

降水現象の極端化に伴う流況変化が河川生態系に与える影響に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 26 年度～平 28 年度

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：傳田 正利、萱場 祐一

【要旨】

気候変動が河川生態系に与える影響を評価するため、気候変動、流出及び河川生態系モデルを組み合わせたモデルを開発した。開発したモデルを用いて、気候変動に起因する降水現象の極端化に伴う流量変動と、流域のダム・河道復元等の緩和策が、ヒゲナガカワトビケラの個体群動態に与える影響を評価した。その結果、降水現象極端化の影響は、降水域の面積が一定以上大きくなると顕著になり、個体群を縮小させる可能性が高いことを推定した。また、ダムによる流量調整（ピークカット）・河道の複流路化等の河道再生の組み合わせは、河川生態系に与える影響を緩和する可能性があることを試行的に確認した。

キーワード：気候変動、降水現象極端化、河川生態系、ヒゲナガカワトビケラ、個体群動態

1. はじめに

近年、降水現象の極端化に伴う集中豪雨が生じ、大規模な土砂災害や河川の氾濫を引き起こし、防災分野の大きな課題となっている。同時に、降水現象の極端化は、小規模な降水を減少させることが指摘されている。現在、気候変動の各省庁が政府全体の「適応計画」策定に向け、気候変動影響評価小委員会を設置。平成 27 年度を目途に適応計画の最終案を閣議決定する見通しである。降水現象の極端化は、流況の変化を生じさせ、治水（防災）、利水の大きな課題となる。加えて、河川生態系に関する研究でも、降水現象の極端化に伴う流況の変化が、河川生態系に影響を与えることが指摘されはじめており、今後、これらの影響に関する研究が必要である。

上記のような背景から、本研究では、降水現象の極端化に伴う流況変化等（以下、流況変化と記述する。）が河川生態系に与える影響を評価する。本研究では、指標生物として水生昆虫を選定し、①流況変化と河川生態系の関係性の解明とそのモデル化、②開発したモデルを用いた流況変化等の河川生態系への影響の推定、③流況変化等の緩和が河川生態系保全に持つ効果を試行的なシミュレーションを通して検証する。上記の流れに対応して、以下の 2 つの達成目標を設定する。達成目標 1 では、降水現象の極端化に伴う流況変化が河川生態系に与える影響の解明とそのモデル化を行う。この成果に関しては、2 章においてとりまとめる。

達成目標 2 では、河道掘削、ダム等による流況変

化の緩和事業による河川生態系への影響軽減効果の試行的予測シミュレーションを行う。この成果に関しては、3 章においてとりまとめる。

本シミュレーションを通して、治水、利水、環境がベストミックスされる河道管理方法を考察し、提案することを目的とする。

2. 達成目標 1：降水現象の極端化に伴う流況変化が河川生態系に与える影響の解明とそのモデル化

2.1 はじめに

今後の河川生態系管理において、重要なキーワードとなるものに「気候変動」が挙げられる。

「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において確認され、その影響が懸念されている。これは、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、河川生態系に影響を及ぼす可能性が高いためである。

これらの課題の対応には、特定区間のみに着目した河川生態系管理ではなく、河川流域を一つのシステムと捉え、気候変動（熱環境）に伴う降水現象変化、流域地形・土地利用変化等に伴う流出変化、流出変化に対応した流況変化の河川生態系の変化を一連のサブシステムで記述・予測し、河川生態系管理に反映するアプローチが必要と考えられる。

開発するシステムへの技術的な対応として、筆者らは空間情報科学を用いて、IPCC 気候変動予測モデル、分布型流出モデル及び河川生態系変動予測

モデルを組み合わせた「流域特性を考慮した河川生態系変動予測モデル」(以下、「モデル」と記述する。)の開発を行っている。モデル開発の一環として、水中生態系のバイオマスに重要な役割を果たす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た。

本発表では、筆者らが開発中のモデルを用いて、気候変動に起因とされる降水現象変化に伴う流量変動の変化が水生昆虫に与える影響を評価する基礎的な評価研究の一つの事例として紹介し、モデルの可能性と今後検討すべき課題を河川環境管理的の観点から考察することを目的とする。

2. 2 モデルの概要

モデルは、(イ) IPCC 気候変動予測モデル部、(ロ) 分布型流出モデル部、及び、(ハ) 河川生態系変動予測モデル部の3つのサブモデルで構成される(図-1)。

IPCC に参加する気候変動予測モデルは、モデル間でのバラツキが多く、複数の気候変動予測モデルの結果を平均化しデータを利用する必要性(マルチモデル平均、以下、「平均化」と記述する。)が指摘されている¹⁾。IPCC 気候変動予測モデル部は、IPCC の結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project: CMIP、以下、「CMIP」と記述する。)で提供される将来気候時の降雨データ等を平均化し分布型流出モデルへの入力データとして与える機能を持つ。

分布型流出モデル部は、土木研究所が開発した分布型流出モデル(WEPモデル)で構成され、熱輸送モデルから表面流出までを考慮できるモデルである。CMIP で提供される将来の熱環境まで考慮して流出変化を予測可能となっている。表面流出に大きな影響を与えると耕作放棄等の土地利用変化、国土数値情報、農林業センサスの各省庁の空間データを用いて入力可能となっている。

河川生態系変動予測モデル部は、河川工学を用いた流況・河床変動解析、個体ベースモデル(Individual Based Models: IBMs; 生物種の個体レベルでの生態に着目し、その生態をモデル化する生態モデリング手法)を実装している。生態モデリング部は、一次生産(付着藻類、植物)、二次生産(水生昆虫、魚類等)、高次捕食者(陸上哺乳類)までのモデリングが完了し、生物間相互作用を除いた生物動

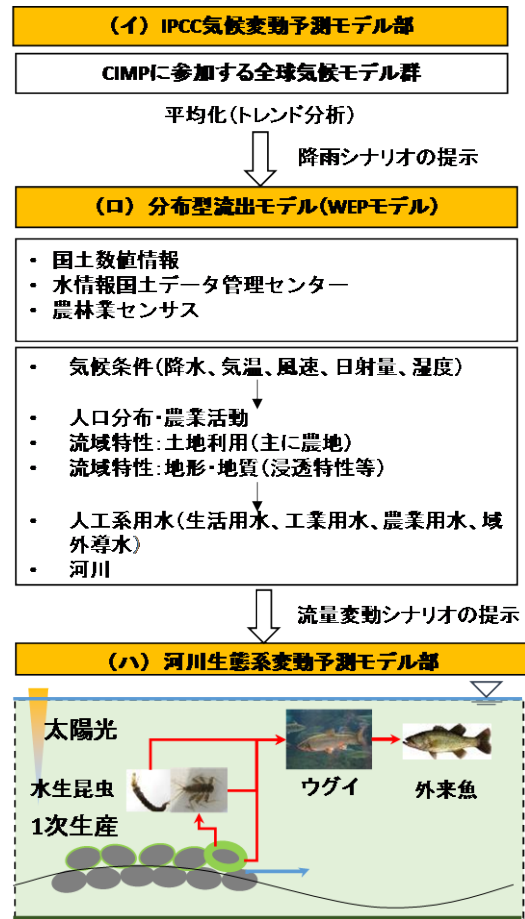


図-1 流域特性を考慮した河川生態系変動予測モデルの概要

態を一定の精度で表現できる構造となっている²⁾(図-1)。

2. 3 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 7,163km²、流路延長 214km の大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

ヒゲナガカワトビケラを選定したのは、下記の3つの理由による。

理由1: ヒゲナガカワトビケラは、水域生態系の中核的な生態学的な位置を占める。流下有機物、付着藻類等の一次生産物を餌資源とするとともに、魚類・鳥類の餌資源となり食物連鎖の重要な役割を果

たす。

理由2：千曲川における水生昆虫群集は、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、水生昆虫現存量への主要な部分を占める。

理由3：ヒゲナガカワトビケラの世代交代数は、流況変化・河川水温変化により大きな影響を受け、気候変動に伴う流況変化・水温変化の影響を受けやすい生態特性がある（次節で詳説する）。

(3) ヒゲナガカワトビケラ (*Stenopsyche marmorata*) の生態の概要

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³⁾。

(4) ヒゲナガカワトビケラの生態モデルの開発とその検証

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。

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、ヒゲナガカワトビケラの個体群再生産に大きな影響を与える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。

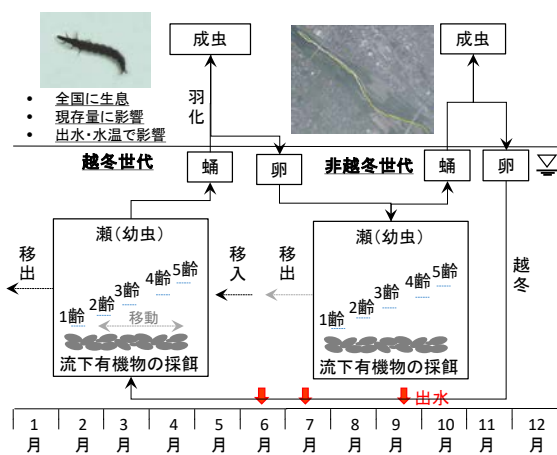


図-2 ヒゲナガカワトビケラの生活史の概要

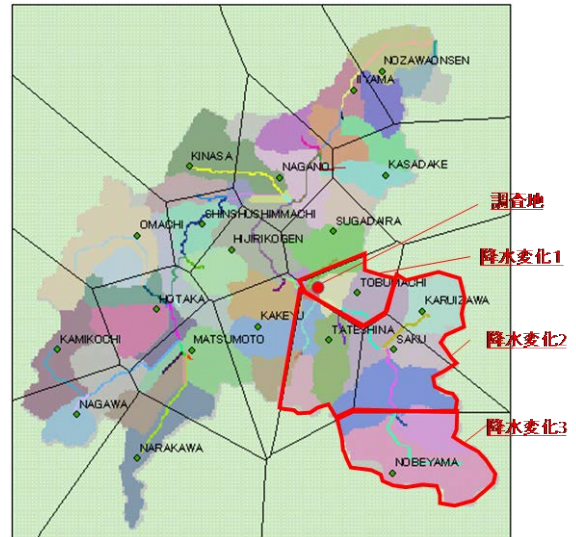


図-3 ティーセン法による分割流域の増加方法の概要

表-1 降水変化に伴う5月、7月の出水時流量の増加率

降水変化	May	July
1	1.15	1.12
2	2.8	3.19
3	3.84	3.74

(倍)

その後、ヒゲナガカワトビケラの個体群が複数年間維持できるか複数回の数値実験を行い、その実証性を検討した。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⁴⁾。また、個体群動態は、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個体のペアが卵約2個を再生産する条件で、個体群が10年程度維持される結果となった⁵⁾。

(5) モデルを用いた降水現象変化がヒゲナガカワトビケラの生活史に与える影響評価の概要

CMIPに参加する気候モデル群のデータを対象にIPCC気候変動モデル部を用いて、近未来(2046年～2065年)、将来(2080年～2099年)における降水量変化のマルチモデル平均の降水量変化特性を算出した。その結果、3月～7月における月合計降水量が平均15mm程度増加する傾向を把握した。

この傾向を考慮し、CMIPで「現代」とされる期間の平均的な降水特性と判断された1997年において、ヒゲナガカワトビケラの羽化行動が活発となる5月、7月の月合計降水量15mm程度、複数の降水日に振り分け増加させ流出解析を行った。流出計算データの構築時にCMIPのモデル群の降水量データ

は、千曲川のティーセン分割流域間における降水量変化を表現する空間解像度を持たない傾向が確認できた。そのため、調査地よりも上流で、ティーセン法に基づき分割された流域数を順次拡大させ、降水変化特性を3類型（降水変化1～降水変化3）設定し流出計算を行い、調査地上流端における各降水変化別の流量時系列を計算した。その後、各降水変化別の流量時系列を、河川生態系変動予測モデル部に与え、ヒゲナガカワトビケラの個体群動態変化を推定した。与える流量時系列は、1997年における降水変化時の流量時系列を2年間繰り返し与え、ヒゲナガカワトビケラの個体群変動を数値実験した。なお、土地利用変化・熱環境変化は、本数値実験では考慮の対象外とした。

2.4. 結果と考察

(1) 降水変化に伴う流量変化の概要

表-1に将来気候時の5月、7月における出水時流量の増加率を示す。降水変化2から、急激に流量の増加が確認され、5月、7月の主要出水時の流量は、約3倍～4倍に増加した。

図-4に1997年の年間流量時系列を示す。降水変化2～降水変化3においては、降水変化を生じた日だけではなく、降水後、数日間は流量の増加が確認できた。千曲川のような流域面積が大きい河川の場合、降水変化の影響は、瞬時的な変化を及ぼすだけでなく、一定の継続性があることが確認できた。

(2) 流量変化に伴うヒゲナガカワトビケラ個体群動態変化の概要

図-5にモデルを用いた1997年～1998年におけるヒゲナガカワトビケラの個体群動態を示す。現況においては、個体群が維持され繁殖率の上昇で個体群が容易に復元する範囲の変化であった。しかし、

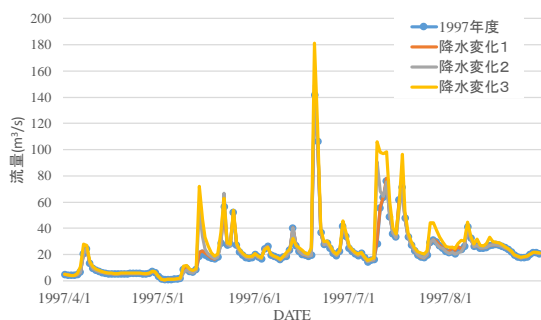


図-4 降水変化に伴う5月、7月の流量変化率

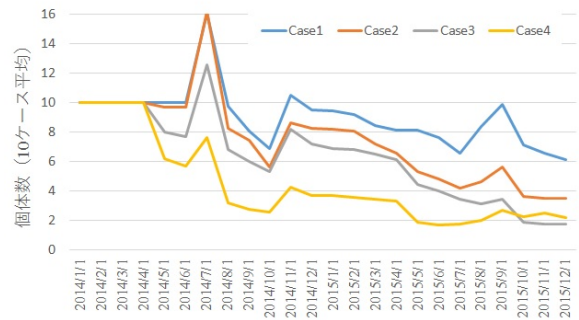


図-5 流量変化に伴うヒゲナガカワトビケラの個体群動態予測結果

降水変化が生じた場合、個体群が減少する傾向が把握でき、その傾向は、降水変化2、降水変化3において、顕著であった。

降水変化2、降水変化3において、個体群減少が顕著になったのは、1997年5月の第1世代の羽化・交配の失敗が大きな要因と考えられる。計算期間の初期に、雌雄の個体群が減少すると、直接的に第2世代の個体数を減少させると考えられる。このことが、世代数の増加を通して増幅され、最終的には個体群の縮小につながっていくと考えられる。本シミュレーションでは、5月と7月に限定して降水量を増加させているが、気候変動に伴う降水変化は、5月、7月に限られず、3月～7月の約5ヶ月間というヒゲナガカワトビケラの再生産期間全般に渡る。この点を考慮すれば、気候変動に伴う流量変動特性の変化は、よりヒゲナガカワトビケラの個体群動態を不安定にさせる可能性があると考えられる。

(3) 本システムの持つ河川環境管理への可能性と今後の課題

本研究では、モデルが対象の内、ヒゲナガカワトビケラの個体群動態という極めて限られた河川生態系的一部分を検討対象にしたに過ぎない。しかし、この検討は多くの意義を有している。既往の河川生態に関する研究は、特定区間の特定生物に焦点を絞った研究が多かった。不確実性が高い河川生態系を構成する物理環境と生物群集の変動を分析するには対象を限定する必要性があり、既往研究の取り組みには合理性がある。

この合理性に加え、気候変動やという流域スケールで生じる大きな空間スケールで生じる変化が河川生態系に与える影響を論じるには、本研究で検討した様な、流域から生物までを一気通貫のシステムとして記述していくことが必要となる。

本研究では、解析対象の限定のため未考慮とした、

気候変動に伴う熱環境変化は、データ入力を簡便化するデータベースの構築等が進めば可能となり、今後の検討で実施する予定である。また、入力条件の精緻化だけでなく、河川生態系変動予測モデル部の予測精度が向上すれば、より正確な河川生態系への影響を予測することが可能となると考えられる。

「気候変動」の影響を受ける多様な現象を調整するための河川環境管理には、本システムで示した複合的な現象をまとめるシステムが必要で、河川環境管理への貢献の可能性を示す結果となった。

3. 達成目標 2：河道掘削、ダム等による流況変化の緩和事業による河川生態系への影響軽減効果の試行的予測シミュレーション

3.1 はじめに

2章までの検討で、流況変化は、ヒゲナガカワトビケラの生態に大きな影響を与えることが推定される結果となった。本章では、流況変化に対する適応策による流況変化を模擬的に作成し、流況変化にตอบสนองするヒゲナガカワトビケラの個体群動態を推定し、その効果を検証する。

3.2 研究の方法

流量時系列を複数設定して検討した。Case1 は、千曲川における平均的な流量時系列と判断した2013年の流量時系列を用いた。Case2 は、2章における検討で最も降水現象が極端化した降水変化3の流量時系列を用いた。Case3 は、千曲川流域のダム・調整池の設置により100m³/sのピークカットに成功した場合の流量時系列を用いた。Case4 は、河床低下等により単調化した単断面河道を複断面化し、瀬・淵構造が2列ある河道に変更した河道をCase3の流量時系列が流下した流況を用いた。

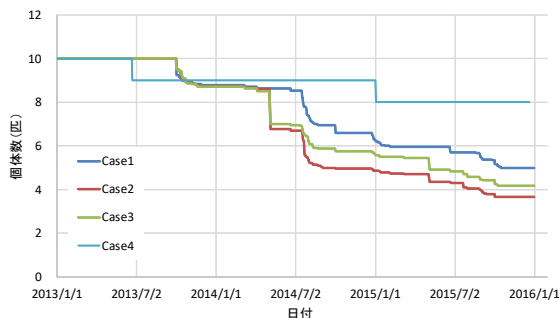


図-6 適応策変化に伴うヒゲナガカワトビケラの個体群動態予測結果

この4つのケースにตอบสนองするヒゲナガカワトビケラの個体群動態を比較した。計算条件は、計算空間の下流端の瀬にヒゲナガカワトビケラを10匹配置し、3年間の個体群動態計算を実施し、個体群の減少傾向を比較した。

3.3 シミュレーション結果と考察

図-6に、各Caseにおけるヒゲナガカワトビケラの個体群動態を示す。Case1に比較して、Case2においては、個体数約24%減少した。これに対し、Case3においては、個体数が16.6%減少するに留まった。Case4においては、個体数減少がほぼ5%未満となったが、その中でも良好な結果を示したケースを示す。個体数は8個体以上を保持した結果となった。

気候変動への適応策を検討する場合、既存ダムの活用等が直感的に考え得るが、Case4で示した河道地形の複雑化に伴う生息域の拡大、生息域のパッチ状の配置（空間的不均質性の向上）等の措置は有効である可能性を示す。

4. 本研究を通じたまとめ

本研究で示した結果は、あくまでも手法の開発を目的とし、適応策の検討は、試行的な取り組みであることに留意しなければならない。

しかし、本研究の実施による萌芽的に大きな研究進展があった。

まず、降雨・流出・河川生態モデルの連結に一つの方向性を見出した点である。従来の河川生態モデルでは、降雨・流出・生態の3モデルを流域スケールで結合した事例は極めて少ない。部分・部分のモデルは、極めて初歩的なモデルであるが一連の評価手続きとして連結できた意義は大きい。

次に、適応策の差異が、ヒゲナガカワトビケラの個体群動態に与える影響を暫定値として示し、適応策の効果を相対的にでも表現できた点は、叙述的な言語モデルで表現されることが多い既往研究に対し、大きな進展であるといえる。

萌芽研究を端緒として始めることが出来た降水現象（気候変動）が河川生態系への与える影響評価の研究は、河川砂防技術研究開発（地域課題分野：河川生態）：河川中流域における生物生産性の機構解明と河川管理への応用（代表研究者；信州大学繊維学部平林教授）へ引き継がれ、基盤研究「河川水温の上昇が有機物代謝に及ぼす影響に関する基礎的研究」の研究と融合することにより、総合的な降水現

象極端化(気候変動)の研究へ発展する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Masatoshi DENDA and Yuichi KAYABA : Development of Individual based models of aquatic insects for assessment on influence of climate change on river ecosystemsp. 83、proceedings ofn International Society Ecological Modeling 2016。
- 5) 傳田正利・萱場祐一：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、環境水理部会環境水理部会研究集会 2016 in 香川講演要旨集、pp. 45-pp. 46.