

林相の異なる森林流域における Fe, Si の動態

株式会社ユニオン ○市川聖佳・豊田政幸・千家正照
岐阜大学自然科学技術研究科 上村岳斗
岐阜大学応用生物科学部 平松研・大西健夫

1. はじめに

森林は河川や水田に栄養塩を供給する物質供給の役割を果たしている。栄養塩の中には生物にとって不可欠な微量元素である鉄 (Fe) や基底流出と強い関連性を有し珪藻類の外殻となるケイ素 (Si) 等があるが、チッ素やリンについては多数の研究があるものの、森林流域からの Fe や Si の動態を観測した事例は少ない。

戦後の拡大造林政策と、1970 年代以降の木材需要の高まり等により常緑針葉樹であるスギ・ヒノキからなる人工林が整備され、現在日本の森林は、常緑針葉樹林が全森林面積の 4 割以上を占めている (林野庁, 2022)。針葉樹人工林流域では、落葉広葉樹林流域と比べて地表流の流出に対する寄与が大きいことやピーク流出量の相違が報告されており (Rahamat, 2018; 平野, 2019)、形成される水質の相違を生み出して、下流域にも異なる影響を及ぼすものと考えられる。

本研究では、落葉広葉樹林流域と針葉樹人工林流域の 2 流域から供給される Fe 及び Si に着目し、平水時及び出水時の濃度変動のパターンおよび負荷量の差を比較した。

2. 試験地の概要

試験地は、岐阜県下呂市に位置する岐阜大学応用生物科学部附属岐阜フィールド科学教育研究センター位山演習林内 (以降、演習林) の 2 流域とした。なお、演習林は東経 137°12'14"~137°14'10"、北緯 35°58'40"~36°01'06" の範囲に位置しており、船山 (標高 1,479.5m) の南西斜面に広がっている。この 2 流域は隣接しており、地質と気候がほぼ同じとみなせる対照流域となっている。一方は、スギ・ヒノキ等の針葉樹人工林が全体の 65% を占めるのに対し、他方は落葉広葉樹二次林が 78% を占める。以下、それぞれの流域を「針葉樹林流域」と「広葉樹林流域」と呼ぶ。演習林事務所付近では、冬の最低気温が約 -10°C、夏の最高気温は約 30°C であり、年間降水量は約 2,500 mm である。地質は濃

飛流紋岩を基岩とし、表層土壌は褐色森林土に分類されるが、急傾斜のため土壌は浅い。

表-1 流域特性

| | 針葉樹林流域 | 広葉樹林流域 |
|------------------------|--------|--------|
| 流域面積(km ²) | 0.60 | 0.72 |
| 最高標高(m) | 1,278 | 1,278 |
| 最低標高(m) | 926 | 909 |
| 平均傾斜(°) | 32.5 | 33.1 |
| 最大傾斜(°) | 63.9 | 61.1 |
| 最低傾斜(°) | 0.7 | 0.5 |
| 地質 | 濃飛流紋岩 | |
| 土壌 | 褐色森林土 | |

3. 観測及び分析方法

3.1. 水文観測

3.1.1. 降水量

降水量は広葉樹林流域の量水堰付近に設置した転倒柵式雨量計により測定した。機器の不良等によるデータ欠測時には、近傍の気象庁アメダス船山観測点の雨量データを使用した。

3.1.2. 流量

流量は、各流域の下流末端の量水堰に水圧式自記水位計 (HOBO U20 型水温・圧力ロガー) を設置し、渓流水深を 2020 年度は 5 分間隔、2021 年度以降は 3 分間隔で記録した。得られた水深から沼地・黒川・淵沢の堰公式 (下式) を用いて流域からの流量に換算した。

$$Q = KH^{5/2}$$

$$K = 1.354 + \frac{0.004}{H} + \left(0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{W}}\right) \left(\frac{H}{B} - 0.09\right)^2$$

ここで、Q: 流量 (m³/s)、H: 越流水深 (m)、W: 堰高 (m)、B: 堰幅 (m)、である。

3.2. 水質分析

3.2.1. 試料採水

本研究では、林外雨、林内雨、深度 10 cm と深度 50cm 地点の土壌水、岩盤湧水を採水した。

林外雨は演習林事務所（標高 750m）に、直径 1 cm の漏斗を直結したポリタンク（10L）を 3 つ設置した。ポリタンク内には、微生物活動を抑制するため 0.1 mg/L CuBr 溶液を 10m L 添加した。さらに漏斗底部にガラスウールを敷き詰め、市販の三角コーナーネットをかぶせることにより、粗大物の混入を防止した。林内雨、土壌水は各流域内において調査森林斜面を 1 箇所選定し、林内雨は林外雨と同様のポリタンクを、土壌水はテンションライシメータ（DIK-8392）を、斜面の上部、中部、下部に 1 つずつ設置して採水した。岩盤湧水は、各流域の調査森林斜面付近に存在する湧水点 1 箇所を採水した。これらの降雨、土壌水、湧水の定期採水は 2021 年 5 月から開始した。採水期間は 2020 年 7 月 11 日～2022 年 1 月 30 日までの 1 年半とし、両流域とも 2020 年 12 月 6 日～2021 年 2 月 28 日、2021 年 12 月 15 日～2022 年 2 月 24 日の期間は冬季のため採水は実施しなかった。

各流域の下流端に位置する量水堰の直上流には自動採水器（ISCO6712 型）を 2 台設置し、1 日に 1 度採水する「日採水」と降雨時に採水する「出水時採水」の 2 種類に分類した。日採水の採水時刻は、針葉樹林流域で 13 時、広葉樹林流域で 12 時と設定した。出水時採水は、降雨時の水位上昇時に 2 時間間隔で採水する設定とした。なお、日採水と出水時採水のサンプルはともに 2 週間に 1 度の頻度で回収した。

3.2.2. 分析対象期間

Si の日採水サンプルは 2020 年 7 月 11 日～2022 年 4 月 7 日の期間において 2 日間隔で分析を行った。Si の出水時サンプルは 2020 年 9 月 4 日から 2021 年 12 月 7 日までの計 28 回について Si 濃度を測定した。Fe の出水時サンプルは 2020 年 9 月 13 日～2021 年 9 月 22 日までの計 6

回について測定した。なお、Fe の日採水サンプルは一部試料の保存方法に不備があったため、2021 年 3 月 1 日～2021 年 12 月 31 日までの試料を用いた。

3.2.3. 分析方法

採水した試料は、Fe 用を燃焼処理済み（450°C 4.5 時間）のガラス繊維ろ紙（Whatman GF/F）と、Si 用メンブレンフィルター（ADVANTEC, A045A047A, 0.45 μm）を用いてろ過し、分析まで冷蔵または冷凍保存した。Fe 用のサンプルは、水酸化物沈殿を防止するため pH 1 以下になるまで硝酸を添加し保存した。Fe と Si の濃度は、誘導結合プラズマ発光分析装置（ICP-AES : Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy）を用いて分析した。あわせて、Fe の動態と密接な関係にあると考えられる DOC 濃度を、全有機態炭素計（SHIMADZU TOC-L）によって分析した。

4. 結果および考察

4.1. 出水時の流量変動

図-1 に両流域の降雨時における流量の時間変化の一例を示した。ピーク流出量は針葉樹林流域の方が大きく、直接流出量が多いことがわかる。しかし、基底流出量は広葉樹林流域の方が大きい傾向を示している。なお、Rahamat (2019)

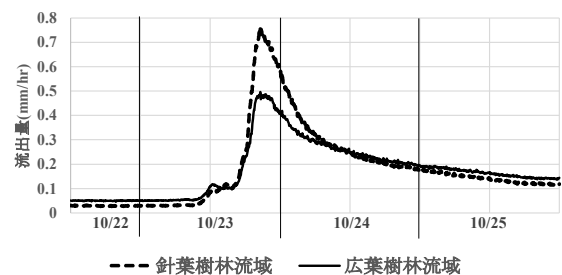


図-1 降雨時のハイドログラフ（2020年）

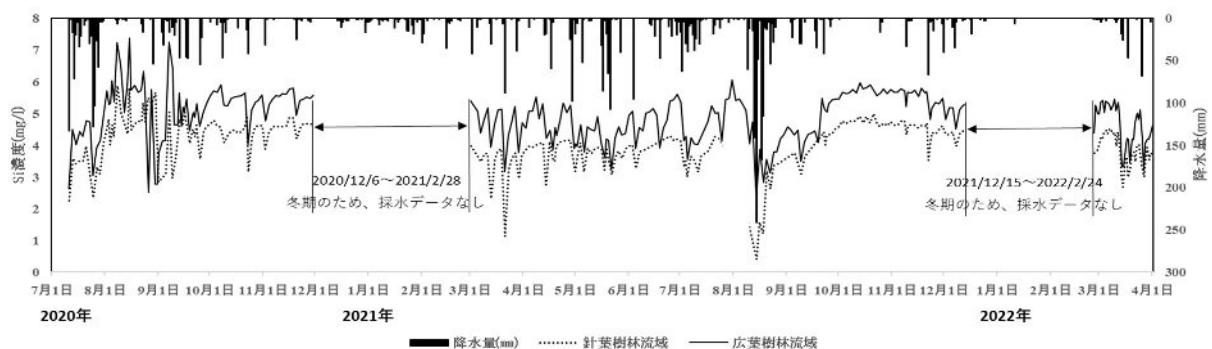


図-2 日採水の Si 濃度

が同流域で観測した 2007 年から 2018 年の間の水文データでも同じ傾向が得られている。

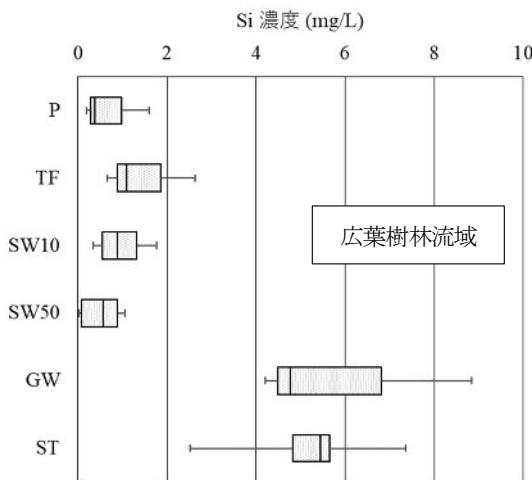
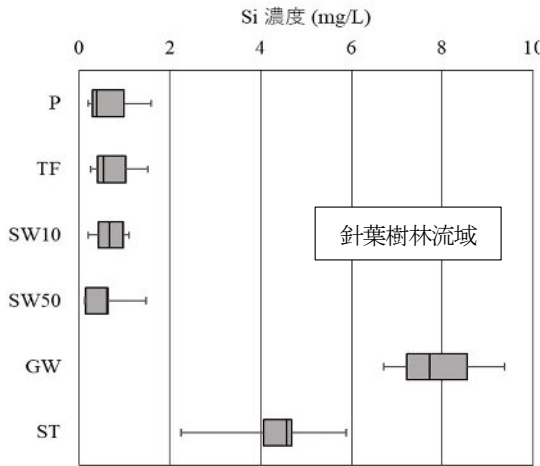
4.2. 日採水の Si 濃度

2020 年 7 月 11 日～2022 年 4 月 7 日までの Si の日採水結果を図-2 および表-2 に示す。針葉樹林流域の平均濃度は 3.99 mg/L に対し、広葉樹林流域は 4.52 mg/L と年間を通して針葉樹林流域より広葉樹林流域の方が Si 濃度は大きい。

図-3 に土壌水中の Si 濃度の計測結果を示す。図より、両流域ともに土壌中の Si 濃度が小さく、

表-2 Si の分析結果

| | 針葉樹林流域 | 広葉樹林流域 |
|-----------|--------|--------|
| 平均値(mg/L) | 3.99 | 4.52 |
| 最大値(mg/L) | 5.88 | 7.37 |
| 最小値(mg/L) | 0.29 | 0.18 |



P : 林外雨、TF : 森林雨、SW10 : 土壌水 (10 cm)、SW50 : 土壌水 (50cm)、GW : 湧出水、ST : 渓流水

図-3 両流域の Si 濃度

岩盤からの湧出水中の Si 濃度が大きいことがわかる。一方渓流水中の Si 濃度は土壌水よりも大きく湧出水よりも小さく、渓流水については針葉樹林流域より広葉樹林流域の方が大きい傾向を示している。

4.3. 出水時採水渓流中の Si 濃度

図-4 に 2020 年 10 月 23 日の測定結果 (図-1 と同じ降雨事象) を示す。両流域ともに流出量がピークに達するにつれて Si 濃度が低下し、流出量の低下とともに Si 濃度がピーク前の濃度に回復している。

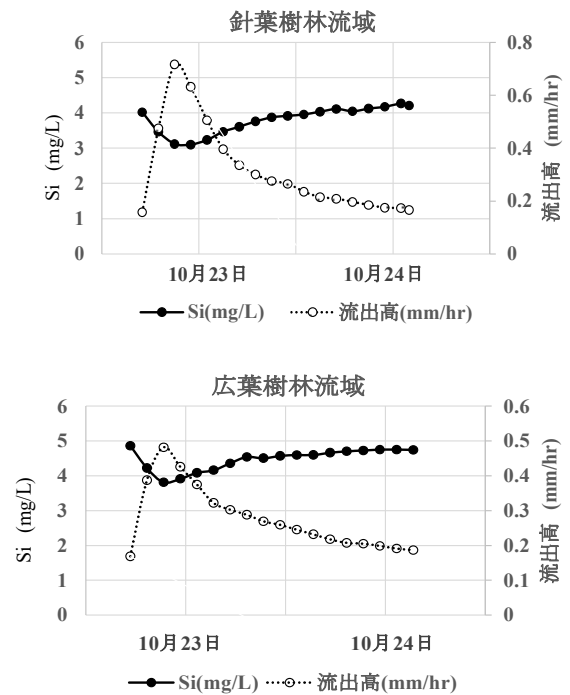


図-4 出水時の Si 濃度 (2020 年)

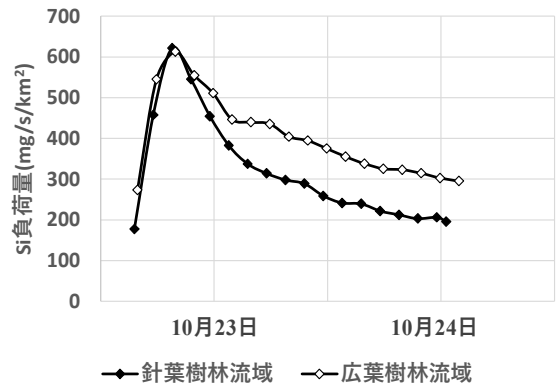


図-5 1km²あたりの Si 負荷量 (mg/s/km²)

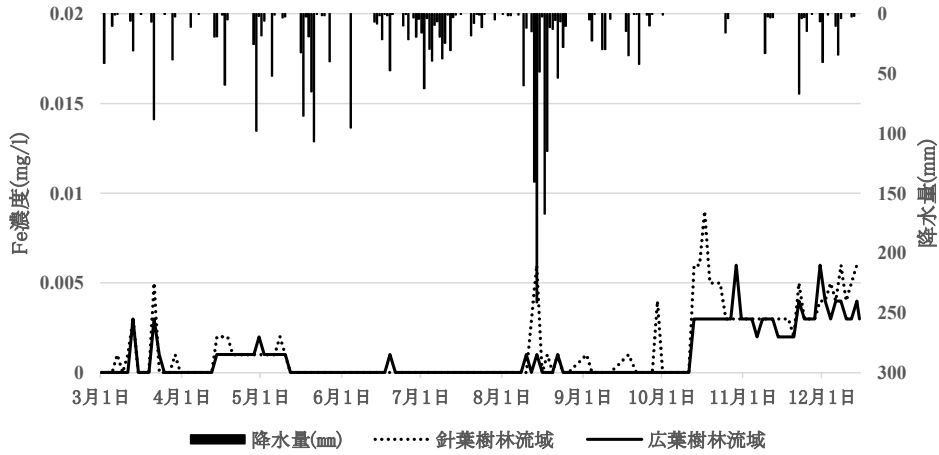


図-6 日採水の Fe 濃度

図-5 は出水時の 1km^2 あたりの Si 負荷量の時間変化を示したグラフである。降雨時の流出に伴って Si 負荷量は増加している。また、針葉樹林流域に比べ広葉樹林流域の Si 負荷量が顕著に大きいことがわかる。

4.4. 日採水の Fe 濃度

2021年3月1日～2021年12月15日までの Fe の日採水結果を図-6、表-2 に示す。針葉樹林流域の平均濃度は $1.52 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ に対し、広葉樹林流域は $0.98 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ となっているが、両流域とも Fe の負荷量は極めて微量である。

表-2 Fe の分析結果

| | 針葉樹林流域 | 広葉樹林流域 |
|------------|-----------------------|-----------------------|
| 平均値 (mg/L) | 1.52×10^{-3} | 0.98×10^{-3} |
| 最大値 (mg/L) | 0.009 | 0.006 |
| 最小値 (mg/L) | 0.000 | 0.000 |

4.5. 出水時溪流中の Fe 濃度

図-7に2020年10月23日の測定結果を示す。Fe 濃度は広葉樹林流域、針葉樹林流域ともにすべての降雨流出において、流出高がピークに達するにつれて上昇し、流出高の低下とともに低下する傾向がみられた。また、DOC 濃度も Fe 濃度と同様の変動を示した。2020年10月23日のデータでは針葉樹林流域の方が Fe 濃度は高いが、全体の分析結果からは針葉樹林流域と広葉樹林流域の明確な差は確認されなかった。

図-8に DOC-Fe の関係図を示す。図より両流域とも DOC の上昇に伴い Fe 濃度が増加している。また、DOC が 0.5mg/L を超過すると Fe の

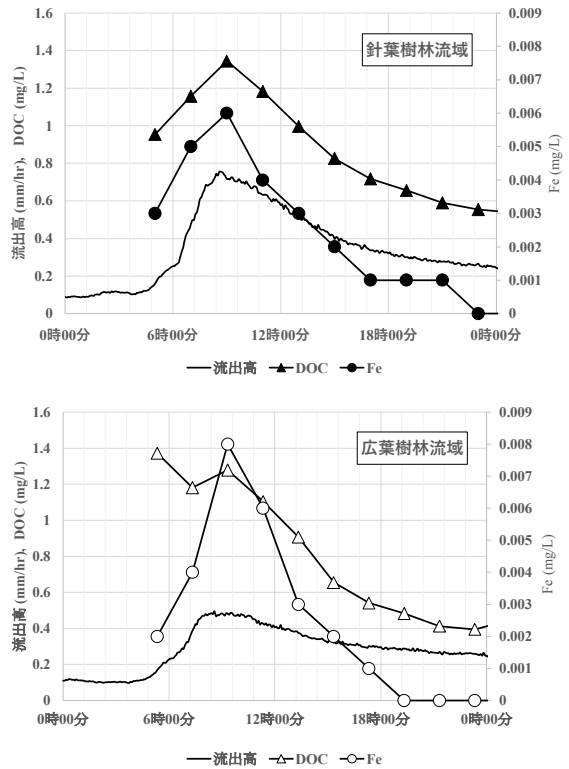


図-7 出水時の Fe と DOC の動態

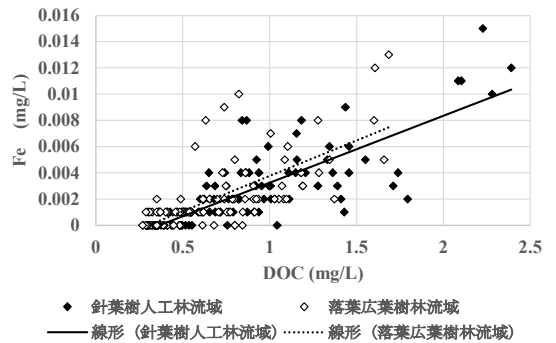


図-8 DOC-Fe の関係

流出がみられた。ただし、DOC と Fe 濃度の関係には両流域での差異はみられなかった。

5. 考察

5.1. 日採水の Si 濃度

Si の流出は主に岩盤由来とされており（古米ら, 2012）、広葉樹林流域では雨水が深層域まで浸透し河川に流出していると考えられる。一方で針葉樹林流域は表面流出の割合が高く、岩盤由来の Si 濃度が広葉樹林流域に比べ低いと推測される。

5.2. 出水時採水の Si 濃度

流出量の増加に伴い Si 濃度が低下する要因として、降雨や地表近くの土壌水を起源とする流出水による希釈効果と推測される。直接流出の多い針葉樹林流域の Si 濃度が低下する程度が大きいと考えられる。

5.3. 出水時の Fe 濃度

流出量増加に伴う Fe 濃度の増加要因として、土壌表層からの供給による寄与が大きいと考えられる。一般に流出量増加時には直接流出の割合が高くなるため、Fe 濃度の上昇は表層土壌に依存している可能性が高い。各出水ピーク時においては両流域の Fe 濃度には明確な大小関係がみられなかったが、降雨時の流出量が大きい針葉樹林流域の方が Fe の負荷量が高くなる傾向にあると推察される。

Fe は DOC との相関があり、DOC の変動に伴って Fe も変化した。一般に DOC は表層ほど豊富に含まれる土壌有機物が主要な起源であるため、出水時の表層流増加により濃度が上昇したと考えられる。出水時における DOC 増加に伴い、DOC と錯体を形成している溶存 Fe の濃度が増加したと推測される。

一般に土粒子において有機物と粘土鉱物とは化学的な結合をしており、粘土鉱物の主要な構成要素である酸化鉄も有機物と錯体を形成している場合が多い。降雨流出時には、この表層の土粒子が一部懸濁し表層流で持ち去られるとともに、その一部が溶存態として溶出してきた結果、Fe と DOC とが類似の挙動を示しているものと考えられる。

金子ら (2003) は渓流水中において Fe が DOC と錯体を形成して流出するとしており、本研究

成果は同様の現象を示している。

6. まとめ

Si は浸透水由来であり、Fe は表層水由来の傾向が強く、微量物質であっても影響を受ける環境要因が異なることが明らかとなった。さらに、Fe については濃度が低く、下流河川や沿岸海域に大きな影響を持つものではないと推定された。一方で、Si は広葉樹林と針葉樹林によって明確な差異が見られることから、森林の状態変化が下流河川の付着藻類相に影響を及ぼす可能性があることが示唆されるものとなった。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 20K06295、岐阜県委託調査費、岐阜大学ユニオン共同研究講座の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 林野庁 (2022) 都道府県別森林率・人工林率 (平成 29 年 3 月 31 日現在) . (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/1.html>)
- 2) Rahmat A, Noda K, Onishi T and Senge M (2018) Runoff Characteristics of Forest Watersheds under Different Forest Managements. *Reviews in Agricultural Science*, 6: 119–133. (<http://dx.doi.org/10.7831/ras.6.11>)
- 3) 平野智章, 寺嶋智巳, 中村智博, 境優, 青木文聡, 名波明菜 (2009) 針葉樹林流域と広葉樹林流域の短期流出特性の違い-降雨イベントの規模が森林流域の水流発生機構に及ぼす影響-. *水文・水資源学会誌*, 22(1): 24–39.
- 4) Rahmat A, Ariyanto DP, Noda K, Onishi T, Ito K and Senge M (2019) Hydrological Characteristics under Deciduous Broadleaf and Evergreen Coniferous Forests in Central Japan. *International Journal of GEOMATE*, Vol.16, Issue 54, pp.217 – 224.
- 5) 古米弘明, 山本晃一, 佐藤和明 編 (2012) ケイ酸その由来と行方. 技報堂出版, p.181.
- 6) 金子真司, 平野恭弘, 深山貴文, 古澤仁美 (2003) 京都府の森林流域における渓流水中の溶存鉄および溶存アルミニウム濃度の経時変動. *森林応用研究*, 12: 93–97.