

流出特性に応じたダム放流量の決定方法と その洪水水位低減効果に関する研究

STUDY ON DETERMINATION METHOD OF A DAM DISCHARGE BASED ON THE RUNOFF CHARACTERISTICS AND ITS REDUCTION EFFECTS ON FLOOD

秋葉雅章¹・腰塚雄太²・宮本 守³・戸谷英雄⁴・佐藤直良⁵・山田 正⁶

Masaaki AKIBA, Yuta KOSHIZUKA, Mamoru MIYAMOTO, Hideo TOYA, Naoyoshi SATO and Tadashi YAMADA

¹正会員 国土交通省 九州地方整備局 熊本河川国道事務所 調査第一課 (〒862-0929 熊本県熊本市西原1-12-1)

²学生員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 工修(独) 土木研究所 (CREST/JST) (〒305-8516 茨城県つくば市大字南原1番地6)

⁴正会員 河川環境管理財団 研究第4部 部長 (〒104-0042 東京都中央区入船1-9-12)

⁵正会員 独立行政法人水資源機構 経営企画部長 (〒330-6008 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2)

⁶正会員 工博 中央大学理工学部教授 土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-27-13)

The effects of flood control and water use by a dam is looked at from the point of view of total management of a large-scale river basin. We propose a method of discharge control by dam operation intended to increase the efficiency of flood control and water use. This method is based on the idea that releasing the amount of discharge which flows into a dam certainly in the rainfall that has already fallen. Furthermore, we propose a method of graphical method that based on this theory, for the first step to apply on actual dam application by the operation. And we analyzed by looked at from the viewpoint of flood water-level effect of decreasing in the downstream by preliminary discharge.

Key Words : flood controle, water use, runoff characteristics, preliminary discharge, graphical method

1. はじめに

我が国の水資源においては、主に河川や地下水にその源を求めており特に河川の水においては歴史的にも高度に利用されてきた。古くはため池で水を貯留し必要な水を確保するという利水的な事業に始まり、我が国の社会生活の発展は支えられてきた。近代においては土木技術の蓄積・発展を背景に全国に数多くの大規模ダムが建設され、安定した水資源の供給という国民生活には欠かせない大きな役割を果たしてきた。これらの取り組みにより全国的には水需要に対して供給が追いつかないという状況は脱しつつあり渇水による被害は大幅に軽減されたと言える。しかしながら、ため池やダムの建設により利水的な安全性は高まったものの、近年においては依然渇水による被害が頻発している。これら依然起こりうる渇水被害や国民生活環境の変化へ順応するためにも、今後も着実な治水対策は進められるべきであり、ダムにおける利水上の役割も更に重要性が増すものと考えられる。

一方我が国においては、世界でも有数の多雨地帯であり、梅雨時や台風時の短期間に集中して降雨が発生するという気候条件、また急峻な地形により構成されている

という非常に厳しい地形条件下に置かれている。このような国土条件の中、古来から多くの治水対策がなされてきた。堤防嵩上、河床掘削、引堤等がその例である。これらの手法は河川上の土地利用の発展や環境に与える影響を考慮し、放水路、遊水池、ダムなどとの治水手法の組み合わせによりその効果を発揮してきた。結果、洪水による人的被害は大幅に軽減され、浸水面積の減少に伴い高度利用が可能な土地の供給が可能となった。しかしながら依然として洪水被害は頻発しており、治水同様今後も着実な治水対策が行われるべきである。このような背景の中、治水対策上最も効果を発揮する一つの手法としてダムによる洪水制御が挙げられる。高埤、池淵、小尻ら¹⁾は1つの水系スケールにおいて降雨の時・空間分布を基に最も効率的な治水計画策定を行っている。本研究では、今後ダムを建設する場合、また既設のダムに対しても、治水、利水、環境という観点において最大限にその効果を発揮させる手法を提案することを目的として、まず一つのダムに着目しその効率化を図ることを目的として解析を行った。これまで予備放流方式によりダム放流操作を行った例はあるが、本研究ではダム流域の流出特性に応じて可能となる独自の理論に基づき前期放流量を

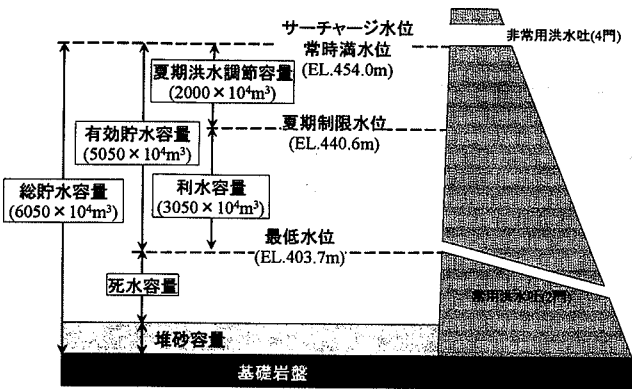


図 - 1 草木ダム容量配分図 (草木ダム管理事務所 HP 参照)

算出した。その手法とは既に降った降雨のうち確実にダム湖へ流入する量、すなわち流入ハイドログラフ逓減部の積分値を毎時算出し、その量を前期放流量の総量とするものである。また、この操作方法を用いた場合に下流での水位を現行のダム操作を行った場合と比較した。さらに、実際のダム運用操作の難しさから、前期放流量を図式解法によって同様に算出する手法も示した。

2. 解析対象流域

本研究では首都圏の水資源需要において最大の影響力を持つ利根川流域を対象として解析を行った。

(1) 利根川上流の 10 ダムの諸元

利根川水系に位置する 10 個のダムの諸元を表 - 1 に示す。利根川流域には治水目的を持つ大きなダムは 10 個存在し(草木、園原、川治、五十里、川俣、下久保、藤原、矢木沢、奈良俣、相俣; 水文水質 DB より)、全てが多目的ダムである。最も貯水容量が大きなダムは矢木沢ダムで $17580 \times 10^4 \text{ m}^3$ であり、最も貯水容量が小さなものは園原ダムで

$1414 \times 10^4 \text{ m}^3$ であるが、園原ダムが持つ集水面積は利根川水系の 10 ダムの中で最も大きい 493.9 km^2 である。このようにそれぞれのダムの持つ役割、特徴は異なるため、それらを十分把握した上で解析を行う必要がある。

(2) 解析対象ダムの概要と操作規則

本研究では利根川流域最大の支川である渡良瀬川本川に唯一存在する草木ダム(集水面積: 254 km^2)を例として解析を行った。図 - 1 は草木ダムの容量配分図である。

全国の現行のダム運用操作は一定率一定量放流方式や一定量放流方式等の固定した運用操作が採られているが草木ダムにおいては洪水時の原則的な操作規則は昭和 52 年の建設当時に定められており、それによると流入量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上を洪水と定義し、放流量は次の式 (1) のように決定される。ここに、 Q_{OUT} : 放流量 [m^3/s], Q_{IN} : ダム湖への流入量 [m^3/s] である。

$$Q_{OUT} = (Q_{IN} - 500) \times 0.1 + 500 \quad (1)$$

この放流規則で対処しきれないような洪水の際にはダムが満水になってくるとただし書き操作により流入量とほぼ同じ量が放流される。草木ダムのこれまでの既往最大放流量は 2001 年 9 月 10 日(台風 15 号)の $906 \text{ m}^3/\text{s}$ である。このときの草木ダムにおける実際の運用状況を図 - 2 に示す。この洪水では残りの洪水調節容量が洪水調節容量全体の約 9% となった時点で、ただし書き操作に入った。その後ダム貯水位が夏期制限水位になるまで流入量と同じ流量を放流していることが分かる。このように、現在のダム操作規則では対処しきれないような大きな洪水が過去に発生しており、固定的な放流操作が必ずしも全ての洪水に対して機能しきれているとは言えないと考える。

3. 流出特性に応じた前期放流量の算出

表 - 1 利根川水系 10 ダムの諸元 (水文・水質 DB 参照)

ダム名	管理機関	河川名 (ダム所在地)	集水面積 [km^2]	堤高 [m]	有効貯水容量 洪水調節容量 [$\times 10^4 \text{ m}^3$]	サージング水位 [EL. m]	常時満水位 [EL. m]	夏期制限水位 [EL. m]	最低水位 [EL. m]	目的
草木ダム	水資源機構	渡良瀬川 (群馬県)	254.0	140	5050 2050	454.0	454.0	440.6	403.7	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・特定灌漑 ・工業用水 ・発電
園原ダム	国土交通省 関東地方整備局	片品川 (群馬県)	493.9	76.5	1414 1114	565.0	564.0	550.0	543.5	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・発電
川治ダム	国土交通省 関東地方整備局	鬼怒川 (栃木県)	144.2	140.0	7600 4000	616.0	616.0	594.0	544.0	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・特定灌漑 ・工業用水 ・発電
川俣ダム	国土交通省 関東地方整備局	鬼怒川 (栃木県)	179.4	117	7310 5249	976.0	976.0	967.5 (6月15日・8月14日) 965.5 (8月15日・9月30日)	930.0	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・特定灌漑 ・発電
五十里ダム	国土交通省 関東地方整備局	鬼怒川 (栃木県)	271.2	112.0	4600 -	591.0	586.0	578.0 (6月15日・8月14日) 575.0 (8月15日・9月30日)	566.0	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・発電
下久保ダム	水資源機構	神流川 (群馬県・埼玉県)	322.9	129	12000 3500	296.8	296.8	283.8	223.7	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・水道用水 ・工業用水 ・発電
相俣ダム	国土交通省 関東地方整備局	赤谷川 (群馬県)	110.8	67	2000 940	565.0	565.0	563.5	535.0	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・発電
藤原ダム	国土交通省 関東地方整備局	利根川 (群馬県)	138.2	95	3101 2120	654.0	651.0	639.0	624.0	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・発電
矢木沢ダム	水資源機構	利根川 (群馬県)	167.4	131	17580 2210	854.5	850.0	-	796.5	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・特定灌漑 ・水道用水 ・発電
奈良俣ダム	水資源機構	樽俣川 (群馬県)	60.1	158	8500 -	888.0	888.0	881.0	800.0	・洪水調節 ・流水の正常な機能の維持 ・特定灌漑 ・水道用水 ・工業用水 ・発電

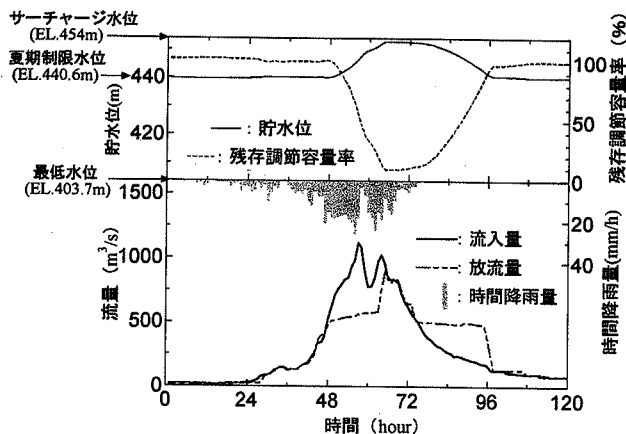


図-2 洪水時における草木ダム流域の
時間降雨量、流入・放流量の実測値

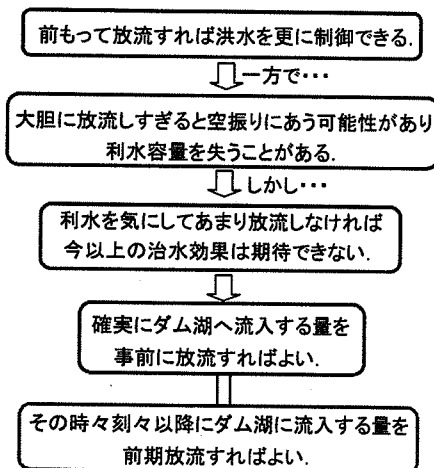


図-4 本研究で提案する放流ルールを考え方

(1) ハイドログラフ逓減特性を用いた流出特性

降雨予測を目的としたレーダや雲物理モデルを用いた研究は広く行われているが、その定量的な予測は未だ難しい。これらの現状が流入量の予測精度の低下を招き、ダム操作の難しさを生んでいる。ダム湖への流入量を予め知することは実際の管理上非常に有益なことであり、著者らは草木ダム流域の流出特性を過去 25 年間の観測データを回帰することによりその特性をハイドログラフ逓減部に着目し検証した。図-3 はピーク流入量とピーク時から 4 日間の総流入量の関係である。この傾向により草木ダムへの流入量のハイドログラフの逓減部を再現することができる。また図-3 よりダムへの流入量がピークからの 4 日間で最低でも $2000 \times 10^4 \text{ m}^3$ が草木ダムに流入していることがわかる。草木ダムの利水容量が $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ であるから、例えばダム操作により利水容量を使ったとしても 4 日間で夏期制限水位まで回復することが可能であると言える。

(2) 本研究で提案する放流理論

図-2 の事例に示したような大きな洪水に対しては前期放流によりダム貯水位を下げた状態で洪水を迎える事は治水に非常に効果的である。しかしダムの利水として

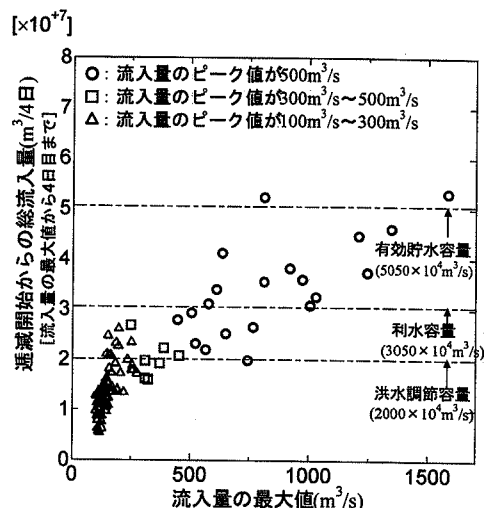


図-3 草木ダムにおける流入量のピークと逓減開始
以降 4 日間の総流入量の関係

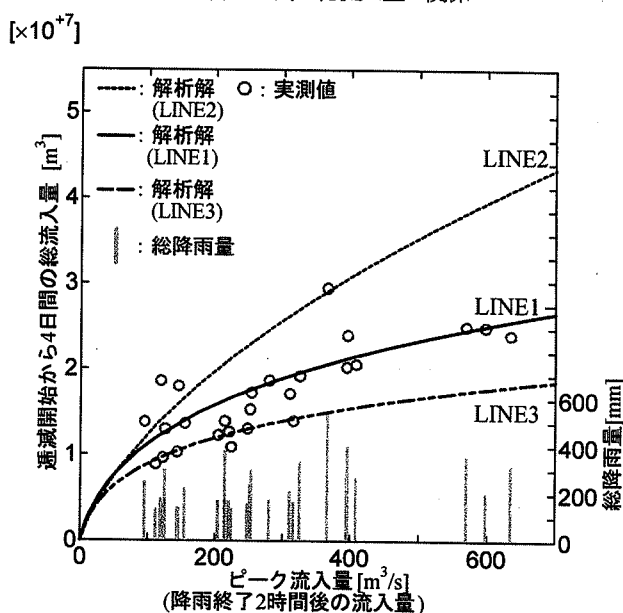


図-5 ピーク流入量と逓減開始から 4 日間の
総流入量の関係と放流量算出に用いた解析解
(V と Q_m の関係)

の役割を考慮すると夏期制限水位以下に貯水位を下げることはできない。これらを踏まえて治水的観点及び利水的観点から最適なダム放流量の決定方法の導出を試みた。図-4 にその理論過程を示す。本研究では、既に降った降雨のうち確実にダム湖へ流入する量、すなわちハイドログラフ逓減部の積分値を毎時算出し、その量を放流するという操作方法を提案している。この放流方法によりダム貯水位はいったん下がるものの前期放流の総量はハイドログラフ逓減部でダム湖へ流入してくるため、洪水終了後にダム貯水位は回復する。すなわち利水的安全性も確保した放流操作であると言える。

(3) 前期放流量の算出式

以上の理論を数学的定式化すると式 (2) になる。左辺は前期放流量の総量であり、右辺はハイドログラフ逓減部にダム湖へ流入する総流入量である。この式 (2)

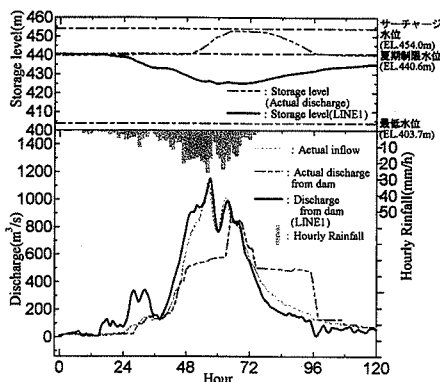


図-6 LINE1を用いて算出した放流量、実測流入量、現行の流量制御のハイドログラフと貯水位の時系列

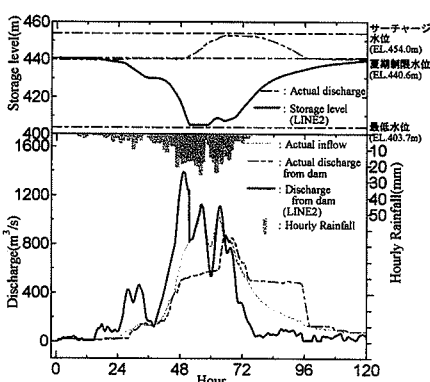


図-7 LINE2を用いて算出した放流量、流入量、現行の流量制御のハイドログラフと貯水位の時系列

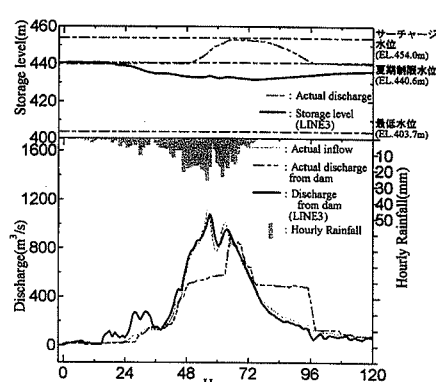


図-8 LINE3を用いて算出した放流量、実測流入量、現行の流量制御のハイドログラフと貯水位の時系列

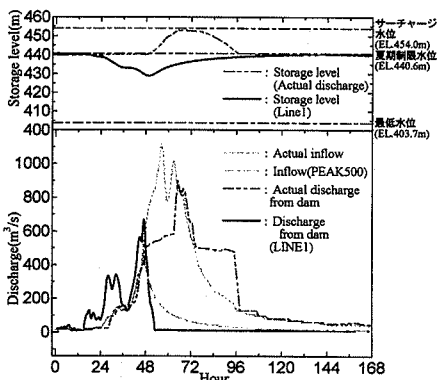


図-9 流入量が500m³/sで通減が開始したと仮定した場合の放流量、流入量、現行の流量制御のハイドログラフと貯水位の時系列

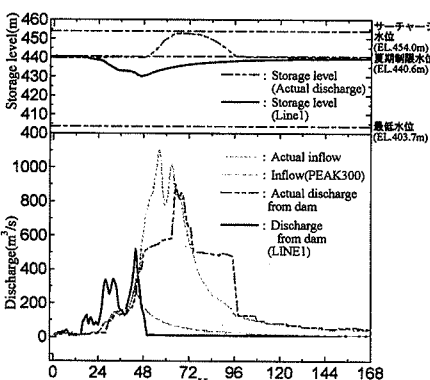


図-10 流入量が300m³/sで通減が開始したと仮定した場合の放流量、流入量、現行の流量制御のハイドログラフと貯水位の時系列

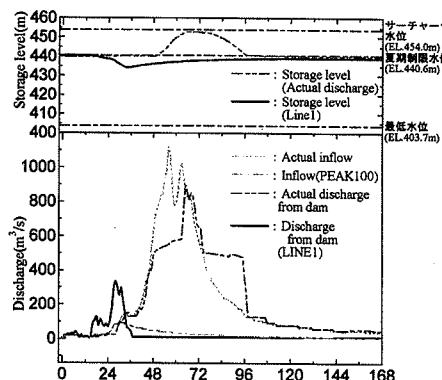


図-11 流入量が100m³/sで通減が開始したと仮定した場合の放流量、流入量、現行の流量制御のハイドログラフと貯水位の時系列

を時間 t で微分し変形することで式(3)を導出した。ここに V :流入ハイドログラフ通減部の総流入量[m³]である。さらに、式(4)よりダム貯水位も同時に算出した。

$$-\int_0^t (Q_{IN} - Q_{OUT}) = V(Q_{IN}(t)) \quad (2)$$

$$Q_{OUT} = Q_{IN} + \frac{dV}{dt} = Q_{IN} + \frac{dV}{dQ_{IN}} \cdot \frac{dQ_{IN}}{dt} \quad (3)$$

$$A(h) \frac{dh}{dt} = Q_{IN} - Q_{OUT} \quad (4)$$

流入ハイドログラフ通減部の総流入量である V の算出に当たっては、山田²⁾が導出した流出高通減部の解析解を積分した値である式(5)を用いた。

$$\int_0^{24n} q_{**}(t) dt = \frac{q_{**0}^{(1-\beta)} \left((1 + 24na_0\beta q_{**0})^{(\beta+1)/\beta} - 1 \right)}{a_0(\beta-1)} \quad (5)$$

ただし、

$$a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (6), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (7)$$

ここに α , m は流域の流出特性を表すパラメータであり

次の式(8), (9)によって土壌・地形特性(表層土層厚 D , 飽和透水係数 k_s , 有効空隙率 w , 透水性の減少の程度をあらわす無次元パラメータ γ , 斜面長 L)より表現する事ができる。

$$\gamma = m+1 \quad (8), \quad \alpha = \frac{k_s \sin \omega}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (9)$$

図-5は降雨終了後から2時間後の流入量とその後4日間の総流入量の関係の解析解及び実測値、総降雨量を示したものである。すなわち、式(3)の V と Q_{IN} の関係である。この V と Q_{IN} の関係が既往の観測データから作成することで本研究の放流理論は、どのダム流域に対しても適用可能である。前期放流量の算出には以下に示す3ケースを用いた。これらは流出パラメータに、

- ・実測値の平均値を用いた場合: LINE1
- ・通減部の総流入量が最も多い場合: LINE2
- ・通減部の総流入量が最も少ない場合: LINE3

である(本論文では以後これらをLINE1, LINE2, LINE3と定義する)。

(4) 前期放流量の算出結果

草木ダム流域で既往最大の放流量(906m³/s)を記録した2001年9月8日~13日(台風15号)の洪水に対し

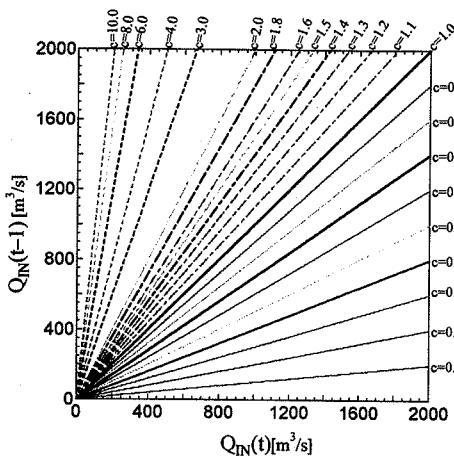


図-12 $Q_{IN}(t)$ と $Q_{IN}(t-1)$ の関係
(c (式 (3)) の決定)

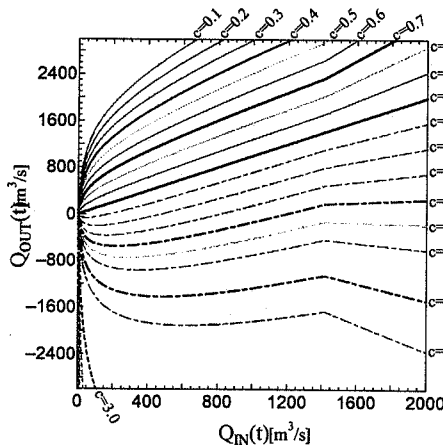


図-13 $Q_{IN}(t)$ と $Q_{OUT}(t)$ の関係

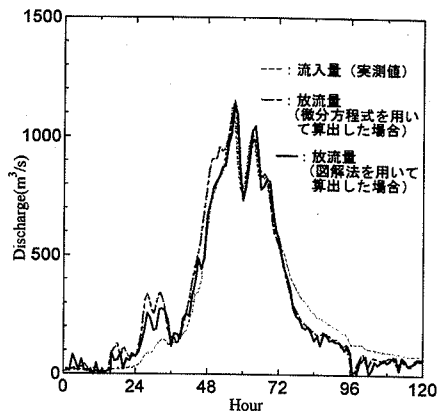


図-14 図式解法により算出した放流量と式(3)を用いた数値解法により算出した放流量の比較

て放流量を算出した。LINE1, LINE2, LINE3 を用いて放流量を算出した場合の流入量, 放流量, 貯水位の時系列をそれぞれ図-6, 7, 8 に示す。ここで, LINE2 を用いた場合では流入量のピーク付近で貯水位が最低水位まで下がっており, その際には流入量と同じ流量を放流している。図-7 より, LINE2 を用いた場合には貯水位は完全に夏期制限水位まで回復している。しかし降雨が途中で止んでしまった場合にも適用可能な放流操作でなければ実際のダム管理において意味を成さない。そこで前期放流を行った後, 早い段階で雨が止んだ場合に貯水位が回復するか否かを検証する。本論文では流入量のピークが $500 \text{ m}^3/\text{s}$, $300 \text{ m}^3/\text{s}$, $100 \text{ m}^3/\text{s}$ になった時点で降雨が終了し, 洪水が逡減開始した場合を想定した。放流量算出には LINE1 を用いた。図-9, 10, 11 は放流量を算出した結果であるが, どの場合でも洪水終了後に貯水位は夏期制限水位まで回復していることが分かる。

4. 図式解法による前期放流量の決定方法

以上述べてきた放流量算出方法は式 (3) に示した微分方程式を用いた数値解法により算出している。実際のダム管理現場では, 洪水時の非常に緊迫した中で的確な, 且つ瞬時の判断力が必要とされる。そこで本研究では図式解法による放流量決定手法も同時に発案した。式 (3) の dV/dQ_{IN} は図-6 の V と Q_{IN} の関係から予め作成しておくことが可能である。また式 (3) の dQ_{IN}/dt を差分化することで以下の式 (10) が得られる。

$$Q_{OUT} = Q_{IN} + \frac{dV}{dQ_{IN}(t)} \cdot \frac{Q_{IN}(t) - cQ_{IN}(t)}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\text{ただし, } c = \frac{Q_{IN}(t-1)}{Q_{IN}(t)} \quad (11)$$

式 (8) 中の定数 c を図-12 により決定すれば図-13

より Q_{IN} と c の関係から現時点の放流量 Q_{OUT} を算出できる。図-14 には図式解法を用いて算出した放流量と式 (3) に示した微分方程式による数値解法により算出し

た放流量との比較である。この結果からかなりの精度で放流量の算出が可能となることが分かる。

5. 前期放流による流量制御と洪水水位低減効果

実際のダムにおいては, 算出した放流量を前期放流量に適用し, 治水容量を大きくとった状態で洪水を迎えることが有効である。LINE1 を用いて前期放流量を決定し, 流入量が $500 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えてからは現行の流量制御通りの放流を行った場合の流入量, 放流量, 貯水位の時系列を図-15 に示す。その際のダム下流 22km 地点と 42km 地点で前期放流を行った流量制御の水位をダムによる制御のない場合, 現行の流量制御を行った場合と比較するために利根川河道全体を不定流計算した。図-17 は計算に用いた利根川河道網と懸案地点である。

(1) 基礎式と計算条件

河道部の不定流計算には連続式及び不定流の基本式 (サン・ヴナン式) を用いている。連続式及び運動量保存式を式 (12) と式 (13) にそれぞれ示す。ここに, A: 通水断面面積 [m^2], Q: 流量 [m^3/s], q: 側方流入流量 [m^3/s], α : エネルギー補正係数 (1.0), h: 水深 [m], g: 重力加速度, n: Manning の粗度係数, R: 径深 [m] である。水位計算点と流量計算点を交互に配置するスタッグート法で差分化し, 陰解法 6 点アボットスキームによって解いている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (13)$$

河道の粗度係数は渡良瀬川には 2001 年と 2002 年の洪水痕跡調査からセグメントごとに逆算した値を与え, 渡良瀬川以外の河道には上流部, 中流部, 下流部のそれぞれに 0.03, 0.025, 0.02 を与えた。草木ダム上流の上流端境界条件は実測流入量を与え, 渡良瀬川流域の上流端境界条

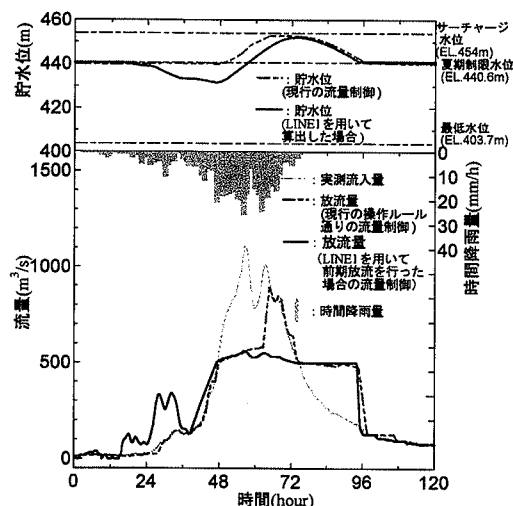


図-15 Line1 を用いて前期放流を行った流量制御、
実測流入量、現行の流量制御の
ハイドログラフと貯水位の時系列

件には実測流量のうち残流域のみからの流量を与えた。
渡良瀬川以外の上流端境界条件には、草木ダムでの実測
流入量の流出高を集水面積倍した流量ハイドログラフを
与えた。下流端境界条件は江戸川河口と利根川河口のそ
れぞれに芝浦、鹿島で実測された潮位の時系列を与えた。

(2) 前期放流による洪水水位低減効果

前期放流を行った際のダム下流 22km 地点と 42km 地
点での水位のハイドログラフを図-17, 18 に示した。前
期放流を行った流量制御ではただ書き操作を回避して
いるため、ダム下流 22km 地点においては、洪水自体の
ピーク水位を 77cm、現行の流量制御と比較すると 58cm
ピーク水位を下げていることが分かる。ダム下流 42km
地点においては、洪水自体のピーク水位を 43cm、現行
の流量制御と比較すると 26cm ピーク水位を下げている
ことが分かる。

6. まとめ

本論文では独自のダム放流理論に基づき、数値解法と
図式解法による前期放流量算出手法を提案した。またこ
の放流方法がダム下流域に与える効果を下流の水位に着
目し検証した。それにより得られた知見を述べる。

- 1) 本研究独自の理論による前期放流を用いたダム放流
量の決定方法を提案した。この方法により前期放流を行
った後、早い段階で雨が止み洪水とならなかった場合で
もダム貯水位は夏期制限水位まで回復することを示した。
- 2) 微分方程式を用いた数値解法以外にも、図式解法に
よるダム放流量決定方法も同時に発案した。これにより
洪水時において瞬時にダム放流量を算出することが可能
であることを示した。
- 3) 前期放流を行うことで2001年9月の洪水ではただし

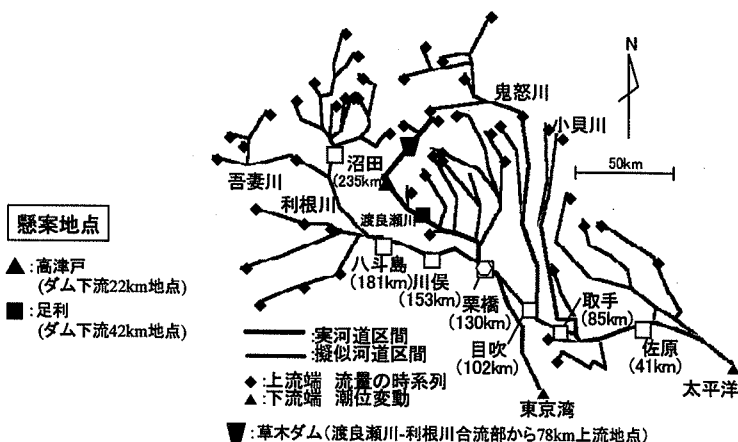


図-16 計算に用いた利根川河道網と懸案地点

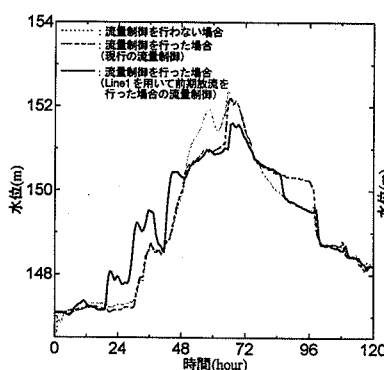


図-17 ダム下流 22km 地点に
おける水位のハイドログラフ

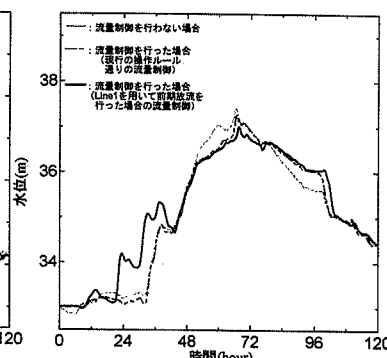


図-18 ダム下流 42km 地点に
おける水位のハイドログラフ

書き操作を回避でき、さらには下流での水位において、
ダム下流 22km 地点で洪水自体のピーク水位を 77cm、
現行の流量制御と比較すると 58cm ピーク水位を下げる
ことが可能になった、また、ダム下流 42km 地点では洪
水自体のピーク水位を 43cm、現行の流量制御と比較す
ると 26cm ピーク水位を下げることも可能になった。

謝辞：本研究の遂行にあたっては河川環境管理財団研究
顧問吉川秀夫先生から有益なご助言を頂いた。こ
の助言なしには本研究の成果は得られなかった
ものとする。また草木ダム管理事務所からは貴
重な観測データを提供して頂いた。ここに記して
関係者各位に深甚なる感謝を表す。

参考文献

- 1) 高橋琢馬, 池淵周一, 小尻利治: 水量制御からみたダム群
のシステム設計に関する DP 論的研究, 土木学会論文報告
集, 第 241 号, pp.33-50, 1975.
- 2) 山田正: 山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水理
講演会論文集, Vol.47, pp.259-264, 2003.
- 3) 志村光一, 大原憲明, 松本浩志, 山田正: 水理計算に基づく大
規模河道網の洪水流出特性に関する研究, 水文・水資源学会
誌, Vol.14, No.3, pp.217-228, 2001.

(2004. 4. 7 受付)