

水工学シリーズ 09-A-1

河川環境における変動の把握とその評価

国土技術総合研究所 河川環境研究室長

天野 邦彦

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

河川環境における変動の把握とその評価

Appreciation of the role of fluctuation in river environment and its estimation

天 野 邦 彦

Kunihiko AMANO

1. はじめに

2007年に発表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第4次評価報告書の統合報告書は、気候の変化とその影響に関する観測結果として、「気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である」と結論づけ、地球温暖化に伴う気候変動については、その真偽に関する議論から具体的な対応の検討を行う段階に明確に入ったと言える。

河川環境についても気候変動による影響が予想される。地球温暖化に伴う気候変動により引き起こされると考えられる河川環境への影響としては、種々のものが想定されている。地球温暖化に伴う気候変動としては、気温上昇や降雨パターンの変化が予測されているが、これらの気候変動が生じたとすれば、河川水温上昇や海面上昇、流況の変化を招く。水温や流況は、河川における物理環境、生化学的環境を規定する極めて重要な要素であり、これらの特性が変われば、総体として河川環境に変化を生じせしめるだろうということは想像に難くない。

このように、気候変動が生じたとすれば、河川環境にも影響が生じるであろうというところまでは、ほぼ自明の様に思われるが、その影響は具体的にどのような形で顕在化するのか、またその程度はどれほどのものなのかということが予測できなければ、適切な対応を準備することができない。このため、気候変動がもたらすであろう河川環境への影響について、その特性や程度を早急に検討する必要があると考えられる。

しかし、水温や流況の変化が河川環境に与える影響の作用機構は複合的であること、河川環境自体が常に変動しており、河川環境の評価自体が未だ発展途上の研究段階にあること、河川環境への人為影響の程度が極めて大きく、既往情報から気候変動の影響を単純に抽出できないことなどの理由により、気候変動が河川環境に与える影響について予測することは、たやすいことではない。

本稿では、上記の状況を踏まえて、まず河川環境を評価する上で種々の環境要素の変動が河川環境にどのような影響を与えるのかについて整理する。そして、この整理に基づいて気候変動が河川環境に与える影響について今後どのような観点から検討を進めることが必要かについて述べる。

2. 環境要素の変動特性と河川環境

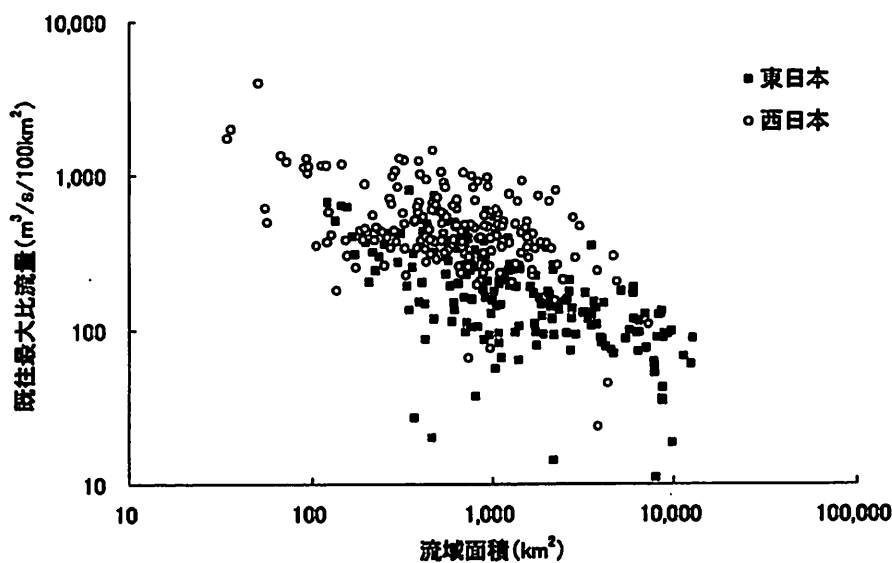
本稿では河川環境の要素として、河川の水量・水質および生物・生態系を念頭に置いて議論することにする。地球温暖化に伴う気候変動は、このうち河川の水量と水温を直接的に変化させると考えて、これらの変化が他の河川環境要素にどのような影響を及ぼしうるのかについて検討する。ここでは、河川環境を規定する主たる環境要素として、河川水量（流量）と水温をとりあげ、これらの変動特性について整理し、変動が生じることで水質や生物・生態系といった河川環境要素にどのような影響があるかについて検討することとする。

2. 1 日本における河川流量の概要

河川流量は、河川における水域を決定すると共に、水や土砂、有機物や栄養塩類、さらに熱量の運搬量を

決定する。特に洪水は、その規模に応じて河川の形状を変化させる働きをもつ。このように、河川流量の変化特性は、河川環境を規定する最も重要なものの一つであるということについては論を俟たないであろう。河川流量については、古くから記録が残っており、その変動特性については、種々の検討がなされてきている。日本の河川流量は、平水比流量が $1\sim7\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ の間にあり、世界の主要河川 ($0.023\sim3.16\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$) と比べて比流量が大きいことが指摘されている¹⁾。これは日本の河川流量が大きいことと流域面積が小さいことによる。また、最大洪水比流量は、東北の河川で一般に小さく、西南日本の外帯や北陸・九州の河川で大きい²⁾。白川³⁾ は、流量年表に記載されている記録を利用して、既往最大比流量を河川ごとに抽出して、流域面積との比較を行っている(図一1)。流域面積と既往最大比流量の相関は東日本の方が強く、西日本では流域面積に関わらずほぼ一定値をとることが判っている。

日本の河川における流量変動特性の重要な点として、最大流量と最小流量との比(河況係数)が大きいことが知られている¹⁾。洪水は河川環境に対する大きな攪乱であり、日本の河川は一般的に自然の攪乱が環境を大きく規定していると考えられる。



図一1 流域面積と既往最大比流量の関係³⁾

2. 2 河川流量と環境

河川流量の変化は、河川環境に種々の影響を及ぼすが、ここでは水質および生物・生態系に対してどのように影響するかについて検討する。

2. 2. 1 河川流量と水質

流量変化に伴う水質変化の中には、流域からの降雨等に伴う影響だけでなく、河床における物質動態の影響が強く反映されるものもある。河床との関わりの文脈での流量の影響については、河床の付着藻類や堆積土砂との関係が強いため、一部分を次項の河川流量と生物・生態系で検討することとし、ここでは、流域からの流出という文脈で河川流量と水質の関係について検討する。

河川流量と水質の間には一般に相関関係が見られることが多い。流量と水質の相関関係を示すものとして、濃度～流量式(C・Q式)あるいは、負荷量～流量式(L・Q式)がある。負荷量(L)、水質(C)と流量(Q)の間には、 $L=CQ$ の関係があるので、C・Q式とL・Q式は独立の関係にはない。これらの関係式を実測データから導き出す場合には、最小自乗近似法などが用いられるが、L・Q式は相関関係をとる両者に流量が入っているためC・Q式より相関係数が高くなる傾向がある。このことから、実際にはL・Q式の形で流量変化に伴う負荷量変化という形で河川流量と水質の関係が示されることが多い。

流量変化に伴う水質変化については、その影響を大きく受ける湖沼、貯水池、内湾などの閉鎖性水域へ流入する河川における調査が多く行われている。流量増加に伴い顕著になる水質変化現象としては、土砂による水の濁りがまず挙げられる。櫻井ら⁴⁾は、全国のダム貯水池の流入河川における流量と濁りの関係について調査し、結果を整理している。多くの場合 $L \cdot Q$ 式や $C \cdot Q$ 式は、式(1)の様に指数型の関数で近似されることが多いが、櫻井ら⁴⁾の作成した結果を見ると濁りに関しては、指数部の b が 2 よりも大きいと見られる河川が大半であることがわかる(図-2)。これは、流量増加に比して、負荷量増加の割合が大きい、すなわち流量増加に応じて濃度が上昇することを示している。このような関係を持つ水質項目は流域において負荷の発生が面的であり、降雨により流域からの負荷流出が増加する項目である場合が多い。逆に負荷が点源で降雨量とあまり関係がない場合には、降雨に伴う流量増加はこの負荷を希釈する効果を持つため指数部の b が 1 より小さくなる。流量と水質の関係は、このように水質項目毎に流域における負荷の発生および流出形態により大きく影響される。

$$L = aQ^b \quad (1)$$

ここに、 $L(g/s)$ ：単位時間あたりに流出する負荷質量あるいは $L(m^3/s)$ ：単位時間あたりに流出する負荷体積量、 $Q(m^3/s)$ ：流量、 a, b ：地点毎に決定されるパラメータ

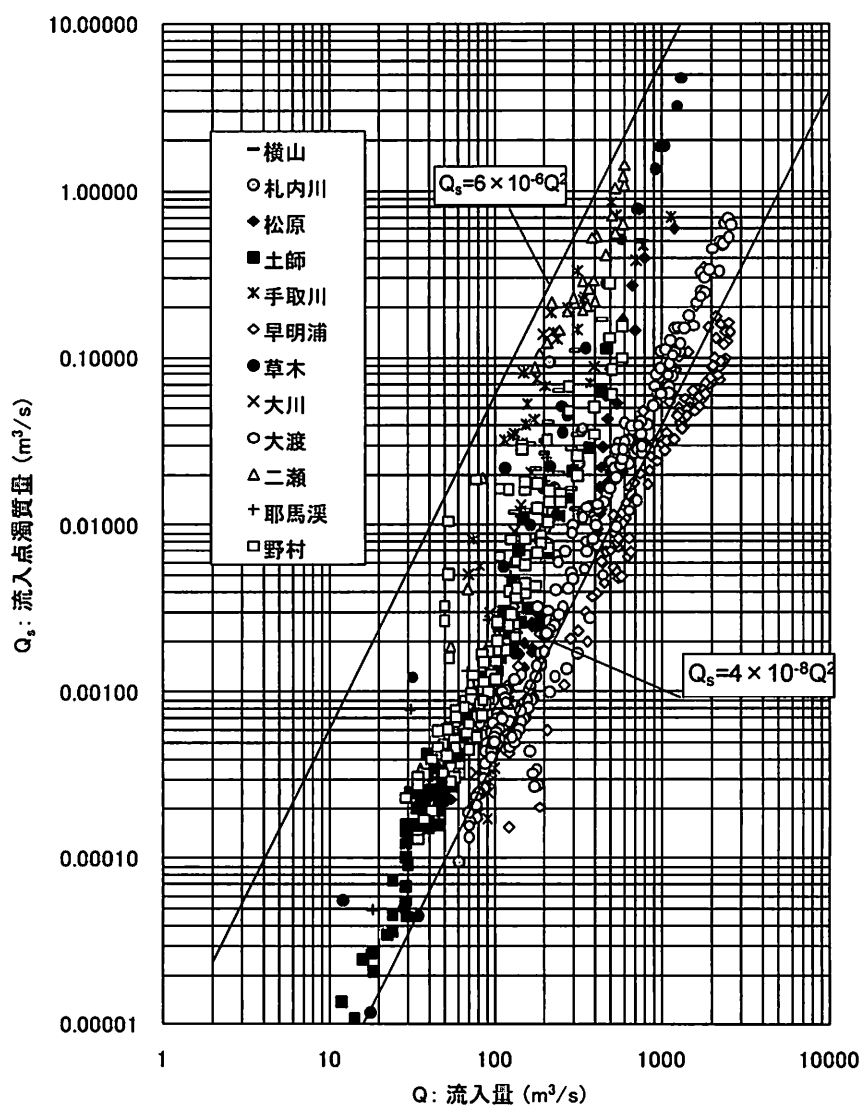


図-2 貯水池の流入濁質量と流入量の関係⁴⁾

山田ら⁵⁾は、降雨に伴う出水時における森林集水域から流出する水質成分の特性について調査を行い、式(1)中の b が1以上の場合を洗い出し型、 b が1より小さい場合を希釈型、 b が1付近の場合は濃度一定型、また、負荷量と流量との相関性が悪い非安定流出型に分類している。また、濃度一定型については、 b が1より大きい、負荷量と流量との相関性が低く、流量のみでなく流域における貯留量が、負荷量の変化を左右していると考えられる安定流出型(貯留型)と相関性が高い安定流出型(非貯留型)に分けている。山田ら⁵⁾が洗い出し型として整理している出水に伴い濃度が高まる水質項目の中でも、流域における貯留の影響が見られる。例えば、塚原ら⁶⁾は一つの出水中における水中懸濁物質と流量との関係をプロットし、出水中の同じ流量時において、流量増加期の方が流量減少期よりも濁質濃度が高くなることを示している(図-3)。

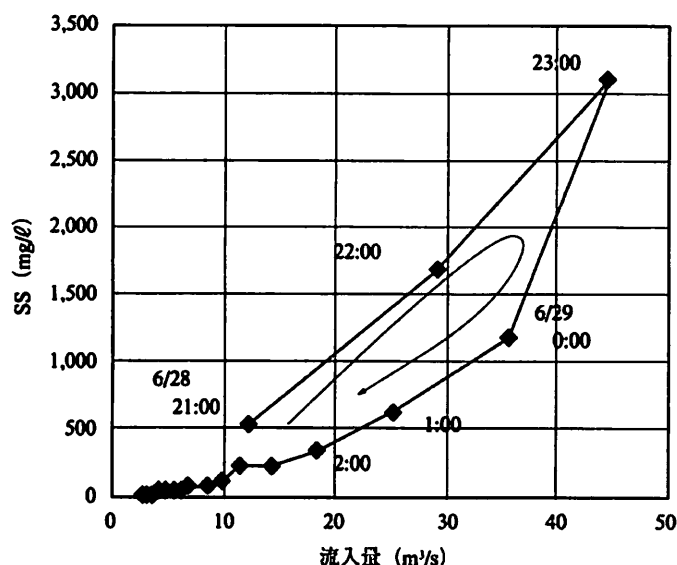


図-3 流入濁質の出水中の変化⁶⁾

流量と水質との関係は、以上のように種々の形態が見られるが、水質項目、流域特性により、様々な関係を示す。気候変動により流況が変化した場合には、同時に水質変化のパターンも変化することが予想される。降雨特性に変化が生じるような場合、特に洗い出し型に属する水質項目については、大きな変化が生じる可能性が高いと考えられる。

2. 2. 2 河川流量と生物・生態系

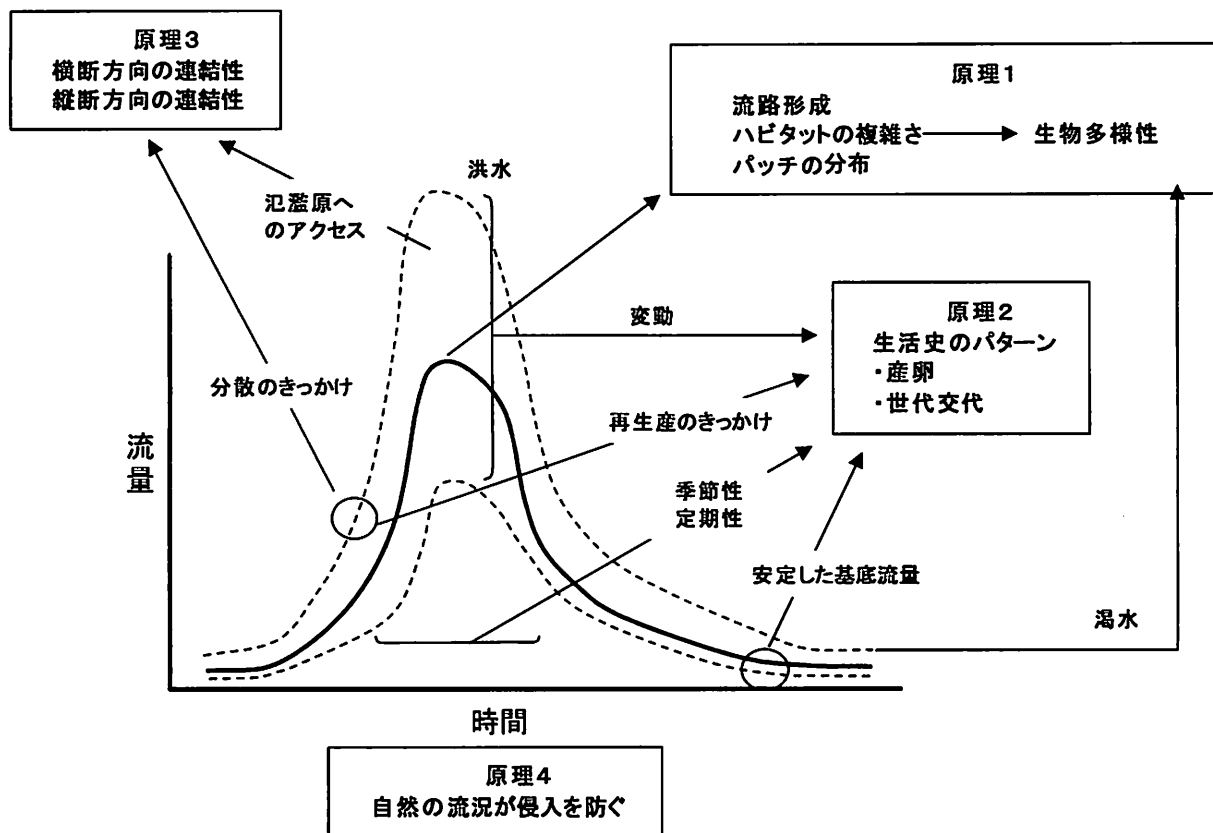
河川流量が生物・生態系に与える影響に関しては、多くの研究が実施されている。自然の河川流況は河川や周辺の氾濫原における湿地の生態系を規定していることが示されている⁷⁻¹¹⁾。Bunn and Arthington⁷⁾は、河川流況が河川における水生生物の多様性に影響する観点として、以下のような4つの原理を提示している。

原理1：流れは河川の物理的な生物生息場(ハビタット)を強く規定するもので、この作用により生物構成を規定する。ハビタットのスケールは、流域スケール(河道網規模)、リーチスケール(瀬や淵の分布)、パッチスケール(個々の河床材料に対する水理条件)にわたる。

原理2：水生生物種は主として自然の流況(natural flow regime⁹⁾)に直接反応する形で生活史戦略を進化させてきている。

原理3：水域の縦横断方向の連結性が自然なパターンにより維持されることが、多くの河川に生息する種の生育にとって重要である。

原理4：流況の改変は、外来種や移入種の定着を促進させる。



図—4 水生生物の多様性と河川の自然の流況⁷⁾

Bunn and Arthington⁷⁾ が整理したこれら4つの原理を概念図として示すと、図—4のようになる。河川の自然の流況は、異なる時空間スケールに対していくつかの相互的な機構により水生生物多様性に影響している。原理1にあるように、生物多様性と水域のハビタットの物理的特性の関係は、河道形状に影響を与える大きなイベント（洪水）により主に規定されている。河道の形状や大きさ、瀬淵の分布、河床の安定性は概ねすべて流況と地質や地形との相互作用により決められている。そして、この流れと物理的ハビタットの複雑な関係が河川の生き物の分布、量、多様性を決定している。また渇水や流量が少ない時期もハビタットの利用可能性を制限することにより影響を及ぼしている。

原理2に記述されるように、個々の河川流況の多くの特性は、水生生物の生活史に影響している。特に流況全体のパターンのうち、季節性や規則性、特有の流れのイベント発生のタイミングが重要である。水生植物に関して、水位変動や攪乱頻度・規模の変化が実生の生き残りや植物体の成長速度に影響を与えることが知られている¹²⁾。

河川流況が生物・生態系に影響を与える原理の3番目は、流況変化と水域の連結の関係によるものである。中小出水のイベントは回遊性の水生生物の縦断方向分散の引き金になる。また大出水のイベントは、これ以外の時期に連結されていない氾濫原のハビタットとの行き来を可能にする。出水時の横方向への氾濫原ハビタットの拡大は、多くの魚類にとって、産卵場、仔稚魚の成育場、採餌場として重要な場を提供する¹³⁾。

原理4は、生態系全体に対する影響である。在来生物種は、それぞれの河川における全体的な流況パターンに適合して進化してきている。土地利用や水利用の変化は、1つないしは複数の観点から流況に変化を及ぼし、これにより水生生物多様性を減少させる。改変された流況に適合する場合、外来生物が在来生物に対して有利になる可能性が高い。

表一 1 出水がハビタット、生物に果たす役割 皆川¹⁴⁾ および表中文献¹⁵⁻³⁴⁾

	出水時期又は出水の規模・擾乱の程度	役割・機能	文献及び研究・調査事例
季節的な出水と生物	春期	・春出水は、魚類の遡上、産卵のトリガーとなる。(II) ・融雪出水による裸地の形成はその後のヤナギ類の種子の定着地となる。(II) ・増水時にワンドや高水敷の草地などが冠水あるいは増水することにより本川と連続し、ワンドやタマリで生活史の一部として利用する生物の存続を維持(III)	・河川下流域の魚の多くは、6月の梅雨期に増水した川の河川敷の草地や湿地帯へ侵入して産卵する習性を身につけた(片野 1995) ・春出水による流量増加は、Coregoninae (コイ・スズノボリ)の孵化と流下を開始に対して最初のきっかけを与えた(Naesje T et al. 1995) ・ヤナギ類は、融雪出水の減水期に種子を分散し、融雪出水によって形成された裸地にいち早く侵入する(中村 1999) ・千曲川における 1999 年 5 月のワンド調査において、出水による本川の増水に伴い、本川とつながっているワンドに魚類が侵入し、ワンド内の魚類が増加した(建設省土木研究所環境部河川環境研究室 2000)
	様々	・出水による種子散布、及び対擾乱による種子の再分散(中村 1999)(II)	
出水規模とハビタット・生物	小	・平常時の数倍以上の河床堆積物が掃流(フラッシュ効果)する程度の出水 ・比較的軽い河床付着物や堆積物の掃流、付着藻類の剥離 →付着藻類の活性化、魚類・底生動物の餌資源としての質の向上、自浄作用の防止 →自浄作用の向上(I) ・底質に堆積した細粒土砂の掃流 →底生動物ハビタットの改善(I)	・自然共生研究センター実験河川における人工出水実験(平常時流量 0.1m³/s を 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0m³/s に増加、ピーク継続時間 20 分)では、出水前の現存量によるが、少なくとも 1.0m³/s (平常時の 10 倍、掃流力では 5 倍)で、付着藻類は有意に減少する(皆川ほか 2000) ・松浦川水系蔵木ダムにおけるフラッシュ放流(1998.11、蔵木川流量 0.8m³/s を 10.7m³/s に増加、ピーク継続時間 2 時間)では、付着藻類の現存量や底生動物の個体数・現存用・群集構造への影響は認められなかったが、比較的移動性の大きい底生動物への行動には影響を及ぼした(皆川ほか 2000) ・木曾川水系比奈知ダム試験湛水時の流量減少によりカゲヨ目は激減し、ホシヅメは増加していたが、フラッシュ放流のフラッシュ放流(1998.3 ~4、ダム放流量 0.5m³/s → 11m³/s に増加(約 1 ヶ月間継続))によって、その分布は試験湛水前に回復する兆候がみられた(辻本 1999)
	水域の擾乱	・河床材料の移動に伴う付着藻類の剥離、底生動物の変化 →優占種の変化、群集構造の変化(I) ・河床堆積物が動くことによる河床内間隙水域(河川水が河床内に浸透した水域)の溶存酸素を含んだ浸透水の維持 →河床内間隙水域生物のハビタットが維持(I) ・河床材料の移動に伴う底生動物の流出 →優占種の変化、群集構造の変化(I)	・利根川水系五十里ダムにおけるフラッシュ放流(出水期 4~7 月に 1 回/月、対象放流量は 1997.5)では、ダム放流量 1.0m³/s → 100m³/s に増加(ピーク流量継続時間: 20 分)させた。その結果、河床材料の移動(最大粒径約 23cm)、付着藻類は Chl-a で 1/3 に減少(緑藻・珪藻類は大きく減少、藍藻類は残存率が高い)、底生動物は早瀬・平瀬でカゲヨ目やホシヅメが減少、深い淵では増加傾向)底質の炭素・窒素含有率が約 1/3 に低下、放流前後の水質では Chl-a 及び大腸菌群数の低下が確認された(角 1998) ・水生昆虫にとって重要な河床内間隙水域を維持するために溶存酸素を含んだ浸透水の存在が必要になり、このような生息場所条件は増等の擾乱時に堆積物が動くことが必要(竹門 1997) ・実験により河床材料が移動した時に顕著に、水生昆虫が流出することが把握された(清水ほか 1998) ・流量が安定すると極相として造網型が優占するが、出水による擾乱・流出後は、まず、遊泳型、匍匐型が回復し、その後造網型が回復し、優占種は変更する。伊勢湾台風後の大規模擾乱後の調査結果によると、台風前の状況に回復するのに 7 年を要した(津田 1972)平常時流量の 7~10 倍の出水後の南浅川における回復過程では優占無き群集→匍匐・造網型優先群集に遷移し、1 年後には洪水前の組成の群集に回復(小倉 1985)
	大	・2~3 年に一度の規模の出水 →瀬や淵等、川の形を形成(I) ・5 年に一度の規模の出水 →階段状河床型の淵の形成(I)	・河道の平面形態は低水路満杯流量(平均年最大流量=2~3 年に 1 回の出水)くらいで規定される(山本 1994) ・千代川上流域における階段状河床形態の淵は、約 5 年確率の洪水に対する階段状形態とよく対応している(藤田 1995)
	水際域から陸域の擾乱	・冠水領域の拡大 →本川とワンドやタマリの連続性が高まり、ワンドやタマリで生活史の一部(産卵等)として利用する生物の存続を維持(III) ・冠水頻度 →地味状況に大きく関与(I、III) ・水際域の浸食・堆積 →水際域の浸食・堆積による砂州の形成(I) ・水辺植生の保全(奥田・佐々木 1996)(植生遷移が進まない)(I)	・本流が増水し場合には、その周囲が冠水し、本流やワンドに住むフナ類やナマズ、ドジョウなどが冠水した場所で産卵(片野 1998) ・琴石川では冠水頻度が 1~5 日/年を越える場所に裸地が多い(荻場 2000) ・コロラド川グレン・キャニオンダムにおけるフラッシュ放流((1996.3)ダム放流量 200m³/s → 1,270m³/s に増加、継続時間 8 日)によって、直径 75cm 程度の 10 個の河床材料は全て流下(平均 230m)し、砂浜が形成された(100 ヶ所の砂浜のうち 10%が減少、50%が増加、40%は影響を受けなかった)。河畔植生の影響については、草本植物、特に一年草に有意な減少、外来植生のタマリスクの発芽の若干の抑制効果をみられた。魚類への影響では、在来種は流れの緩やかなところに逃避、移入魚種(綿化魚)も流失せず(鷲谷 1998)(Collier M 1997)
	大	・砂州の移動に伴う植生帯が破壊 →裸地河原の再生 →河原に依存して生育生息する生物の保全(I) →生物多様性の維持(鷲谷 1999)(I~III)	・千曲川においては、1999 年 8 月に生じた観測史上最大規模の出水により、砂州の移動、木本類を含む植物帯の破壊・流出し、規模な裸地河原が再生した(中村 1999) ・ケンウヤナギの種子は、流路変化などによる擾乱によって生じた砂礫裸地に先駆的に侵入することにより存続を可能にする(建設省土木研究所北陸地方建設局松本砂防工事事務所 1995)

皆川¹⁴⁾は、日本における研究事例を中心に、出水とハビタット、生物に関する既往研究を収集し、季節的な出水と生物の生活史と関連した役割や機能、出水規模や攪乱の程度に関連したハビタット、生物への役割や機能について整理している（表—1）。表—1の役割・機能の列には、Bunn and Arthington⁷⁾による4つの原理に対応させたローマ数字を追加している。我が国においても、河川流況が生物・生態系に及ぼす影響について、現地における観測に基づいた種々の研究が行われていることがわかる。また、それぞれの現象は、Bunn and Arthington⁷⁾が整理した、河川流況が河川における水生生物の多様性に影響する原理と矛盾せずに説明できそうである。

上記の4つの原理は、河川流量が生物・生態系に与える影響をとらえる観点として、定性的に見て適切に整理されていると考えられるが、個々の河川環境を評価する上で、どのようにすれば自然の流況（natural flow regime⁹⁾）を定量的かつ客観的にとらえられるのであろうか。この問いに答えるものとして、たとえば Richter et al.¹⁰⁾は、日平均流量データを用いて、異なる32個の水文パラメータを算定することで、流況の特性を定量的に表す Range of Variability Approach (RVA)という手法を提案している。これらのパラメータは大きく分けて、流量の大きさ、頻度、期間、タイミング、水文状況の変化速度という5つの特性に分類できる。RVAについては、次章で言及する。Poff et al.⁹⁾は、これら5つの流況要素が改変された場合に生じると考えられる生物・生態系への影響を整理している（表—2）。皆川¹⁴⁾による表—1と類似のものであるが、5つの流況特性の改変に伴って既に顕在化した事例についてとりまとめており、気候変動に伴う流況変化が生物・生態系に及ぼす影響について検討する際に参考となる。

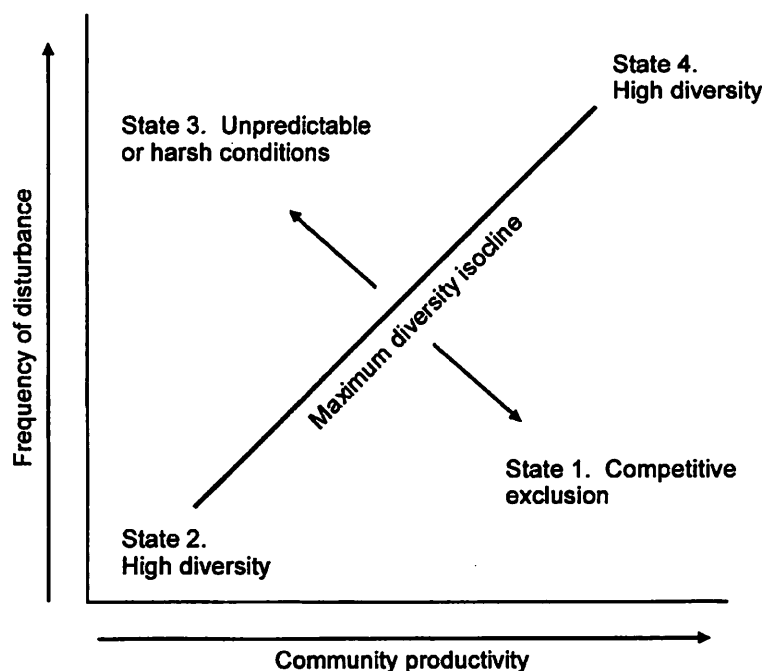
表—2 自然の流況の要素が改変された場合の生態的反応⁹⁾

流量の要素	改変の種類	生態的反応
流量の大きさと頻度	変動の増大	I. 流出や閉じこめ II. 敏感な種類の消失 III. 付着藻類の剥離の増加、有機物の掃流 IV. 生活環の混乱
	流量の安定化	I. エネルギーフローの改変 II. 外来種の侵入・定着による、 ①在来種の絶滅 ②在来商用種に対する脅威 ③種構成の変化 III. 氾濫原植物への水や栄養塩類供給の減少による、 ①実生の乾燥 ②不十分な種子散布 ③植生成立に必要な洗掘を受けたハビタットパッチや二次流路の消失 ④水路への植生の encroachment
タイミング	季節的な流量ピークの消失	I. 魚類の生活史の混乱 ①産卵 ②孵化 ③回遊 II. 魚類の湿地や後背地へのアクセス消失 III. 水生食物網構造の改変 IV. 氾濫原植物の世代更新の減少や消滅 V. 氾濫原の外来種の侵入 VI. 植物の成長速度の低減
期間	低流量期間の延長	I. 水生生物の集中 II. 植生の減少や消失 III. 植物種の多様性の低下 IV. 氾濫原種構成の乾燥に適した種への変化 V. 生理的ストレスによる植物の成長速度低下、分布域変化、枯死
	基底流量のスパイクの期間延長	I. 浮遊している卵の流出
	冠水期間の変化	I. 植生タイプの変化
	冠水期間の延長	I. 植生の機能群の変化 II. 樹木の枯死 III. 淵を利用する種のハビタット消失
変化速度	河川水位の急激な変化	I. 水生生物種の流出や閉じこめ
	急速な洪水の低減	I. 実生の定着の失敗

流況が生物・生態系に与える影響に関する既往研究による整理をまとめると、個々の生物種に対しては、①出水等による河川地形の形成に伴うハビタットの形成を通して、②生活史に応じて必要となる環境（エネルギー、栄養、食物、世代交代、繁殖、分散、忌避の場などを提供する）の提供を通して影響を与えるということが理解できる。また、これらの影響は、程度、頻度、期間、タイミング、変化速度という5つの特性により特徴づけられるものであり、個別河川の流況に適合した生物が生息していると考えられる。

また、生態系という観点から流況の影響を考えると、生物種間の相互関係にも注目する必要がある。個々の生物種について見た場合、流況変化が仮にある種に好都合なものであったとしても、この変化が生息域を競合している種にとってさらに有利なものであった場合、競合種の勢力が拡大して、その結果、単体であれば有利に働いたであろう変化が種間関係の結果不利に働き、当該種が淘汰されることも起こりうる。生態系という観点から流況の影響を考える場合、このように種間関係を考える必要があるため、その評価は個別生物種への影響について検討するよりも複雑なものになる。また生態系そのものの把握自体が容易なものではない。このため、生態系に対する河川流量の影響についての検討は、生態系の評価指標の一つである多様性に着目する場合が多い。河川流量が生物多様性に影響する作用機構も攪乱によるものが大きいと考えられる。

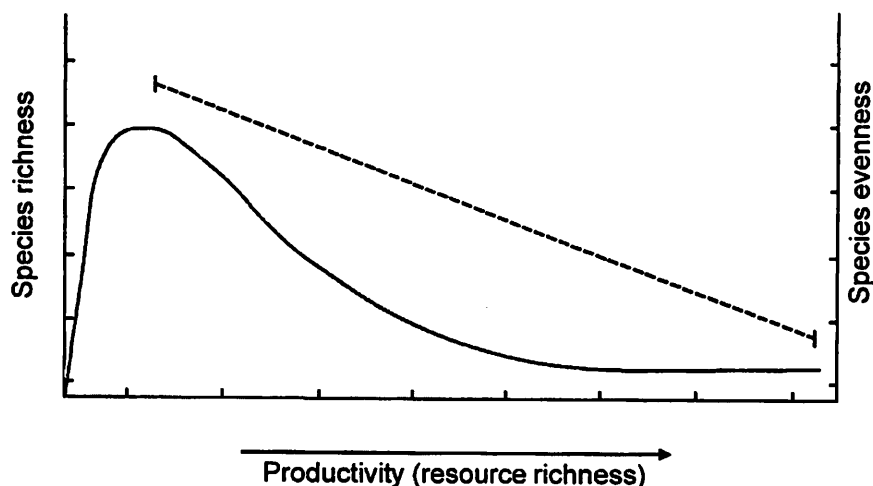
Huston³⁵⁾ の動的平衡モデル (dynamic equilibrium model) は、攪乱と生産性の相互関係から多様性を予測するものであるが、河川における攪乱と多様性を比較する上で参考になる。この概念を図示したものが図一5である。生産性が高く、攪乱のほとんどないシステムでは、優占種が競合の結果、他の種を駆逐してしまうために多様性は低くなる。このような場所で攪乱が増加すると優占種の競合力が低下することで他の種を駆逐することができなくなり、結果として多様性が増加する。逆に生産性が低い場所では、競合による他種の駆逐速度が低いために、攪乱が低くても多様性は高くなる。生産性が低い場所で攪乱が激しいと、攪乱が成長速度の速くない種を再生産が行われる前に消滅させてしまうために多様度は低くなる。生産性が高く、攪乱も頻繁に生じる場所では成長速度が速いものの競合による寡占が生じさせないほど頻繁に攪乱が生じるために多様度は高くなる。



図一5 生物多様性の動的平衡モデル³⁵⁾

これに対して、Tilman³⁶⁾ の不均質な環境における資源競合モデル (theory of resource competition in a heterogeneous environment) は、生物種の多様性は資源の不均一性と生産性に規定されると考える。このモデルの考え方は以下のようなものである。まず、種数は比較的資源の少ないハビタットで最大になるが、資源が

きわめて少なくなると急激に減少し、資源が増大すると徐々に減少する。次に多様性が最も高い集合体においては、多くの種が優占するが、資源が増加するとほとんどの種は数が少なくなり、少数の種により優占される。これらを図示したものが図—6である。最後に、ある資源量の基では、特に資源量が少ない場において、空間的不均一性が高いほど種数が増加する。Huston と Tilman のモデルを合わせると、潜在的生産性、攪乱、空間的不均一性が場における多様性を規定する鍵となっているということが示唆される。



図—6 Tilman の資源競合モデル³⁶⁾

流況が生態系に与える影響を検討するには、個々の生物種についての検討の際に考慮した項目に加えて、生物種間の関係を考慮する必要がある。その際には、場の生産性という概念を追加する必要があるであろう。

流況が、生物・生態系に与える影響についての研究は、数多く実施されているため、今後さらに包括的なレビューを実施することで、気候変動による流量変化に伴う生物・生態系への影響についての理解が整理されると思われる。

2. 3 日本における河川水温の概要

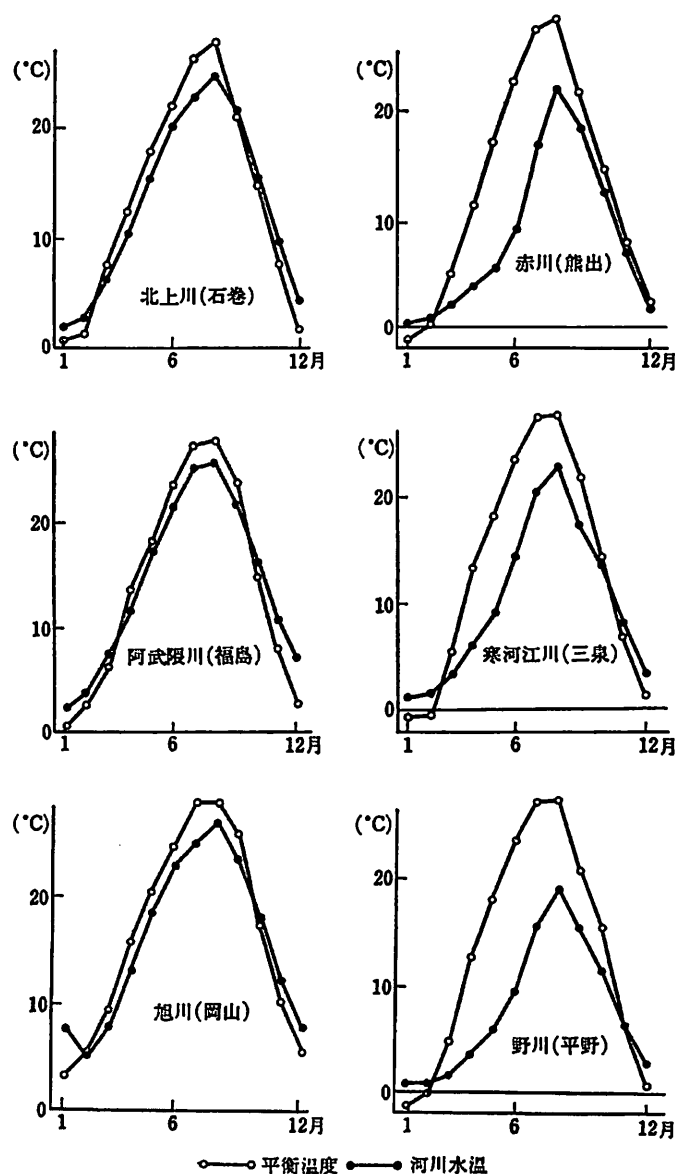
河川水温を決定するもっとも決定的な項目は、気候（日射量、気温、風速）、河川形状、地下水の影響、河川を覆う河畔林の枝葉と考えられる³⁷⁾。河川水温は、単位体積あたりの水が有する熱量である。熱量は、周囲の媒体と交換されるが、これを周囲からの熱負荷と考えて、水の体積は流量により決まるものであることを考慮すると、河川水温は、熱負荷を流量により除した形でほぼ決定されることが考えられる。熱負荷については、季節変化により河川水に加わる熱負荷量が増加することで河川水温も上下することから影響は自明である。例えば、夏季に熱負荷量が増加すれば、水温が上昇する。流量については、夏季において熱負荷量が変わらない場合に取水などで水量が減少すると、分母が小さくなるため、水温は上昇するといった影響を持ちうる。河川水温は、気候等の外部の規定要因と流量という内部の要因から決定される。

河川水温は単位水柱にかかる熱負荷とそれを受け入れる水柱の深さや流速により決まるため、河川における水温の年変化は流出型と密接に関係している。日本における河川水温の年変化曲線は、二つに大別される。その一つは、流量の極大が梅雨から台風期に出現する太平洋側型で、もう一つは、融雪による流量極大を持つ日本海型の河川水温である³⁸⁾。図—7には、左の列に太平洋側型、右の列に日本海型の例を並べてこの二つの型を示している。

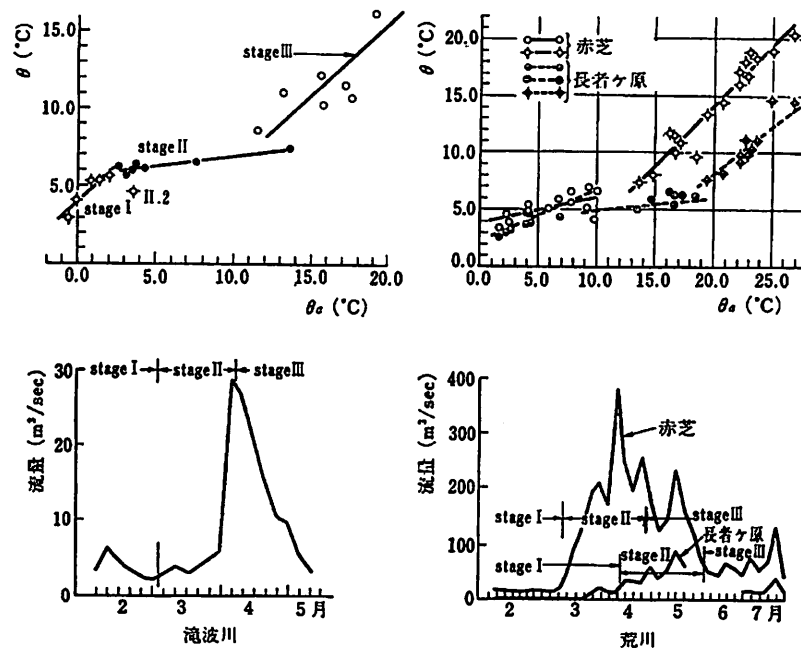
地上におかれた開水面をもつ水塊は、その初期水温にかかわらず水面を通しての受熱・放熱によって、最終的には大気の熱的状态と釣り合った水温を示す。この水温を平衡水温あるいは平衡温度という³⁸⁾。図—7には、測定された河川水温と平衡温度の両方が示されている。融雪出水がある日本海側の河川（図—7の右側列）では、3月から5月ごろまで水温上昇が抑制され、昇温の変化曲線が極端に凹型を示す。この凹型

の深さは、その流域の積雪量によって変化する。図一8には、荒川（山形県）、滝波川（福井県）で調査された水温と気温の半旬平均値の関係が示されている。昇温初期から5～6月までの季節変化は三つのステージを経て夏に向かう。第1ステージは、冬の渇水期から融雪の始まるまで、第2ステージは融雪開始からその最盛期を過ぎて10日前後まで、第3ステージは、それ以降の7月末から8月までの期間である。融雪水のうち、表面流出水の温度は、地下水流出水温よりも低温であると考えられ³⁸⁾、第2ステージで気温の上昇に応じて水温が上昇しないのは、融雪水が表面流出水として河川に供給される割合が大きく、この融雪水の供給面積も最大で、水温上昇が最も小さい時期であるためである。日本における太平洋側の河川については、平衡水温から概ね水温変化を推定できるが、日本海側の河川では融雪による影響を考慮する必要があることがわかる。

山辺³⁹⁾は、日本の山地河川の水温特性を調べて、気温との関係を表一3のように整理している。この表中のbは、水面熱負荷に対する水温の変化率と比例関係にある。これを決定する主な因子は流速と水深であると考えられ、おおまかに流域面積の関数とも考えられている。また、aは水源の水温に近い値と考えられる。河川水温に関する研究は、旧来数多くなされてきており、またデータも数多く取得されている。既往研究により明らかになっている気温と河川水温の関連を評価することで、将来起こりうる気候変動による水温変化予測については、相当程度正確に実施できると思われる。



図一7 積雪の少ない地方（左列）と多い地方（右列）の河川水温年変化の比較³⁸⁾



図一 8 滝波川と荒川における融雪期の水温と流量の変化³⁸⁾

表一 3 日本の山地河川における水温と気温の関係³⁹⁾

わが国における河川水温(θ)と気温(θ_a)の回帰式($\theta = a + b \cdot \theta_a$)

番号	水系	河川名	観測地点	流域面積 (km^2)	海拔高度 (m)	統計年数	a	b	平均偏差 ($^{\circ}\text{C}$)
1	勇別川	勇別川	白滝	127	360	1958~1960	0.61	0.63	± 0.7
2	"	"	丸瀬布	808	170	"	-0.18	0.73	0.7
3	常呂川	無加川	厚和	215	430	"	0.63	0.56	0.7
4	"	常呂川	置戸	377	220	"	0.76	0.66	0.7
5	十勝川	音更川	幌加	205	560	"	-0.33	0.58	0.6
6	"	利別川	利別	1484	80	1959~1960	0.03	0.77	1.4
7	北上川	猿ヶ石川	二日町	540	230	1958~1960	2.87	0.67	0.8
8	"	小友川	小友	78	250	"	4.31	0.59	0.7
9	阿賀野川	只見川	奥只見	518	540	1958~1959	1.57	0.57	1.1
10	信濃川	黒又川	黒又第二 ダム地点	110	420	1960~1961	1.17	0.58	1.3
11	庄川	庄川	御母衣	407	620	1957~1960	1.84	0.61	0.5
12	利根川	神流川	万場	282	290	1965~1966	1.60	0.83	0.8
13	天竜川	大千瀬川	浦川	351	130	1958~1959	1.03	0.89	0.8
14	熊野川	東ノ川	大瀬	141	230	1956~1959	2.63	0.70	0.4
15	"	十津川	風屋	660	210	1957~1959	3.56	0.66	0.6
16	吉野川	吉野川	早明浦	411	240	1956~1960	4.23	0.73	0.4
17	"	伊予川	伊予川	293	140	1957~1960	1.66	0.78	0.8
18	奈半利川	奈半利川	二又	146	170	1958~1960	5.73	0.68	0.7
19	球磨川	川辺川	平川	456	140	1960	4.13	0.75	1.0

2. 3 河川水温と環境

河川水温は、水生生物の代謝速度、生理、生活史特性に直接影響し、栄養塩類の循環や生産性といった重要な過程の速度を決定する⁴⁰⁾という点で、河川環境において非常に重要な項目である。大型生物のみならず、微生物活性も水温に大きく影響されるため、生化学反応による水質変化を規定する極めて重要な要因であるし、水温変化は水の密度も変化させるため、流動にも影響を及ぼしうる。また溶存酸素の飽和濃度は、水温により変化することから、溶存酸素濃度変化という観点を通じてさらに生物に影響する。このように、

数多くの水質項目の中でも水温は、河川環境におけるもっとも重要な項目である。河川水温が変化すると、水中に住む変温動物である魚類や無脊椎動物は、体温を調節できないために大きく影響を受ける。水温の持つ環境への影響の一事例として、環境省が設置した水生生物保全水質検討会の報告書の参考資料^{4 1)}に、日本に広く分布する魚介類の生息水温が整理されている。河川水温と環境の関係は、多岐にわたるため、ここでは、魚介類の生息水温の紹介にとどめ(表—4)、その他の一部を水温変化が及ぼす影響として推定される現象として4章に記述することとする。

表—4 日本の主要魚介類の生息水温^{4 1)}

魚種	発育段階	LT50(°C)		孵化最適温度(°C)	摂餌最適温度(°C)	遊泳最適温度(°C)	産卵水温(°C)	最適水温域(°C)	適水温域(°C)	生存可能範囲	
		高温側	低温側							下限(°C)	上限(°C)
アユ	孵化期	22	2.1~9	19	15~22		14~19				
	稚仔魚期										
イワナ	産卵期								7前後		
	孵化期								11~15		
	未成魚期								10.5~16.8		
	成魚期								0.5~16.8		
	(飼育)								~18		20
アマゴ	稚魚	21.8~23.8	0.5~7.3	13.8							
	小型					14.1					
サケ						14.1	2~17.5				
	産卵期								2~16		
	孵化期							7~10	4~11.5		
	稚仔魚期								13~17		
	成魚期						2.5~15	1.5~19.5		20	
	(飼育)								稚仔 4~10		
	(遡上期)							3~12	0~20		
	稚魚	22.9~25.0	0.2~6.4								
ギンザケ	成魚(春)					11.4					
	成魚(春)					16.6					
		26~33		11							
ニジマス	幼魚(餵食)					22					
	幼魚(絶食)					18					
						18~19					
	成魚					13~21.1					
	産卵期							11~14	9~16		
	孵化期							7~12	7~15		
	稚仔魚期							10~15	7~15		
	未成魚期							12~18	10~20		
	成魚期							9~18	3~21	1	23
	(飼育)							9~18	7~20		23
カラフトマス	稚魚	21.3~23.9				11.7~12.8					
	仔魚					11.7					
	成魚期					11.7					
サクラマス	産卵期							7~11	4.5~13		
	孵化期								11~18		
	成魚期								1~2		
	成魚期							8~11	6~13		
	(遡上期)							9.5~15.4	5.5~20		
ワカサギ				10							
	産卵期							6~7	5~10		
	孵化期								5~17.5		
ヒメマス	成魚期								0~30	0	30
	未成魚期								6~10		
オイカワ	産卵期							6.5~11	3.5~12		
	孵化期								18~24		
シラウオ									5~20	3.5	23
	(飼育)								仔魚 13~14		
コイ	産卵期							20~22	14~22		
	孵化期							18~22	14~30	14	30
	成魚期								成長水温 20~28		
	(飼育)							25~28	15~30		
	(越冬休眠期)								7以下		
フナ類	産卵期								17~20		
	孵化期								15~20		
ゲンゴロウブナ	産卵期							18	17~25		
	孵化期								15~25		
スジエビ	(飼育)								20~27		
テナガエビ	浮遊期							28~30			
	(飼育)								幼生 25~31		
	(変態水温)							26~30			
モクズガニ	孵化期								11~18		
	底生期							10~30	5~35		
	(飼育)								浮遊幼生 28~30		
	(越冬休眠期)								5以下		
マシジミ	産卵期								18以上 (旬間平均)		
	底生期								17以上		
ヤマトシジミ	底生期							15~25	5~25		

3. 変動特性の評価

3章では、これまでに整理した河川環境の変動特性の評価について若干の整理を行う。評価手法は、概念や手法が多岐にわたるため、ここでの検討は、流況変化自体を評価する統計的手法と流況が生物に与える影響を評価する手法に限定する。

3. 1 流況

流況特性を評価する手法として、前章で述べた Range of Variability Approach (RVA)は、流量に関する河川生態系管理目標の設定のために Richter et al. ¹⁰⁾ により開発されたものである。本手法は、在来の水生生態系の多様性や自然な生態系機能の保護を第一に考えている河川に適用することを想定して開発されている。この手法の適用方法は、まず流況に対する人為的攪乱が無視しうる時代の日流量データを用いて、表—5に示す32の指標（水文改変指標、Indicators of Hydrologic Alteration(IHA)と呼ぶ）を算出することで、もともとの河川の自然の流況特性を求め、それぞれの指標について、平均値±標準偏差、あるいは25%値から75%値の範囲を最初の管理目標値とするものである。この手法は、生態系に関する長期データが得られていなくても、暫定的ではあるが生態系保全を目指した流況管理目標を設定しうるものと考えられる。RVAは、個別河川の流況を統計的に、程度、頻度、期間、タイミング、変化速度という5つの特性により特徴づけるものであり、そのために表—5に示される簡便な指標を用いて評価する実用的な手法と思われる。

表—5 水文改変指標として使用される水文量¹⁰⁾

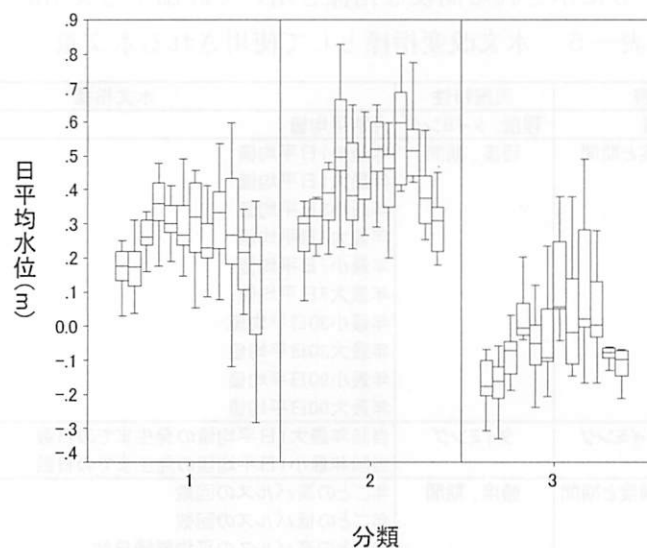
IHA 統計群	流況特性	水文指標
月別流量	程度、タイミング	月別平均値
年間極値の程度と期間	程度、期間	年最小1日平均値 年最大1日平均値 年最小3日平均値 年最大3日平均値 年最小7日平均値 年最大7日平均値 年最小30日平均値 年最大30日平均値 年最小90日平均値 年最大90日平均値
年間極値発生タイミング	タイミング	当該年最大1日平均値の発生までの日数 当該年最小1日平均値の発生までの日数
高ノ低パルスの頻度と期間	頻度、期間	年ごとの高パルスの回数 年ごとの低パルスの回数 年ごとの高パルスの平均継続日数 年ごとの低パルスの平均継続日数
流量変化の速度／頻度	変化速度、頻度	連続した2日間の日流量変化のうち正の値を持つものの平均値 連続した2日間の日流量変化のうち負の値を持つものの平均値 流量増加回数 流量低下回数

傳田ら^{4,2)}は、個々の河川流況の特性を抽出するだけではなく、その河川における流況のパターンをさらに分類する手法を提案している。長期（32年間）の水位観測データを対象に、各年の各月平均水位、各月水位の標準偏差をパラメータとして、クラスタ分析（K-平均法）を実施し、流況を3つのタイプ（いわゆる平水年、出水年、渇水年）に分類している（図—9）。Krasovskaia^{4,3)}は、月流量データ系列の流況タイプへの階層的統合をエントロピーに基づいた目的関数の最小化により得る方法を提案している。この方法は、季節的流量パターンの時間的規則性を考慮できる利点がある。流況の評価については、RVAのように流況特性を示す何らかの指標や基準を作成したり、必要に応じてこれらの指標や基準を対象に特性分類を行うことで可能となる。

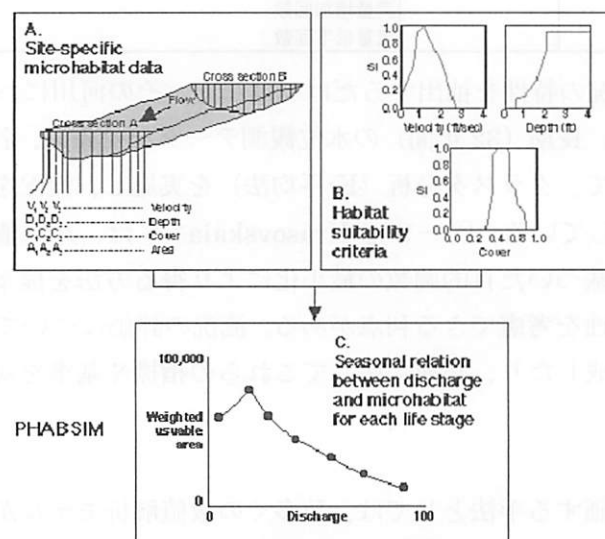
3. 2 流況と生物

流況が生物に与える影響を評価する手法としては、数多くの数値解析モデルが提案されている。モデルの概念も多くのもが存在するが、水中の生物と陸上（氾濫原）の生物に与える流況の影響評価について紹介する。水中生物に対する流況影響を見るために、水理量と生物情報を組み合わせる手法が多く開発されてい

るが、魚類の生息地としての河川環境を流量の観点から評価する手法である PHABSIM (Physical habitat simulation) ⁴⁴⁾ が、このようなモデルの代表例である。PHABSIM は、図—10(A)の様に河道を分割し、分割された格子毎に水深や流速などの水理量を計算する。ある魚の生息地としての適性度が水深、流速に関してあらかじめ設定できれば (図—10(B))、水理計算結果を用いることで格子毎の生息地としての適性度を求めることができる。この値に水表面積を乗じたものを全区間について足し合わせたものを重み付き利用可能面積と呼び、この値が大きいほど魚の生息地としての適性度が高いと評価するものである (図—10(C))。水中の生物に対する流況の影響評価手法は、物理環境を水深や流速といった水理解析などにより定量評価が可能な物理量の要素に分割し、それぞれの物理量要素の評価対象生物に対する適性度を別途求めて、水理解析結果を生物の生息地の適性度評価に変換することを試みる PHABSIM の考え方に類似のものやこれを発展させたものが多い。物理量要素の評価対象生物に対する適性度が妥当なものであれば、このような評価手法は客観的かつ定量的なものになりうる。天野ら ⁴⁵⁾ や傳田ら ⁴⁶⁾ は、このような適性度を現地で評価することを試みている。天野ら ⁴⁵⁾ は水理計算で求めた冠水頻度と植生情報、詳細な地形情報を組み合わせて冠水頻度と樹林割合とを関連づける試みを実施しており、傳田ら ⁴⁶⁾ は、魚に発信器を装着して出水時の魚類行動を連続的に追跡するとともに、水理計算を実施して、魚の行動と流れ場との関連づけを試みている。



図—9 3つのグループに分類された月毎の水位変動特性 ⁴²⁾



図—10 PHABSIM の概念図 ⁴⁴⁾

氾濫原植生の遷移に関しては、藤田ら⁴⁷⁾が河床変動と裸地の形成、パイオニア植物の繁茂、細流土砂の堆積と安定植生域の形成、洪水による植物の流失という一連の変化を流況と組み合わせたモデルを作成している。氾濫原植生の遷移については、出水による攪乱と植生の破壊、安定期の植物の繁茂を評価する必要があるが、その際には、河床変動を含めた土砂動態の評価が重要になる。水中生物に対する流況影響評価に際しても、大洪水によるカタストロフィックな生息域の攪乱をも評価しようとすれば、流れのみの解析にとどまらず土砂動態についても考慮する必要があるが出てくる。

流況の生物への影響を適切に評価するためには、種々の極値（最大流量や最小流量）も含めた流量の程度、その頻度、期間、タイミング、変化速度という観点で流況特性を統計的に妥当に評価した入力条件の基で、さらに空間的にもある程度以上の区間（少なくとも数リーチのレベル）を対象に解析を行い、河川環境の動的状态を評価していく必要がある。

4. 気候変動が河川環境に与えると考えられる影響

社会資本整備審議会は、「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）」⁴⁸⁾の中で、地球温暖化に伴う河川環境の変化として、地球温暖化による気候変動が生じた場合、気温の上昇による水温上昇、降水量の変化による流況変動、また流域の環境の変化等も相まって、土砂・栄養塩類等の物質の流出が変化することが予想されるとしている。降水量の変動幅が大きくなることから、異常洪水や異常渇水が発生し、流量の変動幅が大きくなるとともに、積雪量や雪解け時期の変化による流量パターンが変化する。また、異常洪水の発生や大規模な洪水の発生頻度の増加により、土砂・物質の流出量が増加し、水質（濁度）や河床の環境に影響を及ぼすことが予想される。流量パターンの変化は、魚類等のライフサイクルに影響を及ぼし、適応が難しい種は生息数の減少など大きな影響を受けることが予想される。濁度の増加やシルト・粘土質の堆積による河床環境の変化は、魚類、底生動物、付着藻類等への影響が考えられる。また、流況や土砂・物質の流出の変化は、河道内の植生にも影響を与え、攪乱の状況等に応じて種の分布が変わることが考えられる。こうした様々な種の変化は、種間関係を通じ生態系に対しさらなる影響を及ぼすことが考えられる。また、連続性を有する流域の環境の変化は、外来種の繁殖や新たな種の侵入などが考えられる。水質への影響は、流況との関係もあり、予想することは難しい面もあるが、水温の上昇や溶存酸素（DO）消費を伴った微生物による分解反応が進むことにより、溶存酸素濃度の低下による水質の悪化が懸念される。湖沼や貯水池においては、気温・水温の上昇により湖沼等内部での温度成層や植物プランクトンの活動が影響を受ける等、河川以上に厳しい水質変化が予想される。水質の変化によっても生物への影響は考えられる。気候変化による生態系や水・物質循環系への影響は、現段階において知見やデータも少なく、予測するのは難しい、と総括している（図-11）⁴⁸⁾。

魚類への影響に関する既往研究^{49) 50)}は、生活史を通して生存可能な上限水温以上にならない限り（一般に卵や稚仔魚は水温の制限が強く作用する）、魚類の個体の成長や再生産速度はむしろ増加すると推定している。しかし、水温上昇が生じた場合、冷水魚は生息地が限定される可能性が高い。この場合、同一河川でも標高の高い場所に生息地が限定される可能性がある。冷水魚の分布域の減少や、残存個体群の分断は温暖化による魚類への重要な影響として予測される。温暖化の影響としては、水温上昇だけではなく流況変化も予測されているが、魚類に対するこのような複合的影響に関する検討も実施されており、水温変化による予測だけでは不十分であるとする結果が報告されている⁵¹⁾。複合的影響を含めて、生息環境の変化に対して、動物は生息適地への移動を試みると考えられる。水生生物については、すでに生じている水域の分断が問題を大きくする可能性がある。これらの例のように個別の生物種への影響に関する検討事例は枚挙にいとまがないが、温暖化の生物・生態系への影響評価は、現在行われている河川環境の評価に関する研究成果が相当部分利用可能である。

資料、v. 40, n. 11, pp. 178-183, 1998.

- 7) Bunn, S. E. and Arthington, A. H.: Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, *Environmental Management*, v. 30, n. 4, pp. 492-507, 2002.
- 8) Junk, W. J., Bayley, P. B. and Sparks, R. E.: The flood-pulse concept in river-floodplain systems, in Dodge, D. P. (ed.), Proceedings of the international large river symposium (LARS). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* Special Publication 106, pp. 110-127, 1989.
- 9) Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. C.: The natural flow regime, *Bioscience*, 47, pp. 769-784, 1997.
- 10) Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R. and Braun, D. P.: How much water does a river need?, *Freshwater Biology*, 37, pp. 231-249, 1997.
- 11) Puckridge, J. T., Sheldon, F., Walker, K. F., and Boulton, A. J., Flow variability and the ecology of large rivers, *Marine and Freshwater Research*, 49, pp. 55-72, 1998.
- 12) Blanch, S. J., Ganf, G. G. and Walker, K. F.: Tolerance of riverine plants to flooding and exposure indicated by water regime, *Regulated Rivers: Research and Management*, 15, pp. 43-62, 1999.
- 13) Ward, J. V., Tockner, K. and Schiemer, F.: Biodiversity of floodplain ecosystems: Ecotones and connectivity, *Regulated Rivers: Research and Management*, 15, pp. 125-139, 1999.
- 14) 皆川朋子: 出水による付着藻類と底生動物の変化、*多摩川の総合研究*, pp. 771-781, 2000.
- 15) 片野修: *新動物生態学入門*、中央公論社、東京、1995.
- 16) Naesje, T., Jonsson, B. and Skurdal, J.: Spring flood: A primary cue for hatching of river spawnig Coregoninae. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.52, No10, pp. 2190-2196, 1995 .
- 17) 中村太士: 水辺林の更新動態に与えるダムの影響、*応用生態工学* 2(2):125-139、1999.
- 18) 建設省土木研究所河川環境研究室: 千曲川後背水域における魚類生態調査報告書、2000.
- 19) 皆川朋子、清水高男、島谷幸宏: 流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討、*河川技術に関する論文集* 第6巻、pp. 191-196, 2000.
- 20) 辻本哲郎、増田健一、寺本敦子、田代喬: 試験湛水時のダム下流河道の生息環境の変質とその復元のためのフラッシュ流量、*河川技術に関する論文集*、No. 5, pp. 81-86, 1999.
- 21) 角哲也、塚原千明、柏井条介: ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察、*ダム技術* No.143、 pp. 40-51, 1998.
- 22) 竹門康弘: 溪流における水生昆虫の棲み場所保全、*砂防学会誌*、Vol.50, No.1, p. 210, 1997.
- 23) 清水高男、皆川朋子、島谷幸宏: 底生動物の掃流に関する基礎研究－実験水路における流量の増加と底生動物の流失量の関係－、第2回応用生態工学研究会、pp. 65-68, 1998.
- 24) 津田松苗、森下郁子: 水中環境の変化と生物相－その破壊と回復、*河川生態系の復元力に関する調査報告書*, 1972.
- 25) 小倉紀雄、市川秀夫、安田卓哉: 洪水による南浅川上流域の水生昆虫群集の破壊と現存量の遷移、*とうきゅう環境浄化財団研究助成No.77*: 20、1985.
- 26) 山本晃一: *沖積河川学*、山海堂、東京、1994.
- 27) 藤田正治、道上正規: 千代川の淵の構造と魚類の生息、*鳥取大学工学部報告*、Vol.26, No.1, pp.181-193, 1995.
- 28) 片野修: *ナマズはどこで卵を産むのか*、創樹社、東京、1998.
- 29) 萱場祐一: 雫石川におけるハビタットの冠水頻度との関連について、*環境システム研究*、Vol. 28, pp. 347-352, 2000.
- 30) 奥田重俊、佐々木寧: *河川環境と水辺植生*、ソフトサイエンス社、東京、1996.

- 31) 鷺谷いづみ：生態系管理における順応的管理、保全生態学研究、Vol. 3, pp. 145-166, 1998.
- 32) Collier, M., Webb, R.H. and Andrews, E.D.: Experimental flooding in Grand Canyon, *Scientific American*, January, pp.82-89, 1997.
- 33) 鷺谷いづみ：生物保全の生態学、共立出版株式会社、東京、1999.
- 34) 建設省北陸地方建設局松本砂防工事事務所：上高地梓川河畔林保全に関する基礎調査、1995.
- 35) Huston, M. A.: *Biological diversity: The coexistence of species on changing landscapes*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- 36) Tilman, D.: *Resource competition and community structure*, Princeton University Press, Princeton, 1982.
- 37) Poole, G. C. and Berman, C. H.: An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation, *Environmental Management*, v. 27, n. 6, pp. 787-802, 2001.
- 38) 新井正、西沢利栄：水温論、水文学講座 10、共立出版株式会社、東京、1974.
- 39) 山辺功二：山地河川の流水水温について、水温研、4 号、pp. 42-47, 1967.
- 40) Allen, J. D.: *Stream ecology: Structure and function of running waters*, Chapman & Hall, New York, p. 388, 1995.
- 41) 環境省水生生物保全水質検討会：「水生生物の保全に係る水質目標について」、2002.
- 42) 傳田正利、竹下邦明、尾嶋百合香、天野邦彦：時系列分析を用いた河川流量変動の典型性抽出手法に関する研究、河川技術論文集、v. 14, pp. 319-324, 2008.
- 43) Krasovskaia, I.: Entropy-based grouping of river flow regimes, *Journal of Hydrology*, 202, pp. 173-191, 1997.
- 44) Milhous, R. T., Updike, M. A. and Schneider, D. M.: Physical Habitat Simulation System Reference Manual – Version II, Instream Flow Information Paper No. 26, U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report 89(16), 1989.
- 45) 天野邦彦、傳田正利、時岡利和、大石哲也：水理特性に着目した河川微地形の生態的機能評価の試み、河川技術論文集、v. 12, pp. 483-488, 2006.
- 46) 傳田正利、天野邦彦、辻本哲郎：魚類自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.
- 47) 藤田光一、李参照、渡辺敏、塚原隆夫、山本晃一、望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション、土木学会論文集、n. 747/II-65, pp. 41-60, 2003.
- 48) 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）、2008.
- 49) Van der Kraak, G. and Pankhurst, N. W.: Temperature effects on the reproductive performance of fish, In: Wood C. M. and McDonald D. G. (eds), *Global warming: implications for freshwater and marine fish*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 159-176, 1997.
- 50) Beitinger, T. L., Bennet, W. A. and McCauley, R. W.: Temperature tolerances of North American freshwater fishes exposed to dynamic changes in temperature, *Environmental Biology of Fishes*, 58, pp. 237-275, 2000.
- 51) Jager, H. I., Van Winkle, W. and Holcomb, B. D.: Would hydrologic climate change in Sierra Nevada streams influence trout persistence?, *Trans. of the American Fisheries Society*, 128, pp. 222-240, 1999.
- 52) Palmer, M. A., Lettermaier, D. P., Poff, N. L., Postel, S. L., Richter, B and Warner, R.: Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options, *Environmental management*, 2009.