

岩盤地下水の大規模開発における計画・初期調査段階での調査法の検討 An Investigation method for the Development of the Ground Water Resources in Rock Mass.

西 琢郎*・百田博宣**・吉田堯史***・牛島恵輔****

Takuro NISHI, Hironobu MOMOTA, Takafumi YOSHIDA and Keisuke USHIJIMA

This paper proposes a hydrogeological investigation method aimed at the development of the ground water resources in rock mass. The method can be applied to the initial investigation stage before carrying out the expensive borehole surveys. This method is based on the newly proposed concept for evaluation of the ground water in rock mass, and it aims to get reliable information practically and economically from the composite results by some existing methods of surveys. The characteristic of the method is a practical and economical evaluation of the electrical soundings. In order to confirm the availability of the method, the method was applied to a real mountainous region which is 400 km² wide and occupied by the granitic rocks as the basement. It has been clarified that the method can arrange many results of surveys without conflicting, and can select the most promising site effectively from the wide region.

Key Words: ground water in rock mass, investigation method, hydrogeological structure

1. 緒 言

水資源白書によれば、近年は小雨傾向が続き、水資源の根幹である河川水資源の減少を主要因とした都市用水や農業用水の渇水が頻発傾向にある。竹中ら¹⁾は、代表的な渇水頻発地域の地形地質的な特徴として、1) 河川水資源が貧弱(一級河川がないなど)、2) 平野が貧弱で浅層地下水も貧弱、3) 山地に近い、または岩着面深度が浅いなど岩盤が支配的、の3点を指摘している。このような渇水頻発地域において水資源開発を計画する場合、上記の地形地質の特徴および岩盤中の地下水が異常気象等の影響を受け難い特性をもつことを考慮すれば、今後は岩盤地下水が未利用な水資源として大規模開発の対象になる可能性があり、地下空間利用の一形態として注目すべきものと考えられる。実際、渇水頻発地域では、小規模ではあるが深井戸等を用いた岩盤地下水の利用事例も見られ、また近年では新たな開発手段として、トンネルから井戸に相当する櫛状の集水孔を設置するシステム構想²⁾も提案されている。

岩盤地下水資源の開発は一般的に図-1に示すようなフローで実施されるものと考えられる。まず図中の実施項目①と②を含む段階は計画段階であり、①で調査検討の対象となる複数の水収支域をもつ山地等を水需給状況等を考慮のうえ設定し、②でこの山地から岩盤地下水の開発が期待できる候補地域を選定する。次いで③～⑤は初期調査段階であり、③では②で選定された候補地域内で岩盤地下水の開発施設の計画に適する地点を絞り込み、④では開発施設の基本設計と可能な場合は開発水量の試算を行い、⑤で調査検討の推進の是非が判断される。次の⑥以降の調査がいわゆる詳細調査に相当し、⑥では概念設計結果に基づいて、地表地質の詳細把握、ボーリング調査試験や水文調査観測等による岩盤透水性、地下水位、水収支などの定量的な把握が行われ、⑦で地下水解析や水収支解析等を行い、開発水量試算の精度向上と開発施設の基本設計を

キーワード：岩盤地下水、調査法、水文地質構造

* 正会員 理博 清水建設(株)和泉研究室

** 正会員 工博 清水建設(株)技術研究所 地下技術グループ 主席研究員

*** 応用地質(株)技術本部ダム部 部長

**** 工博 九州大学大学院 地球資源システム工学専攻 教授

行ったうえで、開発水の原水単価などのコスト検討が行われる。そして、これらの調査・検討結果が⑧で評価され、立地決定が決められ、⑨の実施設計の段階となる。

このような岩盤地下水開発のサイト選定に対する調査方法を体系的に検討した研究には、吉備高原^{2),3)}や阿武隈山地^{4),5)}における例があり、各種の調査法と評価の考え方が結びついた総合的な調査フローが示されている。一般に、岩盤地下水は断層や節理等の割れ目系を主な流動経路とする場合が多く、「水みち」となる割れ目系の分布も一様ではない。このため、開発の可否判断や開発水量の推定を行うには、これらの研究に示されるように様々な調査結果を総合して判断を下す必要があろう。しかし、図-1②③の計画あるいは初期調査段階(以後、計画・初期段階と称す)においては、対象領域は広大であり調査数量も経済的な面で制約を受けるものと考えられ、ボーリングを含む多数の調査を実施することは必ずしも实际的ではない。しかしまた、サイト選定にあたっては、計画・初期段階から水みちの分布や地表水・浅層地下水も含む水循環をも考慮して、候補地の絞り込みに寄与する広域の岩盤地下水状況をできるかぎり把握し、如何に合理的にサイト選定を行っていくかという点が、岩盤地下水開発の成否に係わる重要課題と考えられる。

そこで本論では、大規模岩盤地下水開発の調査における評価項目を明確化し、図-1中②と③の段階におけるサイト選定を対象とした合理的かつ経済的な調査法を検討する。本論ではまず、開発水量の確保や水循環を考慮するための岩盤地下水状況の評価項目を明確化し、ボーリング調査実施前を前提に、物理探査法の積極的な活用も含めて既存の調査法を体系化する。さらに、検討した調査法を実際の岩盤地域で適用し、その有効性について議論する。

2. 岩盤地下水開発のサイト選定に資する計画・初期段階の調査法の検討

大規模な岩盤地下水の開発は、岩盤地下水状況に直接影響を与えるだけでなく、地表水や浅層地下水の水収支状況等にも影響を及ぼす可能性がある。そこで岩盤地下水状況の把握に必要な評価項目を次の3項目にまとめた。すなわち、1)水みちの位置および透水性、2)地下水位分布、3)広域の水収支・流出状況および地下水量である。1)は、地域の岩盤地下水流を規定する主要な断層・節理系や、亀裂が密集して高透水となりうる岩盤部分(透水試験等で検出される。以下、岩盤高透水性部と呼ぶ)、および風化層、地滑り・土石流堆積物、扇状地堆積物等の高透水性となりうる被覆層(以下、高透水性被覆層と呼ぶ)等のいわゆる「水みち」の位置・分布と透水性が評価項目である。また2)の地下水位分布は、地下水流の流速レベルや方向を評価するものである。そして3)は降雨量、河川流量等から解析される水収支・流出状況と、広域の地下水量(流動量、賦存量)が評価項目となる。

計画・初期段階の調査では、これら1)～3)の概略を評価することになるが、ボーリング調査実施前の段階として合理的・経済的にサイト選定に結びつく調査法の選択が必要となる。そこで表-1に1)～3)の評価項目に対して利用が期待できる調査手法と、各手法での調査内容を既報文⁴⁾⁵⁾⁶⁾も参考に整理した。なお表-1では調査手法として9手法を挙げているが、図-1②の計画段階(=複数の水収支域を持つ岩盤地帯から開発候補地域を選定)では対象領域が特に広いため、通常はこのうちの資料調査と地質概略踏査のみが実施可能と考えられる。また扱う資料も広範囲をカバーする概括的なものとなり、地質踏査も資料から得た情報を確認す

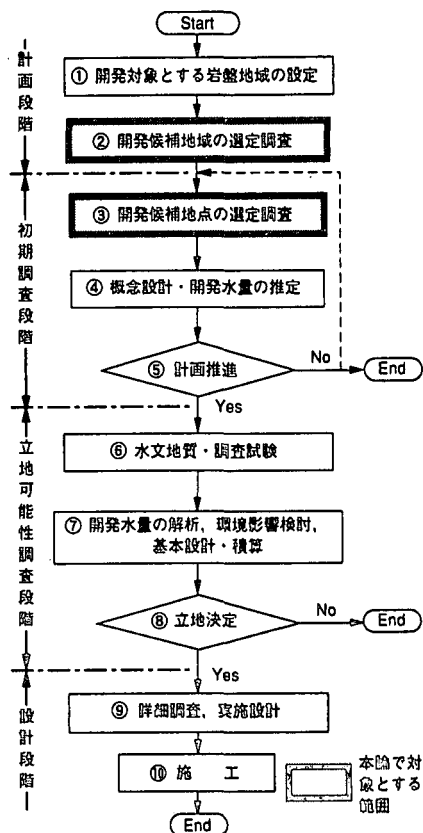


図-1 岩盤地下水資源の開発に関する検討フロー

るためのポイント調査となる。しかし、その評価の考え方は次の③の段階と同様とみなせるため、以下③の段階での調査を念頭に検討する。

表-1に示した調査法は大別すると資料調査、現地地表調査、物理探査である。このうち資料調査は、地形解析、地質・水理・水文資料調査、空中写真判読に分けられる。例えば水みちの位置・透水性評価として主要な断層・割れ目系を対象とする場合、地質資料から直接に断層等の記載を読み取ることに加え、地形解析や空中写真判読から谷や尾根のずれ、傾斜変換線、リニアメント等を抽出して断層等の位置を推定する。また関連する地域のトンネル湧水^{例えば}や井戸揚水記録等の水理資料からその透水性に関する情報を得る。次の現地地表調査は地質概略踏査、地表湧水点調査、河川比流量調査にわけられる。地質概略踏査は主に水みちの位置・透水性評価に対して行われ、表-1中の調査内容によりそれぞれの確認推定を行う。また地表湧水点調査では、断層・節理沿いの湧水点、溪流浸出点位置から地下水位分布の推定を行うと共に、湧水の電気伝導度やpHを簡易に測定して地下水の大まかな滞留状況を推定し⁹⁾、水収支評価に対する情報を得る。次の河川比流量調査は、対象とする水収支域内を支流毎に細分し、その収支域毎の河川流量を収支域面積で除した比流量を比較検討するものである。渇水期の低水流量から求めた比流量は、単位面積当たりの河川への地下水流出量を概略示すことから、他の調査結果と重ね合わせることで、水みちの存在や地下水の涵養・流出状況の推定材料とすることが可能となる⁸⁾。さらに、ボーリングの代替として地下の定量的情報を取得するため物理探査を行うが、多数の探査を実施することは経済性の面から困難であるため、地下水調査に対して実績のある比抵抗探査が有効と考えられる。

次に表-1の各調査手法について、相互の位置づけと得られる成果品、およびサイト選定に至る岩盤地下水状況の把握の流れを図-2にまとめた。まず第一段階として、地形解析により水収支域の区分、水系の把握等を行い、地質資料分析を加えて地形・地質の概況を把握する。並行して周辺地域でのトンネル湧水記録など既存の水理資料、近傍の気象データ等の水文資料調査を行ない、広域の岩盤透水性・水収支状況を把握する。次いで空中写真判読によりリニアメントや風化層・被覆層等の分布推定を行い、地形解析や地質資料調査で

表-1 岩盤地下水開発における各調査手法から得られる情報と評価項目の関係（情報の得られる可能性：◎大，○中，△小）

評価項目 調査手法		水みちの位置および透水性				地下水位分布	水収支・流出状況 および地下水量
		主要な断層・節理系	岩盤高透水性部	風化層	高透水性被覆層		
資料調査	地形解析	◎谷の方向性、ずれ ◎尾根・段丘等のずれ ◎傾斜変換線		◎地形区分 ◎谷密度の少なさ ◎谷壁斜面の逶迤線	◎地形区分	◎地形、水系 状況	◎水収支域の小区分 ◎小収支域毎の面積 ◎水系状況
	地質資料 調査	◎断層・節理系の記録 △コア記録 △小断層解析結果	◎岩種岩相区分の記録 ◎亀裂状況の記録 △コア記録 △小断層解析結果	◎風化状況の記録 △コア記録	◎岩種岩相区分の記録		
	水理資料 調査	△トンネル湧水量、井 戸揚水量による透水性推定 △透水試験結果	△トンネル湧水量、井 戸揚水量による透水性推定 △透水試験結果	△井戸揚水量による透 水性推定 △透水試験結果		△(深)井戸水位	
	水文資料 調査						△降水記録、河川流 量・貯水池等の水 量記録の評価
	空中写真 判読	◎リニアメント系の抽出 ◎地形のずれ抽出		◎崩壊地形の多さ ◎微地形の傾斜変化 (差別侵食による)	◎地滑り堆積物の分布 ◎谷底埋積状況 ◎扇状地発達状況		
現地地表調査	地質概略 踏査	◎断層・節理系、リニア メント系の確認	◎岩盤状況、亀裂の発 達状況確認	◎風化層分布、層厚、 風化程度の確認	◎上記被覆層の分布、 発達状況の確認		
	地表湧水 点調査					○湧水点、溪 流浸出点	◎湧水の水質
	河川比流 量調査	△比流量の大きい流域	△比流量の大きい流域	△比流量の小さい流域		○比流量分布	◎河川低水流量 ○地下水流出量
物理探査	比抵抗 探査	○低比抵抗ゾーン	○低比抵抗ゾーン	◎地表付近の高比抵抗 ゾーンまたは低比抵 抗ゾーン	◎地表直下の高比抵抗 ゾーンまたは低比抵 抗ゾーン	◎地表付近で の比抵抗変 化（高ー低）	

得られない地質構造を推定する。次に資料調査の結果を踏まえて、推定された地形地質状況を確認するための現地地表調査、物理探査を行うが、計画・初期段階調査として重要なものは地質概略踏査と比抵抗探査である。地質概略踏査は、資料調査で推定した水みちの位置・透水性の確認が主目的となる。また確認した割れ目系の卓越方向解析(小断層解析)を行なって、リニアメント系と断層・節理系との関係を検討し、割れ目系分布に関する推定精度の向上も図る。そしてこれらの総合評価として水文地質図を作成する。ここでいう水文地質図は通常の地質平面図に、風化層の風化程度や高透水性被覆層の分布、さらに断層・節理系やリニアメント系を併記したものを意味している。また比抵抗探査はボーリングの代替調査として重要な調査であり、その探査法には種々のものがあるが、岩盤地下水開発の場合、探査深度は最大でも地下200～300m以浅と想定されるため、ここでは電気探査法の利用を中心と考える。この探査結果は、地質概略踏査による地質断面図と比較して水みちの状況把握の信頼性を向上させるために、調査地域を代表する断面での比抵抗分布として得られることが望ましい。しかし比抵抗断面分布は、二次元探査および二次元逆解析を用いれば高精度な推定が可能であるが、計画・初期段階では経済性の面で必ずしも実施できないこともある。そのような場合、垂直電気探査の測定点を測線上に複数設け、比抵抗深度分布と同時に比抵抗断面分布を推定する方法^{9,10,11)}が利用できる。さらに得られた比抵抗分布をより水文地質の解釈に有効なものとするため、例えば Archie の式¹²⁾,

$$F = \rho_r / \rho_w = a \cdot \phi^m \cdot S^n \quad (1)$$

ここで、 F : 地層比抵抗係数、 ρ_r : 岩石の比抵抗(Ωm)、 ρ_w : 間隙水の比抵抗(Ωm)、 ϕ : 間隙率、 S : 水分飽和度、 m : 膠結係数、 n : 飽和指数、 a : 迂回率定数

などを用いて比抵抗値を間隙率に換算することも可能である。Archieの式は砂質物質に海水を充填した際の実験式であるが、諸文献や岩石試料を用いた試験結果を整理すると、一般的な地下水の比抵抗値に相当する水で満たした岩石試料においても、図-3に示すような間隙率と地層比抵抗係数の関係が得られる場合が多い¹³⁾。そこで、得られた比抵抗断面分布に対し、断面内の地層を区分し適用できる地層を吟味した上で、例えば図-3などを利用して(1)式の係数を決めれば、比抵抗分布から換算間隙率分布が求められ^{14,15)}、この間隙率に基づいて計画・初期段階における一次評価としての透水性分布の概略推定も可能となる。

このようにして作成した水文地質図や比抵抗分布図、ならびに別途行った河川比流量・地表湧水点調査結果をまとめた比流量分布図、地下水位分布図を相互に比較し、さらに水理・水文資料から得られた情報も加味して候補地域を絞りこむが、その際には当然、前述した3つの評価項目について総合的に評価することになる。すなわち、1)に対応するものとして、水みちとなる可能性がある断層・リニアメント系の分布や連続性の程度が選定の重要な要素になる。さらに、地山の保水機能や涵養機能を担う風化層や高透水性被覆層の分布

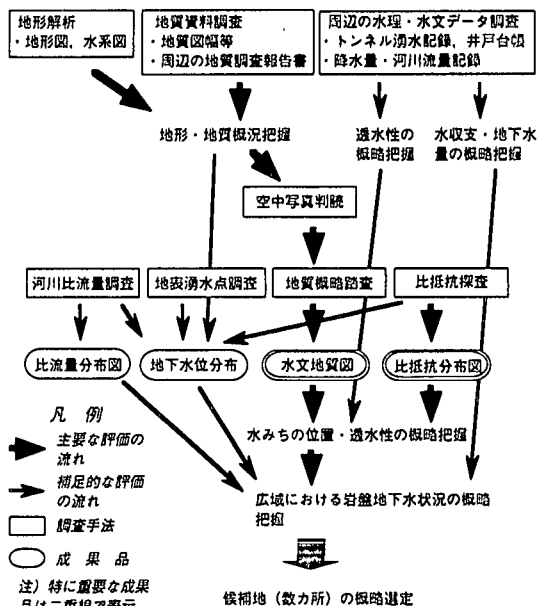


図-2 計画・初期段階における大規模地下水開発の調査フロー

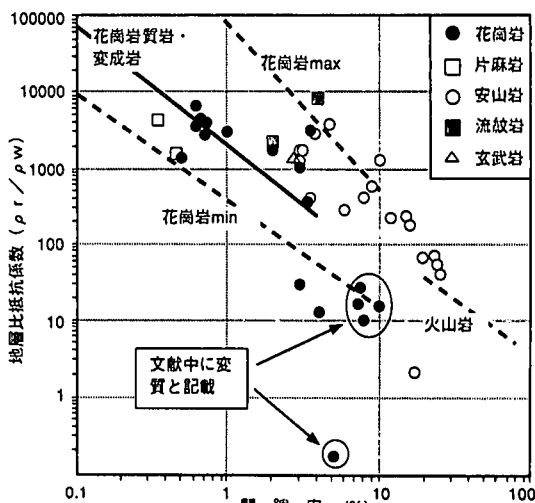


図-3 地層係数と間隙率の相関¹³⁾

発達状況も選定の参考要素となる。また2)と3)については、複数の水収支域では、その面積の大小が各流域内の地下水賦存量・流動量の目安となり、地形・水系状況からは概略の地下水流動機構も推定され、これらの状況も候補地域選定の要素となる。

以上、計画・初期段階における調査法とその内容について整理し評価の過程について検討してきたが、この段階の調査レベルにおいては、種々の調査法から関連する情報を最大限抽出し、それらを重ね合わせることで、評価項目の推定精度を向上させることが基本と考えている。

表-2 各調査段階での調査内容の実績

3. 調査フローの実地への適用シミュレーション

前述した調査フローの実用性を検討するため、実地への適用シミュレーションを行った。調査内容の実績を表-2に示す。今回対象とした地域は花崗岩を基盤とする広さ400km²の山地であったが、本論ではこの山地から開発候補地域を選定した過程は省略し、候補地域から開発候補地点を選定した過程を詳述する。

3.1 開発候補地点の選定

候補地域は、海に隣接した約12km²の水収支域である。以下、表-2の調査内容から、得られた成果品ごとに調査結果を述べる。

(a) 水文地質図

図-4に、地形解析から地質概略踏査までの結果を取りまとめた水文地質平面図・断面図を示す。まず読図による地形解析から、調査地域南限の東西方向の境界はこの山地の分水嶺をなし、大局的な地下水の流動方向は、この分水嶺から北方の海に向かって流下するものと推定された。また、水系(谷)の方向性は北東-南西および南北方向のものが卓越し、後述するリニアメント系の方向との関連が強いと考えられた。谷密度や地形起伏は、南限の分水嶺付近で比較的大きく、活発な侵食作用が想定されるが、その他の地域では小さく、地表付近の風化が進んでいるものと推定された。次に空中写真の判読から、当地域には北東-南西(以下、NE系と記す)、北西-南東(以下、NW系)、南北(以下、NS系)方向の3系統のリニアメントが分布し、各々の頻度はNE、NW系が多く、NS系は少ないことが分った。またNE、NW系のリニアメントは全体に連続性が良く、調査地域外の山地の広い範囲にも共通して認められ、この地域のリニアメントとしては主要なものと推定された。またこれらの他に、ほぼ平行する2本のリニアメントに挟まれて周囲の地形起伏とは異なった小起伏面を示す帯状のゾーンが2つ認められた。

次の地質概略踏査の結果、調査地域の地質構成は、基盤をなす花崗岩類を、河谷ないし山麓斜面に分布する土石流・崖錘堆積物と沖積層が覆うものであることが確認された。そこで基盤岩の地質区分は水文地質状況に關与する花崗岩の風化程度に基づき、マサ状風化、開口風化、亀裂密着新鮮の3種とした。空中写真から抽出されたリニアメント系の内の幾つかは、露頭において断層として確認できた。また平行なりニアメントに挟まれ周囲と異なる地形起伏を示すゾーンの内、NS系のものは数m程度の幅にわたって亀裂が密に発達し、一部に粘土を伴う破碎帯として見出された。地表のほぼ全域はマサ状風化を被っており、風化層の厚さは最大20m程度で、全体に空隙が多く高透水性と判断された。しかし、地形起伏の大きかった調査地南西部分水嶺の北側斜面では、比較硬質な亀裂開口風化ゾーンが広く分布するほか、地域中央部付近の主流河床には亀裂密着新鮮ゾーンが連続して露出していた。河床部を埋積する堆積物は土石流堆積物や崖錘堆積物であり、空隙が多く高透水性と推定され、層厚は厚いところで十数m以上であった。

踏査ルート沿いに露出する断層・節理系の小断層解析の結果(図-5; 測定数59)、調査地域南東部や南西部

調査段階 調査手法	計画段階 (候補地域(水系) 選定過程)	初期調査段階 (候補地点選定過程)
地形解析	1/5万地形図: 400km ² 相当 1/2.5万地形図: 20km ² 相当 ×4ヶ所	1/1万地形図: 4km×4km
地質資料調査	1/20万地質図幅: 1枚 1/5万地質図幅: 1枚 活断層図	左記以外の該当資料無し
水理資料調査	全国鉄道トンネル湧水実績からの概算値 ¹⁾	左記以外の該当資料無し
水文資料調査		該当資料無し
空中写真判読	1/4万白黒航空写真: 143枚	1/4万白黒航空写真: 4km×4km
地質概略踏査	ポイント調査	1/1万ルートマップ: 4km×4km 踏査ルートでの小断層解析
地表湧水点調査		踏査ルートでの確認(10地点)
河川比流量調査		踏査ルートで砂防ダム・堰の 越流量、および谷底埋積の少 ない沢流量を目視
比抵抗探査		測定点数: 11 測定深度: 150m 測定手法: シュランパルサー法 1次元、2次元逆解析

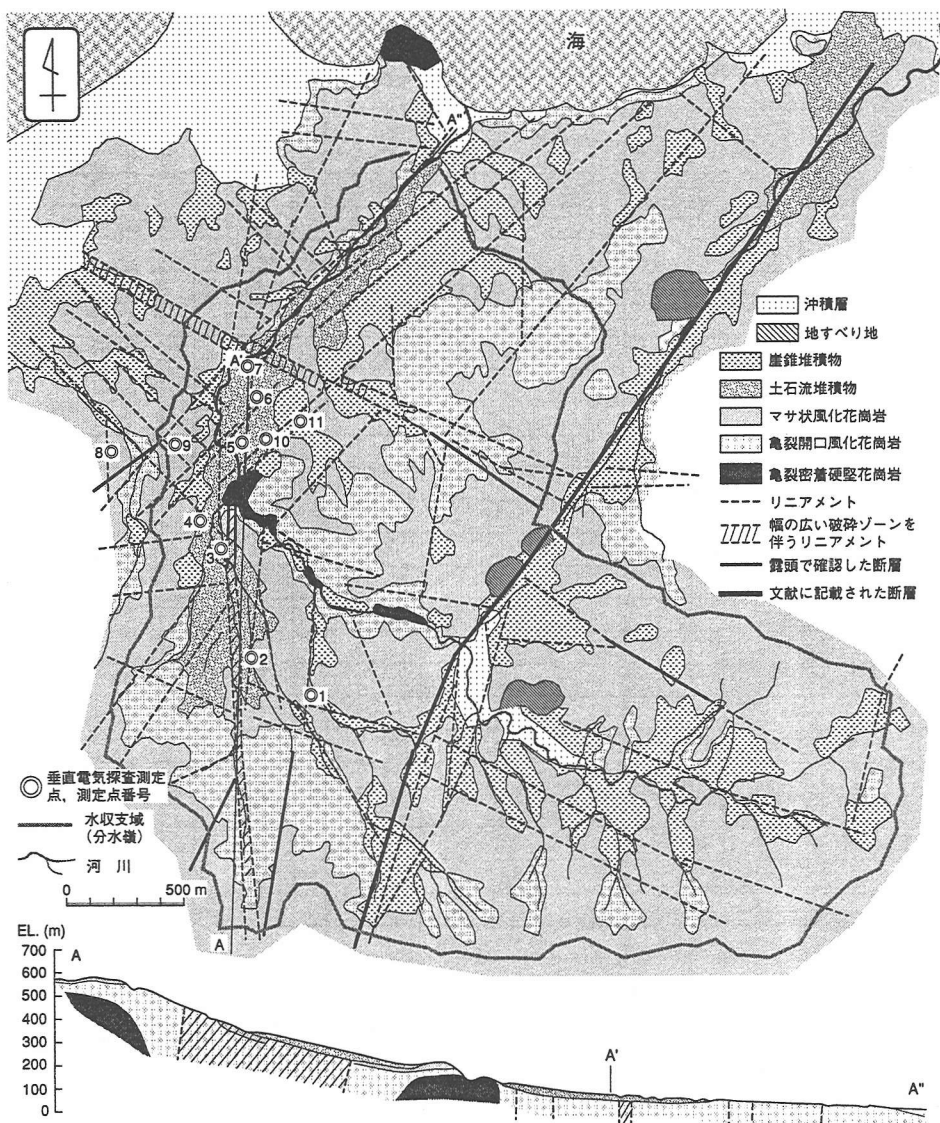


図-4 水文地質図および断面図（断面図の縦横比＝1：1）

での割れ目系は、西南西走向で急傾斜のものが大半で、南北走向のものを若干含み、北部では北西と北東走向のものが多かった。これらの割れ目系の分布は、測定数は少ないものの、前述したリニアメントの方向性と頻度にほぼ一致し、リニアメントが地下の割れ目系を反映したものであることが示唆された。

(b) 地下水位分布図および比流量分布の推定

地表湧水点調査から、地下水位分布の概略を推定した。結果を図-6に示す。小沢沿いの溪流浸出点は、分水嶺である尾根から標高で数十～150m程度下った亀裂開口風化ゾーンに分布することが多かった。これは尾根沿いの風化部分にしみ込んだ降水が、風化がやや弱く亀裂が緩んだゾーンから浸出していることを示し、溪流浸出点がある場所における地下水面標高にほぼ一致することを考えると、少なくとも比較的浅所の地下水面は、マサ状風化ゾーンの下底付近にあることを示唆している。さらに、沢筋や道路法面などで認められる湧水地点は、調査地南西部のNS系のリニアメント沿いに多い傾向が見られた(図-6)。これらの湧水点位置と地形状況より地下水位分布ならびに地下水流向を推定した結果、調査地中央部付近のNS系リニアメントが多い地域に地下水流が集中する地域が存在する可能性が高いと考えられた(図-4, 6)。

次に、砂防ダム・堰での越流量、および土砂埋積の少ない部分での沢流量の観察から、比流量の相対的な大きさを比較した(図-6)。今回の調査では目視等による簡易な判定を主として行ったため、河川比流量分布図の形式での定量評価を行うことはさけたが、全体として分水嶺に近い領域ほど比流量は少ない傾向が認められ、分水嶺周辺の風化部から岩盤中に降水が浸み込んでいるという前述の推定と矛盾しない結果が得られた。一方、調査地中央部付近に比流量が多い流域が見られ、地下水の流出域となっている可能性が考えられた。

(c) 比抵抗分布図

表-2に示すように、シュランベルジャー法による垂直電気探査を11点で実施した。測定深度は150mとし、測定点はほぼ直交する2測線上に配置した(図-4)。観測データから逆解析¹⁶⁾による比抵抗深度分布を推定した結果、探査地点の比抵抗分布は、GL.-5m付近までの比較的高比抵抗なゾーン、GL.-5m～-50m付近の数100Ωmを示す比較的低比抵抗なゾーン、それ以深の1000Ωm以上の高比抵抗ゾーンへと変化する3層構造を成していた。また、一部の測点にはGL.-30～40m付近において100Ωm前後の低比抵抗帯が分布することが認められた。

次に、11点の垂直電気探査データを用いて前記2測線の鉛直断面に対して2次元逆解析^{10,11)}による比抵抗断面分布を求めた。解析断面のうち1断面は図-4に示す地質断面位置(A-A')にはほぼ一致しており、両者の対応を図-7に示す。比抵抗断面分布(図-7(a))より、地下深部の高比抵抗ゾーンの上面の深度が測点4付近において変化し、測点1, 6には200Ωm以下の低比抵抗ゾーンが分布することがわかる。また測点1, 5では、地表付近浅所に分布する高比抵抗ゾーンの下面深度が周辺よりやや深いことがわかる。次に、コンター表示した比抵抗分布図(図-7(b))と地質断面図(図-7(c))を比較すると、測点1, 5の地表付近の高比抵抗帯は土石流堆積物の分布域と一部重複し、測点3, 4, 5の地表から深度50m付近までの低比抵抗ゾーンは、土石流堆積物の一部あるいは風化によりマサ化ないし亀裂が開いたゾーン、そして測点3での深度100m付近の高比抵抗ゾーン亀裂密着新鮮花崗岩に相当すると考えられる。また測点1や6付近に見られる100～200Ωm程度の低比抵抗部は、NS系リニアメントの近傍に位置し、これらリニアメントが断層である可能性を支持すると考えられた。

次に、2章で述べた方法により、比抵抗断面分布から間隙率分布を換算した。尚、ここでは計算の簡略化のため、断面全域を飽和状態、間隙水比抵抗値(ρ_w)を70Ωmと仮定した。換算には(1)式を用い、新鮮な花崗岩の係数($a=1.4$, $m=1.58$, $n=2$)¹⁵⁾を用いて計算を行った(図-8(a))。次に、同図で換算間隙率10%以上となった部分は、風化等により何らかの変質を被っている部分と解釈し、この部分のみ変質した花崗岩を含んだ場合の係数($a=0.6$, $m=1.4$, $n=2$)¹⁵⁾を用いて再度計算した(図-8(b))。その結果、再計算した部分の大半は風化が進んだ花崗岩の一般的な間隙率¹⁷⁾に相当する分布になった。しかし、測点1, 6付近には依然として25%

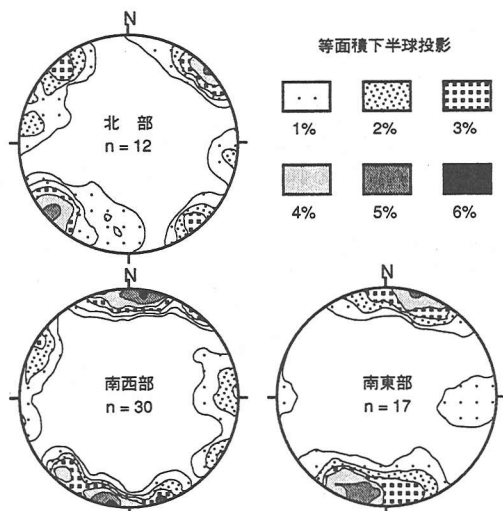


図-5 調査地域における小断層および節理の方向性

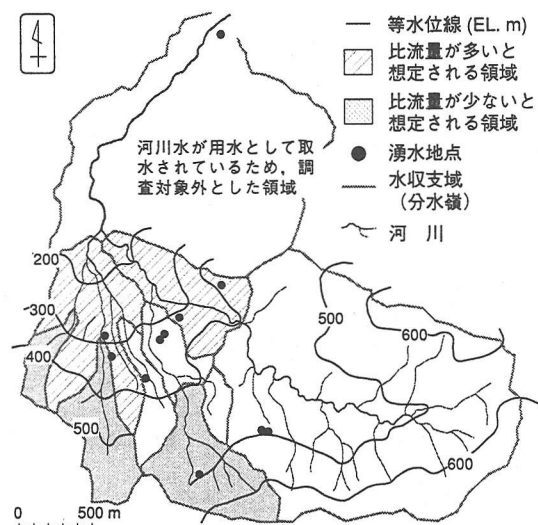


図-6 地下水位分布および目視による河川比流量の分布

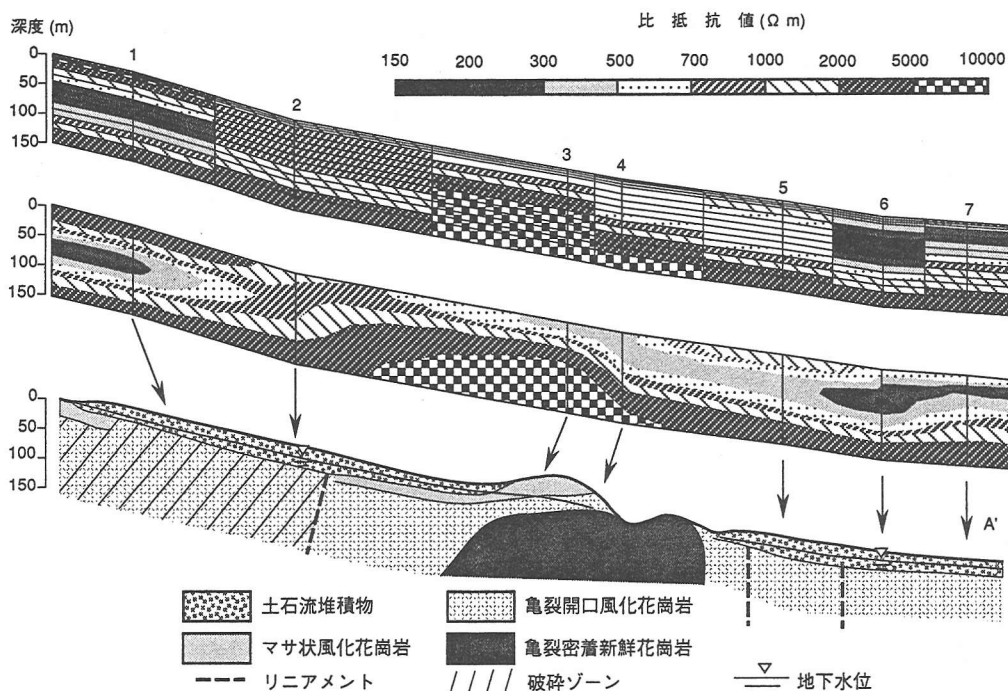


図-7 比抵抗断面分布と地質断面の比較。(a) 上段：解析セル毎の比抵抗分布。図中の数字は各垂直探査実施地点，(b) 中段：比抵抗分布のコンター表示，(c) 下段：地質断面図（断面位置は図-4 参照）

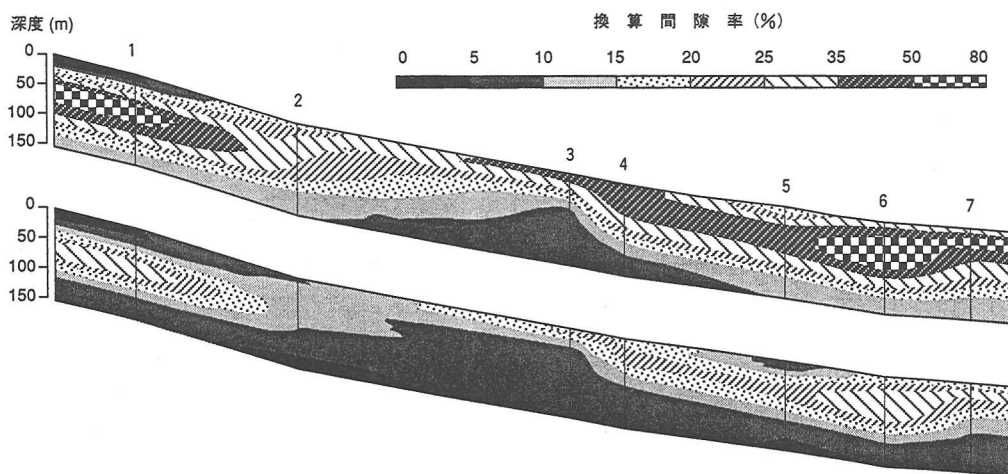


図-8 換算間隙率分布。(a) 上段：新鮮な花崗岩での換算係数を使用，(b) 下段：間隙率10%以下の部分において変質した花崗岩の換算係数を使用

を超え、花崗岩としては異常に高い間隙率を示す箇所が残っている。このような箇所は、ここで行った花崗岩の係数を用いた換算が成立しない部分と解釈でき、踏査で判明した粘土を伴う破碎帯の存在とよく対応すると考えられる。以上の結果から、当地域では比抵抗値200～1000 Ω mまではマサ状風化部または亀裂開口風化部の花崗岩であり、2000 Ω m以上ならば新鮮な花崗岩、150 Ω m未満は断層粘土が分布する地層であると推定された。

3.2 調査結果の総合解釈と開発候補地点

以上に示した調査結果より、対象地域の岩盤地下水状況は次のように推定される。断層・節理系については、地質図幅等では断層・節理系の記載は僅かであったが、空中写真判読からNE、NW、NS系の3系統の比較的

連続性の良いリニアメント系が発達していることがわかった。そして、これらのリニアメント系は地質概略踏査による露頭観察や小断層解析から、地下の断層・節理系を反映したものであると推定された。また、一部のリニアメントは粘土を伴った幅の広い破碎ゾーンとして露出し、物理探査結果からも低比抵抗ゾーンと対応する箇所があると認められた。マサ状風化部とその下位の亀裂開口風化部も低比抵抗ゾーンとほぼ対応し、岩盤高透水性部に相当すると推定された。風化層や高透水性被覆層の分布は、地形解析・空中写真判読で概ね把握され、地質概略踏査にてその分布状況が把握できた。地下水位分布・流向については、NS系のリニアメントと地表湧水の関係や地形・水系状況から概略の地下水流動機構が把握され、地下水流の集中域が推定できた。また、目視ではあるが、小流域毎の比流量を概算した結果、分水嶺付近は比流量が小さい涵養域、NS系のリニアメントの密集地で比流量の多い流出域があることが推察ができた。

これらの結果より、本地域では低比抵抗ゾーンとNS系リニアメント系の分布域が主な水みちである可能性が高いと考えられ、「垂直探査測点5周辺の低比抵抗ゾーン」、あるいは「測点5近傍を縦断するNS系リニアメントに対応した低比抵抗ゾーン」を岩盤地下水開発の候補地点に選定した。これらの地点は、推定地下水流の集中地域にも相当し、岩盤地下水の確保が有望な地域と考えられ、また同地点周辺および後背地は風化層や土石流堆積物が厚く、これらの水みちは、開発候補地点のリニアメント系や低比抵抗ゾーンに対する地山の保水・涵養機能を期待できるものと考えられた。

4. ま と め

本論では、図-1の②と③に対応する岩盤地下水資源開発の計画・初期段階のサイト選定に資する体系的な調査法を検討した。また、検討した調査法を実際の岩盤地帯に適用したシミュレーションを行った。この適用結果の信頼性や妥当性の判定は図-1の⑥以降で判断することになるが、得られた知見および本システムの有効性をまとめると、次の通りとなる。

- ・計画・初期段階は、水みちの抽出が最も重要な課題であり、空中写真判読は広域の割れ目系発達状況把握に有効な調査手法といえる。
- ・地表湧水点調査は、量的に十分なものではなかったが、地下水位分布の推定には有効と判断された。また、河川比流量調査は主要な水みちの検出に役立つ可能性があり、その有効性に関して今後の検証が必要である。
- ・比抵抗探査はボーリング代替として重要であり、比抵抗値の間隙率へ換算することで、水文地質的な地質区分の妥当性を検討することも可能と考えられる。

謝辞 本稿をまとめるにあたり、九州大学理学部島田允堯教授には対象地域の地質一般に関してご指導を頂いた。また、元九州大学大学院（現東邦治水（株））の坂本千花氏には、垂直電気探査の実施および探査データの逆解析において多大な協力を頂いた。さらに、応用地質（株）坂下晋氏には比抵抗値と岩盤物性の関係について議論して頂いた。ここに深謝の意を表します。

5. 参 考 文 献

- 1) 竹中 久・西 琢郎・百田博宣・竹林亜夫: 岩盤地下水資源の取水システムに関する基礎的検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 4, pp. 95-104, 1999. 2.
- 2) 長岡正利・安野雅満・中島 誠: 花崗岩地域における地下水開発可能性評価手法の検討, 日本応用地質学会平成1年度研究発表会講演論文集, pp. 41-44, 1989.
- 3) 安野雅満・長岡正利: 山地・丘陵地域における地形学的観点からの地下水開発調査手法の検討ー吉備丘陵花崗岩地域を例としてー, APA, (45-9), pp. 51-68, 1989.
- 4) 越谷 信・長江亮二・大上和良・森田安彦: 南部阿武隈山地花崗岩体の断裂系と地下水, 応用地質, 32(4),

- pp. 23-39, 1991.
- 5) 長江亮二・早坂 巧: 南部阿武隈山地花崗岩体の断裂系と地下水 (その2), 応用地質, 34 (2), pp. 27-36, 1993.
 - 6) 大島洋志: トンネル掘削に伴う地下水問題, 応用地質, 38 (5), pp. 23-39, 1997.
 - 7) 石井政次・佐久間文彦: トンネル湧水の地形・地質的分類, 鉄道技術研究報告, (1041), 1977.
 - 8) 岩の調査と試験編集委員会編: 岩の調査と試験, 土質工学会, pp. 102-108, 1989.
 - 9) 牛島恵輔: 電気探査法による地下水モニタリング, 物理探査, 50 (6), pp. 632-642, 1997.
 - 10) Uchida, T. and Murakami, Y.: Development of a Fortran Code for the Two-Dimensional Schlumberger Inversion, Geological Survey of Japan. Open-File Report, (150), pp. 1-12, 1990.
 - 11) 内田利弘: ABIC最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗2次元インバージョン, 物理探査, 46 (2), pp. 423-435, 1993.
 - 12) ARCHIE, G. E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. AIME, 146, pp. 13-52, 1942.
 - 13) 西 琢郎・百田博宣・竹中 久・坂下 晋・吉田寛史: 岩盤地下水開発における比抵抗値と地下水賦存量との関係に関する基礎的検討, 日本応用地質学会平成10年度研究発表会講演論文集, pp. 41-44, 1998.
 - 14) Katsube, T. J. and Hume, J. P.: Electrical resistivities of rocks from Chalk River, Proc. Ws. Geophys. Geosci. Res. at Chalk River, pp. 105-114, 1983.
 - 15) 鈴木浩一: 物理探査法による地盤工学的物性値の評価, 電力土木, (287), pp. 72-76, 2000.
 - 16) 牛島恵輔・水永秀樹・加藤昭彦: パソコンによる電気探査データの解析, 物理探査, 40 (6), pp. 426-435, 1987.
 - 17) 地下水ハンドブック編集委員会: 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp. 75-76, 1979.