

木曽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 Kiso River Basin

水循環・まちづくりグループ 研 究 員 後藤 勝洋
河川・海岸グループ グループ長 佐合 純造
水循環・まちづくりグループ グループ長 柏木 才助

木曽川水系は中部地方を代表する河川であり、その流域の経済社会は木曽川水系の水により支えられている。木曽川水系における水利用は、表流水と地下水の双方に依存しているが、両者は一つの水循環系として密接に係している。濃尾平野では、かつて高度成長期における過剰な地下水の汲み上げにより地盤沈下が進行し、水災害の潜在的リスクが増大するなど影響が生じた。また、近年の小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、木曽川水系における表流水、地下水の水収支や伏没・湧出の状況などの水循環構造を把握することが重要である。本研究は、木曽川水系における健全な水循環系の構築に向けた検討に資するため、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を把握し、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、水利用による影響が表流水・地下水の水収支や比較的浅い層を起点とする流線網の変化に顕著に表れること、木曽三川の各河川で地下水の湧出・伏没の様相が異なることなどが明らかとなった。

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 Kiso River basin is the river representing the Chubu Region, with its water supporting neighboring economic societies. Water use in the Kiso River basin depends on surface water and ground water, both of which belong to a water cycle structure. In the Nobi Plain, ground sinkage had been accelerated due to excessive pumping of ground water in the high-growth period, increasing potential risks of water disasters. 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. It is thus important to understand the water cycle structure such as the hydrological balance of surface water and ground water in the Kiso River basin, as well as the condition of water flow disappearance and eruption. In this study, a water cycle analysis model which integrates surface water and ground water was established, aiming to contribute to the development of a sound water cycle system in the Kiso River basin, and the water cycle structure was understood using the analysis results to analyze its features and the effect on the water cycle due to artificial water use. The results revealed that the effect of water use is obviously recognized in the water balance of surface water and ground water as well as the changes in net flow starting at a comparatively shallow layer, and that there are differences of water flow disappearance and eruption of ground water in the Kiso three rivers.

Key Words: Water Resource Management, Water Cycle Analysis, Ground Water, Surface Water, Visualization

1. はじめに

木曽川水系は中部地方を代表する河川であり、その流域の経済社会は木曽川水系の水により支えられている。木曽川水系における水利用は、河川水と地下水の双方に依存しているが、両者は一つの水循環系として密接に関係している。濃尾平野では、かつて高度成長期における過剰な地下水の汲み上げにより地盤沈下が進行し、水災害の潜在的リスクが増大するなど影響が生じた。また、近年の小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。

地球上に存在する淡水のうち、河川水は 0.01%にも満たず、それに対して地下水は 30%と大きな水資源ポテンシャルを有しているにも関わらず、地下水は目に見えないことから量的な把握が難しく、適正な管理がなされていない。気候変動に対応し、安定的かつ良質な水利用を持続するには、従来の表流水を中心とした水資源管理では限界があり、地下水も含めた一体的な管理を実現することが必須である。そのためには、表流水、地下水の水収支や伏没・湧出の状況などの水循環構造を把握することが重要である。

本研究は、木曽川水系における健全な水循環系の構築に向けた検討に資するため、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を把握し、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. 水循環解析モデルの構築

2-1 水循環解析モデルの要件



図-1 木曽川流域図(庄内川流域を含む解析対象範囲)

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の構築を行った。

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。

表流水、地下水を連成して一体的に解析できる。

表流水、地下水の流れからなる水循環の全体像を3次的に捉えられる。

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。

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。

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。

地表付近の地盤の不飽和特性を的確に表現できる。

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-2)」(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。水質の変化についても、海水などの密度流や地下水中の溶解物質の輸送を考慮することが可能であり、土壌中の塩化物イオン濃度などの現状再現および将来予測を行うことができる。

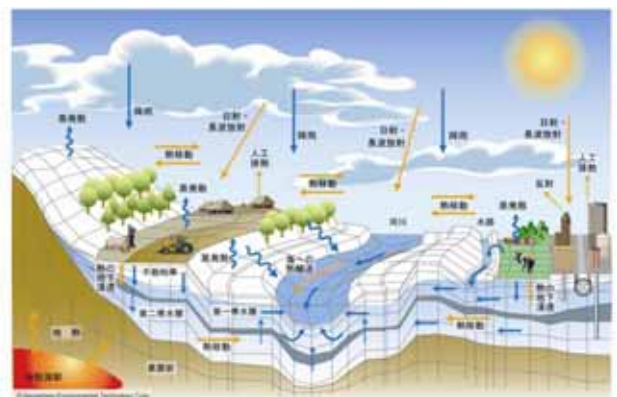


図-2 「統合型水循環シミュレータ」の概念

2 - 2 水循環解析の基本条件

(1) 対象範囲

水循環解析の対象範囲は、濃尾平野全体の水循環構造を再現するため、木曽川流域（木曽川、長良川、揖斐川）に加えて、庄内川流域を含む約 11,000km² の範囲とした（図 - 1）。

(2) 時空間スケール

水循環解析に当たっては、木曽川水系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、過去 10 年（2000 年～2010 年）を、過去の水循環を想定した自然状態（3 - 1 で記述）の再現のための対象期間とし、このうち、流況の小さい 2005 年（平成 17 年）を含む 5 ヶ年（2003 年～2007 年）を、季節変化や水利用を考慮した現状再現のための対象期間とした。時間分解能は日単位を基本とした。

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、水平解像度を主要河川（揖斐川、長良川、木曽川及び庄内川）の河道スケールに合わせて約 250m（200m～500m）に設定し、下流域の主要河川の周辺については、堤防を含む河道周辺の形状を表現するため、より詳細な約 100m 程度に設定した。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 - 2km までを対象として 24 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	2000 年 ～ 2010 年	10 年平均	自然状態 再現
	2003 年 ～ 2007 年	5 年平均及び日単位	現状 再現
空間 スケール	水平 約 11,000km ²	約 250m（200m～ 500m） 下流域の主要河川は 約 100m	水平 解像度
	鉛直 約 2km	24 層	鉛直 解像度
格子数	全格子数 4,870,272 （平面格子数 202,424）		-

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・積雪深	気象庁アメダス 国土交通省テレメータ	（降水量）ティーセン法により陸面分布データ化 （融雪量）菅原の手法により、降水量、気温、積雪深データから領域内の融雪量を算定
	気温・日照時間	気象庁アメダス	（蒸発散量）ハーモン式により蒸発散量を算定し、ティーセン法により陸面分布データ化
地形	陸域	国土地理院数値地図 （5m/10m/50m 格子）	（地形）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面分布データ化
	河道断面	国土交通省横断測量・LP	
土地利用	利用区分	国土交通省国土数値情報 （100m/1km 格子）	（粗度係数）100m 格子数値情報を基本に領域内の等価粗度係数を陸面分布データ化
地質	表層地質	産業総合技術研究所 20 万分の 1 地質図 総理府資源調査委員会木曽川流域濃尾平野水害地形分類図 国土交通省 5 万分の 1 土地分類調査	（地質）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 3 次元空間分布データ化
	地下地質	東海三県地盤沈下調査会・文部科学省・国土交通省既往調査資料	
水文	河川水位・流量	国土交通省テレメータ	（水位・流量）解析結果の検証用に実績データを使用
	地下水位・位置	既往調査資料	
水利用	ダム諸量	国土交通省等運用実績	（ダム放流量）解析への入力用に実績データを使用 （ダム流入量）解析結果の検証用に実績データを使用
	河川水取水量	河川水取水実績・水利権量 （上水、工業、農水）	（河川水取水量）解析への入力用に実績データを使用（実績データがない場合は水利権量を使用）
	地下水揚水量・位置	地下水揚水実績	（地下水揚水量）解析への入力用に実績データを使用（深度情報がない場合は、帯水層別揚水量の比率で按分）

2 - 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、土地利用、地形、水利用等のデータについては、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

濃尾平野地下には主要な帯水層で知られる3層の礫層(浅い層から順にG1、G2、G3)が分布しており(図-3) それらを忠実にモデル化することが解析精度の確保に最も重要である。濃尾平野周辺は、過去の地盤沈下に関連して多くの地質調査資料がまとめられていることから、本研究ではそれらを活用して地質構造モデルを作成した。

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。濃尾平野については、既往の水害地形分類図等を参考とし、扇頂部の新規扇状地堆積物、扇央部の氾濫平野、三角州平野、扇端部化広域の盛土及び干拓地に水理地質区分を細分化した。濃尾平野一帯の地下地質については、東海三県地盤沈下調査会の調査資料を基本とし、文部科学省や

国土交通省の調査報告書で補足して、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作成した。

(3) 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202,424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、上流域の山地部はやや粗い格子分割とし、濃尾平野内の主要河川については、格子分割を更に細分化して、河川の流れに沿って格子を組み込むことに留意した。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4,870,272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、図-5)。

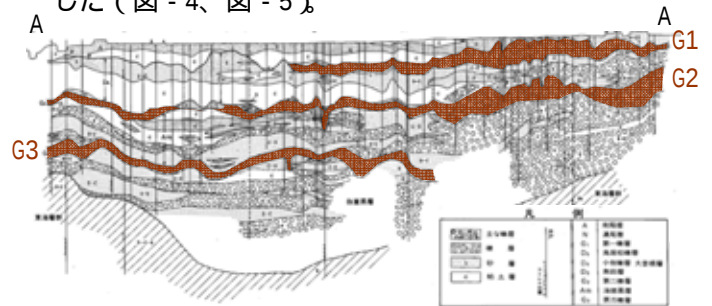


図-3 濃尾平野の帯水層構造(図-5のAA断面)
出典：東海三県地盤沈下調査会

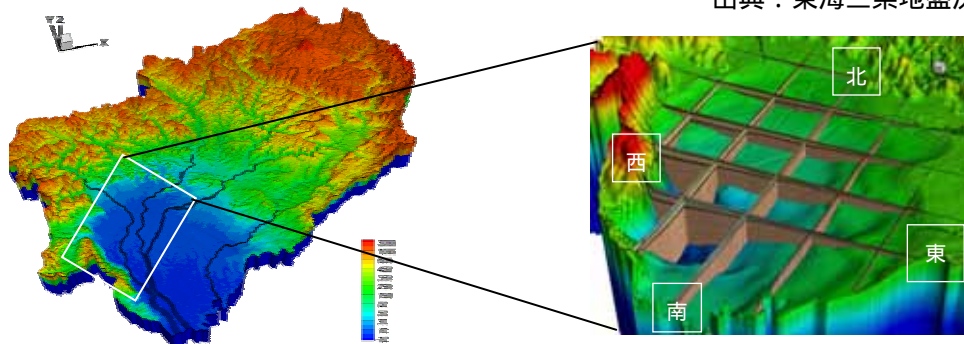


図-4 木曽川流域水循環解析モデル(地形モデル)

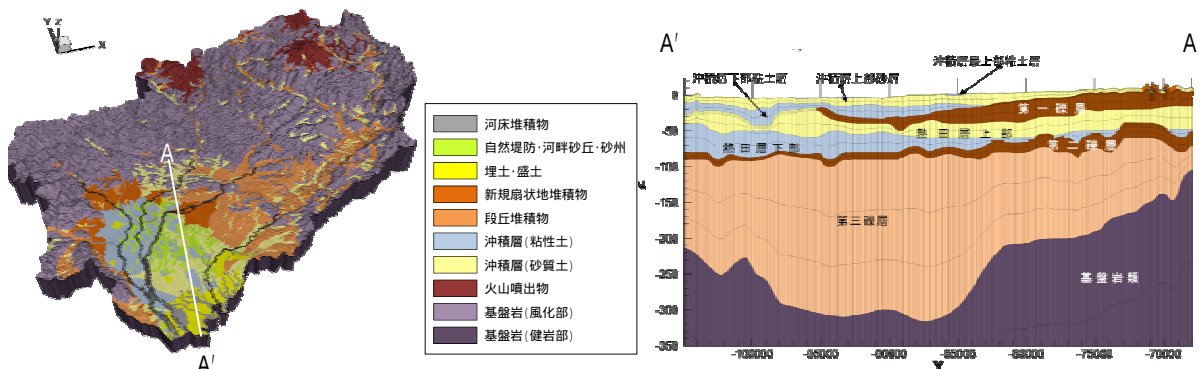


図-5 木曽川流域水循環解析モデル(地質構造モデル)

3．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必要な精度を確保した。

3 - 1 自然状態（過去）の水循環の再現

(1) 解析手順

自然状態の水循環の再現は、ダム運用、河川取水、地下水揚水などの人間活動の影響のない過去の状態を想定し、以下の手順で行った。

地上に水がなく、地中を完全飽和にした状態を作成する（図 - 6）。

この状態を初期流動場として、流域の平均降水量を与え続け、地盤中を移動する水、空気との2相流れの非定常解析を行う。

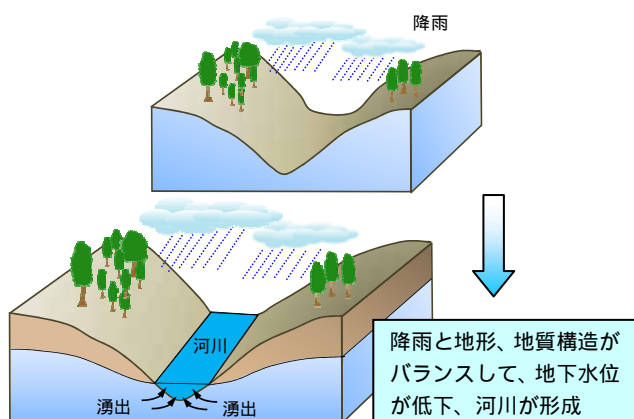


図 - 6 自然状態の水循環の再現イメージ

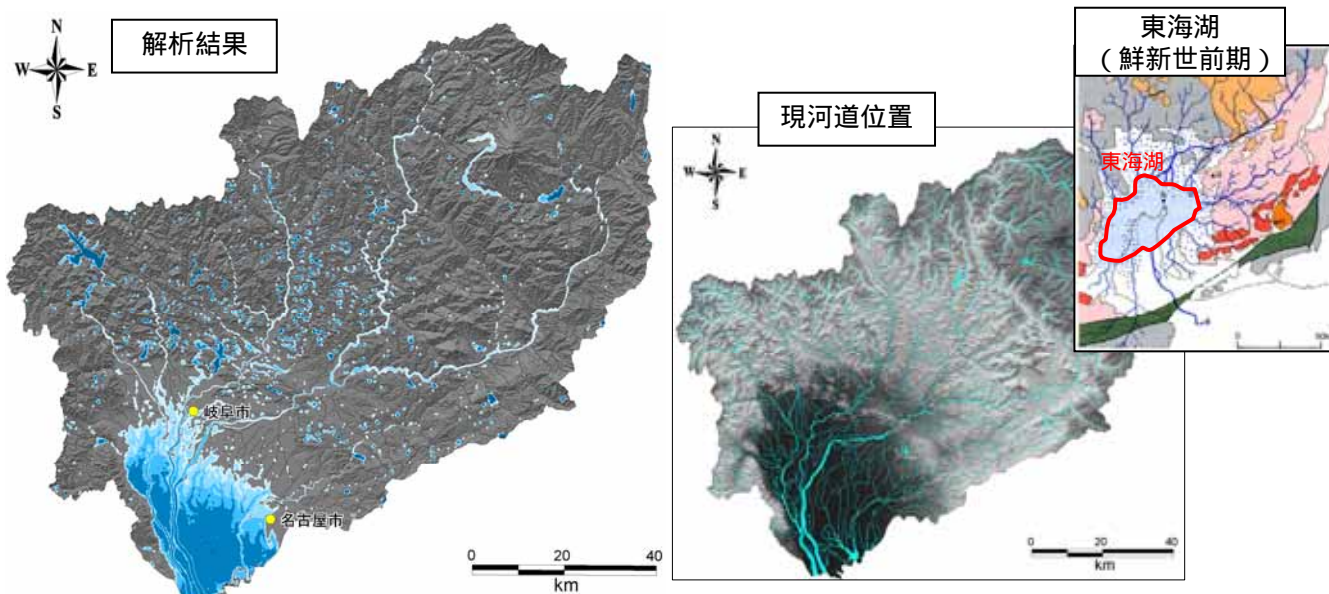


図 - 7 自然状態の解析結果：表流水分布（水深 1cm 以上の範囲を表示）

出典：現河道（国土地理院 1/25000 河道データ）

東海湖（株式会社クボタ アーバンクボタ No.29 p12）

低地では湧水が起こり、河川が形成され、高地では地盤内に空気が侵入し、不飽和帯が発生する（地下水面が低下）。

与えられた降水量・地形・地質構造がバランスし、表流水、地下水が一体化された平衡状態の水循環が作り出される。

平衡状態での表流水分布、河川水位・流量、地下水位などの解析値と観測値を比較してその再現性を検証し、必要に応じて、透水係数や有効間隙率などの物性パラメータを再設定し、解析精度を確保する。

(2) 検証結果

自然状態の水循環の解析結果として、表流水分布（水深 1cm 以上の範囲を表示）を図 - 7 に例示する（参照として、国土数値情報による現河道位置、古地理図に示された鮮新世前期の東海湖の位置図を併記）。

山間部の中・上流域では、解析結果は主要な現河道網の分布を再現し、それらと概ね整合している。解析結果では、濃尾平野内のゼロメートル地帯に広範な湛水域が形成されており、これは現状が人為的な排水により陸地が維持されていることを示唆するものであり、その範囲は古地理図で示されるかつて東海湖と呼ばれた領域と概ね一致する。河川流量の観測値と解析値を比較した結果、水利用の少ない中・上流域で両者が概ね整合することを確認している。

以上より、自然状態における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気象、地形、地質などのモデル化が基本的に妥当であることが示された。

3 - 2 現状の水循環の再現

(1) 解析手順

現状の水循環の再現は、前述した自然状態を初期流動場として、実際のダム運用、河川取水、地下水揚水などの人為的な水利用を考慮し、検証期間である2003年～2007年のデータセットを与えて非定常解析を行った。解析結果は、自然状態の再現計算と同様に、表流水分布、河川流量、ダム流入量、地下水位などの観測結果と比較検証し、透水係数や有効間隙率などの物性パラメータを若干調整することにより、再現性を確保した（物性パラメータの再設定に応じて、初期流動場も再計算）。

(2) 検証結果

現状の水循環の解析結果として、図-8に河川流量の解析値と観測値の比較を示す（木曽川の基準点である笠松の結果を例示）。検証期間5年間における流量変動に対して、解析流量が観測流量を概ね良好に再現していることを対象範囲の河川流量観測点及びダム地点で確認した。

図-9に地下水位の解析値と観測値（月別）の比較を示す（濃尾平野のG1礫層の地下水位を観測している

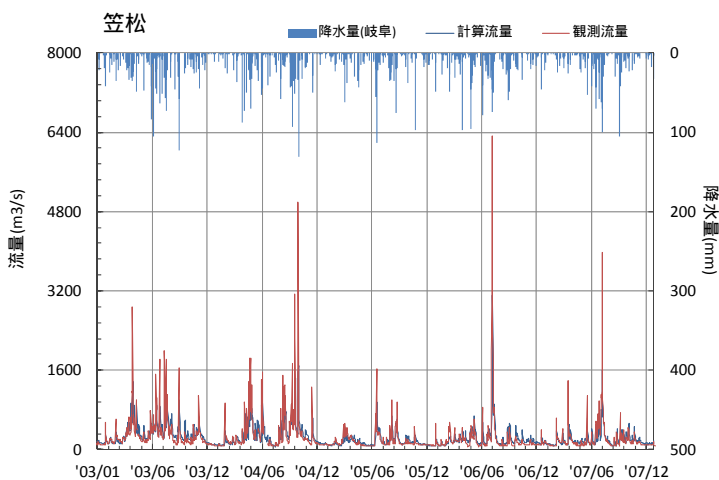


図-8 河川流量の解析値と観測値の比較（笠松）

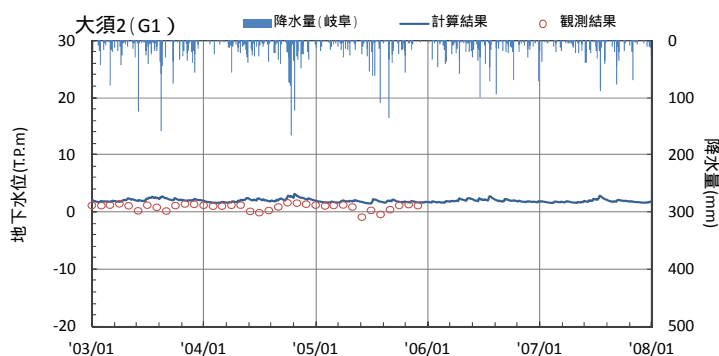


図-9 地下水位の解析値と観測値の比較（大須）

大須の結果を例示）。濃尾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5m以内であり、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。

図-10に地下水位コンターの解析値（検証期間の雨量、水利用等の平均値を与え続けた平衡状態の解析結果）と観測値（平成15年7月の観測値）の比較を示す（G1礫層の地下水位コンターを例示）。礫層内の地下水位（観測値：白線）は地形起伏に対応して、濃尾平野の北側及び東側の扇状地で動水勾配が大きく、河口部に近づくに従って緩やかになる傾向を示しており、解析値（色線）もその傾向を再現できている。解析に用いた地下水揚水量が市町村単位を基本としたデータであるため、局所的な変化が捉えられていない部分はあるものの、平野部における観測値と観測値の差異は2m以内と良好な再現性を示している。

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。

4. 水循環構造の分析

自然状態及び現状再現の2ケースの解析結果から、木曽川水系及び濃尾平野の水循環構造を「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。

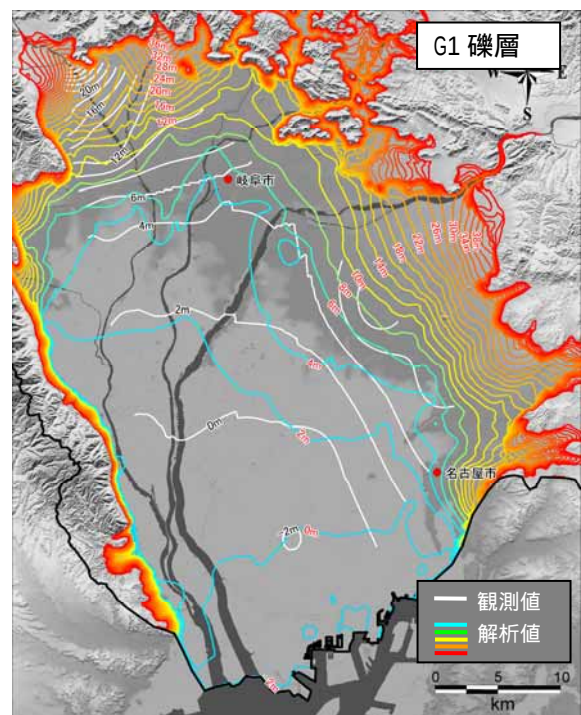


図-10 地下水位コンターの解析値と観測値の比較（G1礫層の地下水位）

4 - 1 水循環構造の分析

解析結果から以下の考え方にに基づき木曽川水系の水循環構造を分析した。

表流水と地下水のストック（貯水量）、フロー（流入・流出量）に着目した、定量的な流域水収支

水循環の全体像を俯瞰できるように、表流水と地下水の流れを色分けして、それらの相互関係（伏没、湧出）を明確にした流線網

河川の着目する区間の定量的な伏没、湧出の状況を把握できるように、各河川の縦断的な水収支
水循環構造の分析に当たっては、目に見えない地下水の流れをできる限り視覚的にわかりやすく「見える化」することが重要である。

なお、以下に示す結果は、検証期間の雨量、水利用等の平均値を与え続けた平衡状態の解析結果に基づくものあり、対象地域の平均的な水循環の状態を分析したものである。

4 - 2 流域水収支の定量化

水循環解析結果から推定した対象範囲全域（木曽川流域、庄内川流域）及び濃尾平野の水収支を表 - 3 に示す。

(1) 木曽川流域（庄内川流域含む）の水収支

木曽川流域（庄内川流域含む）の水収支の特徴、水利用に伴う変化を以下に示す。

- ・自然状態の河川から海への流出量は 172 億 m^3 / 年で

表 - 3 木曽川流域、濃尾平野の水収支（年間値）

要素	自然状態	現状	差（ - ）
降水量	226 億 m^3	226 億 m^3	(変化なし)
	26 億 m^3	26 億 m^3	(変化なし)
蒸発散量	54 億 m^3	54 億 m^3	(変化なし)
	9 億 m^3	9 億 m^3	(変化なし)
河川から海への流出量	172 億 m^3	140 億 m^3	-32 億 m^3
	(同上)	(同上)	(同上)
地下から海への流出量	0.2 億 m^3	1.8 億 m^3	+1.6 億 m^3
	(同上)	(同上)	(同上)
地下への伏没量	87 億 m^3	95 億 m^3	+8 億 m^3
	15 億 m^3	23 億 m^3	+8 億 m^3
地下からの湧出量	87 億 m^3	88 億 m^3	+1 億 m^3
	15 億 m^3	17 億 m^3	+2 億 m^3
河川水取水量	-	25 億 m^3	+25 億 m^3
	-	10 億 m^3	+10 億 m^3
地下水取水量	-	5 億 m^3	+5 億 m^3
	-	(同上)	(同上)
地下水帯水量	1080 億 m^3	1080 億 m^3	(変化なし)
	913 億 m^3	913 億 m^3	(変化なし)

上段：木曽川流域（庄内川流域含む） 下段：濃尾平野
河川取水量は解析対象範囲外へ導水する量を集計

あり、降水量(226 億 m^3 / 年)の約 75%に相当する。
一方、現状の河川流出量は自然状態より 2 割減少して 140 億 m^3 / 年となり、降水量の約 62%程度である。

- ・自然状態の地下から海への流出量は 0.2 億 m^3 / 年であり、地下帯水量（1080 億 m^3 ）のわずか 0.02%程度である。一方、現状の地下流出量は自然状態の約 10 倍の 1.8 億 m^3 / 年となり、地下帯水量の約 0.2%である。
- ・自然状態の地下水伏没量と湧出量は共に 87 億 m^3 / 年とほぼ均衡している。一方、現状の地下水伏没量は 95 億 m^3 / 年、湧出量は 88 m^3 / 年と自然状態に比べて伏没量の増加が大きい。現状の伏没量と湧出量の差である約 7 億 m^3 / 年は、地下水取水量 5 億 m^3 / 年と地下流出量 1.8 億 m^3 / 年によりバランスしている。
- ・地下水の帯水量は自然状態と現状で変わらず 1080 億 m^3 で、現状の地下水流出量 1.8 億 m^3 / 年、湧出量 88 m^3 / 年の総和で割ると、地下水の平均滞留時間は約 12 年と概算される。
- ・以上のことから、木曽川流域における人為的な水利用による水循環への影響は、河川から海への流出量の減少、地下への伏没量の増加に見られる。

(2) 濃尾平野の水収支

濃尾平野の水収支の特徴、水利用に伴う変化を以下に示す。

- ・自然状態の地下水伏没量は 15 億 m^3 / 年、湧出量は 16 億 m^3 / 年であり、湧出量の方が大きい。一方、現状の地下水伏没量は 23 億 m^3 / 年、湧出量は 18 m^3 / 年となり、地下への伏没量が卓越する傾向にある。
- ・人為的な水利用により、木曽川流域全域としては伏没量・湧出量が減少する傾向にあるが、水利用が集中している濃尾平野で見ると、地下水位の低下に伴い表流水と地下水の流出入が増加する傾向にある。

4 - 3 表流水、地下水一体の水循環流線網

濃尾平野における表流水、地下水一体の水循環流線網を見える化した結果を図 - 11 に示す。これは、地表面直下及び各礫層を出発点とする地下水の流動経路を平面的に投影表示したものであり、地下水として流れる流線を赤色、地下から湧き出し表流水として流れる流線を青色で表示している。

(1) 自然状態の流線網の特徴

濃尾平野における各層の自然状態の流線網の特徴を以下に示す。

- ・地表面直下を起点とする流線（図 - 11a）は、三川の扇状地部では地下水として流れ、平野部に入るとほ

とんどの流線が地上に湧き出し、表流水として流れる傾向が見られる。河口付近のゼロメートル地帯では、表流水の流れが広範に及んでおり、図-7の表流水分布でも見られるように人為的な排水を考慮していない自然状態では湛水域の形態を成している。また、庄内川、日光川流域の表流水が木曽川河口に向けて流れているなど、動水勾配により複雑な流動経路を示しているのが特徴的である。

- ・G1 礫層を起点とする流線(図-11b)は、地表に湧き出す流線と地下水のまま海へ流出する流線が混在している。主に濃尾平野北部から揖斐川へ集まる流線と、表流水の流域界を越えて日光川へ集まり、更に木曽川河口に向かう流線が卓越している。揖斐川は、牧田川合流点付近で沖積層上部粘土層が途切れているため、この場所に水が集まりやすい地質構造となっていることが解析結果に反映されている。
- ・G2、G3 礫層を起点とする流線(図-11c,d)は類似しており、G2 礫層で一部日光川流域への湧き出しが見られるのみで、ほとんどが地下水のまま海へ流れる傾向にある。

(2) 現状の流線の特徴、水利用に伴う影響

濃尾平野における各層の現状の流線網の特徴、自然状態の流線網との比較により分析される水利用の影響を以下に示す。

- ・現状の地表面直下を起点とする流線(図-11e)は、自然状態と比べて地下水の流線が多くなり、ゼロメートル地帯で湛水域の状態にあった表流水が消失し、そのまま海域への流出する傾向にある。
- ・現状のG1 礫層を起点とする流線(図-11f)は、地表面直下と同様に海域へそのまま流出する地下水が増加している。また、揖斐川や日光川へ集まる流線が増加しており、三川が近接する下流低平地では、自然状態では見られなかった木曽川の下を横断する東西方向の流線が見られ、複雑な流動網を呈している。河川で湧き出し表流水として流下する流線が減少し、木曽川での流線が見られなくなったことが特徴的である。
- ・現状のG2、G3 礫層を起点とする流線(図-11g,h)は、自然状態とほぼ類似しているが、扇状地部から長良川へ湧き出した表流水が見られることが異なる。

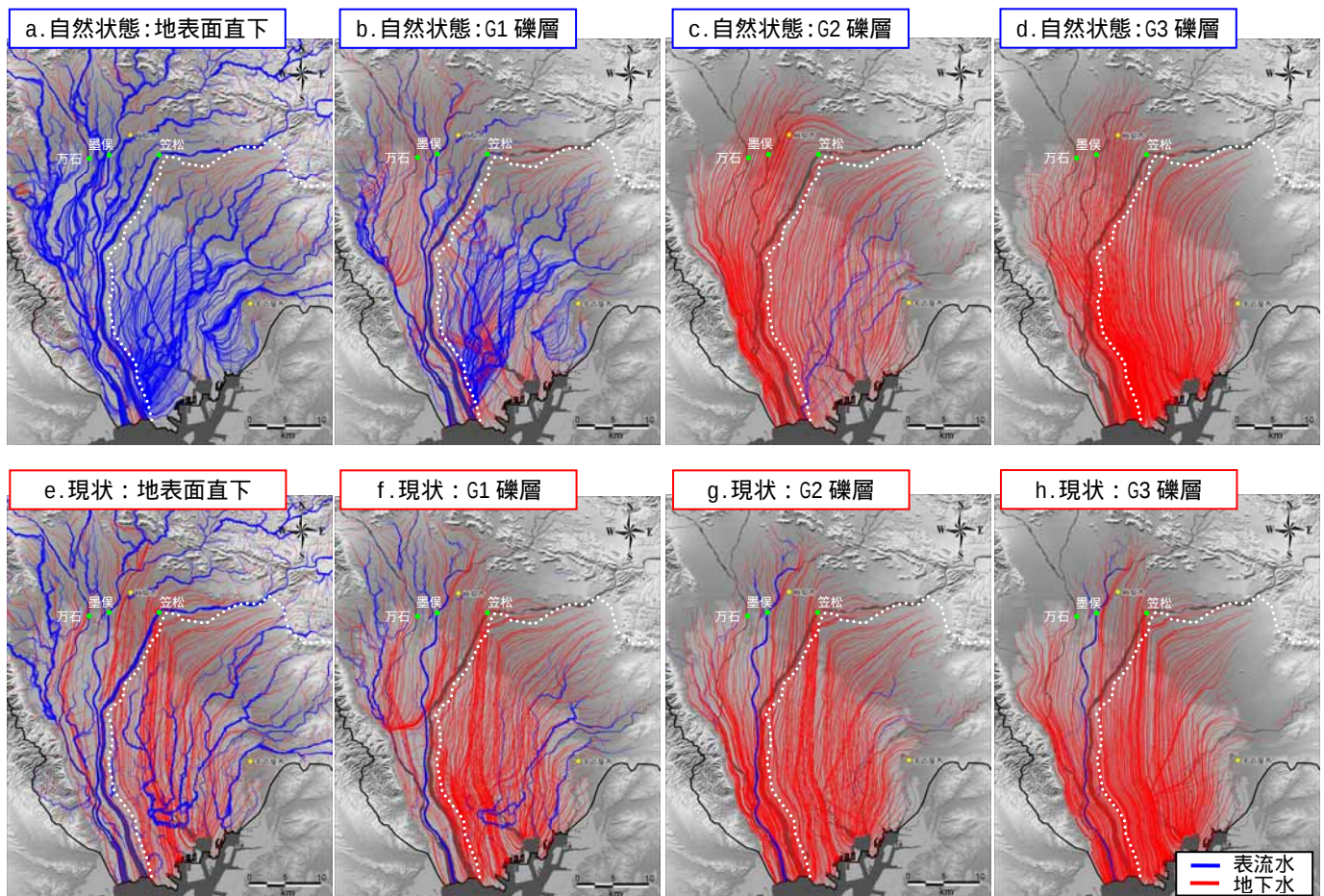


図-11 濃尾平野の表流水・地下水流線網(上段:自然状態、下段:現状)

- ・以上のことから、地下水揚水などの水利用の影響は、特に地表面直下、G1 礫層の流線の変化に顕著に見られ、地下水のまま海域へ流出する流線の増加、木曽川の下を横断して揖斐川や日光川へ集まる流線が卓越する傾向を示す。
 - ・笠松より下流から河口にかけて部分的に湧出と伏没が卓越する区間が認められるが、いずれも $0.01 \sim 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と小さい。
- (2) 長良川の湧出・伏没量 (図 - 12b)
- 長良川の区間毎の湧出・伏没量の特徴を以下に示す。

4 - 4 各河川の縦断的な水収支（現状）

現状における各河川（木曽川、長良川、揖斐川）の縦断的な水収支（湧出・伏没量）を図 - 12 に示す。これは、河川に沿った 1km 区間毎に積分した河床からの流入量（緑の棒グラフ）及び支川など側方からの流入量（赤の棒グラフ）を表示したものである。

地下からの湧出の方が大きい傾向にあり、これは本川流量（約 80～100m³/s）に対して約 4%である。

- ・ 鏡島大橋～墨伊間（48k～39k）で湧出が卓越し、濃尾平野北側に分布する沖積粘土層の南縁からの湧出に対応するものであり、図 - 11（f, g, h）でも深層か

(1) 木曽川の湧出・伏没量 (図 - 12a)

木曽川の区間毎の湧出・伏没量の特徴を以下に示す。 (3) 揖斐川の湧出・伏没量 (図 - 12c)

- ・木曽川の河床を出入りする流量は、積算値で約 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ と、全体として地下への伏設量の方が大きい傾向にあり、これは本川流量（約 $200 \sim 240\text{m}^3/\text{s}$ ）に対して 0.2% 程度である。
- ・犬山～笠松間（55k～40k）で伏設が卓越しており、新期扇状地堆積物の分布する透水性の高い地域と対応する。
- ・揖斐川の区間毎の湧出・伏設量の特徴を以下に示す。
- ・揖斐川の河床を出入りする流量は、積算値で約 $0.8\text{m}^3/\text{s}$ と、全体として地下からの湧出量の方が大きい傾向にあり、これは本川流量（約 $30 \sim 170\text{m}^3/\text{s}$ ）に対して約 1% 程度である。
- ・岡島～万石間（57k～40k）で湧出と伏設が交互に見られる複雑な構造を呈しており、万石付近の伏設域

- ・笠松より下流から河口にかけて部分的に湧出と伏没が卓越する区間が認められるが、いずれも $0.01 \sim 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と小さい。

(2) 長良川の湧出・伏没量 (図 - 12b)

長良川の区間毎の湧出・伏没量の特徴を以下に示す。

- ・長良川の河床を出入りする流量は、積算値で約 $2.7\text{m}^3/\text{s}$ と、三川の中では最も大きく、全体として地下からの湧出量の方が大きい傾向にあり、これは本川流量（約 $80 \sim 100\text{m}^3/\text{s}$ ）に対して約 4%である。
- ・鏡島大橋～墨俣間（48k～39k）で湧出が卓越し、濃尾平野北側に分布する沖積粘土層の南縁からの湧出に対応するものであり、図 - 11（f, g, h）でも深層から長良川へ湧き出す流線が示されている。

(3) 揖斐川の湧出・伏没量 (図 - 12c)

揖斐川の区間毎の湧出・伏没量の特徴を以下に示す。

- ・揖斐川の河床を出入りする流量は、積算値で約 $0.8\text{m}^3/\text{s}$ と、全体として地下からの湧出量の方が大きい傾向にあり、これは本川流量（約 $30\sim 170\text{m}^3/\text{s}$ ）に対して約 1%程度である。
- ・岡島～万石間（57k～40k）で湧出と伏没が交互に見られる複雑な構造を呈しており、万石付近の伏没域



図-12 各河川における地下水の湧出・伏没量の縦断分布（現状再現）

は扇状地堆積物の分布する透水性の高い地域と対応する。

(4) 河川流量と地下水の湧出・伏没の応答関係(現状)

現状の主要な基準点における河川流量及び河床流入量の時間変化を図 - 13 (木曽川の笠松地点(2004年)の解析結果を例示)に示す。

- ・笠松地点においては、図 - 12a で示す平均的な流況では微湧出の傾向であったが、年間を通じて見ると河床流入量は経年的に変動している。
- ・河川流入量は河川流量の増加とともに一旦伏没し、その後、湧出に転じる傾向が見られ、他の河川でも同様の応答関係を示している。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、流出入が一時的に卓越するものと推察される。
- ・笠松地点における河床流入量の変動幅は約 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ と大きい。なお、墨俣(長良川)の変動幅は $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、万石(揖斐川)の変動幅は $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、河川流量の規模に関係して変動している。

5. おわりに

本研究は、木曽川水系を対象とした水循環解析モデルを構築し、解析結果から流域水収支、表流水・地下水一体の水循環流線網、河川縦断的な地下水の伏没・湧出状況などの水循環構造の定量化、見える化を試みた。人為的な水利用のない自然状態の水循環と現状の水循環を比較することで、これまでの人間活動による

水循環への影響を推定することができ、これは今後の木曽川水系における健全な水循環系のあるべき姿を検討していく上での基礎資料になると考える。また、本稿では濃尾平野の水循環を平面的に表現した流線網図しか示していないが、流域関係者の理解促進・認識共有に資するため、3次元の水循環の立体構造を俯瞰的に表現した動画を作成している(図 - 14)。

今後は、本モデルにより詳細なデータを組み込むことで解析精度を高めるとともに、将来の気候変動を考慮したシナリオ解析、木曽川水系における健全な水循環系の構築に向けた検討が研究課題と考える。

なお、本研究は木曽川水系の水循環構造解明の基礎的研究であり、本稿で示した解析結果は、平均的な流況を与えた場合の水循環の状態の傾向を示すものであり、今後のモデルの精度の向上等に伴い、これらの結果も変動する可能性があることを付記しておく。

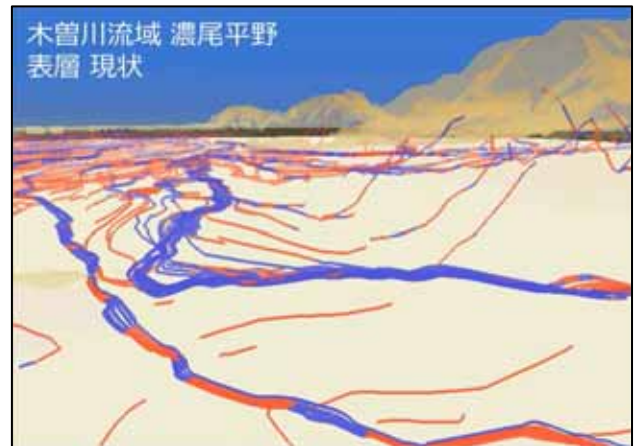


図 - 14 濃尾平野の3次元水循環動画

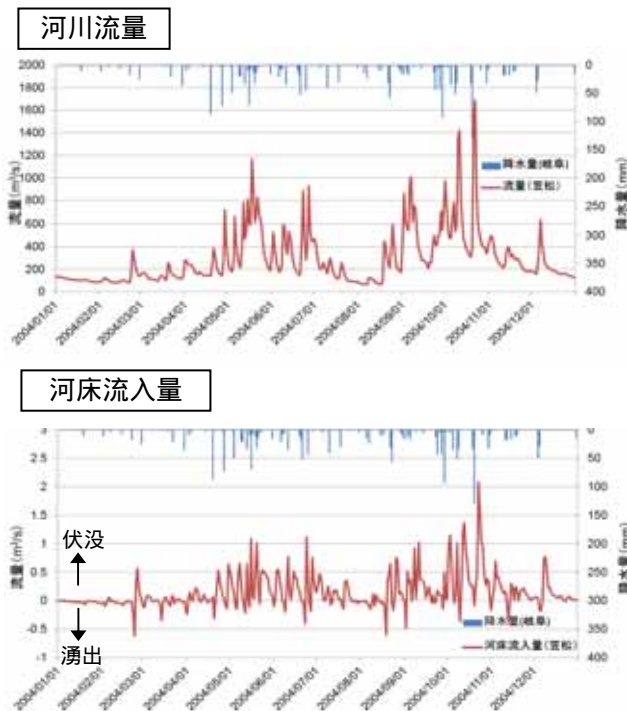


図 - 13 河川流量、河床流入量の時間変化(笠松)

< 参考資料 >

- 1) 国土交通省中部地方整備局：木曽三川地形地質概要図作成業務報告書、平成 12 年 3 月
- 2) 東海三県地盤沈下調査会：濃尾平野の地盤沈下と地下水、昭和 60 年
- 3) 文部科学省：地震関係基礎調査交付金濃尾平野地下構造調査委員会報告書、平成 14 年
- 4) 国土交通省中部地方整備局：濃尾平野地下水利用調査業務報告書、平成 19 年 3 月
- 5) 国土交通省中部地方整備局：濃尾平野地盤沈下資料整理業務報告書、平成 19 年 8 月
- 6) 株式会社クボタ：アーバンクボタ No.29、平成 2 年 3 月
- 7) 森康二(地圏環境テクノロジー)ら(2008)：神奈川拡大流域圏における自然水循環挙動の復元可能性の検討、日本地下水学会 2008 年秋季大会、平成 20 年 11 月