

流域水循環解析モデルの構築

○常松晃¹・小坪洋巳²・桜井剣³

概要：

気候変動の影響等による極端な少雨や渇水が懸念される状況においては、表流水と地下水を一体的に管理し、持続可能な資源として適正な利用を図っていくことが必要である。これまで、表流水の流出、蒸発等についてはある程度の知見があるが、表流水と地下水を関連づけた知見はほとんどない。一方で水循環を考えていく上では、表流水と地下水の相互関係の把握が必要である。

このため水資源機構（以下「機構」という。）では、主な水資源開発施設を全て機構が管理している豊川水系を対象に、三次元水循環解析モデルの構築を行った。構築したモデルは、相互に影響する表流水と地下水の流動を解析し、人為的な水利用や気候変動予測を踏まえた水収支計算、および解析結果に基づく表流水や地下水の流動を視覚的に再現できるものである。

構築したモデルによる再現計算の結果、豊川流域では人為的な水利用による影響は、地下水流線の変化に顕著に見られ、地下水の流動範囲が表流水の流域界を越えて、豊橋平野南部の渥美半島付け根付近まで拡大する傾向等が確認された。

キーワード：三次元水循環解析モデル、地下水、可視化、

1. はじめに

近年の少雨化傾向や地球温暖化に伴う気候変動等、これまで前提と生きてきた気象、水文状況の変化により、治水、水利用に新たな問題が顕在化しており、治水、利水、河川環境の保全のバランスの取れた適正な水資源管理が求められている。

こうした中、2014年7月に「水循環基本法」が施行され、地下水を含む水が「国民共有の貴重な財産であり、公共性の高いもの」とであると法的に位置付けられ、今後地下水を含む水資源管理のための基本的な施策が検討されていくこととなった。

しかし、定点観測の結果による地下水位のみで、目に見えない地下水の流動を把握しようとする従来の水管理には限界があることから、数値解析により表流水、地下水一体の水循環構造をわかり易く把握する手法が必要となる。

本稿は、表流水、地下水一体の水資源管理の実現に向けた検討に資するため、豊川流域を対象とした表流水、地下水を一体に取り扱える水循環解析モデルを構築するとともに、解析結果から水循環構造の見える化を試み、それらの特徴や人為的な水利用による水循環への影響を分析するものである。

2. 豊川水系の概要

豊川は愛知県北設楽郡設楽町にある鷹ノ巣山（通称：段戸山）を源とし、愛知県東部の山間部から豊橋平野へ流下して三河湾に注ぐ一級河川である。（図-1）

本川流路延長77km、流域面積724km²と、一級河川の中で特に大規模な河川ではないが、愛知県東三河地域や静岡県湖西地域の水道、農業、工業など各種用水は、その多くを豊川に依存しており、地域を支える水源となっている。

このため、豊川水系は平成2年2月に全国で7番目の「水資源開発水系（フルプラン水系）」に指定され、水資源開発基本計画に基づいて総合的な水資源の開発と利用の合理化が進められているところである。

豊川流域の年間降水量は、上流域～下流域で約2,400mm～1,800mmと我が国の平均（約1,700mm）より大きいものの、季節による降水量の偏りが大きく、豊川の河況係数（年間の最大流量と最小流量の比）は約8,000（日本の河川中第1位）と、流量変動が極めて大きい河川である。

このため、豊川水系だけでは水需要を十分に賄えないことがあり、豊川用水事業において、隣接する天竜川水系からの導水（振草導水：最大15m³/s、佐久間導水：最大5,000万m³/年）が行われている。

-
1. 本社経営企画部 計画課 主幹
 2. 本社経営企画部 計画課長
 3. 本社経営企画部 計画課 課長補佐

豊川用水事業により、豊川から取水された水は、総延長約 112km に及ぶ幹線水路によって、渥美半島等を含む東三河地域全域と静岡県の浜名湖西部地域に供給されており、流域を超えた広域的な利用がなされているが、渇水時には河川流量が著しく減少する状況となっている。

一方、地下水の利用について、環境省の全国地盤環境情報ディレクトリによると、豊川流域下流部の豊橋平野における平成 24 年度の揚水量は約 255 千 m^3 /日。近年、豊橋平野の地下水位は上昇傾向にあり、累積的な地盤沈下の傾向は見られていない。

3. 地表水・地下水一体管理の必要性

近年、地球温暖化に伴う気候変動により降水特性等が変化し、極端な大雨の頻度が増加する一方で、無降水日の増加や積雪量の減少が予測されている。これにより、河川流出量の減少のほか、春先の農業用水等を融雪に依存している地域の水利用に大きな影響が生じるなど、将来の渇水リスクが高まる懸念がある。

これら水資源に対する新たな不安定要因が予測されている中で、水利利用の安全性を確保するためには、地下水を適正な保全と管理の下で持続的に利用可能な水源とし、表流水と一体的に管理していくことが必要となっている。

このため、両者の水循環を再現、把握、評価し、機構施設の効率的な水運用・水資源の管理に資するツールとして、水循環モデルの構築を行った。

4. 三次元流域水循環モデル構築

4-1 水循環解析の要件

今回のモデル構築に当たっては、総合性、発展性の高い水循環解析モデルとするため、地下水と表流水を一体的に解析できる「統合型水循環シミュレーションシステム（図-2）」を用いることとした。

このシステムは、地形、地質、土地利用等条件を不定形の格子で忠実にモデル化でき、降雨、蒸発散量を入力条件として、表流水と地下水の間の伏没・湧出などの相互関係の解析が可能である。

気候変動を想定した影響の検討は、降雨、蒸発散、海水面などの気候条件を設定することによって可能となる。

4-2 水循環解析モデルの構築

(1) 対象範囲

水循環解析の対象領域は、豊川流域に関わる表流水、地下水一体の水循環域をカバーするため、豊川流域より広げた範囲の谷筋まで含めることを基本とし、地質構造

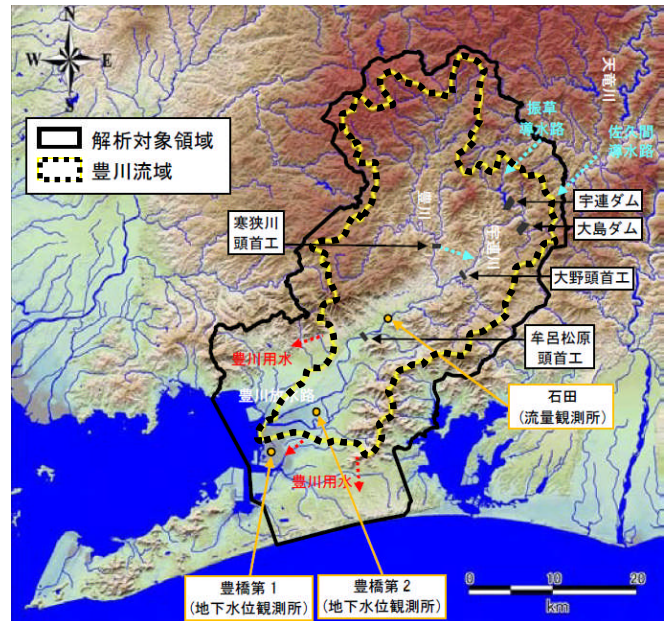


図-1 豊川流域図（解析対象範囲）

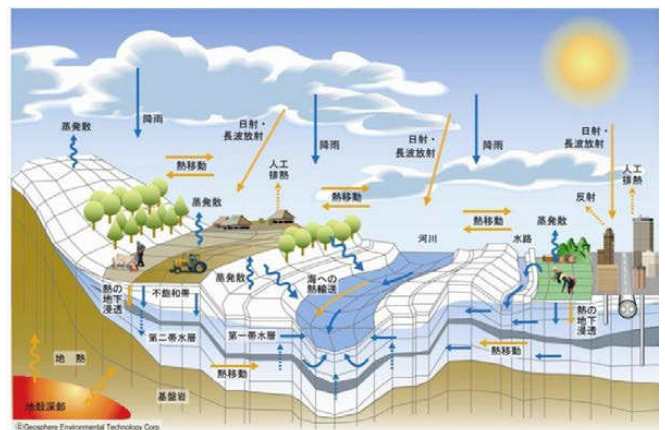


図-2 統合型水循環シミュレーションシステムのイメージ

や地下水揚水状況を踏まえ、豊橋平野の低平地部と渥美半島の一部を含む約 1,380 km^2 （図-1 黒線囲）とした。

(2) 格子データの作成

水循環解析モデルの空間スケールの設定にあたり、平面格子の分割間隔は豊川本川の河道規模に合わせて約 250m を基本とした。ただし、河道網や地形形状を適切に反映するため、格子間隔が均一でない変形格子とし、地形の変化点や河道周辺は間隔を密に、豊川流域外の山間地等は粗な間隔とした。このため、格子の解像度は 200m ～500m まで変化している。

鉛直方向の格子は、地下水の流動がモデル底部と干渉しないよう標高-3,000m までを対象に 25 層に分割した。層間隔は地形・地質を考慮して場所毎に調整したが、全体に地表に近い部分は密、深い部分は粗となっている。

以上の条件により作成した結果、平面格子数は13,382となった。更に、平面格子を鉛直方向へ拡張し、3次元格子システムとした結果、解析領域全体の格子総数は334,550となった。

(3) 陸面分布データのモデル化

流域の地表面の状況を反映させた陸面分布データのモデル化にあたっては、それぞれの平面格子に降水量、蒸発散量、地形、土地利用等の入力情報を当てはめる必要がある。

土地利用については国土数値情報のメッシュデータにより整理したが、気象観測データや標高データなど、元のデータが観測点ごとの点情報として得られている場合、観測点でない地点のデータは周囲の観測点のデータから補間することで面的分布を整理した。

これらの陸面分布データを平面格子の解像度に合わせて当てはめ、地表モデルを作成した。

(4) 3次元地質構造のモデル化

地質構造のモデル化にあたって、表層地質は（独）産業技術総合研究所で公開している20万分の1シームレス地質図、地下地質は5万分の1地質図幅および同説明書等に示されている地質断面図や基底面コンターを基本とし、データが整合しない部分は地形データの河床や段丘地形などの分布を判読して修正した。

水理地質区分は図-3に示す21区分を設定し、それぞれの水理地質区分に対して分布範囲と基底面等高線、層厚コンター図を作成し、主要帯水層の連続性に着目して水理地質構造モデルを作成した。

(5) 水利用のモデル化

水利用のモデル化にあたり、河川水については発電を除く豊川流域の取水実績において、大野頭首工と牟呂松原頭首工による取水が全体の97%を占めることから、この2施設の取水と寒狭川頭首工による導水を再現することとし、これに佐久間・振草導水による流域外からの導水、および宇連・大島ダムによる貯留・放流を含めて、取排水システムをモデル化した。

地下水については、対象区域にある407カ所の揚水井の位置（緯度・経度）と取水深度、取水量（揚水量）の実績値を解析モデルに割り当てた。

4-3 水循環解析モデルの検証

構築した水循環解析モデルにより、2003-2007年の5年間を対象とする再現計算を行い、実測値と比較した。

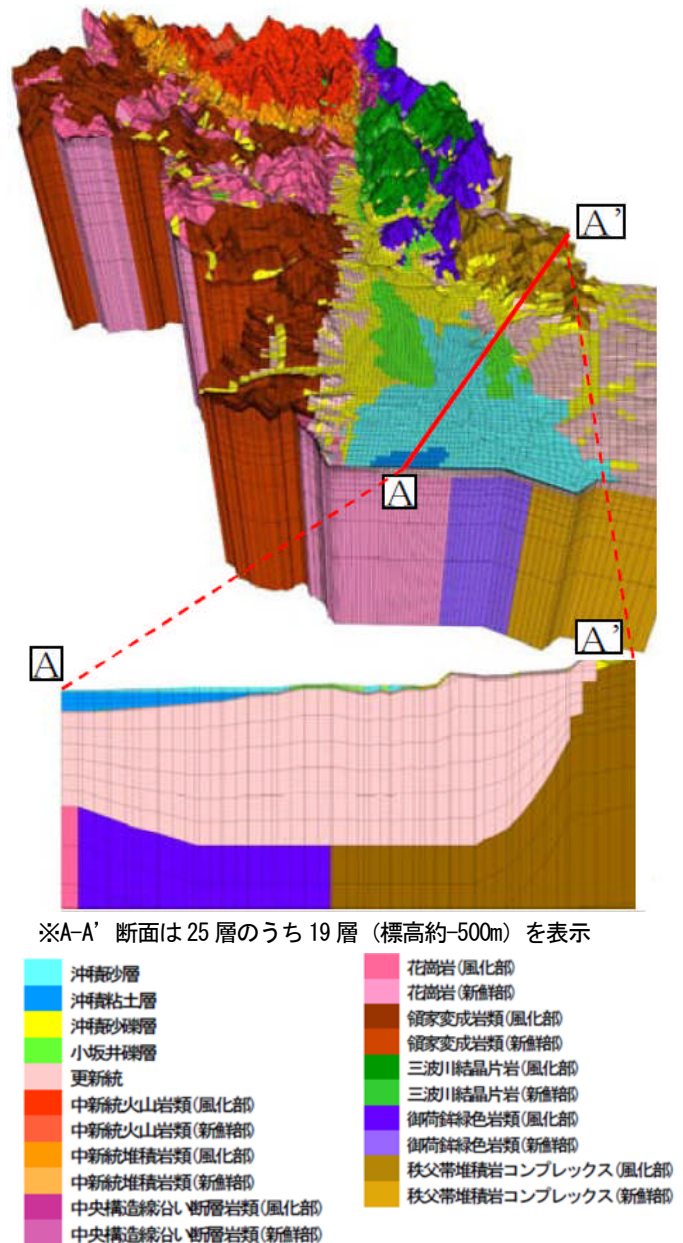


図-3 豊川流域水循環解析モデル（三次元モデル）

豊川の中流域にある流量観測所「石田」における流量の計算結果を図-4に示す。出水時のピーク付近で観測値と計算値に乖離を生じている部分が見られるものの、全体的な流況の変化は概ね再現されている。

次に、豊橋平野中心部にある地下水位観測所「豊橋第2」における地下水位の計算結果を図-5に示す。期間全体を通して、計算値は観測値に対して2.5m程度低いものの、観測値が変動しても両者の差には大きな変化はなく、地下水位の変動状況は概ね再現されている。

5. 水利用による水循環の変化

帯水層における地下水流動が、人為的な水利用（揚水）によってどのように変化するのか、水循環モデルによる

解析結果から「見える化」した結果を図-6に示す。

人為的な水利用がある状態では、水利用がない状態と比べて、流線が揚水地点に集中する様子が顕著である。この影響は広範囲に及び、「水利用なし」では河川に流出している流線が、「水利用あり」では河川を地中で横断して流域外から揚水地点に集まる流線に変化している。

豊川流域に流入する地下水の流動範囲（図-6 破線圏）に着目すると、「水利用あり」の場合、地下水の流動範囲が流域外に大きく拡大し、その範囲は豊橋平野部の全域から渥美半島付け根付近にまで及んでいる。

6. おわりに

今回のモデル構築により、豊川流域における表流水と地下水の相互の関係や流動の状況について、気象条件や

人為的な水利用等の条件を与えて解析し、また図化することが可能となった。

今後は、水循環基本法に関わる施策の動向を見据えつつ、本モデルを水資源管理へ活用していくため、特に渇水時における地下水の流動、河床からの地下水湧出・伏没といった表流水に与える影響など、渇水時特有の水循環の状況等に着目した検証・分析を進める。

地下水は、渇水時はもとより、震災や津波等で既存の水道網が寸断するといった大規模災害時の水源としても重要と考えられる。例えば、通常時は表流水主体の水利用によって、地下水の温存、積極的な涵養を行い、緊急時には表流水の不足を補う代替水源として活用するなど、表流水と地下水の一体的な利用について、平素から検討を深めておくことが必要である。

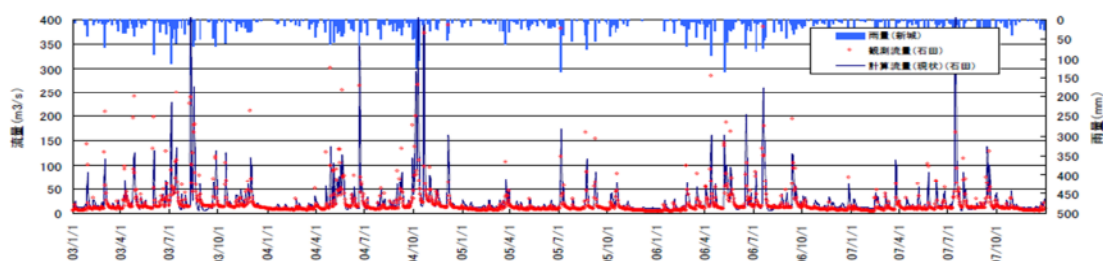


図-4
河川流量の計算値と
観測値の比較
(石田地点)

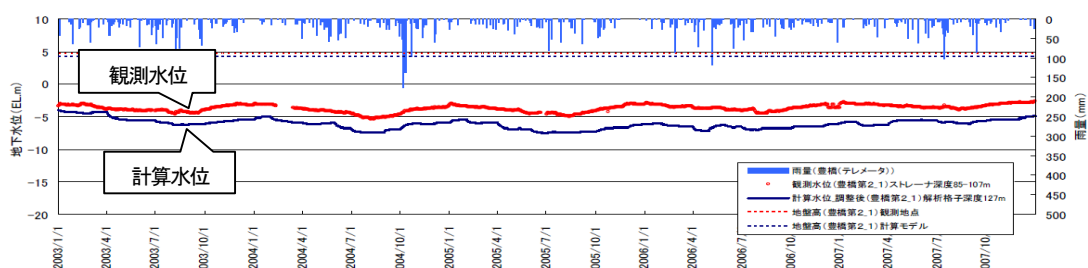


図-5
地下水位の計算値と
観測値の比較
(豊橋第2：
ストレーナ深度 85~107m)

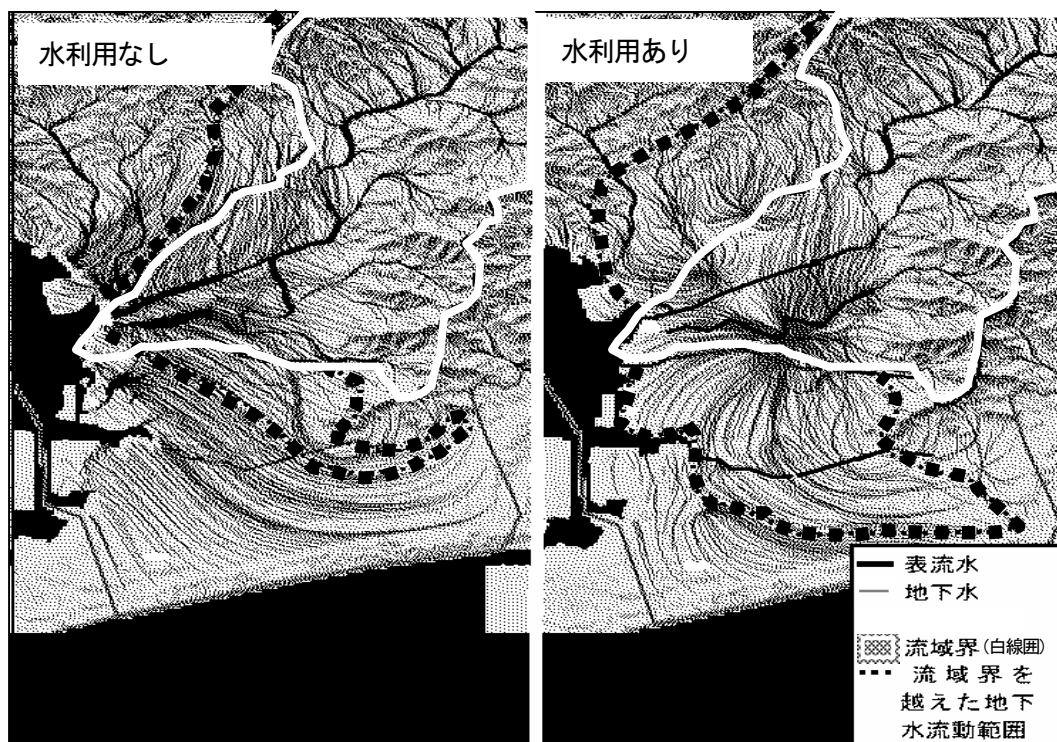


図-6
水利用の有無による
表流水と地下水の流線
の比較（帯水層）

