

角閃石中のAl量—花崗岩類に有効な地質圧力計

高橋裕平*

TAKAHASHI Yuhei (1993) Al in hornblende as a potential geobarometer for granitoids: a review. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.44(10), p.597-608, 5fig., 2tab.

Abstract: Total Al content (Al(t)) of magmatic hornblende coexisting with melt, hydrous fluid, biotite, quartz, K-feldspar, plagioclase (oligoclase to andesine) and two phases of sphene, magnetite or ilmenite in granitoids correlates linearly with crystallization pressure at the time of intrusion. The calibration based upon this relationship has been proposed by some researchers. This paper reviews the hornblende geobarometer with some applications.

The hornblende geobarometer was firstly calibrated based on an empirical correlation between the total Al contents of hornblendes in the granitic bodies and the estimated pressures in the surrounding thermal aureoles. This correlation was confirmed by experiments conducted at near-solidus conditions for granitic composition. The increase of Al(t) contents with pressures is attributed to increasing extent of tschermak-exchange between hornblende and coexisting biotite.

On the other hand, it is proposed that the Al in hornblende and albite content of coexisting plagioclase give a pressure-dependent geothermometer due to edenite-exchange between these two phases. However, the solidus temperature of wet calc-alkaline granitic magma is virtually independent of pressures above 2kbar. Therefore, the estimated pressures by the hornblende geobarometer must be reliable for calc-alkaline granitoids, with exception of shallow-level and/or later altered intrusions.

要 旨

花崗岩類中の角閃石の Al 量は貫入時の圧力をよく反映していて、多くの研究者によって圧力計としての換算式が提案されている。本論では地域地質研究への応用をめざしてこれらの研究をレビューした。

角閃石圧力計とは、花崗岩類がソリダスでメルト、流体、角閃石、黒雲母、石英、K-長石、斜長石(オリゴクレスーアンデシン)の7相に加えてスフェーン、磁鉄鉱、チタン鉄鉱のうちの2相が平衡にある場合(> 2kbar)、角閃石の Al 総量に圧力依存性が認められる現象を利用したものである。角閃石の Al 量と圧力との関係は、はじめは、地質学的に圧力のよくわかっている貫入岩体中の角閃石を利用して経験的にその換算式が求められた。その後直接圧力を規制した実験からこの圧力計が有効であることが確かめられ、より精度の高い換算式が得られた。角閃石中

の Al 量の圧力依存性は、主にチェルマク閃石成分の置換で説明できる。これに対して、角閃石中の Al 量は、斜長石のアルバイト成分と組み合わせたエデン閃石成分の置換のため温度依存性も認められるという議論がある。しかし、通常の花崗岩類ではソリダス温度が狭い範囲に限られるため、共存鉱物が前提条件を満たしサブソリダスで再平衡が認められない場合、角閃石の Al 量は花崗岩類の晶出時の圧力推定に有効である。本論ではさらに角閃石圧力計の国外・国内における応用例を紹介し、併せて応用上の注意をまとめた。

1. ま え が き

野外調査に基づく花崗岩類研究において、その花崗岩質岩体の形成の場を定量化することは、個々の岩体の特性を明らかにしたり、もっと広い岩石区の単位で総合化していく上で有益な情報となる。

*地質部

Keywords: aluminum, hornblende, geobarometer, granitoid.

最近、花崗岩類中に含まれる角閃石中の Al 量に着目して花崗岩類生成時の圧力を推定する試みが数多くなされてきた。これは、必ずしも理論的に完成されたわけではないが、少なくともいくつかの実例では生成時の圧力を半定量的に与え、経験的圧力計として形成場推定の有効な指標となっている。

小論では、造岩鉱物から得られるさまざまな情報から花崗岩類の形成条件を推定しようとする立場から、角閃石地質圧力計を紹介する。なお、ここで言う角閃石とは広い意味での“ホルンブレンド”(Hawthorne, 1983)で、国際鉱物学連合(Leake, 1978)で定義されているエデン閃石(edenite)、マグネシオ普通角閃石(magnesiohornblende)、パーガス閃石(pargasite)及びその周辺を総称するものである。

2. 角閃石圧力計の概略

カルクアルカリ花崗岩類中の角閃石の Al 量が、地質圧力計として経験的に有効であることに着目して、多くの研究者がさまざまな立場から換算式を提唱している。角閃石の組成が地質圧力計になりうる根拠は次のように説明できる(Hollister *et al.*, 1987; Schmidt, 1992)。

花崗岩類は一般に SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O の10成分からなる。このうち角閃石を含む花崗岩類は、角閃石、黒雲母、斜長石、正長石、石英、それにスフェーン、磁鉄鉱、チタン鉄鉱の中の2相からなる。さらに固結直前(ソリダス)ではメルト及び気相と共存していたと考えることができる。すなわち9相からなる系と近似できる。そうすると相律($F=C+2-P$)から、自由度 F は、

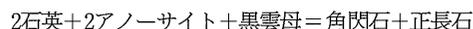
$$F=C+2-P=10(\text{成分})+2-9(\text{相})=3$$

となる。

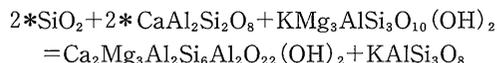
花崗岩類のウェットなソリダス温度は、ほぼ700°C程度であり、蒸気圧2kbar以上の高圧側では、温度依存性がほとんど認められない(例えば、Piwinski, 1975)。また斜長石の組成は通常の花崗岩類ではオリゴクレスーアンデン程度でほぼ一定の組成を示す(Hollister *et al.*, 1987)。すると自由度は2減って1となる。すなわち圧力だけが変数となる。変数として酸素のフュガシティーをとることもある(Schmidt, 1992)が、この場合はスフェーンや Fe-Ti 酸化物(磁鉄鉱やチタン鉄鉱)の存在からその値がほぼ一義的に決まるので変数として考えなくてもよいだろう。

このことは、角閃石を含む花崗岩質メルトのソリダスが温度一定で圧力に依存することから容易に説明でき

る。このときの単純化した反応式としては、



を考えれば良い。このときの角閃石をチェルマク閃石と考えると



このとき角閃石は、(Mg, Fe)Si と AlAl の置換(チェルマク置換)が可能である。そこで角閃石の Al 量が圧力計の指標となるのである。さらにこの単純化した式から正長石の存在や斜長石のアノーサイト成分が規定されることがわかる。

3. 経験的圧力計

圧力条件がよくわかっている天然の試料を基準にして得た地質圧力計を経験的圧力計(an empirical geobarometer)と呼ぶ。Hammarstrom and Zen (1986) は、カルクアルカリ花崗岩類中の角閃石の Al 量が圧力とよく相関することを積極的に主張して、地質学的によく研究されている北アメリカ大陸西部の5つの花崗岩体のデータに基づいて角閃石圧力計を構築した。参考のために、彼らが花崗岩体の定置深度(圧力)をどのように推定したかを紹介する。

Mount Princeton バソリス(コロラド)と Pioneer バソリス(モンタナ南西部)は、浅成で非調和的な貫入岩体である。Mount Princeton バソリスは、関連する火山岩の年代や地質学的な復元から、岩体が隆起して被覆部も含めて3km(1kbar 相当)の部分が浸食されたものと推定されており、その定置時の圧力は約1kbar と考えられる。Pioneer バソリスは、周囲の変成岩に黒雲母+堇青石+紅柱石の組み合わせが発達すること、地質学的に定置時岩体の上位に厚さ3-4kmの地層が堆積していたと推定できること、角閃石と黒雲母の⁴⁰Ar/³⁹Ar年代に基づく冷却速度から浅い場に貫入(急冷)したと考えられることから、定置の圧力を2kbar前後と推定できる。

Round Valley 岩体(アイダホ)、Moth Bay 岩体(アラスカ南東部)、Ecstall 岩体(ブリテッシュコロンビア東部)は、変動帯に調和的に貫入しており、さらに高圧を示すマグマ性の緑れん石(Zen and Hammarstrom, 1984; Farrow and Barr, 1992)が存在することや周囲の変成岩の変成鉱物から、定置圧力を8kbarと推定した。Moth Bay 岩体の周りの変成岩には藍晶石が含まれている。さらにこれら3岩体は片麻状でミグマタイトを伴うなど、深所で定置したことを示唆する産状を示している。

このようにして5岩体を低圧(1-2kbar)と高圧(約8 kbar)に二分した上で、角閃石を化学分析し、酸素を23, 全鉄をFeOとした時のAl総量を圧力計の変数とした。用いた角閃石は、後からの変質生成物を避けるために $Si \leq 7.5$ かつ $Ca \geq 1.6$ のものに限定している。

以上の5岩体に加えて文献に基づき他の花崗岩体の角閃石のデータも加えた。データを選択する際、Ti量をバッファーするためにスフェーンが存在し、温度依存性の問題がないように、角閃石のTi量や斜長石の組成がオーバーラップし、岩石の全岩組成が類似したものになるように考慮している。さらに、実験的に花崗岩類のソリダス温度付近(725-750°C)で、HMバッファー及びQFMバッファーのもとで得られた5kbarと1kbarにおける角閃石のAl総量(Helz, 1973; Spear, 1981)を比較して、酸素のフュガシターの違いが圧力に比べてAl量を大きく変えるものではないことも付け加えている。

これらの11岩体のデータを統計処理し、最終的に次の関係を得た。

$$P(\pm 3\text{kbar}) = -3.92 + 5.03Al(t) \quad (1)$$

{ただし、

$$P: \text{圧力 (kbar)}, Al(t): \text{角閃石の Al 総量 (O=23)}$$

さらにこの式を導く過程で、4配位のAl(Al(iv))とAl(t)についての次の関係式をも導いている。

$$Al(iv) = -0.23 + 0.87Al(t) \quad (2)$$

このようにして得た角閃石圧力計は、誤差をやや大きくとっていることからわかるようにまだ不十分なものであった。圧力計作成に用いた11岩体が低圧及び高圧で形成されたものに片寄り、中間(4-6kbar)のものを欠いている。さらに、角閃石の組成が岩石とメルトが共存しているときのものも示しているかどうかの吟味も不十分であった。また、地質学的にあるいは変成鉱物に基づく圧力の値の精度もあまり良くない。

Hollister *et al.* (1987) はこれらの問題点を考慮して、貫入時の圧力が周囲の変成岩から精度良く求められているブリテッシュコロンビア及びアラスカ南東部の深成岩体の角閃石の組成から、より精度の良い地質圧力計を提案した。岩体の圧力推定の例としてアラスカ南東部のCarlson Creek 岩体を挙げると、岩体との境界近くの変成岩からは、閃亜鉛鉱圧力計で4.9kbar、ざくろ石—白雲母—斜長石—黒雲母圧力計で4.5kbar、ざくろ石—珪線石—斜長石—石英圧力計で $4.6 \pm 1\text{kbar}$ の圧力値が求められている。以上の圧力見積りに基づき、彼らは岩体の定置時の圧力を $4.7 \pm 1\text{kbar}$ としている。さらに彼ら

は、2kbar以下では花崗岩ソリダスの温度依存性が無視できなくなるので、圧力計の適用範囲は2kbar以上としている。

結論的に、彼らは2-8kbar間の圧力計として次のように提案した。

$$P(\pm 1\text{kbar}) = -4.76 + 5.64Al(t) \quad (3)$$

第1図に Hammerstrom and Zen (1986) と Hollister *et al.* (1987) が用いた角閃石の組成を示しておく。ただし、ここに図示してあるのは、個々の分析値が論文中の表に示されているものだけである。圧力計作成には、もっと多くのデータが用いられていることを付け加えておく。

4. 相平衡実験に基づく圧力計

以上の経験的圧力計の適用範囲を検討するため、Rutter *et al.* (1989) はトータル岩を10kbarのもとで部分溶融させ、メルトと平衡に達した角閃石の組成をもとに角閃石圧力計が10kbarまで外そうできることを示した。

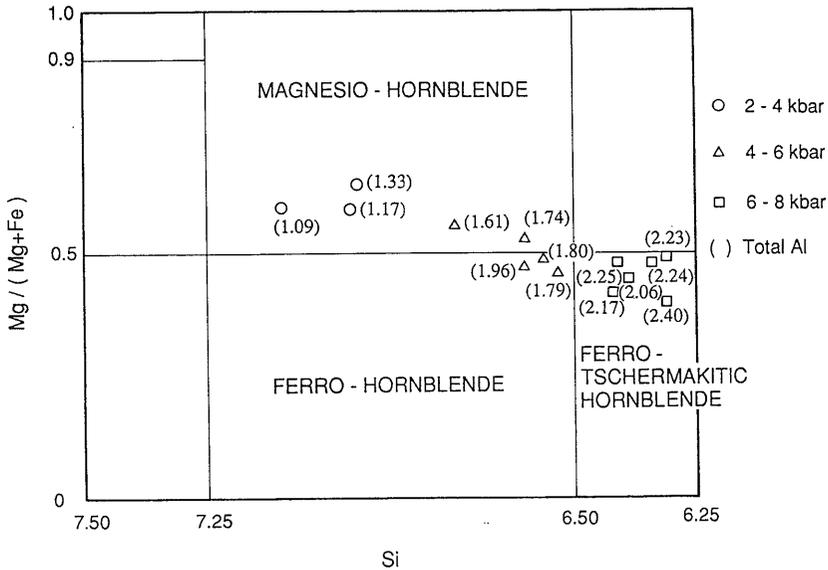
天然の試料から得た圧力計は、そのもととなる岩体の定置の圧力見積りを主に周囲の変成岩の変成鉱物から推定した変成条件に頼っている。変成岩に用いられる圧力計の誤差を考慮すると、経験的角閃石圧力計から得られた圧力の数値そのものはそれほど厳密なものではない。そこで圧力を厳密にコントロールした実験から、より精度の高い角閃石地質圧力計を求めることが試みられた。

Johnson and Rutherford (1989) は、角閃石がメルト、流体、黒雲母、石英、サニディン、斜長石、スフェーン、Fe-Ti酸化鉱物(磁鉄鉱かチタン鉄鉱)とともに平衡共存するよう(9相)にし、740-780°C、2-8kbarの条件下で、実験を行った。その結果得られたガラス(メルト)と平衡にある自形の角閃石を分析した。このデータに基づく地質圧力計は次のようになる。

$$P(\pm 0.5\text{kbar}) = -3.46 + 4.23Al(t) \quad (4)$$

ここでの誤差は圧力を直接規制した実験によるため、経験的圧力計のそれよりも著しく小さくなっている。彼らはこの圧力計をカリフォルニアのLong Valleyカルデラの流紋デイサイト(rhyodacite)の斑晶鉱物組み合わせに適用し6kbarの値を得た。その上で、この岩石は地下約6kbarのマグマ溜まりで安定にあって地表に噴出したと解釈した。

実験ではスフェーンが必ず存在していたが、スフェーンを欠く試料でも実用上は問題とはならない。その場合



第1図 経験的圧力計の基となった角閃石

Hammarstrom and Zen (1986) の Table 4及び Hollister *et al.* (1987) の Table 1と5より.

Fig. 1 Hornblende used as empirical geobarometer

After Table 4 of Hammarstrom and Zen (1986) and Table 1 and 5 of Hollister *et al.* (1987).

の角閃石の TiO_2 は1.3wt%以下で, 実験に用いられた角閃石とほぼ一致する必要がある. この場合2種類の Fe-Ti 酸化物 (磁鉄鉱及びチタン鉄鉱) が共存していて, それらがメルトと角閃石の TiO_2 量をバッファーしていると解釈できる.

Schmidt (1992) は角閃石の組成が地質圧力計となることを, ほぼ Hollister *et al.* (1987) と同じ論理で論じている. その上で圧力を規制した実験を行った. この際, 果たして角閃石に晶出時の圧力が記録されているのかどうか, 温度や CO_2 の効果はどの程度考慮したらよいかなども議論している. 彼の実験から得た地質圧力計は, 2.5-13kbar, 700-655°C の範囲で水に飽和した条件で

$$P(\pm 0.6kbar) = -3.01 + 4.76Al(t) \quad (5)$$

$Al(t)$ が圧力とともに増加するのは主にチェルマク置換によるものであるが, $Al(t)$ が高くなると, この置換は Mg-Fe に対して必ずしも理想的ではなく, むしろ Mg- Fe^{2+} と $Al-Fe^{3+}$ に関して置換が進む. このことは, Mg が Al を置き換えるが, Fe(t) (鉄の総量) はそれほど変化しないことを反映していて, その結果 $Mg/(Mg+Fe(t))$ は圧力に負の相関をすることも指摘している. さ

ら角閃石はソリダスで平衡を保っていて実用的な圧力計であることも示した. また彼は流体の組成が Al 含量に変化をもたらすことを指摘し, とりわけ CO_2 を含む流体の取扱いには注意を要することを言及した.

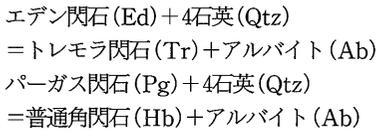
以上の相平衡実験に基づく圧力と角閃石の $Al(t)$ の値との関係を第2図に示した. また, 角閃石圧力計として提案された (1) (3) (4) (5) 式を第3図に示した.

5. 温度依存性の問題

角閃石圧力計に対して Blundy and Holland (1990) は角閃石と斜長石の平衡の温度依存性を論じている. 彼らは圧力, 温度, 酸素のフガシチー, 流体中の水の割合が明らかになっている場合の斜長石と角閃石の組成を多くの例からとりまとめた. 扱った岩石は半分が玄武岩質組成で残りが安山岩とデイサイトである. 条件は広い範囲にわたり, 温度が 400-1,100°C, 圧力が 1-10kbar, 酸素のフガシチーが graphite-methane から hematite-magnetite (HM) バッファー, 流体に占める水の割合 $X(H_2O)$ は 0.25-1.0 である.

熱力学的解析に先立ち, 彼らは角閃石固溶体を次のように単純化した. 角閃石の一般的な形は, $A(M_4)_2$

(M13)₃(M2)₂(T2)₄(T1)₄O₂₂(O,OH,F)₂で、トレモラ閃石(Tr), エデン閃石(Ed), パーガス閃石(Pg), 普通角閃石(Hb)が理想的な端成分であり、それらの構造式を第1表のように示すものとした(Blundy and Holland, 1990の Table2上半分)。これらの端成分を用いることで、角閃石、石英と共存する斜長石中のアルバイトの間には次の関係が成り立つ。



この平衡関係を熱力学的に解析して、温度と圧力の関係式を得ることができる。角閃石のT1サイトのSiとAl、及び斜長石のアルバイト量を変量とするモデルから、最終的に次のような温度(T)と圧力(P)に関する関係を得た。

$$T = (0.677P - 48.98 + Y) / (-0.0429 - 0.008314 \ln K) \quad (6)$$

このとき、斜長石中のアルバイト成分のモル比をX(Ab)とすると、

$$\begin{aligned} K &= ((\text{Si}-4) / (8-\text{Si})) * X(\text{Ab}) \\ & \text{ただし,} \\ X(\text{Ab}) &> 0.5 \quad Y=0 \\ X(\text{Ab}) &< 0.5 \quad Y=-8.06+25.5(1-X(\text{Ab}))_2 \end{aligned}$$

この関係は角閃石組成の著しい温度依存性を示し、平衡温度が不確かな場合角閃石中のAl量による地質圧力計は信頼できないと結論している。

この角閃石圧力計に否定的な結論に対して、Hammarstrom and Zen (1992)及び Rutherford and Johnson (1992)は次のような反論を行った。

角閃石圧力計では岩石種を限定してソリダス温度をせまい範囲に定めている。鉱物組み合わせも限定して酸素のフガシチーも狭い範囲になるようにバッファーしている。これに対して Blundy and Holland (1990)が角閃石斜長石温度計を導くのに用いたデータは多種の岩石、広い温度・圧力・酸素のフガシチー範囲から採られたものである。さらにサブソリダスでの再平衡の可能性は、岩石組織から容易に判断できるとしている。

この圧力計否定に対する反論に Blundy and Holland (1992a)が好意的に返答している。すなわち、角閃石圧力計を否定するものではなく、最終的な平衡温度が決まれば角閃石斜長石温度計は圧力計として使える。比較的単純な熱史を持つ岩体では、この温度はウェットなソリダス温度である。すなわち、T=700°C、斜長石をAn 20として、(2)式で示した Hammarstrom and Zen (1986)の Al(iv)と Al(t)の関係に基づけば、

$$P(\text{kbar}) = -3.53 + 5.03 \text{Al}(t)$$

という関係になり経験的圧力計とよく一致するとしている。Blundy and Holland (1992a)は注意深い記載岩石学的な評価を行い、なるべく多くの角閃石と斜長石の

第1表 角閃石の理想的な端成分

Blundy and Holland (1990) の Table 2の上半分より。
一般式; A(M4)₂(M13)₃(M2)₂(T2)₄(T1)₄O₂₂(O,OH,F)₂。
□; 空席。

Table 1 Summary of amphibole end member compositions(Blundy and Holland, 1990)

End member	Symbol	A	M4	M13	M2	T2	T1
Tremolite	Tr	□	Ca ₂	Mg ₃	Mg ₂	Si ₄	Si ₄
Edenite	Ed	Na	Ca ₂	Mg ₃	Mg ₂	Si ₄	AlSi ₃
Hornblende	Hb	□	Ca ₂	Mg ₃	MgAl	Si ₄	AlSi ₃
Pargasite	Pg	Na	Ca ₂	Mg ₃	MgAl	Si ₄	Al ₂ Si ₂

General formula; A(M4)₂(M13)₃(M2)₂(T2)₄(T1)₄O₂₂(O,OH,F)₂.

□; vacancy.

対について分析を行うことを勧めている。固結後流体の通過などの複雑な熱史を経た岩体では、角閃石の温度を独立に求めて圧力計を利用する必要がある。

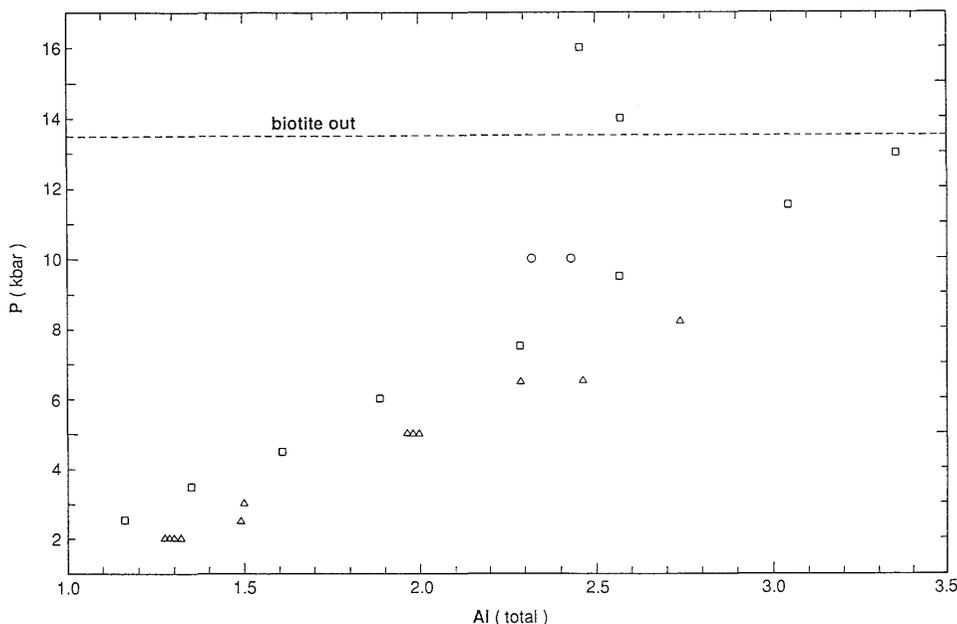
Poli and Schmidt (1992) は別の論点から角閃石斜長石温度計に反論している。彼らは温度計の根拠とした反応式 (アルバイト + トレモラ閃石 = エデン閃石 + 4石英) では Al(iv) の置換を完全に説明しきれないと主張した。これに対して Blundy and Holland (1992b) は、角閃石斜長石温度計では天然及び人工の角閃石がエデン閃石、パーガス閃石、ホルンブレンド、ヘスチング閃石成分からなることを充分考慮したものであると返答している。

6. 角閃石圧力計使用上のまとめ

以上のように、角閃石圧力計はいくつかの制限のもとに充分信頼できる圧力値を与えると評価できる。

対象となるのは、角閃石 (広い意味のホルンブレンド)、黒雲母、斜長石、正長石、石英に加えてスフェーン、磁鉄鉱、チタン鉄鉱の中の2相からなるカルクアルカリ質の花崗岩類である。また固結後に複雑な熱史を経していない岩体への適用が好ましい。圧力計作成時には、TiO₂ をバッファーするためにスフェーンが存在する必要があるとされていたが、磁鉄鉱とチタン鉄鉱が存在し角閃石の TiO₂ が 1.3% 以下であるならば、角閃石中の TiO₂ がバッファーされていると見なせスフェーンは必要ない。さらに後生的な角閃石と区別するため対象となる角閃石は、O=23 で Si ≤ 7.5, Ca ≥ 1.6 となるものである。斜長石はオリゴクレス-アンデシンである。すなわち、多くの角閃石黒雲母トータル岩-花崗閃緑岩-花崗岩 (アダメロ岩) なら適用可能と結論できる。

このような岩体中の角閃石のリム組成について O=23 とした時の Al 全量から (1), (3), (4), (5) 式のいづ



第 2 図 実験で得られた角閃石の Al 総量と圧力との関係

丸印: Rutter *et al.* (1989) の Table 2 のカリ長石と平衡にある角閃石の縁部及び新たに晶出した相。

三角印: Johnson and Rutherford (1989) の Table 2 から。

四角印: Schmidt (1992) の Table 3 より。13kbar より高压では黒雲母が消失する (Schmidt, 1992)。

Fig. 2 Total Al in experimental hornblendes as function of total pressure

Circle: rim and new prism of hornblendes coexisting with K-feldspar in Table 2 of Rutter *et al.* (1989).

Triangle: after Table 2 in Johnson and Rutherford (1989).

Square: after Table 3 in Schmidt (1992). Above 13kbar biotite is not stable (Schmidt, 1992).

れかを利用して圧力を推定することができる(第3図)。このとき斜長石と接するものであれば、角閃石斜長石温度計(6式)からサブソリダスで再平衡に達したかどうかのチェックが可能である。もし、固結後に複雑な熱史を経て再平衡に達した岩体では、独立に角閃石の温度を求められれば、角閃石斜長石温度計(6式)にその温度と斜長石の組成を入れ圧力計として転用することも可能である。使用する角閃石地質圧力計によって値が異なるので、どの圧力計を用いたかを明記する必要がある。たとえば Cullers *et al.* (1992)によるコロラドの San Isabel バソリスの研究では、「Hollister ほか(1987)の経験的な換算に従えば $6.1-6.2 \pm 0.8$ kbar, Johnson and Rutherford (1989)の実験による換算では $4.7-4.8 \pm 0.8$ kbar という圧力が得られ、地殻の密度を約 2.7 g/cm^3 とするとマグマは17-23kmの深さで晶出固化した。」としている。

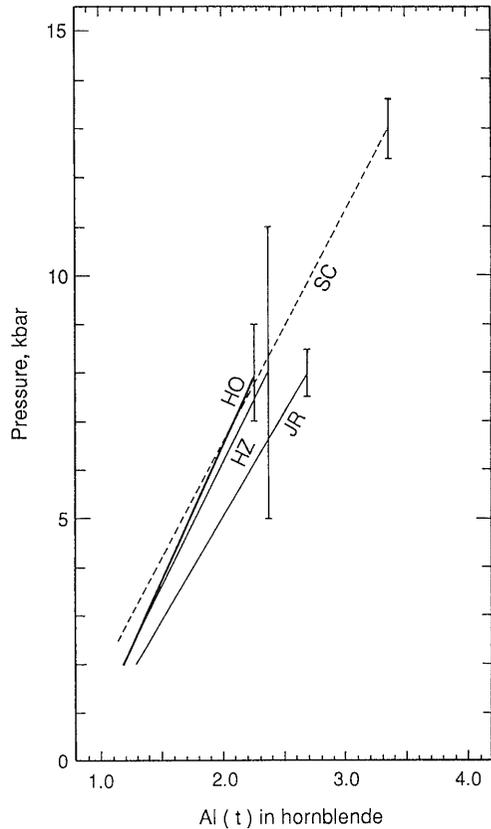
7. 角閃石圧力計の応用例

7.1 マグマ溜まりと定置の場の推定

北米では多くの研究者がこの角閃石圧力計を用いて花崗岩質岩体の定置の場の推定を行っている。最近 Speer とその共同研究者は、アパラチア山地の花崗岩質岩体について角閃石圧力計を利用して積極的に研究を進めている。例えば、Speer (1988)は南カロライナの石炭紀 Liberty Hill 岩体の形成場を次のように推定した。角閃石に単斜輝石が包有されていることから、Ellis (1980)による斜長石—単斜輝石—石英地質圧力計を用いてマグマ上昇前のマグマ溜まりの圧力を8-10kbarと推定した。一方、花崗岩質マグマが上昇し定置した場所は、Hammarstrom and Zen (1986)による角閃石圧力計から3.1-4.7 kbarとした。このように2種類の圧力計を使い分けることにより、マグマ溜まり及びマグマ上昇後の定置の場を明らかにすることができた。

7.2 構造地質学への貢献

角閃石圧力計を花崗岩体の物理条件の推定のみならず、もっと一般地質学に応用した例として Vyhnał and McSween (1990)の研究を挙げることができる(第4図)。アパラチアのピーモント地域の古生代後期 Alleghenian 変動の変形に関して、スラストの水平成分や走向方向の断層の変位量の見積りは既にある程度なされていたが、垂直方向の変位量はあまりよくわかっていなかった。そこで彼らは、角閃石を含む古生代後期の花崗岩質岩体14個について、Johnson and Rutherford (1989)による角閃石圧力計を適用して貫入時の圧力を求め、平均密度 2.65 g/cm^3 と仮定して深度に換算した。その結果に



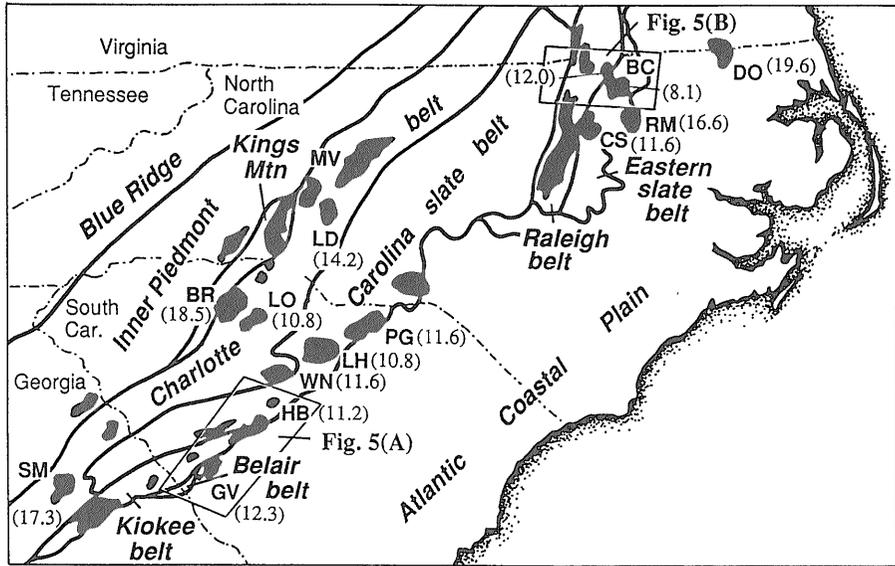
第3図 角閃石圧力計のまとめ

HZ: Hammarstrom and Zen(1986), HO: Hollister *et al.*(1987), JR: Johnson and Rutherford(1989), SC: Schmidt(1992). 縦棒はそれぞれの圧力計の誤差範囲を示す。

Fig. 3 Total Al in hornblende (Al(t)) as function of pressure

HZ: Hammarstrom and Zen(1986), HO: Hollister *et al.*(1987), JR: Johnson and Rutherford (1989), SC: Schmidt(1992).

もとづき、この変動帯を北東—南西方向に延びる数個の構造帯(belt)に区分し、それぞれの構造帯の現在の地表面の過去の深度や変形運動のセンスなどを明らかにしている。例えば、構造帯の一つの Kiokee 帯の現在の地表面は、泥質変成岩の変成鉱物を利用した解析により29.7kmの深度に相当する一方、その北西側及び南東側で断層で接する Carolina 帯及び Belair 帯の現在の地表面は、貫入している花崗岩類 Harbison 岩体(HB)と Graniteville 岩体(GV)に角閃石圧力計を利用してそれぞれ11.2 km, 12.3kmの深度に相当すると推定している(第5図



第4図 南アパラチア Piedmont 地域の Alleghanian 花崗岩類

原図は VyhnaI and McSween(1990)による。数字は原著者が角閃石の分析から Johnson and Rutherford(1989)に基づき求めた各岩体の深度(km)。太線枠は第5図の対象範囲を示す。

岩体名と略号: Butterwood Creek(BC), Bald Rock(BR), Castalia(CS), Dort(DO), Graniteville(GV), Harbison(HB), Landis(LD), Liberty Hill(LH), Lowrys(LO), Mooresville(MV), Pageland(PG), Rocky Mount(RM), Siloam(SM), Winnsboro(WN)。

Fig. 4 Alleghanian Granitoids in the southern Appalachian Piedmont(VyhnaI and McSween, 1990). Values are the depths (km) of emplacement of the intrusives based on Al-in-hornblende barometry(Johnson and Rutherford, 1989) deduced by VyhnaI and McSween(1990). Solid line areas show the regions of Fig. 5.

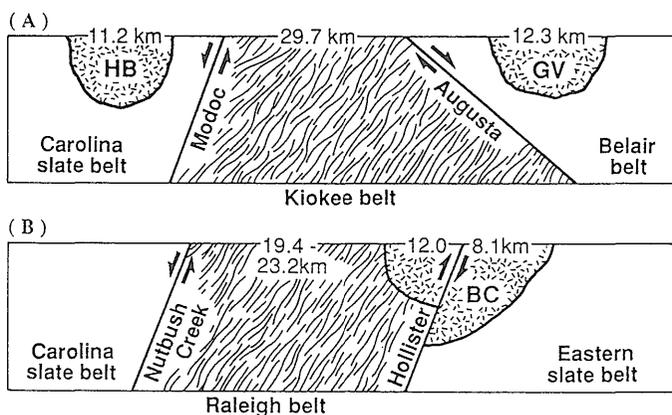
Pluton abbreviations are as follows;Butterwood Creek(BC), Bald Rock(BR), Castalia(CS), Dort(DO), Graniteville(GV), Harbison(HB), Landis(LD), Liberty Hill(LH), Lowrys(LO), Mooresville(MV), Pageland(PG), Rocky Mount(RM), Siloam(SM), Winnsboro(WN)。

上)。Butterwood Creek岩体(BC)はRaleigh帯とEastern slate帯に貫入していて、それぞれの構造帯で12.0kmと8.1kmの定置深度を示し、2つの構造帯間の変位量やすべりのセンスを求めることができる(第5図下)。さらに彼らは角閃石の閉鎖温度と深度の関係からそれぞれの構造帯の地温勾配も求めている。

7.3 中国地方における西南日本内帯花崗岩類の定置の場

わが国の花崗岩類のうち、西南日本内帯の白亜紀—古第三紀花崗岩類は、一般に南より領家帯—山陽帯—山陰帯に分けられている。筆者は以前に、これらの花崗岩類に関する田結庄ほか(1979)の鉱物化学的データに筆者の広

島花崗岩類のデータ(高橋ほか, 1989; 高橋, 1991)を加えて、Hammerstrom and Zen(1986)の地質圧力計を適用して、巨視的に領家帯, 山陽帯(広島花崗岩類), 山陰帯の順に圧力が低くなっていることを明らかにした(高橋, 1989)。ここでは、Czamanske *et al.*(1981)のデータも加えて、中国地方を東部と中央部に分けて Hollister *et al.*(1987)(2-8kbar)及び Schmidt(1990)(8kbar以上)により求めた圧力の値を第2表に示した。2kbar以下の圧力値が計算されるものは、<2kbarと示した。領家帯の花崗岩類のうち、片麻状構造を有するもの(“古期”花崗岩)が4.2-8.5kbar, 塊状のもの(“新期”花崗岩)が4.0kbarの値を与える。山陽帯の花崗岩類のうち、底盤状の産状を示すものが3.2-4.1kbar, ストック状岩体が2.9-



第5図 Kiokee及びRaleigh帯付近の模式的地質断面 (Vyhnal and McSween, 1990のFig.2)

数値は変成作用の解析や花崗岩類中の角閃石から推定された位置深度。花崗岩類の略号は第4図の説明参照。

Fig. 5 Schematic cross sections of Kiokee and Raleigh belts (Fig. 2 in Vyhnal and McSween, 1990) Numbers refer to calculated depths of emplacement or metamorphism for rocks exposed at the surface. Pluton abbreviations as in Fig. 4.

第2表 角閃石中のAl総量から推定した中国地方の花崗岩類の圧力(kbar)

Table 2 Pressure(kbar) estimated from Al-in-hornblende in the granitoids of Chugoku District in Japan

Belt	Central Chugoku	Eastern Chugoku
SAN-IN	Daito gd <2 Yokota gr <2	Ningyo-pass gr <2, 3.2, 3.4 Okutsu gd 2.2
SAN-YO Stock Batholith	Hiroshima gr 3.3, 3.4, 4.1	Small granitic bodies 2.9, 3.9, 4.2 Mannari gr 3.6
RYOKE Massive Gneissose	Takanawa gd 4.2	Shiratori gr 4.0 Shido gd 4.7, 5.0 Shido gr 5.2, 6.4, 8.5

Numbers are pressure (kbar) estimated from chemical data of Tainosho et al. (1979), Czamanske et al. (1981) and Takahashi (1989), using geobarometer of Hollister et al. (1987) (2-8kbar) and Schmidt (1992) (8-13kbar). gd: granodiorite, gr: granite.

4.2kbarの圧力を示す。山陰帯の花崗岩類で2kbar未満-3.4kbarの値を示す。これらの値の違いは、領家帯の花崗岩類が領家変成岩と密接に産すること、山陰帯の花崗岩類がしばしば火山岩と密接に産するといった地質学的状況をよく表わしている。

7.4 圧力計使用が不適当な例

以上は角閃石圧力計を有効に用いた例であるが、角閃石が含まれていても地質圧力計として使えなかった例も参考となろう。サブソリダスで再平衡に達した場合は、当然無制限に圧力計を用いることはできないが、ここではソリダス時に既に角閃石がメルトと非平衡にあったと判断された岩体を紹介する。

白亜紀後期の La Posta 岩体は、Peninsular Ranges バソリスを構成するもので、最外縁部から中心へと優黒質黒雲母角閃石閃緑岩、スフェーン角閃石黒雲母トータル岩、スフェーン角閃石黒雲母花崗閃緑岩、黒雲母花崗閃緑岩、白雲母黒雲母花崗閃緑岩の順に変化する(Clinkenbeard and Walawender, 1989)。彼らは、角閃石含有相が角閃石圧力計の前提条件である諸鉱物を有すること、二次的な変質が認められないこと、2kbarよりも浅成でないことが予想されることを踏まえた上で角閃石の産状を検討してみた。その結果、角閃石が組成上ゾーニングを欠いていて、縁部が最終的なメルトと平衡にないと判断でき、ソリダス温度での組成ではないと考えた。さらに岩石の組成の変化に比して角閃石の組成が一定(Leake, 1978 の分類でマグネシオ普通角閃石とフェロ普通角閃石の境界付近)であることから、角閃石は最終的なメルトよりもっと前の中間組成のものと平衡にあったとしている。また、角閃石含有相では正長石の量が少なく充填状で、角閃石結晶はアルカリ長石に飽和したメルトと接してはいなかったと論じている。このような理由で、彼らは本岩体では角閃石は地質圧力計として使える条件を満たしていないと判断している。Hollister *et al.* (1987)の圧力計に基づく、地質学的及び年代学的に岩体内に不連続性が認められないにもかかわらず、西側の角閃石含有相で1.9kbar、東側のそれで5.2kbarという値が求められ、これらの値が無意味であると彼らは述べている。

8. あとがき

小論で花崗岩類形成場推定における角閃石圧力計の有効性を紹介した。また、本圧力計使用の際、誤った取り扱いはないよう、適用岩種や構成鉱物等の注意も考慮してある。小論が個々の花崗岩質岩体の解析に加えて花崗岩類の地質学的体系化に近い将来役立つことを願う次第で

ある。

謝辞：奥村公男情報解析課課長は小論の内容に興味を示され、有益なご助言をしてくださった。吉田史郎層序構造課課長と久保和也岩石地質課課長からは初歩的な文脈状のミスを指摘していただいた。滝沢文教地質部長は本来業務と離れた内容にもかかわらず積極的に小論の投稿を勧めていただいた。さらに奥山康子博士は丁寧な査読と議論をしてくださった。以上の方々に対して感謝します。

文 献

- Blundy, J.D. and Holland, T.J.B. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.104, p. 208-224.
- and ——— (1992a) "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer": Reply to the comments of Hammarstrom and Zen, and Rutherford and Johnson. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.111, p. 269-272.
- and ——— (1992b) "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer" - reply to the comments of Poli and Schmidt. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.111, p. 278-282.
- Clinkenbeard, J.P. and Walawender, M.J. (1989) Mineralogy of the La Posta pluton: Implications for the origin of zoned plutons in the eastern Peninsular Ranges batholith, southern and Baja California. *American Mineralogist*, vol. 74, p.1258-1269.
- Cullers, R.L., Griffin, T., Bickford, M.E. and Anderson, J.L. (1992) Origin and chemical evolution of the 1360 Ma San Isabel batholith, Wet Mountains, Colorado: A mid-crustal granite of anorogenic affinities. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 104, p.316-328.
- Czamanske, G.K., Ishihara, S. and Atkin, S.A. (1981) Chemistry of rock-forming min-

- erals of the Cretaceous-Paleocene batholith in Southwestern Japan and implications for magma genesis. *Jour. Geophys. Res.*, vol.86, p.10431-10469
- Ellis, D.J.(1980) Osumilite-sapphirine-quartz granulites from Enderby Land, Antarctica: P-T conditions of metamorphism, implications for garnet-cordierite equilibria and the evolution of the deep crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.74, p.201-210.
- Farrow, C.E.G. and Barr, S.M.(1992) Petrology of high-Al-hornblende- and magmatic-epidote-bearing plutons in the Southeastern Cape Breton Highlands, Nova Scotia. *Canadian Mineralogist*, vol.30, p.377-392.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E-an(1986) Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, vol.71, p.1297-1313.
- and ——— (1992) Discussion of Blundy and Holland's(1990)"Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer". *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.111, p.264-266.
- Hawthorne, F.C.(1983) The crystal chemistry of the amphiboles. *Canadian Mineralogist*, vol.21, p.173-480.
- Helz, R.T.(1973) Phase relations of basalts in their melting range at $P_{H_2O}=5$ kbar as a function of oxygen fugacity. *Jour. Petrol.*, vol.14, p.249-302.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H. and Sisson, V.B.(1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, vol.72, p.231-239.
- Johnson, M.C. and Rutherford, M.J.(1989) Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, vol.17, p.837-841.
- Leake, B.E.(1978) Nomenclature of amphiboles. *Mineralogical Magazine*, vol.42, p.533-563.
- Piwinskii, A.J.(1975) Experimental studies of granitoid rocks near the San Andreas Fault zone in the Coast and Transverse Ranges and Mojave Desert, California. *Tectonophysics*, vol.25, p.217-231.
- Poli, S. and Schmidt, M.W.(1992) A comment on "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer" by J.D. Blundy and T.J.B. Holland(Contrib Mineral Petrol(1990) 104:208-224). *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.111, p.273-278.
- Rutherford, M.J. and Johnson, M.C.(1992) Comment on Blundy and Holland's(1990) "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer". *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.111, p.266-268.
- Rutter M.J., Van der Laan, S.R. and Wyllie, P. J.(1989) Experimental data for a proposed empirical igneous geobarometer: Aluminum in hornblende at 10 kbar pressure. *Geology*, vol.17, p.897-900.
- Schmidt, M.W.(1992) Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.110, p.304-310.
- Spear, F.S.(1981) An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite. *Amer. Jour. Sci.*, vol.281, p.697-734.
- Speer, J.A.(1988) Depth and mineralogy of the magma source or pause region for the Carboniferous Liberty Hill pluton, South Carolina. *Geology*, vol.16, p.521-524.
- 田結庄良昭・本間弘次・田崎耕市(1979) 東中国にお

- ける花崗岩類の造岩鉱物の化学組成。地質学論集, 17号, p.99-112.
- 高橋裕平(1989) 広島市周辺の広島花崗岩類の黒雲母と角閃石—特に角閃石圧力計の応用—。MAGMA, 84号, p.20-24.
- (1991) 広島地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 41p.
- ・牧本 博・脇田浩二・酒井 彰(1989) 津田地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 56p.
- Vyhnal, C.R. and McSween, H.Y.(1990) Constraints on Alleghanian vertical displacements in the southern Appalachian Piedmont, based on aluminum-in-hornblende barometry. *Geology*, vol. 18, p.938-941.
- Zen, E-an and Hammarstrom, J.M.(1984) Magmatic epidote and its petrologic significance. *Geology*, vol.12, p.515-518.

(受付: 1993年4月6日; 受理: 1993年7月26日)