

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職					
		いしだいら ひろし 石平 博	国立大学法人山梨大学	准教授					
②技術研究 開発テーマ	名 称	扇状地河川富士川における伏流水の実態の解明							
③研究経費（単位：万円）		平成 年度	平成 年度	平成 年度	総 合 計				
※端数切り捨て。		196 万円	224 万円	77 万円	498 万円				
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）									
氏 名		所属機関・役職（※平成31年3月31日現在）							
馬籠純		山梨大学大学院総合研究部 国際流域環境研究センター・助教							
中村高志		山梨大学大学院総合研究部 国際流域環境研究センター・助教							
西田継		山梨大学大学院総合研究部 国際流域環境研究センター・准教授							
⑤研究の目的・目標									
本研究は、洪水対策のための河道掘削工事が計画されている富士川流域成田地区を対象とし、伏流水の寄与域を高精度で把握できる安定同位体トレーサーを用いた伏流水の流動状況の検討や、滞留時間を推定できる放射性同位体トレーサー(トリチウム)の観測を行うとともに、流量推定のための水文モデルの構築を行うことで、扇状地河川富士川における伏流水と地下水の実態解明を目指すものである。 本研究により得られる成果は、短期的には笛吹川成田地区の洪水対策のための河道掘削工事等による周辺地下水への影響(地下水位の低下量や影響範囲)を考慮した工事計画を策定するための重要な情報となる。また、本研究の成果であるモデルは、長期的には、伏流水が広く分布し水資源としての利用量も多い富士川水系の他エリアにおける地下水への影響の評価方法への拡張が期待できる。さらに、河川由来の伏流水と甲府盆地地下水との判別ができるようになることで、伏流水と盆地地下水を区別した地下水文プロセスの科学的・学術的な説明が可能となり、河道掘削による周辺井戸への影響に関する住民理解の促進が期待される。									

⑥研究成果

1. 伏流水の量に関する研究（水文モデル解析）

1.1 基礎情報の収集と整理

伏流水量の推定や河川水と地下水の関連性に関する検討に必要となる、水文気象情報(降水量、河川流量・水位などの時系列データ)、地下水位情報(時系列データ)ならびに、対象地域周辺の地形・地質・地盤情報(地理空間データ)の収集と整理を行った。その結果、2002年以降の約10年前後にわたる降水量・河川水位・地下水位等のデータを入手・整備することができた。さらに、地下水位情報については、既設の観測井戸(山梨県管理)に加え、民間井戸に自記水位計を設置することで、新たにデータを取得した。

1.2 河川と伏流水の相互関係の評価

河川流量の収支解析や河川流量・水位と周辺地下水位の相関解析に基づき、河川流況と周辺地域への伏流量との関連性について検討を行った。

(1) 河川流量解析：笛吹川で実施されている同時流量観測及び現業流量観測のデータを用いて対象河道区間における河川水量の収支解析を行い、当該地域における伏流量の概略値を推定した。その結果、年平均で約 $1.82\text{m}^3/\text{s}$ 程度の水量が河川から地下水帯へ伏流している可能性が明らかとなった。

(2) 降水・河川水位と周辺地下水位の変動特性：石和地点の降水量、河川水位と山梨県管轄のモニタリング井戸(石和1号、2号)における地下水位観測データを用いて、降水・河川水と河川近傍地下水の変動傾向を確認するとともに、相互の関連性について検討を行った。その結果、河川水と浅層地下水帯は連動しており、河川からの伏流水が浅層地下水位の変化に強く影響を及ぼしている可能性が確認された。ただし、河川水位及び浅層地下水位の変化は降水量の時間変化とも良く対応しており、浅層地下水位の変化が伏流水と降水(地表面からの涵養)のどちらの影響を強く受けているかについては、地下水試料の同位体分析に基づく起源解析により明らかにする必要がある。

1.3 河川と伏流水の相互関係の評価モデル

(1) 伏流水量の推定：同時流量観測等のデータに基づく河川水量の収支解析から推定した成田地区近傍(重川、日川、笛吹川の三川合流地点から蛍見橋までの区間)の伏流水量(Q_R)と石和地点の河川水(WL)ならびに三川合計流量(Q_3)の関係をモデル化した。なお、三川合流地点での流量の方が伏流水量との相関が高くなっており、このことから三川合流地点の扇頂部からの伏流が支配的であることが示唆される。

(2) 河川水位・伏流水が周辺地下水位に及ぼす影響のモデル化：以下に示す三種類の異なるモデルにより、河川水位や伏流水の変化が周辺地下水位に及ぼす影響の再現・推定を試みた。

a) 重回帰モデル：安定同位体を用いた地下水起源の解析結果より、当該地域の地下水は降水(地表面からの浸透)と河川水(伏流水)を主な起源とする水で構成されていることが明らかとなっていることから、伏流水量 Q_R と降水量 P を入力変数とし、地下水位を推定する重回帰モデルを作成した。本モデルでは、水位変動幅がやや小さく見積られる傾向があるものの、長期的な変化傾向は概ね再現できており、地下水位の推定誤差(RMSE)は 0.094m であった。

b) 概念モデル：重回帰モデルと同様に、地表面からの浸透と河川からの伏流水をかん養源とする概念モデルを構築した。このモデルは、線形貯水池を模した構造を有しており、地下水帯における貯留-流出機構も考慮されている。なお、計算は日単位で行い、モデルパラメータのうち、浸透に関するパラメータ(w_1)は、地下水流動モデルに関する過去の研究事例(近藤,1985)を参考に設定し、伏流水の寄与を表現するパラメータ(w_2)及び排水パラメータ(α)については、キャリブレーションにより決定した。石和2号井戸への適用事例では、日単位の地下水位推定誤差(RMSE)は 0.118m (月平均値で 0.105m)となった。

c) 地下水流動モデル：対象地域を含むより広域(甲府盆地全体)の地下水流動や河川水と周辺地下水との関連性について検討するため、有限差分法による3次元地下水流動解析モデルMODFLOWを用いて、甲府盆地の地下水流動状況の把握を行った(以下、盆地スケールモデル)。なお、盆地スケールモデルの鉛直方向層厚(基盤面深さ)は、後述のトリチウム分析の結果から得られる地下水滞留時間を参考に設定している。また、成田地区近傍のより詳細な地下水流動パターンの把握を目的とし、高解像度モデル(解像度 100m 、笛吹川モデル)の作成とそれを用いた数値実験も実施した。盆地スケールモデルでは、甲府盆地全体の地下水位分布ならびに流動パターンを概ね捉えることができるとともに、笛吹川モデルに関しては、計算領域内に位置する観測井(3地点)における地下水位の計算値と実測値の比較結果から、モデルによる成田地区近傍の地下水現況の再現性を確認した。

1.4 数値実験に基づく扇状地河川の特徴に関する検討

地下水流動モデル(笛吹川モデル)を用いて、甲府盆地の地下水における扇状地河川の影響の実態解明を行った。ここでは、評価対象の河川による浸透(伏流)が地下水へ及ぼす影響を、基準となる数値実験結果と評価対象河川を除いた数値実験結果との差分で表されるものと仮定して検討を行った。

(1) 日川・重川の影響：笛吹川・日川・重川の三河川を考慮したケース(基準実験)と、日川・重川削除したケースの地下水頭計算結果の差分を取り、その分布から日川・重川の影響範囲と大きさを明らかにした。これより、各河川上流部で地下水頭を上昇(涵養)させる影響が見られる一方で、重川中流域から三河川合流地点にかけて地下水頭を低下させる影響が確認された。この日川・重川による水頭低下傾向は、地下から河川への流出傾向が一因と考えられるが、この低下が見られる領域は河床標高が地下水面よりも低く、一部の地下水が河川へと流失すると予想される地域(国土交通省関東地方整備局, 2000)と一致している。なお、このように地下水頭が低下する領域が存在するため、三河川モデルの重川周辺における谷形状のような地下水分布系が形成されている。

(2) 複合扇状地河の影響：金川を含む笛吹川左岸の複合扇状地を対象として、上記(1)と同様の影響評価を行った。その結果、対象とした河川の多く(金川、馬場川、境川、浅川狐川)は涵養源としての効果が大きいことが明らかとなった。一方で、天川は日川・重川と同様に、中流・下流笛吹川合流付近で水頭が低下する領域が確認され、上流や付近の扇状地河川からの伏流(浸透)分がこの領域へ流入しやすい状況になっているものと考えられる。

(3) 成田地区透水低下実験：笛吹川左岸の扇状地河川(金川ほか)の影響が笛吹川の旧河道である平等川付近まで現れる可能性について検討を行った。ここでは、成田地区の笛吹川直下の透水係数を極端に小さく設定(1/10倍)した数値実験(疑似マルチレイヤ実験)を行うことで、金川を含む笛吹川左岸の扇状地河川が笛吹川右岸に及ぼす影響について検討を行った。この実験では、笛吹川右岸部を中心に水頭値が上昇する領域や、地下水の流動方向が笛吹川流下方向に対して直角に変わった地点もみられ、右岸方向への流動方向の変化が確認された。これより、笛吹川左岸の扇状地の影響が右岸の平等川付近まで及んでいるとすれば、成田地区の笛吹川右岸地域における基準実験はやや地下水位の過小評価の可能性が考えられる。また、この結果は同位体分析の結果とも整合的であり、扇状地河川の影響が旧河川の平等川付近まで及ぶ可能性が示唆される。

1.5 河道掘削が周辺地下水に及ぼす影響に関する数値実験

洪水対策を目的とした河道掘削工事が予定される地点の河川標高を低下させた数値シミュレーションを行うことで、河道掘削実施後の周辺地下水影響の評価を試みた。具体的には、対象の成田地区の河道区間標高を1mならびに2m低下させた数値実験を実施した。図-1aは、基準実験(通常時)に対する河道掘削2m時の周辺地下水頭変化であり、河道掘削により笛吹川右岸部の平等川付近まで影響が及ぶことが確認された。また、平等川除外実験(図-1b)では図-1aのケースよりも影響範囲が右岸域の広範囲に及ぶことが明らかとなった。さらに、図-1cの成田地区笛吹川透水係数低下実験(疑似マルチレイヤ実験)では、河道掘削区間上流部右岸においては水頭値の低下が見られたものの、逆に中下流右岸の地下水頭は上昇した。これは笛吹川左岸の扇状地河川の影響であると考えられ、実際は図-1aの基準河道掘削実験ほどの地下水低下が発生しない可能性が示唆される。

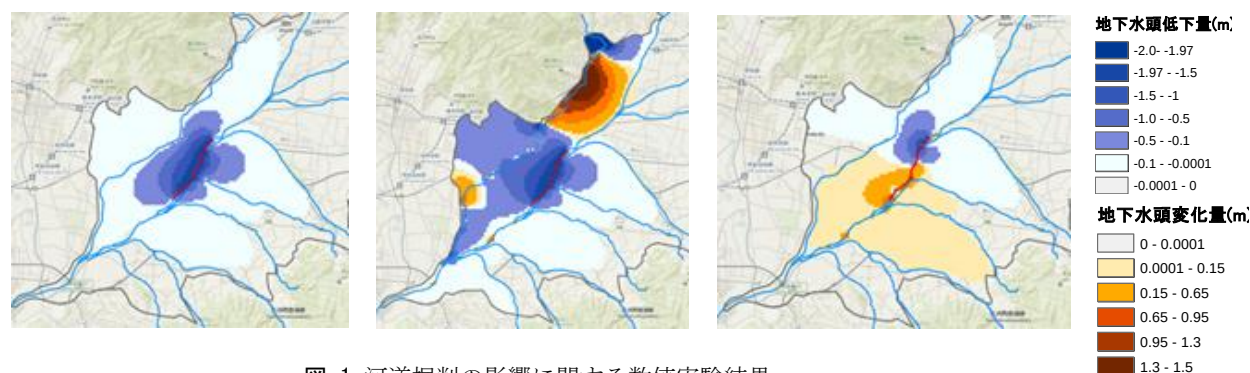


図-1 河道掘削の影響に関する数値実験結果

a(左): 河道低下時の地下水位影響範囲 b(中): 河道低下時の平等川除外実験結果
c(右): 河道低下時の疑似マルチレイヤ結果

2. 伏流水の流動に関する研究（地下水調査および水質トレーサー観測）

調査地域における河川伏流水の分布域を推定するために、調査対象地域の笛吹川右岸直近に位置する既存井戸3地点、笛吹川からおよそ1km離れた平等川(旧笛吹川河道)左岸の既存井戸3地点ならびに笛吹川からおよそ3km離れた既存井戸1地点を対象とし、水の水素および酸素安定同位体比組成ならびに主要溶存化学成分の観測を行った。また、伏流水の滞留時間の推定のためトリチウム年代測定を実施した。

2.1 ヘキサダイアグラムを用いた水質特性の把握

ヘキサダイアグラムは、地下水中の主要溶存化学成分をそれぞれ軸にプロットし、それらを結ぶ6角形で水質組成を整理するものである。当該地域において採取した地下水及び河川水のヘキサダイアグラムを作成したところ、ヘキサダイアグラムの面積は河川水で最も小さく、地下水では河川近傍で比較的小さく、河川から離れるに従って溶存イオン濃度が大きくなる傾向見られ、河川水の涵養と地下水流動に伴う滞留時間の増加、それに伴う水質組成の変化(カルシウムや重炭酸濃度の増加)が考えられる。また扇状地上の降水の涵養については、河川水の溶存化学成分より低いと考えられるためこの寄与率については同位体等、他の指標を使って把握する必要があると考えられた。また西部に位置する観測井では Na^+ 、 Cl^- の濃度が高いNa-Cl型の地下水が確認できた。

2.2 地下水涵養源の塩化物イオン濃度および酸素同位体比

対象地域の地下水は上述の検討結果より河川水、降水、温泉水の混合によって形成されていると考えられる。本研究では、 $\delta^{18}\text{O}$ と塩化物イオン(Cl^-)濃度をトレーサーとして用いてEnd Member Mixing Analysis (EMMA)解析を実施した。水分子を構成する水素と酸素の安定同位体は、他の水中溶存物質等と比較して地下水流動過程での保存性が高い。特に Cl^- は温泉水の涵養があることで顕著な値を示すため本研究では最適なトレーサーと考えられる。なお、河川水、降水、温泉水の同位体組成と Cl^- 濃度は以下の通りである。

- 河川水：河川水は笛吹川で採水したものをイオンクロマトグラフ、同位体解析システムを用いて測定した値($\delta^{18}\text{O}$ ：-10.7‰、 Cl^- 濃度：1.8mg/L)を使用した。
- 降水：山梨大学屋上にて2013年4月～2015年6月の各月に採水したデータを降雨量荷重平均して求めた水質データ、酸素・水素安定同位体比の平均値($\delta^{18}\text{O}$ ：-9.7‰、 Cl^- 濃度：0.3mg/L)を使用した。
- 温泉水の塩化物イオン濃度及び酸素同位体比：温泉水のデータは2016年に6源泉で採取されたものを用いる。採水された温泉水は水質にバラつきがあり平均値を採用することができないことから、今回使用する値は Cl^- 濃度と温度を用いて決定することとする。それぞれ異なる温度、 Cl^- 濃度を示す温泉水は明瞭な放物線を描き、低温で Cl^- が低濃度を示す温泉水は、笛吹川河川水のそれとよく一致する。これは、この地域の温泉水が、地下深部の高温・高濃度 Cl^- を有する原泉と地表から浸透する水が混合して形成されているためと考えられる。したがって、温度、 Cl^- 濃度が低い温泉水は地表水による希釈が行われている可能性があるため、温泉水の温度・ Cl^- 濃度が最も高いものを原泉($\delta^{18}\text{O}$ ：-10.8‰、 Cl^- 濃度：296.3mg/L)と仮定し用いた。

2.3 三成分混合モデルの適用による地下水涵養源の推定

三成分混合系を想定して、地下水涵養源の相対的寄与率の評価を行った。本研究で対象とした地下水および地下水の起源として推定される3つの水源(笛吹川河川水、甲府盆地内部にもたらされる降水、温泉水)の $\delta^{18}\text{O}$ および Cl^- 濃度の関係を、図-2(2016年11月及び2018年1月の調査結果)と図-3(2018年9月の調査結果)に示す。また、地下水涵養源の混合割合(寄与率)を推定するために、降水、河川水、温泉水を端成分とし、これら端成分から地下水までの距離を寄与率として算出する3成分混合解析を行った結果(2016年11月の調査結果)を図-4に示す。笛吹川右岸直近の観測井では河川水の寄与率が小さく20～26%程度を示し、河川から離れるに従って寄与率が大きくなる傾向が確認できた。笛吹川から離れた観測井では降雨の寄与率が少ないことから、河川水と温泉水が混合された地下水となっていると推定できた。甲府盆地内部では降水が涵養しているが他の河川水、温泉水の濃度が濃いいため降水が検出されなかった可能性がある。

以上の結果は、笛吹川河川近傍における地下水に対する河川伏流水の寄与率は低く、この地域の降水の寄与が大きい事を示している。この結果から、当該地域における笛吹川河川水の地下浸透は、金川扇状地先端部に形成された難透水のシルト層によって制限されていると考えられる。しかしながら、これらの地下水についてはこの地域に降った降水の寄与率が高い事を示している。これを解釈するために、金川扇状地上に降った降水が砂礫層が分布する先端部や扇央部で地下浸透し、扇状地の地下を先端部へ向かって流動し、先端部のシルト層の下部(笛吹川の下)を通過して笛吹川右岸地域まで到達しているという仮説を設定した。

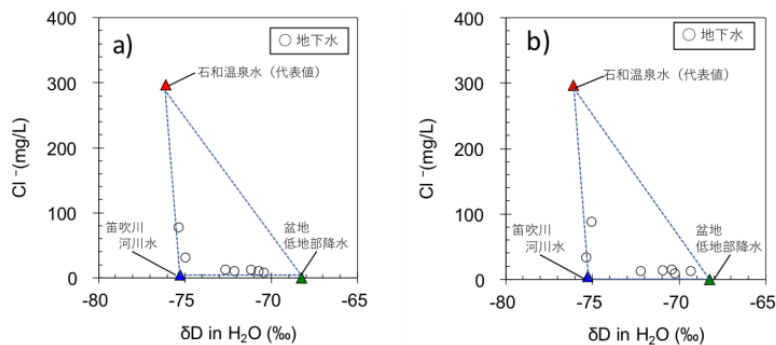


図-2 水中水素安定同位体比値と塩化物イオン濃度の関係
a): 2016年11月 b): 2018年1月

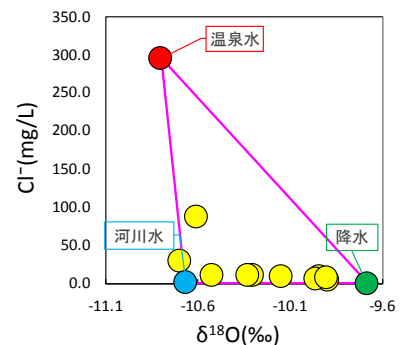


図-3 $\delta^{18}\text{O}$ と塩化物イオン濃度の関係(2018年9月)

2.4 笛吹川伏流水と金川扇状地地下水系の水の混合割合の推定

水質成分や同位体から算出される寄与率の分布が笛吹川両岸でよく一致していることや、この地域の笛吹川が地表からの浸透が少ないとされる扇状地の扇端部に移動した経緯を考慮すると、金川扇状地上で涵養した降水が地形に沿って笛吹川方向へ流下し、扇端部の粘土層の下に潜り込んで笛吹川左岸から右岸側へアンダーパスしているという仮定を得るに至った。このアンダーパスをより詳細に確認するために二成分混合モデルを用いて左岸から右岸へ流下する地下水の寄与率を解析した。その結果、笛吹川右岸近傍の地下水における笛吹川河川水の寄与率は18%～28%で、金川扇状地地下水(扇状地から右岸へ流動してきた地下水)の寄与率は72%～82%であった。このことから、本研究対象地域における地下水流動の特性は、金川扇状地によって形成された難透水のシルト層の上を流れる笛吹川の地下水涵養は比較的小さく(およそ20～30%程度)、金川扇状地地下水が笛吹川の下部を流下し、右岸川へ到達していると考えられ、その混合率はおよそ70～80%程度と高いことが明らかとなった。

2.5 トリチウム解析

地下水流動を解析するにあたって、帯水層の境界条件の適切な設定は極めて重要であり、一般的に水理地質図から帯水層を把握し境界条件を設定する。しかしながら、地質情報が限られている地域において正確な帯水層の空間分布の把握は困難を極める。そこで本研究では、地球化学的視点から地下水年代を帯水層厚の推定に用いることを試みた。甲府盆地の地下水におけるトリチウム等の地下水年代データはほぼ皆無であるが、研究者らが所属する研究センターで独自に蓄積している同位体データベースを活用し、解析を実施した。

深度200mまでは地表水と同程度の濃度のトリチウムが検出され、比較的若い(推定滞留時間50年未満)循環型地下水の帯水層であり、それ以深では急激にトリチウム濃度が減少し、深度200m程度に地下水年代の躍層があることが明らかとなった。この結果から、甲府盆地において地下水流動モデルの解析を実施する際に計算対象とする地下水帯水層の層厚を設定するのに極めて有用な情報を得ることができた。

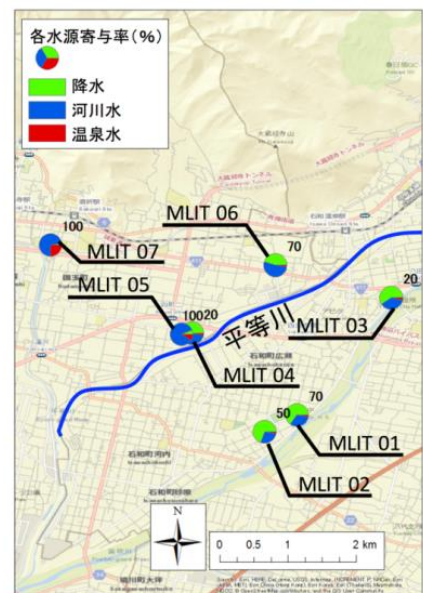


図-4 各種涵養源別の寄与率
(2016年11月)
円グラフ横の数値: 掘削深度[m]

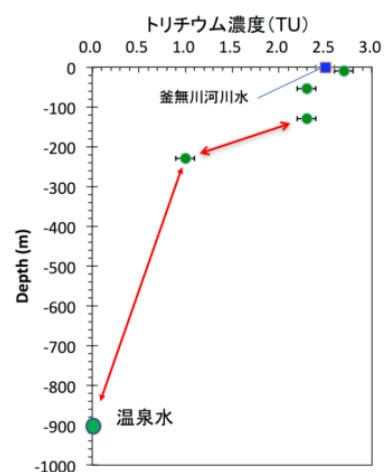


図-5 甲府盆地中央部の
トリチウム濃度鉛直分布

⑦研究成果の発表状況・予定

下記の学会において、研究成果の発表を行った。

中村 高志，石平 博，馬籠 純，西田 継，大澤 俊太，土田 元気，坂本 守：甲府盆地の笛吹川氾濫域における河川伏流水の分布，日本地球惑星科学連合2018年大会(千葉, 2018年5月20日～5月24日)

西山 晃平，馬籠 純，中村 高志，西田 継，石平 博：扇状地河川富士川における河川水位・伏流水が周辺地下水位に及ぼす影響のモデル化，水文・水資源学会2018年度研究発表会(三重, 2018年9月12日～9月14日)

また、本研究課題での検討結果を取りまとめ、水文・水資源学会誌、地下水学会誌、日本水文科学会誌などに投稿することもあると考えている。

⑧研究成果の社会への情報発信

- ・公開イベント：山梨県育水県民大会「サイエンスの目で見える山梨の水世界」2017年11月19日
県民向けの公開講演会で、山梨県の水に関する学術研究の解説を行い、その中でも本研究課題に関する紹介も行った。
- ・新聞掲載：山梨日日新聞，2018年1月13日
本研究の成果を直接紹介したものではないが、研究分担者(山梨大学 中村高志)が実施した同位体分析に基づく富士山麓地域の伏流水起源解析に関する研究事例が掲載された。
- ・公開イベント：第19回アカデミックサロン「特殊水質の分析と山梨の水資源」2018年1月19日
地域の一般市民を対象としたサロン形式の公開イベントにおいて、本研究でも用いられている同位体技術及びその水資源解析への応用に関する研究成果の紹介を行った。

⑨表彰、受賞歴

なし

⑩研究の今後の課題・展望等

本研究では複数のモデル(重回帰モデル、概念モデル、3次元地下水流動モデル)について検討を行っているが、それぞれの特徴や制約を考慮しながら、今後これらを利用する必要がある。重回帰モデル及び概念モデルは過去の実績データに基づき構築されたモデルであり、河川改修で想定される河川水位等の変化が過去に起きた変動幅の範囲内であれば、ある程度妥当な推定結果を与えることが期待される。しかし、これらのモデルだけでは、過去の変動幅を超えるような大規模な河川水位の低下やそれに伴う広域的な地下水流動パターンの変化を直接的に取り扱うことは困難である。一方、地下水流動モデルは、地下水流動系の変更などを表現することが可能であるが、定量的な影響評価を行うためには境界条件や地質構造などの詳細な入力情報をモデルに与える必要がある。詳細な水文・地質情報や検証データが不足する状況のもとで、同位体トレーサー解析から得られた知見等を取り入れながら、どこまで地下水流動モデルの精度を高められるかが今後の課題である。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究の成果は、伏流水が広く分布し、水資源としての利用量も多い富士川水系の他エリアや同様の特性を持つ流域における地下水への影響の評価方法への拡張も期待される。また、同位体トレーサーやトリチウムの利用により、対象地域の水文地形・地質特性に起因する複雑な水移動や、河川-地下水の相互作用を把握できる可能性が示されたことは、本研究の大きな成果である。安定同位体比の分析装置自体は非常に特殊かつ高価なものであるが、民間企業などが提供する委託分析サービスも利用可能であることから、地下水・河川水試料を採取し、その分析結果を解析することで、対象地域の水循環に関する情報を抽出できる本手法は、今後、様々な場所で利用される可能性を有している。さらに、同位体観測に基づく伏流水寄与率の分布などの情報を、河川掘削工事が予定されている成田地区近傍の地下水位モニタリング計画の立案(監視用井戸を設置する場合の適地選定など)に利用することなども期待される。