

岩盤空洞を用いた岩盤地下水資源の開発方法

The development of the groundwater resources in bedrock using rock caverns

百田 博宣¹・西 琢郎²・鈴木 誠¹・本多 眞³

Hironobu MOMOTA・Takuro NISHI・Makoto SUZUKI・Makoto HONDA

Water shortages frequently occur in the regions that are poor at conventional water resources such as river water and shallow groundwater. As for geographical and geological features, these regions are usually located in bedrock zone where a class-A river doesn't exist. Typical examples of such regions are coastal regions of Seto Inland Sea, northern regions of Kyushu, and Okinawa regions. Considering the above mentioned geographical features, many islands and peninsulas are listed as examples. The water resource reserve that can sustain economic activities and social life is an urgent problem in these regions.

We took interest in the unused groundwater resources in bedrock which might be able to be developed in the above mentioned regions. The possibility of the use of groundwater resource in bedrock has been shown in our past studies through the analysis of tunnel water discharge in our country. Furthermore, an outline of "an intake system in bedrock" and the required technology to extract the groundwater from bedrock has been previously published.

In order to propose "a simplified" intake system in bedrock as well as "the intake system using underground rock caverns", the principle of water intake, the performance and the structural form of both systems are shown qualitatively and quantitatively in this paper. It also reports on research and development results concerning the technology of investigation and design analysis that may lead to success of these systems. The investigation items including these technologies are shown and the application to an actual site is discussed about several typical technologies.

In addition, a concept and a structural form of "an intake and reservoir system" which can store groundwater and river water in underground rock caverns are also discussed as other development methods. Thus a new use of deep underground space is proposed in this study.

Key Words : groundwater, bedrock, rock cavern, intake system, reservoir system

1. はじめに

渇水頻発地域は一級河川等のない岩盤地帯に位置し、従来型の河川水資源や浅層地下水資源に恵まれない地形地質条件の場合が多い¹⁾。代表例が、瀬戸内海沿岸地域、北部九州地域および沖縄地域であり、地形的な要因も含めると、数多くの島嶼や半島もあげられる。このような地域は、前述の従来型の水資源に恵まれないため、平常時においても経済活動や社会生活の維持・発展を可能とする水資源確保が急務と考えられる。このため、著者らは上記のような地形地質的な特徴をもつ渇水頻発地域においても開発の可能性がある未利用な岩盤地下水資源に着目し、わが国におけるトンネル湧水事例の分析を通じて岩盤地下水資源の活用の可能性を示してきた。また、岩盤地下水資源の開発方法として、岩盤地下水取水システム（以下、岩盤取水システムと称す）と同システムの実現を可能とする必要技術の構成について、その概要を示してきた¹⁾。

キーワード：地下水、岩盤、岩盤空洞、取水システム、貯水システム

¹ フェロー会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 グループ長

² 正会員 理博 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員

³ 正会員 博士(工学) 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員

本研究では、前記の研究¹⁾を更に発展させた研究開発成果を報告するもので、岩盤地下空洞を用いた「岩盤取水システム」に加えて「超長尺孔型新岩盤取水システム」を具体的に提案することを目的に、両システムの取水原理、構造形式および取水性能を定性的かつ定量的に示すものである。また、これらのシステムの実現を可能にする調査技術や設計解析技術の技術構成を示し、2,3の代表的な技術については技術の具体的な研究開発結果を報告すると共に、実地への適用結果を議論する。さらに、岩盤地下空洞を用いた他の水資源開発方法として、岩盤地下水や河川水を岩盤空洞に貯水して水資源として活用する「岩盤貯水システム」の構想概要、構造形式等を示し、岩盤深部地下空間の新たな活用方法についても提案するものである。

2. 岩盤地下水資源の取水システム

(1) 取水システムの構造形式・湧水原理と適用範囲

岩盤地下水資源の取水方法としては、地表から深井戸を設置する案もあるが、鉛直井戸では傾斜角の大きい割れ目系を捉えることが難しく、土質地盤が厚い場合も経済的に不利である。また、開発水量が大きい場合は、多数の井戸を設置する必要があるが、井戸相互の離間距離、設置地点の制約および全井戸への水中ポンプの設置など、必要数の井戸設置地点の有無や経済性および維持管理上の問題もある。そこで、著者らは図-1の岩盤地下水取水システムを既に提案している¹⁾。本システムは立坑（または斜坑）と取水対象となる岩盤中に集水トンネルと櫛状の集水孔および吸水槽（立坑最深部）に設置した揚水設備から構成されている。図の立坑内の水位（以下、立坑水位と称す）と周辺岩盤中の地下水位との水頭差によって、主に集水孔に岩盤地下水が湧出する湧水機構を有しているため、揚水設備で立坑水位を制御することにより、湧水量を調節できる。また、集水トンネルは立坑より登り勾配で設置しているため、湧出した岩盤地下水は吸水槽に自然流下し、揚水装置で地上に揚水できる。なお、図では、集水孔は水平集水孔のみを示したが、割目系の走向傾斜に応じて効果的な方向に設置することが可能である。

上記の岩盤取水システムは、地下水開発対象範囲が広域で集水トンネルが概ね700～800mより長い場合は経済性のある開発方式であるが、施設の規模に拘わらず立坑の建設費はほとんど変わらないため、集水トンネル長さがそれ以下の場合は岩盤地下水の開発単価が高くなる。このため、開発対象範囲が比較的に狭い場合や極めて高透水性岩盤（石灰岩や火山岩など）での立地の場合は、小規模な取水施設での開発に対する経済的で合理的な開発方法として、図-2に超長尺孔型新岩盤取水システムの概念図を示す。

図-2のように、図-1の立坑は同様に設置するが、集水トンネルと櫛状の集水孔を複数の超長尺孔で代替したもので、水平超長尺集水孔と斜下方集水孔によって地下水開発を行うものである。また、取水原理は岩盤取水システムと同様に立坑水位と周辺岩盤中の地下水位との水頭差によって、超長尺集水孔等に岩盤地下水が湧出する湧水機構であり、立坑水位の制御による湧水量調節が可能なことも同様である。

次に、岩盤地下水取水システムおよび超長尺孔型新岩盤取水システムの採用に適した地形地質と両システムの適用範囲の比較を表-1,2に示す。なお表-1では、渇水頻発地域におけるダムや淡水化プラントによる水資源開発単価とコスト比較から、両システムの検討対象となる地質は 10^{-5}cm/s 以上の透水性を有する岩盤と設定している。また、施設規模等を判断指標には分水嶺で囲まれた地表水の水収支域の広さを用いている。

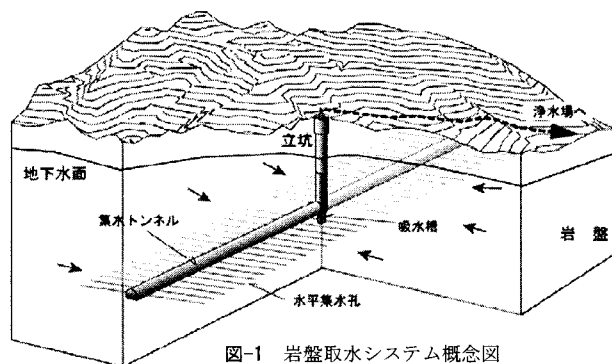


図-1 岩盤取水システム概念図

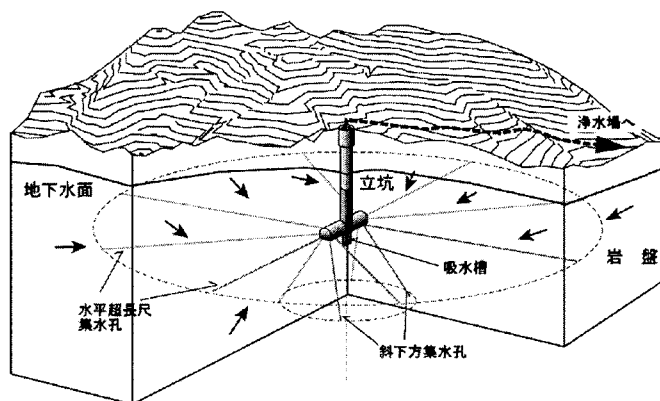


図-2 超長尺孔型新岩盤取水システム概念図

表-1 岩盤取水システムおよび超長尺孔型新岩盤取水システムの採用に適した地形地質的条件

項目	適用条件
開発に適した水需給状況	・河川水や浅層地下水資源に恵まれない地域（瀬戸内沿岸、北部九州、沖縄県、島嶼、半島など） ・異常気象等による渇水への対応水源の必要な地域（渇水頻発地域など）
対象となる地質	・全体として 10^{-5} cm/s 以上の透水性を有する岩盤（火山岩、深成岩および石灰岩など） 火山岩 ：グリーンタフ地域および第四紀の火山岩分布域など、 深成岩 ：西南日本領家帯花崗岩類など、 石灰岩 ：秋吉・平尾台石灰岩、琉球石灰岩など
対象となる地形地質的要因	・連続性のよい断層・節理・破碎帯の密集地域 ・概ね $400 \sim 500\text{m} \times 200\text{m}$ 以上の集水孔設置範囲を計画しうる比較的広域な水収支域をもつ地域

表-2 岩盤取水システムおよび超長尺孔型新岩盤取水システムの適用範囲

項目	岩盤取水システム	超長尺孔型新岩盤取水システム
地形地質的条件	・700～800m 以上の集水トンネルを設置できる水収支域が分布 ・割れ目系の方向性が明確なため、集水孔の設置方向がほぼ一定方向	・集水トンネル長が 700～800m 以下になる比較的小さい水収支域の条件。又は極めて高透水性岩盤（石灰岩など）のため、小規模施設で開発水量を賄える条件 ・比較的均質等方性の透水性を有する岩盤
開発規模	・数千トン～数万トン/日 規模	・数千トン/日。但し、石灰岩等の場合は更に大
初期コスト	・十億～百億円程度	・数億円～十億円未満

(2) 取水システムの取水性能

岩盤取水システムと超長尺孔型新岩盤取水システムの基本的な取水性能を3次元地下水解析にて検討した。解析モデルを図-3, 4 に示しているが、地下水面は低下しない最大湧水量を求める条件で、岩盤の透水係数は代表値として 3×10^{-5} cm/s とした。図-5 に、深度 H 、集水孔長さ L 、集水孔間隔 A をパラメータとした岩盤取水システムの湧水量を示しているが²⁾、 L の増大や A の縮小で湧水量の増大が認められ、集水孔の設置による取水性能の向上を把握できる。また図-6 に、 H 、 L 、水平集水孔本数 N をパラメータとした超長尺孔型新岩盤取水システムの全湧水量を示しており、例えば $H=60\text{m}$ 、 $N=8$ 、 $L=100\text{m}$ の場合には集水孔全長は 800m で全湧水量は $1450\text{m}^3/\text{day}$ である。一方、図-5 より $H=60\text{m}$ 、 $A=20\text{m}$ 、 $L=100\text{m}$ 、集水トンネル長が 100m の場合には集水孔全長は 1,000m で全湧水量は $820\text{m}^3/\text{day}$ であり、超長尺孔型新システムの方が取水性能の高いことが把握できる。

以上により、集水孔の設置による取水性能の向上効果が認められると共に、両システムの基本的な取水性能を示せたと考える。なお、取水によって周辺地下水位の低下が生じるため取水性能は図-5, 6 より低下するが、低下割合は降水条件、岩盤の透水性、水収支域の広さなどのサイト条件に左右される。このため、実際の設計では後述する広域地下水解析等でサイト条件と地下水位と湧水量の相互作用を考慮して検討するが、設計の第一段階では図-5, 6 の基本的な取水性能を参考に施設の配置構造や深度等を設定することになる。

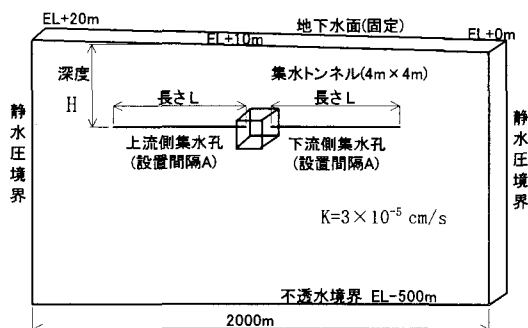


図-3 岩盤取水システムの解析モデル(集水孔1ピッチ幅)

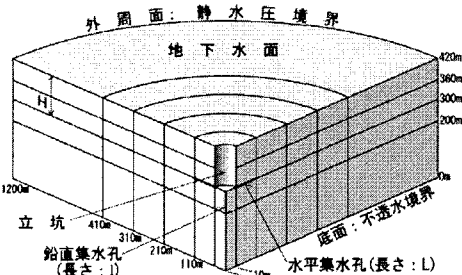


図-4 超長尺孔型新岩盤取水システムの解析モデル(1/4領域)

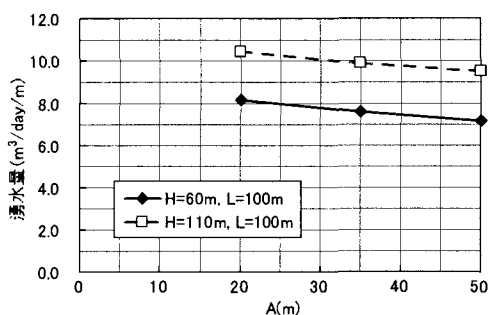
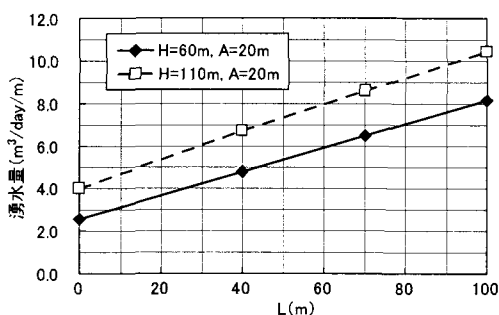


図-5 岩盤取水システムの取水性能の算出結果 ($K=3 \times 10^{-5}$ cm/s)

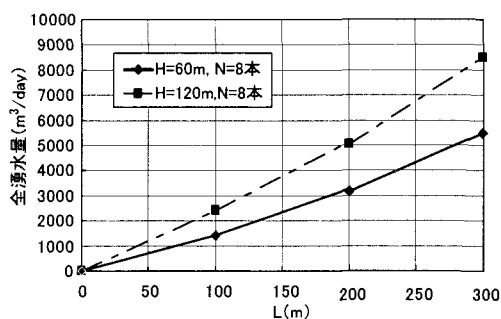
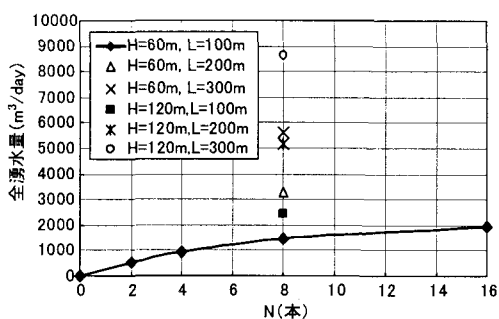


図-6 超長尺孔型新岩盤取水システムの取水性能の算出結果 ($K=3 \times 10^{-5}$ cm/s)

3. 調査・設計解析技術の研究開発

(1) 技術課題と必要な技術構成

岩盤地下水資源の取水システムとして、「岩盤取水システム」と「超長尺孔型新岩盤取水システム」の技術概要を示してきたが、これらの実現を可能にするためには、計画→調査→設計・解析→施工→維持管理(モニタリング技術)まで多くの技術が必要になる。これら必要技術と技術課題および研究開発状況を表-3に纏める。また表中の開発技術のうち、特に重点的に実施した「統合型地形解析システム」と「地表水、空洞湧水の評価可能な広域地下水解析(以下、「広域地下水解析」と称す)」について、技術の概要と適用例を示す。

(2) 統合型地形解析システム

岩盤地下水資源の調査においては、広域(水収支域)の地形地質・割れ目系状況、地下水状況、水収支状況に

基づいて地下水開発の可能性の有無、取水候補地の絞り込みを行う「計画、初期段階調査」が極めて重要である。このため、著者らは図-7 に示す調査フロー、調査データと評価項目の関係等を構築した調査システムを既に提案しているが³⁾、地形解析・空中写真判読・地下水位分布の評価等では評価の基礎となる各種図面（例えば水系図）の作成が比較的煩雑であり、迅速な評価が困難であった。そこで、パソコンを用い DEM データ（数値標高データ）から、地形傾斜量解析、水系解析、リニアメントの解析および溪流浸出点・地表湧水点・河川標高を考慮した地下水位分布の解析等が行える統合型地形解析システムを開発しており、図-7 の調査フロー実施の簡便化と高度化を図っている⁴⁾。例えばリニアメント解析では、DEM から作成した地形陰影図を空間フィルタリングによってエッジ強調することにより地形急変点を抽出する手法を用いている。この処理を光源位置を変えて複数実施した後これらを重ね合わせることで光源位置に依存しない結果を得てリニアメントとしてより確度の高いものを抽出する。また地下水位分布の推定では、地形学分野で用いられてい

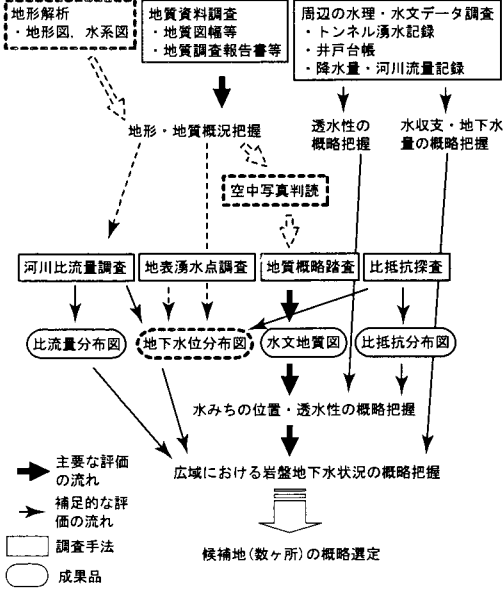


図-7 計画・初期段階での調査フロー（文献3を修正。
破線は統合型地形解析システムに含まれる機能及び同システムを用いる評価の流れ）

表-3 岩盤取水システムと超長尺孔型新岩盤取水システムの実現に必要な技術

項目	技術課題または要求仕様	研究開発状況
計画技術	水道事業者の要望（取水量、利用形態等）、現地の地形地質状況に応じた構造形式の計画	実サイトで適用済み
調査技術		
・計画、初期段階	広域（水収支域）の地形地質・割れ目系状況、地下水状況、水収支状況に基づく候補地抽出	・調査手法の構築 ・統合型地形解析システムの開発
・基本設計段階	透水性把握、帯水層能力の把握	既存技術で構成・実サイトで適用
設計解析技術	実降水を考慮のうえ、広域の地表水、地下水を解析 ・湧水量と地下水位分布を高精度に算出 ・地表水、地表浸出点への影響を高精度に算出	・GAを用いたタンクモデルの開発 ・地表水、空洞湧水を評価可能な広域地下水解析を開発
施工技術	大湧水条件化での確実・安全で低コストな施工法	実サイトで検討済み
モニタリング技術	地表水地下水環境、取水システム運転状況のモニタリング	実サイトで検討済み

る接谷面（谷底に接する仮想面で、その地域の谷底より上の尾根部を削り取った地形面）を仮想的な地下水面とみなしうるとの研究⁵⁾を進展させている。すなわち、統合型地形解析システムでは、まずDEMで求めた接谷面を計算初期に地下水位分布の平均的トレンド（傾向）と仮定し、これに溪流浸出点や湧水点など地下水位の実データを加えることによりトレンドを補正するという地球統計学的手法（外部トレンド型クリギング）を用いている。

本システムの適用例として、国土数値情報 50m メッシュデータを用いた解析例を示す⁴⁾。解析対象としたものは、花崗岩を基盤岩とする山地（約 10×6.9km）である。花崗岩のような硬質岩盤を基盤とする山地の地下水流動は、基本的には割れ目系の分布と全体的な地下水位分布に支配されていると考えられるので、ここでは、割れ目系分布を示唆するリニアメントの抽出図、分水界や河川発達状況を示す水系図、および地下水位コンター図等を作成し地下水流動方向を推定した。主な結果として、リニアメント抽出結果と水系図を図-8 に示し、また図-9 には地下水位コンターを示す。地下水位は全水頭であるから、地下水位平面分布とリニ

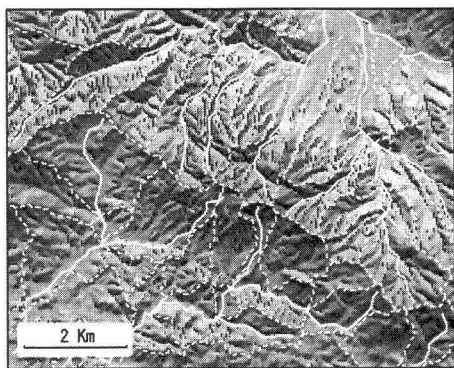


図-8 水系図およびエッジ強調によるリニアメント抽出結果
(白破線：分水界，白線：河川，黒線：強調されたエッジ)

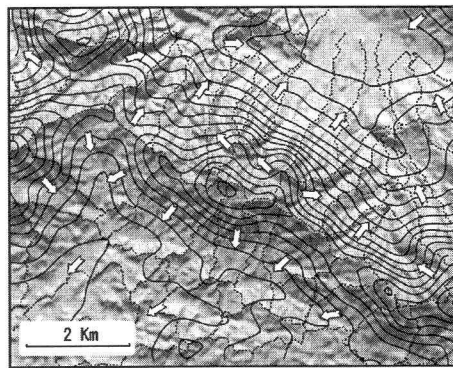


図-9 地下水位コンターおよび推定地下水流動方向
(破線：分水界，実線：地下水位コンター，
白矢線：推定地下水流動方向)

アメントの分布等から図-9の矢線で示す地下水流動方向を推定することも可能である。

(3) 広域地下水解析

図-5, 6 に例示した岩盤取水システム，超長尺孔型岩盤取水システムの取水性能は取水に伴う地下水位変動の影響を考慮していないが，実際には取水量（湧水量）と地下水位は相互に関連するばかりでなく，取水に伴う地下水位変動は河川水や沢水等の地表水にも影響を与える可能性がある^{6), 7)}。このため，地下水位と湧水量の相互作用を考慮したモデルで，降水を入力条件として地下水位分布と湧水量および地表流出量を同時に解析することが必要になる。しかし，このような解析の対象領域は，候補地を含む広域（水収支域）の地表から深部までの3次元地形地質構造モデルであり，利用の可能性が高いと想定される3次元飽和・不飽和地下水 FEM 解析の適用には幾つかの課題がある。主な課題は，1) 広域が対象のため，地表面形状の正確な表現と，深さ方向の要素分割を極めて小さくし地表境界面処理の精度の保持を図ると，計算容量が膨大になること，2) 不飽和部の地表面に降水が作用すると，不飽和物性の強い非線形性に起因して解の収束性が大幅に低下すること，の2点であり，3次元飽和・不飽和解析の3次元地形地質構造モデルへの適用は実用的ではないと考えられる。このため，著者らは比較的小さい容量で3次元地形地質構造モデルを構築でき，不飽和部の降水に対しても解の安定性が高い「準3次元飽和・不飽和地下水 FEM 解析」を機能拡張した「広域地下水解析」を開発している^{8), 9)}。機能拡張内容は，地下水位との相互作用を考慮した空洞湧水量の推定法と，飽和部・不飽和部の地表面境界処理法を導入した地表流出量の推定法である。また，河川流量の推定に影響する降雨浸透能と地表流出量の河川到達時間を評価するため，直列4段タンクモデルの2段タンクへの涵養量を広域地下水解析の涵養条件としたハイブリッド型のタンクモデル・広域地下水解析も開発している¹⁰⁾。

このような広域地下水解析によって，広域の3次元地形地質構造モデルに対しても，時系列の降水条件下で，現況の地表流出・地下水位分布，取水時の地表流出・地下水位分布・湧水量が算出でき，開発水量の推定と地表水・地下水環境への影響が検討できる。ここでは，広域地下水解析の概要と適用例を以下に示す。

タンクモデルは図-10 に示す直列4段タンクモデルであり，誤差評価関数は最小二乗誤差基準と対数をとった最小二乗誤差基準の2通りである。未知量は $a_1 \sim a_5$ ， $b_1 \sim b_3$ ， $c_1 \sim c_4$ およびタンク水深 $h_1 \sim h_4$ の初期水深の16個であり，遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた同定手法を用いている¹¹⁾。

次に，時間を t ，水平面上に x ， y 軸，鉛直上方に z 軸を設定し，準一様流仮定を用いて，飽和・不飽和の3次元地下水流の基礎方程式を水平不透水性基盤 ($z=0$) から地表面 ($z=b$) まで積分すると，広域地下水解析で用いる飽和・不飽和の準3次元地下水流の基礎方程式は次式で与えられる¹²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + V_b - V_0 + \int_0^b q \, dz = (S_A + S_B) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

ここに，地盤厚さ： b ，地下水位： $h(x, y, t)$ ， T ：不飽和域も加味した透水量係数， S_A ：比水分容量の地下水面から地表面までの積分値， S_B ：貯留係数， V_b ：地表における降雨浸透量， V_0 ：不透水性基盤 ($z=0$)

における鉛直流速で0, q : 単位体積当たりの湧水率(湧き出し水量)である。

広域地下水解析の場合、準一様流仮定を用いているため深さ方向(z 軸方向)の水頭値は一定で、水頭値は地下水位と同義であるため、空洞等の水頭に関する境界条件を入力すると、地下水位が算出できない。このため、空洞湧水量を式(1)の q で考慮する入力条件として地下水位を算出することが一般的であるため、広域地下水解析では地下水位 h と空洞湧水量の相互作用は考慮できない。そこで、図-11 に示すように、空洞周辺の平均地下水位 H と大気圧条件下の空洞湧水量 Q の $H \sim Q$ 関係を別途3次元解析等で求めて広域地下水解析の入力条件とし、 $H \sim Q$ の関係を満足するように地下水位 h を求めれば、相互作用を考慮して地下水位と空洞湧水量が求まることになる。なお、大気圧条件下でない空洞の場合は、空洞と地下水位の水頭差変化によって湧水量が Q から水頭差に比例して変化するだけであり、 $H \sim Q$ の関係から地下水位と空洞湧水量を求めることができる⁹⁾。

次に、地表面境界処理法について説明するが、まず、降水量 $p(t)$ は降雨浸透能 P_{out} を超えた直接流出成分 Pr と P_{out} 以下の Ps の和と仮定する。この関係を図-12 に示しているが、 Pr はタンクモデルの一段タンク流出量として算出し、 Ps を広域地下水解析に地表面から涵養量として入力する。広域地下水解析の結果として、各節点で h と節点流量 Q' が求まるが、図-13 の地表面条件により、地表流出量と地下浸透量を分離できる。すなわち、図-13 のように地表面を不飽和域と飽和域にわけると、前者では地下水位は $h < b$ で節点流量(地下浸透量)は $Q' = Ps - Q$ 、後者では $h = b$ でかつ $Q' < Ps - Q$ が満足すべき地表面条件であり、地表流出成分は飽和地表面では Pr 、不飽和地表面では $Pr + (Ps - Q - Q')$ で算定できる⁹⁾。したがって、時刻毎に、地下水位 h の収束条件、 $H \sim Q$ の関係を満足する収束条件に加えて、地表面条件を満足する反復計算を行えば、地表流出量も地下水位や湧水量と同時に算出できる。ただし、降雨浸透能の条件設定が難しく、地表水の河川到達時間の考慮に課題が残るが、直列4段タンクモデルの2段タンクへの涵養量を広域地下水解析の地表面涵養条件としたハイブリッド型の解析を行えば、対応可能になる。

ここでは、ハイブリッド型の解析の適用例として、ダム貯水池周辺の花崗岩岩盤での解析結果¹⁰⁾を示す。対象としたMダムは、堤高45m、総貯水量260万 m^3 の上水用の重力式粗石コンクリートダムであり、観測記録として、図-14 に示す1992年1月から4年1ヵ月までの日降雨量と日流出量の観測記録を対象とする。観測記録によれば、一雨降水と流出量のピークの時間的遅れは1~2日であり、基底流量は概ね20000 m^3/day である。また、図-15 に水収支域の解析モデルを示しているが、流域面積は11.4 Km^2 であり、山容は南から北に向かって地表標高が低くなり(EL+1000m~200m)、平均標高はEL+600m程度である。

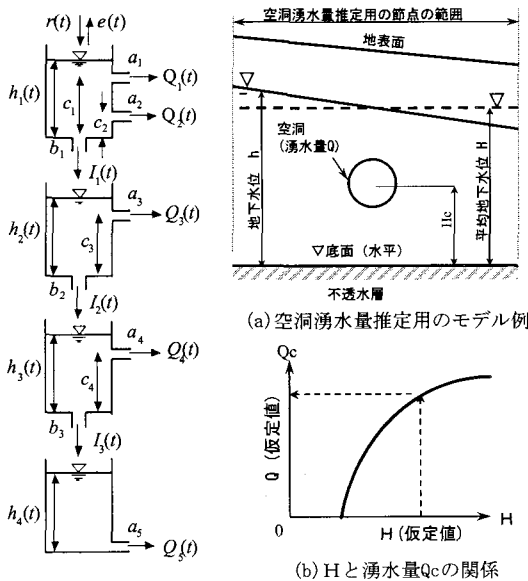


図-10 タンクモデル

図-11 $H \sim Q$ 関係の設定方法

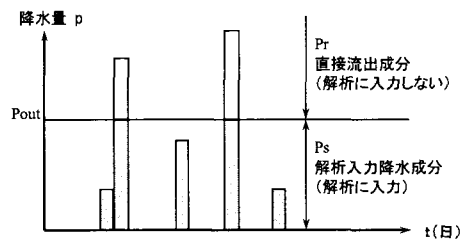


図-12 降水量 $p(t)$ と降雨浸透能 P_{out} の定義

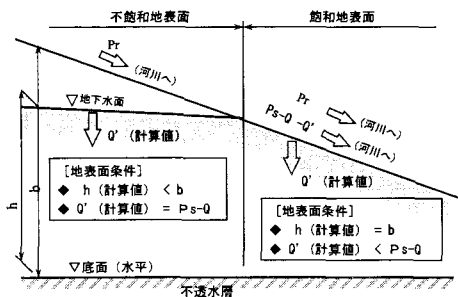


図-13 地表面条件と地表流出成分と地下浸透成分

タンクモデルの解析結果として、広域地下水解析の涵養条件である 2 段タンクの涵養量と広域地下水解析結果の地表流出量に加算する 1 段タンク流出量を図-16 に示す。降雨量が多い日には 1 段タンクの流出量は 2 段タンク涵養量のほぼ 2/3 となっている。また、広域地下水解析では、空洞を設置しない 4 年 1 ヶ月の現況解析を CASE-1、集水孔のない空洞のみを設置した CASE-2 の解析を行っている。空洞は EL+353m に半径 3m、空洞長さ 730m であり、図-15 に $H \sim Q$ の関係を考慮して湧水量を算出する節点位置(空洞に相当)を「○」、平均水位 H 算定用の節点を「●」として示している。また、M ダム貯水池の水位を指定境界以外の解析領域周囲は不透水境界である。また、流出量、地下水位、湧水量の経時変化を図-17 に示すが、流出量については 1993 年のみを拡大して表示しても空洞設置の影響が見られない。また、湧水量の経時変化は平均地下水位と同様となることから、図-11 の $H \sim Q$ の関係を考慮することにより、広域地下水解析で地下水位変動と湧水量変動の相互作用を合理的に評価できることが分かる。また、比較的多雨時期(1993. 8. 8)での地下水位平面分布と空洞設置による地下水低下量を図-18 に示しているが、地下水位低下が 1m の影響範囲などがわかり、地表水・地下水環境への影響を評価することが可能である。

4. 大規模岩盤空洞を用いた他の水資源開発方式

これまで、岩盤取水システムと超長尺孔型新岩盤取水システムの構造形式・取水原理、取水性能および必要技術と研究開発状況を説明してきた。これら 2 つのシステムについては、渇水頻発地におけるダムや海水淡水化プラント等による水資源開発単価とのコスト比較を行っており、比較的高透水性岩盤での立地であれば、小断面空洞を用いた経済的・合理的な取水システムと考えられる。これに対し、比較的低透水性の岩盤を対象にした場合には、経済的な取水システムの適用は難しいが、大規模岩盤空洞を用いた他の水資源開発方式も考えられ、以下に示す。

図-19 に岩盤取水・貯水システムの概念図を示しているが、取水した岩盤地下水を大規模空洞に貯水して渇水期等の必要な時期に払い出し運用するもので、河川水等の貯水も合わせて行うことも想定される。貯

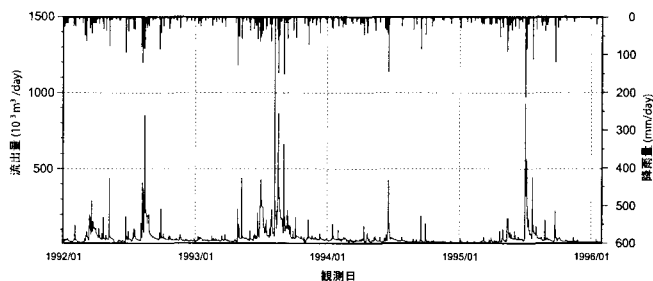
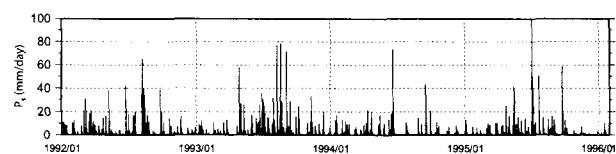
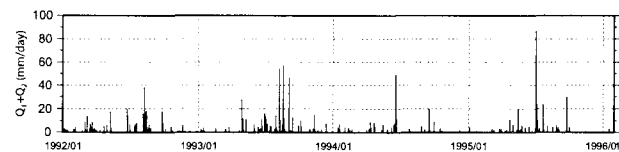


図-14 日流出量と日降雨量観測値



(a) 2 段タンクの涵養量



(b) 1 段タンク流出量

図-16 タンクモデルから広域地下水解析への入力条件

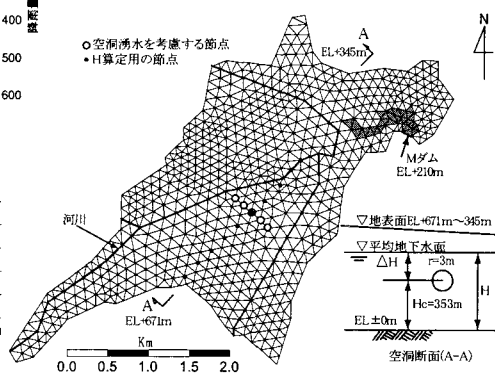


図-15 水収支域の解析モデル

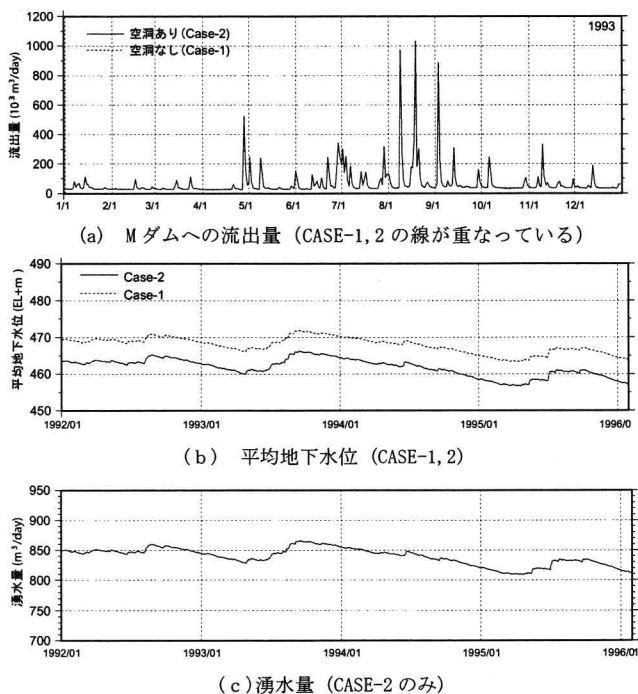


図-17 CASE-1, 2 の諸量の経時変化の算出結果



図-18 多雨時期(1993.8.8)における地下水位分布の算出結果

水対象が岩盤地下水のみの場合は、貯水部を有することで立地は比較的低透水性岩盤まで広がるが、水の開発単価が高くなるため、大規模空洞を用いる場合は、対象水資源は河水とした貯水システムとすることが合理的と考えられる。また、近年のダム貯水池の適地の減少、環境保護の逆風の状況下におけるダムの新規立地地点確保の困難性も合わせて推測すると、岩盤貯水システムをダム代替施設として河川の上流部・中流部の岩盤地下空間に設置することが想定される。環境保全性に優れていると共に、NATMで施工可能な石油岩盤備蓄空洞規模の大断面(300m²以上)であれば、建設コストも比較的に低くなり、実現性も高くなる。

ここでは、洪水時の河川水の貯留を対象としたダム代替型の岩盤貯水システムの概念図を図-20に示す。図のように地形の高低差を考慮すれば、自然流下流入・自然流下送水式の配置構造が可能で(貯水空洞も下流側に下り勾配)、懸濁物の貯水空洞内での堆積を極力防止するため、洪水時河川水への対応も考慮している。対応方法は各種考えられるが、懸濁物の多い洪水初期の取水の回避、取水深度を選択可能な取水ゲートや取水用防塵設備を備えた取水口構造など想定している。また、流入水路中に河川水前処理装置の設置、貯水空洞内に礫間接触酸化法の適用および洗浄管の設置など、各種の工夫が考えられる。なお、図には貯水空洞内への岩盤地下水の湧出も示されているが、湧水量の量を期待しているのではない。図のように、地下水面以下に設置し、湧水が発生する条件を保持させれば貯留水は空洞外に漏洩することがないため、コンクリートライニング等が不要な経済的な貯水空洞が可能なことを意味している。この貯蔵方式は地下水流の効果を利用したものであり、石油岩盤備蓄等の水封式貯蔵に準じた広義の「水封式貯蔵」といえる。

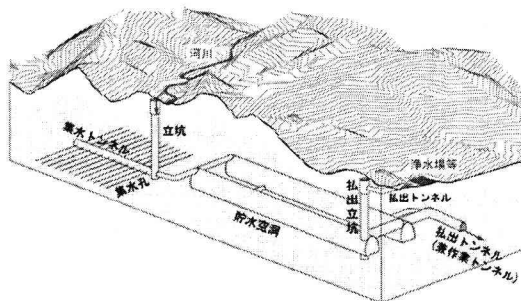


図-19 岩盤取水・貯水システムの概念構造

5. おわりに

本報告では、岩盤空洞を用いた岩盤地下水資源の開発方法として、「岩盤取水システム」と「超長尺孔型新岩盤取水システム」の構造形式・取水原理および基本的な取水性能を説明した。また、両システムの実現を可能にする必要技術の構成を示し、その中で重点的に研究開発を行った「統合型地形解析システム」と「広域地下水解析」に対して技術概要と適用例を示した。さらに、大規模岩盤空洞を用いたダム代替型の岩盤貯水システムの構造形式を紹介し、今後の地下空間利用の可能性の一端を示したつもりである。

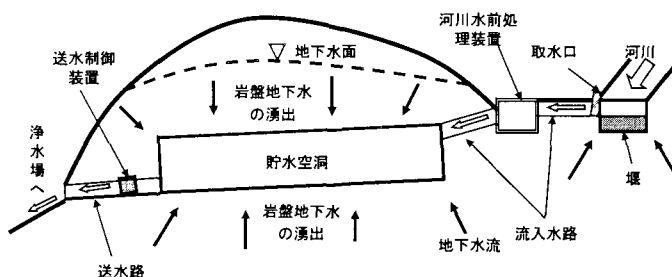


図-20 自然流下流入・自然流下送水型の岩盤貯水システム（断面図）

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，第4巻，pp.95-104, 1999.
- 2) 山田俊子・長谷川 誠・百田博宣・鈴木 誠・神野健二：岩盤地下水取水システムの湧水特性と湧水量近似式の基礎検討，土木学会第53回年次講演会概要集，第2巻，pp.426-427, 1998.
- 3) 西 琢郎・百田博宣・吉田堯史・牛島恵輔：岩盤地下水の大規模開発における計画・初期段階での調査法の検討，地下空間シンポジウム論文報告集，第6巻，pp.79-88, 2001.
- 4) 西 琢郎・本多 眞：水文地質構造評価のための地形解析システムの開発，清水建設研究報告，Vol.81，pp.7-12, 2005.
- 5) 安岡雅満・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 ―吉備丘陵花崗岩地域を例として―，調査測量技術，No.45-9，pp.51-68, 1989.
- 6) 村上郁雄・大島洋志・塚本正雄：丹那トンネルの湧水・漏水はどうなっているか，トンネルと地下，Vol.8，No.10，pp.685-695, 1977.
- 7) 大島洋志：トンネル掘削に伴う地下水問題，応用地質，Vol.38，No.5，pp.312-323, 1977.
- 8) 鈴木 誠・百田博宣・神野健二・長谷川 誠：準三次元解析による地表流出量と空洞湧水量の評価法，土木学会論文集，No.677/II-55，pp.21-31, 2001.
- 9) 鈴木 誠・百田博宣・神野健二：広域地下水流動解析を用いた岩盤地下水取水システムの取水量の推定，地下空間シンポジウム論文報告集，第6巻，pp.89-96, 2001.
- 10) 鈴木 誠・百田博宣：大規模地下水開発における地下水・地表水の環境評価手法，清水建設研究報告，Vol.79，pp.43-50, 2004.
- 11) 鈴木誠・百田博宣・神野健二・河村明：GAを用いたタンクモデル同定に関する統計的検討，水工学論文集，No.42，pp.115-120, 1998.
- 12) 百田博宣・佐藤邦明：割れ目系地山のトンネル・空洞を対象とした三次元地下水挙動の解析，土木学会論文集，No.364/III-4，pp.41-50, 1985.