

水循環・物質循環構造に関する研究

Study on water and substance cycle structure

水循環・まちづくりグループ	研究員	石徹白伸也
	代表理事	竹村公太郎
水循環・まちづくりグループ	グループ長	柏木 才助
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	研究員	立田潤一郎
水循環・まちづくりグループ	研究員	長澤 修宏
水循環・まちづくりグループ	研究員	星野 哲志
株式会社地圏環境テクノロジー		森 康二
八千代エンジニアリング株式会社		山中健二郎

近年の気候変動に伴う極端な少雨や多雨、さらに土地開発や水利用等の人間活動による流域の変化は、水資源管理の不安定化や水環境の悪化などの様々な問題を引き起こす要因となっている。これらの問題は水・物質循環系にもたらした影響の現れであり、問題の根本的な解明には、水や物質の動きを一体的に捉えた流域スケールでの対応が求められている。

そこで本研究は、表流水・地下水および物質の挙動を流域スケールで捉えるため、阿武隈川流域および周辺河川流域を対象に、人間活動（人為的水利用）を考慮した水循環モデルを構築して、物質の輸送媒体である水（表流水・地下水）と土砂（浮遊砂）の挙動を解析した。解析結果から、水循環ブロック（影響範囲）、水循環サイクル（移流経路・時間）や水収支、さらに水循環系を介して移動する浮遊砂の経路や輸送量など、水と浮遊砂の循環プロセスを定量的に把握することができ、物質移行に資する基礎的な情報が得られた。また、人為的水利用のない自然状態との相違から、過去から現在に至る水循環の変化量を知ることができ、人間活動の水循環への影響の推定が可能となった。今後はさらに自然的・社会的変化の情報を集積して解析モデルを深化させていくとともに、モニタリング調査との連携による情報の補完によって解析レベルを向上させることが必要である。

キーワード：水資源管理、水循環、物質循環、表流水・地下水解析、浮遊砂解析

Extreme drought and heavy rains due to recent climate change along with human activities such as land development and water use leading to changes to flow system are becoming factors causing issues, resulting in instability in water resource management and degradation in water environment. These issues are seen as a result of influences to water and substance cycles, and solving such issues entirely requires addressing the movement of water and substances systematically in a flow system.

Thus, this research, in an attempt to understand surface water, groundwater and substances in a flow system, water cycle model was developed, considering human activities (water uses) in the Abukuma River and its tributaries river system. Results provided understanding of water and suspended sediment cycle process quantitatively such as water cycle block (range of influence), water cycle (movement channels and time), water budget and channels and volume of suspended sediments that move through the water cycle, and obtained fundamental information regarding substance movement. Furthermore, contrasting with non-water uses in a natural state provided volume changes in the water cycle from the past to the present, making it possible for us to estimate any influences of human water uses over the water cycle. For future, the analytical model must be developed further by adding information on natural and social changes and improve analytical level by supplementing collaborating with monitoring survey.

Key Words: water resource management, water cycle, substance cycle, surface water and groundwater analysis, suspended sediment analysis

1. はじめに

近年の気候変動に伴う極端な少雨や多雨、さらに土地開発や水利用等の人間活動による流域の変化は、水資源管理の不安定化や水環境の悪化などの様々な問題を引き起こす要因となっている。これらの問題は水・物質循環系にもたらした影響の現れであり、問題の根本的な解明には、水や物質の動きを一体的に捉えた流域スケールでの対応が求められている。

そこで本研究は、表流水・地下水および物質の挙動を流域スケールで捉えるため、阿武隈川流域および周辺河川流域を対象に、人間活動（人為的水利用）を考慮した水循環モデルを構築して、物質の輸送媒体である水（表流水・地下水）と土砂（浮遊砂）の挙動を解析したものである。

2. 水循環解析モデルの構築

2-1 解析モデルの基本条件

(1) 解析モデルの概要

本研究で扱う水循環解析モデルは、表流水と地下水からなる水循環の全体像を三次元で解析可能な「統合型水循環シミュレータ」（以下、「水循環モデル」と記載）を用いている。水循環モデルの特徴を以下に示す。

- ・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、また、地下水盆の立体構造を組み込むことができる。
- ・降雨を入力条件として、表流水、地下水間の伏没、湧出などの相互関係を完全連成で解くことができ、表流水・地下水一体の水収支の解析が可能である。
- ・土砂（浮遊砂）の生産、移流、拡散、沈降・堆積、巻上げ・侵食等を組み込むことができる。
- ・河川取水や地下水揚水等の水利用システムを考慮することが可能である。
- ・表流水と地下水の流れからなる水循環の全体像を3次元で捉えられる。
- ・実用レベルで高速計算処理が可能である。

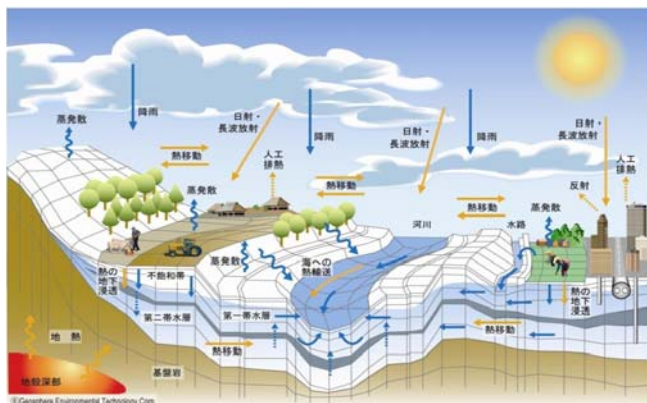


図-1 「統合型水循環シミュレータ」の概念

次に、水循環系における水・浮遊砂の輸送プロセスの概念を図-2に示す。地表付近では、河川や斜面流に該当する「①地表層」、浮遊砂の生産・消滅源となる「②土砂交換層」、土壌や岩盤を表す「③固定層」の3区分で構成され、水は地表層-土砂交換層-固定層間を移流し、浮遊砂は地表層-土砂交換層間でのみ沈降・堆積や巻上げ・侵食が生じる。なお、土砂交換層は粒径の異なる浮遊砂 (10^{-4}m ・ 10^{-5}m ・ 10^{-6}m) によって構成され、移動床（河床変動）や掃流形態で移動する土砂（掃流砂）については考慮していない。

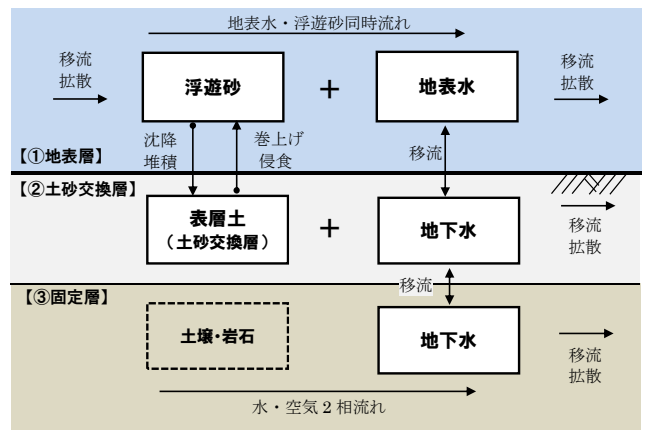


図-2 水・浮遊砂の輸送プロセスの概念図

(2) 解析対象範囲

水循環解析の対象領域は解析目的に応じて地方ブロックレベル、県レベルの2段階を設定した。地方ブロックレベルの解析では流域を越えた大局的な水循環挙動を把握するために阿武隈川流域と周辺流域を含む約48,000km²を、県レベルの解析では浮遊砂を考慮した水循環機構を把握するために地方ブロックレベルの解析結果（水循環ブロック）を踏まえ阿武隈川流域界・福島県境を包絡する約20,000km²を解析対象範囲とした。

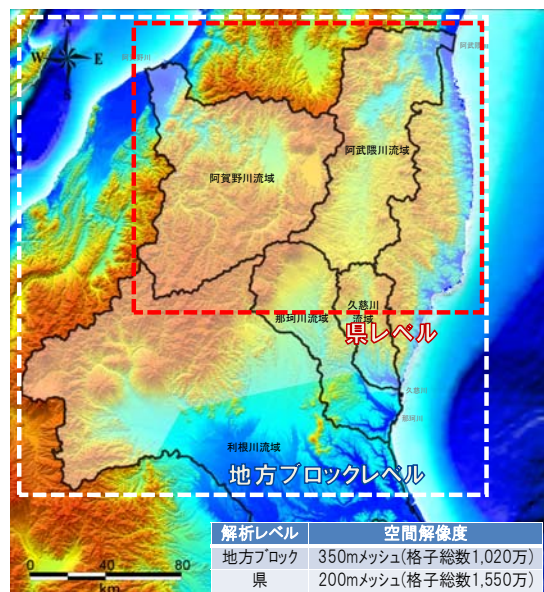


図-3 解析対象領域

(3) 解析スケール

本解析では、各解析レベルに応じて表-1 に示すように時間的・空間的スケールを設定した。

空間スケール：地方ブロックレベルの解析では主に地形起伏の表現と計算負荷を考慮して水平解像度を平均350mに設定した。県レベルの解析では浮遊砂の流れを規定する河道網を表現するため200mに設定した。さらに、浮遊砂の侵食・堆積は河川の蛇行や砂州、複断面形状などの河道内地形の影響を受けると考えられるため、別途、河道部を水平解像度50~100mで細分化した河道切出しモデル(図-4)を構築した。

鉛直解像度については、地下水流動速度の大きい分布層(第四紀層等)ほど細密化し、地表面近傍の水・浮遊砂の相互交換が活発に行われる浅層土壌に関しては、数10cm~数m程度のより緻密な離散化を行った。

時間スケール：解析対象年は平均的な河川流況である2003年~2005年とし、時間分解能は水利用の状況や洪水時により多く流出する浮遊砂の挙動特性を勘案して日単位とした。

表-1 解析スケール

		地方ブロックレベル	県レベル
解析目的		大局的な水循環挙動の把握	浮遊砂を考慮した水循環機構の把握
解析対象		水(表流水・地下水)	水・浮遊砂
解析スケール	空間スケール	平均 350m (約 48,000km ²)	平均 200m (約 20,000km ²) 河道モデル(切出し): 50~100m 程度
	時間スケール	2003年~2005年 (分解能:日単位)	

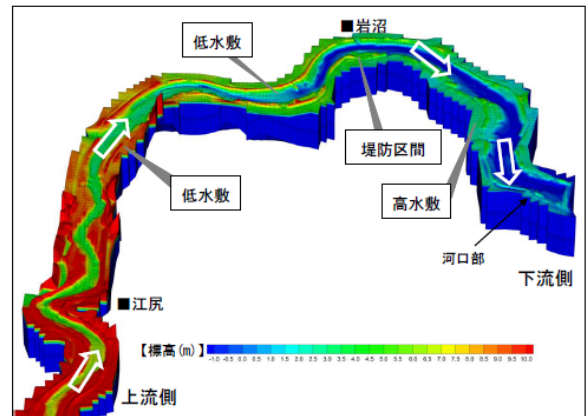


図-4 河道切出しモデルの鳥瞰図(阿武隈川下流)

(4) 基本的な解析手法

水循環モデルの基本的な数値解法として、表流水の流動は平均流速公式(Manning)を適用した開水路流れで表現し、運動方程式は数値的安定性を考慮して線形化拡散波近似を採用した。地下水の流動については、空気・水二相流れを対象とした一般化ダルシー則を適用し、表流水との相互関係を完全連成で解析した。

また、浮遊砂の挙動は、地表水中の乱流拡散による輸送を表現するため、粒径成分毎の移流拡散方程式を採用し、浮遊砂の雨滴衝撃による剥離や水流による侵食・堆積作用などの生産項・消滅項を付加している。

2-2 解析モデルの構築

モデルの構築にあたっては、表-2 に示すデータおよびモデル化手法に基づき、水循環構造を表現した。

(1) 陸面分布データの作成

解析格子は河道網や地形を反映するため変形格子を採用した。格子分割は地形起伏や河道内の流れを捉えることに留意して変化させている。

水循環解析の入力情報となる気象条件、地形、植生・土地利用の地表被覆状況については、不規則に整備されているデータを解析格子の平面解像度に合わせて補完し、陸面分布データを作成した。

表-2 水循環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		
			地方ブロックレベル	県レベル	
陸面分布	気象	降水量	気象庁アメダス・国土交通省テレメータ	ティーセン法による空間分布化	雨量線法による空間分布化
		蒸発散量	気象庁アメダス(気温/日照時間/風速/気圧等)	ハーモン法による推定	熱収支法による推定
		積雪融雪量	植生・土壌被覆、地形 等	菅原の手法による推定	熱収支法による推定
	地形	陸域	国土地理院数値地図(50m/10m/5m メッシュ標高)	50m 格子によるデータ化	10m・5m 格子によるデータ化
河道断面		国土交通省横断測量・航空レーザ測量LP	本川+1~2次支川のモデル化	本川+3~5次支川のモデル化	
地表被覆	植生	20万分の1土地保全図	—	保全図をもとにグループ区分化	
	土地利用	国土交通省国土数値情報H18年度(100m格子)	土地利用毎の等価粗度係数を設定。解析格子内の土地面積で按分	—	
水理地質	表層土壌	国土交通省20万分の1土地分類基本調査(土壌図)	—	土壌図をもとにグループ区分化	
	表層地質	産業総合技術研究所20万分の1地質図	既往調査資料等に基づき、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	研究機関等による地質関連資料・調査文献 等	—		
人為的水利用	利水施設	ダム:ダム年鑑、ゲート総覧、操作規則 等 堰 :施設台帳、施設一般図面 等	ダム:総貯水容量500万m ³ 以上のダムを対象 堰 :直轄区間の本川・支川の堰		
	水利用	河川取水:河川水取水実績・水利権量 地下水揚水:自治体公表値・利用実態調査結果	河川取水:実績データを使用(実績データがない場合は水利権量) 地下水揚水:県・市集計の公表値を基に土地利用等から面分布データ化		

(2) 水理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に地質区分を設定し、深度方向の地質層序については日本列島における三次元水文地質モデルや地質文献、各種調査資料等を踏まえて設定した。また、地表面近傍の水・浮遊砂の相互交換が活発に行われる表層土壌については、地表面から層厚 30cm、100cm 程度の 2 層で表現した。

水理地質構造の 3 次元化は、各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 上で構築した(図-5)。

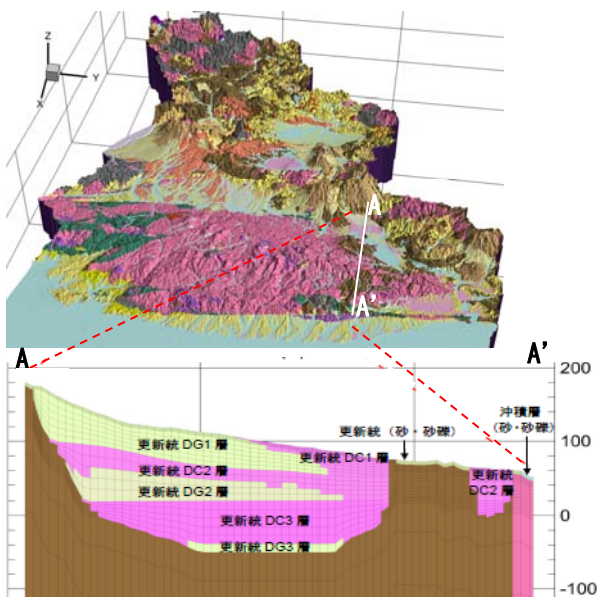


図-5 水理地質構造のモデル図 ※県レベル

(3) 人為的水利用モデルの構築

人為的水利用のモデル化は、流域内の水と土砂輸送系に影響を与える利水施設(ダム・堰)、水利用(河川取水・地下水揚水・水田)を対象とする(図-6)。

なお、人為的水利用のモデル化は表3に示すように解析レベルに応じて解像度を設定している。

1) 利水施設(ダム、堰)

ダム施設は、総貯水容量が 500 万 m³以上の施設(全ダム総貯水容量の約 95%を占有)を対象とした。また、ダム湖が浮遊砂の挙動に影響を与える点を踏まえ、県レベルの解析では湖底地形を貯水池 HV や堆砂状況を踏まえて忠実に再現した。

取水堰は直轄区間に位置する固定堰・可動堰を対象とし、堰諸元については施設台帳や LP データから設定した。なお、可動堰の運用は操作規則に準じモデル化している。

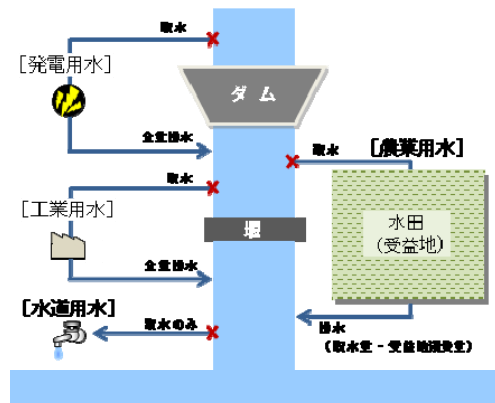


図-6 人為的水利用モデル(河川取水)のイメージ図

表-3 人為的水利用のモデル化方針

種別	概念図	項目	モデル化の考え方/方法	
			地方ブロックレベル	県レベル
利水施設		対象施設	・総貯水容量 500 万 m ³ 以上のダム	・同左
		堤体	・天端高を解析格子標高に設定	・同左
		貯水池	・旧版地形図より貯水池内の解析格子標高を設定	・貯水池HVと堆積状況を考慮した格子標高を設定
		ダム運用	・実績貯水容量変化量(流入量-放流量)と計算流入量より算定	・同左
		取水	・実績取水(もしくは水利権量)を使用	・同左
河川取水		排水	・間接流域からの導水量を考慮	・同左
		対象施設	・阿武隈川水系は、本川および支川(直轄区間)の堰。 ・その他水系は、本川(直轄区間)の堰	・同左
		堤体	・固定堰は、天端高を設定。可動堰は、操作規則に準じてゲート敷高を操作	・同左
		越流量	・越流量は河川水位が越流高ないしゲート敷高を超過した場合に、越流公式により算定	・同左
		取水位置	・取水位置は水利権関連資料および整備計画資料より設定	・同左
地下水揚水		取水	・実績の取水(もしくは水利権量)を使用	・同左
		排水位置	・水利権関連資料、地形、水路等から位置を把握	・同左
		受益地	・取水位置、主要な取排水系統、地形区分等を考慮して設定	・水利権資料(受益地・取排水系統図等)から設定
		農業	・取水位置、受益地減水深(一般的な平均値 25mm/日、山崎、1960)	・同左
		発電・工業	・全量排水	・同左
水田		農業	・大部分が消費されると仮定し排水は考慮せず	・同左
		工業・水道	・平地部の農地から、河川取水の受益地を除外した地区	・同左
		農業	・解析メッシュにおける平地部の建物用地の土地利用区分	・同左
		工業・水道	・平地・盆地別の県単位揚水量から、解析格子内の取水量を設定	・同左
		農業	・年ごとの取水量(実績)を使用	・同左
水田のモデル化		深度	・利用実態調査結果を踏まえ揚水深度はすべて浅井戸と設定	・同左
		取水方法	・全国地下水資料台帳(国土政策局)を参考に揚水深度を推定	・同左
		対象	・公表資料の浅井戸/深井戸の区分を使用	・同左
		対象	・1つの計算格子に含まれる複数の揚水井の集合体(揚水格子)としてモデル化	・同左
		対象	・解析メッシュにおける水田の土地利用区分	・同左

2) 水利用

①河川取水

河川取水は農業用水、発電用水、工業用水、水道用水を扱い、取水量 $1\text{m}^3/\text{s}$ 以上の施設を対象とした。

解析に使用する取水量は収集した実績データを基本とし、取水位置は水利権関連資料等をもとに設定した。

排水量については、農業用水では取水量から受益地消費量(減水深)を差し引いた量を排水させ、工業用水は全量排水、水道用水は消費される(排水しない)ものとしてモデル化した。

②地下水揚水

地下水揚水は水道用水、工業用水、農業用水を扱うが、個別揚水井の諸元(位置・深度、揚水量)が明らかになっていないため、揚水範囲は土地利用区分や地形勾配を参考に推定し、揚水深度は浅井戸/深井戸に大別、揚水量は県・市集計の実績揚水量を用いるなどして、個別揚水井の集まりとして巨視的にモデル化した。

③水田

水田の水張りによる地下水涵養、河川取水に伴う浮遊砂の流入、田面水位変化による浮遊砂の挙動を表現した。なお、水田のモデル化は解析格子単位に複数の田面、畦畔、用排水路をまとめた集合体(圃場格子)として扱っている。

2-3 解析モデルの検証

水循環の再現性は、平均的な流況の2003年~2005年(2004年は比較的大きい出水が発生)を対象に、日単位での非定常解析により確認した。なお、解析の初期流動場は人間活動の影響のない過去の状態(表流水と地下水が完全に平衡した状態)を試算し与えている。

再現性の項目は、河川流量と地下水位、加えて県レベルの解析では浮遊砂濃度とし、観測値との検証を行いながら透水係数や有効間隙率、表層土壌の初期粒径成分などの物性パラメータを調整し再現性を確保した。

(1) 河川流量

河川流量は、解析対象内の代表地点(地方ブロックレベル:55箇所、県レベル:31箇所)において、年間を通じた流況や累積流量、出水時のピーク流量や出水後の低減傾向について観測値との適合性を確認し、概ね良好な再現性が得られた。図-7に阿武隈川の基準点(福島)での2004年の結果を例示する。

また、水利用を反映したことによる精度向上の一例として図-8~10に阿賀野川支川日橋川(南大橋地点)での2004年の解析結果を示す。水利用のない自然状態の解析流量では低水時の変動が少なく観測流量との乖離がみられたが、上流の猪苗代湖での施設操作を考慮したことで、観測値との適合度が全体的に向上した。

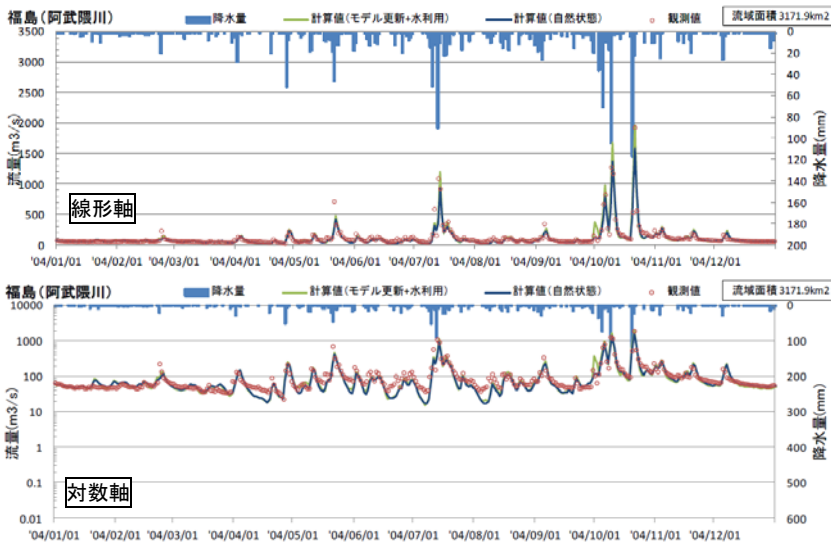


図-7 河川流量の解析値と観測値の比較(阿武隈川_福島) ※県レベル

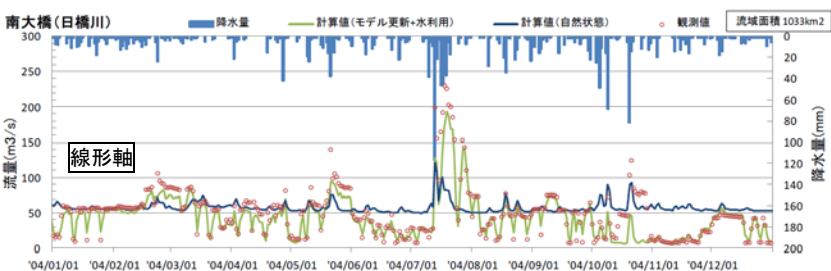


図-8 河川流量の解析値と観測値の比較(日橋川_南大橋) ※県レベル

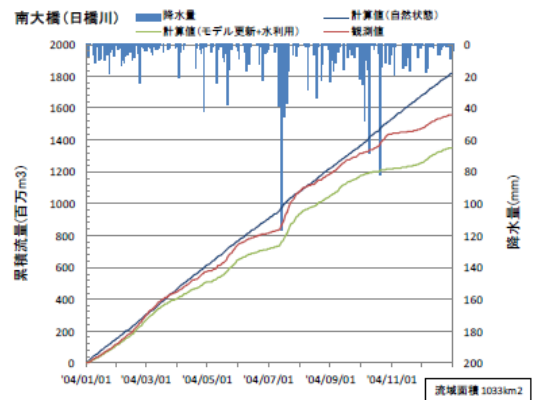


図-9 累積流量の比較(日橋川_南大橋)

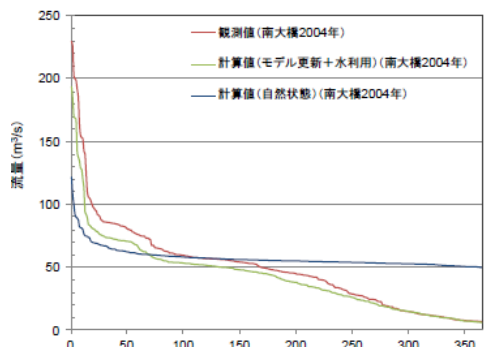


図-10 流況曲線の比較(日橋川_南大橋)

(2) 地下水位

地下水位では、福島盆地および会津盆地での既往調査（自由地下水位等高線）を用いて、広域的な地下水位の分布状況を確認した。既往調査は昭和50年代と古く現在の水利用と異なるため、概ねの地下水位と地下水流動方向の傾向を比較することで再現性を確認した。

一例として図-11に福島盆地での観測値と解析3カ年の最高水位・最低水位との比較を示す。盆地中央部（EL. 70~110m間）では、自由水位等高線の観測値と解析値が概ね整合しており流動方向の傾向は捉えている。次に、盆地を横切る断面では、標高の高い地域ほど観測値との乖離がみられた。これは、水利用の実態が明らかでないこと、また、地下水流動を規定する地形に関して、昭和50年代のものは収集資料の図からの読み取りであり、最新のデジタル標高データとの乖離があることなどが原因の一つに挙げられる。

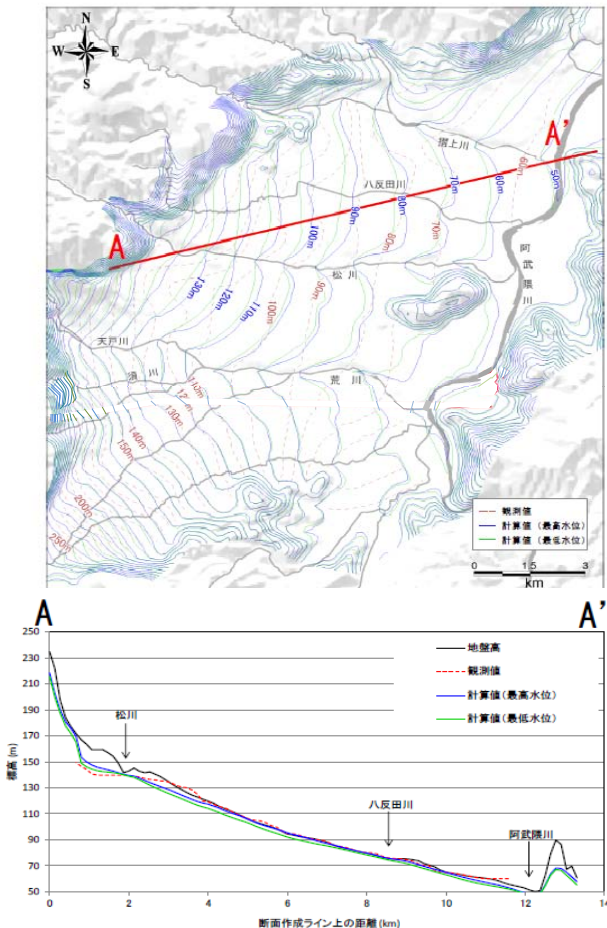


図-11 地下水位の観測値と計算値の比較 ※県レベル

(3) 浮遊砂

浮遊砂の再現性は、浮遊砂濃度と浮遊砂フラックス（浮遊砂輸送量）の両面から確認した。

図-12に阿武隈川伏黒地点での河川流量と浮遊砂濃度の関係を示す。浮遊砂濃度の観測値は、同程度の

河川流量でも2~3オーダー程度の幅をもっており、河川流量が大きくなるとその幅は小さくなる。その中において、浮遊砂の挙動解析の結果は観測濃度の範囲にあり、浮遊砂輸送量（河川流量×浮遊砂濃度）が大きい洪水時を重視して再現性を確認したところ、観測値と計算値のオーダーは一致していることが確認された。

次に、洪水時および年間の浮遊砂フラックスの文献既報値と解析値との比較結果を表-4に示す。ここで、解析値については、洪水時の比較では既報値の河川流量と同程度の2004年10月洪水を、年間の比較は2004年の解析結果を使用した。集計年が異なるため直接の比較はできないが、洪水時および年間の浮遊砂輸送量の解析値は既報値とオーダーでは整合している。

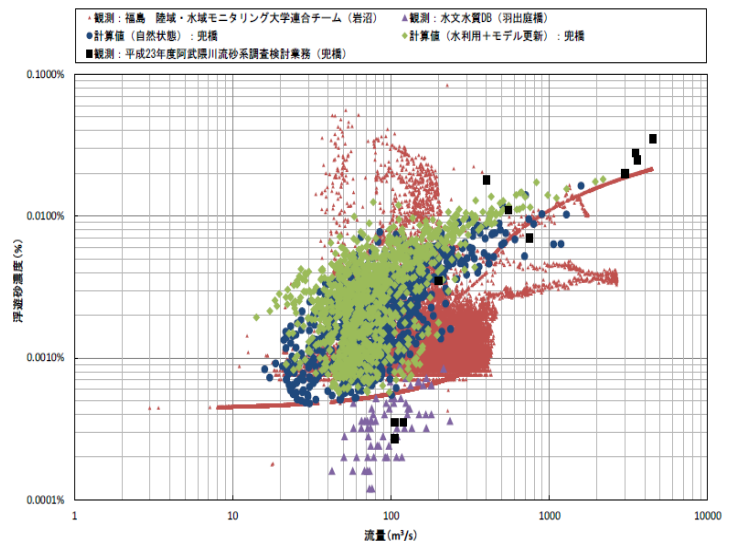


図-12 河川流量と浮遊砂濃度の関係

表-4 浮遊砂輸送量の既報値と解析値の比較

		既報値	解析値	備考
洪水時 流量/ 土砂輸 送量	阿久津 地点	1,000(m³/s)/ 750(kg/s)	1,249(m³/s)/ 509(kg/s)	既報値: 1996年洪水 解析値: 2004年10月洪水
	岩沼 地点	2,200(m³/s)/ 2800(kg/s)	2,312(m³/s)/ 987(kg/s)	
阿武隈川の 年間土砂輸送量		8 × 10 ⁴ (m³/y)	35.2 × 10 ⁴ (m³/y)	既報値: 過去5,000年間 平均値 解析値:2004年

3. 水循環機構の分析

水循環からみた物質の挙動を理解するために、物質の輸送媒体である水と浮遊砂の循環に着目して、現状の水循環機構を分析した。

3-1 水の循環

水の循環に関する分析結果の一例として、本稿では表流水・地下水の流れ（水循環流線網）、ストック・フローに着目した流域水収支について整理した。ここでの分析結果は、とくに水に溶けやすい物質を対象として検討する場合には、有効な基礎情報となる。

(1) 表流水・地下水の流れ (水循環流線網)

1) 水循環ブロック (影響領域)

水循環ブロックは、表流水と地下水を一体とした水資源の利用、保全を考える際の領域として重要となる。

- ・水循環ブロックは、水理ポテンシャル、流線網 (表流水と地下水の流動経路を平面的に投影表示したもの)、分水嶺での地下水流動量分析結果を参考に「概ねこの範囲を考慮しておけば対象水系に流動してくる表流水、地下水は含まれる領域」として区分した。
- ・図-13 に阿武隈川水系の水循環ブロックを示す。阿武隈川水系は、周辺の久慈川、那珂川、阿賀野川水系、浜通り二級河川からの地下水流動があり、水循環ブロックは流域より広がっている。とくに阿賀野川、浜通り二級河川の境では概ね2~5kmの水循環ブロックが重複していると想定される。

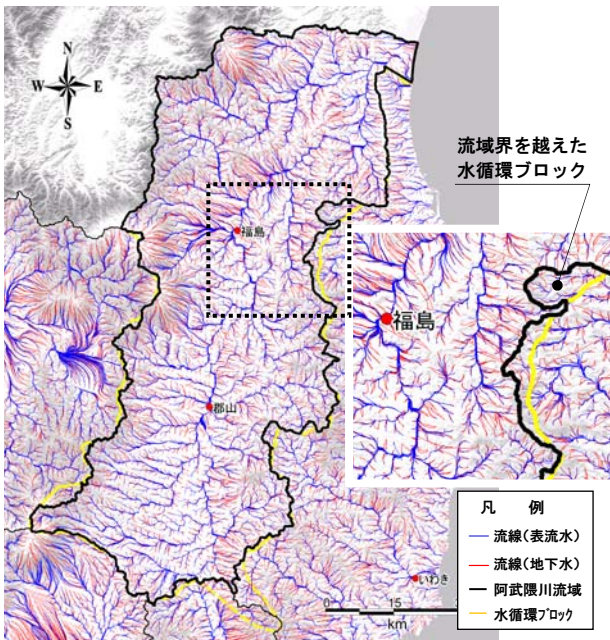


図-13 水循環ブロック (阿武隈川流域) ※地方レベル

2) 人為的水利用による影響

水利用のある場合と水利用のない自然状態での解析結果の相違から、水利用による表流水・地下水の流れの変化を理解することができ、人間活動に伴う水循環系への影響を検討する上で有効な基礎情報となる。

- ・図-14 は福島盆地を例に、地表面付近の水粒子の三次元的な流動経路を水平面内に投影して表示したものであり、青線は表流水を赤線は地下水を表している。
- ・人為的水利用のある現在は、自然状態に比べて地下水の流線 (赤線) が多くなる。その傾向は、水利用の多い地域や砂・砂礫層が分布する透水性の高い地域で顕著であり、表流水が一旦地下へ伏没した後に本川へ湧出する流れのパターンがみられる。

(2) 流域水収支 (主要盆地)

水循環解析結果から推定した主要盆地 (福島盆地、郡山盆地、会津盆地) の年間水収支を表-5 に示す。

- ・主要盆地を出入りする水量は、降水量を1とした場合に表流水で5~12、地下水で0.01~0.2と表流水の出入りが激しく、福島盆地ではその割合が大きい。
- ・地下水涵養量に対する地下水流入量の割合は、福島盆地が約34%、会津盆地が約24%、郡山盆地が約9%で、郡山盆地が少ない。また、各盆地とも地下水流出量は地下水流入量の約1/10程度であり、盆地外へ流出が少ない水収支構造を示している。
- ・地下水かん養量に対する地下水揚水量の割合は、福島盆地が約7%、郡山盆地が約2%、会津盆地が約3%であり、地下水の利用は相対的に少ない。
- ・表流水および地下水の水収支変化量は、各解析年では10百万m³程度の幅がみられたが、解析3カ年の平均値でみると何れの盆地もほぼ平衡している。

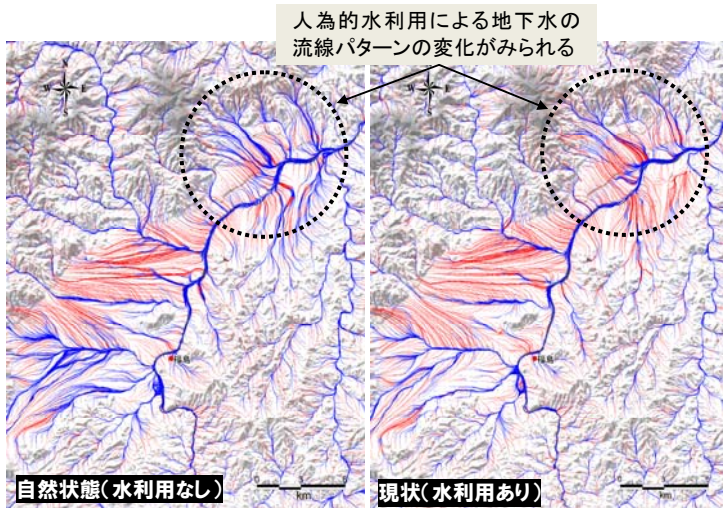


図-14 表流水・地下水の流線軌跡 (福島盆地) ※県レベル

表-5 主要盆地の水収支 (年間値) ※県レベル

水循環構成諸量		福島盆地 (214.1km ²)		郡山盆地 (202.9km ²)		会津盆地 (315.7km ²)		
		百万m ³	比率	百万m ³	比率	百万m ³	比率	
表流水	流入	降水量	297	1.00	267	1.00	516	1.00
		地表水	3,351	11.29	1,765	6.61	2,709	5.25
	流出	灌漑水等	6	0.02	102	0.38	413	0.80
		蒸発散量	25	0.08	43	0.16	48	0.09
地下水	流入	地表水流	3,666	12.35	2,072	7.76	3,658	7.08
		灌漑水等	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	流出	地下水	67	0.23	13	0.05	92	0.18
		蒸発散量	24	0.08	29	0.11	20	0.04
表流水-地下水間	地下水	8	0.03	2	0.01	7	0.01	
	地下水揚水	13.1	0.04	2.6	0.01	9.7	0.02	
	地下水涵養	197	0.67	138	0.52	387	0.75	
表流水収支	地下水湧出	221	0.74	116	0.43	444	0.86	
	流入量	3,887.7		2,252.7		4,091.9		
	流出量	3,888.0		2,252.6		4,092.1		
地下水収支	貯留変化量	-0.3		0.1		-0.3		
	流入量	264.8		150.8		479.1		
	流出量	264.8		148.7		480.7		
	貯留変化量	0.0		2.2		-1.6		

※解析年(2003-2005年)の平均値

3-2 浮遊砂の循環

浮遊砂の循環に関する分析結果の一例として、本稿では浮遊砂の輸送量と侵食・堆積量の地域性を分析した。ここでの分析結果は、特に浮遊砂に吸着しやすい物質を対象に検討する場合には有効な基礎情報となる。

(1) 浮遊砂輸送量

浮遊砂の輸送量に関して、場所による違いや水利用による影響を分析した。

- 2004年の累積浮遊砂輸送量分布を図-15に示す。累積土砂輸送量の地域分布では、福島県東側の阿武隈山地や浜通り、西側の越後山脈の山腹斜面で相対的に多く、後述の浮遊砂堆積量(図-16)の多い地域と整合している。水域では阿武隈川、阿賀野川と支川、ダム湖、また背後地に浮遊砂発生源を抱える浜通り地区の二級河川で輸送量の多い区間が確認された。
- 次に、阿武隈川における浮遊砂輸送量及び比浮遊砂輸送量を表6に示す。本川の比浮遊砂輸送量は、下流から上流まで120~160千kg/年/km²であるのに対して、支川では60~280千kg/年/km²と幅が広い。また、支川での比浮遊砂輸送量の平均値でみると、表層地質の大部分を花崗岩類で占める右支川では200千kg/年/km²、花崗岩類が殆どない左支川では

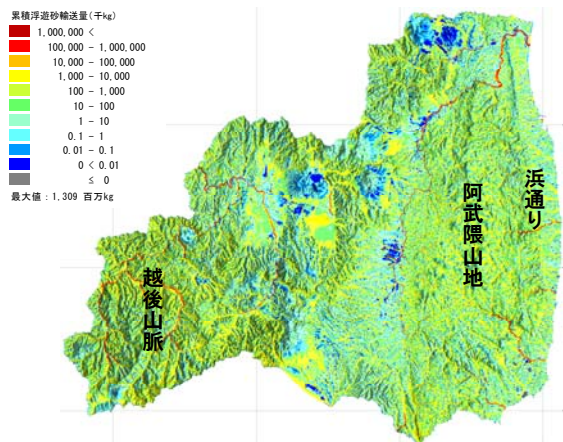


図-15 累積浮遊砂輸送量分布(2004年)

表-6 阿武隈川主要地点の浮遊砂輸送量

河川	地点	流域面積	浮遊砂輸送量	比浮遊砂輸送量
		(km ²)	(百万kg/年)	(千kg/km ²)
阿武隈川 [本川]	岩沼	5,265.0	648.0	123.1
	館矢間	4,133.0	601.3	145.5
	福島	3,171.9	498.9	157.3
	本宮	2,283.5	307.5	134.7
	阿久津	1,865.2	248.1	133.0
阿武隈川 [左支川]	須賀川	910.2	120.0	131.8
	釈迦堂川	307.0	28.0	91.3
	五百川	190.0	28.0	147.2
	荒川	185.0	25.3	136.8
	摺上川	321.4	19.2	59.8
阿武隈川 [右支川]	白石川	788.7	57.2	72.5
	社川	438.0	86.0	196.4
	大滝根川	384.0	38.1	99.3
阿武隈川 [支川]	移川	281.0	78.8	280.6
	広瀬川	266.8	59.7	223.9
	阿武隈川 左支川	358.4	31.5	101.5
阿武隈川 右支川	342.5	65.7	200.1	

※値は2003-2005年の平均値

100千kg/年/km²と流出特性の地域性がみられた。

次に、河川取水を通じて水田(受益地)へ運ばれた浮遊砂量について整理した。

- 阿武隈川水系および阿賀野川水系の受益地への年間浮遊砂輸送量と比浮遊砂輸送量を表7に示す。
- 受益地への比年間浮遊砂量は、0~10m³/年/km²と30~60m³/年/km²に2分される。年間比土砂量が0~10m³/年/km²と少ない受益地では、猪苗代湖やダム湖を水源とするものが多い。滞留時間の長い湖沼等では粒径の大きい土粒子ほど沈降しやすく、そのため細粒成分の浮遊砂が取水される割合が高くなり、浮遊砂輸送量が少なくなる傾向にあると考える。

表-7 受益地への年間浮遊砂輸送量

受益地	かんがい面積 (km ²)	最大取水量 (m ³ /s)	浮遊砂輸送量 (千kg/年)	比浮遊砂輸送量 (千kg/km ²)	取水地点
岩地蔵取水口	60.2	12.870	3,286.5	54.6	阿武隈川
新小斎揚水機	9.1	2.065	463.1	51.1	阿武隈川
新桜揚水機	9.5	2.260	323.8	34.2	阿武隈川
坪石揚水機	3.8	2.440	547.1	143.1	阿武隈川
稲荷山堰	16.7	2.790	141.9	8.5	白石川
菰神堰	6.8	1.322	289.0	42.6	白石川
黒沢尻・澄川揚水	7.4	1.886	246.6	33.4	白石川
県営灌漑船岡用水	4.8	1.202	191.4	40.2	白石川
上名倉かんがい用水	3.5	2.200	23.0	6.5	荒川
荒井かんがい用水	13.8	2.200	91.4	6.6	荒川
東根堰かんがい用水	8.2	2.407	0.13	0.02	信夫ダム
安積疏水	134.4	15.670	556.1	4.1	猪苗代湖
郡山東部かんがい用水	19.2	1.000	0.18	0.01	三春ダム
戸の口堰	7.2	3.850	73.4	10.2	猪苗代湖
馬越頭首工及び富川頭首工	59.5	4.436	2,704.1	45.4	阿賀川
国営阿武隈川農業水利事業	47.5	5.750	0.01	0.00	羽鳥ダム

(2) 堆積・侵食量

浮遊砂の侵食・堆積しやすい地域性について、陸域と水域で整理した。

- 2004年を例に浮遊砂(全粒径)の年間侵食量および年間堆積量の空間分布を図-16に示す。浮遊砂の侵食量分布を見ると、地表勾配の急な山腹斜面や谷筋で侵食量が大きく、流水による侵食の影響がみとれる。一方、堆積については、地形勾配が変化する山裾や地形勾配の緩い平地・くぼ地、ダム湖やため池などの閉鎖水域で増加する傾向にあり、地形的な要素が強く、その傾向は粒径が小さいほど顕著である。

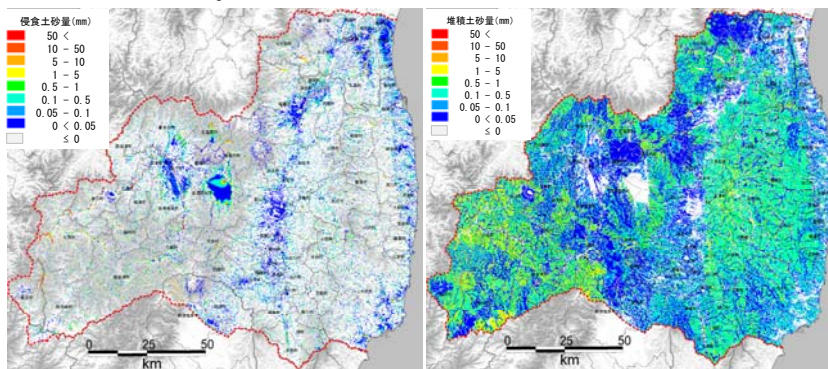


図-16 浮遊砂量分布_全粒径(左:侵食、右:堆積)(2004年)

次に、河川の縦断方向における浮遊砂の堆積・侵食傾向を整理した。

- ・ 図-17 に 2004 年における阿武隈川的全粒径および粒径別の年間侵食・堆積高 (mm/年) を示す。本図は河道内の微地形を表現した河道切出しモデルによる解析結果であり、今回は低水路内の状況を例示する。
- ・ 浮遊砂の粒径が $10^{-6}\text{m} \cdot 10^{-5}\text{m} \cdot 10^{-4}\text{m}$ と大きくなるほど、侵食・堆積高の幅が広がっており、河道内の堆積・侵食量は粒径 10^{-4}m の浮遊砂に支配される。
- ・ 粒径 10^{-4}m の浮遊砂は、本川に位置する信夫ダムと蓬莱ダムの上流部や河口付近など、流速の比較的遅い区間で堆積する傾向にある。また、全川を通じて堆積高に比べて侵食高の幅が大きい。
- ・ 粒径 $10^{-6}\text{m} \cdot 10^{-5}\text{m}$ の浮遊砂は、信夫ダムと蓬莱ダムの上流部で侵食の傾向にあり、洪水時のダムゲート開放に伴う影響と考えられる。それ以外の区間では侵食・堆積量の変化はほとんどなく、この状況は一旦河川へ流れ出た細粒分の浮遊砂が沈降しないまま流れに乗って海域まで運ばれるウォッシュロードの状態にあると解釈できる。

4. おわりに

本研究は流域スケールでの物質移行を理解するため、現状の水利用状況を反映した水循環解析モデルを構築し物質の輸送媒体である水と浮遊砂の挙動を解析した。

- ・ 解析結果から、水循環ブロック (影響範囲)、水循環サイクル (移流経路・時間) や水収支、さらに水循環系を介して移動する浮遊砂の経路や輸送量など、水と浮遊砂の循環プロセスを定量的に把握することができ、物質移行に資する基礎的な情報が得られた。
- ・ 人為的水利用のない自然状態との相違から、過去から現在に至る水循環の変化量を知ることができ、人間活動の水循環への影響の推定が可能となった。

今後はさらに自然的・社会的変化の情報を集積して解析モデルを深化させていくとともに、モニタリング調査との連携による情報の補完によって解析レベルを向上させることも必要である。

最後に、水循環系の問題を扱う場合には、直接見ることができない水循環の動きを分かり易く理解するための可視化が重要である。本研究では、解析結果を4次元 (空間3次元+時間経過) で表示可能な「水循環可視化システム」を構築した。システムでの可視化イメージを図-18 に例示する。引き続き意識共有・合意形成のツールとしての利用に向けて検討を進めていく。

<参考文献>

- 1) 森康二, 多田和広 他: 陸水・流砂連成解析手法の開発, 水工学論文集, 第55巻, 2011年2月, (2011)

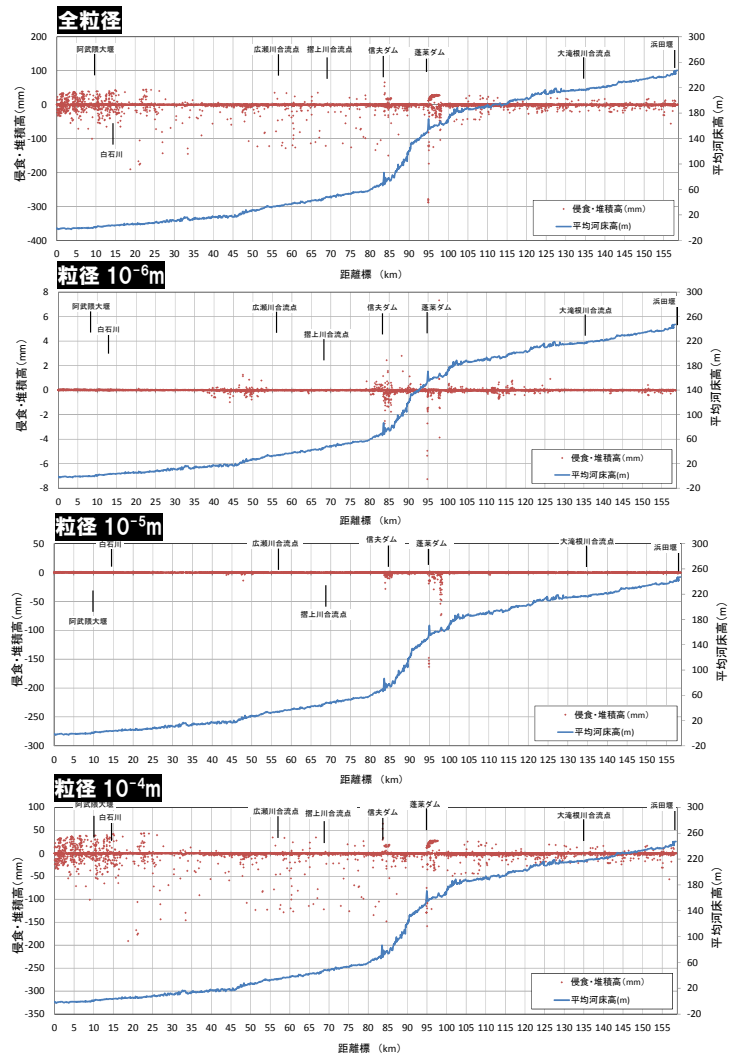


図-17 河川低水路部の堆積・侵食(2004年)※河道切出しモデル

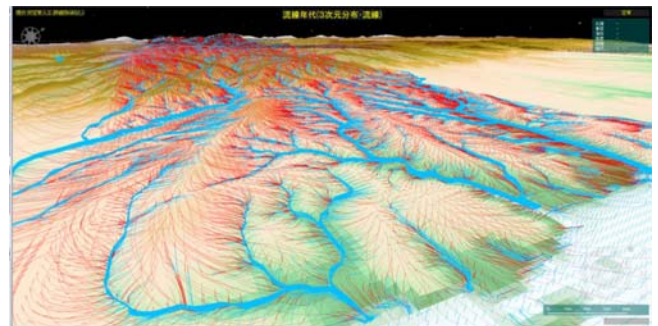


図-18 水循環可視化システムのイメージ図(流線軌跡)

- 2) Torri D, Sfalaga M, et al.: Splash detachment: runoff depth and soil cohesion, Catena, 14, 149-155, (1987)
- 3) 東北農政局計画部, 1978. 福島県水文地質図集 農業用地下水調査 山形・福島地区調査報告書.
- 4) 国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所:阿武隈川流砂系調査検討業務報告書, 平成24年3月
- 5) 真野明, 沢本正樹, 1998. 阿武隈川の土砂排出速度, 京都大学防災研究所年報 第41号 B-2.