

物理定数から見た白亜紀—古第三紀花崗岩類— その 3. 足尾帯 (関東地方北部)

金谷 弘^{1,*}・大熊茂雄¹

Hiroshi Kanaya and Shigeo Okuma (2010) Physical properties of Cretaceous to Paleogene granitic rocks in Japan: Part 3. A case of the Ashio Belt (northern Kanto region) *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 61 (1/2), p. 1-15, 10 figs, 1 table.

Abstract: About 300 granitic rocks exposed in the Ashio Belt (contains partially Jouetsu Belt) situated in the most eastern part of Southwest Japan were collected. And they were measured on density, porosity, magnetic susceptibility and Natural Remanent Magnetization. For more detailed observation, Ashio Belt was divided into three area, north Ashio area, south Ashio area and south-east Ashio area.

The results are as follows:

1. Density The mean density of the Ashio Belt shows 2.65 ($\text{g/cm}^3 = 10^3\text{kg/m}^3$), which varies from 2.57 to 2.85 and its mode 2.63. Three areas show 2.65, 2.65 and 2.65, and its mode 2.63, 2.63 and 2.61, respectively.
2. Porosity The mean porosity shows about 0.83% and its mode 0.50%. Three areas show 0.75, 0.92 and 0.81 %, and its mode 0.40, 0.54 and 0.59.
3. Magnetic susceptibility All the samples can be sectioned within a zone bounded by two straight lines in a density-magnetic susceptibility chart: The samples in the Ashio Belt lie mainly near the lower line (north Ashio area and south-east Ashio area) and partially middle zone (a part of south Ashio area). There is no sample along the upper line.
4. Natural Remanent Magnetization (NRM) The relationship between the density and NRM could scarcely show the correlation, but the magnetic susceptibility and NRM show more correlative. Königsberger ratio (Q_n)s of the 90 percent rock sample show less than 0.4.
These results are summarized in Table 1. (physical properties of the Cretaceous to Paleogene granitic rocks in the east Japanese Island).
5. Oxidation ratio In order to define the relationship between magnetic susceptibility and the oxidation state of iron, molecular ratio $(2\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 100) / (2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ termed the “oxidation ratio”, was calculated for 1,200 Cretaceous to Paleogene granitic rocks exposed in the east Japanese Island. The plot Fe_2O_3 (as total iron) against the magnetic susceptibility value divided into three groups (low magnetic susceptibility, intermediate magnetic susceptibility and high magnetic susceptibility), exhibits considerable scatter in these plots. It makes difficult to draw definitive conclusion about trends. But it is possible to find a slightly correlation trend. This fact means that several causes participate to decide the magnetic susceptibility value.

Keywords: density, porosity, magnetic properties, oxidation ratio, granitic rocks, Ashio Belt.

要 旨

本報では、東日本ですでに報告を行った、北上山地、太平山地、栗駒—鳴子地域、村上地域 (その 1. 東北地方北部; 金谷・大熊, 2003), それに阿武隈山地 (その 2. 東北地方南部; 金谷・大熊, 2007) を除く新潟, 山形, 福島, 栃木, 群馬そして茨城県下, いわゆる足尾帯 (一部上越帯を含む) に露出する花崗岩質岩約 303 露頭から採取した試料について報告する。つい

で、これまでの結果 (金谷・大熊, 前出) と合わせ東日本に露出する白亜紀—古第三紀花崗岩類について概観した。

ここでは関東北部から新潟・山形県 (北緯 38 度 10 分) に到るいわゆる足尾帯を、新潟・山形・福島県下 (北部), 福島・群馬・栃木県下 (南部・上越帯を含む) それに茨城県下 (南東部, 八溝・筑波山地) の 3 つに分け考察した。求めた物理定数は当地域の岩石密度, 孔隙率, 磁化率そして Q_n 比であるが, 岩石磁化率につい

¹地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

* Corresponding author: H. KANAYA, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: h.kanaya@aist.go.jp

ては303試料中例外的な5サンプルを除き殆どの岩石試料は低い値 (1×10^{-2} SI以下) を示した。

また、東日本でこれまでに測定された磁化率について、磁化率の強さを決める指数の1つと考えられている酸化比 (oxidation ratio) を用いこれらと比較した。この結果、花崗岩質岩類が示す磁化率の強度は全鉄には相関を示すものの、酸化比との相関は極端に悪く、個々の試料について両者の関係を論ずることはかなりの困難を伴う。このことは磁化率を決める重要な要素が他にも存在している事を意味しているものと考えられる。

1. はじめに

著者らは、従来より、日本列島の基盤を構成する深成岩類で12パーセントの露出面積をもつ花崗岩類の物理的性質を同一精度で、列島全域を対象に集約・公表し、これらデータがもつ意味や傾向、地域の特徴、問題点を明確にしてきた。それらは、東北地方では、北上山地、太平山地域、栗駒-鳴子地域、村上地域 (その1. 東北地方北部; 金谷・大熊, 2003), それに阿武隈山地 (その2. 東北地方南部; 金谷・大熊, 2007) である。今回は足尾帯に見られる花崗岩類 (第1図) のこれら結果を報告し、これまでに報告されている結果とあわせ東日本に露出する白亜紀-古第三紀花崗岩類試料約1,200個の密度、孔隙率、磁化率そして Q_n 比 (Königsberger ratio) を用い、これら物理定数をもつ地域差や傾向、そして特徴について概観した。これらのデータはこれまで公表したもの、今後公表を予定しているものを含め日本列島全域をカバーすることを目標にしている。また、より多くの人の利用を可能にするため、一部化学元素 (SiO_2 , Fe_2O_3) などとの対比も行った。

2. 研究の概要

これまで足尾 (上越帯を含む) 帯に関する報告は、矢内 (1972, 1973a, 1973b), 吉田ほか (1976), 茅原 (1986), Rezanov *et al.* (1999), Takenouchi *et al.* (2002) など、その他数多くの報告がなされている。それらの中からそこに含まれる分類や記載を参考に後期中生代酸性火成岩類中の花崗岩類の報告を参考にし、当地域に露出する花崗岩類の物理的性質を明確にし、東日本に見られる同時代の花崗岩類と比較しこれらの取りまとめを行った。また20万分の一地質図、新潟 (角ほか, 1985), 高田 (竹内ほか, 1994), 日光 (山元ほか, 2000), 宇都宮 (須藤ほか, 1991) も使用した。当地域のもつ花崗岩類の平均密度は他地域と比較して最も小さく、その最頻値も同様であった。また磁化率も低

く、村上地域、阿武隈山地西部、同南部よりも低かった。しかし孔隙率、 Q_n 比は他地域のそれと類似している。磁化率の強さで分類した試料の Fe_2O_3 (全鉄, 重量パーセント) と酸化比 (oxidation ratio) との対比図では低磁化率を示す他地域のものに近い相関もみられた。

3. 試料および測定方法

3.1 測定試料

露頭より採取した数kgの岩石塊より長さ・直径ともに、25.4mmの円筒試料数個を切り出し密度、孔隙率、磁化率そして残留磁化の測定を行った。試料の形状は帯磁率計 (磁化率計)、スピナー磁力計の試料ホルダーの大きさによる。測定値は最低3個の平均値を用い、不均質または粗粒の岩石は6個の平均値を使用した。

3.2 測定器及び測定方法

磁化率測定はBison 3101型帯磁率計 (Bison社, 米国) およびMS2 (MS2B) 型帯磁率計 (Bartington社, 英国) を用いた。残留磁化測定はスピナー磁力計SMD-88型 (夏原技研, 日本国) を使用し、測定値はSI (小玉, 1999) にて表示した。表示単位は磁化率 (無名数)、磁化 (A/m) である。スピナー磁力計の測定は、X, Y, Z軸方向それぞれ4回 (6スピン)、スタック回数が35回のとき、全磁力のパラッキ (1σ) が50パーセントを示す値はおおよそ 3×10^{-3} ($\times 10^{-6} \text{Am}^2$) である。この値は測定試料の大きさを考慮すると、弱い試料の測定には必ずしも十分な感度ではない。

密度測定は測定試料の強制乾燥状態における重量、強制湿潤状態における水中重量および空中重量の3つを測定した。強制乾燥状態は岩石試料の磁氣的性質の変化を避けるため一切熱を加えず乾燥を行った。使用した水は水道水を活性炭とイオン交換樹脂に通したものをを使用した。

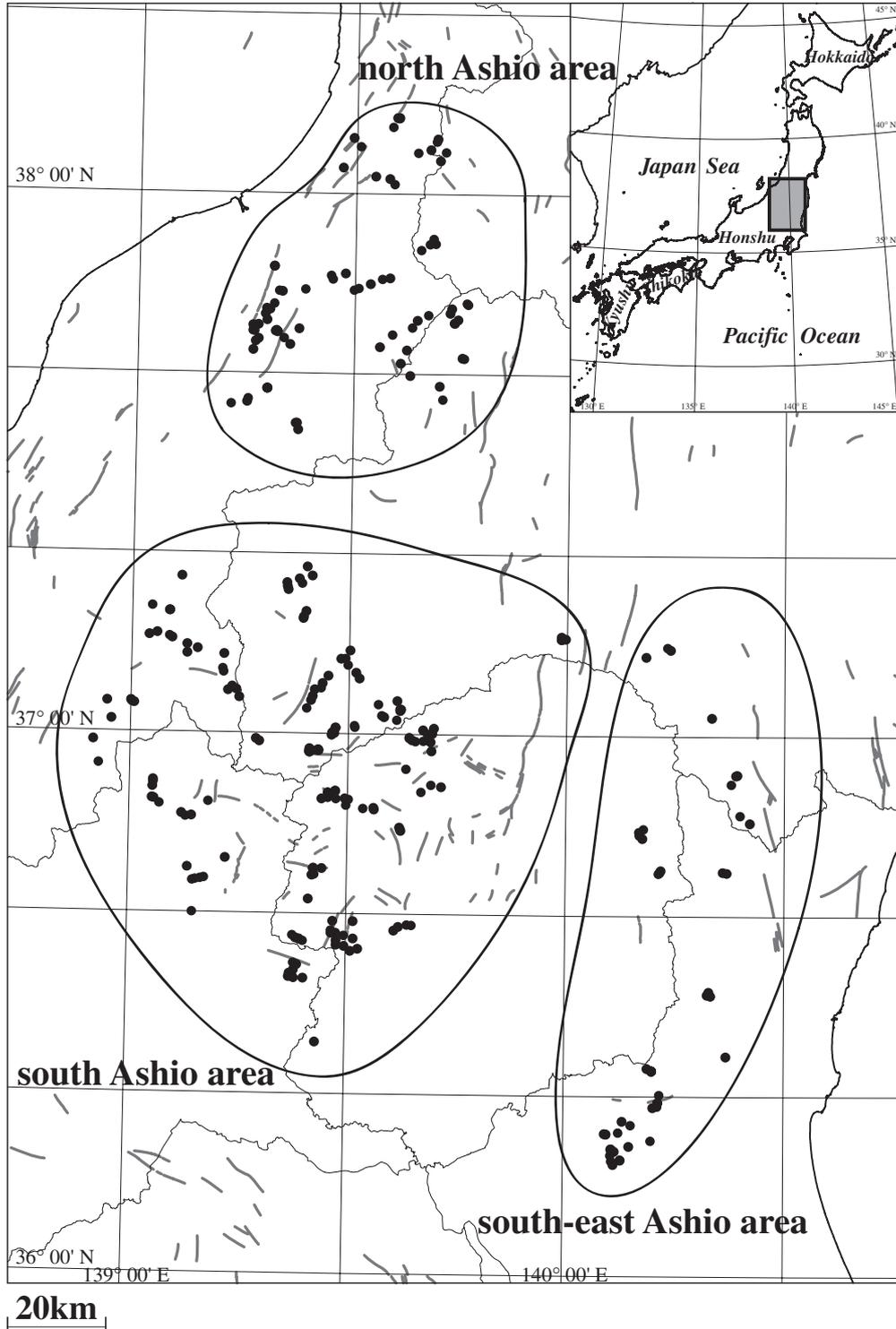
4. 測定結果

測定結果を表示するため花崗岩の指数として密度 (乾燥密度) を使用した。当研究における密度の精度は 0.002 ($10^3 \text{kg/m}^3 = \text{g/cm}^3$) 程度の精度が確保されている。花崗岩の SiO_2 の変化幅と同密度の変化範囲を単純に比較した場合、珪酸塩岩石に見られる SiO_2 の分析精度は0.125%に匹敵する分解能がえられるので指数として十分ではないかと考えられる。

これまでの報告と同様、密度と SiO_2 および Fe_2O_3 (全鉄, いずれも重量パーセント) が一次式 ($y=ax+b$, y : 密度, x : 元素含有量) であわせるものとし、足尾帯全域から求めた係数、定数をこれまでの東北地方北部および南部の結果 (金谷・大熊, 2003, 2007前出) と比較す

ると, SiO_2 の係数 a は 0.0108, 0.0105 に対し 0.0113 でかなり近く, 定数 b も 3.427, 3.405 に対し 3.443 である. しかし Fe_2O_3 (全鉄) の場合は係数 a が 0.0274, 0.0282 に対し 0.0326 とやや高く傾斜が多少異なる値を

示す (b は 2.593, 2.581 に対し 2.554). これを足尾帯の北部・南部 (上越帯を含む)・南東部 (第1図) に分けてみると (第2図 a-f), 東北地方北部および南部の結果よりも北部がやや低く, 南東部が最も近く, 南部



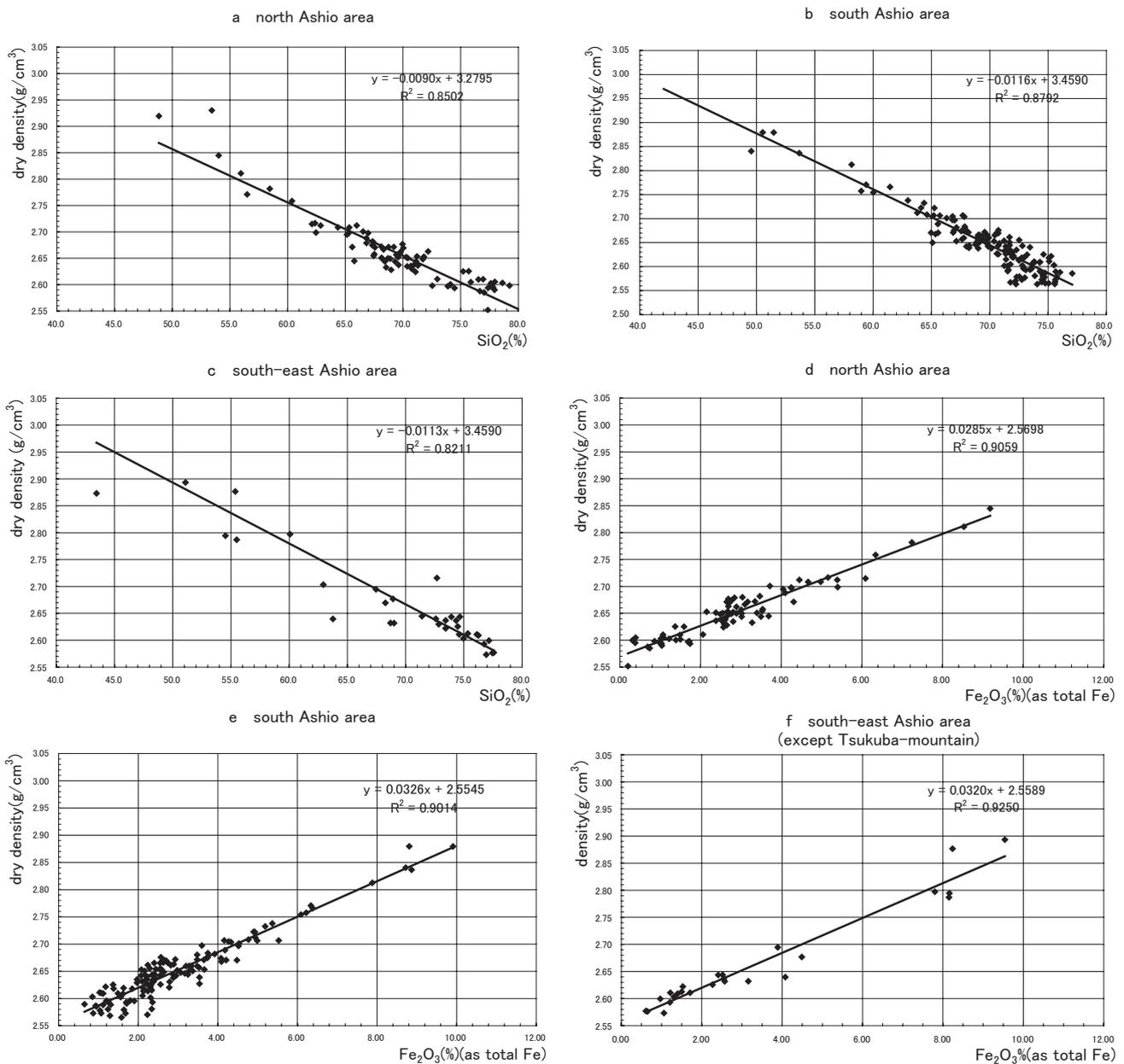
第1図 研究対象地域と岩石採取地点.

Fig. 1 Sampling sites in the Ashio Belt.

がやや高い値を示す。これは後述するように足尾帯南部は密度の低い（SiO₂の多い）岩石の割合が多いこと、孔隙率2%以上（風化が進んだと思われる）の岩石の割合も多いこと（相関係数も低い）も大きく影響しているとも考えられるが、地域の違いによる有意の差とも考えられ今後の検討が必要である。これら係数の僅かな違いは測定値が変化範囲全域に分布するか、低い部分、中央部、または高い部分に偏在するかで影響を受けることも1つの要因であろう。

4.1 密度

足尾帯3地域の乾燥密度の頻度分布図（第3図 a, b, c）を作成した。北部地域は乾燥密度 $\rho_d=2.59\sim 2.85$ (g/cm³=10³kg/m³, 以下同様) の変化幅を持ち、平均密度 $\rho_{av}=2.65$ (n=82) で最頻値は2.63である。南部地域のそれは、変化幅2.57~2.81, 平均密度 $\rho_{av}=2.65$ (n=164), 最頻値は2.63である。次に南東部の変化幅は $\rho_d=2.59\sim 2.80$, $\rho_{av}=2.65$ (n=42), 最頻値は2.61であった。



第2図 密度と化学元素（SiO₂, Fe₂O₃（全鉄））の対比図。 a, d：足尾北部地域, b, e：足尾南部地域, c, f：足尾南東部地域。

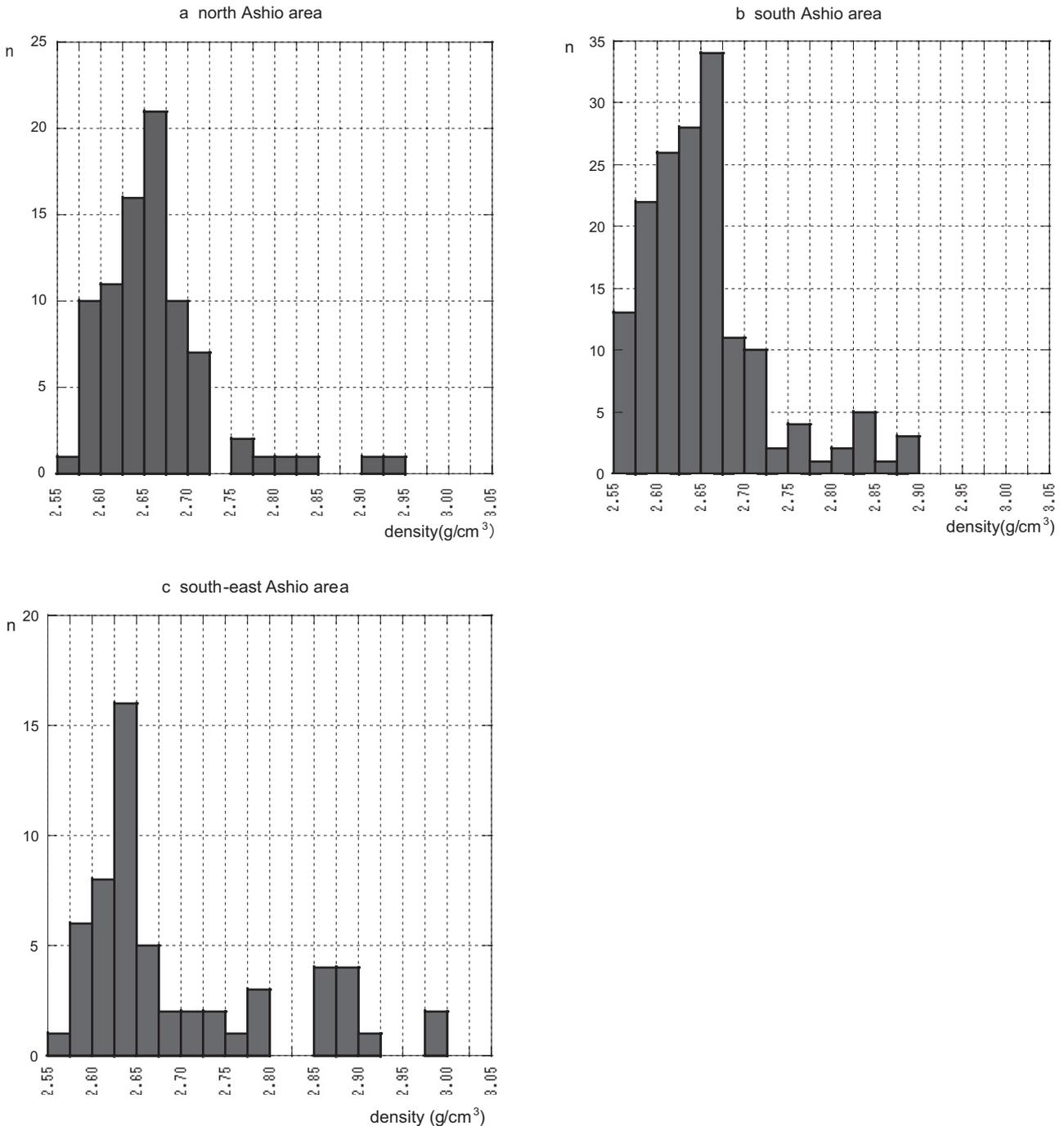
Fig. 2 Relationship between density and chemical elements (SiO₂, Fe₂O₃ as total Fe) in each area. a, d: north Ashio area, b, e: south Ashio area, c, f: south-east Ashio area.

4.2 孔隙率

孔隙率 (第4図 a, b, c) の平均値は北部地域 0.75%, 南部地域 0.92% そして南東部地域 0.81% で, それぞれの最頻値は北部 0.40, 南部 0.54 そして南東部 0.59 であった.

4.3 磁化率

当地域に見られる磁化率 (第5図 a, b, c) は全地域で5試料を除き比較的低く (この5試料については後述) 1×10^{-2} (SI) 以下で, これを超えるものは見られない.



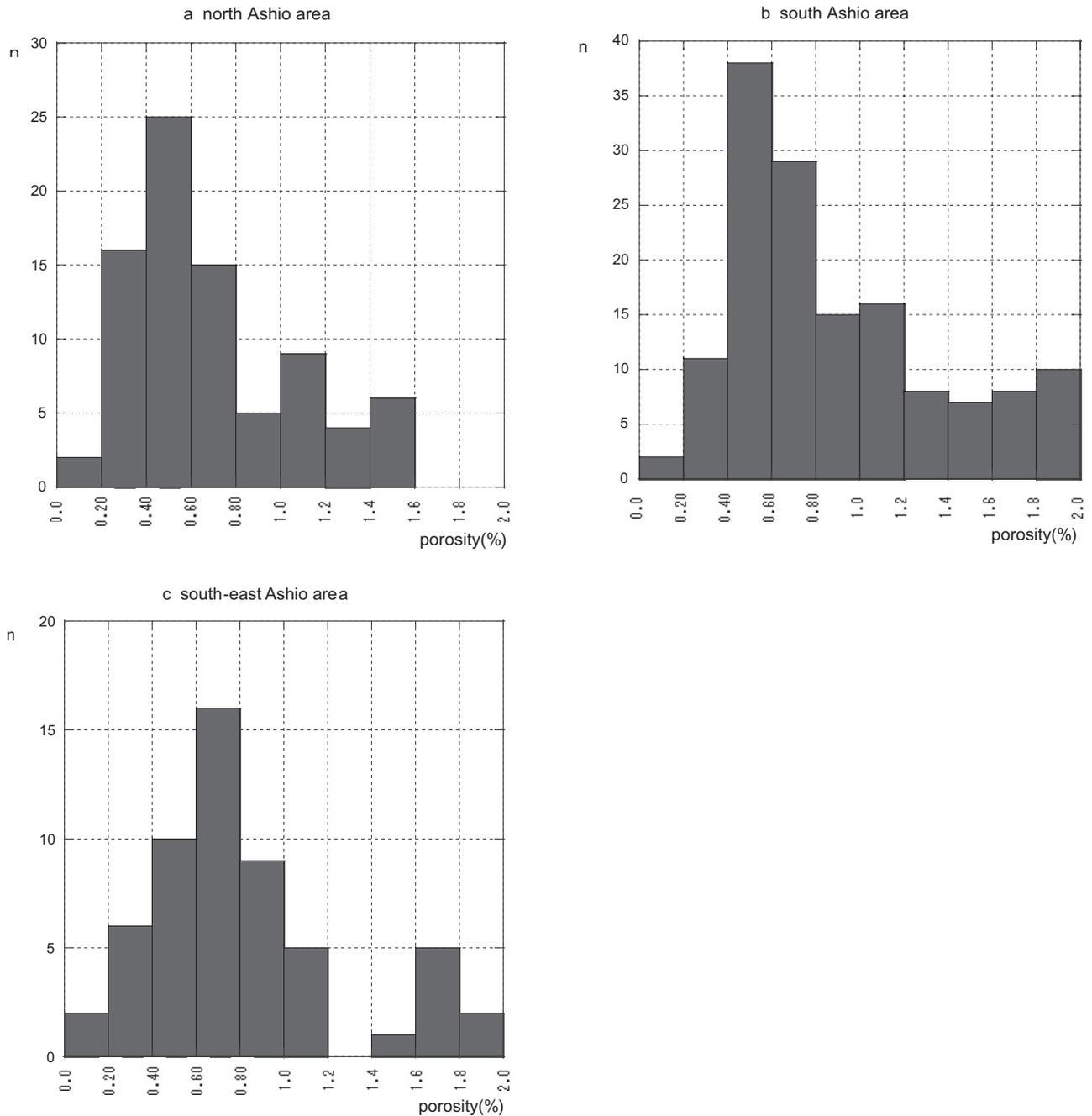
第3図 各地域でみられる密度の頻度分布. a: 足尾北部地域. b: 足尾南部地域. c: 足尾南東部地域.

Fig. 3 Histogram of density distribution of each area (a: north Ashio area, b: south Ashio area, c: south-east Ashio area).

4.4 磁化率と密度の対比

磁化率と密度を対比 (第6図 a, b, c) した. これまで花崗岩の磁化率と密度の関係は大雑把に見て, 乾燥密度, $\rho_d=2.60$ (g/cm³) と磁化率 $\kappa_{SI}=10 \times 10^{-5}$ および $\rho_d=2.95$ と $\kappa_{SI}=100 \times 10^{-3}$ を結ぶ直線 (下限線), 同じく密度, $\rho_d=2.60$ (g/cm³) と磁化率, $\kappa_{SI}=2,000 \times 10^{-5}$ 及び $\kappa_{SI}=20,000 \times 10^{-5}$ を結ぶ直線 (上限線) の2直線で囲まれる範囲に含まれる. 当地域は下限線付近に分布す

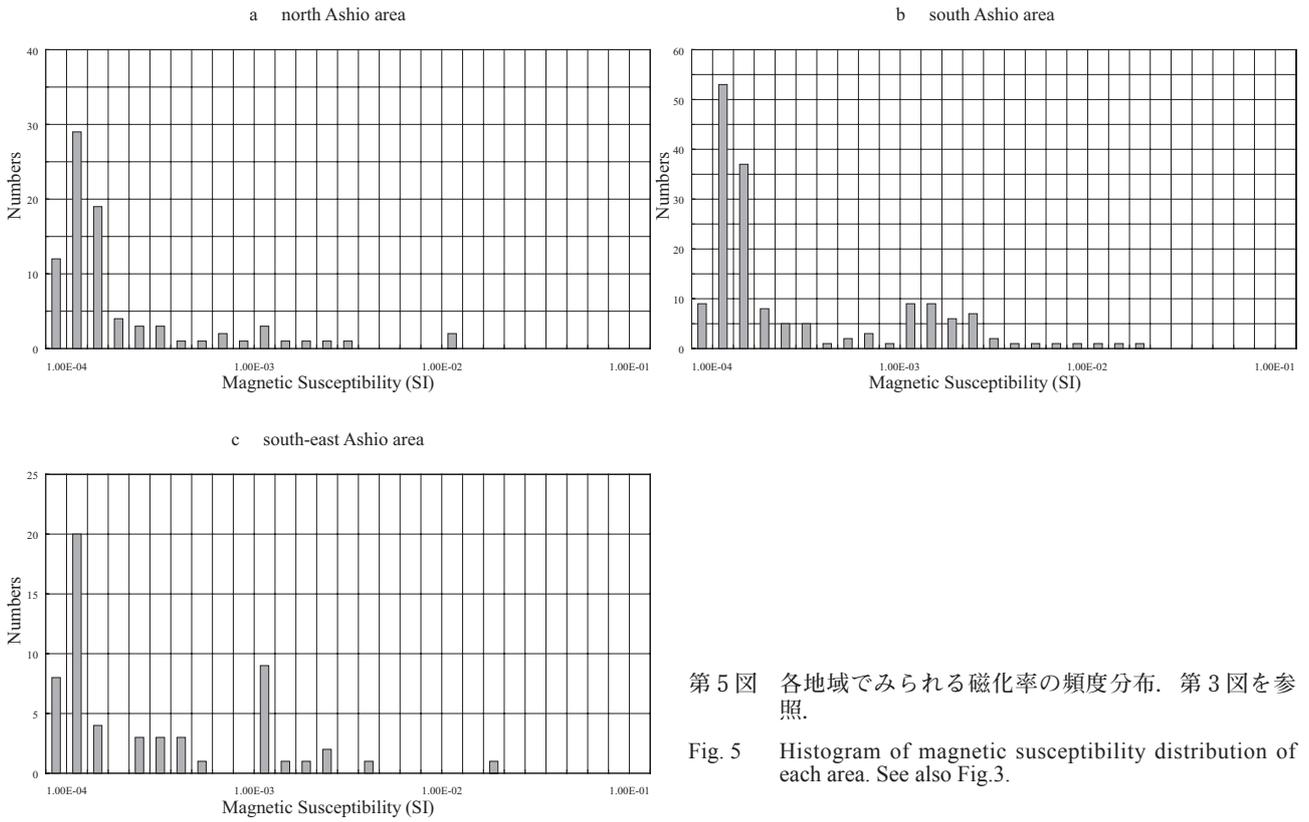
る試料の割合が多く上限線に近いものは全く見られない. これは栗駒-鳴子地域, 太平山地域, そして村上地域の一部 (金谷・大熊, 2003) と共通している. 足尾帯南部 (第6図 b) 地域では, 北部 (第6図 a), 南東部 (第6図 c) 地域に比べ密度の低い (SiO₂ の多い) 部分に中程度の磁化率 ($1 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$) SI を示すものの割合が多い.



第4図 各地域でみられる孔隙率の頻度分布. 第3図を参照.

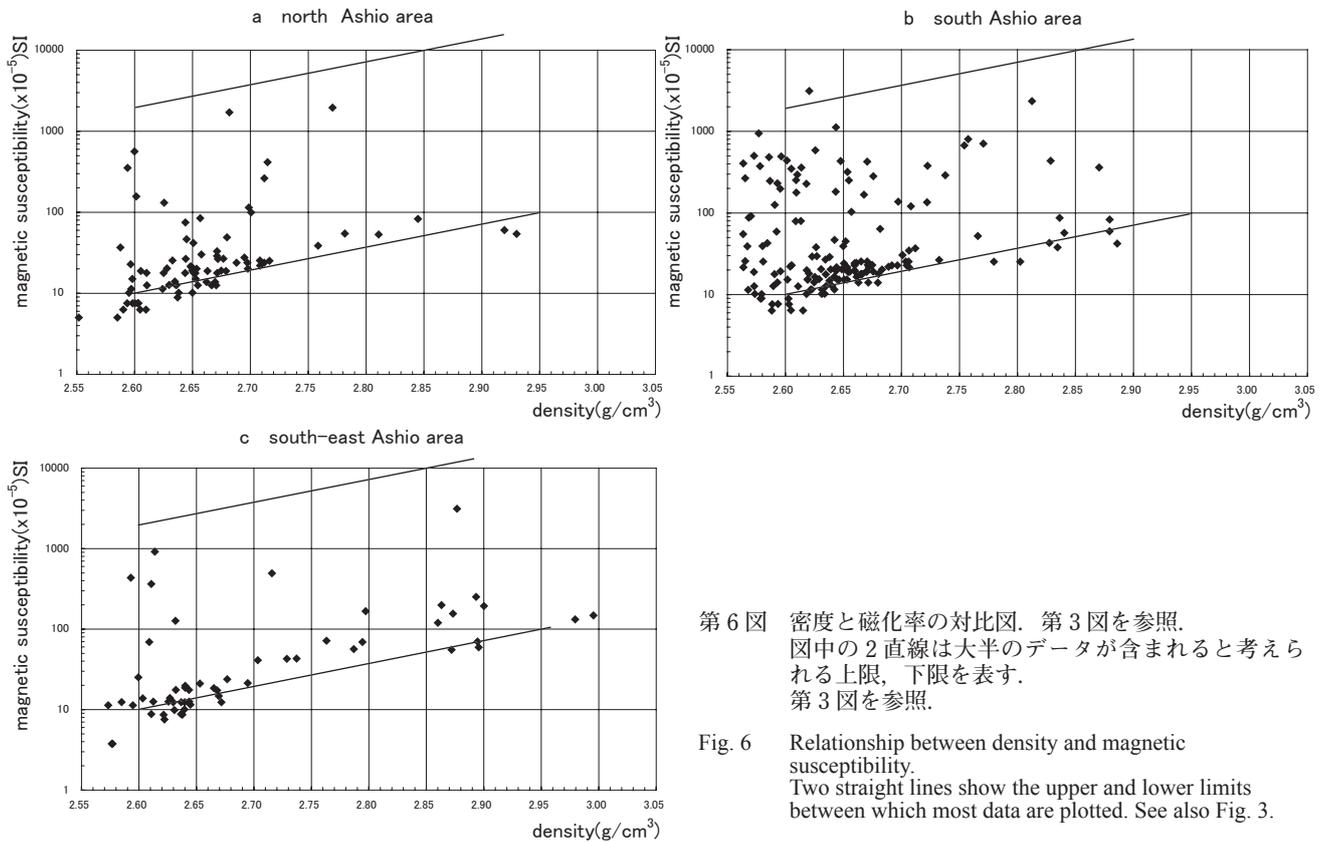
Fig. 4 Histogram of porosity distribution of each area. See also Fig. 3.

物理定数から見た白亜紀-古第三紀花崗岩類 (金谷・大熊)



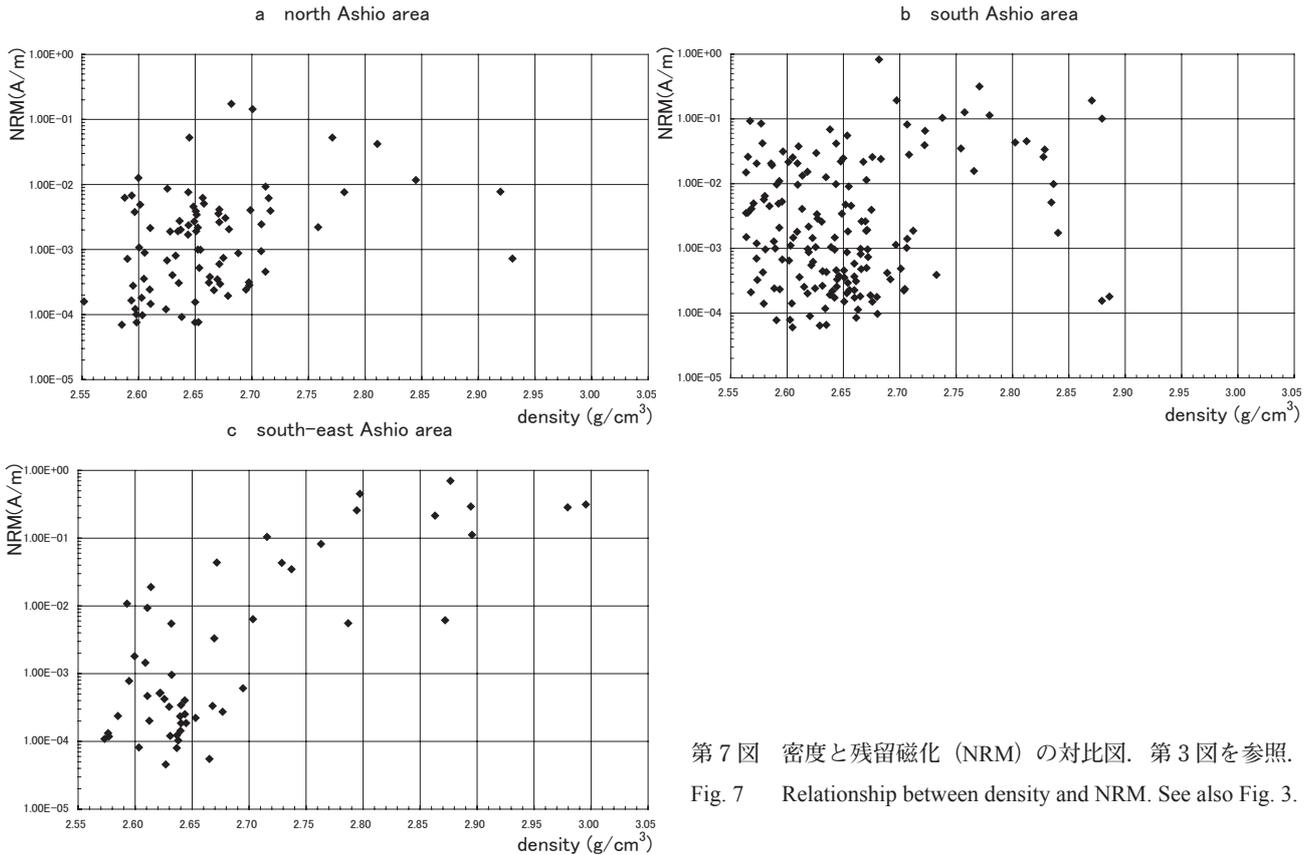
第5図 各地域でみられる磁化率の頻度分布。第3図を参照。

Fig. 5 Histogram of magnetic susceptibility distribution of each area. See also Fig. 3.



第6図 密度と磁化率の対比図。第3図を参照。
図中の2直線は大半のデータが含まれると考えられる上限、下限を表す。
第3図を参照。

Fig. 6 Relationship between density and magnetic susceptibility.
Two straight lines show the upper and lower limits between which most data are plotted. See also Fig. 3.



第7図 密度と残留磁化 (NRM) の対比図. 第3図を参照.
Fig. 7 Relationship between density and NRM. See also Fig. 3.

4.5 残留磁化

磁化率と同様、密度と残留磁化の対比図 (第7図 a, b, c) を作成した。足尾帯北部と南東部では密度の増加に対し大雑把な増加傾向がみられるが明確な相関は認められない。足尾帯南部では全く認められない。

4.6 Q_n 比 (Königsberger ratio)

残留磁化 (NRM) と現在の地球磁場による誘導磁化 (κH , κ は磁化率, H は現在の地球磁場の強さ) の比 Q_n の頻度分布図 (第8図 a, b, c) をみると大半が0.6以下で0.2以下が非常に多い。しかし Q_n が2.0以上 (図面上では非表示) を示す試料の割合は足尾帯北部3個 ($n=82$), 南部9個 ($n=164$) そして南東部16個 ($n=42$) と南東部でその割合が増えている。

Q_n 比に関連して磁化率と残留磁化との対比図 (第9図 a, b, c) を作成した。両者の間には正の相関が認められる。

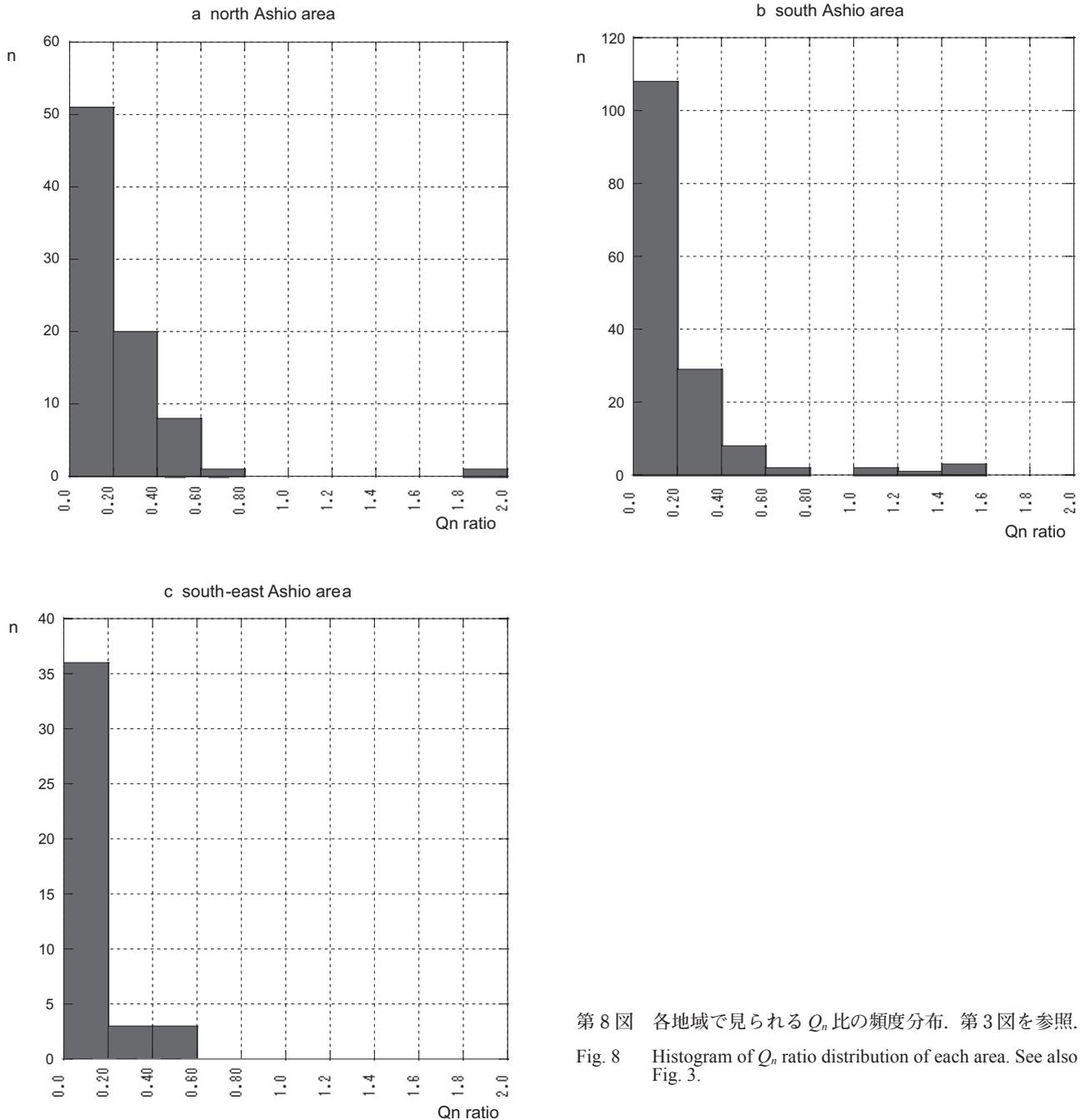
5. 高磁化率を示す試料について

1) 第6図 aに見られる磁化率 $\kappa_{SI}=1 \times 10^{-2}$ を超える2試料はいずれも山形県小国町の玉川上流、梅花皮沢沿 (飯豊山) で採取した試料 $\kappa_{SI}=1.71 \times 10^{-2}$, 1.96×10^{-2} の岩石で、いずれも飯豊山花崗閃緑岩 (高橋ほか, 1996)

である。これらは、 $\rho_d=2.66$, 2.77 で SiO_2 はそれぞれ67.4, 56.5%, Fe_2O_3 (全鉄) 3.47 および7.26%である。鏡下観察によると両試料とも熱の影響を受けて出来たと見られる不透明鉱物が見られ、二次的に生成された磁鉄鉱ではないかと考えられる。

2) 第6図 bに見られる岩石の1つは燧ヶ岳北方約3.7km (国道352号松枝岐村御池北西1.7km) の道路沿いで採取した $\kappa_{SI}=2.35 \times 10^{-2}$, $\rho_d=2.81$ のやや塩基性 (閃緑岩?) の岩石で (SiO_2 は58.2%, Fe_2O_3 は7.88%), 詳細は不明である。もう1つの試料は栃木県藤原町男鹿川支流の芹沢上流4.8km付近に露出する $\kappa_{SI}=3.13 \times 10^{-2}$, $\rho_d=2.62$ の試料で SiO_2 は67.6%, Fe_2O_3 は3.69%の岩石である。この岩石は20万分の1地質図日光 (山元ほか, 2000) の新第三紀深成岩 (G_4) に岩相が類似している。

3) 第6図 cにみられる岩石は八溝山地鷲ノ子山塊、袋田岩体中に見られる $\rho_d=2.88$ (閃緑岩, SiO_2 : 55.4%, Fe_2O_3 : 8.24%) で、柴田ほか (1973) による記載では、同地域の65~68m.y.のK-Ar年代の岩石に対し、阿武隈山地の古い年代100m.y.と火成活動時期を同じくした岩石とされている。



第 8 図 各地域で見られる Q_n 比の頻度分布. 第 3 図を参照.

Fig. 8 Histogram of Q_n ratio distribution of each area. See also Fig. 3.

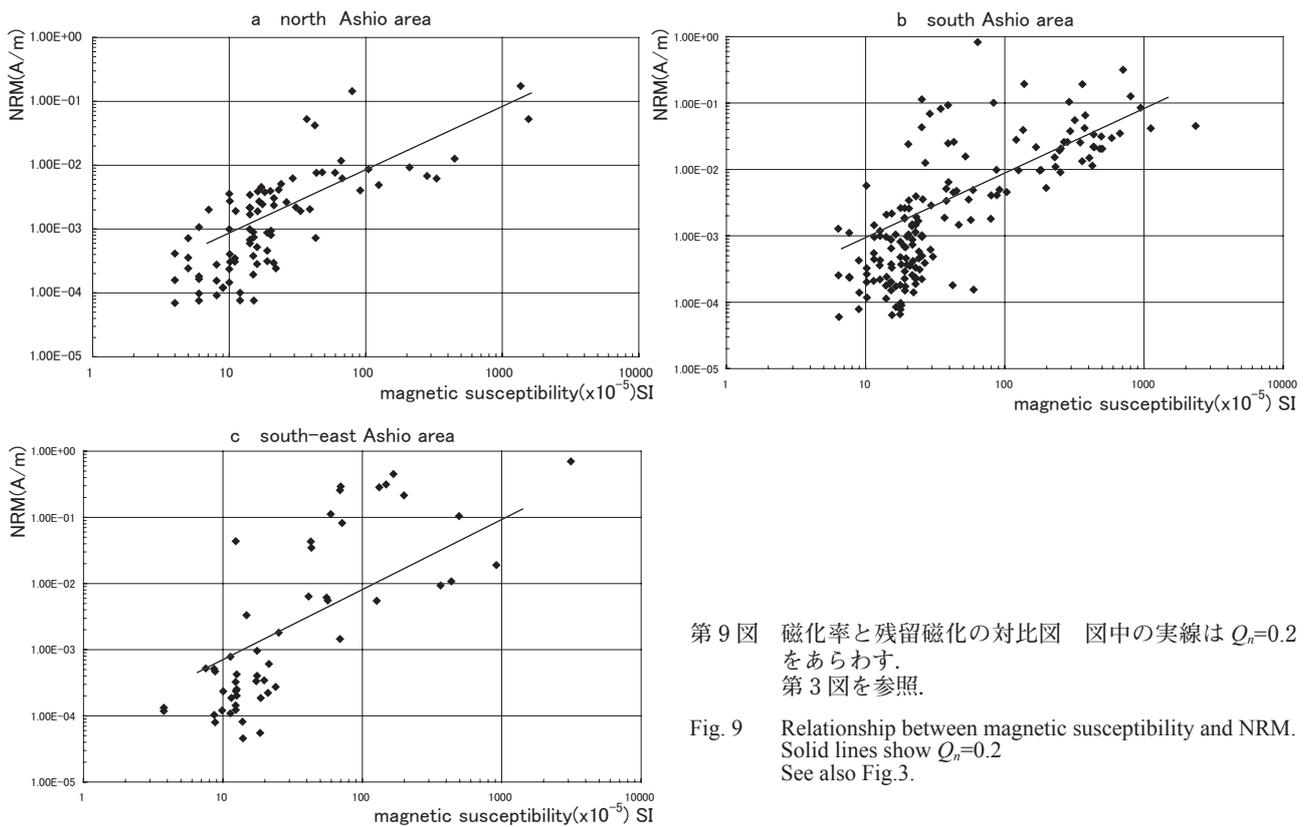
6. 考察とまとめ

今回、足尾帯を北部、南部（上越帯を含む）そして南東部の 3 つの地域に分けて考察した。

足尾帯全体の密度の変化範囲は $\rho_d=2.57\sim 3.12$ (g/cm³) であるが密度の大きい試料の割合が圧倒的に多いのは南東部（八溝山・筑波山）であって、採取した試料中に斑レイ岩類の割合が多いことによる。平均値 $\rho_{av}=2.65$ 、北部、南部ついで南東部ともに殆ど変わらない。最頻値も、 $\rho_d=2.63, 2.63, 2.61$ と殆ど変わらない。

孔隙率の平均値は北部、南部そして南東部の順に 0.75, 0.92, 0.81% で南部が最も高い。これは南部地域より採取した試料に風化の影響を受けたとみられる岩石の割合の多さが反映されているものと思われる。これらの最頻値はそれぞれ 0.40, 0.54, 0.59% であった。

磁化率をみると足尾帯（上越帯を含む）全域は例外なく低く $\kappa_{SI}=1\times 10^2$ 以下で、これらの内 85% 以上の試料が 1×10^3 以下である。密度と磁化率の関係をみると磁化率が $\kappa_{SI}=1\times 10^2$ 以下 1×10^3 以上の中程度の強さを示す試料の割合は足尾帯南部が最も多く、密度の低い



第9図 磁化率と残留磁化の対比図 図中の実線は $Q_n=0.2$ をあらわす。第3図を参照。

Fig. 9 Relationship between magnetic susceptibility and NRM. Solid lines show $Q_n=0.2$. See also Fig.3.

試料に多い。残留磁化 (NRM) の変化範囲は $10^{-5} \sim 10^0$ (A/m) で、密度との相関は殆ど認められない。 Q_n 比は南東部で非常に高い値を示すものが多く、落雷によるものと思われ、現世の地形の影響を反映しているのかも知れない。また、残留磁化と磁化率の間には正の相関が認められる。

足尾帯の結果を白亜紀—古第三紀花崗岩類である東北地方北部および東北地方南部 (金谷・大熊, 2003, 2007) と合わせ東日本のとりまとめ (第1表) を行った。表中に2つの数値が記載されているものはヒストグラム中に一定以上の大きさのピークが2つ認められるケースで何らかの意味を持つものと考えられる。これらの考察については最終章で行う。

7. 酸化比による考察

これまでに報告を行った東日本に露出する白亜紀—古第三紀花崗岩類を酸化比 (oxidation ratio: (mol $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 100 / 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$) [Dodge, 1972]) を用いて概観した。これは磁化率の強さが一義的には強磁性鉱物の種類及びその量比 (Lindsley *et al.*, 1966) できまる。花崗岩質岩の場合は磁鉄鉱 (キュリー温度 578°C) および全鉄の量とその酸化比に比例するものと考えられている (Buddington and Lindsley, 1964; Bateman *et al.*,

1991)。日本列島に露出する花崗岩類の測定でもチタノマグネタイト—マグネタイト系列の端成分 (磁鉄鉱) の 570°C 以上を示す試料が大半であり (金谷未公表資料) 検討の価値があるものと思われる。今回、 Fe_2O_3 (全鉄) の定量は蛍光 X 線分析法、 FeO は KMnO_4 を用い滴定法 (地質調査所化学分析法, 1978) にて約 1,200 個の試料について求めた。

酸化比で検討を行うにあたり以下のように取り扱った。本来はマグマとその分化系列の明確な岩体 (今岡ほか, 1977a, b) について検討を行うのが妥当と考えられるが、十分な情報を有する岩体がなく、これは今後の検討課題とし、これまでに分類した地域を単位として考察した。

1) 地域についてはこれまでの分類に従い a, 北上山地 (片田ほか, 1971) は早池峰構造帯を挟んで、北部北上山地 (IV 帯のカリ長石 > 石英の岩石は除く)、南部北上山地 (氷上花崗岩を除く) b, 阿武隈山地は畑川破碎帯以東 (太平洋側)、畑川破碎帯以西 (内陸側)、そして阿武隈変成岩類が見られる北緯 37 度 10 分以南の南部地域の3地域 c, 栗駒—鳴子地域 (中央部) 太平山地 (日本海側) d, 村上地域 (羽越地域) e, 足尾帯北部、足尾帯南部 (上越帯を含む)、足尾帯南東部 (筑波山は FeO 分析データ不足のため検討から外した) 3地

物理定数から見た白亜紀-古第三紀花崗岩類 (金谷・大熊)

第 1 表 東日本に露出する白亜紀-古第三紀花崗岩類の物理量のとりまとめ.

Table 1 Physical properties of Cretaceous to Paleogene granitic rocks in the east Japanese Island.

locality		試料数 sample n	変化範囲 variation -range	密度 平均値 density mean value 10 ³ kg/m ³	最頻値 mode	孔隙率 平均値 porosity mode	最頻値 mode	磁化率 最頻値 magnetic Susceptibility (x10 ⁻⁵)SI	Qn比 (以下) Qn ratio < n	
北上山地 (Kitakami- Mountains)	North area	I-III帯	179	2.62-2.98	2.76	2.72	0.61	0.48	2570	0.4
		IV帯	22	2.65-3.17	2.87		0.46		4500	0.6
	South area	V-VI 帯	166	2.63-2.91	2.77	2.74	0.63	0.50	2220	0.6
	Kurikoma-Narugo area	栗駒一鳴子	50	2.61-2.77	2.69	2.69	0.72	0.33	22 1500	0.2
	Taihei Mountain	太平山	42	2.60-2.88	2.69	2.71	0.43	0.34 0.92	35 137	0.6
	Murakami area	村上地域	77	2.59-2.91	2.63 2.71	2.66 2.71	0.59	0.45	22 133	0.4
阿武隈山地 (Abukuma- Mountains)	east of Hatagawa F.Z.*	双葉破碎帯東	14	2.65-2.72	2.69		0.86		1970	0.2
	between Futaba and Hatagawa F.Z.*	双葉破碎帯一 畑川破碎帯間	46	2.61-2.82	2.69	2.62 2.69	0.76	0.64	22 296 555	0.4
	west of Hatagawa F.Z.*	畑川破碎帯西	183	2.61-2.88	2.70	2.63 2.73	0.78	0.68	35 147	0.4
	south area	南部地域	101	2.61-2.85	2.74	2.69 2.79	0.62	0.53	56 138	0.4
	gabroic rocks	(斑レイ岩)	13	2.93-3.16	3.02		0.27			
足尾帯 (Ashio-Belt)	north area	北部	82	2.59-2.85	2.65	2.63	0.75	0.40	17	0.4
	south area (includes Joetsu Belt) (上越帯を含む)	南部	164	2.57-2.81	2.65	2.63	0.92	0.54	20 231	0.4
	south-east area	南東部	42	2.59-2.80	2.65	2.61	0.81	0.59	24	0.4
	gabroic rocks	(斑レイ岩)	15	2.86-3.12	2.93		0.49			
合計(total)			1196							

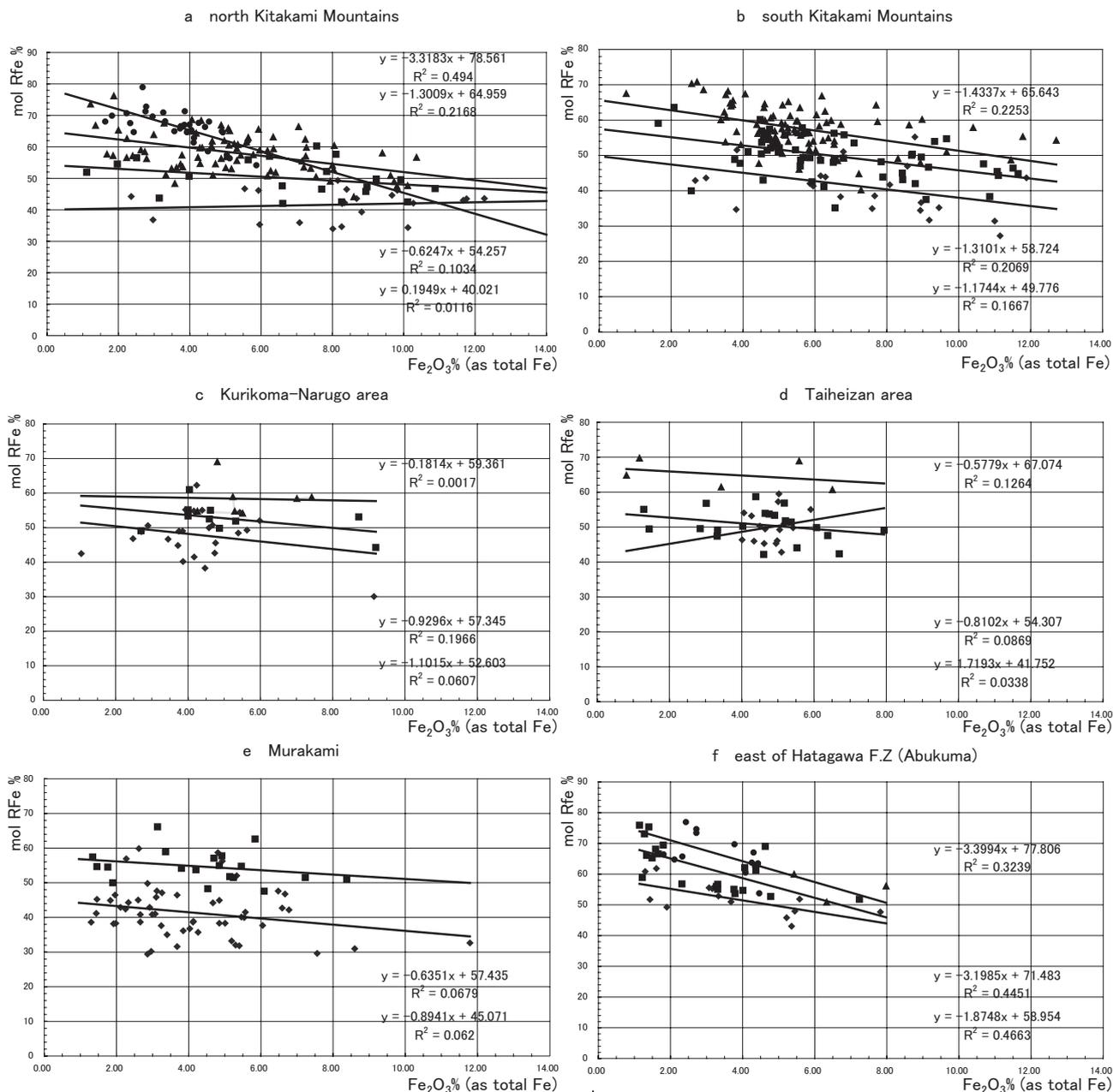
F.Z.*: Fracture Zone

方, 計 5 地区 11 地域に分けた.

2) 磁化率については密度と磁化率の対比図 (第 6 図の
下限線, 上限線) を基に, 試行錯誤の結果, 密度 2.60
~2.95 (g/cm³) に対し κ_{SI} 10~100 (下限線) および
2,000~20,000x10⁻⁵ (上限線) 間をより細分化し, 60
~600 及び 600~6,000x10⁻⁵ を加え, 密度 2.60 (2.95)
(g/cm³) のとき κ_{SI} 60 (600) 以下, 同じく 60-600 (600
-6,000), 同じく 600 (6,000) 以上の 3 段階 (弱磁性
グループ, 中磁性グループそして強磁性グループ) に
分類した. 密度が 2.60 (g/cm³) の場合, 磁化率を κ_{SI}
=60x10⁻⁵ 以下, 60 から 600x10⁻⁵ の間そして 600x10⁻⁵
以上 (密度が 2.95 の場合はそれぞれ 10 倍の 600x10⁻⁵

以下, 600-6,000x10⁻⁵ の間, 6,000x10⁻⁵ 以上) に分け
て検討を行った. また孔隙率が大きく (約 2%) 風化の
影響が考えられる試料は一部除外した.

3) 密度と磁化率の対比で, 大きさにより弱磁化率花崗
岩, 中磁化率花崗岩, 高磁化率花崗岩の 3 グループに
分類 (北部北上山地及び阿武隈山地の双葉破碎帯以東
のアダカイト質花崗岩 (金谷, 1996) を 1 グループとし
て加え 4 グループとした, 磁化率をその試料の鉄含有
量 (全鉄として Fe₂O₃ 含有量) と鉄のモル比から計算
された酸化比 (oxidation ratio) をパーセントであらわ
し対比した. 各地域を単位とした理由は, 既に述べた
ように, マグマの分化系列が明確な岩体であっても試

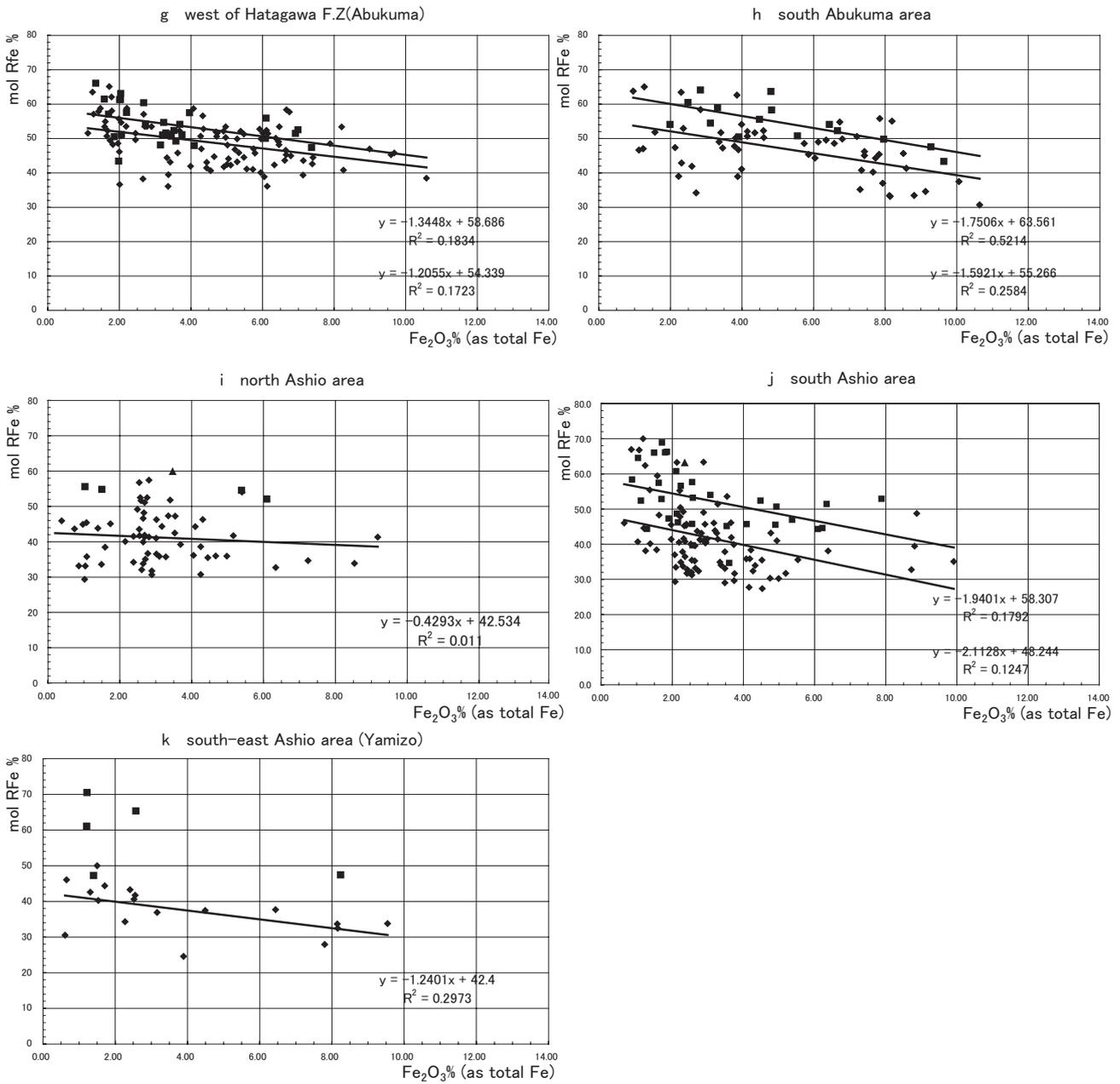


第10図 東日本に露出する白亜紀-古第三紀花崗岩類の Fe_2O_3 (全鉄) と酸化比 (Oxidation ratio) の対比図 a: 北部北上山地, b: 南部北上山地, c: 栗駒-鳴子地域, d: 太平山地域, e: 村上地域, f: 畑川破砕帯東側 (阿武隈山地), g: 畑川破砕帯西側 (阿武隈山地), h: 南部地域 (阿武隈山地), i: 足尾北部地域, j: 足尾南部地域, k: 足尾南東部地域. (図中のマーク, ◆, ■, ▲, ●はそれぞれ低磁化率, 中磁化率, 高磁化率そしてアダカイト質花崗岩をあらはす. また図中のトレンドは各マークのトレンドをあらはす).

Fig. 10 Relationship between Fe_2O_3 (as total Fe) and oxidation ratio of Early Cretaceous to Late Paleogene granitic rocks distributed in East Japan
 a: north Kitakami Mountains, b: south Kitakami Mountains, c: Kurikoma - Narugo area, d: Taiheizan area, e: Murakami area, f: east of Hatakawa Fracture Zone (Abukuma Mountains), g: west of Hatakawa Fracture Zone (Abukuma Mountains), h: south Area (Abukuma Mountains), i: north Ashio area, j: south Ashio area, k: south-east Ashio area.
 (The four symbols of ◆, ■, ▲ and ● in the figure represent low magnetic susceptibility, medium magnetic susceptibility, high magnetic susceptibility and magnetic susceptibility of adakitic rocks, and. each trend represents each symbols respectively.)

料数が十分でなく, 細分化 (4グループ) した結果, 1グループ当りの試料数が不足し, またそれら試料の変化幅, 変化範囲の偏在度などにより, 異なる結論を引

き出す危険性があるためである. 今回, 得られた酸化比の変化範囲はおおよそ 30~70%であった. この指数は, 花崗岩に含まれる鉄鉱物が磁鉄鉱のみであるとす



第 10 図 続き

Fig. 10 Continued

ると数式から見て 2/3 でおよそ 66.7% になる筈であるが、共存する他の鉄鉱物との平均値として出てくるためより厳密に比較する場合は他の鉄鉱物 (ホルンブレンド、バイオタイトなど) の指数を出しておく必要がある。66.7% を越す値が一部に見られるがこれは風化の影響、その他があるのかも知れない。これらは今後の課題とし、今回はこれら結果 (第 10 図, a-k) を概観した。その結果は以下のようなものである。

a. 11 地域について試料の全鉄含有量と酸化比の相関を

一次式 ($y=ax+b$) で求めた。いずれの地域も磁化率の強さに応じて分類したグループ (3 グループ) のトレンドが求められ、それらが磁化率の強さに応じて各地域とも酸化比が低下している。係数 a は原則としてマイナスで鉄含有量の増加と共に低下している。しかし相関係数 (R^2) は極端に悪く、求めたトレンドに対して絶対値で ±10-15% 程度のバラツキがみられる。係数 a がマイナスになるのは鉄含有量の多い岩石は有色鉱物に対し不透明鉱物の量比の割合が少ないことによ

るものであろう。

b. いずれの地域も密度と磁化率の大きさに従って分類した。前述したように、より細分化する事による試料数の不足、偏在などを避けるため4つの領域に区分した(アダカイト質花崗岩, $\kappa_{SI}=600$ (密度2.60)以上, 同60-600, 同60以下), その結果はそれらの順に従って求めたトレンドが低下している。 $\kappa_{SI}=60 \times 10^{-5}$ 以下は強磁性鉱物を全く含まないか, または殆ど含まない弱磁性(常磁性)花崗岩類と考えられ, $\kappa_{SI}=600 \times 10^{-5}$ 以上はある程度以上の量の強磁性鉱物が含まれる強磁性花崗岩類である事を意味している。北部北上山地では $\kappa_{SI}=600 \times 10^{-5}$ 以上の領域に分類される試料数が圧倒的に多く, $\kappa_{SI}=60 \times 10^{-5}$ 以下の試料数が極端に少ない。南部北上山地では $\kappa_{SI}=600 \times 10^{-5}$ 以上, 同60-600の試料数の割合が多いが北部と同様60以下の試料数が少ない。北上山地以外では $\kappa_{SI}=600 \times 10^{-5}$ (密度2.60)以上の試料の割合が極端に少ない。阿武隈山地では双葉破碎帯(畑川破碎帯)以東にみられるアダカイト質花崗岩, $\kappa_{SI}=60-600$, 同60以下の順であり, 北部北上山地のように600以上(強磁性)を示す試料はアダカイト質花崗岩を除けばほんの僅かである。畑川破碎帯西部は600以上を示す試料は全くなく, 南部阿武隈地域も600以上を示すものは殆ど見当たらない。鳴子地域及び大平山地域は両地域ともマイロナイト帯で東西に区分され(笹田, 1984, 1985; 藤本, 2006), かつ試料の絶対数の不足と Fe_2O_3 (全鉄)の変化幅の不足により求めたトレンドの信頼度は低い。村上地域, 足尾帯北部, 足尾帯南部(上越帯を含む)は $\kappa_{SI}=60$ 以下の試料(弱磁性)の割合が圧倒的に多い。

c. 係数aについて詳しく見ると北部北上山地(II帯)の一部に見られるアダカイト質花崗岩(SiO_2 63.8~71.0%, Fe_2O_3 5.87~1.68%)は, 他のカルケアルカリ岩に比べて Fe_2O_3 (全鉄)の変化範囲が非常に狭く係数の絶対値が最も大きい, 阿武隈山地の双葉(畑川)破碎帯東部の同質岩(割山庄碎花崗閃緑岩および松川浦試錐コア, SiO_2 62.55~71.44%, Fe_2O_3 4.43~1.81%)もこれに準ずる。これはアダカイト質花崗岩のもつマグマの性質と, 分化の特徴を示すものであろう。またその酸化比の一部が磁鉄鉱の理論値66.7を越しているのも何らかの意味を持つのかも知れない。

全鉄と酸化比の関係は, 大局的に磁化率と酸化比は比例関係を示すものの, 磁化率の強さにより酸化比で分けた3つの領域はそれぞれかなり重複しており, 個々の試料で見た場合, Fe_2O_3 (全鉄)含有量と酸化比の大小関係だけで磁化率の大きさを単純に論ずることは困難と考えられる。これにはすでに述べたように, マグマ系列の違いや, 貫入時の壁岩との反応問題などいくつかの要因が考えられるが, 今後, 地質年代, マグマ系列, 不透明鉱物の鏡下観察結果なども含め, より詳

細な検討が必要と思われる。

8. 東日本に見られる花崗岩類の総括

東日本に露出する白亜紀-古第三紀花崗岩類約1,200試料の酸化比を含む取りまとめ(第1表)を行うと以下の様である。これまで日本列島は棚倉破碎帯を境として東北日本, 西南日本に分けられ今回取り扱った足尾帯(上越帯を含む)は地質構造的に見て西南日本の東端(東北端)に位置している地域である。

- 1) 密度についてみると平均密度が $\rho_d=2.75$ を超えるのは北上山地のみであり, 2.66以下を示すのは村上地域の一部および足尾帯にみられる。
- 2) 孔隙率はほぼ0.9%以下であり, その最頻値も0.7%で風化の影響がない場合, 地域的に見ても大きく変わらないものと考えられる。また優黒質の岩石ほど孔隙率は小さい。
- 3) 磁化率の最頻値は北上山地が圧倒的に高く強磁性花崗岩であり, ついで阿武隈山地に見られるアダカイト質花崗岩そして栗駒-鳴子地域の一部である, ついで阿武隈山地双葉破碎帯-畑川破碎帯間に $300-600 \times 10^{-5}$ 程度の試料がみられる。
- 4) Q_n 比(Königsberger ratio)は大半が0.4以内に入り, 0.2以下が最も多い。このことは磁気探査を行う場合, 花崗岩の残留磁化の影響は殆ど考慮する必要がない。
- 5) 磁化率の大きさ(弱, 中, 強)で分類した試料を, 酸化比(oxidation ratio)と全鉄(Fe_2O_3)で対比し, 各地域毎に1次式で相関を求めたところ磁化率の大きさに応じて相関関係は求まるものの, 相関係数は極端に悪く, 両者の間にいくつかの要因が介在することが推測される。言い換えれば花崗岩質岩の場合, 磁化率(磁鉄鉱含有量)は岩石の鉄含有量と酸化指数だけで一義的に決まるものではない事を意味しているものと思われる。

謝辞: 本稿をまとめるに当り産業技術総合研究所の高橋浩博士には飯豊山花崗岩体と足尾帯の分類について多くの助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。

文 献

- Bateman, P.C., F.C.W., Dodge, and R.W., Kistler (1991) Magnetic susceptibility and relation to initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ for granitoids of Central Sierra Nevada, California. *J. Geophys. Res.*, **96** (B12), 19555-19568.
- Buddington, A.F., and D.H., Lindsley (1964) Iron - titanium oxide minerals and synthetic equivalents, *J. Petrol.*, **5**, 310.

- 茅原一也 (1986) 上越帯・足尾帯の構造地質学的・岩石学的研究. 総研「上越帯・足尾帯」研究報告 no.3 84p
- 地質調査所技術部化学課 (1978) 地球化学的試料の化学分析法 2. 地質調査所分析法 no.51, p.280.
- Dodge, F.C.W. (1972) Variations of ferrous-ferric ratios in the central Sierra Nevada batholith, U.S.A., *Proc. Int. Geol. Congr.*, 24th, 12-19.
- 藤本幸雄 (2006) 秋田県太平山複合花崗岩質岩体の岩石学的研究. 岩石鉱物科学, **35**, 253-269.
- 今岡照喜・松久幸敬・村上允英 (1977a) 島根県雲城花崗岩体について—地表水関与の問題に寄せて—. *MAGMA*, **51**, 8-14.
- 今岡照喜・松久幸敬・村上允英 (1977b) 地質学会演旨, 43.
- 金谷 弘 (1996) 福島県相馬市の試錐コア—の化学組成と磁性についての 2—3 の知見—松川浦試錐コア—の花崗岩類—. 岩鉱, **91**, 364-372.
- 金谷 弘・大熊茂雄 (2003) 物理定数から見た白亜紀—古第三紀花崗岩類—その 1. 東北地方北部. 地調研報, **54**, 303-313.
- 金谷 弘・大熊茂雄 (2007) 物理定数から見た白亜紀—古第三紀花崗岩類—その 2. 東北地方南部. 地調研報, **58**, 239-252.
- 片田正人・大貫 仁・加藤裕三・蟹沢聡史・小野千恵子・吉井守正 (1971) 北上山地, 白亜紀花崗岩類の帯状区分. 岩鉱, **65**, 230-245.
- 小玉一人 (1999) 古地磁気学. 東京大学出版会, 248p.
- Lindsay, D.H., G.E., Andreasen, and J.R., Balslay (1966) Magnetic properties of rocks and minerals, Handbook of Physical constants, rev. ed., *Mem. Geol. Soc. Am.*, **97**, 543-552.
- 村山正郎・河田清雄 (1956) 5 万分の 1 地質図幅「燧嶽」. 地質調査所.
- Rezanov, A.I., K. Shuto, S. Iizumi, and T. Simura (1999) Sr and Nd isotopic and geochemical characteristics of Cretaceous — Paleogene granitoid rocks in the Niigata area, the northernmost part of the Southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **53**, 269-286.
- 笹田正克 (1984) 神室山—栗駒山地域の先新第三紀基盤岩類—その 1. 鬼首—湯沢マイロナイト帯—. 地質雑, **90**, 865-874.
- 笹田政克 (1985) 神室山—栗駒山地域の先新第三紀基盤岩類—その 2. 阿武隈帯と北上帯の境—. 地質雑, **91**, 1-17.
- 柴田 賢・蜂須紀夫・内海 茂 (1973) 八溝山地の花崗岩類の K-Ar 年代. 地調月報, **24**, 513-518.
- 須藤定久・牧本 博・秦 光男・鶴ノ沢 昭・滝沢文教・坂本 亨・駒澤正夫・広島俊男 (1991) 20 万分の 1 地質図「宇都宮」, 地質調査所.
- 角 靖男・笹田政克・広島俊男・駒澤正夫 (1985) 20 万分の 1 地質図「新潟」, 地質調査所.
- 高橋 浩・山元孝広・柳沢幸夫 (1996) 「飯豊山地域の地質」. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所.
- Takenouchi, K., and Y. Takahashi (2002) Deformation history of low - grade shists in the Joetsu region, central Japan -Correlation between the Kawaba and Mizunashigawa metamorphic rocks-. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **108**, 794-805.
- 竹内圭史・加藤碩一・柳沢幸夫・広島俊男 (1994) 20 万分の 1 地質図「高田」. 地質調査所.
- 山元孝広・瀧澤文教・高橋 浩・久保和也・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久 (2000) 20 万分の 1 地質図, 「日光」. 地質調査所.
- 矢内桂三 (1972) 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類, その 1, 地質. 岩鉱, **67**, 193-202.
- 矢内桂三 (1973a) 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類, その 2, 岩石並びに造岩鉱物の記載とその考察. 岩鉱, **68**, b6-29.
- 矢内桂三 (1973b) 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類, その 3, 形成機構と成因的考察. 岩鉱, **68**, 78-96.
- 吉田 尚・笠井勝美・青木ちえ (1976) 八溝山系の地質と足尾帯の構造. 地質学論集 第 13 号 15-24.

(受付: 2009 年 2 月 25 日; 受理 2009 年 7 月 17 日)