされる現象（深成作用）がある。

1. はじめに

変成岩を構成する角閃石の組成累帯構造は、古くから多くの地域で報告されている（小野, 1976・桑谷, 2003）。それらは、マグマから角閃石が結晶化し岩石が形成された後、変成作用の影響で二次的に形成されたものと考えられており、その発達の様子は、その地域の変成作用の環境を示している。

一方、火成岩の角閃石からの波状累帯構造についてはあまり報告がない。山口（1982）はカンラン岩の輝石に微細構造があることを示し、これを再平衡によって形成されたものであることを示した。さらに山口（1984）は、深成岩の角閃石の累帯構造を発見し、同様のメカニズムで形成されたことを示した。その後、Yamaguchi and Tomita（1985）は、輝石が二次的な離溶によって微細構造を形成することを示した。Kawakatsu and Yamaguchi（1987a）は、山陰帯の大東－横田地域の角閃石から波状累帯構造を発見し、Kawakatsu and Yamaguchi（1987b）、川勝・山口（1987）、川勝・山口（1990）によって、既に結晶化した角閃石を、周囲からマグマ残液が循環し、複数の陽イオンが同時に組み合わせ置換を起こすことによって波状累帯構造が形成されることを明らかにした。このように、晶出した角閃石がイオン置換を起こすことによって累帯構造を形成したり、他の鉱物と共存関係になったりすることは、マグマ残液の量や循環した回数、残液の温度や組成を反映することが次第に明らかになってきた。

筆者らは、兵庫県南西部の姫路市－加古川市と兵庫県南東部の神戸市に分布する花崗岩類の露頭調査をおこない、採取したすべての試料から薄片を作成し、角閃石を偏光顕微鏡を用いて詳細に観察したところ、姫路市－加古川市の花崗閃緑岩の角閃石に波状累帯構造を発見することができた。本地域の花崗岩類からは初めての発見である。神戸市の花崗岩類からは発見できなかった。筆者らは、この微細構造からマグマ分化過程末期の環境の推定を試みた。

2. 岩石・鉱物記載

兵庫県南西部の姫路市および加古川市に点々と分布する播磨花崗岩類の小岩体と兵庫県南東部神戸市に広く分布する六甲花崗岩類の露頭調査を行い、試料を採取して（図1）薄片を作成し、偏光顕微鏡で観察した。播磨花崗岩類と六甲花崗岩類は、いずれも白亜紀後期に凝灰岩類に貫入したものとされている（田結庄, 1987）。

（1）播磨花崗岩類（姫路市）

姫路市南西部の飾西付近の南北4 km×東西3 kmの中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の小岩体から試料を採取した（図2）。同様の岩体は、兵庫県南部の加古川市－姫路市に島状に点々と分布している（山元ほか, 2000）。白亜紀後期に、火砕流堆積物に貫入したと考えられている（岸田・弘原海, 1967）。花崗閃緑岩は等粒状で、斜長石、石英、カリ長石、角閃石、黒雲母からなり、風化変質をほとんど受けていない（図3）。部分的

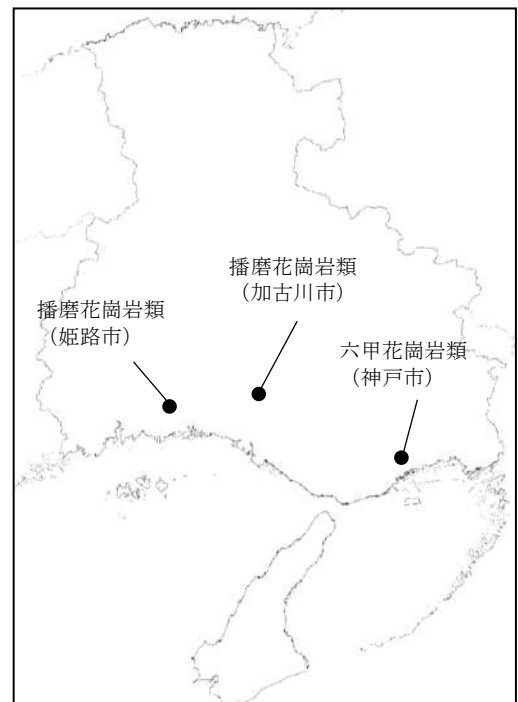
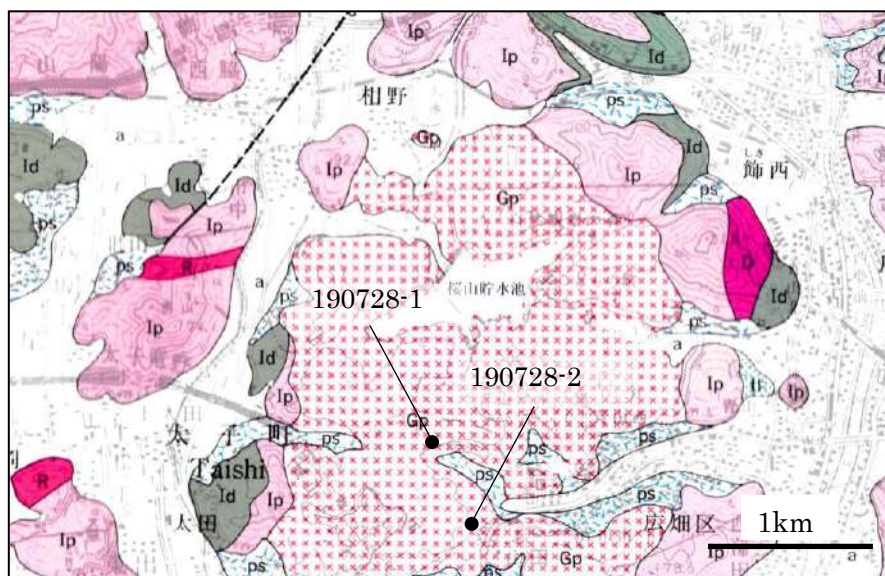


図1 試料を採取した地点

に、有色鉱物が集合している。本岩体の詳しい研究はまだおこなわれていない（兵庫県都市住宅部土地政策局企画室, 1992）。

火砕流堆積物は、石英の斑晶に富む黒雲母流紋岩質火山礫凝灰岩で、30mm 程度の同質岩片を含み、貫入の際の熱によって強溶結している。このことは、地下に岩体が大きく広がっていることを示している。



Ps : 礫・砂
 Gp : 角閃石黒雲母花崗閃緑岩
 R : 花崗閃緑斑岩—花崗斑岩
 Ip : 流紋岩火山礫凝灰岩
 Id : 角礫岩
 (Ps は第四紀、Gp~Id は白亜紀後期)

図2 中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の試料採取地点 (山元ほか, 2000 に加筆)

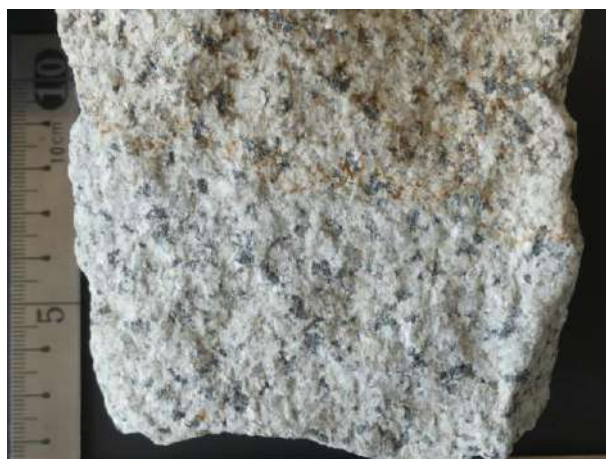
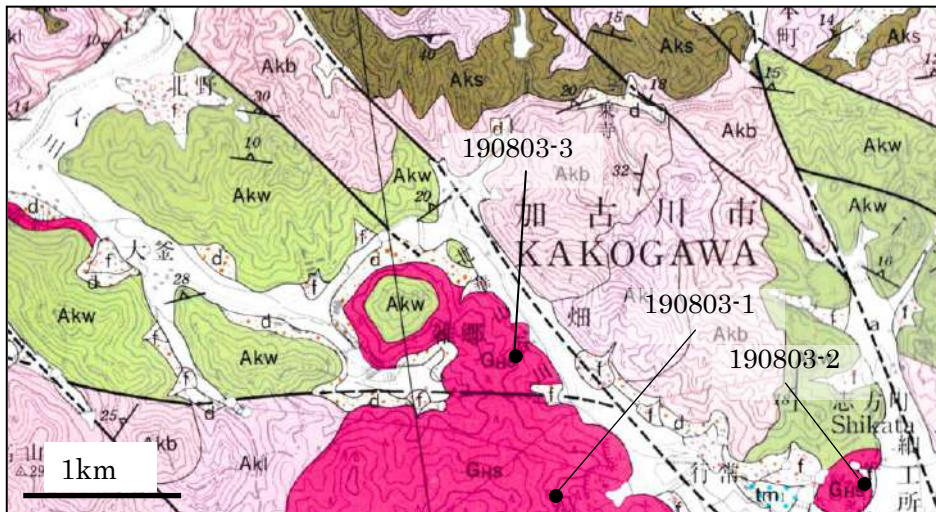


図3 姫路市の中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩 (試料 190728-2)

(2) 播磨花崗岩類 (加古川市)

姫路市の東側に隣接する加古川市志方町の南北 4 km × 東西 4 km の中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の小岩体から試料を採取した (図4)。これは姫路市の花崗閃緑岩と一連のものである (尾崎ほか, 1995)。花崗閃緑岩は等粒状で、斜長石、石英、カリ長石、角閃石、黒雲母からなり、一部に鱗灰石もみられる。部分的に、10mm 程度に有色鉱物が集合している (図5)。風化変質の程度は低い。本岩体の詳しい研究はまだおこなわれていない (尾崎ほか, 1995)。

流紋岩質凝灰岩は、数 10m の規模で貫入による熱によって溶結している。



GHS : 角閃石黒雲母花崗岩・花崗閃緑岩
 Akw : 流紋岩強溶結ガラス質凝灰岩
 Akl : 流紋岩溶岩
 Akb : 流紋岩火山礫凝灰岩
 Aks : 成層凝灰岩・礫岩
 (GHS は白亜紀後期、Akw～Aks は白亜紀中期)

図4 中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の試料採取地点 (尾崎ほか, 1995 に加筆)

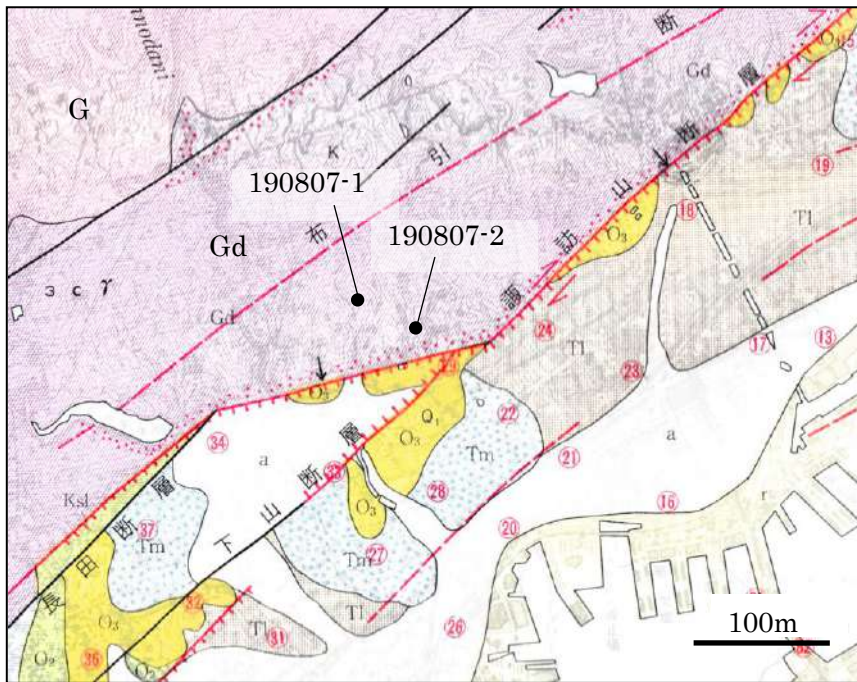


図5 加古川市の中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩 (試料 190803-1/190803-3)

(3) 六甲花崗岩類 (神戸市)

JR 新神戸駅北側には、広く中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の露頭が東西方向に広がっている。この岩体から試料を採取した (図6)。花崗閃緑岩は、斜長石、ピンク色化したカリ長石、石英、角閃石、黒雲母からなり、一部に鱗灰石、スフェーン、ジルコンを含む。まれに、有色鉱物の集合体が見られる。多くは風化変質によってマサ化が進んでいる (図7)。

周囲の流紋岩質凝灰岩は、斜長石、カリ長石、黒雲母の斑晶からなり、貫入の熱によって溶結してガラス質になっている。一部はホルンフェルス化している (兵庫県都市住宅部土地政策局企画室, 1997)。



Tl・Tm：礫・砂
 O2・O3：流紋岩質火山灰
 Gd：角閃石黒雲母花崗閃緑岩
 G：黒雲母花崗岩
 (Tl～O3は第四紀、GdとGは白亜紀後期)

図6 中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の試料採取地点（兵庫県都市住宅部土地政策局企画室, 1997に加筆）



図7 神戸市の中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩（試料 190807-1/190807-2）

3. 角閃石の微細構造

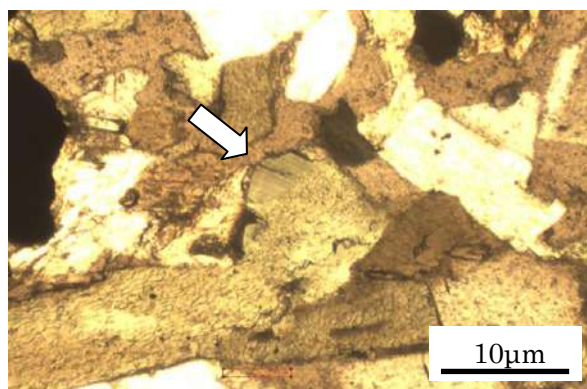
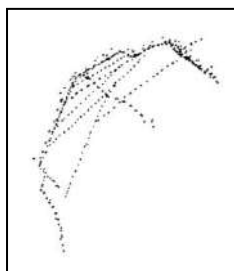
採取したすべての花崗閃緑岩の薄片（厚さ 0.03mm）を作成して、偏光顕微鏡で詳細に観察したところ、島状に点々と分布する小岩体をなす姫路市と加古川市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造を発見した。一方、神戸市に広く分布する花崗閃緑岩からはひとつも発見することができなかった。この微細構造は幅数 μm 程度の細い縞模様をなすもので、高倍率でなければ観察することができず、また肉眼で確認できても写真に撮影することは困難である。

(1) 播磨花崗岩類（姫路市）

角閃石は自形～半自形で、偏光顕微鏡下では淡緑色～淡褐色である。へき開に沿って、一部に緑泥石が晶出している。自形結晶のへき開に沿って、鉍物の輪郭に平行に、幅 $1 \mu\text{m}$ 程度の帯からなる微弱な波状累帯構造がみられる（図8）。波状累帯構造は、角閃石と共存する鉍物が斜長石であろうと黒雲母であ

ろうと関係なく形成されている。山陰帯の磁鉄鉱系列花崗岩類から報告されている角閃石の波状累帯構造は、角閃石全体に発達している（Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a）が、これに比べて発達の程度はきわめて微弱である。

図8 姫路市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の偏光顕微鏡写真
（試料試料 190728-2/オープンニコル×100）



(2) 播磨花崗岩類（加古川市）

偏光顕微鏡下では、角閃石は自形～半自形で、淡緑色～淡褐色である。へき開に沿って一部に緑泥石が晶出している。角閃石のへき開は60度に交わる2方向に発達しているが、波状累帯構造は一方のへき開に平行な方向に形成されている累帯構造を、他方のへき開に平行な方向の累帯構造が切っているようすが多く観察できる（図9・図10）。波状累帯構造は、角閃石と共存する鉱物に関わらず形成されている。

図9 加古川市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の偏光顕微鏡写真
（試料試料 190803-2/オープンニコル×100）

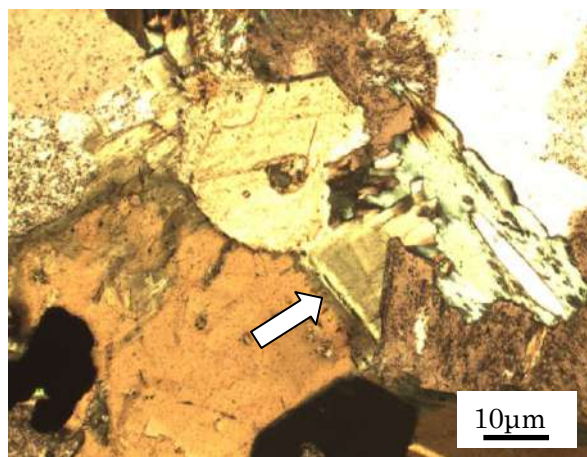
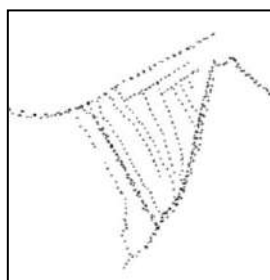
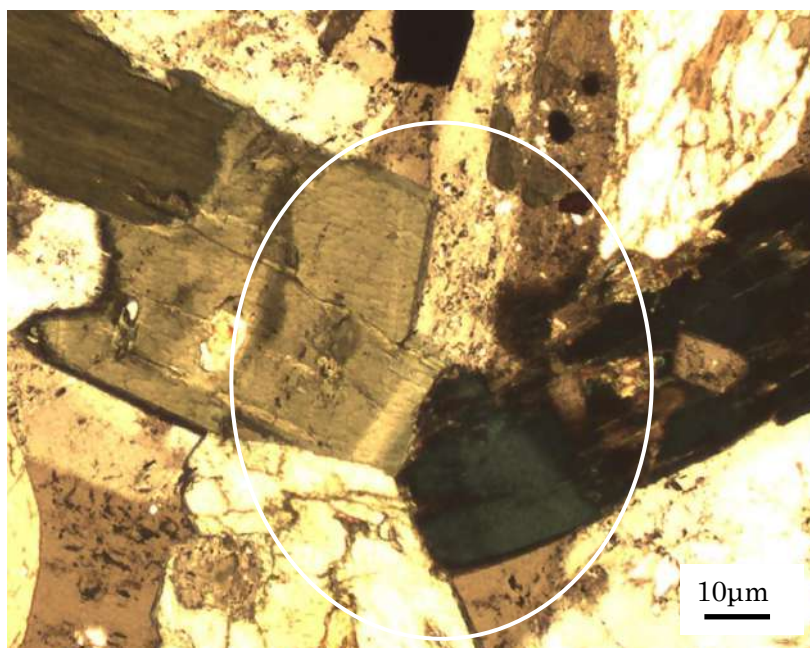
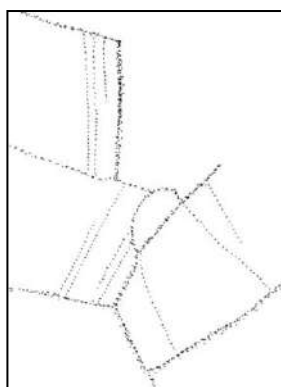


図10 加古川市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の偏光顕微鏡写真
（試料試料 190803-3/オープンニコル×100）



4. 考察

角閃石は花崗岩類を構成する主要造岩鉱物で、マグマが徐々に冷却していく過程で、順に、カンラン石、輝石に続いて結晶化するとされてきた。しかし実際には、一方的で不可逆的に結晶化するわけではなく、いったん角閃石が結晶化した後に再び溶融したり再平衡したりして、離溶組織を形成したり、輝石や黒雲母に変化したりすることが知られるようになった（富田, 1976・沢田, 1978・山口, 1985）。この原因として、一律に温度や圧力が低下していくわけではないことや、既に結晶化した鉱物にマグマ残液が反応することなどが指摘されている。

姫路市や加古川市の播磨花崗岩類（花崗閃緑岩）の角閃石には波状累帯構造がみられる。この構造は、角閃石が自形で結晶化しており、周囲に共存している鉱物に関係なく形成されていることから、角閃石の結晶化後に、マグマ残液によって二次的にイオン置換が行われた結果形成されたものと考えられる。また、すでに形成された累帯構造を、後から別の角度で切断するように新たな累帯構造が形成されている。この不整合に似た形状は、不整合の形成過程と同様に、マグマ残液の循環が方向を変えて何度も繰り返り起こっていたことを示している。

波状累帯構造の発達程度は、熱水残液の循環の程度を反映しており、その形状は、熱水残液が循環した回数や置換を受けた方向を記録している。熱水残液の度重なる循環の影響を受けてもなお深成岩の組織を残していることは、これが変成作用ではなく火成作用の一環であることを示している。波状累帯構造の形成には累進的な酸化環境が必要であり、もともと酸化的環境か還元的環境かは関係ないことが知られている（和田ほか, 2004）。山陰帯の花崗岩類の角閃石の波状累帯構造が著しく発達しているのは、マグマ残液が激しく循環したことを示している（Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a）。これに比べて、播磨花崗岩類の角閃石の波状累帯構造が微弱であることは、岩体の周縁部であっても残液の循環が激しいものではなかったことを、また六甲花崗岩類では波状累帯構造がみられないことは、岩体の中央部では残液の循環がほとんどなかった可能性を示している（図 11）。

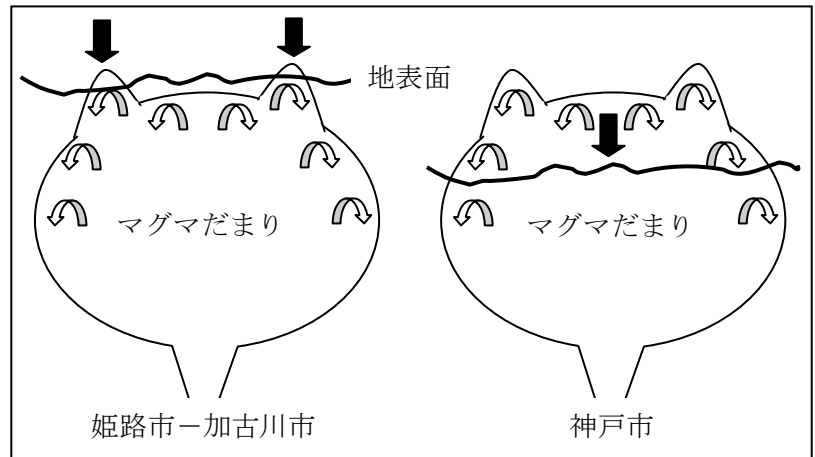


図 11 マグマ残液の循環の仮想モデル図
(矢印は熱水の循環を表わす)

5. 今後の課題

今回の研究では、花崗閃緑岩体と周囲の凝灰岩の関係を露頭で確認し、さらに先行研究からその形成時期や特徴が類似していることを確認した。採取した岩石試料から作成した薄片を丁寧に観察し、神戸市の花崗閃緑岩から波状累帯構造を発見することはできなかったが、本当に神戸市の六甲花崗岩類にはないという確証を得たわけではない。今後、六甲花崗岩類の観察を続ける中で波状累帯構造が発見されれば、本研究の考察を修正する必要性が生じることになる。

マグマ分化末期の環境についてはまだよくわかっていない。角閃石の波状累帯構造部分の成分を EPMA を用いて分析することで、マグマ分化末期にどのようなイオン置換が起こっているのかを明らか

にしていきたい。姫路市－加古川市の花崗閃緑岩にも神戸市の花崗閃緑岩にも輝石は含まれていない。

引用文献

- 兵庫県都市住宅部土地政策局企画室（1992）土地分類基本調査－播州赤穂・姫路・坊勢島・寒霞溪（兵庫県）
- 兵庫県都市住宅部土地政策局企画室（1997）土地分類基本調査－神戸（兵庫県）
- 岸田孝蔵・弘原海清（1967）姫路深成岩類の火山層序－近畿の後期中生代火成岩類の研究（I）（柴田秀賢教授退官記念論文集, 241-255）
- Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987a) Successive zoning of amphiboles during progressive oxidation in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan (*Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 3, 535-540)
- Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987b) Microprobe analyses of zoned amphiboles from quartz diorites in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan（島根大学地質学研究報告, 6, 175-183）
- 川勝和哉・山口佳昭（1987）大東－横田地域の石英閃緑岩の Fe-Ti 酸化鉱物および珪酸塩鉱物の再平衡（日本地質学会学術大会講演要旨, 457）
- 川勝和哉・山口佳昭（1990）大東－横田地域の石英閃緑岩中の累帯構造を示す角閃石の F および Cl 組成変化（島根大学地質学研究報告, 9, 5-8）
- 桑谷立（2003）丹沢変成岩中の角閃石の組成累帯構造（日本地質学会第 110 年学術大会講演要旨集, 292）
- 小野晟（1976）中部地方北部の中央構造線付近の変成岩について（地質学雑誌, 83, 4, 207-212）
- 尾崎正紀・栗本史雄・原山智（1995）地域地質研究報告－北条地域の地質（地質調査所）
- 沢田順弘（1978）島根県掛合陥没体に伴われる貫入複合岩体－非アルカリ岩のマグマ型と岩石系列に関する 2, 3 の問題－（地質学雑誌, 84,4, 177-200）
- 田結庄良昭（1987）日本の地質 6－近畿地方（共立出版株式会社, p58）
- 富田克敏（1976）輝石・角閃石の離溶組織（岩石鉱物鉱床学会誌特別号, 1, 93-104）
- 和田肇・山口佳昭・原山智・木村純一（2004）黒部川花崗岩体の希土類元素分布と副成分鉱物－珪長質マグマ溜まりにおける結晶分化作用（日本岩石鉱物鉱床学会学術講演会講演要旨集, 39）
- 山口佳昭（1982）カンラン岩における単斜輝石の再平衡と微細組織（地球科学, 36, 2, 62-68）
- 山口佳昭（1984）浅所貫入深成岩の Ca 角閃石の累帯構造（地球科学, 38, 5, 346-351）
- 山口佳昭（1985）深成岩中のアクチノ閃石－ホルンブレンド連晶とその再平衡（島根大学地質学研究報告, 4, 27-31）
- Yamaguchi, Y. and Tomita, K. (1985) On the structure of Clinohypersthene Derived as a Host Phase from Parental Pigeonite by Exsolution（島根大学理学部紀要, 19, 151-157）
- 山元孝広・栗本史雄・吉岡敏和（2000）地域地質研究報告－龍野地域の地質（地質調査所）

謝辞

本研究をおこなうにあたって、本校科学部顧問の川勝和哉先生には、始終有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。