

# 花崗岩類にみられるマグマ混合の産状： 野外・鏡下での特徴

山崎 徹<sup>1</sup>

## 1. はじめに

マグマから固結した岩石のうち、肉眼で判別できるほどの大きさの鉱物から構成されるものを深成岩と呼びます。深成岩は、花崗岩類・閃緑岩・斑れい岩類などから構成され、しばしば墓石や建物の壁材(化粧石)として利用されています。ビルの壁材等に使用されている花崗岩中には、径数センチほどの楕円形の黒色部がみられることがあります。これは一般に「暗色包有物」などと呼ばれ、花崗岩マグマ中に取り込まれた、異質な岩石の痕跡と考えられています。花崗岩類は、マグマが地下深部でゆっくりと冷え固まった岩石で、マグマの移動や定置の過程で周囲の岩石を取り込むことによって、このような包有物が形成されます。一方で、花崗岩中には、断面が楕円形ではなく、不規則な形で入り組んだ境界を持つ暗色包有物が産することがあります。それらは花崗岩質のマグマと、玄武岩質のマグマとが混合した産状を示す、いわば“マグマ混合の化石”であると考えられています。その印象的な産状は研究者の関心を引きつけ、これまでに数多くの研究がなされていますが、筆者の知る限り、こうした産状の解説は邦文の書籍・教科書では十分になされておらず、特に、顕微鏡下(薄片)での組織については、全く紹介されていないようです。

そこで、本論では、花崗岩中にみられるマグマ混合の産状について、顕微鏡下の組織を含め、代表的な例を紹介します。

## 2. マグマ混合・混交と花崗岩類中の包有物について

学問的な記述を行う際に避けては通れないのが定義で、以下に本論の記述に関連する用語を簡単に説明します。ただし、その用法は、研究分野や論文ごとに異なっているのが実情です。以下の記述は、筆者の考える“多数派”と思われる使い方であって、教科書的な定義ではないことにご注意ください。

異なるマグマ同士が混合することを、一般に“マグマ混合

(マグマ・ミキシング, magma mixing)”と呼びます。一方、オイルドレッシングを振り混ぜた時に、油分と水分が完全に均質化せずに液滴状に混合しているような状態を、“マグマ・ミングリング(magma mingling)”と呼び、日本語ではしばしば“マグマ混交”と表記されます。マグマ混交という用語/概念を導入した場合、“マグマ混合”には、2種類のマグマが完全に均質化した状態を指す場合と、単純に、均質化の状態に関わらず、ある一定の範囲(例えばマグマ溜まり)内に2種類のマグマが混在している状態を指す場合とがあり得ます。本論では、後者の状態として用いることとし、マグマ混交はマグマ混合の具体的な様態の1つとします。一方、完全に均質化した場合、あるいは化学的に均質化しつつある場合は、ハイブリッド化(hybridization)を使うことにします。

次に、花崗岩中の各種包有物(岩)について、第1表に一覧を示します。冒頭に述べた暗色包有物(dark inclusion)は、暗色包有岩とも呼ばれ、成因に関係なく、優白質の花崗岩類中に含まれる暗色の包有物(岩)のことを指します。花崗岩の研究においては、包有岩のことを伝統的にフランス語のエンクレーブ(あるいはエンクレイブ, enclave)と呼びます。これはLacroix(1890)が、均質な火成岩中に捕獲された岩石片を指す用語として用いたことに由来します。このLacroix(1890)では、エンクレーブと包有物とは明確に区別され、包有物という語は鉱物の中に取り込まれたものに対して使用されていました。しかしながら、現在では、上述のように露頭スケールの岩片に対しても包有物という用語が一般的に使用されています。エンクレーブや包有物と似たような用語に、ゼノリス(xenolith)やオートリス(autolith)があります。いずれも日本語では捕獲岩と表記されることが多いのですが、ゼノリスは、マグマに捕獲された、マグマとは異なる起源の岩石のことを意味し、多くの場合、マグマの通路やマグマ溜まり周囲の岩石(壁岩)由来の捕獲岩を指します。一方、オートリスは、ゼノリスと区別するため、同源捕獲岩と表記される場合もあり、マグマと同源の早期晶出・固結相、例えば、マグマの結晶分

<sup>1</sup> 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

キーワード：深成岩、花崗岩、MME、苦鉄質マグマ、マグマ混合、マグマ混交

第1表 様々なタイプのエンクレーブ.

	用語/名称	性質	境界	形態	特徴
ト ー ン ク ラ ン ク ハ ン ド	ゼノリス/捕獲岩 (Xenolith)	母岩の断片 (接触変成岩)	シャープ	角礫状	接触変成組織・鉱物
	雲母質エンクレーブ (Surmicaceous enclave)	部分溶融の融け残り (レスタイト)	シャープな黒雲 母の殻	レンズ状	変成組織を示す雲母 及びアルミナス鉱物
	珪長質細粒状エンクレーブ (Felsic microgranular enclave)	分断された細粒の縁	シャープもしくは は漸移	球形	細粒火成組織
	苦鉄質細粒状エンクレーブ (Mafic microgranular enclave)	液滴状の共存マグマ	ほとんどの場合 シャープ	球形	細粒火成組織
	キュムレイトエンクレーブ/オートリス (Cumulate enclave/Autolith)	分断されたキュムレイト	ほとんどの場合 漸移	球形	粗粒キュムレイト 組織

Didier and Barbalin (1991) を簡略化. これらのうち, 暗色のものが暗色包有物/岩とも表現される.

化作用の早期に晶出した鉱物が沈積してできた, キュムレイト(沈積岩)等を指します.

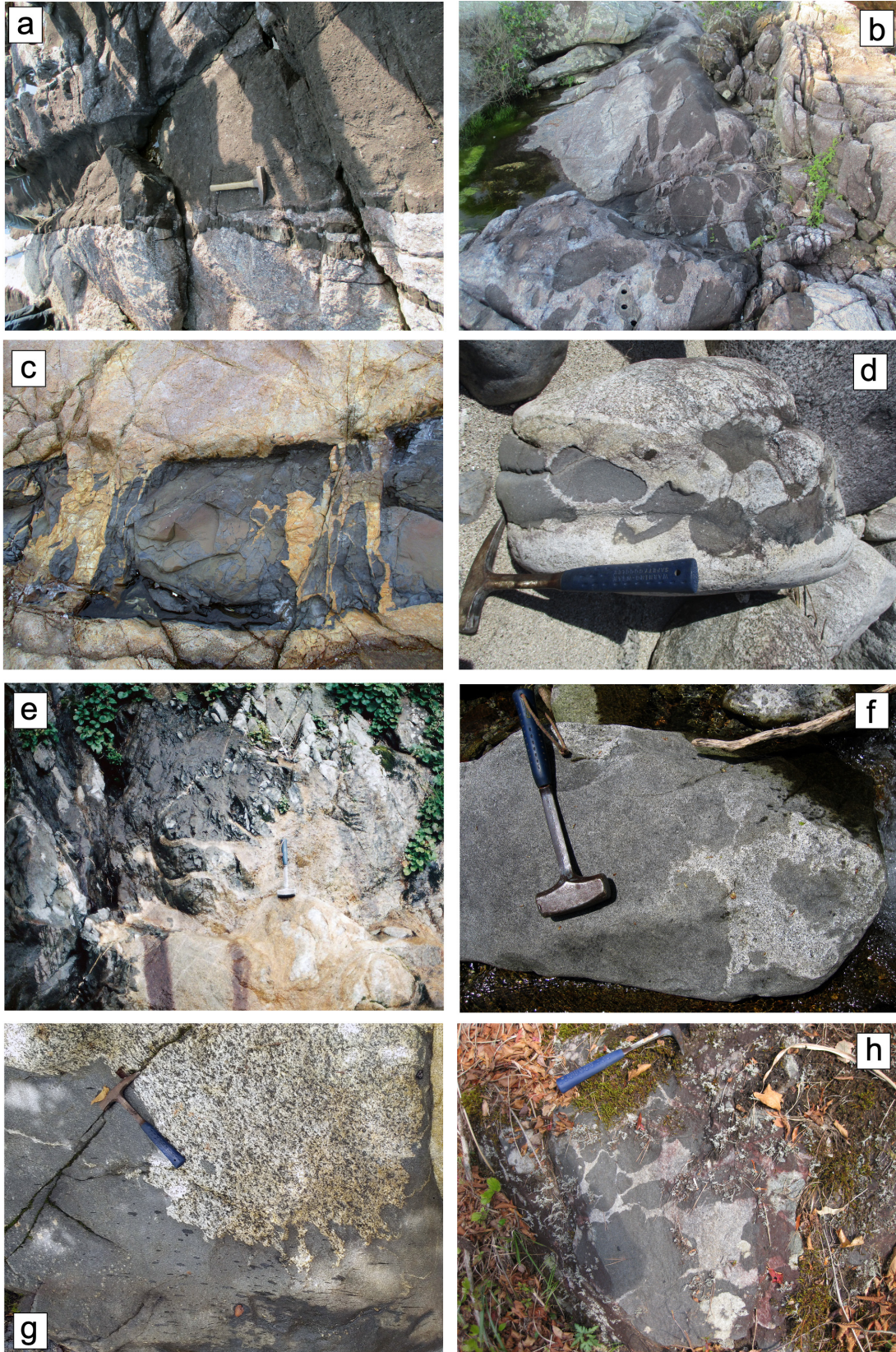
エンクレーブのうち, 暗色で火成組織を持つものは, Mafic Magmatic Enclave(苦鉄質火成エンクレーブ), Mafic Microgranular Enclave(苦鉄質細粒状エンクレーブ), Mafic Microgranitoid Enclave(苦鉄質細粒花崗岩質エンクレーブ)等と, 研究者によって様々に呼ばれてきましたが, それぞれ3つの語の頭文字が共通であるため, MME(エムエムイー)と総称されています. これらは, 火成起源というだけでなく, 定義上, 花崗岩質マグマと同時期に存在した苦鉄質マグマの液滴に由来するとされています(例えば, Didier and Barbalin, 1991). したがって, 本論の主要な対象となるのはこのMMEです. なお, 珪長質とは, 長石や石英(成分)に富み一般に優白質であることで, 苦鉄質とは, 苦鉄質鉱物(成分), 具体的には鉱物やマグマが鉄やマグネシウムに富み, 一般に優黒質であることを意味します. 花崗岩質マグマとは, 固結したら花崗岩になる成分のマグマのことで, 流紋岩質マグマと同じ意味で, 珪長質マグマの一部です. よって, 以降, 特別な場合を除き, 花崗岩質・流紋岩質マグマのことを珪長質マグマ, 玄武岩質~安山岩質マグマのことを苦鉄質マグマと記述します. ちなみに, MMEはその定義上, 苦鉄質なエンクレーブのことを指しますが, MMEに相当する珪長質なものも存在し, それらは珪長質細粒状/火成エンクレーブ(Felsic Microgranular/Magmatic Enclave, FME)と呼ばれます.

### 3. マグマ混合現象の野外における産状

マグマ混合現象の野外における産状については, 吉倉・

熱田(2000)に写真やイラストと共に比較的平易な説明があります. ここでは, それらを参考に簡単に解説します. MMEにおいて, 珪長質マグマと苦鉄質マグマとが同時共存した根拠となるのは, 両者が相互に貫入しあっている産状です. 貫入関係は地質学・火成岩岩石学の基本で, 一方の火成岩が, 他方の火成岩に貫入している場合, 貫入している側が若い(後から貫いた)ことを意味します. よって, 相互に貫入しあうというのは, 両者が貫入可能な液状態として同時に存在する場合しかあり得ないことになります.

例えば, 第1図aの苦鉄質岩脈は, 花崗岩との境界付近で一部枝分かれしているものの, 基本的には花崗岩に対して貫入しているように見えます. しかし, この岩脈の延長(第1図b)では, 苦鉄質部が不規則な形の楕円体状(紡錘状あるいは液滴状)に分裂し, 花崗岩に包有される産状が認められます. したがって, この苦鉄質部と珪長質部とは相互に貫入・包有しあう関係にあり, このような第1図bの産状がMMEです. さらに, このようなMMEに至る過程が観察されることもあります. 第1図cは, 平板状の岩脈に貫入される側の花崗岩類が, 逆に岩脈状部に貫入し, 結果的に包有しています. このように, 周囲の花崗岩類に一部再貫入されている岩脈を逆入脈岩脈(back-veined dike), 結果として第1図cのように分断されている岩脈を分断岩脈(fragmented dike)と呼びます. 第1図dは, MMEが並び, かつて岩脈を形成していたように見えますが, 個々のMMEは丸みを帯びたり不規則な形態をした液滴状です. このような産状を包有岩岩脈(enclave dike)と呼びます. そして, 以上の全ての例のように, 深成岩がマグマあるいはマッシュ状態(粥状で, 完全に固結していない状態)のときに貫入した岩脈のことを, 同時性岩脈(syn-



第1図 花崗岩中のマグマ混合組織の野外での産状。(a) 枝分かれる苦鉄質岩脈。(b) 苦鉄質岩脈(群)の延長に産するMME。中央下部のコア採取孔の直径約2.6 cm。(c) 周囲の花崗岩類に貫入しつつ、逆に貫入される苦鉄質岩の分断岩脈。岩脈状の幅約50 cm。(d) 包有岩岩脈。(e) 火炎状縁の産状。(f), (g) MMEにみられる小円鋸歯状-カスプ状 (crenulate-cusate) 境界。(h) 苦鉄質岩優勢部における花崗岩類の産状。a～c: ブラジル・フロリアノポリス周辺, d: 東濃地方, 明智地域, e: 北海道, 日高変成帯, f: 北海道, 奥士別地域, g: 伊奈地方, 大河原地域, h: 三河地方, 足助地域。

plutonic dike; 直訳的には、深成作用と同時期の岩脈の意)と呼びます。

MMEが花崗岩中に産する場合、苦鉄質部と周囲の花崗岩類が同時にマグマ(液)状態である場合に形成される特徴的な産状を示すことがあります。その1つが、第1図eに示した火炎状縁です。苦鉄質部と花崗岩質部とは、鋸歯状あるいは火炎状の明瞭(シャープ)な境界で接し、相互に貫入しあうような産状を示します。より一般的には、小円鋸歯状(丸みを帯びた小さな鋸歯状, crenulate)ないしカスプ状(半島のような先端を持つ形, cuspsate)の境界を持つMMEがしばしば観察されます(第1図f, g)。このような産状は、日本語としては“入道雲様”のほうが分かりやすいかもしれませんが。以上はMMEにみられる産状の一部で、吉倉・熱田(2000)には、その他の産状についても紹介されています。

このような一連の産状は、接触する2つの液の間に温度・組成・レオロジー(物質の流動や変形に関する性質)の大きな差異があるために形成されると考えられています(例えば, Barbalin and Didier, 1991)。ごく簡単に説明すると、玄武岩・安山岩・流紋岩の順にそのマグマは苦鉄質から珪長質になるため、その両極端の玄武岩と流紋岩のマグマが接触する場合、組成に大きな差があることとなります。同時に、玄武岩質マグマは約1200°C程度でさらさらしている一方、流紋岩質マグマは800~700°Cで粘度が高いことから、温度・物性にも大きな差が存在します。こうしたマグマの性質の違いにより、2種類のマグマが容易には均質化せず、様々な混交構造が形成されるということです。なお、マグマ同士の接触であっても、両者には400~500°Cの温度差があるため、苦鉄質マグマは急冷され、MMEに急冷周縁相が認められる場合があります。

ところで、こうしたMMEは、多くの場合、珪長質のマグマに苦鉄質のマグマが注入(貫入)して形成される産状として観察されますが、露頭によっては苦鉄質部のほうが多いこともあります(第1図h)。液状態で同時共存して相互貫入の関係にあるため、この場合は、苦鉄質部に優白質部が包有されている、あるいは貫入している産状として観察されます。

#### 4. 鏡下におけるマグマ混合組織

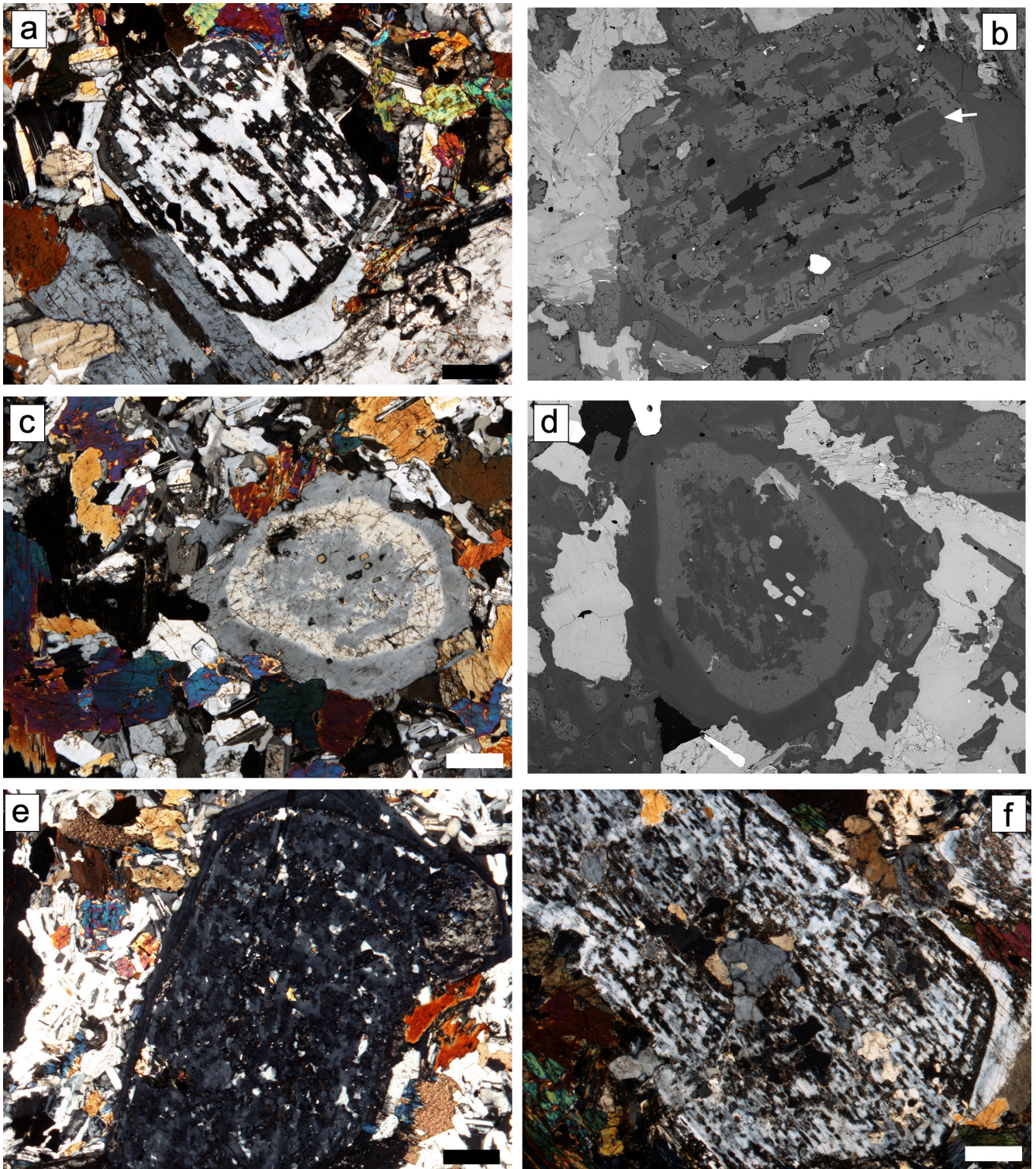
鏡下におけるマグマ混合組織とは、顕微鏡下においてのみ観察されるスケールのマグマ混合のことでなく、露頭においてマグマ混合現象を示す場合、MMEやその周囲の花崗岩類の中に観察される特徴的な組織のことです。米国

のM. J. Hibbard博士によって精力的に検討され、書籍としてもまとめられています(Hibbard, 1995)。そうした組織は日本語の書籍等において全く紹介されていないため、以下に代表的なものを示します。露頭でのマグマ混合現象に伴われて、しばしば以下に紹介する組織が同時に(同一の岩石・薄片内に)認められるのが特徴です。ただし、それぞれの組織は個別にマグマ混合以外の原因でも形成されるため、こうした組織が存在することがマグマ混合の確実な根拠となるわけではないことに注意が必要です。

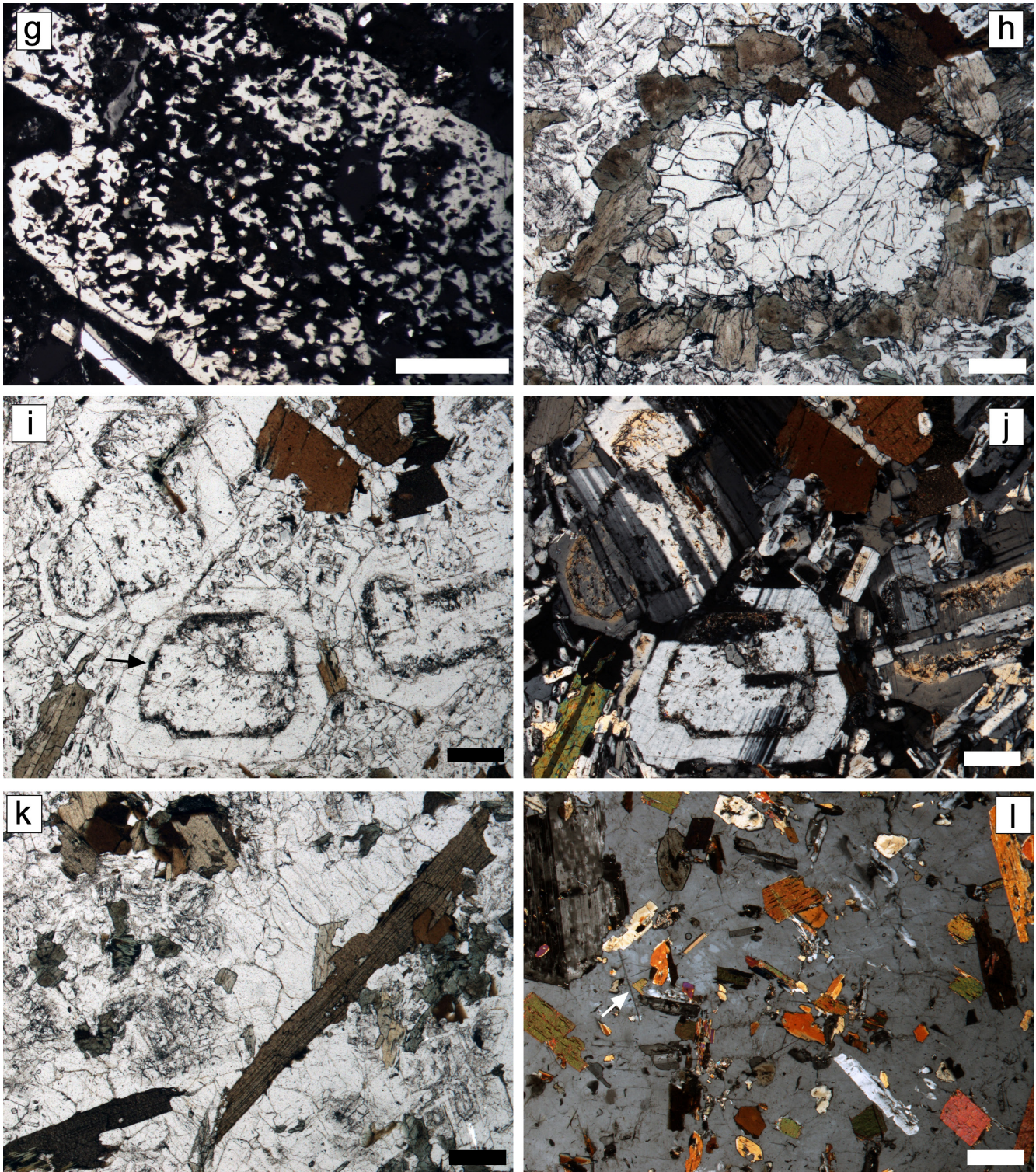
斜長石は構成元素・結晶構造の性質上、結晶内部での拡散による元素の移動が起きにくい(遅い)ため、マグマ混合、すなわちマグマの組成や温度の変化に伴う様々な組織が残されています。第2図aは、箱型セル状(boxy-cellular)斜長石と呼ばれるものです。単一の斜長石結晶が、文様状の異なる2つの消光位の斜長石から構成されていることが分かるといえます。明色部分に注目して、第2図bの反射電子組成像を見ると、例えば矢印で示した部分は長柱状の自形を示しており、写真が小さくて分かりづらいですが、この部分はリムにおいて組成逆累帯構造を示しています(反射電子組成像ではCaに富む部分が明色に見えます)。箱型セル状斜長石は、このように自形性の強い箱状の斜長石が細胞あるいは昇目(セル)のように連結し、全体として1つの斜長石結晶として産するのが特徴です。

第2図cは、斜長石結晶中のCaに富むゾーン(calcic zone of plagioclase)と呼ばれるものです。箱型セル状斜長石と似ていますが、反射電子組成像(第2図d)で見ると、直線的外形を持つドーナツ状のCaに富む部分が明瞭に識別できます。第2図e及びfは、スポンジセル状斜長石(spongy-cellular plagioclase)と呼ばれるものです。変質のためであって、やや不明瞭ですが、箱型セル状との違いは、個々のセルが自形性の強い箱状ではなく、丸みを帯びた液滴状である点です。Hibbard(1995)による典型的な例としては、第2図gのような産状が提示されています。

第2図a-fのような組織は、マグマ混合による、特にマグマの温度変化によって、斜長石が内部から部分的に溶融し、その溶融した部分が温度変化後に再度結晶化することによって説明できます。Hibbard(1995)も述べているように、こうした現象はマグマ混合だけでなく、圧力変化(断熱減圧)によっても生じ得ます。実際に、第2図gの例は、マグマ混合を伴わない火山岩の斑晶に観察される減圧組織ですが、組織自体はマグマ混合による典型的なものと同様です。深成岩の形成条件においては、急激なマグマの組成・温度・圧力変化によって第2図gのような組織ができたとしても、その後ゆっくり冷えることによって結晶化し、最



第2図 マグマ混合に伴われる特徴的な鏡下での組織。(a) 箱形セル状 (boxy-cellular) 斜長石。(b) (a) の反射電子像。矢印は自形性の強い結晶の例。(c) 斜長石結晶中の Ca に富むゾーン (calcic zone of plagioclase)。(d) (c) の反射電子像。(e), (f) スポンジセル状 (spongy-cellular) 斜長石。(g) 火山岩の減圧組織として産する スポンジセル状斜長石。(h) オセラー組織を示す、ホルンブレンドに覆われた石英 (ocellar texture of hornblende-mantled quartz)。(i), (j) 斜長石中の汚濁帯 (dusty-zone, 矢印部)。(k) 刃状黒雲母 (blade-shaped biotite)。(l) ポイキリティックアルカリ長石と針状アパタイト (acicular apatite, 矢印部)。a ~ d: 三河地方, 足助地域, e: 東濃地方, 明智地域, f: 伊奈地方, 大河原地域, g: 中部沖縄トラフ, h ~ k: 東濃地方, 明智地域, l: 北海道, 日高変成帯。h, i, k: オープン・ニコル, a, c, e, f: クロス・ニコル。顕微鏡写真右下のスケールの長さは約 0.5 mm。



第2図 続き.

終的には第2図eのような、不明瞭な境界を持つ“まだら”な消光位の斜長石となるものと思われます。

その他に、第2図hのホルンブレンドに覆われた石英 (hornblende-mantled quartz) を典型とした、各種鉱物から構成される球状あるいは同心円状の、オセラー組織と呼ばれる鉱物集合体 (ocellar とは単眼状というような意味) も、

比較的稀ではありますがマグマ混合に特徴的な特異な組織です。こうした組織は、石英結晶や石英長石質のメルトが、より苦鉄質の液と接触することによって、両液間(あるいは液-結晶間)で元素移動が生じ、ミクروسケールでハイブリッド化が達成された部分でそれぞれ安定な鉱物が結晶化することで形成されと考えられます。

斜長石には、セル状のまだらな消光のほか、明瞭な汚濁帯 (dusty-zone) が存在する場合があります (第 2 図 i, j)。これは、マグマ混合によって、マグマの化学組成・温度が変化した際に形成されたり溶融した微細な鉱物粒が、成長中の斜長石のリムの部分に取り込まれたものです。斜長石がそのまま成長すると、ドーナツ状あるいはリング状の帯として残ります。花崗岩側では、溶融に伴うセル状組織と組み合わせあって出現することが多く、苦鉄質岩側 (MME) では、温度が低下するだけで必ずしも溶融を伴わないため、セル状組織を伴わずに産することが多いです。

以上に加えて、急激なマグマの温度・組成変化に伴って、著しく伸長した (縦横比の大きい) 刃状黒雲母 (blade-shaped biotite) や針状アパタイト (acicular apatite)、そして、細粒・自形の様々な鉱物を多量に包有するポイキリティック・アルカリ長石 (もしくは石英) も、上述のような他の鉱物組織と組み合わせあって、マグマ混合の際にしばしば産します (第 2 図 k, l)。

## 5. おわりに

深成岩体中にみられるマグマ混合の痕跡は、進行中のハイブリッド化の一時点が固化したものであるため、段階あるいは進行度の違いによって、本論で紹介した以外にも多様な産状が生じ得ます。また、本論で扱ったもの以外にも、論文等では様々なタイプの野外・鏡下での産状が報告されています。特に、我が国ではアルカリ岩に関連したマグマ混合の報告はほとんどないため、今回は説明を省略しましたが、いわゆるラパキビ花崗岩の長石は、楕円体状のアルカリ長石を斜長石が取り囲むという構造を示し、アルカリ質マグマの関与したマグマ混合の代表例と考えられています。足摺岬のラパキビ花崗岩とマグマ混交については、吉倉 (2015) に詳しい解説があります。

本論では、マグマ混合に伴われる野外・鏡下の産状のうち、筆者が露頭写真や試料を有する代表的なものについて紹介しました。特に鏡下での組織については邦文での紹介がほとんどありませんので、顕微鏡観察まで含めた踏み込んだ研究を行っている市民研究者の方々や、職業上こうした産状を見る機会のある技術者の方々の参考となれば幸いです。

## 文 献

- Barbalin, B. and Didier, J. (1991) Macroscopic features of mafic microgranular enclaves. *In* Didier, J. and Barbalin, B., eds., *Enclaved and Granite Petrology*, Developments in Petrology, 13, Elsevier, Amsterdam, 253–262.
- Didier, J. and Barbalin, B. (1991) The different types of enclaves in granites—Nomenclature. *In* Didier, J. and Barbalin, B., eds., *Enclaved and Granite Petrology*, Developments in Petrology, 13, Elsevier, Amsterdam, 19–23.
- Hibbard, M. J. (1995) *Petrography to Petrogenesis*. Prentice-Hall, New Jersey, 587p.
- Lacroix, A. (1890) Sur les enclaves acides des roches volcaniques d'Auvergne. *Bulletin du Service de la carte géologique de la France*, 2, 25–56 (in French).
- 吉倉紳一 (2015) 足摺岬のラパキビ花崗岩. 鈴木堯士・吉倉紳一編, 最新・高知の地質 大地が動く物語 (第二版), 南の風社, 高知, 174–199.
- 吉倉紳一・熱田真一 (2000) 花崗岩体に記録されたマグマ混交・混合現象. 月刊地球 / 号外, no. 30, 140–145.

---

YAMASAKI Toru (2024) Magma mixing texture in granitoids: Field and microscopic features.

---

(受付：2024年8月7日)