

丸亀平野における水循環系の調査と解析

MEASUREMENT AND NUMERICAL ANALYSIS OF HYDROLOGIC CYCLE IN THE MARUGAME PLAIN

濱崎修¹・大八木豊²・辻倉裕喜³・河原能久⁴

Osamu HAMAZAKI, Yutaka OYAGI, Hiroki TSUJIKURA and Yoshihisa KAWAHARA

¹ 正会員 工修 国土交通省香川河川国道事務所 (〒761-0104 高松市高松町 2422-1)

² 正会員 工修 (株)建設技術研究所九州支社 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

³ 正会員 工修 (株)建設技術研究所大阪本社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

⁴ フェロー会員 工博 広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

In the Marugame plain, recent variation in the hydrologic cycle due to landuse change has posed urgent need to develop new water resources in harmony with the sustainable water cycle. In this paper, measurement of confined and unconfined groundwater and data collection of water uses in the plain were carried out and a numerical analysis of the hydrologic processes for five years including dry and wet years was performed using the MIKE-SHE model, with special emphasis on agricultural water use. It was made clear that the numerical model can fairly reproduce the daily river discharge of the Doki River and the groundwater levels in the plain. And water balance analysis for 1996 showed that the evapotranspiration accounted three-quarters of the annual precipitation and that the domestic water use is heavily dependent on the groundwater and the water introduced through the Kagawa water conveyance channel.

Key Words : hydrologic cycle, water resources development, agricultural water use, MIKE-SHE model, groundwater

1. はじめに

丸亀平野は、瀬戸内気候区に位置し、自己流域の降水量が少ないため、その水利用については、古来、満濃池などの溜池の造成に代表されるように水の確保に苦心するとともに、種々の工夫を凝らしてきた。1974年に香川用水(吉野川流域からの導水)の運用が開始され、農業用水及び都市用水の取水形態は従来と大きく変貌した。また、流域の社会・経済情勢の変遷に伴う灌漑面積の減少、都市用水・排水量の増大等、流域の水循環系が大きく変化してきた。

丸亀平野では、国土地理院の水準測量結果(1991年)から海岸部での地盤沈下・地下水塩水化が認められており、地下水利用者等で香川中央地域地下水利用対策協議会を組織し、自主規制を行っている状況である¹⁾。香川県が地下水利用を推進するための調査を行っているが²⁾、地

下水流動の実態は十分に明らかになっていない。今後、限られた水資源を有効に利用するとともに、諸施策を正しく評価し、且つ、生態系を良好な状態で保全し、流域の健全な水循環系を構築していく必要がある。

本研究の最終的な目的は、丸亀平野の水循環系の現状を解明し、流域の適正な水管理システムの確立を図ることである。本論文では、丸亀平野における地下水や農業用排水系統の調査結果および流域水循環系の解析結果を述べる。

2. 丸亀平野の概要

本研究の対象流域である丸亀平野は、瀬戸内海に面し、讃岐平野の中央に位置する平野で、丸亀平野流域(丸亀平野とその涵養域を包括する流域)の面積は約320km²である。平野中央部には一級河川土器川等の4河川を擁し

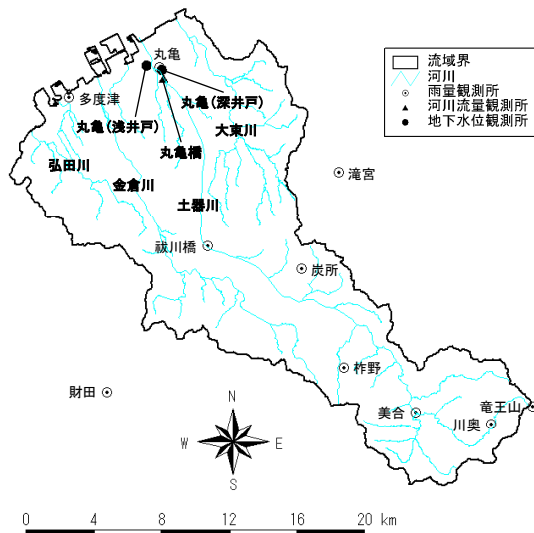


図-1 丸亀平野流域の概要

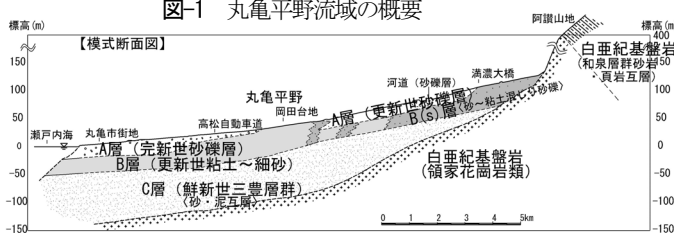


図-2 水文地質の模式断面

ている(図-1参照)。丸亀平野における土地利用は、1976年以降、水田面積が減少し、宅地化が急速に進展している。現在、流域内の土地利用は、山林約43%、水田約28%、畑約8%、宅地・市街地約10%、その他約11%となっている。丸亀平野の水文地質構造は、図-2に示す水文地質の模式断面のとおり4層に分けられる。最上位の沖積層(A層)は、約10~20m層厚で不圧地下水が分布し、その下位には難透水層の段丘堆積層(B層)が約20~40m、更にその下位には被圧地下水が分布する三豊層群(C層)が約40~80m現れ、平野部の基盤は領家花崗岩類で構成される。

3. 丸亀平野における水循環系の実態調査

(1) 地下水位の経年変化

図-1中の丸亀(浅井戸)、丸亀(深井戸)地点における浅層・深層地下水の地下水位変動を図-3に示す。丸亀平野下流域の地下水特性として、以下のことが挙げられる。

- ①丸亀平野の地下水の変動傾向は、浅層地下水は夏期に1.0~1.5m水位上昇するが、長期変動はみられない。
- ②深層地下水の1977年~1979年の水位低下は、灌漑期であることから農業用水の揚水が、1985年~1987年の水位低下は、非灌漑期であることから上水道の揚水の影響が主たる原因であると考えられる。
- ③1988年~1993年は、水位が一定から若干の上昇傾向を示すため、この期間中の揚水量が、この地域における安定揚水量であると考えられる。

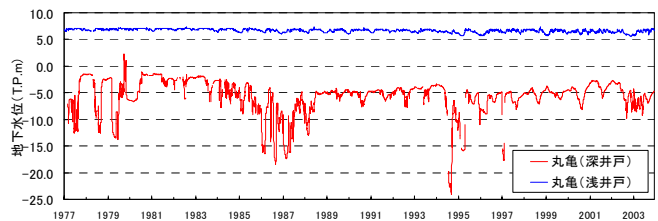


図-3 丸亀平野における地下水位変動

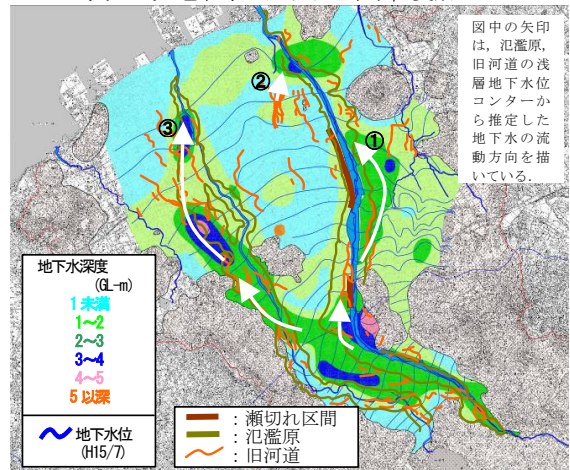


図-4 浅層地下水面の地表面からの深度

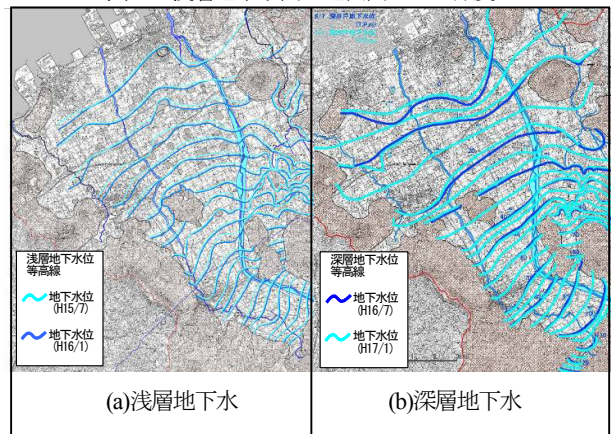


図-5 地下水位の等高線(標高表記)

④1994年の渇水にみられるように深層地下水位は、過剰な汲み上げにより著しく低下した。近年では、2002年渇水を除けば、1996年から2001年にかけて3m程度の回復が見られるが、これは地下水の揚水量の減少に起因している。水位の回復には、数年の期間が必要であると推察される。

(2) 地下水位の平面分布と地下水の流動

丸亀平野における地下水位の平面分布と地下水流動状況を把握するため、灌漑期・非灌漑期に地下水調査を実施した(浅井戸105箇所、深井戸22箇所)。丸亀平野における浅層地下水面の地表面からの深度を図-4に、浅層および深層地下水の水位の等高線を図-5に示す。

丸亀平野では、地質調査結果より旧河道とその周囲の透水性の高い氾濫原が確認されている(図-4参照)。①土器川の伏流水が左岸側から右岸側へ流動する水脈、②平野中央部を流れ再び土器川下流に環流する水脈、③多く

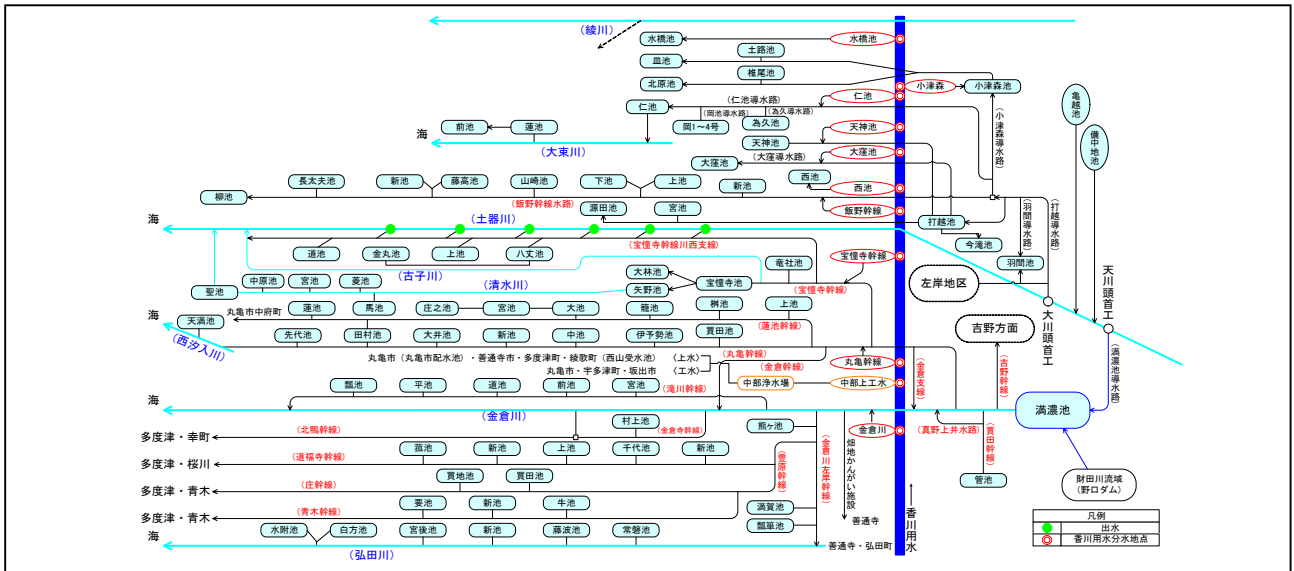


図-6 丸亀平野における用排水系統

蒸発散モデル：Penman 式

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - G)}{al} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2) (e_{sa} - e_a)$$

E_p : 可能蒸発散量, Δ : 気温 t での温度飽和水蒸気曲線の勾配, γ : 乾湿計定数, R_n : 正味放射量
 $f(u_2)$: 風速関数, G : 地中鉛直方向への熱流量, u_2 : 地表面から 2m の高さの風速
 e_{sa} : 飽和水蒸気圧, e_a : 水蒸気圧

表層モデル：平面 2 次元 diffusive wave モデル

$$\frac{\partial h_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh_f) + \frac{\partial}{\partial y}(vh_f) = i - \frac{u^2}{K_x^2 z_f^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x}(z_f + h_f) = 0 \quad \frac{v^2}{K_y^2 z_f^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial y}(z_f + h_f) = 0$$

z_f : 地盤標高, h_f : 水深, u, v : 流速, i : 単位面積あたりの流入量, K_x, K_y : 粗度係数 (=1/n)

不飽和層モデル：1 次元 Richards 方程式

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$$

θ : 体積含水率, ψ : 吸引率, K : 不飽和透水係数, S : 根からの吸取量, C : 比水分容量

地下水層モデル：3 次元地下水流動モデル

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H_g}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H_g}{\partial z} \right) - Q = S \frac{\partial H_g}{\partial t}$$

K_x, K_y, K_z : 透水係数, S : 比貯留係数, H_g : 帯水層水頭, Q : 単位面積あたりの流出量

河道モデル：1 次元 dynamic wave モデル

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_o + S_f \right) = q_L V_x$$

A : 河積, Q : 流量, q_L : 単位長さあたりの流入量, S_o : 河床勾配, S_f : 摩擦損失勾配
 V_x : 横流入流速

図-7 MIKE-SHE モデル中の基礎式

は金倉川方向へ流れ旧河道沿いを流下する水脈の 3 系統の地下水の流動傾向が認められる。浅層地下水位は、概ね地表の地形に沿った分布であるが、平野の東西に位置する氾濫原では、地盤から地下水位までの深度が平野中央部に比べ 2~3m 深い。また、土器川の瀬切れ発生区間と氾濫原や旧河道の位置が一致していることから、河川水と浅層地下水は、密接に関連していると考えられる。図-5 より灌漑期と非灌漑期の浅層地下水を比較すると、地下水位の標高 15~20m, 20~25m の範囲において約 1.0~1.5m の変動幅がみられる。

深層地下水は、浅層地下水に比較して地下水位の勾配が緩く、地表の地形に沿った分布となっている。

(3) 農業用排水系統

丸亀平野においては、灌漑期における水田からの地下水水養が重要となることから、本研究では、対象流域に

における灌漑実態を明確にするため、現地において農業用排水系統を調査するとともに、関係市町並びに土地改良区にヒアリング・アンケート調査を実施した。

丸亀平野における用排水系統を図-6 に示す。対象流域では、香川用水、河川水、溜池（満濃池含む）、出水（湧水）、井戸（浅井戸・深井戸）が農業用水の水源として利用されている。土器川等の 4 河川に対し、香川用水が横断しており、香川用水の導水路と約 80 箇所の溜池がネットワーク化された複雑な水利用形態となっている。

4. 水循環解析モデルの構築

(1) 水循環解析モデルの概要

本研究では、対象流域における水循環系を定量的に把握するため、水循環素過程を物理式で表現し、表流水と

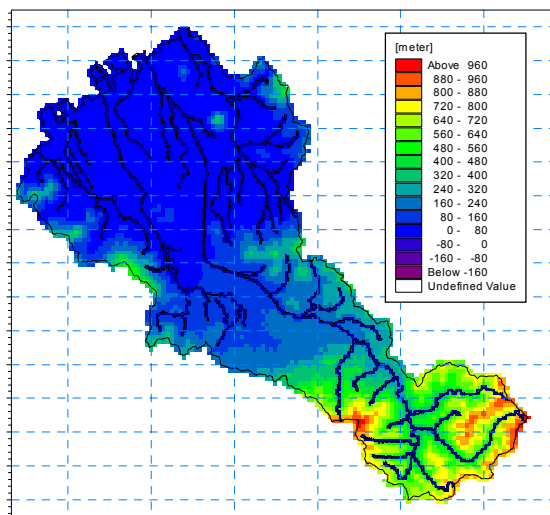


図-8 対象流域のグリッド標高

地下水を連動して解析できる MIKE-SHE モデルを適用した。MIKE-SHE モデルは、デンマーク水理研究所 (DHI) 等で開発されたグリッド型の水循環解析モデルであり、①遮断・蒸発散、②表面流・河道流、③不飽和流、④飽和流、⑤帯水層と河川との水交換、⑥融雪の 6 つの部分から構成されている。図-7 に MIKE-SHE モデルの基礎式を示す。

表面流と河道流は、St.Venant 方程式を簡略化した diffusive wave モデル (河道流には dynamic wave モデル適用可) と連続の式により解析され、表面流は 2 次元モデル、河道流は 1 次元モデルで表現されている。土壌層における不飽和流は 1 次元 Richards 方程式を用い、飽和流はダルシー式と連続式に基づく 3 次元モデルにより解析される。また、不飽和層底部の土壌水分と地下水位の変動が連成解析される。帯水層と河川の水交換は、ダルシー則を用いて算定され、河川水位に対して地下水位が高い場合には河川へ流出し、地下水位が低い場合には河川水は地下へ涵養される。解析手法の詳細は文献³⁾⁵⁾に記載されているため、ここでは省略する。

(2) 水循環解析モデルの構築

対象流域のグリッドスケールとしては、地形条件の再現性及び計算時間を考慮して、250m を採用し、対象流域を 5,518 グリッドに分割した。表層モデルの作成にあたっては、数値地図 50m メッシュ標高を抽出、グリッド毎に平均化してグリッド標高を設定した。対象流域のグリッド標高を図-8 に示す。地下水層のモデル化にあたっては、図-2 に示す 3 層を対象に沖積層を不圧地下水帯水層、段丘堆積層を難透水層、三豊層を被圧地下水帯水層とし、平野内の既存ボーリング柱状図 (1,160 箇所) をもとに内挿法によりグリッド毎の各層基底標高を設定した。

また、河道縦横断面図から横断面形状を設定し、河道モデルを作成した。測量成果が存在しない区間については国土数値情報の河道位置、河道長、河床高を取得し、矩形

表-1 水源の優先順位の設定

タイプ	地域の概要	水源の優先順位
上流域	土器川沿いの大川頭首工より上流域	①土器川表流水のみ
下流左岸域	平野部土器川左岸の主に満濃池受益エリア	①香川用水・満濃池 (実績値)
上流右岸域	平野部土器川右岸の主に大川頭首工受益エリア	①香川用水・大川頭首工 (実績値)、②出水 (湧水)・井戸

表-2 境界条件の設定

モデル	境界条件	設定方法
表層モデル	日雨量	地上雨量計 (国土交通省、気象庁) の配置図より、それぞれの代表範囲をティーセン分割により求め、各グリッドに地上雨量計の日雨量を与えた。
	農業用水	減水深法により各グリッドの必要水量を推定した。
表層モデル・不飽和層モデル	蒸発散量	丸亀 (気象庁) を代表観測所として Penman 式を用いて蒸発散量を推定した。
地下水層モデル	沿岸部	水頭境界として高松験潮所の日平均潮位を与えた。
	山地部	地下水水分界として閉境界とした。
	揚水量	上工水については各水源の取水実績を、農水については減水深法により必要水量を推定し、与えた。
河道モデル	下流端水位	高松験潮所の日平均潮位を与えた。
	河川流量	満濃池からの日放流量を河道モデルの境界条件として与えた。
	河川取水量	上工水については各水源の取水実績を、農水については減水深法により必要水量を推定し、与えた。
	河川排水量	下水放流量は市町毎の実績値を与えた。雑排水量 (上工水) は使用水量から下水処理水量を差し引き、各グリッドに与えた。

断面を設定した。

(3) 水田のモデル化の方法

水田は、人為的な灌漑により水位・水量がコントロールされ、また、その構造上、大きな貯留効果を持つなど、自然地とは異なった水循環特性を有する。

一般に、用排水系統が複雑であり、灌漑実態が不明であるため、その物理的なモデル化は容易ではない。

本研究では、灌漑による水循環系を可能な限り詳細に定量化するため、下記に示すとおり、降雨、蒸発散、灌漑、浸透等を表現できる水田モデルを構築した。

- ①水田の水管理状況をモデル化するため、水田の減水深 (蒸発散・浸透) に一致するように、不飽和浸透特性を設定した。
- ②灌漑区域毎の水源位置 (香川用水、溜池、出水、井戸)、用排水系統の調査結果をもとに取水地点、供給区域を当該グリッドに設定した。
- ③対象流域では灌漑区域毎に複数の水源を有しているため、各灌漑区域の取水地点を設定するにあたっては、使用水源タイプ別に区分し、水源の優先順位を表-1 のとおり設定した。
- ④減水深法により減水深、田面降水量等から単位面積あたりの必要水量を算定し、各グリッドの灌漑面積を乗じて、農業用水使用量を推定した。
- ⑤グリッド毎の必要水量に対して実績取水量が既知の水源からの供給量を差し引き、残分については地下

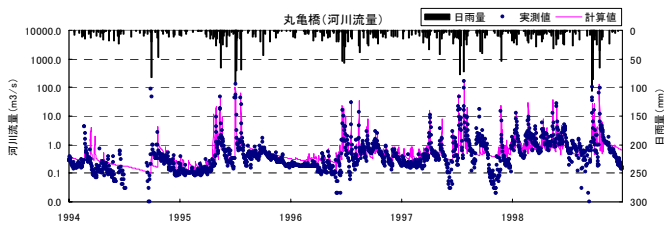
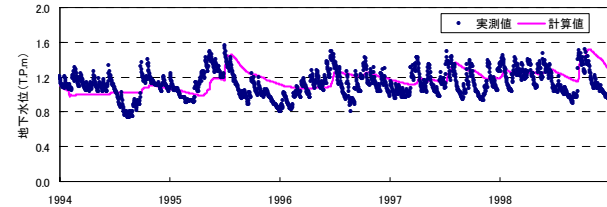
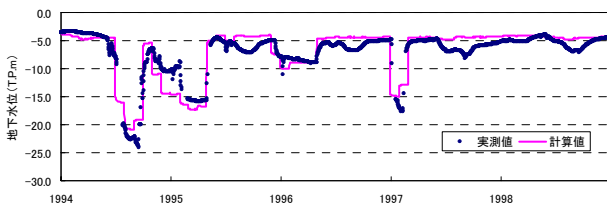


図-9 河川流量 (丸亀橋地点)



(a) 浅層地下水 (丸亀浅井戸地点)



(b) 深層地下水 (丸亀深井戸地点)

図-10 地下水位

表-3 透水係数と比貯留係数 (平野部)

	透水係数(m/s)	比貯留係数
不圧地下水帯水層	$5.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-4}$ 旧河道： 1.0×10^{-3}	0.03~0.15
難透水層	$5.0 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-9}$	1.0×10^{-6}
被圧地下水帯水層	$5.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-5}$	1.0×10^{-6}

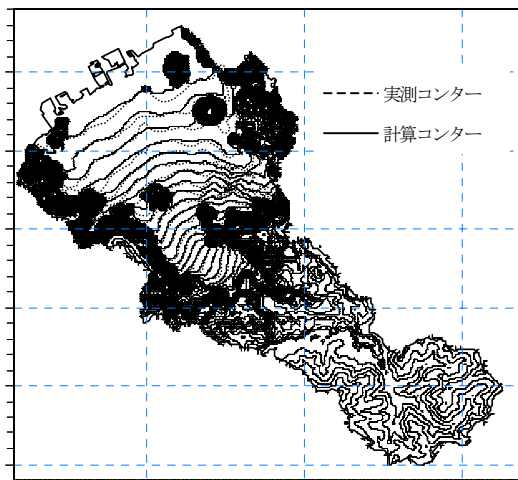


図-11 浅層地下水の水位の等高線

水取水量をパラメータとして地下水位を再現するように、表流水と地下水の供給量を配分した。

(4) 境界条件・初期条件の設定

境界条件として、表-2 に示す条件を各モデルに設定した。各グリッドの生活用水、工業用水の人工系の水量を定量化するにあたっては、各種統計書および関連市町へのヒアリング等から水源別の取水量を整理し、境界条件として設定した⁶⁾。また、本研究ではPenman式を用いて可能蒸発散量を算定し、古藤田による補正係数⁷⁾を乗じて実蒸発散量を推定した。

初期条件として、非灌漑期(1月)の地下水一斉観測結果より得られた浅層・深層地下水位の面的な分布を各グリッドに与えた。

5. シミュレーション結果

(1) パラメータの設定と同定

近年の渇水年や平水年を含むよう、シミュレーション期間を1994年1月1日~1998年12月31日の5年間とした。日単位のシミュレーションを実施し、河川流量及び地下水位の実測値と計算値を比較して、各種パラメータの同定を実施した。

表層モデルでは、土地利用分類(国土数値情報・1/10細分区画土地利用分類データから抽出)等により各グリッドを分類し、等価粗度係数および窪地貯留量を設定した。不飽和層モデルでは、土壌分類(国土数値情報・土壌分類データから抽出)や土地利用分類等により各グリ

ッドを浸透度別⁸⁾に分類し、不飽和浸透特性を設定した。不飽和浸透特性としては、不飽和透水係数と水分特性曲線が必要であり、これらについては、西垣ら⁹⁾により整理されたvan Genuchten式への適用結果を参考にパラメータを設定した。

地下水層モデルでは、各層の透水係数については、現場で行われた透水試験結果を基に一次設定し、再現計算により表-3のとおり設定した。比貯留係数については、文献¹⁰⁾による一般的な値を適用した。また、地下水取水量(農業用水)をパラメータとして、地下水位を再現するように設定した。

河道モデルに必要なパラメータ(粗度係数および漏水係数)については、河川流量の再現計算により同定を実施した。

(2) シミュレーション結果

図-9に同定したパラメータによる河川流量の再現結果を示す。河川流量(日流量)については、平常時の流量については、概ね実測値を再現できている。図-10に浅層地下水(不圧)及び深層地下水(被圧)の地下水位の再現結果を示す。浅層地下水位については、長期的な再現性は良いが、日変動では実績水位との乖離がみられる。深層地下水については、取水の影響による地下水位の低下現象がみられるが、低下の度合いについても精度良く再現できている。また、長期的な傾向を概ね再現できている。設定した透水係数の妥当性を示している。

図-11に浅層地下水(不圧)の水位の等高線を示す。非灌漑期における経年的な水位変動は、概ね同じであるこ

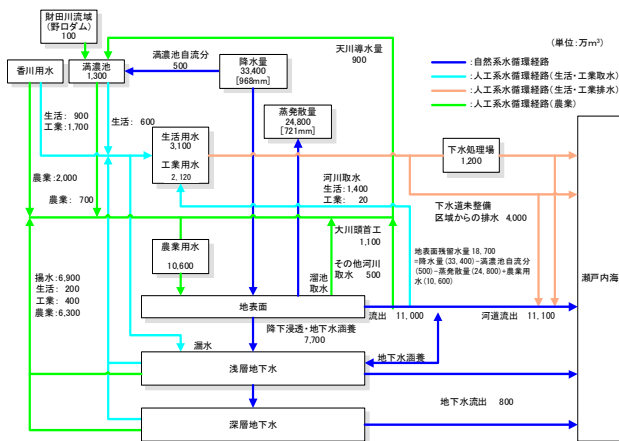


図-12 対象流域における年間水収支 (1996年)

とから、同図に1998年12月における計算水位コンター(実線)と一斉観測結果(破線, 2004年1月)を併記している。同図より、計算水位は部分的に見ると沿岸部の旧河道沿いに実測水位との乖離が見られるが、面的な再現性は比較的良好である。この旧河道沿いの地下水位コンターの乖離の原因としては、この部分の透水係数を過大評価していることが考えられる。

6. 水循環系の評価・要因分析

水循環解析結果をもとに平水年(1996年)における年間水収支図を作成し、図-12に示す。水収支から丸亀平野の水循環系を評価すると、下記のことが考えられる。

- ①年間降水量968mmの内、約74%(=24,800/33,400)が蒸発散量で、地表面に残留する水量の内、約59%(=11,000/18,700)が河川流出し、約41%(=7,700/18,700)が地下に降下浸透する。
- ②人工系使用量の内、満濃池(1,300)、河川水(3,020)、香川用水(4,600)、地下水(6,900)の使用比は約1:2:3:4である。
- ③河川流出量の内、農業用水と都市用水(3,920=1,100+500+1,400+20+900)を合わせて約36%(=3,920/11,000)が取水されている。
- ④地下水の瀬戸内海への流出量は涵養量の約10%(=800/7,700)で、流域の地下水は高度に利用されており、人工系使用量の約44%(=6,900/15,820)が地下水から供給されている。
- ⑤香川用水への依存度は人工系使用量の約29%(=4,600/15,820)で、丸亀平野の水循環系に与える影響は大きい。

7. 結論と今後の課題

本研究では、丸亀平野において水循環系の実態調査を行うとともに、水循環機構を明確にするため、水循環解析モデル(MIKE-SHE)を適用した。得られた結果を次

に整理する。

- ①河川水と浅層地下水は、密接に関連しており、土器川沿川等で3系統の流動傾向が認められる。
 - ②平水年においては、丸亀平野では蒸発散量の占める割合が多いこと、地下水が高度に利用されていること、香川用水への依存度が高いこと等を明らかにした。
- また、今後の課題は、以下のとおりである。
- ①現時点で評価すれば、計算水位の面的な再現性及び浅層・深層地下水の長期的な応答は、比較的良好であると考えられるが、浅層地下水の一部旧河道沿いで乖離が見られる。
 - ②本論文では、丸亀平野における平水年の年間水収支について評価したが、豊水年、渇水年についても検討する必要がある。

現在、②については検討中であり、別報で報告する予定である。

謝辞：用排水系統調査に御協力下さり、貴重な資料を提供して頂いた関係市町並びに満濃池土地改良区、土器川右岸土地改良区連合に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉野文雄：香川中央地域の地下水、香川中央地域地下水利用対策協議会、2003。
- 2) 香川県企画部水資源対策課：平成10年度香川県地下水利用推進調査総括報告書、1999。
- 3) Singh, V. P.: COMPUTER MODELS OF WATERSHED HYDROLOGY, Water Resources Publications, 1995。
- 4) Abbott, M. B. et al: An Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen "SHE" 1: History and philosophy of a physically based distributed modelling system, Journal of Hydrology, Vol.87, pp.45-59, 1986。
- 5) Abbott, M. B. et al: An Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen "SHE" 2: Structure of a physically based distributed modelling system, Journal of Hydrology, Vol.87, pp.61-77, 1986。
- 6) 安陪和雄, 大八木豊：分布型流出モデルの広域的適用, 水工学論文集, Vol.46, pp.247-252, 2002。
- 7) 古藤田一雄：Estimation of River Basin Evapotranspiration, Environmental Research Center Papers, No.8, pp.1-66, 1986。
- 8) 中野秀章：森林水文学, 共立出版, 1980。
- 9) 西垣誠, 竹下祐二：室内及び原位置における不飽和透水特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学土木工学科, pp.30-95, 1993。
- 10) Anderson, M.P. and Woessner, W.W.: Applied Groundwater Model Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, p.41, 1992。

(2005. 9. 30 受付)