



高レベル放射性廃棄物の
地層処分研究開発特集

地層処分研究

3. 地質環境調査研究

中部事業所 環境地質課
環境技術開発推進本部

資料番号：85-12

Research on Geological Disposal
3. Geological Environment Studies

(Waste Isolation Research Section Chubu Works
Radioactive Waste Management Project)

日本の地質環境を踏まえた、超長期におたって適切かつ安全な地層処分ができることを科学的・技術的に実施するための、地層処分の研究開発においては、日本の地質環境条件を適確に把握し、地下で生起する現象を観測・解明することによって、現実性の高い地質環境モデルの構築と質量共にそろった体系的なデータの取得を進めることが、処分技術の研究開発および性能評価研究を効果的かつ効率的に推進する上で重要である。このために、まず地域岩種を特定することなくわが国全体の地質環境調査に資するため、地層処分の観点から地質環境の構成要素の特性および地質環境の安定性に関する調査研究が行われている。本調査研究では、日本の地質と地質構造に関する知見と調査結果を整理し、日本列島を構成する要素として岩石と地下水をあげ、それらの産状ならびに鉱物学的・地球化学的および水理学的特徴を整理し、また、地質環境の安定性を評価する上で重要な断層系に関する調査について示す。さらに、地質環境データを管理・解析するための地質環境データベースシステムの開発の現状を記す。

1. はじめに

性能評価研究において、地域や地層を特定することなくわが国における超長期にわたって安全な地層処分の実現可能性を科学的に示すためには、わが国の地質環境条件を概括的にかつ適確に把握することが重要である。そのため、文献調査を中心にわが国の地質環境データの収集や蓄積を図っている。ここでは、まずわが国の地質の概要を示し、これに基づく地質区分を考慮しつつ、地質環境データの収集や整理状況を、岩盤の物性データ、断層系に関するデータ、水理地質データ、地下水の地球化学データについて記述する。なお、わが国の地質環境を理解する上で重要な火山活動や断層運動と書いた天然現象に関するデータについては、その発生のメカニズムの研究を含めて地層科学研究の地質環境の安定性に関する研究として実施しているので、ここでは言及しない。また、笠石鉱山や東濃鉱山周辺で実施している地層科学研究によって原位置のデータが蓄積されている。これについては地層科学研究の項で紹介する。

2. 日本の地質環境

日本列島の地質を、古生代～古第三紀の地層群とその広域変成岩、カコウ岩類と流紋岩類、新第三紀の地層群、第四紀の地積層および第四紀の火山岩類という5つの地質単元に分類し、各単元ごとに地質学上の知見を整理した。また、断層系の分布を広域的に捉えるための調査を行い、リニアメントを特性によって分類した。日本列島を構成する主な岩石を、火成岩、地積岩、変成岩、火山砕屑物および火砕岩に区分して、それらの鉱物学的および化学的特徴ならびに分布と産状を整理した。さらに、処分技術の研究開発や多重バリアシステムの性能評価研究に必要な岩盤物性を文献調査等によりとりまとめた。

2.1 日本の地質の概略

(1) 日本列島の地理上および地質上の位置

日本は、北海道・本州・四国・九州および周辺の島々と、伊豆・小笠原諸島、南西諸島等からなり、アジア大陸の東縁部に沿って、南北に細長く延びる弧状の列島をなしている。

日本列島（以下、伊豆-小笠原諸島や南西諸島等を含めた日本の国土全体の意味で用いる）は、環太平洋造山帯の一部であり、世界的に見て地殻変動の大きい地域の一つである。火山活動について見れば、世界の既知の活火山の内の約10%が、世界の陸地面積の約0.25%を占めるに過ぎない日本列島に分布している¹⁾。地震の震源についても日本列島の周辺は、地球上で最も密集している場所の一つとなっている。また、地形的に見れば本州中央部には3,000 mを超える山々が形成され、日本列島のすぐ東側には深さ7,000~8,000 mにおよぶ日本海溝や伊豆-小笠原海溝が存在している。このことから、日本列島は国土の約3/4を丘陵地や火山を含めた山地地域が占める起伏の大きい地域ということが出来る。

地質学的にみると、日本列島は大陸プレートと海洋プレートの接する位置にある。日本列島における現在の地殻変動や火山活動は、このようなプレートの衝突や沈み込み等に関連して起っていると考えられる²⁾。

(2) 日本列島の地質構造

日本列島の地質構造は、その形成時代によって2つに大別される。

1) 先新第三紀の地質構造

先新第三紀（古第三紀以前）の地質構造は、図1

に示すように、多くの構造線によって地層や岩体が境されるという特徴を示す。

2) 新第三紀以降の地質構造

新第三紀以降の地質に関しては、データも比較的豊富であり、深部の地質構造についても先新第三紀の地層に比べると情報が多い。

概して言えば、図2に示すように、新第三紀の地層は、東北日本を主体に分布するグリーンタフ地域の地層と非グリーンタフ地域の地層に分けられる。

(3) 日本列島の地質単元とその特徴

日本列島の地質を地質学上の知見に基づき、主として地層処分研究開発という技術的観点から、次の単元に分類し、その特徴をまとめた。

- ① 古生代~古第三紀の地層群とその広域変成岩
- ② カコウ岩類と流紋岩類
- ③ 新第三紀の地層群
- ④ 第四紀の堆積層
- ⑤ 第四紀の火山岩類

各単元の分布（表層地質図）を図3に示す。

1) 古生代~古第三紀の地層群とその広域変成岩

この地層群は、現在の日本列島の基盤をなすものであり、顕著な断層に境された地質構造体として分布している。主な構成岩石は、玄武岩類、超塩基性岩、石灰岩、チャート、砂岩~泥岩の碎屑岩類である。

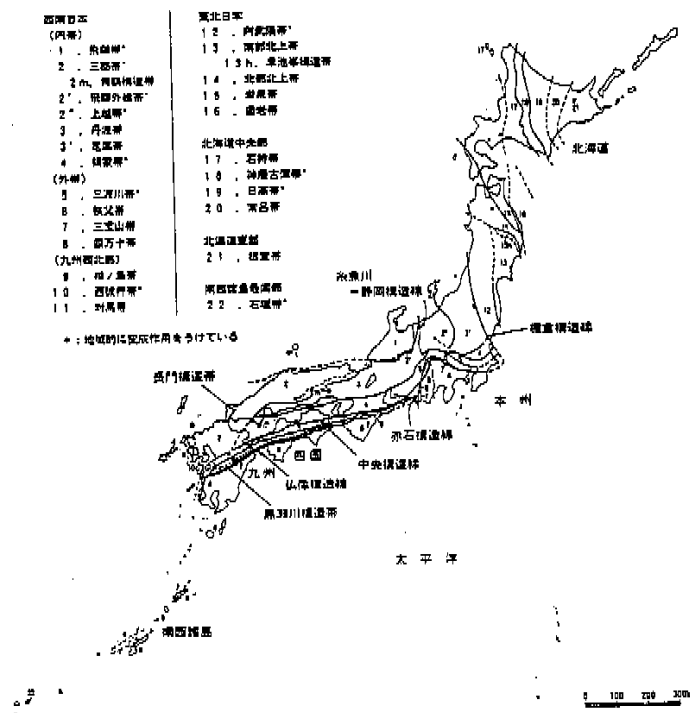


図1 先新第三紀の地質構造区分図 (Tanaka and Nazawa(eds.), 1977による)

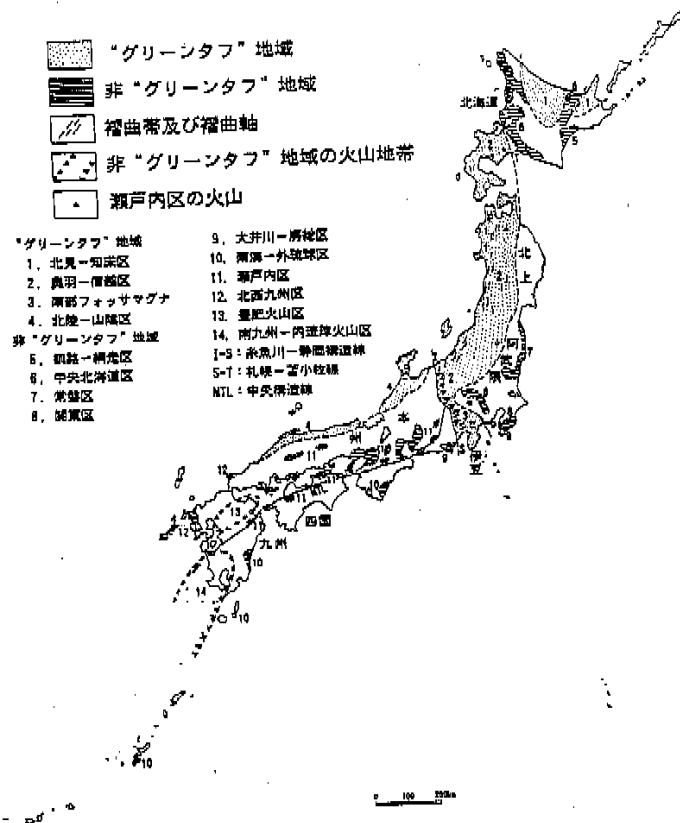


図2 新第三紀の地質構造区分図 (Tanaka and Nazawa(eds.), 1977による)

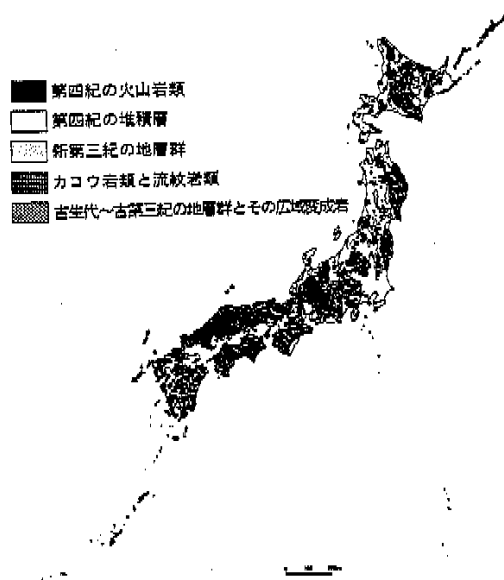


図3 日本列島の地質の概要 (地質調査所200万分の1地質図、1990に基づき編集)

これらの古生代～古第三紀の地層群の一部は、広域的な変成作用を受けている。それぞれの変成帯は、母岩と変成条件の違いにより、種々の変成鉱物の組合せからなる変成岩で構成される。変成の時期はそれぞれの変成帯で異なっている。

2) カコウ岩類と流紋岩類

カコウ岩は北海道から九州まで広く分布する。その約70%は白亜紀～古第三紀のものであるが、小規模なものについては約600～0.8Ma (Ma: 百万年)の放射年代も報告されている^{3),4),5)}。

西南日本では、カコウ岩の貫入に先立って噴出した流紋岩類が広く分布し、それらの中には10,000km²を超す規模のものがある⁶⁾。

3) 新第三紀の地層群

新第三紀の地層群は、いくつかの地域に分かれて分布している。西南北海道から東北日本、および西南日本の日本海沿いには、緑色化した火山岩類や火砕岩を多く含む地層群が広く分布し、この地域は“グリーンタフ地域”と呼ばれ慣らされている。

新第三紀の地層群は地域により、層序、層厚、構成岩石等が異なり、続成作用、熱水変質作用、熱

変成作用等の変質作用を受けて、さらに多様になっている。

4) 第四紀の堆積層

日本列島は広く第四紀の堆積物に覆われている。ほとんどが浅海成—陸成であり、礫・砂・泥等とともに火山性物質が多く含まれる。第四紀層の分布は、大きくみて4つに分けられる。

- ・第四紀層が厚く分布している臨海平野部
- ・海成、河成、風成のローム等で構成される海岸や山間の段丘部
- ・円礫や角礫等の粗粒物質で構成される扇状地や崖錐
- ・礫性石灰岩が発達している南西諸島

一般に、第四紀の堆積物は固結が弱く、粗粒物質が多く、場所による変化が大きいという特徴がある。

5) 第四紀の火山岩類

現在、日本列島は第四紀の火山岩類によって覆われており、その分布は日本列島の地質上の位置（島弧—海溝系）に関連している。第四紀の火山の分布する太平洋側の境界は火山フロントと言われており、火山噴出物量の3/4がこの火山フロントから50 km以内に分布している²⁾。

(4) 日本列島の地形

現在、日本列島は典型的な島弧—海溝系に属し、海溝に並列する千島弧、東北日本弧、西南日本弧、伊豆—小笠原弧、琉球弧の5つの島弧（弧状列島）が接合することにより成り立っている²⁾。日本の大地形は、これら5つの島弧の接合によって特徴づけられている。

日本列島の地形は、主に火山、山地、丘陵、台地、低地に分けられる。日本の地形的特徴として、火山や山地が多いことが挙げられる。丘陵地や火山を含めると、国土の76%が山地地域で占められ、台地と低地を合わせた平野面積は24%に過ぎない(表1)。

(5) 日本列島の断裂系

岩体の安定性や水理地質特性は、岩体に発達する
断層（岩石の破壊によって生じた断層や割れ目の総
称）と密接に関係しているため、断層の分布状況や

特性は地質環境の性能を支配する重要な要素である。現在、全国規模での地質環境調査の一環として、わが国における断裂系の分布を広域的にとらえるための調査を行っている。これは空中写真による地形判読によって、地殻部にみとめられるリエアメント（線構造）を、その特性によって以下の5種類に分類して抽出するものである。

- ① 活断層の可能性が高いリニアメント
(活断層1)
- ② 活断層の可能性があるリニアメント
(活断層2)
- ③ 地質断層と推定されるリニアメントで既存文
献に記載されているもの(地質断層1)
- ④ 地質断層と推定されるリニアメントで既存文
献に記載されていないもの(地質断層2)
- ⑤ 断層以外の断裂系(割れ目)に起因すると考
えられるリニアメント

なお、ここで活断層とは第四紀地質時代に活動した断層をいい、リニアメントの判定基準は変位地形の有無による。

これまでに、九州、四国および東北地方を除く本州（合計面積：約20万 km^2 ）に対する調査を終了した。その結果、断層あるいは断層と推定されるリニアメントとして、14,631本が抽出された。その内訳は以下の通りである。

活斷層I： 921本

活斷層2：1,832本

地質斷層 1 : 872本

地質斷層 2 : 11,006本

西南日本における断層の分布状況は、中央構造線をはじめとする東西—北東—南西方向の大構造線およびこれに規制された地層の分布を良く反映している。活断層および地質断層ともに同方向が卓越しており、また分布密度も構造線の近傍（特に北側）で高い。一方、近畿地方においては、中央構造線以北（内帯）と以南（外帯）との間で明瞭な差がみられ、内帯では断層の分布密度が高く連続性に富むのに対し、外帯では分布密度、連続性ともに低い。とくに、近畿三角地帯と称される地域における断層の分布密度はきわめて高い。ただし、断層の方向は、大構造の方向（東西—北東—南西）に斜交するものも顕著である。また、中部地方でも、糸魚川—静岡構造線に沿う南北方向の断層とこれに斜交する北東—南西系の断層が発達している。

一般に、断層の分布状況と岩石の種類との関係は不明瞭であり、同じ岩種でも分布域によって断層の発達に差が認められ、逆に異なる岩種でもその分布域によっては同様の分布傾向を示す。また、岩石の

表1 各種地形のしめる面積（國土地理院、1960による）

[illegible]

注) 括弧内の数値は「山麓・火山麓」としての値。「山地」はこの数値を
変えたもの。

生成時代との関係を見ると、古い岩石の分布域の方が新しい岩石の分布域よりも断層の分布密度は概して高いといえるが、この傾向は地域的な差に比べれば著しく弱い。すなわち、断層の分布状況は、岩質よりも地域による地質構造上の特徴を、より強く反映していると考えられる。これまでに調査の終了した地域の中では、上述の近畿三角地帯と中部地方は、断層の分布密度がきわめて高い地域、また四国南部および紀伊半島南部は極めて低い地域と位置づけられる。このような断層の分布に関する地域性については、今後、定量的な解析や評価を行って行く予定である。

今後も、全国規模での本件調査を継続する一方で、断層と岩盤の水理特性や力学特性との関係を把握するための調査研究を進める必要がある。

(6) 日本列島を構成する主な岩石の特徴

岩石の地質学的な分類に基づいて、火成岩、堆積岩、変成岩、および火山碎屑物と火砕岩について、産状と鉱物学的、化学的特徴をまとめた。さらに、岩石の物性に関する文献調査結果をとりまとめた。

これらの岩石に関する情報は、地下水シナリオとの関係において、地層中における地下水と岩石との反応やニアフィールドにおける岩盤の熱特性、力学特性等を検討する際の基礎的情報となるものである。また、地表から地下深部におよぶ岩石の各物性とその変化は、各岩種を対象とした地下施設の設計研究を行う上での基礎的情報となる。

1) 火成岩

地球規模でみると、地表に露出している火成岩の割合は大きくはない。しかし、日本列島の場合には例外的で、特に白亜紀以降の火成岩の占める割合は大きい。また、種類も多く、アルカリ岩を除くと主要な火成岩はほとんど存在すると言ってよい。

2) 火山碎屑物と火砕岩

火山碎屑物や火砕岩を構成する本質的な物質は、火山噴火時に破砕した火山岩類である。火砕岩は普通の火山岩と比べると著しくガラス質である。また、変質作用を受けていることが多い。火砕岩は規模の大きなものが多く、1回の火砕流の体積が数100 km³に及ぶものや⁷⁾、分布域が 1.4×10^6 km²、体積100 km³に達するものもある⁸⁾。

3) 堆積岩

日本列島における堆積岩の特徴として、i 各堆積量の規模が大體に比べて小さいこと、ii 蒸発岩や水成堆積物を欠くこと、iii 白亜紀以後は火山岩起源の物質が著しく多いことが挙げられる。

4) 変成岩

変成岩は地下深部の岩石が温度や圧力の変化に伴

い鉱物組成、組織、化学組成に変化を生じたものである。変成相は一般に、高・中・低圧型に分けられる。その主要な変成鉱物は火成岩の場合と同様、地下水水質の形成に必要な基礎的情報となるものである。

2.2 岩盤の物性と初期地圧

地下水シナリオ解析上および地下施設の設計検討上必要な岩盤の物性と初期地圧を、とくに深度との観点で文献により調査した。

地下深部における岩盤の物性は表層部と異なると考えられるが、地下深部条件を表わす岩盤の物性データの収集は十分ではないため、今後は文献調査とともに、試験孔や地下深部の空洞等を利用した実測定により、地下深部の岩盤物性に関するデータの蓄積を図っていく必要がある。

(1) 岩盤の物性

岩盤の物性は、その長期的な力学的、熱的性能の評価を行う上で、また地下施設の設計条件を検討するうえで基礎的情報となるものである。岩盤の力学的、熱的評価に必要な項目としては、弾性係数、ポアソン比、内部摩擦角、熱伝導率、比熱、密度等があり、設計に必要な調査対象項目としては、密度、有効間隙率、一軸圧縮強度、静ポアソン比、静弾性係数、圧裂引張り強度、せん断強度、内部摩擦角、熱伝導率、比熱等がある。また、岩盤の性質をある程度推定するための基礎資料として収集すべき項目として、超音波速度、動ポアソン比、動弾性係数、地山弾性波速度、吸水率、含水率等がある。同一種類の岩石でも、その地質環境の違いにより岩石学的特性が異なるため⁹⁾、これらの項目についても把握しておく必要があると考えられる。

このような観点から上記物性値の分布の幅、あるいはそのような物性値の岩石の種類や深度との関係を把握するための文献調査を実施した¹⁰⁾。調査の対象は土木工学、地質、鉱山、水資源等に関する公開文献であり、表2に示す岩種区分に基づいて、各種物性に関するデータの収集を行った。これまでに、1959年～1989年までに発行された約180件の文献を調査し、3,671件のデータを収集した。収集データのうちで熱伝導率に関するデータはきわめて少ない。一方、一軸圧縮強度、静弾性係数については、1,000件以上のデータを収集することができた。ただし、各特性値については、岩石の種類や時代によってデータ数に相当の偏りがあった。特に、岩石の強度や密度等については、「新しい堆積岩（新第三紀堆積岩）」と「古い堆積岩（先新第三紀堆積岩）」および結晶質岩（火成岩および変成岩）」との間には、各特性値に比較的に明瞭な差が認められる

表2 岩種区分と主な岩石名 (佐藤ほか, 1992より)

岩種区分	主な岩石名
カコウ岩類	カコウ岩・カコウ斑岩・石英斑岩・石英閃緑岩・石英閃長岩・文象斑岩・片麻岩
ハンレイ岩類	ハンレイ岩・閃緑岩・角閃岩・超玄武岩
流紋岩・デイサイト類	流紋岩・デイサイト
安山岩・玄武岩類	安山岩・玄武岩
新第三紀堆積岩	砂岩・泥岩・礫岩・凝灰岩
先第三紀堆積岩	砂岩・泥岩・礫岩・チャート
石灰岩	石灰岩
片岩	結晶片岩・千枚岩

が、後者の岩種間においては有意の差は認められないことがわかった。

収集したデータのうち、試料の採取深度が明らかなのは、約450件と全体の1割程度であった。さらに、その約半分は100m以浅のデータで、500m以上のデータは64件だけであった(表3)。これらの64件のデータのうち、多くは新第三紀堆積岩の熱伝導率、有効間隙率、密度に関するデータであり、その他では、流紋岩・デイサイト類、安山岩・玄武岩類についても同様の特性に関するデータが得られた。ポアソン比、弾性係数、一軸圧縮強度・圧裂引張り強度、せん断強度・内部摩擦角については500m以上のデータは得られなかった。

64件のデータの岩種ごとの各特性の平均値の傾向としては、新第三紀堆積岩がその他の2岩種に比べて、熱伝導率、超音波速度および密度で小さく、有効間隙率で大きい。また、深度が明らかな新第三紀堆積岩に関するデータのうち、比較的情報量の多い特性について、深度と特性値との関係を比較したが、顕著な傾向は認められなかった。

(2) 初期地圧

地下施設の構成要素である坑道の安定性の検討を行うためには、深部岩盤内の初期応力状態を把握する必要がある。鉱山やトンネル等においては初期地圧の測定例があり、最近では地震予知のための測定が実施されているが、まだ、深部での測定データは少ない。従来、地下数百mまでの実測データから、初期地圧の鉛直成分の大きさはほぼ土被り荷重に等しいこと、水平成分は鉛直成分より大きく偏圧状態になっていることが報告されている¹¹⁾。また、同じく地下千数百mまでの実測データから、初期地圧の水平成分と鉛直成分の比(側圧係数)が深くなるにつれて1以下となる傾向を示すことが報告されている¹²⁾。諸外国の3,000m程度までの実測データに基づく研究においても同様の傾向が報告されている¹³⁾。

2.3 地下水に関する調査

地下水は、地層処分システムの性能を評価するに

表3 岩石物性データの深度別件数(佐藤ほか, 1992より)

岩種	総データ数	(その内、深度明示データ数)						計
		0-100m	100-200m	200-500m	500-1,000m	1,000m以上		
カコウ岩類	565	9	13	4	0	0		26
ハンレイ岩類	116	19	9	0	0	0		27
流紋岩・デイサイト類	131	2	2	11	9	1		25
安山岩・玄武岩類	733	1	1	4	5	2		13
新第三紀堆積岩	976	66	32	93	20	27		238
先第三紀堆積岩	819	83	3	3	0	0		99
石灰岩	68	0	0	0	0	0		0
片岩	262	22	0	1	0	0		23
(総計)	3,671	212	59	116	34	30		451

あたって、重要な要素である。特に地下水が関連する事項として、広域地下水流動、地下水地球化学、および天然バリア中の核種移行等がある。それらの解析においては、水理・水文特性、地下水の地球化学的特性、地下水の流動に関する地層の構造・組織および岩質等の物理的、地球化学的特性が必要な情報となる。

(1) 地下水の分類

地下水は成因により大きく初生水(または処女水)と循環水に分けられ、循環水の一つとして化石水がある。初生水はマグマに含まれていた高温蒸気や熱水溶液が、まわりの岩石の空隙系や割れ目系を通過して上昇し、火山ガス・温泉・鉱泉等として、初めて地表に現れたものであり、地表近くを中心とする水循環に初めて関与する水といえる。循環水は、主に降水起源のもので地表水や大気中の水蒸気とともに循環系を形成する。化石水は堆積物が地層として固結する過程で、堆積時に地層内に閉じ込められた水で、油田や天然ガス田のかん水等はこれに属する。

(2) 水理・水文学的な地質および地質構造の特徴

地下水は、岩盤の間隙や裂き等を媒体にして、浸透・流動または貯留する。したがって、地下水の水理学的特性を規定、支配するものは岩盤自体の空隙の性質・形態といえる。このような水理学的特性の観点から岩盤は、多孔質岩盤と亀裂性岩盤に大きく分けられる。

多孔質岩盤は、粒状ないし単塊状の固体と、これを取り巻く空隙部分が混在した集合体である。第四紀の未固結層や、新第三紀の堆積岩の一部が多孔質岩盤に分類される。多孔質岩盤は、構成単位の岩層(例えば礫岩、砂岩、泥岩等)毎には地下水の賦存や流動を考える上で、近似的に等方均質な性質を示すと考えられる。ただし、層理面に平行な方向と垂直な方向では、水の流れやすさに多少の違いがあると考えられる。

亀裂性岩盤は、緻密・堅硬であるが、節理や断層等の割れ目を有する岩盤で、主に火成岩・変成岩および古第三紀以前の堆積岩がこれに相当する。岩盤

中の割れ目は、岩石の生成時や、その後の応力履歴にしたがって生じたものである。亀裂性岩盤中の地下水の動きや、動水勾配は、割れ目の方向、大きさや分布状況および場にかかる応力分布によって不規則に変化する。

(3) 透水係数

1980～1989年の10年間に、18種類の公開文献に掲載された、日本の岩盤を対象として測定された透水係数値をとりまとめ、種々の観点からそれらの特徴や傾向を調査した。

調査の対象とした552件の透水係数値は、測定法、測定深度、測定区間の地質情報の記載がないか、十分でないものが多い。また深度が明らかなものの中でも深度100mよりも浅い地表付近の土木施工に関わるデータが多い。

透水係数の測定深度に関する情報を整理した結果、深度50mまでの浅い場所において測定されているものが50%を超える。これに測定深度を特定できないものを含めると、ほぼ90%に達する。逆に測定深度が500mを超えるものは2%に過ぎない。

第四紀堆積層以外の岩石で、深度が明らかにされている透水係数は172件であり、深度50mまでの透水係数値が全体の80%弱を、深度100mまでの透水係数値について見れば全体の約90%を占める。500mを超えるものは約5%に過ぎない。深度の増大にともなう透水係数のオーダーの変化については、100mを超える深度での透水係数値のデータ数が19件と少ないという問題はあるものの、最頻値のオーダーが地表付近から500m以深にかけて低下する傾向(10^{-4} から 10^{-6} cm/sへの低下)がある。ただし、これらの透水係数値は、データ取得上の特徴(ダムやトンネルの施工に伴うものが多い)を考慮すると、相対的に透水性の高い領域を代表している可能性が高い。

表4に亀裂性岩盤に分類されるカコウ岩類、流紋岩・デイサイト類、安山岩・玄武岩類、先新第三紀堆積岩、石灰岩、片岩、第四紀火山岩類の地質情報(風化部であること、破碎帯や断層部であること)を考慮した透水係数のオーダーの頻度分布を示す。各岩石ともデータ数は限られているが、全体の透水係数の分布と、それらのうちの風化部と破碎帯や、断層の部分の透水係数の分布に大きな相違は認められない結果となっている。この理由としては、個々の測定区間における亀裂の規模や存在の頻度が不明であり、破碎帯等と記述されているもの以外にも、亀裂が含まれている可能性があることおよびデータ数が少ないために傾向を十分に表わしきれていない可能性が考えられる。さらに各岩石に含まれていると

表4 岩質を考慮した亀裂性岩盤の透水係数のオーダーの頻度分布

頻度分布		透水係数のオーダー (cm/s)								
岩石の種類	件数	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
カコウ岩類	47	0	2	2	16	18	4	2	3	
(風化部)	10	0	0	1	5	3	0	1	0	
(破碎帯)	4	0	0	0	1	2	0	0	1	
流紋岩・デイサイト類	28	0	0	1	9	14	4	0	0	
(風化部)	3	0	0	0	2	1	0	0	0	
安山岩・玄武岩類	43	0	1	1	16	22	1	2	0	
(風化部)	3	0	0	0	2	1	0	0	0	
先新第三紀堆積岩	46	0	0	2	15	25	3	1	0	
(風化部)	10	0	0	0	4	5	1	0	0	
(破碎帯)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
石灰岩	5	2	0	0	2	0	1	0	0	
片岩	15	0	0	1	5	7	2	0	0	
(風化部)	5	0	0	1	3	2	0	0	0	
第四紀火山岩類	38	1	1	5	11	10	8	2	0	
(破碎帯)	1	0	0	0	0	1	0	0	0	

(注) ①室内試験データを除く。

②括弧内はそれぞれ、全体のうち、特に、風化あるいは破碎帯の記載のあるものを示す。

思われるさまざまな程度の亀裂が適切に測定されているか不明であることにも留意しておく必要がある。これは往々にして高い透水性を示すものと思われる破碎帯等が、測定不能等の理由から測定対象から除外されること等がありうるからである。

各岩石全体の透水係数のオーダー的に促えた分布状態については、データ数の非常に少ない石灰岩を除くと、カコウ岩類、流紋岩・デイサイト類、安山岩・玄武岩類、先新第三紀堆積岩、片岩が同様の分布傾向を示しているのが認められる。すなわち、ともに 10^{-2} ～ 10^{-3} cm/sの高透水性の領域から、 10^{-7} ～ 10^{-8} cm/sの低透水性の領域にわたっており、最頻値も 10^{-5} cm/sで同一である。このような同様の分布傾向を示したのは、割れ目頻度が類似している可能性を示していると考えられる。第四紀火山岩類については、最頻値が 10^{-4} cm/sであるが、 10^{-5} cm/sオーダーの頻度も大きく、全体的な傾向としては表示した他の岩石と同じであるといえる。

表5に、構成粒子の大きさに着目した場合の多孔質岩盤(新第三紀堆積岩と第四紀堆積層)の透水係数のオーダーの頻度分布を示す。透水係数の全体的な分布傾向については、新第三紀堆積岩の場合は亀裂性岩盤の分布に近いが、最頻値が 10^{-4} cm/sであり、やや透水性の高い領域に偏った頻度分布が見られる。第四紀堆積層については、高透水性領域に大きな分布が認められ最頻値も 10^{-3} cm/sと高い、すなわち、全体的な傾向として、多孔質岩盤の透水性は亀裂性岩盤よりも高い。しかしながら、多孔質岩盤の構成粒子の大きさの相違(泥質か砂礫質か)に着目すると、異なる特徴が明らかとなる。

新第三紀堆積岩について、泥岩・頁岩のみと砂岩・礫岩のみを比較すると、透水係数の分布範囲はほぼ

表5 多孔質岩盤の岩相別透水係数のオーダの頻度分布

岩石の種類(岩相)	数量	透水係数のオーダ (cm/s)							
		10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
新第三紀堆積層 (泥岩・頁岩のみ)	101	0	2	14	29	24	24	7	1
(泥岩・砂岩の互層、 砂質泥岩など)	18	0	1	1	2	7	5	2	0
(砂岩・礫岩のみ)	12	0	0	1	4	1	5	1	0
(凝灰岩)	27	0	1	10	10	4	1	0	1
(風化部)	19	0	0	0	5	8	4	2	0
(破砕帯)	7	0	0	0	4	2	1	0	0
(不明、その他)	6	0	0	1	0	0	5	0	0
	12	0	0	1	4	2	3	2	0
第四紀堆積層 (粘土・シルトのみ)	221	11	52	73	42	16	14	6	7
(粘土・シルトと砂・ 礫を含む)	32	0	0	0	2	6	11	6	7
(砂・礫のみ)	8	0	0	4	0	2	2	0	0
(不明、その他)	146	11	45	60	27	3	0	0	0
	35	0	7	9	13	5	1	0	0

注) 室内試験データを除く。

同じであるが、透水係数のオーダの最頻値が泥岩・頁岩では $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sに、砂岩・礫岩では $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sにあり、両者間に二桁の相違が認められる。

一方、未固結の第四紀堆積層については、粘土・シルトのみより構成されるものと、砂・礫のみより構成されるものとの間に、新第三紀堆積岩の場合よりも明瞭な違いが認められる。すなわち粘土・シルトのみよりなる地層の透水係数は、オーダの分布範囲が $10^{-4} \sim 10^{-8}$ cm/s、最頻値が 10^{-6} cm/sと低い値を示す。これらは亀裂性岩盤と比較しても、より低い値である。これに対して、砂・礫のみよりなる第四紀堆積層の透水係数のオーダの分布範囲は、 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ cm/s、最頻値は 10^{-3} cm/sと、高い値を示す。

以上、新第三紀堆積岩と第四紀堆積層の透水係数の分布からいえることは、多孔質岩盤の透水性が、構成粒子の粒径(空隙率)に大きく依存しているということである。また、固結度の高い新第三紀堆積岩の泥岩・頁岩の透水係数が粘土・シルトよりなる第四紀堆積層よりも大きい値を示すが、これは固結度の高い堆積岩に通常多く認められる割れ目が新第三紀堆積岩の透水性の増大に寄与しているためと考えられる。

構成粒子の大きさ以外の点では、新第三紀堆積岩における泥岩・頁岩、凝灰岩および風化部の透水係数の分布が類似していることが認められる。風化部の透水性が類似している理由としては、もともと岩質が泥質であることや、粘土化を伴う風化であることが挙げられる。破砕帯の部分の試料数は少ないが、それらの透水係数のオーダは主として、 10^{-6} cm/sと低い値を示す。この理由として、これらの破砕帯が粘土化を伴うものである可能性が考えられる。

(4) 地下水の水質の形成要因

地下水の水質は、地下水の起源および地下での循環

一滞留中における土壌や岩石の構成鉱物との反応によって規制される。日本列島における地下水の起源としては、降水・海水・マグマ水が考えられる。降水中の溶存成分は微量であるが、海水やマグマ起源の水には相当量の溶存成分が含まれている。

降水起源の地下水の水質は一般に、降水が地下に浸透し、土壌や岩石およびそこに含まれる地下水の水質と反応することによって形成されるといえる。このような地下水には、その反応の際にもたらされたさまざまな成分が溶存している。主な溶存成分は、溶存ガスと溶存イオンに大別される。溶存ガスとしては N_2 ・ O_2 ・ CO_2 ・ Ar ・ H_2 や H_2S ・ CH_4 等が含まれる。溶存イオンとしては Na^+ ・ K^+ ・ Ca^{2+} ・ Mg^{2+} ・ Fe^{2+} ・ Fe^{3+} ・ Al^{3+} 等の陽イオンと、 SO_4^{2-} ・ Cl^- ・ HCO_3^- ・ CO_3^{2-} 等の陰イオンが含まれる。地下水が地層中を移動すれば、一般に溶存酸素は有機物の分解のために消費されて減少し、窒素や酸素・メタンは有機物の脱窒素化作用により増加する。酸素が溶存している酸化環境では、地下水の成分はCa・Mgの重炭酸塩が多く、無酸素状態の還元環境では、Na・Kの重炭酸塩が多くなる¹⁴⁾。

日本列島は周囲を海に囲まれ、また火山や温泉が数多く分布しているため、海水やマグマ水の影響を受けた地下水も少なくないと考えられる。海水やマグマ水に含まれる主要な成分は、基本的には降水起源の地下水と同様と考えられるが、その濃度や割合は大きく異なる。

結晶質の岩石である火成岩や変成岩は、一般に石英・長石・雲母等のアルミノケイ酸塩鉱物を相当量含んでいる。これらの鉱物は地表付近に比べて、より高温・高圧の条件下で生成したものであり、地下数百m～千mの環境では、熱力学的に不安定である。したがって、地下深部で地下水と接触した場合には地下水中にアルミノケイ酸塩鉱物中の元素が溶解する傾向がある。これらの鉱物中の元素の溶解によって、地下水中の溶存成分は増加する。鉱物中の元素の溶解は、主に地下水中に含まれる二酸化炭素濃度に強く影響される。二酸化炭素を含み、溶存成分濃度が比較的低い地下水が、陽イオン、アルミニウムおよびシリカに富むケイ酸塩鉱物と接触した場合には、陽イオンとシリカが地下水中に浸出し、Al/Si比の高いアルミノケイ酸塩鉱物が固相側に生成する。固相側に生成する鉱物は、通常、カオリン・イライト・モンモリロナイト等の粘土鉱物である。一方、地下水に浸出する陽イオンは、 Na^+ ・ K^+ ・ Mg^{2+} ・ Ca^{2+} 等である。これらの反応に伴い、地下水中のpHと HCO_3^- 濃度は上昇する。

堆積岩には、その起源となった岩石に由来するき

まざまな鉱物が含まれている。したがって地下水が堆積岩中を移動する際、組成の異なるさまざまな鉱物と接触することになる。これによって地下水の地球化学的特性が変化していくと考えられる。

たとえば、アルコース砂岩は主として石英や長石類からなっており、これらの鉱物が地下水に接すると、 Na^+ や Ca^{2+} 等が地下水中に溶解する。また、泥岩などに含まれるNaモンモリロナイトと Ca^{2+} を含む地下水が接触すれば、陽イオン交換反応により、地下水中の Na^+ が増加し、 Ca^{2+} が減少する。その他、割れ目充填物、あるいは構成鉱物として存在する方解石や石膏と反応すれば、陽イオンとしては Ca^{2+} が、陰イオンとしてはそれぞれ HCO_3^- ・ CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} が地下水中に増加する。

(5) 日本における地下水の地球化学的特性

1953年～1988年の36年間に発行された全国各地の地下水に関する公開文献約3,600件を収集した。これらの文献のうち有用な水質データ(pH、温度、主要溶存成分等)が示されている401件を調査対象とし、地球化学的特性の把握を行った。

これまでの文献調査により収集した水質データの特徴は、以下のとおりである。

- ・ 用水、温泉・鉱泉、油井等に関して得られたデータが多い。
- ・ 第四紀層中の地下水を対象としたデータが多い。
- ・ 採水深度が不明なものが多い。
- ・ 500m以深の地下水データが少ない。
- ・ 酸化還元電位のデータが他の項目と比較して少なく、特に200m以深のデータは9件のみである。
- ・ 温泉等を除いたデータに関しては、pHの多くは5から10の間にある。

地下水は、海水を起源とする地下水や温泉水等の溶存成分濃度の高いものと、降水を起源とする溶存成分濃度の低いものとに分けられる。しかし、実際にはこれらが混合した濃度を示す地下水も多く、厳密に区別することは難しい。

海水起源の地下水や温泉水は、溶存成分に富んでおり、一部の成分(Mg等)を除いては、母岩の影響は比較的受けにくいと考えられる。一方、降水起源の地下水の水質は、主として母岩との相互反応によって形成されたものと考えられる。

1) 降水起源と考えられる地下水の水質採水深度との関係

全データから海水の影響を受けている地下水や温泉水等を除くことにより、降水起源と思われる地下水の水質と母岩との関係や深度による水質変化の把握を試みた。海水の影響を受けている地下水のデ

ータや温泉水のデータと、それ以外の降水を起源とする地下水のデータとを厳密に区別することは難しいが、ここでは以下の基準を設定してデータの分類を行った。

- ・ 温泉・鉱泉、地熱関係、油井・ガス井関係の文献から抽出したデータを除く。
- ・ $5.7 \leq \text{pH} \leq 10$ の範囲のデータを対象とする。
- ・ 水温 $\leq 3^\circ\text{C}/100\text{m} \times$ 深度 $+20^\circ\text{C}$ の範囲のデータを対象とする。
- ・ Cl^- 濃度 $\leq 141\text{mg}/\ell$ 、 SO_4^{2-} 濃度 $\leq 100\text{mg}/\ell$ の範囲のデータを対象とする。

有機物の分解によって生じた炭酸ガスを含む降水起源の地下水は、地中では岩石・鉱物から、主に Na^+ を溶出させるため、pHがアルカリ性へ移行する¹⁵⁾。また、pHが5以下を示す水としては、湿原地等にしばしば見出される有機腐食酸に起因するものや、温泉や鉱山廃水の影響のある場所の無機の酸性水が考えられる¹⁶⁾。これらのことを考慮し、通常の岩石-水反応に規制された地下水とは考えにくい酸性の地下水を除くために、大気と水が平衡にあるときの理論値($\text{pH}=5.7$)をpHの下限とした。また、pHの非常に高い領域は、通常の岩石-水反応では考えにくいため、pH値の分布を考慮して $\text{pH}=10$ を上限とした。また、温度に関しては、日本の平均的な地下増温率が $3 \sim 4^\circ\text{C}/100\text{m}$ であることを考慮し、温泉地域や地熱地域等地下増温率の高い場所のデータを除外する観点で、上記の条件を設定した。塩素イオン濃度と硫酸イオン濃度については、これらの数値が高い地下水は、海水や工業廃水の混入の可能性が考えられるため、これらのイオン濃度の累積頻度分布における後背値を上限とした。

これらの基準を適用して、全データから海水や温泉等の影響が少ないと考えられるデータ5,127件を抽出した。これらを解析した結果、降水を起源とする地下水の平均的な水質は、深度が増すにつれて $\text{Na}^+ \cdot \text{Na}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型から $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型に変化することが分かった。また、500m以深で Na^+ 、 HCO_3^- 濃度が明瞭に増大する傾向が認められた(図4)。

2) 降水起源と考えられる地下水の水質と母岩との関係

前項で抽出した地下水データについて、母岩の種類ごとに採水深度とpH、主要溶存成分濃度、陰イオンと陽イオンの関係について調べた。ただし、岩種によっては、データ数が不十分なものがあるため、ここではデータ数が100件以上の新第三紀堆積岩(323件)、第四紀火山岩類(172件)および第四

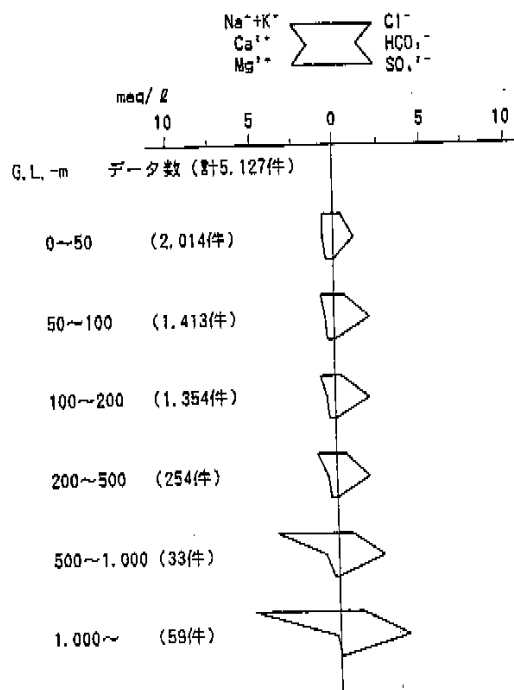
紀堆積岩 (3,585件) を母岩とする地下水についての解析結果をまとめる。それぞれについて、主要溶存成分の深度ごとの平均値 (ヘキサダイアグラム) を図5-7に示す。

① 新第三紀堆積岩地帯の地下水

- ・ $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型を示す。
- ・ 採水深度が深くなるにしたがって、すなわち母岩との反応が進行するにしたがって、pHおよび Na^+ , HCO_3^- 濃度が高くなる傾向がある。特に500m以深で Na^+ , HCO_3^- 濃度が明瞭に増大する。
- ・ 採水深度と K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- 濃度との間には、相関はほとんど認められない。
- ・ $\text{Na}^+ / \text{HCO}_3^-$ (当量) 比は1に近い。
- ・ HCO_3^- 濃度と K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- 濃度との間には、相関はほとんど認められない。

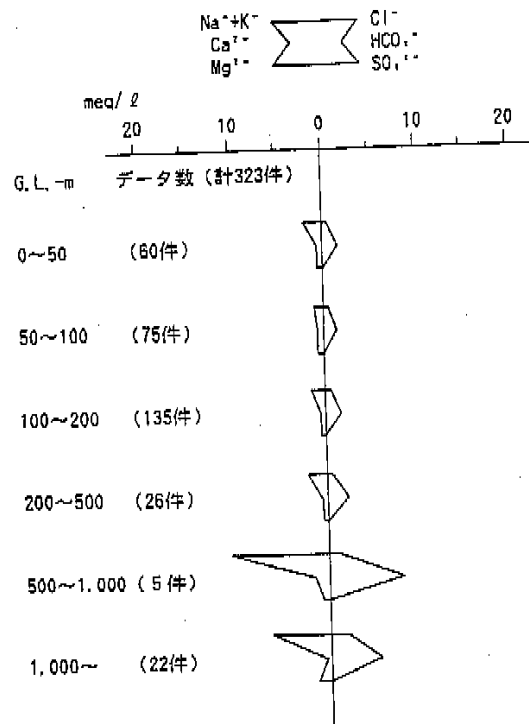
② 第四紀火山岩類地帯の地下水

- ・ Na^+ , $\text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型を示す。
- ・ 採水深度が深くなるにしたがって、すなわち母岩との反応が進行するにしたがって、 Na^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- 濃度が増大する。特に200m以深でそれらの濃度の増大が明瞭である。



注：深度は採水した孔底深度またはストレーナ設置深度

図4 降水起源と考えられる地下水の化学組成 (ヘキサダイアグラム)



注：深度は採水した孔底深度またはストレーナ設置深度

図5 新第三紀堆積岩地帯の降水起源と考えられる地下水の化学組成 (ヘキサダイアグラム)

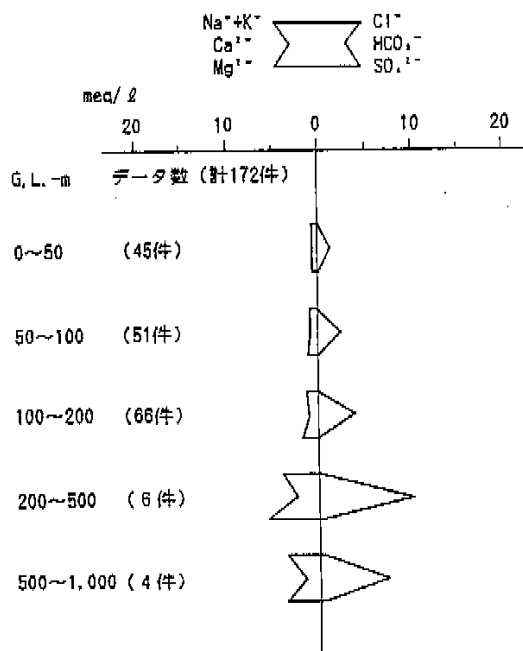
- ・ $\text{Na}^+ / \text{HCO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ および $\text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ (当量) 比は、いずれも0.25に近く、 $\text{K}^+ / \text{HCO}_3^-$ (当量) 比は0.1程度である。
- ・ HCO_3^- 濃度と SO_4^{2-} , Cl^- 濃度との間には、相関はほとんど認められない。

③ 第四紀堆積岩地帯の地下水

- ・ 採水深度が表層付近の場合には、 Na^+ , $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型であるが、深部では $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型である。
- ・ 採水深度が深くなるにしたがって、pHが高くなる傾向がある。
- ・ 深度の増大に伴う溶存成分濃度の明瞭な増大は認められない。
- ・ 採水深度と Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- 濃度との間には、相関はほとんど認められない。
- ・ $\text{Na}^+ / \text{HCO}_3^-$ (当量) 比は1に近い。
- ・ HCO_3^- 濃度と K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- 濃度との間には、相関はほとんど認められない。

3. 地質環境データベースの開発

わが国の地質環境を概括的に把握することを目標

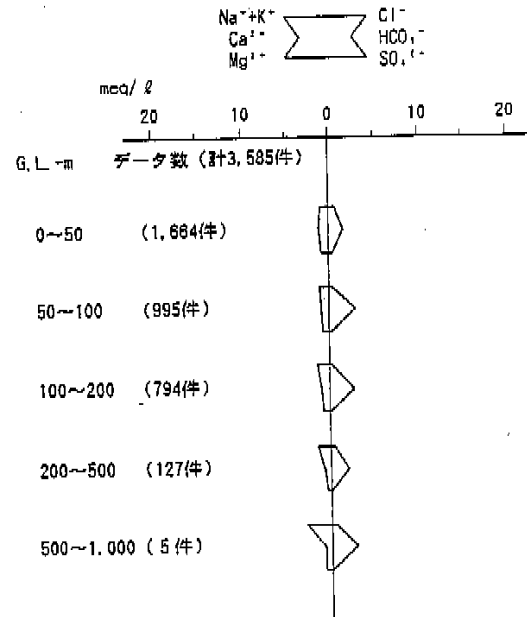


注：深度は採水した孔底深度またはストレーナ設置深度

図6 第四紀火山岩類地帯の地下水の化学組成（ヘキサダイアグラム）

に、日本全国を対象として地質環境の特性および安定性に関する基礎データの収集・整備を進めている。これらのデータを全国規模でとりまとめ、わが国の地質環境の特性評価や性能評価に反映していくためには、蓄積されたデータを利用目的に応じて機能的に管理する必要がある。このような作業を効率的・効果的に支援して行くため、データベースやグラフィックスを主体としたコンピュータ支援システム（地質環境データベースシステム）の開発・整備を行っている。

地質環境の調査研究によって取得・収集されるデータには、表として管理すべきコード情報（文字・数値）と各種分布図等の図幅として管理すべき地図情報がある。これらのデータ管理や解析作業を支援するシステムも、地図データを対象に管理するシステムと表データを対象に管理するシステムの2本立てで整備を進めている。地質環境に関する調査研究は、現在、地域および岩種を特定せずに全国規模で実施している段階にあるため、地質環境データベースシステムにおいても、まず日本全体を対象とした各種分布図等、地図データの管理およびこれを用いた解析処理を支援するシステム（地図データ管理システム）の整備を優先的に進めている。表データに



注：深度は採水した孔底深度またはストレーナ設置深度

図7 第四紀堆積層地帯の地下水の化学組成（ヘキサダイアグラム）

については、現在、パソコン上にデータファイルを作成することによって管理している。

地図データ管理システムの開発に当たっては、図形・画像情報の処理に係わる機能の整備が主要な開発要件となるため、コンピュータ・グラフィックスに関する現在の技術動向等と支援すべき作業内容を調査検討した上で、データの管理方法や実現すべき機能を設定した。また、調査の進展やコンピュータ技術の進歩に伴う機能の改良や拡張に柔軟に対応できるように、システム全体をいくつかのサブシステムに分割し、機能単位でプログラムを独立させた¹⁷⁾。これまでに、データの管理、検索、表示、編集・演算に係わる基本的な機能を整備した。地図データ管理システムを利用することによって、対象範囲（地域名や緯度・経度）と情報の種類によって検索した複数の地図情報を、位置や投影法を統一して重ね合わせて表示することができる。また、属性の種類や値（例えば、温泉の種類や泉温）に応じて、地図上への表示の有無や表示方法（形状や色）を設定・変更することも可能である。これまでに、断層、火山、温泉、地下資源、地質、地形に関する全国分布図等、地質環境の特性や安定性を把握する上で参考となる既存の地図情報の入力を行った。今後は、現在実施中である地質環境調査研究によって取得・収



図8 地質環境データベースシステムの出力例

集されるデータの入力を継続していく。

これまでに整備した主な機能を以下にまとめる。

また、システムの出力例を図8に示す。

- ・データ管理機能：入力した地図情報をデータベース上に保存。
- ・検索機能：対象とする領域（地域名や緯度・経度）および情報の種類によって任意のデータを検索。
- ・表示機能：検索した地図情報を画面上に表示。表示した地図情報を拡大・縮小。表示範囲を水平・垂直移動。
- ・重畳表示機能：複数の地図情報を、位置・投影法等を統一して重ね合わせて表示。
- ・属性表示機能：属性の種類や範囲によって、地図上への表示の有無や表示方法（形状や色）を設定・変更。
- ・編集・演算機能：入力データの幾何形状や属性を変更。
データ間のAND演算やOR演算を実行。
- ・出力機能：画面上に表示された地図情報を、ハードコピーとして出力。

一方、文献調査等で収集したコード情報は、検索や統計処理等が可能な市販の表計算ソフトを用いて、パソコン上のデータファイルとして管理している。これまでに、地下水の地球化学的特性（データ数：14,541件）、岩石の地質工学的特性（3,671件）、岩石の水理地質学的特性（552件）等に関する

データファイルを作成した。

（中部事業所 環境地質課
清水和彦、石丸恒存）
（環境技術開発推進本部 地層科学研究グループ
中司 昇）

参考文献

- 1) 貝塚英平、松田時彦、他、日本列島の構造と地質・火山、科学、Vol. 46、196-210、(1976)。
- 2) 上田誠也、杉村 新、弧状列島、現代科学選書、156 (1970)。
- 3) 菊田 賢、野沢 保、京山県加賀郡飛騨変成岩のRb-Sr年代（講演要旨）、岩鉱、75巻、130、(1980)。
- 4) 皆木田芳文、スターン、T.W.、他、八代花崗岩のPliocene年代、西南学院大学文理論叢、11、11-13、(1970)。
- 5) S. Harayama, The Youngest Exposed Granitoid Pluton on Earth: Cooling and Rapid Uplift to the Pliocene-Quaternary Takidani Granodiorite in the Japan Alps, Central Japan. Geology (in Press) (1992)。
- 6) 石原邦三、花崗岩と流紋岩、岩城講座地球科学15「日本の地質」（勘米良典助他編）、岩波書店、105-141、(1980)。
- 7) 熊谷重雄、鹿児島県国分地域地質と火砕流堆積物、地質雑、73巻、426-442、(1969)。
- 8) 町田 洋、新井房光、他、南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラ・赤松や火山灰一、第四紀研究、17巻、143-163、(1978)。
- 9) 八木健三、福地地域の地質環境と高レベル放射性廃棄物の地層処分、昭和58・59・60年度文部省科学研究費補助金 総合研究(A)「放射性廃棄物の地層処分に関する総合的基礎研究」、188-194、(1986)。
- 10) 佐藤隆紀、石丸恒存、他、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、PNC TN7410 92-018 (1992)。
- 11) T. Kanagawa, S. Hibino, et al., 4. 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. Abstr., Vol. 23, No. 1, 29-39、(1986)。
- 12) 斉藤敏明、石川 毅、他、実験結果に基づく我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、第394号/III-9、(1988)。
- 13) E. Hoek and E.T. Brown, Underground Excavations in Rock, the Institution of Mining and Metallurgy, London, (1982)。
- 14) 山本正敏、新地下水調査法、古今書院、490、(1983)。
- 15) 杉崎隆一、杉浦 弘、他、地下水質と地下水の流動機構—瀬田平野の例を中心として—、日本河川水質年鑑（日本河川協会）、885-897、(1979)。
- 16) 半谷高久、小倉紀雄、他、水質調査法（改訂2版）、丸井、378、(1985)。
- 17) 清水和彦、地質環境データベースシステムの開発研究（基本設計）、TR/GE 89-01、PNC TN7410 89-029、15、(1989)。