

流域水循環に基づく貯留量を考慮した洪水流出計算の研究

Research on Flood Runoff Calculation Considering Water Storage Amount Based on Hydrologic Process in Watersheds

室蘭工業大学 ○学生員 谷口 陽子 (Yoko Taniguchi)
 室蘭工業大学 正 員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 (一財) 日本気象協会 正 員 臼谷 友秀 (Tomohide Usutani)

1. はじめに

洪水流出計算の精度に着目すると、ある条件下では再現性が良いものが、事例が変わると途端に精度が落ちる例がよく見られ、河川管理者を悩ませてきた。例えば、先行雨量が多い場合や融雪期では少量の降雨であっても予想を超える大規模な出水に至るケースや、雨の降らない日が長く続いた後ではまとまった雨が降っても思ったほど出水しないケースが見られる。これらは、流域の乾湿状態が流出現象に大きく関与していることを表しており、このことを考慮しなければ普遍性のある洪水計算は難しいと考える。また、流出モデルを考える際、その洪水の最中だけの降雨量だけでなく出水前から出水中にかけての土壌湿潤状態を適切に与える必要があると考える。しかしながら現在現業化されている洪水流出計算システムでは、特定のケースのみの降雨と流出の関係に基づいてモデルパラメータが設定されているため、同一流域であっても異なる事例をあてはめると精度が悪化することがある。

そこで本研究では、現業での洪水流出計算の精度向上を目的に、以下の検討を行った。

- 1) 流域の長期水循環から、流域土壌の湿潤状態を表す「流域貯留量」を求めた。
- 2) 「流域貯留量」に応じて随時変化する流出率を導入することで、土壌水分の状態を考慮した洪水流出計算モデルを提案し、洪水流出量の再現精度向上を試みた。

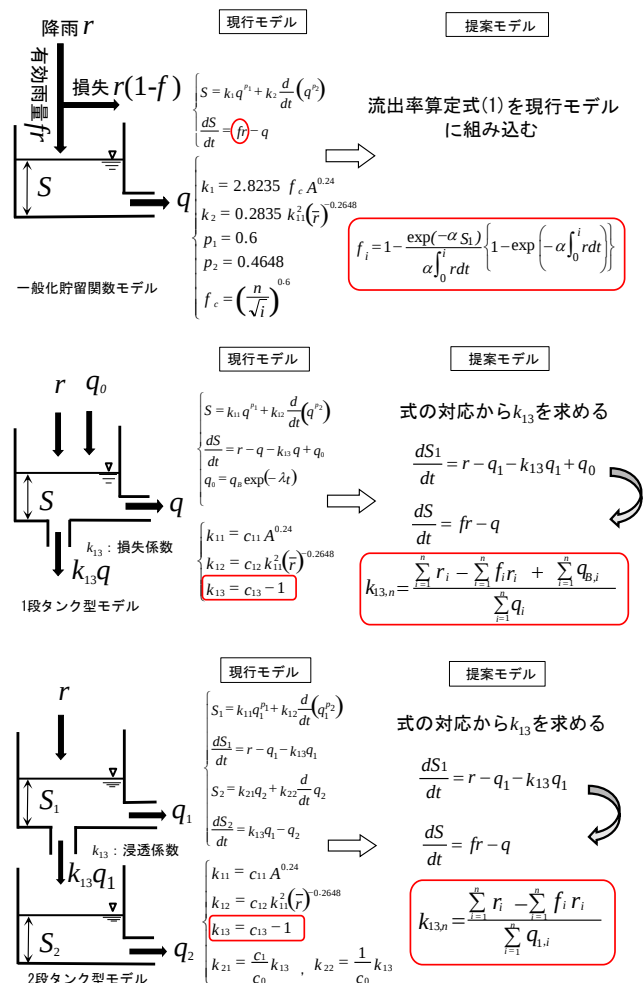
2. 方法

2.1 現行モデル

主に北海道開発局の現業部門で用いられている洪水流出計算モデルは、星ら¹⁾が提案した「一般化貯留関数モデル」、「1 段タンク型貯留関数モデル」及び「2 段タンク型貯留関数モデル」の3つである。これらを以下「現行モデル」と称し、図-1 に基本式を記す。

現行モデルは流出過程の非線形性を比較的簡単な構造式で表すことができ、河川の洪水予測や洪水時のダム操作のための貯水池流入予測に用いられている。また、1 段タンク型貯留関数モデルや2 段タンク型貯留関数モデルは、有効雨量を必要とせず、観測雨量をそのまま使用できるという特徴があり、流出解析の前処理として必要とされていた基底流量の分離作業や流出率を決めるといった作業を必要としない。

しかしながら、現行モデルではパラメータの設定を事



ここで、 S : 貯留高(mm), S_1 : 1段タンク貯留量(mm/h), S_2 : 2段タンク貯留量(mm/h), q : 表面流出高(mm/h), q_0 : 基底流出高(mm/h), q_B : 初期流出高(mm/h), q_1 : 表面流出高(mm/h), q_2 : 中間・地下水流出高(mm/h), r : 観測雨量(mm/h), $\bar{r}$: 平均有効雨量強度(mm/h), f : 流出率, n : 等価粗度(s/m^{1/3}), i : 平均斜面勾配, A : 流域面積(km²), k_1 , k_2 , k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_2 , p_1 , p_2 : モデルパラメータ, c_{11} , c_{12} , c_{13} : モデル定数, c_0 , c_1 : 定数, λ : 減衰係数

図-1 現行モデルと提案モデルの相違

例ごとに行うことは難しく、事例が変わると精度が悪化する場合がある。また、北海道内では近年の気候変動による夏季の大雨洪水の増加や、融雪期の予想をはるかに超える大規模な出水に至るケースが続出している。このような洪水流出計算の再現性を向上するには単に洪水時の降雨と流出の関係のみならず長期水循環を考慮した土壌の湿潤度を評価できるモデルが必要と考える。

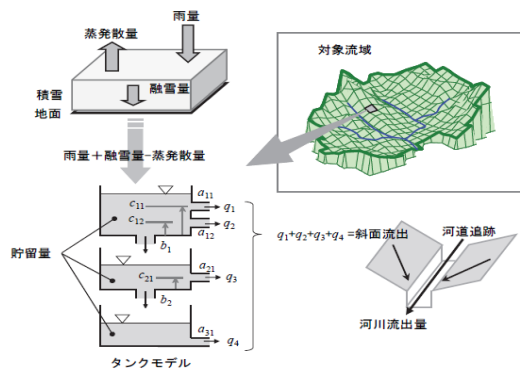


図-2 LoHAS のイメージ図

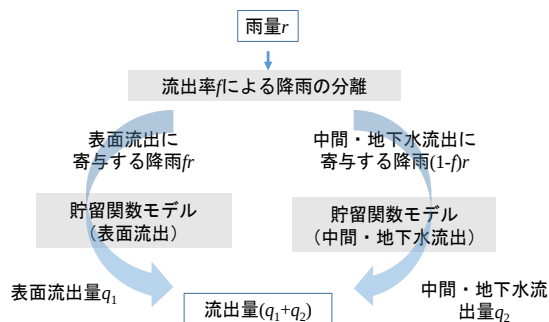


図-3 流出モデルのイメージ図

2.2 長期水循環モデル (LoHAS)

現行モデルでは再現できない流域の乾湿状態を考慮したモデルで推算する。流域の乾湿状態を表す「流域貯留量」は長期水循環から求めることができ、この推定を行うモデル（口澤ら²⁾，臼谷ら³⁾）を Long-term Hydrologic Assessment model considering Snow processes（以下、LoHAS）と称する。

LoHAS では、日単位の地上気象データ（降水量、気温、日射量、風速、相対湿度）から約 1km 四方のメッシュ毎の降雨量、融雪量および蒸発散量が得られる。降雨量と融雪量の合計から蒸発散量を差し引き、それをタンクモデルに入力することでタンクモデルの貯留高を算出する。これを各メッシュの土壌水分の状態を表す変数（流域貯留量と称する）とする（図-2）。

流域貯留量の推定結果については臼谷ら³⁾ が検証しており、LoHAS は土壌が貯留する水量を定量的に表すことができることを示している。

2.3 流域貯留量を考慮した流出モデル（提案モデル）

次に流域貯留量を考慮した流出率の算定方法と流出モデルについて説明する。山田ら⁴⁾ は、次式に示す流域の保水能を考慮した流出率の算定方法を提案している。この方法では、初期水分量と累加雨量から流出率が算出される。

$$f_i = 1 - \frac{\exp(-\alpha S_1)}{\alpha \int_0^i r dt} \left\{ 1 - \exp\left(-\alpha \int_0^i r dt\right) \right\} \quad (1)$$

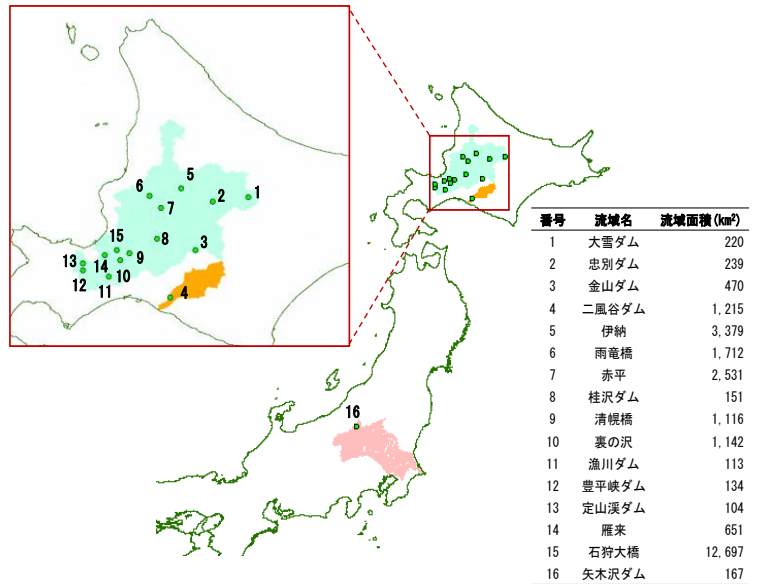


図-4 対象流域位置と流域面積

ここで、 f_i は降雨開始 i 時間後の流出率、 S_1 は降雨開始前日の流域貯留量（1 段目タンクの貯留高）（mm）、 r は雨量強度（mm/h）である。また、 α はパラメータ（1/mm）で、ハイドログラフの再現性から流域毎に与えられる。なお、ここでの初期水分量は表層土壌を対象にしていることから、本研究では式(1)の初期貯留量 S_1 には表層土壌に対応するものとして 1 段目タンクの貯留高を与えた。

以上の流出率算定式で得られた流出率を観測雨量に乘じ、それを表面流出量に寄与する雨量（有効雨量）とし、残りを中間流出及び地下水流出量に寄与する雨量とした。このように分離したそれぞれの雨量を別々の貯留関数モデル³⁾ に入力して流出量を算出し、その合計を全流量とした（図-3）。ここでは現業レベルでの汎用性を鑑み、導入実績のある以下の 3 つの現行モデルに式(1)を組み込むことで流域貯留量を考慮したモデルを提案する（図-1）。新たに LoHAS の結果を導入した流出モデル（以下、提案モデル）の内容を以下に示す。

(1) 一般化貯留関数

提案モデルでは流出率 f の算定式(1)を組み込むことで時間毎に変化する流出率を使用する。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようにする。

(2) 1 段タンク型貯留関数モデル

提案モデルでは刻々と変化する流出率 f を損失係数 k_{13} に換算して浸透効果を変化させる。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようにする。

(3) 2 段タンク型貯留関数モデル

提案モデルでは刻々と変化する流出率 f を浸透係数 k_{13} に換算して浸透効果を変化させる。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようにする。

2.4 対象流域・事例

対象流域は、北海道流域を基本とし本州 1 流域を含めた全 16 流域とする（図-4）。また、1 流域につき洪水事例を 7 つ選定し、合計 112 事例の検証を行った。

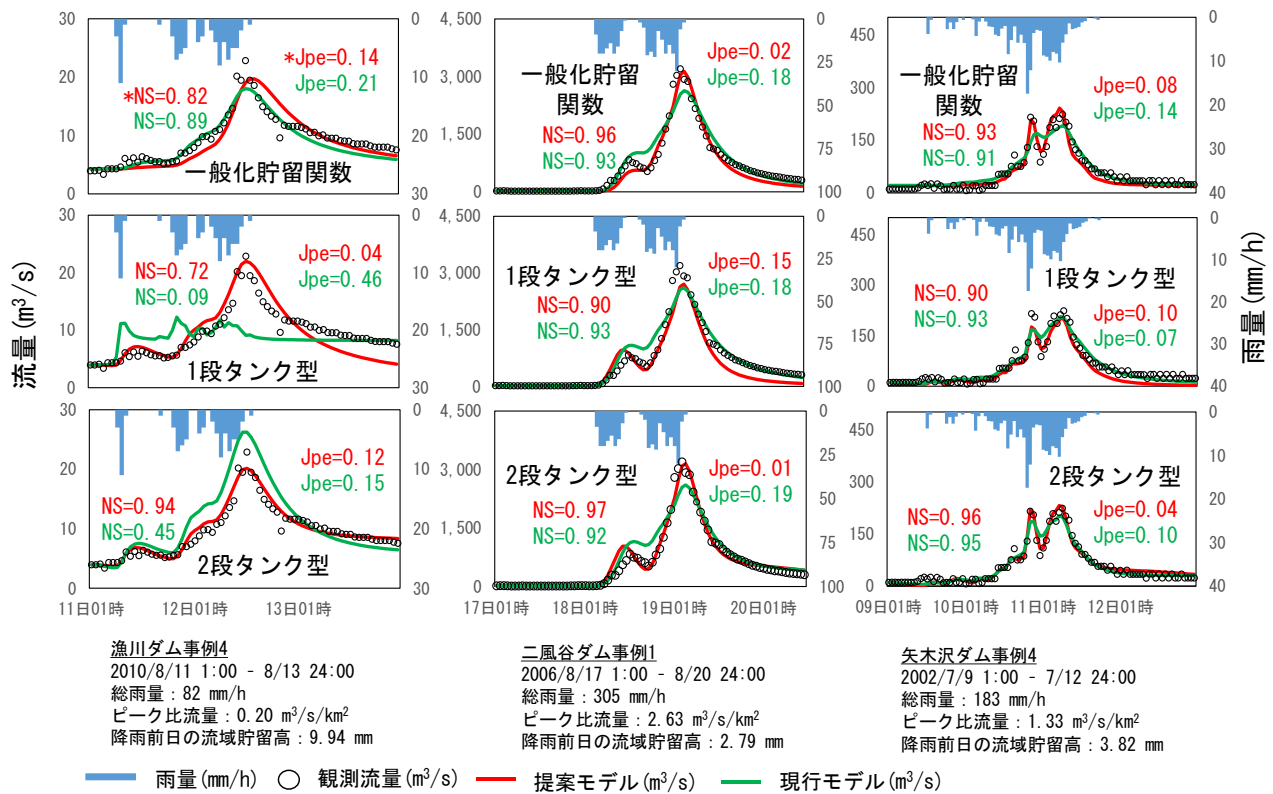


図-5 現行モデルと提案モデルの洪水再現結果

表-1 現行モデルと提案モデルの再現精度

(上: NS 係数計算結果, 下: Jpe 計算結果)

3. 結果と考察

3.1 再現性の検証

現行モデルと提案モデルによる流出再現の比較を行った(図-5)。精度指数は Nash-Sutcliffe 指数(以下, NS 係数), ピーク流量相対誤差(以下, Jpe)の2つを用い, それぞれを次式で求めた。計算結果を表-1 に示す。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{oave})^2} \quad (2), \quad Jpe = \frac{|q_{op} - q_{cp}|}{q_{op}} \quad (3)$$

ここで, q_{oi} は降雨開始 i 時間後の観測流出量(m³/s), q_{ci} は降雨開始 i 時間後の計算流出量(m³/s), q_{oave} は観測流出量平均(m³/s), q_{op} は観測ピーク流出量(m³/s), q_{cp} は計算流出量(m³/s), N は総降雨時間数である。

図-5 より漁川ダム事例4では, 1段タンク型モデルにおいて提案モデルは現行モデルよりも精度が向上していることが分かる。また, 2段タンク型モデルにおいては現行モデルの過大評価に比べ適切なピーク流量値が算定されている。また, 二風谷ダム事例1では全モデルにおいて現行モデルの過小評価を改善できているとともに, ピーク流量への立ち上がりの再現精度も向上した。唯一の本州事例である矢木沢ダムでも, ピーク比流量が比較的大きな事例4において2山目のピーク流量や立ち上がりを精度良く再現できている。

流域	一般化貯留関数		1段タンク型		2段タンク型	
	現行モデル	提案モデル	現行モデル	提案モデル	現行モデル	提案モデル
赤平	0.87	0.82	0.90	0.81	0.83	0.85
伊納	0.87	0.81	0.89	0.54	0.84	0.83
石狩大橋	0.86	0.84	0.91	0.71	0.76	0.82
雨竜橋	0.86	0.86	0.84	0.54	0.84	0.71
裏の沢	0.92	0.88	0.94	0.87	0.93	0.90
清幌橋	0.79	0.78	0.89	0.66	0.88	0.84
雁来	0.88	0.89	0.90	0.79	0.90	0.84
大雪ダム	0.84	0.82	0.85	0.73	0.85	0.86
忠別ダム	0.79	0.68	0.79	0.41	0.70	0.53
金山ダム	0.84	0.78	0.74	0.75	0.62	0.86
桂沢ダム	0.77	0.74	0.90	-0.01	0.85	0.32
漁川ダム	0.71	0.63	0.54	0.51	0.61	0.71
定山溪ダム	0.91	0.87	0.91	0.65	0.95	0.82
豊平峡ダム	0.85	0.85	0.85	0.88	0.91	0.91
二風谷ダム	0.93	0.93	0.94	0.83	0.95	0.96
矢木沢ダム	0.89	0.88	0.92	0.91	0.94	0.92
平均	0.85	0.82	0.86	0.66	0.84	0.79

流域	一般化貯留関数		1段タンク型		2段タンク型	
	現行モデル	提案モデル	現行モデル	提案モデル	現行モデル	提案モデル
赤平	0.14	0.17	0.14	0.20	0.10	0.18
伊納	0.14	0.08	0.14	0.27	0.08	0.11
石狩大橋	0.13	0.15	0.10	0.25	0.14	0.14
雨竜橋	0.06	0.06	0.06	0.21	0.05	0.10
裏の沢	0.08	0.08	0.05	0.10	0.04	0.06
清幌橋	0.14	0.10	0.14	0.25	0.12	0.18
雁来	0.27	0.21	0.29	0.33	0.27	0.28
大雪ダム	0.17	0.10	0.19	0.22	0.16	0.16
忠別ダム	0.25	0.22	0.23	0.37	0.23	0.33
金山ダム	0.13	0.09	0.09	0.12	0.17	0.10
桂沢ダム	0.10	0.12	0.14	0.19	0.11	0.17
漁川ダム	0.16	0.16	0.23	0.17	0.19	0.16
定山溪ダム	0.19	0.18	0.18	0.26	0.15	0.23
豊平峡ダム	0.26	0.19	0.28	0.27	0.22	0.23
二風谷ダム	0.12	0.06	0.15	0.19	0.12	0.08
矢木沢ダム	0.09	0.13	0.07	0.06	0.05	0.07
平均	0.15	0.13	0.16	0.22	0.14	0.16

*数値は各流域7事例の平均値

表-2 ピーク比流量が大きな事例の NS 係数比較

流域・事例番号	ピーク比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	一般化貯留関数		1段タンク型		2段タンク型	
		現行	提案	現行	提案	現行	提案
矢木沢ダム1	6.66	0.90	0.90	0.92	0.95	0.94	0.95
矢木沢ダム2	3.59	0.91	0.91	0.94	0.95	0.97	0.96
忠別ダム1	2.98	0.96	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97
二風谷ダム1	2.79	0.93	0.96	0.93	0.90	0.92	0.97
豊平峡ダム1	3.98	0.85	0.85	0.91	0.93	0.94	0.95
平均	4.00	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96

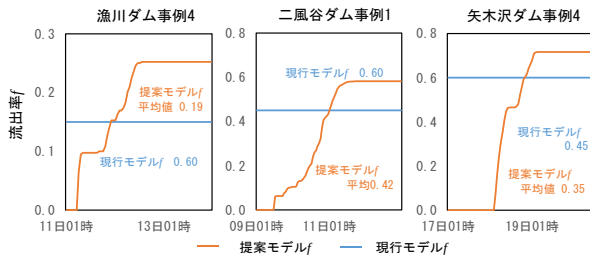


図-6 現行モデルと提案モデルの流出率 f の比較

しかしながら、全 112 事例を総括すると全体の精度が向上したとは言えない。NS 係数の平均値を比較すると 3 つのモデルとも現行モデルの方が良いという結果が得た。また、Jpe に関しては、一般化貯留関数では提案モデルの方が精度はよいが、1 段タンク型、2 段タンク型の精度は低下している。このことは、提案モデルに改善の余地があることを表しており、具体的にはパラメータと流域貯留量の関係性についてさらなる検討が必要である。ただし、表-2 に示すようにピーク比流量が 2 以上の比較的大規模な洪水事例に着目すると、提案モデルの方が流出量の再現性が良いことが確認できる。

3.2 流出率と流域貯留量の考察

提案モデルの特徴の 1 つは流出率を逐次変化させていることである。今回の提案モデルにおいて現行モデルよりも精度が良い事例でそれぞれの流出率を比較した。図-6 より提案モデルの流出率は、ピーク流出に合わせて流出率もピーク値になりその時々刻々の土壌の状態を考慮した流出率が求められたことを表している。よって現行モデルで一定値として設定されている流出率よりも、流域貯留量によって随時変動する流出率の方が精度が良くなると考えられる。

また、提案モデルのもう 1 つの特徴は、土壌水分量の初期状態として流域貯留量を考慮していることである。図-7 に示すように同一流域において洪水前日の流域貯留量が小さい事例と大きい事例を比較したところ、両者とも現行モデルより精度が向上していることが確認できる。また、ピーク流量時の立ち上がりに着目すると、洪水前日の流域貯留量が小さい場合には、現行モデルよりも遅く立ち上がり、大きい場合には、現行モデルよりも早く立ち上がっている。この結果より、特に先行雨量が多い場合、すなわち土壌が湿潤している場合に安全側の評価が可能であることを示している。

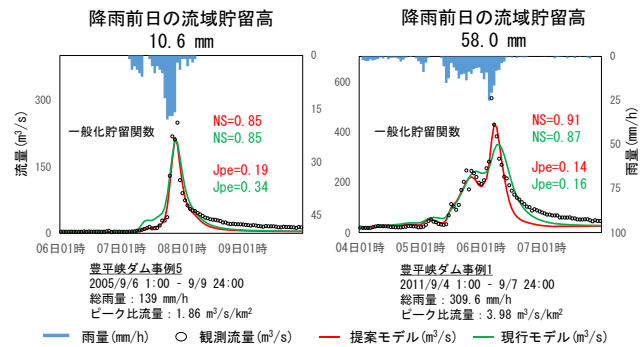


図-7 同一流域での流量貯留量の大小事例による比較

4. まとめ

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 長期水循環計算を通し流域貯留量を含む一連の水文諸量を包括的に推定した。
- 2) 流域貯留量に基づいて変化する流出率を組み込んだ提案モデルでは、流出率固定の現行モデルよりも流出量の再現性の向上が期待できる。
- 3) 全 16 流域 112 事例で精度検証したところ、提案モデルで NS 係数や Jpe の精度は全てで向上していないが、大規模洪水事例に着目すると向上がみられる。
- 4) 同一流域において洪水前の流域貯留量が多い場合はピーク流量への立ち上がりが現行モデルよりも早く、小さい場合は立ち上がりが遅いことが分かった。この結果から、土壌水分の状態に応じた洪水流出計算の改善が可能であることが示唆された。

今後は地質等流域の特性に応じた流域貯留量と流出率に関係性を見出し、洪水予測について更なる検討を推し進めていくつもりである。

謝辞：本研究の一部は国土交通省河川砂防技術研究開発公募（水防災技術分野）および H26 年度（一財）河川情報センター研究助成金（助成研究名「流量データのない河川でも利用可能な流出計算ソルバーの開発」）の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、独立行政法人水資源機構沼田総合管理所、ならびに、（一財）日本気象協会からデータ提供等で協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) (財) 北海道河川防災研究センター・研究所：実践流出解析ゼミ 講義テキスト編、第 4 回、第 12 回、2006。
- 2) 口澤寿，中津川誠：熱収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散量の推定，北海道開発土木研究所月報報文，No.588，pp.19-38，2002。
- 3) 臼谷友秀，中津川誠，松岡直基：流域貯留量を考慮した現業用洪水予測手法の改良，河川技術論文集，第 20 巻，pp.331-336，2014。
- 4) 山田正，山崎幸二：流域における保水能の分布が流出に与える影響について，第 27 回水理講演会論文集，pp.385-392，1983。