

# 文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に 関するデータの収集（その2）

佐藤 稔紀  
谷口 航  
藤田 朝雄  
長谷川 宏

1999年12月

核燃料サイクル開発機構

東濃地科学センター

東海事業所

2000年レポートチーム

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

平成 11 年 12 月

JNC TN7400 99-011

## 文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に関するデータの収集（その 2）

佐藤稔紀<sup>1)</sup>, 谷口 航<sup>2)</sup>, 藤田朝雄<sup>2)</sup>, 長谷川 宏<sup>3)</sup>

### 要 旨

わが国における地下深部の岩盤が有する一般的な熱的および力学的性質を理解するため、文献調査および釜石鉱山と東濃鉱山における調査・試験によりデータを収集し、岩種ごとの物性の頻度分布や物性間の相関関係などについて検討した。

その結果、岩石の熱物性および力学物性について、岩種ごとの頻度分布を把握した。また、従来より示唆されてきた物性間の相関関係との整合性が確認された。新第三紀堆積岩では深度の増加とともに一軸圧縮強度などが増加する傾向が認められた。

岩盤の初期応力については、文献調査の結果を取りまとめ、鉛直応力は単位体積重量の勾配で線形近似できること、水平面内平均応力と深度の関係も線形近似できること、および、側圧係数（水平面内平均応力と鉛直応力の比）は浅部では大きな値を示し、深度の増加に伴い、深度 500m 程度より深くなると 1 より小さい値に近づくことが認められた。

---

1) : 東濃地科学センター 地質環境情報グループ

2) : 東海事業所 環境保全・研究開発センター

3) : 東京事務所 2000 年レポートチーム

December 1999

JNC TN7400 99-011

## Data Collection by Literature Survey on Rock Physical Properties in Japan (II)

T. Sato<sup>1)</sup>, W. Taniguchi<sup>2)</sup>, T. Fujita<sup>2)</sup> and H. Hasegawa<sup>3)</sup>

### Abstract

In order to understand the general thermal and mechanical properties of rock masses and initial stress of rock at depth, data were compiled from the published literature in Japan and collected from investigations carried out at Kamaishi mine and Tono mine.

Statistical examinations derived the ranges, means and medians of the mechanical properties for the different rock types. It was confirmed that the correlations between the mechanical properties were in agreement with correlations determined previously in other similar surveys. The unconfined compressive strength of Neogene sedimentary rocks showed a tendency to increase with increasing depth ( $\geq 500$  m).

An examination of the measured initial stress data collected through literature surveys showed that the vertical stress can be approximated by the extent of gravitational loading at a particular point. There is an approximately linear relationship between the average stress in a horizontal plane and the depth. The lateral pressure coefficient tends to have a high value and large range at shallow depths, but tends towards  $< 1$  with increasing depth.

---

1) : Geological Environmental Research Group, Tono Geoscience Center

2) : Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

3) : Geological Isolation Research Project

## 目 次

1. はじめに	1
2. 調査方法	2
2.1 対象文献とデータの整理方法	2
2.2 岩種の分類	2
2.3 サイクル機構のデータの取り扱い	3
3. 調査結果および考察	4
3.1 热物性	4
(1) 物性値の統計学的検討	4
(2) 热物性の深度依存性	4
3.2 岩石の力学特性	11
(1) 物性値の統計学的検討	11
(2) 物性値の相関	20
(3) 物性値の深度依存性	25
3.3 岩盤の初期応力	29
(1) 既往の調査例	29
(2) 今回の調査結果	29
4. まとめ	34
5. 参考文献	35

## 図表リスト

### 【表】

- 表 2.1 岩種の分類と対応する岩石名
- 表 3.1 岩石の諸特性統計量一覧表

### 【図】

- 図 3.1 热伝導率の頻度分布図
- 図 3.2 热伝導率の箱ひげ図
- 図 3.3 热伝導率の確率密度分布
- 図 3.4 比熱の頻度分布図
- 図 3.5 比熱の箱ひげ図
- 図 3.6 比熱の確率密度分布
- 図 3.7 線膨張係数の頻度分布図
- 図 3.8 線膨張係数の箱ひげ図
- 図 3.9 線膨張係数の確率密度分布
- 図 3.10 热物性の深度依存性
- 図 3.11 有効間隙率の頻度分布図
- 図 3.12 有効間隙率の箱ひげ図
- 図 3.13 有効間隙率の確率密度分布
- 図 3.14 一軸圧縮強度の頻度分布図
- 図 3.15 一軸圧縮強度の箱ひげ図
- 図 3.16 一軸圧縮強度の確率密度分布
- 図 3.17 弹性係数の頻度分布図
- 図 3.18 弹性係数の箱ひげ図
- 図 3.19 弹性係数の確率密度分布
- 図 3.20 ポアソン比の頻度分布図
- 図 3.21 ポアソン比の箱ひげ図
- 図 3.22 ポアソン比の確率密度分布
- 図 3.23 引張強度の頻度分布図
- 図 3.24 引張強度の箱ひげ図
- 図 3.25 引張強度の確率密度分布
- 図 3.26 せん断強度の頻度分布図
- 図 3.27 せん断強度の箱ひげ図
- 図 3.28 せん断強度の確率密度分布
- 図 3.29 内部摩擦角の頻度分布図
- 図 3.30 内部摩擦角の箱ひげ図
- 図 3.31 内部摩擦角の確率密度分布
- 図 3.32 一軸圧縮強度と弾性係数の相関関係

- 図 3.33 一軸圧縮強度とポアソン比の相関関係  
図 3.34 一軸圧縮強度と引張強度の相関関係  
図 3.35 一軸圧縮強度とせん断強度の相関関係  
図 3.36 一軸圧縮強度と内部摩擦角の相関関係  
図 3.37 一軸圧縮強度と有効空隙率の相関関係  
図 3.38 物性値と深度の関係  
図 3.39 文献調査によって得られた初期応力のデータ  
図 3.40 初期応力データ（鉛直と水平が揃っているデータ）  
図 3.41 初期応力データの岩種および測定手法の以外による影響

## 1. はじめに

サイクル機構では、原子力委員会バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について」などに従って、地層処分研究開発を進めている。その研究成果を技術報告書（第2次取りまとめ）として取りまとめ、わが国における地層処分の技術的信頼性を示すことが求められている。

地層処分のサイトが決まっていない現状において、地層処分の技術的信頼性を示すためには、広く日本の地質環境を考慮することが必要とされている。したがって、資源や土木などの各分野に蓄積されているデータを収集し、物性ごとのデータの取りうる範囲や統計量などを把握し、これに従ってパラメータスタディーを行うことによって様々な要素の決定や検討に資することが重要となる。

岩石の熱的および力学的な性質は、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発においては、処分場のレイアウトや人工バリアの仕様を検討する際に重要な要素である。岩盤の温度や熱物性は、人工バリアの化学的な反応に影響を及ぼす。また、岩盤の初期応力や力学物性は、処分場の設計・施工の最適化、建設・操業時における空洞の安定性およびオーバーパックと緩衝材の力学的な安定性の検討にとっても重要である。

具体的な例を示すと、地下深部の岩盤における初期応力の値や方向に関する情報は、地下空間の形状や寸法あるいは支保形態などを決定するうえで重要である。例えば、カナダ AECL (Atomic Energy of Canada Limited) の URL (Underground Research Laboratory) では最大主応力の値および主応力の差が大きいために、坑道周辺に岩盤が破壊する領域が生じている (Read, 1996)。このため、破壊領域を生じないように掘削しようとすると、坑道掘削の方向や坑道の形状が制限される。また、地下発電所のための大規模地下空洞の掘削に際しては、空洞の長手方向を最大主応力の方向と一致させることが通例となっている。

上記のような要素技術の信頼性を検討するための基礎となる情報を収集するため、すなわち、わが国における地下深部の岩盤が有する一般的な熱的および力学的な性質を理解するため、文献調査および釜石鉱山と東濃鉱山における調査・試験によりデータを収集し、岩種ごとの物性の頻度分布や物性間の相関関係などについて検討した。

## 2. 調査方法

### 2.1 対象文献とデータの整理方法

文献調査の方法は、同様な調査を実施した佐藤ほか（1992）に従った。土木建築、地質、鉱山、水資源・地熱開発関係の学会誌や講演会要旨集などについて、佐藤ほか（1992）以降に発行された資料および学会等のデータベースからデータを収集した。これらを、非常に風化・変質が進んでいることが明らかな試料のデータは省くなど、下記に示す佐藤ほか（1992）と同じ基準によりデータを選択し、2.2に示す岩種ごとに分類し、それぞれの統計量（最大値、最小値、平均値、中央値、標準偏差、データ数）を算出した。

- ・岩盤区分がE, D または C<sub>1</sub>級（電中研式の区分）を主体とする試料
- ・風化花崗岩（マサ土）の試料
- ・断層・破碎帯など、非常に風化・変質が進んでいることが明らかな試料
- ・土木建設物の設計値など、試験・計測結果をある目的を持って取りまとめたもの。

岩盤の初期応力については、佐藤ほか（1992）では調査の対象ではなかったため、岩石の物理的性質と同様な文献を対象としてデータを収集した。

### 2.2 岩種の分類

岩種については、地質環境の条件として重要でかつ岩種による違いが比較的明瞭な性質に着目して、以下の6つのタイプに区分した。

- ①酸性（珪長質）の結晶質岩（火成岩・变成岩）
- ②塩基性（苦鉄質）の結晶質岩（火成岩・变成岩）
- ③先新第三紀（古第三紀以前）の堆積岩（砂質岩）
- ④先新第三紀（古第三紀以前）の堆積岩（泥質・凝灰質岩）
- ⑤新第三紀以降の堆積岩（砂質岩）
- ⑥新第三紀以降の堆積岩（泥質・凝灰質岩）

岩石の物理的・化学的な性質は連続的に変化するものであり、また、地質環境の特性と岩種との関係は必ずしも単純ではない。上記の区分は、地質環境の特性に関する研究の成果をできるだけ具体的な情報として処分システムの設計解析や性能評価研究に反映する観点で作業仮説的に設定したものである。設定に際する着目点は以下のようである。

岩盤の熱特性・力学特性や地下水の流動特性にとって重要な岩石の物性に着目すると、堆積岩は固結度の高い（古い）堆積岩と固結度の低い（新しい）堆積岩に大別できる。前者は、比較的強度が高く、緻密（粒子間隙が少ない）で割れ目が発達しやすい。後者は強度が低く、多孔質（粒子間隙が多い）で割れ目は比較的少ない。両者に明瞭な境界はないが、土木工学

の分野で用いられている硬岩（主に、古第三紀以前の堆積岩）と軟岩（主に、新第三紀以降の堆積岩）の分類が目安となる。

地下水の地球化学特性や物質の収着能力にとって重要な岩石の鉱物・化学組成に着目すると、結晶質岩は酸性岩（珪長質岩）と塩基性岩（苦鉄質岩）に、また、堆積岩は収着能力の高い雲母や粘土鉱物を比較的多く含む泥質・凝灰質岩と、一般に石英や長石、岩片の割合が大きい砂質岩とに、それぞれ大別することができる。

表 2.1 に佐藤ほか（1992）における岩種の分類と今回の分類の関係を示す。結晶質岩については大きく 2 つにまとめるとともに、堆積岩については詳細化した。石灰岩については第 2 次取りまとめにおいて検討の対象外としたことから、今回の検討においても除外した。

### 2.3 サイクル機構のデータの取り扱い

東濃地科学センターでは、地層科学研究の一環として文献調査の他にも、東濃地域や釜石鉱山における試験研究で熱的および力学的性質に関するデータを取得している（核燃料サイクル開発機構, 1999a ; 1999b ; 1999c）。東濃地域における試験研究と釜石原位置試験において取得された物理的性質については、東濃鉱山の瑞浪層群の堆積岩は新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）と、東濃周辺の土岐花崗岩および釜石鉱山の栗橋花崗閃綠岩は結晶質岩（酸性岩）のデータと比較した。瑞浪層群の堆積岩は新第三紀堆積岩の砂質岩と泥質岩・凝灰質岩の両方を含むが、後述する力学物性も含めて、両者の差はほとんど認められないことから、データ数の多い新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）の文献値と比較して示した。

表 2.1 岩種の分類と対応する岩石名

今回の岩種分類	佐藤ほか（1992）の岩種分類	
結晶質岩（酸性岩）	花崗岩類	花崗岩、花崗閃綠岩、花崗斑岩、石英斑岩 石英閃綠岩、石英閃長岩、片麻岩
	玄武岩類	玄武岩、安山岩
	片岩	結晶片岩、千枚岩
結晶質岩（塩基性岩）	斑レイ岩類	斑レイ岩、閃綠岩、角閃岩
	流紋岩類	超塩基性岩（超苦鉄質岩） 流紋岩、デイサイト
新第三紀堆積岩（砂質岩）	新第三紀堆積岩	砂岩、礫岩
新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）		泥岩、凝灰岩
先新第三紀堆積岩（砂質岩）	先新第三紀堆積岩	砂岩、礫岩
先新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）		泥岩、チャート
	石灰岩	石灰岩

### 3. 調査結果および考察

#### 3.1 热物性

热物性としては、热伝導率、比热および線膨張係数が調査の対象である。これらの热物性や後述する力学物性は供試体の含水状態や測定条件に依存する。上記のデータは、前述のように明らかに風化が激しいものや岩盤等級が著しく悪いものを主体とするような場所から採取されたものは除いているものの、含水状態や測定条件を付記しているものが少なかったため、条件の違いが特性に与える影響を検討することはできなかった。したがって、以下に示すデータは、岩種ごとの取りうる範囲の中に、供試体の状態や試験条件の違いによる差も含まれたものになっている。表 3.1 に調査によって得られた热物性および力学物性の岩種ごとの平均値や標準偏差などの統計量を示す。

##### (1) 物性値の統計学的検討

###### ①熱伝導率

結晶質岩と先新第三紀は  $2\sim3 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  にピークを有し、新第三紀堆積岩では  $1 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  付近のデータが多いという傾向が認められた（図 3.1~3.3）。東濃の土岐花崗岩および釜石の栗橋花崗閃綠岩のデータは結晶質岩（酸性岩）の文献データのピーク値とほぼ一致する。また、東濃の堆積岩は、 $1 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  付近に多く、新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）の文献データのピーク値とほぼ一致する。いずれの岩種も、頻度分布は正規分布の形状を呈し、平均値と中央値がほぼ一致する。

###### ②比熱

結晶質岩と先第三紀堆積岩は  $0.7\sim1.1 \text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  の範囲にある（図 3.4~3.6）。それ以外の岩種ではほとんどデータが得られなかった。

###### ③線膨張係数

いずれの岩種も  $0.5\sim1.5\times10^{-5}\text{K}^{-1}$  にピークを有する（図 3.7~3.9）。新第三紀堆積岩の泥質岩と凝灰質岩はそれ以外の岩種と比較してデータの範囲が広い。マイナスの膨張率を示すデータについては、加熱に伴う粘土鉱物などの層間水の脱水による収縮が物性を決めるメカニズムと推定されたため図表からは削除した。東濃の土岐花崗岩および釜石の栗橋花崗閃綠岩のデータは結晶質岩（酸性岩）の文献データとほぼ同じ分布を示す。一方、東濃の堆積岩は新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）の文献データの中では低い値を示す。

##### (2) 热物性の深度依存性

岩盤の物性には深度依存性が認められることがある。とくに堆積岩については、その固結

物性 岩種	熱			空隙・水			弾性波速度					密度			強度						
	熱伝導率 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	比熱 kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	線膨張係数 ×10 <sup>5</sup> K <sup>-1</sup>	吸水率 %	含水率 %	有効間隙率 %	超音波速度		動ボアソン比	動弾性係数 GPa	地山の弾性波速度 km s <sup>-1</sup>	飽和密度 g cm <sup>-3</sup>	自然密度 g cm <sup>-3</sup>	乾燥密度 g cm <sup>-3</sup>	一軸圧縮強度 MPa	弾性係数 GPa	ボアソン比	圧裂引張強度 MPa	三軸圧縮試験		
							P波 km s <sup>-1</sup>	S波 km s <sup>-1</sup>											せん断強度 MPa	内部摩擦角 deg	
結晶質岩 (酸性岩)	個数	102	71	70	402	105	315	748	160	210	193	73	250	643	307	493	495	171	259	216	119
	最大値	5.38	1.08	1.29	27.9	38.7	58.2	9.30	4.03	0.50	88.7	6.00	3.12	3.60	3.11	405.7	136.2	0.56	94.1	52.2	62.0
	最小値	1.10	0.73	0.04	0.1	<0.1	0.0	1.04	<0.1	0.02	<0.1	0.33	1.76	1.05	1.48	0.4	<0.1	0.04	0.1	0.0	4.6
	平均値	2.86	0.99	1.05	1.0	2.0	4.0	5.03	2.38	0.28	40.8	3.61	2.67	2.64	115.8	35.0	0.25	8.2	14.7	38.5	
	中央値	2.76	1.03	1.18	0.5	0.4	1.3	5.05	2.37	0.28	41.7	4.30	2.67	2.65	107.8	28.1	0.23	7.1	13.2	40.0	
	標準偏差	0.62	0.01	0.46	2.1	6.3	7.7	1.15	0.56	0.10	20.9	1.82	0.18	0.22	0.20	70.5	27.3	0.10	9.4	9.9	11.8
結晶質岩 (塩基性岩)	個数	183	55	50	433	37	248	662	190	183	310	149	125	529	230	529	448	68	238	191	60
	最大値	4.23	1.28	1.29	12.3	11.5	25.2	8.08	4.13	0.42	123.4	5.20	3.09	3.37	3.06	437.5	160.7	0.50	23.1	53.6	55.3
	最小値	0.68	0.72	0.03	0.1	0.1	0.1	1.50	0.67	0.10	<0.1	0.14	2.15	1.56	1.84	3.9	<0.1	0.07	0.5	1.0	5.5
	平均値	2.36	0.96	0.82	1.9	4.2	7.0	4.79	2.38	0.26	24.7	1.51	2.66	2.63	2.60	134.0	26.5	0.25	9.9	22.8	36.3
	中央値	2.39	1.06	0.81	1.2	4.1	5.4	4.86	2.32	0.26	18.4	1.11	2.66	2.65	2.63	127.4	20.7	0.23	9.6	20.9	39.0
	標準偏差	0.77	0.17	0.22	2.1	3.4	5.7	1.19	0.61	0.06	25.7	1.11	0.24	0.24	0.25	72.1	27.8	0.09	4.7	9.9	10.0
新第三紀 堆積岩 (砂質岩)	個数	75	1	1	16	22	110	220	31	1	8	409	87	277	108	78	70	23	15	30	31
	最大値	4.74	0.77	0.70	24.4	53.6	55.1	6.85	2.99	0.25	68.6	6.13	2.64	2.98	2.78	205.8	82.2	0.45	31.4	30.0	62.1
	最小値	0.47	0.77	0.70	0.2	1.1	0.1	0.70	0.25	0.25	<0.1	0.41	1.74	1.28	1.09	0.2	<0.1	0.11	0.1	0.1	22.0
	平均値	1.56	0.77	0.70	7.3	21.2	17.9	2.83	1.49	0.25	30.7	3.75	2.27	2.20	2.01	31.2	11.0	0.32	7.9	5.2	35.8
	中央値	1.30	0.77	0.70	4.1	18.8	16.1	2.70	1.25	0.25	23.6	3.74	2.29	2.25	1.98	17.2	3.2	0.33	6.7	3.5	32.0
	標準偏差	0.78	-	-	7.8	14.4	13.7	1.20	0.99	-	30.3	0.76	0.25	0.36	0.39	36.8	19.6	0.12	7.6	6.3	10.8
新第三紀 堆積岩 (泥質/凝灰質岩)	個数	90	6	6	91	106	203	412	57	5	21	61	155	537	183	380	364	61	93	132	149
	最大値	3.63	0.93	2.44	125.0	60.0	55.4	6.40	3.51	0.31	20.3	5.30	2.62	2.99	2.66	377.6	58.8	0.50	54.8	98.0	60.0
	最小値	0.35	0.77	0.83	0.7	0.6	0.2	0.70	0.30	0.21	1.9	0.64	1.40	1.05	0.68	<0.1	<0.1	0.07	0.1	<0.1	7.0
	平均値	1.62	0.85	1.42	14.9	21.7	20.0	2.58	1.38	0.28	15.0	2.52	2.23	2.02	1.99	25.8	6.7	0.27	3.7	5.1	25.8
	中央値	1.37	0.85	1.36	10.3	19.9	20.0	2.32	1.30	0.30	17.5	2.38	2.29	1.98	2.01	9.1	4.1	0.28	1.8	1.1	26.0
	標準偏差	0.87	0.07	0.56	19.5	11.6	12.8	1.07	0.59	0.04	5.4	0.81	0.28	0.35	0.41	38.0	9.4	0.11	6.4	11.7	10.8
先新第三紀 堆積岩 (砂質岩)	個数	16	4	4	215	9	124	420	102	47	82	35	48	333	95	355	493	25	72	92	124
	最大値	4.48	1.08	1.08	3.4	4.7	40.0	7.00	4.22	0.45	87.5	5.40	2.79	2.98	2.80	414.5	150.9	0.32	22.1	78.0	61.6
	最小値	2.38	1.05	0.65	0.1	0.0	1.08	1.39	0.17	<0.1	0.50	1.23	1.60	2.45	0.3	<0.1	0.10	0.5	<0.1	14.0	
	平均値	3.19	1.08	0.93	0.7	1.3	6.5	4.57	3.05	0.28	35.1	2.15	2.58	2.52	2.61	134.4	18.6	0.20	8.7	16.9	38.4
	中央値	2.97	1.08	1.00	0.5	1.1	3.1	4.61	3.21	0.26	43.0	1.90	2.63	2.58	2.56	127.4	13.7	0.20	7.6	15.8	39.0
	標準偏差	0.59	0.01	0.19	0.6	1.4	9.0	1.24	0.75	0.07	26.0	1.38	0.28	0.26	0.08	83.6	19.7	0.07	5.4	15.5	8.3
先新第三紀 堆積岩 (泥質/凝灰質岩)	個数	14	6	5	58	3	53	201	26	19	68	16	18	214	35	178	321	16	40	85	78
	最大値	3.65	1.04	1.09	2.6	0.9	46.0	7.80	3.96	0.39	97.7	5.50	3.05	3.04	344.0	105.8	0.39	24.7	98.0	45.0	
	最小値	1.88	1.09	0.80	0.1	0.6	0.4	1.07	1.46	0.20	1.8	0.90	1.90	1.41	2.08	1.5	0.2	0.06	0.1	0.4	7.0
	平均値	2.68	1.06	0.96	0.6	0.8	7.7	4.59	2.69	0.30	42.9	2.82	2.69	2.48	2.72	104.9	17.8	0.26	7.6	15.9	25.5
	中央値	2.68	1.06	0.94	0.4	0.8	1.8	4.95	2.53	0.29	45.6	2.26	2.70	2.66	2.74	89.7	8.2	0.30	5.4	1.8	25.5
	標準偏差	0.48	0.02	0.11	0.5	0.2	11.4	1.64	0.60	0.05	24.3	1.60	0.25	0.38	0.19	76.4	19.9	0.09	6.6	20.8	10.9

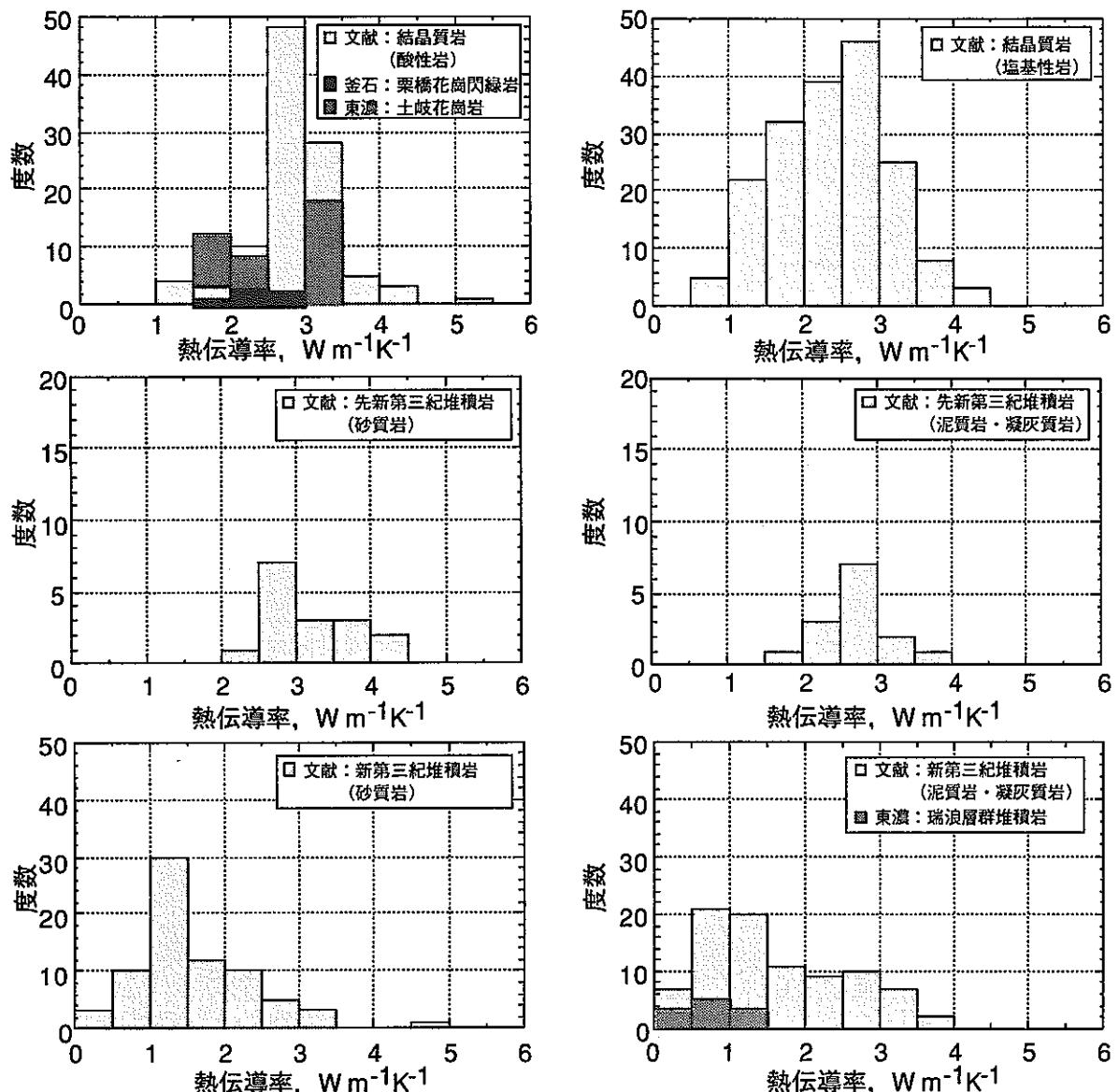


図 3.1 热伝導率の頻度分布図

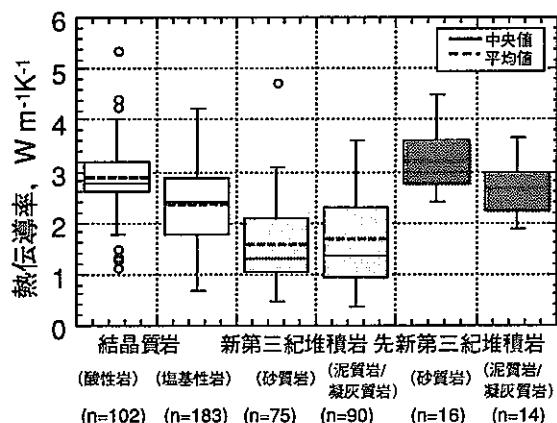


図 3.2 热伝導率の箱ひげ図

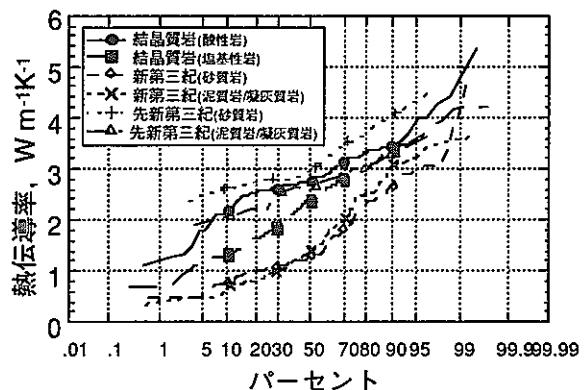


図 3.3 热伝導率の確率密度分布

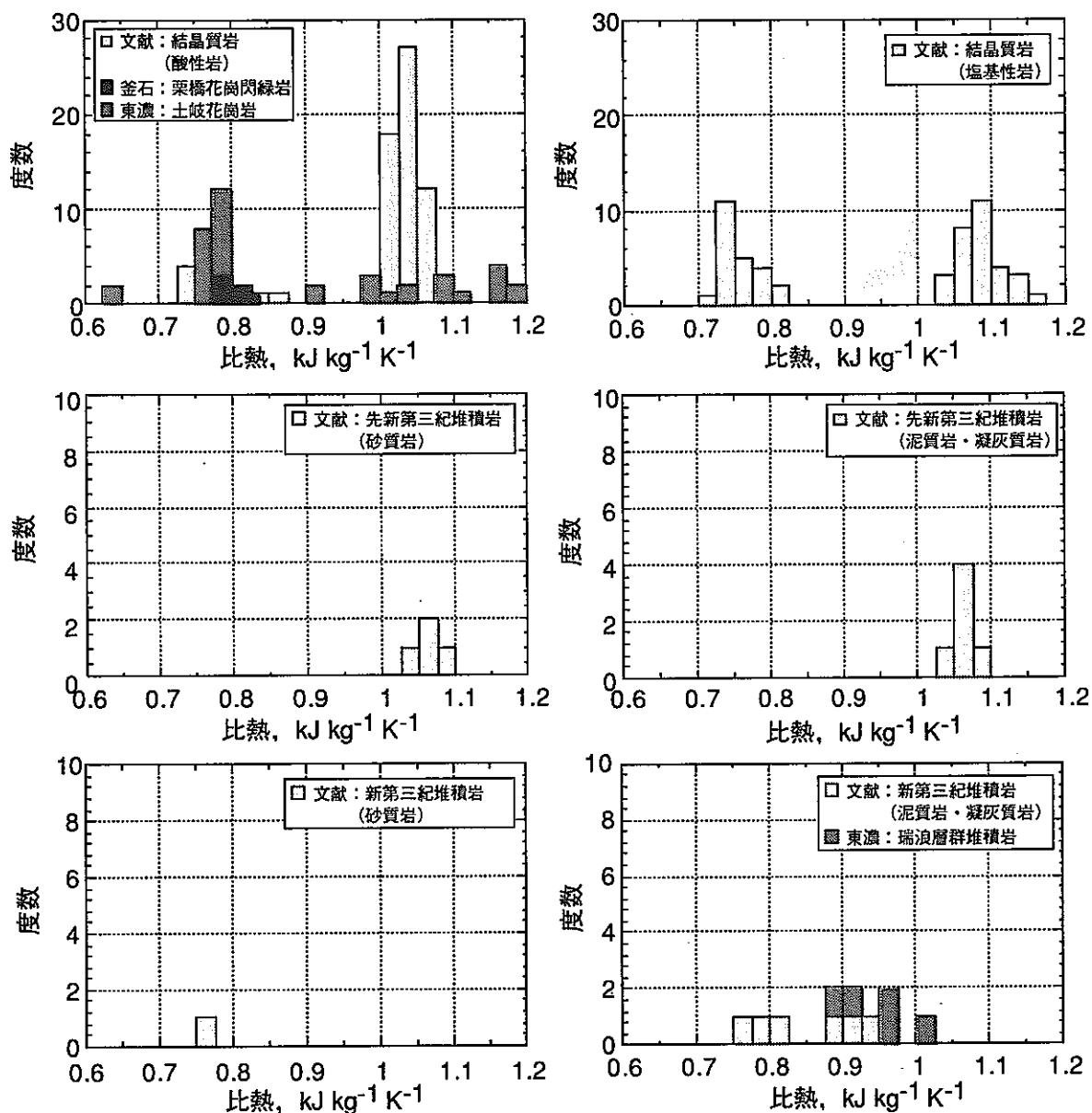


図 3.4 比熱の頻度分布図

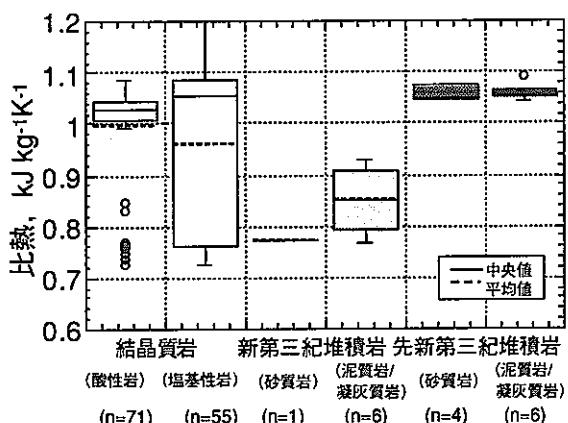


図 3.5 比熱の箱ひげ図

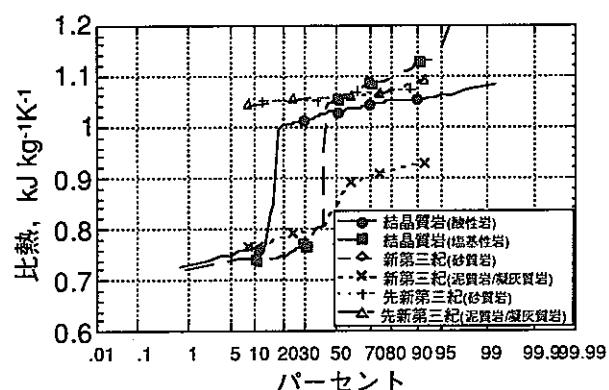


図 3.6 比熱の確率密度分布

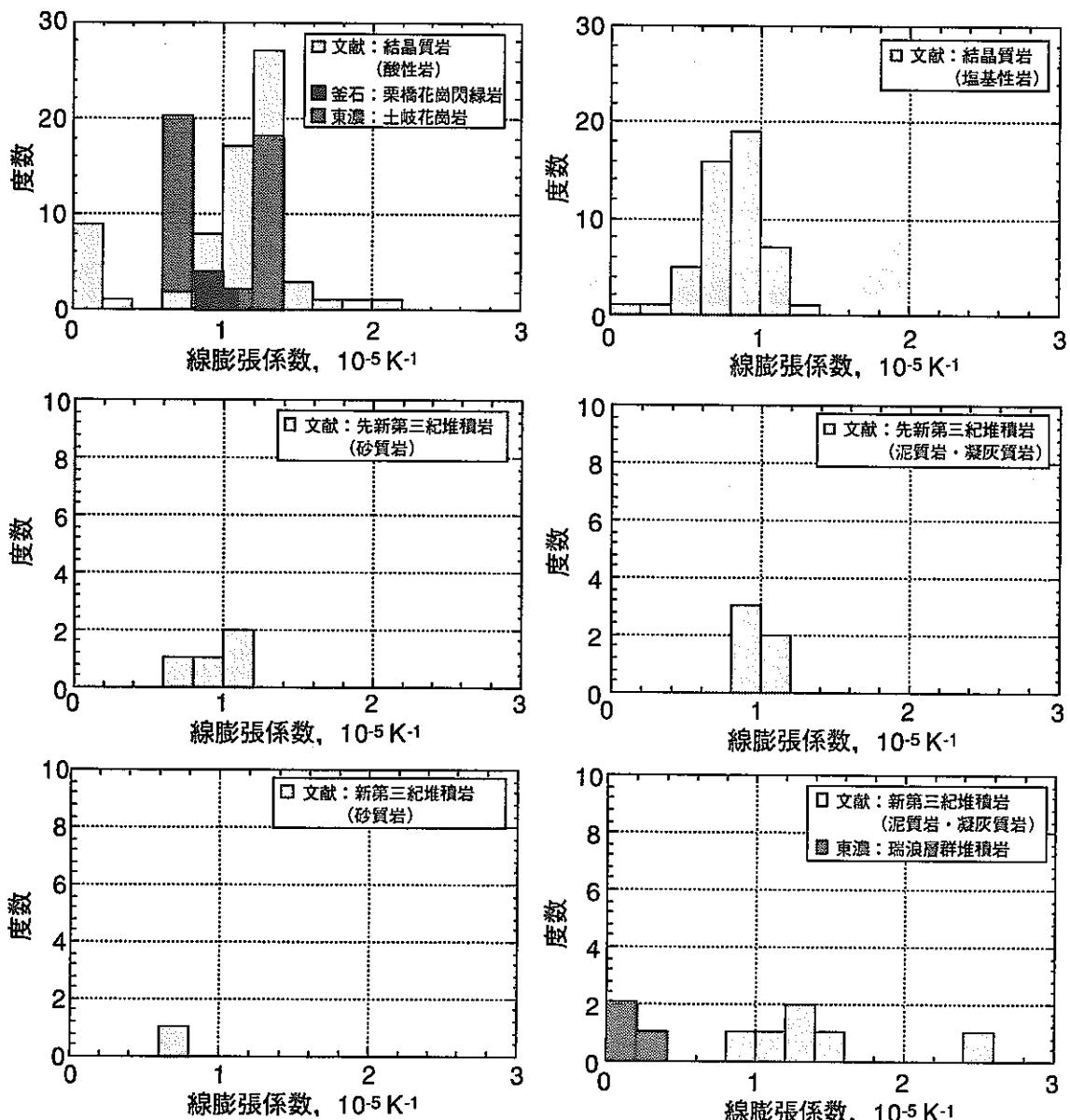


図 3.7 線膨張係数の頻度分布図

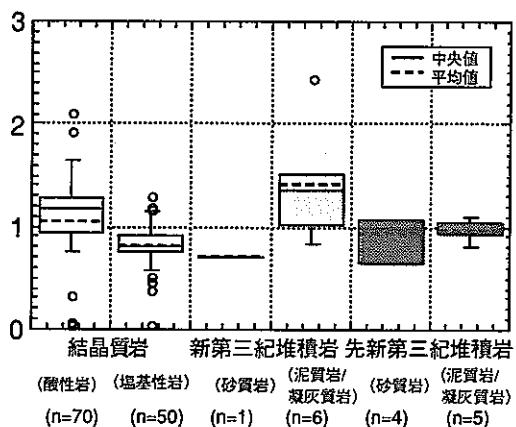


図 3.8 線膨張係数の箱ひげ図

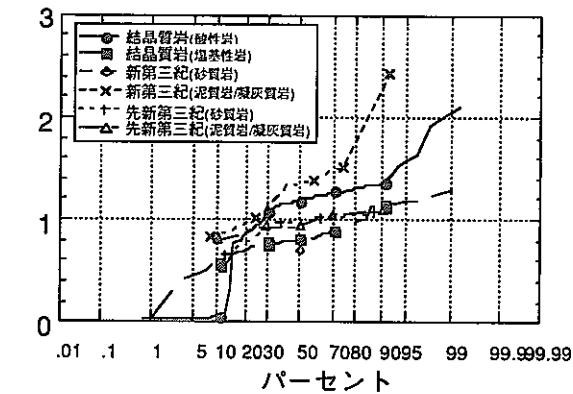


図 3.9 線膨張係数の確率密度分布

度が地質学的時間の経過に伴って増すという、いわゆる続成作用によって、密度が大きくなり有効間隙率が小さくなることが知られている。試料の採取深度が付記されているデータについて深度との関係を図 3.10 に示す。いずれの岩種もデータの範囲が広く、深度依存性を見い出すことは困難である。これらのデータの他に、地熱関係のデータについては、地質調査所において地熱調査の坑井データが地熱情報データベースに収録されており、100m より深い 321 本の坑井のデータが坑井ごとに図表に編集されている（地質調査所、1991）。密度、有効間隙率、熱伝導率などの深度分布が図示されており、これによると、砂岩、泥岩、凝灰岩などの堆積岩については、物性値の深度依存性が認められるものが多い。

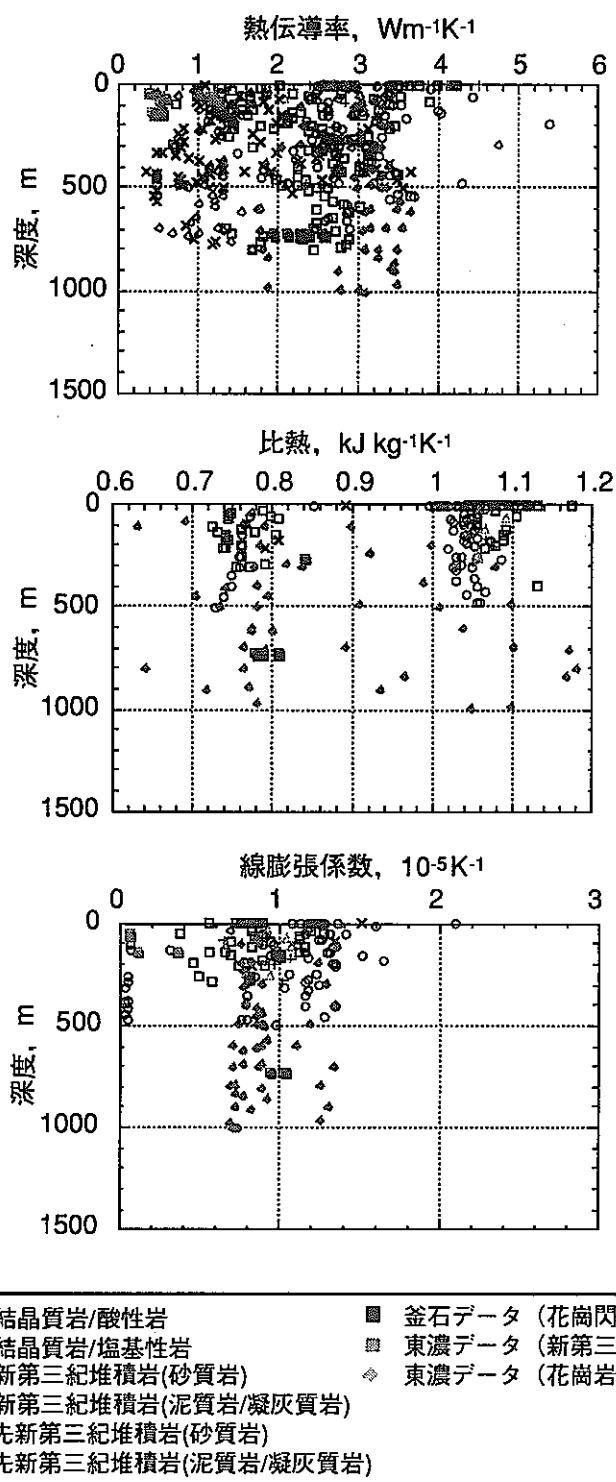


図 3.10 热物性の深度依存性

## 3.2 岩石の力学特性

文献調査で収集したデータについて、物性値が岩種ごとに示す範囲、あるいは平均値や中央値の岩種ごとの相違を検討するために、物性値のヒストグラム、箱ひげ図および確率密度分布図を示した。

### (1) 物性値の統計学的検討

#### ①有効間隙率

有効間隙率は、力学物性のみならず熱物性を決める要素のひとつであるため、重要なデータのひとつである。調査の結果、結晶質岩と先新第三紀堆積岩ではほとんどのデータが 10% 以下であり、ピーク値は 2% 以下であること、また、新第三紀堆積岩では 60% まで幅広く分布する傾向が認められる。東濃の土岐花崗岩および釜石の栗橋花崗閃緑岩の有効間隙率のはほとんどは 2 % 以下であり、結晶質岩（酸性岩）の文献データのピークとほぼ一致している。東濃の堆積岩のデータは 30~60% の範囲にあり、新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）の文献データの分布の中では大きい値を示す（図 3.11~13）。

#### ②一軸圧縮強度

岩石はその一軸圧縮強度によって、10~20MPa 以下の軟岩とそれ以上の硬岩に分類される。岩種ごとにみると、結晶質岩と先新第三紀堆積岩の多くは硬岩に分類され、新第三紀堆積岩は軟岩が多いものの硬岩に分類されるものまで連続的に幅広く分布し、硬岩と軟岩（あるいは中硬岩）の境界が明瞭ではないことが示される。東濃の土岐花崗岩および釜石の栗橋花崗閃緑岩のデータは結晶質岩（酸性岩）の文献データのピークより若干大きめの 150~200MPa の範囲にピークがある。東濃の堆積岩のデータのほとんどは固結度が低いことにより 10MPa 以下である。平均値は 7MPa であり軟岩に分類される（図 3.14~16）。結晶質岩は正規分布の形状を呈する。新第三紀堆積岩は最小値にピークがあり一軸圧縮強度が増加するにつれて急激に度数が減少するような分布を示す。先新第三紀堆積岩はこれらの中間的な分布の形状を示す。

#### ③弾性係数（ヤング率）

いずれの岩種においても最小値にピークがあり、弾性係数が大きくなるにつれて徐々に度数が小さくなる。結晶質岩と先新第三紀堆積岩では 100GPa まで、新第三紀堆積岩は 20GPa までのデータがほとんどを占める。東濃の土岐花崗岩および釜石の栗橋花崗閃緑岩のデータは 50~70GPa がほとんどで、結晶質岩（酸性岩）の文献データの中では比較的大きな値を示す。東濃の堆積岩のデータは 1~4GPa がほとんどである（図 3.17~19）。

#### ④ポアソン比

ほとんどの岩種で 0.2~0.3 にピークがあり、結晶質岩と先新第三紀堆積岩では小さめの値、

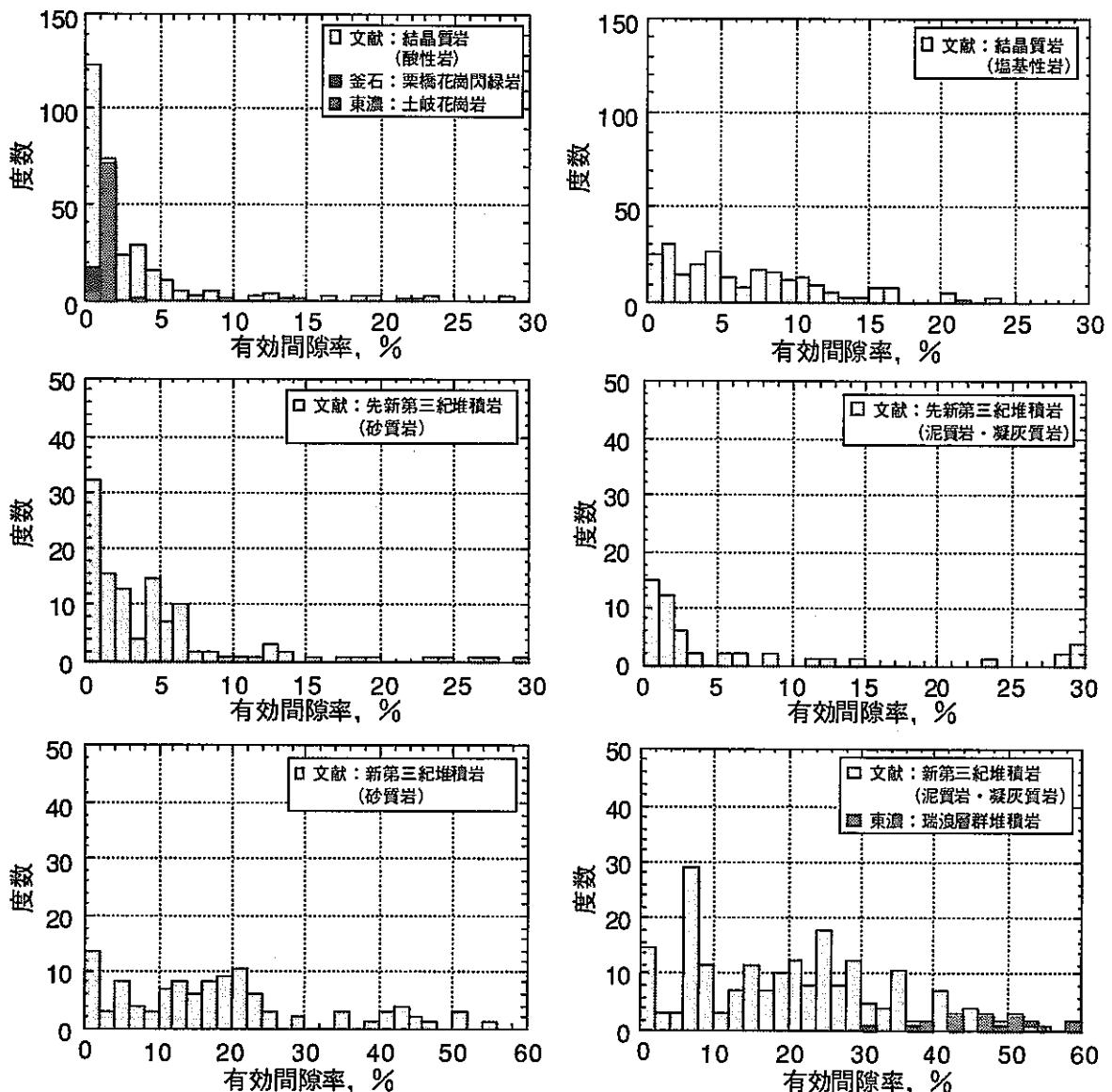


図 3.11 有効間隙率の頻度分布図

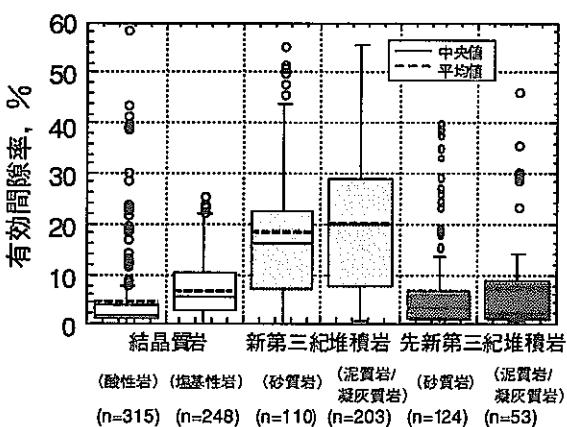


図 3.12 有効間隙率の箱ひげ図

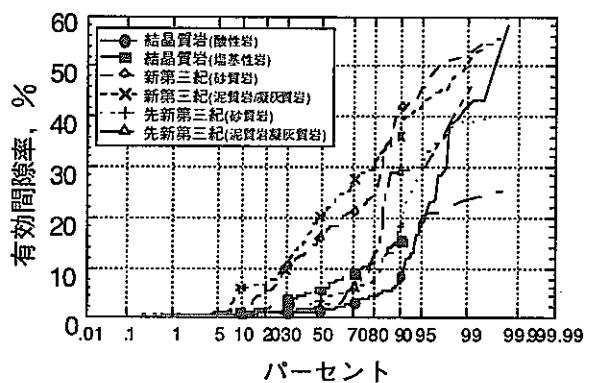


図 3.13 有効間隙率の確率密度分布

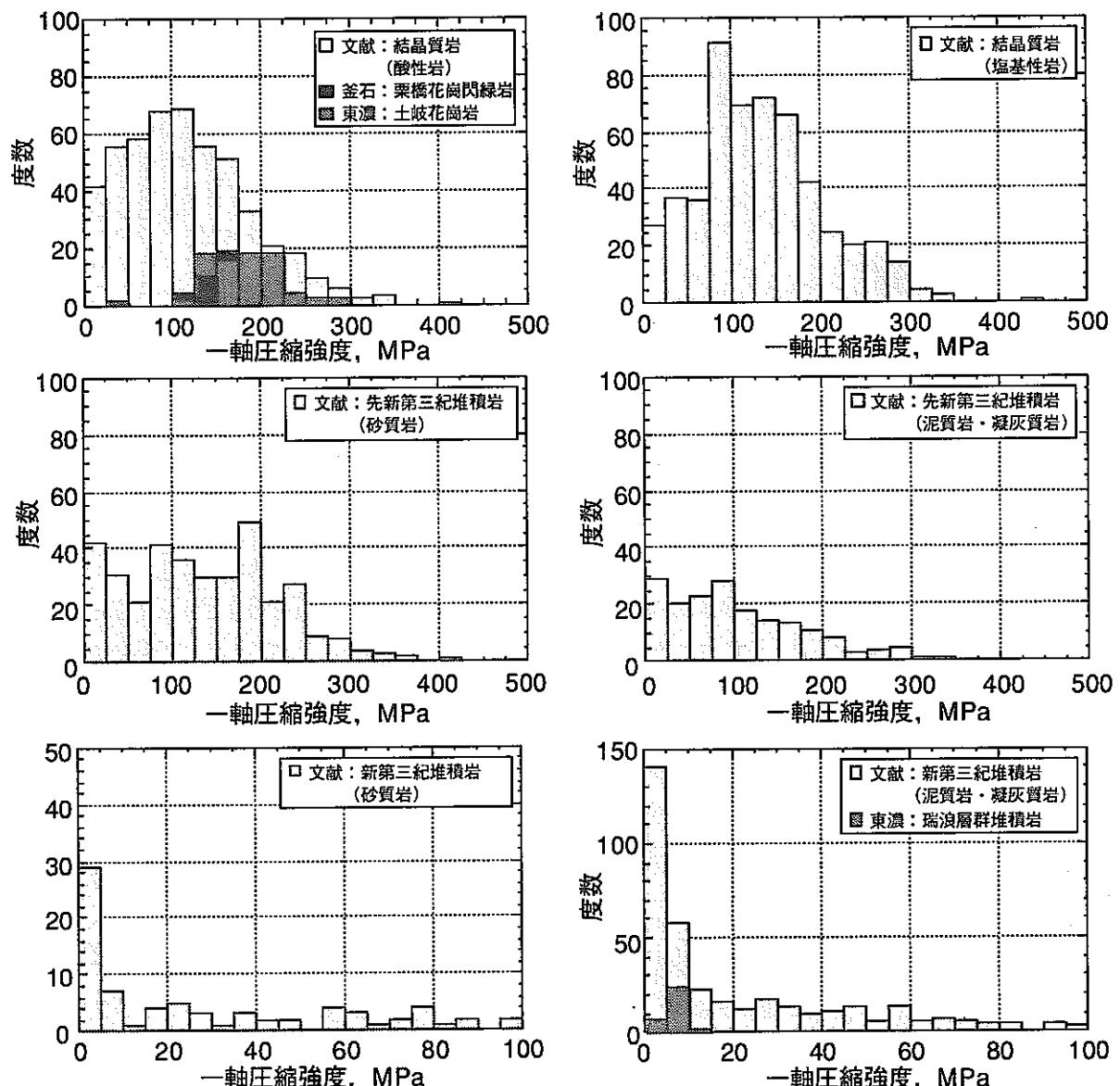


図 3.14 一軸圧縮強度の頻度分布図

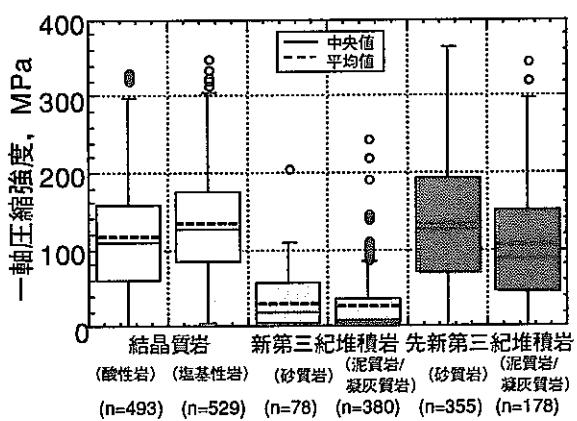


図 3.15 一軸圧縮強度の箱ひげ図

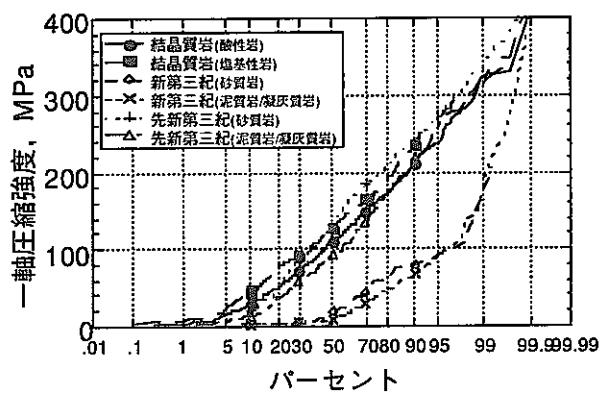


図 3.16 一軸圧縮強度の確率密度分布

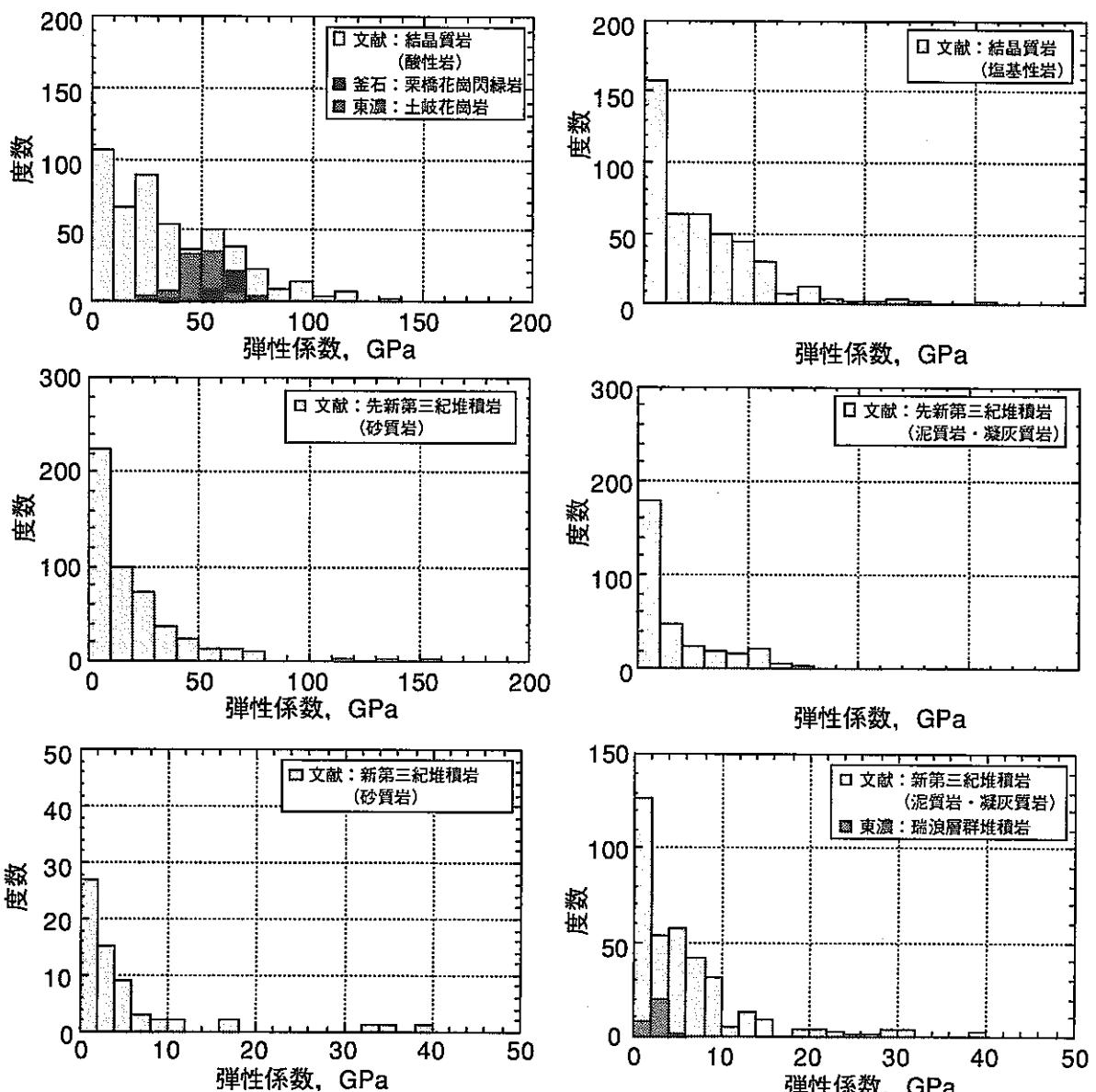


図 3.17 弹性係数の頻度分布図

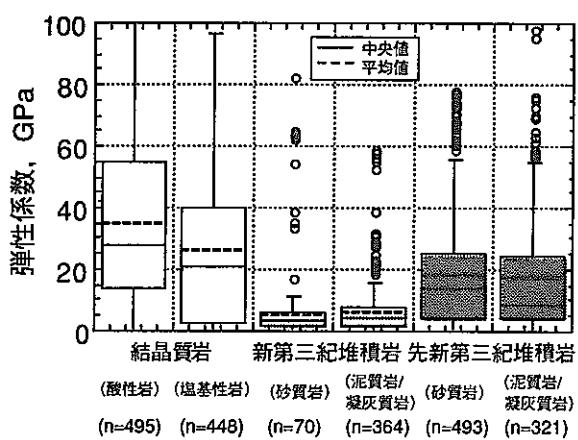


図 3.18 弹性係数の箱ひげ図

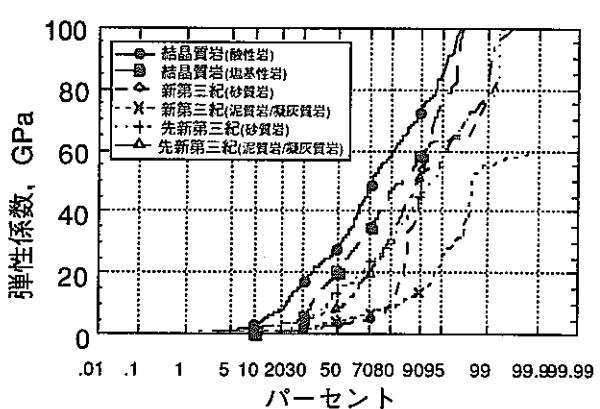


図 3.19 弹性係数の確率密度分布

新第三紀堆積岩では大きめの値をとる傾向がある。釜石鉱山と東濃地域のデータは、結晶質岩（酸性岩）と新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）の文献データのそれぞれの分布と同様の傾向を示す（図3.20～22）。いずれも頻度分布は正規分布の形状を呈している。

#### ⑤引張強度

ここで示す引張強度は圧裂引張試験（プラジリアンテスト）によって求められるものである。結晶質岩では10MPa付近に、新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）では最小値である2MPa以下にピークがあるが、その他の岩種では、明瞭なピークが認められず、0～20MPaの範囲にある。釜石鉱山と東濃地域のデータは結晶質岩（酸性岩）と新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）のそれぞれの分布とほぼ同様であるが、その範囲は狭い（図3.23～25）。

#### ⑥せん断強度

ここで示すせん断強度は三軸圧縮試験の結果から算出されるものである。すなわち、封圧とピーク強度を利用して描く複数のモール円の接線と応力の軸の交点から求められるものである。結晶質岩では40MPaまで、新第三紀堆積岩では10MPaまでのデータがほとんどを占める。先新第三紀堆積岩は2MPa以下にピークを持つが、50MPaまで幅広く分布する。東濃の土岐花崗岩および釜石の栗橋花崗閃綠岩のデータは20～40MPaが多く、結晶質岩の文献データの中では比較的大きな値を示す。東濃の堆積岩のデータは1～4MPaの範囲にある（図3.26～28）。

#### ⑦内部摩擦角

三軸圧縮試験のピーク強度を基に描くモール円に対して求められる内部摩擦角について、ほとんどの岩種で10～50°の範囲にある。結晶質岩と砂質岩では大きめ、泥質岩・凝灰質岩では小さめの値を示す傾向がある。東濃の土岐花崗岩および釜石の栗橋花崗閃綠岩のデータは50～60°のデータが多く、結晶質岩（酸性岩）の文献データの中では比較的大きい値を示す。東濃の堆積岩のデータは0～30°の範囲にあり、新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）の文献データの中では小さめの値を示す（図3.29～31）。

上記の物性値は高温条件下において変化する可能性があることが知られている。北野ほか（1988）では、文献調査により、0℃から600℃までの岩石の力学特性、熱特性および透水特性に関して取りまとめている。これによると、花崗岩や安山岩については比較的よく調べられており、その他の岩種についてはデータが乏しいことが報告されている。人工バリア周辺の岩盤で想定されている温度は100℃未満であり、この温度条件下では室温と比較して最大でも10～20%以内の変化に収まっている。これらの結果はすべて大気圧下での試験であり、封圧が作用した場合の結果はこの文献調査では得られなかった。北野ほか（1988）以降、試験装置の性能の向上により封圧下における試験の結果も報告が多くされるようになった。封圧が作用した場合、大気圧下での結果と比較して温度の上昇に伴う物性の変化は小さくなることも報告されている（喜多ほか、1998）。

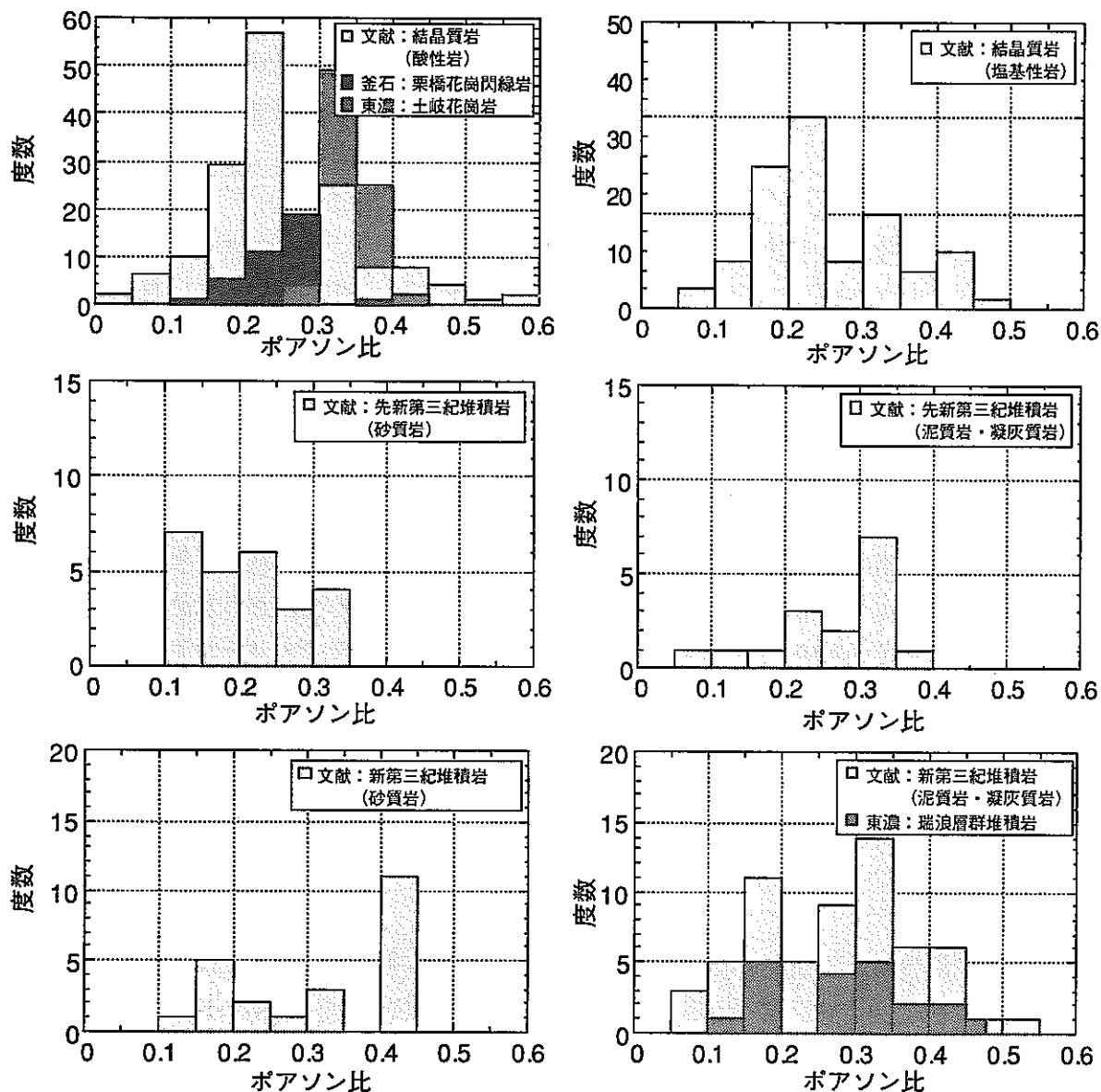


図 3.20 ポアソン比の頻度分布図

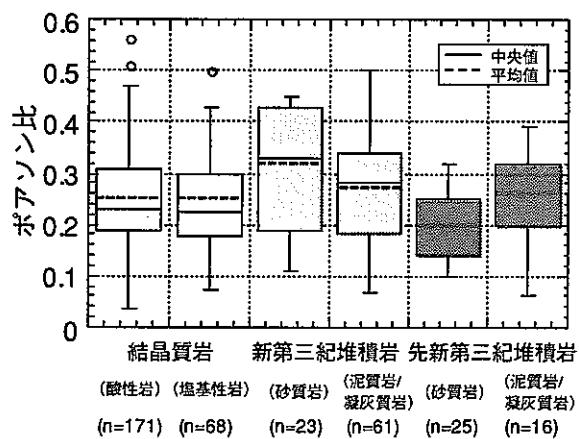


図 3.21 ポアソン比の箱ひげ図

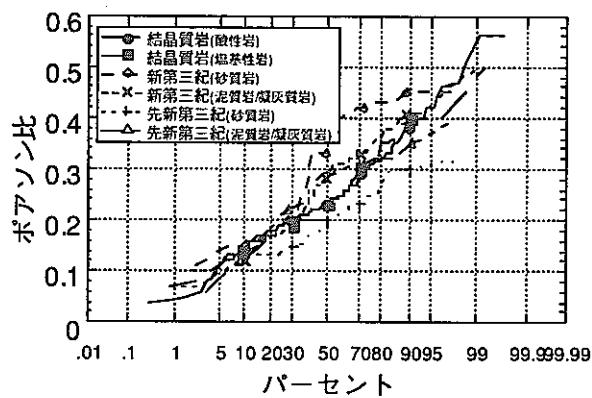


図 3.22 ポアソン比の確率密度分布

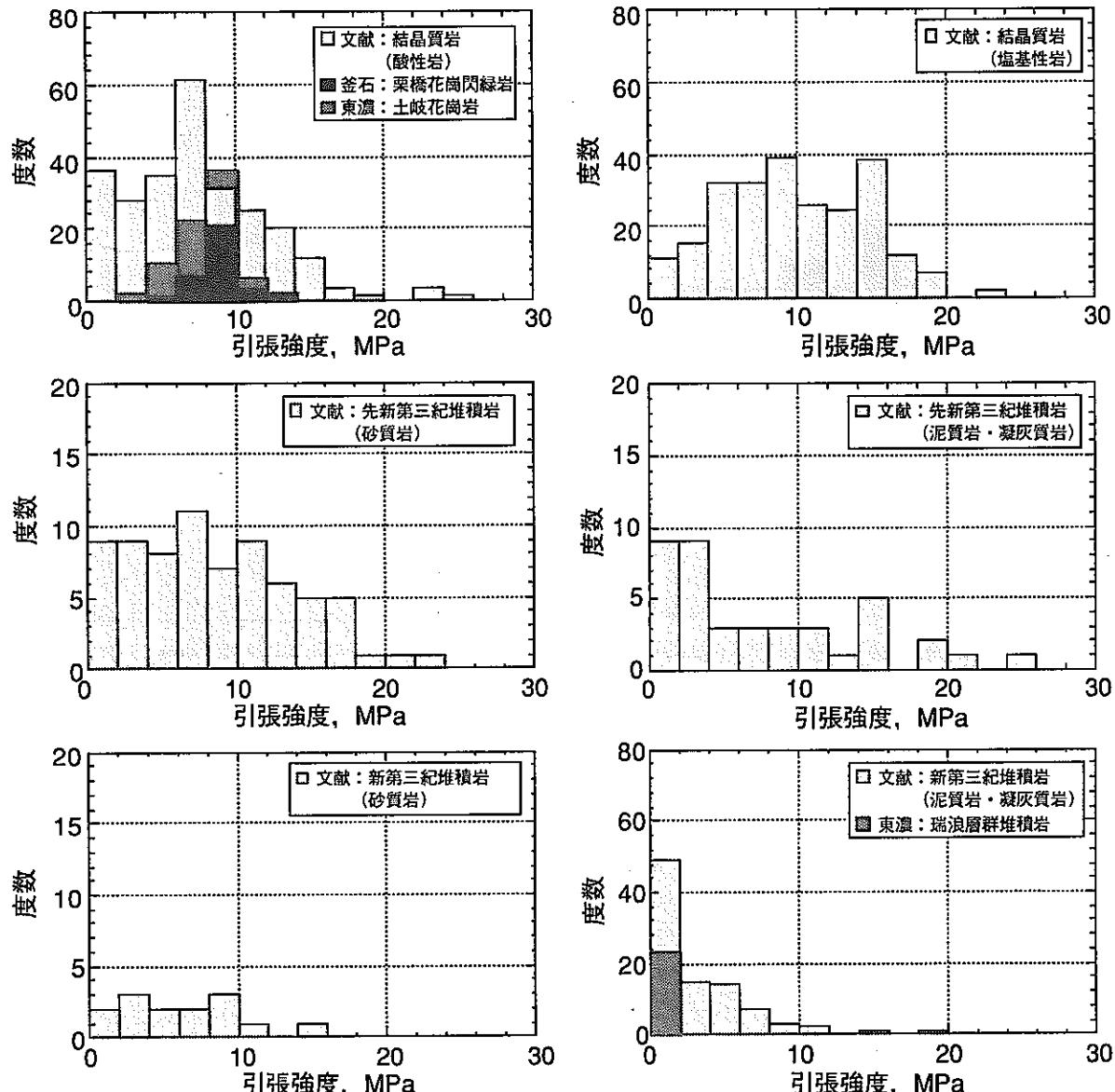


図 3.5-23 引張強度の頻度分布図

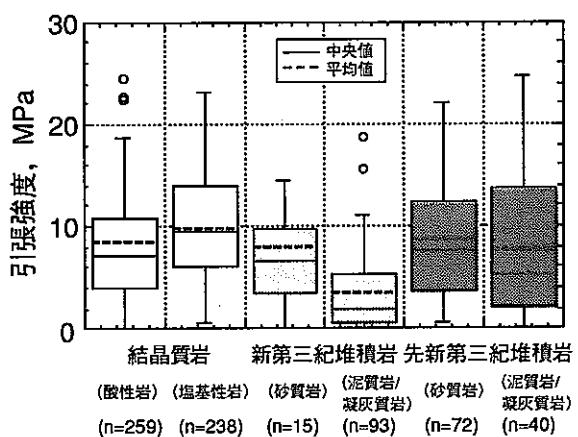


図 3.24 引張強度の箱ひげ図

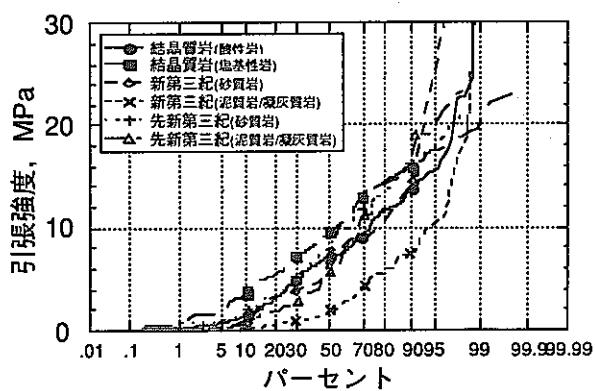


図 3.25 引張強度の確率密度分布

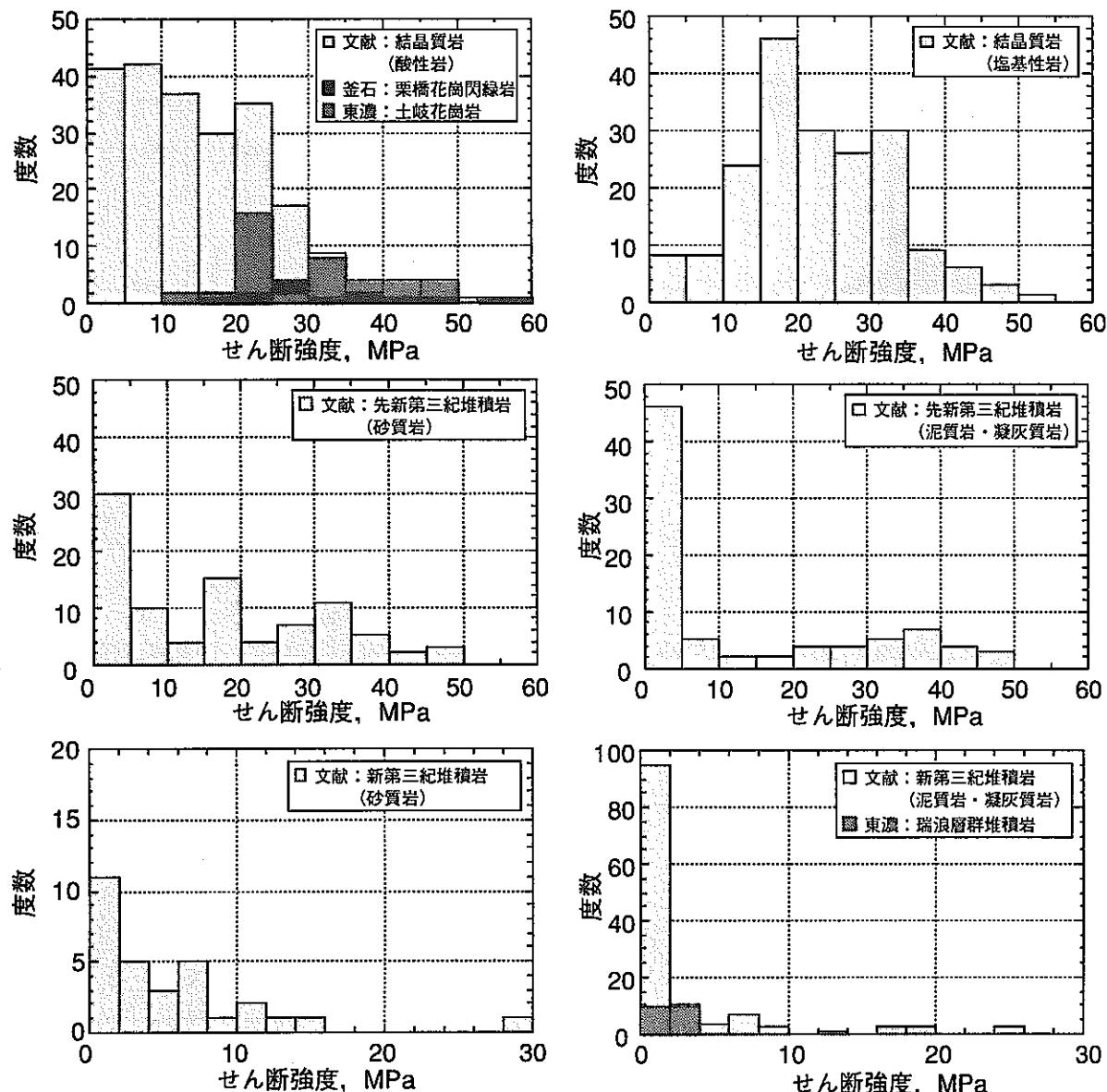


図 3.5-26 せん断強度の頻度分布図

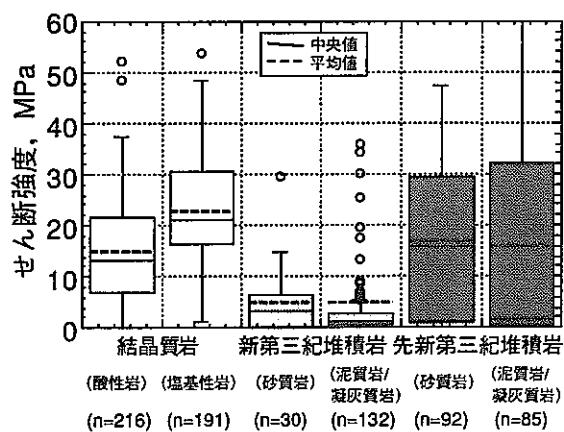


図 3.27 せん断強度の箱ひげ図

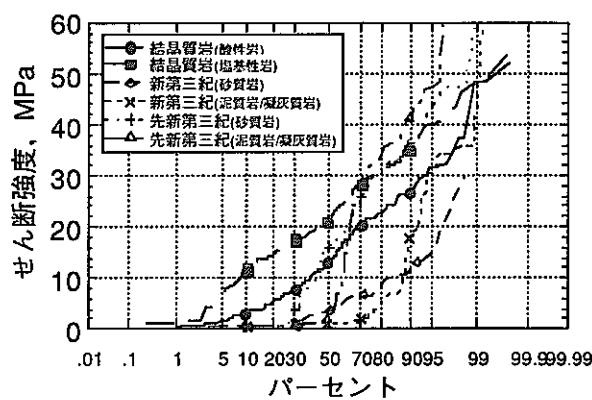


図 3.28 せん断強度の確率密度分布

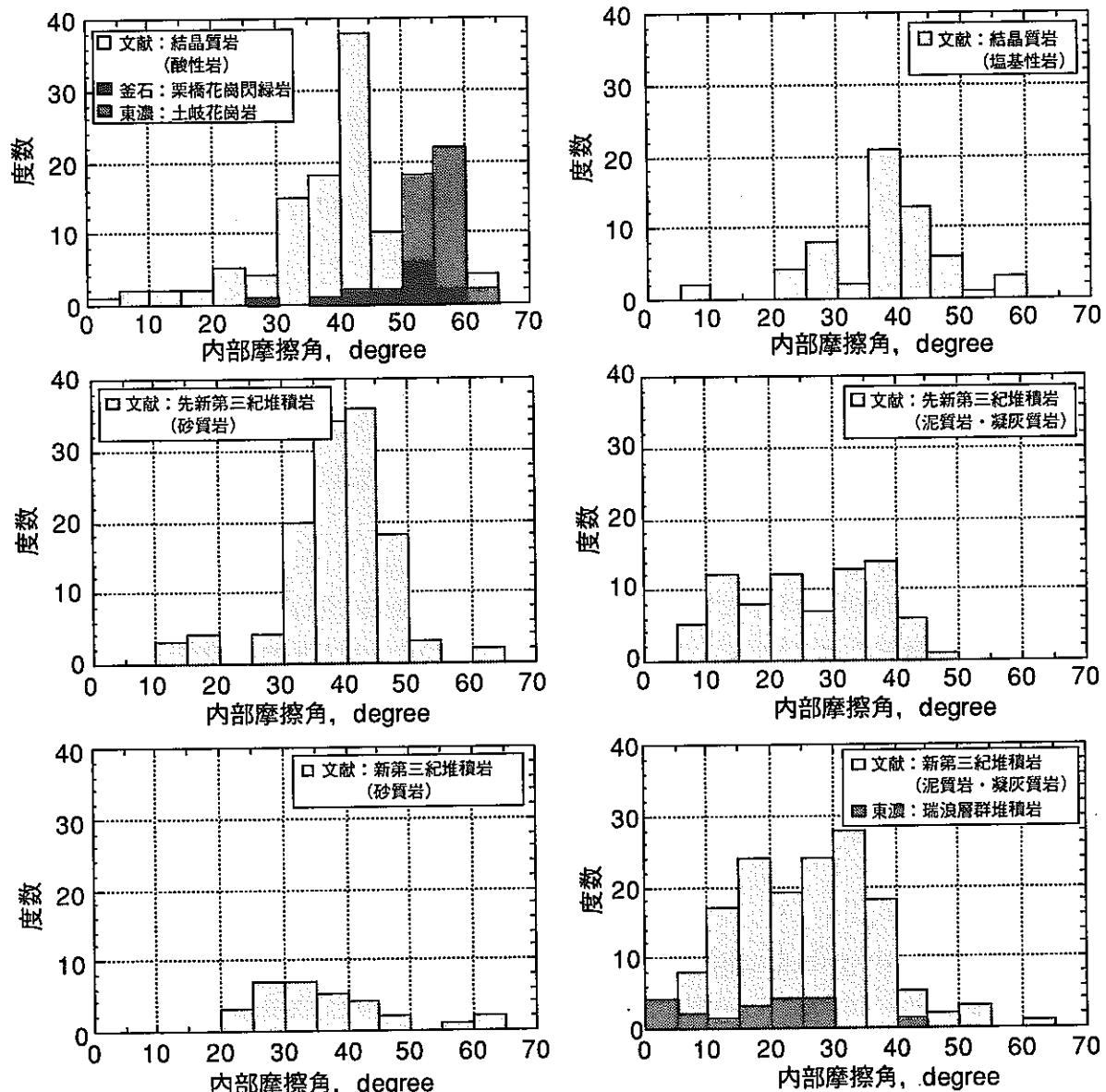


図 3.29 内部摩擦角の頻度分布図

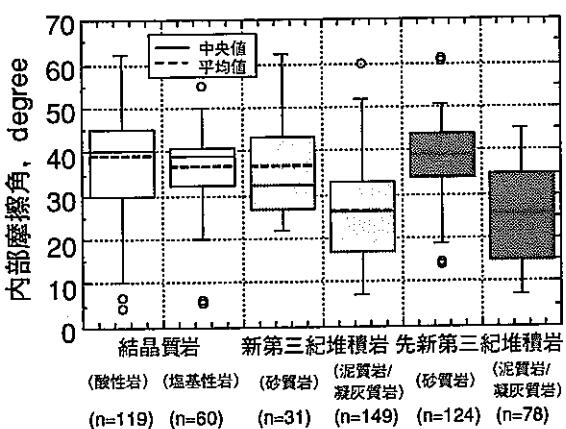


図 3.30 内部摩擦角の箱ひげ図

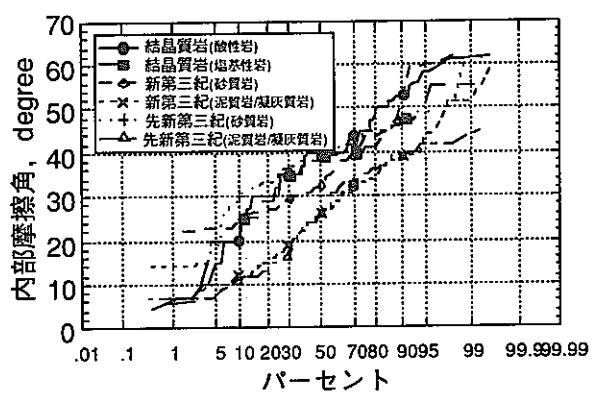


図 3.31 内部摩擦角の確率密度分布

## (2) 物性値の相関

岩石の物性は、岩石を構成する鉱物の種類・量比、微小亀裂や空隙の量や構造、あるいは、粒子間の結合力などに依存する。このため、岩石の物理的性質と力学物性の間あるいは力学物性どうしの間では相関関係が認められる場合が多い（例えば、桑原、1984；菊地ほか、1984）。一方、物性によってデータ数に多寡があり、一軸圧縮強度などはデータ数が多いものの、せん断強度や内部摩擦角などはデータ数が少ない。このようなデータ数の少ない物性についても、データ数の多い物性と相関関係がある場合は、この関係から大まかな値を推定することが可能である。文献調査で収集したデータについて、これらの相関を検討し、従来示唆されている相関がどの程度認められるかについて検討した。ここでは、最も基本的な力学物性である一軸圧縮強度とその他の物性との相関について検討した結果を示す。

①一軸圧縮強度と弾性係数の相関については、例えば菊地ほか（1984）は、硬質岩から中硬質岩、軟質岩までの幅広い岩石について、これらの間に両対数で直線関係があることを示唆している。文献調査のデータでは、ばらつきが大きいものの、両対数のグラフ上で、3~4オーダーの広範囲にわたって直線関係が認められる（図3.32）。岩種別では、結晶質岩はデータの範囲が狭くばらつきも大きいため、相関係数は小さい。一方、新第三紀堆積岩ではデータの範囲が広いため相関係数が比較的大きい。回帰直線はいずれの岩種もほぼ同じである。釜石の栗橋花崗閃緑岩、東濃の土岐花崗岩および東濃の堆積岩はいずれも回帰直線の近傍に分布する。

②一軸圧縮強度とポアソン比の相関については、両者の間に相関が認められない（図3.33）。この理由としては、ポアソン比の値自体の取りうる範囲が狭いことなどが想定される。岩種別でも、両者の間に相関は認められない。

③一軸圧縮強度と引張強度の比はぜい性度といわれ、一般的な岩石は10~20程度とされている。図3.34より、強度の小さい方ではばらつきが大きいものの、ぜい性度が10~20の範囲には多くのデータが含まれることがわかる。新第三紀堆積岩の回帰直線の勾配が比較的大きく、ぜい性度が小さいことを示す。

④一軸圧縮強度とせん断強度の相関については、菊地ほか（1984）は、乾燥状態の硬質岩から中硬質岩、軟質岩までの幅広い岩石について、これらの間に両対数で直線関係が認められるとしている。今回の文献調査では、菊地ほか（1984）のデータと比較するとばらつきが大きいものの、3オーダーの広範囲にわたって両対数のグラフ上で直線関係が認められる（図3.35）。相関係数（R）は大きく、全てのデータで0.88以上を示す。岩種別でも、せん断強度は他の物性と比較して一軸圧縮強度との相関は極めて良い。特に新第三紀堆積岩は相関係数が大きく、泥質岩・凝灰質岩では0.96を示す。

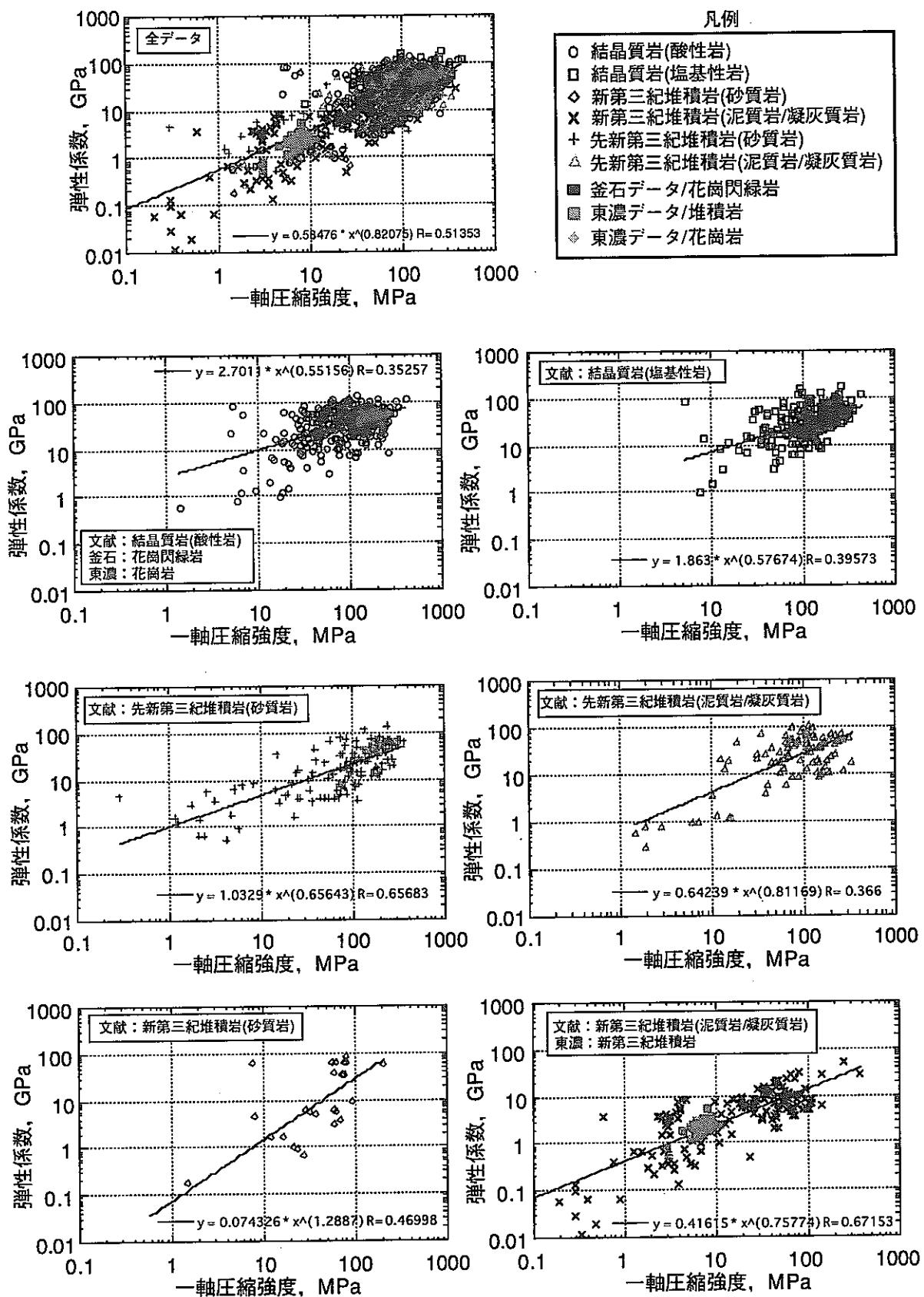


図 3.32 一軸圧縮強度と弾性係数の相関関係

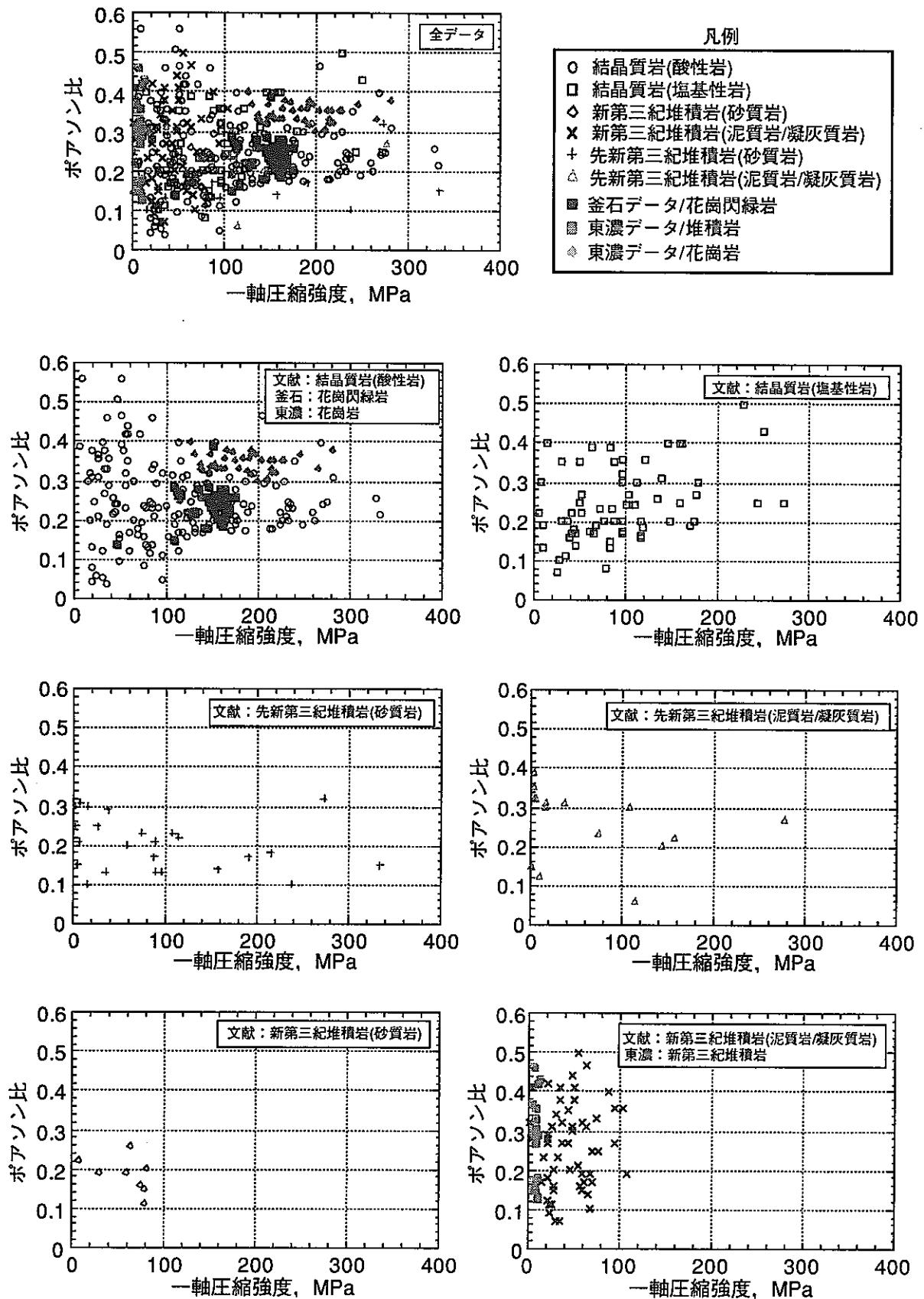


図 3.33 一軸圧縮強度とポアソン比の相関関係

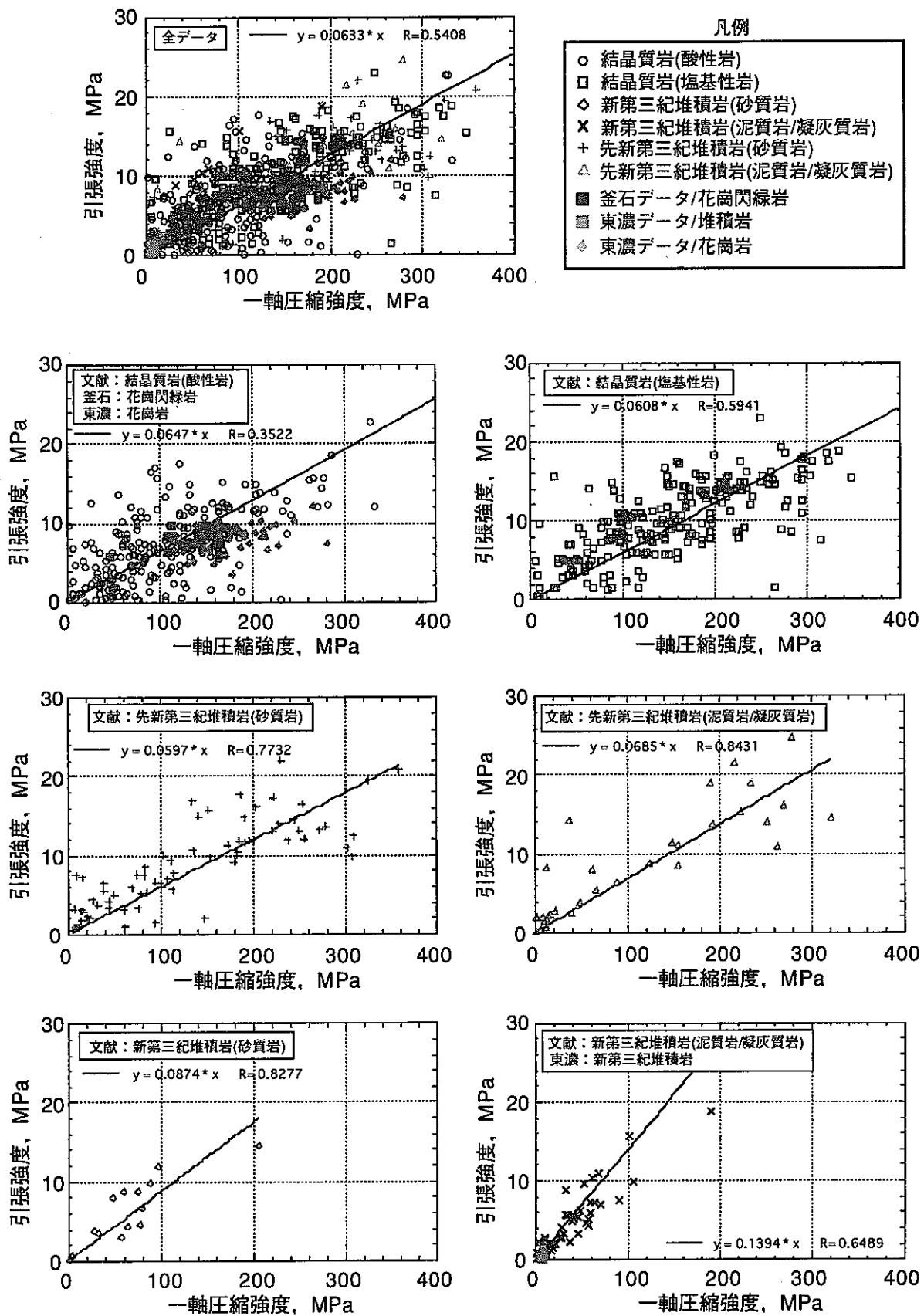


図 3.34 一軸圧縮強度と引張強度の相関関係

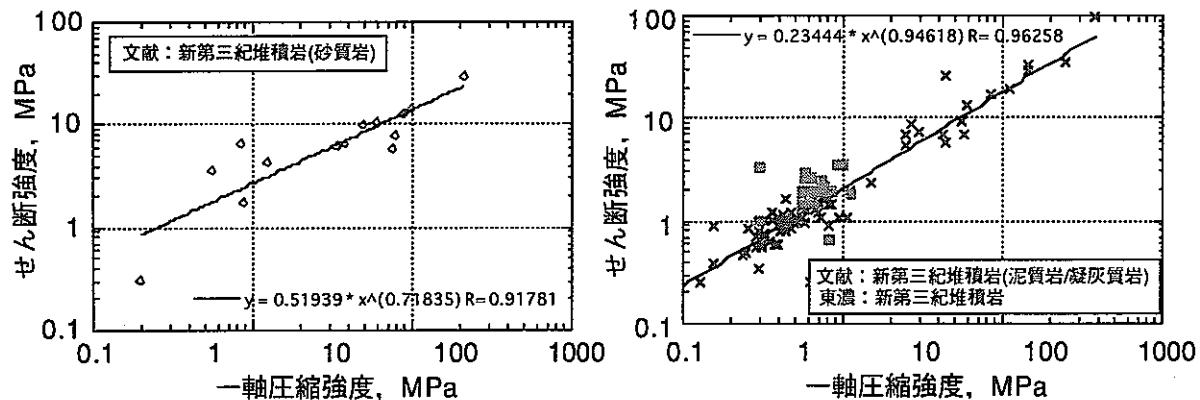
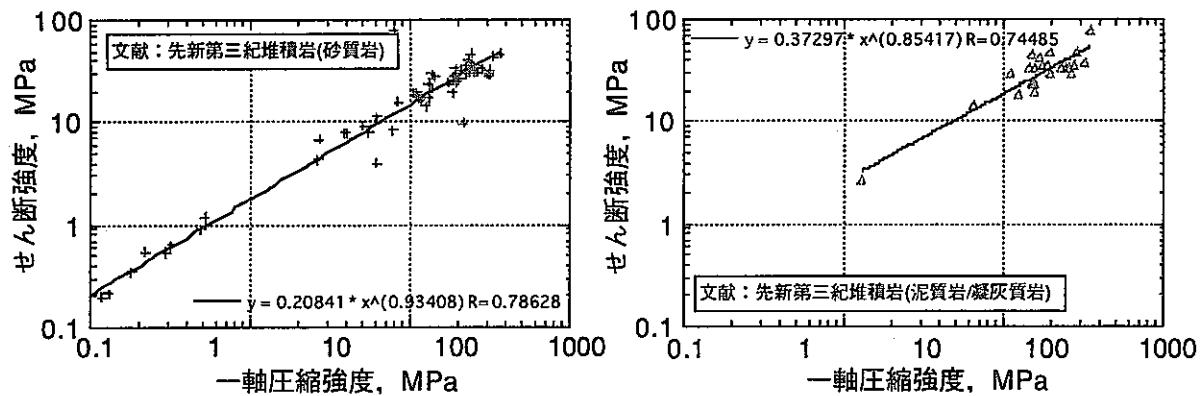
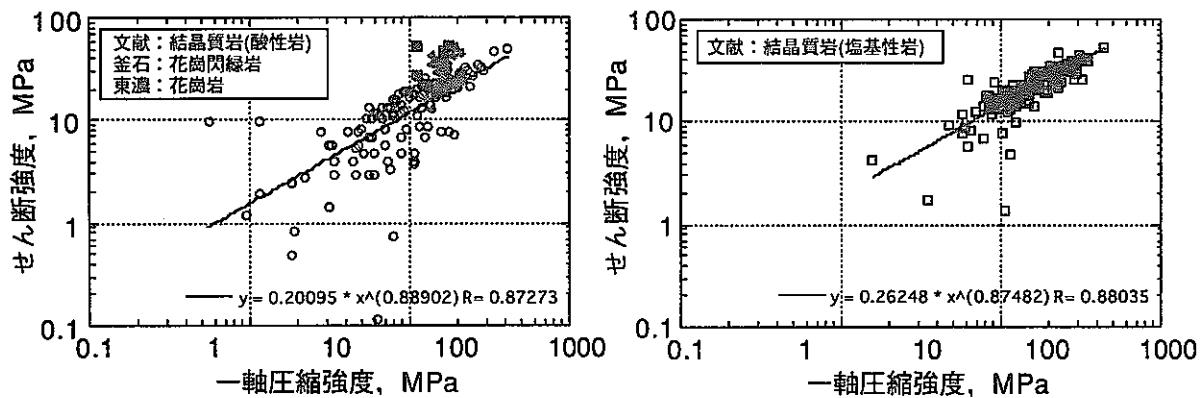
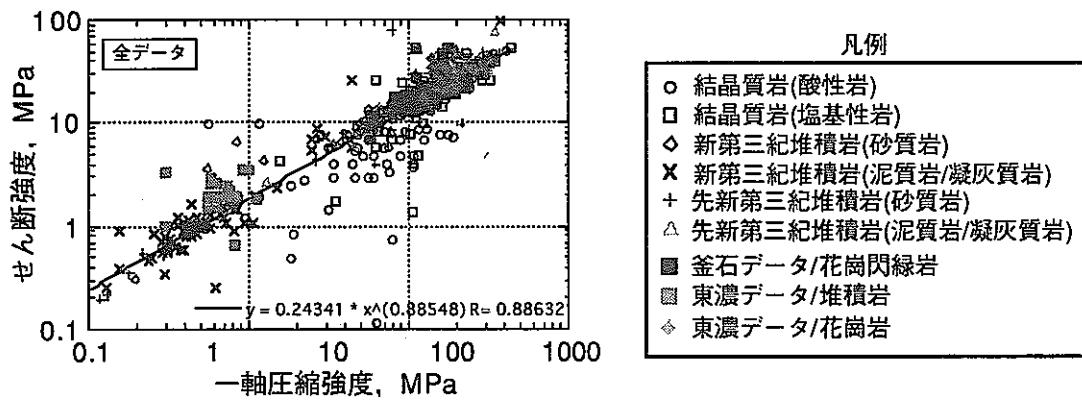


図 3.35 一軸圧縮強度とせん断強度の相関関係

⑤一軸圧縮強度と内部摩擦角の間には非常に弱いながら正の相関が認められる（図 3.36）。一軸圧縮強度が大きい範囲には結晶質岩が占める割合が高く、岩石に含まれる微小亀裂が封圧の作用によって閉鎖し、これに伴い強度が大きくなるために内部摩擦角も大きくなることが理由のひとつと推察される。一方、一軸圧縮強度が小さい範囲には、封圧の作用に敏感ではない形状（球状）の空隙を含む堆積岩が占める割合が高いため、内部摩擦角が小さくなることが理由のひとつと想定される。岩種別に示すとデータ数が少なくなるため回帰直線を示すことはできない。

⑥一軸圧縮強度と有効間隙率の相関については、例えば桑原（1984）は、複数の岩種について、これらの関係が双曲線で表わされることを示唆している。文献調査のデータについてもこのような関係が認められる（図 3.37）。結晶質岩と先新第三紀堆積岩では一軸圧縮強度が大きく有効間隙率が小さい領域にデータが分布し、新第三紀堆積岩では一軸圧縮強度が小さく有効間隙率が大きい領域にデータが分布する。

### (3) 物性値の深度依存性

上記のデータについて、深度と物性値の関係を図 3.38 に示す。いずれの岩種・物性もデータの範囲が広く、深度依存性を見い出すことは困難であるが、新第三紀堆積岩では深度の増加とともに、自然密度や一軸圧縮強度が増加する傾向が認められる。これは、房総半島における深堀り試錐孔の岩芯を用いた物性試験のデータであり、深度 300~2100m から試料が採取されている（渡辺ほか、1992）。これらのデータからは深度の増加に伴う物性の変化が認められる。

東濃鉱山の堆積岩については、深度が 150m までと浅く、また、岩相変化が激しいため、物性値の深度依存性は見い出せない。一方、釜石鉱山の栗橋花崗閃緑岩については、単位体積重量、有効間隙率、せん断強度および内部摩擦角に深度依存性が認められる。これは、構成鉱物の構成比の違いや内在する微小き裂などのミクロスケールでの差によるものと想定される（サイクル機構、1999a）。

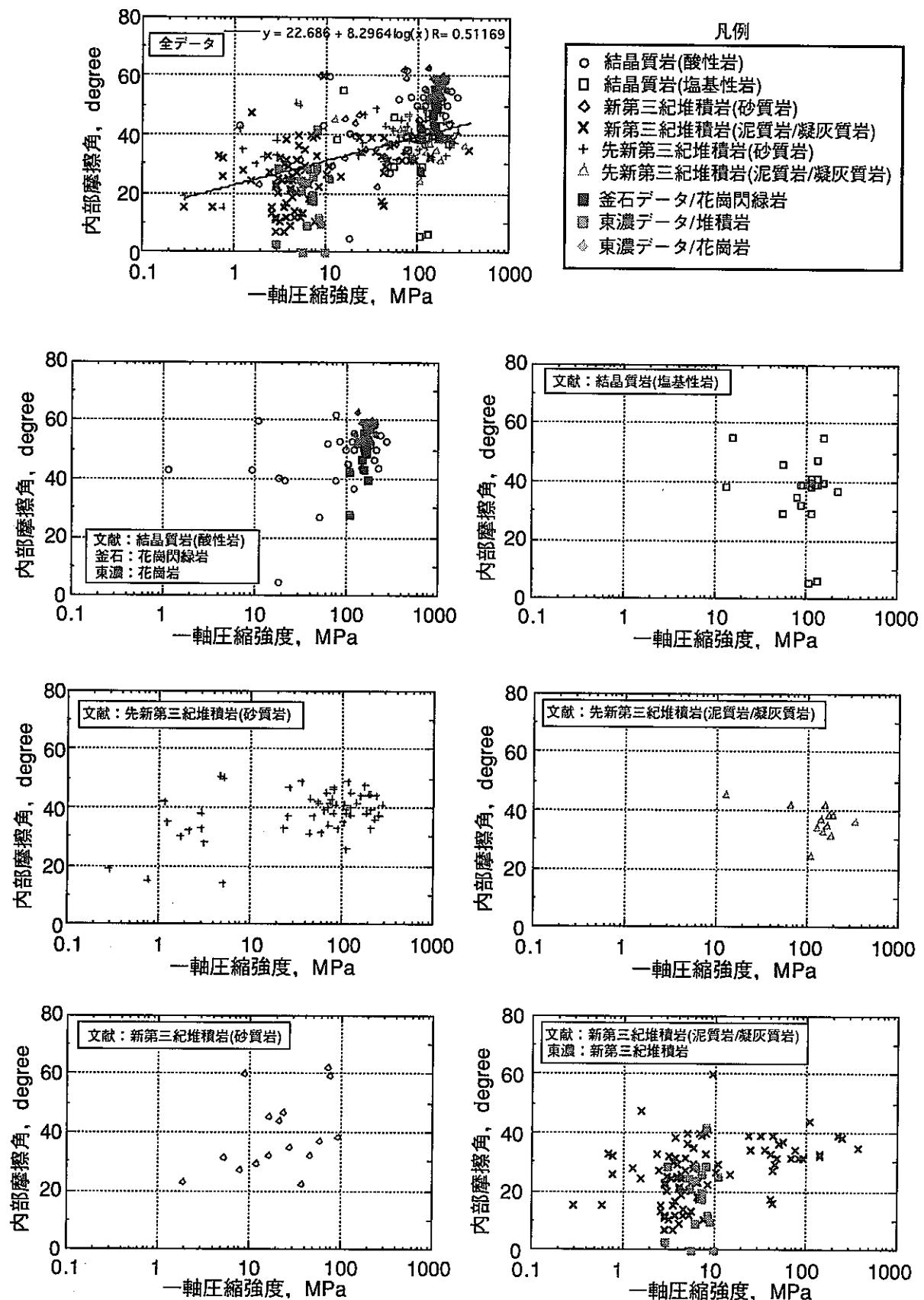


図 3.36 一軸圧縮強度と内部摩擦角の相関関係

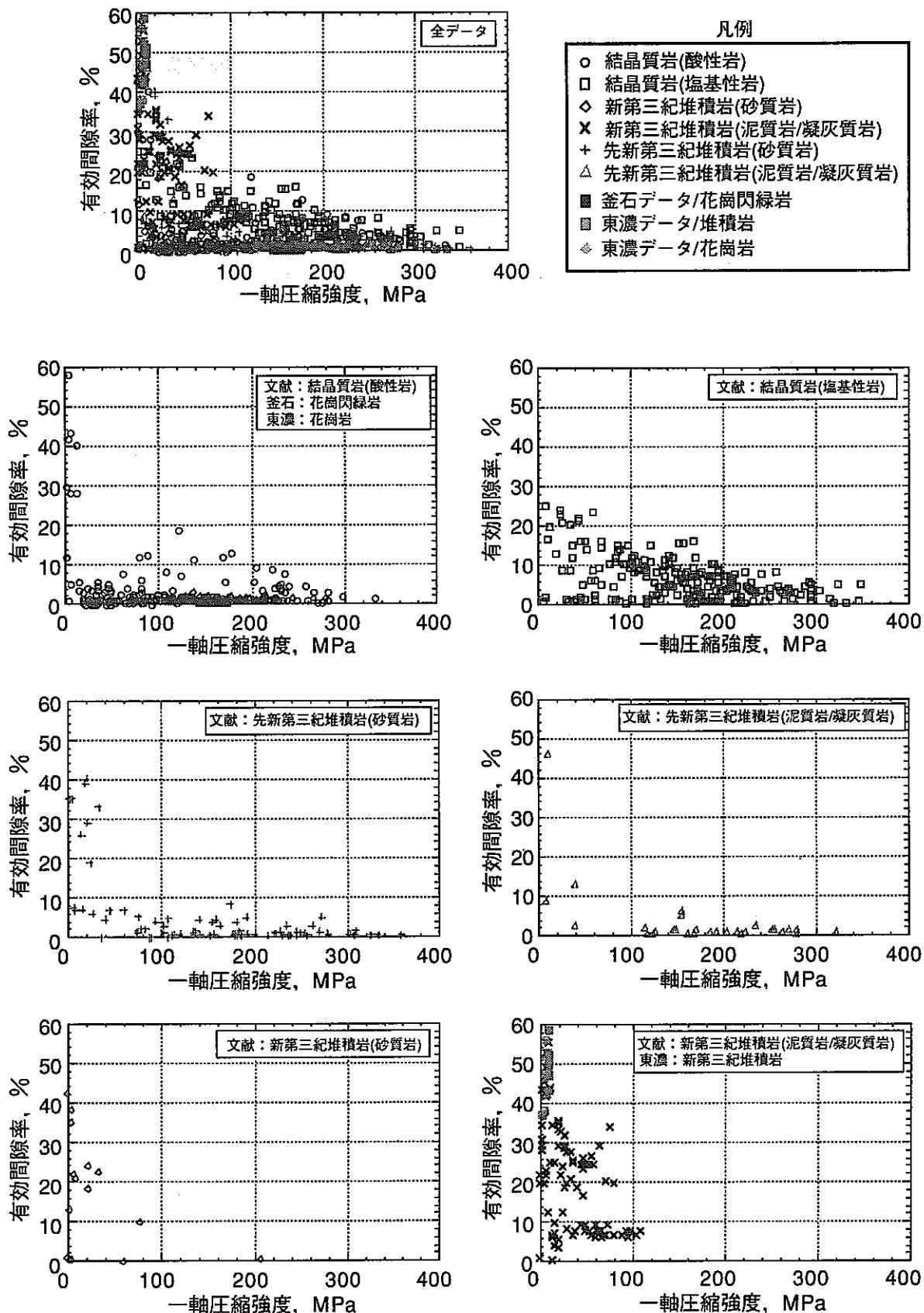


図 3.37 一軸圧縮強度と有効空隙率の相関関係

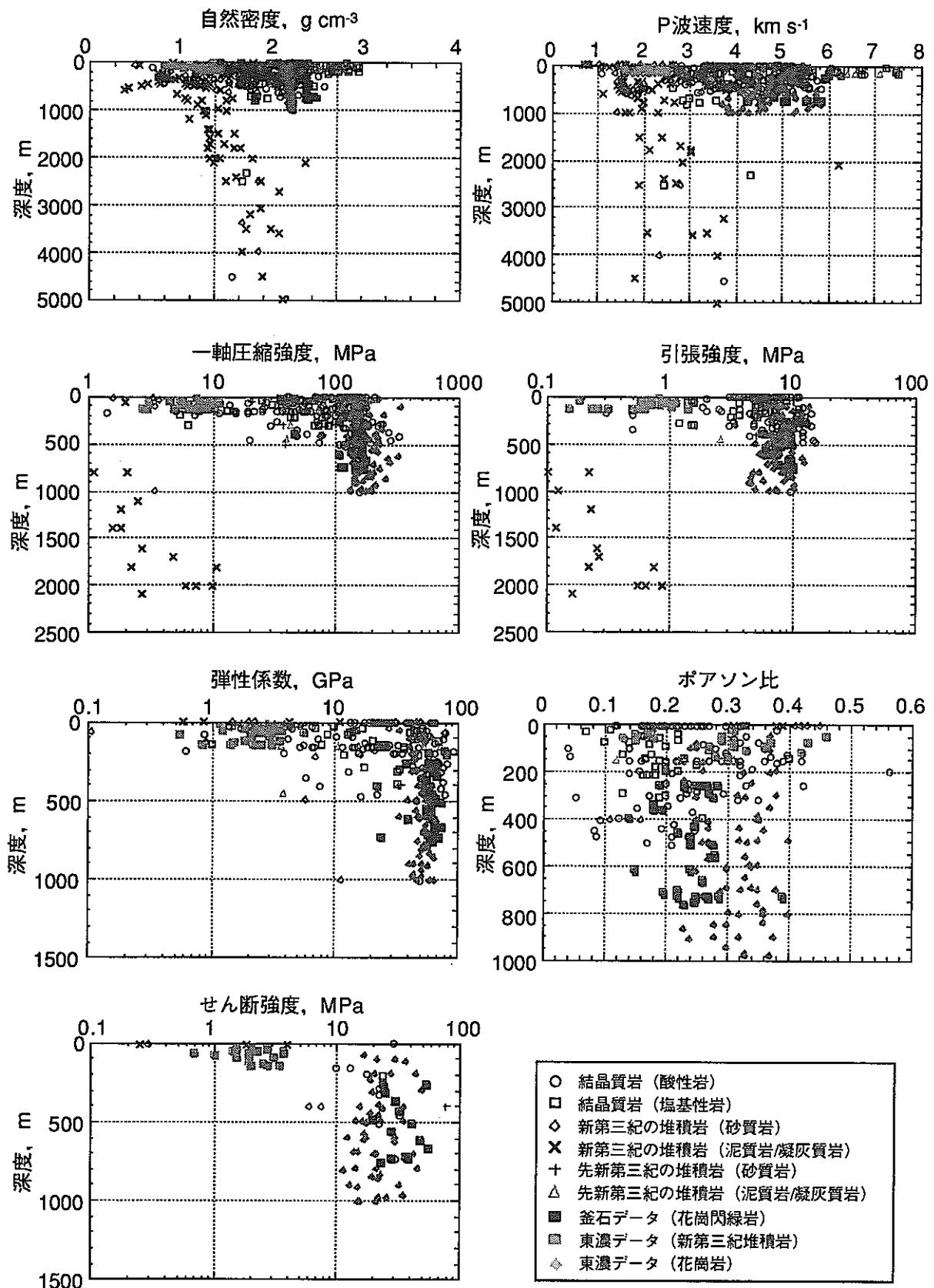


図 3.38 物性値と深度の関係

### 3.2 岩盤の初期応力

#### (1) 既往の調査例

初期応力のデータについては、Hoek and Brown (1982) が、オーストラリア、カナダ、アメリカ、スカンジナビア、南アフリカ、アイスランドなどの10カ国における測定データを収集して、鉛直応力 ( $\sigma_v$ ; MPa) および側圧係数 ( $k$ : 水平面内の主応力の平均値 ( $\sigma_{hav}$ ; MPa) と鉛直応力 ( $\sigma_v$ ) の比) と深度 ( $Z$ ; km) の関係について考察している。これによると、鉛直応力と側圧係数は以下の式で表現できるとしている。

$$\sigma_v = 27 \times Z$$

$$k = 0.1/Z + 0.3 \text{ (上限曲線)}, k = 1.5/Z + 0.5 \text{ (下限曲線)}$$

国内のデータについては、Kanagawa et al. (1986) は電力中央研究所で開発したひずみゲージを用いた測定結果を取りまとめた。これらのデータを含めて斎藤ほか (1988) が日本国内で得られた測定結果を取りまとめ、鉛直応力、平均水平面内応力および側圧係数の深度分布を示している。鉛直応力 ( $\sigma_v$ ; MPa) および側圧係数 ( $k$ ) と深度 ( $h$ ; m) の関係は次の式で示される。

$$\sigma_v = 0.023 \times h$$

$$k = 155/h + 0.65$$

上記の国内外のデータによると、鉛直応力や平均水平面内応力と深度の関係は線形近似でき、側圧係数は浅部では大きな値を示すものの、深度の増加にともない1より小さい値に近づくことが示されている。このような傾向は弾性球殻モデルを用いて理論的に説明することが可能である (McCutchen, 1982; 日本材料学会, 1993)。すなわち、均質等方の弾性地殻が重力の作用によって地球の半径方向にだけ変位し、地殻の底面における変位は零と仮定した場合の微分方程式を解くと、側圧係数は地殻底面で1より小さくなり、地表において発散する。

#### (2) 今回の調査結果

文献調査では、鉛直応力108件、水平面内平均応力178件、側圧係数71件のデータが収集された。これらのデータと深度の関係を図3.39に示す。この図には、斎藤ほか (1988) で示されている関係式も表示した。関係式の算出方法は、斎藤ほか (1988) と同様に、鉛直応力と水平面内平均応力については直線近似し、側圧係数については、深度と鉛直応力および水平面内平均応力の近似式から算出した。この図より、文献調査で得られたデータは、既往の調査で指摘されている関係を示すことが分かる。

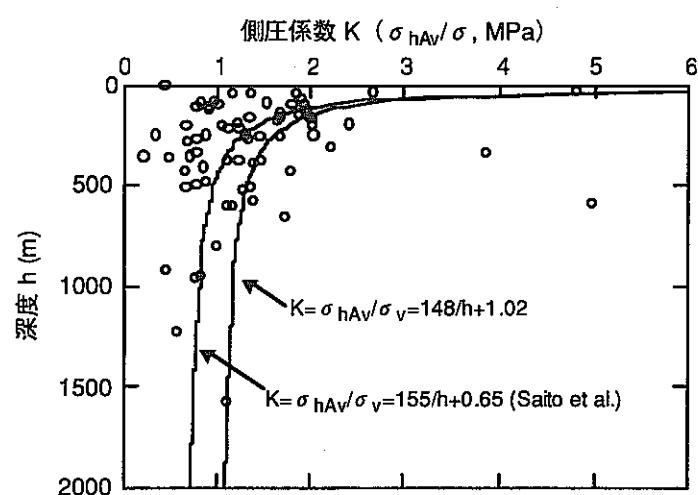
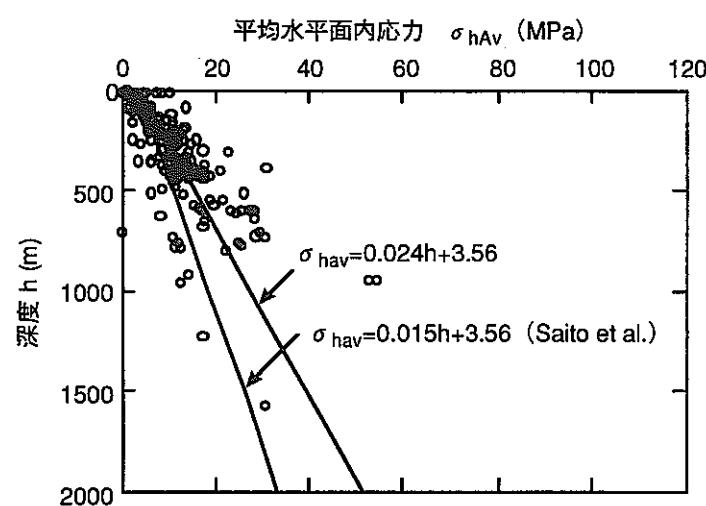
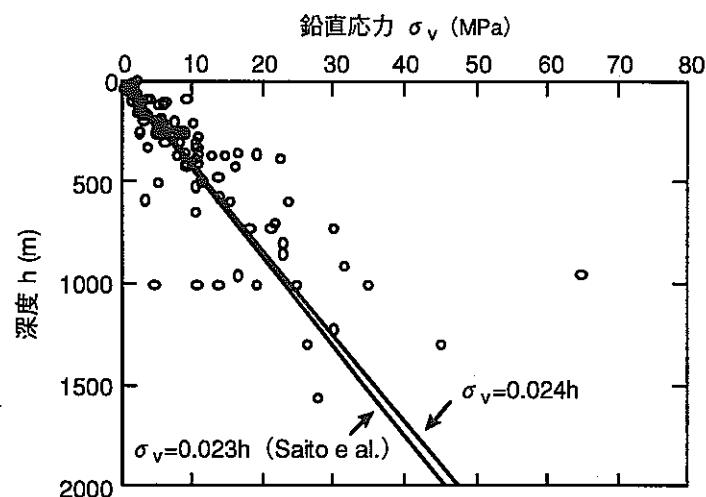


図 3.39 文献調査によって得られた初期応力のデータ

文献調査で収集されたデータのうち、鉛直応力と水平面内平均応力の両方が揃っているデータは49件であり、これらのデータについて、深度との関係式を導いた（図3.40）。鉛直応力については、ばらつきが大きいものの、岩石の単位体積重量を $27\text{kN/m}^3$ とした直線で近似され、斎藤ほか（1988）より若干大きな勾配を示す。水平面内平均応力についても若干大きな勾配を示す。側圧係数についてはほぼ同様であり、深度の増加とともに側圧係数は小さくなり、地下深部では1より小さい値に漸近する。同図には東濃地域や釜石鉱山における測定結果（Maeda et al., 1999; Matsui et al., 1997）も示しているが、文献データと同様に上述の傾向が認められる。

さらに、初期応力のデータについて、岩種と測定手法ごとに整理し検討した。図3.41に鉛直応力および水平面内平均応力と深度の関係を岩種ごとに、側圧係数と深度の関係を測定手法別に示す。

①鉛直応力と深度の関係については、結晶質岩（酸性岩）や岩種の記載の無いデータはばらつきが大きい。その他の岩種については、単位体積重量が $25\text{kN/m}^3$ の勾配を中心とした線上付近に分布する傾向が認められる。

②水平面内平均応力と深度の関係については、結晶質岩のデータはばらつきが大きい。新第三紀堆積岩のデータは例外はあるものの、比較的小さい応力値を示す。これに対して先新第三紀堆積岩のデータは比較的大きな応力値を示す。

③側圧係数と深度の関係については、鉛直応力と側圧係数が揃っているデータセットで岩種が記載されているデータは少なく、岩種の影響を検討することはできない。しかし、硬岩では鉛直応力も水平面内平均応力も大きく、軟岩では両方が小さい。したがって、側圧係数は両方の比をとるため、硬岩と軟岩で違いが認められなくなるものと推察される。測定手法別では、応力解放法のデータがほとんどを占め、水圧破碎法とコア法のデータが数件ずつある。データが少ないため、手法間で有為な差が存在するか否かは判断できない。

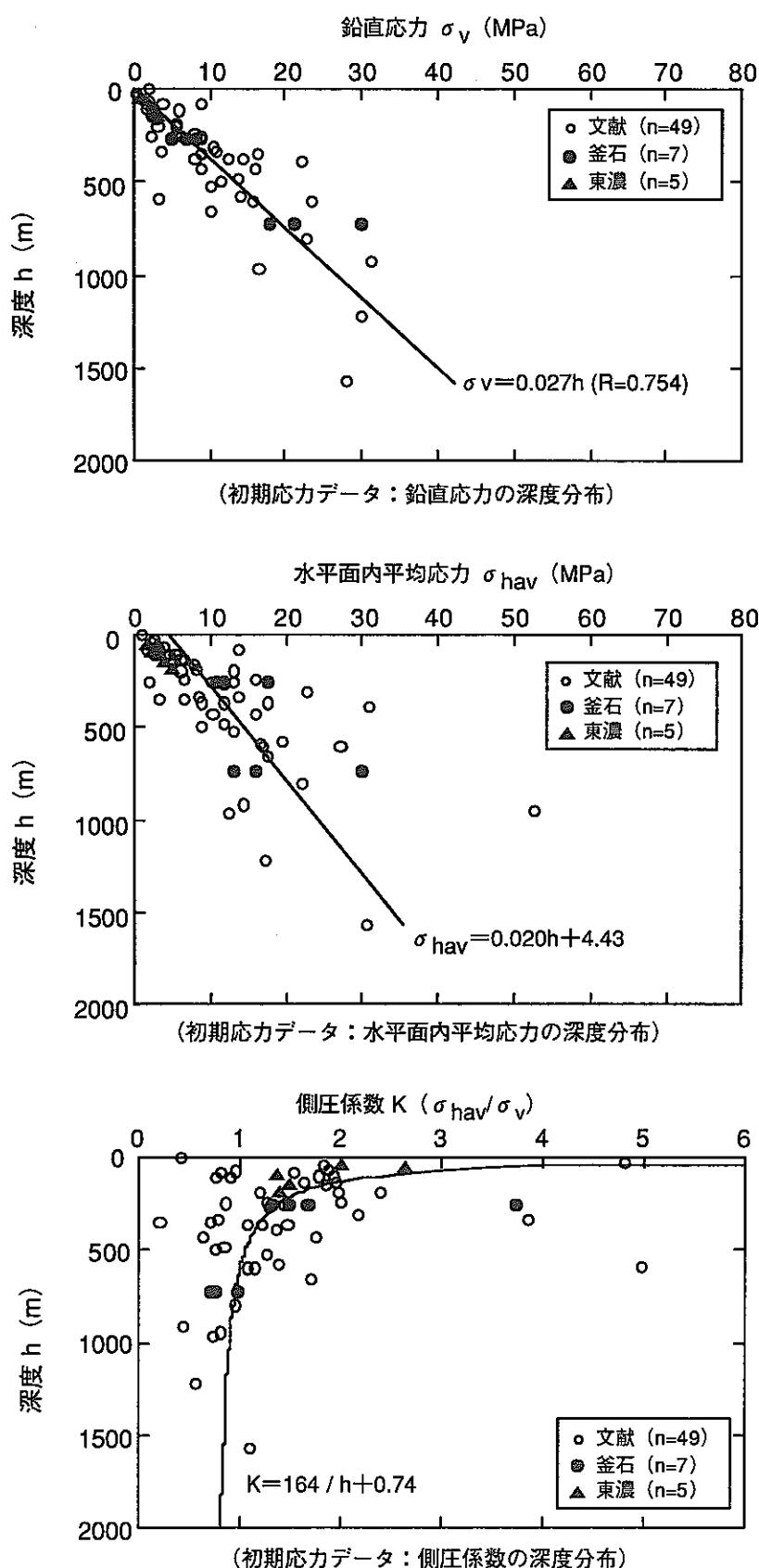
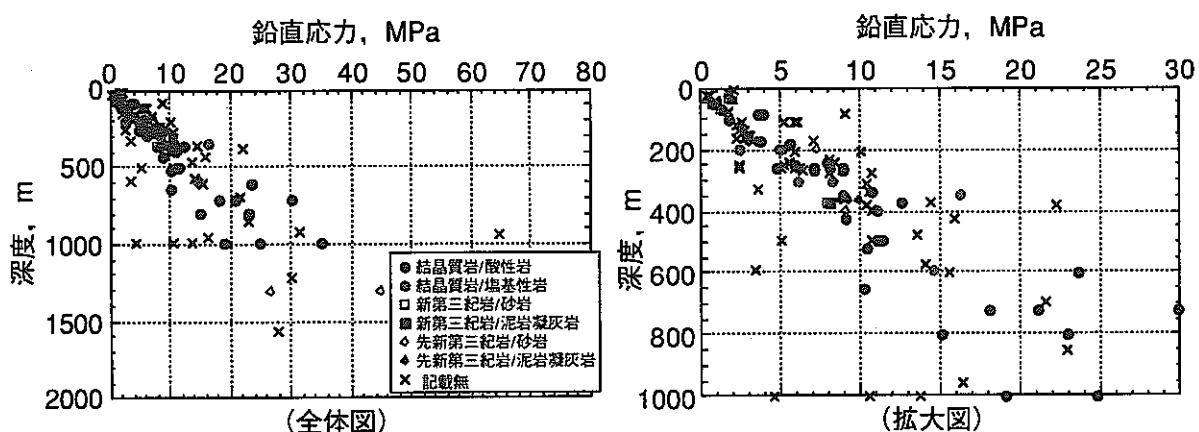
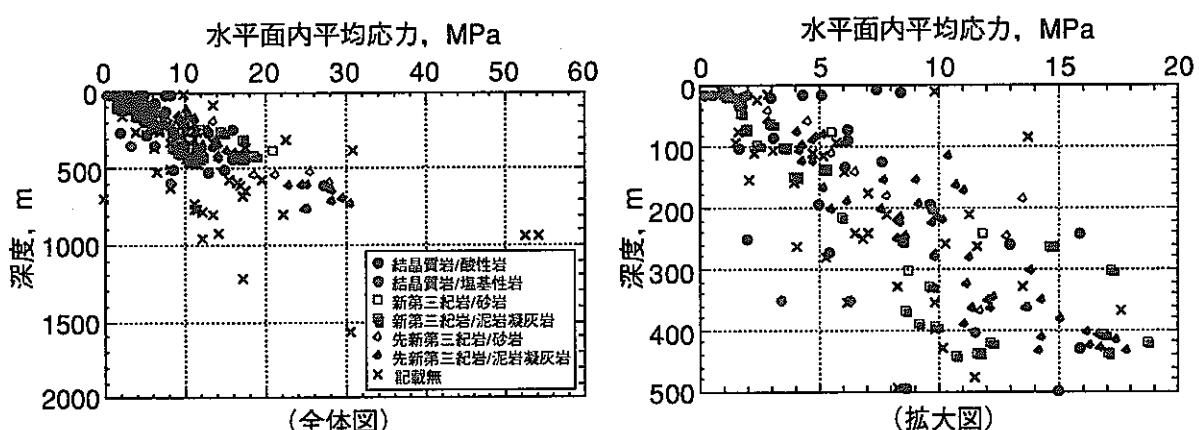


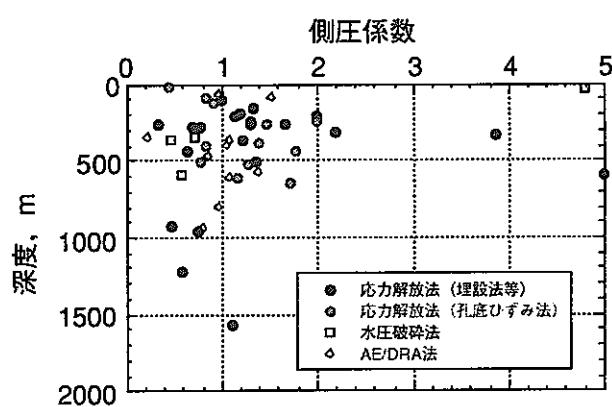
図 3.40 初期応力データ  
(鉛直と水平が揃っているデータ)



a) 鉛直応力と深度の関係 (岩種別)



b) 水平面内平均応力と深度の関係 (岩種別)



c) 側圧係数と深度の関係 (測定手法別)

図 3.41 初期応力データの岩種および測定手法の違いによる影響

#### 4. まとめ

岩盤の熱的性質については、文献調査により得られたデータの一般的な性質について検討した結果、熱伝導率、比熱および線膨張係数について岩種ごとの頻度分布を把握した。

岩盤の力学的特性については、文献調査および東濃地域と釜石鉱山のデータをもとに、統計学的な検討および物性間の相関について検討した。これにより、岩種ごとの物性値の範囲、平均値や中央値などの統計量を把握することができたものの、その範囲は広く、岩種ごとの物性のばらつきを把握することの重要性が示唆された。また、従来より示唆されてきた物性間の相関関係との整合性が確認された。いずれの岩種・物性もデータの分布範囲が広く、深度依存性を見い出すことは困難であるが、新第三紀堆積岩では深度の増加とともに一軸圧縮強度などが増加する傾向が認められた。

岩盤の初期応力については、文献調査の結果を取りまとめ、日本全国における初期応力の状態すなわち、鉛直応力、水平面内平均応力および側圧係数の深度分布を検討した。さらに、東濃地域と釜石鉱山の実測結果もあわせて示し、鉛直応力は単位体積重量の勾配で線形近似できること、水平面内平均応力と深度の関係も線形近似できること、および、側圧係数は浅部では大きな値を示し、深度の増加に伴い、深度 500m 程度より深くなると 1 より小さい値に近づくことが認められた。

## 5. 参考文献

- 原子力安全委員会バックエンド対策専門部会（1997）：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の進め方について。
- Hoek, E. and Brown, E. T. (1982) : Underground Excavation in Rock, The institution of Mining and Metallurgy, London England.
- 石田 毅, 金川 忠, 矢田 篤, 田仲正弘 (1991) : 空洞掘削時の応力再配置に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案, 第 23 回岩盤シンポジウム講演論文集, pp.227-231.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999a) : 釜石原位置試験総括報告書, 核燃料サイクル開発機構技術報告書, JNC TN7410 99-001.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999b) : AN-1 号孔および MIU-1 号孔における力学特性調査結果, 核燃料サイクル開発機構技術報告書, JNC TN7420 99-004.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999c) : DH-6, 7, 8 号孔における力学特性調査結果, 核燃料サイクル開発機構技術報告書, JNC TN7420 99-006.
- Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y. (1986) : In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands:Over-coring Results from a Multi-element Gauge Used at 23 Sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. Vol.23, No.1, pp. 29-39.
- 喜多治之, 木山 保, 佐藤稔紀, 石島洋二 (1998) : 稲田花崗岩と白浜砂岩の力学物性に及ぼす温度の影響, 地盤工学会, 岩の一軸および三軸圧縮試験方法検討委員会, 岩の一軸および三軸圧縮試験の方法と結果の適用に関するシンポジウム, 発表論文集, pp.143-150.
- 北野晃一, 新 孝一, 木下直人, 奥野哲夫 (1988) : 高温下岩石の力学特性, 熱特性および透水特性に関する文献調査, 応用地質, 29 卷 3 号, pp. 36-47.
- 菊地宏吉, 藤枝 誠, 岡 信彦, 小林隆志 (1984) : ダム基礎岩盤の耐圧性に関する地質工学的評価, 応用地質学会特別号, pp.103-117.
- 桑原啓三 (1984) : 岩石の圧縮強度とせん断強度による分類の試み, 応用地質学会特別号, pp.25-33.
- Maeda,N., Sato,T., Matsui,H. and Sugihara,K. (1999) : Estimation of applicability of stress measurement methods and three dimensional stress state in soft sedimentary rock, '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, August 2-4, 1999, Fukuoka Japan, pp.277-284.
- Matsui, H., Sato, T., Sugihara, K. and Nakamura, N. (1997) : Comparizon of the results of stress measurements determined by various methods at the Kamaishi mine, Proc. of the International Symposium on Rock Stress, pp.95-100.
- McCutchen,W.R. (1982) : Some elements of a theory for in-situ stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.19, pp.201-203.
- 日本材料学会 (1993) : 岩の力学 基礎から応用まで, 丸善, pp.357-361.
- Read, R. S. (1996) : Characterizing Excavation Damage in Highly-Stressed Granite at AECL's Underground Research Laboratory, Proc. of the EDZ Workshop, Int. Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Winnipeg, Canada, pp.35-46.
- 斎藤敏明, 石田 殿, 寺田 孚, 田中 豊 (1988) : 実測結果に基づくわが国の地下岩盤内

- の初期地圧状態の検討, 土木学会論文集, No.394, pp.71-78.
- 佐藤稔紀, 石丸恒存, 杉原弘造, 清水和彦 (1992) : 文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集, 動燃事業団技術報告書, PNC TN7410 92-018.
- 地質調査所 (1991) : 日本の地熱調査における坑井データ その1 コア測定データー物性, 地質層序, 年代, 化学組成ー, 地質調査所報告, 第271号.
- 渡辺浩平, 星野一男, 宮本武司, 釜井俊孝 (1992) : 房総半島地下深部における地盤物性, 第27回土質工学研究発表会, pp.1223-1224.