

流出負荷量モデルの最適化手法に関する研究 A study on optimization of runoff loading model

○渡辺浩二，田中丸治哉，多田明夫

○Koji WATANABE, Haruya TANAKAMARU and Akio TADA

1. はじめに 河川の水質濃度や流出負荷量を把握・予測するには，流出負荷量モデルが用いられる．流出負荷量モデルに関する研究事例では，精緻なモデルであっても水質変動の再現性が不十分なものが少なくない．これは，水質データの観測頻度が少ないことに加えて，パラメータ数が多い割にそれらの決定法が不適切であることが一因と考えられる．本研究では，流出負荷量モデルには既存のシンプルなものを用い，水質データが高頻度で観測されている状況において，最適化手法を用いてパラメータを同定した場合，流出負荷量がどの程度まで再現できるか，河川流量の再現性と両立できるかについて検討した．

2. 対象流域と解析資料 本研究では，奈良県五條市の山林小流域（12.82ha）を対象とした．降水量・流量データには，2007年5月1日～2011年4月30日の10分単位データを用いた．蒸発散データには，五條の気象データに基づき Penman 式で推定した日蒸発散能を用いた．水質データには，FIP オンサイト水質観測システム¹⁾で観測されたナトリウムイオン濃度データ（Na⁺）を用いた．このシステムでは，イオン選択性電極によって15分間隔で渓流水質を2週間連続モニタリングできる．この観測データを線形補間によって10分単位に変換した後，観測流量を乗じて流出負荷量の観測値とした．この水質データは2009年6月9日から2011年4月27日まで利用できる．なお，ここで使用したデータは降水量・流量が4年間，水質が2年弱と比較的短いことから，データ期間を同定期間と検証期間に分けず，全期間をパラメータ同定に用いることとした．

3. 流出負荷量モデル 河川流量の再現には，角屋・永井²⁾の長短期流出両用モデル(LST-II)を用いた．これは3段4層のタンクから成る貯留型概念モデルであり，第1段タンク上層からの流出は表面流出と速い中間流出を，同タンク下層からの流出は遅い中間流出を，第2段タンクと第3段タンクからの流出は地下水流出を表している．決定すべきパラメータは，初期水深を含めて14個である．流出負荷量の再現には，上述の4流出成分に対し，それぞれべき乗型LQ式（ $L = \alpha Q^\beta$ ， L ：流出負荷量， Q ：流量， α と β は係数）を設定した．流出負荷量について決定すべきパラメータは8個である．

4. パラメータ同定法 これら22個のパラメータは，強力な大域的探索法の一つであるSCE-UA法を用いて，河川流量及び流出負荷量の再現誤差が小さくなるように決定した．再現誤差を表現する誤差評価関数には様々なものがあるが，ここでは河川流量，流出負荷量ともに最小二乗誤差平方根（RMSE）を用いた．RMSEは高水重視の誤差評価関数とされるが，低水時よりも高水時に流出する負荷量がかなり多いことからこれを採用した．河川流量の評価では，総流出高の推定誤差を2%以内に収めるためのペナルティを導入した．

パラメータの同定手順として，次の3通りの手順を検討した．①河川流量の再現誤差を最小化して流出モデルのパラメータ14個を決定した後，その計算流量に基づいて得られる

神戸大学大学院農学研究科，Graduate School of Agricultural Science, Kobe University

キーワード：水質，長期流出，流出負荷量モデル，最適化

流出負荷量の再現誤差を最小化して LQ 式のパラメータ 8 個を同定する。②流出負荷量の再現誤差を最小化して、全パラメータ 22 個を同定する。③河川流量と流出負荷量の再現誤差を両立させる解を妥協計画法³⁾で同定する。妥協計画法の適用に際しては、河川流量の再現誤差を横軸に、流出負荷量の再現誤差を縦軸に取った目的関数平面を考え、①で求めた河川流量と流出負荷量の *RMSE* 値をそれぞれ f_1^{\min} , f_2^{\max} , ②で求めた河川流量と流出負荷量の *RMSE* 値をそれぞれ f_1^{\max} , f_2^{\min} とする。そして (f_1^{\min}, f_2^{\min}) を理想点とし、目的関数平面上で理想点からのユークリッド距離が最小となるようなパラメータを探索する。

5. 結果と考察 3 通りの手順による河川流量及び流出負荷量の *RMSE* 値と相対誤差を **Table 1** に示す。*RMSE* 値でみると①は河川流量の再現性が良いが、流出負荷量の再現性が悪く、②は逆に河川流量の再現性が悪いが、流出負荷量の再現性が良くなっている。妥協計画法による③は、河川流量の再現性は①よりやや劣る程度、流出負荷量の再現性は②よりやや劣る程度となっており、③によれば両者の再現性のバランスが取れたモデルが得られることが分かる。**Fig.1** に 2010 年の日流出高と日流出負荷量の再現結果を示す。低水時の計算流出高は、①は過大、逆に②は過小であるが、③は低水時を含めて再現性がかなり良好である。日流出負荷量の再現性は、①～③ともに概ね良好であり、日流出高に比べるとそれらの違いは小さいが②が最良で、③もそれと遜色ない再現結果となっている。これらの結果は、妥協計画法が水量と水質の再現性を両立させたパラメータ決定に有効な手法であることを示している。

Table 1 誤差評価関数値
Error function values

最適化 手法	河川流量		流出負荷量	
	<i>RMSE</i> (mm/h)	相対誤差 (%)	<i>RMSE</i> (g/ha/10min)	相対誤差 (%)
①	0.0701	44.8	0.180	38.7
②	0.0885	52.4	0.159	24.5
③	0.0750	37.5	0.164	29.9

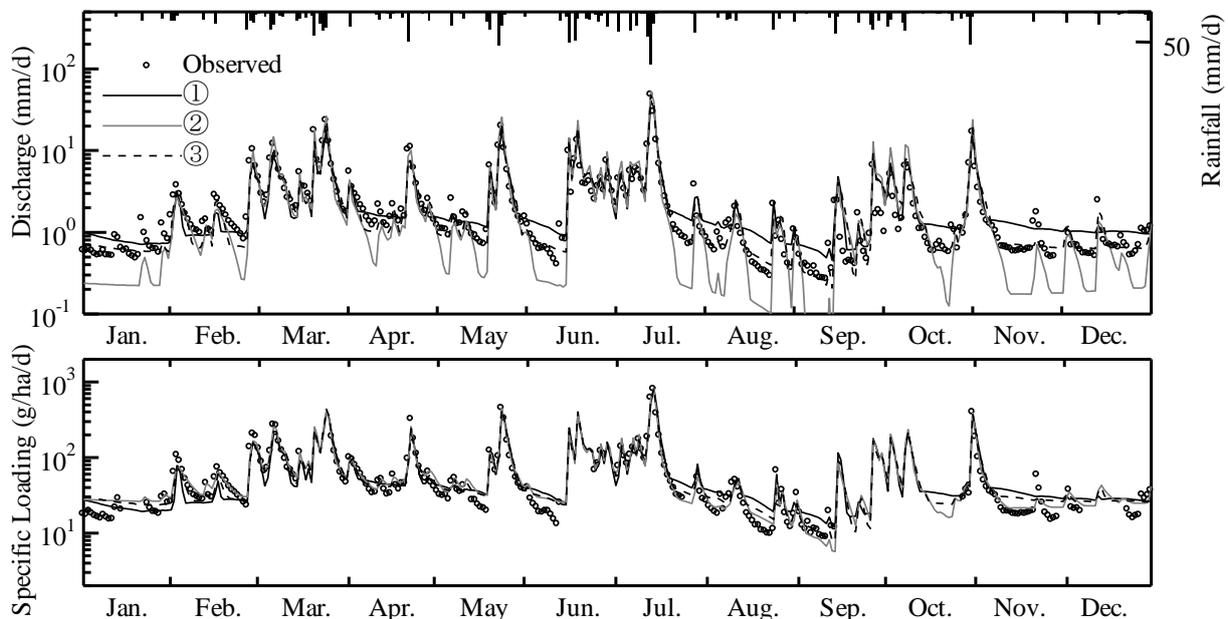


Fig.1 日流出高と日流出負荷量の再現結果 (2010 年)
Estimated result of daily runoff and loading (2010)

引用文献 1)Tada, A. *et al.*: 水文・水資源学会誌, 19(6), pp.445-457, 2006, 2)角屋 睦・永井明博: 農土論集, 136, pp.31-38, 1988, 3)田中丸治哉・藤原洋一: 農土論集, 241, pp.107-115, 2006