

# 豊川水系における水循環構造に関する研究

## A study on water cycle structure in Toyo River Basin

水循環・まちづくりグループ 研究員 後藤 勝洋  
水循環・まちづくりグループ グループ長 柏木 才助  
河川・海岸グループ 研究員 伊藤 将文

2014年3月の通常国会において水循環基本法が成立し、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る。また、近年の少雨化傾向や地球温暖化に伴う気候変動等、これまで前提と考えてきた気象、水理状況の変化により、治水、水利用に新たな問題も顕在化しており、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。そのためには、目に見えない地下水の流動を定点観測のみにより把握しようとする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可視化する技術の構築が重要となる。

本研究は、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した。結果、豊川流域では、少雨時に地下水の湧出が流況の改善に寄与する方向に働く傾向が見られること、人為的な水利用による影響は、特に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：水資源管理、水循環解析、地下水、表流水、見える化**

The ordinary Diet session enacted Water Cycle Act in March 2014, and water including ground water is regarded by law as valuable property of high public value and is shared by all people. Implementation of fundamental policies on water resources management including ground water will be considered shortly. Additionally, new problems of flood control and water use have become obvious, according to the changes of climate and hydraulic conditions which had been taken for granted, including decrease of rain in recent years and climate change caused by global warming. Consequently, proper water resource management is required with balanced flood control, water use, and preservation of river environment. For this purpose, there are limitations in water resources management by observation of invisible ground water flows at a fixed point, and therefore, it is important to develop technology to visualize easily the water cycle structure of surface water and ground water as a unit by quantitative analysis.

This research, in the interest of assisting implementation of water resources management of surface water and ground water as a unit, developed a water cycle analysis model that considers surface and ground water together in Toyo River Basin, we attempted to visualize water cycle structure and analyzed its characteristics and effect on water cycle by human water uses. We confirmed that in Toyo River Basin, there is a trend that availability of ground water during the time of light rain helps improve flow condition, and effect of human water uses are seen significantly on the changes to ground water flow lines, of which the flow range expand beyond the watershed boundary and extend to the base of Atsumi Peninsula in the southern Toyohashi Plain.

**Key Words: water resource management, water cycle analysis, ground water, surface water, visualization**

## 1. はじめに

2014年3月の通常国会において水循環基本法が成立し、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る。また、近年の少雨化傾向や地球温暖化に伴う気候変動等、これまで前提と考えてきた気象、水理状況の変化により、治水、水利用に新たな問題も顕在化しており、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。そのためには、目に見えない地下水の流動を定点観測のみにより把握しようとする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やすく可視化する技術の構築が重要となる。

本研究は、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。なお本報告は、「豊川流域他水循環モデル作成業務、独立行政法人水資源機構発注」の成果よりとりまとめたものである。

## 2. 豊川流域の水利用の概要（図-1）

豊川は、愛知県北設楽郡設楽町の段戸山（標高1,152m）を源に発する1級河川（流路延長77km、流域面積724km<sup>2</sup>）で、愛知県東部の山間渓谷を南下して宇

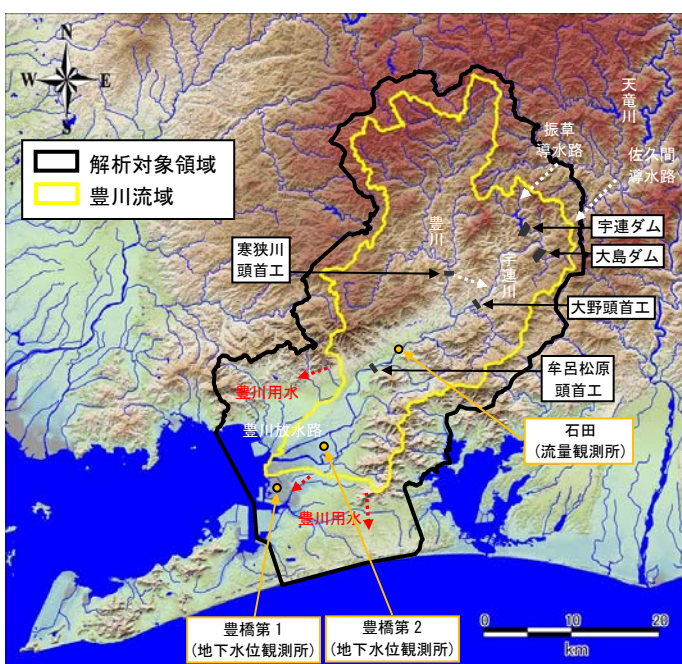


図-1 豊川流域図（解析対象範囲）

連川と合流し、下流部で豊橋平野を流れ、豊川市内で豊川放水路を分派し、豊橋市内で再度合流しながら三河湾に注ぐ。

豊川流域の年間降水量は、上流域～下流域で2,400mm～1,800mmと大きいものの、季節による降水量の差が大きく、河況係数（最大流量と最小流量の割合）が約8,000に達する、流量変動の大きい河川である。このため、豊川水系だけでは十分に水需要を賄えないことがあり、豊川用水事業にて隣接する天竜川水系から導水（振草導水：最大15m<sup>3</sup>/s、佐久間導水：最大5千万m<sup>3</sup>/年）が行われている。また、豊川の水利用は、渥美半島等を含む東三河地域全域と静岡県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。

豊川水系における発電用水を除く最大取水量（水利権量）は、約50m<sup>3</sup>/sであり、そのうち豊川用水に係る取水量が38m<sup>3</sup>/s（大野頭首工で30m<sup>3</sup>/s、牟呂松原頭首工で8m<sup>3</sup>/s）で全体の約8割を占めている。用途別の最大取水量は、水道用水が約3.45m<sup>3</sup>/s、工業用水が約3.38m<sup>3</sup>/s、農業用水が約33.93m<sup>3</sup>/s（うち、慣行水利権が約8.2m<sup>3</sup>/s）であり、農業用水が全体の約8割を占めている。渇水時には主要な取水地点下流の河川流量が著しく減少し、水涸れ状態になるなどの問題が発生している。

一方、豊川流域下流部の豊橋平野（東三河地域）における地下水揚水量は、255千m<sup>3</sup>/日（平成24年度時点）である。近年、豊橋平野の地下水位は上昇傾向（図-2：豊橋第1観測所（深層）の観測結果を例示）にあり、経年的な地盤沈下の傾向は見られていない。また、昭和60年の調査資料によると、豊橋市沿岸部を中心に地下水塩水化が確認されているが、近年は、昭和60年当時に比べて、地下水位が上昇しており、塩水化の危険性は減少している。

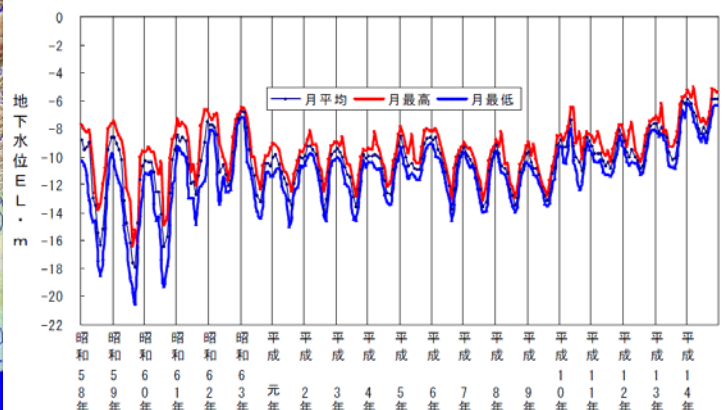


図-2 豊橋平野の地下水位（豊橋第1：深度80～83m）

出典：国土審議会水資源開発分科会豊川部会資料

### 3. 水循環解析モデルの構築

#### 3-1 水循環解析モデルの要件

表流水、地下水一体の水循環構造の解明、持続可能な水利用、気候変動による影響の把握等を踏まえ、今後の水資源管理の検討に資する、総合性、発展性の高い水循環解析モデルとするために、以下の要件に着目して解析モデルを構築した。

- ①地形、地質、土地利用などの状況を忠実にモデル化し、水の流れの連続性を物理的に表現できる。
- ②表流水、地下水を連成して一体的に解析できる。
- ③表流水、地下水の流れからなる水循環の全体像3次元的に捉えられる。
- ④降雨、蒸発散などの時間変動による表流水及び地下水の変化を、任意の時間単位で解析できる。
- ⑤過去～現在の再現計算に加え、将来の気候変動による影響を条件設定し、予測計算ができる。
- ⑥地下構造物の建設などの人為的改変による影響を条件設定し、予測計算ができる。
- ⑦地表付近の地盤の不飽和特性を的確に表現できる。
- ⑧水質、水温など、水の質的变化の予測計算ができる。

上記の要件を満足する水循環解析モデルとして、地下水と表流水を連成して一体的に解析できる「統合型水循環シミュレータ(図-3)」(以下、「本モデル」と記載する)を用いることとした。本モデルは、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、地下水間の伏没、湧出などの相互関係の解析を可能とする。地盤中は空気と水の2相系の流れを扱い、地表付近の地盤不飽和特性を的確に表現することが可能である。また、解析範囲は、地形、地質等の条件を考慮して水循環域全体を対象とし、解析の目的に応じて任意に解析時間単位を設定可能である。気候変動による影響予測は、降雨、蒸発散、海水面などの条件設定により予測可能とする。

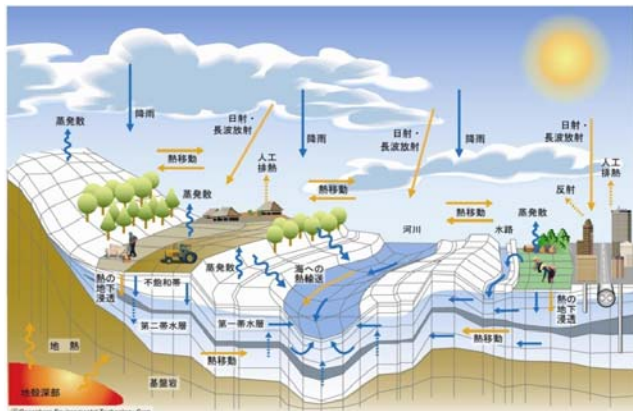


図-3 「統合型水循環シミュレータ」の概念

#### 3-2 水循環解析の基本条件

##### (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、地質構造や地下水揚水状況を踏まえ、豊橋平野の低平地部、渥美半島の一部を含む領域(図-1)を設定した。

##### (2) 時空間スケール

水循環解析に当たっては、豊川流域の水循環構造の全体像を明らかにする観点から、対象範囲の平均的な流況を再現・予測可能な適切な時空間スケールを設定する必要がある。本研究では、少雨年である2005年(平成17年)を含む近年5ヵ年(2003年～2007年)を、人為的な水利用を考慮していない自然状態(利水計算という“自然流況”)の再現、及び、人為的な水利用を考慮した現状の水循環再現のための検証期間とした。解析の時間分解能は、地下水管理を念頭に、流況や地下水位等を再現するため、日単位とした。

水循環解析の空間スケールは、河道網や地形形状を反映するため、水平解像度を豊川本川の河道スケールに合わせて約250m(200m～500m)に設定した。鉛直方向の解像度は、地下水の流動がモデル底部と干渉しないように標高-3kmまでを対象として25層に分割し、地形や地質分布を考慮して場所毎に層間隔を調整した。

##### (3) 水循環解析の基本的な解法

本モデルに採用した基本的な数値解法として、河川や山肌を流れる表流水の流動は、マンニングの平均流速公式を適用した開水路流れでモデル化し、運動方程式のうち、流れへの寄与が小さい慣性項と速度項を省略し、圧力項と重力項、摩擦項で表現した拡散波近似で取り扱った。地下水の流動は、空気・水二相流れを対象とした一般化ダルシー則でモデル化し、表流水と地下水の流れを完全連成で解析を行った。

表-1 水循環解析モデルの時空間スケール

	解析対象範囲	分解能	備考
時間 スケール	2003年 ～2007年	5年平均(定常計算) 及び日単位 (非定常計算)	自然状態 再現
		日単位 (非定常計算)	現状 再現
空間 スケール	水平 約1,400km <sup>2</sup> 鉛直 約3km	約250m (200m～500m)	水平 解像度
		25層	鉛直 解像度
格子数	全格子数 334,550 (平面格子数 13,382)		—

### 3-3 水循環解析モデルの構築

対象範囲の気象、地形、地質、土地利用、水文、水利用などのデータ(表-2)に基づき、表流水・地下水の水循環構造を物理法則に従って再現できる水循環解析モデルを構築した。

#### (1) 陸面分布データのモデル化

水循環解析の入力情報となる降水量、蒸発散量、地形、土地利用(粗度係数)、水利用等のデータについては、観測データに基づく不規則に配置された点データを補完し、解析格子の水平解像度に合わせて陸面分布データを作成した。

#### (2) 3次元地質構造のモデル化

表層地質は産業総合技術研究所で公開している20万分の1シームレス地質図を基本とし、地質区分を設定してGIS上で数値データ化した。地下地質については、5万分の1地質図幅「豊橋及び田原地域の地質」の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にして作成した。本解析で対象とする水理地質の層序を設定し、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GIS上で3次元水理地質モデルを構築した。

#### (3) 水利用のモデル化

河川水の取水は、当該流域の利水実績に基づき、総取水量(慣行水利権、発電用水を除く)の95%以上を占める水利権(1m<sup>3</sup>/s以上)を対象として、流域外からの導水を含む、主要なダム、堰等の関連施設の取排水系統をモデル化した。地下水の揚水は、各揚水地点で整理されている実績値を用いた。

#### (4) 格子データの作成

水循環解析の水平空間解像度に基づき、平面格子システムを作成した結果、平面内の全格子数は13,382となった。本モデルは、河道網や地形形状を反映した変形格子を設定しており、河川の流れに沿って格子を組み込むことに留意し、上流域の山地部はやや粗い格子分割とした。更に、平面格子データを鉛直方向へ拡張し、3次元格子システムを作成した結果、格子総数は334,550となった。

3次元格子システムに陸面分布データ及び3次元地質構造モデルを組み込み、格子毎の数値データを作成した(図-4)。

### 3-4 水循環解析モデルの検証

本モデルの再現性の検証は、人為的水利用のない自然状態の水循環の再現、人為的水利用を考慮した現状の水循環の再現の2段階で行い、それぞれでの段階で

表-2 水循環解析モデルに用いたデータ及びモデル化手法

項目		データ	モデル化手法
気象	降水量	気象庁アメダス 国土交通省・愛知県・水資源機構テレメータ	等雨量線法(クリキング法)により、降水量を陸面分布データ化
	気温・可照時間 ・風速・相対湿度	気象庁アメダス	気温・可照時間・相対湿度・風速、ならびに、土地被覆状態(土地利用)を加味した熱収支法により、蒸発散量を陸面分布データ化
地形	陸域	国土地理院数値地図(5m/10m格子)	水平解像度の異なる標高データセットを合成し、自然近傍補間法により、陸域地形を陸面分布データ化
	河道断面	国土交通省・愛知県横断測量	主要な河川の河道部は、横断測量による最深河床高を縦断的に線形補間して河道地形を再現
	海域	日本海洋データセンター500mメッシュ水深データ	自然近傍補間法により、海域地形を陸面分布データ化
土地利用	利用区分	国土交通省国土数値情報(100m格子)	100m格子数値情報を基本に領域内の土地利用に応じた等価粗度係数を陸面分布データ化
地質	表層・地下地質	産業総合技術研究所20万分の1地質図 産業総合技術研究所5万分の1地質図幅 国土交通省5万分の1土地分類調査 日本地質学会編集日本地方地質誌	既往調査資料に基づき、解析対象範囲の水理地質区分、層序を設定し、GISを用いて表層・地下地質構造を3次元空間分布データ化
		水文	河川流量
	地下水位	国土交通省・愛知県観測データ	
水利用	ダム諸量	国土交通省等運用実績	ダム放流量(実績データ)は、解析への入力用を使用 ダム流入量(実績データ)は、解析結果の検証用を使用
	河川水取水量・導水量	河川水取水量・導水量実績	河川取水量・導水量(実績データ)は、解析への入力用を使用
	地下水揚水量	地下水揚水量実績	地下水揚水量(実績データ)は、解析への入力用を使用



必要な精度を確保できるよう、透水係数や有効間隙率などの物性パラメータの調整を行った。ここでは、現状(検証年 2003~2007年)の水循環の再現結果を示す。

(1) 河川流量の検証結果

河川流量の解析値と観測値の比較を図-5(豊川本川の宇連川合流点下流の石田地点の結果を例示)に示す。降水量の小さい(豊川本川の宇連川合流点下流の石田地点の結果を例示)冬季の流量低減期に数 m<sup>3</sup>/s オーダーで下がりきれていない期間があるものの、全体的な変動傾向は観測値を概ね再現できている。検証期間 5 年間における流量変動、累積流量、流況に対して、解析流量が観測流量を概ね良好に再現していることを解析対象範囲の河川流量観測点において確認できた。

(2) 地下水位の検証結果

地下水位の解析値と観測値の比較を図-6(豊橋平野中心部の地下水位を観測している豊橋第2観測所(深層)の結果を例示)に示す。豊橋平野の主要な地下水観測井において、解析水位と観測水位の差異は 2.5m 程度の範囲内であり、解析水位は長期的な地下水位の変動傾向を概ね良好に再現していることを確認できた。

以上より、現状再現の解析値と観測値の整合性が確認され、本モデルに設定した透水係数や有効間隙率などの物性パラメータが妥当であることが示された。

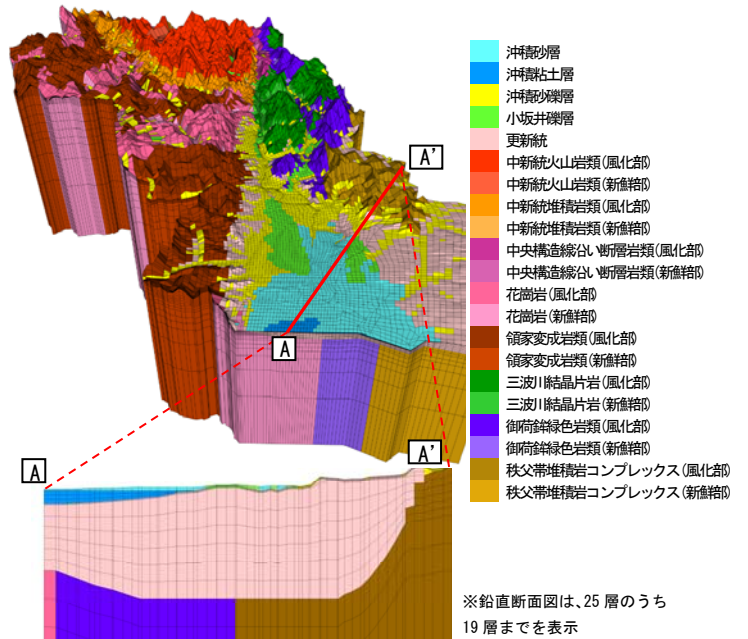


図-4 豊川流域水循環解析モデル(地質構造モデル)

現状(2003-2007年)

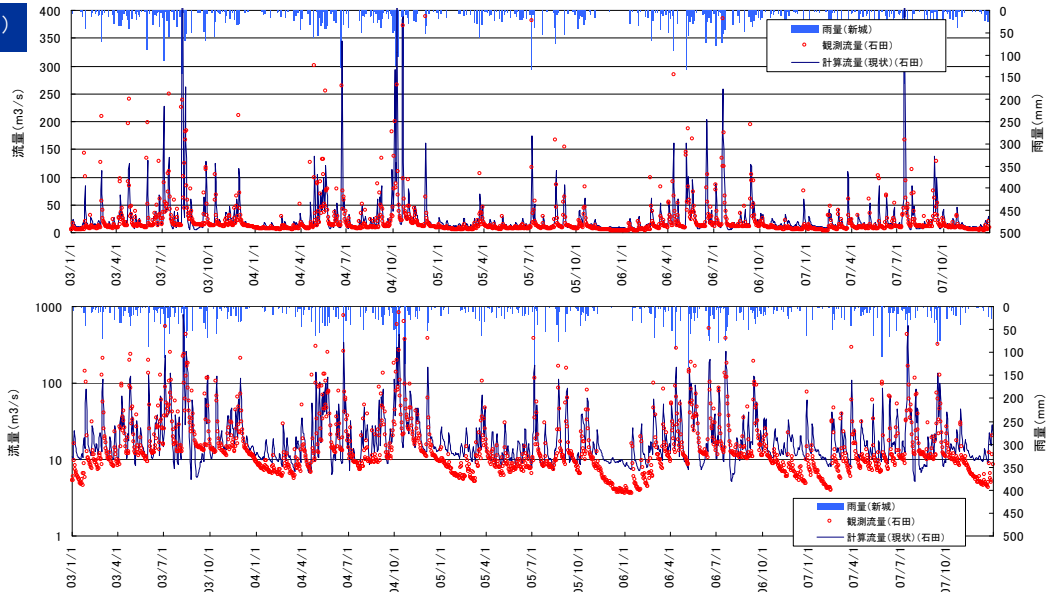


図-5 河川流量の解析値と観測値の比較(石田)

現状(2003-2007年)

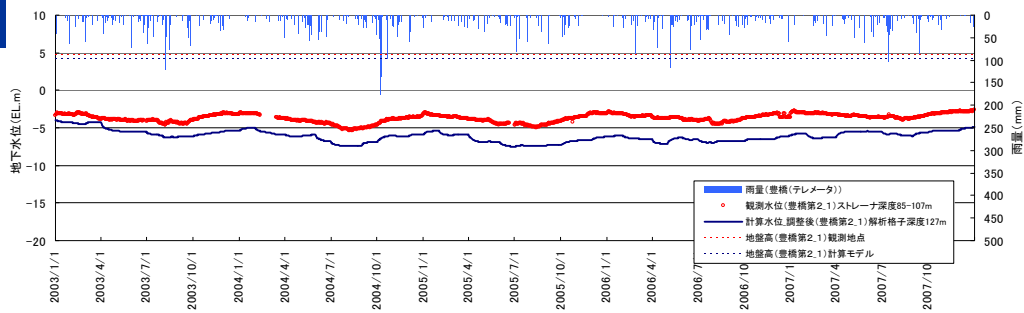


図-6 地下水位の解析値と観測値の比較(豊橋第2: 深度 85~107m)

### 4. 水循環構造の分析

自然状態及び現状の水循環再現の2ケースの解析結果から、豊川流域の水循環構造を図化处理して見える化し、その特徴、人為的な水利用に伴う水循環への影響を分析した。

#### 4-1 流域水循環の視点からの水循環構造

水循環解析結果より、表流水と地下水を一体として捉えた流域水循環の視点からの水循環構造の特徴を分析した。

##### (1) 流域水収支

水循環解析結果から推定した豊川流域全体の水収支の特徴、水利用に伴う変化を示す。

##### ①5ヵ年平均(2003年～2007年)の流域水収支(表-3左)

- ・地表の水収支に着目すると、現状の地表(河川)から海への流出量(9.5億m<sup>3</sup>/年)は、自然状態(11.5億m<sup>3</sup>/年)より約2割(-2.0億m<sup>3</sup>/年)減少しており、その減少分は、流域内に農業用水配水する量を差し引いた河川取水量(1.3億m<sup>3</sup>/年)と蒸発散量の増加量(1.2億m<sup>3</sup>/年)から流域外からの導水量(0.4億m<sup>3</sup>/年)を差し引いた総和(2.1億m<sup>3</sup>/

年)と概ねバランスする。

- ・地下の水収支に着目すると、自然状態と現状で流域外から流入する地下水量(0.3億m<sup>3</sup>/年)は同程度であるが、現状の地下水揚水量(0.2億m<sup>3</sup>/年)より地下蒸発散量の減少量(-0.5億m<sup>3</sup>/年)が上回っているため、自然状態に比べて現状は地下水貯水量の減少が小さくなっている。

- ・5ヵ年(2003年～2007年)で見た平均的な流域水収支は、流入量、流出量が概ねバランスした状態にあると推察される。

##### ②渇水年(2005年)の流域水収支(表-3右)

- ・自然状態、現状ともに、少雨により地表水貯水量が減少(-0.2～1.0億m<sup>3</sup>/年)する傾向が見られるが、地下伏没量(5.8～5.9億m<sup>3</sup>/年)よりも地下湧出量(6.2億m<sup>3</sup>/年)の方が卓越しており、地下水の湧出が少雨による影響を緩和する方向に働いていると推察される。

- ・渇水年(2005年)の流域水収支は、地下水貯水量が減少(-1.2億m<sup>3</sup>/年程度)する傾向が見られる。この傾向は現状だけでなく自然状態にも現れること

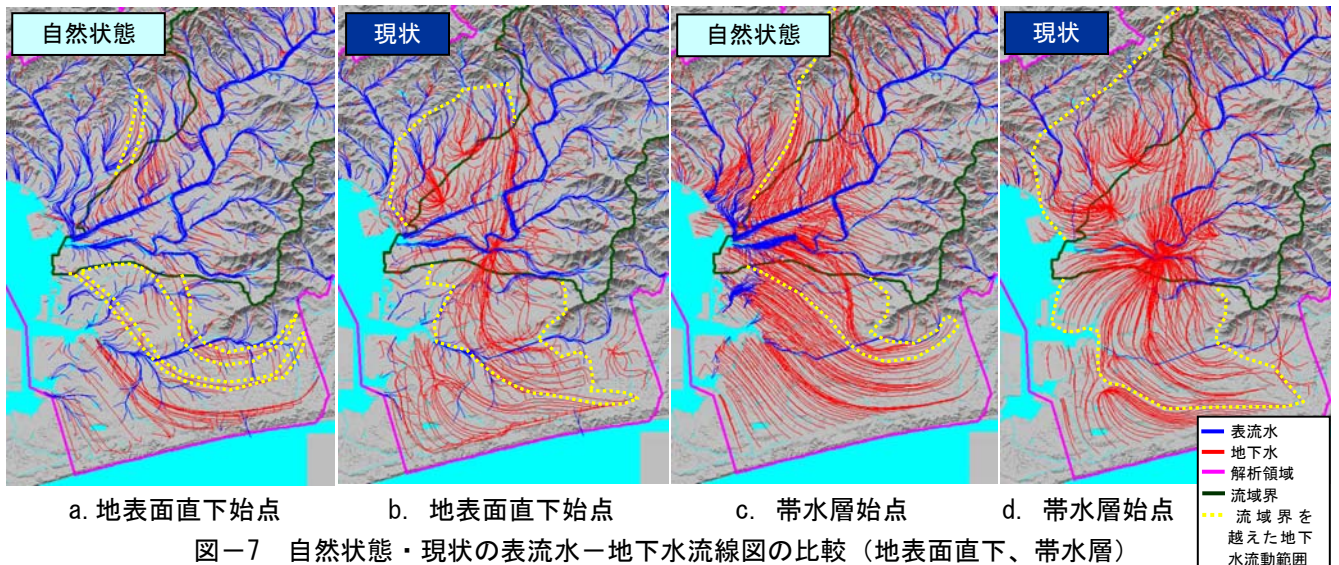
表-3 自然状態・現状の流域水収支の比較 (左:5ヵ年平均(2003年～2007年)、右:渇水年(2005年))

5ヵ年平均(2003年～2007年) 流域水収支		自然状態		現状		変化量 (現状-自然状態) 年総量	
		年総量	降水量比	年総量	降水量比		
地表 水収支	流入量	降水量	1560	1560	1.00	1.00	-
		地表湧出量	690	0.44	690	0.44	0
		湧水量	-	-	40	0.03	40
		農水配水量	-	-	150	0.10	150
	(総流入量)		2250	1.44	2440	1.56	190
	流出量	蒸発散量(地表)	370	0.24	490	0.31	120
		地表流出量	1150	0.74	950	0.61	-200
地下伏没量		730	0.47	740	0.47	10	
(総流出量)		2250	1.44	2460	1.58	210	
地表水貯水変化量		0	0.00	-20	-0.01	-20	
地下 水収支	流入量	地下流入量	30	0.02	30	0.02	0
		地下伏没量	730	0.47	740	0.47	10
		(総流入量)		760	0.49	770	0.49
	流出量	蒸発散量(地下)	95	0.06	50	0.03	-45
		地下流出量	20	0.01	20	0.01	0
		地表湧出量	690	0.44	690	0.44	0
		地下水揚水量	-	-	20	0.01	20
(総流出量)		805	0.52	780	0.50	-25	
地下水貯水変化量		-45	-0.03	-10	-0.01	35	

渇水年(2005年) 流域水収支		自然状態		現状		変化量 (現状-自然状態) 年総量	
		年総量	降水量比	年総量	降水量比		
地表 水収支	流入量	降水量	1020	1020	1.00	1.00	-
		地表湧出量	620	0.61	620	0.61	0
		湧水量	-	-	50	0.05	50
		農水配水量	-	-	130	0.13	130
	(総流入量)		1640	1.61	1820	1.78	180
	流出量	蒸発散量(地表)	330	0.32	460	0.45	130
		地表流出量	750	0.74	610	0.60	-140
地下伏没量		580	0.57	590	0.58	10	
河川取水量		-	-	260	0.25	260	
(総流出量)		1660	1.63	1920	1.88	260	
地表水貯水変化量		-20	-0.02	-100	-0.10	-80	
地下 水収支	流入量	地下流入量	25	0.02	30	0.03	5
		地下伏没量	580	0.57	590	0.58	10
		(総流入量)		605	0.59	620	0.61
	流出量	蒸発散量(地下)	105	0.10	60	0.06	-45
		地下流出量	20	0.02	20	0.02	0
		地表湧出量	620	0.61	620	0.61	0
		地下水揚水量	-	-	20	0.02	20
(総流出量)		745	0.73	720	0.71	-25	
地下水貯水変化量		-140	-0.14	-100	-0.10	40	

単位: 100万m<sup>3</sup>/年



a. 地表面直下始点      b. 地表面直下始点      c. 帯水層始点      d. 帯水層始点  
図-7 自然状態・現状の表流水-地下水流線図の比較(地表面直下、帯水層)

から、水利用による影響ではなく、湧水特有の現象であると推察される。

(2) 表流水、地下水一体流線網

水循環解析結果から推定した豊川流域の表流水ー地下水一体の流線網(図-7:豊橋平野部を表示)の特徴、水利用による影響を示す。

- ・自然状態と現状の地表面直下を始点とする流線(図-7a、b)を比較すると、現状の水利用の影響は地下水揚水が行われている河口付近の豊橋平野部において顕著に見られ、揚水地点に引っ張られる複雑な流向を示す流線が生じている。地下水揚水の影響は広範囲に及び、流域外から河川の下を横断して揚水地点に集まる流線が卓越する。
- ・帯水層を始点とする流線(図-7c、d)も同様に、地下水揚水地点に流線が集まる様相が見られる。地表面直下を始点とする流線に比べて、流向の乱れは小さく、より広範囲から流線が伸びており、流線の集中する箇所も増えることから、地下水揚水が地表面付近に比べて多いことが影響していると推察される。
- ・地下水の流動範囲(図中黄色点線)の変化に着目すると、自然状態、現状ともに流域外から流入する地下水の流線が確認されるが、現状の方が地下水の流動範囲は広く、北は豊橋平野部の全域、南は渥美半島付け根付近まで及んでいる。

4-2 表流水の視点からの水循環構造

水循環解析結果より、表流水の視点からの水循環構造の特徴を分析した。

(1) 河川縦断水収支(湧出・伏没量分布)

水循環解析結果から推定した、現状の湧水年(2005年)における豊川本川、宇連川の縦断的な水収支(湧出・伏没量分布)の特徴を示す。

① 豊川本川の湧出・伏没量(図-8)

- ・豊川本川では、全区間にわたって河床からの地下水の湧出が卓越する傾向にある。
- ・豊川本川における河床湧出量は、宇連川合流点~当古間(36k~13k)の累積量で $0.46\text{m}^3/\text{s}$ であり、これは当古地点の平均流量 $28.26\text{m}^3/\text{s}$ (現状再現計算結果、5ヵ年平均値)の2%程度であるが、流況の改善に寄与する方向に働いているものと推察される。

② 宇連川の湧出・伏没量(図-9)

- ・宇連川も豊川本川と同様に、全川を通じて河床からの地下水の湧出が卓越する傾向にある。
- ・宇連川における河床湧出量は、宇連ダム下流~大野頭首工間(17k~4k)の累積量で $0.52\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、これは大野頭首工の平均流入量 $8.9\text{m}^3/\text{s}$ (現状再現計算結果、5ヵ年平均値)の6%程度に相当する。なお、湧水ピーク時(2005年12月1日)の累積河床湧出量( $0.40\text{m}^3/\text{s}$ )は、大野頭首工流入量( $4.0\text{m}^3/\text{s}$ )の1割程度に相当し、流況改善効果を得ているものと推察される。
- ・豊川本川の河床湧出量に比べて、宇連川の河床湧出量の方が1km単位区間平均で3倍程度大きい。

③ 河川流量と河床湧出量の応答関係

現状の主要な地点における河川流量と河床流入量の時間変化の関係(図-10:湧水年(2005年)の宇連川

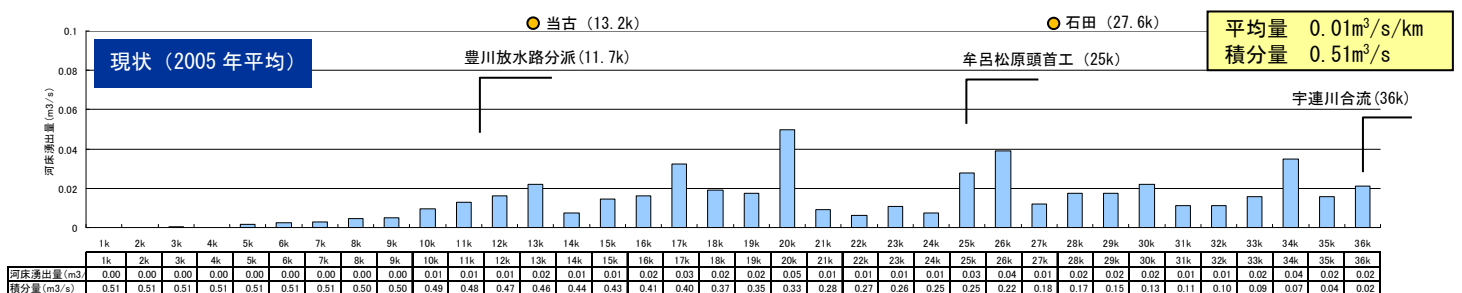


図-8 豊川本川における河床湧出量の縦断分布

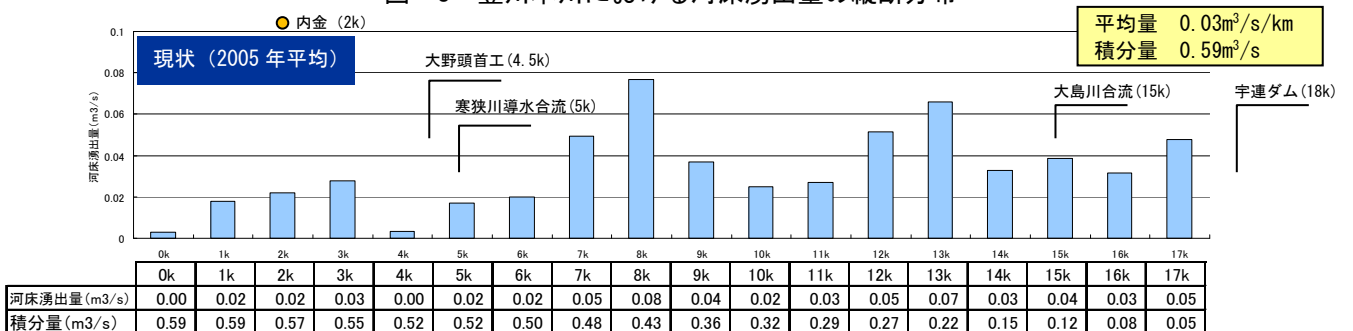


図-9 宇連川における河床湧出量の縦断分布



の大野頭首工地点の結果を例示)を示す。

- ・河床湧出量は、河川流量の変化に応じて変動しており、河川流量が急激に増加すると、河床湧出量が減少し(伏没に向かう)、その後、再び湧出量が増加する傾向が見られる。これは、河川水位が上がることで河川水と地下水の間のポテンシャル差が生じ、河床から地下への流入が一時的に卓越することによると推察される。
- ・年間を通じて一定量以上の河床湧出(宇連ダム下流～大野頭首工間で  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$  程度)が生じていることから、渇水期の河川流況の改善に河床湧出が一定の効果(大野頭首工流入量の6%程度)を担っていると推察される。

(2) 流域の湿潤状況と地表流出の関係

水循環解析結果から推定した、現状の平水年(2004年)、渇水年(2005年)における流域の湿潤状況(地下空隙量)と地表流出(流域全体の地表湧出・伏没、河川流量)の関係(図-11)を示す。

①流域全体の湧出・伏没

- ・流域全体の地下伏没量の年間変動を見ると、降雨に対応して大きく変動しており、降雨時に急増し、降雨が終わると急速に低減する傾向が見られる。一方、流域全体の地表湧出量の年間変動は小さく、降雨時には若干増加する程度であり、流量変動を緩和する方向に働く傾向があると推察される。
- ・平水年(2004年)では、夏季～冬季(5月～12月)

にかけて地下空隙量が低下(貯水量が増加)しており、その期間中の地下伏没量は春季(4月)に比べて降雨に対する増加量が小さいことから、地下水が貯水されており、地表水が地下へ伏没しにくい状況にあると推察される。

- ・渇水年(2005年)では、降雨による地下水の供給が少なく、地下空隙量が年間を通じて大きい(貯水量が小さい)、平水年(2004年)のような地下伏没量が制限される傾向は見られない。特に11月以降の降水量の低減に対応して、地下空隙量の急増に伴って地表湧出量と地下伏没量の変動も縮減しており、流域水収支(表-3右)で確認されたように、地下水貯水量が減少している状況が伺える。

②地表・地下の水循環から見た地表流出プロセス

- ・地表湧出量の年間変動は小さいが、降雨増水時以外の平常時の河川流量より大きい。これは、平常時の流水が地下への湧出・伏没を経て流出していることを示唆するものであり、このプロセスが河川の基底流量を形成していると推察される。
- ・洪水時においては、地下からの地表湧出量の大きな増加は見られないことから、洪水時の流量増加は地表面流出を主体としていると推察される。
- ・以上のことから、流域の湿潤状況(地下空隙量)は、基底流量や洪水流出の状況を判断する、低水管理上、治水上の重要な情報指標の一つとなり得る可能性があると考えられる。

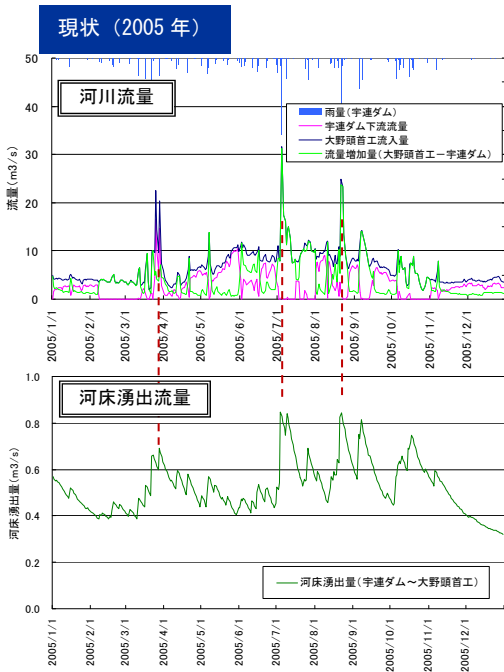


図-10 河川流量と河床湧出量(宇連ダム～大野頭首工間累積)の関係

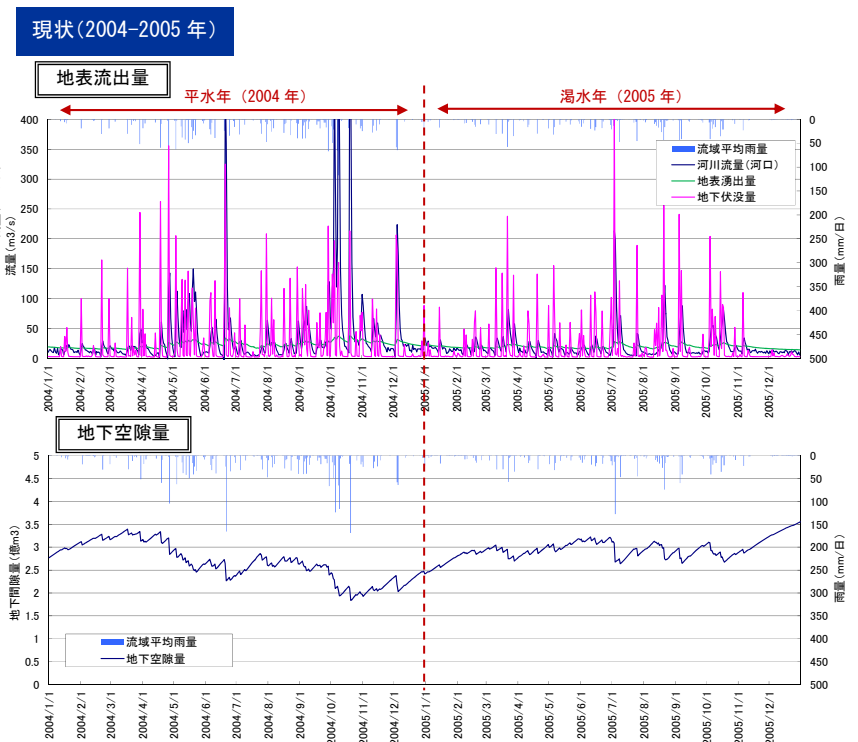


図-11 地表流出量と地下空隙量の関係



### 4-3 地下水の視点からの水循環構造

水循環解析結果より、地下水の視点からの水循環構造の特徴を分析した。

#### (1) 人為的な水利用に伴う地下水位への影響

水循環解析結果から推定した、豊橋平野部における自然状態と現状の地下水位の差分コンター（図-12：現状で地下水揚水量の大きい時期の結果を例示）より、人為的な水利用に伴う地下水位への影響について示す。

- ・地下水揚水が行われている帯水層に着目すると、自然状態に比べて現状では最大で30m程度地下水位が低下している箇所が見られる。浅層と深層の帯水層では、地下水揚水量に依存して分布が異なり、深層の帯水層の方が地下水位の低下が顕著（全域で14m以上低下）に現れている。
- ・昭和60年に確認された地下水塩水化区域の境界と地下水位が大きく低下している地点が対応していることから、地下水塩水化の要因として、地下水揚水が集中している箇所における地下水位の低下が関係していると推察される。現状では、昭和60年当時の地下水位より上昇し、地下水塩水化の発生は抑制され

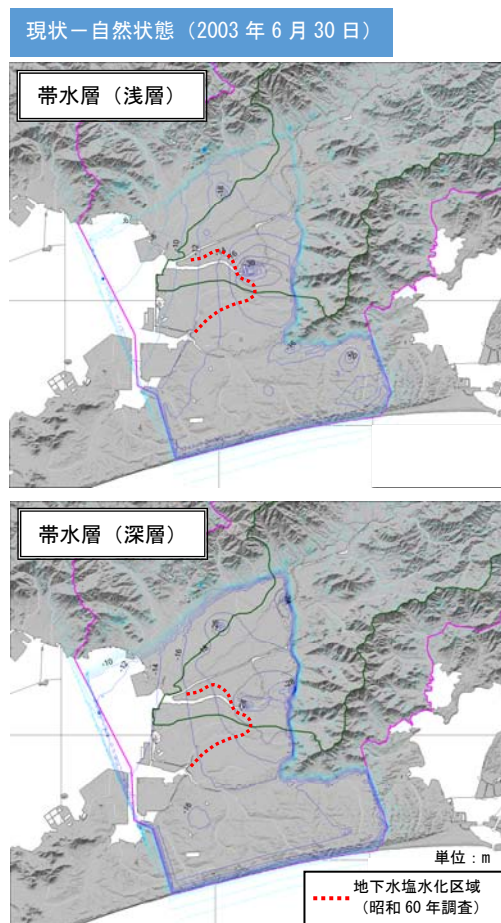


図-12 水利用による豊橋平野の地下水位の低下量（自然状態と現状の地下水位の差分コンター）

ているが、今後の水需要の増加によっては、渇水期の少雨傾向と地下水揚水量の増加が重なることで一時的に地下水位が低下するような状況になると、流線図（図-7.d）でも見られるような沿岸域からの地下水流動が生じ、地下水塩水化の発生も懸念される。

#### (2) 帯水層水収支

水循環解析結果から推定した、自然状態と現状の豊橋平野地下における帯水層水収支（図-13：渇水年（2005年）の結果を例示）より、人為的な水利用に伴う帯水層水収支への影響について示す。

- ・自然状態では、帯水層への流入量（0.44億 $m^3$ /年）と流出量（0.47億 $m^3$ /年）は概ねバランスしている（渇水年のため、地下貯水量は微減少傾向）。一方、現状では、帯水層への流入量（0.59億 $m^3$ /年）は、自然状態に比べて1.3倍程度に増加しており、流出量（0.24億 $m^3$ /年）と地下水揚水量（0.36億 $m^3$ /年）の総量と概ねバランスしている。
- ・現状の帯水層流入量に対する地下水揚水量の割合は約6割と大きく、地下水揚水による帯水層の貯水量への影響は現状で大きいものと推察される。

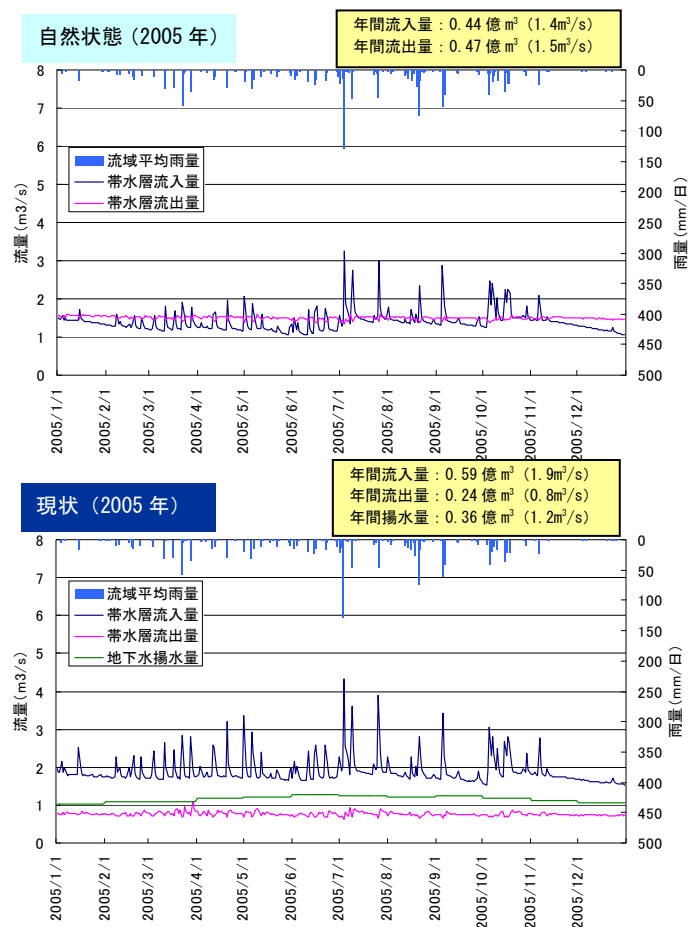


図-13 自然状態・現状の豊橋平野地下の帯水層水収支の時間変化の比較

## 5. おわりに

本研究は、表流水、地下水一体の水資源管理の実現に向けた基礎検討として、豊川流域を対象とした水循環解析モデルを構築し、観測結果のみでは捉えられない表流水、地下水一体の水循環構造（流域・帯水層水収支、表流水、地下水一体流線網、河床湧出・伏没状況など）、人為的な水利用のない自然状態の水循環の状況の推定が可能となり、自然状態と現状の水循環を比較することで、人為的水利用による水循環への影響の分析が可能となった。また、水循環基本法の定める地下水を含む水を「国民共有の貴重な財産」として認識していくためには、必ずしも専門家でない流域関係者の理解促進・認識共有を得ることが重要であり、本研究では、表流水、地下水一体の水循環構造のわかり易い見える化手法の検討を進めており、水循環の立体構造を3次元で俯瞰的に表現した動画(図-14)を作成している。

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、本モデルによる解析結果で明らかとなった、流域界を超えた地下水流動、河床からの地下水湧出・伏没、渇水時特有の水循環の状況等に着目した検証・分析を進めるとともに、観測と解析が連携した水循環の効果的なモニタリング手法や見える化手法等の検討を行っていくことが有効と考えられる。

3) 国土交通省国土政策局：地下水マップ（伊勢湾周辺地域）、平成2年

4) 愛知県：平成24年地盤沈下調査結果、平成25年

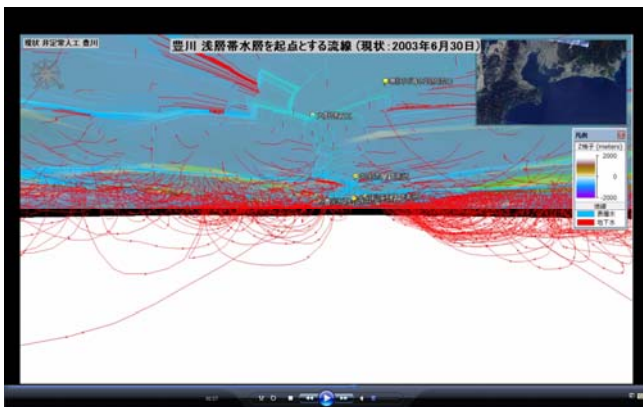


図-14 水循環構造の見える化（3次元動画）

### <参考資料>

- 1) 国土交通省中部地方整備局：豊川水系河川整備計画，平成18年修正
  - 2) 国土交通省国土審議会水資源開発分科会：豊川部会資料，平成14年～平成20年
- 環境省：全国基盤環境情報ディレクトリ（平成24年度版）