

# 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

外来珪藻ミズワタクチビルケイソウ (*Cymbella janischii*) の細胞密度 (単位面積当たりの細胞数) が肥厚した付着藻類群落の中で増大する現象を確かめるため、ミズワタ状の群生が消失してから再出現するまでの間、那珂川および千曲川支流大石川で断続的に本種の細胞密度、付着藻類群落の肥厚状態 (河床付着物の強熱減量およびクロロフィル *a* 量で評価)、および付着藻類群落の増殖に影響を及ぼす河川環境要因 (水温、流量、全窒素、全リン) を測定し、それらの関係を解析した。なお、那珂川の流量は、国土交通省水府橋観測所の水位データを参照した。ポアソン回帰分析の結果、外来珪藻の細胞密度は、大石川 (2022 年 7 月～12 月) ではクロロフィル *a* 量の増加に伴い、那珂川 (2021 年 7 月～2023 年 4 月) では河床付着物の強熱減量の増加に伴いそれぞれ増大した。河川規模に関わらず、外来珪藻は肥厚した (河床付着物の強熱減量あるいはクロロフィル *a* 量が増加した) 付着藻類群落内で増殖するものと考えられる。また、那珂川では、外来珪藻の細胞密度が水位の低下に伴い増大した。さらに、富士川支流荒川 (山梨県) で、これまでにミズワタ状群生の繁茂が確認されている 4 カ所の河床を調査した結果、いずれも河川工作物の水叩き、あるいは河床の約 7 割以上の石が埋まって動かない「はまり石」の状態にあった。

### 1. はじめに

近年、日本各地の河川で、外来珪藻ミズワタクチビルケイソウ *Cymbella janischii* (A.W.F.Schmidt) De Toni の繁茂が報告されている (洲澤ら 2011、洲澤・洲澤 2021、Kato-Unoki et al. 2022)。本種が形成するミズワタ状の群生 (図 1) は、河川景観を著しく損なうだけでなく、河床から剥離・流下すると漁網や各種取水施設を汚損する原因となる。また、ミズワタ状群生が繁茂した場所には放流したアユが定着し難いことが報告されている (芦澤・加地 2018)。本種の増殖には水温の低下が関係していると考えられているが (洲澤・洲澤 2021)、本種の生態学的知見は非常に限られており、どのような環境下で本種が増殖してミズワタ状群生を形成するのか解明されていない。そのため、被害防止に向けた具体的な対策や予防処置を講じるまでには至っていない。そこで本課題では、外来珪藻の増殖に関係する環境要因を探索し、ミズワタ状群生が繁茂しやすい場所を示したハザードマップを作製する一連の手法を提案する。



図 1. 外来珪藻によるミズワタ状群生。  
(2022 年 12 月 10 日に大石川で撮影)。

「令和3年度効果的な外来魚等抑制管理技術開発事業」の本課題において、肥厚した付着藻類群落内で本種の細胞密度が増大することを見い出した。そこで本年度は、本種の出現が確認されている大石川、那珂川および荒川で野外調査を行い、外来珪藻の細胞密度と付着藻類群落の肥厚状態との関係を検証すると共に、本種の増殖に関わる河川環境要因の抽出を試みた。

## 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)、那珂川(茨城県)および富士川支流荒川(山梨県)で調査を行った。大石川は川幅10 m程度の山地小河川で、千曲川支流石堂川との合流点から約100 m上流にある砂防堰堤の水叩きとその下流にある瀬で調査を行った。那珂川は川幅が100 m以上ある大きな河川で、河口から約30 km上流の岩盤が露出した右岸の瀬で調査を行った。富士川支流荒川(山梨県)では、昇仙峡ロープウェイ乗車口付近から10 km下流の河川区間内で、これまでにミズワタ状群生の繁茂が確認されている4カ所で調査を行った。

### (2) 調査方法

#### i 外来珪藻の細胞密度と付着藻類群落の肥厚状態との関係に関する調査

大石川(2022年7月25日~12月4日)および那珂川(2021年7月20日~2022年4月7日および2022年7月19日~)では、ミズワタ状群生が消失してから再出現するまでの間、断続的に外来珪藻の細胞密度、付着藻類の肥厚状態(河床付着物の強熱減量およびクロロフィル*a*量で評価)および付着藻類の増殖に影響を及ぼす河川環境要因(水温、流量、全窒素、全リン)を測定した。

毎月1~3回の頻度で、各調査地点から付着藻類試料( $n=10\sim15$ )を採取した。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。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 cm<sup>2</sup>)を用いて採集した。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密度測定用の試料とした。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。

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。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。

#### ii ミズワタ状群生が形成された場所の河床状況調査

荒川(2022年11月21日~22日)では、ミズワタ状群生の繁茂が確認されている4カ所の河床状況を調査した。20 cm 四方の格子からなる 1 m 角の格子枠を河床に設置し、格子の交点(36点)にある石礫の大きさ(長径)と素手で動くかどうかを記録した(阿部ら 2014)。なお、河床に埋まって動かない石を「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 4.2.2 を用いて行った(R Core Team 2022)。計数した外来珪藻の細胞数を目的変数、水温、流量(那珂川では水位)、全窒素、全リン、河床付着物の強熱減量および Chl. *a* 量を説明変数とし、付着藻類を採集した時の試料容量に対する外来珪藻の細胞数の計数に用いた試料容量の割合を採集面積に掛けて求めた面積(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、目的変数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た。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、VIF < 10 の説明変数を解析に用いた。VIF の算出およびモデルの過分散の検定は、R パッケージ“performance”を用いた(Lüdtke *et al.* 2021)。説明変数のプロファイル尤度による 95 %信頼区間は、R パッケージ“MASS”を用いた(Venables & Ripley 2002)。逸脱度検定(Type II 検定)は R パッケージ“car”を用いた(Fox & Weisberg 2019)。

## 3. 結果

### (1) 外来珪藻の細胞密度と付着藻類群落の肥厚状態との関係

#### i 大石川(2022年7月25日~12月4日)

ミズワタ状群生は、水温が 5.5 °C に低下した 12 月に確認された(図 2a)。12 月の河川流量(0.17 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)は 7~8 月の流量(0.21 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)と大きく変わらなかった(図 2a)。全窒素および全リンは調査期間中に徐々に減少し(図 2b)、水叩きおよび瀬の河床付着物の強熱減量(図 2c)および Chl. *a* 量(図 2d)の平均値は 12 月に最も多くなった。

外来珪藻の細胞密度の変動を 6 つの説明変数を用いてポアソン回帰分析を行った結果、VIF > 10 となる説明変数(水温、全窒素、全りん)が認められた。「令和 3 年度効果的な外来魚等抑制管理技術開発事業」の本課題で得られた研究成果では、外来珪藻の細胞密度の変動に対して栄養塩濃度に有意な効果は見られなかった。そこで、全窒素と全リンを除いた 4 つの説明変数を用いてポアソン回帰分析を行った結果、変数間の強い相

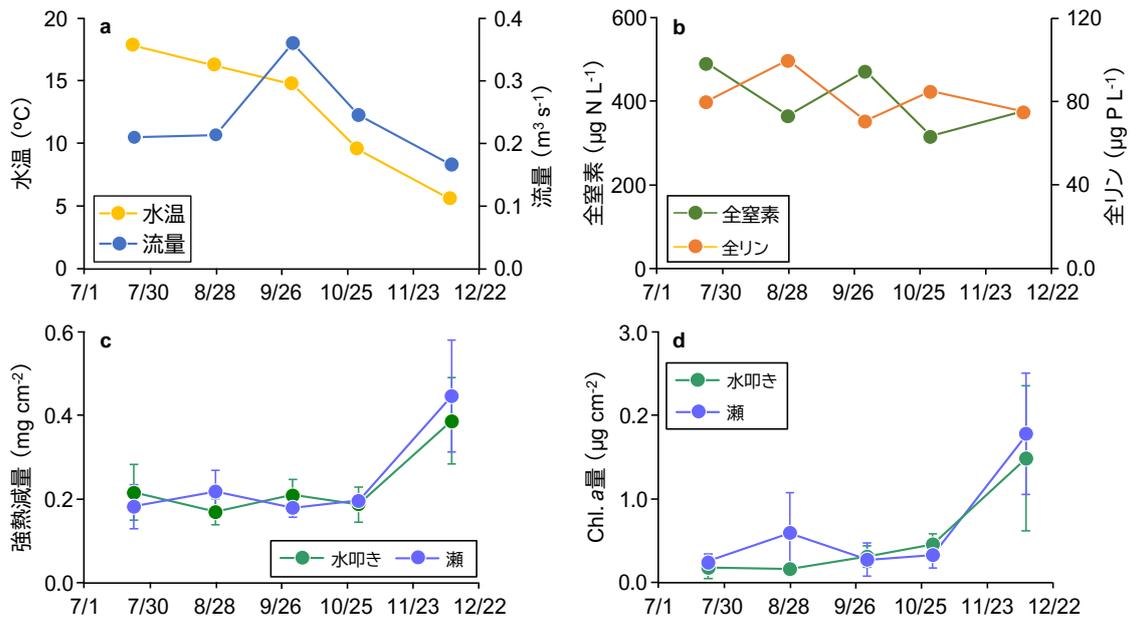


図 2. 大石川の調査地点(砂防堰堤の水叩きおよび瀬)における水温と流量(a)、全窒素・全リン(b)、および河床付着物の強熱減量(c)・Chl. a 量(d)の経時変化。

関は見られなかった ( $VIF < 4$ )。しかし、過分散が認められたため ( $\chi^2 = 10459.068$ ,  $p < 0.001$ )、疑似ポアソン分布を指定して再計算した。その結果、外来珪藻の細胞密度は Chl. a 量と正の相関が認められた (表 1)。

表 1. 2022 年 7 月～12 月の間に大石川で観察された外来珪藻の細胞密度の変動を、水温、流量、河床付着物の強熱減量および Chl. a 量で説明した一般化線形モデルの偏回帰係数(推定値、95 %信頼範囲)および逸脱度検定の結果 ( $\chi^2$  値)。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。

説明変数	偏回帰係数		$\chi^2$ 値
	推定値	95 %信頼区間	
切片	0.943	[-3.389, 5.645]	
水温	-0.004	[-0.261, 0.189]	-0.035
流量	1.625	[-22.093, 18.509]	0.174
強熱減量	-0.457	[-4.397, 3.843]	-0.219
Chl. a 量	2.070	[1.158, 3.086]	4.425***

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

### ii 那珂川 (2021 年 7 月 20 日～2022 年 4 月 7 日)

2022 年 4 月 7 日にミズワタ状群生を確認した。ミズワタ状群生が繁茂するまでに、水温は 4.1 °C (2022 年 1 月 19 日) に低下した後、14.1 °C まで上昇した (図 3a)。水位は、調査期間中に徐々に低下し (図 3a)、全窒素は調査期間中に徐々に増加した (図 3b)。一方、全リンは 2021 年 11 月に減少した後、2022 年 1 月下旬に入って増加した (図 3b)。河床付着物の強熱減量および Chl. a 量の平均値は 2022 年 1 月に最大に達し、その後減少した (図 3c)。

外来珪藻の細胞密度の変動を 6 つの説明変数を用いてポアソン回帰分析を行った結果、変数間に強い相関は認められなかった ( $VIF < 9$ )。しかし、過分散が認められたため

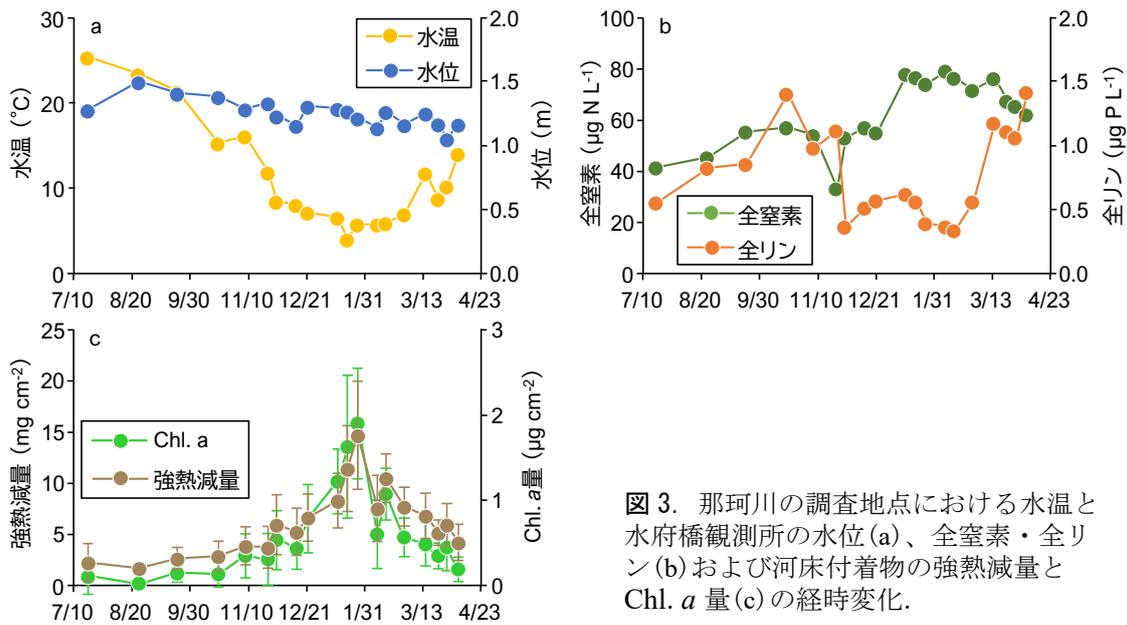


図3. 那珂川の調査地点における水温と水府橋観測所の水位(a)、全窒素・全リン(b)および河床付着物の強熱減量とChl. a量(c)の経時変化。

( $\chi^2 = 16205.135$ ,  $p < 0.001$ )、疑似ポアソン分布を指定して再計算した。その結果、外来珪藻の細胞密度は、全窒素、全リンおよび河床付着物の強熱減量との間に正の相関が、水温、水位およびChl. a量との間に負相関がそれぞれ認められた(表2)。

表2. 2021年7月～2022年4月の間に那珂川で観察された外来珪藻の細胞密度の変動を、水温、水位、全窒素、全リン、河床付着物の強熱減量およびChl. a量で説明した一般化線形モデルの偏回帰係数(推定値、95%信頼範囲)と逸脱度検定の結果( $\chi^2$ 値)。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。

説明変数	偏回帰係数		$\chi^2$ 値
	推定値	95%信頼範囲	
切片	2.151	[-1.754, 6.050]	
水温	-0.375	[-0.581, -0.169]	12.727***
水位	-4.754	[-8.114, -1.571]	8.686**
全窒素	0.045	[0.002, 0.095]	4.154*
全リン	6.783	[4.731, 9.108]	72.495***
強熱減量	4.167	[2.574, 5.784]	26.300***
Chl. a量	-0.331	[-0.563, -0.160]	15.483***

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

### iii 那珂川(2022年7月19日～)

2022年7月に調査を開始して以来、2022年12月20日現在までにミズワタ状群生は観察されなかった。しかし、2022年8月に生じた大水によって右岸に漂着した倒木により川の流れが遮られた場所(緩流部、図4a)で外来珪藻の群落を観察された(図4b)。

2022年8月22日の水温は24℃であった。倒木によって流れが遮られていない場所(本流)と緩流部で水深( $t = -2.389$ ,  $df = 17.369$ ,  $p = 0.028$ )および流速( $t = 4.125$ ,  $df = 14.058$ ,  $p < 0.01$ )が異なっていた。本流に比べて、緩流部の水深は深く、流速は緩やかだった。河床付着物の強熱減量および付着藻類現存量を説明変数としてポアソン回帰分析を行った結果、外来珪藻の細胞密度と河床付着物の強熱減量との間に正の相関が、Chl.

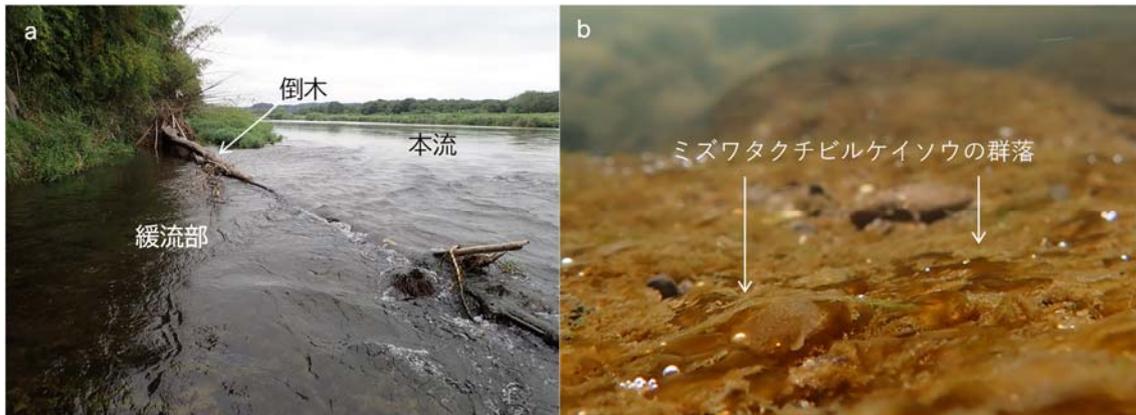


図 4. 2022 年 8 月の大水で右岸に漂着した倒木によって形成された緩流部(a)および緩流部の河床で観察されたミズワタクチビルケイソウの群落(b).

$a$  量との間に負の相関がそれぞれ認められた(表 3)。説明変数の間に強い相関はみられず(VIF<3)、過分散も認められなかった( $\chi^2=11.472$ ,  $p \leq 0.119$ )。その後、調査地点の流況がさらに変化して、外来珪藻は再び観察されなくなった。

表 3. 2022 年 8 月 22 日に那珂川で観察された外来珪藻の細胞密度の変動を、河床付着物の強熱減量および Chl.  $a$  量で説明した一般化線形モデルの偏回帰係数(推定値、95 %信頼範囲)と逸脱度検定の結果( $\chi^2$  値)。

説明変数	偏回帰係数		$\chi^2$ 値
	推定値	95 %信頼範囲	
切片	-2.683	[-4.569, -1.185]	
強熱減量	8.432	[5.919, 11.323]	45.994***
Chl. $a$ 量	-0.370	[-0.568, -0.164]	11.701***

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

## (2) ミズワタ状群生が形成された場所の河床状況

### i 荒川(2022 年 11 月 21 日~22 日)

調査時の水温は 8.1~12.0℃、4 カ所の河床勾配は 0.07~2.85 %の範囲にあった。4 カ所のうち 2 カ所でミズワタ状群生を確認した、そのうち 1 カ所は河川工作物の水叩きの上に形成されていた。他の 3 カ所の河床は主に石(長径 64~256 mm)および巨石(長径 256 mm <)で占められており、河床の約 7 割石が動きにくい「はまり石」の状態にあった(表 4)。

表 4. 荒川でミズワタ状群生の繁茂が確認されている 4 カ所の河川勾配と河床に占めるはまり石の割合。

地点	緯度経度	ミズワタ状群生の繁茂	河床勾配 (%)	はまり石の割合 (%)
地点 1	35°42'22"N, 138°31'29"E		0.0007	75.9
地点 2	35°41'25.3"N, 138°31'45.7"E	確認	0.0285	河床工作物の水叩き
地点 3	35°42'50.4"N, 138°32'19.6"E		0.0113	100.0
地点 4	35°45'11.8"N, 138°33'55.9"E	確認	0.0123	70.0

#### 4. 考 察

「令和3年度効果的な外来魚等抑制管理技術開発事業」の本課題にて、2021年7月～2021年12月に大石川で行った調査から、外来珪藻の細胞密度は水温の低下と河床付着物の強熱減量および Chl. *a* 量の増加に伴い増大する傾向が認められた。この傾向は2022年7月～12月に大石川で行った調査でもみられ、外来珪藻の細胞密度は Chl. *a* 量の増加に伴い増大した。さらに、2021年7月～2022年4月に那珂川で行った調査でも、外来珪藻の細胞密度は河床付着物の強熱減量の増加に伴い増大する傾向がみられた。これらの結果は、河川の規模に関わらず、外来珪藻が肥厚した(河床付着物の強熱減量あるいは Chl. *a* 量が増加した)付着藻類群落内で増殖する性質を有することを示唆する。なお、那珂川では外来珪藻の細胞密度と Chl. *a* 量との間に負の相関がみられた。那珂川では、有機物が蓄積する一方、付着藻類の生細胞が減少した“垢ぐされ”状態の付着藻類群落内で外来珪藻が増殖しやすいことが考えられる。

2021年7月～2022年4月に那珂川で行った調査では、外来珪藻の細胞密度が水位の低下に伴い増大した。2022年12月現在、那珂川の調査地点のミズワタ状群生は確認されていない。しかし、2022年8月に生じた大水によって右岸に漂着した倒木により川の流れが緩やかになった場所で外来珪藻の群落を観察された。そこでは、外来珪藻の細胞密度と河床付着物の強熱減量との間に正の相関が、Chl. *a* 量との間に負の相関がそれぞれ認められた。流量と外来珪藻の細胞密度との関係は山地小河川で見られなかった。流量の影響は比較的大きな河川でみられるものと考えられる。大きな河川では、冬から春先にかけて水位が低下すると川の流れが緩やかになり、付着藻類群落が肥厚して外来珪藻が増殖し易い環境が作られる可能性が考えられる。

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。荒川で、これまでにミズワタ状群落の繁茂が確認されている4カ所の河床状況を調査した結果、いずれも河川工作物の水叩きあるいは河床の約7割以上の石が「はまり石」の状態にあった。河床が硬化・安定化した場所は、ミズワタ状群生が形成され易い可能性が考えられる。今後、ミズワタ状群生の繁茂が確認されている場所の河床状態を調べる必要がある。

#### 5. 外来珪藻侵入ハザードマップ

本年度までに得られた結果を基に、外来珪藻のミズワタ状群生が形成され易い場所を示し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!

外来種と考えられる微細藻類(ミズワタクチビルケイソウ)が、日本各地の河川に出現しています。この藻類は珪藻の仲間で、冬から春先に繁茂してミズワタ状の群生をつくります。ミズワタ状の群生が繁茂すると川の眺めが著しく損なわれるだけでなく、それらが河床から剥がれて流下すると、まるで千切れたティシュペーパーを川に流したようになって、漁網や各種施設の取水口を目詰まりさせます。また、ミズワタ状群生が繁茂した場所には放流したアユが定着し難いようです。

ミズワタクチビルケイソウの被害を防ぐには、川で使った道具などを介して、外来珪藻を知らぬ間に別の川に持ち込まないようにすることです。一方、外来珪藻がミズワタ状の群生をつくるにはある条件が必要なことが分かってきました。ミズワタクチビルケイソウの侵入を監視するために、この藻類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。



川底を覆うように繁茂した外来珪藻のミズワタ状群生

### 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

ミズワタクチビルケイソウは、肥厚した付着藻類群落の中で増殖し始めることが分かってきました。川底に繁茂する付着藻類の量は、様々な要因の影響を受けて変化します。以下の点に着目して外来珪藻がミズワタ状の群生をつくりやすい場所を探してみてください。

#### 1. 川の水量の変化を知っておきましょう

冬から春先の水温がまだ低い時期に川の水量が減少すると、付着藻類群落が肥厚し易くなり、ミズワタ状の群生が形成され易いようです。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(要検証)。

川の水量(流量)の変化は、同じ場所で測った川幅や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公開されています。

#### 2. 河床の状態を調べましょう

川の地図を作り、冬から春先に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。これらの場所では、外来珪藻がミズワタ状の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で、ミズワタ状の群生がよく観察されます(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.
- 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.
- Fox, J. & Weisberg, S. 2019. An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Kato-Unoki, Y., Kurihara, A., Kuge, T., Shimasaki, Y., Suzawa, Y. & Mayama, S. 2022. Genetic evidence for the invasion of *Cymbella janischii* (A. Schmidt) De Toni, 1891 in Japan. BioInvasions Records 11; 409-415.
- 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.
- Lüdecke, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., Waggoner, P. & Makowski, D. (2021). performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models. Journal of Open Source Software, 6(60), 3139. <https://doi.org/10.21105/joss.03139>
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- 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.
- Venables, W. N. & Ripley, B. D. 2002. Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.

阿部 信一郎 (茨城大学教育学部)