

利根川ダム群における水文統計法に基づいた 環境流量の設定とその評価

ENVIRONMENTAL FLOW SETTING BASED ON HYDROLOGICAL INDICES IN UPPER TONE RIVER BASIN RESERVOIRS AND ITS EVALUATION

藤澤洋輔¹・土田佳菜恵²・白川直樹³

Yosuke FUJISAWA, Kanae TSUCHIDA and Naoki SHIRAKAWA

¹学生会員 筑波大学大学院 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 社会・国際学群国際総合学類 (同上)

³正会員 博士(工学) 筑波大学准教授 システム情報工学研究科 (同上)

Flow regime alteration causes adverse effects on riverine ecosystem downstream of dams. Changes on 33 statistical indices for flow alteration are studied at 10 reservoirs in the Upper Tone River basin. Minimum flows are decreased and daily fluctuations are enhanced in these reservoirs. Then four types of environmental flow indices - minimum flow, dry flow, low flow and spates- are settled by the rate to median flow based on flow statistics. These indices are derived for 7 types of flow pattern which came out from cluster analysis over Japan. Environmental flow release is simulated to satisfy the four index values in a reservoir and evaluated from flow regime improvement and impact on water usage.

Key Words : *Environmental flow, hydrological indices, reservoirs, Tone river*

1. 研究の背景と目的

環境流量は、水力発電等の取水による減水やダム放流による流況変動の悪影響を緩和する目的で河道内に確保される流量である^{1),2)}。河川整備基本方針で定められる正常流量が各期間に維持すべき最低流量を表しているのに対し、環境流量は最低流量に加えて攪乱や平常時流量を含めた365日の河川流況であり、複数の指標を組み合わせることで表現されるべきものである。しかし、複雑な流況の変化を評価する手法が無いために、環境流量を最適化する、すなわち最も効率の良い量と変動を求める道筋をつけられずにいるのが現状である。

そこで本研究では利根川上流の多目的ダムを対象に複数の水文統計指標を組み合わせた環境流量を設定し、その環境改善効果(水文統計指標の改善)と経済影響を評価して、最適な放流方法を定めるための枠組を提示することを目的とする。

本論文は3つの部分から構成される。最初に水文統計指標を用いて現状の流況変動の状況を把握する。次に環境流量の目安となる複数の流量指標を統計資料から導出する。最後に、設定した環境流量による流況の改善と利水への影響を評価する。

2. 利根川ダム群における流況変動の現状評価

(1) 分析の対象と方法

利根川水系の上流部に位置する10の多目的ダムを対象として、ダムによる流況変動の実情を調べる。『多目的ダム管理年報』および『ダム諸量データベース』³⁾記載の日流入量と日放流量を用い、前者を自然流量、後者をダムにより変動された流量(人為流量)とみなして両者の差を分析する。

ダム操作は下流の河川流量を減少させるだけでなく増加させることもあり、攪乱を減らすだけでなく変動を激化させる場合もある^{4),5)}。これらの変化を長年月にわたって分析できるRVA法^{6),7)}にならない、表-1に示す33の流況指標を調べることにした。自然流況(ダム流入量)における各指標値のばらつきを求め、これを理想状態として適正分布範囲を設定する。人為流況(ダム放流量)の平均値や毎年の値がこの範囲にどの程度収まっているかを計算し、自然流況からの変容を調べる。変容には、①全体的に増加、②全体的に減少、③上下のばらつきが激化、④ばらつきが失われ過度に平滑化、の4通りがありうる。豊水年や渇水年など年々変動のばらつきを考慮できるのがこの方法の特徴である。

表-3 月流量の変動パターンによる一級水系の分類.

タイプ名	水系
融雪卓越型	石狩, 天塩, 常呂, 鶴, 尻別, 沙流, 後志利別, 湧別, 網走, 渚滑, 留萌, 赤, 姫
融雪中心型	北上, 最上, 岩木, 米代, 雄物, 子吉, 信濃, 阿賀野, 庄, 手取, 荒, 関
安定型	小矢部, 梯, 九頭竜, 由良, 円山, 北, 千代, 斐伊, 天神, 日野
梅雨・台風型	十勝, 釧路, 阿武隈, 久慈, 富士, 鶴見, 木曾, 天竜, 安倍, 豊, 矢作, 狩野, 菊, 鈴鹿, 庄内, 紀, 大和, 加古, 熊野, 土器, 大淀, 大野, 大分, 肝属, 嘉瀬
台風卓越型	名取, 利根, 那珂, 多摩, 雲出, 櫛田, 宮, 吉野, 那賀, 仁淀, 物部, 四万十, 五ヶ瀬, 番匠, 小丸
梅雨卓越型	常願寺, 黒部, 大井, 佐波, 芦田, 小瀬, 肱, 重信, 筑後, 遠賀, 六角, 山国, 緑, 球磨, 川内, 菊池, 松浦, 本明, 矢部
梅雨中心型	淀, 揖保, 太田, 江, 吉井, 旭, 高梁, 高津, 白

表-4 各タイプの基準値と出水期. %は中央値との比.

タイプ名	最低流量	許容流量	低水流量	出水期(月)	攪乱流量
融雪卓越型	13%	19%	61%	4, 5, 9	
融雪中心型	11%	17%	69%	3, 4, 5, 7	
安定型	2%	5%	56%	2, 3, 4, 7, 9	
梅雨・台風型	14%	24%	65%	6, 7, 8, 9	1000%
台風卓越型	9%	13%	57%	6, 7, 8, 9, 10	
梅雨卓越型	9%	14%	64%	5, 6, 7, 8, 9	
梅雨中心型	12%	17%	65%	3, 5, 6, 7, 9	

特徴をもつ。これは、流入量そのものが上流に存在する矢木沢や奈良俣のダム操作の影響を受け、それを調整するほど大きな容量をもたないことが理由と考えられる。矢木沢+奈良俣の合計放流量と藤原の流入量の相関係数は0.87と高く、藤原の回転率（年流入量/有効貯水容量）は22.4であるのに対し、同様に川俣を上流に持つ川治は流入量が川俣の放流量と0.63の相関しか有さず、回転率が1.87と小さい。

相俣は最頻値との一致率が最もよく、流況変容の観点から10ダムを代表する存在といえる。よって後出のシミュレーションは相俣を対象に行うこととした。

3. 複数の環境流量基準の検討

(1) 複数指標の必要性

河川流量が極端に少ないと、水生生物は生存していきことが困難になる。最低流量は環境流量の最も基本的な形といえる。しかし、最低流量さえ確保してあれば生物は生きていけるわけではない。生き残りぎりのラインを下回らないことは最悪の条件であって、その状態が長く続くような状況は自然界ではありえない。河川流量は自然に増減を繰り返す量であり、流況曲線の形状（最低部分だけでなく、曲線全体の形状）が環境状態を表す。

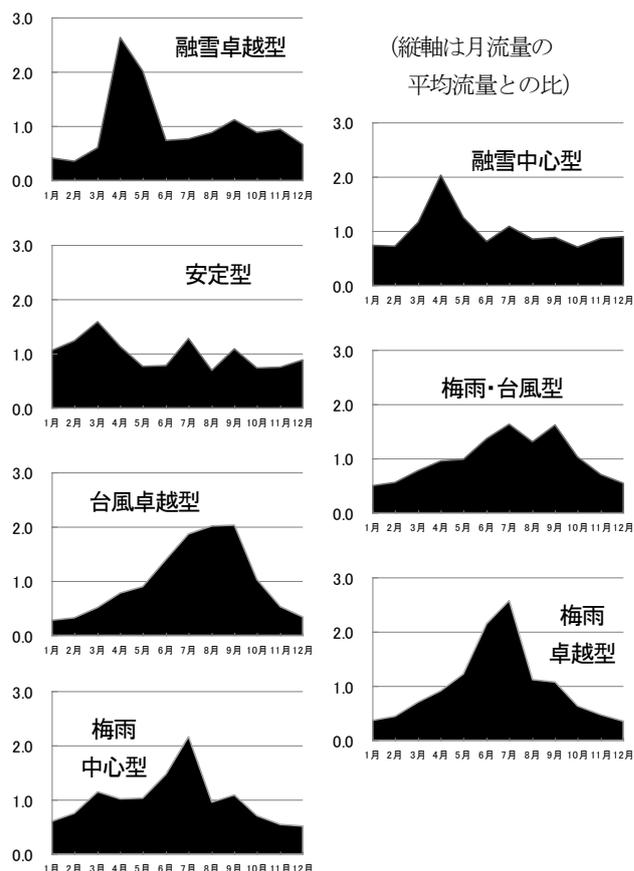


図-2 月流量の7タイプの変動パターン.

複数指標を取り上げる際に決まった方式が確立されているわけではない。前章では33の指標を用いて評価を行ったが、操作段階であり多くの指標を使うのは現実的でない。ここでは、最低流量、許容流量、低水流量、攪乱流量の4つの指標を検討する。

最低流量は、一日たりとも下回ってはならない流量である。許容流量は、短期間なら生物が耐えられるが長期化すると望ましくない乾燥条件の流量とする。最低流量は極端なイベントであるため、もう少し高い頻度で発生しうる乾燥条件を表現するためこの指標をとりあげた。低水流量は全体的な流況を代表する値として用いる。平均流量や中央値流量よりも、人間の取水圧力により減少する河川流量を表す代表値として適切と思われる。最後に攪乱を表現するために攪乱流量を考える。

これらの指標を環境流量の基準として水文統計的に定めるには、入手しやすい物理量との関係を求めておくことと便利である。観測の蓄積がある場所ならば過去の流況資料から計算することができるが、そういう場合だけでは限らないからである。水力発電所の維持流量放流では流域面積が（比流量）、世界で最も広く使われる環境流量設定法のTennant法³⁾では年平均流量が基準として用いられている。いずれにしても、地域の水文特性に応じて値を変えていく必要がある。

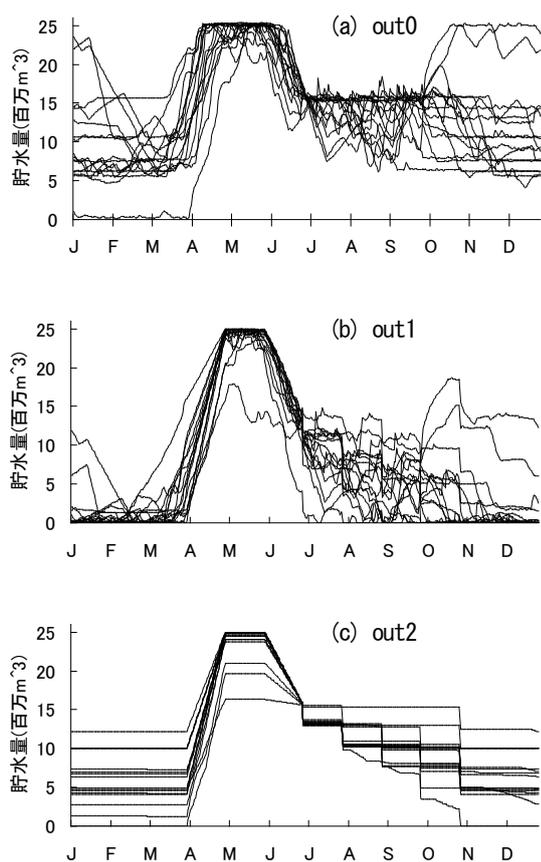


図-3 3つの計算ケースにおけるダム貯水量の年間推移。
横軸は1/1から12/31. 1993~2008年を重ねている。
16本の線それぞれが1年分に相当する。

(2) 河川流況の分類

実績流量の統計値を使って環境流量基準を設定したいこと、また洪水攪乱の要素を取り入れるには地域によって異なる洪水の起こり方を反映させなければならないことから、流量変動のパターンを分類した。

『流量年表』から全国109の一級水系における月平均流量を計算し、12ヶ月の平均値との比をとって月流量の変動を数値化した。計算対象は1983~2003年の21年間である。これにクラスター分析を行って大きく7つのタイプに分類した(表-3, 図-2)。流量年表記載の観測流量は人間活動の影響を受けており、自然流況から大きく外れているようだと注意が必要になる。各地点の年流出高と年降水量を比較し、概ね2割以下の差に収まっていたため今回の目的には不適でないと判断した。最初はTennant法に沿って年平均流量を基準にとって計算したところ、洪水流量に左右されすぎることがわかったため、21年間の中央値流量を基準にとることにした。これらのタイプごとに環境流量の基準を設定する。

(3) 基準値の設定

最低流量は対象期間内に観測された最小流量とする。許容流量の耐久期間は各河川、各地点の生態系に基づいて選ばれるべきであるが、ここでは多くの河川を一括し

た共通基準を定めるため個別の情報を用いず、北米、南米、欧州においてこの目的でよく用いられ¹⁾、RVAにも採用されている⁷⁾7日間という値をとることにした。対象期間内に一度だけ7日間連続して下回ったことのある流量を求める。低水流量は対象期間の第一四分位値(小さい方から25%)である。

攪乱流量の設定には、まず各流量変動タイプにおける洪水期を定めた。河川ごとに平均流量が12ヶ月平均流量を上回っている月を調べ、タイプ内の半数以上の河川で月流量が平均流量を上回っている月をそのタイプの出水期とした。自然流況に近似させて攪乱放流を設計した事例⁹⁾を参考に、この出水期内に限り月に一度の攪乱が必要と考える。実験河川におけるフラッシュ流量の事例¹⁰⁾から平常時流量の10倍を付着藻類を剥離させる流量とし、全タイプに対し中央値の100%流量を攪乱流量とする。

各河川において実績流量からそれぞれの基準値を求め、中央値流量との比を算出した。タイプごとにそれらの値を平均し、タイプの基準値とした。結果を表-4に示す。利根川は「台風卓越型」に含まれるため、最低流量は中央値の9%、渇水時流量は13%、低水流量は57%となり、出水期は6-10月である。

4. 環境流量の設定と評価

(1) 環境流量の放流規則

前章で設定した値を用いて実際のダム流入量に対する環境流量の放流をシミュレートする。

最低流量以外の指標は事前に放流のタイミングと量を定めておくことができず、流入量の増減に応じて対処することになる。例えば自然に大きな洪水が起きた場合には攪乱流量を人為的に供給する必要はない。また対処の方法には大きな自由度が存在する。

ここでは、実績放流量を最大限尊重して環境流量基準に近づける方法(out1と呼ぶ)と、流入量になるべく近い放流を行う方法(out2と呼ぶ)の2ケースを検討する。前者は原則として実績放流量を放流するものとし、4つの基準値を満たせなくなったとき(及びダムが空または満水になったとき)に放流量を調節する。後者は原則として流入量と放流量を等しくし、ダムの貯水量が0または満水になるときに放流量を調節する。ともに最低流量は下回らず、6日連続して許容流量を下回ったときは7日目に許容流量を放流するものとする。また1年のうち25%の日数(92日)が低水流量を下回ったときには残りの日はできるだけ低水流量を確保する。出水期には月ごとに攪乱流量の生起状況をチェックし、起きていない月には月末に必ず攪乱流量分を放流する。

環境流量の放流は発電取水口を通して行うと想定するので、貯水量ゼロ(最低水位)まで放流が可能である。

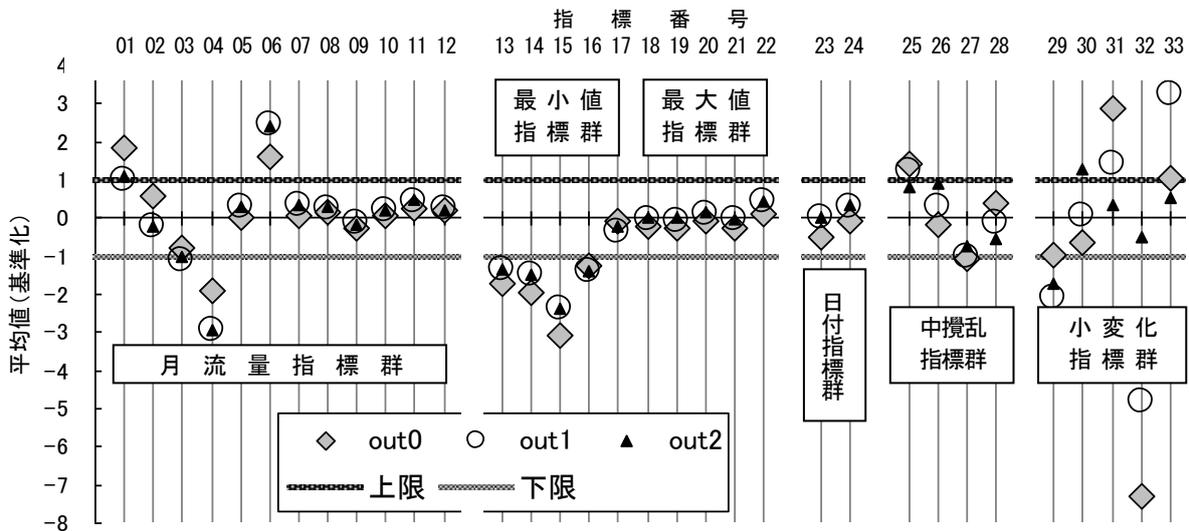


図-4 3つの計算ケースに対する流況指標の平均値の変化。水平線は適正分布範囲の上下限を示す。平均値はこの領域内に収まっていることが望ましい。

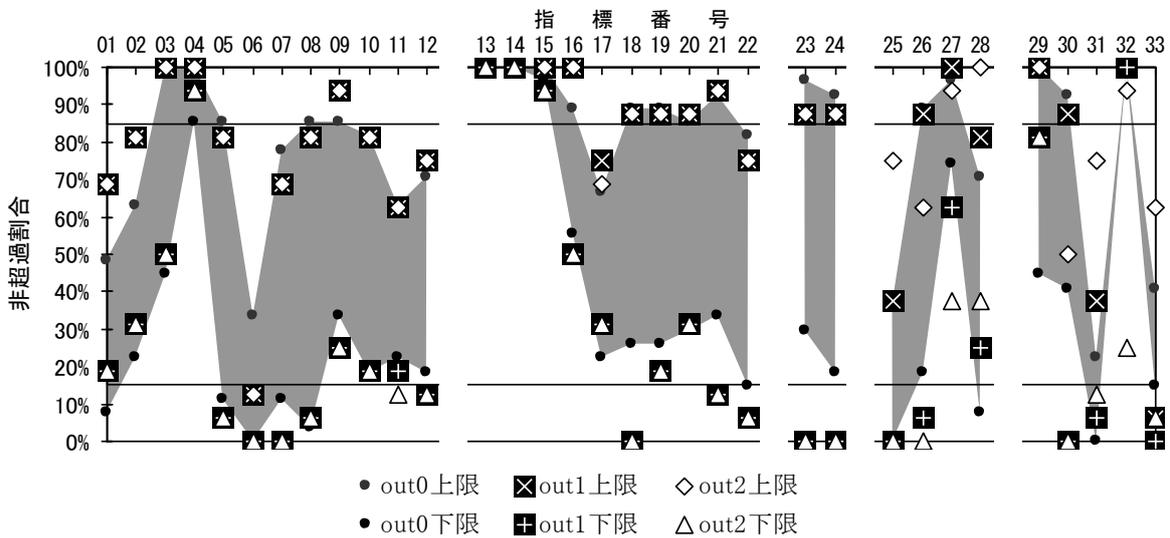


図-5 3つの計算ケースに対する流況指標の年々変動（逸脱率）。

各ケースにおいて下限を下回った年数と上限を上回った年数の割合を示している。適正分布範囲を上下15%の逸脱率に定めているため、下限は15%、上限は85%に近いほど自然流況に似て望ましい。変動が激化すると上限と下限の値が接近し、逆に平滑化すると遠く離れる。灰色の領域はout0の上下限間を示し、これを15~85%に近づけることが目標になる。out2では指標25や31の上限、27や32の下限を大きく改善していることが読み取れる。

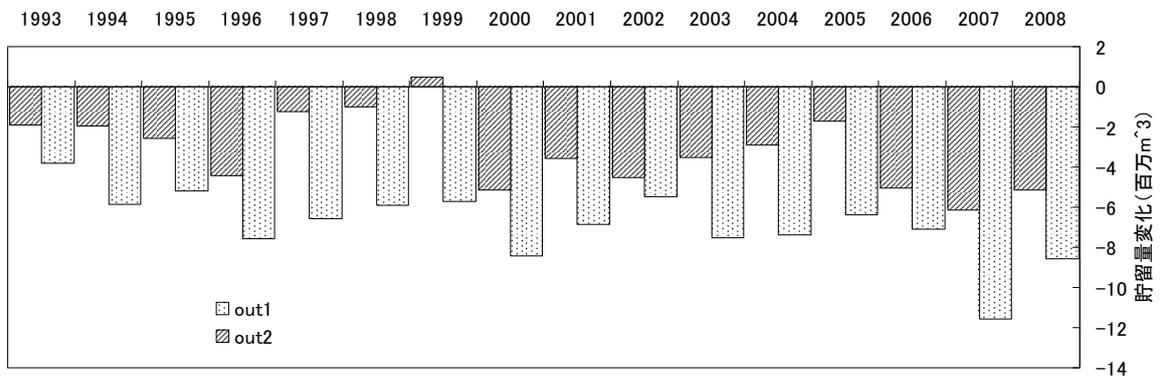


図-6 環境流量を放流することによるダム貯水量の変化（減少量）。

(2) ダム放流シミュレーション

2章で計算したダムのうち、典型的な挙動を示している相俣ダムをシミュレーションの対象とした。計算期間は1993年～2008年の16年間である。

貯水池側の操作要請として、5月初めに常時満水位まで水位を上昇させ、6月に下降させて7月から9月までは夏期制限水位を上回らないようにする条件を課した。環境流量を考慮しない場合、つまり流入量と実績放流量のみから計算されるダム湖内の貯水量の推移を図-3(a)に示す。これをout0のケースと呼ぶ。同様にout1とout2における貯水量の推移を図-3(b)および(c)に示す。前述のとおり、out1の貯水量はout0のケースに類似し、out2では水位が一定に保たれる期間が長くなる。

(3) 環境流量放流の効果

環境流量を考慮する2つのケースについて、流況改善の効果を2章と同様の方法により評価する。

流入量より定められる適正分布範囲の上限が+1.0、下限が-1.0となるように各指標の平均値を基準化し、3ケースの結果を比較したものが図-4である。out0に比べ著しく適正化したとは言えないが、最小流量の指標群に改善がみられ、out2では小変化のばらつきも抑えられている。年々変動の変化をみたものが図-5である。月流量や極値の指標にout1とout2の差はみられないが、変動の指標は異なった影響が現れており、ややout2が勝るようである。今回設定した4つの指標はいずれも単年における基準であり、年々変動を考慮して定めたものではない。よって年々変動は平滑化の方向に動いてよさそうなものであるが、そのような傾向はみられない。

図-3に表れているように、この2つのケース設定は環境流量を増強する意味合いが強く、ダム湖内の貯水量は減らされる方向にある。貯水量が減ると利水可能性が減じられ、渇水リスクが高まる。各年における貯留量の減少は図-6に示す通りであって、out2はout1より利水に与える影響が少ない。これは、春の終わりに夏期制限水位へ向けて水位を下げていく際、out1は実績放流量に引っ張られて過大な放流をしがちなものに対し、out2はより正確に夏期制限水位に近づける程度の放流量をとれることによる。

平均するとout1では6,870千 m^3 、out2では3,140千 m^3 の貯水減少が発生している。全国の平均的な水道給水原価を175円/ m^3 とし¹¹⁾、人件費や設備の減価償却費を除いた分を20%とすると、out1は2.40億円/年、out2では1.10億円/年のコストに相当する。利水への影響からみるとout2の方が優れた放流方式といえる。この差は季節による水単価の違いを考慮すると小さくなる（灌漑用水の単価が高い4～6月の時期にout1とout2はほぼ等しい）が、

out1よりout2が優れるという結論は動かない。貯水池内に増えた空き容量が洪水リスクの減少に寄与する分を計算に入れると、out1に優位性が生じる可能性はある。

5. まとめ

本研究では、利根川流域のダムで起きている流況変容の状況を調べ、最小流量が減じられていること、小変化は激化される傾向にあること、中規模攪乱は一つの決まった方向にはくれないことを明らかにした。続いて複数指標を地域ごとに定める方法を提案し、具体的な数値を算出した。最後にこの指標を用いた環境流量の放流が可能なことをシミュレーションにより示し、流況改善と利水への影響を比較することで代替案を評価する手順を提示した。

参考文献

- 1) Tharme, R.E.: A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers, *River Research and Applications*, Vol.19, pp.397-441, 2003.
- 2) 白川直樹：環境流量の実現と発展に向けて、科学, Vol.79, pp.304-308, 2009.
- 3) ダム諸量データベース, <http://www2.river.go.jp/dam/>.
- 4) 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.
- 5) 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, No.50, pp.1255-1260, 2006.
- 6) Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R. and Braun, D.: How Much Water does a River Need?, *Freshwater Biology*, Vol.37, pp.231-249, 1997.
- 7) 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.
- 8) Tennant, D.: Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources, *Fisheries*, Vol.1, pp.6-10, 1976.
- 9) 三石真也・浦上将人・浜西豊：下流河道環境を考慮したダム放流の検討, 河川技術論文集, Vol.8, pp.359-364, 2002.
- 10) 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, 河川技術論文集, Vol.6, pp.191-196, 2000.
- 11) 日本水道協会：水道統計要覧（平成19年度）。

(2010. 4. 8受付)