

領家変成帯に産する高い初磁化率を示すアプライト岩脈

星 博幸*・太田貴子**

Aplite dikes with high initial magnetic susceptibility in the Ryoke Metamorphic Belt, Japan

Hiroyuki Hoshi* and Takako Ota**

(Abstract)

On the Nishiura Peninsula projecting into Mikawa Bay in central Japan, aplites with high initial magnetic susceptibilities occur as dikes intruding gneissose tonalites (belonging to the Kamihara Tonalite) and amphibolites of the Ryoke Metamorphic Belt. The susceptibilities range broadly from 10^{-5} to $10^{-1.5}$ SI (geometric mean = 0.55×10^{-3} SI) with a maximum of approx. 30×10^{-3} SI. Rock magnetic experiments demonstrate that the aplite dikes and the surrounding country rocks (tonalites and amphibolites) have ferromagnetic minerals; magnetite and/or pyrrhotite were magnetically detected in all the rock samples treated. The pyrrhotite possibly precipitated during hydrothermal activity in relation to the emplacement of the aplites, whereas the formation of the magnetite probably predates the pyrrhotite precipitation. The tonalites have magnetite even if their susceptibility values are lower than 3×10^{-3} SI, a widely used value to discriminate between magnetite-series and ilmenite-series granitoids.

はじめに

この論文の主題は、領家変成帯（領家帯）に産するアプライト岩脈の中に異常に高い初磁化率（初帯磁率）を示すものがあることを記載し、その原因について考察することである。

一般にアプライトの初磁化率は非常に低い。アプライトは 10^{-5} SI 程度かそれよりも低い初磁化率を示すことが多く（例えば、伊藤・星, 2011）、マイナスの値を示すこともある。アプライトの初磁化率が低いのは、磁鉄鉱に代表される強磁性鉱物がほとんど含まれていないためである。マイナスの初磁化率は石英や長石の反磁性に起因する（鉱物の初磁化率については Hunt et al., 1995 や中井, 2004 を参照）。

筆者らは、愛知教育大学における野外実習で愛知県

三河湾北岸の西浦半島（第1図）を訪ねた際、半島に露出する領家花崗岩類（領家研究グループ, 1972；西浦団研グループ, 1974；鈴木・三宅, 2006）の初磁化率を携帯型初磁化率計（Kappameter KT-9, 以下 KT-9 と呼ぶ）を使って測定してみた。測定は、半島全域に分布する花崗岩質岩（神原トータル岩）、それに貫入する岩脈状角閃岩、さらにそれらを非調和に切って発達するアプライト岩脈に対して行った。その測定により、筆者らはアプライト岩脈がその母岩の花崗岩質岩や岩脈状角閃岩よりも著しく高い初磁化率を示す場合があることを認めた。

領家帯花崗岩類の初磁化率データ（金谷・石原, 1973；Ishihara, 1979；大熊・金谷, 2004）を見ると、三河湾周辺では他の花崗岩類分布域よりもやや高い初磁化率が得られていることがわかる。これは西浦半島

*愛知教育大学自然科学系理科教育講座。Department of Earth Sciences, Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542, Japan.

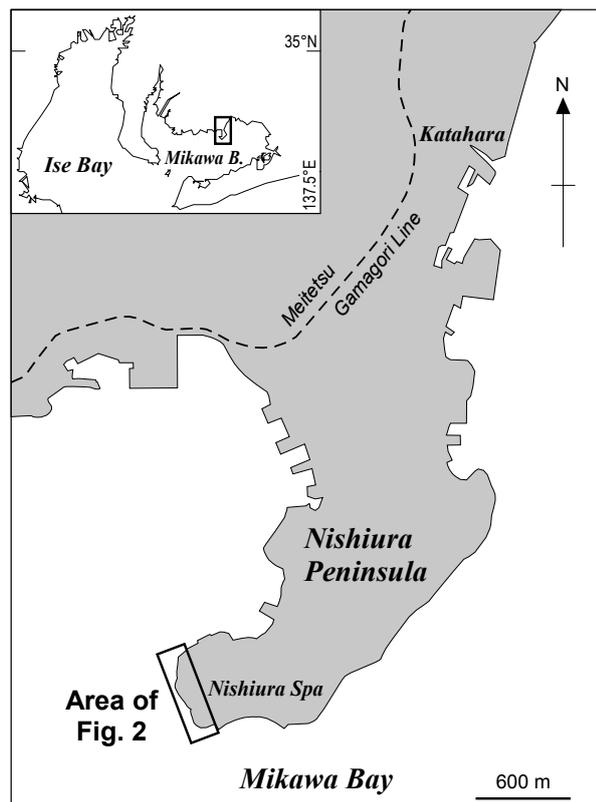
**愛知教育大学卒業生。Graduate, Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542, Japan.

原稿受付 2011年7月15日。Manuscript received Jul. 15, 2011.

原稿受理 2011年8月30日。Manuscript accepted Aug. 30, 2011.

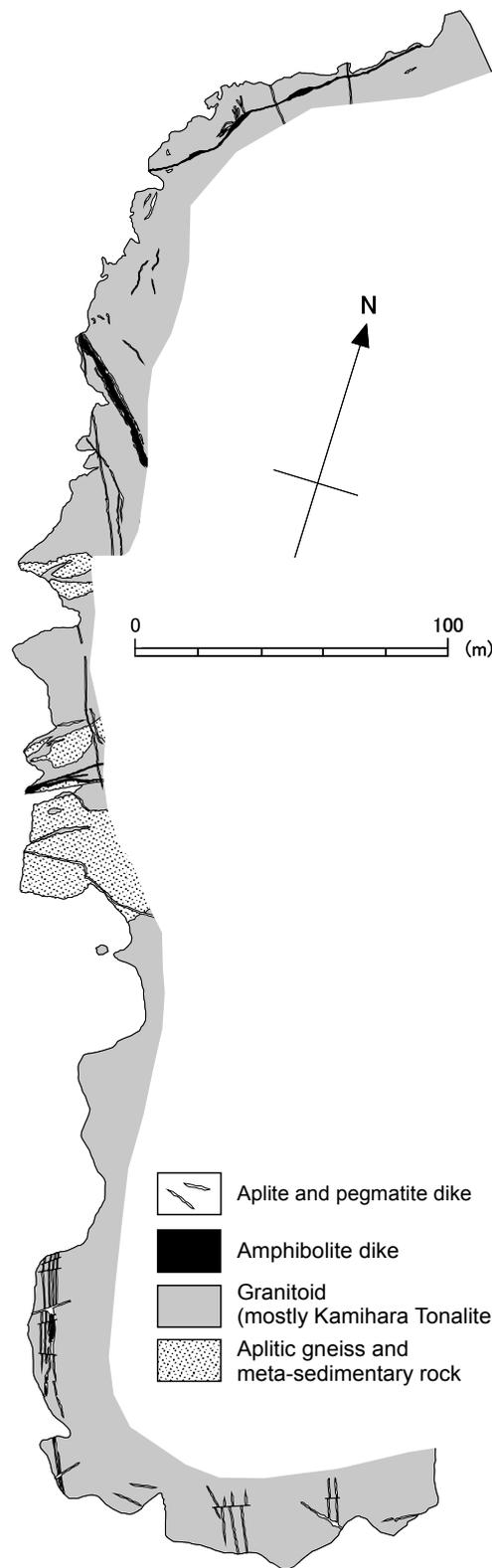
キーワード：領家変成帯、花崗岩類、初磁化率、岩石磁気、アプライト。

Key words : Ryoke Metamorphic Belt, granitic rocks, initial magnetic susceptibility, rock magnetism, aplite.

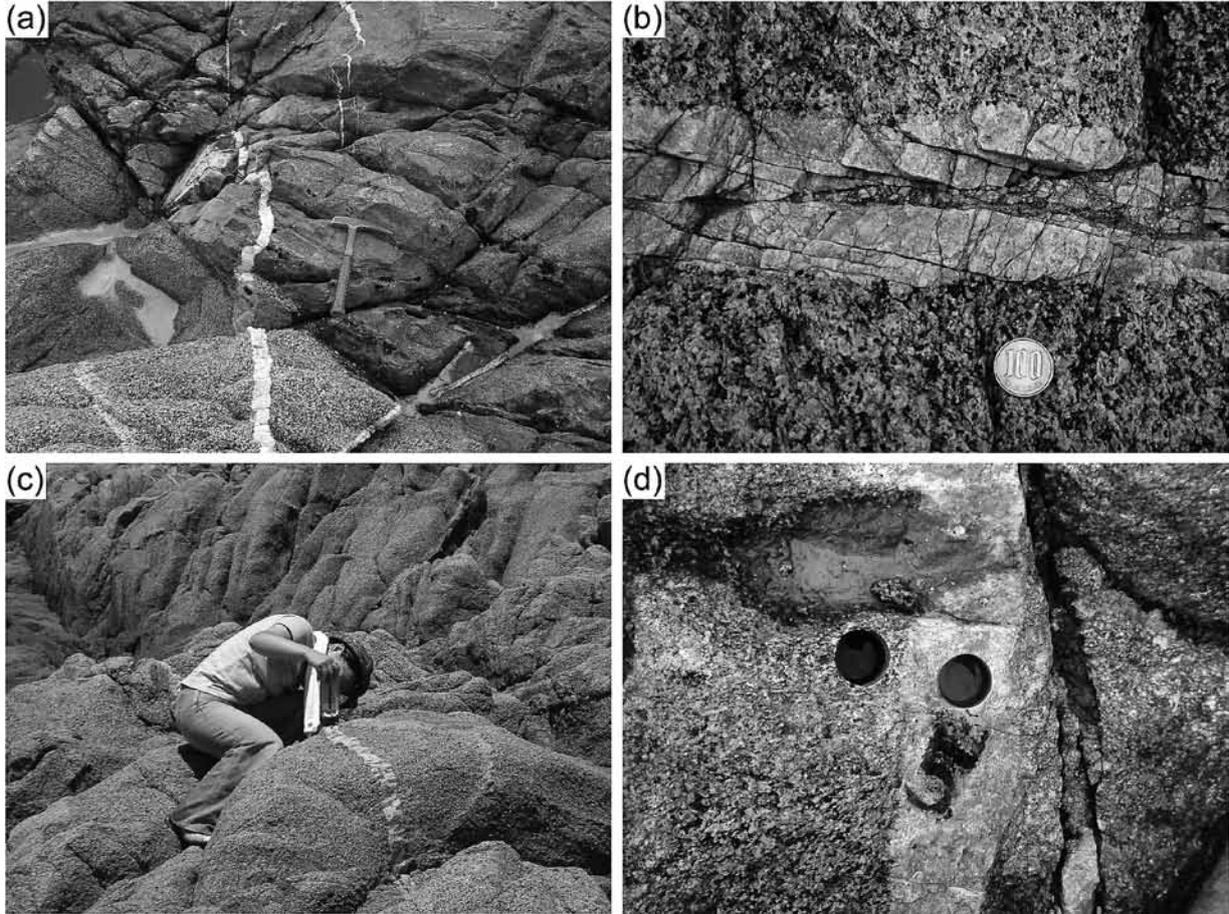


第1図. 西浦半島とその周辺の位置図.
 Fig. 1. Map showing the location of the Nishiura Peninsula and vicinity.

のアプライトが高い初磁化率を示すことと関係があるのだろうか？最近、伊藤・星（2011）は、三河湾北岸に分布する領家花崗岩類の初磁化率測定結果（KT-9を使用して露頭で測定）を報告した。それによると、神原トータル岩（古期領家花崗岩類の一種）や天竜峡花崗閃緑岩（同）、それにアプライト・ペグマタイトは、大部分の露頭で低い初磁化率（ $< 3 \times 10^{-3}$ SI）を示し、初磁化率の観点からは花崗岩類の大部分がチタン鉄鉍系（Ishihara, 1977）に属する可能性が高いようである。しかしながら、神原トータル岩の複数の露頭では磁鉄鉍系（Ishihara, 1977）を示唆する初磁化率（ $> 3 \times 10^{-3}$ SI）も計測された。この高い初磁化率の原因を探るためには、岩石磁気学的手法（例えば、Tauxe, 2010）による分析が有効と考えられるが、伊藤・星（2011）を含め過去の研究では初磁化率以外の磁氣的性質が検討されていない。そこで、西浦半島のアプライト岩脈および花崗岩類が高い初磁化率を示す理由を探るために、筆者らは西浦半島から岩石試料を採取し、岩石磁気測定を行った。



第2図. 調査地（西浦半島先端部）の地質図。西浦研グループ（1974）に基づく。
 Fig. 2. Simplified geologic map of the study area (at the tip of the Nishiura Peninsula, see Fig. 1) after Nishiura Research Group (1974).



第3図. 調査地のアプライト岩脈。(a) 神原トータル岩（写真左下）と岩脈状角閃岩（右上）を貫く新期アプライト岩脈。トータル岩と岩脈状角閃岩の境界面に対して非調和に貫入する。(b) 神原トータル岩に貫入する新期アプライト岩脈（クローズアップ）。一般的にアプライト岩脈には節理が発達。この写真では、貫入面に対して斜めに配列する雁行状の節理が見られる。アプライトは変質を受けている。(c) 新期アプライト岩脈の初磁化率を Kappameter KT-9 を用いて測定する筆者(T.O.)。(d) 新期アプライト岩脈と母岩（トータル岩）の試料採取跡。穴の直径は約 25 mm。

Fig. 3. Photographs of aplite dikes in the study area. (a) An aplite dike intruding both the Kamihara Tonalite (lighter-colored rock) and an amphibolite intrusion (darker-colored rock). The dike cuts obliquely the boundary between the tonalite and amphibolite. (b) An aplite dike intruding the Kamihara Tonalite. En echelon joints develop in this dike. (c) One of the authors (T.O.) is measuring the initial magnetic susceptibility of an aplite dike by using a field portable susceptibility meter (Kappameter KT-9). (d) Two rock cores 25 mm in diameter were taken from this site; one from an aplite dike and the other from the Kamihara Tonalite (country rock).

地質概説

西浦半島を含む三河湾北岸域の位置図を第1図に、同半島先端部（本研究の調査地）の地質図を第2図に示す。

調査地域には片状花崗岩質岩（西浦団研グループ、1974の片麻状石英閃緑岩に相当）が広く分布する。その他、アプライト質片麻岩、準片麻岩（堆積岩源片麻岩）、岩脈状角閃岩、中期および古期アプライト岩脈、新期アプライト岩脈、新期ペグマタイト岩脈などが識別されている（西浦団研グループ、1974；鈴木・三宅、2006）。

アプライト岩脈は、変形の様子などから、いくつか

の種類が識別されている。西浦団研グループ（1974）の中期および古期アプライト岩脈は、露頭で複雑な形状を示し、アプライト岩脈中にも母岩（片状花崗岩質岩）と調和的な片状構造が見られる。これらの岩脈は調査地域北部に特に多く認められる。それに対し、西浦団研グループ（1974）の新期アプライト岩脈は直線的な形状を示し（第3図）、母岩の片状構造を切っていることが多く、岩脈中には片状構造が認められない。新期アプライト岩脈は半島のほぼ全域に発達し、走向・傾斜がよく揃っている（一般走向NNW）。

アプライト岩脈の母岩である花崗岩質岩は、中粒ないし粗粒の角閃石黒雲母トータル岩からなり、明瞭な片状構造を示す。この岩石は神原トータル岩に属

するとされている（領家研究グループ, 1972）。模式地（長野県下伊那郡天龍村神原）付近に分布する神原トータル岩からは、約 95 Ma の CHIME モナザイト年代が報告されている（Nakai and Suzuki, 1996; Suzuki and Adachi, 1998）。西浦半島からの年代の報告はない。

西浦団研グループ（1974）、鈴木・三宅（2006）によると、岩脈状角閃岩は細粒ないし中粒の優黒色質岩であり、トータル岩活動時のシンプルトニック岩脈である。原岩はソレアイト質玄武岩と考えられている。岩脈は少なくとも 3 枚あり、そのうち 2 枚は母岩（花崗岩質岩）の片状構造と調和的な方向に伸び、1 枚は非調和な方向に伸びている。非調和な方向に貫入している岩脈については西浦団研グループ（1974）が詳しく記載している。

片状花崗岩質岩に含まれる苦鉄質包有岩は半島全域で見ることができ、特に半島中部～南部において量が多い。帯状に集中して分布しているところもある。苦鉄質包有岩には、鉱物が比較的粗粒で色指数の大きい岩石、中粒から細粒で色指数の比較的小さい岩石などがある。顕微鏡下での性質や化学的性質は岩脈状角閃岩（上記）と類似する（鈴木・三宅, 2006）。

調査地域ではアプライト質片麻岩や堆積岩源片麻岩も認められる。アプライト質片麻岩は半島の中部、堆積岩源片麻岩は中部および北部に分布する。いずれも片麻状構造を示す細粒～中粒変成岩である。これらは片状花崗岩質岩中に構造がほぼ調和的な板状、レンズ状の岩体として産し、花崗岩質岩中の捕獲岩体である（西浦団研グループ, 1974）。

露頭での初磁化率測定

1) 方法

調査地域に分布する岩石の初磁化率を、KT-9 を使用して露頭で測定した（第 3 図 c）。KT-9 は懐中電灯のような形をしており、測定部は 10 kHz の LC 発振回路とコイルからなる（KT-9 の詳細については星・亀井, 2003 を参照）。測定は、アプライト・ペグマタイト岩脈とその母岩（神原トータル岩、岩脈状角閃岩）、および神原トータル岩中の苦鉄質包有岩に対して、合計 315 地点で行った。1 地点で 10 回測定を行い、平均値をその地点の初磁化率とした。測定誤差を小さくするために、測定は可能な限り平滑な露頭面を選んで行った。

2) 結果

各地点の測定結果を第 4 図に示す。この図には岩石種にかかわらず各地点の初磁化率（平均値）を示しているが、調査地域内での明瞭な傾向や系統的变化は認められない。なお、多くの地点において標準偏差は平均値の 10% 以内に収まったが、低い初磁化率の地点では 20% を超えることがあった。

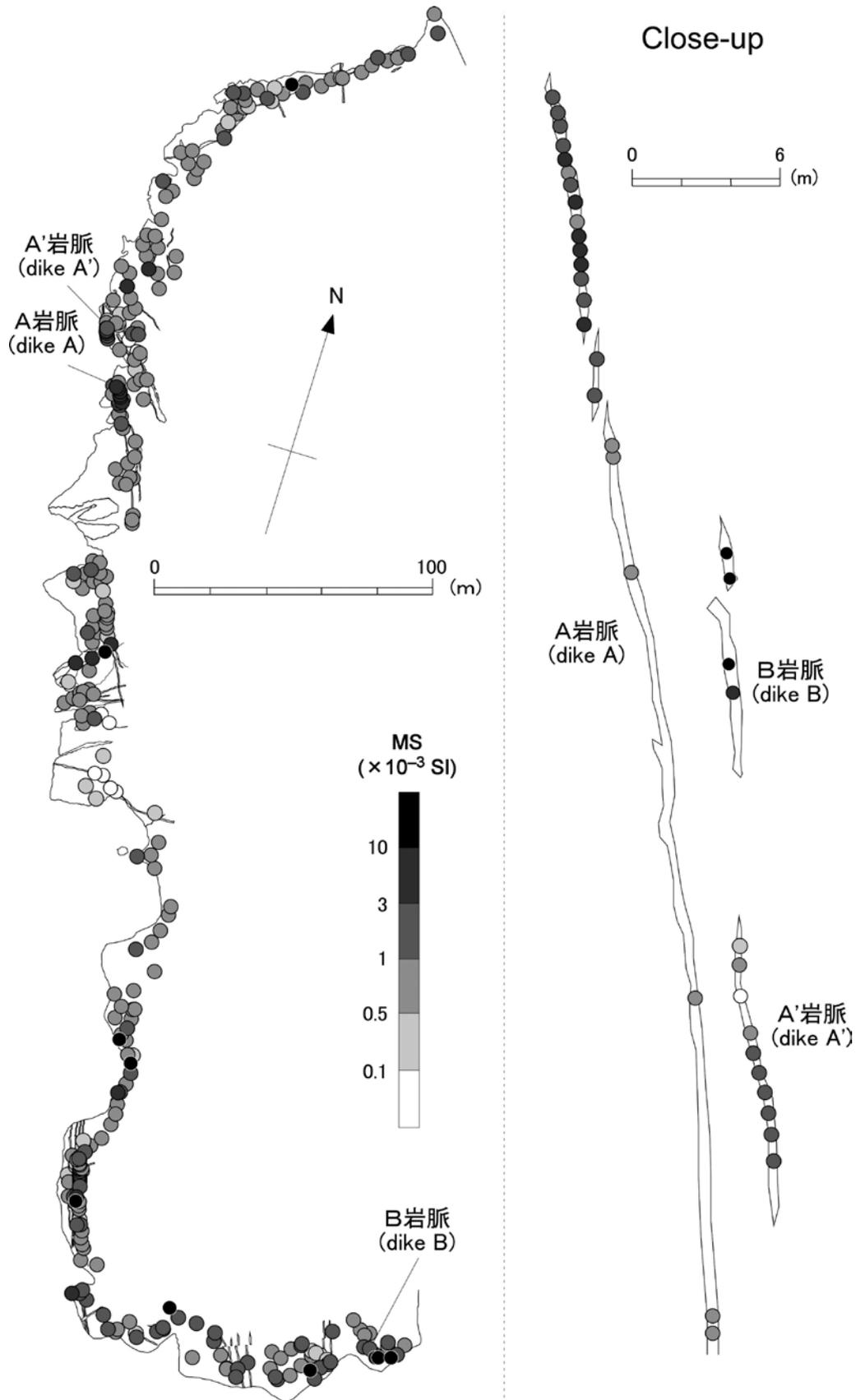
岩石種毎に作成した初磁化率のヒストグラムと累積度数曲線を第 5 図に、統計のまとめを第 1 表にそれぞれ示す。第 5 図の横軸は初磁化率の常用対数である。縦軸は左側が地点数ヒストグラム、右側が累積度数であり、いずれもパーセント表示である。以下、岩石種毎に測定結果の概要を記す。

アプライト・ペグマタイト：露頭で測定した初磁化率は、最小値が 0.02×10^{-3} SI、最大値が 25.2×10^{-3} SI であり、4 桁にもわたる幅広い分布を示した。測定値は対数正規分布に近い形を示し、幾何平均は 0.55×10^{-3} SI となった。この幾何平均は、伊藤・星（2011）が愛知県幡豆郡吉良町および幡豆町（現在はいずれも西尾市に編入合併）から得た結果（第 1 表）と比べて 1 桁大きい。測定した 108 地点のうち約 11% にあたる 12 地点で、 3×10^{-3} SI（第 5 図の $10^{0.5} \times 10^{-3}$ SI にほぼ相当）よりも高い初磁化率が得られた。特に、3 枚のアプライト岩脈で比較的高い値が計測され、それらを以下では A 岩脈および A' 岩脈（いずれも新期アプライト岩脈）、B 岩脈（中期・古期アプライト岩脈）と呼ぶことにする（第 4 図）。これらの岩脈内では一様に高い初磁化率が計測されたわけではなく、測定地点によってかなりのばらつきがある（第 4 図右側）。なお、伊藤・星（2011）の測定では、アプライト・ペグマタイト岩脈から 3×10^{-3} SI を超えるような高い値は得られていない（最大値 0.22×10^{-3} SI）。

神原トータル岩：最小値は 0.21×10^{-3} SI、最大値は 25.5×10^{-3} SI であり、最大値はアプライト・ペグマタイトと同程度であるが、 3×10^{-3} SI よりも高い値は 145 地点中わずか 3 地点（2%）だけであった。幾何平均は 0.76×10^{-3} SI となり、これもアプライト・ペグマタイトと大きな違いはないが、値の分布は比較的狭い（対数の標準偏差が小さい）。

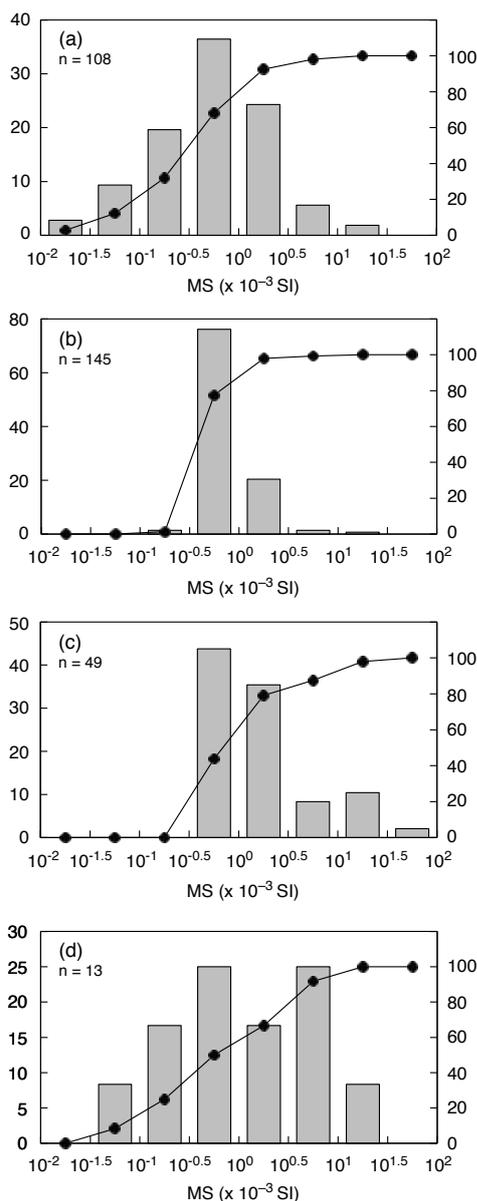
岩脈状角閃岩・トータル岩中の苦鉄質包有岩：今回測定した岩石のうち、全体的に最も高い初磁化率を示したタイプである（幾何平均 1.67×10^{-3} SI）。最小値は 0.42×10^{-3} SI、最大値は 110×10^{-3} SI に達した（苦鉄質包有岩）。

アプライト質片麻岩・堆積岩源片麻岩：最小値は 0.10



第4図. 露頭で測定した初磁化率(平均値). A岩脈とA'岩脈は西浦団研グループ(1974)の新期アプライト岩脈に, B岩脈は中期・古期アプライト岩脈に属する.

Fig. 4. Map showing site mean initial magnetic susceptibilities (MS).



第5図. 岩石種別にまとめた初磁化率（露頭測定値）のヒストグラムと累積度数曲線（いずれも%）。横軸が対数表示であることに注意。(a)アプライトおよびペグマタイト、(b)神原トータル岩（苦鉄質包有岩を除く）、(c)岩脈状角閃岩およびトータル岩中の苦鉄質包有岩、(d)アプライト質変成岩および堆積岩源変成岩。統計量については第1表を参照。

Fig. 5. Histograms and cumulative curves of initial magnetic susceptibilities (MS) for (a) aplite and pegmatite dikes, (b) Kamihara Tonalite (excluding mafic enclaves), (c) amphibolite dikes and mafic enclaves in tonalites, and (d) aplitic gneisses and meta-sedimentary rocks. See Table 1 for summary statistics.

$\times 10^{-3}$ SI, 最大値が 12.3×10^{-3} SI であり, かなり広い分布を示した (検討した4岩石種のうち, 対数の標準偏差が最大). 片麻岩が広い初磁化率分布を示すのは, 伊藤・星 (2011) の結果と共通している. 幾何平均は 0.92×10^{-3} SI であった.

岩石磁気測定

1) 方法

アプライト・ペグマタイト岩脈のうち, 露頭測定で比較的高い初磁化率が得られた A 岩脈, A' 岩脈, B 岩脈 (いずれもアプライト) とそれらの母岩 (神原トータル岩, トータル岩中の苦鉄質包有岩, 岩脈状角閃岩) から岩石試料を採取した. 採取には夏原技研製エンジンドリルを使用し, 直径 25 mm のコアを採取した (第3図 d). コアは, A 岩脈では初磁化率が比較的高い3地点と比較的低い2地点から, A' 岩脈では初磁化率が低い2地点から, B 岩脈では初磁化率が高い4地点からそれぞれ採取した. 隣接する母岩からもコアを採取した. コアは実験室に持ち帰り, 岩石カッターを用いて高さ約 23 mm の円筒形試料 (以下, 試料と呼ぶ) を切り出した.

試料に含まれる強磁性鉱物の種類を検討するために, いくつかの岩石磁気測定を行った. 測定はすべて愛知教育大学で実施した.

初磁化率測定: すべての試料について, Bartington MS2 磁化率計 (センサーは MS2B) を使用して初磁化率を測定した.

等温残留磁化 (isothermal remanent magnetization: IRM) の段階着磁実験: 試料を 100 mT (回転法) で交流消磁後, 試料に 10, 20, 30..., 1600 mT (1.6 T) と段階的に強い静磁場を加えて IRM を着磁し, IRM が増加する様子を調べた. 交流消磁には夏原技研製 DEM-95C (コントローラー) と Schonstedt GSD-5 (コイル) を組み合わせたシステムを, IRM 着磁にはトーキン製水冷電磁石を, IRM 測定には夏原技研製 ASPIN スピナー磁力計をそれぞれ使用した.

3成分IRMの段階熱消磁実験: Lowrie (1990) に従い, 試料の直交3方向 (x, y, z) にそれぞれ 1.6 T, 0.4 T, 0.12 T の静磁場で IRM を着磁し, それらを hard (H) 成分, medium (M) 成分, soft (S) 成分とした. 3成分を室温で測定後, 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 480, 510, 540, 560, 580, 600℃ と段階的に消磁温度を上げ, 3成分IRMの強度変化を調べた. 一部の試料についてはさらに 620, 640..., 700℃ の熱消磁も行った. 熱消磁は

第1表. 初磁化率測定データ（露頭での測定値）のまとめ.

Table 1. Summary of initial magnetic susceptibilities measured in the field.

Rock type	Ns	Min (10^{-3} SI)	Max (10^{-3} SI)	GM (10^{-3} SI)	Min (10 Log)	Max (10 Log)	LM	LSD
This study								
Aplite, pegmatite	108	0.02	25.2	0.55	-1.80	1.40	-0.26	0.62
Kamihara Tonalite	145	0.21	25.5	0.76	-0.68	1.41	-0.12	0.25
Amphibolite dike, mafic enclave in tonalite	49	0.42	110	1.67	-0.38	2.04	0.22	0.49
Aplitic gneiss, meta-sedimentary rock	13	0.10	12.3	0.92	-1.02	1.09	-0.04	0.76
<i>Data reported by Ito and Hoshi (2011)</i>								
	(Nm)							
Aplite, pegmatite	(22)	0.01	0.22	0.04	-2.00	-0.66	-1.41	0.31
Kamihara Tonalite	(1653)	0.09	45.7	1.12	-1.05	1.66	0.05	0.50
Mafic enclave	(312)	0.28	56.7	2.16	-0.55	1.75	0.33	0.60
Metamorphic rock (gneiss)	(395)	0.06	94.0	1.61	-1.22	1.97	0.21	0.86

Ns, number of sites; Nm, number of measurements; Min, minimum value; Max, maximum value; GM, geometric mean; LM, logarithmic mean; LSD, standard deviation of logarithmic data.

Initial magnetic susceptibilities were measured in the field with a Kappameter KT-9.

Schonstedt TSD-1 熱消磁装置を使用して空気中で行った。

2) 結果および強磁性鉱物の解釈

3枚のアプライト岩脈 (A, A', B) とそれらに隣接する母岩 (神原トータル岩, 岩脈状角閃岩) から得られた結果を第6図に示す。この図には10地点の結果が示されているが、各地点の結果 (3つのグラフ) のうち左のグラフはIRM段階着磁の結果である (縦軸はIRM最大値を100%として規格化したIRM強度, 横軸は静磁場強度で単位はT)。中央と右のグラフは、それぞれアプライトとその母岩の3成分IRM段階熱消磁結果であり、縦軸はIRM (arbitrary scale), 横軸は消磁温度 (°C) を示す。

測定した試料の初磁化率は、最小値が 0.01×10^{-3} SI (Ap-A'-10), 最大値が 31.3×10^{-3} SI (Ap-B-1) であり、いずれもアプライト試料であった。

測定したすべての試料はIRMを獲得した。これは試料中に強磁性鉱物が含まれていることを示す。

A岩脈とB岩脈の試料のIRM段階着磁結果は、これらの試料に含まれる強磁性鉱物の保磁力が比較的低いことを示す。これらの試料では、約100 mTまでにIRMが急激に立ち上がり、200 ~ 300 mT付近で飽和IRM (saturation IRM) に達した。両岩脈に隣接する母岩 (トータル岩) から得られたIRM段階着磁結果も、これらのアプライト岩脈と同様、強磁性鉱物が比較的低保磁力であることを示す。これらの岩脈と母岩からは、赤鉄鉱や針鉄鉱などの高保磁力鉱物の存在を示す結果は得られなかった。

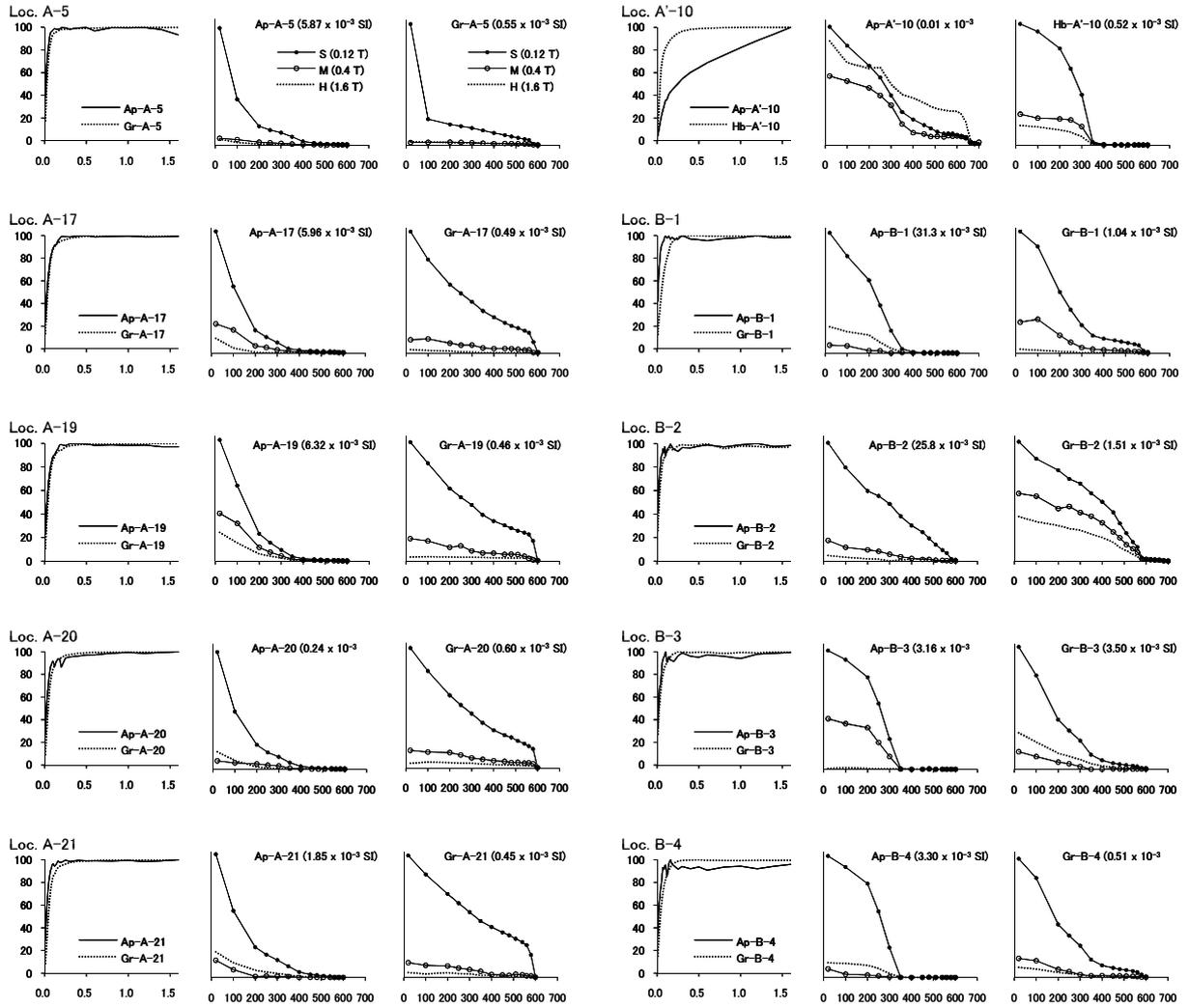
A, B両岩脈および隣接母岩 (トータル岩) から得

られた3成分IRMの段階熱消磁結果は、大きく次のタイプに分類することができる。

- ・タイプ I a: A岩脈のアプライト試料がこのタイプに属する。S成分がすべての温度ステップ (室温を含む) で最も大きく、全体としては高温側に尾を引くような (指数関数的に減衰するような) 消磁曲線を示したタイプである。詳しく見ると、S成分には400°C付近に屈曲が認められ、この温度付近でアンブロックされる低保磁力の強磁性鉱物が含まれていると判断できる (試料によってはM成分とH成分にも同温度付近でのアンブロッキングが見られる)。400°C付近で磁化が消失する低保磁力鉱物として、ウルボスピネル組成比0.3程度のチタン磁鉄鉱 ($0.3\text{Fe}_2\text{TiO}_4 \cdot 0.7\text{Fe}_3\text{O}_4$) が推定される。縦軸を対数表示にしてS成分の減衰を見ると (第7図)、このチタン磁鉄鉱に加え560 ~ 600°Cにも顕著なアンブロッキングが認められ、磁鉄鉱 (Fe_3O_4) と判断できる。

- ・タイプ I b: A岩脈の母岩 (トータル岩) 試料およびB岩脈の地点B-2の試料 (アプライト, トータル岩の両方) がこのタイプに属する。S成分がすべての温度ステップで最も大きいことはタイプ I aと同じだが、消磁曲線は560 ~ 600°Cの間で急減するような形を示し、磁鉄鉱を明確に示している。試料 Gr-B-2ではM成分とH成分もかなり大きく、磁鉄鉱の保磁力分布 (粒子サイズ分布?) が広い。本タイプの試料では強磁性鉱物として磁鉄鉱が支配的であることは疑いないが、試料 Gr-A-21ではM成分とS成分に400°C付近の僅かな屈曲 (チタン磁鉄鉱を示唆?) も認められる。

- ・タイプ II: B岩脈のアプライト試料 (タイプ I bのAp-B-2を除く) がこのタイプに属する。S成分が最も



第6図. アプライト岩脈と隣接母岩の岩石磁気実験結果. 試料はA岩脈5地点(A-5, 17, 19, 20, 21), A'岩脈1地点(A'-10), B岩脈4地点(B-1, 2, 3, 4)から採取. Ap, アプライト; Gr, 花崗岩質岩(トータル岩); Hb, 岩脈状角閃岩. 各地点の結果を次の3つのグラフに示した.

左: IRM段階着磁実験. 縦軸はIRM最大値を100%として規格化したIRM強度. 横軸は静磁場強度(単位T).

中央と右: アプライト(中央)と母岩(右)に対する3成分IRM段階熱消磁実験. 縦軸はIRM強度(arbitrary scale). 横軸は消磁温度(単位°C). シンボルについては地点A-5のグラフを参照. 括弧内の数値はBartington MS2磁化率計で計測された初磁化率.

Fig. 6. Rock magnetic experimental results for aplite dikes and country rocks. Rock samples analyzed were collected from five sites of "dike A" (A-5, 17, 19, 20, 21), one site of "dike A'" (A'-10), and four sites of "dike B" (B-1, 2, 3, 4). Ap, aplite; Gr, granitoid (tonalite); Hb, amphibolite dike. Results from each site are shown in the following three plots.

Left: Stepwise acquisition of isothermal remanent magnetization (IRM). The vertical axis is the normalized IRM (ratio of IRM at each acquisition step to the maximum IRM, %), and the horizontal axis is the applied magnetic field (T).

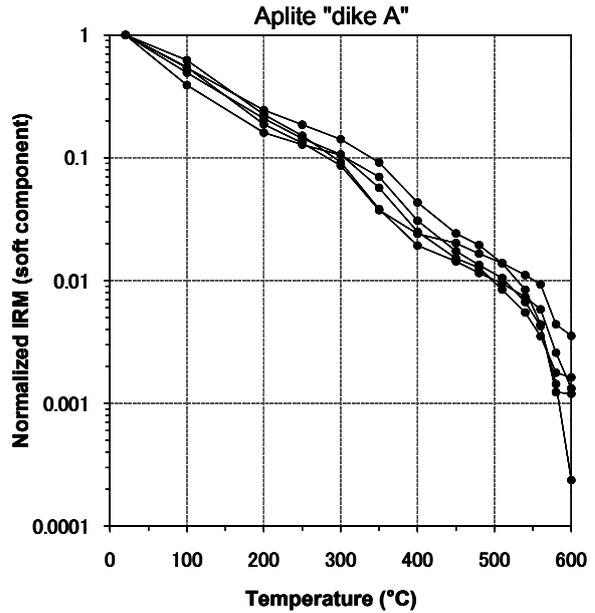
Center and right: Stepwise thermal demagnetization of three-component (composite) IRM for aplite (center) and the country rock (right). The vertical axis is the IRM intensity (arbitrary scale), and the horizontal axis is the demagnetization temperature (°C). Initial magnetic susceptibilities measured with a Bartington MS2 meter are given in parenthesis.

大きく、試料によってはM成分やH成分も無視できない大きさであるが、いずれの成分も鈞鐘型（右上に凸）の減衰曲線を示し、300～350℃の間でアンブロックされた。この消磁結果は、主要な強磁性鉱物が磁硫鉄鉱であることを示す。

・タイプI b + II : B岩脈の母岩試料（トータル岩、タイプI bのGr-B-2を除く）は、タイプI bとタイプIIの組み合わせになっているように見える。例えば試料Gr-B-4では、300～350℃の間で3成分のアンブロッキングが認められ（S成分は200～350℃で鈞鐘型の曲線）、磁硫鉄鉱の存在が強く疑われる。350℃以上ではS成分が残り（M成分とH成分は実質的に消滅）、それは560～600℃の間で急減したことから、磁化の担い手が磁鉄鉱であることは疑いない。つまり、組み合わせ型（タイプI b + タイプII）の試料には磁鉄鉱と磁硫鉄鉱の両方が含まれていると判断できる。

もう1枚のアプライト岩脈であるA'岩脈の試料Ap-A'-10は、非常に低い初磁化率を示した（ 0.01×10^{-3} SI）。岩石磁気実験結果はやや複雑であり（第6図）、磁氣的性質がA、B岩脈と大きく異なる。IRM段階着磁では、低磁場での急激な立ち上がり、その後（ > 200 mT）の緩やかな増大が確認され、1.6 Tでも飽和IRMに達しなかった。この結果は低保磁力の強磁性鉱物に加えて高保磁力鉱物も含まれていることを示す。3成分IRMの段階熱消磁結果からは、Tiを僅かに含むチタン赤鉄鉱（3成分、特にH成分の660℃付近における急減）、磁硫鉄鉱（300～350℃におけるM成分とS成分の屈曲）、およびチタン磁鉄鉱（500℃付近のS成分の屈曲）が推定される。IRM段階着磁で見られた高保磁力鉱物はチタン赤鉄鉱と判断できる。一方、A'岩脈の母岩試料Hb-A'-10（岩脈状角閃岩、初磁化率 0.52×10^{-3} SI）からは、A、B両岩脈の「タイプII」と同じく磁硫鉄鉱を示す結果が得られ、A'岩脈で推定されたチタン赤鉄鉱やチタン磁鉄鉱を示すサインは検出されなかった。

神原トータル岩に含まれる苦鉄質包有岩から採取した2試料（Dark-3, -4）の結果を第8図に示す。これら2試料の初磁化率（ 2.16×10^{-3} SI, 1.11×10^{-3} SI）は、岩脈状角閃岩・苦鉄質包有岩（第1表、第5図）の平均的な値であった。これらの試料は、A、B両岩脈の「タイプI b + II」と同様の岩石磁気実験結果を示し、主要な強磁性鉱物として磁鉄鉱と磁硫鉄鉱が推定される。

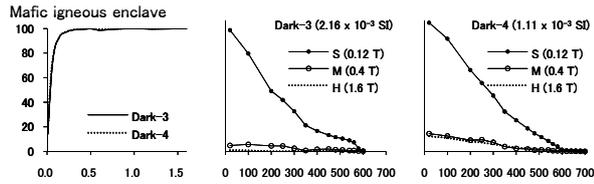


第7図. アプライトA岩脈の試料に対する3成分IRMのsoft (S)成分の熱消磁曲線。縦軸が対数表示であることに注意。
Fig. 7. Thermal demagnetization curves of the soft component of composite IRM for aplite "dike A".

考 察

IRMを利用した磁気測定（第6図）により、測定したすべてのアプライト試料に強磁性鉱物が含まれることが明らかになった。A、B両アプライト岩脈に含まれる強磁性鉱物の種類に基づくと、強磁性鉱物が「主に磁鉄鉱（±チタン磁鉄鉱）」（タイプI a, I b）と「主に磁硫鉄鉱」（タイプII）というエンドメンバーがありそうである。A岩脈の試料は前者に属し、B岩脈の試料の多く（試料Ap-B-2を除く）は後者に属する。試料Ap-B-2は前者（主な強磁性鉱物は磁鉄鉱）に属するが、S成分の熱消磁曲線からは磁硫鉄鉱の存在も示唆される。一方、A'岩脈の試料Ap-A'-10は、上記のようにチタン磁鉄鉱、チタン赤鉄鉱、磁硫鉄鉱の存在を示唆する複雑な結果を示し、どちらのグループにも属さないと考えるべきであろう。試料Ap-A'-10は初磁化率が 0.01×10^{-3} SIと低く（むしろ、他のアプライト試料の初磁化率が高いと言うべきか）、その点でもA、B両岩脈のアプライト試料とは異なる。

また、今回の磁気測定により、アプライト岩脈の母岩をなす神原トータル岩および岩脈状角閃岩にも強磁性鉱物が含まれることが明らかになった。初磁化率の大小にかかわらず、神原トータル岩に磁鉄鉱が含ま



第8図. 神原トータル岩に含まれる苦鉄質包有岩2試料(Dark-3, -4)の岩石磁気実験結果.

左: IRM 段階着磁実験. 縦軸は IRM 最大値を 100% として規格化した IRM 強度. 横軸は静磁場強度 (単位 T).

中央と右: Dark-3 (中央) と Dark-4 (右) に対する 3 成分 IRM 段階熱消磁実験. 縦軸は IRM 強度 (arbitrary scale). 横軸は消磁温度 (単位°C). 括弧内の数値は Bartington MS2 磁化率計で計測された初磁化率.

Fig. 8. Rock magnetic experimental results for two mafic enclave samples (Dark-3, -4) from the Kamihara Tonalite.

Left: Stepwise acquisition of IRM. The vertical axis is the normalized IRM (%), and the horizontal axis is the applied magnetic field (T).

Center and right: Stepwise thermal demagnetization of composite IRM for Dark-3 (center) and Dark-4 (right). The vertical axis is the IRM intensity (arbitrary scale), and the horizontal axis is the demagnetization temperature (°C). Initial magnetic susceptibilities measured with a Bartington MS2 meter are given in parenthesis.

れていることは、岩石磁気実験結果 (第6図) から間違いない。この結果は、単純に初磁化率のある値をもって「磁鉄鉱を含む、含まない」と判断することができないことを意味する。花崗岩類の磁鉄鉱系/チタン鉄鉱系 (Ishihara, 1977) を分類する一つの簡便な目安として、初磁化率 3×10^{-3} SI という値がよく使われている (例えば, Ishihara, 1990)。その程度の初磁化率を境にして経験的に磁鉄鉱系/チタン鉄鉱系を区別できることについて異論を唱えるわけではないが、 3×10^{-3} SI よりも低い初磁化率であっても決して磁鉄鉱を含まないというわけではないことに注意する必要がある。ここでは、初磁化率が 3×10^{-3} SI より 1 桁低いトータル岩試料が磁鉄鉱の明確な証拠 (磁鉄鉱のキュリー点) を示したという事実 (A 岩脈の結果: 第6図) を強調しておく。

アプライト岩脈の主な強磁性鉱物が磁硫鉄鉱である場合、それに隣接するトータル岩 (母岩) 中にも磁硫鉄鉱が含まれている (B 岩脈の試料)。逆に、アプライト岩脈に磁硫鉄鉱のサインが見られない場合は、隣接するトータル岩にも磁硫鉄鉱のサインは認められない (A 岩脈の試料)。この事実、磁硫鉄鉱がアプライト貫入に伴う局所的な熱水活動に関連して生じた

ことを示唆する。

一方、アプライト岩脈の磁硫鉄鉱の有無にかかわらず、隣接するトータル岩には磁鉄鉱が含まれている。この事実は、磁硫鉄鉱の生成 (地質学的にはアプライト形成とほぼ同時と推定される) よりも先にトータル岩中に磁鉄鉱が生成されていたことを示唆する。岩石磁気データからは、磁鉄鉱がマグマ冷却時に生成した初生鉱物であるのか、それとも岩石形成後に苦鉄質ケイ酸塩鉱物の変質によって生じた二次的鉱物であるのかは判断できない。これを検討するには、電子顕微鏡観察を含む岩石学的・鉱物学的研究が必要である。しかし、初生鉱物であっても二次的生成物であっても、トータル岩中の磁鉄鉱がアプライト岩脈形成時 (白亜紀後期の領家帯火成活動時であることは疑いない) よりも先に存在していたならば、その磁鉄鉱は白亜紀後期の古地磁気情報を熱残留磁化あるいは化学残留磁化の形で記録している可能性がある。

まとめると、西浦半島に見られるアプライト岩脈と花崗岩類が部分的に高い初磁化率を示すのは、岩石形成時あるいは形成後に生じた強磁性鉱物が多く含まれているためと考えられる。強磁性鉱物が主に磁硫鉄鉱の場合、熱水活動によって磁硫鉄鉱が生じた可能性が考えられ、高い初磁化率は岩石 (あるいはマグマ) 本来の性質に起因するものではないと考えられる。一方、強磁性鉱物が主に磁鉄鉱である場合は、それが初生鉱物である可能性と二次的鉱物である可能性の両方があり、現段階では岩石 (あるいはマグマ) 本来の性質に起因するのかどうかは結論を出せない。黒雲母や角閃石の変質により微細な磁鉄鉱が生じることはよくあり、岩石磁気学的には単磁区や擬似単磁区サイズの磁鉄鉱として検出されることがある (例えば, Otofujii et al., 2000)。A 岩脈の母岩のトータル岩 (タイプ I b) で検出された磁鉄鉱も、 580°C 付近で磁化が急減するという IRM 熱消磁曲線の形 (第6図) から、細粒 (単磁区あるいは擬似単磁区サイズ) であることが疑われる。今後、磁鉄鉱の起源を探る研究が必要である。また、アプライトやバグマタイトを伴わず変質も受けていない神原トータル岩について岩石磁気学的研究を行い、その結果と今回の西浦半島の結果を比較検討することも必要である。

結 論

- 1) 西浦半島におけるアプライト・ペグマタイト岩脈の初磁化率は、 $10^{-5} \sim 10^{-1.5}$ SI (4桁) にわたる幅広い分布を示した(幾何平均 0.55×10^{-3} SI)。アプライトでは部分的に高い初磁化率 ($> 3 \times 10^{-3}$ SI) が計測され、個別試料測定では 30×10^{-3} SI を超えるものも認められた。
- 2) 岩石磁気実験を行ったすべてのアプライト試料と母岩試料(神原トータル岩, 岩脈状角閃岩)には強磁性鉱物が含まれている。アプライトとトータル岩が部分的に高い初磁化率を示すのは、岩石形成時あるいは形成後に生じた強磁性鉱物が多く含まれているためと考えられる。強磁性鉱物が磁硫鉄鉱の場合、アプライト形成に伴う局所的な熱水活動に関連して生成した可能性が高い。強磁性鉱物が磁鉄鉱の場合、磁鉄鉱は磁硫鉄鉱の生成よりも先に生成されていたと推定される。
- 3) 神原トータル岩には、初磁化率の大小にかかわらず磁鉄鉱が含まれる。初磁化率が 3×10^{-3} SI (花崗岩類の磁鉄鉱系/チタン鉄鉱系の区分の目安として使われる値) より低くても磁鉄鉱が含まれており、初磁化率のある値をもって磁鉄鉱の有無を論じることができない。

謝 辞

愛知教育大学の三宅 明教授には、西浦半島の岩石および領家帯全般についてご教示頂いた。名古屋大学の諏訪兼位名誉教授および星野光雄名誉教授には、西浦半島の岩石学研究について貴重な情報を頂いた。査読者から頂いた建設的なコメントは、本論文の改善に大きく役立った。以上の方々に深く感謝します。本研究の一部は科研費(基盤(C), no. 23540532)によった。

引用文献

- 星 博幸・亀井春美, 2003. 陸上に露出する無層理堆積物の初磁化率(帯磁率)による対比: 静岡県, 更新統佐浜泥部層の例. 地質雑, **109**: 697-709.
- Hunt, C. P., Moskowitz, B. M. and Banerjee, S. K., 1995. Magnetic properties of rocks and minerals. In Ahrens, T. J. (ed.), *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants, Vol.3*, Amer. Geophys. Union, Washington, DC, 189-204.
- Ishihara, S., 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks.

Mining Geol., **27**: 293-305.

- Ishihara, S., 1979. Lateral variation of magnetic susceptibility of the Japanese granitoids. *J. Geol. Soc. Japan*, **85**: 509-523.
- Ishihara, S., 1990. The Inner Zone batholith vs. the Outer Zone batholith of Japan: Evaluation from their magnetic susceptibilities. *Univ. Mus., Univ. Tokyo, Nature and Culture*, (2) : 21-34.
- 伊藤秀敏・星 博幸, 2011. 愛知県三河湾北岸に分布する領家帯変成帯構成岩類の初期磁化率. 名古屋地学, (73) : 1-8.
- 金谷 弘・石原舜三, 1973. 日本の花崗岩質岩石にみられる帯磁率の広域的变化. 岩鉱, **68** : 211-224.
- Lowrie, W., 1990. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophys. Res. Lett.*, **17**: 159-162.
- 中井陸美, 2004. ジオロジストのための岩石磁気学: 帯磁率・古地磁気から AMS まで. 地団研, 178p.
- Nakai, Y. and Suzuki, K., 1996. CHIME monazite ages of the Kamihara Tonalite and the Tenryukyo Granodiorite in the eastern Ryoke belt of central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **102**: 431-439.
- 西浦地研グループ, 1974. 愛知県西浦半島の領家帯変成岩類, とくに変成岩脈について. 地球科学, **28** : 71-85.
- 大熊茂雄・金谷 弘, 2004. 中部地域 PB-Rock 21 (日本列島基盤岩類データベース), RIO-DB (研究情報公開データベース), **87**, 産総研.
- Otofujii, Y., Uno, K., Higashi, T., Ichikawa, T., Ueno, T., Mishima, T. and Matsuda, T., 2000. Secondary remanent magnetization carried by magnetite inclusions in silicates: a comparative study of unremagnetized and remagnetized granites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **180** : 271-285.
- 領家研究グループ, 1972. 中部地方領家帯の花崗岩類の相互関係. 地球科学, **26** : 205-216.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1998. Denudation history of the high *T/P* Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *J. Metamorphic Geol.*, **16**: 23-37.
- 鈴木和博・三宅 明, 2006. 領家帯変成帯. 日本地質学会(編), 日本地方地質誌4 中部地方, 朝倉書店, 230-231.
- Tauxe, L., 2010. *Essentials of Paleomagnetism*. Univ. California Press, Berkeley and Los Angeles, 489p.

(要 旨)

星 博幸・太田貴子：領家変成帯に産する高い初磁化率を示すアプライト岩脈

愛知県三河湾北岸の西浦半島において、領家変成帯の神原トータル岩および岩脈状角閃岩に貫入するアプライト岩脈が著しく高い初磁化率を示すことを見出した。初磁化率は 10^{-5} SI から $10^{-1.5}$ SI まで幅広く分布し（幾何平均 0.55×10^{-3} SI）、最大値は約 30×10^{-3} SI に達した。岩石磁気実験により、アプライト岩脈とその母岩（神原トータル岩、岩脈状角閃岩）に磁鉄鉱や磁硫鉄鉱といった強磁性鉱物が含まれることが判明した。強磁性鉱物が磁硫鉄鉱の場合、アプライト形成に伴う局所的な熱水活動に関連して生成した可能性が高い。強磁性鉱物が磁鉄鉱の場合、磁鉄鉱は磁硫鉄鉱の生成よりも先に生成されていたと推定される。初磁化率が 3×10^{-3} SI（花崗岩類の磁鉄鉱系/チタン鉄鉱系の区分の目安として使われる値）より低くても磁鉄鉱が含まれており、初磁化率のある値をもって磁鉄鉱の有無を論じることはできないようである。