

物理定数から見た白亜紀—古第三紀花崗岩類— その 4. 西南日本内帯

金谷 弘^{1,*}・大熊茂雄¹

Hiroshi Kanaya and Shigeo Okuma (2011) Physical properties of Cretaceous to Paleogene granitic rocks in Japan: Part 4. A case of the inner zone of Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 62(5/6), p. 000-000, 9 figs, 1 table.

Abstract: About 1500 granitic rocks exposed in the inner zone of Southwest Japan were collected and measured on their physical properties such as density, porosity, magnetic susceptibility and Natural Remanent Magnetization (NRM). The results were classified in seven areas (Hokuriku, Chubu, east Kinki, west Kinki, east Chugoku, central Chugoku and north Kyushu) and their geologic time (late Cretaceous: K₁₋₂, K₂, Paleogene: PG₁, PG₂, Neogene: N₁, N₃) and compared with the same geologic time between each area.

1. Density

The mean density of K₁₋₂ (older Ryoke) of the Chubu area, east Kinki area, and K₂ of the north Kyushu ranges 2.72~2.74 (g/cm³=10³kg/m³) and that of the PG₁ of the Hokuriku area, PG₂ of the central Chugoku area shows 2.62.

2. Porosity

The mean porosity shows 0.45% in the east Kinki area K₂ (younger Ryoke) and 1.27%, PG₂ of the central Chugoku area with the mode of 0.22 to 0.79%. Rock density is inversely proportional to its porosity.

3. Magnetic susceptibility

Magnetic susceptibilities of K₁₋₂ (older Ryoke) and K₂ (younger Ryoke) in the Chubu area and K₁₋₂ and K₂ in the east Kinki area show lower value of 10⁻⁴. Magnetic susceptibilities of the K₂ in the Hokuriku area, west Kinki area and central Chugoku area show from 10⁻⁴ to 10⁻³. In addition, those of K₂ of the east Chugoku area and north Kyushu area (west part) contain small amount of 10⁻² order. Most of Paleogene PG₁, PG₂ samples show relatively strong magnetic susceptibilities of 10⁻³ and 10⁻² but some show weak susceptibility of 10⁻⁴.

4. Density and magnetic susceptibility

Considering the basicity of rocks, measured results are classified by Kanaya and Okuma (2010) into four groups, paramagnetic, low magnetic, medium magnetic and high magnetic. Accepting this classification, granitic rocks K₁₋₂ and K₂ of the Chubu and east Kinki areas are defined as paramagnetic to low magnetic zone, K₂ of the Hokuriku area, west Kinki area and central Chugoku area contain paramagnetic to medium magnetic samples and K₂ of east Chugoku area contains paramagnetic to medium samples and small amount of high magnetic samples.

5. Natural Remanent Magnetization (NRM)

No relationship between the density and NRM is observed but there is a correlation between the magnetic susceptibility and NRM. Königsberger ratio (Qn) of about 90 percent rock samples shows less than 0.4.

These results are summarized in Table 1 (physical properties of Cretaceous to Paleogene granitic rocks in the inner zone of Southwest Japan).

Keywords: density, porosity, magnetic properties, granitic rocks, the inner zone of Southwest Japan.

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

要旨

西南日本内帯の花崗岩類の密度、孔隙率、磁化率の測定を行った。

密度についてみると、中部地域、東近畿地域の K_{1-2} (古期領家) および北九州地域の K_2 (新期領家) の平均密度が $2.72 \sim 2.74$ ($\text{g}/\text{cm}^3 = 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 以下同様) と最も大きく、北陸地域の古第三紀 (暁新世) 及び中央中国地域の古第三紀 (始新世) 花崗岩が 2.62 で最も小さい。

孔隙率についてみると、平均孔隙率は東近畿地域 (新期領家) が 0.45% で最も低く中央中国地域、古第三紀 (始新世) の 1.27% で最も大きい。その最頻値はほぼ 0.22 から 0.79% であっておおざっぱにみて平均密度に逆比例している。

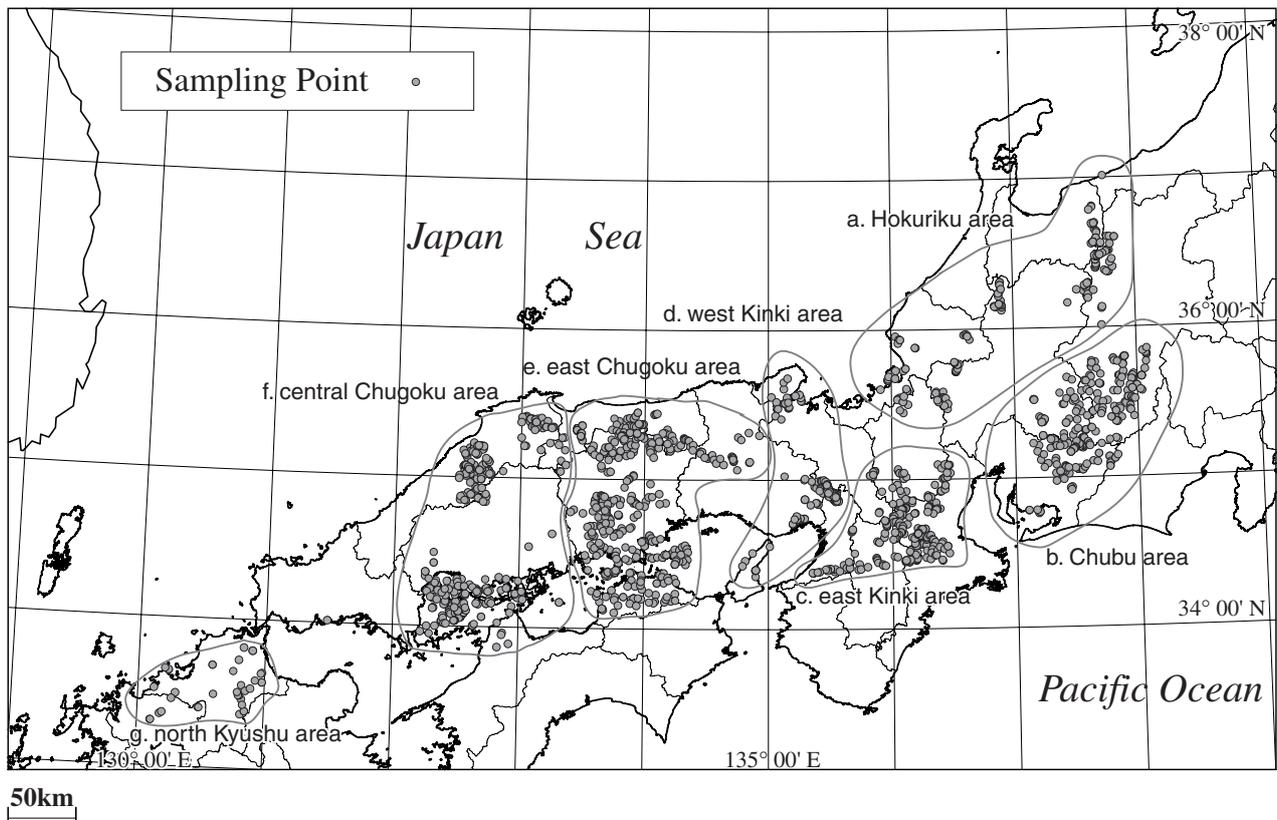
磁化率についてみると白亜紀後期に分類される試料 (K_{1-2} , K_2) は中部地域、東近畿地域そして中央中国地域では 10^{-4} (SI 単位, 以下同様) 前半の試料が非常に多く、北陸地域、西近畿地域では 10^{-3} 前半の試料が加わる。東中国地域と北九州西部地域は更に 10^{-2} を示す試料がある程度存在する。古第三紀に分類される試料 (PG_1 , PG_2) は 10^{-4} の試料が一部存在するものの、 10^{-3} の試料に加え 10^{-2} の強度を示す試料が主流を占める。

残留磁化と密度の相関は全く見られないが、残留磁化と磁化率の相関 (Q_n 比) は時代区分に関係なく 0.2 ~ 0.3 付近に見られる。これは火山岩に比べ花崗岩の強磁性鉱物の磁区構造がかなり大きいことを意味しているものと考えられる。

1. はじめに

本研究は、日本列島を構成する基盤深成岩類の中で花崗岩類を対象にそれらが共通してもつ性質や、各時代、地域が持つ特有の性質を明確にし、岩石の成因や地質構造の解析、災害予知など各方面に必要な基礎資料を提供する事を目標に取りまとめを行っている。今回は西南日本内帯を対象に、これらを北陸地域 (北アルプス・白川地区)、中部地域、東近畿地域、西近畿地域、東中国地域、中部中国地域そして北九州地域 (第1図) に分けて記載した。

今回用いた時代区分は 100 万分の 1 日本地質図第 3 版 (地質調査所, 1992) である。それによれば深成岩類を表す記号として中生代白亜紀前期 (K_1)、同後期 (K_2 ; 新期領家) 両者の中間を (K_{1-2} ; 古期領家), 新生代古第三紀暁新世 (PG_1), 始新世 (PG_2), 漸新世 (PG_3), 新



第1図 研究対象地域と岩石採取地点。

a : 北陸地域, b : 中部地域, c : 東近畿地域, d : 西近畿地域, e : 東中国地域, f : 中央中国地域, g : 北九州地域。

Fig. 1 Sampling sites in the inner zone of Southwest Japan.

a: Hokuriku area, b: Chubu area, c: east Kinki area, d: west Kinki area, e: east Chugoku area, f: central Chugoku area, g: north Kyushu area.

生代新第三紀を (N_1 , N_2 , N_3) として表現している. これらをもとに今回扱った岩石試料の年代は K_{1-2} から K_2 , PG_1 , PG_2 そして N_1 , N_3 に到る. この区分によれば従来の領家帯・山陽帯は主として K_{1-2} , K_2 , 同じく山陰帯は PG_1 , PG_2 , それに岐阜・福井県に N_1 , 北アルプスに N_3 が見られる. N_1 , N_3 に関しては甲府・丹沢・西南日本外帯など新第三紀花崗岩類 (N_2 , N_3) などが存在するので, 稿を改めることとし, ここでは簡単な記載にとどめる.

これまで, 西南日本内帯に露出する花崗岩類は白亜紀から古代三紀に至る岩石が, 南から北に向かって領家帯・山陽帯そして山陰帯と東西に帯状構造を示すような形で記載されてきた. しかしこれらは村上 (1979) や飯泉ほか (1985) にも指摘されているように, これら帯間の境界は全域を通じて必ずしも明瞭なものではなく, それらが持つ諸種性質による区分と同位体年代などによる区分が必ずしも一致しておらず問題もある. しかしこれらは大局的に共通した地質学的・岩石学的特徴を持っていることも事実であって, 木野崎 (1953) による鉍床学的見地から領家帯以北に分布する貫入岩類を広島花崗岩区と山陰花崗岩区に区分して以来, この区分は多くの人達に受け継がれ利用されてきている. 今回は西南日本のこれら花崗岩類が持つ物理的諸性質を地質年代による区分を基に物理定数で再考察した. 参考にしたのは前述の100万分の1日本地質図第3版 (地質調査所, 1992) およびその後出版された同位体年代と地質図である. 日本の花崗岩類の同位体年代はこれまで $K-Ar$ 法による結果が多いが, $K-Ar$ 法による欠点は, 比較的低温においてもアルゴンガスが鉍物から失われ $300^{\circ}C$ 以下に冷却された後の年代を示しているに過ぎないと考えられるものもあり信頼度は高くない. しかし20万分の1地質図幅「豊橋および伊良湖岬」(牧本ほか, 2004) は放射年代値を CHIME (モナザイト) 法で測定したものを集約し, 現時点では最も信頼度が高いと考えられるが, 同種のもののはこれ以外になく, $Rb-Sr$ 法による値も含めて全体像を考察した. 従って今後, CHIME 法による年代値が増えればある程度の見直しが必要となる可能性が残る. 今回対象とした地域は中央構造線西側, 富山・長野県, 北アルプス地域から福岡県北九州市に至る地域であるが広島県下の一部地域, 愛媛県高縄半島の試料数が少なく, かつ山口県下の試料を欠いているのでこれら周辺地域の結果は参考値として見て頂きたい. また西南日本内帯最東端と考えられる足尾帯 (金谷・大熊, 2010) の一部にも山陽帯の特徴の一部に共通した性質が見られるのでこれら結果についても記載した.

2. 研究の概要

西南日本内帯にみられる地質学的・鉍床学的研究の歴史は非常に古くその報告も膨大な数にのぼる. 他方, 地

球物理的手法によるものとしては, 重力探査, 地震探査, 空中磁気探査, 電磁探査などがあるが系統的に両者をつなぐ研究は少ししか行われて来ていない. そのため日本列島の露出面積の約12%を占める基盤花崗岩類に着目し, 日本列島全体の物理定数 (岩石密度, 孔隙率, 磁化率, 残留磁化そして弾性波速度など) を同一精度で求め, それらの関係を明確にし, 成因などに関する新知見を得ることを目標にした. またこれら結果は当然重力探査や磁気探査の構造解釈の一助になる事が考えられる. 今回は磁化率の強さを参考とした山陽帯, 山陰帯 (金谷・石原, 1973) の結果を地質年代を基に再考察した. ここで使用した岩石試料およびその詳細については, 産業技術総合研究所のRIO-DB (研究情報公開データベースの一貫としてwebサイト <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/pb-rock21/index.html>) からダウンロードが可能である.

今回使用した地質図は100万分の1日本地質図第3版, 地質調査所 (1992), 20万分の1地質図幅; 日光 (山元ほか, 2000), 富山 (原山ほか, 1996), 高山 (山田ほか, 1989), 金沢 (鹿野ほか, 1999), 飯田 (山田ほか, 1990), 豊橋及び伊良湖岬 (牧本ほか, 2004), 岐阜 (脇田ほか, 1992), 宮津 (黒田, 1968), 京都及大阪 (河田ほか, 1986), 和歌山 (栗本ほか, 1998), 鳥取 (上村ほか, 1974), 姫路 (猪木, 1981), 徳島 (牧本ほか, 1995), 松江及び大社 (坂本ほか, 1982), 高梁 (寺岡ほか, 1996), 岡山及丸亀 (松浦ほか, 2002), 浜田 (鹿野ほか, 1988), 広島 (山田ほか, 1986), 福岡 (久保ほか, 1993). つぎに5万分の1地質図幅; 立山 (原山ほか, 2000), 大町 (加藤ほか, 1989), 槍ヶ岳 (原山ほか, 1991), 信濃池田 (加藤・佐藤, 1983), 敦賀 (栗本ほか, 1999), 近江八幡 (吉田ほか, 2003), 呉 (東元ほか, 1985), 厳島 (松浦ほか, 1999) である. その他30万分の1東中国花崗岩地域地質図 (笹田ほか, 1979) も参考にした.

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の岩石塊より磁化率, 残留磁化そして密度測定用に円筒カッターを用いて円柱試料を切り出し, これを一定の長さで切って円筒試料を作成した. 円筒試料の大きさは直径, 長さともに25.4 (または25.0) mmである. この円筒試料数個を測定し, その平均値を用いた. 円筒試料の大きさは帯磁率計 (磁化率計) およびスピナー磁力計の試料ホルダーの形状による.

3.2 測定器および測定方法

密度測定は試料の3つの状態を秤量する1.強制湿潤状態における水中重量, 2.これを空気中に取り出し試料表面に付着している水をふき取り空中重量, 3.強制乾燥状態における空中重量である. 秤量は上皿天秤の下部

第1表 西南日本内帯に露出する白亜紀・古第三紀花崗岩類の物理定数のとりまとめ.

Table 1 Physical properties of Cretaceous to Paleogene granitic rocks in the inner zone of Southwest Japan.

	地質年代 (geologic time)			試料数	密度変化範囲	平均密度	最頻値	平均孔隙率	最頻値	磁化率最頻値	Qn比	
				sample n	density variation range	mean density (10 ³ kg/m ³)	mode	mean porosity (%)	mode	magnetic susceptibility (x10 ⁻⁵) SI	Qn ratio	
北陸地域 Hokuriku area	K ₂	PG ₁		54	2.58-2.82	2.65	2.60 2.66	0.83	0.43	20	< 0.4	
				52	2.58-2.72	2.62	2.59 2.65	0.95	0.55 1.00	20 660 1430	< 0.4	
			N ₁	21	2.62-2.77	2.70	2.72	0.99	0.58	2550	< 0.4	
				39	2.59-2.94	2.67	2.62 2.67	1.08	0.95	870 1570	< 0.4	
中部地域 Chubu area	K ₁₋₂			62	2.60-2.87	2.72	2.68 2.75	0.67	0.42	20	< 0.4	
	K ₂			176	2.58-2.90	2.67	2.65	0.83	0.44 0.78	15	< 0.4	
東近畿地域 east Kinki area	K ₁₋₂			56	2.63-2.93	2.74	2.65 2.78	0.45	0.30	30	< 0.4	
	K ₂			169	2.57-3.03	2.67	2.60 2.65	0.62	0.46	13	< 0.4	
西近畿地域 west Kinki area	K ₁₋₂	K ₂		150	2.57-2.88	2.68	2.60 2.65 2.77	0.82	0.22 0.61?	13 109 322	< 0.4	
							2.66		2.64	0.49	0.35	600 1560
			PG ₁		21	2.60-2.88	2.66	2.64	0.49	0.35	600 1560	< 0.4
東中国地域 east Chugoku area	K ₂	PG ₁		239	2.57-3.03	2.66	2.62	0.80	0.59	15 1810	< 0.4	
				84	2.58-2.88	2.65	2.60 2.65	0.89	0.39 0.79	590 1020 2800	< 0.4	
				14	2.56-2.79	2.62	2.60	1.32	780 1350	< 0.4		
中央中国地域 central Chugoku area	K ₁₋₂	K ₂		4	2.56-2.91	2.74	2.61 2.58 2.67	0.51	0.58 0.25 0.59 1.09	10 18 340 1600 2500	< 0.4	
				152		2.65					1.10	0.58
			PG ₁		126	2.56-2.95	2.66	2.67	1.15	0.25	18	< 0.4
					74	2.55-2.85	2.62	2.57 2.63	1.27	0.79 1.82	8 163 1180 2570	< 0.4
北九州地域 north Kyushu area	K ₂			42	2.59-3.10	2.73	2.70	0.62	0.38	30 1590	< 0.4	
合計 (total)				1535								

フックにケージを吊るし試料を乗せ水中重量を、ついで空中に取り出し表面水を短時間でふき取り空中重量を測定する。この際使用した水は水道水を活性炭とイオン交換樹脂を通したものをを用いた。強制湿潤状態は水につけた試料を真空槽中で減圧し、一定時間その状態を確保することで可能であり、乾燥重量の測定は強制乾燥状態(またはそれと類似の状態)が必要であるが、この測定では試料中の自然残留磁化(NRM)の消滅や試料の変形を恐れ熱を加えることを避けた。このため測定試料を特殊空調室に長期間放置する、真空槽中に長時間放置するなどの方法を取った。

磁化率測定はBison3101型帯磁率計(Bison社, 米国)

およびMS2 (MS2B)型帯磁率計(Bartington社, 英国)を用い双方で測定を行い、それぞれの平均値で確認を行った。測定値の再現性は非常に良好である。残留磁化測定はスピナー磁力計“SMD88”型(夏原技研, 日本国)を使用した。またこれら値はSIにて表示した。残留磁化測定に用いた“SMD88”型スピナー磁力計は、X, Y, Z軸方向それぞれ4回(6スピン)スタック回数35回の時、全磁力のバラツキ(1σ)が50%を示す時の値はおおよそ3x10⁻³ (x10⁻⁶Am²)で単位体積あたり2.3x10⁻⁴ (A/m)であり、花崗岩の弱い試料の測定には必ずしも十分な感度ではない。磁化率は無名数、磁化はA/m表示である。

4. 測定結果

測定結果を表示するのに花崗岩類の分化指数として密度(乾燥密度, ρ_d)を横軸に使用した. 花崗岩類を表示する場合, 通常 SiO_2 や DI (Differentiation Index) 等が使用される場合が多い. SiO_2 の変化は一般に 40 ~ 77% (重量比) 程度でありこれが 0.1% 程度の精度をもつとすると密度の変化範囲は 2.58 ~ 3.10 で密度測定の精度は当報告では 0.002 程度が確保されているので精度的には問題はないものと考えられる. 今回検討地域の 1 つ, 中部地域の元素 (SiO_2 , Fe_2O_3 (全鉄)) と密度の関係 (第 2 図 a および b) を表示した. 1 次式 ($y=ax+b$) で近似したが, 両元素とも係数, 定数ともに北上山地 (金谷・大熊, 2003), 阿武隈山地 (金谷・大熊, 2007) の結果と大差なく花崗岩類のこれら元素は密度と密接な関係にあることが認められる.

次に, 第 1 図の地域区分と時代区分 (白亜紀後期, 古第三紀そして新第三紀) に従い岩石を分類すると a. 北陸地域 (北アルプス, 白川地区) (K_2 , PG_1 , N_1 , N_3), b. 中部地域 (K_{1-2} , K_2), c. 東近畿地域 (K_{1-2} , K_2), d. 西近畿地域 (K_{1-2} , K_2 , PG_1), e. 東中国地域 (K_2 , PG_1 , PG_2), f. 中央中国地域 (K_{1-2} , K_2 , PG_1 , PG_2), g. 北九州地域 (K_2) (第 1 表) である.

4.1 密度

これら 7 地域の K_{1-2} , K_2 (白亜紀後期) の密度のヒストグラムを示す (第 3 図 a ~ i).

北陸地域の K_2 に分類される花崗岩の乾燥密度 (ρ_d) の平均値 (ρ_{av}) は 2.65 でその最頻値は 2.60 と 2.66 にみられる. これらの岩石の多くは 5 万分の 1 地質図「大町」(加藤ほか, 1989) に記載されている有明花崗岩である. 中部地域にみられる K_{1-2} (古期領家) の平均値は 2.72 でその最頻値は 2.68 と 2.75 に見られる. 同様に K_2 (新期

領家) の平均値は 2.67 でその最頻値は 2.65 である.

東近畿地域の K_{1-2} の平均値は 2.74 であってその最頻値は 2.65 と 2.76 に見られる. 同様に K_2 の平均値は 2.68 で最頻値は 2.60 と 2.65 にみられる.

西近畿地域の K_{1-2} の試料は, 淡路島に数個存在するものの数が少ないためこれを省略した. K_2 の平均は 2.68 その最頻値は 2.60, 2.65 そして 2.77 である.

東中国地域にみられる K_2 の平均は 2.66, 最頻値は 2.62 である.

中央中国地域に見られる K_2 の平均値は 2.65 で, その最頻値は 2.61 である.

北九州地域に見られる K_2 は平均値 2.73, 最頻値は 2.70 であった.

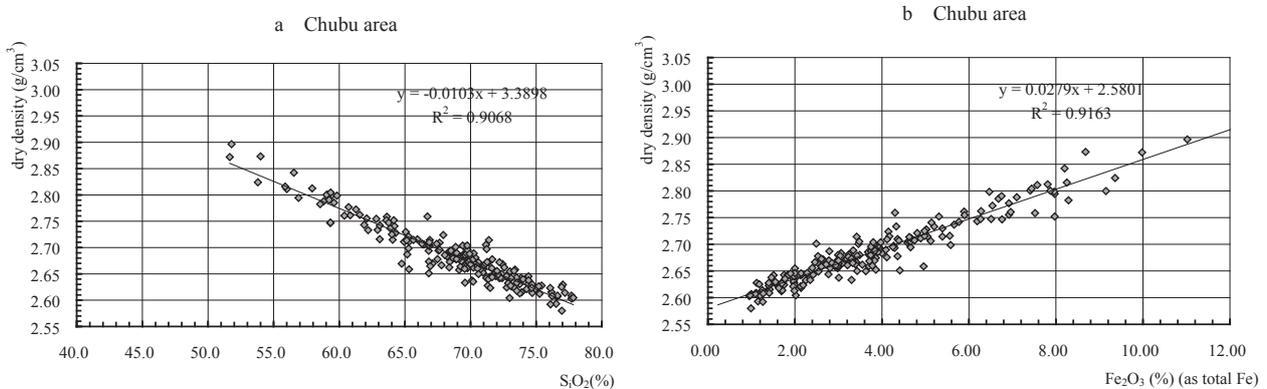
次に新生代古第三紀に分類される PG_1 , PG_2 (第 3 図 j ~ o) についてみると, 北陸地域の PG_1 は岐阜県白川村から富山県上平村, 利賀村に到る白川谷付近に分布する古第三紀花崗岩類に琵琶湖北部から若狭湾にかけて分布する江若花崗岩を含む. これらの平均密度は 2.62 で最頻値は 2.59 と 2.65 である.

西近畿地域における PG_1 は宮津花崗岩のみであり平均密度 2.66, 最頻値 2.64 である.

次に東中国地域には PG_1 , PG_2 がみられ, PG_1 の平均密度 2.66, 最頻値 2.60, 2.65, PG_2 はそれぞれ 2.62, 2.60 である.

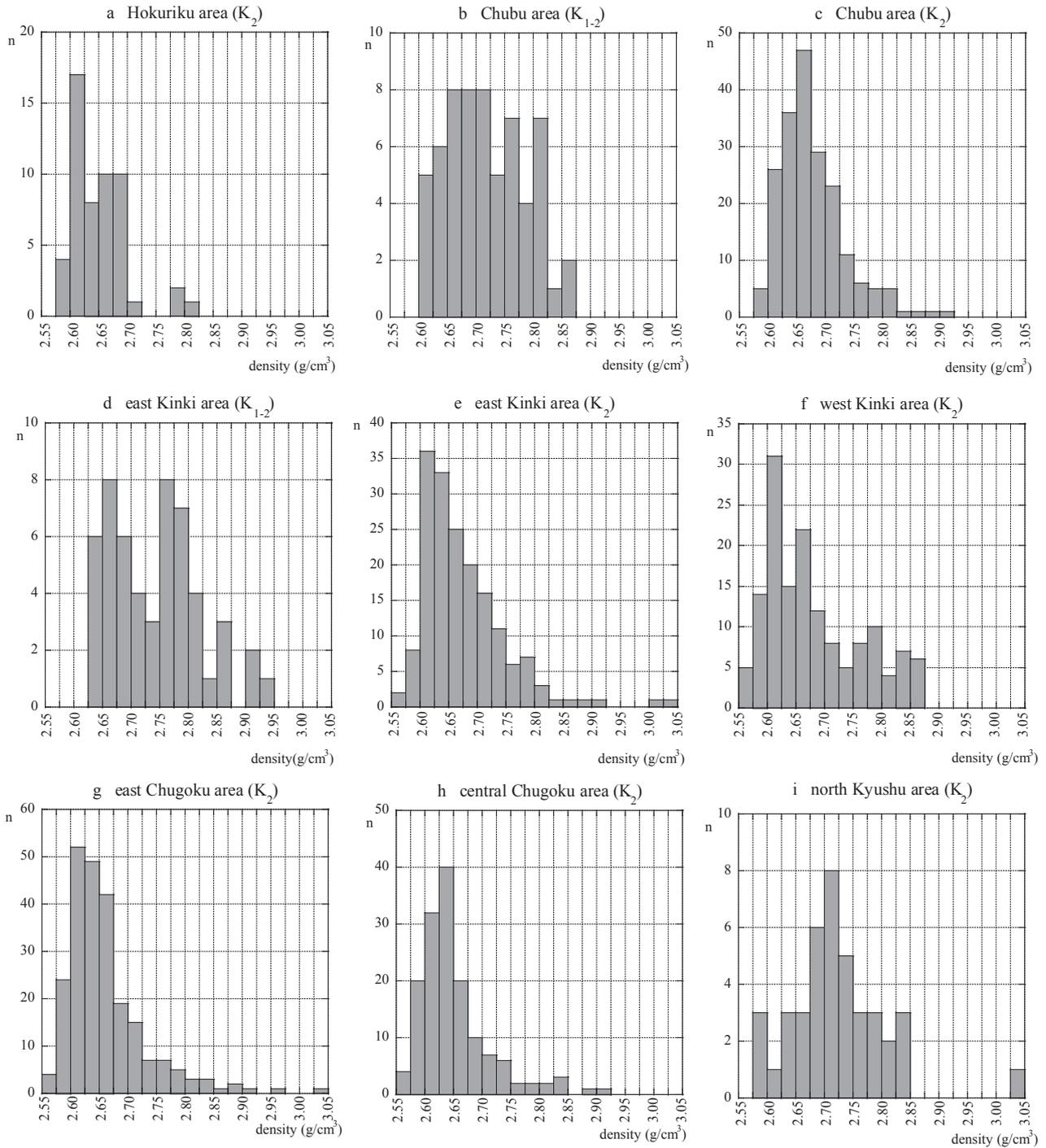
中央中国地域にも PG_1 , PG_2 があり PG_1 の平均密度 2.66, 最頻値 2.58, 2.67 であり, PG_2 の平均密度は 2.62 最頻値は 2.57, 2.63 である.

このほか北陸地域には新生代新第三紀花崗岩類 (第 3 図 p, q) の N_1 , N_3 は, それぞれ N_1 の平均密度 2.70, 最頻値 2.72 で, N_3 の平均密度 2.67, 最頻値 2.62, 2.67 がみられる.



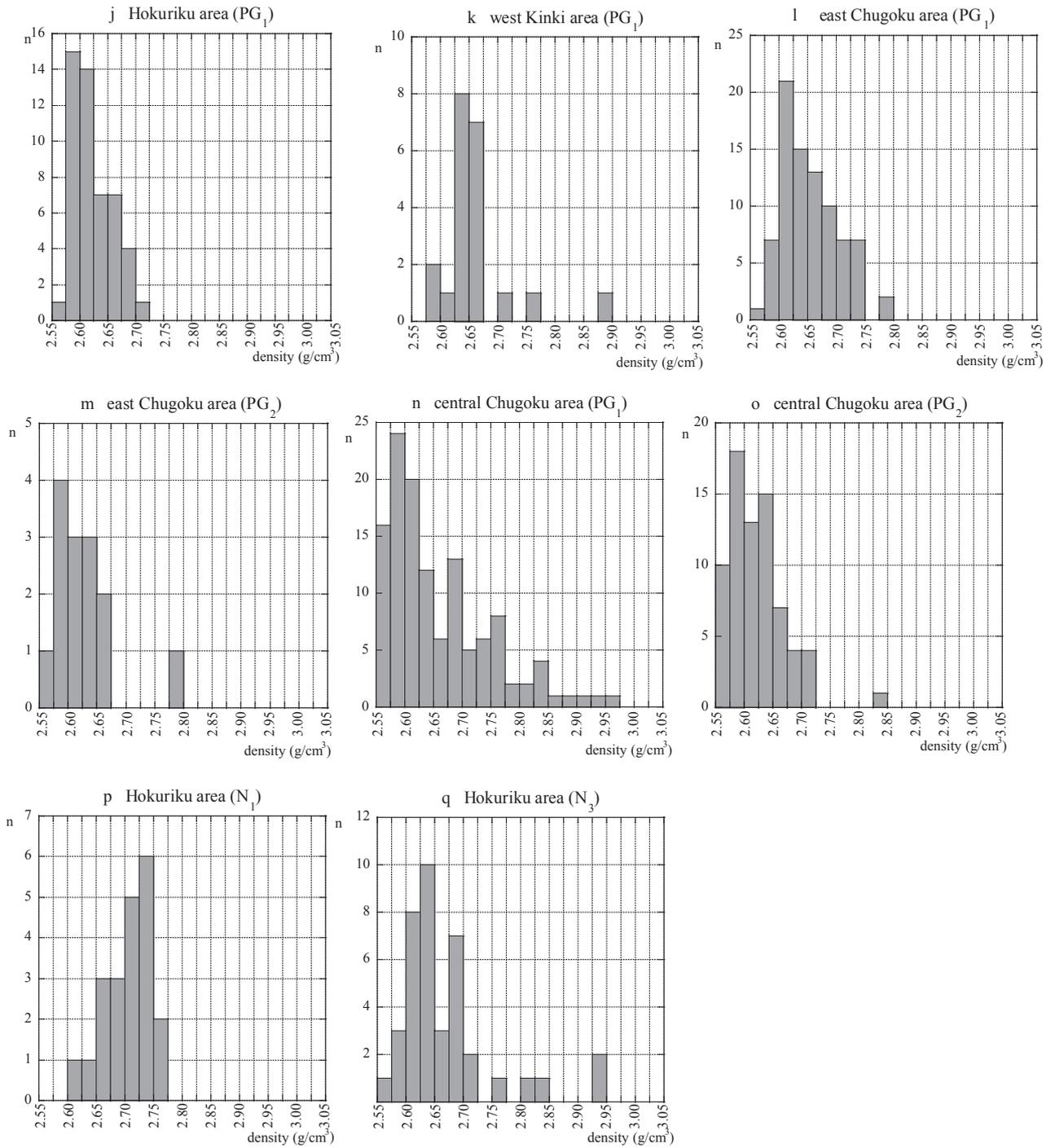
第 2 図 中部地域の密度と化学元素 (SiO_2 および Fe_2O_3 (全鉄)) の対比図.

Fig. 2 Relationship between density and chemical elements (SiO_2 , Fe_2O_3 as total Fe) in Chubu area.



第3図 各地域でみられる密度の頻度分布図 (白亜紀後期 K_{1-2} , K_2 , 古第三紀 PG_1 , PG_2 , 新第三紀 N_1 , N_3). A:北陸地域 K_2 , b:中部地域 K_{1-2} , c:中部地域 K_2 , d:東近畿地域 K_{1-2} , e:東近畿地域 K_2 , f:西近畿地域 K_2 , g:東中国地域 K_2 , h:中央中国地域 K_2 , i:北九州地域 K_2 , j:北陸地域 PG_1 , k:西近畿地域 PG_1 , l:東中国地域 PG_1 , m:東中国地域 PG_2 , n:中央中国地域 PG_1 , o:中央中国地域 PG_2 , p:北陸地域 N_1 , q:北陸地域 N_3 .

Fig.3 Histogram of density distribution of each area (Late-Cretaceous: K_{1-2} , K_2 , Paleogene: PG_1 , PG_2 , Neogene: N_1 , N_3). a: Hokuriku area K_2 , b: Chubu area K_{1-2} , c: Chubu area K_2 , d: east Kinki area K_{1-2} , e: east Kinki area K_2 , f: west Kinki area K_2 , g: east Chugoku area K_2 , h: central Chugoku area K_2 , i: north Kyushu area K_2 , j: Hokuriku area PG_1 , k: west Kinki area PG_1 , l: east Chugoku area PG_1 , m: east Chugoku area PG_2 , n: central Chugoku area PG_1 , o: central Chugoku area PG_2 , p: Hokuriku area N_1 , q: Hokuriku area N_3 .



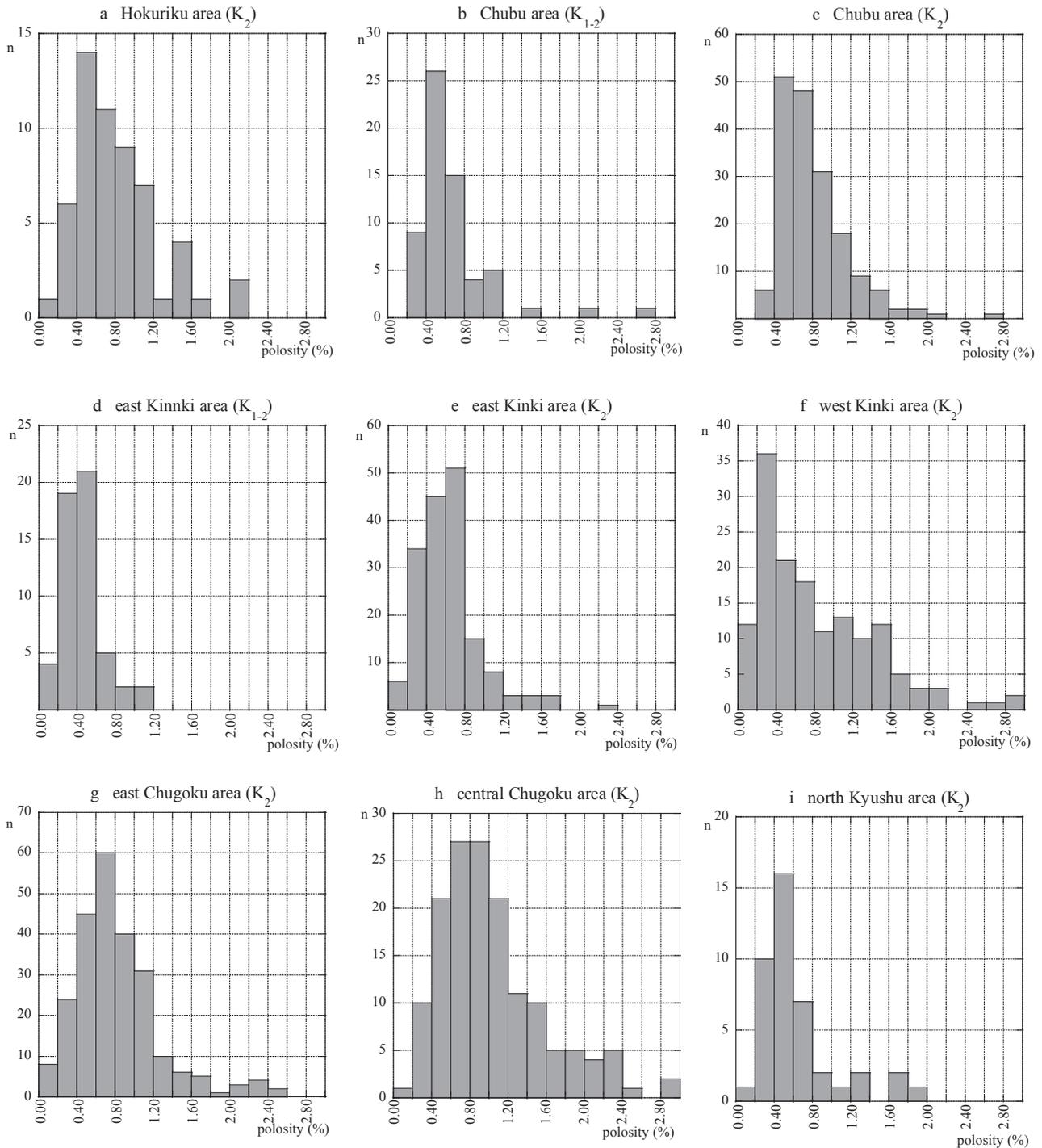
第3図 続き.

Fig.3 Continued.

4.2 孔隙率

K_{1-2} , K_2 の孔隙率については密度と同様 (第4図 a ~ q) で, その平均値でみると東近畿地域は K_{1-2} が 0.45% でもっとも低く, ついで東近畿地域の K_2 及び北九州地域の 0.62%, 中部地域 K_{1-2} の 0.67%, 東中国地域の 0.80%, 西近畿地域の K_2 の 0.82%, 中部地域及び北陸地域 K_2 の 0.83%, 中央中国地域の K_2 の 1.10% となっている. こ

れらを孔隙率の最頻値でみると, 西近畿地域の 0.22% が最も低く, 東中国地域の 0.59% で最も高い. PG_1 , PG_2 は西近畿地域の 0.49% が最も低く東中国地域の PG_2 で最も高い. 孔隙率は測定した岩石の風化・変質の進行状況と優白質・優黒質の割合を示すもので, 岩石密度の最頻値の低い値を示す地域ほど高い孔隙率がみられる. これらはまとめの項でさらなる検討を行う.



第4図 各地域で見られる孔隙率の頻度分布 (記号の区分は第3図参照).

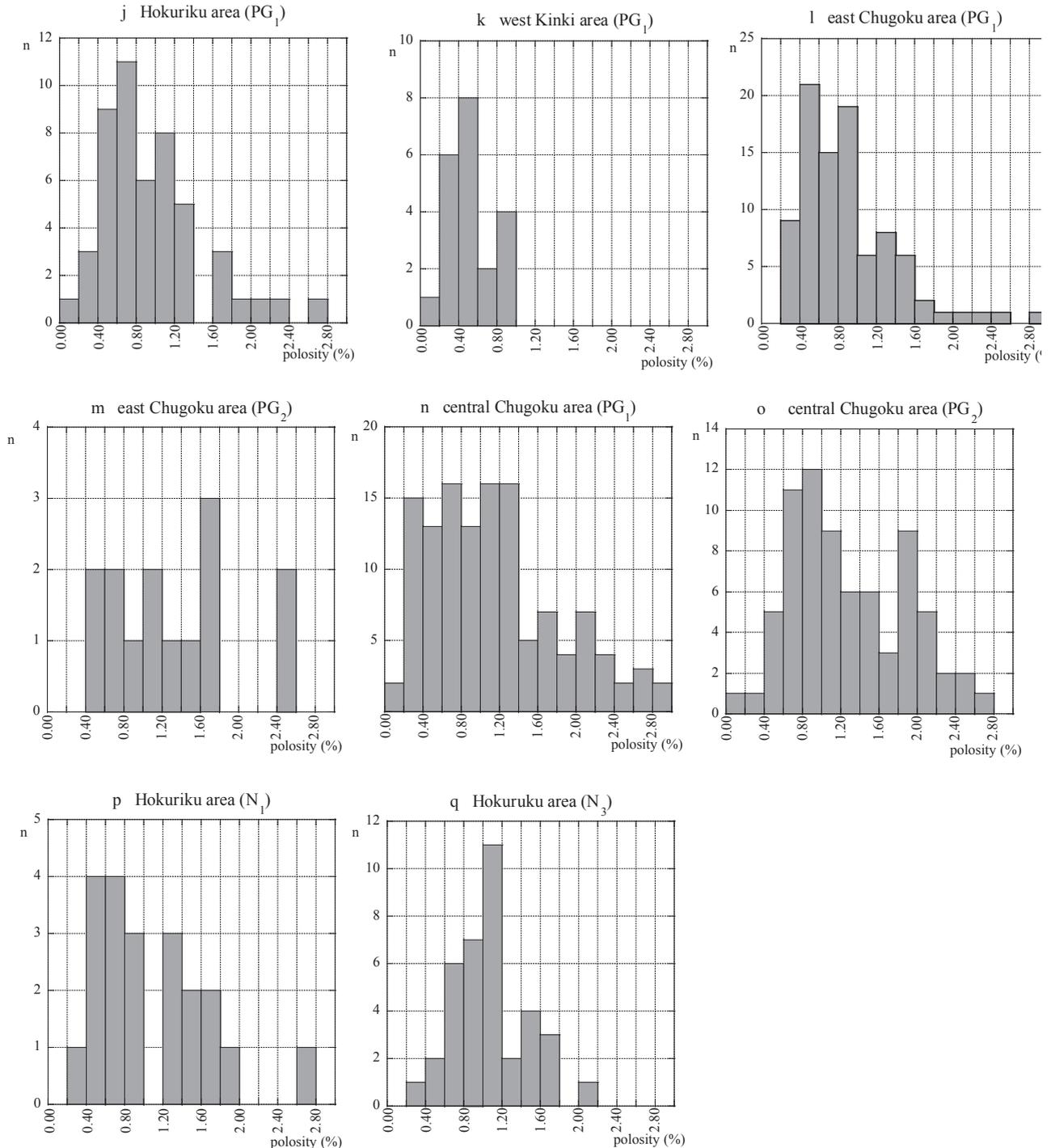
Fig.4 Histogram of porosity distribution of each area. See also Fig.3.

4.3 磁化率

磁化率の大きさのみで各地域をみると (第5図 a ~ q), 白亜紀後期に分類 ($K_{1,2}$, K_2) される花崗岩類は東中国地域および北九州地域西部を除き 1×10^{-2} を越す値を示すものは見られず大半の試料は $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ の弱い値を示す. 北陸地域, 西近畿地域の試料はこれに 10^{-3} オーダーの試料がある程度加わり, 東中国地域及び北九州地域西部は $1 \sim 2 \times 10^{-2}$ の高い値を示す試料がさらに加わる.

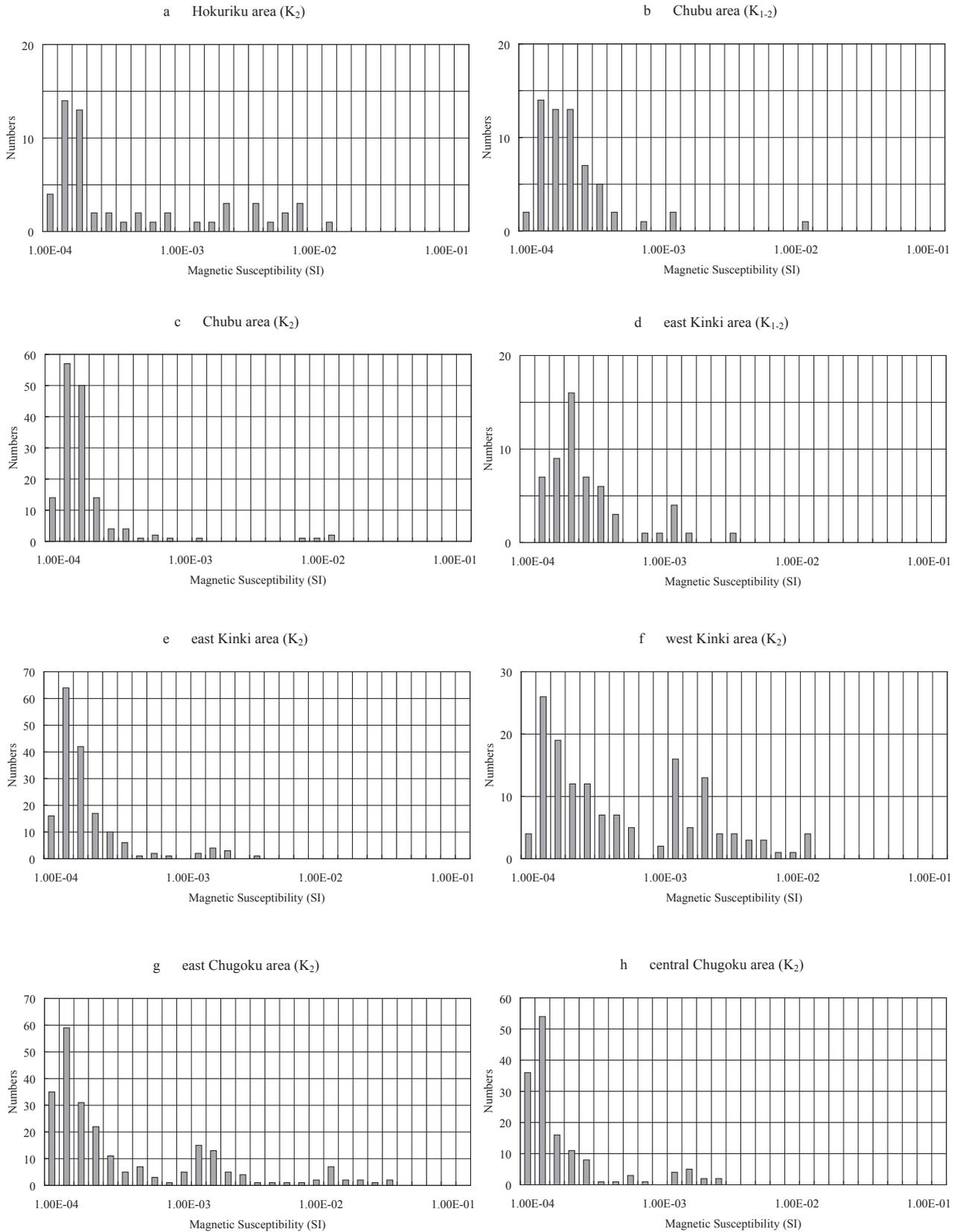
古第三紀に分類される花崗岩類 (PG_1 , PG_2) は少量の 10^{-4} の試料が入るものの, 10^{-3} に加え 10^{-2} オーダーの強度を有する試料の割合が非常に多い.

次に新第三紀に分類される花崗岩類 (N_1 , N_3) は 10^{-4} の試料はほとんど見当たらず 10^{-2} の試料が大半を占める.



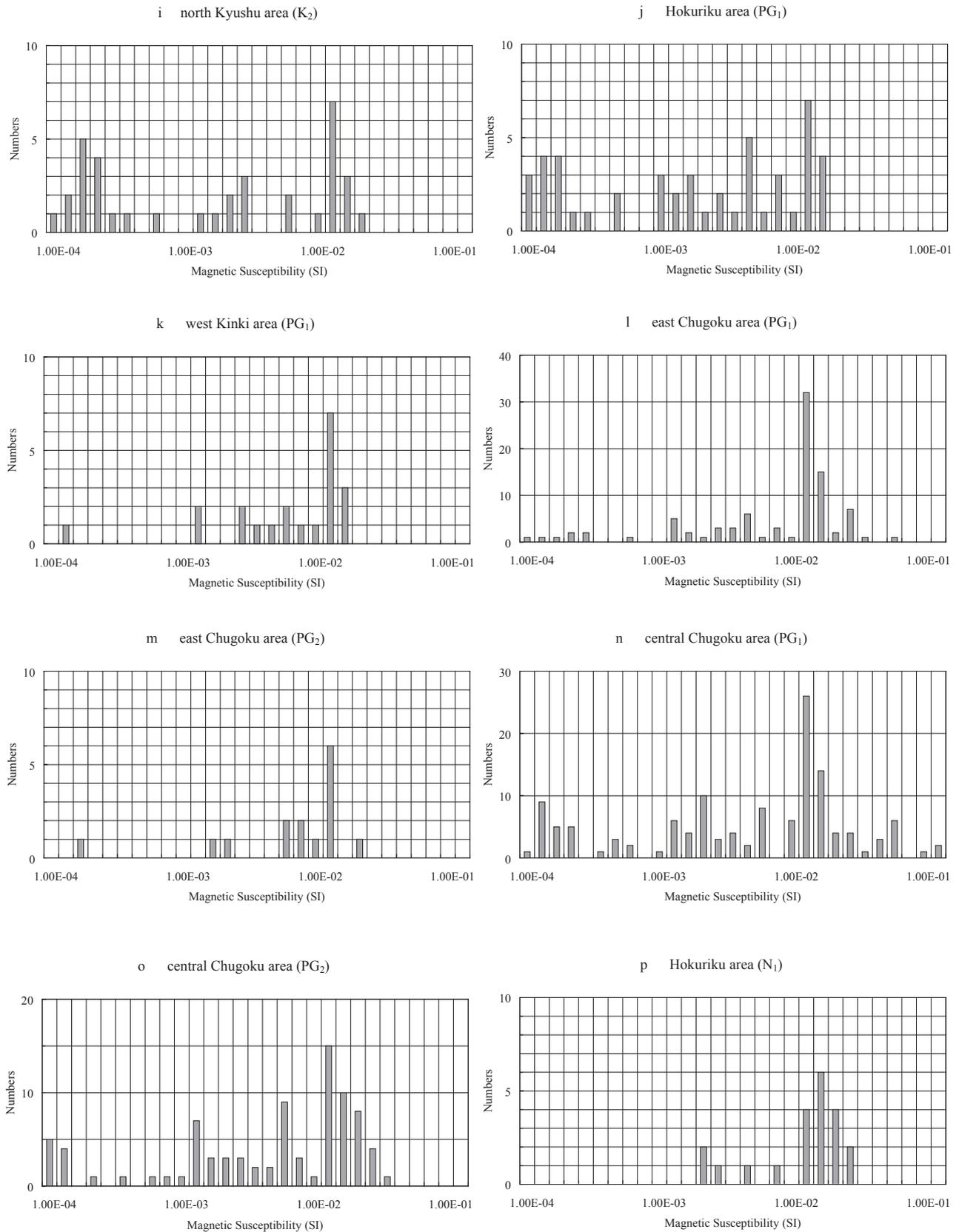
第4図 続き.

Fig.4 Continued.

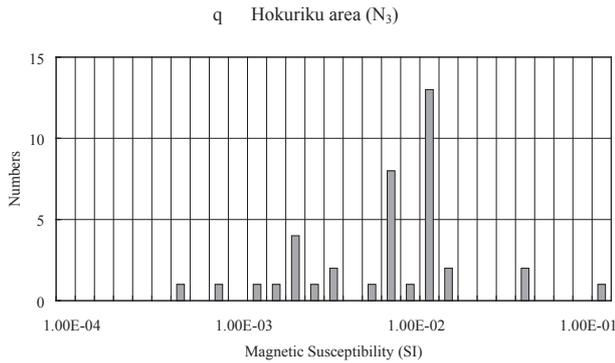


第5図 各地域でみられる磁化率の頻度分布 (記号の区分は第3図参照)。

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



第5図 続き.
Fig.5 Continued.



第5図 続き。
Fig.5 Continued.

4.4 磁化率と密度の対比

磁化率と密度を対比 (第6図 a ~ k) した。これは岩石の磁化率の大きさが分化指数に相関を示すためである。密度が SiO₂ や Fe₂O₃ (全鉄) に相関することはすでに述べた (金谷・大熊 2003, 2007) ところであるが、このことは花崗岩質岩においては、斑レイ岩から狭義の花崗岩までの鉄含有量は 13 - 14% から 0.6 - 0.8% (全鉄) の変化に対し磁化率が 10 - 15 倍程度の変化を示すことによる。鉄鉱物は塩基性岩においては常磁性の有色 (鉄) 鉱物がより多く含まれるため、鉄含有量に対し強磁性鉱物の割合が酸性岩に比べて低く、日本列島に見られる花崗岩質岩は密度が 2.60 から 2.95 の変化に対し磁化率 10 - 100 ($\times 10^{-5}$) および 2000 - 20000 ($\times 10^{-5}$) の 2 直線間 (片対数で表示) に大半の試料が含まれる (アダカイト質岩の一部が外れる) 事による。

本項目では上記の観点からこれらを多少細分化し「金谷・大熊 (2010)」同様、密度 2.60 ~ 2.95 の変化に対し磁化率 30 ~ 300, 60 ~ 600, 600 ~ 6000 ($\times 10^{-5}$) の 3 本の区分線 (第6図) を加えて密度 2.60 のとき磁化率 30 以下 (常磁性), 30 ~ 60 (弱磁性), 60 ~ 600 (中磁性), 600 ~ 2000 (強磁性), 2000 以上 (アダカイト質, 強磁性) と名付け記載した。本報告でもこの分類に従う。白亜紀後期花崗岩 (K₁₋₂, K₂) に見られる磁化率は、東中国地域と北九州地域西部 (小倉-田川断層帯西部) を除く 5 地域では原則として 600 (密度 2.60) を超える強度 (強磁性) をもつものは殆どなく中磁性を示すものももっとも多い。中磁性を示す花崗岩は、北陸地域においては有明花崗岩体の一部、東近畿地域は野州花崗岩体、西近畿地域では茨木花崗岩体、東中国地域 (岡山南部) においては黒雲母花崗岩 (I 型, 濡木ほか, 1979; 日本地質学会, 2009) に多く見られ、同時に瀬戸内海の香川県, 本島, 豊島そして小豆島の一部にもみられる。中央中国でも呉花崗岩他 (厳島他) の一部にもあり、斜長石中に二次的な白雲母を生じたり、有色鉱物の変質に伴って鉄酸化物 (magnetite) を生じるなど、マグマ固結後の 2 次的な熱水変質を蒙っていると考えられる岩石の一部に中磁性を

示す試料が見られる。それ以外では弱磁性・常磁性で特に中部地域及び東近畿地域では殆どの試料が常磁性を示す。強磁性を示す花崗岩は中部地域ではアダカイト質花崗岩 (日曾利花崗岩) があるが、東中国地域では花崗岩を 7 種類に分類 (濡木ほか, 1979) し I ~ IV 型花崗岩または細粒花崗岩に貫かれる中-塩基性岩 (ホルンブレンド黒雲母花崗閃緑岩を主体とし斜方輝石や普通輝石を含むトータル岩, 石英閃緑岩, 石英モンゾ閃緑岩などをもともの (日本地質学会, 2009) や、白亜紀後期花崗岩類の各岩型 Kgb, Kgd, Kfg (寺岡ほか, 1996) の一部にも強磁性を示すものが多く見られる。前者は田結庄 (1982) や高木 (1993) による Fe ~ Ti 酸化鉱物の報告にもあるように磁鉄鉱または磁鉄鉱・チタン鉄鉱比が高い値を示す岩石である。そして北九州地域西部では強磁性花崗岩に属する岩石がいくつか見られる。

古第三紀花崗岩は北陸地域 (PG₁) においては強磁性, 弱磁性・常磁性がほぼ同数で中磁性示す岩石が一部みられる。本報告で北陸地域に含めた琵琶湖北岸から若狭湾にいたる江若花崗岩は PG₁ に分類されているが、岩体を構成する粗粒黒雲母花崗岩と中粒黒雲母花崗岩は全て常磁性・弱磁性花崗岩で細粒斑状黒雲母花崗岩のみ中磁性花崗岩に分類される。西近畿地域 (PG₁, 宮津花崗岩) は強磁性, 中磁性ほぼ同数である。東中国地域 (PG₁, PG₂) においては強磁性花崗岩が最も多く、ついで中磁性, 弱磁性・常磁性花崗岩も僅かであるが認められる。中部中国地域 (PG₁, PG₂) は強磁性花崗岩が圧倒的に多くついで中磁性, 弱磁性・常磁性も一部みられる。

新第三紀花崗岩類 N₁, N₃ は西南日本内帯では、北陸地域にのみ存在し、N₁ (能郷白山岩体ほか) は強磁性花崗岩が大半で、N₃ (滝谷花崗岩, 黒部川花崗岩) は強磁性花崗岩約 65%, 中磁性花崗岩 35% である。

4.5 残留磁化

磁化率同様、密度と自然残留磁化 (NRM) の対比図 (第7図 a ~ k) を作成した。

K₁₋₂, K₂ については密度の増加と共にやや右肩上がりに見うけられる地域も見られるが、かなり漠然としており相関があるとは言えない。PG₁, PG₂, N₁ そして N₂ は K₁₋₂, K₂ よりも多少明確になるもののやはり相関があるとは断定できない。

4.6 Qn 比 (Königsberger ratio)

自然残留磁化 (NRM) と現在の地球磁場による誘導磁場 (κH , κ は磁化率, H は現在の地球磁場の強さ) の比 Qn の頻度分布図 (第8図 a ~ q, 階級値は 0.2) を示す。K₂ の西近畿地域を除き地質年代に関係なく殆どが 0.4 以下の値を示す。西近畿地域も 0.4 以下が多い。しかし全体の約 25% が Qn 比 2.0 を超えている。

Qn 比に関連して磁化率と残留磁化の対比図 (第9図

a ~ k) を示す. 多少のパラッキが認められる地域はあるものの両者は明らかな正の相関を示す.

5. 考察と解釈

今回考察を行った西南日本内帯は白亜紀後期, 古第三紀そして新第三紀に到る花崗岩質岩類であって, 絶対年代でおよそ1億年より170万年に到る. これらを白亜紀後期, 古第三紀そして新第三紀に分けて考察すると白亜紀後期の K_{1-2} (古期領家) は主として今回分類の中部地域と東近畿地域に存在 (西近畿地域の淡路島にも少量) し, K_2 (新期領家) はそれ以外の5地域を含めた全地域に存在する. これらを平均密度でみると, 中部・東近畿地域の K_{1-2} は2.72, 2.74 に対し, K_2 は2.65 の北陸・中央中国地域から2.68 の東近畿・西近畿地域に到る狭い範囲に集中している (北九州地域は2.73). これらを最頻値で見ると K_{1-2} は K_2 より高い最頻値をもつことから K_{1-2} は密度の大きい岩石の占める割合がより多いためと考えられる.

つぎに古第三紀の PG_1 をみると北陸地域の2.62, 西近畿・東中国・中央中国地域の平均値はいずれも2.66で, 北陸地域是最頻値の低いものの割合が多いことによるものではないかと考えられる. PG_2 は中国地方にしか存在せず平均密度は2.62であるが, これはその岩石記載 (文象斑岩, 文象質花崗岩, 細粒花崗岩など浅成の岩相で特徴づけられる) からみて, その岩質によるものと考えられる.

同様に孔隙率についてみるとその平均値は東近畿地域の K_{1-2} の0.45% から中央中国地域の PG_2 の1.27% に到る. 日本の白亜紀後期花崗岩類についての密度と孔隙率の対比図を作成すると, $y=a/(x-b)$ (y :孔隙率, x :密度, a, b :定数) の関係が見られ a, b は地域により多少異なる値 (地域の特徴, 風化, 変質等の影響などを受ける) を示す. 孔隙率は岩質により異なり, 密度が2.60の時孔隙率はおおよそ1.3%, 2.65の時0.7%, 2.70のとき0.55%, 2.80の時0.38%程度の数値を示す. これらを元に西南日本の平均密度と平均孔隙率をみると大局的には比例関係が見受けられる. しかしこれらはそれらが持つ最頻値や試料全体の風化・変質の程度やその割合もある程度反映しているものと考えられる.

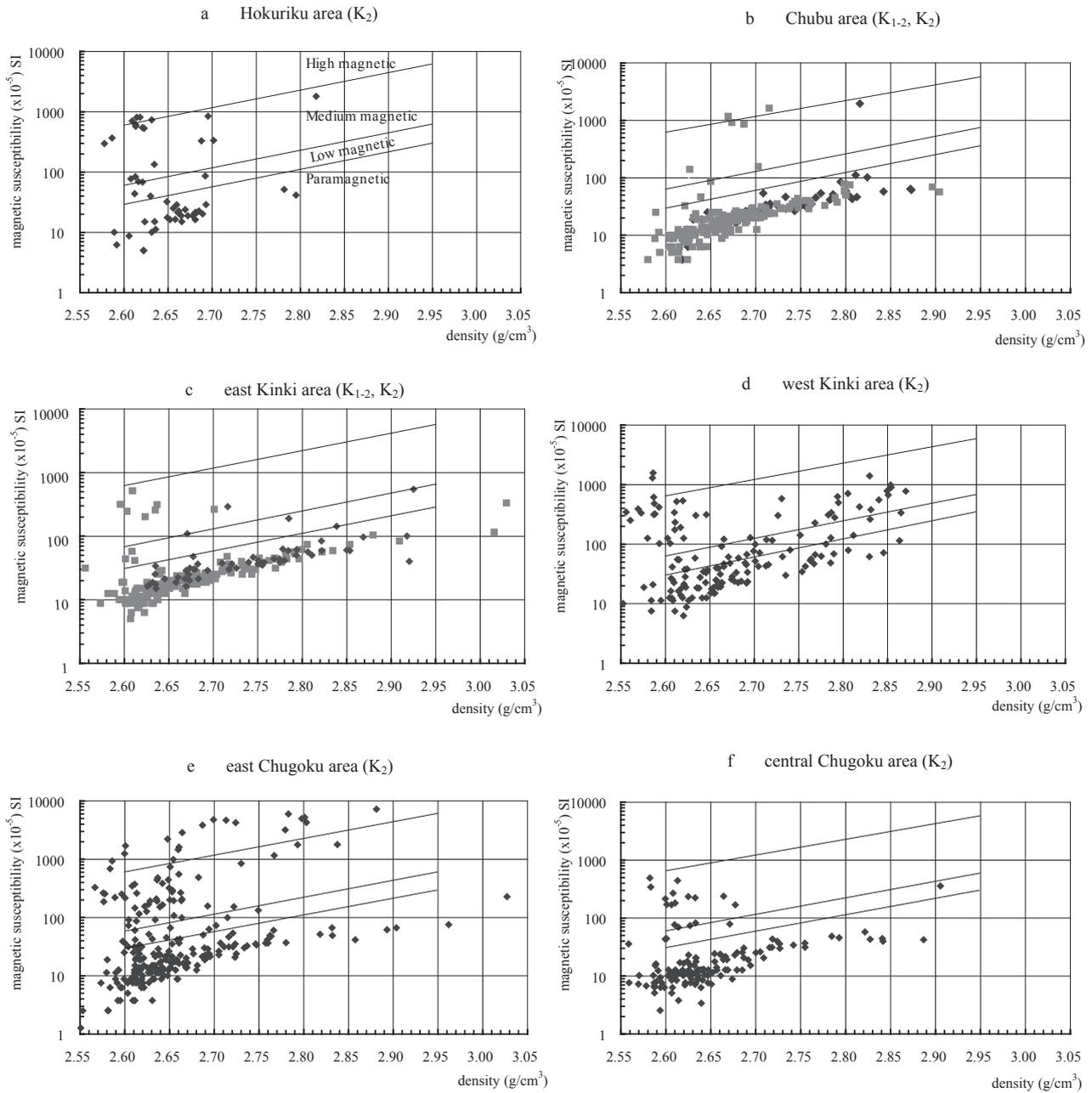
つぎに磁化率についてみると白亜紀後期の K_{1-2} , K_2 は一般に低く, アダカイト質岩を除くと $10 \sim 30 \times 10^{-5}$ で高いものは見られない. しかし東中国地域の K_2 は低いものの他に, 高い磁化率示すものが8%強含まれる. また, 北九州地域の花崗岩類も小倉—田川断層帯より西部のものに高い磁化率を示す岩石が多い. 同様に古第三紀花崗岩類の PG_1 , PG_2 についてみると, 北陸地域では常磁性的なもの他にやや高い値を示すものが見られる. 西近畿地域も同様である, 東中国地域・中央中国地域はかなり高い所にピークが見られる. 北陸地域の新第三紀花崗

岩類 N_1 , N_2 は非常に高いピークがみられる.

磁化率と密度について K_{1-2} , K_2 をみると, 北陸地域の K_2 は常磁性の試料が多く弱磁性のものは数が少なく, 中磁性の試料が全体のおおよそ30%を占める. 中部地方の K_{1-2} , K_2 は大半の試料が常磁性であるが数個強磁性に入る試料 (アダカイト質岩, 前述) が見られる. 東近畿地域にみられる K_{1-2} , K_2 は多くが常磁性花崗岩であるが中磁性花崗岩も一部に見られる. 西近畿地域に見られる K_2 は常磁性・弱磁性共に多く中磁性花崗岩もそれなりの数が見られる. 東中国地域の K_2 は常磁性花崗岩が多く, 弱磁性もある程度認められるが, 密度の低い (2.67以下) 約20%の試料に中磁性が, また約8%の試料に強磁性の岩石が認められる. 前回報告の足尾帯南部の中磁性花崗岩は, 20万分の1地質図「日光」(山元ほか, 2000) にみられる分類凡例が後期白亜紀—前期古第三紀になっている事, 及び中磁性を示す花崗岩の分布が群馬県利根郡武尊山周辺, 群馬県水上町, 奥利根湖周辺に限られる事などから今回の分類基準の K_2 に該当しない可能性があり, 山陽帯に見られる特徴とは異なるものではないかと考えられる. 東中国地域の強磁性花崗岩の一部については既に報告 (高木, 1993) があるが, これら強磁性花崗岩に分類される岩石はその割合は異なるものの, 東中国の山陽帯に属するいくつかの岩型に見られる. 中央中国地域の K_2 は常磁性花崗岩がかなり多くまた, 12%前後の試料が中磁性を示す. 北九州地域は小倉—田川断層帯東側の K_2 は常磁性を示すものが多いが西側の多くは強磁性花崗岩である. これらについては, 既に詳細な報告 (石原ほか, 1979) がある.

つぎに PG_1 , PG_2 について考察すると, 北陸地域の PG_1 は常磁性・弱磁性, 中磁性, 強磁性を示すものの割合はそれぞれ1/3ずつで強磁性を示す試料は主として白川谷に露出する試料 (白川花崗岩) であり, 琵琶湖, 若狭湾付近にみられる江若花崗岩については強磁性を示すものではなく常磁性・弱磁性及び中磁性を示すものがほぼ同数である. 西近畿地域 (宮津花崗岩) は強磁性, 中磁性を示し, 前者の割合が多い. 東中国地域の PG_1 は強磁性を示すもの73%, 中磁性を示すもの18%, 弱磁性・常磁性を示すもの9%である. PG_2 は強磁性, 中磁性で, 前者が約80%である. 中央中国地域の PG_1 は強磁性・中磁性そして常磁性・弱磁性の割合は60%・25%そして15%であり, PG_2 のそれは58%, 32%そして10%である. 新第三紀に分類される N_1 は能郷白山岩体他で殆どが強磁性花崗岩であり, N_3 に分類される黒部川・滝谷花崗岩は2/3が強磁性, 1/3が中磁性である.

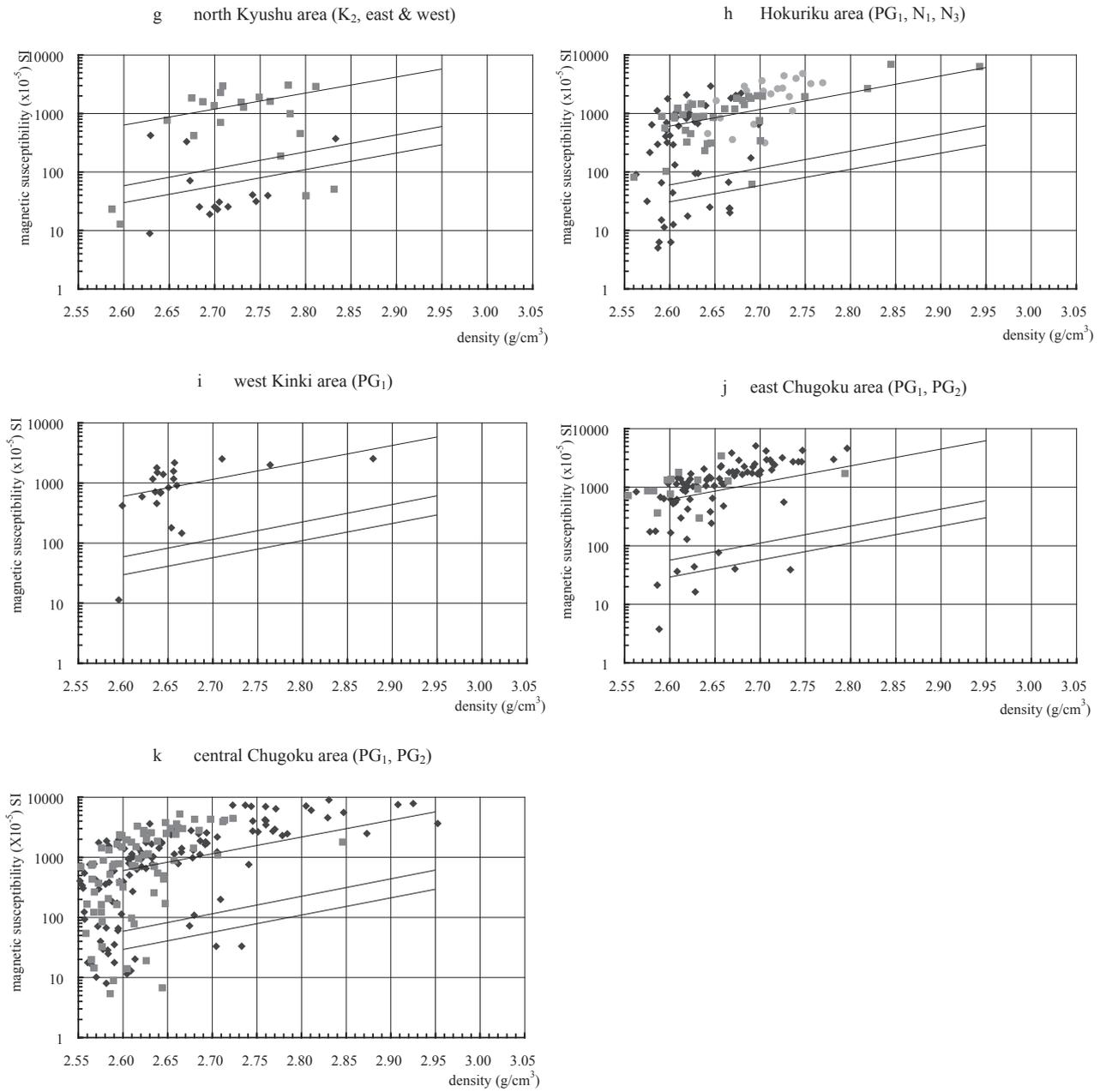
残留磁化についてみると密度との相関は見られない. Q_n 比は地域に関係なく0.4以下を示す. 一部地域の試料には雷の影響を受けたと見られる Q_n 比の高いものが認められる.



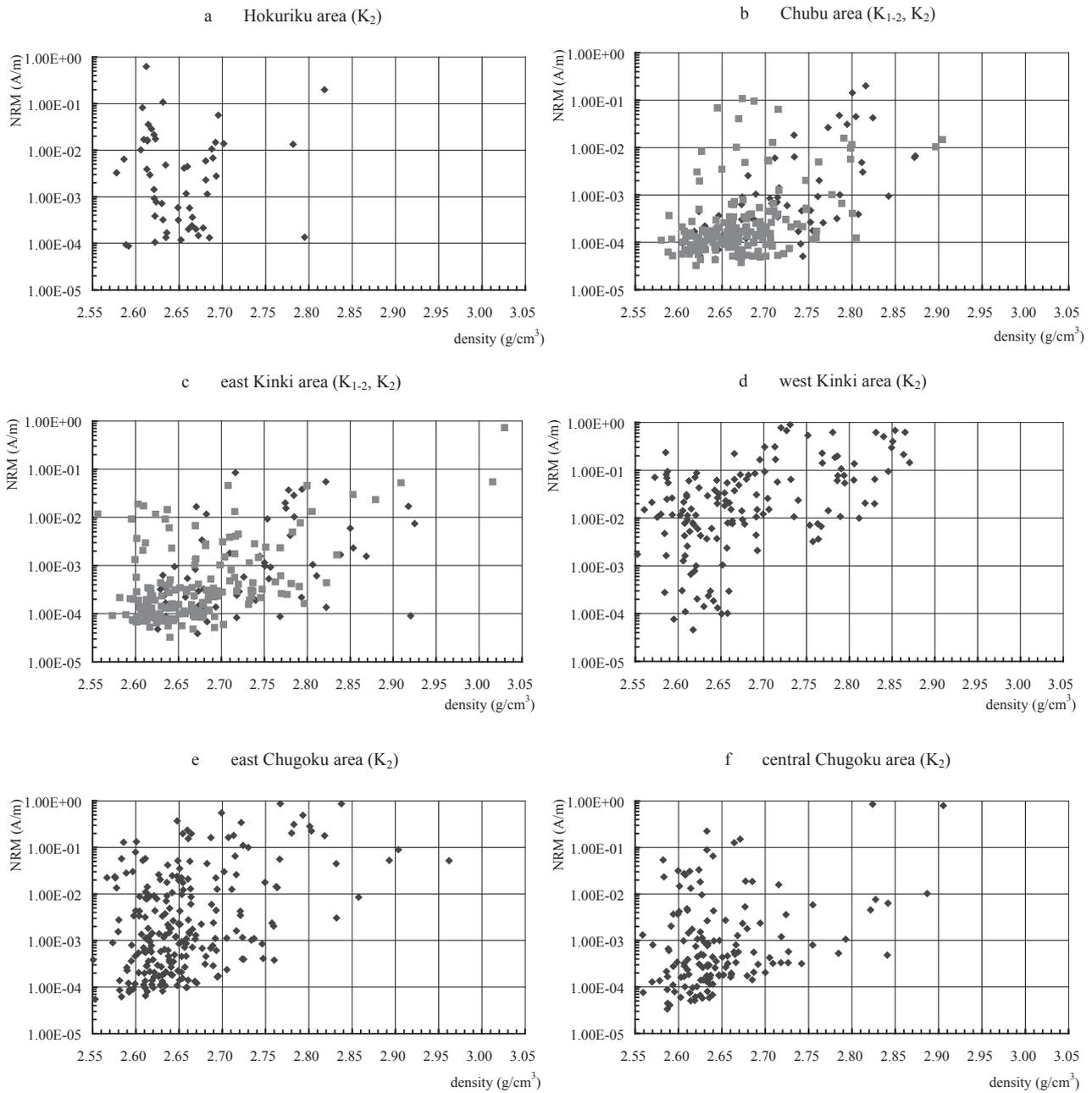
第6図 密度と磁化率の対比図 (白亜紀後期 K_{1-2}, K_2 , 古第三紀 PG_1, PG_2 , 新第三紀 N_1, N_3). a:北陸地域 ◆: K_2 , b:中部地域 ◆: K_{1-2} , ■: K_2 , c:東近畿地域 ◆: K_{1-2} , ■: K_2 , d:西近畿地域 ◆: K_2 , e:東中国地域 ◆: K_2 , f:中央中国地域 ◆: K_2 , g:北九州地域 東◆: K_2 , 西■: K_2 , h:北陸地域 ◆: PG_1 , ●: N_1 , ■: N_3 , i:西近畿地域 ◆: PG_1 , j:東中国地域 ◆: PG_1 , ■: PG_2 , k:中央中国地域 ◆: PG_1 , ■: PG_2 . 三本の直線は a:常磁性・弱磁性, b;中磁性そして c;強磁性の区分線をあらわす.

Fig.6 Relationship between density and magnetic susceptibility. Three straight lines indicate the boundary of a; paleomagnetic, lower magnetic, b; medium magnetic and c; high magnetic zones.

(Late Cretaceous: K_{1-2}, K_2 , Paleogene: PG_1, PG_2 , Neogene: N_1, N_3), a: Hokuriku area ◆: K_2 , b: Chubu area ◆: K_{1-2} , ■: K_2 , c: east Kinki area ◆: K_{1-2} , ■: K_2 , d: west Kinki area ◆: K_2 , e: east Chugoku area ◆: K_2 , f: central Chugoku area ◆: K_2 , g: north Kyushu area, east ◆: K_2 , west ■: K_2 , h: Hokuriku area ◆: PG_1 , ●: N_1 , ■: N_3 , i: west Kinki area ◆: PG_1 , j: east Chugoku area ◆: PG_1 , ■: PG_2 , k: central Chugoku area ◆: PG_1 , ■: PG_2 .



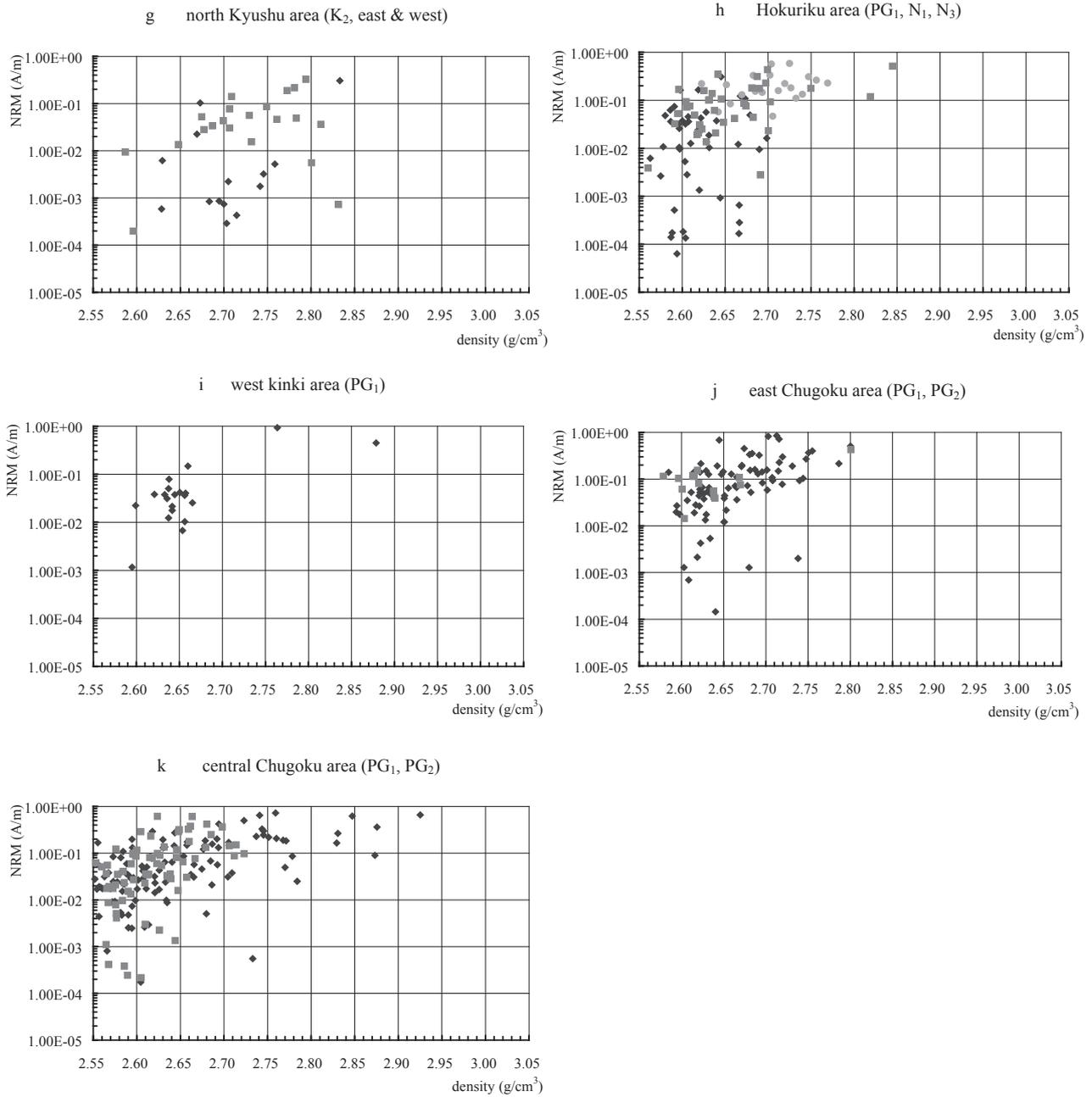
第6図 続き.
Fig.6 Continued.



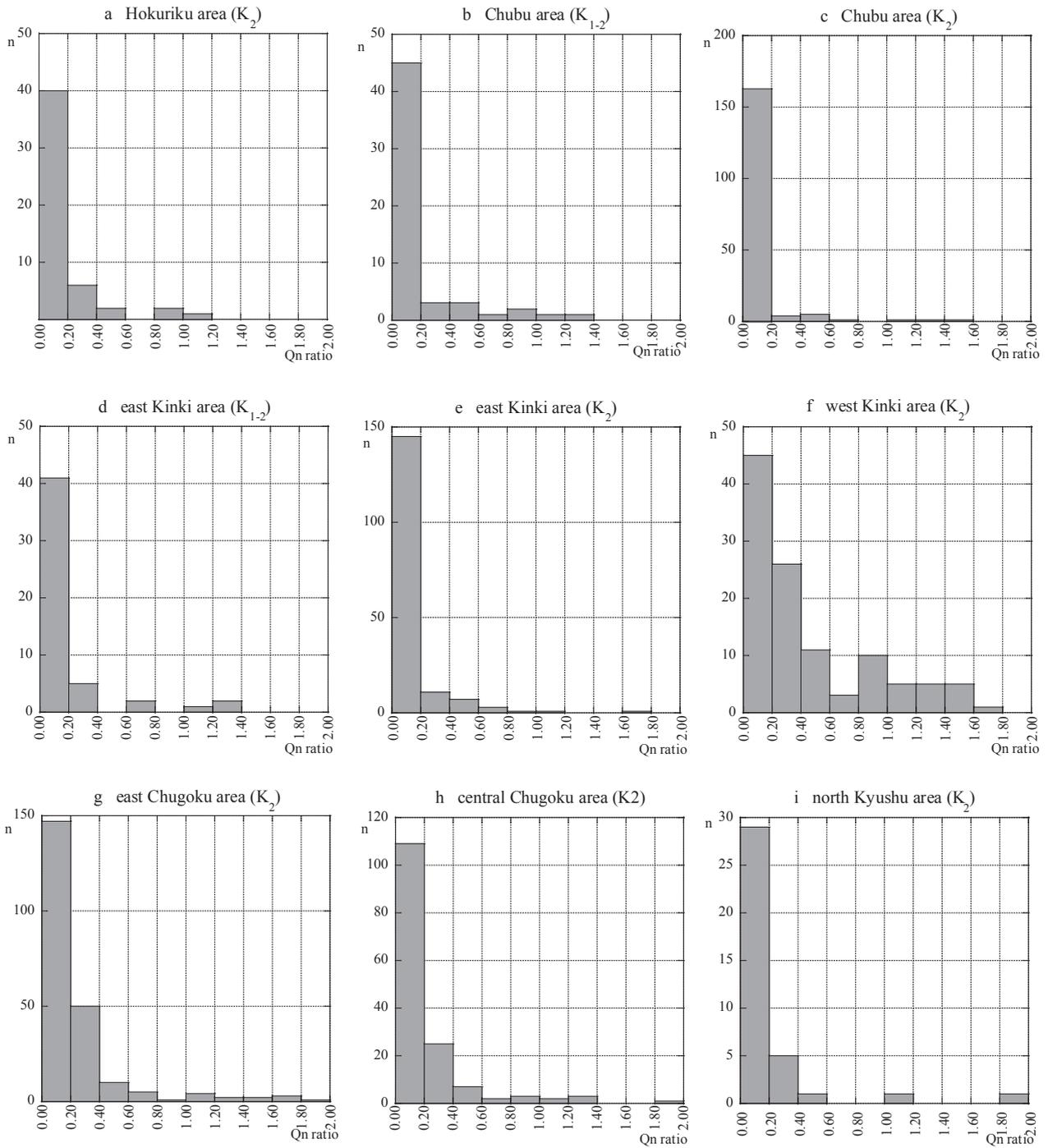
第7図 密度と残留磁化の対比図。

a : 北陸地域 K_2 , b : 中部地域 K_{1-2} , K_2 , c : 東近畿地域 K_{1-2} , K_2 , d : 西近畿地域 K_2 , e : 東中国地域 K_2 , f : 中部中国地域 K_2 , g : 北九州地域 K_2 , h : 北陸地域 PG_1 , N_1 , N_3 , i : 西近畿地域 PG_1 , j : 東中国地域 PG_1 , PG_2 , k : 中央中国地域 PG_1 , PG_2 (記号の区分は第6図参照)。

Fig.7 Relationship between density and NRM. See also Fig.6.

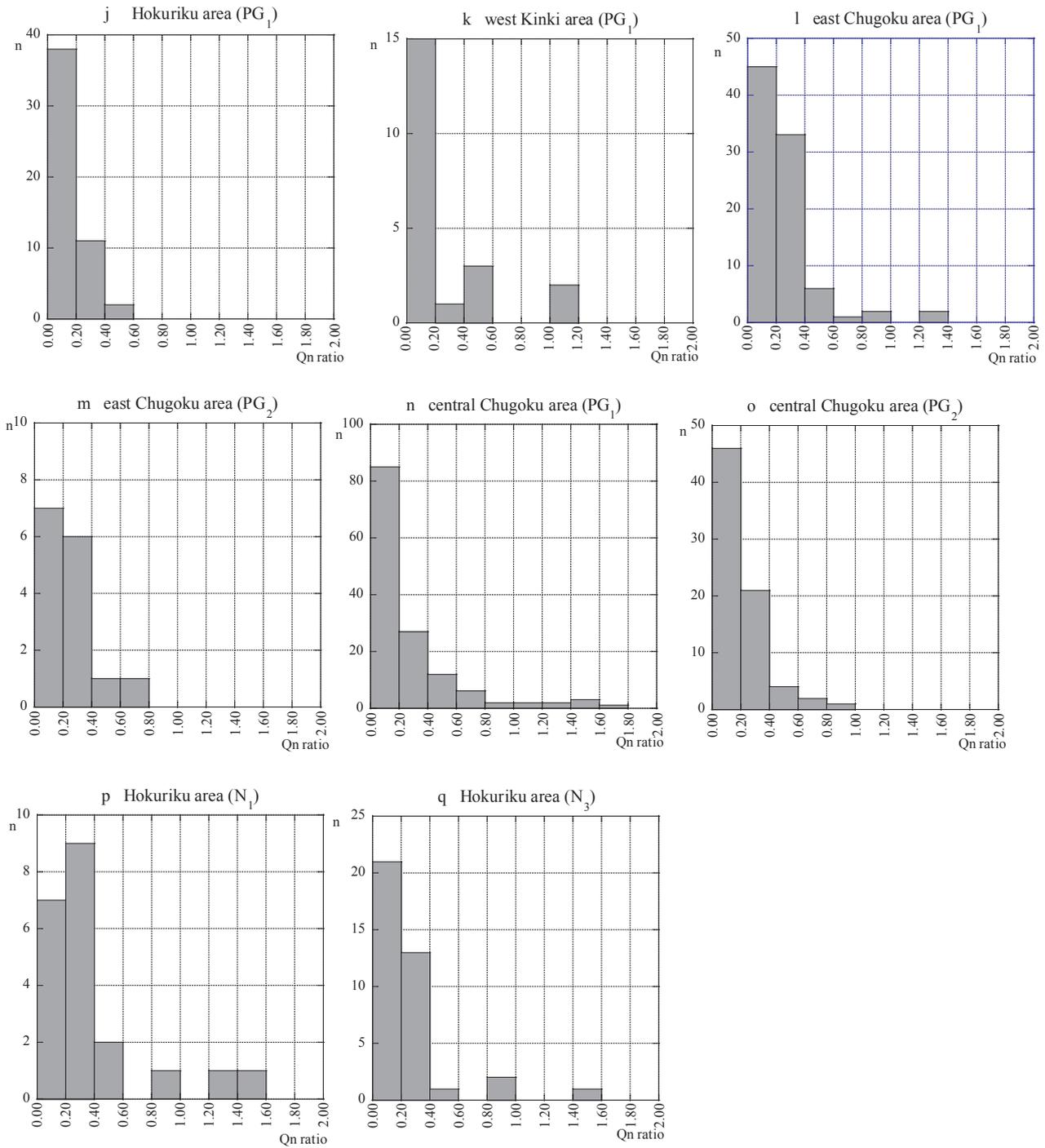


第7図 続き.
Fig.7 Continued.



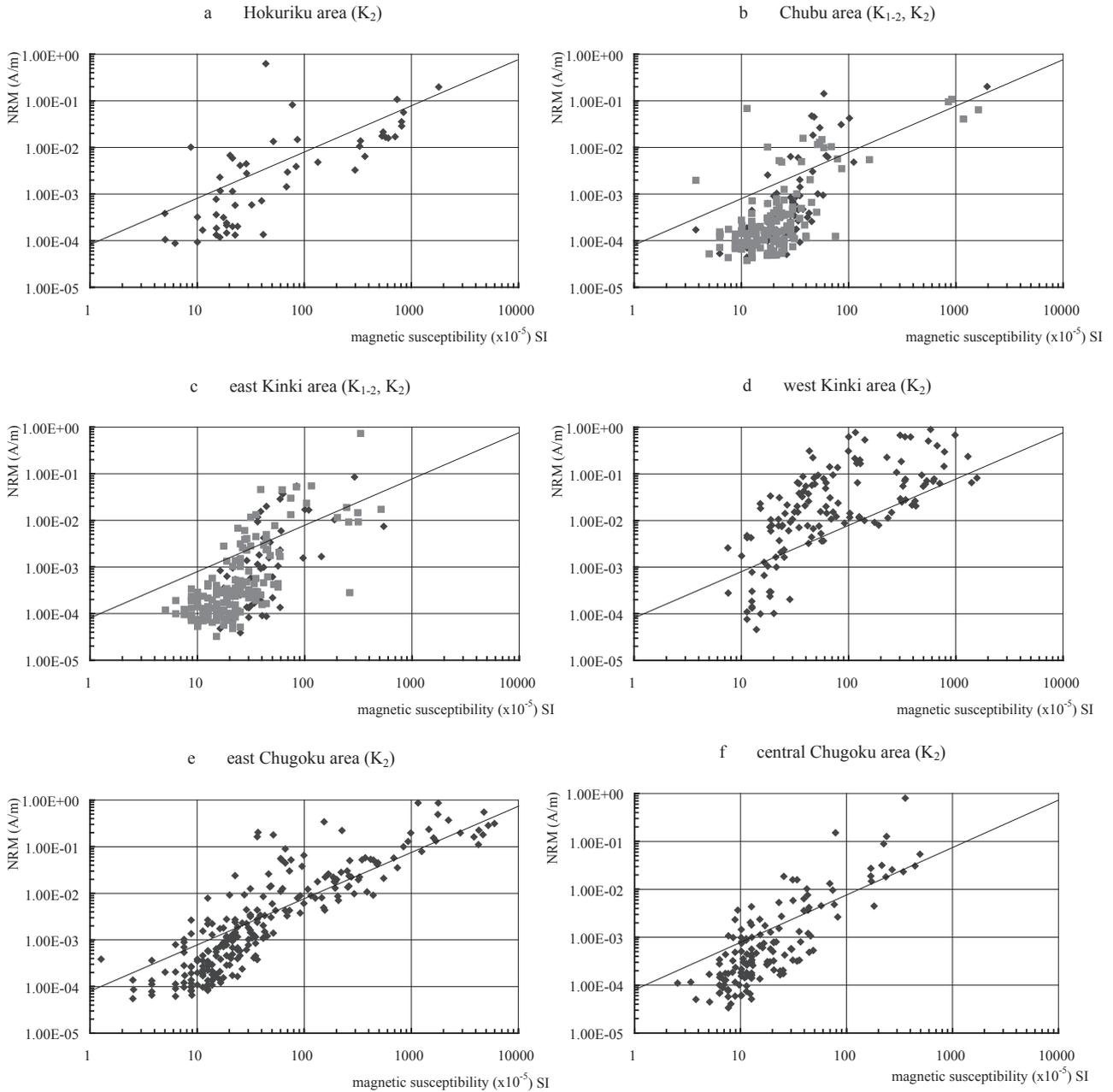
第8図 各地域の Qn 比の頻度分布 (記号の区分は第3図参照).

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



第8図 続き.

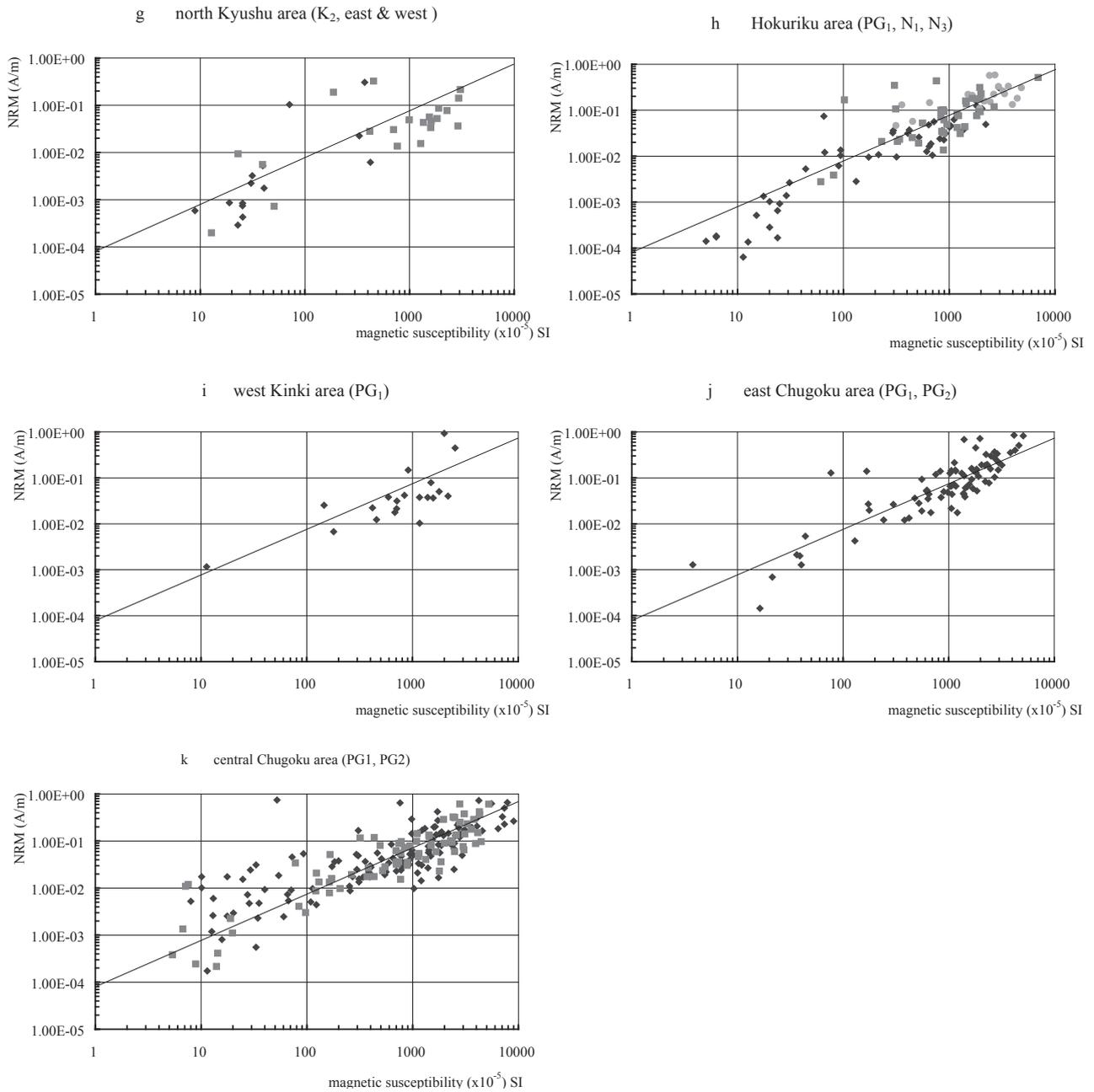
Fig.8 Continued.



第9図 磁化率と残留磁化の対比図.

a : 北陸地域 K₂, b : 中部地域 K₁₋₂, K₂, c : 東近畿地域 K₁₋₂, K₂, d : 西近畿地域 K₂, e : 東中国地域 K₂, f : 中央中国地域 K₂, g : 北九州地域 K₂, h : 北陸地域 PG₁, N₁, N₃, i : 西近畿地域 PG₁, j : 東中国地域 PG₁, PG₂, k : 中央中国地域 PG₁, PG₂ (記号の区分は第6図参照). 図中の実線は Q_n=0.2 を表す. (記号の区分は第6図参照)

Fig.9 Relationship between magnetic susceptibility and NRM. Solid lines show Q_n=0.2. See also Fig.6.



第9図 続き.

Fig.9 Continued.

6. まとめと結論

西南日本内帯を7地域に分け地質年代を基にこれを観察した。これらの結果以下の事が確認された。

1. 密度の平均値は白亜紀後期、中部地域・東近畿地域の K_{1-2} (古期領家) と北九州地域 K_2 (新时期領家) が、2.72 ~ 2.74 と最も大きく、北陸地域、中央中国地域の PG_1 、 PG_2 (古第三紀) の 2.62 で最も小さい。

2. 孔隙率は大局的に見て各地域の平均密度 (最頻値) の大きさに逆比例している。また密度が 2.80 ~ 2.60 (斑レイ岩~狭義の花崗岩) まで変化した時の孔隙率の変化はおおよそ 0.38 ~ 1.4% で、その差はほぼ 1% 見られる。これは両岩石の構成鉱物の違い、つまり石英とカリ長石の量比が完全に異なることから、冷却時の石英の相変化 ($\alpha - \beta$) や、鏡下でみられる石英・カリ長石の割れ目の存在などからも説明される。

3. 岩質を考慮して分けたその岩石のもつ磁化率の大きさにより強磁性、中磁性、弱磁性・常磁性に分類した時、強磁性を示す岩石の多い区域、少ない区域に分類することができる。

強磁性を示す地域は強磁性を示す岩石試料の割合が圧倒的に多いことを示すもので中磁性、弱磁性・常磁性の岩石試料もある割合で含まれ、地質年代や地域によってその割合は異なる。

これらを地質年代で分けてみると、白亜紀後期に分類される岩石のうち K_{1-2} に分類される北陸地域、中部地域、東近畿地域、西近畿地域、中央中国地域の花崗岩は主として a. 常磁性・弱磁性で構成され、 K_2 に分類される花崗岩は b. 常磁性・弱磁性、中磁性に分類され、古第三紀に分類される岩石 (PG_1 、 PG_2) は主として c. 中磁性、強磁性花崗岩で構成される3種に分けられる。これら岩石はこれまで、それぞれの岩石学的特徴や絶対年代などから領家帯、山陽帯そして山陰帯などと名付けられ使用されてきた。しかし各帯の境界は必ずしも明瞭でないところもあり、これまでも報告されているように磁気的に見ても、東中国地域において K_2 に分類される花崗岩のいくつかに強磁性を示す岩石が見受けられ、また K_2 に分類されてきた山陽帯に密度 2.58 ~ 2.66 の低密度 ($SiO_2=77 - 70\%$) の部分に中磁性を示す岩石がいくつか存在する。これはこれら地域の密度と主成分元素 (SiO_2 、 Fe_2O_3) の相関々係はそうでない地域の結果と比較して係数がやや異なる事実とも合わせ今後検討されるべき問題と考えられる。

4. 残留磁化と相関が認められるのは磁化率であって、その Q_n 比 (Königsberger ratio) は地域によらず 0.4 以下である。このため磁気探査を行った時、誘導磁化への影響は非常に小さい。

謝辞：本研究を進めるにあたり中央中国地域 (浜田・広島南北断面) および北九州地域の岩石試料の提供を受け、現地における地質情報や鏡下観察結果など貴重な情報の提供を頂き、かつ適切な助言をして戴いた産業技術総合研究所地質情報研究部門、松浦浩久博士には深く感謝の意を表する。

文 献

- 地質調査所 (1992) 100 万分の 1 日本地質図 第 3 版。
 原山 智・竹内 誠・中野 俊・佐藤岱生・滝沢文教 (1991) 「槍ヶ岳地域の地質」。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)、地質調査所。
 原山 智・滝沢文教・加藤碩一・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久 (1996) 20 万分の 1 地質図幅「富山」、地質調査所。
 原山 智・高橋 浩・中野 俊・菊谷愛彦・駒澤正夫 (2000) 「立山地域の地質」。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)、地質調査所。
 東元定雄・松浦浩久・水野清秀・河田清雄 (1985) 「呉地域の地質」。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)、地質調査所。
 飯泉 茂・沢田順弘・先山 徹・今岡照喜 (1985) 中国・四国地方の白亜紀~古第三紀火成活動一火成岩類の対比を中心として一。地球科学, **39**, 372 - 384。
 猪木幸雄 (1981) 20 万分の 1 地質図幅「姫路」、地質調査所。
 石原舜三・唐木田芳文・佐藤興平 (1979) 北九州一西中国地域の磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系花崗岩類の分布一特に小倉一田川断層帯の再評価一。地質雑, **85**, 47 - 50。
 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。
 金谷 弘・大熊茂雄 (2003) 物理定数から見た白亜紀一古第三紀花崗岩類一その 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一古第三紀花崗岩類一その 2. 東北地方南部。地調研報, **58**, 239 - 252。
 金谷 弘・大熊茂雄 (2010) 物理定数から見た白亜紀一古第三紀花崗岩類一その 3. 足尾帯 (関東地方北部)。地調研報, **61**, 1 - 15。
 鹿野和彦・松浦浩久・服部 仁・山田直利・東元定雄・広島俊男・須田芳朗・駒澤正夫 (1988) 20 万分の 1 地質図幅「浜田」、地質調査所。
 鹿野和彦・原山 智・山本博文・宇都浩三・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久 (1999) 20 万分の 1 地質図幅「金沢」、地質調査所。
 加藤碩一・佐藤岱生 (1983) 「信濃池田地域の地質」。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)、地質調査所。

- 加藤硯一・佐藤岱生 (1989) 「大町地域の地質」. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所.
- 河田清雄・宮村 学・吉田史郎 (1986) 20 万分の 1 地質図幅「京都及大阪」, 地質調査所.
- 木野崎吉郎 (1953) 中国地方の花崗岩とタングステン及びモリブデン鉱床について (概報). 広大地研報, **3**, 61 - 76.
- 久保和也・松浦浩久・尾崎正紀・牧本 浩・星住英雄・鎌田耕太郎・広島俊男 (1993) 20 万分の 1 地質図幅「福岡」, 地質調査所.
- 栗本史雄・牧本 博・吉田史郎・高橋祐平・駒澤正夫 (1998) 20 万分の 1 地質図幅「和歌山」, 地質調査所.
- 栗本史雄・内藤一樹・杉山雄一・中江 訓 (1999) 「敦賀地域の地質」. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所.
- 黒田和男 (1968) 20 万分の 1 地質図幅「宮津」, 地質調査所.
- 松浦浩久・栗本史雄・吉田史郎・斉藤文紀・牧本 博・利光誠一・巖谷敏光・駒澤正夫・広島俊男 (2002) 20 万分の 1 地質図幅「岡山及び丸亀」, 地質調査所.
- 松浦浩久・豊 遙秋・佃 栄吉 (1999) 「巖島地域の地質」地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所.
- 牧本 博・利光誠一・高橋 浩・水野清秀・駒澤正夫・志知龍一 (1995) 20 万分の 1 地質図幅「徳島」, 地質調査所.
- 牧本 博・山田直利・水野清秀・駒澤正夫・須藤定久 (2004) 20 万分の 1 地質図幅「豊橋及び伊良湖岬」, 地質調査総合センター.
- 村上允英 (1979) 東中国における後期中生代～古第三紀酸性岩類の南北変化の概要. 地質学論集, **17**, 3 - 18.
- 日本地質学会編, 日本地方地質誌 6 中国地方 (2009), p.296 - 299, 朝倉書店.
- 濡木輝一・浅見正雄・光野千春 (1979) 岡山県中・南部の花崗岩類. 地質学論集, **17**, 35 - 46.
- 坂本 亨・山田直利・須田芳郎 (1982) 20 万分の 1 地質図幅「松江及び大社」, 地質調査所.
- 笹田政克・山田直利・先山 徹・上田 薫 (1979) 東中国, 三朝・奥津・湯原地域の白亜紀後期～古第三紀火成岩類, 地質学論集, **17**, 19 - 35.
- 田結庄良昭 (1982) 東中国および近畿地域の後期中生代～古第三紀花崗岩類中の Fe - Ti 酸化鉱物. 岩鉱, **77**, 387 - 402.
- 高木哲一 (1993) 磁鉄鉱系列 / チタン鉄鉱系列花崗岩質マグマの酸化還元状態の推移—中国地方中部～東部の例—. 岩鉱, **88**, 165 - 178.
- 寺岡易司・松浦浩久・牧本 博・吉田史郎・神谷雅治・広島俊男・駒澤正夫・志知龍一 (1996) 20 万分の 1 地質図幅「高梁」, 地質調査所.
- 上村不二男・坂本 亨・山田直利 (1974) 20 万分の 1 地質図幅「鳥取」, 地質調査所.
- 脇田浩二・原山 智・鹿野和彦・三村弘二・坂本 亨・広島俊男・駒澤正夫 (1992) 20 万分の 1 地質図幅「岐阜」, 地質調査所.
- 山田直利・東元定雄・水野清秀・広島俊男・須田芳郎 (1986) 20 万分の 1 地質図幅「広島」, 地質調査所.
- 山田直利・野沢 保・原山 智・滝沢文教・加藤硯一・広島俊男・駒澤正夫 (1989) 20 万分の 1 地質図幅「高山」, 地質調査所.
- 山田直利・脇田浩二・広島俊男・駒澤正夫 (1990) 20 万分の 1 地質図幅「飯田」, 地質調査所.
- 山元孝広・滝沢文教・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 地質図幅「日光」, 地質調査所.
- 吉田史郎・西岡芳晴・木村克巳・長森英明 (2003) 「近江八幡地域の地質」, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査総合センター.

(受付: 2010 年 9 月 8 日; 受理: 2011 年 3 月 11 日)