

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）

Influence of high turbid water generated from a huge landslide occurred in the headwater area of Mt. Hakusan on the Tedoru River Basin environment: Part2

石川県立大学生物資源環境学部 環境科学科 柳井 清治
環境科学科 岡崎 正規
環境科学科 高瀬 恵次
環境科学科 瀧本 裕士
環境科学科 一恩 英二
環境科学科 百瀬 年彦
環境科学科 藤原 洋一
環境科学科 北村 俊平
環境科学科 長野 峻介
食品科学科 本多 裕司

Abstract

The comprehensive study on the landslide occurred in 2015 spring in the headwater area of Mt Hakusan was demonstrated a profound ecosystem relationship between water and biota. The vegetation established after BettoValley landslide in 1934 showed four distinctive types based on substratum condition, which indicates direction for future revegetation measure on 2015 landslide. A relation between the sediment distribution and the flow velocities in the sand settling channels was measured in Miyatake settling pond, then it is concluded that the settling pond has performed very well. The average percolation from all paddy fields was 12.4 mm/day in 2014 and 7.9 mm/day in 2016, indicating a significant decrease in percolation. The groundwater recharge from the paddy fields reduced by 36% and the total groundwater recharge reduced by 25%. Analysis of groundwater level in 2015 by the regression model using Random Forest showed irregular fluctuation particularly from May to July at both sites. Finally, a hydrologic model analyzed effects of the turbidity water on groundwater. These results showed that the water might decrease percolation from paddy fields and groundwater recharge from the Tedoru River to cause the lowering of groundwater level in the alluvial fan. A grain analysis in paddy field and channel of Yamajima irrigation system showed that most of the fine sediments generated from the landslide were trapped within the alluvial fan of Tedoru River. Monitoring of *Pungitius* sp.1 and the habitats was carried out in the Tedoru River alluvial fan. Based on the monitoring results, emergency protection measures and medium- and long-term protection measures for *Pungitius* sp.1 were examined.

Keywords: Tedoru River, landslide, revegetation, settling pond, suspended solid, percolation, groundwater recharge, hydrologic model, *Pungitius* sp.1.

I. はじめに

森は海の恋人と言われ、森・川・里地そして海は一つの繋がりを持つものとしてとらえられ、全国各地でこの繋がりを重視した環境改善の取り組みが行われている。だが、一旦上流の森林域で異常現象が発生した場合、それは下流のシステムに伝播し、普段には見られなかった景観要素の繋がりが明らかになる場合がある。

石川県の最高峰・霊峰白山（標高 2702m）の源流域において 2015 年 5 月に大規模な地すべりが発生した。この地すべりから発生した多量の土砂や濁水は手取川下流に流下し、農業地帯や沿岸に拡散した。著者らは 2015 年の春以降に発生した土砂流出被害の実態と軽減に関する研究を始めた（柳井ほか, 2016）。

手取川は石川県最大の一級河川である。白山に源を発し、数十の支流を合流して北流し、金沢平野を流下して白山市美川において日本海に注ぐ我が国固有数の急流河川である。下流部には白山市鶴来を頂点とした典型的な扇状地地形が形成され、この扇状地は半径約 12km、扇状地の面積は約 17,000ha であり、そのほとんどは水田として利用されている。また扇頂部で河川水は取水され、扇状地内の灌漑排水路網を通じて水田へと導水されている。

2015 年には下流農業地帯においては水田の取水口付近に土砂が流入した。農作物に対して生育の低下が懸念されたものの、その影響範囲は限られていた。しかし用水の取水口に設置された沈砂池の堆積量は通常の 10 倍以上が観測された。一方、濁水の影響を直接受けたのが内水面および漁業である。河川では例年 5 月にアユの稚魚を放流していたが、濁水により放流が中止となった。河口に産卵のために遊泳するシロウオ漁が不振となり、沿岸域に拡散した濁水により漁網に泥が付着し、網が切れたり、網を引き揚げる際の障害となるなどの被害が発生した。

扇状地帯では、2015 年濁水発生以降から 11 月中旬までに地下水の顕著な低下がみられるようになった。この変化は、低下速度、最低水位ともこの 20 年間では最も大きかった。石川県の手取川扇状地には、湧水を起源とする細流にトミヨ属淡水型（学名：*Pungitius* sp.1）（中坊, 2013、以降トミヨと略す）が生息しており、石川県希少野生動物種および石川県絶滅危惧 I 類に指定されている。扇状地の地下水位の低下による水涸れは、2004 年以降、期間として最長で、その水涸れの範囲も手取川下流域の多くの河川にまで及ぶ最大の規模であることが確認された。

崩壊 2 年目である 2016 年においても、濁水の発生は継続しており、その実態解明と対策が急がれている。本研究では地すべり発生以降 2 年目の生態系への影響とその対策方向を多面的に明らかにすることを目的とした。

II. 研究フレーム

手取川濁水プロジェクトの研究フレームは、昨年同様、流程に従い上流から下流に沿って行い、流域全体にわたる影響とその対策について検討を行った。

1. 地すべり地の地形変化と濁水防止のための緑化手法の開発（担当：環境科学科 柳井清治・北村俊平）

すべり地の地形変化と土砂発生メカニズムをレーザー測量データに基づいて解析する。また濁水を減少させるための地すべり地を被覆する緑化手法や最適な植生などの生態的性質を明らかにする。

2. 宮竹用水沈砂池における堆積土砂量の推定（担当：環境科学科 瀧本裕士）

手取川扇状地の上流に設置された宮竹用水沈砂池において前年度に引き続きモニタリングを行い、沈砂池の性能を定量的に調査する。

3. 手取川河口から沿岸域における濁水成分の拡散実態の把握（担当：環境科学科 百瀬年彦・岡崎正規・食品科学科 本多裕司）

崩壊地を起源とする濁水成分が河口や沿岸域に拡散する実態について、浮遊・底質サンプルの採集を行うとともに、沿岸域の砂浜に堆積した成分の粘土鉱物分析を行い、濁水の影響を評価する。

4. 濁水が地下水に与える影響（担当：環境科学科 高瀬恵次・藤原洋一・長野峻介）

濁水が扇状地の地下水位に与える影響を解明する。河床および水田からの地下水涵養量を測定し、これまでに構築してきた手取川扇状地の地下水モデルを精緻化して、高濃度濁水と地下水位低下の因果関係を明らかにする。

5. トミヨの生息状況モニタリングと保全対策の検討（担当：環境科学科 一恩英二）

手取川扇状地において前年度に引き続きトミヨの生息環境モニタリングを実施し、その結果に基づいて、トミヨの緊急保護対策と中・長期的な保護対策を検討する。

Ⅲ. 各テーマの研究成果

1. 地すべり地の地形変化と濁水防止のための緑化手法の開発

1) はじめに

白山（標高 2,702m）源流域において、2015年5月に大規模な地すべりが発生し、崩壊土砂は下流に流下し深刻な濁水被害を与えた。このため濁水を抑えるために早期に崩落斜面の植生復元が課題となっているが、発生個所は国立公園特別保護区内にあり、自生植物による復元でなければならない（環境省自然保護局, 2015）。他にもアクセスが困難、多雨多雪、急斜面で土砂移動が激しいなど厳しい条件がある。そのため、植生復元を行うにあたって、地すべりによって形成された地形とそこに構成される植生群落の関係を把握することが必要である。そこで本



図 1. 仙人谷崩壊地と別当谷崩壊地位置

研究では、過去の大規模崩壊地（1934年発生）の植生調査、LiDARを用いた地形解析を行い、地すべり地の修復の方向性を検討した。

2) 研究方法

(1) LiDARによる仙人谷崩壊地の地形解析

仙人谷崩壊地における金沢河川国道事務所及び近畿中国森林管理署提供の崩壊前後5時期（2014年秋、2015年春、同年秋、2016年6月、同年10月）のLiDARデータをそれぞれLAS形式へ変換し、さらに0.3mメッシュのDEMデータに変換した。崩壊部、山脚部、側壁部、溪谷部の4タイプの地形における土砂移動量を把握するため、ESRI社のGISソフト「ArcGIS for Desktop 10.3.1」「切り盛り (Cut Fill)」ツールを用いて差分処理を行った。また、崩壊部の滑落崖及び地すべり下部に発達した谷の地形変化を把握するため、「3D

崩壊直後

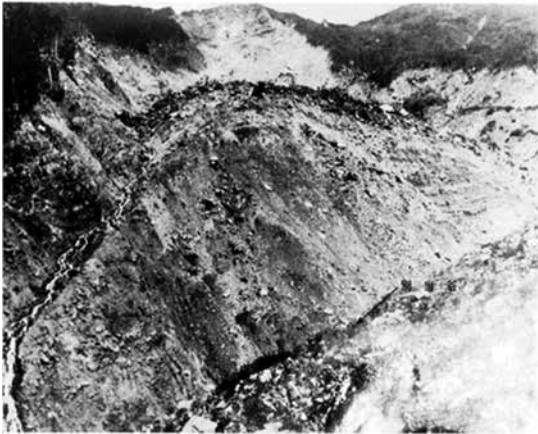


写真-3 崩壊直後の別当谷

崩壊後82年(2016年)



図2. 別当崩壊地の植生回復過程 (左 西川 (1988) による)

る。気象は年平均降水量約3,205mm、年最深積雪量約246cmであり、地質は手取層群で構成された流れ盤であるため、地すべりが発生しやすい地質条件となっている。

Analyst」ツールを用いて各時期の横断面図を作成した。これらを基に仙人谷崩壊地における地形図を作成し、別当谷崩壊地の植生調査結果と照合させ、推測される仙人谷崩壊地の植生群落を示した。

(2) 別当谷崩壊地の植生調査

別当谷は白山（標高 2,702m）を源として南西に流れ、手取川上流域牛首川に合流す

1934年7月には牛首川上流域で崩壊が発生し、未曾有の大災害となった。この年は多くの残雪があり、気温の急上昇による融雪と400mm達する豪雨が重なり、発生した崩壊土砂が下流河川への土石流となって流下したため、被害は上流から河口までほとんど全流域にわたった。別当谷で発生した崩壊が大規模であり、右岸山腹が長さ約900m、幅約200mの範囲で一時に崩壊し、別名「別当山津波」とも呼ばれた（吉村ら, 1991）（図1, 2）。

「別当谷山津波」から約82年が経過した現在、滑落崖の源頭域では侵食が継続しており、裸地が見られるものの、滑落崖下部や土石流堆積地などの斜面で植生回復が進んでいる（図1）。植生は地すべりによって形成された地形の影響を受け、パッチ状に分布している。航空写真（金沢河川国道事務所提供 2015年）をArcGIS上に取り込み、樹冠の色彩の違いから大まかに4つの植生パッチを判読した。

次に、現地において異なる植生群落ごとに5m四方のコドラートを設置し、樹種、樹高、胸高直径、林床植生（草本類、シダ類、地衣類）、各種の被度を調査した。なお、反復はパッチごと3から4として計10か所を調査した（図3）。

コドラート内の地形条件（標高、傾斜角及び

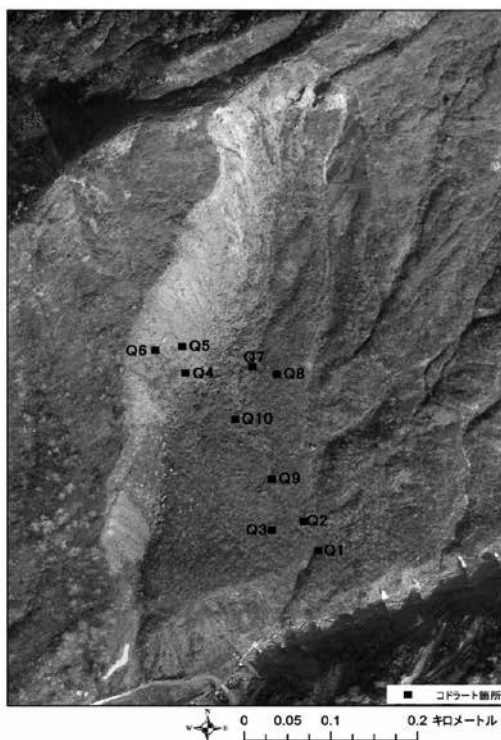


図3. 別当谷崩壊地における植生調査箇所

方向)はLiDARデータ(金沢河川国道事務所提供2013年秋)を、ESRI社のGISソフトウェアArcMap10.4.1を用いて解析した。土質及び土性については、別当谷崩壊地が国立公園に位置しており、土壌の採取が禁止されているため、現地踏査によって定性的に行った。

3) 結果と考察

(1) 別当谷崩壊地の植生調査

別当谷崩壊地では崩壊発生後82年を経過して植生が回復し図のような4つのパターンが形成されていた(図4)。

a) 土石流堆積地-ダケカンバーコヨウラクツツジ群落

土石流堆積地の土層はダケカンバが優占していた。中下層はコヨウラクツツジが優占する群落と、ミズキが優占する群落の2群に分かれた。ミズキは谷底近くや地すべり地の湧水点などの

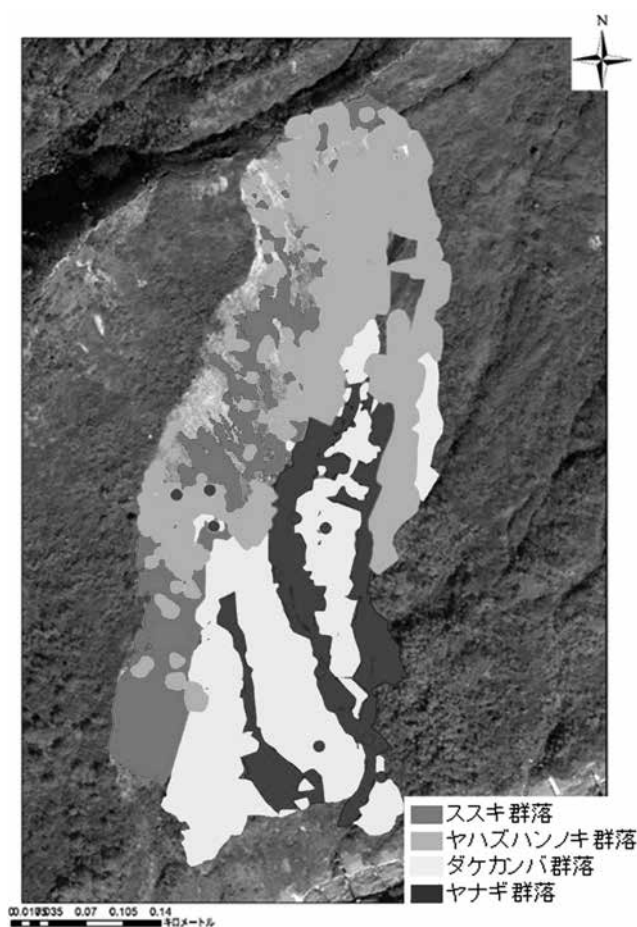


図4. 別当谷崩壊地における植生パターン

湿潤環境に生育するのに対して、コヨウラクツツジは乾燥気味的环境に生育することが知られている。直径1mを超える礫が堆積する場所では、ダケカンバの中下層をコヨウラクツツジが優占したと考えられる。

b) 溪流沿い-オノエヤナギ-高茎草原群落

溪流沿いでは林床に高茎草原が発達し、上層はオノエヤナギが優占する群落とダケカンバが優占する群落の2群に分かれた。オノエヤナギ、カワヤナギ、イヌコリヤナギはハンノキ類と同様に不定根形成は旺盛であり、河畔域のように冠水しやすい立地に生育することから、カンバ類より冠水耐性を持っていると考えられる。

c) 安定化しつつある急斜面-ヤハズハンノキ群落

ヤハズハンノキ群落は滑落崖下部の安定化しつつある急斜面に発達することが示唆された。ハンノキ類は風散布型であるため、崩壊地に先駆的に侵入する。ハンノキ類は放線菌と共生して根粒を形成し窒素固定を行い栄養塩類のストレスに対応している。この種は土砂の再堆積に対して不定根を形成する性質もあり、ハンノキ周辺の土砂移動方向が変化するとその方向に不定根の分布を拡大する(松下ら,2002)。このため、ヤハズハンノキは安定化しつつある急斜面で優位に生育できたと考えられる。

d) 不安定斜面-ススキ群落

ススキ群落は主に滑落崖中上部の不安定斜面に発達することが示唆された。ススキは風散布型であり、崩壊地に先駆的に侵入する。また、株が土砂をかぶったりすると、越冬芽が匍匐根茎または匍枝をのぼし、複合根茎をつくる性質がある(松下ら,2002)。このため、ススキは不安定斜面で優位に生育できたと考えられる

(2) 仙人谷崩壊地の地形条件と植生群落

別当谷崩壊地の植生調査と仙人谷崩壊地周辺で確認されている樹木を基に仙人谷崩壊地の地形条件と植生群落の関係について検討する。安

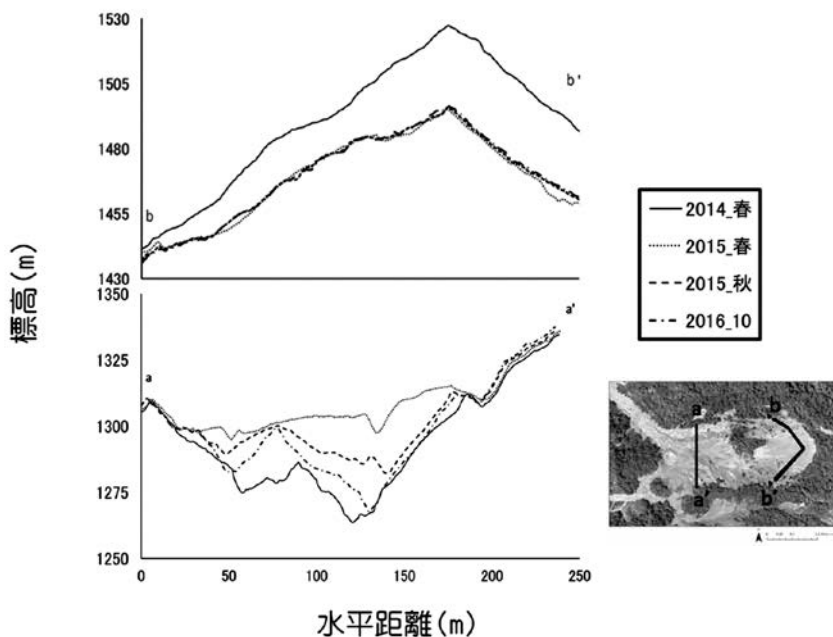


図5. 仙人谷崩壊地における横断面の地形変化
(上部：滑落崖、下部：山脚部)

定化しつつある滑落崖下部にはハンノキ群落、侵食が継続しており、不安定な滑落崖上部にはススキ群落が発達することが推測される。残存部及び地すべり下部の谷壁斜面に形成されている土砂堆積地には、ダケカンバやブナ等の広葉樹林が発達する。残存部上部の土石流堆積地及び地すべり下部の溪流沿いには、オノエヤナギ-高茎草原群落が発達することが推測される。

(3) LiDARによる仙人谷崩壊地の地形解析

各地すべり地形における地形変化を図5に示す。2014年秋から2015年春までは地すべり面で1271千 m^3 の土砂が生産され、地すべり下部(側壁部、山脚部、溪谷部)に1093千 m^3 の土砂が堆積していた。その後、地すべり上部では滑落崖源頭部からの土砂堆積が見られるのみで、土砂移動は比較的緩やかであったが、地すべり下部では堆積土砂が激しい縦侵食を受け、溪谷が発達していた。地すべり下部の侵食は崩壊後半年間が最も激しく、経過とともに緩やかになっており、崩壊から1年後には侵食量及び侵食範囲が大幅に縮小していた。

次に、地すべり上部及び地すべり下部の地形変化を解析したところ、地すべり上部ではほとんど地形変化が見られないのに対して、地すべり下部では崩壊後に10mから40mの削剥が見られ、地形変化が激しかった。このように、地すべり上部では土砂移動が比較的緩く、地形変化もほとんど見られないのに対して、地すべり下部では土砂移動及び地形変化が激しいことが示された。

(4) 仙人谷崩壊地の植生復元方向

別当谷崩壊地の植生調査

と、仙人谷崩壊地周辺で確認されている樹木を基に、仙人谷崩壊地の植生復元方向について検討する。地すべり斜面上部の滑落崖においては、不安定な急斜面にはススキ群落、その下部の安定化しつつある崖錐部ではハンノキ類が発達することが推測される。地すべり斜面中腹の樹林残存部及びその下部の地すべり土砂堆積地にはダケカンバやブナ等の広葉樹林が発達し、中腹の樹林残存部上部の土石流堆積地及び地すべり地内に流入する溪流沿いにはオノエヤナギ-高茎草原群落が発達することが推測される。

この結果より、仙人谷崩壊地の植生復元の方角性としては自然林の復元、また立地条件に応じた植生導入が望ましい。不安定斜面ではススキなどによる緑化工により、土砂の流出を抑制する。勾配の急な斜面では、そこに生育することができるヤハズハンノキ、安定した乾燥地では、ダケカンバやツツジ、ブナのような広葉樹を、沢沿いの湿性地では、溪流を好んでいるヤナギ類を、場所ごとに条件に適した種子や挿し木を用いて植生導入を図ることが望ましい。

2. 宮竹用水沈砂池における堆積土砂量の推定
(担当：環境科学科 瀧本裕士)

1) はじめに

宮竹用水沈砂池は、手取川からの土砂を一旦堆積し、適切なタイミングで手取川へ排砂することにより、沈砂池下流側の小水力発電所や農地（受益面積 2,457ha）に対し過剰な土砂流入から守る働きがある。2015年に発生した上流域における土砂崩落の際には、農地 1ha あたりダンプカー 1 台分（約 5m³）の運搬量に相当する土砂を抑制することができた。前年度の研究（柳井ら, 2016）では、沈砂池の土砂堆積能力を検討した。本年度は、引き続き沈砂池の堆砂特性に関するモニタリングを行い、特に沈砂溝の流速と堆砂の関係を新たな分析項目に加えた。なお、本研究の調査期間は4月～10月までの7ヶ月間である。

2) 既往の研究

沈砂池の設計や効果、および排砂に関する研究はこれまで多く行われている。志村ら（1969）は通水と排砂という水理的には相反する沈砂池の機能について、いかに有効に働かせるかを目的とし、水理的知見を通じて最適な構造設計理論を提案した。小久保ら（2004）はダムに

併設する水力発電所への導水路に混入する土砂を効率的に排砂する方法を見出すため、導水路内の土砂濃度分布の特性を実験的に明らかにした。小笠原ら（2003）は山地に設置された沈砂池を対象に、沈砂池への流入水について降雨と濁度の関係を明らかにし、沈砂池の濁度軽減効果を評価した。仲村ら（2012）は浮遊土砂の除去率の観点から設計値と実測値を比較することにより沈砂の性能を評価した。細川ら（2009）は沈砂池の堆積調査を継続的に行い、沈砂池機能の指標となる土砂捕捉率の算出も試みている。

このように沈砂池の機能を評価する研究は多いものの、沈砂池の性能はその構造、流入土砂の粒度分布、降雨量、流入量、排砂条件等によっても異なることから得られた知見を一般化することは難しく、事例の積み重ねが必要である。特に宮竹用水沈砂池のように複数の沈砂溝をもつ構造は珍しく、研究事例も少ないことから継続的にモニタリングを行い、沈砂池の特性を捉えることは重要であると考えられる。

3) 研究方法

(1) 宮竹用水沈砂池の概要

宮竹用水沈砂池は、石川県能美市岩本町内に

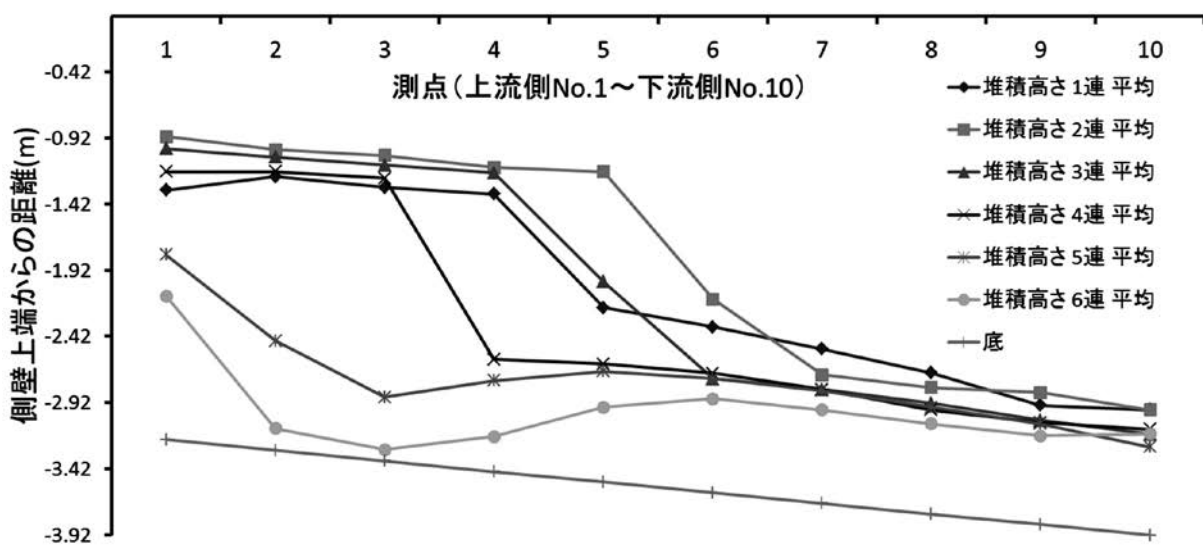


図 6. 沈砂溝における土砂の堆積状況

位置し、2010年3月に完成した施設である。

手取川からの取水量について、灌漑期（4/10～9/10）の本線平均流量（中島）が $92.7\text{m}^3/\text{s}$ 、取水量が $10.2\text{m}^3/\text{s}$ であることから、その割合は11%である。

沈砂池の全長は42mで、6連の沈砂溝からなり、1連あたりの幅は2.9mである。沈砂溝の深さは最上流部が3.20m、最下流部が3.92mであり、流下方向に対して一定の勾配で深くなっている。本調査では沈砂溝の中、上流管理ゲートと下流排砂ゲートの一部分を除く、長さ33.5mの区間を対象に流入土砂の堆積深を測定した（柳井ら, 2016）。

(2) 土砂堆積深の測定

本研究では、沈砂溝33.5mを3.3mごとの10点に分割し、全6連の左右両岸の計120点について、概ね週1回の間隔で土砂堆積高さを測定した。土砂堆積高さの測定では、標尺を沈砂池水中に差し入れ、側壁の頂上から土砂堆積がある深さを読み取った。なお、土砂堆積量は平均断面法（平均堆積高さ×幅×沈砂溝長さ）で求めた値とした（柳井ら, 2016）。

(3) 流速の測定

沈砂溝の上流から下流にかけて流速がどの様に変化しているかを調査した。流速の測定では、プロペラ式流速計（株式会社ケネック, 2017）を用いて、上流管理ゲート前と沈砂溝10測点の中、上流側測点（No.1）、中流側測点（No.5）、下流側測点（No.9）の3測点を選定し、沈砂溝6連すべてについて測定を実施した。沈砂溝の流速を測定する場合には、3点法、2点法、1点法といった水深方向に対して複数点で行い、平均流速を求めるのが一般的である（土木学会, 2001）。しかし本調査では、測定地点の足場が十分に確保できず危険を伴うことから、測定可能な沈砂溝中央の水深20cmの地点で測定を行った。したがって、得られた測定値は正確な平均流速というわけではなく、あくまで参考程

度である点に注意を要する。

4) 結果及び考察

(1) 沈砂溝における土砂堆積特性

2016年に実施した沈砂溝の土砂堆積状況の観測例（2016年7月25日）を図6に示す。前年度と同様に沈砂溝の上流側から下流側にかけて段丘状に土砂が堆積している。また、流入土砂は6連の沈砂溝に均一に溜まるのではなく、右岸から左岸にかけて堆積する傾向も同様であった。2ヶ年に渡る測定でこれらの傾向が逆になるようなことは無かったことから、この堆積傾向は宮竹用水沈砂池の一般的な特性であると言える。

(2) 流速分布の傾向

沈砂溝内の堆積状況が各連によって異なることは流速分布の違いが影響しているものと考えられる。そこで各連において上流側から下流側にかけて流速を測定した例（2016年6月3日）を図7に示す。流速は沈砂溝流入口付近（測点No.1）において 1m/s 程度で速く、沈砂溝中流部（測点No.5）で $0.2\text{m/s} \sim 1.0\text{m/s}$ と変動幅があるものの流速が落ちている。そして下流部（測点No.9）では右岸側が $0.5\text{m/s} \sim 0.7\text{m/s}$ 、左岸側が $0.1\text{m/s} \sim 0.2\text{m/s}$ とさらに流速が低下していた。これらの傾向は、他の測定日でも概ね同様であった。土砂の堆積は、流速と比例関係が見られ、流速の比較的速い右岸側に流入土砂が優先的に沈砂することがわかった。ただし今回の調査では、流速が各連でなぜ異なるのか、流

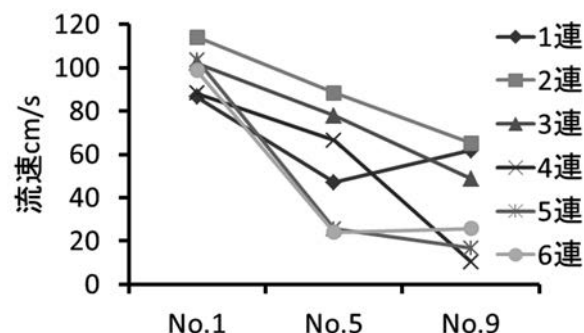


図7. 各沈砂溝における流速分布

速が堆積と比例関係にあるのはなぜかといった所までは解明できなかった。したがってこれらのことは今後の課題である。

(3) 土砂堆積量の経年変化

2015、2016年の2ヶ年にわたって計測した6連合計の堆積土砂量についてまとめた結果を図8に示す。図中の点は堆積土砂量の実測値であり、点間を結ぶ線は堆積過程を示す。堆積過程の線が途切れている部分は、排砂が行われている期間である。この期間において2015年では排砂は8回であったが、2016年では2回であった。

土砂堆積量は、沈砂開始から排砂に至るまでの過程で最大1123m³と推定される(柳井ら, 2016)。そして本研究では、堆砂総量 = 最大土砂堆積量 × (沈砂溝全長 / 調査区間) × 排砂回数で計算することにする。計算によって推定された堆積総量は、2015年は排砂回数が8回あり11,264m³、2016年は排砂回数が2回であり2,816m³であった。手取川の濁水が目立った2015年に比べ、2016年の堆積総量は低下して

いることがわかった。ただ、2016年の堆積総量は低下しているとは言え、一度に堆積できる土砂量は計画値(550m³)を上回っている。このことから、宮竹用水沈砂池は計画以上の土砂量をコントロールすることができ、その結果想定外の事象に対しても下流側の農地への土砂流入を抑制できたことから機能的にも良好であると言える。

5) まとめと今後の課題

これまでの調査により宮竹用水沈砂池では、流入土砂が沈砂溝に段丘状に堆砂すること、流速は沈砂溝の右岸側が左岸側よりも大きく、それに比例する形で流入土砂は右岸側に優先的に堆積すること、沈砂池の性能は計画を上回っており、下流側農地への土砂流入の抑制に効果的であったことがわかった。

このような沈砂池の特性を把握することは、沈砂池を運用する上でも役立つと考えられる。例えば、排砂の際に堆積状況に応じて沈砂溝各連に優先順位をつけることにより、手取川本線に向けた排砂のタイミングがより柔軟に行えること、排砂時間もコントロールできることから作業負担軽減にも繋がること等、新たな維持管理手法を見出すきっかけになり得る。

ただ一方で、沈砂溝各連における流速分布の違いや堆積傾向との関連性について因果関係を突き止めることはできなかった。これらの分析は今後の課題としたい。

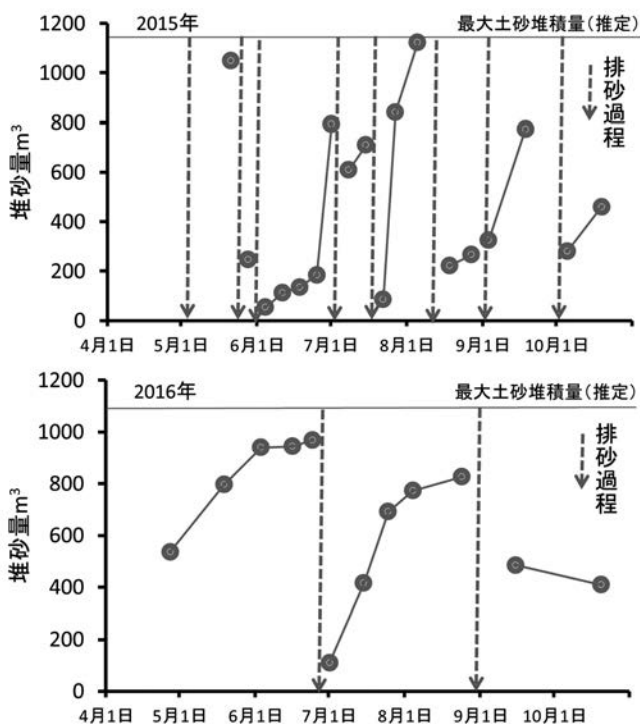


図8. 6連合計の堆積土砂量

3-1. 手取川河口から沿岸域における濁水成分の拡散実態の把握 (担当: 環境科学科 百瀬年彦・岡崎正規、食品科学科 本多裕司)

1) はじめに

2015年5月に手取川上流部で発生した大崩壊は、大量の懸濁物を下流域および沿岸域にもたらした。その量は1154千m³(柳井ら, 2016)で、その60%が下流域の水田地帯で保持され、

40%が直接沿岸域に分配された(百瀬, 2017)。美川漁港は手取川の河口に位置しており、上流からの懸濁物の直接的な影響を受ける。コウイカ (*Sepia (Platysepia) esculenta* Hoyle, 1885) 漁は、1海里(約1825 m)沖にカゴ網の中に樹木の枝を入れて仕掛ける(山本, 1942)。コウイカは樹木枝、網などに西洋ナシ形で白色の卵を産み付ける。コウイカ卵は、卵表面に懸濁物を付着させ、外敵から身を守るとされる(Watanabe and Kawamura, 1999)。本研究は、2016年5月24日に石川県美川市美川漁港において採取したコウイカ漁具に産み付けられたコウイカ卵を懸濁物とともに採取し、コウイカ卵および懸濁物の組成、化学成分および炭素・窒素安定同位体比の特性を明らかにし、手取川崩壊の影響を示したものである。

2) 材料および方法

(1) 採取試料

2016年5月24日石川県美川市美川漁港において、水揚げされたコウイカ漁具に付着していたコウイカ卵および懸濁物を採取した(図9)。実験室に持ち帰り、風乾後、過酸化水素で20分間酸化処理し、コウイカ卵と懸濁物を分離した。コウイカ卵は、白色部位と黄色部位を分離した後、真空乾燥し、全炭素、全窒素、炭素・窒素安定同位体比分析試料とした。白色部位および黄色部位を、さらに酸分解し、分子量、糖タンパク質、アミノ酸組成分析用試料とした。付着懸濁物については、水洗後、粒径組成分析用試料とした。一方、崩壊地の土壌は、2016年9月に採取した後、風乾し、2 mm篩を用いて篩別した。

(2) 鉍物分析

崩壊地土壌および付着懸濁物試料を0.045 ~ 0.250 mmに篩別し、脱鉄処理(加藤, 1959)を行った。脱鉄処理後の試料をスライドガラス上に乗せ、100 ~ 1000倍の倍率で、走査型電子顕微鏡Hitachi TM-1000を用いて鉍物表面を

観察した。100 ~ 400倍の倍率で、Meiji Techno MT9300を用いて観察し、鉍物を同定した。また、それぞれの試料についてX線回折(Rigaku MiniFlex)分析を行い、鉍物を同定した。

(3) 蛍光X線分析

崩壊地土壌および付着懸濁物試料をさらに乳鉢で粉碎した後、PANalytical社製波長分散方蛍光X線分析装置Axiosで、元素分析を行った。元素は酸化物で表示した。

(4) コウイカ卵糖タンパク質分析

コウイカ卵の糖タンパク質を自動電気泳動装置GE Healthcare Japan Phast Systemを用いて分画し、Coomassie Brilliant Blue (CBB) およびPeriodic acid-Schiff stain (PAS) で染色した。

(5) コウイカ卵アミノ酸分析

コウイカ卵白色部位および黄色部位を0.02 molL⁻¹塩酸溶液で抽出し、日立L-8900アミノ酸分析計を用いて分析した。分析条件は、カラム: 高速ツインカラム 5.4 mmID x (25 + 25) mm、生体アミノ酸分析カラム 4.6 mmID x 80 mmを用い、流量0.56 mL min⁻¹、カラム温度28 ~ 70 °Cでステップワイズ溶離法である。

(6) コウイカ卵の炭素・窒素安定同位体比分析

手取川懸濁物の付着したコウイカ卵試料の炭素・窒素安定同位体比をIso Prime IRMS (GV Instruments, Cheadle, UK) と連結したEuro EA 3028-HT Elemental Analyzer (Euro Vector, Milan, Italy) を用いて分析した。

3) 結果および考察

(1) 懸濁物中の鉍物

崩壊地土壌およびコウイカ卵に付着した懸濁物試料の鉍物は、劈開面の明瞭な粒子と劈開面の不明瞭な粒子とが存在した。さらに、表面の凹凸の明確な粒子と不明瞭な粒子が混在していた。偏光顕微鏡を用いて鉍物粒子を同定したが、顕微鏡下で同定できない岩片として類別される粒子が50%を超え、鉍物粒子の選別が十分なされていないことが明らかになった。同定可能



図9. コウイカ漁具に付着した手取川懸濁物

な無色鉱物は、石英、長石類であり、劈開面が不明瞭で、表面の凹凸の少ない粒子の大部分は石英であった。一方、劈開面が明瞭な粒子は長石類であり、それらの表面は、石英に比較して凹凸が明確であった。有色鉱物は極めて少なく、紫蘇輝石および黒雲母が同定された。崩壊地土壌と懸濁物試料は類似した鉱物組成を示した。

(2) 懸濁物の化学組成

崩壊地の土壌とコウイカ卵に付着した懸濁物の化学成分は、ほぼ類似した化学組成を示した。手取川原流域は、土石流、地すべりなどの土砂災害の発生しやすい地域である。この地域の中生代の地層は、来馬層群、手取層群、足羽層群および新期花崗岩類からなる。崩壊地の土壌は、 SiO_2 含量が66%以上であり、酸性岩に由来する岩石に由来するものと推定された。手取層群中の炭酸塩の存在は、小林(1977)によって明らかにされており、手取層群の一部は塩基性を示す。

(3) コウイカ卵の糖タンパク質

SDS-PAGEによる、コウイカ卵(全量、白色部位、黄色部位)に存在する糖タンパク質は150000を超える高分子物質であった。白色部位は黄色部位よりも250 kDaを超える高分子物質の存在量が少なかった。高分子物質表面に連続する繊維状高分子物質の広がりをもとに、砂あるいはシルト粒子の電気二重層の厚さ $1/\kappa$ とすると、 $2/\kappa > \delta$ の関係の場合は、砂あるい

はシルト粒子は繊維状高分子物質に吸着することはない。しかし、コウイカ卵表面には多量の細砂ないしシルト粒子が吸着しており、 $2/\kappa < \delta$ の関係を示すと考えられる。

Cornet et al. (2015) は、ヨーロッパコウイカ *Sepia officinalis* の卵タンパク質および糖タンパク質を SDS-PAGE を用いて分画し、CBB および PAS で染色した結果、塩基配列 104-129 の 5'-GGAGGCACTTGACACCGCAAAAGG-3' のシーケンスを持つ SepECP1 および塩基配列 22-47 の 5'-TCGCTGCTGTTCCTCAGCAT TTGG-3' のシーケンスを持つ SepECP2 を認め、分子量が135000から60000であることを報告している。本研究結果は、Cornet et al. (2015) と類似した SDS-PAGE 結果を示しているといえる。

(4) コウイカ卵のアミノ酸組成

コウイカ卵を構成するアミノ酸には、グリシン、シスチン、フェニルアラニン、リジン、ヒスチジンが見出された。アミノ酸には類別されていないが、コウイカ卵中にはタウリンが多量に含まれていた。Lei et al. (2014) は、コウイカ卵中のアミノ酸組成が卵の発達ステージによって大きく変化していること、アミノ酸の中では、グルタミン酸、アスパラギン酸、ロイシン、イソロイシンの存在割合が高いことを明らかにした。これらの結果は、本研究の結果と大きな相違が認められるが、コウイカ卵の発達ステージの違いによるところが大きいと考えられる。

(5) コウイカ卵の炭素・窒素安定同位体比

コウイカ卵の炭素・窒素安定同位体比を植物プランクトン、動物プランクトンおよびホタルイカ(生体)の炭素・窒素安定同位体比(山崎, 2013)と比較すると、植物プランクトン—動物プランクトン—ホタルイカ(生体)の食物連鎖系列とはやや異なる位置にプロットされる。一般に、食物連鎖にしたがって、炭素安定同位体比は約1%、窒素安定同位体比は約3.4%上昇する傾

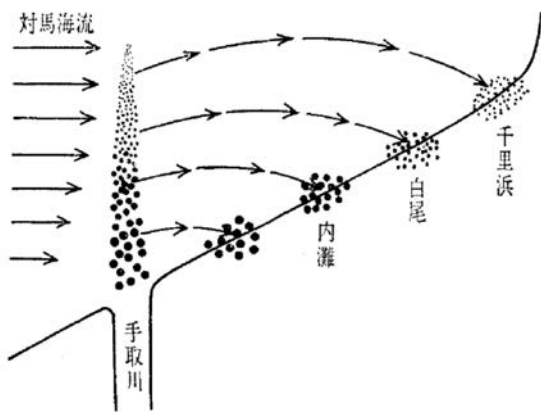


図 10. 手取川土砂と海岸形成の模式図

き、すなわち食物連鎖系列の傾きは 3.4 であると言われている (Vander Zanden and Rasmussen, 2001)。したがって、コウイカ卵の炭素・窒素は、必ずしも通常食物連鎖には関係しない位置にあるのかもしれない。

コウイカ漁具に付着・吸着した懸濁物は、手取川上流部の崩壊地土壌鉍物を主体としており、両者の鉍物組成、化学組成はきわめて類似していた。コウイカ漁具に付着・吸着したコウイカ卵は、表面の糖タンパク質の有する粘着性が懸濁物を容易に付着・吸着させた。

3-2. 手取川河口から沿岸域における濁水成分の拡散実態の把握 (担当：環境科学科 百瀬年彦・岡崎正規)

1) はじめに

手取川からの土砂は、手取川の水流によって粒径の細かいものほど沖合に運ばれ、対馬海流によって能登方面へ運ばれる (図 10; 石田, 1991)。こうした運搬過程のなかで手取川の土砂は自然に篩い分けられ、石川県西側の砂浜形成に寄与したとされる (石田ら, 1984; 早瀬ら, 2009)。今回の大規模な土砂崩壊が、砂浜回復に寄与する可能性は十分に考えられる。ところが、2 年近く経った現時点においても、能登はんみょう海岸 (羽咋市柴垣～志賀町大島) で砂浜回復の兆候は見られない。ここに来るはずの

砂は、今どこにいるのだろうか。

能登はんみょう海岸は、0.11-0.25mm 範囲の砂が 95% 以上を占める (中西・百瀬, 2016)。この粒径範囲の砂が、手取川上流域の崩壊地から能登はんみょう海岸までのどこかにある。漁業や農業関係者への聞き取りおよび現地調査を重ねていくなかで、①白山頭首工が手取川から半分以上 (約 6 割) を取水する、②水田や用水路に大量の土砂が溜まったという実態がみえてきた。そこで私たちは、「能登はんみょう海岸を形成するはずの砂が、手取川扇状地内の水田や用水路にトラップされている」という仮説を立てた。

本研究では、七ヶ用水の 1 つである山島用水に狙いを定め、その上流から下流にかけての幹線付近の水田 5 ヶ所、山島用水の幹線水路内の 6 ヶ所から、堆積土砂を採取し粒度分析を行った。また、水田や用水路の堆積土砂と能登はんみょう海岸砂との粒径比較から、崩壊土砂と砂浜形成との関連性を考察することとした。

2) 試料および実験方法

(1) 山島用水水系の水田堆積土砂の粒度分析

図 11 に示すように、山島用水の上流から下流で、幹線に近い水田を 4 ヶ所選定し (向島町、矢頃島町、剣崎町、村井町)、取水口に堆積する土砂を採取した。採取日は、2016 年 7 月 6 日、2016 年 7 月 14 日、2016 年 7 月 28 日の 3 日である。なお、2016 年 7 月 28 日には、山島用水の最下流部に位置する相川町の水田からも堆積土砂を採取した。ただし、相川町水田の堆積量は他と比べて少なかった。採取日は、いずれも降雨で手取川が濁った数日後であり、各水田に土砂が堆積していることを確認してから採取した。水田 4 ヶ所の 3 日分と水田 1 ヶ所の 1 日分、計 13 サンプルの篩分析を行った。また必要に応じて沈降分析も行った。

(2) 山島用水幹線水路の堆積土砂の粒度分析

幹線水路には水流を弱めることを目的として

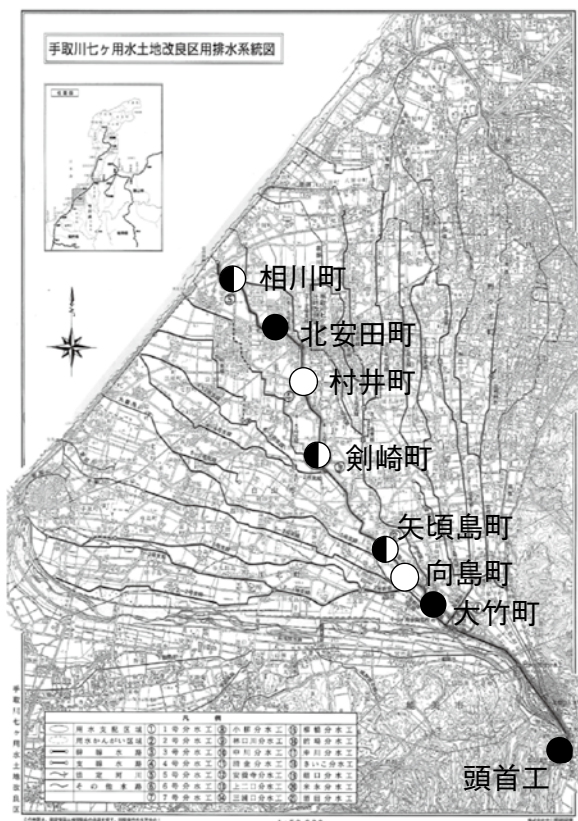


図 11. 土砂採集地点（白：水田；黒：用水路）

落差工が設けられ、その落差工の上流部は水路幅が少し広がっている。原則、ここに溜まる土砂を採取することとした。図 11 に示すように、山島用水の上流から下流で、6ヶ所（頭首工、大竹町、矢頃島町、剣崎町、北安田町、相川町）を選定した。上流部 3ヶ所の堆積量は、頭首工、大竹町、矢頃島町の順に減少し、下流部の剣崎町、北安田町、相川町の堆積量は、上流部 3ヶ所と比べて明らかに少なかった。採取日は七ヶ用水停水期間中の 2016 年 10 月 22 日とした。水田堆積土砂の粒度分析と同様に、篩分析、必要に応じて沈降分析を行った。

3) 結果および考察

(1) 山島用水水系の水田堆積土砂の粒度分析

各水田の堆積土砂の粒度分布を図 12 に示す。相川町を除き、0.11-0.25mm の砂を主体にして堆積していることが明らかとなった。最下流部に位置する相川町は、0.08mm 以下の土砂を溜めていた。別の採取日（2016 年 7 月 6 日お

よび 7 月 14 日）についても同様の結果を得た。水田に一旦堆積した土砂は、自然任せで外に出ていくとは考えにくい。0.11-0.25mm の砂は、相川町よりも上流域の水田でトラップされると考えられる。

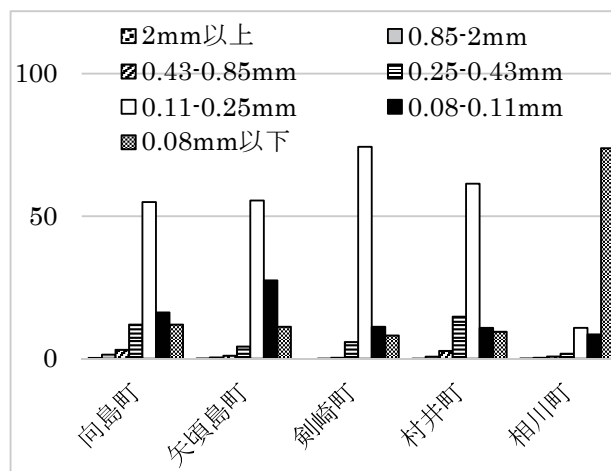


図 12. 水田堆積土砂の粒度分布
(採取日 2016 年 7 月 28 日)

(2) 山島用水幹線路の堆積土砂の粒度分析

各用水路内の堆積土砂の粒度分布は、上流部 3ヶ所の頭首工、大竹町、矢頃島町において、水田堆積土砂と同様に、0.11-0.25mm が主体であることが明らかとなった(図 13)。下流部 3ヶ所では、堆積土砂にはさまざまな粒径のものが含まれていた。しかし、堆積量が上流部 3ヶ所と比較し明らかに少なかったため、下流部 3ヶ所は堆積していなかったものとして無視しても差し支えないと考えている。

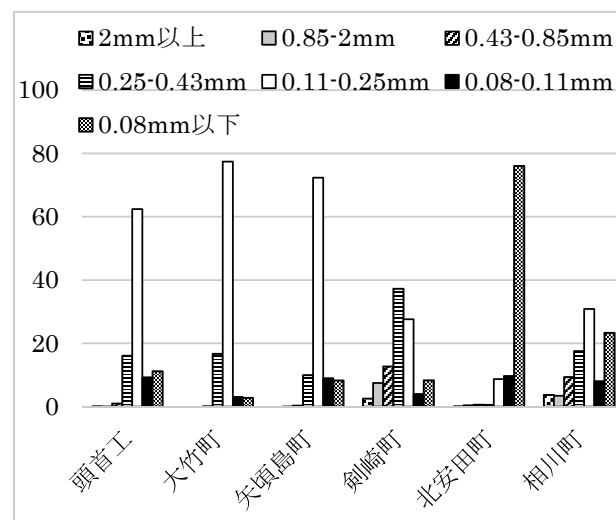


図 13. 用水路堆積土砂の粒度分布

4) おわりに

崩壊土砂は砂浜をつくるといわれてきた。このため、今回の大規模土砂崩壊が、侵食問題を抱える石川県の砂浜海岸の回復に寄与するであろうと期待していた。しかし、今回の崩壊土砂が、砂浜回復に寄与した可能性はほとんどないであろう。その理由は、現在の水利用のあり方にある。

手取川を流れる半分以上の水は白山頭首工で取られ、その水は手取川扇状地の水田で流入流出を繰り返し、網の目のように張り巡らせた七ヶ用水や宮竹用水を通じて最終的に海に放出される。こうした水の動きのなかで、濁水中に含まれる 0.11-0.25mm の砂は、水田や用水路で堆積し、海に放出される濁水中にはほとんど残らない。能登はんみょう海岸を形成する砂は、水田や用水路でトラップされるのである。

白山頭首工をすり抜けて手取川本流から海に放出される土砂はどうなるのだろうか。白山頭首工で半分以上の水を取ることは、手取川河口部の水の勢いを弱めさせる。ここでもう一度、図 10 を見てほしい。手取川河口部の水の勢いが弱まれば、土砂は沖合に届かない。ダムで水流を制御することも、水の勢いを弱めることに影響する。

頭首工と砂浜との共生を導くためには、土砂の動きを以前の状態に近づけることが重要になると考えている。このため、(1) 頭首工で取られた土砂を手取川本流に戻すこと、(2) 手取川河口で土砂を沖合に運ぶこと、これら 2 つが重要課題になる。その仕組みづくりだす、新しいアイデアが求められる。

4. 濁水が手取川扇状地の水循環に与える影響

(担当：環境科学科 高瀬恵次・藤原洋一・長野峻介)

2015 年春に起こった手取川の濁水は 2 年を経過しても継続しており、用水路や水田への堆

砂や内水面漁業への影響など直接的な影響と併せて沿岸漁業や地下水への長期的な影響評価が必要な課題である。本節では、濁水が扇状地の水循環に与える影響を検討するために行った現地観測および解析結果について報告する。

1) 現地観測による検討 (藤原洋一)

(1) はじめに

手取川上流において 2015 年 5 月に大規模な土砂崩壊が発生し、泥成分を多量に含む土砂が手取川に流出した。濁度は高濃度(最大 4,000 度)で平常時の 40 倍以上の値が観測された。高濃度濁水が顕著化されて以降、崩壊地では侵食防止策が早急に行われているが、下流扇状地では濁水が水田や地下水の水収支に与える影響について十分に把握されていない。そこで本研究では、土砂崩壊前後において水田減水深調査を実施し、浸透量を比較することで水田からの地下水涵養量に与える影響を明らかにすることを試みた。

(2) 研究方法

土砂崩壊は 2015 年 5 月に手取川上流 60km の石川県白山市尾添大汝国有林の中ノ川右岸で発生した。土砂崩壊規模は幅 200m、高さ 200m、深さ 50m であり、崩壊した土砂は推定で約 130 万 m^3 である。このうち河川内への堆積が約 50 万 m^3 である(高村, 2016)。

水田減水深調査は、手取川扇状地内の 45 地区 135 筆を対象とし、2014 年(5 月 27 日～5 月 30 日)と 2016 年(5 月 31 日～6 月 3 日)の中干し前の連続晴天日に実施した。なお調査した 2 時期は土砂崩壊の前後に該当している。調査対象水田は、一筆排水樋が設けられており、灌漑水の取り入れがないこと、排水がないことを確認した上で基準高から湛水面を計測し、前日の値との差分により水田減水深を計測した。蒸発量は水稻の株間に容器を設置して別途計測し、水田減水深から差し引いて水田浸透量を求めた。

表 1. 水田浸透量の有意差検定 ($p < 0.05$, $**p < 0.01$)

範囲区分	左岸				右岸				両岸			
	筆数	浸透量(mm/day)		p値	筆数	浸透量(mm/day)		p値	筆数	浸透量(mm/day)		p値
		2014	2016			2014	2016			2014	2016	
扇頂	3	8.2	12.4	—	12	15.5	12.3	0.21	15	13.4	12.3	0.36
扇中央	6	6.7	7.6	0.34	20	17.3	7.8	0.04*	26	15.4	7.8	0.10
扇端	22	10.3	6.9	0.08	29	11.1	6.5	<0.01**	51	10.7	6.6	0.02*
全体	31	9.5	7.8	0.25	61	13.1	7.7	<0.01**	92	12.4	7.9	<0.01**

(3) 研究結果

水田減水深調査で2時期とも計測できた有効筆は41地区92筆であった。水田圃場で計測した蒸発量平均値は4.3mm/dayであった。調査地区ごとの浸透量の結果を図14に示す。扇状地は等高線応じて扇端部、扇中部、扇頂部とした。2014年と2016年共に扇頂部から扇中部の値が大きく、扇端部で値が小さい傾向が得られた。浸透量の増減割合をみると、増加地区は11地区、減少地区は30地区であり、分布傾向に特徴が表れた。増加地区は扇頂部から扇中部の河川付近や扇状地の北東部に集中し、減少地区は扇中部と扇端部に集中した。また、変化割合が0.5を超える地区は16地区存在し、土砂崩壊前後において浸透量が大きく変化していることがわかる。

範囲区分を左岸、右岸、両岸、扇頂部、扇中部、扇端部、全体ごとに分類し、土砂崩壊前後で浸透量を比較したものを表1に示す。分類ごとにWilcoxonの符号順位和検定により有意差検定を行った。なお左岸扇頂部では有効筆数が3筆であり、検定に必要な標本数が確保できなかったため、p値は得られなかった。検定の結果、p値が右岸扇中部では0.05以下、右岸扇端部では0.01以下となり、浸透量が減少する有意な差が認められた。

両岸全体における浸透水量の平均値は、2014年は12.4mm/day、2016年は7.9mm/dayである。これは灌漑期の作付水田(7,539ha)の浸透量であるため、扇状地全体(17,682ha)の浸透量は、2014年は5.3mm/day、2016年は3.4mm/day(37%減)となった。さらに、文献値(丸山

ら, 2012)である水田以外からの浸透量0.3mm/day、手取川水系からの涵養量2.2mm/dayを用いて各水収支成分からの地下水涵養量を概算すると、2014年は7.7mm/dayに対して、2016年は5.8mm/day(25%減)となった。

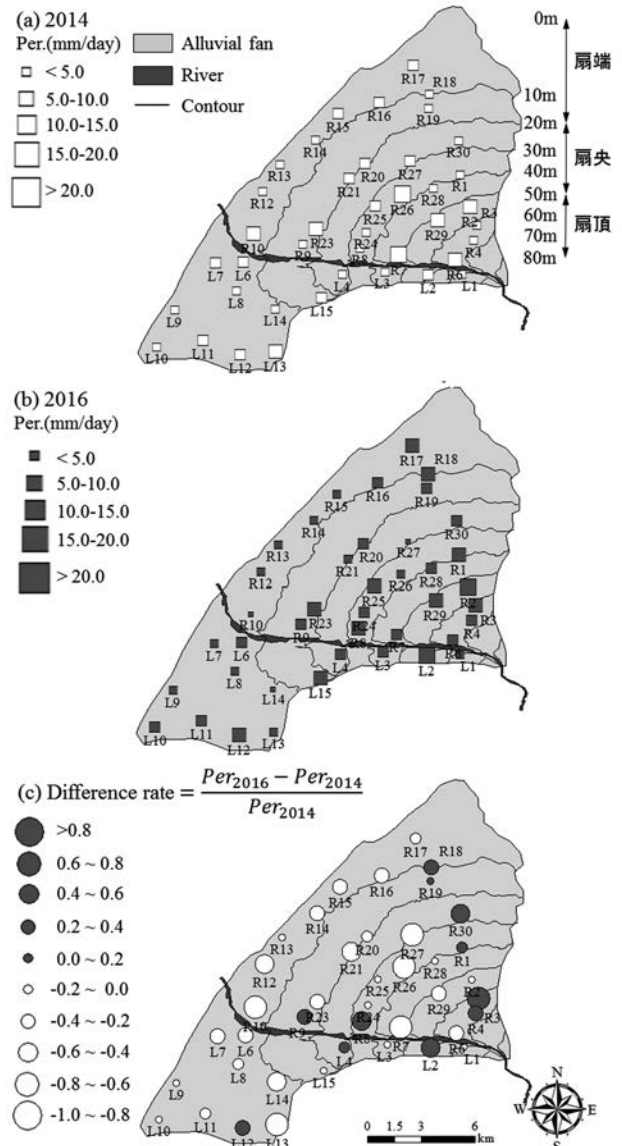


図 14. 水田浸透量の結果

(4) 結論

本研究は手取川上流で発生した土砂崩壊の前後で水田減水深調査を実施することで、浸透量の変化を比較した。その結果、右岸扇央部と右岸扇端部において有意な差が認められ、土砂崩壊に伴う高濃度濁水により水田浸透量が減少したことが明らかとなった。本研究の結果と文献値を基に扇状地全体の地下水涵養量を概算すると、水田からの涵養量が37%減少したことで、扇状地全体の地下水涵養量が25%減少することが明らかとなった。

2) ランダムフォレストによる解析 (長野峻介)

(1) はじめに

手取川での2015年の濁水現象の発生と同時期に、手取川扇状地では著しい地下水位低下が報告されている。土原ら(2011)は扇状地浅層地下水の涵養源を同位体分布から推定を行った。ただし、扇状地内の地下水位は各地で異なる増減を頻繁に繰り返しており、その変動特性は分析されていない。そこで、本研究では機械学習の手法の一つであるランダムフォレストを用いて、手取川扇状地における地下水位変動特性のモデル化と水位変動の要因、2015年の水位低下の特徴を分析した。

(2) 研究対象地

手取川扇状地内には福増、末広、太平寺、千代野西、井関、安吉、赤井、北市の合計8地点の石川県が管理する観測井戸が存在する。観測井戸では地下水位が1974年から継続して観測されており、8地点のうち安吉、北市、井関、赤井、千代野西では、2015年の地下水位が過去10年のうちで最も低下していた。2010年からの安吉と北市(図15)における地下水位の変化を図16に示す。

本研究では機械学習の手法の一つであるランダムフォレストを用いて地下水位変動解析を行った。安吉と北市を解析対象として、地下水位変化量(地下水位日変化)を目的変数、手

取川流量や降水量などを説明変数として、2002年から2014年までの4月から10月の期間の観測データを学習させた回帰モデルを構築し、地下水位変化量に影響を及ぼす要因を検討した。さらに、回帰モデルを用いて2015年の地下水位変動をシミュレーションし、実測値との比較を行った。

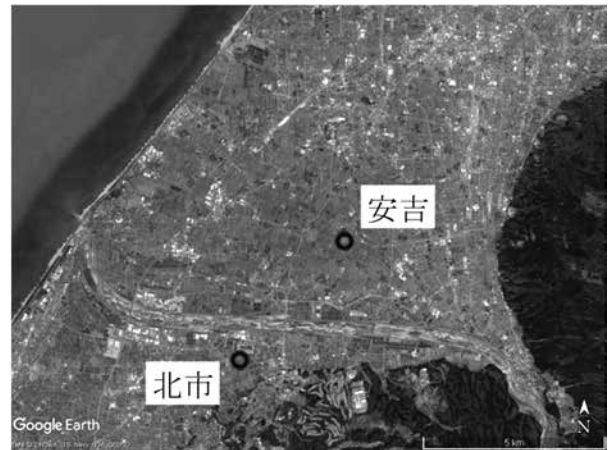


図15. 観測井戸の位置

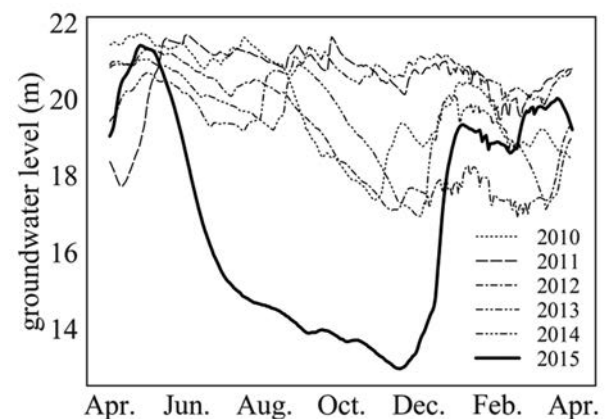
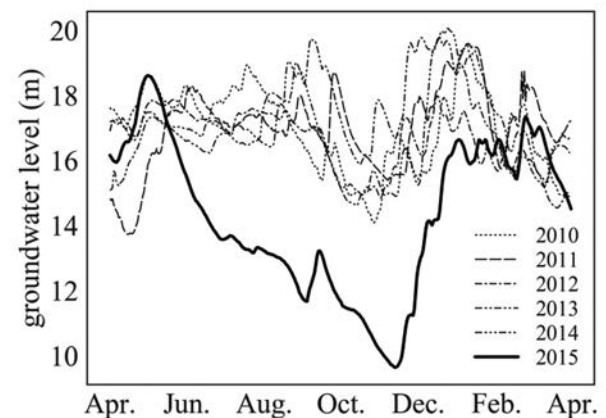


図16. 地下水位 (上: 安吉 下: 北市)

ランダムフォレストは機械学習の手法の中で教師あり学習に分類され、ランダムな複数の決定木を組み合わせるアンサンブル手法である。主にパターン認識や回帰、クラスタリングに利用され、その学習方式は計算速度が速く、外れ値やノイズに関して相対的に頑健であるとされる(杉本ら, 2007)。ランダムフォレストでは、各特徴(説明変数)がノード分割に使われた時の不純度(ジニ係数)の減少量を森全体で平均した量を用いて、各特徴の重要さ(変数重要度)を評価することができる。また、Out of Bag (OOB) と呼ばれる学習に用いられない一部の学習データを学習モデルに入力した際の決定係数(R^2 (OOB))により、未知のデータに対する回帰精度を評価することができる。

ランダムフォレストによる回帰分析に用いた説明変数は、安吉と北市の地下水位、中島と鶴来の手取川流量、白山頭首工の取水量、年が始まってからの週数、曜日、金沢で観測された降水量、気圧、気温、日照時間、積雪量の観測データである。さらに、それぞれ解析対象日より過去のデータやある期間平均したデータを用いた。

表 2. 回帰分析結果 (安吉)

	R^2	R^2 (OOB)	MSE (m^2/day^2)
2002-2014	0.905	0.707	0.0014
2015	0.006	-	0.0063

表 3. 回帰分析結果 (北市)

	R^2	R^2 (OOB)	MSE (m^2/day^2)
2002-2014	0.910	0.741	0.0004
2015	0.244	-	0.0032

(4) 結果

2002年から2014年までの4月から10月までの期間の観測データを用いて、地下水位の変動パターンを学習させ、ランダムフォレストによる回帰モデルを構築した。この回帰モデルによる水位変化量の解析結果についての決定係数(R^2 , R^2 (OOB))および平均二乗誤差(MSE)を表2、3に示す。また、算出された変数重要度は、安吉では降水量に関する説明変数が大きくなり、北市では手取川流量に関する説明変数が大きくなった。

学習させたランダムフォレストモデルに、2015年の4月から10月の観測データを入力し、地下水位変化量の回帰予測シミュレーションを行った。地下水位変化量の解析値と実測値を図17に示す。2015年の解析結果の R^2 を表2、3に示す。2015年に適用した R^2 は学習時の R^2 (OOB)と比較して低下した。

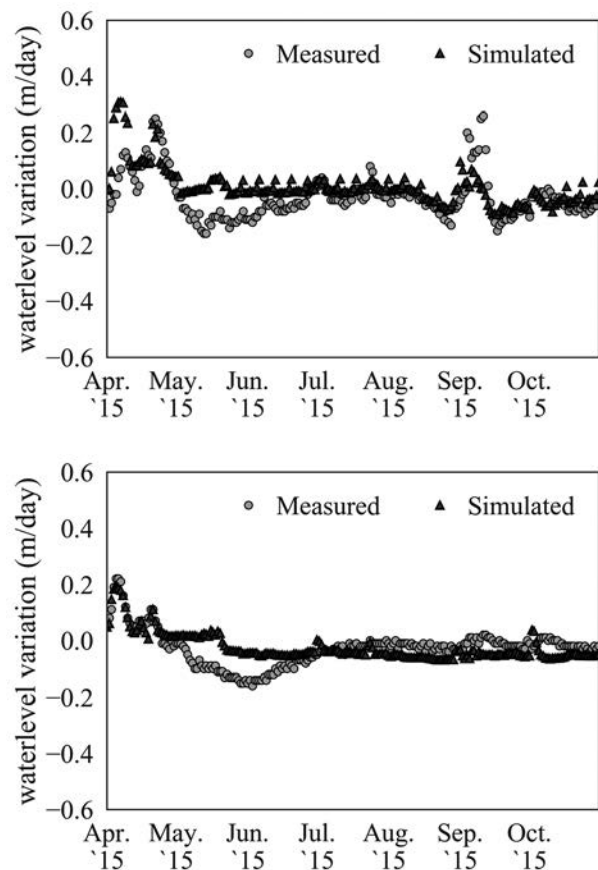


図 17 地下水位変化量の解析結果
(上: 安吉 下: 北市)

(5) 結論

2002年から2014年の観測データを学習させた回帰分析では、 R^2 が約0.9と再現性の高い結果が得られた。安吉では変数重要度が大きい項目を降水量が占めており、北市では手取川流量に関する変数重要度が大きな値となった。安吉は北市に比べ手取川から離れており、安吉では手取川よりも水田などでの降水による涵養が大きく、北市では手取川からの涵養が大きいと推測される。2015年の地下水位変動解析した結果では、地下水位変化量は5月から7月にかけて実測値は解析値より低くなり、例年と異なり地下水位が大きく低下する傾向であった。これらのことから、2015年に異常な水位変動が発生した期間は特に5月から7月であり、この期間に異常低下の原因があると考えられ、水田と手取川からの涵養量を減少させたと推測される。

3) 地下水収支モデルによる検討（高瀬恵次）

昨年度は濁水が扇状地地下水に与える影響を

検討するため、扇状地内の水循環を表現するモデルを構築し地下水位の変動を再現するとともに、扇状地の水収支構造を明らかにした。しかしながら、濁水が地下水に与える影響についてはデータが十分でなかったため、次年度の課題とされた。そこで、以下では構築されたモデルを用いて、濁水が地下水に与える影響を検討した。

(1) 水収支モデルの概要

本年度の解析に用いたモデルは昨年度報告したものと同一である。図18には手取川扇状地における水循環の概要を示す。解析に用いた水収支モデルは図に示す水循環を反映したものとなっている（柳井ら, 2016）。

(2) 計算に用いるデータとモデルの改良

モデルの入力値として用いるデータは、前報で説明したとおり、降水量、可能蒸発量、手取川およびその他の背後地からの流入量、農業用水取水量、地下水揚水量、地下水位、気温などである。

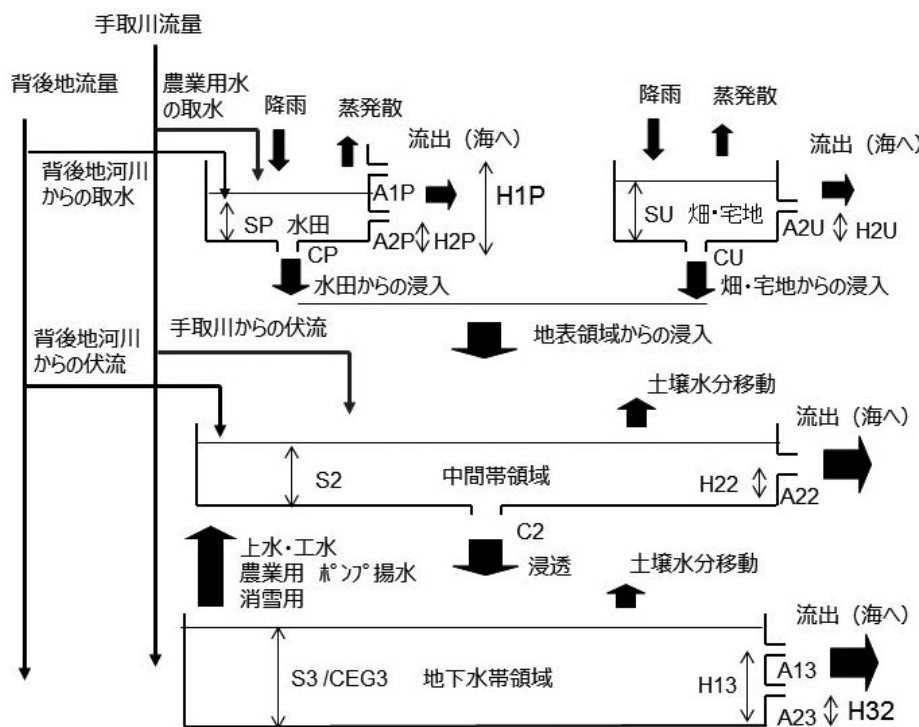


図 18. 手取川扇状地の水収支モデル

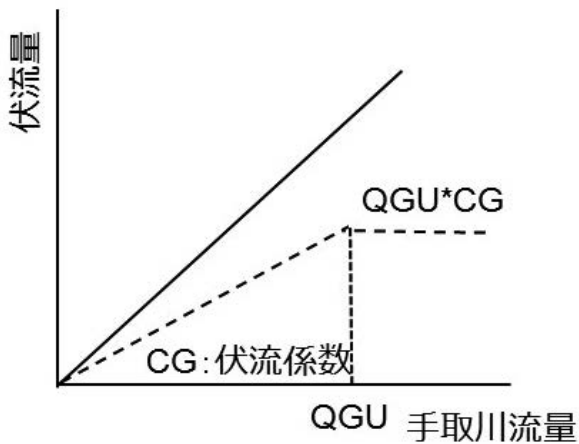


図 19. 河川からの伏流量計算

今年度の解析では、地下水揚水のうち消雪揚水の取り扱いについて改良を加え、気温がある値以下（降雪基準温度）となった場合に消雪揚水が発生するものとした。また、図 19 には手取川およびその他の扇状地内を流れる河川から中間帯領域への伏流量計算の模式図を示す。図に示すように、伏流量（GR）は河川流量（Q）がある上限値（QGU）に達するまでは比例的に増加するが（比例定数：CG）、河川流量が QGU を超えると一定になるものとした。

(3) モデルパラメータの同定

前報と同様、2006～2008 年の観測データを用い、モデルによる計算地下水位と実測地下水位の絶対誤差の総和が最小となるよう、数学的最適化法によってモデルパラメータを同定した。図 20 にはモデルによる計算地下水位と実測地下水位との比較を示す。このように両者はよく一致し、本モデルは扇状地の水循環をよく表現していると判断された。また、先にも述べたように、昨年度のモデルに改良を加えた結果、再現性は向上した。

(4) 濁水が地下水位に与える影響について

2015 年春以降の濁水が地下水位に与えた影響を検討するため、2012 年～2016 年の降水量、可能蒸発量、手取川およびその他の背後地からの流入量、農業用水取水量、地下水揚水量、地下水位、気温データを用い、同定されたモデルパラメータにより地下水位を計算した。その結果を図 21 に示す。図中の破線が手取川扇状地の水循環に係わるモデルパラメータが変化しないとして予測した結果（現況）である。この図から明らかなように、2015 年の 4 月までは予測地下水位（現況）は実測地下水位と同じような変動をしているのに対して、5 月以降は実測地下水位が急激に低下して予測値と大きく乖離している。そして 2015 年 11 月頃から上昇し予測値とほぼ同じ水位となるものの、2016 年

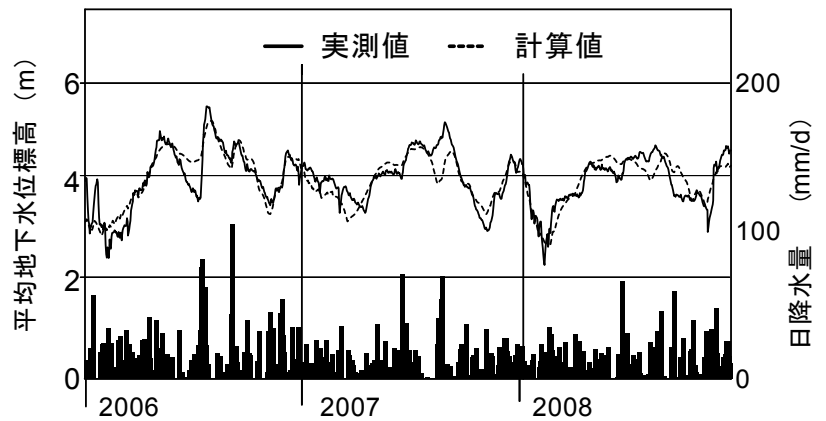


図 20. モデルによる計算地下水位と実測地下水位の比較（モデルパラメータの同定）

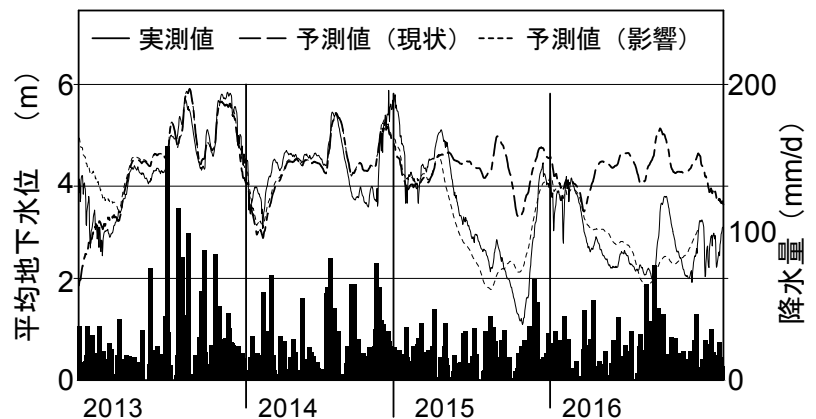


図 21 2012 年以降の地下水位予測結果

3月頃から再び急激に低下していることがわかる。このことから、2015年春からの濁水が地下水水位に何らかの影響を与えていることが推察される。

そこで、濁水によって水田の浸透量および手取川からの伏流量が低下したと仮定し、図19に示した水田タンクの浸透係数CPと図20に示した伏流係数CGを小さくすることでその影響を考察した。図21には2015年5月からCP・CG値を減じた場合の計算地下水水位（影響）の変動を示した。ただし、先にも述べたように2015年11月から2016年2月頃の間には実測地下水水位が回復したことを勘案して、この間のCP・CG値には濁水発生前の値を用いた。

図に示されるようにCP・GP値を変化させた場合の予測値は実測地下水水位とほぼ一致し、濁水が水田からの浸透量と手取川からの伏流量に影響を与えている可能性が示唆された。

5. トミヨの生息状況モニタリングと保全対策の検討（担当：環境科学科 一恩英二）

1) はじめに

2015年7月上旬より手取川扇状地の地下水水位の低下によって生じた湧水の消失および減水がそこに生息するトミヨに影響を与えている（柳井ら, 2016）。手取川扇状地では、2016年4月以降も能美市の竹藪用水（図22の粟生用水の最上流約75m区間）や白山市のやすまる銘水（図22の安産川の親水公園内）などの湧水源において、湧水の消失や減水が報告されている。本州のトミヨ属魚類は湧水の消失や減水によって生息が不可能となることから（高田, 2001）、手取川扇状地のこれらの湧水源周辺に生息するトミヨの絶滅の危険性が高まっている。このため、トミヨの生息状況モニタリングを図22に示す水域について実施した。このモニタリング結果に基づいて、石川県環境部が設置したトミヨ保全対策緊急調査事業検討会にお

いて、トミヨの緊急保全対策と中・長期的な保全対策を検討したので、ここに報告する。

2) 手取川左岸部のトミヨの生息状況モニタリング

一恩ら（2006）によれば、竹藪用水は、熊田川水系のトミヨの主たる繁殖場所と考えられている。ドジョウかご調査は、竹藪用水の下流入口部において、Nishizonoら（2013）に準拠して、5個のドジョウかごを下流方向に開口部を向けて横断方向に一直列に並べて実施した。竹藪

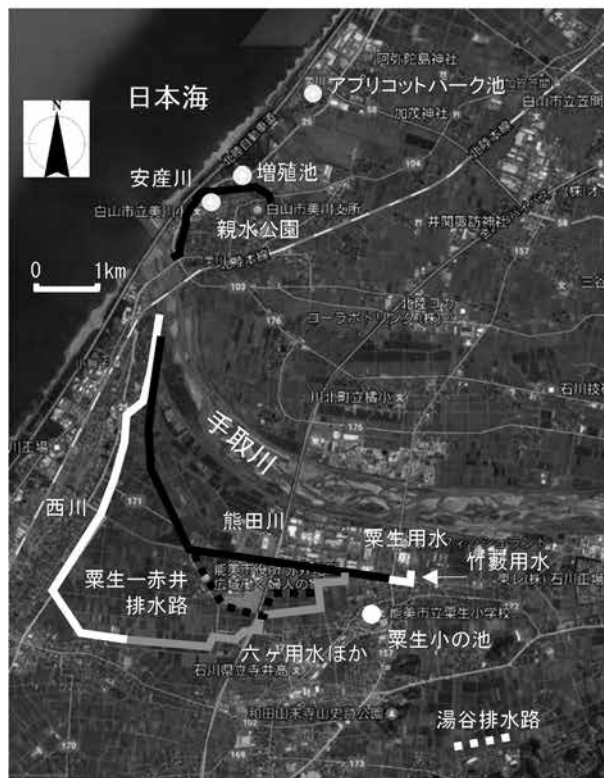
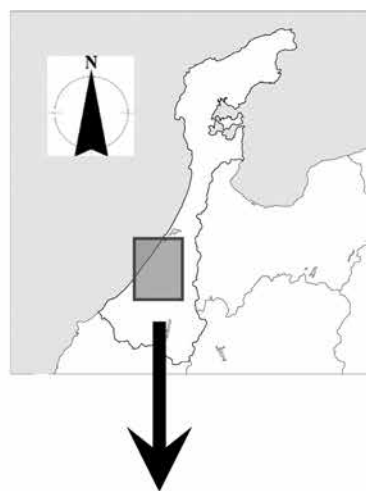


図 22. 調査位置図

用水で2016年3～7月のドジョウかご調査で採集されたトミヨの総数は17個体で、柳井ら(2016)に示した2006～2015年の採集数と合わせて、図23に示す。繁殖時期である3～7月のトミヨの採集数は249～1,153個体と比較的大きな変化を示していたが、2016年の採集数は、2006～2015年の平均採集数の556個体と比べると激減したことが分かる。

柳井ら(2016)によれば、手取川扇状地の地下水は2015年7月下旬から急激に低下し、竹藪用水においても7月下旬～12月下旬に水涸れが生じ、トミヨの生息に大きな影響を及ぼしたと推測している。この水涸れは、2004年以降、期間として最長で、その水涸れの範囲も下流の粟生用水、熊田川上流部にまで及ぶ最大の規模であったことが確認されており、このため2016年度に竹藪用水のドジョウかごで採集さ

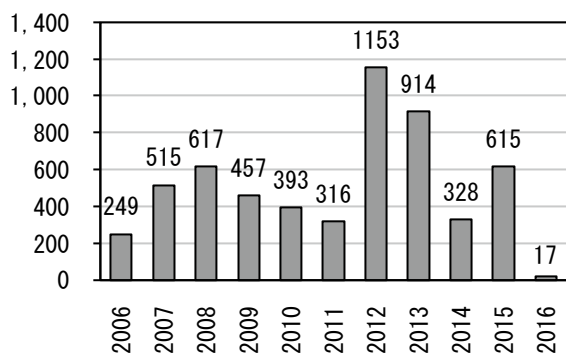


図23. 竹藪用水に設置したドジョウかごに採集されたトミヨの個体数（繁殖期間である3～7月の合計数）

表4. 熊田川・西川流域におけるトミヨの個体密度の比較

時期	区分	調査地点数	平均個体密度 (/m ²)	標準誤差
2016年8～9月	竹藪用水	2	0.00	0.00
	粟生用水	3	0.00	0.00
	熊田川上流	7	0.00	0.00
	熊田川中流	4	0.36	0.36
	熊田川下流	4	0.00	0.00
	粟生一赤井排水路	4	0.24	0.16
	六ヶ用水ほか	3	0.00	0.00
	西川	2	0.00	0.00

れるトミヨが激減したと推定される。

サデ網（三谷釣漁具店、固定式押し網 bl-S3、間口0.80m、目合い3.0mm）によるトミヨの個体密度調査を、小谷ら(2016)に準拠して実施した。調査地点は、表4に示すとおり、熊田川・西川流域に29の調査地点を設定し、1地点あたり3～5m²の採集調査を実施した。その結果、トミヨが確認されたのは、熊田川中流と粟生一赤井排水路（図22の点線部）のみで、個体密度はそれぞれ0.36個体/m²と0.24個体/m²であった。熊田川中流では4調査地点中1地点で、粟生一赤井排水路では、4調査地点中2地点でトミヨが確認された。

手取川左岸部では、八丁川流域の湯谷排水路において、サデ網によるトミヨの個体密度調査を2016年5月13日と9月5日に実施した。5月13日には、体長17～53mmのトミヨが採集され、個体密度は0.2個体/m²で、成魚、幼魚のほかに卵塊も確認し、この水路でトミヨが繁殖していることが確認された。9月5日には、30～47mmのトミヨが採集され、個体密度は1.0個体/m²となっていた。湯谷排水路は、2006年にいしかわ動物園が熊田川産のトミヨを300個体放流した記録があり、放流したトミヨが定着している可能性がある。また、地元の方への聞き取り調査から、湯谷排水路には、熊田川のトミヨを放流する前から、八丁川水系のトミヨが生息していたという説があり、その説が正しいければ熊田川と八丁川のトミヨがすでに交雑した可能性も考えられる。

手取川左岸部のトミヨの生息地の水温調査のために、8地点に水中用温度計測データロガー（Onset社テイドビット V2 および HOBO ウォーターテンププロ V2）を設置した。その計測結果を図24に示す。

トミヨの緊急避難場所の候補である、湯谷排水路と粟生小学校のトミヨ池の水温は、いずれも生息可能帯である5～25℃（平井・梅本、

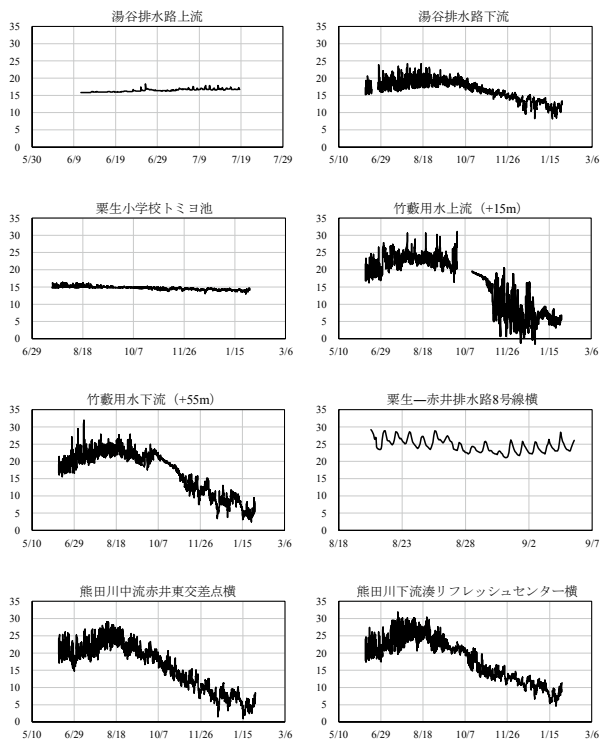


図 24. 手取川左岸部のトミヨ生息地の水温

1991) の範囲で、特に湯谷排水路上流と粟生小学校トミヨ池は適温帯である 8～20℃ (平井・梅本, 1991) の範囲であったことが調査結果から明らかになった。竹藪用水の水温は、上流地点、下流地点とも時間変動が大きかった。特に、夏季は 25℃ を超える温度を記録し、トミヨの生息可能温度帯を逸脱していた。水温データから、竹藪用水で湧水が見られたのは、2016 年 10 月のみで、竹藪用水上流の温度変化が大きい 11～12 月の期間は、水涸れのため水温ではなく気温を測定していた可能性が高いと考えられる。

トミヨの分布が確認された熊田川中流と粟生一赤井排水路の水温も、夏季に 25℃ 以上で、生息可能温度帯を逸脱していた。Nelson (1968) によれば、*Pungitius* を湖岸のいけすに入れ、24～28℃ で 1 週間おいた場合でも、ほとんどが生存しているとあり、25℃ 以上で直ちに死亡する訳ではない。しかしながら、湧水等の減少で水温が常に 25℃ になるようであれば、トミヨが姿を消していく可能性はある (平井・梅本,

1991)。また、熊田川下流の白山市湊町の夏季水温は中流より高く、トミヨの水温環境としてはより厳しくなっていた。六ヶ用水や西川流域の夏季水温も下流ほど高くなると推測され、熊田川・西川流域において、トミヨの生息可能温度帯を年間を通じて満たす生息地は消失してしまった可能性が高い。

3) 手取川右岸部のトミヨの生息状況モニタリング

安産川において、サデ網によって得られたトミヨの個体密度を表 5 に示す。初夏から秋にかけて個体密度が低下する傾向が見られた。トミヨが確認された地点数も 2015 年 11 月は 2 地点、2016 年 6 月は 5 地点、9 月は 3 地点と初夏に多くなる傾向があった。また、最も個体密度が高かったのは下流のお台場橋地点で 10 個体/m² (2016 年 6 月)、次いで親水公園バイパス側の 9 個体/m² (2016 年 6 月) で、いずれもやすまる銘水やお台場の水など、水汲み場の湧水が流下する地点であった。安産川流域のトミヨの生息地は下流部の手取川合流点～お台場橋付近と親水公園～増殖池間 (天然記念物指定区間) に大別され、時期によってその分布の範囲は変動する傾向があった。

手取川右岸部のトミヨの生息地の水温調査のために、7 地点に水中用温度計測データロガー (Onset 社テイドビット V2) を設置した。その計測結果を図 25 に示す。

安産川では、下流から順に、国交省出張所裏 (Y1)、お台場橋 (Y2)、親水公園本川側 (Y4)、ほうきじま橋 (Y5) の 4 地点で水温計測を実施した。トミヨの緊急避難場所として、手取川

表 5. 安産川流域におけるトミヨの個体密度の比較

時期	区分	地点	平均個体密度 (/m ²)	標準誤差
2015 年 11 月	安産川	6	0.33	0.23
2016 年 6 月	安産川	7	3.00	1.69
2016 年 9 月	安産川	7	0.43	0.28

右岸側では増殖池（Y7）、親水公園バイパス水路（Y4'）、アプリコットパークの池（Y8）の3地点でも水温観測を行った。

国交省出張所裏（Y1）およびお台場橋（Y2）の水温は、トミヨの生息可能温度帯をわずかに逸脱していた。上流の親水公園本川側（Y4）やほうきじま橋（Y5）の水温は、より長時間25℃を超える傾向を示した。

親水公園のバイパス水路は、やすまる銘水から流下する湧水を貯留する目的で土のうを積んで本川とバイパス水路を仕切る対策が美川自然人クラブ（地元の保護団体）によって講じられた（図26）。この仕切りによって、親水公園バイパス側（Y4'）の水温は生息可能温度帯の5～25℃に首尾良く収まっていた。親水公園バイパス水路の水温が25℃近くまで上昇したのは、8月下旬に公園のやすまる銘水で水涸れが生じたためである。美川自然人クラブは、やすまる銘水に揚水ポンプを設置することを検討している。

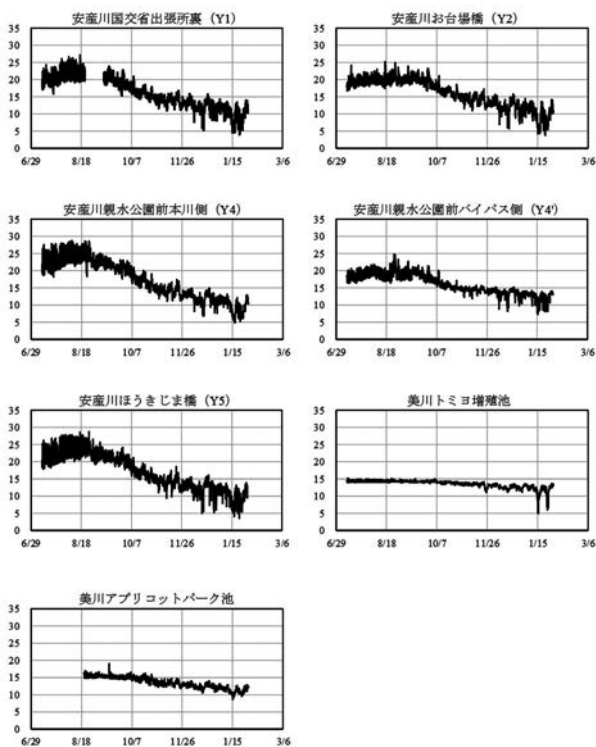


図 25. 手取川右岸部のトミヨ生息地の水温

美川の増殖池およびアプリコットパーク池は揚水ポンプを備えた池である。増殖池は常時は井戸から湧水が自噴しているが、2015年度以降、自噴が停止してポンプが稼働する時間が増えたことが、聞き取り調査から明らかになった。増殖池の水温は、トミヨの適温帯の8～20℃の範囲にほぼ入っているが、冬季に2回ほど、8℃を下回っていた。一方、アプリコットパークの池は、ポンプで常時揚水されており、水温は常時トミヨの適温帯である8～20℃の範囲に入っていた。

4) 保全対策の検討

石川県環境部自然環境課のトミヨ保全対策緊急調査事業において、2016年8月25日、10月18日、2017年2月17日の3回の検討会を能美市（午前）と白山市（午後）において開催し、トミヨの緊急保全対策と中・長期的な保全対策を検討した。検討会では、手取川左岸部の熊田川・西川流域のトミヨの危機的状況が報告され、地下水位の低下に起因する湧水の消失や減水が継続すれば、近い将来に熊田川・西川流域のトミヨは絶滅すると結論づけられた。このため、2017年は (i) 3～7月に竹藪用水でドジョウかご調査を実施、(ii) 水温が上昇する6～9月の夏季には竹藪用水から熊田川中流および粟生一



図 26. 安産川親水公園のバイパス水路側と本川側を仕切る土のう（白色矢印はやすまる銘水の流下地点）

赤井排水路において水温調査を能美市が行い、すべての測点の水温が25℃以上になった場合には、能美市が緊急連絡会議を招集し、粟生小学校の池へのトミヨの緊急避難を検討することが、検討会で合意された。

白山市の検討会では、安産川流域のトミヨの状況は、熊田川・西川流域のトミヨの個体密度や水温環境に比較すると緊急性は低く、経過観察を行うことが適切だと結論し、2017年は石川県立大学と美川自然人クラブによるトミヨの生息状況モニタリングと白山市による水温・湧水モニタリングの実施が合意された。

トミヨの個体数の激減に伴うボトルネック効果の把握や緊急避難に伴う遺伝子汚染などの問題に対処するため、石川県立大学生物資源工学研究所において手取川流域のトミヨのDNA解析を実施することが提案された。

また、中・長期的対策として、(i) 地下水保全・管理、(ii) 魚道やトミヨ保全池の設置の検討、(iii) 河川管理者・水路管理者との情報共有や協働の活発化などが必要であることなどが検討会で専門家から勧告された。

謝辞：本研究は下記の機関、個人などからデータ、試料の提供、および現地調査における協力とご指導を受けて実行されたものである。記して謝意を表する（敬称略、順不同）。

金沢河川国道事務所、近畿中国森林管理局・石川森林管理署、石川県環境部自然環境課・水環境創造課、石川県南加賀農林総合事務所、石川県石川土木総合事務所、白山市、能美市、手取川七ヶ用水土地改良区、宮竹用水土地改良区、能美市土地改良区、北陸電力（株）石川支店手取電力部土木課、株式会社国土開発センター、白山手取川ジオパーク友の会、美川自然人クラブ・ハリンコ保存会、石川県立大学 上田哲行名誉教授、皆巳幸也准教授、森 丈久准教授、瀬川 学、環境科学科4年 田口 信、向島

愛、いしかわ動物園 山本邦彦、白山自然保護センター 小谷直樹。

引用文献

- Cornet, V., Henry, J., Goux, D., Duval, E., Bernay, B., Corguillé, G. L., Corre, E. and Céline Zatylny-Gaudin. 2015. How Egg Case Proteins Can Protect Cuttlefish Offspring. PLOS ONE. 10: e0132836.
- 土木学会 . 2001. 平成 13 年度水理実験指導書 . 52-53.
- 早瀬和宏・由比政年・石田 啓 . 2009. 石川県千里浜海岸における海浜地形変化に関する基礎的研究. 日本海域研究 . 40: 37-49.
- 平井賢一・梅本浩照 . 1991. トミヨの温度選択と季節変化. 金沢大学教育学部紀要（自然科学編） . 40: 1-9.
- 細川博明・池田晴彦・鶴木啓二 . 2009. 沈砂池の土砂捕捉機能持続性に関する調査研究の意義と展開方法. 寒地土木研究所平成 20 年度技術研究発表会 . <http://thesis.ceri.go.jp/db/files/00109780001.pdf> [2017年3月15日確認]
- 一恩英二・上田哲行・北村邦彦 . 2006. 手取川水系熊田川流域の湧水環境とトミヨの保全について . 第 14 回日本雨水資源化システム学会（山口大学） : 15-18.
- 石田 啓 . 1991. 車が通れる千里浜海岸 . 土と基礎 . 39: 393-398.
- 石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦 良一 . 1984. 渚ドライブウエーを有する千里浜海岸の現況と侵食対策 . 第 31 回海岸工学講演会論文集 : 55-359.
- 株式会社ケネック . 2017. プロペラ式流速計 . <http://www.kenek-co.com/vr301.html> [2017年3月10日確認]
- 環境省自然保護局 . 2015. 自然公園における法面緑化指針解説編 . 69. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/28386.pdf> [2017年3月21日確認]

- 加藤芳朗 . 1959. 偏光顕微鏡による土壌粒子の見分け方 . ペドロジスト . 3: 59-81.
- 小林典夫 . 1977. 手取川上流域の手取層群中における炭酸塩膠結物について . 日本地質学学会大会講演要旨 . 87: 157.
- 小久保鉄也・上坂 薫・大木雄二 . 2004. 発電用導水路に混入した土砂の効率的分離・排出法に関する実験的研究 . 水工論文集 . 48: 1141-1146.
- 小谷直樹・一恩英二・長野峻介・泉 智揮・上田哲行 . 2016. 石川県於古川流域におけるトミヨ属淡水型の HSI モデルの構築 . Journal of Rainwater Catchment Systems. 21 (2) : 47-53.
- Lei, S., Zhang, X-M., Zhang, P-D. and Ikeda, Y. 2014. Biochemical composition of cuttlefish (*Sepia esculenta*) eggs during embryonic development. Molluscan Research. 34: 1-9.
- 松下一樹・天田高白・宮本邦明・眞板秀二・大坪輝夫 . 2002. 大井川水系東河内沢沿いの段丘上の植生群落分布 . 筑大演報 . 18 : 57-74.
- 丸山利輔・能登史和・吉田 匠・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.
- 中坊徹次 . 2013. トゲウオ科 . 日本産魚類検索全種の同定 . 第三版 . 東海大学出版会 : 606-607.
- 仲村渠将・吉永安俊・酒井一人 . 2012. 沈砂池の浮遊除去率の設計値と実測値の比較 . 日本雨水資源化システム学会誌 . 17 (2) : 57-62.
- 中西麻綾・百瀬年彦 . 2016. 土壌物理の視点から見たイカリモンハンミョウの生息環境 . The IPU Seminar on the Environment, Ishikawa Prefectural University: 50-55.
- Nelson J. S. 1968. Deep-water ninespine sticklebacks, *Pungitius pungitius*, in the Mississippi drainage, Crooked Lake, Indiana. Copeia 1968 (2) : 326-334.
- 西川 一 . 1988. 砂防学会誌 . 40 (6) : 33-35.
- Nishizono Y, Ichion E, Uéda T, Kitamura K, and Yamabuki H. 2013. Evaluation of Canal Rehabilitation Works Executed with Attention to a Habitat of the Freshwater Type of Nine-spined Stickleback. Proceedings of the 21st Annual Congress of Japan Rainwater Catchment Systems Association (Matsue) : 49-54.
- 小笠原新治・山田 正 . 2003. 山地に設置された沈砂池の濁度軽減効果に関する研究 . 第 30 回関東支部技術研究発表会講演概要集 : II -21.
- 岡村俊邦・吉井厚志・福間博史 . 1996. 生態学的混播法による自然林再生法の開発 . 土木学会論文集 . 546: 87-99.
- 杉本知之・下川敏雄・後藤昌司 (2007) : 樹木構造接近法と最近の発展 . 計算機統計学 . 18 (2) : 123-164
- 高田啓介 . 2001. トミヨ属 . 改訂版 山溪カラー名鑑 . 日本の淡水魚 . 山と溪谷社 : 442.
- 志村博康・前川勝朗 . 1969. 通水と排砂を同時に実現する沈砂池の理論設計 . 農業土木学会論文集 . 30: 62-68.
- 高村幸治 . 2016. 手取川濁水に関する対応について . JAGREE. 91: 9
- 土原健雄・吉本周平・石田 聡・今泉 眞 . 2011. 水質及び同位体分布特性からみた水田主体扇状地における地下水涵養源の分類 . 農工研技報 . 211: 21-34.
- Vander Zanden M. J. and Rasmussen J. B. 2001. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies. Limnol Oceanogr. 46: 2061-2066.
- Watanabe, N. and Kawamura, G. (1999) A Review of cuttlefish basket trap fishery. South Pacific Study. 19: 31-48.
- 山崎奈津実 . 2013. ホタルイカ及び動物プランクトンの炭素・窒素安定同位体比による日本海食物網解析 , 日本海学研究グループ思念

事業報告書（平成 24 年度）. 1-4. 富山大学 .
山本孝治（1942）カフイカ *Sepia esculenta* 卵の
発生, 植物及動物 . 10: 125-130.
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.