

令和 2 年 9 月 14 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02999

研究課題名(和文)水減少流域における持続的な水循環と生態系の構築に関する研究

研究課題名(英文)A sustainable water cycle and construction of an ecosystem in a water-poor watershed

研究代表者

山田 佳裕 (Yamada, Yoshihiro)

香川大学・農学部・教授

研究者番号：30297460

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、灌漑による水利用が多い河川の持続的な水循環と生態系の構築に資する目的で、河川の有機物汚濁のメカニズムを解析した。河口堰でのPOC量に占める内部生産量は50%程度であった。灌漑期には、Microcystis属が一次生産を担い、総生産量は霞ヶ浦に匹敵していた。夏期には中流以降でため池等から種が供給され、河川中の栄養塩を用いた光合成が行われていた。冬期は活性が弱い珪藻が優占したが、水の滞留時間が長いため、濃度は高くなった。灌漑を目的とした河川構造は水の少ない非灌漑期に流れを分断し、水の滞留時間が増大させる。その結果、生産活性が低くても多くの植物プランクトンを水中に蓄積させていた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの河川は水利用のために分断されている。現在の日本では、短い滞留時間と豊富な水量により、その影響は軽微のように見えるが、将来的に降水量の減少によるリスクを常に抱えていることを認識しないとイケない。このような視点から、研究成果は、陸域と海域における水・物質循環の適切なバランスを管理するための研究に発展させ、今後の気象変動に対応した水利用、生物生産(食料生産)に関する長期的危機管理対策の提案につなげたい。さらに、原発事故以来、放射性物質の動態や食物連鎖への移行に関する解析の難しさから、陸域から海域への物質輸送モデル構築の必要性が認識されている。このような分野にも大きく貢献出来る。

研究成果の概要(英文)：The mechanism of organic pollution was analyzed for the purpose of contributing to a sustainable water cycle and the construction of an ecosystem in a river where much of the water is used for irrigation. The internal production of POC at the river mouth was about 50%. During the irrigation period, Microcystis spp. was responsible for primary production, and the gross production was comparable to that of Lake Kasumigaura. In the summer, plankton species were supplied to the river from reservoirs after the midstream and increased with the nutrients in the river. Diatoms with low activity predominated in winter, and the concentration was high because the residence time of the water was long. The structure of the river for the purpose of irrigation divides the flow of water and increases the residence time of the water during the non-irrigation period when water is scarce. As a result, a large amount of phytoplankton accumulated in the water even though the production activity was low.

研究分野：水環境科学

キーワード：水利用 生態系 河川 一次生産 光合成 灌漑 堰 香川県

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本をはじめアジアではモンスーンの豊富な雨を背景に生産活動を営んでおり、生産性の高い稲作は多くの水を必要とする。一方で、水の効率的利用は、水質低下、生態系の衰退とそれに伴う浄化機能の劣化を引き起こす。これは、水利用の阻害や生物生産の減少としてフィードバックされる。さらに、陸水域から海域へ供給される物質を質・量的に変化させ、海域生態系へも影響を与える。このような環境の中では、持続的な生物生産のため、生態系とのバランスを考えた水利用が求められるが、それに資するための流域レベルでの水・物質循環に関する科学的知見は不足している。水利用のために河川の連続性が分断されている流域において、分断が山から海への物質循環に及ぼす影響を明らかにすることが重要になる。そのためには、水資源が少ない流域の水・物質循環の実態を把握し、そのメカニズムを明らかにすることが必要で、その成果は流域において持続的に水と生物資源を利用するための施策に反映される。

2. 研究の目的

大陸の河川に比べて日本の河川水質は良好である。これは、植物プランクトンの分裂速度(3日程度)に比べ、河川水の源流から海までの到達時間が2日程度と短いためである。しかし、効率的な水利用のため、貯水池や堰等の貯水域が設けられると、水が長時間滞留し、藻類を主体とする有機物の生産が増加する(Murakami et al. 1994; Webster et al. 2000)。これが進むと、深刻な河川の有機物汚濁が引き起こされるとともに、有機物が河口や沿岸域へ輸送され、海域生態系も攪乱する(Yamada et al. 2010)。そして、陸域や海域の生物生産に負のフィードバックを与えることになる。このような視点から流域のスケールでの水・物質循環のプロセスに焦点を当て、水域の有機物汚濁のメカニズムを明らかにすることが、流域の物質循環や生態系を保全し、持続的な水・生物資源を得る上で重要になってくる。水資源が不足すると、高い割合で流域の水が利用される一方で、局所的な視点から個別に水が運用され、流域全体で見ると水の流れが統一化されなくなる。下流域では河川水の履歴を把握することは難しく、河川の有機物汚濁にともなう陸域、海域の保全に関して効果的な対策が出来ない大きな原因である。

これに対処するには、水利用の効率化が進んでいる流域を対象とした水・物質循環メカニズムの解析が必要だが、自然環境の研究で、流域レベルで水や物質の動きを捉えるには、観測体制に多くの労力と予算が必要になる。四国の瀬戸内地域では河川延長が数十kmと短いため、流域が狭く、その中に山、河川、平野、海といった要素がコンパクトに収まっている。また、水資源が乏しいため、灌漑のための水利用が高度に発達している。そのため、瀬戸内地域の河川は、研究対象として扱いやすい。観測ポイントを適切に選択することで、操作実験系に似た結果を得られるため、水文環境と物質循環との関係性を評価しやすいという特徴がある。

本研究では、水資源の乏しい瀬戸内地域の主要流域を対象に、水動態と生物生産について解析し、効果的な水利用が生態系に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

調査は、香川県で最大の流域面積をもつ新川で行った(全長18.7km、流域面積69km²)。流域には1ha以上のため池が約90カ所、可動堰が13基ある。流域の最大規模のため池が男井間池(貯水量は956千トン)で、池へは新川及び香川用水から導水される(図1)。河口では最大の止水域が形成されており、89mのゴム堰と10mの魚道用の鉄ゲートがあり、最大水深は1.4m、河口から870m上流の流入端までの貯水量は4.6×10⁴tである。洪水時にはゴム堰は自動的に転倒される。河川流量が少ない時には、海への放流はゴム堰横の水門からのみとなる。

調査は河口堰によって形成された止水域と男井間池で行い、2015年12月30日から2018年8月28日まで週に1回程度採水及び一次生産の測定を行った。新川の全体観測は、2018年2月から8月に新川本流の12地点で行った。

現場での測定項目は水温及び電気伝導度、溶存酸素、照度である。照度は水面直前と0cmから10cmごとに測定した。現場での一次生産は、明暗法で測定した。実験室でもインキュベーターによる培養を行い、光合成-光曲線を求めた。一次生産は、呼吸商を1と仮定し、炭素量に換算した。これを用いて水柱あたりの生産量も算出した。試料中の懸濁物を濃縮し、植物プランクトンの同定と計数を行った。採水した水のろ液からは水の安定同位体比と栄養塩を、フィルター上の懸濁物からはクロロフィルa+フェオ色素、POC、PON、15N、13Cを定法で測定した。

調査概要

新川
全長: 19km 流域面積: 69km² 堰の高さ: 約1.4m

観測地点
●新川河口堰により形成された止水域
●男井間池

観測期間
2015/12/30~2018/8/28の期間に週1回。

新川河口堰によって形成された止水域



図1 観測地点図

4. 研究成果

(1) 水文環境について

平水時における河口堰からの越流量は、灌漑期 $1.2 \pm 1.8 \text{ m}^3 / \text{s}$ 、非灌漑期 $0.4 \pm 0.7 \text{ m}^3 /$

s だった。灌漑期は非灌漑期と比較して約 3 倍水量が多いことが分かる。時期によって河川流量が変化するの、農繁期の灌漑期には香川用水やため池の水が中流以降の各箇所に配水がされることにより、幹線水路として利用されることによる。水資源を補うために、他水系の吉野川から供給されている香川用水は年間合計 2 億 4,700 万トン配水されており、灌漑期の平均値は非灌漑期の平均値の約 10 倍の水量であった。降水量は灌漑期に 162 mm、非灌漑期に 78 mm であった。河口堰止水域における滞留時間は、灌漑期で 0.9 ± 1.4 day、非灌漑期 3.3 ± 2.7 day であった。新川には中流から下流にかけて、多くの可動堰が設けられており、各々の堰で止水域が形成されている。川幅と貯水量が比例し、流出量は河口堰と同じと仮定すると、灌漑期の滞留時間は河川全体で 5.2 日、非灌漑期は 19.1 日となった。日本の河川は急流河川と呼ばれているが、新川は利水のために河川中に堰が多く設置されていることによって水がせき止められ、緩やかに河川流路の長い海外の河川に近い特徴を持つことがわかった。新川の滞留時間の長さは浮遊藻類の生態に影響を及ぼすと思われる。

(2) 河口堰止水域における有機物汚濁および植物プランクトンの種組成の変動

河口堰止水域の POC は平均 3.6 mg / L、Chl a + Pheo は平均 95 μ g / L、最大 363 μ g / L で、過栄養湖の濃度に相当していた (Forsberg and Ryding 1980, Nakashima et al. 2007、(図 2)。栄養度の高い水域では、増殖期の植物プランクトン細胞が多いため、POC / Chl a 比は 30~40 程度と低い (福島ら 1986)。河口堰止水域では 50 程度で、かつ Chl a と POC は正の相関関係にあることから、懸濁態有機物の大部分を比較的活性が高い藻類が占めていると考えられる。観測日前 3 日以内に 50 mm を超える降水があると、POC / Chl a 比は 100 を超えた。

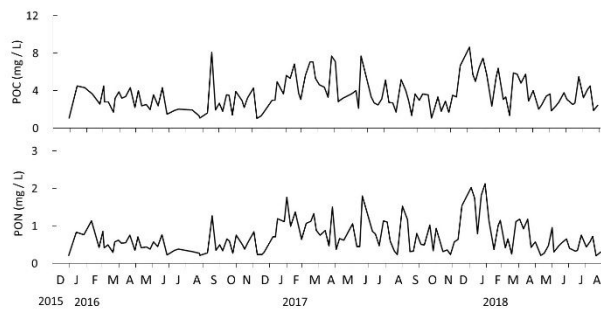


図2 河口堰止水域におけるPOC、PONの経時変化

新川の上流域は花崗岩で、河床は砂床である。河口堰が倒されて河川が干上がり、砂の河床が現れていた時の堆積物の表層の Chl a+Pheo は最大値で 6.6 mg / m² であった。河川水中の Chl a は 134 mg/m² と見積もられ、河床の約 20 倍であった。新川河口堰止水域において主要な一次生産者は、付着藻類ではなく植物プランクトンであることがわかった。また、DIN 濃度が検出限界値以下の時の河川水に KNO₃ を 1mg/L 添加して培養実験を行ったところ、N を添加した明瓶の POC 量が大きく増加したことから、DIN が植物プランクトンの増殖制限要因となっていると考えられた。植物プランクトンの活性が高い時期に降水がなく、栄養塩の供給がないと、河川においても湖と同じように窒素が枯渇し、植物プランクトンの増殖が制限されることがわかった。

Microcystis 属の優占は、5 月から 12 月までの表層の総生産量が高い時期 (5 月から 8 月) と一致した。水温が 30 度になる 7 月 8 月は特に生産量が高くなっていった (図 3)。一方で、ケイ藻の *Cyclotella dubius* と *Stephanodiscus hantzschii f. tenuis* が 11 月の中旬以降から 5 月までの比較的低温の時期に出現した。最も細胞数が多くなるのは 1 月と 2 月でこの時期の水温は 10 度以下であった。水温に対する特性が出現する植物プランクトン種に大きな影響を及ぼしていることがわかった。また、Chl a+Pheo 濃度は夏期の Microcystis 属が優占し、高い一次生産量がある時期とは一致せず、冬の珪藻が優占している時期に高かった。

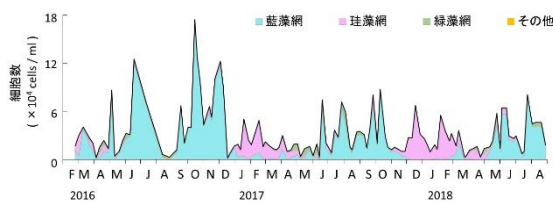


図3 新川河口堰止水域における植物プランクトン網と細胞数の変化

(3) 新川河口堰止水域における一次生産の特性

総生産量の季節変動のパターンとしては冬期から夏期にかけて高く、秋期から冬期にかけて低く、平均値は 3.6 ± 2.2 mgC / L / day (n = 127) であった。純生産量の季節変動のパターンは総生産量と同様で、観測期間中の平均値は 2.2 ± 1.7 mgC / L / day (n = 127) であった。呼吸量の総生産量に対する割合は観測期間中の平均で 40% 程度であった。新川河口堰止水域の観測期間中、観測日ごとの表層の総生産量、光合成活性、Chl a+Pheo 濃度、DIN 濃度で主成分分析を行ったところ、5 月から 8 月の総生産量と光合成活性が高いグループ、9 月から 11 月の一次生産量、Chl a+Pheo 量は低い光合成活性が高いグループ、12 月から 4 月の総生産量が低く、Chl a+Pheo が高いグループに

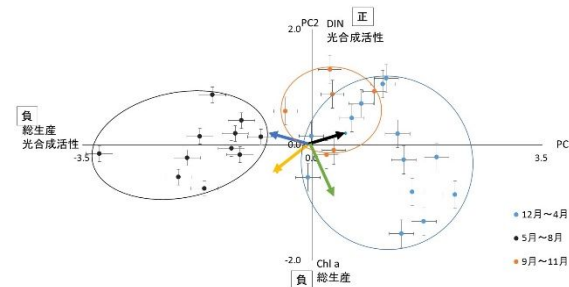


図4 河口堰止水域における月別の各種項目のPCA解析
←(黄)総生産 ←(青)光合成活性 ←(緑)Chl a ←(黒)DIN

分けることが出来た(図4)。水温が高い時期に出現しているのは *Microcystis* 属で、その生理特性によって5月から8月の総生産量が高くなっていると考えられる。一方で、9月から11月までの平均滞留時間は0.3 day、12月から4月までの平均滞留時間は1.8 dayであることから、12月から2月の高いChl a+Pheoは滞留時間が影響していると考えられる。事実、この期間では光合成活性が上昇してもChl a+Pheoは増加しないが、滞留時間が増加すればChl a+Pheoも増加している日が多かった(図5)。Chl a+Pheo濃度を目的変数として滞留時間、珪藻の細胞数を説明変数として重回帰分析を行った結果、滞留時間(P=0.0034)と珪藻細胞数(P=<0.0001)相関が得られた。新川河口堰において河川水の滞留時間は有機物の濃度を左右し得る重要な指標になることがわかった。新川河口堰は洪水時以外、堰は倒されず河川水が溜まる状態にあるが、香川用水等の灌漑用水の影響で灌漑期にあたる夏期や秋期には水量が多く、堰から越流する水量が多い。このことは水の滞留時間を少なくさせ、植物プランクトン量の減少に寄与しているといえる。一方で、香川用水からの配水が少ない非灌漑期は河川水量が少なく、滞留時間の増加と植物プランクトンの蓄積につながっていると考えられる。

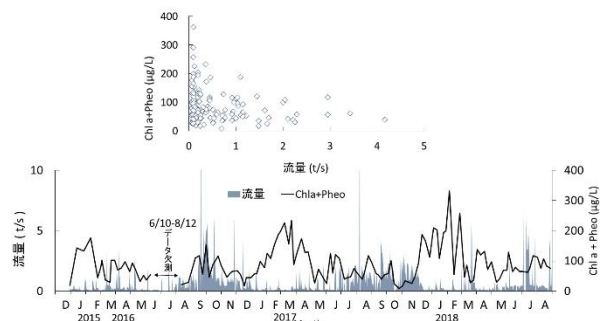


図5 流量とクロロフィルa+フェオフィテン量の経時変化

一次生産量に影響を及ぼす環境要因に関して、雨の降り方や、雨量さらに、観測日の何日前に降ったかによって総生産量、Chl a+Pheo濃度、光合成活性などが様々な変化を示した(図6)。降水時は、Chl a+Pheoと総生産量が減少し、光合成活性は上昇していた。Chl a+Pheoは1週間程度で回復することが多く、それとともに光合成活性は低下した。台風による多量の降水時は、総生産量、Chl a+Pheo濃度、光合成活性全ての値が低下した。Chl a+Pheo濃度はすぐには回復しないが、光合成活性は上昇した。降雨による希釈でChl a+Pheoは減少するが、栄養塩が供給されることで植物プランクトンの活性は高くなり、遅れてChl a+Pheo濃度が増加することがわかった。この状態は、堰の少ない自然河川の状態に近いといえる。

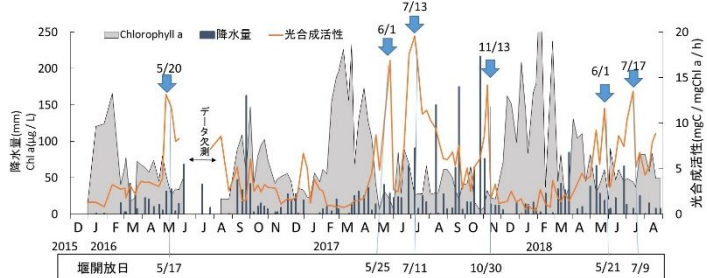


図6 河口堰における光合成活性と水文環境の変化
図中の日付は観測日であり、重要だと考えられる堰の開放日は図の下に示した。

河口堰止水域における1日あたりの有機物量に対する内部生産比を以下の式を用いて求めた。

$$1 \text{ 日あたり内部生産比}(\%) = \{ \text{純生産} - \text{夜間の呼吸}(\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}) \} / \text{POC}(\text{g}/\text{m}^2) \times 100$$
 観測期間中の内部生産比は平均で46%であった。季節ごとでは、冬期(12月から2月)は14%、春期(3月から5月)は27%、夏期(6月から8月)は95%、秋期(9月から11月)は43%であった。内部生産比は、植物プランクトンが高い活性で生産を行う夏期が100%近くなった。冬期は水温が低いため出現する珪藻の活性が弱く、1日あたりの内部生産比は一番低くなった。次に、以下の式により、滞留時間を考慮した内部生産比率について見積もった。

$$\text{内部生産比}(\%) = \{ \text{純生産} - \text{夜間の呼吸}(\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}) \times \text{滞留時間}(\text{day}) \} / \text{POC}(\text{g}/\text{m}^2) \times 100$$
 この値には観測日の滞留時間を用いているが、実際の滞留時間は降水などにより、変化するのであくまで理論値である。観測期間中の内部生産への比率は平均で50%であった、季節ごとに内部生産への比率をみる。冬期(12月から2月)は49%、春期(3月から5月)は74%、夏期(6月から8月)は50%、秋期(9月から11月)は14%であった。滞留時間を考慮すると、冬期の値が夏期と同程度になった。これからも、滞留時間による植物プランクトン蓄積が河川の有機物に与える影響が大きいことがわかる。

(4) 新川全体での植物プランクトンによる一次生産について

灌漑期のPOC / Chl a比はStn. 1とStn. 2、で高いが、扇状地の上端であるStn. 3以降は30以下で低く、新川は中流以降は有機物に占める植物プランクトンの割合が多いことを示している。上流から下流までのChl a+Pheoをみると、観測期間中全ての月において、ため池密度の増加するSt 5以降の地点で距離とともにChl a+Pheoは減少していなかった。2018年11月23日に堰が倒されて河川が流水状態のときに、Stn. 0P以降からStn. 8付近に一定の間隔(約200m程度)で8地点分水を採水し、Chl a+Pheoを測定したところ、男井間池の水が河川中に流入した直後では1043 - 1169 µg / Lであったが、その後782、509、310、206、151、98 µg / Lと、距離とともにChl a+Pheoは低下した。植物プランクトンは流下によって、河床によるろ過や動物による捕食で減少するのである。新川で全域的にChl a+Pheoが高いのは、堰により河川中へ止水域が多く形成されているためだと思われる。

灌漑期の180は、Stn. 1からStn. 12にかけて上昇していた。特にStn. 4、Stn. 7、Stn. 9の池流入直後や最大の支流流入直後の値の上昇が大きかった。池や支流から流入してくる水の

影響を新川本流は受けていた。また、上流から下流までの植物プランクトンの種組成の変化をみると、Stn. 1 から Stn. 6 までは *Stephanodiscus hantzschii f. tenuis*, *Cyclostephanos dubius* などの珪藻のみ出現していたのに対して、男井間池より下流にある Stn. 7 から Stn. 12 までは全ての地点において *S. hantzschii f. tenuis* と *A. cf. gracile* が出現していた (表 1)。男井間池では *S. hantzschii f. tenuis* に加えて藍藻の *Planktothrix agardhii* と *Aphanizomenon cf. gracile* が優占していた。特に夏期に藍藻の *Microcystis* 属が出現するタイミングが河川とため池で同じであり、*Microcystis* 属の中でも男井間池優占種の種が変化すると河川で優占する種も変化していたことから、河川の植物プランクトンの種の起源としてため池が考えられる。

表1 上流、池、中下流の植物プランクトン種組成

St.1-6	男井間池	St.7-河口
<i>Stephanodiscus hantzschii f. tenuis</i>	<i>Aphanizomenon gracile</i>	<i>Aphanizomenon gracile</i>
<i>Navicula</i> spp	<i>Stephanodiscus hantzschii f. tenuis</i>	<i>Stephanodiscus hantzschii f. tenuis</i>
<i>Aulacoseira ambigua</i>	<i>Planktothrix agardhii</i>	<i>Cyclostephanos dubius</i>

新川の上流から下流までの灌漑期の $\delta^{13}\text{C}$ を比較すると (2018年6月から8月の平均) 最上流の地点で -25 から -26 ‰ 程度の値が Stn. 12 の河口では -23 ‰ まで上昇しており、特に Stn. 6 以降では高かった。Stn. 7 の男井間池流入直後の地点から Stn. 12 の河口堰止水域の地点までの Chl a+Pheo 濃度と炭素安定同位体比がともに高く、高い光合成活性によって、有機物が生産されていることがわかる。一方で、新川上流から下流までの $\delta^{15}\text{N}$ を比較すると、Stn. 1 の最上流はもっとも低く 6.0 ‰ であるが Stn. 2 から値は上昇し、St 6 から Stn. 12 まで 12‰ 程度で推移した。人口密度に比例し、 $\delta^{15}\text{N}$ は上昇していた。 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の散布図からは $\delta^{13}\text{C}$ の影響で、地点間の連続性はみられなかった。これは堰により、河川が分断化されていることが原因だと考えられ、それぞれの地点で新たに有機物が生産されていることを示している (図 7)。その一方で、 $\delta^{15}\text{N}$ に連続性がみられるのは、溶存態で水中で回帰する DIN については、河川分断の影響を受けず、上流から下流への連続性が保たれていると考えられる。

新川河口堰止水域の水柱あたりの一次生産の値を用いて、川幅と貯水量が比例すると仮定すし、新川の上流から下流までのそれぞれの堰における止水域の一次生産量を概算してみると、灌漑期、非灌漑期の河口堰止水域における総生産量の 1 日当たりの平均値はそれぞれ 0.41 トン、0.21 トンで、新川各堰の総生産量合計は平均値で 2.40 トン 1.21 トンとなった。河口堰止水域の内部生産率が 50% 程度であることを考えると (止水域に流入する植物プランクトンは外来有機物として算出される) 新川下流での有機物の大部分は植物プランクトン起源であるといえる。

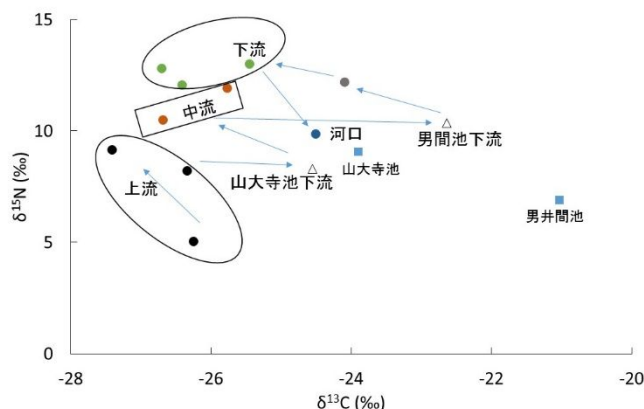


図7 2018年6-8月灌漑期の新川 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の関係

本研究から水資源が乏しい流域の効果的な水利用は、河川水の流れの分断により、河川の有機物生産を大きく改変し、有機物汚濁を引き起こしていることがわかった。これは、河川の分解による溶存酸素の枯渇といった酸化還元環境だけでなく、食物連鎖やそれに伴う生物相も変える。また、海域への河川生産物の供給により、海の生態系も改変するであろう。水量が少ない非灌漑期に分断の影響が大きいことから、恒常的な河川水量の確保など、流れの分断の影響を少なくし、堰があっても自然の河川に近い状態を保つための工夫が必要であることがわかった。

引用文献

- Murakami T. et al. (1994) Development of Potamoplanktonic Diatoms in downreaches of Japanese rivers., Jpn. J. Limnol. 55, 13-21
- Webster I.T., Sherman B.S., Bormans M. and Jones G. (2000) Management strategies for cyanobacterial blooms in an impounded inland river., Regul. Rivers: Res. and Mgmt. 16, 513-525
- Yamada Y. et al. (2010) Organic pollution in dammed river water in a low-precipitation region of Japan., Limnology 11, 267-272.
- Forsberg C. and Ryding O. (1980) Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes., Arch. Hydrobiol. 89, 189-207
- Nakashima S., Yamada Y. and Tada K. (2007) Characterization of the water quality of dam lakes on Shikoku Island, Japan. Limnology 8, 1-22
- 福島武彦, 天野耕二, 村岡浩爾 (1986) 湖沼水質の簡易な予測モデル 2. 湖水栄養塩濃度と内部生産 COD, クロロフィル a との関係, 水質汚濁研究 9, 775-785

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森貞里咲・野崎健太郎・山田佳裕
2. 発表標題 灌漑による水利用の多い河川の河口堰上流に存在する 植物プランクトンの一次生産
3. 学会等名 日本陸水学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森貞里咲・山田佳裕
2. 発表標題 有機物汚濁が著しい河川における植物プランクトンの種組成と季節変化について
3. 学会等名 E L R 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 一井築, 山田佳裕
2. 発表標題 香川県新川流域における浅層地下水の水質特性と水安定同位体組成
3. 学会等名 日本陸水学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 藤永 薫、大嶋 俊一、菅原 庄吾、杉山 裕子、千賀 有希子、向井 浩、山田 佳裕	4. 発行年 2017年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 148
3. 書名 陸水環境化学	

〔産業財産権〕

[その他]

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中野 孝教 (Nakano Takanori) (20155782)	総合地球環境学研究所・研究部・名誉教授 (64303)	
研究 分担者	申 基子ヨル (Shin kikyoru) (50569283)	総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・准教授 (64303)	