

平成 28 年度
土木学会水工学委員会
環境水理部会
研究集会 2016 in 香川
発表概要集



平成 28 年 5 月 19 日（木）、20 日（金）
高松市生涯学習センターまなび CAN 大研修室

全体プログラム

研究発表会：

5月19日（木）13:00～16:30

5月20日（金） 9:00～12:30

特別講演：

5月19日（木）16:40～18:00「瀬戸内海の環境の変遷と将来」

多田邦尚先生（香川大学農学部教授、香川大学瀬戸内圏研究センター長）

ナイトセッション（※別会場：DELTA MARKET）

5月19日（木）19:00～21:00（DELTA MARKET）

（話題提供：篠原隆一郎氏，古里栄一氏，田井明氏，大槻順朗氏，中谷祐介氏）

現地見学会：

5月20日（金）12:30～19:00（昼食含む、バス利用）

土器川、香川用水記念館、香川用水東西分水工、満濃池など

※解散場所：高松空港・JR 高松駅

※協力：四国地方整備局、水資源機構、かがわ水と緑の財団ほか

*CPD（土木学会）対象は研究発表会のみ（8単位）です



香川用水記念館

環境水理部会研究集会2016 in 香川 発表プログラム

会場：高松市生涯学習センターまなびCAN 大研修室

発表プログラム

2016年5月19日(木)

開始時刻	終了時刻	発表者	所属	発表タイトル
------	------	-----	----	--------

12:00	受付開始
-------	------

13:00	13:05	宮本 仁志	部会長	開会挨拶
-------	-------	-------	-----	------

第一セッション：沿岸域・湖沼の水環境（司会：矢島 啓）

1	13:06	13:18	鶴田 泰士	(株)建設技術研究所	汽水湖沼における塩分増加要因の解析と水質改善に向けた取り組み
2	13:19	13:31	篠原 隆一郎	国立環境研究所	霞ヶ浦における懸濁態リンの変動要因についての検討
3	13:32	13:44	古里 栄一	埼玉大学大学院	ダム貯留水の戦略的品質確保に関する今後の研究課題—河川連続性を考慮した貯水池内の微小藻類ハビタットと制限栄養塩動態の人為的制御における欧州と日本の相違点—
4	13:45	13:57	澤田 育則	(株)建設技術研究所	深層曝気装置および高濃度酸素水供給装置によるBOD改善効果の検討 ～ダム湖を事例として～
5	13:58	14:10	安東 尚美	流域調整室技術事務所	塩田跡地・耕作地間の高さを大きく変えない土地利用
6	14:11	14:23	諸原 亮平	鳥取大学大学院	穴道湖におけるシジミの移動要因の検討
7	14:24	14:36	中西 哲	土木研究所	ダム下流河川への土砂供給による地形の応答について
8	14:37	14:49	櫻井 寿之	土木研究所	土砂バイパストンネルを流下する土砂を把握する試み

休憩（5分）

第二セッション：水環境の数値シミュレーション（司会：大石哲也）

1	14:54	15:06	新谷 哲也	首都大学東京	デカルト座標流体シミュレーターにおける局所高解像度化の試み
2	15:07	15:19	鈴木 準平	電力中央研究所	河川一次生産ポテンシャルの空間マップに関する基礎的研究
3	15:20	15:32	河野 誉仁	山口大学大学院	ハイブリット河川生態系モデルの開発
4	15:33	15:45	溝口 裕太	名古屋大学大学院	河川生態系モデルの開発と、その応答特性・活用法の検討
5	15:46	15:58	中谷 祐介	大阪大学大学院	深層学習を用いた河川感潮域の水質変動予測
6	15:59	16:11	岡田 輝久	大阪大学大学院	季節変動調整法による瀬戸内海東部海域データの時空間解析
7	16:12	16:24	田井 明	九州大学	河川汽水域に生息する甲殻類浮遊幼生の回帰戦略の解明
8	16:25	16:37	井上 徹教	港湾空港技術研究所	伊勢湾における堆積物酸素消費ポテンシャルの推定

休憩（5分）

＜特別講演＞（司会：石塚正秀）

16:42	18:02	多田邦尚	香川大学農学部教授、香川大学瀬戸内圏研究センター長	瀬戸内海の環境の変遷と将来
-------	-------	------	---------------------------	---------------

18:40	受付開始
-------	------

19:00	21:00		交流会、ナイトセッション、見学会紹介
-------	-------	--	--------------------

2016年5月20日(金)

開始時刻	終了時刻	発表者	所属	発表タイトル
------	------	-----	----	--------

8:45	開場、受付
------	-------

第三セッション：地球温暖化適応（司会：矢野真一郎）

	9:05	9:10	矢野 真一郎	ワーキンググループリーダー（九州大学大学院工学研究院）	H28年度環境水理部会研究集会 第3セッション「地球温暖化適応」趣旨
1	9:11	9:23	湯浅 岳史	パシフィックコンサルタンツ（株）	気候変動が全国の河川水温に及ぼす影響
2	9:24	9:36	金山 拓広	(株)建設技術研究所	気候変動がダム水質に及ぼす影響と適応策
3	9:37	9:49	矢島 啓	鳥取大学大学院	温暖化によるダム放流水温の変化と選択取水設備の運用
4	9:50	10:02	田代 喬	名古屋大学	流込み式水力発電システムが水域生態系に及ぼす影響
5	10:03	10:15	傳田 正利	土木研究所	気候変動に伴う降水現象変化がヒゲナガカワトビケラ個体群動態に与える影響に関する基礎的研究
6	10:16	10:28	長縄 秀俊	京都大学大学院（フィールド科学教育研究センター瀬戸臨海実験所）	いまバイカル湖の沿岸生態系で起こっていること

休憩（5分）

第四セッション：水環境における新技術の開発・実践（司会：宮本仁志）

1	10:33	10:45	中山 恵介	神戸大学大学院	水理学的視点からの成層場研究への試み
2	10:46	10:58	赤松 良久	山口大学大学院	ドローンをを用いた中小河川の環境モニタリング法の開発
3	10:59	11:11	小川 智也	法政大学	玉川上水における再生水の窒素・リン除去速度
4	11:12	11:24	朝位 孝二	山口大学大学	LED光を用いたシャジクモの発芽実験
5	11:25	11:37	井芹 寧	西日本技術開発株式会社	応用量子生物学に基づく水環境修復技術
6	11:38	11:50	乾 隆帝	山口大学大学院	環境DNAを用いた河川生物量推定法の開発
7	11:51	12:03	山下 慎吾	魚と山の空間生態研究所	竹蛇籠魚道の設置にかかわる試行錯誤と週上効果
8	12:04	12:16	田中 颯馬	徳島大学	土器川における正常流量の算定および流量増加の方策に関する検討

12:17	12:20	矢島 啓	副部会長	開会挨拶
-------	-------	------	------	------

12:30	19:00		見学会
-------	-------	--	-----

汽水湖沼における塩分増加要因の解析と水質改善に向けた取り組み

(株)建設技術研究所 ○鶴田 泰士、金山 拓広

1. はじめに

A湖は最大水深 20m 以上を有する汽水湖である。近年著しく湖内塩分量が増加（図-1 ○記号）し、浅くなった塩淡水界面から豊富な栄養塩が回帰することで水質が悪化している。本報では、同湖で塩分量が増加した要因について分析するとともに、塩水遡上抑制による水質改善の取り組みの現状を紹介する。

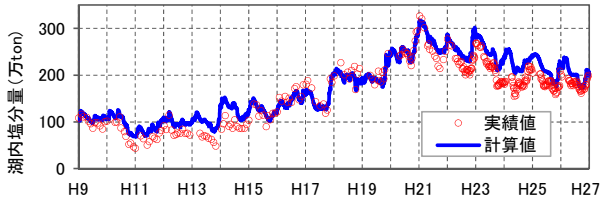


図-1 水質の経年変化

2. A湖における塩水遡上メカニズム

A湖は河道延長 6km 余りのB川を通し、外海と繋がっている。図-2 に示すように、潮位が湖水位を上回るとB川を塩水が遡上し、この状態が長く続いた場合、まとまった塩水が湖内に侵入する。一度侵入した塩水は水深 20m 以上の湖盆に溜まり、容易には流出しない。

B川の流量は、湖水位と潮位の差によって起動される。従って、塩水の遡上量や頻度は、これら水位を支配する潮位（天文潮位+気象潮位）や気象・水文条件（降雨や流入河川流況）に影響を受ける。また、水位条件が同じでも河道状況によっては塩水遡上状況は異なると考えられる。そこで、これらの要因に注目し、A湖における湖内塩分量増加に及ぼす影響を分析した。

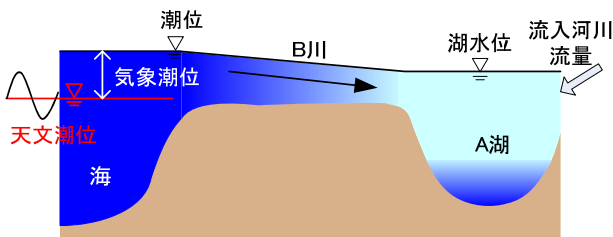


図-2 A湖における塩水遡上メカニズム(イメージ)

3. 要因分析

(1) 分析ツールの構築

まずA湖における湖内塩分量の変化を再現できる数値シミュレーションモデルを構築した。

A湖内の塩分成層の変化は鉛直一次元モデルで取り扱った。B川の流量(Q)は ADCP に基づく流速観測により時々刻々把握されており、湖水位と潮位の差(Δh)と図-3 に示すような関係がある。この関係は湖の水位レベルや河道状況によって特性が変化することから、それぞれの影響をパラメータとして考慮

した定式化を行った。河道状況の影響は、 Δh -Q 式にかかる係数（図-3 中の α ）として表現している。

B川の塩分濃度は、既往研究と同様にB川の逆流量の積分によって求められる河道内塩水量の関数で算定した。本関数によるB川のCL濃度の計算結果は図-4 に示す通りであり、実績のCL濃度変化を良好に再現することができる。

以上を組み合わせたモデルにより、湖内塩分量の再現計算を行った結果を図-1 に実線で示す。細かな変化には課題があるが、平成 14~21 年の増加、それ以降の減少傾向など、特徴は概ね再現できている。

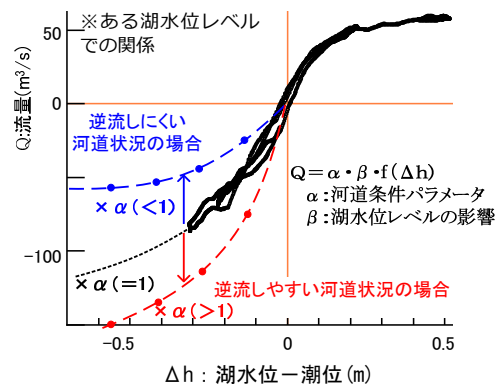


図-3 B川における水位-流量関係

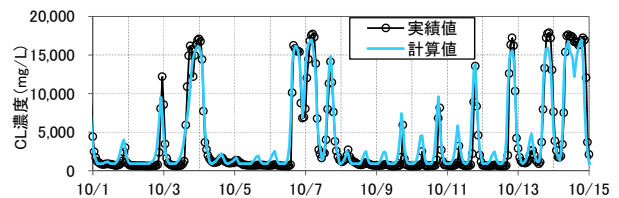


図-4 B川におけるCL濃度変化

(2) 河道状況の影響度分析

図-5 に示すのは、B川流量の定式化の過程で得られた河道状況に係るパラメータ (α) の経年変化である。A湖で湖内塩分量が増加し始める以前（平成 9 年）の河道状況を基準($=1.0$)とした比率で、逆流しやすさを表している。例えば、平成 18 年には大規模出水が生じ、河道が拡幅した可能性があるが、 α は当該出水後 2 年程度 1.2 程度と大きな値となっている。このように Δh -Q 式から数値的な処理で求めた α の値は、実現象との対応が見られた。

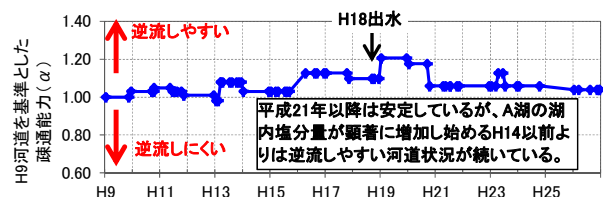


図-5 B川河道状況を示すパラメータの変化

構築したモデルにより、図-5における河道状況を表すパラメータが、常に 1.0 としてB川の流量を設定し、河道状況の変化がなかった場合のA湖の湖内塩分量変化を予測した。結果は図-6 に示す通りであり、河道状況の変化の有無による湖内塩分量の差は最大 80 万トンであった。

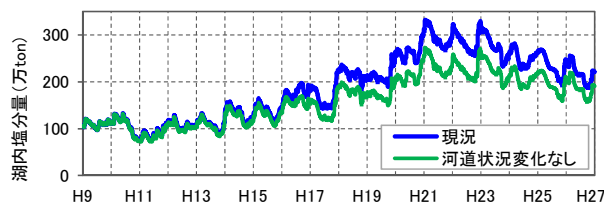


図-6 河道状況変化が湖内塩分量に及ぼす影響

(3) 天文潮位の影響度分析

天文潮位は 20 年程度の長周期成分を有している。A湖付近の検潮所における朔望満潮位を抽出すると、図-7 に示すように、天文潮位の長周期成分の上昇期は、湖内塩分量の上昇期とよく対応している。

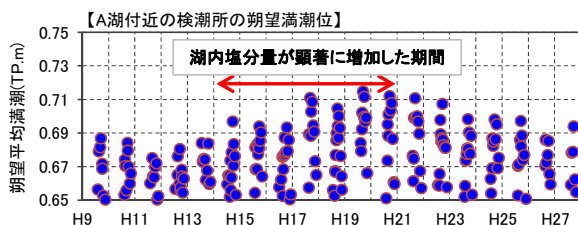


図-7 朔望満潮位（予測値）の変化

構築したモデルにより、気象潮位や流入河川流量は同じ年の条件を繰り返し、天文潮位のみ予測値を設定した条件で、30 年間の湖内塩分変化計算を行った。河道状況は平成 9 年河道で一定とした。

平成 9～24 各年の条件に対する計算結果を図-8 に示す。湖内塩分量は各年の気象・流況条件に応じたレベルに近づいていくが、いずれの条件でも 20 年程度の長周期で変動する様子が伺える。この計算では、湖内塩分量が周期的に変化する要因は天文潮位のみであるため、この変動幅が天文潮位による湖内塩分量への影響だと考えられる。この変動幅は 70 万トン程度であった。

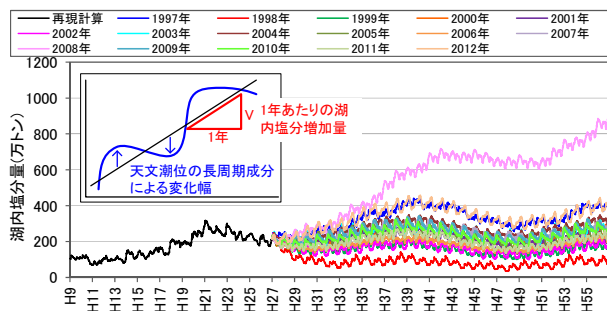


図-8 湖内塩分量の長期計算結果

(4) 気象潮位および流入河川流量の影響分析

気象潮位、流入河川流量は、いずれも低気圧の通過による降雨や海面上昇により変化するため、それぞれ独立した要因ではない。従って、これらの影響

度はまとめて検討することとした。

図-8 に示す結果では、年ごとの気象潮位や流入河川流量の条件によって、計算開始後の湖内塩分量の変化特性が異なっている。そこで、計算開始後 10 年の湖内塩分量の変化から、年ごとの気象潮位や流入河川流量に応じた、平均的な湖内塩分増加速度（1 年あたりの湖内塩分増加量）を求めた。

これを湖内塩分量が顕著に増加した平成 14～21 年について累加した値が、天文潮位や河道状況によらない、気象・流況による湖内塩分量増加への影響度になると考えられ、約 60 万トンとなる。

(5) まとめ

図-9 に(2)～(4)で検討した各要因の影響度を、実績の湖内塩分量増加と比較して示す。平成 14～21 年におけるA湖の湖内塩分量増加はおよそ 200 万トンである。また、検討した 3 要因の湖内塩分量への影響度の和は約 210 万トンである。両者はほぼ同オーダーであることから、A湖における湖内塩分量の増加は、今回注目した 3 要因で概ね説明できるのではないかと考えられる。

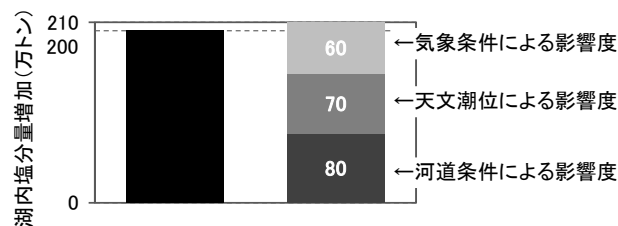


図-9 各要因が湖内塩分量増加に及ぼす影響度

4. 塩水遡上抑制の取り組み状況

3. の検討で示したように、A湖の塩分量の増加は主に自然現象による影響が大きいと考えられる。しかし、塩分量の増加に伴う水質悪化により、地元の水産業への影響も懸念されることから、A湖では平成 22 年度から塩水遡上抑制による水質改善に取り組んでいる。

具体的には、B川の河道内に水制を設置し、河道の流水抵抗を増やすことにより、湖内に侵入する塩分量の抑制を試みている。他河川で見られるように強制的に塩水遡上を防止していない点が特徴である。なお、年々の流況・気象条件により、塩水遡上イベントの規模や頻度は異なり、それに応じて塩水遡上抑制効果が変動する点が課題である。

平成 24 年度からは、塩水遡上が生じやすい冬季のみ、現地での試験施工を実施している。これにより、年間の塩水遡上量を 10%強低減することを期待しているが、試験施工時のモニタリング結果に基づく効果検証では、概ね想定通りの効果があることが確認できている。今後も試験施工を実施しながら、施設の更なる改善を図っていく予定である。

霞ヶ浦における懸濁態リンの変動要因についての検討

篠原隆一郎¹⁾, 今井章雄¹⁾, 高津文人¹⁾, 富岡典子¹⁾, 古里栄一²⁾, 佐藤貴之¹⁾³⁾, 佐野友春⁴⁾, 小松一弘¹⁾, 三浦真吾¹⁾, 霜島孝一¹⁾

1) 国立研究開発法人国立環境研究所・地域環境研究センター

2) 埼玉大学大学院 理工学研究科

3) 福島県環境創造センター 研究部

4) 国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測研究センター

1. はじめに

湖沼において、リンは、生物の生長に対して制限要因になる物質である。過剰なリンの供給は、シアノバクテリア等植物プランクトンの異常増殖を引き起こし、異臭や、景観の悪化等の問題を引き起こすことが知られている。浅い湖沼において、底泥の巻き上がりが懸濁態リン、特に無機態リン、の主な供給プロセスであると考えられている一方で^{1,2)}、懸濁態リンには、表層水中に存在する生物体(藻類・バクテリアに含まれるリン)由来のものも含まれている。

茨城県の県南に位置する霞ヶ浦は、浅い湖沼でありながら、懸濁態リンの中には、有機態のリンの割合が無機態リンに比べて多い湖である³⁾。つまり、浅い湖沼でありながらも、「生物由来のリン」による変動が、表層水中におけるリンの濃度を決定する主要な要因である可能性が推察される。しかしながら、湖沼において波が十分に発達した場合、底泥の巻き上がりが発生することも知られている⁴⁾。そこで、本研究では、巻き上がり、および、生物由来のリンのプロセスのどちらが懸濁態リン濃度に影響を与えるのか、観測を行い、検証した。

これらの供給プロセスの違いは、懸濁態リンから、溶存態リンへの遊離・溶出のプロセスにも影響を与える。例えば、底泥から水面へと無機態リンが供給される場合、底泥由来の粒子と、水柱とのリンの平衡濃度によって、底泥由来の粒子に付着したリンが水中へと供給される。一方で、生物由来のリンが優占している場合、有機態リンの分解プロセス—特に、酵素活性等によって無機態リンが水中へと供給されると考えられる。つまり、本研究によって、それらどちらのプロセスが湖内のリン循環に影響を与えるか、という点が明らかになる可能性がある。本研究では、① 現地における波の推算と、濁度の変化の連続分析、② 有機態および、無機態リンの濃度変動を観測し、風の変動などと併せて解析、③ 核磁気共鳴装置(³¹P NMR)を用いて懸濁粒子に含まれるリンの具体的な形態を分析することで、どのようなリンの化合物形態が懸濁態リン中に存在するのかを明らかにした。

2. 方法

霞ヶ浦の南岸にある国立環境研究所の敷地にある防波堤で、2012年~2013年の5月~9月にかけて、合計23回の採水を行った。採水は4Lのポリバケツで行い、酸洗浄したナルゲンの20Lタンクに保存し、実験室に持ち帰った。10Lは、GF/Fフィルターを用いて濾過を行い、³¹P NMR用に保存した。また、200mLずつ濾過したGF/Fフィルターに関しては、懸濁態リン(PP)、懸濁性無機態リン(PIP)、懸濁性有機態リン(POP)、懸濁性有機炭素(POC)、懸濁性有機窒素(PON)の分析に使用した。

PPの分析に関しては、ろ紙を470°Cで2時間焼き、それを塩酸で抽出して分析した。PIPは、ろ紙を焼くことなく、塩酸でPを抽出することで測り取り、PPとの差分をPOPとした。

³¹P NMRの分析はsolid, solutionの二種類あるが、今回はより詳細な化合物の分析を行うため、solution ³¹P NMRを使用して分析を行った。分析前に、NaOH: 0.25mol L⁻¹, EDTA 0.05 mol L⁻¹の混合溶液を作成し

⁵, これを用いて, 1 サンプル, 50 mL の溶液を注入し, 4 時間の振盪・抽出を行った. その溶液を凍結乾燥し, 分析直前に再度 1.35mL の NaOH(1 mol L⁻¹)-EDTA(0.1mL⁻¹), 0.15 mL の D₂O に溶解した上で, ³¹P NMR の分析を行った. NMR の詳細なセッティングに関しては, Shinohara et al. (2012, 2016)^{2,6} を参照されたい. この分析を行うことで, PO₄ の形を持つオルトリン酸以外にも, モノヌクレオチド等のモノエステル結合, DNA やリン脂質等のジエステル結合等のリン化合物を検出することができる.

3. 結果と考察

2012 年夏季において推算された波と, 濁度の変化を, 図 1 に示す. 風向の変動は, 観測された時期においてはよく見られるパターンで, 概ね南南西~北東の風であった. 観測された地点が南西岸であることから, 東北東~北東風の際には特に波が発達し, 底面せん断応力が, 以前から観測されている限界底面せん断応力を超えていた. また, その際には, 濁度が明らかに上昇し, 波による底泥巻き上がりによって濁度が上昇していたことがわかる.

PIP, POP の組成については, POP が殆どを占めており(図 2), 全体で約 80%が有機態であった. PIP は, 風速や底面せん断応力との相関が得られなかった. むしろ, POC, PON 等と割と明瞭な相関が得られたため, 底泥巻き上がりよりも, 水柱における生物生産が PP の変動に影響を与えているものと推察された.

³¹P NMR の結果を見ると, 有機態が全体の 70%を占めており, DNA 等のジエステル結合態は存在するものの, 核酸(モノヌクレオチド)が最も多いリン化合物であった. モノヌクレオチドは, 極めて容易に分解する化合物と言われている. つまり, 霞ヶ浦の懸濁態リンは, ① 生物由来のリンが PP の変動に影響を与え, ②非常に分解されやすい化合物で構成されていることが明らかになった.

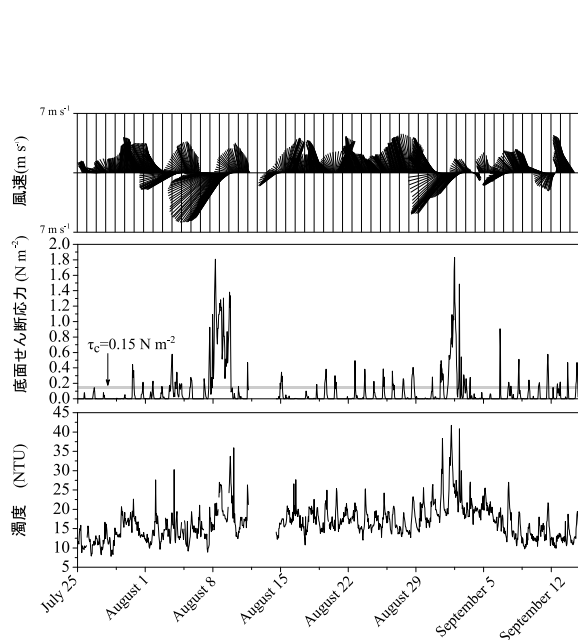


図 1. 風速のベクトル図と波による底面せん断応力および, 濁度の時間変化.

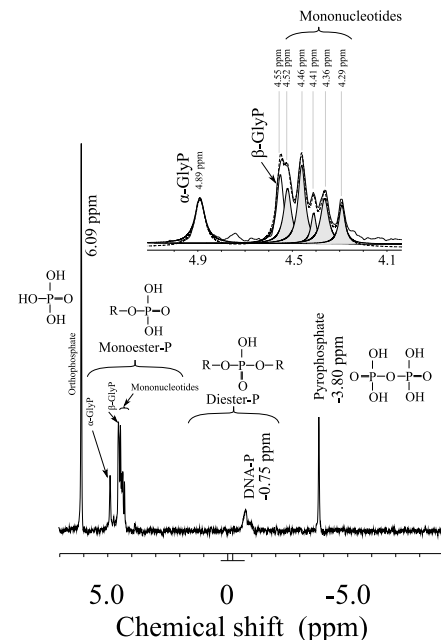


図 2. 霞ヶ浦における懸濁態リンの化合物組成の例.

1) Hamilton, D. P.; Mitchell, S. F. *Freshwat. Biol.* 1997, 38, 159–168. 2) Shinohara, R.; Isobe, M. *Fundamen. Appl. Limn.* 2010, 176, 161–171. 3) Shinohara et al. *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 10572–10578. 4) Seki et al. *J Jpn Soc. Civil Eng. G* 2006, 62, 122–134. 5) Cade-Menun, B.; Preston, C., *Soil Sci.* 1996, 161, 770–785. 6) Shinohara et al. *Sci. Tot. Environ.* 2016, 563–564, 413–423.

ダム貯留水の戦略的品質確保に関する今後の研究課題 ―河川連続性を考慮した貯水池内の微小藻類ハビタットと制限栄養塩動態の人為的制御における欧州と日本の相違点―

埼玉大学大学院理工学研究科

Federal Environment Agency, Germany

Federal Environment Agency, Germany

国立研究開発法人国立環境研究所・地域環境研究センター

独立行政法人水資源機構総合技術センター

正会員 ○古里 栄一

Ingrid Chorus

Jutta Fastner

正会員 篠原 隆一郎

正会員 今本 博臣

1. はじめに

ダム貯留水の品質である水質の保全是水資源開発施設のストックマネジメントにおいて重要な要素である。本発表では、現在でも世界的に解決の望まれる富栄養化現象の抑制技術に関する今後の研究課題について、学術および社会実装の両面を考慮して述べる。こうした技術の作用機構においては、有害藍藻類の発生機構の無効化という観点から、制限すべき環境要素は光および栄養塩の2要素に大別される。これら双方について国内外で古くから莫大な学術的研究および技術開発等が実施されており、現在は環境水理学的な研究テーマとしては重要性が高くない可能性がある。しかしながら上記2点の基本効果に関しても、技術だけでなく学術的にも現在でも課題が存在すると考えられる。特に後者については歴史的背景により現在わが国において十分に周知されていない、ヨーロッパ北部バルト海周辺諸国でのリン制限に関する学術的知見および社会資本に係る管理政策についてベルリンの水源湖沼での事例を述べる。

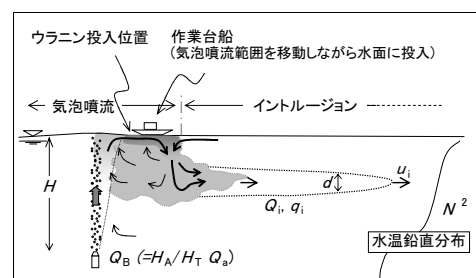


図-1 Type 1 の気泡噴流形態および広域密度流の模式図。濃淡はウラン濃度⁵⁾

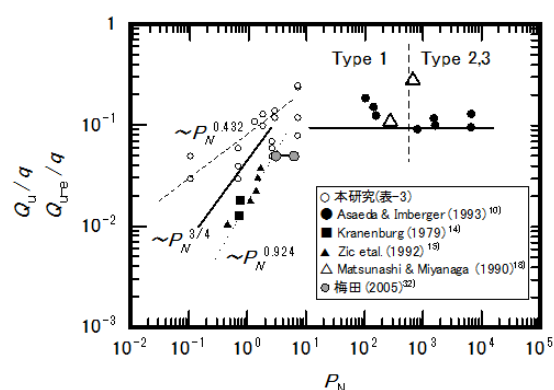


図-2 無次元 Q_H と P_N との関係⁴⁾

2. 光制限と貯水池循環対策 ―現地での低 P_N ―

日本では多くの貯水池において気泡循環対策が実施されている。わが国の実施例においては、その作用機構において気泡からの直接的「曝気」効果は期待しないことから、ここでは一般的に用いられる「曝気循環」という用語は用いず、「気泡循環」と呼称することとする。図-1 に本対策で貯水池に生じる局所および広域的流動の模式図を示す。局所的な気泡噴流によって副次的に生じた広域的水平密度流が継続して発生することにより水温成層が変形する。結果として植物プランクトンのハビタットが制御され、有害藍藻類の増殖抑制を主に光制限効果から達成するものである。この対策の作用機構は、水理学における気泡噴流と密度流およびその結果生じた水温成層形態に応じた、風や水面冷却による鉛直混合に加え、植物プランクトンにかかる生理生態学的な藍藻類の競合戦略などの広範な学術的領域にわたる。このため工学的指針構築のためには、まず気泡噴流によって生じる、広域的な水平密度流の流量が最も基礎的な知見となる。成層流の学術分野においては、この流量は気泡噴流スケールで無次元化すると、プルーム数 (P_N) に対して一定値となることが報告されており¹⁾、現在でもその結果に基づいた多くの気泡噴流に関する多くの研究が実施されている²⁾。ところが先行研究における P_N は、実貯水池の循環装置の条件に比べて著しく大きいこと

が、古くから指摘されている³⁾。近年、古里ら⁴⁾は、実用条件に相当する小さい P_N (<10) においては、従前指摘されてきた傾向¹⁾とは異なり、 P_N の低下、すなわち密度成層が弱くなるに従い、広域的な表層水平流量が少なくなることを報告している(図-2)。また、intrusion としての中層流においても P_N の低下に応じて水平密度流量が減少することも確認されている⁵⁾。こうした傾向は従前の成層流に関する基礎水理学的な事例では対象とされていないために、その水理学的な機構に関して更なる学術的研究が必要であるとともに、これに基づく工学的指針構築と社会実装が求められる。

3. テーゲル湖における流入河川水の全量処理によるリン削減と酸化剤としての硝酸態窒素⁶⁾

テーゲル湖は、ドイツの首都ベルリンの北西部に位置し、ベルリン域の上水水源の約2割を供給するとともに、市街地に近接することから親水利用の盛んな水域である。水面積3.1 km²、最大水深16m、平均水深6m、湖水容量2,460万m³の自然湖沼である。流入河川はNordgraben川とTegeler川であり滞留時間は約60日である。流入水に対してNordgraben川の下水处理場の

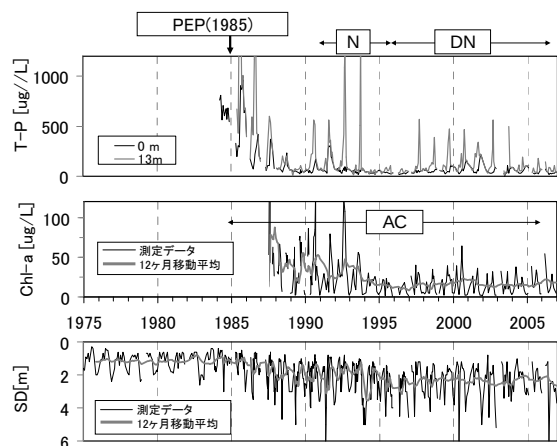


図-3 テーゲル湖における水質の経年変化(細黒線, 測定結果; 太グレー線, 12ヶ月移動平均; AC, 気泡循環; N, 硝化; DN, 脱窒処理期間を示す)

放流水が多くを占めるために、対策前(1985年以前)の無機態栄養塩濃度は過栄養レベルであった。その結果*Microcystis*属等によるアオコが例年発生し、親水利用および上水水源として極めて不適な状態であった。1985年以降、湖内対策としての気泡循環対策と、流入河川におけるリンの浄化施設(PEP: Phosphorus Elimination Plant)が導入された結果、貧栄養化に成功し(図-3)、現在はベルリン近郊の親水および上水原水としての役割を果たしている。

3.1 気泡循環対策

計 15 基の空気吐出施設から総空気量 91,000m³/d が放出されている(吐出水深水深12~16m)。この対策規模は、わが国で使用されている k 値に換算すると 240 であり、混合状態の維持に十分な規模である。本対策は 1980 年から 2004 年まで実施され、通年稼働だけでなく間欠稼働など様々な運用方法が行われた。特筆すべきは、日本では間欠式揚水筒を導入していた時期から、適切な規模での循環装置が導入されたことに加え、既に約 30 年前から近年日本において河川環境分野で議論されている中規模攪乱仮説が実施の運用で議論されていることである。

3.2 流入リン負荷除去対策

PEPは、2つの流入河川が合流した後に、Tegel湖の流入直前に設置された無機態リンの除去施設であり、1985年から稼働している。本施設は、流入河川の平水流量に相当する最大約6m³/sの全量を処理している。なお、出水時の余剰流入量である約2.4m³/sはその全量を放流河川にバイパスしているために、無処理水はテーゲル湖に流入しないシステムとなっている。処理方式は、前処理として沈殿槽を経由した後、吸着剤(鉄)を添加しリン酸鉄のブロックを軽石を混合した濾剤を用いた緩速濾過で除去するものであり、リン除去に特化したシステムである。なお、ドイツ地方は日本と気象特性が異なり出水時の流量が多くないために栄養塩負荷量供給バランスが異なる。このため、少ない出水流入量の全量バイパスが可能であること、結果として溶出栄養塩負荷の寄与度が大きいために平水時の流入リン負荷除去が顕著な効果を有する特性がある。流入河川のリン濃度は処理前の0.8mg/Lから約1/40に相当する0.02mg/Lに、湖内リン濃度も約0.8mg/Lから

約0.03mg/Lまで低下し、以前の極度の有害藍藻類の増殖は抑制された。

ここで注目されるのが、窒素除去を積極的にとりやめたことである。バルト海諸国の研究者達により硝酸態窒素はリン制限水域においては、一次生産に対する栄養塩供給ではなく、酸化剤として溶出抑制に作用することが30年以上前から指摘されていた⁷⁾。実際に上述した流域の下水処理施設において、1991年から1997年までの硝化处理の期間は湖底からのリン溶出が減少したのに対して、1998年から開始された脱窒処理後は、湖底からのリン溶出が徐々に増加した。その結果、窒素除去を取りやめ、現在は硝酸態窒素は積極的に供給されている。わが国においては、リン制限水域においても富栄養化対策として流入窒素除去対策が実施されている。窒素リン対策の基礎原理としてのリーベットの最小律から考えてもそうした水域での窒素除去は必要性が低いはずである。しかも上述した硝酸態窒素の作用は、窒素除去が場合によっては、富栄養化対策として悪影響を与えている可能性を示唆しており、今後の研究が必要である。

4. 課題

光制限に関しては気泡噴流以外のテーマである、生態学的な基礎である臨界水深および水理学的な問題である混合水深の評価方法について、現在でも海洋学の分野において活発な研究が実施されている。また、リン溶出と硝酸態窒素の関係についても、酸化還元電位や鉄、イオウとの相互関係を含めて海外では学術的研究が現在でも盛んである。今後は日本でも、貯留水の品質確保のために、光制限および栄養塩制限に関する更なる学術・技術開発および研究が必要である。とりわけ、日本とともに先の大戦の敗戦国であるドイツとの貯水池環境分野における学術・技術知見の交流が十分でなかったために、硝酸態窒素に関する認識がわが国では知られていなかったのではないだろうか。今後は、そうしたいわゆる戦後スキームの問題を克服して真の水環境保全とインフラのストックマネジメントのための学術・技術的な取り組みが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、埼玉大学Lab-to-Lab事業および河川財団河川基金助成事業(平成28年度 ダム下流の川づくりに資する貯水池水質保全対策の高度化—河床微細付着物と貯水池内一次生産の関係に対する曝気循環対策の影響—、代表者古里栄一)、公益財団法人 高橋産業経済研究財団(「水資源開発貯水池における戦略的な貯留水品質確保方策の開発—微細藻類のハビタット制御—」、代表者古里栄一)により行われた。ここに記して謝意を示す。

【参考文献】

- 1) Asaeda, T. & Imberger, J., 1993, *J. Fluid Mech.*, **249**, 35-57.
- 2) Socolofsky, S. A., 2013, *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, **2**, 55-67.
- 3) Kranenburg, C., 1979, *J. Hydraulics Div.*, **4**, 333-1132.
- 4) 古里ら, 2015, *土木学会論文集G*, **71**, III_455-III_466.
- 5) 古里・犬山, 2016, *土木学会論文集B1*, **72**, I_691-I_696.
- 6) Chorus, I. & Schlag, G., 1993, *Hydrobiologia*, **249**, 67-92.
- 7) Schauser, I et al., 2006, *Acta hydrochim. hydrobiol.*, **34**, 325-332.

深層曝気装置および高濃度酸素水供給装置による DO 改善効果の検討 ～ダム湖を事例として～

(株)建設技術研究所 森井 裕、斎藤 健、柳井 信一、○澤田 育則
国土交通省 四国地方整備局 山鳥坂ダム工事事務所 田窪 遼一

1. はじめに

愛媛県大洲市にある鹿野川ダム湖の下層では、夏季に貧酸素化が顕著となり、マンガンやリン等の濃度が上昇する傾向があった。既設の曝気循環装置により EL+50m までは DO が改善されており、EL+50m 以深を対象とし、深層曝気装置、高濃度酸素水供給装置が設置され、平成 26 年より試行運用が行われている。この両装置の DO 改善効果を検証するとともに効果的な運用方法を確立することを目的として現地調査をし、地形条件や装置の特徴に着目して改善効果を考察した。

2. 深層曝気装置・高濃度酸素水供給装置の概要

深層曝気装置、高濃度酸素水供給装置は、水深が大きい堰堤直上の 0.06k、0.12k に設置されている(表 1、図 1)。平成 27 年は、3 月から 11 月の間両装置の同時運用が実施され、11 月初旬から中旬に高濃度酸素水供給装置の単独運用が実施された(図 2)。

表 1 深層曝気装置、高濃度酸素水供給装置の諸元

装置名	設置数	運用開始	諸元等
深層曝気装置	1基	H26	吸込口 EL44m(水深37m [※])
			吐出口 EL48m(水深33m [※])
			水量 1240m ³ /hr
高濃度酸素水供給装置	1基	H26	吸込口 EL46.7～51.7m(水深29～34m [※])
			吐出口 EL47.2～52.2m(水深29～34m [※])
			水量 80m ³ /hr

※洪水期制限水位時(EL81m)の水深

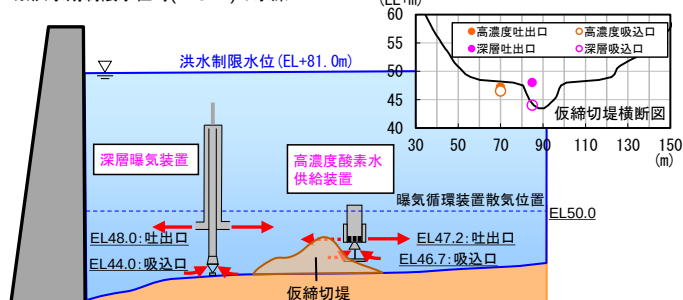


図 1 装置設置縦断イメージ図

3. 現地調査の方法

現地調査は、以下の 2 つの調査を実施した。

(1) 分布観測

分布観測では、鹿野川ダム湖において縦横断的に観測地点を設定(図 3)し、水温・DO の鉛直分布の観測を 3 月～11 月に月 1 回程度の頻度で実施した。観測地点には GPS で座標を確認して舟で移動し、ケンナワで水深を計測しながら対象湖底標高となるよう舟の位置を微修正して地点を決定した。水温・DO の観測は、船上から多項目水質計を下ろし、表層(0.5m)、1/4 水深、1/2 水深～底上 1m : 1m 間隔、底上 0.5m で観測を行った。

さらに、ダム湖 4 地点(図 3)において、湖底上 1.0m で採水を行い、Mn、T-P 等の分析を実施した。

(2) 連続観測

連続観測では、ダム湖 3 地点に観測地点を設定し、湖底上 0.5m にメモリー式 DO 計(JFE アドバンテック RINCO-W)を設置した(図 3)。観測は 3 月～12 月の間実施し、2 時間間隔で水温・DO を計測した。データの回収は 1 ヶ月に 1 回の頻度で行い、その都度機器点検を実施し機器に異常がないことを確認した。

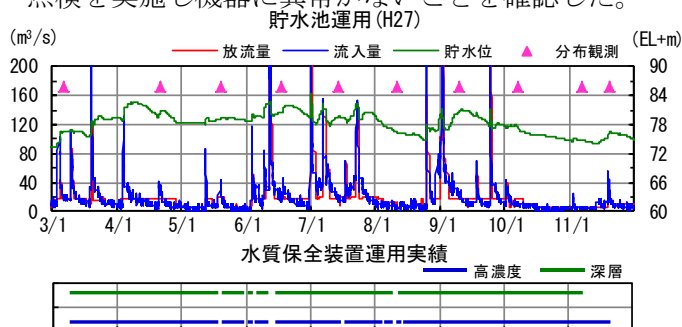


図 2 貯水池、装置運用図



図 3 調査地点図

4. 調査結果の分析

(1) DO 改善効果の空間的変化

5 月の分布観測結果では、両装置同時運用により 1.8k 程度まで DO 改善効果が確認された(図 4)が、2.0k より上流へは到達しなかった。2.0k 付近に存在するマウンド(天端標高 EL+53.3m)のため DO 改善効果が 2.0k より上流へ及ばなかったと考えられる。両装置運用なし(H22 定期観測)と比較すると、貧酸素の領域を縮小していた。また、H26 に実施した高濃度酸素水供給装置の単独運用時の DO 改善効果範囲は、2 週間の運用で装置から 300m 程度であったが、H27 は同時運用により高濃度酸素水の一部を取り込むことで改善範囲が拡大した。

6-8 月は高濃度酸素水供給装置より上流側の一部範囲で底上 0.5m の DO が改善しにくくなっていた。これは、下層において水温が上昇し DO 消費速度が上昇したことや深層曝気装置(吸込口 : EL+44m)により

高濃度酸素水の一部が取り込まれたこと等が要因と推察される(図 5)。

(2) DO 改善効果の時系列変化

3/21 の出水後より水温成層が明らかとなり、0.5k, 1.0k で DO が低下を開始、5 月後半に 1.0k で 0mg/L となり 8 月後半には全地点で DO が 0mg/L となった(図 6)。9/24 出水により DO が上昇したが、11/6 に同時運用から高濃度酸素水供給装置の単独運用に切り替わると 0.5k, 1.0k では DO が低下した。その後、11/18 出水により循環期に移行したと考えられる。

両装置が停止したすべての停止期間に 0.05k において停止直後から DO が急激に減少した(図 6)。6/10-14 の停止期間では、停止後 10.5mg/L から 3 日程度で 0.05mg/L まで DO が減少(図 7)した。両装置は当初、出水時には運用を停止していたが、装置停止直後から DO が急激に減少することから出水時にも連続運用するよう運用方法を見直した。

(3) 溶出抑制効果

0.05k 地点の湖底上 1.0m における水質の変化を図 8 に示す。8 月を除き、3-10 月に底層 DO の低下が抑制され、4-10 月において過去の各月の DO 最大値を超えていた。また、DO の低下に伴い、T-Mn が上昇したが、過去の定期観測 Mn と比較して低く、6-10 月(8 月を除く)の各月における T-Mn 最小値を下回った。T-P においても、各月における過去の定期観測の平均値を下回っており、両装置の同時運用による溶出抑制効果と判断される。

5. まとめ

本研究では、現地調査を行いその結果をもとに特徴の違う両装置の同時運用による DO の改善効果、溶出抑制効果について考察を行った。その結果、年間を通じて下層 DO を概ね改善し、マンガン等の溶出が抑制されていることを確認した。また、両装置同時運用により効果範囲が拡大することを確認したが、

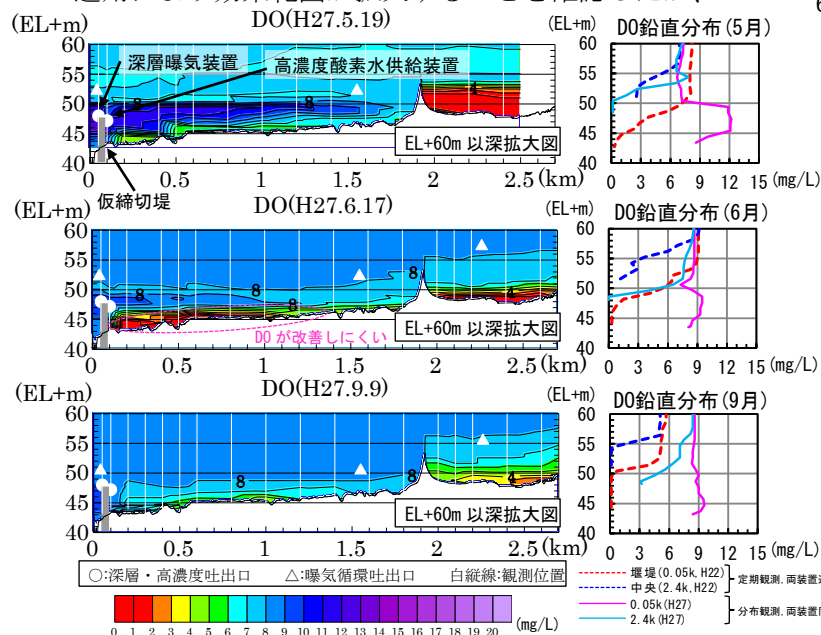


図 4 DO 縦断分布図

一方で、高濃度酸素水供給装置より上流側の一部範囲で底上 0.5m の DO が改善しにくくなることが確認された。これは、深層曝気装置が高濃度酸素水供給装置の高 DO の一部を引き込み、吐出させていることが要因の一つと推察される。そのため、今後はこのような特徴を踏まえて効果的な運用方法を検討する必要がある。

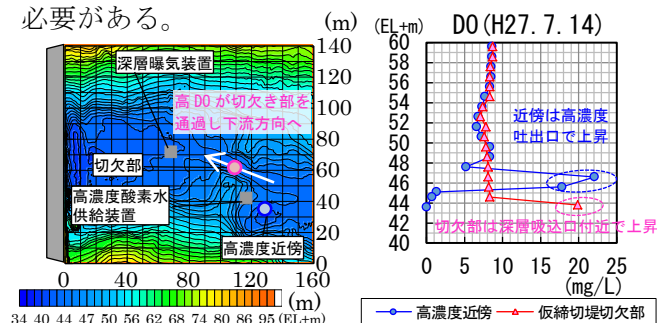


図 5 仮締切堤切欠部の DO 鉛直分布

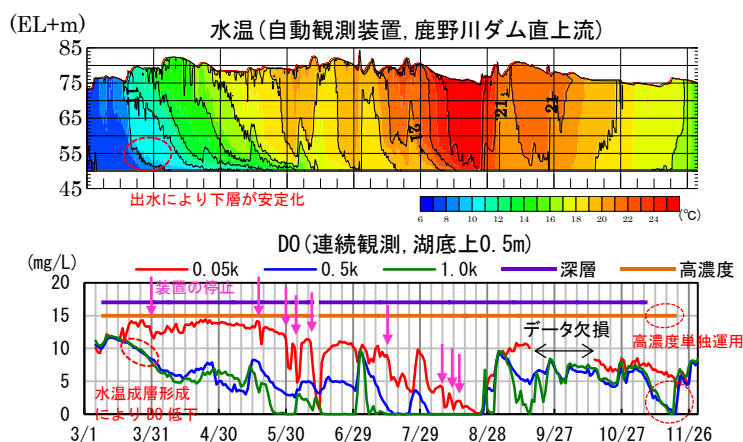


図 6 DO 連続観測結果(日平均)

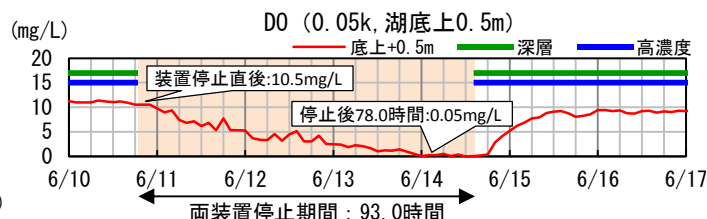


図 7 装置停止時の DO 時間変化(連続観測)

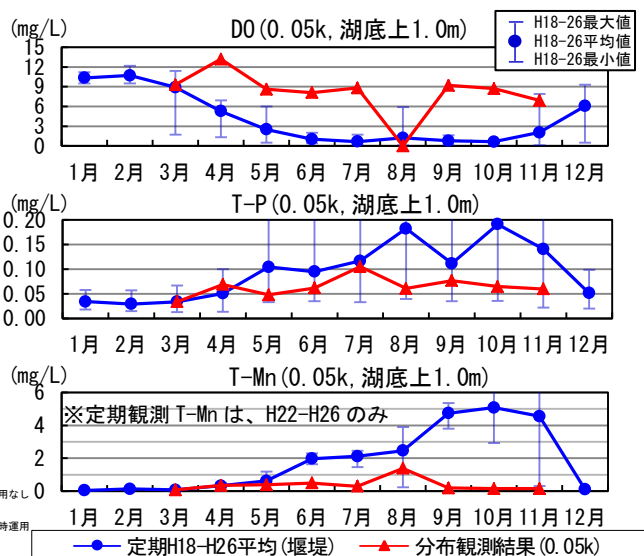


図 8 底層における水質の変化

塩田跡地・耕作地間の高さを大きく変えない土地利用

流域調整室技術事務所 安東尚美

river-basin@gaia.eonet.ne.jp

1. はじめに

日本国内では2つの脊梁山脈に囲まれ少雨で、潮流により形成された砂堆上の干潟も豊富な瀬戸内海沿岸では、江戸時代初めより、多くの入浜式塩田が形成されてきた。入浜式塩田は、干満潮の間どりを田面として海成粘土を敷いた上に撒砂し、「ゆる」と呼ばれる樋門から満潮時に海水を取り入れ、毛管作用で撒砂上に塩を析出させた砂を「沼井」に集めて海水をかけて5倍程度濃い「かん水」を作るもので、これを煮詰めて塩にしていた。

1950年代後半に傾斜面や竹枝で作った枝条架を流下させる流下式に切り替えられ、1971年にイオン交換膜によるかん水作りに転換され、国内の塩田は全廃された。

徳島県鳴門市には、塩田時代の田面高を変えずにサツマイモ畑になっている場所や、入浜式塩田を使われなくなってからそのまま残した場所がある。

一方、中国河北省の沿岸部では、塩田廃止後の耕地化が課題となっているところがあり、ビニールハウス等で乾燥、塩分が析出した場合に水田化して脱塩する技術の適用ができないかと考えた。食卓塩には海外の天日塩を日本の海水で溶かして煮詰めていた日本では2009年に塩が自由化されたが塩田の復活は進まず、中国では2014年より塩の専売が廃止され自由化の方向となったものの安全な塩の供給も課題になっている。

2. 塩田跡サツマイモ畑の灌漑と排水

鳴門市撫養町大工野地区は、1929年に塩田が廃止され、1947年の空中写真から畑となっている。1990年代に吉野川からの灌漑用水をポンプで地上タンクに貯めて配水し、畑地下から排水路に可変高管を入れる県営用排水工事が、サツマイモになると金時の大産地・里浦地区ともになされた。大工野地区では、新池川防潮水門(1983年紀伊水道高潮対策として建設)の内外で、塩分濃度が5~6‰と30‰に変化し、水門の外側(小鳴門海峡と旧吉野川につながる撫養川側)に可変高排水管が出ている。10年位前に台風で冠水もあり、塩田当時と変わらない高さで、冬季の裏作はダイコンである。



図1. 大正6年(1917) 国土地理院1/25,000 地形図



写真1. 新池川水門外側



写真2. 冠水した畑

塩田跡地の耕作地化には地下伏流水の塩淡密度流が寄与していると考え、塩田跡地での検

出調査や、実験所でのトレンチ上の砂層、及び塩田模型での再現実験を行った。

3. 入浜式塩田跡の水ミチ調査

鳴門市高島の福永家住宅は、1961年の第二室戸台風まで居住し、1971年の塩田廃止まで流下式塩田があった所で、「ゆる」と入浜式塩田跡が残されている。「ゆる」閉鎖後1980年代に防潮堤が築かれて海との間は閉鎖され、今では入浜式塩田跡に常時水が溜まっている。

2016年4月15日に、「ゆる」周辺で1m深地温調査と、塩田内を採水し塩分濃度と水温、及び海側の調査を行った。その結果、防潮堤の目地拡大部に向かって、古い水が浸出していると考えられる低温部が検出された。

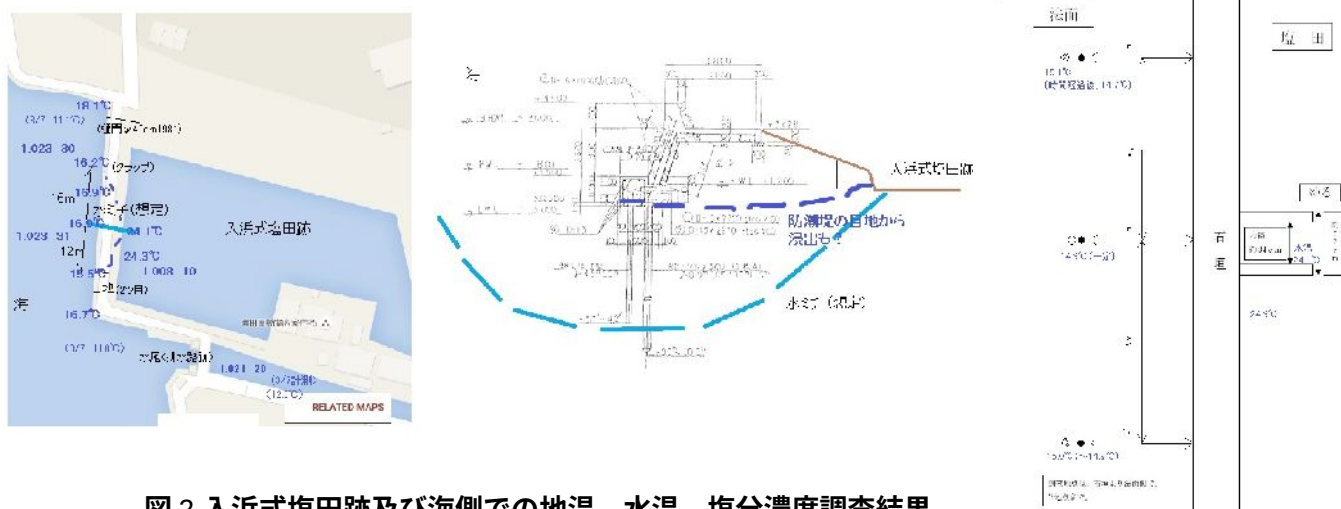
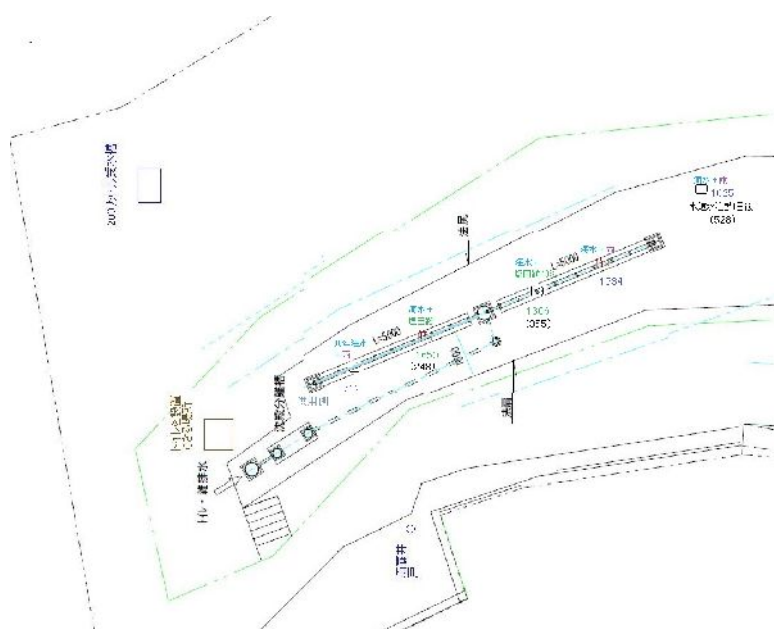


図 2.入浜式塩田跡及び海側での地温、水温、塩分濃度調査結果

4. トレンチ上及び入浜式塩田模型実験

サツマイモ畑に3年毎に入れ替えられる里浦地区東側の大手海岸の細砂を、定常に達した後の変水位透水係数を $2.8 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ と計測し、京都府和束町にある流域調整室技術事務所の実験所に設けた土壌浄化トイレのトレンチ上や付近に、2リットルペットボトルの上下を切り欠いた筒にいれ、海水や塩田跡の10%汽水、淡水を注いで、土壌EC計の値を計測した。その結果、トレンチ上の方が早く耕作適な範囲にEC値が低下し、降雨がなくても後で淡水を注ぐと1日でEC値が低下した。

入浜式塩田模型地層をペットボトルに作り、塩水を注いで干上がらせ、後淡水を注ぐと、粘土層より下の排水管より、濃い塩水が出た。



宍道湖におけるシジミの移動要因の検討

鳥取大学大学院工学研究科 学生会員 ○諸原亮平
鳥取大学大学院工学研究科 正会員 矢島啓
元鳥取大学工学部土木工学科 非会員 川野裕美

1. はじめに 島根県の東部に位置する宍道湖では、名産であるヤマトシジミの漁獲量が、昭和 48 年は 2 万 t 近くあったが、平成 24 年は 1,700t と大幅に減少した。これを受けて、島根県ではシジミの漁獲量減少の改善を行うこととした。対策を行うためにも、現在未解明であるシジミの移動のメカニズムを解明することが必要である。シジミ自体に湖内を移動する能力はほとんど無いことから、湖内に生じる湖流や風浪に伴って移動していると推察される。そのため、本研究では現地調査によってシジミ生息域の湖流や波を観測するとともに、湖流や波によって生じる底面せん断応力からシジミの移動評価を行うことを目的とした。また、現地の波の周期、波長を参考に造波水路を用いた室内実験による移動評価も行った。

2. 現地調査及び室内実験とシジミの移動評価の方法 現地調査はシジミが生息できる水深 4m 以浅の宍道湖北岸中央の秋鹿地区を対象に調査地点(図-1)とした。調査ラインは南から東に 30° 傾けて設定した。2015 年 7 月 22 日～2015 年 10 月 1 日まで長期観測として、St.1 から St.3 において流速・流向、波高、水温、塩分及び濁度の観測を行った。また、2015 年 9 月 7,8 日に集中観測として、調査ラインを対岸まで延長して、対岸の岸付近で 2 地点、St.3 から対岸までの距離を等間隔に 6 等分した 7 地点の計 12 地点で、流速・流向及び水温や塩分などの水質項目の観測を行った。集中観測の地点位置図は割愛する。

造波水路を用いた室内実験では、調査地点で採取した宍道湖の底質(中央粒径 0.0187mm)を敷き詰めて、その上にシジミを置き、任意の波高と周期に設定した波によるシジミの移動の有無を観察した。この移動評価は、シジミの潜砂行動は考慮せずに行った。

移動評価はシジミを殻長 0.5mm 稚貝、3mm, 5mm, 10mm 幼貝に分類して行った。観測結果より算出した掃流限界、浮遊限界の 2 つの移動限界と、波と流れによって生じる底面せん断応力を用いて行った。室内実験では 0.5mm 稚貝は使用せず、波による底面せん断応力のみを対象とした。なお、本研究においてはシジミを砂粒子と仮定した評価式を用いている。さらに、波浪推算モデル SWAN を用いて 8 方位からの定常風によって湖内に生じる底面せん断応力より、移動可能範囲の推定も加えて行った。

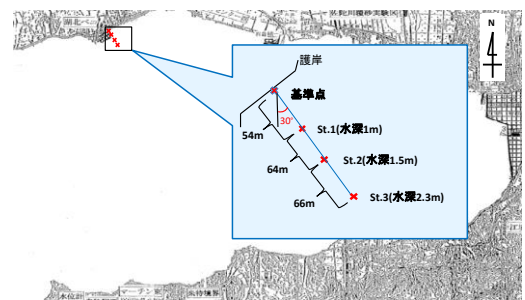


図-1 現地調査地点位置図

3. 現地調査結果 長期観測の結果より、比較的風が発達していた期間(2015 年 9 月 1 日～9 日)に松江地方气象台で観測された風速・風向と現地で観測された波高を図-2 に示す。波高が 0.15m(赤色の実線)以上となるときの風速は 2.5～11.5m/s と多様であったが、風向に着目すると 67.5°～135° (ENE～SE), 225°～247.5° (SW～WSW) であった。このことから、東西方向からの風が発生したとき調査地点での波高は高くなると言える。これは、東西方向に長い形状をした宍道湖において調査地点が東西方向のほぼ中央に位置していることから、十分な吹送距離によって波が発達したためであると考えられる。

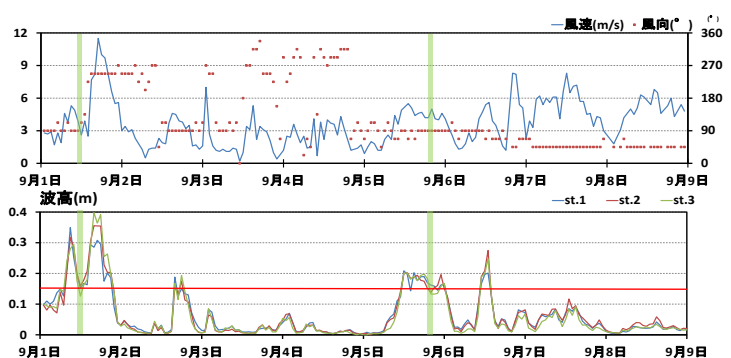


図-2 風速・風向と波高の関係

4. シジミの移動評価

(1) 造波水路を用いた室内実験 造波水路を用いた室内実験では Particle Image Velocimetry(PIV)法を用いて観測した底面近傍の流速より、底面せん断応力を算出し、理論式との比較を行った。実験条件は周期 0.8s, 1.0s, 1.5s, 2.0s, 波高 2cm~10cm の範囲で 1cm ごとに変更して設定した。ここで、周期 1.6s で波高 5cm, 6cm の結果を図-3 に示す。

(a)のケースでは移動が認められなかったが、(b)のケースでは移動が認められた。これは、桑原^リと同様にシジミを砂粒子と仮定して算出した移動評価式とほぼ同一の評価ができる結果が得られたことを示している。

(2) 現地調査 図-4 は現地観測で得られた流速、有義波高、平均周期、水温を用いて算出した流れによる底面せん断応力と、波による底面せん断応力の長期観測期間中の 1 時間毎の値をプロットした図である。ここに重ねて、シジミの掃流限界値(図中緑の点線)及び浮遊限界値(図中赤の実線)を表した。この図より掃流限界値を超えるケースは St.1 で 87 回, St.3 で 20 回(全観測回数 1689 回)観測されたが、浮遊限界を超えるケースは観測されなかった。また、掃流限界を超えるとき、波によるせん断応力によって超過していることがわかる。さらに、図中の楕円で囲んだ範囲に着目すると、水深の浅い St.1 における波によるせん断応力が大きいことがわかる。このことから、シジミは波によって掃流移動しており、浅水部になるにつれて波の影響は大きくなっていることが示された。

波浪推算モデル SWAN より算出した波高などを用いて、宍道湖内におけるシジミの移動可能範囲を推定した(図-5)。結果より、波の発達する風下側の沿岸部においてシジミは移動を開始すると考えられる。また、観測期間中に東西方向の風が支配的であったため、東岸と西岸付近においてシジミは最も活発に移動していると考えられる。

5. まとめ 長期観測データより算出した底面せん断応力よりシジミの移動評価を行った結果から、移動の要因は湖内の流動よりも波浪によるものが支配的であることが示された。室内実験による移動評価では、実験式と同一の評価を再現することができた。そのため、潜砂行動などのシジミの生態系的な要因を考慮しない条件であれば、砂粒子と同様な移動評価を行うことができると考えられる。

謝辞 本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発地域課題分野(河川生態)(研究代表: 東京大学山室真澄)より研究助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 桑原久美: 低湿の安定性からみた好適あさり生息場環境。生田和正, 日向野純也, 桑原久美, 辻本哲郎(編)「アサリと流域圏環境—伊勢湾・三河湾での事例を中心として」, 恒星社厚生閣, pp.61-70, 2009.

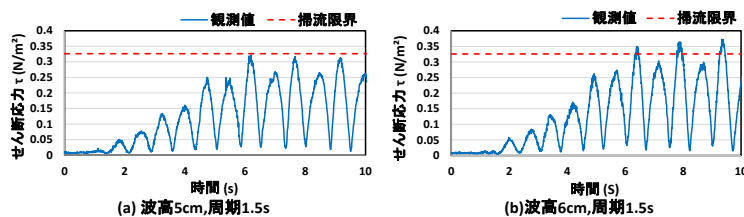


図-3 観測値によるせん断応力と幼貝の移動限界値

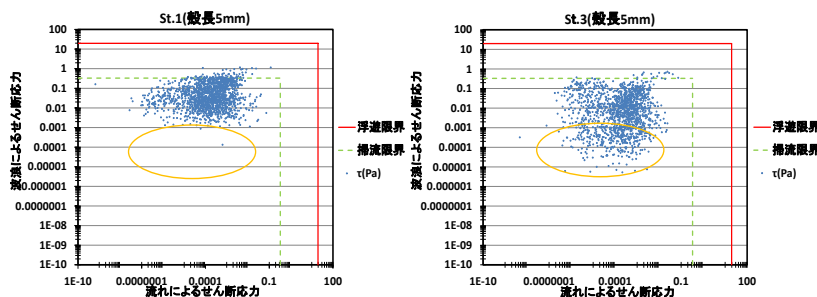


図-4 各 St における殻長 5mm のシジミ幼貝の移動評価

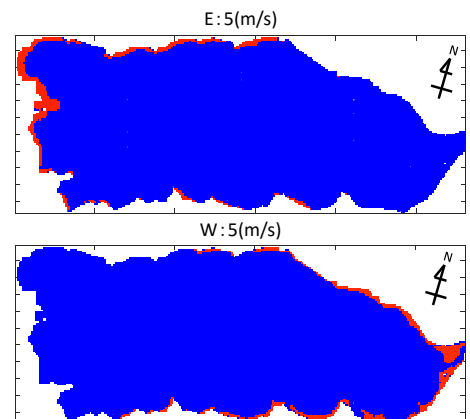


図-5 波浪推算モデル SWAN によるシジミの移動開始地点(殻長 5mm)

ダム下流河川への土砂供給による地形の応答について

国立研究開発法人土木研究所

○中西 哲

同上

櫻井 寿之

同上

石神 孝之

1. はじめに

ダムなどの河川横断工作物は、流水のみならず、河川を流下する土砂輸送も分断させ、下流河川での粗粒化や河床低下などの環境変動を引き起こす。一方最近では、ダムからの土砂の排砂技術も提案・開発されている。しかしながら、これら土砂の供給量や質によって、ダム下流河川がどのように応答するかという事例の検討はあまり無い。

ここでは、実際のダム下流河川を対象に、供給土砂の質、粒度分布の違いに着目し、ダム下流河川がどのように応答するかについて、一次元河床変動計算による検討を行った。

2. 河床変動計算

本研究では、一次元不定流河床変動計算プログラムを用いて数値計算を行った。対象河道は実際のダムが設置されている A 川の河道を選定した。図 1 に A 川の計算対象区間を示す。計算対象区間は、上流の A ダムと下流の B ダムに挟まれた区間である。地形条件は A 川で実際に計測された 200m ピッチの横断測量データを用いた。上流端の流量境界条件は 1987 年から 2003 年までの 17 年間の A ダム運用実績に記録されている放流量から決定した。

数値計算での土砂供給は、上流端の流入土砂量として与えた。今回対象とした計算ケースは、土砂供給を行わない無給砂条件の 1 ケースに、供給土砂として材料 1～3 の 3 種類を設定した合計 4 ケースとした。図 2 に供給土砂・初期河床の粒度分布曲線を示す。供給材料には、砂を主体とする材料 1 ($D_{60}=0.36\text{mm}$)、材料 1 と 3 を半量ずつ混合した材料 2 ($D_{60}=4.55\text{mm}$)、礫を主体とする材料 3 ($D_{60}=10.7\text{mm}$) を利用することとした (0.074mm 未満を粘土・シルト、0.074mm 以上 2mm 未満を砂、2mm 以上を礫とした)。また供給土砂濃度は 20% とした。

3. 供給土砂材料の違いによる河床高への影響

検討を行ったケースの河床変動の比較結果を図 3 に示す。材料 1 供給のケースは材料 3 供給のケースに比べ、68km 地点より上流では河床上昇が小さく、

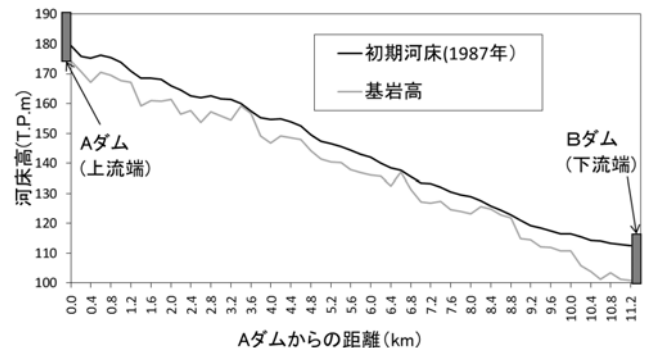


図 1 対象区間概略図

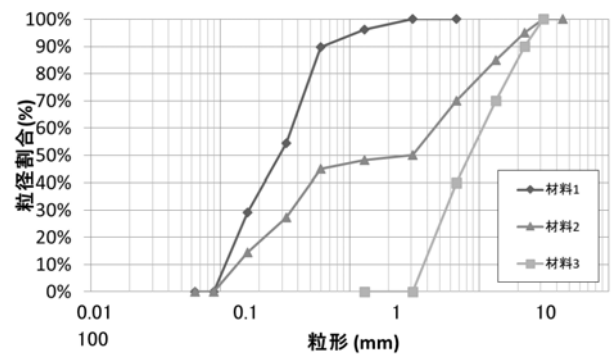


図 2 供給土砂の粒度分布

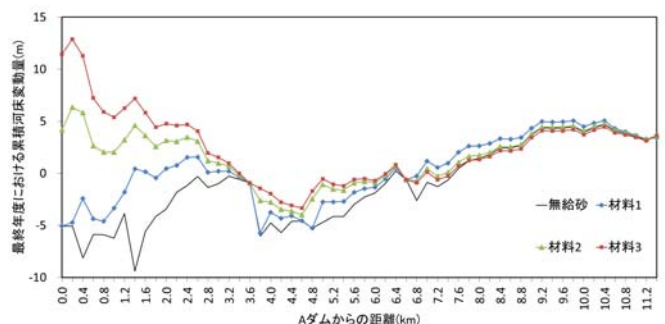


図 3 河床変動量の比較

同地点より下流では河床上昇が大きい。また、材料 2 供給のケースは、材料 1 供給、材料 3 供給の中間的な河床上昇となる。この結果は、土砂粒径の大小による流送距離の違いによるものだと考えられる。また、供給土砂量の質によって過剰な堆積・侵食箇所のある程度の予測は可能であると考えられる。

土砂バイパストンネルを流下する土砂を把握する試み

(国研) 土木研究所 櫻井 寿之、京都大学防災研究所 角 哲也

京都大学大学院工学研究科 小柴 孝太、(国研) 土木研究所 宮脇 千晴、石神 孝之

1. はじめに

ダム貯水池の堆砂の軽減およびダム下流の流砂環境の保全・改善のための手法の一つとして、土砂バイパストンネル（以降 SBT と記載）が用いられている。SBT を通過する土砂量を把握することは、施設の操作、施設の摩耗・損傷に関する維持管理と対策、下流河川の河床環境変化の検討・評価などにおいて重要である。

そこで、本稿では、H28 年度より試験運用が開始される予定の天竜川支川の小渋川に建設中の小渋ダム SBT¹⁾への適用を想定しつつ、SBT を流下する土砂を把握する手法についての現状と課題を考察するとともに、現在実施中の礫が掃流形態で通過する量を把握するための計測手法についての検討状況を報告する。

2. SBT を流下する土砂の把握手法の現状と課題

SBT を通過する土砂は、粒径や輸送形態などによって分類することができるが、ここでは、国交省天竜川ダム統合管理事務所が設置している「小渋ダム土砂バイパストンネルモニタリング委員会」で用いられている下記の粒径による分類を使用して、流下土砂の把握手法について記載する。

(1) シルト成分 (0.075mm 以下)

ウォッシュロードとも称される粒径の小さい土砂であり、ダムの多くが設置される山地河川では、出水時に浮遊状態で輸送され、流水中で概ね一様に混合されると考えられる。現状では、出水時に 1 時間程度の間隔でバケツ採水等によって得られたサンプル水の SS と粒度分布を分析することで、流下量を把握する。出水時に欠測が無いように採水するための労力は大きく、省力化には濁度の自動計測が有用であるが、土砂の粒度分布や土質などにより濁度と SS との相関関係が異なるため、採水分析によるキャリブレーションが重要である。

(2) 砂成分 (0.075mm~2.0mm)

砂成分については、掃流力に応じて掃流形態から浮遊形態で輸送される。山地河川では出水時には掃流力が大きくなり、浮遊形態で輸送される量も多くなるため、出水前後の河床形状の違いから通過量を把握することは難しい。SBT では一般に比較的急勾配の開水路トンネルとして設計される場合が多く、小渋ダムの SBT でも出水時には 10m/s 以上の流速となることが想定され、砂成分は浮遊状態で輸送されると考えられる。ただし、

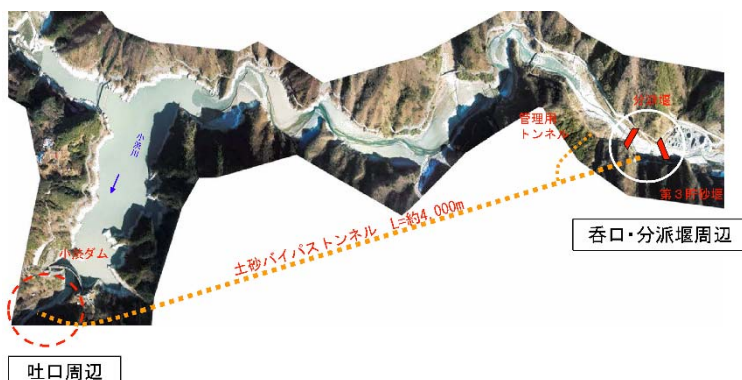


図-1 小渋ダム SBT の概要（平面配置）¹⁾

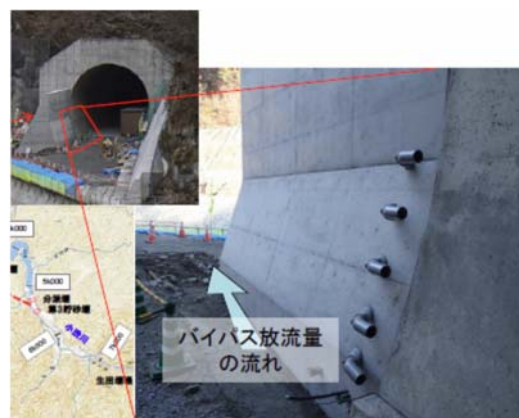


図-2 小渋ダム SBT の吐口の採水管¹⁾

水深方向の土砂濃度が異なることも想定され、小渋ダム SBT では、吐口に高さ別の採水管を設置して採水分析することが計画されている。この採水分析の結果はシルト成分、礫成分についても利用される予定である。

(3) 礫成分 (2.0mm 以上)

砂成分と同様に、掃流力に応じて掃流形態から浮遊形態で輸送されるが、砂成分よりは掃流形態の輸送量が多い。小渋ダム SBT では、出水期後に SBT の上下流（上流約 2km、下流約 4.6km）の河床形状を測量し、SBT 上流の河床材料調査を行い、その変化から流下土砂量を把握することが計画されている。

また、SBT を通過する礫成分を直接計測するための試みとして、SBT の吐口にプレート型振動センサを設置することも計画されている。掃流砂の計測手法の既往研究としては、京大穂高砂防観測所での観測など砂防分野で多くの検討が行われているハイドロフォン²⁾やスイスでのジオフォン³⁾などの研究事例があるが、小渋ダム SBT で想定されているような高速流（最大 15m/s 程度）での計測特性については十分な知見がない。

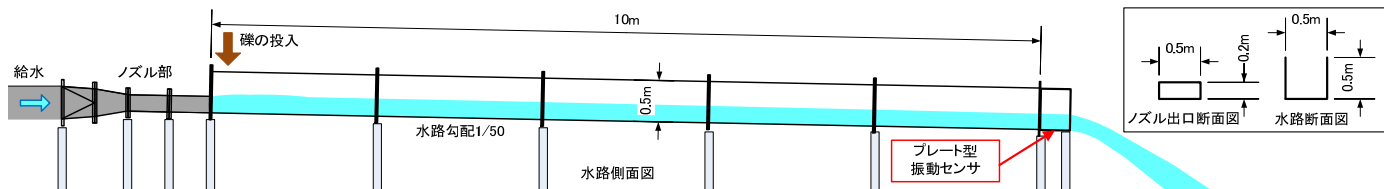


図-3 実験装置の概要

3. 高速流中を流下する礫計測の試み

前述の礫成分の直接的な計測に関する課題に関して、筆者らは、室内実験によって高速流中に礫を流下させた際の計測特性に関する検討を実施しており、その検討状況の概要を報告する。

実験装置の概要を図-3に示す。給水用のポンプからの水流を高さ 0.2m×幅 0.5m の長方形の出口を持つノズルで整流し、下流端に図-4に示すプレート型振動センサを設置した高さ 0.5m、幅 0.5m、長さ 10m、勾配 1/50 の鋼製水路（底面はステンレス製）に通水を行った。プレート型振動センサは、長辺 0.5m×短辺 0.36m×厚さ 15mm の鋼製プレートと裏面に設置された音響センサ（ハイドロフォン）と振動センサおよびジオフォンの3つのセンサで構成される。

実験では、通水を行った状態で上流端付近から単一の礫を水面付近から落下させる方法で投入し、センサから出力される電圧を $20\mu\text{s}$ 毎（50kHz）に記録した。

実験に用いた礫の材料は小渋ダム SBT の流入部直上流付近の河床から採取した土砂をふるい分けし、約 2、5、10、20、50、100mm の6つの一様粒径とした。

実験結果の流況の例を図-5に、礫を流下させた際の計測結果の例を図-6に示す。出力電圧の波形の振幅と継続時間は、概ね粒径との相関がみられ、音響センサの結果にその傾向が顕著にみられた。振動センサは、小さい粒径にも反応し感度がよいが、小さい衝撃でも振幅が計測上限値に達してしまい、振幅から粒径の大きさを判別することは難しいと考えられる。ジオフォンは、振動センサの波形と似ているが、小さい粒径の場合の振幅が小さめになり、振幅の低減時間が長めとなる傾向がみられた。

4. まとめ

小渋ダム SBT の運用については、堆砂の軽減などの本来の目的の効用が期待されるのはもとより、土砂流下量の把握手法や施設の操作・維持管理手法の技術的な発展も期待される。室内実験による検討についても現場への適用を考慮して進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所webサイト (<http://www.cbr.mlit.go.jp/tendamu/picup/monitoring/index.html>)
- 2) 堤大三，野中，水山，藤田，宮田，市田：掃流砂観測にお

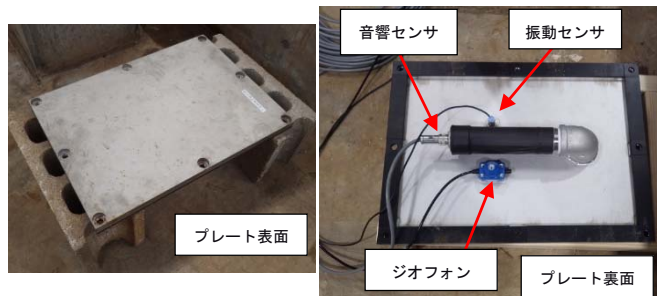
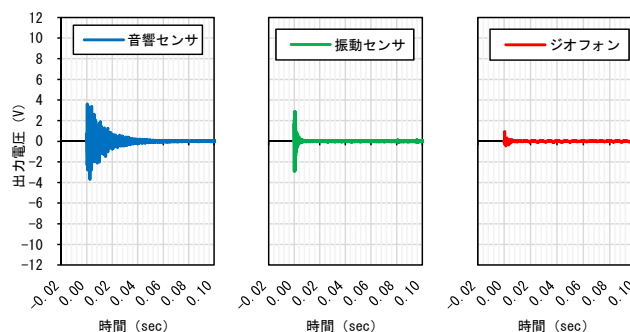


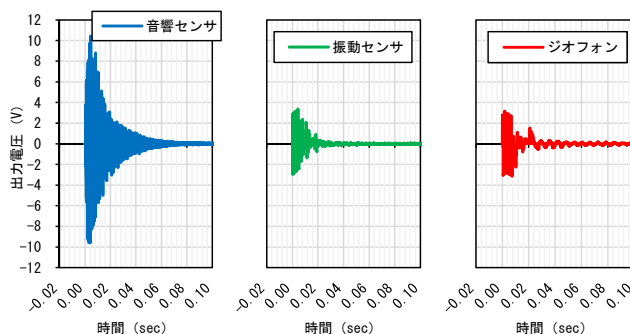
図-4 プレート型振動センサの概要



図-5 流速約 8m/s の流況(上)と高速撮影した礫の流下状況(下)



(a) 水路上流端流速 10m/s、粒径 20mm の計測結果



(b) 水路上流端流速 10m/s、粒径 100mm の計測結果

図-6 礫を流下させた際の出力電圧計測結果の例

けるプレート型ジオフォンとパイプ型ハイドロフォンの比較，京都大学防災研究所年報，(57)，pp. 385-390，2013。

- 3) Hagmann, M., Albayrak, I., Boes, R.M.: Field research: Invert material resistance and sediment transport measurements, Proc. Int. Workshop on Sediment Bypass Tunnels, VAW-Mitteilung 232, ETH Zurich, Switzerland, pp. 123-135, 2015.

デカルト座標流体シミュレーターにおける局所高解像度化の試み

首都大学東京 都市基盤環境コース 新谷哲也

ツール（道具）は「目的を実現すること」の重要性はもちろんのこと、その「使い易さ・分かり易さ」が利用される分野、もしくはその分野を超えた領域の発展に寄与することがある。つまり、ツールを操作することに時間と気を大きく取られることがなくなれば、さらなる応用を考える余裕ができるということである。模型ヘリコプターが古くから存在したにもかかわらず近年ドローンが大きく取り上げられ、様々な場面で応用されていることはその良い例である。それ故、我々がツールとして利用している湖や貯水池、沿岸域における流動・水質解析シミュレーターもその「使い易さ・分かり易さ」を追求する意義はある。このことは、シミュレーターを GUI 等でラッピングしてユーザーフレンドリーにするというよりもむしろ、その構造が我々の理解と一致していること、直感に基づいて操作可能なこと、組み替えが可能なように適切な粒度の部品でシミュレーターが構成・分類されていることが重要と考えている。

これまで、著者らは上記目的のために、シミュレーターを組み込み型（例えば int, double 等）から直接積み上げるのではなく、数値流体の分野で理解可能な型（オブジェクト：例えば水域、移流、計算セル等）を定義し、ある意味専用の言語体系（階層構造）を作ってその上でシミュレーターを組み上げる試みを行っている（新谷・中山 2009）。また、ユーザーが自由にオブジェクトを生成・組み換え・修正を行って実行内容を変化させることができるようにスクリプト言語上で利用可能とした（新谷・中山 2015）。これらにより、Couette 流れのような単純な計算から東京湾の流動計算まで無駄なくスケーラブルな対応、既存の GUI やグラフィックライブラリー等とのシームレスな連携、シミュレーター自身を繰り返し計算の内部に入れる計算等が可能になった。

「使い易さ・分かり易さ」という観点から空間の離散化を考えると、デカルト座標格子は直感的で他を圧倒するメリットがある。さらに、過去の膨大な数値スキームの研究資産、地形データを始め多くのデータがデカルト座標で与えられることも魅力的な点である。しかしながら、曲線的な地形境界を粗い計算格子で表現することや部分的に解像度を上げることが苦手であり、この欠点を克服した一般座標格子や非構造格子等が開発されて実務で利用されはじめている。一方、これらの空間離散化手法の問題点として、複雑な形状の水域に対して適切な計算格子を作成することに多くの労力が必要なのが挙げられる。境界に適合した格子であっても大きく歪んだ格子は精度低下・不安定性の原因となる。それ故、デカルト座標格子（より一般的に、境界に無理に沿わず楽に構築できる構造格子）を合理的に利用して、上記欠点を克服する試みは多くの研究者によってなされてきた。nesting grids や multiple grids, そして tree-based grid（四分木）はその代表的な例である。しかしながら、これら提案されてきた多くの手法はそのアルゴリズムや利用法が複雑になる傾向にあり、著者の主観もあるが、ツールとしての「使い易さ・分かり易さ」が損なわれているように思われる。

そこで本研究では、デカルト座標格子の局所高解像度化 (refinement) を可能な限り「複雑さ」を増大させずに実現することを目的として、非構造格子のデータ構造と四分木の離散化パターンに基づいた新しいアプローチを提案する。まず、単純化するためにいくつかの妥協を行う。(1) refinement は水平方向のみとする（鉛直方向は partial-step を導入した非一様 z 座標）。(2) refinement 前の基本となる水平グリッドは各方向にそれぞれ一様間隔格子とする。(3) 静的な refinement とする。これらの近似の下、 1 に示すような refinement 前の基本グリッドを定義する。この基本グリッドの採用によって (i, j) インデックスによる容易な場所の特定（境界条件の指定、データの抽出等）の恩恵が得られる。ここまでは、従来のデカルト座標モデルと全く同様に見えるが、ここで示されている計算セル（のようなもの）は一段階抽象化されていて、計算セル（3次元の場合は鉛直方向にセルが積み重なったコラム）のコンテナ（入れ物）となっている。つまり、このコンテナ一つ一つが水平方向に任意分割可能な 3次元デカルト座標系グリッドとなっていると考えて良い（コンテナ内部にさらに

(i, j) インデックスが存在する). すべてのコンテナに一つずつ計算セル (コラム) が入っていれば従来のデカルト座標モデルと同等となる. また, この図の決して冠水しない陸部分 (灰色部分) と水底以下の計算セルはマスクするなどして計算から除外するのではなく, 水平・鉛直方向ともにメモリー上からもそぎ落とす. このような対応を行うと $i+1$ や $j-1$ などのインデックスを利用したフラックスの計算が不可能になるが, これらは非構造格子的な対応関係 (簡単に言うと, お隣さん pointer を保持するオブジェクト群) を構築することによってフラックスの計算を実現している (新谷・中山 2015). このことにより, コンテナ内の計算セルの接続, コンテナを跨いでの接続を含め自由な連結関係を実現できる. さらに良いことは, 非構造格子では困難であった移流計算における高次補間のための風上点の特定が接続関係により容易に特定できるため, 3 次精度の ULTIMATE-QUICKEST 等をそのまま利用できる. また, 非構造格子と異なり, 連続的に計算セルを番号付けできるため, 生成される行列が優対角化される可能性が高い等のメリットも期待できる.

次に簡単に利用方法を説明する. 先ほどの基本グリッド情報の他に, 図 2 に示すように各コンテナの 2 方向の分割数情報マトリックスを定義する (テキストファイルで与える). これらの情報を元に最終的な空間離散化は図 3 に示すような形になる. 従来の四分木モデルでは隣り合う計算セルの分割数の比が 2 倍に固定されていることが多いが, 本手法では隣接するセル間の境界面に対して接線方向の分割数が整数倍の関係になっていればよく, 法線方向の分割数は基本的に何倍でも構わない. これらの比を大きくすると当然計算精度は低下するが, このことで保存性が失われることはない. 本手法のメリットは, 全体, もしくは任意の場所の解像度を図 2 に示す内容のファイルをテキストエディターで修正しながら計算できることにある. 解像度を変化させるためにグリッドを再作成する必要なく, インクリメンタルに修正しながら高精度化を行える. 地形データの解像度が refinement の解像度の整数倍であれば, より解像度の高い地形データを採用しながら空間離散化ができる.

本シミュレーターは SWIG を利用してスクリプト型プログラミング言語 Lua のモジュールとして作成しており, モジュール自身は C++ (および CMake, Boost ライブラリー) で作成し, 内部は OpenMP によって並列化されている. 水面変動や非静水圧の陰的な行列計算には, OpenCL (GPGPU) と OpenMP が利用可能な ViennaCL (<http://viennacl.sourceforge.net/>) を利用した. また, 四分木構造のデータは可視化が面倒であると言われていたが, 非構造格子とみなし VTK unstructured データ形式 (vtu, <http://www.vtk.org/>) で出力することで容易に可視化できる. 設計方法や数値アルゴリズム等の詳細に関しては, 別の機会に紹介したい.

陸				(4,3)
		水	(3,1)	
(0,0)				(4,0)

図 1 基本グリッドの概念図

1	1	1	3	1
1	2	1	1	1
1	2	1	5	1
1	1	3	1	1

1	1	1	1	1
1	2	1	1	3
3	3	1	5	1
1	1	1	1	1

図 2 x 方向分割 (左) と y 方向分割 (右) 情報マトリックス

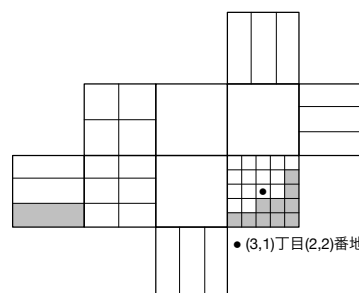


図 3 最終的な計算グリッド

参考文献: 新谷・中山 (2009) オブジェクト指向型環境流体モデルの開発と検証, 水工学論文集 53, 新谷・中山 (2015) 生物の細胞組織構造を模した流体シミュレーターの開発と検証, 水工学論文集 59

河川一次生産ポテンシャルの空間マップに関する基礎的研究

(一財) 電力中央研究所 鈴木 準平, 中野 大助, 今村 正裕

1. はじめに

付着藻類は、河川生態系の基盤となる生産者として重要であることやイベントに対する応答が早いことから、短期的な河川環境の変化を把握する上で重要な生物である。しかし、付着藻類は、種構成といった生物的な複雑さや時空間的なばらつきから評価が難しいことも知られている。近年、測定技術の進歩によって、溶存酸素(DO)の長期観測などから河川内の一次生産力の把握が容易になり(田代ら,2015)、簡便な付着藻類の広域評価が可能になりつつある。これらの技術による測定結果の理解を深めるためには、従来の付着藻類調査や数値計算等で評価される結果と比較し、相互の関係把握を実施することが重要になるものとする。そこで、付着藻類の広域評価のため、生息場ごとの付着藻類の一次生産ポテンシャルのマッピングについて基礎的な検討を行った。

2. 方法

調査は、埼玉県西部の小鹿野町を流れる赤平川を対象として行った(図 1)。対象河川に、写真 1 に示す付着板を様々な流速および水深の地点に設置した(2016 年 2 月 18 日)。7 日後の 2 月 25 日に付着板を回収し、付着板上の付着物を歯ブラシでこすり取り、それに含まれる Chl.a および強熱減量による AFDM を測定した。

マッピングのための流況の再現計算は iRIC を用いて行った。地形は、VRS-RTK を用いて横断測量したデータを用い、境界条件として、上流端に 2 月 18 日に測定した河川流量 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、下流端に水位を与え定常となるまで計算した結果を使用した。



図 1 調査地点



写真 1 付着板設置状況

3. 結果と考察

各流速と水深における Chl.a の量を比較したが水理条件との間に関係は得られなかった。例えば、戸田ら(2002)が示す結果において、試験開始 1 週間において瀬と淵に違いがなかったことから Chl.a 量を用いた評価の際には、より長期的な評価が必要になるのかもしれない。一方、AFDM については、流速が高いほど低い値を示し($P < 0.01$), Biggs et al.(1998)と同様の傾向が得られた。水深については、当該地点の濁りがほとんどないため影響が小さかったものとする。したがって、本検討においては、流速について AFDM モデルを構築しマッピングに用いた。AFDM モデルは、負の値を取らないことを考慮し、 γ 分布に従う一般化線形モデルにより構築した。

その結果、相対的に流速が小さい淵において AFDM が高い地点が見られる。ただし、これは付着藻類の増殖期間が 7 日の場合のマップであり、付着藻類量が時空間的にばらつくことや戸田ら(2002)の実験による流速の早い環境において活性が高い結果が得られたことを考えると、付着板の設置期間を長くした場合には異なる結果が得られることが想定される。今後、各種条件において得られた付着藻類のポテンシャルマップと別途実施している各瀬淵区間における DO の日周変化から得られた河川一次生産力とを比較することで、DO モニタリングによって得られる付着藻類の情報と数値計算によって評価される結果が持つ意味についての理解を深める予定である。

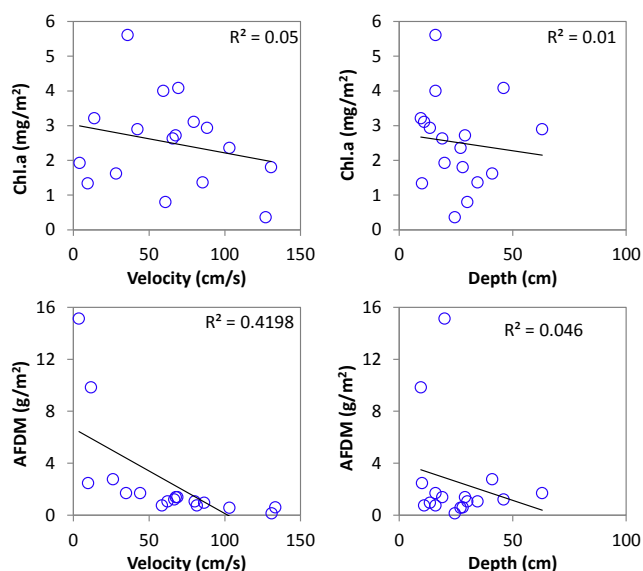


図2 Chl. a および AFDM と流速・水深場との関係

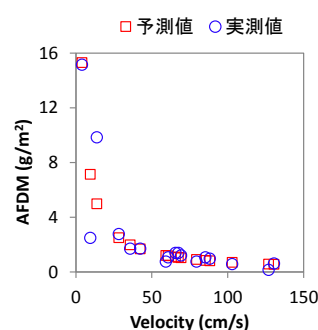


図3 AFDM の推定モデル

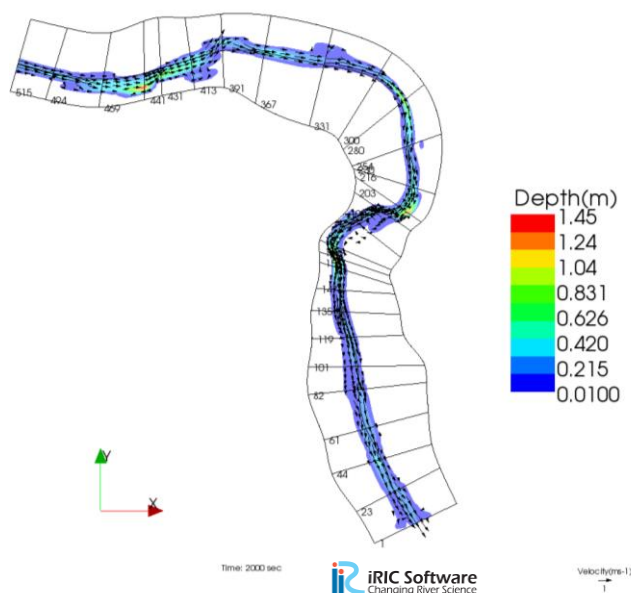


図4 iRIC を用いた流況計算結果

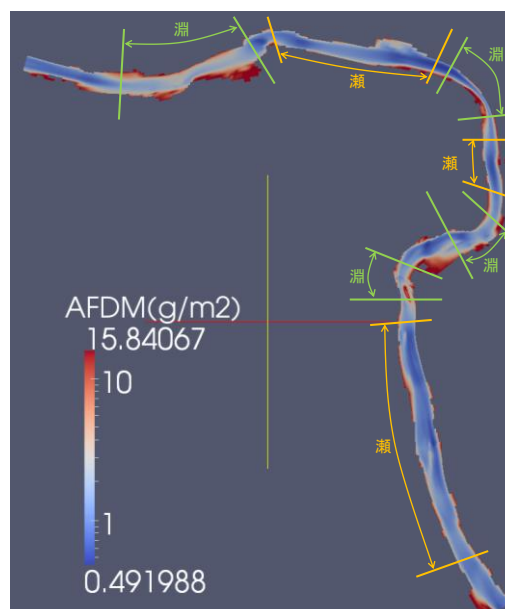


図5 付着藻類のポテンシャルマップ

参考文献

- 田代ら：土木学会論文集 B1（水工学）Vol.71, No.4, pp.1129–1134, 2015.
 戸田ら：土木学会論文集 B1（水工学）Vol.59, No.705, pp.161–174, 2002.
 Biggs et al. : *Journal of Phycology*, Vol.34, No.4, pp.598–607, 1998.

ハイブリット河川生態系モデルの開発

山口大学大学院 学生会員 ○河野誉仁
山口大学大学院准教授 正会員 赤松良久
群馬工業高等専門学校 助教 正会員 永野博之

1. 緒論

一般的に、河川における流れ・物質循環モデルは上流から下流までの長い区間に適用する際は計算負荷の観点から縦断方向の一次元モデルとして扱われている。しかし、河川内の生物の分布等は横断方向に大きく変化するため、河川生態系モデルでは二次元的な取り扱いが必要不可欠である。そこで本研究では、河川の水系について上流域から下流域まで一貫して取り扱うことができるハイブリット河川生態系モデルを開発している。なお、本モデルは現在平水時のみを対象としている。

2. モデルの概要

本研究で構築する生態系モデルは図-1 のように、(a)河川の流れ場を解析する河川流動モデル、(b)水温を解析する熱収支モデル、(c)水質を解析する物質輸送モデル、(d)生物バイオマスを解析する生物成長モデル、(e)土砂移動を解析する河床変動モデル、の5つのサブモデルにより構成されている。また本モデルは1次元計算と2次元計算を混合したモデルとなっており、生物成長モデルの付着性藻類、底生動物、魚類について縦断方向に加え横断方向にも解析を行い分布で表現した。これらの生物量の初期分布は一般化線形モデルに

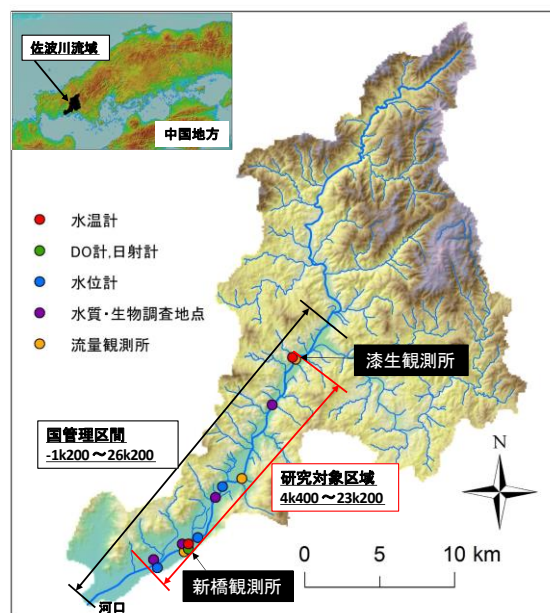


図-2 佐波川流域図と観測地点

よって予測された生物量分布を与えており、現地観測より得られた生物量データと物理環境データである水深、流速、河口からの距離を用いて構築されたモデルを用いている。

3. 対象河川と計算条件

本モデルを検証するにあたり対象河川を佐波川とした。佐波川は山口県のほぼ中央に位置する幹川流路延

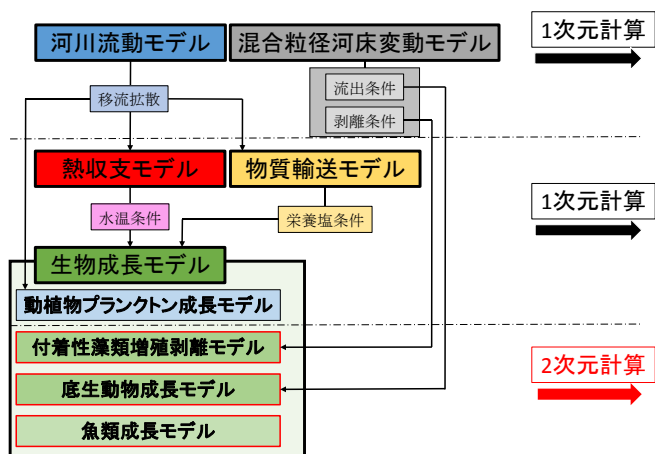


図-1 モデルの概略図

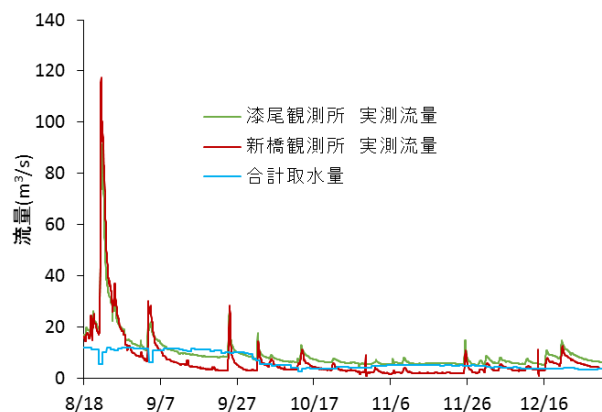


図-3 新橋、漆尾観測所の実測流量と対象区間の合計取水量

キーワード 生態系モデル、物質収支、生物量分布

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科 TEL0836-85-9342

長 56km, 流域面積 460km² の一級河川である。

対象区間は 4k400～23k200 とし, 対象期間は 2014/8/18～2014/12/31 とした。また上流端には図-3 に示す漆尾観測所の実測流量を与え, 下流端は等流水深とした。実河川の実測値との比較をするため堰による取水を考慮した。図-3 に研究対象区間の合計取水量を示す。

4. モデルの検証

4.1. 水位の検証

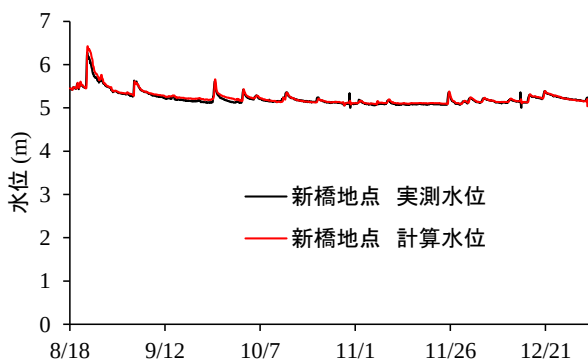


図-4 新橋地点における水位の計算結果

図-4 に新橋地点における計算水位と実測水位の比較図を示す。計算値と実測値を比較すると概ね一致することから, 十分な再現性を持つことが分かった。

4.2. 水温の検証

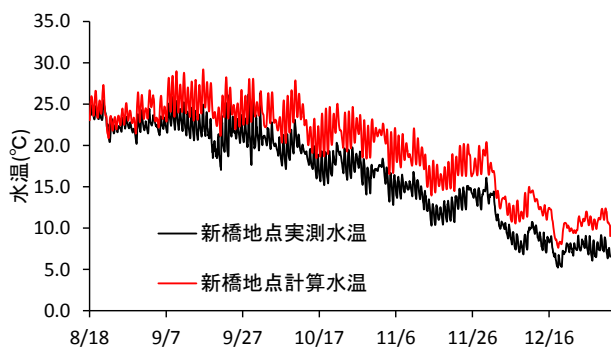


図-5 新橋地点における水温の計算結果

図-5 に新橋地点における計算水温と実測水温の比較図を示す。計算期間前半の夏季においては概ねの一致をしめすものの, 計算期間後半の冬季において計算値と実測値の差が大きくなっている。原因として河床との熱交換がうまくいっていないことが考えられ改善の必要があることが分かった。

4.3. 付着性藻類の検証

図-6 に新橋地点における付着性藻類量の実測値と計算値の時系列比較図を示す。計算値と実測値を比較

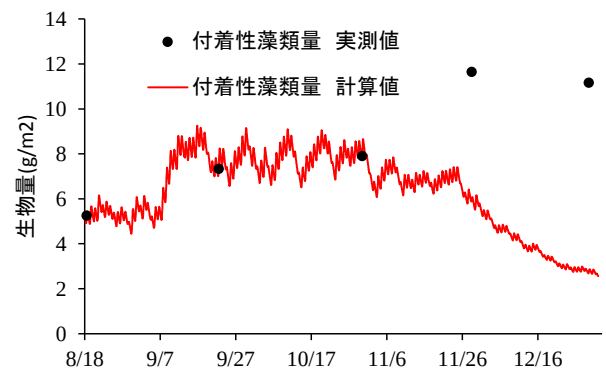


図-6 新橋地点における付着性藻類量の計算結果

すると, 実測値のピークと計算値のピークがずれていることが分かる。また, 計算期間前半は概ねの一致を示すものの, 後半になると大きく外れていることが分かる。原因として, 実河川では秋になると付着性藻類を主に捕食する鮎が産卵のために下流域へ移動するが, 本モデルではこのような季節的な変動を考慮していない。また, 水温が下がり日射量の低下する冬季において付着性藻類の成長量が低下することも要因の一つと考えられる。

5. 現在の取り組み

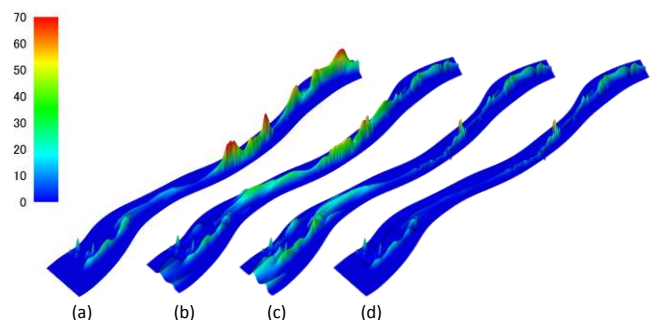


図-7 鮎流下の様子(a)→(d)

上記のような結果を受け, 秋季における鮎の流下を表現することに取り組んでいる。図-7 は現在開発中のモデルで表現した鮎の流下の様子である。流下が始まるとほとんどの鮎が計算区間より下流に流下する。流下する条件として, 計算区間上流端の3日間の水温の平均値が 15～18℃になったとき流下を開始する。流下するときは, 断面当たりの鮎の全量を計算し計算時間間隔の間に断面から一つ下流の断面にある割合だけの鮎が移動する。移動した鮎は水深見合いで配分している。このモデルの問題点としては, 水温の条件や移動する鮎の割合などの数字に根拠がないことである。鮎の流下について何かいい指標や表現する上でもっといい方法があるなど, 意見をいただければ幸いです。

河川生態系モデルの開発と、その応答特性・活用法の検討

名古屋大学大学院工学研究科 溝口 裕太・戸田 祐嗣

1. 序論

河川の水・物質循環や生態系の特徴を抽出し、これを河川環境管理に活用するには、広域かつ長期に亘る現地調査、観測に基づくアプローチや、数値解析技術を用いた現象の解明、予測などが考えられる。これまで我々の研究グループでは、技術的・経済的な課題を抱える現地調査、観測による現象の把握、解明を代替、補完しうる河川生態系解析モデル^{1,2,3)}の構築を目指して開発を進めている。本報では、図-1に示すように物理基盤、物質循環、生物相のサブシステムに区分される河川生態系に対して構築された数値モデルの応答特性について検討すると共に、このモデルの活用例を示す。

2. 河川生態系モデルの概要

河川環境の水系一貫管理を念頭に置き、河川連続体仮説⁴⁾に代表される上流から下流にかけての河川生態系の遷移を表現するために必要と考えられる生物相および物質循環をモデル化の対象とした(図-1)。具体的には、生物相として浮遊生物(動植物プランクトン)、付着生物(藻類、他栄養生物)、底生動物(破碎食者、刈取食者、濾過食者、堆積物食者、捕食者)と魚類(雑食性魚類、藻食性魚類)および、物質項目として粒状有機物(CPOM, FPOM), DOM, 窒素三態, リン酸態リン, 溶存酸素を考慮した。なお、本数値モデルでは河川環境を把握する上で多用される底生動物の群集構造に着目しており、これ

を摂食機能群および河床生息型⁵⁾に分類することで現地観測データとの親和性を高めている^{2,3)}。また、群集動態を規定する因子として、これらの成長を決定する摂食機能群に対応した餌資源および魚類の捕食圧をモデル化し、各項目の相互作用を解析的に求めることで、ボトムアップ並びにトップダウン的な影響を加味した。

3. 解析結果と考察

(1) 解析の概要: 本報では、これまでに構築した河川生態系モデルを水系全体へ適用する前段として、この応答特性を把握する観点から、前報^{2,3)}に従い阿木川ダム下流区間を対象として、水理・地形条件を設定した。また、2000年9月から2005年2月の阿木川ダム貯水池の水質データ⁵⁾を用いて解析を実施した。

(2) 数値モデルの応答特性: 本数値モデルには相当数のパラメータが設定されており、これらの感度分析を進めることがモデル精度の検証に不可欠である。そこで本報では、各パラメータの値を±20%とした各ケースでの感度分析を実施し、モデルの応答特性を検討した。その結果、付着生物(藻類・他栄養生物)、底生動物、魚類およびFPOMに関係するものが高感度なパラメータとして抽出された。ここでは、FPOMに関するパラメータのうち微粒状有機物密度の分析結果を例示する。図-3(a)より堆積(BFPOM)は密度に対して正の相関、一方で、わずかながら浮遊有機物(FPOM)は負の相関が確認できる。

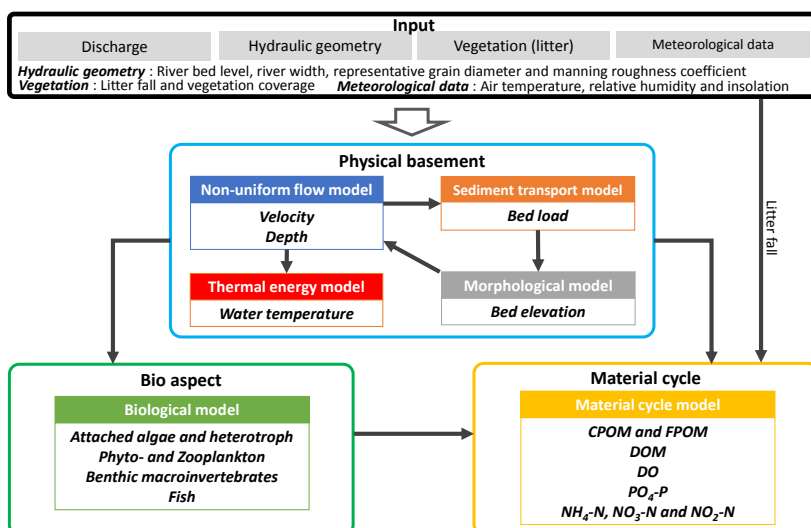


図-1 河川生態系解析モデルの概要

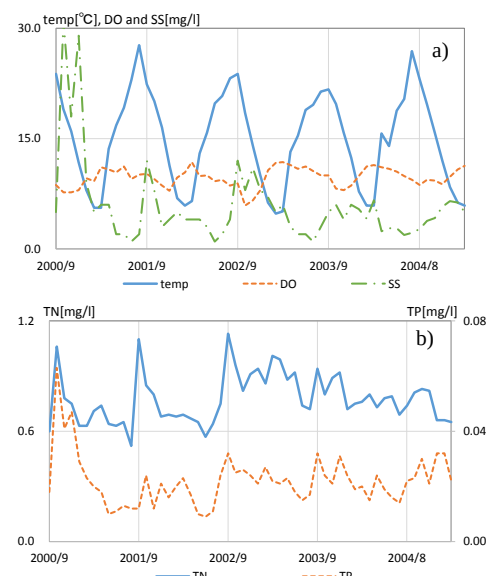


図-2 水温及び各水質の入力条件

また、微粒有機物密度は堆積有機物に対して高感度である一方で、付着藻類に対しては低感度である。図-3(b)に示す底生動物群集は、餌資源の感度の大小関係に対応しており、堆積物を摂食する堆積物食者や底生動物を捕食する捕食者は感度が高く、付着藻類を摂食する刈取食者や、水中有機物(FPOM)を摂食する濾過食者に対する感度は相対的に小さい。また図-3(c)から、主に底生動物を捕食する雑食性魚類が藻類を捕食する藻食性魚類よりも高感度であることがわかる。図-3(d), (e)に示す流下物質については、河道内のストック(図-3(a)から(c))と比して感度は低いが、堆積有機物の分解過程で生成されるDOCやNH₄-N、PO₄-P濃度が左右されることを確認した。

(3) 数値モデルの活用法: 図-4(a), (b)には本数値モデルの活用例として、雑食性および藻食性魚類の摂食餌資源

源の時系列データを示す。魚類の餌資源に関しては、胃内容物や安定同位体比による分析がなされているが、本数値モデルの有用性が担保されれば、これら現地調査に基づくデータを補完しうる解析結果を提供できると推察され、河川生態系の理解の深度化に貢献できると考えられる。

謝辞: 本研究は特別研究員奨励費(15J10717)の助成を受けて実施された。ここに記して御礼申し上げる。

参考文献: [1]戸田ら: 土木学会論文集G(環境) 69, II_127-II_138 (2013). [2]溝口ら: 土木学会論文集G(環境) 71, II_171-II_181 (2015). [3]溝口・戸田: 土木学会論文集B1(水工学) 72, I_1009-I_1014 (2016). [4]Vannote & Minshall: Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37(1) VN, 130-137 (1980). [5]国土交通省ダム諸量データベース(阿木川ダム観測データ, <http://dam5.nilim.go.jp/dam/>)

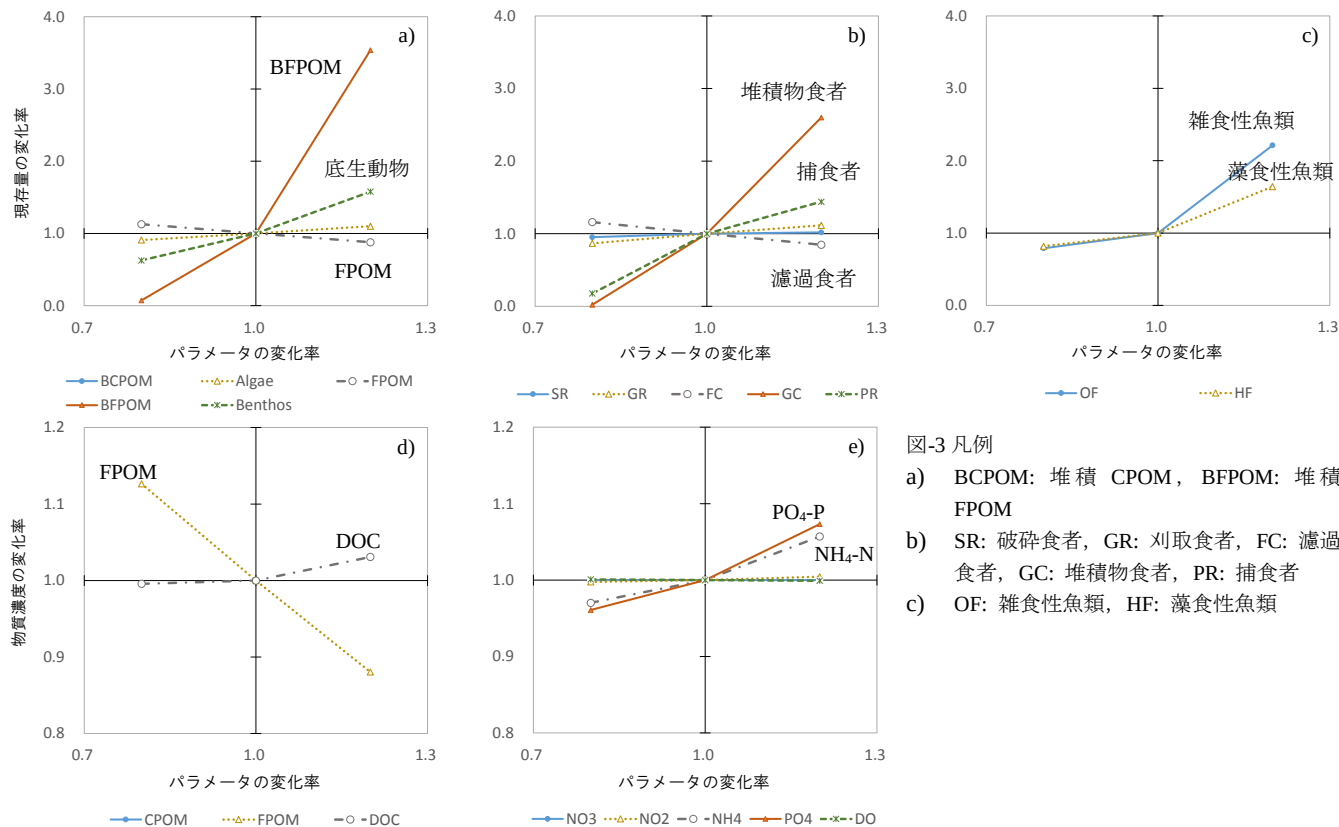
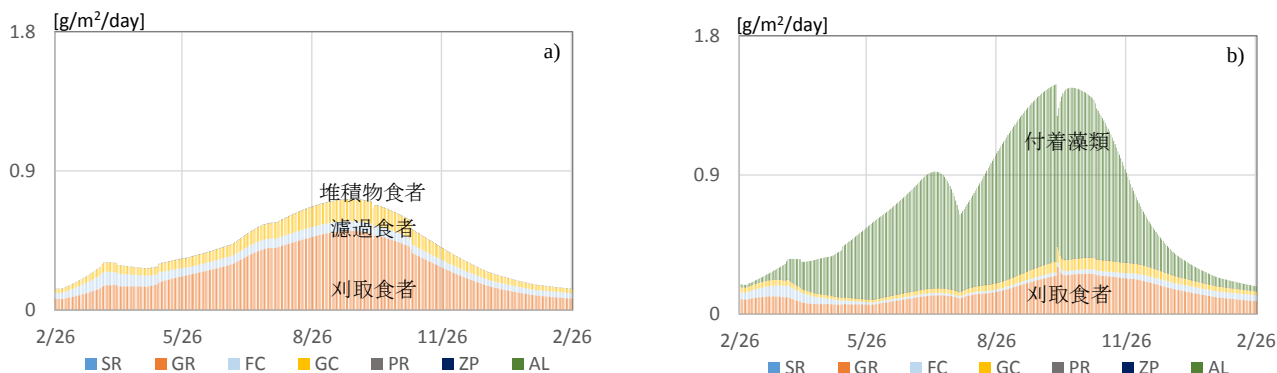


図-3 パラメータ感度分析の例(懸濁態物質密度) a)底生動物の餌資源, b)底生動物, c)魚類, d)粒状態・溶存態有機物および e)窒素三態・リン酸態リン・溶存酸素濃度の応答特性



1. はじめに

河道部の流動・水質解析においては、物理過程や生物化学過程を考慮した数値モデルが用いられることが多い。しかしながら、感潮域や分合流部付近のように流動が複雑な水域においては、流動水質モデルによる水理水質現象の再現・予測は困難であることが多い。本研究では、河川感潮域における水質変動予測の手法として、ニューラルネットワーク（以下 NN と表記する）と、NN を高度化した新たな手法である深層学習を用いた解析を行い、その予測精度と適用性について検討した。さらに、積層オートエンコーダを用いた非線形主成分分析を行い、水質変動要因の抽出を試みた。

2. 対象領域

本研究では、大阪市内を流れる東横堀川の上流水門外側の溶存酸素濃度 DO を予測対象とした。予測地点の周辺図を図-1 に示す。予測地点は感潮域に位置し、潮汐による水位変動や塩水遡上の影響を受けている。また、上流からは大川と寝屋川から 2 種類の河川水が流下している。大川の水質は比較的清浄であるのに対し、寝屋川の水質は汚濁しているため、その混合割合によって予測地点の水質は大きく変動する。

東横堀川の上流端は普段は水門で閉ざされており、潮汐周期にあわせて開閉することで清浄な大川河川水を導水し、水質の保全が図られている。しかし、水門操作は水門外の水位のみに基づいて行われており、寝屋川の汚濁水を導水しているケースが確認されている。水門操作の改善には、導水される上流水門外の河川水の水質を精度良く予測することが重要であるが、予測地点周辺では潮汐や水質の異なる水塊の混合により複雑な流動・水質構造が形成されている。

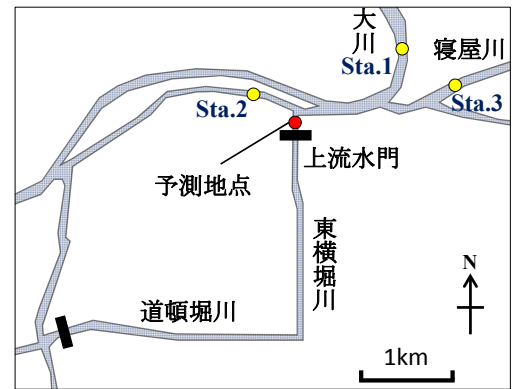


図-1 対象領域

3. 方法

NN は神経回路網を模した回帰モデルであるが、深層学習は NN を多層化することでより複雑な回帰式を構築する手法である。本研究では、NN モデルとして①階層型 3 層 NN と②階層型 7 層 NN を、深層学習モデルとして③オートエンコーダによる事前学習を施した階層型 7 層 NN と④中間層に LSTM ユニットを適用した再帰型 3 層 NN を用いた。③は事前学習により多層 NN の学習を可能にしたものである。また、④の LSTM ユニットとは内部に記憶機構を持たせたものであり、中間層に再帰構造を構築することで時間方向に多層化している。

各モデルの中間ユニット数を表-1 に示す。全てのモデルにおいて、平均二乗誤差 RMSE を学習における損失関数とした。階層型 NN では Adam を用いた確率勾配降下法で学習を行い、再帰型 NN では 48 時刻毎に Adam による誤差逆伝播を行った。出力層以外のユニットの活性化関数には ReLU 関数、出力層には恒等関数を採用した。

解析に使用するデータを得るために、図-1 に示す予測地点と Sta.1～3 において自記式水質計による 10 分間

表-1 モデルの中間ユニット数

モデル	中間ユニット数				
①階層型 3 層	10				
②階層型 7 層	34	34	34	34	10
③階層型 7 層 (事前学習)	34	34	34	34	10
④再帰型 3 層 (LSTM)	50				

間隔の連続計測を行った。ここでは 2015/8/17～10/30 に得られたデータを解析に使用し、9/15～9/30 のデータを NN のテストデータとして予測精度の評価に用い、残りをトレーニングデータとした。

NN への入力データには、予測時刻を現在としたときの 2 時間前の大川導水量、現在の大阪港潮位、直前の干潮位、直前の干潮からの経過時間、日累積降雨量（1，2，3 日前）の 7 データ、さらに Sta.1～3 における DO，電気伝導度 EC，水温（それぞれ 1，2，3 時間前）の 27 データの計 34 データを用いた。

4. 結果と考察

(1) 全ての入力データを用いた予測

表-2 に各モデルによる予測値と観測値の誤差 RMSE と相関係数を示す。最も予測精度が高かったモデルは、③事前学習を行った階層型 7 層 NN であった。図-2 にその予測値と観測値の時系列比較を示す。DO に関しては通常の NN モデルに比して深層学習モデルの RMSE が低い値を示し、深層学習の適用により精度が向上することが示された。

(2) 入力データに大川導水量，気象，潮位データのみを用いた予測

Sta.1～3 における水質のモニタリングデータが得られない場合を想定し、大川導水量，日累積降雨量，潮位等の 7 データのみを入力データとして、①階層型 3 層 NN による予測を行った。図-3 に予測結果を示す。RMSE は 14.2%，相関係数は 0.69 となり、(1) の場合と比べて変動ピークの再現性が低下しているものの、観測値の変動をある程度追従できている。

(3) 積層オートエンコーダによる主成分の抽出

モデル③において積層エンコーダの適用により構築した NN の中間層より、入力データと高い相関を示す特徴量を主成分として抽出した。

一例として、特に高い相関を示した特徴量と入力データの組み合わせを表-3 に示す。第 1 主成分は Sta.1 の EC との間に特に高い相関を示し、Sta.1 における EC の変動が雨水の流入による希釈効果を反映しているものと考え、第 1 主成分は流域の降雨状況に関係していると推察される。また、第 2 主成分は Sta.1～Sta.3 における水温との相関がいずれも高く、DO 変動が河川水温の影響を強く受けていることが示唆された。

5. おわりに

本研究では NN と深層学習を用いて河川感潮域の DO の予測を行った。その結果、NN モデル、深層学習モデルはともに DO の変動を良好に予測し、手法の有用性が示された。また、NN モデルに比べて深層学習モデルの RMSE は低く、予測精度が向上することが示された。

謝辞 調査にあたり、大阪市建設局の方々には多大なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

表-2 予測精度

モデル	DO (%)	
	RMSE	相関係数
①階層型 3 層	11.3	0.82
②階層型 7 層	11.8	0.78
③階層型 7 層 (事前学習)	10.5	0.83
④再帰型 3 層 (LSTM)	11.0	0.82

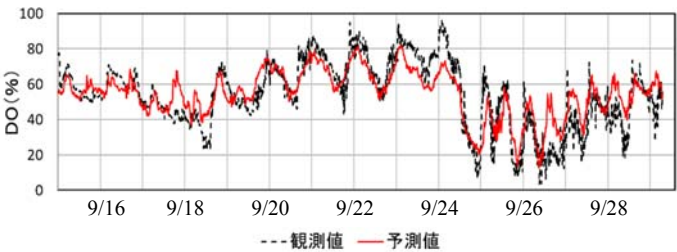


図-2 モデル③による予測値と観測値の時系列比較

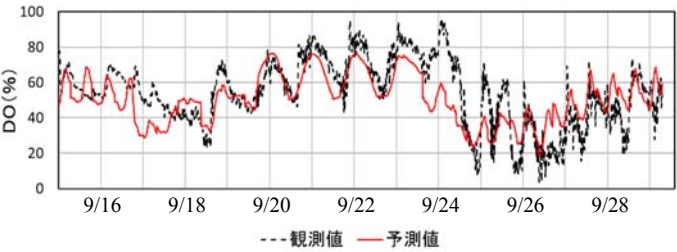


図-3 Sta. 1～3 の水質データを使用しない場合の結果

表-3 抽出された主成分と相関の高い入力データ

第 1 主成分		第 2 主成分	
EC(Sta.1)	R=0.80	水温(Sta.3)	R=0.82
DO(Sta.1)	R=0.62	水温(Sta.2)	R=0.82
DO(Sta.2)	R=0.55	水温(Sta.1)	R=0.81

季節変動調整法による瀬戸内海東部海域データの時空間解析

大阪大学大学院工学研究科 岡田輝久

大阪大学大学院工学研究科 入江政安

1. はじめに

沿岸海域の水質は、河川流入・気象擾乱などの非定常な影響を強く受け、時間的変動や空間勾配が大きく、特性の把握が難しい。水質変動特性の時空間的な情報は、データ同化などの数値モデル解析の事前情報としても有用な情報となる。

水質の変動特性を解析するため、実海域で測定されたデータを評価する場合、欠損や測定方法・時刻の違いなどを考慮する必要がある。季節変動調整法（北川，2005）は、時系列データを統計的にトレンド成分や周期的な季節変動成分、および残差成分などに分解することで、データの特徴を抽出できる手法である。そこで、本研究では、瀬戸内海東部で定期的に測定された化学的酸素要求量 COD および溶存酸素量 DO データに対して、季節変動調整法を適用し、対象領域における時空間的特徴を抽出する。

2. 状態空間接近による季節変動調整法

柏木（1997）は、過去に東京湾水質測定データに対して季節変動調整法を適用している。以下に仮定されたモデルを示す。

$$y_k = t_k + s_k + u_k, \quad u_k \sim N(0, \sigma^2), \quad k = 1, \dots, n$$

$$t_k - 2t_{k-1} + t_{k-2} \sim N\left(0, \frac{\sigma^2}{\alpha}\right), \quad k = 3, \dots, n$$

$$s_k - s_{k-12} \sim N\left(0, \frac{\sigma^2}{\beta}\right), \quad k = 13, \dots, n$$

$$\sum_{l=0}^{11} s_{k-l} \sim N\left(0, \frac{\sigma^2}{\beta}\right), \quad k = 12, \dots, n$$

ここで、 y_k 、 t_k 、 s_k および u_k は、ある測定点における第 k 月の観測、トレンド、季節変動および残差成分を表し、 $\sim N(0, \sigma^2)$ は平均 0、標準偏差 σ の正

規分布に従うことを示す。 n はデータ数である。

各成分の分散を既知とすれば、上式の最小 2 乗値を最小化する t_k および s_k を推定すれば良い。そこで上式を状態変数 $\mathbf{x}_k = (t_k, t_{k-1}, s_k, \dots, s_{k-10})'$ とする線形ガウスの状態空間モデルで記述し、 $\mathbf{x}_k$ をカルマンスムーザによる逐次式によって更新する。その都度、パラメータ α 、 β におけるベイズ型対数尤度を計算し、最尤推定によって α 、 β を決定する。

3. 公共用水域データ

用いるデータは、国立環境研究所よりダウンロードした公共用水域調査結果の瀬戸内海東部海域の測点のうち、解析に十分な期間かつ各月で観測されている 286 地点の COD と DO のデータである。各測点における 1981 年 4 月から 2009 年 3 月までの最大 29 年 $\times$ 12 ヶ月 = 348 個のデータを用いた。明らかな外れ値は削除している。表層は水面下 0.5～1.0 m、底層は海底面上 1.0 m である。

各測点ごとの時系列データよりトレンド、季節変動、残差成分を推定した後、点在する推定値を水平方向に逆距離補間法で補間した。

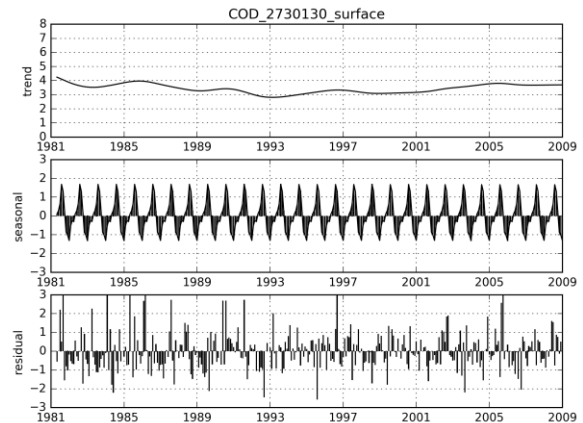


図 1 測点 A における表層 COD (mg/l) のトレンド・季節変動・残差成分

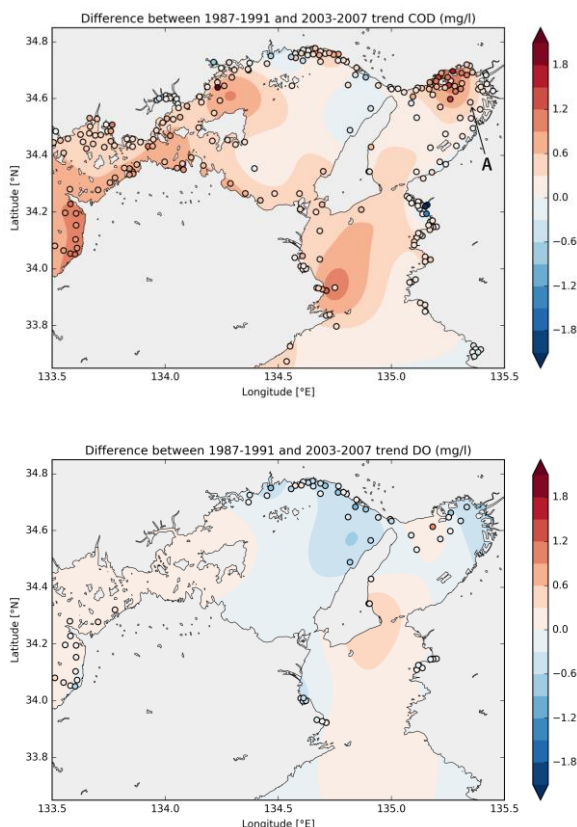


図2 1987-1991年度から見た2003-2007年度のトレンド平均値（上図：表層COD，下図：底層DO）

4. 結果と考察

図1に測点A（図2）における表層CODのトレンド・季節変動・残差成分の推定結果を示す。測点Aにおける表層CODには、明瞭な季節変動が存在するが、残差成分のばらつきも大きいことから、不規則なイベントが強く影響を及ぼすことがわかる。また、トレンドが数年ごとに上下していることから、他周期の成分の存在が示唆されるが、本研究では3成分で解析を進める。

1990年頃を基準とした近年までの長期的変化を見るため、図2に1987～1991年度の5年分のトレンド平均値を2003～2007年度のトレンド平均値から差し引いた値を示す。表層CODでは、主要河川の河口付近で減少している測点もあるが、ほとんどの測点で増加している。また、底層DOでは、播磨灘兵庫県沿岸や大阪湾奥部で僅かに減

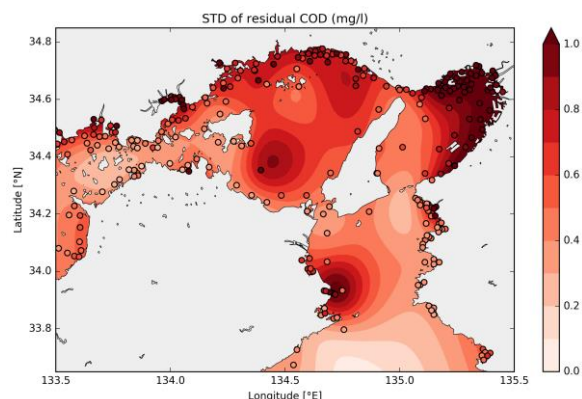


図3 表層CODの残差成分の標準偏差

少している。ただし、採用できる測点が67点と少ないため、全域での把握は難しい。

最後に、図3に表層COD残差成分の標準偏差を示す。各地の主要河川の河口周辺で高くなっていることから、表層CODは河川からの流入水の影響を受けやすいことが分かる。また、大阪湾東部で最も高くなっていることから、停滞性の強さや気象擾乱等への強い応答性が示唆される。

5. まとめと今後の課題

本研究では、公共用水域調査結果のCODおよびDOデータに対して季節変動調整法を適用し、瀬戸内海東部における時空間的特徴を抽出した。

同調査結果のTN、TPに対しても、同様のモデル化による季節変動調整法を適用したところ、ほとんどのデータで各成分に上手く分解することができなかった。TN、TPはデータ数の制限に加え、負荷削減等による変動特性自体の変化が考えられ、AR成分や時変分散などのモデル化が必要であると考えている。

謝辞 本研究はJSPS特別研究員奨励費の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 北川源四郎, 時系列解析入門, 岩波書店, p.265, 2005.
- 2) 柏木宣久, 状態空間接近による季節変動調整に関する一考察, 統計数理, 第45巻, 第2号, pp. 329-342, 1997.

河川汽水域に生息する甲殻類浮遊幼生の回帰戦略の解明

九州大学 田井明・綿貫香貫花（現，福岡市），福岡大学 伊豫岡宏樹，鹿児島大学 齋田倫範

1. 目的

河川域・海域双方の影響を受ける汽水域では、複雑な環境に応じた生態系が維持されているが、その維持機構には未解明な点が多い。本研究では、宮崎県五ヶ瀬川水系北川感潮域を対象に汽水域の中で重要な生態的地位を占めるカニ類の生息環境と浮遊幼生の挙動を把握し、その個体数維持機構の解明を試みた。特に、出水期を対象に現地観測と数値シミュレーションを行うことで、幼生分布を明らかにし、出水といったイベントが分布状況に与える影響について検討を行った。

2. 内容

2.1 現地調査

現地調査は2015年8月29日から2015年9月1日に図1に示す北川河道内から日向灘で実施した。8月25日から8月26日には台風により大きな出水が生じており、この観測期間中も降水のため北川を含む五ヶ瀬川水系は出水状態であった（図2）。まず、北川河道内の塩水侵入状況を調べるために、図1に示す河道内測点において、超音波ドップラ一流速計による流速観測と携帯型投げ込み式塩分水温計によるCTD観測を満潮時と干潮時に実施した。次に、プランクトン調査では、海域でのカニ類の幼生の分布を明らかにするために、8月30日に北川河口につながる日向灘に設けた8地点において、フローメーターを取り付けたプランクトンネットを投入し幼生を採取した。サンプル回収時には多項目水質計を用いて、表層の塩分分布を記録した。持ち帰ったサンプルは実体顕微鏡を用いてソーティングを行い、ゾエア幼生、メガロパ幼生を抽出・計数した。

図3(1)に満潮時の河道縦断面の塩分分布を示す。塩分躍層が生じており、楔状に海水が河道内に侵入している様子が分かる。2008年3月に伊豫岡（2013）

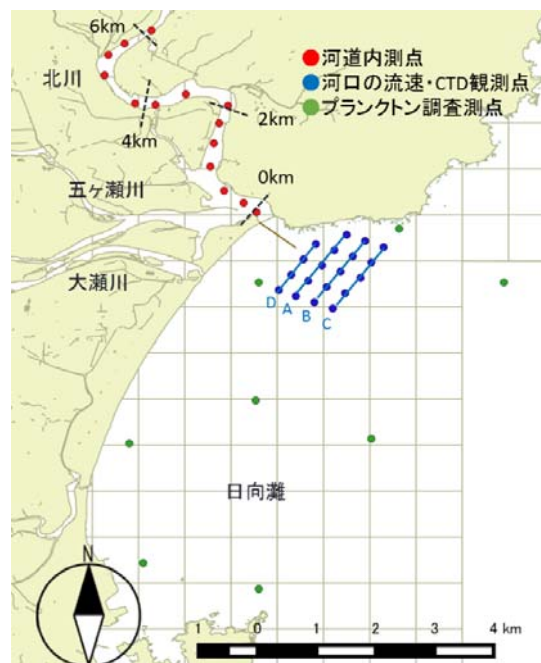


図1 対象領域

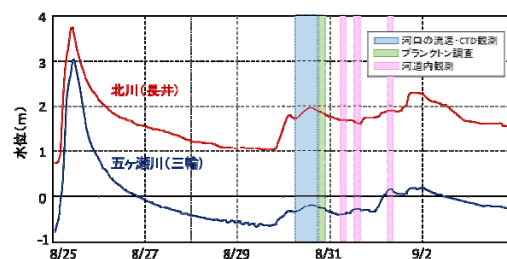
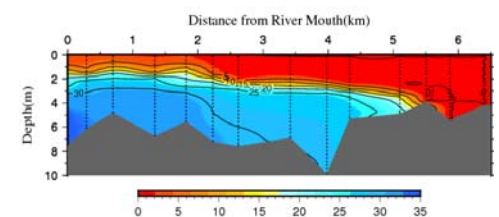
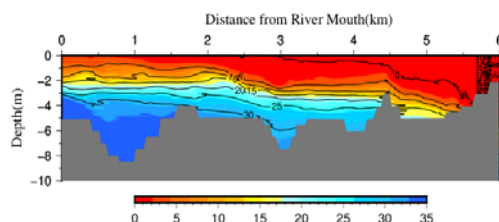


図2 対象期間における北川、五ヶ瀬川の水位



(1) 現地観測



(2) 数値シミュレーション

図3 満潮時の北川河道内塩分分布

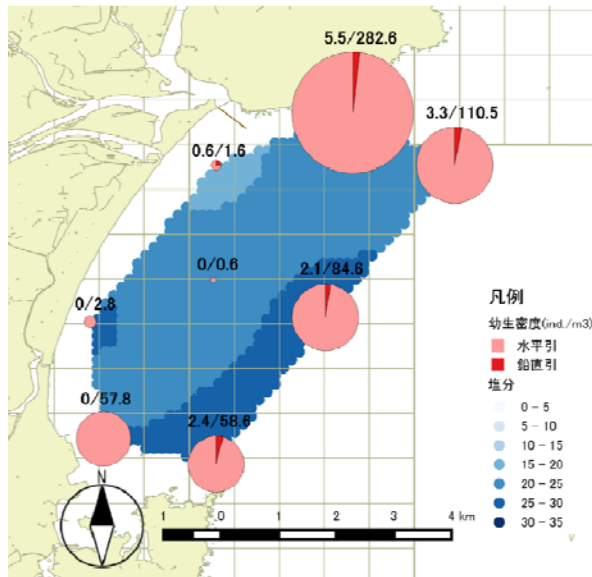


図4 幼生分布調査結果(鉛直/水平, ind./m³),
表層塩分分布

により実施された観測では緩混合に近い塩分分布になっていたのに対し、本観測時は弱混合状態に近い塩分分布であったと言える。これは、観測日の河川流量の違いによるものだと考えられる。次に、プランクトン調査で得られた幼生の採取密度を図4に示す。全体的に水平引きの採取密度が大きく、表層に多く分布していることが分かった。また、河口から近くても、北部に比べ南部に位置する点では採取数が少なく、河口に存在する導流堤が浮遊幼生の分布に大きく影響していると考えられる。

2.2 数値シミュレーション

大きな出水後における北川感潮域の物理環境の再現と幼生分布への影響を明らかにするために、数値シミュレーションを行った。流動シミュレーションには Princeton Ocean Model を用い、それに塩分選好性を考慮可能な浮遊幼生分散モデルを組み込んだ。計算対象領域は、図5に示したような北川と五ヶ瀬川および日向灘である。観測期間を含む2015年8月25日から2015年9月3日の10日間を対象期間とし、その期間の流量は図2に示す水位の暫定値からH-Q曲線を用いて推定した。浮遊幼生の塩分選好性は、既往の室内実験により得られた知見をパラメータとして与え、その再現を試みた。

図3(2)に計算結果による塩分の縦断分布を示

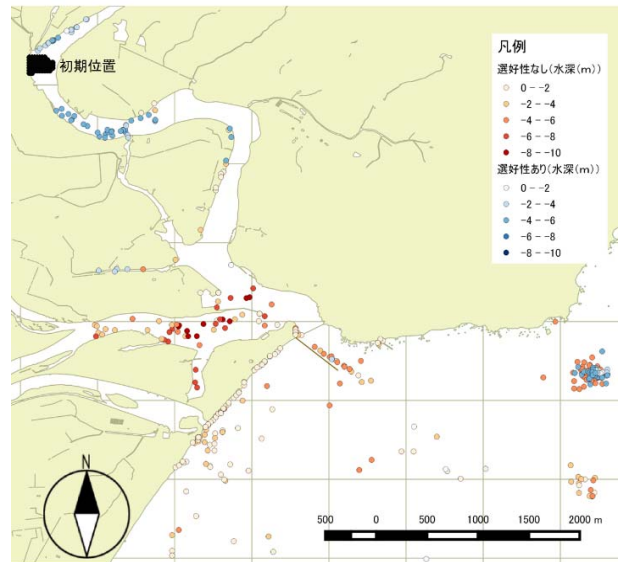


図5 数値計算による幼生分布(8月30日)
(暖色系: 選好性なし, 寒色系: 選好性あり)

す。図3(1)と比較すると、塩水楔の侵入等、観測時の弱混合状態を良好に再現しているといえる。図5ではプランクトン調査日(8月30日)における塩分選好性を考慮する場合、しない場合の浮遊幼生分布を示す。選好性を考慮した場合は河道内上流部にとどまろうとするのに対し、考慮しない場合では海域に拡散しているのが分かる。また、いずれの場合でも北部で幼生が多く分布し、図4の調査結果とも一致する。これは導流堤が幼生の拡散に影響したからだと考えられる。

3. 結論

本研究では、甲殻類浮遊幼生の挙動を把握し、その個体数維持機構を解明することを目的に、北川感潮域を対象に現地調査と数値シミュレーションを行った。出水時の北川では混合形態は弱混合型であり、これは数値計算でも同様の結果を得ることができた。浮遊幼生は、出水によって流量が増大した場合でも、その塩分選好性により親カニと同じ生息域への残存・回帰が可能なことが示された。また、観測結果、数値計算結果共に河口の北部に多く分布しているが、これは導流堤によって河川水が北部へ拡がっているためと考えられる。本研究は、前田記念工学振興財団研究助成ならびに九州大学工学研究院若手研究者育成研究助成の援助を受けて実施した。ここに記して深甚なる謝意を表す。

伊勢湾における堆積物酸素消費ポテンシャルの推定

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 井上徹教

1. はじめに

伊勢湾・三河湾は流入河川による陸域負荷の影響を強く受けており、底層の貧酸素化を左右する底質については経年的に悪化傾向であると考えられる。しかし、堆積物による酸素消費は定期的な調査ではほとんど測定されて事例がない。そのため、過去の底層酸素消費を定量的に説明するデータがなく、経年的な貧酸素水塊の範囲拡大に対して、底質の悪化がどの程度寄与しているのかを示すことができない。本研究では堆積物による酸素消費ポテンシャルと一般的な底質分析項目との比較を行い、定量的に推定する手法について検討した。

2. 内容

(1) 堆積物採取・分析

堆積物の採取はアクリルパイプを用いた柱状採泥により、2006年9月および11月にそれぞれ伊勢湾20点、三河湾8点で行った(図-1参照)。得られた堆積物は表層0~5cmを混合し、以下の分析に供した。

分析は酸揮発性硫化物(AVS)、強熱減量(IL)など常用される29項目に加え、酸素消費ポテンシャルを示す指標として、堆積物の生物化学的酸素要求量(以下S-BODとする)を測定した。これは既知量のろ過海水に任意量の堆積物を懸濁させ、そこでの酸素濃度の低下速度から求めるものである(細井ら、1992)。

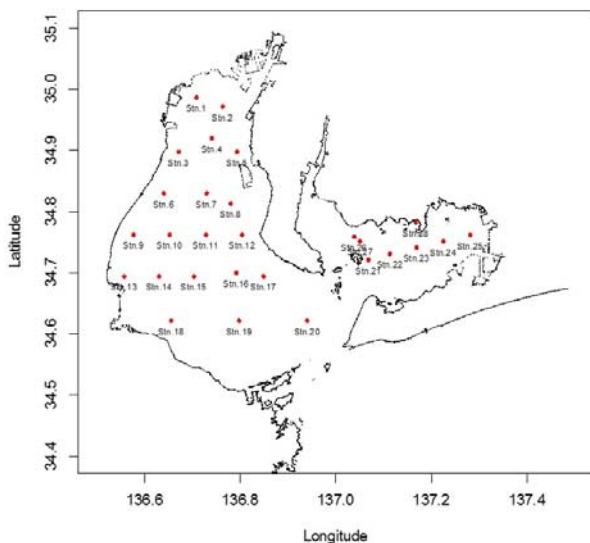


図-1 堆積物採取地点

(2) S-BODの推定

S-BODを目的変数、他の底質分析項目を説明変数として重回帰分析を行った。その結果、AVSとILを説明変数として採用した下記の回帰式が得られた。

$$S-BOD = 4.57AVS + 0.63IL + 0.05 \quad (1)$$

ここで、AVSは mg g-dry^{-1} 、ILは%の単位系での数値とする。

(3) S-BODの変遷

上述のS-BODの推定式は過去の観測データにも適用できるものと仮定し、1970年代以降の底質データを元に過去の伊勢湾・三河湾における酸素消費ポテンシャルを推定した。過去の底質調査データについては、「伊勢湾・三河湾水底質調査報告」(三重県・愛知県、1972)等から情報を得た。観測は不定期に行われており、時間方向について粗なデータセットであったため、約10年毎に代表的な値を抽出し、それぞれ1970年代、1980年代、1990年代、2000年代の代表値として取り扱った。

次に、各観測地点のAVS、ILの値から式(1)を用いてそれぞれの地点でのS-BODを推定し、それを水平方向に補完してS-BODの水平分布を求めた(図-2)。木曽三川が流入する伊勢湾奥(名古屋市周辺)と伊勢湾西部の津市及び三河湾北部の西尾市周辺では1970年代に既に高いS-BODを示している。1980年代~1990年代には沿岸部の高S-BOD領域が拡大すると共に水深の大きな伊勢湾中央においてもS-BODが上昇している。

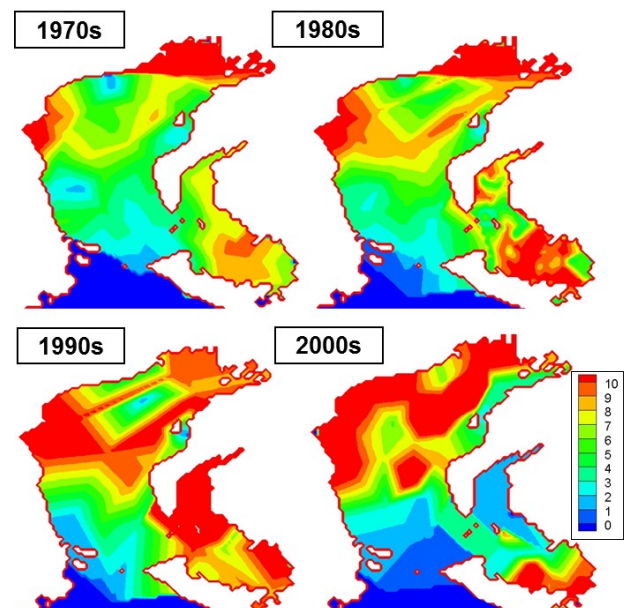


図-2 S-BOD推定結果

カラーバーの単位は $\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$

3. 考察

(1) 酸素消費要因

水域を代表する5地点について、式(1)においてAVS、*IL*に関わるそれぞれの項の寄与についての変遷を示す（各地点の位置は図-1の通り）。なお本稿ではAVSを還元性物質を代表する指標、*IL*を有機物分解を代表する指標としてとらえた。

図-3をみると伊勢湾奥にあるStn.2では*S-BOD*は減少傾向にある一方、伊勢湾中央のStn.11と三重県沿岸のStn.13では増加傾向にある。各項の寄与を見るとStn.11では*IL*（有機物分解）に起因する増加であるのに対し、Stn.13ではAVS（還元性物質）に起因する*S-BOD*の増加が顕著である。三河湾では豊川が流入する湾奥水域では漸増傾向にある一方、湾央で減少傾向にある。この*S-BOD*の減少は、中山水道航路の浚渫で発生する良質な砂を利用した覆砂（シーブルー事業）により堆積物表層のAVSおよび*IL*の値が下がったためだと考えられる。

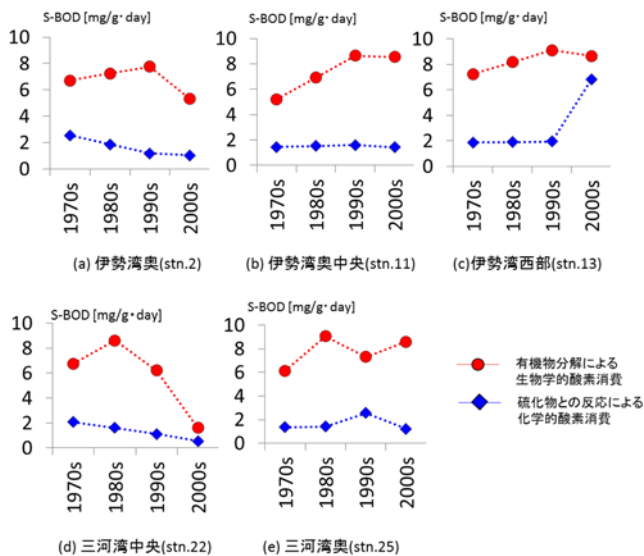


図-3 AVS（凡例：青）、*IL*（凡例：赤）の
S-BOD への寄与と変遷

(2) 底層酸素濃度への影響

上述のような底質の変遷に伴う底層水中の酸素濃度への影響を把握するため、水質シミュレーションにより評価を行った。本シミュレーションでは水中での酸素消費に係る項目については全て無視し、堆積物による酸素消費のみを計算対象とした。得られた底層酸素濃度の結果から、各年代間の差分をとった結果を図-4に示す。これを見ると、堆積物の酸素消費に起因する底層酸素濃度の低下は、概ね時間の経過とともに拡大している傾向が見て取れる。特に1980年代から2000年代にかけての伊勢湾奥部での底層酸素濃度の低下が顕著であり、伊勢湾全体で貧酸素化リスクが高まっていることが示唆される。一方三河湾においては、1990年代から2000年代にかけてわずかではあるが貧酸素化が抑制される傾向が見て取れる。これは前述のように覆砂による表層底質の改善が寄与したものと考えられる。

4. 結論

本研究では、内湾底層の貧酸素・無酸素化に重要な影響を与える堆積物による酸素消費速度について、常用される底質分析項目から推定することを試みた。また、既存の底質データと数値シミュレーションを併用することにより、伊勢湾・三河湾における堆積物の酸素消費ポテンシャルおよびそれが底層酸素濃度に与える影響について、それらの変遷とともに検討した。経年的には底層貧酸素化リスクは上昇する傾向にあるが、覆砂等の事業を継続的に行うことにより底層環境の改善の可能性が示された。

本研究のデータ解析においては東京工業大学、安藤氏（現東京都）の協力を得た。また、底質データについては国土交通省中部地方整備局より提供を受けた。ここに記して謝意を示す。

参 考 文 献

- 細井由彦, 村上仁士, 上月康則 (1992) 底泥による酸素消費に関する研究. 土木学会論文集 456/II(21): 83-92.
三重県, 愛知県 (1972) 伊勢湾・三河湾水底質調査報告. 421-435.

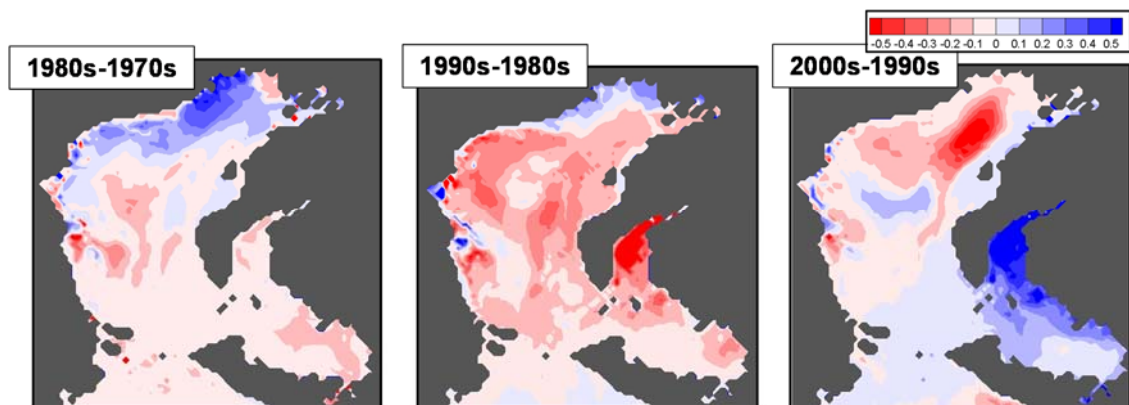


図-4 底層酸素濃度の各年代間の差分

2016 年 5 月 20 日 (金)
適応 WG 主査 矢野(九州大学)

H28 年度環境水理部会研究集会 第 3 セッション「地球温暖化適応」趣旨

昨年度、環境水理部会の新しい WG として『温暖化適応の環境水理学的視点からの探求 WG』を立ち上げた。本 WG の設置目的は以下の通りである。

IPCC の第 5 次報告書に示されたとおり、地球温暖化の進行が確実になっている。そのような状況で、適応策の検討が強く求められるようになった。我が国においては、災害への対応が最も関心と呼んでいるが、環境変化に対する適応策の検討も必要になると考えられる。特に流域圏の水環境に関連する適応策の検討や、適応策（緩和策も含む）を適用した場合の水環境への影響評価など課題は数多く存在するものと考えられる。これらの課題抽出を行い、今後の水環境への適応策研究の方向性を議論する場を設けること、ならびに、ファンドの獲得による研究プロジェクト立ち上げなど研究環境を整備する方向も視野に入れた活動を行うことを目的とした。

今後の活動計画は、メンバーの研究報告やアイデアの紹介などを行う勉強会的なものを進めながら情報共有を進め、ワークショップ的な会合を入れながらシンポジウムを開催（水工学委員会に設置された『グローバル気候変動適応研究推進小委員会』と連携することを模索中）できればと考えている。

本セッションでは、WG メンバー（メンバーの共同研究グループも含む）からの研究事例紹介を 4 件（湯浅・矢島・田代・傳田）、ならびに WG 外から 2 件の研究紹介を頂く。内容を見て分かる通り、適応策と直接関連する発表は 2 件となっている。このことが、（水）環境面の適応策研究の難しさを物語っていると考えられる。すなわち、環境面の適応策として技術的側面やコスト面から可能なものが現段階で多くはないということが示されている。WG においても、この部分のブレイクスルーの必要が議論されており、そのヒントを探ることも目的の一つとして、今回の特別セッションを設けた次第である。

この適応 WG は極力オープンに実施したいと考えている。本研究集会翌日(5 月 21 日)には、同じ会場で 9 時から 12 時まで WG が開催されます。参加は自由であるので、適応策研究に興味のある方は奮って参加頂き、そのあるべき方向性を議論頂きたい。

気候変動が全国の河川水温に及ぼす影響

パシフィックコンサルタンツグループ株式会社
グループ経営企画部 湯浅 岳史

1. はじめに

気温上昇等の気候変動の影響は、水温の上昇、水質・水域生態系をはじめとする水環境への影響を引き起こすと考えられる。しかしこれまで、特定の河川を除いて、日本全国の水温変化傾向を分析した事例はみられない。そこで本研究は、1970年頃から継続的に測定されている全国の公共用水域水質観測における水温データを用いて、全国の河川における冬季及び夏季の水温の変化状況を調べたものである。

2. 分析方法

(1) 気温変化状況の分析

水温の分析に先立ち、気候変動等による気温上昇の状況について分析した。全国のアメダス 157 地点の気温測定値¹⁾を用いて、1981～2007 年（水温分析期間と同期間）の年平均気温、夏季（6～8 月）および冬季（12～2 月）平均気温を算出した。さらに、水温と同様、年次と気温で直線回帰式の傾き（1 年あたりの平均的な気温変化）に 30 年を乗じて、30 年間の気温変化を算出した。なおこの回帰式の傾きの算出にあたり、1～2 年のデータ欠測が見られる地点があったが、この場合は、前後年値から内挿補間して相関式を求めた。

(2) 水温変化状況の分析

水温変化の分析は、以下の方法によった。分析に用いた水温データは、公共用水域水質観測の水温データで、国立環境研究所が環境数値データベースとして公開している検体値データ²⁾をダウンロードして使用した。分析対象年次は、1981年～2007年の36年間である。分析対象とした地点は、全国の河川の公共用水域水質観測地点のうち、1981年以降の経年的な水温データが得られる地点とした。2007年度の水質観測地点は河川で6,053地点あり、うち経年的な水温データが得られる分析対象地点は3,121地点であった（以下、「分析対象地点」とする）。なお、年間を通じた欠測が1～2年程度の場合は許容して分析対象としたが、これ以上の欠測がある場合は分析対象から除外した。

水温変化の分析は、夏季（6～8月）および冬季（12～2月）の平均水温とした。年平均値ではなく夏季平均、冬季平均を用いる理由は、気候変動による気温（および水温）の変化は、平均気温上昇および気温変動増加（極端に暑い・寒い現象が増える）からなり、これにより暑い天候が増える³⁾とされること、夏季や冬季は四季の中でも温度極値をとる時期であり、気候変動による影響が出やすいと考えられることによる。なお、夏季または冬季のみの欠測がある場合は、欠測期のみ分析対象外とした。

水温上昇の判定は、以下の 3 条件を全て満たす場合のみとした。これら条件とは逆の条件を満たす地

点を、水温低下地点として判定した。

- (a) 1980 年代と 2000 年代で夏季または冬季平均値に有意な水準差がある（マン・ホイットニーの U 検定、有意確率 0.05 未満）。
- (b) 年次と水温の回帰直線の傾きが正である。
- (c) 年代別平均値が 1980 年代<1990 年代<2000 年代の順になっている

全ての分析対象地点について、水温上昇・低下の判定とともに、水温変化を「30 年間の水温変化（℃）」として算出した。これは、年次と水温の回帰直線の傾き（一年あたりの平均的な水温変化）に 30 年を乗じて算出した。

3. 分析結果および考察

(1) 気温変化状況の分析結果

全国のアメダス 157 地点について、1981～2007 年の気温変化傾向を調べたところ、全ての地点で年平均、夏季（6～8 月）平均、冬季（12～2 月）平均気温とも上昇傾向が確認された。30 年間の気温上昇は、年平均気温で 0.5～2.5℃程度であった。

(2) 水温変化状況の分析結果

水温変化状況分析の結果を表 1 に示す。分析対象地点 3,121 地点のうち、997 地点（分析対象地点の 31.9%）で冬季または夏季に水温の上昇が認められることが、109 地点（3.5%）で冬季または夏季に水温の低下が認められることがわかった。概して、水温低下よりも水温上昇の方が見られることが明らかになった。

表 1 水温変化地点分析結果

分類	地方	水温変化地点数					水温変化地点の割合 (%)				
		夏季 変化	冬季 変化	夏冬 いずれか 変化	夏冬 とも 変化	全 地点	夏季 変化	冬季 変化	夏冬 いずれか 変化	夏冬 とも 変化	
水温 上昇 地点	北海道	8	5	13	0	110	7.3	4.5	11.8	0.0	
	東北	4	35	36	3	377	1.1	9.3	9.5	0.8	
	関東	130	130	216	44	564	23.0	23.0	38.3	7.8	
	中部	134	110	209	35	579	23.1	19.0	36.1	6.0	
	近畿	119	78	164	33	456	26.1	17.1	36.0	7.2	
	中国	113	68	152	29	370	30.5	18.4	41.1	7.8	
	四国	28	31	56	3	162	17.3	19.1	34.6	1.9	
	九州	129	42	151	20	503	25.6	8.3	30.0	4.0	
	全国	665	499	997	167	3,121	21.3	16.0	31.9	5.4	
水温 低下 地点	北海道	10	7	12	1	110	9.1	6.4	10.9	0.9	
	東北	15	13	21	1	377	4.0	3.4	5.6	0.3	
	関東	8	2	20	1	564	1.4	0.4	3.5	0.2	
	中部	6	18	8	0	579	1.0	3.1	1.4	0.0	
	近畿	5	4	23	0	456	1.1	0.9	5.0	0.0	
	中国	0	0	4	0	370	0.0	0.0	1.1	0.0	
	四国	0	16	0	0	162	0.0	9.9	0.0	0.0	
	九州	5	63	21	0	503	1.0	12.5	4.2	0.0	
	全国	49	0	109	3	3,121	1.6	0.0	3.5	0.1	

水温上昇地点位置図を図 2 に示す。地方別に水温上昇地点の割合を見ると（図 1）、北海道・東北を除き 4 割弱の地点で水温上昇が確認されることがわかる。多くの地点で水温上昇が見られる河川・水系は、表 2 に整理する通りである。周辺部・集水域の

都市化など、人為影響が強いと考えられる河川（荒川・多摩川・淀川・大和川等）のみならず、人為影響が相対的に低いと考えられる河川でも水温上昇が確認されることがわかる。

(2) 夏季および冬季の水温変化傾向

夏季の30年間の水温変化を横軸に、冬季のそれを縦軸にプロットした（図3）。後述するとおり、気温の変化が0.5～2.5℃であるのに対して、水温の変化はより大きく、冬季・夏季とも0～5℃程度上昇する地点が多い。また、地点数は少ないものの、5℃を超えて変化している地点もある。なお、夏・冬とも水温上昇など、夏・冬の傾向が一致している地点が多い。

(3) 気温変化と水温変化との関連性

分析対象地点全3,121地点について、夏季・冬季の30年間の気温および水温変化の関係について整理した（図4）。各分析対象地点の水温変化に対して、最近隣のアメダス地点の気温変化を対応づけた。

夏季の気温・水温変化で見ると、気温変化が0.6～2.1℃程度であるのに対して、水温変化は-5～5℃程度と変化が大きい。気温変化と水温変化とに明確な相関関係は見られない。冬季の気温・水温変化でも、気温変化が1.0～2.6℃程度であるのに対して、水温変化は-5～10℃程度と変化が大きい。また、気温変化と水温変化は、夏季と比較すると、若干の相関性が見られるが、明瞭な相関関係とは言えない。

気温と水温に明確な相関性は見られないことから、水温変化は気温変化以外の影響、例えば人為影響などを受けていることが示唆される。

4. おわりに

本研究の結果、年平均・夏季平均・冬季平均気温とも全国のアメダス157地点において上昇傾向が確認された。一方水温は、全国の公共用水域水質観測地点のうち、997地点（全体の31.9%）において冬季または夏季に水温の上昇が、109地点（同3.5%）で冬季または夏季に水温の低下が認められることがわかった。しかしながら、気温変化と水温変化の関連性は認められなかった。今後は、地域/地点毎に詳細な分析を行い、水温変化要因を明確にする必要がある。また、気温上昇やこれに伴う河川環境への影響が不可避であれば、今後、その影響を予測した上で、適切な適応策を講じる必要がある。

参考文献

- 1) 気象庁：過去の気象データ検索
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 2) 国立環境研究所：環境数値データベース / 公共用水域水質 検体値データ
http://www.nies.go.jp/igreen/mk_down.html
- 3) 環境省 地球温暖化影響・適応研究委員会：気候変動の賢い適応 ―地球温暖化影響・適応研究委員会報告書、p60, 2005

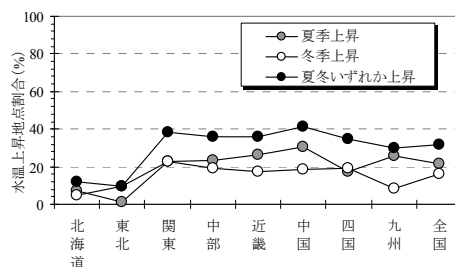


図1 水温上昇地点の割合

表2 水温上昇が見られる河川

地方	河川	地方	河川	地方	河川
東北	雄物川	中部	天竜川	中国	旭川
	最上川		矢作川		芦田川
	阿武隈川		木曾三川		太田川
関東	鬼怒川	近畿	淀川	四国	吉井川
	小貝川		大和川		四方十川
	利根川		九頭竜川		重信川
	多摩川	中国	由良川	九州	吉野川
	荒川		円山川		遠賀川
	鶴見川		天神川		筑後川
中部	相模川	中国	日野川	九州	琢磨川
	信濃川		千代川		川内川

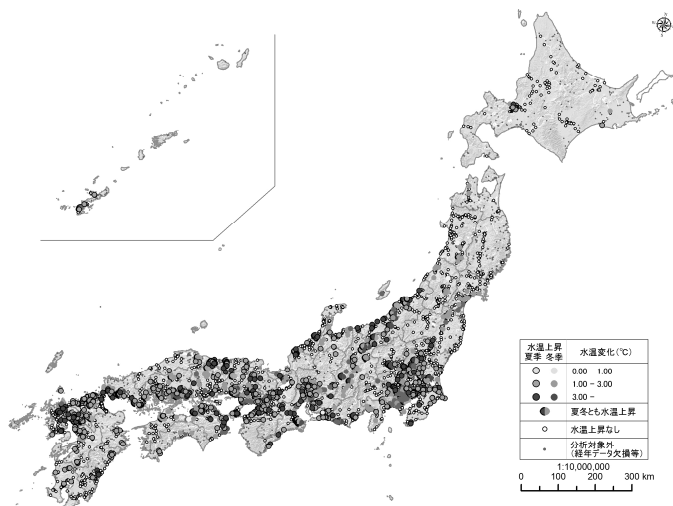


図2 水温上昇地点分析結果

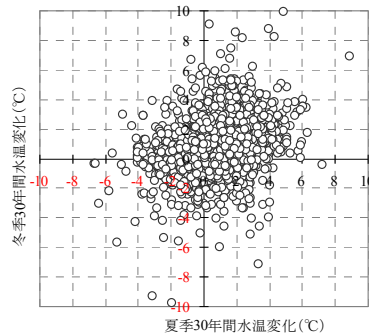


図3 夏季・冬季の水温変化の関係

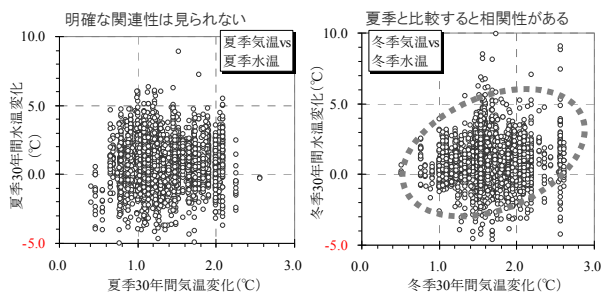


図4 気温変化と水温変化との関連性

気候変動がダム水質に及ぼす影響と適応策

株式会社建設技術研究所 ○金山 拓広、鶴田 泰士

1. はじめに

本検討は、気候変動がダム貯水池水質に与える影響について、後述する気候変動シナリオを踏まえた流出及び水質解析により定量的に評価し、標準的な適応策をとりまとめることを目的としたものである。対象とする水質変化現象は、図 1 に示す気候変動によりダム貯水池に生ずる可能性のある、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」に分類して整理した。

2. 気候変動シナリオ

2014 年 6 月 6 日に環境省が日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測に供することを目的に、RCP シナリオに基づいた地域気候モデル (MRI-NHRCM20 : 水平格子間隔 20km) の出力結果を公表しており、本検討では、同出力結果を用いたダム貯水池の水質変化試算を実施した。RCP シナリオは、政策的な温室効果ガスの緩和策を前提として、将来の温室効果ガス安定化レベルとそこに至るまでの経路のうち代表的なもの（代表的濃度経路）を選び作成したシナリオである。この RCP シナリオには放射強制力の変化に応じて、RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6 の 4 つのシナリオが存在し、本検討では表 1 に示す、4 つのシナリオの違いを見る観点と、最高位シナリオ(RCP8.5)の海面水温による違いを見る観点から 7 ケースを予測計算ケースとした。

3. ケーススタディダムの選定

ダム貯水池の基本的な水質現象である、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」の気候変動による変化を幅広く検討可能な「釜房ダム」、「耶馬溪ダム」、「寒河江ダム」、「早明浦ダム」をケーススタディダムとして選定した。

4. 気候変動による水質変化予測

4.1 予測方法

ケーススタディダムに対して、流域の流出・利水モデル（非定常分布型物理モデル）、ダム貯水池の水質モデル（鉛直二次元モデル）を構築し、これに気候変動予測モデルの出力結果を入力することで、気候変動によるダム貯水池の水質・水温への影響を試算した。なお、気候変動予測モデルの出力値（気温、降水量、日射量）を扱う上では、長期的な平均や分散等の統計的な観点から、観測値に近づけるバイアス補正を行った。

4.2 予測結果

気候変動後による現在気候からの水質変化として RCP8.5_C3 の将来予測結果を表 2 に整理した。また、水質変化現象毎の気候変動後における水質予測結果の概要を以下に示す。

(1) 藻類増殖

気候変動により、平均年降水量はやや増減するものの、気温上昇による蒸発散量も増大するため、平均年総流入量が顕著な増加を示すケースはほとんどない。そのため、流入負荷量が顕著に増加するケースもほとんどないと考えられ、全体的には、藻類増殖に顕著な変化は見られない。ただし、図 2 に示すように釜房ダム、耶馬溪ダムにおいては、気温上昇に伴う水温上昇により藻類増殖期が早期化・長期化する場合が見られる。

(2) 底層水質悪化

耶馬溪ダム、寒河江ダムにおいては、気候変動により、水温上昇に伴う水温成層の安定化および有機物分解のための酸素消費量が増加し、底層の貧酸素化の進行が見られる。

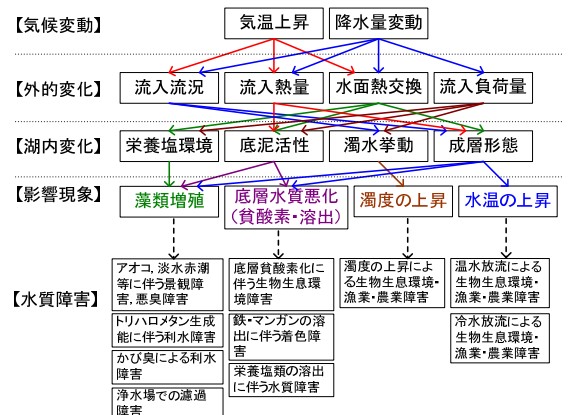


図 1 ダム貯水池の水質変化現象の関係概念図

表 1 予測計算ケース

期間	シナリオ	海面水温	情景対流スキーム	ケース名
現在気候	-	HadISST	YS	HPA_m02
将来気候	RCP8.5	SST1	YS	HFA_rcp85_C1
		SST2	YS	HFA_rcp85_C2
		SST3	YS	HFA_rcp85_C3
	RCP6.0	SST1	YS	HFA_rcp60_C1
	RCP4.5	SST1	YS	HFA_rcp45_C1
	RCP2.6	SST1	YS	HFA_rcp26_C1

RCP8.5: 高位参照シナリオ (2100年以降も放射強制力の上昇が続く)

RCP6.0: 高位安定化シナリオ (2100年以降に放射強制力が安定する)

RCP4.5: 中位安定化シナリオ (2100年までに放射強制力が安定する)

RCP2.6: 低位安定化シナリオ (2100年までにピークを迎えその後現象する)

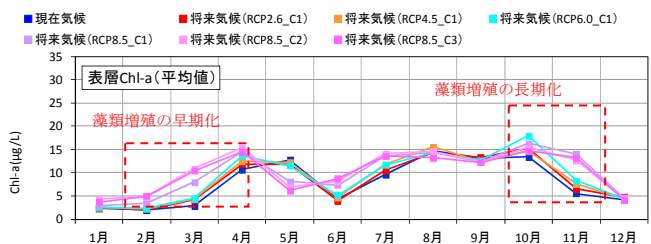


図 2 釜房ダムにおけるクロロフィル a の変化

(3) 濁度の上昇

寒河江ダムにおいては、気候変動により、発生頻度は低いですがダムへの流入量規模の増大やダムの流出土砂の特性から、濁度の上昇が見られる。

(4) 水温の上昇

気候変動により、気温上昇に伴って貯水池内水温およびダム流入水温が上昇しており、ダムの流入水温変動幅に対する温水放流日数の増加が見られる。また、耶馬溪ダム、早明浦ダムにおいては、選択取水設備の現状の運用ルールを継続した場合、若干の冷水放流の増加が見られる。

表 2 気候変動による現在気候→将来気候(RCP8.5_C3)にかけての水質変化

水質現象	指標	釜房ダム	耶馬溪ダム	寒河江ダム	早明浦ダム
藻類増殖	表層Chl-a濃度(年平均値)	8.0 $\mu\text{g/L}$ →10.0 $\mu\text{g/L}$	12.5 $\mu\text{g/L}$ →11.1 $\mu\text{g/L}$	2.8 $\mu\text{g/L}$ →2.9 $\mu\text{g/L}$	1.0 $\mu\text{g/L}$ →0.7 $\mu\text{g/L}$
	Chl-a25 $\mu\text{g/L}$ 超過日数	0日→4日	37日→21日	0日→0日	0日→0日
	藻類増殖期の変化	1ヶ月程度の早期化・長期化	1ヶ月程度の早期化・長期化	1ヶ月程度の早期化・長期化	変化なし
底層水質悪化	底層DO2mg/L未満日数	0日→0日	19日→59日	55日→84日	0日→0日
濁度の上昇	年平均表層SS濃度	3.2mg/L→3.4mg/L	1.9mg/L→2.2mg/L	3.2mg/L→5.1mg/L	0.7mg/L→1.0mg/L
	SS25mg/L超過日数	1日→2日	0日→0日	6日→28日	0日→0日
水温の上昇	年平均表層水温	11.0℃→14.9℃	18.2℃→21.8℃	9.1℃→12.9℃	17.5℃→20.5℃
	冷水放流日数	温水放流日数: 127日→144日	温水放流日数: 48日→55日 冷水放流日数: 8日→29日	温水放流日数: 44日→49日 冷水放流日数: 21日→13日	温水放流日数: 146日→161日 冷水放流日数: 37日→59日
気候変動により影響を受ける水質変化現象 ◎: 変化が大きい現象 ○: 変化はあるが顕著ではない現象		◎貯水池内水温上昇→温水放流増加 ○藻類増殖期間の早期化・長期化	◎底層での貧酸素化の助長 ◎貯水池内水温上昇に伴う温水放流増加 ◎冷水放流が増加(不適切な選択取水) ○藻類増殖期間の早期化・長期化	◎出水後の濁度上昇 ◎底層での貧酸素化の助長 ○藻類増殖期間の早期化・長期化	◎貯水池内水温上昇に伴う温水放流増加 ◎冷水放流が増加(不適切な選択取水)

5. 適応策の検討

気候変動により、水質の変化が大きいと思われる現象に対して、「既存施設の改造・強化(運用方法の見直しや施設諸元の改造など)による適応策を実施した場合の効果」と、「既存施設による適応策では十分な効果が発揮できない場合に、通常想定される施設の新規設置(新規対策は検討の対象外)を適応策として設定した際の効果」を検討した。気候変動により、水質の変化はあるが顕著ではない現象に対しては、既存施設の改造・強化の適応策により改善が図れるかについて検討を行った。水質変化現象毎の適応策検討結果の概要を以下に示す。

(1) 藻類増殖

藻類増殖に対する適応策としては、既設の曝気循環施設が有効であり、さらには、釜房ダムでは散気量の増量、耶馬溪ダムで曝気開始時期の前倒し及び散気量増量により、効果が増すと考えられる。(図 3(a)参照)

(2) 底層水質悪化

底層水質悪化に対する適応策としては、深層曝気施設や高濃度酸素水供給施設が有効と考えられる。(コスト面では深層曝気施設が有利)(図 3(b)参照)

(3) 濁度の上昇

出水に伴う濁度の上昇に対する適応策としては、選択取水設備の効果は限定的と見られ、清水バイパスのような新規施設の検討も有効と考えられる。(図 3(c)参照)

(4) 水温の上昇

冷水放流の増加に対する適応策としては、選択取水設備の運用ルールを気候変動による流入水温の変動等に対して柔軟なものに変更することが有効と考えられる。(図 3(d)参照)

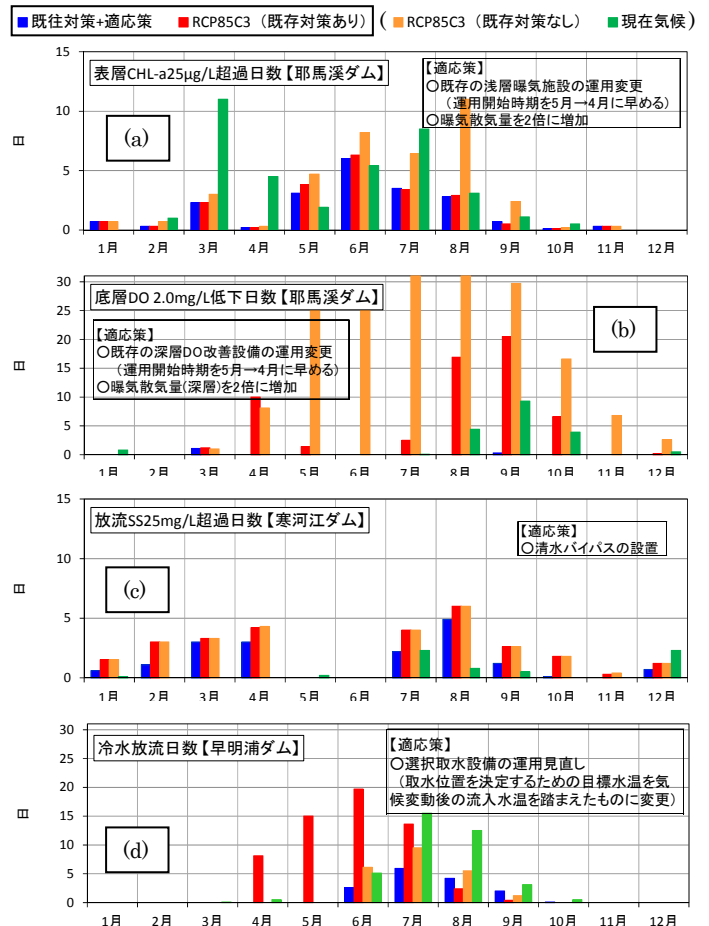


図 3 適応策の検討結果(将来気候 RCP8.5_C3 の例)

温暖化によるダム放流水温の変化と選択取水設備の運用

鳥取大学大学院工学研究科 矢島 啓

1. はじめに 近年、気候変動による干ばつや大雨頻度の増加、河川流量の減少や増加に伴い、ダム貯水池及び湖沼の水位変化と水質悪化が生じ、それによる水資源の量・質的な問題が重要な社会に問題になってきている。今後、多くのダム貯水池で設置・運用されている選択取水設備とフェンスなどの水質保全施設に対して、将来の気候変動に適応した新たな運用方法の検討が必要であると考えられる。本研究では、温暖化に伴う水量・水質の変化が危惧される荒川流域の浦山ダムにおいて、将来における水温等の変化を予測するとともに、鳥取市に建設され H23 年から運用が行われている殿ダムを対象に、選択取水設備を用いた水温コントロールについて検討を行った結果を報告する。

2. 浦山ダムにおける温暖化によるダム放流水温等の変化 本研究で用いる現在気候について 2001～2004 年は JRA25 と 2005～2010 年は気象庁気候データ JCDAS をもとに WRF を用いてダウンスケーリングを行い、将来気候は CMIP5 における NOAA の GFDL-CM3 の 2061～2070 年の 10 年間の温暖化実験結果を用い、濃度パス RCP4.5 を採用し、2001～2010 年の現在気候との差分を利用した将来における疑似温暖化の WRF によるダウンスケーリングを行い、それらから分布型流出モデルによる流入量の推定を行った結果を用いた（金沢大学谷口先生、山梨大学馬籠先生との共同研究）。バイアス補正は、経験的分布、正規分布、ガンマ分布及びベータ分布関数を採用した頻度分布マッピングによる補正を行い、主に AME と RMSE が小さい分布関数を採用した。ここでは取り上げないが、極値の補正や、洪水発生時期等の補正も大きな課題である。また将来気候モデルとして、CNRM-CM5, GISS-E2-R, MIROC5, MRI-CGCM3 も準備できている。

上記で得られた結果より、現在の気温の 2002～2010 の 9 年間平均値は 12.6℃、将来のそれは 15.5℃であり、将来は現在より 2.9℃高くなることが予想された。さらに、季節を考慮すると、現在と将来の平均気温は、夏季(6～8 月)においてはそれぞれ 21.9℃、24.9℃と将来に 3.0℃上昇し、冬季(12～2 月)においてはそれぞれ 3.0℃、5.6℃と将来に 2.6℃高くなり、夏季の上昇が大きい結果が得られた。さらに、3 次元湖沼生態系モデル ELCOM-CAEDYM を用いて、現在及び将来（2062～2070）の水質予測計算を行った。図-1 に示すように、貯水池内では、底層より表層において水温上昇が大きく予測され、温暖化に伴い水温成層が強固になることが示唆されている。また、図-2（流入水温は現在値）に示すように、ダム下流の放流水温は、現在より将来に大きく昇温することが予測されている。運用の基本は、流入水温＝放流水温であるが、将来は流入水温をいつの時点に設定するのかも課題となる。

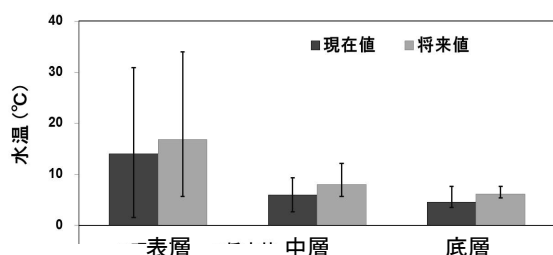


図-1 貯水池内の水温変化（平均値と変動範囲）

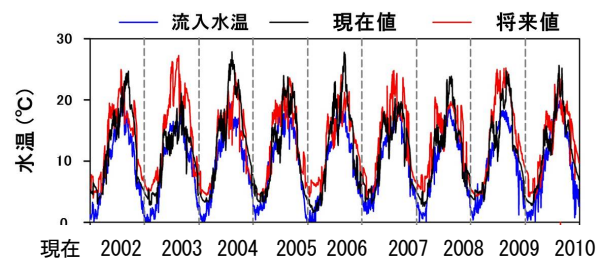


図-2 現在と将来の下流河川における放流水温

3. 殿ダムにおける選択取水設備の弾力的運用による水温管理 国内のダムにおける選択取水設備の運用は、冷水放流を避けるために表層取水が行われていることが多い。ここでは、異なった高さから同時に取水する異高同時取水を行うことができる連続サイフォン式選択取水設備を持つ殿ダムを対象に、選択取水設備の弾力的運用による水温障害の軽減について、渇水年の2013年を対象に検討する。

ダム規模の小さい場合は特に取水設備の運用が貯水池内の水温分布に影響を与える（殿ダムの総貯水容量は1240万 m^3 ）。図-3に示すように、取水深が深くなるにつれて水温躍層位置も深くなり、平均取水深が同じでも異高同時取水の方が温水が確保されている。

冷・温水放流の基準として、日平均で流入水と 2°C 以上の差がある日数をカウントした結果を表-1に示す。3mの表層取水を行った場合は、温水放流が顕著であると同時に、冷水放流の日も19日あるのが興味深い。これは、確保される温水量が少ないため、流入水以上をダムから補給する場合に、表層からの取水も冷水となるためである。

選択取水設備の弾力的運用として、3月下旬から、3m水深に相当するゲートと最終的な放流水温と流入水温との差が 2°C 以内となるもう一つのゲートの2つのゲートから同時取水行う運用

を12月中旬まで行った結果を、流入水温と3m取水の結果と合わせて図-4に示す。これによると、異高同時取水を用いた弾力的運用により、流入水温に近い放流水温を常に保つことができると同時に、表-1に示すように、表層取水より冷水放流日数も軽減することができている。

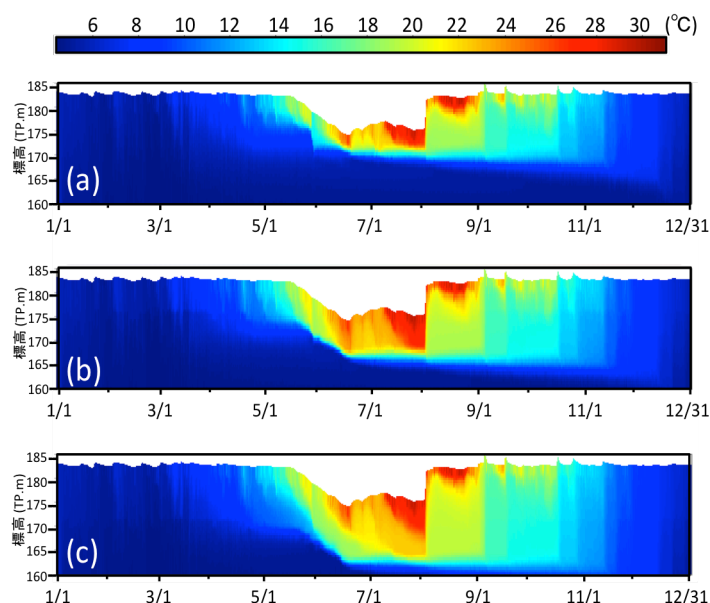


図-3 取水設備の運用の違いによる水温分布比較
(a) 水深3m取水, (b) 水深7.5m取水, (c) 水深3+12m取水

表-1 選択取水設備の運用の違いによる水温障害日数

取水方式	3m	7.5m	3+12m	弾力運用
冷水放流日数	19	34	34	11
温水放流日数	117	56	51	18
水温障害日数	136	90	85	29

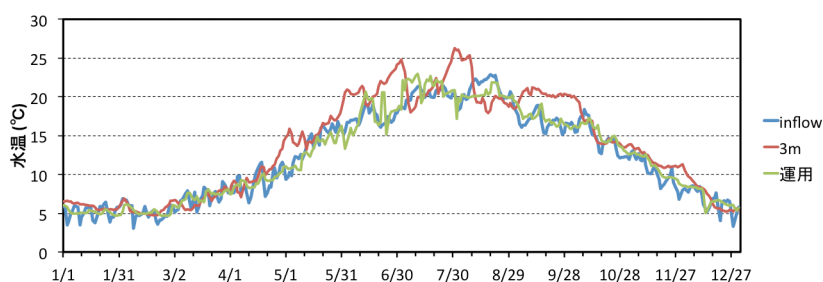


図-4 取水設備の運用の違いによる放流水温比較

4. おわりに 異高同時取水ができる選択取水設備を持つダムは限られているものの、温暖化による水温等の影響軽減のためには、既存ダムの改築が必要になる可能性もある。また、精度の高い将来予測のためには、温暖化予測情報の利用法や、生態系部分のモデルパラメーターの設定についても議論を行っていく必要がある。

流込み式水力発電システムが水域生態系に及ぼす影響

○田代 喬（名大減災センター）、松谷隆祐（日揮）、戸田祐嗣（名大院工）

キーワード：熱環境変化適応，環境影響，生態系代謝

1. はじめに

水力発電は、一般には環境負荷の少ない再生可能なエネルギーとして認識され、山地の多い我が国において温暖化適応の一方策として注目されている¹⁾。流込式発電は中でも最も一般的な水力発電形態であり、多くの場合、急峻な山地溪流に建設された取水堰からの一時取水により運用される。そのため、堰下流は恒常的な減水区間となり、特に低水期にはしばしば「瀬切れ」や止水域が生じて生態系を変質させる²⁾。さらに、多くの場合、同じ水系に連鎖的に配置されており、流下方向にもその影響が伝搬すると考えられることから、堰下流の単独減水区間のみならず、一連のシステムとして捉えた評価が必要になると思われる。しかしながら、規模の大きなダムの影響調査に比べて研究事例は少ない。

水域生態系の影響評価は技術的に未確立であるが、著者ら³⁾が導入した生態系代謝（光合成による一次生産と群集呼吸）を算定する方法は、同所的に生息する生産者・消費者全ての過程を反映して数値化できるなど、水域生態系を包括的に扱える利点がある。流水・止水を問わず、水中の溶存酸素濃度の高精度な連続計測が可能になった昨今、本手法を導入する際の技術的課題は解消されつつあり、欧米では Odum⁴⁾の理論に基づく生態系代謝を算定するためのマニュアルやソフトウェアが公開されているが⁵⁾、日本での観測事例は依然として少ない。

本研究では、生態系代謝の算定に基づき、流込み式発電が連鎖して存在する水系における生態影響の実態を紹介するとともに、各発電所の集水域規模、発電出力と生態系影響の関係について考察することにより、生態系から見た流込み式発電の在り方について議論することを目的とする。なお、本研究は JSPS 科研費 26701013 の助成を受けて実施し、愛知県豊田加茂建設事務所、中部電力越戸土木管理所、巴川漁業協同組合の方々には調査の便宜を図っていただいた。ここに記して御礼申し上げる。

2. 材料と方法

Odum⁴⁾によって記述された、水域中の単位体積当たりの酸素の収支式を以下に示す。

$$\frac{dX_{DO}}{dt} = P - R + D$$

ここで、 X_{DO} は溶存酸素濃度、 t は時間、 P は単位体積当たりの生産速度、 R は単位体積当たりの呼吸速度、 D は単位体積当たりの再曝気量である。水位が大きく変動しない期間に得られた夜間の溶存酸素データを用いて呼吸速度と再曝気係数を算出し、続いてこれらをもとに日中の総生産速度を推定した。

調査地は、矢作川流域の一水系（愛知県豊田市）であり、図 1 には、当該水系における取水堰堤、発電所および調査地点の分布状況を示す。右支流の流域面積は約 30 km² であるのに対し、本川のそれは支流を含めず、140 km² となっている。5 つの堰堤の堤高は流域規模によらず 1.8 ~ 6.25 m で、そこから導水する発電所は 500 ~ 2,100 kW の小規模出力となっている。調査地点には取水前の上流地点を含め、堰堤と発電所の上下流に設置した。具体には、St. kA ~ kD が支流筋、St. tE ~ tI が本川筋に位置する。支流では断続的取水による流下方向への影響を、本川ではそれに加えて発電後の放水による影響を把握することが狙いである。解析に必要なデータは、堰堤からの越流が無い低水期を含む 2015 年夏季～冬季の約 4 カ月間、溶存酸素、水位、電気伝導度、照度の各項目を記録する投込み式ロガー（Onset 社製 HOB0 U26-001, U20-001, U24-001, CO-UA-002）を設置して連続観測を行うことにより得た。また、この観測期間中、付着藻類の採取・分析、魚類の採捕を複数回行った。

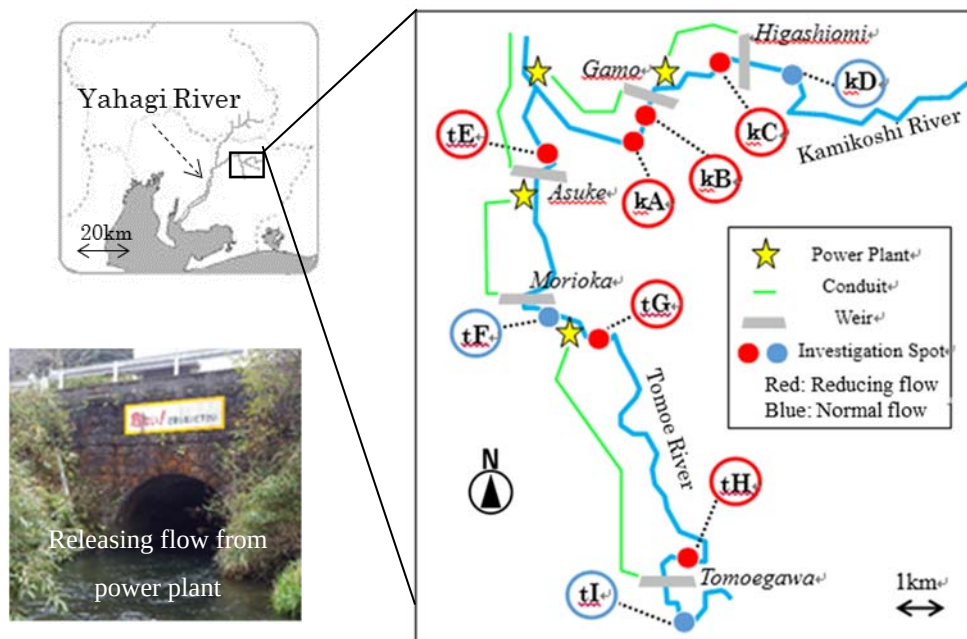


図1 矢作川流域の一水系における流込み式水力発電システムとその影響把握のための調査地設定

3. 結果と考察

表1には支流において算定された、一次生産速度 (P), 群集呼吸速度 (R) およびそれらの比 (P/R) を, 表2には本川において算定されたそれらを示す. 支流では, 著者らによる同所における過去の観測³⁾と同じく, 最上流の堰堤直下の減水区間で一次生産速度が極端に大きくなった一方で, ほぼ同様であった群集呼吸速度にも同様の大小関係が現れるなど, 過去の観測³⁾と異なる傾向を示した. 同時期の付着藻類の現存量では地点間に有意差は見られなかったが, 魚類生息密度は St. kC で最大を示すなど, 群集呼吸速度と対応する結果が得られた. 堰堤直下では開空度が高く, 水深も浅くなったことで付着藻類の生産活性が上がり, 魚類ほか消費者の生息密度の増加が群集呼吸を押し上げたことによるものと考えられる. また, P/R では流下方向に増加する傾向が見られ, 別の山地溪流での観測⁶⁾と類似も著しく早く増加する点で違いがあり, 取水が連鎖する流込み式水力発電システムの影響と考えられた. 本川では, 堰堤下流の減水区間より発電所からの放水後の流量回復箇所 (St. tF) において, 一次生産速度が極端に大きくなった. 付着藻類現存量では有意差が無かったが, 放流水の栄養塩濃度が相対的に高く, 流量増加の効果と相俟って栄養塩供給フラックスが上昇した可能性が示唆された. なお, P や R の地点間の大小関係は季節的に入れ替わることは無かった. 各発電所の集水域規模, 発電出力による変化については講演で補足することとしたい.

表1 8月12日における支流調査地点の一次生産速度 (G.P.) ($\text{mg-O}_2/\text{m}^2/\text{d}$), 群集呼吸速度 (R.) ($\text{mg-O}_2/\text{m}^2/\text{d}$), 生産呼吸比 (P/R ratio)

Site	G.P.	R.	P/R ratio
St.kA	3.72	7.52	0.50
St.kB	1.41	4.13	0.34
St.kC	2.46	9.43	0.26
St.kD	0.19	1.44	0.13

表2 11月22, 23日における本川調査地点の一次生産速度 (P) ($\text{mg-O}_2/\text{m}^2/\text{d}$), 群集呼吸速度 (R) ($\text{mg-O}_2/\text{m}^2/\text{d}$), 生産呼吸比 (P/R)

	November 22 nd			November 23 rd		
	P	R	P/R	P	R	P/R
St.tF	2.24	0.84	2.66	1.14	1.19	0.96
St.tG	0.15	1.01	0.15	0.14	1.03	0.13
St.tH	0.22	1.02	0.22	0.36	1.03	0.35

参考文献

- 1) 例えば, 環境省: <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep/index.html>. / 2) Skuka, et al.: Journal of JSCE B1 (Hyd. Eng.), 69(4): I_229-I_234, 2013. / 3) 田代他: 土論 B1(水工), 71(4): I_1129-I_1134, 2015. / 4) Odum: LO 1(2): 102-117, 1956. / 5) Bott: Methods in Stream Ecology, Academic Press, 533-556, 1996. / 6) McTanny et al.: J. NABS 22(3): 359-370, 2003.

気候変動に伴う降水現象変化がヒゲナガカワトビケラ個体群動態に与える影響に関する基礎的研究

国立研究開発法人土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム ○傳田 正利
萱場 祐一

1. はじめに

気候変動に起因するとされる降水現象の極端化が全国の河川で確認され、その影響が懸念されている。河川生態系を構成する生物群集は、地域固有の流量変動に適応・進化してきたため、降水現象の極端化に伴う流量変動の変化は、河川生態系に何等かの影響を及ぼす可能性がある。

降水現象の極端化が河川生態系に与える影響を解明し、緩和策を検討するためには、シミュレーションの手法が有効である¹⁾。例えば、河川を一つのシステムと捉え、降水、流出、流況変化と生物群集というサブシステムを結合した生態シミュレーション（以下、「気候変動に対応した生態モデル」と記述する。）ができれば、IPCCの結合モデル相互比較プロジェクト（以下、「CMIP」と記述する。）において提供される気候モデルの降水変化予測データとこのデータに基づく対応した流況変化を推定することが可能となる。その結果として、降水現象の極端化での河川生態系変化を推定することが可能となると考えられる。

筆者らは、この研究の一環として、河川の水生昆虫に着目して気候変動に対応した生態モデルの開発を行っている。本発表では、筆者らの開発した水生昆虫の気候変動に対応した生態モデルの概要および気候変動が水生昆虫の生態に与える影響評価の試行について結果を報告する。

2. 研究の方法

(1) 対象河川および調査地の概要

対象河川は信濃川水系千曲川で行った。本河川は流域面積 7163km²、流路延長 214km の大河川であり甲武信ヶ岳（標高 2,475m）から、長野盆地を流下し、新潟県境に入り信濃川と名前を変える。調査地は千曲川の中流部に位置する常田新橋付近（長野県上田市、以下、「調査地」と記述する）で行った。

(2) ヒゲナガカワトビケラ (*Stenopsyche marmorata*) の選定理由と生態の概要

調査地を含む千曲川の水生昆虫群集ではヒゲナガカワトビケラが優占し、他の水生昆虫に比べて湿重量が大きく、千曲川における水生昆虫現存量への主要な部分を占める。

ヒゲナガカワトビケラは、卵、幼虫、蛹、成虫の順で成長する。幼虫段階では5回の脱皮を行い5齢幼虫に成長する。その後、蛹化（ようか）し、成虫に成長する。初夏・晩秋の水位安定期に、成虫の雌雄が飛翔し、飛翔の過程で交配・着床が行われる。その後、越冬し、翌年に上述の孵化・成長・再生産の過程が行われる。一般に1年に2~3世代の回転があるとされ、その特性は、河川の流況・水温特性（成虫になるまでに必要な積算温度等）により異なることが知られている²⁾。

(3) ヒゲナガカワトビケラの気候変動に対応した生態モデルの概要、検証・実証及びモデル実験

a) ヒゲナガカワトビケラの気候変動に対応した生態モデルの概要

気候変動に対応した生態モデルは、IPCCのCMIPプロジェクト参加する気候モデルの予測結果に基づく降雨特性変化傾向の把握部（気候モデル部）、土木研究所が開発した分布型流出モデル（WEPモデル）部、河川の特定区間の生態系を表現する生態モデル部で構成される（図-1）。

一般に、気候モデルはモデル間でのバラツキが多く、平均化しデータを利用する必要性（マルチモデル平均）が指摘されている³⁾。気候モデル部においては、マルチモデル平均処理した降水量データをWEPモデルに与える。WEPモデルは、気象特性、流域特性を考慮し、降水特性変化を流量変化に変換する。流量変化を上流端条件として、生態モデル部においては、流況計算及び生態モデリングを行う。生態モデリングは多くの手法が開発されているが、その中で、個体ベースモデル（Individual Based Models :IBMs）を選択した。IBMsは、生物種の個体レベルでの生態に着目し、その生態（成長過程等）をモデル化する手法である。IBMsの様な詳細なモデリング手法を選択した

のは、特定区間の微生息空間内（例：瀬、淵）を選択しながら生息する指標生物の生態への影響を評価する場合、各生息段階の評価を丁寧に行い、その後、数式化することが重要であると考えたためである。

(2)節で述べたように、ヒゲナガカワトビケラの世代交代数は、降水変化とそれに伴う流況変化・河川水温により大きな影響を受ける。本研究では、既往文献からヒゲナガカワトビケラの生態を整理するとともに、調査地における流況・水温から、その成長に関するパラメータを定量的に整理した。

b) ヒゲナガカワトビケラの生態シミュレーションの検証・実証及びモデル実験概要

上記で定量化したヒゲナガカワトビケラの生態モデルの検証・実証を行った。2013 年～2015 年の流況・水温を生態モデル部に与えた。モデルの検証は、ヒゲナガカワトビケラの羽化時期等が正確に再現されているかを重点的に検証した。その後、ヒゲナガカワトビケラの個体群が複数年間維持状況からその実証性を検討した。

生態モデルの検証・実証後、CMIP3 のデータを用いて、マルチモデル平均の降水量変化特性を WEP モデルに与え、流量変化特性を把握した。降水変化特性を与える際には、降雨面積（ティーセン分割域）を変化させ、流況変化特性の把握、流況変化に伴う生態モデル部の結果の変化傾向を把握した。

3. 結果と考察

(1) ヒゲナガカワトビケラの生態シミュレーションの検証・実証結果

生態モデルは、ヒゲナガカワトビケラの生態を良好に再現した。特に、羽化時期は、一般的なヒゲナガカワトビケラモデルの生態、千曲川での研究報告に合致する良好な再現となった。また、個体群動態は、個体が流失する河床材料粒径 0.04m 程度が流出する流況で個体が流出する条件、雌雄各 1 個体のペアが孵化まで到達する卵約 2 個を産卵する条件で、個体群が 10 年程度維持される結果となった。

(2) モデル実験結果

CMIP3 のマルチモデル平均結果、千曲川流域では台風出水期までの月降水量平均が約 1.2 倍増加し、調査地上流のティーセン区域全体でこれらの降水変化が生じた場合、5 月、7 月の出水の流量が最大で約 3 倍に増加することを明らかにした。これらの変化を生態シミュレーションに与えた結果、日最大流量が約 2 倍以上に増加すると個体群存続可能性が減少に転じる傾向を確認することが出来た。

4. まとめ

降水現象極端化が河川生態系に与える影響を評価するため、CMIP の気候モデル、分布型流出モデル及びヒゲナガカワトビケラの生態モデルを結合したモデルを開発した。その結果、降水特性変化と降水域変化がヒゲナガカワトビケラの生態に与える影響を推定すること可能となった。

引用文献

- 1) 楠田哲也・巖佐庸：生態系とシミュレーション，朝倉書店，pp. 130-140，2002.
- 2) 西村登：日本の水生昆虫⑨ ヒゲナガカワトビケラ，pp. 24- pp. 96，文一総合出版，1987.
- 3) 道広有理・佐藤嘉展・鈴木靖：CMIP3 マルチ気候モデルにおける日本の気候再現性比較，京都大学防災研究所年報，第 53 号 B，2010.

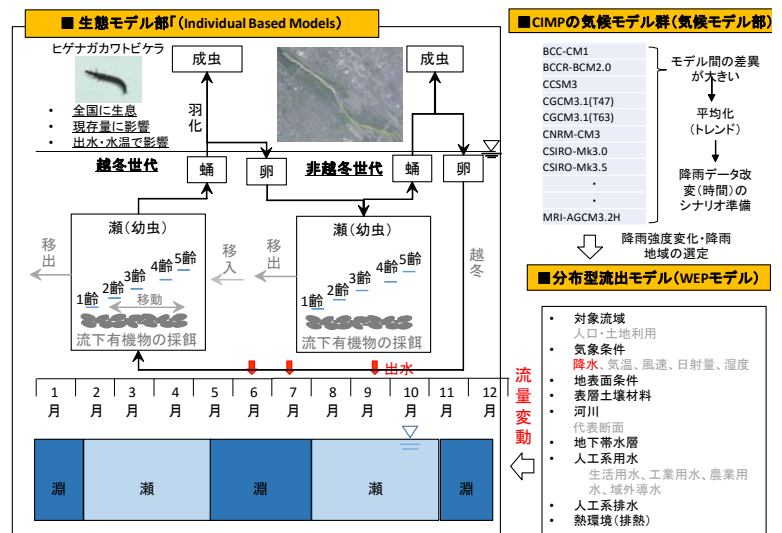


図-1 気候変動に対応した生態系モデルの概要

いまバイカル湖の沿岸生態系で起きていること

京都大学大学院 理学研究科 動物学教室 (瀬戸臨海実験所)
ロシア科学アカデミー地殻研究所 客員研究員 長縄 秀俊

1. はじめに

バイカル湖の成立は約 3,000 万年前(世界最古)で、その長さは 640 km (博多から高槻あたりまで)、表面積は瀬戸内海よりも広く、鹿児島を除いた九州に匹敵する。最大水深は 1,637 m (湖沼では世界最大水深)。バイカル湖の位置は北緯 51~56 度、東経 104~110 度(ちなみに、日本最北の稚内市〔弁天島〕の緯度は、北緯 45 度 31 分 35 秒である)。その容積は世界の淡水の約 20% (琵琶湖の 820 倍)に相当し、流入河川数は 336 であるのに対し、流出するのは 1 河川(アンガラ川)のみである。

2. 高い透明度

「シベリアの青い真珠」の深層(水深 250~1,200 m)の透明度は、海洋で最も高い透明度を示すサルガッソー海に匹敵する。バイカル湖における湖水の純度は、独自の生物濾過システムにより常に維持されている。バイカル湖に生息する淡水海綿動物として 19 種が報告されているが、そのうち 14 種がバイカル湖の固有種である。その濾過能力は、例えば、直径 5~7 cm の樹状個体で昼夜 10~12 リットル/時である。バイカル湖の樹状海綿は高さ 1 m に達するが、その成長は遅く、100~200 年かかる。死滅した珪藻のケイ素を再利用している。動物プランクトンの一種(カイアシ類)バイカルエピシューラの生息密度は 3,000~4 万 5,000 個体/m³ (ただし、この最大値は 10~11 年に 1 度の大量増殖時のみ。冬季には現存量が全プランクトンの 90%以上に達することもある)であり、年間にバイカル湖の水深 50 m までの湖水を 3 回浄化するとされるが、水温上昇に弱く 15℃を超えると死滅する。

3. 個体数が少ない生物は重要ではないのか？

個体数は少ないが、消えることなくいつも湖に存在する生物種がある(優占種にはならない)。しかし、水温が上がったり、富栄養化が進んだりすると優占することがあるので、こうした種が環境の急変時に生態系を支えていると考えられる。同様に、ふだんは少数派の細菌類が増殖して、石油生成物を分解し無毒化することが知られている。すなわち、こうした生物種は生態系の安定に寄与するような機能をもつことから、存在意義があるといえる。

4. メロシラの年

バイカル湖では古くから 10~11 年周期で、糸状珪藻 *Aulacoseira baicalensis* (便宜的に「メロシラ」〔*Melosira* 属にちなむ〕とよぶこともある)が、2 月~6 月に異常増殖(おそらくは太陽活動の影響であろう)する現象が知られていた。こうしたメロシラの年には、大量の糸状珪藻が死滅すると通常の 1,000 倍以上の有機物が 1,000 m ほどの深さに沈降して、そこに生息する底生生物に栄養を供給するというメカニズムが成立する。ところが近年ではこうした周期性が乱れ、まったく発生のないこともある。



【無秩序な観光開発、付着藻類の増加、泥炭の発火、渇水、大型商業施設、老朽化した発電所、森林火災】

5. アオミドロの仲間

5 年ほど前から、バイカル湖では **大型の緑藻 *Spirogyra* spp. (アオミドロの仲間) が異常増殖** するようになった。しかも、年間を通じて発生している。とりわけ嵐のあとには、湖岸に大量の緑藻の死滅個体が打ち寄せられて堆積し、最大で 90 kg/m^2 にもなる。すると、こうした緑藻の死骸は湖岸で腐敗し、細菌類が異常増殖することになる。バイカル湖の研究は 18 世紀から始まったが、これほどの環境の急変は前例がない。大量のアオミドロ類の群集は水深 40 m にまで達するようになった。演者は、数年前から “Protection-destruction spiral: a nightmare scenario” (保護と破壊の悪循環: 悪夢のシナリオ) という表現を用いるようになったが、今まさにバイカル湖の沿岸生態系では、こうした悪夢のシナリオが進行中である。

6. 数十億の生命の死と 100 億ルーブル(約 160 億円)

アオミドロなど大型藻類の異常増殖の主な原因は、やはり湖水環境の急速な富栄養化である。未処理の下水に含まれる過剰な栄養塩類の沿岸域への流入は、無秩序な観光基地の開発(スキリゾート、マリーナ、ホテル・コテージ建設)などに起因するもので、近隣の中国の好景気に伴いシベリアにも登場した新興富裕層の台頭が思わぬ結果を生み出した、比較的近年、新たに生じた問題といえる。このほか、**持続不可能な資源利用**(断片化した資源管理、複雑な社会制度、統合された法的枠組みの欠如、資金不足・人材不足など)、環境法はあるが、法的拘束力がない(自然保護区内での有害な事業や活動が制限されない)、さらには自然保護区内にあっても、インフラ整備の名目によって経済特区が新設されるといった、驚くべき現状が認められる。バイカル湖のユニークな生態系(2,000 万年超の歴史、約 65 %が固有種、卓越した湖水の自浄システム、大きな貯水能、超極貧栄養状態、表層から深層にいたるまで保たれる高い酸素濃度)の破壊は、地球上で **人類が利用可能な淡水総量の 20 %をたたえる** バイカル湖の将来に、暗い影を落としている。

7. バクテリオファージはバイカル湖を救うか？

ロシアの研究者らは、バイカル湖に分布する天然のバクテリオファージの再評価を進めている。これは、特定の細菌に寄生し自己の DNA を注入増殖させたのち、宿主を死滅させるウイルスである。しかも、バクテリオファージは、宿主の細胞膜を溶菌という方法により死滅させるため、細菌の死骸を環境水中に残さないという利点がある。ただし、あくまでも細菌類の異常増殖を抑える用途を満たすだけで、汚染の根源を除去するわけではない。

8. むすびにかえて

これまでも、琵琶湖研究における蓄積をバイカル湖研究へ応用する試みは続けられてきた。しかしながら、本来バイカル湖では、懸濁態リン・窒素比をみても **湖沼というよりは海洋と共通の特性**を示しており、陸水科学と海洋科学との連携は、今後ますます重要性を増すであろう。同時に、生物学分野に限らず、ミクロコスモスとマクロコスモスの連環に応じて、われわれの研究体制も変えていかなければならない。中西 正己・京都大学名誉教授のお言葉を借りれば、「**自然界の諸現象の 99.5 %は、未解明の世界**」なのである。



【大気汚染、温熱廃水、放置された工場跡、バイカル湖の堰き止めダム、沿岸火災と泥炭煤煙粒子の影響】

水理学的視点からの成層場研究への試み

神戸大学 中山恵介

数値計算の精度が向上しています。その結果、過去には再現できなかった現象を再現できるようになりました。ということは、現象理解が進み、様々な環境水理に関する問題解決が容易になったことを意味するのでしょうか。環境水理学の中で最も重要な研究課題の一つとして考えられる成層場に関する過去の研究を振り返ってみますと、1960年代から2000年までの間に重要な研究成果が集中しています。多くは現象を理解するために水深積分形の方程式を利用したレイヤーモデルによるものです。2000年に入りますと、いよいよレイヤーモデルを利用した成層場研究は姿を消し、現時点まで3次元数値計算による解析が主体となってきます。

表面波のレイヤーモデルに限ると、Boussinesq タイプの方程式を改良したもの等が開発されており、2000年までにそれなりの発展を遂げてきました。しかし、成層場に関しては、レイヤーモデルの多くは長波近似されたものであり、僅かに Boussinesq タイプの方程式や Choi&Camassa らによる方程式が存在する程度です。層が増えることにより方程式が複雑化し、動圧成分の評価が困難になることに起因していると思われます。例えば、表面波の分散関係式は非常に単純な形をしておりますが、2層になるだけで以下のとおり複雑化します（記号の意味は省略します）。

$$\sigma^2 = \frac{\rho_2 g k}{2} \frac{1}{\rho_2 \coth(kh_1) \coth(kh_2) + \rho_1} \left[\coth(kh_1) + \coth(kh_2) \pm \left\{ \left\{ \coth(kh_1) + \coth(kh_2) \right\}^2 - 4 \left\{ \coth(kh_1) \coth(kh_2) + \frac{\rho_1}{\rho_2} \right\} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \right\}^{1/2} \right]$$

そこで本発表では、あらためてレイヤーモデルを見直す機会を見出すことを目的とし、変分原理を利用することにより可能となった強非線形強分散内部波方程式を利用した適用例を紹介します。

- 適用例 1 : 内部波のソリトン干涉
- 適用例 2 : トロコイド波
- 適用例 3 : 成層場での湧昇
- 適用例 4 : 多数の内部波干涉
- 適用例 5 : breather solution

1. 緒論

近年、山口県内においても河川災害が頻発しており、被災後の災害復旧工事や災害調査には被災前の河川の横断形状や植生繁茂状況の情報が必要とされている。しかし、従来の定期的な河川横断形状の測量や航空写真撮影による植生繁茂状況の把握には多くの労力と予算を必要とするため、山口県内ですら十分な河川情報の整備が行われていない状況にある。

そこで、本研究では近年様々な分野で活用が期待されているドローンを用いて、山口県内の中小河川における河床形状や植生繁茂状況などの河川情報を効率的に収取する方法を検討し、実用的な中小河川の環境モニタリングシステムについて検討する。

2. 方法

2.1 現地調査

検証サイトは、佐波川の、河口からの距離が約 8.5km に位置する約 250m の区間とした。図-1 に、検証サイトの空中写真（オルソ画像）を示す。

まず、空中写真撮影とほぼ同期した測量（同期測量）として、2016 年 1 月 5 日に、図-1 に示すように縦横断方向に約 15m ピッチで、底面高の RTK-GPS 測量を行った。機器としては Trimble R4 GNSS（ニコン・トリンブル）を用いた。

次に、2016 年 1 月 6 日に、対象区間において陸上対空標識の設置と測量、およびドローンによる空中写真撮影を行った。対空標識は右岸に 2 個、左岸に 5 個の計 7 個設置した。空中写真撮影は、高度約 25m からほぼ鉛直下向きに、約 5～10m ピッチで行い、270 枚の画像を得た。

2.2 デジタル標高モデルの作成

現地調査で得られた空中写真と対空標識の測量結果を元に、デジタル標高モデルを作成した。ソフトウェアとして、通常の SfM の画像処理には PhotoScan (Agisoft) , その後の処理には ArcGIS10.2 (ESRI) を用いた。空間補間には、3 次多項式による 2 次元補間を用いた。

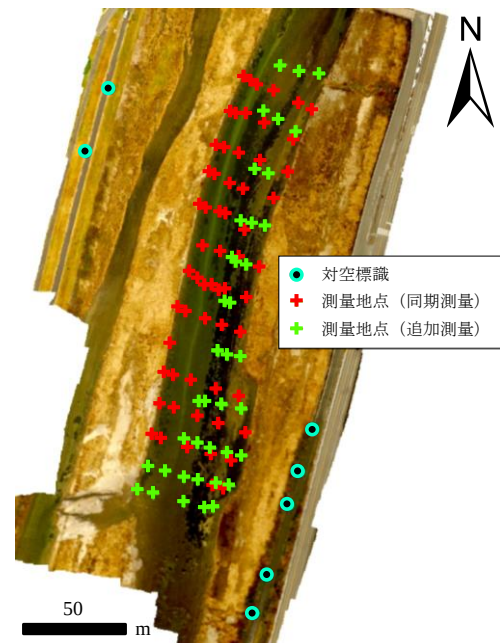


図-1 検証サイトのオルソ画像と測量地点

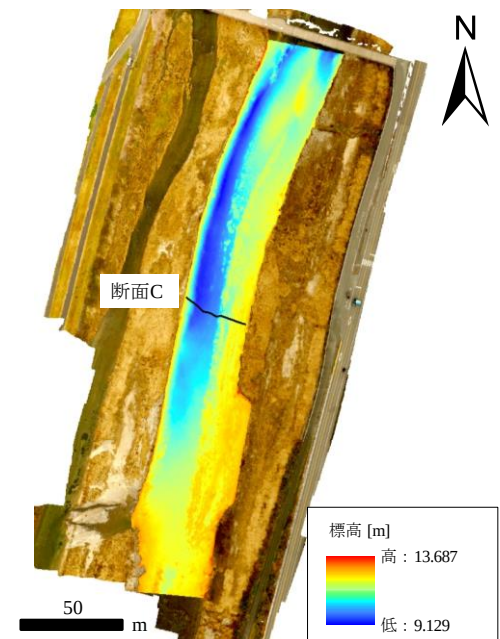


図-2 写真測量から得られたデジタル標高モデル

本研究では、撮影位置によらない簡易的な補正方法として、補正係数を水の空気に対する相対屈折率 (1.34) とする方法を用いた。すなわち、見かけの水深に相対屈折率を乗じて、真の水深を推定した。

3. 結果と考察

図-2 に UAV-SfM 手法で得られた、冠水部分について

の水面屈折補正後のデジタル標高モデルを示す。これらの図より、堤防から水面下に至る河道地形が詳細に表現されている様子が観察できる。なお、この河川区間は逆勾配であり、下流側で標高が高くなっているのは誤りではない。

写真測量で得られる水面下の標高は原理的に表面高（底質の表面すなわち上面の標高；底面高と差があるのは、底質が植生のときのみ）であるが、河川測量では底面高（河床高；植生の場合、植生の基部の砂泥の標高）が求められる。そこで、写真測量で得られた標高を底面高とみなしたときの精度を把握するため、**図-3**に、同期測量における RTK-GPS 測量値と、写真測量による水面屈折補正前後の標高推定値の散布図を示す。この場合の底面高の推定誤差（写真測量による推定値－RTK-GPS による実測値）の統計量は、平均が -0.068 m （わずかな過小評価傾向）、RMS が 0.165 m であった。推定値を実測値で説明する単回帰直線の決定係数は 0.93 と大きく、写真測量の結果を底面高とみなしても、全体的には良好な精度となった。一方で、測量地点のうち、推定誤差が最も大きい 2 点 (0.351 m , 0.333 m) は、写真の目視判読からオオカナダモの分布域にあった。当該領域では実際に数十 cm 厚のオオカナダモが確認されており、写真測量がオオカナダモの表面高を推定することにより、結果を底面高として扱った場合には大幅な過大評価となることが示唆される。

水面屈折補正の効果を例示するため、**図-4**に、**図-2**に示した断面 C（後述の河道方向位置に依存するバイアスが小さい断面）における、同期測量における標高の測量値と、水面屈折補正前後の推定値の分布を示す。この図からも、水面屈折補正が正しく機能していることが分かる。

また、本研究で用いた UAV-SfM 手法によって**図-5**に示すような 3 次元画像が作成され、高水敷に繁茂する植生高さも把握可能である。今後は植生の繁茂状況モニタリングへの活用法について検討していく予定である。

4. 結論

UAV-SfM 手法を用いた河道測量技術を国内で初めて、冠水部分について水面での光の屈折を考慮して適用し、精度を検証した。その結果、水面屈折の補正は、見かけの水深に屈折率を乗じる単純な方法でも、主要な誤差要因にはならず、正しく機能することが明

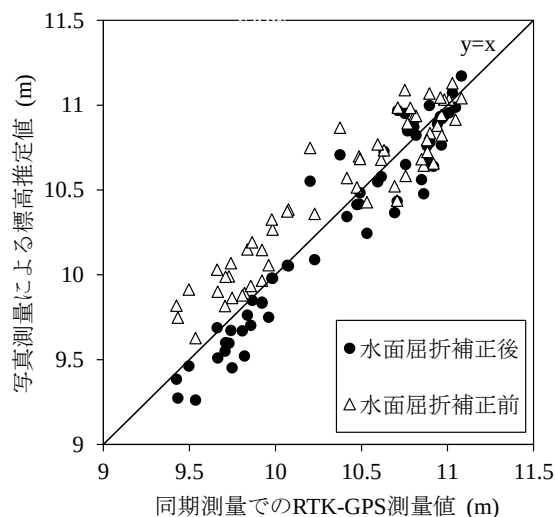


図-3 同期測量における RTK-GPS 測量値と、写真測量による水面屈折補正前後の標高推定値の関係

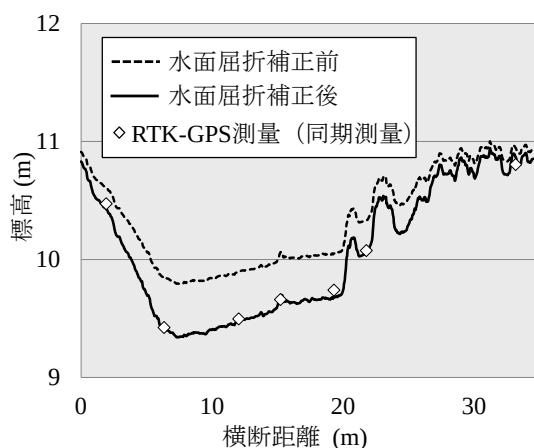


図-4 断面 C における、水面屈折補正前後の標高の推定値と、RTK-GPS による測量値の分布

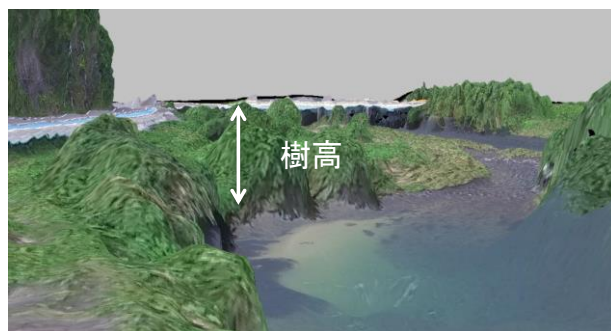


図-5 UAV-SfM 手法によって得られる 3 次元画像

らかとなった。したがって、UAV-SfM 手法を用いることによって、定期的な河床形状測量が行われていない中小河川においても簡易に定期的な河床形状モニタリングが行える可能が示唆された。

玉川上水における再生水の窒素・リン除去速度

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻 小川智也

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻 村上昂

法政大学理工学部教授 山田啓一

1.はじめに

東京都の清流復活事業として、枯渇していた玉川上水に 1986 年、下水道再生水が通水された。当初周辺環境への影響が懸念され、水路内の流量、水質などの調査研究がなされた。関東ローム層を素掘りで開削したため、流量は半減していることが示されたが（田瀬 1988）水路内の水質変化については明確な指摘がなされていなかった。再生水の水質は人間活動の影響により時間変化が著しく、流下に伴う水質変化は水質の連続採水分析が必要であった。近年、窒素、リンの自然浄化に関する知見が多く示されている。著者ら（山田ら 2009）は水路内における窒素除去について検討した。本研究は、自動採水器により連続採水分析とその季節変化から窒素、リン除去速度の濃度依存性を示した。

2.対象地域と調査方法

多摩川上流水再生センター（T0）では東京都が流量、TN、TP などを毎時観測している。旧小川水衛所（T1）と関野橋（T2）の 2 地点に、自動採水器を設置し、24 時間連続採水を季節ごとに行った。分析項目は TN、TP、COD、DO、pH である。T0 から T1 区間を A 区間（14.4km）、T1 から T2 区間を B 区間（4.4km）とする（図-1）。放流口での流量は 300(L/s)でほぼ一定であるため、各点での流量流速は時間変化、季節変化は見られなかった。流下時間を考慮して各点の水質を比較すると図-2 の様である。T0 での顕著な時間変化が T1 にも表れている。いずれの

時間も濃度低下が顕著である。



図-1 玉川上水の概要

3.除去速度の算定

各区間での漏水帳を考慮した物質収支式は以下の様である。

$$R = (C_u Q_u - C_d Q_d - C_l Q_l) / A \quad \begin{cases} u = 0, 1 \\ d = 1, 2 \end{cases}$$

R; 除去速度(g/m²/d),

C; 濃度(mg/L), Q; 流量(m³/d),

A; 流下面積(m²), C_l=(C_u+C_d)/2

Q_l=Q_u-Q_d(区間内漏水量)

なお、おおよそ水路の幅 3m、水深 0.4m、流速 0.2(m/s)である。

A 区間では季節に関係なく、TN、TP、COD の濃度低下が顕著に確認された。B 区間では夏季に TP の濃度低下が確認されたが、それ以外の観測項目では濃度変化はあまり見られなかった。

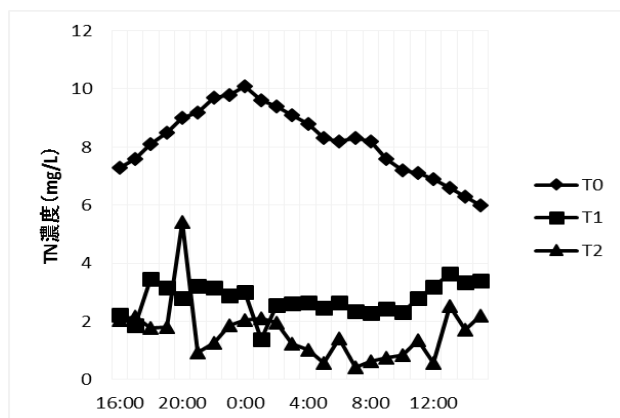


図-2 TN 濃度の流下に伴う時間変化

窒素・リン除去速度に関して、水生植物や微生物との関係性を調べるため、DO、pH、COD の 3 項目の影響を検討したが、明確な関係は見られなかった。一方、上流側の濃度に伴い除去速度が変化する傾向があったため、各区間の上流側濃度と除去速度の関係を示すと、直線関係が示された(図-3,図-4)。

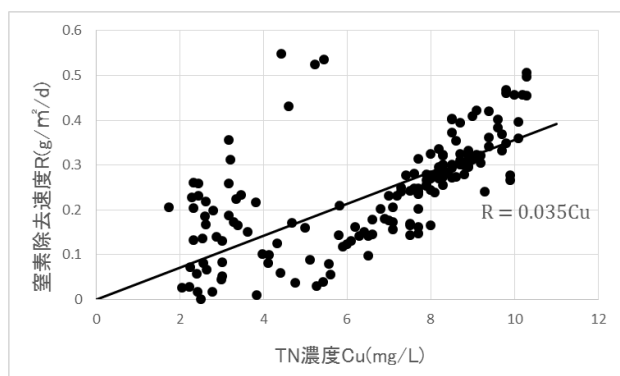


図-3 上流側 TN 濃度と窒素除去速度

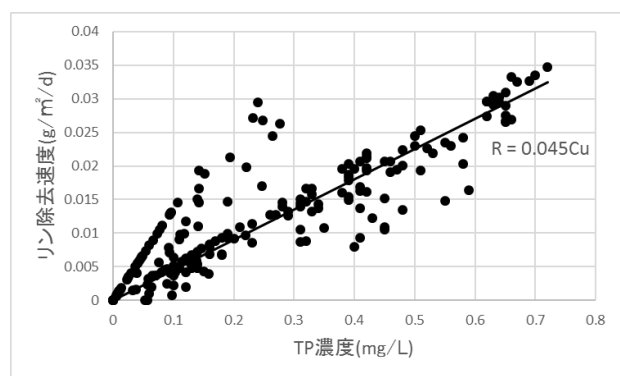


図-4 上流側 TP 濃度とリン除去速度

4. 除去速度の濃度依存性

上流側 TN 濃度が 2(mg/L)以上になると窒素除去が起こり、上流側濃度が 4(mg/L)を超えるとほぼ直線上にある。一方、低濃度域では両者の関係は明瞭でない。さらに濃度が

2(mg/L)以下では窒素除去は行われず、下限があるように見える。図-3 の除去係数は 0.035(m/day)となった。田渕ら(2005)が指摘した 0.032(m/day)に近い値となり、水路内での窒素除去速度の濃度依存性が示された。土層の表層で硝化がそしてそのすぐ下層では嫌気的な脱窒が生じ水面下で適当な有機物があれば脱窒はどんな条件でも起きている。

TP 除去速度も上流側濃度 0.4(mg/L)を超える領域で明瞭な濃度依存性が示された。低濃度領域ではTNと同様、両者の関係は明瞭でなく、他の要因に支配されるようである。

田村ら(2003)は小水路内でリンの除去を報告しているが除去速度の濃度依存性については言及していない。水路や湖沼におけるリン除去に関しては水生植物による吸収、微生物による吸収、金属による沈殿などが報告されているが、除去速度に言及した研究はない。

リン除去のメカニズムについては、沈殿物の分析など、さらに検討する予定である。時間変動の大きい TP も連続観測による詳細な調査で動態を正確に把握することができる。

比較的 TN,TP 濃度の高い再生水を農業用水などの素掘りの水路に通水することにより自然浄化が期待でき、環境改善と再生水の有効利用が計られる。

参考文献

- 1) 山田啓一他(2007)：野火止用水における再生水の窒素除去に関する検討。下水道協会誌 46,558,p87~95
- 2) 田渕俊雄他(2005)：流量が湛水流下過程の硝酸性窒素除去機能に及ぼす影響、土壌の物理性 99,p73~83
- 3) 田村良三他(2003)：河川における自浄作用評価-植物の存在が自浄作用を促進させるかどうか-、新潟県保健環境科学研究所年報 18,p104~107
- 4) 田瀬則雄他(1988)：玉川上水における再通水が水環境に及ぼす影響に関する研究、とうきゅう環境財団、研究助成,118

LED 光を用いたシャジクモの発芽実験

山口大学大学院 ○朝位 孝二
西日本技術開発 井芹 寧
九州大学大学院 郝 愛民
太平環境科学センター 田村 和敏

1. はじめに

湖沼は閉鎖性が強いいため水交換能力が低く、富栄養化しやすい水域である。このため水質汚濁が進行しやすく湖沼の水環境保全は容易ではない。このため湖沼の水質浄化工法が種々提案されているが、近年湖沼が本来有していた生態系を回復することで水質環境の保全を行う試みが進められている。その一つに沈水植物の再生による方法がある¹⁾。沈水植物による湖水の栄養塩や濁度の低下。それにもなう植物および動物プランクトンの発生など豊かな生態系を育むことが期待される。

沈水植物の再生は全国的に行われているが、主流の方法は湖水の水位を低下させ、太陽光によって底泥に含まれている種子を発芽させる方法である。しかしながら、この方法では大掛かりな工事が必要であり、コストが掛かることが問題点である。水位を低下させることなく発芽を促す新しい手法としてLED光を湖底近傍で照射することが考えられる。本研究では、この新しい方法の第一歩としてLED光のよる沈水植物（ここではシャジクモを対象とする）の発芽実験を行った。その結果を報告するものである。

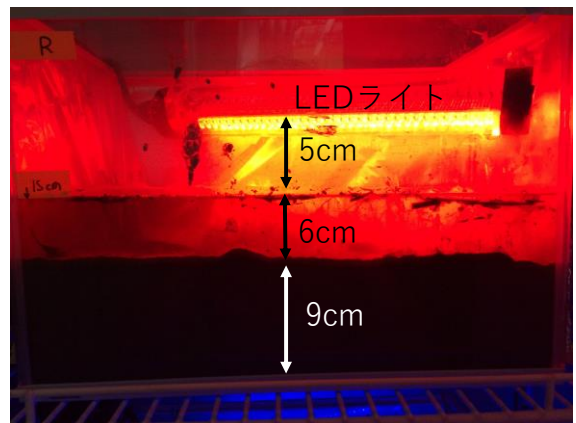


図-1 実験装置



写真-1 底泥の状況（培養前）

2. 実験方法

図-1 に示すように、水槽に休耕田（福岡県太宰府市内山）から採取した土を厚さ 9cm に敷き詰め、浄水を 6cm の水深となるように注いだ。水面から 5cm（底泥から 11cm）の高さに LED 灯を設置して照射を行った。LED は単一波長の光を発光できることが特徴で、ここでは青色および赤色を発光できる LED を用いた。LED 光を連続照射（24 時間明条件）した。青色照射の水槽、赤色照射の水槽および無光条件の水槽をインキュベーターに入れ 20℃ の一定温度条件で培養した。インキュベーター内には LED 光以外の光が入らないようにした。またそれぞれに水槽の周りにアルミホイルを巻いて遮光を施した。

インキュベーターで 35 日間培養した。その間適宜、底泥からの発芽状態の観察を行った。また 35 日後の水槽内の水の水質分析を行った。分析項目は溶存酸素（DO）、三態窒素、全窒素、全リン、リン酸態リンであるが、ここでは紙面の都合上、DO、全窒素、全リンの結果のみ示す。

表-1 培養後の出現種

出現種	無光条件	青色LED	赤色LED
コナギ			○
ウキクサ		○	○
アオウキクサ			○
イヌホタルイ			○
マツバイ			○
シャジクモ類		○	○



写真-2 赤色照射の場合の培養後の状況



写真-3 青色照射の場合の培養後の状況

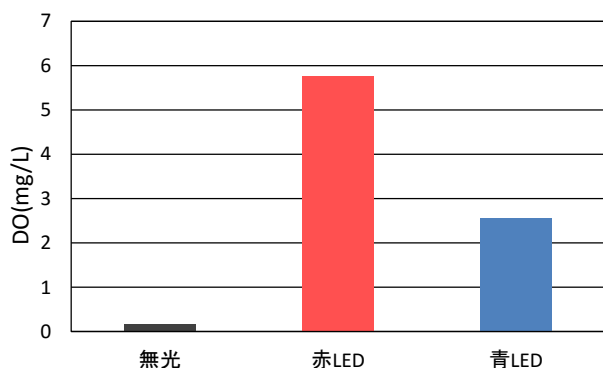


図-2 DOの結果

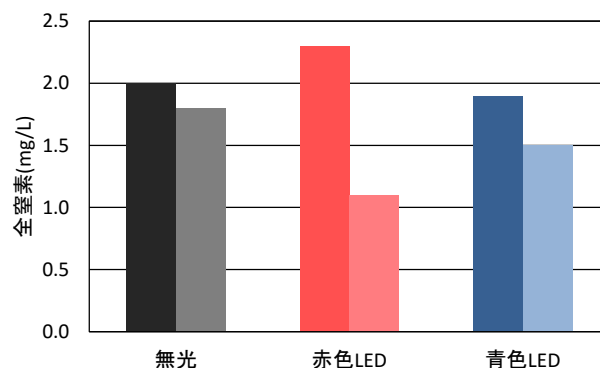


図-3 全窒素の結果

3. 実験結果と今後の課題

写真-1 に培養前の底泥の状況を示す。写真-2 に赤色照射の場合の実験後の状況を、写真-3 に青色照射の場合の実験後の状況を示す。いずれも植物が発芽・成長していることが分かる。表-1 に出現した種を示す。○が出現した種を表す。種の種類としては赤色の場合が多い。ジャジクモは赤色、青色ともに出現しているが、出現株数としては青色の場合の方が多かった。

図-2 に培養後の DO の結果を示す。培養前のデータは計測していないが、飽和に近い状況であったと思われる。

無光条件では 0.17mg/l (飽和度 2.0%) であるが、赤色 LED 光では 5.76 mg/l (飽和度 65.5%), 青色 LED 光では 2.55 mg/l (飽和度 30.9%) であった。無光では植物が発芽していないため、貧酸素状態になったままである。一方、植物が存在している照射系では光合成作用により酸素が発生し貧酸素状態になっていない。個体数が多かった赤色照射系の方が青色照射系よりも DO が高い。図-3 および図-4 に全窒素と全リンの結果をそれぞれ示す。照射条件毎に二本のバーがあるが、いずれも左側が培養前で右側が培養後である。無光系においても微生物の作用で脱窒、脱リンが発生しているようである。照射系では窒素においては赤色が、リンにおいては青色に大きな低減効果が見られた。

LED 光でジャジクモが発芽することが確認できた。今後は照射強度や水温などを変化させ、発芽条件をより明確にしていく予定である。本研究に遂行に協力してくれた当時 4 年生の黒崎裕一君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局河川環境課：自然の浄化力を活用した新たな水質改善手法に関する資料集（案）
http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/suishitukaizen/shiryousyuu.pdf

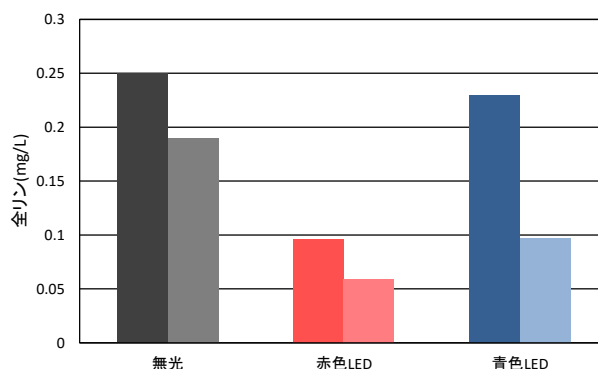


図-4 全リンの結果

応用量子生物学に基づく水環境修復技術

井芹 寧(西日本技術開発), 朝位孝二(山口大)
原口智和, 郝愛民(佐賀大), 久場隆広(九州大)

1. はじめに

筆者らは、微生物の異常発生や在来(貴重)生物の衰退等の水環境問題の解決のために、電界・磁界、電磁波・光エネルギーを活用した環境修復手法の検討を実施してきた。その中で、紫外線殺菌による淡水赤潮の増殖抑制効果など、理論と効果が明確に合致した成果を得られたものもあるが、想定外の反応や目的と逆の結果が繰り返し示され、その原因が不明のまま終了したプロジェクトも存在する。これらの結果に対し、新たに、生物細胞内部の微細生理機構の視点からアプローチすると、各プロジェクトにおける生物応答は基本的に化学的、物理的相互反応から成り立っており、最終的に電子伝達系の仕組みに係わっている可能性があることが明らかとなった。これらの基本的な研究分野は量子生物学にひとまとめにすることができる。

本報は、これまでの、量子生物学的機構に関連すると推察される研究結果をまとめ、新たな視点からの評価を加え、今後の応用量子生物学への発展のきっかけとすることを目的としている。

2. 量子生物学に関連する水環境修復技術の開発

(1) 紫外線による異常発生藻類の制御

殺藻より少ない UV 照射量となる増殖能力を消失させる条件を自動コントロールし、淡水赤潮の大量処理を可能とした淡水赤潮処理船を開発した(写真-1)。本研究においては、紫外線照射により渦鞭毛藻の遊泳能力が消失する現象が観察された。渦鞭毛藻の遊泳運動は細胞の中央と尻部 2 カ所の分子レベルの鞭毛モーターで駆動されている。鞭毛モーターはプロトンポンプ機構に基づき駆動力が得られている。紫外線照射作用は DNA における二量体形成による複製、転写機構の破壊に加え、量子生物学的な機構で成り立つ鞭毛モーターを不活性化させる効果も有することが推察され、その機構を明確化することが課題である。



写真-1 紫外線照射法による淡水赤潮処理船

(2) 電界、磁界による異常発生藻類の制御

水中微生物に電界、磁界処理が可能な培養実験装置を製作し(写真-2)、異常発生微生物を含むダム貯水池水に対し、500V~1,000V、50G~1,000G の電界、磁界処理を行ったところ、特定の微生物の増殖抑制に効果があることが明らかとなった。在来の珪藻類等には影響をほとんど及ぼさず、異常発生藻類・シアノバクテリアのみを抑制する条件を明らかにできた(図-1)。

淡水赤潮殺藻の目的で実施した市販の電気風呂施設を用いた電気暴露実験において、処理後に明らかな細胞遊泳速度の増加と、長期的な細胞生存率の増加傾向が示された(図-2)。想定と逆の効果で、当時では失敗ケースとしてお蔵入りした成果であったが、量子生物学的には貴重な情報を得る機会であったかもしれない。

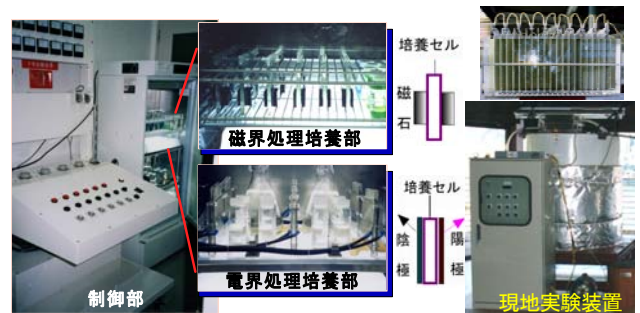


写真-2 電界・磁界暴露 藻類培養実験装置

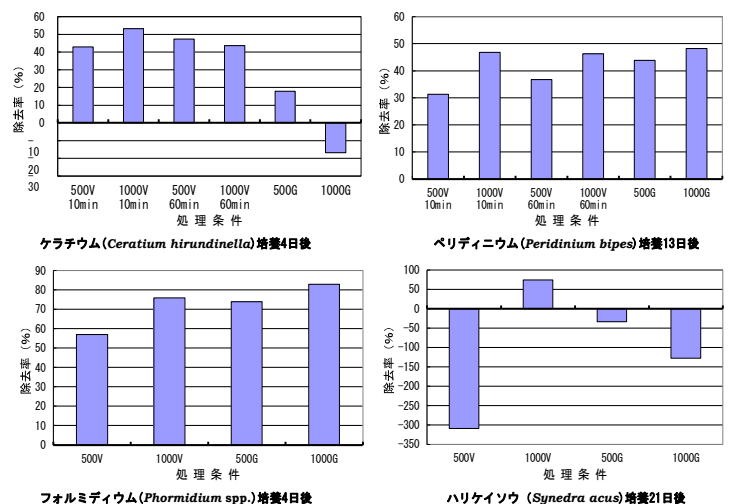


図-1 電界・磁界処理による異常発生藻類の制御結果

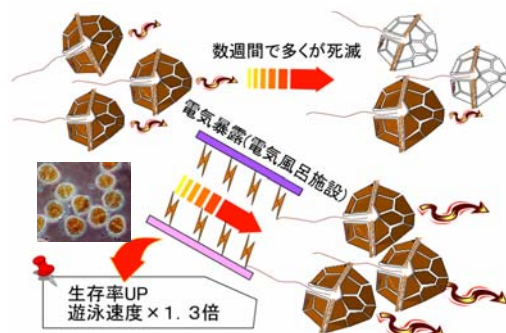


図-2 電気暴露による *Peridinium bipes* の活性化

他の鞭毛・繊毛微生物に対する効果の有無を確認し、その発現機構を明らかにすることが課題である。

(3) LED 照射による水質浄化微生物活性化、沈水植物帯修復技術の開発（現プロジェクト）

湖底における *Microcystis* アオコの枯死分解を想定したビーカー室内実験を行った。温度条件 20℃で、アオコ含有湖水（約 100 億細胞/mL）分解時に LED 照射を行ったところ、DO や栄養塩濃度削減効果等が確認された(図-3)。青色は緑藻の *Scenedesmus* sp. 赤色はシアノバクテリアの *Phormidium* sp. が優占的に増殖しており(写真-3)、これらの光合成による同化作用により水質改善効果が発現したものと考えられる。

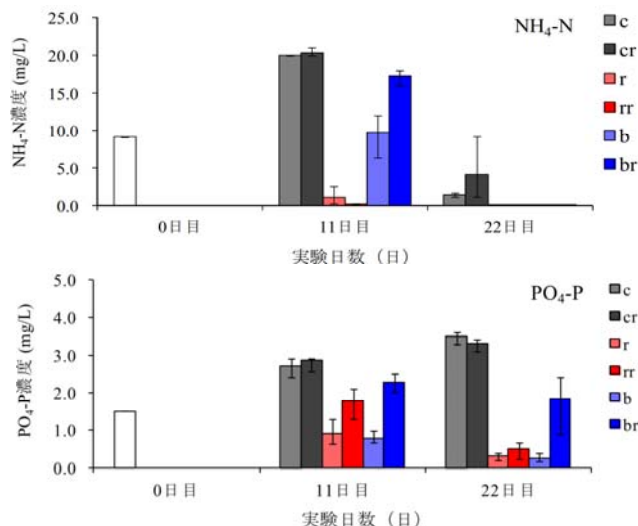


図-3 アオコ分解時の LED 照射による栄養塩浄化効果

注) c : 無光, r : 赤色 LED 照射, b : 青色 LED 照射, cr・rr・br : 各生物付着担体設置

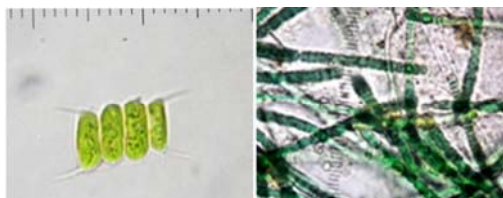


写真-3 出現した優占光合成微生物

林地化した休耕田土壌を水槽に入れ冠水し、LED 照射を行ったところ、土中の Seed Population が活性化され、赤色照射ではコナギ、ウキクサ、アオウキクサ、イヌホタルイ、マツバイ、シャジクモ類等の多様な水生植物の発芽・育成効果が示された。一方、青色照射

では沈水植物のシャジクモ類と浮葉植物のウキクサのみの発芽・育成効果が認められた(写真-4)。

LED 照射法は、富栄養化等による光量不足が原因で衰退した水生植物帯の修復対策として、従来法の欠点を補う新たな手法として期待される(図-4,5)。また、青色照射は、水質浄化能力が高く、貴重種でもあるシャジクモ類の選択的修復に利用できる可能性がある。

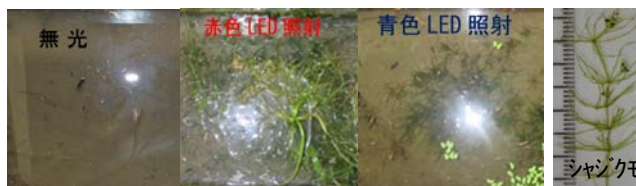


写真-4 LED 照射による Seed Population 活性化

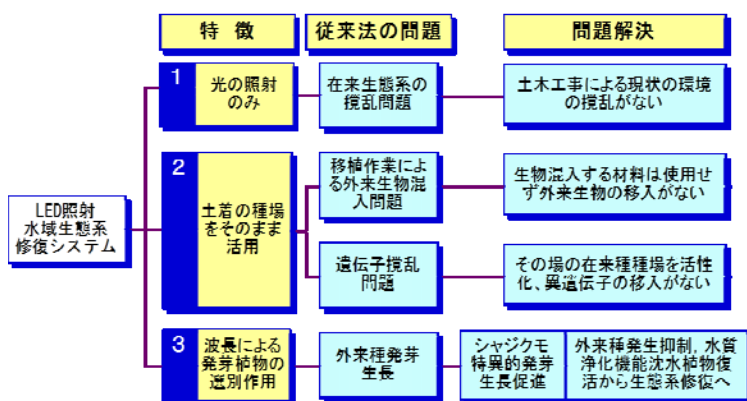


図-4 LED 照射法の特徴

LED 照射による水質浄化機能を有する微生物活性化技術及び水生植物の Seed Population 活性化技術の実用化においては、適用水環境に対し、広範囲にまた選択的に効果を発現させる必要があり、効率的に光合成作用を活性化する光供給方法(パルス法等)や、種選択的に Seed population を活性化する光供給法(特定波長照射等)を確立することが課題である。

3. おわりに

電界・磁界、電磁波・光エネルギーを利用した水環境修復技術の開発研究において、処理により従来にない現象(効果)が確認されており、それらの現象の発現機構を把握し、活用していくことが課題となっている。これらの課題を解決していくためには、基本的な生物・化学・物理的知見に加え、関連する量子生物学的な機構を十分に理解し、応用していくことが、実用的な新技術開発への近道と考えている。

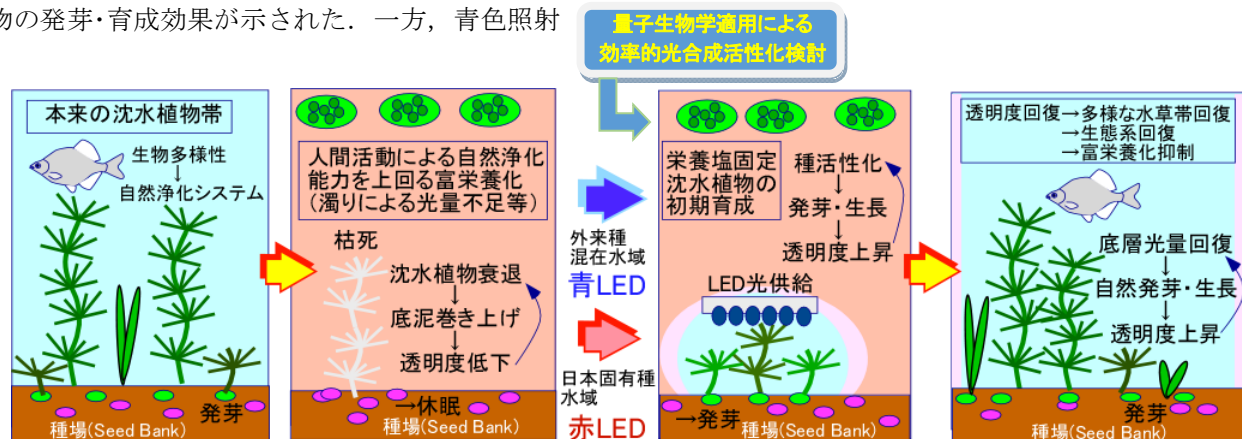


図-5 LED 照射法による沈水植物帯修復の概要

環境 DNA を用いた河川生物量推定法の開発

山口大学大学院 創成科学研究科 乾 隆帝

1. 目的

近年、河川生態系の保全と防災との両立が河川管理上の重要な課題となっている。現在、環境の変化を捉える指標としては、主に種多様性に着目されることが多い一方、生物の現存量変化が着目されることは少ない。その理由としては、水生生物の定量化の困難さが挙げられる。

そこで本研究では、水産上有用種であるにもかかわらず、定量化が困難なアユに着目し、(1)目視調査によって得られたデータを用い、物理環境の変化に応じたアユの現存量の空間的な分布・現存量予測モデルを構築し、佐波川の直轄区間におけるアユの現存量推定をおこなうこと、(2)環境 DNA 分析を用いてアユの定量化を試み、目視調査による現存量（実測値）との関係性を調べること、(3)環境 DNA 量と、現存量予測モデルに基づく採水地点上流区間の現存量推定値との関係性を調べることにより、環境 DNA の生物量調査方法としての有効性と、空間解像度の検討をおこなうことを目的とする。

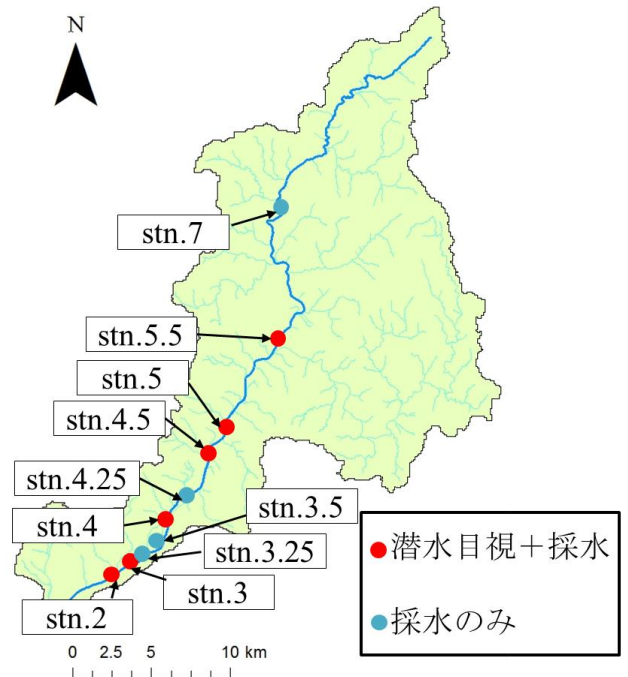


図-1 調査地点

2. 現地観測概要

(1) アユの現存量予測モデルの構築

山口県の一級河川である佐波川の 10 地点を対象に（図-1）、2015 年 5 月 28 日、7 月 30 日、10 月 7 日の 3 回調査を行った。各地点ともに、必ず瀬を含む縦断（上下流）方向約 80m の調査範囲を定め、約 15m 間隔で河川の横断方向に 6 ラインを設定し、潜水目視調査を行った。調査ではラインごとのアユの密度を明らかにし、6 ラインを平均することにより、各地点の密度(n/m^2)とした。また、密度(n/m^2)とアユの平均体重(g/n)を乗ずることで平均重量(g/m^2)とした。なお、アユの平均体重は乾^りによる平均体重調査の結果を用いた。

アユの湿重量と物理環境との関連性を明らかにするためのモデルには一般化線形モデル(GLM)を用い、構築した。目的変数に各月、各ラインにおけるアユの湿重量、説明変数に各月、各ラインにおける流速および河口からの距離を用いた。なお、AIC が最も低いモデルをベストモデルとして選択した。

(2) 環境 DNA 分析

潜水目視調査と同時、調査地点に含まれる瀬の下流側で表層水の採水(1L)を行った。サンプルは冷暗状態で保管し、当日中に濾過作業を行い、フィルターは冷凍保存した。冷凍保存したフィルターから DNA を抽出後、リアルタイム PCR 法でアユ特異的な DNA を定量化した。

(3) 環境 DNA の空間解像度の検討

存量予測モデルを、iRIC ソフトウェアを用いて算出した流れ場の結果に外挿することにより、佐波川の直轄区間内におけるアユの現存量推定を行った（図-2）。その結果を用いて、各調査地点の採水ポイントから上流に 25m, 50m, 100m, 200m, 400m, 800m, 1600m, 3200m, 6400m におけるアユの平均推定現存量を算出し、各調査

地点の環境 DNA 量との関係性を単回帰分析によって調べた。

3. 結果

(1) アユの現存量予測モデル

AIC(赤池情報量基準)に基づくベストモデルを以下に示す。なお、流速は V 、河口からの距離は D である。

$$5 \text{ 月} = 11.67854 \times V - 0.00068 \times D + 7.08046$$

$$7 \text{ 月} = 22.66232 \times V - 0.00088 \times D + 6.735$$

$$10 \text{ 月} = 20.22196 \times V - 0.00095 \times D + 8.7625$$

各月の現存量予測モデルから算出される予測値と実測値を単回帰分析した結果、7月の精度が 0.4495 と最も高く、次いで 10 月で 0.3564, また、5 月が最も低く 0.2095 であった。

(2) アユの現存量と環境 DNA の関係

図-3 に潜水目視調査から得られた重量と環境 DNA 量の関係性を示す。なお、今回は紙面の都合上 7 月のみの結果を示している。 R^2 値が 5 月では 0.845, 7 月では 0.747, 10 月では 0.961 となり、すべての月で高い値を示した。これらの結果から、環境 DNA 量とアユの現存量とには高い相関があることが示された。

(3) 環境 DNA の空間解像度の検討

図-4 に、7 月における採水地点から上流の区間毎の平均推定現存量と環境 DNA 量の単回帰分析の結果(R^2)を示す。採水地点からの距離が大きくなるにつれて決定係数が高くなる傾向は各月とも同様であったが、5 月は 200m 以降で決定係数がほとんど変化せずに 1600m でピーク(0.6661)を迎えた。7 月は 800m でピーク(0.6759)を迎え、10 月では 400m でピーク(0.9134)を迎えた。7 月および 10 月の現存量予測モデルの精度は 5 月よりも高かったことから、環境 DNA の空間解像度は、採水地点からおおむね 400m から 800m 範囲内の密度を反映したものと予想される。

4. まとめ

本研究により、環境 DNA 分析は、アユの定量化が可能だけでなく、生息場の季節変化をも捉えることが出来る可能性のある手法であることが示された。環境 DNA は河川の生物モニタリング手法として非常に有用であると言える。本研究手法を他の分類群まで発展させることにより、河川生態系の網羅的な把握が可能になることが期待される。

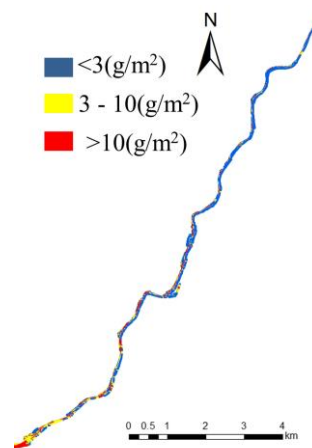


図-2 アユの現存量推定 (7 月)

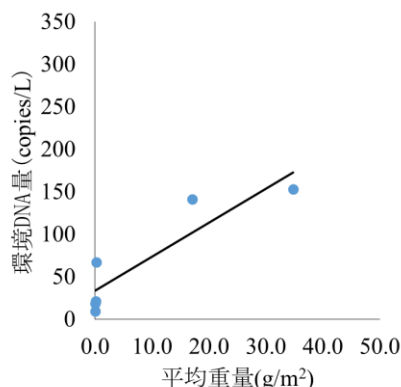


図-3 重量と環境 DNA 量 (7 月)

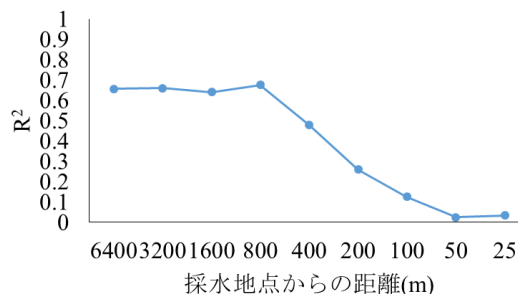


図-4 環境 DNA 量の推移 (7 月)

竹蛇籠魚道の設置にかかわる試行錯誤と遡上効果

山下 慎吾（魚山研）

1. はじめに

高知県土佐清水市を流れる三崎川は、流域面積約26km²の小河川である。生物相の豊かな海域に流入する河川であるが、堰堤による分断化が著しく、河口から遡上する水生生物にとって連続性に乏しい。そこで、生態ネットワーク回復に向けて「研究会はたのおと」が市民主導型の小さな自然再生事業を進めている。

本発表では、竹蛇籠魚道の設置にかかわる試行錯誤と、水生生物モニタリング調査のうち現時点における遡上状況について報告する。

2. 検討課題

春季の遡上を促すため、2014年度は木枠土嚢工法による魚道を三崎川の第一堰堤に期間設置し、水生生物モニタリング調査を実施した。その結果、魚類やエビ・カニ類が魚道を遡上していることが確認され、2015年6月に予定どおり構造物の撤去を完了した。

一方で、出水等により木枠土嚢魚道の構成材料がもし流出した場合、重量のある間伐材が問題となる可能性があること、ポリエチレン製土嚢袋がゴミになってしまうという短所があった。さらに、三崎川の水生生物相を考慮し、遊泳魚類よりも小型の底生魚類やエビ・カニ類にとって遡上しやすい構造とするという課題があった。

木枠土嚢魚道の短所と課題に対応するため、今年度は新たに竹蛇籠を活用した魚道の設置に挑戦した。



図1 魚道設置箇所と調査地点

3. 方法

3.1 場所

魚道設置場所は、三崎川の河口から約550mに位置する第一堰堤である。この堰堤には既設魚道がなく、平水時は中央部のみ越流しており、最も低い箇所では約1.4mの垂直落差が生じている。

水生生物モニタリングの調査地点は、St.1（河口付近）、第一堰堤に設置した魚道の上流端、St.2（第一堰堤より上流）の3箇所である（図1）。

3.2 竹蛇籠魚道の製作と設置

近隣の放棄竹林において、所有者の許可を得たうえで、モウソウチク伐採をおこなった（図2）。伐採は「犯土（つち）」の期間を避けて実施した。

京都府木津川で開催された竹蛇籠製作設置講習会において、静岡県職人の方々からマダケを用いた竹蛇籠の作成方法を学ぶ機会をいただいた。そのうえで、モウソウチクを使用可能とし、かつ魚道として機能しうる構造にするための試行錯誤をおこなった。

魚道設置に際しては、事前に河川法上の手続きをおこない、河川管理者である高知県から堆積土砂の活用、河川区域内占有および工作物の設置について許可を得た。河川管理者からは、前年度と同様に、堤体にボルト等を打たないこと、夏秋季の台風出水を避けるため、6月には魚道を撤去することといった条件が提示された。



図2 竹林伐採と材料準備

3.3 水生生物モニタリング

月1回、各調査地点に小型定置網2個を1晩設置したのち、翌日に回収して魚類やエビ・カニ類の種別個体数を記録した。第一堰堤においては、春季（3-5月）のみ魚道上流端出口に小型定置網を設置し、遡上した水生生物を捕らえられるようにした。

4. 結果

4.1 竹蛇籠魚道の製作と設置

竹材について、マダケでは幅50mmとされていたが、モウソウチクは肉厚であるため幅35mmに揃えることが最適であることがわかった。また、輪状にした竹材を用いた編み方に改良することにより、魚道構造とするうえで、均一性が高くかつ圧縮に強い竹蛇籠となった。製作した竹蛇籠は、直径50cmと40cm、長さ3.0m、2.3m、1.8mの計30個である。

完成した竹蛇籠を現地に運搬し、1-3段に俵状に積み、最大高さ1.4m、竹蛇籠部の長さ9.0mの魚道とした。詰物として、堰堤に堆積した石礫、葦簀、ツルヨシの根を組み合わせることで適度に不透水性を持たせ、堰堤から越流する水を受けて竹蛇籠魚道の上部および内部に通水するよう工夫した（図3）。設置は2016年1月末に完了した。5月上旬の時点で、ツルヨシが生長し始め鳥類からの遮蔽効果となることが期待されるとともに、竹蛇籠の中を覗くとハゼ類やヌマエビ類などを容易に観察することができる（図3）。



図3 竹蛇籠の製作と魚道設置状況

4.2 水生生物モニタリング

魚道上流端における遡上調査により、ヒラテテナガエビ、ミナミテナガエビ、ヌマエビ、トゲナシヌマエビ、スジエビ、クロヨシノボリ、シマヨシノボリなど、多くの水生生物が魚道を利用していることが判明した。現時点の結果では、木杵土嚢魚道よりも竹蛇籠魚道のほうが遡上効果が高いことが示唆された（図4）。

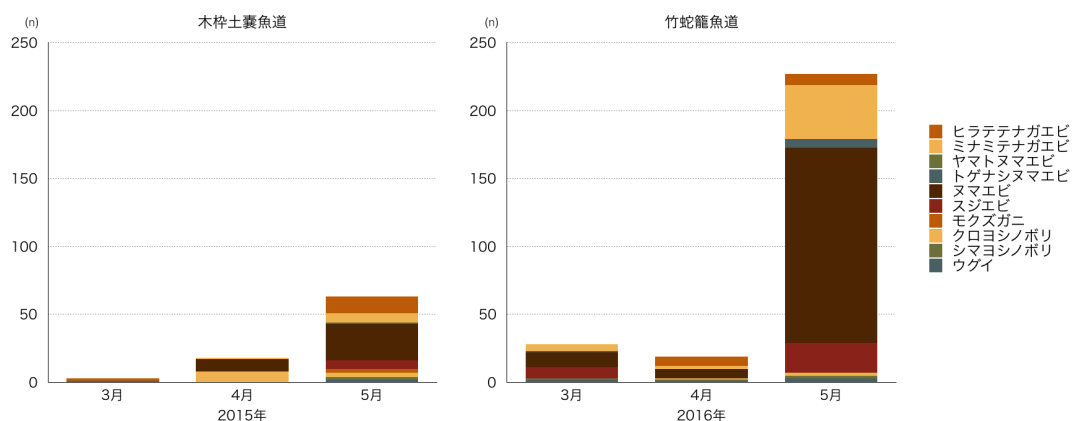


図4 魚道を遡上した生物種および個体数（一晚設置）

5. まとめ

今回の実践研究により、竹蛇籠の魚道への活用方法について知見が得られた。木杵土嚢魚道の短所を克服できるとともに、竹蛇籠魚道のほうが遡上効果が高いことも示唆された。今後も様々な試行錯誤を通して、川に興味ある人達とともに小さな自然再生事業を進めていく予定である。

この実践研究の一部は、公益信託タカラ・ハーモニストファンド助成を受けて実施しました。記して謝意を表します。

土器川における正常流量の算定および流量増加の方策に関する検討

徳島大学 工学部 田中颯馬 山本隼也 大西靖之 永井純平
 葉名鼓太郎 森川裕基 小野元毅
 徳島大学大学院 理工学研究部 武藤裕則 田村隆雄

1. 背景と目的

香川県を流れる一級河川土器川は瀬戸内海式気候により雨量が少なく、扇状地により川の水が伏流している。このため中・下流域では瀬切れが発生し、生物（特に魚類）にとって住みにくい環境となっている。本研究は土器川の中・下流域の代表的な魚の生息条件から正常流量の算定を行い、農地転換および下水再利用による流量増加の検討を行った。

2. 正常流量の算定

観測データ(流量, 水位, 断面形)が多く、図 1 のように瀬切れ区間の上流に位置する祓川橋地点における正常流量を算定する。

魚の生息条件は主に水深や流速に左右されるが、魚の選好性が強いのは水深である²⁾。表 1 に土器川中・下流域に生息する代表的な魚類の移動水深と産卵水深を示すが、最も条件が厳しいのはムギツクの産卵水深 0.5m であり、これを必要水深とする。

まず、瀬切れ区間下流に位置する丸亀橋地点の必要水深 0.5m に対応する流量を、平成 25 年～平成 27 年に作成された同地点の H-Q 曲線式(式①)から求めると 1.23 m³/s となった。

$$Q = 21.06(H - 0.05)^2 \quad \dots \textcircled{1}$$

ここに、Q：流量(m³/s), H：水位(m)である。

次に、祓川橋地点と丸亀橋地点における流量の関係式を定め、丸亀橋地点における流量が 1.23 m³/s の時の祓川橋地点における流量を求める。その結果、関係式は式②のように定まり、祓川橋地点における必要流量は 0.45 m³/s となった。本研究では祓川橋地点の必要流量を正常流量と考えた。

$$Q_H = 0.347Q_M + 0.025 \quad \dots \textcircled{2}$$

ここに、Q_H：祓川橋地点の流量(m³/s), Q_M：丸亀橋地点の流量(m³/s)である。

3. 流量増加の方策

3.1 農地転換

土器川流域面積(127km²)の内 30% (38.1km²) が水田である。この水田の一部を畑に転換し、土器川からの取水を減らすことを目的とするのが農地転換である。土器川の表面流から農業目的での取水は、天川頭首工および大川頭首工合わせて、0.63m³/s である。よって、頭首工からの取水をやめることで、これだけの流量の増加が期待できる。次に水田を畑に転換した場合、どれだけの流量増加が見込めるか算出する。水田作物として米、畑作物として大玉トマト(香川県で栽培しており、水の使用量が少ない)で検討した。まず、米作により年間 1.4×10⁴m³/m²⁴⁾の水が使われる。単位時間および単位面積当たりの水量に換算すると、0.4×10⁻³m³/(s・m²)となる。次に、トマト一個を収穫するための平均使用水量は 50 リットル⁵⁾で、全国平均の収量は 4.22×10³g/m²⁶⁾であるから、トマト一個の平均重量を 200g⁷⁾とすると、栽培するために必要な水量は 0.3×10⁻⁷m³/(s・m²)となる。従って、トマト栽培のための使用水量は極めて小さく、米作に比べると無視できる量と考えられる。以上より、前述した 2 つの頭首工の表面流からの取水(0.63m³/s)をやめるためには、米作による取水(0.4×10⁻³m³/(s・m²))をやめなければならないので、1,575m²の農地転換が必要となる。このうち、1,133m²の農地転換を行い正常流量 0.45 m³/s を満たす。

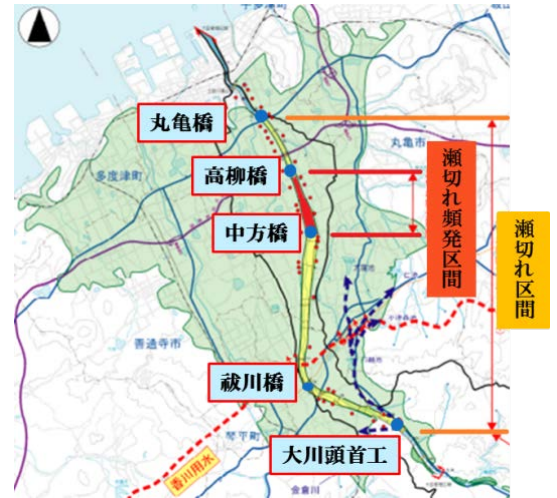


図 1 土器川の瀬切れ区間¹⁾

表 1 土器川中・下流域に生息する代表的な魚種生息条件³⁾

	ムギツク	シマヨシノボリ	ウナギ
移動水深	0.1m	0.1m	0.1m
産卵水深	0.5～1m	0.2m	—

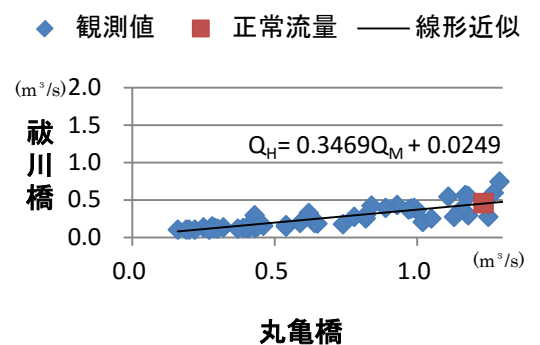


図 2 祓川橋地点の流量と丸亀大橋地点の流量の関係

農地転換に係る費用を算定する。初期費用として、水はけを良くする目的で、暗渠排水工と補助暗渠工を行い、317 円/m²⁹⁾ 必要である。維持費用として、大玉トマトの露地野菜作経営に係る費用（肥料、農機具など）に 637 円/m²¹⁰⁾ 必要になる。

3.2 下水の再利用

土器川河口にある丸亀市浄化センター(処理能力 37,400m³/日¹¹⁾)と、金倉川浄化センター(処理能力 28,400m³/日¹¹⁾)で処理された水を、ポンプを用いて上流へ放流する方法を考えた。しかし、既存の施設では放流水中の BOD 値は 15mg/L¹²⁾であり、環境基準(BOD 値 2mg/L 以下)を満たせておらず高度処理が必要である。そこで、久留米市田主丸浄化センターの事例を参考に段階的の高度処理を適用することを考える¹³⁾。段階的の高度処理を適用することの特徴としては、安価で早期に導入が可能であり電力消費が通常の高高度処理に比べ抑えることができる。また、図 3 のように既存の施設の改良や運転方法の工夫により高度処理を実現できるので環境負荷が少なくなる¹³⁾。施設の処理能力を単位時間あたりに換算すると得られる流量は平均 0.76m³/s である。このうち正常流量 0.45m³/s を祓川橋地点までポンプで持ち上げ、正常流量を満たす。

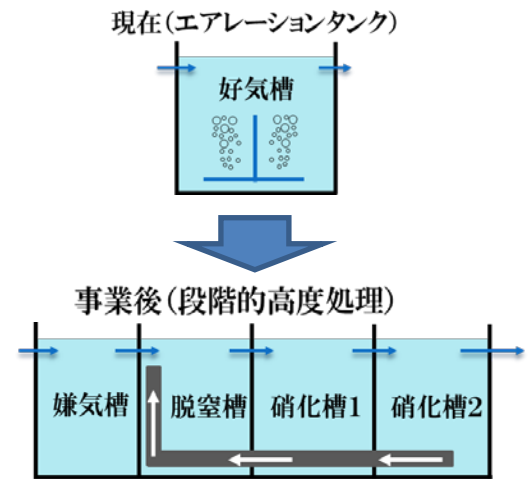


図3 段階的の高度処理の例

表3 流量増加の方策の検討

	増加流量	初期費用	維持費用(年間)
農地転換	0.45m ³ /s	36万円	72万円
下水の再利用	0.45m ³ /s	48,367万円	8,670万円

4. 結論

本研究では土器川の必要流量について、生息する魚類の視点から算定し、丸亀橋地点で 1.23 m³/s、祓川橋地点で 0.45m³/s の値を得た。観測データが多く、瀬切れ区間の上流に位置する祓川橋地点での必要流量を正常流量と定める。そしてこれらの流量を得るために、農地転換と下水処理水の再利用について検討し、どちらの手法でも正常流量は確保可能であるという結論を得た。その他の案としては、表 3 に農地転換および下水の再利用の比較を示すが、下水の再利用に比べ農地転換は初期費用かつ維持費用が安価であることがわかる。

参考文献

- 1) 国土交通省：土器川水系河川整備計画，p.1，2012.
- 2) 知花武佳ら：河床勾配で区分される小区間に着目した魚類生息環境評価に関する基礎的研究，土木学会年次学術講演会講演概要，pp.388-389，2001.
- 3) 石川悌二：川の生物図典，株式会社 山海堂，pp.312-313,pp.350-351,pp.412-413，1996.
- 4) 竹下伸一：稲－水田の水管理あれこれ，http://www2t.biglobe.ne.jp/~bono/study/memo/rice_water.htm，確認日 2016 年 5 月.
- 5) 日経ナショナル ジオグラフィック社：トマト一個を育てる為に必要な水量は？，<http://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/20141023/421311/?P=2&answer=2>，確認日 2016 年 5 月.
- 6) 農林水産省：作況調査，http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/，確認日 2016 年 5 月.
- 7) AJINOMOTO Park：食材の目安量，<http://park.ajinomoto.co.jp/recipe/corner/meyasu>，確認日 2016 年 5 月.
- 8) 農林水産省：統計情報，<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kensaku/bunya3.html>，確認日 2016 年 5 月.
- 9) 山形県：水田で畑作物を作りたい方へ，<http://www.pref.yamagata.jp/ou/norinsuisan/140029/nouchifull/suidende.html>，確認日 2016 年 5 月.
- 10) 農林水産省：農業経営収支（1戸当たり），<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001061833>，確認日 2016 年 5 月.
- 11) 丸亀市：生活排水処理基本計画，p.57，2011.
- 12) 公益財団法人 香川県下水道公社：浄化センターの紹介，<http://www.kagawa-gesui.or.jp/>，確認日 2016 年 5 月.
- 13) 国土交通省：高度処理ナレッジ集～既存施設を活用した段階的の高度処理の取り組み～，pp.142-145，2014.
- 14) 国土交通省：機械設備積算基準（案）（対比表）第4章，pp.1-11，2010.
- 15) 四国電力：法人向け料金メニュー一覧，<http://www.yonden.co.jp/kouri/menu/corp/>，確認日 2016 年 5 月.