

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23580334

研究課題名(和文) 水量・水質の再現性を両立させるための流出負荷量モデルの多目的最適化に関する研究

研究課題名(英文) Study on multi-objective optimization of loading and solute concentration models for simulating stream flow and water quality with acceptable accuracy

研究代表者

田中丸 治哉 (TANAKAMARU, Haruya)

神戸大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80171809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、河川水質モデルにおいて水量・水質の再現性を両立させるパラメータ同定法の確立を目指している。まずタンクモデルの最適化を対象として、多目的最適化手法の一つである妥協計画法の適応性について検討した。次いで、長短期流出両用モデルに流出成分別のLQ式ないしCQ式を組み合わせたモデルを用いて、奈良県五條市の山林小流域を対象としてナトリウムイオンの流出負荷量及び水質濃度の推定を行った。流出モデル定数及びLQ式ないしCQ式の決定には、妥協計画法を適用した。その結果、妥協計画法によれば、河川流量と流出負荷量の再現性、あるいは、河川流量と水質濃度の再現性を両立させたモデル定数が求められることが分かった。

研究成果の概要(英文)：This study aims at establishment of a parameter calibration method to achieve a good balance of estimated accuracies of stream flow and water quality in the application of loading model and solute concentration model. Firstly, the applicability of compromise programming, one of the multi-objective optimization methods was investigated in the multi-objective optimization of Tank Model parameters. Secondly, sodium loading and sodium concentration of a small forest catchment in Gojo, Nara prefecture were estimated by the Long- and Short-Term Runoff Model (LSTRM) combined LQ or CQ equations applied to four runoff components. 14 parameters of LSTRM and 8 parameters of LQ or CQ equations were estimated by the compromise programming. The results show that the compromise programming is effective for calibrating model parameters which show good accuracies of both stream flow and sodium loading or both stream flow and sodium concentration.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学、農業土木学・農村計画学

キーワード：流出負荷量モデル 水質濃度モデル タンクモデル 長短期流出両用モデル LQ式 CQ式 多目的最適化 妥協計画法

1. 研究開始当初の背景

河川の流出負荷量や水質濃度を推定するための様々な河川水質モデルが提案されてきたが、精緻なモデルであっても河川流量ないし水質変動の再現性が不十分な検討事例が見られる。その原因として、水質データの観測頻度が少ないこと、その一方で未知パラメータの数が多く、それらの決定が適切でないことが考えられる。

一方、流出モデルのパラメータ同定においては、例えば、高水流量の再現性を重視して同定すると、低水流量の再現性が悪化するといった問題が生じることがある。そこで、研究代表者らは、この問題を解決するために、多目的最適化手法の一つである妥協計画法をパラメータ同定に適用することを提案している(田中丸・藤原, 2006)。

河川水質モデルについても、河川流量の再現性を重視して最適同定すると、水質の再現性が悪化する、あるいは、水質の再現性を重視して最適同定すると、河川流量の再現性が悪化するといった問題が予想されることから、河川水質モデルのパラメータ決定についても妥協計画法の有効性が期待される。

2. 研究の目的

流出モデルのパラメータ同定に対する妥協計画法の有効性は、滋賀県・永源寺ダム流域を対象としたタンクモデルの多目的最適化において検討されているが、他の流域における検討事例が無かった。そこで、まずは複数のダム流域を対象としたタンクモデルのパラメータ同定に妥協計画法を適用して、同法の有効性を明らかにする。

次いで、比較的シンプルな河川水質モデルを用い、水質データが高頻度で観測されている状況において、妥協計画法を用いてパラメータを同定することで、河川流量と流出負荷量の再現性を両立させたモデル、あるいは、河川流量と水質濃度の再現性を両立させたモデルが得られるか否かについて検討する。

3. 研究の方法

(1)多目的最適化

本研究では、流出モデル、河川水質モデルのパラメータ同定に多目的最適化手法の一つである妥協計画法を適用することから、最初に多目的最適化問題と妥協計画法の考え方について簡潔に説明する。

多目的最適化とは、複数の目的関数を同時に最小化(最大化)することである。多目的最適化問題における最適解は、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定義され、これをパレート最適解と呼ぶ。パレート最適解は一つの解ではなく、先の定義を満たす解の集合となる。例えば、目的関数 f_1 と f_2 に対する多目的最適化において、**Fig.1** のように各目的関数を横軸と縦軸に取ったグラフ(目的関数空間)を描くと、パレ

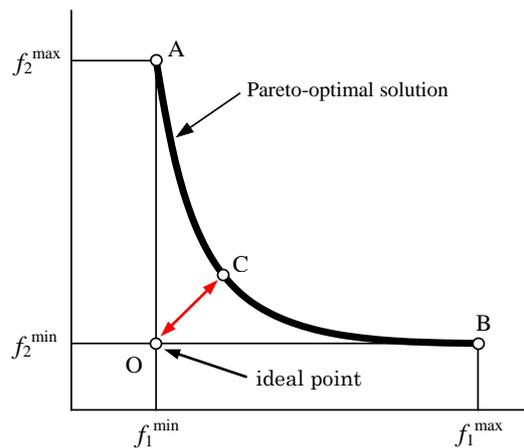


Fig.1 妥協計画法の概念図(目的関数空間)

ート最適解は太い実線上の解集合となる。

パレート最適解の計算には、古典的手法の一つである加重和最小化法が適用できる。これは、加重係数 w ($0 \leq w \leq 1$) を変えながら目的関数 f_1 と f_2 の加重和 $f = w \cdot f_1 + (1-w) \cdot f_2$ を最小化する方法であるが、加重係数を設定する度に最小化計算が必要となるため、計算量が膨大となることが難点である。

(2)妥協計画法

二つの目的関数が競合関係にある場合、一方の目的関数をことさら重視すると、他方の目的関数をかなり犠牲にしなければならないことがあるが、Yu (1973), Zeleny (1973) によって提案された妥協計画法によれば、両者を両立させた解を得ることができる。

Fig.1 を用いて説明すると、妥協計画法では、まず目的関数 f_1 , f_2 をそれぞれ単独で最小化して A 点と B 点を求め、それらの座標に基づいて O 点 (f_1^{\min}, f_2^{\min}) を設定する。この O 点は理想点と呼ばれ、実際には得られない解である。次いで、O 点との距離が最小となる解(C点)を探索して、これを妥協解とする。この方法では、3回の最小化計算によって妥協解を求めることができる。ただし、 f_1 , f_2 の単位やオーダーが異なる場合を想定して、目的関数空間 (**Fig.1**) へのプロットに際しては、無次元化して横軸の $[f_1^{\min}, f_1^{\max}]$ を $[0,1]$ 、縦軸の $[f_2^{\min}, f_2^{\max}]$ を $[0,1]$ に線形変換する。詳細については、文献(田中丸・藤原, 農土論集 241, 2006)を参照されたい。

本研究では、目的関数の最小化には、強力な大域的探索法として知られている SCE-UA 法(Duan ら, 1992)を用いた。

(3)高水と低水の再現性を両立させるためのタンクモデルの多目的最適化

この検討課題では、代表的な長期流出モデルの一つである菅原(1972)の直列4段タンクモデルを用いる。決定すべきパラメータは初期水深4個を含めて合計16個である。

誤差評価関数には、高水の再現性を重視した評価関数である RMSE(最小二乗誤差平方

根) と低水の再現性を重視した評価関数 RR (相対二乗誤差平方根) を用い、それぞれ **Fig.1** における f_1 と f_2 に対応させた。

対象流域は、滋賀県・永源寺ダム流域 (流域面積 131.5km^2)、奈良県・大迫ダム流域 (114.8km^2)、京都府と三重県にまたがる青蓮寺ダム流域 (100.0km^2) の 3 ダム流域で、水文資料は、日単位の流域平均降水量と流出高、月単位の日蒸発散量である。パラメータ同定に用いるデータの期間は各流域とも 4 年間とした。計算時間刻みは 1 日単位である。

(4) 水量・水質の再現性を両立させるための河川水質モデルの多目的最適化

流出負荷量の推定には、長短期流出両用モデル (LST-II) にべき乗型 LQ 式 ($L = \alpha Q^\beta$, L : 流出負荷量, Q : 流量, α と β は係数) を組み合わせたものを、水質濃度の推定には、同モデルにべき乗型 CQ 式 ($C = \alpha Q^\beta$, C : 水質濃度, Q : 流量, α と β は係数) を組み合わせたものを用いる。角屋・永井 (1988) によって提案された LST-II は、3 段 4 層のタンクから成る貯留型概念モデルで、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。そこで、これら 4 成分にそれぞれ LQ 式ないし CQ 式を当てはめることとした。

決定すべきパラメータ数は、LST-II が 14 個 (初期水深を含む)、LQ 式、CQ 式がそれぞれ 8 個 (2 個×4 成分) であるから、流出負荷量モデル、水質濃度モデルともに合計 22 個である。また、河川流量、流出負荷量、水質濃度の再現性を評価する際の誤差評価関数には、いずれも $RMSE$ (最小二乗誤差平方根) を用いる。

対象流域は、奈良県五條市の山林小試験流域 (12.82ha) である。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、フローインジェクションポテンシオメトリー (FIP) オンサイト水質観測システム (Tada ら, 2006) で観測された 15 分間隔のナトリウムイオン濃度データ (Na^+)、カリウムイオン濃度データ (K^+)、塩化物イオン濃度データ (Cl^-) を用いた。これらの観測データを線形補間によって 10 分単位に変換したものを水質濃度の観測値とし、これに観測流量を乗じたものを流出負荷量の観測値とした。

なお、水質データの観測期間は対象期間の後半 2 年弱で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ている。計算時間刻みは 10 分単位である。

4. 研究成果

(1) 高水と低水の再現性を両立させるためのタンクモデルの多目的最適化

タンクモデルのパラメータ同定には、次の①～③の手順を適用する (**Fig.1** 参照)。

- ① 目的関数 f_1 ($RMSE$) を単独で最小化して A 点を得る。
- ② 目的関数 f_2 (RR) 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}) を持つ理想点との距離を目的関数とし、これが最小になる C 点を求めて妥協解とする。

妥協計画法の適用結果 (**Fig.1** に相当する目的関数空間) を **Fig.2**～**Fig.4** に示す。図中の○印は加重和最小化法で得たパレート最適解で、●印は妥協計画法で求めた A 点、B 点と妥協解 (C 点) である。□印は加重係数を 0.5 としたときのパレート最適解と、妥協解に最も近いパレート最適解とその加重係数を示している。

どの流域においても f_1 を小さくしていくと

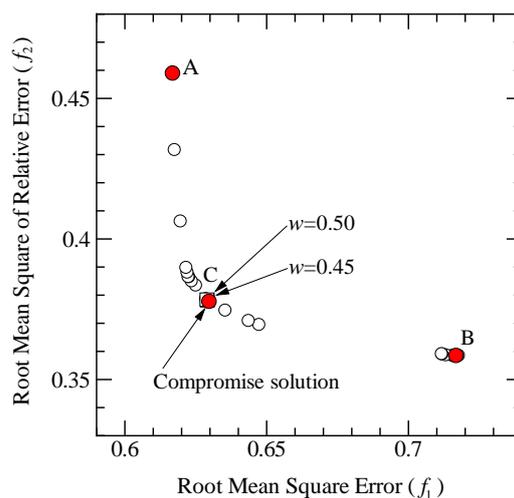


Fig.2 永源寺ダム流域の妥協解 (目的関数)

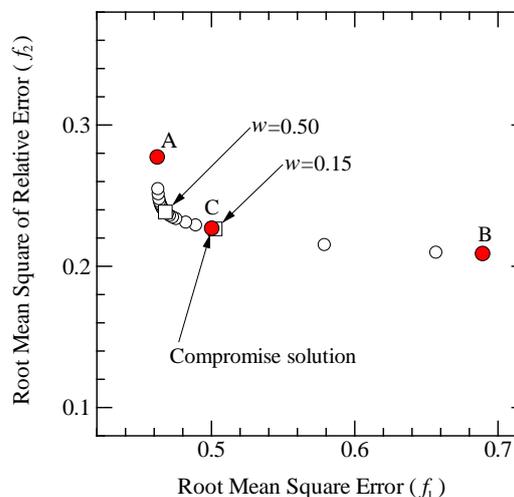


Fig.3 大迫ダム流域の妥協解 (目的関数)

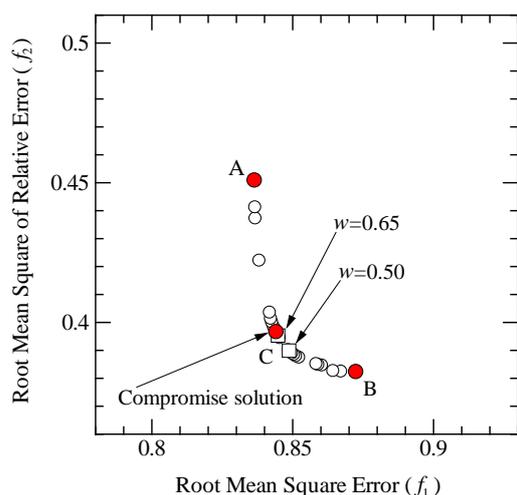


Fig.4 青蓮寺ダム流域の妥協解（目的関数）

途中から f_2 が急に大きくなり、一方、 f_2 を小さくしていくと途中から f_1 が急に大きくなることから、高水（低水）の再現性を特に重視した最適化を行うと、低水（高水）の再現性が著しく低下することが分かる。

妥協解によれば、高水、低水ともに最良の再現性ではないが、それぞれ最良に近い再現性が得られている。なお、妥協解に最も近いパレート最適解に対応する加重係数は、永源寺ダム流域では 0.45、大迫ダム流域では 0.15、青蓮寺ダム流域では 0.65 となり、流域によってかなり異なることが分かった。

(2)水量・水質の再現性を両立させるための河川水質モデルの多目的最適化

ここでは、河川流量と濃度に比較的強い負の相関が見られたナトリウムイオンの流出負荷量と濃度の推定結果について述べる。

河川水質モデルのパラメータ同定には、次の①～③の手法を適用する。以下では、流出負荷量を例として説明するが、水質濃度のときは「流出負荷量」を「水質濃度」に、「LQ式」を「CQ式」に置き換えればよい。

- ① 河川流量の再現誤差を最小化して LST-II

のパラメータ 14 個を決定後、その計算流量に基づいて得られる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 (A 点)。

- 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 (B 点)。
- ③ 理想点との距離を目的関数とし、これが最小になる C 点を求めて妥協解とする。

すなわち、河川流量の再現誤差を横軸、流出負荷量の再現誤差を縦軸に取った目的関数空間において、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、目的関数空間上で理想点からの距離が最小となるようなパラメータを探索する。①は河川流量を最重視した同定、②は河川水質を最重視した同定、③は両者の両立を図った同定に相当する。

以下、得られた結果を示す。Table 1 に流出負荷量モデルの再現誤差を、Table 2 に水質濃度モデルの再現誤差を示しているが、①は流量が最良、水質が最悪、②は流量が最悪、水質が最良であるに対して、妥協計画法による③は、流量・水質とも最良にかなり近い結果となっていて、両者の再現性が両立していることが分かる。Fig.5 に最大出水時の流量と濃度の再現結果を例示している。①③は流量・濃度とも概ね良好な結果であるが、②は再現性が不十分であった。Fig.6 に③による最終年度の日流出高及び濃度の再現結果を示す。長期ハイドログラフにおいても③による流量・濃度の再現性は全般に良好である。

なお、CQ 式を LQ 式に換えて流出負荷量を再現させた場合についても、出水ハイドログラフ、長期ハイドログラフともに良好な再現性が得られている。また、カリウムイオン、塩化物イオンについてもナトリウムイオンと概ね類似した結果が得られている。

以上の結果から、水量と水質の再現性を両立させたモデルを得るためには、妥協計画法によるパラメータ決定が推奨される。

Table 1 河川流量及び流出負荷量 (Na⁺) の再現誤差

同定方法	河川流量		流出負荷量		水収支 誤差 (%)	物質収支 誤差 (%)
	RMSE (mm/h)	相対誤差 (%)	RMSE (g/ha/10min)	相対誤差 (%)		
①	0.0701	44.9	0.180	38.8	-0.623	0.193
②	0.0818	44.9	0.160	28.0	-0.043	0.712
③	0.0733	37.3	0.166	31.2	0.657	0.277

Table 2 河川流量及び水質濃度 (Na⁺) の再現誤差

同定方法	河川流量		水質濃度		水収支 誤差 (%)	物質収支 誤差 (%)
	RMSE (mm/h)	相対誤差 (%)	RMSE (mg/l)	相対誤差 (%)		
①	0.0701	44.9	0.1966	5.07	-0.623	5.13
②	0.123	45.9	0.1610	4.24	2.00	9.50
③	0.0713	41.4	0.1612	4.20	2.00	6.91

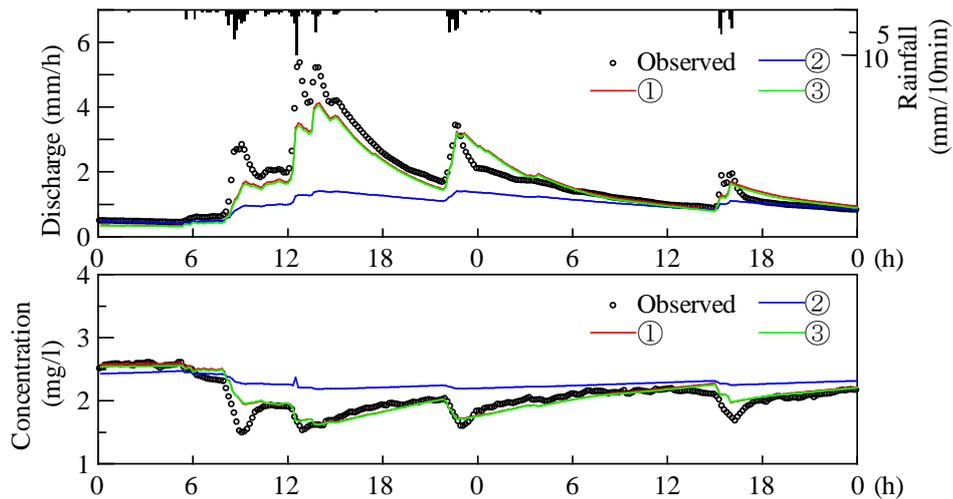


Fig.5 最大出水における河川流量及び水質濃度 (Na⁺) の再現結果 (2010年7月14~15日)

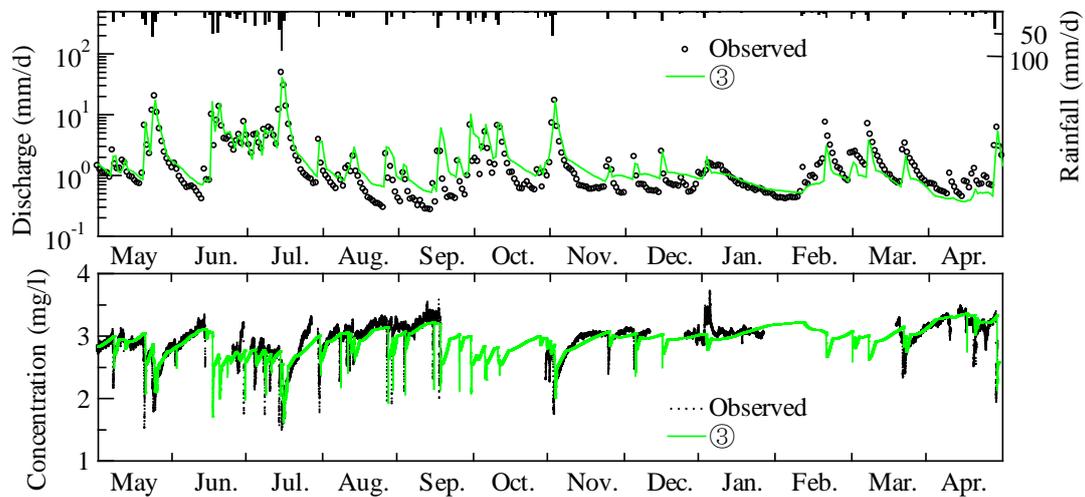


Fig.6 妥協解③による日流出高及び水質濃度 (Na⁺) の再現結果 (2010年5月~2011年4月)

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① 渡辺 浩二, 田中丸 治哉, 多田 明夫, 妥協計画法による流出負荷量及び水質濃度推定モデルの多目的最適化, 応用水文, 26, 2014, pp. 72-81, 査読無
- ② 田中 暁大, 田中丸 治哉, 多田 明夫, 多雪流域における融雪流出解析とその衛星データによる検証, 応用水文, 26, 2014, pp. 62-71, 査読無
- ③ 栗原周平, 多田明夫, 田中丸治哉, 山林小流域からの溶存物質の総流出負荷量推定法の評価, 農業農村工学会論文集, 286, 2013, pp. 77-86, 査読有
- ④ Eltaib, K.A., Tanakamaru, H., Tada, A., Estimation of actual evapotranspiration in Gash Delta, Sudan using a satellite-based energy

balance model, International Water Technology Journal, 2(1), 2012, pp. 47-56, 査読有

- ⑤ 阿布都沙塔尔 买买提明, 田中丸 治哉, 多田 明夫, 新疆ウイグル自治区における水資源開発と耕地塩類化, 水土の知 (農業農村工学会誌), 80(2), 2012, pp. 99-102, 査読有
- ⑥ 田中丸 治哉, 水循環と持続的な農業生産, TOYRO BUSINESS, 149, 2011, pp. 6-7, 査読無

[学会発表] (計11件)

- ① 田中丸治哉, 渡辺浩二, 多田明夫, 河川水質モデルにおいて水量と水質の再現性を両立させる方法, 水文・水資源学会2014年度研究発表会, 2014/9/25-27, 宮崎市
- ② 田中丸治哉, 渡辺浩二, 多田明夫, 水量・水質の再現性を両立させるための河川水質モデルの多目的最適化, 平成26年度農業農村工学会大会講演会, 2014/8/26-28,

新潟市

- ③ Tanakamaru, H., Watanabe, K., Tada, A., Multi-objective optimization of a conceptual model for simulating streamflow and solute concentration, AGU Fall Meeting, 2013/12/9, San Francisco, USA
- ④ 田中丸治哉・田中暁大, 多雪流域における融雪流出解析と温暖化の影響評価, 農業農村工学会ダム研究委員会シンポジウム, 2013/11/22, 東京都
- ⑤ 田中暁大, 田中丸治哉, 多田明夫, 鳴子ダム流域における融雪流出解析と温暖化の影響評価, 第70回農業農村工学会京都支部研究発表会, 2013/11/13, 京都市
- ⑥ 渡辺浩二, 田中丸治哉, 多田明夫, 妥協計画法を用いた水質濃度推定モデルの多目的最適化, 第70回農業農村工学会京都支部研究発表会, 2013/11/13, 京都市
- ⑦ 渡辺浩二, 田中丸治哉, 多田明夫, 流出負荷量モデルの最適化手法に関する研究, 平成25年度農業農村工学会大会講演会, 2013/9/4, 東京都
- ⑧ 田中暁大, 田中丸治哉, 多田明夫, 多雪流域における気温指数法を用いた融雪流出解析, 平成25年度農業農村工学会大会講演会, 2013/9/3, 東京都
- ⑨ Tanakamaru, H., Tada, A., Multi-objective optimization of Tank Model for simulating high and low flows with acceptable accuracy, 2nd International Conference on Water Resources (ICWR2012), 2012/11/6, Langkawi, Malaysia
- ⑩ 田中丸治哉, 多田明夫, 高水と低水の再現性を両立させたタンクモデル定数の多目的最適化, 水文・水資源学会2012年度研究発表会, 2012/9/26, 広島市
- ⑪ 田中丸治哉, 多田明夫, 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, 平成24年度農業農村工学会大会講演会, 2012/9/19, 札幌市

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中丸 治哉 (TANAKAMARU HARUYA)
神戸大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号：80171809

(2) 研究分担者

多田 明夫 (TADA AKIO)

神戸大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号：00263400

(3) 連携研究者
該当無し