

ダム直下における付着藻類の 繁茂を抑制する流量管理方針のモデリング

MATHEMATICAL AND NUMERICAL MODELING OF THE DAM DISCHARGE OPERATION POLICY TO SUPPRESS OVERGROWTH OF HARMFUL ATTACHED ALGAE ON RIVER BED JUST DOWNSTREAM OF A DAM

吉岡秀和¹・八重樫優太²

Hidekazu YOSHIOKA and Yuta YAEGASHI

¹正会員 農博 島根大学助教 生物資源科学部地域環境科学科 (〒683-0045 島根県松江市西川津町1060)

²学生会員 農修 京都大学大学院生 (日本学術振興会特別研究員DC) 農学研究科地域環境科学専攻 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

The attached algae *Cladophora glomerata* Kützinger overgrowth in just downstream reach of a dam causing numerous issues on ecology, environment, inland fisheries, and landscapes. We present prompt research results on a new mathematical model based on a stochastic control theory to suppress overgrowth of the attached algae. The algae dynamics is modelled with a minimal stochastic differential equation having the outflow discharge of a dam as a control variable. The performance index to be maximized by controlling the discharge is established from the viewpoint of an ecologically-conscious dam operator. The model is numerically applied to Hii River having Obara Dam as a study site. Values of model parameters are identified from field observation results. The application results imply that the outflow discharge operation decided by the current dam operation policy should be set more flexible so that the overgrowth of the attached algae is suppressed more than several tenth percent.

Key Words : *Cladophora glomerata* Kützinger, dam operation, outflow discharge, stochastic control, Hamilton-Jacobi-Bellman equation,

1. はじめに

ダム直下流では、人為的起源の河川流量減少や流況安定化に起因して、カワシオグサ (*Cladophora glomerata* Kützinger) 等の大型糸状藻類の大規模繁茂がみられる¹⁾³⁾。これは、河川環境や生態系の変化、景観の悪化、内水面の遊漁者や漁業者の減少を招く一因であり、日本の多くの河川が直面する普遍的な課題である。内田⁴⁾は、日本の主要な内水面水産資源であるアユがカワシオグサを摂食するが消化できないことを解明している。また、野崎・内田²⁾は、浄水場の目詰まりや河川でのレクリエーション阻害など、カワシオグサの大規模繁茂が人間活動に与える影響を多面的に論じている。こうした背景から、ダムの利水・治水機能を発揮しつつも、その下流におけるカワシオグサの繁茂を効果的に抑止できる河川管理策の確立が、我が国では急務の課題である。

これまで、現地観測や水理実験に依拠して、大型糸状藻類の成長や剥離といった生物・物理学的な特性⁵⁾⁷⁾を検討する、実験的研究が着実に積み重ねられてきた。他方、数理モデルに依拠して、水理学の要素を含む理論や数値計算⁸⁾¹¹⁾により藻類の動態を検討する、数理科学的な研究もなされてきた。こうした先行研究は、流況や土砂動態、水質と大型糸状藻類の関係性を定量化してきた。しかし、両者を効果的に繋ぐ実際のダム管理方針の策定に直結する研究は、その重要性に反してそう多くはない。

以上の問題背景を鑑み、本論文では、ダム直下流におけるカワシオグサの繁茂動態を考慮しつつ動的なダム管理方針を直接算出できる、確率制御理論¹²⁾に依拠した簡素な萌芽の数理モデルとその実問題への適用に関する速報的結果を示す。こうした試みは、著者らが知る限り前例がない。本モデルのゴールは、ダム運用規則の制約下において、いつ・どの程度カワシオグサが繁茂しているとき、どの程度の流量をダムから放流すべきかを決定す

ることである。まず、ダム直下流におけるカワシオグサの不確実な繁茂動態を簡素な確率微分方程式 (SDE)¹²⁾で定式化する。つぎに、動的計画原理により、流量をダム管理方針の許容範囲内に留めつつ、カワシオグサの繁茂を効果的に抑制する最適放流量を理論的に導く。とくに、最適放流量の導出が、ハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式 (HJB方程式)¹²⁾という偏微分方程式の求解に帰着されることを示す。モデルの係数やパラメータは、既往研究の蓄積データと島根県斐伊川での著者らの観測結果から同定する。とくに、提案する理論的枠組みの第一歩として、まずは定性的に現実と整合するモデルの確立を目指す。さいごに、斐伊川中流部の尾原ダムを対象に、流量管理方針や繁茂動態について、ダム管理者の姿勢や擾乱への依存性を数値的に検討する。すなわち、ダム管理者が目標放流量の達成とカワシオグサの繁茂抑制のどちらに重きをおくかというバランスや、水質・水理的な要因、パラメータの時間変動など、不確実性の大きさが変化した際に流量管理方針および繁茂動態がどのように変化するかを検討する。

2. 数理モデル

(1) カワシオグサの繁茂動態モデル

ダム直下流の礫河床である河川区間におけるカワシオグサの繁茂動態をあらわす数理モデルを提示する。なお、本モデルはダム運用において注視すべき指標である貯水量を変数としない。これを含む定式化も可能だが、問題を簡単化するため、ダムには十分な貯水量があると仮定する。時刻を t (day) と書く。繁茂動態を考える期間を、終端時刻を T (day) として $0 \leq t \leq T$ とする。時刻 t でのカワシオグサ個体群の河床単位面積当たり繁茂量、すなわちクロロフィル a 量を X_t (mg/m^2) と書く。既往研究^{9), 10)}と整合しつつ流況や繁茂動態の不確実性を考慮した最小数理モデルを定式化するために、環境容量 K (mg/m^2) を持つ伊藤型SDE¹²⁾

$$dX_t = r(1 - K^{-1}X_t)X_t dt - p(q_t)X_t dt + \sigma X_t dB_t \quad (1)$$

を X_t の支配方程式とする。 r (1/day) は個体群の成長率、 σ (1/day^{1/2}) は繁茂動態の不確実性をあらわす正定数、 q_t (m^3/s) は時刻 t でのダム放流量、 p (1/day) はカワシオグサの剥離率であり q_t の関数、 B_t (1/day^{1/2}) は1次元標準Brown運動¹²⁾である。SDE(1)の左辺は個体群の正味の増減、右辺第1項は個体群の成長、第2項は剥離、第3項は不確実性をあらわす。許容される放流量 q_t について、各時刻 t で下限 $q_{\min}$ と上限 $q_{\max}$ を仮定し、値域を $\Gamma_t = [q_{\min}, q_{\max}]$ と書く。カワシオグサは河床の底面せん断応力に依存して漸次的に剥離し⁹⁾、これが限界せん断応力を超過した時点で河床材料の移動により急激に剥離する⁹⁾。こうした知見から、剥離率 p を

$$p(q_t) = 24 \times 3600 \times \alpha W + \begin{cases} \lambda & (\tau_* > \tau_c) \\ 0 & (\tau_* \leq \tau_c) \end{cases} \quad (1/\text{day}) \quad (2)$$

と与える。 $\alpha = 1.23 \times 10^{-4}$ (m/N) は剥離抵抗、 τ_* は河床せん断応力 (N/m^2) で q_t の関数、 q_c (m^3/s) はカワシオグサの急激な剥離が生じる流量の下限値である。 $\lambda = 100$ (1/day) は急激な剥離をあらわす大きい正定数である。 λ を一定以上 (50 (1/day)) に指定すれば、本論文の計算結果に大きく影響しない。 W はサルテーション砂礫のなす摩擦力による仕事率

$$W = \gamma q_b d_s^{1/3} u_*^{2/3} \quad (\text{N}/\text{m s}) \quad (3)$$

である⁹⁾。 $\gamma = 4.94 \times 10^5$ ($\text{N s}^{2/3}/\text{m}^4$) は礫の材料特性に関わる定数、 q_b はMeyer-Peter・Müllerの式¹³⁾による単位幅流砂量 (m^2/s)、 d_s は砂粒子直径 (m)、 u_* は底面摩擦速度 (m/s) である。 τ_* と u_* はManning式に基づき q_t の関数とみなすことができる。

SDEの右辺第1, 2項が決定論的モデル^{9), 11)}と同様である一方、第3項は X_t の非負性を担保できる最も単純なノイズ項であり、水質変動、パラメータの時間変化や水理依存性など、多様な不確実性を含むものと意味づけられる。大規模な出水がない限りカワシオグサ個体群の根絶可能性は著しく低いと考えられることから、条件¹⁴⁾

$$2r > \sigma^2 \quad (4)$$

を得る。SDE(1)では、擾乱が大きいほど X_t の平均値が減少傾向にあると推察できる¹⁴⁾。これは、カワシオグサが流況の擾乱に弱いという知見と整合する¹⁵⁾。

(2) 評価関数

放流量 q_t がダムの利水や治水、その下流の水環境や生態に与える影響をダム管理者の観点から定量化する指標である無次元の評価関数 $J = J(t, x; q_t)$ を

$$J(t, x; q_t) = E_{t,x} [J_1 + J_2] \quad (5)$$

とおく。ここに、 x は時刻 t における繁茂量 ($X_t = x$) であり、 $E_{t,x}$ は $X_t = x$ のもとでの条件付き期待値をあらわす。 J は、利水や治水の観点から設定される目標放流量 $w_t > 0$ と実現される放流量 q_t の差をあらわす

$$J_1 = -\frac{1}{2T} \int_t^{\min\{T, \tau\}} \left(\frac{q_s - w_s}{w_s} \right)^2 ds, \quad (6)$$

および、カワシオグサの繁茂による生態、環境、水産、景観などに関わる負の便益を一括的にあらわす

$$J_2 = -\frac{R}{T} \int_t^{\min\{T, \tau\}} \left(\frac{X_s}{K} \right)^m ds \quad (7)$$

の2項から成り立つ。 τ は、 $X_t = 0$ となる、時刻 t 以降の最も早い時刻である。 R と m は無次元正定数で、前者は J_1 と J_2 の重みを、後者は負の便益の増大度を定める。カワシオグサの繁茂動態は不確実であり、式(5)のように平均を用いた評価関数の定式化が合理的である。

本モデルの見地からは、評価関数 J を大きくする放流量 q_t ほどダム管理者にとって望ましい。 J の型から、 R が大きいほどカワシオグサの繁茂動態を重視した放

流が実施される． R と m の値は，ダム管理者が河川管理を行う際の姿勢に依存する．以下では，簡単のために $m=1$ と指定する．評価関数 J を最大化する q_t を，最適放流量 $q_{opt,t}$ と呼ぶ．また， $q_t = q_{opt,t}$ を代入した評価関数 J を t と x の2変数関数とみなし，値関数 $\Phi = \Phi(t, x)$ と呼ぶ．定義より，次式が成立する．

$$\Phi(t, x) = J(t, x; q_{opt,t}). \quad (8)$$

次節では， Φ の支配式が $q_{opt,t}$ を決定することを示す．

(3) 最適放流量

動的計画原理¹²⁾によれば，SDE(5)と評価関数(8)に基づいて，値関数 Φ を支配するHJB方程式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \max_{q \in \Gamma_t} \{L^q \Phi\} = 0, \quad 0 \leq t < T, \quad x > 0 \quad (9)$$

が解析的に導出される．ここに，

$$L^q \Phi = \frac{\sigma^2 x^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \left[r \left(1 - \frac{x}{K} \right) - p(q) \right] x \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{1}{2T} \left(\frac{q - w_t}{w_t} \right)^2 - \frac{Rx}{TK} \quad (10)$$

である．式(9)には，カワシオグサの繁茂が全く無い場合に問題は生じないという意味の終端・境界条件

$$\Phi(t, 0) = 0, 0 \leq t < T \quad \text{および} \quad \Phi(T, x) = 0, x > 0 \quad (11)$$

が付帯する．このとき，各時刻 t と各カワシオグサの繁茂量 x に対して，式(9)第2項の中身を最大化する関数 $v = v(t, x)$ が Φ を介して定まり¹²⁾， $q_{opt,t}$ は

$$q_{opt,t} = v(t, X_t), \quad 0 \leq t < T, \quad x > 0 \quad (12)$$

と表現できる．すなわち，式(9)を求解できれば最適放流量が求まる．式(9)は時間後退型の放物型方程式であり¹²⁾，その強力な非線型性から，具体的な厳密解は得られない．しかし，次節で示すように，近年の数値計算技法によればその安定した数値計算を実現できる．

ひとたび $q_{opt,t}$ が求まれば，各時刻における繁茂量 $X_t = x$ の確率密度関数 (PDF) や，平均値 $M_t = E[X_t]$ などの X_t の統計的モーメントを算出できる．これには，Yoshioka and Unami¹⁶⁾の数値手法を用いる．

3. 島根県斐伊川への適用

(1) 斐伊川の概要

本論文では，島根県東部を流れる一級河川であり，近年カワシオグサの大規模繁茂に悩まされている斐伊川の尾原ダム下流部³⁾を数理モデルの適用対象とする．斐伊川は島根県仁多郡奥出雲町の船通山を源流とし，支流と合流しつつ北流し，出雲市大津町上来原で斐伊川放水路を通じて神戸川へ洪水を分派した後，出雲平野を東流し，



図-1 尾原ダム直下流の衛星画像。
(Google Earthを用いて作成)

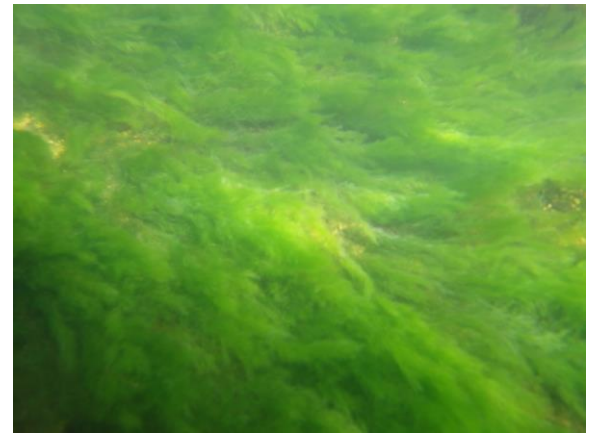


図-2 尾原ダム直下流に繁茂するカワシオグサ。
(2016年11月4日に第1著者が撮影)

その後，宍道湖や中海を経て日本海に注ぐ．その流路延長は153 (km)，流域面積は2,540 (km²) である．斐伊川には，日本の主要内水面水産資源である，天然・放流のアユが生息する．斐伊川では，毎年5月に斐伊川漁業協同組合の主導によりアユ稚魚が放流され，7月から8月にアユ釣り・漁解禁，10-11月にアユの産卵がある．

斐伊川中流部では，堤高90 (m) を有する島根県下最大のダムである尾原ダム (多目的ダム．宍道湖から48 (km) に位置) が2011年に竣工した (図-1)．その1年後辺りから，“ダム直下流で黒色や緑色のコケが大発生している”という報告が斐伊川漁協の組合員や地域住民から相次いだ．2016年における著者らの現地調査によれば，緑色のコケはカワシオグサ (図-2)，黒色のコケは土粒子が付着したカワシオグサであった．漁協組合員は“尾原ダム直下流はアユの好漁場だったが，カワシオグサの繁茂とともに漁獲量が減少した”，“カワシオグサ周辺は水の色が黒く，変だ．”と証言している．アユとカワシオグサの因果関係は明確ではないが，斐伊川の内水面漁業にとってカワシオグサの繁茂抑制は死活問題である．

国土交通省¹⁷⁾は，2016年4月1日から現在まで尾原ダムの放流量と流入量の60分間隔での測定値を公開している．本研究ではこのデータをモデルの入力に用いる．尾原ダムは，流入量300 (m³/s) まではこれと等しく放流する，一定率一定量放流方式を採用している¹⁸⁾．これ以上の流

入量では異なる基準の放流量となるが、以下で対象とする2016年は最大流入量が300 (m³/s) 未満である。そのため、流入量 Q_t を目標放流量 w_t と設定する。なお、尾原ダム直下流は粒径 O (10⁻¹) (m) 程度の礫区間であり、そのManning係数を0.05 (s/m^{1/3}) と定める。

以下ではまず、2016年の放流量と入力に、現地観測によるカワシオグサ繁茂状況を対象として数値モデルを検証する。つぎに、本モデルに基づき、カワシオグサの繁茂をより効果的に抑制できるダム管理方針を検討する。そのために、2016年のカワシオグサの最大繁茂量を環境収容力 K と同一視し、その値を既往研究から推定する。発達した糸状緑藻群落は各個体の長さが数mに成長して河床一面を覆い、その状態のクロロフィル a 量は500～1000 (mg/m²) に達する²⁾。著者らの観測と斐伊川漁業協同組合の目撃情報によれば、尾原ダム直下では、カワシオグサは数m規模に育つ前に剥離する。この事実を鑑み、本論文では $K = 500$ (mg/m²) と設定する。この値は他河川の K と同程度である¹⁹⁾。なお、尾原ダムから下流2 (km) 程度までのカワシオグサ繁茂動態は、季節を通してダム直下流と定性的に同じであることを確認している。

(2) 数値計算条件

式(9)の求解には、精度と安定性が確認されており、類似の非線型微分方程式の数値計算に実績がある有限要素法^{20), 21)}を用いる。計算期間は、尾原ダムの放流量データ開示が開始された2016年4月1日 ($t = 0$) から同年12月31日 ($t = T$) の $T = 275$ 日間とする。数値計算では、計算領域を時間方向に $(0, T)$ 、空間方向に $(0, 2K)$ と定め、それぞれ一様に66,000分割および400分割する。本来、式(9)は正の1次元無限領域で解かれるべきだが、これは数値的な困難を伴うので領域を有限値 $2K$ で切除する。より大きな値で領域を切除しても、以下の計算結果は大きく変化しない。 $x = 2K$ では条件 $\partial\Phi/\partial x = 0$ を課す。

(3) 検証計算

現実の放流量 q_t を対象に、平均値 $Y_t = E[X_t]$ と著者らおよび斐伊川漁業協同組合による現地観測結果のフィッティングに焦点を絞り、繁茂動態をあらわすパラメータ r 、 σ 、 q_c の値を試行錯誤的に同定する。2016年の各月1-2回の頻度で、図-1に示す地点においてカワシオグサの繁茂状態を水中で画像撮影した。撮影画像の解析により、観測誤差を鑑みて繁茂状態を3段階に分類する：河床一面に繁茂 ($X_t = 2K/3 \sim K$)、まばらに繁茂 ($X_t = K/3 \sim 2K/3$)、繁茂なし ($X_t = 0 \sim K/3$)。また、観測結果に基づき $Y_0 = K$ とする。画像解析的な手法に基づくより細かい分類も可能と考えられる。しかし以下で示すように、この分類は、本論文が目指す定性的に現実と整合する数値モデルの確立には十分である。

図-3は、同定されたパラメータ値 $r = 0.65$ (1/day)、 $\sigma = 0.2$ (1/day^{1/2})、 $q_c = 20$ (m³/s) に対する Y_t と現地観

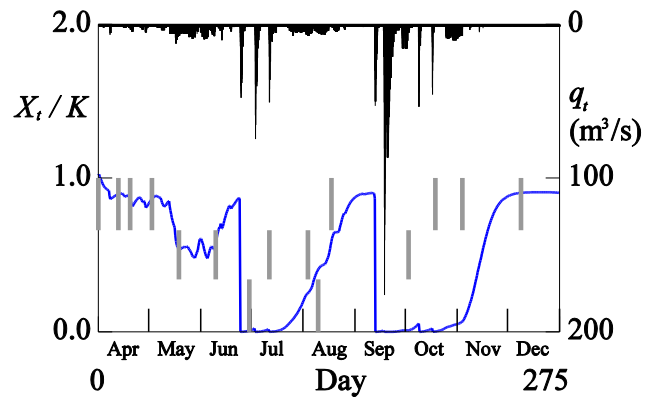


図-3 同定されたパラメータに基づく繁茂動態。
(青： Y_t 、灰：現地観測による X_t 、黒：放流量)

測による X_t を示す。放流量が50 (m³/s) 以上と大きく繁茂がない期間、および放流量が10 (m³/s) 以下と小さく繁茂が著しい期間で両者は良好に整合する。この中間の放流量が生じる期間では、比較的両者の誤差が大きい。これは、本モデルが物理的要因による剥離のみを陽的に定式化しており、加えてパラメータを定数として同定したため、生物・化学的要因による繁茂動態の評価に限界があることを示唆する。より詳細なパラメータ同定は後続研究の課題とするが、簡素な同定手法にもかかわらず、本モデルは定性的に現実と整合する繁茂動態を再現する。

(4) 流量管理方針とカワシオグサ繁茂動態

同定されたパラメータ値をもとに、対象期間における尾原ダムの最適放流量と対応するカワシオグサ繁茂動態を検討する。前述の一定率一定量放流方式¹⁹⁾に基づき、目標放流量を流入量 Q_t とする。とくに、現状の放流方式 $q_t = q_{opt,t} = Q_t$ と、その緩和版

$$(\text{乗法的緩和策}) \quad \Gamma_t = [\alpha Q_t, \beta Q_t] \quad (13)$$

を比較し、繁茂抑制における後者の有用性を検討する。すなわち、現行の放流方式を緩和した場合、繁茂動態をどの程度抑制できるかを定量化する。ここに、 $0 \leq \alpha \leq 1$ と $\beta \geq 1$ は定数であり、式(13)は現行の放流方式を上限 βQ_t 、下限 αQ_t と緩和した放流方式を意味する。もちろん、式(13)以外にも多様な緩和策はあり得るであろう。緩和策における放流量の下限 α は最適放流量に大きな影響を与えないことを事前に確認したため、以下では $\alpha = 0.5$ とする。

図-4と図-5は $\beta = 2.0$ および $R = 1$ とし、時刻 t を縦軸、繁茂動態 x を横軸にみる、最適放流量 $q_{opt,t}$ と確率密度関数 $P(t, x)$ の等高線図である。ただし、

$$\text{Ratio} = q_{opt,t} Q_t^{-1} \text{ および } \text{Biomass} = x K^{-1} \quad (14)$$

である。図-4は、ダム管理者が時刻 t に繁茂動態 x を観測した場合、どの程度の放流量を指定すればよいか (最適放流量)を示す。図-4の赤い箇所は、現行の放流量が最適放流量に対して著しく過小な期間を、青い箇所は現

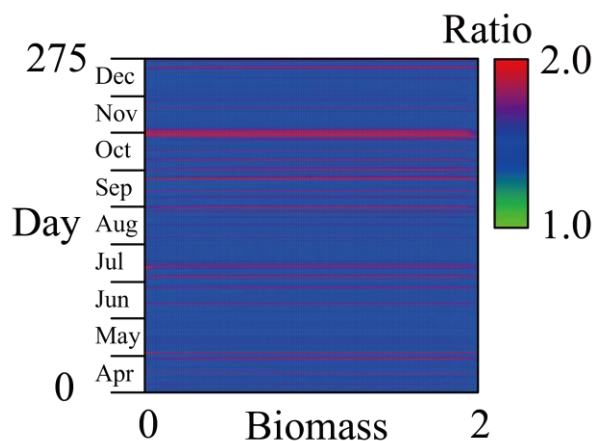


図-4 各時刻と繁茂動態に対する最適放流量.

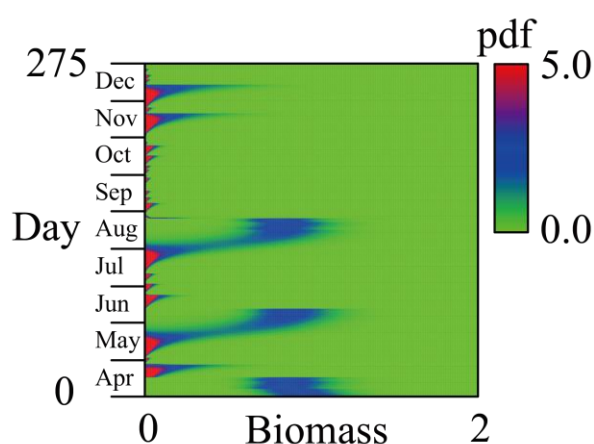


図-5 各時刻と繁茂動態に対する確率密度関数.

行の放流量と最適放流量が概ね一致する期間である。このように、ひとたび式(9)を求解すれば、ダム管理者は、あらゆる繁茂動態に対して、いつ、どの程度放流すべきかを判断することが出来る。図-4は、カワシオグサの繁茂を抑制するためには、現状の一定率一定量放流方式では常時的に放流量が少ないことを示す。 R を1オーダー変化させても、同傾向の結果が得られる。図-5は、ダム管理者が最適放流量を放流した場合、カワシオグサの繁茂動態がどう変遷するか確率変動を示す。PDFが大きいほど、カワシオグサがその繁茂動態にある確率が高いことを示す。図-5のPDFが急変する箇所は大規模な放流がなされる期間に対応する。これは、大規模な放流により繁茂動態が「繁茂無し」の状態に移行するためである。

以下では、乗法的緩和策による最適放流量に対する繁茂動態を検討する。図-6から図-8は、異なる β , R , σ に対する繁茂動態を示す。図-6は、緩和の上限 βQ_i を大きくすれば、繁茂をより抑制できることを示す。とくに、図-6は6月のアユが成長する時期について、現行の放流方式が直面し得る1か月程度の繁茂、および秋期の繁茂を顕著に抑制できる可能性を示す。図-7は、ダム管理者がよりカワシオグサの繁茂を抑制しようとするれば、

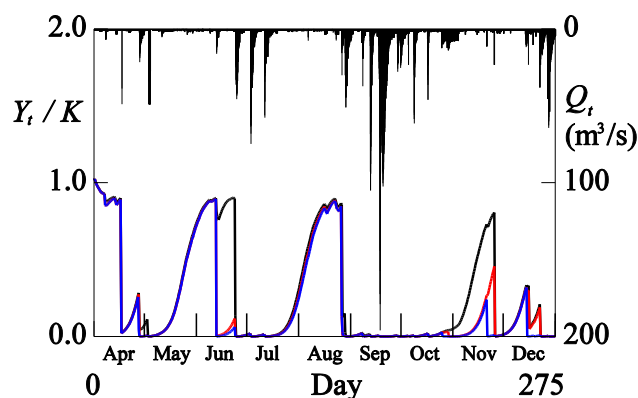


図-6 異なる β に対する繁茂動態 ($R=1$).
(黒: $\beta=1$, 赤: $\beta=1.5$, 青: $\beta=2$)

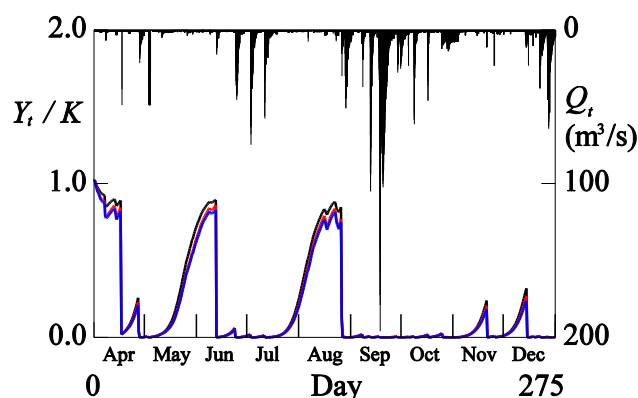


図-7 異なる R に対する繁茂動態 ($\beta=2$)
(黒: $R=1$, 赤: $R=10$, 青: $R=100$)

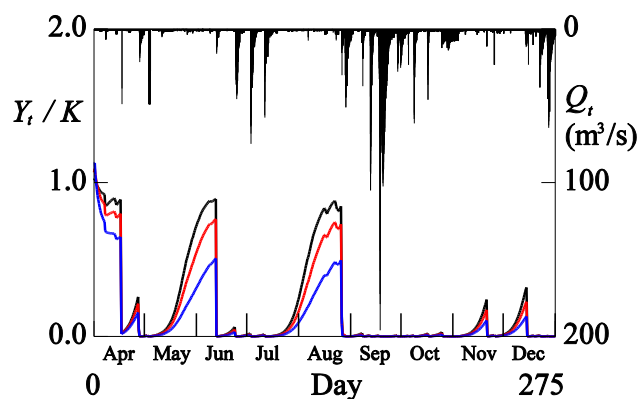


図-8 異なる σ ($1/\text{day}^{1/2}$)に対する繁茂動態
($\beta=2$, $R=1$)
(黒: $\sigma=0.2$, 赤: $\sigma=0.4$, 青: $\sigma=0.6$)

実際に繁茂が抑制されることを示唆する。しかし、一定値 ($R=10$) より大きい R に対して繁茂動態は顕著に変化しない。さいごに、図-8は個体群動態に加わる擾乱がより大きい、すなわち、同じ放流量に対して σ がより大きい場合には、繁茂がより効果的に抑制されることを示唆する。これは、小規模であっても流況の擾乱の増加がカワシオグサの効果的な繁茂抑制につながることを示唆する。また、今後、もし降雨の時間局在化が減少すれば

ば、人為的によらずとも流れの擾乱の頻度が増加する可能性はある。図-8の数値計算結果は繁茂抑制における擾乱の重要性を示唆するが、モデルの実用性向上には、水理や環境に関わる指標に基づく σ の具体的パラメタ化が望まれる。

4. おわりに

本論文では、カワシオグサの繁茂動態を効果的に抑制するための新しい数理モデルを定式化し、尾原ダムへの応用例を示した。とくに、いつ・どの程度カワシオグサが繁茂しているとき、どの程度の放流をすべきかを算出した。加えて、現行のダム管理方針はアユの成長に関わる時期に1カ月以上の長期的な繁茂を招きうることを示した。また、放流方式を緩和、すなわち、現行の放流方式と比較して許容される放流量にある程度の幅を持たせれば、繁茂の規模や時期を小さくし得ることを示した。

本モデルは萌芽的だが、ダム直下流におけるカワシオグサの繁茂を効果的に抑制できる手法策定の基盤となることが示唆される。加えて、その定式化の汎用性から、様々な河川やダムにおける多様な環境や放流方式を検討できる可能性がある。本モデルの妥当性や有効性は、カワシオグサ繁茂動態のより定量的な現地観測と並行して引き続き検証する。今後は、水質や水生生物との相互作用などを考慮し、より現実的でありつつ簡素さや実用性を欠かない数理モデルの樹立を模索する。

謝辞：本研究は、河川（整備）基金No. 271263920 およびNo. 285311020、科研費No. 15H06417、WEC応用生態研究助成No. 2016-02の援助を受けた。斐伊川漁業協同組合から、本研究に関わる貴重な情報や助言を頂いた。

参考文献

- 1) 矢作川研究所編：豊田市矢作川研究所12年のあゆみ、3-2. カワシオグサの繁茂実態調査と抑制対策に向けた研究，矢作川研究，No.12, pp.16-21, 2008.
- 2) 野崎健太郎，内田朝子：河川における糸状藻類の大発生，矢作川研究，No.4, pp.159-168, 2000.
- 3) 吉岡秀和，吉井傳，八重樫優太：斐伊川中流域における内水面漁業の現状とその展望，島根大学生物資源科学部研究報告，Vol. 21, pp.23-28, 2016.
- 4) 内田朝子：矢作川中流域におけるアユの消化管内容物，矢作川研究，No.6, pp.5-20, 2002.
- 5) 小川弘子，内田臣一：礫の転がしによる大型糸状緑藻カワシオグサの剥離実験，愛知工業大学研究報告，No.40B, 6pp. 2005.
- 6) 戸田祐嗣，多田隈由紀，辻本哲郎：砂河川における付着藻類の空間分布に関する研究，水工学論文集，Vol.61, pp.1212-1218, 2007.

- 7) 長谷見優，田中規夫：付着藻類の繁茂が粗粒化河床の粗度層内外の運動量交換と底面せん断力に与える影響，土木学会論文集B1（水工学），Vol.73, No.4, pp.I_1189-I_1194, 2017.
- 8) 田代喬，渡邊慎多郎，辻本哲郎：矢作川中流における付着藻類の増殖・剥離過程に関する群落動態モデルを用いた数理解析，矢作川研究，No.8, pp.65-74, 2004.
- 9) Tsujimoto, T., Tashiro, T.: Application of population dynamics modeling to habitat evaluation—growth of some species of attached algae and its detachment by transported sediment—, *Hydroécologie Appliquée*, Vol.14, pp.161-174, 2004.
- 10) Graba, M., Kettab, A., Sauvage, S. and Sanchez-Pérez, J. M.: On modeling chronic detachment of periphyton in artificial rough, open channel flow, *Desalination and Water Treatment*, Vol.41, No.1-3, pp.79-87, 2012.
- 11) Fovet, O., Belaud, G., Litrico, X., Charpentier, S., Bertrand, C., Dauta, A. and Hugodot, C.: Modelling periphyton in irrigation canals, *Ecol. Model.*, Vol.221, No.8, pp.1153-1161, 2012.
- 12) Øksendal, B.: *Stochastic Differential Equations*, Springer, 2003.
- 13) 荒井信行，清水康行：現場のための水理学（3）. http://river.ceri.go.jp/contents/uploads/docs/suirigaku_old03.pdf（最終アクセス日：2017年3月29日）
- 14) Grigoriu, M.: Noise-induced transitions for random versions of Verhulst model, *Prob. Eng. Mech.*, Vol.38, pp.136-142, 2014.
- 15) 内田朝子，近藤和広，竹内康之2，永田直人：矢作川，豊川，長良川における大型糸状緑藻の発生状況，矢作川研究，No.8, pp.89-98, 2004.
- 16) Yoshioka, H. and Unami, K.: A cell-vertex finite volume scheme for solute transport equations in open channel networks, *Prob. Eng. Mech.*, Vol.31, pp.30-38, 2013.
- 17) 国土交通省：任意期間ダム諸量検索，<http://163.49.30.82/cgi-bin/SrchDamData.exe?ID=607041287705020&KIND=1&PAGE=0>（最終アクセス日：2017年3月2日）
- 18) 国土交通省：尾原ダム，<http://www.cgr.mlit.go.jp/izumokasen/jimusho/jigyo/obara-dam/index.html>（最終アクセス日：2017年3月2日）
- 19) 内田朝子，大八木麻希，加藤元海，中西正己：矢作川の生態系を支える付着藻類の栄養状態，陸水学雑誌，Vol.74, No.2, pp.63-72, 2013.
- 20) Yoshioka, H. and Yaegashi, Y.: Optimization model to start harvesting in stochastic aquaculture system, *Appl. Stochastic Model. Bus.* DOI: 10.1002/asmb.2250 (in press)
- 21) Yoshioka, H., Unami, K. and Fujihara, M.: Mathematical analysis on a conforming finite element scheme for advection-dispersion-decay equations on connected graphs, *J. JSCE A2*, Vol.70, No.2, pp.I_265-I_274, 2004.

(2017. 4. 3受付)