

2015年度（第51回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 15-A-7

極端現象が与える流域生態系への影響評価  
—降水現象の極端化に伴う流況変化等が河川生態系に与える  
影響に着目して—

土木研究所 主任研究員

傳田正利

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

# 極端現象が与える流域生態系への影響評価

-降水現象の極端化に伴う流況変化等が河川生態系に与える影響に着目して-

Assessment on influence of extreme weather on river basin ecosystem

-Focusing on change of flow regime due to extreme weather -

傳田正利

Masatoshi DENDA

## 1. はじめに

気候変動の進展は世界的な共通認識となり、気候変動への対応は、科学・技術分野のみならず、行政分野も含んだ世界的な対応が求められる課題である。また、気候変動に伴う極端現象の増加も日本全国において確認されている。河川分野では、降水現象の極端化、それに伴うと考えられる土砂災害・河川氾濫の増加が生じている。

水工学分野では、気候変動に伴う降水現象極端や災害発生メカニズム解明、降水減少極端化への適応策の研究が活発に行われている。また、行政・施策としても、降水減少極端化への対応が検討事項に挙げられている。気候変動、それに伴う極端現象（例えば、降水現象極端化）は、「治水」や「利水」という形で直接的に影響が生じるため対応への社会的要請が高く、研究・技術開発から行政施策まで、幅広い対応が試みられている。

しかし、治水・利水だけでなく「環境」との調和を目指す河川行政にとって、気候変動やそれに伴う極端現象に起因する環境変化への対応が必要となる。環境の中でも水質問題等は利水に影響を与えるため検討が本格化しているが、環境の中でも河川生態系に与える影響については、極端現象と関連して検討されることは少ないと考えられる。この理由は、現在、気候変動や極端現象に伴う河川生態系管理上の問題が指摘されることは少ないためと思われるが、一度、種の著しい減少等の生物多様性に関する問題が顕在化してからの対応では、復元が容易でない生物多様性・河川生態系の特性を考えると、事前の対応が必要となると考えられる。

本稿では、2章において、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響に関する研究動向を整理し、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響の研究の方向性を考察する。3章において、河川生態系の構造を改めて分析し、気候変動・極端現象が河川生態系へ及ぼす影響要因を整理する。

次に、4章において、気候変動・極端現象の研究ではモデル研究が多用されるが、気候変動・極端現象が河川生態系へ及ぼす影響予測に有力な手法である生態モデリングを紹介する。また、5章において、生態モデリングを河川工学と融合させ、出水、河川地形変化、植生変化、及び生物群集が連動して変化する河川生態系の特徴を表現した河川生態系変動予測モデルの概要を紹介する。その後、6章において、気候変動・極端現象の増加が河川生態系へ与える影響評価の適用例として、極端現象に伴う流量と水温変化が水生昆虫の生活史に与える影響を評価する事例を紹介する。

最後に、水文学、河川工学及び生態モデリングを結合し、流域スケールでの河川生態系管理、IPCC等で提供される気候モデルの計算結果を活用した河川生態系管理にむけて、今後、水工学で必要となる検討事項を整理し、具体的な生態系管理への応用の方向性を議論することを目的とする。

## 2. 気候変動に伴う極端現象が流域河川生態系に与える影響の研究動向

本章では、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響に関する研究動向を整理し、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響の研究の方向性を考察する。なお、気候変動に関する研究は、自然科学から社会科学までの多岐に渡るが、筆者らの研究蓄積は浅いため、十分に既存研究を網羅していない可能性もあるが、現段階で把握している研究動向を整理する。

まず、気候変動に関する国際的な研究・政策検討などの取り組みといえば、気象学における全球気候モデル(GCM: Global Climate Model)、や気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の取り組み等を思い浮かべる方が多いと考える<sup>1)</sup>。国際誌をレビューすると気象学や水文学分野では、GCM, IPCCに関連した気候変動のメカニズムや気候変動が自然・人間社会に与える影響を研究した事例は多数存在する。

気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える研究に関しては、(イ)気候変動に伴う極端現象等の変化が流域スケールでの河川生態系に与える影響評価に関する研究、(ロ)気候変動に伴う極端現象等の変化が特定の生物階層に与える影響を評価する研究、以上の2通りに分類される。(イ)の研究の一例として、Andrew et. alの研究が挙げられる<sup>2)</sup>。Andrew et. alらは、Hadley Centre climate model(HadCM3)を用いて、2080年のイギリスの河川生態系を推定し、暖かい冬季と穏やかな春季は、河畔に生息する鳥類の生息、サケ・マス以外の魚類の再生産を促すが、魚類の病気の発生率の上昇、サケ・マス科の生息地の減少、外来性の大型水生植物・魚類の増加等を促す可能性を指摘している。イギリスの広範囲を対象とし、気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響を総合的に評価した事例として、今後の研究に重要な示唆を与える研究である。(ロ)の研究の一例として、Rui et. alの研究がある<sup>3)</sup>。Rui et. alは、Mediterranean riversを対象に、モデルを用いて気候変動に伴う極端現象に起因する流量変化(Flow regime)が、河道内植生に与える影響を検討している。その結果、植生がない区域が拡大し、パイオニア的な植生が減少する可能性を指摘し、河道内植生管理が課題となる日本の河川にも有用な研究成果を示している。

紹介した以外にも、多くの興味深い研究成果があるが、これらの研究に共通しているのは、「モデル」を活用した研究である点である。(イ)はレビュー研究ではあるが文献調査対象の個々の研究は、降雨モデルと流出モデルが連携し、検討項目が多岐に渡る河川生態系への影響分析を行えている点が興味深い。(ロ)の研究は、(イ)の研究に加えて、河川生態系を構成する各生物階層の詳細なモデルでの検討がなされ、より河川生態系管理に近いレベルでの検証がなされている。これらは、河川生態系を「モデル化」することの重要性を示している。気候変動に伴う極端現象(流量変化等)は、未だ顕在化していない現象が複雑な機構を持つ河川生態系に与える影響を評価する点が難しい。この難点を克服するには、複雑な機構を持つ河川生態系の構造の理解、そのモデル化を行い、高精度化したモデルに種々の計算条件を与えて将来の河川生態系像を推定していくことが必要となる。

3章では、複雑な構造を持つ河川生態系のモデル化のため、河川生態系の定義の再確認、河川生態系を特徴づける重要概念を整理する。

## 3. 生態系の構造と生態系を駆動するもの

### (1) はじめに

2章においては、気候変動に伴う極端現象が、河川生態系に与える影響を予測するためには、複雑な構造を持つ河川生態系のモデル化が必要であることを整理したが、その準備として、河川生態系の構造と特性を十分に理解する必要がある。本章では、生態系の定義に立ち戻り、河川生態系の構造と特徴(独自性)を理解するため、その重要概念である「生態系」、「流量変動」及び「河川連続体仮説」を整理すると共に、気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響要因を検討する。

### 3.2 生態系の定義から見る河川生態系の構造と特徴

生態系（エコシステム：ecosystem）とは、ある地域に生息している多種類の生物全体と、それらの生活基盤となっている土壌や水、気象、海流などの物理的科学的な環境を全体として一つのシステム（相互作用系）とみなしたものをいう<sup>4), 5)</sup>。多くの文献・書籍に生態系の構造を示す図が存在するが、研究者の研究対象によりその構成要素は異なるが、筆者は出来る限りの要素を挙げると図-1のようになると考えている<sup>6)</sup>。

まず、生態系に着目する範囲が設定され、非生物的空間と生物集団が認識され、非生物的空間または生物集団を構成する諸要素は相互作用を持つ。河川生態系であれば主に河川とその周辺空間が範囲として設定され、河川を流下する流量と流れに輸送される土砂や有機物、熱量等の非生物的空間要素、河川とその周辺域に生息する鳥類、哺乳類、魚類、両生類、爬虫類、水生昆虫、陸生昆虫、付着藻類及び植生などの生物集団が認識できる。これらは、お互いに相互作用を持ち、複雑な系（システム）を構成する<sup>6)</sup>。この相互作用の一例としては、出水時の流況が、河道内地形と植生を変化させること、植生の繁茂が流下を阻害し水位上昇をもたらすこと等が挙げられる。

生態系は、「生態系サービス（Ecosystem service）」や「生態系機能（Ecosystem function）」という用語で定義されるように多くの財・サービスの提供を行う機能を持っている<sup>7)</sup>。その生態系の機能中で、生態学が古くから研究の対象としたものとして、「生産（produce）」がある。

「生産」とは、生態系が光合成によって無機物から有機化合物を合成することをいう。生産者（producer, 光エネルギーを固定する。主に緑色植物が該当）が生産した有機化合物の総量を「総生産」、生産者の呼吸量を差し引いた残りを「純生産」という<sup>6)</sup>。生産者が生産した生産は、「消費者（consumer, 主に動物が該当）」、そして、植物や動物の排泄物やその遺体を分化する「分解者（decomposer, 主に微生物や菌類の腐

生生物が該当）」により利用される。生産者の生産から出発して栄養段階を順次上がるとそれぞれの生物は下位の生物の有機物を利用して自らの体を生産したといえるので、同化量（生物が細胞内で外から取り入れた物質を有用な物質につくりかえる働き）から呼吸量を差し引いた量この生産を二次的な生産、「二次生産」

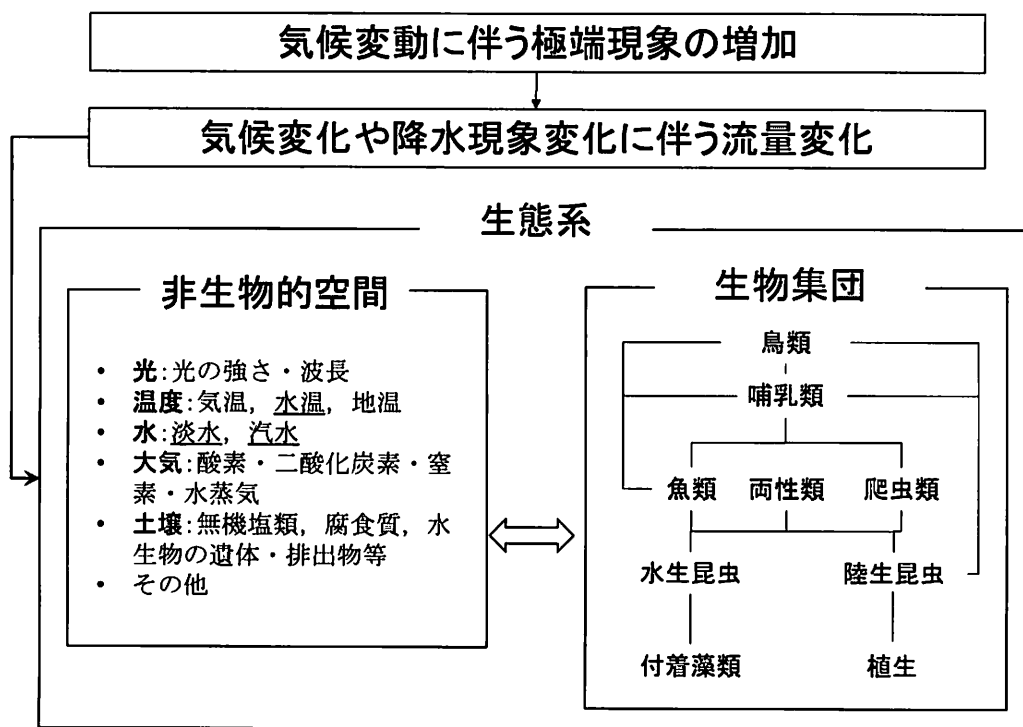


図-1 生態系の構成図（平林ら<sup>6)</sup>を一部改変）

8)という。この生産には、非生物的要素としての「熱」が大きな役割を果たす。植物の種子の発芽、水生昆虫の成長や魚類の孵化・成長等には、気温や水温が大きく影響し、生態学の研究では、「有効積算温度」等の用語があることから、生物集団にとって「熱」は重要な要素であることがわかる。

気候変動に伴う極端化現象は、生態系の生物集団直接的に影響を与える経路と、非生物的空間の変化を介して生物集団へ影響を与えると考えられるが、水工学を始め土木工学が研究対象とするのは、非生物的空間についてであるため、以下に、非生物的空間として、「流量変動」「流域」の二つに着目して検討する。

### 3.3 河川生態系を特徴づける流量変動の重要性

河川生態系の構造や機能は、「変動」という言葉でその特徴を示すことができる<sup>9)</sup>。特に、日本の河川は、流量の季節変動、出水と平水の流量差が著しい等の特徴が挙げられ、融雪出水、梅雨出水及び台風出水等が一例として挙げられる。

出水による砂州の変化に伴い、河川地形、土壌材料等、植生の空間分布が変化し、ワンド・たまりといった河川景観も変化する。この変化は、河川に生息・生育する生物の生息空間を改変し、河川生態系を構成する各生物種は、生活史にこれらの出水イベントを巧みに取り入れ種・個体群の存続を図っている。

河川生態系研究における「流量変動」の研究は多く存在するが、その代表例として、Bunn, Arthingtonの研究が挙げられる。Bunnらは、洪水攪乱が河川生物の多様性に与える影響として、(イ)生物生息場は、川の流れによって形成され、生物相も影響を受ける。(ロ)水生生物は主として自然の流況(natural flow regime)に適応して生活史戦略を進化させた。(ハ)河川に生息する生物種が生存には、水域の縦横断方向の連結性が重要、という4つの原理を挙げ、出水時系列との関連性を指摘している。図-2にその概要を示す<sup>10)</sup>。

気候変動に伴う極端現象は、第1段階として、自然の流況(natural flow regime)の変化を介して、種(個体群)の維持・再生産に大きな影響を与えると推定される。例えば、梅雨時期の出水が減少した場合、図-2

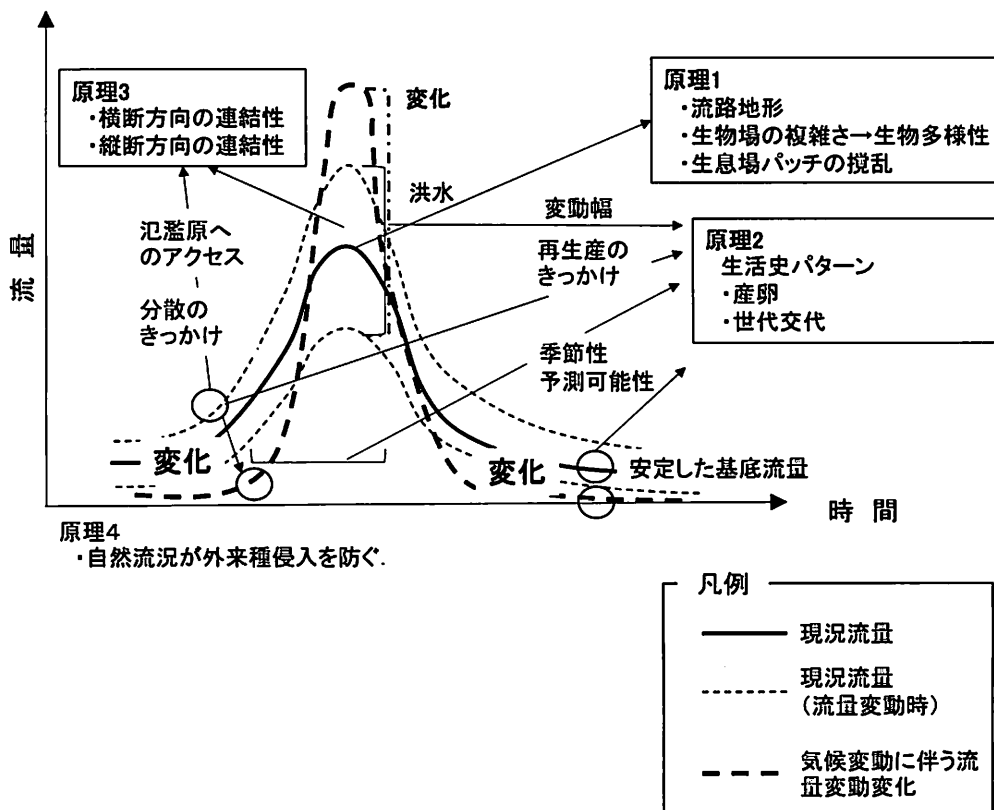


図-2 流量変動の概念図(Bunn SE et.al. Environ Manage 30:493(2002) (一部改変)

に示す氾濫原等へのアクセス性は減少し、生息場の連結性が減少すると考えられる。また、「流量変動」と「熱量」は関係性を持つ。例えば、気候変動に伴う極端化現象に伴う気温の上昇、流量変動が極端化（大規模出水の増加、中小規模の出水数や平水流量の減少等）により平水流量が減少した場合、浅い水域での水温上昇、流下による熱量輸送の減少が生じ河川中の水温が上昇する等の相互作用が考えられる。その結果として、河川生態系の生物集団の生活史は影響を受けることが推定される。気候変動に伴う極端減少の増加は、河川生態系を構成する生物群集が長い期間をかけて築き上げた生活史の成立を危うくすることから、河川生態系に影響を与える。このように気候変動に伴う極端現象に起因すると考えられる流量変動の変化は、河川に生育・生息する生物の生活史に直接的・間接的に影響を与えると考えることができる。

本節では、「流量変動」と「熱量」を一例として示したが、検討を進めるに従い、多くの相互作用が懸念されることとなると考えている。

### 3.4 流域スケールでの河川生態系の構造の変化

前節では、特定区間の河川生態系を対象に、気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響をについて、非生物的空間要素である「流量変動」と「熱量」を主に指摘した。しかし、これは特定区間の河川生態系に着目した結果であり、流域スケールで、気候変動に伴う極端現象が河川生態系への影響を考察した場合、これらの推定は、流域スケールに対象を拡大した場合、影響要素が異なってくると考えられる。

本節では、流域の生態系を考える上で、重要な概念となる生態学の「河川連続体仮説 (River continuous concept: RCC)」を用いながら、流域スケールにおける気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響について考察する。

河川連続体仮説は、有機物供給やエネルギーバランスが周辺環境に対応する形で、上流から下流へと連続的に変化する一つのシステムとして河川を概念的に説明する<sup>10)</sup> (図-3)。RCCが指摘する重要な現象は、河川

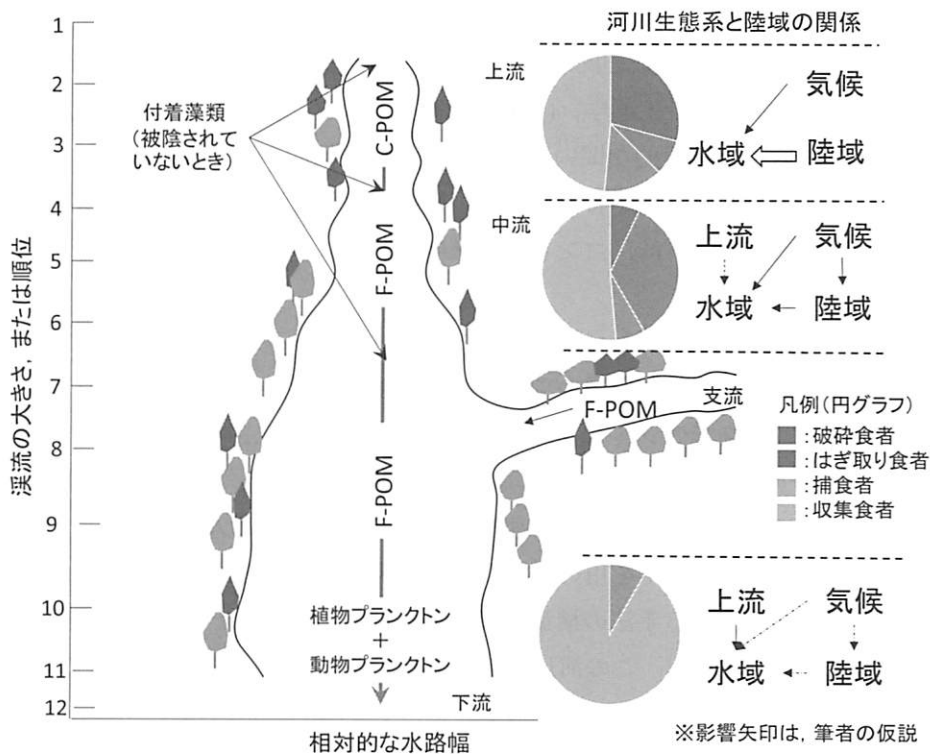


図-3 RCCの概念図とセグメントとの関連性 (Vannote R. L. et. al. Can. J. Fish Aquatic Sci. 37, pp. 130 ~137 (1980) より引用・一部改変)

生態系は、上流、中流、下流と流下するに従い、基盤と各区間の河川生態系が依存する有機物に変化し、その変化に対応して、河川生態系構成する生物集団（水生昆虫群）が変化する点である。すなわち、上流域では、河畔林が繁茂するため河川内での光合成が制限され（樹冠効果）、落葉などの有機物供給が多いために、破碎食者が優先し、腐食連鎖が卓越する。中流域では、川幅が広がり藻類や水生植物の生産が増加するため、生食連鎖が発達し、付着藻類を利用する水生動物が定着しやすい。下流域では、流下してくる懸濁物が増えて水深が深いために河川内での一次生産量が減少し、上流から供給される比較的細かな有機物に依存されるコレクター（収集者）が優占し、腐食連鎖が盛んになると言われている<sup>10)</sup>。

この指摘は、気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響は異なる経路で、流域スケールでの河川生態系に影響を与えることを推定させる（図-3）。上流域では、河畔林を始めとする陸域の生産物に依存する河川生態系が構築される。気候変動に伴う極端現象、例えば、時間雨量の多い雨の増加は、山間地の土砂流出の増加や森林環境の変化に伴う有機物動態に変化を与えること等が推定される。中流域では、気候変動に伴う極端現象により、流量変動が変化し平水流量の減少・出水時流量の増加が生じた場合には、河川内で生産される流下有機物量や動態に変化が生じるとも考えられる。

このように、気候変動に伴う極端現象は、広範囲にその影響を及ぼすが、RCCが示すように河川生態系は流域の各区分により流域、上下流と異なる関係性があるため、河川生態系への影響を考察する場合には、流域の各区分に分けて、その影響を考慮しなければならないと考えられる。これは、2章で指摘した気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響評価にはモデル等による影響評価が重要であることに加えて、RCCは、流域の各区分で適切なモデルを選択する必要性を指摘していると考えられる。

#### 4. 気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響評価のための生態学の数理的解析の重要性

2章では、気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響を予測する手法として、生態学（生態系）の数理的解析の手法を用いたモデル研究等を通して、現象変化を予測し、その兆候を把握することが大切であること指摘した。

その際に、有効となるのが生態学の数理的解析（以下、「数理的解析」と記述する。）である。数理的解析は、（イ）数理生態学、（ロ）統計生態学、（ハ）生態モデリングに分類することが出来る<sup>5)</sup>。

（イ）数理生態学は、生態系の一般的な問いに答えようとする傾向が強く、着目する生態系機構をなるべく簡易なモデル（数式等）で記述する点が特徴である。伝統的な例としては捕食者と被食者の動態を記述する例が挙げられる。（ロ）統計生態学は、コンピュータの高速化に伴う複雑な統計手法を用いて、生態現象の解明等を行う研究である（図-4）。

これに対し、応用的な側面が強いのが、（ハ）生態モデリングである。（イ）数理生態学・ロ）統計生態学は、生態現象の機構解明を解析・統計を用いて行うのが、生態モデルでは、具体的な対象に対して定量的な予測計算を行う。環境影響評価でのシミュレーション等が好例である。

筆者らが所属する土木研究所は、土木事業が環境へ与える影響を評価し、その影響を軽減する方法を検討する手段として、（ハ）生態モデリングに着目し、生態モデリング手法の導入、生態モニタリングの高度化による生態情報の空間情報化<sup>11)</sup>、河川工学を用いた空間動態表現の高度化等を行い、人為的インパクトと河川生態系のレスポンスを再現・予測する手法の構築を行ってきた。その結果として、河川生態系変動予測モデルの基礎モデルが構築されつつある<sup>12)</sup>。この河川生態系変動予測モデルは、5章において詳述する。

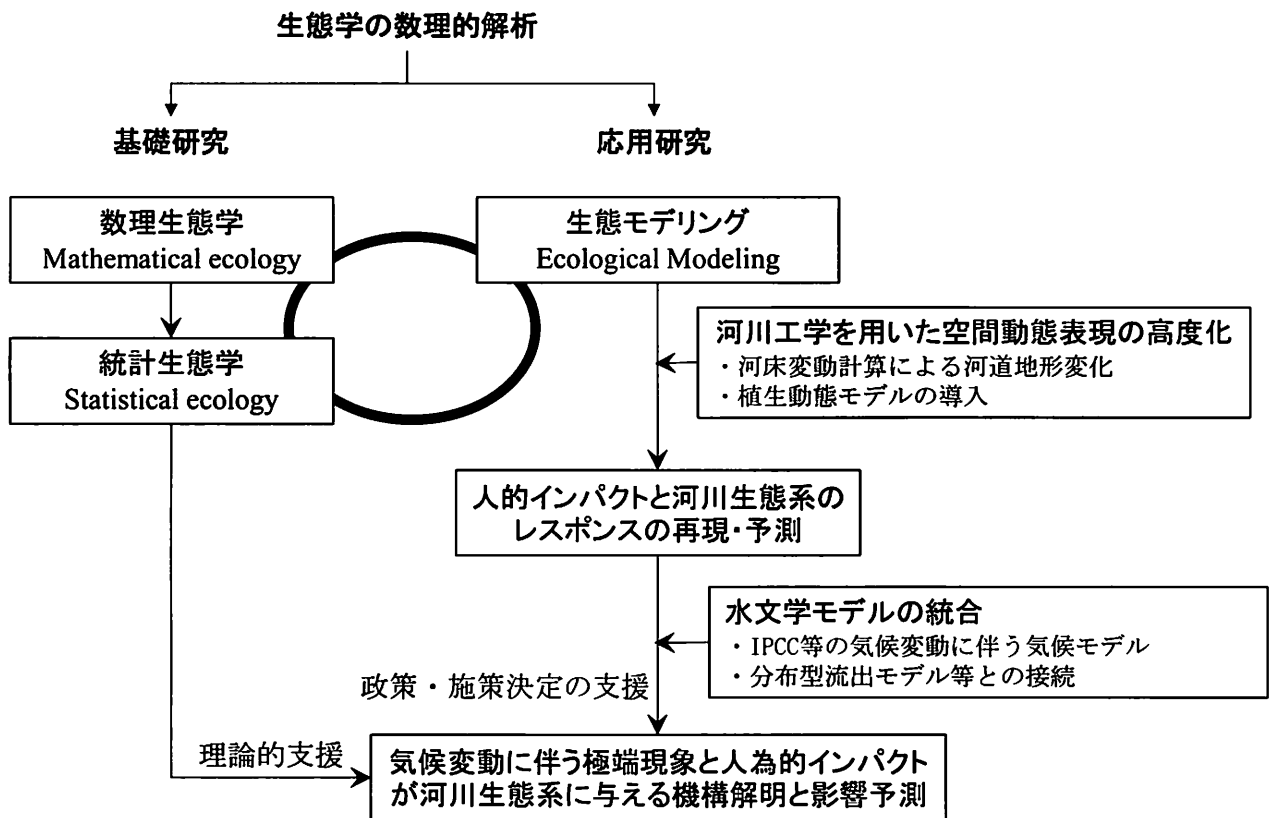


図-4 生態学の数理的解析の分類と筆者らの研究の方向性（楠田ら<sup>5)</sup>に加筆）

## 5. 物理モデルと生態モデルへ結合

### 5.1 河川生態学術研究会五ヶ瀬川研究グループによる河川生態系変動予測モデルの開発

河川生態学術研究会五ヶ瀬川研究グループ（以下、「五ヶ瀬川G」と記述する。）は、河川環境の維持・管理・再生への機構解明のツールとして、河川生態系変動予測モデル（REVPM：River ecosystem variability prediction model, 以下、REVPMと記述する。）を開発した。REVPMは、河川工学を用いて、一部の生態モデリングで行う空間情報再現をより動的に再現にしているのが特徴である。非定常河床変動計算を用いて、河川生態系の基盤となる河道内地形変動を定量的に再現し、物理生息場モデルや植生動態モデルを用いて、生息空間変動の再現・評価を行った後、各対象領域の指標生物の生態が再現されるモデルである。

五ヶ瀬川Gが研究対象とした五ヶ瀬川水系北川（宮崎県延岡市近郊）は、比較的、小規模な流域でありながら、山間地（セグメント1）から河口域（セグメント3）を持ち、四十帯に属する流域は大きく蛇行しながら流下する特性を持ち、多様な生物群集が生息・生育する河川である。

REVPMは、この北川の特性を再現できるように（イ）礫セグメントでの高水敷掘削を対象とした検討ツール、（ロ）礫セグメントでの水中部掘削を対象とした検討ツール、（ハ）感潮域内での礫～砂セグメント変化点周辺での河道掘削を対象とした検討ツール、で構成されている。

（イ）は、筆者と宮崎大学が主として取り組んだモデルである。上述のように河床変動計算、植生動態モデル、野生動物行動予測モデルで構成されている。モデルの計算手順を詳述すると、流量時系列データの河床変動計算へ入力により、各グリッドにおいて流況・せん断応力等が計算され、主にせん断応力により植生変化が計算される。その後、生物の個体レベルの動態に着目した生態モデリングである個体ベースモデル（IBM: Individual Based Model）（以下、「IBMs」と記述する）生態モデルを用いて、タヌキ、アナグマ、イタチ、ウサギ等の陸上哺乳類の行動を再現するモデルである。陸上哺乳類は、個体内の生理機構を記述し



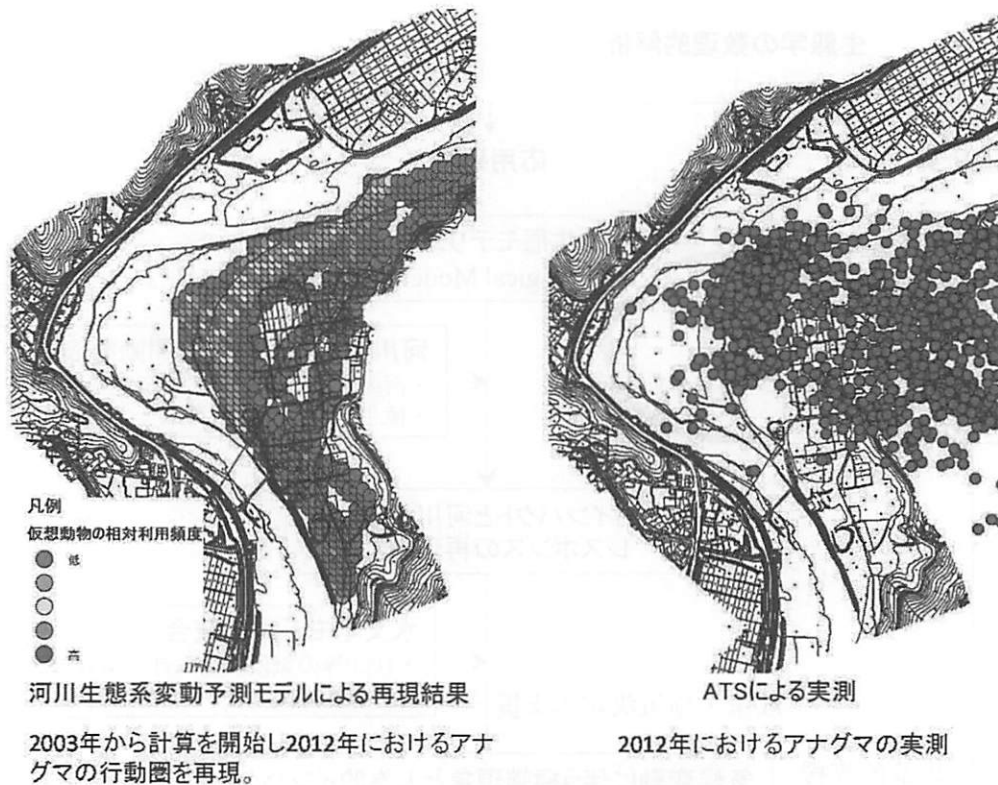


図-5 REVPMによるアナグマの行動再現モデル

た内部モデルを持ち、摂取カロリーと消費カロリーの差から空腹を判断し、採餌行動等の個体維持の行動を決定する。採餌行動モデルは、植生の選好性を考慮しながら記憶された採餌場への距離が最小化するように移動し採餌するように記述され、野生動物の採餌行動や空間選択過程が詳細に記述されているモデルとなっている。

(ロ)、(ハ)は、主に九州大学、福岡大学の研究者が開発したサブモデルであるため、詳細は、参考文献に譲るが、(ロ)は、上述の河床変動計算や流動解析の結果を早瀬の指標種であり河床材料の粒径・流況によって生息場としての健全度が評価される瀬セグメントでの典型的な生物であるボウズハゼの生息適地を物理生息場モデルで評価するモデル、(ハ)は、河口付近の塩分濃度変化、河床変動変化及び水際への砂の堆積の評価の指標種となるカワスナガニの生息適地評価を用いて汽水域環境を評価するモデル、2つの生態モデルである。

REVPMは、五ヶ瀬川水系北川における河川生態系を構成する主要な河川生態系の変動の再現に成功し、河川生態系管理のための河川工学と生態モデリングの融合事例として、良好な成果を収めている(図-5)。

## 6. 水生昆虫を例とした予測科学の研究

### 6. 1 はじめに

降水現象の極端化が全国の河川で確認され、その適応策の必要性が指摘されている。河川生態系を構成する生物群集は、地域固有の流量変動とそこに適応・進化してきたため、降水現象の極端化は、河川生態系に何等かの影響を及ぼす可能性がある。しかし、この河川生態系への影響は一部の先行研究で指摘され始めた段階であり、適応策の検討を行うための知見は十分ではない。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、生態シミュレーションの手法が有効である<sup>5)</sup>。例えば、極端現象に起因する流況・河川水温の変化への反応が顕著な生物に着目し、生態シミュレーション手法を開発する必要が挙げられる。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生態シミュレーションの開

発を行っている。一般に、水生昆虫は、その個体の成長と個体群の再生産が流況と水温に大きく影響を受け、極端現象に起因する流況変化とそれに伴う河川水温の変化への反応が顕著であると推定されるためである。本発表では、筆者らの開発した水生昆虫の生態シミュレーションの概要および、生態シミュレーション手法の再現性についての検証結果を報告する。なお、本稿投稿時には、本章で紹介する生態シミュレーション手法を用いて、気候変動に伴う極端現象に起因する流量変動特性の変化が水生昆虫の生活史に与える影響と、水温変化が水生昆虫の生活史に与える影響評価の検討が終了しているが、未発表のため、講演でその内容を紹介する予定である。

## 6.2 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ある。本河川は流域面積 7163km<sup>2</sup>、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。着床は、ヒゲナガカワトビケラの個体群が再生産をする上で重要な意味を持ち、卵の孵化・幼虫期の成長に適した上流側の瀬に着床することで、次世代の個体群に安定した成長環境を与えることが出来る。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<sup>13)</sup>。

### (3) 調査地におけるヒゲナガカワトビケラの生態の特定

生態シミュレーション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、開発を行った。IBMs は、生物種の個体レベルでの生態に着目し、その成長過程をモデル化する手法である。(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、流況・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。

### (4) ヒゲナガカワトビケラの生態シミュレーションモデルの概要と検証

上記で定量化したヒゲナガカワトビケラの生態を流況シミュレーションと IBMs で再現した。2014 年 4 月~2015 年 3 月における調査地内の流況を平面流計算で再現し、平面流計算の瀬に該当する計算グリッド内でトビケラの IBMs を実行した。水温に関しては、最寄りの水質観測所地点の水温時系列を調査地に均一に与えた。モデルの検証は、ヒゲナガカワトビケラの個体群の再生産に重要な飛翔行動が正確に再現されているかを重点的に検証した。モデルにより、複数回シミュレーションを行い、(イ) 飛翔行動を行う時期、(ロ) 飛翔後の着床位置の 2 点を整理した。その後、飛翔時期、着床位置を現地調査で確認した。

## 6.3 結果と考察

### (1) ヒゲナガカワトビケラの生態の整理と定量化

図-6 にヒゲナガカワトビケラの生態のブロック図を示す。ヒゲナガカワトビケラモデルを用いた試行計算の結果、調査地のヒゲナガカワトビケラは、1 年間に 2 回、再生産を行っていることが算出され、千曲川のヒゲナガカワトビケラの生態に関する既往研究の成果と良好に合致した。

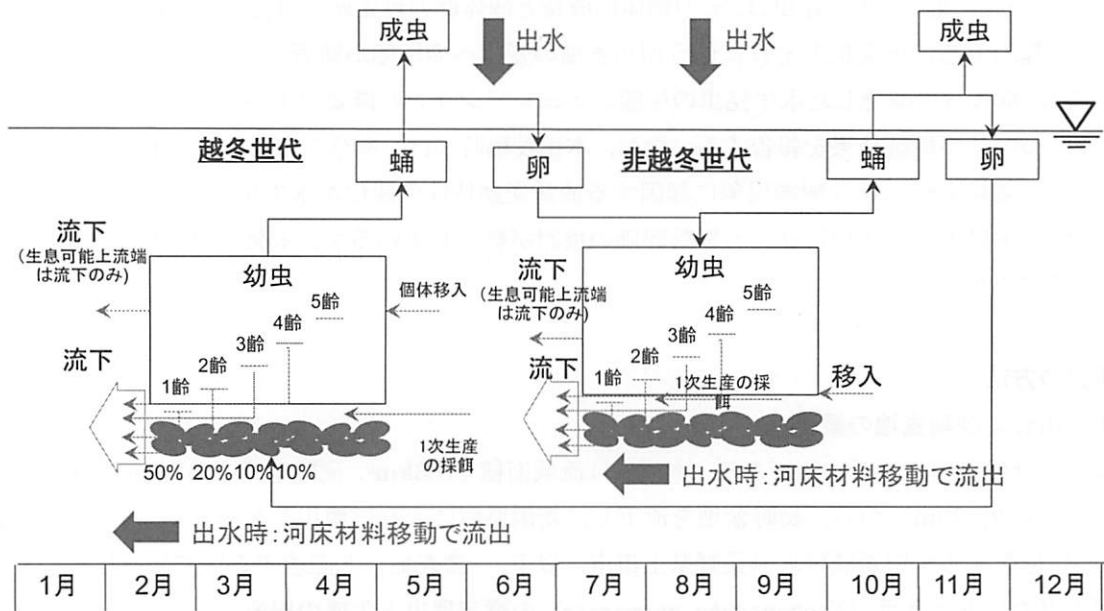


図-6 ヒゲナガカワトビケラの生活史概要



図-7 ヒゲナガカワトビケラの飛行シミュレーション結果

## (2) 飛行行動に着目したヒゲナガカワトビケラの生態モデルの検証

図-7 にヒゲナガカワトビケラの飛行シミュレーションの結果を示す。開発したモデルを用いた複数回のシミュレーションで、着床場所が瀬になることが確認出来た。現地調査により、シミュレーション上で着床することが示された場所で、ヒゲナガカワトビケラの齢期の低い個体を確認することが出来、シミュレーションモデルの妥当性を確認することが出来た。

## 6.4 まとめ

極端現象が河川生態系に与える影響を評価する対象生物として水生昆虫の一種であるヒゲナガカワトビケラに着目し、個体ベースモデルを用いた生態再現モデルを開発した。その精度を千曲川の現地調査結果と

比較検証した結果、ヒゲナガカワトビケラ個体群維持に重要な飛翔行動を概ね再現できた。

## 7. 流域への接続・予測科学への展開

6章では、生態モデルを用いて、水生昆虫の生態モデルの開発・検証、水生昆虫の生態モデルを用いた気候変動に伴う極端現象に起因する流量変動特性の変化が水生昆虫の生活史に与える影響と、水温変化が水生昆虫の生活史に与える影響の比較を紹介した。その結果、複雑な生態を持つ水生昆虫の生活史の再現、流量変化の方が水温変化よりも水生昆虫に大きな影響を与える可能性が大きいことを明らかにした。

日本の水工学分野（河川生態系研究）においては、生態モデルを用いて河川生態系の機構解明や気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響を評価する研究は欧米に比較して少ない傾向がある。しかし、生態モデル研究は、未だ現象が顕在化しない気候変動に伴う極端現象が、河川生態系に与える影響評価について、大きな可能性を持つ（図-8）。

例えば、水文分野で研究・普及が進む分布型流出モデル等の流出モデルへの生態モデルの接続で、より流域レベルでの河川生態系変化の機構解明・将来予測が可能になると考えられる。気候モデルは様々なモデルが開発されその予測結果が異なりと同時に河川生態系に影響を与える流量変動は確率的に変動する不確実性を持つ。近年、研究が進む予測科学において、このような現象を対象とする場合、アンサンブル予測（集団予測が行われることが多い。すなわち、解析誤差程度に初期条件が異なる複数のモデル計算を同時に走らせ、その結果を合わせて、不確実性の高い現象を予測する手法である。

以上の述べた2つの方法（気候変動・流出モデルとの接続、アンサンブル予測技術の実装）を実現することができれば、気候変動に伴う極端現象に伴う流量変化が河川生態系に与える影響の機構解明・定量的予測

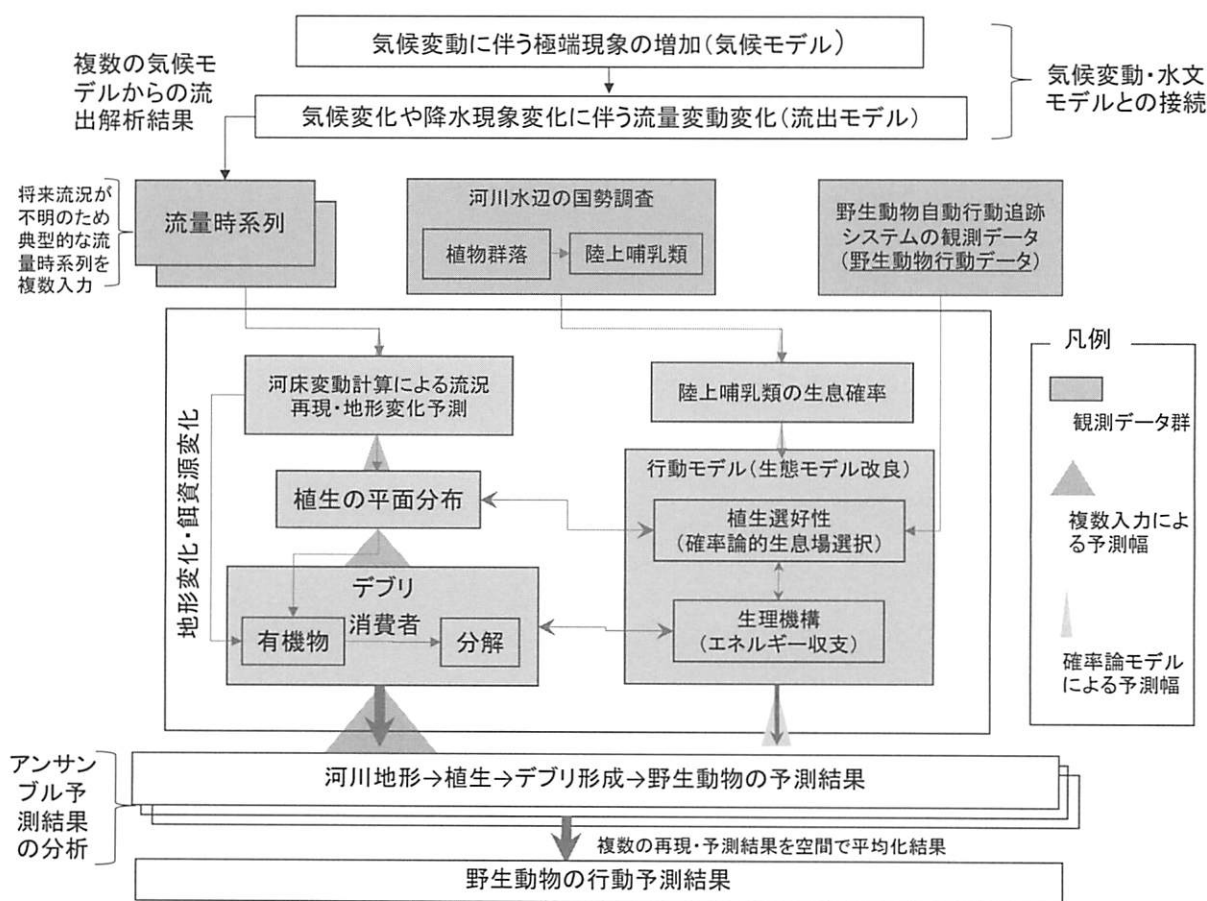


図-8 気候モデルを入力とする流出モデルへのREVPの接続と集団予測のフロー図

が可能になると考えられる。また、数理生態学・統計生態学の研究者・実務者による研究・事業を進めば、生態系モデリングの実用性が向上することにつながり、難度が高いが今後より顕在化する予測され気候変動に伴う極端現象に伴う流量変化が河川生態系に与える影響解明と予測が可能となると考えられる。

## 8. 引用文献

- 1) 2013 Intergovernmental Panel on Climate Change(気象庁翻訳):気候変動2013, 自然科学的根拠, 技術要約
- 2) Andre C. Johnson et. Al. : The British river of the future: How climate change and human activity might affect two contrasting river ecosystem in England, Science of the Total Environment, Vol.407, pp. 4787-4798,2009.
- 3) Rui Rivaes et. al.: Riparian vegetation responses to alter flow regimes driven by climate change in Mediterranean rivers, Ecohydrol. Vol.6, pp.413-pp.424, 2013
- 4) A.G. Tansley: The use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms, Ecology, Vol.16, No.3, pp.284-307,1935
- 5) 楠田哲也・巖佐庸: 生態系とシミュレーション, 朝倉書店, 2002
- 6) 平林公男・白井孝治: 応用生物学入門, pp. 6, 2010
- 7) 森章編: エコシステムマネジメント-包括的な生態系の保全と管理へ-, 共立出版, pp. 151-pp. 153, 2012
- 8) 日本生態学会編: 生態学入門, 東京化学同人, pp. 215, 2012
- 9) 沖野外輝夫: 洪水がつくる川の自然 千曲川河川生態学術研究から, 信濃毎日新聞社, pp4, 2006.
- 10) 川那部浩哉・水野信彦(監修)・中村太士(編): 河川生態学 River ecology, 講談社, 2013.
- 11) 傳田正利・天野邦彦・辻本哲郎: 魚類自動行動追跡システムの現地実証実験と魚類行動特性の把握, 土木学会論文集B, Vol. 65, No. 1, pp. 1-14, 2009
- 12) 河川生態学術研究会五ヶ瀬川水系研究グループ: 五ヶ瀬川水系の総合研究-河川環境の維持・管理・再生について-, 公益財団法人リバーフロント研究所, 2013.
- 13) 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.