

大倉ダムにおける *Asterionella* 優占機構と
シリカの滞留・放流に関する研究

Conditions necessary for *Asterionella* dominance in Okura dam and variations
in the ratio of silicate discharge load against silicate inflow load at the dam

原田茂樹*・岸本拓之**・越川海***・熊谷悠里香****

*福島大学 食農学類 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1)

**農林水産省 関東農政局 (〒330-9722 埼玉県さいたま市中央区新都心2-1)

***国立環境研究所 地域環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

****株式会社ステップ (〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央1丁目6-35)

HARADA Shigeki*, KISHIMOTO Takuyuki**, KOSHIKAWA Hiroshi***, KUMAGAI Yurika****

*Department of Agroenvironmental Sciences, Fukushima University (1 Kanayagawa, Fukushima 960-1296, Japan)

**Kanto Regional Agricultural Administration Office, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (2-1 Shin-Toshin,
Saitama-Chuo, Saitama 330-9722, Japan)

***Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies (16-2 Onogawa,
Tsukuba, Ibaragi 305-8506, Japan)

****STEP Co., Ltd (1-6-35 Aoba-Chuo, Sendai 980-0021, Japan)
(Received 4 December 2020)

Abstract

At Okura Dam located at the suburbs of Sendai, we have done monthly based sampling from April 2011 to December 2016 and April 2019 to February 2020. The dominant phytoplankton species succession was analyzed focusing on the conditions necessary for the dominance of *Asterionella*. The results suggested the importance of water temperature and mixing regime of the water body. Dissolved silicate discharged from the dam, generally, affects the species abundance of diatoms at coastal and marine environment and thereby control the food web interactions. Thus, discharge of dissolved silicate from the dam is essentially important. Based on our analyses on input-output relationship of the dissolved silicate load at the dam, even *Asterionella* serves as a trap, as a whole silicate output was larger than that of input, reflecting the variations in the discharge volume from the dam.

Key words: Okura dam, diatoms, *Asterionella*, species succession, dissolved silicate budget

要 旨

仙台市近郊にある大倉ダム内の生物生態学的物質循環は下流の農地・水域・生活圏などの環境に与える影響が大きい。本稿では、2011年4月から2016年12月及び2019年4月から2020年2月までの月一度のサンプリングを通じ、特に出現数の多くを占める *Asterionella* 属の大倉ダムでの優占条件として、春は成層・混合状態および冬は混合状態の水塊構造があり、また春の低水温が支配的であることを示した。ダムへの溶存態シリカ流入負荷量と放流負荷量の比較を行った結果、*Asterionella* の優占期にはシリカがトラップされる傾向があるものの、全期間を見ると放流されるシリカの方が流入するシリカを上回ることがわかった。多目的ダムである大倉ダムからのダム操作（放流特性）に影響されていると考えられる。

キーワード: 大倉ダム、珪藻、*Asterionella* 属、シリカ流入負荷量、シリカ放流負荷量、ダム操作

1. はじめに

流域圏における、食料生産・人間活動と環境保全が両立した「共生環境社会システム」の実現（管理と評価）は、今後の流域圏計画における最も重要な視点であると言っても過言ではない。特に東北

地方の流域圏については、温暖化により大きな変動の可能性が示唆されている積雪・融雪の挙動を含んだ上での計画立案を図る必要がある。「共生環境システム（あるいは共生環境社会システム）」については、環境省が提唱する「森里川海をつなぐ地域循環共生圏」、内閣官房水循環本部が推進する「流域水循環計画」、日本学術会議他が提唱する「自然共生型流域圏」のいずれにも共通する考えが含まれている。本研究の軸は、その共通点、例えば、①流域圏管理指標数値化、②管理のツールとしての流出負荷量算定モデル構築、③共生環境システムを構成する主体による評価・認知構造の解明による集団合意形成システムの提案などに将来的につながるものである。

本研究の対象地は、流域水循環計画の対象地域に指定されかつ仙台圏の重要な流域圏である「名取川水系」の「大倉ダム流域」とした。この流域では、後背地森林の定義山から下流水域へ、と、森里川海の連環（環境省，2018）を通して水と物質が移動する。流域はダムを含み、ダムを通して下流の受水域・農地などに流達する水・物質量の算定が重要である。本研究では物質としてシリカに注目し解析を行った結果を示す。大倉ダムでは *Asterionella* 属をはじめとする珪藻が出現数の多くを占めることから、シリカのダム内循環においても大きな影響を持ち、結果としてダムへのシリカの滞留・放流に大きな影響を与える可能性がある。特に、シリカのダム内滞留については、近年、ダム貯水池が持つシリカの捕捉機能と位置付けた考え方がある。その機構として、①ダム貯水により水が滞留すると、鉱物性シリカ（LSi）も滞留する、②珪藻が増殖時にダム湖水中の溶存態シリカ（DSi）を生物態シリカ（BSi）に変換しダム中に滞留する、③それはダム下流域のシリカの減少につながる、ということである（Fig.1）。このダム内滞留機構は、シリカがダム下流域の内湾や海域の珪藻にとって必須であることから、ダムから放流される DSi の減少が有害赤潮やクラゲの増殖に繋がるという「シリカ欠損仮説（Harashima *et al.*, 2006）」と言われる考え方につながる。これまで国内では、滞留が大きいとする説（例えば、原島，2008；国立環境研究所，2011）、少ないとする説（例えば、天野・時岡，2007）が混在している。国外では、既に 1997 年に、ドナウ川におけるアイアンゲートの建設による滞留のため、黒海でシリカ欠損が起こったという報告がある（Humborg *et al.*, 1997）。しかし、東北地方のダムにおいてそれらの検討を行った例は見られない。シリカ以外の物質のダム内滞留にも興味を持たれ、著者らは検討を行っているが、本研究では著者らが解析の中心として扱ってきたシリカ（Harada *et al.*, 2014）に絞って報告する。

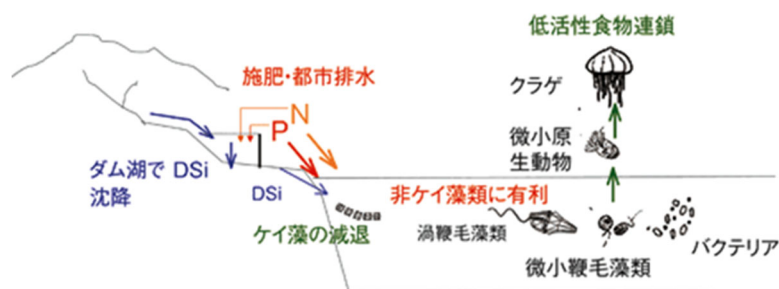


Fig.1 「シリカとケイ素循環模式図」（国立環境研究所，2011）

本研究は大倉ダムを対象とした約 7 年間（2011 年 4 月～2016 年 12 月、2019 年 4 月～2020 年 2 月）、月一度のサンプリングに基づき、ダム内および流入・放流河川中の溶存態シリカ濃度、水塊構造、生物・生態系挙動などの解析結果を用いて、優占種遷移とシリカのダム内滞留とダムからの放流について解析したものである。まず、大倉ダムで優占する *Asterionella* の優占機構を明らかにする。そして、ダムへの溶存態シリカ流入負荷量（流量×シリカ濃度）の観測結果と、溶存態シリカ放流負

荷量の観測結果と推定結果（ダム放流位置から推定したもので、観測結果との相関回帰分析によってその確からしさを確認したもの）を併せたものから、流入と放流のどちらが卓越するか、またその変動特性について、*Asterionella* 優占状態の変化とともに解析した結果を示す。

2. 材料と方法

2.1 モニタリングサイト（大倉ダム）

大倉ダム（場所は既報(Harada *et al.*, 2017)における地図を参照されたい）は仙台近郊に位置し、大倉ダムに流入する大倉川は、仙台市を流れる広瀬川に市の中心部より約 16 km 上流で合流する左支川である。流路延長は 22.4 km で、大倉ダムは大倉川上流仙台市青葉区字大倉地内に建設されたダブルアーチ式コンクリートダムである。大倉ダムの計画は昭和 22 年のカスリン、昭和 23 年のアイオン両台風をはじめ、昭和 25 年 8 月の出水と相次ぐ大洪水に見舞われたことから検討された。一方、戦後の仙台市、塩竈市の人口増加に伴い上水道用水と、発展途上にある仙塩工場地帯への工業用水の補給等、水資源の総合的開発も期待された。工事は旧建設省直轄事業として昭和 33 年度に着手、4 年の歳月を経て昭和 36 年度に完成した。ダム管理は昭和 37 年度から宮城県が行っている。洪水調節・かんがい・上水道・工業用水・発電を目的とした多目的ダムである。

2.2 サンプルングと計測

大倉ダム内外でのサンプルング場所を Fig.2 に示す。2011 年 4 月から 2016 年 12 月まで、Fig.2 中の「流入河川」、ダム堤側の「表 2」（鉛直方向に、表層、中層、下層で）の採水を月一度（基本的に月上旬の好天日、凍結時は流入河川のみ）、仙台市水道局がバンドーンサンプラーを用いて行った。2019 年 4 月から 2020 年 2 月には、基本的に同じ採水を行った。ただし、2019 年 4 月より、ダム堤側の「表 2」よりも堤の影になりにくい「表」に変更された。それに伴い、2019 年 4 月から、仙台市水道局の「表」での採水と同時間に、「表 2」においてバケツ採水で表層のみを採水した。その後直ちにダム放流河川へと移動し、採水をバケツ投げ込みにより行った（以下、「川下」と呼ぶ。Fig.2 の右手に位置する）。なお、放流河川での採水は、2012 年 9 月から 12 月にも実施している。

また、大倉ダム管理事務所が毎月中旬の好天日にダム内 3 地点（Fig.2 の「NO.1」「NO.2」「NO.3」）において継続してきた水温、濁度、透明度の計測において、2019 年夏期には採水も行うことを依頼し得られたサンプルも使用した。

「表 2」および「川下」では、バケツ採水時には水温と透視度（50cm 透視度計）を計測した。2019 年には光環境に注目し、「表 2」での 3 深度光量子（DEFI）、透明度（セッキ板）を計測した。「表 2」



Fig.2 サンプルング地点

での水温・濁度分布も適宜、大倉ダム管理事務所がダム内3地点で用いている機器を使用して実施した。

2.3 前処理と分析

TOC (NPOC) (島津 TOC-V)、TN (島津 TOC-V)、COD (HACH DR-5000、JISK0102 法、Mn を酸化剤とした公定法と互換性がある吸光光度法) は宮城大学食産業学部にて直ちに計測した。TP、シリカなどの無機栄養塩濃度は、2014年6月まで宮城大学食産業学部にて吸光光度計 (HACH DR-5000) で分析した。テストサンプルを用いたクロスキャリブレーションを経て、2014年7月から、TN、TP、溶存態シリカなどの無機栄養塩濃度は、国立環境研究所がオートアナライザーで計測した。国立環境研究所へのサンプル移送のため、濾過前、及び濾過後の試料を凍結するため、事前に、計測項目の凍結前と解凍後の計測値比較を行った。その結果、溶存態シリカは凍結により重合体が形成されるため、解凍直後は値が凍結前と乖離するが、解凍後一週間冷蔵放置し計測した場合、凍結時に形成された重合体が溶存態シリカに戻り、凍結前の溶存態シリカ計測値と一致することを確認した(宮城大学食産業学部の DR-5000 でも国立環境研究所のオートアナライザーでも確認した)。濾過は 47φGF75 (ADVANTEC) により行った。GF75 の孔径は 0.3μm と公表されているが、環境サンプルを用いた捕捉効率比較により、47φGF/B (Whatman, 孔径 1.0μm) と一致することを別途確認している。なお、シリカ計測において、濾過に用いるグラスファイバーフィルター、濾過器、保存時のガラス容器の影響はないことを、ガラス瓶への大倉ダム試水の長期保管実験を通じて確認した(大倉ダムの溶存態シリカ濃度は高く、最低でも 5mg/L 程度、通常は 10~30mg/L にあることも影響がない原因と思われる)。色素 (クロロフィル a とそれが分解したフェオ色素) は Holm-Hansen 法で国立環境研究所が計測した。そのほか、流入河川流量、ダム水位から計算した放流量、2019年以前のダム内3地点での温度・濁度の深度分布、透明度が大倉ダム管理事務所より提供され、「表2」と「表」の水温と属レベル植物プランクトン個体数の深度分布は仙台市水道局より提供された。

2.4 水塊構造解析

「表」、「表2」およびダム内3地点での計測期間中の水温・濁度深度分布を解析し、大倉ダム内の水塊が混合状態にあるか、成層状態にあるかを判定した。

2.5 放流水濃度推定

「川下」での採水は、計測期間中において常にはできていない。しかし、2012年と2019年に行った採水時の有機物およびシリカを中心とした溶存態無機栄養塩濃度、同時刻の「表2」あるいは「表」における3深度の有機物およびシリカを中心とした溶存態無機栄養塩濃度、大倉ダム管理事務所より提供されたダム流入量とダム放流量から、川下での各水質成分負荷量と、「表」における3深度のうち中層の濃度を放流濃度とした場合の各水質成分負荷量を求め、両者の相関回帰分析から高い相関係数を示すことが明らかとなった(別稿にて詳述する。投稿準備中)。

3. 結果と考察

3.1 2019年のサンプリング地点変更の影響

2019年の4月から12月の、「表2」と「表」における表層の計測値を比較した。まず、溶存成分の比較によれば、溶存態シリカ、硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リンの全て、および溶存態と懸濁態の混合成分の比較によれば、TN、COD、TOCの全てにおいて、Table 1に示すように、回帰式の傾

きが 1 に近く、相関係数は 1% 有意水準 (n=8) で有意であった。Fig.3 には溶解性成分のうち、シリカの相関回帰分析例を示す。一方、色素は水質成分よりも 2 地点の差が大きかった。Chl.a と Pheo 色素濃度はともに 2 地点の間で傾向の類似性は見られたが、相関係数は 1% 有意水準では有意とはいえなかった (Chl.a 濃度の方が Pheo 色素濃度より類似性が高かった)。これまで著者らが報告してきたように、深度方向の Chl.a 濃度と Pheo 色素濃度は、植物プランクトンの沈降過程での分解等の反応の影響を受けている (原田ら, 2014) ために水塊の環境条件の違いが現れたと考える。今後さらに解析を継続する必要がある。しかし、水質成分から判断し、サンプリング地点変更の影響は小さく、2 地点の計測値は、一番ダム堤よりの数値として同列に扱って良いと考える。

Table 1 「表 2」と「表」の表層の水質成分の相関回帰分析結果 (n=8)

水質項目	回帰式 (y:「表 2」表層、x:「表」表層)	相関係数
D-SiO ₂	y = 1.0286 X	0.9992
NO ₃ -N	y = 1.0634 X	0.8501
NH ₄ -N	y = 0.7602 X	0.8498
PO ₄ -P	y = 0.8909 X	0.9421
TN	y = 1.0904 X	0.9450
COD	y = 0.9548 X	0.9901
TOC	y = 0.9947 X	0.9999

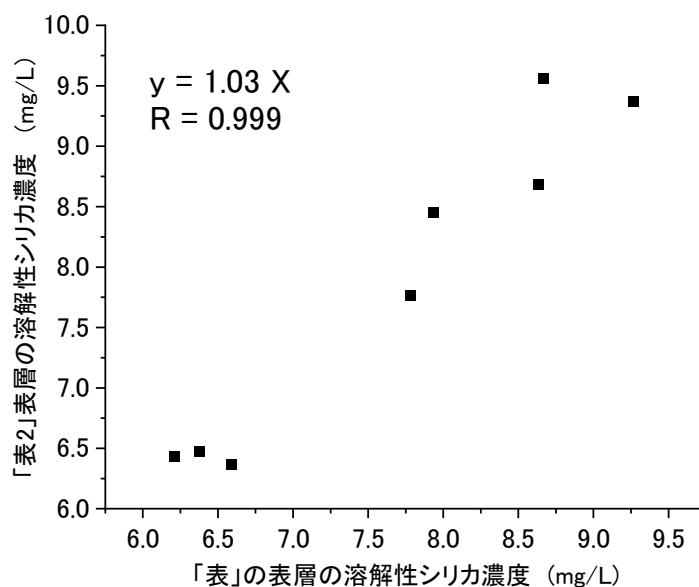


Fig.3 「表 2」と「表」の表層の溶解性シリカ濃度の相関回帰分析結果 (n=8)

3.2 光環境

「表」は著者らが近寄ることはできない環境である (水力発電のための吸込み口になっている) ため光環境の観測はできなかった。しかし、前項で示したように計測値が類似していることから光環境も少なくとも「表」と「表 2」の表層部では類似性があると推察された。そこで、「表 2」でのみ、透明度と

光量子深度分布（10cm 深、50cm 深、3m 深、10m 深）の値を 2019 年には計測した。前者は概ね 2.0～3.5m 程度であり、光量子も 3m 深で 10cm 深の 1% 以下に低下する。当初は「表 2」が堤側にあり堤の影になるためと考えていたが、ダム内にあり堤の影響を受けない NO.1～3 の透明度も同様に 3.0～3.5m 程度であることが多いことが大倉ダム管理事務所提供のデータから明らかとなった。「表 2」、「表」の値は堤側にあるものの、ダム内の任意の地点の光環境を代表すると考えられる。つまり、大倉ダムは、全体にわたり下層には光は十分には届いていない可能性がある。一方、前項で示したように、著者らは植物プランクトンの沈降過程での光合成反応が水質値や色素の深度分布に影響を与えていると考え、また沈降過程での光合成反応を考えると水質分布はよく説明できた（原田ら, 2014）。この時点では鉛直一次元の挙動のみを考えており、堤側で取得した「表 2」、「表」の水質値を説明する上で、今後、ダム全体での水塊構造や水平方向の移動・混合を考える必要がある。

3.3 *Asterionella* 属の優先機構

3.3.1 全層での出現数

Fig.4 に全層での珪藻 *Asterionella*、珪藻 *Asterionella* 以外、珪藻以外の出現数の年間推移を示した。ここで、出現種の中には鉛直移動する種もあり、また水塊が混合状態の時もある（後述）ため、まず大倉ダムにおける優占種を判定するには全層でとらえることがふさわしいと考えた。Fig.4 では年々変動はあるが、2013 年以降特に *Asterionella* の出現数が多いことが示されている。

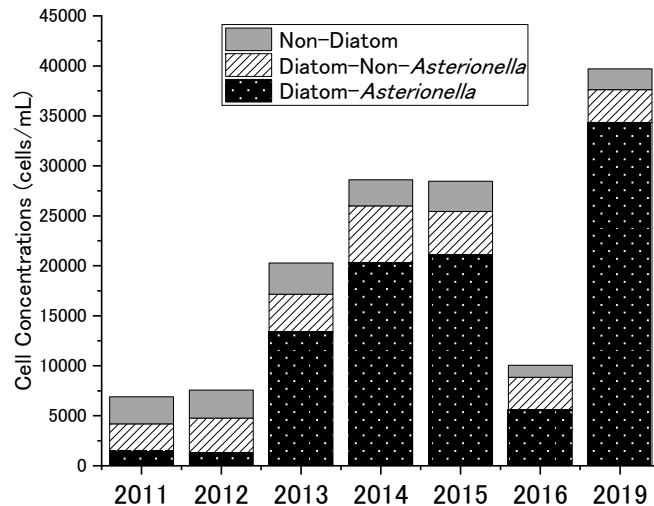


Fig.4 全層での出現数の推移

3.3.2 表層と全層での *Asterionella* 優占率

前項での解析を補うために、Fig.5 には、表層と全層の *Asterionella* 優占率の推移を示した。表層と全層のそれぞれで優占率を計算すると差が生じる部分もあるが、全体の傾向は同じであり、表層で優占期を判定しても全層で判定しても同じ結論に至ると考えられる。

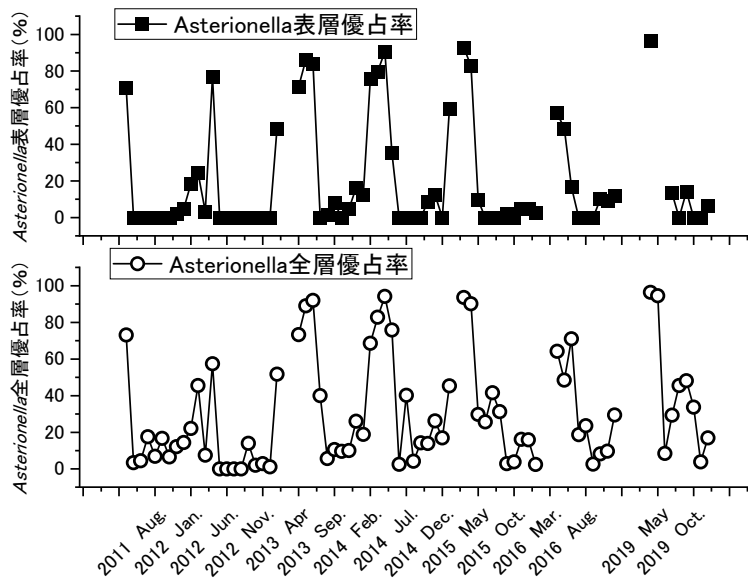


Fig.5 表層と全層の *Asterionella* 優占率の推移

3.3.3 水塊混合・成層状態

3地点の水温データからコンターを作成した。混合期と成層期のコンター例を Fig.6 と Fig.7 に示す。

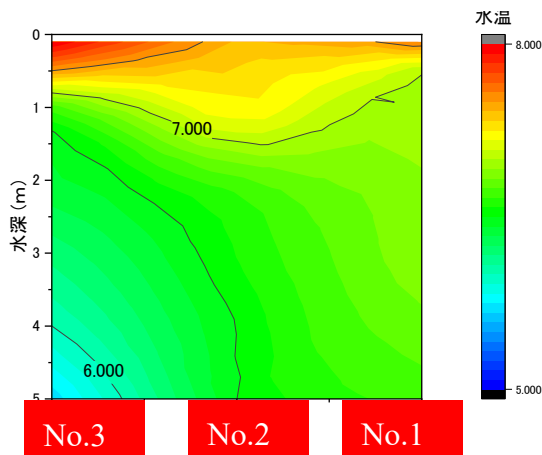


Fig.6 混合状態 2013年4月

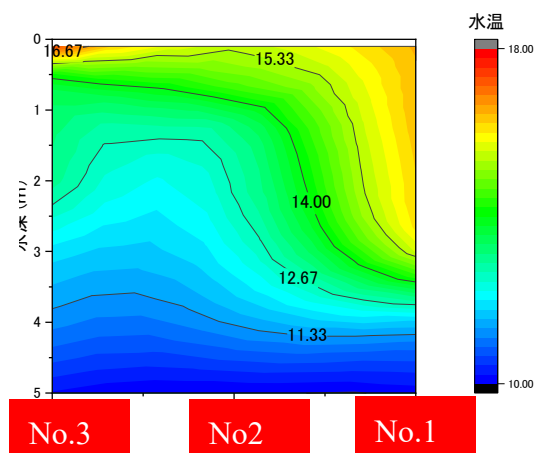


Fig.7 成層状態 2013年5月

3.3.4 水塊状態と *Asterionella* 優占状態の関係

各年の春夏秋冬に属する各月の水塊状態が混合状態であるか、成層状態であるかを、「表」と「表2」の水温深度分布と、「NO.1」～「NO.3」のコンターを併せて判断し、Table 2 にその月数（春と冬は結氷などのため計測できていない月が含まれている）を示した。うち、*Asterionella* が出現数の平均値を上回っている月数を括弧内に示した。この結果より、*Asterionella* が優占するのは、春（3～5月）は混合状態と成層状態、冬（12～2月）は混合状態の時であり、夏と秋は優占しないことがわかった。また、各年の表層の *Asterionella* 優占率を水温および溶存態シリカ濃度とともにプロットする (Fig.8 に2014年の例を示す) と、優占率に影響を与えているのは、溶存態シリカ濃度ではなく、水温である（春から夏にかけて温度上昇すると優占率が下がる）ことが明確となった。これらのことより、*Asterionella* 優占

Table 2 季節ごとの水塊構造の形成回数（表中数字）と *Asterionella* の優占回数（表中括弧内数字）

	春	夏	秋	冬
混合状態	9(6)	1(0)	6(0)	12(3)
成層状態	6(5)	18(0)	13(0)	0(0)

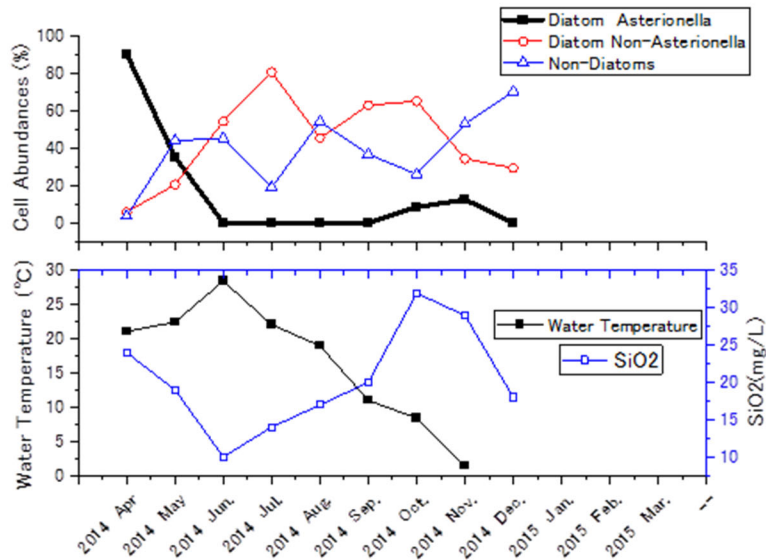


Fig.8 表層での種組成遷移と水温、溶存態シリカ濃度

条件は、水塊構造と水温から説明できると言える。

3.4 シリカの流入負荷量に対する放流負荷量の比率

放流濃度推定値を用いて、2011年4月から2019年9月までの溶存態シリカ負荷量のインプット（流入負荷量）とアウトプット（放流負荷量）について解析を行った。「放流負荷率 (%)」=放流負荷量÷流入負荷量×100 (%) を求め、Fig.9 に示すように、100 を下回る時には滞留が、上回る時には放流が起こったと判定すると、放流が起こったと判定される月の方が多い。ここで滞留と判定された時は、*Asterionella* 優占率が高い時が多い傾向がある。

そこで、*Asterionella* 優占率と放流率の関係をより詳しく検討した（珪藻である *Asterionella* の優占がシリカの滞留と関係があるかを調べるためである）。Fig.10 では、計測期間を約7水文年と考え、月ごとに概ね（欠測値を除き）7回の平均値として、*Asterionella* 優占率と放流率を比較している。Fig.9 では、各月で、同時に流入負荷量と放流負荷量を比較しており、流入から放流までのタイムラグが考慮されていない。Fig.10 でも同様にタイムラグは考慮できていないが、7回の平均値であることから、各月の一般的な傾向をより強く表していると考えられる。

このグラフより評価すると、*Asterionella* の優占する春（3～5月）と冬（12～2月）にシリカが滞留することが多く *Asterionella* の優占も物質滞留に関係していることが否定できない。つまり、ダム内のシリカ収支を考える上で *Asterionella* による取り込みとその後の滞留（ダム内での沈降など）を考慮する必要性は高いが、各月で7回の平均値が概ね全て100 (%) を超えていることから、大倉ダムにおいては一般的傾向として、シリカは滞留よりも放流される傾向が強いといえる。データは示さないが、放流率の変動は放流量の変動と一致していた。大倉ダムは多目的ダムであり、ダム操作（放流量操

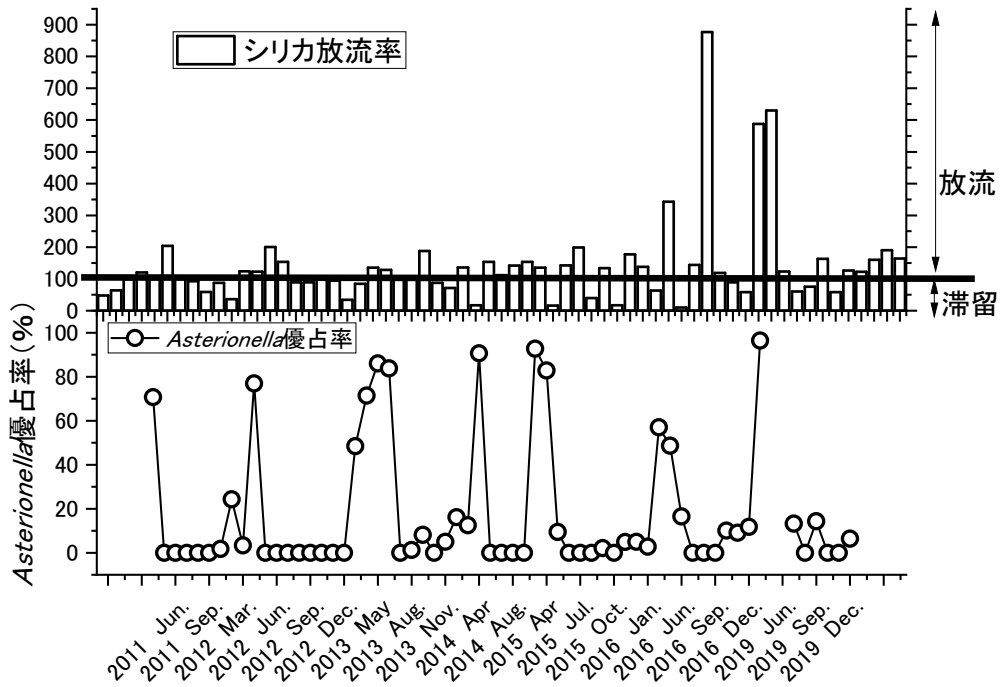


Fig.9 2011年4月から2019年12月までの溶存態シリカ放流率

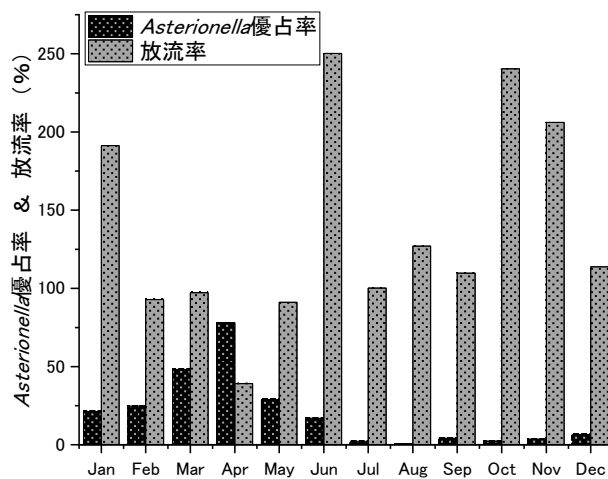


Fig.10 7水文年の平均による各月のAsterionella優占率と溶存態シリカ放流率

作) が溶存態シリカの滞留と放流の比、ひいては、下流水域への溶存態シリカの供給にも大きな影響を与えたと考えられる。

3.5 生物体シリカの評価

流入水・放流水中の BSi (生物体シリカ) について検討した。本研究では流入と放流の DSi 負荷量を検討するためにろ過をしており、 BSi は収支計算から外れる。しかし、ろ紙上のクロロフィル a 濃度を文献値 (Jørgensen *et al.* 2000) から BSi 量に直したところ、流入と放流の負荷量の1%以下を占めるにとどまり、流入と放流の比較をする上では影響が無視できることが分かった。

4. 今後の課題

前節で示したように、流入と放流は、本来は毎日の流入負荷量と放流負荷量を累積し、比較すること

が必要である。現在は、サンプリングを行ったその日の流入負荷量と放流負荷量を比較しているに過ぎずダムでの溶存態シリカの一時的滞留量の増減を考慮できていない。その解決のためには、流入負荷量を連続で算定する必要があり、LQ式(丹野・原田, 2018)の改善と適用、これまで提案してきた先行降雨量を用いた負荷量算定式(Harada *et al.*, 2014; 原田ら, 2015)の構築と適用、融雪期を考慮した流出動態解析(Harada *et al.*, 2017; 原田ら, 2020)、さらにはダム内の鉛直方向と水平方向の水と物質の移動についての解析を行う必要がある。

5. 謝辞

本研究は、宮城大学研究費、および福島大学科研費研究助成(20RK006)により行われた。本稿は、元宮城大学の小関達也氏、橋本泰祐氏、白石琢磨氏、佐藤泰介氏による大倉ダム調査関係の基礎的な検討の結果が反映されていることを示します。仙台市水道局、大倉ダム管理事務所の関係者に感謝いたします。

引用文献

- 天野邦彦・時岡和利(2007)：ダム貯水池における珪藻類による珪酸捕捉量の評価，環境工学論文集，**44**，pp.539-545
- 環境省(2018)：平成30年版 環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書
- 国立環境研究所(2011)：「シリカ欠損仮説」と海洋生態系の変質，環境儀，**39**
- 丹野愛海・原田茂樹(2018)：大倉川の基底流出時における非特定汚染源負荷量推定方法に関する研究，第5回日本水環境学会東北支部大会予稿集，pp.48-49
- 原田茂樹・丹野愛海・岸本拓之・佐藤清也(2020)：大倉川における $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3$ から同定した融雪期の窒素・リン・シリカ・有機物流出，農業農村工学会東北支部第62回研究発表会講演要旨集，pp.90-93
- 原田茂樹・橋本泰祐・佐藤泰介・小関達成・白石琢磨(2014)：森林から受水域へのシリカ流出に影響するダム滞留中のシリカ動態，水文・水資源学会2014年度研究発表会要旨集，pp.26-27
- 原田茂樹・橋本泰祐・越川海(2015)：海域へのシリカ流達とその潜在的影響：受水域物質循環と森林からのシリカ流出，水文・水資源学会2015年度研究発表会要旨集，pp.24-25
- Harada, S., Hashimoto, T., Sato, T. (2017) Comparison of isotope analysis and tank model calculation method to determine the snowmelt water ratio in river water, *Int. J. Hydrol. Sci. Tech.*, **7**, 1-11
- Harada, S., Hashimoto, T., Shiraishi T., Sato, T. (2014) Improved statistical analyses for extrapolating silicate load from observed forest silicate runoff: case study of the Okura River Catchment, *Abstract Proceedings of DIPCON/ARC-2014*, pp.32-33, 2014 Kyoto
- Harashima, A., Kimoto, T., Wakabayashi, T., Toshiyasu, T. (2006): Verification of the silica deficiency hypothesis based on biogeochemical trends in the aquatic continuum of Lake Biwa–Yodo River–Seto Inland Sea, Japan, *AMBIO*, **35**, pp.36-42
- 原島省(2008)：海洋生態系におけるケイ藻とシリカの役割，環境バイオテクノロジー学会誌，**8**，pp.9-16
- Humborg, C., Ittekkot, V., Cociasu, A., Bodungen, B.V. (1997): Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure, *Nature*, **386**, pp.385-388
- Jørgensen, L.A., Jørgensen, S.E., Nielsen S.N., Jørgensen L.A. (2000) : *Handbook of Ecological Parameters and Ecotoxicology*, Elsevier, Amsterdam.
- 宮城県：大倉ダムの概要，宮城県公式ウェブサイト，<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/snd-dam/sdam2492.html> (2020年12月13日閲覧)