

陸水物理学会報

—第42回研究発表会（2021 名古屋大会）講演要旨—

主催：陸水物理学会

共催：日本陸水学会東海支部会

期日：2021年11月20日（土）～11月21日（日）

11月20日（土）研究発表会・総会

11月21日（日）研究発表会

会場：南山大学

〒466-8673 愛知県名古屋市昭和区山里町18

Tel: 052-832-3111（代表）

11月20日（土）

9:55 開会の挨拶 大八木 英夫（南山大学）

*発表時間は、10分は発表8分・質疑2分（⑩）、15分は発表12分・質疑3分（⑮）、20分は発表17分・質疑3分（⑳）です。

*発表時間は、新型コロナウイルス感染症対策により、発表の交代時間などで時間が前後する可能性があります（休憩・準備の時間で調整されます）。

<Session 1：対面形式> 10:00-10:35

- 10:00 1) [阿武隈川流域の河川水質と流域特性](#)
*山形えり奈（法政大・院），小寺浩二（法政大）⑩
- 10:10 2) [多摩川水系浅川の水質と流域特性](#)
*小田理人（法政大・学），小寺浩二（法政大）⑩
- 10:20 3) [濃尾平野西縁の近代以降の堆積環境](#)
*田代喬（名古屋大），陀安一郎（総合地球環境学研究所）⑮

===休憩と準備（20分）===

<Session 2：オンライン形式> 10:55-11:45

- 10:55 4) [密度成層場における気泡噴流に関する長さスケール](#)
*古里栄一（鹿児島大）⑮
- 11:10 5) [地質条件が異なる積雪寒冷地の小流域における流出・水温の再現](#)
*鈴木啓明（室蘭工業大），中津川誠（室蘭工業大），石山信雄（道総研）⑮
- 11:25 6) [青森県・青池の呈色に関する研究：輝度に基づく定式化と画像解析](#)
*花石竜治（青森県環境保健センター），知北和久（北海道大）⑳

=== 11:45-13:30 昼休み（105分） ===

<Session 3：対面形式> 13:30-15:55

- 13:30 7) [活火山火口湖における水・化学物質・熱収支評価による地下熱水系の推定：蔵王・御釜について](#)
*知北和久（北海道大），後藤章夫（東北大），岡田純（気象研），三浦哲（東北大），山本希美（東北大），山口高志（道総研）⑳
- 13:50 8) [扇状地における長期地中温度変化の分析](#)
*阪田義隆（金沢大），小泉高志（日本工営），明山雄真（北海道大）⑮

- 14:05 9) 北海道・然別湖における水温・水質の特徴について
*大八木英夫(南山大), 澤田結基(福山市立大), 金森晶作(とちぎ鹿追ジオパーク) ⑮
- 14:20 10) 陸水物理の何が伝わらないか —琵琶湖博物館での実践から—
*戸田孝(滋賀県立琵琶湖博物館) ⑳

===休憩と準備(20分)===

- 15:00 11) センシングと窒素動態モデルを基盤としたハイブリッド型土壌診断の可能性
*濱 侃(千葉大), 松橋寛太(千葉大), 松本祐太郎(千葉大), 松岡延浩(千葉大) ⑮
- 15:15 12) 多摩丘陵におけるスギ林内雨中のNO₃⁻沈着量の季節変動
*苗村晶彦(戸板女子短大) ⑩
- 15:25 13) 狭山丘陵周辺河川上流域の水質の変化とその要因について
*乙幡正喜(法政大・院), 小寺浩二(法政大) ⑩
- 15:35 14) 日本全国の河川水質とその変動に関する研究
—「身近な水環境の全国一斉調査」2020年・2021年の結果を中心に—
*小寺浩二(法政大), 猪狩彬寛(法政大・院), 齋藤圭(京都大) ⑳

<総会> 16:15-17:00

11月21日(日)

<Session 4: 対面形式> 10:00-11:00

—日本陸水学会東海支部会 特別セッション—

- 10:00 15) 御嶽山南麓河川の水質分布と季節変化について
*松本嘉孝(豊田高専), 宇佐見亜希子(名古屋大), 野崎健太郎(相山女学園大),
田代喬(名古屋大), 江端一徳(豊田高専), 谷口智雅(三重大) ⑮
- 10:15 16) 火山山麓地域における発電用ダムの河川取水と河川流量
*谷口智雅(三重大), 宇佐見亜希子(名古屋大), 松本嘉孝(豊田高専),
江端一徳(豊田高専) ⑮
- 10:30 17) 火山山麓のダム減水区間における湧水と付随ガスによる水環境の特性
*宇佐見亜希子(名古屋大), 田代喬(名古屋大), 松本嘉孝(豊田高専),
江端一徳(豊田高専), 谷口智雅(三重大), 坪井秀樹(東海技術センター),
青山晃太(愛工大), 八木明彦(愛工大), 岩月栄治(愛工大) ⑮
- 10:45 18) 火山性無機酸性湧水における糸状緑藻 *Klebsormidium flaccidum* の繁茂と
溶存無機態炭素濃度との関係
*野崎健太郎(相山女学園大), 松本嘉孝(豊田高専), 谷口智雅(三重大),
宇佐見亜希子(名古屋大), 田代喬(名古屋大) ⑮

<研究交流会>

注) 進行を円滑にするため, 発表者は予め備付けPCにppt ファイルをインストールして
ください(ファイルは, 研究会終了後に責任をもって削除します)。

1. はじめに

阿武隈川は、福島県、宮城県を流下する、幹川流路長約 239 km (全国第 6 位)、流域面積約 5,400 km² (同 11 位) の一級河川である。当流域について、河川水質と流域特性を明らかにする目的で、調査結果の解析と考察を行った結果を報告する。

2. 対象地域の概要と方法

2019年10月から2020年9月に、支流は月1回、本流は数か月おきに現地調査を行った。調査地点は本流支流を合わせ計 61 地点 (一部欠測含む) であり、現地では気温、水温、比色 pH、比色 RpH、電気伝導度 (EC) を測定し、採水を行った。また、2019年10月に採水した河川水については、主要溶存成分の分析を行った。

3. 結果と考察

調査結果より、阿武隈川流域全体の水質の傾向が分かった。本流の EC は、103~230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の間で推移したが、特に、上流部の田町大橋上流 400 m の地点から滑津橋にかけて、大きく増加している。これは、その地点間に散在する農業集落排水処理施設からの処理水が本流に流れ込んだ影響と白河市内を流れる支流谷津田川からの負荷が原因と考えられる。

一方、支流において、EC の値が高い主な河川は、逢瀬川 (中央値 375 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 変動係数 40.3%), 東根川 (同 259 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 50.9%) であった (図 1)。両河川とも、変動係数が大きく、最大値が四分位範囲から大きく外れていることや、シェティフダイアグラムが Na-Cl 型を呈したことから、工場等の排水による人為的な点源汚染の存在が推察され、水質汚濁が認められた。EC の値が低い主な支流は、摺上川 (中央値 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 変動係数 10.1%), 内川 (同 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 13.8%) であった。国土交通省の平成 26 年度土地利用細分メッシュおよび流域界・非集水域データを基に、各支流の流域における土地利用割合を求めたところ、摺上川流域では、森林の割合が 90.6%, 内川流域のそれでは 79.7% であった。これにより、森林の割合が大きい流域は、河川水の EC の値が低いことが示唆され、土地利用と水質との関連が示された。

また、支流の水質は、左岸と右岸で大きく異なり、左岸の支流では、右岸の支流に比べ、含有するイオン成分が多様であった。左岸には火山があり、火山地域を水源に持つ荒川、松川で硫酸イオン濃度が高かった。一方、右岸には火山はなく、右岸の支流の多くは Ca-HCO₃ 型で、大きな違いは見られなかった。左岸は、標高 1,975 m の東吾妻山など奥羽山脈に水源を有する河川がある一方、右

*山形えり奈(法政大・院), 小寺浩二(法政大・地理)

岸の多くの支流は、標高 800 m 程度の阿武隈高地に水源を有する。地形、地質、土地利用など、水質に強い影響を与えると思われる複数の要因が、右岸の水質と左岸の水質に差異を生じさせると考えられる。

4. おわりに

今回、阿武隈川流域の河川水質について、汚濁の認められる河川 (東根川、逢瀬川)、EC の低い河川 (摺上川、内川)、火山性の河川 (荒川、松川) の存在を明らかにし、流域特性との関連を明らかにした (図 2)。今後各イオン成分や他の項目間の関係性を究明し、流域の水質形成要因を明らかにしていく必要がある。

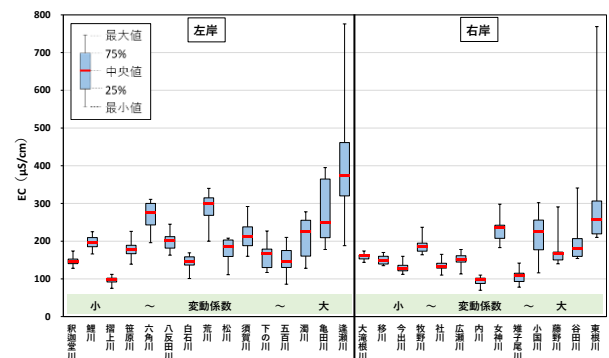


図 1 支流の EC の変動

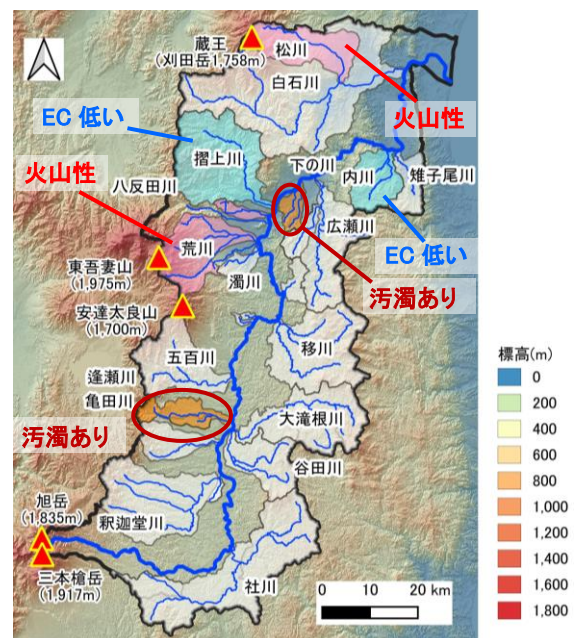


図 2 阿武隈川流域の河川水質まとめ

参考文献

中山 祐介ほか (2008) :阿武隈川上流域および釈迦堂川流域の水環境保全・再生に関する地理学的研究 (4), 日本地理学会発表要旨集, 2008s, 145.

*小田理人（法政大・学），小寺浩二（法政大・地理）

1. はじめに

多摩川水系の浅川では、生活排水による水質悪化が問題視され、様々な研究が行われてきた。しかし、研究の多くは最大の支流である南浅川についての研究であり、浅川水系全体を包括的に研究した例はほとんどない。本研究では現地調査とその結果を多変量解析の手法を用いて分析し浅川水系全体の水質特性を明らかにすることを目的とする。

2. 対象地域の概要と方法

浅川は本流延長 30.1km、流域面積 156.1 km²の多摩川水系の一級河川である。水源は東京都八王子市の山中にあり、八王子市内を流下したのち日野市で多摩川と合流する。南浅川、川口川、湯殿川、城山川、山田川などの支流を持つ。今までの研究成果を検討したうえで 2020 年 5 月 3 日より現地調査を開始し、34 地点において月一回の継続観測を行っている。現地における測定項目は気温、水温、電気伝導度、pH、RpH、COD、流量である。サンプリングした河川水は研究室へ持ち込み、TOC 及びイオンクロマトグラフィを用いた主要溶存成分の分析を行った。得られた水質データをもとに、Python により多変量解析（クラスター分析、主成分分析）を行い、各地点の水質について考察した。

3. 結果と討論

浅川本流の EC は、上流部では平均 80~90 μ S/cm 程度である。各支流の合流に伴い値は上昇し、最下流部の新井橋の平均は 195 μ S/cm である。変動係数は上流では小さく、下流域や支流で大きい。

pH は本流上流では 7.4 程度で下流に行くにしたがい値が上昇する傾向にある。

クラスター分析では本流の下流部の地点と南浅川の上流部の地点が同一のクラスターに分類されている例などが見られ、EC 値が大きくことなっているも、亜硝酸塩や硝酸塩の濃度が似通っている地点が多く存在することが明らかとなった。主成分分析では、第一主成分が 48.9%の寄与率を示した。南浅川の支流の地点ではカルシウムイオン濃度の高さから第一主成分と共に第二主成分の影響も大きい。

4. 考察

浅川流域では都市域と山間部では違った水質を示しており、EC や TOC 値の分布状況にも違いが見られ、水源地の状況や、周辺環境、地質等が関係しているとみられる。季節ごとの水質変化は降水量や地下水の有無等が地点ごとの変動に影響を与えている。今後は今までのデータをさらに解析し、各地点の水質指標の変動特性等を明らかにする必要がある。

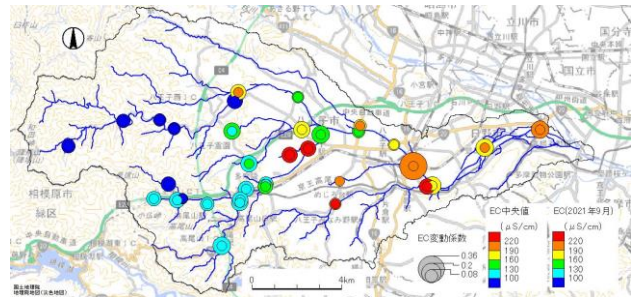


図 1. EC の空間分布 (2020 年 6 月～2021 年 9 月)

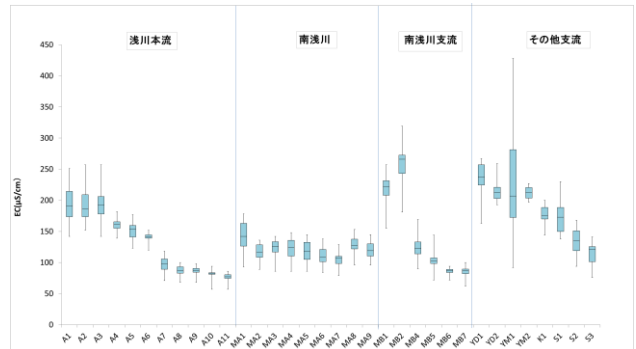


図 2. EC の変動 (2020 年 6 月～2021 年 9 月)

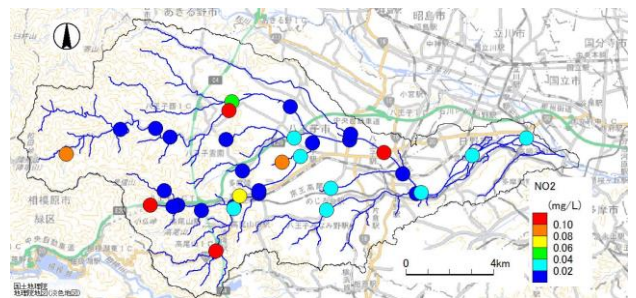


図 3. NO2 の空間分布 (2021 年 9 月)

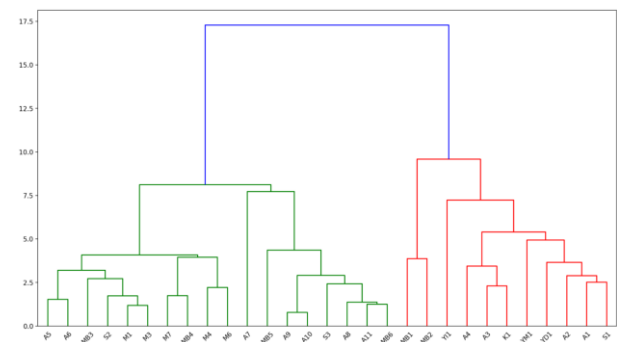


図 4. クラスター分析結果 (ward 法, 2021 年 9 月)

参考文献

小田理人,小寺浩二(2021): 多摩川水系浅川の水質に関する水文地理学的研究(3), 日本地理学会発表要旨集 2021a(0), 79, 2021

*田代 喬 (名古屋大・減災セ), 陀安一郎 (総合地球環境学研究所)

1. はじめに

濃尾平野の基盤には濃尾傾動地塊運動に伴って生じた東高西低の沈降盆地があり、西縁の養老—伊勢湾断層によって養老山地を分化させている。木曾・長良・揖斐の木曾三川が運搬・堆積する土砂が広く氾濫平野を形成してきた一方で、西縁地域には急峻な養老山地東麓に小規模な土石流扇状地が多数分布し、豊富な地下水を伴う特異的な堆積環境を呈する。

当該地域における長期的な堆積過程は、地震に伴う崩壊や土石流などの大規模地盤変状について、ボーリング試料を用いて分析されてきた(須貝, 地理学会, 2012; 堀ほか, 地理学会, 2020)。本研究では、近代以降の濃尾平野西縁地域における堆積環境に着目し、存続する水域の水底堆積物を分析することにより、洪水氾濫や河川/砂防整備, 土地改変などの人為的影響を明らかにすることを目的とする。

2. 対象地域の概要と方法

揖斐川の右支川である津屋川は、濃尾平野の西縁に位置し、「養老の滝」(岐阜県養老郡養老町)を水源に養老山地東麓の小規模扇状地群の末端を縫うように流れる。現在の幹線流路は、左岸(東)の連続堤防とともに1656年に人為的に整備された(養老町教育委員会: 郷土の治水, 1991)。

津屋川周辺地域では、養老山地からの山水や揖斐川からの逆流による水害が常襲的であったため、治水・用水・排水や砂防を目的とする整備・改修が行われてきた(岐阜県: 津屋川圏域河川整備計画, 2001; 木村・安江: 岐阜大農研報 43: 65-73, 1980; 養老町教育委員会: 郷土の治水, 1991)。そこで本研究では、上記を含む文献(養老町, 養老町の大水害, 1962; 岐阜県, 昭和 34・35・36 年連年災害復興誌, 1965; 南濃町, 南濃町通史編, 1982: 建設省中部地方整備局, 木曾三川治水百年のあゆみ, 1995)から、近代以降の津屋川における水害/改修履歴を抽出・整理した。

堆積環境の推定には、「湖沼近過去調査法」(占部編, 2014)の年代決定法を採用した。はじめに、年代の異なる旧版地図(国土地理院, 1891~2015年測量)を参照し、津屋川水系で存続する水域から、中流部で本川と繋がった池(1カ所)を調査地として抽出した。本川からの距離が異なる2地点にて、柱状採泥器(佐竹式コアサンプラー, 離合社)により50cm長の底泥コアを採取し、それぞれ14mm層厚に切り分けた。各層の試料は、湿潤密度, 乾燥かさ密度を計測し、密閉容器に1ヶ月封入した後、 γ 線スペクトロメーター(SEIKO EG&G MCA7700)により分析した。近過去堆積物の年代推定には底泥に含まれる放射性核種の含有量とその壊変特性を用

いるが、ここではセシウム(Cs)-137と鉛(Pb)-210(半減期22.3年)による年代測定法を採用した(占部: 湖沼近過去調査法, 2014)。Cs-137は、大規模核実験(1963年), チェルノブイリ原発事故(1986年), (主に日本海沿岸域への)黄砂を通じた大気経路輸送(2002年)などを反映して比放射能がピークを示すため、底泥中の分布により各時点の深度を特定できる(例えば, Fujiwara: *Bull. Natl. Inst. Agro-Environ. Sci.*, 85-115, 2011)。一方、大気中や底泥中で常に供給されるPb-210については、水底に取り込まれた(大気と隔離された)後で壊変される大気由来の過剰Pb-210の鉛直分布から堆積過程を推定できる。

3. 結果と考察

採取した底泥内の過剰Pb-210の鉛直分布に、堆積速度を一定とするCIC(constant initial concentration)モデルとこの仮定を要しないCRS(constant rate of supply)モデルを適用したところ、CRSモデルの結果はCs-137比放射能が示すタイムマーカーを再現した。

堆積速度は本川に近いほど大きく(重量堆積速度の平均値は, St. 1/St. 2: 0.49/0.29 g cm⁻² yr⁻¹), 年代による変異は大きい。湖沼で最大級の諏訪湖(金井ほか: 地質調査所月報 46: 225-238, 1995)と同程度であった。なお、重量堆積速度で見られる各年代のピークは、過去の水害履歴に対応しておりを反映したが、相対的に大きな1980~90年代の極大値に対応する大水害は特定できなかった(図1)。現地河川での継続的調査によると(森: プロ・ナトゥーラ・ファンダ成果報告, 1992), 生息環境の変質が顕在化した年代と整合していることから、各種の整備・改修による影響が示唆される。

以上より、これまで閉鎖性水域における近過去の堆積環境を対象に適用されてきた古典的なPb-210法(CRSモデル)であるが、河川の堆積環境も説明できる可能性が示された。

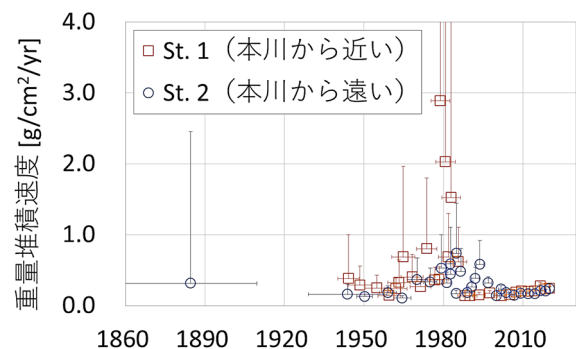


図1 CRSモデルにより推定された堆積速度の経年変化

古里栄一（鹿児島大学）

1. はじめに

貯水池や湖沼における水質問題の解決方法の一つとして、気泡噴流を活用した湖水循環、すなわち気泡循環（いわゆる「曝気循環」）対策がある。気泡噴流に関しては、古くから均質場だけでなく密度成層条件における様々な研究が存在する。本対策は、複数の圧縮空気吐出装置を水中に配置した方が循環効率が向上する性質がある。一方で、それぞれが近すぎると相互干渉が発生して効率が低下することから、水面における気泡噴流のサイズの評価が重要である。このことから、水面における高い密度が原因で生じる沈下までの距離(R : 図-1)の評価が重要となる。

本研究は、気泡噴流の水面サイズの評価に資することを念頭に置き、乱流に関する長さスケールの一つとして、自由噴流の一つである気泡噴流に関して、密度成層場で生じた場合の長さスケールについて検討するものである。

2. 気泡噴流を含む乱流に関する長さスケール

表-1 および図-2 に気泡噴流を含めた乱流に関する長さスケールを示す(Imboden and Wuest 1995). 気泡噴流の長さスケール L_{BP} は、いくつかの先行研究ではオズミドフ長さ (L_0) として用いられていたが、表-1 からわかるとおり L_0 ではない。 L_{BP} は気泡噴流に関して噴流上昇高さ(図-1 における h_p) として扱われている(Socolofsky and Adams 2005)。これらの長さスケールは、大別すると水へのエネルギー供給要素と、エネルギー消散逸散のカスケードの結果としての消失要素に分けられる。 L_i や L_0 、 L_{BP} は最大で数 m を超える。供給されたエネルギーは L_k や L_b を最小サイズとして乱流運動エネルギーから熱エネルギーへと消失する。長さスケールの多くは粘性消失率 ϵ の値に依存する。自然界で最も大きい ϵ レベルでは L_k や L_b は 1mm 以下のオーダーとなる(図 3)。

近年著者は、密度成層場における気泡噴流の水面半径(図 1, R) に関して、 L_{BP} の整数倍は気泡吐出水深(H) と R との和に相当することを明らかにした。これは気泡浮力は気泡噴流のドーム高さ(h_p) としてまずは発現し、もし水面までドーム高さが達する場合、向きを水平方向に変えたのち、 L_{BP} に相当する距離までは、たとえこの流れの密度が周囲表層水よりも大きくても進行し、その後ある条件で沈下すると解釈できる。こうした概念に基づき多くのデータから L_{BP} と $H+R$ の関係について整理した結果を図 4 示す。なお用いたデータは小規模な室内実験から現地における大規模な実験結果を含んでいる。図より明らかのように、 $H+R$ の値は L_{BP} の 4 倍とみなして

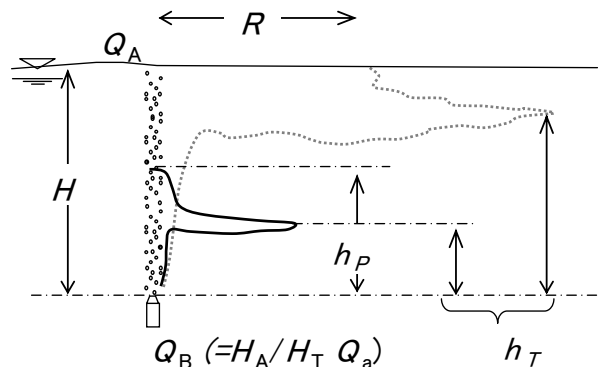


図 1 水温成層条件で生じる気泡噴流の形態 (記号は本文参照)

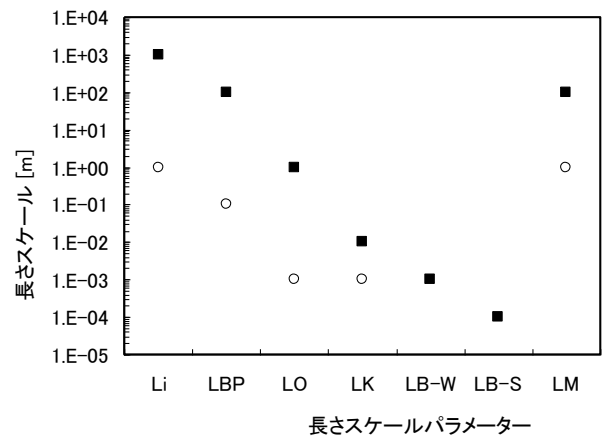


図 2 複数の乱流長さスケールのオーダーの比較 (■ : 最大値, □ : 最小値)

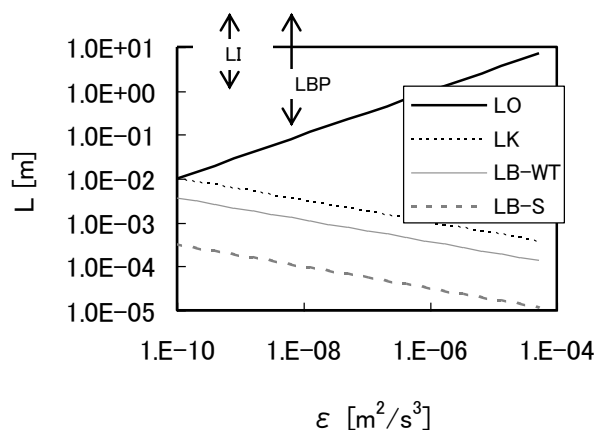


図 3 複数の乱流長さスケールの乱流逸散率 (ϵ_t) との関係

よい。このことにより従前研究では存在しなかった、 h_p と R を統一的に扱う事が可能となった。なお、この知見は気泡浮力が周囲成層に対して弱いことから、気泡噴流が水面に到達しない条件である、 h_p が H

表 1 乱流に関する長さスケール (Imboden and Wuest 1995 を改変)

長さスケール	定義	一般値	備考
Energy-containing	L_i	1 ~ 10 ³ m	システムに供給されるエネルギーの長さスケール 例: セイシュに関する水域の長さスケール, および表層混合に関する混合水深
Ozmidov	$L_o = (\varepsilon/N^3)^{1/2}$	10 ² ~ 1m	浮力と慣性力の等しくなる長さであり, 渦の最大鉛直スケールに相当する。更に大きい渦は浮力により制限される
Bubble Plume	$L_{BP} = (Q_B g/N^3)^{1/4}$	10 ¹ ~ 10 ² m	気泡浮力と水温成層との比の長さスケールであり, 高密度水の上昇高さに相当する。なお L_{BP} が十分大きい場合は, 水面における気泡噴流の水平放射流の長さにも影響する。
Thorpe変位	Δ_T	-	水温鉛直微細分布における, スムースかつ安定な密度的な平衡位置からの水塊の絶対鉛直変位の絶対値
Thorpe	$L_T = (\overline{\Delta_T^2})^{1/2}$	-	水中における Δ_T のRMS(2乗平方根) (Overturning渦の鉛直サイズの統計値)
Kolmogorov	$L_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$	10 ⁻³ ~ 10 ⁻² m	粘性力と慣性力の等しい条件: 乱流エネルギーと消散スペクトルの最小値 (例: 流速勾配による渦消散時の渦の最少スケール)
Batchelor	$L_B = (\nu D^2/\varepsilon)^{1/4}$	~10 ⁻⁴ (salt) ~10 ⁻³ (temperature)	正のスカラー値における粘性詳細スペクトルの最小値 (水温, 塩分等)、スカラーのばらつき (勾配)は最小値で消失する
Monin-Obukhov	$L_M = -\frac{u_*^3}{kJ_b^o}$	1~10 ³ m	剪断と浮力フラックスによる乱流エネルギー生産が等しい深さ (高さ)

ν : 動粘性係数, $1 \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$; ε , TKE の粘性散逸率, $10^{-10} \sim 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ (W kg^{-1}) (Barton *et al.* 2014); N , 浮力周波数, 10^{-3} to 10^{-1}s^{-1} , (深層では 10^{-4} まで減少), D , スカラー量 (水温, 塩分等) の分子拡散係数 (塩分: $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, 水温は $1.4 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$; u_* , 摩擦速度 (m/s), k ; カルマン定数 (=0.4), J_b : 水面の浮力フラックス ($= \alpha g H_{\text{net}} / (c_p \rho)$), α : 水の膨張係数, g : 重力加速度, H_{net} : 熱フラックス (W/m^2), c_p , 水の比熱 (4180J/(kg K)), ρ : 水の比重 (kg/m^3)

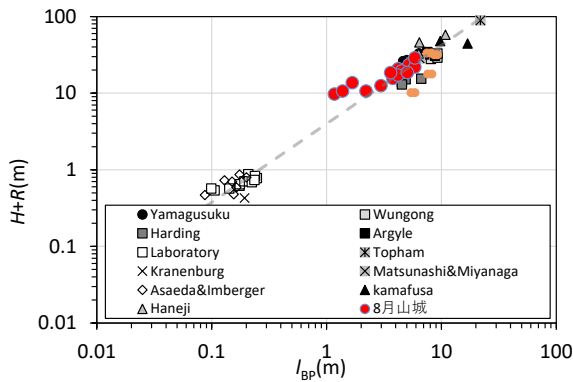


図 4 L_{BP} と $H+R$ の関係

より小さい条件でも適用である。そうした状況では R は存在しないために $h_b = 4 L_{BP}$ となる。これはそうした条件における先行研究と (Socolofsky and Adams 2005) 一致する。

参考文献

- 1) Imboden, D. M., and A. Wuest (1995), Mixing mechanisms in lakes, in Physics and Chemistry of Lakes, edited by A. Lerman, D. Imboden, and J. Gat, pp. 83- 138, Springer-Verlag, New York.
- 2) S. A. Socolofsky and E. Eric Adams (2005) Role of slip velocity in the behavior of stratified multiphase plumes, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131,
- 3) A. D. Barton, B. A. Ward, R. G. Williams and M. J. Follows (2014) Limnology and Oceanography: Fluids and Environments, 4 34-49

- 4) Kolmogorov AN, 1941, The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, Dokl Akad Nauk USSR 3-: 299-303
- 5) R. V. Ozmidov (1965) On the turbulent exchange in a stably stratified ocean, Izv., Acad. Sci., USSR, Atmos. Oceanic Phys. 1, 853-860.
- 6) Batchelor, G. K. (1950) The application of the similarity theory of turbulence to atmospheric diffusion, QJR Meteorol Soc, 76, 133-146.
- 7) Batchelor GK, (1959) Small-scale variation of convected quantities like temperature in turbulent fluid, JFM, 5: 113-139.
- 8) S. A. Thorpe (1977) Turbulence and mixing in a scottish loch, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A 286, 125-181.
- 9) A.S. Monin and A.M. Obukhov (1954) Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, Originally published in Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst. 24(151):163-187,

*鈴木 啓明(室工大・工, 道総研), 中津川 誠(室工大・工), 石山 信雄(道総研)

1. はじめに

積雪寒冷地の河川では気候変動に伴い、河川流量や水温が変化し、水域生態系への影響が懸念される。影響の程度は地域特性に応じて異なり、地質の違いは重要な要素の一つと考えられる。そこで本研究では、気候変動影響評価を見据え、水文モデルを用いて、地質の違いに応じた流出・水温再現を行った。

2. 対象地域

北海道の石狩川水系空知川上流域にある4つの小流域である。2つの流域には第四紀更新世の火砕流堆積物が分布する一方、他の2流域は中生代の日高層群及び変成岩類が分布する(図1)。

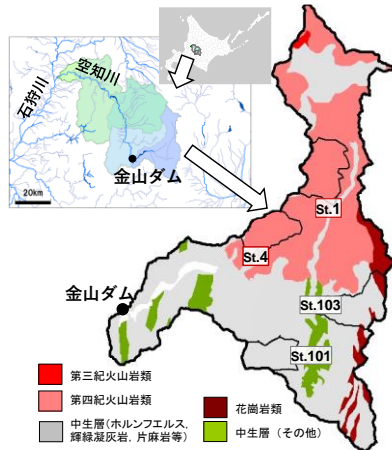


図1. 対象小流域 (St.1,4,101,103)

3. 解析方法

2018年3月から2019年9月に、4つの小流域で水位と水温を水位・水温ロガーにより測定した。現地での流量観測・測量から求めた Manning の粗度係数を Manning の平均流速公式に適用して日平均水位を流量に変換した。これらの河川流量及び水温を、後述するモデルで計算した値の再現性検証に用いた。

植生地における熱収支をモデル化した2層モデル(近藤, 1994)に積雪・融雪過程を加味した大気陸面過程モデル LoHAS (白谷ら, 2005)により、気象データから1kmメッシュ単位で日別の降雨量、融雪量及び蒸発散量を計算した。気象データは、1kmメッシュ毎に構成された降水量、気温等の情報を使用した。計算に必要な LAI, バルク輸送係数, 蒸発効率, 受光係数比, 降雪密度, 積雪密度は白谷ら(2005)他の既存研究に基づき設定した。

計算した降雨量と融雪量の和から蒸発散量を引いた値を有効降水量とし、菅原(1972)の直列4段タンクモデルを用いて1kmメッシュ単位で各段からの流出量を計算して合計し、kinematic wave式によって河道追跡し、河川流量を計算した。タンクモデルのパラメータは、小流域ごとに最適化手法であるSCE-UA法で探索後、試行錯誤により調整して決定した。なお、タンク4段目の流出のうち、割合aはそのメッシュで流出し、残る割合(1-a)は地下に涵養され、空知川本流到達時に再流出すると仮定し、流域水収支を考慮してaを小流域ごとに設定した。

河川水温は、タンクモデルの各タンクからの流出成分について、1段目の水温 t_1 は当日の気温、4段目の水温 t_4 は(年平均気温+1.5)(°C)を与えた。2段目・3段目の水温 t_2, t_3 は、観測値再現が良好になるよう1段目と4段目の水温を以下のとおり按分して与えた。

$$t_2 = 0.60t_1 + 0.40t_4$$

$$t_3 = 0.50t_1 + 0.50t_4$$

これらの斜面からの流出水の水温フラックスと、水面熱収支式に基づく大気・水面間の水温フラックス(水温度フラックスは流量と水温の積, $m^3/s \cdot K$)の和を流量と同様に kinematic wave式で河道追跡し、水温度フラックスの和を流量(m^3/s)で除すことで各メッシュにおける河川水温を推算した。

4. 結果

4つの小流域で2018年3月から2019年9月までの流量及び水温を計算した結果、観測値を概ね良好に再現していた。相対的に新しい第四紀火砕流堆積物からなる小流域の河川では、相対的に古い中生層からなる小流域の河川に比べ、水温の変動幅が小さいことが確認された(図2)。

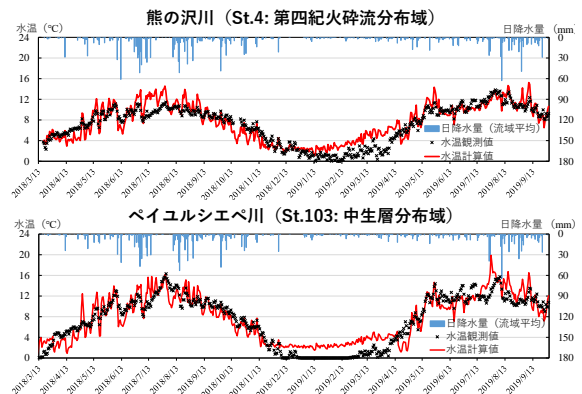


図2. 第四紀火砕流分布域と中生層分布域の水温再現

5. おわりに

地質条件が異なる小流域の河川流量・水温を、水文モデルにより再現した。今後は将来気象データを入力データとして、本モデルにより将来の河川流量・水温を計算し、河川環境への気候変動影響について検証する。

参考文献

- 近藤純正(1994) 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店.
- 白谷友秀他(2005) 水工学論文集, 49, 229-234.
- 菅原正巳(1972) 流出解析法, 共立出版.

謝辞 室蘭工業大学 武田 篤弥氏には解析・現地観測に多大なご協力・ご助言を頂いた。本研究は国土交通省砂防技術開発公募(河川生態)の助成を受けて実施した。記してお礼申し上げます。

*花石竜治（青森県環境保健センター），知北和久（北海道大学北極域研究センター）

1. はじめに

現代の湖沼・海域の呈色に関する分野では、衛星画像解析による水質や植物プランクトンの生態系の推定などが行われている。

それらの呈色，すなわち分光反射率を求める計算ソフトは，放射伝達理論に基づいて，HydroLight [1]と PlanarRad [2]の2つがある。これらは，ともに多重散乱，空の色，水面の波を考慮して計算できる。

演者らは，水域の外部からそれを見た場合，散乱が一次近似でき，観測されない光を計算しない光線逆方向追跡法(Reverse ray tracing method)が適用可能なことに着目した。これにより，計算速度を高速化でき，また，水底を三次元的に考慮できる。

演者らは，これまで，青色湖沼の呈色のモデル式の研究を行ってきた[3, 4]が，今回は，輝度に基づく定式化と適用例[5]を報告する。

2. 研究対象

青森県西津軽郡深浦町の「十二湖青池（じゅうにこ・あおいけ）」の青色呈色を対象とした。

青池は，津軽国定公園にあり，世界自然遺産白神山地の山麓に位置する山間小湖である。流入河川はなく，このため濁度は極めて低く閉鎖的で，湧出する地下水により湖水が供給されているとされ十二湖の越口ノ池（こしぐちのいけ）湖群の源泉である。

青池は水温が夏季でも全層で 10℃程度，透明度は全透（最大水深 8.8 m）とされている。

3. 輝度を用いた定式化

(1) 定式化方法とデジタルカメラ感度係数[5]

カメラなどの画像での観測の理論は，Szirmay-Kalos (2008) [6]により説明されている。それによれば，RGB 値は無次元観測量であり，（輝度）×（スケールングファクタ）で表される。このスケールングファクタは，アルベド $\rho = 0.18$ の灰色標準紙を撮影して決定した[5]。この場合，灰色標準紙は，完全拡散面(Lambertian)と仮定した。

(2) 湖底点および湖内点からの反射，散乱光[5]

湖底乱反射点あるいは湖内散乱点を走査して，湖底あるいは湖内全体からの輝度の寄与を，それら由来の光束の湖面射出点に対して求めた。これらの湖底乱反射点あるいは湖内散乱点は， x, y 軸に平行な面積区間，あるいは x, y, z 軸に平行な体積区間に属すると仮定した。

(3) 光線逆方向追跡法における四次方程式[3]

花石ほかは，三次元的スネルの法則から，観測点，および乱反射点あるいは散乱点が与えられたときに，それらの点から発せられる光束の単位方向ベクトル $\mathbf{B}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ の z 成分 b_{1z} の二乗に従う四次方程式を導いた。この方程式を DKA 法で数値的に解き，

反射あるいは散乱以後の光路を決定した。

これらの乱反射点あるいは散乱点が与えられれば，太陽高度および方位角から，湖面入射点を求めることができ，光線逆方向追跡法が適用可能である。

(4) 二次元正規分布密度関数による補外[5]

演者らの方法では，光束が湖面射出点を中心に二次元正規分布をして，重ね合わせられると仮定した。数値的な処理は，[長さ]²の次元を持つ二次元正規分布密度関数の乗算である。離散的な面積区間あるいは体積区間に対応する光強度式に対して，この密度関数とともに，それらの区間の水平面内への射影（次元：[長さ]²）を乗ずることで，離散和と補外の両方の効果を取り入れた。

4. 青池への日射入射の2パターン[5]

青池は周囲を急峻な崖に囲まれ，その崖には落葉広葉樹が自生している。春にはその樹木は葉を持たないが，初夏以降，葉が生い茂り，青池への日射を遮蔽する。この概念を図1に示す。木の葉による遮蔽の隙間から日光が入射すると，青池湖内に入射し，その軌跡が湖内で線状に観測される。以下，これを木漏れ日と呼ぶ。

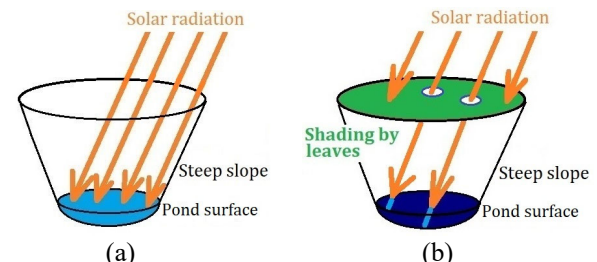


図1. 青池における日光入射の2パターン。(a) 湖面上空に遮蔽物がない場合，(b) 遮蔽物がある場合

5. 上空に遮蔽物がない場合の青池の画像解析[5]

2021年4月24日は，薄く雲がかかった安定した晴れであった。4つの時刻(1056h, 1110h, 1145h, 1228h)における青池画像のピクセル座標から，花石ほかの方法[4]により座標点($n = 245$)を求め，それに対応する線形 RGB 値を画像から抽出し，パラメータ推定解析に供した。GB 値の理論的再現の結果を図2に，3つの呈色機構の寄与も含めて図3に示す。

画像再現で得られたパラメータのうち，理論的な光強度に対する実測値の光強度の比[4]は $\beta_2 = 0.786$ であり，1に近いことから，モデルが概ね良好に再現したと判断された。

図2から，GB 値の再現が確認でき，また図3から，青池青色に寄与するのは，主に水の密度変動散乱および懸濁物質のミー散乱であることが分かった。なお，これらの機構には，散乱の前後の湖内光路で

の水の光吸収も含む。

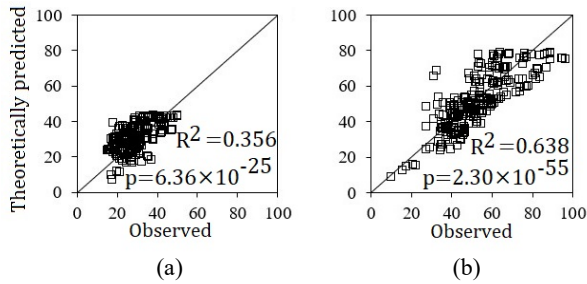


図 2. モデルによる湖面画像の GB 値の再現. (a) G 値, (b) B 値

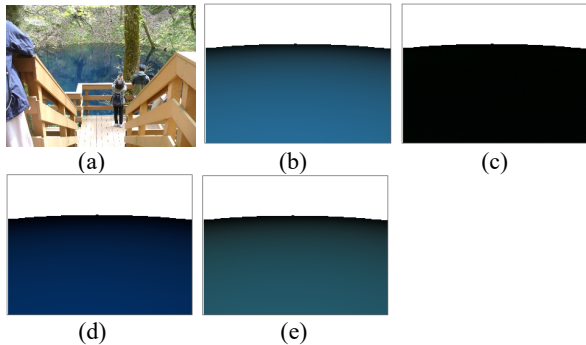


図 3. 上空に遮蔽物がない場合の青池画像(2021/4/24 1228h), およびそのシミュレーション. (a) 撮影画像について明暗を標準化したもの, (b) シミュレーション, (c) (b) における湖底乱反射の寄与, (d) 水による密度変動散乱の寄与, (e) 懸濁物質によるミー散乱の寄与

6. 青池における「木漏れ日」画像解析[5]

(1) 画像から RGB 積分値の採取

花石ほかの方法[4]で木漏れ日の光軌跡ピクセルから湖面上座標を求め、その光軌跡に直交する方向で、RGB 値を積分した。なお、湖面に浮かぶ木の葉の影響を回避するため、範囲[0, 255]の線形 RGB 値が $R > 10$ のとき、その座標の RGB 値の代わりに、スプライン補間で得られた RGB 値を用いた。

なお、ベースライン補正は、木漏れ日軌跡範囲のすぐ外の RGB 値を一次直線で結び、これを積分前の RGB 値から差し引くことで行った。

(2) 理論式を用いた RGB 積分値の再現によるパラメータ推定

前項で得られた RGB 積分値を、その理論値と比較した。理論値は、湖底乱反射点あるいは湖内散乱点に対応するモデル式から求め、光軌跡の軸と直交する方向の積分値とした。これらの中で、残差平方和が最小となる条件から、モデル式のパラメータを推定した。図 4 に、木漏れ日を含む撮影画像(2021/6/5 1435h)、その一部分の木漏れ日のシミュレーション、その木漏れ日について撮影画像から抽出した RGB 積分値とそのシミュレーションを示した。

木漏れ日画像は 2021 年 5 月 9 日、6 月 5 日の 4 つの日時で撮影できた。そのシミュレーションにより推定されたモデル式パラメータは、湖面上空に遮蔽物がない場合に得られたものと概ね同じ桁になった。上空に木の葉がない場合、湖底乱反射と湖内散乱

の効果画像上で重ね合わせになるが、木漏れ日画像では、その光軌跡において、これらの効果が分離されて見える。よって、この画像解析から、より正確度の高いパラメータ推定が可能と考える。

なお、水域の上空が部分的に遮蔽されているとき、その隙間から湖内に入射する光束を光物理の立場で理論的に再現したのは、本研究が最初と考えられる。

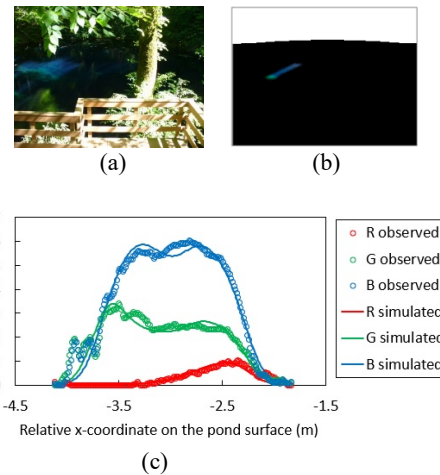


図 4. 木漏れ日画像(2021/6/5 1435h), これから抽出した RGB 積分値およびそのシミュレーション. (a) 撮影画像, (b) 木漏れ日の一部のシミュレーション, (c) 木漏れ日の光軌跡軸における RGB 積分値とそのシミュレーションで、横軸は相対座標系表示

7. 結論

本研究では、呈色の物理モデルを、輝度を用いて定式化した。このモデル式により、湖面上空の木の葉の遮蔽がない場合の青池画像、および木の葉で遮蔽されたときの木漏れ日画像の 2 タイプの再現を行い、モデル式中のパラメータを推定した。これらのパラメータは、2 タイプの画像で、概ね桁が一致し、両方の画像の解析法が正しいことが示唆された。

以上から、青池の青色呈色の主要な要因は、1) 水の密度変動散乱、2) 懸濁物質のミー散乱であり、これらの機構において、3) 湖内光路を通過する際の水の光吸収を含むことと推定された。

参考文献

- [1] <https://www.sequoiasci.com/product/hydrolight/> (accessed on 27 Sep, 2021).
- [2] <http://www.planarrad.com/index.php?title=PlanarRad> (accessed on 27 Sep, 2021).
- [3] 花石竜治・大坂直人・知北和久(2019): 陸水物理学会誌, **1**: 3-23.
- [4] 花石竜治・大坂直人・知北和久(2020): 陸水物理学会誌, **2**: 25-45.
- [5] Hanaishi, R., Chikita, K. A.(2021): *Appl. Sci.*, **11**: 9231.
- [6] Szirmay-Kalos, L.(2008): *Monte Carlo Methods in Global Illumination Photo-realistic Rendering with Randomization.*; VDM Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. KG, Saarbrücken, Germany.

活火山火口湖における水・化学物質・熱収支評価による 地下熱水系の推定：蔵王・御釜について

*知北和久(北大・北極域セ), 後藤章夫(東北大・北東アジア研セ), 岡田 純(気象研),
三浦 哲・山本 希(東北大・地震噴火予知セ)・山口高志((独)道総研)

1. はじめに

研究対象の火口湖・御釜は、宮城～山形の県境をまたぐ活火山・蔵王の宮城県側に位置する。蔵王の近年の顕著な火山活動として、1894～1897年の御釜からのマグマ水蒸気噴火があり、この時、湖水・地下熱水を伴う高温の火砕サージが御釜西方の”馬の背カルデラ”を超えて発生した(図1)。2019年6月に開始した御釜の地下熱水系の調査について、本報告では、1)御釜の水・化学物質収支の評価に基づく地下水流入・流出量の定量化、2)湖底熱流量の算定、および3)湖水・川水の溶存成分と堆積物の鉱物組成との関係、について議論する。

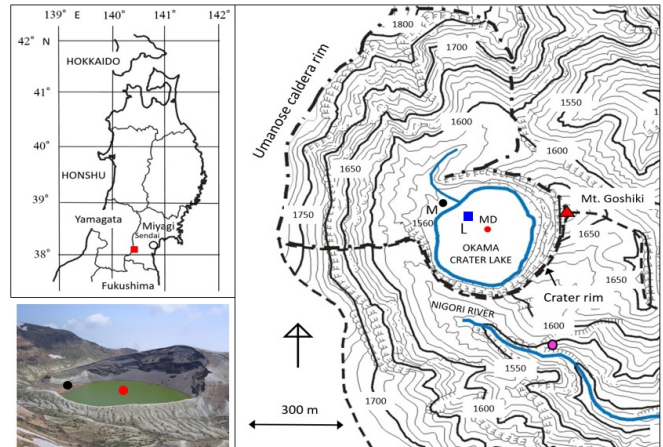


図1. 蔵王・御釜と観測点の位置(右図の点線は分水界)

2. 対象地域の概要と方法

御釜(湖水 pH 3.2～3.7)は、約 300 m 径の円形に近い湖岸形状を示し、最深点は図1の MD 地点(水深約 25 m)である。この点に計 8 台の水温ロガーと 1 台の電導度ロガーの係留系を設置し、年に 3～4 回、船上でのプロファイラー観測と採水・採泥を行った。L 地点では、圧力ロガーによる水位測定、湖畔 M 地点では 6 月～10 月に気象観測を行った。御釜には、M 地点がある北西岸の 3 か所で小川(北から、五色川、西の川、南の川)が流入しているが、恒常河川は五色川のみである。また、御釜クレーターの南は“濁川”の源頭部になっている。調査時には、これらの川の流量を求め、水質(水温・pH・25°C電導度)を調べた。

3. 結果と討論

図2に、2019～2020年に採取された湖水・川水に対するイオンクロマトグラフィーによるスティフ・ダイアグラムを示す。陽イオンでは Ca^{2+} 、負イオンでは SO_4^{2-} が支配的である。ただし、どの試水もイオンバランスはとれておらず、その理由は、他に Fe^{3+} が多く存在するためである。なお、湖水・川水の 25°C電導度 (EC25) は SO_4^{2-} 濃度、pH、との間で高い相関(それぞれ $R^2=0.996, 0.887$)があり(EC25～ SO_4^{2-} 濃度間について図3参照)、この回帰式を用い、EC ロガーやプロファイラーの EC25 値を pH、 SO_4^{2-} 濃度に変換した。

図4は、2020年8～10月における日雨量と日平均湖水位の変化を示す。無降雨時には比較的大きな水位低下が見られ、地下水漏出が大きいことを示唆する。図5は、結氷期間での時間水温の変化を示す。湖底(b-0m)～15m 高 (b-15m)の層で、ほぼ一貫した水温上昇が見られた。これは、湖底から熱流量があることを意味する。この上昇は、風による攪乱がな

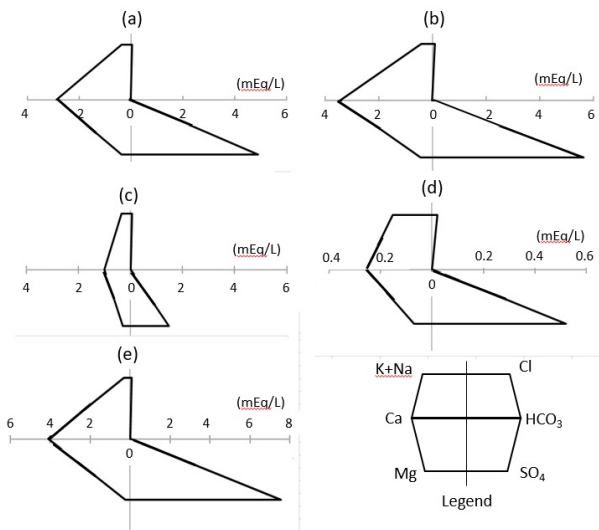


図2. 試水のスティフ・ダイアグラム (a) 御釜表層水, (b) 御釜 20m 深, (c) 五色川, (d) 西の川, (e) 濁川

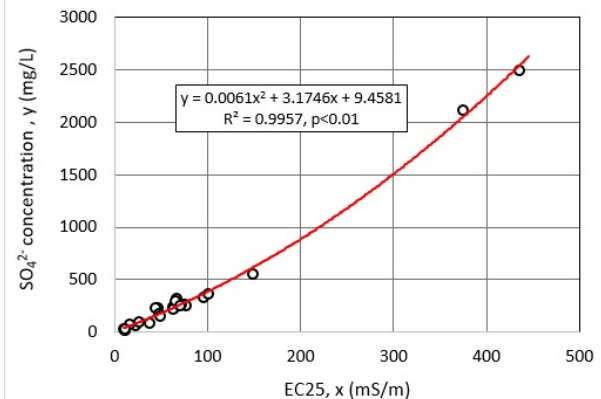


図3. 地表水に対する EC25～ SO_4^{2-} 濃度間の関係

い結氷期間にのみ認められた。特に、完全結氷となった2020年12月15日～2021年3月29日では、平均熱流量3.1 W/m²と求められた。

図6は、御釜最深点の底質に対するXRD(X線回折分析)による鉱物組成を示す。特徴的な鉱物として、半水石膏(Semi-hydrated Gypsum)と水酸化鉄(Oxy- α Fe(OH)₃)が認められる。前者は、御釜周辺の堆積層にみられ、降雨時に川が白濁化する要因となっている。石膏は、CaSO₄化合物であり、ある程度の水溶性がある。このため、この溶解で図2のようなCa²⁺、SO₄²⁻リッチの組成となることが考えられる。

4. 考察

4.1. 水収支評価

閉塞湖である御釜に対する水収支式は次式で与えられる：

$$\Delta V / \Delta t = A_0(P - E) + R_{in} + G_{in} - G_{out} \quad (1)$$

ここで、左辺は貯留量 V の時間変化率(m³/s)、 A_0 ：湖水面積(m²)、 P ：降水量(m/s)、 E ：湖面蒸発量(m/s)、 R_{in} ：河川流入量(m³/s)、 G_{in} 、 G_{out} ：それぞれ地下水流入量、流出量(m³/s)である。ここで、図4に示す雨量と水位のほか、M地点での風速・気温・湿度、MD地点での湖面水温の値を用いると、 R_{in} 、 G_{in} 、 G_{out} が未知量となる。ここで、図4の無降雨期間を考え、この時に観測した河川流入量を与えると、 G_{in} 、 G_{out} が未知量となる。

4.2. 化学物質収支評価

(1)式に対応した化学物質収支式は、以下のようである：

$$A(C_L V) / \Delta t = C_{Rin} R_{in} + C_{Gin} G_{in} + C_P P A_0 - C_L G_{out} - S \quad (2)$$

ここで、 C ：湖水(L)、降水(P)、川水(R_{in})、地下水(G_{in} 、 G_{out})の溶存イオン濃度(mg/L)、 C_L ：代表的な湖のイオン濃度、 S ：正味の沈殿率(g/s)、である。ここで、代表的な溶存イオンとしてSO₄²⁻を考え、各水のSO₄²⁻濃度を与える。このとき、SO₄²⁻に関する正味の沈殿はないものとして $S=0$ とすると、(1)式との連立で未知量 G_{in} 、 G_{out} が求められる。なお、流入地下水のSO₄²⁻濃度 C_{Gin} として、底質の間隙水の平均値 823 mg/L を与えた。

無降雨期間での計算結果を表1に示す。赤字が無降雨期間が長く、比較的信頼性の高い場合を示す。これより、正味の地下水流入量 $G_{in} - G_{out}$ は全て負で、 $G_{in}=0.007\sim 0.016\text{m}^3/\text{s}$ 、 $G_{out}=0.035\sim 0.047\text{m}^3/\text{s}$ と地下水流出量が多い結果となった。これにより、無降雨時には2.2 cm/dの割合で湖水位が低下することがわかった(図4)。特に、雨水の影響がない完全結氷期間は一貫して水位低下が起こることを示し、毎年融雪期後に確認されている御釜の著しい水位低下は、地下水流出量が

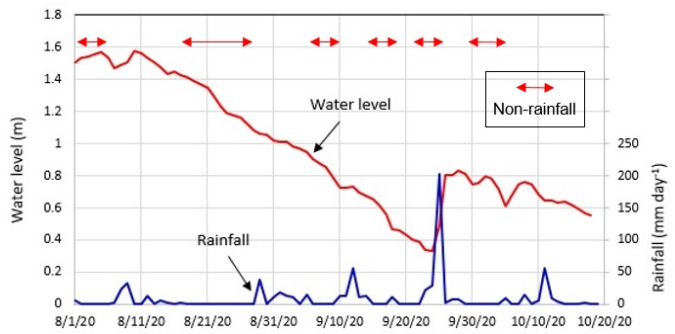


図4. 湖畔日雨量と日平均湖水位の変化

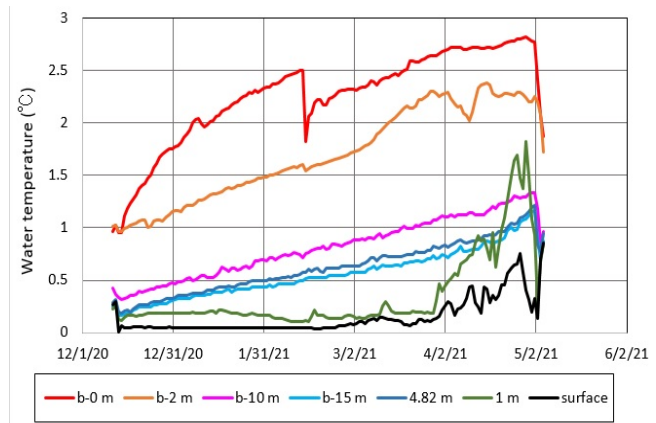


図5. 結氷期における御釜の水温変化

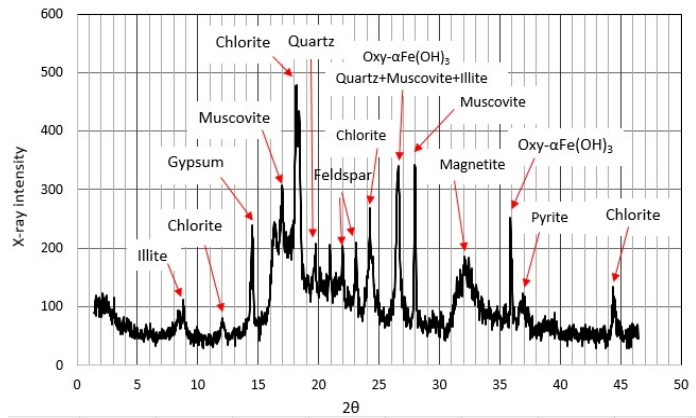


図6. XRDによる底質の鉱物組成

表1. (1)(2)式に基づく2020年計算結果

Period	R_{in} (m ³ /s)	$G_{in}-G_{out}$ (m ³ /s)	G_{in} (m ³ /s)	G_{out} (m ³ /s)
3-6 Aug.	0.00332	-0.020	0.016	0.036
19-28 Aug.	0.00332	-0.035	0.012	0.047
7-8 Sep.	0.00271	-0.043	0.018	0.061
16-17 Sep.	0.00271	-0.072	0.019	0.091
21-22 Sep.	0.00271	-0.031	0.011	0.042
30 Sep. - 4 Oct.	0.00212	-0.028	0.007	0.035

大きいことが要因であることがわかった。

参考文献

- 1) Chikita et al. (2004): *J. Hydrol.*, **291**, 91-114.
- 2) Chikita et al. (2019): *Hydrology*, **6**, 4.

*阪田義隆（金沢大・理工），小泉謙夫（日本工営），明山雄真（北大院・工）

1. はじめに

進行する気候変動に伴う地下温度変化がもたらす地下熱利用への影響について，国内外において数多く議論されてきた。地下温度変化は，地表面の熱収支と地下の水理地質構造，地下水環境，更には揚水や地下鉄などの人為影響も含めた結果である。こうした複合的な地下水流れ場を考慮した地下温度の長期変遷を都市全体で再現する熱輸送・地下水シミュレーションに取り組んだ事例は限られる。

本研究では，人口 200 万人を抱える札幌市が広がる豊平川扇状地を対象に，気象（気温・降水量），土地被覆，河川の水位・水温，井戸揚水について，1961～2020 年に至る過去 60 年間での変化を考慮した熱輸送・地下水シミュレーションを試み，地下温度の長期変遷についての分析を試みた。

2. 研究手法の概要

本研究では，札幌市が発展する一級河川豊平川による扇状地において，既往研究の地下水流動シミュレーションモデルを温度輸送モデルへと修正させ（図 1），地下温度の変遷の再現を試みた。解析エンジンは，流れが MODFLOW2005，熱輸送が MT3DMS である。解析領域である扇状地境界を図-1 に示すように 12 ブロックに分類する。それぞれのブロックでの地表面水収支（地下水涵養量）および井戸による揚水量は，既往研究による推定を同様に 2020 年まで拡張した。なお MODFLOW は飽和流計算のみのため，各ブロックの地下水面温度を 1D Hydrus（PC-Progress）により推定し境界条件として与えた。本モデルの物性値は帯水層毎に与え，それらの妥当性は計算水位および観測水温の再現性により確認した。

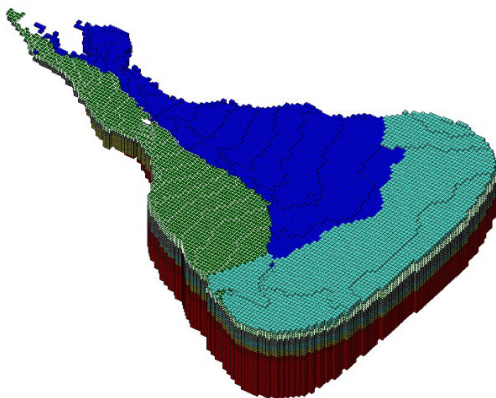


図 1. 扇状地の数値モデル(色は物性の違いに対応)

3. 結果と討論

図 2 に，扇状地縦断面に対し，計算した地下水位および地下水温のコンター図（2020 年 4 月 1 日

時相当）を示す。地下水位は標高-50～50 m に分布する礫層（帯水層 II）にて左から右へ並行なコンター分布を示し，同層の高い透水性を反映する。また河川から冬季の冷水塊が浸透し，約 1 km 先まで地中温度の低下の影響を与えており，熱輸送は移流が卓越することを再現する。

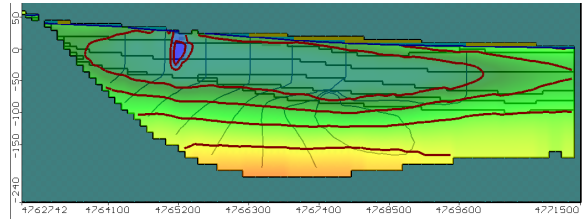


図 2. 扇状地の数値モデル(色は物性の違いに対応)

図 3 に，例として，札幌市街地中心にある北大植物園観測所の深度 $Z=10, 50, 150$ m における地中温度の 1965 年および 2020 年の計算結果を示す。本観測所は，扇状地の流出域の市街地内に位置する。同地点の地温勾配はゼロもしくは負の傾向が観測されており，本計算ではこの傾向が深度 150m まで続く結果となった。これは，流域スケールでの上流からの地下水流れ（特に河川涵養）の影響を反映する。また 1965 年と 2020 年を 3～4℃ 全体に上昇しており，特に深度が浅いほど，上昇幅が大きい。

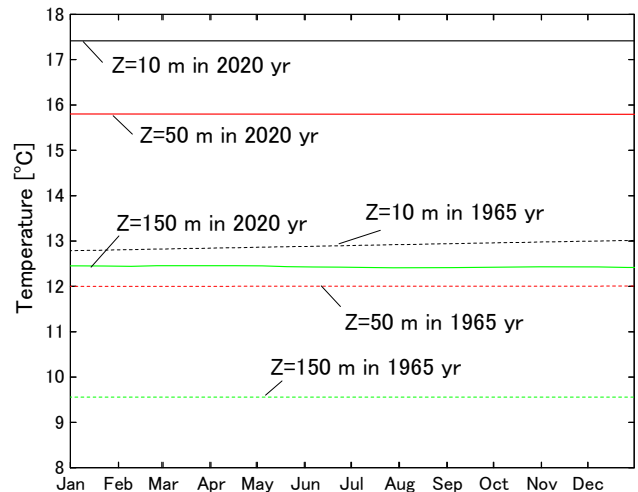


図 3. 計算した地中温度の過去（1965 年）および現在（2020 年）の比較の例（植物園観測所）

4. まとめ

本研究では，豊平川扇状地において，気候変動を勘案した長期における地中温度の変遷の再現を試みている。最終的には，流域全体における地中熱エネルギーの賦存ポテンシャルについても評価する計画である。なお，本研究は，本研究は JSPS 科研費 JP 19132228 の助成を受けたものです。

*大八木 英夫（南山大），澤田 結基（福山市立大），金森 晶作（とちろ鹿追ジオパーク）

1. はじめに

ジオパークは、ユネスコの正式プログラムで、地球科学的価値の高い自然環境を保護・保全し、教育やツーリズムに活用しながら、地域の持続可能な開発を進める地域認定プログラムである。2021年10月現在、44地域が日本ジオパークネットワークに加盟しており、その内9地域がユネスコ世界ジオパークである。「とちろ鹿追ジオパーク」は、北海道東部に広がる十勝平野の北西部に位置する鹿追町全域をエリアとし、2013年12月に日本ジオパークネットワークに加盟している。この地域のテーマは、「火山と凍れ（しばれ）が育む命の物語」であり、風穴の地帯の永久凍土の存在や、然別湖およびその周辺の自然環境で構成されている。然別湖では、冬季に湖上に雪と氷を使った構造物が作られ、湖の結氷状況を観光資産にしている地域でもある。気候変動の影響を最も強く受ける水環境は、水温と凍結であり、然別湖においても水温環境の解明は急務であるといえる。本発表では、2021年8月の観測結果より、湖水の水温環境・水質特性について議論する。

2. 対象地域の概要と方法

然別湖は、大雪山国立公園唯一の自然湖であり、標高810mと北海道内では最も高い場所に位置する。最大深度は98.5m（図1中の地点Center），流入河川（主にヤンベツ川，St.A）と流出河川（然別川，St.Rout）のある開放湖である。

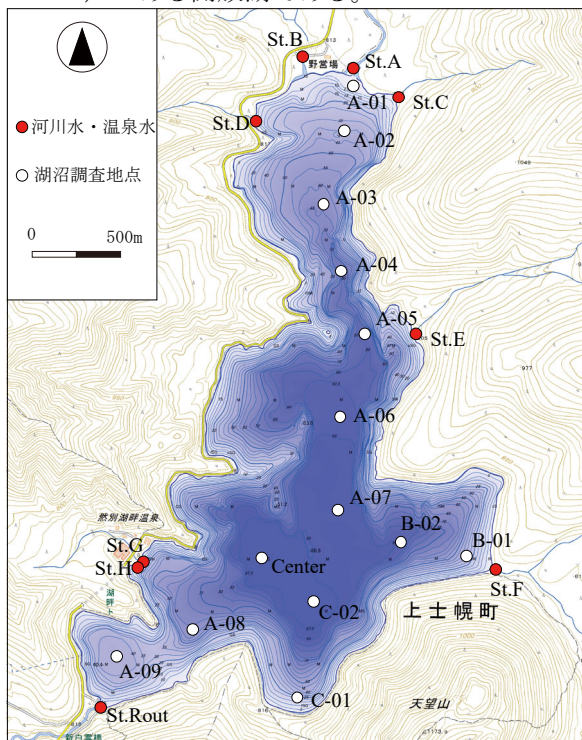


図1. 然別湖の観測地点

観測は、地点 Center, A-01~09, B-01・02, C-01・02 および流入（St.A~H）・流出河川（St.Rout）において実施し、各地点において水温、電気伝導度（EC）、溶存酸素（DO）、濁度、クロロフィルの鉛直観測（JFEアドバンテック社 RINKO-Profiler）を実施した。また、地点 Center, A-03 および流入・流出河川では採水し、イオンクロマトグラフおよびアルカリ度法にて分析した。

3. 結果および考察

調査地点は、主に St.A から流入し、St.Rout で流出するまでの間の湖底地形の谷に沿って観測した。観測日の透明度は 17.4 m であり、いずれの地点でも水温躍層は約 8~15 m にかけて形成されていた。したがって、表層から中層にかけて、水温のパターンには大きな差異は生じていない。しかしながら、深層部では水温分布のパターンにばらつきがみられる。図2は、2021年8月に観測された、地点 A-02・04・06・Center の水深 40m 以深の水温鉛直分布の結果を示す。水深 40 m の水温は、4.0~4.3 °C の範囲にあるが、深くなるにつれて、水温が上昇傾向にある。特に、地点 A-02 や Center は顕著である。地点 Center については、湖底部の EC は 100 mS cm⁻¹ 以上となり、表水層（10 mS cm⁻¹）より一桁高い高濃度の水塊となっており、地点 Center の西方には、湖畔温泉があることから、この地点との関係性で、湖底からの高濃度の溶存成分の湧出が考えられる。

また、水温構造は、地点によって異なり、特に A-02 や A-06 では、深層部において急激な温度低下の層が存在しており、深層部での強い流れがあると考えられる。

謝辞

本研究における水質分析は、北海道立総合研究機構にて行った。当機構における山口高志氏、長谷川祥樹氏には、心よりお礼申し上げます。

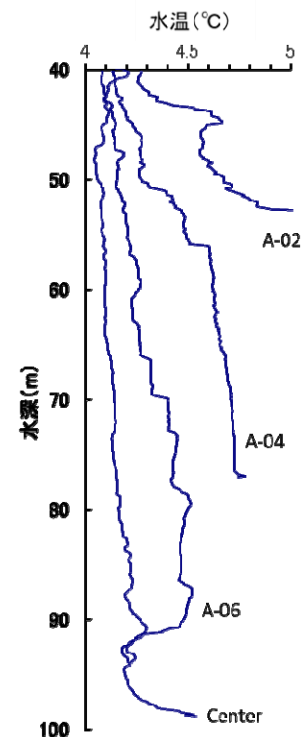


図2. 水温の鉛直分布

戸田 孝（滋賀県立琵琶湖博物館）

1. はじめに

アウトリーチ活動を効果的に進めるには、対象者の興味関心を惹くことが重要であることは言うまでもない。陸水物理学の対象となる現象は流体地球物理学の他の分野よりも日常生活に近いところで起こる傾向があるから、身近で起こっている現象を手がかりにすることができる。

しかしながら、流体地球物理学的現象は生物学や地質学など「自然史」の範疇に属する現象と違って

- ・現象の存在自体を認識することが難しい
- ・現象と背後の科学原理との対応が解りにくい

という問題が起りやすい。

演者は「地域博物館」の性格を有する博物館で、自然史や人文社会の分野に属する内容と並ぶ形で地球物理学の分野を担当してきたが、終始一貫して上記の問題に悩まされ続けてきた。定年退職を迎えるに際して、30年間の活動を総括する小規模展示の機会を与えられるに至ったのを機に、陸水物理学（特に湖沼物理学）の現象に関するアウトリーチの問題点について改めて論じる。

2. 過去の実践結果

琵琶湖博物館が直面した陸水物理現象に関する課題は「湖流」特に「琵琶湖環流」に関するものである（戸田, 2016）。琵琶湖全体を巡る規模の流れになると地球自転効果（Coriolis 効果）が重要になってくる。そこで、地球自転効果自体を体感的に理解できることを目指した「回転実験室」を1996年から2015年まで運営した。これは「科学館」の典型的な手法をそのまま適用したものである。

回転実験室は「科学館」としては成功していたが「地域博物館」としては失敗であったといえる。科学館は通常「科学原理」そのものの理解を目標として展示等の活動を展開する。回転実験室も地球自転効果という「原理」を効果的に伝えるという、科学館としての目標には到達していた。

しかし、科学館では通常、目標とする原理が明瞭に浮かび上がるように実験条件等を制御するから、その条件が現実離れしてしまうことも少なくない。回転実験室での実験についても、実際に琵琶湖で起こっている「現象」と単純に対応するものにはできなかつた。そのため、地域で実際に起こっている現象の理解という地域博物館の目標は達成されたとと言える状況では無かつた。

3. 「環流」という主体の問題

回転実験室で「原理」と「現象」との対応関係を伝えきれなかつた要因は種々考えられるが、その中でも重要な要因の1つとして「環流とはそもそも何

か」という問題があると考えられる。

何らかの現象について理解するうえで、その現象が「どのように発生するのか」という「成因論」は重要である。琵琶湖環流の研究史を追うと、成因に関する議論が極めて重要であったことが判る（戸田, 2014）。そして、その成因論を改めて検討してみると、実は「環流」をどういう主体と考えるかに依存していた。初期の成因論では環流を季節風に直接反応する応答と考えたが、実際には環流には「エネルギーを蓄積する構造」があり、季節風や日射による加熱も含めた種々のエネルギーを蓄積して生成されることが明らかになっている。そして、環流を「単なる流れ」と捉えて運動エネルギーだけで評価するのか「流れと成層構造が支えあって形成されるシステム」と捉えて有効位置エネルギーとの合計で評価するのかが、エネルギー収支に関する結論が逆転してしまう（図1）（戸田, 2013）。

この環流像の違いは、アウトリーチ活動に際しても重要と考えられる。季節風への直接応答とする初期の成因論は1960年代に否定された後も長く流布し続けた。これは、季節風という「入力」と環流という「出力」の幾何学的対応関係が単純なため「納得」してしまいやすいことも原因になっていると考えられる。この一見素朴に見える描像から脱却し、「単なる流れ」ではない「エネルギータンクとして機能するシステム」というイメージを効果的に伝えることが重要である。それによって、環流という「実体の無い存在」を「エネルギーを蓄積できる主体」として捉えることができ、環流に対する「エネルギー収支」という抽象度の高い概念自体を伝えることにもつながると考えられるからである（戸田, 2015）。

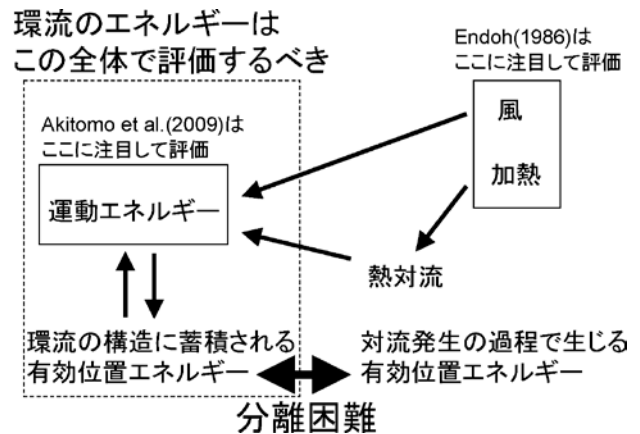


図1. 琵琶湖環流の生成に関わるエネルギーの流れ（戸田, 2013, 2015）

4. 実践しようとしている内容

環流を「主体」と捉えることの重要性は以上のように明らかになっていたが、それを実地実践する機会は、資金調達の失敗などもあってなかなか実現しなかった。それを小規模ながら実践しようというのが今回の展示企画である。

展示企画では環流以外の内容も含めて、科学館的手法を地域博物館に持ち込む際の課題である「原理」と「現象」の間の距離感を縮める手法を実践してみようと考えている。

環流については、それを「擬人化」して「感情移入できる主体」とすることによって実現する手法を戸田(2016)の段階から提唱しているが、それ以外の内容についても、個々の問題ごとにちょっとした「考え方のコツ」を伝えることで、広く応用できる発想法の修得に結びつくのではないかと考えている。その具体的な内容は戸田(2021a, 2021b)で提示しているが、その一部をここでも紹介する。

(a) 「琵琶湖の深呼吸」の成立条件

琵琶湖は水深 60m 以上の領域が広く分布する深い湖でありながら、毎年の鉛直運動によって酸素を多く含む表層水が深層まで到達する。これを「琵琶湖の深呼吸」と呼び慣わしている。最近、この「深呼吸」が不完全になる年があることが観測で判明しており、地球温暖化の影響ではないかと考えられている。一見すると合理的なようだが、少しおかしい。温暖化が進まなくても、前年より少しでも冷却が弱ければ「深呼吸」は最深層まで及ばず、不完全になるのではないだろうか。

実際には、低層の水温は前年の冬の水温をそのまま保っているわけではなく、伝導や弱い混合によって夏の間少し(1°C程度)上昇する。また、冬季の冷却には日ごとの強弱が当然あるから、冷却が少し強い日があれば、それによって「深呼吸」が完成する可能性がある。結局、冷却の強さが少しくらい前年より弱くても完全な「深呼吸」が起こるのである。重要なのは温暖化の「進行」によって「少しくらい前年より弱くても」という条件を超越する可能性(確率)が高まることである。温暖化した結果が安定すれば、季節変化そのものが不明瞭にならない限り「深呼吸」は成立する。

多くの人は「温暖化が進めば冬季に向けての冷却が弱くなり混合が起こりにくくなる」というところまでで考えが止まるのではないだろうか。そこで止まらずに論理を進める要領をどうやって伝えるかが課題である。

(b) 琵琶湖での地震津波

琵琶湖では「地震津波」は起きないとされている。動く可能性のある断層が、湖の周辺のみで湖の中に無いというのが理由である。断層が動くかどうかの評価はさておくと、この評価が正しい限り津波は起きない、周辺の断層が動いても湖という「容器」全体が揺れるだけで津波にはならない、という理路が案外理解されない。

これは、津波が「一方的に押し寄せる波」であり、海底や湖底の「段差」が急変することで発生するというイメージが伝わらず、容器を揺らすことで発生する波との本質的な違いが理解されていないことが原因だと考えられる。

(c) 虹の原理

琵琶湖は実は虹の名所である。大きな湖の存在により大気中への安定的な水分供給があるうえ、湖に向かう向きの眺望には人工的な建物等が少なく虹が映えやすいということもあると思われる。

虹の原理は、プリズムで白色光が分光してスクリーンに7色の光の帯ができるイメージで説明されることが多いが、これは「分光」が起こること自体の説明でしかなく、その分光によって「虹」という形の像が形成される説明には全くなっていない。虹の丸い形を説明するには、虹が「1個のプリズムから分光する」ものではなく、多数の水滴が関与しており、1個の水滴は1色にしか寄与しないことを説明することが必須である。

虹の形状の理解には、これをさらに立体的に展開する必要もある。立体感覚の涵養も物理を理解する上での大きな課題であることは言うまでもない。

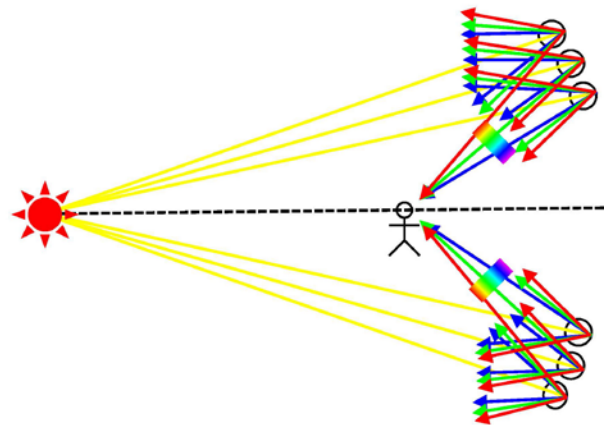


図2. 虹の「形状」を説明するのに必要な概念図

参考文献

- 戸田孝(2013): 琵琶湖環流に関する残された課題—エネルギー源の問題, 日本陸水学会第78回大会, 89.
- 戸田孝(2014): 琵琶湖環流の研究史, 陸水学雑誌, 75, 35-48.
- 戸田孝(2015): 「エネルギーを持つシステム」としての琵琶湖環流, 陸水物理研究会第37回研究発表会講演要旨, 19.
- 戸田孝(2016): 自然史系博物館における「科学館的手法」への試み, 全国科学博物館協議会第23回研究発表大会資料, 40, 61-65.
- 戸田孝(2021a) 地域博物館の素材で「科学館」を展開する具体的な方法, 全日本博物館学会第47回研究大会発表要旨, 33-34
- 戸田孝(2021b): 「科学館的手法」で地域の現象を扱う「コツ」, 日本科学教育学会年会論文集, 45, 589-592.

11 センシングと窒素動態モデルを基盤としたハイブリッド型土壌診断の可能性

*濱侃 (千葉大・園芸), 松橋寛太(千葉大・園芸), 松本祐太郎 (千葉大・園芸), 松岡延浩(千葉大・園芸)

1. はじめに

硝酸態窒素による地下水汚染などの農地からの環境負荷の軽減は世界的な課題である。施肥量の削減が求められるが、施肥量の削減は収穫量とトレードオフの関係になる可能性があり、生産者の利益と環境負荷の軽減の両立は極めて困難である。

この課題の解決には、根拠に基づいた最適な施肥の指導が必須で、センシング技術による土壌養分(特に窒素)診断は、施肥指導を省力・軽労化・精密化できる可能性がある。しかし、土壌の窒素含有量(以下、土壌窒素)は土壌自体のスペクトル特性として現れず、特に画像を用いたセンシングでは土壌窒素の「定量的」な推定は極めて困難な課題と知られている。

一方で、画像を用いたセンシングで観測可能な生育のむらは、土壌窒素のむらと密接に関わっている。ただし、作物が吸収する窒素量は、生育期間中の気象条件等で変動するため、センシングのみを用いた場合、土壌窒素の推定結果は「定性的」な評価に留まり、推定手法の再現性・汎用性に課題がある。

本研究は、センシングと窒素動態モデルを組み合わせた土壌窒素の推定における第1段階として、センシングによる生育パラメータの推定と、既存の窒素動態モデルの適合性の検証を目的とした。

2. 試験圃場の概要と方法

千葉大学松戸キャンパス内の試験圃場に、高畝マルチ栽培でサツマイモ2品種(べにはるか、ベニアズマ)を栽培し、試験区を3反復、計54区画設ける。生育期間の気象条件を変化させるため、移植を3時期にわけ、各反復で施肥量を3パターン(0, 5, 10 gN/m²)施用した。サツマイモは、窒素1kg当りの乾物生産量が極めて多いだけでなく、過剰な施肥で収量が低下する「つるぼけ」が知られている。つまり、窒素施用量の最適化によるメリットが大きい作物と言える。

生育期間中は、気象データの計測に加えて、週2回の生育観測を行い、草高、葉色、葉面積指数(LAI)の計測を行った。また、生育観測と同期してドローン(DJI P4 Multispectral)を用いたセンシングを行った。

窒素動態モデルは、DeNitrification-DeComposition (DNDC) モデルを使用した。DNDCモデルは土壌からの温室効果ガスの排出量を評価するためにアメリカで開発されたモデルであり、本研究では高畝マルチで栽培するサツマイモにおけるシミュレーション結果の適合性を検証した。

3. 結果と考察

DNDCモデルにおいてLAIは窒素吸収量に直接関

わる重要なパラメータであり、LAIをセンシングで簡易的に推定できると、モデルの計算結果の検証に役立つ。そこで、ドローンで計測した正規化差植生指数(NDVI)で実測したLAIを推定した結果、R²で0.842、RMSEで0.31の精度でLAIを推定することができた(図1)。

図2には、NDVIから推定したLAIとDNDCモデルで計算したLAIの時系列変化を示す。両者の変化の傾向は類似し、特に植え付けから50日までの両者のLAIは類似している。50日以降は、DNDCモデルで計算されたLAIは、NDVIから推定したLAIよりも小さくなった。モデルが正しいとするならば、LAIの最大値は初期窒素量を多くすると大きくなるため、試験区では想定した土壌窒素よりも多くの土壌窒素が存在したと考えられる。なお、試験区で想定した硝酸態窒素は0.50mg/kgに対し、実際の土壌窒素量は0.72mg/kgと想定よりも多かった。この他にも、モデル自体のパラメータ(特に最大バイオマス)が実際の生育状態と一致していない可能性もある。このように、モデルの適合性については改善の余地が多いが、その計算結果の傾向は実際の生育状態を概ね再現できた。

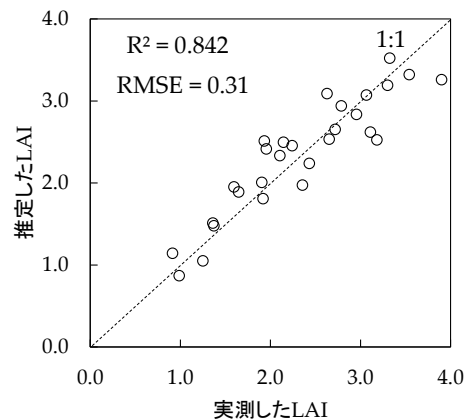


図1. NDVIで推定したLAIと実測したLAIの比較

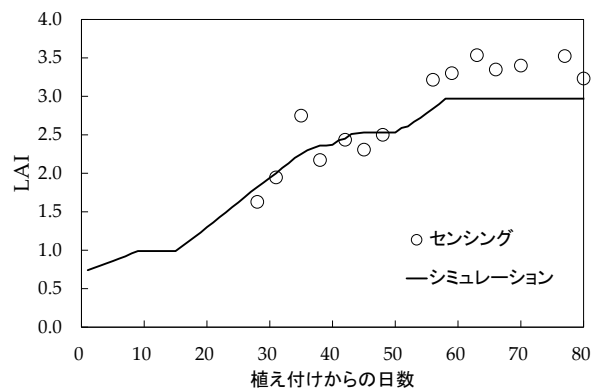


図2. NDVIで推定したLAI(センシング)とDNDCで計算したLAI(シミュレーション)の時系列変化

苗村 晶彦 (戸板女子短大・総合教養センター)

1. はじめに

陸水の代表的な供給源は降水であるが、降水が森林の樹冠を通過する際に、溶存陽イオンの増加や有機酸の溶出などによって、図1のように水質は劇的に変化する。陸水環境の動態把握に、森林樹冠への大気エアロゾルなどの沈着や、降雨時の樹体内部からの元素の溶脱に関する研究は重要であり、多摩丘陵においては2000年8月下旬～2001年8月下旬の調査において、物質収支のシミュレーションの結果、林内雨および樹幹流中の NO_3^- に

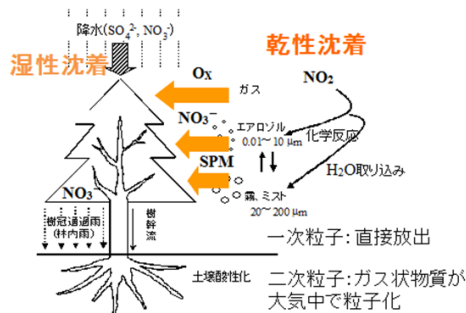


図1. 樹木への酸性沈着(苗村・渡邊, 2016a)

ついて奥秩父では吸着、多摩丘陵では溶脱が認められた (Naemura *et al.*, 2007)。

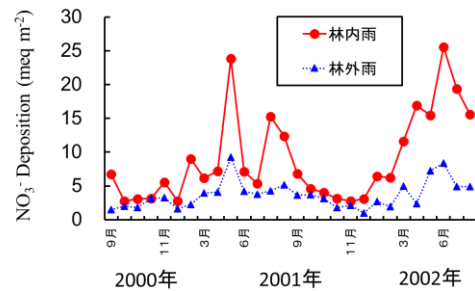
本研究では、大都市近郊の多摩丘陵において、林外雨および林内雨 (スギ *Cryptomeria japonica*) を2年間採取し、 NO_3^- 沈着量の季節変動を探索した。

2. 方法

調査地は、東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センターのフィールドミュージアム多摩丘陵の実験実習施設内に設置した。調査地点において、森林裸地で林外雨、スギの林分について林内雨 ($n=3$) を2000年8月下旬～2002年8月下旬 (前半は2000年度調査、後半は2001年度調査) で計28回採取した。採取した試料についてはメンブランフィルターで濾過した後、 NO_3^- 濃度を DIONEX 社のイオンクロマトグラフィー (QIC Ionchrom Analyser) を用いて測定した。

3. 結果と考察

調査期間において、2000年度調査および2001年度調査の林外雨はそれぞれ1983 mm、2029 mmとなった。スギ林内雨の NO_3^- 沈着量の季節変動を図2に示した。季節変動については、2000年度調査および2001年度調査において5～6月にピークがあった。またスギ林内雨は林外雨と比例していると推測されつつ、2001年度調査においては、春季に林内雨で顕著に高くなる傾向が確かめられた。林内雨から林外雨を差し引いたのを乾性沈着とすると春季の

図2. スギ林内雨中の NO_3^- 沈着量の季節変動

乾性沈着の NO_3^- が急激に高くなる変動であった。 NO_3^- は NO_x からの二次物質で生成するが、 NO_x からの二次物質として O_3 も NO_3^- と連動する報告があり (佐々木ら, 1986)、首都圏にて春季に高くなる O_3 と共に注視すべきであろう。

NO_3^- 沈着量については、2000年度調査で110 meq m^{-2} 、2001年度調査で142 meq m^{-2} と算出された。春季と夏季調査を合わせた沈着量は、2000年度および2001年度調査にて、それぞれ全体の64%、74%を占めた。都市圏では冬季に接地逆転層の影響で NO_2 は滞留されるが (Naemura *et al.*, 1996)、夜間の高 NO_2 時にポテンシャルオゾン濃度は光化学スモッグ注意報レベルの約1/3ほどの40 ppb前後の低濃度で推移する場合があります (苗村・渡邊, 2016b)、冬季に NO_2 から二次物質が生成し樹冠へ負荷する影響は小さいと考えられた。わが国の重要な環境問題においてアジア大陸からの越境汚染の影響も散見されるため (例えば、苗村ら, 2021)、 NO_x からの二次物質の動態をさまざまな観点から議論していくことが重要である。

参考文献

- 苗村晶彦・齋藤圭・奥田知明・小寺浩二 (2021) 源流と河口の環境一鳥取県加勢蛇川を事例として. 流域圏学会誌, **8**, 2-9.
- Naemura, A., A. Tsuchiya, Y. Fukuoka, K. Nakane, H. Sakugawa and H. Takahashi (1996) Climatic inversion layer and atmospheric NO_x concentration on the slope of forest decline area in the Seto Inland Sea district, Japan. Japanese Journal of Biometeorology, **33**, 131-136.
- 苗村晶彦・渡邊善之 (2016a) 横浜市大岡川流域における NO_2 濃度の季節変動とその影響について. 戸板女子短期大学研究年報, **59**, 27-33.
- 苗村晶彦・渡邊善之 (2016b) 東京タワーにおける季節別の夜間高 NO_2 濃度とポテンシャルオゾン濃度との関係. 日本生気象学会雑誌, **53**, 39-44.
- Naemura, A., T. Yoshikawa, M. Yoh, N. Ogura and Y. Dokiya (2007) Acidic deposition on Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in mountain and on suburban hill. Natural Environmental Science Research, **20**, 13-17.
- 佐々木一敏・栗田秀實・村野健太郎・水落元之・植田洋匡 (1986) 大気汚染物質の長距離輸送時における硫酸塩硝酸塩等の挙動. 大気汚染学会誌, **21**, 216-225.

* 乙幡正喜 (法政大・院) ・小寺浩二 (法政大・地理)

1. はじめに

新河岸川流域は、かつて水質悪化が顕著な地域であったが、近年は流域下水道や親水事業で水質が改善しつつある。しかし、狭山丘陵に位置する支流の上流部においては依然水質が改善していない地域も存在し、汚染源の特定や水質改善を図っていくには源流域における調査・研究が重要である。今回は、狭山丘陵周辺において河川を調査した結果をもとに、水質を中心とした水環境の特徴を考察する。

2. 対象地域

狭山丘陵は、東京都と埼玉県の5市1町にまたがる地域である。丘陵の周辺地域では高度経済成長期から都市化が急速に進む一方、多摩湖や狭山湖の周辺には森林が分布し、里山の環境を残している。河川のほとんどは新河岸川水系に属する支流で、狭山丘陵はそうした水流の源流部である。残堀川は南東に流れ多摩川水系となっている。

3. 研究方法

既存研究の整理と検討を行った上で、現地調査は2017年11月から月に1回行っており、2年間で24回行なった。現地では、水温、気温、電気伝導度(EC)、比色、pH及びRpH、を計測し、採水して実験室に持ち帰り、全有機炭素の測定と主要溶存成分の分析を行なった。特に悪化している河川を調査対象に2020年12月より毎月12地点の調査を実施している追加調査地点は、柳瀬川水系の不老川上流部、六ツ家川上流部、黒目川中流域と目黒川と空堀川中流域の4ヶ所である。

4. 結果・考察

ECは、100–300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 前後の地点が多かった(図1)が、不老川の上流域の大橋付近では隣接する雨水調整池からの放流により4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の高い数値を示している。一方で、南西部の一部河川・湧水では100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を下回る良好な水質を示す地点があった。pHは7.2前後であり、空堀川中流域の下砂橋では8.0を超えている。これは滞留時間が比較的長いことが考えられる。

水質組成は、多くの地点においてCa-HCO₃型を示しているが、北西部の河川を中心に硝酸が多く検出された。北西部においては近郊農業が盛んであり、下水道普及率が比較的低いことで硝酸多く出ていることが考えられる。東部の六ツ家川や南東部の空堀川、野火止用水の地点では極端なNaCl型の水質組成となり、生活排水や下水の処理水が多く流れ込んでいることがわかる。

特に悪化している河川を調査対象に2020年12月より毎月12地点の追加踏査を実施した。EC推移図(図2)では、柳瀬川水系の六ツ家川上流部(M2)と不老川(F1)で平均629 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と706 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の高い数値を示している。六ツ家川上流の北野一

般廃棄物最終処分場放流口(M1)で2021年8月のECは1023 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。黒目川の降馬橋(KR1)E平均値は231 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と低い数値である。ここから100m下流の清涼飲料水工場排水放流口(KR2)の8月のECは1877 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と高い数値である。下流のよしきり橋(KR3)の同月のECは365 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と希釈されている。砂川堀では、東永橋(S2)で12月は1320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ に高い数値を示していた。6月のECは2354 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と急上昇し、薄茶色の水が流れていた。空堀川の東芝中橋(K1)のEC平均値は1033 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と高い数値である。

5. おわりに

六ツ家川上流では一般廃棄物最終処分場の水質がECに影響し、空堀川では中流域でEC、pHが乳製品工場排水の影響で負荷が高まっている。また、黒目川の中流域でも清涼飲料工場の排水の影響でEC、CODが高い数値を示している。継続調査を行い、主要溶存成分の分析結果を研究に反映させたい。

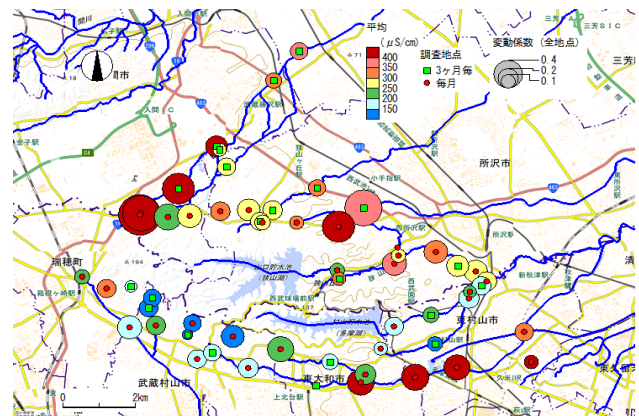


図1 EC空間分布(2017年11月–2019年10月)

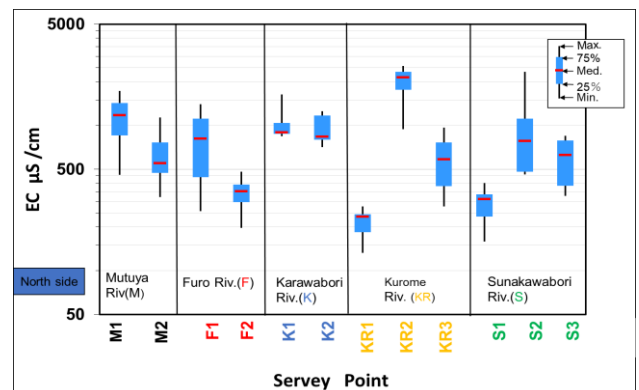


図2 ECの変動(2020年12月–2021年8月)

参考文献

乙幡 正喜・小寺 浩二(2021): 狭山丘陵の水環境に関する水文地理学的研究—河川源流域の汚染源を中心に(3)—, 日本地理学会発表要旨集, 2021a, 107

*小寺浩二(法政大・地理)・猪狩彬寛(法政大・院/日本工営)・齋藤 圭(京都大)

1. はじめに

日本では高度成長期に全国で水質汚濁が問題となったが、法整備や排水処理施設の普及などにより、急速に水質が改善されてきた。しかし、現在でも都市への人口集中が進み、郊外などで水質汚濁が激しい地域も残っている。行政によって1971年から継続されてきた「公共用水域の水環境調査」結果や、市民団体を中心に2004年に始まった「身近な水環境の全国一斉調査」といった全国規模の観測記録を中心に、日本の河川水質の長期変動について検討してきたが、本稿では、第17回「身近な水環境の一斉調査」(2020年)に加え、第18回(2021)の法政大学測定結果をあわせて考察する。

2. 研究方法

国立環境研究所のデータベース「公共用水域の水質調査結果」を用いて1971年以降の水質変化を整理し、「身近な水環境の全国一斉調査」については、2004年～2018年のCODの調査結果を整理して長期変化について考察した。1971年以前に関しては、研究成果のデータを整理し、2018年以降については、研究室の全国規模の観測記録を用いた。さらに、2020年と2021年に関しては、研究室と関係者が実施した2,000地点前後の観測結果を対象とした。

3. 結果と考察

1) 公共用水域の水質調査結果

1971年に約1,000点だった観測地点が、1986年には5,000点を超え、その後6,000点弱の地点で観測が継続されてきた。BODの経年変化では、当初3以上が半数だった(1971年)が、1976年には2以下が半数となり、最近では、2以下が約8割を占めている(2018年)。1～4の地点数は変わらず4以上が減少し、1以下が全体の約半数に増えている。

2) 身近な水環境の全国一斉調査

2004年は約2,500地点だったが、2005年には約5,000地点となり、その後6,000地点前後で推移し、2018年には約7,000地点となった。COD4以下が約半数で変化なし。2020年は、新型コロナウイルスの影響で、観測地点が減ったが、約2,000地点の法政大学の沿岸域の調査結果を解析した。さらに、2021年は、より内陸の約1,400地点と比較した

3) 1971年以前の水質

先駆的な小林(1961)による研究成果などはあるものの、系統的に観測された水質データは入手しづらく、研究論文や、報告書などから抜粋し整理したが、十分な水質復元はできず、過去の水質を明らかにすることの困難さが浮き彫りとなった。

4) 最近の水質

2017年～2020年にかけて、毎年全国2000箇所

上で調査したデータを整理し、近年の河川水質の現状を明確にした。

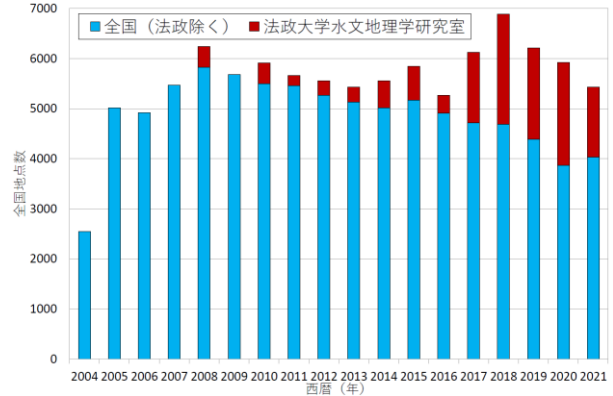


図1 「身近な水環境の全国一斉調査」地点数変化

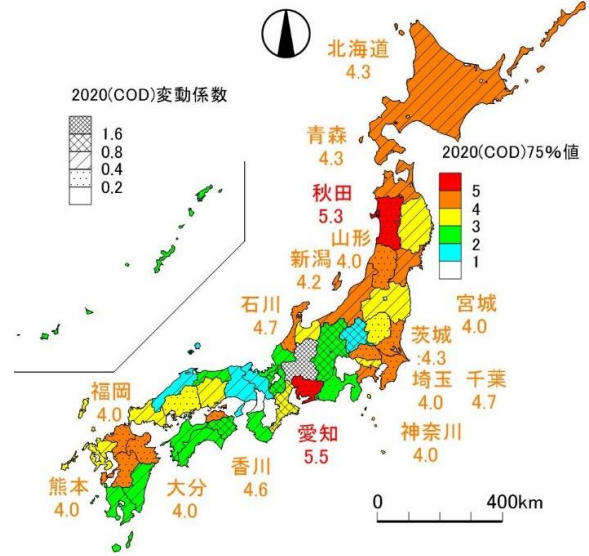


図2 COD75%値と変動係数(2020年)

4. おわりに

全国規模の長期的な観測結果に加えて、1971以前のデータを収集整理して過去の水質の復元を試みた。最近の水質に関しても、独自に全国規模で約2,000地点の観測を行い、現況を明らかにした。特に、2020年の沿岸域に加えて、2021年には内陸部の調査を行ったことで、広域に検討することができた。今後も広域な調査を継続し精度を上げていきたい。

参考文献

小林 純(1961)：日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究. 農学研究,48-2,63-106.
 小寺浩二ほか(2021)：日本における河川水質の長期変動に関する水文地理学的研究(3)
 - 「身近な水環境の一斉調査」第17回・18回の結果を中心に, 日本地理学会発表要旨集, 2021a,

*松本嘉孝（豊田高専・環境都市），宇佐見亜希子（名大・減災セ），野崎健太郎（椋山女学園・教育）
田代喬（名大・減災セ），江端一徳（豊田高専・環境都市），谷口智雅（三重大・人文）

1. はじめに

木曾川は中京圏の飲料・工業用水の水資源を担う位置づけであるため、1970年代後半から名古屋水道局がその上流域である御嶽山南麓の水質調査を開始すると共に、1979年と2014年の噴火後には多くの研究者が河川水質調査を行った。丹羽（1954）は1934年の観測で、御嶽山南麓河川が酸性化していることを記述しており、日本の陸水の特徴でもある火山による無機酸性化が現れる地域である。

2014年の噴火を機に、日本陸水学会東海支部は仲間を募り水質や水文、水生生物相等の調査を続けている。今回の発表ではこの7年間の調査で得られた成果について、御嶽山南麓の河川水質分布、酸性河川のpH変化、噴火後のpH変遷について記す。

2. 対象地域の概要と方法

調査対象は御嶽山南麓の王滝川およびその左岸支川と非山体側の王滝川右岸支川で行った。調査は御嶽山が噴火後の2014年12月から開始し、現在も継続している。2018年2月から2019年5月までは、5箇所の主要地点にて毎月調査を行った。これまで濁川では計81回の水質調査を行っている。

調査では、流量観測に加え、水温、pH、EC、ORP、濁度の計測を行った。持ち帰った試料は実験室にてアルカリ度、DOC、DTN、IC、主要陽・陰イオンの測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 御嶽山南麓の河川水質分布

御嶽山を起源とする河川のうち、噴気孔を源頭部とする濁川は平均pHが5.4で4.0を下回ることもあり、平均DOC濃度は $0.4(\text{mg L}^{-1})$ の無機酸性河川である。ただし、王滝川左岸の他の支川で濁川のように酸性を示す河川は見られなかった。王滝川は濁川の合流によりpHが平均6.9から5.9へ減少することが確認されており、濁川の酸性影響が下流へ伝播していることがわかる。その後、右岸からの鹹川や支川の合流により、御岳湖流入の松原橋地点では平均pH6.4に上昇する。

3.2 酸性河川の流量、pH変化

無機酸性河川の濁川は王滝川合流点から上流1.0km地点にて、濁沢川と伝上川に分岐する。両河川のpHと流量割合、合流後のpHを図1に示す。濁沢川、伝上川は、年間を通してほぼ一定のpHである。しかし、両河川の合流後のpHは大きく変動していることが読み取れる。両河川の流量割合を見ると、濁沢川の割合が50%を越える時に合流後

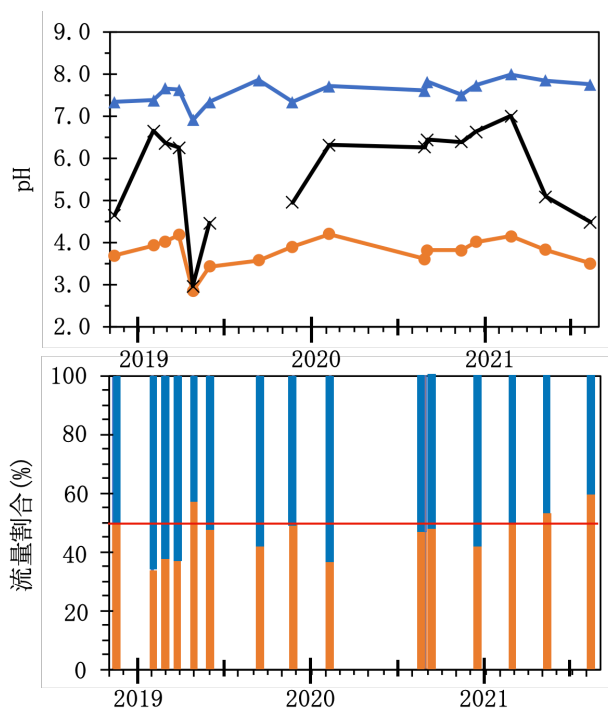


図1. 濁沢川、伝上川、両河川合流後のpH変化（上段）と濁沢川、伝上川の流量割合（下段）
青：伝上川、オレンジ：濁沢川、黒：合流後

のpHが5.1以下になることがわかる。このことは、濁川のpHが濁沢川の流量の影響により変化することを示している。

3.3 王滝川の噴火後pH変遷

水資源機構がHPで公開している王滝川松原橋で毎週観測したpH結果より、2015年より2020年の年平均pHは、6.0、6.1、6.4、6.7、6.4、6.6となり、噴火後徐々にpHが上昇していることが確認できる。pHのヒストグラムを見ても、pHが5.0を下回る観測日は2015年には6日あったが、2018年は0日、2019年は4日、2020年は1日と減る傾向にある。噴火の際の火山噴出物が降雨などにより流出したことにより、噴火による酸性化傾向は回復していると考えられることができる。

参考文献

丹羽彌（1954）：木曾谷の生態諸要因．木曾谷の魚河川魚相生態学 上流篇 木曾教育會：9-54.

本研究はJSPS科研費・基盤研究(B)『自然災害/資源開発を 受容する火山山麓地域の自然共生に向けた水文水質・生態機構の 解明、研究代表者:田代喬(課題番号19H04318)』の一部として実施した。

*谷口智雅（三重大・人文），宇佐見亜希子（名古屋大・減災セ）
松本嘉孝・江端一徳（豊田高専・環境都市）

1. はじめに

新しい火山は透水性が良く、地下に水が浸透するため、河川は枯渇しにくく、水利用に都合の良い流域と言われる。木曾川上流の御嶽山南麓を流下する王滝川流域でも、発電用のダムが分布し、王滝川の支流の各所で河川水が取水されている。その支流の一つである濁川は酸性河川として特徴づけられており、この強酸性河川は本流の河川水質にも大きな影響を与えている。酸性水の影響がどの程度下流まで伝播するのかを把握することは、流域の河川環境を知るうえでも重要である。また、酸性河川の影響の伝播に加えて、酸性を示さない支流からの流入による酸性水緩和の効果も重要な視点となってくる。それぞれの支流の水質と合わせて、取水地点や取水量も含めた河川流量の把握が不可欠であることから、王滝川上流域における発電用ダムの河川取水と河川流量について報告する。

2. 研究方法

濁川の酸性水の影響と御岳発電所への導水を考慮して（図1）、三浦貯水池・滝越発電所より下流に位置する滝越集落の支流域から御岳湖の西側の王滝村中心集落を流下する支流域までの区間を基本とし、発電用取水がされている王滝川支流を中心に調査を行った。流量観測は2019年9月～2021年11月で、基本無降水期間が継続した日に行い、降雨の影響がないよう配慮した。

流量について、アドバンテック社製の電磁流速計AEM1-Dによる60%水深で測流する1点法の流速観測の断面流速法によった。各地点の水深観測数は、基

本的には0.05～0.2m間隔で測定したが、川幅もあり・流速が早い地点では安全性等も考慮して0.5～1m間隔で行った。得られた流量から各支流の特徴と取水による減水を理解するため、比流量による比較を行なった。流域面積は、地形図による流域界（集水域）を判読し、1mm方眼紙による方眼法によって流域面積を算出した。

3. 結果

発電用として取水されていない河川と取水口より上流地点で調査した観測結果を見ると、濁川支流の伝上川と濁沢川の流量は比較的維持しているが、伝上川の方が流量は多く、比流量は濁沢川の方が多い傾向がある。上黒沢と千沢は同じ王滝川左岸側支流であるが、比流量に大きな差が見られる。上黒沢の水源地は御嶽山火口部より離れており、植生被覆も含めて地域差が見られる。一方、御嶽山非山体側の王滝川右岸側の崩沢の比流量は左岸支流と比較すると小さく、渇水期には水枯れの様子も観測された。

発電用として取水されている河川の取水後下流地点でも、部分取水や取水後の支流の流入によって、流水があり流量観測を実施した。しかし、大又川や鹹川の発電用の河川取水は全川幅の河床がスリット式になって取水されるため、河川水が全量取水されて水が流れない様子も観察された。

その一方で、許可取水量の上限もあり、許可取水量2.7 m³/秒の鹹川の取水口前後の2021年8月の観測では、取水前4.346606 m³/秒の流量が取水後1.57311 m³/秒となり、計算上2.773496 m³/秒の取水となり、これは許可取水量とほぼ一致している。許可取水量を超える流量の場合は、全て取水されることなく流下するが、発電用に河川取水された支流の比流量は非取水河川と比較すると取水された分値は小さくなり、取水の影響が顕著に示されている。

4. おわりに

王滝川の支流では人工的な水移動や植生被覆等によって、河川環境の顕著な地域差が見られる。特に発電用のための取水は、河川水質や生態系などの陸水環境に大きな影響をもたらす場合もあるが、必ずしも取水地点や取水量の数値的データの把握は十分ではない。このため、さらなる現地調査と各支流間の比較検討などによって、流域全体や各支流の特徴を把握する予定である。

本研究はJSPS科研費・基盤研究(B)『自然災害/資源開発を受容する火山山麓地域の自然共生に向けた水文水質・生態機構の解明、研究代表者；田代喬（課題番号19H04318）』の一部として実施した。



図1 王滝川水系の水力発電施設分布（田代、2016）

17 火山山麓のダム減水区間における湧水と付随ガスによる水環境の特性

*宇佐見亜希子・田代喬（名古屋大・減災セ），松本嘉孝・江端一徳（豊田高専・環境都市），谷口智雅（三重大・人文），坪井秀樹（東海技術センター），青山晃大・八木明彦・岩月栄治（愛知工業大・工学）

1. はじめに

御嶽山南麓にある牧尾ダムの堰堤から 400m 下流までの区間（以降、牧尾ダム直下と呼ぶ）に、湧水と付随してガスが噴出している地点が存在している。このような水域は日本の温泉地で確認され、成分分析や形成過程の研究は進んでいる（Ohsawa ら 2002）。しかし、こうした環境下での生態系の仕組みや水質動態を調査した研究は少ない。当地は木曾川水系王滝川の集水域であることから、用水の受益地域を含む下流域への影響も懸念される。そこで本研究では、湧水と付随ガスが顕著な牧尾ダム下流の減水区間に着目し、水質とガスの成分を調査することにより、水環境の特性を明らかにすることを目的とする。

2. 対象地域の概要と方法

御嶽山南麓を流れる王滝川下流部に愛知用水の水瓶となる牧尾ダムが設置されている。ダム堰堤より下流への水の流れは通常時はなく、貯水池の水は導水管を通り 9km 下流の王滝川へ放水される。また、牧尾ダム上流の水域では御嶽発電用に取水がされており、その放水口が牧尾ダム堰堤から約 3km 下流にあるため、牧尾ダム直下からその放水口までが減水区間となる（図 1）。この減水区間内の河川水は湧水あるいはその両岸から流入する支川により王滝川が形成される。牧尾ダム貯水池からダム直下への水の流れは、大雨等による洪水吐ゲートからの放流がある。2018 年、2019 年、2020 年でそれぞれ 1,296 時間（54 日分）、576 時間（24 日分）、1,392 時間（58 日分）であり、年間を通して牧尾ダム直下へ放流される頻度は少なく、減水区間の水環境は安定している。

2019 年 9 月～12 月、2020 年 8 月、10 月、12 月に牧尾ダム直下にて調査を実施した。現地では、pH 測定、流量観測をした。実験室で RpH（採水した試料水をビーカーに入れ 15 分間曝気）、アルカリ度、硝酸態窒素塩化物イオンの測定、主要成分（Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, S, Si）分析（ICP 発光分光分析装置：SHIMADSU：ICPE9000（平成 24 年度文科省私大研究設備整備費等補助金））、ガス成分分析を実施した。

3. 結果と考察

牧尾ダム直下の湧水を源水とする表流水（王滝川）は弱酸性（pH4.8～5.5）であった（図 2）。湧出ガス成分の 96～98% が CO₂ であり、この溶解による酸性化と考えられた。これは、表流水の硫酸イオンや硝酸イオンは低濃度、塩化物イオンでは同程度

の Na の存在があったことから推察される。牧尾ダム直下で弱酸性を示した地点の RpH は 8.0 と弱アルカリ性であった（図 2）。酸性水により鉱物から Na や Ca 等の成分が溶解しアルカリ性の水質が形成されたと考えられる。この水環境下では、CO₂ 脱気により pH5.5 から 8.0 へ大幅に変化する水質であり、また、高濃度の金属イオンが溶解しているため、水生生物の生息が困難であることが示唆される。



図 1. 御嶽山南麓の牧尾ダム減水区間の位置

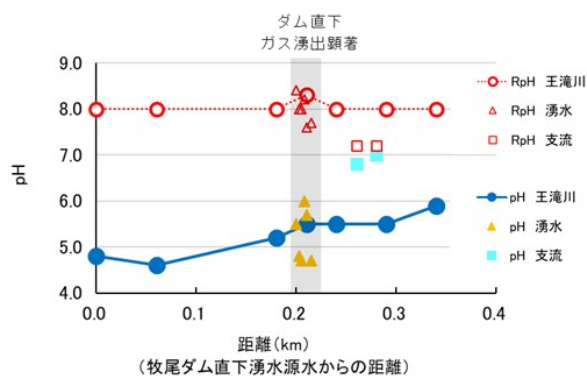


図 2. ダム直下付近の pH、RpH

参考文献

Ohsawa, Kazahaya, Yasuhara, Kono, Kitaoka, Yusa, Yamaguchi (2002): Escape of volcanic gas into shallow groundwater systems at Unzen Volcano (Japan): Evidence from chemical and stable carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon. *Limnology*, 3, 169-173.

謝辞

(独)水資源機構牧尾管理所には調査の便宜を図っていただいた。JSPS 科研費 19H04318（代表：田代喬、2019-2022 年度）と WEC 応用生態研究助成（代表：宇佐見亜希子、2020-2021 年度）の助成を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

Klebsormidium flaccidum の繁茂と溶存無機態炭素濃度との関係

*野崎健太郎（椋山女学園大学），松本嘉孝（豊田高専），谷口智雅（三重大学），宇佐見亜希子（名古屋大学）
田代 喬（名古屋大学）

1. 背景と目的

火山性の無機酸性陸水は，日本の興味深い研究対象の1つである（Ueno, 1958）. Nozaki (2016) は，pH 4~6 を示す御嶽山南麓の無機酸性河川では，付着藻群落が発達しないことを報告している．酸性水域では，溶存無機態炭素が二酸化炭素分子として大気中に放出され，理論的には， 0.31 mgC L^{-1} を超えることはない（Satake and Saijo, 1974）. Nozaki *et al.* (2020) は，無機酸性河川では付着藻は炭素律速の状態にあることを推察している．ところが，私たちは，2020年11月13日に御嶽山南麓の pH 3 を示す河川敷の湧水において，糸状緑藻 *Klebsormidium flaccidum* の大繁茂を観察した（図1）．そこで，この繁茂と溶存無機態炭素濃度との関係を考察した．



図1. 御嶽山南麓の pH 3 を示す無機酸性湧水における糸状緑藻 *Klebsormidium flaccidum* の繁茂（2020年11月13日）.

2. 方法

野外調査は2020年11月13日から14日に行った．調査地は，御嶽山の噴気孔が位置する地獄谷から流出する濁沢川の河川敷である．一般水質項目として，水温，pH，電気伝導度を測定した．付着藻は，20 cm × 20 cm のコドラートを用いて採取した．付着藻の活性は，酸素ロガー（HOBO U26, CO-UA 002, Onset Co.）を用いた溶存酸素濃度の日変化測定から評価し

た．*K. flaccidum* の群体を11月15日に採取し実験室に持ち帰り，明暗びん法によって，光合成と呼吸を測定した．溶存無機態炭素濃度（DIC）は，TOC/TN計（Analytik-jena Co.）で定量した．

3. 結果と考察

本調査地で繁茂していた *K. flaccidum* の細胞の幅は6~8 μm，長さは8~27 μmであった．*K. flaccidum* は陸生藻として知られているが，英国では流水からも報告されており（Rindi, F. 2011, *The Freshwater algal flora of the British Isle* p.554-557），細胞の大きさ，細胞壁と細胞質の形態から *K. flaccidum* と同定した．図2は，調査地におけるクロロフィル a 量（A），強熱減量（B），溶存無機態炭素濃度（C）の分布である．クロロフィル a 量，フェオフィチンと強熱減量は，湧出部から10 m 下流から増加し，溶存無機態炭素濃度は，下流に向かって明瞭な減少を示した．*K. flaccidum* の光合成一光曲線は陽生型であり，湧出部は堤防の縁で遮光されているため増殖が抑えられていたと考えられる．溶存無機態炭素の減少は *K. flaccidum* の吸収によるものと推察された．

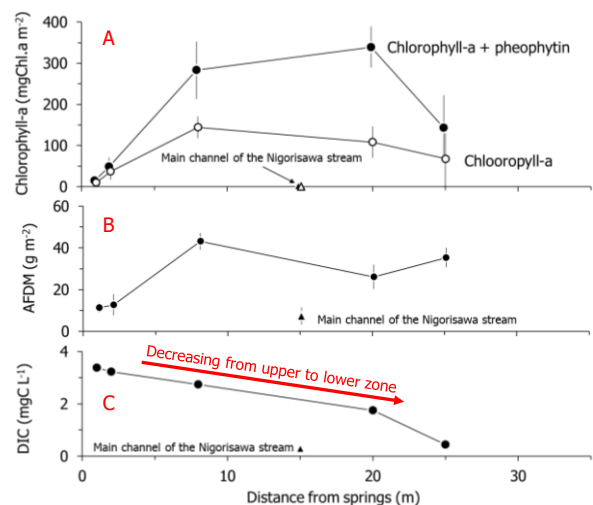


図2. 調査地におけるクロロフィル a 量（A），強熱減量（B），溶存無機態炭素濃度（C）の分布（2020年11月13日）