

◇研究報告◇

アパタイト中のフッ素と塩素の定量，東南極ナピア岩体トナー島産の 変成超苦鉄質岩中のアパタイトの起源

大和田正明*・森福洋二**

Quantitative analyses of F and Cl in apatite:
Implication for origin of apatite in meta-ultramafic rock
from Tonagh Island in Napier Complex, East Antarctica

Owada, M.* and Morifuku, Y.**

The Napier Complex, East Antarctica is one of the oldest Archaean terrane in the world. Tonagh Island is located in the southern end of Amundsen Bay. Mafic gneisses and meta-ultramafic rocks are exposed on Tonagh Island. The meta-ultramafic rock that is located at the northeastern part of the island cuts the layers or foliations of neighboring quartzo-feldspathic gneisses, suggesting that the meta-ultramafic rock was originally intrusive rock. The meta-ultramafic rock consists mainly of olivine, clinopyroxene, orthopyroxene and hornblende. Subhedral apatite is included in olivine. Major and trace element compositions of the meta-ultramafic rock resemble those of komatiitic rocks from the Archaean greenstone belts. Chondrite normalized REE pattern for the meta-ultramafic rock shows enrichment in LREE. Quantitative analyses of F and Cl were done for the apatite in the meta-ultramafic rock. F and Cl contents of the apatite revealed that the apatite was directly crystallized from komatiitic melt. An apatite is regarded as a main container for LREE in the upper mantle. Both LREE-enriched and -depleted types of komatiitic rocks are exposed on the Archaean continents. Therefore, an apatite component may play an important role to understand the petrogenesis of Archaean komatiitic rocks.

1. はじめに

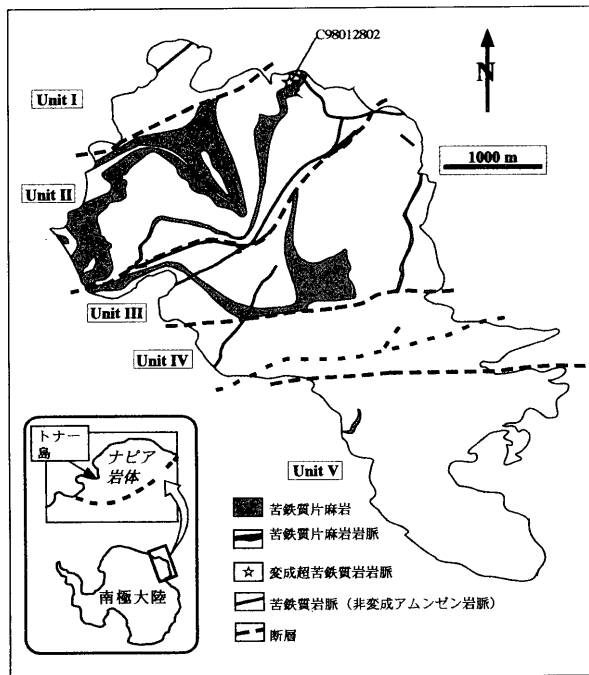
南極大陸の沿岸部東経47°～58°を中心に露出するナピア岩体は、グラニュライト相変成岩類が広く分布する。これら変成岩類の原岩の形成年代は約39億年前にさかのぼり¹⁾、地球上で最も古い大陸地殻が露出している地域のひとつである。また、この岩体は、最高1100℃、1.2 Gpaに達する超高温変成作用 (Ultrahigh-temperature metamorphism: UHT) をこうむったとされている^{2,3)}。

ナピア岩体西部のアムンゼン湾南部に位置するトナー島は、各種変成岩類と非変成貫入岩から構成される (第1図)。変成岩類は構成岩石からUnit

I～Vの5ユニットに区分されている⁴⁾。各ユニットはWNW-ESE～E-Wの断層によって境されている。Unit Iは泥質、苦鉄質および珪長質片麻岩の細互層によって特徴づけられる。これらの互層に加え、Unit IIとIIIには層厚50～100mに達する苦鉄質片麻岩が分布する。それに対し、Unit Vは苦鉄質片麻岩をほとんど含まず、厚い珪長質片麻岩が卓越する。Unit IVはUnit IIIとVにはさまれた狭長なゾーンである。このユニットは、構成岩石全体がマイロナイト化をこうむっている。また、各ユニットには少量であるが、石英-磁鉄鉱片麻岩を挟在するほか、超苦鉄質岩や石灰珪質片麻岩がレンズやブロックとして産する。

* 理学部化学・地球科学科 Department of Earth Sciences, Faculty of Science

** 機器分析センター Center for Instrumental Analysis



第1図. ナピア岩体トナー島の位置とトナー島のユニット区分。変成超苦鉄質岩岩脈の採集位置も示してある。

Unit IVや各ユニットを境する断層付近の岩石を除くと、トナー島を構成する各種変成岩類は面構造の発達が弱い。各岩相境界と弱い面構造はほぼ平行である。一方、苦鉄質片麻岩の一部には岩相境界を切って産するものがある⁴⁾。同様の産状を示すものは、トナー島の北東40kmに位置するナピア岩体のリーセル・ラルセン山地からも報告されている⁵⁾。Ishizuka et al.⁵⁾やOwada et al.^{6,7)}は、このような産状を示す変成岩類の原岩が貫入岩であるとした。特に、Owada et al.⁶⁾では、超苦鉄質岩で同様の産状をUnit II中に見出した(第1図)。そして、この岩石の化学組成が太古代の緑色岩地帯に産するコマチアイトに類似することから、岩脈として貫入したコマチアイト質岩が変成作用をこうむったものであるとした。本論文では、以後この岩石を変成超苦鉄質岩と呼ぶことにする。

Owada et al.^{6,7)}は、変成超苦鉄質岩中にアパタイトを見出した。アパタイトはマントルカンラン岩、キンバーライトおよびアルカリ玄武岩中に広く見出されているが、太古代の非変成コマチアイトからはこれまでほとんど知られていない。一方、マグマから晶出した初生ホルンブレンドを含むコマチアイトは世界各地の太古代緑色岩体か

ら報告されている⁸⁾。このことは、少なくともコマチアイト質マグマの一部が含水マグマからもたらされたことを示している。すなわち、地質時代を通じ、多種類の玄武岩質本源マグマが生じているように、コマチアイト質マグマについてもその起源物質が多様であったことを示唆している。

最近筆者らは、機器分析センターに設置してあるEPMA(島津V6)で造岩鉱物のFとClの定量化を行ってきた。その一環として上述のアパタイトについてもFとClの定量化を行った。本論文では、FやClのデータをもとに変成超苦鉄質岩中のアパタイトの起源とその意味について検討する。

2. 変成超苦鉄質岩と産状と岩石記載

Unit IIの北東部には、斜方輝石を含む珪長質片麻岩と斜方輝石と単斜輝石を含む苦鉄質片麻岩の互層が発達する。Owada et al.⁶⁾は、これらの岩相境界を切って産する幅5mの変成超苦鉄質岩岩脈を報告した。第2図に変成超苦鉄質岩の産状を示す。この変成超苦鉄質岩の周縁部には、幅数cmで周囲の珪長質片麻岩との反応帯がしばしば発達している。周辺部の粒度は内部に比べてやや細粒であるが、岩脈内部の粒度変化はほとんどない。同様の岩脈は全部で3本確認している。他の2本はいずれも幅数10cmと狭く、岩脈の幅が狭い程、鉱物の粒度は小さくなる。

変成超苦鉄質岩は、主にホルンブレンド、斜方輝石、単斜輝石およびカンラン石から構成され、スピネル、磁鉄鉱およびアパタイトを副成分鉱物として含む。珪長質片麻岩との反応帯では斜長石



第2図. 変成超苦鉄質岩岩脈の産状。貫入母岩は珪長質片麻岩。

を含みカンラン石を欠く。主成分鉱物はグラノブラスティック組織を示し、各鉱物に累帯構造はほとんど認められない⁷⁾。ホルンブレンドはカンラン石に包有されるものがある。そのようなホルンブレンドの産状から、変成超苦鉄質岩の原岩はもともH₂Oに富むマグマからもたらされたと考えられている⁹⁾。スピネルは褐色または緑色を示す。前者はCrに富み、自形～半自形でカンラン石に包有されるが、後者は半自形～他形で磁鉄鉱とともに鉱物粒間に産する。アパタイトは、今のところ幅5mの岩脈から1粒見出しされたのみである。半自形でカンラン石に包有されている(第3図)。また、このアパタイト中は微細な結晶を多数包有している。また、アパタイトを包有しているカンラン石中には、上述した自形の褐色スピネルも包有されている(第3図)。

3. 鉱物化学組成

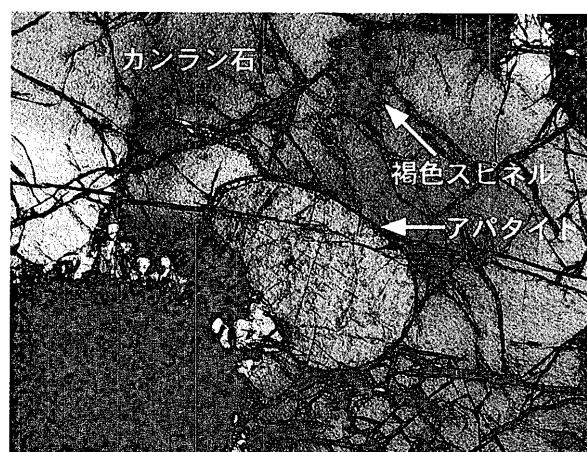
変成超苦鉄質岩の構成鉱物について、主要造岩鉱物(カンラン石、斜方輝石、単斜輝石および角閃石)とアパタイトの分析を行った。

3-1. 分析条件

分析は本学機器分析センターの波長分散型EPMA(島津V6)を用いて以下の分析条件で10元素(Si, Ti, Al, Cr, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K)とアパタイト用の4元素(Ca, P, F, Cl)を行った。主要10元素については、加速電圧15kV、試料電流は15nAそしてビーム径5 μ mで分析した。一方、アパタイトの分析は、加速電圧、試料電流は同じで、ビーム径は10 μ mで行った。リンの分析は標準試料としてGa(PO₄)を用い、測定時間はピーク10秒、バックグラウンドはピーク位置の前後各10秒とした。また、ピークサーチは測定毎に行わせた。塩素の分析は標準試料としてNaClを用い、測定時間は、Pと同様にピーク、バックグラウンド各10秒とした。フッ素は標準試料としてCaF₂を用いて、ピーク100秒、バックグラウンド各20秒で測定を行った。補正法はすべての元素についてZAFで行った。

3-2. 主要造岩鉱物とアパタイトの組成

変成超苦鉄質岩に含まれる各鉱物の代表的な組成を第1, 2表に示す。アパタイトのFとClは上



第3図. アパタイトの産状を示す鏡下写真。スケールバーは0.2mm。アパタイトは半自形で、カンラン石に包有されている。また、同じカンラン石には、自形の褐色スピネルも包有されている。

述の方法によって測定した値であるが、H₂Oについては計算によって求めた。

第4図にカンラン石、斜方輝石、単斜輝石およびホルンブレンドのFeO (wt%) - MgO (wt%)図を示す。この図には、太古代緑色岩帯に産する非変成のコマチアイト(Belingwe)と緑色岩相～角閃岩相の変成作用をこうむった変成コマチアイト(Sula Mountain)の鉱物組成範囲⁹⁾も示してある。トナー島の変成超苦鉄質岩は、グラニュライト相の変成作用をこうむっており、各鉱物組成は変成作用時に再平衡した組成を示していると考えられる。第4図でトナー島の変成超苦鉄質岩のカンラン石と単斜輝石の組成に注目すると、それらは、BelingweやSula Mountainのコマチアイトの鉱物組成が示す火成岩(非変成)から変成岩(～角閃岩相)へ向かう矢印の組成トレンド上にプロットされる。

変成超苦鉄質岩のカンラン石に包有されるアパタイトのFとCl組成を第5図に示す。同図には同じくトナー島の苦鉄質片麻岩中のアパタイトの組成と大陸に産する苦鉄質層状分化岩体やマントルカンラン岩ゼノリス中のアパタイトについてもプロットした。苦鉄質片麻岩中のアパタイトは半自形で、鉱物粒間あるいは黒雲母中に包有されている。層状分化岩体やマントルゼノリス中のアパタイトはFに富むものとClに富むものに区分される。トナー島の変成超苦鉄質岩中のアパタイトの組成は層状分化岩体のFに富む領域内にプロットされ

第1表. 主要造岩鉱物の代表的な化学組成.

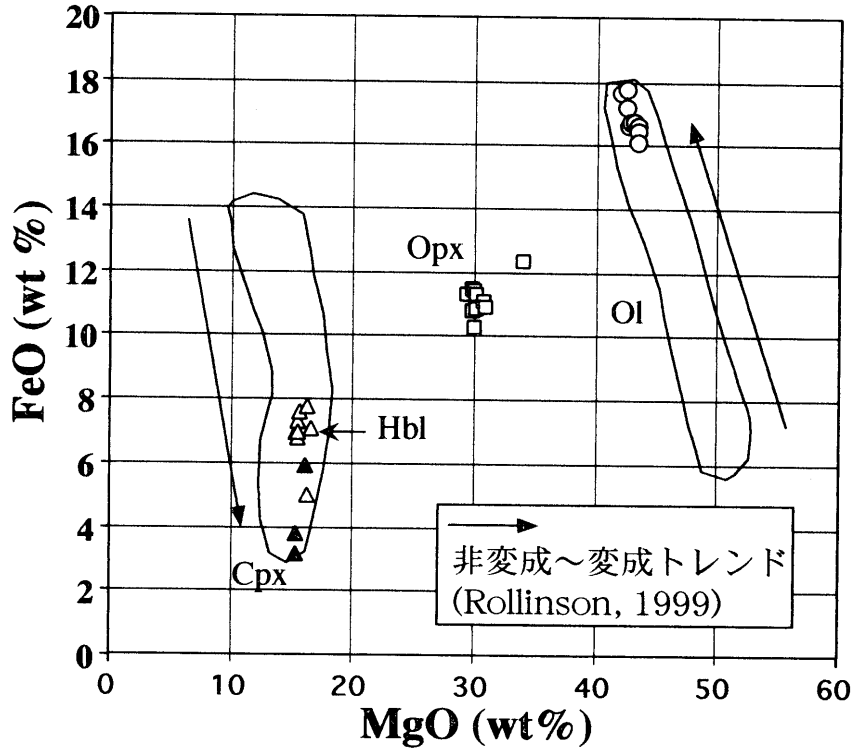
Sample No. C98012802								
	Ol	Ol	Opx	Opx	Cpx	Cpx	Hbl	Hbl
SiO ₂	39.93	39.44	55.39	54.58	49.83	51.93	43.28	44.03
TiO ₂	0.00	0.00	0.31	0.00	0.66	1.07	2.49	2.80
Al ₂ O ₃	0.38	0.47	3.18	3.28	4.51	4.46	14.02	13.78
Cr ₂ O ₃	0.00	0.19	0.00	0.31	0.11	0.06	0.46	0.15
FeO	17.22	16.76	11.47	10.83	5.92	3.83	7.32	5.03
MnO	0.00	0.00	0.12	0.12	0.17	0.00	0.01	0.04
MgO	42.44	42.95	29.88	29.70	16.12	15.36	15.46	16.21
CaO	0.03	0.11	0.26	0.47	21.56	23.04	12.23	13.06
Na ₂ O	0.09	0.01	0.04	0.21	0.62	0.60	2.93	2.90
K ₂ O	0.08	0.00	0.00	0.06	0.21	0.16	0.52	0.81
Total	100.17	99.93	100.65	99.56	99.71	100.51	98.72	98.81
NOA	O=4	O=4	O=6	O=6	O=6	O=6	O=23	O=23
Si	1.01	1.00	1.94	1.93	1.85	1.89	6.18	6.23
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.27	0.30
Al	0.01	0.01	0.13	0.14	0.20	0.19	2.36	2.30
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.02
Fe	0.36	0.35	0.34	0.32	0.18	0.12	0.87	0.60
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	1.60	1.62	1.56	1.57	0.89	0.83	3.29	3.42
Ca	0.00	0.00	0.01	0.02	0.86	0.90	1.87	1.98
Na	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.81	0.80
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.09	0.15
XMg	0.81	0.82	0.82	0.83	0.83	0.88	0.79	0.85

Ol: カンラン石, Opx: 斜方輝石, Cpx: 単斜輝石, Hbl: ホルンブレンド.

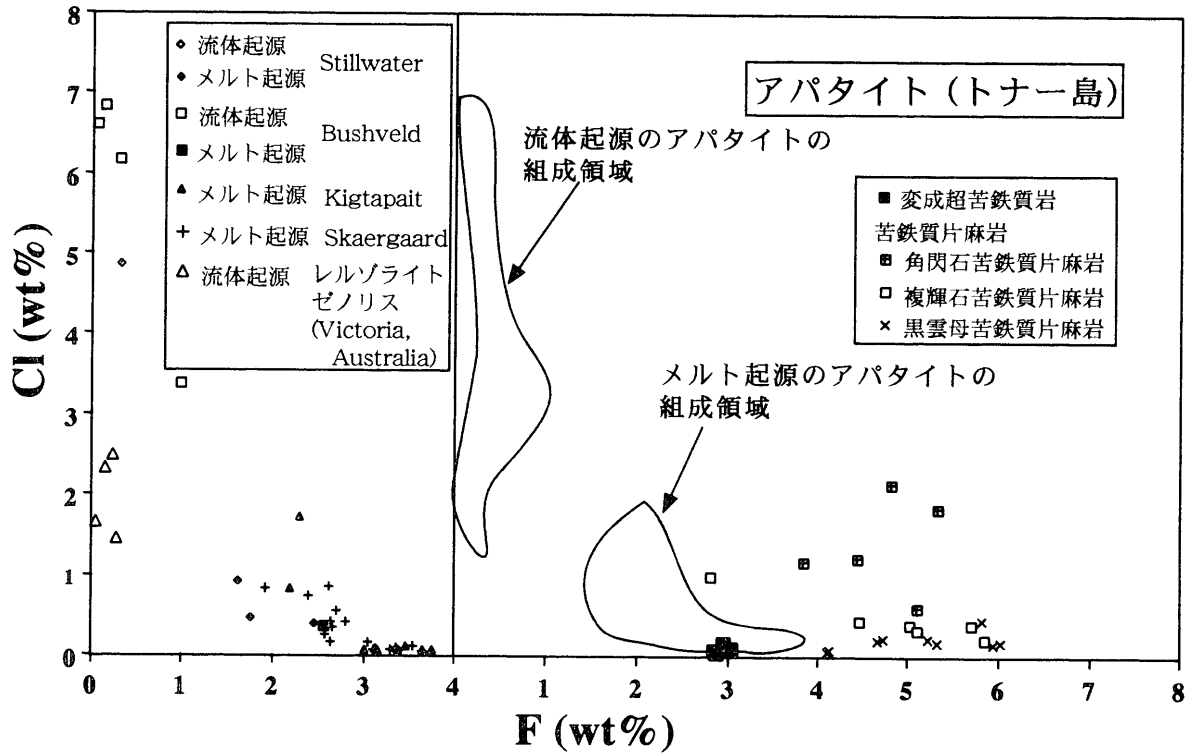
第2表. アパタイトの化学組成.

Sp. No. C98012802					
	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
CaO	55.03	56.97	55.21	57.01	55.82
P ₂ O ₅	41.64	38.73	41.61	40.79	41.03
F	2.95	2.87	3.04	3.03	2.85
Cl	0.19	0.06	0.12	0.11	0.09
F=O	1.24	1.21	1.28	1.27	1.20
Cl=O	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02
Total	98.52	97.41	98.67	99.63	98.56
H ₂ O*	1.48	2.59	1.33	0.37	1.44
Total*	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
NOA	O=26	O=26	O=26	O=26	O=26
Ca	9.77	10.12	9.81	10.13	9.91
P	5.84	5.44	5.84	5.72	5.76
F	1.55	1.50	1.59	1.59	1.49
Cl	0.05	0.02	0.03	0.03	0.02
OH	1.63	2.87	1.47	0.41	1.59
XF	0.48	0.34	0.51	0.78	0.48
XCl	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01
XOH	0.50	0.65	0.47	0.20	0.51

H₂O量は計算によって求めた. Ap: アパタイト.



第4図. 変成超苦鉄質岩中に含まれる苦鉄質鉱物のFeO (wt%) - MgO (wt%)図. Ol: カンラン石, Opx: 斜方輝石, Cpx: 単斜輝石, Hbl: ホルンブレンド。実践で囲った領域はRollinson⁷⁾による非変成～角閃岩相のコマチアイトに含まれる各鉱物の組成範囲。矢印は、それらの組成トレンドで、矢印の先に向かって変成度が上昇していく。



第5図. アパタイトのCl (wt%) - F (wt%)図. 変成超苦鉄質岩中のアパタイトの他に、トナー島に分布する各種苦鉄質片麻岩 (角閃石苦鉄質片麻岩, 複輝石苦鉄質片麻岩, 黒雲母苦鉄質片麻岩) 中のアパタイトの組成と層状分化岩体とマンツルカンラン岩中のアパタイトの組成もプロットしてある。トナー島産のアパタイトのデータは本研究とOwada et al. (未公表), 層状分化岩体とマンツルカンラン岩中のアパタイトのデータはTribuzio et al. ⁹⁾とその中の文献による。

るが、苦鉄質片麻岩中のアパタイトはよりFに富む領域にプロットされる（第5図）。

4. アパタイトの起源

アパタイトはリン酸カルシウムを主成分とするリン酸塩鉱物で、結晶構造の中に(OH)⁻、F⁻およびCl⁻を含む。Tsuchiya¹⁰⁾は、西南北海道の松前深成岩体を例に、結晶作用の進行に伴うアパタイト中のFとClの組成変化を検討した。マグマの結晶作用の進行や圧力の減少によってH₂Oが飽和した場合、流体相の脱ガスが生じる。その場合、FやClにおける流体とメルトの分配からみてClは脱ガスしやすいので、アパタイト中にはClよりFが濃集する¹⁰⁾。つまり、アパタイトのFやCl量はマグマの脱ガス時期のよい指標となると同時に、マグマ中のH₂Oの飽和度についても示唆できることを明らかにした¹⁰⁾。しかし、アパタイト、流体相、気相および珩酸塩メルト間の(OH)、FおよびClに関する分配は判明しておらず、アパタイトの組成に関する定量的な議論については不明な点が多い¹¹⁾。

一方、層状分化岩体やマントルゼノリスに含まれるアパタイトのうち、流体相の関与が大きなものはClに富むことが知られている¹¹⁾。これは、ClがFより流体に入りやすく、流体の組成がClに富んでいたためと考えられている。第5図に示した層状分化岩体やマントルゼノリスのアパタイトで、流体相の関与が大きなものはClに富み、メルトから晶出したものはFに富む。たとえば、同じ岩体(Stillwater ComplexやBusveld Complex)でも、アパタイトのFとCl含有量は起源によって異なっている（第5図）。したがって、母岩や流体相の組成を考慮すれば、FやCl量からアパタイトの起源が推定できることになる。

トナー島の変成超苦鉄質岩中のカンラン石に含まれるアパタイトは、Fに富みメルトから晶出したアパタイトの領域にプロットされる。一方、苦鉄質片麻岩中のアパタイトは変成超苦鉄質岩のそれに比べてよりFに富む（第5図）。しかし、両岩石に含まれるアパタイトは産状が異なる。すなわち、苦鉄質片麻岩中アパタイトの組成は、鉱物粒間や黒雲母に包有された産状を示すのに対して、変成超苦鉄質岩中のものはカンラン石に包有され

ている。

トナー島産変成岩類のProgradeステージに形成された黒雲母や角閃石は、アパタイトと同様に高いF含有量で特徴づけられる¹²⁾。Tsunogae et al.¹²⁾は、苦鉄質片麻岩中のホルンブレンドと共存するアパタイトについて、FとClの分析を行った。それによれば、共存するホルンブレンドのF含有量が高くなるとアパタイト中のF量も高くなる。このことから、彼等はホルンブレンドやアパタイトの高いF含有量は原岩形成時の全岩化学組成に依存しているとした。このことは、今回示した苦鉄質片麻岩中のアパタイトの組成が原岩形成時のF量を反映したものであることを示唆する。しかし、黒雲母中にもFやClが含まれることから、黒雲母に包有されるアパタイトはFやClに関して再平衡に達していたと考えられる。また、鉱物粒間に存在するアパタイトについても変成作用時の流体と平衡であった可能性がある。したがって、苦鉄質片麻岩中のアパタイトは原岩形成時の組成をそのまま残しているとは考えにくい。それに対して、変成超苦鉄質岩中のアパタイトは、以下に述べるように変成作用時の流体と平衡でなかった可能性がある。

第4図で示したように変成超苦鉄質岩中のカンラン石や単斜輝石は非変成～変成コマチアイトの鉱物組成のトレンド上にプロットされる。このことは、カンラン石や単斜輝石の組成が変成作用時に再平衡に達していたことを示唆する。しかし、カンラン石に包有されるアパタイトはカンラン石結晶にブロックされて流体の影響をほとんど受けなかったと考えられる。また、このカンラン石はもともとPを含み、Caについてもほとんど含んでいない（第1表）。したがって、アパタイトは変成作用を受ける以前の組成を残している可能性がある。すなわち、変成超苦鉄質岩中のカンラン石に包有されるアパタイトは岩脈形成時にメルトから晶出し、その組成をほぼ凍結していると考えられる。

最近、世界の各地からホルンブレンドを含むコマチアイトが報告されてきた⁸⁾。Stone et al.⁸⁾によると、このようなホルンブレンドは変質や変成作用によって生じたのではなく、含水マグマから

晶出した初生的なものとされている。既述のように、変成超苦鉄質岩はホルンブレンドを含むことからH₂Oに富むマグマからもたらされたと考えられている⁶⁾。また、ここで述べたアパタイトの組成はFに富みClに乏しく、大陸に産する層状分化岩体のそれと同様の組成を示す(第5図)。これらのことは、アパタイトがH₂Oに飽和して脱ガスしたメルトから晶出し、Fに富むようになったことを示唆する。また、アパタイトはマントルにおけるLREEの貯留鉱物としても知られている。実際、変成超苦鉄質岩のREE組成はLREEに富んでいる⁶⁾。コマチアイト質マグマの成因については諸説あるが、前述の含水マグマやここで述べたようにアパタイト成分やLREEに富むfertileマントルの存在も今後検討する必要がある。

謝 辞 理学部地球科学教室の飯石一明教授には、EPMAの使用に際して便宜をはかっていただいた。同教室の亀井淳志博士には測定を手伝っていただくとともに、日常的に議論していただいた。また、岡山大学の小山内康人助教授と島根大学の角替敏昭助教授には本論文の内容について日頃から議論していただいた。以上の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) Black, L.P., Williams, I.S. and Compston, W. (1986), Four zircon ages from one rock: The history of a 3930 Ma-old granulite from Mount Sones, Antarctica. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 427-437.
- 2) 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. *BMR Bull.*, **223**, 51 p.
- 3) 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.
- 4) Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Tsunogae, T., Hokada, T. and Crowe, W.A. (1999), Geology of ultrahigh-temperature metamorphic rocks from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **12**, 1-28.
- 5) Ishizuka, H., Ishikawa, M., Hokada, T. and Suzuki, S. (1998), Geology of the Mt. Riiser-Larsen area of the Napier Complex, Enderby Land, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **11**, 154-171.
- 6) Owada, M., Osanai, Y., Toyoshima, T., Tsunogae, T., Hokada, T. and Crowe, W.A. (1999), Petrography and geochemistry of mafic and ultramafic rocks from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica: A preliminary report. *Polar Geosci.*, **12**, 87-100.
- 7) Owada, M., Osanai, Y., Tsunogae, T., Toyoshima, T., Hokada, T. and Crowe, W.A. (2000), LREE-enriched mafic and meta-ultramafic rock from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **13**, 86-102.
- 8) Stone, W.E., Deloule, E. and Larson, M.S. (1997), Evidence for hydrous high-MgO melt in the Precambrian. *Geology*, **25**, 143-146.
- 9) Rollinson, H. (1999), Petrology and geochemistry of metamorphosed komatiites and basalts from the Sula Mountains greenstone belt, Sierra Leone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**, 86-101.
- 10) Tsuchiya, N. (1986), Cl and F contents of apatite in the Matsumae plutonic rocks, southwestern Hokkaido, Japan – A useful indicator of vapor saturation –. *Jour. Japan Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **81**, 67-76.
- 11) Tribzio, R., Tiepolo, M. and Thirlwall, M. (2000), Origin of titaian pargasite in gabbroic rocks from the Northern Apennine

- ophiolites (Italy): Insights into the late-magmatic evolution of a MOR-type intrusive sequence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **176**, 281-293.
- 12) Tsunogae, T., Osanai, Y., Toyoshima, T., Owada, M., Hokada and Crowe, W.A. (2000), Fluorine-rich calcic amphiboles in ultrahigh-temperature mafic granulite from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica: Preliminary report. *Polar Geosci.*, **13**, 103-113.