

外来珪藻の繁茂に関連する河川環境要因の抽出とハザードマップの作製

要 旨

千曲川支流大石川(長野県)および那珂川(茨城県)で外来珪藻 *Cymbella janischii* の繁茂が確認されている河川区間に調査地点を設定し、本種のミズワタ状群生が消失した2021年7月から再出現するまでの間、定期的に外来珪藻の細胞密度(単位面積当たりの細胞数)、河床付着物の強熱減量、付着藻類現存量(クロロフィル *a* 量)および河川環境要因(水温、流量、全窒素、全リン)を測定した。大石川では、水温が11℃に低下して流量が減少した2021年10月にミズワタ状群生が確認された。一般化線形モデルを用いて解析した結果、大石川では、外来珪藻の細胞密度が水温の低下と付着藻類現存量の増加と共に増大することが分かった。那珂川の調査地点では、2022年1月19日現在、水温が4℃まで低下したものの、水位の低下に伴い付着藻類現存量は依然、増加傾向にあり、ミズワタ状群生は観察されなかった。外来珪藻が繁茂するには、水温の低下だけでなく、付着藻類群落の肥厚が必要と考えられる。大石川の調査地点は河川工作物の水叩きおよび河床の約7割の石が埋まって動かない瀬であり、那珂川の調査地点は岩盤が露出した瀬であった。河床が硬化した場所は、河川の流量が減少したとき、付着藻類群落が肥厚し、外来珪藻が繁茂しやすい可能性が考えられる。

1. はじめに

近年、日本各地の河川で、クチビルケイソウの一種 *Cymbella janischii* (A.W.F.Schmidt) De Toni の繁茂が相次いで報告されている(洲澤・洲澤 2021)。本種は、細胞の一端から粘液柄を分泌して基質に付着し、好気性細菌 *Spaerotilus* sp. のミズワタに似た群生を形成することから、本種の和名として「ミズワタクチビルケイソウ」が提案されている(洲澤・洲澤 2021)。本種の分布はこれまで米国の河川に限られており、殻長が100 μm以上の大型の珪藻(図1)であるにも関わらず日本での出現記録がないことから、近年、国内に侵入した外来生物と考えられている(洲澤ら 2011)。剥離して流下した本種の粘液柄は捕獲カゴや養殖施設の取水口などを目詰まりさせるほかに、ミズワタ状群生が繁茂した場所には放流アユが定着し難いことが報告されている(芦澤・加地 2018)。しかし、日本の河川における本種の生態は未だ明らかにされておらず、水産業や河川生態系に及ぼす影響は十分に解明されていない。さらに、本種は微細な藻類であるため、漁具等を介して知らぬ間に散布されてしまうことが懸念される。国内の被害が顕在化する前に、本種の拡散を防ぐ具体的な処置を講じると共に、ミズワタ状群生が繁茂しやすい場所を特定して被害防止に向けた注意喚起を行うことが喫緊の課題になっている。



図1. 外来珪藻 *C. janischii* (ミズワタクチビルケイソウ) の顕微鏡写真。

そこで本課題では、日本の河川において外来珪藻 *C. janischii* の増殖に関わる環境条件を把握し、ミズワタ状群生が繁茂しやすい河川環境および時期を示したハザードマップ

プを作製する一連の手法を提案する。本年度は、外来珪藻の出現が確認されている千曲川支流大石川(長野県)および那珂川(茨城県)の河川区間で野外調査を行い、本種の増殖に関わる環境条件を探索した。

2. 方 法

(1) 調査地点

外来珪藻の繁茂が確認されている千曲川支流大石川(長野県)および那珂川(茨城県)の河川区間に調査地点をそれぞれ1か所設定した。大石川では千曲川支流石堂川との合流点から約100 m 上流にある河川工作物の水叩き(図 2a)およびその下流にある瀬(図 2b)で、那珂川では河口から約30 km 上流の岩盤が露出した瀬(図 2c)で調査を行った。



図 2. 珪藻 *C. janischii* の繁茂が確認されている大石川(a、b)および那珂川(c)の調査地点。

(2) 調査方法

各調査地点において、ミズワタ状群生が消失した2021年7月から再出現するまでの間、定期的に外来珪藻の細胞密度、河床付着物の強熱減量、付着藻類現存量(クロロフィル *a* 量)および河川環境要因(水温、流量、全窒素、全リン)を測定した。付着藻類は、河床から無作為に取り出した石の表面に置いた方形枠内(5×5 cm)からナイロンブラシでこすり落として採集した。なお、水叩きおよび岩盤上の付着藻類は、Loeb (1981)の採集器(採集面積 6.61 cm²)を用いて無作為に選んだ10か所から採集した。付着藻類試料は3つに小分けし、1つは中性ホルマリン(5%)を加えて外来珪藻の細胞数測定用試料とした。残り2つは、それぞれガラス繊維ろ紙(Whatman GF/C)でろ過し、強熱減量およびクロロフィル *a* (Chl. *a*) 量の測定に用いた。

強熱減量は、ろ過した試料を80°Cで24時間乾燥させて乾燥重量を求めた後、500°Cで1時間燃焼させて灰分量を測定し、乾燥重量から灰分量を差し引いて求めた(Steinman & Lamberti 1996)。Chl. *a* 量は、ろ過した試料を90%アセトンに24時間浸漬し、分光学的方法を用いて算出した(Steinman & Lamberti 1996)。中性ホルマリンで固定した試料は、遠心分離機で沈殿濃縮した後、その一部を光学顕微鏡(x10)を使って外来珪藻の細胞数を計数した。

大石川の流量は、川幅を横断面に沿って10等分した各区間の流速と断面積を測定し、各区間の断面積と流速の積を足し合わせて求めた。なお、流速は、プロペラ式流速計(佐藤商事、VR-401-D)を用いて測定した。那珂川の流量変動は、国土交通省の水文水質デ

データベース (<http://www1.river.go.jp/>) のうち水府橋観測所の水位データを参照した。全窒素および全リンは、採水後直ちにガラス繊維ろ紙(Whatman GF/C)でろ過した試水に、それぞれアルカリペルオキシ二硫酸カリウム溶液およびペルオキシ二硫酸カリウム溶液を添加し、オートクレーブを用いて加熱分解(120°C、1 気圧、30 分間)した後、それぞれ紫外吸光度法(都築・内野 1966)およびモリブデン青法(橘・那須 1966)を用いて測定した。調査地点の光環境を表す開空率は、アクションカメラ(コダック、SP360)を用いて撮影した全天写真をコンピューターソフト CanopOn2 version 2.03c (<http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>) で解析して算出した。調査地点の河床の状態は、20 cm 間隔で格子を組んだ 1 m 角の格子枠を河床に設置し、格子の交点にある石礫の長径を手で動かせるかどうか確かめながら記録した(阿部ら 2014)。なお、河床に埋まって動かない石は「はまり石」と記録した。また、測量機を用いて河川勾配を測定した。

(3) 統計解析

全ての統計解析は、統計分析フリーソフト R version 4.1.1 を用いて行った。外来珪藻の細胞密度の変動は、計数した外来珪藻の細胞数を目的変数とし、採集面積に付着藻類を採集した時の試料総量に対する細胞数の計数に用いた試料容量の割合を掛けて求めた面積(観察面積)をオフセット項に加えた一般化線形モデルを用いて解析した。なお、データのばらつきはポアソン分布を仮定し、対数リンク関数を用いて解析した。説明変数には、付着藻類の採集場所、水温、流量、全窒素、全リン、河床付着物の強熱減量および付着藻類現存量を設定した。なお、過分散が認められた場合、疑似ポアソン分布を指定して再計算した。説明変数の多重共線性は VIF (variance inflation factor) を用いて評価した。VIF の算出、モデルの過分散の検定、およびゼロ過剰の検定は R パッケージ “performance” を用いた。

3. 結 果

(1) 大石川

調査地点は山間地を流れる河川にあるため、南北の河岸に遮られて開空率は 36.3 % と小さかった。しかし、河床勾配(0.006)は砂防対策が施されているため山地河川としては緩やかだった。河川工作物の水叩きの下流にある瀬の河床は、石(長径 64 ~ 256 mm)が 52 % および巨石(長径 > 256 mm)が 42 % を占めており、67 % の石が「はまり石」の状態にあった。

外来珪藻のミズワタ状群生は、水温が 11°C に低下し、流量が減少した 10 月に水叩き下流の瀬で、11 月に水叩きで確認された(図 3a)。河川水的全窒素および全リンは 10 月に大きく減少した後、全窒素は低い濃度にあったが、全リンは徐々に増加した(図 3b)。水叩きおよび下流の瀬の河床付着物の強熱減量は、流量の減少に伴い徐々に増加した(図 4a)。一方、付着藻類現存量は、流量の減少に伴い下流の瀬では 9 月頃から増加し始めたのに対し、水叩きでは 11 月になって大きくなった(図 4b)。

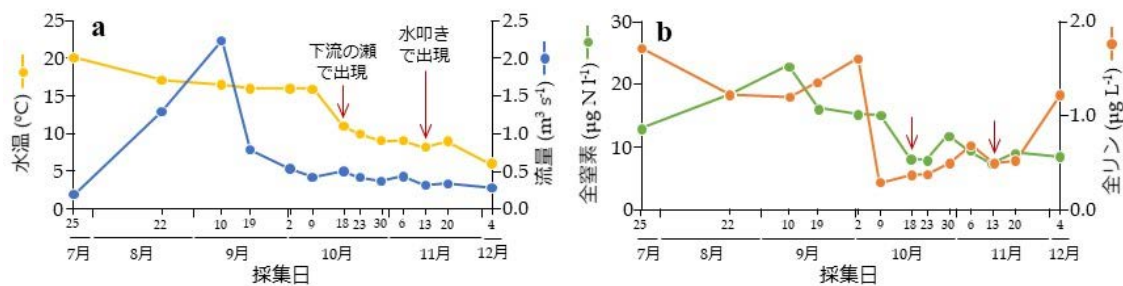


図 3. 大石川の調査地点における水温と流量(a)および全窒素と全リン(b)の経時変化。

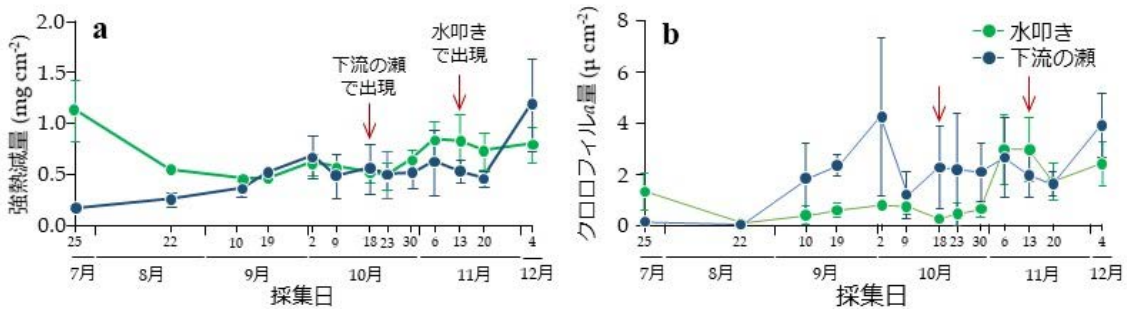


図 4. 大石川の調査地点における河床付着物の強熱減量(a)および付着藻類現存量(Chl. a、b)の経時変化。

外来珪藻の細胞密度の変動を、7つの変数で説明する一般化線形モデルを構築した(表 1)。全ての説明変数の VIF は 8 未満であり、変数間の強い相関は認められなかった。また、モデルのゼロ過剰は認められなかったが(値ゼロの観察値の数/値ゼロの予測値の数 = 49/53)、過分散が認められた(Pearson's $\chi^2 = 101682.230$, $p < 0.001$)。そこで、疑似ポアソン分布を指定して再計算した結果、外来珪藻の細胞密度の変動は、水温の低下($p < 0.1$)と付着藻類現存量の増加($p < 0.05$)により説明されることが分かった(表 1)。

表 1. 外来珪藻の細胞密度の変動を、採集場所、水温、流量、全窒素、全リン、河床付着物の強熱減量および付着藻類現存量(Chl. a 量)で説明した一般化線形モデルの偏回帰係数と有意性検定結果。疑似ポアソン分布を指定して、モデルの誤差のばらつきを調整した。

	偏回帰係数	標準誤差	t値	p値
切 片	7.266	2.959	2.456	0.016**
場 所(瀬)	-0.077	0.826	-0.094	0.926
水 温	-0.806	0.453	-1.780	0.078*
流 量	-0.514	8.477	-0.061	0.952
全窒素	0.183	0.419	0.436	0.663
全リン	0.073	1.681	0.043	0.966
強熱減量	0.846	0.767	1.103	0.272
Chl. a 量	0.666	0.280	2.378	0.019**

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$

(2) 那珂川

2022 年 1 月 19 日現在、水温が 4°C まで低下したが(図 5a)、河床付着物の強熱減量お

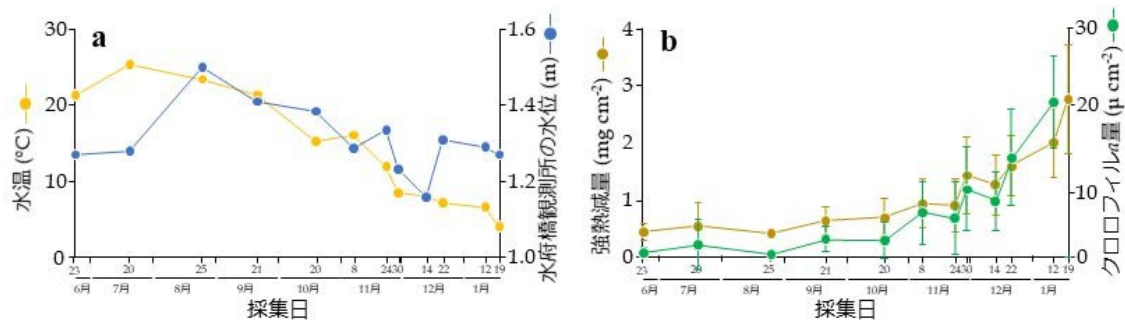


図 5. 那珂川の調査地点における水温と水府橋観測所の水位 (a) および河床付着物の強熱減量と付着藻類現存量 (Chl. a、b) の経時変化。

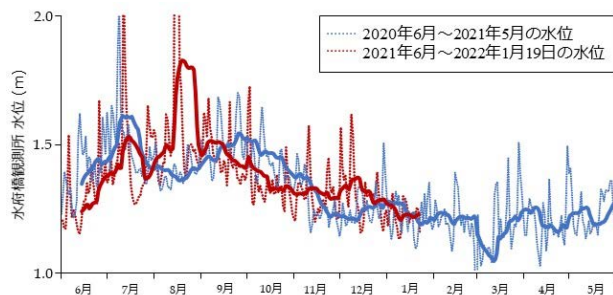


図 6. 国土交通省水府橋観測所で 2020 年 6 月から 2022 年 1 月 19 日の間に測定された那珂川の水位。実線は 1 週間の移動平均を示す。

よび付着藻類現存量は増加傾向にあり (図 5b)、ミズワタ状群生は観察されなかった。調査地点の下流にある国土交通省水府橋観測所の 2020 年 11 月～2021 年 3 月の水位と現在の水位を比較した結果、2022 年 1 月 19 日現在の水位は、依然、低下途中にあると考えられた (図 6)。

4. 考 察

ミズワタ状群生の繁茂が確認された大石川の測定値を用いて解析した結果、外来珪藻の細胞密度は、水温の低下と付着藻類現存量の増加に伴い増大することが分かった。外来珪藻 *C. janischii* は冬季に繁茂することから、本種は低水温を好むことが指摘されてきた (洲澤・洲澤 2021)。しかし、外来珪藻の増殖には、水温の低下だけでなく、付着藻類群落が肥厚していることが必要と考えられる。実際、那珂川の調査地点では、2022 年 1 月 19 日現在、水温が 4°C まで低下しても、水位の低下に伴い付着藻類現存量は依然、増加傾向にあり、ミズワタ状群生は観察されなかった。付着藻類群落の種組成は、群落の発達に伴い、優占種が入れ替って変化する (McCormick & Stevenson 1991)。*C. janischii* は、現存量の増加に伴う群落内部の何らかの環境変化がきっかけになって増殖するものと考えられる。外来珪藻の細胞密度と付着藻類現存量との関係は、今後、那珂川の調査データを用いて検証することが必要である。

大石川および那珂川の調査地点は河川工作物の水叩き、河床の約 7 割の石が「はまり石」の瀬、あるいは岩盤が露出した瀬であった。それらの河床硬化した河川区間は付着藻類群落が肥厚しやすいものと考えられる。現在、日本各地の河川から外来珪藻の出現が報告されている。しかし、外来珪藻が出現した場所の河川環境はほとんど提示されていない。今後、本種の出現が確認されている長野県および山梨県等の河川で調査を行い、ミズワタ状群生が繁茂する場所の河床条件等について知見を集めることが必要である。

5. 外来珪藻侵入ハザードマップ

本年度に得られた結果を基に、外来珪藻の侵入に備えたハザードマップの作成手順を検討した。

「外来珪藻侵入ハザードマップ」の作成手順(案)

注 意！

外来生物と考えられる微細な藻類(外来珪藻)が、日本各地の河川に出現しています。外来珪藻が繁茂すると、冬から春先にミズワタ状の群生をつくります。ミズワタ状群生が繁茂した場所には放流アユが定着し難いようです。また、ミズワタ状群生が剥がれて流れると捕獲カゴや養殖施設の取水口などの目詰まりを起こします。

外来珪藻の被害を防ぐには、漁具等を介して、外来珪藻を知らぬ間に川に持ち込まないようにすることです。また、外来珪藻の侵入を監視するために、外来珪藻が繁茂しやすい場所を予め調べておきましょう。そのために、身近な川の「外来珪藻侵入ハザードマップ」を作りましょう。



外来珪藻のミズワタ状群生が繁茂しやすい場所を知るために

1. 冬の川の流量を調べましょう

冬に流量が減少し、大きく変動しない川は、外来珪藻が侵入すると繁茂し易いと考えられます(要検証)。冬の降雨や降雪が少ない地域の川や、ダムによって流量が調節されている川は要注意です。

川を流れる水の量(流量)の変化は、同じ場所で測った水深の変化から分かります。近くに国土交通省の観測所があれば、水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)に過去の水位も含め速報値が掲示されています。

2. 河床の状態を調べましょう

外来珪藻は、水温が下がったあと、河床の水アカ(付着藻類群落)が肥厚した場所で増殖するようです(要検証)。川の地図を作り、冬から春にかけて肥厚した付着藻類群落がみられる場所に印を付けましょう。それらの場所は、外来珪藻がミズワタ状群生をつくりやすいと考えられます。川底の石が埋もれて動かない場所、岩盤が露出した場所、河床がコンクリートで固められた場所などは要注意です(要検証)。

6. 引用文献

- 阿部信一郎・新井肇・荒木康男・榎本昌弘・原徹・藤本勝彦・伊藤陽人・井塚隆・松崎賢・田子泰彦・山本敬哉. 2014. 河床に露出した巨石の割合とアユの漁獲不振の関係. 水産増殖 62; 37-43.
- Loeb, S. L. 1981. An in situ method for measuring the primary productivity and standing crop of the epilithic periphyton community in lentic systems. Limnology and Oceanography 26; 394-399.
- McCormick, P. V. & Stevenson, R. J. 1991. Mechanisms of benthic algal succession in lotic environments. Ecology 72; 1835-1848.
- 芦澤晃彦・加地弘一. 2018. ミズワタクチビルケイソウが放流アユの定着に与える影響. 山梨県水産技術センター事業報告書 46; 34-38.
- Steinman, A. D. & Lamberti, G. A. 1996. Biomass and pigments of benthic algae. In: Hauer, F. R. & Lamberti, G. A. (eds.) Methods in Stream Ecology. pp. 296-313. Academic Press, San Diego, CA.
- 洲澤多美枝・清野聡子・真山茂樹. 2011. 筑後川上流に大量出現した *Cymbella janischii* (A.W.F.Schmidt) De Toni と *Gomphoneis minuta* (Stone) Kociolek & Stoermer : 外来種珪藻の可能性について. Diatom 27; 58-64.
- 洲澤譲・洲澤多美枝. 2021. 酒匂川(神奈川県)で採集された外来種ミズワタクチビルケイソウ. 神奈川県自然誌資料 42; 87-93.
- 橘治国・那須義和. 1966. 全リン. 日本分析化学会北海道支部(編) 水の分析. 第 4 版. pp. 271-273. 化学同人, 京都.
- 都築俊文・内野栄治. 1966. 全窒素. 日本分析化学会北海道支部(編) 水の分析. 第 4 版. pp. 266-269. 化学同人, 京都.

阿部 信一郎 (茨城大学教育学部)