

地殻内変成作用の高温限界：超高温変成作用

小山内 康人¹⁾・吉村 康隆²⁾

1. はじめに

変成作用は、ダイヤモンドやコース石を含みマントル内の温度-圧力条件で形成される超高压変成岩をのぞき、一般に地殻内部で進行する地質現象である。地殻内変成作用 (Crustal metamorphism) では、Eskola (1915) や Coombs (1954) によるさまざまな温度-圧力条件に対応した変成相の確立以降、グラニュライト相あるいはエクロジヤイト相の変成岩類がもっとも高温条件をしめすものであると考えられてきた。これらのなかで、エクロジヤイト相よりも低圧でおこるグラニュライト相変成作用において、部分溶融が進行するような変成過程を“超変成作用 (ultra-metamorphism)”と呼称する場合があります。かつては変成作用の高温限界にあたりとみなされてきた。変成岩 (とくに泥質変成岩) の部分溶融は、白雲母+アルバイト+カリ長石+石英+H₂O=メルトのようなソリダス上での反応が約600~650℃でおこる。また、ソリダスよりも高温でおこる、揮発性成分をとみなわない脱水溶融反応 (黒雲母+石英=斜方輝石+カリ長石+メルトなど) でも、さまざまな実験岩石学的解析によって、その温度条件は800~850℃程度が見積もられている (例えば Vielzeuf and Holloway, 1988)。各種地質温度計を用いたグラニュライト相変成岩の温度条件見積もりにおいても、世界各地で得られる変成温度条件は750~850℃に集中する。これらの温度条件は、一般的なカコウ岩ソリダスの温度条件 (例えば Huang and Wyllie, 1973) とほぼ一致する。以上のことから、地殻内でおこる変成作用の高温限界は“超変成作用”が進行する条件であり、一般に

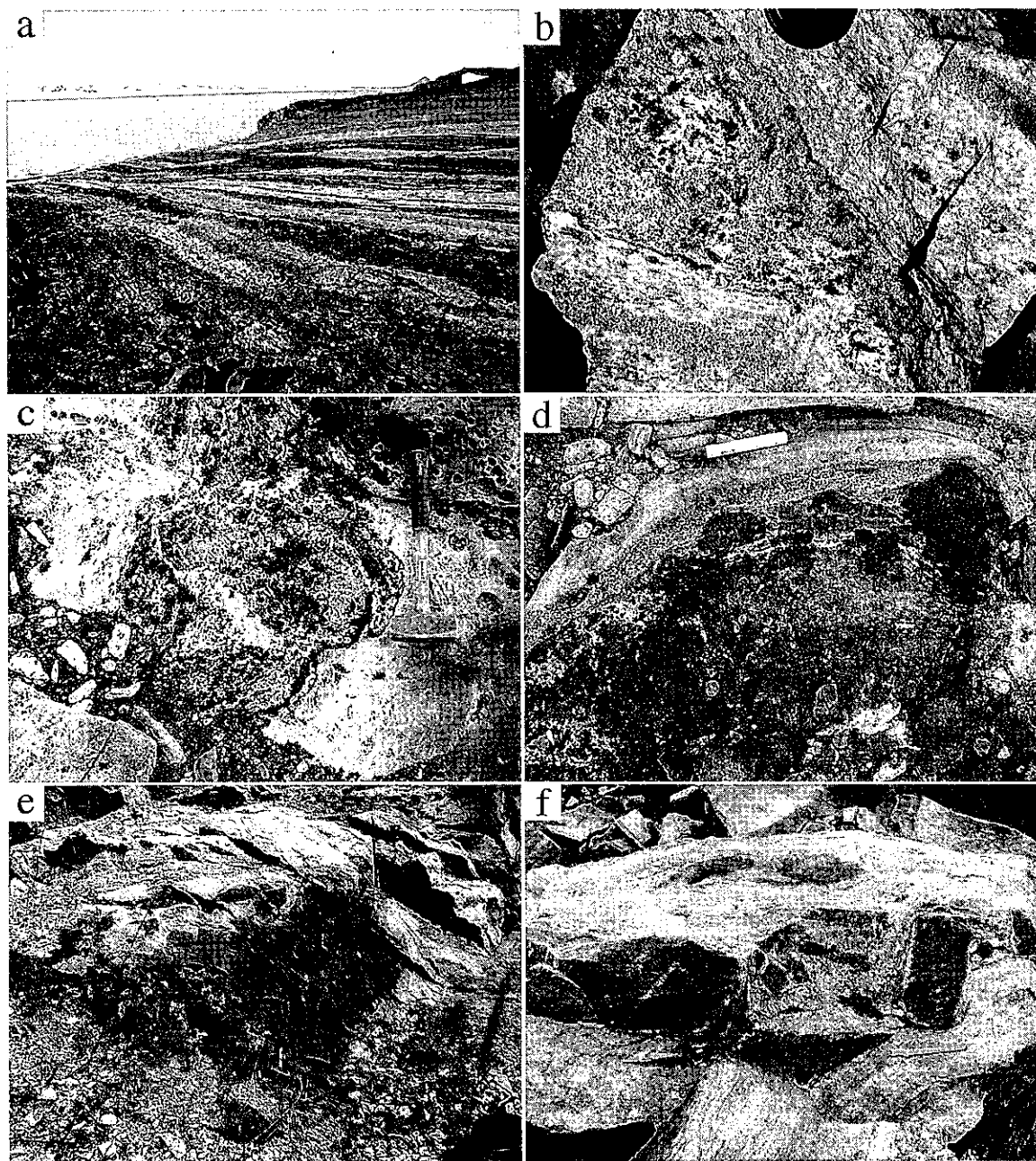
750~850℃が想定されてきた (Bohlen, 1987; Harley, 1989 など)。

最近になって、世界各地の太古代~原生代クラトン内部や古生代以降の大陸衝突帯変成地域で、750~850℃程度の一般的なグラニュライト相変成岩よりもはるかに高温条件をしめす変成岩が見出され始めた。このような岩石では、東南極ナピア岩体 (Harley and Motoyoshi, 2000 など) や中央ブラジルのパロアルト地域 (Morales and Fuck, 2000 など) のように、変成温度条件が1,100℃に達するような場合もみとめられ、グラニュライト相の中でも特に高い温度条件をしめすことから“超高温変成岩 (ultrahigh-temperature metamorphic rock; UHT metamorphic rock)”とよばれるようになった。超高温変成岩を形成する変成作用を“超高温変成作用 (UHT metamorphism)”とよび、900℃以上の変成温度条件をしめす変成岩形成に適用される (Spear, 1993; Harley, 1998)。かつてこのような変成作用は、Harley and Hensen (1990) などによって Very High Temperature (VHT) metamorphism とよばれたこともある。変成岩が超高温条件をしめす根拠となるさまざまな鉱物共生の存在は、1960年代後半にカーネギー研究所 (当時) の B. J. Hensen らによって実験岩石学的に推定されていた。天然の岩石で超高温変成岩が最初に記載されたのは、東南極ナピア岩体の変成珪岩から見出されたサフィリン+石英共生である (Dallwitz, 1968)。

超高温変成岩の形成プロセスを明らかにするためには、その苦鉄質マグマの温度にも匹敵する“超高温条件”をいかにして獲得するのか (超高温の成因) と、超高温変成条件にいたる変成履歴 (テクト

1) 岡山大学 教育学部地学教室：
〒700-8530 岡山市津島中3-1-1
2) 高知大学 理学部自然環境科学教室

キーワード：地殻内変成作用, 超高温変成岩, サフィリン, 大隅石, P-T 経路, 太古代~原生代クラトン, 大陸衝突帯



第1図 超高温変成岩類の代表的な産状。a: 層状片麻岩の産状(東南極ナビア岩体・トナー島), b: 層状片麻岩中の超高温泥質グラニュライト(ナビア岩体・ハワードヒルズ), c: ブロック状のレストタイト(ナビア岩体・バドー山), d: 超苦鉄質岩と石英長石質片麻岩の境界で超高温交代作用によるサフィリングラニュライト(ナビア岩体・トナー島), e: 純粋なマーブル中の超高温泥質グラニュライトのブロック(スリランカ・ハイランド岩体), f: 石英長石質片麻岩中のブロック状超高温苦鉄質グラニュライト(ベトナム・コンツム地塊)。

ニクス)の詳細な解析が重要であるが、現時点では後に述べるような諸説を含めて、変成作用の実態は明らかではない。小論では、超高温変成作用と

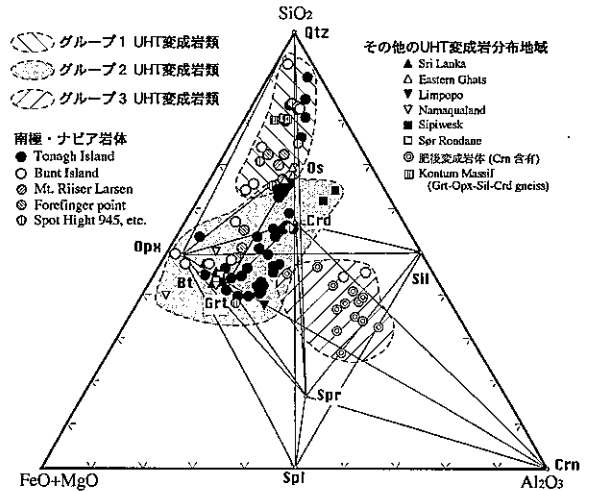
超高温変成岩についてレビューし、超高温変成岩形成プロセスを明らかにするためのいくつかの問題点について述べる。日本語で書かれた超高温変

成岩のレビューとしては、本吉(1998)による南極ナピア岩体の例も参照されたい。なお、以下では超高温変成岩であっても、片麻状組織の発達したものは“片麻岩”とよび、塊状の岩石を“グラニュライト”とよぶことにする。

2. 超高温変成岩の産状と原岩

多くの超高温変成岩類は、一般のグラニュライト相変成岩に比べてはるかに高温条件下で変成作用を受けたものではあるが、その原岩は苦鉄質岩・超苦鉄質岩・泥質岩など他のグラニュライト相変成岩と大きく異なるものではない。これらの超高温変成岩類のさまざまな産状を、第1図にまとめた。代表的なものは複輝石-ザクロ石グラニュライトあるいは片麻岩、変成カンラン岩質グラニュライト、石英長石質ザクロ石-サフィリングラニュライトあるいは片麻岩などで、層状片麻岩体を形成したり岩脈状に産したりする(第1図a, b)。しかし一部の超高温変成岩は、著しく Al_2O_3 や MgO に富み、 SiO_2 に枯渇した全岩化学組成をしめし、その原岩が部分溶融にともなうレスタイト(溶け残り岩)起源と考えられるものも多く存在する。これらは一般に、石英を欠くサフィリン-ザクロ石-斜方輝石グラニュライトやサフィリン-スピネル-コランダム-フログパイトグラニュライトとして、石英長石質片麻岩に取り囲まれてポッド状・ブロック状あるいはレンズ状に産する(第1図c)。また、苦鉄質岩、超苦鉄質岩、珪長質岩、泥質岩などを原岩とする、さまざまな超高温変成岩から構成される層状片麻岩において、石英長石質片麻岩と超苦鉄質グラニュライトが接する部分では、両者の間に超高温条件下で交代作用によって形成された優黒質のザクロ石-斜方輝石-サフィリングラニュライトなどが、レンズ状あるいは薄層としてみられることがある(第1図d)。一方スリランカ・ハイランド岩体などでは、稀にグラニュライト相の純粋なマープル中にサフィリン-ザクロ石-斜方輝石グラニュライトがブロックとして産する場合がある(第1図e)。また、ベトナム・コンツム地塊などでは、珪長質火成岩起源の石英長石質片麻岩中に超高温苦鉄質グラニュライトがブロックとして産することもある(第1図f)。

多くの超高温変成岩類では、後述するように変



第2図 世界各地のサフィリンを含む超高温変成岩類の全岩化学組成。鉱物名略号: Bt-黒雲母, Crd-堇青石, Crn-コランダム, Grt-ザクロ石, Opx-斜方輝石, Os-大隅石, Qtz-石英, Sil-珪線石, Spl-スピネル, Spr-サフィリン。

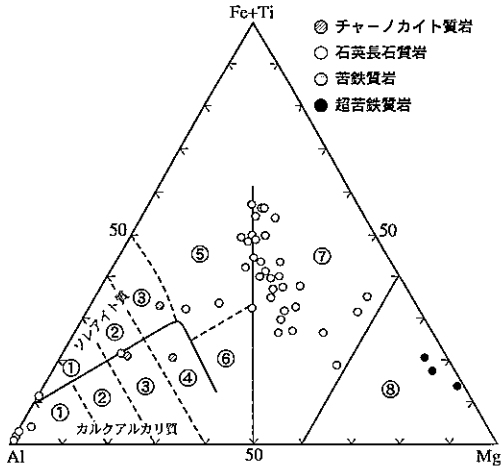
成作用の温度-圧力条件の推定などで石英の有無が重要となるため、石英を表示可能な三角図(SiO_2 - $FeO+MgO$ - Al_2O_3 図: FMAS図)をもちいて、全岩化学組成の比較や鉱物組合せの解析などがおこなわれる。世界各地のサフィリンを含む超高温変成岩類(苦鉄質岩および超苦鉄質岩起源を除く)の全岩化学組成を、FMAS図にまとめた(第2図)。これらは、大きく次の3つのグループに区分される。

グループ1: サフィリン+石英の鉱物共生がみられるもの。全岩化学組成は、大隅石-斜方輝石連結線よりも SiO_2 に富み、 $SiO_2 / (SiO_2 + FeO + MgO + Al_2O_3) > 0.65$ (モル比)である。

グループ2: 石英を欠き、サフィリン+ザクロ石+斜方輝石やサフィリン+大隅石+ザクロ石などの鉱物共生をしめす。全岩化学組成は、ほぼ大隅石-斜方輝石-サフィリンを結ぶ小三角形内にプロットされる。

グループ3: サフィリン+コランダムがみられる。全岩化学組成は SiO_2 に乏しく著しく Al_2O_3 に富み、 $Al_2O_3 / (SiO_2 + FeO + MgO + Al_2O_3) > 0.3$ である。

グループ1は多くの場合、石英長石質グラニュライトあるいは片麻岩として層状片麻岩を構成し、石英に富む堆積岩あるいは珪長質火成岩起源と考えられる。グループ3はポッド状・ブロック状あるいは



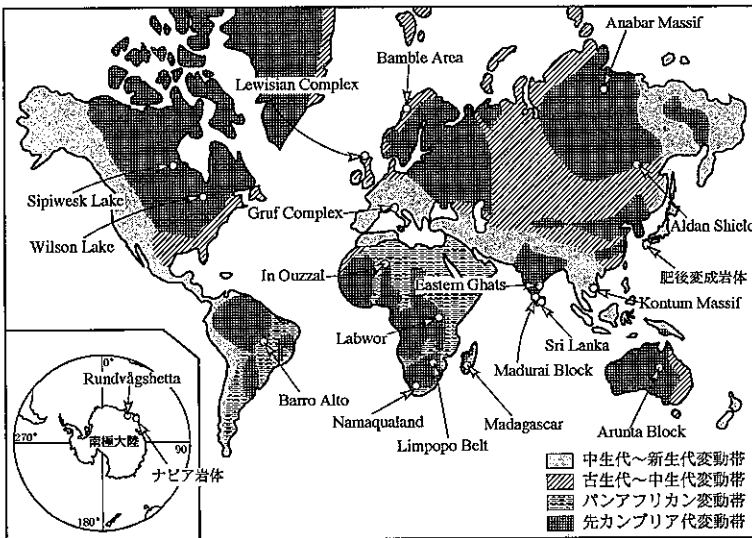
第3図 火成岩起源の超高温変成岩の全岩化学組成。
 ①：流紋岩，②：デイサイト，③：安山岩，④：玄武岩，⑤：Feに富むソレイト質玄武岩，⑥：Mgに富むソレイト質玄武岩，⑦：コマチアイト質玄武岩，⑧：コマチアイト。

レンズ状の産状で、レスタイト起源と考えられる。一方グループ2はさまざまな産状をしめし、原岩はFeOやMgOに富む泥質岩・レスタイト、あるいは超高温条件下で交代作用によって形成された岩石などさまざまな可能性が考えられているが、原岩を特定することが困難である場合が多い。苦鉄質火成岩起源の超高温変成岩類は原生代以前の変成岩分布地域に産出することが多く、Fe+Ti-Al-Mg図(Jensen diagram)などでみると、コマチアイト質玄武岩起源と考えられるものが多い(第3図)。これら

は層状片麻岩体を構成したり、岩脈状に産することが多い。

3. 世界の超高温変成岩分布

現在知られている世界の超高温変成岩分布地域は、以下にあげる約20ヶ所の地域がある。それぞれの地域では、分布する変成岩すべてが超高温変成条件をしめすわけではなく、ある限られた岩体や層状片麻岩中のブロックなどにのみ産出する場合が多い。その代表的地域は、東南極のナピア岩体(Ellis *et al.*, 1980; Sheraton *et al.*, 1987; Harley, 1987; Motoyoshi and Hensen, 1989; Hokada *et al.*, 1999; Yoshimura *et al.*, 2000など)、インドのEastern Ghats (Grew, 1982; Mohan *et al.*, 1986; Lal *et al.*, 1987; Sengupta *et al.*, 1991; Dasgupta, 1995; Shaw and Arima, 1998など)やMadurai Block (Raith *et al.*, 1997; Sajeev *et al.*, 2001など)、スリランカのHighland Complex (Osanai, 1989, Osanai *et al.*, 2000; Kriegsman, 1991; Kriegsman and Schumacher, 1999など)、カナダのWilson Lake (Arima *et al.*, 1986; Currie and Gittins, 1988)やSipiwesk Lake (Arima and Bennett, 1984)、ロシアのAldan Shield (Perchuk *et al.*, 1985)やAnabar Massif (Lutts and Kopaneva, 1968)、アルジェリアのIn Ouzzal (Kienast and Ouzegane, 1987; Bertland *et al.*, 1992; Guiraud *et al.*, 1996; Mouri *et al.*, 1996など)、ウガンダのLab-

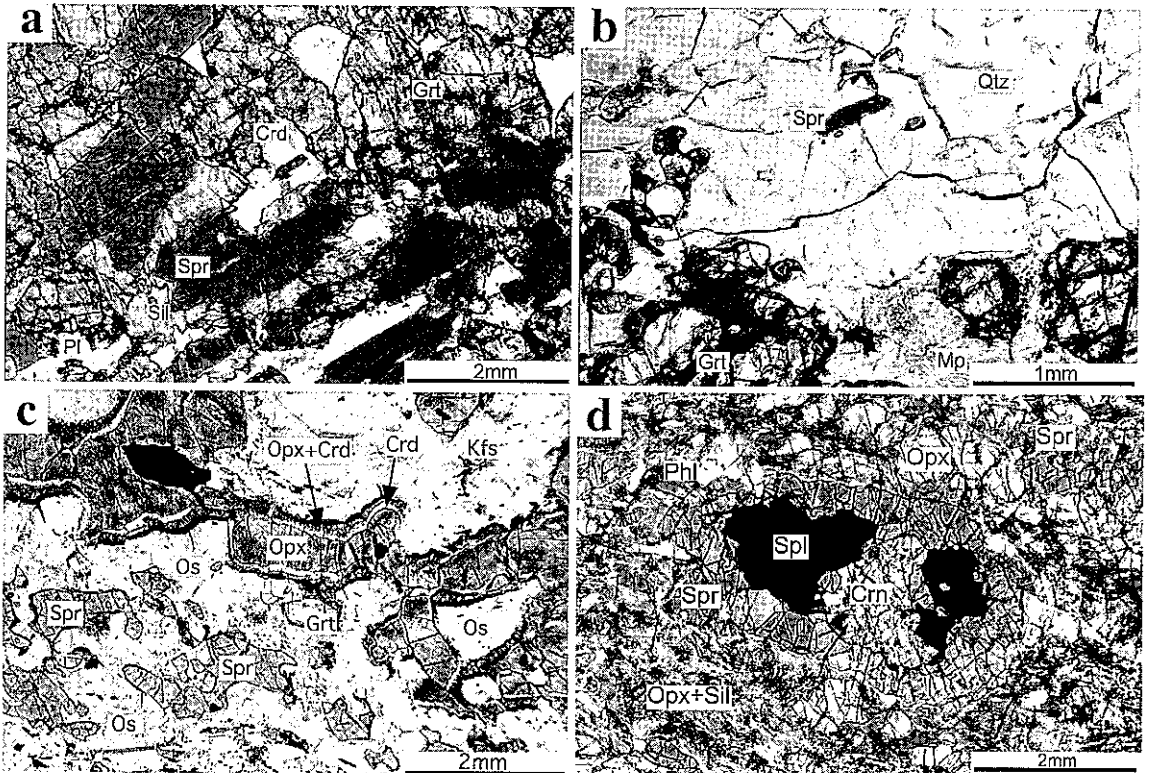


第4図 世界の超高温変成岩分布地域。変成帯の時代区分は、Liou *et al.* (1998)による。

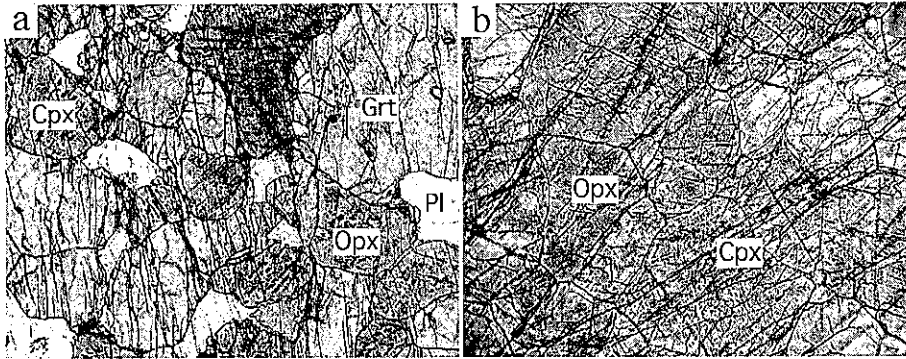
wor Hills (Sandiford *et al.*, 1987), 南部アフリカの Limpopo Belt (Droop, 1989; Hisada and Miyano, 1996) や Namaqualand (Waters, 1988), マダガスカル (Nicollet, 1990), ブラジルの Barro Alto Complex (Morares and Fuck., 2000), スコットランドの Lewisian Complex (Baba, 1998) などがある。これらはほぼすべてが、太古代～原生代の変動帯に位置する。また、東南極の Rundvågshetta (Motoyoshi and Ishikawa, 1997), ノルウェーの Bamble area (Kihle and Bucher-Nurminen, 1992), イタリアの Gruf Complex (Droop and Bucher-Nurminen, 1984), ベトナムの Kontum Massif (Osanaï *et al.*, 2001a) などの古生代以降の大陸衝突型変動帯でも存在が確認されており、国内においては唯一、約250Maの年代をしめす肥後変成岩体からサフィリン-コランダムグラニュライトの報告がある (Osanaï *et al.*, 1998)。これらの世界各地の超高温変成岩産出地を第4図にまとめた。

4. 超高温変成岩の岩石学的・鉱物学特徴

超高温変成作用を受けた泥質変成岩・石英長石質変成岩を特徴づける鉱物組合せには、サフィリン+石英, スピネル+石英, 大隅石+ザクロ石+石英, 斜方輝石+珪線石+石英などがある。これらは斜長石, アルカリ長石, 珪線石, ザクロ石, 斜方輝石などと共生し, 基本的に無水鉱物だけからなる鉱物組合せをしめすことが多い(第5図a~c)。しかし, 黒雲母や堇青石などの含水鉱物がまったく存在しないわけではない(第5図d)。超高温変成作用のなかでも比較的低温・低圧条件(900~1,000℃, 1.0 GPa以下)では, より一般的なグラニュライト相の泥質変成岩と同様に, ザクロ石+堇青石+珪線石, ザクロ石+堇青石+スピネルなどの鉱物組合せがみられる場合もある。苦鉄質変成岩・超苦鉄質変成岩では, より低温のグラニュライト相の岩石とほぼ同様の鉱物組合せをしめし, 超高温変成作用



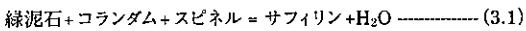
第5図 泥質岩やレスタイト起源の超高温変成岩を特徴づける鉱物共生。a: サフィリン(Spr)+ザクロ石(Grt), b: サフィリン+石英(Qtz)共生とメソパーサイト(Mp)も出現, c: サフィリン+ザクロ石+大隅石(Os)共生が見られ, 大隅石と斜方輝石の間に後退変成によるシンプレクタイトが形成, d: コランダム(Crn)+スピネル(Spl)+サフィリン。Fに富むフログパイト(Phl)も共存する。



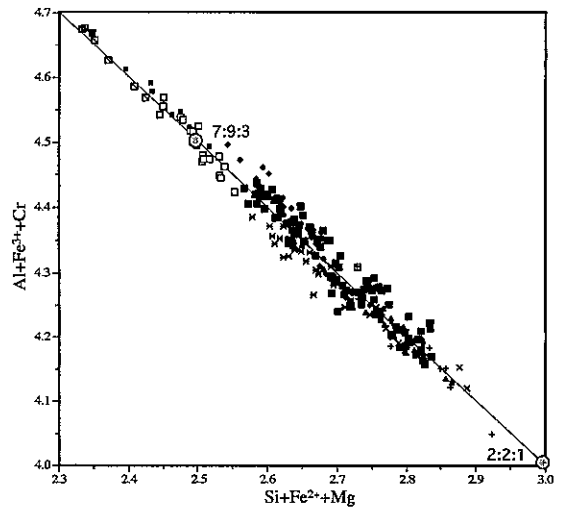
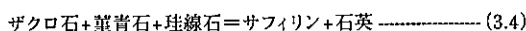
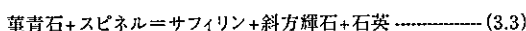
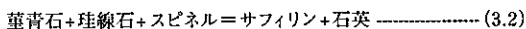
第6図 苦鉄質岩および超苦鉄質岩起源の超高温変成岩。写真の長辺は約4mm。

を特徴づける明瞭な鉱物組合せは存在しない。これは主要な構成鉱物が、広範な温度-圧力範囲で安定な単斜輝石+斜方輝石+斜長石+カンラン石+石英であることによる(第6図)。以下に超高温変成岩を構成する各種鉱物の特徴をまとめる。

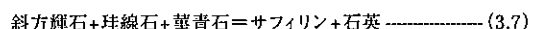
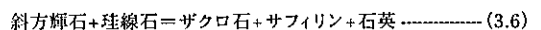
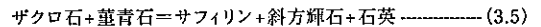
サフィリン：一般に青色をしめすことが特徴で、 Al_2O_3 に富み SiO_2 にとぼしい泥質変成岩やレスタイトに多くみられるが、 SiO_2 に著しく富み Al_2O_3 や MgO を含む不純な珪岩(変成チャート)にも出現する。顕著なMg-ツェルマク置換($MgSi \rightleftharpoons 2Al$)がみられ、Alに富むものからSiに富むものまで組成変化する。MgSiサイトには Fe^{2+} が含まれ、2Alサイトには Fe^{3+} や Cr^{3+} も含まれる(第7図)。Mgに富む($X_{Mg} : Mg / (Fe^{2+} + Mg) > 0.9$)場合は淡青色となり、肥後変成岩体やベトナム・コンツム地塊などのサフィリン-コランダムグラニュライトにみられる著しくAlに富むサフィリン($X_{Mg} = 0.85 \sim 0.87$)は無色～淡紫色をしめす。 Fe^{3+} を多く含む場合は濃青色となり、Crを多く含む場合は緑色をしめす場合がある。サフィリンは超高温変成作用を含むグラニュライト相に出現し、最も低温で出現する場合は、



での反応で形成されるらしい(Ackermand *et al.*, 1975)。この反応は、500MPa程度では約750℃でも起こりうる。一方、典型的な超高温変成作用を特徴づけるサフィリン+石英共生が出現するためには、1,050℃以上の温度条件が必要となり、以下のような反応で形成される。

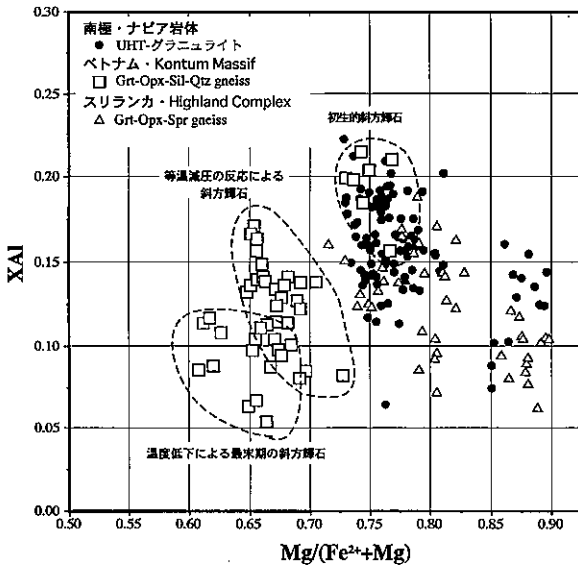


第7図 サフィリンの化学組成。全岩化学組成により、組成は大きく変化するが、それぞれでコア(Siに富む)からリム(Alに富む)へ、 $MgSi \rightleftharpoons 2Al$ の顕著な置換関係がみられる。記号の違いは世界各地のサンプルの違いをしめすが、コアとリムは区別していない。



反応3.2および3.3は比較的低压(約850 MPa以下)でおこり、反応3.6および3.7は比較的高圧(約1.05 GPa以上)でおこるとされている(例えば、Harley, 1998)。

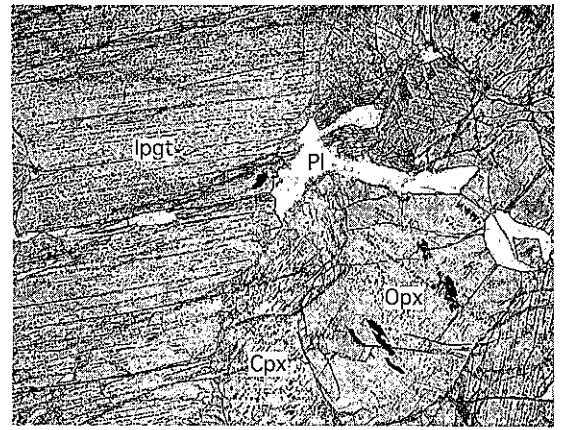
斜方輝石：超高温変成岩を特徴づける斜方輝石は、苦鉄質および超苦鉄質グラニュライトをのぞき、一般に高いAl含有量(7~8wt%以上)と比較的高い X_{Mg} 値(0.7~0.9)をしめす(第8図)。このよ



第8図 代表的な超高温泥質グラニュライトの斜方輝石の化学組成。X_{Al}はM1サイトのAl量をしめす。

うな7wt%以上のAl含有量(M1サイトのAl: X_{Al} > 0.15)をしめす斜方輝石は、実験岩石学的に900℃以上で安定に存在することが知られている(例えば, Carrington and Harley, 1995)。サフィリンや石英と共生し著しく高いAl含有量(最大12wt%程度)をしめす斜方輝石(1,000~1,100℃でも安定)が、後退変成作用でサフィリンとAlに比較的乏しい斜方輝石に分解することがある。このような斜方輝石では淡赤色~淡緑色の顕著な多色性がみられ、高いAl^{VI}/Al^{IV}比をしめす。組成累帯構造がみられる場合は、一般にコアで高いAl含有量と低いX_{Mg}値、リムで低いAl含有量と高いX_{Mg}値をしめす。

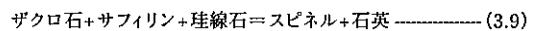
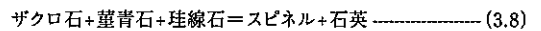
超高温変成作用をうけた苦鉄質および超苦鉄質グラニュライトあるいは縞状鉄鉱では、単斜輝石のラメラを多く含む斜方輝石がしばしば認められる(第9図)。このラメラは、1,000℃以上の超高温下で安定に存在していた変成ピジョン輝石が、後退変成作用にともなう冷却過程で斜方輝石に転移する際に形成されたものと考えられており(Grew, 1982; Harley, 1987; Sandiford and Powell, 1988など)、いわゆる“スティルウォーター型斜方輝石”あるいは“転移ピジョン輝石”に相当する。このような斜方輝石は、超高温変成作用をうけた岩石であっても、Caアクティビティーの低い泥質岩やレスタイト起源のものには見出されない。



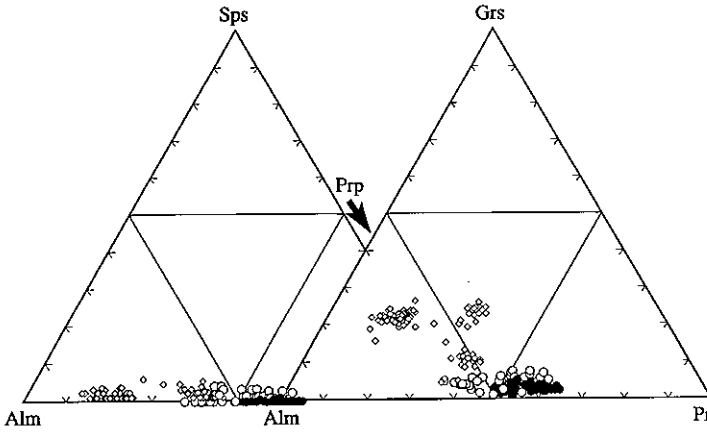
第9図 転移ピジョン輝石(Ipgt)を含む超高温苦鉄質グラニュライト。写真の長辺は約4mm。

ザクロ石：超高温変成岩に含まれるザクロ石は、全岩化学組成を反映して広範な組成をしめす(第10図)。泥質岩あるいはレスタイト起源の超高温変成岩では、1,050℃を越えサフィリン+石英が安定な条件のザクロ石は、X_{Mg}=0.5~0.7の比較的高いMg含有量をもつが、グロッシュラーやスペサルティン成分は乏しい。一方、堇青石と共生する比較的低温・低圧の超高温変成条件(<約1,050℃, <約1.05GPa)では、やや低いX_{Mg}値(0.4~0.55)をしめす。一方、苦鉄質グラニュライトでは全岩化学組成を反映して、比較的高いグロッシュラー成分(最大で20モル%程度)をもつが、X_{Mg}値は0.2~0.4程度である。

スピネル：超高温条件下でのスピネルの産出は、泥質岩やレスタイト起源のグラニュライトにおいて堇青石と共生する 경우가多く、約900MPa以下の比較的低圧条件をしめす。スピネル+石英共生は約1,000℃以上の温度条件が必要であり、次のような反応によって形成される(Hensen and Harley, 1990など)。



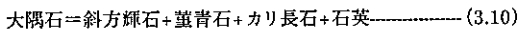
スピネル+石英共生は、スピネル中のZn含有量が増加すると低温のグラニュライト相でも安定に存在可能なことが知られている。超高温変成岩にみられるスピネルは、温度条件を敏感に反映した鉱物共生の違いによって広範なX_{Mg}値をしめすが、Zn含有量は一般に著しく低い。反応3.8や3.9で形成



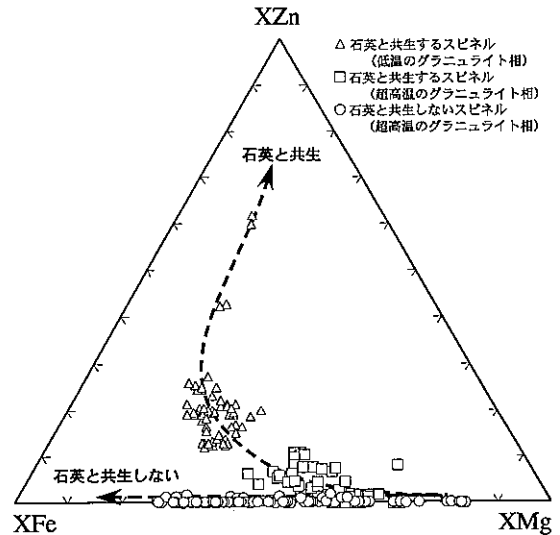
第10図
超高温変成岩のザクロ石の化学組成。
○と●は泥質岩あるいはレスタイト起源、
◇は苦鉄質岩起源のグラニュライトのザ
クロ石。

されたスピネルは、スピネル+堇青石共生のもの ($X_{Mg}=0.4\sim 0.6$) に比べて高い X_{Mg} 値 ($0.6\sim 0.8$) をしめす (第11図)。

大隅石: 泥質岩やレスタイト起源の変成岩に大隅石が産出することは、一般に超高温変成作用を特徴づける重要な指標となる。大隅石の安定領域は、実験岩石学的には低温限界として $850\sim 900^\circ\text{C}$ が得られているが、全岩化学組成や酸素フュガシティー (fO_2) が異なると、圧力限界と高温限界が変化するらしい。比較的 MgO に富む全岩化学組成で低い fO_2 の条件では、高压限界は 1.15GPa であるが $1,100^\circ\text{C}$ を越えても安定に存在する (Motoyoshi *et al.*, 1993; Audibert *et al.*, 1995; Carrington and Harley, 1995 など)。このような場合は、超高温変成条件下で高温高压側から低温低压側に向かい、サフィリン+大隅石→ザクロ石+大隅石→斜方輝石+大隅石のように特徴的な鉱物組合せが変化する。一方高い fO_2 条件下ではスピネル+大隅石が出現し、全岩化学組成が MgO に富むほど安定領域が高温側に拡大するが、高温限界は約 $1,000^\circ\text{C}$ 程度である。このとき、高压限界は約 850MPa が得られている (Das *et al.*, 2001)。大隅石は一般に高い X_{Mg} 値 ($0.85\sim 0.95$) をしめし、後退変成作用にともなう以下の反応によって分解し、斜方輝石や堇青石などからなるシンプレクタイトを形成する (第12図)。



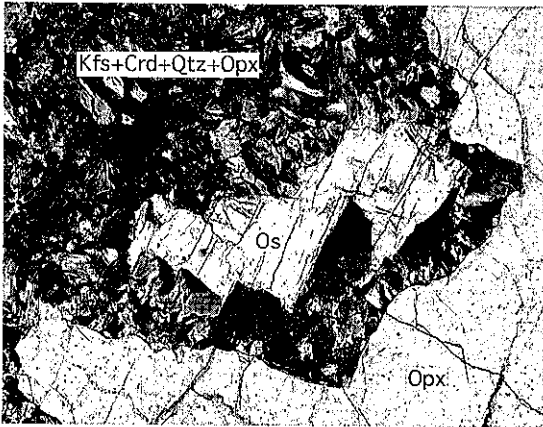
この反応は、左辺から右辺へ温度低下することをしめしている。インド・Eastern Ghats (Lal *et al.*, 1987), ロシア・Aldan Shield (Perchuk *et al.*, 1985), アルジェリア・In Ouzzal (Audibert *et al.*, 1993) や中国・北大別山地域 (Osanaï *et al.* in



第11図 スピネルの Zn-Fe-Mg 図。スピネル+石英共生をしめさない場合 (○) は、Zn に乏しく広い組成範囲をしめす。超高温変成岩 (□) でスピネル+石英共生をしめす場合は、○ と大差ない組成をしめす。低温のグラニュライト相でスピネル+石英共生をしめす場合 (△) は、著しく Zn に富む。Xi は元素 i の $\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Zn}$ に対する分子比をしめす。例えば、 $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Zn})$ 。

prep) などでは反応が完全に進行し、右辺の鉱物共生からなるシンプレクタイトのみが見出されることがある。

黒雲母: 超高温変成岩は一般に含水珪酸塩鉱物を欠き、ほぼ完全に“ドライ”な状態で変成作用を受けたと考えられる場合が多い。しかし従来から、東南極ナビア岩体などの典型的な超高温泥質グラニュライトにおいても、しばしば黒雲母が存在するこ

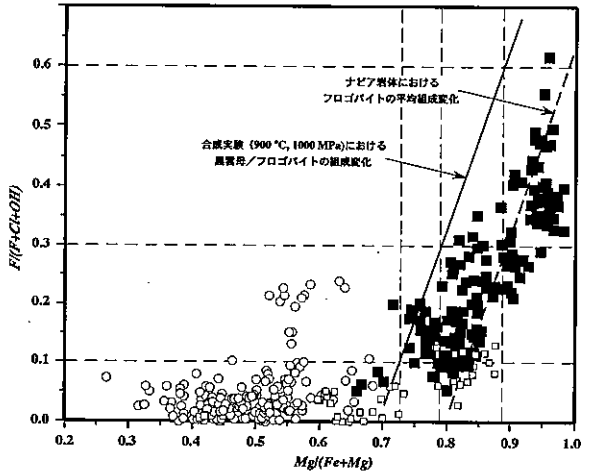


第12図 大隅石の後退変成作用による、斜方輝石+堇青石+カリ長石+石英のシンプレクタイト。写真の長辺は、約4mm。

とが知られていたが、これらはすべて後退変成作用による二次的な反応生成物として扱われてきた(例えば, Sheraton *et al.*, 1987)。一方最近になって、サフィリンや大隅石などの超高温条件を特徴づける鉱物と平衡に共存すると考えられる黒雲母が、世界各地の超高温泥質変成岩から報告されるようになった。また、サフィリンや大隅石に包有された昇温期変成過程の残留鉱物としての黒雲母も見出され、これらは高い X_{Mg} 値(0.80~0.95)と高いフッ素(F)含有量(最大8wt%:本吉・Hensen, 1997)をしめすフロゴパイトであることが明らかにされてきた(第13図)。

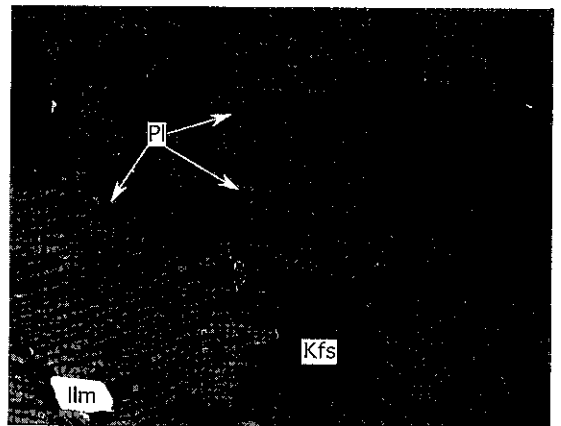
黒雲母におけるOHのFによる置換は、黒雲母の安定領域を高温側へ拡大することが知られている(Peterson *et al.*, 1991; Skjerlie and Jhonston, 1993; Hensen and Osanai, 1994; Dooley and Patiñ Douce, 1996)。Hensen and Osanai (1994)の実験では、圧力が900MPaの場合、 $X_F (=F/(F+OH+Cl))=0.1$ では黒雲母の安定な高温限界が約950℃となり、 $X_F=0.3$ では約1,000℃、 $X_F=0.6$ では約1,050℃となることが明らかにされている。このことから、高いF含有量をしめす黒雲母(フロゴパイト)は、超高温条件でも安定に存在可能で、かつ超高温変成作用の指標ともなる。ちなみに、本吉・Hensen (1997)による約8wt%のFを含むフロゴパイトでは $X_F>0.9$ となり、多くの超高温変成岩中の初生的フロゴパイトは $X_F=0.2\sim0.6$ である。

アルカリ長石: 泥質岩や珪長質火成岩起源の超高

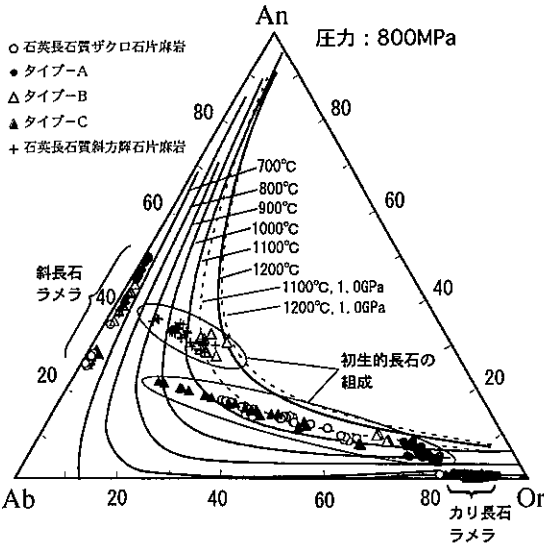


第13図 変成岩中に出現する黒雲母・フロゴパイトの X_{Mg} - X_F 図。黒四角は、超高温変成岩に出現する初生的な黒雲母~フロゴパイトで、高い X_F をしめす。白四角は、超高温変成岩中の後退変成作用による二次的な黒雲母。白丸は低温のグラニュライト相およびさらに低温の変成岩に含まれる黒雲母。

温変成岩に出現するアルカリ長石は、アルバイト成分に富む斜長石のラメラを多く含むメソパーサイトである(第14図)。これは、もともとアルカリ長石のソルバスを越える超高温で安定に存在した $An_{25}Ab_{46}Or_{29}$ の組成をしめすような長石が、後退変成過程(温度低下)でOr成分に富むアルカリ長石と斜長石に離溶したものと考えられている(例えば, Sheraton *et al.*, 1987)。最近になって、外田ほか(1997)、Hokada (2001)やYoshimura *et al.* (2000)は、反射電子像をもとに斜長石ラメラの割



第14図 メソパーサイトの反射電子像写真。長辺は約1mm。

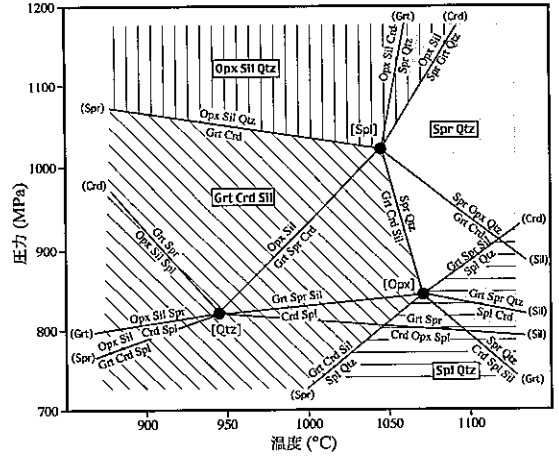


第15図 長石のAn-Ab-Or図。メソパーサイトは、カリ長石(Or)と斜長石(Pl)のラメラからなる。超高温変成条件下では、これらが離溶せず1相の長石として存在した。等温線は、Kroll *et al.* (1993)の方法でもとめた。詳細はYoshimura *et al.* (2000)を参照。MPa：メガパスカル，GPa：ギガパスカル。10kbar=1,000MPa=1.0GPa。

合を正確にもとめ、同時に得られたアルカリ長石と斜長石の組成から初生的な長石の組成を復元した(第15図)。このような長石は、Kroll *et al.* (1993)の長石ソルバス温度計を適用すると、1,050～1,100℃で安定であったことがしめされ(Hokada, 2001)、共存するサフィリン+石英などから見積もられる変成温度条件とも矛盾しない。

5. 変成温度-圧力条件とP-T経路

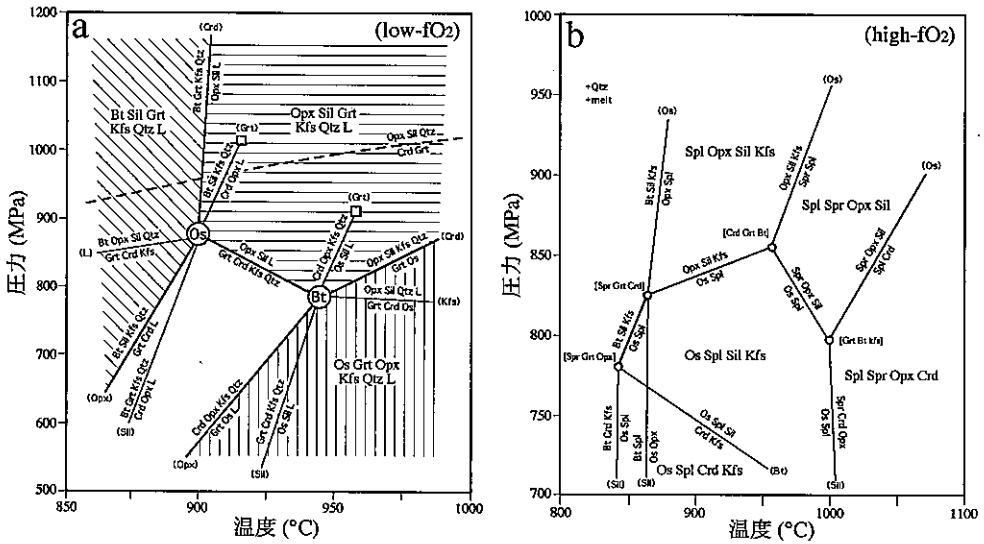
変成温度条件が1,100℃に達するような超高温変成岩の温度-圧力条件を見積もる場合、一般的な地質温度-圧力計を適用すると、750～950℃程度の低い温度条件と低圧条件が得られる場合が多い。これは後退変成作用にともなう冷却過程(サブソリダス条件下)における、鉱物の元素分配に関する閉止温度での温度-圧力条件をしめすと考えられ、真の超高温変成条件をしめしていない。したがって、超高温変成岩の温度-圧力条件は地質温度-圧力計を適用するよりも、実験岩石学的データおよび熱力学的計算によって得られた岩石成因論



第16図 超高温変成岩の変成反応をしめすFMAS系の岩石成因論的グリッド(Harley, 1998)。超高温変成作用を特徴づける鉱物組合せが、サフィリン+石英、スピネル+石英、斜方輝石+珪線石+石英、ザクロ石+堇青石+珪線石の大きく4つの領域に区分される。

的グリッド(petrogenetic grid)や鉱物の組成アイソプレス図(isopleth diagram)をもちいて解析される。超高温変成作用は、一般に中圧型変成相系列(変成地温勾配：20～30℃/km)における最高温変成岩とみなされ、ピーク変成条件では1,000～1,100℃で800～1,300MPaをしめす。

泥質岩あるいはレスタイト起源の超高温変成岩の解析には、Hensen and Green (1973), Hensen and Harley (1990), Harley (1998)などによって提案されたFeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (FMAS)系の岩石成因論的グリッドや、Carrington and Harley (1995), Harley (1998), Das *et al.* (2001)などによるK₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (KFMASH)系の岩石成因論的グリッドが用いられる。Harley (1998)による代表的なFMAS系岩石成因論的グリッド(第16図)では、超高温変成作用を特徴づける鉱物組合せが、(1)サフィリン+石英、(2)スピネル+石英、(3)斜方輝石+珪線石+石英、(4)ザクロ石+堇青石+珪線石の大きく4つの領域に区分され、サフィリン+石英は約1,050℃以上で安定であることや、斜方輝石+珪線石+石英は約1.02GPa以上で安定であることがわかる。またKFMASH系のグリッドでは、黒雲母、大隅石、アルカリ長石などのKを含む鉱物の安定関係を議論することが可能となる。ここでは超高

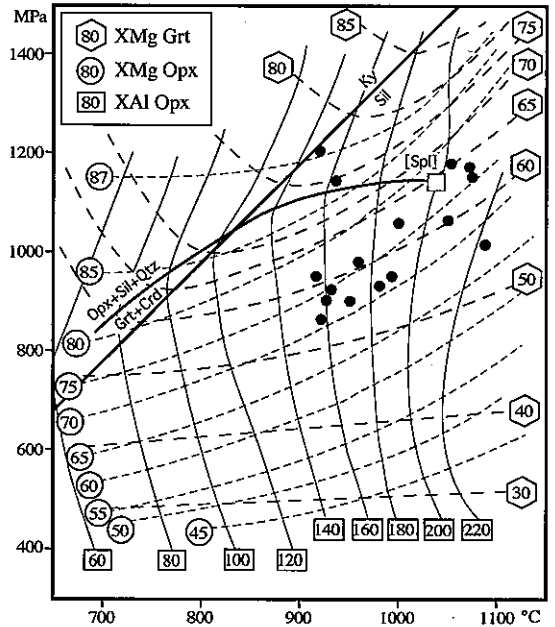


第17図 KFMASH系の岩石成因論的グリッド。(a): 低 f_{O_2} 条件下での反応曲線網 (Harley, 1998), (b): 高 f_{O_2} 条件下での反応曲線網 (Das et al., 2001). 鉱物名略号: Kfs-カリ長石, L-メルト.

温条件のKFMASH図の例として、低 f_{O_2} 条件 (Harley, 1998) の場合と高 f_{O_2} 条件 (Das et al., 2001) のグリッドをしめす (第17図)。どちらの場合でも、大隅石の出現はMgに富む黒雲母の脱水溶解反応によるか、あるいはさらに高温条件であること、超高温条件であっても比較的低压であることがわかる。ザクロ石と斜方輝石が共生する場合、それらの化学組成をもちいて、Hensen and Harley (1990), Aranovich and Berman (1996) などによる組成アイソプレックス図 (第18図) から温度-圧力を推定することもおこなわれる。斜方輝石の X_{Al} および X_{Mg} が増加すると、それぞれ温度および圧力の上昇をしめす。

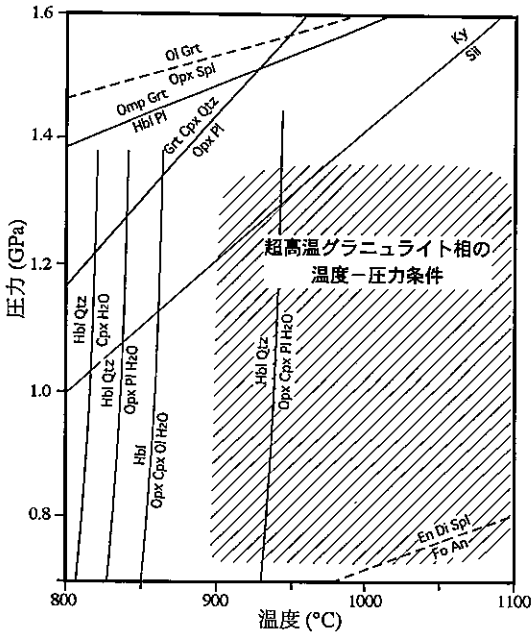
苦鉄質岩や超苦鉄質岩起源の超高温変成岩は、多くの場合斜方輝石+単斜輝石+斜長石からなり、全岩化学組成の違いに応じてザクロ石、スピネル、カンラン石、石英なども出現する。ホルンブレンドが含まれる場合は、黒雲母と同様に、フッ素に富む (Tsunogae et al., 2000)。これらの鉱物共生の、おおよその安定領域を第19図にしめた。苦鉄質岩起源の超高温変成岩では、高压条件下で斜長石を欠くザクロ石+単斜輝石+石英共生が安定となる。また超苦鉄質岩では、斜方輝石+単斜輝石+カンラン石+スピネルなどが安定に存在することがわかる。

超高温変成岩のP-T経路は、ピーク変成条件以

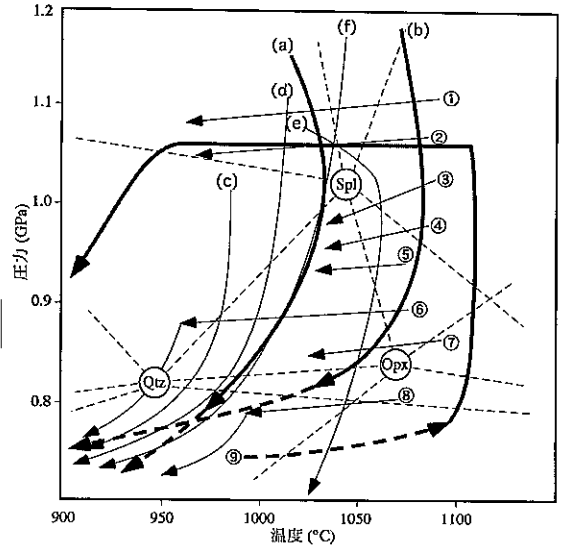


第18図 ザクロ石および斜方輝石の組成アイソプレックス図 (Hensen and Harley, 1990)。斜方輝石の X_{Al} 値は、1,000倍、 X_{Mg} 値は100倍してある。ナピア岩体の例を黒丸でしめすが、岩石成因論的グリッドで見積もられる温度-圧力条件よりも、やや低温・低压をしめす。

降の後退変成過程のみがしめされる場合が多い。これは、ピーク変成条件が超高温条件であるがゆえに変成結晶作用が十分に進行したため、包有鉱



第19図 超高温変成条件における苦鉄質岩の鉱物反応関係。鉱物名略号：An-アノーサイト，Cpx-単斜輝石，Di-デオブサイド，En-エンスタタイト，Fo-フォルステライト，Hbl-ホルンブレンド，Ky-藍晶石，Ol-カンラン石，Pl-斜長石。



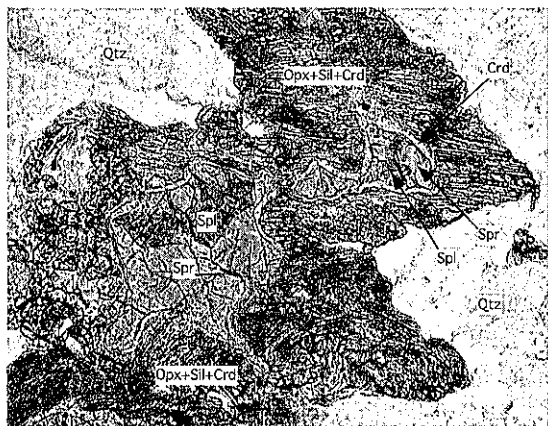
第20図 世界各地の超高温変成岩にみられるP-T経路 (Harley, 1998に加筆)。(a)～(f)：等温減圧 (ITD)の例，①～⑨：等圧冷却 (IBC)の例。(a)：ベトナム・コンツム地塊のP-T経路 (Osanaï et al., 2001a)，(b)：ナピア岩体・バント島のP-T経路 (Osanaï et al., 2001b)，⑨：ナピア岩体・トナー島のP-T経路 (小山内ほか, 2001)。これ以外はHarley (1998)を参照。

物や鉱物の組成累帯構造などの昇温期変成過程の痕跡が残らないためと考えられている。ピーク変成作用直後の後退変成過程のP-T経路は、等圧冷却 (isobaric cooling : IBC) 過程と等温減圧 (isothermal decompression : ITD) 過程に区別される (Harley, 1989)。超高温変成岩の代表的産地である東南極・ナピア岩体では、北部の約1.1GPaと南部の約0.9GPaの圧力差はあるものの、ともにIBCのP-T経路が考えられている。一方ナピア岩体の昇温期変成過程は、Ellis (1987)による時計回りのP-T経路とMotoyoshi and Hensen (1989)による反時計回りのP-T経路が提案されてきた。最近になって、時計回りのP-T経路はナピア岩体北東部の岩石に、反時計回りのP-T経路は南西部の岩石にみられることが明らかにされた (小山内ほか, 2001)。前者には、約2.0GPa以上の圧力条件を示唆するスリランカイトがサフィリンの包有物として存在したり、高压条件をしめすザクロ石+ルチルが低圧の珪線石+イルメナイト+石英に反応する組織が見出される。また後者では、低圧で安定であったスピネル+石英の安定領域からサフィリン+石英の

領域を経て、斜方輝石+珪線石+石英の安定領域への変化をしめす変成反応過程が読みとれる。世界各地の超高温変成岩にみられるP-T経路を第20図にまとめた。さまざまな超高温変成岩の変成反応組織と、そこから推定されるP-T経路について次に紹介する。

6. 超高温変成岩の反応組織の実例

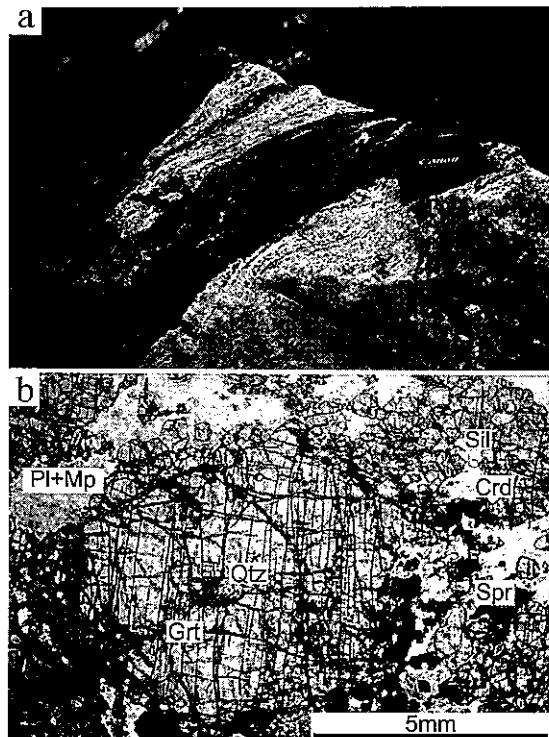
反時計回りのP-T経路が読みとれる例を第21図にしめす。この岩石はサフィリン、ザクロ石、珪線石、石英、メソパーサイトを主成分とし、スピネルや斜方輝石を少量含む、石英に富む泥質岩起源の超高温変成岩である。ここでみられる反応は、約1,070°C以上 (不変点[Opx]よりも高温) で900MPa以下の超高温低圧条件で安定であったスピネル+石英 (あるいはスピネル+サフィリン+石英) が、圧力増加にともないスピネルが分解することによってザクロ石やサフィリンを形成し、不変点[Spl]よりも高压 (約1.05GPa以上) でピーク変成条件に達した



第21図 反時計回りのP-T経路をしめす反応組織の例 (ナピア岩体・トナー島産)。スピネル+石英→サフィリン+石英→斜方輝石+珪線石+堇青石の順に反応が進行した。写真の長辺は約4mm。

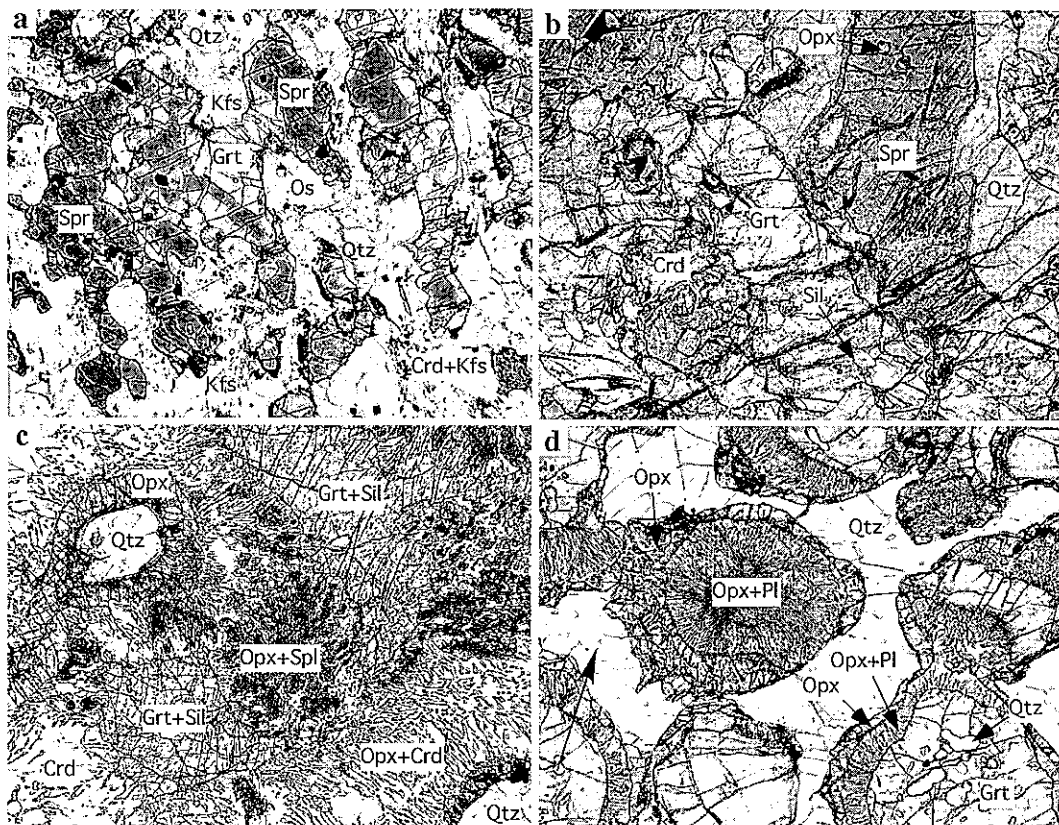
(第16図)。その後IBCの後退変成作用でサフィリン+石英が反応し、サフィリンと石英の間に斜方輝石+堇青石+石英のシンプレクタイトが形成されたことがわかる。次に、やや低圧条件下での昇温期変成過程で、部分溶融によるメルトと共存したレスタイトの例を第22図にしめす。この岩石は、ザクロ石、サフィリン、珪線石に富み、石英長石質ザクロ石片麻岩中に厚さ数mm～30cm程度の薄層として産するルミナス片麻岩である。マトリックス中に石英は認められないが、粗粒ザクロ石の包有物として石英が存在する。ザクロ石の組成は、 $Alm_{42-45}Prp_{51-55}Grs_{4-5}Sps_1$ の範囲を示し、 Y_2O_3 を最大0.15wt%含む。斜長石の組成は周囲の片麻岩(An_{25-35})と比べてCaに富む(An_{50-70})。このような SiO_2 に不飽和で Al_2O_3 に著しく富む岩石で、ザクロ石中に石英が包有されていることは、ザクロ石が成長を開始した時期には SiO_2 に飽和な環境であったものが、最終的には SiO_2 に不飽和な環境に変化したことを示しており、ザクロ石中の Y_2O_3 含有量や斜長石の高An値等も、部分溶融によるレスタイト起源とみなす根拠となる。この岩石はメルトと共存したため、潜熱の効果でサフィリン+石英の安定領域(約1,050℃以上)まで温度上昇しなかったのであろう。

時計回りのP-T経路の例を第23図にしめす。超高温の泥質変成岩を特徴づける大隅石-サフィリングラニュライトもその一つで、大隅石が多量に含ま



第22図 昇温期変成過程で、部分溶融によるメルトと共存したレスタイトの例 (ナピア岩体・パドード山産)。石英がザクロ石中にのみ存在することは、 SiO_2 に飽和な環境から SiO_2 に不飽和な環境に変化したことをしめす。

れることは、最終的に比較的低圧で超高温条件を経たことがわかる。第23図aでは、高压側のサフィリン+アルカリ長石+石英±斜方輝石から低圧側のザクロ石+大隅石への反応がみられる。また、大隅石を欠く場合(第23図b)でも、斜方輝石や珪線石が、サフィリンやザクロ石中の包有物としてのみ産することがあり、斜方輝石+珪線石=ザクロ石+サフィリン+石英の昇温あるいは減圧をしめす時計回りのP-T経路の一部とみなせる。引き続き後退変成過程で、サフィリンと石英の間には、堇青石のモートが形成される。超高温・高压のグラニュライト相変成条件で安定であった泥質変成岩(第23図c)では、斜長石を欠きザクロ石+石英の安定な条件から、ほぼ等温の減圧過程で斜方輝石+堇青石が形成される。また同様の苦鉄質グラニュライト(第23図d)でも、斜長石を欠き単斜輝石+ザクロ石+石英の安定な条件から、ほぼ等温の減圧過程で斜方輝石+斜長石のシンプレクタイトを形成し、ザクロ石



第23図 時計回りのP-T経路をしめす反応組織の例。(a)：斜方輝石+珪線石+石英→サフィリン+ザクロ石(ナピア岩体・バント島産)，(b)：サフィリン+斜方輝石+カリ長石+石英→ザクロ石+大隅石(ナピア岩体・バント島産)，(c)：斜方輝石+珪線石→ザクロ石+石英→斜方輝石+堇青石，ザクロ石+珪線石→斜方輝石+スピネルなどの複雑な反応をしめすシンプレクタイト(ベトナム・コンツム地塊産)，(d)：ザクロ石+単斜輝石+石英→斜方輝石+斜長石(スリランカ・ハイランド岩体産)。写真の長辺は約4mm。

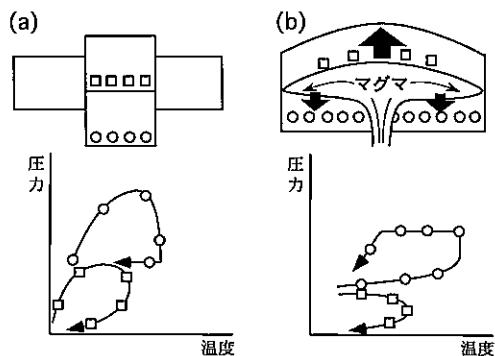
や単斜輝石の周囲に出現する。反応が著しく進行すると、もとのザクロ石の形状を残した斜方輝石と斜長石のシンプレクタイトとなる。

7. まとめ

超高温のピーク変成条件にいたる昇温期変成過程を識別することは、一般に困難であるとされてきた。しかし最近になって、世界各地の超高温変成岩について詳細な反応組織の解析が進み、いくつかの地域で昇温期変成過程が明らかにされはじめた。反時計回りのP-T経路の場合は、低圧下で部分熔融反応が十分に進行したのちメルトが分離することによって、ほぼドライに近い $Al_2O_3 \cdot MgO$ に

富み SiO_2 に乏しいレスタイトが超高温変成岩になる。メルトの分離が進行しない場合は、変成作用におよぼす熱の供給が続いたとしても、潜熱の効果でレスタイトの変成温度も比較的低温条件をしめすかも知れない。一方、時計回りのP-T経路をしめす場合は、超高温グラニュライト相のピーク変成条件に達する以前に、エクロジャイト相の変成条件を経ていることもわかってきた。このような例は、コース石を含む超高压変成作用をうけた岩石でも後退変成作用でグラニュライト相にいたる例が報告されており(Wang et al., 1993など)、多くの超高温変成岩では高压条件の痕跡が残存していないだけかもしれない。

Ellis (1987) や Spear (1993) は、ナピア岩体など



第24図 時計回り・反時計回りのP-T経路を説明可能なテクトニクスのモデル (Ellis, 1987; Spear, 1993 に一部加筆). (a): 地殻の2重化モデル, (b): マグマの底付モデル.

で識別される時計回り・反時計回りのP-T経路は、大陸衝突による地殻のバイル (crustal doubling model) やマグマの底付 (magma underplating model) で説明できるとした (第24図). いずれにしても、1,100℃以上の温度条件をしめす超高温変成岩は、地殻内における固体の岩石としての最高温度条件をしめすものであり、変成作用の熱源としてアノソサイト岩体などの貫入が考えられる場合があるが、すべての超高温変成岩地域に適用できるわけではない。また、その形成テクトニクスを明らかにする上でも不可欠な変成履歴 (P-T経路) の追跡が冷却過程に限定されることが多く、包有鉱物の包有物を識別するなどさらに精密な反応組織の解析も必要である。“超高温変成作用”が地質学的用語として定義されてから数年を経た現在、地球創生期からの地殻深部現象の詳細を明らかにする上で超高温変成岩は多くの情報を提供してくれるであろう。

謝辞：本稿を執筆する機会を与您えいただき貴重なコメントをいただいた、産総研・石原舜三博士に感謝申し上げます。また、本稿をまとめるにあたり日常的な討論をいただいている日本南極地学研究グループの諸氏に感謝申し上げます。文献検索には、石渡 明および榎並正樹両氏のデータベースを使用させていただいた。両氏にお礼申し上げます。

引用文献

Ackermann, D., Seifert, F. and Schreyer, W. (1975) : Instability of sapphirine at high pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 50, 79-92.
 Aranovich, L. Ya and Berman, R. G. (1996) : Optimized standard

state and solution properties of minerals II. Comparisons, predictions, and applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 126, 25-37.
 Arima, M. and Barnett, R.L. (1984) : Sapphirine bearing granulites from the Sipiwesk Lake area of the late Archean Pikwitonei granulite terrain, Manitoba, Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88, 102-112.
 Arima, M. Kerrick, R. and Thomas, A. (1986) : Sapphirine bearing paragneiss from the northern Grenville Province in Labrador, Canada: protolith composition and metamorphic P-T conditions. *Geology*, 14, 844-847. .
 Audibert, N., Bertrand, P., Hensen, B.J., Kienast, J.R. and Ouzegane, K. (1993) : Cordierite-K-feldspar-quartz-orthopyroxene symplectite from southern Algeria: new evidence for osumilite in high-grade metamorphic rocks. *Mineral. Mag.*, 57, 354-357.
 Audibert, N., Hensen, B.J. and Bertrand, P. (1995) : Experimental study of phase relations involving osumilite in the system $K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ at high pressure and temperature. *Jour. Metamorphic Geol.*, 13, 331-344.
 Baba, S. (1998) : Ultra-high temperature metamorphism in the Lewisian Complex, South Harris, NW Scotland. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 53, 93-108.
 Bertland, P., Ouzegane, K. and Kienast, J.R. (1992) : P-T-X relationships in the Precambrian Al-Mg-rich granulites from In Ouzal, Hoggar, Algeria. *Jour. Metamorphic Geol.*, 10, 17-30.
 Bohlen, S.R. (1987) : Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *Jour. Geol.*, 95, 617-632.
 Carrington, D.P. and Harley, S.L. (1995) : Partial melting and phase relations in high-grade metapelites: an experimental petrogenetic grid in the KFMASH system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120, 270-291.
 Coombs, D.S. (1954) : The nature and alteration of some Triassic sediments from Southland, New Zealand. *Trans. Royal Soc. New Zealand*, 82, 65-109.
 Currie, K.L. and Gittins, J. (1988) : Contrasting sapphirine parageneses from Wilson Lake, Labrador and their tectonic implications. *Jour. Metamorphic Geol.*, 6, 603-622.
 Dallwitz, W.B. (1968) : Co-existing sapphirine and quartz in granulite from Enderby Land, Antarctica. *Nature*, 219, 476-477.
 Das, K., Dasgupta, S. and Miura, Y. (2001) : Stability of osumilite coexisting with spinel solid solution in metapelitic granulites at high oxygen fugacity. *Amer. Mineral.*, 86, 1423-1434.
 Dasgupta, S. (1995) : Pressure-temperature evolutionary history of the Eastern Ghats granulite province: recent advances and some thoughts. *India and Antarctica during the Precambrian. Mem. Geol. Soc. India*, 34, 101-110.
 Dooley, D.F. and Patiñ Douce, A.E. (1996) : Fluid-absent melting of F-rich phlogopite+rutile+quartz. *Amer. Mineral.*, 81, 202-212.
 Droop, G.T.R. (1989) : Reaction history of garnet-sapphirine granulites and conditions of Archean high-pressure granulite facies metamorphism in the Central Limpopo Mobile Belt, Zimbabwe. *Jour. Metamorphic Geol.*, 7, 383-403.
 Droop, G.T.R. and Bucher-Nurminen, K. (1984) : Reaction textures and metamorphic evolution of sapphirine-bearing granulites from the Gruf Complex, Italian Central Alps. *J. Petrol.*, 25, 766-803.

- Ellis, D.J. (1987) : Origin and evolution of granulites in normal and thickened crusts. *Geology*, 15, 167-170.
- Ellis, D.J., Sheraton, J.W., England, R.N. and Dallwitz, W.B. (1980) : Osumilite-sapphirine-quartz granulites from Enderby Land, Antarctica: mineral assemblages and reactions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 72, 123-143.
- Eskola, P. (1915) : On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijärvi region. *Bull. Comm. Geol. Finlande*, 44, 109-145.
- Grew, E.S. (1982) : Osumilite in the sapphirine-quartz terrane of Enderby Land, Antarctica: implications for osumilite petrogenesis in the granulite facies. *Amer. Mineral.*, 67, 762-787.
- Guiraud, M., Kienast, J.R. and Rahmani, A. (1996) : Petrological study of high-temperature granulites from In Ouzzal, Algeria: some implications on the phase relationship in the FMAS/TCr system. *Eur. Jour. Mineral.*, 8, 1375-1390.
- Harley, S. L. (1987) : A pyroxene-bearing meta-ironstone and other pyroxene-granulites from Tonagh Island, Enderby Land, Antarctica: further evidence for very high temperature (>980°C) Archaean regional metamorphism in the Napier Complex. *J. Metamorphic Geol.*, 5, 341-356.
- Harley, S. L. (1989) : The origin of granulites: a metamorphic perspective. *Geol. Mag.*, 126, 215-331.
- Harley, S.L. (1998) : On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism. In Treloar, P.J. and O'Brien, P.J. eds., *What drives metamorphism and metamorphic reactions?*, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, no. 138, 81-107.
- Harley, S. L. and Hensen, B. J. (1990) : Archaean and Proterozoic high-grade terranes of East Antarctica (40-80° E) : A case study of diversity in granulite facies metamorphism. *High-temperature Metamorphism and Crustal Anatexis*. ed. by J. R. Ashworth and M. Brown. London, Unwin Hyman, 320-370 (*Mineral. Soc. Ser.*, 2) .
- Harley, S.L. and Motoyoshi, Y. (2000) : Al zoning in orthopyroxene in a sapphirine quartzite: evidence for >1120°C UHT metamorphism in the Napier Complex, Antarctica, and implications for the entropy of sapphirine. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 138, 293-307.
- Hensen, B.J. and Green, D.H. (1973) : Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions at high pressures and temperatures. III. Synthesis of experimental data and geological applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 38, 151-166.
- Hensen, B.J. and Harley, S.L. (1990) : Graphical analysis of P-T-X relations in granulite facies metapelites. *High-temperature Metamorphism and Crustal Anatexis* (eds. Ashworth, J.R. and Brown, M.), pp. 19-56, Unwin-Hyman, London.
- Hensen, B.J. and Osanai, Y. (1994) : Experimental study of dehydration melting of F-bearing biotite in model pelitic compositions. *Mineral. Mag.*, 58A, 410-411.
- Hisada, K. and Miyano, T. (1996) : Petrology and microthermometry of aluminous rocks in the Botswana Limpopo Central Zone: evidence for isothermal decompression and isobaric cooling. *Jour. Metamorphic Geol.*, 14, 183-197.
- Hokada, T. (2001) : Feldspar thermometry in ultrahigh-temperature metamorphic rocks: Evidence of crustal metamorphism attaining ~1100°C in the Archaean Napier Complex, East Antarctica. *Amer. Mineral.*, 86, 932-938.
- 外田智千・本吉洋一・石塚英男・石川正弘・鈴木里子 (1997) : 東南極ナビア岩体のサフィリン-カリ長石-石英共生: >1000°C超高温変成作用. *岩鉱学会1997年学術講演会要旨*, 仙台, 178.
- Hokada, T., Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T. and Crowe, W.A. (1999) : Petrology and metamorphism of sapphirine-bearing aluminous gneisses from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, 12, 49-70.
- Huang, W.L. and Wyllie, P.J. (1973) : Melting relations of muscovite-granite to 35 kbar as a model for fusion of metamorphosed subducted oceanic sediments. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42, 1-14.
- Kienast, J.R. and Ouzegane, K. (1987) : Polymetamorphic Al-Mg rich parageneses in Archaean rocks from Hoggar, Algeria. *Geol. Jour.*, 22, 57-79.
- Kihle, J. and Bucher-Nurminen, K. (1992) : Orthopyroxene-sillimanite-sapphirine granulites from the Bamble granulite terrane, Southern Norway. *Jour. Metamorphic Geol.*, 10, 671-683.
- Kriegsman, L.C. (1991) : Sapphirine-bearing granulites from central Sri Lanka-outcrop description and mineral chemistry. In: *The Crystalline Crust of Sri Lanka, Part I*. (Kröner, A. ed.), Geological Survey Department of Sri Lanka, Professional Paper, 5, 178-187.
- Kriegsman, L.M. and Schumacher, J.C. (1999) : Petrology of sapphirine-bearing and associated granulites from central Sri Lanka. *Jour. Petrol.*, 40, 1211-1239.
- Kroll, H., Evangelakakis, C. and Voll, G. (1993) : Two-feldspar geothermometry: a review and revision for slowly cooled rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 114, 510-518.
- Lal, R.K., Ackermann, D. and Upadhyay, H. (1987) : P-T-X relationships deduced from corona textures in sapphirine-spinel-quartz assemblages from Paderu, southern India. *Jour. Petrol.*, 28, 1139-1168.
- Liou, J.G., Zhang, R.Y., Ernst, W.G., Rumble, D. and Maruyama, S. (1998) : High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks. *Reviews in Mineral.*, 37, 33-138.
- Lutts, B.G. and Kopaneva, L.N. (1968) : A pyrope-sapphirine rock from the Anabar Massif and its conditions of metamorphism. *Doklady Acad. Sci., USSR*, 179, 161-163.
- Mohan, A., Ackermann, D. and Lal, R.K. (1986) : Reaction textures and P-T-X trajectory in the sapphirine-spinel bearing granulites from Ganguvarpatti, Southern India. *Neues Jahrb. Mineral. Abh.*, 154, 1-19.
- 本吉洋一 (1998) : 東南極ナビア岩体の超高温変成作用: 総説, *地質雑*, 104, 794-807.
- Motoyoshi, Y. and Hensen, B.J. (1989) : Sapphirine-quartz-orthopyroxene symplectites after cordierite in the Archaean Napier Complex, Antarctica: Evidence for a counterclockwise P-T path? *Eur. Jour. Mineral.*, 1, 467-471.
- 本吉洋一・Hensen, B.J. (1997) : 東南極ナビア岩体から見いだされたF-phlogopiteの産状とその意義について. *岩鉱学会1997年学術講演会要旨*, 仙台, 177.
- Motoyoshi, Y., Hensen, B.J. and Arima, M. (1993) : Experimental study of the high-pressure stability limit of osumilite in the system K_2O -MgO-Al₂O₃-SiO₂: implications for high-temperature granulites. *Eur. Jour. Mineral.*, 5, 439-445.
- Motoyoshi, Y. and Ishikawa, (1997) : Metamorphic and structural evolution of granulites from Rundvågshetta, Lützow-Holm Bay,

- East Antarctica. In: Ricci, C.A. (ed.) The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes. Terra Antarctica Publ., Siena, 65-72.
- Moraes, R. and Fuck, R.A. (2000) : Ultra high temperature metamorphism in Central Brasil: The Barro Alto Complex. *Jour. Metamorphic Geol.*, 18, 345-358.
- Mouri, H., Guiraud, M. and Hensen, B.J. (1996) : Petrology of phlogopite-sapphirine-bearing Al-Mg granulites from Ihouhaouene, In Ouzal, Hoggar, Algeria : an example of phlogopite stability at high temperature. *Jour. Metamorphic Geol.*, 14, 755-761.
- Nicollet, C. (1990) : Crustal evolution of the granulites of Madagascar. In: Vielzeuf, D. and Vidal, P. (eds.) *Granulites and Crustal Evolution*. NATO ASI series, Kluwer Acad. Publ., Boston, 291-310.
- Osanaï, Y. (1989) : A preliminary report on sapphirine/kornerupine granulite from Highland Series, Sri Lanka (Extended abstract). Seminar on Recent Advances in Precambrian Geology of Sri Lanka, IFS Kandy.
- Osanaï, Y., Hamamoto, T., Maishima, O. and Kagami, H. (1998) : Sapphirine-bearing granulites and related high-temperature metamorphic rocks from the Higo metamorphic terrane, west-central Kyushu, Japan. *J. Metamorphic Geol.*, 16, 53-66.
- Osanaï, Y., Ando, T., Miyashita, Y., Kusachi, I., Yamasaki, T., Doyama, D., Prame, W.K.B.N., Jayatileke, S. and Mathavan, V. (2000) : Geological fieldwork of the southwestern and central parts of Highland Complex, Sri Lanka during 1998-1999, with special reference to the highest grade metamorphic rocks. *Jour. Geosci. Osaka City Univ.*, 43, 227-247.
- Osanaï, Y., Owada, M., Tsunogae, T., Toyoshima, T., Hokada, T., Long, T.V., Sajeev, K. and Nakano, N. (2001a) : Ultrahigh-temperature pelitic granulites from Kontum Massif, central Vietnam: Evidence for East Asian juxtaposition at ca.250 Ma Gondwana Res., 4, 720-723.
- Osanaï, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T., Hokada, T., Crowe, W.A. and Kusachi, I. (2001b) : Ultrahigh temperature sapphirine-osumilite and sapphirine-quartz granulites from Bunt Island in the Napier Complex, East Antarctica-Reconnaissance estimation of P-T evolution-. *Polar Geosci.*, 14, 1-24.
- 小山内康人・豊島剛志・大和田正明・角替敏昭・外田智千・笹野景子 (2001) : 東南極ナピア岩体の異なるP-T経路-太古代・原生代のテクトニクスの解析-. 地質学会第108年大会講演要旨, 金沢, 165.
- Perchuk, L.L., Aranovich, L.Y., Podleskii, K.K., Lavrent'eva, I.V., Gerasimov, V.Y., Fed'kin, V.V., Kitsul, V.I., Karasakov, L.P. and Berdnikov, N.V. (1985) : Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR. *Jour. Metamorphic Geol.*, 3, 265-310.
- Peterson, J.W., Chacko, T. and Kuehner, S.M. (1991) : The effects of fluorine on the vapor-absent melting of phlogopite+quartz: implications for deep-crustal processes. *Amer. Mineral.*, 76, 470-476.
- Raith, M., Karmakar, S. and Brown, M. (1997) : Ultra-high temperature metamorphism and multistage decompressional evolution of sapphirine granulites from the Palni Hill Ranges, southern India. *Jour. Metamorphic Geol.*, 15, 379-399.
- Sajeev, K., Osanaï, Y. and Santosh, M. (2001) : Ultrahigh-temperature stability of sapphirine and kornerupine in Ganguvarpatti granulite, Madurai Block, Southern India. *Gondwana Res.*, 4, 762-766.
- Sandiford, M., Neall, F.B. and Powell, R. (1987) : Metamorphic evolution of aluminous granulites from Labwor Hills, Uganda. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95, 217-225.
- Sandiford, M. and Powell, R. (1988) : Pyroxene exsolution in granulites from Fyfe Hills, Enderby Land, Antarctica: evidence for 1000, C metamorphic temperatures in Archaean continental crust-Reply. *Amer. Mineral.*, 73, 434-438.
- Sengupta, P., Karmakar, S., Dasgupta, S. and Fukuoka, M. (1991) : Petrology of spinel granulites from Araku, Eastern Ghats, India, and a petrogenetic grid for sapphirine-free rocks in the system FMAS. *J. Metamorphic Geol.*, 9, 451-459.
- Shaw, R.K. and Arima, M. (1998) : A corundum-quartz assemblage from the Eastern Ghats granulite belt, India: evidence for high P-T metamorphism? *Jour. Metamorphic Geol.*, 16, 189-196.
- Sheraton, J.W., Tingey, R.J., Black, L.P., Offe, L.A. and Ellis, D.J. (1987) : Geology of Enderby Land and Western Kemp Land, Antarctica. *Aust. Bur. Miner. Resource Bull.*, 223, 51p.
- Skjerlie, K.P. and Jhonston, A.D. (1993) : Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: implications for the generation of anorogenic granites. *Jour. Petrol.*, 34, 785-815.
- Spear, F. (1993) : Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. *Mineral. Soc. Amer., Monograph. MSA, Washington, D.C.*, 799p.
- Tsunogae, T., Osanaï, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Hokada, T. and Crowe, W.A. (2000) : Fluorine-rich calcic amphiboles from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica: Preliminary report. *Polar Geosci.*, 13, 103-113.
- Vielzeuf, D. and Holloway, J.R. (1988) : Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system: Consequences for crustal differentiation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98, 257-276.
- Wang, Q., Ishiwatari, A., Zhao, Z.Y., Hirajima, T., Hiramatsu, N., Enami, M., Zhai, M., Li, J. and Cong, B. (1993) : Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *Europ. Jour. Mineral.*, 5, 141-152.
- Waters, D.J. (1988) : Partial melting and the formation of granulite facies assemblages in Namaqualand, South Africa. *Jour. Metamorphic Geol.*, 6, 387-404.
- Yoshimura, Y., Motoyoshi, Y., Grew, E.S., Miyamoto, T., Carson, C.J. and Dunkley, D.J. (2000) : Ultrahigh-temperature metamorphic rocks from Howard Hills in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, 13, 60-85.

OSANAÏ Yasuhito and YOSHIMURA Yasutaka (2002) : High-temperature limit of crustal metamorphism : a perspective of ultrahigh-temperature metamorphism.

< 受付 : 2002年3月26日 >