

【課題番号】 2025#03

【採 扱 者】 二階堂智明（新潟大学農学部）

【研究テーマ】

濁度と電気伝導度測定に基づく小規模流域の土砂災害発生リスクの推定

【要旨】

1. はじめに

山地・丘陵地域の流域における土砂の動態は、化学的風化と物理的侵食により支配される。化学的風化は土砂の生産過程の1つであり、岩石を溶解させ、河川水に溶存物質を供給する。一方、物理的侵食は土砂の流出過程の1つであり、河川水に懸濁物質を供給する。

Millot et al. (2002) は、世界の主要河川を対象として、2つの作用がべき乗則に従う平衡状態にあることを示した。しかし、土砂災害のリスクが高い流域では、平水時においてもこの平衡状態が崩れている可能性がある。すなわち、化学的風化（土砂生産）が物理的侵食（土砂流出）よりも活発な場合、土砂が流域に残留し、斜面崩壊や地すべりの準備状態にあると考えられる。

近接する流域同士を比較する場合、気象条件を同一とみなし、2つの作用を物質の濃度で比較できる。総溶存イオンの当量濃度、および懸濁物質濃度は、それぞれ電気伝導度（以下 EC）および濁度と相関関係がある。これらを代替指標として流域の風化・侵食特性を評価できると考えた。

本研究では、濁度と EC の関係を規定する地質・地形学的要因を明らかにし、広範囲に適用可能で、かつ個々の小規模流域の特性に基づく斜面災害危険度の評価手法の確立を目指す。

2. 方法

対象地域は北陸地方の河川である。本稿では、堆積岩地域である新潟県東山丘陵・魚沼丘陵・東頸城丘陵の3地域を取り上げる。中でも、特異的な水質が見られた東頸城丘陵について述べる。

研究手法は、現地調査、水質分析、鉍物分析、GIS 分析の4つである。まず、平水時の河川で EC と濁度を測定し、水試料を採取した。その後、水質分析により主要イオン濃度と懸濁物質濃度を求めた。また、一部の河川では懸濁物質の鉍物分析を行った。最後に、GIS ソフトウェアを用いて地質・地形等の条件と水質の関係について総合的に解析し、EC と濁度の関係を規定する地質・地形学的要因を検討した。

3. 結果・考察

3.1 東頸城丘陵における特異な水質

3つの丘陵における濁度と EC を比較した結果、東頸城丘陵の測定値は低濁度・高 EC の領域に集中し、他地域とは異なる分布を示した。また、小林（1971）のデータに基づき日本の河川の濁度と EC を推定し、本研究の測定値と比較した結果を図 1 に示す。東頸城丘陵の分布は、全国の分布傾向と比較して低濁度・高 EC 側に広がり、土砂生産が土砂流出に対して相対的に活発であると判断できる分布を示した。

3.2 硫酸による化学的風化

水質分析の結果、海成泥岩主体の流域において硫酸イオン濃度が高い傾向が見られた（図 2）。

このことから、東頸城丘陵が特異的な水質を示した要因として、黄鉄鉱の酸化に由来する硫酸による激しい化学的風化が考えられる。

3 地域（東頸城丘陵、東山丘陵、魚沼丘陵）の地質は、東頸城丘陵と東山丘陵の西部が海成層泥岩主体、東山丘陵の東部と魚沼丘陵が陸成層砂礫岩主体である。海成泥岩は構成粒子が細粒であり、水と岩石の接触面積が大きく、化学的風化が活発に行われる。また、海成層の泥岩は黄鉄鉱に富むため、これが酸化して硫酸が生成し、激しい化学的風化が生じる。結果として、河川水の EC が高い値を示したと推察される。

3.3 地すべりによる化学的風化の促進

東頸城丘陵は、全国有数の地すべり多発地域として知られる。地すべりは、化学的風化の結果であると同時に、化学的風化を促進する要因でもある。一般的な斜面では、鉱物の消費とともに化学的風化速度が減少する。一方、化学的風化に続いて地すべりが発生すると、岩石の破砕により未風化鉱物が供給され、化学的風化が持続的に進行する。この化学的風化と地すべりの間に働く相互作用が、当地域における高い EC の要因と考えられる。

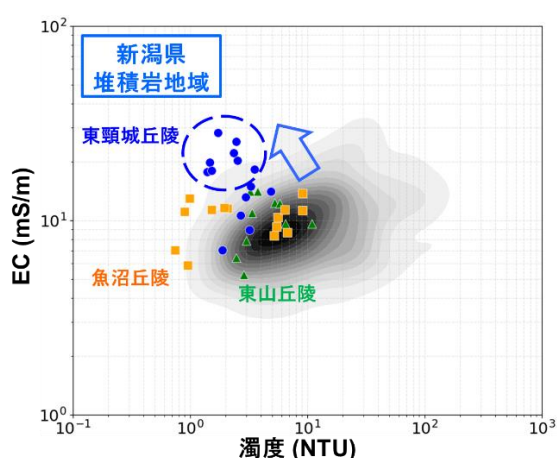


図1 全国および新潟県堆積岩地域の濁度・EC

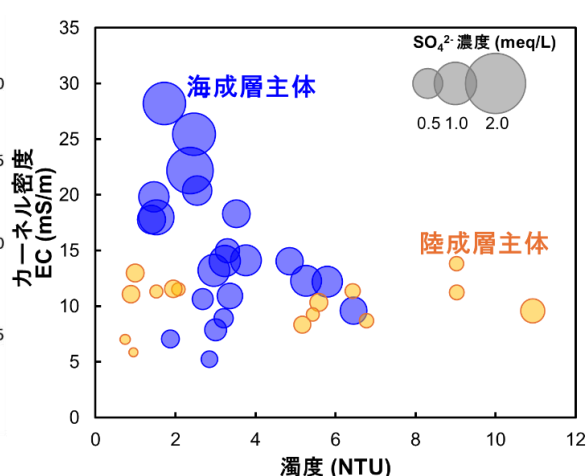


図2 濁度・EC と硫酸イオン濃度

3.4 懸濁物質の凝集

粘土鉱物は負電荷を持ち、陽イオン濃度が高い条件下では電荷が中和して凝集・沈降する。この凝集・沈降の境界となる電解質濃度は臨界凝集濃度と呼ばれ、特に 2 価陽イオンは強い凝集作用を示す。

そこで、凝集作用による濁度低下を検証するため、ベントナイト懸濁液に CaCl_2 溶液を加える凝集実験を行った。西村ほか (1999) のモンモリロナイトに対する臨界凝集濃度を参考に、 Ca^{2+} 濃度は $0.0\text{--}1.0\text{ meq/L}$ の範囲で調整した。1 時間経過後に上澄みの濁度を測定した結果、 Ca^{2+} 濃度 $0.8\text{--}1.0\text{ meq/L}$ の間で顕著な濁度の低下が認められた。この濃度範囲が臨界凝集濃度に相当する。

この結果を実河川と比較した結果を図 3 に示す。東頸城丘陵における低濁度河川の 2 価陽イオン濃度は、本実験で得られた臨界凝集濃度を上回る。したがって、東頸城丘陵では、化学的風化

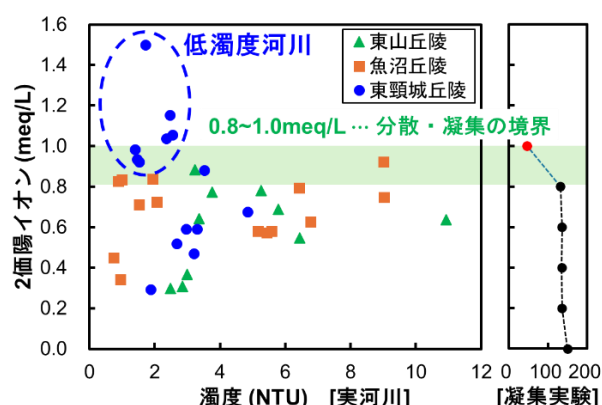


図3 実河川の濁度・2価陽イオン濃度と凝集実験の結果

により生じた高濃度の陽イオンにより懸濁物質が凝集・沈降し、河川水の濁度が低くなったと推察される。

3.5 流域特性の補正

濁度およびECは、風化・侵食以外の要因により変化する可能性がある。本研究では、河床堆積物の再移動に伴う濁度変化と、深層地下水の混入に起因するEC変化について検討した。

まず、河床堆積物の移動は河川の掃流力に依存する。掃流力は水深や流量に加えて河床勾配の影響を受けるため、GISソフトウェアを用いて河床勾配を求め、濁度との関係を検討した。その結果、両者の間に明瞭な関係性は認められず、河床堆積物の再移動が濁度に及ぼす影響は小さく、無視できる程度であると考えられた。

次に、小林(1971)によれば、日本の河川におけるCl⁻濃度の平均値は約0.16 meq/Lと報告されている。この成分は化学的風化に由来しないため、そのままでは化学的風化を過大評価する可能性がある。そこで、本研究ではこの平均値を閾値とし、Cl⁻濃度が高い流域に対してECの補正を行った。その結果、主に高ECを示していた流域で値が低下し、深層地下水の影響を除外できた。

3.6 風化・侵食の平衡関係と新潟県堆積岩地域の特異性

全国の河川における濁度・ECのカーネル密度分布に対し、姫川左岸地域の測定結果を重ねた結果を図4(a)に示す。高密度領域では、濁度とECの間に正の相関が認められた。この特徴は、Millot et al. (2002)と同様に、物理的侵食速度と化学的風化速度の平衡関係を示すものと推察される。

姫川左岸地域のうち、金山沢と浦川は濁度とECが共に高く、生産された土砂が継続的に排出されている状況にある。よって、この2地点では、化学的風化と物理的侵食が平衡状態にあると仮定する。この2地点と全国の河川の最大密度点の3点を用いて、単回帰分析により回帰式を導出し、これを日本の河川の化学的風化速度と物理的侵食速度の平衡式とした。

$$EC = 4.11 (\text{濁度})^{0.46}$$

この平衡式に対し、新潟県の堆積岩地域のデータを重ねた結果を図4(b)に示す。東頸城丘陵の一部の河川が、左上方向(低濁度・高EC)へ大きく逸脱する傾向が認められる。これらの流域では、土砂生産が排出を上回ることによって土砂が残留し、大規模な土砂流出を引き起こす準備状態にある可能性がある。

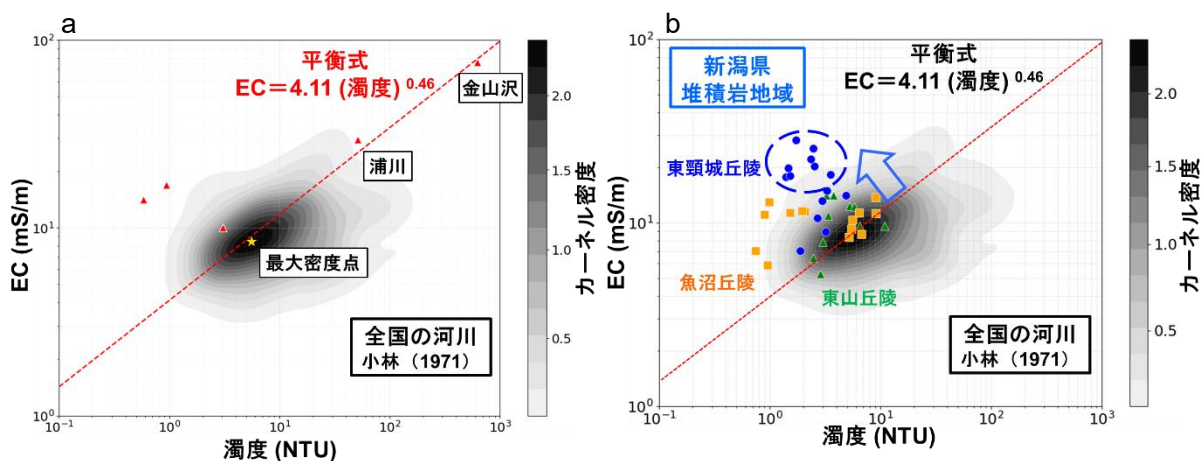


図4 風化・侵食の平衡式と濁度・ECの測定結果 (a:姫川左岸地域, b:新潟県堆積岩地域)

4. 今後の展望

①地質ごとの濁度、EC 特性の定量化

研究で考察した濁度・EC の規定要因は、水質分析と GIS 分析に基づいた定性的な推定にとどまっている。今後は、現地で岩石試料を採取し、懸濁物質と溶存イオンの生成過程を再現する室内実験により、地質ごとの濁度・EC への寄与を定量的に把握したい。

②広域的かつ多地点での調査の実施

本研究では、主に新潟県内の堆積岩地域を中心に調査を行った。しかし、火成岩地域における調査は姫川左岸地域などの一部に限られている。広範囲に適用可能な評価手法を確立するため、多様な地質を有する流域について、濁度と EC の傾向を把握したい。また、流域内の水質変化を捉えるため、支流や上流域でも採水を行いたい。

③世界の河川との比較

化学的風化と物理的侵食の相互作用は、Millot et al. (2002)をはじめとして多くの先行研究で報告されている。今後はさらなる文献調査を通じ、国内外における濁度と EC の分布を把握することで、本研究で用いた評価手法の海外への適用可能性を検討したい。

【研究成果・まとめ】

本研究では、北陸地方の河川を対象として水質調査を行い、以下の知見を得た。

- ①東頸城丘陵は、全国の河川と比較して低濁度・高 EC に分布が集中し、特異的な水質を示した。この水質は、流域内に土砂が残留している可能性を示唆する。
- ②東頸城丘陵の水質は、硫酸による活発な化学的風化と、化学的風化と地すべりの間に働く相互作用に起因する。
- ③地すべり頻発地帯における特異的な濁度・EC の出現は、両指標を用いた斜面災害危険度評価手法の有効性を示唆する。

【参考資料（論文・学会発表など）】

- ・小林 純 (1971) .水の健康診断.岩波書店,1-207.
- ・西村ほか (1999) .土コロイド現象の基礎と応用 (その 12) -コロイドから見た土の透水性と侵食-,農業土木学会誌,67,3,277-284.
- ・渡部ほか (2019) .河川水の溶存物質・浮遊物フラックスに基づく流域の風化・侵食速度推定技術の開発.国土交通省 平成 28~30 年度 河川砂防技術研究開発公募地域課題分野公募 (砂防).
- ・ Millot et al.(2002). The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion: new insights from rivers of the Canadian Shield. Earth and Planetary Science Letters 196, 1-2,83-98.