

# 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

鈴木 誠 百田 博宣  
(技術研究所) (技術研究所)

## Technique for Evaluating Groundwater and Surface Flow Environment for Large-scale Groundwater Development

by Makoto Suzuki and Hirinobu Momota

### Abstract

The groundwater intake system that forms the large-scale bedrock water table is also one of the most common causes of frequent water shortages in susceptible regions. This paper describes an analytical method for calculating the groundwater and surface flow environment over a large area and evaluating the amount of groundwater necessary to maintain the intake system. This paper also discusses the applicability of a tank model and a quasi three-dimensional groundwater flow analysis of a typical water revenue model, as well as describes an expenditure analysis method for estimating the surface flow and the quantity of water entering the intake system. Furthermore, this paper proposes a hybrid type analysis method for analyzing a quasi three-dimensional groundwater flow incorporating the tank model, describes an algorithm for the analytical method, and provides an example of its application.

### 概 要

渇水頻発地域は、渇水時のみならず平常時の水資源の確保が必要であり、岩盤地下水を大規模に開発する岩盤地下水取水システムは一つの有効な方法と想定される。このシステムは新たな水資源開発施設であるため、広域の地下水環境や河川水等の地表水環境への影響を算出して適正な地下水開発量を評価する解析法が必要である。本報告では代表的な水収支解析法であるタンクモデル、および取水量と河川流量の算出機能を加えた準三次元地下水解析の適用性を検討するものである。両解析とも時系列の降水条件下で適用可能であり、前者で水収支領域の時系列の流出特性、後者では広域の地下水流動・地下水水位平面分布・取水量と河川流量を時系列で算出可能なことを示す。また、タンクモデルと準三次元地下水解析のハイブリッド型解析法についても提案し、解析法のアルゴリズムを示すと共に適用例を示す。

### § 1. はじめに

トンネルや空洞の計画のために地下水問題を検討する場合、安全性・施工性の観点から湧水量を算出し、地下水環境への影響の観点から地下水流や地下水水位等の変化を検討することが多い<sup>1)2)3)</sup>。トンネル等の建設は、水収支域内外の地下水流や地下水水位の分布に影響を与えるばかりでなく、沢水の枯渇や地表湧水群の減少など地表水にも影響する場合もある。すなわち、トンネル等の建設に伴う地下水環境の変化が降水の地表流出、中間流出、地下水流出等の流出特性の変化要因となって河川流量に影響を与える場合が考えられるため、河川の水収支域(またはそれより広域)の地形地質を反映できる水理モデルを用いて、地表水と地下水を関連付けて解析することが必要である。

流出解析の代表的な手法としてのタンクモデル<sup>4)</sup>は、

水収支域の降水量、蒸発散量および河川流量の観測データから河川流量の流出状況を簡単に把握できるモデルで、多くの実績がある。しかし、タンクモデルは概念流出モデルであるため、地形地質構造等を考慮できず、降水の流出過程や地下水流の物理的把握はできない。すなわち、観測データは現況の水収支・流出系を示すものであり、トンネル等の計画時にトンネル等の湧水量やその影響を予測することは困難である。

一方、地下水解析の分野においても、飽和・不飽和の三次元 FEM 地下水解析<sup>5)</sup>(以下、三次元解析と称す)であれば、広域水収支域の地下水状況と流出状況の同時推定に適用できる可能性はあるが、計算容量から地表境界面処理を行う地表面形状を十分に表現できない。この要素分割数の不足と不飽和部物性の強い非線形性に起因して、不飽和部で解の収束性が大幅に低下することにより地表境界面処理の精度が低下する。そのた

め、広域水収支域の解析に飽和・不飽和の三次元解析を適用することは実用的ではない。これに対し、準三次元 FEM 地下水解析<sup>6,7)</sup>(以下、準三次元解析と称す)は、比較的小さい容量でモデルを構築できるため、トンネルや空洞等の建設に伴う広域水収支域の地下水状況や水文流出状況の解析に適用できる可能性があった。

そこで、トンネル等も考慮した地表水と地下水の同時解析手法として、飽和・不飽和の準三次元地下水解析を対象に、地下水位との相互関係を考慮した空洞湧水量の推定法と降水の地表境界面処理法を導入し、地表流出量や河川流量の評価法も加えた広域地下水解析を示す<sup>8)</sup>。また、河川流量の評価に影響する降雨浸透能と地表流出量の河川到達時間を合理的に考慮するために、直列4段タンクモデルの2段タンクへの涵養量を地下水解析の地表面涵養条件としたハイブリッド型のタンクモデル・準三次地下水解析を提案する。

さらに、これらの解析手法を対象とし、ダム貯水池周辺の観測データに適用して、地下水流の算出結果と河川流量の再現性の向上について論じると共に、同サイトに空洞掘削を想定した数値シミュレーションを行い、地下水位に伴う空洞湧水量、地下水位および河川流量の推定結果について検討する。

## § 2. 解析手法

### 2. 1 タンクモデル

タンクモデルとして、図-1に示す直列4段タンクモデルを考える。

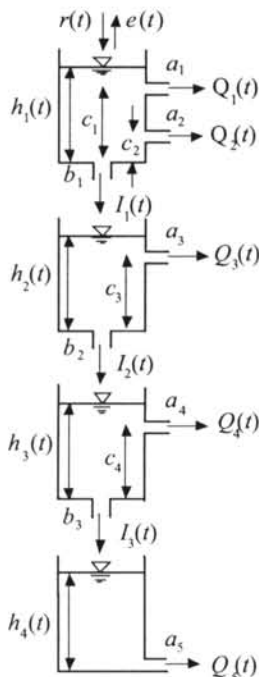


図-1 タンクモデル

図中、 $r(t)$  : 降水量、 $e(t)$  : 蒸発散量、 $h_1 \sim h_4$  : タンク水深、 $a_1 \sim a_5$  : タンク側方流出係数、 $b_1 \sim b_3$  : タンク下方流出係数、 $c_1 \sim c_4$  : タンク側方流出孔高さ、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  : 下段タンクへの浸透量、 $Q_1 \sim Q_5$  : タンク側方からの流出量であり、 $Q_1 \sim Q_5$  の総和が河川流量  $Q_r(t)$  になる。

$$Q_r(t) = \sum_{i=1}^5 Q_i(t) \quad (1)$$

なお、蒸発散量  $e(t)$  は  $h_1(t) > 0$  の場合は1段タンクから取るが、 $h_1(t) = 0$  の場合は下記のように下段のタンクより取ることにする。

$$h_1(t) > 0:$$

$$\frac{dh_1}{dt} = r(t) - e(t) - Q_1(t) - Q_2(t) - I_1(t)$$

$$h_1(t) = 0, h_2(t) > 0:$$

$$\frac{dh_2}{dt} = I_1(t) - e(t) - Q_3(t) - I_2(t) \quad (2)$$

$$h_1(t) = h_2(t) = 0, h_3(t) > 0:$$

$$\frac{dh_3}{dt} = I_2(t) - e(t) - Q_4(t) - I_3(t)$$

$$h_1(t) = h_2(t) = h_3(t) = 0, h_4(t) > 0:$$

$$\frac{dh_4}{dt} = I_3(t) - e(t) - Q_5(t)$$

また、誤差評価関数は下記の最小二乗誤差基準、対数をとった最小二乗誤差基準の2通りとする。

$$J_1 = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (Q_a(t) - Q_0(t))^2 \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (\ln Q_a(t) - \ln Q_0(t))^2$$

ここに、 $Q_0$  : 観測河川流量、 $Q_a$  : 計算河川流量、 $M$  : データ数を示す。したがって、タンクモデルの解析では、 $a_1 \sim a_5$ 、 $b_1 \sim b_3$ 、 $c_1 \sim c_4$  およびタンク水深  $h_1 \sim h_4$  の初期水深に関する16個の未知パラメータを探索する必要があるが、ここでは遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた同定手法を用いる<sup>9)</sup>。

### 2. 2 地表流出量と空洞湧水量を考慮した準三次元地下水解析

時間を  $t$ 、水平面上に  $x$ 、 $y$  軸、鉛直上方に  $z$  軸を設定し、地盤厚さ  $b$  の地下水流を準一様流と仮定すると、地下水位  $h(x, y, t)$  に関する飽和・不飽和の準三次元地下水流の基礎方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + V_b - V_0 + \int_b^0 q dz \quad (4)$$

$$= (S_A + S_B) \frac{\partial h}{\partial t}$$

ここに、 $T$  : 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、 $V_0$  : 下面の鉛直

流量で0、 $q$ ：空洞湧水等の正值の湧水率である。

式(4)を空間に関してガラーキン法で離散化し、時間微分項に差分法を適用すれば、有限要素各節点の地下水位 $h$ を未知量とする非線形連立一次方程式が得られ、時刻ごとに反復計算で $h$ が得られ、各節点の節点流量 $q'$ (湧水強度×節点の支配面積)も算出できる。準三次元解析の場合、降水量(または有効降雨量)は式(4)の $V_b$ で考慮され、空洞湧水量も $q$ で考慮されるため、どちらも解析の入力条件である。以下、地下水位変動に伴う空洞湧水量の評価法、地表境界処理法と河川流量の推定法を示す。

### <空洞湧水量の推定法>

空洞湧水量は準三次元解析の入力条件であるが、湧水量は準三次元解析の解である地下水位と相互に関連するため、入力条件の設定そのものが困難である。そこで、図-2のように断面二次元または三次元解析等の定常計算で、空洞周辺の地下水位 $H$ と大気圧条件下の空洞湧水量 $Q_c$ の $H-Q_c$ 関係を別途求め、準三次元解析では $H-Q_c$ の関係を満足するように地下水位 $h$ を求めれば、地下水位 $h$ から空洞周辺の地下水位 $H$ が得られ空洞湧水量 $Q_c$ が算出される。なお、空洞内が大気圧条件下でない場合については、空洞と地下水位の水頭差 $\Delta H$ が変化するだけであり、ここで求めた関係から空洞湧水量 $Q_c$ を求めることができる<sup>10)</sup>。



図-2 空洞湧水量の入力条件のモデル化

### <地表境界処理法と河川流量の評価法>

降水量 $p(t)$ の条件下における河川流量 $Q_r(t)$ は、図-3の記号を用いて、次式で与えられる。

$$Q_r(t) = R_p(t) + R_r(t) + R_s(t) \quad (5)$$

また、降雨浸透能を $P_{out}$ とすると、 $p(t)$ は $P_{out}$ を超える降雨成分 $P_r(t)$ と $P_{out}$ 以下の降雨成分 $P_s(t)$ および蒸発散量 $e(t)$ の和とすると $R_r(t)$ は次式で与えられる。

$$R_r(t) = R_{r1}(t) + R_{r2}(t) \quad (6)$$

ここに、 $R_{r1}(t)$ は $P_r(t)$ による直接流出量(地表面が飽和

または不飽和のいずれの場合も生じる流出量)、 $P_s(t)$ のうち $R_{r2}(t)$ は飽和地表面で地下に浸透できない降水量および地表湧出量である。

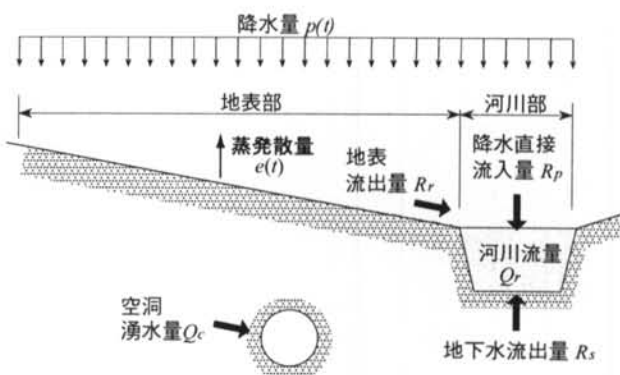


図-3 河川流量および空洞湧水量の概念

次に、図-4には地表面を不飽和域と飽和域に分け、それぞれの領域における地表流出量と地下浸透量、および地表面条件を示している。 $Q'$ は解析で得られる地下浸透量であり、図中の各流量値は有限要素法と対応させるため、 $Q'$ や $q_c'$ と同様に節点の支配面積を考慮して表示し、 $P_r, P_s$ の節点流量値は $P_r', P_s'$ と表している。

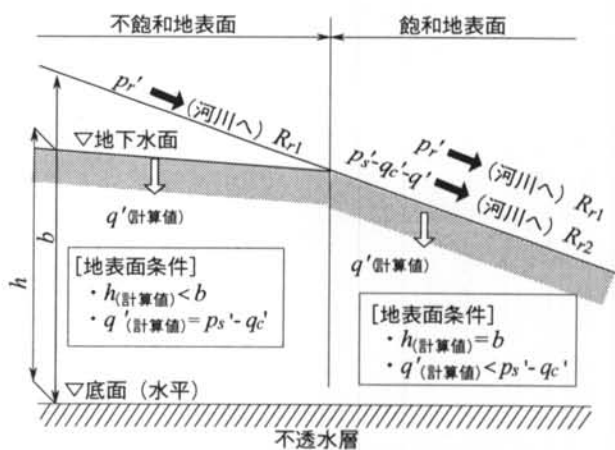


図-4 地表流出量と地下浸透量

したがって、各時刻ごとにピエゾ水頭 $h$ の収束条件と図-4の地表面条件を満足するまで反復計算を行えば、各節点ごとに地下浸透量と地表流出量が同時に得られ、式(5)、(6)は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R_p(t) &= \sum_k p'(t) \\ R_s(t) &= -\sum_k Q'(t) \\ R_{r1}(t) &= \sum_m P_r'(t-\delta) \\ R_{r2}(t) &= \sum_n (P_s'(t-\delta) - q_c'(t-\delta) - Q'(t-\delta)) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $p$ は節点の支配面積を考慮した節点降水量であり、 $\Sigma_k$ は河川が位置する節点に関する総和、 $\Sigma_m$ は河川を除く全節点に関する総和、 $\Sigma_n$ は飽和地表面を有する節点に関する総和、 $\delta$ は地表流出量の河川流量に対する平均的な時間遅れを意味する。

### 2. 3 ハイブリッド型準三次元地下水解析

河川流量の算出に関連した課題として、降雨浸透能  $P_{out}$  の設定法と地表流出量の時間遅れ (河川到達時間)  $\delta$  の設定法の2項目があげられる。そこで、水収支域の有効降雨量 (降水量-蒸発散量) のデータと河川流量の観測データがある場合を対象に、この2項目の改良を目的としたタンクモデルと準三次元解析の結合方法を示す。

タンクモデルを解くことによって、未知パラメータが求まる共に、 $I_1(t) \sim I_3(t)$ の浸透量、 $Q_1(t) \sim Q_5(t)$ の流出量が得られる。ここで、1段タンクの流出量は主に地表流出量、2段タンクの流出量は地表流出量と中間流出量、3段タンクと4段タンクの流出量が地下水流出量に相当すると考えると、2段タンクへの浸透量  $I_1(t)$  または3段タンクへの浸透量  $I_2(t)$  が、降雨浸透能  $P_{out}$  以下の有効降雨量成分  $P_s(t)$  と対応づけられる。このため、 $P_{out}$  を設定することなく、準三次元解析の涵養条件  $P_s(t)$  をタンクモデルのタンク浸透量から設定でき、 $P_{out}$  を超える降水成分  $P_f(t)$  に対応する河川流出量はタンク流出量から算出できることになる。ここでは、トンネル等の地表水への影響を評価する観点から、準三次元解析の地表涵養量はなるべく有効降雨量に近い方が望ましいと考え、準三次元解析の涵養条件  $P_s(t)$  は、 $I_1(t)$  を基に次式で与える。

$$P_s(t) = I_1(t) - E \quad (8)$$

ここに、 $E$ : タンクモデル解析において  $h_1(t)=0$  の条件下で、2段~4段タンクから取られた蒸発散量の総和である。式(8)の  $P_s(t)$  と2段タンク浸透量  $I_1(t)$  と区別するため、この  $P_s(t)$  は、2段タンク涵養量と称す。

2段タンク涵養量には地表流出や中間流出の成分が残っているが、図-4に示した地表境界面処理で対応できる。したがって、準三次元解析の涵養条件を式(8)で与える場合には、 $R_{r1}(t)$  は1段タンク流出量で得られるため、式(6)の  $R_r(t)$  は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} R_r(t) &= R_{r1}(t) + R_{r2}(t) \\ R_{r1}(t) &= Q_1(t) + Q_2(t) \\ R_{r2}(t) &= \sum_n (p_s(t-\delta) - q_c(t-\delta) - q'(t-\delta)) \end{aligned} \quad (9)$$

これにより、降雨浸透能  $P_{out}$  については、式(7)で対応できた。また、地表流出量の時間遅れ (河川到達時間)  $\delta$  については、式(9)のように  $R_{r2}(t)$  は  $\delta$  を考慮する必要

はあるが、洪水等のピーク流量の主要成分と考えられる  $R_{r1}(t)$  の時間遅れを考慮する必要はなくなる。

### § 3. ダム貯水池周辺への適用

ダム貯水池の観測データに、タンクモデル、地表流出量と空洞湧水量を考慮した準三次元地下水解析、ハイブリッド型解析を適用し、河川流量の再現性を中心に検討する。

対象としたMダムは、堤高45m、総貯水量260万  $m^3$  の重力式粗石コンクリート形式の上水用ダムである。観測記録として、図-5に示す1992年1月から4年1ヵ月にわたる日降水量と日流出量を対象とする。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、 $\delta=1 \sim 2$ 日であり、基底流量は概ね20000  $m^3/day$  である。また、図-6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。

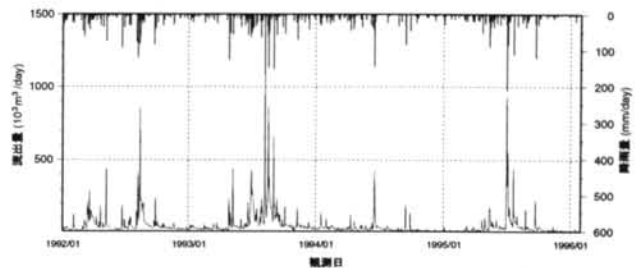


図-5 観測された日流出量と日降水量

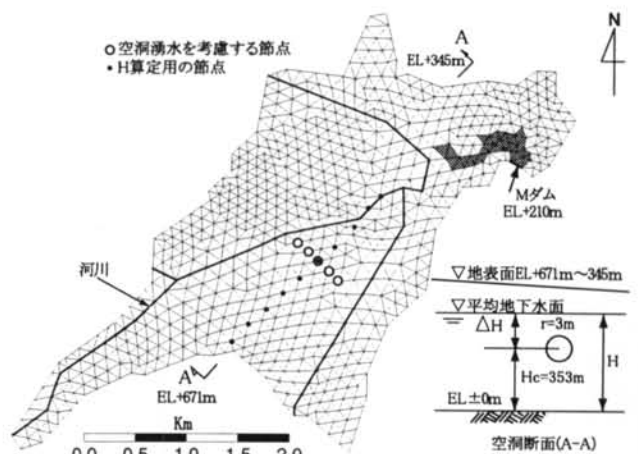


図-6 水収支域の解析モデル

#### 3. 1 タンクモデルによる流出解析

ここでは、降水量と河川流量の観測記録と蒸発散推定値<sup>11)</sup>にタンクモデルを適用するが、有効降雨量の総

和と河川流量の総和が等しくなるように蒸発散量 1.1mm/day を水収支域の降雨量から一律差し引いて与える。またパラメータの同定には、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いており、16個のパラメータの探索における上限値は既往の文献より設定した。これらの探索範囲をGAではビット数 $L=77$ として各パラメータ $p_i$ は次のように離散化する<sup>12)</sup>。

$$p_i = \Delta p_i z_i$$

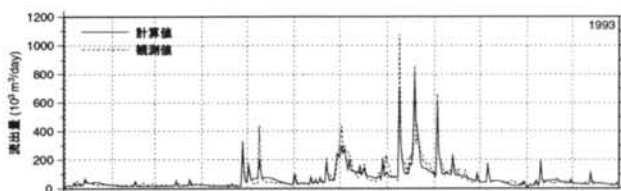
$$z_i = (p_i - p_i^{lower}) / (p_i^{upper} - p_i^{lower}) \quad (10)$$

$$\Delta p_i = (p_i^{upper} - p_i^{lower}) / (2^7 - 1)$$

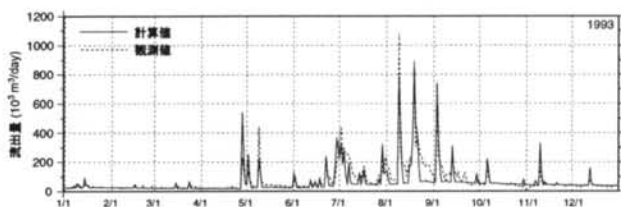
ここに、 $z_i$ : 整数、 $0 \leq z_1, z_2, \dots, z_{16} \leq 2^7 = 127$ 、 $\Delta p_i$ :  $p_i$ の離散化幅を表す。

ここでは、GAの個体数を1000、交叉率を0.6、総試行回数を100,000(世代数)と設定し、突然変異の発生確率には0.01を採用した。また、誤差評価基準には式(3)の最小二乗誤差基準と対数値の最小誤差基準の2通りで解析した。

河川流量を約4年間表示すると観測値との対応がわかりにくいので、最小二乗誤差基準と対数値の最小二乗誤差基準による2通りの解析結果のうち比較的降雨量の多い1993年について図-7に示す。両図とも、河川流量の解析結果と観測記録が示されている。これらの結果より、最大値を表現には対数誤差の方がいいが、ピーク後の流出量となる地下水の保水能力については正規誤差である最小二乗誤差基準の方が適用性がよいと判断できる。



(a) 最小二乗誤差基準



(b) 対数最小二乗誤差基準

図-7 タンクモデルによる流出解析

### 3. 2 準三次元解析モデルによる流出解析

図-6に示す準三次元解析モデルは、解析上の底面をEL±0mとし、各節点には地形を忠実に反映させた

地層厚さが考慮されている。境界条件について、解析領域周囲は不透水境界、Mダム貯水池のみ水位を指定した境界で、沢等には水位等を与えない条件とした。また、Mダム観測データへの準三次元解析の適用結果を参考して、地層構成は表層(表土・マサ土:厚さ20m)と新鮮岩盤の2層モデルとし、表層の透水係数 $K$ は $1.0 \times 10^{-4}$ cm/s、新鮮岩盤の透水係数 $K$ は $1.0 \times 10^{-5}$ cm/sとした。不飽和浸透特性についても、同様に $K$ の値に応じて設定することとし、図-8のタイプIを表層、タイプIIを新鮮岩盤に用いる。準三次元解析では、タンクモデルで用いた有効降雨量を直接入力する。

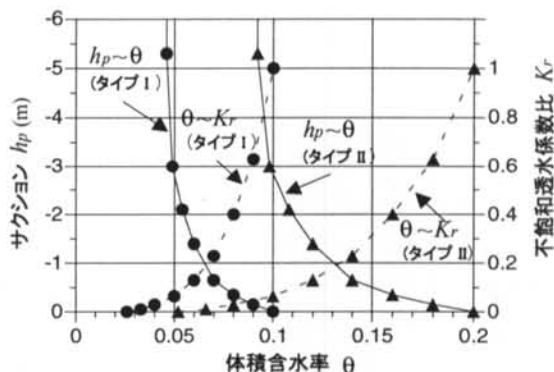


図-8 適用する不飽和浸透特性

解析結果を図-9に示す。河川流量を約4年間表示すると観測値との対応がわかりにくいので、比較的降雨量が多い1993年の解析結果を示している。

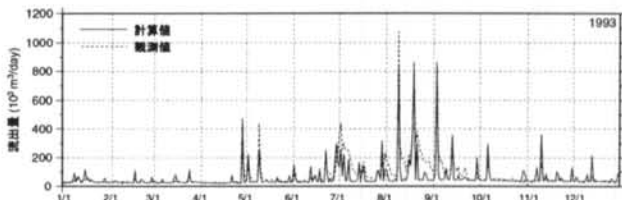


図-9 有効降雨量を直接入力した準三次元解析結果 (Case-0)

### 3. 3 ハイブリッド型準三次元解析

ハイブリッド型準三次元解析についても図-4に示す解析モデルを用い、タンクモデルの2段タンク涵養量を地表面から入力して流出量を算定する。1段タンクの流出量 $Q_1(t)$ と $Q_2(t)$ は地表流出量とみなしているため、河川流出量に算入する。検討ケースは、最小二乗誤差基準Case-1と対数値の最小二乗誤差基準Case-1'とする。

一例として最小二乗誤差基準で同定したタンクモデルの2段タンク涵養量 $Ps(t)$ と1段タンクの流出量 $Q_1(t)+Q_2(t)$ を図-10に示す。これらは降雨量と同様に単位面積当りの値である。2段タンク涵養量は図中では

表現できないが、蒸発散量があるため、1mm/day 程度の負の日も存在する。全体的に今回のタンクモデルにおいては、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。

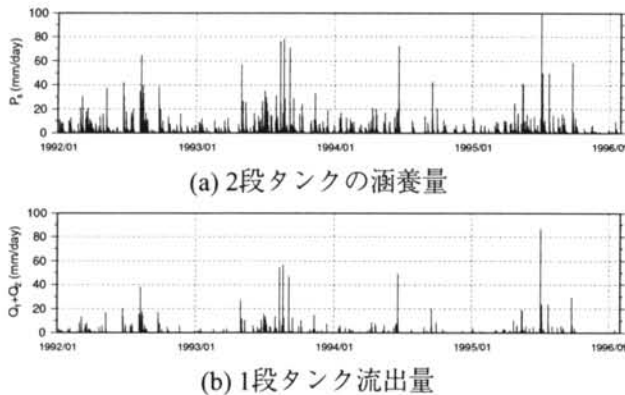
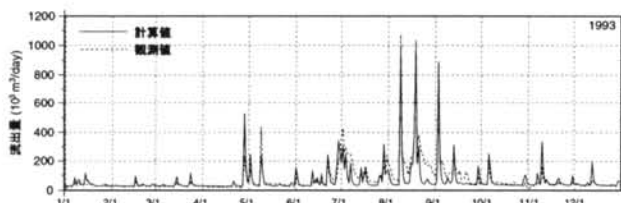
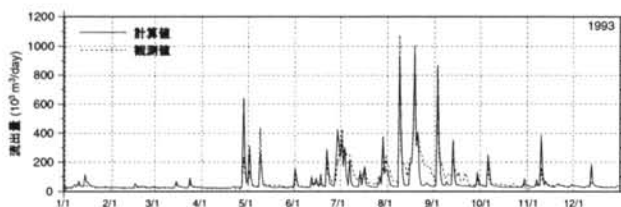


図-10 タンクモデルから準三次元解析への入力

ここでも、河川流量を約4年間表示すると観測値との対応がわかりにくいので、比較的降雨量が多い1993年の解析結果を図-11に示す。図-9に示す従来の有効降雨量を直接入力したCase-0は、流出量のピーク値は比較的良好に表現されているが、降雨時と無降雨時の差が大きく地表流出量の遅れは過少評価になっている。また、図-11に示すCase-1とCase-1'は、タンクモデルによる差異は大きくはないが、ピーク時の流出量がCase-1'の方が過大評価となっている。また、地表流出量の遅れについては、両者ともCase-0よりは観測値を多少表現できており、基底流量に近い流出量はCase-1の方が一致している。1993年の流出量の日平均誤差をみると、最大流出量 $1,074,700\text{m}^3/\text{day}$ のCase-0は5.7%、Case-1は4.9%、Case-1'は5.2%と若干ではあるがCase-1のモデルの方が少ないことがわかる。



(a) 最小二乗誤差基準(Case-1)



(b) 対数値の最小二乗誤差基準(Case-1')

図-11 2段タンク涵養量入力による解析結果

### 3.4 空洞湧水量を考慮したハイブリッド型準三次元解析

さらに、ハイブリッド型準三次元解析で空洞を設置した場合の解析としてCase-2を行う。Case-2の空洞の設置条件も既往の研究と同様であり、EL+353mに半径3mを想定している。図-6に平均地下水位 $H$ ~空洞湧水量 $Q_c$ の関係を考慮する湧水を考慮する節点位置(空洞に相当)を「○」、湧水量推定に用いる平均水位 $H$ 算定用の節点を「●」として示している。空洞は730mと長く、空洞湧水の三次元性はそれ程強くないと考えられるので、ここでは $H$ ~ $Q_c$ の関係は、A-A断面を対象とした断面二次元浸透流解析で別途算出している。空洞を設置した解析の場合、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とし、「○」の節点位置で $H$ ~ $Q_c$ 関係を考慮することになる。

図-12に空洞を設置した場合の解析結果Case-2を示す。比較で空洞を設置しない場合のCase-1を合わせて示したが、ほとんど差がなく線が重なった。Case-0、Case-1とCase-2について、空洞周辺の平均地下水位の経時変化を図-13に示すが、有効降雨量を直接入力したCase-0に比べ、2段タンク涵養量入力によるCase-1は若干低くなっている様子がわかる。これはタンクモデルで地表流出量を分離したため、涵養量が少なく評価された影響が表れている。また、空洞を設置しない(Case-1)と4年間で空洞からEL+463mからEL+472m間で変動しているが、空洞を設置する(Case-2)と約5mほど低くなっている。Case-2の4年1ヵ月の湧水量の経時変化を図-14に示すが、これらの変動傾向は平均地下水位と同じであり、空洞からの水頭差で湧水量が決まることから、平均地下水位が高くなると湧水量が増加するなど経時変化には関連をもっていることがわかる。

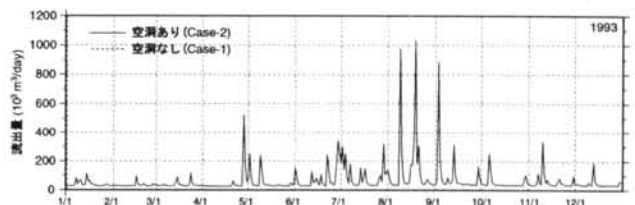


図-12 空洞を設置した場合の解析結果(Case-2)

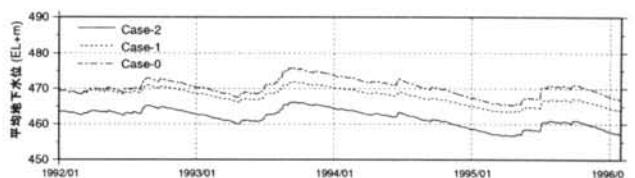


図-13 平均地下水位の経時変化

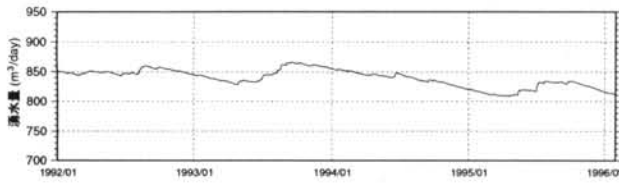
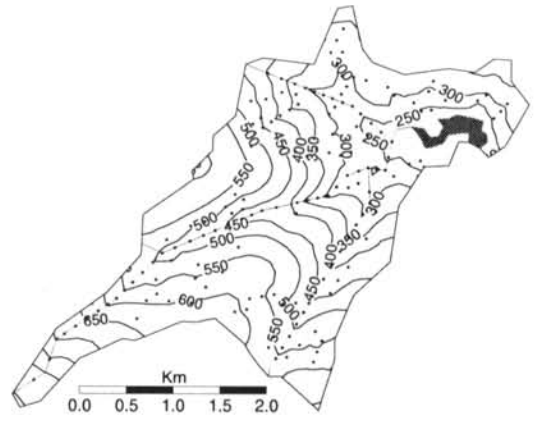


図-14 湧水量の経時変化(Case-2)

図-15 に Case-1 の比較的少雨時期(1993.3.10)と多雨時期(1993.8.8) の等地下水位線と地表浸出点分布を示す。図中の細い実線は河川を表している。多雨時期の方が全体に地下水位が高く、地表浸出点(・)も多い様子がわかる。また、図-16 に Case-2 の比較的少雨時期(1993.8.8)の等地下水位線と地表浸出点分布と Case-1 との地下水位差分布を示す。(a)は Case-2 の等地下水位線は Case-1 に比べて空洞設置の近傍で若干低く、地表浸出点分布は多少減少していることがわかる。地下水位低下の様子を詳細に見るため、(b)に 1m と 10m ごとの等地下水位線を表している。大きく地下水位低下する領域は空洞設置の近傍であるが、1m の影響圏は比較的上流までとなっていることがわかる。

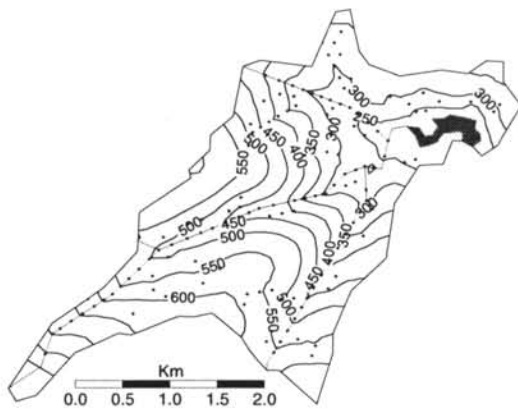


(a) Case-2 の等地下水位線と地表浸出点

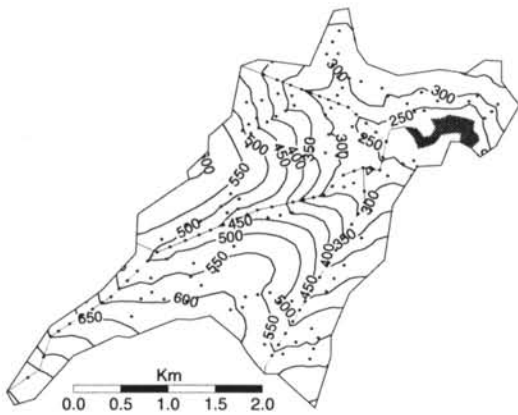


(b) 地下水位低下分布

図-16 空洞の設置による影響(1993.8.8)



(a) 少雨時期(1993.3.10)



(b) 多雨時期(1993.8.8)

図-15 等地下水位線(単位EL+m) と地表浸出点(・) 分布(Case-1)

#### § 4. おわりに

渇水時のみならず平常時の水資源の確保を目的とした岩盤地下水の大規模開発として、岩盤地下水取水システムが提案されている。このシステムでは、広域の地下水環境や河川水等の地表水環境への影響を算出して適正な地下水開発量を評価する解析法が必要となっている。

そこで、流出解析の代表的な手法としてのタンクモデルをダム貯水池周辺の観測データに適用し、河川流量の流出状況を解析した。誤差評価関数を最小二乗誤差基準と対数最小二乗誤差基準の2ケース行い、どちらも流出状況をおおむね表現できることがわかった。特にピーク後の流出は正規誤差とした最小二乗誤差基準の方がよく表現できるものである。

次に、トンネルや空洞を設置した場合の地下水と地表水への影響を関連付けて解析するとの観点から、準三次元地下水解析を対象に空洞湧水量の評価法、降水の地表境界面処理方法と地表流出量・河川流量の評価法を実サイトに適用した。しかし、降雨浸透能の設定法と地表流出量の河川への到達時間については、概念

的な表現に留まり、実サイトへの適用結果においても河川流量観測記録の再現性には改良の余地があると考えられた。

そのため、これら課題を解決することを目的に、直列4段タンクモデルの2段タンク涵養量を地下水解析の地表面涵養条件としたハイブリッド型のタンクモデル・準三次元地下水解析を提案した。さらに、同じサ

イトの観測記録に適用し、その有用性を検討した。その結果、地表流出量の河川到達時間を、若干考慮できることがわかった。

#### 謝辞

本検討にあたり、九州大学神野健二教授にはご指導を頂きました。末筆ながら大変感謝申し上げます。

#### <参考文献>

- 1) 村上郁雄, 大島洋志, 塚本正雄: “丹那トンネルの湧水・湧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.
- 2) 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.
- 3) 高橋彦治, 菊池幸吉, 吉川恵也, 桜井孝: “建設工事における地質工学”, 鹿島出版会, pp.278-316, 1985.
- 4) 菅原正巳: “流出解析法”, 共立出版, 1972.
- 5) 百田博宣, 楠本太: “多孔質地山の地下空洞を対象とした三次元地下水解析”, 第29回水理講演会論文集, pp.739-744, 1985.
- 6) 河野伊一郎, 西垣誠: “有限要素法による広域地下水の準三次元解析”, 岡山大学工学部土木工学教室 Report, No.82-1, 1982.
- 7) 百田博宣, 佐藤邦明: “割れ目系地山のトンネル・空洞を対象とした地下水の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.
- 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, 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.
- 10) 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.
- 11) 近藤純正, 中園信, 渡辺力, 桑形恒男: “日本の水文気象(3), 森林における蒸発散量”, 水文・水資源学会誌, Vol.5, No.4, pp.8-18, 1992.
- 12) 田中丸治哉: “タンクモデル定数の大域的探索”, 農業土木学会論文集, No.178, pp.103-112, 1995.