

58. 米代川流域における分布型流出モデルのピーク流量誤差原因の評価

高 雷^{1*}・風間 聡¹・小森 大輔²

¹東北大学大学院工学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

²東北大学大学院環境科学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

* E-mail: gao@kaigan.civil.tohoku.ac.jp

気候変動や温暖化によって、豪雨や異常気象が近年続き、日本全国で洪水被害をもたらしている。洪水被害の低減策の面において、河川流量の推定が極めて重要であると言える。多くの河川流量推定において、分布型流出モデルが主に用いられている。しかし、依然としてピーク流量に大きく誤差が生じることがある。

本研究では、流量誤差となる要因を検証した。重回帰分析により、ピーク流量に対して山岳部を含む上流地域に比べ、下流地域の近傍の観測精度が重要であること、また、冬季においては気温分布の影響度大きいことが判明した。

Key Words : AMeDAS, Evapotranspiration, Multiple Regression Analysis, ROS, Sensitivity Analysis

1. はじめに

日本は世界的にも有数な水に恵まれた国である。降雨・降雪により河川に流出した水は下流地域において大変重要な水資源となっている。ところが、水資源に恵まれている半面、洪水の危険性がある。洪水には、台風や前線に伴う大雨に起因するものが考えられる。これに加え、豪雪地帯の河川には融雪洪水がある。融雪洪水とは、急激な昇温による融雪に、降雨が重なり生じるものである。近年では気候変動により豪雪や気温の異常上昇など、極端現象が生じ、大規模な融雪洪水が発生する可能性が十分に考えられる。

豪雨や融雪に起因する出水に関し、分布型流出モデルを利用した研究は多くなされてきた。特に豪雨に起因する洪水予測に関する研究は数多く報告されている(山本ら¹⁾、檜山ら²⁾。一方、融雪に起因する洪水予測に関する研究では、小池ら³⁾は、降水、日射量、気温などのデータを用いた融雪洪水モデルを提案し、その有効性を示した。柏ら⁴⁾は同化手法を用いて積雪量の補正を行い融雪出水モデルの精度を向上させた。甲山ら⁵⁾はDegree Hour法を改良したTemperature Index 法を用いた融雪出水モデルで融雪洪水の再現計算を行った。

数多くの研究がなされるも未だピーク流量の精度に問

題があり、治水上大きな問題である。そこで本研究では、分布型流出モデルに対し、豪雨・融雪出水の両面において分布型流出モデルの精度に最も影響与える因子を特定することを目的とし、蒸発散、降雨の地域特性、融雪出水への気象要素の影響に着目した。

2. 対象地域・データセット

対象地域は秋田県北部に位置する米代川流域である。水源は中岳および八幡平から発し幹川流路延は136km、流域面積4100km²の一級河川である(図-1)。

解析に使用した標高データ、年間積雪深は国土数値情報から、気温データ、降水量データ、風速データは地域気象観測(AMeDAS:Automated Meteorological Data Acquisition System)データから、日照時間は国立天文台データから取得した。さらに流域の流量の比較のため観測流量データを水文水質データベースより取得した。流域内には4つの流量観測点(十二所、鷹巣、米内沢、二ツ井)と、12つの AMeDAS 観測点がある。利用した観測点は、図-1に示している5つの AMeDAS 観測点である。

3. 流出計算

流出解析は斜面部の流出成分を直接流出と基底流出に分け、直接流層をマニング則に基づいたkinematic wave法を、基底流層は貯留関数法を用いて算出した。河道部はkinematic wave法を用いて算出した。

(1) kinematic wave法

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = (r_e + SM)B \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{n} B h^{5/3} I^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 A は流水断面積(m^2)、 B はメッシュ幅(m)、 Q は流量(m^3/s)、 r_e は効降雨量(m/s)、 t は時間(s)、 x は流下方向の距離(m)、 h は水深(m)、 n はマニングの粗度係数($m^{1/3} \cdot s$)、 I は流路勾配である。

(2) 貯留関数法

$$\frac{ds}{dt} = r' - q \quad (3)$$

$$s = kq^p \quad (4)$$

ここで、 s は見かけの貯留高(m)、 r' は浸透量(m/s)、 q は基底流の流出高(m/s)、 k 、 p はモデル定数($k=150.0$ 、 $p=0.5$)である。浸透量 r' は以下の式により求めた。

$$r' = k_a \times h \quad (5)$$

ここで k_a はモデル定数($k_a=5.55 \times 10^{-16}$)である。

(3) 蒸発散:Hamonの式

本研究では夏季に蒸発散現象が盛んに生じることから流量計算にHamon式を導入した。

$$E_p = 0.14 D_0^2 p_t \quad (6)$$

ここで、 P_t : 月平均気温に対する飽和絶対湿度(gm/m^3)、 E_p : 日平均蒸発散能(mm/day)、 D_0 : 日照時間($12h/day$ を1とする)である。Hamon式は月平均気温と日照時間から蒸発散能すなわち可能最大蒸発散量を与える式である。

(4) 推定精度評価

推定流量の再現性を検討するために誤差評価関数として、Nash-Sutcliffe係数を用いた。Nash-Sutcliffe係数の式を以下に示す。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N'} (Q_{oj} - Q_{sj})^2}{\sum_{j=1}^{N'} (Q_{oj} - N' \sum_{j=1}^{N'} Q_{oj})^2} \quad (7)$$

ここで、 Q_{oj} は j 時間目の実測流量(m^3/s)、 Q_{sj} は j 時間目の推定流量(m^3/s)、 N' は解析した時間数、 ε はNash-Sutcliffe係数である。値が1.0に近いほど観測値と計算値の適合度が近いことを表し、一般には0.8程度を超えていれば良好な再現結果が得られたものと判断される。本研究で用いた流出計算モデルの年間の流量予測結果は概ね0.8であり、精度は良いと言える(図-2)。

4. 重回帰分析

重回帰分析手法として1項目ずつ説明変数を選択し、その際に説明変数間の多重共線性(multi-collinearity)を判定し、互いに独立な説明変数のみを重回帰モデルに取り入れる手法であるステップワイズ法を採用し、重回帰モデルを構築した。説明変数を取捨選択するステップワイズ法に用いるF値有意確率は、モデルに組み込む場合に $F=0.4$ 以下、モデルから除外する場合に $F=0.5$ 以上とした。また、構築された重回帰モデルの危険値 p が0.05以下になることに加えて、多重共線性の発生有無を判断するた



図-1 米代川流域

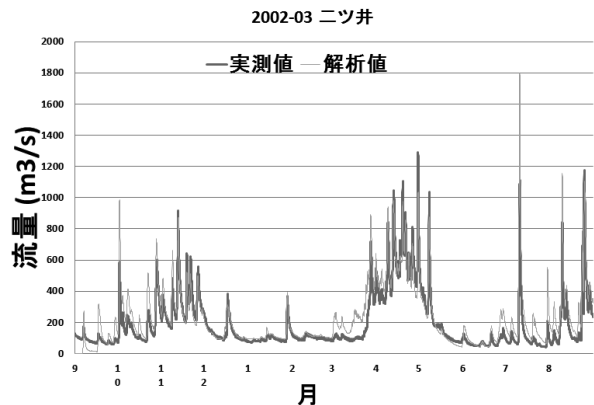


図-2 流量予測(二ツ井)

めの指標であるVIF (Variance Inflation Factor)が5以下となる場合をモデルとして採用した。

5. 結果

(1) 蒸発散

流出解析モデルの植物による蒸散と、水面における蒸発を考慮した蒸発散の計算を導入した。予測結果、各年（2002～2007年）のNash-Sutcliffe係数の変化を表-1に示す。一部精度が改悪している点もあるが、いずれの年においても全体的には精度改善が見られ、蒸発散の導入により流出解析精度の向上に繋がったと判断できる。特に上流に位置する十二所では、いずれの年においても最も改善されており、蒸発散の影響が大きいことが示唆された。例えば、2002年の場合、夏季（6月から11月）の日蒸発散平均量は1.8mm/dayであり、冬季（12月から5月）の場合は0.99mm/dayであり、時間流量換算すると86m³/sおよび47m³/sであった。蒸発散の精度による流量推定への影響は、最大でおよそ100m³/s前後であると考えられる。したがって、瞬間的なピーク流量予測への影響度は小さいと考えられるが、長期間における流量予測では無視できないと考えられる。

(2) 降雨の地域特性

AMeDAS観測地点ごとのピーク流量誤差への影響度を特定するため、2002年～2004年で重回帰分析を行った。各降雨イベント時の推定ピーク流量を観測ピーク流量で除したピーク流量差を目的変数とした。下流の流量観測点である二ツ井および、中流の流量観測点である鷹巣の流量を目的変数とした。説明変数には各AMeDAS観測値とした。

目的変数を二ツ井地点の流量観測値と推定値の差分とした分析結果(表-2)では、鷹巣のAMeDAS観測値の影響力が高い結果となった。これにより、全観測地点中において鷹巣地点の雨量が、最も下流の二ツ井観測地点のピーク流量推定誤差への影響が大きいことが示唆された。一方、目的変数を鷹巣地点の流量観測値と推定値の差分とした分析結果(表-3)では、能代のAMeDAS観測値の影響力が高いことが示唆された。これまでの研究の通説で

は、上流（山岳部）における降雨誤差が最も下流におけるピーク流量誤差への影響が大きいとされてきたが、本研究から流量観測地近傍の降雨誤差がピーク流量誤差への影響が大きいことが示され、推定対象地域近傍の降水分布の精度が流量予測に重要であると示唆された。この原因としては、上流部の降雨誤差による流量誤差が、流下と共に時間的分散が生じ、下流に到達時には流量誤差が小さくなっていると考えられる。一方、流量推定地点付近における降雨誤差は、流量推定地点までに要する流下時間・距離が短いため、降雨誤差がそのまま流量誤差と表れてしまうと思われる。

(3) 融雪出水への気象要素の影響

ここでは、融雪期に着目し、気象要素（気温・降雨量・積雪量）の流量推定への影響度を評価する。融雪出水は、降雨量に加え、積雪量、気温が大きく流量へ影響を与える。分布型流出モデルに対して感度分析を行い、それぞれの気象要素がどの程度流量へ影響を与えるのかを求めた。

a) 対象時期

国土数値情報から得た平年的な積雪に最も近く、降雨を伴った2004年3月17～18日の融雪出水を分析対象とした。流域内の平均日最高気温は16.7℃、平均日最低気温は-1.3℃。降雨規模はそれぞれ、流域平均総雨量、降雨強度、標準偏差、発生確率が、31.6mm, 2.8mm/h, 1.5, 1.4ヶ月である。降雨期間中の最大流量は1855m³/sであった。流域内の3月平年日最高気温は5.8℃、3月平年日最低気温は-2.8℃であることから、この日は非常に気温の高い日であったと言える。

表-2 重回帰分析結果(二ツ井)

目的変数	モデル	変数	標準化係数	決定係数	VIF
二ツ井	1	(定数)		-1.707	
		鷹巣	.858	5.278	1.000
	2	(定数)		1.025	
		鷹巣	.976	5.908	1.221
		鹿角	-.278	-1.681	1.221

表-3 重回帰分析結果(鷹巣)

目的変数	モデル	変数	標準化係数	決定係数	VIF
鷹巣	1	(定数)		3.395	
		能代	.805	4.297	1.000
	2	(定数)		-1.616	
		能代	1.041	5.257	1.487
		鷹巣	.412	2.080	1.487

表-1 各地点のNash-Sutcliffe係数

	二ツ井	鷹巣	米内沢	十二所
2002-2003	0.87(+0.09)	0.77(+0.21)	0.8(+0.01)	0.57(+0.34)
2003-2004	0.8(+0.06)	0.8(+0.26)	0.58(-0.04)	0.5(+0.62)
2004-2005	0.91(-0.03)	0.92(+0.07)	0.79(-0.01)	0.81(+0.24)
2005-2006	0.89(+0)	0.86(+0.28)	0.86(+0)	0.74(+0.48)
2006-2007	0.62(+0.07)	0.64(+0.25)	0.47(+0.06)	0.55(0.25)

b) 感度分析

感度分析は入力値である気象要素を次の様に変化させた。気温は+1℃と+2℃、降雨量と積雪量に関してはそれぞれ 25%、50%、75%増しし、計算を行った、その際の二ツ井地点の流量変化への影響度を算出した。その結果を表-4 に示す。気温 1℃上昇当たり流量へ 160m³/s の影響を与えることが分かる。また、気温の 2℃上昇では 341m³/s、降雨量の 25%増が 330m³/s の流量への影響を示し、気温 2℃上昇と降雨量の 25%増(7.9mm)が同程度の影響力があるということが示唆された。また、気温や降雨量と比べて積雪量は流量への影響度が極めて小さい。これは、山脈が急勾配であるため、降雪の標高依存性により、山岳部の積雪量増加分に対し積雪面積が大きくなるためだと考えられる。

以上の結果より、通年の積雪量推定の誤差はピーク流量誤差に大きく影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。融雪期の気温の精度は降雨量と同程度に流量へ影響し、降雨分布同様に気温分布の精度が重要となっている。

6. まとめ・結論

流量推定の誤差を与える要因として、豪雨出水には蒸発散量、観測地点を、融雪出水に対しては気温分布、積

雪量を挙げ、それぞれに関して流量推定への誤差検証を行った。その結果、蒸発散は瞬間的なピーク流量への影響度は小さいと考えられる。また、重回帰分析より、降雨推定による誤差が大きく出る地点との精度と流量推定地点の距離が流量推定精度と大きく関連性があることが示された。一方、冬季においては、気温の2℃上昇の影響度は総降雨量の7.9mm増と匹敵し、流量へおよそ330 m³/s影響を及ぼすことが判明した。

以上より、降雨分布の精度向上が最も推定誤差の是正に重要であり、その中でも中流域の精度が重要であると言える。一方、冬季においては降雨強度が大きくなるとも、気温が高い時は流量が大きい。これは、言い換えると、冬季においては気温分布の精度向上が降雨分布に匹敵もしくは、それ以上に流量推定の是正に重要だと言える。今後の課題として、降雨分布の精度および、気温分布の精度を上昇させる方策が必要である。

謝辞：本研究は、三井共同建設コンサルタントおよび科学研究費補助金（25241024、代表：竹門康弘）、東北地域づくり協会の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 山本好克・丸井信雄 1995. 山地河川流域における洪水流出解析. 水工学論文集 Vol.39:13-18.
- 2) 檜山航平・立川康人・キムスンミン・萬和明・椎葉充晴 2013. 分布型流出モデルを用いた熊野川における既往最大級の洪水の再現性の分析. 研究発表会要旨集22.
- 3) 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一 1985. 融雪量分布のモデル化に関する研究. 土木学会論文集 第 363 号/II 4:165-174.
- 4) 柏俊輔・朝岡良浩・風間聡 2012. 同化手法を用いた流出解析による山岳域の積雪分布推定. 土木学会東北支部論文集.
- 5) 甲山治・佐原将史・寶 馨 2009. 分布型流出モデルを用いた融雪洪水の再現計算. 京都大学防災研究所年報 52(B):67-7.

表-4 気象要素ごとの感度分析結果

		最大流量(m ³ /s)	差(m ³ /s)
観測値		1855	
気温	+1℃	2016	161
	+2℃	2196	341
降雨量	125%	2186	331
	150%	2544	689
	175%	2918	1063
積雪量	125%	1903	48
	150%	1932	77
	175%	1933	78