

## 妥協計画法によるタンクモデル定数の多目的最適化と考察 Multi-objective optimization of Tank Model using compromise programming

○ 田中丸 治哉, 多田 明夫  
Haruya TANAKAMARU and Akio TADA

1. まえがき 本研究の目的は、流出モデル定数の最適化に多目的計画法を適用して、高水と低水の再現性、水量と水質の再現性など複数の目的を両立させたモデル定数を得ることである。これまでの研究では、多目的計画法として進化戦略による方法（藤原ら, 2004）、妥協計画法の適用（田中丸・藤原, 2006）などを検討してきたが、後者では1流域への適用にとどまっていた。本報告では、妥協計画法を3ダム流域に適用して、高水と低水の再現性を両立させたタンクモデル定数の同定を試みるとともに、得られた妥協解の一貫性に関して考察した。

2. 多目的最適化問題と妥協計画法 多目的最適化問題は、複数の目的関数を同時に最小化（最大化）するもので、この問題では、ある目的関数値を改善するためには、少なくとも他の一つの目的関数値を改悪せざるを得ない解としてパレート最適解の集合を得る。Fig.1 は横軸に目的関数値  $f_1$  を、縦軸に目的関数値  $f_2$  をプロットした目的関数空間であるが、パレート解は曲線 AB で表される。本研究では、 $f_1$  を主に高水の再現性を表現する平均二乗誤差平方根  $RMSE$ 、 $f_2$  を主に低水の再現性を表現する平均相対二乗誤差平方根  $RR$  とする。これらの誤差評価関数は以下の通りである。

$$RMSE = \frac{1}{Q_m} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{ci} - Q_{oi})^2}, \quad RR = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})^2}{Q_{oi}^2}}$$

ここに、 $Q_{ci}$  : 計算流量,  $Q_{oi}$  : 観測流量,  $Q_m$  : 平均流量,  $i$  : データ番号,  $N$  : データ数。

加重和最小化法ないし MOCOM-UA 法（Yapo ら, 1998）などを利用すればパレート解集合が求められるが、同集合の全体を把握しなくても、その中から解析者の目的に合致する一つの解を求めれば実用上は十分である。そこで、妥協計画法（土木学会, 1989）では、2つの目的（ここでは高水と低水の再現性）を両立させた妥協解を次の手順で求める（Fig.1 参照）。

- ①目的関数  $f_1$  を単独で最小化して A 点を得る。②目的関数  $f_2$  を単独で最小化して B 点を得る。
- ③目的関数値 ( $f_1^{\min}$ ,  $f_2^{\min}$ ) を持つ解 (O 点, 実際には存在しない) を理想解と定義する。
- ④理想解との距離が最小になる C 点を求めて妥協解とする。

3. 対象流域と解析資料 対象流域は、滋賀県・永源寺ダム流域、奈良県・大迫ダム流域、三重県・青蓮寺ダム流域であり、同定期間のデータとして、永源寺ダム流域では 1981～1984 年、大迫ダム流域では 1974～1977 年、青蓮寺ダム流域では 1978～1981 年のそれぞれ 4 年間の水文資料（流域平均日降水量、日流出高、月平均日可能蒸発散量）を用い、流出解析は日単位で行う。

4. 妥協計画法の適用結果 流出モデルには菅原の直列 4 段タンクモデルを用いる。同定すべきパラメータは、モデル定数 12 個と初期水深 4 個の合計 16 個である。 $RMSE$  の最小化及び  $RR$  の最小化で Fig.1 の A 点, B 点, O 点を求めた後、距離 OC が最小になるような妥協解 (C 点) を探索するが、各関数の最小化には SCE-UA 法（Duan ら, 1992）を用いる。ただし、距離 OC は、水平距離を  $f_1^{\max} - f_1^{\min}$  で、鉛直距離を  $f_2^{\max} - f_2^{\min}$  でそれぞれ基準化したときの距離とする。

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

（キーワード） 流出解析, タンクモデル, 多目的最適化, 妥協計画法

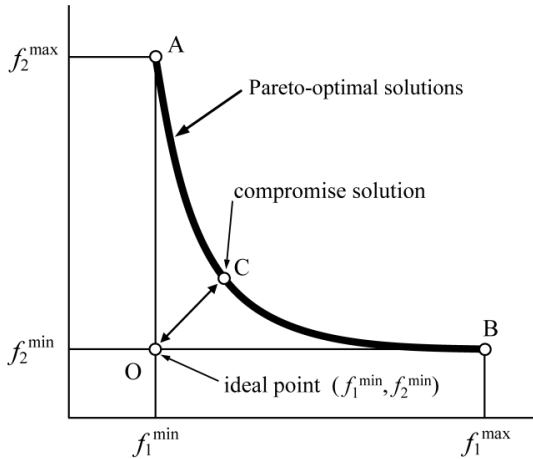


Fig.1 妥協計画法概念図(目的関数空間)

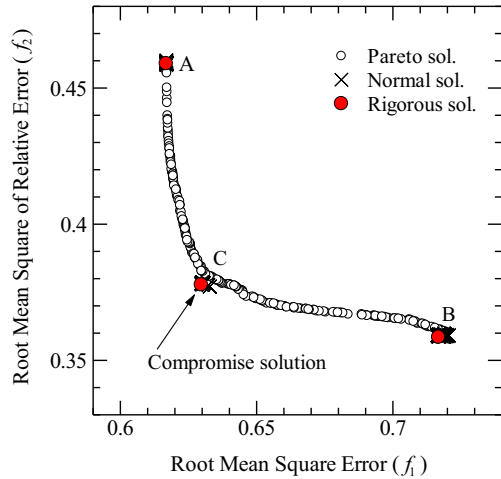


Fig.2 永源寺ダム流域の妥協解(目的関数)

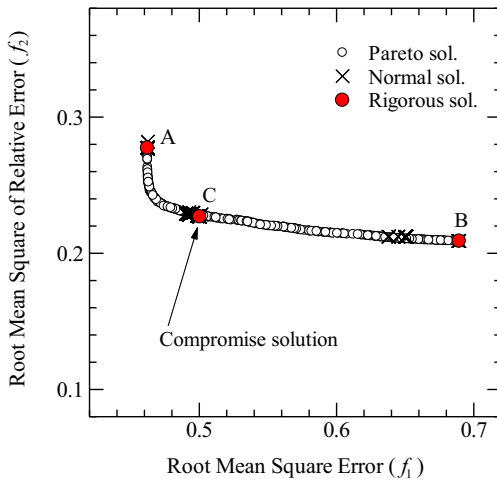


Fig.3 大迫ダム流域の妥協解(目的関数)

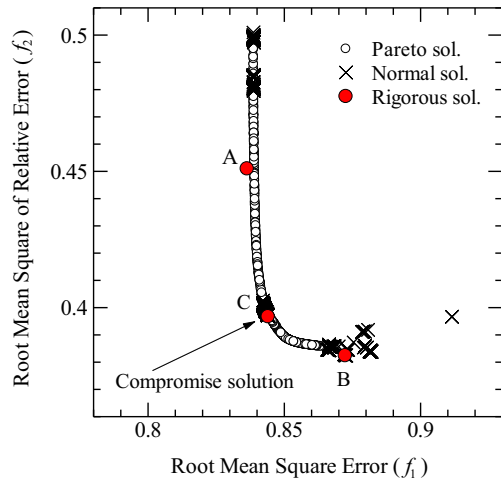


Fig.4 青蓮寺ダム流域の妥協解(目的関数)

適用結果 (Fig.1 に相当する目的関数空間) を Fig.2~Fig.4 に示す。×印は①~④の手順で得た結果(通常解)で、乱数の種を代えて 100 回の探索試行を行った結果を示した。●印は RMSE 及び RR の最小化をそれぞれ 100 回実施して最小のものを選び、さらに距離 OC の最小化も 100 回実施して最小のものを選んだ結果で、試行毎のばらつきを極力抑えた厳密解である。○印は進化戦略で求めたパレート解集合(藤原ら, 2005)で、参考のために示した。永源寺ダム流域では、A~C 点のいずれについても通常解と厳密解はよく一致しているが、大迫ダム流域では B 点について、青蓮寺ダム流域では A 点と B 点について通常解のばらつきと厳密解とのずれが目立った。一方、両流域ともに妥協解である C 点については、通常解のばらつきと厳密解とのずれが小さく、パラメータ値で見ても同様であった。この適用結果によると、妥協解は探索試行毎のばらつきが生じにくい解と言える。高水と低水の再現性を両立させることに加え、その頑健性も評価すべきであろう。

引用文献 土木学会(1989): 土木工学ハンドブック, 技報堂出版, Duan et al. (1992): *Water Resources Research*, **28**(4), 藤原ら(2004): 農土論集 **230**, 藤原ら(2005): 農土論集 **237**, 田中丸, 藤原(2006): 農土論集 **241**, Yapo et al. (1998): *Journal of Hydrology*, **204**