

島根県隠岐島後における森林溪流水質の空間変動

藤巻玲路¹・山下多聞^{1,2,*}・葛西絵里香²

¹島根大学学術研究院環境システム科学系・

²島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター森林科学部門

本研究では、隠岐島後(どうご)の森林溪流水質の特性を明らかにするため、隠岐島後の森林溪流81ヶ所の溪流水質を調べ、採水地の集水域の地形および植生との関連を考察した。隠岐島後の森林溪流水では、日本全国の平均的な森林溪流水に比べ、4.9倍のCl⁻濃度が観測された。また、電気伝導度およびNa⁺、K⁺、Mg²⁺の濃度についても大きな値を示した。これらのイオンの全国平均との濃度差におけるCl⁻との比は、海水における元素比に近いことから、海塩の影響が強いことが考えられた。HCO₃⁻は、Mg²⁺およびCa²⁺濃度と強い正の相関関係があり、Mg²⁺およびCa²⁺のカウンターアニオンとして重要であることを示唆している。また、pHやMg²⁺、Ca²⁺およびHCO₃⁻濃度は集水域の標高が高いほど低下する傾向を示し、高標高の集水域では集水域の酸緩衝能が相対的に小さい可能性がある。NO₃⁻濃度は平均23.4 μmol L⁻¹であったが、地点間変動が大きく、およそ1/4の溪流において隠岐諸島における窒素沈着で生じる窒素飽和状態の森林溪流で予測される濃度を超えた。溪流水NO₃⁻濃度は集水域最高地点の標高や傾斜角の最大値と最小値の範囲と正の相関を示し、起伏の大きい地形を持つ集水域において窒素流出が生じやすいことが示唆された。

キーワード：隠岐諸島、森林溪流、水質、地形

Reiji Fujimaki, Tamon Yamashita, and Erika Kasai : Spatial variability of stream chemistry measured at forested watersheds in the Oki-Dogo Island, western Japan. *Japanese Journal of Forest Environment* 64:57-64, 2022.

We investigated stream water chemistry at 81 forested watersheds in the Oki-Dogo Island in relation to topography and dominant vegetation in each watershed. Concentrations of Cl⁻, Na⁺, K⁺, and Mg²⁺ in Oki-Dogo forest streams were much higher than those in Japanese average values, suggesting strong influence of sea salt. Positive correlations among HCO₃⁻, Mg²⁺ and Ca²⁺ indicates that HCO₃⁻ is important counter anion of Mg²⁺ and Ca²⁺. Relatively low pH and concentrations of HCO₃⁻, Mg²⁺ and Ca²⁺ were observed in the stream waters in higher elevation. Therefore, acid neutralizing capacity in the forested watersheds at higher elevation may be small compared to watersheds at the lower elevation forests. Mean NO₃⁻ concentration was 23.4 μmol L⁻¹, whereas one-fourth of the sampling sites exhibited higher NO₃⁻ concentration than expected value at the stream in nitrogen-saturated forest under N deposition level in Oki Islands. NO₃⁻ concentration was positively correlated to the highest elevation and range of slope steepness within the watersheds, suggesting that nitrogen loss tends to occur frequently in watersheds with hilly topography.

Key words : Oki Islands, forest stream, water chemistry, topography

1. はじめに

森林流域の河川溪流水質は下流域における水資源利用や沿岸水域の生産性にとって重要である。河川や沿岸部に過剰な栄養塩が流入すると種々の水棲生物に強いインパクトを与えることがある。例えば、森林溪流への窒素流入が増加すると、淡水域や沿岸域の酸性化や富栄養化を引き起こす(Vitousek *et al.*, 1979)。源流部の水質は、その流域での人為的な汚染のないバックグラウンドとして捉えられているが(木平ら, 2006)、特に島嶼部においては河川の源流部から河口部までの距離が短く、森林溪流による沿岸水域の水質形成への寄与は大きい。

隠岐諸島は島根半島の北約50 km, 北緯36度, 東経133度付近の日本海に位置する諸島である。隠岐諸島の中で最も大きな島である島後(どうご)は、面積は約242 km²で、最高標

高は大満寺山頂の608 mである。1963年に隠岐諸島のほぼ全域が大山隠岐国立公園に指定されるとともに、2013年には隠岐ユネスコ世界ジオパークに認定されている。約2万年前の氷期に本州島根半島と陸続きとなった履歴をもつことや、現在は対馬暖流の影響で温暖な気候下にあることが関係し、北方系植物種と南方系植物種が共存している(Takahara *et al.*, 2001)。このように島嶼という限られた面積の中で極めて特徴的な生物相をもつことから、隠岐諸島の固有種や稀少種も含めた植物種リストが作成され、植生の記載が進んでいる(例えば、枚村, 1994)。その一方で森林がもつ公益的機能、特に森林が提供する水源涵養機能についての研究に乏しい。

四周を海に囲まれた島嶼では河川溪流の水質は海塩に強く影響を受ける(海老瀬・永淵, 2002; 海老瀬, 2013)。また屋久島では、卓越する北西の季節風により長距離輸送される硫酸化物の影響が顕著であることが報告されており(海老

* 連絡・別刷請求先著者 (Corresponding Author) : 〒690-8504 島根県松江市西川津町1060 島根大学生物資源科学部 : Faculty of Life and Environmental Sciences, Shimane University, 1060, Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan
Email : tamonyam@life.shimane-u.ac.jp

¹ Institute of Science of Environmental Systems, Shimane University

² Forest Science Section, Education and Research Center for Biological Resources, Faculty of Life and Environmental Sciences, Shimane University

(2021年12月7日受付, 2022年8月3日受理)

瀬・永淵, 2002), 海塩や大気からの酸性沈着物が渓流水に流出していることを示している。一方で, 渓流水の水質は集水域内の植生(Lovett *et al.*, 2002)や地形(Ogawa *et al.*, 2006; Fujimaki *et al.*, 2008)などの特性によっても左右される。例えば, 藤巻ら(2014)は島根県中部の森林渓流において, 落葉広葉樹が優占する集水域と比較してスギ人工林が優占する集水域の渓流水質は近接する集水域であっても Ca^{2+} や NO_3^- の濃度が高いことを報告している。また, 急傾斜地の面積が大きい集水域においては NO_3^- の濃度が高くなることも知られている(Fujimaki *et al.*, 2008)。隠岐諸島の森林渓流の水質については, 佐々木ら(1997)による湧水の調査や海老瀬(2013)による渓流水質の調査により, 海塩の影響を強く受けていることが指摘されている。その一方, 集水域の森林の植生や地形状況との関連は研究されていない。隠岐諸島における森林渓流の水質状況の地域的空間的な変動を把握するには, 海塩や大気沈着物といった大局的な要因のみならず, 集水域内の特性といったより局所的な要因との関連も検討が必要である。

本研究では, 隠岐諸島のうち隠岐島後の森林渓流の水質と集水域内の森林の植生や地形状況との関連を明らかにすることを目的とし, 隠岐島後の81ヶ所の森林渓流の水質を調査

した。また, 調査を行った渓流の集水域内の地勢情報として地形および植生を地理情報システム(GIS)によって解析し, 渓流水質との関連を検討した。

2. 調査地

島根県隠岐郡隠岐の島町(隠岐島後)の計81地点の森林小集水域で渓流水の採水を行った(図-1)。隠岐島後は北東部山地, 南西部山地, 中央低地に大別される(林, 1990)。地質は大まかに, 南西部山地にはアルカリ流紋岩や粗面岩が広く分布し, 中部低地では泥岩・凝灰岩などの堆積岩や安山岩・玄武岩などの火山岩からなる。北東部山地の地質はやや複雑だが, 隠岐片麻岩や花崗岩を基盤とし, それらを覆うアルカリ流紋岩・安山岩・玄武岩や凝灰岩が見られる(林, 1990)。隠岐島後南東部の気象庁西郷特別地域気象観測所における1991年から2020年までの年平均気温は14.3℃, 平均年降水量は1,816 mm, 降水量の最小月は2月で112 mm, 最大月は9月で235 mmである(気象庁, 2021)。対馬暖流の影響で冬季も比較的暖かく, 降雪や積雪は少ない。隠岐島後南部の西郷岬アメダスでは, 渓流水を採水する調査日の直前5日間に, 日降水量が10 mmを超えるまとまった降水は観測されてい

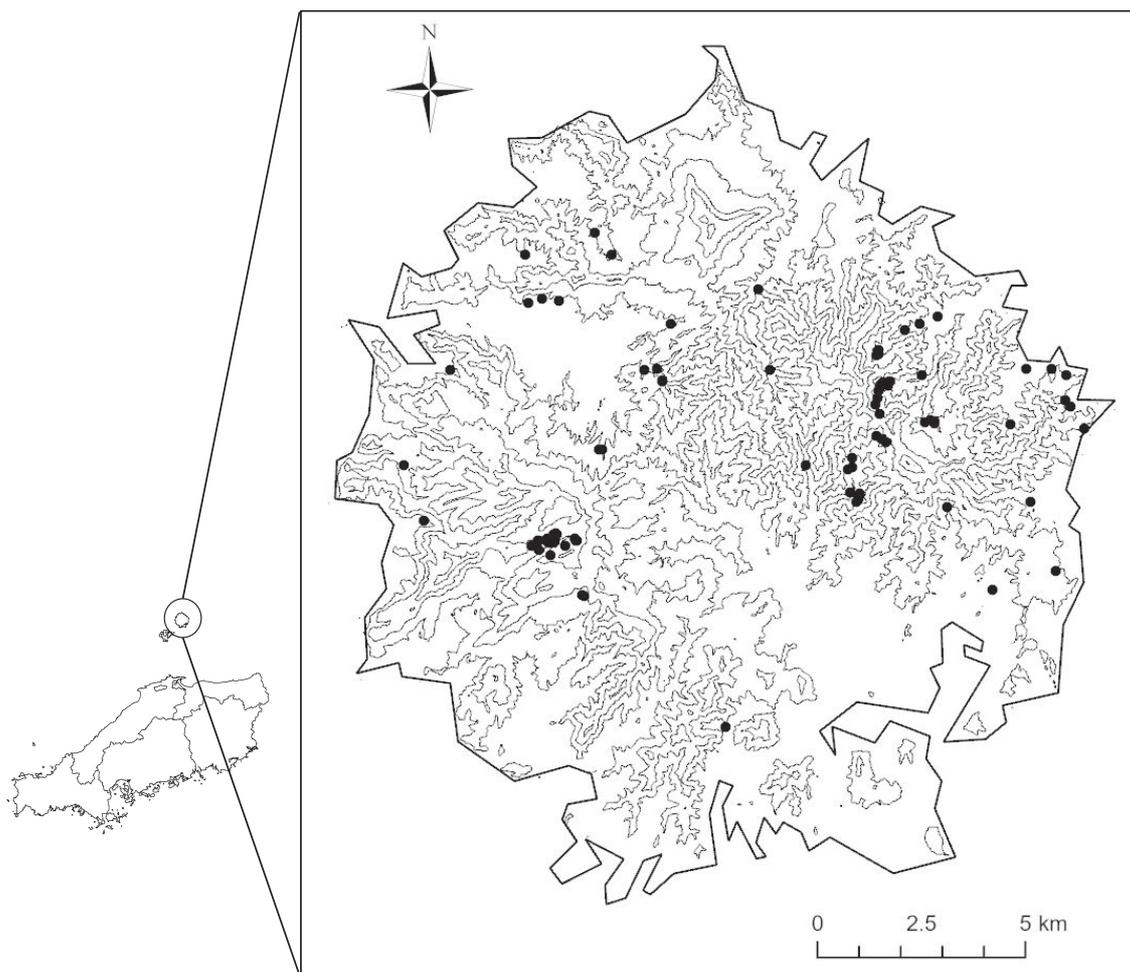


図-1. 隠岐島後の採水地位置図
●は採水地点を示す。

表-1. 採水を行った集水域の特性

	平均値	最大値	最小値
集水域面積(ha)	42.12	369.22	0.01
集水域最高標高(m)	414	607	125
採水地標高(m)	174	427	2
集水域内標高差(m)	240	529	12
集水域内最大傾斜角(°)	53	77	20
傾斜角の範囲(°)	49	77	9
植林地面積割合(%)	48.6	100.0	0.0
広葉樹林面積割合(%)	45.7	100.0	0.0

広葉樹林面積割合は、常緑広葉樹二次林と落葉広葉樹二次林の面積の合計面積割合を用いた。

い。隠岐島後の南東部を除く70溪流において、2016年8月21日から同年8月23日にかけて渓流水の採水を行った。また、南東部の11溪流については、2017年3月13日に採水した。渓流水をポリプロピレン製瓶で採水し、採水後は分析まで冷蔵庫で保管した。本研究では溪流によって異なる月の採水となっているが、渓流水質の季節変動に関する先行研究において、渓流水のイオン類の濃度では季節変動が顕著ではないとする報告(浅野ら, 1996; 海老瀬・永淵, 2002; 戸田ら, 2007)や、季節変化が認められる場合でも春と夏とでは渓流水イオン濃度が大きく異なっていない報告(徳地ら, 1991; 五名ら, 2007)があることから、本研究においても採水時期の違いによる影響は小さいと仮定した。ただし渓流水NO₃⁻濃度については夏季にピークが見られることを報告する研究もあることから(平田・村岡, 1991; 大手ら, 2010)、NO₃⁻濃度の季節変動の影響については考察で述べる。採水を行った地点の集水域について、本研究で検討した地勢情報(後述)の概況を表-1に示した。

3. 方法

採取試料のpH(HORIBA, D-21)および電気伝導度(EC, HORIBA ES-51)を測定し、試料の一部を孔径0.20 μmのメンブレンフィルター(東洋濾紙, ADVANTEC DISMIC-25AS)で濾過した後、イオンクロマトグラフ(Dionex, ICS-1600)により溶存態の陽イオン(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)および陰イオン(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)の濃度を分析した。また、陽イオン電気当量合計値と陰イオン電気当量合計値との差はHCO₃⁻濃度として扱った。

採水地点の集水域の抽出には、ArcGIS10.8のエクステンションであるSpatial Analystの水文分析ツールセットを用いた。使用した5 mメッシュ標高データは微細な窪地を取り除くためにFillツールを用いてデータの平滑化を行ってから、Flow Directionツールを用いて流向を求め、Flow Accumulationツールを用いて累積流量のラスターを作成した。現地ハンディGPSを使って記録した採水地点のポイントデータから一定距離内の累積流量が最も多いセルを検索し、そこを流

出点として、Watershedツールを用いて集水域を作成した。集水域モデルを2万5千分の1地形図上で確認し、現地の状況と明らかに異なっていた場合に、等高線を元に現地の状況に合わせて集水域の範囲を修正した。作成した集水域モデルから、集水域の面積、採水地の標高、集水域の最高地点の標高、セル毎の傾斜角、集水域内の植生面積割合を求めた。国土地理院基盤地図情報数値標高モデル(国土地理院, 2020)を加工して集水面積、集水域の最高地点および採水地の標高、セル毎の傾斜角を算出した。この解析で用いたセルのサイズは5 m × 5 mメッシュサイズに相当する。植生は自然環境GISの第6回および第7回自然環境保全基礎調査植生調査報告書の植生調査データ(環境省自然環境局生物多様性センター, 2020)を用いた。

検討した集水域の地勢状況は、各集水域の面積の対数値、最高地点および採水地の標高と標高差、傾斜角の最大値、集水域内の傾斜角の最大値と最小値の差(傾斜角の範囲)、植林地および広葉樹二次林(落葉広葉樹および常緑広葉樹二次林の合計)の面積割合とした。それぞれの地勢状況について、渓流水のpH、ECおよび各種イオン濃度との相関係数を求めた。

4. 結果

表-2に隠岐島後の森林渓流水における各水質項目の平均値を示す。また表-2には比較として、日本の森林渓流水1,278ヶ所の水質を調査した木平ら(2006)の報告の値も示した。隠岐島後の森林渓流は、日本全国の森林渓流の平均と比較して、電気伝導度およびNa⁺, K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻の濃度が大きな値を示した。特にCl⁻濃度の値が大きく、全国平均値の4.9倍の濃度であった。pH, NO₃⁻, HCO₃⁻は全国平均と同等の値を示し、NH₄⁺およびCa²⁺は全国平均値よりも小さな値であった。

隠岐島後の渓流水各種イオン濃度の相関行列を表-3に示した。Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻のイオン濃度は相互に強い正の相関が認められた。特にNa⁺とCl⁻の相関係数は0.96と大きな値を示した。また、K⁺とNa⁺, K⁺とCl⁻, Ca²⁺とNa⁺およびCa²⁺とMg²⁺の間にも正の相関が認められた。陰イオンにおいて

表-2. 隠岐島後と全国の森林渓流水質の比較

	pH	EC	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
隠岐島後	6.6±0.5	13.3±4.4	633±215	0.7±3.6	48±29	107±64	98±80	590±218	23±14	79±47	322±245
全国平均	6.8±0.8	7.0±3.5	216±128	6.1±3.8	16±9	54±37	133±105	120±89	26±14	60±53	341±229

数値は平均値 ± 標準偏差を示す。電気伝導度(EC)の単位はmS m⁻¹, イオン類の単位はμmol L⁻¹。全国平均は木平ら (2006)から引用。

表-3. 渓流水各種イオン濃度の相関行列

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
NH ₄ ⁺	n.s.							
K ⁺	0.43	n.s.						
Mg ²⁺	0.65	n.s.	n.s.					
Ca ²⁺	0.37	n.s.	n.s.	0.67				
Cl ⁻	0.96	n.s.	0.41	0.63	0.27			
NO ₃ ⁻	n.s.	n.s.	-0.26	n.s.	n.s.	-0.22		
SO ₄ ²⁻	0.23	n.s.	n.s.	0.37	0.53	n.s.	n.s.	
HCO ₃ ⁻	0.58	n.s.	n.s.	0.82	0.86	0.46	n.s.	0.23

n.s.は、有意(p < 0.05)な相関が認められなかったことを表す。

表-4. 集水域の地勢状況と各渓流水質の相関係数

	pH	EC	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
集水域面積の対数値	n.s.	n.s.	n.s.	0.26	n.s.	0.24	0.23	n.s.	0.33	n.s.	0.25
集水域最高標高	-0.31	-0.63	-0.63	n.s.	n.s.	-0.53	-0.38	-0.61	0.30	-0.30	-0.44
採水地標高	-0.26	-0.58	-0.50	n.s.	n.s.	-0.56	-0.44	-0.47	n.s.	-0.31	-0.48
集水域内標高差	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.29	n.s.	n.s.
集水域内最大傾斜角	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.27	n.s.	n.s.
傾斜角の範囲	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.31	n.s.	n.s.
植林地面積割合	0.34	0.31	0.27	n.s.	n.s.	0.28	0.25	0.31	n.s.	n.s.	0.33
広葉樹林面積割合	-0.29	-0.25	-0.23	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0.29	n.s.	n.s.	-0.23

広葉樹林面積割合は、常緑広葉樹二次林と落葉広葉樹二次林の面積の合計面積割合を用いた。n.s.は、有意(p < 0.05)な相関が認められなかったことを表す。

は、SO₄²⁻にMg²⁺およびCa²⁺と正の相関が認められた。HCO₃⁻はNa⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻と正の相関を示した。NO₃⁻はいずれのイオン濃度とも強い相関関係は認められなかった。

採水地の上流集水域の地形状況および植生と、各水質項目との相関係数を表-4に示す。Cl⁻濃度は、集水域の最高標高および採水地の標高と負の相関を示し、植林地面積割合の増

加とともに値が増加する傾向にあった(表-4, 図-2)。Cl⁻濃度と相関が強いNa⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻の濃度についても同様の傾向が認められた。Cl⁻濃度とは強い相関が認められないCa²⁺濃度についても、集水域の最高標高および採水地の標高の上昇とともに減少し、また、植林地面積割合の高いいくつかの集水域において高い濃度を示した(表-4, 図-3)。NO₃⁻

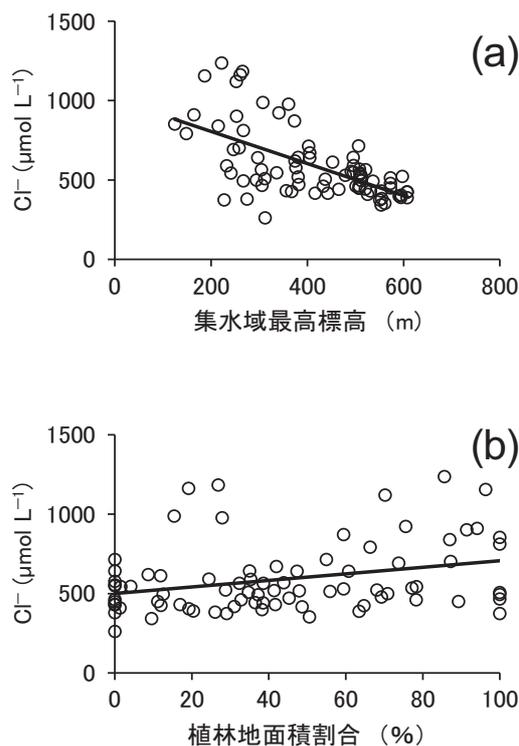


図-2. 渓流水Cl⁻濃度と集水域最高標高(a)および植林地面積割合(b)との関係

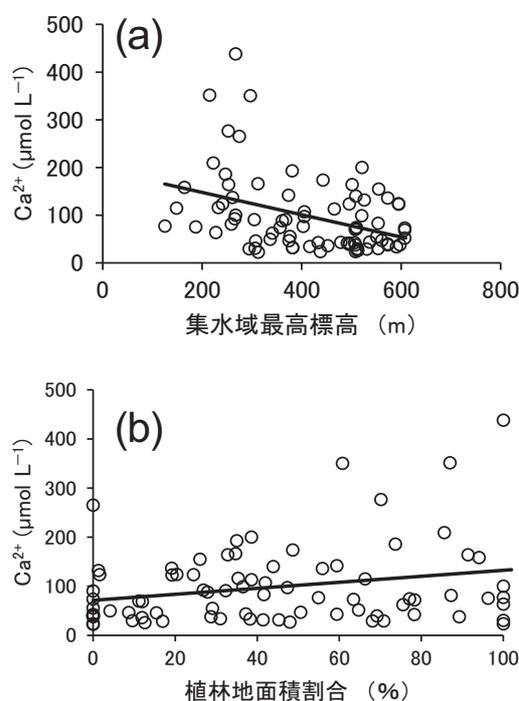


図-3. 渓流水Ca²⁺濃度と集水域最高標高(a)および植林地面積割合(b)との関係

濃度は、集水域面積(対数値)、集水域の最高標高、集水域内の傾斜角の範囲と正の相関が認められた(表-4、図-4)。

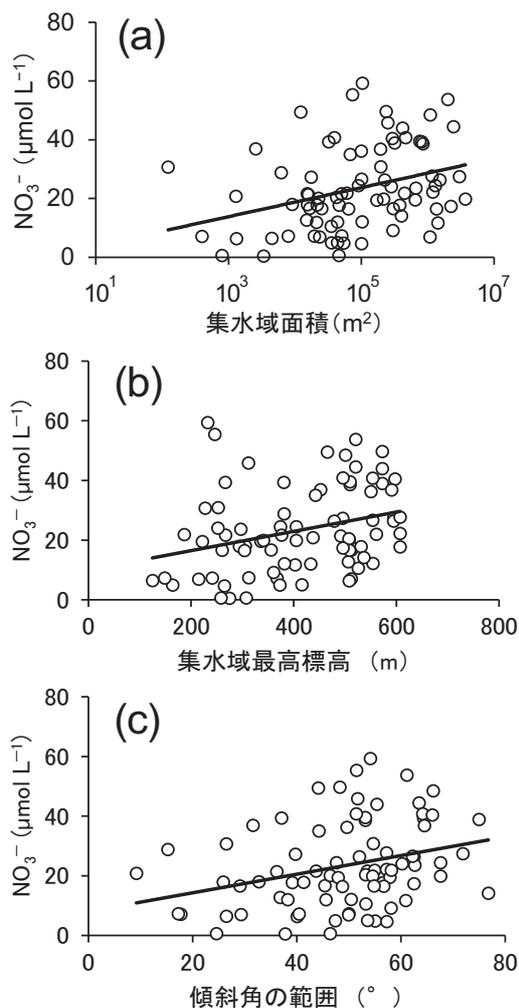


図-4. 渓流水NO₃⁻濃度と集水域面積(a)、集水域最高標高(b)および傾斜角の範囲(c)との関係

5. 考 察

5.1 海塩の影響と集水域特性

全国森林渓流水質の平均値と比較して、隠岐島後の森林溪流は電気伝導度、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻の濃度が大きい値を示した(表-2)。特にCl⁻の濃度が極めて高く、島嶼部である隠岐島後の森林渓流水質は、海塩の強い影響を受けていることを示している。電気伝導度もこれらのイオン類の濃度が高いことが影響していると考えられる。

海水においては、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻の濃度はそれぞれ0.468、0.010、0.053、0.546 molL⁻¹であり(加藤, 1994)、Na⁺、K⁺、Mg²⁺の濃度のCl⁻に対する比はそれぞれ0.86、0.02、0.10である。一方で本研究の渓流水におけるNa⁺、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻の平均濃度と全国平均値との差は、それぞれ417、32、53,470 μmolL⁻¹であり、Na⁺、K⁺、Mg²⁺とCl⁻との比はそれぞれ、0.89、0.07、0.11と、海水における元素比と良く似た値となる。このことから、隠岐島後の森林溪流における高いNa⁺、K⁺、Mg²⁺濃度についても、海塩の影響が強かった

ことが示唆される。この結果は、隠岐島後および屋久島の渓流水において、 Na^+/Cl^- 比が1前後で海塩の影響が強いとする海老瀬(2013)による報告と一致する。また、佐々木ら(1997)による隠岐諸島の湧水に関する調査においてもアルカリ非炭酸塩(海水)タイプに分類された湧水が多く、隠岐諸島の湧水や河川水が海水の影響を受けていることを考察している。

Cl^- 濃度は、集水域の最高標高や採水地の標高と負の相関を示した(表-4, 図-2a)。塩素は岩石や植物体にほとんど蓄積しておらず、岩石の風化によって渓流水中に放出される量は極めて限られている。渓流水の Cl^- 濃度は、蒸発散速度の違いが影響しており、標高が高くなるにつれて蒸発散速度が低下するような場合には、 Cl^- 濃度と標高との間に負の相関が生じることが報告されている(Vitousek, 1977)。Vitousek(1977)の調査地は落葉広葉樹林から森林限界の上部の山岳ツンドラまでの範囲に渡っている。しかし、本研究では標高600m程度までの範囲であり、もっとも標高の高い集水域まで森林植生がみられる。このような状況においても蒸発散速度で説明がつくかどうかはさらに検討が必要であろう。また、低標高の集水域は相対的に海岸線に近いので、高標高の集水域と比べて降水における海塩の寄与が強い可能性がある。 Cl^- 濃度はまた、集水域の植林地面積割合とも正の相関を示した(表-4, 図-2b)。植林地の樹種はスギやアカマツなどの常緑針葉樹が多い。常緑針葉樹はその樹冠構造から、粒子状の大気浮遊物を捉えやすい。常緑針葉樹が優占する集水域では、海塩が粒子状となって大気中に浮遊していた場合に樹冠に捉えられることで、海塩由来の物質が沈着しやすくなっていることが考えられる。集水域の植林地面積割合が比較的低い20%付近で Cl^- 濃度の高い調査地点が4箇所あるが(図-2b)、これらは隠岐島後の西部または北西部に位置しており、北西季節風の影響を強く受けていた可能性がある。海老瀬(2013)の研究においても、隠岐島後の北部または西部の渓流水は Cl^- 濃度が高いことを報告している。

5.2 Ca^{2+} および HCO_3^- 濃度と集水域特性

pHや Mg^{2+} 、 Ca^{2+} および HCO_3^- 濃度は、集水域の標高が高いほど低下する傾向を示した(表-4)。また、 HCO_3^- は、 Mg^{2+} および Ca^{2+} 濃度と強い正の相関関係があり(表-3)、 Mg^{2+} および Ca^{2+} のカウンターアニオンとして重要であることを示唆している。隠岐島後では、 Mg^{2+} については Cl^- と強い相関関係があり、海塩が沈着するパターンにも強く影響されていた可能性がある。一方で Cl^- とはそれほど強い相関関係にない Ca^{2+} が標高と負の相関を示したことは(表-4, 図3-a)、集水域の土壤中のプロセスが関与していると考えられる。また HCO_3^- は、鉱物の化学風化の際に二酸化炭素の取り込みによって生成されると考えられており、降雨が多く温暖な日本では風化による HCO_3^- の生成が活発に生じていると考えられている(Hartmann, 2009)。標高の上昇に伴いpHや塩基性陽イオン類および HCO_3^- の濃度が低下する傾向は、Fukushima and Tokuchi(2009)によるスギ人工林渓流水における渓流水質の研究でも報告されている。彼らは、低標高の集水域では水が土壌と接触する時間が比較的長く、土壌の陽

イオン交換反応が優占して酸緩衝能が大きく働いた一方で、高標高の集水域では土壌が残積性で薄く深部の地下水の寄与も少ないため、酸緩衝能が小さくなったと考察している。隠岐島後においても、高標高の集水域は比較的傾斜が大きく急峻な地形に富むため、土壌が流亡しやすく残積性になりがちである。崩れた土壌は低標高の集水域で堆積するので、低標高の集水域では崩積土が発達しやすい。このことから、低標高の集水域の渓流水は崩積性の土壌を通過する経過時間が長く、土壌の酸緩衝作用を比較的強く受けた水質となっていることが考えられる。

Ca^{2+} 濃度はまた、集水域の植林地面積割合と正の相関を示した(表-4, 図-3b)。これは、植栽された造林木が関係していることが考えられる。市川ら(2002)は、落葉広葉樹天然林のスギ人工林化により、鉍質土壌層の交換性カルシウムの蓄積が増加していることを報告している。これは、カルシウム含量の大きいスギのリターで主に構成されるAo層を雨水が通過することで土壌に供給される Ca^{2+} 量が大きくなるためとされている(市川ら, 2003)。また、スギの樹冠を通過した降雨による林地への Ca^{2+} の供給量は広葉樹の樹冠に比べて大きくなることが知られている(澤田・加藤, 2007)。このように、スギ林ではカルシウム蓄積量が大きくなりやすく、一部が溪流に流出することで、渓流水 Ca^{2+} 濃度が高くなることが考えられる。本研究では、植林地における造林樹種の内訳の情報が得られなかったが、隠岐島後ではスギの人工林施業を熱心に行っている地域もある(片桐ら, 1988)。本研究における渓流水 Ca^{2+} 濃度と植林地面積割合との正の相関関係は、スギ人工林地の大きなカルシウム蓄積を反映していることが考えられる。

5.3 窒素濃度

温帯の森林では窒素が生産力の制限要因となっており(Vitousek and Howarth, 1991)、森林には窒素が保持されるため溪流に流出する窒素は限られた量であると考えられてきた。しかし近年、大気からの窒素沈着の増加により森林が窒素飽和の状態になり、溪流へ窒素が流出する森林が報告されてきている(Chiwa *et al.*, 2019)。窒素循環に攪乱をうけた森林では、溪流に流出する窒素は NO_3^- が主な形態である(Vitousek, 1977; Perakis and Hedin, 2002)。隠岐島後の森林溪流の NO_3^- 濃度は平均23.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ であり全国平均値(木平ら, 2006)と同等の値であったが、0.5~59.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ と地点間変動が大きかった(表-2, 図-5)。ただし、本研究では採水が1回のみであり、渓流水 NO_3^- 濃度の季節変化を反映できていない。渓流水 NO_3^- 濃度は、我が国ではしばしば夏季に増大することが報告されている(平田・村岡, 1991; 大手ら, 2010)。日本がアジアモンスーンの気候環境下であり、夏に降水量が多くなることにより土壌の硝化を促すとともに、降雨による洗脱作用により NO_3^- が溪流に流出しやすくなることが指摘されている(大手ら, 2010)。ただし本研究では5日間まとまった降雨がなく平水時に採水を行っており、降雨による洗脱作用の影響は大きくはないと考えられる。

窒素飽和状態となった状態の森林の渓流水窒素濃度は、森

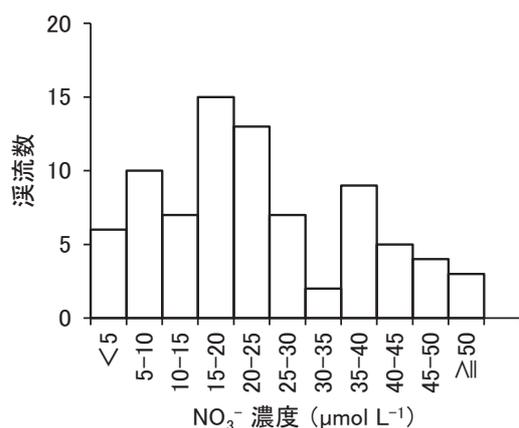


図-5. 渓流水NO₃⁻濃度の頻度分布

林に沈着する窒素量と降水量および流出量から概算することができる。隠岐島後の北西部(36°17'19"N, 133°11'06"E)には環境省酸性雨観測所が設けられており、湿性窒素沈着量は環境GIS酸性雨調査のデータベースにて公開されている(国立環境研究所, 2021)。このデータより算出された隠岐島後における無機窒素(NH₄⁺とNO₃⁻の合計)の湿性沈着量の2000年から2016年の平均値は6.14 kg-N ha⁻¹ year⁻¹である。島根県では、バルク沈着量(湿性沈着と乾性沈着の合計)に対する乾性沈着量の寄与は約10%と報告されている(宮廻ら, 2002)ことから、窒素沈着量は6.8 kg-N ha⁻¹ year⁻¹程度と見積もることができる。森林からの流出水量を推定することは難しいが、年降水量を西郷特別地域気象観測所の1,816mmとし、流出率(流出量/降水量)を島根大学三瓶演習林で報告された0.623~0.7465(新村ら, 1993)とすると、年間流出量は1,132~1,356 mmと計算される。この流出水量に、窒素沈着量と同じ6.8 kg-N ha⁻¹ year⁻¹の窒素量が溪流へ流出した場合、窒素濃度は35.8~42.9 μmol L⁻¹となる。

隠岐島後で渓流水NO₃⁻濃度が36 μmol L⁻¹を超える森林溪流は20箇所あり、全調査地の約4分の1であった(図-5)。最大では59.3 μmol L⁻¹のNO₃⁻濃度が観測された。このような高いNO₃⁻濃度が観測された溪流の森林流域では、窒素飽和に近い状態にあることが示唆される。日本の森林の窒素飽和に関する先行研究では、窒素飽和にいたる森林への窒素沈着量として、およそ10 kg-N ha⁻¹ year⁻¹の値が報告されている(Ohrui and Mitchell 1997; Chiwa *et al.*, 2019)が、隠岐島後で観測されている窒素沈着量は、この値に比べて低い値である。それに関わらず、隠岐島後の一部の森林溪流では、窒素飽和に匹敵する高い渓流水NO₃⁻濃度が観測されていることから、森林が保持しうる窒素量が小さいことが懸念される。このような高い渓流水NO₃⁻濃度を示した森林流域では、森林内部の窒素循環機構についてより詳細に明らかにする必要があるだろう。

渓流水NO₃⁻濃度は、集水域の面積(対数値)、集水域最高地点の標高、および傾斜角の最大値と最小値の範囲と正の相関を示した(表-4, 図-4)。大きな面積をもつ集水域では、

様々な特徴をもつ立地環境を含む確率が高くなる。硝化活性の高い立地環境を含むと、その特徴が強く現れ、渓流水窒素濃度が高くなることが考えられる。傾斜角の最大値と最小値の範囲が大ききことは、集水域内において地形の起伏が大ききことをあらわしている。比較的高標高の集水域には地形が急峻となる場所が多く、標高とNO₃⁻濃度の相関は地形の起伏との関係を表しているのかもしれない。谷底部などの溪畔域では土壤中の飽和帯においてNO₃⁻は脱窒作用により消費されると考えられており(木平ら, 1997)、溪畔域が平坦であれば飽和帯が広く発達すると考えられる。しかし、Ohrui and Mitchell (1998)は、急傾斜地からなる集水域では飽和帯の範囲が狭く、溪畔域の土壤の窒素動態は硝化が主なものとなるため、溪畔域が渓流水NO₃⁻のソースとして重要になると考察した。隠岐島後においても、溪畔域に急傾斜地を持つ立地が渓流水のNO₃⁻のソースとなっていることが考えられ、面積の大きな集水域や起伏の大きな集水域ではそのような立地が集水域内に存在することで渓流水NO₃⁻濃度が大きくなった可能性がある。本研究では飽和帯の大きさや急傾斜地土壤の硝化活性の上昇の程度について詳細な検討を行うことができないため、隠岐島後で森林溪流のNO₃⁻濃度が集水域によって大きく変動する要因と考えられる溪畔域を中心とした立地環境をさらに詳しく調べる必要がある。

謝 辞

本研究は、公益財団法人自然保護助成基金第27期プロ・ナトゥーラ・ファンドによる助成を受けた。隠岐世界ジオパーク推進協議会事務局の平田正礼氏、岡田美耶氏には現地調査において多大なるご協力をいただいた。厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 浅野友子・大手信人・小橋澄治(1996) 森林の成立過程における水質形成機構の変化—植生の発達段階の異なる流域における水質・水文観察—。京都大学農学部演習林報告68:25-42。
- Chiwa, M., Tateno, R., Hishi, T., and Shibata, H. (2019) Nitrate leaching from Japanese temperate forest ecosystems in response to elevated atmospheric N deposition. *Journal of Forest Research* 24:1-15.
- 海老瀬潜一(2013) 独立峰と円形島の放射状流下渓流水質の方位分布特性。環境科学会誌26:461-476。
- 海老瀬潜一・永淵 修(2002) 屋久島溪流河川水質の流出特性と酸性雨影響。陸水学雑誌63:1-10。
- Fujimaki, R., Kawasaki, A., Fujii, Y., and Kaneko, N. (2008) The influence of topography on the stream N concentration in the Tanzawa Mountains, Southern Kanto District, Japan. *Journal of Forest Research* 13:380-385.
- 藤巻玲路・西本侑未・葛西絵里香・山下多聞(2014) 三瓶演習林およびその周辺における森林溪流水質の空間的变化。島根大学生物資源科学部研究報告19:3-8。
- Fukushima, K., and Tokuchi, N. (2009) Factors controlling the acid-neutralizing capacity of Japanese cedar forest watersheds in stands of various ages and topographic characteristics. *Hydrological Processes* 23:259-271.
- 五名美江・蔵治光一郎・春田泰次・鴨田重裕・小田智基・堀田紀文・鈴木 誠・木村徳志・五十嵐勇治・大村和也・渡邊良広(2007) 東京大学5演習林8試験流域における渓流水質の特

- 性. 東京大学農学部演習林報告118:65-83.
- Hartmann, J. (2009) Bicarbonate-fluxes and CO₂-consumption by chemical weathering on the Japanese Archipelago — Application of a multi-lithological model framework. *Chemical Geology* 265: 237-271.
- 林 正久 (1990) 隠岐諸島の地形—島後島—. *山陰地域研究(自然環境)* 6 :1-10.
- 平田健正・村岡浩爾 (1991) つくば森林試験地における土壌水質および渓流水質の季節変化について. *水工学論文集*35:105-110.
- 市川貴大・深澤文貴・高橋輝昌・浅野義人 (2002) 落葉広葉樹天然林のヒノキおよびスギによる人工林化が土壌の養分特性に及ぼす影響. *森林立地*44(2):23-29.
- 市川貴大・高橋輝昌・浅野義人 (2003) 落葉広葉樹天然林のヒノキおよびスギの人工林化が生態系内の養分動態に及ぼす影響. *森林立地*45(1):35-42.
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2020) 自然環境調査Web-GIS. <http://gis.biodic.go.jp/webgis/> (2020年9月15日閲覧)
- 片桐成夫・金子信博・三宅 登 (1988) 中国地方の人工林の施業法と林分構造との関係—島根県隠岐島の人工林の実態—. *山陰地域研究(森林資源)* 4 :45-54.
- 加藤拓紀 (1994) 酸性雨の分析. (水の分析第4版, 日本分析学会北海道支部編, 493pp化学同人, 京都). 435-444.
- 気象庁 (2021) 過去の気象データ検索. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. (2021年8月23日閲覧)
- 国土地理院 (2020) 基盤地図情報ダウンロードサービス. <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>. (2020年9月15日閲覧)
- 国立環境研究所 (2021) 環境GIS. <https://tenbou.nies.go.jp/gis/>. (2021年8月23日閲覧)
- 木平英一・新藤純子・吉岡崇仁・戸田任重 (2006) わが国の渓流水質の広域調査. *日本水文科学会誌*36:145-149.
- 木平英一・楊 宗興・戸田任重・八木一行・窪田順平・塚本良則 (1997) 森林流域谷底部土壌の脱窒作用—NO₃⁻-N窒素安定同位体比による解析—. *日本林学会誌*79:83-88.
- Lovett, G.M., Weathers, K.C., and Arthur M.A. (2002) Control of nitrogen loss from forested watersheds by soil carbon: nitrogen ratio and tree species composition. *Ecosystems* 5:712-718.
- 宮廻隆洋・佐川竜也・藤原 誠・多田 納 (2002) 島根県における酸性雨の長期変動. *全国環境研会誌*27:255-261.
- Ogawa, A., Shibata, H., Suzuki, K., Mitchell, M.J., and Ikegami, Y. (2006) Relationship of topography to surface water chemistry with particular focus on nitrogen and organic carbon solutes within a forested watershed in Hokkaido, Japan. *Hydrological Processes* 20:251-265.
- Ohrui, K. and Mitchell, M.J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Applications* 7:391-401.
- Ohrui, K. and Mitchell, M.J. (1998) Spatial patterns of soil nitrate in Japanese forested watersheds: importance of the near-stream zone as a source of nitrate in stream water. *Hydrological Processes* 12: 1433-1445.
- 大手信人・徳地直子・藤本将光 (2010) NO₃⁻流出の季節変動を制御する要因. *水利科学*312:1-16.
- Perakis, S.S. and Hedin, L.O. (2002) Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature* 415:416-419.
- 佐々木健・西村良司・荒谷昌弘 (1997) 名水を訪ねて(39)隠岐の名水. *地下水学会誌*39:343-350.
- 澤田智志・加藤秀正 (2007) スギ・落葉広葉樹混交林の表層土壌の化学性に及ぼす樹幹流, 林内雨およびリターの影響. *森林立地*49:93-101.
- 新村義昭・長山泰秀・金子信博・片桐成夫 (1993) 島根大学三瓶演習林の最上流域に設定された微少流域における水文観測(2). *山陰地域研究(森林資源)*9:51-56.
- 杵村喜則 (1994) 隠岐諸島の植生と植物相: 森林植生. *山陰地域研究(森林資源)*10:25-33.
- Takahara, H., Tanida, K., and Miyoshi, N. (2001) The full-glacial refugium of *Cryptomeria japonica* in the Oki Islands, western Japan. *Japanese Journal of Palynology* 47:21-33.
- 戸田浩人・白木克繁・石川芳治・内山佳美・笹川裕史・鈴木雅一 (2007) 丹沢山地の渓流水質. (丹沢大山総合調査学術報告書, 丹沢大山総合調査団編, 794pp, 国際文献印刷, 東京). 410-415.
- 徳地直子・辻 明子・岩坪五郎 (1991) 山地小流域における降水と流出水の水質. *京都大学農学部演習林報告*63:60-68
- Vitousek, P.M. (1977) The regulation of element concentrations in mountain streams in the northeastern United States. *Ecological Monographs* 47:65-87.
- Vitousek, P.M., Gosz, J.R., Grier, C.C., Melillo, J.M., Reiners, W.A., and Todd, R.L. (1979) Nitrate loss from disturbed ecosystems: Interregional comparative studies show mechanisms underlying forest ecosystem response to disturbance. *Science* 204:469-474.
- Vitousek, P.M., and Howarth, R.W. (1991) Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry* 13:87-115.