第II部門　　地下水スキームを導入した陸面過程モデルによる河川流量推定の精度評価

京都大学大学院工学研究科　学生会員　○多田伊織
京都大学防災研究所　正会員　萬 和明
京都大学大学院工学研究科　フェロー会員　立川康人

1　序論　水資源管理を行うためのモデルは洪水と渇水の両方を良好な精度で推定できることが望ましい．萬ら[1]は陸面過程モデルSiBUC[2]と河道流追跡モデル1K-FRM[3]を組み合わせて河川流量を推定する水循環モデルを開発し，九州地方に適用した．その結果，高水部を比較的良好に推定できた一方で，低水部では過小評価が起きた．筆者らはSiBUCが地下水流動を考慮していないことがこの過小評価の原因であると考え，SiBUCへの地下水スキームの導入を試み推定精度に及ぼす効果について検討を行った．

2　水循環モデルへの地下水スキームの導入

2.1　水循環モデル　SiBUCとは京都大学防災研究所が開発した陸面過程モデルである．SiBUCでは1グリッドを土地被覆ごとに分割しそれぞれで並列に計算を行い，計算結果に対して面積割合で加重平均を取った値が出力される．

1K-FRMとは京都大学大学院工学研究科が開発した河道流追跡モデルでありる．計算領域を約1km四方のグリッドに分割して各グリッドを斜面あるいは河道に分類し，1次元kinematic wave理論に基づき流量を計算する．

2.2　地下水スキームの導入　本研究では，陸面過程モデルSiBUCにおける各種植生地領域の土壌層の下に新たに地下水貯留を表現するタンクを地下水スキームとして設けた．この地下水スキームにおいて，土壌からの基底流出は全てタンクに流入すると仮定し，タンクから地下水流出として水が排出される．本研究ではタンクが枯渇していない限り地下水流出量は常に一定の値を取るように簡易的に設定した．これを基準地下水流出量とする．以上の設定により，洪水時に発生した多量の基底流出をタンクに貯留し渇水時にその一部を流すことで渇水時の流量の過小評価改善を目指した．

3　河川流量の推定

本研究では九州地方の5つの一級河川の流域を対象にシミュレーションを行った．ヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)によるERA5-Land hourly data from 1950 to present[4]のデータと気象庁の解析雨量[5]を基に作成した気象データを入力とし，河川流量を計算する．

3.1　基準地下水流出量の設定　本研究でははじめに，地下水スキームが導入されていない場合のSiBUCの各グリッドでの基底流出量の平均値を基準地下水流出量として設定した．その結果，球磨川の人吉地点など一部の流量観測地点において低水部の過大評価が発生したため，流量を小さくすることを見込んで基準地下水流出量を0.6倍にして再び推定を行った．

3.2　推定結果　筑後川の瀬ノ下地点と球磨川の人吉地点での2007年のハイドログラフを図1に示す．赤色の点は観測流量を表し，青色，水色，緑色の線がそれぞれ既存のSiBUC，地下水スキームが導入されたSiBUC，地下水スキームの基準地下水流出量を0.6倍に設定したSiBUCを用いて推定された流量を表す．続いて，複数の指標を用いて河川流量の推定精度を評価する．採用した指標はNush-Sutcliffe係数(NSE)とそれを基にした係数NSE_{iQ}，NSE_{sqrtQ}，NSE_{lnQ}であり，それぞれの定義式を(1)式から(4)式に示す．ここで，nは日数，Q_i，$\widehat{Q_i}$はそれぞれi日目の観測流量と推定流量を表し，$\varepsilon = \frac{\overline{Q_i}}{100}$とする．$\overline{Q_i}$，$\overline{\frac{1}{Q_i+\varepsilon}}$，$\overline{\ln(Q_i+\varepsilon)}$はそれぞれ$Q_i$，$\frac{1}{Q_i+\varepsilon}$，$\ln(Q_i+\varepsilon)$の平均値である．推定精度が高いほど指標の値は1に近づく．Pushpalatha *et al.*[6]によると，NSEは高水部に対して，NSE_{inQ}は低水部に対して感度が高く，NSE_{sqrtQ}，NSE_{lnQ}は高水部と低水部の両方に対してある程度の感度を有する．

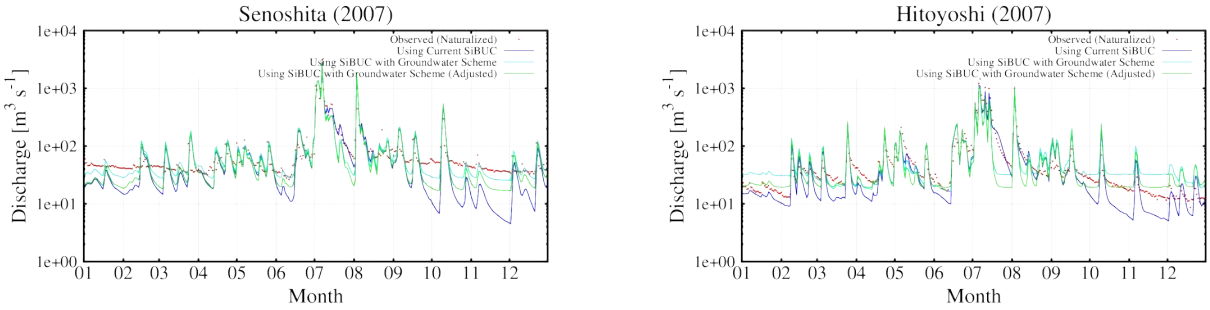
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \widehat{Q_i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \overline{Q_i})^2} \tag{1}$$

$$NSE_{\mathrm{iQ}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\frac{1}{Q_i+\varepsilon} - \frac{1}{\widehat{Q_i}+\varepsilon})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\frac{1}{Q_i+\varepsilon} - \overline{\frac{1}{Q_i+\varepsilon}})^2} \tag{2}$$

$$NSE_{\mathrm{sqrtQ}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\sqrt{Q_i} - \sqrt{\widehat{Q_i}})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\sqrt{Q_i} - \overline{\sqrt{Q_i}})^2} \tag{3}$$

$$NSE_{\mathrm{lnQ}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\ln(Q_i+\varepsilon) - \ln(\widehat{Q_i}+\varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^{n}(\ln(Q_i+\varepsilon) - \overline{\ln(Q_i+\varepsilon)})^2} \tag{4}$$

Iori TADA, Kazuaki YOROZU and Yasuto TACHIKAWA
tada.iori.64z@st.kyoto-u.ac.jp



(a) 瀬ノ下地点　　(b) 人吉地点

図 1　2007 年におけるハイドログラフ．赤色の点は観測流量を，青色，水色，緑色の線は既存の SiBUC，地下水スキームが導入された SiBUC，地下水スキームの基準地下水流出量を 0.6 倍に設定した SiBUC を用いて推定された流量をそれぞれ示す．

表 1　2007 年におけるそれぞれの指標の値．

SiBUC の条件	瀬ノ下地点				人吉地点			
	NSE	NSE_{iQ}	NSE_{sqrtQ}	NSE_{lnQ}	NSE	NSE_{iQ}	NSE_{sqrtQ}	NSE_{lnQ}
地下水スキーム無	0.92	-26.88	0.77	-0.39	0.92	-1.41	0.89	0.65
地下水スキーム有	0.90	-0.11	0.84	0.62	0.81	0.17	0.78	0.59
基準地下水流出量 0.6 倍	0.90	-3.81	0.79	0.25	0.80	0.42	0.78	0.63

表 1 に両地点における各条件での 2007 年の指標の値を示す．どちらの地点でも高水部の精度をよく反映する NSE の値は地下水スキームの導入により減少し，低水部の精度をよく反映する NSE_{iQ} は増加した．洪水時の流量を渇水時に回す効果が現れていると言える．一方，人吉地点では NSE_{sqrtQ}，NSE_{lnQ} の値が減少し，推定精度の低下が見られた．地下水スキームにより渇水時の流量が大きくなりすぎたことが原因であると考えられる．また，基準地下水流出量の値を小さくしたところ，瀬ノ下地点では全ての指標の値が減少したが，人吉地点では NSE_{iQ}，NSE_{sqrtQ}，NSE_{lnQ} の値が増加した．基準地下水流出量が小さくなり渇水時の流量が減少したためであると考えられる．

4　結論　本研究では陸面過程モデル SiBUC に地下水スキームを導入し，河川流量の推定精度の変化を調べた．地下水スキームの導入により低水部の流量が増加し，低水部に対する感度が高い指標 NSE_{iQ} の下では推定精度が向上した．今後の展望としては，最適化手法により土壌あるいは土地利用ごとに地下水スキームのパラメータの倍率を求めることを考えている．

謝辞

本研究は，JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2283】，文部科学省気候変動予測先端研究プログラム JPMXD0722678534 の支援を受けたものです．

参考文献

1) 萬和明，市川温，立川康人: 流出量に対するバイアス補正手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76, No.2, pp. I_79-I_84, 2020.
2) Tanaka, K.: Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, *Doctoral dissertation*, Kyoto University, 2005.
3) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文･水資源学分野: 1K-FRM/DHM, `http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html`, 2020/2/10 参照.
4) Muñoz Sabater, J.: ERA5-Land hourly data from 1981 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019, `https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview`, 2022/11/12 参照.
5) 一般社団法人 気象業務支援センター: 解析雨量, `http://www.jmbsc.or.jp/jp/offline/cd0100.html`, 2023/1/20 参照.
6) Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Andréassian V.: A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations, *Journal of Hydrology*, Vol. 420-421, pp. 171-182, 2012. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.055.