琉球大学学術リポジトリ

硫化物鉱床を伴う含サフィリン変成岩：アメリカ，コロラド州，カスターカントリーの例

メタデータ	言語:
	出版者: 琉球大学教育学部
	公開日: 2007-08-27
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 馬場, 壮太郎, Baba, Sotaro
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1521

硫化物鉱床を伴う含サフィリン変成岩
～アメリカ，コロラド州，カスターカントリーの例～

馬　場　壮太郎*

Sapphirine-bearing metamorphic rock associated with sulfide deposit
- An example at Custer Country, Colorado, U.S.A

Sotaro Baba*

はじめに

サフィリンは高Mg/Fe比を有する岩石に出現する変成鉱物であり，これまで数多くの高温変成岩複合岩体から報告されてきた。しかし，その原岩形成に関する報告は限られる。これは，どのような地質環境で高いMgO/FeO比を持ち，Al_2O_3に富む岩石が形成するかについての議論が，地球化学的な視点からこれまで充分におこなわれていなかったことを意味している。Baba(2002)はスコットランド，サウスハリス地域に分布する含サフィリン変成岩について鉱物共生関係，全岩化学組成に基づき４つのタイプに区分し，その形成過程を論じた。その結果，３つの過程で形成したことが明らかにされた。すなわち，a)初生的にMgO/FeO比の高い堆積岩が存在する，b)部分溶融にともなう変成分別作用の結果である（高MgO/FeO残留固相の形成），ｃ）高MgO/FeO超塩基性岩とAl_2O_3に富む堆積岩類との変成交代作用によるである。これらのうち，初生的に高いMgO/FeO比を有する岩石の一部については海洋底熱水変質作用が関与する可能性を指摘した。これは含サフィリングラニュライトが海嶺玄武岩組成の塩基性グラニュライト中に脈状に産すること，さらに，その主要化学組成ならびに微量元素の特徴が現世の熱水変質玄武岩に酷似することに基づく(Baba and Windley, 投稿中)。

一般に海洋底熱水変質作用の副産物として硫化物鉱床が産することが広く知られている。そのような場所では，海水と熱水との相互作用により高Mg/Fe比を有する岩石が形成される可能性が高く(Alt, 1995)，さらにそれらが高温変成作用を被った場合に含サフィリン変成岩が出現することが予想される。海洋底熱水変質に起因し，高Mg岩類が形成したと考えられる例としてオーストラリア，アルンタ岩体と，米国，コロラド州カスターに分布する捕獲岩類が挙げられる。これらはともに硫化物鉱床を伴うことが特徴であり，熱水変質作用の存在をうらづける数少ない好例といえる。筆者はコロラド州カスターに分布する含サフィリン捕獲岩および周辺に産する塩基性岩類の採取を目的として2005年９月に野外調査を実施した。本報告では採取した岩石試料の鏡下観察の結果を取りまとめ，全岩化学分析に適した試料について考察すること目的とする。加えて変成作用および形成条件についても若干の考察を行ったのでここに報告する。

地質概説

コロラド州南部のWet Mountain 周辺は原生代変成岩類および，それを貫く原生代花崗岩類(San Isabel花崗岩類）から構成される(図1)。前者は珪長質片麻岩，角閃岩，およびそれらの互層からなり，変成年代は1700Maとされている(Tweto, 1977)。この一部には硫化物鉱床も含まれ周囲の

*琉球大学教育学部　生涯教育課程　自然環境教育コース

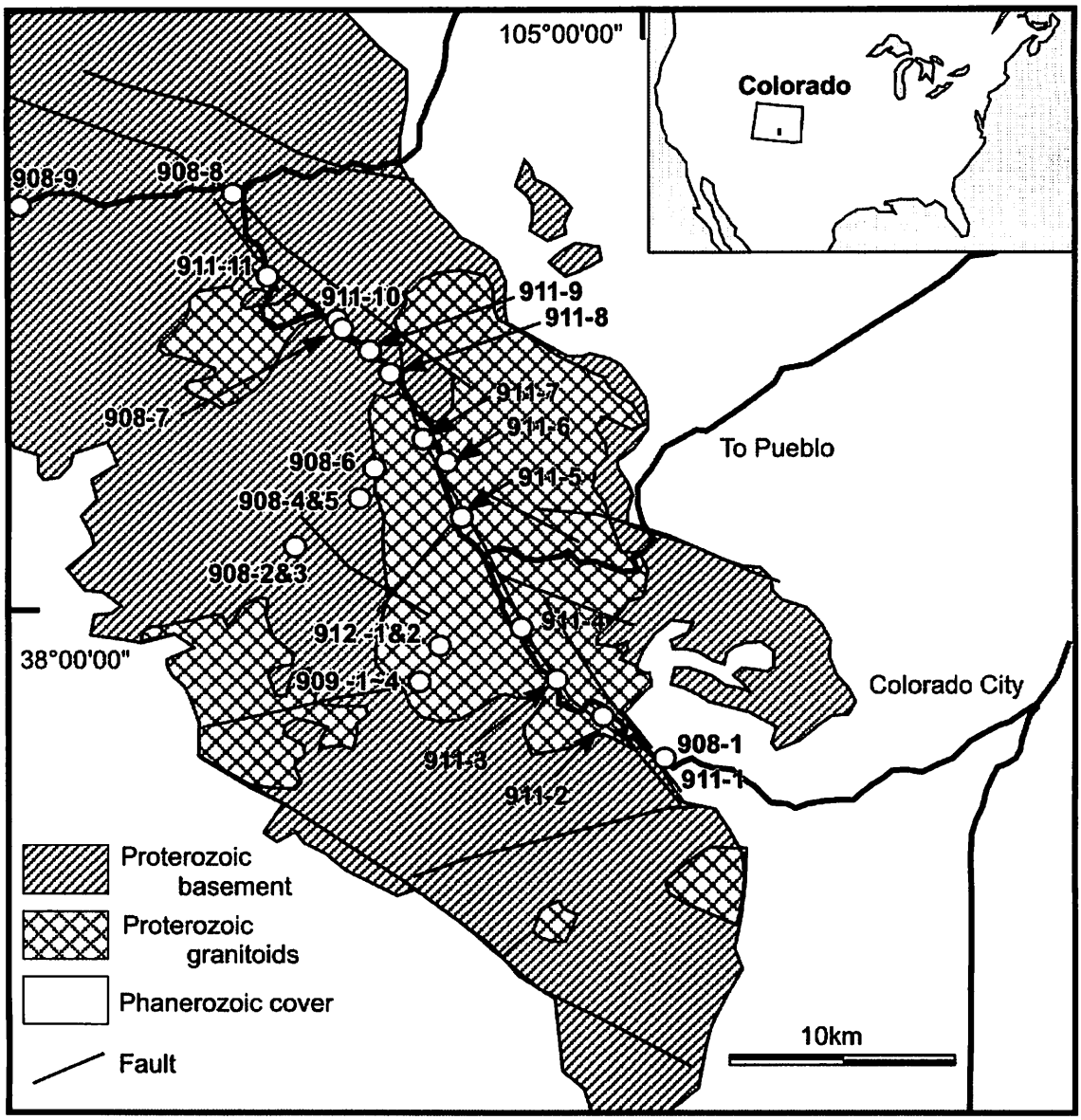


Figure 1. Simplified geological map around Wet Mountain (modified after Tweto, 1979). Sampling localities are also shown.

図１．ウエット山地周辺の地質図（Tweto, 1979を改変）

変成岩類とともに変成作用を被っている。San Isabel花崗岩類は一般に粗粒塊状な花崗岩～花崗閃緑岩から構成されるが，一部は細粒～中粒で眼球状（船津型花崗岩類に類似）に産するものもある。多量の捕獲岩を有する露岩では，母岩中に層々注入し産するものや，母岩の角閃岩や片麻岩類を貫きネットワーク状に産するものがある。貫入年代として1400MaのPb年代が報告されている(Boyer, 1962)。

Raymond et al.(1980)はSan Isabel花崗岩類の捕獲岩として含サフィリン変成岩類が硫化物鉱床とともに産することを報告した。この捕獲岩は角閃

表１．採取した岩石の鉱物組み合わせ

Sample No.	Rock name	Mafic mineral	Felsic Mineral	Trace
Basement				
908-1A	Mafic gneiss	Hbl	Pl	Ilm
908-1B	Mafic gneiss	Cpx-Hbl	Pl-Qtz	Tit-Ap-Zrn-Ilm
908-1C	Banded gneiss	Bt	Qtz-Pl	Tit-Ilm-Ap
908-2	Gabbro	Hbl-Cpx-Opx	Pl	Cc-Ilm
908-3	Granite	Hbl-Bt	Pl-Kfs-Qtz	Ap-Zrn
908-4A	Calcsilicate	Cpx-Hbl-Grs-Ep	Pl	Scp-Tit-Ap-Opq
908-4B	Calcsilicate	Cpx-Hbl-Grs-Ep	Pl	Scp-Tit-Ap-Opq
908-5	Granite	Hbl-Bt	Pl-Kfs-Qtz	Ilm-Ap
908-7	Mafic gneiss	Hbl-Oamp	Pl	Cc-Ilm
908-8A	Felsic gneiss	Grt-Bt-Hbl-Mus	Qtz-Pl	Ap-Ilm
908-8B	Leuco granite	Grt	Kfs-Qtz	Ap-Zrn
908-8C	Felsic gneiss	Bt	Qtz-Pl	Ilm-Zrn-Ap
908-8D	Mafic gneiss	Hbl-Bt	Pl	Ilm
908-9	Ultramafic	Opx-Olv-Spl-Hbl	---	Sep*
Xenolith				
909-2A	Mafic gneiss	Opx-Bt-Hbl	Qtz-Pl	Ilm-Ap-Zrn
909-2B	Mafic gneiss	Opx-Cpx-Hbl	Qtz-Pl	Ilm-Ap
909-3C	Calcsilicate	Hbl-Cpx	Qtz-Pl	Tit
909-3D	Calcsiicate	Hbl-Cpx-Bt	Pl	Tit
909-3F	Quartzite	---	Qtz	Opq
909-3G	Calcsilicate	CaAmp-Cpx-Bt	Qtz	---
909-3H	Calcsilicate	Hbl-Cpx-Bt	Pl	Opq-Tit
909-3I	Calcsilicate	Hbl-Cpx	Pl	Opq-Tit
909-3J	Calcsilicate	Cpx-CaAmp-Mus-Bt	Pl	---
909-3K	Calcsilicate	Cpx-CaAmp-Bt	Pl-Qtz	Opq
909-4	Calcsilicate	Hbl-Grs-CaAmp	Pl	Tit
Basement				
911-1A	Bt gneiss	Bt-Grt	Qtz	Ap-Zrn
911-1B	Granite	Bt	Qtz-Pl-Kfs	Ilm-Ap-Zrn
911-10	Mafic gneiss	Hbl	Pl(Cc)	Chl*-Tit-Ilm-Ap-Zrn
911-4	Schist	Chl*-Ep*	Pl(Cc)	(relic igneous textue)
911-7	Schist	Bt-Act	---	Ilm-Zrn
911-8	Granitic gneiss	Bt	Pl-Qtz	Ilm-Ap-Zrn
911-9	Mafic gneiss	Hbl-Bt	Pl-Qtz	Ap-Zrn
Xenolith				
912-1A	Spr-metamor. Rock	Bt-Spl-Crn-Spr-Crd-Ged	---	Ilm-Zrn
912-1B	Grt-Bt gneiss	Grt-Bt-Crd	Qtz-Pl	Sil-Ilm-Zrn
912-1C	Spl-metamor. Rock	Spl-Opx-Mus	---	Pylite
912-1D	Spl-metamor. Rock	Spl-Opx-Mus-Crd	Kfs	Pylite
912-1E	Bt gneiss	Bt-Spl-Mus	---	Ilm
912-2A	Bt gneiss	Bt-Spl-Mus-Oamp	Pl	Ilm-Zrn
912-2B	Mafic gneiss	Opx-Hbl-Bt	Pl-Qtz	Ap-Opq

Table 1. List of mineral assemblege

Act, actinolite; Ap, apatite; Bt, biotite; CaAmp, calsic amphibole; Cc, calcite; Chl, chrolite; Cpx, clinopyroxene; Crd, cordierite; Crn, corundum; Ep, epidote; Ged, gedrite; Grs, grossular; Grt, garnet;Hbl, hornbrende; Ilm, Ilmenite; Kfs, K-feldspar:Mus, muscovite; Oamp, orthoamphibole; Olv, olivine; Opq, opaque mineral; Opx, orthopyroxene; Pl, plagioclase; Qtz, quartz; Scp, scapolite; Sep, serpentine; Sil, sillimanite; Spl, spinel; Spr, sapphirine; Tit, titanite; Zrn, zircon. * as secondary mineral.

表２　鉱物化学組成

Sample No.	059012-1A							05909-3G		
Anal. No.	1	2	3	4	5	6	7	1	2	5
	Spl	Spr	Crd	Crn	Crd	Bt	Ged	Oamp	Cpx	Bt
SiO_2	0.00	11.62	48.38	0.00	48.61	41.44	42.66	51.56	55.18	41.95
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.31
Al_2O_3	61.14	65.13	33.42	99.37	33.43	15.65	19.18	6.36	0.72	12.41
FeO*	21.56	4.98	2.37	0.61	2.35	4.97	10.96	4.60	2.37	3.73
MnO	0.30	0.27	0.22	0.00	0.00	0.00	0.91	0.45	0.28	0.19
MgO	13.27	17.99	12.23	0.00	12.18	23.84	20.40	20.43	17.53	25.49
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	12.99	25.05	0.06
Na_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.85	1.30	0.00	0.53
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00	0.86	0.00	10.46
Total	96.27	99.99	96.62	99.98	96.57	94.92	97.67	98.55	101.3	95.13
O	4	20	18	3	18	22	23	23	6	22
Si	0.00	1.37	4.94	0.00	4.96	5.82	6.02	7.20	1.98	5.96
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03
Al	1.97	9.05	4.02	1.99	4.02	2.59	3.19	1.05	0.03	2.08
Fe	0.49	0.49	0.20	0.01	0.20	0.58	1.29	0.54	0.07	0.44
Mn	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11	0.05	0.01	0.02
Mg	0.54	3.16	1.86	0.00	1.85	4.99	4.29	4.25	0.94	5.40
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	1.94	0.97	0.01
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.35	0.00	0.15
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	0.00	0.15	0.00	1.90
Total cation	3.01	14.10	11.05	2.00	11.03	15.56	15.78	15.53	4.00	15.99
X_{Mg}	0.52	0.87	0.90	0.00	0.90	0.90	0.77	0.89	0.93	0.92

Table 2. Representative chemical compositions of constituent minerals
FeO*, total Fe as FeO. Chemical analyses of minerals were performed using an electron microprobe with an energy dispersive X-ray analytical system (HITACH-S3000N) at Univ. of the Ryukyus

岩，石灰珪質片麻岩およびそれらの互層から構成されるが，広い面積に分布することが特徴である。

岩石記載

本調査で得られた試料は39試料である。本調査では花崗岩の捕獲岩として産する含サフィリン変成岩及び角閃岩の採取を目的としているため，花崗岩類ならびにその母岩と考えられる変成岩類の採取は極力避けた。それぞれ採取した試料の鉱物組合せを表1に示した。これらの採取地点は図１に対応する。また，表２には２つの岩石試料の鉱物化学分析結果を示した。以下には採取した岩石の組織について述べる。

１．捕獲岩類

含サフィリン変成岩：黒色粗粒片状の岩石であり，多量の黒雲母から構成され，スピネル，コランダム，サフィリン，キン青石からなる径10～20㎜程度の点紋が散在する。黒雲母の定向配列による片理面が確認される。構成鉱物は黒雲母，スピネル，サフィリン，コランダム，キン青石，ゼードル閃石，不透明鉱物である。スピネル，コランダム，サフィリンは集塊状に産するが(図2a & 2b)，スピネル，コランダムはおおむねその中心部に他形粒状（1～2㎜)の結晶として観察される(図2c)。サフィリンはスピネル及びコランダムを取り囲む形で不規則な形状を呈する。それら集塊状の鉱物はキン青石によって完全に包有される。ゼードル閃石は黒雲母に包有され産することが多く，その長軸は黒雲母の定向配列に調和的である。

含スピネル変成岩：暗緑色一部片状の岩石で，黄褐色の黄鉄鉱が点在する。スピネル，斜方輝石，黄鉄鉱，白雲母，黒雲母，緑泥石から構成される。スピネルは淡青色，1㎜程度で他形粒状のものが多いが，稀に長径2㎜程度の粒子もある(図 2d)。斜方輝石は淡く赤みを帯びており，他形粒状（0.5㎜)の粒子として産する。へき開が発達したものが多い。肉眼で片状に見える部分はスピネルおよび斜方輝石の卓越する組成縞により構成されている。黄鉄鉱はスピネル，斜方輝石を充填して産し，薄片内のすべての領域に確認される。白雲母，黒雲母，緑泥石は二次鉱物として変質の進行した領域に観察される。構成鉱物の組み合わせから判断すると，本岩石は硫化物鉱床の一部と考えられる。今回は光学的特徴から鉱物の判定を行っているが，そのような岩石には硫化鉱物が含まれることが予想される。化学組成を把握し鉱物の同定を厳密に行う必要がある。

ザクロ石黒雲母片麻岩：ザクロ石の点紋が散在する粗粒黒色の岩石である。構成鉱物は黒雲母，ザクロ石，石英，斜長石。キン青石，珪線石，イルメナイト，アパタイト，ジルコンである。ザクロ石は他形粒状(2～4㎜)の斑状変晶として産し，微細な黒雲母，イルメナイト，石英などの包有物を多く含む。黒雲母はシンプレクタイトとして産することが特徴であり(図 2e)，定向配列するものは少ない。キン青石は黒雲母とともに確認されるが，稀に繊維状の微細な珪線石を包有することがある。

石灰珪長質片麻岩：全体に暗緑色を呈す岩石であり，斜長石からなる灰白色の薄層を含むことがある。構成鉱物は多い順からカルシウム角閃石，単斜輝石，斜長石，クサビ石，石英，不透明鉱物である(図2f)。これらに加えて黒雲母，白雲母，Ca-ザクロ石（グロシュラー）を含むことがある(図2g)。角閃石はZ軸で淡緑色を呈し，半自形から他形，最大長径5㎜程度である。単斜輝石は多くの場合，粒状に角閃石に包有されて産するものが多い。斜長石，石英はマフィック鉱物の粒間を充填し産する。

塩基性片麻岩：暗緑色塊状の岩石であり，鏡下ではグラノブラスティック組織を示す(図 2h,2i & 2j)。主に斜方輝石，普通角閃石，斜長石，石英から構成され，少量の黒雲母,イルメナイト，アパタイトを含む。斜方輝石は不規則な形状を呈し，粒径2～3㎜程度のものが多い。丸みを帯びた石英，斜長石，普通角閃石，イルメナイトを包有する。単斜輝石も斜方輝石と同様に産するが，淡緑色を呈し多色性がないことから区別できる。普通角閃石はz軸で茶褐色を呈し，丸みを帯びた斜方輝石を包有することがある。黒雲母は斜方輝石の周辺に二次鉱物として産する。

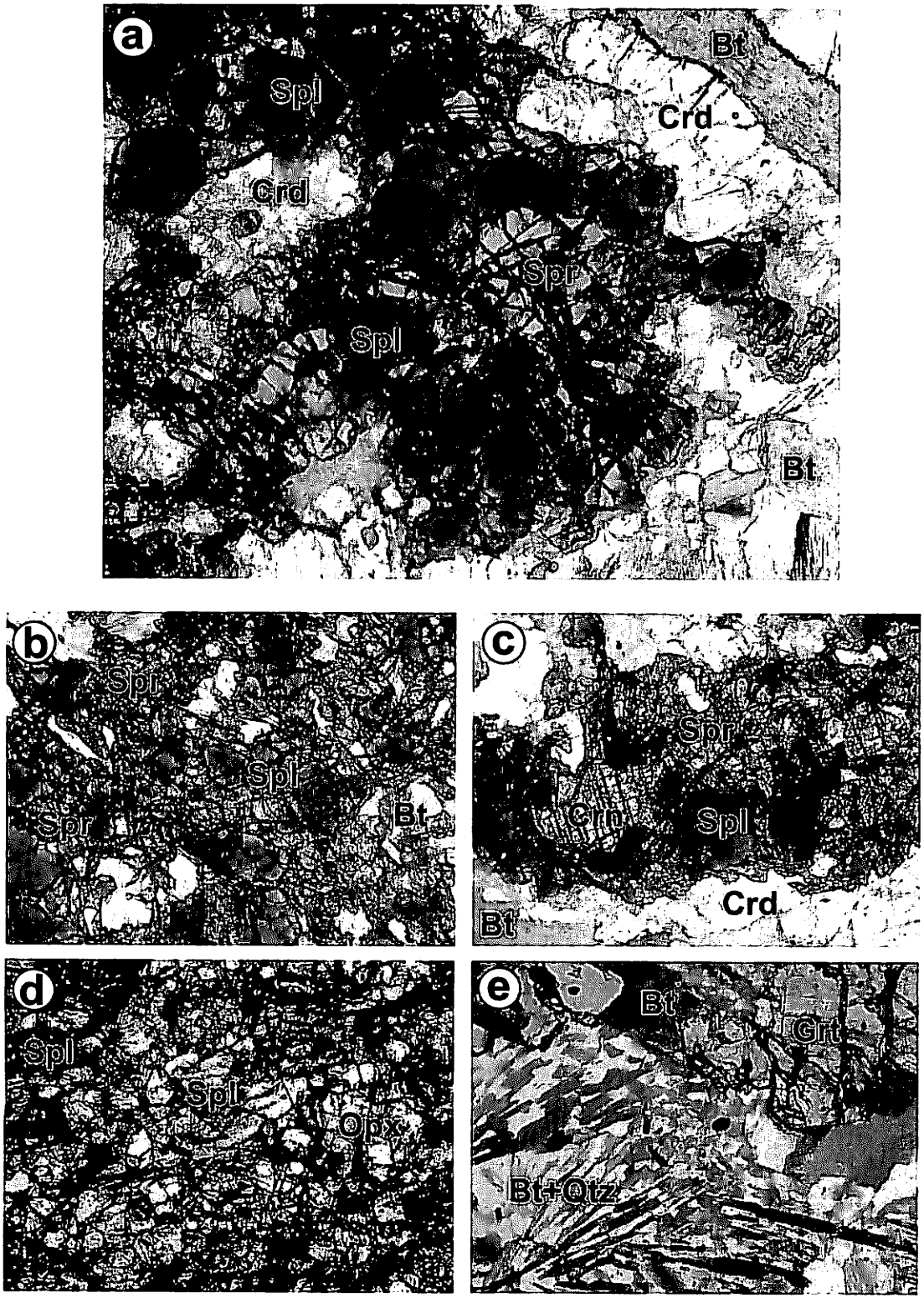
2．基盤岩類（母岩）

角閃岩：フェルシック鉱物の含有量によって黒色～暗緑色を呈する。主要な構成鉱物は普通角閃石，斜長石，黒雲母であるが(図2k)，これに加えて少量の黒雲母，石英，イルメナイト，アパタイト等が含まれる場合がある。普通角閃石，黒雲母は定向配列することが多い。普通角閃石は粒径2㎜程度のものが多く，包有物は稀である。黒雲母は茶褐色で長柱状に産する。斜長石は粒径0.5㎜程度でモザイク状に産する。

石灰珪長質片麻岩：珪長質鉱物に富む灰色の薄層と苦鉄質に富む暗緑色の層とが縞状構造を呈する岩石である。単斜輝石，斜長石，普通角閃石，ザクロ石，緑レン石，斜長石から構成され(図2l)，グラノブラスティック組織を示す。柱石，クサビ石，アパタイト，不透明鉱物を少量含む。単斜輝石は粒状他形で1㎜程度のものが多く，斜長石とともに寄木細工状に産する。普通角閃石・緑レン石はともに単斜輝石の周縁を置換して産する。柱石は長径約10㎜の斑状変晶として産しザクロ石，単斜輝石を包有する。

黒雲母片麻岩：黒雲母の含有量によって様々な岩相を呈する。主要鉱物は黒雲母，斜長石，石英であり，これらに加えてザクロ石，普通角閃石が含まれる。副次鉱物としてイルメナイト，アパタイト，ジルコンなども少量含認められる。多くの黒雲母は粒径1～2㎜程度で，長柱状～板状に定向配列する。普通角閃石が含まれる場合は黒雲母と

図２．採取した試料の鉱物組織写真



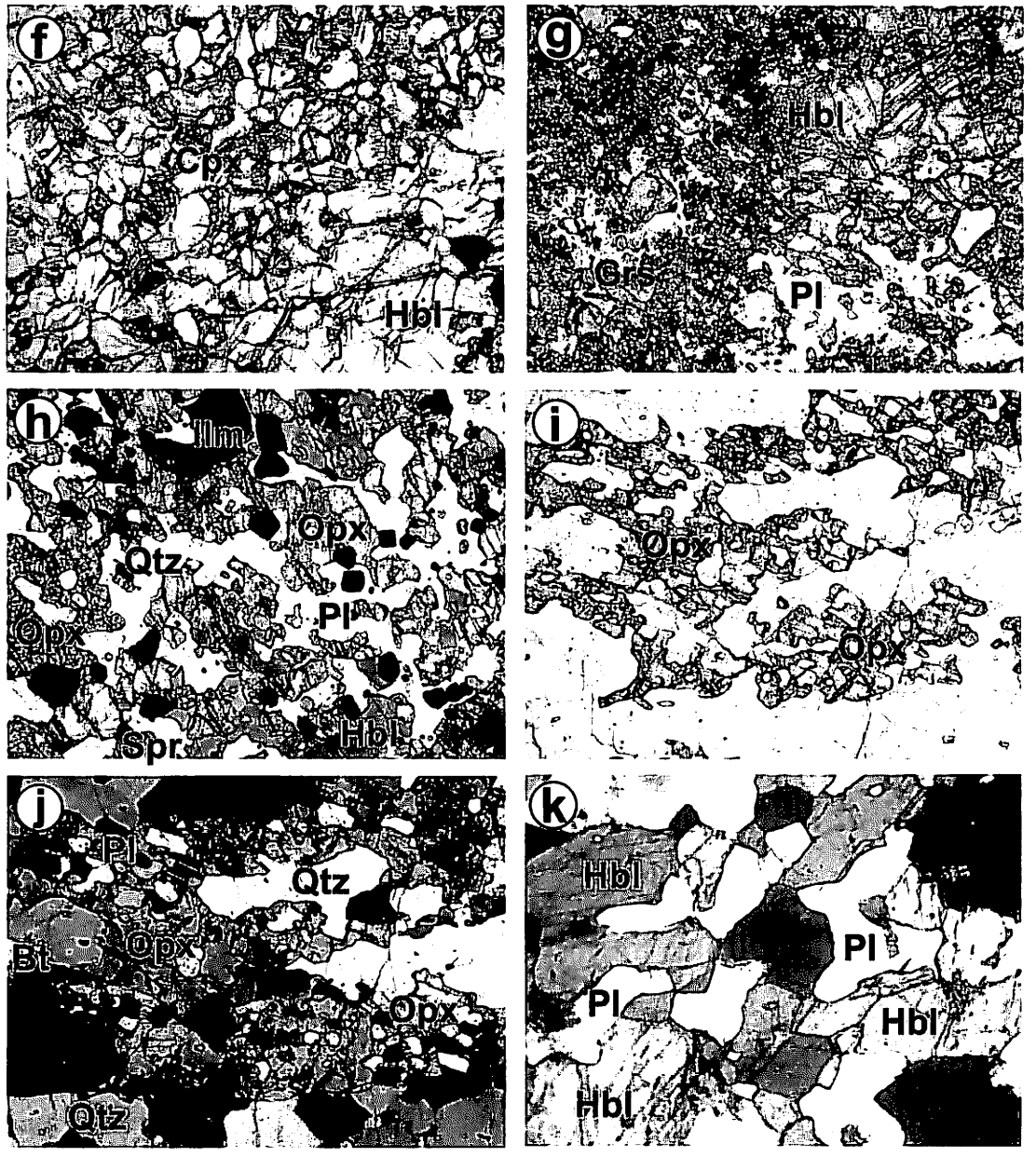


Figure 2. Photomicrographs of the microtextures observed in collected samples in this study. (a) & (b) Sapphirine (Spr)-Spinel (Spl) association in 05912-1A. The Spr occurs around the margin of Spl, and in turn Spr is surrounded by cordierite (Crd). (c) Corundum enclosed by Spl and Spr. (d) Spl-Orthopyroxene (Opx) association in 912-1C. (e) Biotite (Bt) and quartz (Qtz) symplectite occurs in garnet (Grt)-bearing felsic gneiss (908-8B). (f) Clinopyroxene (Cpx) and hornblende (Hbl) in calcsilicate (909-3H). (g) Grossular (Grs) and calsic-amphibole (CaAmp) bearing calcsilicate (909-4). (h) & (i) orthopyroxene (Opx) bearing mafic gneisses (905-2A & -2B). (j) Crossed polarized view of (i). (k) amphibolite (908-2A).

同様に定向配列する。ザクロ石は班状変晶として認められ，黒雲母，石英，斜長石，イルメナイトを包有する(図 2m)。最大粒径10㎜程度のものも一部には認められ，内部の包有物は定向配列している。斜長石，石英はともに定向配列して産するが，石英には波動消光するものもある。

図２（つづき）

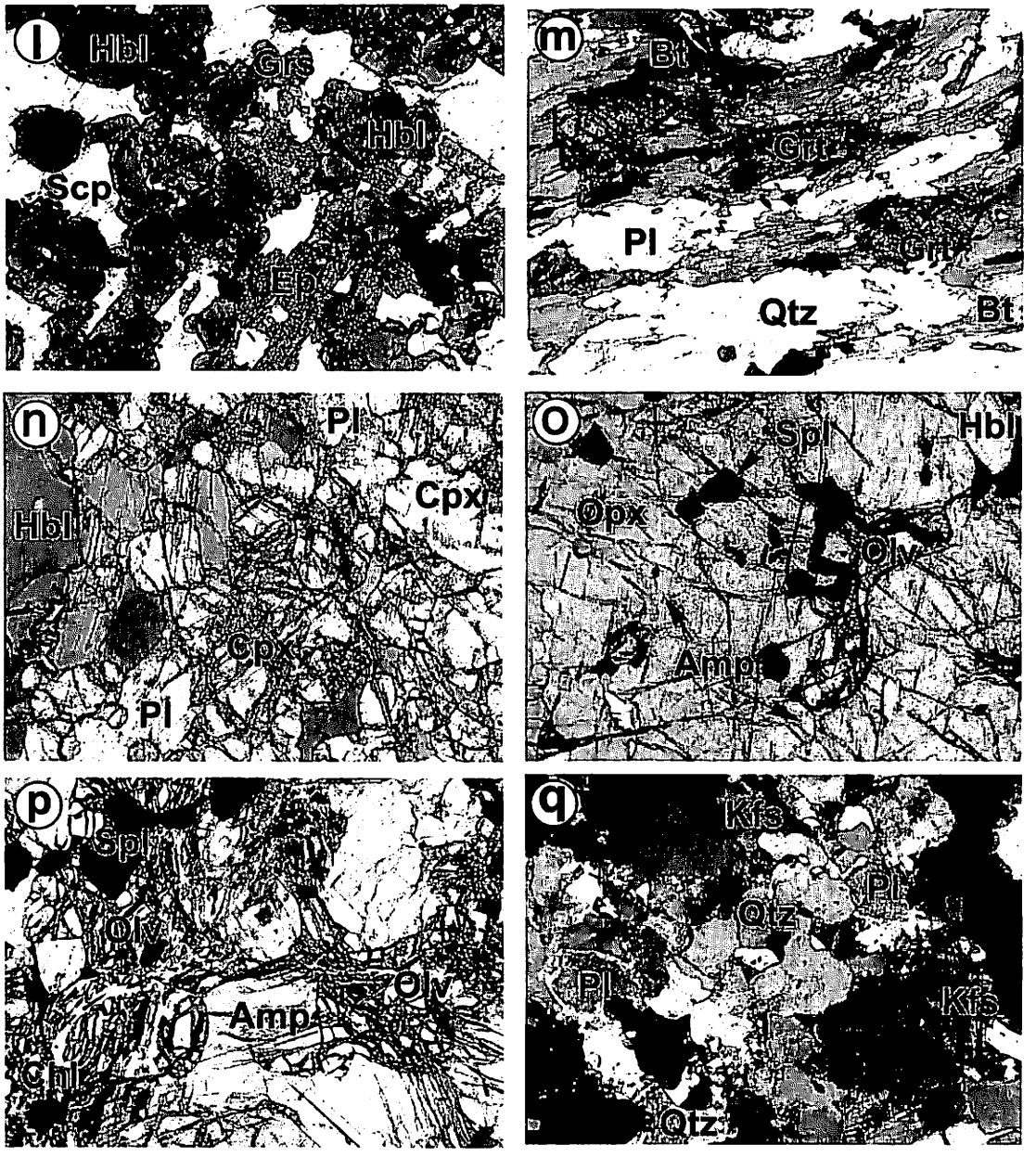


Figure 2 (continued). (l) Grs – Hbl – Epidote (Ep) association enclosed by Scapolite (Scp) in 909-4. (m) Cpx-Hbl in metagabbro (908-2). (n) Grt-Bt in felsic gneiss (908-8A). (o) Olivine (Olv), Spl and amphibole (Amp) inclusions in large Opx (908-9). (p) Olv crystals are replaced by chrolite and serpentine. (q) crossed polarized view of granite (908-8B).

変ハンレイ岩：肉眼では暗緑色を呈する岩石で，粒径8～10㎜程度の角閃石が点紋状に散在する。主な構成鉱物は普通角閃石，単斜輝石，斜方輝石，斜長石であり(図2n)，少量の方解石，イルメナイトを含む。普通角閃石は長径2～3㎜程度であり集片塊状に濃集し点紋を構成する。単斜輝石，斜方輝石はいずれも他形で丸みを帯びており寄木細工状に産する。斜長石はそれら苦鉄質鉱物の粒間を充填し産するが，方解石に変質しているものもある。

超塩基性岩：粗粒塊状で暗緑色を呈する岩石であり，斜方輝石からなる点紋が認められる。構成鉱物は，斜方輝石，角閃石，カンラン石，スピネル，単斜輝石，イルメナイトであるが，二次鉱物として緑泥石，蛇紋石が認められる。斜方輝石は5㎜程度の他形結晶として産し，スピネル，イルメナイト，角閃石，かんらん石を包有する(図2o)。角閃石は淡緑～淡青色を呈し斜方輝石の周囲に認められる。スピネルは青緑色で斜方輝石の包有物以外にも様々鉱物に包有され確認される。カンラン石は粒径1㎜程度のものが多いが，その内部には不規則な割れ目が発達し，二次鉱物に置換されている(図2p)。一部のカンラン石は斜方輝石，スピネルと直接接して確認される。

3．花崗岩類

黒雲母花崗岩：肉眼では粗粒塊状，桃白色の岩石であり，鏡下では半自形粒状組織を示す(図2q)。石英，斜長石，アルカリ長石，黒雲母から構成され，イルメナイト，アパタイト，ジルコンを少量含む。普通角閃石を含むものも認められる。石英，斜長石，アルカリ長石は半自形～他形であり粒径は3～5㎜程度である。アルカリ長石は丸みを帯びた石英，斜長石をプール状に包有することがある。黒雲母の多くは茶褐色のものが多く，不規則に配列する。一部の変形を被った岩石では斜長石が破砕され，細粒な石英が片理を形成することもある。しかし，二次鉱物の形成は顕著ではない。

考　察

1．変成温度圧力条件

これまで，調査地域において変成作用の詳細を議論した研究は少ない。今回の観察で基盤岩類中（母岩）に斜方輝石は認められず（超塩基性岩類を除く），鉱物組み合わせは角閃岩相の変成岩体であるとする従来の考えを支持する。しかし，花崗岩類の捕獲岩として得られた試料には，斜方輝石を含む塩基性片麻岩が確認された。このことは，一部の岩石の変成温度条件がグラニュライト相に達していた可能性を示すものである。温度条件の推定については，両輝石地質温度圧力計を用いて推定可能であるが，圧力の推定はザクロ石を伴わないことから不可能と考えられる。そこで本論では，含サフィリン変成岩に認められるスピネルとサフィリンの共存関係に注目し温度条件の推定を試みた。その結果，Owen and Greenough(1991)の地質温度計では909℃，Sato and Kawasaki(2006)では718℃を得た。しかし，今回の分析ではCrやZnの含有量を測定していないため，あくまで参考値である。また，FMAS系における鉱物共生関係(図3)から圧力条件を見積ると，700～800℃，8kbar以下で形成可能であることが明らかになった。図3にはスコットランド，サウスハリス地域に分布する含サフィリングラニュライトより得られた温度圧力経路も同時に示している。サウスハリスの岩石にコランダム，スピネル，サフィリンはザクロ石の包有物として観察されることから，今回報告した含サフィリン変成岩はサウスハリス地域での初期昇温変成作用時に形成された鉱物組み合わせに相当すると考えることができる。また，ザクロ石を含まず，キン青石が認められることから，低圧条件であることは明白である。

2．試料選定

本研究の最終的な目的は，含サフィリン変成岩類の形成場を周囲に産する塩基性変成岩類の地球化学的特徴から推定することにある。それには蛍光X線分析を行い，全岩化学組成を明らかにし地球化学判別図から推定するのが一般的である。しかし，そこにはいくつかの問題が挙げられる。すなわち，1）SiO_2含有量が塩基性岩類（厳密には45-52wt％）の範囲内であること，2）変質などによる二次的な鉱物の成長が認められないこと，3）重量があり均質であることである。このような視点から改めて顕微鏡観察結果を見てみると，分析に用いることが可能な試料は限定される。採取した試料のなかに肉眼では塩基性片麻岩と極めて類似する石灰珪長質片麻岩が多く含まれることがその理由である。ザクロ石（グロシュラー）およびカルシック角閃石を含むものについては分析対象外とすると，基盤岩類からは5試料(908-1A, 908-1B, 908-7, 911-10, 911-9)，捕獲岩からは3試料(909-2A,909-2B,912-2B)がその候補となる。

今回，採取した試料のなかで，スピネルを含有する岩石の鉱物組み合わせは極めて特異である。

また，これらの岩石は黄鉄鉱を含むことから熱水変質作用の影響により形成された可能性が高く，鉱物化学分析ならび全岩化学組成分析を行うことで含サフィリン変成岩との岩石成因関係の詳細を明らかにすることが可能かもしれない。今後，これらをふまえ各種化学分を行う予定である。

謝　辞

本研究の遂行にあたり文部科学省／日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究(B)「原生代における高Mg堆積岩類の形成場と形成環境」課題番号：167402895001　代表：馬場壮太郎）を使用した。EPMA分析に際し琉球大学理学部物質地球学科の新城竜一助教授には便宜をはかっていただいたここに感謝申し上げる。

引用文献

Alt, J.C. (1995) Sub-seafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems. In: Humphris, S.E., Zierenberg, R., Mullineaux, L., Thomson, R. (eds.), *Seafloor Hydrothermal System: Physical, Chemical, Biological and Geological Interactions within Hydrothermal Systems*, American Geophysical Union, Washington, pp. 85-114.

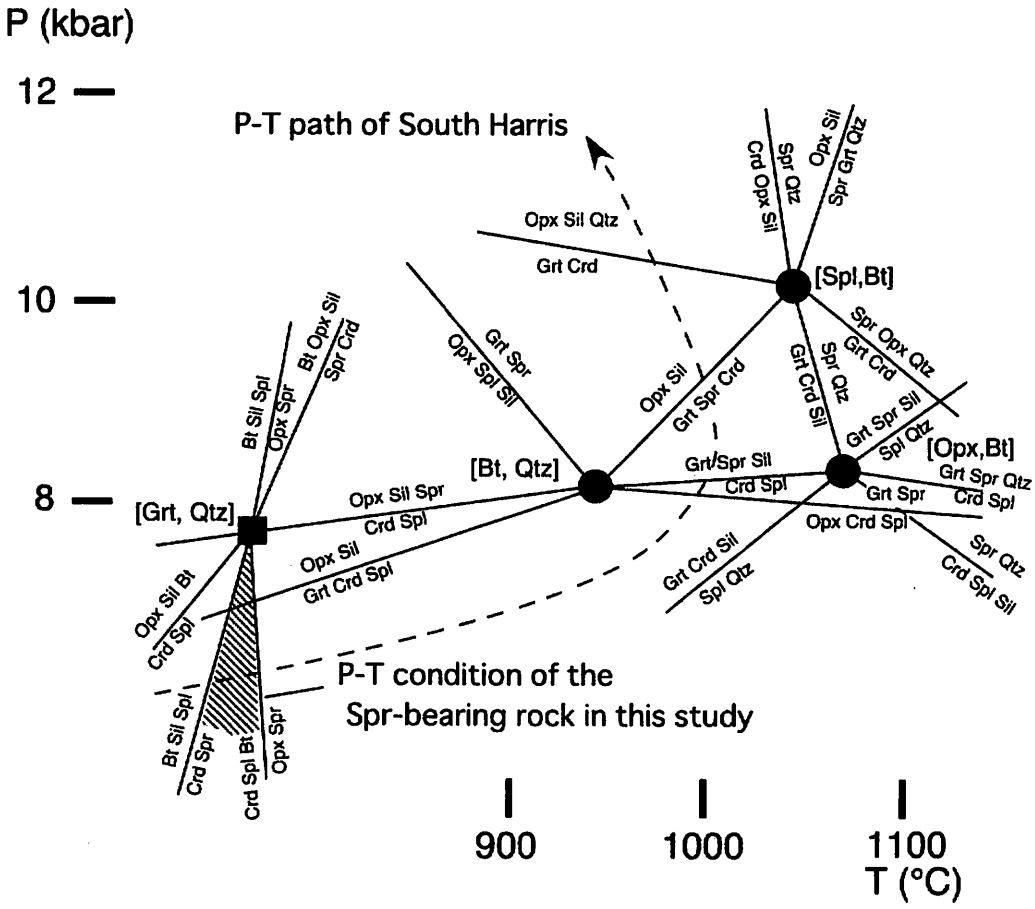


Figure 3. *P-T* grid for FMAS and KFMAS systems at low oxygen fugacity (Hensen, 1987; Hensen & Harley, 1990; Bertrand et al., 1991; Harley; 1998) showing divariant fields relevant to the mineral associations observed in sapphirine-bearing metamorphic rock. Dashed arrow represents P-T path of South Harris sapphirine-bearing granulite.

図３．　FMAS・KFMAS系における温度圧力図

Baba. S. (2003) Two stages of sapphirine formation during prograde and retrograde metamorphism in the Palaeoproterozoic Lewisian complex in South Harris, NW Scotland. *Journal of Petrology* 44, 329-354.

Bertrand, P., Ellis, D.J. & Green, D.H. (1991). The stability of sapphirine-quartz and hypersth ene-sillimanite-quartz assemblage: an experime ntal investigation in the system FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 under H_2O and CO_2 conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 108, 55-71.

Boyer, R.E. (1962) Petrology and structure of southern Wet Mountains, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 73, 1047-1070.

Harley, S.L. (1998). On the occurrence and characterisation of ultrahigh-temperature crustal metamorphism. In: Treloar, P.J. & O'Brien, P. (eds) *What Drives Metamorphism and Metamorphic Reactions?* Geological Society of London Special Publication 138, pp. 75-101.

Hensen, B.J. & Harley, S.L. (1990), Graphical analysis of P-T-X relations in granulite facies metapelite. In: Ashworth, J.R. & Brown, M. (eds) *High Temperature Metamorphism andCrustal Anatexis.* London: Unwin-Hyman, pp.19-56.

Owen, J.V. & Greenough, J.D. (1991) An empirical sapphirine-spinel Mg-Fe exchange thermometer and its application to high grade xenoliths in the Popes Harbour dyke, Nova Scotia, Canada. *Lithos* 26, 317-332.

Raymond, W.H., Leiggi, P.A. & Sheridan, D.M. (1980) Sapphirine in Precambrian rocks associated with stratabound sulfide deposits, Custer Country, Colorado. *U.S. Geological Survey Bulletin* 1513, 1-22.

Sato, K., Miyamoto, T. & Kawasaki, T. (2006) Experimental calibrationof sapphirine-spinel Fe2+-Mg exchange thermometer: Implicationfor constraints on P-T condition of Howard Hills, Napier Complex, East Antarctica. *Gondwana Research* 9, 398-408.

Tweto, O. (1977) Nomenclature of Precambrian rocks in Colorado. *U.S. Geological Survey Bulletin* 19422-D, D1-D22.

Tweto, O. (1979) Geological map of Colorado. U. S. Geoloical Survey.