

突発的な高濃度濁水が扇状地の地下水環境および砂浜海岸に与えた影響 —手取川流域を事例として—

石川県立大学生物資源環境学部 藤原洋一・長野峻介

1. はじめに

石川県・手取川扇状地は北陸を代表する扇状地の一つである。河川地表水は、扇頂部の白山頭首工により取水され、七ヶ用水と宮竹用水として約 7,500 ha の水田に灌漑される。そのため水田からの浸透量は、扇状地の地下水涵養源として重要な役割を担っている。また、扇状地を流れる河川は、砂礫を多く含む透水性の高い河床であり、伏流することから地下水を涵養する役割を担っている。北陸地方の生活用水の地下水依存率は 40%、工業用水の地下水依存率は 63%と高く（国土交通省、2006）、酒造業、繊維産業、先端産業等に利用され、豊富な地下水資源の存在が地域の発展に寄与している（能登ら、2011）。これまでの研究により、手取川扇状地における水文・水循環特性はかなり解明されてきた。河川に関する研究としては、河川流量観測により伏流・湧出機構を定量化し、地下水位との関係を調べたもの（二俣ら、2005；森田ら、2008）などが挙げられる。水田による涵養に関する研究としては、減水深調査により水田浸透量を評価したもの（村島ら、2012）が挙げられる。さらに、丸山ら（2012）、岩崎ら（2013）は、扇状地の水収支解析により、地下水涵養源は河川からの伏流量と水田からの浸透量が大部分を占めることなどを明らかにしている。

近年の気候変動に伴い、突発的で局所的な大雨や豪雨の増加、台風勢力の増大により、土砂災害の発生頻度の増加が懸念されている。本研究の対象地である手取川上流域においては、2014年10月に小規模な土砂崩壊が発生し、2015年5月に融雪に伴い大規模な土砂崩壊に拡大した。土砂崩壊現場では、ヘリコプターによる袋型土溜工の設置や侵食防止工の実施、ヤナギの木を散布する航空緑化工が実施（林野庁、2016）されたが、土砂流出は2年以上にも及んだ。土砂崩壊による濁水流出に関する研究によると、細粒土砂を含む土砂流出は、河床に堆積することで河川生態系や河川の伏流量に影響が及ぶことが指摘されている（Waters、1995；藤原、1997；村上ら、2001）。

手取川ではこの土砂崩壊に伴い高濃度濁水が観測され、扇状地の水循環特性に大きな影響が及ぶことが懸念された。柳井ら（2016）は、扇状地内の水循環を表現する地下水収支モデルを構築し、高濃度濁水が水収支構造に及ぼす影響を分析した。さらに、機械学習手法であるランダムフォレストを用いて、地下水位変動を分析し地下水位の異常低下の時期と濁水発生の時期が合致することを指摘している（柳井ら、2017）。さらに、筆者らは扇状地の水田減水深調査、河川伏流量調査を行い、濁水発生後に水田および河川からの浸透量が、36～61%減少したことを明らかにした（田中ら、2018）。水田と河川からの浸透量は、手取川扇状地における地下水涵養量の70%以上を占めていることから、土砂を含む濁水が異常な地下水位低下を引き起こしたと考えられる。しかし、水田および河川からの浸透量の減少状態が何年間続くのか、地下水位の回復はいつどの様に生じるのか、浸透量が回復するとすれば何がトリガーとなって回復するのかなど不明な点が多い。

一方で、全国の海岸で問題となっている砂浜侵食を考えると、斜面崩壊による大量の土

砂は砂浜に良い効果をもたらすかもしれない。砂浜海岸は、津波のエネルギーを弱める減災機能、貴重な動植物の生息場機能などを有しており、土砂を含む濁水が砂浜回復をもたらせば、濁水の発生はポジティブな現象とも言える。しかしながら、海岸工学の分野における研究事例を探しても、土砂を含む濁水とそれにとまなう砂浜回復に関する研究は少ない。もちろん、手取川流域での斜面崩壊と砂浜回復との関係について調べた事例はなく、生産された土砂がどのくらい砂浜にたどり着き、砂浜回復にどのくらい貢献するのかは不明である。

そこで、本研究では、土砂を含む高濃度濁水のネガティブな点（地下水位の低下）だけでなく、ポジティブな面（砂浜の回復）にも着目した総合的な研究を行い、斜面崩壊にとまなう高濃度濁水の功罪を明らかにすることを試みた。

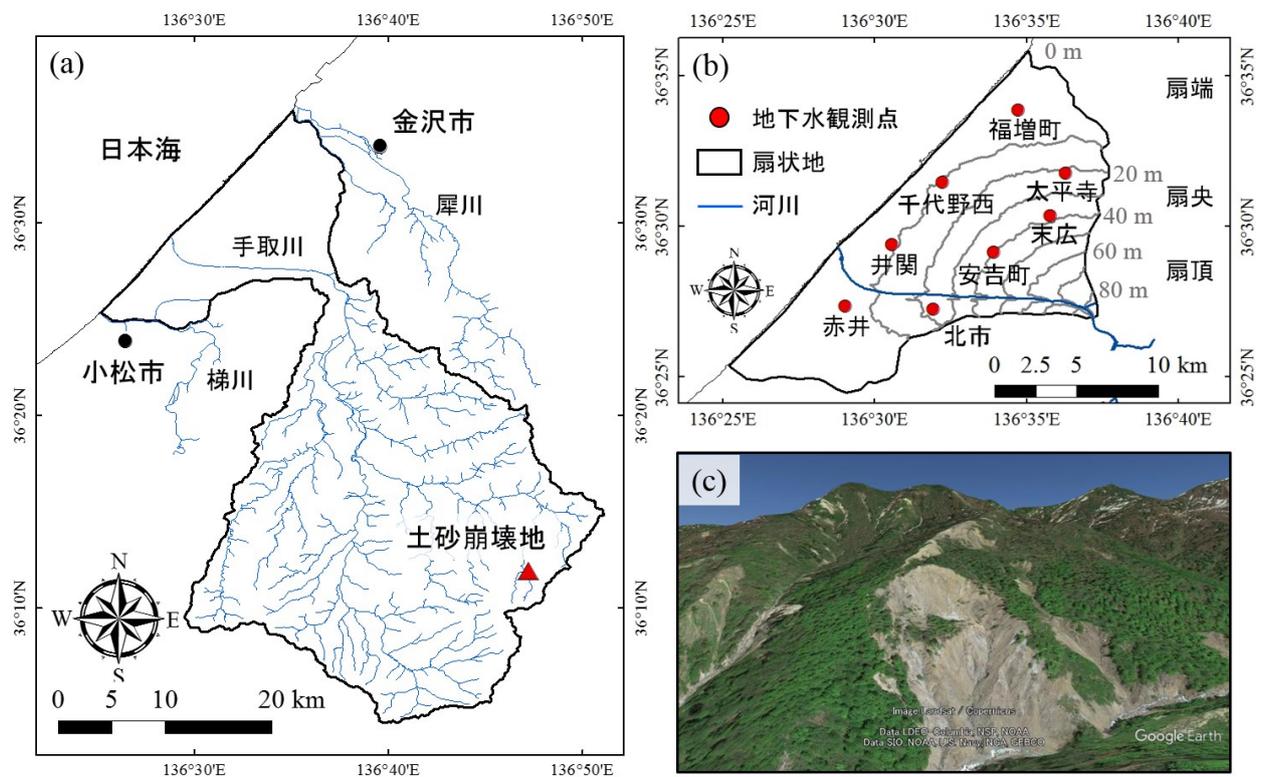


図1 手取川流域、扇状地、斜面崩壊地の衛星画像（グーグルアースより）

2. 研究対象地

本研究の対象地である一級河川・手取川流域は、その源を標高 2,702 m の白山に発し、流域面積 809 km²、流路延長 72 km を有し、平均勾配は 27 分の 1 であり日本有数の急勾配河川である（図 1）。手取川流域の面積の約 9 割を山地が占めるが、下流部には典型的な扇状地が形成されている。手取川地表水は扇頂部の白山頭首工により取水され、七ヶ用水と宮竹用水として約 7,500 ha の水田に灌漑されている。そのため水田からの浸透量は、扇状地の地下水涵養源として重要な役割を担っている。また、扇状地を流れる河川は、砂礫を多く含む透水性の高い河床であり、伏流することから地下水を涵養する役割を担っている。

土砂崩壊は 2014 年 10 月に手取川上流 60 km の石川県白山市尾添大汝国有林の中ノ川右岸で発生し、その後 2015 年 5 月頃の融雪にとまなない規模が拡大した。土砂崩壊規模は滑落

崖の長さ 400 m、幅 300 m、崩壊深さは最大で 45 m であり（図 1）、侵食土砂量は 115.3 万 m³ である（柳井、2017）。手取川本流において高濃度濁水の発生が確認されたのは 2015 年 5 月上旬の融雪期からである。2015 年における濁度の平均値は 219 度、最大値は 4,012 度であり、2016 年における濁度の平均値は 75 度、最大値は 3,363 度である。濁水発生以前の 2014 年における濁度の平均値 18 度、最大値 65 度と比較すると極めて高濃度であることがわかる。また、土砂崩壊以降、2015 年から 2016 年にかけて濁度が低くなる傾向はみられたが、大雨出水時には高濃度の濁水が観測されている。また、濁水は扇頂部で手取川から取水された後、扇状地に網の目状に張り巡らされた用水路を流下し水田に供給されることが確認されている。さらに、用水路内の落差工や取水堰などにより流速が遅くなる箇所では堆砂が生じた。

3. 地下水への影響評価：実測に基づく分析

3. 1 研究方法

3. 1. 1 地下水位の変動

高濃度濁水の発生により急激な地下水位の低下が生じ、石川県立大学が位置している扇中央部においてはポンプによる地下水利用に影響が出た。さらに、河口部における湧水地帯においては湧水の停止といった深刻な問題が生じた。そこで、まず、本研究では手取川扇状地全体の地下水位変化に着目して解析を行うこととした。対象観測井戸は、石川県が水位観測を行っている 7 地点（赤井、井関、北市、太平寺、千代野西、福増、安吉）、および、国土交通省が観測を行っている 3 地点（橘、東任田、寄新保）の計 10 地点とした。

2002 年～2018 年までの各観測井戸の観測データを整理して、日単位の水位データセットを作成した。次に、濁水発生前の 2002 年～2014 年の 1 月 1 日～12 月 31 日までのデータから、各観測井戸の濁水発生前の平年水位を求めた。次に、2015 年～2018 年の年ごとの平均水位を求め、各年毎に平年水位からの差を調べることによって経年変化を調べた。さらに、ArcGIS の Spatial Analyst ツールを利用し、逆距離加重法によって地下水位データの内挿を行って地下水位の空間変動を表現した。

3. 1. 2 河川浸透量調査

手取川扇状地では、水田からの浸透水と河川からの伏流水が地下水涵養源として重要な役割を担っている。そのため、水田浸透量調査と河川伏流量調査の両方を行うのが好ましい。田中ら（2018）が行った濁水発生前の手取川扇状地内における地下水涵養量の計算結果によると、河川浸透を起源とする割合が 41%、水田浸透を起源とする割合が 31%、その他の土地利用からの浸透水が 28%となっており、河川からの涵養割合が最も大きいことが分かっている。河川流量観測は土砂崩壊前の 2009 年に実施された既調査（能登ら、2011）と同様の調査を 2016 年 6 月、2016 年 12 月、2017 年 6 月、2018 年 6 月、2020 年 6 月に実施した。河川流量観測の対象区間は、手取川河口 1.1 km 地点から 16.4 km 地点までの扇状地を流下する区間である。流量観測は、手取川本流の 8 断面、支流・流入口の 16 断面において実施した。なお、本流断面で分水している場合は、近い場所の複数断面において流量観測を実施した。一日ですべての観測を行い、流量観測の水収支誤差をできるだけ少なくしている。本流の観測断面と支流・流入口断面の流量を用いた水収支計算により、本流観測

断面間の区間増減量を求める。区間増減量が正值の場合は扇状地から河川へ流入する湧出区間であり、負値の場合は河川から扇状地へ流出する伏流（浸透）区間となる。

さらに、2006年から2016年において、国土交通省・金沢河川国道事務所が実施した河川流量観測の区間増減量算出結果を発表論文（吉岡ら、2018）から入手した。観測地点などを吟味した結果、県立大学によって行った流量観測とほぼ同様であることが分かったため、金沢河川国道事務所が実施した結果と県立大の調査結果から算出した区間増減量をマージして、濁水発生前後の伏流量の推移を明らかにすることを試みることにした。

3. 1. 3 水田浸透量調査

水田減水深調査は、土砂崩壊前後の2014年と2016年に実施された既調査と同様の調査を2020年に実施した。その結果を比較することによって、高濃度濁水が水田浸透量の与える影響について明らかにすることを試みる。

水田減水深調査の対象水田は、右岸の30地区、左岸の15地区、計45地区を選定し、手取川扇状地内の水田できる限り均等にカバーするようにした。また各地区において面積と形状が同等の3筆を選定し、計135筆において水田減水深調査を実施した。調査時期は中干し前の5月下旬、中干し後の8月上旬の連続無降雨期間とした。2020年の調査では、既調査の結果から中干し後において濁水による影響は小さいと判断し、中干し前のみ観測を実施した。調査対象水田には、水尻に一筆排水柵が設置され、 $i-1$ 日における基準高からの湛水面までの高さ h_{i-1} を計測し、24時間後に再び i 日における湛水面までの高さ h_i を計測し、その差を計算することで水田減水深（mm/d）を求めた。そして、減水深からペンマン式（Penman、1948）により求めた蒸発量を差し引くことで水田浸透量を求めた。調査期間において給水・排水が行われていた水田、蒸発散量以下の水田は無効筆として解析から除外した。また、休耕田や転作されていた場合についても無効筆とした。3年分の調査で比較することができる有効筆は、中干し前は32地区54筆、中干し後は23地区32筆であった。なお、中干し後の有効筆が少ないのは、個々の水田で栽培スケジュールが異なっていたためである。

3. 2 結果

3. 2. 1 地下水位の変動分析の結果

手取川扇状地の地下水位の経年変動を調べた結果を図2に示す。これら一連の図において、暖色系統は地下水位が平年水位に比べて低下したことを表しており、赤色に近づくほど水位が大きく低下していることを表現している。また、黄緑色に近づくほど平年水位と近いことを表しており、寒色に近づくほど平年水位に比べて上昇したことを意味している。この結果を見ると、高濃度濁水発生前である2012年から2014年は、扇状地全体は黄緑色であり地下水位は安定して推移していたことが分かる。一方、濁水発生後の2015年になると北市、寄新保、安吉を中心にして暖色となっており、地下水位が急激に低下していることがよく分かる。濁水発生後1年後である2016年もほぼ同様の傾向であり、暖色の地域が増え地下水位が低下した状態が継続していることが分かる。濁水発生2年後である2017年には赤色、濃い橙色はほとんど見られなくなり、地下水位は回復傾向に向かったことを示している。そして、2018年にはほとんどの地域で黄緑色に戻り、濁水発生前の水位まで扇状地の地下水が回復したことが確認できた。

なお、具体的な水位で比較したところ、2016年の寄新保では、 -4.03 m と扇状地全体で最も水位が低下していたが、2018年7月には 0.93 m まで回復していた。すなわち、この地点においては、年平均水位で約 5 m もの水位低下となっていたことになる。

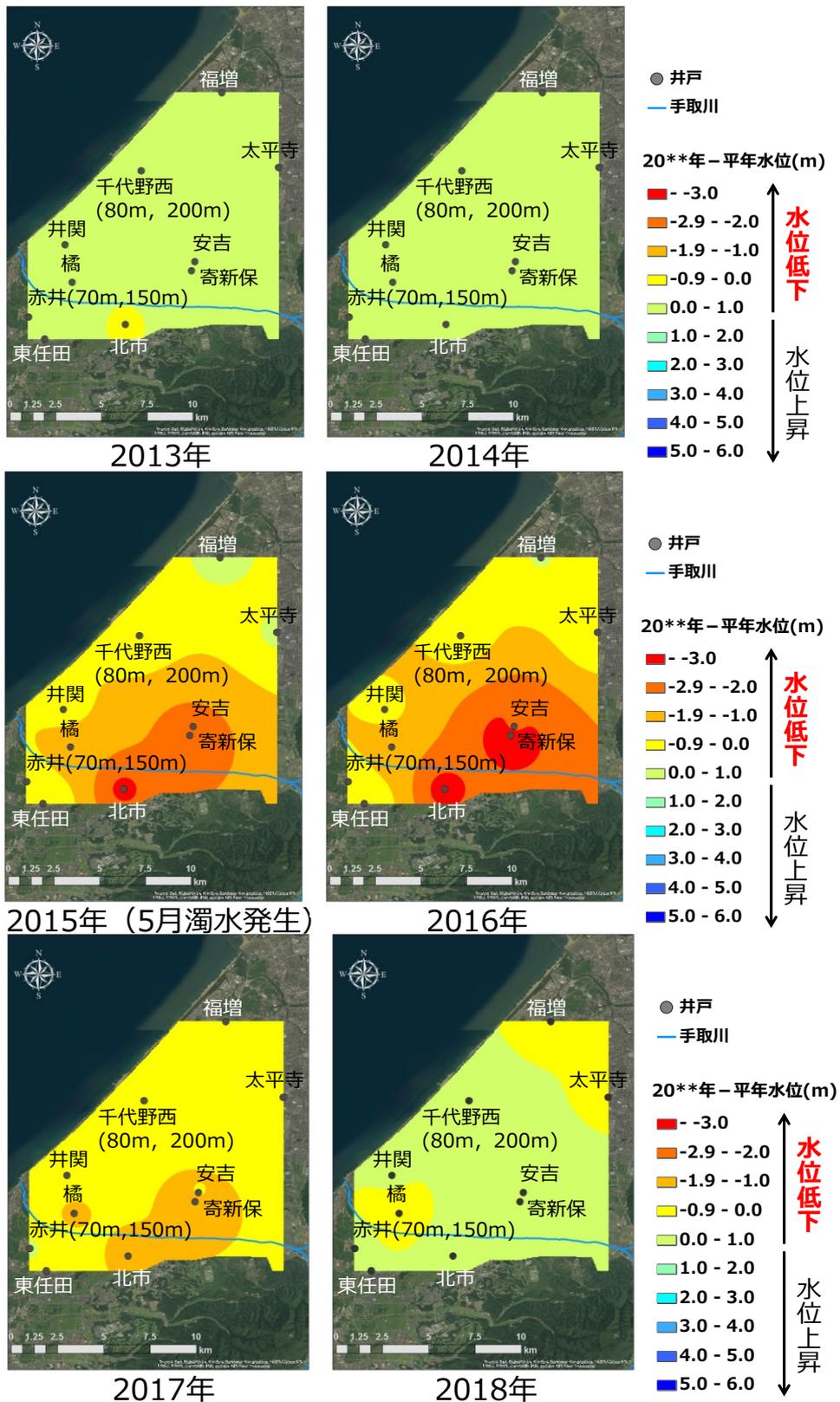


図2 扇状地内の地下水位の経年変化。年平均水位からの偏差で表している

3. 2. 2 河川浸透量調査の結果

濁水発生前後に金沢河川国道事務所によって行われた河川流量観測結果と石川県立大学で行われた河川流量観測結果を図3に示す。この図において、正值は扇状地から河川への湧出量、負値は河川から扇状地への伏流量（浸透量）を表している。また、河川1 kmあたりの区間増減量としている。さらに、上段には、手取川から最も近い北市にある観測井戸の地下水位を載せている。これを見ると濁水発生前は $-0.8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$ （1 kmあたり $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ の浸透）前後であったが、濁水発生後は $0 \sim -0.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$ （1 kmあたり $0 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ の浸透）になっていることが分かる。2016年12月の観測では、 $-0.086 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$ （2016年12月）まで減少していた。その後、徐々に回復し始め、 $-0.773 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$ （2018年6月）まで回復していることも分かる。また、手取川から最も近い北市にある観測井戸の月ごとの地下水位も、濁水の発生により20.57 m（2014年4月）から13.12 m（2015年11月）まで低下したが、20.39 m（2018年2月）と濁水発生前の地下水位まで回復していることが認められた。

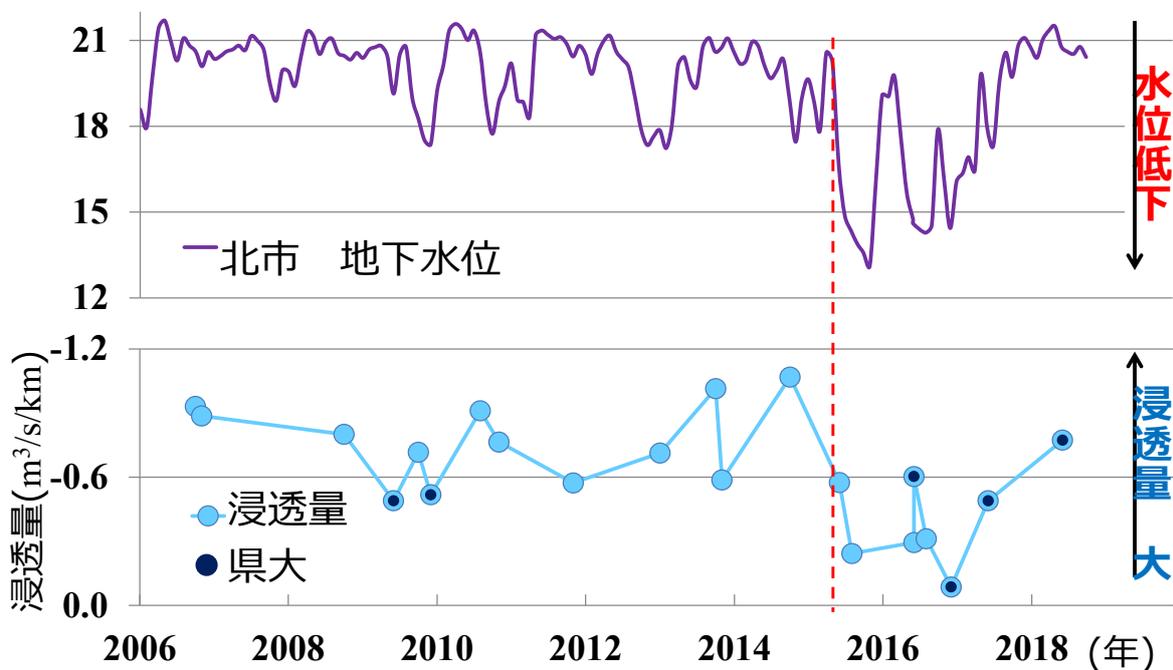


図3 地下水位と河川浸透量の観測結果

さらに、手取川河口から白山合口堰堤までを7つの区間に分け、伏流・湧出区間を調べた。濁水発生後、伏流・湧出区間が逆転する変化がある区間があった。しかし、濁水発生前後各5回分の総伏流区間の平均値は、8.72 km、9.02 kmと大きな変化は見られなかった。観測時における手取川流量の差異を考慮するため、川北大橋上流地点の河川流量に対する総伏流量の割合を算出した（図4）。川北大橋上流部の観測地点は、河口から10.2 km上流に位置し、白山合口堰堤で農業・発電用に取水した用水の一部が再び手取川に流入している。金沢河川国道事務所及び発表論文の観測結果では、各地点の流量は記載されていないため、河川流量を把握できる県立大学の観測結果のみを用いた。点線左側が濁水前、点線右側が濁水後の結果を表している。濁水前においては、手取側流量に対する総伏流量の割合は65%以上という結果になり、手取川流量が多いほど総伏流量も多いことが分かった。

濁水発生から1年後の2016年では、総伏流量の割合が低下傾向になり、12月には6.9%まで低下した。その後、2017年からは回復傾向にあり、総伏流量の割合は2017年6月が46.2%、2018年6月が55.8%と推移し、2020年6月には92.6%まで増加した。

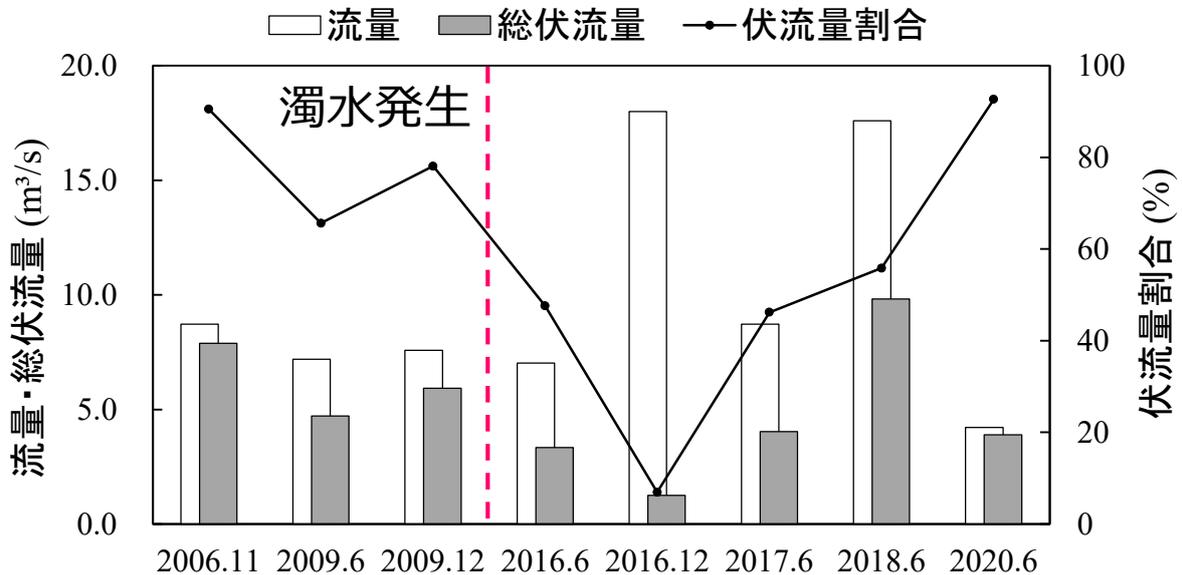


図4 川北大橋上流の流量に対する総伏流量の割合

3. 2. 3 水田浸透量調査の結果

2014年と2016年、2020年の3年間で有効筆となり比較可能な水田は、中干し前は54筆、中干し後は32筆であった。手取川扇状地を左岸、右岸、扇頂、扇央、扇端、全体の範囲に区分し、水田浸透量の変化を中干し前と中干し後でまとめた(表1、表2)。範囲区分全体における浸透量の値は、筆数で重み付き平均した値である。中干し前は左岸全体において7.3 mmから6.4 mm、3.9 mmに変化し、徐々に減少していることがわかる。中干し前において、濁水発生前後で浸透量に有意な差があるかを確認するために、Steel法を用いて多重比較検定を行った。濁水前の2014年を対象群、濁水後の2016年と2020年を比較群とした。Steelの多重比較法を用いて解析したところ、2014年と2016年の浸透量には有意差が見いだされなかった。2014年と2020年の間には、左岸全体、両岸扇端、両岸全体で危険率5%、5%、1%で有意差が見いだされた。中干し後において、2014年と2016年の浸透量は左岸全体で12.3 mmから10.4 mm、右岸全体で13.9 mmから16.1 mm、両岸全体で13.5 mmから14.9 mmと大きな変化は見られなかった。中干し後において、濁水発生前後の浸透量に有意な差があるかを確認するために、関連のある2群の差を検定するWilcoxonの符号順位和検定を行った。なお、有効筆数が6筆以下であった範囲区分においては、Wilcoxonの符号順位和検定に必要な標本数が確保できなかったため有意差検定は行っていない。Wilcoxonの符号順位和検定を行ったところ、中干し後において濁水前の2014年と濁水後の2016年の浸透量には有意差が見いだされなかった。以上のことから、中干し前において濁水の影響により浸透量が有意に減少していることが明らかになった。

表 1 中干し前の水田浸透量の有意差検定の結果

範囲区分	左岸 浸透量 (mm/d)			右岸 浸透量 (mm/d)			両岸 浸透量 (mm/d)		
	2014	2016	2020	2014	2016	2020	2014	2016	2020
扇頂	6.4	8.8	4.0	7.9	7.0	6.5	7.3	7.6	5.5
扇中央	8.6	6.1	5.5	6.8	7.4	4.8	7.3	7.1	5.0
扇端	6.9	5.3	2.8	6.0	4.4	4.3	6.5	7.9	3.5*
全体	7.3	6.4	3.9*	6.8	6.5	5.0	7.0	6.4	4.6**

*:危険率5%, **:危険率1%

表 2 中干し後の水田浸透量の有意差検定の結果

範囲区分	左岸 浸透量 (mm/d)			右岸 浸透量 (mm/d)			両岸 浸透量 (mm/d)		
	2014	2016	<i>p</i> 値	2014	2016	<i>p</i> 値	2014	2016	<i>p</i> 値
扇頂	9.8	10.5	-	10.6	11.1	-	10.4	11.0	-
扇中央	15.2	13.2	-	16.4	17.6	0.58	16.2	17.0	0.64
扇端	11.3	8.4	-	10.9	15.6	0.18	11.0	13.5	0.41
全体	12.3	10.4	0.60	13.9	16.1	0.30	13.5	14.9	0.46

3.2.4 高濃度濁水が地下水涵養量に与える影響

土砂崩壊に伴う高濃度濁水の発生により、水田浸透量および河川伏流量が減少した。そこで、扇状地全体の地下水涵養量に換算し、涵養量減少分から地下水位低下量を求めた。扇状地の主要の地下水涵養源は水田、河川、その他（宅地、畑地など）であり、灌漑期間 151 日、非灌漑期間 214 日として年間地下水涵養量を計算した。水田からの地下水涵養量は、中干し前期間を 61 日、中干し後期間を 90 日とした。河川からの地下水涵養量は灌漑期、非灌漑期ごとに計算した。また、その他（宅地、畑地など）からの地下水涵養量については、文献値（丸山ら、2012）である灌漑期 0.3 mm/d、非灌漑期 2.9 mm/d を用い、濁水発生前後で変化しないものとした。2020 年の水田浸透量に関して、中干し後に計測を行っていないが、中干し後は濁水の影響を受けていないと判断し、2014 年の中干し後の浸透量の値を用いた。また、河川浸透量に関しては、非灌漑期の観測はまだ実施していない。そこで、河川浸透量調査の結果から濁水前の水準まで回復していると判断して、濁水前の 2014 年の値を用いて計算した。

各水収支成分の年間における地下水涵養量を概算した結果を図 5 に示す。地下水涵養量は手取川扇状地全体（17,682 ha）に対する量であり、単位は mm/y へ換算している。水田からの涵養量は 700 mm/y、738 mm/y、638 mm/y、河川からの涵養量は 967 mm/y、376 mm/y、907 mm/y へと変化した。結果として、扇状地全体の地下水涵養量は 2,335 mm/y から 1,783 mm/y、2,213 mm/y となり、濁水発生後に地下水涵養量は減少し、その後濁水前の状態まで回復したことが分かった。この結果から、高濃度濁水が地下水涵養機能に大きな影響を及ぼす可能性があることが分かり、定量的に影響を示すことができたといえる。

濁水発生前後の 2014 年と 2016 年で減少した地下水涵養量は 552 mm/y であり、扇状地

における有効間隙率を 50% (西山ら、1999 ; 青山、2012) とすると、地下水位は 1.11 m 低下したことになる。手取川扇状地における平均地下水位は濁水発生前後で 1.52 m 低下したため、実際の地下水位低下量とおおよそ整合しているといえる。

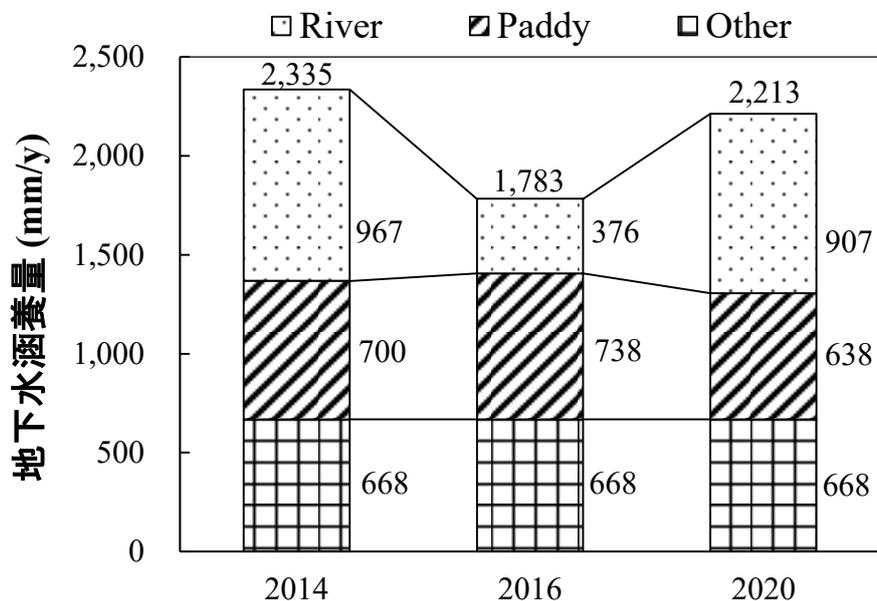


図 5 手取川扇状地の年間地下涵養量

4. 地下水への影響評価：数値解析に基づく分析

4. 1 研究方法

4. 1. 1 地下水モデル

手取川扇状地を対象として、地表帯領域・中間帯領域・地下水帯領域の 3 領域で構成される集中定数型・三段タンク水収支モデルを構築した。解析においては、中島地点での手取川上流域からの流量、およびその他の背後地流量と平野部での降雨などの入力要素をはじめ、手取川やその他河川からの農業用水取水、地下水からの各種用水取水(ポンプ揚水)、降雨等の流出、蒸発散など平野内での様々な水循環過程を考慮して水収支モデルを構築した。水収支モデル (図 6) では、雨雪判別式から降雪と判断された際には、融雪目的の揚水が生じるように計算しており、扇状地内の人為的な水利用 (農業用水の取水など) も考慮されている。そして、第 3 段目のタンク貯留深の変動が扇状地内地下水位の平均的な変動を表現するとした。本モデルには、各領域タンクからの流出や浸透に関わるパラメータ、河川からの伏流に関わるパラメータなどがあり、物理的に決定できない 23 個のパラメータについては、大域的探索法の一つである進化戦略 (ES) によって同定した。そして、濁水発生前の 2013~2014 年における地下水位の再現性を確認したところ、相対誤差で約 5% となっており、本モデルで扇状地の地下水位を計算できることが示された (図 6)。しかしながら、濁水発生後の 2015 年以降については、計算値が過大推定となっており (図 7)、この過大推定の要因は水田からの浸透量と河川伏流量が減少したことによると考えられた。

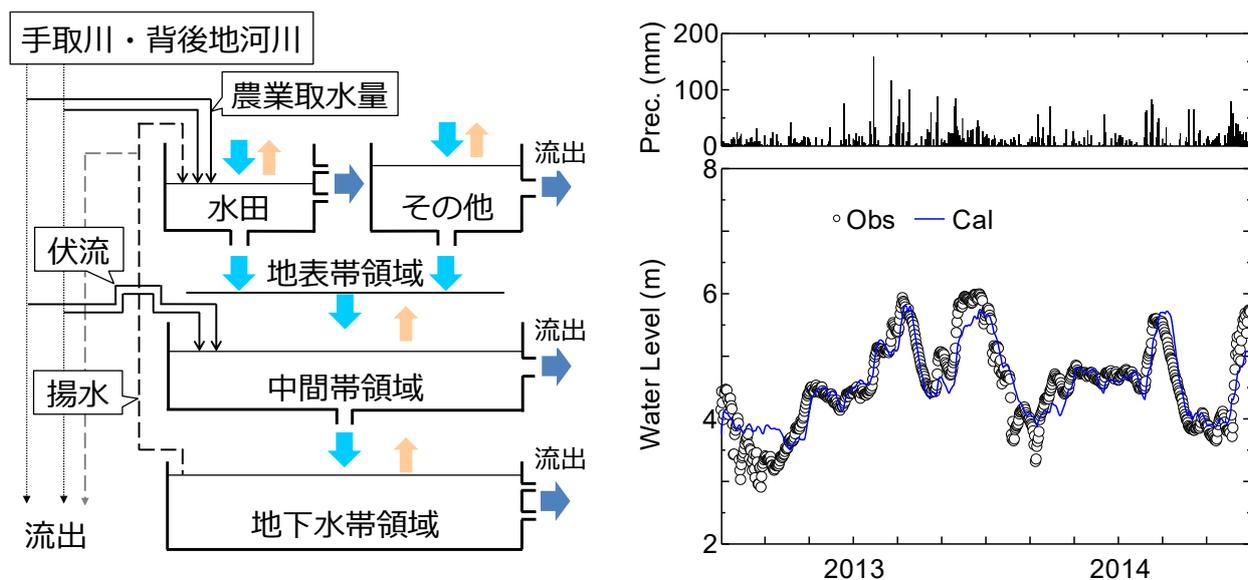


図6 地下水モデルの概念図、地下水位の再現結果

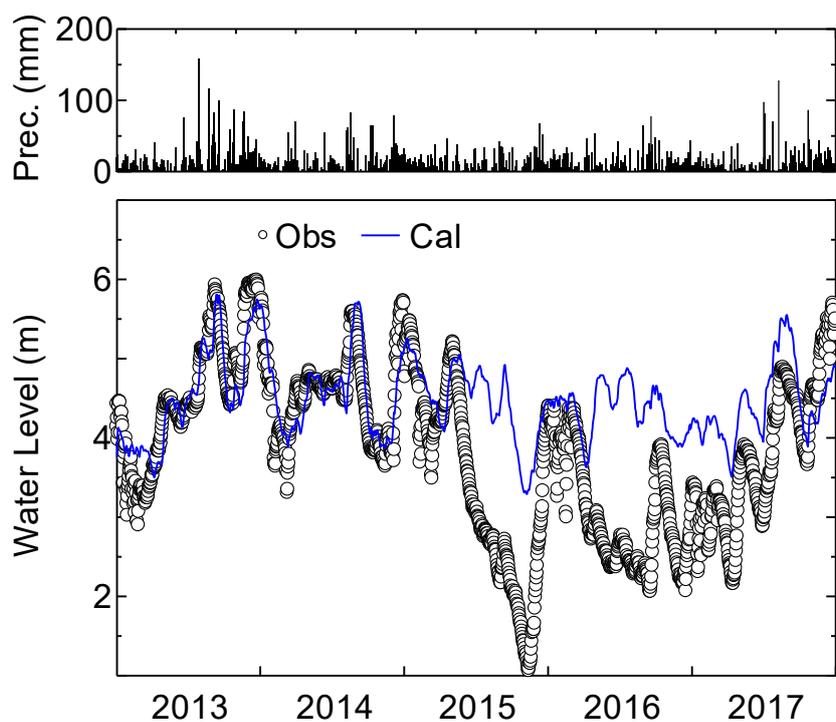


図7 地下水位の再現結果。濁水発生後に過大推定となっている

4. 1. 2 粒子フィルタ

水循環モデルの浸透量と伏流量のパラメータの変化を逐次推定できれば、浸透量の時系列変化を把握できる。ここで、このパラメータ（状態）の推定に粒子フィルタを適用する。粒子フィルタはベイズ理論を応用したモンテカルロ法的状態修正法であり、観測値 y_t が得られた後の状態量 x_t の事後分布 $p(x_t|y_t)$ を多数のサンプル（粒子）で近似し状態修正を行う。粒子フィルタは、非線形モデルにも直接適用できることから、実時間洪水予測（工藤ら、2009）などに数多く適用されている。本研究では以下の手順によって適用した。

- ① 水田浸透量と河川伏流量の 2 個のパラメータを逐次推定の対象とする。これに、4 個の貯留高（水田、その他、中間帯、地下水帯）を加えたものを一つの粒子とする。さらに、各パラメータの値に正規乱数を加えて、1,000 個の初期粒子を生成する。
- ② 各粒子で地下水位を計算（予測）する。また、各粒子には正規乱数でシステム誤差（各パラメータの探索範囲の 4%）を加える。
- ③ 観測地下水位（日単位）を用いて各粒子の尤度を計算する。観測誤差は観測地下水位の 15%とした。さらに、各粒子の尤度を正規化して、各粒子の重みを求める。
- ④ 重みに比例する割合で、1000 個の粒子のリサンプリングを行う。t=t+1 とし、②に戻る。

4. 2 結果

粒子フィルタを適用した結果を図 8 に示す。まず、過大推定が見られた 2015 年以降についても、観測値地下水位と計算地下水位はほぼ合致しており、粒子フィルタによって状態（パラメータ）の修正がうまく行われていることが分かる。さらに、水田浸透量と河川伏流量の 2 個のパラメータの時系列変化を見ると、濁水が発生した 2015 年 5 月以降に急激にパラメータの値が小さくなっていることが分かる。2016 年は一時的にパラメータの値が大きくなる時期も見られるが、値が小さい状態が続いている。2017 年になると 5 月あたりからパラメータの値が大きくなり始め、12 月にはほぼ濁水前の大きさに戻っていることが分かる。なお、2015～2016 年では浸透量が 26～54%に減少、2017 年では浸透量が 52～54%に減少となっていた。

実測浸透量との整合性、水田浸透量と河川伏流量の切り分けの妥当性、粒子フィルタの超パラメータの設定方法、など検討すべき課題は多いが、粒子フィルタを用いることによって濁水が地下水位に及ぼした影響を定量的に評価できると考えられた。

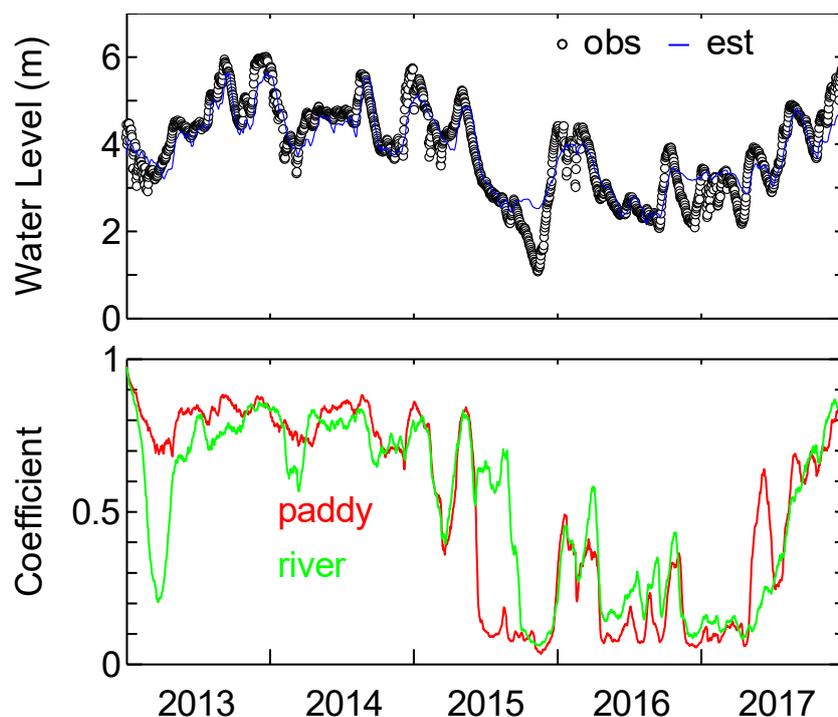


図 8 粒子フィルタの適用結果

5. 砂浜への影響評価

5. 1 研究方法

5. 1. 1 汀線変動の解析

手取川河口から北東方向には、石川海岸と呼ばれる砂浜海岸が続いており、日本で唯一自動車が行ける千里浜なぎさドライブウェイも手取川起源の土砂によって形成されたと考えられている（由比、2013）。高濃度の濁水は河口まで達し、日本海まで排出されたことが確認されている。本研究では、Google Earth の画像を使用して 2014 年（濁水発生前）～2017 年（濁水発生後）の汀線変動を調べ、汀線変化量を算出することとした。画像として利用できたシーンは、2014 年 4 月 23 日、2015 年 4 月 12 日（濁水発生前）、2016 年 5 月 13 日（濁水発生後）、2017 年 5 月 23 日である。また、対象範囲は手取川河口から健民海浜公園（河口から 15 km 離れた地点）までとした。

まず、各年の汀線位置を Google Earth 画像から目視で読み取り、ポリラインとして保存した。その際、汀線位置として基本的には水際線を読み取ったが、航空写真における砂浜の色合いから波の遡上による湿潤範囲が広いと認められる場合には、波の遡上限界と引き波による水際線の間を読み取った。また、汀線変化量を求めるために、ベースとなる基準線もポリラインで作成した。基準線は内陸の砂帯と歩道の境界部分を直線で、手取川河口から作成した。そして、基準線を一定間隔に分け、そこから鉛直方向に線を延ばして汀線ポリラインとの交点を求めた。さらに、各年の汀線位置から基準線までの距離を計算し砂浜回復量を計算した。

5. 1. 2 濁水の到達場所の推定

河口まで達した土砂が沿岸海域のどこに堆積するのかを推定するために、発信器付きの GPS を利用して河口からの海流をトレースすることにした。本研究では、Ping という小型 GPS を利用することとした。これはアメリカの Ping 社が開発した約 4 cm 四方、薄さ約 1.2 cm の小型 GPS であり、専用アプリをダウンロードすると携帯電話ネットワークに接続して、世界中のどこにいてもスマートフォンのマップで Ping の位置を把握することができる。Ping は、子どもや高齢者、ペット、鍵、自転車、スーツケースやバッグ等に付けておけば、いつでもスマートフォンからそれらの現在地が地図上で表示できるデバイスとなっているのが特徴である。

本研究では、この Ping を使用しておもりとともに採水ボトルに入れて手取川に放流し、どこの海岸線に漂着するのかを調べることにした。採水ボトルには約 220 g のおもり 4 つ、ソフト緩衝材、さらに、Ping を入れた。採水ボトルに Ping を入れる際、風の影響を受けずに川の流れや海流だけで流れるように、ボトルができるだけ水中に浸かるようにおもりの数を調整することと、GPS を受信できるよう Ping が入っている部分は水面から出ていることの 2 点に考慮した。また、土砂の大半は洪水時に運ばれると考えられることから、実験には、降雨が続いて流量の増加している出水日（9 月 29 日：37mm、9 月 30 日：14mm、10 月 1 日：24.5mm）を選定した。放流後は約 30 分おきに Google Map 上で Ping の現在地を追跡し、得られた GPS ポイントの緯度経度座標を記録した。さらに、記録した緯度経度座標を GIS 上にプロットし、Ping の流れた経路を追跡した。さらに、漂着した時点で Ping を回収して実験を終了することにした。

5. 2 結果

Google earth 画像から作成した 2015 年～2017 年までの汀線変化量を示す (図 9)。2014 年をベースラインとして表しており、赤色が汀線位置の前進 (砂浜の回復)、青色が汀線位置の後退 (砂浜の侵食) を示している。まず、濁水発生前の 2015 年を見ると、前進 (赤色) と後退 (青色) は同程度でありとくに目立った特徴はない。濁水発生直後の 2016 年を見ると、土砂が海域まで達して砂浜の前進が期待されたが、むしろ後退 (青色) の割合の方が多い。濁水発生の 2 年後である 2017 年を見ると、前進 (赤色) の割合の方が後退よりも多いことが分かる。この結果、2016 年は砂浜侵食の割合が多いが、2017 年は砂浜が回復している割合が多いということが判明した。また、2017 年では特に、河口から 10km～15km 地点において汀線位置の前進が顕著であった。

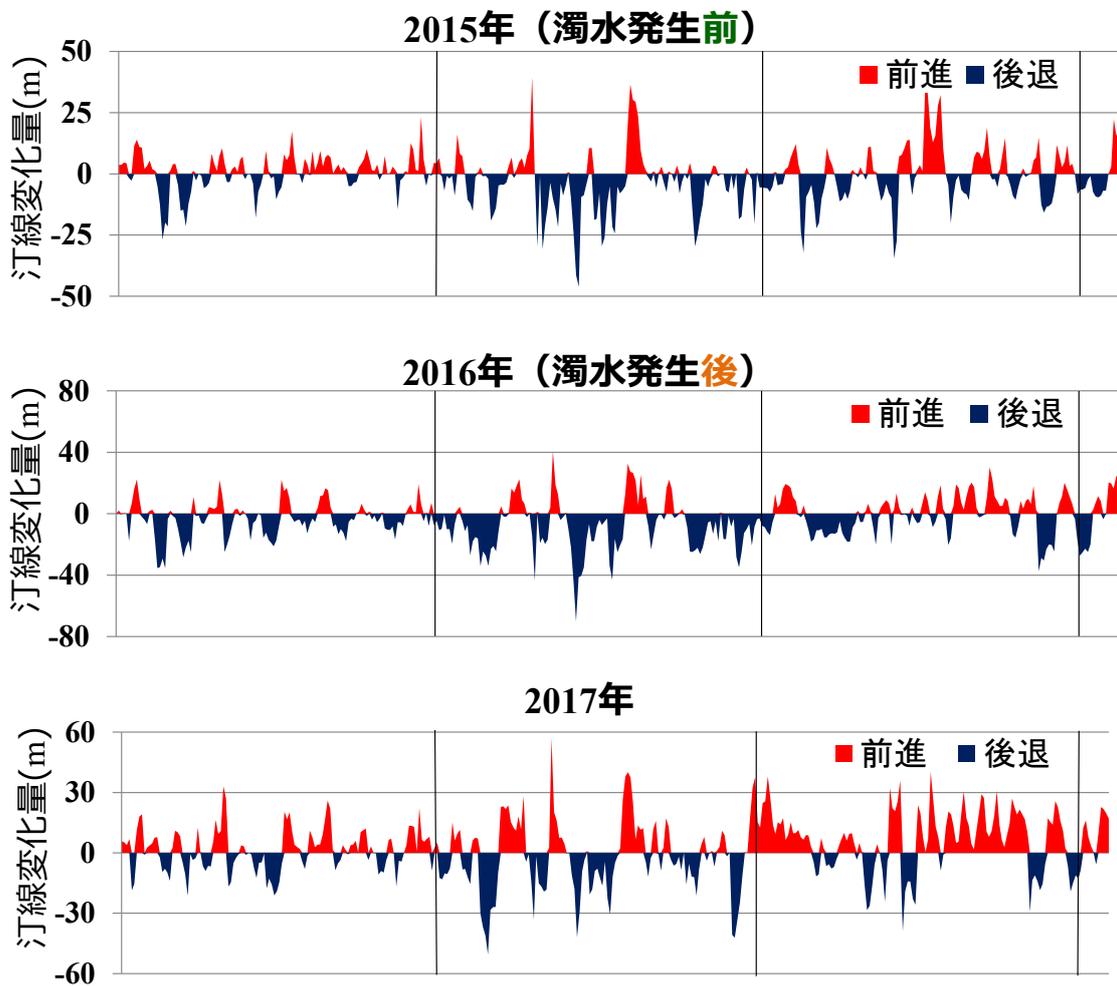


図 9 汀線位置の変化。赤：前進、青：後退

Ping から受信した GPS ポイントを GIS 上に取り込んだ結果を図 10 に示す。黄色い丸印が Ping からの位置情報が受信できた場所を示している。GIS を用いて緯度経度を調べた結果、Ping をセッティングした石川県立大地点、Ping を放流した 11:10 の地点、Ping が漂着したポイント、といった一定時間動かずに止まっている時は地図上の緯度経度とおおよそ

一致していた。一方、それ以外の流されているときのポイントは、地図上の位置とのズレが大きく、明らかに誤った地点を示していることが分かった。このことから、Ping を使って川を流れている間や海域を漂流している時の GPS 取得は難しそうであるが、Ping を使って漂着する場所を見つけ出すことが可能であることが分かった。また、漂着したポイントは、河口から約 1km 離れた地点であった。これは、他の研究結果（石田、1984）で得られた漂着ポイントとおおよそ一致しており、出水時であっても遠くまで運ばれるわけではないことが分かる。



図 10 Ping の位置情報

6. まとめ

本研究では、大規模な土砂崩壊にともなって発生した高濃度濁水が、地下水循環と砂浜海岸に及ぼした影響について明らかにすることを試みた。

- 1) 濁水発生前後の扇状地内の地下水位変動を調べた。扇央や手取川の右岸側にある観測井戸では地下水位の急激な低下が見られた。一方、手取川の左岸側や扇端、手取川から離れた地点にある観測井戸では水位の低下はほとんど見られなかった。また、濁水発生から 3 年後の 2018 年には、地下水位は回復していた。
- 2) 河川流量観測結果から区間増減量を算出した結果、2016 年 12 月から伏流量は回復に

向かっており、濁水発生から3年後の2018年は濁水発生前の伏流量まで回復していることが明らかとなった。高濃度濁水の発生によって地下水涵養量が減少する状態は3年～4年で解消された。

- 3) 2014年（濁水発生前）と2016年、2020年（濁水発生後）の水田浸透量の変動を調べた。中干し前において、両岸全体で水田浸透量は7.0 mm/d、6.4 mm/d、4.6 mm/dに変化し、徐々に減少していることがわかった。2014年と2020年の間には、危険率1%で有意差が見いだされた。中干し後においては、濁水発生前後で浸透量の変化は見られなかった。
- 4) 地下水位をシミュレーションできる集中型水循環モデルを構築し、データ同化手法の一つである粒子フィルタを適用することによって、時々刻々変化する浸透量の逐次推定を試みた。その結果、濁水発生後、パラメータの値が急激に小さくなり、濁水発生2年目からパラメータの値が徐々に大きくなり地下水涵養量が回復したことが推定された。
- 5) 濁水発生前後に撮影された航空写真を利用して、2014年の汀線を基準に汀線変化量を求めた。濁水発生後の2016年は砂浜侵食の割合が多く、2017年は砂浜回復の傾向が見られた。しかし、これらの結果だけでは、濁水によって生じた細粒土砂が砂浜の回復に寄与しているか結論付けることはできなかった。
- 6) 小型GPSのPingを手取川に流し、河川から出水が到達するポイントを探したところ、河口から1 km離れた地点であった。これは、他の研究結果で得られた漂着ポイントとおおよそ一致しており、出水時であっても遠くまで運ばれるわけではないことが分かった。

なお、水田からの浸透量の減少状態が何年続いているのか、浸透量は何がトリガーとなって回復し始めたのかなど未だ不明な点も多い。また、砂浜の回復については明確な回答を得られなかった。海域における深浅測量のデータを用いることで、海中の砂の堆積状況がわかり濁水によって生じた砂の行方がより正確に判明すると思われる。さらに、土砂を含む濁水の流域水循環への影響を最小化し、砂浜の回復を最大化するといった新たな水資源管理、土砂管理方法はあるのかなど、今後も継続して研究を続ける予定にしている。

謝辞：本研究は、公益財団法人・国土地理協会の支援を受けた。また、寒地土木研究所の田中健二さんからは、河川浸透量の調査方法について詳しく教えていただいた。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 足立一日出 (1988) : 代かきによる浸透抑制効果の実験的考察、農業土木学会論文集、135、1-8
- 青山咸康 (2012) : 金沢平野の地下水汲水と地盤沈下、“丸山利輔、早瀬吉雄編、農業用水を核とした健全な水循環－地球温暖化を前提とした手取川流域の事例－”、石川県立大学出版会、181-190
- 藤原公一 (1997) : 濁水が琵琶湖やその周辺河川に生息する魚類へおよぼす影響、滋賀県水産試験場研究報告、46、9-37

- 二俣 秀、高橋 至、井上美嶺 (2005) : 手取川扇状地における地下水・伏流水に与える河道の影響について、北陸地方整備局管内技術研究会論文集、2005年度、209-212
- 広瀬慎一 (2014) : 流水客土の歴史と事業の実績、農業農村工学会誌、82(8)、23-26
- 石田啓・高瀬信忠・長原久克・浦良一 (1984) : 渚ドライブウェイを有する千里浜海岸の現況と侵食対策、海岸工学講演会論文集、31、355-359
- 岩崎有美、尾崎正志、中村公人、堀野治彦、川島茂人 (2013) : 定常地下水流動解析に基づく手取川扇状地における灌漑期の地下水位に影響を与える要因の評価、水文・水資源学会誌、26(2)、99-113
- 和 吾郎、藤田真二、東 健作、平賀洋之 (2014) : 高知県物部川の大規模山腹崩壊に伴う濁質の流出特性の変化、陸水学雑誌 75 (1)、13-26
- 片貝武史、荻田章仁、鷲見哲也、辻本哲郎 (2006) : 水際河床間隙の目詰まりに関する実験的研究、水工学論文集、50、241-246
- 国土交通省 (2006) : 日本の水資源 第3章 水資源開発と水供給の現状、41-81
- 工藤亮治、近森秀高、永井明博 (2009) : 粒子フィルタを用いた河川流域における実時間洪水予測、農業農村工学会論文集、259、17-25
- 丸山利輔、能登史和、吉田 匡、中村公人、堀野治彦、村島和男、瀧本裕士 (2012) : 手取川扇状地における水収支の分析、水文・水資源学会誌、25(1)、20-29
- 森田賢治、本田敏也、西村友之 (2008) : 手取川の正常流量設定に向けてー白山と手取川の恵みを伝えるふるさとづくりー、北陸地方整備局管内技術研究会論文集、入手先<http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h20/pdf/c/cj_15kanazawa.pdf>
- 村上まり恵、山田浩之、中村太士 (2001) : 北海道南部の山地小河川における細粒土砂の堆積と浮き石および河床内の透水性に関する研究、応用生態工学 4(2)、109-120
- 村島和男、丸山利輔、吉田 匡 (2012) : 農業用水利用実態と変化予測、“丸山利輔、早瀬吉雄編、農業用水を核とした健全な水循環ー地球温暖化を前提とした手取川流域の事例ー”、石川県立大学出版会、87-91
- 西川 一 (1988) : 別当谷の大崩壊、砂防学会誌、40(6)、33-35
- 西山賢一、横田修一郎、岩松暉 (1999) : 扇状地堆積物における赤色化礫の分布と性状、応用地質、40(1)、2-13
- 能登史和、丸山利輔、早瀬吉雄、瀧本裕士、中村公人 (2011) : 手取川流域における積雪水資源量の長期間分析と地球温暖化による影響予測、農業農村工学会論文集 79(4)、249-255
- Penman, H.L. (1948) : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 193, 120- 145.
- 林野庁 (2016) : 手取川上流大汝国有林における崩壊地対策の実施状況について (オンライン)、入手先<http://www.rinya.maff.go.jp/kinki/kikaku/pdf/20160823_tetorigawa-kanryou.pdf>
- 瀬川 学、丸山利輔、高瀬恵次 (2016) : 手取川扇状地における水田、畑地、宅地からの大雨時における単位流出量の推定、農業農村工学会論文集、84(2)、103-112
- 高村幸治 (2016) : 手取川濁水に関する対応について、JAGREE、91、9
- 田中健二、瀬川 学、藤原洋一、高瀬恵次、丸山利輔、長野峻介 (2017) : 土砂崩壊に伴う高濃度濁水が手取川扇状地水田の地下水涵養機能に与える影響、水文・水資源学会誌、

30(3)、173-180

田中健二・瀬川学・藤原洋一・高瀬恵次・丸山利輔・長野俊介（2018）：高濃度濁水が扇状地の水田浸透量・河川伏流量に及ぼす影響―手取川流域の大規模土砂崩壊を事例として―、農業農村工学会論文集、86（1）、I_47-I_54

Waters T.F. (1995): Sediment In Streams、American Fisheries Society、572

柳井清治、岡崎正規、瀧本裕士、一恩英二、高瀬恵次（2016）：白山源流で発生した地すべりによる濁水が手取川の流域環境に及ぼす影響とその対策、平成 27 年度石川県立大学年報、8-27

柳井清治（2017）：近年の土砂災害シリーズ 2015 年 5 月に白山源流で発生した地すべりと濁水の発生、水利科学、61（2）、74-91

柳井清治・岡崎正規・高瀬恵次・瀧本裕士・一恩英二・百瀬年彦・藤原洋一・北村俊平・長野峻介・本多裕司（2017）：白山源流で発生した地すべりによる濁水が手取川の流域環境に及ぼす影響とその対策（2）、平成 28 年度石川県立大学年報、9-34

吉岡有美・伊藤真帆・中村公人・瀧本裕士・土原健雄（2018）：酸素・水素安定同位体比からみた手取川扇状地の河川水―地下水の交流現象と地下水涵養源、地下水学会誌、60(2)、205-221

由比政年（2013）：石川海岸における沿岸砂州の形成・移動・消失に関する長期変動解析、土木学会論文集 B2（海岸工学）、69（2）、I_641-I_645