

論文

山陽帯チタン鉄鈹系列酸性マグマの結晶分化作用に関する一考察  
～西南日本内帯加古川市花崗閃緑岩の角閃石から発見された波状累帯構造を指標として～

川勝 和哉\*・青山えりか\*\*

**Magmatic differentiation of ilmenite series granitoids in San-yo belt.**  
**～discovery an oscillatory zoning of amphiboles in granodiorite**  
**in the Kakogawa area, southwest Japan～**

Kazuya Kawakatsu\* and Erika Aoyama\*\*

**Abstract**

Medium-grained Cretaceous to late Paleogene hornblende-biotite granodiorites are distributed from east to west in Kakogawa as small masses about 1 km × 2 km in size. The granodiorites are thought to be a part of a batholith around the Sea of Harima, and belong to the ilmenite series granitoids in the San-yo belt. Oscillatory zoning was discovered in the amphiboles in the Kakogawa granitoids.

The granitoids contain automorphic ilmenite in the pale green rims of automorphic amphiboles. This shows that oxygen fugacity was not so high, and indicates reducing conditions in the early stages of magmatic differentiation. Following that, the outer parts of the amphiboles re-equilibrated, and pale brown cores and pale green rims were formed by replacement of the primary stage, due to fluid circulation under subsolidus conditions. Moreover, replacement of the secondary stage by fluid circulation continued, and oscillatory zoning formed in the pale green rims of the amphiboles by sudden oxidation of the remaining magmatic fluid. At the same time ilmenite re-equilibrated into a combination of rutile and sphene among the amphiboles and other crystals. The oscillatory zoning, which has developed only in automorphic apatite in the pale green rims of the amphiboles, shows that the oscillatory zoning formed after replacement, by fluid circulation of the primary stage. The oscillatory zones are a few micrometers wide, with a form like a cross-lamina structure. This developed in the direction of c-axis.

The San-yo and San-in granitoid belts became active at the same time, but differ greatly in the extent of oxidation of their early magmatic differentiation stages. However, there are some similarities, such as the same oscillatory zoning of amphiboles. Using this as an index, contrasted with granitoids of both belts, suggest the temperature and pressure conditions after the late magmatic differentiation were alike in both belts.

**Key words:** ilmenite series, oscillatory zoning, Kakogawa granitoids, oxygen fugacity, subsolidus conditions, re-equilibrated

はじめに

Ishihara (1977) および津末・石原 (1974) は、西南日本内帯に分布する花崗岩類を、帯磁率と  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比が低く、チタン鉄鈹のみを含み、主に山陽帯に分布するチタン鉄鈹系列と、帯磁率と  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  比が高く、多量の磁鉄鈹とチタン鉄鈹を含み、主に山陰帯に分布する磁鉄鈹系列に二分した。磁鉄鈹系列花崗岩類は高い酸素分圧条件下で、またチタン鉄鈹系列花崗岩類は還元的环境で固結したとされている。さらに石原 (1982) は、磁鉄鈹系列花崗岩類には、本源的に酸化条

件下で生成したものと、二次的に酸化条件下で生成したものがあり、チタン鉄鈹系列花崗岩類にも、本源的に還元的条件下で生成したものと、二次的な還元的条件下で生成したものがあるとした。そして、山陽帯は本源的に還元的条件、山陰帯は本源的に酸化的条件であったと結論付けている。磁鉄鈹系列とチタン鉄鈹系列のマグマの違いは、堆積岩中の炭素による還元作用によるものだとか、地表水の関与、あるいはマグマが生じる深さやマグマの上昇過程での汚染などが考えられているが、まだはっきりとしたことはわかっていない。

本論では、加古川市に分布する山陽帯花崗岩類から発見した角閃石の波状累帯構造の意義について報告する。深成岩の角閃石の波状累帯構造は、Kawakatsu and Yamaguchi (1987) による、山陰帯磁鉄鈹系列に属する島根県東部大東-横田地域の花崗岩類からの報告がある。そこでは、角閃石の晶出末期に、そのリム部がマグマ残液と反応して、イオン置換をおこした結果形成されたと結論付けた。このように形成される波状累帯構造が、山陽帯チタン鉄鈹系列の花崗岩類からも発見された意義は大きい。同時代の白亜紀～古第三紀に活動し

\* 兵庫県立加古川東高等学校  
(連絡先: 675-0039 兵庫県加古川市加古川町粟津 232-2)  
Kakogawa higashi senior high school  
(present address: Awazu 232-2, Kakogawa-cho, Kakogawa-city, Hyogo, 675-0039 Japan)

\*\*筑波大学生命環境学群地球学類  
(連絡先: 305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1)  
University of Tsukuba, School of Life and Environmental Sciences,  
College of Geoscience  
(present address: Tennoudai 1-1-1, Tsukuba, Ibaragi, 305-8572 Japan)

た山陽帯と山陰帯の2種類のマグマは、マグマ分化早期の酸化の程度が大きく異なっていたにもかかわらず、角閃石やリン灰石に同様の波状累帯構造が形成されているなど共通点が多く、これを指標として用いて両帯の岩石を対比することによって、マグマ過程末期の結晶を取り巻く環境を推定する一助となる。

## 地質概説

筆者らが作成した地質図を第1図に示した。本調査地域には、現在火山活動が皆無であるが、白亜紀後期には大規模な火山活動があったことが知られており(松下進, 1971)、当時の火山活動で生じた流紋岩や火砕岩が、加古川市～高砂市に広く分布している。これは従来「相生層群伊勢累層」と地質区分されていたものである。また、竜山周辺の採石をしている山々の地層は「大殿部層」とされてきた(近畿地方土木地質図編纂委員会, 1987)。これらは、兵庫県東部の神戸市北区や西宮市、宝塚市、および三田市などに分布する「有馬層群」と一連の火山岩類であるため、加古川市～高砂市に分布する「相生層群」は「有馬層群鴨川層」に岩相対比される(尾崎・栗本・原山, 1995)。このように複雑な区分を正すため、尾崎・原山(2003)は、高砂地域～加古川地域にかけて分布する白亜紀火山岩層を「大殿層」と再定義している。

この流紋岩～流紋岩質火砕岩に、加古川市志方町を中心に花崗岩類が貫入し、周囲の凝灰岩類に熱変成作用を与えている。この花崗岩類は、岸田・弘原海(1967)によって「播磨花崗岩体」と命名され、播磨灘を中心とするバソリスの一部が、西部の赤穂市や南部の家島諸島まで点々と分布している。島状に分布する岩体の規模は1 km×2 km程度である。白亜紀後期の花崗岩類の同様の産状を示すものには、島根県東部大東～横田地域で報告されている山陰帯(磁鉄鉱系列)の花崗岩類がある。加古川市志方町に分布する花崗岩類は中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩であり、白亜紀～古第三紀後期の六甲花崗岩類とほぼ同時期の、山陽帯チタン鉄鉱系列に属する(近畿地方土木地質図編纂委員会, 1981, 日本の地質「近畿地方」編纂委員会, 1987)。高砂市教育委員会(2005)によると、本地域の花崗岩類は、 $5 \times 10^{-4}$ SI以下の低い帯磁率を示している。これまでのところ、播磨花崗岩類についての記載はこれ以外にみられない。また、本地域に分布する火山岩類、堆積岩類、花崗岩類の具体的な放射性同位元素による年代測定もおこなわれていない。なお、本調査地域南部の兵庫県飾磨郡家島町に分布する黒雲母花崗岩をRb-Sr法で測定したところ、黒雲母73 my、カリ長石88 myであったという報告がある(松下進, 1971)。この花崗岩は、志方町を中心として分布する花崗岩類と同じ起源のマグマが同時期に貫入したものと考えられている。

### 中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩

加古川市北西部の大藤山を中心に分布し、さらに小岩体が西部に点々と続いている。これは、巨大なバソリスの一部が

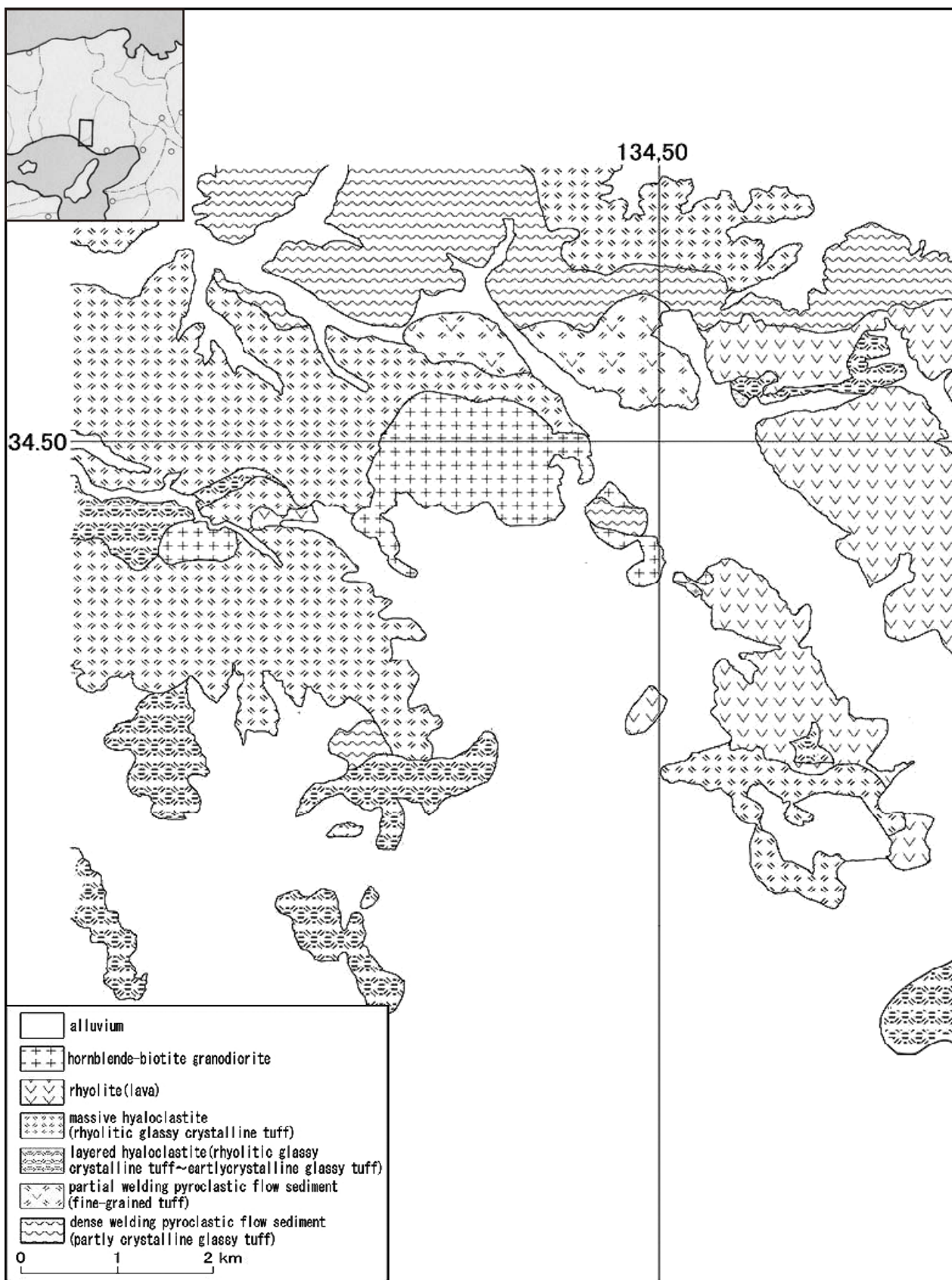
侵食によって顔を出したもので、これらの小岩体は地下深部ではひとつにつながっていると考えられる。このような産状は、山陰帯の島根県大東～横田地域の花崗岩類と類似している。露頭ではタマネギ状に風化が進んでおり、試料採取に際しては、タマネギ状ブロックの中心部を得た。

組織は、石英とカリ長石による微文象構造が発達している。ときに斜長石と石英がミルメカイト組織を示す。鉱物組成は、斜長石(30%・自形～半自形)、カリ長石(30%・他形)、石英(28%・他形)、角閃石(7%・自形～半自形)、黒雲母(3%・半自形)、その他、ジルコン(自形～半自形)、チタン鉄鉱(自形～半自形)、リン灰石(自形～半自形)、磁鉄鉱(細粒)がある。自形～半自形のチタン鉄鉱は大きく、角閃石や黒雲母、斜長石のリム部に包有されている(第2図)。これは、チタン鉄鉱がマグマ分化の早期に、それら包有している鉱物と同時期に晶出したことを示すものであり、晶出当時は還元的環境であったことを示している。一方、角閃石や黒雲母の周囲には、細粒の自形～半自形の磁鉄鉱がスフェーンやルチルと共存して晶出している(第3図)。チタン鉄鉱は低温の酸化条件下で磁鉄鉱やスフェーンおよびルチルに変化して再平衡することが知られている。さらに、鉱物粒間に磁鉄鉱の微細粒がプール状に集合している。これらの微細な磁鉄鉱はマグマ過程で晶出したものではなく、二次的に酸化条件下で生じたものと考えられる。角閃石や黒雲母のリム部形成時以降の、マグマ分化末期～サブソリダス条件下で晶出あるいは再平衡したと考えられる鉱物の組み合わせとそれらの特徴は、山口・川勝(1987)で報告されている山陰帯磁鉄鉱系列花崗岩類のものと類似している。

### 角閃石の波状累帯構造

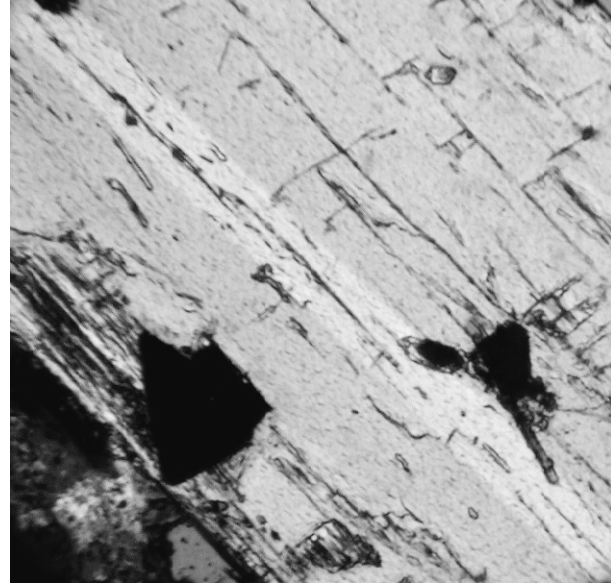
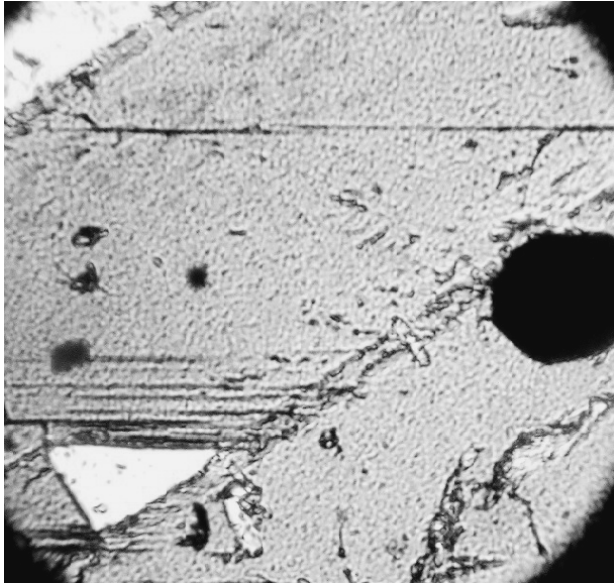
マグマ分化末期の高い酸素分圧のサブソリダス条件下で火成岩の角閃石に累帯構造がみられることは、すでにスウェーデンのFinnmarka複合岩体(Czamanske and Wones, 1973)やバプア・ニューギニアのWestern Highlands複合岩体のporphyry copper 鉱床(Mason, 1978)、ソロモン島ガダルカナルのKoloula複合岩体(Chivas, 1981)、山口県須佐高山の石英閃緑岩体(Yamaguchi et al., 1974)などで報告されている。しかし、これまでのところ、深成岩の角閃石から、複雑に発達した波状累帯構造が見つかったという報告は、山陰帯磁鉄鉱系列の浅所貫入岩体である、島根県大東～横田地域の石英閃緑岩に限られており(Kawakatsu and Yamaguchi, 1987)、しばしば特異な構造とみられることもあった。しかし今回、山陽帯チタン鉄鉱系列の貫入岩体である角閃石黒雲母花崗閃緑岩からも同様の構造が発見されたことにより、マグマ分化末期の流体相の影響を受けた証拠がさまざまな岩体に残存している可能性がでてきたと同時に、異なる起源とされるマグマの分化過程を比較追跡する指標となり得るものとして注目される。

なお、ここでいう波状累帯構造とは、マグマ分化末期のサブソリダス温度条件下で、幾度となく循環するマグマ残液の流体相によってイオン置換がおこなわれ、晶出途中の結晶が融食と成長を繰り返し、その記録が不整合的に切りつ切られ

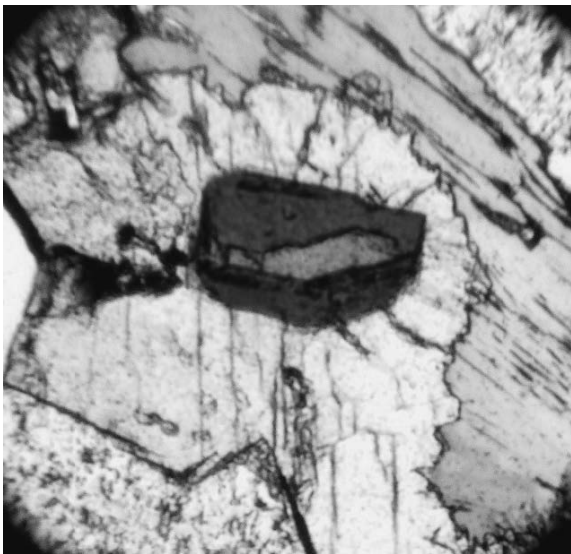


第1図 加古川市～高砂市の地質図(2万5000分の1地形図を使用)





第2図 角閃石のリム部に包有されている自形～半自形のチタン鉄鉱  
オープンニコール/横 0.5 mm



第3図 チタン鉄鉱がスフェーン+ルチルに再平衡している  
オープンニコール/横 0.2 mm

つの形態を示す、幅数 $\mu\text{m}$ の累帯構造をいう。

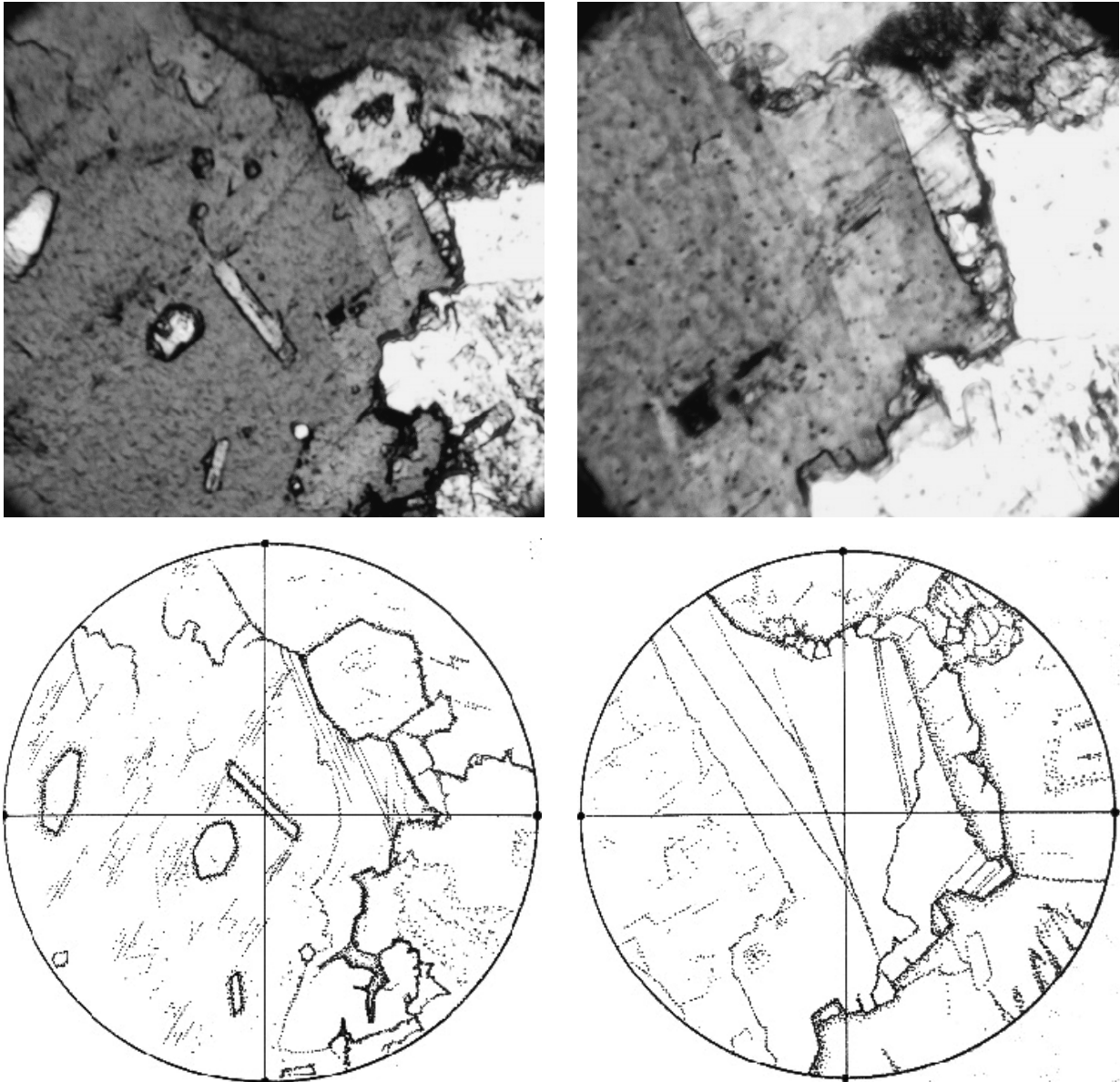
波状累帯構造が発見された花崗岩類は、加古川市志方町高畑に分布する小岩体である。角閃石は自形～半自形で、Mg普通角閃石の褐色コアと、アクチノ閃石～Mg普通角閃石の淡緑色の広範なリム部からなる。まれに濃緑色の最外縁リム（アクチノ閃石）をもつ場合もある。波状累帯構造は淡緑色リム部のみにみられる。累帯1本の幅は数 $\mu\text{m}$ で、斜交葉理のような切りつ切られつの形態を示しながらc軸方向に向かって発達している（第4図a～c）。波状累帯構造は、淡褐色コアや濃緑色リムにはみられない。

#### 山陽帯チタン鉄鉱系列マグマの分化に関する一考察

波状累帯構造には、マグマ分化末期のマグマ組成の変化や、

水蒸気圧の上昇によってもたらされる二次沸騰のようす、 $\text{H}_2$ の母岩への拡散による酸素分圧の上昇、流体相による物質交代の影響などが克明に記録されている。それを解き明かす際に酸素分圧の指標となるのが、酸化鉱物とその組み合わせである。山陽帯の角閃石や黒雲母のリム部形成時以降の、マグマ分化末期～サブソリダス条件下で晶出あるいは再平衡したと考えられる酸化鉱物やリン灰石の特徴は、山陰帯磁鉄鉱系列花崗岩類のものと類似している。このことは、山陽帯および山陰帯のマグマ分化末期以降の環境条件が類似していたことを示している。今回の成果をもとにして、山陽帯と山陰帯の酸性マグマの分化を対比した模式図を第5図に示した。

島根県東部大東～横田地域に分布する白亜紀花崗岩類（斑れい岩～石英閃緑岩）の小岩体は、山陰帯磁鉄鉱系列に属すバソリスの一部をなしており、古第三紀花崗岩類（花崗岩～花崗閃緑岩）に広範に貫かれて、島状に取り残されたように産する（Kawakatsu and Yamaguchi, 1987）。自形角閃石の淡緑色リムに自形の大きな磁鉄鉱が包有されており、角閃石が晶出する過程（マグマ分化早期）から酸素分圧が上昇していたことを示している。その後、共存磁鉄鉱～チタン鉄鉱温度計による推定で $585^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  ( $\log f_{\text{O}_2} = -17.4 \sim -24$ )という、マグマのソリダス最低温度よりもずっと低い温度で角閃石の外縁部が再平衡し、淡褐色のコア（Mg普通角閃石）の周囲に淡緑色のリム（アクチノ閃石～Mg普通角閃石）が形成された（第1段階交代作用）。さらに共存長石温度計による推定で $425^\circ\text{C} \sim 390^\circ\text{C}$ という低温で、多くの porphyry copper を胚胎する花崗岩類と同様に、粒間残液の気体による飽和脱水と酸素分圧の累進的な上昇がほぼ同時期におこり、サブソリダス条件下で角閃石やリン灰石の波状累帯構造が形成され、斜長石とカリ長石が再平衡し、さらに細粒磁鉄鉱が晶出した（第2段階交代作用）。一部に見られるチタン鉄鉱は、初期には磁鉄鉱と共存していたものだが、より低温の酸化による第2段階の交代作用で消失し、スフェーン+磁鉄鉱の鉱物組み



第4図 a 角閃石にみられる波状累帯構造とそのスケッチ  
 左：オープン・ニコル/横 0.5 mm, 右 (拡大)：オープン・ニコル/横 0.2 mm

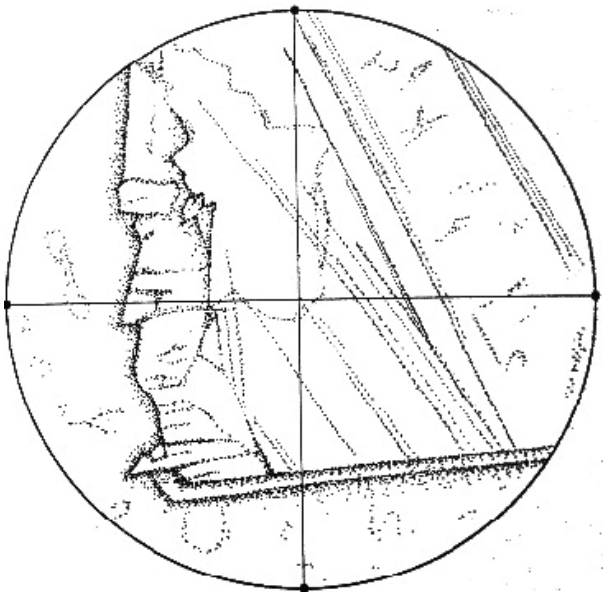
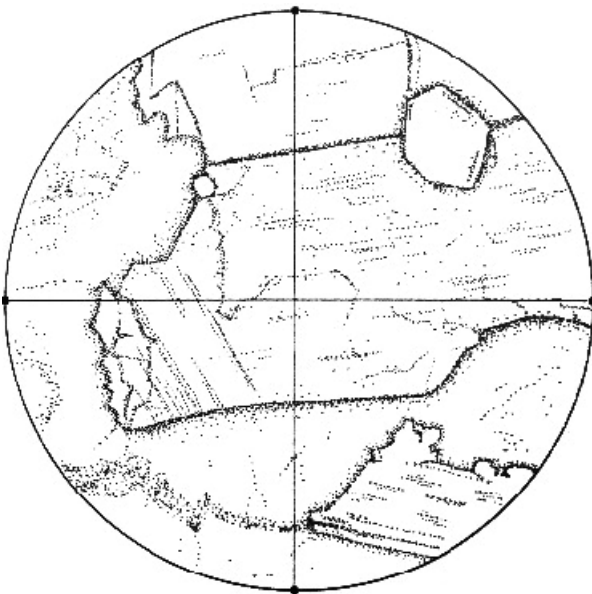
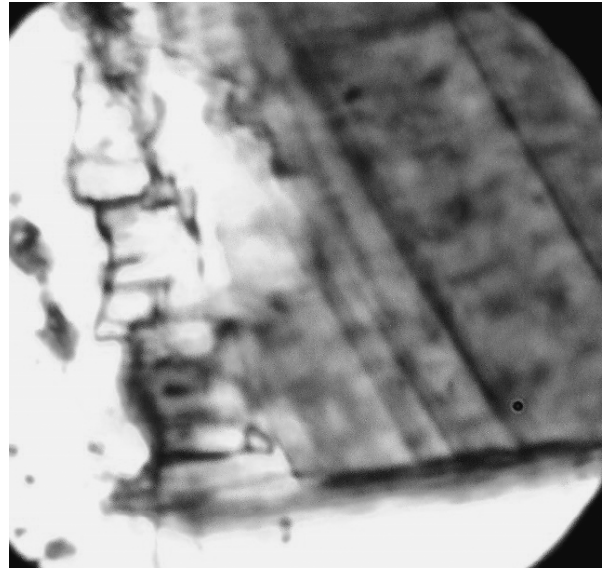
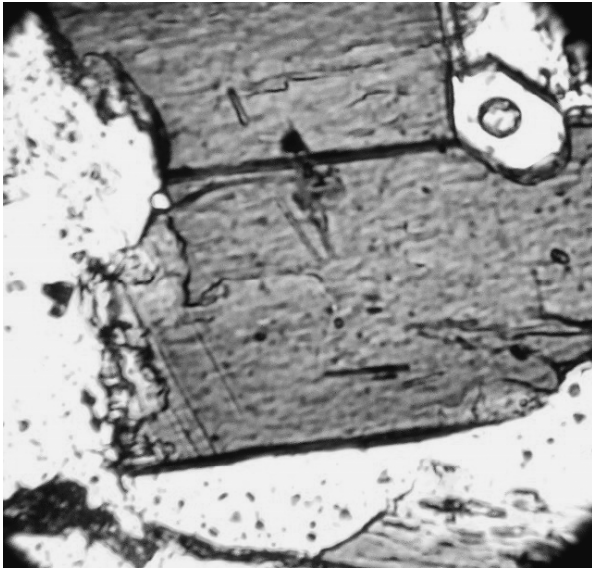
合わせに変化した。既存の磁鉄鈳も、より端成分に再平衡した。これらはいずれも、相当高い酸素分圧条件であったことを示している。

これとほぼ同時期の白亜紀後期～古第三紀に活動した加古川市の花崗岩類(山陽帯チタン鉄鈳系列)は、自形角閃石の褐色コアや淡緑色リムに自形～半自形の大きなチタン鉄鈳が包有されている。これは、マグマ分化の早期にはそれほど酸素分圧が高くなく、還元的環境であったことを示している。その後、サブソリダス条件下の流体相循環による第1段階の交代作用によって角閃石の外縁部が再平衡し、淡褐色コアと淡緑色リムが形成された。さらに、流体相の循環による第2段階の交代作用がおこり、急激なマグマ残液の酸化によって角閃石に波状累帯構造が形成され、チタン鉄鈳は結晶粒間でルチル+スフェーンの鉱物組み合わせに再平衡した。波状累帯構造の形状から、この平衡温度はサブソリダス温度であっ

た可能性が高い。山陽帯および山陰帯の花崗岩類に共通にみられるリン灰石は、いずれも角閃石内部で自形に大きく発達していることから、マグマ分化末期に角閃石とともに晶出したものと考えられる。このうち、角閃石の淡緑色部分に包有されるリン灰石のみに発達している、不整合的な形状を示す波状累帯構造は、第1段階の流体相による交代作用以降に形成された。波状累帯構造の斜交葉理状の構造は、残液が度重なる循環をおこしていたことを示唆している。

このような流体相の循環は、加古川市志方町や島根県東部大東-横田地域の花崗岩類のみにおこった特殊なできごとではないと考えられる。多くの花崗岩類は第1段階交代作用のみを経験し、第2段階の流体相による交代作用を経験していないため、淡褐色コアと淡緑色リムからなる単純な累帯構造にとどまった。流体相の循環は幾度となくおこなわれ、その程度によってさまざまな結晶構造が形成される。第2段階の





第4図b 角閃石にみられる波状累帯構造とそのスケッチ  
左：オープン・ニコル/横0.5mm，右(拡大)：オープン・ニコル/横0.2mm

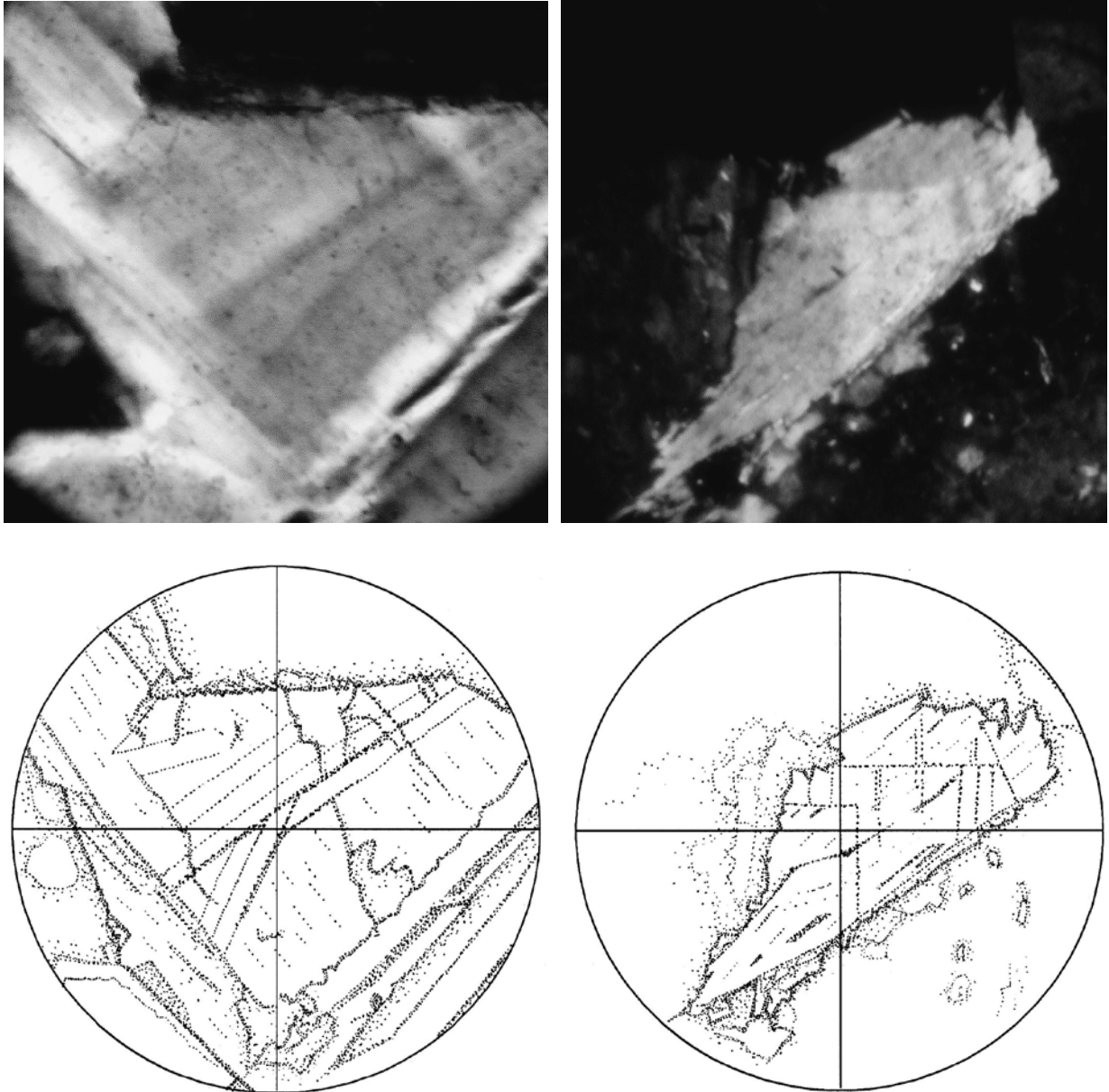
交代作用を経験した証拠を示す波状累帯構造を形成している角閃石は、校庭に転がっている花崗岩類や、一般に市販されている花崗岩類の薄片にもみられる。一度鉍物として晶出した後でも、比較的高圧下で $H_2O$ に飽和した条件下では、 $650^{\circ}C$ 程度の低温であっても固相が部分熔融することはよく知られている。このように、白亜紀後期～古第三紀に活動したマグマは、起源が異なっても、マグマ分化の後期からほぼ同じように酸素分圧が上昇し、互いに似た環境に近づいていったと考えられる。

#### おわりに

本研究は、筆者らが兵庫県立加古川東高等学校地学部岩石鉍物班の協力を得ておこなったものである。特別な装置や機器を用いることなく、フィールドをよく歩き、よく観察し、

先行研究をよく学ぶという、基本的な研究手法によって得られた成果である。現在までのところ、化学分析には至っておらず、今後の課題である。

- ①加古川市志方町を中心に分布する角閃石黒雲母花崗閃緑岩の淡褐色コアおよび淡緑色リムのFやClなどのハロゲン元素を含むEPMA測定をおこない、山陰帯の角閃石との化学組成を比較する。さらに、二長石および酸化鉍物による晶出温度の推定をおこなう。
- ②加古川市のリン灰石のハロゲン元素を測定することで、マグマがいつ飽和脱水したかをつきとめる。マグマが脱水すると残液中のCl量が急激に低下することが知られている。島根県のリン灰石は波状累帯構造を呈しており、Cl含量が低いから、マグマがすでに飽和脱水していたことを示している。
- ③山陰帯の酸化鉍物には、チタン鉄鉍をバンド状にもつ磁鉄



第4図c 角閃石にみられる波状累帯構造とそのスケッチ  
 クロス・ニコル/横 0.2 mm

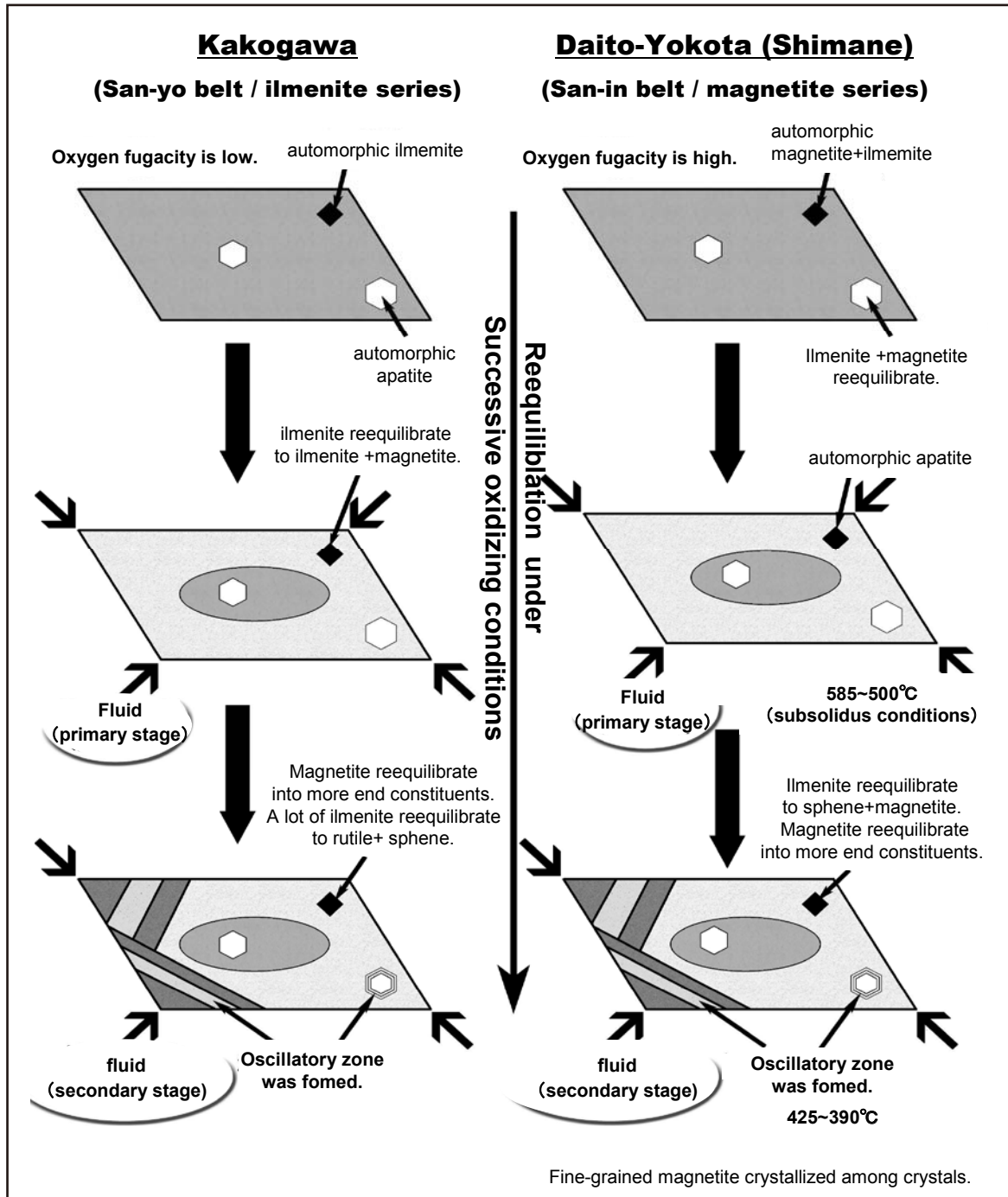
鈳や、チタン鉄鈳やジルコンを残留させている磁鉄鈳などが多く見られる。これらの場合のチタン鉄鈳は、その内部がルチルや赤鉄鈳に分解されている。さらに、磁鉄鈳そのものも赤鉄鈳に交代されている。EPMA分析によって、加古川市の花崗岩類の酸化鈳物についても同様の分析をおこなう。

#### 謝 辞

本研究をおこなうにあたって、前信州大学の山口佳昭博士には、北海道大学における日本地質学会第114年学術大会において、有意義なご指摘と議論をしていただいた。この場を借りて謝意を表します。

#### 引用文献

- Chivas, A.R., 1981, Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization. Part 1. Mafic silicates from the Koloula igneous complex., *Contrib. Mineral. Petrol.*, **78**, 389-403.
- Czamanske, G.K. and Wones, D.R., 1973, Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo area, Norway, 2, The mafic silicates., *J. Petrol.*, **14**, 349-380.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks., *Mining. Geol.*, **27**, 293-305.
- 石原舜三, 1982, 花崗岩系列と鈳化作用., *鈳山地質*, **32**, 281-283.
- Kawakatsu, K and Yamaguchi, Y., 1987, Successive zoning of amphiboles during progressive oxidation in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, No.3, 535-540.
- 川勝和哉, 1989, 西南日本山陰帯の花崗岩類の角閃石から oscillatory zoning の発見., *兵庫県立西脇高等学校研究紀要*, **6**, 24-61.
- 近畿地方土木地質図編纂委員会, 1981, 近畿地方土木地質図.



第5図 山陽帯および山陰帯酸性マグマの分化と角閃石の波状累帯構造の形成モデル

岸田孝蔵・弘原海清, 1967, 姫路酸性岩類の火山層序 - 近畿の後期中生代火成岩類の研究 (1), 柴田秀賢教授退官記念論文集, 241-255.

Mason, D.R., 1978, Compositional variations in ferromagnesian minerals from porphyry copper - generating and barren intrusions of the Western Highlands, Papua, New Guinea., *Econ. Geol.*, 73, 878-890.

松下進, 1971, 近畿地方 - 日本地方地質誌., 朝倉書店, 92 p ~ 112 p.  
日本の地質「近畿地方」編纂委員会, 1987, 日本の地質 6 - 近畿地方., 共立出版株式会社, 40 p ~ 60 p.

尾崎正紀・栗本史雄・原山智, 1995, 北条地域の地質 - 地域地質研究報告, 5万分の1地質図幅, 地質調査書, 101 p.

尾崎正紀・原山智, 2003, 高砂地域の地質 - 地域地質研究報告., 5万分の1地質図幅, 地質調査書, 87 p.

高砂市教育委員会, 2005, 兵庫県高砂市所在竜山石切場., ~ 竜山採石遺跡詳細分布調査報告書, 1p ~ 22 p.

津末昭生・石原舜三, 1974, 西南日本における花崗岩質岩石中のFe-Ti酸化鉱物., *鉱山地質*, 24, 13-30.

山口佳昭・川勝和哉, 1987, 大東 - 横田地域の石英閃緑岩類中のFe-Ti酸化物の産状と化学組成., *山陰地域研究 - 自然環境 - 第3号*.

山口佳昭・川勝和哉, 1988, 大東 - 横田地域の石英閃緑岩類中のリン灰石のFおよびCl含量., *山陰地域研究 - 自然環境 - 第4号*.

Yamaguchi, Y., Tomita, K. and Sawada, Y., 1974, Crystallization trend of zoned pyroxenes in quartz gabbro from the Koyama intrusive complex at Mt. Koyama, Yamaguchi prefecture, Japan., *Mem. Geol. Soc. Jap.*, No 11, 69-82.