

# 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

## DOWNSTREAM EFFECTS OF RESERVOIRS ON FLOOD PULSES IN JAPAN

白川直樹<sup>1</sup>  
Naoki SHIRAKAWA

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 筑波大学講師 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻  
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Flood pulses are indispensable for healthy river ecosystem. Reservoir management gives significant impact on river flow regime including those pulses. This paper intends to clarify those impacts from statistical point of view. Using daily flow data upstream and downstream of reservoirs, we can find how natural flood pulses are affected by flow control in reservoirs. 24 dams in Japan are chosen and 11 year records are analyzed to find out difference between natural and regulated flood pulses. As a result, pulses greater than  $7\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$  were less in number for regulated flow, but pulses smaller than the value were often enhanced by reservoirs. Analysis of occurrence frequency and dam impacts suggest that two kinds of pulses can be identified. Daily fluctuations became more symmetric, losing gradually diminishing stage after flood peaks. Change of flushing seasonality has also detected.

**Key Words :** Flow regime analysis, environmental flow, flushing discharge, reservoir control

### 1. はじめに

自然の流量変動は生態系を含めた河川環境の成立や変化を規定する大きな要因である<sup>1)</sup>が、ダムや堰における人為的な流量操作が自然攪乱を変容させ、種々の環境影響をもたらしている事例が世界各地で数多く報告されている<sup>2)3)4)</sup>。わが国でも、ダム下流の河川区間において高水敷を含めた河道内植生や堆積土砂を一掃するような大規模洪水の欠損に起因する河道内樹林化(多摩川<sup>5)</sup>、渡良瀬川<sup>6)</sup>)、ダム操作により河床材料の平均粒径を移動させる程度の出水が顕著に減少した結果としての水域生物相の変容(矢作川<sup>7)</sup>)などがみられている。自然復元を目指す維持流量や正常流量の議論においては、最低流量の確保にとどまらず流量変動の意義を踏まえた流況の保全を意識することが必要である。

流量変動と河川環境に関する既往の研究をみると、流量変動とその変容が河川生物・生態系に与える影響の個別事例分析及びその一般化<sup>1)3)4)</sup>、生態系影響からみた自然流況の分類<sup>8)</sup>、流況変化を評価する指標の開発<sup>9)10)</sup>などのように生態学の立場からこの問題を扱ったものが多い。それらの知見から、流量変動は物理的生息場条件に支配的な影響を与え、水生生物の生活史戦略を左右し、

縦断・横断方向の連続性を維持し、外来種の侵入と蔓延を制限する、という4つの大きな機能をもつこと<sup>4)</sup>、生態系からみて重要な流量変動要素は、量、頻度、季節性、予測容易性(定時性)、継続期間、変化速度、であること<sup>3)</sup>などが指摘されている。しかしこれらの研究では、流量変動とその変容がもたらす影響、もしくはそれに対する生態系の応答に重点が置かれており、流況の変容そのものは生態系に変化のあった個別事例における所与の条件とされているか、いくつかの典型的パターンとして認識されているにすぎない。いったん生態学的な意義から離れて、人為的操作による流況変容自体にどのような特徴があるのか、生態系がこうむる影響の有無に関わりなく網羅的に調べておくことは河川管理の立場から意味をもつ。

本研究では、流量変動に及ぼす人為的影響を統計資料より見出し、その一般的性質と地域性を探ることによって環境(攪乱)流量設定の指針を与えることを目指す。

### 2. 河川における流量攪乱

環境攪乱として捉えるべき流量変動は、その規模から3つに分類できる。一つめは数年に一度ないしそれ以下

の頻度で起きる大規模出水攪乱である。沖積河川の河道特性を特徴づける平均年最大流量<sup>1)</sup>などがこれに当たり、河道の地形や高水敷の植生遷移を規定する要因となる。大型治水ダムの洪水調節は、この規模の出水攪乱頻度を減少させている。

第二に、河床の攪乱を引き起こす程度の、毎年数回～数十回起きる中規模出水がある。この中規模攪乱は主に水域生態系の機能維持に重要な役割を担うことが知られている<sup>1)~4), 7)</sup>。多くの試験的フラッシュ放流がターゲットに擬しているのもこの中規模攪乱である。

流量変動の三つめは、日々の小さな変化である。ダム下流でよく現れる、一定流量が長期間続くような流況は、維持流量が最低流量で定義されている限り改善されない。一定流量の放流がかえって河川環境を悪化させたとの批判が聞かれることもあり、この平滑化現象も環境流量の改善ターゲットとなるべき流況変容の一つに数えられる。逆に水力発電や観光・レクリエーションを目的に含むダムでは晴天時の流量変動が日レベルで激化することもある。洪水調節の前後には流量の増減率が自然要因でなくゲート操作により規定され、増水や減水に対する生物の応答（避難・回帰など）が狂わされる。東北地方のいくつかのダムでは、日単位の変化はおおむね激化する傾向がみられた<sup>12)</sup>。

本論文ではこのうち中規模攪乱と小変化について、量、頻度、季節性、予測容易性（定時性）、変化速度に注目しながら、現実には多くのダムではどのような変化が起きているのか、流量統計データを利用して探っていく。

### 3. 検討手法

#### (1) 攪乱の定義

本研究では、流量が設定した閾値を越える事象を攪乱と定義する。閾値を下回った瞬間に攪乱が終了したとみなすが、回数を数える際には流量のピークごとに一つの攪乱とカウントする（これで閾値が大きいほど攪乱回数が小さくなるのが保障される）。

また便宜上攪乱を次のように分類する。まず生起頻度が年1回に達しないような出水を大攪乱と呼ぶが、今回は対象外である。年1回から30回程度起きるものを中小攪乱とし、中でも比較的大きなものを中攪乱、小さなものを小攪乱とする。中と小の区別は後ほど分析の中で行う。これらは比流量にすると1～100 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>ほどの出水になるが、多くの地点に共通な範囲として3～50 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>がメインターゲットとなる。この攪乱の生起頻度およびタイミングを調べることは水生生物の生活史に与える影響という意味から重要である<sup>1)3)4)</sup>。

扱う流量資料は最小単位が日である。日ごとの変化を小変化と呼ぶことにする。既往の研究では変化速度としても言及されている<sup>1)3)4)10)</sup>。

|       |       |
|-------|-------|
| 1岩尾内  | 13草木  |
| 2大雪   | 14二瀬  |
| 3豊平峡  | 15下久保 |
| 4浅瀬石川 | 16大町  |
| 5玉川   | 17美和  |
| 6寒河江  | 18真名川 |
| 7七ヶ宿  | 19室生  |
| 8釜房   | 20土師  |
| 9石淵   | 21弥栄  |
| 10白川  | 22野村  |
| 11五十里 | 23下笠  |
| 12川俣  | 24緑川  |

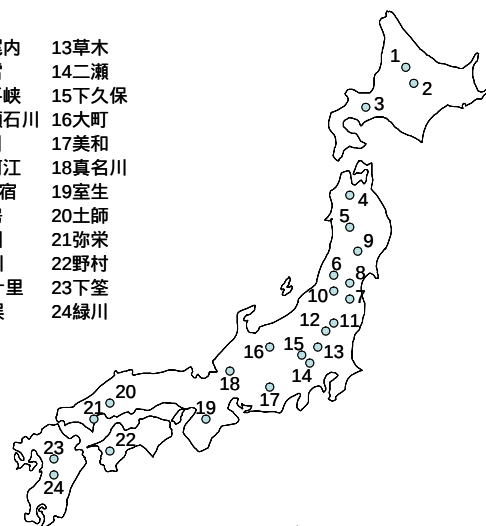


図-1 検討対象24ダム

#### (2) 使用資料と対象地点

人為的流量操作には専用ダムや取水堰などもあるが、今回の検討対象は多目的ダムに絞る。

流量データとして用いたのは、国土交通省のダム諸量データベース<sup>13)</sup>である。1992年までは「多目的ダム管理年報」として毎年発行されていたが、1993年のデータからウェブ公開となった。2005年9月現在、全国の直轄および水資源機構管理の118ダムについて、日流入量・放流量・ダム水位、水温、濁度、水質のデータが掲載されている。今回取り扱うのは1993年から2003年までの11年分の日流入量と日放流量である。統計処理をするに年数が十分とはいえないが、年数を多くすると社会条件や周辺状況の影響を受けてしまうおそれもあり、ここではウェブ公開を一つの便宜的区切りとすることにした。

ダム流入量を擬似的に自然流況とみなし、ダム放流量を人為操作流量とみなす。ダム流入は厳密には自然流量といえないが、対象地点選定においてできるだけ自然に近い場所を選ぶこととした。

ダム諸量データベース記載の多目的ダムのうち、11年間のデータが揃うもの、集水面積がほぼ同じもの（150～300km<sup>2</sup>を目安とした）を基準に、図-1の24ダムを選定した。顕著な流域外導水や揚水発電を含むものは除外し、間接流域や上流に存在するダムの大小、発電バイパスの有無も考慮した。図-1の中でも、大町ダムの上流に高瀬ダムが存在するなど完全に条件の良い地点ばかりとはいえないが、今回の検討を大きく阻害する要因はない。

#### (3) 検討手順

まず各ダムの流入量を自然流況とみなし、その特性を整理する。閾値を比流量で何通りか定め、各閾値に対する攪乱の生起回数を数える。これにより、およそどの程度の規模の攪乱がどのくらいの頻度で起きるのが自然の状態なのかということがわかる。次に、生起頻度からみた中攪乱と小攪乱の区別を試みる。年1回の攪乱と年30回の攪乱が違う意味を持つならば、どのあたりに境界が

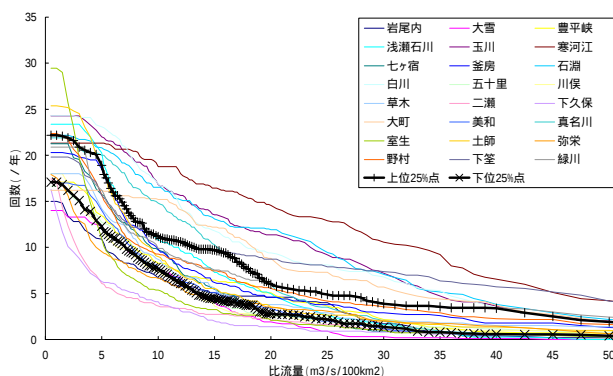


図-2 自然流況（ダム流入量）の攪乱頻度

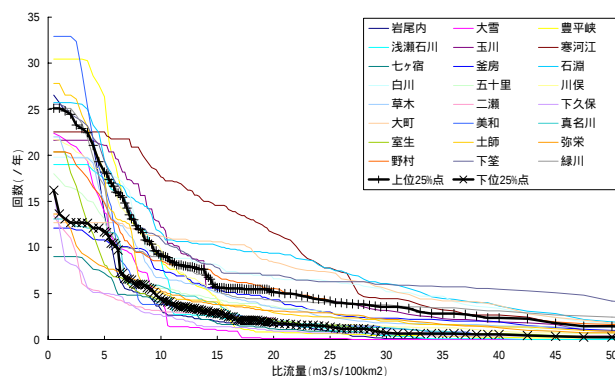


図-3 人為流況（ダム放流量）の攪乱頻度

あるのだろうか．中攪乱と小攪乱の生起頻度が別々の法則で支配されているようならば，環境の側もそれぞれに違う意味を見出して反応しているだろう，という仮説をもって中小攪乱の頻度分布を分析する．

次に，人為流況における攪乱発生状況を調べる．自然流況と同様に攪乱回数を数えたのち，自然攪乱との比較を行う．攪乱頻度を全体としてどう変えているか，また攪乱規模別にみるとどうなっているか検討し，人為的影響のパターンを分類する．

小変化については，まず増加と減少の日数を調べる．自然流況では逓減曲線の部分で減少日数が多くなるが，人為流況でこれがどの程度消えるかをみる．影響の季節性を調べ，増加・減少量の変容を検証する．

最後に中小攪乱の季節性を検討する．生物にシグナルを与える流量の代表として春先以降初めて起こる出水を取り上げ，閾値を越える出水の発生日付がどう変化しているかを調べる．

## 4. 結果と考察

### (1) 自然攪乱の共通性と地域性

24ダムの流入量を対象に攪乱回数を数え，比流量で整理したものが図-2である．上下の四分位点を印及び太線で示したが，これよりほぼ半数のダムが該当する標準的な値として，比流量 $50\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ の攪乱は平均して年に0～2回程度起きていることがわかる．同様に $20\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ の攪乱は3～6回， $10\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ は7～11回， $5\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ は12～20回となっている．この範囲を上回って攪乱が発生しているのは寒河江，玉川，石淵，白川，大町といった相対的に流量の豊富な河川であり，下回っているのは下久保，二瀬，室生，弥栄といった流量の少ない河川である．つまり，大雑把に言って攪乱の大きさと回数はまず流量の豊富さに依存するといえよう．

次に，この範囲内の規模の攪乱は統計的に均質と言えるかどうか検討する．まずは図-2の各曲線の3～50  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ に相当する部分を二次関数で近似し，その係数をみたところ，寒河江，玉川，石淵，真名川の各ダム

では二次の項の係数が0.1未満と小さくなっており，ほぼ直線で近似できることがわかった．すなわち，これらのダムでは中小攪乱の規模と回数に単純かつ単一な関係があることが示唆される．

相対的に大きな規模の攪乱と小さな攪乱が違う原因で発生するのなら，生起頻度曲線に変曲点が見れるだろう．そこで，図-2の各曲線について任意の比流量を境に大きい側と小さい側をそれぞれ直線で近似し，その適合度の和を最大にする閾値を求めた．すると，先ほど触れた4地点（全体が直線近似できる）を除くと大部分の地点の閾値は $7\sim 8\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ と $16\sim 17\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ の2グループに大別できることがわかった．前者は岩尾内，浅瀬石川など北日本と野村，下笠，緑川といった西日本のダムが，後者は東北南部から関東のダムが該当する．

閾値が見出された地点では，この値より大きな攪乱は相対的に起こりにくくなっており，これを境に小攪乱と中攪乱を区別することができよう（唯一の例外は大町ダムで，閾値より小さな攪乱が多くない：図-2の曲線が上に凸．これは上流に存在する大ダムの影響と考えられる）．発生回数にすると，前者の閾値は7～13回/年，後者は3～5回/年に相当している．年6回程度の攪乱は，前者では中，後者では小攪乱に分類されることになる．

結局， $7\sim 8\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ を境に小攪乱と中攪乱が区別できる地点， $16\sim 17\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ を境に小攪乱と中攪乱が区別できる地点，小攪乱と中攪乱が区別できない地点，の3タイプの存在が確認された．

### (2) 人為操作による攪乱頻度の変化

ダム操作によって作られる人為的流況，すなわちダム放流量のもつ攪乱特性を調べ，自然攪乱と比較する．

攪乱回数は図-3の通りである．一見して自然攪乱より回数が少なく，各ダムの曲線もギザギザが目立つ．先程の攪乱回数と比べると，比流量 $50\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ の攪乱は平均して年に0～1.5回， $20\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ の攪乱は2～5回， $10\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ は4～9回， $5\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ は12～18回となっていて，比較的小規模の攪乱では影響が少ない．

次に自然流況（操作前流況）との差をみる．今回対象としたダムには複数年にわたって流量を調節できるほど

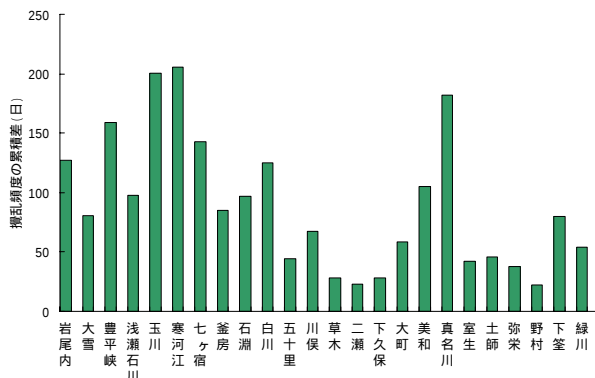


図-4 自然流況と人為流況の攪乱頻度の差

の容量を持ったものではなく、いずれも年総量でみれば流入量と放流量はほぼ等しい。攪乱頻度の差（図-2と図-3の曲線の差分の累積）をとったものが図-4である。二瀬、草木、下久保、野村といったダムではほとんど差がなく、実際攪乱頻度曲線には微小な違いしかみられない。これらのダムでは中小攪乱頻度には全くといっていいほど影響が出ていないのである。一方、中小攪乱に多大な影響を与えているのは寒河江、玉川、真名川といったダムである。これらは大きな貯水容量という共通点をもつが、下久保や弥栄など大容量にも関わらず攪乱への影響が小さいところもあり、ダムの規模とは関係が薄いようである（回転率とも低相関）。東日本のダムは比較的影響が大きいようにも見えるが、これ以上の示唆は得られない。

そこで頻度変化の方向を攪乱規模毎に詳しくみたのが図-5である。それぞれの比流量において、自然攪乱が人為操作によってどれだけ増えたか減ったかを示している。7~8  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ を境に全く異なった傾向がみられる。これより大きな攪乱は減らされることはあっても増やされることがほとんどないのに対し、小さな攪乱は増える場所と減る場所がほぼ同数、増加と減少の度合いも拮抗している。8~25  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ 程度の攪乱は、およそ年間5回ほど減らされていることもわかる。

各地点の規模別変容パターンを分類すると、およそ5つの型に分けられた。最も多かったのが（7地点）、大きめの攪乱は減り小さめの攪乱が増えたタイプAである。増減の境界はおよそ7  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ あたりにある。次に、大規模攪乱は不変で小規模攪乱（15  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ 以下程度）が減ったタイプB（5地点）。これと傾向は同じだが減少の上限が30  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ 辺りにあるものもみられた（2地点）。そして、10  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ 以上の攪乱が大きく減らされたタイプC（3地点）。ほとんど不変だが7~10  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ 近辺の攪乱のみが減らされたタイプD（2地点）。最後に前述の変化なしタイプE（4地点）である。川俣ダムは15  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ を境に小規模攪乱は増え大規模攪乱は不変であった。

自然攪乱の中／小境界値と人為変化の型を比較すると（表-1）、自然攪乱が7~8  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ を境に分類される地点ではタイプA、16~17  $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ を境にする地点ではタイプBの変化がやや多いという傾向がみられた。

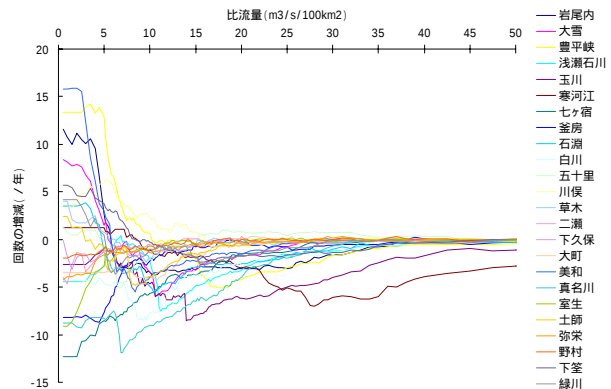


図-5 比流量による攪乱頻度の差

表-1 攪乱による流況変化タイプの分類

数値はダム番号（図-1参照）

|        |   | 自然攪乱タイプ（小と中の境界値） |    |           |     |
|--------|---|------------------|----|-----------|-----|
|        |   | 7~8              | 中間 | 16~17     | なし  |
| 人為操作の型 | A | 1,3,17,23,24     |    | 2         | 9   |
|        | B | 19               | 16 | 7,8,10,21 | 18  |
|        | C | 4                |    |           | 5,6 |
|        | D |                  | 20 | 11        |     |
|        | E | 14,22            |    | 13,15     |     |
|        | 他 |                  |    | 12        |     |

自然流況における中攪乱と小攪乱の区分点は人為変化パターンの区分点と似た場所にある。この中攪乱と小攪乱の区別に生態環境上の意味があるかどうかはなんともいえないが、ダム操作側の要因にはなんらかの共通性がありそうである。

### (3) 小変化の影響

日単位の小変化を調べる。前日からの変化量をとって、増加した日数、減少した日数、不変だった日数をそれぞれ1年ごとに数えたものが図-6である。自然流況では減少日数が増加日数をはっきりと上回り、ダム間の差や年々差もそれほど大きくはない。流量が前日と同じになる日（平滑流況）も少ない（唯一の例外は大町ダム）。人為流況は減少日数と増加日数が同数に近づき、流量一定の期間も増えている。また場所による違い、年によるばらつきも大きい。流入量と放流量を直接比較した散布図（図-7）をみると、減少日数は年間50日ほど減らされ、増加日数は20~30日増やされていることがみてとれる。

この変容は、どの季節に起きているのだろうか。図-8には月ごとに流量増加日数と減少日数の差、それに流量変化ゼロの日数を調べたものである。二つの図を見比べると、11月から4月の冬季は流量変化が全く抑えられる傾向が強く、5月から10月の夏季は流量減少日数が減る（もしくは増加日数が増える）傾向にあるように見える。冬季は洪水調節や灌漑用水補給の必要がないためにゲート操作または発電の利便性から一定流量放流がなされ、夏季は利水用途の放流増加と洪水調節時の逡巡減速消滅が流量増減日数の相似化を招いているのではないかと推測される。

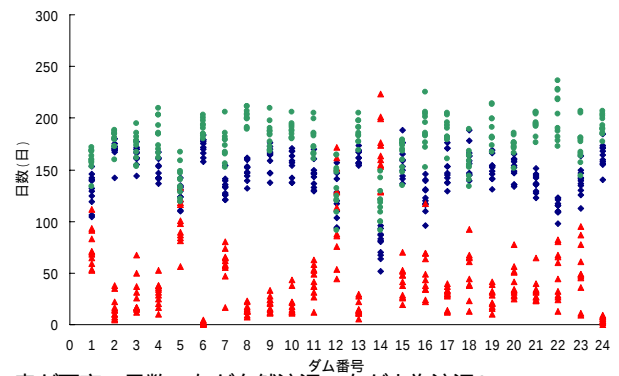
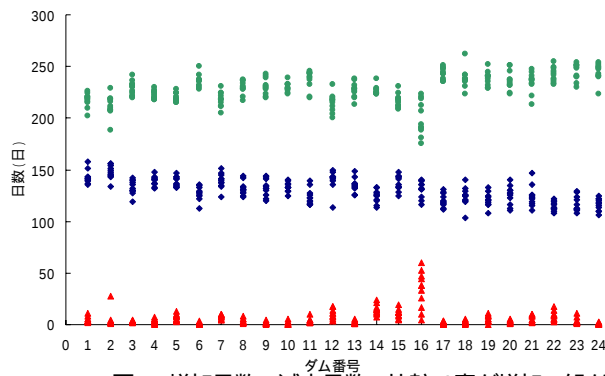


図-6 増加日数・減少日数の比較（青が増加，緑が減少，赤が不变の日数．左が自然流況，右が人為流況）

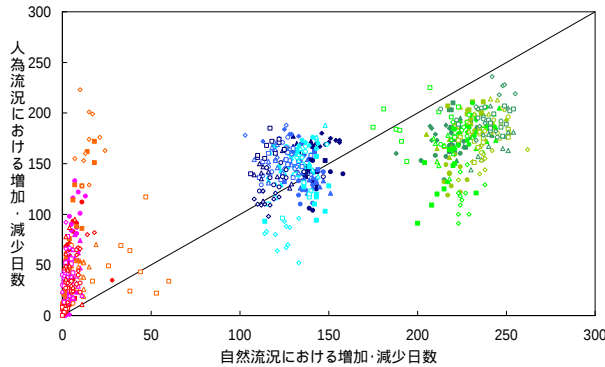


図-7 増加日数・減少日数の比較（色は図-6と同じ）

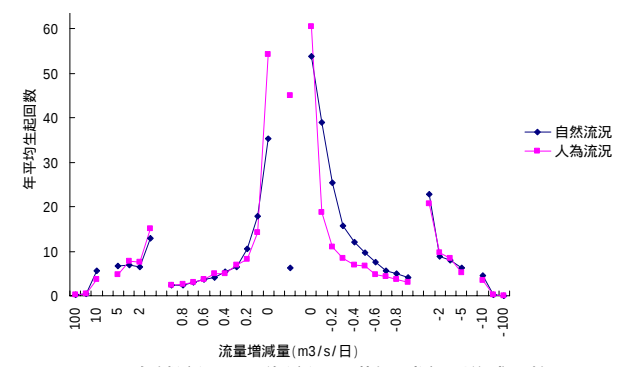


図-9 自然流況と人為流況の階級別流量増減日数

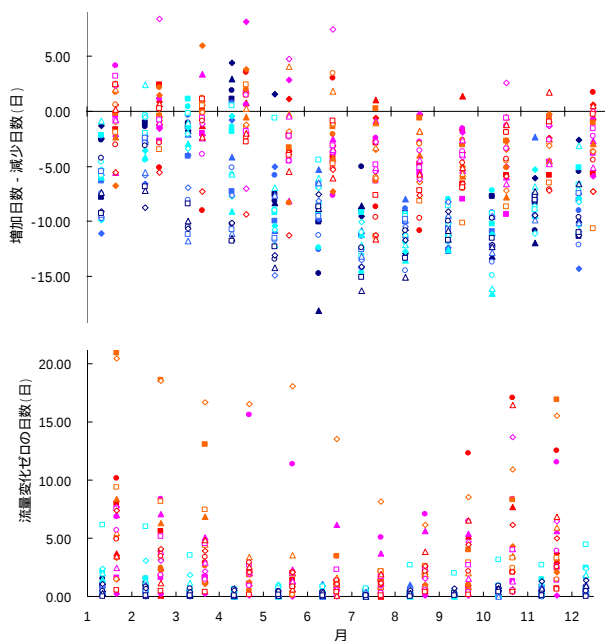


図-8 月別の流量増減日数（上）および不变日数（下）  
青が自然流況，赤が人為流況

こういった流量の増減はどの量で多く起きているのか，全24ダムの平均値でみたのが図-9である．流量減少は  $0.1 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{s}/100\text{km}^2/\text{日}$  の広い範囲で削られているのに対し，流量増加は  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}/100\text{km}^2/\text{日}$  以下の極めて小さな変化が多い．前者は逡減曲線の消滅を意味しているが，後者には二つの可能性が考えられる．一つは人間側になんらかの理由があって小規模な変動を増やしている事態であり，もう一つは今回対象とした資料が日単位で

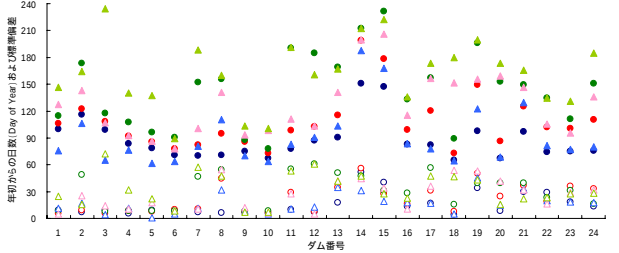


図-10 中小攪乱の季節性（●が自然，▲が人為流況，青が5，赤が10，緑が  $20\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$  の攪乱．○は標準偏差）

あったために一定流量期間の開始時と終了時の日データがこのような微小な変化をしているかのごとく見えているだけという状況である．減少側で  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}/100\text{km}^2/\text{日}$  以下の日数が増えているのもこのどちらかの理由であると考えられる．

#### (4) 中小攪乱の季節性

出水攪乱は，河川の物理基盤を規定したり河床を更新したりするだけでなく，生物に行動のシグナルを与えるという意味も持つ<sup>1)~4), 14)</sup>．いくつかの魚類は出水時の流れが持つ水温や濁水に反応して産卵の時期をつかむ<sup>15)</sup>．また出水攪乱の時期は攪乱に依存する生物の成長を左右する．犬上川では琵琶湖の水位操作のために攪乱が発生しない春季に糸状藻類の増殖がよく進み，矢作川では通常の増殖期である初夏に攪乱が頻繁に起きた年には増殖が抑えられたという<sup>16)</sup>．

ここでは気温の上がり始める春先以降の出水を対象に，その生起タイミングの変化を抽出する．先ほど中小攪乱

の境界目安として抽出された7 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>および15 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>をはさんで5, 10, 20 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>の3種類の攪乱について春以降最初に発生する日付を調べた。春以降とはここでは3月1日以降を指すものとした。11年間の発生日の平均値と標準偏差を図-10に示す。

小攪乱(5 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>)は自然状態では二ヶ所の例外を除いてほとんどが3月中、遅くとも4月には発生している。また特に東日本において年々変動が小さく、生起時期の安定した予測可能性の高い出水であるといえる。季節的予測性の高い攪乱に対しては発育段階の同調性を高くしておくことが生物群集の抵抗性に有利であり<sup>2)</sup>、こういった地点ではダム操作による攪乱の時期変化は生物側の対応の裏をかく形で壊滅的な打撃を与えてしまうおそれがある。実際、人為操作流量をみると東北日本で発生時期を早める方向に動いており、標準偏差も大きくなっている。

10 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>の攪乱も自然流況では3月後半から4月に起きているところが多く、東日本では5 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>の攪乱とほぼ同時期である。このことは、東北南部から関東で10 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>を小規模攪乱に分類したさきほまでの結果と整合する。この規模の攪乱は人為操作により生起が早まっている場所はほとんどなく、一致するかやや遅くなるかのどちらかである。

中攪乱(20 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>)は東日本の多くで4月ごろ、西日本の大部分と東日本の一部では夏に起きている。人為操作による発生の遅れも大きくみられ、年々変動も激しい。

## 5. 環境流量への提言

検討結果から、自然攪乱の特徴と人為操作の影響が出やすい点を抽出できる。フラッシュ放流など環境流量の設定に際して目安となるだろう。

河床更新等の機能をもつ中規模攪乱の中には相対的な規模の大小がある。今回の結果では、場所にもよるが7~8ないし16~17 m<sup>3</sup>/s/100km<sup>2</sup>を境に発生頻度や人為影響に違いがみられた。フラッシュ放流も一通りの流量でなく、何段階かの規模を設ける必要があるかもしれない。

人為操作は中小攪乱を一様に減らしているわけではなく、小攪乱は逆に増やしている可能性があることもわかった。中攪乱減少の影響だけでなく、小攪乱増加の環境影響も考えていかなければならない。

小変化はほぼどのダムにも共通する変容を示した。ダム貯水時や放流時に、逓減曲線を模倣するなど変化率にも気を配ってはどうか。

春先の増水は、特に融雪水が卓越する場所では毎年の生起時期にぶれが少なく季節的予測性の高い出水攪乱である。こういった場所ではできるだけ年々変動を避け、時期を大きく外さず攪乱を供給する努力も必要だろう。

今回の検討は流況資料のみから行ったため、個別事情に左右されることも少ないが、結果の生態的・環境的意義が明瞭とはいえない。ただし個々の現場で得られた知見を普遍化し広めていく際に、ここで行った流況の整理と組み合わせて考察を深めていくことには大いに意義があると思われる。

## 参考文献

- 1) 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*, Vol.47, pp.769-784, 1997.
- 2) 小倉紀雄, 山本晃一編: 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系, 技報堂出版, 2005.
- 3) Lytle, D. A. and Poff, N. L.: Adaptation to natural flow regime, *TRENDS in Ecology and Evolution*, Vol. 19, pp.94-100, 2004.
- 4) Bunn, S. E. and Arthington, A. H.: Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity, *Environmental Management*, Vol. 30, pp.492-507, 2002.
- 5) 李参熙, 藤田光一, 山本晃一: 礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ - 多摩川上流部を対象にした事例分析より -, 水工学論文集, No.42, pp.977-982, 1999.
- 6) 清水義彦, 小葉竹重機, 岡田理志: ハリエンジュによる動的河道内樹林化, 水工学論文集, No.45, pp.1099-1104, 2001.
- 7) 田代喬: ダム下流河道における河床の低攪乱化に着目した水域生態系評価に関する研究, 名古屋大学学位論文, 2004.
- 8) Poff, N. L.: A hydrogeography of unregulated streams in the United States and an examination of scale-dependence in some hydrological descriptions, *Freshwater Biology*, Vol. 36, pp.71-91, 1996.
- 9) Tennant, D.: Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources, *Fisheries*, Vol.1, pp.6-10, 1976.
- 10) Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J. and Braun, D.: A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems, *Conservation Biology*, Vol.10, pp.1163-1174, 1996.
- 11) 山本晃一: 構造沖積河川学, 山海堂, 2004.
- 12) 白川直樹・玉井信行: 環境用水の概念整理と水文統計的設定手法の利用可能性について, 水工学論文集, No.47, pp.379-384, 2003.
- 13) 国土交通省: <http://www2.river.go.jp/dam/>.
- 14) Middleton, M. A.: The Flood Pulse Concept in Wetland Restoration, *Flood Pulsing in Wetlands*, Middleton, B. ed. Wiley, pp.1-10, 2002.
- 15) 森下郁子・森下雅子・森下依理子: 川のHの条件, 山海堂, 2000.
- 16) 野崎健太郎: 自然的攪乱・人為的インパクトに対する河川水質と基礎生産者の応答, 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系の関係に関する研究, 河川整備基金事業成果報告書, (財)河川環境管理財団, pp.131-141, 2002.

(2005.9.30受付)