

# 山間狭隘区間における洪水流の伝播 に関する研究

## PROPAGATION CHARACTERISTICS OF FLOOD FLOWS THROUGH GORGE SECTION IN RIVERS

竹村 吉晴  
Yoshiharu TAKEMURA

There are a lot of river with long gorge sections in Japan. But because of the lack of observed data, the propagation mechanism of flood flows through the gorge sections has not been sufficiently studied. Moreover, a series of small hydropower dams constructed along the gorge sections, it makes difficult to understanding of that.

In this study, we investigate transformation and propagation speed of the water level hydrographs and outflow discharge hydrographs from the small hydropower dams in the large floods in the gorge section of the Agano River and the Kitakami River. From the investigation and using the unsteady flood flow analysis we show the effect of the channel form and gate operation of small hydropower dams on flood propagation in the gorge section.

**Key Words** : flood flow, flood propagation speed, gorge, small hydropower dam, gate operation

### 1. 背景

我が国の多くの河川は、長い山間狭隘区間を有している。洪水流が山間狭隘区間上流でどのように波形を変形させ、長い山間狭隘区間をどのように流下するのかについて理解を深めることは、山間狭隘区間を有する河川を管理する上で重要なことである。

しかし、山間狭隘区間では観測データが少ないことに加え、水量の豊富な河川では、川幅が狭く落差の確保が容易な山間狭隘区間に小規模な発電ダムが連続的に設置されており、洪水流の伝播の理解を難しくさせている。

山田、高橋ら<sup>1)2)</sup>は、山間狭隘区間上流での貯留量増大や支川からの流入流量によって、山間狭隘区間上下流では洪水波形が不連続的に変化することを実測データから示している。玉井ら<sup>3)</sup>は、水路実験および非定常一次元解析から、山間狭隘区間上流での洪水波形の変形の程度について検討している。また、貯水池における洪水流の伝播については1950年代から1970年代にかけて集中的に研究が行われており<sup>4)5)6)</sup>、尾崎・秋元<sup>9)</sup>は、貯水池における洪水流の伝播特性をゲート操作との関係から図示している。しかし、実河川での観測データが少ないことから、これらの研究は水路実験において行われたものがほとんどであった。観測データが蓄積され、計算機の利用が十分行えるようになった現在では、実河川を対象としたより詳細な議論が行える段階にある。

本論文では、山間狭隘区間上流で変形した洪水流が、山間狭隘区間をどのように伝播するのかについて、北上川と阿賀野川山間狭隘区間を対象に実測データと非定常平面二次元解析および非定常一次元解析から検討する。

### 2. 北上川山間狭隘区間における洪水伝播機構

#### (1) 対象区間・洪水概要

北上川は、岩手県と宮城県を流れる一級河川であり、県境に約27km続く山間狭隘区間を有している。山間狭隘区間の河床勾配は、3000~5000程度と緩勾配であり、途中に比較的大きい支川である砂鉄川が合流している。本研究では、図-1に示す支川砂鉄川合流点下流の諏訪前観測所(67.6km)~大泉観測所(48.9km)の山間狭隘区間を対象に、洪水時の観測水位データと非定常平面二次元解析から洪水流の伝播について検討する。対象区間の低水路川幅は100~200m程度であるが、諏訪前観測所(67.6km)から下流は比高差の大きい複断面河道となっており、水面幅が600mに達する断面も見られる。図-2、図-3は、近年の主要洪水である平成14年7月洪水と平成19年9月洪水における各観測所での観測水位ハイドログラフおよび痕跡水位と高水敷高さの縦断分布である。図に示すように平成14年洪水は平成19年洪水に比べ規模の大きい洪水であった。

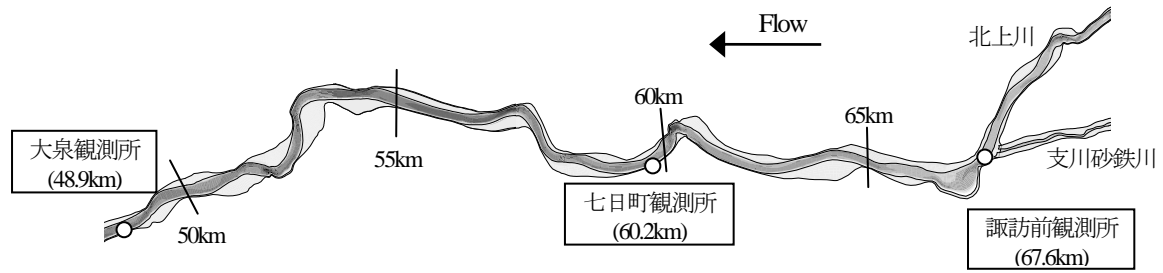


図-1 北上川山間狭隘区間の平面図と観測所位置

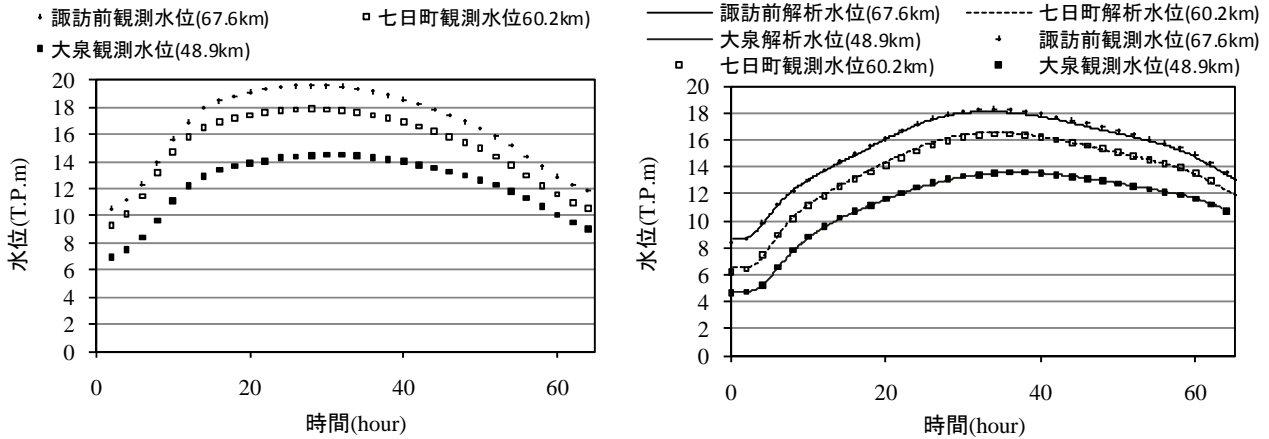


図-2 平成14年7月・平成19年9月洪水時の観測水位ハイドログラフ (左:平成14年, 右:平成19年)

## (2) 観測水位ハイドログラフの変形

表-1 北上川平成19年洪水における洪水伝播速度

洪水伝播速度 C	断面平均流速 V	$V' = \beta V$	$\beta$	$C/V'$
2.53 (m/s)	1.98 (m/s)	2.45 (m/s)	1.23	1.03

洪水は水量の伝播であることから洪水波形の変形については流量を基に検討する必要がある。しかし、洪水中の流量を正確に測ることは難しく、観測データ数も少ないことから、本研究では、以下に示す方法で各観測所における観測水位ハイドログラフを無次元化し洪水波形の変形を検討する。

各観測所断面における流速を等流の抵抗則から仮定すると断面を通過する流量は(1)式のように表せる。

$$Q = \int_B \frac{1}{n} h^{5/3} i_0^{1/2} dy \quad (1)$$

ここに、 $Q$ : 流量、 $n$ : マニングの粗度係数、 $i_0$ : 河床勾配、 $h$ : 水深、 $B$ : 水面幅、 $y$ : 横断方向の空間座標である。(1)式において、マニングの粗度係数  $n$  と河床勾配  $i_0$  を断面で一定とすると(1)式は水深  $h$  のみの関数となる。各観測所における観測水位データと横断測量データから(2)式で定義する  $h'$  の時間変化を求め、これを無次元化することで洪水波形の変形を検討する。

$$h' = Q \frac{n}{i_0^{1/2}} = \int_B h^{5/3} dy \quad (2)$$

まず、各観測所の観測水位が平水時の水位より高くなった時刻から最大水位発生時刻までの  $h'$  の平均値  $h'_{ave}$  を

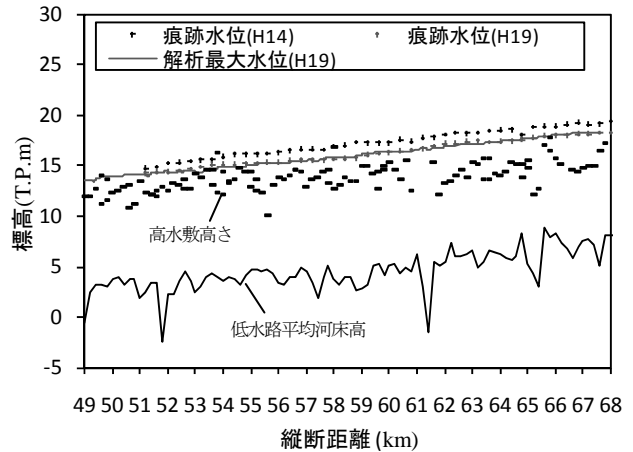


図-3 痕跡水位と解析最大水位の比較

求める。縦軸は、平均値  $h'_{ave}$  からの  $h'$  の上昇量を最大上昇量で無次元化する。横軸は、増水期から減水期において  $h'$  が  $h'_{ave}$  より大きい時間帯を平均的な洪水継続時間と定義し、この期間で無次元化する。

図-4に、平成14年、平成19年洪水における各観測所での無次元水位ハイドログラフを示す。図-4に示すように、両洪水ともに無次元水位ハイドログラフはほとんど変形していないことが分かる。

## (3) 流量ハイドログラフの変形と伝播速度

諏訪前観測所 (67.6km) ~ 大泉観測 (48.9km) における洪水流の伝播機構について、平成19年洪水における非定常平面二次元解析から検討する。解析は、対象区間最上流

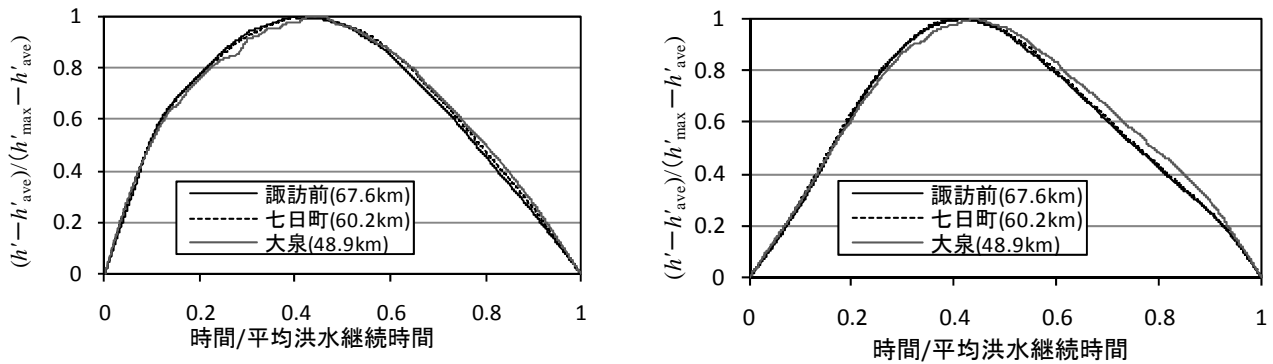


図-4 平成14年7月・平成19年9月洪水時の無次元水位ハイドログラフ (左:平成14年, 右:平成19年)

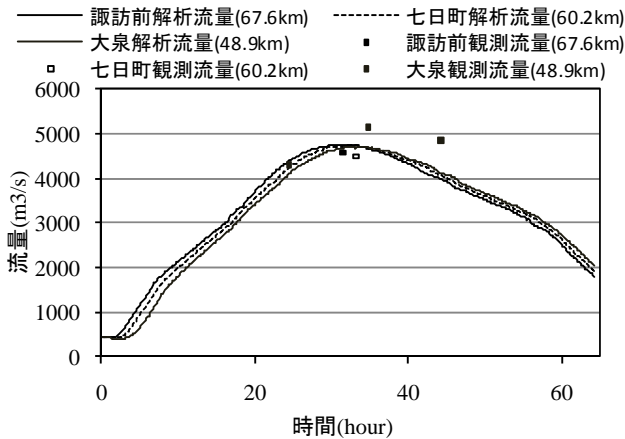


図-5 観測流量と解析流量ハイドログラフの比較

の諏訪前観測所(67.6km)の直上流で支川砂鉄川が合流しているため、上流端の境界条件には、諏訪前観測所より上流の本川及び支川観測所における観測水位の時系列データを用いる。下流端の境界条件には、大泉観測所(48.9km)における観測水位の時系列データを用いている。図-2、図-3の実線は各観測所における解析水位を示している。図-2、図-3に示すように解析水位は観測水位および痕跡水位をほぼ説明できていることが分かる。また、図-5は各観測所での観測流量と解析流量の比較であるが、解析値は観測値に近い値となる。

図-6は各観測所における、解析流量ハイドログラフを無次元化し比較したものである。縦軸の流量は解析初期の定常流量からの解析流量の増加分(増加流量)を、解析区間最上流の諏訪前観測所(67.6km)における最大増加流量で無次元化している。横軸の時間軸は、諏訪前観測所(67.6km)における洪水継続時間で無次元化している。諏訪前観測所(67.6km)における洪水継続時間は解析流量が解析初期の定常流量より大きくなった時刻から、最大流量発生後、再びほぼ定常状態になる時刻までの期間と定義した。図-6に示す、各観測所における増加流量は、その総和が諏訪前観測所における洪水継続時間での増加流量の総和と一致するようにプロットしている。図-6から分かるように、最大流量の低減は見られるものの無次元流ハイドログラフはほとんど変形していない。このこと

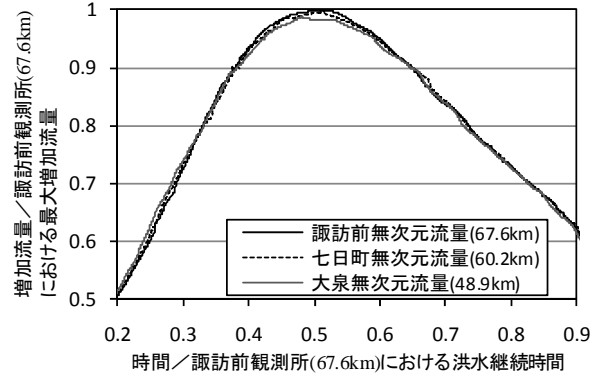


図-6 無次元流量ハイドログラフの比較

は、北上川山間狭隘区間では、図-1に示すように河道が大きく湾曲する区間や水面幅の大きく広がる区間が見られるが、それらは流量ハイドログラフの変形に大きな影響を与えていないことを示している。

表-1は、諏訪前観測所(67.6km)～大泉観測所(48.9km)の区間における洪水伝播速度  $C$  と最大流量時の断面平均流速  $V$ 、横断方向の流速分布を考慮した断面平均流速  $V = \beta V'$  ( $\beta$ :運動量補正係数)、運動量補正係数  $\beta$  及び  $C/V$  の値を示す。本研究では、洪水伝播速度  $C$  は、観測所における流量ハイドログラフの図心を求め、図心の移動速度として定義している。断面平均流速  $V$  及び  $V'$  は、対象区間において(各解析断面間の距離)/(各解析断面の断面平均流速)で重みを付けて平均したものである。表-1に示すように、洪水伝播速度  $C$  は  $V'$  に近い値となっていることが分かる。

従来、洪水流の伝播速度はKleitz-Seddon 則<sup>8)</sup>から説明され、この場合、洪水伝播速度  $C$  は、断面平均流速の1.33～1.67倍となり、流量ハイドログラフは流下につれて前面が切り立つように変形することが知られている。北上川平成19年洪水では、流量ハイドログラフはほとんど変形していないことから、流量ハイドログラフにおける最大流量の発生位置は流下によって大きく変化せず、全体として最大流量時の運動量補正係数を考慮した断面平均流速程度で伝播することになるものと考えられる。

### 3. 阿賀野川山間狭隘区間における洪水伝播機構



図-7 対象区間の概略図

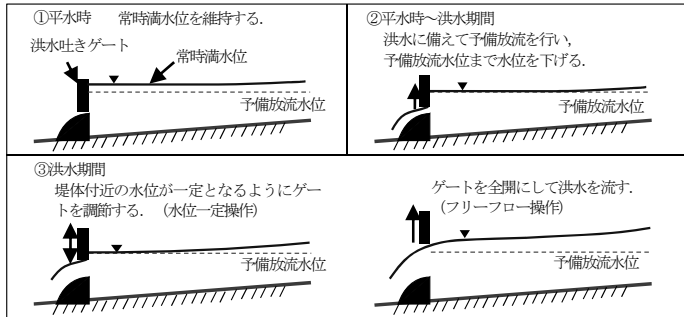


図-8 小規模発電ダムのゲート操作方法の概略図

(1) 対象区間の概要・小規模発電ダムのゲート操作方法

阿賀野川は、福島県と新潟県を流れる一級河川であり、県境には約70km続く山間狭隘区間が存在する。図-7に、阿賀野川山間狭隘区間の概略図を示す。対象区間の川幅は50~200m程度であり、写真-1に示すような堤高が20~30m程度の小規模な発電ダムが、連続的に6基設置されている。図-7は、小規模発電ダムの洪水時のゲート操作の模式図である。ゲート操作は以下のようにになっている。

①(平水時)発電のため、常時満水位付近を維持するように運用する。②(平水時~洪水期間)流入量が洪水量に達すると判断された時は、洪水に備えて貯水池内の水位を予備放流水位まで低下させる。その後は、ゲート操作により予備放流水位を維持する。洪水量とは、河川水が河道を安全に流下できる流量として各ダムで定められる流量であり、対象区間では全てのダムで3000m<sup>3</sup>/sとなっている。本論文では、流入量が洪水量を超えている時間帯を「洪水期間」と定義する。③(洪水期間)対象とした発電ダムでは、予備放流水位がダム堤体の越流部よりも十分高い位置にある。そのため、ダムの放流能力に対して流入量が小さい場合はダムからの放流量を調節する必要があり、観測水位が予備放流水位と等しくなるようにゲートを操作することで、貯水池への流入量とダムからの放流量を一致させる(水位一定操作)。流量規模が大きく、水位一定操作では流入量がダムの放流能力を超える場合は、ゲートを全開にして洪水を流下させる(フリーフロー操作)。この時、洪水流はゲート操作の影響を受けなくなる。

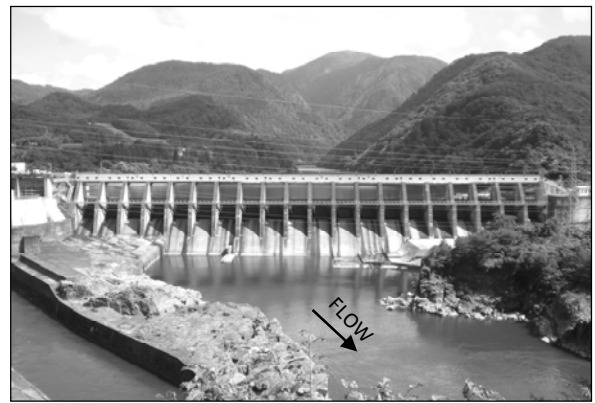
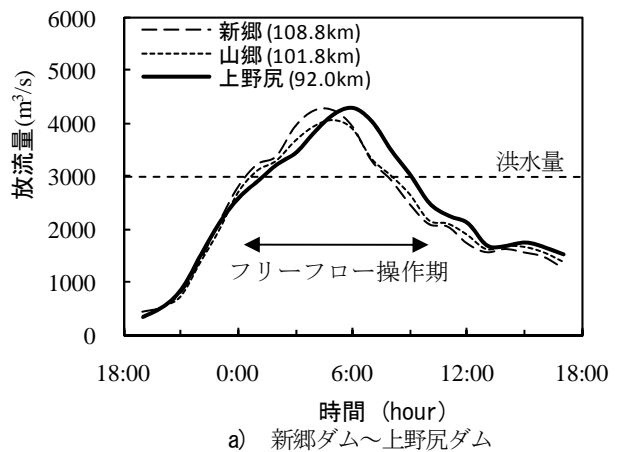
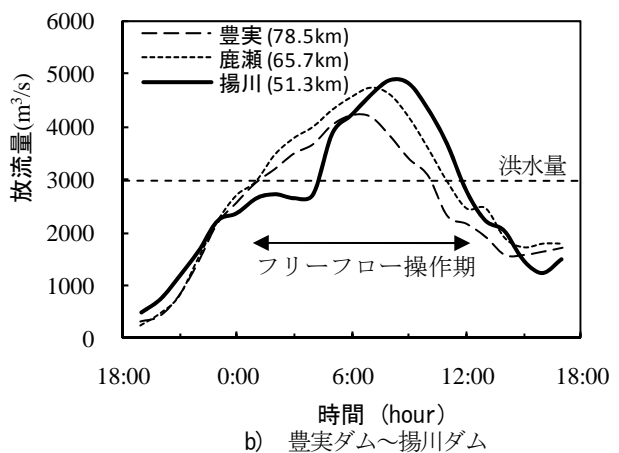


写真-1 鹿瀬ダム堤体



a) 新郷ダム~上野尻ダム



b) 豊実ダム~揚川ダム

図-9 平成14年洪水時の放流量ハイドログラフ

(2) 小規模発電ダム群のゲート操作が流量ハイドログラフの変形及び洪水伝播速度に及ぼす影響

近年の主要洪水である昭和57年、平成14年、平成16年洪水では、図-7の上野尻ダムと揚川ダムにおいてフリーフロー操作が行われ、他のダムでは水位一定操作が行われた。図-9に平成14年洪水時の各発電ダムからの放流量ハイドログラフを示す。上野尻ダム、揚川ダムでは、図の両矢印の期間でフリーフロー操作を行っている。図-9から、フリーフロー操作となった、上野尻ダム(上図)、揚川ダム(下図)では、両矢印の期間で、直上流のダムと比べ放流量ハイドログラフの変形が大きいのに対し、水位一定操作となった、山郷ダム(上図)、鹿瀬ダム

表-2 平成14年・平成16年洪水の対象区間における洪水伝播速

		CASE1	CASE2	
対象区間		新郷ダム(108.8km)～揚川(51.3km)	新郷ダム(108.8km)～豊実ダム(78.5km)	新郷ダム(108.8km)～鹿瀬ダム(65.7km)
洪水伝播速度	平成14年洪水	4.36 m/s	5.05 m/s	4.79 m/s
	平成16年洪水	4.17 m/s	4.59 m/s	

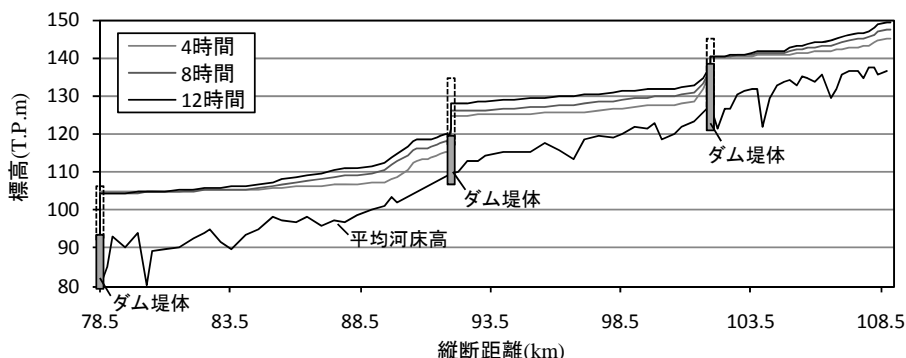


図-10 各ダム貯水池における水面形の時間変化 (増水期)

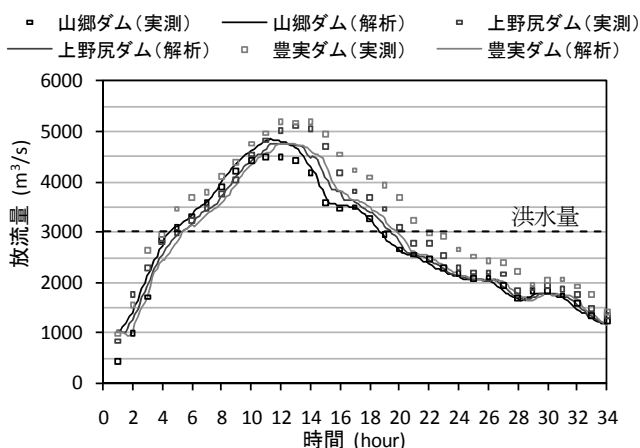


図-11 観測流量と解析流量ハイドログラフ

(下図)では直上流のダムと放流量ハイドログラフの形状が大きく変わらない。同様の傾向が、昭和57年、平成16年洪水においても確認できている。

次に、フリーフロー操作時と水位一定操作時での貯水池における洪水伝播速度について、平成14年、平成16年洪水を対象に検討を行う。検討区間は、図の新郷ダム(108.8km)～揚川ダム(51.3km)区間 (CASE1:フリーフロー操作を行っていたダム貯水池を2区間含む)と新郷ダム(108.8km)～豊実ダム(78.5km)、新郷ダム(108.8km)～鹿瀬ダム(65.7km)区間 (CASE2:フリーフロー操作を行っていたダム貯水池を1区間含む)とした。各区間の洪水伝播速度は各ダムの放流量ハイドログラフ(10分～30分毎)とゲート操作記録からピーク放流量発生時刻を定め、区間距離を流下時間で除して求めた。表-2に各区間の洪水伝播速度を示す。表-2から、CASE1に比べてCASE2の洪水伝播速度が大きく、水位一定操作時はフリーフロー操作時に比して洪水伝播速度が大きくなる傾向にあることが分かる。これらの原因については、平成16年洪水の解析結果から考察する。

### (3) 小規模発電ダム群が洪水流の伝播に及ぼす影響

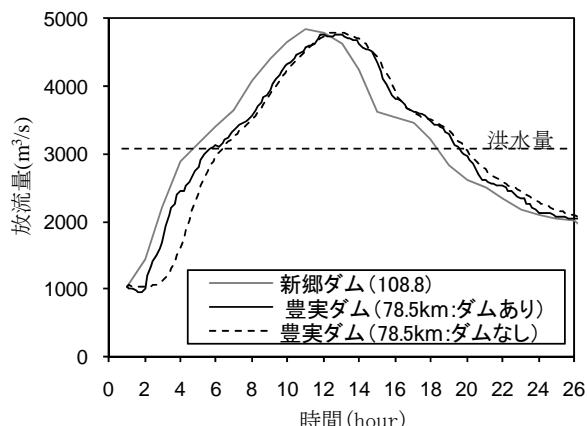


図-12 ダムありとダムなしでの豊実ダム地点における流量ハイドログラフの比較

解析法には非定常次元解析法を用いた。上流側の境界条件には、対象区間最上流の新郷ダム(108.8km)からの放流量の時系列データ、下流側は豊実ダム上流78.75km地点での観測水位の時系列データを与えている。地形データには平成14年の測量成果を用いている。粗度係数は、貯水池内で痕跡水位等が得られていないことから山地流路における粗度係数として $n = 0.04$ を全対象区間で与えている。小規模発電ダム群が洪水流の伝播に及ぼす影響を検討するため、解析は小規模発電ダム設置前の河道条件においても行っている。

図-11は平成16年洪水における各発電ダムからの放流量ハイドログラフの実測値と解析値の比較を示す。解析値は実測値と比べ流量が全体的に小さい。これは、解析は支川からの流入流量を考慮していないことが大きな原因である。しかし、解析の放流量ハイドログラフは、水位一定操作となった新郷ダム～山郷ダム、上野尻ダム～豊実ダム区間での変形が小さく、フリーフロー操作となった山郷ダム～上野尻ダムの区間では、両矢印で示すフリーフロー操作を行った期間で流量ハイドログラフの伝播が相対的に遅れており、実測の傾向を再現できている。そのため、解析は全体的な流量ハイドログラフの傾向を

表-3 各発電ダム地点でのピーク流量の低減率

		山郷ダム	上野尻ダム	豊実ダム
ピーク流量の 低減率(%)	ダムあり	0.10	1.56	1.60
	ダムなし	0.33	0.64	0.88

とらえていると言える。図-10は、この時の、各ダム貯水池における水面形の時間変化（増水期）を示す。水位一定操作を行った山郷ダム、豊実ダム貯水池では、上流区間においては水位が上昇するのに対し、下流区間ではゲート操作によって水位上昇が抑えられ、水面形は急勾配となる。一方、上野尻ダム貯水池では、フリーフロー操作となるとゲート操作の影響を受けないことから、ダム堤体の影響によって水面形は緩やかになり、ほぼ水平に変化する。このような水面形の時間変化の違いが、水位一定操作時とフリーフロー操作時での洪水流の伝播の違いを与えている。

#### (4)小規模発電ダム群設置前後での洪水伝播機構の変化

図-12は、小規模発電ダム設置前後での豊実ダム地点における流量ハイドログラフの比較である。図-12から分かるように、ダムありでは、ダムなしに比べ流量ハイドログラフの伝播が速くなっており、その差は流量の増大につれて小さくなる傾向にあり、洪水期間でのダムありとダムなしでの流量ハイドログラフの到達時間の差は10分程度である。表-3は、ダムありとダムなしでの各ダム貯水池における最大流量の低減率を示している。ダムありの方がダムなしに比べ最大流量の低減率が大きくなる。また、ゲート操作毎に見ると、ダムありでの最大流量の低減のほとんどはフリーフロー操作となった上野尻ダムで生じていることが分かる。

北上川山間狭隘区間では、支川の影響を受けない長い区間において流量ハイドログラフの変形が小さいのに対し、阿賀野川山間狭隘区間では小規模発電ダム群のゲート操作によって流量ハイドログラフの形状が変形した。このことは、山間狭隘区間での河道構造の影響に比して小規模発電ダム群のゲート操作が洪水流の伝播に及ぼす影響が大きいことを示している。今後は、河道構造の異なる複数の河川において検討を行うことで、山間狭隘区間の河道構造が洪水流の伝播に及ぼす影響について検討を進めていく予定である。

#### 4.まとめ

1. 北上川山間狭隘区間では、支川の影響を受けない区間において水位ハイドログラフ及び流量ハイドログラフはほとんど変形しないこと、流量ハイドログラフの伝播速度は運動量補正係数を考慮した最大流量時の断面平均流速程度となることを観測水位データ及び非定常平面二次元解析より示した。

2. 阿賀野川山間狭隘区間では、小規模発電ダムにおいてフリーフロー操作を行った場合、水位一定操作時に比べ流量ハイドログラフの変形が大きくなり、洪水伝播速度が小さくなることを実測データから示し、非定常一次元解析からその原因について考察した。

3. 阿賀野川山間狭隘区間において、小規模発電ダム群設置前後での洪水流の伝播の変化について非定常一次元解析から検討し、小規模発電ダム群の設置により下流への洪水到達時間が10分程度早まり、ピーク流量の低減率が大きくなることを示した。

#### 参考文献

- 1) 山田啓一, 高橋 裕: 峡谷部での洪水波の不連続現象について, 水理講演会論文集, 第22巻,1978, pp. 227-232
- 2) 山田啓一, 高橋 裕: 洪水波の不連続現象とその発生機構について, 水理講演会論文集, 第24巻, 1980, pp. 375-380.
- 3) 玉井信行, 河西 基: 河道狭窄部が洪水波形に及ぼす影響について, 水理講演会論文集, 第22巻,1978, pp.239-244.
- 4) 矢野勝正, 足立昭平: 貯水池における洪水波伝播に関する実験的研究, 京都大学防災研究所創立5周年記念論文集, 1956, pp. 211-219,.
- 5) 秋元 保, 丸岡 計: 貯水池内における洪水伝播の解析とダム放流操作に関する考察, 水理講演会講演集, 12, 1968, pp. 43-48.
- 6) 尾崎幸雄, 秋元 保: 貯水池内に流入する洪水の挙動について, 水理講演会講演集, 23,1979, pp. 27-33.
- 7) Mitkova V, Pekarova P, Miklanek P, Pekar J. Analysis of flood propagation change in the Kienstock-Bratislava of Danube River, Hydrological Sciences Journal 50(4), 2005, 655-668.
- 8) 水理公式集(平成11年度版),土木学会,1999.