

日本の多目的ダムによる 小規模攪乱の変容について

THE VARIATION OF SMALL DISTURBANCE WITH THE MULTIPURPOSE DAM IN JAPANESE RESERVOIRS

辻村太郎¹・上野晶鋭²・白川直樹³
Taro TSUJIMURA, Akito UENO and Naoki SHIRAKAWA

¹正会員 博士(工学) 筑波大学特別研究員 システム情報工学研究科
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²学生会員 筑波大学第三学群国際総合学類(同上)

³正会員 博士(工学) 筑波大学講師 システム情報工学研究科(同上)

Variation of small disturbance regime is investigated in 100 Japanese dam reservoir. Natural flow disturbance is large in spring-summer and small in autumn-winter. The disturbance can classify the dam into three types(The North East type, The South type, The Middle type).The North East type is large in spring, and The South type is large in summer. The reservoir operations tend to depress the flow disturbance of spring. And the operations tend to press up it of winter. Urban water demands lead to flatter hydrographs as one can imagine, but irrigation and hydropower caused complex effects on flow regimes. By the newly proposed rule, the influence of the dam operation was improved in spring but was not improved in winter.

Key Words : Flow regime, environmental flow, reservoir operation, hydrological seasonality

1. はじめに

ダムの運用は自然の流量変動を変容させる。数年に1度以下の発生頻度しか持たない大規模攪乱はダムの洪水調節によって量・頻度ともに減衰されることが多いのに対し、年に何度も発生するような中小規模の攪乱は一樣に減衰されるわけではなく、逆にダムの操作によって攪乱が増やされるケースもある¹⁾。

中小攪乱の頻度や量、タイミングの移動が生物に影響を与えることが指摘されている。例えば、サケ科魚類では滝などの障害物を遡上して産卵場に向かう行動が大雨後に多くみられ、また稚魚の浮上時に大增水が起こると死亡率が高まると言う²⁾。水生昆虫の孵化期に起こる出水は幼虫の流下に影響する要因となる可能性があり³⁾、水力発電が引き起こす流量変動が幼虫の流下に与える影響はピーク流量の値そのものよりも基底流量からの上昇量に左右される⁴⁾との知見もある。つまり、一年を通して同流量の攪乱が同じ意味をもつのではなく、季節ごとに中小攪乱の意味が異なるのである。また、気候的要因により出水攪乱の多い川では底生昆虫の存続に小支谷が

果たす役割が大きくなる⁵⁾など、地域性の違いを考慮した検討も必要となる。

流量の季節性を簡便に表現できる指標のひとつに Colwell's Index⁶⁾がある。流量変動の定常性や規則性を扱える手法だが連続量への適用性が悪いとの指摘もあり⁷⁾、実際に北海道のダムを対象にした検討⁸⁾では有効な解釈を見出すことは難しかった。これらのことから、河川環境の解析においては、たとえ数学的には洗練されていなくとも「物理現象と結び付けやすく意味の明快な指標」を用いた分析の蓄積が必要であると考えられる。

河川環境を念頭においた日本の流況分析には、多目的ダムにおける洪水ピークの低減や平常時流量平滑化の様相を探った研究⁹⁾や、九州の河川における中規模攪乱の統計的検討¹⁰⁾などがある。しかし、全国の河川を対象に小規模な攪乱を季節ごとに検討し、ダムによる変容を調べたものはない。本研究では国土交通省のダム諸量データベース¹¹⁾を利用して、月に数回起きる程度の小規模出水攪乱に対する多目的ダム操作の影響を検討する。

2. 小規模攪乱について

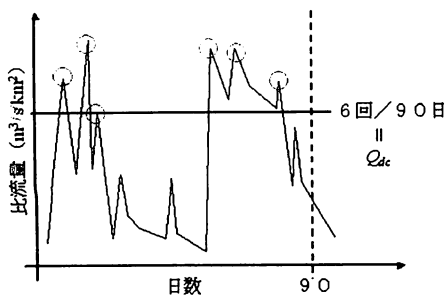


図-1 小攪乱の定義

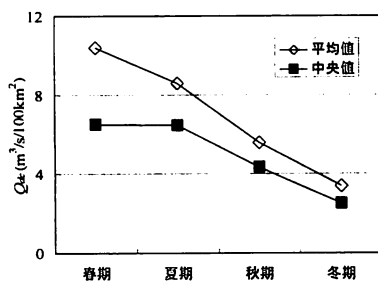


図-2 Q_{dc} の平均値と中央値

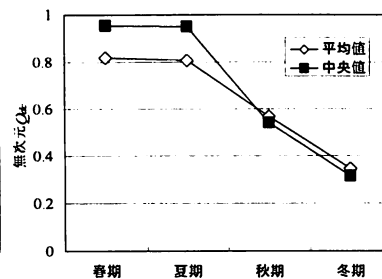


図-3 無次元 Q_{dc} の平均値と中央値

表-1 地方別の計算対象ダム数

地方	ダム数
北海道	14
東北	14
関東	14
北陸	6
東海	12
近畿	11
中国	7
四国	9
九州	8
沖縄	6
全国計	101

ハイドログラフに現れる頂点形のイベントを攪乱として、頻度、量、タイミングのうち頻度とタイミングを固定して量の変化を指標とする。

既往の検討では、年に14～30回程度の頻度で発生する小規模攪乱（これ以後「小攪乱」と記す）がそれ以下の頻度で起きる中規模攪乱と統計的に区別された¹⁾。ここでは2回/月（24回/年）の発生頻度をもつ攪乱を小攪乱の代表値とする。計算上の都合から、月単位でなく3ヶ月ごとの季節区分を集計単位とする。つまり、3ヶ月（約90日）に6回の割合で発生するものを小攪乱とし、これらの最小「ピーク流量」に相当する流量を小攪乱閾値流量（ Q_{dc} ）と定義する（図-1）。

ダム諸量データベース記載の施設から堰や遊水地を除外して計算対象とした（表-1）。13年分の資料を用い、月の半数以上が欠測もしくは未計測の場合は、その月ごと計算から除外した。流入放流ともに全指標を計算できたダムは79基であった。

3. 小規模攪乱の地域特性

ここではダム流入量を自然流量であると仮定し、自然流量の小攪乱について検討を行う。

(1) 全国の代表値について

全国のダム流入量の平均値、中央値を図-2に示す。図より、春期、夏期の値が大きく、秋期、冬期の順に小さくなる傾向があることがわかる。また、平均値と中央値の乖離が激しい。これは、融雪水や台風などの影響で極端に大きい Q_{dc} の値を示すダムが存在することが原因であると考えられる。

次に、各ダム毎に Q_{dc} を年間最大の Q_{dc} で割ることによって無次元化し、 Q_{dc} の年間変動のパターンについて検討する。図-3に無次元 Q_{dc} の平均値および中央値を示す。無次元 Q_{dc} も Q_{dc} とほぼ等しい傾向が見られた。

(2) 小攪乱の地域性

年平均 Q_{dc} （4季節の平均値）は、東北日本海側や北陸で高く、太平洋側と西日本で低くなっている（図-5（左））。

次に小攪乱の季節変化の地域性について検討を行う。自然流況（ダム流入量）の小攪乱は、春期に大きく冬期に小さい（図-2、3）。しかし地方別にみると、春期と夏期の関係により3つのグループに分類することができる（図-4）。北海道、東北、北陸、沖縄では夏期的小攪乱は春期より小さく、関東、中部、近畿では春期と夏期的小攪乱の差小さく、中国、四国、九州では夏期的小攪乱が春期を上回って年内最大となっている。これらの特徴から、春期 Q_{dc} が最も大きいものを東北日本タイプ、夏期 Q_{dc} が最も大きいものを南日本タイプ、春期もしくは夏期が大きく春期と夏期の大きさの差が20%以下のものを中間タイプとする。

図-5（中央）に小攪乱の年間変動タイプの地理的分布を示す。図より、東北日本タイプのダムは積雪の多い地方（北海道、東北、北陸）に多く分布していることがわかる。また、中間タイプが中部、近畿地方だけではなく、東北の太平洋側にも存在しており、春期 Q_{dc} の卓越には集水域での積雪量が大きく関係していると考えられる。

(3) 小攪乱が最大となるタイミング

季節や月よりも細かく小攪乱が最大となるタイミングを調べるため、1月1日から1日ずつ移動しながら向こう30日間で2回超過する流量閾値を求め、流量閾値が最大となるタイミングを調べた（図-5（右））。日本海側では4月ごろに最大となるダムが多く、西日本では7月

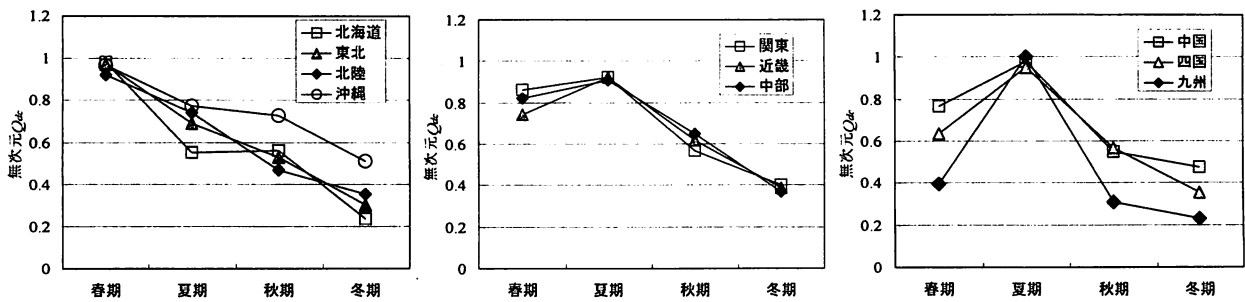


図-4 地方別 Q_{dc} の季節パターン
(左：東北日本タイプ 中央：中間タイプ 右：南日本タイプ)



図-5 小攪乱の地理的分布
(左：年平均 Q_{dc} の分布（流入量） 中央：小攪乱タイプ（流入量） 右：小攪乱が最大となる日付)

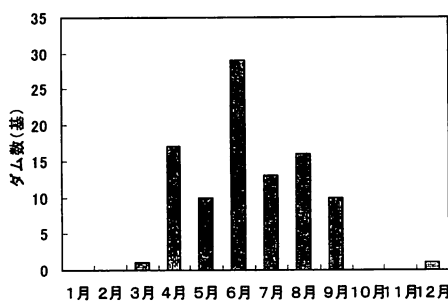


図-6 小攪乱最大日のヒストグラム

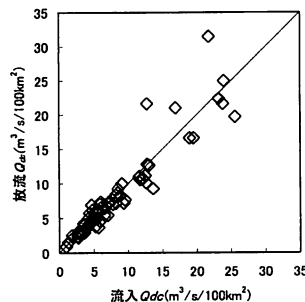


図-7 年平均 Q_{dc}

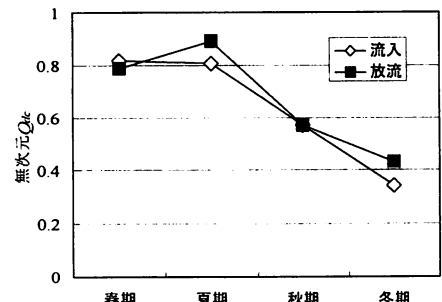


図-8 無次元 Q_{dc} の全ダム平均

ごろに最大となるダムが多い傾向が見られた。

図-6に各月の小攪乱が最大となるダム数のヒストグラムを示す。図より、雪融期（4，5月）と台風期（7～9月）と共に6月に小攪乱が最も大きくなるダムが多いことがわかる。これは夏期制限水位に向けた放流の基底流量の増加と共に、梅雨による小攪乱が発生に起因していると考えられる。

以上のことから自然流量における小攪乱はサイズから東

北日本タイプ、南日本タイプに分けられ、また、小攪乱が最大となるタイミングが融雪期、梅雨期、台風期となるダムが多いことがわかった。

4. 小規模攪乱に対するダム流量操作の影響

ここではダム流入量と放流量を比較することによって、

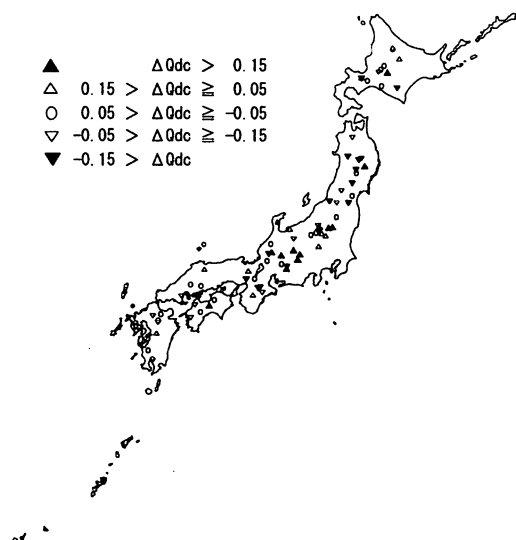


図-9 年平均 ΔQ_{dc} の地方分布

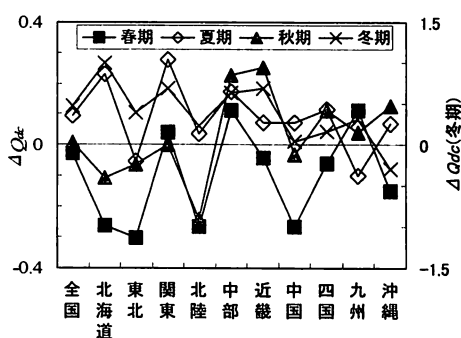


図-10 地方平均 ΔQ_{dc}

小攪乱に対するダム流量操作の影響について検討する。

(1) 小攪乱の年平均の変化

図-7に流入と放流の年平均 Q_{dc} の関係を示す。年平均値は増加と減少の両方に変化をみせており、小攪乱が量の面で増強されるダムと抑制されるダムは6：4の比で存在した。年平均 Q_{dc} の全ダム平均は流入で $7.8\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ 、放流で $7.7\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ であり、ほぼ等しい値となっている。また、図より本検討で対象としている月2回の小攪乱はTennant法¹²⁾で用いられる年平均流量との比にすると80～170%に当たり、フラッシュ流量の基準とされる200%よりは小さく、ダム操作による影響はその範囲を逸脱させるほどではないことがわかる。

小攪乱のダムの流入放流での変化率 ΔQ_{dc} を

$$\Delta Q_{dc} = (Q_{dc_放流} - Q_{dc_流入}) / Q_{dc_放流}$$

と定義する。図-9に ΔQ_{dc} の年平均の地理的分布を示す。図より、年平均 Q_{dc} が減少しているダムと増加しているダムが偏った分布を示していることがわかる。地域別に見ると、東北、瀬戸内、九州で減少しており、中部、関東で増加している。

(2) 小攪乱の季節特性の変化

流入量全国平均値(図-8)は中間タイプの特徴が現れており、ダム操作によって変容した放流量は南日本タイプに近い。

図-10に地方平均の ΔQ_{dc} を示す。春期では北海道、東北、北陸、中国で大幅な減少($|\Delta Q_{dc}| > 0.2$)を、夏期では北海道、関東で大幅な増加を、秋期 ΔQ_{dc} では中部、近畿で大幅な増加、北陸で大幅な減少が見られた。また、冬期は沖縄を除いて増加の傾向が見られる。

すなわち、東北日本パターン地域(特に東北、北陸)では、春期の小攪乱が減少し、夏期の小攪乱が増加し、中間パターンの傾向に近づく。中間パターン地域(関東、近畿、中部)では、小攪乱の大きな減少を示す季節はなく、夏期と秋期(関東は除く)の増加が見られた。南日本パターン地域(中国、四国、九州)では、共通の変化傾向が見出されなかったものの、すべての地域でダム操作後も南日本タイプを示している。

春期の小攪乱の縮小は(農業用水として)融雪水の貯水が、夏期の小攪乱の増加は貯水量の夏期制限水位に向かった放流量増加が原因であると考えられる。

(3) 小攪乱が最大となるタイミングの変化

流入と放流での攪乱が最大となるタイミングの比較を行った。結果、ダム操作によって10日以上この最大となる日付が遅れている場所が全体の19%あり、特に北海道に多いことがわかった。逆に10日以上早まる場所も15%あり、東北(特に北上川水系)や東海に多い。全体の半数(53%)では日付が変わらなかった。

(4) 小攪乱の変化とダムの使用主目的

自然流況に近いダム流入量の小攪乱は、気候によると考えられる地域性をもつことがわかった。一方でダム操作による変容が加わった放流量には、地域性に加えてダムの性質が大きな影響要因となっていることが予想される。

そこで、ダム諸量データベース¹¹⁾に記載されたダム用途(洪水調節、流水の正常な機能の維持(これ以後「流水」と記す)、特定灌漑、水道用水、工業用水、水力発電)と小攪乱の変化の関係を調べる。各用途のダム数を表-2に示し、図-11に「各用途を持つダムの平均 ΔQ_{dc} 」を示す。「全平均」は全ダムの ΔQ_{dc} を平均したものである。春期は水力発電が $|\Delta Q_{dc}|$ を減少させていることがわかる。夏期は $|\Delta Q_{dc}|$ を特定灌漑が増加させ、流水が減少させている。秋期は全平均の $|\Delta Q_{dc}|$ がゼロに近く、また、ダム操作の影響も少ない。冬期は $|\Delta Q_{dc}|$ を特定灌漑と水力発電が増加させ、流水が減少させている。洪水調節では全平均とほぼ等しい傾向が見られたが、これはほぼすべてのダムで洪水調節が行われていることが原因である。また、このように本手法では影響が大きいことを示す一手段にはなりえても、影響が

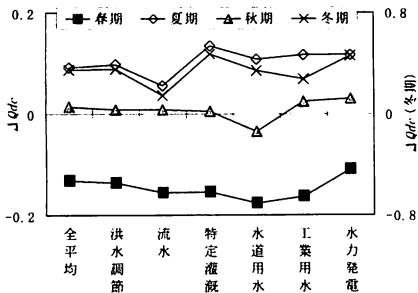


図-11 ΔQ_{dc} のダム用途

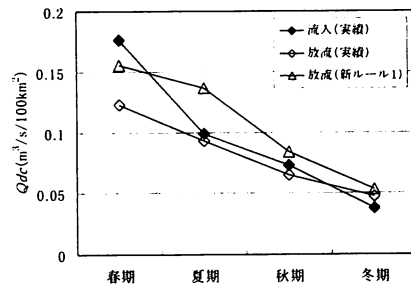


図-12 東北地方の平均 Q_{dc}

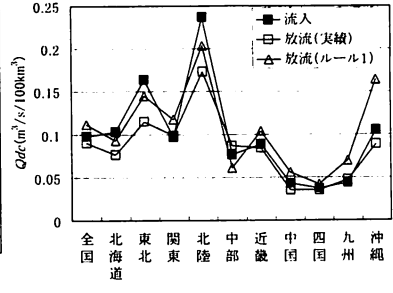


図-13 春期 Q_{dc}

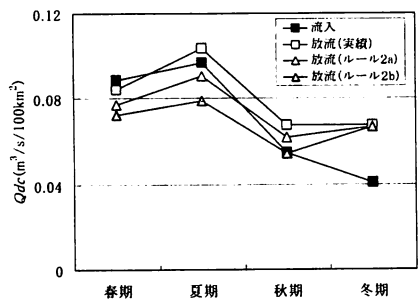


図-14 近畿地方の平均 Q_{dc}

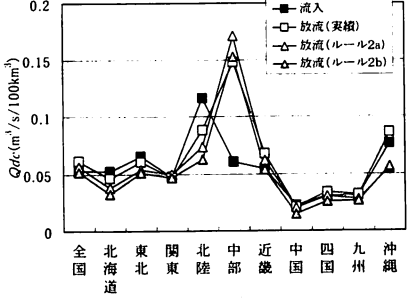


図-15 秋期 Q_{dc}

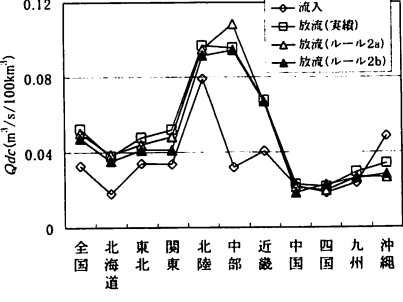


図-16 冬期 Q_{dc}

表-2 地方別の計算対象ダム数

用途	ダム数
洪水調節	97
流水	71
特定灌漑	44
水道用水	70
工業用水	37
発電	77
全ダム数	99

小さいことを評価することはできないことを注意したい。

5. ダム流量操作の影響の軽減について

小攪乱に対するダム流量操作の影響を軽減するダム運用法について検討を行う。具体的な手法としては現状のダム運用のルール（「5月1までに常時満水位まで貯水量を増加させる」や「6月1～30日の期間で制限水位まで貯水量を減少させる」など）に新たなルールを付加する。また、各ダムの現状の運用ルールを正確に把握することは困難である。そこで放流量を「ダムの運用ルールが適用された結果」と見なして、「新ルールによる流量変化」を放流量に加算し「新ルール適用放流量」とした。また、新ルールの作成には運用の簡易性を考え「月末に放流量を操作すること」とした。

ここでは2つの新ルール適用例について述べる。

(1) 新ルール1

北日本タイプに見られた春期 Q_{dc} の減少の軽減を目的

として「月内（1～20日）の放流の出水イベントが2回以下の場合、月末（21日～）に流入の平年出水イベントを2回発生」させる。平年出水イベントとして、各ダムの12年分の流入量データ（計算年のデータを除いたもの）を用いて、出水イベントを抽出し、サイズが大きい順に並べ、上位から20%の順位の出水イベントを用いた。

図-12にそれぞれ東北地方の平均 Q_{dc} を示す。図より Q_{dc} が全体的に増加し、春期におけるダム操作の影響が軽減されていることがわかる。図-13に春期 Q_{dc} の各地方平均を示す。図より、北海道、東北、北陸ではダム操作の影響を軽減していることがわかる。一方で関東、近畿、九州、沖縄で影響の増加を示している。

(2) 新ルール2

ここでは、秋期および冬期の Q_{dc} の増加を軽減することを目的として、ルール2a「月内の放流の出水イベントが2回以上の場合、月末の放流は一定量（21日の放流量）を維持」とルール2b「（月内の出水イベントとは関係なく）月末の放流は一定量を維持」を適用する。

図-14に近畿地方の平均 Q_{dc} を示す。図より、冬期を除く Q_{dc} がルール2a、2bともに減少していることがわかる。しかし、冬期 Q_{dc} の減少は見られない。図-15、16に秋期および冬期の地方別平均 Q_{dc} を示す。両図より、 Q_{dc} が大きく減少している地域、変化が少ない地域が見られる。変化が少ない地域は放流の基底流量が増加しており、出水イベント自体の規模は変わらないものの Q_{dc} は大きく増加している原因と考えられる。

以上のことより、ルール1を用いることによって、東日本タイプに属するダムに対して春期のダム操作の影響

響を軽減できることがわかった。一方で、季節、地域もしくはダム用途によっては現状のダムの影響をさらに大きくする可能性がある。また、ルール2を用いることによって秋期および冬期のダム操作の影響を軽減することは出来なかった。原因として基底流量の増加が原因と考えられ、簡易的なダム操作による改善は困難であった。ダム操作の影響の軽減には放流の基底流量を流入のそれに近づけるが必要であると考えられる。

6. まとめ

自然流況（ダム流入量）は、春期に大きな小攪乱を経験する東北日本タイプ、夏期に大きな小攪乱を経験する南日本タイプ、その中間に位置する中間タイプの3種類に大きく分けられる。東北日本タイプの春期小攪乱の卓越は融雪による基底流量の増加が原因と考えられる。これらの地域では降雨イベントごとの細かな変動を保存することよりも、融雪出水による基底流量の増加をある程度保つことが河川環境に妥当なシグナルを送るうえで重要となる。

ダムの流量操作によって小攪乱が一定に縮小されているわけではなく、季節や地域、用途により増幅、縮小されていることがわかった。東日本タイプにおいて春期の小攪乱は縮小される傾向を示したが、これは（農業用水として）融雪水の貯水が、夏期の小攪乱の増加は貯水量の夏期制限水位に向かっての放流量増加が原因であると考えられる。また、冬期の小攪乱はおおむね増幅される傾向にあるが、これは基底流量の増加が原因と考えられる。ダム用途の影響として、春期は水力発電が小攪乱を縮小させている。夏期は特定灌漑が増幅、流水の正常な機能の維持が縮小させている。冬期は特定灌漑と水力発電が増加させ、流水が減少させている。

小攪乱に対するダム流量操作の影響を軽減するダム運用法として、春期小攪乱の縮小の軽減を目的としたルール1と秋期、冬期小攪乱の増幅の軽減を目的としたルール2を提案した。結果、ルール1によって春期小攪乱の縮小は影響を軽減する可能性を示した。また、ルール2では冬期小攪乱の増幅を抑制することはできなかった。

冬期ダム操作の影響の軽減には基底流量の改善が必要であると考えられる。

本手法ではカバーできなかった渇水イベントも同様に重要な河川環境維持システムの一部であり、それらを考慮し、流量変化イベントを評価することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 白川直樹：日本の中規模多目的ダムにおける河川環境攪乱頻度の人為的变化, 水工学論文集, Vol.50, pp.391-396, 2006.
- 2) 森田健太郎, 森田晶子：イワナ（サケ科魚類）の生活史二型と個体群過程, 日本生態学会誌, Vol.57, pp.13-24, 2007.
- 3) 柴谷篤弘, 谷田一三編：日本の水生昆虫, 東海大学出版会, 1989.
- 4) Cereghino, R., Legalle, M. and Lavandier, P.: Drift and benthic population structure of the mayfly *Rhithrogena semicolorata* (Heptageniidae) under natural and hydropowering conditions, *Hydrobiologia*, Vol.519, pp.127-133, 2004.
- 5) 大串龍一：水生昆虫の世界, 東海大学出版会, 2004.
- 6) Colwell, R.K.: Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena, *Ecology*, Vol.55, pp.1148-1153, 1974.
- 7) Gan, K.C., McMahon, T.A. and Finlayson, B.L.: Analysis of periodicity in streamflow and rainfall data by Colwell's indices, *Journal of Hydrology*, Vol.123, pp.105-118, 1991.
- 8) 上野晶鋭：北海道石狩川水系のダム流量における変動の予測度について, 平成18年度筑波大学国際総合学類独立論文, 2007.
- 9) 大沼克弘, 藤田光一, 井上優：ダムによる流量変化の特性分析, 河川技術論文集, No.12, pp.241-246, 2006.
- 10) 菰渕延, 島谷幸宏：九州10河川を対象とした流量レジームの特性に関する研究, 河川技術論文集, No.12, pp.317-322, 2006.
- 11) 国土交通省：<http://www2.river.go.jp/dam/>.
- 12) Tennant, D.: Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources, Fisheries, Vol.1, pp.6-10, 1976. Robinson, S. K.: Coherent motions in the turbulent boundary layer, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.23, pp.601-639, 1991.

(2008.4.3受付)