# 降雨流出と河道洪水流の一体解析による 流域水収支分布図の作成とその応用

## 石井 優太朗1・福岡 捷二2

 <sup>1</sup>正会員 国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部 幾春別川ダム建設事業所 (〒068-2113 北海道三笠市幾春別山手町91-1)
E-mail: ishii-y22ac@mlit.go.jp

<sup>2</sup>フェロー 中央大学研究開発機構 機構教授(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27) E-mail: sfukuoka001t@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

流域治水では、流域全体の治水安全度が高くなるように、河川の流下能力向上のための治水対策と、流 域での貯留対策を流域関係者が協働して実行することが求められている.本論文は、降雨分布を与条件と した降雨流出と河道洪水流の一体解析法を構築し、それに基づき流域内の貯留・流出量の関係を示す流域 水収支分布図を作成している.具体的には、流域を分割した小流域にタンクモデルを適用した降雨流出解 析と平面二次元洪水流解析を組み合わせた降雨流出・洪水流の一体解析法を構築し、これを石狩川水系豊 平川へ適用することで流域水収支分布図を作成し、本解析法による流域水収支分布の有用性と流域水収支 分布図の活用方法を提示している.

# *Key Words:* flood flow analysis, rainfall-runoff analysis, coupling analysis, basin water balance map (BWBM), Toyohira River

## 1. 序論

#### (1) 研究背景

近年の降雨量増大に伴う水害の頻発化・激甚化により、 本川河道中心の治水対策に限界がみられ、本川・支川 群・氾濫域の流域全体で水害軽減を図ろうとする流域治 水への転換が行われている.具体的には、これまでの河 川改修による流下能力の向上に加え、流域内での降雨の 貯留等によって被害の軽減を図ることが、流域関係者の 協働で進められている.これを実行するためには、河川 管理者が中心となって豪雨時の流域内の貯留・流出関係 をわかりやすく表現し、見える化することが課題であり、 そのために流域における降雨流出・河道洪水流を一体的 に解析できる技術の開発が求められている.

#### (2) 流域治水で求められている技術

水文学分野では,降雨を与条件とする様々な降雨流出 解析法が提案されている.降雨の流出機構を概念的に表 現し,流出量を推定する貯留関数法<sup>11</sup>やタンクモデル<sup>2)</sup> は,単純でありながらも河川における洪水流量波形を再 現できるため,治水計画等で広く用いられている.また, 地形や土地利用など流域の状況を考慮する分布型のタン

クモデル 3や、粗度係数や土層厚といった物理的なパラ メータを用いた物理モデルも、国内外を通じ開発されて おり 4,5,6, 近年では実用的な面から国内外で RRI モデ ル "の検討が進められている. その一方で, 降雨流出過 程の不確かさが指摘され<sup>8</sup>,不確かさを補う研究も盛ん に行われている. 例えば、モデル構造とモデルパラメー タの不確かさについて、地中内部の流れ構造を把握する ことへの課題や、モデルパラメータの決定のための現地 の流量観測値への課題等が指摘されている. これらの課 題に対し、山地流域を対象として流域分割をほぼ同じ流 域面積となるように行い,大・中出水条件の下,地質に よってタンクモデルのパラメータを総合化した小葉竹・ 石原の研究 %や,流域内の表層地質割合によってタンク モデルパラメータを重回帰式より求め、流出現象を再現 しようとする研究 10等,不確かさを解消しようとする試 みが進められている.

このような検討を通して流域治水で望まれていること は、対象流域で計測された土層厚や透水係数といった実 際の流域特性値を反映し、空間的な流域特性の違いを考 慮した降雨流出・河道洪水流の一体解析を実施し、流域 の規模や流域特性に応じた流域の貯留量・流出量や河道 貯留量等に着目した水の動態に基づく流域水収支分布を 求めることである.分布型流出解析と洪水流解析を組み 合わせた検討も行われているが,分布型流出解析で用い るパラメータは,流域全体で一様とし,統計的に同定し たものであることが多く,流域の水収支分布の検討に用 いるには流域特性との関連付けが弱くパラメータの同定 に課題が残されている<sup>例えば11)</sup>.

洪水流解析について福岡ら <sup>10</sup>は、洪水水面形の時間変 化が洪水流の特性を支配しているとして、水位観測地点 における計算水位が観測水位を再現するように解析する ことにより、河道における洪水形成過程を高精度に解析 することを可能にした. また, この解析法は, 河道の任 意地点における流量ハイドログラフを求めることを可能 にし、これにより河道貯留量を求めることが出来、洪水 流における河道貯留量の重要性が明らかにされた. その 一例として、2015年9月鬼怒川洪水について水面形の観 測値を用いた解析を行い, 流域, ダム, 河道, 氾濫域で の水の貯留量の時空間分布から流域の水収支分布を示す ことによって、洪水流出、氾濫過程における水の動態の 新しい説明を与えている<sup>13)</sup>.この流域水収支の考え方は 本・支川群から構成される洪水流解析にも用いられ、 本・支川一体の洪水流解析、流域治水への地平が開かれ た. 見上ら<sup>14</sup>は、利根川上流域の1次支川および本川を 一体とし、2次支川からの流出ハイドログラフはタンク モデルを用いて求め、これを1次支川に合流させること により、1次支川および本川の洪水流解析を行い、洪水 水面形の時間変化が再現可能であることを示し、1次支 川,2次支川群からの流出量が本川の洪水流に与える影 響を定量的に評価している.また、立川ら 5は、洪水流 解析で得た水位を観測水位に一致するように粒子フィル タ法を用いた同化手法を提案している. 国土交通省国土 技術総合研究所 1%は、立川らの方法を準用し、多地点水 位を用いた水位予測を検討し、水害リスクラインとして 洪水時の予測水位を公表している注1).

福岡<sup>17</sup>は、洪水水面形の時系列変化を用いた解析によって河道における洪水ボリュームの変化を算出し、降雨 量やダム及び河道での貯留量、氾濫量との関係を流域水 収支分布図として表わし、流域治水における水収支分布 図の重要性を示した.石井ら<sup>18</sup>は、この考え方を石狩川 下流域に適用し、本・支川で観測された水面形を再現す るように洪水流解析を行うことで、支川流域からの流出 量や本川の石狩大橋地点を流下した総量を算出し、それ と流域での総降雨量や、ダム貯留量を組み合わせること で、流域水収支分布図を作成し、支川での洪水及び支川 からの洪水が本川にどのように影響を及ぼしたのかを検 討している.また、見上ら<sup>14</sup>は利根川上流域を対象とし、 観測水面形に合致するようにタンクモデルと洪水流解析 を組み合わせた降雨流出・洪水流解析法を用いて流域水 収支分布図を作成し、流域治水での活用方法を示してい



図-1 豊平川流域図

る.小谷ら<sup>19</sup>は、本論文で示す解析法に準じ、流域水収 支の考え方を斐伊川流域の高水計画に用い、解析法の有 効性を示すとともに、洪水に伴う流域土砂の収支分布も 検討し、斐伊川流域における水収支分析と土砂収支の分 析の重要性及び算定方法の課題を示している.

このように、河道では、多地点で得られた観測精度の 高い水位を境界条件として活用することによって河道内 の水収支分布が求まり、河道計画の高度化が図られてい る. 福岡 20は、河道貯留量をベースとした流域水収支分 布図を表し、この図が流域治水の検討のための基本的な 手段となることを示している.しかし、河道洪水流解析 を基とした流域水収支分布図は、水面形観測や解析を行 った範囲内での貯留量、氾濫量に基づいており、観測範 囲外の流域での貯留量は直接求めることができず、現状 では流域貯留量として一括して表示したものとなってい るため、不十分な図となっている、流域治水では、流域 のどの場所でどれくらいの水量がどのような状態で存在 し、また流域外にどれくらいの水量が流出したのかを定 量的に表現できることが望ましく、流域の貯留量の内訳 も明らかな流域水収支分布を求め、これを治水上どのよ うに活用するかが課題となっている.

## (3) 本研究の目的

近年充実した降雨の観測網により、流域では精度の高 い降雨分布データが得られ、また河川では洪水時の水面 形時系列データ、河道貯留量のデータが得られるように なった.これにより流域の水がいつ、どこに、どのよう な状態で存在しているかといった水の動態が流域水収支 分布図としてわかりやすく見える化することが可能とな り、関係者や住民に提供することが期待されている.流 域水収支分布図は、流域全体だけでなく、支川流域や、 氾濫域における氾濫計算と併せて避難や地域づくりに活



図-2 降雨流出と河道洪水流の一体解析手法

かすことが出来ることから、対象とするスケールに合わ せた対策検討が可能となる.これまで行われてきた分布 型流出解析は、同様の解析は可能ではあるが、(2)で述 べたように解析精度の向上が必要と考えている.

このような背景から本研究では、図-1に示す石狩川水 系豊平川を対象とし、流域特性を考慮した、降雨流出解 析と洪水流解析を一体的に行う解析法を構築すること、 流域での貯留量、流出量等の水の動態を明らかにした流 域水収支分布図を作成し、流域治水への活用方法を検討 することを研究目的としている.

## 2. 降雨流出と河道洪水流の一体解析法の構築

本研究で構築した解析手法は、図-2に示すように、観 測水面形に基づく河道区間での洪水流解析 Step1, Step1 で得られた流量ハイドログラフに整合するパラメータを 用いたタンクモデルにより、山地小流域からの降雨流出 量を求め、それらを各河道区間での与条件とした支川群 での洪水流解析と流域水収支分布図 Step2, Step2 で得た 水収支分布を説明するパラメータを活用した本・支川一 体の洪水流解析 Step3 の3 ステップから成る.

Stepl では、これまで河川技術で用いられてきた手法 を踏襲し、観測水面形を再現するように平面二次元洪水



流解析を行う<sup>12,14)</sup>.解析区間は、水面形の観測されてい る本・支川とし、本川と支川の合流点の解析メッシュを 重ねることで一体的に解析する.これまでの解析と異な る点として、支川についてできるだけ上流まで水位計を 設置、観測し、解析区間を伸ばしている点があげられる. 解析により、河道内の流速分布を求め、上流断面での流 量ハイドログラフを見積もる.これにより Step2 の解析 で必要となる山地流域からの流出量を得る.

Step2 では、Step1 の解析を行った支川の上流域に着目 する. Stepl の解析範囲は、水面形に合うように洪水流 解析を行っているため,水位観測所のある地点までとし たが、実際の河道区間はさらに上流まで伸びている.本 研究では、この河道区間は国土地理院地図上で記載され ている2条河川21)とした.国土地理院の地図では、河川 は2条河川と1条河川で表記している.ここで、1条河 川とは、川幅が5m未満であり、2万5千分の1地図上で 記載されていない河川であり、それ以外の河川は2条河 川となる.本研究では、この2条河川で示されている区 間を河道区間と定義し、それより上流の1条河川や、国 土地理院地図上で記載のない河川は山地斜面域としてい る. そしてこの山地斜面域を, 尾根や河道区間によって 決まる流域界によって小流域に分割した.流域界は、地 形図の標高データをもとに、地形図上の各地点について 最急勾配となる方向へ水が流れるとして決定した. この 分割された各小流域に対し、図-3に示す三段タンクモデ ル 2を用いて降雨流出解析を行い、小流域からの各流出 量を求めるとともに、得た流出量を河道区間の境界条件 として与え平面二次元洪水流解析を行うことで、降雨流 出・河道洪水流の解析を行う. タンクモデルは、小流域 において適応性が高い単純なモデルであるが、洪水期間 内で卓越する成分ごとに分離して分析できる特徴がある. ただ、精度の高い結果を得るためには、パラメータを適 切に同定することが重要である.

本研究では、タンクモデルの特性である降雨強度に応 じた各流出孔からの流出量の変化に着目し、降雨強度が 強く, 流量がピークの時間帯では主に一段目のタンクの 係数を、降雨が収まり減水期の時間帯では二段目のタン クの係数を、減水期から基底流出へ変化している時間帯 では三段目のタンクの係数を調整することで、各小流域 からの流出量の波形を調整し同定した.また、このとき 用いるパラメータは各小流域で変更せず、同じ値のもの を用いることとした. 解析区間を上流まで延伸した Stepl の結果を用いることで、山地斜面域の流域面積を 小さくすることができ、同一のパラメータを用いる流域 が土壌・表層地質の分布が比較的均一な領域となること, 山地斜面域と河道区間を区別し、山地斜面域のみをタン クモデルで表現するため、 パラメータに河道による遅れ 効果による影響などが含まれず、流域特性により決まる パラメータとなること、山地斜面域を一つのタンクモデ ルで表現するのではなく、小流域に分割しそれぞれにタ ンクモデルを適用しているため、降雨の空間分布を考慮 できることが本解析法の特徴としてあげられる.

Step3 では、Step2 で得た支川群での水収支分布を用い、本川流域全体での降雨流出・洪水流現象を再現する.まず Step2 と同様に、本川流域を 2 条河川を基準として河 道区間と山地斜面域に分け、山地斜面域については河道

区間と尾根を基に小流域に分割する.そして小流域について、土壌・表層地質構造を分析し、構造が似た流域ご とにグルーピングする.土壌・表層地質構造は、国土交 通省により一般的に公開されているデータ<sup>注3</sup>を用いた. Step2 で解析を行った支川群と同じ分類となった小流域 は、Step2 で求めたパラメータを用いることで、本川流 域全体の山地斜面域からの流出量をタンクモデルにより 算出した.また、河道区間では、得られた小流域からの 流出量を小流域と河道区間の合流点での境界条件とする ことで、平面二次元洪水流解析を行った.これより、降 雨を与条件としながら流域の降雨流出・洪水流現象について一体的に解析を行う.

従来の流出解析では、パラメータの値に流域特性と 河道特性の両方が包含されている.このため他流域で求 めたパラメータをそのまま用いることは適切な方法とは 言えない.本研究では、水面形を境界条件とした洪水流 解析 Step1 と、流出解析である Step2 を分離して解析する ことで、粗度係数として考慮すべき河道特性と、流出パ ラメータとして考慮すべき流域特性を分離して同定して いる.また、Step3 の解析では Step2 で分割した小流域と 同規模となるように流域分割を行なうことで、分割され た各小流域の地形形状が類似するとし、流域特性で考慮 すべき違いは土壌・表層地質であると考え、土壌・表層 地質の違いに基づき他流域で求めた流出解析パラメータ を準用している点が本研究の特色である.

## 3. 豊平川流域の流域特性と対象降雨特性

本研究で対象とする豊平川流域の全体像を図-1に示す. 豊平川は、札幌市を流れ石狩川へ流入する流域面積 902km<sup>2</sup>の一級河川である.本研究で河道区間とする豊 平川本川と支川は、図-1に水色線と赤線で示しており、 豊平川本川は、豊平峡ダム下流 48km~石狩川との合流 点0km区間である.支川は、本川河道区間において合流 する1次支川及び国土地理院地図上で2条河川として示 されている河道区間とした.

また,対象豪雨は,2011年9月豪雨とした.上下流での降雨ハイエトグラフと,累加雨量分布をそれぞれ図-4,図-5に示す.対象とした2011年9月豪雨は,豊平峡ダム集水域や,豊平川中流右岸流域において集中していることが分かる.

## 4. Step1の解析結果

Steplの解析範囲は、図-1の赤線に示す範囲であり、この範囲を対象として本・支川一体の洪水流解析を行った.







図-5 2011年9月豪雨時の豊平川累加雨量コンター

本川解析区間の上流端は白川水位観測所(30.1km)とし、 下流端は石狩川との合流点(0km)とした. なお、下流端 の境界条件は、石狩川15km地点の篠路水位観測所で得 られた水位とした. この本川解析区間内に流入する支川 について、水位観測所のある支川は図-1の赤丸に示す水 位観測所を上流端とし,水位観測所のない支川はタンク モデルを用いて各流域からの流出量を求め、横流入とし て解析した. 粗度係数は本川については計画で用いられ ている値、支川については浮子による流量観測が行われ た際に算出された逆算粗度の値を基準とし、また、本川 の低水路際や砂州上には樹木が繁茂しているため、航空 写真や河川環境図により確認できた樹木の繁茂状況に見 合う樹木群透過係数20を考慮し水面形に合うように調整 した. 0km~21.4kmまでの本川低水路の地形は2006年に 行われた定期横断測量や横断構造物の諸元を基に作成し、 それ以外の場所は5mDEMを元に作成した. その他の解 析諸元については表-1に示す.

2011年9月豪雨を対象としたSteplについて、図-6に豊 平川水面形の時間変化を示す.また、本川各観測所での 水位ハイドログラフを図-7に、流量ハイドログラフを図 -8に示す.同様に支川での水位・流量ハイドログラフを 図-9に示す.図-6に黒線で示す解析最大水位では、一部

表-1 Step1の解析条件

解析期間	H23年9月1日18時~15日0時
上流端境界条件	白川観測水位 <b>(30.1km)</b>
下流端境界条件	篠路観測水位 (石狩川との合流点で与える)
粗度係数(本川)	0km~10km:0.022 10km~31km:0.035 高水敷:0.045
粗度係数(支川)	オカバルシ川, 穴の川:0.035 真駒内川, 精進川:0.033 南の沢川, 中の沢川:0.05 月寒川, 厚別川:0.022
樹木透過係数22)	35(m/s)

の地点において痕跡水位を再現できていないが、樹木の 繁茂状況等局所的な問題であり、全体として解析結果は 観測値をおおむね説明している.

#### 5. Step2の解析結果

図-10は、豊平川全流域のうちStep2の解析を行った支 川流域を示している. 簾舞川以外の支川は、水面形に基 づいたStep1の洪水流解析を行うことのできた河川であ り、解析上流端の流量ハイドログラフが得られている. 簾舞川については、簾舞水位観測所と豊平川本川の白川 水位観測所で得られた観測水位を用いて洪水流解析を行 い、簾舞水位観測所での流量ハイドログラフを求めてい る.各支川流域の流域面積を図-11に示す.支川の河道 上流端より上流域に着目し、図-10の青線で示すように 河道区間を2条河川まで延伸する.その後、伸ばした河 道区間と、尾根より得られる流域界を基に、山腹斜面を 図-10の緑色で示すように小流域に分割する.この各小 流域と、残った残留域に対し、三段タンクモデルを用い て流出量を算出し、それら流出量を河道区間の境界条件 として洪水流解析を行うことで、Step1の解析を行った



図-8 Steplの解析より求めた 2011 年9月豪雨時の豊平川本川の流量ハイドログラフ

0

9/1 0:00 9/2 0:00 9/3 0:00 9/4 0:00 9/5 0:00 9/6 0:00 9/7 0:00 9/8 0:00 9/9 0:00

0

9/1 0:00 9/2 0:00 9/3 0:00 9/4 0:00 9/5 0:00 9/6 0:00 9/7 0:00 9/8 0:00 9/9 0:00



図-9 Step1の解析より求めた 2011年9月豪雨時の豊平川支川の水位・流量ハイドログラフ

支川河道上流端と同じ地点での流量ハイドログラフを得る. この得られた流量ハイドログラフが, Steplで得た 流量ハイドログラフと一致するようにタンクモデルのパ ラメータを調整することで, Steplでは得られなかった 山地上流域の降雨に対する貯留・流出現象を明らかにす る. なお, 与条件である降雨量は, レーダ解析雨量を用 いて流域平均雨量を求めている. 具体例として, 真駒内 川流域でのStep2の解析を図-12に示す. 真駒内川での Steplの解析区間は, 図-12の赤で示す河道区間であり,

上流端を真駒内常盤(8.3km)としたことにより,Step2の解 析範囲はこの真駒内常盤より上流域となる.この上流域 について、図-12の青で示す2条河川を河道区間とし、そ の周囲の山地斜面域を尾根に基づいて1から18までの小 流域に分割した.また、真駒内常盤より下流側について も、主要な山地斜面域として19と20の小流域に分割した. なお、この小流域の平均流域面積は2.63km<sup>2</sup>である.こ の各小流域での流域平均雨量を、レーダ解析雨量を用い て算出し、それを与条件とした3段タンクモデルを用い て各孔からの流出量を求め各小流域からの流出量を算出 する.図-13の点線のハイドログラフは、各小流域で得 た特定の孔からの流出量を合算したハイドログラフであ る.なお、各孔の名称は吉野ら3を参考に定義した.ま た、図-13の赤の実線は、真駒内常盤地点でのSteplで得 た流量ハイドログラフを示しているが、この実線と点線 を比較すると、洪水ピーク時には1段目のタンクからの 流出量が、洪水初期や洪水減水期には2段目のタンクか らの流出量が、降雨が収まり平水へ戻る頃は3段目のタ ンクからの流出量が実線で示す真駒内常盤地点通過流量 の成分の多くを占めていることが分かる.そのため、各 期間に応じて調整するタンクを決め、図-13の青の実線 で示すStep2で得た真駒内常盤地点での流量ハイドログ ラフが赤で示す流量ハイドログラフに一致するように、 パラメータを調整した.

このような Step2 の解析を,他の支川流域についても 同様に行った. Step2 で得た流量ハイドログラフと Step1 で得た流量ハイドログラフの比較を図-14に,4つの流域 において得られたタンクモデルパラメータを表-2に示す. タンクモデルは,他の降雨流出解析法に比べ簡易的であ るが,多数のパラメータを上述のように洪水時期に応じ て調整することで,各降雨のピークに応じて精度よく再 現ができていることが分かる.



図-10 Step2の解析を行った豊平川支川流域





	流域面積	流域分割数	平均小流域面積
簾舞川	24km²	6	<b>3.40k</b> m <sup>2</sup>
オカバルシ川	8km <sup>²</sup>	4	<b>1.92</b> km <sup>2</sup>
真駒内川	37km <sup>2</sup>	20	<b>2.63k</b> m <sup>2</sup>
南の沢川	6km <sup>*</sup>	4	<b>1.32</b> km <sup>2</sup>

図-11	Step2の解析を行った豊平川支川流域の小流
	域分割結果



図-13 真駒内川流域での Step2 の解析結果

## 6. Step3の解析結果

上流のダム群では、図-15や図-16に示すように、ダム 区間での水位と水表面積の関係からダム流入量が計測さ れている.このダムへの流入量を再現するようにダム流 域でのタンクモデルパラメータを同定した. 同定したダ ム流入量ハイドログラフを,図-15,図-16 に示す.表-2 にはダム流域を含む同定した各流域でのタンクモデルパ ラメータを示す. Step3 の解析では,Step2 と同様に図-17 の流域図に示すように河道区間を2条河川まで延伸し,



9/1 0:00 9/2 0:00 9/3 0:00 9/4 0:00 9/5 0:00 9/6 0:00 9/7 0:00 9/8 0:00 9/9 0:00

流量(m<sup>3</sup>/s) オカバルシ地点の流量ハイドログラフ



表-2 同定した各流域でのタンクモデルパラメータ

パラメータ	簾舞川	オカバルシ川	真駒内川	南の沢川	定山渓	豊平峡
α1	0.8	0.15	0.8	0.2	0.2	0.4
α2	0.09	0.13	0.15	0.12	0.12	0.1
α3	0.05	0.08	0.08	0.08	0.05	0.08
$\alpha_4$	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.06
$Y_1(\text{mm})$	36	40	35	24	32	35
$Y_2(\text{mm})$	8	8	9	10	15	9
$Y_3(\text{mm})$	15	10	5	10	15	5
$Y_4(\text{mm})$	15	5	5	0	8	5
$\beta_1$	0.26	0.2	0.12	0.2	0.2	0.12
$\beta_2$	0.08	0.02	0.04	0.04	0.06	0.04
B3	0.005	0.02	0.005	0.005	0.01	0.005



その周囲の山腹斜面を小流域に分割した.小流域は, 108 個であり、小流域の平均流域面積は約 3km<sup>2</sup>である. 図-18に豊平川流域の土壌分布図注2を、図-19に表層地質 分布図注2を示す.土壌分布図が示すように、真駒内・ 精進川流域では黒ボク土である場所が多く、それ以外の 流域ではほとんどが褐色森林土である. それに対し、表



<sup>9/1 0:00 9/2 0:00 9/3 0:00 9/4 0:00 9/5 0:00 9/6 0:00 9/7 0:00 9/8 0:00 9/9 0:00</sup> 



<sup>9/1 0:00 9/2 0:00 9/3 0:00 9/4 0:00 9/5 0:00 9/6 0:00 9/7 0:00 9/8 0:00 9/9 0:00</sup> 

図-14 Step2の解析を行った豊平川支川の流量ハイドログラフ

表-3 Step3の解析条件

解析期間	H23年9月1日18時~15日0時
上流端境界条件	豊平峡ダム放流量
下流端境界条件	篠路観測水位 (石狩川との合流点で与える)
粗度係数(本川)	0km~10km:0.022 10km~31km:0.035 31km~48km,高水敷:0.045
粗度係数(支川)	オカバルシ川, 穴の川: 0.035 真駒内川, 精進川: 0.033 南の沢川, 中の沢川: 0.05 月寒川, 厚別川: 0.022 その他の支川: 0.045
樹木透過係数22)	35(m/s)
支川の扱い	月寒川,厚別川:水位を境界条 件として解析 その他の支川:タンクモデル流 量を境界条件として解析





層地質は、様々なものが流域内に分布しており、特に火 山性や半固結~固結の表層地質が流域内に多く点在する. 例えば簾舞川等は下流側に半固結~固結の表層地質が分 布し、上流側に火山性の表層地質が分布する. それに対 し、真駒内川や精進川では、上流側が半固結~固結が分 布し、下流側に火山性が分布する. そこで、図-17の流



図-17 豊平川流域図

域図に示すように、流域を土壌分布に対応してタンクモ デルパラメータの得られている6流域に分類した.具体 的には、豊平川中流左岸エリア、簾舞川から上流側の右 岸中流エリア、薫舞川より下流から真駒内川より上流の 右岸中流エリア、真駒内川・精進川エリア、定山渓ダ ム・白井川エリア、豊平峡ダム・薄別川エリアの6エリ アである.同じ分類の小流域では同じパラメータを用い ることで各小流域からの流出量を算出し、それを河道間 の境界条件に与えた.用いたパラメータを表-2に、解析 諸元は表3に示す.

2011 年 9 月豪雨を対象として行った Step3 の豊平川水 面形の時間変化を図-20に示す.また、本川各観測所で の水位ハイドログラフを図-21 に、流量ハイドログラフ を図-22 に示す. 流出解析として基底流出を考慮してい ないため、洪水減水期の流量は Step1 と比べやや低くな っているが、解析結果は観測結果及び Stpel の解析結果 をおおむね説明していることがわかる. これは、モデル パラメータ決定のために下流河川の水面形を用いて河川 上流の流量ハイドログラフを算出したこと、各小流域に 分割した際、流域面積のばらつきが少なくなるように細 かく分割し、地形・地質の似た流域ごとに分類できたこ と、与条件である降雨について、1km四方に30分間隔の レーダ雨量データを用いることで、降雨の時空間分布が 検討対象流域の規模に対し適切に考慮できていたこと, 河道区間を川幅が 5m 程度となるまで設定することで、 検討対象流域の規模に対し河道の影響を十分に考慮でき ていたことの3点によると考えられる.

### 7. 2018年7月豪雨による解析再現性の検証

降雨流出解析では、モデル構造やパラメータ同定の不 確かさによりパラメータが降雨強度等により変化する可 能性があることがこれまで指摘されている<sup>8</sup>.そこで、 検討した豪雨と別の豪雨についてStep1からStep2の解析



図-18 豊平川流域における土壌分布<sup>注2)</sup>



図-19 豊平川流域における表層地質分布注2)

を行い、豪雨によるパラメータの違いについて考察する. 加えて、2011年豪雨により得たパラメータを用いてStep3 の解析を行い、他豪雨により同定したパラメータを用い た際の洪水の再現性について分析する.

対象とした別豪雨は、図-23に示す 2018年7月豪雨で ある.本豪雨は、2011年9月豪雨と異なり、ダム集水域 以外の流域に降雨が集中している.特に,豊平川中流右 岸の支川流域や、薄別川流域等で降雨が集中し、多いと ころで一週間に 300mm ほどの降雨となっている. この 豪雨について、はじめに Step1 から Step2 の検討を行う. 解析期間は2018年6月30日18時~7月13日0時であり、 Step1 については 4 章と同じ解析範囲・条件とし、Step2 については支川の真駒内川を対象としてタンクモデルの パラメータを同定した. Step1 の解析結果として豊平川 の水面形の時間変化を図-24 に示す.また、本・支川各 観測所での水位ハイドログラフを図-25,図-26に示す. 図-25, 図-26 に示すように, Step1 の解析結果は観測水位 を再現しており、この解析より得た真駒内川真駒内常磐 地点の流量ハイドログラフに合うように真駒内川流域の タンクモデルパラメータを同定する. 図-27 は, Step1, Step2 より得た真駒内常磐の流量ハイドログラフ及び洪

水ごとに同定したタンクモデルパラメータの比較を示し











図-23 2018年豪雨時の豊平川流域累加雨量コンター

ている.水面形に合うように調整したパラメータは、 2011年豪雨で同定したパラメータに比べ,遅い中間流出 に関する α3 が小さく,鉛直浸透に関する β が大きくな っていることがわかる.このパラメータの違いについて、 2011年9月洪水時の真駒内川流域では,洪水ピーク前2 日間の断続的な降雨により土壌が飽和し,パラメータ同 定を行った洪水ピーク時では流出しやすい状態となって いたため,鉛直浸透に関するパラメータを小さくする必 要があったと考える.それに対し 2018年豪雨では,前 期降雨が少なく浸透しやすかったため,鉛直浸透に関す るパラメータを大きく設定し,洪水ピーク時の流出量を 再現する必要があったと考える.

このような各豪雨のパラメータの違いを踏まえ,2011 年豪雨にて同定したパラメータを用いて2018年豪雨が 再現可能であるか検討する.Step1,Step2の解析では, 変化したパラメータの多くが鉛直浸透に関するものであ り,洪水ピーク時に影響を及ぼす表面流出や,早い中間 流出に関するパラメータは変わっていないことがわかっ た.そこで,これらパラメータの相違が,本川洪水の再 現性に対しどの程度影響を及ぼすのかを分析することが 目的である.解析対象・解析条件は6章と同様とした. 解析結果として豊平川の水面形の時間変化(1km~20km)を 図-28 に示す.また,本川観測所での水位・流量ハイド ログラフを図-29 に示す.解析結果は,観測水位や上述 した Step1 解析結果に比べ減水期に誤差が生まれている ものの,洪水ピーク時については比較的誤差が少なく解 析できていると考える.

本解析手法は、小流域と河道区間に分離したことにより流出過程ごとに適した解析モデルを用いていること、 タンクモデルを適用している小流域の流域面積の平均値 が約3km<sup>2</sup>であり、図-11に示すタンクモデルパラメータ を同定した際の流域面積に近い大きさの流域に適用して いること、各小流域ごとに流域平均雨量を算出している ため、従来よりも細かい降雨分布を考慮していることが 特徴である.これらの特徴を活用したことにより,異な る洪水にて同定したパラメータを用いた際にも洪水を概 ね再現できることがわかった.ただ,前期降雨等,降雨 の状況に応じて土壌の飽和度など流域の特性は変化する ため,減水期も含めた洪水全体を再現するにあたっては, 洪水に応じた適切なパラメータの設定が重要となると考 える.重要なことは,本解析手法は,豪雨の流出現象と 洪水の形成・流下現象を統合的に説明するため,水文学 と河川工学の技術・学術を有機的に結合し,水収支分布 の検討を可能にしていることである.

#### 8. 流域水収支分布図の作成とその応用

平面二次元洪水流解析から,各河道断面での流速分布 が求まることにより,流量ハイドログラフを任意の断面 で得ることができる.また,得た流量ハイドログラフを 用いることで,式(1)で示すように解析区間内の河道貯 留量*Sriver*が求まる.

$$\frac{dS_{river}}{dt} = Q_{(x)} - Q_{(x+\Delta x)}$$
(1)

なお,任意地点xでの流量を $Q_{(x)}$ ,微小区間 $\Delta x$ 下流側 での流量を $Q_{(x+\Delta x)}$ とする.このようにして得た解析区 間内の河道貯留量 $S_{river}$ と,流域内の総降雨量やダム貯 留量 $S_{dam}$ ,解析結果から得た流域から出ていく流量  $Q_{out}$ を用い,式(2)を基に流域水収支分布図を作成する.

$$\frac{dS_{basin}}{dt} + \frac{dS_{dam}}{dt} + \frac{dS_{river}}{dt} = \frac{1}{3.6}R \cdot A - Q_{out} \quad (2)$$

なお、*S<sub>basin</sub>をダム*・解析区間内の河道以外の流域で の貯留量、*R*は流域平均雨量(*mm/hr*)、*A*は流域面積 (km<sup>2</sup>)である.式(2)に基づき、図-30に示す豊平川流域に ついて、雁来地点より上流での豊平川流域水収支分布図 を図-31に示す.図-31より、本洪水により流域の総降雨 量に対し7割程度の洪水ボリュームが雁来地点より下流 へ流下したことが分かる.

Stepl の解析, つまり観測水面形に基づく洪水流解析 より得られる図-31 の流域水収支分布図では,総降雨量 に対しどれくらいの量が洪水時に流域の外に流下したの かを分かりやすく示すことが可能だが,流域のどの場所 でどの程度の水量が貯留しているかについては水面形が 観測されている区間の河道貯留量以外を示すことができ ない.そこで, Step3 の解析では,タンクモデルと流域 特性を紐づけることで,流域貯留量*S*<sub>basin</sub>の中身を明ら かにする.具体的には,各タンクと孔を,吉野ら<sup>3</sup>によ



















図-28 2011年9月豪雨により同定したパラメータを用いた STEP3 解析水面形(1kmから 20kmを抜粋)



る各タンクの名称を参考に、図-32 に示すように定義した.そして、対応する場所の各時間の貯留高に流域面積を掛け合わせることで各貯留量を算出した.これにより 求まった各地点での貯留量と、流域内の総降雨量、洪水 流解析から得られる流域外への流出量の関係を基に、流 域水収支分布図の基礎式(2)を式(3)に示すように表す.



なお、 $S_{surface}$ を地表面貯留量、 $S_{intermediate}$ を表層貯 留量、 $S_{unsaturated}$ を不飽和帯貯留量、 $S_{ground water}$ を地



図-34 2011年9月豪雨時の豊平川支川流域の流出率の時間変化

下水帯貯留量, Slossを地下損失量とする.

间

これにより、流域のどの場所でどの時間どの程度の量 が貯留しているかについての分析が可能となるとともに、 流域特性の分析を行うことも可能となる.具体例として、 豊平川の支川流域である簾舞川流域及び真駒内川流域で の流域水収支分布図を、各流域の流域平均雨量、累加雨 量と合わせ図-33 に示す.この二つの支川流域は、図-30 に赤枠で示すように豊平川の右岸に位置しており、図-33の流域平均雨量、累加雨量に示すように、2011年9月 豪雨では降雨強度及び累加雨量が似たような流域であっ た.また、この二つの流域面積も図-11 に示すように大 きな差がないことが分かる.それに対し、流域水収支分 布図では、総降雨量に対する総流出量の割合が大きく異

9/1 0:00 9/3 0:00 9/5 0:00 9/7 0:00 9/9 0:00 9/11 0:00 9/13 0:00 9/15 0:00

なり、簾舞川流域では降雨量に対し最終的に6割ほどし か豊平川へ流出していないものの、真駒内川流域では9 割ほどが流出しており、図-34の豊平川支川流域におけ る流出率の時間変化より分かる.これは、直接流出率で も同様であり、簾舞川の直接流出率は5割程度であるの に対し、真駒内川の直接流出率は7割ほどである.また、 簾舞川流域では、真駒内川流域に比べ地下水帯貯留量や 地下損失量の割合の増加が降雨に関わらず起きており、 図-35に示す2018年7月洪水時の豊平川支川流域での流 域水収支分布図からも2つの流域の流出の違いが明らか である. 簾舞川流域は降雨に対し鉛直浸透しやすく、第 三タンクにて貯留されやすい. 簾舞川流域と真駒内川流 域の河川近傍で行われたボーリングデータ<sup>注3</sup>より、岩

9/1 0:00 9/3 0:00 9/5 0:00 9/7 0:00 9/9 0:00 9/11 0:00 9/13 0:00 9/15 0:00



図-36 簾舞川流域と真駒内川流域の土層厚の比較

0

0.70

より上を土層厚とした際の各流域の土層厚を図-36 に箱 ひげ図として示しているが、簾舞川流域では真駒内川流 域に比べ平均的な土層厚が 1.5m ほど厚いことが分かる. そのため、この土層厚の厚さの違いが、パラメータの違 いとなり、流域水収支分布図に反映されているものと考 えられる.

0

流域治水は、各流域からの総流出量を時空間的に分析 し、豪雨の流出量のうちどの程度の量が河川施設によっ て流域外へ安全に排水されるのか、下流の河川改修状況 によっては河道で排水できないことから、水量の一部を どの時間帯に流域のどこに貯留させるのが望ましいのか、 流域全体の治水安全度が高くなるようにこれらの水量を 調節することにある.このためには、流域水収支分布図 を、本川の多地点で作成し、流入する各支川が本川にどの程度影響を及ぼしているのかを把握する.また、各支 川流域でどの程度の水量が貯留されているのか、貯留で きるのかを明らかにすることが大切である.そして、検 討している対策を考慮した流域水収支分布図を作成し、 対策の有無により水収支分布がどのように変化するかを 調べ、どの流域で対策を行うことが最も効果的かを流域 の関係者と議論し、対策を選択することが重要となる.

0.00

具体例として,豊平川流域での降雨分布に対する流域 水収支分布図の見方と利用例について示す.まず,流域 での貯留量に注目すると,図-37の貯留量に着目した流 域水収支分布図や,図-38の雁来地点より上流のどこで どの程度貯留しているのかについての時間変化が示すよ









本川への総流入量の時間変化

うに、洪水期間中のダム貯留量に着目すると、ピークで は表層貯留量のピークと匹敵するほどの効果があること が分かる.このような流域やダムでの貯留により、雁来 地点を流下した洪水ボリュームの傾きは緩やかとなり、 雁来地点のピーク流量が低減していることが分かる.こ のように水収支分布図は、貯留量等洪水ボリュームで治 水対策を検討する上で重要な情報を与えると同時に水収 支分布図の傾きが流量を表すことになり従来の流量ベー スでの治水対策の検討にも有効に使えることがわかる.

次に、流域から豊平川本川への流入量に注目する.本 研究では、本・支川を一体的に解析しているため、各支 川流域や本川の解析上流端から、豊平川本川へどの時間 にどのくらいの水量が流入したのかが得られている. そ のため、対象地点より上流域での総降雨量に対し、どの 流域からどの程度の量がどの時間に豊平川本川へ流入し, 洪水を形成したのかを流域水収支分布図を用いて議論す ることができる. 図-39 は石山地点より上流の各流域か ら豊平川本川への流入量に着目した流域水収支分布図を, 図-40 は雁来地点より上流の各流域から豊平川本川への 流入量に着目した流域水収支分布図を示す。また、石山 地点より上流の各流域から本川への総流入量の時間変化 を図-41 に、雁来地点より上流の各流域から本川への総 流入量の時間変化を図-42に示す.なお、各流域の色分 けは図-30に示す流域の色分けに対応する.まず、これ らの図より、2つのダムが降雨のピークである9月5日0 時から6時にかけて流出量の調節を行っていることが分 かる. すなわち, ピーク付近のダムからの総放流量が, 他の流域から本川への総流入量に比べ緩やかな勾配とな っており、放流量がこの時間では抑制され、効果的な洪 水調節が行われていることを示している.次に、石山地 点と雁来地点でこれらの図を比較すると, 豊平川中流右 岸流域からの流入量が雁来地点では石山地点に比べ増加 しており、特に雁来での洪水ピークであった9月6日6 時から9時頃の豊平川中流右岸流域から豊平川への総流 入量の傾きが大きくなっていることが分かる.これは,

中流域の支川の中で流域面積が最大である真駒内川が石 山地点と雁来地点の間で流入しており,この流域からの 流入が豊平川本川の洪水ピーク時に流入した結果,雁来 地点の洪水ピークに大きな影響を及ぼしていたためと考 えられる.このように,流入量に着目した流域水収支分 布図より流域の特性が,貯留量に着目した流域水収支分 布図より流域対策の効果が可視化できる.このため,流 域水収支分布図を多地点で作成することにより対策の選 択やその効果を分析することが可能となる.今後流域管 理や治水計画を適切に行うために,流域水収支分布図を 多面的,多層的に活用していくことが期待される.

### 9. 結論とまとめ

本研究で得られた結論を下記に示す.

- (1) 流域の上流まで観測された河川水面形に基づき求めた洪水流のハイドログラフに整合するように、 タンクモデルのパラメータを決め、流出解析を行うことで、豊平川支川流域での貯留・流出形態を 分析し、水収支分布を得た.
- (2) この水収支分布の算出法を活用することで、流域 での降雨分布を与条件とする降雨流出と洪水流の 一体解析を行い、本・支川の洪水流の流下機構を 再現した。
- (3) 本論文で示した解析手法は、流域を約3km<sup>2</sup>と小流 域に分割したこと、小流域と河道区間に分離した ことにより流出過程ごとに適した解析モデルを用 いていること、各小流域ごとに流域平均雨量を算 出しているため、細かい降雨分布を考慮している ことが特徴である.これらの特徴により別豪雨に て同定したパラメータを用いた場合であっても洪 水を概ね再現することが可能であるが、減水期も 含めた洪水全体を再現するにあたっては、土壌の 飽和状況など、流域の状況に応じた適切なパラメ ータの設定が重要となる.
- (4) 流域に降った豪雨が、いつ、どこに、どのような 量がどのような状態で存在しているかを把握でき る流域水収支分布図を、上記の解析結果を用いて 作成し、その活用方法を示した。

これまでの治水計画においても、本川中心に水収支的 な検討はされてきている.しかし、流域治水では、支川 規模や内水氾濫からみた水収支といった各スケールに応 じた水収支分布の検討が重要となる.本研究によって流 域スケールに応じた水収支分布を、多層的に比較検討す ることで、どの場所で対策を行うことが流域全体にとっ て効果的かを検討することが可能になる.

また,流域水収支分布図は,流域を構成する山地や地 形,地勢,降雨特性等流域のもつ自然特性を,水の動的 挙動に着目して表現する本質的な方法といえる.流域水 収支の考え方は,自然と人間との共生のあり方,流域の 環境保全や利用の在り方など,水を中心に据えた国土の 計画や国土の管理にまで活用が可能なツールとなり得, 気候変動下にあって大きな展開が期待される.

謝辞:本研究を進めるにあたり,豊平川流域のデータを 準備していただいた北海道開発局,北海道庁建設部河川 砂防課に謝意を表します.

## NOTES

注1) 国土交通省:「水害リスクライン」により身近な箇

所の危険度が明らかに, https://www.mlit.go.jp/report/ press/mizukokudo04\_hh\_000108.html (2024年3月29日 アクセス可)

- 注2) 国土交通省国土調査(土地分類調査・水調査), https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/ download (2024年3月29日アクセス可)
- 注3) 国立研究開発法人土木研究所:国土地盤情報検索サ イト KuniJiban, https://www.kunijiban.pwri.go.jp/viewer (2024年3月29日アクセス可)

## REFERENCES

- 木村俊晃:貯留関数法による洪水流出追跡法,土木 研究所, 1961. [Kimura, T.: Flood runoff tracking by storage function method, *Public Works Research Institute*, 1961.]
- 2) 菅原正巳:流出解析法,共立出版,1972. [Sugawara, M.: Runoff Analysis Method, Kyoritsu Shuppan, 1972.]
- 3) 吉野文雄,吉谷純一,堀内輝亮:分布型流出モデル の開発と実流域への適用,土木技術資料, Vol. 31-10, pp. 54-59, 1990. [Yoshino, F., Yoshitani, J. and Horiuchi, T.: Development of the distributed models for river basins, *Civil Engineering Journal*, Vol. 31-10, pp. 54-59, 1990.]
- 4) Troch, P. A., Paniconi, C. and Emiel van Loon, A. E.: Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response, *Water Resources Research*, Vol. 39 (11), 2003.
- 5) 立川康人,永谷言, 寶馨: 飽和・不飽和流れの機構 を導入した流量流積関係式の開発,水工学論文集, 第 48 巻, pp. 7-12, 2004. [Tachikawa, Y., Nagatani, G. and Takara, K.: Development of stage-discharge relationship equation incorporating saturated-unsaturated flow mechanism, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 48, pp. 7-12, 2004.]
- Kong, J., Shen, C., Luo, Z., Hua, G. and Zhao, H.: Improvement of the hillslope-storage Boussinesq model by considering lateral flow in the unsaturated zone, *Water Resources Research*, Vol. 52 (4), 2016.
- Sayama, T.: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Technical Manual, *Technical Note of PWRI*, No. 4277, Public Works Research Institute, 2014.
- 立川康人:降雨流出予測の最新技術,2011 年度(第 47回)水工学に関する夏期研修会講義集,土木学会 水工学委員会・海岸工学委員会,pp. A-2-1 - A-2-20, 2011. [Tachikawa, Y.: State-of-the-art Technology of Rainfall-Runoff Prediction, Lecture notes of the summer seminar on hydraulics, Committee on Hydroscience and Hydraulic Engineering and Coastal Engineering Committee, pp. A-2-1 - A-2-20, 2011.]
- 9) 小葉竹重機,石原安雄:タンクモデルおよび集中面 積図を利用した洪水流出モデルの総合化,土木学会 論文報告集,第 337号,pp. 129-135, 1983. [Kobatake, S. and Ishihara, Y.: Synthetic runoff model for flood forecasting, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 337, pp. 129-135, 1983.]
- 臼谷友秀,中津川誠,松岡直基:流域貯留量推定の ためのモデルパラメータの一般化に関する研究,土 木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 70, No. 4, pp. I\_355-I\_360, 2014. [Usutani, T., Nakatsugawa, M. and Matsuoka,

N.: Generalization of model parameters for evaluating basin-scale soil moisture content, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1, JSCE, Vol. 70, No. 4, pp. I\_355-I 360, 2014.]

- 11) 重枝未玲,秋山壽一郎,Adelaida Castillo DURAN,伊藤翔吾,林泰史:令和2年7月豪雨時の球磨川流域 を対象にした降雨流出・洪水氾濫プロセスの検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 78, No. 2, pp. I\_685-I\_690, 2022. [Shigeeda, M., Akiyama, J., Duran, A. C., Itou, S. and Hayashi, Y.: Investigation on Rainfall-Runoff and flood inundation process in the Kuma River basin during the heavy rainfall in July 2020, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1, JSCE, Vol. 78, No. 2, pp. I 685-I 690, 2022.]
- 12) 福岡捷二, 渡邊明英, 原俊彦, 秋山正人: 水面形の 時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイ ドログラフと貯留量の高精度推算, 土木学会論文集, No. 761/II-67, pp. 45-56, 2004. [Fukuoka, S., Watanabe, A., Hara, T. and Akiyama, M.: Highly accurate estimation of hydrograph of flood discharge and water storage in rivers by using an unsteady two-dimensional flow analysis based on temporal change in observed water surface profiles, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 761/II-67, pp. 45-56, 2004.]
- 福岡捷二,田端幸輔,出口桂輔:平成27年9月洪水 における鬼怒川下流区間の流下能力,河道貯留及び 河道安定性の検討,河川技術論文集,第22巻,pp. 373-378,2016. [Fukuoka, S., Tabata, K. and Deguchi, K.: Analysis of discharge capacity, river storage and riverbed stability in the Kinu River during 2015 Flood, Advances in River Engineering, Vol. 22, pp. 373-378, 2016.]
- 14) 見上哲章,水草浩一,西澤洋行,安達孝実,福岡捷 二:利根川上流域の本・支川を一体とした洪水流解 析一流域治水への活用に向けて一,木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 77, No. 2, pp. I\_427-I\_432, 2021. [Mikami, T., Mizukusa, K., Nishizawa, Y., Adachi, T. and Fukuoka, S.: The integrated flood flow analysis for the Tone River and its tributaries using observed water surface profiles, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1, Vol. 77, No. 2, pp. I\_427-I\_432, 2021.]
- 15) 立川康人,須藤純一,椎葉充晴,萬和明,キムスン ミン:粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測 手法の開発,土木学会論文集 B2(水工学), Vol. 67, No. 4, pp. I\_511-I\_516, 2011.[Tachikawa, Y., Sudo, J., Shiiba M., Yorozu, K. and Kim, S.: Development of a real-time river stage forecasting method using a Particle Filter, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1, JSCE, Vol. 67, No. 4, pp. I 511-I 516, 2011.]
- 16) 川崎将生,猪股広典:洪水予測の精度向上に向けた 技術検討~粒子フィルタの適用~,国総研レポート, 2014. [Kawasaki, M. and Inomata, H.: Technical study for improving the accuracy of flood forecasts—application of particle filter—, *Annual Report of NILIM*, 2014.]
- 17) 福岡捷二: 洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集、第 23 巻、pp. 251-256, 2017. [Fukuoka, S.: Creating an idea of integrated river plan due to the use of widespread water surface profiles of floods in river basins, Advances in River Engineering, Vol. 23, pp. 251-256,

2017.]

- 18) 石井優太朗,吉村俊彦,福岡捷二:石狩川下流域に おける支川群の洪水流出特性と本川洪水への影響, 河川技術論文集,第28巻, pp. 121-126, 2022.6. [Ishii, Y., Yoshimura, T. and Fukuoka, S.: Characteristics of tributary floods in the lower Ishikari River Basin and effects of tributary floods on the main river floods, *Advances in River Engineering*, Vol. 28, pp. 121-126, 2022.6.]
- 小谷哲也,後藤岳久,福岡捷二:斐伊川の降雨流 出・洪水流・土砂移動の一体解析法の開発と流域治 水に向けた活用,河川技術論文集,第 30 巻,pp. 453-458,2024. [Kotani, T., Gotoh, T. and Fukuoka, S.: Development of an integrated analysis method for rainfall runoff, flood flow and sediment transport in the Hii River and its application for basin-wide flood control, *Advances in River Engineering*, Vol. 30, pp. 453-458, 2024.]
- 福岡捷二:近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える、河川技術論文集、第28巻、pp. 457-462, 2022.

[Fukuoka, S.: Thinking about basin-wide flood control initiatives based on the recent large floods, *Advances in River Engineering*, Vol. 28, pp. 457-462, 2022.]

- 21) 国土地理院:平成25年2万5千分1地形図図式(表示 基準), pp. 7, 2004. [Geospatial Information Authority of Japan: Topographic Map of Japan 2013, 1:25,000 scale (display standard), pp. 7, 2004.]
- 22) 中井隆亮,須藤純一,福岡捷二:樹木群スケール, 河道スケールと樹木群透過係数の関係,河川技術論 文集,第16巻, pp. 431-436, 2010. [Nakai, T., Sutou, J. and Fukuoka, S.: The relationship between vegetation permeability coefficient, scales of vegetation and channels, *Advances in River Engineering*, Vol. 16, pp. 431-436, 2010.]

(Received May 7, 2024) (Accepted May 12, 2025)

# CREATION AND ITS APPLICATION OF BASIN WATER BALANCE MAP BASED ON COUPLING ANALYSIS OF RAINFALL-RUNOFF AND FLOOD FLOW

## Yutaro ISHII and Shoji FUKUOKA

It is required that the stakeholders work together to improve the balance between flow capacity and basin storage so that the flood control of the entire basin is increased. Therefore, it is necessary to analyze and visualize the relationship between water storage, infiltration, and runoff in a basin during heavy rainfall events. In this study, a coupling method of rainfall-runoff and flood flow analysis was developed to analyze flooding phenomena with rainfall as a given condition. Basin Water Balance Map showing the relationship between water storage, infiltration, and runoff in a basin is developed, and its application to flood control in a basin is examined. Specifically, we developed an analysis method that combines a tank model, which is a rainfall-runoff analysis method, and flood flow analysis, and applied it to the Toyohira River to demonstrate the usefulness of this analysis method and to show how the Basin Water Balance Map can be used.