

ダムによる流量変化の特性分析

CHARACTERISTICS OF THE CHANGE OF AMOUNT OF FLOW CAUSED BY DAM OPERATION

大沼 克弘¹・藤田 光一²・井上 優³

Katsuhiko ONUMA, Koh-ichi FUJITA and Yutaka INOUE

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 主任研究官
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 室長(同上)

³正会員 工修 応用地質株式会社 東京本社 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5)
(元 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 交流研究員)

We analyzed characteristics of the change of amount of flow caused by dam operation in four views, decrease of disturbance, stabilized flow, trembling change, seasonal change. For the analysis, we proposed the index to represent the four characters based on the data of inflow and outflow and calculated the index of all dams managed by Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and Incorporate Administrative Agency Japan Water Agency. Utilizing the index, we tried to represent the characters of every dam objectively and analyzed the reason why the dam has the characters based on the data of capacity for every purpose, facilities to discharge, and the rules for flood control.

Key Words : decrease of disturbance, stabilized flow, trembling change, seasonal change

1. はじめに

ダムはそれぞれ所期の目的を達成するよう放流を行うため、下流河川の流況に多かれ少なかれ影響を及ぼす。この流況の変化は、下流河川の河床材料や河道形状等の物理環境、植生等に影響を及ぼすことがあり、流況変化が生物に直接影響を与える可能性¹⁾とあいまって、ダムによる環境影響を評価する上で重要なファクターの一つと言える。

ダムが下流の流況に与える影響として、たとえば攪乱の減少や平常時の流量の平滑化がしばしば指摘されるが、その度合いはダムにより大きく異なっていると考えられ、そのような違いの実態を明らかにし、それがどのような要因と関係しているかを分析することは、環境影響評価の高度化や環境保全を考慮したダム管理のあり方を実務的に検討する上で必須である。

日本のダムが流況に及ぼす影響については、いくつかのダムを例にとりて概説を記述したもの²⁾、いくつかのダムについて流入量と放流量との関係分析を行ってダムの用途と下流河川への影響について整理したもの³⁾、24の中規模多目的ダムの日流入量と日放流量データを用いて比流量の観点から中小規模の攪乱を中心に頻度の変化の傾向を分析したもの⁴⁾がある。しかし、幅広く全国

のダムを対象に流量変化の傾向を把握し、その要因について分析した事例は見られない。

本研究は、国土交通省が所管するダムのうち、国土交通省および水資源開発機構が管理しているすべてのダムを対象に、主に平成5年から平成15年の流入量および放流量のデータを用いて、ダムが下流河川の流況に与える影響とその要因について分析を行ったものである。

分析にあたっては、国土交通省の水文水質データベースや(財)ダム水源環境整備センターのホームページからアクセスできるダム諸量データベースを主に用いた。本データベースでは、平成5年から平成15年について、貯水池の水位、流入量、放流量等に関する日単位データ(毎正時値の24時間平均)が整備されている。ただし、流入量はダム貯水池に流入する水量のすべてを合わせたものであり、放流量はダムから下流に放流するゲート、バルブ等から流れ出る水量、および貯水池から直接取水する発電および各種用水の使用水量を合計したものである。なお、本論文で用いている流入量、放流量とはことわりのない限りこの定義にしたがっている。そのため、例えばダム貯水池からの発電取水によって下流河川に減水区間が生じている場合、ダム直下に放流している分と発電取水の分とを区別できないため、減水区間の流況の推定はできないことになる。それでも当データベースはダムの流入量、放流量について全国的に整備されている

唯一のものであり、その活用は十分有用と考えた。

さらに本データベースには、月ごとおよび年ごとの最大流入量や最大放流量データも整理されている。これは、先に述べた日単位のデータではなく、それぞれ瞬間最大値であり、出水時の瞬間のピークを捉えることができる。

2. ダムによる流量変換パターンの抽出とその要因分析

本研究では、以下の切り口からダムによる流量変換の特性を分析した。

- 出水時のピーク流量の減少（攪乱の減少）
- 平水時の流量の平滑化
- 短時間での大きな流量変動
- 季節ごとの流況の変化

まず、それぞれの項目についてその度合いを表現する指標を設定し、ダム毎にその値を算出して全国的な傾向を整理した。次に指標値の大小が生じる要因やダムによる流量変換のパターンについて代表的な事例を使いながら分析を行った。

(1) 出水時のピーク流量の減少（攪乱の減少）

ダムは操作規則等にしがたって操作を行っている。操作規則には洪水調節開始流量や洪水調節を行う方式（一定量放流方式、一定率一定量放流方式、自然調節方式等）が記載されている。しかし、中小規模の洪水に対しては、ダムの空き容量に余裕がある場合、その操作規則に基づく流量よりも少ない量の放流を行うこともある。

本研究では、ダムによる出水時のピーク流量の減少の度合いを示す指標として、平成5年から平成15年の11年間における[年最大放流量 / 年最大流入量]の平均値を用いた（いずれも瞬間値）。11年間のデータがそろっている79ダムを分析の対象とした。

その結果を図-1に示す。ただし、新豊根ダムは揚水式発電を行っているため2.44と突出して高かったため、このグラフからは除いている。この指標値が小さいほど攪乱減少の度合いが大きいことを、1程度とは攪乱減少ダム数

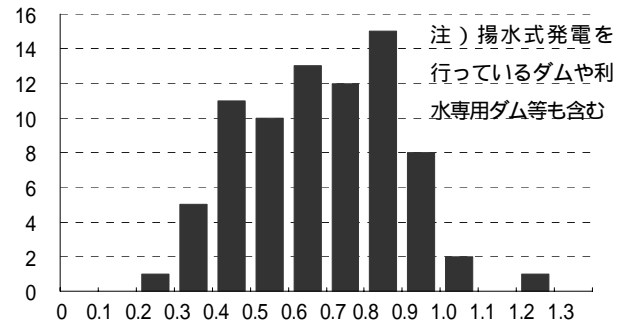


図-1 年最大放流量 / 年最大流入量のヒストグラム

がほとんどないことを示すことになる。図に示すように、値は幅広く分布しており、ダムによる攪乱減少の度合いはダムにより大きく異なっていることがわかる。

まず、攪乱減少の度合いが小さい指標値0.9以上のダムについて抽出したところ、概ね次のいずれかに該当することがわかった。

揚水式発電を行っている：新豊根(2.44)、矢木沢(1.27)、天ヶ瀬(0.92)

目的に洪水調節が含まれていない：芦別(1.04)、猿谷(0.93)

流入量が洪水調節開始流量を上回る頻度が比較的小さい：菌原(1.03)、丸山(1.00)、横山(0.95)、高山(0.92)、新宮(0.93)

洪水調節を一定率一定量方式で行っているダムでかつ流入量の増分に対する放流量の増分の割合が大きい：大渡(0.92)、大川(0.90)

流入量に対して貯水容量が小さい（高回転率）ため、ほぼ流入量と放流量が等しい：池田(0.98)

の例として菌原ダムの年間最大放流量と流入量を図-2に示す。洪水調節開始流量である1,000m³/sに流入量が達したのがこの間平成10年の1回だけで、洪水調節を行う頻度が小さく、中小規模よりもむしろ大規模な洪水に対して効果を発揮するダムと言える。さらに、平成12年、13年、15年では流入量が洪水調節開始流量を下回っていて年最大放流量が年最大流入量を上回っているが、いずれも放流量のピークが流入量のピークの前に生起しており、なおかつこの時一時的に貯水位が低下して制限水位を下回り予備放流水位に近づいていることから、予備放流（洪水が予想される場合に、必要な洪水調節容量を確保するため、事前に放流すること）を行っていることによる現象と推察できる。以上から、指標値が1を上回る結果となっている。

の例として大川ダムについて示したのが図-3であ

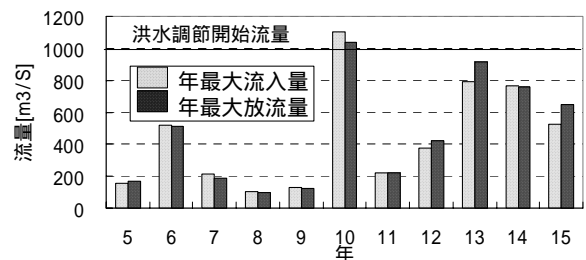


図-2 菌原ダムにおける年最大流入量と放流量

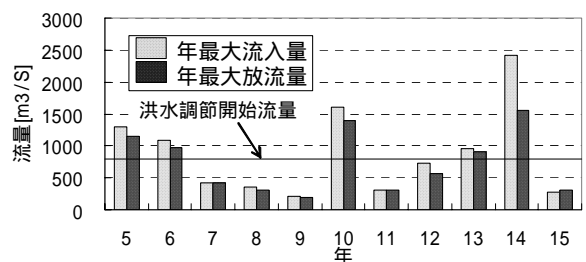


図-3 大川ダムにおける年最大流入量と放流量

る。大川ダムは洪水調節開始流量が $800\text{m}^3/\text{s}$ で、流入量を Q_{in} 、放流量を Q_{out} とした時、 Q_{in} が計画高水流量である $3,400\text{m}^3/\text{s}$ に達するまで、次式にしたがい放流し、その後一定量 $2,600\text{m}^3/\text{s}$ で放流する、いわゆる一定率一定量放流方式で洪水調節を行っているダムである。

$$Q_{out} = (Q_{in} - 800) \times 0.692 + 800$$

流入量の増分に対する放流量の増分の割合が0.692と大きいため、ピーク流量の低減割合が小さくなる傾向となる。このようなダムにおいても、大規模な洪水例えば Q_{in} が計画高水流量の $3,400\text{m}^3/\text{s}$ である場合は $Q_{out} = 2,600\text{m}^3/\text{s}$ であり、 Q_{out}/Q_{in} が0.76となることからわかるように、攪乱の減少の度合いは比較的大きなものとなる点にも注視する必要がある。

なお、に該当する洪水調節を行わない2ダムのうち、指標値が1を上回っている芦別ダムは桂沢ダムに導水して発電を行うダムであり洪水調節は導水先の桂沢ダムで行っており、に該当する池田ダムにおいても、最大流入量が洪水調節開始流量である $5,000\text{m}^3/\text{s}$ を上回っている時の最大放流量はいずれも最大流入量を下回っている。

次に、指標値の年最大放流量/年最大流入量の平均値が低いダム、すなわちダムによる出水時のピーク流量の低減度合いが大きいダムについて俯瞰したところ、年最大放流量の傾向として以下のパターンがあることがわかった。

利水放流施設能力で頭打ちになる

洪水調節開始流量程度で頭打ちになる

洪水調節開始流量未満で放流されることが多いが、その値はまちまちである

流入量の大小に応じて放流量が変化する

の事例として金山ダム(0.32)が挙げられる(図-4)。金山ダムは、洪水調節、灌漑、上水、発電を目的としており、有効貯水容量 $130,420\text{km}^3$ 、最も制限水位が低い7月から9月で洪水調節容量は $51,400\text{km}^3$ で残り $79,020\text{km}^3$ は利水容量であり、比較的利水容量が大きい。そのため、中小洪水が来た時に洪水調節のポケットが利水分も含め大きい場合、常用洪水吐きゲートを用いずに発電取水施設からの放流で済むことが多いためこのような傾向を持つと考えられる。金山ダムの場合、この発電放流施設能力約 $50\text{m}^3/\text{s}$ を越えた放流量となったのは11年間で2回だけで、平成12年の5月と平成13年の9月である。前者は融雪出水により既に貯水水位が高くなっていたこと、後者は流入量が約 $400\text{m}^3/\text{s}$ とこの11年間で最大規模の洪水であったことが要因と考えられる。これと同じパターンに該当する事例として、他に十勝(0.37)、手取川(0.39)が挙げられる。

の事例として、下笠ダム(0.48)が挙げられる(図-5)。下笠ダムは洪水時には $350\text{m}^3/\text{s}$ の一定量で放流する、一定量放流方式の洪水調節を行うダムであり、有

効貯水容量 $52,300\text{km}^3$ のうち梅雨期には $51,300\text{km}^3$ と大部分を洪水調節に用いているダムである。流入量がほぼ毎年洪水調節開始流量に到達しており、洪水調節を行う頻度が高いダムである。このパターンに該当する事例として、他に定山溪(0.48)、玉川(0.41)が挙げられる。流入量が洪水調節開始流量に達する頻度が高いダムに多く見られる。

さらに、利水放流施設能力と洪水調節開始流量程度の両方で頭打ちになる傾向がある、いわばこの複合型として、桂沢(0.27)、大雪(0.34)、豊平峡(0.35)が挙げられる。

の事例として七ヶ宿ダム(0.49)が挙げられる(図-6)。七ヶ宿ダムは、有効貯水容量 $99,500\text{km}^3$ で、そのうち洪水調節容量が $35,000\text{km}^3$ 、利水(水道、灌漑、工水、不特定)容量が $64,500\text{km}^3$ であり、洪水調節容量が年間を通じて変化せず、洪水時は一定量 $250\text{m}^3/\text{s}$ を放流する一定量放流方式である。利水容量が大きく、平成14年のように約 $600\text{m}^3/\text{s}$ と洪水調節開始流量を大きく上回る出水があっても常時満水位よりかなり低い貯水水位であれば $250\text{m}^3/\text{s}$ を下回る放流で済ませることがある等、洪水調節開始流量未満で放流されることが多いが、その値はまちまちになる傾向がある。このパターンに該当するものとして、他に下久保(0.47)、奈良保(0.45)が挙げられるが、いずれも発電を除く利水容量が

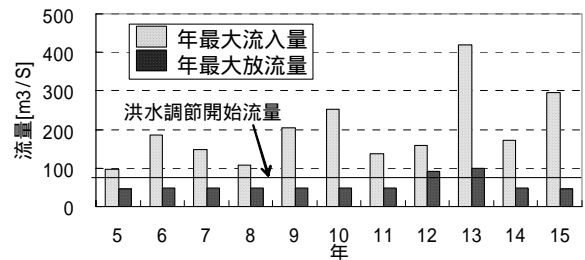


図-4 金山ダムにおける年最大流入量と放流量

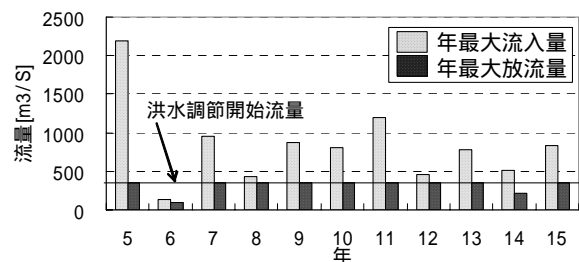


図-5 下笠ダムにおける年最大流入量と放流量

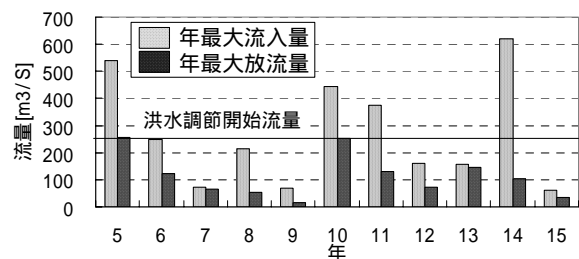


図-6 七ヶ宿ダムにおける年最大流入量と放流量

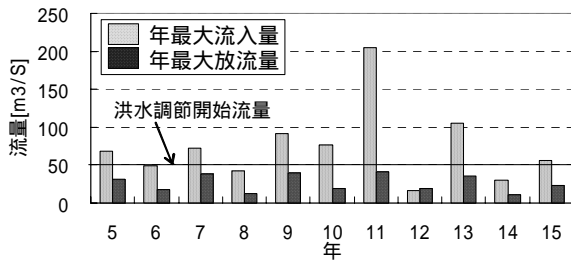


図 - 7 島地川ダムにおける年最大流入量と放流量

50,000千m³を越えており、利水容量が比較的大きいダムである。

この事例として島地川ダム(0.44)が挙げられる(図-7)。島地川ダムはゲートレスの自然調節方式のため、流入量の波形に対してやや遅れてかつそれよりもピークが低い放流量の波形となるため、それぞれの洪水規模に応じた放流量となる。

(2) 平水時の流量の平滑化

本研究では、平成5年から平成15年を対象に、ある1年間の日流量のうち、10日間移動平均値との乖離率が10%以内となる日数の平均を流入量と放流量について求めた。この日数は、10日間程度よりも小さい(たとえば数日程度の)周期を持つ流量変動成分があまり効いていない年間日数を表し、これが大きいほど、細かな流量変動が見られない期間の割合が大きいことを意味する。そこで、放流量についてのこの日数から流入量についての日数を差し引いた日数を、ダムによる流量の平滑化の度合いを示す指標として用いることとした。以後、これを流量平滑化指数と呼ぶことにする。

流量平滑化指数を、2ヶ年以上流量データがある96ダム全てを対象に算出した結果を図-8に示す。ただし、ダム群がトンネルにより連結されていてこれらのトンネルからの流入量や放流量が含まれたデータとなっているため、この指数が突出して大きくなっている福地ダム(247日)、漢那ダム(240日)は、この図から除外している。

この値の中央値は0日より大きい11日であることから、平均的にはダムにより流量はやや平滑化される方向にあると言える。しかしながら、最高の福地ダム(247日)から最低の金山ダム(-95日)まで幅広く分布している。

80日以上の上位のグループに属するものとして上から、福地、漢那、富郷(140日)、七ヶ宿(109日)、布目(104日)、川治(93日)、新宮(91日)、浦山(86日)、阿木川(82日)が挙げられる。これらのダムは、有効貯水容量に

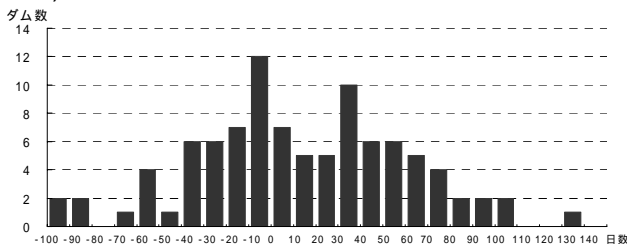


図 - 8 流量平滑化指数についてのヒストグラム

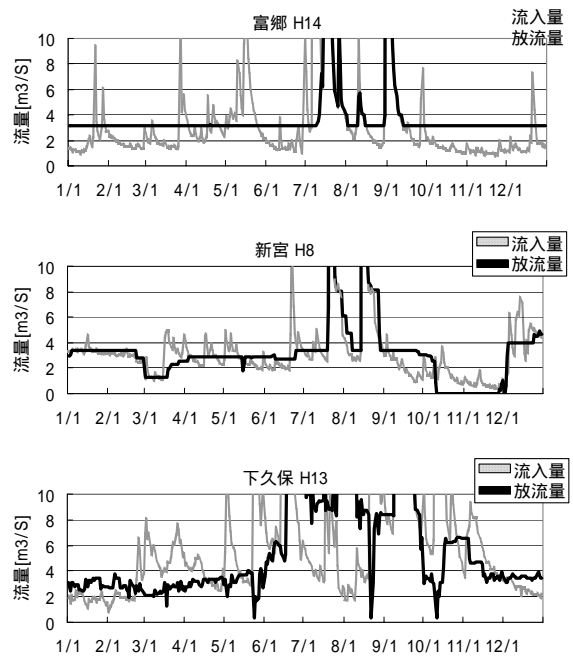


図 - 9 富郷、新宮、下久保ダムの流入量と放流量

対する都市用水容量の占める割合が全て50%以上になっており、流量の平滑化は都市用水のウエイトの高さと関連が深いことがうかがえる(ここで、洪水期と非洪水期の目的別容量が異なるダムについては、より期間が長い非洪水期の容量を採用している)。

流量平滑化指数が高いダムについて、その年間変動を見たところ、図-9のように、富郷ダム等出水時およびその数日後以外は放流量が一定量になる傾向があるダム、新宮ダム等放流量が階段状に変化する傾向があるダム、下久保ダム(57日)等小さなレンジの中で小刻みに変化するダム等、様々なパターンが見られた。現時点で、このようなパターンの相違とダムの運用方法の考え方との相関性について把握できていない。

(3) 短時間での大きな流量変動

本研究では、短時間での流量の変動の大きさを示す指標として2の(2)で用いた流量平滑化指数を使い、この値が小さいほど短い周期の流量変動がダムにより付与される度合いが大きいとした。

この指標値の下位グループに属するものとして、下から、金山(-95日)、美和(-91日)、豊平峡(-87日)、大雪(-86日)、田瀬(-67日)、川俣(-57日)、矢木沢(-53日)、下笠(-52日)、九頭竜(-50日)、園原(-49日)が挙げられる。これらのダムは全て目的に発電を含んでいる点で共通している。発電は発電需要に応じて行うため、他の水利用に関係なくできる非従属発電を行う場合は特に、放流量の変動が大きくなるのは当然と考えられる。実際、先述のダムのうち、金山、美和、大雪、田瀬、矢木沢、下笠、九頭竜は非従属発電を行っている。しかし、豊平峡、川俣、園原は、発電を他の水利用に

従って行う従属発電方式をとっているダムである。他の水利用とは灌漑用水、都市用水、不特定用水であるが、これらはどちらかという流量の平滑化にはたらくものと考えられ、矛盾が生じる。

そこで、豊平峡ダムについて目的別の毎正時放流量データを入力し、放流の実態をより詳細に把握した。豊平峡ダムの流入量および放流量は日データで見ると図-10のようになっている。しかし、先述の詳細データでその内訳を見たところ、放流量が比較的少ない1時期の放流は全て発電放流となっていることが多く、発電放流を行っていない時間は全放流量も0となっている期間もあった。ダムからの放流が灌漑用水、都市用水、不特定用水に依存しているならば、時間単位で放流量が大きく変動することは通常ないことから、従属発電とはいえず、発電以外の利水のための放流の必要がない時は、非従属発電と同様に発電需要に応じて放流することがあると推測できる。

以上から、従属発電方式のダムでも、放流量が短時間に大きく変動する場合があることが示された。

次に、先述の指標値下位グループについて、放流量の年間変動の傾向を分析した。その結果、年間を通じて放流量の変動が大きいものだけではなく、洪水期よりも非洪水期に放流量の変動が大きくなる傾向があるものがあることがわかった。中でも、図-11に示す九頭竜ダム等の揚水式発電が行われているものは変動が大きいものが多い。については、図-12に示した美和ダムのように、非洪水期に、洪水期（6月～9月）の洪

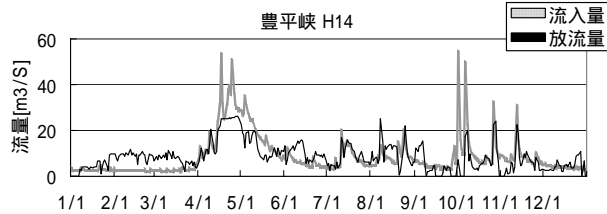


図-10 豊平峡ダムにおける流入量と放流量（H14）

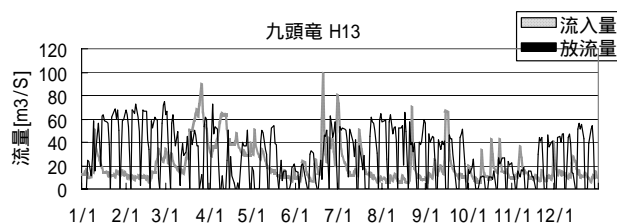


図-11 九頭竜ダムにおける流入量と放流量（H13）

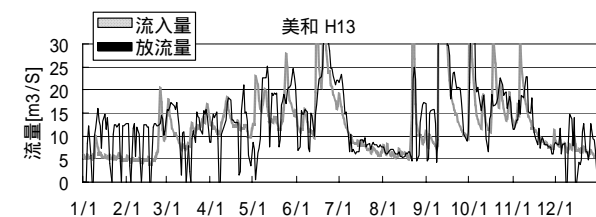


図-12 美和ダムにおける流入量と放流量（H13）

水調節容量の一部が非従属発電に振りかわるダムに見られる。

先述のように、発電放流量は、発電需要に応じて短時間の間に変化することが多い。したがって、毎正時の平均である日放流量が安定していても、時刻流量は大幅に変化している可能性がある。さらに、発電による減水区間は流量が安定しているが、発電用水が合流した後は変動が大きくなり、さらに支川が流入するごとに変動割合が緩和される等、下流河川の流況に与える影響は区間毎に様相が異なるため、詳細に短時間の流量変動を分析するためには、時刻ごとの発電取水量データを入力し、発電用水の放流地点を把握するとともに、支川の流入地点及びその支川の流域面積等を把握する必要がある。

(4) 季節ごとの流況の変化

まず、平常時の流量の季節別の変化について述べる。洪水期に必要な洪水調節容量を確保するため、貯水位を一定の水位（制限水位）まで下げしておく制限水位方式は、洪水期に入る前に水位を落とすため、流入量より多い放流を行うことにより貯水池の水位を低下させる（ドロダウニング）。このため、制限水位方式のダムは洪水期前に自然流況に比べて流量が多くなる傾向が見られる。逆に、洪水期が終わった後は制限水位から常時満水位を目指してなるべく水位を上げようとするところから、放流量は流入量に比べて減少する傾向が見られる。図-13は平成14年の川治ダムの流入量と放流量のグラフである。川治ダムは、7月1日から9月30日の間制限水位まで水位を落として、洪水調節容量を確保している。そのため、洪水期前の5、6月に放流量が流入量を上回る傾向が見られ10、11月は逆に流入量を下回る傾向が見られる。

また流域の積雪量が多いダムでは、融雪出水に備えてあらかじめポケットを確保し融雪水をため込んで利水に活用する運用を行うものが多いため、融雪期における攪乱が減少する傾向が見られる。図-14は平成8年の玉川ダムの流入量と放流量である。融雪期の攪乱低減と

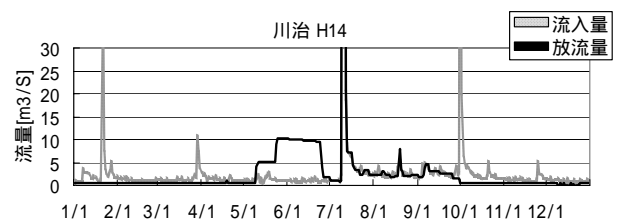


図-13 川治ダムにおける流入量と放流量（H14）

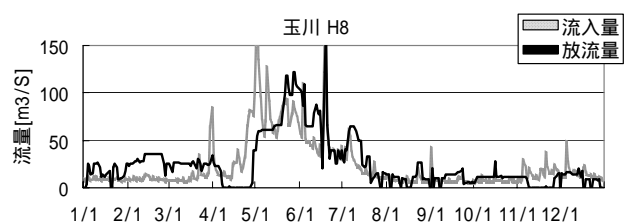


図-14 玉川ダムにおける流入量と放流量（H8）

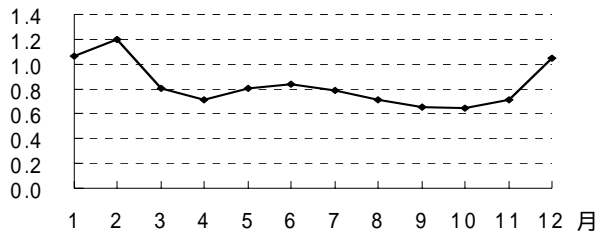


図 - 15 月別最大放流量の総和 / 月別最大流入量の総和の平均値

もに先述の洪水期前後の放流量の特性がよく表れている。

次に、月最大流入量に対する、月最大放流量の比率の月ごとの相違を見ることにより、放流量の期別の特性の分析を試みた。なお、いずれも瞬間値である。まず、平成5年から平成15年を対象に、各ダムで月別最大流入量の合計値に対する月別最大放流量の合計値の比を算出し、全国についてその平均値を月別に算出した。

その結果を示したのが、図 - 15 である。4月と10月が低く、冬と6月が高くなる傾向が見られる、すなわちWの形状になる。その理由は以下のように考えることができる。

冬場は洪水調節を行うことがほとんどないため、月別最大で見ると流入量と放流量が同程度になる、あるいは融雪出水に備えて少しずつ貯水位を下げるため放流量が多めになる。

4月前後に融雪出水により流入量が多くなるのに対して、この時期の貯水位は低めになっているためにこれを呑み込む余裕が多いことから、放流量が流入量に対し低めになる。

多くのダムで採用されている制限水位方式のダムでは6月前後に制限水位めがけて貯水位を低下させるため、この時期はダムの放流量が増加する傾向になる。さらに5月前後は灌漑用水の補給のため、放流量が増加する傾向がある。

制限水位方式のダムでは非洪水期への移行期間に貯水位を上げようとするため、10月前後に放流量を絞り込む傾向がある。さらに9月前後は台風による出水に対応するため放流量を絞り込む傾向がある。

3. まとめ

ダムによりどのような流量変換が行われているか4つの軸についてその度合いを示す指標を提案し、その指標値の全国的なばらつきの中での位置づけから個別のダムの流量変換機能としての特徴を浮き彫りにする道筋を示した。さらに、その特徴が現れる要因について分析を行った。

その結果、出水時のピーク流量の減少度合いの大小は、洪水調節開始流量に流入量が達する頻度、洪水調節方式、利水放流施設能力等の相違が要因と考えられること、平

水時の流況の平滑化が顕著なダムは有効貯水容量に対する都市用水容量の割合が高いこと、短時間で大きな流量変動が見られるダムは発電を目的に含んでおり、従属発電のダムでもその傾向が見られる場合があること、月ごとに最大放流量 / 最大流入量を算出したところ、冬季及び6月前後が高く、4月及び10月前後で低くなる傾向が見られること等がわかった。

言うまでもなく、ダムによる流量変換だけでは環境への影響について評価することはできない。このような流量変換が、下流河川的环境にどのような影響を及ぼすか、すなわち流量変換を環境変換へつなげていくための検討を今後さらに進めていく必要がある。

流量の変化は河道の物理環境に影響を与え、物理環境の変化は植生や底生生物等の生物・生態系に影響を与える。このうち前者については、河川工学の知見の蓄積が相当進んでいることから、その体系化に向けた取り組みも行われている⁵⁾。後者については依然として未解明な部分が多く残されている。

アメリカ等大陸のダムでは自然流況を極端に変えていることが多いのに対して、日本のダムは本研究で示したように流量変換の様相は様々であることから、個々のダムの流量変換の特徴を踏まえ、その変換の背景となっていることを総体的に理解することが、環境に配慮したダム管理や事業の実務の上で肝要である。

ダムの洪水調節容量の一部に流水を貯留して、洪水調節に支障を及ぼさない範囲で維持流量の増量放流やフラッシュ放流を行うダムの弾力的管理等、河川環境の整備・保全に資する取り組みが行われている。本研究によって抽出されたダムの流量変換特性についてさらに検討を深めるとともに、流量変換が及ぼす環境への影響についての研究を並行して行うことにより、より環境に配慮したダム管理の検討等にも寄与できよう。

参考文献

- 1) 皆川朋子, 清水高男, 島谷幸宏: 流量変動が生物に与える影響に関する実験的検討, 河川技術に関する論文集第6巻, pp191-196, 2000
- 2) 島谷幸宏: ダムと自然環境, 河川, No.695, pp6-14, 2004年6月号
- 3) 白川直樹, 山本晃一: 人為的インパクトによる流況の変化, 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系, pp43-55, 技報堂出版
- 4) 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的人為的变化, 水工学論文集第50巻, pp1255-1260, 2006
- 5) 藤田光一: ダム下流河道の物理環境を検討する手法の体系化についての取り組み, 河川, No.713, pp29-33, 2005年12月号