

平成18年度土木学会全国大会 研究討論会  
『ダムが有する治水機能の再評価と豪雨対策』  
水工学委員会

# 既存ダム群の洪水調節機能の向上

中央大学理工学部 山田 正

# 発表の流れ

1. 研究背景および研究目的
2. 提案する事前放流手法について
3. 提案する洪水調節手法を用いた操作について  
(対象とするダム流域のデータのみを用いた場合)
4. 提案する洪水調節手法を用いた操作について  
(ダムの上・下流の降雨データを用いた場合)
5. 可能放流量(ダムから放流して良い最大の流量)について
6. 提案する洪水調節手法を用いて操作した時の洪水水位低減効果
7. まとめ

# 1. 研究背景

## 近年の豪雨・高潮災害

- 1990年～ : フィリピンで毎年台風による水害
- 2002年 : ヨーロッパ水害
- 2003年5月 : スリランカ豪雨被害
- 2003年8月 : 北海道胆振・日高地方豪雨災害
- 2004年7月 : 新潟・福島豪雨, 福井豪雨
- 2005年9月 : ハリケーン カトリーナによる災害



2004年7月 豪雨によって浸水した新潟県三条市  
(国土交通省河川局HPより抜粋)

## 我が国の治水対策

- ・堤防嵩上
- ・河床掘削
- ・放水路
- ・引堤
- ・遊水地
- ・ダムのゲート操作による洪水調節



京都府舞鶴市の由良川では堤防が決壊し、バスに乗客が取り残されバスの上で救助を待つ人々  
(国土交通省河川局HPより抜粋)



朝日新聞H16.11.20記事より抜粋

# ● 事前放流に対する我が国の取り組み

**読売新聞**

発行所  
読売新聞東京本社  
第46531号  
〒100-8055  
東京都千代田区大手町1-7-1  
電話 (03)3242-1111 (代)  
http://www.yomiuri.co.jp/

平成17年 9月29日 木曜日

母と一緒に温泉  
**芦野温泉**  
あしの  
こころの湯でありたい

0287 (74) 0211  
http://www.asinoonsen.co.jp  
アルカリ性単純泉 pH9.85 源泉温度41.5℃

## 利水分もダム事前放流

### 豪雨対策で方針転換

国交省

豪雨被害が相次ぐ中、国土交通省は、台風などの接近に先立ち、水道や発電など「利水」用にとめられたダムの水を流す「事前放流」に乗り出している。従来の河川行政では、どんな大雨が予想されようとも、利水には手を付けず、というのが不文律だった。だが昨年来の連続豪雨に対応するため、戦後一貫して続いた方針の一大転換に踏み切った。事前放流には、雨量予想が外れて後で水不足になるといふリスクもつきまとうが、国交省は「最少雨量」予測システムの開発を目指し、過放流による漏水を防ぐ構えだ。

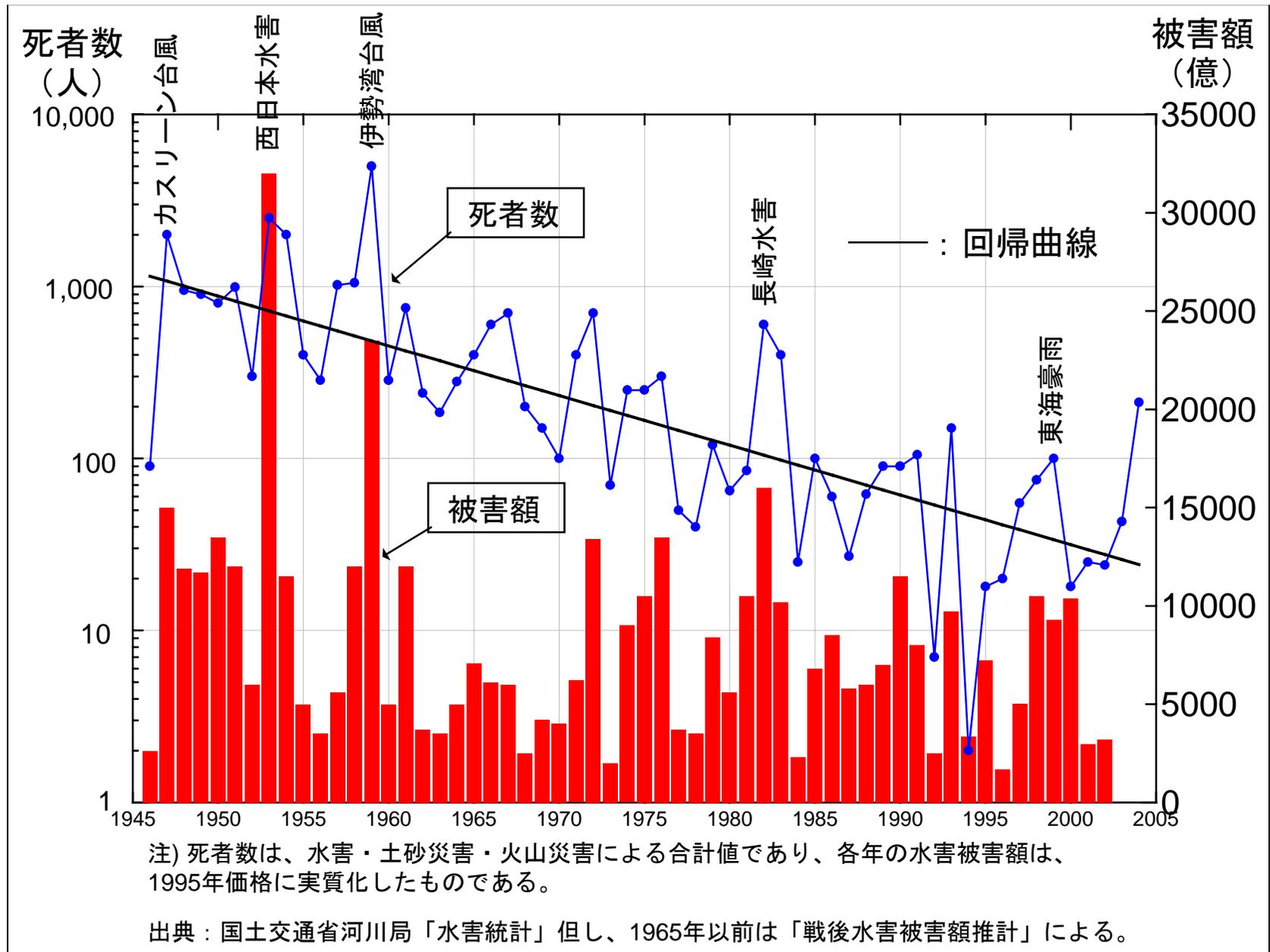
近年のダムは、水送や発電、農業などのために水を貯めるだけでなく、大雨の際に水をせき止めて洪水を防ぐ「治水」の両方の機能を併せ持つ多目的ダムが多い。

台風や前線が接近した際には、ダムをできるだけ空の状態に保ち、おいた方が、洪水を防ぐ能力は高まる。だが、利水用と治水の両方を放流するには、下流の自治体や電力会社などに、台風の接近を知らせ、事前放流の要請を出さなければならない。国交省は、いくらかの事前放流を想定しようとも利水分は放流しないというのが長年の方針だった。

ところが昨年は、7月に新潟、福島、福井で豪雨被害が発生、その後もハイペースで台風が上陸した。こうした中、治水機能を持つダムでは国内最大級の早明浦ダム（長野県）や高知県では、昨年8月17、18日の台風15号による大雨で貯水率が95・5%に達していたなど、台風16号が接近、下流で水害が起きる危険が高まった。このため国交省は、同月28日、利水分も事前放流の仕組み

水が1億6500万立方メートルに達する危険感が長年のうち1000万立方メートルを慣習を破った」とする。この放流した。長年の慣習を破る初の事前放流となった。諮問機関は昨年12月、「事前放流の推進」を提言。結局、九州、中国を縦断した16号で予想通り大雨が降り、早明浦ダムには5400立方メートルの水が新たにたまった。同省河川局は豪雨に先立ち、26日午後3時38分、立川を事前放流し、洪水を食い止めるのに一定の効果を見せた。このため国交省は、事前放流をこれまで行われていなかったのは、台風が予想コースを外れたり、小雨になったりすると、ダムの水位が回復しない恐れがあるからだ。このため国交省では、国土技術政策総合研究所（茨城県つくば市）に全国70ダムの過去の雨量観測データを分析を依頼し、庁の協力を求めて、最少雨量の予測に乗り出した。同省は、最少雨量ができれば自治体の同意が得やすいと話している。

2005年9月29日：読売新聞より抜粋



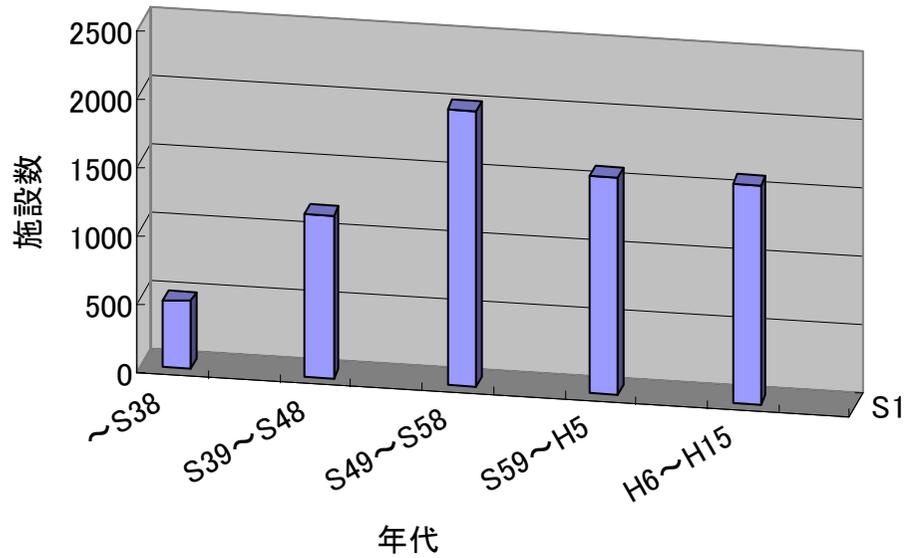
- 計画的な治水事業などにより、死者数は確実に減少してきている

# 全国のゲート規模別・年代別総数表 (平成15年度末時点)

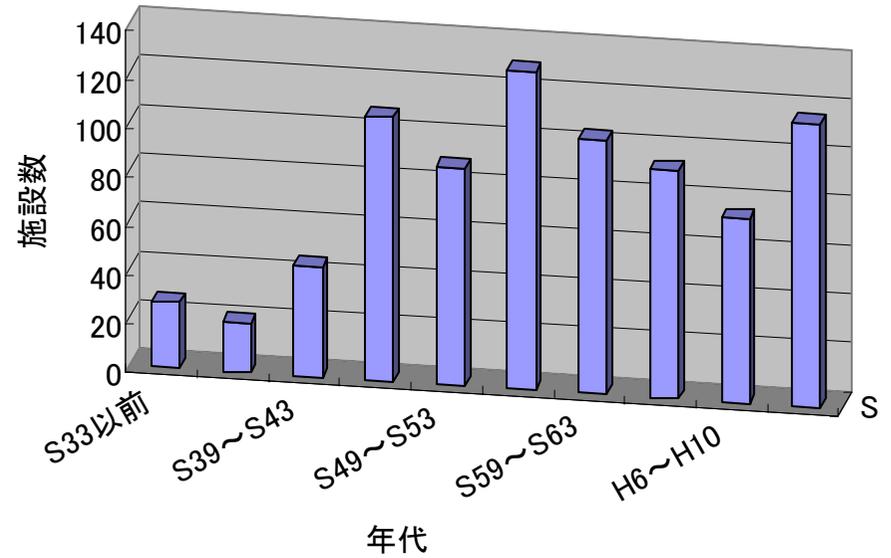
	設置年次											合計 ( )内は施設合計に対する割合
	設置年次不明	設置後40年以上		設置後40年経過		設置後30年経過		設置後20年経過		設置後10年経過		
		～S38		S39～S48		S49～S58		S59～H5		H6～H15		
	S33	S34～S38	S39～S43	S44～S48	S49～S53	S54～S58	S59～S63	H1～H5	H6～H10	H11～H15		
河川用ゲート (小形:10m <sup>2</sup> 未満)	285	497		1,188		2,013		1,589		1,593		7,165(81.8%)
各年代ごとの割合	4.0%	6.9%		16.6%		28.1%		22.2%		22.2%		100.0%
河川用ゲート (中形:10～50m <sup>2</sup> 未満)	15	27	20	45	108	89	130	104	93	75	116	822(9.4%)
各年代ごとの割合	1.8%	3.3%	2.4%	5.5%	13.1%	10.8%	15.8%	12.7%	11.3%	9.1%	14.1%	100.0%
河川用ゲート (大形:50m <sup>2</sup> 以上)	0	7	10	14	34	48	49	32	38	25	24	281(3.2%)
各年代ごとの割合	0.0%	2.5%	3.6%	5.0%	12.1%	17.1%	17.4%	11.4%	13.5%	8.9%	8.5%	100.0%
ダム用ゲート、 放流設備	5	25	13	34	40	25	61	87	46	80	77	493(5.6%)
各年代ごとの割合	1.0%	5.1%	2.6%	6.9%	8.1%	5.1%	12.4%	17.6%	9.3%	16.2%	15.6%	100.0%
合計	305	599		1,463		2,415		1,989		1,990		8,761
各年代ごとの割合	3.50%	6.80%		16.70%		27.60%		22.70%		22.70%		100%

右の出典より著者が作成した資料:国土交通省 ゲート設備の効率的な維持管理方策に関する検討会  
平成17年3月23日

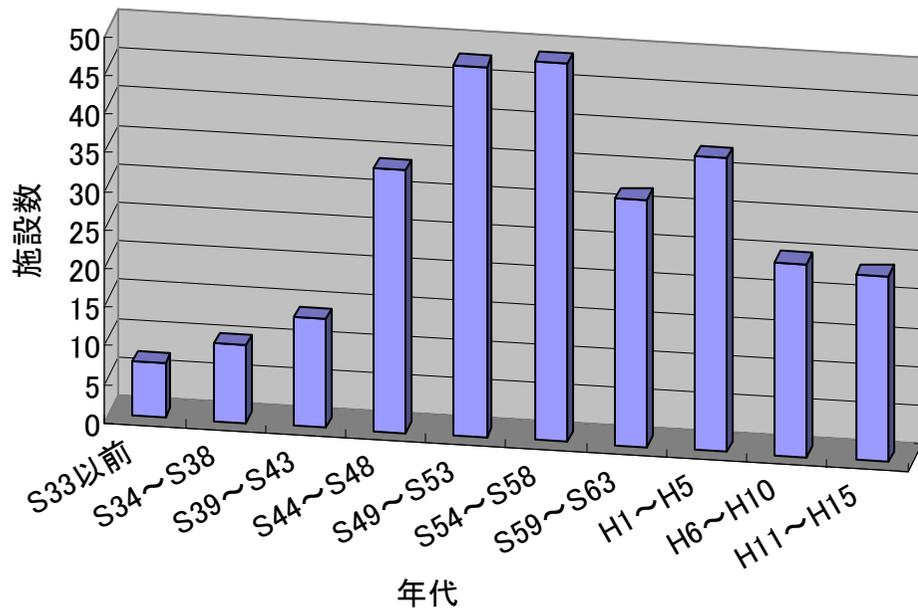
河川用ゲート(小形)



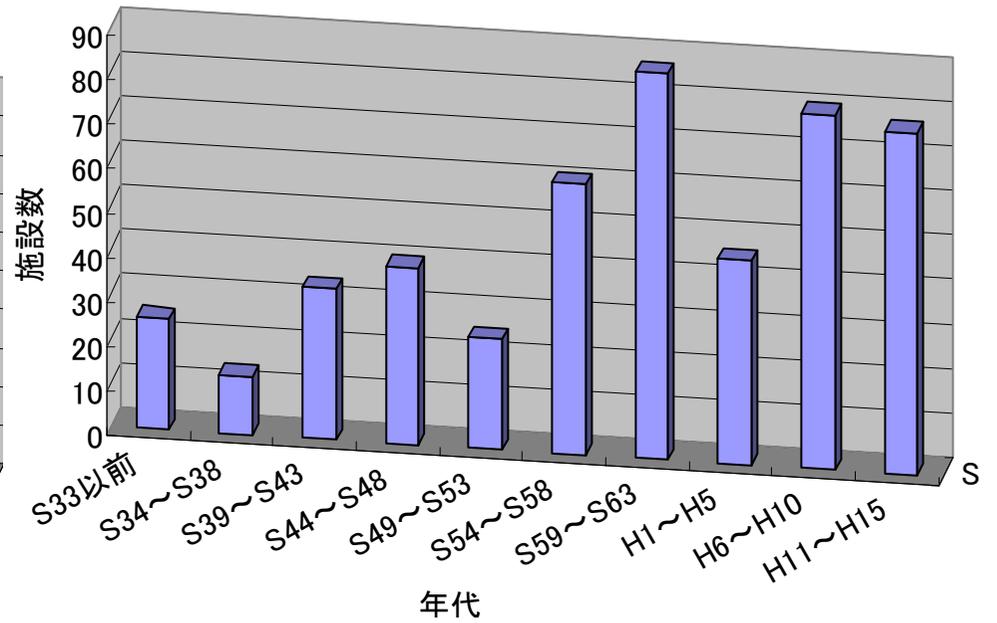
河川用ゲート(中形)

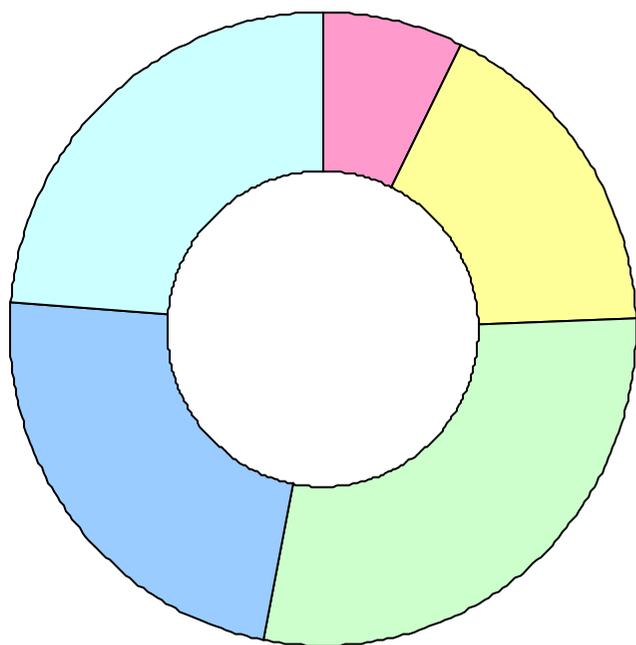


河川用ゲート(大形)



ダム用ゲート、放流設備



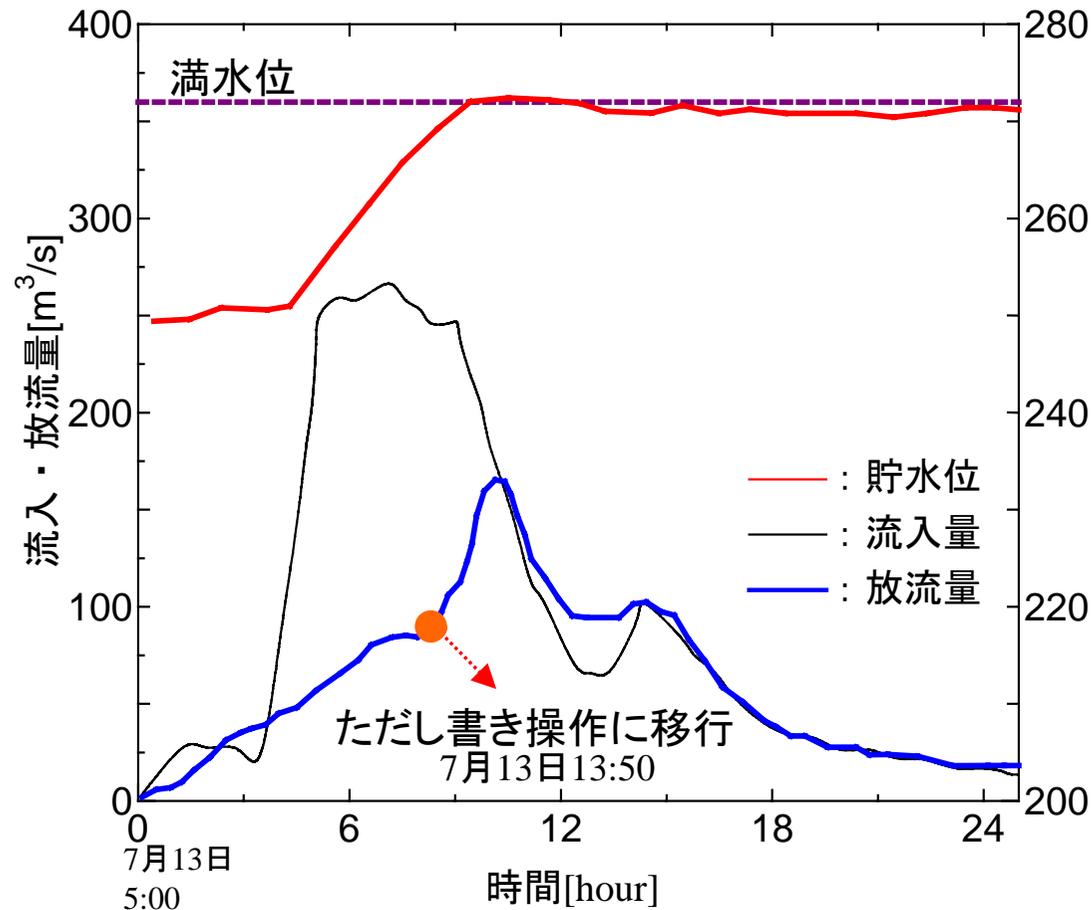


- :設置後40年以上経過
- :設置後30~40年経過
- :設置後20~30年経過
- :設置後10~20年経過
- :設置後10年未満

年度別\_全国直轄管理施設数

# ● ただし書き操作による洪水調節の例

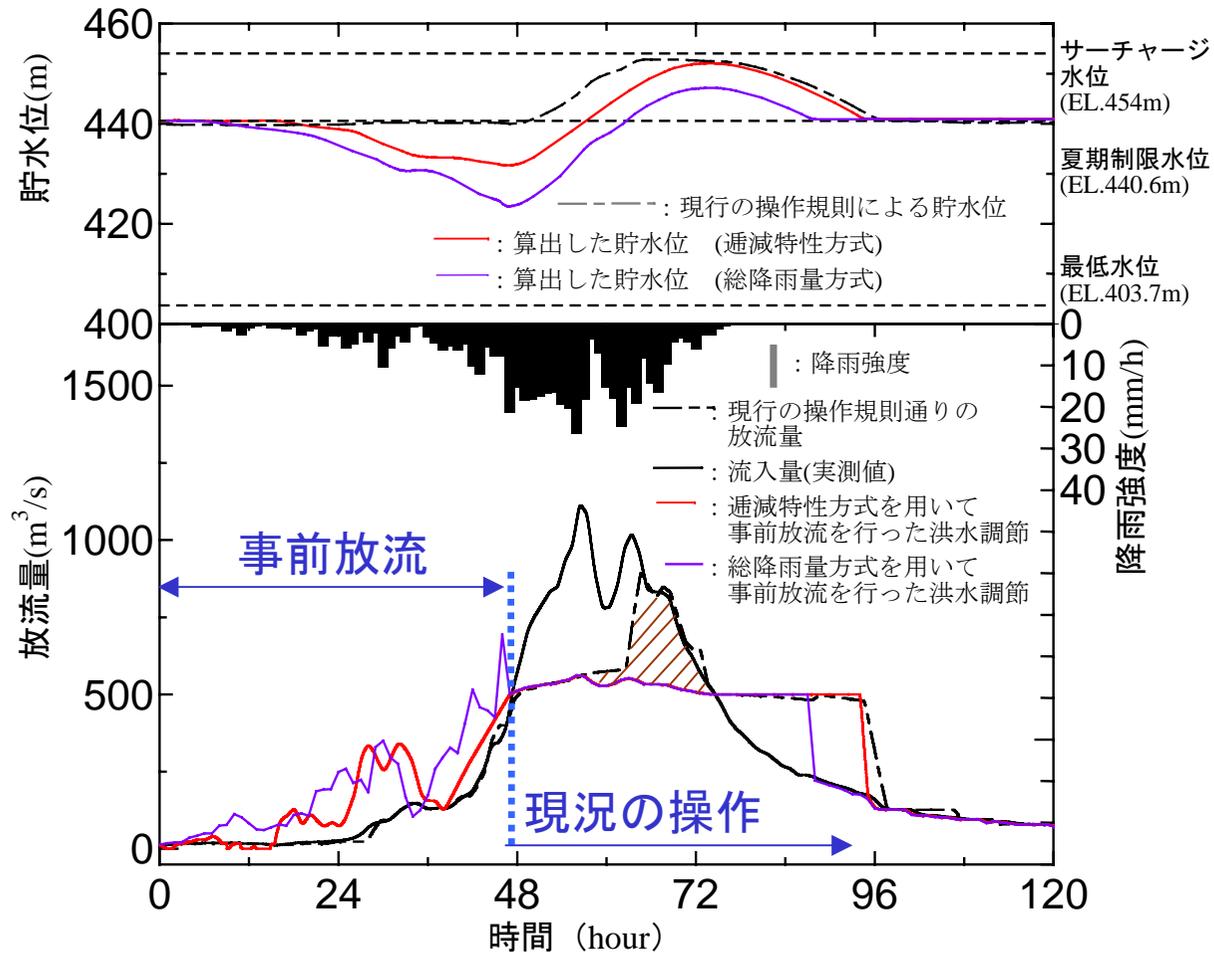
計画を超えるような規模の洪水の場合には、  
ただし書き操作(流入量と同じ量を放流する操作)  
による洪水調節を行わざるを得ない。



ただし書き操作  
による洪水調節  
に成功している

2004年7月新潟・福島豪雨の際の刈谷田川ダムにおける洪水調節  
2005年度国土交通省河川局HP参照

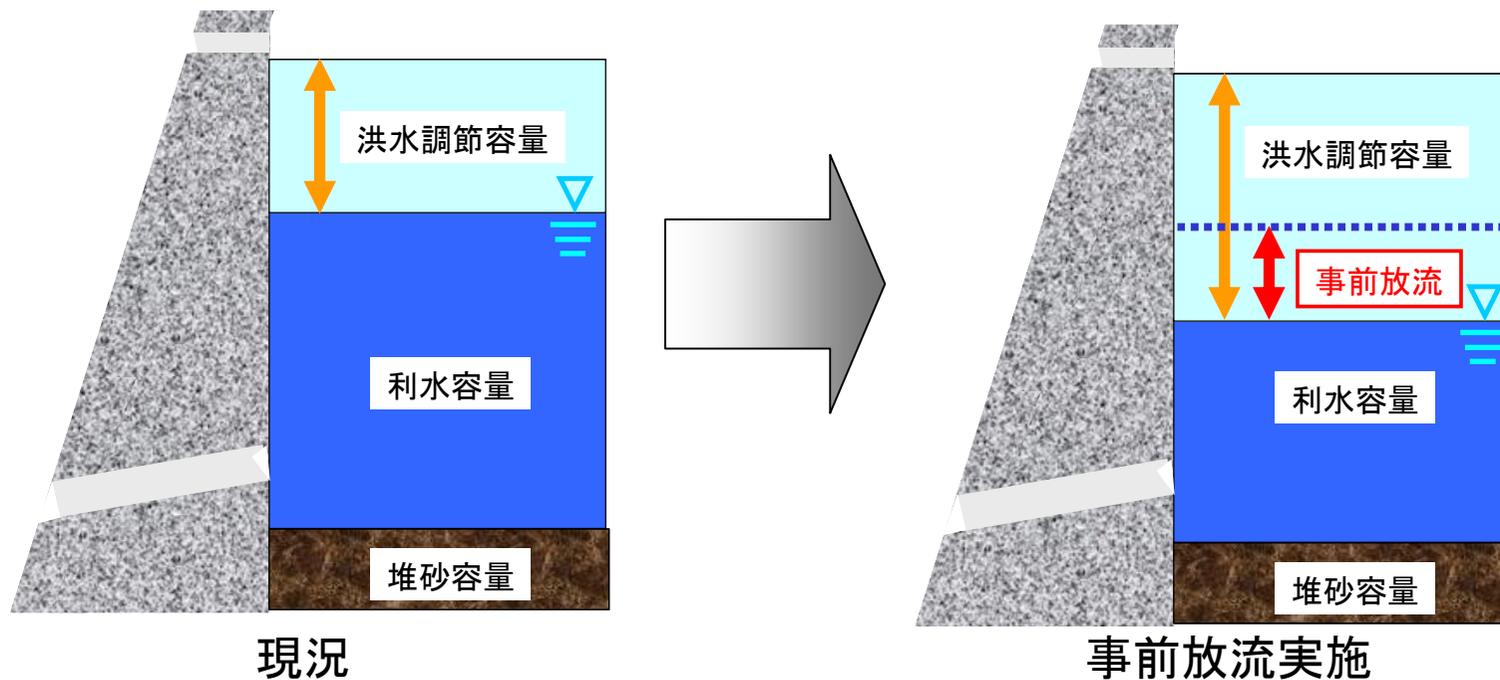
# 3. 本研究で提案する 事前放流を用いた洪水調節の例



通減特性方式と総降雨量方式を用いて前期放流を行った流量制御、  
現行の操作規則による放流量及びその時の貯水位と実測の流入量

● 大規模な洪水に対して既存の施設を有効に活用し  
治水効果を得るための手法

計画を超えるような規模の洪水に対しては、**事前放流**による洪水調節を行えば、より多くの流量を貯留でき、**ダム**の治水効果を更に発揮できる。

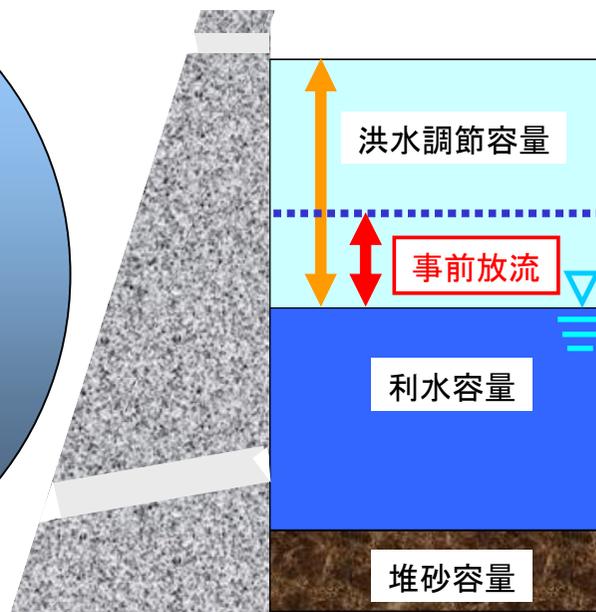


# ● 研究の目的

事前放流を用いた新しい洪水調節手法を提案する

## 治水

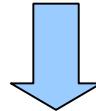
事前放流により利水容量を一時的に治水容量として活用することで、**治水容量を増大**させた状態で洪水調節が可能になる



## 利水

空振りにあった場合は、利水容量を失う危険性を伴う

利水に支障を与えずに事前放流を行う



降雨予測を用いず  
後から確実に入ってくる量だけを放流する

# ● 降雨予測について

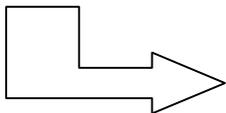
## 降雨予測に関する山田研究室の提出論文

### 物理モデルを用いた降雨予測に関する研究

- 山田正、日比野忠史、深和岳人、松浦正典、藤吉康志、播磨屋敏生、稲毛正昭、中津川誠：実スケールの雲物理実験と降雨モデルによる雲の微物理過程の考察、土木学会論文集、No.509,II-30,pp.1-13,1995,2.
- 山田正：大気中のエアロゾルが降雨現象に及ぼす影響に関する研究、土木学会論文集、No.614, II-46,pp.1-20,1999.2.
- Yamada,T., Hibino,T., Fukawa,G., Matsuura,M., Fujiyoshi,Y., Harimaya,T., Inage,M. :Quasi-Prototype Experiments of Cloud Physics Using Long Shaft in the Mine, Proc. of XXV Congress of I.A.H.R. Vol. I , pp.113-118,1993.
- Yamada,T., Hibino,T., Matsuura,M., Fukawa, G. :Numerical Simulation of Precipitation Considering Cloud Microphysics Processes, Proc. of XXV Congress of I.A.H.R. Vol. I , pp.127-134, 1993.

### レーダー雨量計を用いた降雨予測に関する研究

- 山田正、日比野忠史、鈴木敦、蓑島弥成、中津川誠：新しいタイプのレーザー雨滴計の開発とこれを用いた降雨の雨滴分布の観測、土木学会論文集、No.539,II-35,pp.15-30,1996,5.
- Hibino,T., Yamada,T., Nakatsugawa, M. :Wind Field in Meso-  $\beta$  Scale Caused by Orographic Effect, Proc. of XXV Congress of I.A.H.R. Vol. I , pp.135-142, 1993.
- 池永均、久米仁志、森田寛、山田正：ドップラーレーダを用いたメソ  $\beta$  スケール降雨特性の解析、水工学論文集第41巻、pp.147-154,1997
- 志村光一、原久弥、山田正：レーダ雨量計を用いた関東平野における降雨形態の分類と降雨発生メカニズムに関する考察、水工学論文集第44巻、pp.97-102,2000.



例として気象庁が発表している  
降水短時間予報の精度検証を行う

# 降水短時間予報(気象庁)と実測の時間雨量の比較

予想した時刻	全体			0~10mm未満			10~20mm未満			20~30mm未満		
	A-B の平均値 (mm/h)	相関係数	サンプル数 (mm)	A-B  (mm/h)	相関係数	サンプル数 (mm)	A-B  (mm/h)	相関係数	サンプル数 (mm)	A-B  (mm/h)	相関係数	サンプル数 (mm)
1時間前	1.99	0.87	233537	1.4	0.90	223280	11.29	0.04	7824	21.36	0.01	1600
2時間前	1.96	0.87	233469	1.37	0.91	223215	11.21	0.04	7821	21.36	0.01	1600
3時間前	1.97	0.87	233298	1.38	0.91	223058	11.25	0.04	7809	21.33	0.01	1598
4時間前	1.87	0.87	233433	1.28	0.91	223181	11	0.05	7819	20.93	0.02	1600
5時間前	1.89	0.88	233391	1.31	0.91	223139	11.02	0.05	7819	20.7	0.02	1600
6時間前	1.9	0.88	233353	1.32	0.92	223101	11.06	0.05	7819	20.82	0.02	1600
	30~40mm未満			40~50mm未満			50~60mm未満			A: 実測の降雨強度[mm/h] B: 降水短時間予報モデルを使用して算出された降雨強度[mm/h]		
	A-B  (mm/h)	相関係数	サンプル数 (mm)	A-B  (mm/h)	相関係数	サンプル数 (mm)	A-B  (mm/h)	相関係数	サンプル数 (mm)			
	30.98	0.01	521	42.11	0	184	51.69	0	71			
	30.66	0.01	521	41.88	0	184	52.66	0	71			
	30.6	0.01	521	41.47	0	184	51.75	0.01	71			
	30.01	0.01	521	40.91	0	184	52.44	0	71			
	30.04	0.02	521	40.51	0	184	52.28	0	71			
	29.7	0.01	521	40.11	0.01	184	51.64	0	71			

0~10mm/hまでの降雨については、非常に高い的中率があることが分かった。  
 しかし10mm/hをこえる降雨については、予報の的中は望みにくいことが分かった。

## 2.提案する事前放流手法について

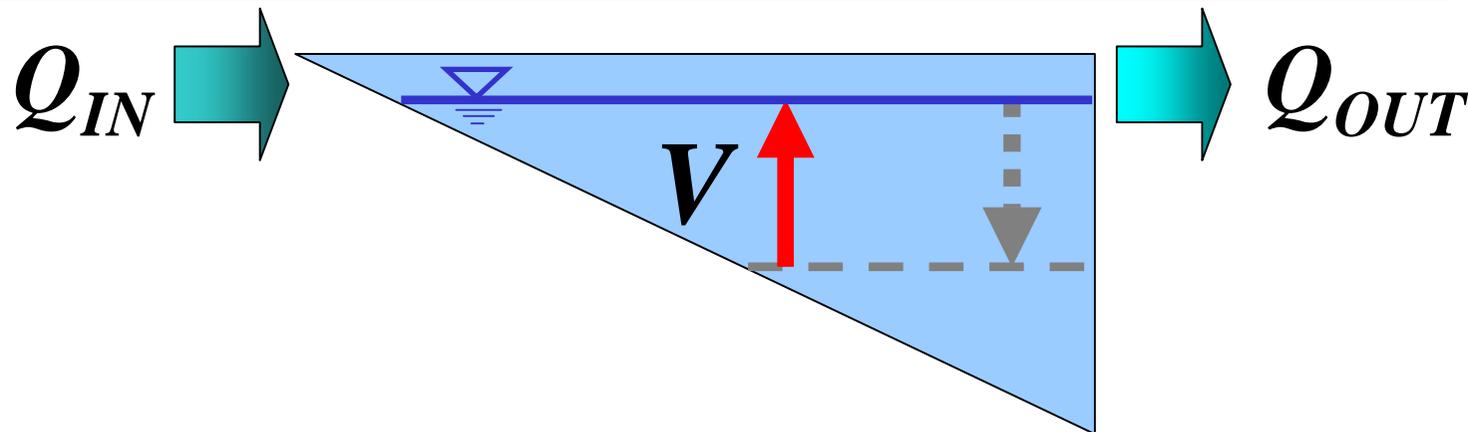
### ● 放流量算出式の導出

ダム貯水池における流入量、放流量の連続式

$$-\int_0^t (Q_{IN} - Q_{OUT}) dt = V(t) \quad \dots(1)$$

ある時刻 から t 時間後まで事前放流を行い、ダム貯水位を下げた分の総貯水量

現時点以降にダム貯水池に流入してくる総流入量



後から入ってくる量を事前に出せるだけ放流する

$$-\int_0^t (Q_{IN} - Q_{OUT}) dt = V(t) = \begin{cases} V(Q_{IN}(t)) \\ V(R(t)) \end{cases}$$

## 0. $V$ を流出計算により算定する手法

### 1. $V$ を時々刻々の流入量 $Q_{IN}(t)$ の関数で表す手法 : $V(Q_{IN}(t))$

- (a)  $V$  と  $Q_{IN}$  の関係を既往のデータから求める  
(過去の水文資料が充実している流域の場合)
- (b)  $V$  と  $Q_{IN}$  の関係を解析解から求める  
(過去の水文資料が不足している流域の場合)

## 逓減特性方式

### 2. $V$ を時々刻々の累積降雨量 $R(t)$ の関数で表す手法 : $V(R(t))$

## 総降雨量方式

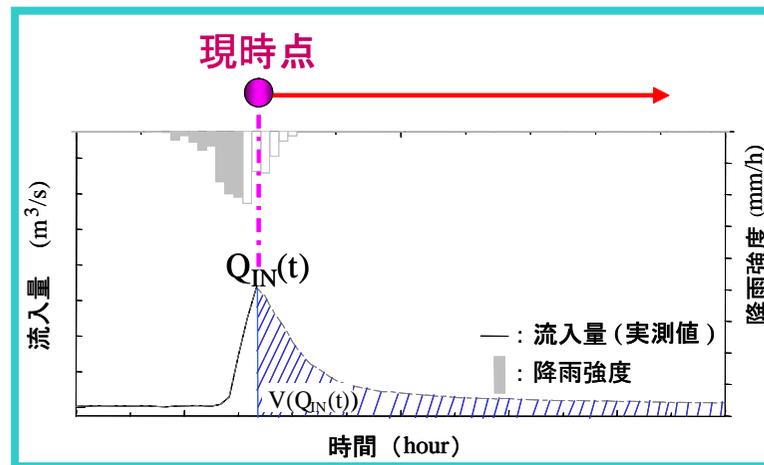
$V$ : 現時点以降にダム湖に最低限流入してくる総流入量	$Q_{IN}$ : ダム貯水池への時々刻々の流入量[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{OUT}$ : ダムからの放流量[m <sup>3</sup> /s]	$R$ : 時々刻々の累積降雨量[mm]

# 1. 時々刻々の流入量から放流量を決定する手法(逓減特性方式)

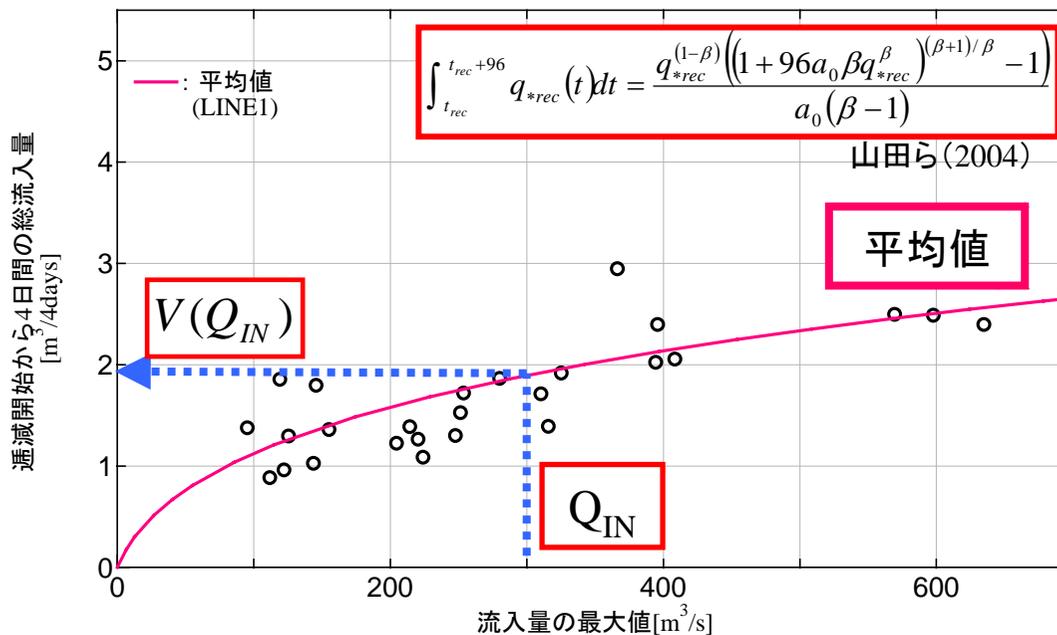
$$-\int_0^t (Q_{IN} - Q_{OUT}) dt = V(Q_{IN}(t)) \quad \dots (2)$$

↓ 時間 $t$ で微分

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



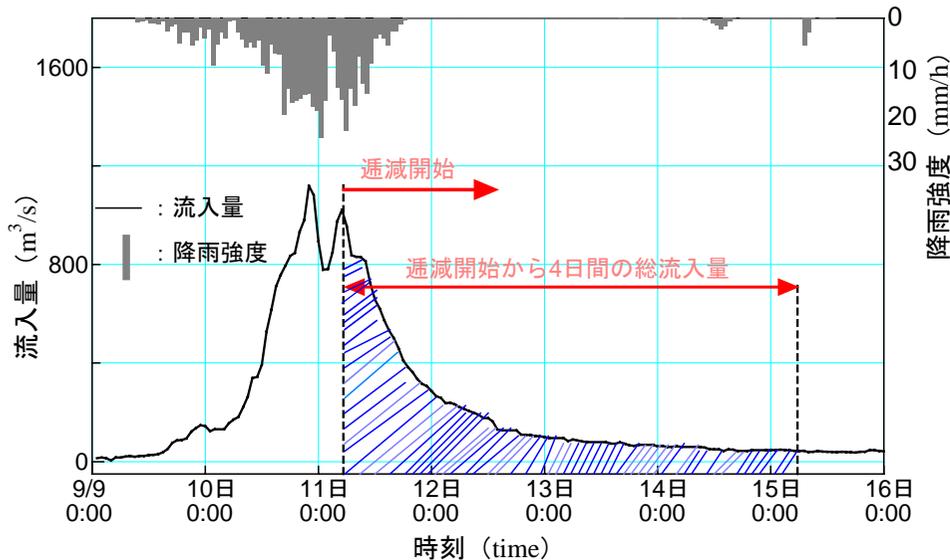
$[\times 10^7]$



時々刻々の流入量 $Q_{IN}$ とその後ダム湖に最低限流入してくる総量 $V$ の関係

ある時刻から確実にダム湖へ流入してくる量を決定するために、  
流入ハイドログラフの逓減特性に着目し解析を行った。

結果、逓減部に流入する総量の解析解を理論的に導出した。



一般化された山地流域単一斜面からの降雨流出を表す基礎式

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = a_0 q_*(t)^\beta (r(t) - q_*(t))$$

ただし、

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

$v$ : 断面平均流速 [mm/h],  $r$ : 有効降雨量 [mm/h]  
 $q_*$ : 流出高 [mm/h],  $\alpha, m$ : 流出パラメータ

流出量逓減部の解析解

$$q_{*rec}(t) = \frac{q_{*0}}{(1 + a_0 \beta q_{*0}^\beta t)^{1/\beta}} \quad \text{山田 (2003)}$$

流出量逓減開始以降4日間の  
累積流入量の解析解

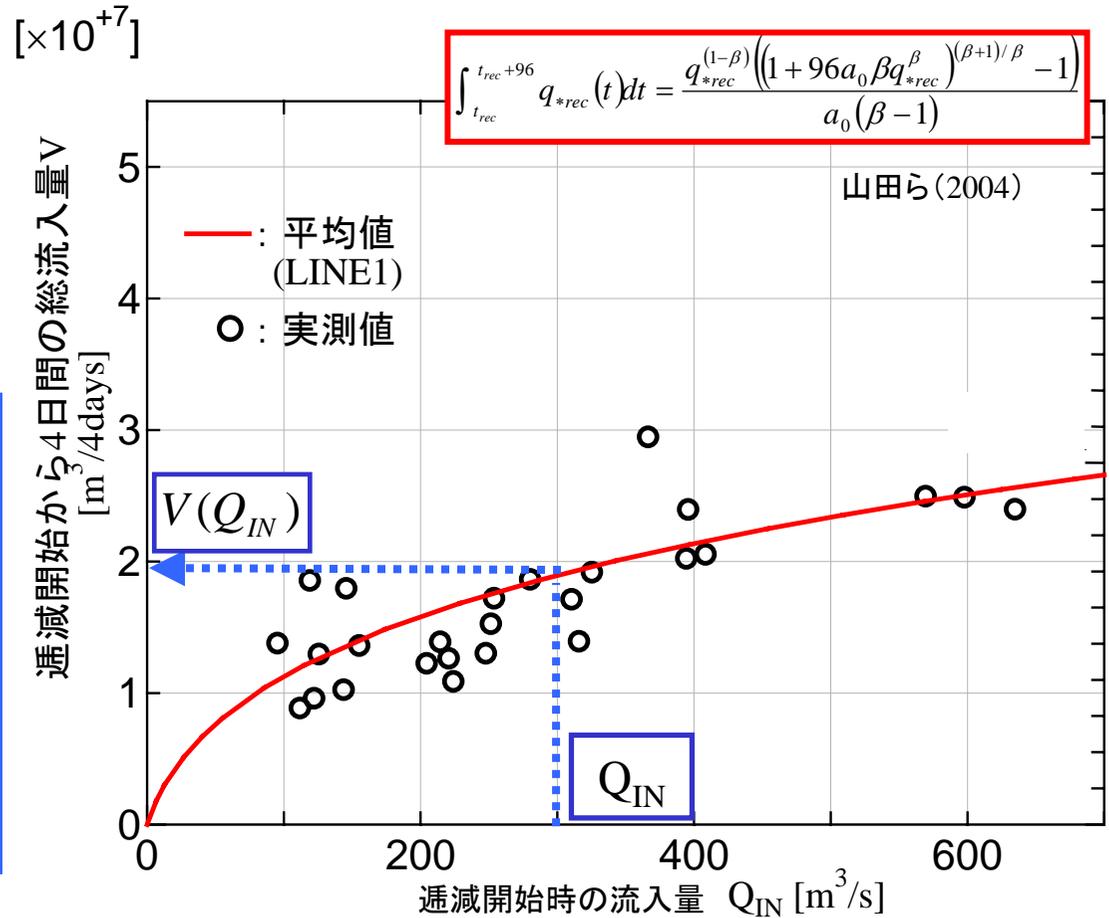
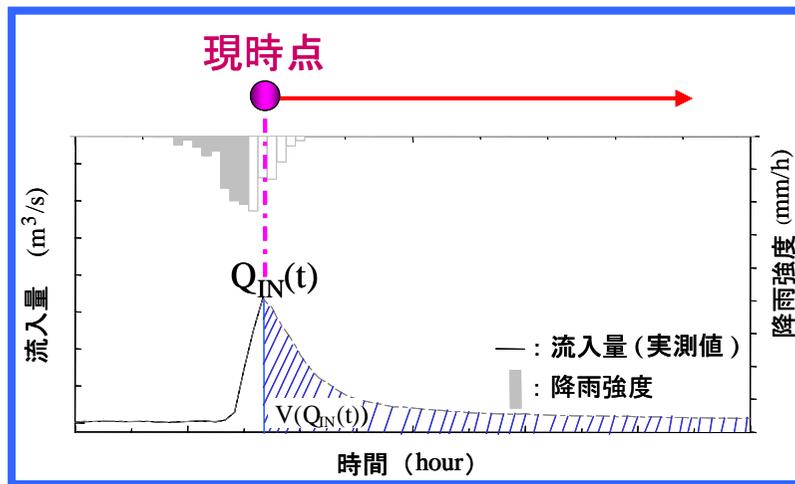
$$\int_{t_{rec}}^{t_{rec}+96} q_{*rec}(t) dt = \frac{q_{*rec}^{(1-\beta)} \left( (1 + 96 a_0 \beta q_{*rec}^\beta)^{(\beta+1)/\beta} - 1 \right)}{a_0 (\beta - 1)} \quad \dots (2) \quad \text{山田ら (2004)}$$

# ● 逓減特性方式による放流量決定手法

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

↓ 時間 $t$ で微分

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

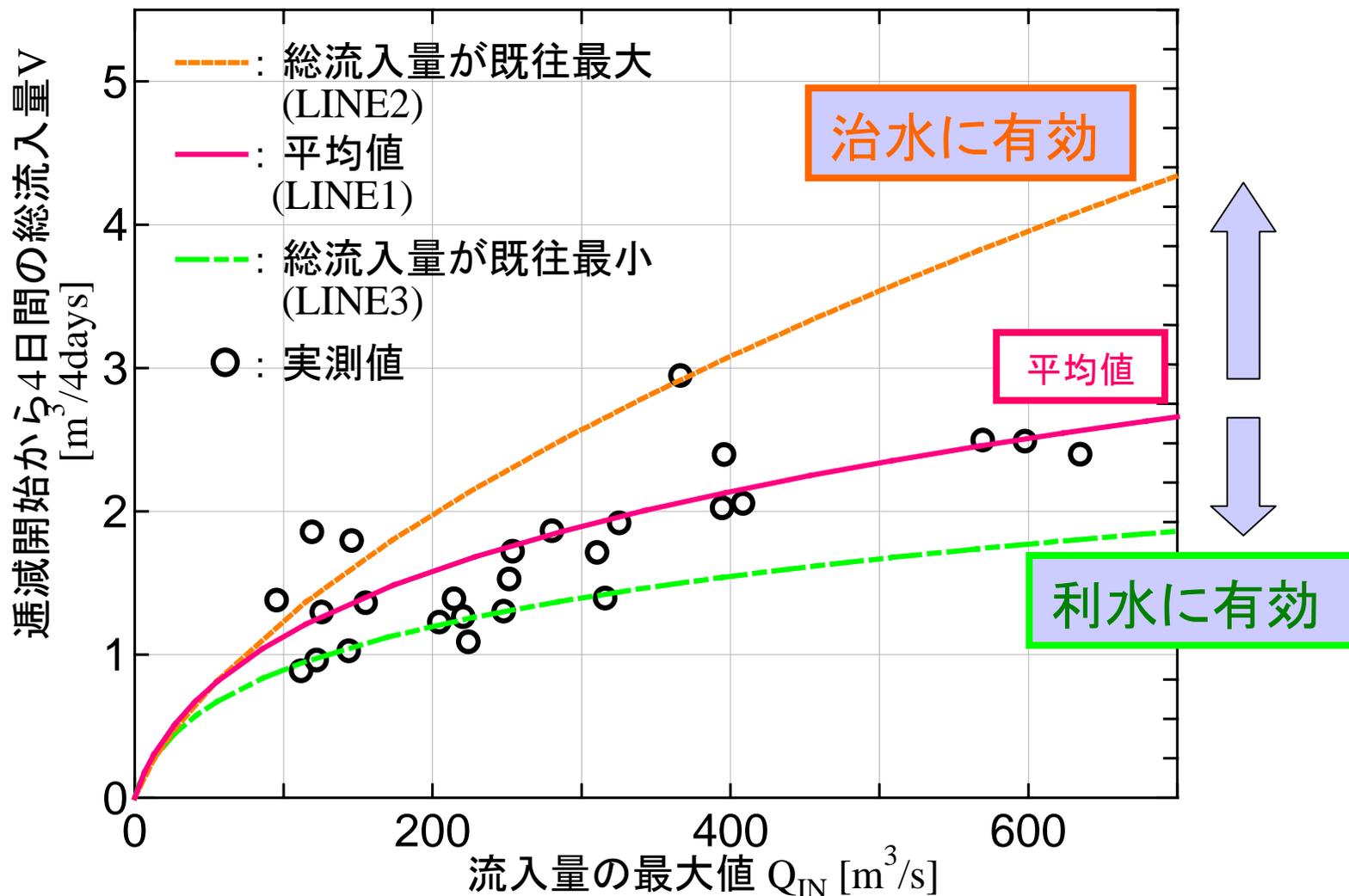


時々刻々の流入量 $Q_{IN}$ とその後ダム貯水池に最低限流入してくる総量 $V$ の関係

# ● $Q_{IN}$ と $V$ の関係

$[\times 10^7]$

どのLINEを使うかによって、状況に応じた事前放流量が決定できる。



どのラインを使用するかはダム管理者が状況に応じて決める

時々刻々の流入量 $Q_{IN}$ とその後ダム湖に最低限流入してくる総量 $V$ の関係

# ● 総降雨量方式による放流量決定手法

$$-\int_0^t (Q_{IN} - Q_{OUT}) dt = V(R(t)) \quad \dots(4)$$

▼ 時間 $t$ で微分する

$$Q_{OUT} = Q_{IN} + \frac{dV}{dR} \cdot \frac{dR}{dt} \quad \dots(5)$$

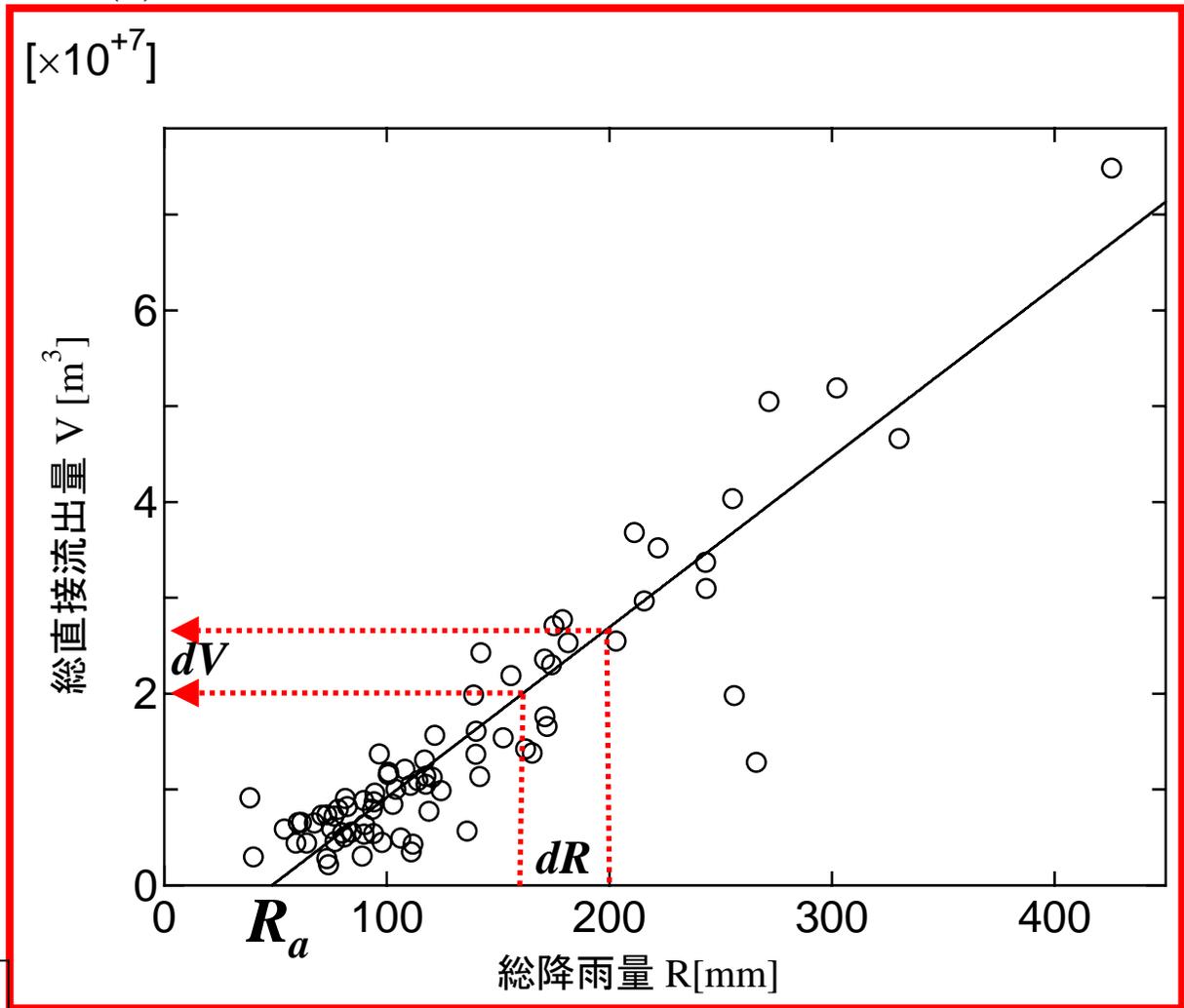
$$r(t) \\ R(t) = \int_0^t r(t) dt$$

$$Q_{OUT} = Q_{IN} + \frac{dV}{dR} \cdot r(t) \quad \dots(6)$$

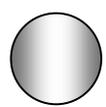
$R(t)$  : 累積降雨量[mm]  
 $r(t)$  : 時々刻々の降雨量[mm/h]

貯留関数法

$$\frac{dV}{dR} = \frac{AdQ_*}{dR} = \begin{cases} 0, & R < R_a \\ Af, & R > R_a \end{cases}$$



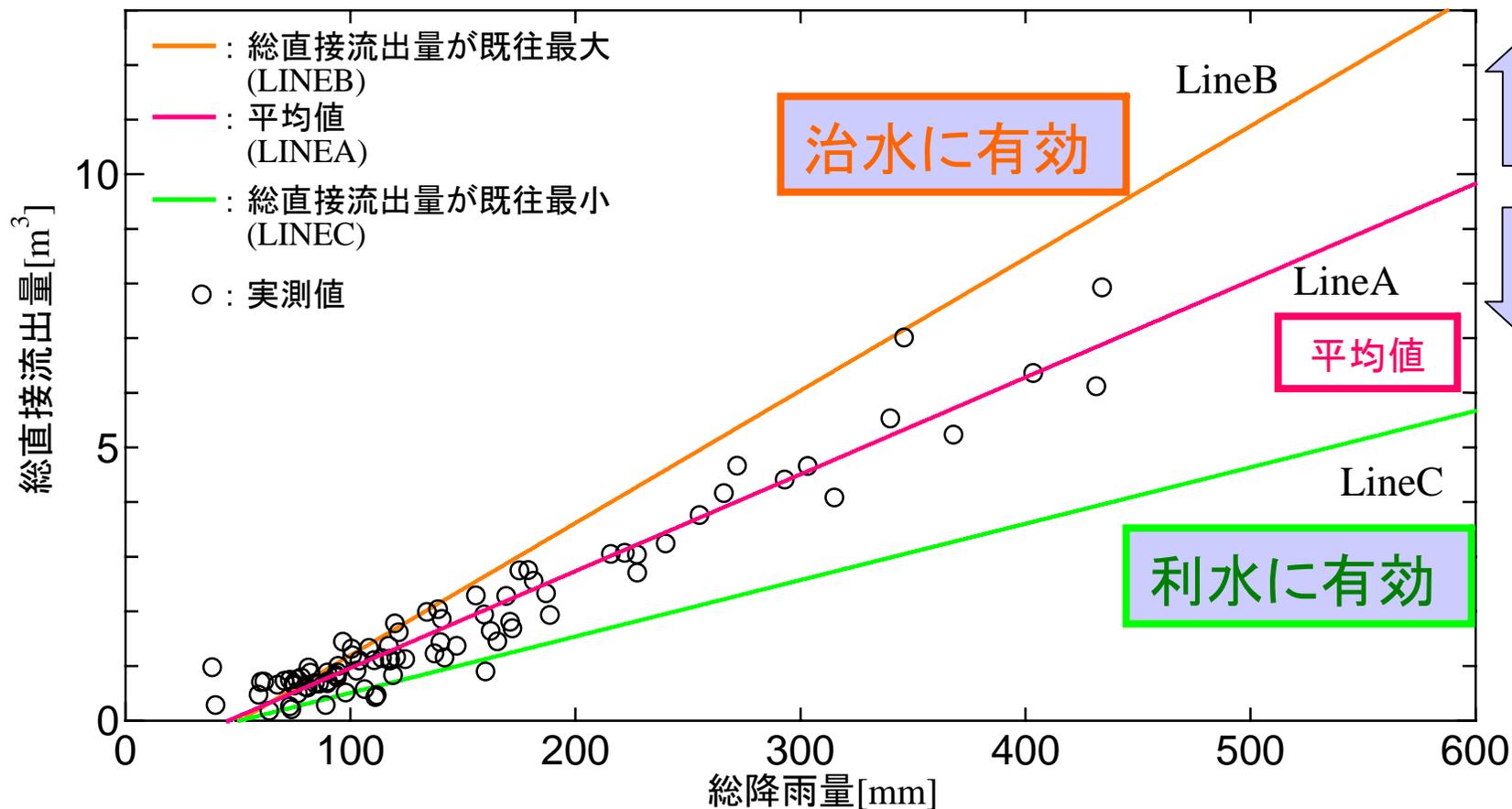
解析対象ダム流域における総降雨量 $R$ と総直接流出量 $V$ の関係



# 総降雨量 $R$ と流出量 $V$ の関係

どのLINEを使うかによって、状況に応じた事前放流量が決定できる。

$[\times 10^7]$



どのラインを使用するかはダム管理者が状況に応じて決める

一雨の総降雨量 $R$ とそれに伴う直接流出量 $V$ の関係

# 解析対象ダムの概要



出典: 利根川ダム統合管理事務所 HPより抜粋



草木ダム(集水面積:254km<sup>2</sup>)における現行の操作規則は昭和52年の建設当時に定められており,それによるとダム湖への流入量500m<sup>3</sup>/s以上を洪水と定義し,放流量はこの式で決定される.

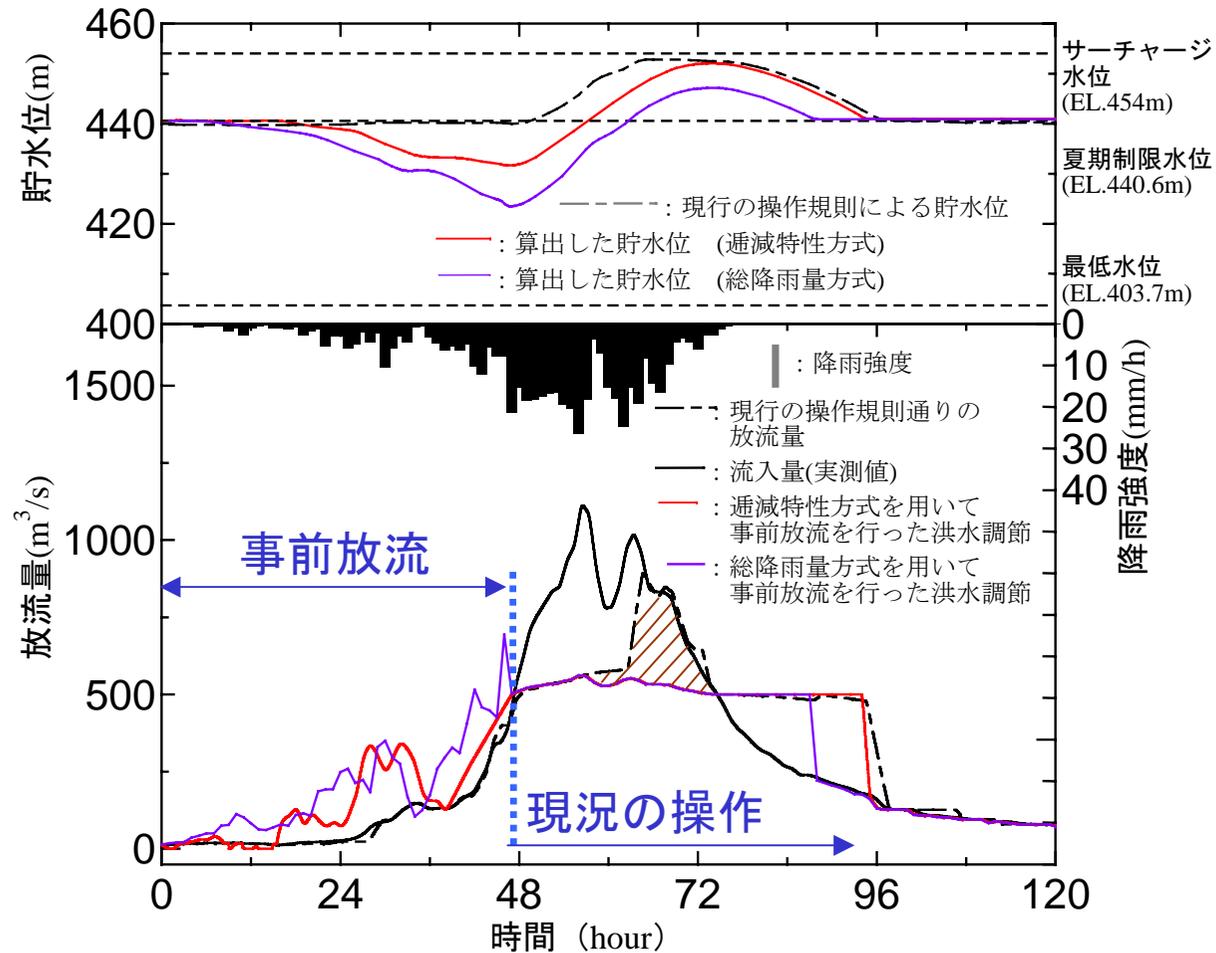
## 洪水時における現行の草木ダムの操作規則

$$Q_{OUT} [\text{m}^3/\text{s}] = (Q_{IN} [\text{m}^3/\text{s}] - 500 [\text{m}^3/\text{s}]) \times 0.1 + 500 [\text{m}^3/\text{s}]$$

放流量

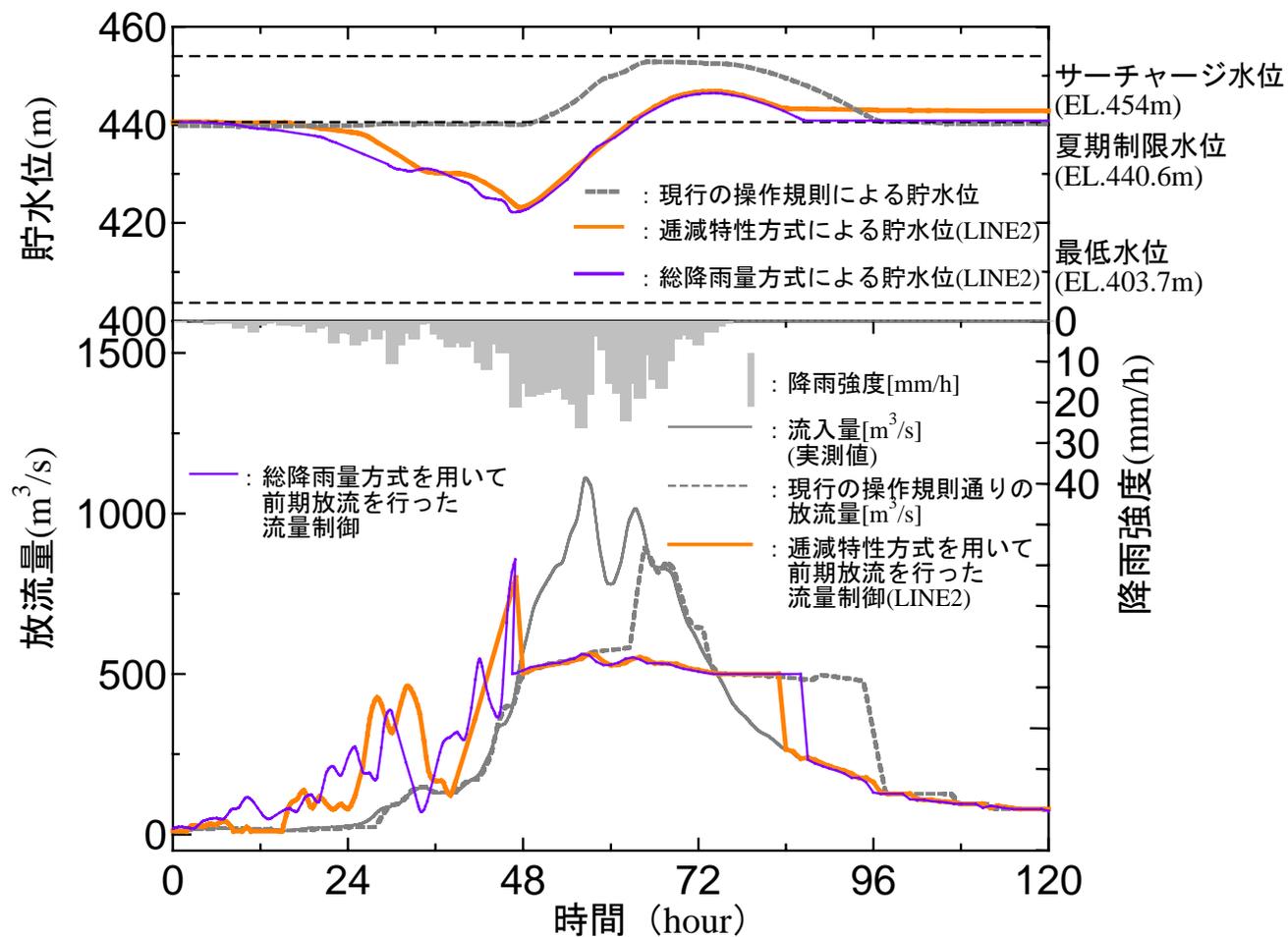
流入量

# 3. 本研究で提案する 事前放流を用いた洪水調節の例



通減特性方式と総降雨量方式を用いて前期放流を行った流量制御、  
現行の操作規則による放流量及びその時の貯水位と実測の流入量

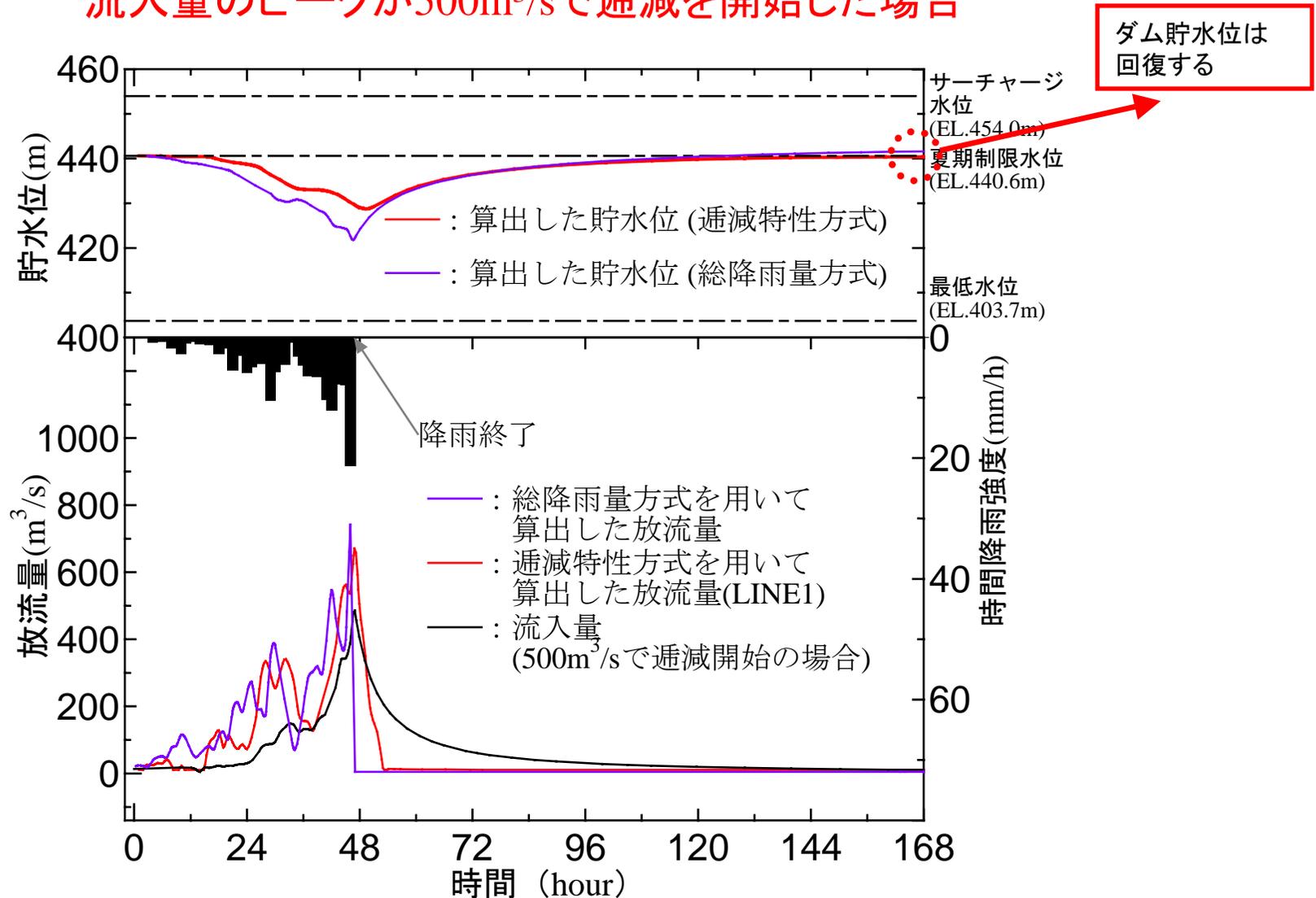
# ● 本研究で提案する 事前放流を用いた洪水調節の例 (LINE2を用いた場合)



逓減特性方式と総降雨量方式を用いて前期放流を行った流量制御、  
現行の操作規則による放流量及びその時の貯水位と実測の流入量

# ● 事前放流を行った直後に降雨が終了した場合

流入量のピークが $500\text{m}^3/\text{s}$ で逡減を開始した場合

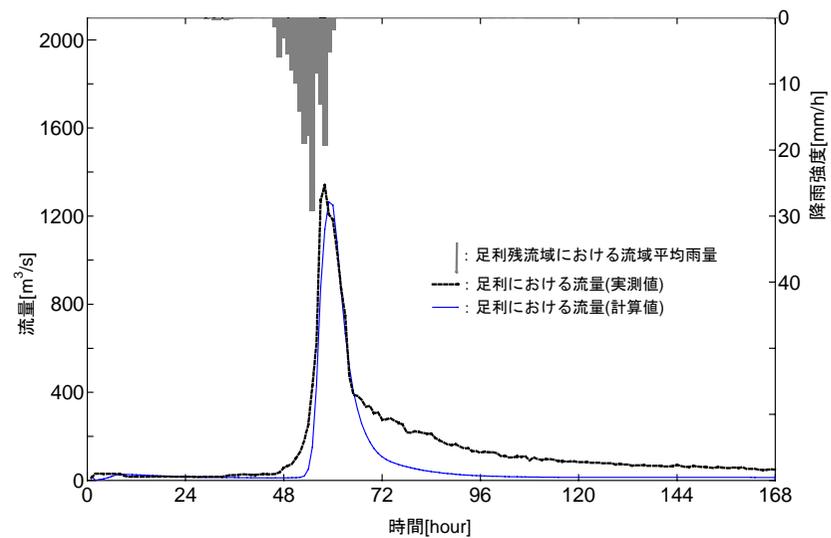
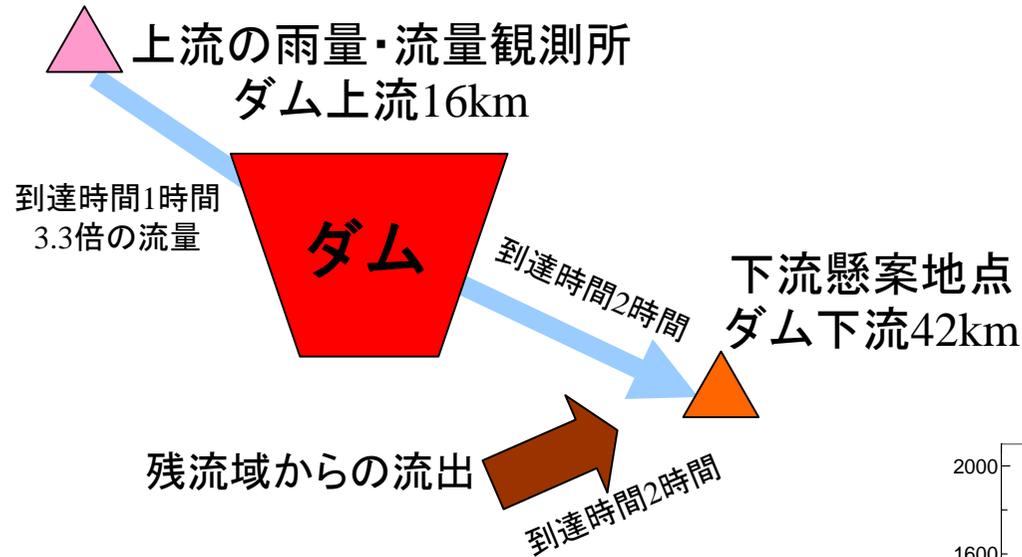


ダム貯水位は回復する

逡減特性方式及び総降雨量方式を用いて算出した放流量と貯水位

# ● ダム上・下流の降雨データを用いた洪水調節

## 残流域からの流出量を流出計算により求める



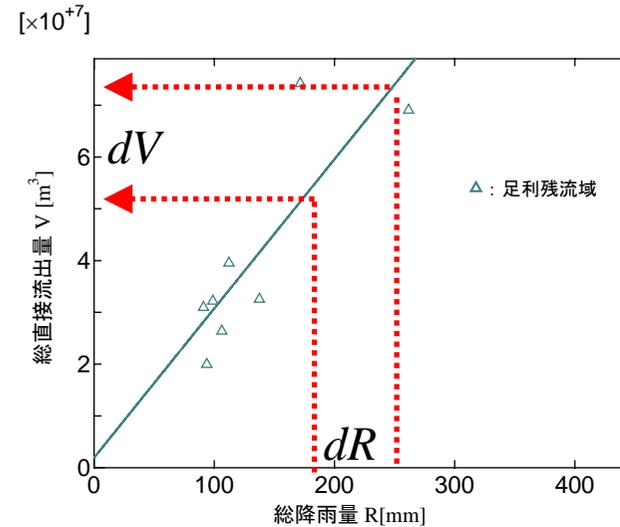
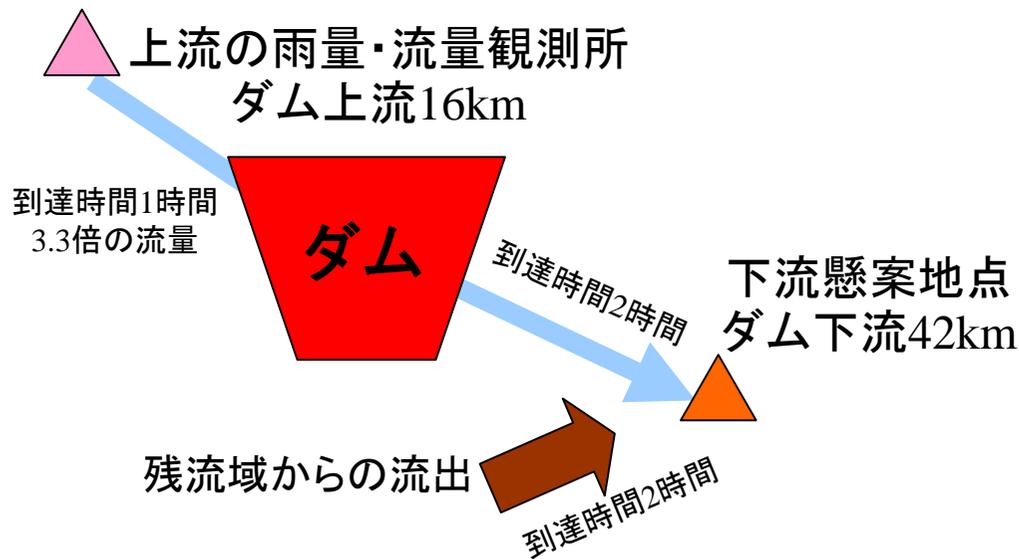
例: 残流域における流量ハイドログラフの実測値と計算値

## 4. 本研究で提案する

### 事前放流を用いた洪水調節の例

(ダムの上・下流の降雨データを用いた場合)

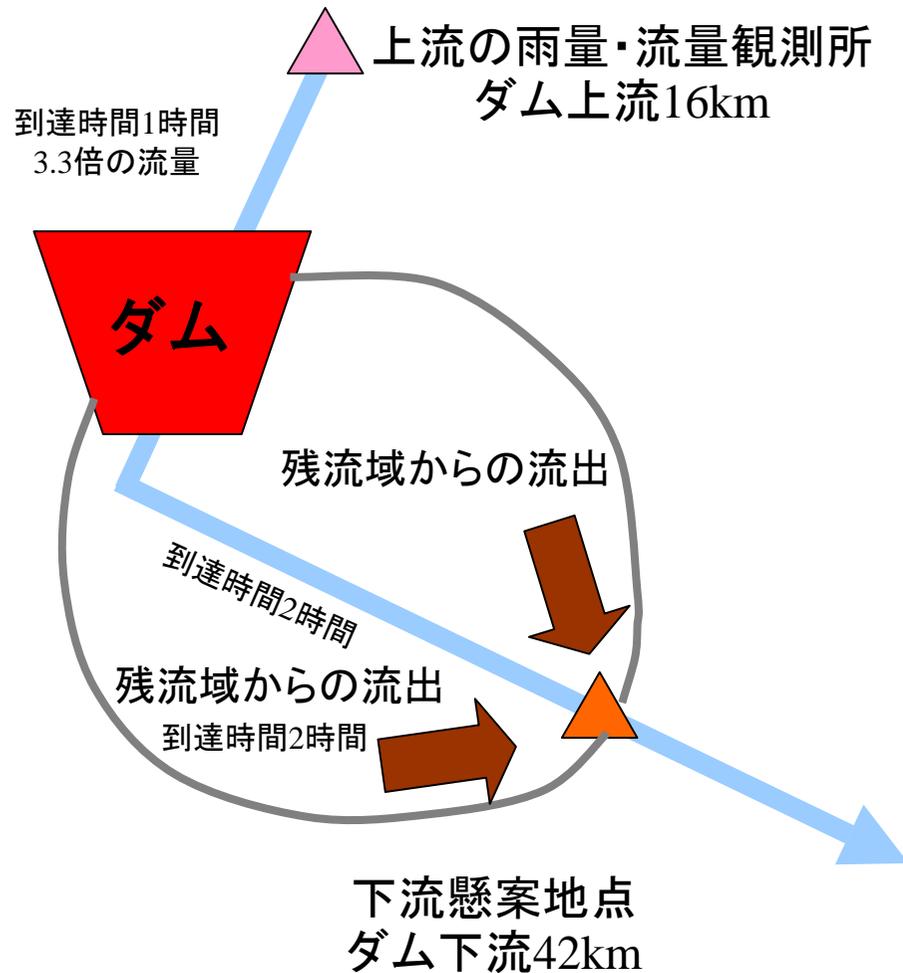
残流域からの流出量を過去の実測値を用いて求める



下流懸案地点における総降雨量Rと総直接流出量Vの関係

# ● ダム上・下流の降雨データを用いた洪水調節

流域全体の降雨データをダムゲート操作に組み込む



上流の雨量・流量観測所からダム貯水池までの到達時間

**=1時間**

ダム貯水池の流量と上流の雨量・流量観測所の流量の比

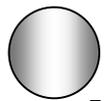
**=3.3**

ダム貯水池から下流懸案地点までの到達時間

**=2時間**

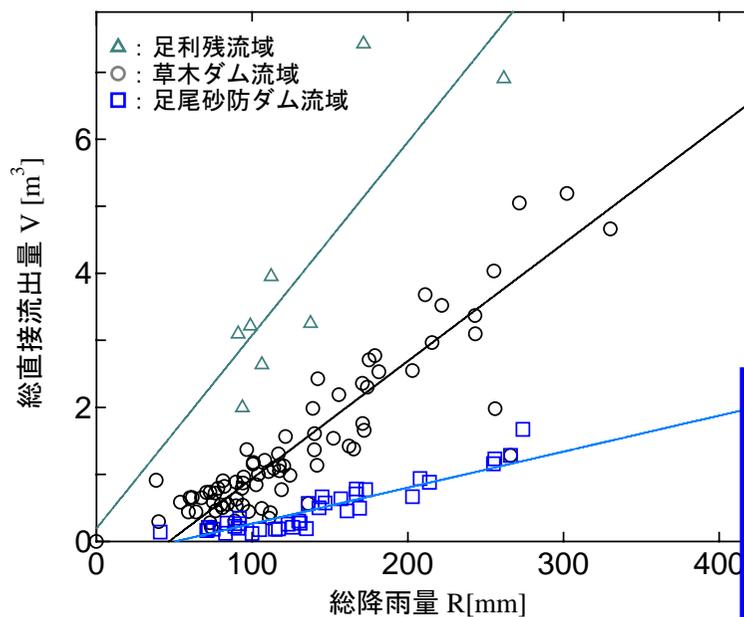
ダム下流残流域から懸案地点までの流出の到達時間

**=2時間**



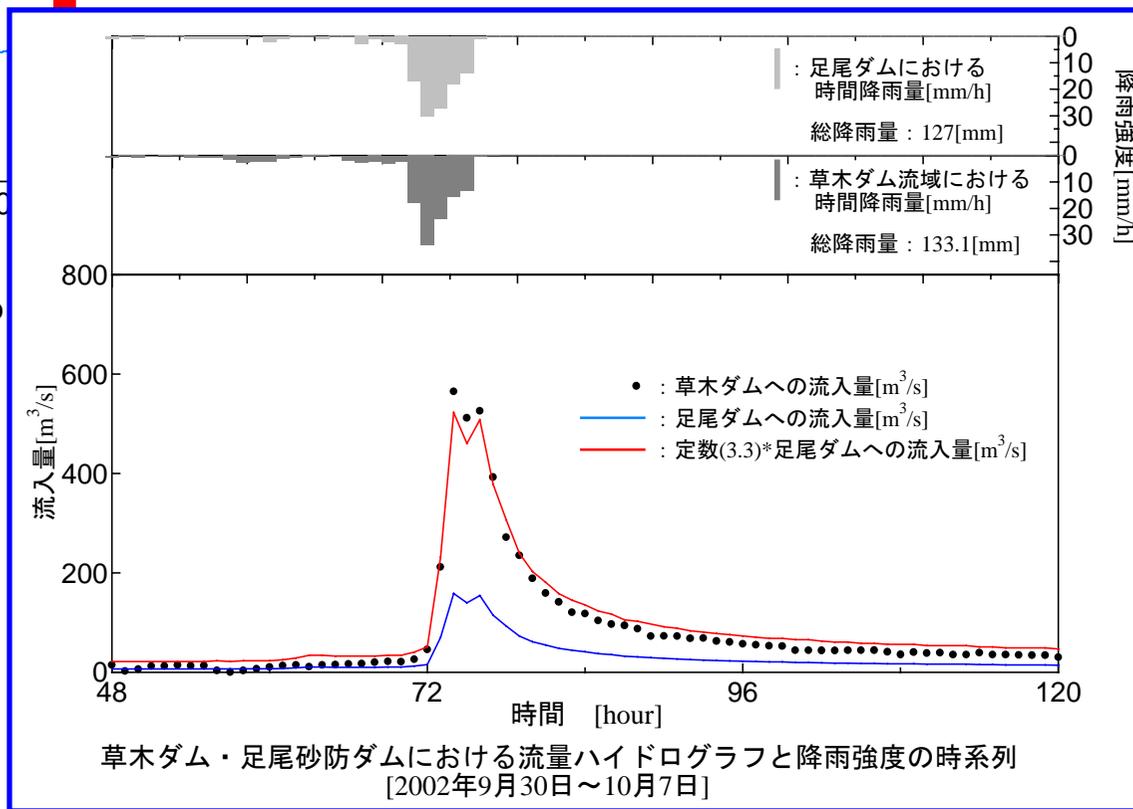
# 草木ダムと足尾砂防ダムの流量相関

[ $\times 10^{+7}$ ]



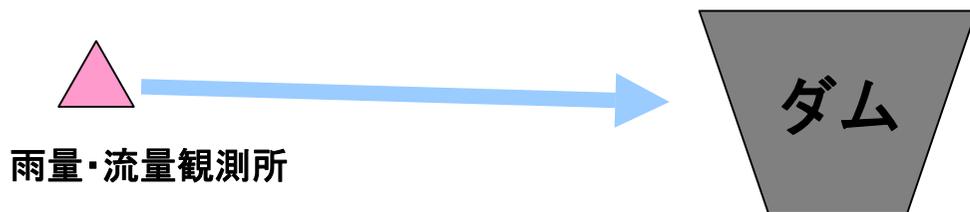
3.3倍

足尾砂防ダム・草木ダム・足利残流域における総降雨量 $R$ と総直接流出量 $V$ の関係

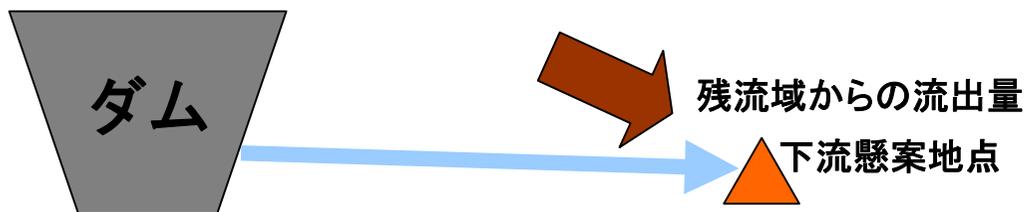


# ● 流出計算を用いる方法

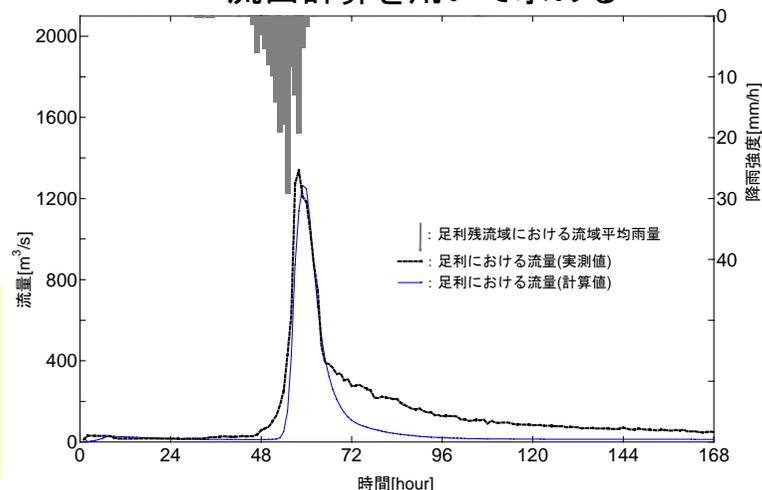
上流の雨量・流量観測所におけるRとVの関係から、  
ダム貯水池に流入する量が決定できる  
= 1時間早い事前放流が可能になる



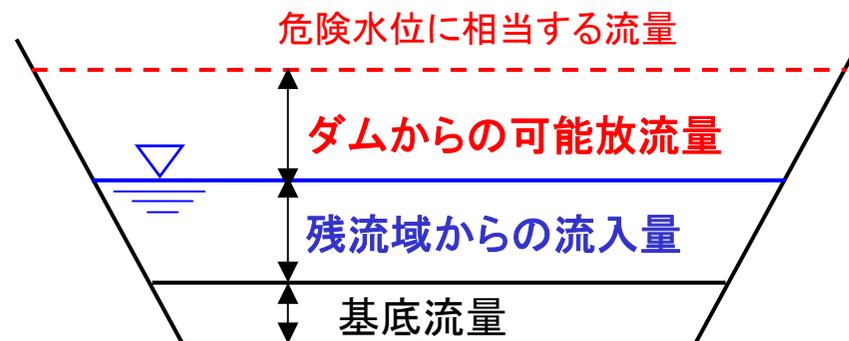
残流域におけるRとVの関係から、下流懸案地点へ流入する量が決定できる = **ダムからの可能放流量(低減目標水位-残流域からの流入量)が決定できる**



ダム上流及びダム下流残流域における流出量を、  
流出計算を用いて求める

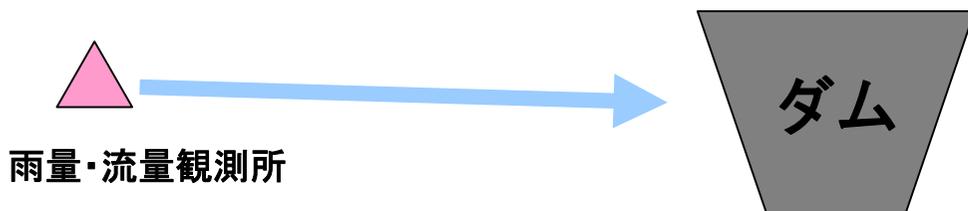


例：残流域における流量ハイドログラフの実測値と計算値

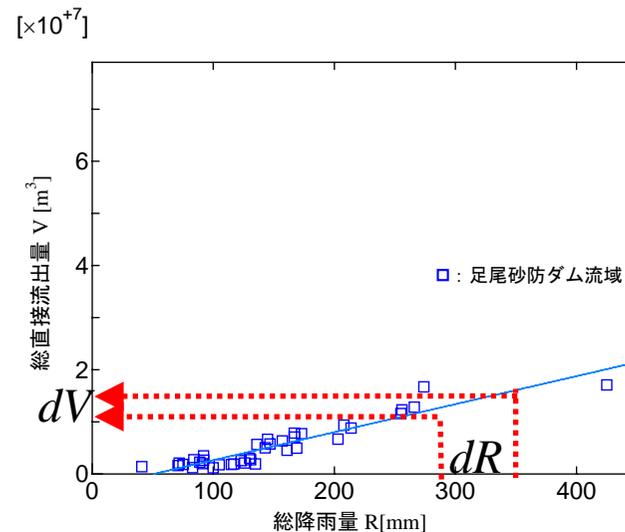
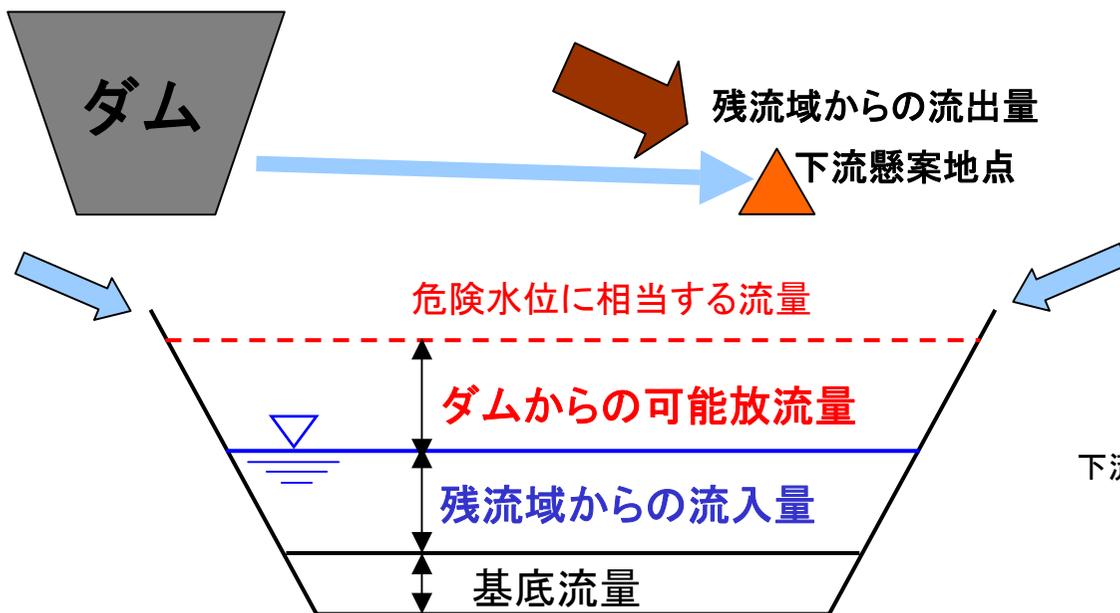


# ● 実測値を用いる方法

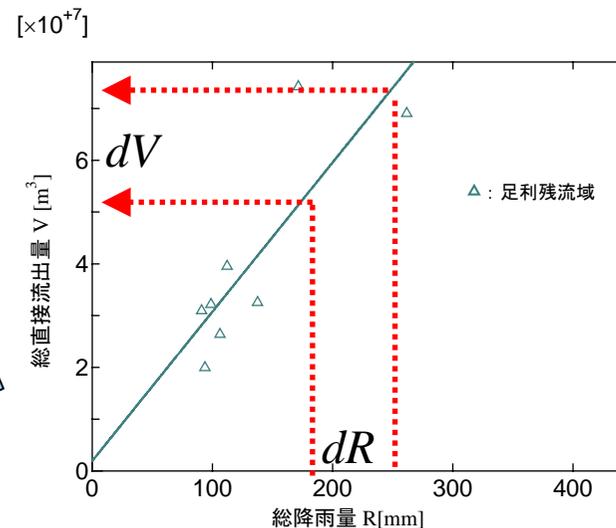
上流の雨量・流量観測所におけるRとVの関係から、  
ダム貯水池に流入する量が決定できる  
= 1時間早い事前放流が可能になる



ダムからの可能放流量(低減目標水位に相当する流量-残流域からの流入量)が決定できる



上流の雨量・流量観測所における  
総降雨量 $R$ と総直接流出量 $V$ の関係



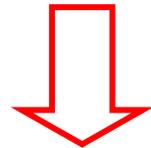
下流懸案地点における総降雨量 $R$ と総直接流出量 $V$ の関係

# より効率的な貯水池操作を行うために必要なこと

## 1. ダム貯水池に流入してくる流量の算定

- ・時々刻々の流入量とその後確実に流入してくる量
- ・時々刻々の累積降雨量とその後確実に流入してくる量

## 2. ダム貯水池から放流する流量を残流域からの流出量を考慮することにより決定



**可能放流量の算定**

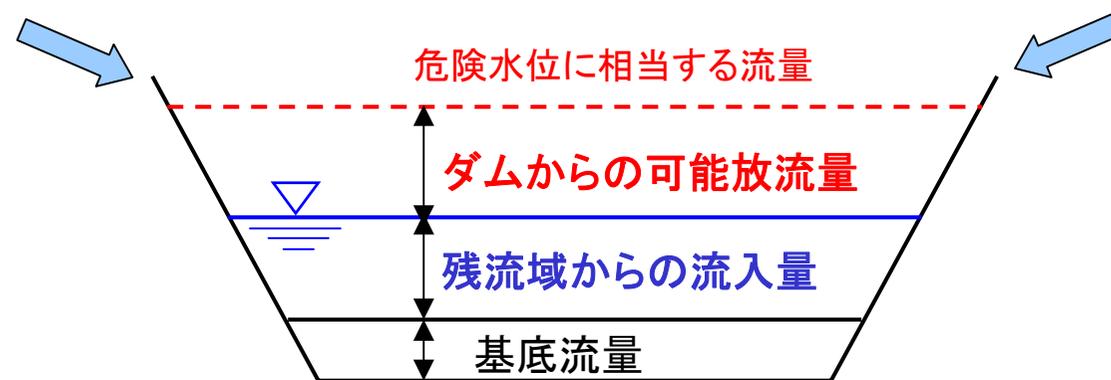
# 5. 可能放流量

(ダムから放流して良い最大の流量)について

可能放流量とは・・・

懸案地点における低減目標水位(例:危険水位)に相当する流量から、到達時間を考慮した残流域からの流入量を差し引いた流量

$$\text{可能放流量} = \text{低減目標水位に相当する流量} - \text{到達時間を考慮した残流域からの流出量}$$

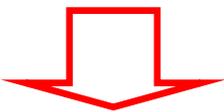


# ● 0. $V$ を流出計算により算定する手法

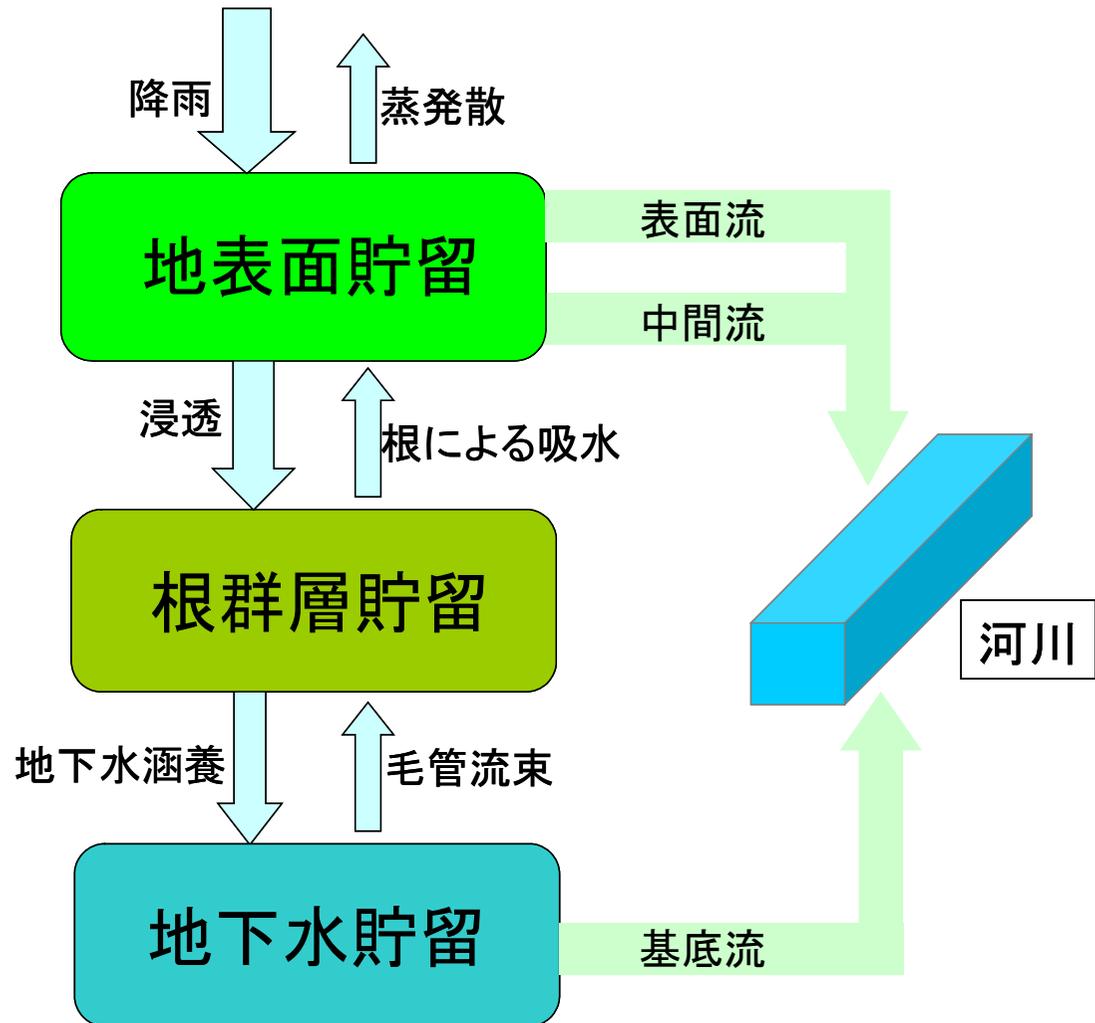
## 流出モデルの構造

(i) 斜面からの流出量の推定にタンクモデルを使用する場合

ダム流域及びダム上・下流域における流出量を、流出計算を行い求める



3段タンクモデル(地表面タンク、根群層タンク、地下水タンク)を使用し、斜面からの流出量を推定する



## 地表流, 中間流, 基底流強度の決定方法

$$\text{地表流: } OF = CQ_{OF} \frac{\frac{L}{L_{\max}} - T_{OF}}{1 - T_{OF}} P_n$$

$OF$ : 地表流強度  
 $CQ_{OF}$ : 地表流流出係数  
 $L/L_{\max}$ : 相対土壌水分  
 $T_{OF}$ : 相対含水比率  
 $P_n$ : 余剰水

$$\text{中間流: } Q_{IF} = (CK_{IF})^{-1} \frac{\frac{L}{L_{\max}} - T_{IF}}{1 - T_{IF}} U$$

$Q_{IF}$ : 中間流強度  
 $CK_{IF}$ : 地表流流出係数  
 $L/L_{\max}$ : 相対土壌水分  
 $T_{IF}$ : 相対含水比率  
 $U$ : 表面貯留量

基底流: 線形貯水池からの流出量として計算

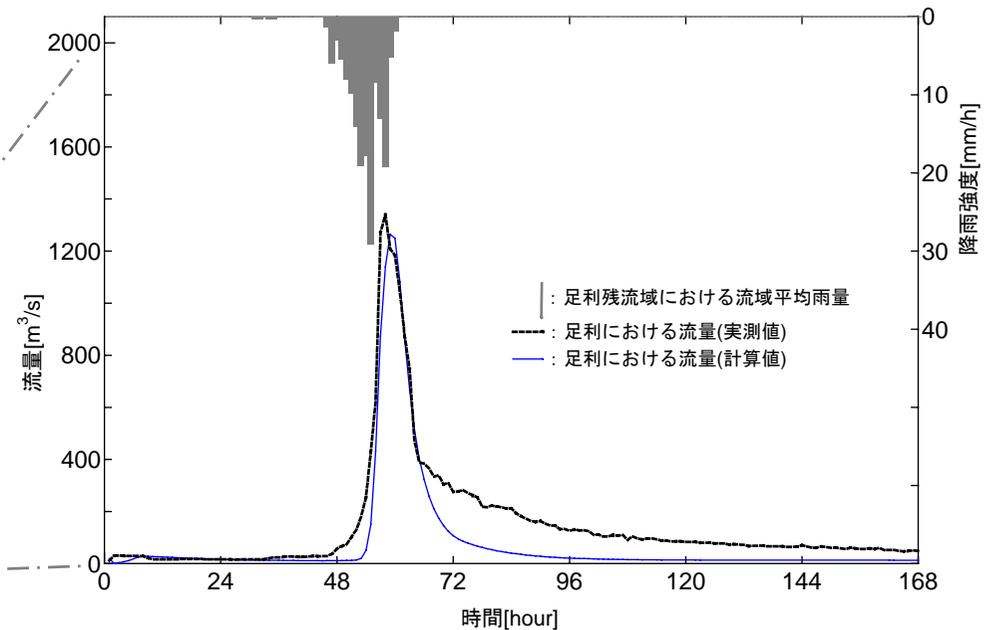
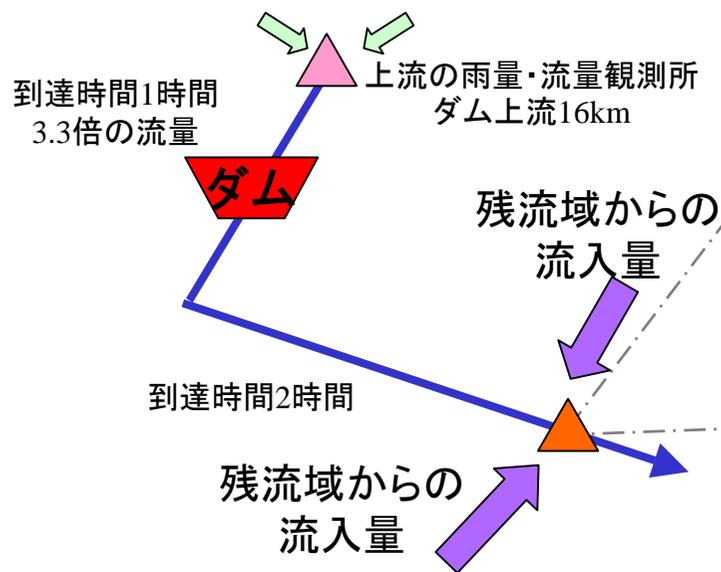
## 土壌・地形特性を表現するモデルパラメータの自動最適化式

$$F_1(\theta) = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{obsj} - Q_{simj}(\theta)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(A)$$

$M_p$ : キャリブレーション期間中の洪水流量事象の回数

$n_j$ :  $j$ 回目の事象におけるタイムステップ数

洪水流量: 実測流量がユーザーの指定した所定の閾値を上回った期間で定義



例: 残流域における流量ハイドログラフの実測値と計算値

# ● 残流域からのVを流出計算により算定する手法

・斜面からの流出量の推定に集中定数系方程式を使用

## 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出(山田、1985)

Kinematic wave法に基づき、  
斜面流下方向流れを対象

$$\text{運動則: } v = \alpha h^m, \quad q = \alpha h^{m+1} \quad (7)$$

$$\text{連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (8)$$

(7)式を(8)式に代入して $q$ について整理する

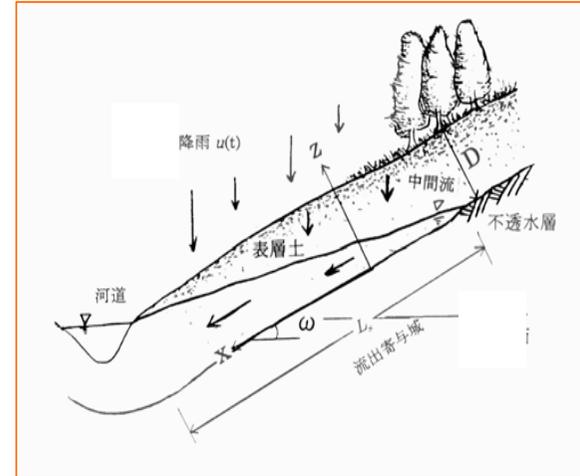
$$\frac{\partial q}{\partial t} + a q^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = a q^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (9)$$

集中化

$q(x, t) \approx x q_*(t) \quad (10)$

- ・直接流出は河道近傍のみから発生
- ・斜面長は実地形上より短い

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = a_0 q_*(t)^\beta (r(t) - q_*(t)) \quad (11)$$



山地単一斜面における流れの模式図

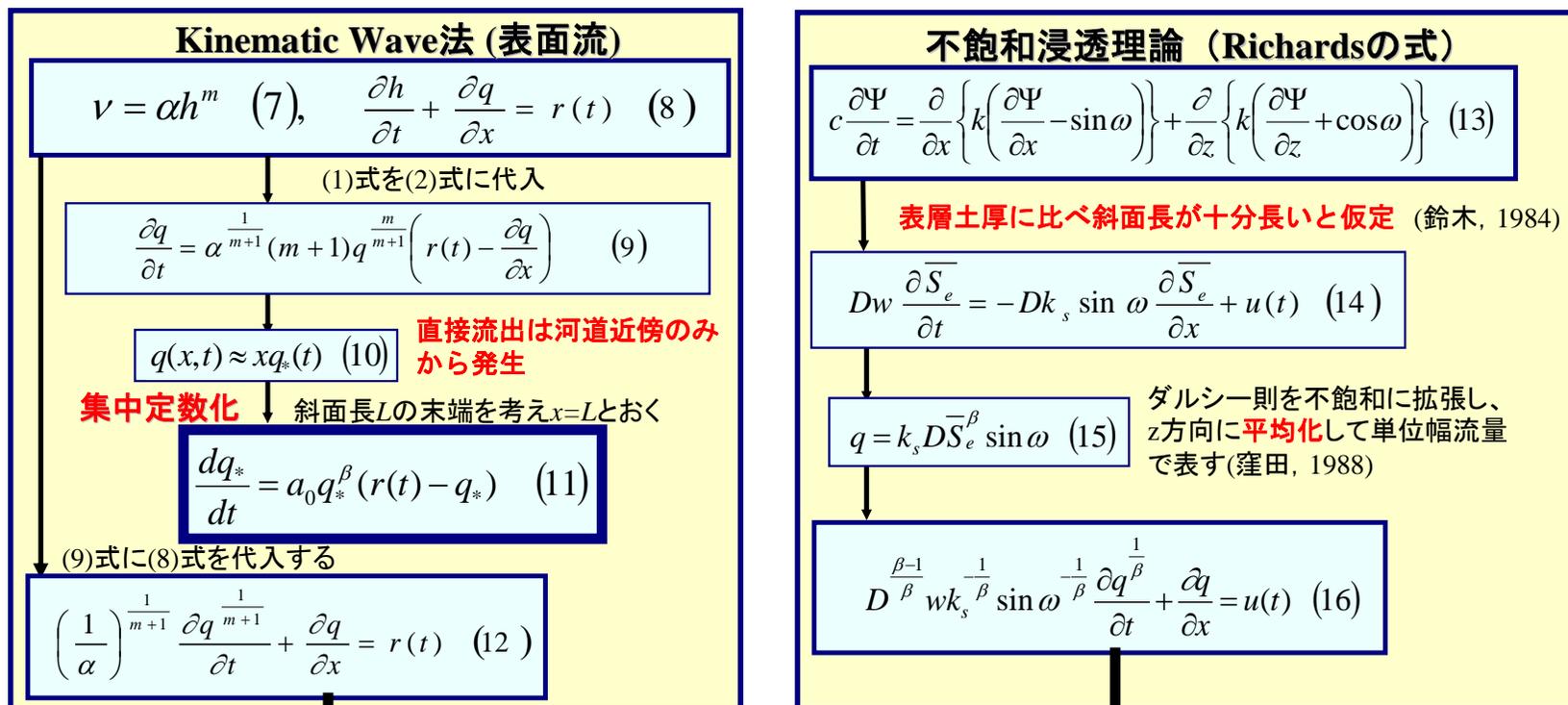
$$a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}$$

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

$v$ : 断面平均流速[mm/h],  $h$ : 水深[mm]  
 $q$ : 単位幅流量[mm<sup>2</sup>/h],  $r$ : 有効降雨強度[mm/h]  
 $q_*$ : 流出高[mm/h],  $\alpha, m$ : 流出パラメータ

…集中定数系方程式

# 集中定数系方程式と不飽和浸透方程式の関係



(12)式と(16)式とを比較

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

流出パラメータを土壤・地形特性で表現することができる。

$\gamma$ : 透水性を表す無次元パラメータ,  $D$ : 表層土層厚  
 $w$ : 有効空隙率,  $k_s$ : 飽和透水係数

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = a_0 q_*(t)^\beta (r(t) - q_*(t))$$

・・・降雨流出の基礎式 (集中定数系方程式)

ここで、

$$a_0 = (m+1) \left( \frac{k_s \sin \varpi}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \right)^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}}$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} = \frac{\gamma-1}{\gamma}$$

ここに、

- |             |                        |                |
|-------------|------------------------|----------------|
| ○斜面長： $L$   | ○有効空隙率： $w$            | ○飽和透水係数： $k_s$ |
| ○表層土層厚： $D$ | ○透水性を示すパラメータ： $\gamma$ | ○斜面勾配： $i$     |

・・・流出パラメータ

斜面流下方向流れを中間流のみ、つまりは鉛直方向一層として取り扱っている

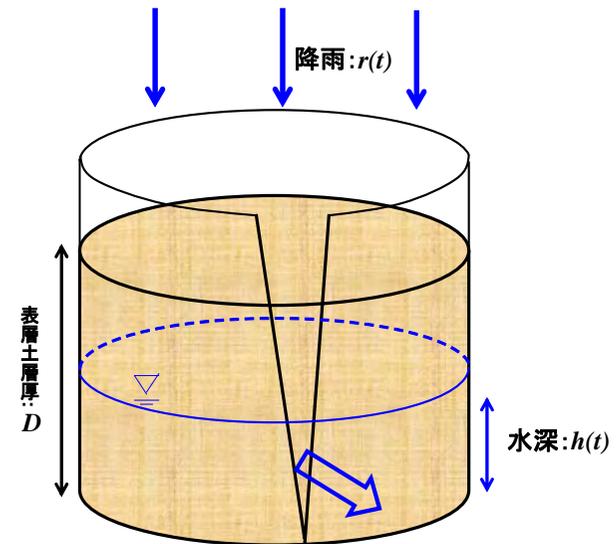
# ○表面流の発生を考慮した降雨流出計算手法

## 流出形態の表現

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = a_0 q_*(t)^\beta (r - q_*(t)) \cdots \text{集中定数系方程式}$$

$$\text{断面平均流速: } v = \alpha h^m$$

ここに、 $h$ :水深、 $m$ :抵抗則



集中定数系方程式の模擬的なイメージ  
(非線形タンクモデル)

— 表面流に関して: *Manning* 則

$$m = 2/3$$

— 中間流に関して: 飽和・不飽和浸透流

$$m = 3 \sim 4$$

$$k(\theta) = k_s \theta^\gamma$$

不飽和浸透理論との比較により  $\gamma = m + 1$  と表せる

$\gamma$  は透水性を表す無次元パラメータで3~10程度の値を取る

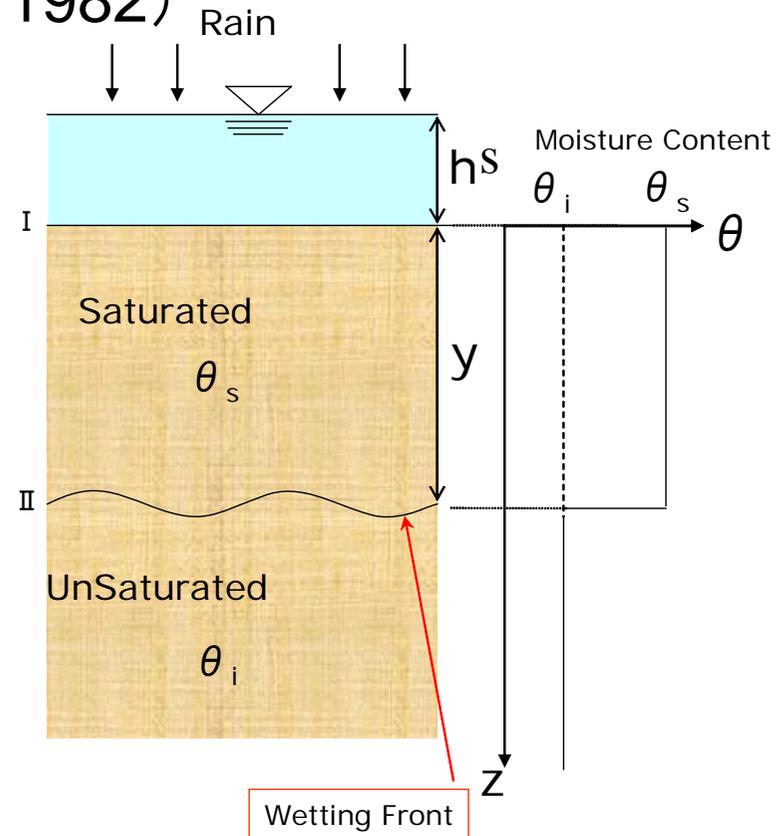
# □降雨の鉛直浸透過程(山田、1982)

・ダルシー則:  $q_0 = K_s \frac{y + h_k + h}{y}$

・連続式:  $\frac{dh_s}{dt} + (\theta_s - \theta_i) \frac{dy}{dt} = r$

$$\frac{dq_0}{dt} = (r - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) K_s (h_s + h_k)} (q_0 - K_s)^2$$

$$\frac{dh_s}{dt} = r - q_0$$



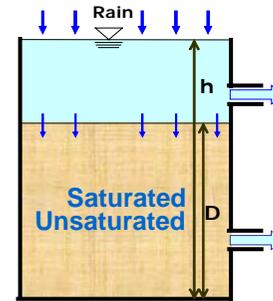
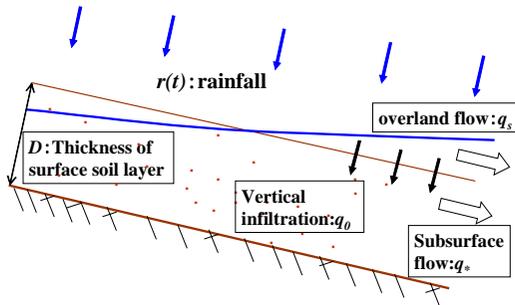
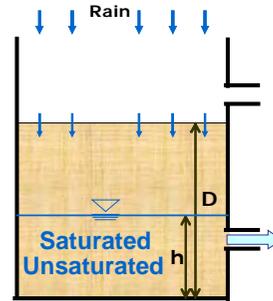
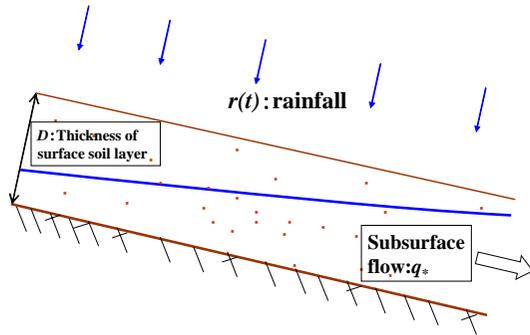
現象の一例として降雨強度が一定とすると、鉛直浸透量に関する解析解を得ます

$$q_0 = \begin{cases} R & (0 \leq t \leq t_p) \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) h_k}{t k_s}} \right\} k_s & (t_p \leq t) \end{cases}$$

$q_0$ : 浸透速度,  $y$ : 飽和部分長さ  
 $h_s$ : 湛水深,  $R$ : 降雨強度  
 $h_k$ : 湿潤線での毛管負圧水頭  
 $t_p$ : 湛水が始まる時刻

# □表面流の発生機構

## 高棹タイプ(1963)



中間流の水深

表層土層厚  
以下

$$(0 \leq h \leq D)$$

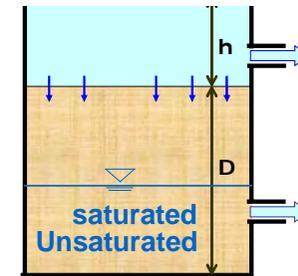
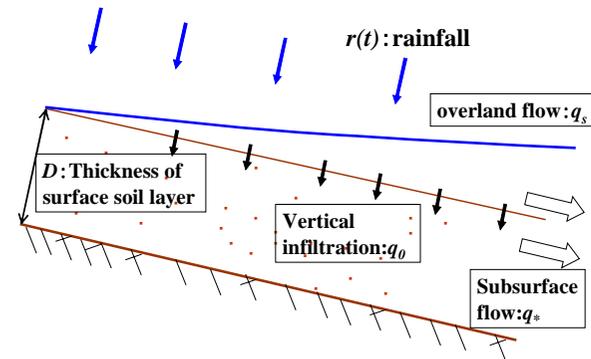
表面流の発生

表層土層厚を  
超えた時以降

$$(h > D)$$



## Hortonタイプ(1933)



降雨強度が土壌の  
浸透能を超えるとき  
に表面流が発生

# □高棹タイプ(1963)の表面流の取り込み

中間流の水深: $h$

表層土層厚以下

$$(0 \leq h \leq D)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*)$$

$$q_T = q_*$$

・・・中間流のみ

$$q_0 = r(t)$$

鉛直浸透流 = 降雨強度

$q_*$ : 流出高(中間流),  $q_s$ : 流出高(表面流),  $q_T$ : 全流出高

$q_0$ : 鉛直浸透量[mm/h]

表面流の発生

表層土層厚を超えた時以降

$$(h > D)$$

$$\frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s)$$

$$q_0 = q_*|_{h=D} \quad q_T = q_0 + q_s$$

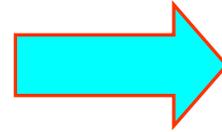
・・・表面流の発生

中間流: 一定 = 鉛直浸透流

# □ Hortonタイプ(1933)の表面流の取り込み

降雨強度が土壌の浸透能を超えるときに表面流が発生

降雨強度と飽和透水係数 $K_s$   
の大小関係で決まる



$$r(t) < K_s \quad q_0 = r(t)$$

$$r(t) \geq K_s \quad \text{表面流発生}$$

$$\begin{cases} \text{表面流:} & \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) \\ \text{中間流:} & \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) \\ \text{鉛直浸透流:} & \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - k_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) k_s} \frac{(q_0 - k_s)^2}{(h_s + h_k)} \\ \text{湛水深:} & \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 \end{cases}$$

● 残流域からのVを集中定数系方程式を使用し算定する手法

□ 表面流の発生を考慮した降雨流出計算手法

$$\frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) \quad \dots \text{表面流}$$

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) \quad \dots \text{中間流}$$

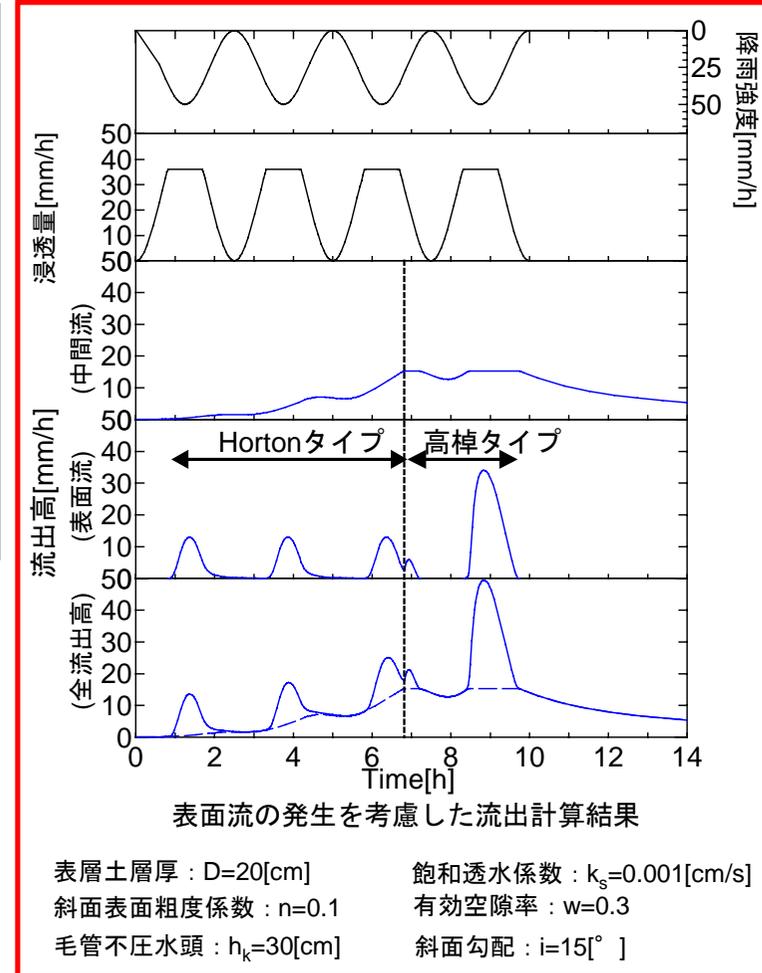
$$\frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) K_s (h_s + h_k)} (q_0 - K_s)^2$$

$$\frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 \quad \dots \text{湛水深}$$

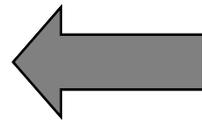
if  $h \geq D$   $q_*(t) = q_*|_{h=D}$   $q_0 = q_*|_{h=D}$

$h < D$  if  $r(t) < K_s$   $q_0 = r(t)$

(山田ら 2005)

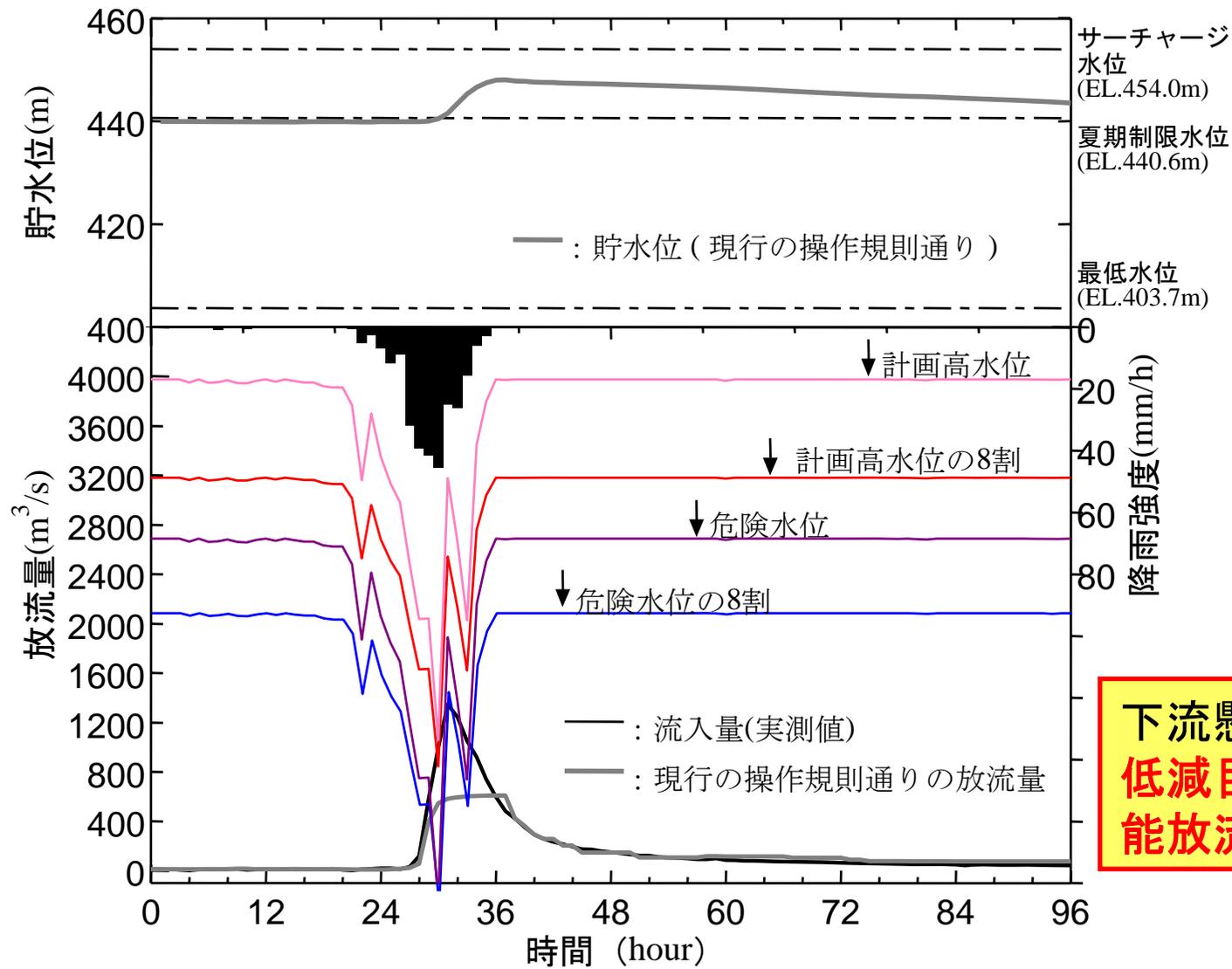


土壤・地形特性と降雨強度  
の関係のみから2つのタイプ  
の表面流が表現される



初期にHortonタイプの表面流が発生し、  
土壌内全てが飽和に達した後、  
Dunne・高棹タイプへと変化している

# 可能放流量の算出結果



草木ダムへのピーク流入量が  
既往2番目 (1340m<sup>3</sup>/s) 時間最  
大降雨強度: 46mm/h

下流懸案地点における、  
低減目標水位に応じた可  
能放流量の算出が可能

解析対象ダム流域における可能放流量と、実測の流入量と放流量及び貯水位

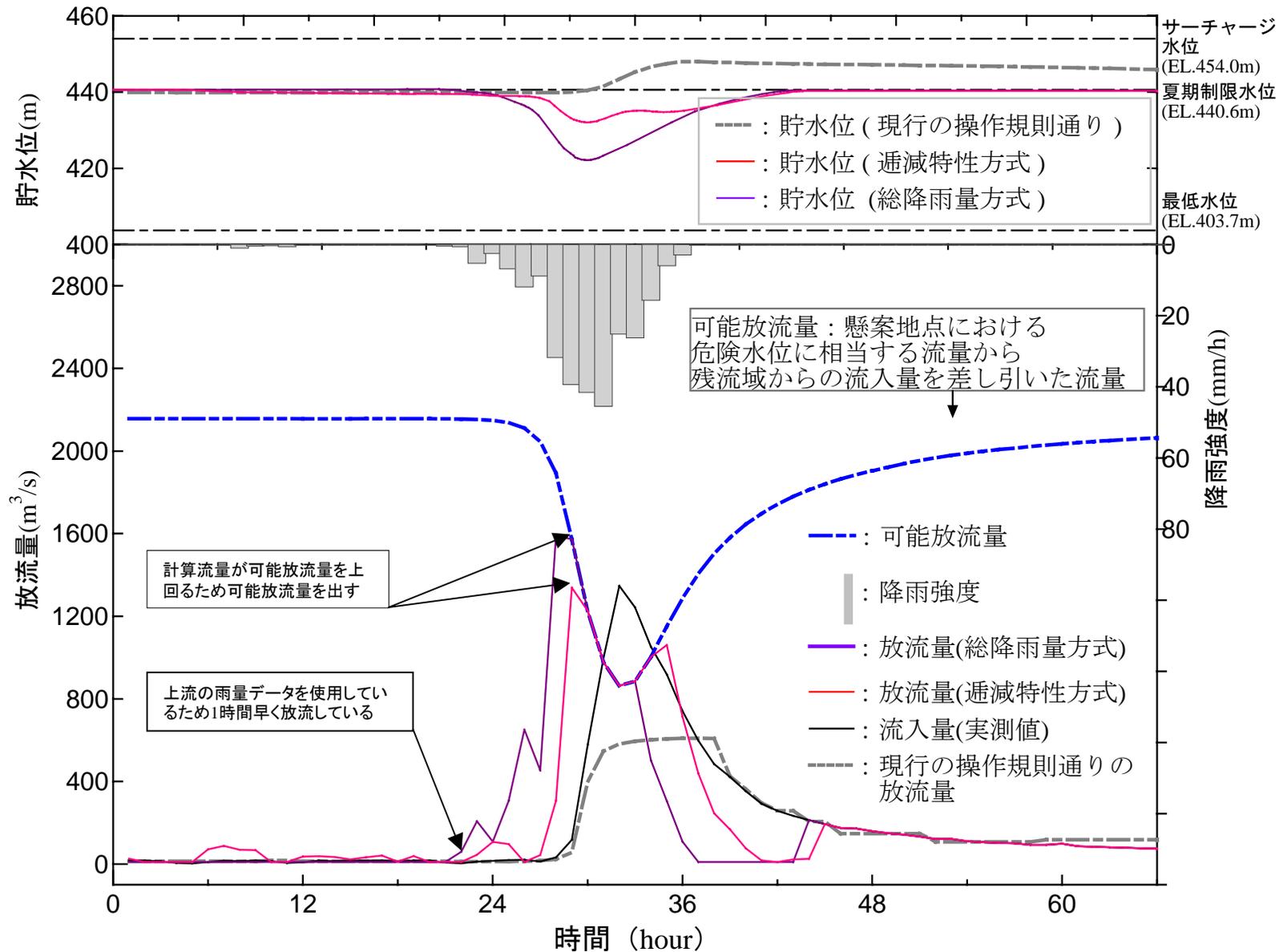
# 6.洪水調節シミュレーション

## ダム下流域における洪水水位低減効果

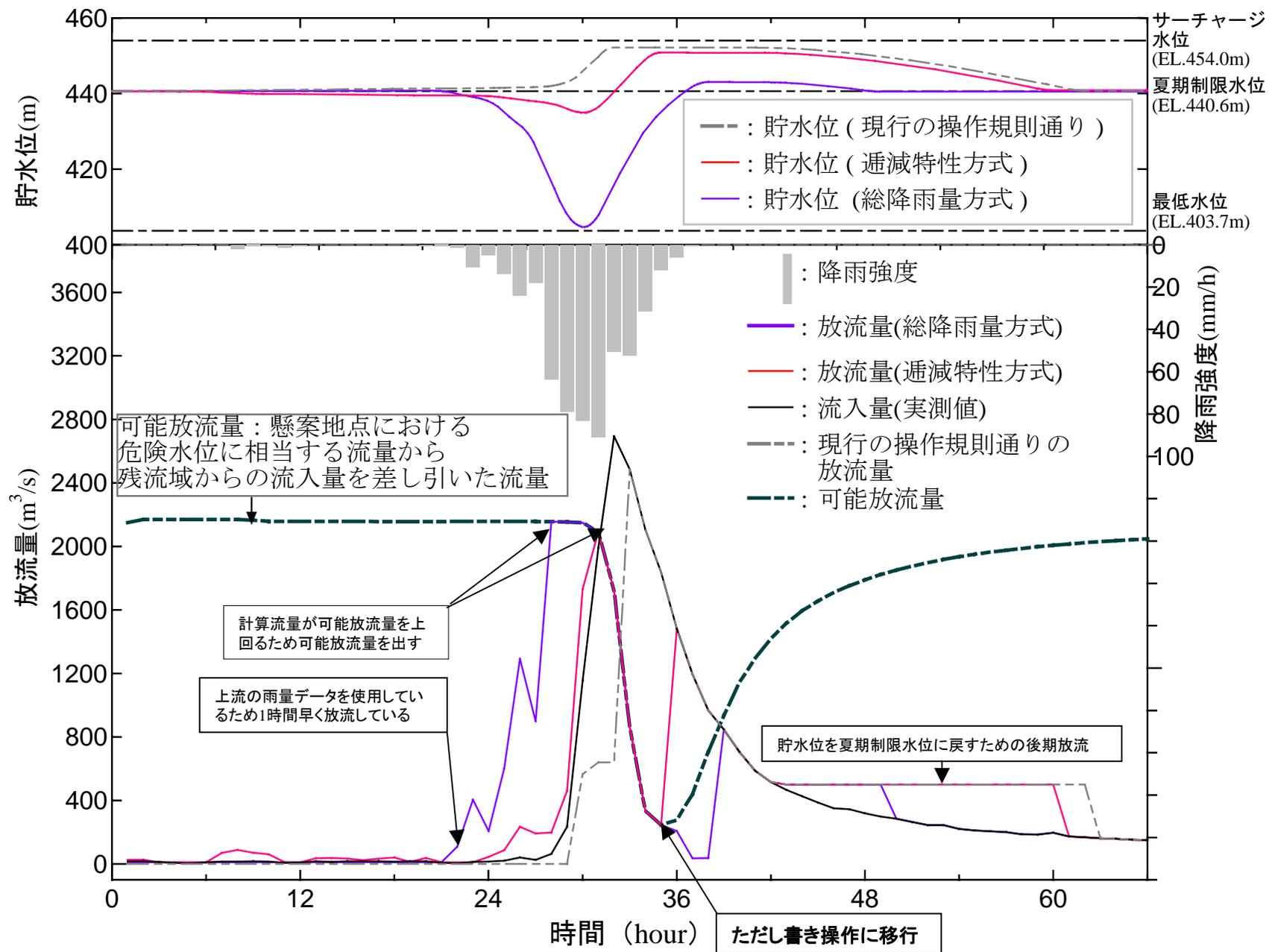
本研究で提案する手法により洪水調節シミュレーションを行った

	対象とした洪水	低減目標水位
CASE1	実測の洪水:1998年9月15日(台風5号) →解析対象ダム貯水池への 流入量のピークが既往2番目	下流懸案地点における危険水位以内
CASE2		下流懸案地点における危険水位の8割以内
<u>CASE3</u>	実測の流入量の2倍の流量を想定した洪水	<u>下流懸案地点における危険水位以内</u>
CASE4		残流域からの流出量に応じて可能放流量を変化させる
CASE5	実測の降雨継続時間の2倍を想定した洪水	下流懸案地点における危険水位以内

# 実測洪水に対して、洪水調節を行った場合



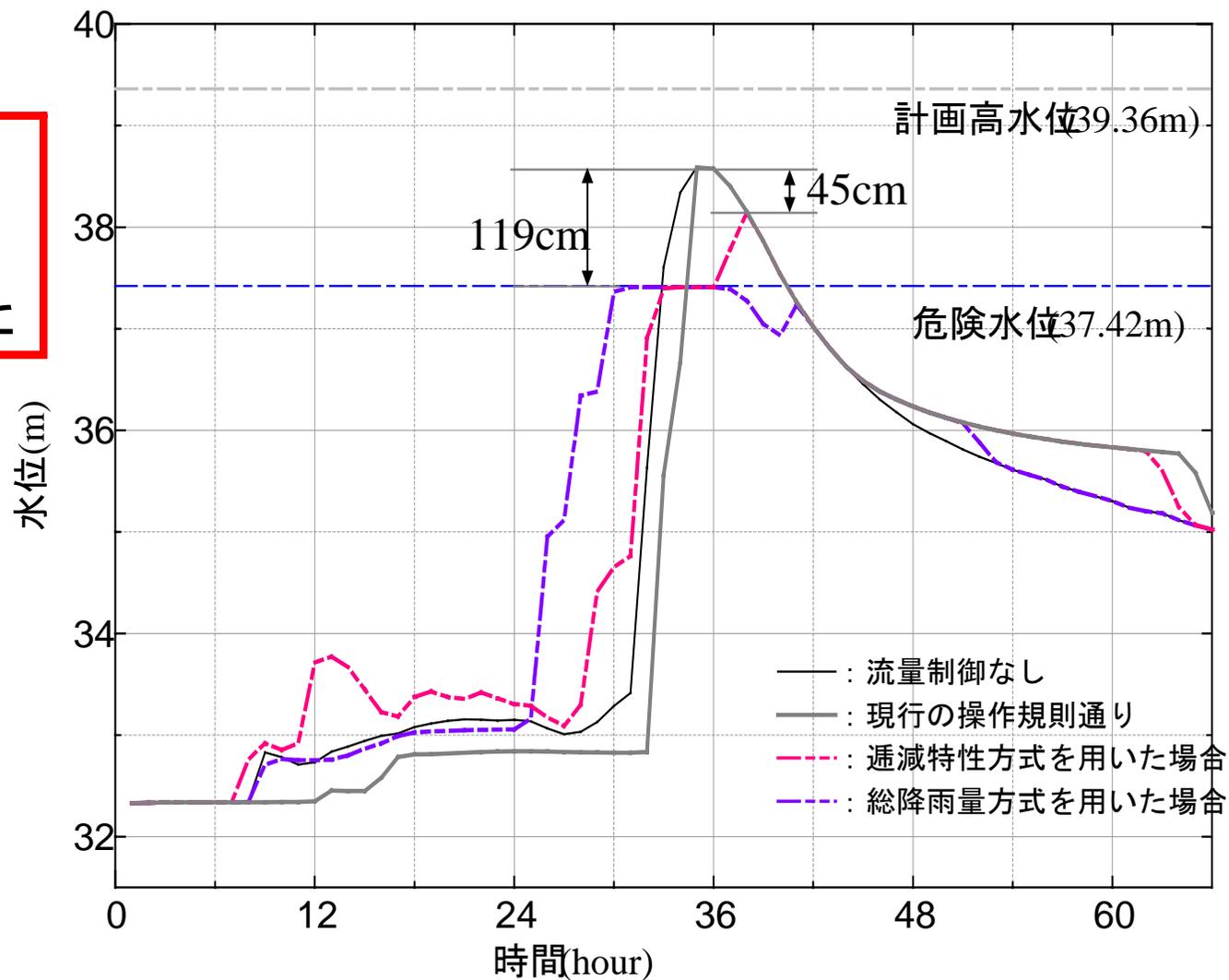
提案する放流手法に基づく事前放流を行った洪水調節、  
現行の操作規則による洪水調節、およびその時の貯水位と実測の流入量



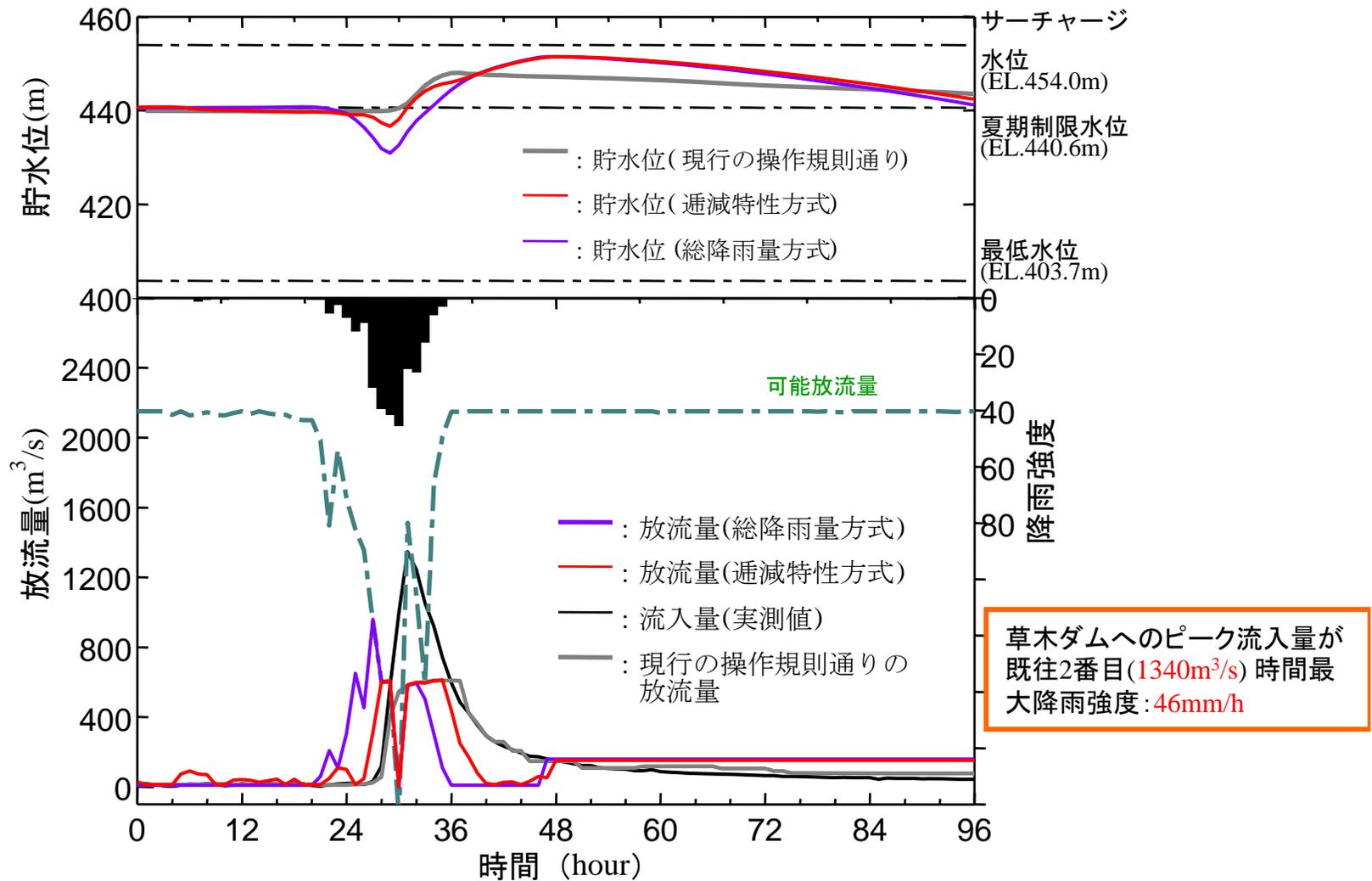
# ● 下流懸案地点における水位低減効果

## CASE3

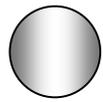
現行の操作より  
119cmの  
水位低減効果を得た



# CASE2 実測の洪水の2倍の流入量の洪水に対して、低減目標水位を危険水位の8割に定めて洪水調節を行った場合

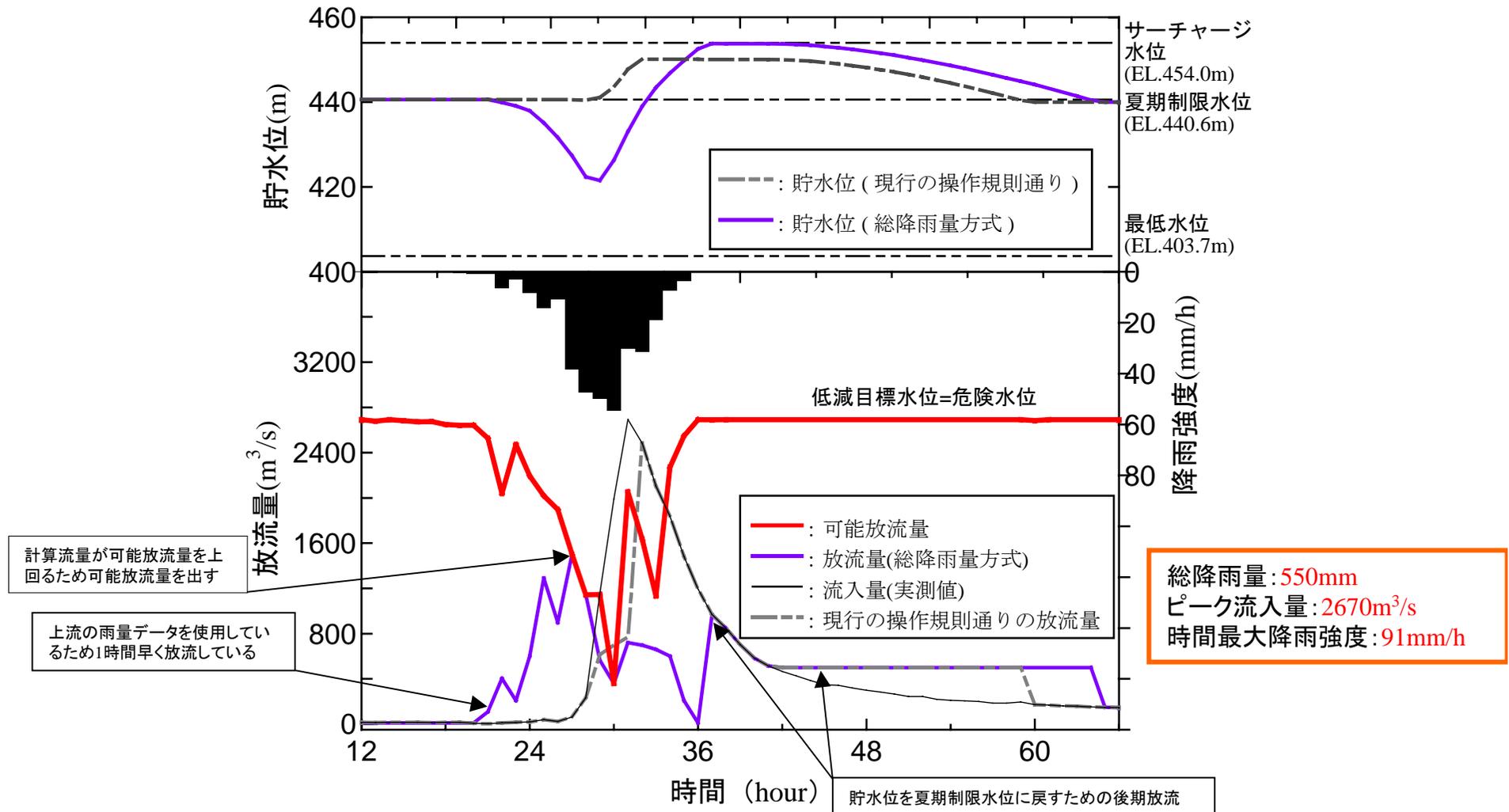


逡減特性方式と総降雨量方式を用いて事前放流を行った洪水調節, 現行の操作規則による放流量及びその時の貯水位と実測の流入量



# CASE3

## 実測の洪水の2倍の流入量の洪水に対して、低減目標水位を危険水位に定めて洪水調節を行った場合



総降雨量方式を用いて事前放流を行った洪水調節, 現行の操作規則による放流量及びその時の貯水位と実測の流入量

# CASE3の操作の手順

- ① 降雨の発生
- ② 事前放流量及び可能放流量を計算する
- ③ 計算放流量 < 可能放流量 ならば計算放流量を放流  
そうではなく 計算放流量 > 可能放流量 ならば可能放流量を放流
- ④ 流入量が500m<sup>3</sup>/sに達する
- ⑤ 計算放流量 > 可能放流量 > 現行の操作規則通りの放流量  
可能放流量 > 計算放流量 > 現行の操作規則通りの放流量  
ならば現行の操作規則通りの放流量を放流

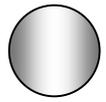
計算放流量 > 現行の操作規則通りの放流量 > 可能放流量  
現行の操作規則通りの放流量 > 計算放流量 > 可能放流量  
ならば可能放流量を放流

可能放流量 > 現行の操作規則通りの放流量 > 計算放流量  
現行の操作規則通りの放流量 > 可能放流量 > 計算放流量  
ならば計算放流量を放流

※ 貯水位がEL451.8mに達したら、  
ただし書き操作により流入量と同じ量を放流

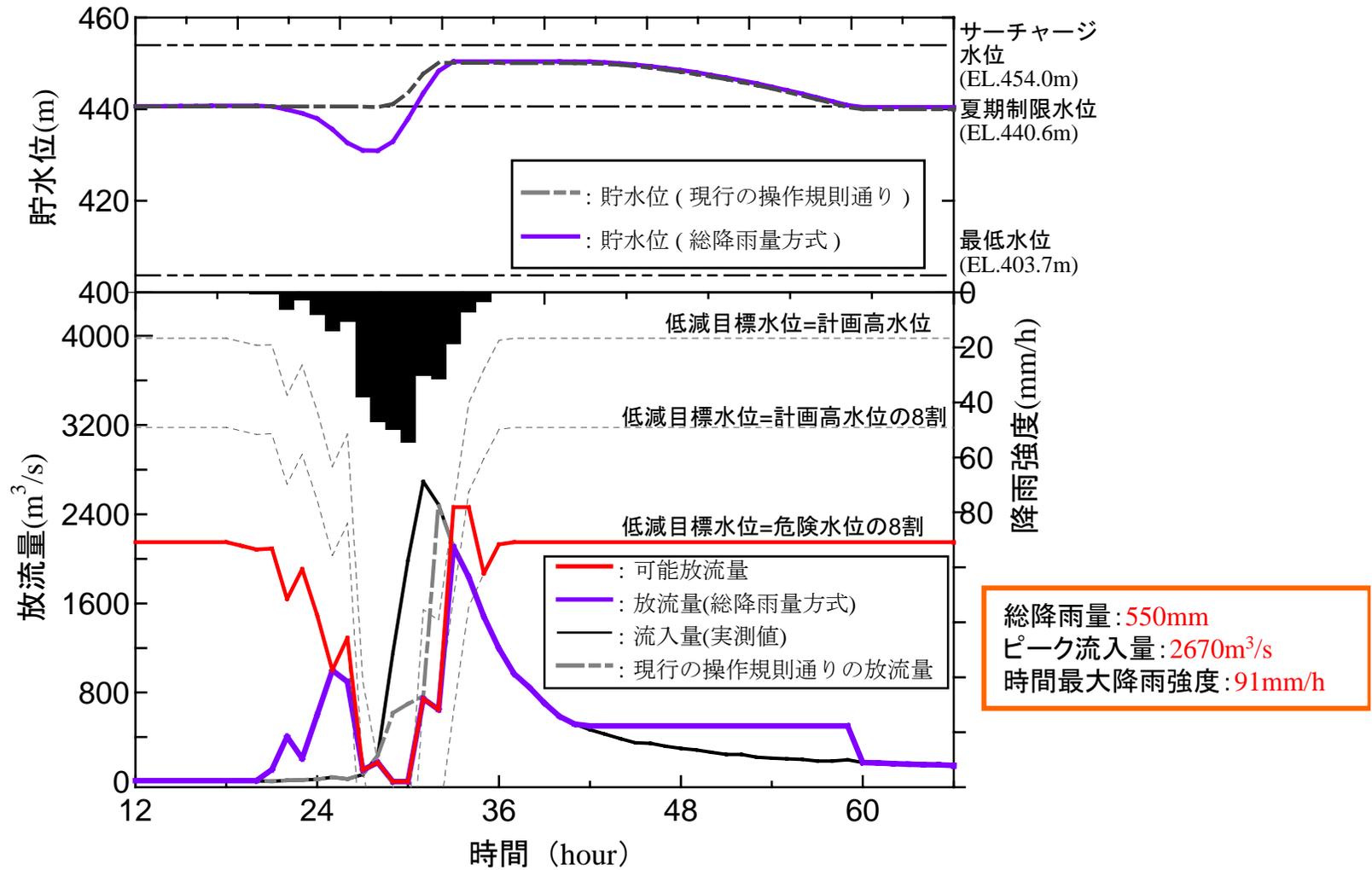
- ⑥ ただし書き操作を実施中、流入量が500m<sup>3</sup>/sを下回ったら、後期放流により500m<sup>3</sup>/sを一定放流
- ⑦ 貯水位が夏期制限水位に戻ったら、流入量と同じ量を放流

現行の  
操作規則  
と同じ



# CASE4

実測の洪水の2倍の流入量の洪水に対して、**残流域からの流出量に応じて可能放流量を変えた場合**



総降雨量方式を用いて事前放流を行った洪水調節, 現行の操作規則による放流量及びその時の貯水位と実測の流入量

# ● 本研究で提案する洪水調節を行った際の 水位低減効果

## 河道部における不定流計算に用いた基礎式

・連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

・運動方程式

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

Q:流量 [Discharge] (m<sup>3</sup>/s)

A:通水面積 [Flow area] (m<sup>2</sup>)

q:側方流入・損失 [Side-inflow, outflow] (m<sup>2</sup>/s)

R:径深 [Hydraulic Radius] (m)

$\alpha$ :流速分布形状による補正係数  
[velocity distribution coefficient]

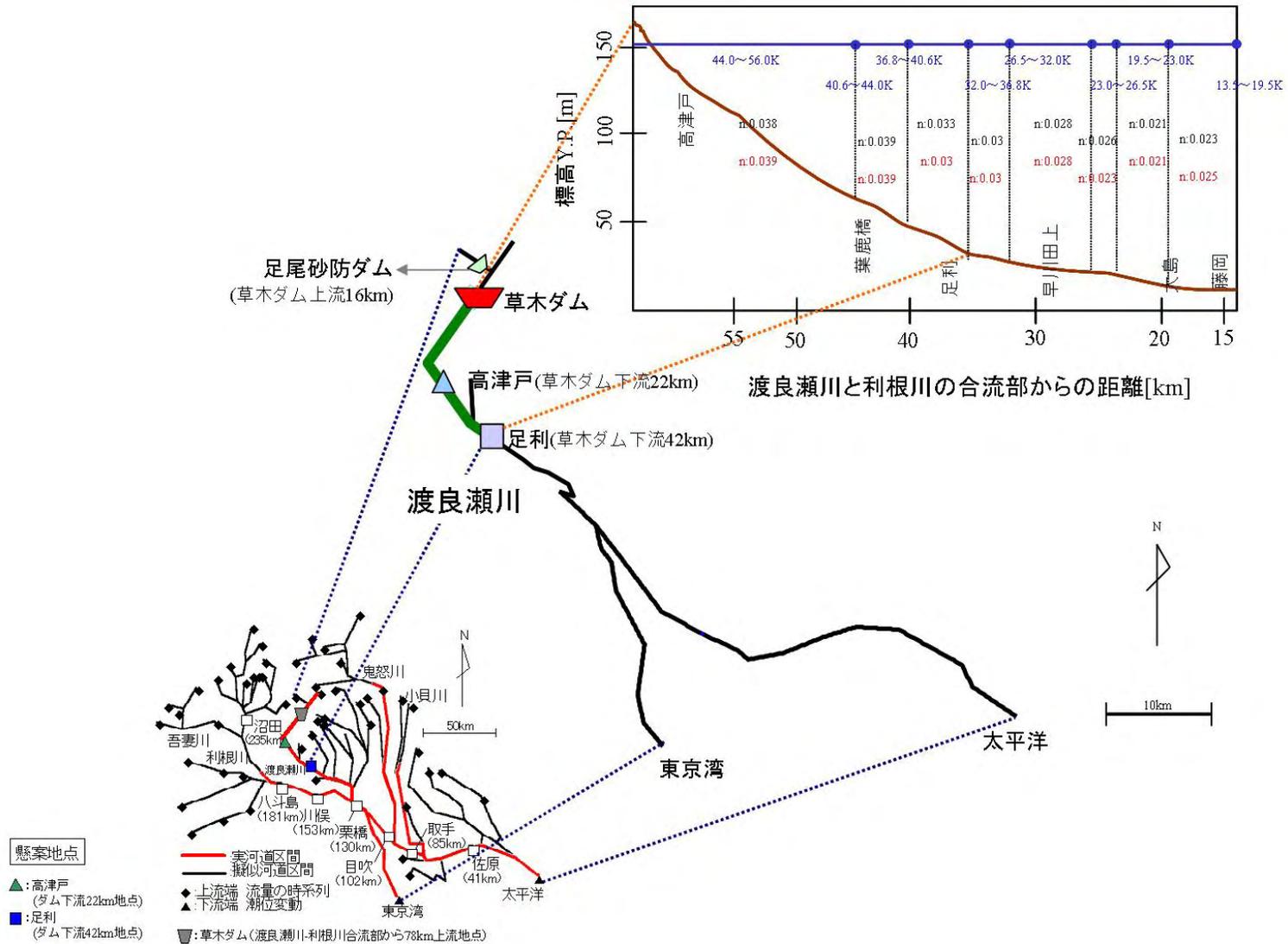
h:水位 [flow depth] (m)

n:Manningの粗度係数

[Manning's coefficient of roughness]

差分法:6点アボット法 (陰解法)

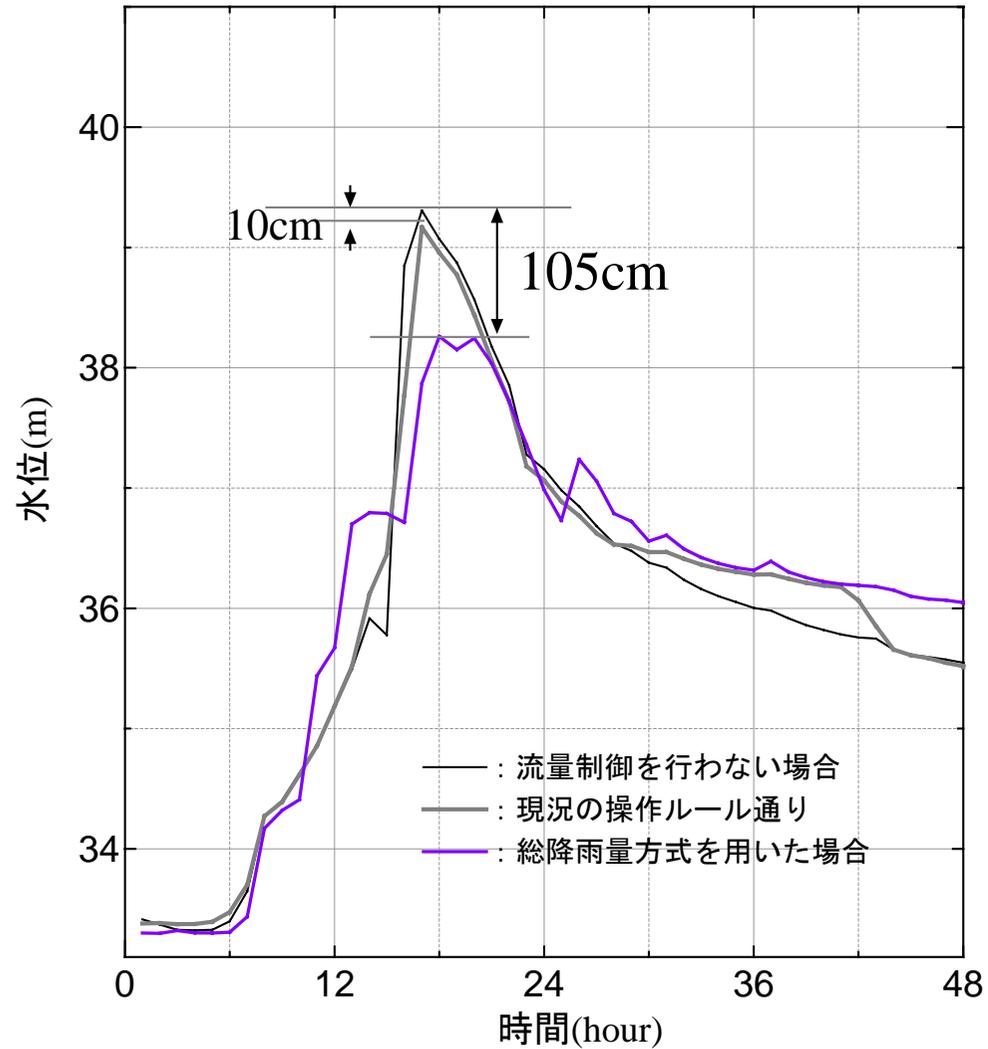
# 渡良瀬川における河床粗度の分布



# ● 下流懸案地点における水位低減効果

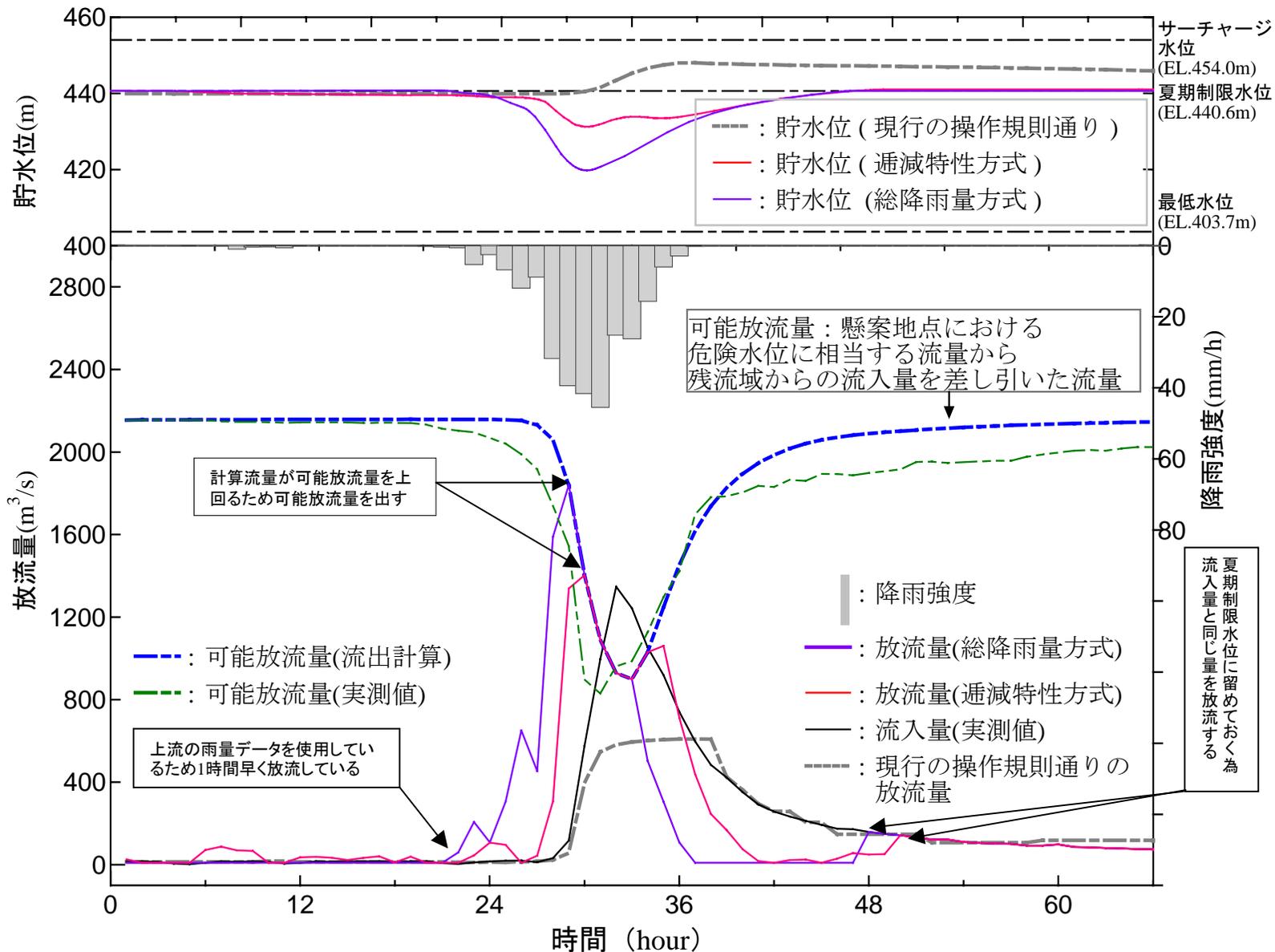
## CASE3

現行の操作より95cmの  
水位低減効果を得た

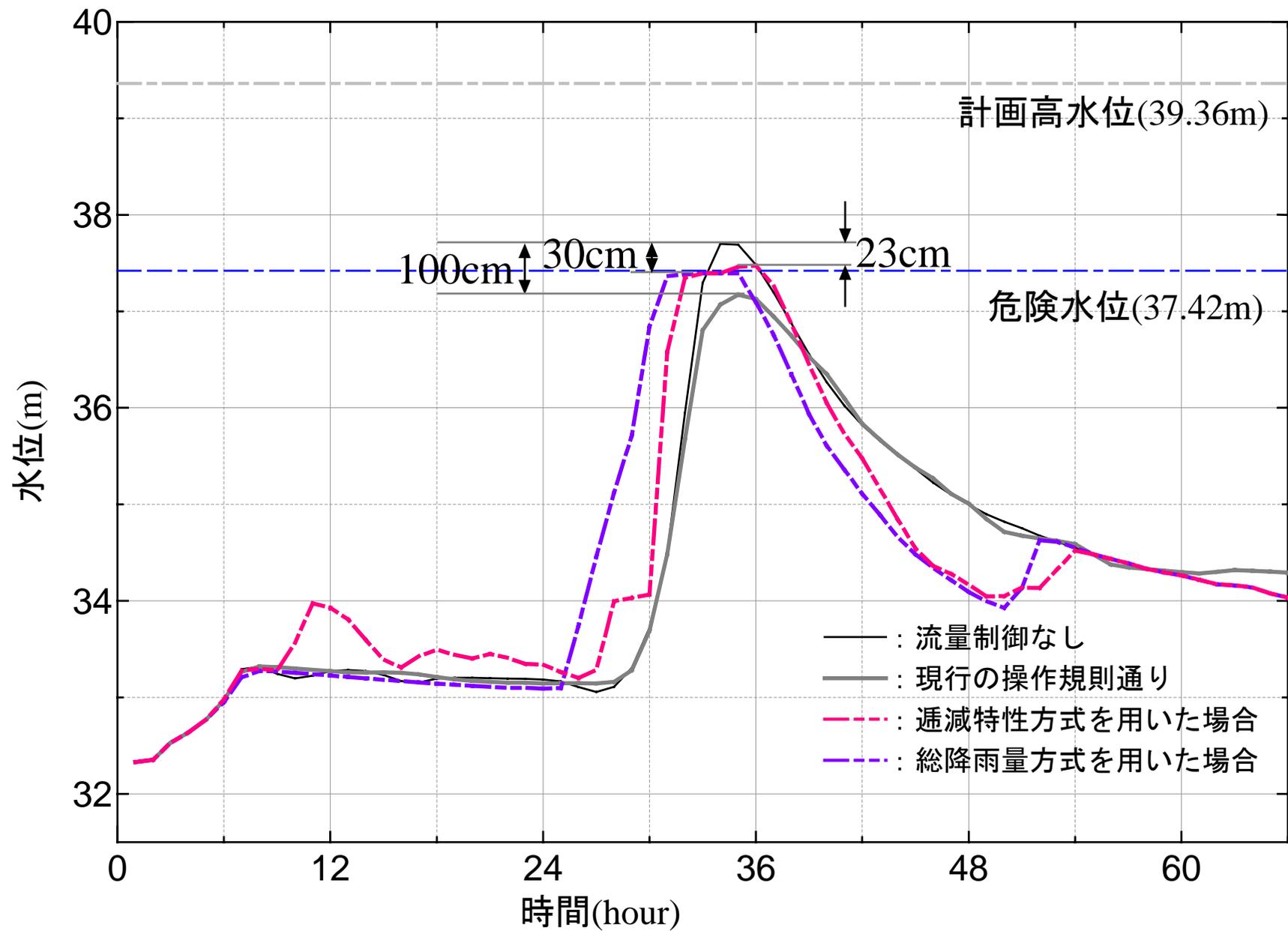


ダム下流42km地点における水位の時系列

# 残流域からの流出量を流出計算により求めた場合



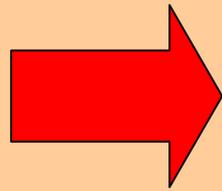
ダム貯水池への流入量が既往2番目の出水に対して本研究で提案する洪水調節を行った場合



ダム下流42km地点における水位の時系列

# ● 本研究で提案する事前放流量の決定手法

降雨予測に頼らない手法 (予測に頼らないので、空振りにあうことはない)



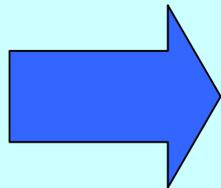
各ダム流域の流出特性のみから放流量を決定する

・ダム流域等の過去の水文資料の収集・整理・解析が非常に重要

※ダム流域等における気象条件・流域状況

ダム下流河道の流下能力等を十分加味したゲート操作を行う

降雨予測を用いる (予測する=空振りにあう危険性が常につきまとう)



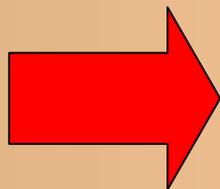
降雨の確率予報を用いて事前放流を行う

・事前放流に伴う治水的な利益と利水的な損失を経済的指標を用いて算定し、事前放流の意思決定を行う

※はずれる可能性がゼロでない限り、不確実な情報である。  
この不確実な情報である気象予報をダムのゲート操作に応用させる

# ● 本研究で提案する事前放流量の決定手法

降雨予測に頼らない手法 (予測に頼らないので、空振りにあうことはない)



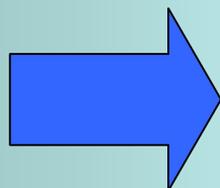
各ダム流域の流出特性のみから放流量を決定する

・ダム流域等の過去の水文資料の収集・整理・解析が非常に重要

※ダム流域等における気象条件・流域状況

ダム下流河道の流下能力等を十分加味したゲート操作を行う

降雨予測を用いる (予測する=空振りにあう危険性が常につきまとう)



降雨の確率予報を用いて事前放流を行う

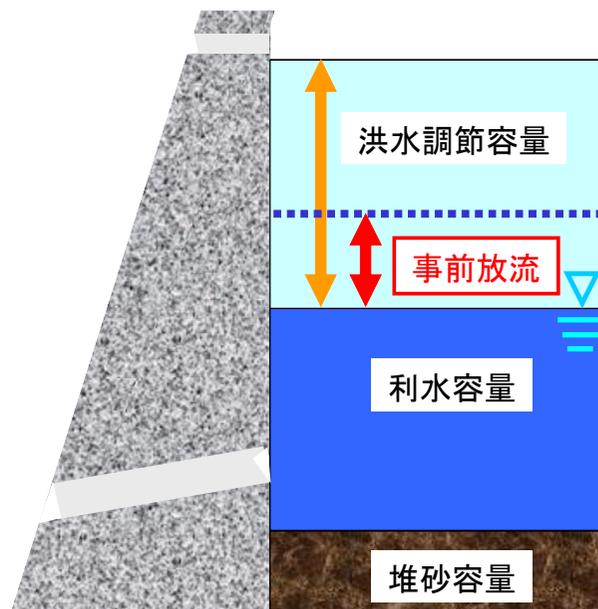
・事前放流に伴う治水的な利益と利水的な損失を経済的指標を用いて算定し、事前放流の意思決定を行う

※はずれる可能性がゼロでない限り、不確実な情報である。この不確実な情報である気象予報をダムのゲート操作に応用させる

# ● 降雨の確率予報を用いた事前放流手法

## 治水

事前放流を行えば現況以上に治水効果を得ることができる



## 利水

予報がはずれる可能性がゼロでない限り、空振りにあい利水容量を失う危険性がある

事前放流を行うという試行に対して、  
治水・利水の観点から考えられる  
全事象の期待利益の合計額が  
プラスになるように事前放流を行えばよい  
事前放流を実行するか否かの降雨の確率  
予報値および総直接流出量の閾値の決定

# ● 事前放流の意思決定に必要な情報

## 降雨の確率予報

これから  $P_f\%$  の確率で総降雨量  $R_f$  [mm] の雨が降る

## 流域における最少雨量

$P_M$  の確率で最低  $R_M$  [mm] 以上の総降雨量が発生する

## ダム流域の流出特性

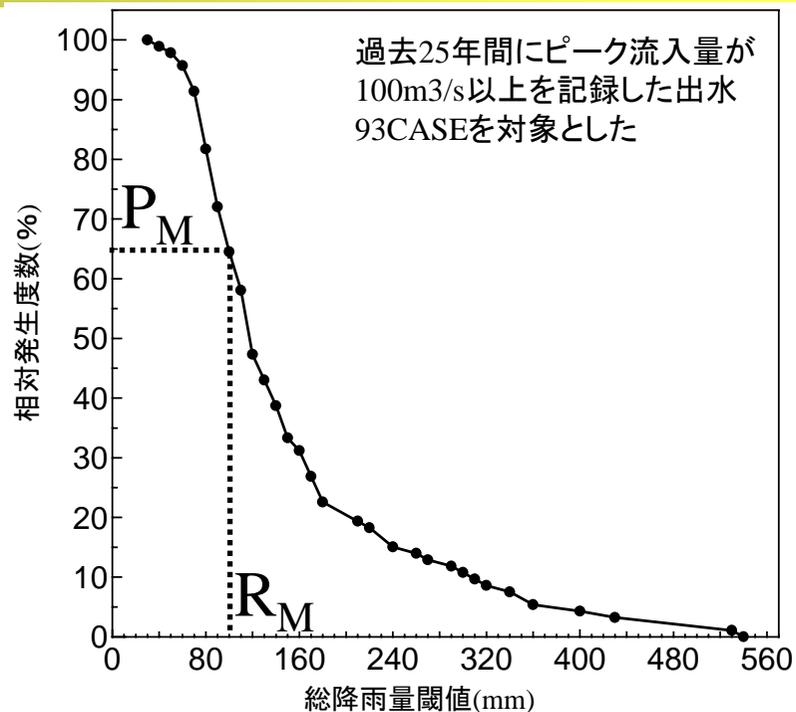
総降雨量  $R$  [mm] が降ると直接流出量  $V$  [m<sup>3</sup>] が  
ダム貯水地に流入する

# 降雨の確率予報

気象庁が発表している大雨確率予報のように、ある降雨量が発生する確率を数値予報モデルなどを使用して予報されたものを使用する

## 流域における最少雨量

既往の統計データにより、各ダム流域で予め作成しておく。  
この際、何mmを最少雨量とするかが重要。

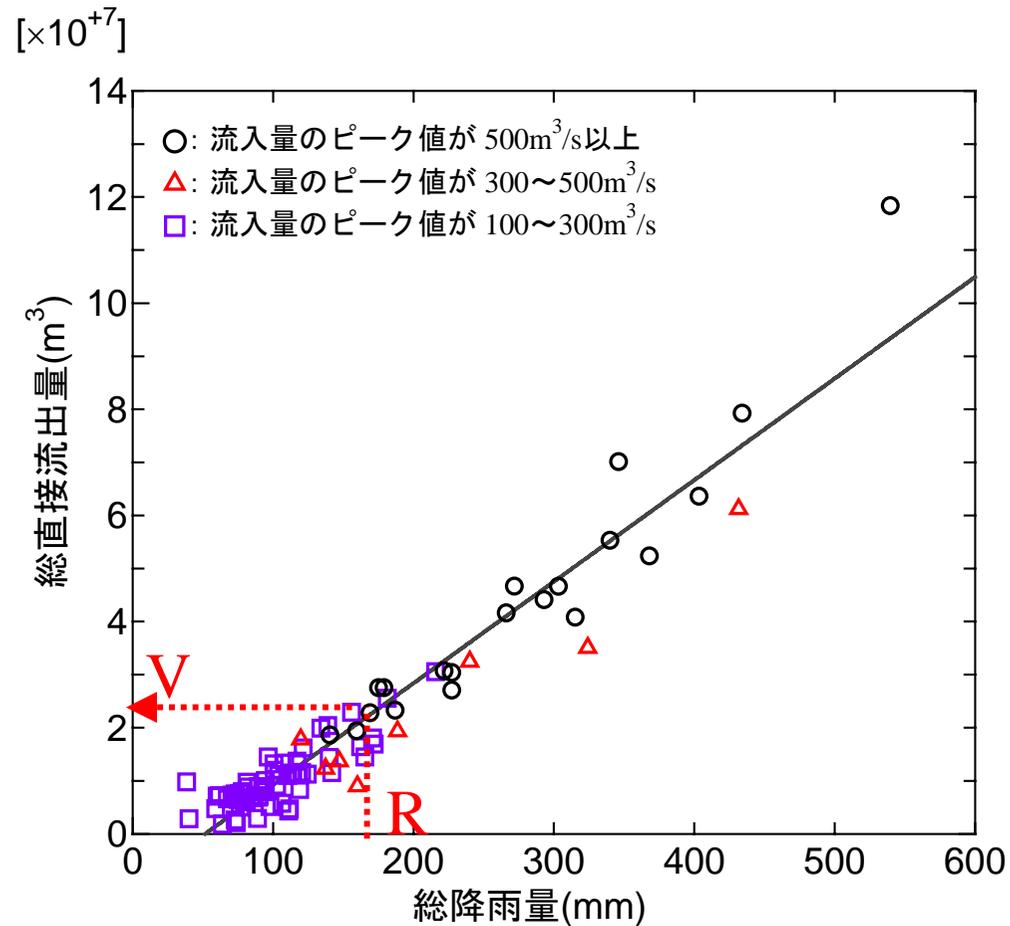


例えば解析対象ダム流域では過去にダム貯水池への流入量が100m<sup>3</sup>/s～300m<sup>3</sup>/sの比較的小規模な出水の総降雨量の平均値は100mmだった。

解析対象ダム流域において閾値以上の総降雨量が発生する確率  
(30mm)で正規化した

# ダム流域の流出特性

既往の統計データにより、各ダム流域で予め作成しておく。  
累積降雨量に応じた総直接流出量が算定できる→RとVの関係



解析対象ダム流域における累積降雨量と総直接流出量の関係

# ● 事前放流を行う場合に考えられる事象

予報：合計 $R$ [mm]以上の雨が降る確率は $P$

予報に基づいて合計 $V$ [m<sup>3</sup>]の事前放流を行うとすると、この試行に対して考えられる事象

## ■ 事象 I

➡ 降雨の確率予報があたる

## ■ 事象 II

➡ 降雨の確率予報ははずれるが、予め見込んでいた流域の最少雨量はあたる

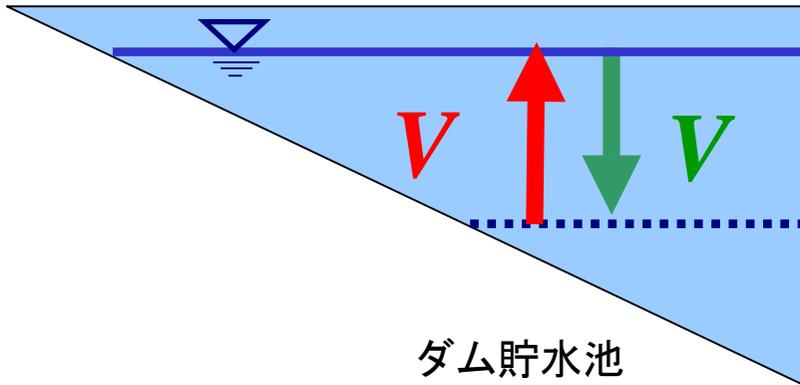
## ■ 事象 III

➡ 降雨の確率予報も最少雨量予測もはずれる

## ● 各事象の期待利益

### ■ 事象 I : 降雨の確率予報があたる

➡  $V$  (m<sup>3</sup>)をダム貯水池に貯め込む事ができる



治水 = +V

利水 = ±0

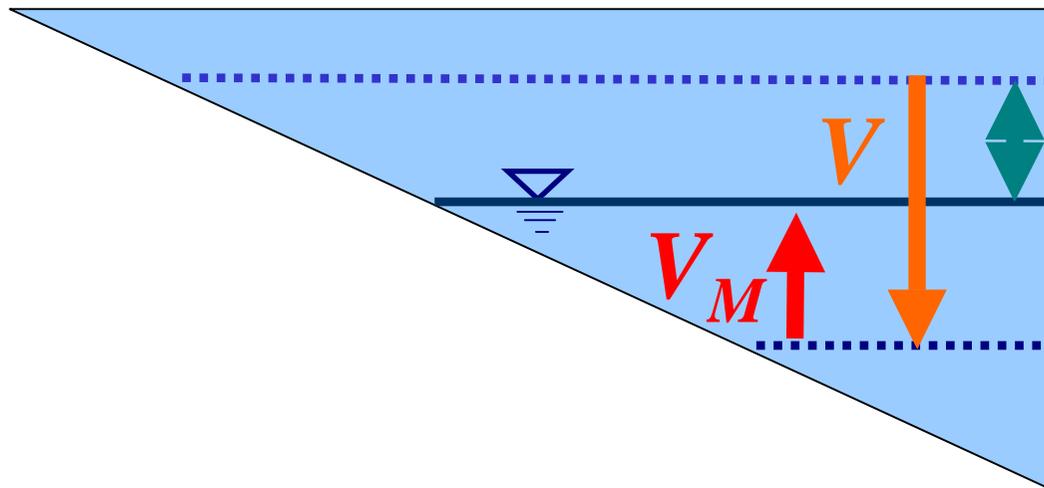
$$EG_{(I)} = \underline{P \cdot V \cdot f} + \underline{P \cdot 0 \cdot w} = P \cdot V \cdot f$$

*EG*: Expected Gain[円], *P*: *R* [mm]以上の総降雨量の発生確率, *V*: 合計*R* [mm]以上降った時, ダム貯水池に流入してくる総流入量[m<sup>3</sup>], *f*: 水1m<sup>3</sup>/sあたりの洪水被害軽減額, *w*: 水1m<sup>3</sup>/sあたりの利水額

■事象Ⅱ：降雨の確率予報はずれるが、  
最少雨量予測はあたる



$V$  [m<sup>3</sup>]事前放流したうちの $V_M$  [m<sup>3</sup>]がダム貯水地に流入する



$V - V_M$

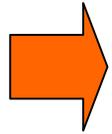
治水 =  $+V_M$

利水 =  $-(V - V_M)$

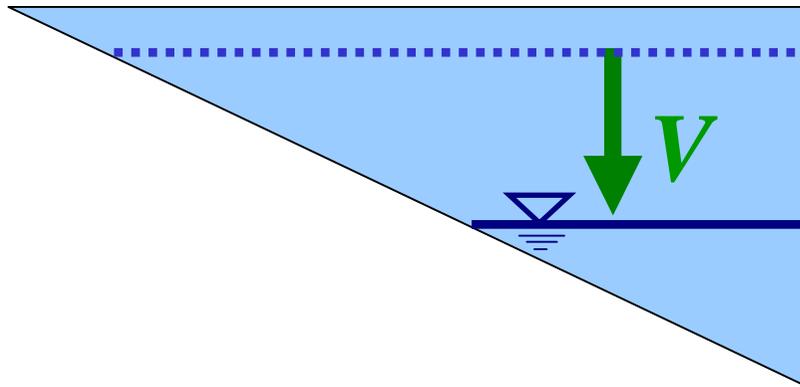
$$EG_{(II)} = \underbrace{(P_M - P) \cdot V_M \cdot f}_{\text{Red underline}} - \underbrace{(P_M - P) \cdot (V - V_M) \cdot w}_{\text{Green underline}}$$

$EG$ : Expected Gain [円]  $P_M$ :  $R_M$  [mm]以上の総降雨量の発生確率 ( $R_M < R$ ),  $V_M$ : 合計 $R_M$  [mm]以上降った時, ダム貯水池に流入してくる総流入量 [m<sup>3</sup>],  $P$ :  $R$  [mm]以上の総降雨量の発生確率,  $V$ : 合計 $R$  [mm]以上降った時, ダム貯水池に流入してくる総流入量 [m<sup>3</sup>],  $f$ : 水1m<sup>3</sup>/sあたりの洪水被害軽減額,  $w$ : 水1m<sup>3</sup>/sあたりの利水額

## ■事象Ⅲ：降雨の確率予報も最少雨量予測もはずれる



空振りにあい、 $V$  [ $\text{m}^3$ ]を失ってしまう



治水 =  $\pm 0$

利水 =  $-V$

$$EG_{(Ⅲ)} = \underline{(1 - P_M) \cdot 0 \cdot f} - \underline{(1 - P_M) \cdot V \cdot w} = -(1 - P_M) \cdot V \cdot w$$

$EG$ : Expected Gain [円]  $P_M$ :  $R_M$  [mm]以上の総降雨量の発生確率 ( $R_M < R$ ),  $V_M$ : 合計  $R_M$  [mm]以上降った時, ダム貯水池に流入してくる総流入量 [ $\text{m}^3$ ],  $P$ :  $R$  [mm]以上の総降雨量の発生確率,  $V$ : 合計  $R$  [mm]以上降った時, ダム貯水池に流入してくる総流入量 [ $\text{m}^3$ ],  $f$ : 水  $1\text{m}^3/\text{s}$ あたりの洪水被害軽減額,  $w$ : 水  $1\text{m}^3/\text{s}$ あたりの利水額,

# ● 事前放流を実行するか否かの閾値の決定

全事象の期待利益の和がプラスになればよい

$$\sum_{i=3} EG_{(i)} = EG_{(I)} + EG_{(II)} + EG_{(III)} > 0$$



$$P > \frac{V \cdot w - P_M \cdot V_M \cdot (f + w)}{(V - V_M) \cdot (f + w)}$$

$P$ :  $R$  [mm]以上の総降雨量の発生確率

$P_M$ :  $R_M$  [mm]以上の総降雨量の発生確率( $R_M < R$ )

$V_M$ : 合計 $R_M$  [mm]以上降った時, ダム貯水池に流入してくる総流入量[m<sup>3</sup>],

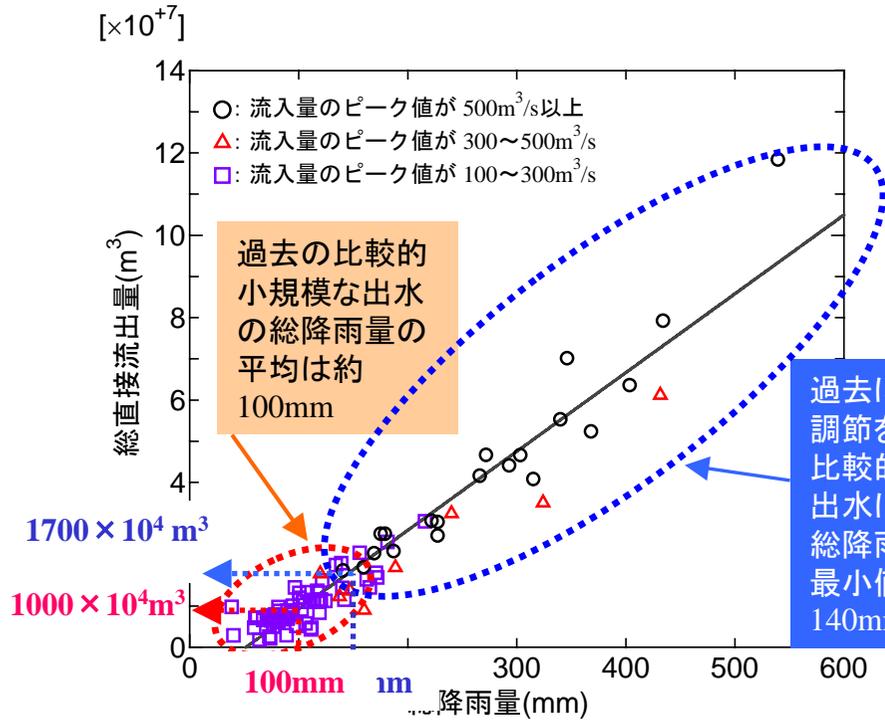
$V$ : 合計 $R$  [mm]以上降った時, ダム貯水池に流入してくる総流入量[m<sup>3</sup>]

$f$ : 水1m<sup>3</sup>/sあたりの洪水被害軽減額

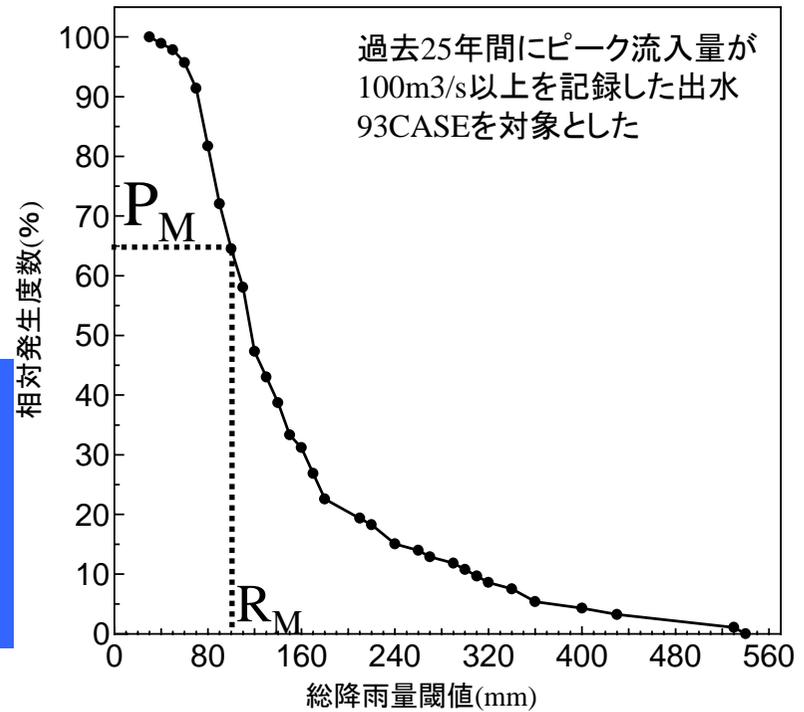
$w$ : 水1m<sup>3</sup>/sあたりの利水額,



# 解析対象ダムへの適用例



解析対象ダム流域における累積降雨量を総直接流出量の関係



解析対象ダム流域において閾値以上の総降雨量が発生する確率(30mm)で正規化した

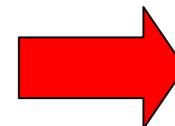
流域における最少雨量  $R_M=100\text{mm}$

流域における総降雨量100mm以上の発生確率  $P_M=0.64$

総降雨量100mmに相当する総直接流出量  $V_M=1000 \times 10^4\text{m}^3$

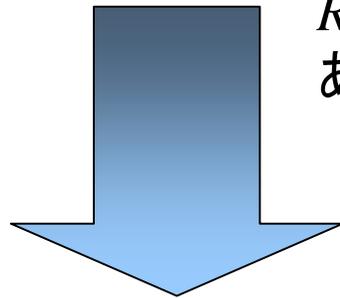
事前放流の目安となる総降雨量  $R=140\text{mm}$

総降雨量140mmに相当する総直接流入量  $V=170 \times 10^4\text{m}^3$



合計170万 $\text{m}^3$   
の事前放流

$$P > \frac{V \cdot w - P_M \cdot V_M \cdot (f + w)}{(V - V_M) \cdot (f + w)}$$



$R_M=100\text{mm}$ 降ると $V_M=100 \times 10^4\text{m}^3$ の流入があり、 $R_M$ 以上の雨が降る確率は $P_M=0.65$

同様に $R=140\text{mm}$ 降ると $V=170 \times 10^4\text{m}^3$ の流入がある

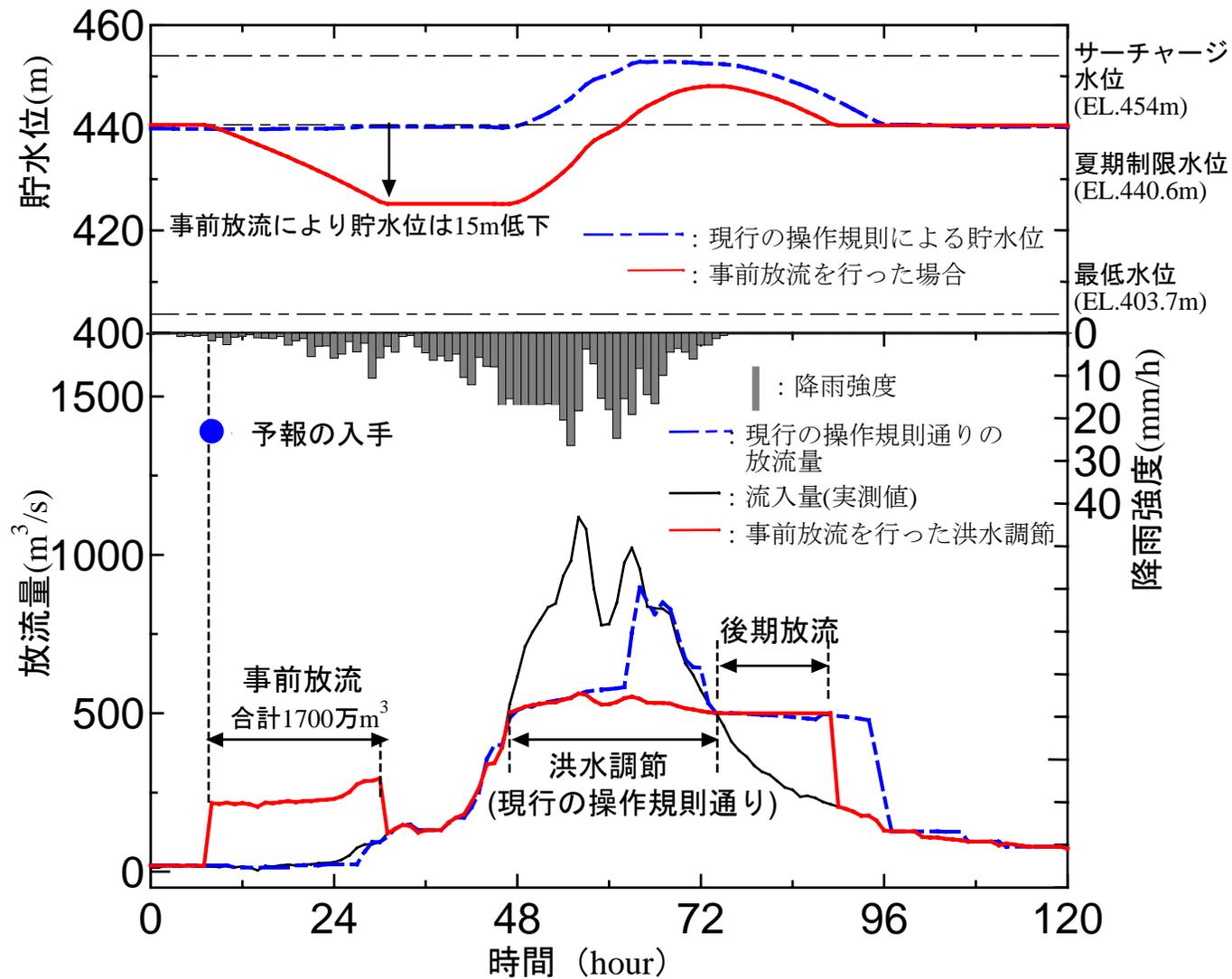
上式に $V_M, P_M, V, f=w$ を代入すると

$$P > \frac{V \cdot w - P_M \cdot V_M \cdot (f + w)}{(V - V_M) \cdot (f + w)} = 0.33$$

事前放流の目安となる総降雨量140mm以上の発生確率が33%より大きい予報なら事前放流を行うと統計的には得をする。→空振りによる損金 < 洪水被害損失金



# 解析対象ダムへの適用例

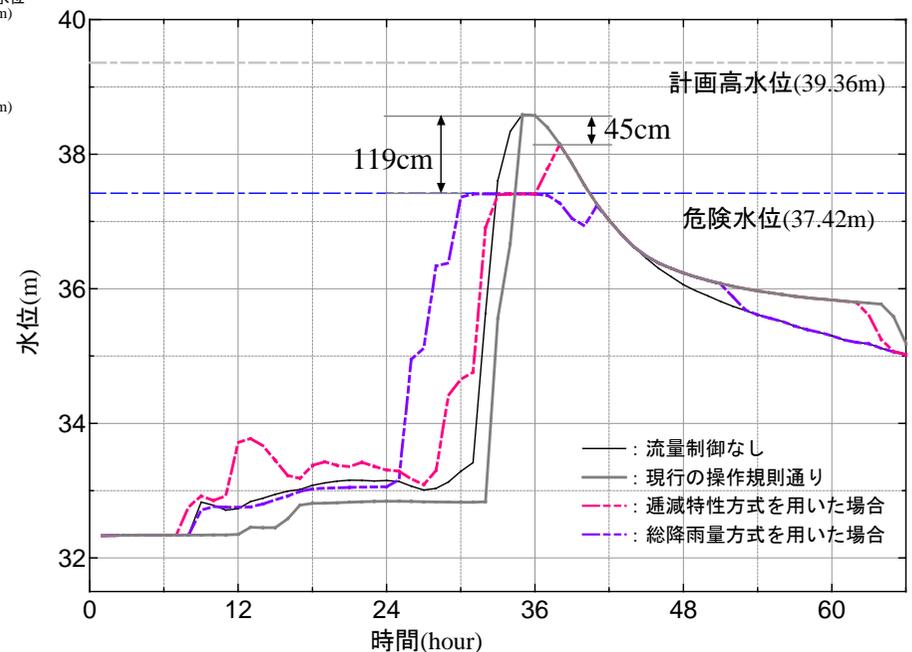
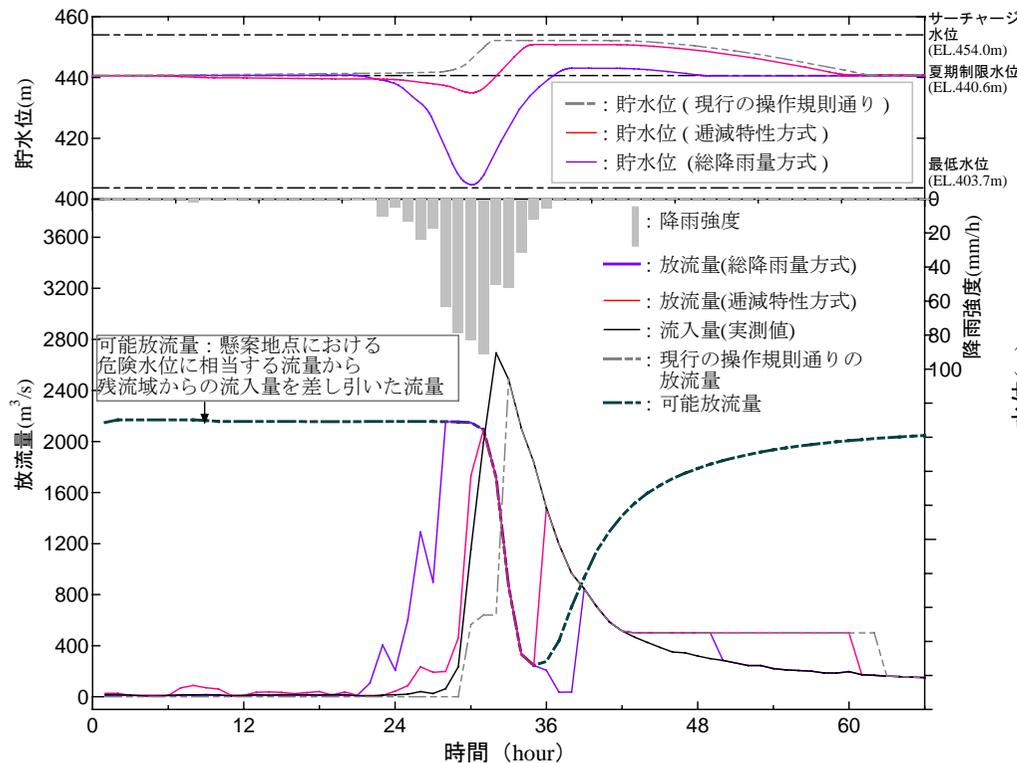


確率予報を用いた事前放流による洪水調節と現行の操作との比較

# 7.まとめ

○逕減特性方式及び総降雨量方式による洪水調節手法を提案し、1998年9月の洪水に対して適用した。事前放流を行うことにより、**ただし書き操作を行わずに洪水を制御することが可能となった。この手法は任意のダム流域において適用可能である**

○ダム上・下流域の降雨データを用いた洪水調節手法を提案した。この手法を仮想的な大規模(既往2番目の流入量を2倍にした)洪水に適用すると、洪水水位を最大で119cm低減することができた。また、**ただし書き操作を回避できた。**



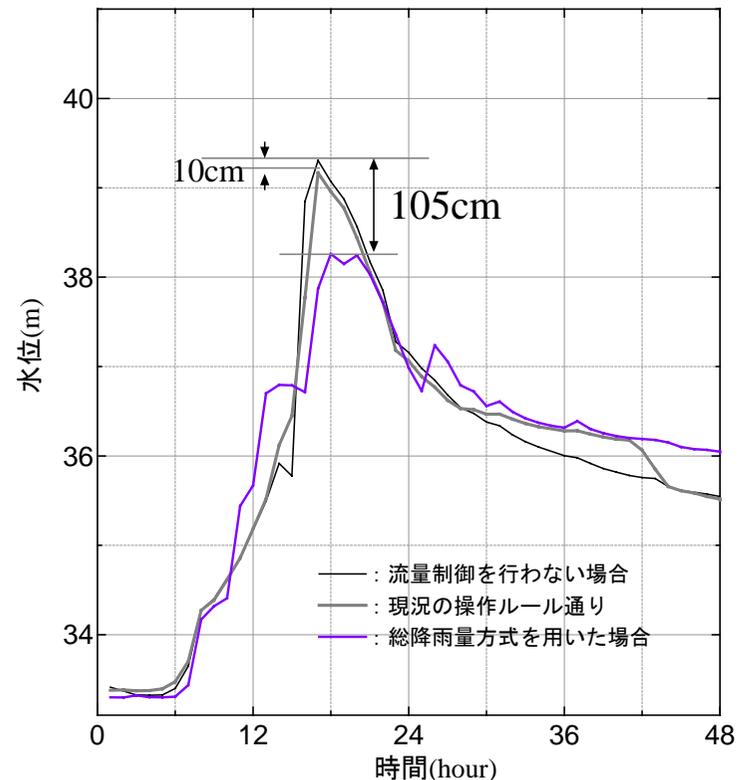
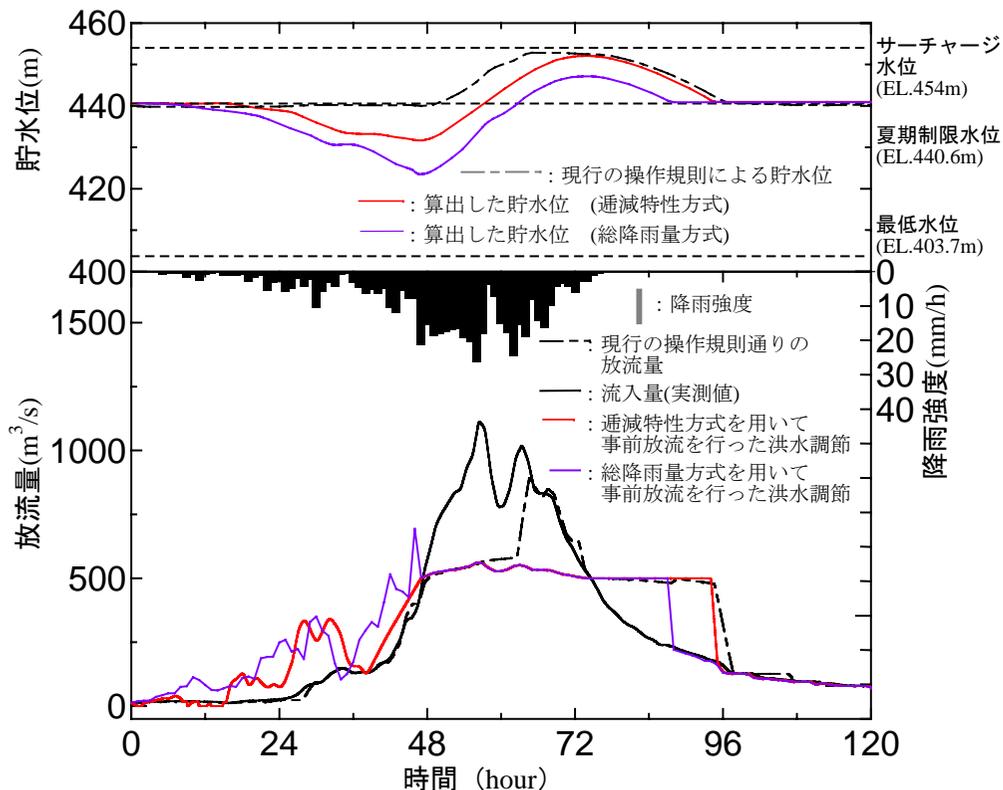
# 7.まとめ

○**降雨予測の必要の無い**、逓減特性方式及び総降雨量方式による洪水調節手法を提案し、2001年9月の洪水に対して適用した。

事前放流を行うことにより、**ただし書き操作を行わずに洪水を制御することが可能となった**。この手法は原則的には、**任意のダム流域において適用可能である**。

○**ダム上・下流域の降雨データを用いた洪水調節手法を提案した**。この手法を仮想的な大規模(既往2番目の流入量を2倍にした)洪水に適用すると、洪水水位を最大**105cm**低減することができた。

**現況の操作ルールと比較すると、水位を95cm低減できた**。

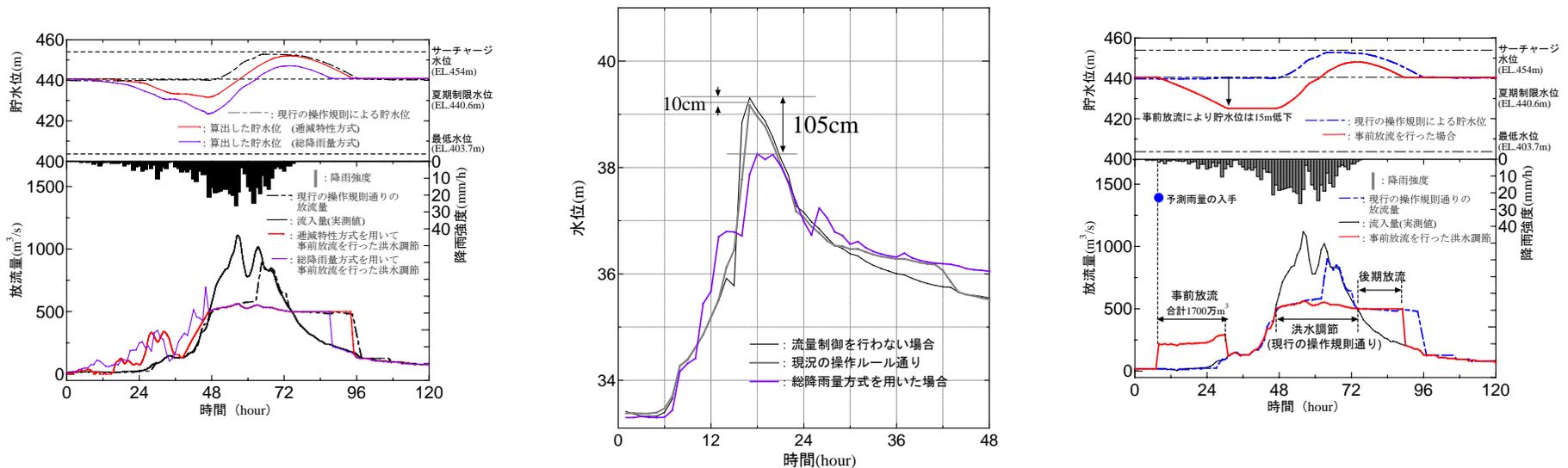


# まとめ

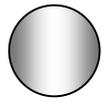
○逓減特性方式及び総降雨量方式による洪水調節手法を提案し、2001年9月の洪水に対して適用した。事前放流を行うことにより、**ただし書き操作を行わずに洪水を制御することが可能となった。この手法はいかなるダム流域においても適用可能である**

**ダム上・下流域の降雨データを用いた洪水調節手法を提案した。この手法で過去の実測洪水に適用すると、洪水水位を最大で105cm低減することができた。現況の操作ルールと比較すると、水位を95cm低減できた。**

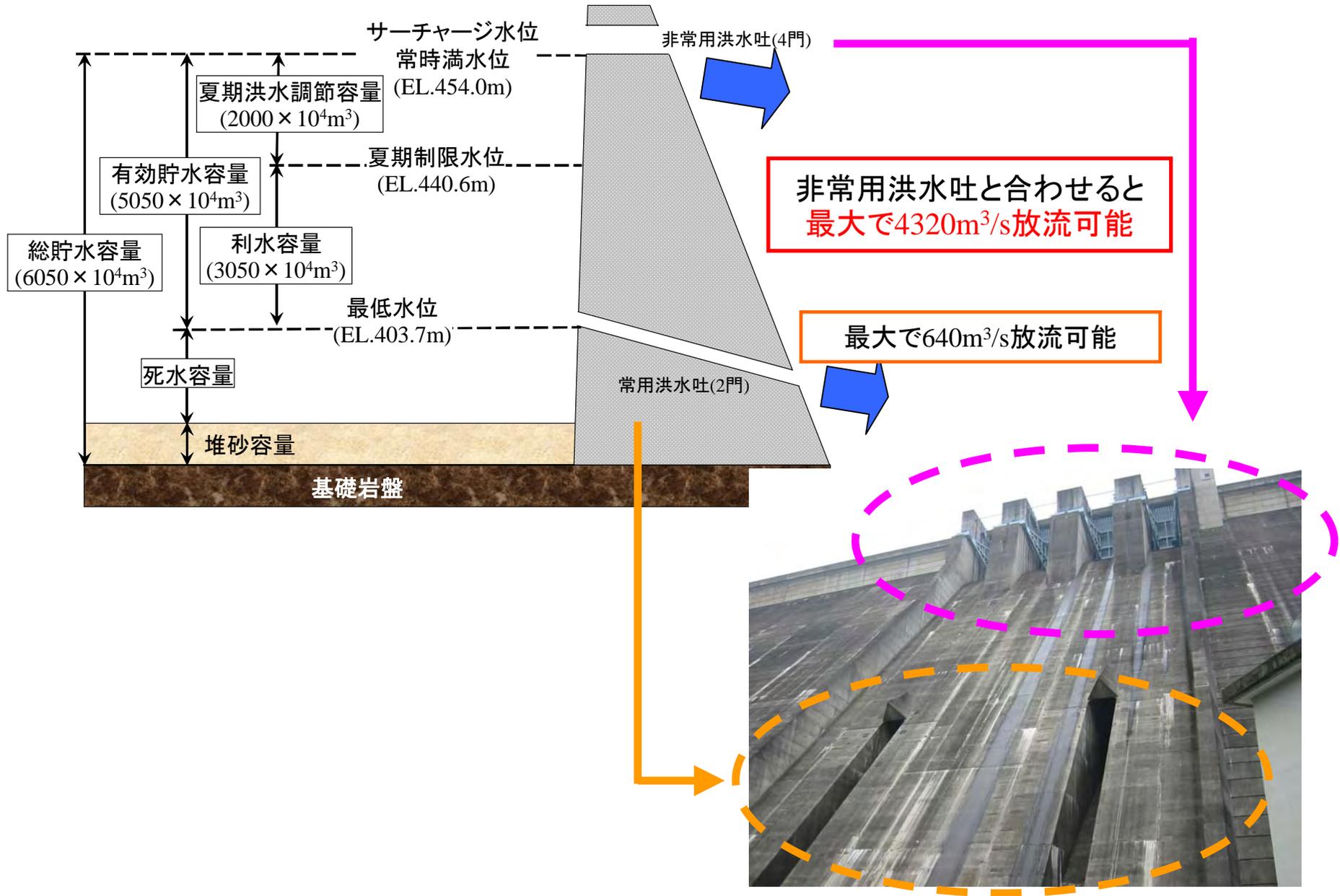
**降雨の確率予報を用いた洪水調節手法を示した。今後、降雨の確率予報が一般的に行われるようになれば、**経済的指標に基いた事前放流の意思決定が可能**になり、より効率的なダム貯水池操作を行える可能性を示した。**

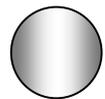


# 本研究に関する補足資料

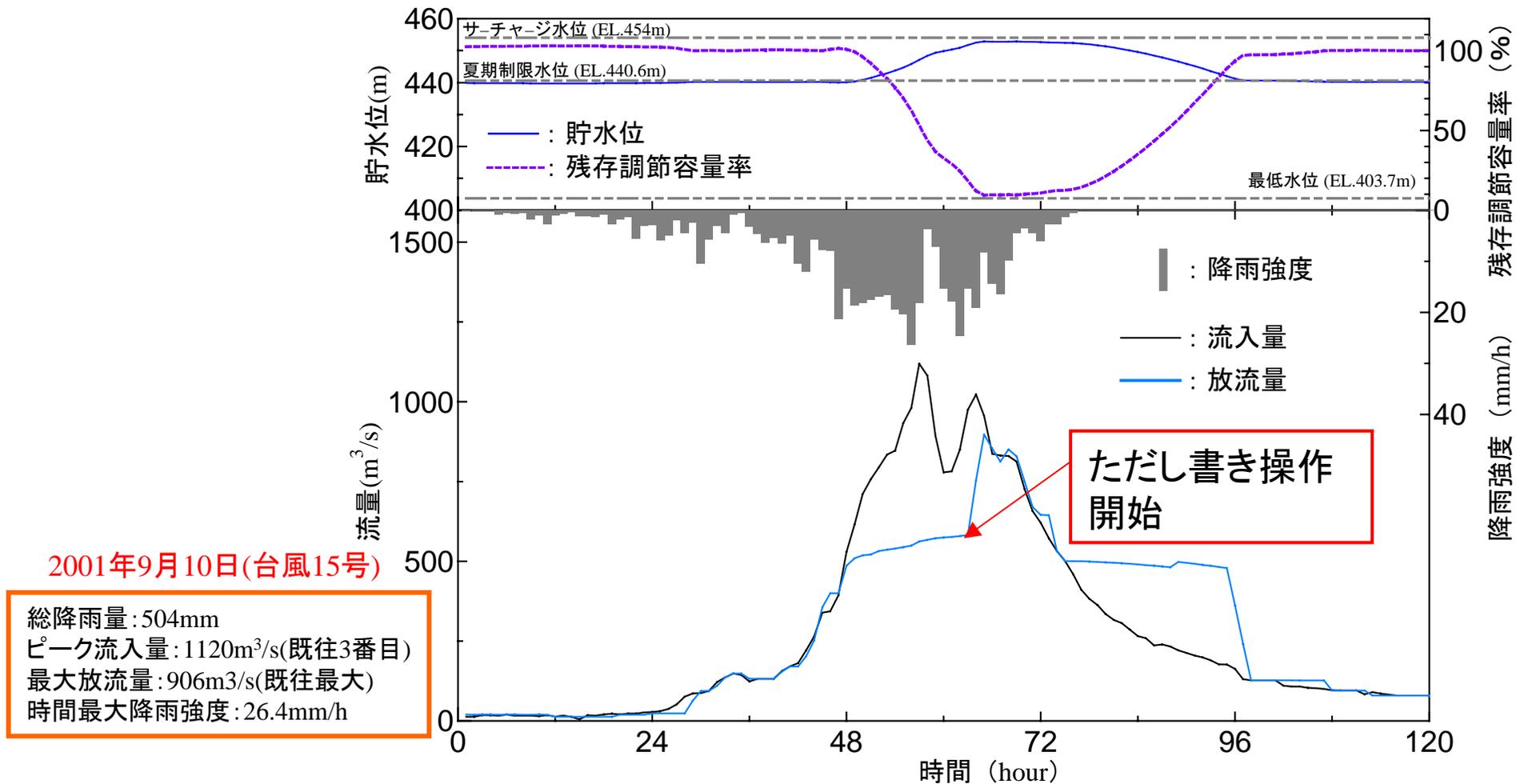


# 解析対象ダム の 容量配分図





# 過去に実際に発生した洪水時における草木ダムの運用例

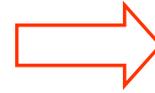


洪水時における草木ダム流域の降雨強度と草木ダムの流入・放流ハイドログラフ

既往最大の放流量906m<sup>3</sup>/sを記録し、ダム貯水位が満水に近づいた時点でただし書き操作に入り流量制御が成功した例。

# ● 降雨予測について

レーダや雲物理モデルを用いた  
降雨予測は、未だ難しい



空振りする可能性がある

## 降雨予測に関する山田研究室の提出論文

### 物理モデルを用いた降雨予測に関する研究

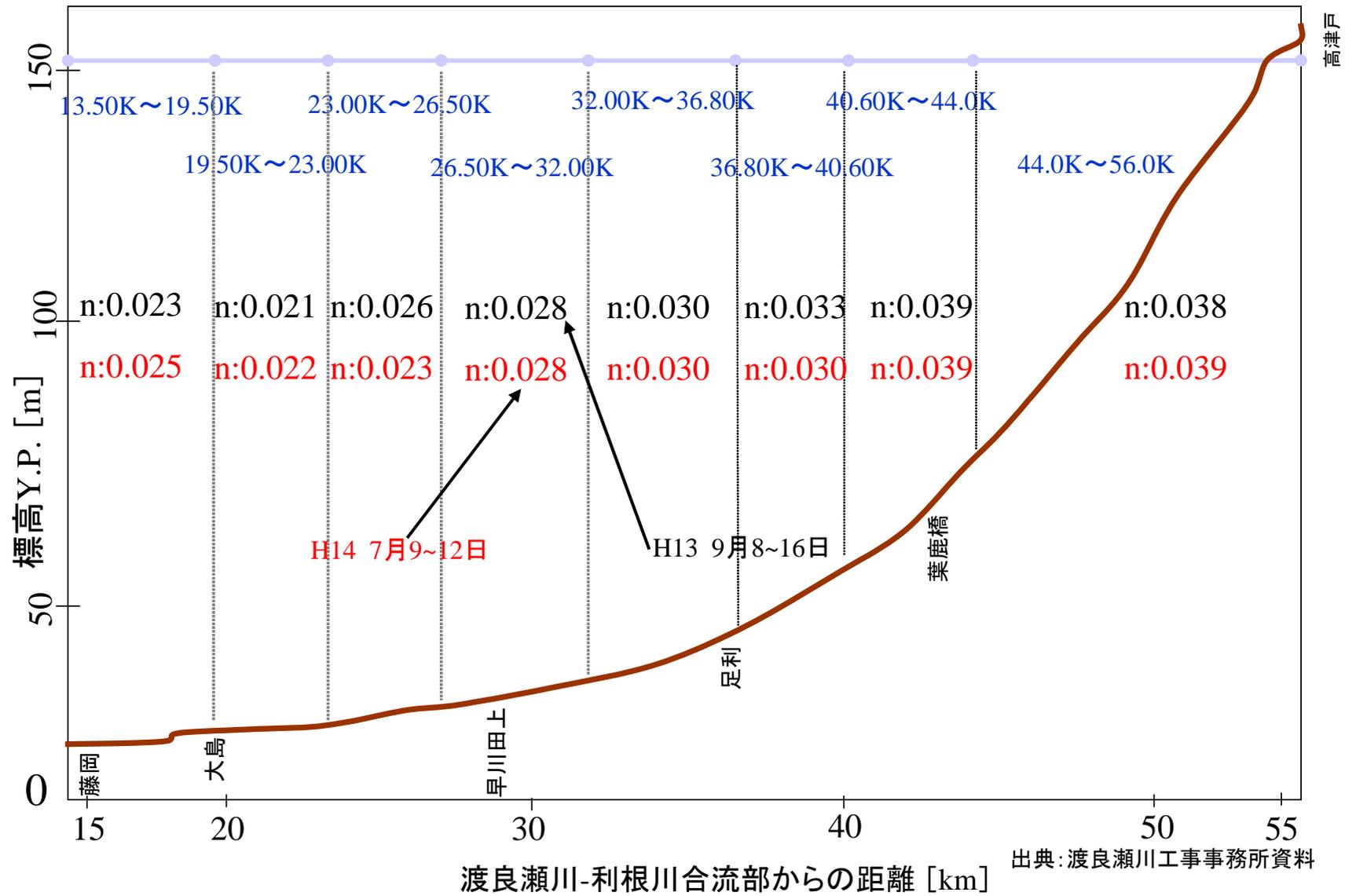
- 山田正、日比野忠史、深和岳人、松浦正典、藤吉康志、播磨屋敏生、稲毛正昭、中津川誠：実スケールの雲物理実験と降雨モデルによる雲の微物理過程の考察、土木学会論文集、No.509,II-30,pp.1-13,1995,2.
- 山田正：大気中のエアロゾルが降雨現象に及ぼす影響に関する研究、土木学会論文集、No.614, II-46,pp.1-20,1999.2.
- Yamada,T., Hibino,T., Fukawa,G., Matsuura,M., Fujiyoshi,Y., Harimaya,T., Inage,M. :Quasi-Prototype Experiments of Cloud Physics Using Long Shaft in the Mine, Proc. of XXV Congress of I.A.H.R. Vol. I , pp.113-118,1993.
- Yamada,T., Hibino,T., Matsuura,M., Fukawa, G. :Numerical Simulation of Precipitation Considering Cloud Microphysics Processes, Proc. of XXV Congress of I.A.H.R. Vol. I , pp.127-134, 1993.

### レーダー雨量計を用いた降雨予測に関する研究

- 山田正、日比野忠史、鈴木敦、蓑島弥成、中津川誠：新しいタイプのレーザー雨滴計の開発とこれを用いた降雨の雨滴分布の観測、土木学会論文集、No.539,II-35,pp.15-30,1996,5.
- Hibino,T., Yamada,T., Nakatsugawa, M. :Wind Field in Meso-  $\beta$  Scale Caused by Orographic Effect, Proc. of XXV Congress of I.A.H.R. Vol. I , pp.135-142, 1993.
- 池永均、久米仁志、森田寛、山田正：ドップラーレーダを用いたメソ  $\beta$  スケール降雨特性の解析、水工学論文集第41巻、pp.147-154,1997
- 志村光一、原久弥、山田正：レーダ雨量計を用いた関東平野における降雨形態の分類と降雨発生メカニズムに関する考察、水工学論文集第44巻、pp.97-102,2000.

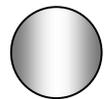


# 渡良瀬川における粗度係数の分布

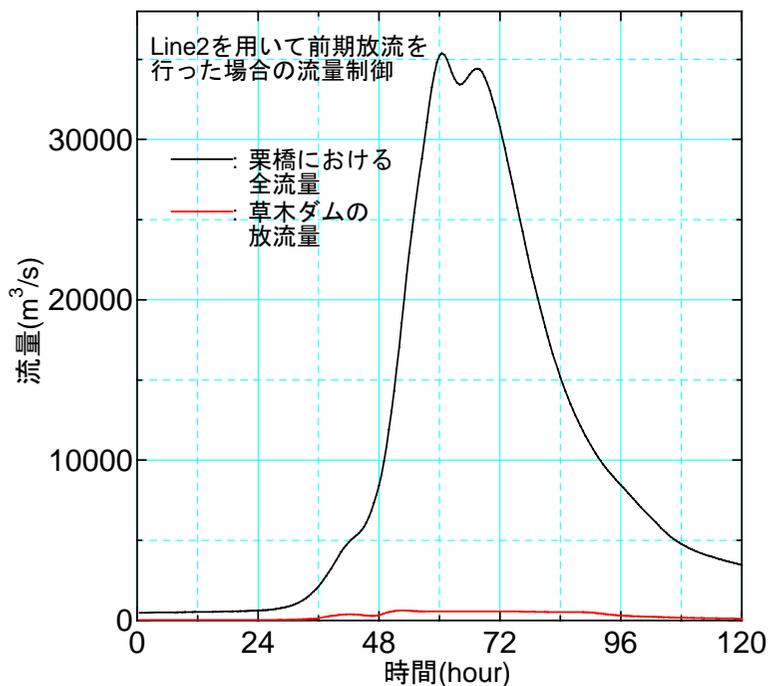


出典: 渡良瀬川工事事務所資料

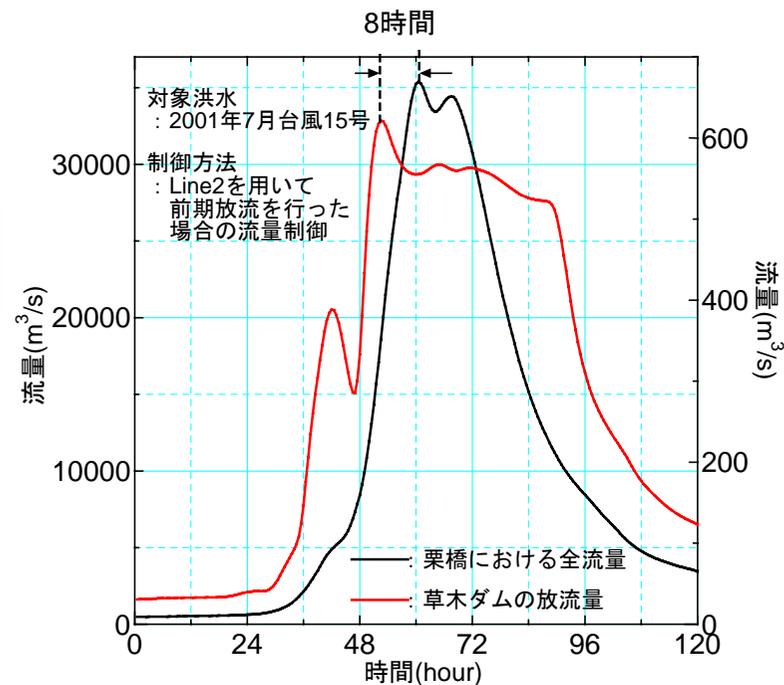
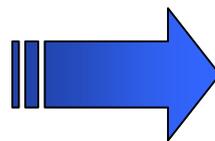
〔示したマンニングの粗度係数は最近の2洪水から逆算した値である〕



# 利根川における草木ダム放流量の時間的評価



草木ダムからの放流量を拡大



栗橋地点(河口から130km)における全流量と草木ダムの放流量のハイドログラフ

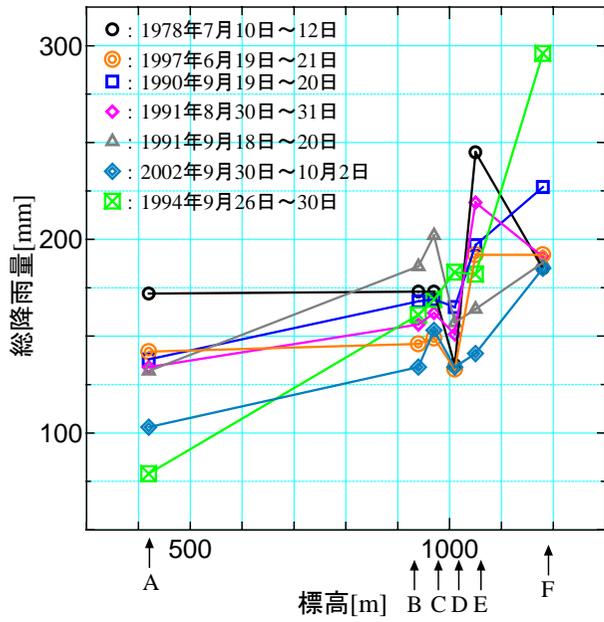
草木ダムで事前放流を行った場合、利根川(栗橋地点)におけるピークのタイミングは全流量より8時間早く発生している

# ダム操作に関連する流出特性

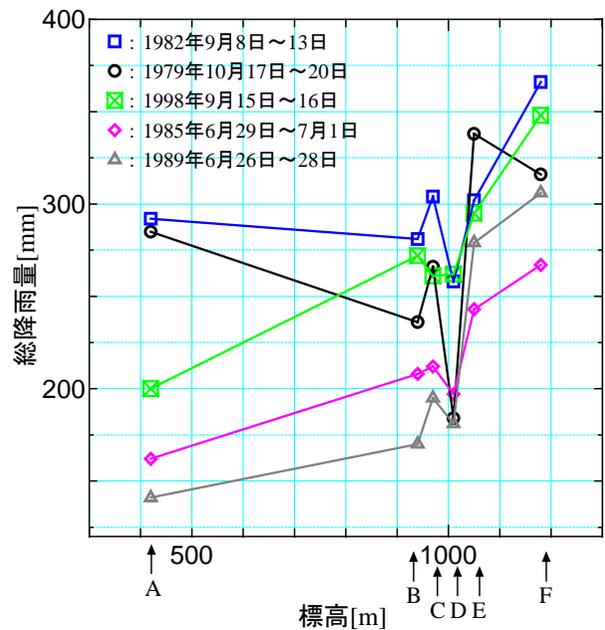
1. 草木ダム流域における降雨特性
2. 草木ダム流域における流出特性
3. 足尾ダム流域における流出特性
4. 足利残流域における流出特性

# 1. 草木ダム流域における降雨特性

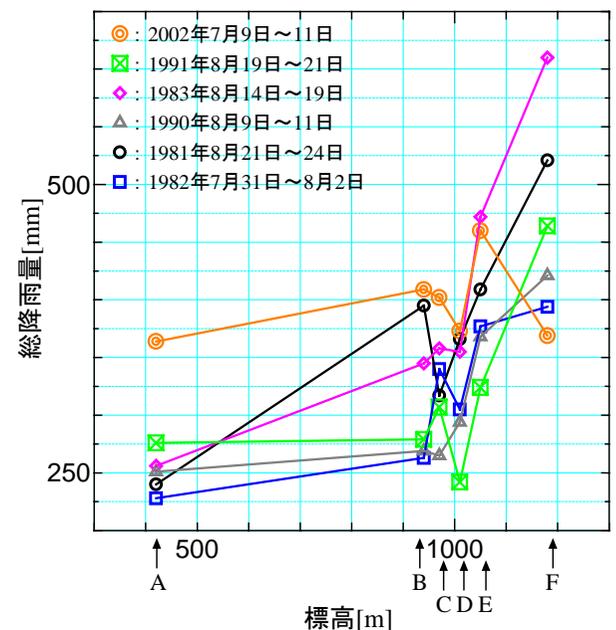
## 各雨量観測地点の標高と総降雨量の関係



流域平均総降雨量が  
100mm～200mmの洪水のとき



流域平均総降雨量が  
200mm～300mmの洪水のとき



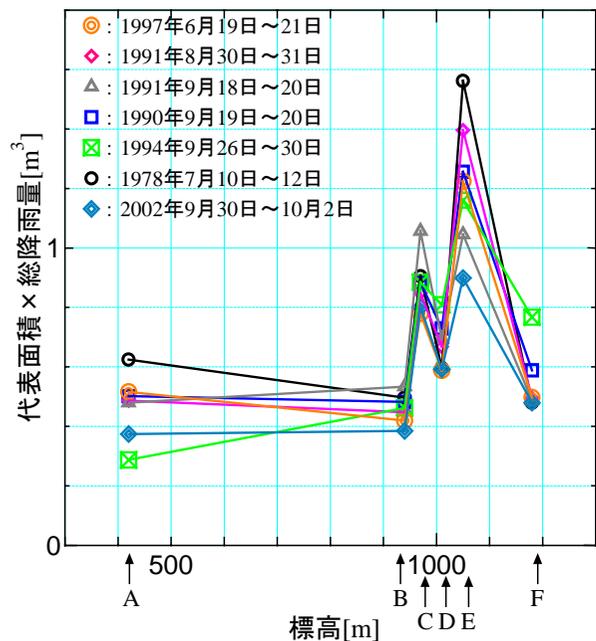
流域平均総降雨量が  
300mm以上の洪水のとき

### ※ 雨量観測地点6ヶ所の標高

A: 草木ダム管理所(EL.420m)	B: 銀山平(EL.940m)	C: 餅ヶ瀬(EL.970m)
D: 久藏(EL.1010m)	E: 地蔵(EL.1050m)	F: 細尾(EL.1180m)

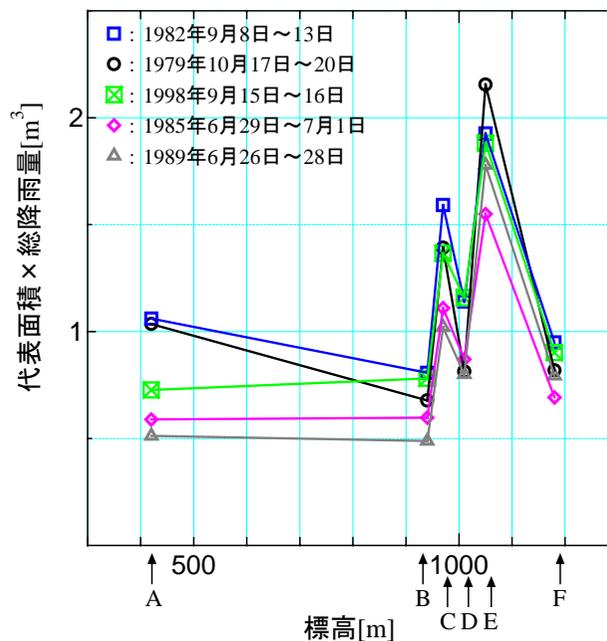
# 各雨量観測地点の 標高と総降雨量 × 代表面積の関係

[ $\times 10^7$ ]



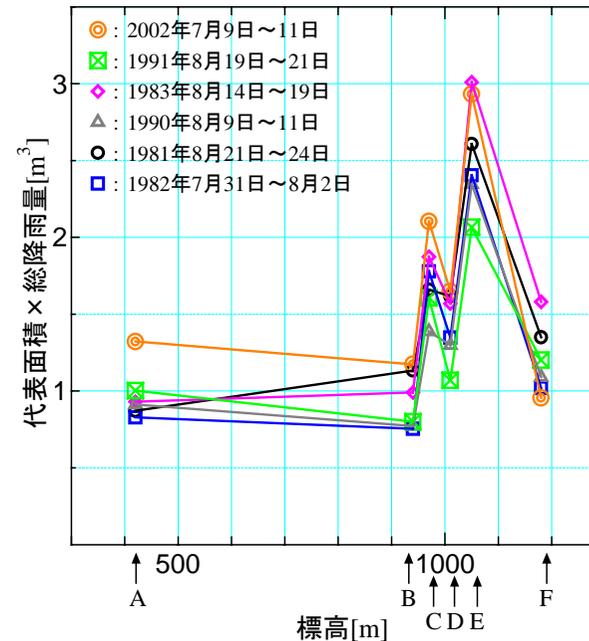
流域平均総降雨量が  
100mm~200mmの洪水のとき

[ $\times 10^7$ ]



流域平均総降雨量が  
200mm~300mmの洪水のとき

[ $\times 10^7$ ]

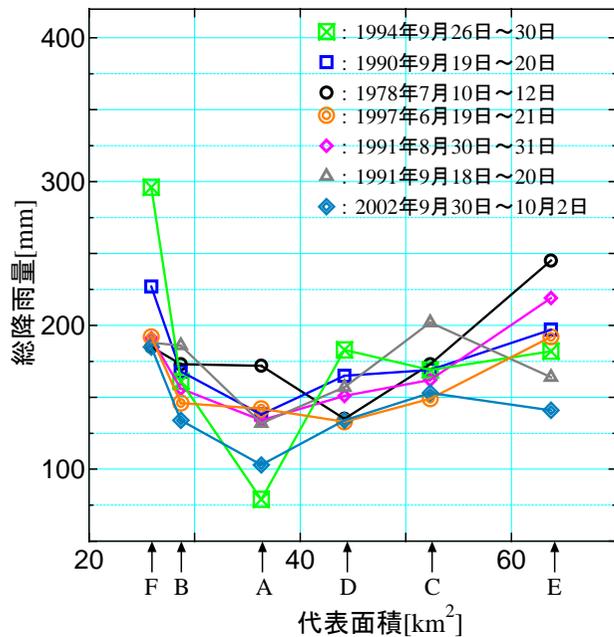


流域平均総降雨量が  
300mm以上の洪水のとき

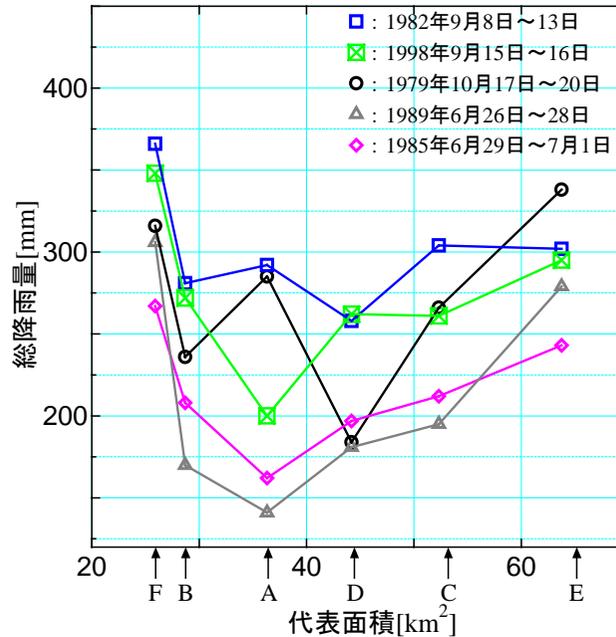
※ 雨量観測地点6ヶ所の持つ代表面積と  
草木ダム流域面積[254km<sup>2</sup>]に対する面積率

A: 草木ダム管理所 [25.9km <sup>2</sup> (14%)]	B: 銀山平 [28.7km <sup>2</sup> (11%)]	C: 餅ヶ瀬 [52.3km <sup>2</sup> (21%)]	D: 久藏 [44.2km <sup>2</sup> (17%)]	E: 地蔵 [63.8km <sup>2</sup> (25%)]	F: 細尾 [25.9km <sup>2</sup> (10%)]
---	---------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------

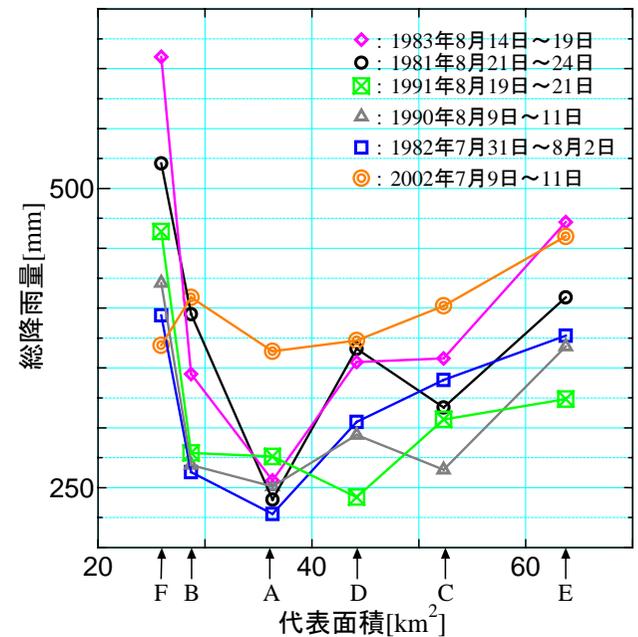
# 各雨量観測地点の代表面積と総降雨量の関係



流域平均総降雨量が  
100mm~200mmの洪水のとき



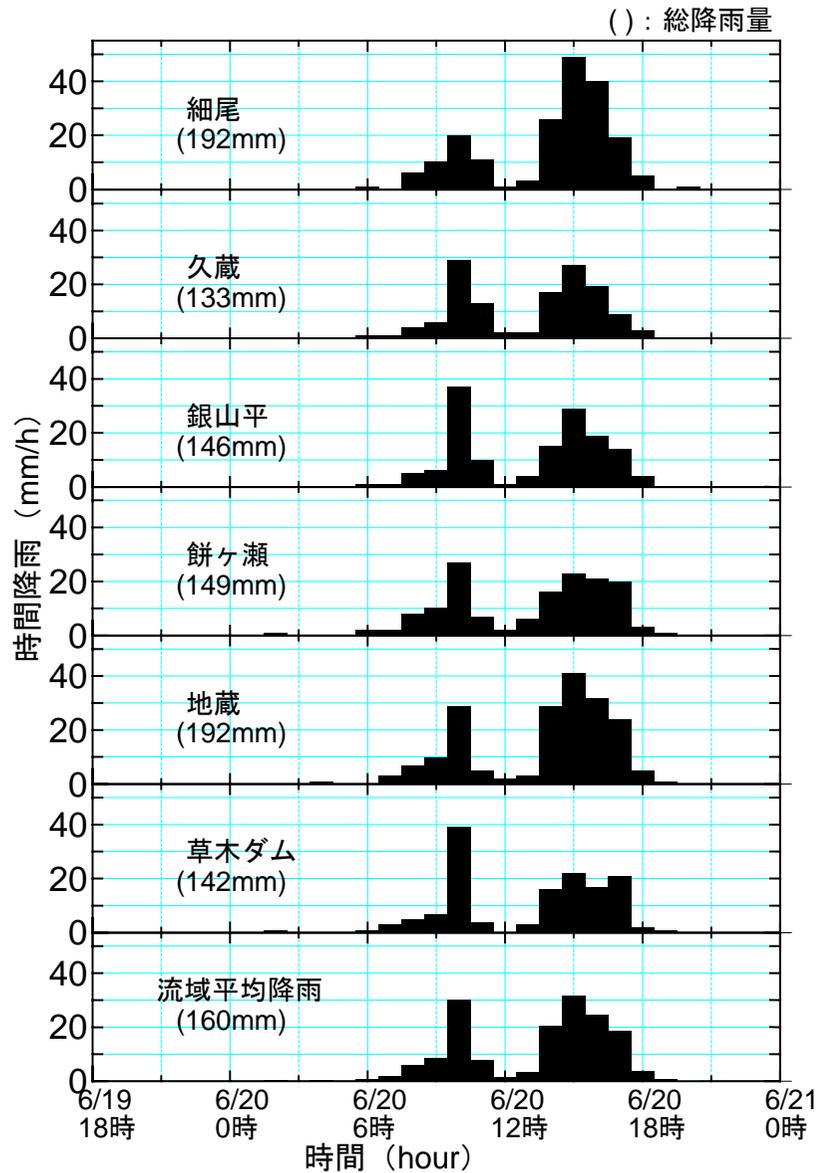
流域平均総降雨量が  
200mm~300mmの洪水のとき



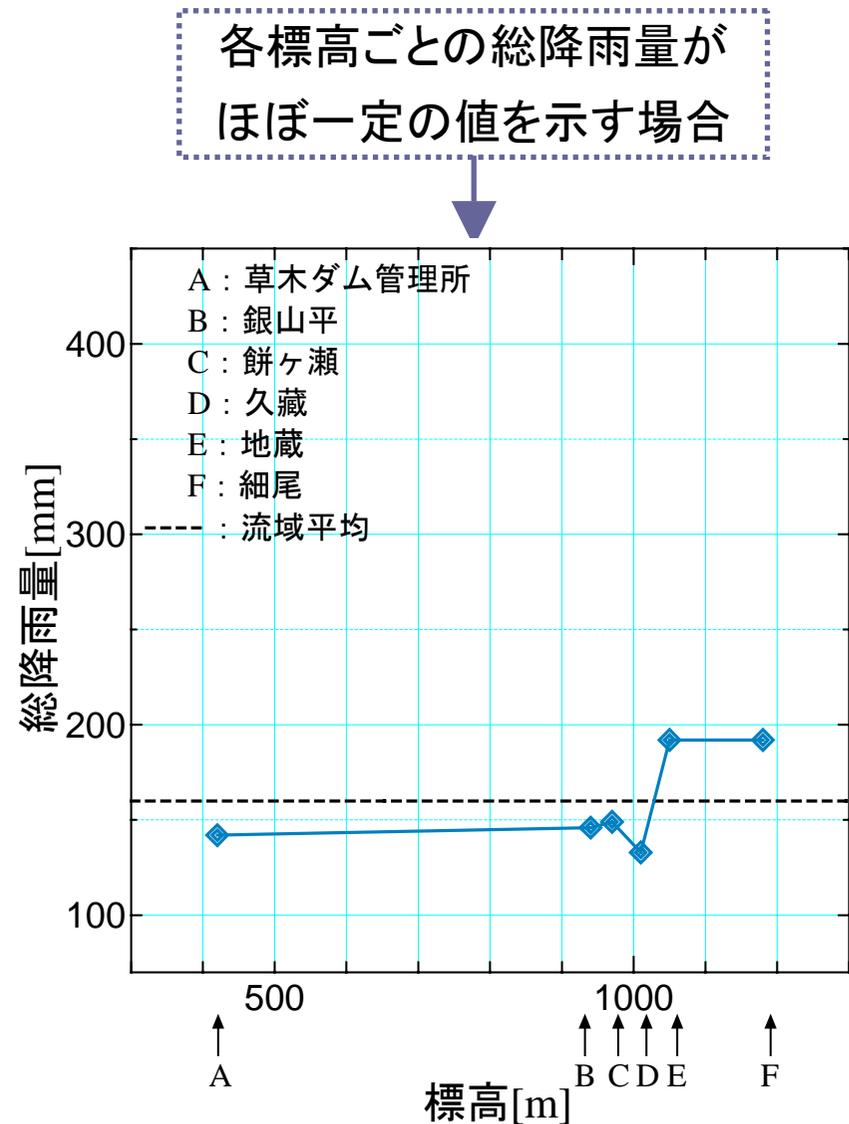
流域平均総降雨量が  
300mm以上の洪水のとき

※ 雨量観測地点6ヶ所の持つ代表面積と  
草木ダム流域面積[254km<sup>2</sup>]に対する面積率

A: 草木ダム管理所 [25.9km <sup>2</sup> (14%)]	B: 银山平 [28.7km <sup>2</sup> (11%)]	C: 餅ヶ瀬 [52.3km <sup>2</sup> (21%)]	D: 久藏 [44.2km <sup>2</sup> (17%)]	E: 地蔵 [63.8km <sup>2</sup> (25%)]	F: 細尾 [25.9km <sup>2</sup> (10%)]
---	---------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------

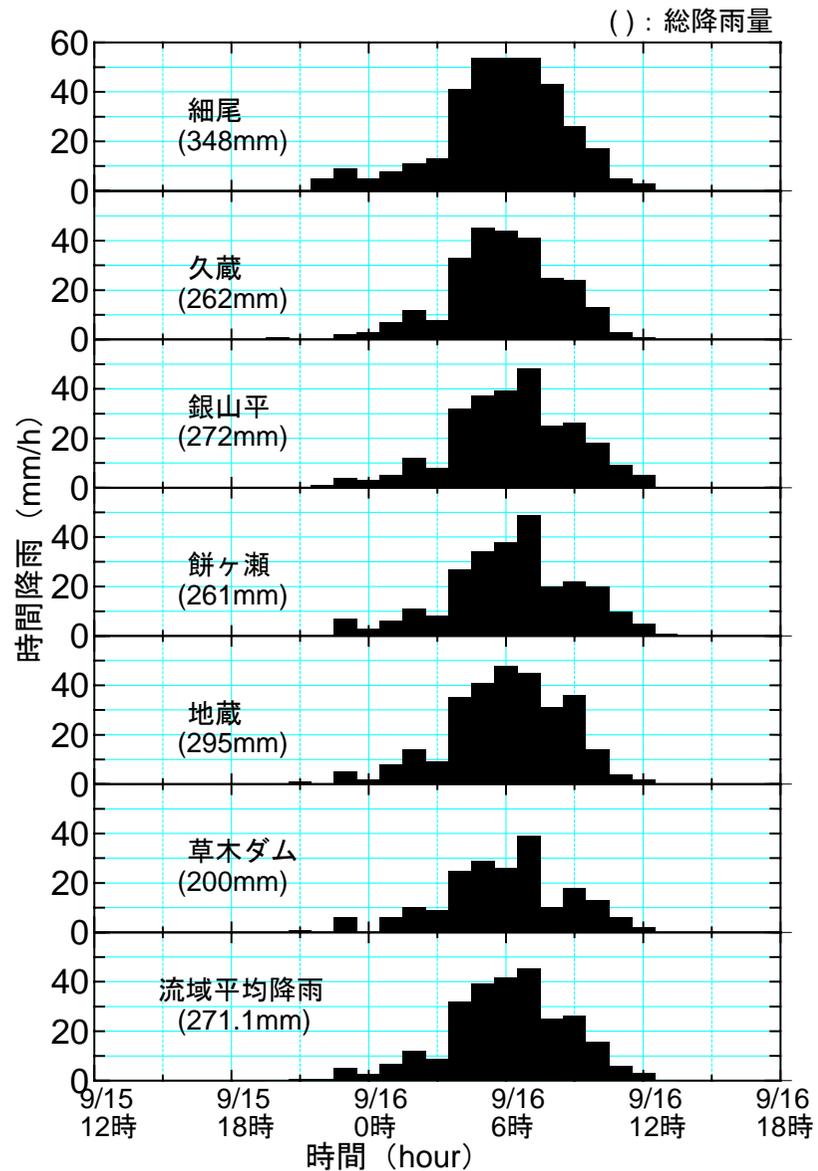


雨量観測6地点のハイトグラフ



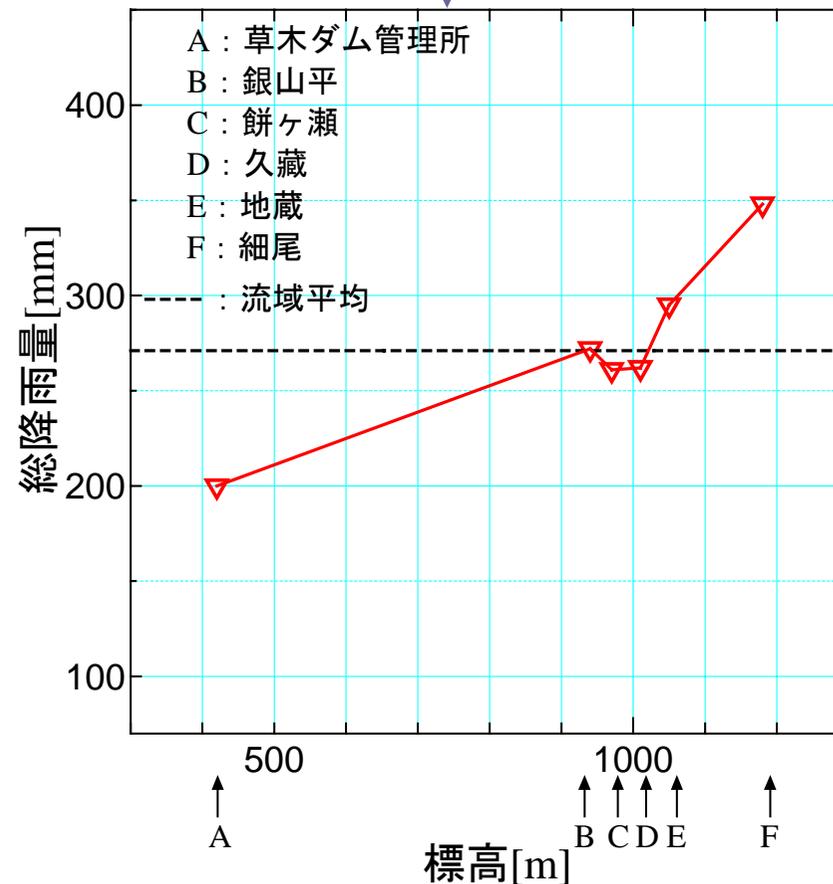
雨量観測6地点の標高と総降雨量

1997年6月19日～21日(台風7号)



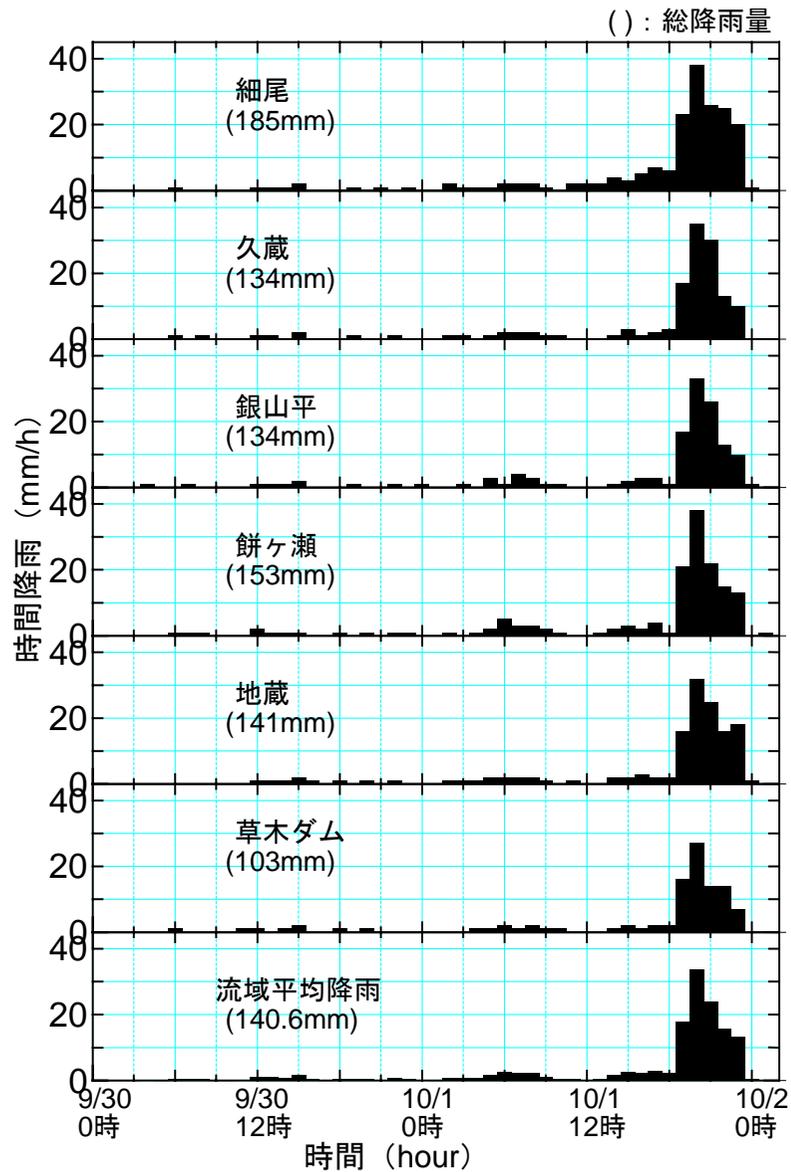
雨量観測6地点のハイトグラフ

標高が高くなるにつれ  
総降雨量の値が増加する場合



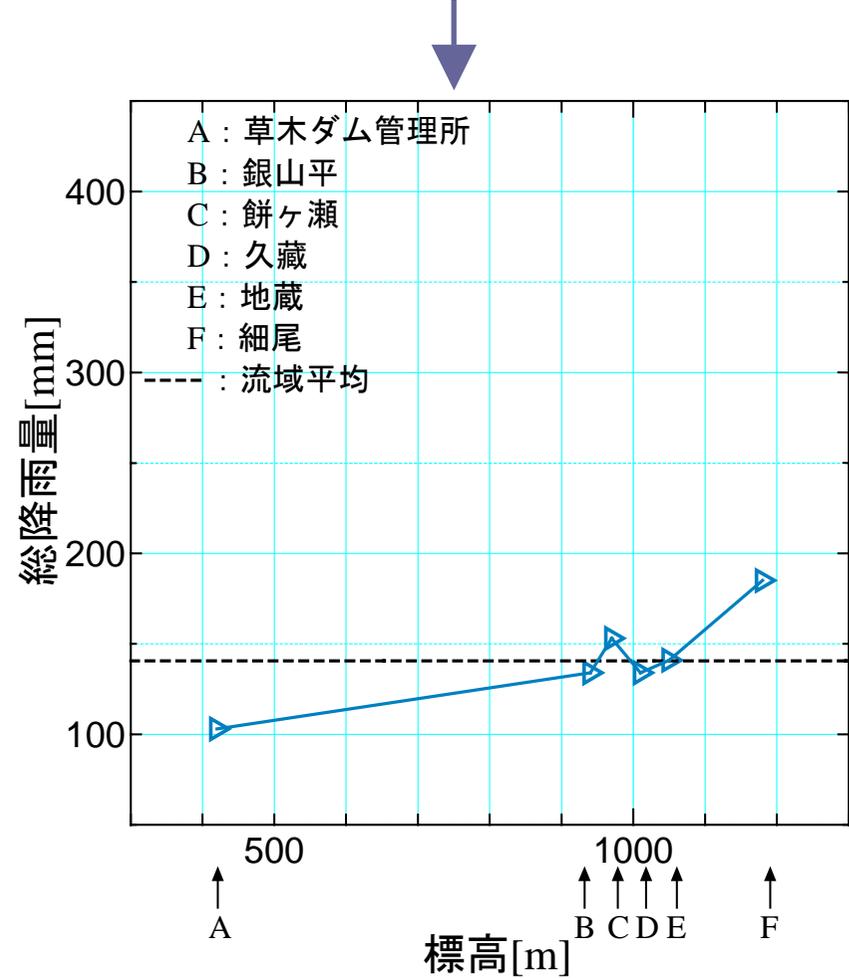
雨量観測6地点のハイトグラフ

1998年9月15日～16日(台風5号)



雨量観測6地点のハイトグラフ

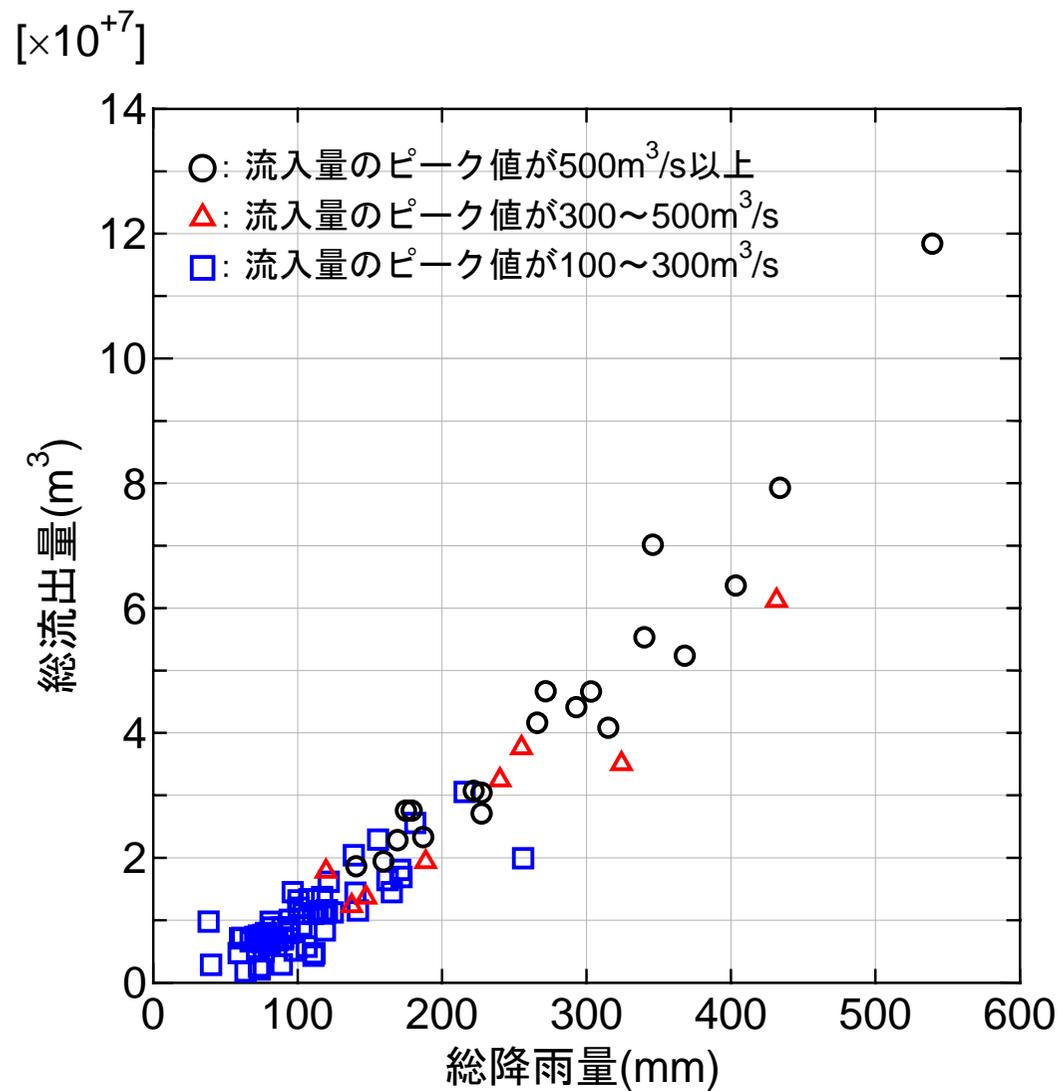
標高が高くなるにつれ  
総降雨量の値が増加する場合



雨量観測6地点のハイトグラフ

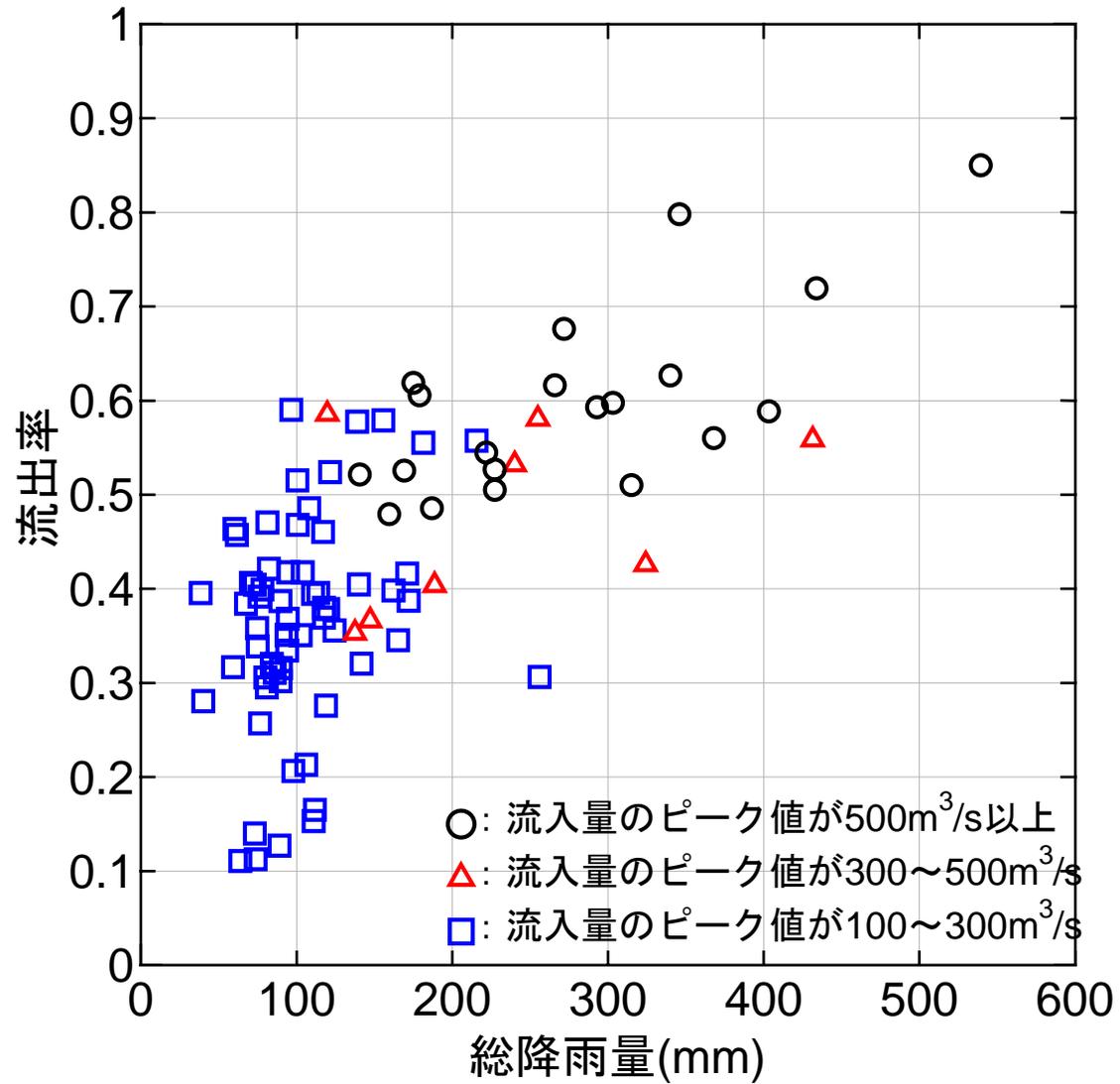
2002年9月30日～10月2日(台風21号)

## 2. 草木ダム流域の流出特性



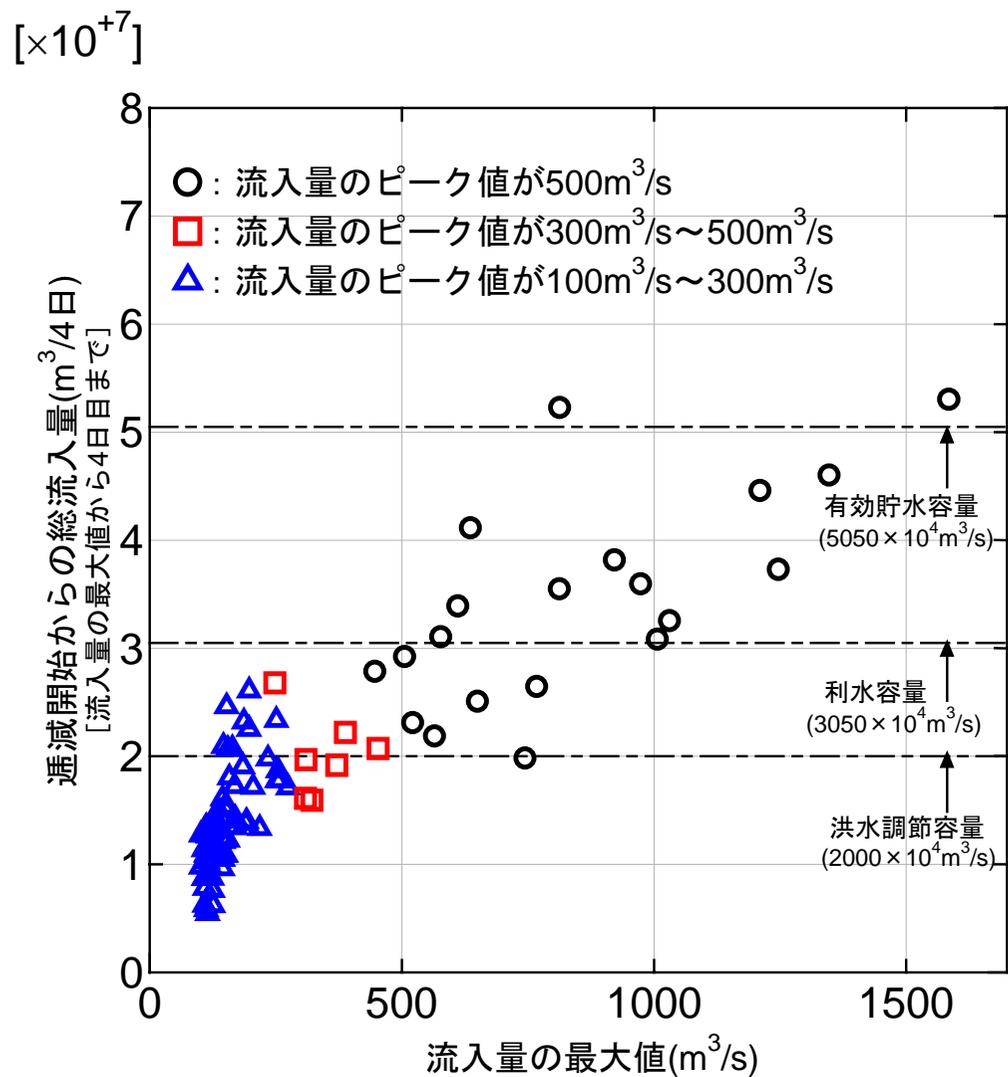
## 草木ダム流域における総降雨量と総流出量の関係

総降雨量から総流出高が分かり、現時点までに流出した観測流量を差し引いたものが現時点以降に降雨が全くなくても流出が確実に見込まれる流出量となる



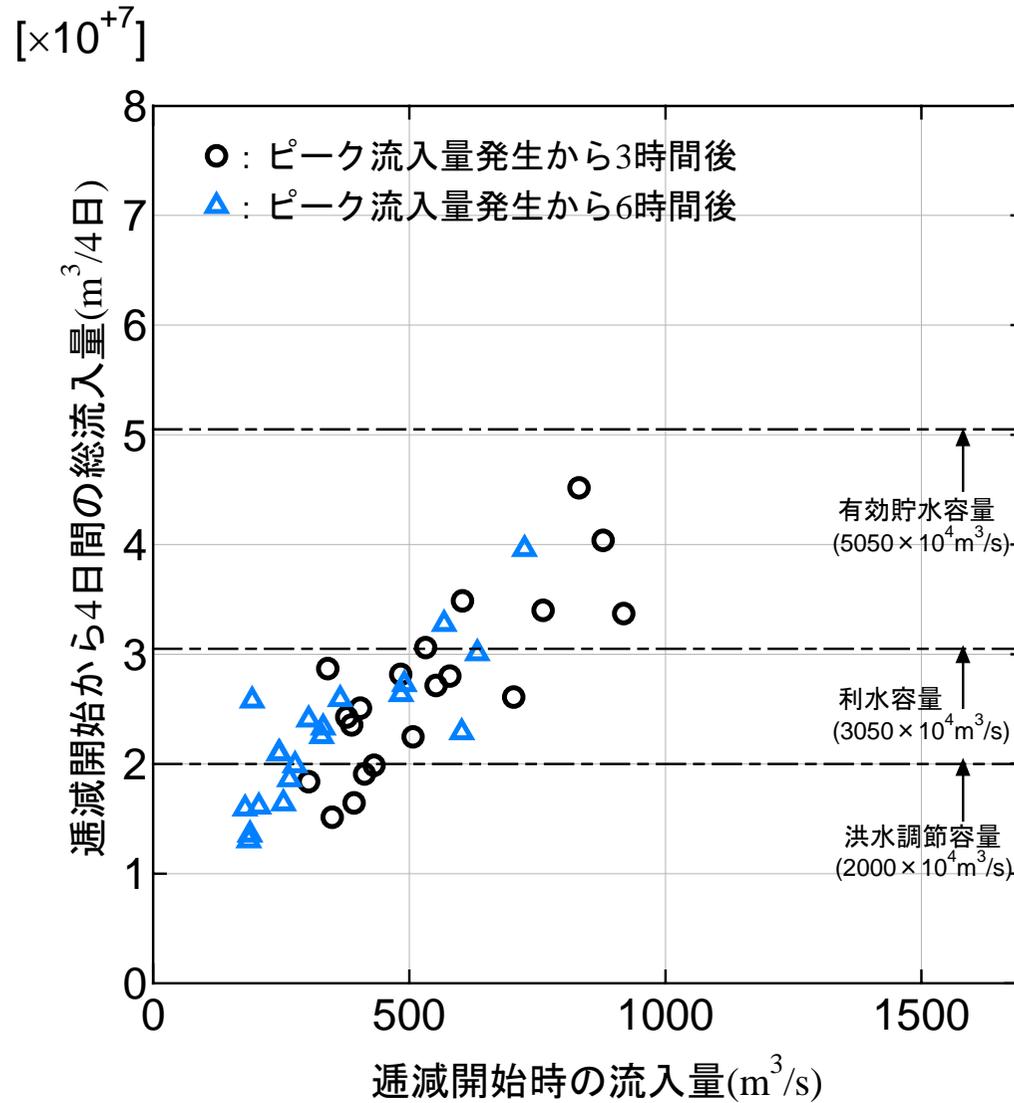
### 草木ダム流域における総降雨量と流出率の関係

総降雨量が200mm以上の降雨の  
 流出率は約0.5~0.7程度である



## 流入量の最大値と逡減開始からの総流入量の関係 (総流入量は流入量の最大値から4日目までの積算)

ピーク流入量とピークから4日間の総流出量の関係により  
 現時点でのダム貯水池への流入量からそれ以降に降雨が  
 全くなくてもこれから流入してくる総流量を推計することができる

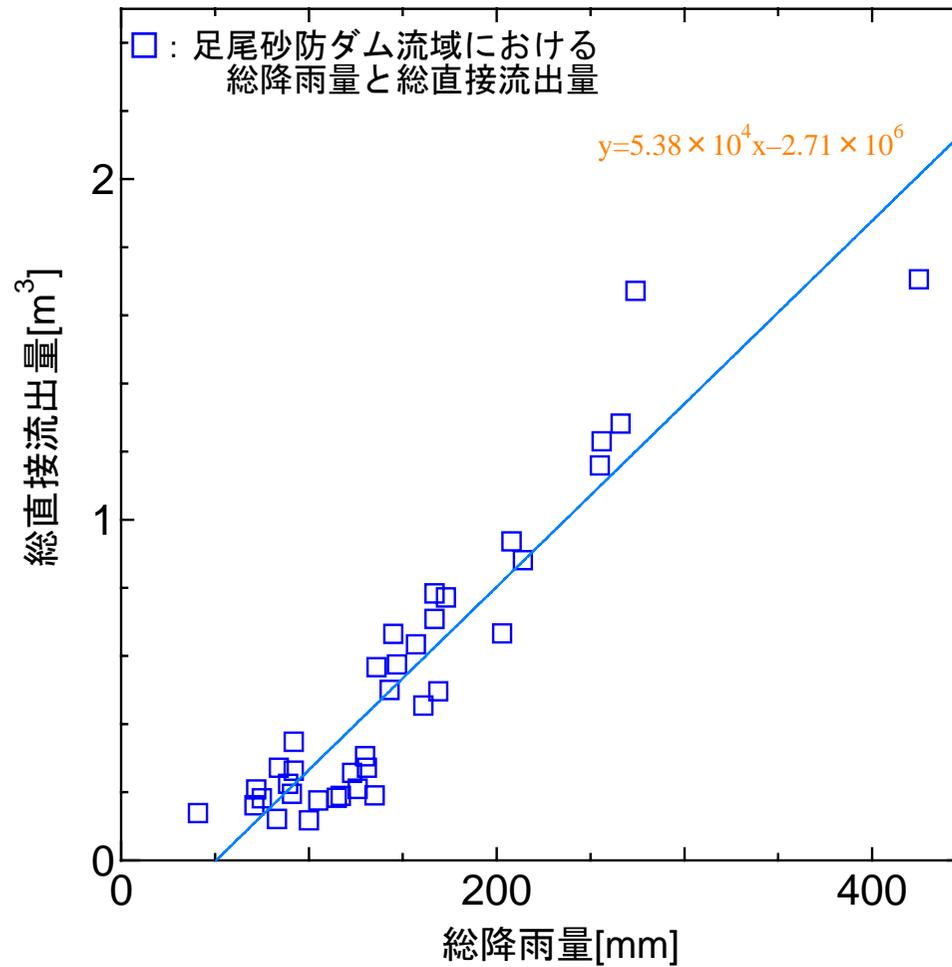


**ピーク流入量と逡減開始からの総流入量の関係**  
 (総流入量はピーク流入量発生から4日目までの積算)

ピークから3時間, 6時間後でも貯水位回復に効果的といえる程度の流量が流入している

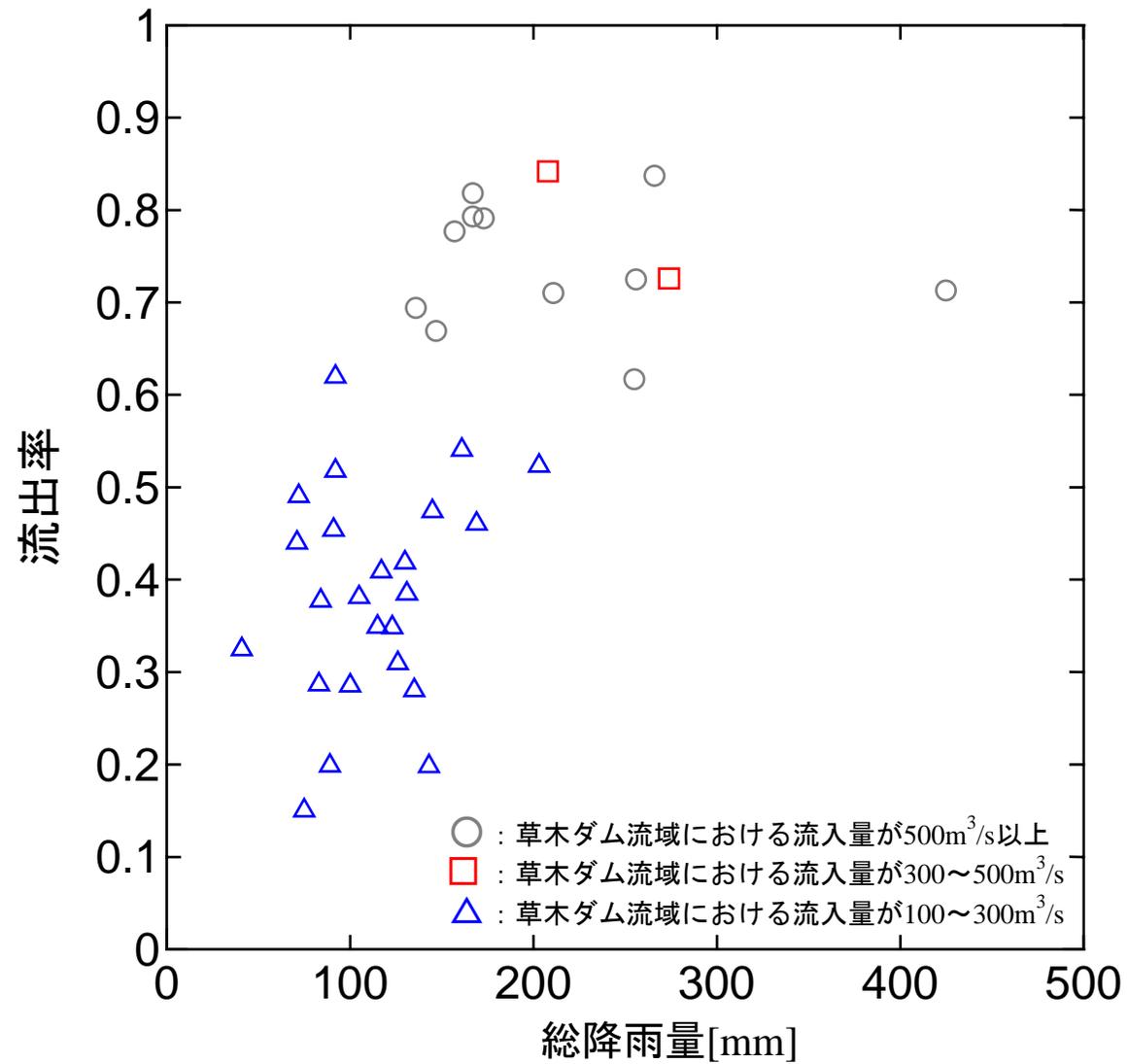
## 5. 足尾砂防ダム流域の流出特性

[ $\times 10^7$ ]



## 足尾砂防ダム流域における総降雨量と総流出量の関係

総降雨量から総流出高が分かり、現時点までに流出した観測流量を差し引いたものが現時点以降に降雨が全くなくても流出が確実に見込まれる流出量となる



## 足尾砂防ダム流域における総降雨量と流出率の関係

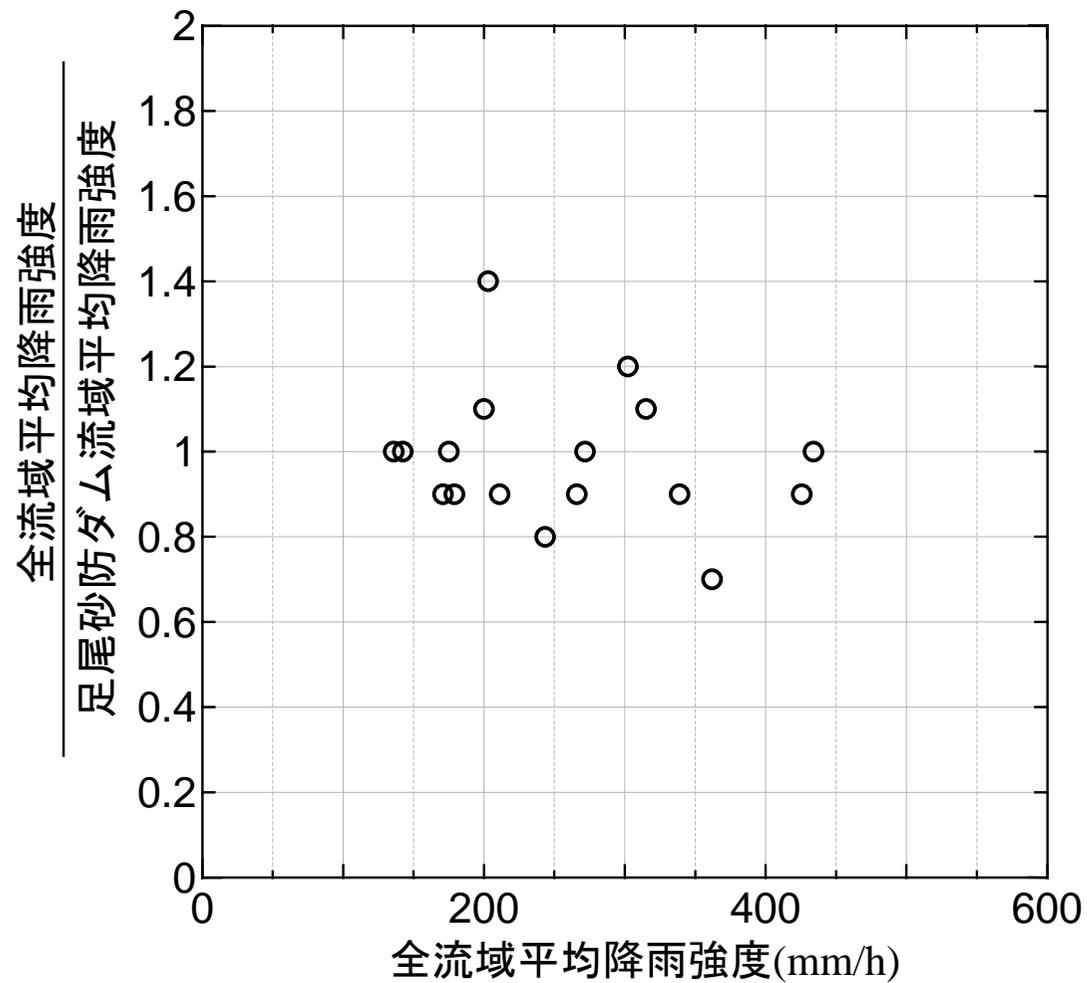
総降雨量150mm以上の降雨の  
流出率は約0.6~0.85程度である

# 草木ダム全流域と足尾砂防ダム 流域の降雨強度の比

(草木ダム全流域における降雨強度の値が最大値を示した前後1時間の比率)

草木ダム			足尾ダム			草木ダム流域平均降雨強度/ 足尾ダム流域平均降雨強度
総降雨量[mm]	降雨強度のmax[mm]	前後1hの雨量[mm]	総降雨量[mm]	降雨強度のmax[mm]	前後1hの雨量[mm]	
203	47	102		15	72	1.4
266	29	74	266	34	86	0.9
362	27	64		38	97	0.7
339	37	91		45	104	0.9
200	24	53		22	50	1.1
434	25	54		27	56	1.0
211.2	21	60	214	23	64	0.9
315.1	27	78		24	73	1.1
175.1	32	61.2	167	26	61	1.0
302.2	31	71	256	29	60	1.2
170.9	20	40.9	157	19	45	0.9
179	15	32.4	167	16	36	0.9
243.5	25.8	54.8	173	34	73	0.8
142.3	31.5	76.5	147	31	75	1.0
271.8	45.5	112.3	255	39	110	1.0
425.7	41.3	83.2	425	45	88	0.9
136	33.8	75.7	136	30	74	1.0

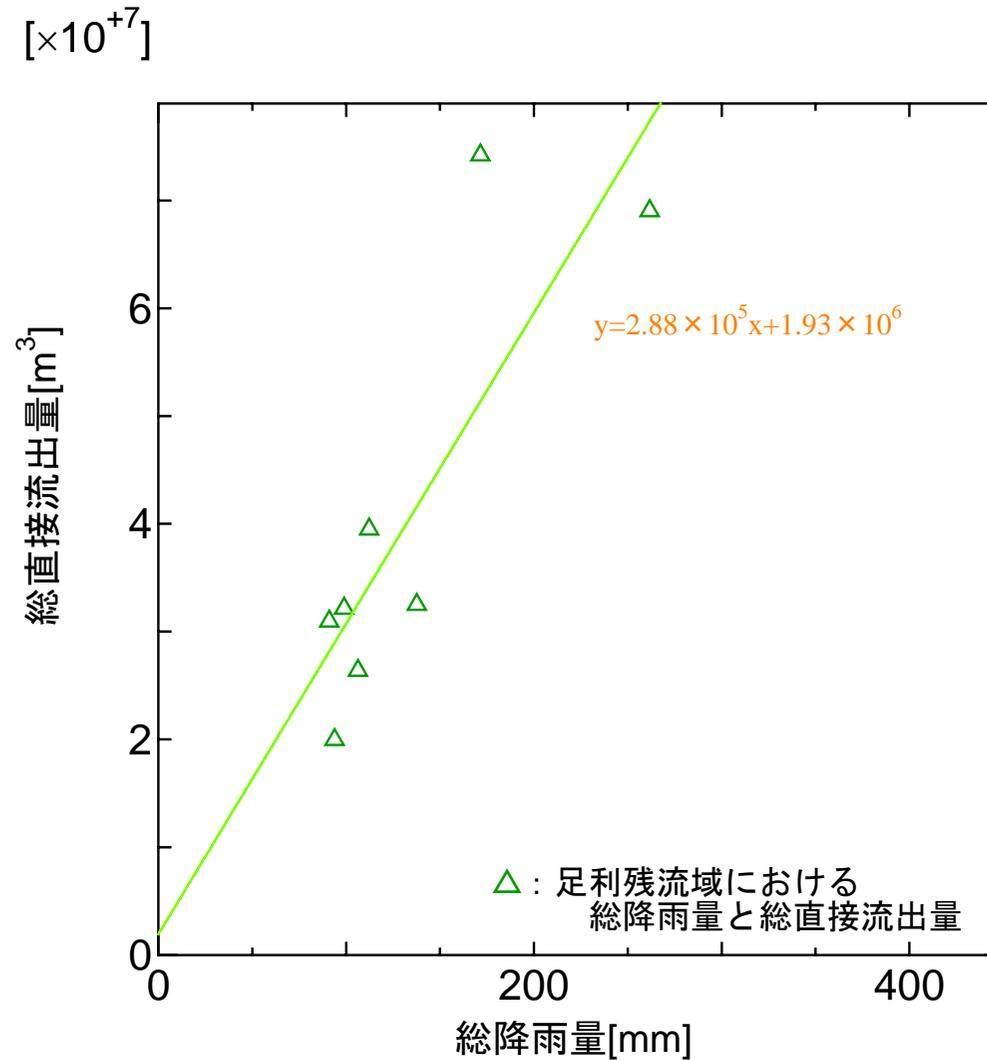
全流域と足尾砂防ダム流域では総降雨量によらず降雨の降り方に大きな差は見られない事が分かる



全流域平均降雨強度と  
足尾砂防ダム流域平均降雨強度の比

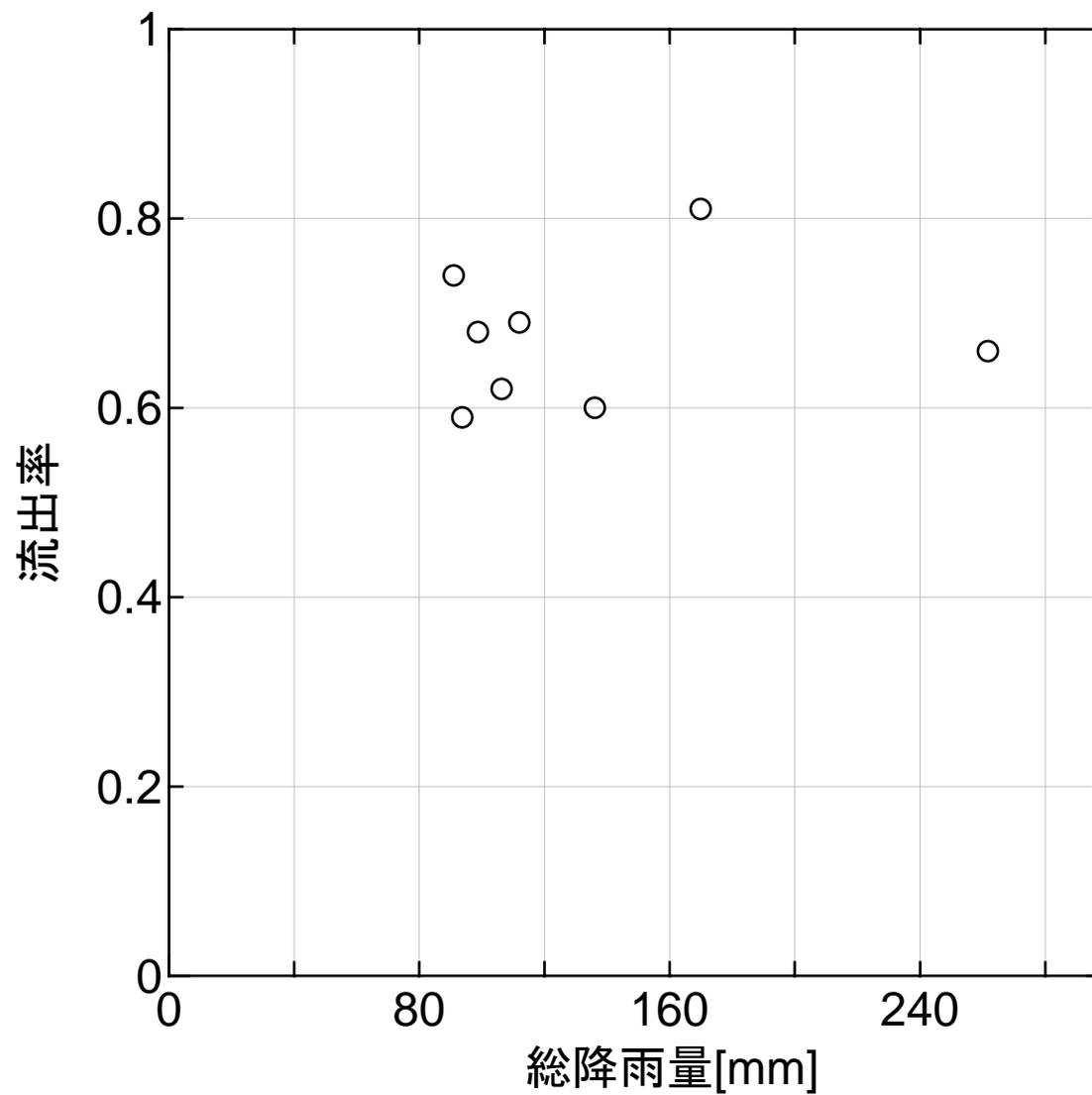
(全流域の平均降雨強度が最大値を示した前後1hの比)

全流域平均降雨強度と足尾砂防ダム流域平均降雨強度の比は  
0.8~1.4程度の値を示す。



## 足利残流域における総降雨量と総流出量の関係

総降雨量から総流出高が分かり、現時点までに流出した観測流量を差し引いたものが現時点以降に降雨が全くなくても流出が確実に見込まれる流出量となる



### 足利残流域における総降雨量と流出率の関係

流出率は約0.6~0.85程度を示す