

15144

環境用水の意義とその定量化に関する研究

平成13年 2月

白 川 直 樹

論文要旨

環境用水とは、河川環境を保全ないし改善するための水利用である。従来河川の流水は人間活動に必要不可欠な資源として利用され、水量の配分が定められてきた。しかし今、環境用水の参入によって既存の利水秩序が修正を迫られている。本論文では、環境用水の意義を明確にし、河川計画の意思決定の中で環境用水が正しく位置づけられるような意思決定プロセスを提案する。

第1章では、研究の背景と立場を明らかにした。減水区間問題に代表されるような水量をめぐる利水と環境の相克は、広義の水資源配分問題と捉えることができる。環境用水とトレードオフ関係にある他利水はそれぞれ独自の価値基準をもち、権利関係や経済価値をもとに水量を分け合ってきた。しかし環境用水の価値基準はいまだ曖昧であるし、環境用水を加えた水量配分における意思決定の判断基準は明確でない。このような状況は諸外国でもみられ、環境用水が水資源問題の一つの焦点になっている。気象、地形、人口密度、土地利用、社会システム、歴史といったその土地固有の条件の重要性を認識した上で、経済活動と自然環境のバランスをとった水資源配分を実現する必要がある。本研究は、環境用水の価値基準と意思決定の判断基準について論じ、環境用水の決定に定量的な基礎を与えることを意図している。

第2章では、環境用水の意義について論じた。2-1では環境用水の事例を紹介した。ダムや滝での観光放流、水力発電所での維持流量放流、人工水路での放流などがある。2-2では正常流量概念の弱点とそれを乗り越えた環境用水概念について述べた。新河川法の下で用いられた正常流量の制度が減水区間の発生を防げなかった理由には、利水の論理をそのまま環境に適用しようとしたことが背景にある。環境用水概念は環境の論理に基づくかねばならない。2-3では河川計画における環境用水の位置づけを考えた。現在の河川計画では、正常流量を確保したのちに他用水の量を定めることとなっている。これは環境を最優先しているようにみえるが、現実には必ずしもそうっていない。環境用水も他用水と同レベルで水量を争うようにすべきである。河川砂防技術基準（案）や治水経済調査要綱の修正案を提示した。

第3章では、環境用水を量の面から検討した。

3-1では河川流量の規定要因を整理した。気象条件+地理条件で決まる流量（潜在的自然流量）が人為条件によって変形されて現実の流量となっている。人為条件による変形を緩和するのが環境用水の目的であるので、潜在的自然流量を100点満点とし、流量ゼロを0点として、できるだけ点数を上げるような流況改善をしなくてはならない。その際、絶対量の減少と変動の平滑化に注目すべきである。

3-2では減水区間の歴史を主として水力発電との関係において振り返った。大正末期から昭和初期にかけての時期が重要なポイントであることが浮かび上がった。それは、使用水量（平水量の採用）、他水利との摩擦の頻発、政府通達などから裏付けられる。

3-3では利根川上流域を例にとって人為条件による流況変化の特徴を調べた。まず絶対量の減少についてみると、現実の流量は支川合流前後などで合っていないが、発電所のバイパス流量を戻して計算すると合致する。量を改善するには、発電取水を放流する以外

の手だてではないことがわかる。変動についてみると、発電所は一定流量取水の傾向が強くて変動の形をあまり変えないが、ダム操作は明らかに平滑化をもたらしている。ただし、ダム放流量の影響は数十 km 下流までしか及ばない。平滑化の程度を表す指標としては、30 番目流量と 120 番目流量の比（豊水平滑度）、および 330 番目流量と 120 番目流量の比（渇水平滑度）が有力である。前日差の分布も有効な尺度である。発電減水区間の平滑化をみるには、最大使用水量取水日数がよい尺度になる。

3-4 では減水区間を費用効果分析にのせるための指標を提案した。流量だけでなく減水区間長も合わせて考慮した量である環境流量ポテンシャルの消費量を通して奥利根流域の減水区間の程度を表現することができた。多摩川でも試算し、利根川と比較した。

3-5 では環境用水の量と効果の関係を考察した。量と効果は単純に対応するものではなく、しきい値で表される最低条件と、連続量で表される条件の部分に分割されよう。最低条件は種（あるいは生態系）が存続できるぎりぎりのラインであって、生物学の裏付けが不可欠である。それ以上の条件は、水理学的な考察から流量の $1/2$ 乗にほぼ比例すると推定した。潜在的な自然流量を 100 点、流量ゼロを 0 点としてその間を流量の $1/2$ 乗で結んだものが流量-効果曲線となる。

第 4 章では、環境用水の価値について論じた。

4-1 では自然環境の価値の分類法を提案し、評価方法を考えた。自然環境が人間の効用を変化させるには、身体に作用する経路、心情に作用する経路、金銭的利害に作用する経路の三つがある。自然環境の価値を評価方法との関連で分類すると、消費資源価値（モノとしての価値）、空間場価値（場としての価値）、基盤価値（機能としての価値）、心情価値（存在としての価値）の 4 つに分けられ、将来まで視野にいれれば可能性価値と遺贈価値（将来世代へ残す価値）もある。環境経済学で使われている手法では、これら全ての価値を測れない。代替法は心情価値を測れない。顕示選好法も心情価値を測れない。表明選好法は基盤価値を測れない。可能性価値はどの方法を用いても確定できない。環境評価にはいろいろな種類があるが、環境用水の定量化という意思決定に必要なのは社会科学的な評価である。そこでは自然科学的な評価と異なり、測れるものと測れないものが共存し、評価値が一つに定まらない（前提となる価値観によって違う値が弾き出される）。消費資源価値は代替法、空間場価値は顕示選好法、心情価値は表明選好法によって測り、基盤価値は自然科学的データ、可能性価値は（意思決定者による）社会情勢の認識、遺贈価値は（意思決定者の）環境倫理にそれぞれ基づいて判断し、それらを総合して意思決定ができればよい。

4-2 では環境用水の費用負担について論じた。出発点となる権利の所在を定めるには自然科学や歴史や政治や法律からのアプローチが必要であるが、それが定まれば環境税や補助金等の手段によって最適な環境用水量を実現することができる。発電減水区間は発電者の負担で解消すべきであり、電力料金を通して消費者が負担することになる。上水道も同様で、水道料金を通して消費者の負担になる。

4-3 では環境用水の価値を試算した。水力発電所からの放流によって失われる電力量を推算すると、電力会社の売上高の 0.1% ほどになった。また表明選好法によって環境用水の価値（心情価値に相当する）を推計すると、1 世帯あたり年間約 10,000 円という結果が得られた。

第5章では、環境用水が社会経済に与える影響を論じた。5-1では環境用水放流にともなう電力料金の上昇がどれだけの波及効果をもつか、産業連関分析を用いて考察した。5-2では多目的ダムのコストアロケーション再計算を通して他水利への影響を考えた。環境用水をどう扱うかによって他水利が受ける影響は異なる。発電者が採算割れに追い込まれる場合が生ずる。5-3では水利秩序に環境用水が及ぼす影響を論じた。ここまでの議論を踏まえ、環境用水を他の水利と同格に扱うべきであることの根拠を述べた。5-4では環境経済統合勘定の河川応用版を構成した。利水と環境のバランスや環境項目相互のバランスなど河川政策を考えるには河川環境を包括的に評価するフレームワークが必須である。環境用水の確保は経済活動や他環境要素（例えば水質）と整合しない場合があるので、こういった総合的なフレームワークは意思決定の助けになるだろう。

最後に第6章において、環境用水を取り入れた河川計画意思決定支援システムへの提言を行った。環境用水を正しく評価して計画に組み入れるのに踏むべき手順を示し、環境用水の量を決定する意思決定プロセスのモデルを構築した。

本論文により、河川環境の水量面での保全・改善策に関して、水資源政策との関係や定量化手法など河川計画上の基礎を与えることができたものと考えている。

初出一覧

- 玉井信行・白川直樹（2000）仮想市場法を用いた環境用水の便益評価について．水環境学会誌 23(8)：461-465.
- 白川直樹・玉井信行・吉田昌平（2000）河川事業の影響を包括的にとらえる自然資源勘定．河川技術に関する論文集 6：243-248.
- 玉井信行・白川直樹（1999）環境経済統合勘定の河川計画における意義について．河川技術に関する論文集 5：13-18.
- 白川直樹・有賀圭司・玉井信行（1999）河川環境を対象とした環境経済統合勘定表の構築．環境システム研究論文集 27：787-792.
- 玉井信行・白川直樹・松崎浩憲（1998）自然復元を目指す河川計画における費用・便益分析について．水工学論文集 42：271-276.
- 白川直樹・玉井信行・松崎浩憲（1997）環境用水を考慮した多目的ダムのコストアロケーション．第20回土木計画学研究．135-138.
- 白川直樹・松崎浩憲・玉井信行（1997）環境用水のコストとその環境経済的評価．環境システム研究論文集－アブストラクト審査部門論文－ 25：629-632.
- 玉井信行・白川直樹・松崎浩憲（1997）発電ダムにおける環境用水のコストと環境経済．第5回水資源に関するシンポジウム論文集．401-406.
- 玉井信行・松崎浩憲・白川直樹（1997）潜在自然型河川の特徴とそれに関する研究・河川管理のあり方について．第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム．147-152.

環境用水の意義とその定量化に関する研究

目次

1. 序論	
1-1 本論文の背景と目的	1
1-2 本論文の構成	7
2. 環境用水の意義	
2-1 環境用水の事例	8
2-2 正常流量と環境用水	
(1) 正常流量概念	12
(2) 環境用水概念	15
2-3 河川計画・事業評価と環境用水	18
2-4 まとめ	23
3. 環境用水の量	
3-1 河川流量の規定要因	24
3-2 発電減水区間の歴史背景	33
3-3 人間活動による流況変化－利根川上流域の例－	
(1) 利根川上流域の自然条件と水利用状況	42
(2) 人工構造物が流量に与える影響	49
(3) 流況の長期変動	57
(4) ダムと水力発電所による流況変化	68
(5) 人間活動による流況変化のまとめ	80
3-4 流況変化の定量指標－環境流量ポテンシャル	
(1) 環境流量ポテンシャルの定義	81
(2) 利根川と多摩川での試算	84
3-5 環境用水の量－効果関係	89
3-6 まとめ	93

4. 環境用水の価値	
4-1 自然環境の価値とその評価方法	
(1) 自然環境の価値の分類	94
(2) 環境経済学の環境評価手法	99
(3) 自然環境の適切な評価方法	102
(4) まとめ	106
4-2 環境用水の費用負担	
(1) 受益者負担と原因者負担	107
(2) 経済的手段による環境用水量の決定	110
(3) 経済学以外のアプローチ	116
4-3 環境用水の経済価値の推計	
(1) 代替費用法による推計	118
(2) 表明選好法による推計	125
4-4 まとめ	139
5. 環境用水が社会経済に与える影響	
5-1 水力発電量減少の波及効果	140
5-2 水資源開発事業への影響ー多目的ダムのコストアロケーションの再計算ー	
(1) 実績コストアロケーション	143
(2) 発電減方式による再計算	145
(3) 新規参入方式による再計算	146
(4) コストアロケーション方式の比較	148
(5) コストシェアリングとアロケーション方式	150
5-3 水利秩序における環境用水	151
5-4 河川環境の総合的評価手法ー環境経済統合勘定	153
5-5 まとめ	157
6. 環境用水を取り入れた河川計画意思決定支援システムへの提言	158
参考文献	161
謝辞	

1. 序論

1-1 本研究の背景と目的

河川の流水は人間活動に必要不可欠な資源である。人間の活動が大規模化すればするほどその要求量は増していく。すでに現在では世界の多くの地域で水資源の需給状況が逼迫しており、河川の水はほぼ究極まで利用しつくされている。しかし、河川水は人間活動を支える資源であると同時に河川環境を構成する大切な要素でもある。河川環境にとっても水量は大事な資源なのである。人間活動の使用水量が増えれば増えるほど、河川環境側の使用水量は減らされてしまう。わが国でも明治以来人口が増加し経済活動が発展していくにつれて、流量が異常に少ない河川があちこちに現れた。極端な場合には流水面が消えてしまい、「涸れ川」「水無川」「河原砂漠」などと揶揄されるほどであった。発電や農業などがまさに「水ももらさぬ」取水を行ったのがその原因であるが、土木技術（取水堰やダムなどの技術）が発達したことも背景にある。減水した区間では、漁業・水質・景観などの価値が損なわれ住民から苦情が発せられた。代表例に東海道の難所として有名だった大井川がある。上流では発電取水、下流では農業と都市用水の取水により川の水は激減し、「箱根八里は馬でも越すが、越すに越されぬ大井川」とおそれられた往時の面影をしのぶことは困難になった。1988年、建設省（現国土交通省）は減水区間軽減のため、一定規模以上の水力発電所に対していくらかの流量を放流するよう通達を出した（水利権更新時の条件として）。この放流は無効放流なので、発電用水ひいては発電量が失われることになる。河川減水の問題は、それだけの犠牲が求められるほどの重要事とみなされつつある。

水資源は人間活動にとって最も基本的な資源の一つである。人間は飲み水や生活用水がなくては生きていけないし、農業用水や工業用水、発電用水などさまざまな産業活動も水資源がなくてはたちゆかない。その重要さゆえに争奪戦も激烈であって、世界各地の河川では有史以来水をめぐって争いと話し合いの長い長い過程が繰り返されてきた。現在の利水秩序すなわち各利水主体間の水量配分は、そういった歴史の蓄積の上に成り立っているのである。しかし今、自然環境という古くて新しい利水者の存在が改めて注目されており、その秩序が揺さぶられている。

表 1-1 各種用水の性質

	農業用水	工業用水	発電用水	生活用水	環境用水
何を向上させるか	農産物生産量 (経済)	製品生産量 (経済)	発電量 (経済)	生活の質 (人間)	河川環境 (環境)
流量面での特徴	農地間で反復 利用が可能	工場内での 再利用が すすんでいる	取水量 ≒排水量	上下水道システム による 大規模取水	河川内で利用⇒ 他利水と共有・ 転用不可
主たる利用地	中・下流	中・下流	上流	中・下流	全域

本研究は、河川流量配分の問題に、これまで不十分だった河川環境の視点を加えてアプローチする。河川環境に配分する流量を環境用水と呼ぶ。すなわち、河川環境を保全ないし改善する水使用を環境用水と定義する。流れ込み式水力発電所での維持流量の放流、ダムからの観光放流、使われなくなった水路への通水、などが環境用水の実例である。流量配分に参加する利水主体は表 1-1 のような特徴をもつ。農業、工業、発電の各用水は基本的に経済論理のメカニズムで取水量を決定するのに対し、生活用水は生活の質という人間的な論理で動く。環境用水はまた別のメカニズムに支配される。こういった異なる論理（価値基準）をもつ各主体が競合して水を奪い合うのが河川流量配分の場合であって、その調整をどうつけるかというのが最終的な問題意識である。

環境用水は利水体系の中で手薄な部分であるが、逆に環境面からみても研究の必要性が高い部分である。1997 年の河川法改正で環境が目的の一つに掲げられるなど河川環境の重要性が広く認識されつつあるが、河川環境として一般に強く意識されてきたのは水質や動植物といった要素であった。流量は河川空間を構成する基本要素であって生物の生息場を規定する最も重要な物理因子でありながら、その意義が十分に明らかにされているとはいえない。流量すなわち環境用水には二つの重要な因子がある。一つは量、もう一つは時間的変動である。それぞれ、取水点と排水点の間の減水区間現象、ダム下流の流況平滑化現象に対応する。本研究では主として量の問題に着目し、変動には軽く触れるにとどめる。河床生息場保全や河道内樹林化との関連で平滑化が良くない影響を与えるケースが報告されており、時間的変動はこの先看過できない重大な要素になってくるだろう。

環境用水は、他利水とトレードオフの関係にある。環境用水を確保しようとする、他利水は不可避免的に取り分を減らされる。図 1-1 のように各利水者は互いに争って河川の水を取り合っているが、環境用水は利害の直接代弁者をもたず、そのため他利水におされがちになる。環境用水確保の論理は、農業・工業・発電用水の経済論理とも違うし、生活用水の論理（生活の質）とも違う。

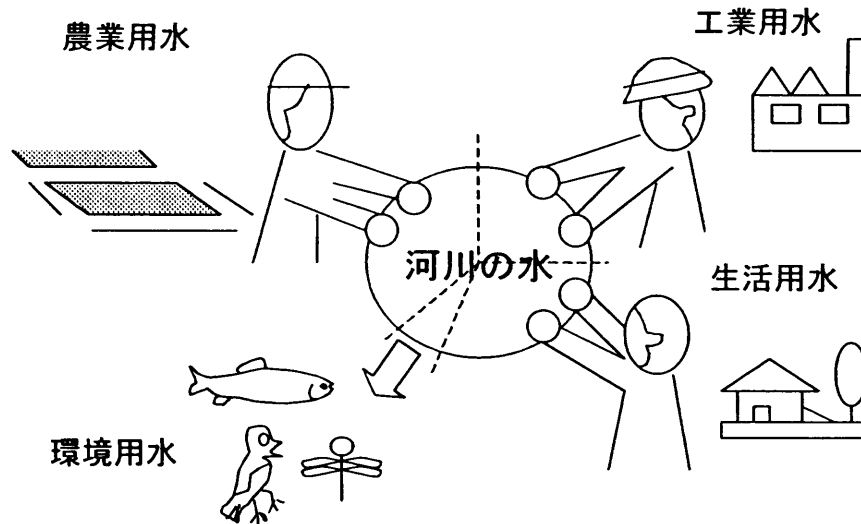


図1-1 環境用水と他利水との関係

現在利水者間で水を分け合う際にものを言っているのは権利関係と経済価値である。日本の河川利水は長らく農業を中心に進行し、農業水利の調整に伴って権利関係が構築されてきた。明治維新から戦後高度経済成長期までは水力発電や都市用水や工業用水の要求水量が一貫して伸びつづけ、それら新規参入者と農業用水の水利調整がたいへんな摩擦と対立を生んだ。その権利関係を調整するために、多目的ダムや河口堰といったハードな構造物対策、河川法・慣行水利権や水管理合理化といったソフトな対策に多大な努力が払われた。その過程や問題点については、水資源管理の立場から（水利科学研究所編「水利河川学」1962 など）、そして農業水利の立場から（新沢嘉芽統「河川水利調整論」1962 など）指摘がある。環境用水の参入は新たな水利調整を迫ることになるが、過去の事例に鑑み、環境用水に適切な権利を与えることが大切である。多目的ダムの費用割振にみられるように、新規の水利用者（発電・都市・工業など）の間では経済価値に基づいた水量配分が行われており、環境用水がここに加わるなら価値についても検討する必要がある。

いまのところ、環境用水は権利も価値も明確にされていないので、現行の枠組の中では適切な扱いを受けられない。新河川法の「正常流量」概念が減水区間の深刻化を防げなかったのは、環境の論理を明確にしないまま従来の利水体系にあてはめようとしたことが原因である。正常流量概念よりも踏み込んだ環境用水概念を確立することにより、各種用水が競合する場面での適切な意思決定が可能になる。

人間活動による河川環境への悪影響は日本だけでなく世界各地で取り沙汰されていて、とくに欧米では環境用水の必要性に関する議論もさかんである。例えばアメリカ合衆国の M. Collier ら（1996）は、水力発電ダムによって土砂供給が減り下流河道の洗掘がすすんだ例（Snake River）、農業取水のため数百 km にわたって減水し土砂堆積がすすんだ例（Rio

Grande)、多目的ダムの運用(とくに発電)とレクリエーション利用の相克が論議を呼んでいる例(Chattahoochee River)、農業用利水ダムの洪水調節によって鳥類(sandhill cranes)の生息場が顕著に減っている例(Platte River)、ダムが希少な野生魚類に悪影響を及ぼしていたために放流操作を変更した例(Green River)、観光地としても生物生息場としても貴重なグランドキャニオンの自然を守るためにさまざまな研究が行われている例(Colorado River)などを紹介している。Rio Grande では減水区間の年流量がダム建設前の10分の1にまで減り、治水・利水上の問題や植生の単調化を引き起こしている。Chattahoochee River では発電放流の日内変動が下流河岸の農地侵食につながっているのではないかと疑念が持たれたり、急な放流量変動によって釣り人が流される事故が毎年のように起きている一方、ダム放流の冷水が Trout の生息に好適な環境をつくりだしている面もある。Green River の Flaming Gorge ダムでは、灌漑や洪水調節や発電の都合を考えるとなく生物の生息場保全のみを目的とした放流量操作が行われている。Colorado River の Glen Canyon Dam では1996年に人工洪水の実験が開始され、環境への影響が詳細に調査されている。この実験には425万ドルの経費がかけられたという。ヨーロッパやオーストラリアでも減水区間や環境用水が水資源政策での重要な課題になっており、instream flow, ecological flow, conservation flow などと呼ばれる環境用水の算定基準が議論的になっている。中国の黄河は1990年代以降毎年のように下流部が干上がる断流現象を経験しているが、これも灌漑用水や都市用水を要因とする減水区間の一種である。この断流はいまのところ利水問題として意識されているが、規模が大きいだけに環境影響もかなりのものがあるだろう。他のアジア地域や発展途上国でも今後利水量の大きな増加が見込まれており、減水現象が重大な環境問題に発展する可能性を秘めている。

環境用水は本質的に地域性・個別性が強い概念である。その河川の自然条件や社会条件と不可分に結びつくので安易な比較は許されない。日本での環境用水は諸外国と比べて以下のような特質をもつだろう。まずは自然条件として、梅雨や台風に象徴される雨の多さ、それに対応する河川流量変動の激しさがある。日本の河川はそのような流量変動に対応した河川生態系をはぐくんでおり、環境用水においても流量変動が重要な要素になろう。治水とのバランスもとらねばならない。自然条件には地形・地質もある。急峻な山地地形と短い河道、すなわち河床勾配の大きい河川における流量は、緩やかな河川とは違った意味をもつ。その違いは土砂輸送や微地形に現れるとともに、人間社会の河川利用形態にも影響を及ぼす。社会条件としては、人口密集と稠密な土地利用、稲作水田に代表される農業との関係、が重要である。人口密集は河川環境へ重い負荷をかけることになるほか、環境対策の選択肢に相当な制約を付す。例えば引き堤や遊水地といった余剰土地を要する対策は採り難いし、移住などもってのほかである。産業が高度に集積していると水の単位価値が高くなるため水量の再配分は難しいし、権利関係が複雑に交錯することも多い。稲作水田は、水の大量需要者であり、河川水利用の複雑なシステムを長い時間をかけて構築してきた功績をもつ。米は日本の伝統社会の中で特別な地位をもってきたし、食糧の安全保障

などといった経済論理を超えた意義にも配慮が必要である。農業用水路は人工水路でありながら今では自然河川と同等の親しみと愛着を持たれているものも多く、水循環系の重要な一翼を担っている。また、水田は河川と一体となった水域生態系を構成しており、農業用水自体が環境用水の機能を併せ持っていることにも注意が必要である。

一方、外国にあって日本にない条件もある。まず自然条件の多様な違いに応じた多様な河川の姿。熱帯、乾燥地、寒冷地等の環境用水は日本と全く様相を異にするだろう。規模の大きな河川では、水循環系から気象にまで影響が及ぶかもしれない。社会条件では、国際河川における上下流や左右岸の利害対立、水力発電の占める役割の大きさ（これが大きいと、発電減水区間の軽減は簡単にはいかない）、貧困への特段の配慮の必要性、などが挙げられる。これらに加えて地域固有の生態系や人間と河川の関わりの歴史・文化が因子となって、千差万別の状況を形成する。

本論文では、自然条件や社会条件の各因子を詳細に検討することはせず、それぞれが投影された河川流量の比較によって環境用水を論ずる。ここで扱うのは日本、それも詳細に検討するのは関東地方の例のみだが、手法や手順は汎用性をもつものである。他地域や海外へ適用する際にも、本論文で提示した枠組が大幅な変更なく応用できよう。ただし、権利関係についてはもう少し突っ込んだ分析が必要である。本論文ではある程度権利関係が定まった状態を前提として議論しているからである。

本研究の位置付けをまとめると、図1-2のようになる。各種の利害者が競合する場において適切な意思決定をするには、それぞれの利害者の価値基準を把握することが必要になる。そこで、現在最も曖昧になっている環境用水の価値基準を明確にする。さらに、意思決定の総合的な判断基準について考察し、判断に役立つ統合ツールの検討を行う。

河川は現代社会の中で人間活動と自然環境の相互作用が最も先鋭化している場である。ダムや取水等の人間活動は、土砂・流水・水質など自然界の物質の流れを大きく変容させている。大規模な自然環境の改変は、人間活動に安定と繁栄をもたらす一方でさまざまなひずみも生んできた。「持続可能な発展」の概念は、人類の長期的な存続の基盤たる自然環境が短期的な視点のみにもとづいた改変によって損なわれてはならない、と警告する。かといって、自然環境保全のために経済活動を中止することなどはできない。経済論理一本槍でもなければ自然環境一辺倒でもない、両者の調和を河川という場で追求するのが本研究の意図するところである。

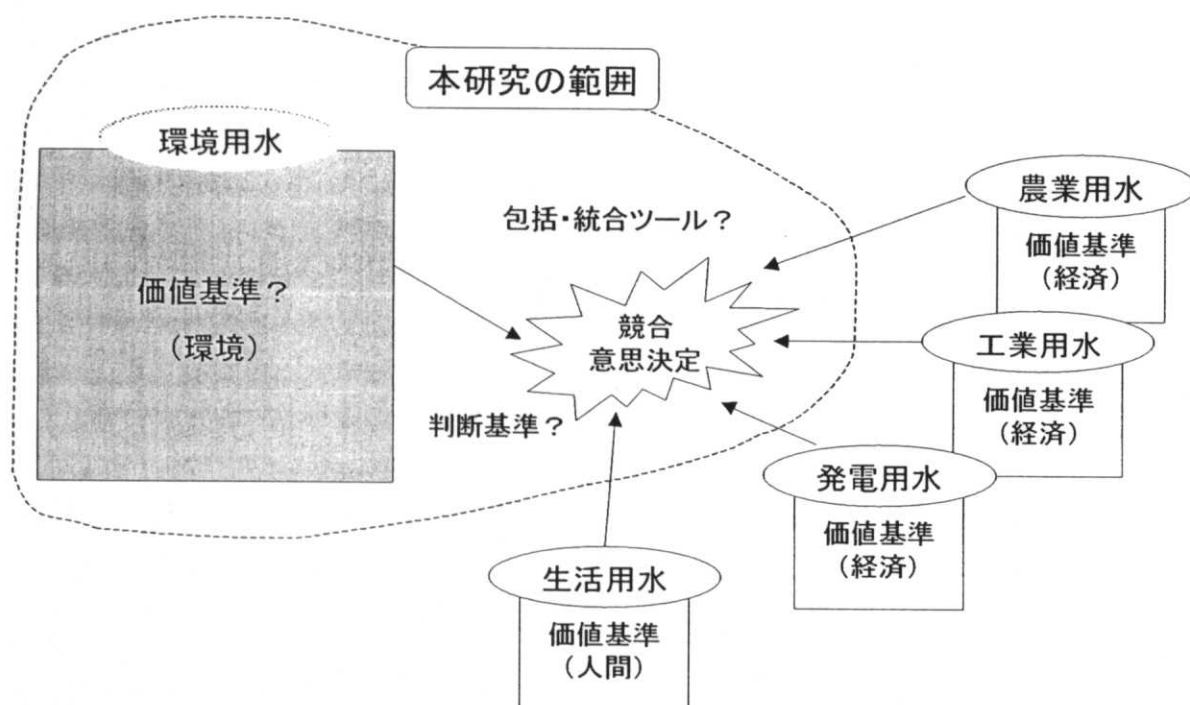


図1-2 本研究の位置づけ

1-2 本論文の構成

本論文の第2章では環境用水の意義について論じる。2-1で環境用水の事例を紹介し、2-2では正常流量概念の弱点を分析しそれを克服した環境用水概念を提案する。2-3では河川計画の中での位置付けを考える。河川砂防技術基準（案）と治水経済調査に環境用水を取り込む方法を提示する。

第3章では、環境用水を量の面から検討する。3-1では河川流量の現状とそれを規定する要因について全国スケールで調べる。人為的影響（取水とダム操作）を取り除いた流量を環境用水の目標流量とし、潜在的自然流量と呼ぶことにする。3-2では減水区間の歴史的背景、とくに水力発電との関係を振り返る。3-3では利根川上流域を例にとって人為条件による流況変化の特徴を調べる。絶対量については潜在的自然流量と発電使用水量の比較をし、変動についてはダム操作の影響を観察する。3-4では減水区間を費用効果分析にのせるための指標を提案する。流量減少量に減水区間長を併せて考慮した環境流量ポテンシャル消費量を通して奥利根流域の減水区間の程度を表現する。3-5では環境用水の量と効果の関係を考察する。量と効果は単純に対応するものではなく、しきい値で表される最低条件と、連続量で表される条件の部分に分割されよう。

第4章では、環境用水の価値について論ずる。4-1では自然環境の価値の分類法を提案し、評価方法を考える。環境経済学で使われている手法では、自然環境の価値を全て測りきれない。環境用水の定量化という意味決定に必要なのは社会科学的な評価であり、評価値が一つに定まらない。自然環境の多面性に応じた手法の組み合わせによって評価することを考える。4-2では環境用水の費用負担について論ずる。経済学からのアプローチをはじめ、自然科学や歴史や政治や法律からのアプローチについても言及する。4-3では環境用水の価値を試算する。水力発電所からの放流によって失われる電力量を推算し、表明選好法によって環境用水の価値を推計する。

第5章では、環境用水が社会経済に与える影響を論ずる。5-1では環境用水放流にともなう電力料金の上昇がどれだけの波及効果をもつか、産業連関分析を用いて考察する。5-2では多目的ダムのコストアロケーション再計算を通して、他水利への影響を考える。環境用水の扱い方によって他水利が受ける影響は異なる。5-3では水利秩序における環境用水の位置を論ずる。5-4では河川環境を包括的に扱う道具として環境経済統合勘定の河川応用版の枠組を構築する。

全体のまとめとなる6章では、以上の検討の結果から環境用水を総合的な河川計画の中で扱う意思決定システムのプロセスを提案する。

2. 環境用水の意義

2-1 環境用水の事例

「環境用水」的な水利用の中で最も早く意識されたのは、希釈により流水の水質を良くするタイプの用水であろう。舟運の水深を確保するための流量や河川構造物（とくに取水堰）の機能を損なわないために必要な流量も早いうちに意識されていたと思われる。ただしこれらの用水は人間が利用することを念頭においてのものであり、環境用水の中でも従来の利水用水に近い概念といえる。

新しいタイプの環境用水としては、観光放流がまず挙げられる。黒部ダム（黒部第四発電所）では国立公園を監督する立場から厚生省が発電者に対して無効放流を求めた。当初お互いが出し合った案は放流量や放流期間などの面で大きくかけ離れていたが、歩み寄って決着した放流は表2-1の通りである。この放流量は年間6,000万 m^3 、損失電力量にして $78 \times 10^6 \text{MWh}$ に相当する。放流の目的は十字峡・白竜峡の景観維持である（関西電力株式会社編集 1966）。黒部ダムのほか、層雲峡ダム、白丸ダムなどでも観光放流が行われている。観光放流の場合、夏季に放流の重点が置かれているのが共通の特徴である。放流によってダム地点および下流区間（峡谷など）の景観価値が上昇するが、下流区間はダム建設前に比べると流量は減っていることから損害軽減とみなされるのに対し、ダムそのものの景観（放流風景）は新たな価値の創造と捉えることができる。

表2-1 各地ダムでの観光放流の例

ダム名	放流量 (m^3/s)	放流期間
黒部ダム（富山）	15.00	(6/26-7/31 の 6:00-17:30)
	15.00	(8/01-8/15 の 6:30-17:00)
	10.00	(8/16-9/10 の 6:30-17:00)
	10.00	(9/11-10/15 の 7:00-16:30)
層雲峡ダム（北海道）	6.0 or 9.0	(5/1-10/31 の昼間)
樽床ダム（柴木川第一発電所）	0.4 or 1.0	(5/1-11/15 の昼間)
白丸ダム（東京） 1959 年合意	5.00	(3/20-6/30 の 9:00-17:00)
	5.15	(7/01-8/31 の 7:00-19:00)
	5.00	(9/01-11/23 の 9:00-17:00)
	0.28	(上記期間の夜間および 11/24-3/19)

観光（もしくは景観）のために水を流すという意味では、役目を終えた人工水路に水を流すことも環境用水の一つである。多摩川の玉川上水や二ヶ領用水がこの例である。玉川上水は 1965 年に淀橋浄水場が活動停止して以来、小平より下流が使用されなくなった。1971 年には千川用水、1973 年には野火止用水も使用されなくなった。これらの用水の歴史的意義等から通水を望む声がわき上がり、下水処理水を活用して 1984 年に野火止用水、1986 年に玉川上水、1989 年に千川用水に水を流すようになった。このケースは生態系や動植物への配慮ではなく歴史的景観の保存および親水機能の増進が目的といえよう。下水処理水を利用しているとはいうものの、多摩川本流の流量を犠牲にしての措置である。もっとも流量はごく小さく、野火止用水が $15,000\text{m}^3/\text{日}$ ($0.17\text{m}^3/\text{s}$)、玉川上水が $13,200\text{m}^3/\text{日}$ ($0.15\text{m}^3/\text{s}$)、千川用水が $10,000\text{m}^3/\text{日}$ ($0.12\text{m}^3/\text{s}$) にすぎないため、本流への影響は軽微といえる。また、動植物保護の場合と違って平滑な流量でも目的にかなうし、需給が切迫したときには一時的にカットしても大きな被害が出ることはない。

二ヶ領用水は川崎市にある農業用水路で、1611 年に完成した。上河原と宿河原の 2ヶ所に取水堰をもち、江戸時代には稲毛・川崎領の農業の発展を支えた。明治以降は水道水や工業用水の水源としても着目されてきたが、小河内ダムの完成など水資源状況の変化、都市化による農地の減少などで、利水面の有用性を失った。その後市民運動の高まりなどもあり、川崎市では現在二ヶ領用水を市の個性を表現する象徴と位置づけて流水を保全している。農業用水としての利用もまだ一部残っているが、環境機能・水循環機能・防災機能などを主として期待しているようである。400 年の歴史が人工水路を生活から切り離せないものとし、自然河川同等の扱いを求めるまでになったといえよう。

正常流量の概念に基づく環境用水は、1988 年の建設省通達以降のものが目立っている。表 2-2 には雑誌「電力土木」に掲載されていた発電所等の例を、表 2-3 には利根川水系片品川の既設発電所をまとめた。片品川では比流量がガイドラインの値 ($0.1\text{--}0.3\text{m}^3/\text{s}$) にぴったり適合していることから、1988 年通達に基づいた放流とみることができる。

多摩川の羽村堰では、小河内ダム建設時に取水者たる東京市と下流に農業用水をもつ神奈川県の間で紛争が起こり、夏の間 (5/20-9/20) だけ $2.00\text{m}^3/\text{s}$ の水を放流することになった。これは利水面から要請された放流であって、夏季以外の時期には放流量がゼロになることから下流の河川環境にさまざまな影響を与えた。1992 年に至り年間を通して $2.0\text{m}^3/\text{s}$ の流量が流されるようになったものの、河川環境回復の面からは流量増強と適度な脈動が望まれるところである。なお、羽村堰地点の流域面積は 488km^2 (調布橋で 433.1km^2) なので $2.0\text{m}^3/\text{s}$ は 100km^2 あたりの比流量にして $0.41\text{m}^3/\text{s}$ にあたる。調布橋地点の渇水流量が $6.14\text{m}^3/\text{s}$ (1969 年～1998 年の平均値) であることから流量の小ささがわかる。

表2-2 水力発電所（新規建設・再開発・既存）における維持流量放流事例
（「電力土木」より抽出）

名称 着工年, 運転開始年 最大出力, 最大使用水量	新規 既存 再開発	確保された 正常流量 (m ³ /s)	100km ² あたり 比流量	理由	出典
神野瀬発電所（中国電力） -, 1945 20,000kw, 20.0m ³ /s	既存	0.47	0.3		1
久々野発電所（中部電力） -, 1962	既存	0.48	0.21	景観	2
竜島発電所（東京電力） -, 1969 32,000kw, 54.0m ³ /s	既存	1.336	0.3	景観 動植物	3
日高発電所（北海道電力） 1995, 1999 10,000kw, 21.0m ³ /s	新規 建設	2.62	0.51	維持流量	4
新湯山発電所（九州電力） 1996, 1999 17,500kw, 24.0m ³ /s	再開発	2.1	0.52		5
新高津尾発電所（関西電力） 1997, 1999 13,800, 32.0m ³ /s	再開発	2.3	0.50	アユなど	6
新五木川発電所（九州電力） 1993, 1995 15,300kw, 20.0m ³ /s	再開発	0.04~0.54 (4つの取水ダム)	0.32~ 0.37	ヤマメ アユ ハヤなど	7
奥沙流発電所（北海道電力） 1991, 1994 15,000kw, 6.1m ³ /s	新規 建設	0.22(4月~11月) 0.05(12月~3月)	0.42 0.10	オショロコマ	8
黒谷発電所（電源開発） 1991, 1994 19,600kw, 12.0m ³ /s	新規 建設	0.42(5月~10月) 0.25(11月~4月)	0.50 0.30	イワナ ヤマメ 溪流景観	9
新川原発電所（九州電力） 1990, 1993 21,000kw, 45.0m ³ /s	再開発	1.31	0.36	景観	10
実川発電所（東北電力） 1988, 1992 8,200kw, 6.00m ³ /s	新規 建設		0.34	イワナ他 景観	11

出典：1（中川ほか 2000），2（後藤ほか 1999），3（久保田ほか 1999），4，5（井上ほか 1997），6（高橋ほか 1997），7（山路 1993），8（野田ほか 1992），9（平山・北村 1991），10（稲元 1991），11（鈴木・武田 1990）

表 2 - 3 利根川水系片品川での正常流量放流（山口 1993 より）

発電所	流量 (m ³ /s)	比流量 (m ³ /s)	減水区間 (km)	対象 魚種	最大使 用水量 (m ³ /s)	常時使 用水量 (m ³ /s)	放流 方法
栓之滝	0.292	0.253	4.9	イワナ	4.7	2.9	排砂門
鎌田	0.554	0.258	11.3	イワナ	12.0	5.12	流木路 排砂門
幡谷	0.758	0.261	10.6	イワナ	11.13	8.66	魚道
千鳥	0.773	0.282	2.4	イワナ	9.04	9.04	魚道 排砂門
伏田	1.840	0.290	8.2	アユ	22.54	14.23	魚道 流木路
岩本 (うち赤谷川)	1.923 0.240	0.258 0.130	20.0 3.9	アユ	30.5	22.54	魚道 流木路 排砂門

2-2 正常流量と環境用水

(1) 正常流量概念

1964年に成立したいわゆる「新河川法」の第1条では法律の目的を次のように述べている：「この法律は、河川について、洪水、高潮等による災害の発生が防止され、河川が適正に利用され、及び流水の正常な機能が維持されるようにこれを総合的に管理することにより、国土の保全と開発に寄与し、もつて公共の安全を保持し、かつ、公共の福祉を増進することを目的とする。」環境に関しては、「流水の正常な機能が維持されるように」という表現で目的にとりこまれている。逆にいうと、この表現しかされていない。「流水の正常な機能」とは必ずしも自然環境のみではなく、むしろ人間の利用を念頭においたものであったろうが、これをもとに正常流量の概念が提起された。

正常流量は、河川法第1条にいう「流水の正常な機能が維持される」ための流量である。河川法施行令では第十条に「河川の適正な利用及び流水の正常な機能の維持に関する事項については、流水の占用、舟運、漁業、観光、流水の清潔の維持、塩害の防止、河口の閉塞の防止、河川管理施設の保護、地下水位の維持等を総合的に考慮すること。」と定められている。また河川砂防技術基準（案）（建設省河川局監修 1997a）では、「流水の正常な機能を維持するために必要な流量（以下、正常流量という）とは、舟運、漁業、景観、塩害の防止、河口閉塞の防止、河川管理施設の保護、地下水位の維持、動植物の保護、流水の清潔の保持等を総合的に考慮し、渇水時において維持すべきであるとして定められた流量（以下、維持流量という）およびそれが定められた地点より下流における流水の占用のために必要な流量（以下、水利流量という）の双方を満足する流量であって適正な河川管理のために定めるものをいう。」とある（計画編、第3章 低水計画の基本、第2節）。これに先立つ第1節「総説」では、種々の利水計画は正常流量を十分考慮して策定するものと述べている。すなわち、正常流量は利水計画の大前提となるものであり、需要水量の予測や開発水量の算定に先だって定められなくてはならない重要な要素である。

正常流量は維持流量と水利流量から成り、維持流量はさきの9項目を考慮して定められる。9項目の中にも軽重があり、河川砂防技術基準（案）同解説では、河口閉塞の防止と河川管理施設等の保護については他の方策を検討すべしと述べている。それぞれの維持流量や正常流量の定義をまとめた表2-4をみて河川法施行令と比較すると、動植物の保護が新しく項目に付け加わっていることがわかる。漁業もおおざっぱにいて動植物の保護に含まれると考えてよいだろう。また景観では、「視覚的に満足を与える程度の流量と水質が要求される」とある。

表 2-4 正常流量で留意すべき事項

	河川法施行令	河川砂防技術基準（案）	
		維持流量	正常流量
利水に関する事項	流水の占用		水利流量
環境に関する事項	観光 流水の清潔の保持	景観 動植物の保護 流水の清潔の保持	景観 動植物の保護 流水の清潔の保持
必要に応じて考慮 する事項	舟運 漁業 塩害の防止 河口の閉塞の防止 河川管理施設の保護 地下水位の維持	舟運 漁業 塩害の防止 河口の閉塞の防止 河川管理施設の保護 地下水位の維持	舟運 漁業 塩害の防止 河口の閉塞の防止 河川管理施設の保護 地下水位の維持

建設省河川局が1992年4月に出した「正常流量検討の手引き（案）」では、正常流量を①河川環境の把握、②河川区分と代表地点の設定、③項目別必要流量の検討、④代表地点における正常流量の検討、の4段階に分けて設定している。減水区間解消のためには、②の代表地点設定が重要なポイントになる。河川から多量の水を取る地点の直下流が流量条件の最も厳しい区間になるので、そのような地点を外さないことが肝要である。多摩川でいえば羽村堰の下流、利根川ならば利根大堰の下流は、大量の都市用水が取水された減水区間にあたる。上流部では水力発電所が高率な取水をし、流量減少のインパクトを与える。

③の項目別必要流量は6つに分けられている。「河川特性からの維持流量」に始まり、「生態系」「景観」「水質」の3つは重要ということで必要流量の求め方が詳述されている。舟運、塩害の防止、河口閉塞の防止、河川管理施設の保護、地下水位の維持は「その他政令5項目」としてまとめられている。最後が「水利流量の検討」である。

生態系（「漁業」と「動植物の保護」を一括している）からの必要流量の検討では魚類のみを対象とすることになっている。その理由として、魚類が河川生態系の中で占める位置（食物連鎖の上位にいる、人間との関わりが深い、水生昆虫等もカバーできる）、および水理量との関係がある程度明確であること、が挙げられている。つまり、魚が生息できるようならば他の生物も生息できるだろう、との判断が根底にある。将来は、河川生態系をより広く支えている、食物連鎖の下位にいる生物を対象としていったほうがよいだろう。魚類生息場の中でも瀬に着目し、成長段階と産卵期の必要水深・適正流速を文献等から求め、その条件を満足させる流量を採用することとなっている。この方法には、対象種の設定、水深・流速以外の条件（底質・カバー等）の考慮方法、淵の評価など課題も多い。最低条件を与えているにすぎないという点にも注意しておく必要がある。

景観は「人間が河川を眺める時に生じる心理現象であり、眺める場所がなければ成立しない」と定義されており、いわゆる狭義の景観である。観者が水量感を得られることを評

価基準としており、実験結果等から見かけの水面幅と河川幅の比を 0.2 以上にすべしと書いている。水質については、負荷量から汚濁解析をし、環境基準値（または現況値）を達成するような流量を求めることになっている。景観、水質いずれについても生態系と同様に最低値を与えるものであるが、値の設定には恣意性を排除できない。

最後に置かれている水利流量も重要な要素であるが、それら全てに先だって設けられている「河川特性からの維持流量」を推定する項では、推定式による維持流量として比流量 $0.69\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ という参考値が示され、流量データの蓄積がある場合には 10 ヶ年最小渇水流量以上で 10 ヶ年平均渇水流量を目安とするように書かれている。この際、現存の流量観測所は水力発電所の減水区間に立地するものも多いため、観測された流量に発電使用水量を加えて解析する必要がある。

「河川特性からの維持流量」は、環境用水を総合的に判断するのに重要な視点を提示している。川の各地点には、そこが背負う流域面積に応じた地形ができていて、そしてその地形にふさわしい流量が流れないと不自然な景観が現出する。多摩川の羽村堰直下の区間は 500km^2 の流域から集まってくる水量を流すだけの景観（入れ物）がありながら、堰取水によってわずか $2\text{m}^3/\text{s}$ しか流れない。 $0.4\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ の比流量では、渇水時はともかく平常時は明らかに流量不足である。この区間で高水敷樹林化などのいろいろなひずみが生じているのは、砂利採取等のインパクトもさることながら、格に見合った流量が流れていないことが根本の原因であろう。逆に利根川の東遷では、わずかの流域を背負うだけであった常陸川に利根川上流の広大な流域を背負わせることになった。当初は荷が勝っていたろうが、何百年という年月の中で、赤堀川の拡幅等の工事もあり徐々に大河川の中下流にふさわしい格を身につけてきたといえる（現在は利根大堰や江戸川にかなりの流量が分派されており、下流の負担は減っている）。流量減少を緩和するにはその地点の格にふさわしい流量がどれくらいなのかを知ることが重要であり、「河川特性からの維持流量」が言っているのもこのことであろう。

(2) 環境用水概念

正常流量概念は、減水区間問題の発生を防げなかった。その理由としては、正常流量が基準点についてしか定められていないこと、既存の水利権秩序とうまく整合しなかったことが考えられる。環境用水は河川区間のあらゆる地点で充足されねばならない流量であり、基準点で流量が確保されていても基準点間で流量が十分あるかどうかはわからない。人里離れた山の中には利水基準点などないが、そのような場所でも動植物のためにはある程度の流量が要求される。また、ひとたび設定された水利権を変更することは既得権益の侵害ととられ困難であったろう。1988年の建設省通達で示された、水利権更新時に条件を付帯させる、という方法は現実的にすぐれた対処法であった。

正常流量概念の背後には、利水中心の見方（論理）が根強く横たわっている。基準点での流量確保というやり方は、利水計画の方法をそのまま踏襲したものである。利水者にとっては取水点で流量が確保されてさえいれば問題がない。流量は点でチェックすればよしとする長年の慣行を受け継いできたことが、「利水上は問題ないが環境には悪影響となる」減水区間を生んだといえるだろう。水利権については、水をめぐる人と人の激しい争いの末に成立した水利秩序の論理を、環境などという得体の知れないもの（人間の利害と短絡しないもの）にそのまま適用するには無理があった。河川環境には利害を代弁（主張）する人間がいなく、環境保全の論拠も薄弱だったからである。正常流量は従来の利水の論理に環境をはめこもうとする試みであったが、結果として不十分であった。

正常流量は必要最小値を定める方式になっている。いわば「しきい値」であり、一定の流量を（季節や期間により変化させることもあるが）確保するべしという概念である。この方法は、流量がしきい値を下回ると大きな損害をもたらすが、逆にしきい値以上に増やしても効果があまり増えない場合に適している。図2-1のAのような場合である。しかし、環境用水の効果はAよりもむしろBのような形で増えていくと考えたほうが自然である。しきい値が存在するのは流量のごく小さいところにすぎず（生存ギリギリのライン）、環境復元で論じられているのはもっと大きな流量である。環境用水の立場から言えば、理想は全流量を環境用水に回して人間の取水量をゼロにすることである。また最悪なのは全流量が人間に取水されて川に水が全く残らない状態である。その中間は、Bのように曲線で緩やかに結ばれるであろう。問題は、他利水との関係においてどの流量が最適になるかである。

環境用水と他用水はトレードオフ関係にあるから、図2-1に競合関係にある他利水者の効果を描き入ると右下がりの曲線になる（環境用水の流量が多いほど、他利水者が得る効果は小さくなる）。すると環境用水の最適流量は、二つの曲線が交わった点から求められる。

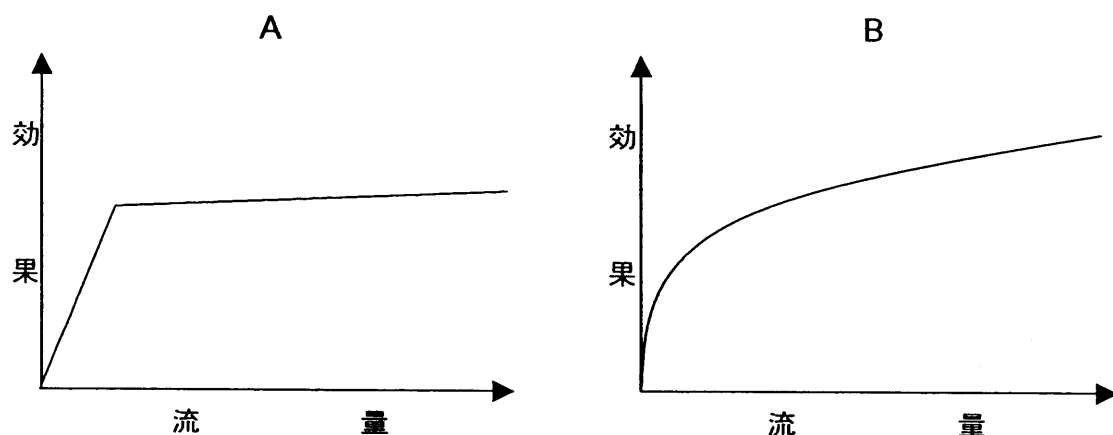


図 2-1 環境用水の流量と効果の関係（模式図）

ここで強調したいのは、環境用水の量が他利水の効果との比較を元に決定されることである。正常流量では、他利水との関係を考慮せず、環境面だけの根拠から流量が決められていた。最小限のしきい値を定めるにはそれでも良かったが、しきい値以上の流量による効果は無視されてしまう。つまり、環境用水がしきい値より増やされることはない。

環境用水の概念として重要なのは、環境用水の価値（＝効果）が図 2-1 B のような滑らかな関数になること、そしてその価値が他利水のもつ価値と比較可能である（むしろ比較すべきである）ということである。従来の正常流量概念は、環境用水の一部、すなわち必要最低限のラインを与えるものとして位置付けられる。図 2-2 のように、河川水のうちまず必要最低限の正常流量を確保し、それを除いた部分を効果に応じて配分する、というのが環境用水を含めた流量配分の基本的な考え方である。環境用水が農業用水や生活用水と同レベルで争っているのがポイントである。

なぜ環境用水は価値をもつのか、どうやってそれを測るのか、については第 4 章で議論する。

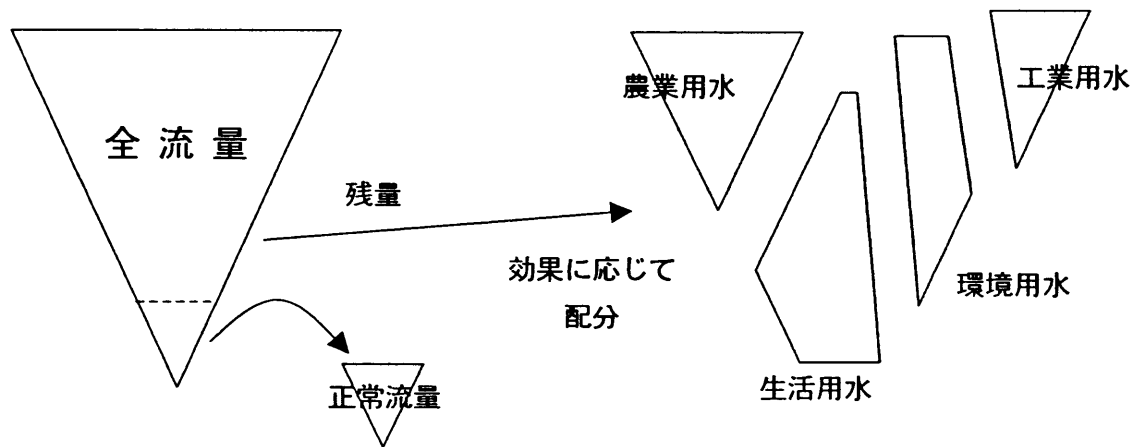


図2-2 流量配分計画における正常流量と環境用水

2-3 河川計画・事業評価と環境用水

1997 年、河川法の目的は次のように改正された。「・・・洪水、高潮等による災害の発生が防止され、河川が適正に利用され、流水の正常な機能が維持され、及び河川環境の整備と保全がされるようにこれを総合的に管理することにより、・・・」 これをもって、河川法の目的は治水、利水、環境の三本柱になった、とされる。逆にいうと、環境はこれまで治水や利水に比べて軽視されてきた。環境用水についても、「流水の正常な機能が維持され」という部分に基づいた正常流量概念を包含しつつ、「河川環境の整備と保全がされ」という部分に基づいた位置付けが必要である。

河川砂防技術基準（案）では、計画編の第 3 章に低水計画が、第 5 章に環境保全計画が解説されている。低水計画は正常流量や水利流量（需要予測）を定めることをいい、環境保全計画は河川空間と水質を保全することをいう。環境用水は環境保全の一環をなすものであるが、具体的には他利水との関係が問題となるため低水計画にも関連が深い。第 5 章で述べられている環境保全事業は、地形や土地利用を改変するタイプのいわゆる「ハード」な事業であって、流量をどう流すかといったような「ソフト」な事業は触れられていない。わずかに「4.4 流況改善による水質保全」の項で、貯水池からの補給や維持用水の循環といった対策が挙げられている。

第 3 章の低水計画では、「流水の正常な機能を維持するために必要な流量」（「正常流量」）をまず設定し、生活用水・工業用水・農業用水のそれぞれの需要予測から確保すべき流量を求めて自然流量と比較する手順になっている。そして、流量に余裕がない場合はダム等の水資源開発が計画される。水資源開発では当然ながら経済性も検討されるため、経済性や物理的限界から利水需要を全量満たせないことも起こり得る。形としては第一段階で正常流量が優先して確保され、第二段階でその残りを生活用水等に振り分けるようになっている。一見すると正常流量が他用水に比べ高い地位を保っているようだが、実際にこの制度のもとで減水区間が発生したことを考えると疑問が残る。形式上「比較できないほど重要」とされているものの、実際には「比較できないから軽視」されてしまったのではないか。現代社会における人間の行動は経済利害に強力に左右され、環境の利害がそこに付けいるスキはきわめて小さい。環境がもつ共同財的な性質から、環境の利害と人間の行動を一致させるには制度面の誘導が不可欠である。現行の制度は結果的にみて不十分であった。

河川砂防技術基準（案）に即して改善案を考えると、第 3 章の第 3 節「需要水量の算定」に環境用水の需要量予測を加え、生活用水・工業用水・農業用水と同列に扱うと明示することが必要になろう。そして、正常流量は従来どおり第 2 節「流水の正常な機能を維持するために必要な流量」の中で最低値を算定する。最低値以上の流量は、第二段階で費用対効果を考えながら定量化する。環境用水と正常流量の役割分担は図 2-2 に示されたとおりである。第 5 章では第 1 節「総説」に「流水の量質に関する維持改善」がうたわれている。

るのをそのまま生かし、第4節「水質保全（改善）計画」に並べて「水量保全（改善）計画」の節を立てて流量の連続性や変動に関する考え方を設定する。

正常流量から拡張する部分（流量に応じて効果が大きくなり、他利水流量と競合する部分）はどのような方式で評価すればよいか。環境用水に限らず、自然環境保全を河川計画の中で評価する制度はまだない。1985 年前後から取り組まれ始め 1990 年の通達により本格化した多自然型川づくりでも、効果を評価するのは難しく費用便益分析のような手法は使い難い現状である。公共事業はもともと費用と効果の関係が明確でないものが多いが（明確ならば民間でやれる）、治水事業や利水事業は費用対効果を客観的に評価する努力をしてきた。つまり、事業をやるべきか否か、やるならどの規模でやるべきか、どの代替案を採用すべきか、のものさが可能なかぎり明確化されているということである。堤防などの治水施設については、「治水経済調査要綱」があるし、治水事業と利水事業が一緒に参加する多目的ダムの計画には、コストアロケーション制度がある。環境整備事業をもそれらの制度に加えるべきである。環境面を加えないならば、それらの制度の有効性（社会に対する説得力）が失われてしまう。

「治水経済調査要綱」は 1970 年にとりまとめられ、1985 年に改定案が出されている。水害被害軽減額と事業費用の比較によって治水事業の経済性を評価することを目的としている。費用側と効果側をともに貨幣尺度で表現することにより一次元的な比較が可能である。事業費を I 、利率を i 、施設の耐用年数を n 、施設の年維持管理費を M 、想定年平均被害軽減期待額を B とすると、年費用 c と年便益 b は

$$c = I \cdot i / \{ (1+i)^n - 1 \}$$

$$b = B - M$$

として表される。河川砂防技術基準（案）調査編第20章「河川経済調査」にも同じ式が載っている。最後は b/c の値によって事業の妥当性を判断し、 $b/c=1$ となる場合の流量規模を適切な投資規模とする。

1999 年にはこの修正版が建設省河川局から「治水経済調査マニュアル（案）」として出された。比較対象を年費用と年便益から総費用と総便益に変えたほか、残存価値を考慮するようにし、維持管理費を便益側から費用側へ移すなどの変更がなされた。評価対象期間を 50 年、割引率として 4% を用いているが、これらの値は社会状況に応じて変わりうる。便益では洪水被害防止効果を直接被害と間接被害に分け、直接被害では抑止される資産被害額を算定、間接被害では営業停止損失と応急対策費用を算定している。その他の便益として、交通途絶やライフライン切断の波及被害、人命被害、リスクプレミアムや高度化便益等が言及されているが、便益算定には含まれていない。費用側では目的に応じて現況河道からの評価と自然河道からの評価を使い分けるよう指示されている。自然環境を考える

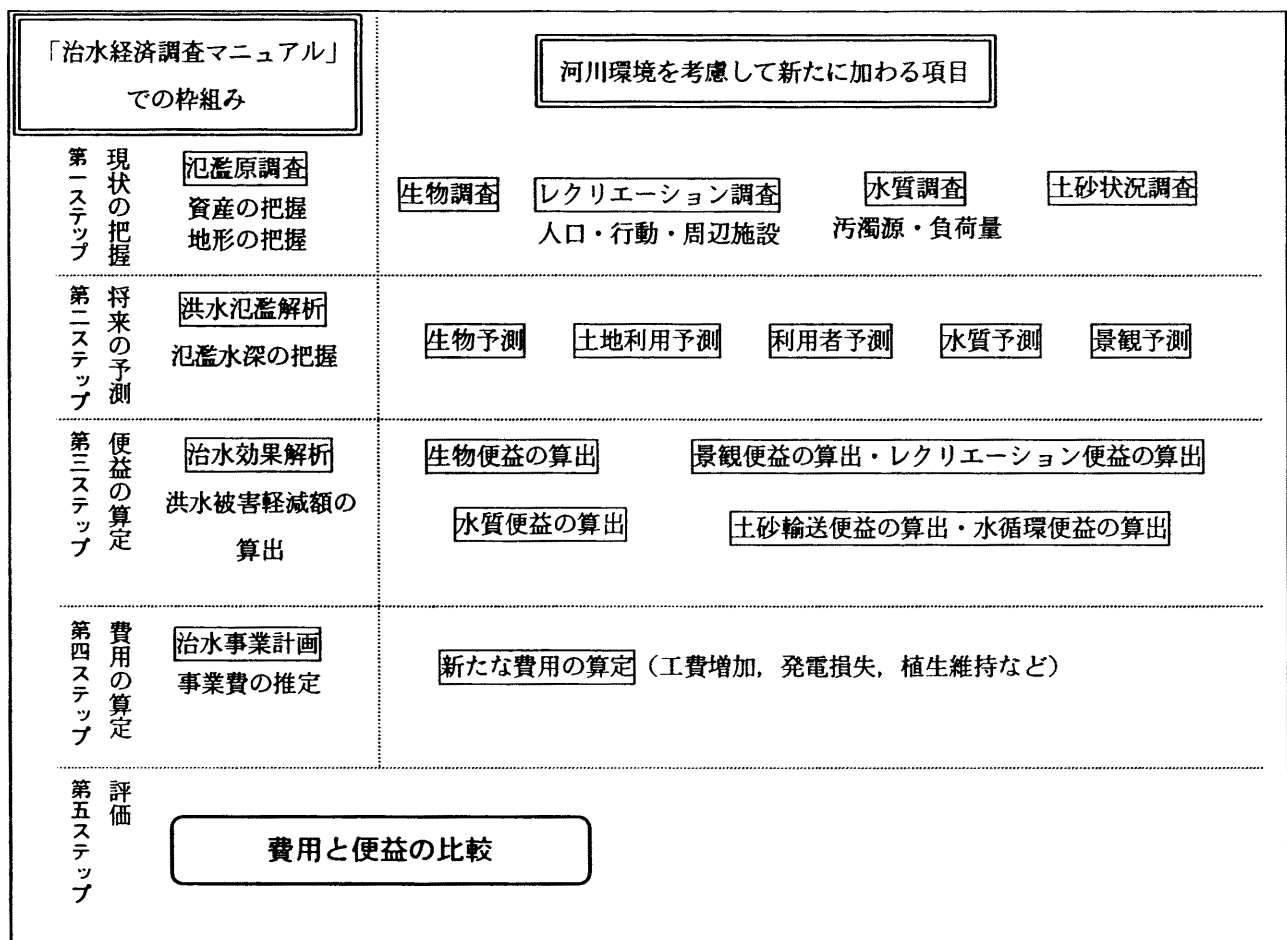


図 2-3 治水経済調査の改善案

ときにこの使い分けは重要である。最後はやはり B/C で評価することになっている。B/C=1 となる点を結論とするならこれでよいが、自然環境を含んで代替案の比較や複数プロジェクトの取捨選択に使うのであれば B-C による評価をしたほうがよからう。

この枠組に河川環境項目を入れようとする、図 2-3 に示すような変更が必要になる。便益の側で各環境項目の便益をそれぞれ算定し、二重計算に注意しながら重ね合わせる。環境用水に話を絞れば、第 1 ステップで現状の生物相や景観等を調査し、第 2 ステップで流量を変化させたときの影響を予測し、第 3 ステップでその影響を貨幣換算する。第 4 ステップでは流量変化にかかる費用（発電減などの逸失利益を含む）を計算して第 5 ステップで比較する。鍵になるのは第 2 ステップと第 3 ステップで、果たして予測ができるのか、そしてすべてを貨幣換算することが可能なのか、という点である。治水経済調査マニュアル（案）でも積み残した便益がいくつもあり、環境に対象を広げたところで実際には積み残しが増えるだけであろう。よって現状でこの枠組を使うことは難しい。ただし、環境を悪くするような事業の場合、なんらかの方法で悪化を防ぎ（あるいは代替し）、その費用増

分と事業の便益を比べることは可能である。すると環境側の第3ステップは不要になるので実現性が高まる。

続いてコストアロケーション制度についても検討する。1952年制定の「電源開発促進法」とその翌年に定められた附属の政令、総理府令、各省庁申合せ事項により「身替り妥当支出法」が多目的ダムのコストアロケーションの基準として定められた(佐々木 1992, p1)。1967年にはこの方法の修正案である「分離費用身替り妥当支出法」が法制化された。図2-4にその概要を示す。分離費用を各自で負担したのち、残余便益の比で費用を割り振る。残余便益の算定に必要な妥当投資額は図2-5のようにして計算される。治水便益については治水経済調査要綱の方法を使い、利水便益についてはそれぞれの事情に応じた計算法を用いることとなっている。

上水と工水の効用が身替り建設費で表せるとしているのは、最初のコストアロケーション制度ではケースバイケースで処理されていた(「計算方法は、経済企画庁長官が国の関係行政機関の長と協議して定める」となっていた)点を改めるため、原価を基準として計算するようにしたからである(佐々木 1992)。上水や工水の効用はダム建設費とは比べものにならないほど高い、とする価値観が暗黙のうちに仮定されている。そうであれば、身替り建設費から原価が決まるのであるから妥当投資額は身替り建設費に等しくなる。高度成長期の日本ではこの仮定が正しかったことは疑いようがないが、現代の日本ではどうか。渇水時以外には水がかなり行き渡っているし、ダム(身替り施設は事実上ダムのみ)の建設はかなり難しくなっている。水道料金の需要弾力性などのデータを使った効用の算出方式が現れてもよい頃である。

環境用水はコストアロケーション制度と相性がよく、容易に計算の中に組みこむことができる。多目的ダムの場合は減水区間の原因者を特定しやすく、その逸失利益が計算できるからである。環境用水はどんなダムであっても確保されなくてはならない流量であり、最低限の量を優先的に配分されたのち、残量を他の利水者と争う。量と効果の関係が明確に規定されていれば問題なく計算できる。環境用水の参加によってコストアロケーションがどう変化するか、5-2で実例をもって検討する。

環境用水は渇水時にこそ必要な流量であるから、渇水調整との関わりも重要な課題である。環境用水を他利水と同等の立場とみなすのだから、渇水調整協議会に環境用水の代弁者を参加させるべきである。他利水者にとってみれば厄介なライバルが一人増えることになるが、実際問題としては人間が取水に困るような渇水時には環境用水の便益よりも他利水の便益が上回ることは間違いない。

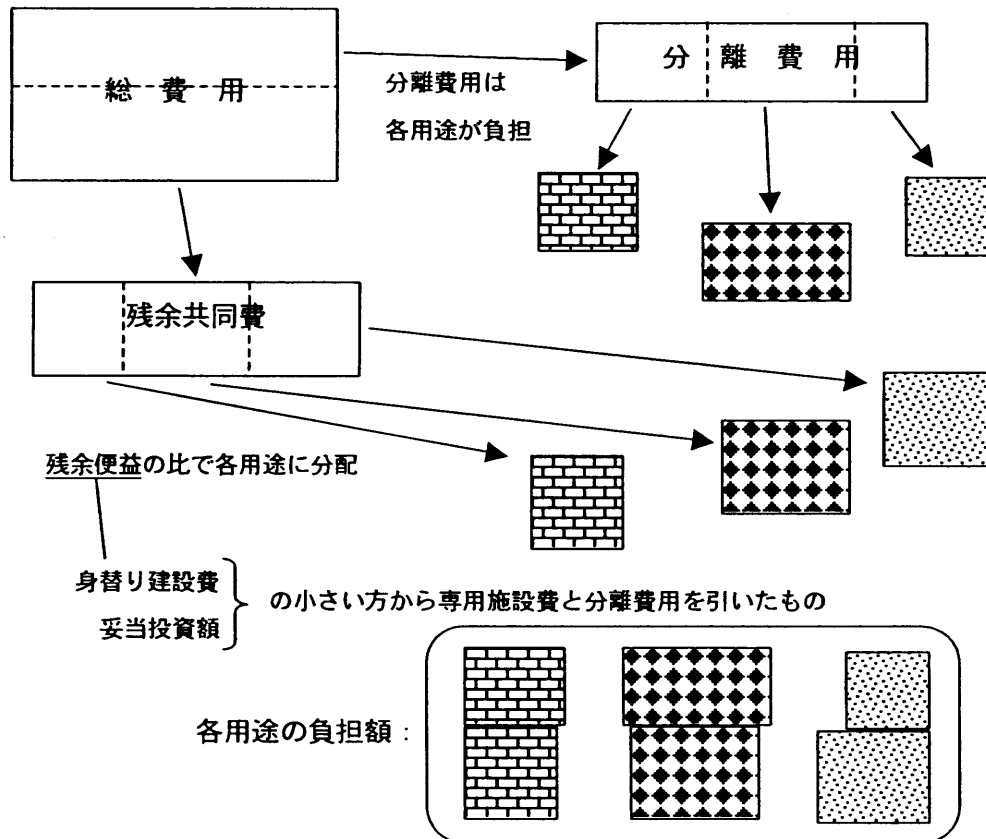


図2-4 分離費用身替り妥当支出法の説明

$$\text{妥当投資額} = \frac{\text{年効用} - \text{年経費}}{\text{資本還元率} \times (1 + \text{建設利息率})}$$

用途	利子率	耐用年数	資本還元率	建設利息
洪水調節	0.045	80	0.0464	—
かんがい	0.055	45	0.0604	0.0065 T
発電	0.08	45	0.0932	0.032 T
上水・工水	—	—	—	—

年効用の算出方法

洪水調節	洪水被害軽減額（「治水経済調査」）
かんがい	農業収益増加＋農業構造改善
発電	kW 単価×有効出力＋kWh 単価×有効電力量
上水・工水	身替り建設費

図2-5 妥当投資額の算出法

2-4 まとめ

環境用水の事例には、観光放流、使われなくなった水路への通水、発電減水区間を軽減するための無効放流などがある。

正常流量概念は、利水の論理を背景に環境を扱おうとしたものであったため、減水区間の深刻化を防げなかった。法的権利も経済価値も認められないまま利水者間の激しい争いの渦中に投げられては、環境用水が自らの立場を主張することは困難である。正常流量の一つの限界は、それが必要最小限の値を与えることにしかないところにある。環境用水量は、他利水との効果の比較によって定められるべきである。

河川砂防技術基準（案）には環境の項目が取り込まれているが、流量に関しては正常流量概念では不十分である。農業用水や生活用水と同レベルで環境用水の項目を加えるべきである。治水経済調査と同じ段階を踏んで環境面の分析もすべきである。

環境用水は環境独自の論理（価値基準）を貫徹する必要があるが、量の決定にあたって他利水との競合関係が生じるときには経済効果等との比較にも応じなくてはならない。「環境は経済に無条件で優先する」として比較を拒否するのは、かえって経済論理に押し切られる結果を招く。正常流量は他利水から超越した概念であるが、環境用水概念はそうではなく経済効果等とも比較可能な相対的な概念である。

3. 環境用水の量

3-1 河川流量の規定要因

河川の流況（ある地点でのある時点での流量）は、主に四つの要件によって決まる。気象条件、地理条件、人為条件、そして観測条件である。

第一の気象条件は、プラス要因としての降雨とマイナス要因としての蒸発散が主をなす。降雨量は長期間でみた総流量の上限を規定する。逆に短時間でみても洪水ピーク流量は降雨量で決められる。蒸発散は降雨量の一部を失わせ、流量を減少させる。年間を通してみると、蒸発散量は降雨量のおよそ $2/3$ にあたる。いかに降雨が多くても蒸発散も大きければ流量は大きくならない。「降雨量－蒸発散量」、これが流量規定要因として最も重要な基本条件である。図3-1に全国河川の年平均比流量（流域面積 100km^2 あたりの流量）の分布を示した。流量年表に記載されている371地点の観測開始以来1998年までの年平均流量の平均値であり、地点によりばらつきはあるが約40年間のデータである。東北地方日本海側・北陸・伊豆半島・南四国・南九州で大きく、北海道・東北東部・関東・瀬戸内で小さくなっているが、この分布は年平均降水量の分布とよく一致している。なお、信濃川、利根川、北上川などでは下流部に分水路があり、その影響が値に現れている。信濃川では流域面積を小さく見積もっているため比流量が過大に出ているし、利根川では江戸川に分水されたあとの比流量が小さくなっている。

第二に考えなくてはならないのが流域の地理条件である。地質、勾配、土地利用などにより降雨に対する応答が異なる。地質は地下水の保持力に関係する。古生層などは水持ちが悪く降雨がすぐ流出してしまうので、洪水後の減衰が早く渇水時の流量が小さい。これに対し第四紀火山岩類は岩石に亀裂が多いため豊富な地下水をもってなかなか流量が小さくならない。同一の降雨条件下におかれた近接流域でも地下水保持力の違いによって異なった流量変動が観察される。土地利用も同様に直接流出と地下浸透に影響を及ぼすほか、集積が進んだ都市域では気象に影響を与えることもある。

気象条件と地理条件で基本的に河川の流量は決まるはずである。しかし、ここに重大な変化をもたらすのが第三の条件、人為的な流量調整である。人為的要因としては取水、ダム操作、分水路や放水路などが挙げられ、その影響として流量減少や流況平滑化といった現象が発生する。竹内はこれを「自然流量」と「人為操作流量」と呼んでいる（竹内1996）。

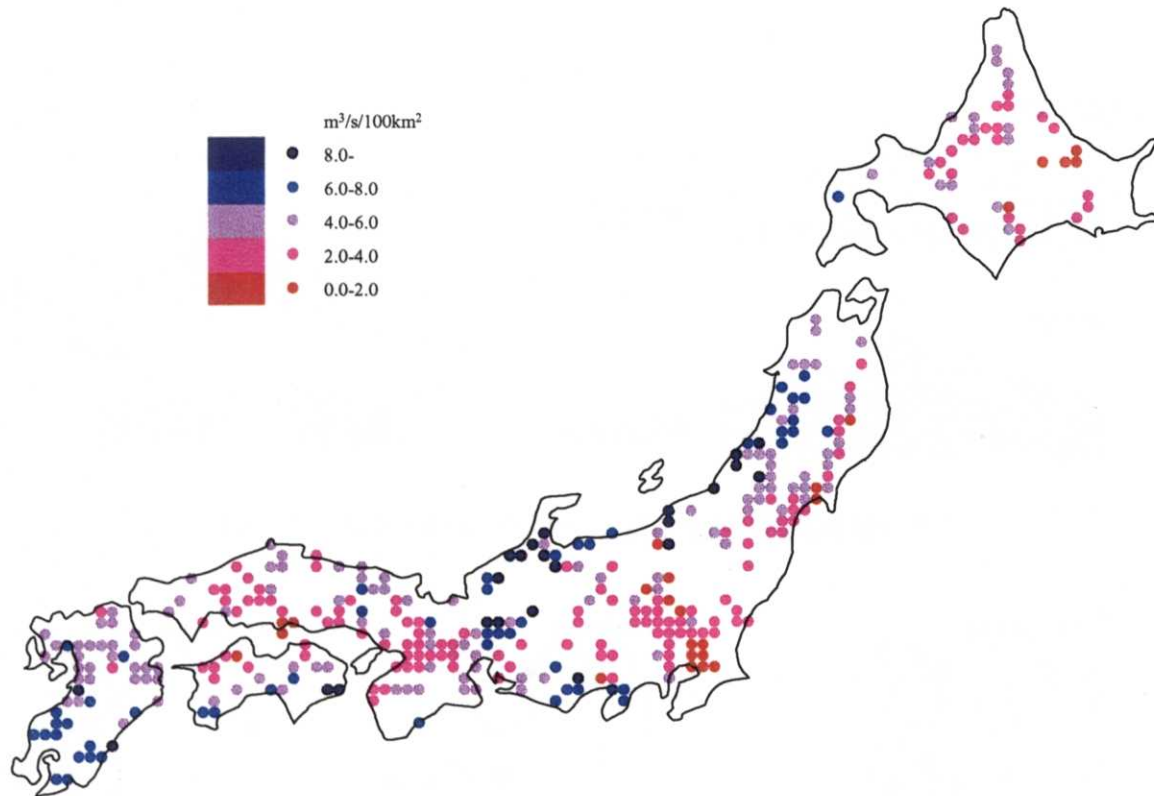


図 3-1 全国河川の年平均比流量

取水には、一定量を取水して残量を下流に流す場合、一定量を下流に流して残量を取水する場合、その中間、と三つのパターンがある（図 3-2）。一定量取水の場合、流量変動は下流に伝わるが流量自体は減少する。一定量流下の場合、流量も減少するし変動も平滑化される。水力発電所でいえば、最大使用水量を取れる日が多く設備利用率の高い発電所は一定流量取水型、設備利用率の低い発電所は一定流量放流型になっているだろう。また、取水と放流の関係でみると、流れ込み式水力発電のように取水量が全量そのまま放流される場合、水道用水のように分散してから集められて放流される場合、農業用水のように分散した先で放流される場合、といくつかのパターンが存在する（図 3-3）。流れ込み式水力発電のケースは最も単純で、取水点と放流点の間では減水し変動も平滑化される（最大使用水量に達していれば平滑化されない）が、放流点より下流には影響を及ぼさない。水道用水の場合は、上水の取水点と下水の放流点の間では減水が起きるし、放流点以下でも変動は下水放流量を通して人間活動の影響を受ける。また、上水道のシステムと下水道のシステムは一対一に対応していないため、流域間の水の移動が頻繁に発生する。その結果、流量減少が発生する河川もあれば増大する河川もある。農業用水のケースでは、利用先（水田など）で蒸発散や地下浸透などにより失われる水量が大きく、河川へのみかけの放流量は小さい。渡辺（1998）によれば 1,800mm の取水に対して蒸発散と浸透で 2,040mm が失われ、900mm の降雨をみこんでも地表流出量は 660mm にとどまる。すなわち取水量の 1/3

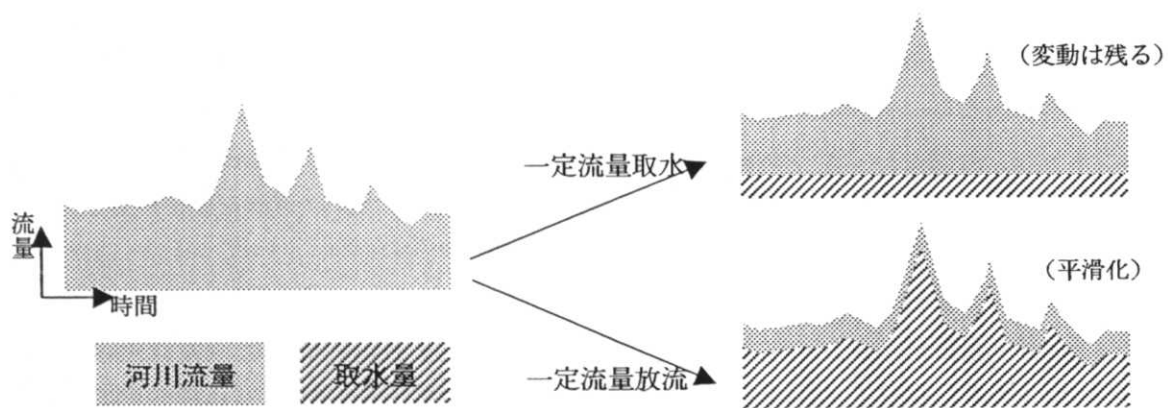


図3-2 取水の時系列パターンによる河川流量変動の差

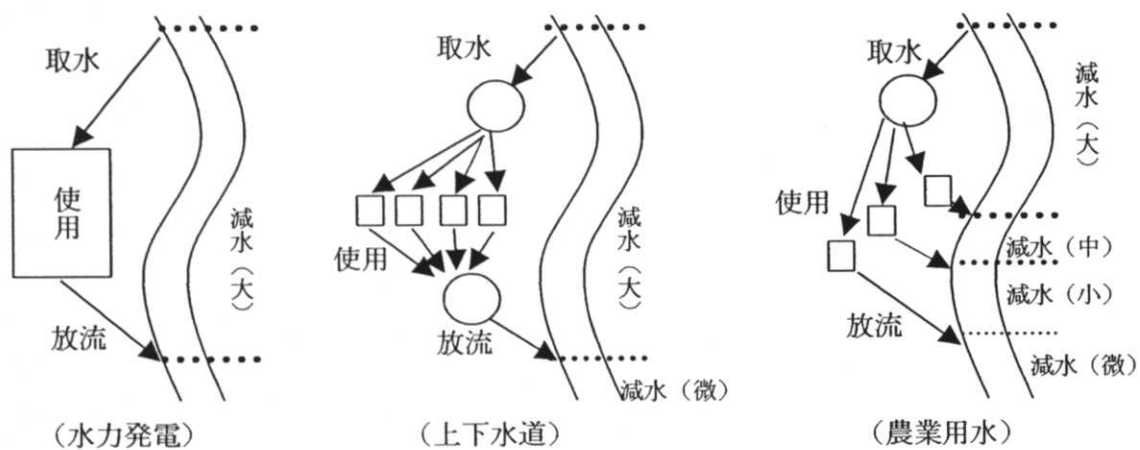


図3-3 取水—放流パターンと減水区間

しか河川に放流されない。地下浸透した分は地下水となっていずれ河川に還元するが、どの地点そしてどの時点で還元するか把握するのは難しい。

大規模な貯水池を建設すると、一日の中でもしくは一年の中で流況をコントロールできるようになる。上流域に建設された多目的ダムでは下流の水利用に合わせて放流量を決定する。すると、ダム地点より下流では降雨などの自然条件で流量が決まらなくなる。長期的にみて減水は起こらないが、短期的にみると減水と増水の両方が起こる。ダム流入量＞ダム放流量ならば減水だし、ダム流入量＜ダム放流量ならば増水である。一般にいてダムは低水時の流量を増強する目的をもつため、変動は平滑化される。この点については3-3で詳しく調べる。

気象条件と地理条件（この二つをまとめて「自然条件」といえる）で決まるべき流量に、人為的な要因が加わって河川の流量が決まる。しかし、この流量を解析する場合に銘記しておかねばならないのが観測条件という要因である。すなわち、データとして我々が扱える流量値と、真の流量との相違である。

考えるべきは、現場で計測する際の誤差と、そこで得られた生データを加工して流量を得る際の誤差である。本論文では流量データとして建設省の「流量年表」および「多目的ダム管理年報」のデータを主に用いているが、その多くは毎正時に水位を測定し、水位流量曲線から流量に換算して得られた一日24個のデータを平均することによって日平均流量を算出している（河川砂防技術基準（案）調査編 p35 および p56）。つまり、水位測定時の誤差、水位流量曲線の誤差、毎正時の値から日平均を算出することによる誤差、の三つが誤差発生要因となる。最後の要因は1時間内の変動が無視されることからきており、洪水時流量にはかなり影響を与えられるが渇水時は変動が小さいためほとんど影響がないであろう。江川は利根川水系神流川での長期間にわたる水文観測の経験から、流量測定値に含まれる誤差を4種類に分類している（江川 1979）。4つとは、測器の誤差、測定方法による誤差、計算式による誤差、流量の時間的変化による誤差、である。神流川での計測では水位流量曲線の誤差は約10%としている。

気象条件がインプットとして流域に与えられ、地理条件がそれに応答して自然の流量が決まる。こうして決まった流量を仮に「潜在的自然流量」と呼ぼう。人為的なコントロールが何も無ければそれがそのまま顕在化して河川流量となる。気象条件と地理条件から「潜在的自然流量」を求めるのは水文学の流出モデルの仕事である。現実には人手の加わっていない川はほとんどなく、人為的条件が重要な影響を与えている。そこに観測誤差が作用した値が我々の手元に届けられる流量データになる。

本論文の主題である環境用水について考えてみる。人手の入らない自然状態では潜在的自然流量が河川流量となりそれに適合した生態系が存在しているはずである。現実には人為的条件により流量が変化させられ、生息場の条件がゆがんでいる。このゆがみを軽減するために流量を増やそうというのが環境用水である。潜在的自然流量を100点満点、流量ゼロを0点とし、人為的操作による減点が小さければ小さいほど環境用水としての価値は高い。もちろん単に量を増やすだけでなく、変動特性も吟味しなくてはならない。よって、環境用水を論ずるためには人為条件による流量変化の特徴をつかむことが必要になる。これは、潜在的自然流量と実際の流量との差をみることに相当する。具体的には、取水による減水とダムでの流量調整の結果をみればよい。なお、土地利用変化にともなう流出機構の変化も流況に大きな影響を与えるが、それは別問題としてここでは扱わない。

河川生態系からみると、減水はハビタットの縮小と条件の変化（水深が浅くなるなど）をもたらす。平滑化は攪乱頻度の減少をもたらす。前者はバイオマスの減少につながるおそれがあり、後者はそこに息づく生物相の変化につながるおそれがある。3-3で水文統計学的に、3-5で水理学的に考察を試みる。

流量は河川生態系の物理基盤を規定する最も重要な因子の一つである。超長期的（数千年～数万年）にみれば気候変動や地形変動、長期的（数百年）には火山の噴火や大規模地すべりや流路の変遷が物理因子として重大な影響をもつが、数百年以下のオーダーでは流量変動が流域景観のほとんどを決定する。流量は数時間単位から数百年単位まで、あらゆ

るレベルで変動しつづけており、この変動の激しさが森林や海洋と比べて河川生態環境を特徴づけている。流量の激しい変動は生態系の攪乱要因になる。攪乱がなければ一方向にゆるやかに進んでいくはずの変化が、攪乱によって元に戻されたり急速に前に進まされたりする。玉井は「攪乱とは、生物の生息域の条件を不連続的に変えてしまう外的な出来事およびその変化した結果」を指すといい、「河川環境を規定している自然因子には大きな変動が含まれており、それに伴って生息域の破壊と更新が惹き起こされている状況を、「自然の攪乱」と呼ぶ」と言っている（玉井ほか編 2000, p10）。生物には、競争に強い種、ストレスに強い種、攪乱に強い種がいる。攪乱がなければ競争に強い種や日常的にさらされるストレスに強い種だけが生き残るが、攪乱によってそれらの種は一時的に弱められ、攪乱に強い種が力を発揮する。攪乱があるため安定した状態が長く続くことがなく常に破壊と更新が行われており、静的な平衡状態にはいつまでも達しないで種の多様性も保たれる。この不安定さが河川生態環境の特徴であり、その特徴を生み出しているのが流量変動である。

攪乱とみなせる流量変動には、洪水と渇水がある。洪水は高水敷と低水路の両方に影響を与える。高水敷では樹木や草本類を根こそぎ洗い流したり動物のすみかを破壊したりするほか、池やたまりの水を更新し土壌の湿潤条件を変化させる。低水路では水中の生き物を下流に押し流したり、河床や河岸の材料を運び去ったりためたりして地形を変化させる。これらをまとめて「生息場の条件を更新するはたらき」とみることができる。高水敷の更新は冠水頻度とそのときの流体力に依存し、低水路の更新は河床付近の流速が最も効くであろう。いずれも流量の大小によって影響の大小が決定される。

渇水は、洪水に比べゆっくりと長い時間続く攪乱である。攪乱の本質を「不連続性」の中に見出すならば、渇水は攪乱と呼ぶにふさわしくないかもしれない。しかし、「平均的な状態からの逸脱」とみるならば、あるいは「生息域の破壊と更新」を本質とするならば、渇水はやや長期的な攪乱といってよからう。流量が小さくなると、水域が狭まり場所によっては断流を起こす。また地下水位の低下など周辺にも影響がある。渇水は多くの生物にダメージを与えるが、だからといって渇水をなくすことが良いこととはいえない。自然の渇水は河川生態場の変動のリズムを構成する攪乱の一つである。人為的な影響によって渇水は強化されたり軽減されたりする。渇水の強化はできるだけ避けたい現象だが、自然状態以上に渇水を軽減することも望ましくない。

洪水や渇水と通常状態の境界は明確ではない。流況曲線を描いてみても、洪水や渇水の不連続点は見出せない。よって、複数の指標を組み合わせないと流量変動の特性は表現できない。よく使われる指標には、洪水頻度や渇水頻度、豊平低渇、変動係数、河況係数などがある。自然生態系への攪乱という意味では洪水と渇水が重要であるから、環境用水を考えるには洪水と渇水がうまく表現できる指標を選ぶ必要がある。

洪水への人為的影響は主に二つ考えられる。一つは治水事業（主としてダム）による洪水頻度減少やピークカット効果であり、もう一つは流域開発によるピークの先鋭化である。

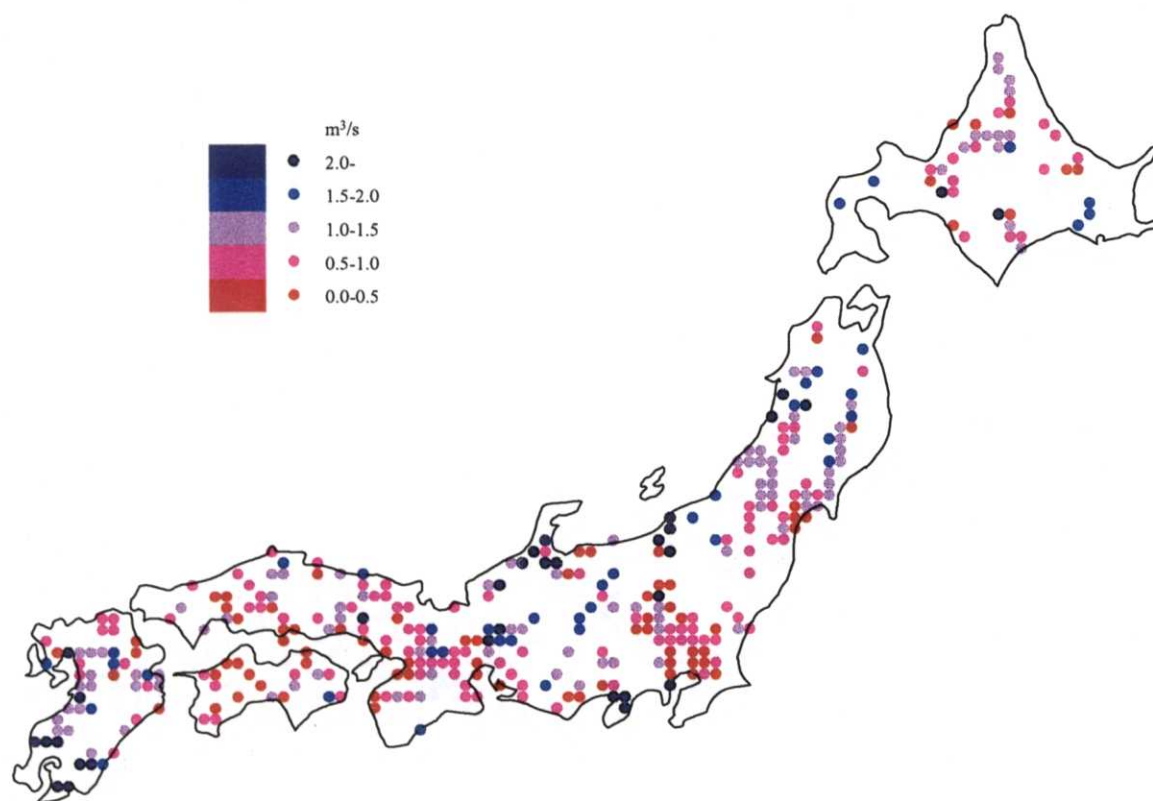


図3-4 全国河川の平均洪水比流量

さらに、河道整備（ショートカットや堤防強化）により、小さな流量で水位が高くなる現象も知られている。治水事業によるピークカットは事業計画の際に議論されているところであり、ピークの先鋭化については流出解析の分野で議論されている。また洪水頻度減少については河床生態の保全という立場から実証的に論じた研究（Tamai & Emura 1996 等）もある。一方で、環境用水に縁の深い渇水現象が人為的にどう影響を受けたかを解析した研究は少ない。そこで次節以下では、人間活動による流況変化を、とくに渇水について掘り下げて考えてみたい。

図3-1にならい、渇水量（年間355番目流量）の値を流域面積あたりに直して1998年までの平均値をとったものが図3-4である。図3-1と比較すると、意外に相関のないことがわかる。相関係数は0.79である。平均値でなく平水量（年間185番目流量）と渇水量の比を図3-5に表した。平水量と渇水量の相関係数は0.90、比の平均は0.38だが、地方によって差があることがわかる。利根川、淀川、北上川などは渇水量が小さいが平水量との比は大きい。四国や日本海側の多くの河川は比が小さい。

平均値は洪水量により大きく変動し、渇水にはほとんど左右されない。平水量は洪水量の影響をあまり受けない頑健な代表値である。平均値は洪水現象も含めた年間通じての流量の多寡を示す指標であり、平水量は洪水期以外の流量規模を示す指標といえる。図3-6で東北日本では西南日本より平水量が（平均値との比で）大きいのは、洪水現象の占める役割がやや小さいということを意味している。

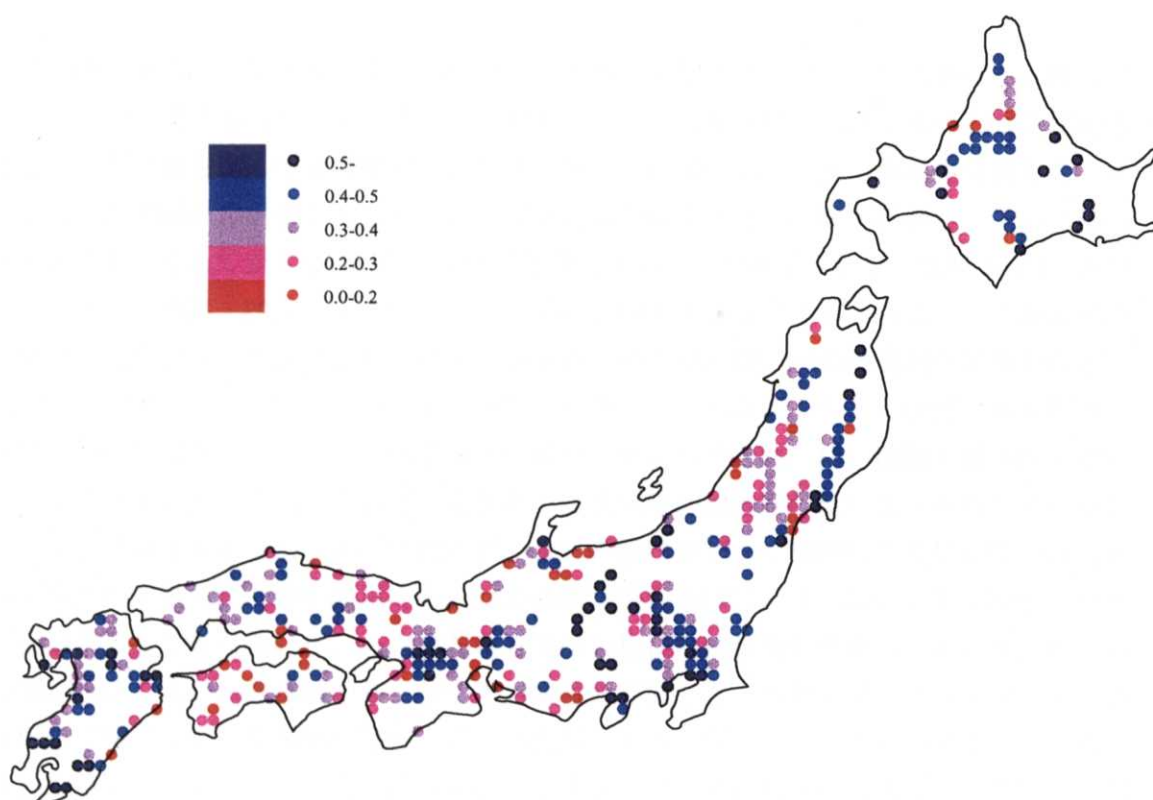


図 3 - 5 全国河川の渇水量／平水量の値

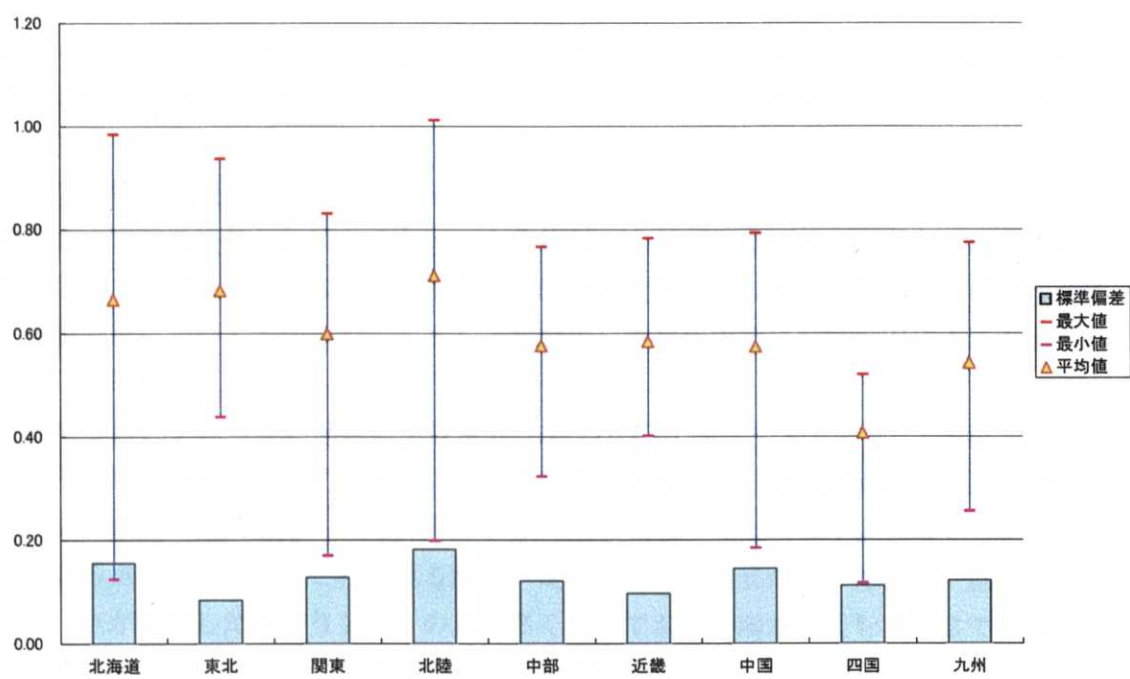


図 3 - 6 地方別の平水量／平均流量の値

洪水量に大きく影響を受ける平均値は、集水域の気象条件、とくに降雨条件を反映している。一方、渇水量は地理条件を多く反映している。虫明らは、水力発電所の常時使用水量を渇水量の投影として流域地質との関連を調べ、両者の間に一定の関係を見出した。すなわち、第四紀火山岩類から成る流域で渇水流量が最も大きく、次が花崗岩、次いで第三紀火山岩類、そして最も小さいのが中・古生層であることが推定された（虫明 1974, 虫明ほか 1981）。小出（1970, 1972）は東北日本－西南日本および外帯－内帯という地質構造区分と河川の特徴を関連づけた。地形・地質的な特徴は人間の河川水利用の形態を規定するので、流量への人為的インパクトの現れ方に差異をもたらす。たとえば河川水を利用しやすい扇状地河川では早くから農業用水の利用がすすんだため、早い段階で減水区間が生じたと考えられる。小出によれば東北日本では大河川が盆地底の低い部分を通るためにポンプが発達するまでかんがいに使えず、むしろ扇状地がよく発達した支川の中小河川に農業用水が立地した。中小河川であるため流量が豊かとはいえず、近世中期の頃から用水不足が目立ってきたという。一方中部地方では大規模な扇状地が発達し、かんがい期にも流量が多いことから農業ばかりでなく水力発電も発展した。九州中部などの火山地帯では裾野の下端で安定した湧水が現れ、渇水比流量が大きな河川となり水田が発達している。九州中部では、東流する河川では台風による洪水が多いため畑作地帯となり、西流する河川では梅雨期の洪水が多いため稲作地帯となったそうである（梅雨期の冠水は稲にとって害が少ないが台風期は深刻なためである）。

地質構造区分によって河川の渇水流量をみると、図 3-7 のようになる。平水量が小さい河川では、東北日本で比較的渇水流量が豊富である。ただしこれは地質のせいではなく、人為的にコントロールされている流況だからである。平水量が大きい河川では、東北日本や西南日本では渇水量は相対的に乏しくなり、外帯河川（九州の河川と狩野川）の豊富な渇水量と対照的である。

日本の各地方で環境用水を確保しようとする場合、地質・地形的要因から決定される渇水量の大小に注意を払わねばならない。火山地帯であれば自然流況での渇水量は大きいので環境用水も多めに必要となる。全国一律に流域面積あたりの流量で定めるのは無理がある。流量変動についても同様で、もともと変動の小さな場所であれば無理に人工洪水を起こすことはない。

全国の多目的ダムの建設前後の流況変化を表したのが図 3-8 である。「多目的ダム管理年報」に記載されているダムのうち、下流に流量年表記載の流量観測点があって流域面積率（ダム地点／観測地点）が 15%以上、かつ建設前後それぞれ 8 年以上のデータが蓄積されている点を抽出した。これを見る限り一定の傾向は見出せない。ただし、低水流量は増加した点が減少した点より 2 : 1 の比で多くなっており、渇水流量も 3 : 2 で多い。ダムによる流況変化は、3-3 で地域を絞ってより詳細に検討する。

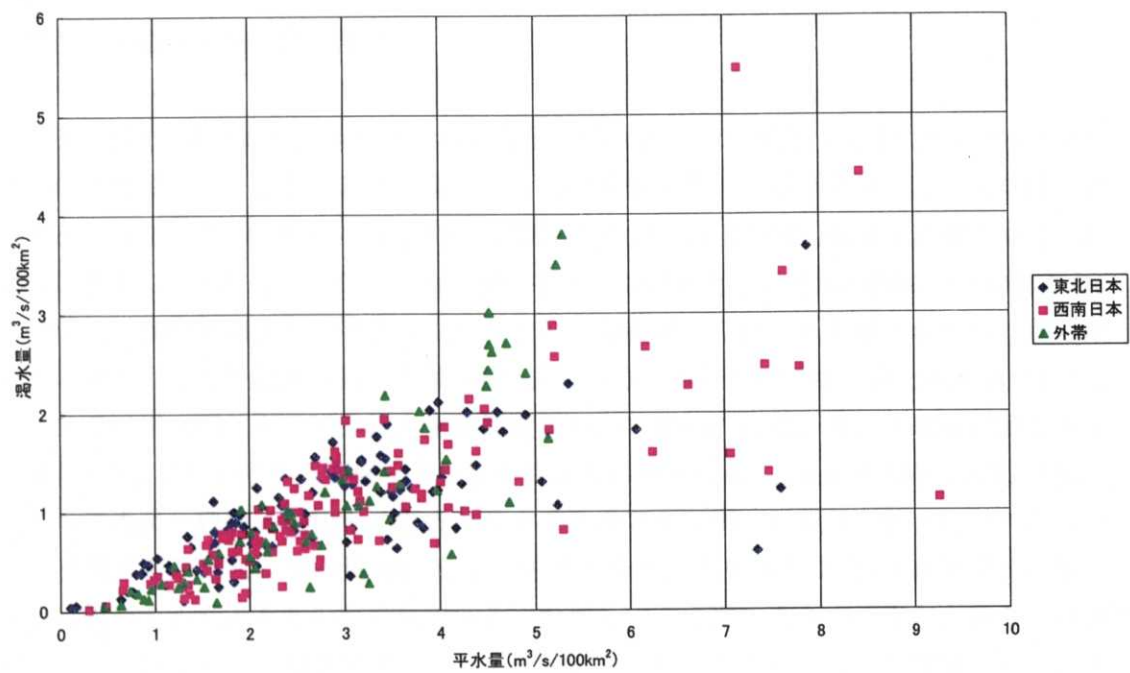


図 3-7 地質構造区分と平水量・洪水量の関係

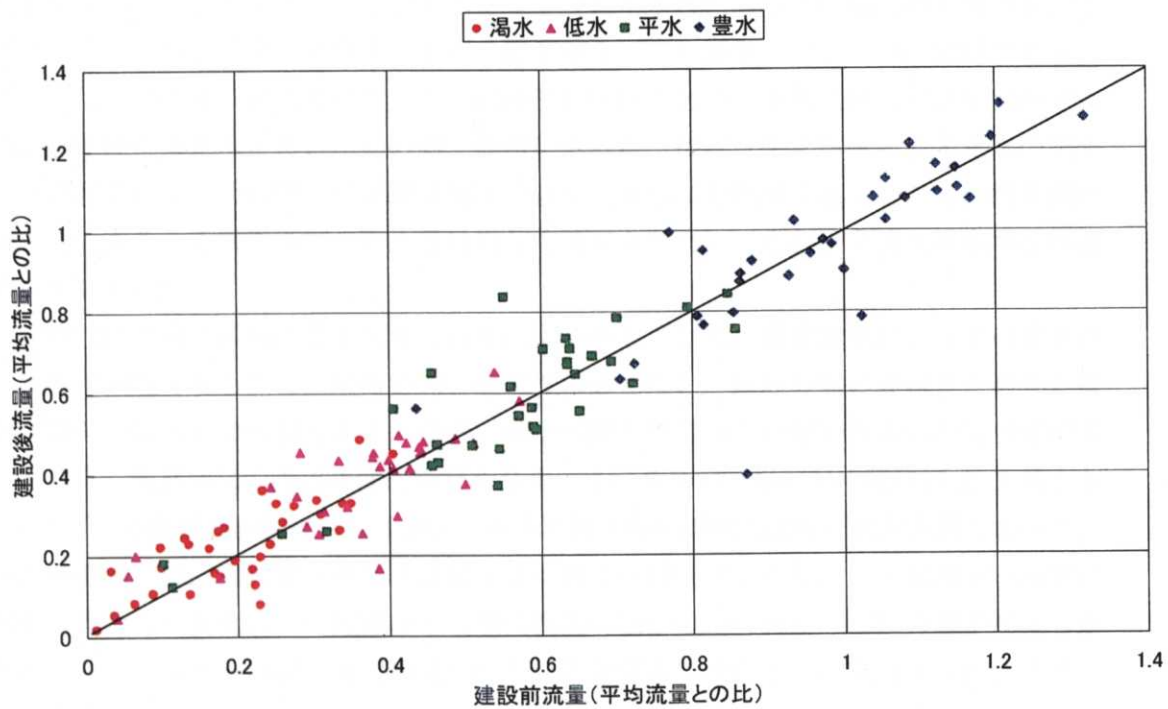


図 3-8 多目的ダム建設前後の流況変化

3-2 発電減水区間の歴史背景

明治 29 年に公布された河川法（いわゆる「旧河川法」）は、明治 10 年代から 20 年代にかけての水害多発、日清戦争の賠償金による財政基盤強化、舟運の衰退、といった社会背景のもとに成立した（山本 1992, p30）。立法の目的は、国家が河川改修を直轄で進められるようにすることであった。そのため法律の条文では治水とくに洪水防御に力点がおかれ、利水に関しては農業用水と舟運や筏流しなどの水面利用くらいしか考慮されていなかった（第十六条～第十九条および第二十条～第二十二条）。第十六条では舟筏と流木について、第十七条では引水用などの工作物と土砂採取について述べられている。水環境に関する条文は存在しないが、わずかに関係する項目が第十九条に現れる。「流水ノ方向、清潔、分量、幅員若ハ深淺又ハ敷地ノ現状等ニ影響ヲ及ホスノ虞アル工事、営業其ノ他ノ行為ハ命令ヲ以テ之ヲ禁止若ハ制限シ又ハ地方行政庁ノ許可ヲ受ケシムルコトヲ得」（新河川法の第二十九条に相当する）とあるのがそれである。ただし、ここに「流水の清潔」とあるのは他の利水への影響（とくに農業用水か？）を念頭においたものであって、水環境としての水質を指しているわけではない。「分量」も同様に環境用水ではなく水利流量が確保されるようにとの意味であろう。

明治以前の河川水はそのほとんどが農業用水に用いられていた。水量が問題になるのも農業用水どうしの関係が主であった。農業用水以外の利用者には、漁業、舟運、筏流し、生活用水がある。玉川上水では水量をめぐって農業用水と生活用水の間に微妙な関係が生じている。一つは羽村堰での取水と下流の農業用水（二ヶ領用水など）との関係であり、もう一つは玉川上水の利用者たる江戸と武蔵野の関係である。前者に関しては小河内ダム建設計画の際に東京市と神奈川県の間で問題にされた。後者は生活用水と農業用水の関係というだけでなく、武蔵野の新田開発地区では生活用水にも利用されていたため地域間の関係ともいえる。各取水点での取水量は厳しく管理されたが、それは下流での利水を保証するためであった。

この時代には減水区間は農業用水の取水により生じていた。農業用水にとっては取水点での流量が問題であるから、縦断方向の連続性は必要ない。縦断方向の連続性が必要となるのは舟運や筏流しの利用である。ひどい減水区間が生じたら舟運や筏流しから苦情が出たであろう。流量は筏の流送速度に影響を与え、平均 6 日の行程が渇水時には 2-3 倍かかったという（多摩川誌編集委員会 1986）。減水区間は環境問題ではなく利水問題であった。玉川上水の例では、羽村堰での取水は堰下流に減水区間を生じさせ、二ヶ領用水の利水に影響を与え、筏流しへの配慮として堰に筏流し場が設けられた。常に舟運や筏流しが可能くらい水量があれば、河川環境がひどい悪影響をこうむることもなかっただろう。ただし筏流しは常時行われるものではなく、羽村堰の場合は月 3 日、それぞれ 1 時間しか通水されていない。灌漑期には農業用水によってかなりの減水が生じていたのではないかと推測できる。取水堰が水の浸透を許さないような構造になってからはなおさらである。

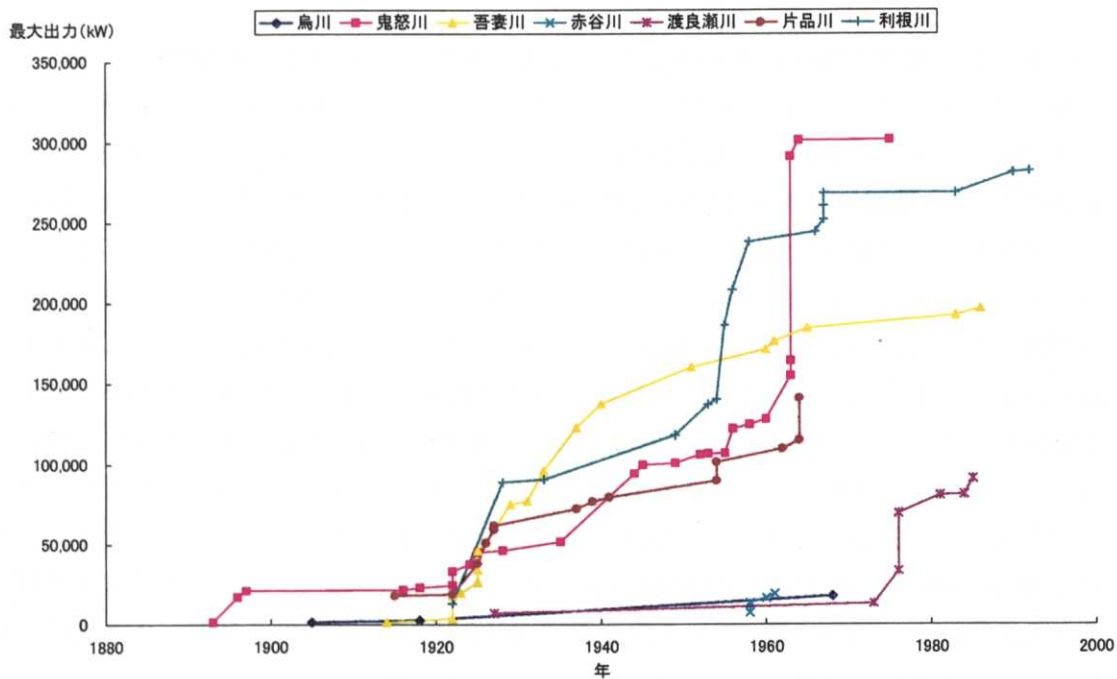


図 3-9 利根川水系水力発電所の最大出力の伸び

旧河川法は70年近くにわたって命脈を保ち、日本各地で洪水防御事業を進展させる力となった。しかし治水事業の進展とともに徐々に水資源利用の要求が増し、利水関係の条項を整備する必要が生じた。古来からの利水者たる舟運や農業用水に、生活用水、工業用水、水力発電等が加わった。中でも存在感を急激に増してきたのが水力発電である。図3-9に利根川水系の各支流における水力発電所の発展を示す。各発電所の最大出力の累計を縦軸に、発電開始年を横軸にとっている。1920年代に急激に伸び、その後も着実に伸びつづけていることがわかる。1957年に建設省河川研究会が編者となった「河川法」（「河川全集」第二巻）では、旧河川法のもとでの利水行政を次のように述べている（「第二篇：河川行政史概説 第四章：利水行政」）。「わが国の利水行政の発展の跡をふりかえってみるとき、その特質を一言にして表現すれば、電力行政とともに歩んできたといい得るのである。」そして、水力発電の発展はより厳しい減水区間を生じさせることになった。

日本の水力発電は明治 20 年代にスタートした。明治 23 年 8 月に下野麻紡績会社が水力発電を開始（「利根川百年史」によると現所野第一）、同じ年の 12 月に足尾銅山の間藤発電所（「間藤原動所」）が竣工している。田辺朔郎の琵琶湖疎水でも疎水の落差を利用した蹴上発電所が明治 24 年 11 月に京都市により供給開始された（初の公営電気事業、「東京電力三十年史」より）。営業用の最初的水力発電所とされるのは明治 26 年の日光発電所（現所野第二、日光第二）である。この直前の明治 25 年 6 月には箱根湯本の箱根電燈所が既存の水車を利用して出力 20kW の発電を行い一般供給を開始している。この時代には送電技術が未発達だったため電力の生産地と需要地が近接している必要があった。よって水力発電も大規模にはなりえず、減水区間や他水利との競合も問題にならなかった。「現代日本産業発達史 Ⅲ 電力」（栗原編 1964）によると、当初は自然の落差たる瀑布やかんがい用水路の落差が利用され、つづいて山岳湖沼を利用した発電が行われるようになった。かんがい用水路を利用した例として、利根川上流域では天狗岩用水の発電所がある。明治 27 年 5 月に使用開始され、水量 $2.0\text{m}^3/\text{s}$ で出力 50kW の規模であった。競合ではなく共存関係をもっていたことになる。一方、山形電気が寒河江川に設置した白岩発電所は農業用水取入口の下流で放流する型式だったため農業用水との摩擦が起きた。明治 32 年 7 月に協定が結ばれて明治 33 年 6 月に開業している。

このころの発電使用水量は、年最小流量を基準としていた。その事情は「Ⅲ 電力」（栗原編 1964）によれば次の通りである：「この水力発電の経営において、その後の展開の側面からとくに興味のあるのはその使用水量の問題である。すなわち個々の電力企業あるいは個々の発電所は、それぞれ独立した一配電系統をもっていたのであるから、電気供給の安全のために一ヵ年を通じて渇水期といえども常に発電しうる流量に応ずる発電力を設備しなければならなかった。したがって河川流量のうちその最渇水量に依存しなければならなかったのである。」（p.9）水不足は即停電につながる恐ろしい現象であって、なんとしても避けなければならなかった。停電しないためには、配電系統を統合して大規模な送電網を築くか、渇水時に別な方法で電力を補給するしかない。事実、当時の発電所には渇水時の予備用に火力発電所を備えるものもあった。また、大正 9 年に出版された「最近 水力電気」（高谷武助著、東京博文館）にはこうある。「故に絶対的に之を論ずれば、一般公衆への電力供給目的の者にありては、実に十数年、或はより以上の間に於ける、最大渇水量以上のものを以て、設計の基準と為さざるべからず。斯くの如くんば水力発電も却って甚だ不経済たるを免れざるべきを以て、通常の場合に於いては、僅か数年間の統計を根拠とし、其の間、一二度起るべき程度の渇水量を以て、取入水量とする者多く、尚ほ電力の供給余り确实を要せざる、町村又は小都市にありては、取入水量を更らに増大するも、大なる支障なかるべし。」（第七章「河川流去量と取入水量」p119）この二つの文から、電力の安定供給のため最小流量（のち渇水流量）を基準としていたことがわかる。日本の河川は河況係数が大きいから、最小流量を常に取水しても流況にあまり大きな影響はない。つまり、この段階では水力発電による減水区間はたいしたことがなかった。

社会経済の発展とともに電力需要が増大してくると、水力発電所の数が増え発電能力の増強も求められるようになった。すなわち、使用水量の増加である。送電技術の発達によって山間部で発電した電力を都市まで運べるようになり、また複数の水力発電所を連結して操作することも可能になった。最小流量の現れる時期は場所によって違うので、うまく運転すればより大流量が利用できることになる（栗原編 1964, p13）。電力料金を下げるためにも効率良く大規模な発電が求められた。明治 30 年代までは渇水量を標準の使用水量としていたのが、大正初期には低水量、昭和初期には平水量を使用水量とするようになった（山本 1992, p83）。平水量が常時使用水量となると年間の半分が全量取水に近い状態になり、河川生態系にとって無視できない影響が生まれる。後にみるように昭和初期の段階で常時使用水量は現在の水準に近く、現在と同等の減水区間が当時生じていたことが推測できる。

明治 42 年に発電水力が逓信省の所管事項となった（山本 1992, p85 および建設省河川研究会編 1957, p319）。そして明治 43 年に臨時水力調査局が設置され、発電水力調査が実施された。5 年間の計画で始められたが結局大正 2 年までの 3 年間で中止された。この調査は渇水量基準で実施された（青木 1964, p80）。なお、この調査において日本の水資源学の基礎用語である「渇水量」「低水量」「平水量」という語が初めて使われた。その後、「その規模の大小にかかわらず当初における渇水量基準の様式は、同じ水路式のなかであって、漸次、その何倍かに当たる低水量なり平水量なりを基準とする様式への発展が次の段階として出てきている。これは、一般には渇水量に対する倍率として表現されるのが普通である。」とされ（栗原編 1964, p21）、大正 7 年からの水力調査では平水量までが調査された。調査報告書の最初にはこうある（水力調査書第一巻「綱要」逓信省、大正 13 年）「之ヲ以テ従来ノ如ク水力利用ノ規準ヲ渇水量ニ止ムルハ徒ニ渇水期以外ノ豊富ナル水量ヲ海洋ニ放流セシムルモノニシテ甚タ不経済タルヲ免レサルカ故ニ近時水力電気事業ノ計画ニ当リテハ概ネ渇水時に数倍スル多量ノ水量ヲ以テ規準トシ其ノ利用能率ヲ増進スルト共ニ電力ノ生産費ヲ可及的低下セシムルハ国家経済上最有利ナル方策トナルニ至リタリ」（p2）この調査では、流量は渇水量、低水量、平水量の 3 つの値が併記されており、発電所出力もそれら 3 つの値に対してそれぞれ計算されている。この調査での利根川流域の発電所（既許可分）の諸元を表 3-1 に載せる（水力調査書第五巻「水力地点表 気象表」）。使用水量については次のような但し書きがある。「火力予備発電所ヲ設置シ又ハ特殊ノ目的ヲ以テ渇水量以上ノ水量ヲ使用スル場合ニハ之ヲ最大欄ニ記入シ一般供給ノ目的ヲ以テ渇水量ヲ使用スル場合ニハ之ヲ常時欄ニ記入セリ」つまり、原則として常時使用水量は渇水量としつつも、最大使用水量を別に定めて河川水をより有効に使用しているのである。表中の常時使用水量がその地点での渇水量を示していると理解できる。

表3-1 第2次水力調査での利根川流域水力発電所の諸元(逓信省1925より)

単位は、水量: $1\text{m}^3/\text{s}=35.9$ 毎秒立方尺, 落差: $1\text{尺}=0.303\text{m}$, 出力: $1\text{馬力}=745.7\text{W}$ として変換した。

発電所名がnoとあるのは無名のもの、かっこ内は次回調査での名称との対応。

発電所名	事業者	水量 (最大)	水量 (常時)	落差	出力 (最大)	出力 (常時)	水力許可 年月	発電開始 年月
no(小谷第二)	東京電燈	4.18	1.67	79.39	3,253	1,301	M39.11	未
no(小谷第一)	東京電燈	5.57	3.06	51.51	2,814	1,548	M39.11	未
no(寶川)	東京電燈	9.75	5.01	51.81	4,954	2,548	M39.11	未
no(幸知)	東京電燈	-	5.57	81.81	-	4,470	M39.11	未
小松	東京電燈	12.53	8.36	115.14	14,154	9,436	M45.07	未
no(岩本)	東京電燈	27.86	12.53	62.72	17,134	7,711	M39.10	未
no(作久の上流半分)	関東水力電気	41.78	27.86	86.66	35,509	23,673	M33.07	未
no(作久の下流半分)	東京電燈	41.78	27.86	39.39	16,141	10,760	M40.01	未
no	東京電燈	0.56	0.28	39.39	216	107	M39.11	未
no(?)	小野伊與吉	1.00	-	54.54	536	-	T07.12	未
no	谷川水力電気	0.47	0.22	38.48	179	92	T10.02	未
no	東京電燈	4.18	1.81	95.14	3,899	1,690	M39.11	未
須川	新治電気	0.45	0.19	24.54	107	47	T06.12	T08.08
岩室	東京電燈	9.75	6.96	158.77	15,180	10,843	M39.11	T04.09
上久屋	東京電燈	-	3.90	109.08	-	4,171	M39.11	M43.11
上久屋第二	東京電燈	11.14	6.96	112.72	12,316	7,696	M39.11	未
no(伏田)	上毛製紙	13.93	-	67.57	9,230	-	T08.01	未
no(根利川第二)	日本鉄合金	2.23	-	81.20	1,775	-	T08.04	未
永井澤(作久の一部)	東京電燈	-	0.17	126.05	-	207	M41.03	M41.10
no	東京電燈	0.28	0.08	757.50	2,069	621	M31.12	未
no	東京電燈	0.42	0.17	127.26	521	209	M39.12	未
no	東京電燈	0.42	0.22	42.42	174	92	M39.12	未
no	東京電燈	0.84	0.22	96.96	795	212	M39.12	未
no	上毛電気	11.14	8.36	72.42	7,913	5,935	T10.02	未
no(後の岩島か)	関東水力電気	-	6.96	106.35	-	7,263	M39.11	未
松谷	群馬電力	13.93	8.36	84.84	11,588	6,953	M39.09	未
甲里(?)	群馬電力	27.86	22.28	30.91	8,443	6,755	M39.09	未
金井	群馬電力	33.43	22.84	42.42	13,906	9,502	M39.09	未
洪川	群馬電力	33.43	22.84	25.45	8,344	5,702	T08.08	未
洞口第二	草津水力電気	0.33	0.22	64.24	210	140	T10.08	未
熊川第一	東京電燈	2.23	1.11	140.90	3,079	1,540	T07.03	未
熊川第二	東京電燈	2.23	1.11	89.69	1,960	980	T07.03	未
厚田	東京電燈	-	1.95	81.51	-	1,559	T01.10	T03.11
温川第二	東京電燈	-	1.95	17.57	-	336	T07.10	T09.02
名久田	吾妻軌道	-	0.47	27.88	-	130	M42.01	M45.07
箱島	東京電燈	-	0.39	90.90	-	347	M42.06	M43.10
no	東京電燈	-	1.11	22.73	-	248	M43.06	M43.10
no(?)	箱島水力電気	0.56	0.47	24.85	136	116	T10.10	未
伊香保町(辨天瀧)	伊香保町	-	0.70	22.73	-	155	M40.03	M41.09
no	烏川電力	0.84	0.42	242.40	1,987	993	M40.08	未
no	烏川電力	1.25	0.84	90.90	1,118	745	M40.08	未
no(権田第二)	烏川電力	1.81	1.03	95.45	1,695	965	M40.08	未
本庄	烏川電力	2.79	2.12	118.47	3,236	2,459	M40.03	未
上室田(室田)	東京電燈	-	3.06	37.88	-	1,138	M ³ 2.11	M37.12
里見	東京電燈	-	3.34	45.75	-	1,500	M ³ 9.12	T08.01
高芝	西毛電気	-	0.28	66.66	-	182	M44.01	M44.09
第二(坂本第二)	西毛電気	-	0.28	52.72	-	144	M40.07	T04.02
no(?)	柳瀬萬吉	1.95	-	17.57	336	-	T06.06	未

no(万場)	関東水力電気	-	4.18	66.36	-	2,719	M40.04	未
矢納	武蔵水電	-	2.23	70.90	-	1,550	M39.10	T04.01
第二	粕川水電	0.17	0.11	99.69	163	114	T09.12	未
責船	東京電燈	-	5.01	15.45	-	760	M41.08	M44.12
高津戸	東京電燈	-	6.96	7.88	-	538	M38.02	M41.01
no(?)	東洋織布	2.98	-	10.00	292	-	M23.03	M45
上間藤	足尾電燈	-	0.47	33.33	-	155	M42.09	M43.10
no(?)	古河鋳業	1.39	-	53.03	724	-	M32.08	M37
渡良瀬	古河鋳業	0.28	-	96.96	265	-	M34.02	M41.04
餅ヶ瀬	足尾電燈	0.43	0.21	66.05	278	139	T10.09	未
no	秋山水力電気	0.22	0.11	51.81	113	57	T09.02	未
大芦川第一(西大芦)	鹿沼水力電気	1.11	0.78	27.88	304	213	T02.11	T10.02
大芦川第二	鹿沼水力電気	0.84	-	64.54	529	-	T02.11	未
no(?)	引田鋳山	1.11	-	10.91	119	-	T07.12	未
鹿沼	帝國製麻	0.86	-	12.42	105	-	M20.11	M43.03
石那田	帝國電燈	-	2.79	10.00	-	273	M31.05	M35.01
第三	鬼怒川水力電気	-	1.67	156.65	-	2,567	M39.11	未
竹ノ澤	鬼怒川水力電気	※12.53	4.74	83.33	10,243	3,869	T08.06	未
下瀧	鬼怒川水力電気	-	*16.71 6.82	333.30	-	54,630 22,308	M39.06	T02.02
放水口	鬼怒川水力電気	10.31	5.15	12.73	1,286	643	T08.02	T09.04
第四or中岩	鬼怒川水力電気	33.43	8.91	16.36	5,364	1,430	M39.06	未
道谷原	帝國電燈	-	11.14	19.39	-	2,119	T10.08	未
佐貫	帝國電燈	-	11.14	25.15	-	2,748	T10.08	未
no(西鬼怒川)	羽黒電力	12.26	5.99	11.51	1,384	676	T09.06	未
no(?)	日光製紙	2.79	-	10.91	298	-	T10.07	未
no(?)	下野紡績	1.59	-	11.21	174	-	M20.06	M36
no(?)	小林清一郎	0.08	-	181.80	149	-	M43.09	未
第一ノ甲	鬼怒川水力電気	-	2.79	121.20	-	3,281	M39.06	未
no	藤原水力電気	0.28	0.14	106.05	290	145	T08.04	未
西澤金山	西澤金山採鋳	1.39	-	40.91	559	-	M42.05	T06.07
no	中宮祠電力	-	0.14	81.81	-	112	M35.05	T06.11
no	中宮祠電力	-	1.39	24.24	-	331	M35.05	未
細尾第三	古河鋳業	8.36	4.18	103.02	8,443	4,221	T05.07	未
細尾第一	古河鋳業	2.79	-	184.83	5,049	-	M37.11	M39.12
細尾第二	古河鋳業	4.18	-	206.04	8,443	-	M37.11	M43.07
細尾第四	古河鋳業	6.69	3.90	80.30	5,265	3,071	T10.07	未
別倉	古河鋳業	2.98	-	60.60	1,771	-	M33.07	M41.08
松原	日光電気軌道	-	2.37	21.21	-	492	M41.07	M43.08
日光第一	帝國電燈	-	6.13	25.15	-	1,512	T05.10	T07.05
日光第二	帝國電燈	-	6.69	25.76	-	1,688	M26.03	M35.07
所野	帝國製麻	6.13	-	36.36	2,185	-	M29.03	T02.03
no(?)	大谷川水力	8.36	2.79	39.39	3,228	1,076	T10.09	未

元の表にある但し書き：

1. 本表には大正十年末現在に於て発電の目的に依り水力の使用を許可せられたる水力地点の内百馬力以上のものを掲記す。
但し印刷中許可に異動を生したるものは適宜之を訂正したり
2. 水量は次の如く区別せり
火力予備発電所を設置し又は特殊の目的を以て渴水量以上の水量を使用する場合には之を最大欄に記入し一般供給の目的を以て渴水量を使用する場合には之を常時欄に記入せり
水量に*を附せるは調節池を有するものにして此の場合には一日中の最大及平均使用水量を併記せり。
又※を附せるは火力の予備発電所を有するものなり

「水力調査書」第五巻「水力地点表 気象表」、大正十四年二月、逓信省

大正 8 年に内務省土木局長と通信省電気局長の連名で発せられた「水利使用事業取扱ニ関スル件」では、水力利用に際しては水量をなるべく有利に利用させること、水力利用の計画は努めて大規模にすること等の方針が示された(建設省河川研究会編 1957, p321)。

「又発電水利使用の形態は、第一次欧州大戦後の好況の波にのる電力需要の増大により、従来の渇水量から平水量に増加する方式に転換する必要が生じ、さらに長距離送電の可能性が増大するとともに次第に大規模となってきたのである。」(建設省河川研究会編 1957, p320) 昭和 4 年、通信省電気局は「発電水力の標準使用水量並に水力火力併用に関する研究」と題する報告書を出した(工藤正平・三ツ井新次郎・上島貞雄)。この中で研究方向の(1)として、「水力の開発に当り、使用水量の標準を経済的に利用し得る範囲に於て従来の平水量よりも更に高め得ないものであろうか。且つ又此の場合の所要石炭量の増加は如何なる程度のものであろうか。」と記されている。そしてこの報告書について「Ⅲ 電力」は「つまり工藤らの著者が問題にしたのは、本多のそれとはちがい一転して河川の豊水(量)である。いわゆる無効放流の減少という問題である。(中略)しかしわたくしがここであえて文意を犯してまで言おうとするのは、その施設の如何を問わず、水力資源の利用において豊水量をもちだしたこと、そしてもちだされたことの画期的な意義をこの報告のなかに認めたいからである。」とコメントしている(栗原編 1964, p126)。

このように、大正から昭和初期にかけて発電使用水量は平水量の水準まで高まってきた。昭和 6 年の逓信省電気局「許可水力地点要覧」から現在稼働中の発電所と同一とみられるものを抜き出して常時使用水量と最大使用水量を比較したのが図 3-10 である。すでにこの時期に、使用水量は現在とほぼ変わらない水準に達していた。高谷武助の「水力電気」では、渇水量以上を使いたいときには貯水池か予備火力発電を設置すればよい、と述べているが、表 3-1 で調節池をもつものは 1 ヶ所だけ(下瀧)、予備火力発電所をもつのも 1 ヶ所だけ(竹ノ澤)である。それが図 3-10 の発電所では、33 ヶ所のうち貯水池・調整池をもつものが 13 ヶ所にのぼっている。水力発電の大規模化がこの時期に急激に進み、河川環境(水量)がそれに応じて貧弱になっていった流れが読み取れる。

水力発電所の使用水量が増え、立地地点数も多くなってくると、既存の他水使用(治水も含む)との競合も目立ち始める。明治 43 年、内務省は発電水利権に期間を定めるよう指示した(建設省河川研究会編 1957, p320)。これは治水との関係である。内水面漁業との関連では、大正 4 年に内務省は漁梯設置の指示をした(建設省河川研究会編 1957, p320)が、その他にも漁族の棲息に必要な水量の放流、魚道設備の設置について指導した(建設省河川研究会編 1957, p324)。昭和 3 年に農商務省との関係でこの事項に関する通達を出している。流筏木との調整では、政府は木材の流送に必要な水量の放流、流筏木路または代替輸送施設の設置を発電者に指導してきた。これも昭和 3 年に通達が出されている。最も厳しかったのが農業用水との摩擦で、前述した山形の例(寒河江川の白岩発電所)をはじめ、各地で利害の対立が発生した。猪苗代湖では湖水水位の低下に関して利害が衝突し、結局大量の無効放流を余儀なくされた(栗原編 1964, p97)。

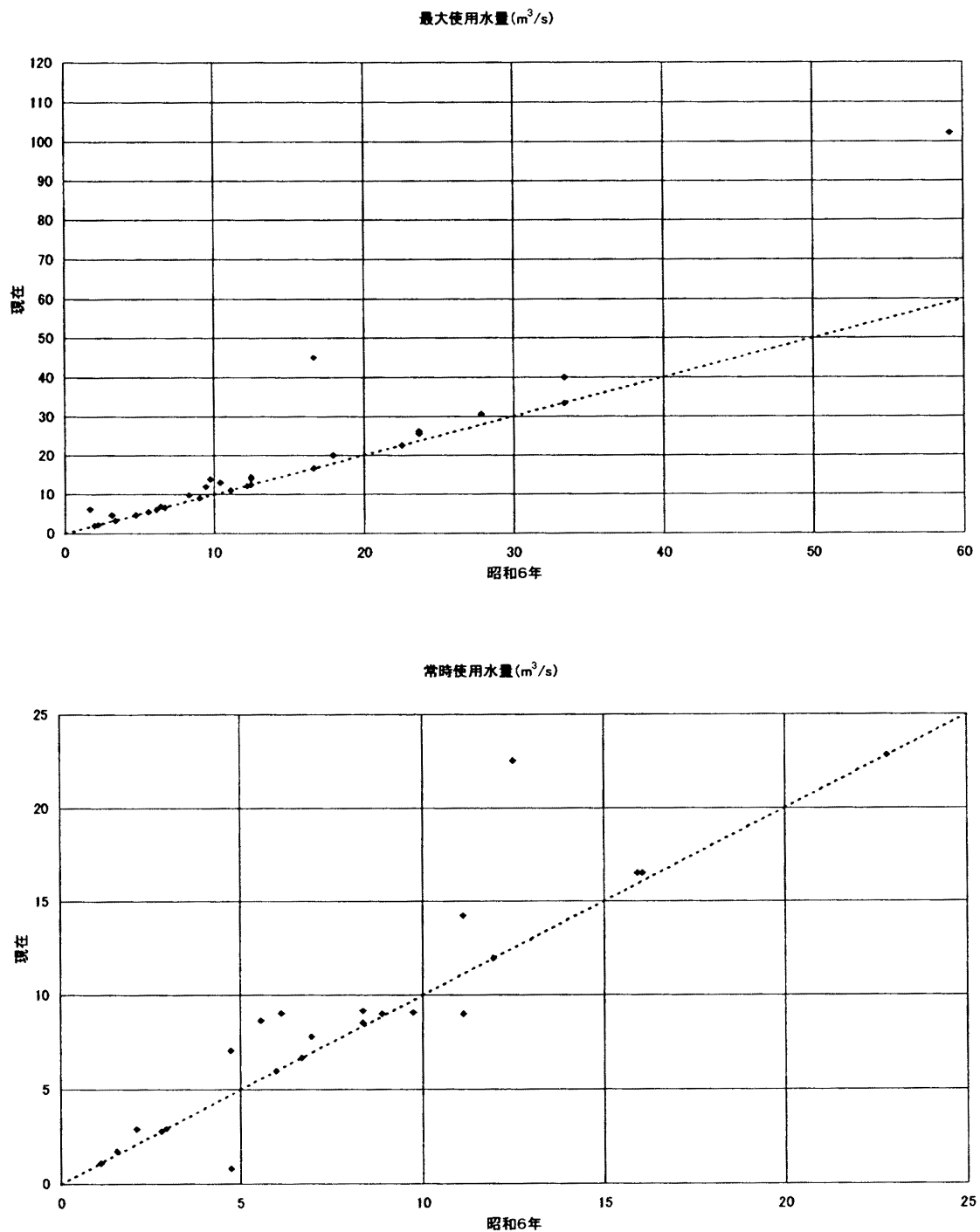


図 3 - 1 0 現在と昭和5年当時の使用水量の比較

(このグラフにプロットした発電所：小松，岩本，作久，片品川，栓ノ瀧，幡谷，千鳥，岩室，上久屋，伏田，一ノ瀬，田代，西窪，今井，羽根尾，吾妻川，松谷，原町第一，金井，渋川，熊川第一，熊川第二，川中，厚田，里見，福岡，下瀧，竹ノ澤，中岩，道谷原，西鬼怒川，日光第一，日光第二)

発電水力は以上のように使用水量を増大させる方向に進んでいったが、工業用水や都市用水もやはり河川からの取水を増大させつつあった。工業用水は当初は地下水に依存するところが大きかったが、地盤沈下が社会的に問題にされるようになり、表流水の使用を増やすようになった。農業用水もこれらの新規水需要のあおりを受けながら河川水に対する権利の主張を強めていった。各利水者が水を争うようになってくると代弁者のいない河川環境は悪影響を蒙るばかりである。利水の立場からみると環境用水は「無効放流」と呼ばれる流量にあたり、各方面からこれを減らすように圧力がかかるからである。

さて、「正常流量」は新河川法以降の用語であるが、旧河川法の下でも維持流量という考え方はあった。それは当時の書籍からうかがえる。新沢嘉芽統は農業水利の立場からこれを論じており、たとえば「河川水利調整論」（1962、岩波書店）では「河川維持水」という言葉を使っている。ところがその中で「著者の手許にある数種の河川工学の一般的著書には、河川維持水を説明しているものは一つもなかった。河川維持水という言葉さえも出ていないのである。」と書いており、必ずしも堅固な基盤に立脚した概念ではなかったことをうかがわせる。「河川維持水」の目的としては、河床維持、工作物維持、舟運、水質保全（希釈）、地下水位の保持、観光、塩害防止、河口維持などのちの正常流量の概念とほぼ同じ項目が挙げられているが、利水面のみが関心事であったろう。建設省側の解説書（水利科学研究所編「水利河川学」1962、地人書館）では維持用水という言葉を使っており、「維持用水は、河川がその本来の機能を維持するために常時必要とする一定量の水」であるが、「その必要量は、一般的には堤防、護岸、水制、河津などの維持保全の見地から定められる」（第5章「河川行政」第3節「水利権」p257）と、主として利水施設の保護が目的であったことがわかる。また、河川浄化や逆潮防止、観光、防災などの観点が入ることもある、とも書かれている。いずれにしても、環境への配慮として流量が前面に出てくるには、新河川法の制定と正常流量の概念の登場を待たねばならない。

以上のことから考えるに、水力発電による減水区間が問題とされる水準に達してきたのは大正後期から昭和初期にかけての時期だといえる。常時使用水量が平水量水準となったためである。他利水との関係でこの時期に政府通達が出されていることも問題の顕在化を示している。

3-3 人間活動による流況変化—利根川上流域の例—

人為的影響による流況変化が実際にはどのように起こっているか、利根川上流域を例にとって調べる。それには、時間軸上でみる方法と、クロスセクショナル（空間的）にみる方法がある。前者は人間活動の影響が加わる前後を比較する方法で、後者は加わっていない場所と加わった場所を比較する方法である。具体的に考えれば、前者はダム建設前と建設後、取水開始前と取水開始後、都市化前と都市化後、を比較することで、後者はダム流入量と放流量、取水堰上流と取水堰下流、ダム無し流域とダム有り流域、を比較することである。

本節の（１）では基礎となる自然条件を整理して各支流域の特徴をつかみ、ダムおよび水力発電所や農業用水と流量観測所との位置関係を整理する。（２）ではダムや水力発電所が下流の流況に及ぼしている影響を調べる。（３）では数十年オーダーの流量資料を整理して各地点での流量変動を把握し、多目的ダム建設前後の差を調べる。（４）ではダム流入量と放流量の比較や発電使用水量と河川内流量の比較からそれらの影響を見積もる。（５）で以上の結果をまとめ、人間活動が流況にどういった変化を与えているか考察する。

（１）利根川上流域の自然条件と水利用状況

栗橋または八斗島より上流を利根川上流域と呼ぶ（図 3-11）。大きな支川として、吾妻川（1,356km²）、烏川（1,809km²）、渡良瀬川（2,621km²）があり、吾妻川合流点より上流を奥利根流域と呼ぶ。八斗島を基準点にとれば、渡良瀬流域は除外され、残流域も大幅に縮小する。栗橋と八斗島の間には利根大堰があり、大量の水が流域外に導水されている。吾妻川合流点前後で取水される農業用水は、八斗島と栗橋の間で合流する支川に還元する。よって、八斗島を基準点とするとこれらの農業用水が還元する前の流量を扱うことになり、栗橋を基準点とすると利根大堰からの流出量を差し引いた流量を扱うことになる。行政区域でみると、渡良瀬川流域は栃木県と群馬県にまたがり、八斗島下流の残流域が埼玉県を一部含む他は、ほぼ群馬県全域に相当する。

流域には大きな多目的ダムが7つある。それらの諸元を表 3-2 にまとめた。矢木沢ダムは巨大な貯水容量をもつが、すぐ下に須田貝ダムと藤原ダムがあるため下流への影響は間接的にしか及ばない。藤原ダムは揚水式発電（玉原発電所）の下池にもなっている。藺原ダムは水力発電所の減水区間に存在する特異なダムである。このほか吾妻川にハッ場ダムが計画されていて、烏川にのみダムがない。

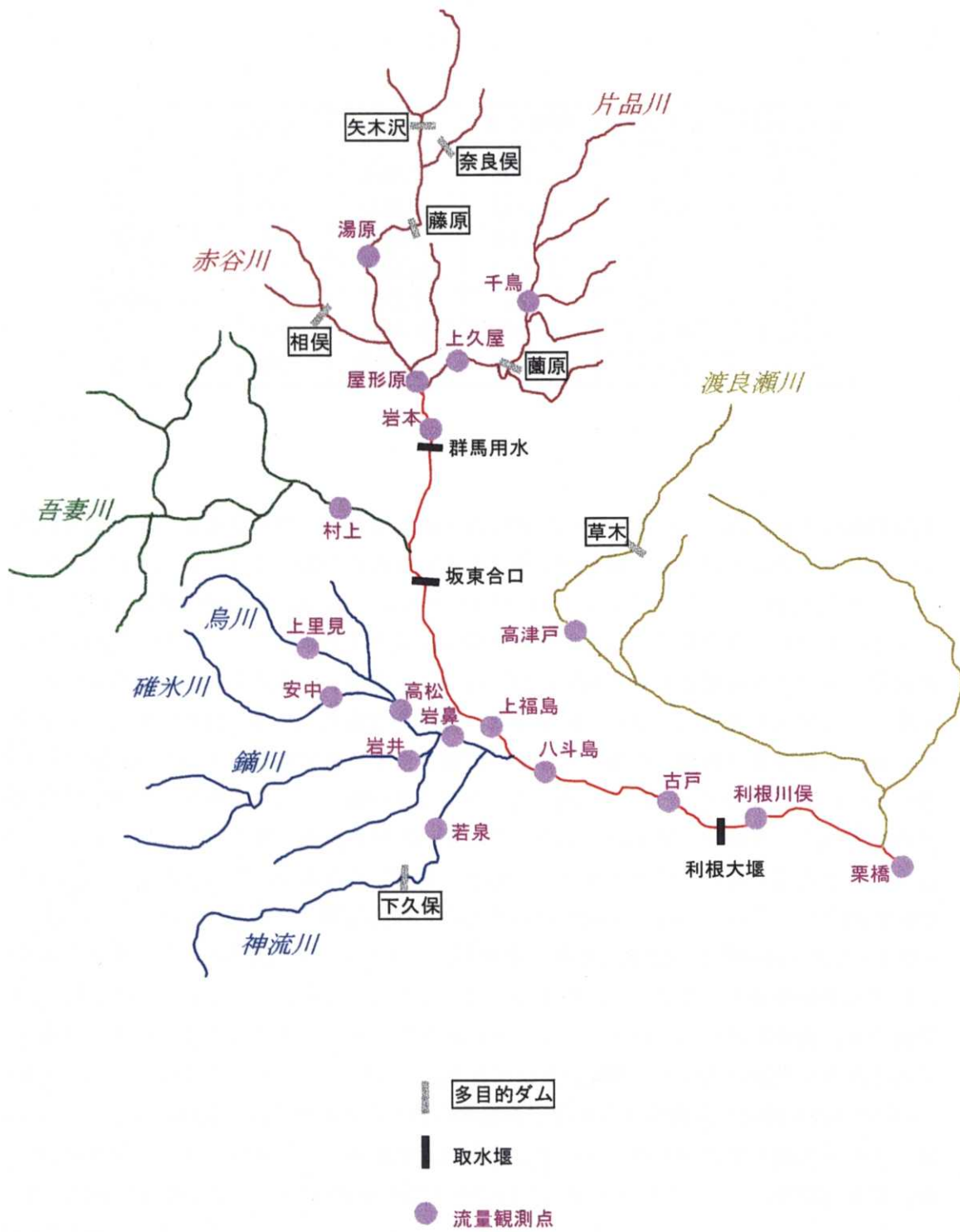


図 3-11 利根川上流域の概要

表 3-2 多目的ダム群の諸元

ダム名	竣工年	河川名	集水面積 (km ²)	総貯水量 (10 ⁶ m ³)	有効容量 (10 ⁶ m ³)
藤原	1958	利根川	401.0	52.4	35.9
相俣	1959	赤谷川	110.8	25.0	20.0
藪原	1966	片品川	493.9	20.3	14.1
矢木沢	1967	利根川	167.4	204.3	175.8
奈良俣	1991	利根川	95.4	90.0	85.0
下久保	1969	神流川	322.9	130.0	120.0
草木	1976	渡良瀬川	254.0	60.5	50.0

奥利根流域には大きな支流として片品川と赤谷川がある。赤谷川合流点以上の地質は主として花崗岩で、片品川との間は安山岩であるが中生層や第三紀層なども複雑に分布している。片品川は奥利根流域の約 1/3 を占め (673km²)、水力発電で大きな役割を担っている。火山性の地質で、とくに本流と片品川の間山地は安山岩地帯が広がり保水力が大きく、水力発電に好適な流況をつくりだしている。南から西へと 90 度向きを変える屈曲部に藪原ダムが建設されており、支流にも戸倉ダムや平川ダムなどが計画されている。上流の溪谷区間は昭和前半に建設された水力発電所が連なっており、中流以下では二系統の発電所群が複雑に入り組んでいる。藪原ダムより下流の西流している区間では河岸段丘が発達し、段丘面の落差が発電に利用されている。赤谷川には相俣ダムがあり、その水が直ちに並んだ二つの水力発電所に送られている。相俣ダムに流入する二つの支川のうち、赤谷川本流には二つの水力発電所が既にあり、川古ダムが計画中である。もう一つの西川は歴史上新潟方面との重要な交通路であった (三国街道)。利根川本流には須田貝・水上・上牧・小松といった水力発電所も立地しているが、むしろ多目的ダムによる水資源開発の舞台として重要である。支流が水力発電中心、本流が多目的ダム中心という形は東北日本の河川の特徴である (小出 1972)。片品川が合流するあたりは兩岸に山が迫り蛇行する地形になっていて、片品川合流後奥利根流域最下流の発電所である岩本発電所と伏田発電所があり、その放流水を受ける綾戸ダムから群馬用水が取水している。奥利根流域は降雪が多く、利根川上流域で累加降雪量が 1,000cm を超えるのはこの地域だけである (利根川百年史編集委員会 1987, p52)。

吾妻川流域は安山岩から成る火山性地帯で、水力発電の宝庫となってきた。水力発電所は大正から昭和初期に開発され、吾妻川に鈴なりになっている。酸性の水質を中和するために建設された品木ダムの他に大きな人工構造物はないが、利根川上流域で最後の大型多目的ダムになるであろうハッ場ダムが計画中である。上流は高原で畑作、下流は河岸段丘上で水田が拓かれているが、支川からの水に依存しているため本川に水力発電所が連な

でも競合せず共存が可能である。

烏・神流川流域は対照的に水力発電所がほとんどない。小出はその理由として河床勾配が小さいことを指摘している（小出 1972）。分水嶺の標高は 2,000m を超えない。また、神流川・鍬川・碓氷川など有力な支流が多く流量が分散することも水力発電に不利である。地質をみると烏川・鍬川と神流川では違っており、神流川は古生層が支配的である。神流川は利根川水系で唯一外帯に属し、江戸時代の付け替え以前は同一水系だった荒川と同じ地質区分に属する。流域の土地の水持ちが悪いため渇水流量が小さく洪水流量が大きい。多目的ダム（下久保）を利用した発電所が一つあるだけである。発電所下流の神流川頭首工からは相当量の農業用水が取水されている。烏川の長野堰用水も 16 世紀以来の歴史を持つ比較的大きな農業用水である。

吾妻川合流点と烏川合流点の間の利根川本川には、農業用水路等を利用した小落差大水量の水力発電所がいくつか立地している。天狗岩、田口、関根、小出、柳原などがそれぞれあり、いずれも坂東合口堰からの取水を利用して（天狗岩は天狗岩用水、他は広瀬用水＝広瀬川）現在は県営発電が行われている。また、佐久発電所からの放流水を直接これらの発電所に導く導水路もできている。

利根川水系は江戸時代に大規模な付け替え工事が行われ、銚子から太平洋に注ぐようになった。付け替え工事の主目的が舟運と水田開発だったように、利根川上流域でも農業用水が江戸時代の主たる関心事であって、数多くの農業用水が利根川や支川から引かれた。明治時代に入って水力発電が勃興すると、吾妻川や片品川を中心に水力発電所が数多く作られた。図 3-9 にみたように大正から昭和初期に発電所の建設は一つのピークを迎える。この頃までに建設された発電所は水路式の流れ込み発電所が多いが、調整池をもつものも徐々に増えている。水力発電は使用水量の増大とともに既存水利（とくに農業用水）との摩擦を増していくが、利根川上流域で発電水力の舞台となった吾妻川や片品川は農地が少なく、かつ吾妻川では発電に使われない支流に依存した農業が行われているため、水力開発も容易だったと思われる。戦時下の河水統制を経て、1958 年の藤原ダムを皮切りに 7 つの多目的ダムが相次いで建設された。表 3-3 のように、これら 7 ダムは栗橋地点の 2 割弱の支配面積を持っている（ハッ場ダムが完成すれば 26.7% になる）。八斗島地点では 25% である（ハッ場ダムが完成すれば 40%）。このことから、河川流況の時系列変化をみるには昭和初期の水力発電大規模化と昭和 40 年前後の多目的ダム群建設を境界として三つの時代に大きく分類できそうである。しかし水力発電以前すなわち大正以前の河川流況データはほとんどない。建設省の流量観測では図 3-12 のように 1950 年代に流量データを取り始めた地点が多く、多目的ダム以前の流況データも乏しい。

表 3 - 3 多目的ダムの支配面積

地点名	流域面積 (km ²)	ダム支配面積 (km ²)	ダム支配率	ダム名
屋形原	980.9	511.8	52.2%	藤原, 相保 (矢木沢, 奈良保)
岩本	1,691.9	1,005.7	59.4%	+ 藺原
八斗島	5,150.0	1,328.6	25.8%	+ 下久保
栗橋	8,588.0	1,582.6	18.4%	+ 草木

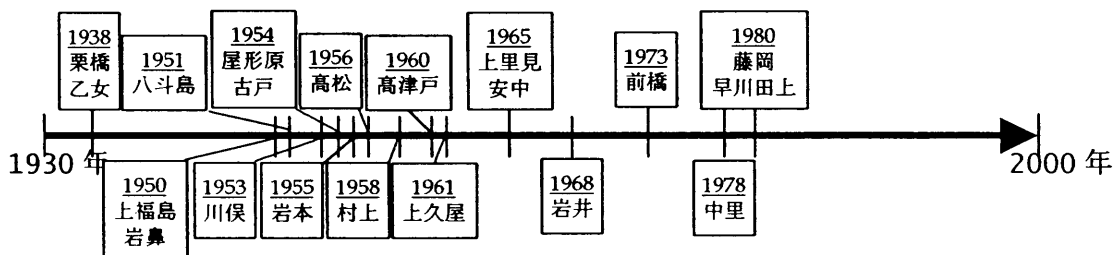


図 3 - 1 2 利根川上流域の流量観測点の最古データ

水力発電以外の大型取水施設としては、1951年に天狗岩・広瀬・桃木・大正各用水を合口した坂東大堰が完成している。ここの最大取水量 $52.8\text{m}^3/\text{s}$ は岩本地点の低水流量にほぼ匹敵する。利根大堰は1968年に完成し、取水量は $136.96\text{m}^3/\text{s}$ と莫大である。計画ではこのうち $86.96\text{m}^3/\text{s}$ が農業用水、 $20\text{m}^3/\text{s}$ が東京と埼玉の都市用水、 $30\text{m}^3/\text{s}$ が荒川の浄化用水となっている。この流量は、古戸地点の低水流量以上平水流量以下に相当し、栗橋地点でも同様である。1970年には岩本地点直下に群馬用水の取水施設ができた。これは当初の農業専用から一部水道に用途を変更しているが、最大取水量 $20\text{m}^3/\text{s}$ 弱とそれほど大きくない。岩本地点の渇水流量以下である。渡良瀬川では1976年の草木ダム完成後に、高津戸の大間々頭首工、桐生の太田頭首工、館林の邑楽頭首工の3ヵ所に農業用水取入口が再編された。最大の太田頭首工での最大取水量が $20\text{m}^3/\text{s}$ 強で、藤岡地点（3頭首工より下流）の平水流量以上に相当する。神流川では1980年に埼玉北部用水の取入口である神流川頭首工が完成した。ここの取水量は最大で $13.68\text{m}^3/\text{s}$ であり、若泉地点の豊水流量に相当する。利根大堰以外の用水は、支流を經由していずれも利根大堰より上流で利根川に戻ってくる。利根大堰からの取水は、荒川流域などへ流出して利根川へは戻ってこない。

利根川上流域には図3-13のように水力発電所が多数立地している。奥利根の水上発電所付近、片品川の白沢発電所付近などでは二重に取水されており、川が三本あるかのご

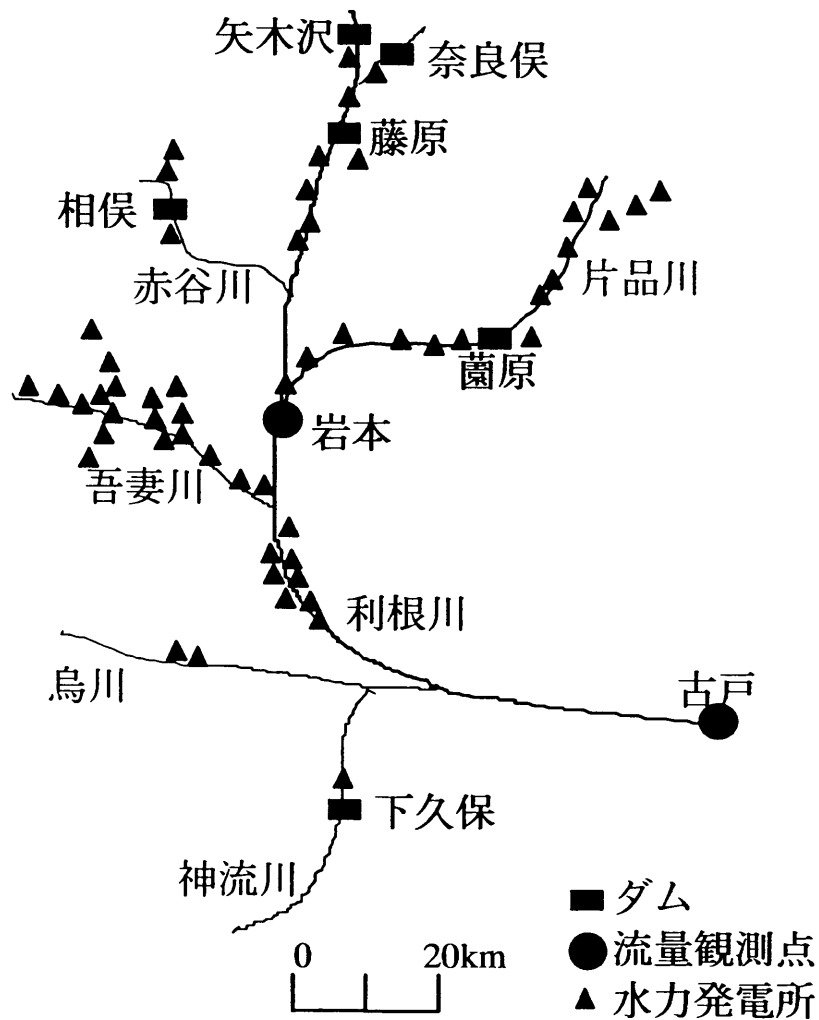


図 3 - 1 3 利根川上流域の水力発電所立地状況

とき状況である。建設省の湯原や上久屋の流量観測点はこの二重減水区間にある。流量観測所と水力発電所の取水・放流地点との関係を奥利根流域について整理したのが図 3 - 1 4 である。片品川や赤谷川でバイパスされた水は岩本発電所と伏田発電所でいったん本川に戻り、岩本地点では流域の水が全量流れている。しかしそれもほんの短区間のことで、すぐ近接して群馬用水の取水点があり、農業用水による減水区間に入る。吾妻川は水力発電との 2 系統で本流と合流するが、佐久発電所の放水は坂東合口に直接流れて取水される。佐久発電所は本流では最下流にある発電所なので水力発電による減水はここまでだが、ここからは農業用水や生活用水が減水の原因者となる。

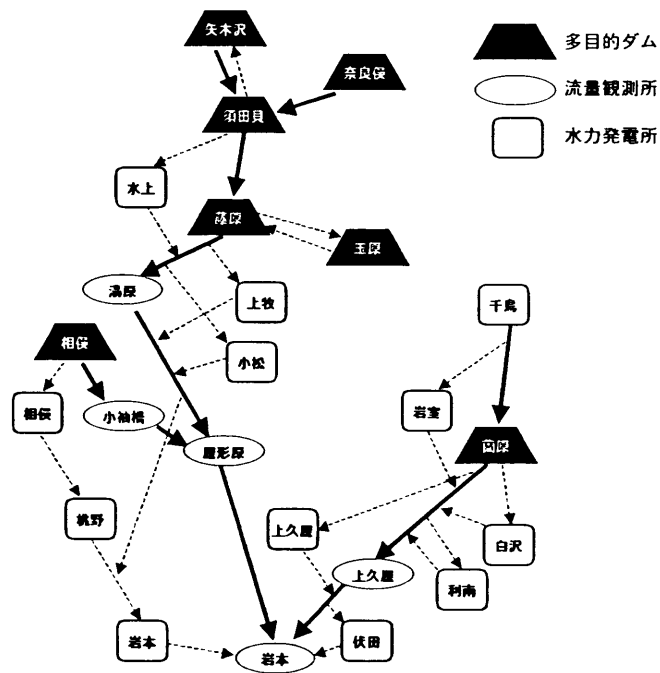
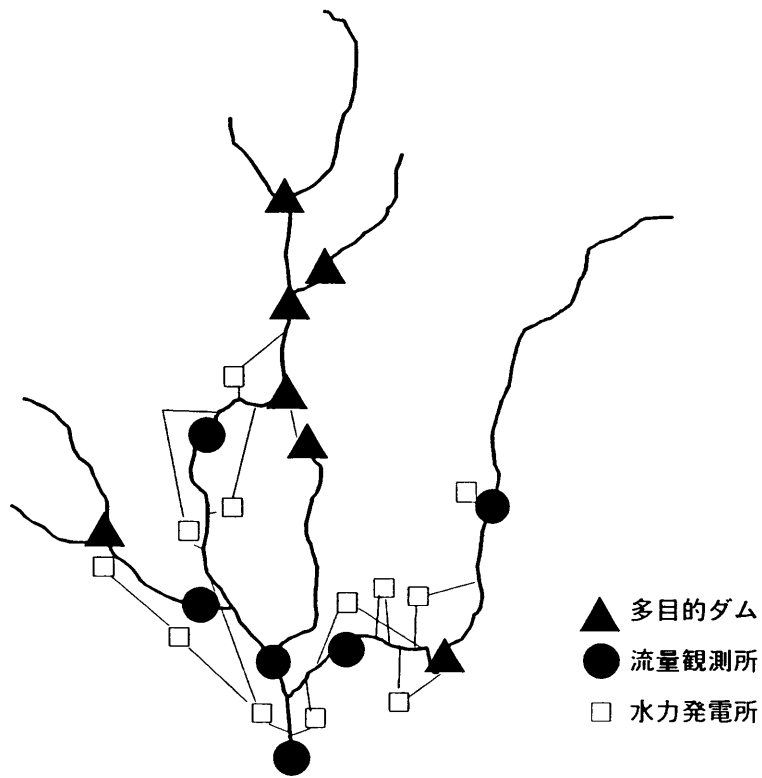


図3-14 奥利根流域の流量観測所の水力発電所との位置関係
(上：地図，下：模式図)

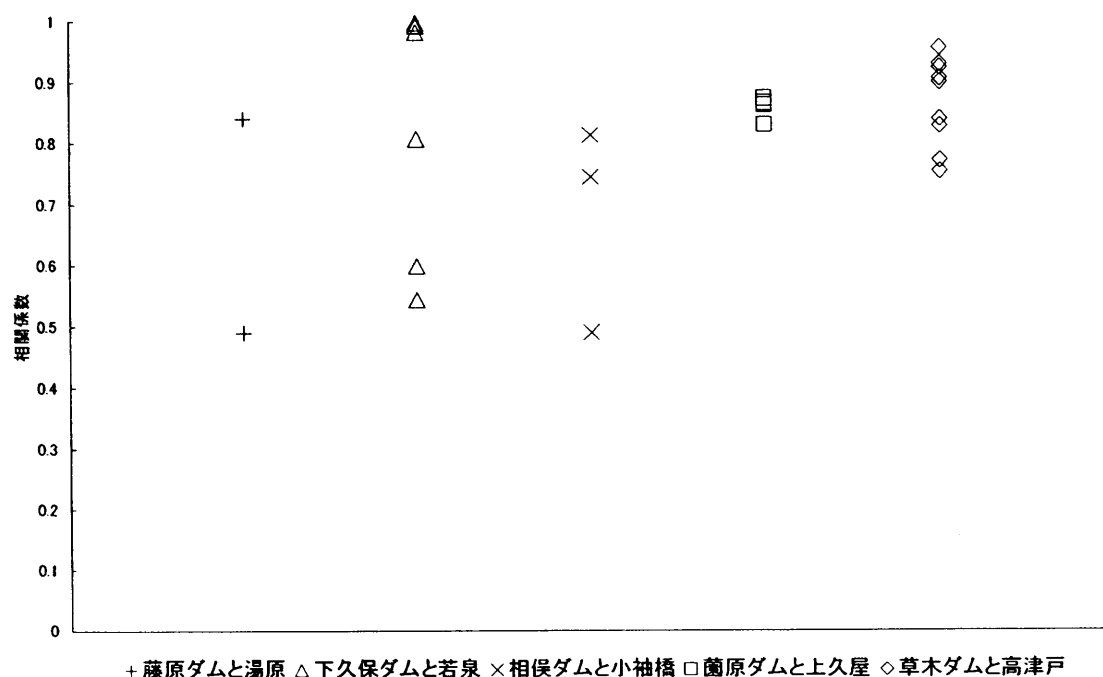


図3-15 ダム放流量と直近地点(10~25km)流量の相関係数

(2) 人工構造物が流量に与える影響

ダムの影響が空間的にどのくらい遠くまで伝わっているかみるため、ダムに最も近い下流の地点とダム放流量の相関係数をみたものが図3-15である。いずれも約10~25kmの距離があり、途中に水力発電所の取水口がはさまっているにもかかわらず総じて相関が高い。発電所は一定流量を取水しているため流量の脈動が絶対値を小さくしながらもそのままの形で下流に伝わっている。ときどき相関係数が小さくなっている(ex. 下久保と若泉)のは、欠測と思われるゼロ値が多く記録されている年にあたっている。ダムから数十kmの範囲では、間に水力発電所があろうともダム放流が有効な環境用水確保の手段であるといえる。

やや離れて岩本地点と上流3ダム(藤原・相俣・菌原)からの放流量和との相関をみると、1992年が0.90、1990年が0.87となっている。ダムからの放流量増強は、岩本あたりまでの環境用水供給手段としては有効であるといえる。しかし、八斗島と上流ダム群(藤原・相俣・菌原・下久保)放流量和との相関は0.41(1992年)および0.65(1990年)と下がってしまう。栗橋までくると0.55(1992年)および0.26(1990年)といった具合になり、むしろ残流域との相関が高い(1992年が0.98、1990年が0.99)。図3-16のようにダム放流量総和は栗橋地点流量の1/4ほどにすぎず(屋形原は減水区間にあるので大きい値になっている)、上流ダム群(藤原+相俣+菌原+下久保+草木)からの放流量の和と栗橋流量を同時に図示すると図3-16のようにになっている。

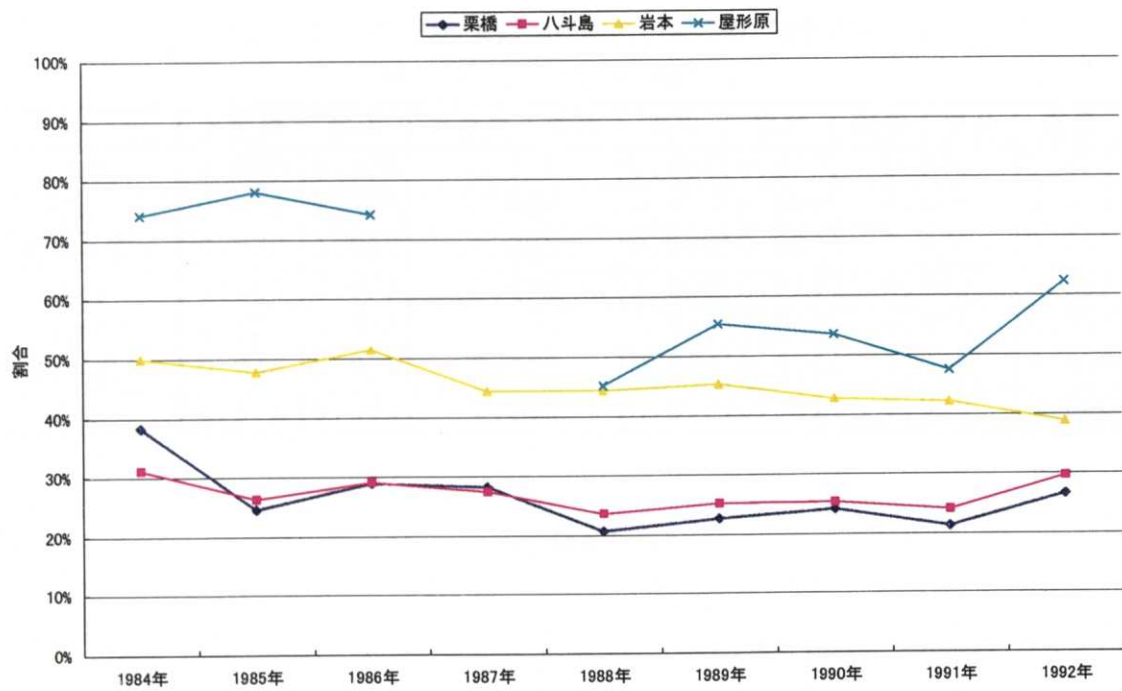


図 3 - 1 6 年総流量に占めるダム放流量の割合

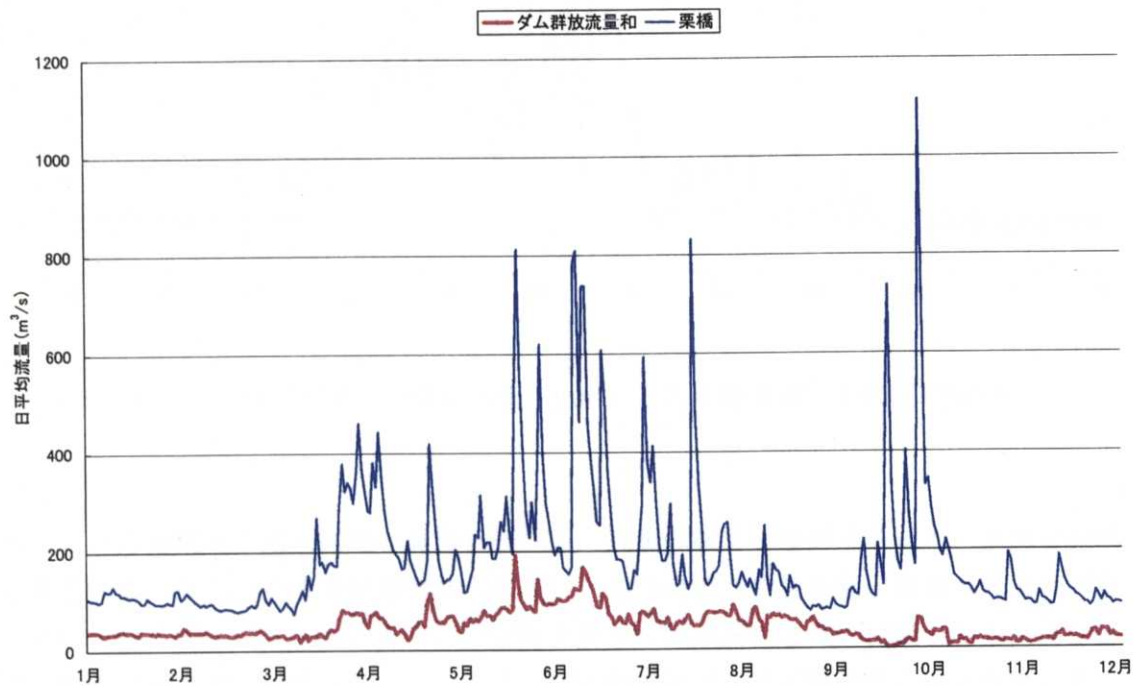


図 3 - 1 7 栗橋流量と上流ダム群放流量の関係 (1992 年)

表 3-4 烏川の流量観測所間の相関係数 (1995 年)

塗りつぶしセルは 0.98 以上

	上里見	安中	上里見+安中	高松	岩井	高松+岩井	岩鼻
上里見	1.000	0.928	0.977	0.967	0.877	0.946	0.871
安中	0.928	1.000	0.987	0.978	0.894	0.959	0.903
上里見+安中	0.977	0.987	1.000	0.991	0.903	0.970	0.905
高松	0.967	0.978	0.991	1.000	0.913	0.980	0.897
岩井	0.877	0.894	0.903	0.913	1.000	0.975	0.901
高松+岩井	0.946	0.959	0.970	0.980	0.975	1.000	0.919
岩鼻	0.871	0.903	0.905	0.897	0.901	0.919	1.000

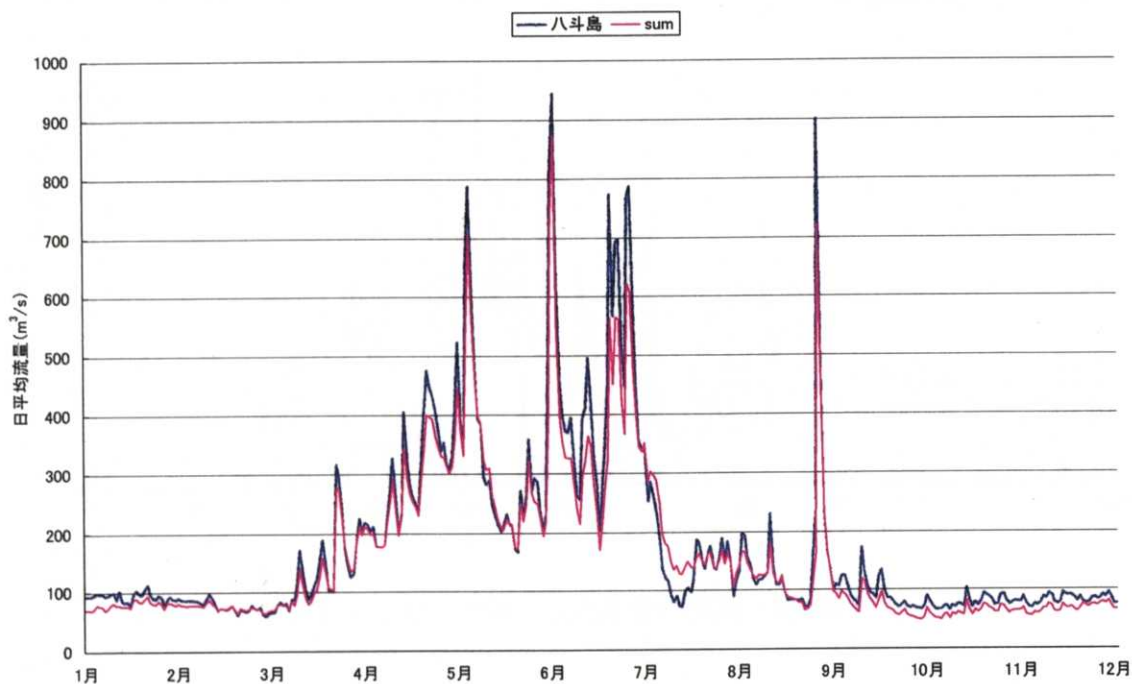


図 3-18 岩鼻+若泉+上福島流量 (sum) と八斗島流量の比較 (1995 年)

次に、水力発電所の減水区間の実態を調べる。流量の収支を検討するため、支川合流前後に着目する。片品川合流点は発電減水があり、烏川合流点や渡良瀬川合流点はそれがない。烏川合流点では表 3-4 のように上里見と安中の和が高松と高い相関をもち、高松と岩井の和が岩鼻と高い相関をもつというように変動特性は合流前後で整合がとれている。また図 3-18 をみるとわかるように合流前の各川の流量を足し合わせると合流後の流量とほぼ等しくなっている。渡良瀬川でも同様に、表 3-5 のごとく栗橋流量は合流前の流量を足し合わせたものと相関が高い。

表 3-5 渡良瀬川流量（藤岡+中里+乙女の値）との相関係数

	1997年	1996年	1995年	1994年	1993年
栗橋と	0.932	(欠測)	0.927	0.939	0.958
川俣と	0.626	(欠測)	0.842	0.875	0.880

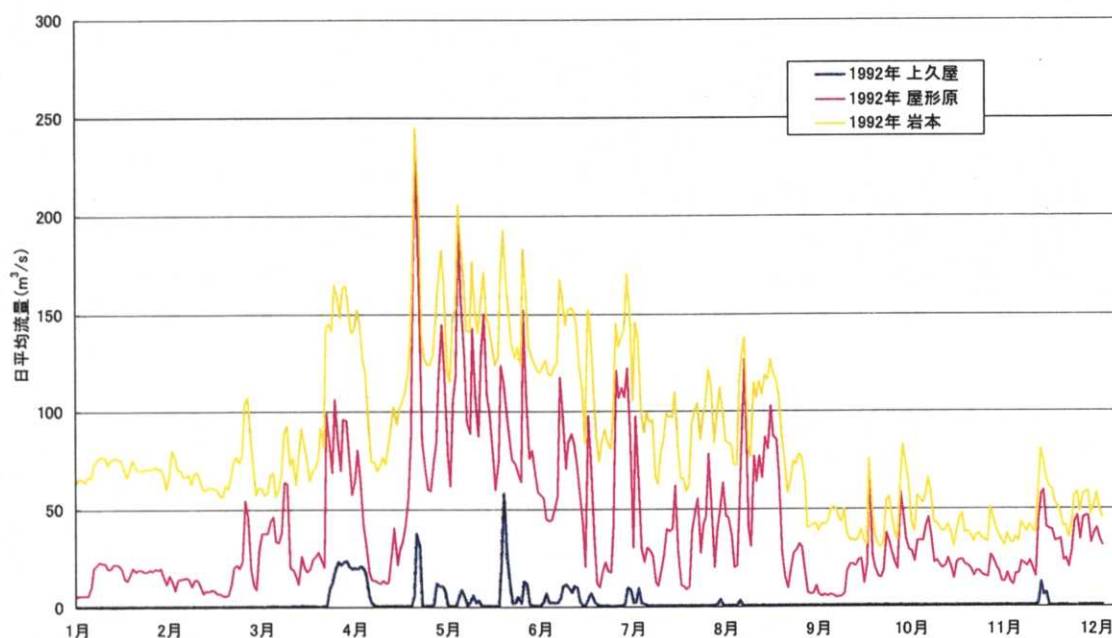


図 3-19 片品川合流前後の流況（1992 年）

ところが片品川合流点では、図 3-19 のように上久屋の流量がきわめて小さくなっており合流が本川にほとんど影響を与えていない。屋形原と岩本は連動して上下している（相関係数 0.90 前後）が、その差は大きい。そこで、伏田発電所の使用水量を上久屋流量に加え、岩本発電所の使用水量を屋形原流量に加えると図 3-20 が得られる。これで収支の整合がとれるのは図 3-21 の散布図に示した通りである。横軸が水力発電使用水量を加えた合計値、縦軸が岩本流量である。同じことは赤谷川合流点でもみられる。結局、水力発電が減水の最大の原因者であって、減水区間解消のためには発電放流以外の手だてがないことがわかる。

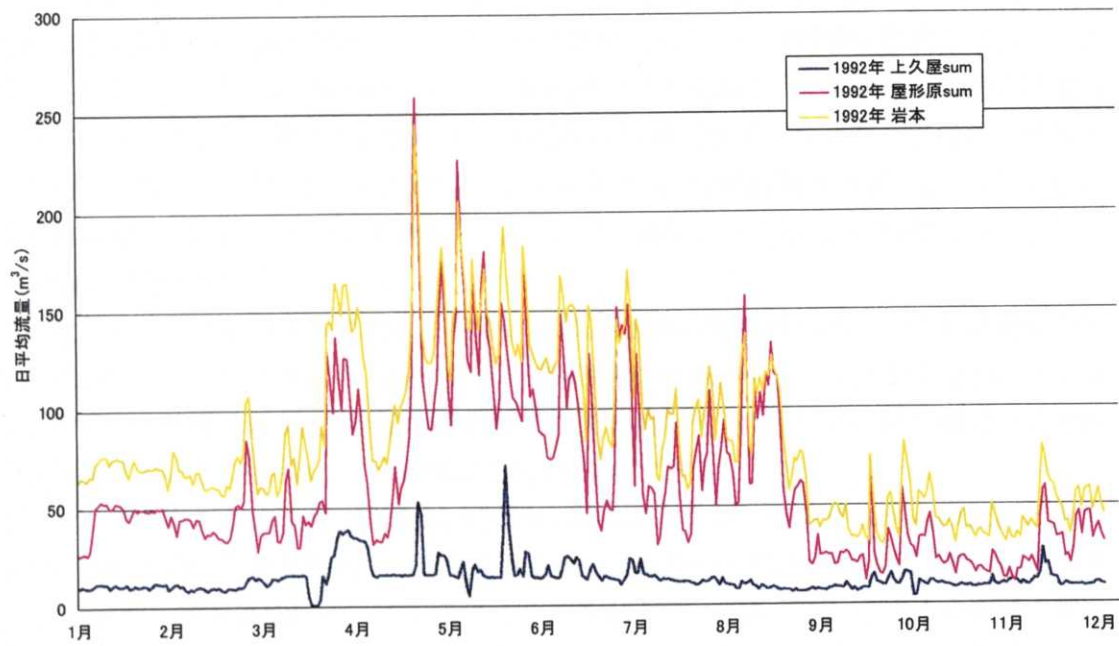


図 3-20 発電用水を戻した片品川合流前後の流況 (1992 年)

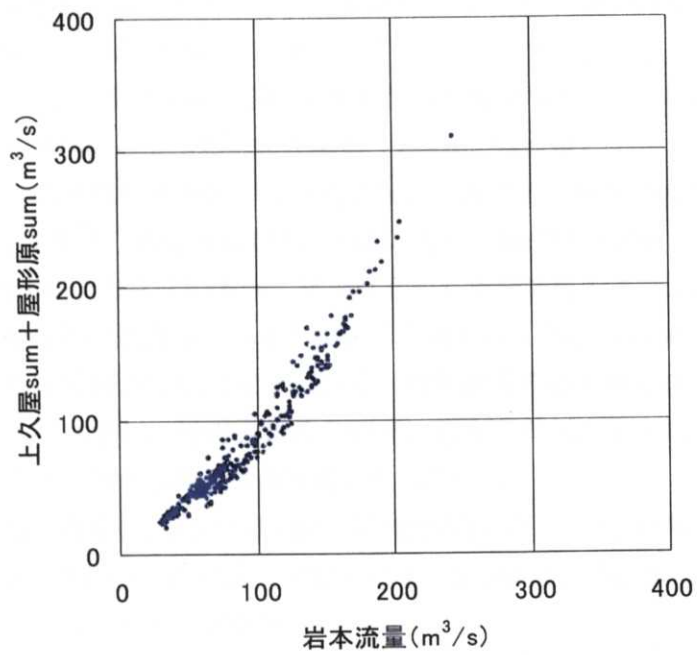


図 3-21 発電用水を戻した片品川合流前後の流量

水力発電使用水量のデータをダムや流量観測所のデータに加えて奥利根流域での流量バランスを検討してみると、図3-22のようになる(1992年)。最上流にある矢木沢ダム(流域面積167km²)では年間約400百万m³の水が流入し、ほぼ同量を放流している。この量は流出高にすると約2,500mmになり、各地点中最大である。矢木沢ダムの下には須田貝ダムがある。須田貝発電所での使用水量は720百万m³である。矢木沢と須田貝の差の半分は奈良俣ダムからの合流量で説明できる。奈良俣ダム(流域面積95km²)は117百万m³の流入量に対し151百万m³を放流している。奈良俣からの放流量は流出高にすると1,588mmにすぎない。

須田貝からの水は藤原ダムに流れこむが、ダム湖上流に取水堰があり、水上発電所の使用水がここからバイパスされる。藤原ダム(流域面積401km²)への流入量が684百万m³で水上発電所の使用水量が221百万m³なので、その合計たる905百万m³が藤原ダム地点での自然流量ということになる。流出高は2,256mmである。

藤原ダムそのものが水上発電所の減水区間に入っているが、藤原ダムからの流出は水上発電所に達する前に上牧発電所によって取水される。藤原からの流出量684百万m³のうち547百万m³が上牧発電所に行っているので、この取水点(小森ダム)と水上発電所の間は二重に減水区間になっており水が大きく減っている。水上発電所から少しいくと湯檜曾川が合流するが、この周辺で小松発電所が取水する。小松発電所の使用水量は187百万m³である。こうして再び二重減水区間に入り、水上町の中心部にある湯原地点での流量は648百万m³になっている。湯原の流域面積560km²で割ると流出高1,157mmとなり明らかに小さいが、上牧と小松の使用水量を加えると2,466mmとなり妥当な値といえる。すなわち、この区間では自然流量の半分が発電により減水している。

湯原の下流5kmほどで上牧発電所と小松発電所からの放流があいついで流入するが、すぐに岩本発電所の取水口があって水量はまた減る。さらに5kmほど下ったところで赤谷川と合流する。赤谷川では利根川本流との合流点直前に小袖橋の流量観測点がある。ここの流量は126百万m³である。流域面積が182km²あまり(新治村の面積から推定)とすると692mmと小さい流出高になっているが、相俣ダムから桃野発電所までが減水区間になっているからである。赤谷川の比流量は小さく相俣ダム流入量(150百万m³)が1,355mm、小袖橋ではさらにその半分ほどの値になっている。相俣からの流出量は流入量とほぼ同じで桃野発電所までバイパスされ、桃野発電所の直下に岩本発電所の取水口があるので赤谷川は相俣ダムより下流はほぼ全区間が減水区間となっている。

赤谷川合流後、片品川合流点の前に屋形原の流量観測点がある。1992年の年間総流量は1,339百万m³であり流域面積(981km²)で割ると1,364mmと小さい値になるが、これは岩本発電所へバイパスしているためである。

片品川はほぼ全域が発電減水区間になっている。千鳥発電所のすぐそばに千鳥流量観測所がある。位置関係は未確認だが、発電所の使用水量に比べ観測流量の変動が大きく総量が少ないことから減水区間に立地していると推測できる。発電所の年間使用水量が236百

万 m^3 、流量観測点での流量は 116 百万 m^3 である。千鳥発電所のすぐ下流に取水堰があり、菌原ダムを迂回して岩室発電所に水を導いている。菌原ダムは藤原ダム同様減水区間に立地していることになるが、菌原の水は岩室発電所より下流の白沢発電所までバイパスされている。岩室発電所の使用水量が 330 百万 m^3 、菌原ダム流入量（流出量も同じ）が 228 百万 m^3 である。千鳥地点（流域面積 471km^2 ）で流出高（発電所＋観測流量）を求めると 746mm となり極めて小さい。菌原ダム（流域面積 494km^2 ）への流入量と岩室での使用水量の和を流域面積で割ると $1,131\text{mm}$ となり千鳥での値より大きい。菌原ダム湖にはダム直下で合流する根利川からの取水が入っているためと思われる。菌原ダムと岩室発電所の間は二重減水区間になっているが、岩室発電所地点には上久屋発電所の取水口がある。上久屋発電所は白沢発電所の下流、平出ダムおよび利南発電所のさらに下流にある。上久屋の流量観測所は利南発電所と上久屋発電所の間にあるようだ。整理すると、上流から、千鳥発電所の取水点、千鳥流量観測所、千鳥発電所、岩室発電所取水点、白沢発電所取水点（菌原ダム湖の中）、菌原ダム、岩室発電所および上久屋発電所取水点、白沢発電所、平出ダム（利南発電所取水）、利南発電所、上久屋流量観測所、上久屋発電所、の順に立地している。上久屋地点での観測流量は 83 百万 m^3 で上久屋発電所の使用水量は 349 百万 m^3 である。これを足して流域面積（ 633km^2 ）で割ると 683mm となる。上久屋発電所のすぐ下流から伏田発電所が水を取っている。

片品川合流直後には、3本の流れがある。1つは利根川本川の流れ、1つは岩本発電所使用水（本川と赤谷川から取水）の流れ、もう1つは伏田発電所使用水（片品川から取水）の流れである。岩本流量観測所はこれら3本の流れが合流した地点にある。ここの流域面積は $1,392\text{km}^2$ 、流量は 2,733 百万 m^3 、流出高にして $1,963\text{mm}$ である。

図3-22をみると、河道に匹敵する流量が水力発電所のパイプを流れていることがわかる。まさにもう一本の川があるかのような状態である。

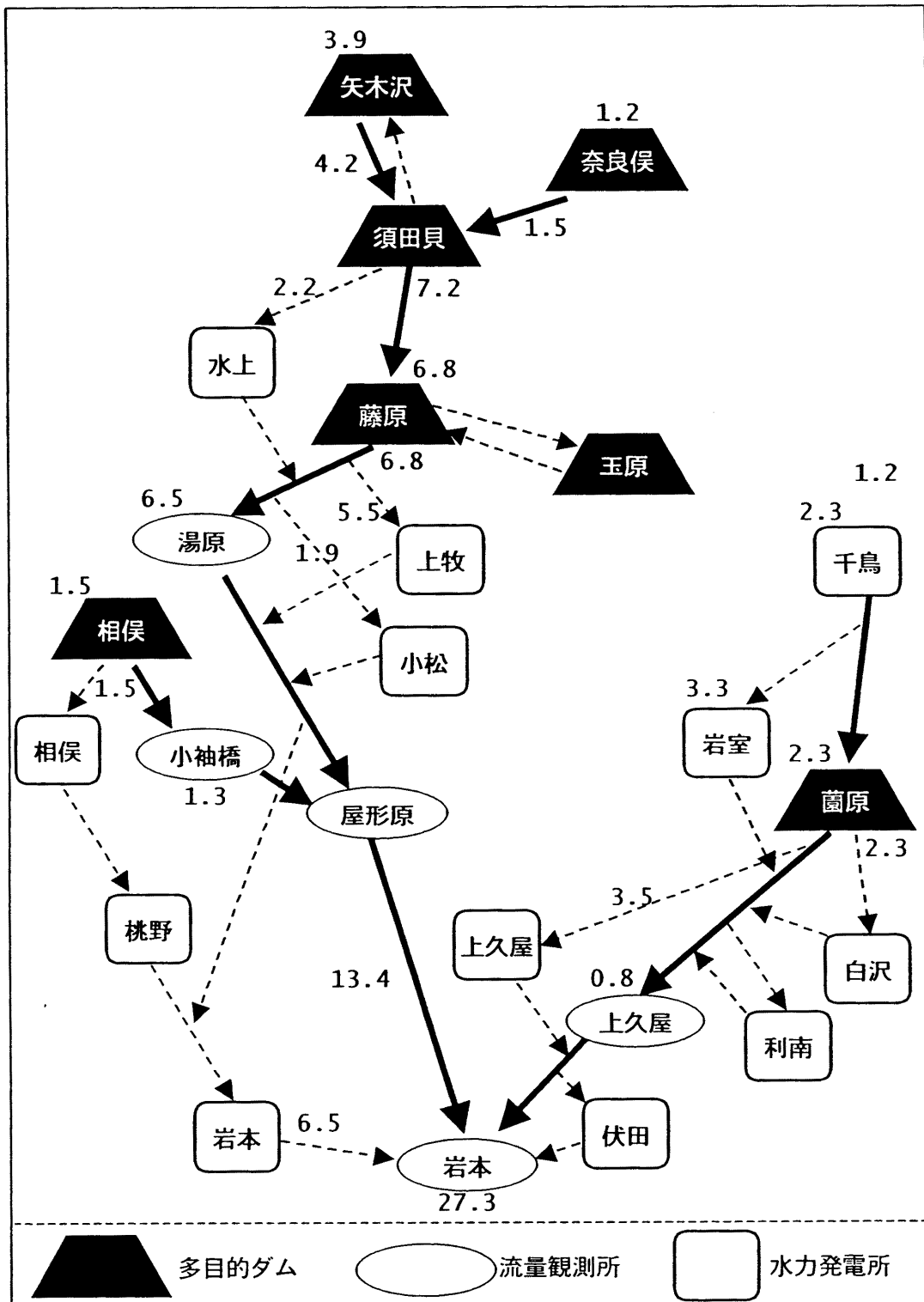


図3-22 奥利根流域の年流量（1992年）

単位は億 m³

(3) 流況の長期変動

次に、人為的影響とくに多目的ダム建設の影響を時系列的に調べる。

図3-23は利根川上流域各地点での流況（豊水、平水、低水、渇水、平均）の長期変動を示したものである。縦軸のスケールは流域面積に比例するようにとってあり、相対的な流量の大小を地点間で比較できる。左の列が本流、右の列は支流である。図3-24には10年移動平均にしたものを示した。

これらの図から人為的影響が加わる前後の変化をよみとっていきたい。1958～59年にかけて藤原ダムと相俣ダムが竣工し、1966～69年にかけて藺原、矢木沢、下久保ダムが相次いで竣工した。やや間があいて1976年に草木ダムが竣工している。また1968年に利根大堰、1970年に群馬用水が完成している。

栗橋地点では1950年代に多かった流量は1960年代からずっと横ばいである。1950年代の多雨傾向が現れている。平均流量は豊水量と高い相関をもち（相関係数0.92、渇水量と平均との相関係数は0.63）、1980年代末からやや増加している。八斗島地点では1950年代に大きく1960年代に小さいのは栗橋と同様ながら1970年代以降少しずつ増えている傾向がみえる。栗橋と八斗島の差は利根大堰で説明できる。栗橋流量と八斗島流量の差をとったものが図3-25であるが、上流にある八斗島の方が流量が大きい日（青色で示される日）があり、それは1970年ごろから急に増加している。4月から6月にかけて多いのも、利根大堰からの農業用水取水の影響と推測される。図3-26はその差の中央値の経年変化を示しているが、1968年に利根大堰が竣工してから小さい値が続くようになった。1970年代以降、八斗島流量が漸増しているのに栗橋流量が不変なのは利根大堰の取水のためと結論できる。

3-3 人間活動による流況変化—利根川上流域の例—

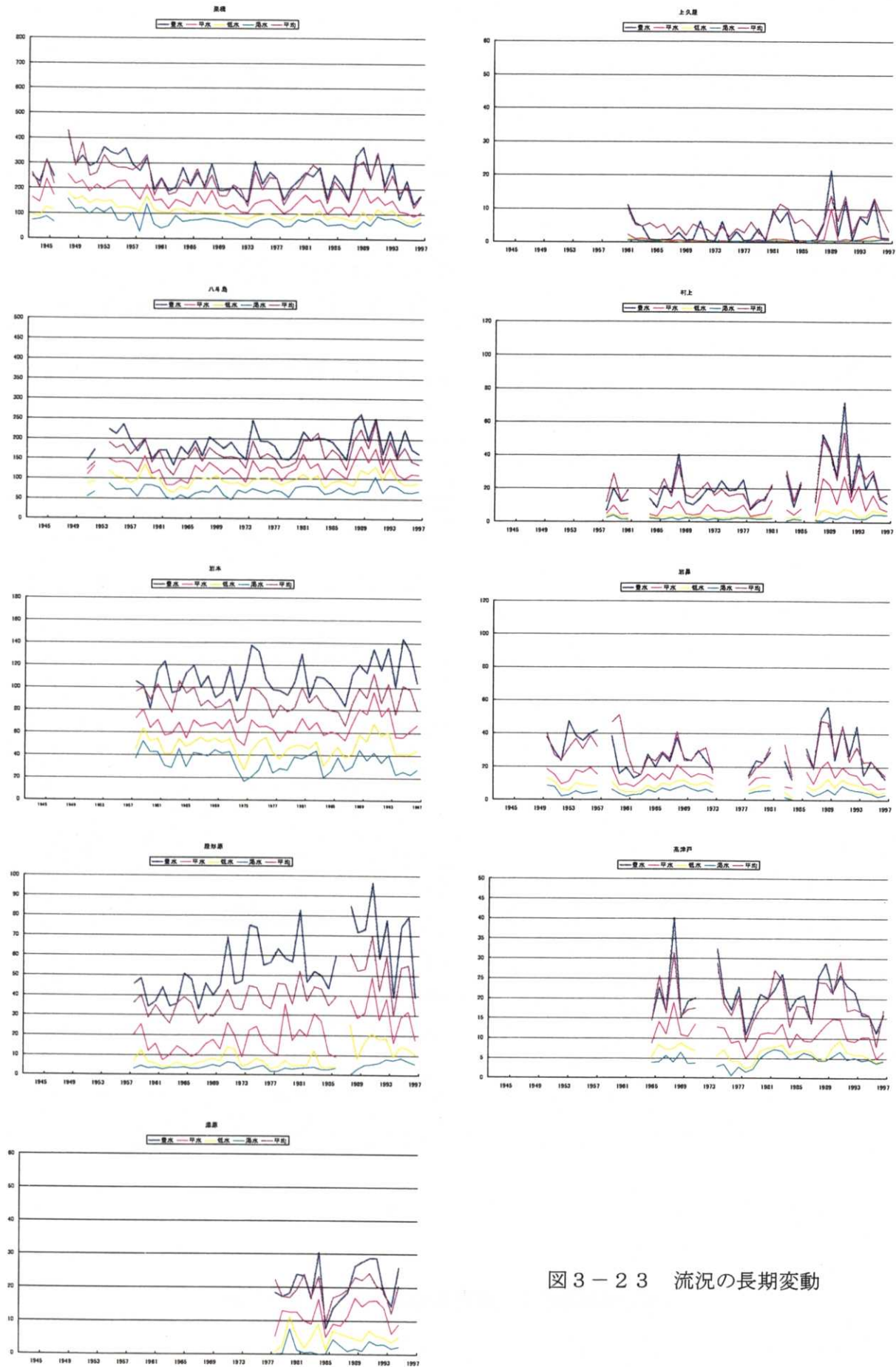


図3-23 流況の長期変動

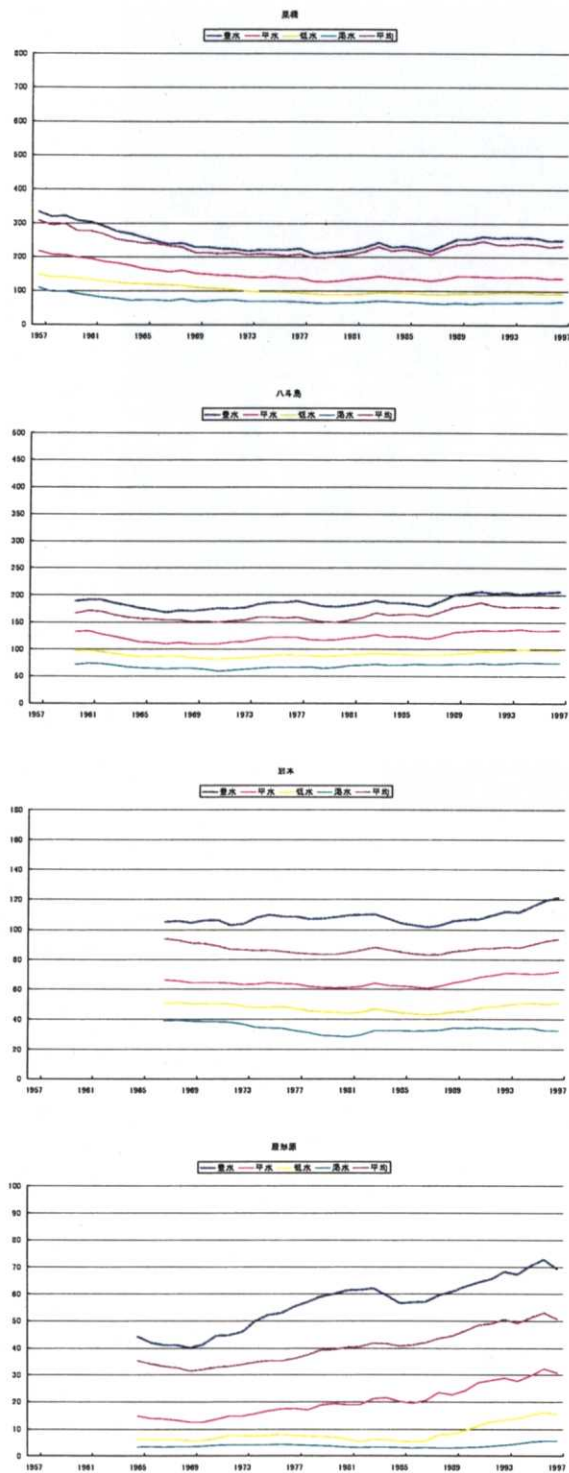


図 3 - 2 4 流況の長期変動 (10 年移動平均)

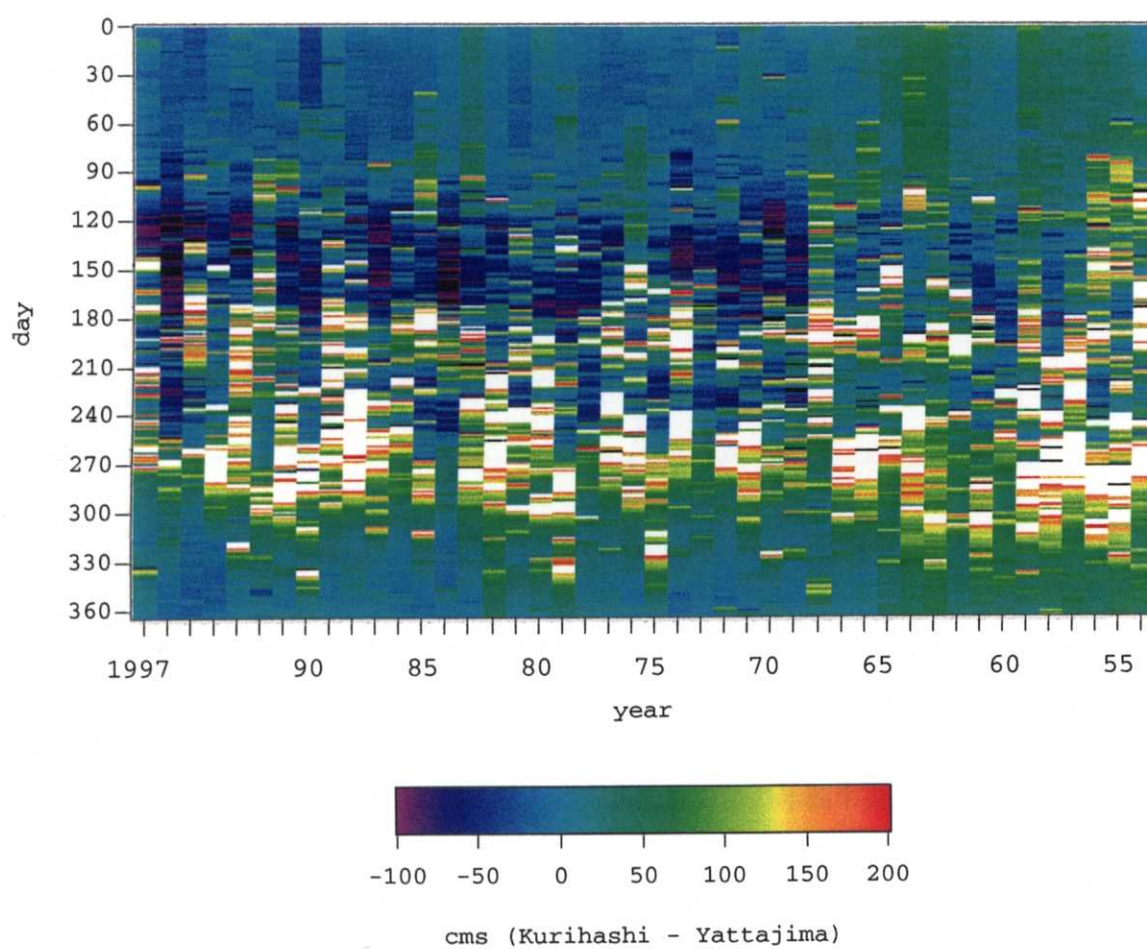


図3-25 栗橋流量と八斗島流量の差（1954～1997年）

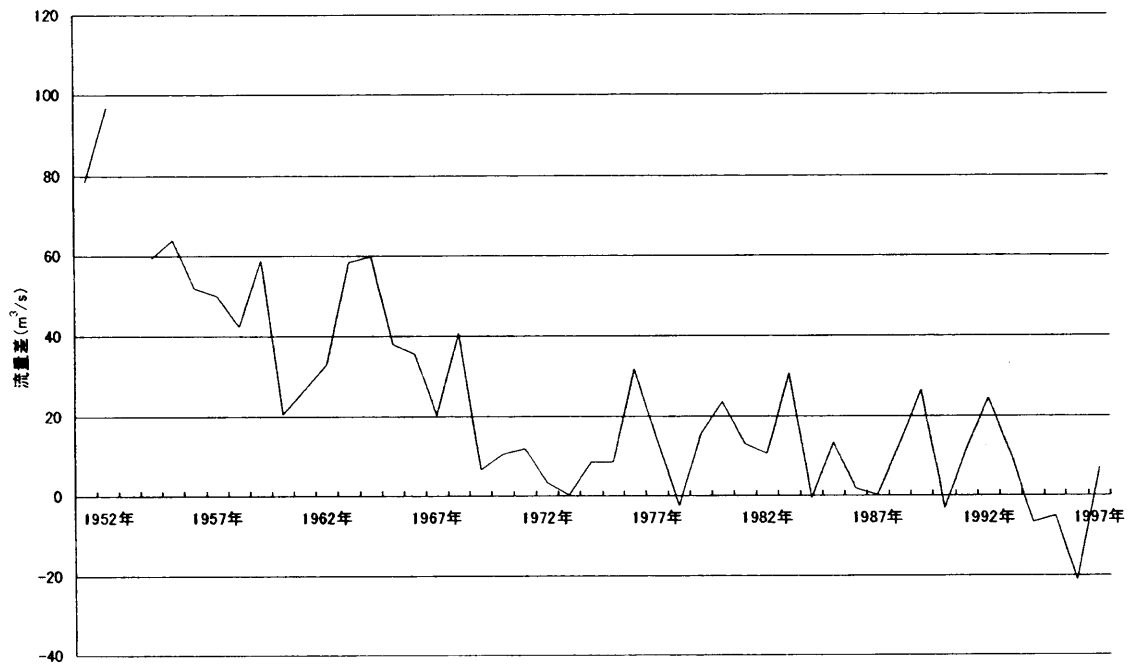


図 3-26 栗橋流量と八斗島流量の差の年間中央値

岩本地点では 1990 年頃までやや減少しているがそれから増えつつある。岩本のすぐ下流には群馬用水の取水堰がある。群馬用水は図 3-27 のように毎年岩本地点流量の 5% ほどを取水している。取水量には図 3-28 にみるごとき明確な規則性がある、6 月～9 月が大きい。取水量の少ない冬季には岩本流量も少ないため割合にすると夏季とそう変わらない。冬場の取水量の約半分を占める上水の取水量は年間を通してほぼ変わらず、残りが農業用水である。坂東合口も同様の季節性をもっていると思われるが、最大水利権量は群馬用水の 3 倍以上と大きい、この二つの堰から取水された水のうち、右岸側で使われた水はほとんどが烏川を經由して八斗島上流で利根川本川に戻るが、左岸側に引かれた水はほとんどが八斗島下流まで行かないと利根川に還流しない。群馬用水が 1970 年に完成、坂東合口の第 1 期改良が 1966 年に完成（第 2 期は 1978 年、合口そのものは 1951 年）している。つまり、岩本地点の流量はこれらの農業用水を含むが八斗島の流量はこれらを含んでいない。

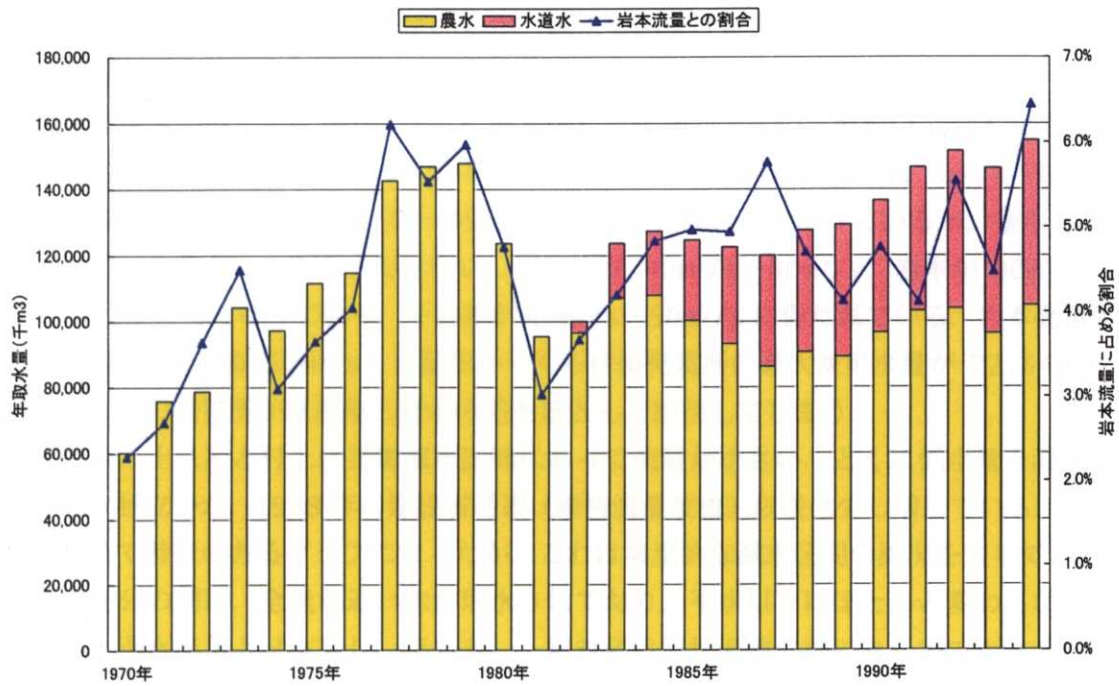


図 3 - 2 7 群馬用水の取水量

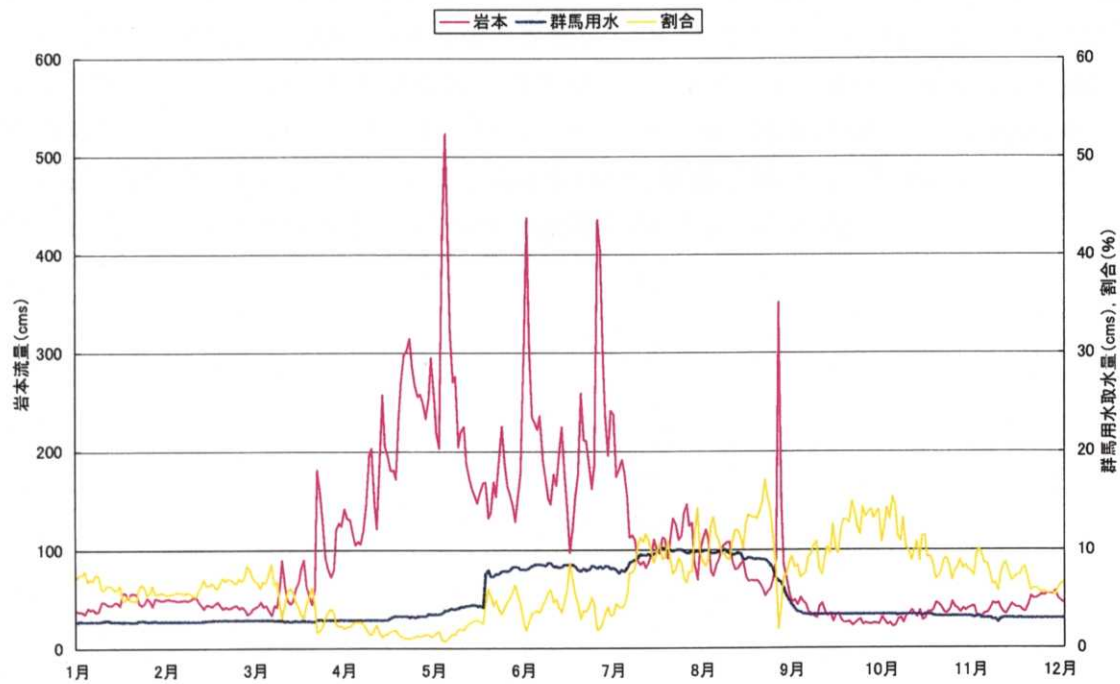


図 3 - 2 8 群馬用水取水量と岩本流量の季節変動 (1995 年)

屋形原地点の流量は明確に増えているが、低水や渇水は最近になるまで増加が明瞭でない。屋形原は岩本発電所の減水区間にある。岩本発電所が工事等で取水量を減らすと屋形原の流量が増大することになり、とくに渇水時には影響が大きい。屋形原と岩本を比較すると、絶対量が比でなく差になっている。すなわち、渇水量は屋形原では $3\text{m}^3/\text{s} \sim 6\text{m}^3/\text{s}$ 程度なのに対して岩本では $30\text{m}^3/\text{s} \sim 45\text{m}^3/\text{s}$ と 10 倍程度大きくなっているが、豊水も 10 倍になっているかというところではない。屋形原が $40\text{m}^3/\text{s} \sim 80\text{m}^3/\text{s}$ 、岩本が $90\text{m}^3/\text{s} \sim 130\text{m}^3/\text{s}$ 程度の値になっており、その差が $40\text{m}^3/\text{s} \sim 50\text{m}^3/\text{s}$ に保たれている。岩本発電所の最大使用水量が $30.50\text{m}^3/\text{s}$ 、片品川からくる伏田発電所の最大使用水量が $22.54\text{m}^3/\text{s}$ と、この二つの発電所が屋形原と岩本の差をほとんど説明してしまう。

支流では、上久屋と村上是発電減水区間にあって流量が小さい。とくに低水量と渇水量の小ささが目立つが、1988 年の建設省通達（維持流量放流）以後は少し増えている。上久屋はきわめて特徴のあるグラフになったが、これは典型的な減水区間の流況を表している。年間の大部分の期間、全量に近い水が取水されており、平水以下はほとんど変わらない。豊水でさえ渇水流量とほぼ等しい年も多い。絶対量は流域面積の割にきわめて小さく、川の「格」に比して貧弱な水しか流れていない。すでに 40 年以上この状態が続いているため、川の生態系もこの小さな流量に応じたものができあがりつつあるだろう。この図からもわかる通り、片品川の合流は本川の流量にほとんど影響を与えていない。むしろ、この地点をバイパスして本流に放流する伏田発電所の使用水量が岩本地点に影響が大きい。

以上のような流量の長期変動を流量差累加曲線を使ってまとめたものが図 3-29 である。流量差累加曲線は平均値との差を年々累加していったもので、上が平水量、下が渇水量のグラフである。各地点の標準偏差で無次元化してある。平水量は全地点ほぼ共通に 1960 年ごろから 1985 年ごろまで下がりつつづけている。唯一高津戸地点だけは 1975 年ごろまで上がり、そこから下がっている。渇水量はやや様相を異にし、各地点でばらついた動きをしている。岩本や屋形原では 1970 年前後にピークがきている。

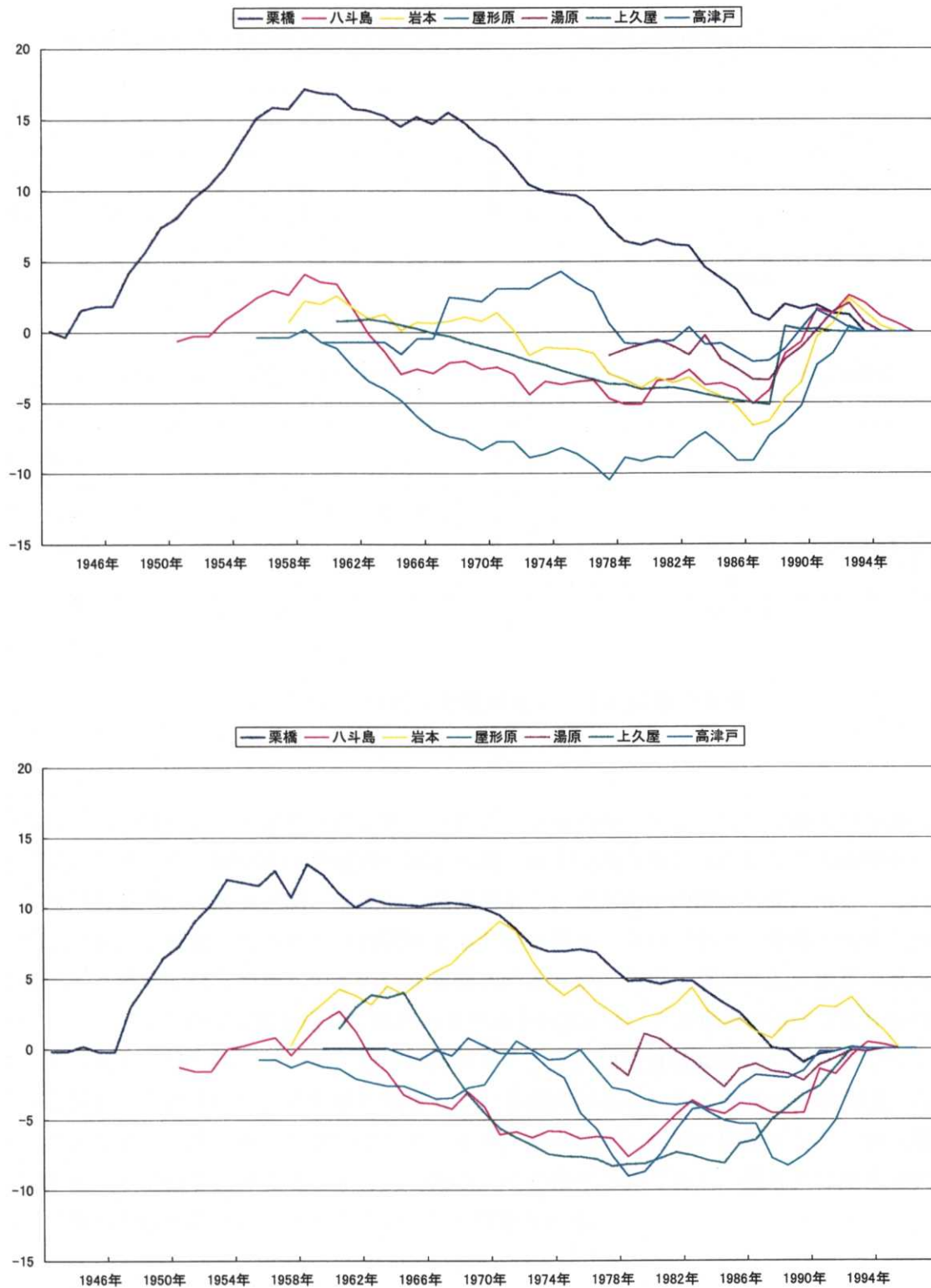


図3-29 流量差累加曲線（上が平水量，下が湧水量）

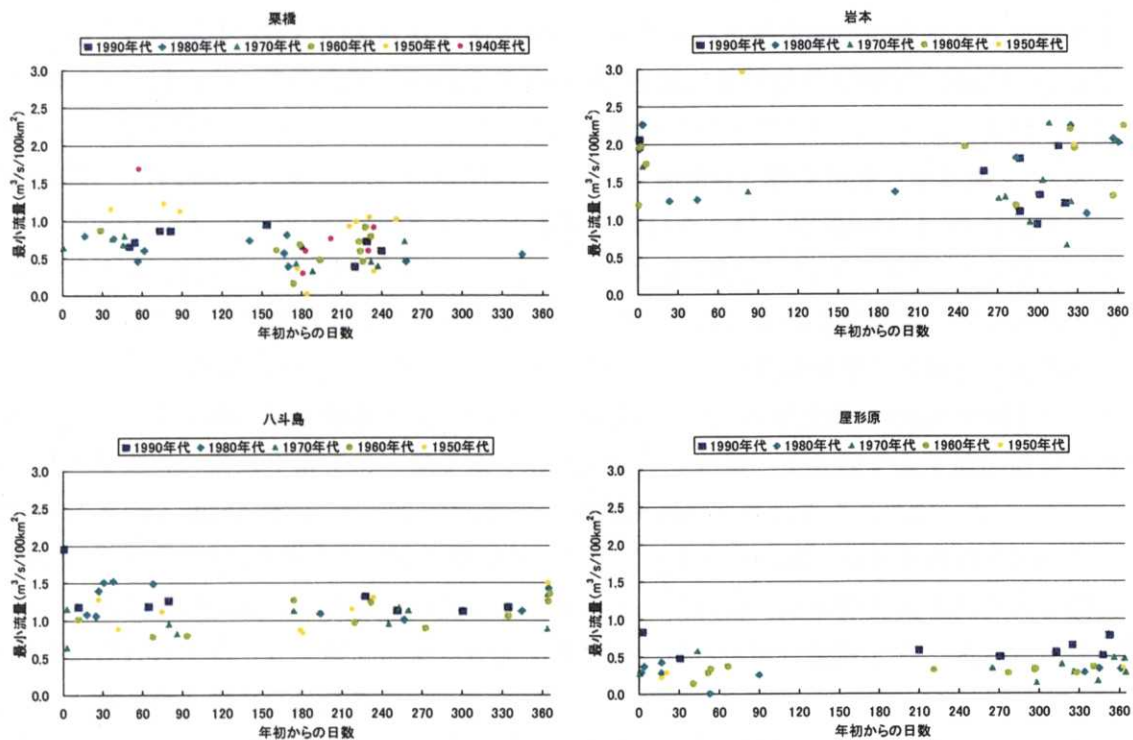


図 3-30 年最小流量発生日とその流量の変遷

環境用水が最もクリティカルに必要とされるのは渇水時である。そこで渇水の特徴の時系列変化を調べる。屋形原は発電所の減水区間、岩本は減水なし（ただしダム調整あり）、八斗島は農業用水の減水区間、栗橋は（農業用水と）都市用水の減水区間にある。これらの地点で年最小流量とその発生日の関係をみたのが図 3-30 である。栗橋では冬より夏に発生する渇水のほうが厳しいものになる傾向があるが、利根大堰の完成以来夏の渇水は減っている。八斗島は年間を通じて差があまりみられないが、ダム群建設後の 1970 年代以降は夏の渇水がやや減っている。岩本は秋に多く、ダム建設後流量がやや小さくなっている。屋形原は冬に多いが、近年逆に増加している傾向がみられる。栗橋は利根大堰、八斗島はダム群により夏の渇水が緩和されているが、岩本はダム調節の影響を受けて秋（夏期制限水位から水位を上昇させていく）の渇水がやや強化されており、屋形原は発電放流の効果で渇水が緩和されているのではないかと推察される。

多目的ダムの建設前後に的を絞り、神流川の下久保ダムと渡良瀬川の草木ダムで流況変化を調べた江村らの一連の論文 (Tamai & Emura 1996, 江村ほか 1997, Tamai et al. 1997, 江村 1997) がある。そこでは主に流量変動の変化を抽出しようとしており、自己相関係数、中小洪水の生起回数と持続期間、COV (変動係数、標準偏差/平均値)、歪度、flow duration curve 等の指標を用いて解析している。自己相関係数は 90 日前後のピークが消え 0 になるまでの日数が短くなったことが見出された (草木ダム)。3 ヶ月ピークは融雪—梅雨—台風のサイクルに相当するので、ダム建設により洪水が減ったことを示唆している。年間 60 番目流量を基準にとった中小洪水の生起回数は栗橋で不変だが高津戸では減った。非洪水期の生起間隔は長くなった。高津戸ではダム建設後に COV が増えたことも示されており、変動平滑化と一見矛盾する結果が出ている。下久保ダム下流の若泉では建設後に flow duration curve が曲折し、対数正規から外れるようになった。

Chavalit (1998, 未発表) は屋形原地点において矢木沢ダム建設前後の流況を調べている。そこでは建設前後にあまり差が見られなかった。これは、屋形原と矢木沢ダムの間に藤原ダムが存在すること、屋形原地点が水力発電所の減水区間に位置することから影響が出にくくなったものと思われる。

藪原、下久保、草木の各ダムで建設前後に下流地点で流況がどう変わったかを示したのが図 3-31 である ((建設後流況-建設前流況)/建設前流況)。藪原ダムでは上久屋地点で 1961~65 年と 1967~97 年を比較、下久保ダムでは若泉地点で 1951~60 年と 1983~95 年を比較、草木ダムでは高津戸地点で 1960 年~1975 年 (のうち 10 年間) と 1977~97 年を比較している。豊水以上の流量はおおむね減っており、これは洪水調節をしていることに対応する。豊水付近が増えているのは流量を補給していることに相当するだろう。しかし平水から低水は 1 割から 3 割減っている。建設前後の比較にはデータの制約がある (建設前の流量データが少ない) ので、流入量と放流量を用いた比較検討を次に行う。

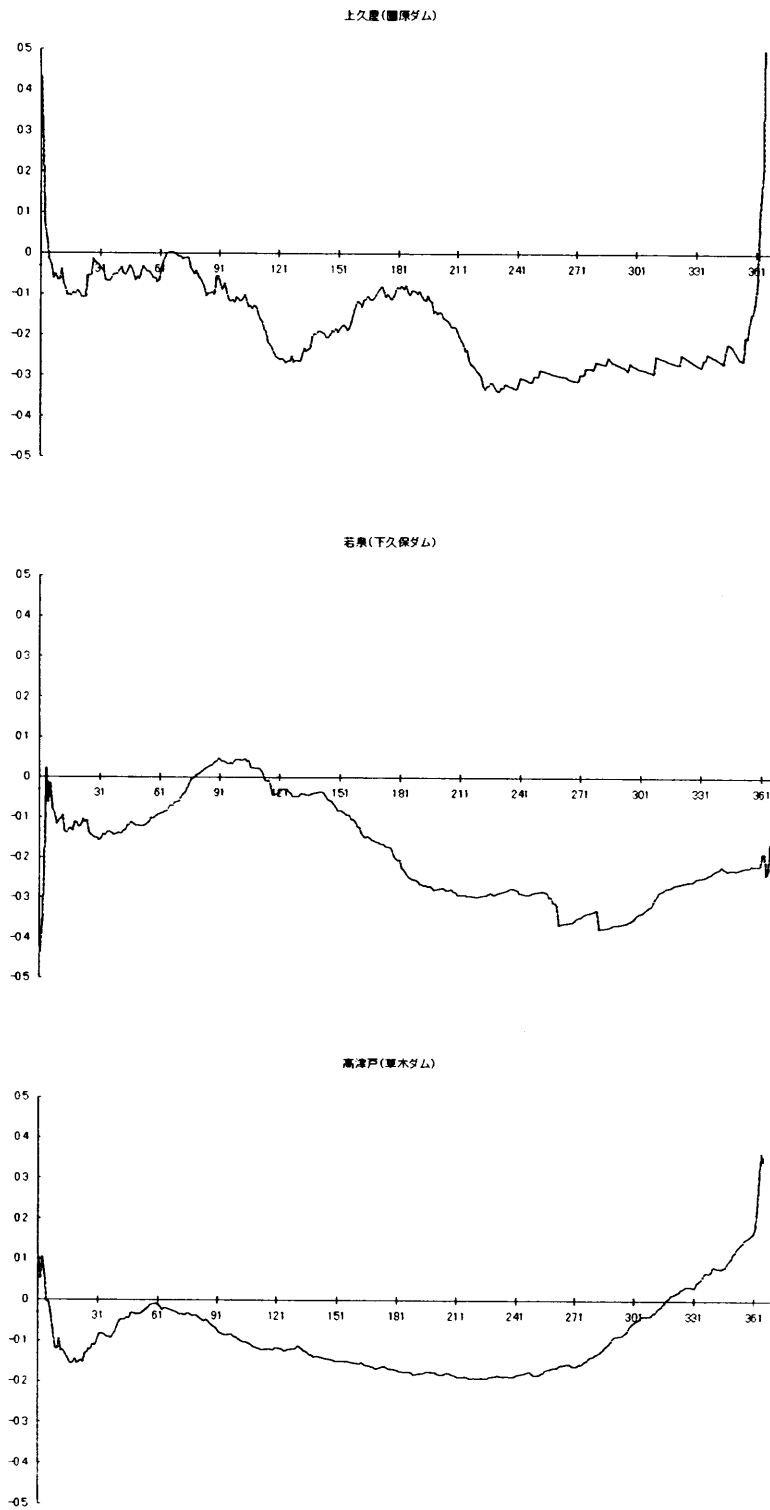


図 3-31 ダム建設後の流況変化

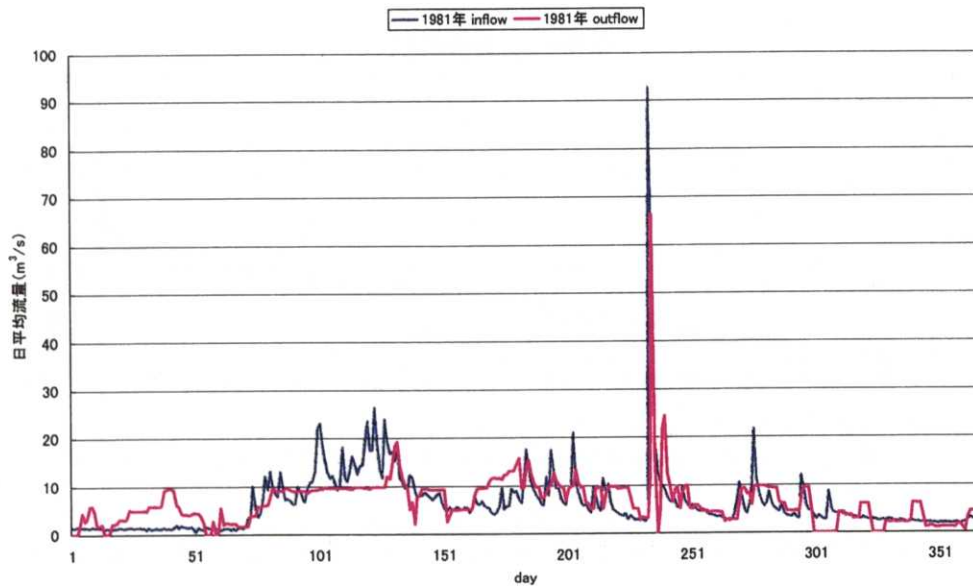


図 3-3-2 ダムの流入量と放流量（相俣ダム，1981 年）

（4）ダムと水力発電所による流況変化

ダムの流入量と流出量を比較するにあたり、資料として用いるのは多目的ダム管理年報である。この資料では、流出量と貯水池水位を計測し、そこから収支があうように流入量を計算している。実際にはダム湖面からの蒸発量や地下への浸透量があるはずだが、明示的には考慮されていない。湖面からの蒸発量を見積もってみると、年蒸発量を 500～1,000mm とするなら（竹内 1996, p92, 近藤 1989）、湛水面積 1km² の湖では（菌原ダム 0.91km², 相俣ダム 0.98km², 下久保ダム 3.27km², 草木ダム 1.70km²）年間 500～1,000 千 m³ の水が蒸発により失われることになる。これを流量に直すと 0.016～0.032m³/s となる。日蒸発量は 10mm を超えるのはまれであろうが、そのとき湛水面積最大の下久保ダムでは 0.38m³/s に相当する水が蒸発することになる。この分だけ流入量は過小評価になっている可能性がある。

多目的ダムの流入量と放流量を比べると、図 3-3-2 のように流入量に比べて放流量は一定の値が続くことが多く、増加・減少が急である。とくに減少時に尾をひかないのが特徴である。流況曲線を描くと図 3-3-3 のようになっており、流量の大きいところと小さいところで減少して中間で増加する傾向がみられる。これは利水ダムの目的から理解できる。図 3-3-1 と同様の図を描くと図 3-3-4 が得られるが、相俣ダムと菌原ダムでは 50 番目以上の洪水流量を減らし、低水付近までは増やし、その下は減らす、という傾向がみられるのに対し、下久保ダムではピークのわずかな部分は減らすそこから 120 番目あたりまでを増やし、300 番目あたりまでを減らしてその下をまた増やしている。いずれも利水流量を 2 割ほど増強しているが、洪水をカットするだけでなく渇水時の流量も減らしてしまっている。

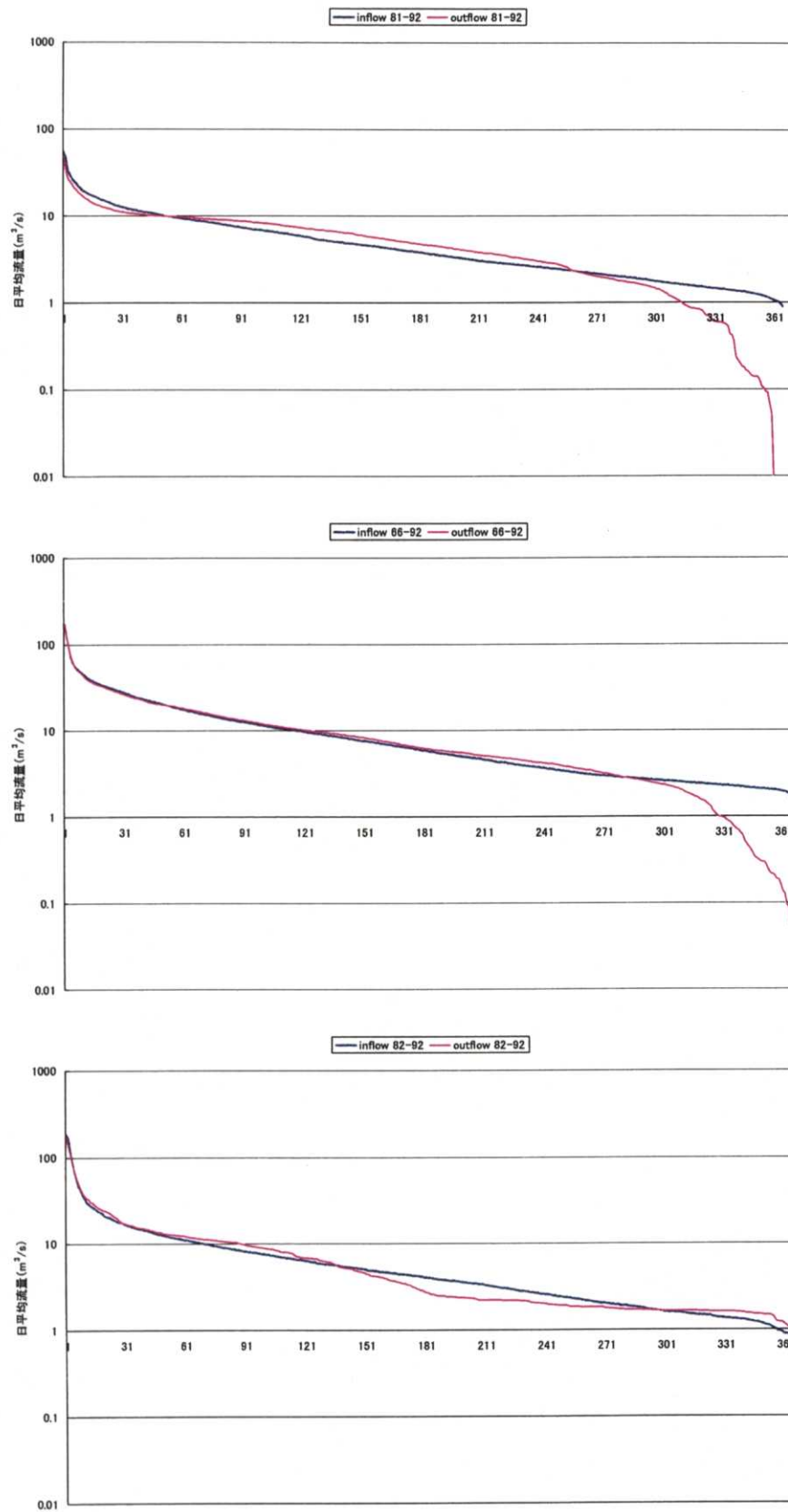


図 3-33 流入・放流量の流況曲線 (上から相俣, 菌原, 下久保ダム)

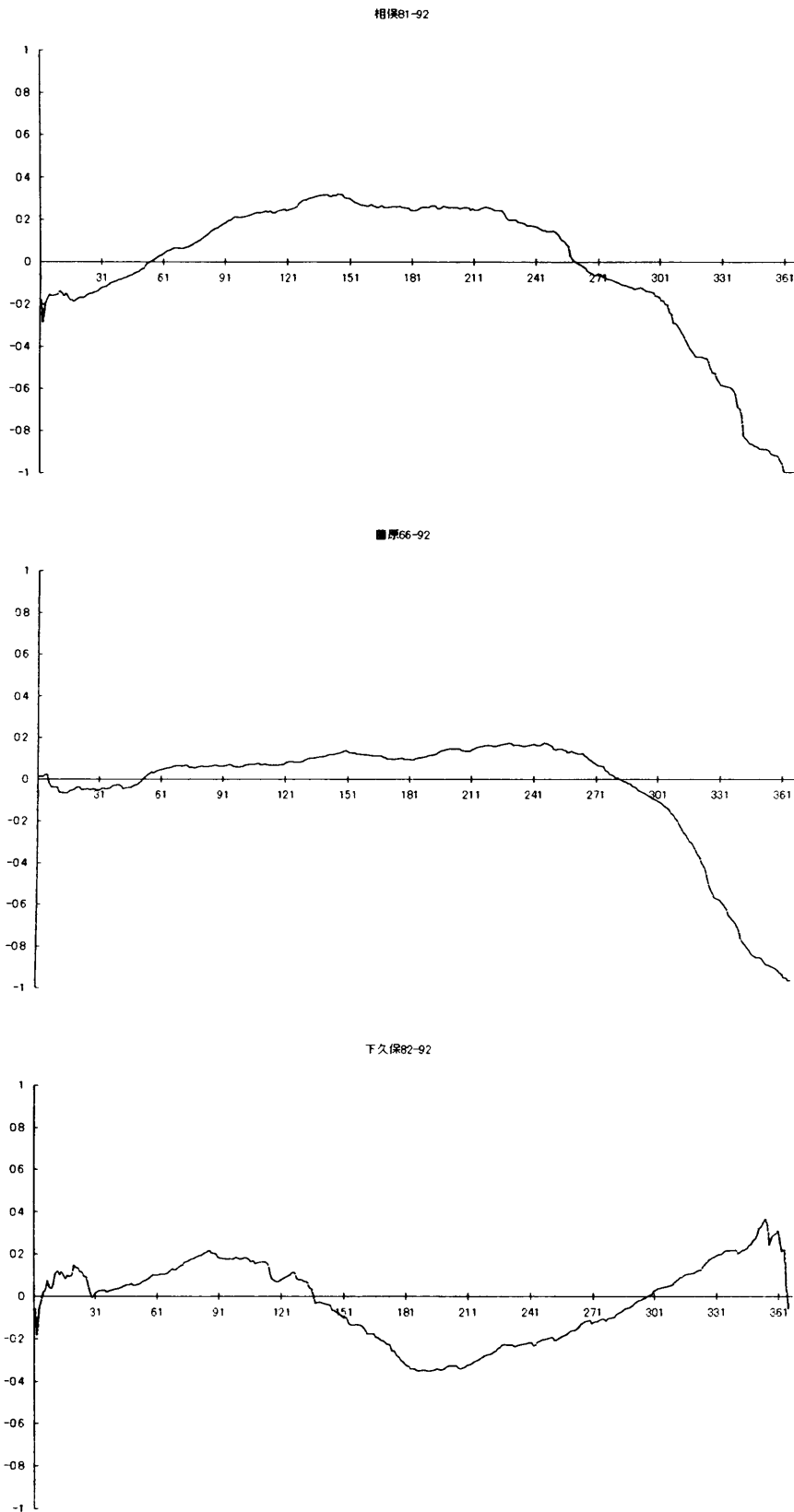


図3-34 ダム操作による流況変化（上から相模，蘭原，下久保ダム）

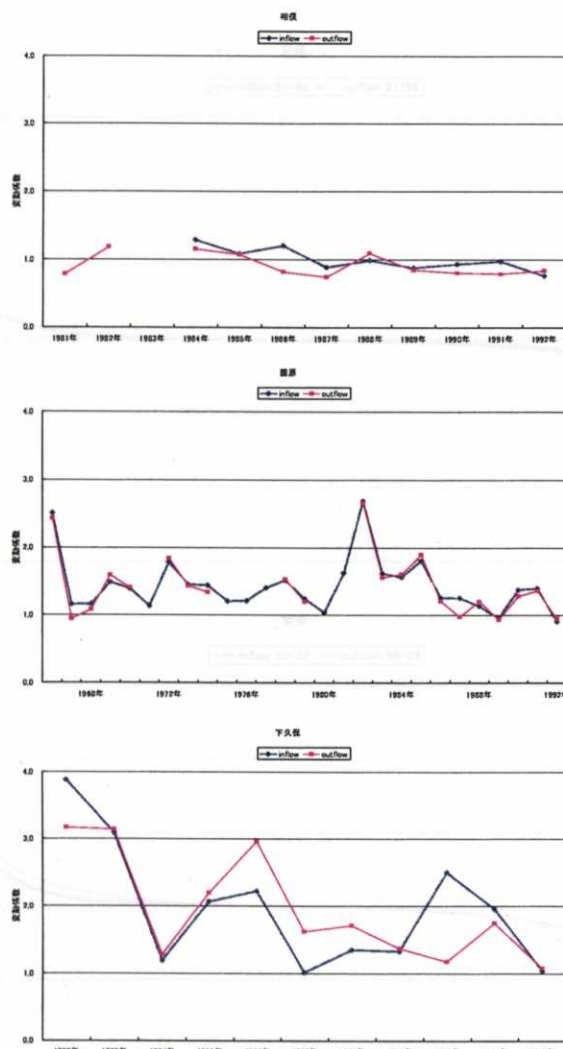


図 3-35 流入・放流量の変動係数（上から相俣，菌原，下久保ダム）

ダムによる流量平滑化を表現できる指標を検討する。変動の程度を表すのによく使われるのが変動係数（標準偏差／平均値）である。図 3-35 をみると、相俣ダムでは放流量の変動係数が小さくなっており平滑化をよく表しているが、菌原ダムではあまり違いがみられず、下久保ダムでは大きくなっている年も多い。一定流量の持続と減衰の速さがダム操作による平滑化の特徴であって河川生態系に与える影響も大きい。変動係数ではそういった時系列情報が消えてしまう。時系列情報を保って平滑化の特性をみるには、図 3-36 のようなグラフを描くとよい。これは前日との差を大きい順に並べかえたものである。ゼロ値の多さと左右の対称性（とくに右側のマイナス部分の形）に注目する。流入量はゼロになる（前日と不変）ことが少なく、増加する日より減少する日が多い（ピークの右裾が長く伸びることに対応する）。放流量はゼロになる日が多く、増加する日と減少する日が同じくらいある。菌原ダムだけは中程度の増加や減少が多くなっているが、これは菌原ダムそのものが水力発電所の減水区間に入っているためである。

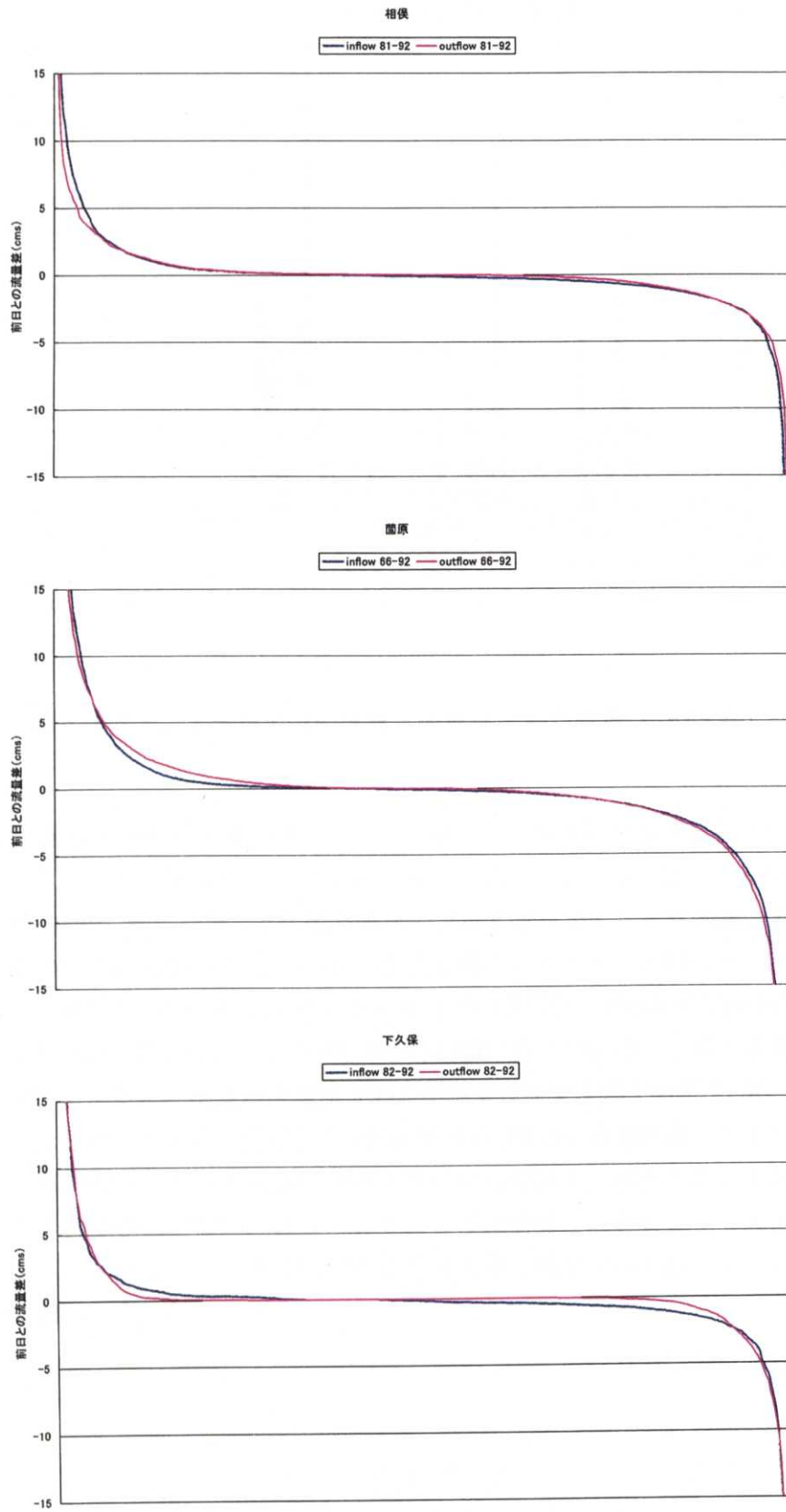


図 3-36 流入・放流量の前日差流況図（上から相俣，菌原，下久保ダム）

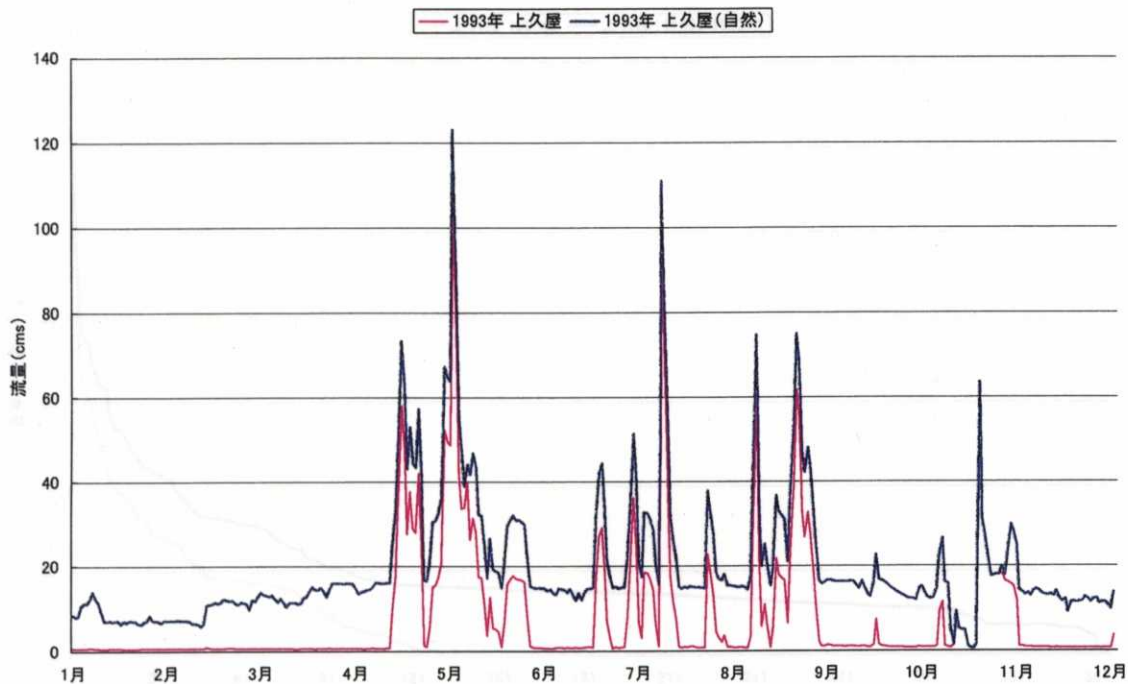


図 3-37 上久屋地点の流量と発電用水戻し流量 (1993 年)

続いて水力発電所の減水区間を調べる。ダム操作では年間総流量は変わらず変動が平滑化されるだけだったが、発電所では平滑化と減水が同時に起こる。図 3-37 は上久屋地点の流量変動 (1993 年) だが、上久屋発電所の使用水量を戻した自然流量に比べて量が減少し、なおかつ細かい変動が消えている。流況曲線にするとともに明白で、図 3-38 のように現実の流量はすべてにわたって小さくなっているほか、1993 年では 120 番目以降、1992 年では 90 番目以降がほとんど一定の小さい値になっている。しかし変動係数 (標準偏差/平均値) をとると、現実の流量は 1992 年が 2.23 で 1993 年が 1.86、発電を戻した潜在的な自然流量は 1992 年が 0.55 で 1993 年が 0.79 と、自然流量の方が小さくなっている。これは標準偏差に比べ平均値の差が大きいからである。減水が起こる場合には変動係数を用いた分析は適切でない。図 3-36 のように前日との差をとって大きい順に並べると、図 3-39 となって多目的ダムのときと同じ傾向がみられ、とくにゼロ値 (前日と不変の日数) が多い。

図 3-38 上久屋地点の流況 (上が 1993 年、下が 1992 年)

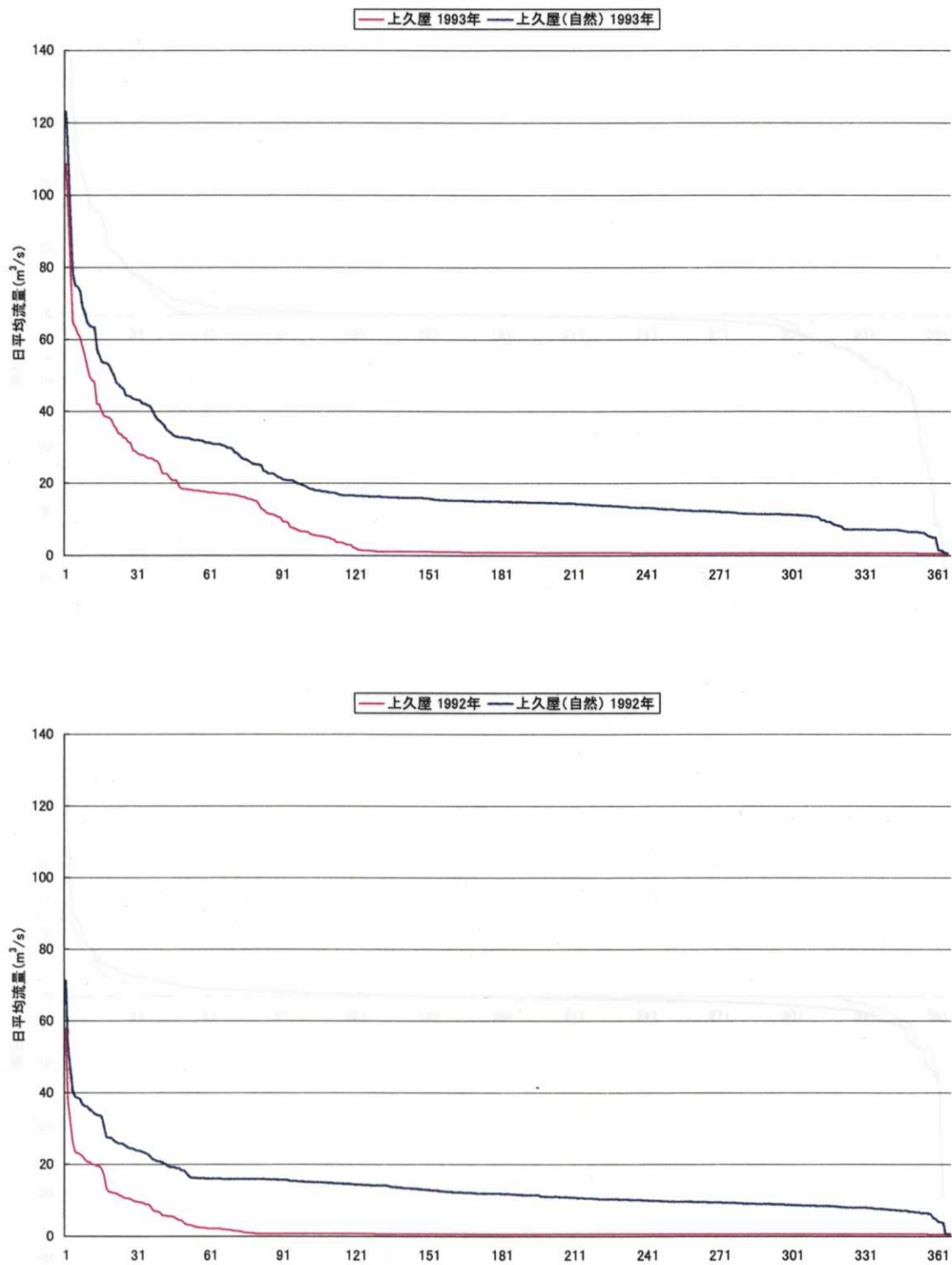


図 3-38 上久屋地点の流況 (上が 1993 年, 下が 1992 年)

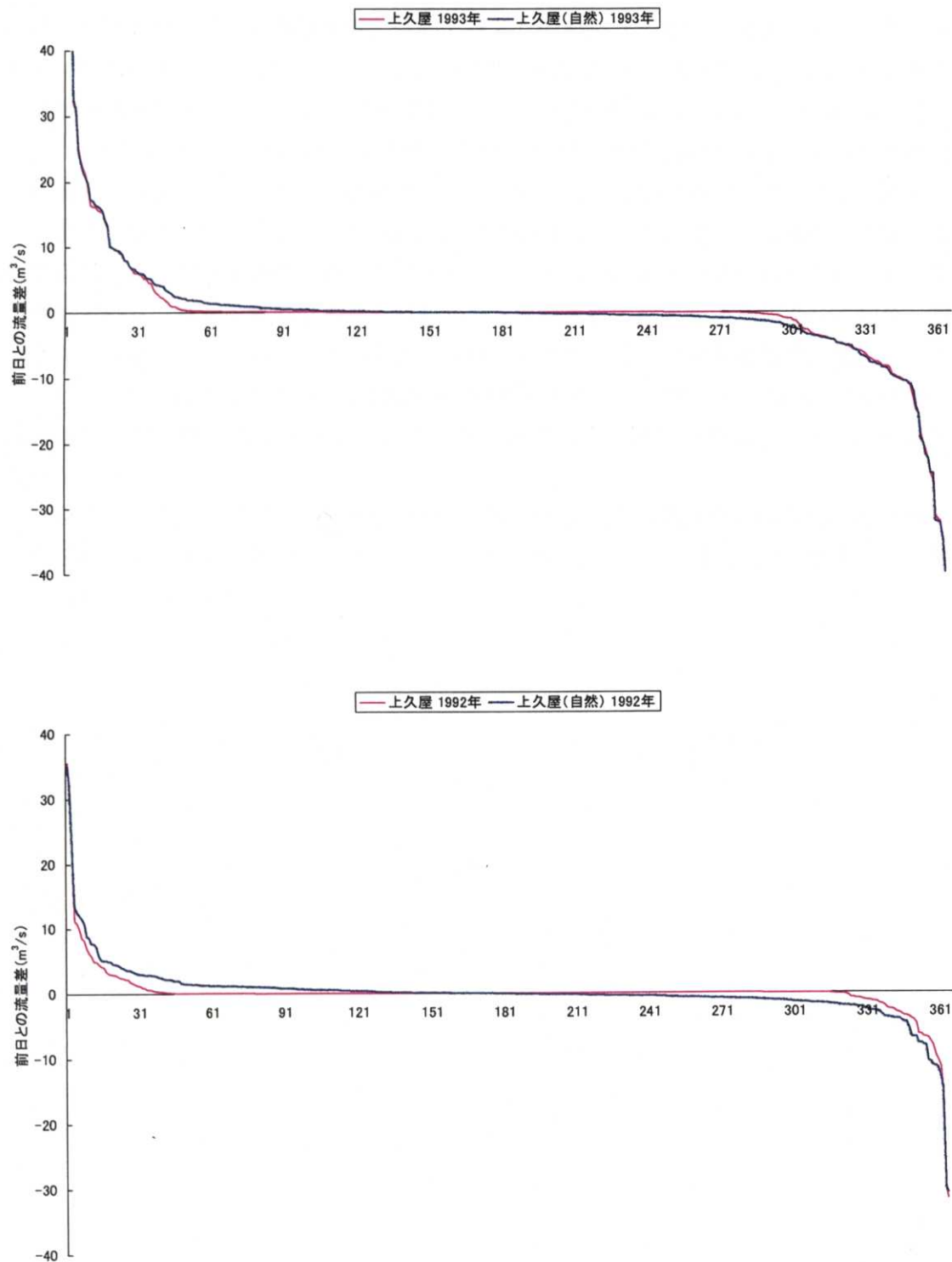


図 3-39 上久屋地点の前日との流量差（上が 1993 年，下が 1992 年）

同様の検討を屋形原と岩本発電所について行ったのが図3-40と図3-41, 湯原と上牧・小松発電所で行ったのが図3-42と図3-43である。岩本発電所では1992年末から1993年初めにかけて工事のため発電しなかった期間があり(1992年は約3ヶ月, 1993年は約2ヶ月半), その期間中は屋形原地点の流量は潜在的自然流量(発電用水を戻した流量)に等しい。こちらの流況曲線では一定値が続く現象はみられず, 図3-2でいう「一定流量取水」型に近い。これは屋形原地点の残流域が上久屋よりも大きく流量が比較的豊富なこと, 岩本発電所で最大使用水量までいっぱいに取り水できる日が多かったことを示唆している。日々の変動は小さくなりつつも保存されて屋形原地点に現れており, 前日差のグラフはほぼ重なっている。上久屋は図3-2でいう「一定流量放流」型になっていて, その差が明確に現れている。流量設備利用率をみると上久屋の72-78%と岩本の68%に大差はないが, 最大使用水量まで取水できた日数は上久屋が44-46日なのに岩本は134-179日もある。

湯原と上牧・小松発電所では, 中間的な状況がみられる。上牧発電所の設備利用率が74%, 小松が54%, 最大使用水量まで取水できた日数は上牧が92日, 小松が133日となっており, いずれも中間の値になっている。

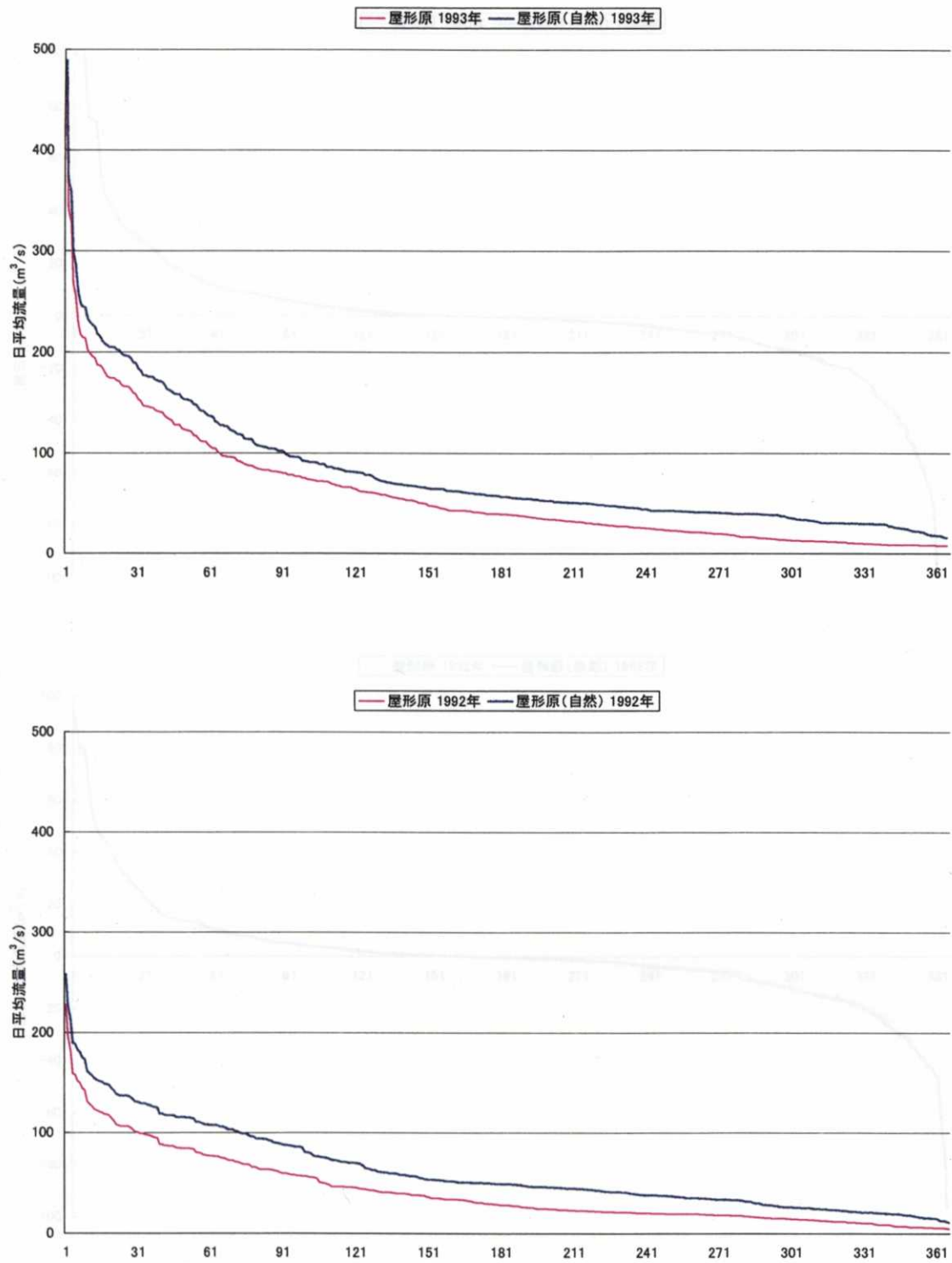


図 3-40 屋形原地点の流況（上が 1993 年，下が 1992 年）

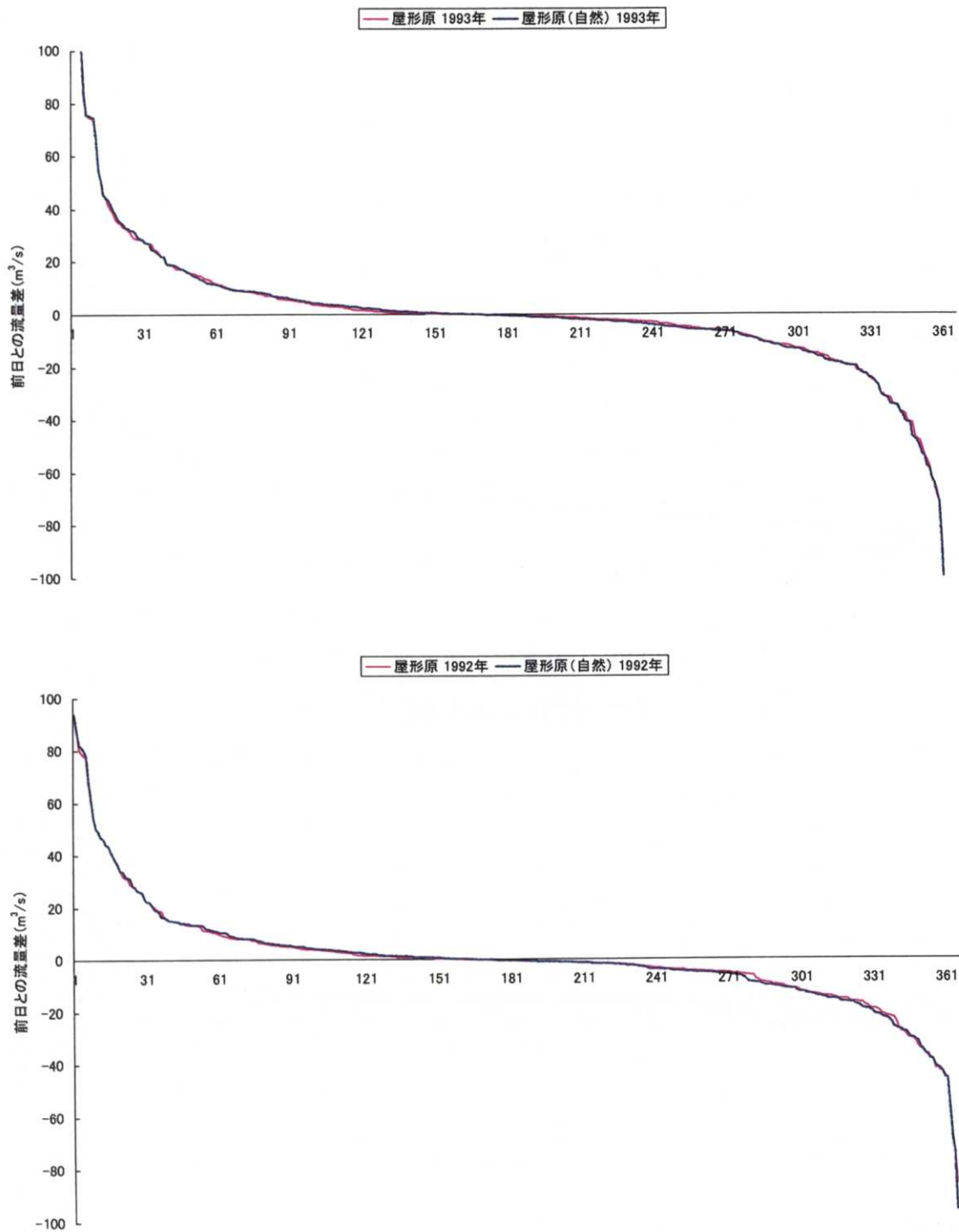


図3-41 屋形原地点の前日との流量差（上が1993年，下が1992年）

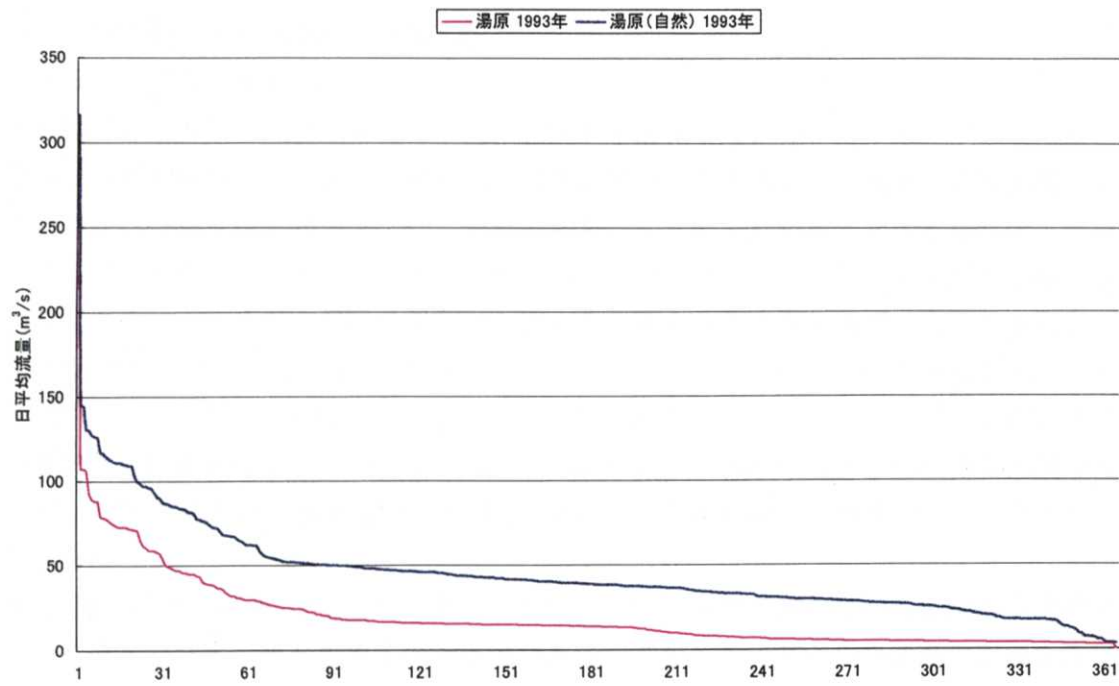


図 3-4 2 湯原地点の流況 (1993 年)

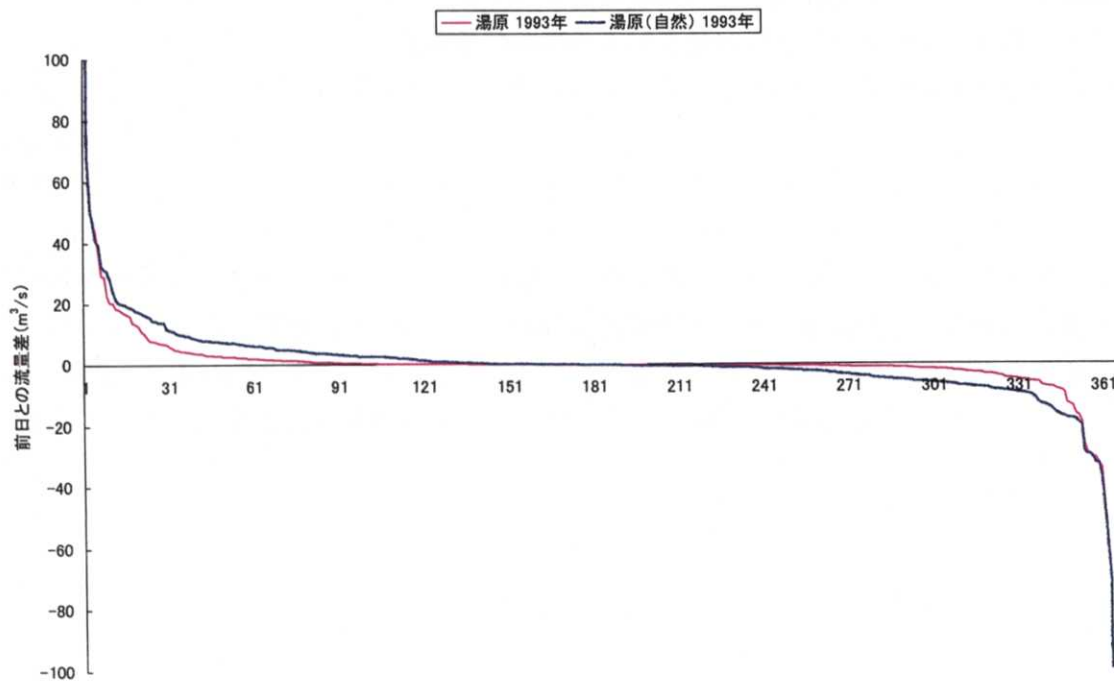


図 3-4 3 湯原地点の前日との流量差 (1993 年)

(5) 人間活動による流況変化のまとめ

以上みてきたことをまとめる。

多目的ダムではダム操作によって下流の流況が平滑化している。しかし、ダム放流量の影響が及ぶ範囲は限られており、利根川上流域の場合、岩本地点は上流3ダムの影響を受けているが八斗島では影響は少ない。栗橋の流量はダム群より利根大堰の影響を強く受けている。ダム操作による平滑化は、洪水を減らし、豊水付近を増やし、平水以下は減らす方向にはたっているが、何番目流量から減ったり増えたりするかはダムにより異なる。およその傾向として、60番目流量あたりまでを減らし、170番目から270番目あたりまでを増やして、それ以下を減らす。このことから、指標としては30番目、120番目、330番目あたりの流量を使えば良いのではないと思われる。30番目流量と120番目流量の比をとり、また330番目と120番目の比をとれば、人為操作による平滑化のインパクトが表現できるだろう。

流況曲線では時系列的な情報が失われてしまう。時系列性を保ちながら変動の平滑化を論じるには、前日差の分布をみるのが有効である。この方法でダムや発電所の影響をみると、流量不変の日数が多いこと、小規模な変化が少なくなっていることが見出せた。

水力発電所は平滑化と減水の両方をもたらす。このような場合、変動係数は指標として適切でない。発電パターンによって平滑化の程度は異なり、一定流量取水型ならば変動は小さくなりながらも保たれるが一定流量放流型ならば変動は消えて河川流量が平滑化する。流量設備利用率はこの程度を推測する手がかりになるが、最大使用水量の取水日数がより良い指標である。

利根川上流域では水力発電所が流況変化の最大の原因者である。それは、発電用水を戻してみると合流前後の流況が再現できることから確かめられた。今後、発電用水を戻した流量を「潜在的自然流量」と呼ぶ。この地域での環境用水の鍵を握るのは水力発電者であるということになる。環境用水の確保のためには発電所から無効放流をする以外に方策はない。発電所から放流をすとなれば、失われる発電量に見合うだけの効果が環境用水になければならない。次節から環境用水の効果を把握するための考察をする。

3-4 流況変化の定量指標—環境流量ポテンシャル

(1) 環境流量ポテンシャルの定義

3-3において人間活動が流況に及ぼす影響を調べた。そこでは影響は各点の流量変動として表された。環境用水を政策として検討するには、地域全体で影響を把握することが必要になる。ここでは、その影響の度合を地域全体で定量的に表す指標を考える。

減水区間の厳しさは、①減少した水量、②減水区間の長さ、の二つの要素で表せる。3-3でみたのは（各地点における）①だけであるが、地域という広がりを見ると②も重要なファクターになる。

そこで、水量と区間長をかけあわせた量を新たに導入する。この量はこういった意味をもつか。勾配が一定ならば区間長は高さの差に比例する。水量と高さの積は水のもつポテンシャルエネルギーに比例する。水力発電の発電量はこのポテンシャルエネルギーにほぼ比例する。環境用水としての能力を示していることから、これを環境流量ポテンシャルと呼ぶことにする。減水区間の厳しさをあらわすには、減水した水量×減水区間長、をとればよい。これは環境流量ポテンシャル消費量になる。

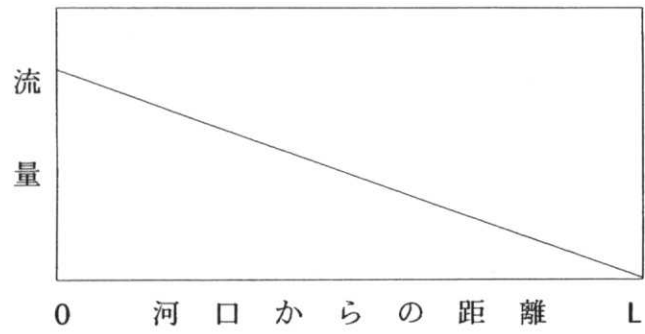
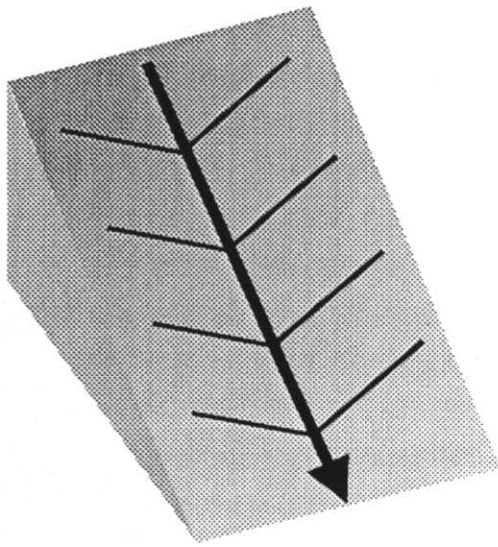
環境流量ポテンシャル消費量は、流量が点の値なのに対し線（および面）の値である。横軸に距離、縦軸に流量をとったグラフを描くと、河川のある区間における環境流量ポテンシャルが求められる。勾配一定（ i ）で流量 Q が流域面積 A に比例する（比流量一定）ような仮想河川を考えると、流域が図3-44のような四角形（幅 b 、長さ L ）であれば流量は

$$Q = kb x \quad (x \text{ は水源からの距離})$$

となり右上のような直線のグラフが描け、環境流量ポテンシャルは直線より下の三角形の面積になる。流域が図3-45のような三角形であれば、流量は

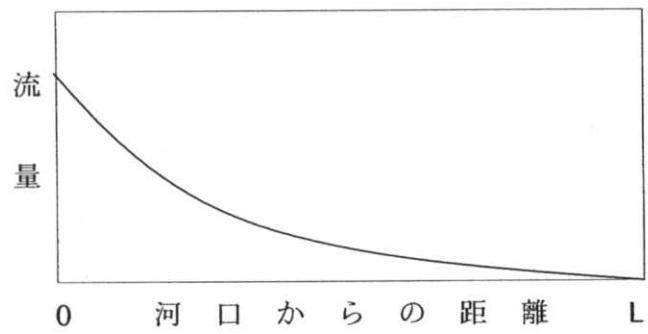
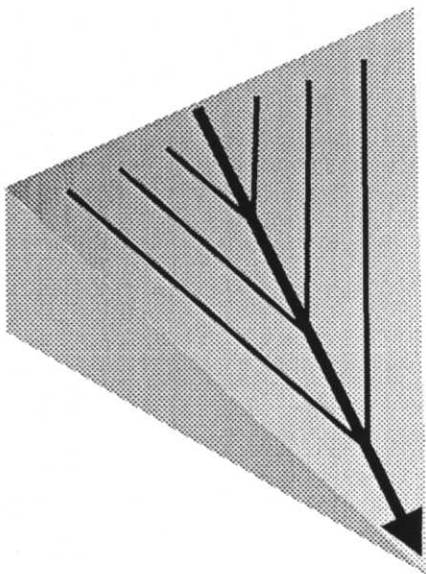
$$Q = (kb/2L) \cdot x^2$$

となり、二次関数になって環境流量ポテンシャルは曲線の下面積になる。



$$\text{環境流量ポテンシャル} = \frac{1}{2}kbL^2$$

図3-44 四角形流域の場合



$$\text{環境流量ポテンシャル} = \frac{1}{6}kbL^2$$

図3-45 三角形流域の場合

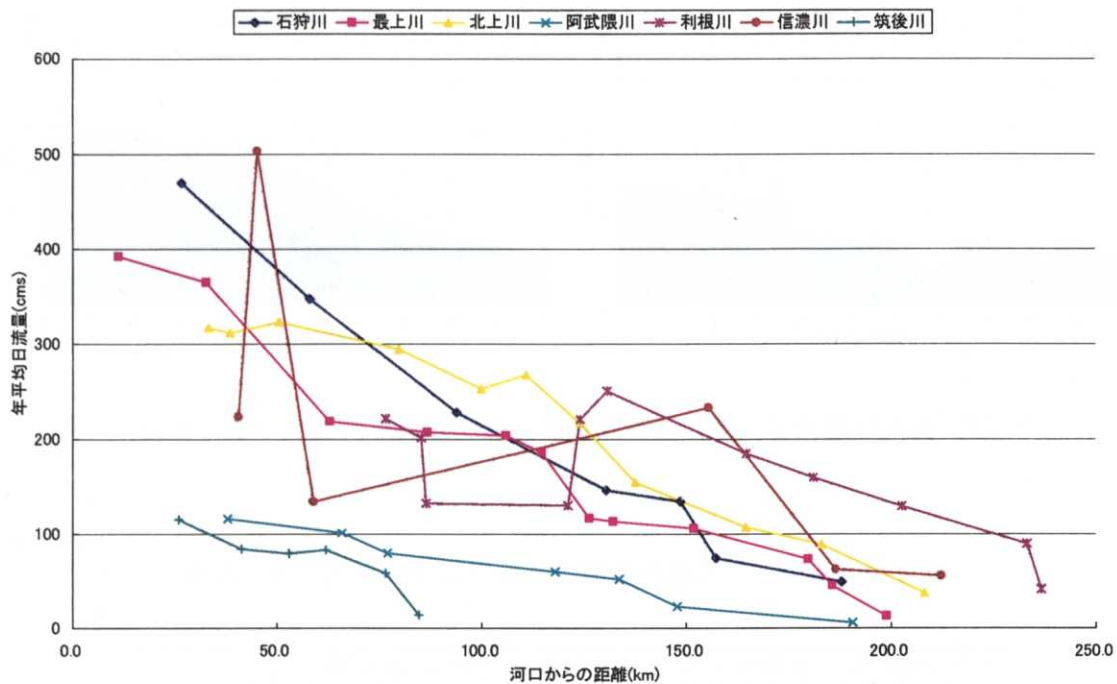


図 3-46 全国主要河川における河口からの距離と年平均日流量の関係

日本のいくつかの河川について、横軸に河口からの距離をとり縦軸に年平均日流量（観測開始から現在までの平均値）をとったのが図 3-46 である。この図は流量年表の値をそのまま使っており、水力発電所のバイパスや農業用水等の影響で減水した状況が示されている。信濃川が途中大きく減っているのは水力発電、北上川や筑後川は農業用水かと思われる。利根川と信濃川が下流で大きく減っているのは分派のためである。いずれの河川でも図 3-44 のような直線で近似でき、傾きもほとんど同じにみえる ($2.5\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$)。

水力発電所では、環境流量ポテンシャル消費量と発電量はほぼ比例する。すなわち、生じる減水区間の厳しさと発電量が普遍的な関係で密接に結びついている。農業用水や都市用水はそうではない。水力発電では、減水区間を軽減するには発電量減少を避けられないが、農業用水や都市用水は代替案を考える余地がある。取水点をできるだけ下流にもってきたり、排水を上流にもっていくなどの措置により同じ水量を使うにしても環境流量ポテンシャル消費量を減らすことができる。

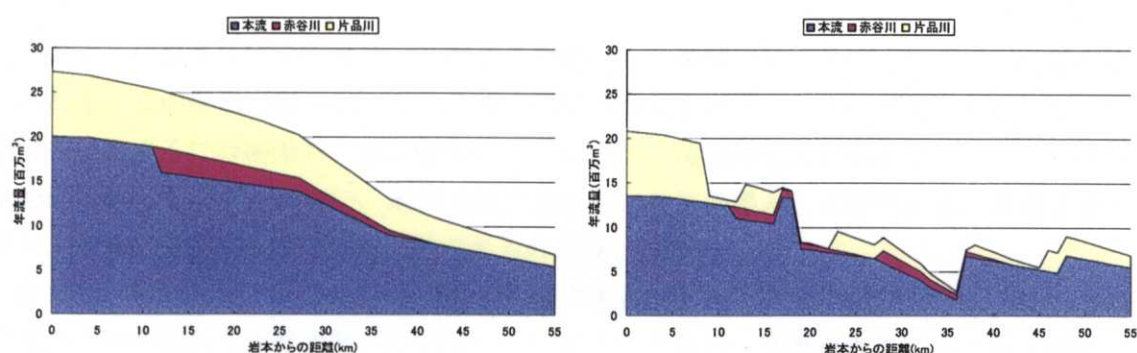


図 3-47 奥利根流域の潜在的な自然流量（左）と実際の流量（右）

表 3-6 利根川各支川ごとの環境流量ポテンシャル消費量

河川名	発電所数	環境流量ポテンシャル消費量 (億 km^3m^3)
赤谷川	4	144.7
片品川	14	176.2
吾妻川	18	458.8
利根川	10	359.6

(2) 利根川と多摩川での試算

環境流量ポテンシャルが実際にはどうなっているか、奥利根流域で試算する。図 3-13 に示した水力発電所のおのおのについて、使用水量と減水区間長から環境流量ポテンシャル消費量を推算した。使用水量は、常時使用水量と最大使用水量、それに設備利用率といった諸元から推定することができる。設備利用率は 1986 年の第 5 次発電水力調査の報告書に記されている値を用いた。減水区間長は 2 万 5 千分の 1 地形図から読み取った。環境流量ポテンシャル消費量はそれらの掛け合わせで求められる。

図 3-47 は、岩本上流の奥利根流域において、横軸に距離、縦軸に流量をとったグラフである。左は発電使用水量を含んだ流量、右は含まない流量である。左が潜在的な自然流量を示しているが発電減水により実際には右のような流量が流れていて、減水状況が一目瞭然である。この減った面積が環境流量ポテンシャル消費量に相当する。表 3-6 にこうして求められた支川ごとの環境流量ポテンシャル消費量を示す。消費量の大きい発電所は、岩本（赤谷川）、箱島、金井、松谷（いずれも吾妻川）、上牧（利根川）などであり、吾妻川の下流にある発電所が使用水量も大きく減水区間も長いいため大きな値が計上されている。岩本発電所は本流分も赤谷川として計算しているため、赤谷川の実際の値はこれより小さい。

このように減水区間を定量的に把握する指標として環境流量ポテンシャルという量が定められる。この指標は環境用水による減水区間軽減量を表現するのに有用である。ふつう流況を把握するには基準点での流量が用いられるが、環境用水の目的からいって点での流量を云々してもしかたがない。地域全体で集計して政策指標として使うにも、環境流量ポテンシャルは物理的意味の明確な量であるため扱いやすい。

ただし、環境流量ポテンシャルは量の表現であるが価値にはすぐ結びつかない。もとの流量の大小に関わらず減水量だけを使っているからである。流量の大きいところでは少し減水しても影響はほとんどない。よって、価値評価につかうには、もう一段階ステップを踏まねばならない。

奥利根流域では水力発電のみであったが、農業用水や都市用水の環境流量ポテンシャルはどうなっているだろうか。栗橋上流の利根川流域を対象にして、すべての水利用者について調べてみる。資料から工業・家庭の水の流れを調べると、図3-48のような流れになっていることがわかった（1993年）。表流水と地下水をほぼ同量利用しており、上水道や工業用水道を通して家計や工場で使われている。工場が直接地下水を使っているところもある。使用後は大部分が下水道を通して川へ排出されるが直接排出している部分もあり、また工業では水の再利用も高度にすすんでいる。これを発電および農業と合わせて水量をみると図3-49の左側の図のようになっている。下流端を栗橋地点におき、年間総流量65.8億 m^3 をまず計上する。発電はさきほど環境流量ポテンシャル消費量を計算した発電所の使用水量の和をとり174.0億 m^3 （ダム式発電所を除く）、都市用水は図3-48から表流水2.5億 m^3 および地下水2.5億 m^3 を計上する。農業用水は坂東合口、群馬用水、長野堰、南牧・下仁田頭首工、渡良瀬沿岸用水の最大取水量の和107.02 m^3/s （利根川百年史による）をかんがい期の4ヶ月間取水したとして11.1億 m^3 となるが、これにかんがい面積の比（上記5用水のかんがい面積が約27,000ha、群馬県全体の農地面積はH10年に85,700ha—農林水産省関東農政局統計情報部）をかけて35.2億 m^3 となる。利根大堰および神流川等からの取水は域外への移動とみて12.0億 m^3 を計上する。上流端の値は、下流端の値と域外への移動を足したものである。発電用水と農業用水は使用された全量に戻ってくるとしてこう計算した。

図3-49をみてわかるように、水量では発電が圧倒的に大きく、家計・工業は小さい。ところが環境流量ポテンシャルにすると図3-49の右側の図のようになる。発電は先ほど計算した4河川の合計、農業は大規模用水の減水区間を5km（ただし群馬用水と坂東合口はそれぞれ30kmと25km）、小規模用水の減水区間を1kmと仮定して計算した。域外への移動は、栗橋までの距離を基準にして計算した。家計・工業の占める割合が農業と同程度まで格段に大きくなる。これは取水点と排水点の距離が大きいことに起因する。

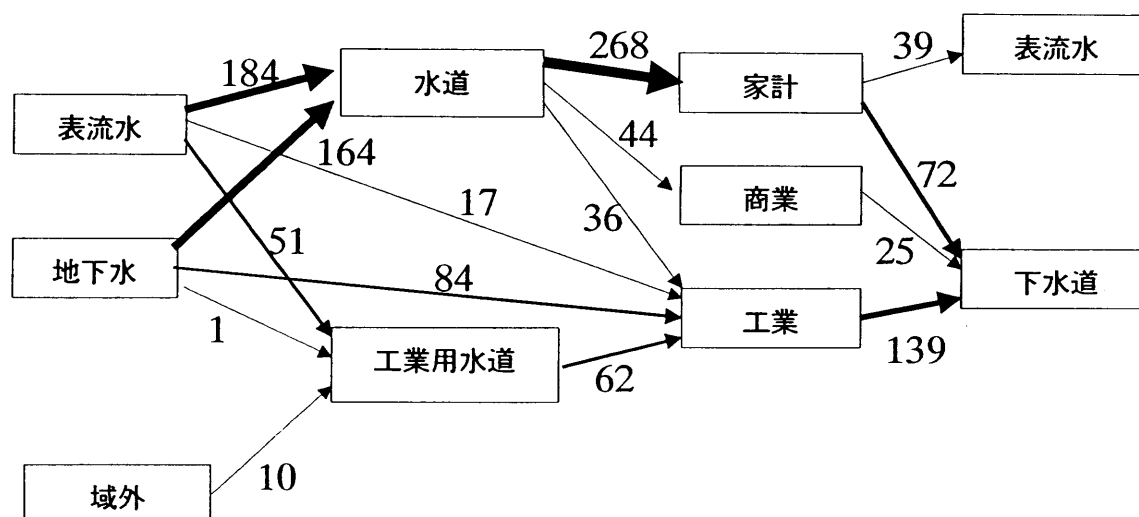


図 3-48 利根川上流域の都市用水の流れ（1993 年，単位：百万 m^3 ）

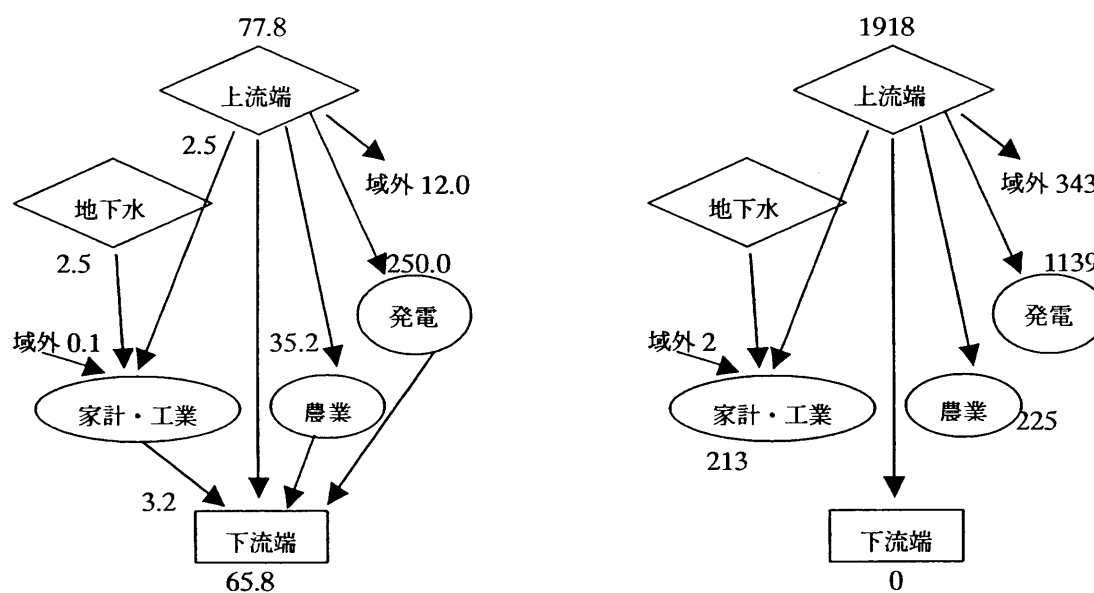


図 3-49 利根川上流域の水および環境流量ポテンシャルの流れ
（1993 年，単位：億 m^3 および億 $km^3 \cdot m^3$ ）

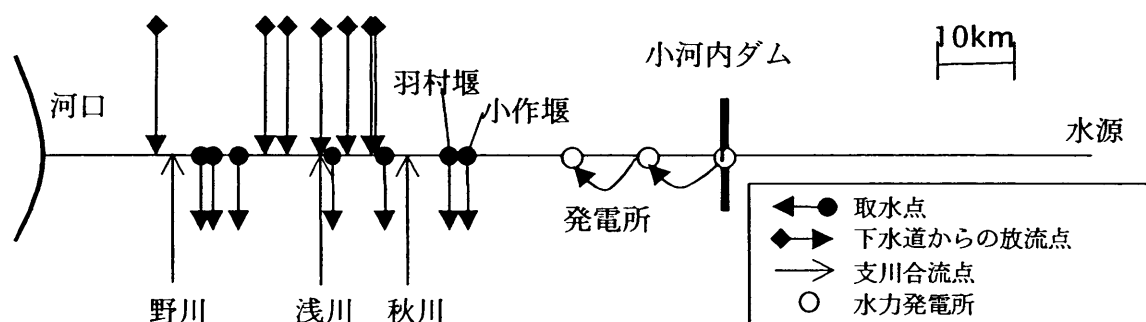


図3-50 多摩川の取水点・放流点

都市用水の大きな河川ではどうなっているだろうか。多摩川で調べてみる。多摩川には上流部に3つの水力発電所があるが、利水として重要なのは都市用水である。多摩川の取水・排水点は図3-50のようになっており、羽村堰で取水された水は東京の多摩地区を中心に使われたのち多摩川へ還流する。主要な取水点は羽村堰1ヶ所のみで、いくつかの浄水場に配水されてから利用地へ給水され、いくつかの下水処理場に集まって何ヶ所かで排水される。東京都水道局や下水道局の年報から水量の流れを追い、住民人口との関連を調べた。取水された水は家庭用水と工業用水に使われているはずだが、住民人口を受益者の代表値とみなした。

まず、水量の把握から始める。全体の水の流れは図3-51のようになっている。浄水場と下水処理場が1対1に対応していないため、浄水場の配水区域と市区町村別使用水量から浄水場と市区町村を対応させ、市区町村から下水処理場への対応づけをした。多摩川の流量はおおよそ図3-52のようになっている。これは月1回の観測値12個から計算したものであるが洪水流量などが落ちていて年間の平均流量ではないが、通常時の流況を表しているとみることができる。羽村堰から取水された水が下水処理場を通して戻ってくる様子がよくわかり、下流では本川の水の大部分が下水処理水で占められていることもわかる。これらのデータから多摩川の都市用水の環境流量ポテンシャル消費量を求めると、年間70億 km^3 という値が得られた。

水力発電も含めて、多摩川と利根川の比較をしたのが表3-7である。構成比からわかるように、利根川が発電中心なのに対して多摩川は都市用水中心である。各欄の下段には単位量あたりの値を示したが、多摩川は集積の密度が高いために都市用水部門が小さい値になっている。

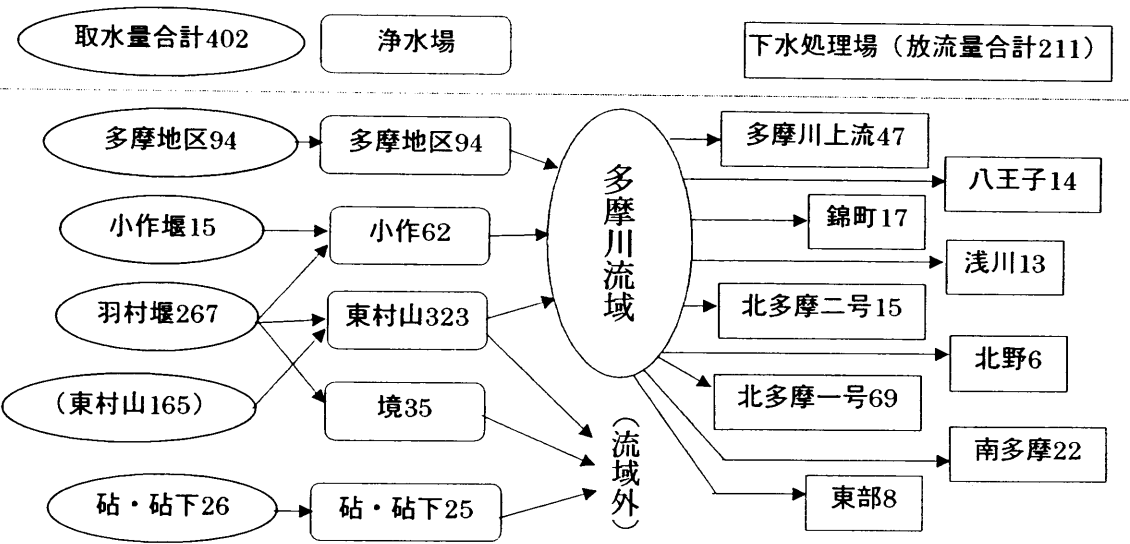


図 3 - 5 1 多摩川流域の都市用水の流れ（1997 年度，単位：百万 m³）

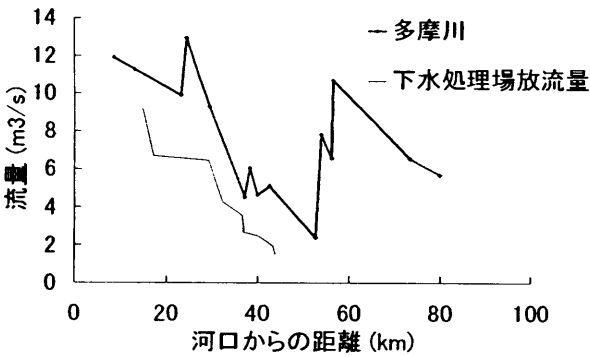


図 3 - 5 2 多摩川の距離と流量の関係（1993 年）

表 3 - 7 利根川上流域と多摩川の環境流量ポテンシャル消費量の比較
(単位：億 km³・m³)

	利根川	多摩川
水力発電	1,139 (17.6/万 kw)	30 (7.5/万 kw)
農業	225	
家計・工業	213 (1.3/万人)	70 (0.2/万人)

3-5 環境用水の量－効果関係

3-3では点での流量変動を調べ、3-4ではそれを面でまとめる指標にして調べた。3-4で導入した環境流量ポテンシャルは、それだけでは環境用水を評価するのに不十分である。もともと流量が大きいところでは多少の減水はダメージにならず、環境用水を流しても効果は小さい。環境流量ポテンシャルは効果と比例しない。そこで次に、環境流量ポテンシャルを効果と関連付ける方法を考える。

第一近似として、減水割合と効果に比例関係を仮定することが考えられる。本来あるべき流量を分母にとり、減水した流量を分子にとって減水区間長とかけあわせる。これは環境用水の効果（減水区間のダメージ）をある程度正しく反映するだろうが、比が効果と本当に比例するとは限らないし、流量の脈動も扱えない。

もっと現実的近づけるため、環境用水がどのような過程で環境改善効果をあげるか考えてみよう。流量が増大すると、水の体積や水に覆われた面積が増えて生物のすめる場所が増える。深い場所や速い場所ができて多様な生息環境が生まれる。汚染物質は希釈されて水質が改善する。景観は、水面幅の広がりによって豊かな水量感が感じられるようになる。人々が水遊びする空間が増大する。流量の脈動は、水際の環境を複雑にしていろいろな生き物に活躍の場を与える。河床をフラッシュアウトして水中の生物が生きていく環境を整える。高水敷に攪乱を与え、多種類の生物が生息するようにする。土砂を上流から下流へと運び、周辺の地形を安定させる（または乱す）。これらの効果を整理すると、表3-8のようになる。Mader（2000）はオーストリアの発電減水区間において、水表面積、水体積、水面幅、最大水深（の平均と分散）、断面平均流速、河床付近の流速分布を維持流量算定の根拠として用いている。

表3-8 環境用水の効果

効果（物理量として）		効果（環境として）	関係する物理量
流量増大	水体積増加	ハビタットの増加	断面積
	水面増加	ハビタットの増加	水面幅
	流速多様化	ハビタットの多様化	最大流速
	水深多様化	ハビタットの多様化	最大水深
	水質希釈	水質改善	流量
	水量感改善	景観改善	水面幅
	親水空間増	親水度の増加	？
変動増加	水際複雑化	ハビタットの多様化	水位変動
	河床保全	ハビタットの健全化	掃流力
	冠水頻度増	生息環境の攪乱（健全化）	洪水頻度
	土砂輸送	物質循環の健全化	掃流力

脈動に関しては、自然状態と同位相の脈動を絶対値を減らして再現するよりも、数が減っても同規模の洪水を起こした方がおそらく効果的であろう。流量に関係しない効果を捨象して、流量と効果を単純な関数で結びつけることを考える。

図3-53のような三角形断面をもつモデル河川を想定する。三角形の頂点の角度を 2θ 、勾配を i とする。水深 h のときマニングの公式では平均流速 v は

$$v = (1/n) \{ (h/2) \sin \theta \}^{2/3} i^{1/2}$$

と表せる。このとき流量 Q は

$$Q = v \cdot A = (1/n) \{ (1/2) \sin \theta \}^{2/3} (\tan \theta) i^{1/2} h^{8/3}$$

となり、 h の $8/3$ 乗に比例する。

水面幅は h に比例し、断面積は h の 2 乗に比例し、平均流速は $2/3$ 乗に比例するから、それぞれ流量の $3/8$ 乗、 $3/4$ 乗、 $1/4$ 乗にそれぞれ比例する。河床にはたらく掃流力は径深と勾配に比例するから、 h と同じく流量の $3/8$ 乗に比例する。

さきほど列挙した環境用水の効果との対応では、ハビタットの増加は水面幅と比例、景観も水面幅に比例、水質希釈は流量に比例、河床のフラッシュは掃流力に比例すると考えられる。現実の河道は形が複雑で一概にはいえないが、一つの計算例を図3-54に示す。これは多摩川の羽村堰下流の区域で1次元不等流計算を行った結果である。水面幅はおよそ流量の $3/8$ 乗から $1/2$ 乗に比例するとみてよいだろう。

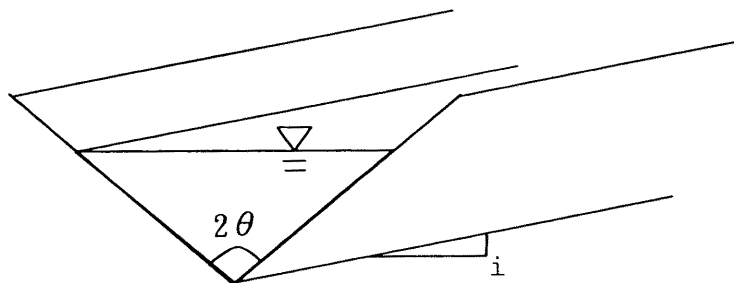


図3-53 三角形断面をもつモデル河川

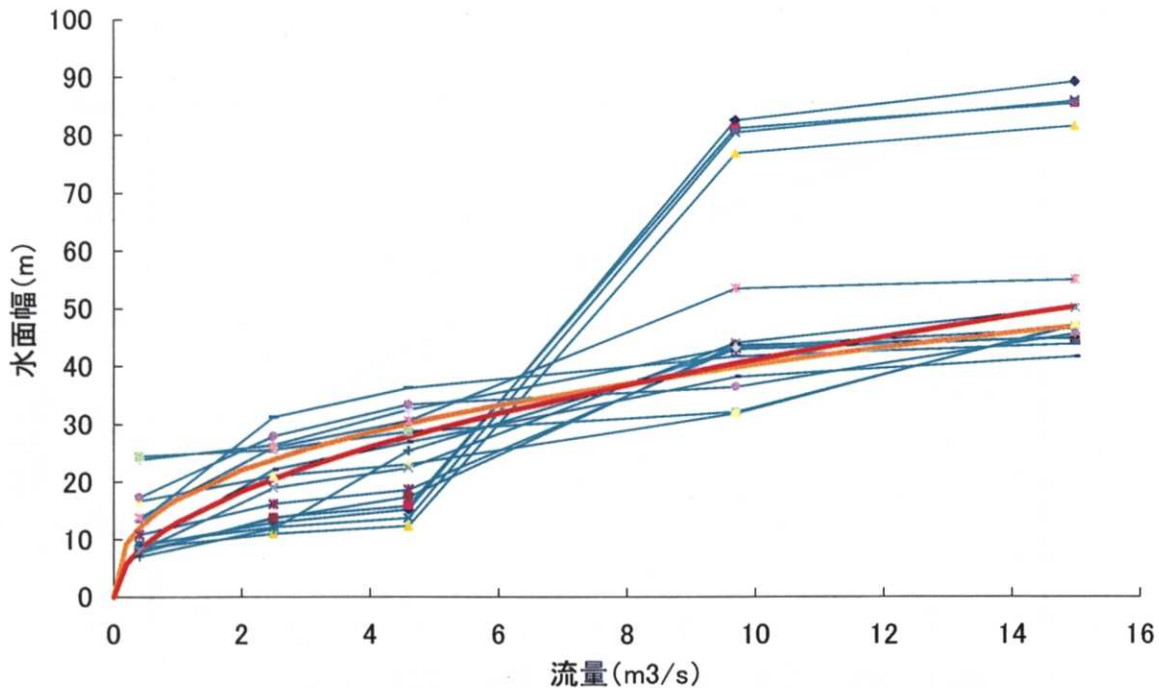


図3-54 流量と水面幅の関係（実河道での計算例）

水色は各断面（15断面）での計算結果，赤は1/2乗，橙は3/8乗に比例とした場合

赤： $B=13h^{1/2}$ ，橙： $B=17h^{3/8}$

今述べたのは量の増大に応じて効果が大きくなっていく部分であったが，よりクリティカルな状況では効果が不連続関数で表されることがありうる．必要最小限の値という意味である．この必要最小限のしきい値を2-2では正常流量と位置付けた．正常流量の条件を決めるには生態学的な裏付けが必要である．個体の生存を保障する最小限の流量にするか，種としての存続が可能な最小限の流量にするか，河川生態系が健全に持続可能な最小限の流量にするか，といった選択もある．しかし，いずれにせよ環境用水でそこへの上乗せを考えるため，正常流量は結果として必ず確保される．

河道断面の多様性と計算の利便性を考え，環境用水の量—効果関数としてここでは1/2乗を採用する．潜在的な自然流量（発電減水区間ならば発電使用水量を戻した流量）を100点とし，流量ゼロを0点として，その間を1/2乗の線をつないだものが流量—効果曲線となる（図3-55）．この曲線を用いて3-4の環境流量ポテンシャルを修正することによってある地域全体での環境用水の効果が計量できる．

効果を価値に換算するのが次のステップとなる．それを次章で検討する．

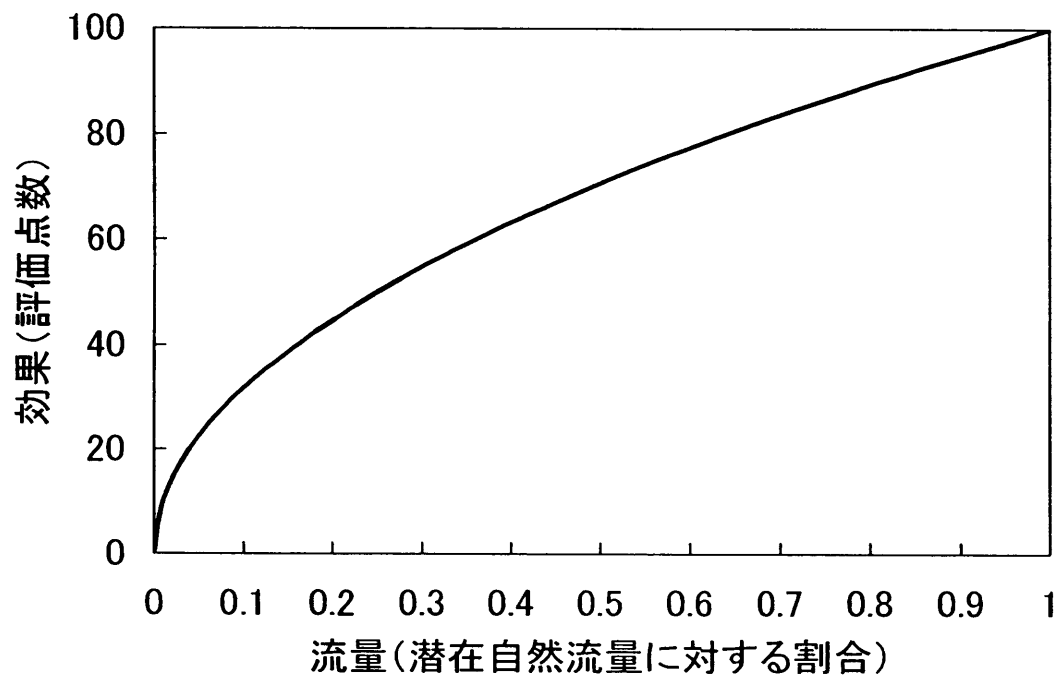


図 3 - 5 5 環境用水の量－効果関係

3-6 まとめ

河川流量を規定する4つの要因（気象条件・地理条件・人為条件・観測条件）のうち、気象条件と地理条件については既往の研究によってかなりのことがわかっている。人為条件に関しては減水と平滑化が言われているが、それをケーススタディにより実証的に調べた。

水力発電の使用水量は当初の渇水量基準から低水・平水へと段階的に増加してゆき、次第に河川環境に負荷を与えるようになった。大正後期から昭和初期あたりが減水区間問題の一つのターニングポイントであったと推測される。

利根川での分析では、水力発電所が河川流量を減らしている実態が定量的に浮かび上がった。河川流量は発電取水量に支配されており、環境用水の確保には発電取水からの無効放流しか手がない。また平滑化に関しては、ダムによる差はあるものの30番目流量あたりが減り（洪水調節）330番目流量あたりが増える（渇水軽減）こと、流量不変の日数が増え小規模な変化が少なくなっていることが見出せた。発電所による平滑化の程度は、流量設備利用率あるいは最大使用水量の取水日数によって推測できる。

減水区間の厳しさを集計して把握する指標として環境流量ポテンシャルを提案した。利根川と多摩川で試算し、発電用水と都市用水の減水影響を定量化した。

環境用水量と効果の関係は普遍化することが難しい。ここでは水理量を用いて流量と効果の関係を一般化することにし、 $1/2$ 乗に比例するという関係式を提案した。