

序

ここに、農業農村工学会の水文・水環境研究部会誌「応用水文第 32 号」の発行を迎えることができました。31 号では平成最後の応用水文誌と書きましたので、“令和最初の応用水文”誌であることも書かせてもらいます。

今回の応用水文も昨年度を踏襲し、Ⅰ.「論文編（査読あり原稿）」とⅡ.「部会報告編（査読なし）」の構成としております。昨年末に開催しました第 31 回水文・水環境研究部会シンポジウムには、1 日目 6 件、2 日目 4 件の話題提供が行われました。これを受けて、論文編は各論文に 2 名の査読者による査読を経て、論文 1 編、部会報告 9 編を本号に収録することができました。シンポジウムに参加し質疑応答に参加していただいた皆様、査読を引き受けていただいた皆様に感謝申し上げます。

元号が変わった令和元（2019）年も多くの気象災害が発生しました。戦後に気象庁が名称を定めた気象災害は、昭和 29（1954）年の洞爺丸台風から令和元年度までに 31 個の気象現象があります。その中の 2 つが令和元（2019）年度に発生しました。9 月の台風 15 号による令和元年房総半島台風と 10 月の令和元年東日本台風です。また、名称は付けられませんでした。8 月末の九州北部地方を中心とした記録的な大雨による災害もありました。

房総半島台風は、豪雨よりも暴風被害の方が甚大な被害が発生させ、千葉県では長期間の停電がありました。東日本台風は、大雨特別警報が 13 都県で発表されるほどの豪雨をもたらしました。特に、箱根では日降水量が 922.5mm と観測史上第 1 位の記録となりました。雨量観測に関しては、気象衛星 8 号・9 号、国交省のレーダ雨量計、気象庁の気象レーダー（東京レーダーが令和 2 年 3 月 5 日から二重偏波気象レーダーの観測に移行）など、以前に増して観測精度の向上が図られています。一方で、防災・減災の立場からは流出水量の予測精度の向上が必須だと思います。水文に関係する学会は多くありますが、農業を基盤とした学会・部会は、農業農村工学会と水文・水環境研究部会のみです。観測される豪雨はあくまでハザードであり、地域の脆弱性と相まって大きなリスクとなります。私たちは、脆弱性をいかに減らすことができるのかという最前線にたって研究を行う必要があります。持続的な農業農村のために、私たちの部会がいかに貢献できるのかを考える機会かと思えます。このような意味でも、水文・水環境研究部会がますます発展することを祈念いたしております。

2020 年は、水文・水環境研究部会の部会長が交代します。この 2 年間部会員の皆様方のご協力無しには部会運営ができませんでした。ここに厚く感謝申し上げます。

令和 2 年 3 月
農業農村工学会 水文・水環境研究部会
部会長 黒田久雄（茨城大学）

応用水文 第32号
Applied Hydrology No.32

目次

I. 論文編

- 低平水田地域における内水氾濫解析モデルの検証—白根郷地区への適用結果—……………1
神戸大学大学院農学研究科
瀧川紀子・田中丸治哉・多田明夫
サンスイコンサルタント株式会社
森田孝治・宮島真理子

II. 部会報告編

- 降雨の空間分布が集中型流出モデルのパラメータに与える影響……………11
岡山大学環境生命科学研究科
刈谷成希・工藤亮治・近森秀高
- レーダーアメダス解析雨量による手取川山地流域の水収支解析……………21
石川県立大学 生物資源環境学研究科
伊藤浩三・丸山利輔
- Real-time Flood Forecasting Considering Probabilistic Distribution of Future Forecasted Rainfall…29
Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University
BUI Thanh Hoa, CHIKAMORI Hidetaka, KUDO Ryoji
- 逆解析法による実蒸発散量とペンマン蒸発散量の比較
—手取川流域の林業試験場および石川県立大学農場での適用事例—……………39
石川県立大学
丸山利輔・伊藤浩三
- 大区画水田における取水による湛水深変化の均一性……………49
農研機構 農村工学研究部門
坂田 賢・鈴木 翔・新村麻実・友正達美
- 集中定数型水循環モデルによる手取川扇状地の水収支解析と
高濃度濁水が地下水位に及ぼす影響評価……………56
石川県立大学 生物資源環境学部
高瀬恵次・藤原洋一
- 水路急傾斜部に設置した可搬魚道における魚類遡上の調査……………65
茨城大学農学部
香川高等専門学校建設環境工学科
須藤真弥・前田滋哉
高橋直己

農業効率化に向けた AI と画像解析技術の適用検討.....	72
東電設計株式会社	信岡卓・横田彩加
茨城大学農学部	井上栄一・吉田貢士
タイ東北部の雨季米生産に対する気候変動影響と適応策の検討.....	80
茨城大学農学部	吉田貢士・前田滋哉・黒田久雄
東北大学農学研究科	本間香貴
福島大学農学群食農学類	牧 雅康
「応用水文」論文投稿の手引き.....	90
「応用水文」編集委員会.....	91
農業農村工学会水文・水環境研究部会規約.....	92

I. 論文編

低平水田地域における内水氾濫解析モデルの検証
— 白根郷地区への適用結果 —

Verification of inundation analysis model in low-lying paddy field area
— Application result in Shironego district —

瀧川紀子*・田中丸治哉*・多田明夫*・森田孝治**・宮島真理子**

*神戸大学大学院農学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

**サンスイコンサルタント株式会社 (〒600-8108 京都府京都市下京区五条通新町西入西鋸屋町 23)

TAKIGAWA Noriko*, TANAKAMARU Haruya*, TADA Akio*, MORITA Kouji**, MIYAJIMA Mariko**

*Graduate School of Agricultural Science, Kobe University (1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, 657-8501)

**Sansui Consultant Co., Ltd. (23 Nishikazariya-cho, Shinmachi-Nishiiru, Gojo-dori, Shimogyo-ku, Kyoto, 600-8108)

(Received 16 December 2019, Accepted 29 February 2020)

Abstract

This study aims to simulate the flood runoff and inland flooding in the Shironego district, Niigata Prefecture, which is a low-lying paddy field area and to comprehend the drainage situation. Here, the inundation analysis model (Yoshikawa *et al.*, 2011) was applied, that can simulate the runoff characteristics of each land use and represent the diffusion of inundated water in the low-lying paddy field area, and the applicability of the model was verified. This model was applied and validated for floods in July 2011 and September 2016. The application result shows that the model can simulate the water level of rivers and drainage channels in the target district with high accuracy and the inundated areas due to inland flooding with acceptable error.

Key words: low-lying paddy field area, flood runoff, inundation analysis, topographically adjustable cells

要 旨

本研究は、低平水田地域である新潟県の白根郷地区の洪水流出と内水氾濫を再現し、排水状況を把握することを目的とする。ここでは、土地利用ごとの流出特性が再現でき、低平水田地域における氾濫水の伝播が表現可能な内水氾濫解析モデル(吉川ら, 2011)を適用し、同モデルの適応性を検証した。平成23年7月および平成28年9月出水に対してモデルの検証を行ったところ、対象地区内の河川・排水路水位が高い精度で再現できること、さらに内水氾濫に伴う湛水区域が概ね再現できることが確認された。

キーワード: 低平水田地域, 洪水流出, 内水氾濫解析, 地形適合セル

1. はじめに

平成29年の水害統計調査(国土交通省水管理・国土保全局河川計画課, 2019)によれば、水害被害別の一般資産および公益事業等の被害額は、内水によるものが全体の34%と最も大きな割合を占めており、内水に伴う浸水被害の社会経済的な影響は大きい。近年、国土交通省では内水浸水想定区域図の策定を進めており、想定し得る最大規模の内水に対する避難体制等の充実・強化を図っているが、これらは都市部での浸水被害の緩和が主目的である。また、低平地の内水氾濫を扱った研究(例えば、川池ら, 2004; 関根ら, 2014; 秋山ら, 2011)の多くも、都市域を解析対象としている。

一方、低平農地においても内水による水害のリスクが高い。低平農地の浸水被害を緩和するための排水計画策定にあたっては、内水氾濫を再現できるモデルが必要である。低平地の都市域と低平農地を比較すると、都市域は貯留域が少ないのに対し、低平農地には畦畔に囲まれた水田が広がっていて、それが出水時に貯留域となる点が大きく異なっており、その点を考慮したモデル化が必要である。

低平水田域の氾濫解析は、水田の貯留計算と河川・排水路流れの1次元不定流計算によることが多い

が、低平地タンクモデル（角屋・早瀬，1981；早瀬，1993）もしばしば用いられる．低平地タンクモデルは，いくつか分割された河道区間を河道タンクで，水田群を水田タンクで表現し，河道タンク間や河道タンク・水田タンク間の水の動きを追跡するモデルである．これらのモデルでは，氾濫域から別の氾濫域への直接的な水の伝播は考慮しないのが普通であるが，氾濫水の平面的な伝播を考慮したモデルとして，吉川ら（2011），宮津ら（2012）は，低平農地を対象とした内水氾濫解析モデルを提案している．このモデルは，地形適合セルという任意多角形によって水田畦畔などの微細地形を巧く表現した空間分割を行うとともに，隣接セル間の水移動を追跡できるようにした点に特徴がある．

本研究では，新潟県の白根郷地区を研究対象とするが，平成 23 年 7 月豪雨における同地区の氾濫状況を見ると，湛水区域（湛水深 30cm 以上，後述）は一つにまとまっておらず，中流域から下流域にかけて多数の箇所に分かれて分布していた．このため同地区の排水状況を把握し，湛水区域の解消に役立てるためには，微小な標高差，細かい水路配置や土地利用分布などを考慮できるモデルが必要である．そこで，本論文では，吉川らの内水氾濫解析モデルを白根郷地区へ適用することとし，2 出水時の地区内の河川・排水路水位の再現性と，大出水時の湛水区域の再現性からモデルの適応性を検証した．

2. 対象地区の概要

本研究で対象とする白根郷地区（Fig.1）は，新潟市南区に位置し，地区の排水面積 7,506ha，農地面積 5,778ha の稲作経営を主体とした農業地帯である．地区内は極めて平坦な地形で，地盤標高 T.P. $-1\text{m} \sim +6\text{m}$ の間に分布し，特に下流部は T.P. $-1\text{m} \sim +2\text{m}$ と起伏が小さい．本地区は，信濃川と中ノ口川に囲まれた完全輪中地帯で，地区内の地盤高よりも河川水位が高い状態にある．常時は白根排水機場から，

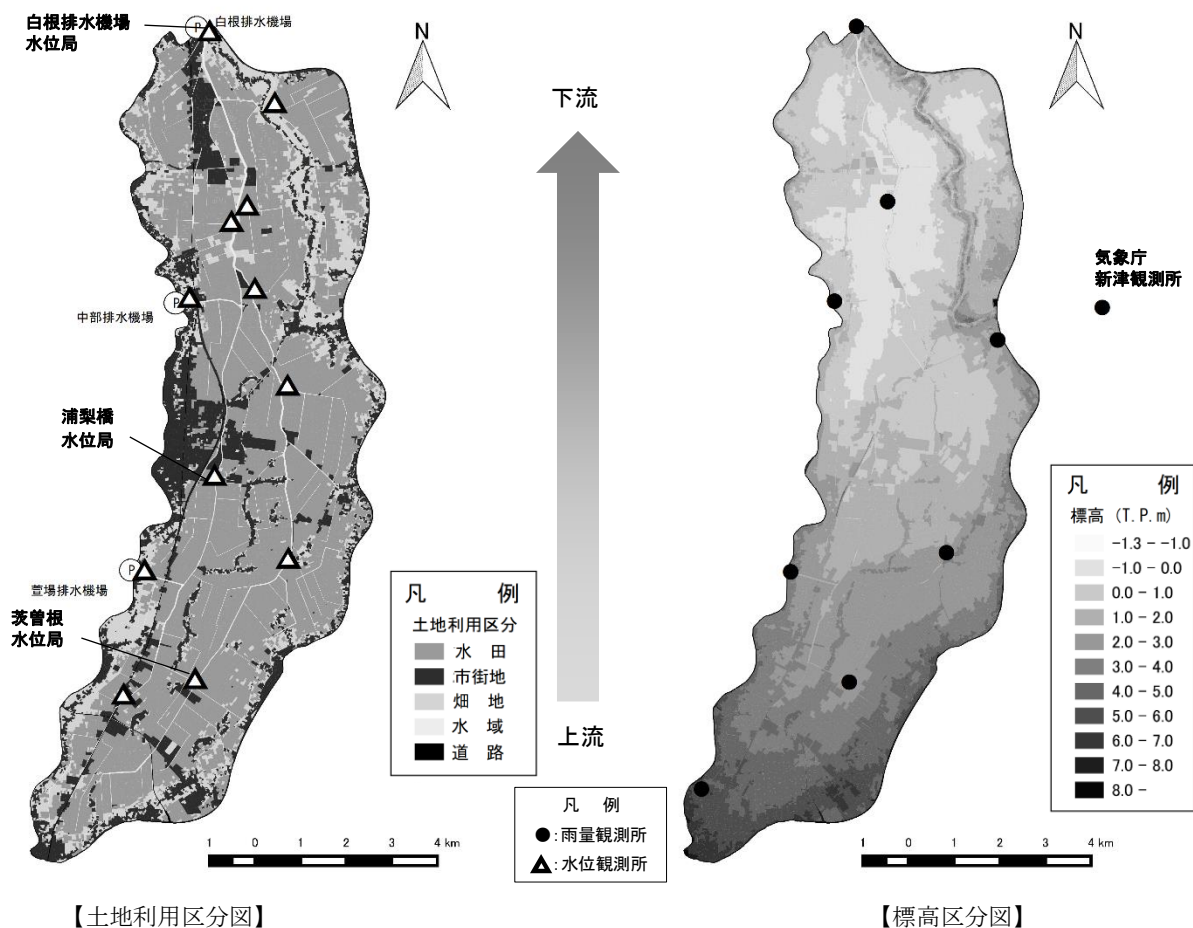


Fig.1 白根郷地区の概要

洪水時においては、白根排水機場、中部排水機場、萱場排水機場の3つの排水機場から中ノ口川に排水される。地域の基幹排水である3排水機場および幹線排水路は、30年確率の出水時に、水田は最大湛水深30cm以上の継続時間が24時間を超えないように、畑地と宅地は無湛水になるように整備されており、農地のみならず農地周辺に広がる市街地等の浸水被害防止にも貢献している。

3. 解析モデルの概要

本研究では、低平地の地形的特徴を表現できる吉川ら(2011)、宮津ら(2012)が開発した内水氾濫解析モデルを使用した。このモデルは、①各土地利用からの流出量を計算する地目別流出モデル、②河川と幹線・支線排水路の流れを計算する河川・排水路網モデル、③氾濫水の伝播を計算する氾濫流解析モデル、の3つのサブモデルで構成される。このモデルの基本となるサブモデルの概要を以下に示す。

3.1 地目別流出モデル

低平地は、湛水を許容する水田と、湛水を許容しない宅地、畑など、異なる流出形態を持つ土地利用から構成されていることから、このモデルでは土地利用別に後述するセルを設定する。セルごとの流入量を以下に述べる運動方程式で計算し、これを貯留方程式(降水量を入力データとする連続式)と組み合わせてセル内の水位変化を追跡している。

3.1.1 水田

水田からの流出は排水マスと樋管を経て排水路に排除される。よって、樋管、排水マスの流出入量をそれぞれオリフィス、セキの公式を用いて計算し、排水能力の小さい方を水田流出入量としている。

$$|q_{PO}| = C_P A \sqrt{2g(|h_P - y_P|)} \quad (|q_{PO}| < |q_{DO}| \text{のときに採用}) \quad (1)$$

$$|q_{DO}| = C_D B (|h_D - y_D|)^{3/2} \quad (|q_{PO}| > |q_{DO}| \text{のときに採用}) \quad (2)$$

ここに、 $|q_{PO}|$:オリフィス式による流出入量 (m^3/s)、 C_P :オリフィスの流量係数(無次元)、 A :孔断面積 (m^2)、 h_P :オリフィス下端を基準とした田面水位 (m)、 y_P :オリフィス下端を基準とした排水路水位 (m) (y_P の最小値は0とする)、 $|q_{DO}|$:セキ公式による流出入量 (m^3/s)、 C_D :セキの流量係数 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)、 B :セキ幅 (m)、 h_D :排水マスのセキ板上端を基準とした田面水位 (m)、 y_D :排水マスのセキ板上端を基準とした排水路水位 (m) (y_D の最小値は0とする)である。

田面水位・排水路水位が畦畔高を超えた場合は、畦畔からの越流量を以下のセキ公式で計算している。

$$|q_P| = E_P B_P h^{3/2} \quad (3)$$

ここに、 E_P :流量係数 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)、 B_P :末端排水路延長 (m) (畦畔越流が生じる区間長に相当)、 h :畦畔上端を基準とした越流水深 (m)である。

3.1.2 畑地および市街地

畑地、市街地の浸水位(セル水位)に応じた流出入量(q_F , q_C)は、畦畔を越流した場合の水田と同様に以下のセキの公式によって計算している。ただし畦畔は設定しない。

$$|q_F| = E_F B_F h^{3/2}, \quad |q_C| = E_C B_C h^{3/2} \quad (4)$$

ここに、 E_F , E_C :流量係数 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)、 B_F , B_C :末端排水路延長 (m) (越流が生じる区間長に相当)、 h :地盤高を基準とした越流水深 (m)であり、添字 F , C はそれぞれ畑地、市街地を示す。

3.2 河川・排水路網モデル

流域内の河川および幹線・支線の排水路は一次元不定流としてモデル化している。流れの計算は、以下の運動方程式と連続式を基礎式としている。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta_D}{\partial x} + \frac{n^2 v |v|}{R^{4/3}} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{LAT} \quad (6)$$

ここに、 v : 流速 (m/s), t : 時間 (s), g : 重力加速度 (m/s²), η_D : 排水路水位 (m), x : 距離 (m), n : 粗度係数 (s/m^{1/3}), R : 径深 (m), A : 流積 (m²), Q : 流量 (m³/s), q_{LAT} : 排水路に沿う単位長さ当たりの横流入量 (q_{PO} , q_{DO} のいずれか, q_P , q_F , q_C の合計値) (m²/s) である。

3.3 氾濫流解析モデル

このモデルは、土地利用地目や地形形状に合わせた自由度の高い計算点配置が可能な地形適合セルを導入している点が大きな特徴である。地形適合セルは、地形形状を任意多角形で表現できる。各セルの標高情報は、セル内の平均標高に加えて、セルを構成する線分に個別に与えられるため、線状構造物による流動への影響も反映することが可能である。氾濫流解析では、流出量算定モデルで求めた当該・隣接セル間の流出入量 q_{ADJ} (q_{PO} , q_{DO} のいずれか, q_P , q_F , q_C の合計値) からセル水位を算出し、隣接セル間に水位差が発生する場合は、非線形項である移流項を除外した以下の運動方程式と連続式を基礎式として、セル間の氾濫水移動の計算を行い、任意時刻におけるセル水位を最終的に決定している。

$$\frac{\partial q_{ADJ}}{\partial t} + ghl \frac{\partial \eta}{\partial s} = - \frac{gn_K^2 |q_{ADJ}| q_{ADJ}}{h^{7/3} l} \quad (7)$$

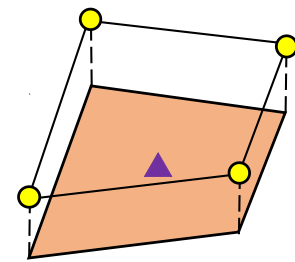
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{A_K} \left(\sum_{i=1}^m q_{ADJi} \right) \quad (8)$$

ここに、 q_{ADJ} : 当該・隣接セル間の流出入量 (m³/s), η : 氾濫セル水位 (m), n_K : セルの粗度係数 (s/m^{1/3}), h : 線分境界との越流水深 (m), A_K : セル面積 (m²), l : セル辺長 (m), s : 隣接セルとの重心間距離 (m), m : 隣接セル数, i : セル番号である。

4. 対象地区におけるモデル適用方法

4.1 モデル適用に必要な流域諸元と整理方法

白根郷地区に先の内水氾濫解析モデルを適用した。モデルは21,000の地形適合セルと454点の河川排水路網から構成される。モデル適用に必要な流域諸元と整理方法をTable 1に示す。モデル適用に際して同定を要したパラメータは、河川・排水路の粗度係数とセキ・オリフィスの流量係数だけであり、これらは、文献値を与えた後、12水位観測点の水位ハイドログラフの適合性を見て若干調整した(Table 1)。その他の諸量は、収集したデータないし文献値に基づいて設定しており、調整などは行っていない。



▲ セル内平均標高値
● 線分境界標高値

Fig.2 地形適合セルのデータ構造
宮津ら (2012) の原図を一部改変

Table 1 モデル適用に必要な流域諸元と整理方法

項目	流域諸元	整理方法
地形適合セル	作成手順	GIS 上で解析対象流域を 21,000 セルの任意多角形に分割した。その作成手順は次の通り。 1 次セル：現地調査などにより対象流域を、河川、幹支線排水路流域に分割 2 次セル：1 次セルを土地利用属性から 5 つに分割 3 次セル（地形適合セル）：2 次セルを水田セルは標高差 0.1m、その他は標高差 0.5m 程度となるよう分割
	土地利用属性	1/2,500 地形図の地図記号を基に水田、畑地、市街地、道路、水域の 5 つに区分
	セル平均標高、セル面積、セル重心座標、セル辺座標	標高は国土地理院 5m メッシュ標高より整理 セル面積、座標は GIS で整理
河川・排水路網モデル	河床高、縦横断座標	解析対象流域の河川・幹支線排水路について縦横断の変化点、流入点から 454 点をモデル化 排水路工事図面、河川測量図面から縦横断を整理
	粗度係数	材料から文献値（農業農村工学会，2014）の範囲内で水位ハイドログラフの適合性より調整し，0.020～0.060 を採用
地目別流出モデル	畦畔高，水田流出孔径，排水マス幅，排水マス深さ	現地調査より次の値を使用 畦畔高：30cm，水田流出孔径：15cm，排水マス幅：35cm，排水マス深：35cm
	排水マス・末端排水路の存在密度	新潟県の圃場整備区間の図面を基に，次の値を使用 水田 75m/ha，畑地 75m/ha，市街地 120m/ha
	セキ・オリフィスの流量係数	近隣地区の文献値（宮津ら，2012）を基に，水位ハイドログラフの適合性より調整し，次の値を使用 セキの流量係数 水田 0.23，畑地 0.23，市街地 0.30 オリフィスの流量係数 0.60
	保留量，基底流量	検討対象出水の実績水文データから設定（後述）
氾濫流解析モデル	氾濫流粗度係数	文献値（建設省土木研究所，1996）を採用 水田 0.035，畑地 0.020，市街地，道路 0.030，水路 0.025

4.2 対象出水

モデルの妥当性検証に用いた出水は、①近年で最も湛水被害の大きい平成 23 年 7 月 27 日～30 日出水と、②比較的近年の出水である平成 28 年 9 月 28 日～30 日出水、の 2 出水とした。平成 23 年 7 月出水は、新潟県や福島県会津で記録的な大雨となった出水であり、気象庁新津観測所の最大 3 日連続雨量は 314.5mm（200 年確率以上）で、最大時間雨量は 38.0mm（20 年確率）である。一方、平成 28 年 9 月出水は、最大 3 日連続雨量 63.5mm、最大時間雨量 15.0mm の中小出水である。

4.3 水文諸量と整理方法

白根郷地区には、地区内に 8 点の雨量観測点、12 点の水位観測点があり（Fig.1）、3 箇所の排水機場では実績排水量が得られる。平成 23 年 7 月出水を例として、モデル適用に際して必要な水文諸量（雨

量、基底流量、雨水保留量、排水機場排水量) とその整理方法を **Table 2** に示す。雨量はティーセン分割した領域ごとに与え、基底流量、雨水保留量は出水時の水収支に基づいて定めており、排水機場排水量には実績値を用いた。地形適合セルの初期水位は、乾燥状態を仮定し 0mm として計算している。

Table 2 水文諸量とその整理方法 (H23.7 出水)

水文諸量	内 容
雨量	地区内 8 箇所の雨量観測所雨量を使用 (なお、気象庁新津観測所はティーセン占有面積が検討対象流域内にないため、8 箇所の中には含まれない) ティーセン分割による占有区域別に雨量を投入
基底流量	各雨量観測所の 1 時間雨量が 0.5mm 以下となる出水前期の排水機場排水量を基底流量に設定 ①集計期間：H23/7/27 10:00~7/27 21:00 (12h) ②集計期間の排水機場排水量：405,976m ³ ③基底流量：②/①=9.398m ³ /s
雨水保留量	出水期間の排水機場排水量と雨量から流出率を計算 ①出水期間：H23/7/27 10:00~8/2 9:00 (144h) ②出水期間総雨量 (流域平均)：307.4mm ③期間排水機場排水量：23,381,726m ³ ④降雨の総量：②×流域面積 (7,506ha) =23,073,444m ³ ⑤流出率：(③-出水期間基底流量) / ④=0.80 土地利用別保留量曲線はこの流出率に基づいて計算 (計算方法は 4.4 参照)
排水機場排水量	実績排水機場排水量を使用

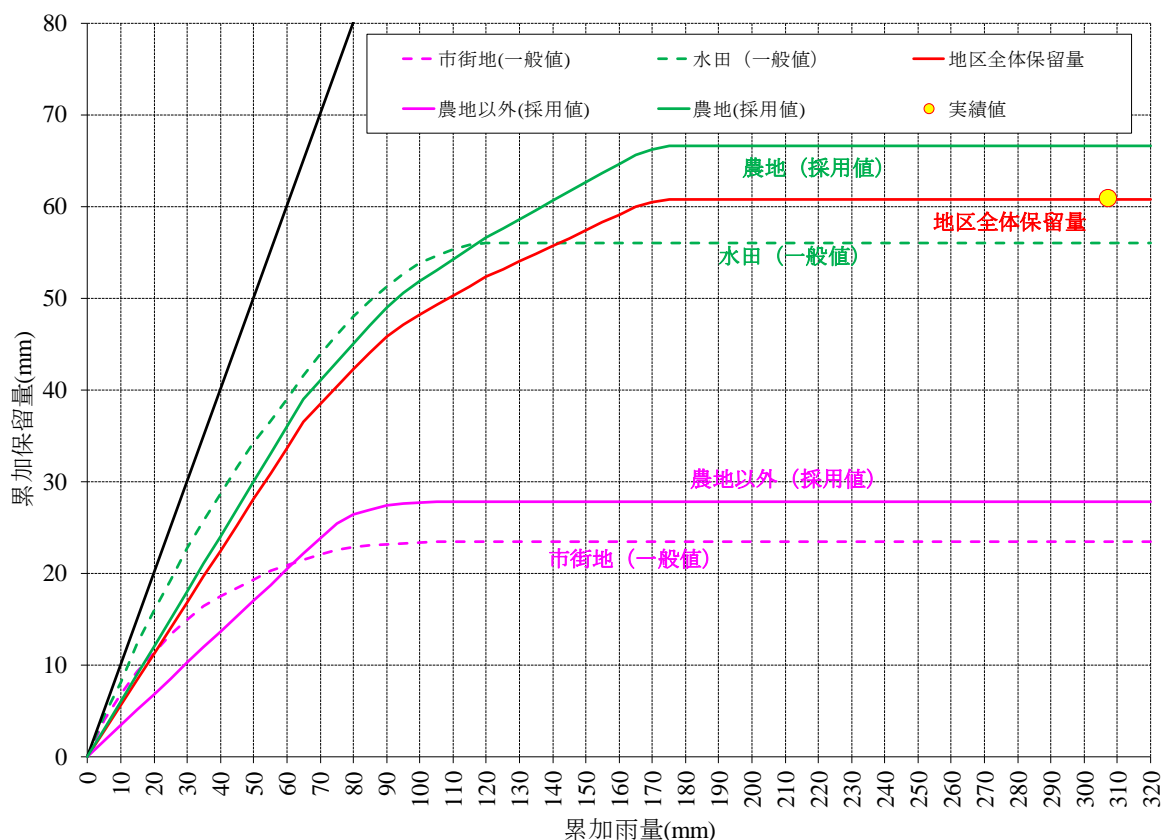


Fig.3 土地利用別保留量曲線 (H23.7 出水)

4.4 土地利用別保留量曲線の作成

土地利用ごとの流出特性を表現するため、出水別の実績雨量、排水量から土地利用別保留量曲線を推定した。平成23年7月出水を例にとり、その作成方法を説明する。出水期間の総雨量307.4mmに対し、流出率が0.80であることから（Table 2）、地区の土中などに保留される雨水保留量は61.5mm（ $=307.4 \times (1-0.80)$ ）となる。対象地区では、地目を水田、畑地、市街地、道路、水域の5つに細分化し、面積を計測している。これら5地目を流出特性が大きく異なる①農地（水田4,607ha、畑地1,171ha）、②農地以外（市街地1,479ha、道路216ha、水域33ha）の2つに大別し、土地利用別保留量を設定した。

文献（農業農村工学会，2006）に示されている保留量曲線の地目別一般値をベースとして、これに補正係数と各土地利用別面積を乗じた地区全体の保留量が、累加雨量307.4mmで61.5mmの累加保留量となるように保留量曲線を求めた。その際、①農地は、畑の面積と比べ水田の面積が多くを占めることから水田の保留量曲線を、②農地以外は、市街地の面積が多くを占めることから市街地の保留量曲線をベースとした。Fig.3に作成した土地利用別保留量曲線（H23.7出水）を示す。

5. モデル適用結果と適応性の検証

内水氾濫解析モデルを白根郷地区に適用し、排水路各点の水位ハイドログラフ、セルごとの湛水深を計算した。モデルの再現性は、排水路12地点で水位が観測されていることから、これら水位観測点の水位ハイドログラフについて観測値と計算値を比較して検証した。さらに、平成23年7月出水においては、実績湛水区域が整理されていることから、湛水区域についても観測値と計算値を比較した。

5.1 排水路水位の再現性

Fig.4に白根排水機場、浦梨橋、茨曾根地点の検証2出水の水位ハイドログラフを示す。2出水ともピーク水位および水位波形は良好に再現できている。とくに平成23年7月出水では、降雨ピークが3箇所あり、それに伴って水位は大きく変動しているが、上・中・下流3地点のいずれも計算水位は観測水位にほぼ合致している。他の9水位観測点についても同様で、若干のバラツキはあるが、ピーク水位、水位波形が概ね良好に再現できている。12水位観測点において水位のRMSEを求めたところ、H23.7出水の地点別RMSEは0.175～0.414（m）、H28.9出水の地点別RMSEは0.088～0.284（m）であった。

平成23年7月出水は計画規模を上回る大出水で、平成28年9月出水は中小出水であるが、排水路水位の再現性については、いずれの出水規模でもかなり良好と言える。

5.2 湛水区域の再現性

平成23年7月出水の湛水区域図をFig.5に示す。実績の湛水区域図は、地元土地改良区が最大湛水深30cm以上の区域を目視で現地調査したものである。実績と計算の湛水区域を比較すると、下流部の湛水区域は実績と計算がほぼ合致している。中・上流部の湛水区域は、湛水が生じている場所は概ね再現できているが、計算の方が実績よりも湛水区域がやや小さく見積もられている。

湛水面積をTable 3に示す。地区全体で実績と計算の湛水面積を比較すると、最大湛水深30cm以上の湛水区域が実績1,453haに対し、計算では911haとなり、実績の6割程度の湛水面積となった。また水田域に限って実績と計算の湛水面積を比較すると、最大湛水深30cm以上の湛水面積は実績の8割程度となった。目視調査された実績湛水区域にはある程度の誤差が含まれること、計算で湛水深が20cm以上と見積もられた区域が地区全体で599ha、水田域だけで563haあることを考慮すれば、湛水面積の再現結果はやや過小であるものの決して悪くはない。

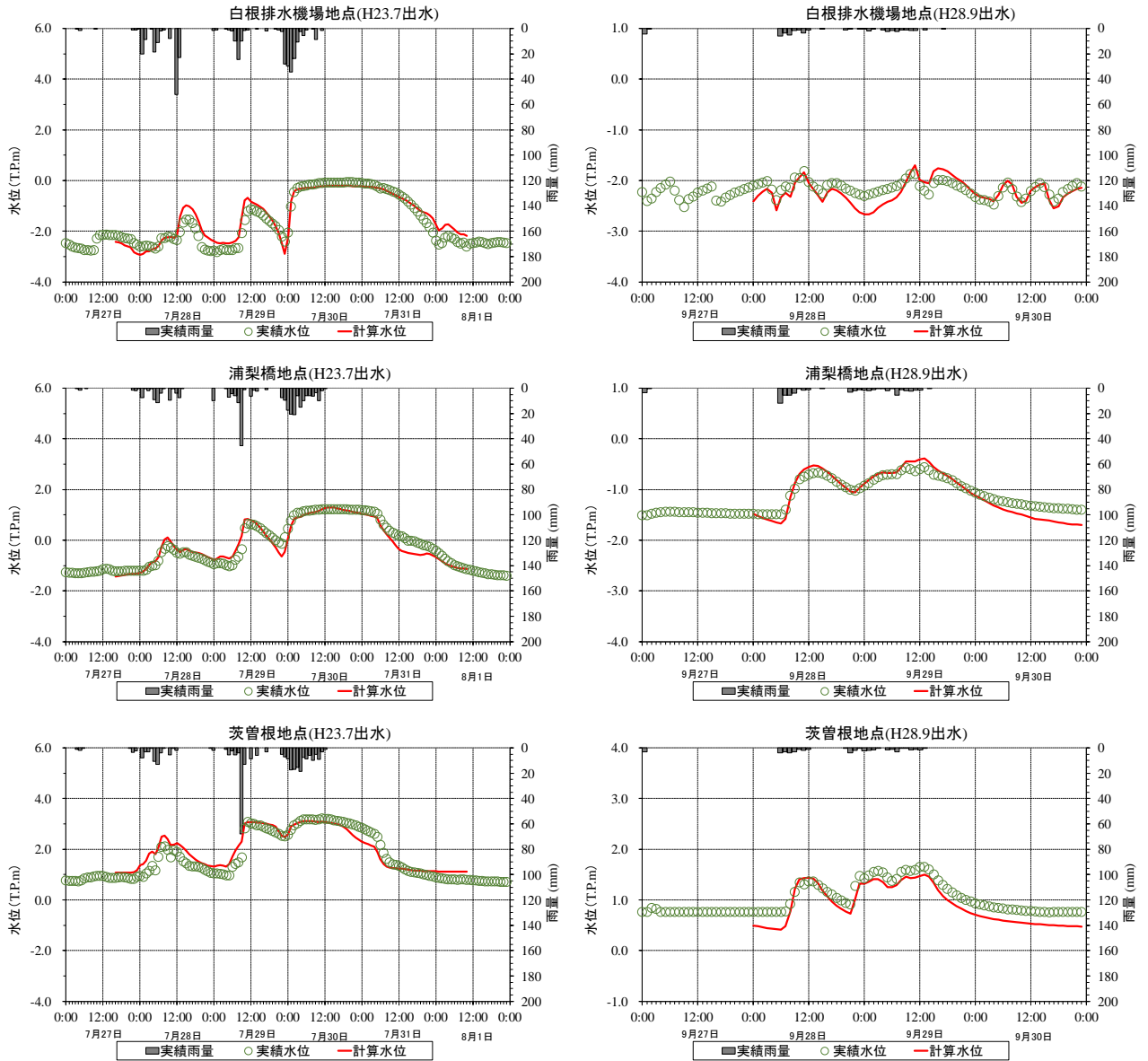


Fig.4 水位ハイドログラフの再現結果 (左：平成 23 年 7 月出水，右：平成 28 年 9 月出水)

なお、湛水面積がかなり過小となった中流部の排水区域（三枚瀧排水路上流域，64ha）について精査したところ、同区域の 8 割以上で 30cm 以上の湛水が発生しており、当該区域に降った雨量のほぼ全てが湛水しなければ実績湛水深が説明できないことが分かった。この排水区域では、何らかの理由で排水路が閉塞し雨水が排除できなかったか、近傍河川からの流入が生じるなど、特殊な事象が湛水深を大きくした可能性も否定できない。

湛水面積は過小推定であったものの、湛水区域の再現状況を総合的に見れば、水位だけでなく湛水区域についても概ね再現できていると言えよう。

5.3 モデルの適応性の評価

先に述べた通り、平成 23 年 7 月出水および平成 28 年 9 月出水へのモデル適用結果から、対象地区内の河川・排水路水位がかなり高い精度で再現できること、内水氾濫に伴う湛水区域が概ね再現できることが確認できた。高い再現性の要因としては、①対象地区は農地主体の低平地域であり、農地に特有な

畦畔などの微細な地表面の構造や、氾濫水の平面的な伝播が表現可能な内水氾濫解析モデルが採用されており、同モデルの適応性が高かったこと、②地区内に雨量観測所が8箇所あり、検討対象出水の雨量分布が細かく把握できたこと、③完全機械排水区域であり、地区外への排水量がポンプ排水量で把握できたため、雨量とポンプ排水量から検討対象出水の基底流量、保留量が算出可能であったこと、などが挙げられる。

Table 1 に示すように、セルに付随する標高データ、土地利用、排水系統などモデル適用に要する流域諸元が多量であることから、それらの準備にかなり労力を要する点がこのモデルの難点である。その反面、このモデルでは、各種の流域諸元の積み上げからモデル構造が決定でき、モデル適用に際しては、河川・排水路の粗度係数とセキ・オリフィスの流量係数を文献値から多少調整した程度で、パラメータの決定にはあまり労力を要しない。この点はモデルの利点と評価できよう。

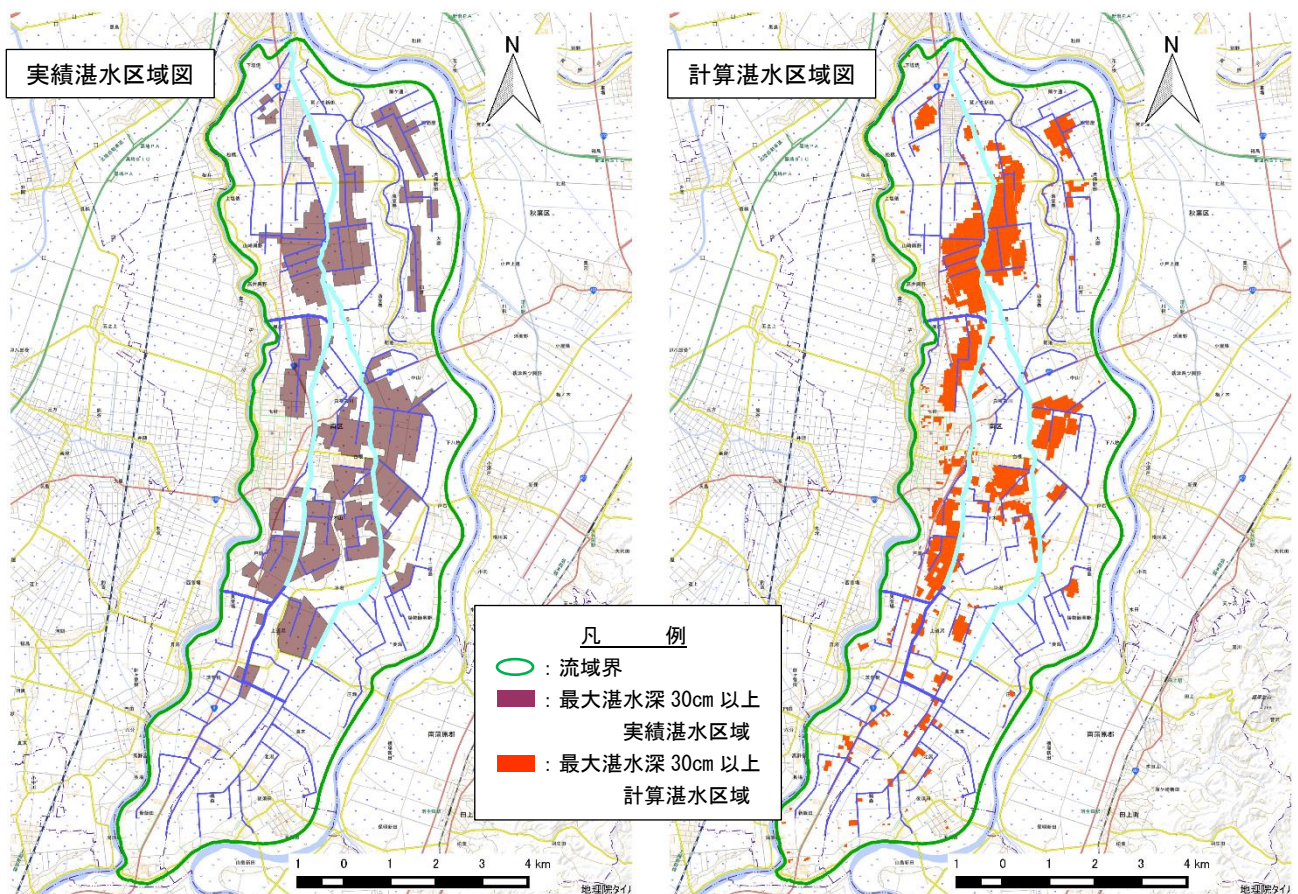


Fig.5 湛水区域図 (H23.7 出水, 左:実績, 右:計算)

Table 3 湛水面積 (H23.7 出水)

最大湛水深	湛水面積 (ha)		湛水面積 (水田のみ) (ha)	
	計算	実績	計算	実績
$h \geq 30\text{cm}$	911	1,453	851	1,107
$20\text{cm} \leq h < 30\text{cm}$	599		563	
$10\text{cm} \leq h < 20\text{cm}$	1,184		1,082	
$0\text{cm} < h < 10\text{cm}$	4,812		2,111	

6. おわりに

本研究では、吉川ら（2011）、宮津ら（2012）が開発した内水氾濫解析モデルを新潟県の白根郷地区に適用し、平成23年7月出水および平成28年9月出水を対象として氾濫解析を実施した。地区内河川・排水路水位、湛水区域とその面積について再現性を確認したところ、いずれも良好であるが、とくに河川・排水路水位についてはかなり良好な再現結果を得た。

近年、気候変動に伴う集中豪雨などの異常気象の増加から、浸水被害等の自然災害の増加が懸念されており、地域の防災対策を効率的に進めて行くため、氾濫区域の予測精度の向上が求められている。そのためには、地区特有の排水状況を踏まえた内水氾濫解析手法の選定が重要となる。本研究では、白根郷地区の排水状況の把握に適した手法として、流域内の微小な標高差、細かい水路配置や土地利用分布などを考慮できる内水氾濫解析モデルを採用した。ここでは、同モデルの適応性を検証することに主眼を置いたが、今後は地形適合セルの入出力データを利用して排水状況を細かく分析し、場所ごとの湛水発生原因について検討したい。

また、近年の河川計画においては、浸水被害の推定に際して平面二次元流れを扱う氾濫解析モデルが多用されているが、25mないし50mの均等なメッシュによる解析がほとんどで、本研究の解析で採用された地形適合セルの適用事例は、実用上の解析ではあまり多くない。そこで、本研究で採用したモデルと従来の氾濫解析モデルの適応性を比較検討することも今後の課題である。

謝辞：本研究における解析は、白根郷信濃川下流地区のかんがい排水事業に関わる調査業務の一部として実施されたものである。本研究を実施するにあたり、新潟大学農学部・吉川夏樹准教授から内水氾濫解析モデルのプログラムをご提供いただくとともにご指導いただいた。また、農林水産省北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所から水文データを提供していただいた。サンスイコンサルタント株式会社からは内水氾濫解析モデルの適用に際して多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 秋山壽一郎，重枝未玲，小園裕司，草野浩之（2011）：治水システムを考慮した飯塚市街地の都市域氾濫解析と被害軽減効果の検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.67，No.4，pp.I_943-I_948
- 早瀬吉雄，角屋 睦（1993）：低平地タンクモデルとその基礎的特性—低平地タンクモデルによる流出解析法（I）—，農業土木学会論文集，No.165，pp.75-84
- 角屋 睦，早瀬吉雄（1981）：流出解析手法（その 14）—低平地タンクモデルによる洪水解析—，農業土木学会誌，Vol.49，No.4，pp.45-56
- 川池健司，井上和也，戸田圭一，野口正人（2004）：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析，土木学会論文集，No.761/II-67，pp.57-68
- 建設省土木研究所（1996）：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）—シミュレーションの手引き及び新モデルの検証—，pp.10-11
- 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課（2019）（参照日 2019.11.8）：平成 29 年度水害統計調査，表-20（オンライン）入手先<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00600590&result_page=1>
- 宮津 進，吉川夏樹，阿部 聡，三沢眞一，安田浩保（2012）：田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用，農業農村工学会論文集，No.282，pp.15-24
- 農業農村工学会（2006）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」，p.218
- 農業農村工学会（2014）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」，pp.186-187
- 関根正人，池田 遼（2014）：東京東部低位地を対象とした浸水・氾濫の数値予測，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.I_1429-I_1434
- 吉川夏樹，宮津 進，安田浩保，三沢眞一（2011）：低平農業地帯を対象とした内水氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.67，No.4，pp.I_991-I_996

II. 部会報告編

降雨の空間分布が集中型流出モデルのパラメータに与える影響

Study on Impact of Spatial Distribution of Rainfall Intensity on Parameters of Lumped Rainfall-Runoff Model

刈谷成希*・工藤亮治*・近森秀高*

*岡山大学環境生命科学研究所 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

KARIYA Shigeki*, KUDO Ryoji*, CHIKAMORI Hidetaka*

*Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University
(3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530)

Abstract

The uncertainty in real-time flood forecasting system by using hydrological models are caused by 1) forecasted rainfall as an input to the models, 2) hydrological model structure, 3) setting model parameters, and 4) initial conditions of forecasting model. In this study, we examined the influence on parameter setting for a lumped rainfall-runoff model caused by the differences in the characteristics of spatial distribution of rainfall intensity. First, synthetic rainfall events that have the same mean areal rainfall but different spatial concentration of rainfall intensity were generated base on radar rainfall data. The generated rainfall data, then, were input to a distributed rainfall-runoff model to investigate the changes of flood peak discharges due to differences in spatial variability of rainfall. In addition, in order to examine the changes in parameters of a lumped rainfall-runoff model, we calibrated the parameters of a lumped model to the synthetic flood events generated through input the synthetic rainfall data to distributed runoff model. Our simulations showed that the larger flood peak discharges occurred with spatial concentration of rainfall being stronger, and that the parameters of the model changed depending on the spatial concentration of rainfall intensity. The results in this study implies that since spatial distribution of rainfall has significant influence on the calibration, parameter setting in consideration of rainfall characteristic is necessary to develop more robust flood forecasting system.

Key words: parameter uncertainty of hydrological models, spatial distribution of rainfall, synthetic rainfall, distributed hydrological model, lumped hydrological model

要 旨

本研究では、流域平均降雨量は変えずに降雨強度の空間分布のみが異なる複数ケースの模擬降雨を作成し、これを分布型流出モデルに入力することで降雨の空間分布が洪水ピーク流量に与える影響を分析した。また、分布型モデルより算出された計算値を模擬洪水と見なし、これを対象に集中型流出モデルのパラメータ同定することで降雨の空間的集中度の違いが集中型モデルのパラメータに与える影響を分析した。その結果、流域平均降雨量が同じでも局地的に強い降雨が発生しているケースほど、ピーク流量が増加することを示した。また、降雨の空間的集中度の違いに応じて集中型モデルのパラメータ値が変化することを示した。このことから、集中型流出モデルのパラメータを同定する際は、降雨の空間分布などの特性を考慮することが必要と考えられる。

キーワード: 水文モデルのパラメータの不確実性, 降雨の空間分布, 模擬降雨, 分布型流出モデル, 集中型流出モデル

1. はじめに

水文モデルによる流出予測精度に影響を及ぼす不確実性の発生要因には、1) 水文モデルへの入力である気象予報値(降雨予測値)、2) 水文モデルの構造、3) 水文モデルのパラメータの設定、4) 予測開始時点のモデルの初期条件などが挙げられ(佐山ら, 2005)、予測精度の向上にはこれらの不確実性の特性を明らかにする必要がある。これまで、モデル構造による流出予測の不確実性に関しては集中型流出

モデル，分布型流出モデルの両者でいくつかの研究があるが（佐山ら，2005；安達ら，2006 など），本研究では集中型モデルのパラメータ設定の不確実性に着目した．集中型モデルは構築が容易で計算負荷も小さいため実時間流出予測という観点では実用上有用なモデルと考えられるが，予測システムの構築という点では出水ごとにパラメータが変動するという問題があり，流域固有のパラメータの設定に課題が残されている．

集中型モデルのパラメータが出水ごとに変動する理由の一つとして，本研究ではモデルへの入力となる降雨データの影響，特に降雨の空間分布に着目し，この降雨の空間分布が集中型モデルのパラメータに与える影響について検討した．

2. 対象流域および解析資料

対象流域は，岡山三大河川の一つである吉井川水系の上流部に位置する吉田ダム流域（流域面積 217.4 km²）である（Fig. 1）．流域の大部分は山地であり，標高は 210～1,250 m の範囲である．

対象出水は，2006 から 2018 年に吉田ダムで観測されたピーク比流量 1.0 m³s⁻¹km⁻² 以上の出水から，降雨強度の空間分布のばらつきが大きい 3 出水を対象とした（Table 1）．

解析資料には同出水期間中の時間単位のダム流入量およびレーダーアメダス解析雨量（空間解像度 1 km. 以下，レーダー雨量）を用いた．前者は国土交通省が公開している水文水質データベースから，後者は気象庁から入手した．また，流域内の標高データには国土数値情報が提供している標準 3 次メッシュ（およそ 1 km×1 km）を用いた．

3. 解析の概要と方法

3.1 解析目的および概要

集中型流出モデルは対象流域を一つの単位として流出計算を行うため，入力には流域平均降雨量となる．しかし，実際の大雨には局地的な強い降雨を伴うものもあれば流域内で一様の降雨となるものもあり，流域平均降雨量が同程度の降雨であってもその空間的特性は多様である．このような降雨の空間特性の違いが，流域平均値を入力とする集中型流出モデルのパラメータに及ぼす影響を把握することは，より高精度な流出予測を行う上で重要となる．そこで，本研究では降雨の空間分布と集中型流出モデルのパラメータとの関係につ

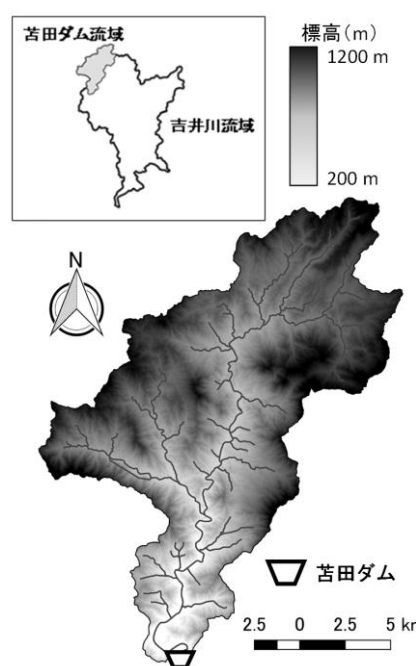


Fig. 1 吉田ダム流域の概要図

Table 1 対象出水一覧

出水 No.	出水期間			日数	総流域平均降雨量 (mm)	総流出高 (mm)	ピーク流量 (m ³ /s)	ピーク比流量 (m ³ s ⁻¹ km ⁻²)
	年	開始	終了					
1	2006	7/15	7/21	7	266.6	166.1	525.3	2.4
2	2011	5/29	5/31	3	156.0	97.5	342.7	1.6
3	2017	8/7	8/8	2	142.7	53.8	317.4	1.5

いて検討を行った。

異なる降雨イベント同士の比較では、出水ごとに総降雨量や降雨時系列、降雨イベント開始時点の流域の乾湿条件（先行降雨履歴）などが異なるため、純粋に降雨の空間分布のみを対象とした議論は困難である。そこで、ある特定の降雨イベントをベースとして、総降雨量や降雨時系列、流域平均降雨量などを変化させずに降雨の空間分布だけを変えた模擬降雨を分布型モデルに入力することで模擬洪水を作成し、これを対象出水とすることで解析を行った。解析内容は、まずレーダーアメダス解析雨量を用いて、対象とする3出水それぞれで、各時間ステップの流域平均降雨量は変化させずに降雨の空間的な集中度のみを変化させた模擬降雨イベントを複数パターン作成し、この一連の模擬降雨を分布型モデルに入力することで、降雨の空間分布が洪水ピーク流量に与える影響を分析した。次に、模擬降雨イベントを分布型モデルに入力することで得られた計算流量を模擬的な洪水イベントとし、この模擬洪水に対して集中型流出モデルのパラメータを同定することで、降雨強度の空間分布が集中型モデルのパラメータに与える影響を吟味した。

3.2 模擬降雨イベントの作成

解析に必要な模擬降雨イベントの作成には1 km グリッドのレーダー雨量を用いた。作成方法には立川ら（2003）によって提案された手法を用いており、手順を以下に示す。

- (1) 各グリッドの降雨強度 R を時間ステップ（本研究では1h）ごとに n 乗する。
- (2) 各時間ステップの n 乗前のレーダー雨量による流域平均値 R_{ave} と n 乗後の流域平均値 R^n_{ave} とが等しくなるような係数を乗じて補正する。

上記の手順を式で表すと以下のようなになる。

$$R'_j = R_j^n \frac{R_{ave}}{R^n_{ave}} = R_j^n \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{\sum_{i=1}^m R_i^n} \quad (1)$$

ここに、 R'_j ：グリッド j の模擬降雨強度（mm/h）、 m ：総グリッド数。

空間分布のばらつきの大小は n の値の大小によって変化させることができ、本研究では、 $n = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00$ の8ケースを採用した。なお、 $n = 1.00$ というのはレーダー雨量値に等しい降雨の空間分布であることを意味する。

作成した模擬降雨イベントについて、各対象出水の流域平均降雨量が最大時の降雨強度の空間分布をFig. 2に示す。Fig. 2 (a), (d), (g)は降雨強度を0.25乗して作成したケースであり、降雨の空間分布のばらつきが小さく、流域内で一様の降雨となっていることが確認できる。一方、Fig. 2 (c), (f), (i)は2.0乗して作成したケースであり、降雨の空間分布のばらつきが強化され、空間的な集中度の高い降雨が生じていることが確認できる。

4. モデルの概要と構築

4.1 流出モデル

本研究では、流出モデルに長短期流出両用モデル（Long- and Short- Term model ; LST モデル）（角屋・永井, 1988）の第1段タンクを用いた。LSTモデルの第1段タンクはFig. 3に示すように、上層と下層に分かれており、上層と下層の水分移動を表現するための浸透孔が設けられている。上層、下層タンクの連続式は次式で表される。

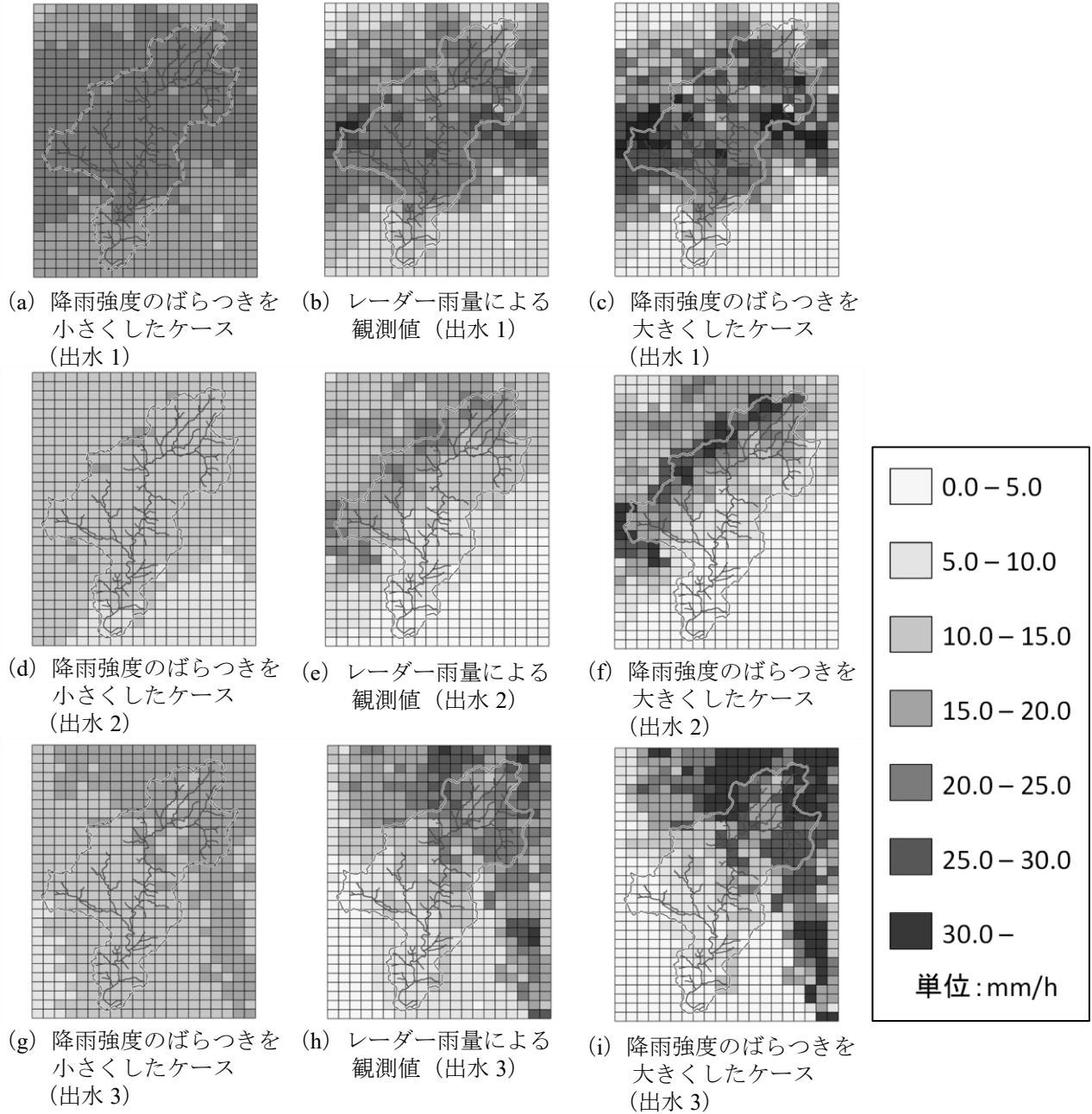


Fig. 2 流域平均降雨量が最大時の降雨強度の空間分布
 ((a), (d), (g) は観測値を 0.25 乗して作成. (c), (f), (i) は観測値を 2.0 乗して作成.)

$$\frac{dS_1}{dt} = r - E_1 - f - Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = f - Q_3 - g_1 \quad (3)$$

ここに、 S_1, S_2 : 貯留量、 t : 時間、 r : 流域平均雨量、 E_1 : 蒸発散強度、 f : 浸入強度、 Q_1, Q_2, Q_3 : 流出量、 g_1 : 第 2 段タンクへの供給強度である。なお、 Q_1 は表面流出、 Q_2 は速い中間流出、 Q_3 は遅い中間流出を想定しており、タンクからの流量 Q は流出成分の和より求まる。 Q, g_1 はそれぞれ次式から求まる。ただし、 Q_1 および Q_2 は貯留量が孔の高さ Z を超える場合のみ流出があるものとする。

$$Q_1 = a_1(S_1 - Z_1)^m, \quad m = \frac{5}{3} \quad (4)$$

$$Q_2 = a_2 S_1 \quad (5)$$

$$Q_3 = a_3 (S_2 - Z_3), \quad g_1 = b_2 S_2 \quad (6)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

ここに、 a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 : 定数, Z_1, Z_2, Z_3 : 流出孔高さ. 表面流は Manning 則に従うものとして $m = 5/3$ を採用している.

4.2 LST モデルの集中適用および分布適用

本研究では、集中型流出モデルおよび分布型流出モデルともに LST モデルを用いており、それぞれ「LST モデルの集中適用」および「LST モデルの分布適用」とした.

LST モデルの集中適用は、従来の集中型流出モデルと同様に、流域平均降雨を入力値として流域下流端の流量 Q を求める. LST モデルの第 1 段タンクにおける未知パラメータは、流出孔の係数 $a_1 \sim a_3$, 浸透孔の係数 $b_1 \sim b_2$, 流出孔の高さ $Z_1 \sim Z_3$, 初期貯留量 $S_1^0 \sim S_2^0$ の合計 10 個である. なお、計算開始時点では表面流出および速い中間流出は発生していないものと仮定し、計算開始時点での実測流出高 q_0 (mm/h) を用いることで S_1^0 および S_2^0 は以下のように求まる.

$$S_1^0 = 0.0 \quad (8)$$

$$S_2^0 = \frac{q_0}{a_3} + Z_3 \quad (9)$$

以上より、未知パラメータは 8 個となるが、集中型流出モデルでは遅れ時間 T_l も必要となるため、合計 9 個のパラメータ同定を行う. なお、集中適用における計算時間間隔 Δt は 1h とする. また、流域平均雨量はレーダー雨量を流域内で平均化した雨量を用いた.

LST モデルの分布適用では、流域をグリッドに分割し、各グリッドに LST モデルの第 1 段タンクを適用することで分布型流出モデルとした. 同モデルではレーダー雨量を各グリッドに入力し、各グリッドからの流出を落水線を基に流域下流端まで追跡することで流量を算出する (Fig. 4). 本研究では、レーダー雨量の空間解像能に合わせて流域を 1km グリッドに分割し、1km メッシュの標高データを用いて最急勾配法により落水線を作成した. LST モデルの分布適用によるグリッド間の流入出は Fig. 4 に示すように、上流タンクからの流出成分が下流タンクの流入成分となることで受け渡しが行われる. なお、一般的な分布型流出モデルとは異なり、斜面グリッドや河道グリッドの区別は一切せずに流域内の全グリッドで一様のパラメータとしている. モデルのパラメータは遅れ時間 T_l を考慮する必要が無く同定対象から除外されるが、初期貯留量 S_2^0 が同定対象に加えられるため合計 9 個のパラメータ同定を行う必要が

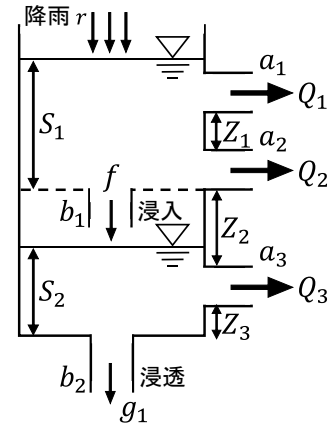


Fig. 3 長短期流出両用モデル (第 1 段タンク)

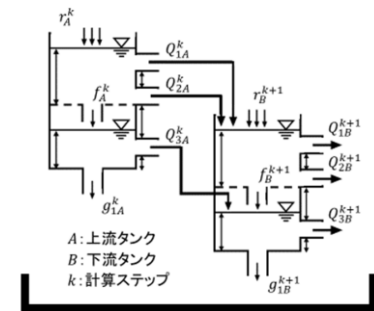


Fig. 4 長短期流出両用モデルの分布適用概念図

ある。また、分布適用における計算時間間隔 Δt は 100 秒とする。

モデルのパラメータ同定は、集中適用および分布適用ともに平方平均二乗誤差 (RMSE) を目的関数とし、差分進化法 (Differential Evolution ; DE) (Storn, 1996) を用いて出水ごとに行った。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{cal} - Q_{obs})^2} \quad (10)$$

ここに、 N : データ数, Q_{obs} : 苦田ダムの観測流入量 (m^3/s), Q_{cal} : 計算流入量 (m^3/s)。

4.3 LST モデルによる実測洪水の再現結果

同定したパラメータを用いた LST モデルの集中適用および分布適用による洪水の再現結果を Fig.5 に示す。両モデルともに再現性は良好であった。RMSE (m^3/s) は 3 出水の平均値が集中適用で $13.07 m^3/s$, 分布適用で $15.56 m^3/s$ となった。このことから、個別洪水の再現性にモデル間での違いはほとんどなく集中適用および分布適用による再現性は定量的にみても問題はないと判断した。

5. 解析結果および考察

5.1 降雨の空間分布が洪水ピーク流量に与える影響

3.2 で作成した一連の模擬降雨を分布適用した LST モデルに入力して得られた流量を Fig. 6 に示す。なお、モデルのパラメータは 3.2 で同定した値を用いた。Fig. 6 は横軸 (時間) の幅をピークを含む 24 時間、縦軸 (流量) の幅をピークを含む $300 m^3/s$ で固定し、ピーク付近を拡大したヒドログラフである。全 8 ケースのうち $n = 0.50, 1.00, 1.50, 2.00$ の 4 ケースを例に示している。同図より、降雨の空間的なばらつきが小さい $n = 0.50$ の場合にピーク流量が小さくなっており、降雨の空間的な集中度が大きく (n が大きく) なるほどピーク流量が大きくなる傾向がみられた。このことは、時間降雨量の流域平均値が同じでも空間内に局地的な降雨があるケースでは洪水ピーク流量が大きくなることを示している。

なお、降雨の空間分布の違いによってピーク流量に変化が生じたものの、モデルに入力した時間降雨量の流域平均値は全ケースで同値であるため総流量に大きな変化はなかった。

5.2 降雨の空間分布が集中型流出モデルのパラメータに与える影響

5.1 で分布型モデルにより算出した模擬洪水に対し、集中適用した LST モデルのパラメータ同定を行

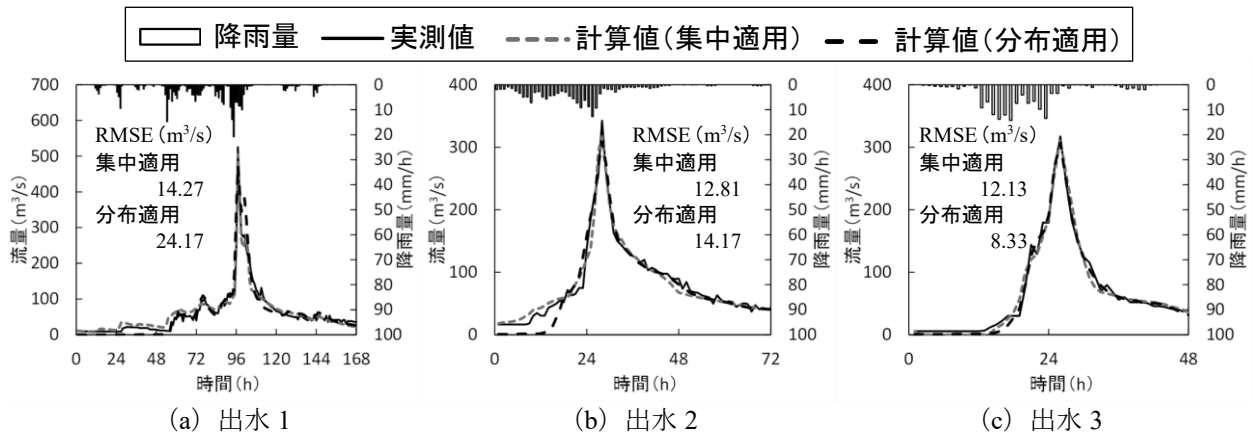


Fig. 5 長短期流出両用モデルによる洪水の再現結果

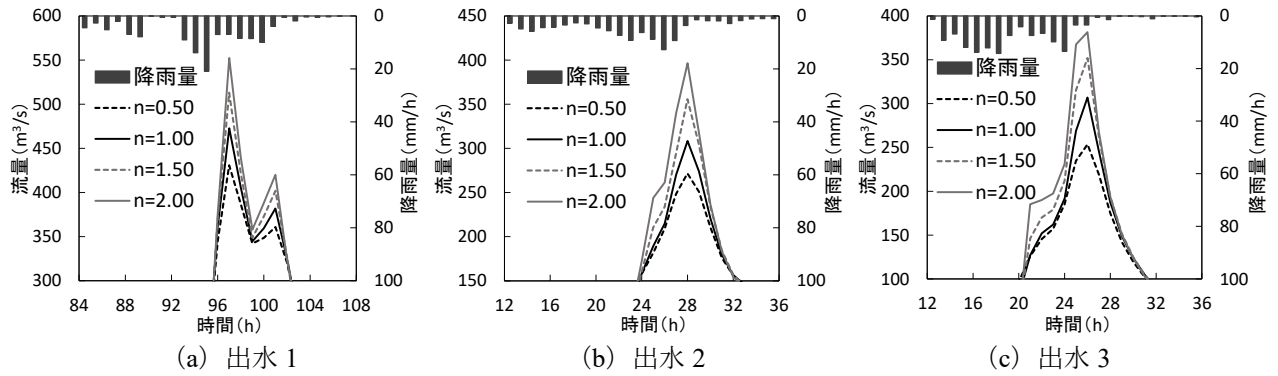


Fig. 6 降雨の空間分布の違いによる流量の変化

った結果について、同定されたパラメータの変化を Fig. 7 に、同定されたパラメータを用いて模擬洪水を LST モデルの集中適用で再現した際の流出成分を Fig. 8 に示す。パラメータの同定は、実測洪水の再現と同様に RMSE ((10) 式) を目的関数とし、差分進化法を用いてケースごとに行った。Fig. 7 は各ケースにおけるパラメータ値を全ケースの平均値で除した値を示している。Fig. 8 の破線はパラメータ同定対象の模擬洪水である。同図には同定パラメータで模擬洪水を再現した際の流出成分 Q_1 , Q_2 , Q_3 を示しており、積み重ねた面グラフの外縁は (7) 式から分かるように計算流量のハイドログラフとなる。

Fig. 7 のパラメータ変化について流出孔のパラメータである $a_1 \sim a_3$ をみると、全出水において a_3 はケース間で大きな差は見られないのに対し、降雨の空間分布のばらつきが大きく (n が大きく) なるにつれ a_1 は大きくなる。 a_2 は出水によって傾向が異なっており、出水 1 と 2 では降雨の空間分布のばらつきが大きく (n が大きく) なるにつれて小さくなり、出水 3 では $n = 1.75$ および 2.00 のケースで大きくなった。 上層から下層への浸入孔のパラメータ b_1 は、全出水において降雨の空間分布のばらつきが大きいケース ($n = 1.75$ 以上) で小さくなる傾向を示した。 流出孔高さのパラメータである z_1 は出水によって変化の程度に差はみられるが、 $n = 1.25$ 以上で大きく、 $n = 1.00$ 以下で小さくなる傾向がみられた。

Fig. 8 をみると、模擬洪水を示す破線と流出成分を示す面グラフの外縁が全てのケースにおいて概ね一致しており、同定パラメータを用いれば LST モデルの集中適用でピークが異なる洪水も十分に再現できていることが分かる。 流出成分をみると、出水 1 と 2 において低水部を表現している Q_3 が各ケースでほとんど変化しないのに対し、降雨の空間的な集中度が高いケースほど Q_1 は増加、 Q_2 は減少しており、ケースによって高水部の流出成分が変化していることが分かる。 特に降雨の空間的な集中度が最も高い $n = 2.00$ では高水部のほとんどを Q_1 で表現している。 出水 3 は、降雨の空間的な集中度が高くなるにつ

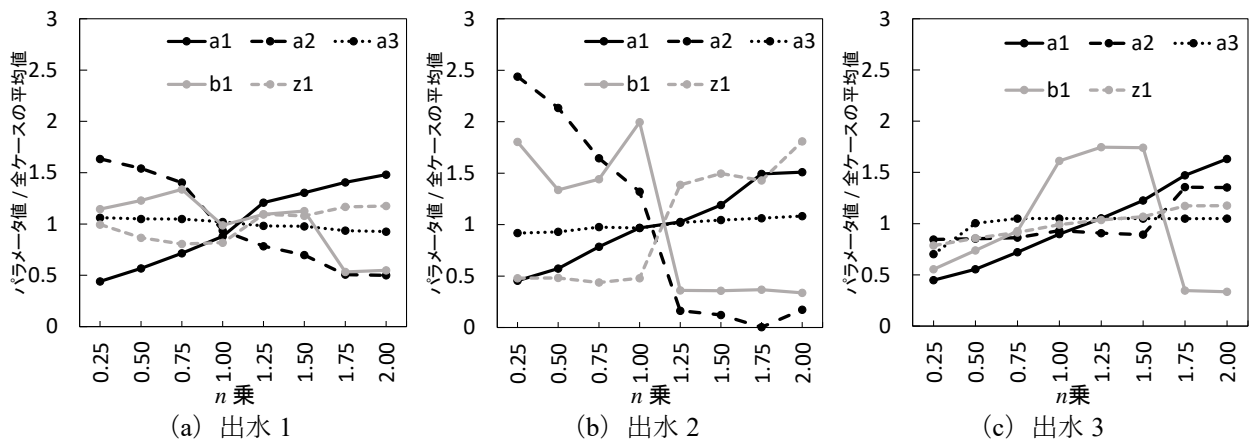


Fig. 7 降雨の空間分布の違いによるパラメータの変化

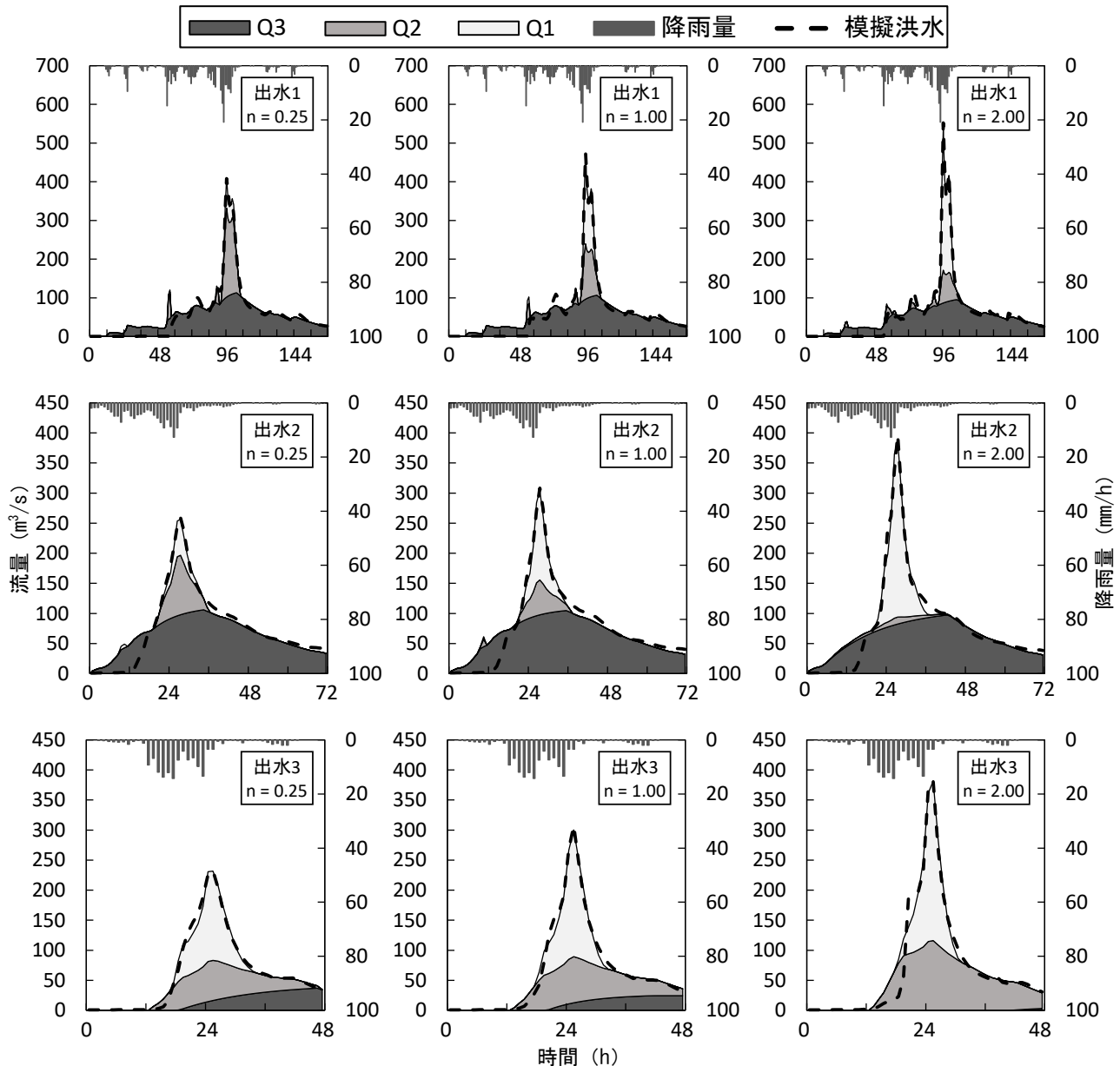


Fig. 8 降雨の空間分布の違いによる流出成分の比較

れて Q_3 が減少し、その分を Q_2 が補う形で増加しており、他の2出水とは低水部の流出形態が異なった。しかし、高水部については他の2出水と同様に、降雨の空間的な集中度が高くなるにつれ Q_1 が増加した。これら流出成分が示した傾向はパラメータ $a_1 \sim a_3$ および b_1 が示した傾向と同様である。また、Fig. 8からは降雨の空間分布のばらつきが大きくなるほどヒドログラフの高水部の形状が細くなるという特徴もみられた。以上より、時間降雨量の流域平均値は変化せずとも、降雨強度の空間分布の違いに応じて集中型流出モデルのパラメータが変化していることが確認できた。

5.3 考察

降雨の空間的な集中度が高まるのに応じて Q_1 を増加させるようにパラメータ a_1 , a_2 , b_1 が変化した理由として、降雨強度の不足が挙げられる。Fig. 8で示したように降雨の空間的な集中度が高いほど流域平均降雨量が同値でもピーク流量が大きくなるのに対し、集中型モデルではどのケースでも同じ流域平

均降雨量が入力される．そのため，流域内に局地的な強い強度の降雨が発生しているケース ($n = 1.25$ 以上) において，ピーク流量に対し流域平均化した降雨強度が不足し， Q_1 を増加させるパラメータセットを選択することでピーク流量に対応していると考えられる．これは，今回対象としたいずれの出水でも共通した傾向であった．

また， n によって Z_1 が変化する傾向については， n が大きくなるほどハイドログラフの高水部が細くなる（流出時間が集中化する）ことに影響を受けていると推察される．(4)式より，流出孔高さである Z_1 は Q_1 の発生を制御するパラメータである．この Z_1 が大きくなることは Q_1 の発生を抑制することとなり， b_1 が小さくなることと相まって S_1 がある程度大きくなるまで表面流の発生を抑制し， Z_1 を超えたときに一気に Q_1 として流出させることで，高水部の流出時間の短縮化およびピーク流量の増加に対応するように Z_1 が調整されたと考えられる．

以上のことは，集中型モデルでは降雨の空間分布がどのようなケースでもパラメータ値を大きく変化させることで流量を再現することができる反面，降雨の空間特性に応じて異なる性質のパラメータセットが選択される可能性があることを示している．そのため，流域固有のパラメータ設定が必要である実時間洪水予測などに集中型流出モデルを用いる場合には，対象出水の降雨の空間分布などを考慮してパラメータを設定する必要があると考えられる．

6. おわりに

本研究では，時間降雨量の流域平均値は変化させずに降雨強度の空間的集中度のみが異なる複数ケースの模擬降雨イベントを作成し，降雨の空間分布の違いが洪水ピーク流量および集中型流出モデルのパラメータに与える影響について分析した．得られた結果は以下のようである．

- 1) 模擬降雨を分布型流出モデルに入力して得られた計算流量を全ケースで比較した結果，流域平均降雨量は同じであっても，流域内に局地的な強い降雨があるようなケースではピーク流量が大きくなる傾向があることを示した．
- 2) 分布型流出モデルに模擬降雨を入力して得られた計算流量に対し，集中型流出モデルのパラメータ同定を行った．その結果，同定されたパラメータおよび集中型流出モデルからの流出成分の比較より，集中型流出モデルのパラメータが降雨の空間的集中度に応じて変化することが確認できた．このことから，降雨の空間分布により同定されるパラメータセットの性質が異なる可能性が示された．

以上の結果より，集中型流出モデルにおいて実時間洪水予測などで必要となる流域固有のパラメータ設定を行う際には，対象出水の選定を行う上で降雨の空間分布などの特性を考慮する必要があると考えられる．今後は，同様の模擬降雨を用いて，降雨の空間分布の違いが分布型流出モデルのパラメータに与える影響について検討する．

謝辞：本研究は，内閣府官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）「ほ場水位予測による応急対応促進・田んぼダムにおける湛水深及び浸水範囲予測と水管理システムの開発（代表者：北川 巖）」の一部として実施した．ここに記して感謝の意を表す．

引用文献

安達雅人・田中丸治哉・多田明夫（2006）：GLUEによる流出モデルの不確実性評価に関する研究，農業土木

- 学会水文・水環境研究部会誌, 19, pp.114-127
- 角屋睦・永井明博 (1988) : 長短期流出両用モデルの永源寺ダム流域への適用と考察, 農業土木学会論文集, 1988 (137), pp.71-78.
- 国土交通省 (2008) : 国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (確認日 : 2019.10.29)
- 国土交通省 (2002) : 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/> (確認日 : 2019.10.29)
- 国土交通省国土政策局国土情報課 (1988) : 5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査, <http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html> (確認日 : 2019.10.31)
- 佐山敬洋・立川康人・寶馨 (2005) : 流出モデルの不確実性評価手法とそのモデル選択への適用, 土木学会論文集, 2005 (789), pp.1-13
- 椎葉充晴・立川康人・市川温 (2013) : 水文学・水工計画学, 京都大学学術出版会, 182p.
- Storn, R. (1996) : On the usage of differential evolution for function optimization, NAFIPS'1996, pp.519-523.
- 立川康人・永谷言・寶馨 (2003) : 分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報 第 46 号 B-2.

レーダーアメダス解析雨量による手取川山地流域の水収支解析 Water balance analysis of the Tedor river mountain basin by Radar AMeDAS analysed precipitation

伊藤浩三*・丸山利輔*

*石川県立大学生物資源環境学研究科（〒921-8836 石川県野々市市末松 1-308）

Ito Kouzo*, Maruyama Toshisuke*

*Ishikawa Prefectural University, 1-308 Suematsu, Nonouchi-city, Ishikawa 921-8836, JAPAN

Abstract

Until now, basin precipitation estimated by point observation by rain gauge and data processing. However, the point observation conducted by small device which not only affected by surrounding conditions, but also limited very convenient location as near people houses except mountainous area. Radar AMeDAS analysed precipitation currently published is excellent and novel method that solve the above problems instantaneously. But the accuracy of the radar AMeDAS is not guaranteed completely. The research aims to confirm the accuracy of the Radar AMeDAS by water balance analysis of the Tedor River basin. As a result of the research, the water balance analysis indicated that the under estimate about 680mm through the entire year but only about 43mm shortage though the summer (July-Sept). From these result, we concluded that the Radar AMeDAS has not observed accurately the winter's precipitation because the evaporation and the discharge would be estimated correctly.

Key words: Basin area rainfall, Water balance analysis, Mountain basin, Evapotranspiration, Snowfall

要 旨

これまで流域面積雨量は、地点雨量観測の情報処理によって推定されてきた。しかし、現在の地点雨量観測では受水マスが小さく周辺の状況に影響されるばかりではなく、設置場所が管理に便利な場所に制限されるため、問題点が多かった。現在、公表されているレーダーアメダス解析雨量（正式名称は「解析雨量」）は流域面積雨量を一括して測定するために、地点雨量観測の問題を解決できる可能性がある方法である。しかし、その精度については未確認な点も多く残されている。本研究は、手取川山地流域を対象に、水収支法によって解析雨量の精度を確認するために行った研究である。この結果、解析雨量による流域面積雨量は通年でみれば約 682mm（流域面積雨量に対する水収支差の割合-19.3%）と過小な値となるが、降雪・積雪・融雪、貯留量変化の影響がほとんどない夏期（7-9月）では、約 43mm（流域面積雨量に対する水収支差の割合 3.9%）の収支差にとどまり、推定精度が高いことが示された。この事実から、水収支の構成要素である蒸発散量と流出量の推定に大きな問題がないことが確認されたため、冬期の降雪量の推定誤差に解析雨量の問題があることが判明した。

キーワード: 流域面積雨量, 水収支解析, 山地流域, 蒸発散量, 降雪量

1. はじめに

流域内の水循環研究に際して最も基本的な物理量は降水量、蒸発散量、流出量である。これらの諸量が精度よく測定されて初めて正確な水循環研究が可能となる。しかし、流域規模でのこれらの諸量を正確に測定する事は容易ではない。降水量は、直径 20cm の雨量計を流域内に配置することによって推定しているが、受水マスが小さいことに加え、配置する場所も観測者の便宜のために人家に近いところに限られる。山奥や尾根に配置することは少ない。このために、流域全体の降水量が測定されているとはいえない。

流域蒸発散量の推定にも問題点が多い。現在では便宜的にペンマン蒸発位にある係数を乗じて推定する方

法や、補完法によって推定しているのが一般的であるが、正確な値と判断するには問題が残されている。河川流量も大きな河川では河床が洪水ごとに変動するとか、水位流量曲線が正確に得られないなど問題点が残されている。

本研究は、これらの問題点を少しでも解消するために、流域降水量の推定に気象庁で公表されているレーダーアメダス解析雨量(以下、解析雨量)を採用し、蒸発散量の推定に最近開発された逆解析法を採用し、河川流量が比較的精度高く測定されている手取川流域を例に、流域水収支解析を行った。すなわち、水収支法によって、解析雨量の推定精度の検討を試みた。解析雨量の推定精度を検討するためには、地点雨量を基礎にした研究では目的に応えることは不可能で、種々の困難を伴うことは覚悟し、流域水収支によってしかその妥当性を評価することはできない、本研究は、このような立場に立った研究であることをあらかじめお断りしておきたい。

これまでに行われた関連する研究を概観する。この流域の水収支を直接対象とした研究は見当たらないが関連した研究は幾つか指摘することができる。能登ら(2010)は年河川流出量に年蒸発散量を加えたものが年流域降水量に相当するとして、年流域降水量を推定した。また、きわめて限られた4地点の観測雨量から降雨の高度依存性を評価したが、今後の大きな課題を残している。Noto et.al(2011)は、さらに31年間の流域降水量を河川流量と補完法で求めた蒸発散から逆算し、年間降水量は3,248mm~5,137mmと推定している。(Noto et.al 2011, 能登ら,2011)はこの成果を利用して地球温暖化に伴う積雪水資源の研究を展開している。

蒸発散量については、最近ボーエン比の逆解析法が提案されている(Maruyama and Ito, 2019,伊藤・丸山, 2019,丸山・伊藤 2019)。この方法は基本的にはボーエン比法の考え方と同様であるが、地表面の温度の測定が困難なことを考慮して、熱収支を前提に最適化手法を使って地表面の温度・湿度を推定し、蒸発散量を推定する方法である。本研究ではこの方法により流域蒸発散量の推定を試みる。ただし、詳細には別途報告しているので、本報告では結果のみ利用する。

2. 研究の方法

2.1 手取川山地流域の概況

研究対象とした手取川山地流域は、流域面積733.07km²(中島測水所地点)を有し、標高2,702mの白山を源流としている日本の特別豪雪地帯の南限に位置する(Fig. 1)。流域には大規模な手取川ダム(貯水量約1.9億トン)や大日川ダム(貯水量約2,700万トン)を有し、手取川の流量はこのダムによる調整量を考慮しなければならない。流域の大部分は森林に覆われているが高山部にはハイ松や高山植物がみられ、山頂付近は万年雪に覆われている。

2.2 解析雨量の概要

解析雨量は気象庁が編集し、一般財団法人気象業務支援センターが発行している。アメダス雨量は実際の地点で観測した雨量であることから精度は高いが観測密度は低い。その欠点を補うため、気象レーダーによる電波を利用し、雨粒によって反射された電波の往復にかかる時間と方向と強さから、距離と方向と雨の強さを、面的に推定するものである。解析雨量は1kmメッシュ毎に時間単位で解析されているため、

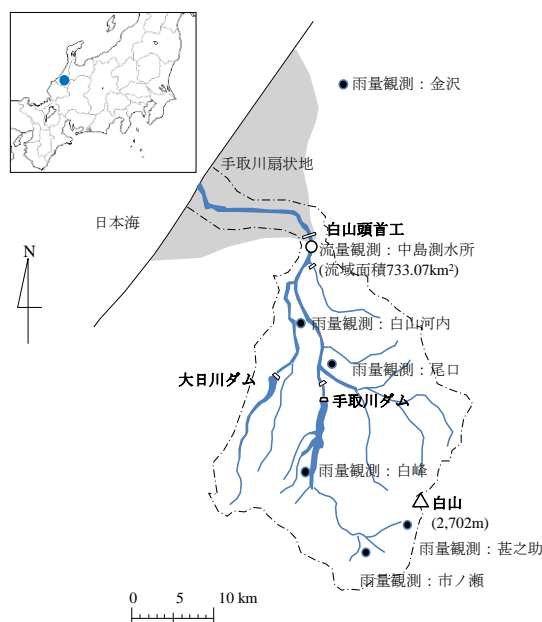


Fig. 1 手取川山地流域概要図

今回、手取川山地流域に該当する範囲を抽出し、すべてのメッシュを平均したものを流域面積雨量とした。データは 2010～2016 水年を使用し、月単位・年単位で整理した。なお、分析の期間は、期間の当初の水環境が安定している当該年の 10 月から翌年の 9 月末までの期間を水年とした。

2.3 逆解析法による流域蒸発散量

著者らが提案している方法は、1 高度の気温 T_z と湿度 $rehz$ 及び純放射 Rn 及び地中熱フラックス G が必要である。これらの諸量は、本試験流域内に設置されている石川県林業試験場気象観測露場で行った。しかし、この露場は周囲を山地に囲まれ、日照時間は流域平均に比較してかなり少ないものと推定される。したがって、平地に立地する石川県立大学農場においても、ほぼ同様の解析を行った、ここで両地点の蒸発散量を比較検討して水収支計算に採用する。

2.4 手取川山地流域からの流出量

手取川山地流域から平野部に開口する中島測水所地点においては、長期間にわたり流量測定が行われており、この資料を採用する。中島測水所地点で測定されている観測流量 (Q') は、Fig. 2 に示すように手取川ダム・大日川ダムによる貯留と放流、流域外へ放流の影響を受けた結果であることから、本来流れてくる流域流出量 (Q) は次式により表される。

$$Q = Q' + (Q_{in} - Q_{out}) + Q'_{out} \quad (1)$$

ここで、 Q_{in} は手取川・大日川ダムへの流入量、 Q_{out} は手取川・大日川ダムからの放流量、 Q'_{out} は流域外への放流量である。この式に従って、中島測水所地点の流域流出量を算定した。

3. 解析結果

3.1 逆解析法による流域蒸発散量

Table 1 は 2011～2017 水年までの 7 年間の農場および林試における純放射と蒸発散量の推定結果である。先に述べたように、林試は谷間に立地しているため、純放射が少なく、蒸発散も少ない。したがって、流域の平均蒸発散量は、平地に立地する農場に近いと考え、農場の蒸発散量を採用した。

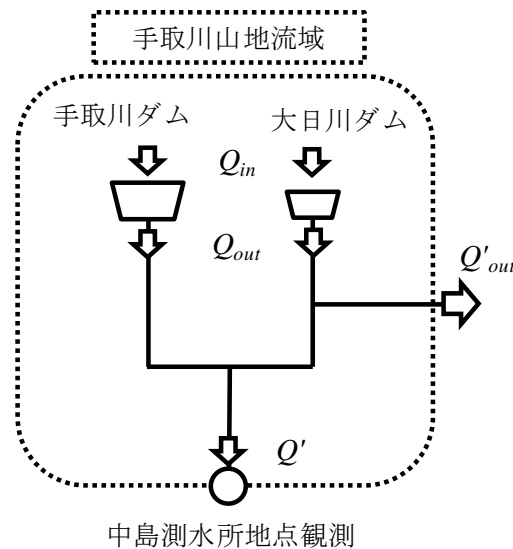


Fig. 2 手取川水系概要図

Table 1 農場・林試における純放射と蒸発散量

水年	農場		林試	
	純放射	蒸発散量	純放射	蒸発散量
(mm/year)				
2011	1095.2	750.8	681.7	388.0
2012	1070.7	708.7	724.9	394.7
2013	944.3	589.7	745.3	433.2
2014	891.8	540.3	744.7	430.0
2015	861.0	536.8	753.1	433.5
2016	861.3	591.8	757.9	385.9
2017	820.8	504.5	749.7	399.6
平均	935.0	603.2	736.8	409.3

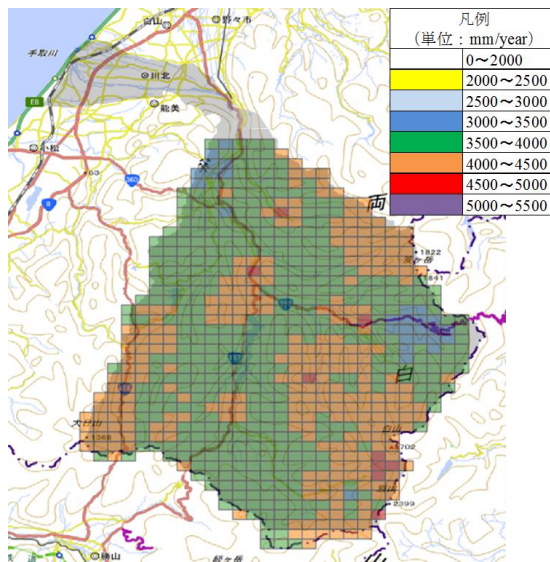


Fig. 3 手取川山地流域の年降水量 (2010 水年)

3.2 解析雨量による年降水量

解析雨量より得られた1kmメッシュ毎の年降水量をFig. 3に示す. この図から明らかなように上流山岳部の降水量は格段に多く, 分析年によっては異なるが, 年間5,000mmを超すところもみられる. この結果は既に解析している能登ら(2010)の研究と矛盾しない.

3.3 通年の水収支解析

解析雨量で算出した年流域面積雨量推定値の妥当性を流域水収支により確認するため, 7年間の解析雨量による流域面積雨量(R), 蒸発散量(ET), 流域からの流出量(Q)を使って, 水収支($R-Q-ET=W$)を計算しTable 2に示した. その結果, 収支差 W は平均-682mm と大きなマイナス値となり, 流域面積雨量に対する割合も-10~-30% (平均-19.3%) とすべての水文年において過小な値となった. この結果から上述の R , Q , ET のいずれかに測定または推定誤差があることが示された.

Table 2 解析雨量による面積雨量算定値と水収支 (通年)

水年	流域面積雨量 R (mm/year)	流域流出量 Q (mm/year)	蒸発散量 ET (mm/year)	収支差 $W=R-Q-ET$ (mm/year)	$W/R \times 100$ (%)
2010	3926.8	3989.6	675.7	-738.5	-18.8
2011	3067.5	3259.2	750.8	-942.5	-30.7
2012	3836.8	3875.6	708.7	-747.5	-19.5
2013	3454.8	3328.4	589.7	-463.3	-13.4
2014	3730.1	4116.1	540.3	-926.3	-24.8
2015	3172.3	2966.4	536.8	-330.9	-10.4
2016	3554.9	3589.4	591.8	-626.3	-17.6
平均	3534.7	3589.2	627.7	-682.2	-19.3

3.4 夏期の水収支解析

そこで, この原因の一つとして, 降雪が正確に観測されていない可能性が高いと考え, この影響が殆どなく, 貯留量変化についても影響が少ない7~9月に限定して水収支を計算しTable 3に示した. 結果として収支差は-7.0~12% (平均3.9%) と小さくなり, 夏期の水収支解析の精度は高い事が示された.

Table 3 解析雨量による面積雨量算定値と水収支 (7~9月)

水年	流域面積雨量 R (mm/92day)	流域流出量 Q (mm/92day)	蒸発散量 ET (mm/92day)	収支差 $W=R-Q-ET$ (mm/92day)	$W/R \times 100$ (%)
2010	1165.6	805.7	218.1	141.8	12.2
2011	830.9	492.0	321.0	17.9	2.2
2012	1454.4	1140.3	299.2	15.0	1.0
2013	1134.6	878.4	222.9	33.3	2.9
2014	808.7	643.8	226.5	-61.6	-7.6
2015	962.6	636.6	227.0	99.0	10.3
2016	1357.0	1062.4	236.8	57.8	4.3
平均	1102.0	808.5	250.2	43.3	3.9

4. 考察

水収支分析結果から次のような考察が可能である. 水収支に関係する要素のうち, 蒸発散量は絶対量が小さく, 水収支全体に対する影響は大きくない. またこれまでの多くの分析結果から判断してもほぼ

妥当な値と判断される。

流量測定値の中島測水所地点において、H-Q 曲線によって観測されており、兩岸は巨岩で囲まれているため、夏期と冬期で河床の変動は考えにくい。したがって、Table 3 のように、夏期の流量が適切に測定されているならば冬期の河川流量も適切に測定されていると考えてよい。

水収支項目のうち、蒸発散量と河川流量の推定精度に大きな問題がないとすれば、残るは降水量の推定精度である。夏期の降水量の推定に大きな問題がないとすれば、冬期の降水量の推定に問題があると判断せざるを得ない。

以上の検討結果から、本流域の水収支の問題点の主なものは、降雪期間の降水量の推定であることが分かった。

5. 討論

これまで流域面積雨量の推定には雨量標高法など他の方法によって行われてきた。この項では、この方法を含めて検討を行う。

5.1 解析雨量と雨量標高法との比較

雨量標高法とは、降水量が標高に依存することを考慮し、降水量と標高の回帰式を用いて流域面積雨量を求める方法である。降水量の元となるデータは Fig. 1 に示す 6 地点(金沢・白山河内・尾口・白峰・市ノ瀬・甚之助)での日雨量を使用した。対象とする期間は欠測がほとんどない 2010~2012 水年の 3 ヶ年とし、観測期間中の 1 水年ごとに降水量と標高の回帰式を求め、標高別面積のウエイトを付け、流域面積雨量を推定した。

解析雨量と雨量標高法により算出した年流域面積雨量を Table 4 に示す。年面積雨量は両者とも解析雨量に対する雨量標高法での推定値の比率が 1.01 程度と 3 年間においてすべて解析雨量の方が若干大きい。ほぼ同値であることが確認された。

Table 4 解析雨量と雨量標高法による面積雨量

水年	流域面積雨量(mm/year)		比率
	解析雨量	雨量標高	
2010	3926.8	3840.9	1.02
2011	3067.5	3043.2	1.01
2012	3836.8	3769.6	1.02

5.2 解析雨量と雨量標高法の標高別降水量

Fig. 4 は 2010 水年における地点雨量の観測値と標高との関係、および解析雨量による標高別の降水量の関係を示している。回帰係数は両者とも標高が高くなるほど、降水量は大きい傾向が見られた。傾きに注目すると、

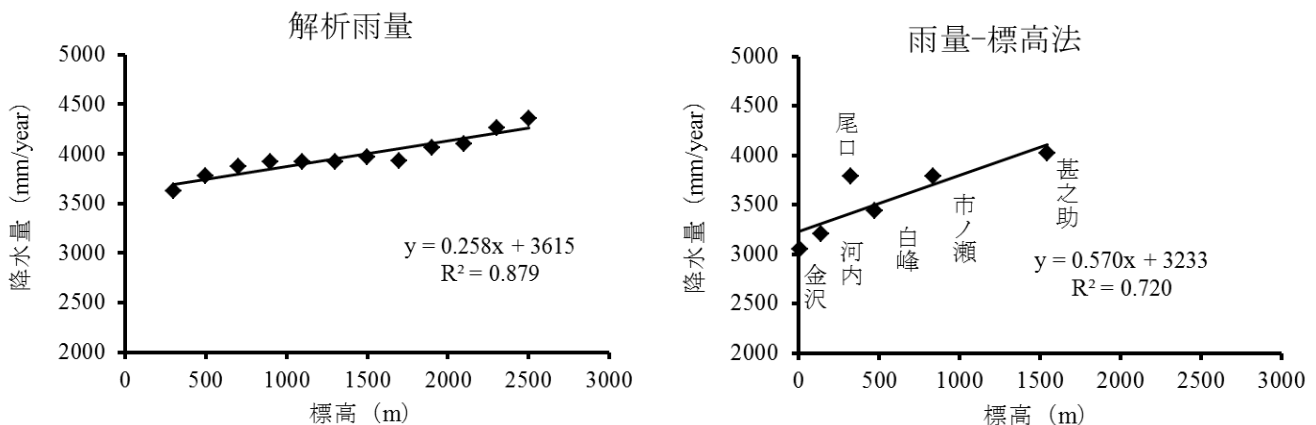


Fig. 4 解析雨量と雨量標高法の降水量と標高の関係 (2010 水年)

雨量標高法の方が大きいことから、標高と降水量との変化の割合は解析雨量より大きいことが分かるが、年平均値で見れば変わらない結果となった。

5.3 地点雨量観測の受水率の補正

通年において、水収支がマイナスとなる理由として、解析雨量はレーダーによって、観測された降水分布をアメダスで観測した雨量値で補正している点と考えられる。アメダスの雨量計は受水口が小さく風により、特に雪に対して真の降水と観測される降水量の比である捕捉率が小さいことを横山らによって指摘されている。つまり、アメダスでの降雪による降水量の観測値は小さく、その補正係数が過小となっている点が原因と考えられる。ここでは、降雪による降水量の補正を試みる。

手取川山地流域内で風速を観測している地点が少ないことから、今回は簡易的に白山河内で風速を計測しているデータを使用し、横山らが示している次式による捕捉率 CR に乗じてすべてのメッシュにおいて降水量データを補正した。

$$CR = \frac{1}{1 + mU} \quad (2)$$

ここで CR は補足率、 U ($m \cdot s^{-1}$) は受水口の高さにおける平均風速、 m は測器ごとの係数で今回は 0.213 を採用。

Table 5 の R' は補正した流域面積雨量であり、結果を雨量に対する水収支差の割合で見ると、補正前は平均-19.3%に対し、補正後は-11.6%と水収支差は小さくなったが補正前と同じく流域面積雨量が過小値である。

Table 5 補正後の流域面積雨量算定値と水収支（通年）

水年	流域面積雨量 R' (mm/year)	流域流出量 Q (mm/year)	蒸発散量 ET (mm/year)	収支差 $W=R-Q-ET$ (mm/year)	$W/R \times 100$ (%)
2010	4150.3	3989.6	675.7	-515.0	-12.4
2011	3327.0	3259.2	750.8	-683.0	-20.5
2012	4116.9	3875.6	708.7	-467.4	-11.4
2013	3660.1	3328.4	589.7	-258.0	-7.0
2014	4123.7	4116.1	540.3	-532.6	-12.9
2015	3313.9	2966.4	536.8	-189.3	-5.7
2016	3750.4	3589.4	591.8	-430.8	-11.5
平均	3777.5	3589.2	627.7	-439.5	-11.6

5.4 地点観測雨量と解析雨量の比較について

解析雨量の精度を確認するために、地点雨量の観測値と解析雨量の推定値を比較する。対象とする地点雨量は気象庁所管の白峰気象観測所と石川県立大学所管の林業試験場で実測した月別雨量で、解析雨量は同地点のメッシュでの月別雨量を比較した（2011～2015 水年）。この図に示すように解析雨量の方が両者とも大きく算定されている。解析雨量はレーダーによる雨量値を基に気象庁や国交省・自治体所管の地点観測雨量で補正しているため、気象庁に提供されていない林業試験場の地点観測雨量とあうことは地点観測値と同等の精度を有していることが確認できた。また、決定係数はどちらも 0.926 であることから、月別で見ても極端な差は生じないことが確認できた。

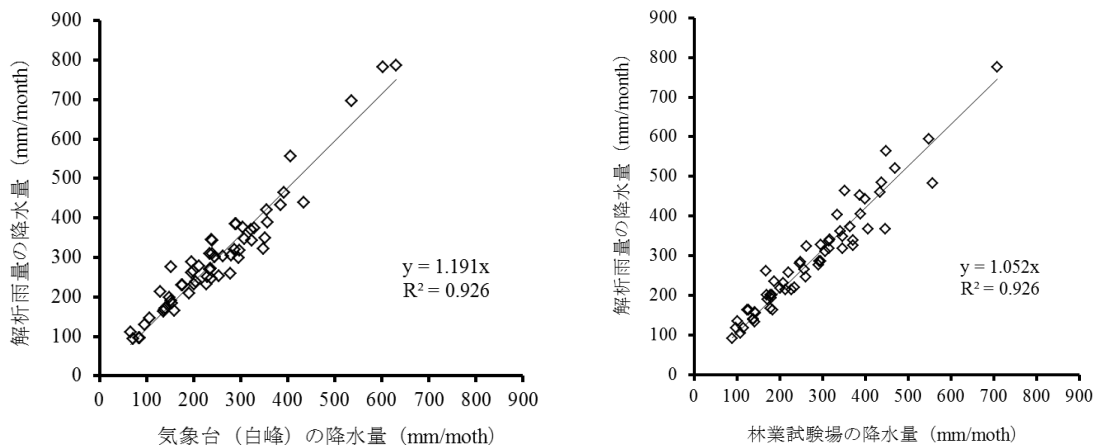


Fig. 5 解析雨量と气象台の年降水量の比較

6. 結言

本研究は、現在公表されている解析雨量を使って手取川山地流域の流域面積雨量を算定し、その推定精度の評価を試みたものである。この種の流域面積雨量の推定精度を評価するには、種々の困難な問題を包含しているとはいえ水収支の方法による外ない。そこで、7年間にわたって手取川山地流域の水収支を検討した結果、通年の水収支では平均約 682mm (流域面積雨量に対する水収支差の割合は-19.3%) の不足となったが、夏季(7~9月)の水収支計算では平均約 43mm (流域面積雨量に対する水収支差の割合は 3.9%) であった。

水収支項目のうち、蒸発散量の推定には大きな問題はないとしたうえで、夏季の水収支に問題がないことから、流量観測にも問題が少ないと判断し、通年の水収支が満足されない最も大きな理由は、冬期の積雪による降水量が正確に観測されていないことが主要な原因であると結論づけた。

このように、現時点では、解析雨量は雪による降水量の測定精度に問題を残しているとはいえ、これまでの地点雨量観測による流域雨量の推定とは一線を画する画期的な方法であることに変わりない。今後のさらなる精度向上に期待したい。

特に、地域の冬季の降水量をいかに把握するかが残された主な問題となる。積雪深は夏季と積雪期の標高差によって測定可能なので、積雪密度がわかれば積雪降水量を求めることができる。今後は解析雨量と並行してこの方法も併せて検討する必要がある。

なお、解析雨量と並行して、JAXA による降水量(Gsmap)も公表されているがメッシュが約 11km×11km と大きく、宇宙からの映像のため精度は手取川山地流域において水収支法で分析した結果、あまり高くなかった。日本のようにアメダス雨量の観測が充実した地域では、この資料の使用はまだ問題が多いと思われる。

謝辞 本研究を実施するにあたって、流量を測定している中島測水所は北陸電力設備であり研究目的に限り情報提供していただいた。ここに記して深謝の意を表する。

引用文献

- 新保明彦 (2001) : レーダーアメダス解析雨量 (I), 天気, 48 (8), 579-583
 新保明彦 (2001) : レーダーアメダス解析雨量 (II), 天気, 48 (10), 777-784

- 能登史和・丸山利輔・早瀬吉雄・瀧本裕士・中村公人（2010）：手取川山地流域におけるタンクモデルを用いた積雪水資源量の評価，農業農村工学会論文集，No.268，31-37.
- 能登史和・丸山利輔・早瀬吉雄・瀧本裕士・中村公人（2011）：手取川流域における積雪水資源量の長期間分析と地球温暖化による影響予測，農業農村工学会論文集，No.274，1-7.
- Noto Fumikazu, Maruyama Toshisuke, Hayase Yoshio, Takimoto Hirishi, Nakamura Kimihito (2011) : Evaluation of water resources by snow storage using water balance and tank model method in the Tedoru River basin of Japan, *Paddy Water Environ*, 11:113-121, DOI 10. 1007/s 10333 -011 -0297 -8.
- Noto Fumikazu, Maruyama Toshisuke, Yoshida Masashi, Hayase Yoshio, Takimoto Hirishi, Nakamura Kimihito (2012) : Prediction of water resources as snow storage under climate change in the Tedoru River basin of Japan, *Paddy Water Environ*, 11:463-471, DOI 10. 1007/s 10333 -012 -0337-z.
- Toshisuke Maruyama, Kouzo Ito, Hiroshi Takimoto (2019) : Abnormal data rejection range in the Bowen ratio and inverse analysis methods for estimating evapotranspiration, *Agriculture and forest meteorology* 269-270, 323-334.
- 伊藤浩三・丸山利輔（2019）蒸発散推定における異常値の定義と熱収支ボーエン比法への適用，農業農村工学会論文集 309（87-2）159-167
- 丸山利輔・伊藤浩三（2019）蒸発散推定のための逆解析法とボーエン比法及び渦相関法との比較－異常値を処理した場合の事例－，農業農村工学会論文集，No.309(87-2)，169-178
- 丸山利輔・伊藤浩三（2020）逆解析による実蒸発散量とペンマン蒸発散量の比較－手取川流域の林業試験場および石川県立大学農場での適用事例－（応用水文発表予定）
- 横山宏太郎・大野宏之・小南靖弘・井上聡・川方俊和（2003）：冬期における降水量計の捕捉特性，雪氷，65-3，303-316

Real-time Flood Forecasting Considering Probabilistic Distribution of Future Forecasted Rainfall

予測降雨の確率分布を考慮した洪水の実時間予測

BUI Thanh Hoa*, CHIKAMORI Hidetaka*, KUDO Ryoji*

*Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University

(3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530)

ブイ タン ホア*・近森秀高*・工藤亮治*

*岡山大学大学院環境生命科学研究科 (700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

Abstract

Accurate and early flood forecasting is important for implementing safety measures, reducing flood damage, and ensuring effective flood rescue operations. In this study, the LST model was applied to hydrological data for 11 years in Kuroki Dam catchment (49.2 km²) in Okayama Prefecture, Japan. The LST model was calibrated by the differential evolution technique. A system for real-time flood runoff forecasting was constructed by introducing the particle filter technique into the operation of the LST model. Using the LST model, the system for probabilistic flood runoff forecasting was developed. Pseudo forecasted rainfall data were generated by adding Gaussian noise to 1- and 2-h ahead future observations collected from gauge points in Kuroki Dam. The generated data were input to the LST model to calculate the distribution of forecasted discharges. The model performed well in the simulation of both flood (short-term) and long-term runoff. The results show that the distributions of 1- and 2-h ahead flood runoff predicted by the proposed forecasting system were accurate, compared with observed data. Therefore, it can provide useful information for efficient flood warning and protection planning.

Key words: Real-time flood forecasting, long- and short-term runoff (LST) model, Differential Evolution (DE) technique, Particle filter (PF), pseudo forecasted rainfall

要 旨

正確な早期の洪水予測は、洪水に対する安全対策、被害軽減、救助活動の実施のために重要である。本研究では、1991～2001年の11年間に岡山県の黒木ダム流域（流域面積49.2km²）で観測された水文気象データを対象としてLSTモデルを適用し、洪水の実時間予測を行った。LSTモデルのパラメータは、差分進化法により同定し、このモデルに粒子フィルターを導入して実時間洪水予測システムを構築した。さらに、1時間および2時間先の地点観測雨量に正規ノイズを加えて擬似的な降雨の確率分布を生成し、これを同定したLSTモデルに入力して将来の流量の確率分布を生成した。その結果、同定されたLSTモデルは対象流域の長期、短期（洪水期）いずれの降雨一流出関係も精度よく再現し、また、ここで提案した流量の分布予測システムは、1、2時間先の流出を精度よく予測した。以上の結果から、これらの情報は、効果的な洪水警報および洪水防御計画の策定に有用な情報を提供することが示された。

Key words: 実時間洪水予測、長短期流出両用モデル、差分進化法、粒子フィルタ、擬似将来降雨

1. INTRODUCTION

With increased frequency and intensity as well as irregular changes of natural disasters in the recent decades, climate change continues to be one of the key risks affecting natural and human systems across the world (Phuong, 2017; Pachauri & Meyer, 2014). Climate change has largely impacted social, economic, and environmental systems and shaped prospects for sustainable development in most countries (Munasinghe, 2007). In the last few decades, floods have without doubt become one of the most devastating manifestations of climate change on Earth,

and every year, extreme floods have severe consequences for the society and mankind in terms of property destruction and loss of lives (Plaza Guingla et al., 2013). A recent increase in damages caused by floods has highlighted the need for significant measures to reduce damages and to protect lives. One of those most significant measures is issuing flood forecasting systems.

Timely and accurate flood forecasting can help in estimating the extent of the eventual flooding and allow safety measures to be taken at an earlier time, thereby reducing the destruction caused by extreme floods as well as assisting the authority in flood rescue operations. Additionally, the provision of flood forecasting and warning system is vital, practical, and promotes the mitigation of flood losses. It is, therefore, a requisite to develop flood forecasting systems that can make predictions as accurately and early as possible during real-time flooding events. To this end, a good forecasting system should be able to probabilistically estimate flood damage, such that effective flood warning and protection planning can be efficiently designed.

In this study, the long- and short-term runoff model (LST model) was applied to analyze flood runoff and long-term runoff successively and used to forecast flood in real-time. Parameters of the LST model were calibrated using the differential evolutionary (DE) technique, and the particle filter (PF) technique was introduced to improve the certainty of hydrological condition. Then, short-term rainfall prediction was conducted by creating pseudo forecasted rainfall with Gaussian distribution, and probabilistic 1- and 2-h ahead flood forecasting was finally performed in real-time using the LST model combined with PF.

2. RESEARCH CATCHMENT AND HYRDOLOGICAL DATA

The research was conducted in Kuroki Dam catchment, which covers an area of 49.2 km². The catchment is located upstream of Yoshii River Basin in the north of Okayama Prefecture in Japan. **Fig. 1** is a geographical map of the Kuroki Dam catchment showing the locations of hydro-meteorological stations.

In this study, hydrological data for 11 years from January 1991 to December 2001 were collected at Kuroki dam and five gauging stations (Kurami, Iwabuchi, Daigasen, Aba, and Tsuyama) in and around the catchment. The number of target flood is 22. The collected data include hourly and daily data of discharge and precipitation, and daily maximum and minimum temperature.

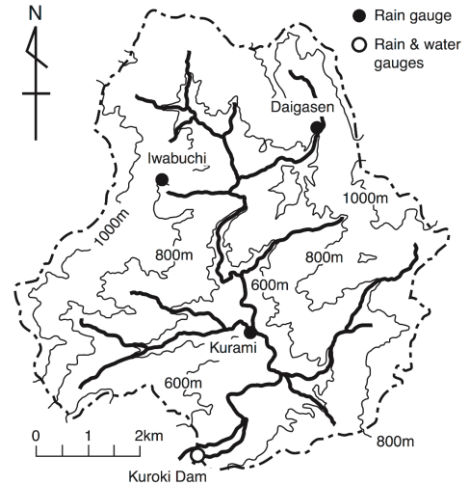


Fig. 1 Kuroki Dam catchment

3. RESEARCH METHODS

3.1 Long- and short-term runoff (LST) model

The LST model, developed by Kadoya and Nagai (1988), was applied to analyze long- and short-term runoff simultaneously and continuously. The LST model consists of three storage tanks arranged in vertical series, and the top tank is composed of upper and lower layers, as shown in **Fig. 2**.

The continuity equation of each tank is as follows:

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= r - E_1 - f - Q_1 - Q_2 & \frac{dS_2}{dt} &= f - Q_3 - g_1 \\ \frac{dS_3}{dt} &= g_1 - E_2 - Q_4 - g_2 & \frac{dS_4}{dt} &= g_2 - E_3 - Q_5 \end{aligned} \quad (1)$$

where S is the water storage depth; r is the rainfall intensity; f is the infiltration rate; g is the percolation rate; and Q is the runoff components in which Q_1 is the surface runoff, Q_2 is the prompt subsurface runoff, Q_3 is the delayed subsurface runoff, Q_4 is prompt groundwater runoff, and Q_5 is delayed groundwater runoff. $E_1 \sim E_3$ are the evapotranspiration rates from each tank, which are calculated as follows:

$$E_1 = \gamma\theta E \quad E_2 = (1 - \gamma)E \quad E_3 = \gamma(1 - \theta)E \quad (2)$$

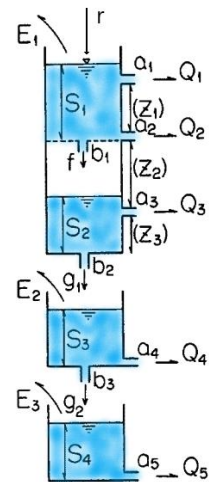


Fig. 2 LST Model

where γ is the separation ratio of evapotranspiration for the upper tank ($\gamma = 0.6$); $\theta = 1$ if $S_1 > 0$ or $S_2 \geq Z_3$, $\theta = S_2/Z_3$ if $S_1 = 0$ and $S_2 < Z_3$; E is the actual evapotranspiration.

The actual evaporation, E , is estimated as the sum of the potential evaporation by the following equation:

$$E = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot k_i \cdot E_p \quad (3)$$

where E_p is the potential evapotranspiration estimated by the Makkink equation; ω_i is the area ratio of the i -th zone of the four altitudinal zones in the Kuroki Dam catchment; k_i is a factor depending on weather conditions, in which $k_i = 1.0$ for $r_i = 0$ and $0 \leq k_i < 1.0$ for $r_i > 0$.

Runoff from each hole of the LST model is linearly related to the water storage depth in the respective tank, except for Q_1 . The runoff Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 and percolation g are calculated by the following equations by assuming that runoff occurs from the holes only when the storage depth of the tank, S , exceeds its corresponding height, Z , i.e., $S > Z$. The surface runoff, Q_1 , is assumed to be expressed by Manning's law. Thus, $m = 5/3$ is used in Eq. (4). Each of the abovementioned relations is summarized as follows:

$$\begin{aligned} Q_1 &= a_1(S_1 - Z_1)^m, \quad m = 5/3 & Q_2 &= a_2S_1 & Q_3 &= a_3(S_2 - Z_3), \quad g_1 = b_2S_2 & (4) \\ Q_4 &= a_4S_3, \quad g_2 = b_3S_3 & Q_5 &= a_5S_4 \end{aligned}$$

where a_1 is the runoff coefficient; b_1 is the infiltration coefficient; b_2 and b_3 are percolation coefficients; and Z is the height of the runoff holes.

3.2 Differential Evolution (DE) technique

The DE technique, originally developed by Storn and Price (1995), is a very simple stochastic population-based global optimization technique. The DE-flow chart is pictorially represented in **Fig. 3**.

The selection and use of an appropriate and meaningful specific objective function, which is also considered as an efficiency criterion or indicator in this case, is a critical step as it strongly affects the success rate in hydrological modeling calibration using automatic optimization technique and in model performance assessment. In this study, the parameters of the LST model were calibrated using the DE method under the objective functions of mean absolute error (MAE) and Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSE), which are used to access the goodness-of-fit of the simulation model to the available observations. MAE and NSE are defined as follows:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{sim,i} - Q_{obs,i}| \quad (5) \quad NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (6)$$

MAE = 0 and NSE = 1 indicate that the simulated values completely correspond to observed values.

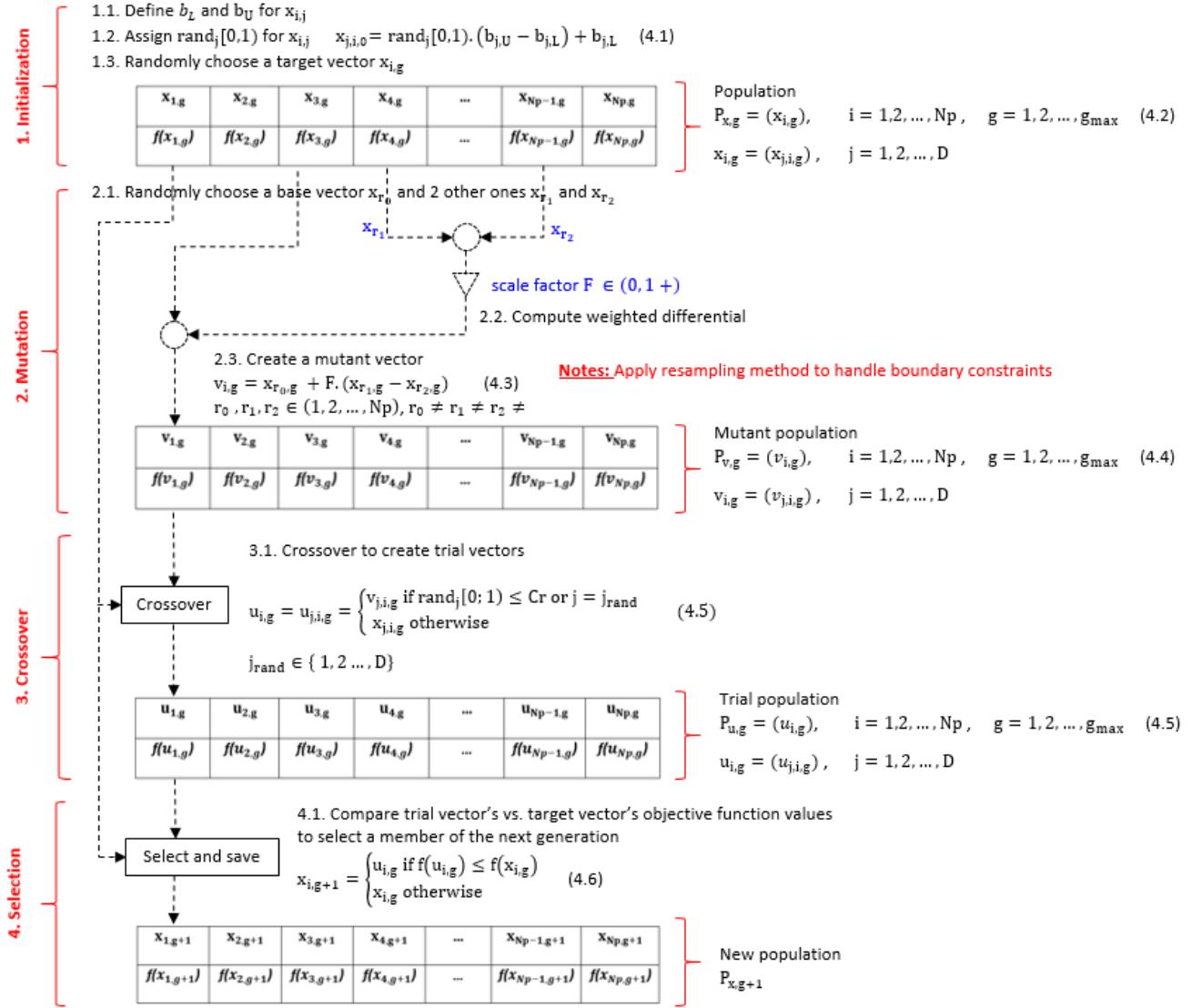


Fig. 3 A flow chart of DE's generate-and-test loop

3.3 Particle filter (PF) technique

A major problem that often occurs in real-time forecasting is the uncertainty quantification (Weerts & El Serafy, 2006). This uncertainty arises due to the oversimplification of the rainfall-runoff process, uncertainties of the model structure and/or model parameters, and the limit of the hydrological information (Nagai, 2003; Kadoya & Tanakaramu, 1989). This uncertainty problem can be efficiently solved by incorporating filtering techniques into a rainfall-runoff model, promoting accurate real-time flood forecasting (Chen et al., 2018, Plaza Guingla et al., 2013). In this research, the system for real-time 1- and 2-h ahead flood runoff forecasting was constructed using the LST model in combination with the PF technique (Gordon et al., 1993). Assuming x as a state variable and y as an observation variable, the procedure of the PF is outlined in the following steps:

Step 1: Randomly generate N initial particles $[x_t^{(i)}]_{i=1}^N$ based on the proposed distribution $\pi(x_t | x_{t-1}^{(i)}, y_{0:t})$. The number of particles is selected by the user as a tradeoff between computational effort and estimation accuracy.

Step 2: Prediction: Perform step (2.1) and (2.2) for each particle i

Step 2.1. Obtain the system noise u_t from a known prior density function $p(u_t)$.

Step 2.2. $x_{t-1} | x_{t-1}^{(i)}$ is evolved over time by the state evolutionary model $x_{t|t-1} = f_t(x_{t-1}, u_t)$ and $x_t | x_{t-1}^{(i)}$ is obtained.

Step 3: Updating: Assume that observation data y_t is obtained, performing step (3.1) to (3.3) for each particle i

Step 3.1. Compute the likelihood $p(y_t | x_t)$ from $x_t | x_{t-1}^{(i)}$

$$p(y_t | x_t | x_{t-1}^{(i)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{E_q^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

$$E_q = |Q_{obs,j} - Q_{cal,j}^{(i)}|$$

$$\sigma_y = 0.1Q_{cal,j}^{(i)}$$

Step 3.2. Use the likelihood density to determine the corresponding importance weight of each particle $w_t^{(i)} = p(y_t | x_t^{(i)})$.

Calculate the total weight $T_w = \sum_{i=1}^N w_t^{(i)}$ and then normalize the particle weights as $w_t^{(i)} = T_w^{-1} w_t^{(i)}$

Step 3.3. Resample each particle based on $w_t^{(i)}$ to obtain $[x_{t|t}^{(i)}]_{i=1}^N$

Step 3.3.1. Construct the cumulative sum of weights (CSW) by computing $c_i = c_{i-1} + w_t^{(i)}$ with $c_1 = 0$.

Step 3.3.2. Let $i = 1$ and draw a starting point u_i from the uniform distribution $U[0, N^{-1}]$.

Step 3.3.3. For $j = 1, 2, \dots, N$

- Move along the CSW by making $u_j = u_1 + N^{-1}(j - 1)$
- While $u_j > c_i$ make $i = i + 1$
- Assign samples: $x_t^j = x_t^i$
- Assign weights: $w_t^j = N^{-1}$
- Assign parents: $i^j = i$

Step 4: Return to step 2 as $t = t + 1$

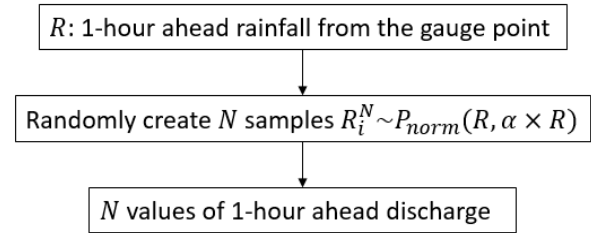


Fig. 4 Formulation of pseudo forecasted rainfall

3.4 Formulation of pseudo forecasted rainfall data

Systems for flood runoff forecasting require short-term prediction of rainfall. A few hours to days ahead online forecasts of rainfall are expected to improve flood forecasting accuracy. However, the Japan Meteorological Agency (JMA) only started providing 1 h to a few days ahead of rainfall forecasting information since June 2019. The record length of online rainfall forecasting by the JMA is not sufficient for assessing the influence of future rainfall prediction uncertainty on the runoff forecast. Additionally, reliable forecasted rainfall information is difficult to acquire. To account for the missing data, we used pseudo forecasted rainfall data created by adding Gaussian noise to 1- and 2-h ahead rainfall data collected from the gauge points in the research catchment instead of real forecasted rainfall information. **Fig. 4** presents a brief description of creating pseudo forecasted rainfall.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Runoff simulation by LST model

The unknown parameters of the LST model were calibrated via DE to optimize the objective function. MAE and the NSE were used as objective functions for minimization and maximization, respectively. Optimal parameters of the LST model and the error of daily and flood runoff are shown in **Table 1**. When the LST model

Table 1 Optimal model parameters (Kuroki Dam catchment)

PARAMETERS	LOWER BOUND	UPPER BOUND	OPTIMAL PARAMETERS
a1	0.001	0.05	0.0482
a2	0.01	0.1	0.0999
a3	0.001	0.1	0.0263
a4	0.0005	0.02	0.0199
a5	0.00001	0.001	0.0001
b1	0.01	0.02	0.0200
b2	0.001	0.04	0.0399
b3	0.001	0.01	0.0083
Z1	5	200	149.1574
Z2	5	500	499.6221
Z3	5	200	198.4917
S1	0	20	3.8738
S2	0	200	124.7907
S3	0	1000	204.1633
S4	0	1000	970.3223

Table 2 Accuracy of runoff simulation using LST model with and without particle filter

	MAE		NSE (%)	
	LT (mm/d)	ST (m3/s)	LT	ST
LST	3.93	4.17	75.40	71.34
LST + Particle filter	0.59	0.33	99.36	99.54

was optimized by minimizing MAE, the daily runoff error was 3.93 mm/d on average for 11 years. When optimized by maximizing NSE, it was 75.40% (see **Table 2**). Two examples of simulated daily runoff are presented in **Fig. 5**. The simulated hydrographs and results of MAE and NSE indicate that the calculated daily runoff well agrees with the observed one. Hence, the optimized LST models can be considered to show good performance in long-term runoff simulation.

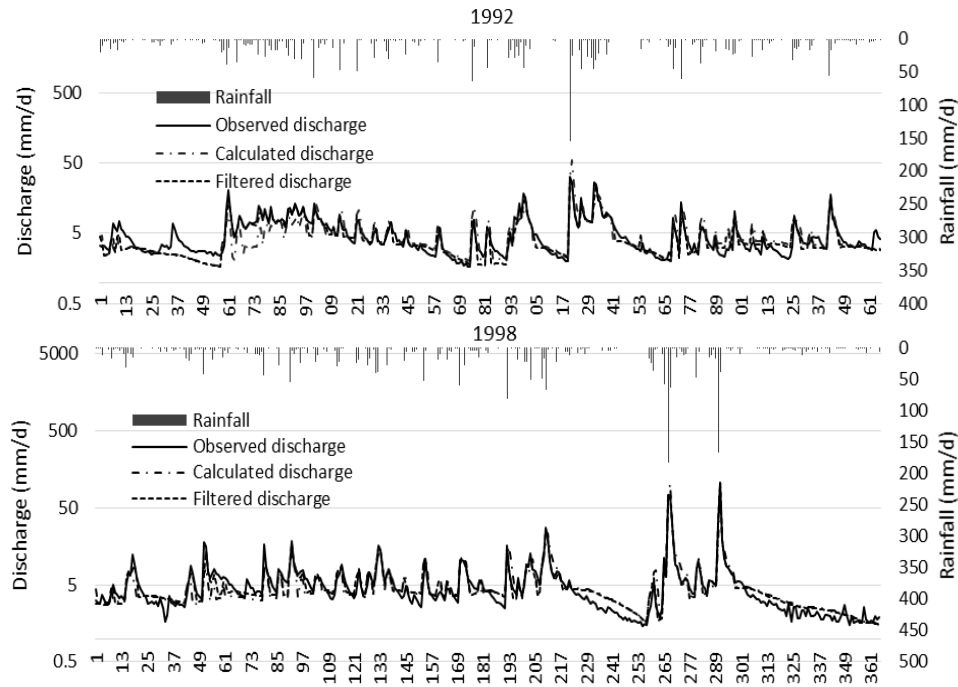


Fig. 5 Examples of simulated daily runoff by the LST model with particle filter

Fig. 6 shows that the calculated flood runoff hydrographs during four floods, which shows that the calculated runoff well simulates the observed runoff. The MAE and NSE in every 1-h discharge for 22 floods shown in **Table 2** were $4.17 \text{ m}^3/\text{s}$ and 71.34%, respectively. Thus, the LST model also simulated the flood runoff suitably. The results clearly indicate that the LST model simulated both long- and short-term runoff with good accuracy.

4.2 Runoff simulation by LST model with updating by particle filter

As the abovementioned results show that the identified runoff model has good applicability in the Kuroki Dam catchment, the existing difference between the calculated and observed discharge can be mainly attributed to the estimation of the areal average rainfall. The rainfall estimation error is believed to influence the storage depth of the top tank, particularly the upper layer's storage, S_1 , of the top tank that dominantly controls flood runoff. S_1 , therefore, is considered to be the state variable in this research. With the application of the particle filter to storage depth in the upper layer of the top tank, the simulation accuracy of the model can be expected to be significantly improved in the short-term runoff. This improvement is shown in **Table 2**, in which MAE is decreased to 0.59 mm/d and NSE is increased to 99.36% in the case of the daily runoff, and $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$ and 99.54%, respectively, in the case of flood runoff.

Figs. 5 and **6** show the good agreement between calculated and observed discharge for both daily and flood runoff, which proves that the combination of the LST model and particle filter can be used for real-time flood forecasting.

4.3 Statistical forecast of discharge considering rainfall forecast uncertainty and updating by particle filter

While planning countermeasures against flood disasters, the uncertainty of discharge forecasting should be evaluated because it is strongly related to the security of our society. The uncertainty related to discharge forecasting is considered to mainly arise from the uncertainty in rainfall forecasting. The influence of rainfall-runoff modeling, which is another important factor in the uncertainty of discharge forecasting, has been already

minimized by optimization of the rainfall-runoff model using the DE technique. The uncertainty is inevitable in forecasting, although the accuracy of the forecasted rainfall is essentially important for real-time flood forecasting. Therefore, we here discuss the influence of uncertainty in rainfall forecasting on discharge forecasting.

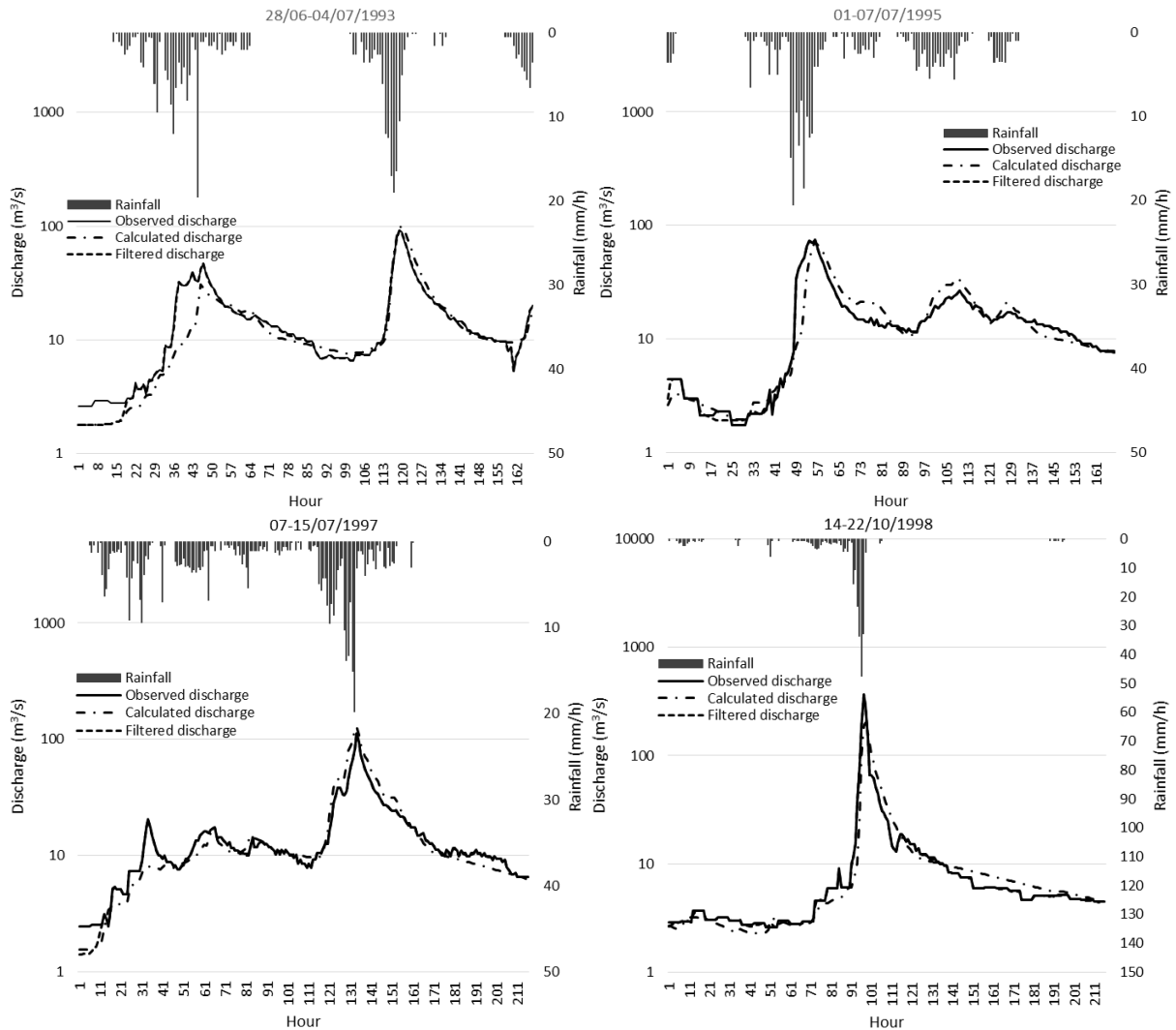


Fig. 6 Examples of simulated flood runoff by the LST with particle filter

The JMA started to deliver 1 h to a few days ahead of rainfall forecasting information in June 2019. This record length is not yet sufficient for use and it is not easy to obtain a reliable record of real-time rainfall information. Additionally, if reliable probabilistic information of future discharge is available, the alert level of flood can be set by considering the exceedance probability of forecasted water levels, which is expected to be used as valuable information for effective flood management. A method for creating pseudo forecasted rainfall data was, therefore, applied to overcome this issue. Instead of using real forecasted rainfall information, we used pseudo forecasted rainfall data created by adding Gaussian noise to the 1- and 2-h ahead future rainfall data collected from gauge points in and around the research catchment. In this research the standard deviation of the rainfall noise was selected as 10% of the future observed rainfall values and all the negative pseudo forecasted rainfall generated from this method were replaced by 0. An example of the distribution of the pseudo forecasted rainfall and the corresponding forecasted discharges are depicted in **Fig. 7**. With the method of creating pseudo forecasted rainfall, a corresponding distribution of forecasted discharges could be obtained. The distribution of forecasted discharge is a significant solution to deal with the problem of forecast uncertainty. It can be used to probabilistically estimate flood risk, thereby supporting efficient real-time flood warning and protection plans.

Next, the mean of all the forecasted discharges was selected as the output for the flood forecasting and compared with the observed discharge obtained from Kuroki dam to assess the accuracy of the proposed

forecasting system. **Fig. 8** presents examples of the results for 1- and 2-h ahead flood forecasting in Kuroki Dam catchment. The hydrographs show that the proposed forecasting method provides remarkably accurate estimations of flood runoff forecasting. The accuracy of flood forecasting is expressed by the Normalized Root-Mean-Squared Error (NRMSE) (given by Eq. 7), which is a measure of errors widely used to assess the forecasting accuracy when comparing with observed values.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs} - Q_{forecasted})^2}{T}} \quad NRMSE = \frac{RMSE}{Q_{obs}^{max} - Q_{obs}^{min}} \quad (7)$$

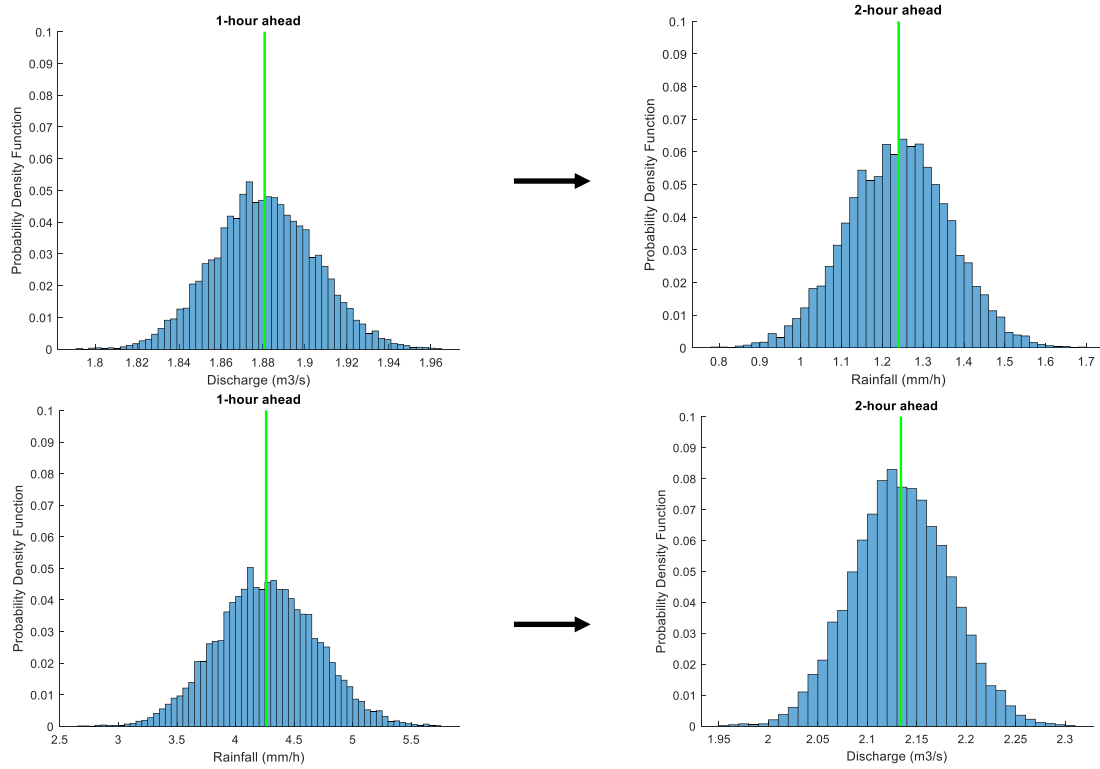


Fig. 7 Example of distribution of pseudo 1-h and 2-h forecasted rainfall and corresponding forecasted runoff

Table 3 Improvement of forecasting accuracy by filtering

Forecasting method	NRMSE (%)	
	1-h ahead	2-h ahead
No filter	9.98	11.10
Particle filter	5.05	7.40

The comparison between observed and forecasted discharge is shown in **Fig. 9** for all floods, in which the errors of 1- and 2-h ahead forecasting are 5.05% and 7.40%, respectively. NRMSE appears to increase with increasing hours ahead of the flood forecasting, but it remained within an acceptable range. Flood runoff was also forecasted without updating (no filter) and the results are presented in **Table 3**. It can be seen that application of PF significantly improves the NRMSE. From the results, it is concluded that by introducing the filtering technique (particle filter) to the LST model and applying a suitable method of rainfall prediction, the 1-h and 2-h ahead flood can be accurately forecasted.

In this research, we used the pseudo probabilistic distribution of rainfall based on the observed rainfall to consider probabilistic forecasting of future discharge. If more reliable probabilistic information of future forecasted rainfall is available, real-time probabilistic discharge forecasting is expected to provide more valuable information to for reducing flood damage.

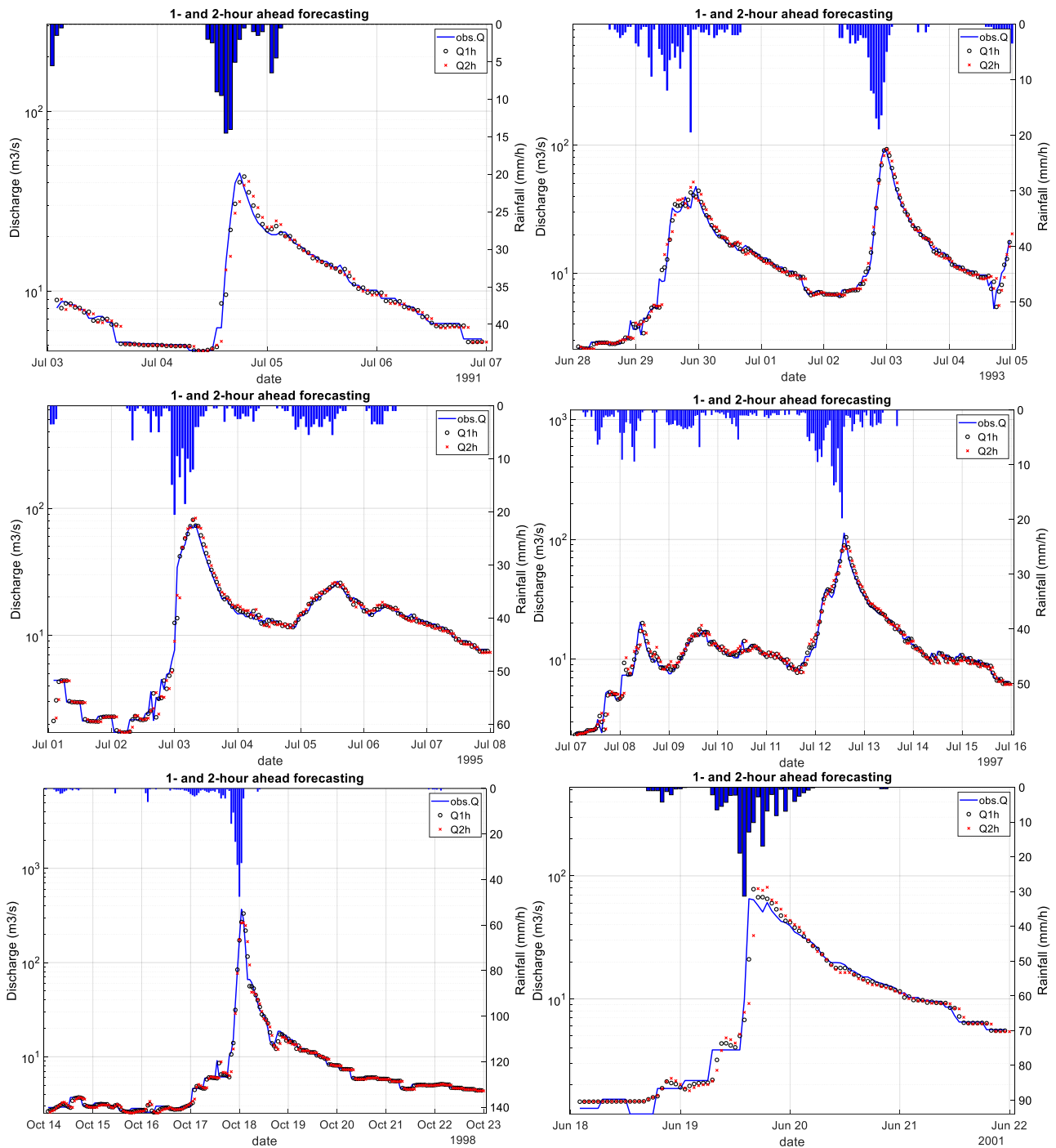


Fig. 8 Examples of real-time flood forecasting (1- and 2-h ahead)

5. CONCLUSION

In this study, the LST model was applied to hydrological data (1991–2001) in the Kuroki Dam catchment (49.2 km²). Some conclusions can be drawn as follows:

- (1) The LST model calibrated by the differential evolution technique can simulate both long-term and flood runoff (short-term runoff) successively with good accuracy. The applicability of the model was tested through continuous simulation for 11 years and for 22 floods.
- (2) Using the method of creating pseudo forecasted rainfall, a distribution of forecasted discharge values can be obtained. It can be used for probabilistic estimation of flood risk that is expected for application to real-time flood warning and protection planning.
- (3) The proposed forecasting system including the LST model combined with particle filter and using the method of creating pseudo forecasted rainfall provided accurate 1- and 2-h ahead flood runoff forecasts.

More reliable probabilistic information of future forecasted rainfall can be obtained, more valuable information for mitigating flood damage can be acquired by using generated real-time probabilistic discharge forecasting. Hence, future research on efficient methods to probabilistically forecast rainfall data is expected.

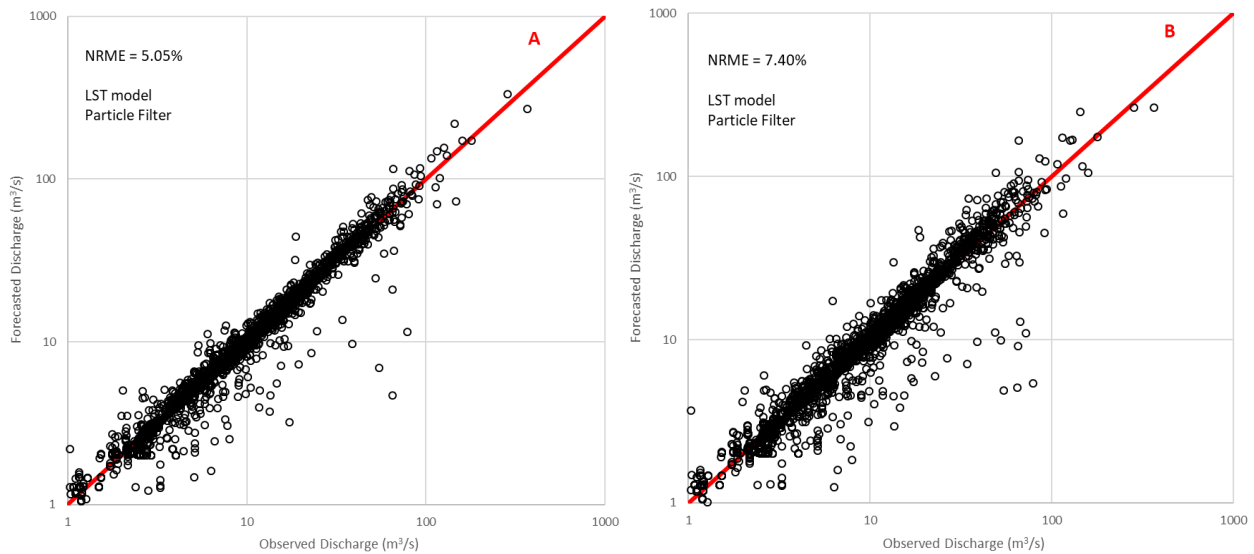


Fig. 9 Comparison between observed and forecasted discharge for all floods (1- and 2-h ahead forecasting)

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors gratefully acknowledge the support of the management office in Kuroki Dam (Okayama Prefecture, Japan) for collecting the research data.

REFERENCES

- Buhaug, H., Gleditsch, N. P., & Theisen, O. M. (2010). Implications of climate change for armed conflict. *Social dimensions of climate change: Equity vulnerability in a warming world*, 75-101.
- Chen, M., Pang, J., & Wu, P. (2018). Flood Routing Model with Particle Filter-Based Data Assimilation for Flash Flood Forecasting in the Micro-Model of Lower Yellow River, China (Vol. 10).
- Fischer, G., Shah, M., & van Velthuisen, H. J. I. f. A. S. A. (2002). *Climate Change and Agricultural Vulnerability*. Johannesburg: IIASA.
- Gordon, N. J., Salmond, D. J., & Smith, A. F. (1993). Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. Paper presented at the IEE proceedings F (radar and signal processing).
- Kadoya, & Nagai. (1988). Development of the long and short terms runoff model. (Vol. 1988).
- Kadoya, M., & Tanakaramu, H. (1989). Long and Short Terms Runoff Model and Its Application to Real-Time Flood Forecasting. *Pacific International Seminar on Water Resources Systems*.
- Phuong, L. T. H. (2017). Developing adaptive capacity in times of climate change in central rural Vietnam: exploring smallholders' learning and governance. Wageningen University.
- Munasinghe, M. (2007). Climate change and sustainable development linkages: Points of departure from the IPCC tar.
- Nagai, A. (2003). Hydrologic Modeling of Rainfall-runoff Process and Its Application to Real-time Flood Forecasting. Present Situation on The Water Resources Water Related Disaster, The Role of Agro-Environmental Education, 111-118.
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (2014). Climate change 2014 Synthesis Report-Summary for Policymakers. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.
- Plaza Guingla, D., De Keyser, R., J. M. De Lannoy, G., Giustarini, L., Matgen, P., & Pauwels, V. (2013). Improving particle filters in rainfall-runoff models: Application of the resample-move step and the ensemble Gaussian particle filter (Vol. 49).
- Storn, R., & Price, K. (1995). Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces (Vol. 23).
- Weerts, A. H., & El Serafy, G. Y. J. W. r. r. (2006). Particle filtering and ensemble Kalman filtering for state updating with hydrological conceptual rainfall-runoff models. (42(9)).

逆解析法による実蒸発散量とペンマン蒸発散量の比較
—手取川流域の林業試験場および石川県立大学農場での適用事例—
Comparison of Actual Evapotranspiration estimated by Inverse Analysis
and Penman Potential Evaporation
—Case Study of Forest Experimental Station and Experimental Farm
in Ishikawa Prefectural University—

丸山利輔*・伊藤浩三*

*石川県立大学（〒921-8836 石川県野々市市末松 1-308）

MARUYAMA Toshisuke*, ITO Kouzo*

*Ishikawa Prefectural University (1-308 Nonoichi City Ishikawa)

Abstract

This paper describes a comparison between actual evapotranspiration (ETa) estimated by inverse analysis, recently proposed by the authors, and the Penman potential evaporation (Ep). To confirm the reasonability of the inverse method, ETa was estimated using climate data for seven years at an experimental farm (flat area) and an experimental forest (mountainous area). To confirm the reasonableness of the inverse method, estimations of yearly and monthly ETa were conducted over seven years and resulted in reasonable results. Then, comparisons between daily Ep and ETa resulted in both items being closely correlated; Ep was 0.805 times that of ETa at the farm and 0.654 at the forest in terms of mean values. Finally, the ratios of ETa versus Ep were calculated. At the forest station, the ratio increased from 0.4 in March to 0.8 in July and was maintained at 0.8 after July for the year, whereas at the farm site, the ratio remained at ~0.7-0.8 throughout the year. The result for the forest was thus quite different from empirical results to date that showed a ratio of ~0.7-0.8 throughout the year. The reason of this difference was considered from aspect of net radiation, wind velocity and soil characteristics.

Key Words: inverse analysis, Penman equation, evaporation ratio, heat balance, single height temperature and humidity

要 旨

本研究は、近年公表した新しい逆解析法による実蒸発散量とペンマン蒸発散量を比較検討した内容である。まず、逆解析法により正常に蒸発散量が算定できるか否かを検討するため、石川県立大学農場及び石川県林業試験場（林試）の7年間の気象資料を活用して検討した。この結果、この方法で蒸発散が正常に算定できることを日単位の資料の比較によって確認した。次に、月別のペンマン蒸発量との逆解析法による実蒸発量の比について検討した。その結果、林試においては、3月から7月にかけて、この比率が0.4から0.8程度に漸増し、それ以降は0.8程度で推移することが示された。農場においてはこの比率が年間を通じて0.7~0.8で推移することが示された。林試の傾向はこれまで経験的に使われていた年間0.7~0.8と異なるものであった。この理由について純放射、風速、土壌の違いの視点から考察した。

キーワード: 逆解析法、ペンマン式、蒸発散比率、熱収支、1高度の気温と湿度

1. はじめに

蒸発散の研究は、古くから今日まで継続して行われてきているが、その意義は次の3点に要約される。①灌漑、特に畑地灌漑の用水量の基礎になる。②地球上の水循環の一要因をなす。③地球温暖化の原因となる炭酸ガスの評価と深い拘わりを持つ。前2要因はこれまでも多くの研究者によって指摘されているので、説明を要しないが、第3の要因について若干の説明を加える。

地球温暖化の原因とされる炭酸ガスのエミッションは渦相関法によって測定されているが、蒸発散も全く同様の原理によって測定されている。しかし、蒸発散の測定結果は、現時点での研究では、熱収支の原則を満足していない。純放射が潜熱と顕熱の和より約20%多く、潜熱と顕熱が正確に測定されていない可能性が高い (FLUXNET)。一方、炭酸ガスには蒸発散のように収支の判定基準 (熱収支関係) がないので、このような判定はできない。このことは、地球温暖化の原因となる炭酸ガスの排出量の評価に疑問を呈することに他ならない。このために、世界中の多くの研究者が、蒸発散の研究に大きな関心を持っている (Foken et al.2008, Wilson et al.2002)。

近年、筆者らは、逆解析法による蒸発散の推定法を提案している (Maruyama and Segawa, 2016a, 2016b, 2017, Maruyama et al.2019)。この方法は、これまでのポーエン比法は2高度の気温と湿度の測定値を必要としたのに対し、1高度の気温と湿度を利用し、もう一つの高度には地表を選び、この気温と湿度は、熱収支を満足させるように、最適化手法を使って決定し、蒸発散を求めようとする新しい方法である。この方法は、提案されて間もないためにも適用事例がほとんどなく、今後多くの適用事例が待たれるところである。

また、これまで、蒸発散の推定法の一つとして、ペンマンの蒸発散ポテンシャルに特定の係数を乗じて実蒸発散を推定する方法が使われてきている。しかし、その係数に確たる根拠がなく、問題が残されている。今回、逆解析法によって実蒸発散が推定できることとなったので、改めてこの係数について研究することとした。すなわち、本研究の目的は次の2点に要約される。

- ① 新しく提案された逆解析法による蒸発散推定法の実用可能性を確認すること
- ② 逆解析法による実蒸発散量とペンマン蒸発量との関係を明らかにすること

2. 研究の方法

2.1 逆解析法による蒸発散推定法の概要

この方法は、純放射 R_n と地中熱フラックス G を使って、1高度の気温 (T_z)、湿度 (reh_z) から顕熱 H 、潜熱 IE を分離し、蒸発散量 ET を推定する新しい方法である。熱収支式 (1) を基本とし、(2) 式の H 、 IE 分配比を仮定して、最適化手法により、未知の地表面温度 T_s と地表面湿度 reh_s を推定する。

この計算を (1) 式が収束するまで繰り返し、解が収束した時点の B_{app} (2) 式を B_0 とする。この B_0 を用いて H 、 IE を求める。未知数が T_s 、 reh_s の2個なので、(4)、(5) の2式を連立に解き未知数 T_s 、 reh_s を確定する (Maruyama and Segawa 2017, Maruyama et al.2019)。

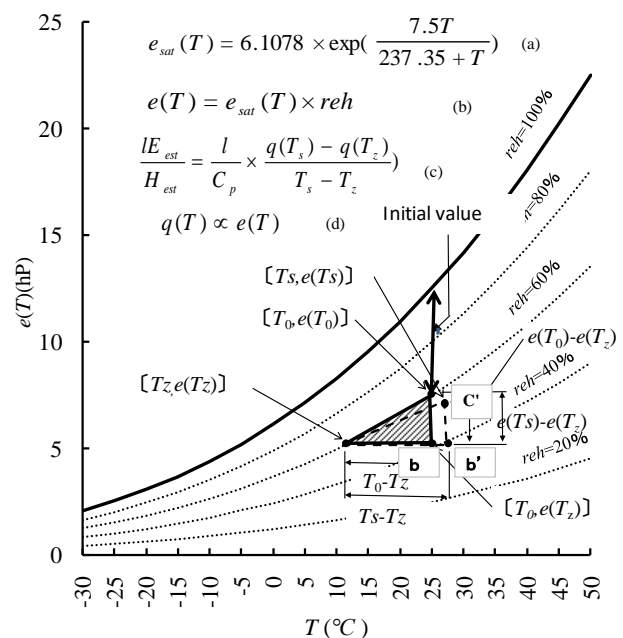


図1 逆解析法における初期値の説明

$$Rn = H + lE + G \quad (1)$$

$$B_{app} = \frac{H_{est}}{lE_{est}} = \frac{Cp(T_s - T_z)}{l[q(T_s) - q(T_z)]} \quad (2)$$

$$q(T_s) = reh_s \times q_{sat}(T_s) \quad (3)$$

$$R_n^j - G^j - H_{est,i}^j - lE_{est,i}^j = \varepsilon_i^j \quad (4)$$

$$R_n^{j+1} - G^{j+1} - H_{est,i}^{j+1} - lE_{est,i}^{j+1} = \varepsilon_i^{j+1} \quad (5)$$

ただし、 i :時間、 j :繰り返し回数。

最適化の目的関数は、(4)式と(5)式の絶対値の和(6)式を選び、この値が最小になるように最適計算する。

$$ABS[\varepsilon_i^j] + ABS[\varepsilon_i^{j+1}] \rightarrow \min \quad (6)$$

ただし、計算の過程で、 H と lE の値が過大に変動するのを防ぐために次の制約を加える。

$$\begin{aligned} [ABS(H^j) + ABS(H^{j+1})] < \alpha \times [ABS(Rn^j - G^j) + ABS(Rn^{j+1} - G^{j+1})] \cdots \cdots H \text{ に対して} \\ [ABS(lE^j) + ABS(lE^{j+1})] < \alpha \times [ABS(Rn^j - G^j) + ABS(Rn^{j+1} - G^{j+1})] \cdots \cdots lE \text{ に対して} \end{aligned} \quad (7)$$

この方法の重要な点は、最適化計算に当たっての初期値の設定である。すなわち、**図1**の $T \sim e(T)$ グラム上で実測値 T_z , $q(T_z)$ により1点 a を定め、地表面近傍で測定した地温 $T_0(b)$ を T_s の近似値と仮定する。さらに、 T_0 に対応する湿度 $q(T_0)(c)$ を求め、(異常が仮定した B_{app}) 熱収支(1)式を満足するように、EXCELLに内蔵されている SOLVER により最適化計算を行う。実際の計算では数回の試行で収束する場合が多い。この方法は、誤差面が複雑で、極値が複数存在するため、初期値を変えて計算を行う必要がある。とくに、 H と lE 分配比を探索するために、解に対する感度が敏感でなく、初期値を出来る限り収束値に近く設定することが肝要である。また、この方法は基本的にはボーエン比 (Bo) 法に属するため、異常値を削除しなければならない。筆者らの方法(伊藤・丸山、2019)により、 $\alpha = 1.5$ の基準によって異常値を削除した。その上で、 $-3 < Bo < +1$ に対して $Bo = -3$ を、 $-1 < Bo < -0.333$ に対して $Bo = -0.333$ を適用して、熱収支 ($Rn - G = H + lE$) が満足されるようにした。

2.2 ペンマン法の概要

この方法はよく知られているので簡単に式のみ示す。

$$lE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Rn}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) \quad (8)$$

$$f(u) = 0.26 \times (1 + 0.537 \times U_z) \times [e_{sat}(T_a) - e_a] \quad (9)$$

ここに、 U_z は 2.0m の高度の風速、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の傾き (hPa/°C)、 λ は気化潜熱、 γ は乾湿計定数、 reh は相対湿度、 e_{sat} は飽和水蒸気圧、 q は比湿。

2.3 R_n の計算

林業試験場では R_n を実測しているが、石川県立大学農場ではこれを実測していない。そこで気温と湿度、および全天日射量の実測値から R_n を算定することとした。

$$R_n = S_n(1-a) + L_D - L_U \quad (10)$$

ここに、 S_n は全天日射量(短波)、 a はアルベド (0.05)、 L_D は下向き長波放射、 L_U は上向き長波放射。

$$L_n = -1 \times \sigma (T_a + 273.16)^4 \times (0.34 - 0.14 \times \text{SQRT}(e_a)) \times (0.1 + 0.9 \times a/b) \quad (11)$$

この式で、 $L_n = L_D - L_U$ 、 σ はステファンボルツマン定数 ($5.670 \times 10^{-08} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 a/b : 日照率 (松井、2010)。

2.4 石川県林業試験場 (林試) での気象観測

林試は、白山市三の宮 (東経 $36^\circ 25'52.64''$ 、北緯 $36^\circ 38'25.21''$ 、標高 139m) に立地し、気象観測露場はこの試験所内にある (写真参照)。純放射 (NR-LITE, プリュード社)、気・湿度 (高さ 2.0m)

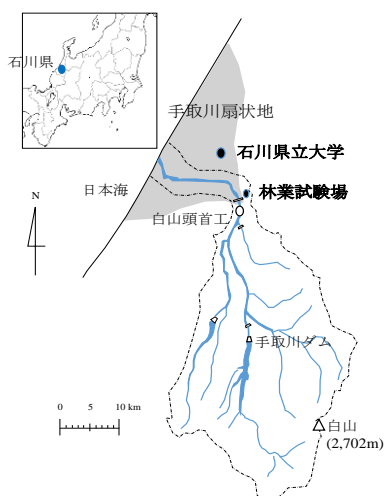


図2 試験地の位置



図3 林試における気象観測

地温 (深さ 10 cm) HMP45C, クリマテック社) 風速 (KDC-SO4-05103, タマヤ社)、日照 (CIS-162, クリマテック社)、日射 (LI200X, クリマテック)、地中熱フラックス (HFP01, クリマテック) を測定した。風速は 10m の高さで測定しているので、ペンマン蒸発量を算定する際には、2.0m の高さに換算した。

2.5 農場における気象観測

石川県立大学は石川県野々市市末松 (東経 $36^\circ 30'43.39''$ 、標高 44m) に立地し、農場は行内に設置され、農場で気象観測が行われている (写真参照)。気象観測機器はすべて Campbell 社製で、温湿度 (CS-500-L6)、風速 (03001-L11) 日射 (LI200X-L11)、地温 (107-L25)、気圧 (CS105)、日照時間、



図4 農場における気象観測

地温(107-L25)を(5cm)測定している。風速は6mの高さで測定しているので、ペンマン蒸発量を算定する際には、2.0mの高さに換算した。

3. 研究結果

3.1 林試資料による分析結果

3.1.1 年間の熱収支

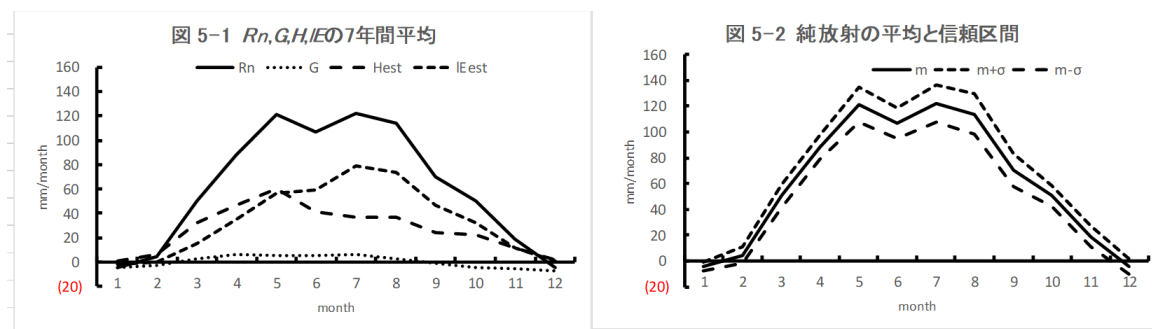
林試において、2012年から2018年までの7年間の時間単位の資料に基づき、逆解析法により、潜熱と顕熱を算定し、月単位にまとめたのが表1である。この表によると、本試験地では、 Rn は平均で739.8mm/y、 H は318.5mm/y、 IE は416.1mm/yで、それぞれ Rn の43.8%、56.2%を占める。本試験地は山間部に立地し日照は平旦部よりかなりすくない。なお、放射フラックスは100W/m²当たり3.53mm/dayの割合で換算した(近藤2015)。

表1 林試における熱収支の解析結果

Year	Rn	G	H	IE	Inbalance
2012	668.3	9.6	281.1	377.6	0.0
2013	725.8	5.8	319.1	400.9	0.0
2014	760.3	8.0	325.0	427.4	0.0
2015	760.5	11.3	308.7	440.4	0.0
2016	744.7	5.4	303.7	435.6	0.0
2017	738.1	-11.6	334.8	414.9	0.0
2018	780.9	7.9	357.4	415.6	0.0
Mean	739.8	5.2	318.5	416.1	0.0

3.1.2 熱収支の季節別変化

次に熱収支の季節別変化に注目する。図5-1は Rn 、 H 、 IE の7年間の平均値の月別変化を示したものである。冬季(12-3月)には H が IE を上回っていることが注目される。これはこの期間の特徴および積雪による影響と考えられる。図5-2は Rn 、図5-3は H 、図5-4は IE の月別変化と7年間の変動範囲(標準偏差)を示したものである。新しく提案した逆解析法によって、各項目とも正常な推定が出来ていると判断される。



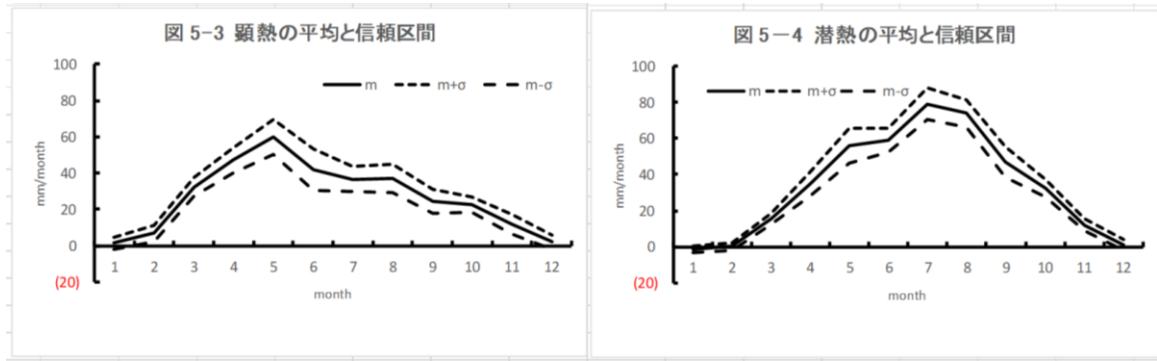


図5 林試における熱収支の月別変化（7年間の資料）

3.2 農場資料による結果

表2 農場における熱収支の解析結果

3.2.1 年間の熱収支

農場において、2012年から2018年までの7年間の時間単位の資料に基づき、逆解析法により、 IE と H を算定し、月単位にまとめた(表2)。この表によると、本試験地では、 Rn は平均で927.5mm/y、 H は329.6mm/y、 IE は597.9mm/yで、それぞれ Rn の35.5%および64.5%を占める。本試験地は平坦部に立地し日照時間は林試よりかなり多く、 Rn に占める IE の割合も高い。

年	Rn	G	H	IE	差
2012	1065.7	0.0	340.6	725.1	0.0
2013	1059.9	0.0	344.6	715.4	0.0
2014	941.8	0.0	368.8	573.1	0.0
2015	891.5	0.0	349.4	542.1	0.0
2016	855.3	0.0	311.3	544.0	0.0
2017	842.8	0.0	273.2	569.6	0.0
2018	835.7	0.0	319.7	516.0	0.0
平均	927.5	0.0	329.6	597.9	0.0

3.2.2 熱収支の季節別変化

次に熱収支の季節別変化に注目する。図6-1は Rn 、 H 、 IE の7年間の平均値の月別変化を示したものである。冬季(12-3月)には H が IE を上回っていることが注目される。

これはこの期間の特徴と考えられる。図6-2は Rn 、図6-3は H 、図6-4は IE の月別変化と7年間の変動範囲(標準偏差)を示したものである。新しく提案した逆解析法によって、各項目とも正常な推定が出来ていること判断される。

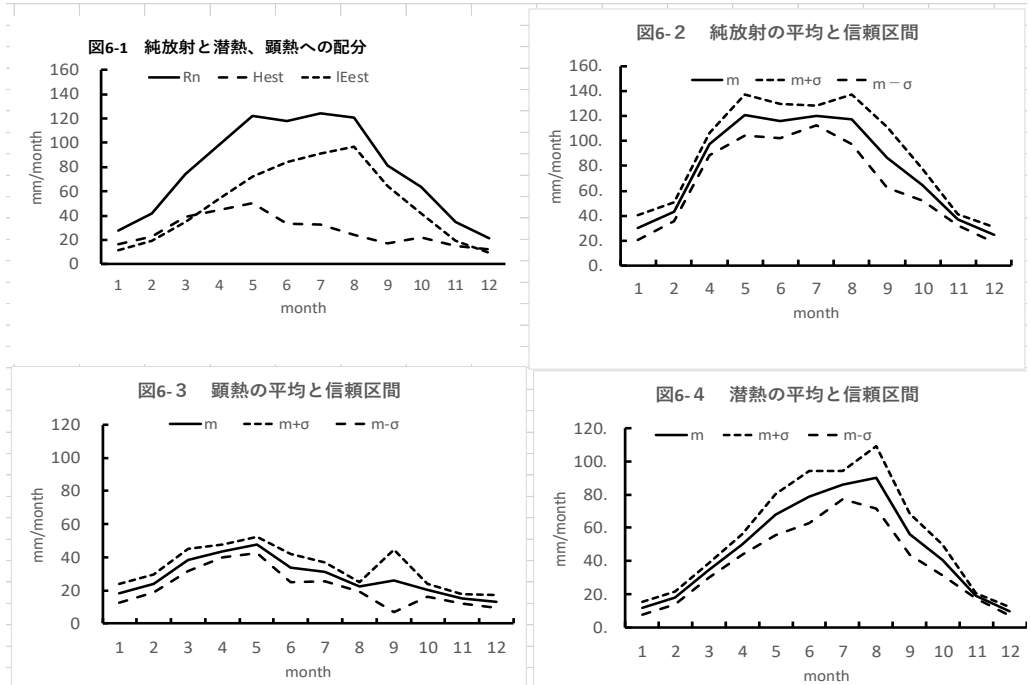


図6 農場における熱収支の月別変化（7年間の資料）

4. 考察

4.1 E_p と ETa の比較

4.1.1 逆解析法の正当性

逆解析法(ETa)の正当性を確認するために、この方法とペンマン法(E_p)の解析結果を比較した(表3)この表に示されるように、係数(ETa/E_p)は、農場では平均0.810、林試では0.664となった。これまで、実蒸発散の算定が困難であったため、このような資料は提示されなかったが、逆解析によって実蒸発散が推定可能となったため、得られた資料といえる。勿論これまで、実験的に実蒸発散量の算定が行われていたが、これらの値と算定結果は矛盾するものではなく、むしろ追認した結果となっている。

表3 逆解析法(ETa)とペンマン法(E_p)の比較

Year	Forest site		Farm site	
	ETa/E_p	R^2	ETa/E_p	R^2
2012	0.645	0.861	0.914	0.733
2013	0.637	0.863	0.885	0.788
2014	0.650	0.810	0.779	0.706
2015	0.689	0.818	0.764	0.721
2016	0.693	0.706	0.787	0.740
2017	0.697	0.746	0.783	0.519
2018	0.637	0.842	0.757	0.733
Mean	0.664	0.807	0.810	0.706
σ	0.028	0.060	0.063	0.086

4.1.2 農場と林試の実蒸発散量 (ETa) とペンマン法 (E_p) の比較

図7に農場と林試の実蒸発散量 (ETa) とペンマン法 (E_p) の関係を2012年の日単位の資料について比較した。林試では、 E_p に対して ETa は約0.645倍の値を示したのに対し、農場では0.914倍と農場の方がやや大きい値を示した。

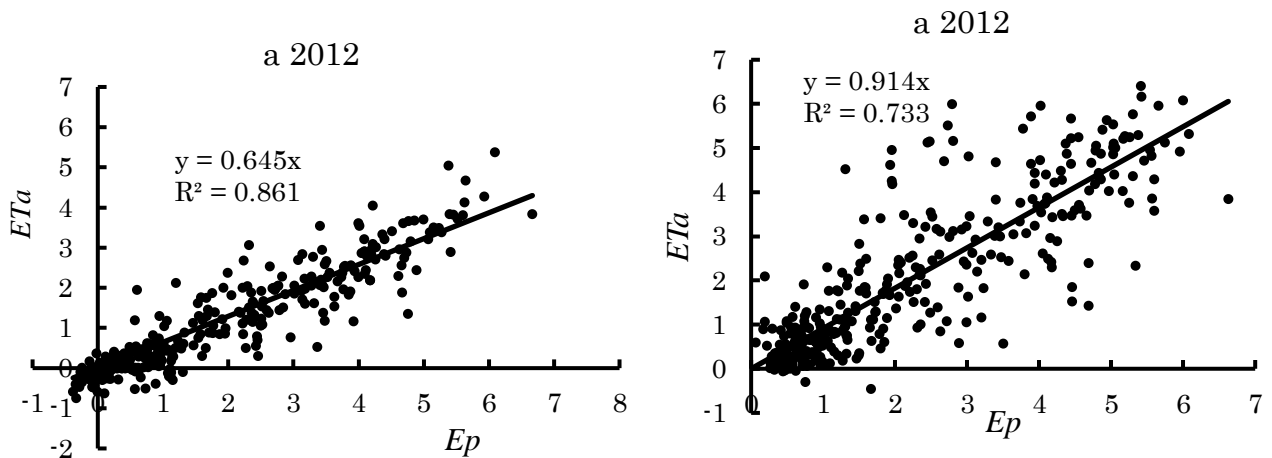


図7 逆解析法とペンマン法の比較

図7-aは林試における E_p と ETa (2012年)の両者を比較したもので、良い相関を示しており、実蒸発散量(逆解析法)が正しく求められていることがわかる。この図は1年の例であるが、解析に供した2013~2018年でもほぼ同様な結果が得られた。

図7-bは農場における E_p と ETa (2012年)の両者を直接比較したもので、 R^2 は林試より小さく分散は大きいですが、良い相関を示しており、実蒸発散量(逆解析法)が正しく求められていることがわかる。この図は林試同様1年の例であるが、解析に供した2013~2018年でもほぼ同様な結果が得られた。

4.2 林試における ETa と Ep の比較

これまで、流域実蒸発散量を推定するのに、しばしば Ep と ETa の比率で推定する場合があった。しかし、この比率は経験的に定めたもので確たる根拠に基づいた係数とは言い難い面があった。本研究で、逆解析法によって、実蒸発散が推定できたのでこの比率を算定し、信頼区間(標準偏差)と共に示した。ただし、冬期(11~2月)は積雪のため除外した。この図から明らかなように、3月から7月にかけて、約0.4から0.8へと漸増する傾向を示し、これまで経験的に使われてきた値と大きく異なる結果となった。この理由は地表面の温度と湿度が農場に比較して大きく変動し、地表がより乾燥したためと考えられる。

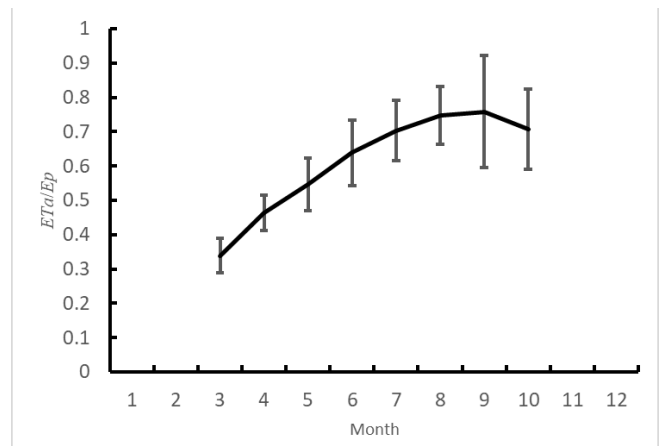


図8 実蒸発散量とペンマン蒸発量の比較 (林試)

4.3 農場における ETa と Ep の比較

同様な目的で、農場における ETa と Ep の月別変化とその信頼区間を図9に示した。この場合は、2月から9月までは0.8程度の値を示し、これまで経験的に使われていた値と大きな差は見られなかった。冬季(11月~1月)にはこの係数が小さくなった。

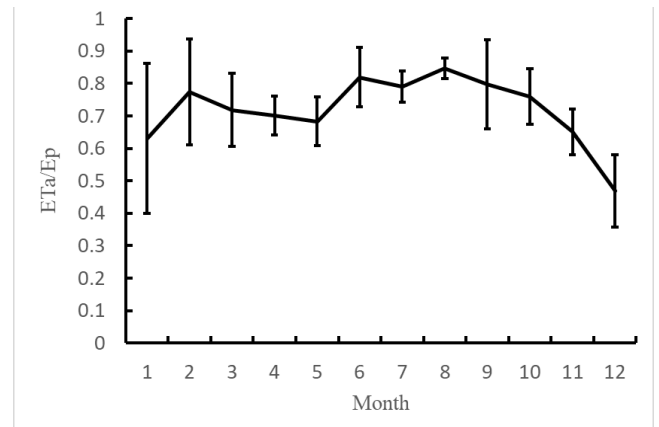


図9 実蒸発散量とペンマン蒸発量の比較 (農場)

4.4 農場と林試の ETa/Ep が大きく異なる理由

この理由を要約すると次の3点にまとめられる。

1. 農場の Rn は林試の Rn より大きいことは当然として、潜熱と顕熱の配分率も前者が大きい
2. 風速の蒸発散に及ぼす影響をペンマン式の第2項により検討したところ、農場の方が林試より風速の影響が大きいことが示された。
3. 最適化計算の結果、湿度及び地表面温度の初期値と収束値の変化を検討した結果、林試の方が農場より大きく、林試では土壌水の流動抵抗の方が大きいことが示された。このことは林試の方がより乾燥しており、減率蒸発の程度が農場より大きいことが推定された。

5. 討論

5.1 収束状況

純放射を実測している林試の逆解析では、最適化計算前の段階ですでに約33%が収束しており、第1段階最適化(初期値 $rehs=rehz$)で約80%の収束、第2段階最適化(初期値 $rehs=0.9rehz+0.1$)で約95%の収束を見ている。これに対し、農場での逆解析では最適化計算前の段階で28%、第1段階最適化(初期値 $rehs=rehz$)で約68%の収束、第2段階最適化(初期値 $rehs=0.9rehz+0.1$)78%、第3段階最適化(初期値 $rehs=0.8rehz+0.2$)で約78%の収束、第4段階最適化(初期値 $rehs=0.95rehz+0.05$)

ようやく 85%の収束に到達した。この原因は明確ではないが、林試では実測純放射を使用しているのに対し、農場では全天日射と計算による長波放射を使用したためではないかと推察している。(但し、 reh_s は仮定した地表面の湿度、 reh_z は実測湿度)

なお、この逆解析法は、仮定した reh_s, Ts による熱収支の残差(式 6)は初期値の設定段階で極めて小さな値となり、 W/m^2 の単位で 10^{-12} オーダーまではゼロに等しい。本研究では 10^{15} を乗じて最適化計算を行った。

5.2 実蒸発散量の計算に際しての注意事項

Bo 法には、2 高度間の潜熱のバルク計数 C_E と顕熱のバルク計数 C_H が等しいという前提がある。したがって、本法もこのバルク計数が等しくなるよう解析領域(同定する未知の下層の温度と湿度の高度)を選定しなければならない。露場の場合は芝であるから、下層の高さは地表面をとって問題ないが、森林の場合は、樹冠直上または樹冠よりやや内部に入った高度、作物や草地の場合は、作物直上または作物高の上から少なくとも 3 分の一程度の高さを想定する必要がある。但し、 Bo 法では 2 高度の温度差と湿度差の比率だけが問題となるので実際の距離は解析結果には関係ない。

6. 結びと今後の課題

本研究は、新しく提案した 1 高度の温度と湿度を使って地表面の温度と湿度を推定し、 Bo 法の考え方による逆解析により蒸発散を求め、 Bo 法と比較検討した内容である。

実験サイトとしては石川県手取川流域の山地部林試を、平坦地として石川県立大学農場を選定した。両地点の 2012 年から 2018 年までの 7 年間の時間単位の資料を解析に供した。逆解析法により、両地点の蒸発散量は正常に算定され、月別変化も同様に正常に求めることができた。これによって、新しく提案した蒸発散の逆解析法は、正常に機能することが確認できた。

以上の資料を用いて、これまで経験的に使われていた ETa と Ep の比率について検討した。その結果、林試の資料では、これまで経験的に使われていた比率と大きく異なる値、すなわち春先には 0.4 と小さな値が得られ、7 月に向かって 0.8 と漸増することがわかった。平坦地の農場では 2 月から 9 月までは 0.7~0.9 とこれまで経験的に得られた値と大きな差は認められなかった、しかし 11 月~2 月の冬期には小さくなった。これによって、 ETa を Ep との比によって推定することの問題点と合理的な点が確認できた。なお、 ETa については、最適化にあたっての初期値の選定に検討の余地があることを付け加える。本研究は手取川流域に限定された地域の解析例であり、一般的の傾向を知るには、資料が少ない、今後の条件の異なる地域で同様な解析を行い、資料の蓄積を待つて一般的な傾向が明らかになることを期待したい。

謝辞： 本研究で使用した石川県立大学農場の気象資料については石川県立大学高居恵愛講師および石川県林業試験場の各位にお世話になった。また、応用水分・水環境研究部会シンポジウム第 32 回 (2019.11.29) において、アルベドを改良すべき指摘があり、今後の改正の予定である。記して深謝の意を表したい。

引用文献

Foken, T., 2008. The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications*. 18(6), 1351-1367. Ecological Society of America

- 伊藤 浩三、丸山 利輔 (2019) 蒸発散推定における異常値の定義と熱収支ボーエン比法への適用例、農業農村工学会論文集 309 (87-2) 1-159~1-167
- 近藤純正, 1996.: 水環境の気象学, 5. 地表面付近の風と乱流, 6 地表面の熱収支の基礎, 99-159, 朝倉書店 東京.
- 近藤純正, 2015. 地表面の熱収支, [http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1999/1999_11_0769.pdf\(ref.2018.6.7\)](http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1999/1999_11_0769.pdf(ref.2018.6.7))
- Maruyama, T., Segawa M., 2016a. : Reciprocal analysis of sensible and latent heat fluxes in a forest region using single height temperature and humidity based on the Bowen ratio concept, *Journal of Water Resources and Protection*, 8 724-742. doi:org/10.4326/jwarp.2016.87059
- Maruyama, T., Segawa, M., 2016b. : Application of reciprocal analysis of sensible and latent heat fluxes with evapotranspiration at a humid region. *Journal of Modern Hydrology* , 6, 230-252, doi:10.4236/ojmh 2016.64019
- Maruyama,T., Segawa, M., 2017. : Estimation of the sensible and latent heat fluxes by reciprocal analysis at an arid and semi-arid region. *Journal of Modern Hydrology*, 7, 38-64, doi:10.4236/ojmh 2017.71003 .
- Maruyama,T., Ito,K.,Takimoto,H.,(2018)Abnormal data rejection range in the Bowen Ratio and inverse analysis method for estimating evapotranspiration, *Agricultural and Forest Meteorology*,269-270.323-334
- Toshisuke Maruyama, Kouzo Ito, and Hiroshi Takimoto (2019) : Abnormal Data Rejection Range in the Bowen Ratio and Inverse Analysis Methods for Estimating Evapotranspiration, *Agricultural and forest meteorology* 269-270、323-334
- 丸山利輔,伊藤浩三 (2019) 蒸発散推定のための逆解析法とボーエン比法及び渦相関法との比較、農業農村工学会論文集 309 (87-2) 1-169~1-178
- 松井宏之 (2010) ペンマン型蒸発散量推定式における有効長波放射量推定式の比較、農業農村工学会論文集、270 (78-6) 95-100
- Wilson, K., Allen,G., Eva,F., Marc,A.,Dennis,B.,Paul,B., Christian, B.,Reinhart,C., Han,D., Chris.F., Achim,G., Andreas,I., Law, B. E., Andy,K., Tilden,M., John,M.,Russ,M., Walter,O., John,T., Shashi, V. and Riccardo,V., 2002: Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1), 223-243, doi: 10.1016/s0168-1923(02)00109-0.

大区画水田における取水による湛水深変化の均一性

Homogeneity of ponding depth change due to irrigation in large-sized paddy field

坂田 賢*・鈴木 翔*・新村麻実*・友正達美*

*農研機構 農村工学研究部門 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6)

SAKATA Satoshi*, SUZUKI Sho*, SHIMMURA Mami*, TOMOSHO Tatsumi*

*Institute for Rural Engineering, NARO (2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609)

Abstract

One of the government goals is using data for Agricultural production. Agricultural machinery using ICT is in the stage of social implementation, but the specifications differ depending on the device. In this study, in order to verify the representativeness of the data used in the field, the spatial distribution of the ponding depth in a large-sized paddy field of 3.3ha was examined. According to leveling, the installation height of the three water level sensors connected to the ICT equipment was different. Though it is thought to increase the ponding depth in the paddy field evenly during rainfall, ponding depth may not necessarily change uniformly due to factors such as drain outlet operation. On the other hand, the difference among the measurement points of the ponding depth change during irrigation is small, and it was confirmed that the water was supplied until the water was distributed throughout the field even when the water supply is automatically stopped when the set water level is reached.

Key words: Ponding depth, Large-sized paddy field, Remote-controlled Water Management System in Paddy Fields, rainfall, irrigation

要 旨

データを活用した農業の実践が、政府の示す目標となっている。ICT を活用した機器が社会実装される段階にあるが、機器によって仕様異なる。本研究では、圃場で利用されるデータの代表性について検討することを目的に、面積が 3.3ha の大区画水田における湛水深変化の空間分布について検討を行った。水準測量により、ICT 機器に接続された 3 つの水位センサーの設置高さが異なっていた。また、圃場内の湛水深が均一に増加すると考えられる降雨時の湛水深変化からは、排水口操作などの要因によって必ずしも均一には変化しない可能性が示された。一方、取水時における湛水深変化の測定点間の相違は小さく、設定水位に達すると自動で給水を停止させる管理を行っている場合でも圃場全体の湛水深が増加するまで給水が行われていることが確認された。

キーワード: 湛水深, 大区画水田, 圃場水管理システム, 降雨, 灌漑

1. はじめに

未来投資戦略 2018 では、2025 年までに農業の担い手のほぼ全てがデータを活用した農業を実践することが目標の一つに掲げられている (首相官邸, 2018)。実現すれば圃場 1 筆ごとの農作業に関するデータが得られることから、情報を統合することでビッグデータとしての利用が期待される。

一方、観測値を分析して現状を把握することや将来を予測するためには、データの多寡にかかわらず、均質な精度が担保されていることが必要であると考えられる。稲作の圃場水管理に関しても情報通信技術 (以下, ICT) を活用し作業の省力化に資する製品が複数のメーカーから上市されている (農林水産省, 2019)。例えば、農林水産省 (2019) によると、後述する圃場水管理システムをはじめ、水田内の水位や周辺の気象状況を記録する機器、給水栓の開閉を制御し設定された水位に達すると自動停止する機器、水位を観測しながら開水路に設置された堰板を上下させる機器などが挙げられてい

る。これらの機器は、イネの栽培に必要な水管理を圃場から離れた場所で監視または制御することを目的に開発されているが、監視や制御の対象や精度は統一されていない。

水管理の指標となる湛水深に関しては、測定の有無を含めて、観測機器の測定原理や精度について公表されていない場合もある。また、湛水深測定が行われている機器であってもほとんどは圃場内の1点での測定であり、圃場内の湛水深の代表値としての信頼性が懸念される。本研究では、農研機構で開発された圃場水管理システムを用いて水管理が行われている大区画水田において、湛水深の圃場内の分布を計測し、ICTを利用した水管理システムの水位観測値の活用について検討した。

2. 圃場水管理システムの概要 (野口, 2019)

日本再興戦略 2016 において「革新的技術の導入による生産性の抜本的改善」を実現するための具体的手法として「生産基盤の整備に当たっては、ICTの活用による水管理の省力化技術の導入等を推進する」(首相官邸, 2016)と示されたことなどを契機として、ICTを取り入れた水管理に関する機器やシステムの開発が盛んに行われるようになった。農研機構では、主にパイプラインが接続された取水口と排水口に適合する給排水装置と、ICTを活用した操作が可能なシステム(以下、圃場水管理システム)が開発された。

開発に際し、手動で操作する従来型の給水栓は安価に普及しているため、開発された装置の販売価格をできる限り抑えられる構造にする必要がある。また、手動の給水栓は既に多数設置されており、完全に取り替えることは現実的ではない。そのため、同一仕様で給排水を制御でき、既存の給水栓に取り付けられる装置の開発を目指した。

圃場水管理システムは、既述の通り、給水栓と排水口を操作できる制御装置、複数の制御装置と費用をかけず通信できる基地局、圃場の状態の記録と制御命令の発信が可能なサーバーおよび携帯情報端末で操作できるソフトウェアで構成されている(Fig. 1)。圃場水管理システムの詳細または導入効果については、若杉(2016)、若杉・鈴木(2017)、若杉ら(2018)、鈴木・若杉(2018a, 2018b)、新村ら(2020)などに示されているが、以下には圃場水管理システムの主な特徴を示す。

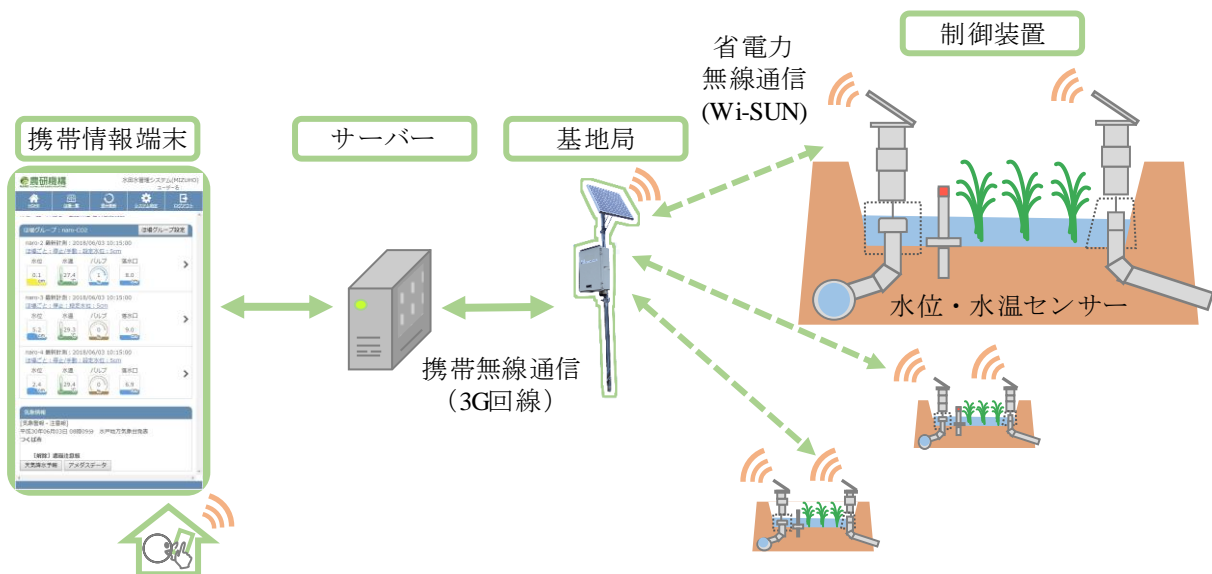


Fig. 1 圃場水管理システムの構成概要

2.1 制御装置

制御装置は、取水側、排水側とも同一仕様であることが特徴である。太陽光パネルから供給された電源によりモーターが駆動し、給水栓の開閉と排水口高さを連動して調整できる (Fig. 2)。また、取水側制御装置には水位・水温センサーを備え、圃場内の状況監視または制御時の取水の開始や停止の判断基準となる。

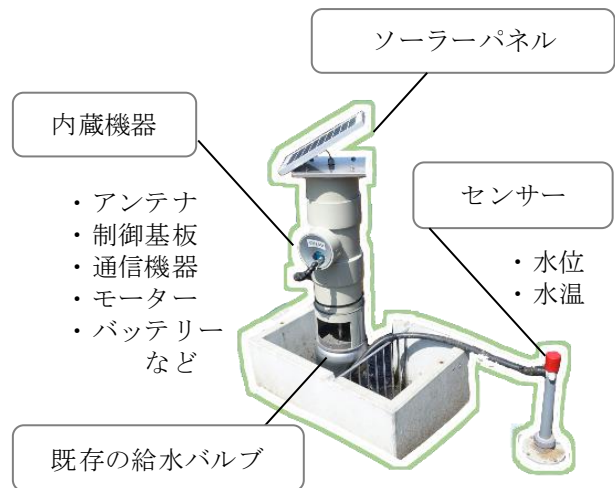


Fig. 2 制御装置の構成

2.2 基地局

基地局は、サーバーと携帯無線通信（3G回線）によりデータの送受信を行っている。すなわち、携帯電話の無線基地局からの電波が届く範囲であれば、任意の場所に設置し通信を行うことが可能である。また、制御装置とは省電力無線通信（Wi-SUN）によりデータの送受信を行っている。1台の基地局で、半径500mの範囲にある最大60台の制御装置との接続が可能である。

2.3 携帯情報端末（ユーザーインターフェース）

スマートフォンやPCなど、インターネット接続が可能な端末を用いることによって、圃場内の水位、水温（湛水がない場合には地表面温度）、給水栓の開度、排水口の高さを一覧できる (Fig. 3)。PCやスマートフォンなどを普段使わない耕作者でも直



Fig. 3 ソフトウェアのトップページ

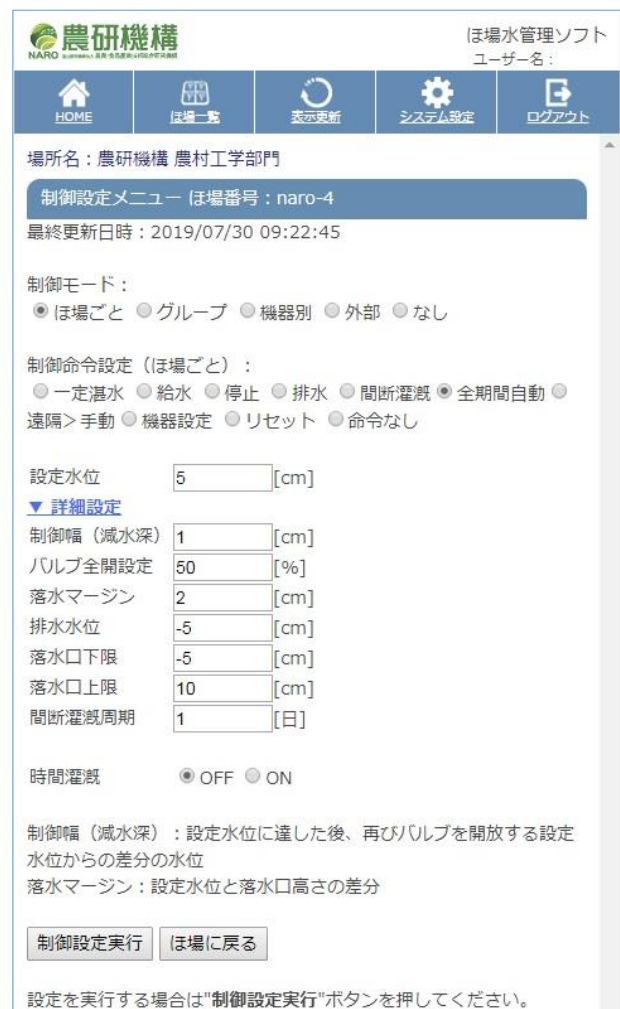


Fig. 4 ソフトウェアの制御命令の設定画面

感的に操作できるよう，イラストでの状況表示や少ない回数で目的が達せられる工夫がなされている。また，取水の開始や終了，強制落水などの指示に加えて，必要な湛水深制御に関する指示を送信できる (Fig. 4)。

3. 調査概要

調査は北海道士別市における面積 3.3ha (長辺 130m, 短辺 255m) の圃場 (以下, 調査圃場) で実施した。圃場の給水栓は片方の短辺に沿って 5 か所, 反対側の短辺に沿って 1 か所に設置され, 排水口は両側の短辺に沿って複数設置されている。長辺に沿った畦畔は勾配が緩やかで, 農作業機械の農道ターンが可能な設計になっている (Fig. 5)。

圃場水管理システムの制御装置は, 2018 年 5 月に圃場短辺の端に位置する給水口 3 か所に水位・水温センサーとともに設置した。本調査対象となる 2019 年灌漑期は, 圃場水管理システムを使用した水管理の実施では 2 作目となる。調査圃場では排水口には制御装置を設置しておらず, 排水の制御は従来通り営農者が手動で行った。

2019 年 6 月 18 日に水準測量および観測機器の設置を行い, 同年 8 月 20 日に観測機器を撤去した。水準測量における測点は, 長辺方向に 5 線, 短辺方向に 7 線となるよう圃場を格子状に分割し, 格子の交点に相当する 35 点の田面高を計測した。この 35 点における標尺の読み値の平均を田面の基準高 (ゼロ点) とした。加えて, 圃場水管理システムの水位・水温センサーが設置されている位置の田面高 (Fig. 6 の S1~S3 地点) を計測した。格子の交点のうち, Fig. 6 に示す 9 点と圃場水管理システムの水位・水温センサー近傍計 3 点に圧力式水位計 (Onset 製: HOBO U20-001-04, 精度 3mm) を設置し 10 分間隔で計測した。また, 転倒マス型自記雨量計 (Onset 製: HOBO RG3-M, 0.2mm/カウント) を圃場近傍に設置し, 10 分単位で集計した。なお, 8 月 18 日に収穫前の落水が開始され, 圃場水管理システムの水位・水温センサーが取り外された。

4. 分析概要

湛水深変化の分析期間を 2019 年 6 月 19 日 0 時から 8 月 18 日 11 時 50 分までとした。分析期間のうち, 圃場水管理システムにより取水が記録されている時間帯における湛水深変化の空間分布を評価した。対照として, 降雨の場合は均一に湛水深が増加すると考えられるため, 降雨イベントごとの湛水深変化を合わせて分析対象とした。なお, 降雨前後 24 時間に降雨がない時系列を 1 降雨イベントとし, 降雨イベントを除く期間を無降雨期間とした。なお, 観測点のうち 2 点 (Fig. 6 中の B1 と C3) は観測機器の不具合と考えられる値が記録されたため, 分析対象からは除外した。

取水量計測は行っていないが, 圃場水管理システムでは給水栓の開度が記録される。開度がゼロよりも大きい場合には取水が行われていると判断した。制御装置が設置されていない給水栓の操作の有



Fig. 5 調査地区の圃場 (ターン農道)

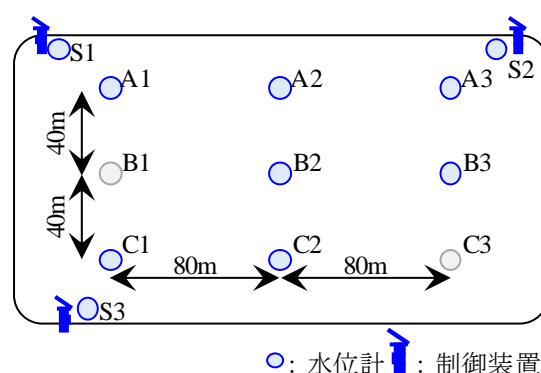


Fig. 6 圃場区画と観測機器の配置

無は確認できていないが、調査期間中は圃場水管理システムを常時遠隔で操作できる設定となっていたため、現場での給水作業は行われていないと仮定した。なお、圃場水管理システムでは1分間隔で操作履歴の記録および制御命令の送信が行われる。一方、排水口の操作に関する計測は行っていない。生育ステージに応じて落水作業が行われると推定されるが、取水時には湛水が確保できるよう排水口が調整されていると仮定して、分析では落水口の高さは考慮していない。

分析期間中に14の降雨イベントが観測された。このうち、1回は取水も記録された。湛水深変化の影響要因が複雑になるため、分析対象からは除外した。また、4回の無降雨期間で取水が記録された。

5. 結果と考察

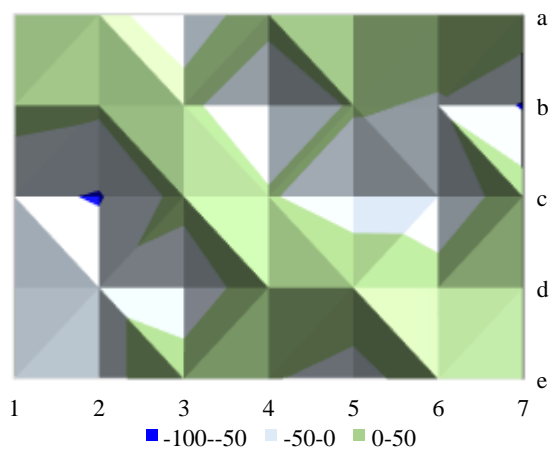
5.1 圃場均平

湛水深測定に先立ち実施した水準測量による田面の空間分布を Fig. 7 に示す。田面高の最大値、最小値はそれぞれ 47mm、-54mm であった。ただし、場所による偏りはみられず、田面高の標準偏差は 29mm となり、基準点より±25mm 以内の測定点数は全体の 59% となった。1ha 区画で実施したレーザー均平作業による均平精度（木村ら、1999）と比較すると調査圃場の高低差は大きいですが、区画規模を考えると妥当な範囲に収まっていると考えられる。

圃場水管理システムの水位・水温センサーは制御装置と有線で接続されているため、設置位置が畦畔に近い部分になる。調査圃場の S1～S3 地点の田面高は順に、-21mm、19mm、62mm となり、圃場内部の測点と同程度の分散傾向がみられた。一方、水位・水温センサーは圃場に挿入して固定することができるが、挿入深が異なるため、水位・水温センサーのゼロ点に相当する部分の田面高は 54mm、77mm、52mm となった。水位・水温センサーが全体的に田面の基準点よりも高くなった原因として、調査圃場は礫が多く耕盤層が浅いため田面とセンサーの基準点との間に隙間ができ、強く挿入することで深くまで差し込まれたりした可能性が考えられる。圃場の大きさや土壌硬度にかかわらず、営農者の水管理作業の一環として1筆に複数のセンサーを同じ高さに設置することは極めて困難である。圃場水管理システムは、基準点からの水位を任意の水位にスライドさせる機能を有しているが、センサーの設置地点の田面高と基準点には相違があることから、営農に使用する際にはこれら両方の相違に留意して管理を行う必要があると考えられる。

5.2 降雨時の湛水深変化

同一圃場における降雨および浸透能の空間的相違がほとんどないと仮定すれば、雨量に比例して湛水深が増加することが想定される。降雨イベントごとに降雨の開始時と終了時の湛水深の差と雨量の関係を Fig. 8 に示した。この結果、いずれの地点も明瞭



注：方向・配置は Fig. 6 と同一である。

Fig. 7 田面高の空間分布

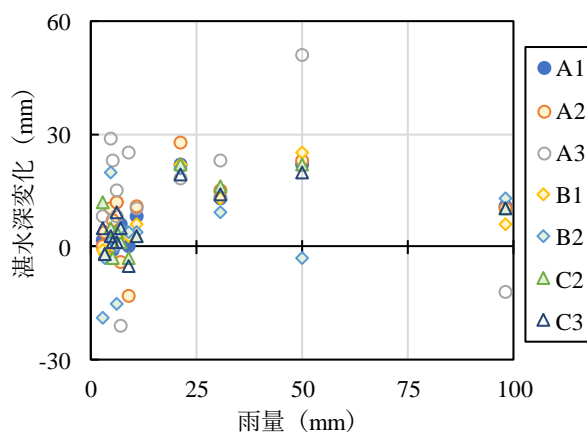


Fig. 8 雨量と降雨前後の湛水深変化の関係

な比例関係は認められず、雨量の増加に対して湛水深の増加割合が小さくなる傾向を示している。この原因は排水口の管理が考えられる。調査圃場を含め当地区では区画が大きいため、全ての排水口は車両が通行できる農道に接しており、降雨時でも排水口に近づいて作業することが容易である。すなわち、雨量の大きい降雨が予測される場合には、予め排水口を調整して湛水深を低く保つ管理が行われていると考えられる。

雨量と湛水深変化の相関係数を用いて評価した場合でも地点による特徴はみられなかった。相関係数が 0.5 以上となった地点は、圃場の角に位置する A1 と C3 であった。反面、同様に角に位置する A3 の相関係数は 0.1 となり全ての地点の中で最小となった。したがって、降雨のように空間的に均一な給水がなされる状況であっても湛水深が一様に増加する傾向は示されなかった。

一方、湛水深の減少過程では均一な変化がみられた。図には示していないが、1 降雨イベントの降雨終了から 24 時間後までの湛水深変化は、ほとんどの地点で 10mm 前後となり同等の値を示した。これは、排水口からの越流や圃場内の湛水の移動などが生じておらず、平均的な減水深に応じて湛水深が均一に減少していると考えられる。

5.3 取水時の湛水深変化

調査圃場では無降雨期間に 5 回の取水が観測され、1 回の取水時間は 6 時間から 17 時間であった。取水ごとに取水開始時刻と終了時刻の湛水深を比較して湛水深変化を求め Fig. 9 に示した。取水ごとに湛水深変化の幅は異なっているが、各回における地点ごとの湛水深変化の違いは取水日による違いよりも小さい。また、給水口付近のみの湛水深のみが増加するという傾向は確認されていない。給水は毎回 3 か所の制御装置が同時に稼働しているが、制御装置から離れた地点 A2 や B2 においても湛水深が増加している。

原口・古木（1995）は、代かき前など湛水がない状態で取水を行うと、排水口付近に水足が到達するまでは湛水深が不均一となり、長辺長が長いほど取水口近傍は相対的に湛水深が大きくなることを示している。調査圃場のように区画面積が大きい圃場では、湛水深の不均衡が顕著になることも想定されたが、調査結果からはそのような傾向はみられなかった。この要因としては、湛水状態から取水を行った場合には土壌面が乾いた状態に比べて用水の拡散が速い可能性が考えられる。仮に用水の拡散が遅ければ、給水口付近の水位が先行して上昇する。圃場水管理システムのように設定した水位に達すると給水を自動で停止する機能を有していると給水口付近に設置されている水位・水温センサーで観測される水位が高くなった段階で給水が停止し、給水口から遠い地点の湛水深は増加しない。

したがって、調査圃場のような大区画水田において、湛水深を管理するための水位観測点が給水口付近に制限されたとしても、調査期間に相当する分けつ期以降の水管理に支障を来すことなく湛水を維持することができていると考えられる。ただし、給水口付近の湛水深と観測点の湛水深から得られた平均値とは必ずしも一致しない。このため、圃場に設置された ICT 機器から得られた多数のデータを解析する場合の代表値として用いることには注意が必要であるが、個別圃場における水管理指標として用いる場合には十分に実用性を有していると考えられる。

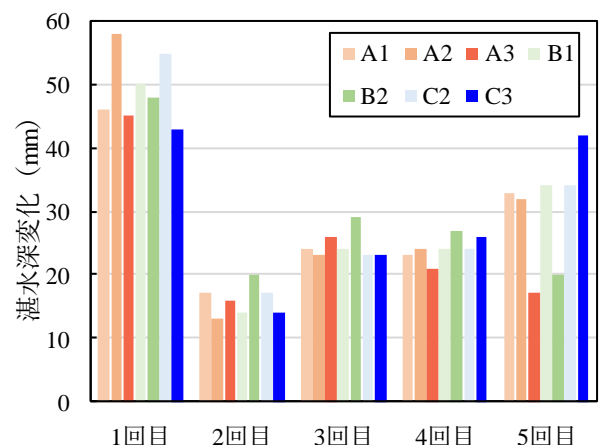


Fig. 9 取水前後の湛水深変化

6. おわりに

ICT を活用した水管理が社会実装される段階にあることを背景として、圃場で利用されるデータの代表性について検討することを目的に、大区画水田における湛水深変化の空間分布について検討を行った。圃場内の湛水深が均一に増加すると考えられる降雨時の湛水深変化からは、排水口操作などの要因によって必ずしも均一には変化しない可能性が示された。一方、取水時における湛水深変化の測定点間の相違は小さく、設定水位に達すると自動で給水を停止させる管理を行っている場合でも圃場全体の湛水深が増加するまで給水が行われていることが確認された。

謝辞：調査の実施に際し、圃場を提供下さった営農者および士別市経済部国営農地再編推進室には多大な助力を賜りました。記して御礼申し上げます。また、本研究は内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「次世代農林水産業創造技術」(管理法人：農研機構生研支援センター、2014～2018 年度)および農研機構生研支援センター「生産性革命に向けた革新的技術開発事業」(2018～2020 年度)の支援を受けて実施した。

引用文献

- 原口暢朗, 古木敏也 (1995) : 用排水管理時間から見た大区画水田の合理的な耕区長辺長と水口間隔の検討, 農業工学研究所技報, 190, 47-57.
- 木村勝一, 今園支和, 矢治幸夫 (1999) : 東北平坦水田における大区画化と直播栽培による低コスト作業技術の開発 第2報 レーザー光を利用した高精度均平化技術の開発, 農作業研究, 34(2), 113-121.
- 野口 伸 監修 (2019) : スマート農業の現場実装と未来の姿 (ニューカントリー秋季臨時増刊号), 北海道協同組合通信社, pp.155-159
- 農林水産省 (2019) : 担い手農家の経営革新に資する稲作技術カタログ, http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/info/attach/pdf/inasaku_catalog-16.pdf (確認日 : 2019 年 11 月 5 日)
- 新村麻実, 鈴木 翔, 坂田 賢, 友正達美 (2020) : 水管理ソフトウェアの使い勝手に関する利用者の評価, 水土の知 88(1), 15-18.
- 首相官邸 (2016) : 日本再興戦略 2016—第 4 次産業革命に向けて—, http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/2016_zentaihombun.pdf (確認日 : 2019 年 11 月 5 日)
- 首相官邸 (2018) : 未来投資戦略 2018, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_zentai.pdf (確認日 : 2019 年 11 月 5 日)
- 鈴木 翔, 若杉晃介 (2018a) : 遠隔制御・自動制御が可能な圃場水管理システムが水稻栽培にかかる用水量と水管理労力に与える影響の把握, 農業農村工学会論文集 307, I_235-I_241
- 鈴木 翔, 若杉晃介 (2018b) : 圃場水管理システムによる現地圃場の稲作水管理への効果, 水土の知 86(12), 17-20
- 若杉晃介 (2016) : 圃場用給排水システム, 特開 2017-192366
- 若杉晃介, 鈴木 翔 (2017) : ICT を用いて省力・最適化を実現する圃場水管理システムの開発, 水土の知 85(1), 11-14
- 若杉晃介, 鈴木 翔, 丸山篤志 (2018) : 圃場水管理システムを用いた ICT のフル活用による高機能水田地帯の構築, 水土の知 86(4), 289-292

集中定数型水循環モデルによる手取川扇状地の水収支解析と
高濃度濁水が地下水位に及ぼす影響評価
Analysis of Water Balance and Influences of High-turbidity River Water on
Groundwater level in an Alluvial Fan by a Lumped Hydrologic Model

高瀬恵次*・藤原洋一*

*石川県立大学 生物資源環境学部 (〒921-8004 石川県野々市市末松 308)

TAKASE Keiji*, FUJIHARA Yoichi*

*Ishikawa Prefectural University (108 Suematsu Nonoichi-city Ishikawa, 921-8836)

Abstract

A huge landslide occurred on the upper reaches of the Tedoru River in early spring of 2015. It caused high-turbidity water and the turbid water continued to flow in several years. It brought a great amount of sediments to the river and paddy fields. Groundwater level in the fan began to decrease just after the occurrence of turbid river flow in May 2015 and we had serious problems that industrial or domestic water was in short supply and some springs dried up. In this paper, a lumped parametric hydrologic mode was developed to evaluate the influences of turbid river water on groundwater level and to analyze water balance in the fan area. As a result, it was concluded that the percolation from paddy fields and seepage from the river played an important role of recharging groundwater and the turbid water affected groundwater level.

Key words: water balance, highly turbid water, groundwater level, , hydrologic model, alluvial fan

要 旨

2015年5月、石川県手取川上流域で大規模な斜面崩壊が生じた。そして、これに伴う高濃度濁水が長期にわたって流下し、微細土砂が扇状地部の河床や農業用水路および水田に堆積して大きな問題となった。この濁水発生直後から扇状地内の地下水位は急激に低下し、非灌漑期（積雪期）にはやや回復するものの、灌漑期（融雪期）には再び低下する傾向が数年継続している。そこで、本研究では手取川扇状地の水循環を表現する集中定数型モデルを構築し、同扇状地の地下水を含む水収支構造を明らかにするとともに、高濃度濁水が地下水位に及ぼす影響を評価した。そして、手取川扇状地の地下水は水田からの浸透と手取川からの伏流によって涵養され、これが同扇状地内の豊富な地下水利用を可能にしていること、濁水の影響は濁水発生後数年でかなり解消されつつあることを示した。

キーワード: 扇状地の水循環, 河川の濁水, 地下水位, 水循環モデル, 扇状地

1. はじめに

石川県加賀地方に広がる手取川扇状地は地下水に恵まれ、多くの市町で地下水が工業、上水道用水さらには消雪用水などに利用されている。同扇状地内の地下水位は工業用水のための過剰揚水や水田面積の減少により1990年代後半にかなり低下したが、その後、低下が収まったためか、地下水利用と管理は各市町の判断に委ねられているのが現状である。しかしながら、2015年5月に発生した手取川上流域での大規模な斜面崩壊による高濃度濁水と時期を一にして扇状地内の地下水位が急激に低下し、工業用

水の不足や下流域における湧水量の減少・枯渇など大きな問題が発生した。また、2018年1～2月の豪雪時には大量の地下水が消雪用水として利用され、急激な地下水位低下を生じた。このような問題に対処し、豊富な地下水を将来にわたって保全・維持するためには、扇状地における水循環構造を理解し、地下水の流れや収支についての情報を得ることが重要である。

手取川扇状地の水循環および地下水については、丸山ら（2012a）によって広範囲にわたる研究が行われた。その中で、丸山ら（2012b）は手取川扇状地における降水量、灌漑用水取水量、各種地下水揚水量などの基本的データと過去に観測された水田の減水深データから推定した水田浸透量、手取川における河川伏没量データから推定した河川伏流量などを総合して、同扇状地における年間水収支を計算した。そして、同扇状地に降る雨・雪のおよそ4/5に相当する量が地表からの浸透と河川からの伏流によって地下水帯に涵養されること、地下水揚水量はその1/3に相当することなどを示した。また、岩崎ら（2013）はMODFLOWを用いた定常地下水流動モデルによって灌漑期の地下水位に影響を与える要因を分析している。しかしながら、その多くは定常的な解析が主で、動的な特性についての研究が少ないのが現状である。また、2015年に発生した手取川の高濃度濁水の影響については、田中ら（2017, 2018）が濁水発生前後の水田浸透量と手取川河川流量の観測結果を比較し、濁水発生後に水田浸透量と河川伏流量が著しく減少したことを示した。そして、濁水発生後の扇状地全体の地下水涵養量は、発生前の36%、量にして約850mm減少したと推算した。

このような地下水を巡る個別の状況とは別に、2005年の水循環基本法の公布以来、地下水管理のありかたについて関心が高まりつつある。しかし、筆者ら（高瀬ら, 2019）が述べたように、地下水を流域スケールで管理するための法律の整備や地下水流動の実態を明らかにするための自然科学的な調査・研究が必ずしも十分でないために、地下水の利用・管理に関する有効な方策が定まらない地域も多い。以上のような状況を背景とし、本論文では石川県手取川扇状地を対象に、同平野地下水位の日変化を再現する概念型・集中定数型水循環モデルを開発して水収支構造を検討するとともに、手取川の濁水が地下水位に与える影響について動的な検討を行ったので、以下に報告する。

2. 調査対象地の概要と水循環

2.1 地形と観測の概要

図1には手取川扇状地およびその周辺と手取川上流域の地図を示す。手取川は、霊峰白山に源を発し、多くの支流を集めながら山間を流下して白山頭首工に至る。その流量は、国土交通省により白山頭首工の約1km地点（中島）で観測されている。中島地点での集水面積は733km²で、高濃度濁水の原因となった大規模な崩壊地は、石川県白山市尾添大汝国有林の中ノ川右岸で発生した。一方、手取川扇状地は、白山頭首工よりやや下流を扇頂として北西方向に拡がり、東は伏見川と野々市の丘陵地、南は能美市の丘陵地に挟まれている、面積は17,682haを有し、その内42.6%にあたる7,539haが水田である。扇頂部の標高は約80m、平均勾配は1/150で北陸地方特有の急勾配地形をなしている。扇状地では地表から10～20mまでは沖積世の砂礫（扇状地性）が、それ以深に

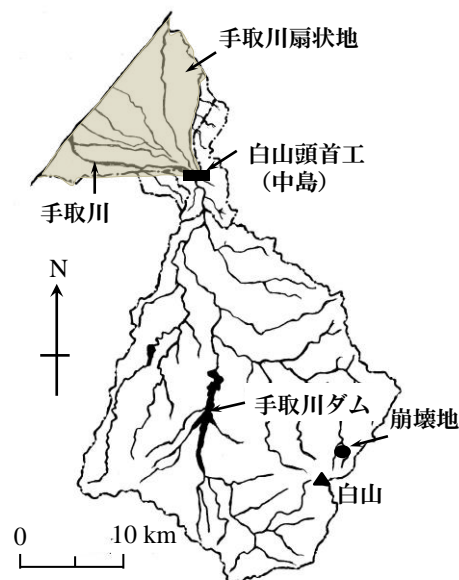


図1 手取川扇状地とその上流域

は洪積世の砂礫（扇状地性）が堆積し、海岸部ではこの砂礫層に粘土層が浸入する地質構造となっている（北陸農政局計画部，1977）．平均的な地下水位は，扇頂部で地表から約 10m，扇央部では約 30m，先端部ではほぼ 0m である．地下水位は，図 2 に示した地点で石川県によって観測されている．

2.2 水循環の概要

図 3 には，手取川扇状地における水循環の概要を示す．本研究では対象地全体を地表領域，中間帯領域，地下水帯領域の 3 領域で表現した．

まず，地表領域への入力要素は扇状地内の降水と手取川上流域およびその他背後地からの河川流入量である．一方，地表領域からの出力要素は，蒸発散，扇状地内降雨の地表流出，河川からの流出および，河川から中間帯領域への伏流と水田・その他地目からの浸透である．中間帯領域では，地下水帯への浸透、地表領域への土壤水分移動と海への中間流出が出力要素となる．地下水帯への入力は中間帯領域からの浸透のみで，出力要素は海へ直接流出する地下水成分あるいは河川や地表に湧出する地下水成分，および工業・農業・上水・消雪用に揚水される地下水である．

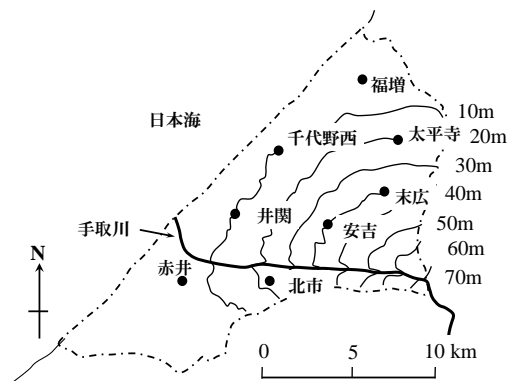


図 2 手取川扇状地の地形と観測井戸の位置図

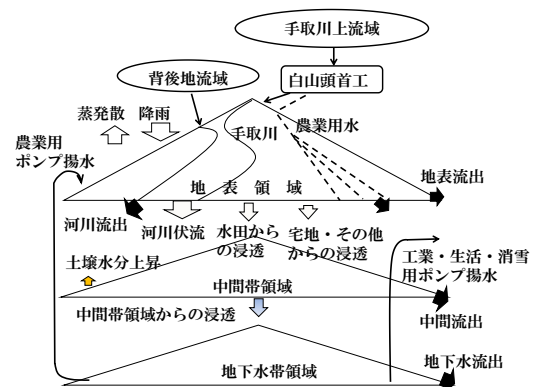


図 3 手取川扇状地の水循環概念図

2.3 特徴的な水収支要素

我が国でも有数の稲作地帯で積雪地でもある手取川扇状地を取り巻く水循環の中には，特徴的な水収支要素がいくつか存在する．

1) 手取川上流域からの流入

手取川上流域に降った雨・雪は，白山頭首工を経て扇状地へと流入する．この流入量は，頭首工から約 1km 上流にある中島地点で国土交通省によって観測されており，その年間総量はおよそ $2.5 \times 10^9 \text{m}^3$ ，上流域面積あたり 3,400mm と非常に大きな水量であり，扇状地内の農業用水をはじめ各種用水の供給源となっている．これは上流域の大部分が白山を中心とする山岳地帯に位置し，冬季の積雪のみならず夏季においても多量の雨が降るためである．筆者らは 2015 年 7 月～9 月に白山山頂付近で降雨量の観測を行い，その総量が平地(金沢)の 2 倍以上に達することを明らかにした．さらに，上流域の複数地点で観測された降水量データに基づいて上流域の流域平均雨量を推定し，年降水量が 3,000mm 以上に達するとした（高瀬ら 2017）．また，上流域の山岳地帯には 6 月上旬頃まで雪が残り，春先の融雪水は下流域の農業を支えている．

2) 農業用水

手取川扇状地の右岸側には七ヶ用水，左岸側には宮竹用水が流れここから分岐した農業用水路が網の目のように張り巡らされている．これら農業用水の水利権水量は，灌漑期で 41.50，非灌漑期 18.80 m^3/s （ともに普通期），年間水量はおよそ $9.6 \times 10^8 \text{m}^3$ となり，さきに述べた手取川流量（中島地点）のおよそ

40%程度となる。ただし、実績取水量は水利権水量の60%程度である。

3) 地下水揚水

手取川扇状地では5市1町の自治体と住民によって、地下水が様々な用途に利用されている。石川県の資料によれば、地下水揚水量は2013～2017年度の平均で、 $1.18 \times 10^8 \text{m}^3$ 、その内訳は、工業用52%、水道用31%、消雪用8%、建物用5%、農業用4%となっている。工業、水道、建物用は年間を通してほぼ一定であるが、農業用は5～8月に、消雪用は12～3月に集中する。消雪用は降雪量に依存して大きく変動する。また、手取川下流の美川地区では地下水が自然湧水し、ふぐの内蔵洗浄用に用いられるほか、県の天然記念物に指定されているトミヨの生息地ともなっている。

3. 地下水を含む水収支モデルの構築

手取川扇状地の水収支状況を把握するには、図3に示したように降水量をはじめ手取川流量や各種ポンプ揚水量、手取川からの農業用水取水量など多くの水収支要素の水量を知ることが必要となる。しかしながら、実際には手取川からの伏流や地下水帯から海への流出など観測が不可能な水の流れがいくつも存在する。このような場合には、コンピュータによる解析が有効な手段となる。

筆者らは愛媛県の西条平野を対象に、背後地河川からの流入量や地下水揚水量の資料や推定値を入力データ、地下水位を主な出力変数とする集中定数型水循環モデルを構築した(高瀬ら, 2019)。そして、モデルにより計算された地下水位が平野内の複数箇所で観測された地下水位平均値を精度良く再現することを示すとともに、同平野の水収支構造を解析した。そこで、手取川扇状地においても同じようなモデルを適用し、同扇状地における水収支の実態を検討するとともに、2015年に発生した高濃度濁水が地下水位の変動に与えた影響を評価することとした。

3.1 モデルの構造

手取川扇状地を取り巻く背後地及び扇状地内における水循環の概要は図3に示したとおりである。解析においては、中島地点での手取川上流域からの流量、およびその他の背後地流量と平野部での降雨などの入力要素をはじめ、手取川やその他河川からの農業用水取水、地下水からの各種用水取水(ポンプ揚水)、降雨等の流出、蒸発散など平野内での様々な水循環過程を考慮して、図4のような水収支モデルを構築した。そして、第3段目のタンク貯留深の変動が扇状地内地下水位の平均的な変動を表現するとした。なお、図4に記載した記号の意味は以下のとおりである。

$A1i, H1i$: タンク上部孔の流出係数と高さ

$A2i, H2i$: タンク下部孔の流出係数と高さ

Ci : タンク浸透孔の流出係数

Si : タンクの貯留深

ここで、添え字 i が P の場合は水田、U の場合は宅地・その他、2 の場合は中間帯、3 の場合は浅層地下水帯を表す。さらに、水田タンクでは貯留深がある閾値(HPMAX)を超えた場合には、それ以上の水がすべて流出するものとした。

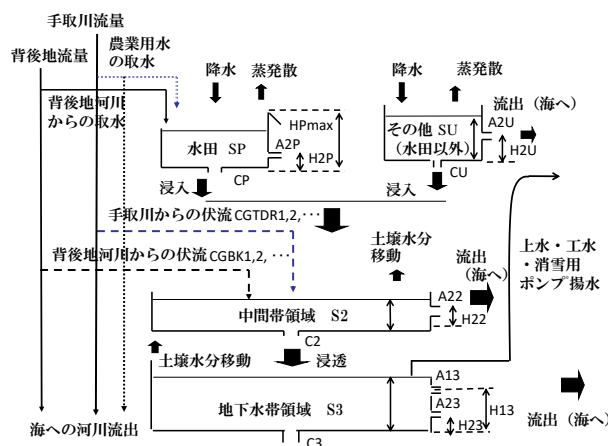


図4 集中定数型水循環モデルの概要

3.2 各水収支成分の取り扱い

1) 手取川上流域およびその他背後地流域からの流入量

先にも述べたように手取川上流域から扇状地への流入量は中島地点で国土交通省によって観測されている。本論では同省公開の水文水質データベースから入手した。一方、その他背後地流域の標高は1,000m以下で、積雪量や融雪時期が手取川上流域とはかなり異なるため、これら流域からの流出量は手取川上流域のそれとはかなり異なる。そこで本論では、扇状地扇頂付近に位置する石川県林業試験場内の森林理水試験地で観測されたデータを用いて降水-流出モデルを作成し、これに扇状地周辺の降水および気象データを入力することによってその他背後地から扇状地への流入量を推定した。

2) 河川からの農業用水の取水

手取川からの農業用水の取水は、中島地点下流の白山頭首工を経て行われており、本論ではその取水実績データを用いた。そして、この実績取水量に水田への取水係数（CIR7）を乗じたものが水田に取水されることとした。一方、その他背後地河川からの取水量については資料が得られないため、上述のその他背後地流量（推定値）に係数（CIRBK）を乗じて推定した。

3) 各種ポンプ揚水量

手取川扇状地における各種ポンプ揚水量は石川県によって年度・月・市町村別に整理されている（石川県地下水保全対策調査報告書）ので、月別の揚水量を日平均して用いた。なお、消雪用ポンプの稼働は原則、降雪日に限られることから、以下のように別途推定することとした。

筆者らは、林業試験場で観測された積雪深及び各種気象データを用いて、降雪・積雪・融雪モデルを構築し、積雪深の経時変化をよく再現できることを示した（高瀬ら、2016）。そこで、本論では、このモデルで得られた降雪サブデルを採用して計算対象日が降雪日であるかどうかを判定し、降雪日である場合には次式で与えられる水量が、消雪用として揚水されるものとした。

$$PMPSNW = PMPSNW0 \cdot R \quad (1)$$

PMPSNW：消雪用ポンプ揚水量（mm） PMPSNW0：積雪量1mm d⁻¹当たりの揚水量（mm⁻¹）

R：該当日の降水量（mm・d⁻¹）

4) 扇状地の降水量および蒸発散量

手取川扇状地内の降水量は、金沢気象台と小松アメダスの平均値とした。蒸発散量は、金沢気象台データを用いアルベドを0.05として、Penman式によって日単位で求めた可能蒸発量に月別の蒸発散比を乗じて計算することとした。

5) 河川水からの伏流

扇状地内では手取川を流下する河川水が日本海に流れ込む過程で伏流・湧出しており、収支的には伏流量が湧出量を上回ることが報告されている（田中ら、2018）。また、筆者らは、河川流量がある上限値を超えるまでは河川流量に比例した量が伏流とするサブモデルを含む中定数型水循環モデルによって瀬戸内沿岸平野部の地下水位を計算し、良好な結果を得ている（高瀬ら、2019）。そこで、本論でも類似したモデルを用いることとした。その概要を図5に示す。計算式は以下のとおりである。

① QTDR < QTDR1 の時

$$GTDR = CGTDR1 \cdot QTDR \quad (2-1)$$

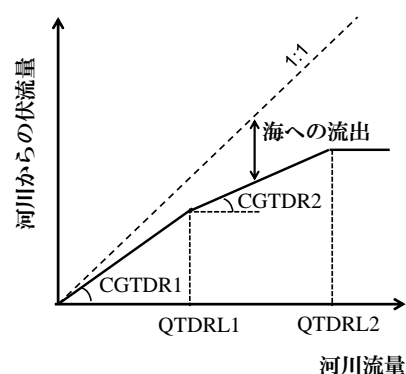


図5 手取川からの伏流モデル

② $QTDR_{L1} \leq QTDR < QTDR_{L2}$ の時

$$GTDR = CGTDR_1 \cdot QTDR_{L1} + CGTDR_2 \cdot (QTDR - QTDR_{L1}) \quad (2-2)$$

③ $QTDR_{L2} \leq QTDR$ の時

$$GTDR = CGTDR_1 \cdot QTDR_{L1} + CGTDR_2 \cdot (QTDR_{L2} - QTDR_{L1}) \quad (2-3)$$

GTDR：手取川からの伏流量

QDTR：白山頭首工より下流の手取川流量

QTDR_{L_i}：第 i 折点の手取川流量 (i=1~2)

CGTDR_i：第 i~i+1 折点の伏流係数 (i=1~2)

また、手取川以外の背後地河川からの伏流も、これと同様に扱った。

6) 地表領域

地表領域は水田と水田以外の 2 サブ領域に分けた。水田への入力、降水と七ヶ用水および背後地河川から取水、出力は蒸発散、地表流出、中間帯領域への浸透である。なお、農業用ポンプ揚水は、畑地灌漑用に供されるものとした。水田以外への入力、降水のみで、出力は水田と同じである。

7) 中間帯領域

中間帯領域への入力、手取川およびその他背後地河川からの伏流と地表領域からの浸透、出力は中間流出および地下水帯領域への浸透である。また、中間領域から地表領域への土壌水分上昇は、地表領域の貯留深が蒸発散量を補うに十分でない場合のみに生ずるとした。

8) 地下水帯領域

地下水帯領域への入力、中間帯からの浸透のみで、出力は海への地下水流出、中間帯への土壌水分上昇と各種ポンプ揚水である。このポンプ揚水は全て海へと流出する。

9) その他

手取川および背後地河川から扇状地への流入量のうち、水田取水量と伏流量を差し引いた残りは、海へと流出する。また、白山頭首工で取水された農業用水については取水量から水田取水を差し引いたものが海へと流出する。

なお、地下水帯領域を表すタンクの貯留深が実際の地下水水深と相対的に等価であるとし、計算貯留深を地下水帯の有効間隙率で除することによって実際の地下水標高と対応させた。また、先にも述べたように本モデルは対象領域を一括（平均化）して扱う集中定数型であるので、地下水帯領域の水位変動が実際の水位変動の平均値に対応することになる。このため、本解析では手取川扇状地内に設けられた 8 ケ所の観測井の位置からティーセン法によってそれぞれの重みを求め、8 ケ所の加重平均値を実測地下水位（平均値）とした。

4. モデルの適用結果

4.1 モデルパラメータの決定とモデルの検証

本モデルに含まれるパラメータは各領域タンクからの流出と浸透に関わるもの (A_i , H_i , C_i)、手取川の伏流に関わるもの ($QTDR_{L_i}$: $i=1,2$, $CGTDR_j$: $j=1,2$)、その他背後地河川からの伏流に関わるもの (QBK_{L_i} : $i=1,2$, $CGBK_j$: $j=1,2$) 農業用水取水係数（七ヶ用水からの取水: CIR7, 背後地河川: CIRBK) および有効間隙率(CEG)など 30 個以上である。これらのパラメータのうち、降雪日を判定するパラメータについてはこれまでの研究結果を参考に、地下水帯の有効間隙率については石川県や北陸農政局による調査結果を参考に定めた。そして、まず、残り全てのパラメータを数学的最適化法の 1 つである SCE-UA 法 (Duan et al, 1992) によって同定した。その後、誤差の収束結果や感度解析結果を参考にできるだけ経験的に定められるものは経験的に決定し、残りのパラメータについて改めて SCE-UA 法により決定することとした。そして実測地下水位と計算地下水位の絶対誤差の総和が最小となるようパラメータを最適化した。モデルパラメータのうち、最終的に数学的最適法によって同定した数は 20~24 個である。また、最適化に用いる観測データは 2006~2010 年のものとし、2002~2019 年のデータをモデルの検証用とした。計算は日単位で行った。

最適化の結果、年平均相対誤差は4.2～6.1%の範囲にあって5年間の平均では5.6%となり、実測値地下水位の変動をよく再現していた。そこで次に、これらのパラメータを用いて2002～2014年の地下水位を計算しモデルの妥当性を検証した。図6には最適化期間および検証期間を通じた実測地下水位と計算地下水位の比較を示す。最適化期間前の検証期間（2002～2005年）の年相対誤差は、13.0～19.0（4年平均で16.0%）、最適化期間後（2011～2014年）では4.7～12.0（4年平均で8.8%）となった。このように検証年では一部、実測地下水位の変動を再現できていない期間もあって相対誤差はやや大きいですが、本モデルは手取川扇状地の地下水を含む水循環の実態を概ね表現していると判断される。なお、とくに2002年の実測地下水位の変動が激しい期間や2004年夏季の急激な水位低下期間で再現精度が悪くなる要因については、今後の検討課題としたい。

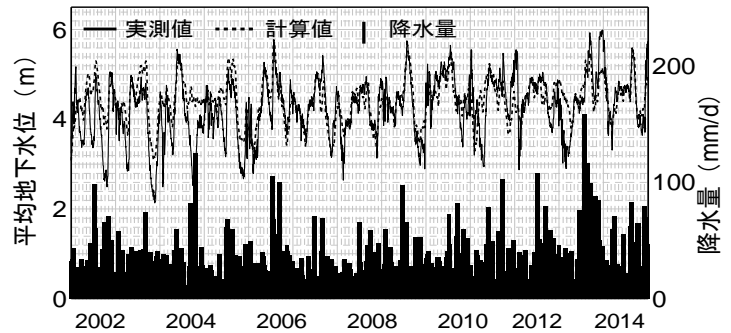


図6 実測地下水位（平均値）と計算地下水位の比較

4.2 手取川扇状地の水収支

次にモデルによる計算結果に基づいて、本平野の水収支構造を検討した。図7には、2006～2014年の年間水収支を示す。図中の数値は、平野部単位面積あたりの等価水深である。ただし、地表部水田、宅地などからの蒸発散、地表流出、浸透量についてはそれぞれの面積当たりの等価水深量を（ ）内に、また各タンク内の貯留変化量については【 】内に示した。このように、扇状地への流入要素では、手取川上流域からの流入量が圧倒的に大きく、扇状地内に降る雨・雪の5倍以上に達する。この流入量の約1/4が農業用水として扇頂部の頭首工から取水され、残りの約1割が扇状地を流下する間に伏流し、降雨による地表からの浸入とともに地下水を涵養する。中間帯からの蒸発散や海への流出を経て地下水帯に達する涵養量はおよそ3,400mmと見積もられ、平野に降る雨の1.5倍程度である。そして、この涵養量のおよそ17%にあたる580mmが工業・生活用水・農業用水として地下水帯から揚水利用され、残りはさらに深部へ浸透するか地下水として直接海へ流出していると推算される。この地下水涵養量に対する地下水利用量の割合を、我が国で有数の地下水名水地である地域と比べてみると、福井県大野市（2017）ではおよそ7%（平成14～22年の平均値）、熊本市（2004）では約31%（使用量は平成13年、涵養量は平成10年の実績）である。いずれにしても、このような地下水の流れと水利用構造が、手取川扇状地における豊富な地下水利用を可能にしていると判断される。しかし、先にも述べたように冬季の消雪用水への地下水依存度が高く、豪雪時には地下水位の急激な低下を生じることもある。

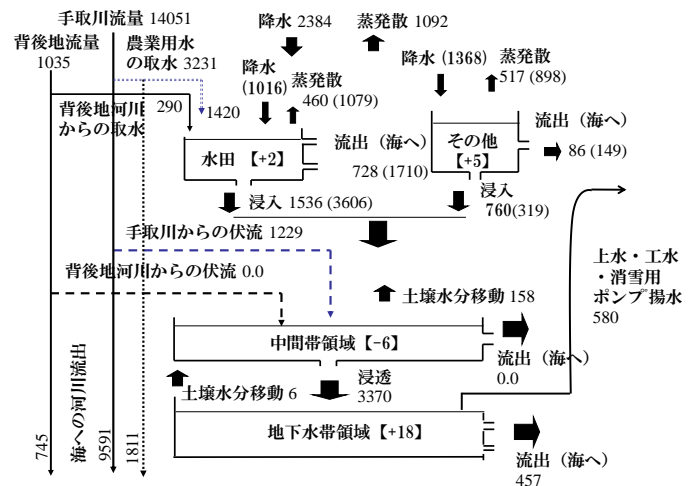


図7 手取川扇状地の年間水収支（2006～2014年平均）

4.3 高濃度濁水が地下水位に与える影響

「はじめに」でも述べたように、2015年5月に発生した手取川上流域での大規模な斜面崩壊による高濃度濁水は、農業水路や水田における大量の堆砂や沿岸海域の濁水化など農業や漁業をはじめ多くの分野で被害を与えた。さらにこの濁水発生後、灌漑期にもかかわらず扇状地内の地下水位が急激に低下し、工業用水の不足や下流域における湧水量の減少・枯渇など大きな問題が発生した。当初は、この地下水位の低下が濁水に起因するかどうかについて様々な意見が交わされたが、田中らが濁水発生前後の水田減水深や手取川の一斉流量観測結果から、濁水の影響を評価したことは既に記述したとおりである。そこで以下では、濁水発生前のデータに基づいて構築した水循環モデルを2015年以降に適用することによ

り、濁水が地下水位変動に与えた影響を検討した。

図8には濁水発生前の2013年から現在までの実測地下水位とモデルによる予測値との比較を示す。なお、同図には影響を受けないとした場合の予測値（現況）と影響を受けたとする場合の予測値（影響）を示した。濁水発生前2015年4月までの実測値地下水はモデルによる予測値とほぼ一致しているのに対して、2015年5月以降は両者の差が非常に大きくなっている。その後、2015年冬にはいったん地下水位は回復するものの2016年灌漑期になると再び低下し、これが2017年秋まで続く。そして、2017年冬から2018年秋にはほぼ濁水発生前の地下水位に回復しているが、その後は予測値（現況）に比べやや低い水位で推移していることが示されている。

田中ら（2017, 2018）は濁水発生前の2014年と発生後の2016年に実施した水田浸透量調査から、濁水発生前に比べ扇状地左岸側では中干し前で82%に、中干し後で50%に減少したと報告している。さらに、手取川の河川流量についても2009年実施の既調査と2016年の調査結果を比較し、濁水発生後の伏流量は灌漑期で70%、非灌漑期で21%に減少していると報告している。また、片貝ら（2006）は手取川周辺の地下水位の経年変化から河床の目詰まりにより周辺地下水位への漏出（伏流）が抑制されている可能性を示唆し、併せて実験室におけるカラム実験からカラム表面に微細粒子のマットが形成・発達する現象を明らかにした。これらの調査・研究結果から、2015年の濁水発生後の計算値（現況予測値）と実測地下水位との差は、主として、濁水に伴う水田浸透量と手取川からの伏流量の減少によるものと推察される。

そこで、濁水発生前の観測データを用いて最適化されたモデルパラメータのうち、水田からの浸透に関わるパラメータ（CPP）と手取川からの伏流に関わるパラメータ（CGTDR1, 2）を変化させて、その影響を評価した。図8には濁水発生直後の2015年灌漑期に水田浸透量が40%に、伏流量が30~10%に減少し、その後徐々に回復し、2019年灌漑期には水田浸透量は完全回復、伏流量は90%回復したと仮定した場合の予測値を（影響）を示した。このように、水田浸透量と手取川からの伏流が影響を受けたとすることにより、濁水発生後の地下水位の変動もほぼ再現することができた。この予測結果によれば濁水直後の2015年には水田浸透量、手取川からの伏流量ともに2/3に減少したと推算された。

5. おわりに

本報告では、手取川扇状地を対象にして、降水量、手取川流量、農業用水取水量、各種地下水揚水量の実測値、および蒸発散量、背後地河川流量の推定値を入力とし、河川からの伏流、降雪・融雪サブモデルを含む集中定数型水循環モデルを構築した。そして、手取川扇状地の水収支構造を解析するとともに、2015年5月以降生じた高濃度濁水が扇状地の地下水位変動に与えた影響を評価した。その結果、扇状地の水収支には、手取川上流域からの流入量が大きな役割を果たしていることを明らかにするとともに、この農業用水の水田からの浸透と手取川からの伏流が地下水を涵養していること、その量は扇状地における地下水利用量の1/5~1/6に相当する推察した。また、濁水の影響は濁水発生直後に著しく、その後徐々に減衰して発生後5年目の2019年には発生前の90%程度に回復していると予測された。

手取川扇状地では複数の市町が扇状地内の地下水を様々な用途に利用しているが、地下水は豊富であると考えられており地下水に対する関心は低いのが実情である。本研究が、同扇状地地下水の保全・管理にとって一助となれば幸いである。

なお、本研究の一部は「流域上空大気と地上部での多様な水文観測に基づく3次元水循環モデルの構築」(科学研究費補助金基盤B:代表, 高瀬恵次)の援助を受けて実施された。また、解析に使用した地下水位観測データについては、石川県生活環境部から直近のデータ入手に関してご配慮をいただいた。ここに、記して感謝申し上げます。

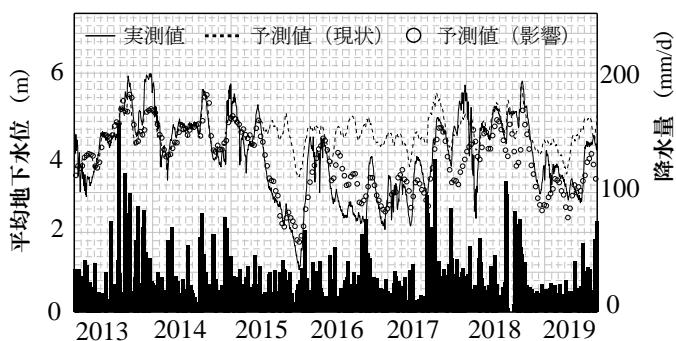


図8 濁水発生前後の観測地下水位と予測値の比較

引用文献

- Dune, Q., Sorrosian, S. and Gupta, V. (1992) : Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, **28**(4), 1015-1031.
- 岩崎有美, 尾崎正志, 中村公人, 堀野治彦, 川島茂人 (2013), 定常地下水流動解析に基づく手取川扇状地における灌漑期の地下水位に影響を与える要因の評価, *水文・水資源学会誌*, **26**(2), pp.99-113
- 北陸農政局計画部 (1977), 石川県の水理地質と地下水, pp.51-54
- 片貝武史, 荻田章仁, 鷺見哲也, 辻本哲郎 (2006), 水際河床間隙の目詰まりに関する実験的研究, *水工学論文集*, **50**, pp.241-246
- 高瀬恵次, 小倉晃, 藤原洋一 (2016), 積雪深の再現を目的としたモデルの構築と検証, *水文・水資源学会誌*, **29**(2), pp.107-115
- 高瀬恵次, 藤原洋一 (2017), 山岳地流域における面積雨量の推定, *水文研究*, pp.49-54
- 高瀬恵次, 徳増実 (2019), 集中定数型水循環モデルによる沿岸平野部地下水の水収支解析, *農業農村工学論文集*, **309** (87-2), pp.211-218
- 田中健二・瀬川学・藤原洋一・高瀬恵次・丸山利輔・長野俊介: 土砂崩壊に伴う高濃度濁水が手取川扇状地水田の地下水涵養機能に与える影響, *水文・水資源学会誌* (2017), **30**(3), pp.173-180
- 田中健二, 瀬川学, 藤原洋一, 高瀬恵次, 丸山利輔, 長野俊介 (2018), 高濃度濁水が扇状地の水田浸透量・河川伏流量に及ぼす影響—手取川流域の大規模土砂崩壊を事例として—, *農業農村工学会論文集*, **306**(86-1), pp.47-54
- 丸山利輔ら (2012a), 農業用水を核とした健全な水循環, 石川県立大学出版会, p1-266
- 丸山利輔, 能登史和, 吉田匡 (2012b), 手取川扇状地における水収支の分析, *水文・水資源学会誌*, **25**(1), pp.20-29

水路急傾斜部に設置した可搬魚道における魚類遡上の調査

Investigation of fish upstream migration on portable fishway installed on steep slope in canal

須藤真弥*・前田滋哉*・高橋直己**

*茨城大学農学部（〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1）

**香川高等専門学校建設環境工学科（〒761-8058 香川県高松市勅使町 355）

SUDO Naoya*, MAEDA Shigeya*, TAKAHASHI Naoki**

*Faculty of Agriculture, Ibaraki University (3-21-1 Chuo, Ami, Inashiki, Ibaraki, 300-0393)

** National Institute of Technology, Kagawa College (355 Chokushi, Takamatsu, Kagawa, 761-8508)

Abstract

Ensuring the movement route of fish is an important issue in conserving the ecological environment of rural water bodies. A fishway has often been constructed to alleviate the obstacles for fish upstream migration in the head and torrent works, but it is generally large and not considered to be attached or detached. In this study, a portable fishway that can be easily attached to and detached from the waterway and can be manufactured at low cost is installed in the steep slope of an agricultural drainage canal. The field observation was conducted in May, July and September 2019. The underwater camera was used to take pictures of the movement path of fish on the portable fishway. The effectiveness of the portable fishway was analyzed by hydraulic observations inside and outside the fishway. As a result, it was confirmed that Medaka, Yoshinobori, and shrimp were migrating upstream on the fishway. The flow velocity in the fishway decreased to about half of the flow velocity in the steep slope of the waterway.

Key words: portable fishway, agricultural drainage canal, fish, ecological environment

要 旨

魚類の移動経路の確保は、農村水域の生態環境を保全するうえで重要な問題である。魚道は落差工や急流工における魚類の遡上障害を緩和するためにしばしば施工されてきたが、一般に大規模で、着脱することを考慮したものではない。本研究では、魚類遡上の障害となっている農業用排水路の急傾斜部を対象に、水路への着脱が容易で安価に製作可能な可搬魚道を設置し、実際の魚類の魚道利用状況を2019年5月、7月、9月に調査した。水中カメラにより可搬魚道での魚類の移動経路を撮影した。また、魚道内外の水理観測により、可搬魚道の有効性を分析した。その結果、メダカ、ヨシノボリ、エビの遡上を確認した。また、魚道内の流速は水路急傾斜部の流速の約半分にまで低下していた。

キーワード: 可搬魚道, 農業用排水路, 魚類, 生態環境

1. はじめに

農業水路には農業水利施設としての機能があるのと同時に、水田生態系にとって重要な水域ネットワークを形成する役割がある。近年、土地改良法の改正に伴い環境に配慮した事業が実施されてきたが、水路内に急傾斜部のような、水田周辺を生息域としている小型水生動物にとって移動困難な場所が多く存在する。

魚道は魚類の遡上障害を緩和するため、しばしば施工されてきた。しかし、アユやウグイのような遊泳力の高い魚種を対象とした魚道が中心であり、通し回遊性のカジカ属魚類やウキゴリ属魚種などの遊泳力の低い水生生物が利用できていないことが報告されている(下田ら, 2003)。このような問題に対して、傾斜側壁にすることで水際の流れを創出する台形断面魚道などの、多様な水生生物の遡上を考慮した魚道が提案されている(安田, 2013)。

河川内の落差工での設置を想定した魚道は、農業水路に設置する魚道と規模が異なる。幅数メートルの水路に設置できる魚道の構造が検討された事例は少ない。また、コンクリートで施工される従来の魚道は設置するために要する労力や費用が大きく、着脱を想定していないため、単独で水生生物の遡上環境を十分に保全することは難しい(高橋ら, 2017)。一方で可搬魚道は、安価に作製することができること、設置するために専門的な知識が必要としないため農家や地域住民等により必要に応じて着脱できる。そこで本研究では、魚類の移動が阻害されている農業排水路の急傾斜部を対象に、持ち運びや着脱が容易な可搬魚道(高橋ら, 2019)を設置し、その有効性を検証することを目的とする。魚道内外の流速観測、遡上魚種の同定、動画撮影による遡上魚種の遡上経路の分析により、可搬魚道の有効性を検討する。

2. 方法

2.1 調査地

茨城県美浦村興津地区の農業用排水路の急傾斜部を調査地とする(Fig. 1)。急勾配区間の長さは0.74m、水路勾配は22.6°である。この急傾斜部で高速流が発生するため、メダカのような小型水生生物の遡上を阻害していると考えられる。水路は高橋川に合流した後、霞ヶ浦に流入するため、当該水路には霞ヶ浦から魚類が遡上する。そのため調査地上流に魚溜や魚巣といった環境配慮工が存在する。



Fig. 1 調査地の概要

2.2 可搬魚道

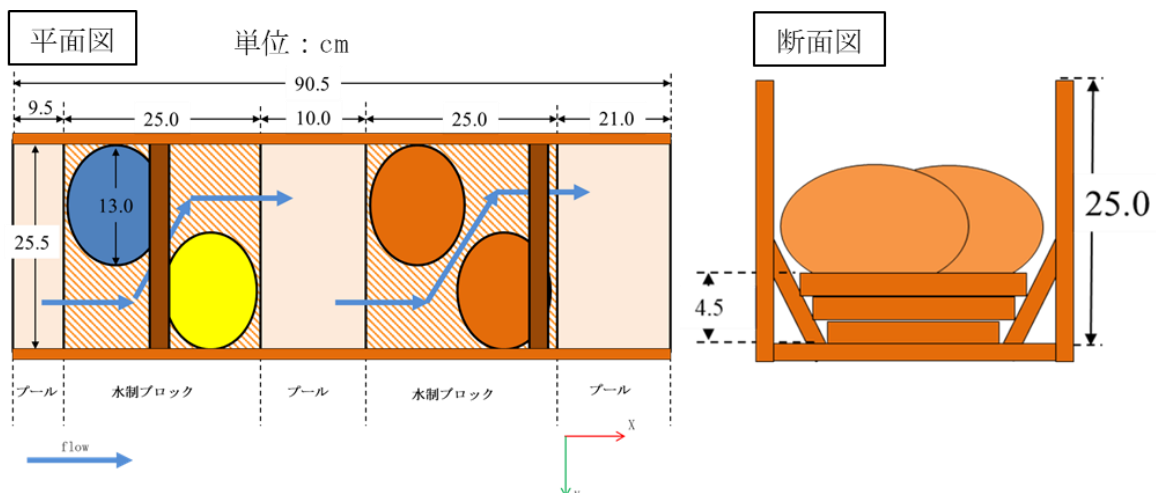


Fig. 2 可搬魚道の概要

高橋ら（高橋ら，2019）により農業水路に適用可能な可搬魚道が提案されており，本研究で利用した可搬魚道もそのうちの1つである（Fig. 2）．魚道は木製で，透水性の水制ブロック（スポンジ製）を設置することで魚道内の流速を低下させるとともに，魚道内断面を台形断面にすることで，小型水生生物でも遡上しやすい構造としている．また，魚道上流端，中央，下流端にプールを設けることで，遡上している個体が休息することを意図している．

本魚道の最大の特徴は，固定用のアンカーなどを使用せず，置くだけで遡上環境を創出できることである．本研究でも魚道の設置は置くだけであり，設置に要した時間は5分程度である．水制ブロックは取り外し可能であり，使用しない期間での清掃，また管理がしやすい．魚道上部に2本の持ち手を付けることで持ち運びやすいようになっている．

2.3 魚類遡上調査

季節ごとの変化をみるため，2019年5月12，13日，7月28，29日，9月10，11日に可搬魚道を水路急傾斜部に設置とした．魚道底部の傾斜角（設置勾配）は，魚道下流端での乱れや魚道の安定性等を考慮し， 8° または 10° とした．魚道を遡上した魚類を採捕するため魚道上流端に定置網を設置した．採捕された魚類を同定し，標準体長を測定した．また，魚道内の水生生物の挙動を把握するため，魚道直上部および下流端水中から動画を撮影した．

2.4 水理観測

水深と流速の観測地点を Fig. 3 に示す．流速は株式会社ケネック製ポータブル3次元電磁流速計を用いて10秒間平均流速を観測した．魚道内では9点，魚道内の主流部と休息場となるプールの中心に測点を設けた．また，水路では，急傾斜部（測点12）を含む6点を配置した．

3. 結果と考察

3.1 遡上魚種

採捕された結果を Table 1 に示す．5月の結果ではメダカが採捕された．メダカの体長は平均で 26.0mm であった．メダカは水田生態系の中で最も小さな魚（端ら，2001）で遊泳力の低い魚とされているため，採捕数が少ないものの，遊泳力が低い遊泳魚でも遡上できる環境が生じていることが分かった．7月，9月の結果では主にヨシ

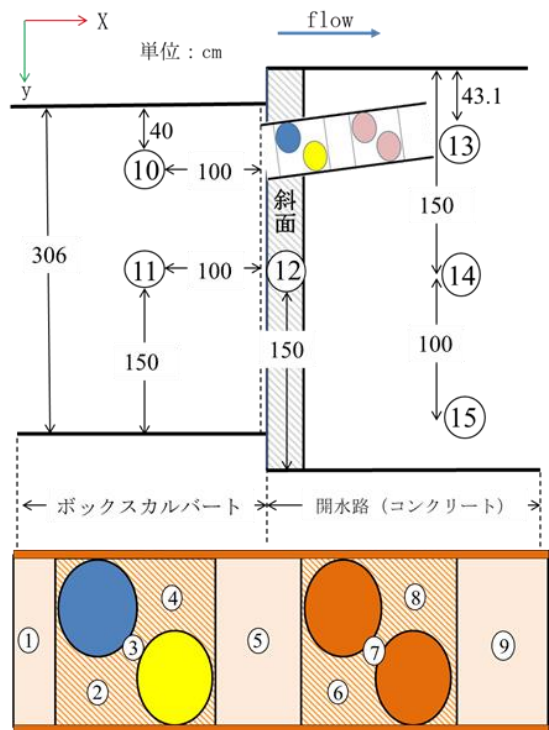


Fig. 3 水理観測点

Table 1 調査日時と魚類の採捕結果

	5月12日 天気：晴れ		5月12日 天気：晴れ		7月28日 天気：雨のうち晴れ		7月29日 天気：晴れ		9月10日 天気：晴れ		9月11日 天気：曇り	
開始時間	12:01		13:45		11:56		10:01		9:35		9:35	
終了時間	13:35		14:36		13:36		11:50		10:45		10:35	
魚種	個体数(匹)	平均体長(mm)	個体数(匹)	平均体長(mm)	個体数(匹)	平均体長(mm)	個体数(匹)	平均体長(mm)	個体数(匹)	平均体長(mm)	個体数(匹)	平均体長(mm)
メダカ	3	25.3	2	27.0	0		0		0		0	
ヨシノボリ	0		0		48	24.0	0		多数	23.3(20匹平均)	11	21.5
エビ	0		0		0		0		3	25.0	0	

ノボリが採捕された。平均体長は 24.0mm, 23.3mm, 21.5mm とどの日でもヨシノボリの稚魚が採捕され、平均体長に大きな差は見られなかった。また、9月の調査結果では甲殻類であるエビが採捕された。この採捕結果より、遊泳魚、底生魚、甲殻類が可搬魚道を利用していることを確認できた。

Table 1 より、各月の2日連続調査において、1日目と2日目の調査で採捕個体数に大きな差がみられる。前日の天候や当日の天候などが、魚類の活性に大きな影響を与えていることが考えられる。今後、水温や水路内流量、天候など、どの環境因子が魚類の活性に影響を及ぼしているかを調査することで、可搬魚道を適切な日に設置するための指針が得られると考える。

3.2 魚類の遡上経路と動き

採捕された魚の遡上経路を Fig. 4, Fig. 5 に示す。Fig. 4 ではメダカとヨシノボリの水制ブロック区間での遡上経路を示す。メダカは下流端プールから上流端プールまで右岸側の水際の流れを使い遡上しているのが確認できた。メダカの動きとしては、水制ブロック区間で止まることなく遡上している個体と、上流水制ブロックの横の水際で定位している個体を確認できた。しかし、定位している個体の中には下流側に戻ってしまう個体も存在した。撮影当日は水が濁っていたため、中央プールで魚が定位しているかどうか確認できなかった。



Fig. 4 水制ブロック区間における魚類遡上経路

ヨシノボリは水際だけでなく、魚道主流部でも遡上していた。水制ブロック区間の遡上の挙動としては、泉ら (2010) や宮園ら (2003) が報告しているように、落差の隔壁に吸着後、一気に遡上する様子や、側壁に付きながら遡上をしている様子が確認できた。

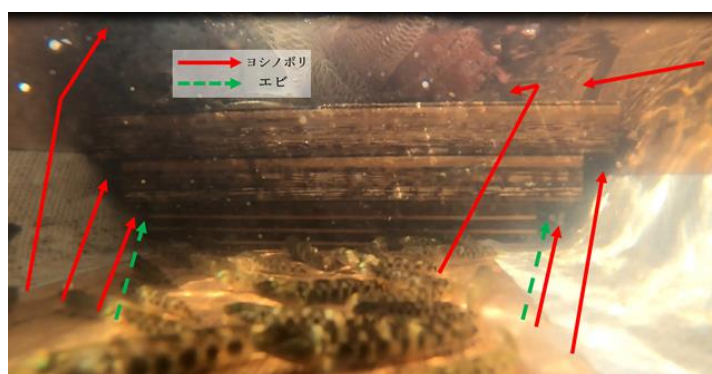


Fig. 5 下流端プールにおける魚類遡上経路

他に、主流部では吸盤を使い路床に付きながら少しずつ遡上するヨシノボリも確認できた。また、上流水制ブロック区間の下流側水制ブロックの脇に目視で水深の小さい場所を確認でき、ヨシノボリが遡上する際、その場所を避け遡上していた。したがって主流部を遡上するには体高以上の水深が必要と考えられる。

Fig. 5 は下流端プールを下流から上流に向けて撮影したものである。ここでは、ヨシノボリとエビの遡上経路を示す。ヨシノボリは Fig. 4 と同様、水際、主流部どちらでも遡上していた。また、魚道側壁と底面に重ねた板の間にできた空洞（以下、トンネルと呼ぶ）を使用して遡上しているヨシノボリとエビが確認できた。この理由として、トンネル内の流速が小さく、ヨシノボリやエビといった甲殻類でも遡上できる環境が整っていたと思われる。

3.3 経路の選択率

下流端プールにおけるヨシノボリの遡上経路に番号を付けた， Fig. 6 に示す． 15 分 50 秒間の経路の選択率は以下のように定義した．

$$\text{経路の選択率 (\%)} = \frac{\text{当該経路の遡上個体数}}{\text{総遡上個体数}} \times 100$$

経路の選択率を Table 2 に示す．トンネルを遡上する個体の中には少し入った後に出て行ってしまふ個体がいたため， その個体はカウントせず， 確実に遡上したと思われる個体のみをカウントした． 経路番号①， ⑥では押し戻されてくる個体は確認できなかった． 結果として， 経路①では 70.1%と高く， 次に⑥で 12.0%となり， ⑤で 0.7%と低い数値となった．

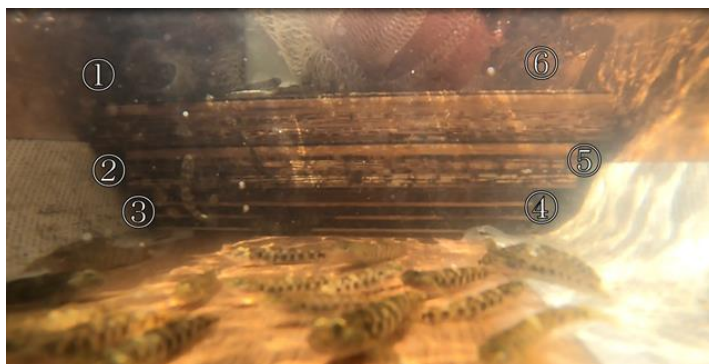


Fig. 6 ヨシノボリの遡上経路番号

Table 2 経路の遡上数と選択率

経路番号	遡上数	経路の選択率 (%)
1	375	70.1
2	39	7.3
3	21	3.9
4	32	6.0
5	4	0.7
6	64	12.0
合計	535	100.0

①の経路で遡上率が高い理由としては， 水が流れ込んでおり， ヨシノボリが遡上経路として識別することが出来たこと， 水制ブロックと側壁の間の流れであり， 水際の水深が確保されていたことが関係していると考えられる．

⑥では， ②や③のようなトンネルの中を遡上していく経路よりも高い遡上率となった． 理由としては流れ込みがあるため， ①の経路と同様に遡上経路として識別できたことであると思われる． 遡上の様子を見ると主流部の中心ではなく， 水制ブロックの横と水際を利用する個体が多く見られた．

経路②～⑤は四方が壁に囲まれている． そのため， 経路①， ⑥よりも流速が小さいと推測され， 遡上しやすい環境だと思われる． しかし， トンネルの選択率が低いことから， ここからの遡上を促進させる場合には遡上経路にある程度の流速が必要であると考えられる．

3.4 流速観測結果

観測した合成流速， 水路内流量， 魚道勾配を Table 3 に示す． 流量は対象地のの上流部で観測したものである． また， Fig. 7 に測点の流速分布を図示する．

魚道内の合成流速は， 7 月 28 日を除くすべての観測日において， 測点 4 で最大となった． しかし， 測点 4 の流速は水路急傾斜部の測点 12 のその半分以下であり， 魚道の流速低減効果が確認された（魚道の設置勾配 10°）． 一方で， 設置勾配が 8°のときは勾配 10°の時に比べ， 流速の低減効果が小さかった． 魚道の設置勾配 2°の

Table 3 魚道での合成流速の観測結果

測点	2019/5/12 定置網なし	2019/5/12 定置網あり	2019/7/28 定置網あり	2019/7/29 定置網あり	2019/9/10 定置網あり	2019/9/10 定置網なし
魚道	1	0.547	0.061	0.152	0.199	0.126
	2	0.467	0.562	0.599	0.539	0.466
	3	0.443	0.415	0.445	0.322	0.425
	4	0.833	0.898	0.699	0.566	0.685
	5	0.024	0.082	0.203	0.092	0.175
	6			0.319	0.355	0.300
	7			0.288	0.309	0.253
	8			0.736	0.510	0.431
	9			0.072	0.078	0.025
水路	10		0.259	0.111	0.309	0.109
	11		0.463	0.596	0.500	0.951
	12		1.425	1.670	1.576	1.768
	13		0.076	0.187	0.218	0.134
	14		0.263	0.637	0.517	0.662
	15		0.434	1.070	0.387	0.197
流量 (m ³ /s)	0.203	0.236	0.243	0.215	0.247	0.274
勾配 (°)	8	8	10	10	10	10

違いで合成流速に最大で 0.300m/s 程度の差があり、これはメダカのような突進速度が 1.00m/s 以下とされる小型水生生物にとっては大きな差だといえる。そのため、可搬魚道の適切な設置角度は今後の検討課題である。

メダカの突進遊泳速度について、泉ら(2018)は、一様流で2cm台のメダカの突進遊泳速度は0.330m/s～0.580m/sとしている。これを本調査結果と比較すると、Fig. 7に示すように、測点2, 4, 8で突進遊泳速度を超えていた。本調査での流速観測地点は限られているため詳細は不明だが、メダカは側壁水際などの低流速部を利用して遡上したと考えられる。

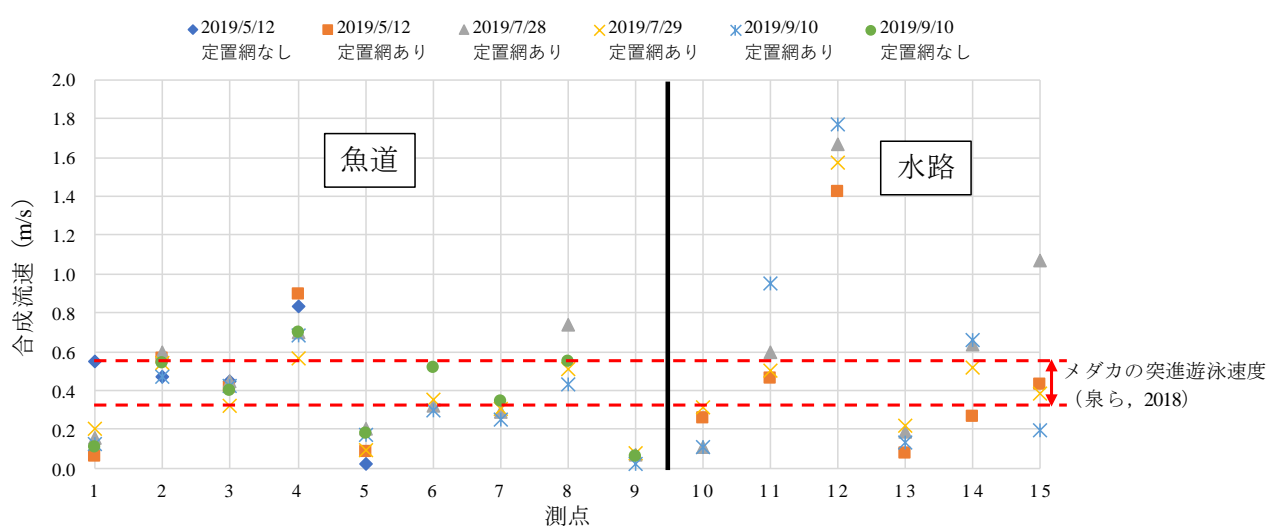


Fig. 7 観測した流速とメダカの突進遊泳速度の比較

4. おわりに

魚類の遡上障害緩和に対する可搬魚道の有効性を評価するため、農業用排水路の急傾斜部に魚道を設置し、魚類の遡上調査と水理観測を行った。その結果メダカ、ヨシノボリ、エビが採捕され、遊泳魚、底生魚、甲殻類が遡上できることを確認した。メダカは水田地帯に生息する小型水制生物の中でも遊泳力の低い魚であるため、本魚道は流速低減効果を発揮したと考えられる。遡上経路として、右岸側の水際の流れを利用する個体が多く見られた。魚道内の流速は、水路急傾斜部の流速の半分以下に低下した。今後は、魚道の設置角度が魚道内流速の低減にどの程度影響するか調べる必要がある。また、魚道内の魚類の休息場、流況をより詳細に把握すること、調査日による採捕数の違いの要因を、流量、水温、濁度、降水量等の環境因子を踏まえて分析する予定である。

引用文献

- 泉完, 清水秀成, 東信行, 丸居篤, 矢田谷健一 (2018) : ミナミメダカの突進速度に関する実験, 農業農村工学会論文集, No.306 (86-1), pp.II_1-II_7.
- 泉完, 神山公平, 藤原正幸 (2010) : 全面越流型階段式魚道プール内の流況と魚の遊泳行動, 農業農村工学会論文集, No.269, pp.127~135.
- 下田和孝, 中野繁, 小野有五 (2003) : プールタイプ魚道の設置が北海道の通し回遊魚の流程分布に与える効果, 魚類学雑誌, 50 (1), pp.15-23.
- 高橋直己, 長尾涼平, 林和彦, 多川正 (2017) : V型断面簡易魚道の流況特性と小型水生生物の魚道利用状況, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol. 73, No.4, I_391-I_396.

高橋直己，木下兼人，本津見桜，柳川竜一，多川正（2019）：農業水路における小型水生動物の移動環境創出に
適する魚道構造の検討，第74回農業農村工学会中国四国支部講演会。

端憲二，竹村武士，本間新哉，佐藤政良（2001）：流れにおけるメダカの遊泳行動に関する実験的考察，農土
誌，69（9），pp61-66。

宮園正敏，戸松修（2003）：斜路式魚道における粗石の配置について，砂防学会誌，Vol.56，No.1，pp3-12

安田陽一（2013）：技術者のための魚道ガイドライン - 魚道構造と周辺の流れからわかること - ，コロナ社，
35p。

農業効率化に向けた AI と画像解析技術の適用検討 The study on application of AI and image analysis technology to enhancing the efficient agriculture.

信岡卓*・井上栄一**・吉田貢士**・横田彩加*

*東電設計株式会社（〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12）

**茨城大学農学部（〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1）

NOBUOKA Takashi*, INOUE Eiichi**, YOSHIDA Koshi**, YOKOTA Ayaka*

*Tokyo Electric Power Service Corporation（1-7-12 Shinonome, Koutou-ku, Tokyo, 135-0062）

**Faculty of Agriculture, Ibaraki University（3-21-1 Amimachi Chuo, Inashiki-gun, Ibaraki, 300-0393）

Abstract

Generally, quality and quantity of agricultural products are indirectly assessed by meteorological hysteresis data at municipal level. And, by adding the image analysis technology, it becomes possible to assess quality and quantity of products directly and timely for farmers and contribute to improve the agricultural efficiency. Recently, artificial intelligence (AI) that mechanically learn mass data are applied in many fields. Especially, by developing the neural network and deep learning that have high capability of recognizing pattern, many kind of picture analysis services are proposed. We are engaged in developing image analysis technology for apple farm using AI that assess the products quality in real time with entire farm image. In this paper, we report the result of virtual examination using images acquired from web site.

Key words: agricultural efficiency, image analysis, harvest assessment, neural network, machinery learning

要 旨

農業生産物の生産量や品質は、都道府県単位では温度・湿度・日射量などの気象履歴データから間接的に予測することが一般的であり、これに併せて、各圃場の画像情報を解析することで、農業従事者が作柄をリアルタイムで、かつ直接的に評価することが可能となり農業効率化に寄与すると考える。近年、大量のデータを機械学習する人工知能(AI)が多くの分野に適用されており、その中でも、高いパターン認識力を有するニューラルネットワークの活用と、その進化系であるディープラーニングの登場により、様々な画像解析サービスが提案されている。筆者らは、りんご果樹園を対象として、果実の着果から収穫までの期間に果樹園の全体画像を取得して、AIを利用した画像解析で作柄をリアルタイムに評価する手法の開発に取り組んでいる。本論文は、Web サイトから取得した画像を用いた仮想検討の成果を報告するものである。

キーワード: 農業効率化, 画像解析, 作況評価, ニューラルネットワーク, 機械学習

1. はじめに

農業生産物の生産量や品質は気象条件と密接な関係があり、収穫時期に至るまでの温度・湿度・日射量などの履歴に大きな影響を受ける。農業従事者にとって、農作物の収穫量や品質を収穫する以前のある時点で正確に予測することは、当該年の収入を想定して次年度の経営計画を立てる上で重要であり、安定した経営を継続するために欠かせないものと考えられる。作況予測においては、任意の農作物について、気象条件の履歴データから間接的に当該年の生産量や品質を予測することが一般的であり、一例としてJA グループでは、各都道府県別の7月末までの気象履歴データと作況推計プログラムを用いて水稻の作況指数を予測している。すなわち、同手法で得られる予測値は、気象データからの間接的な値であり、かつ、都道府県単位というマクロな視点での値であるが、農業従事者の立場からは、自身が経営する圃

場の収穫量や品質といったマイクロな視点での予測手法が望ましい。

筆者らは、日々、圃場から得られる作物の画像を定量的に分析することで、直接的で、かつ圃場単位でのマイクロな視点での作況予測が可能であると考え。そこで、Web サイトから得られる画像データを用いて AI を利用した仮想検討を行い、画像解析による作況予測の可能性を検討した。さらに、仮想検討結果を参考にして、茨城大学農学部試験農園のりんご果樹園を対象とした現地実験を進める。

本論文では、第 2 節で Web サイトから取得した画像を用いた仮想検討の成果を、第 3 節で試験農園での現地実験計画を示し、第 4 節では画像解析評価に関する今後の展望を述べる。

2. 画像解析を用いた仮想検討

2.1 概要

仮想検討のフロー図を Fig.1 に示す。Step1 と 2 でりんご果実個々の全体画像を取得して、それらをトリミングして果実部分のみの画像に編集する。つぎに、Step3 と 4 で果実部分の画素情報を読み込んで、画素値の組み合わせを機械学習させる。最後の Step5 と 6 で果樹園の全体画像を取り込み、その中から機械学習結果をもとにりんご果実部分の画素のみを抽出する。以上の方法で果樹園の全体画像の中から果実部分のみを抽出した画像を得て、作況評価に利用することを目的とする。

2.2 りんご果実画像の取得と編集

Web サイトから任意の情報を自動的に取得するスクレイピング(Scraping)により、“りんご”と“ふじ”という 2 つのワードで約 600 の画像データが得られた。その中から、無関係な画像や画質の劣る画像、贈答用に着色したと思われる画像などを取り除き、りんご果実全体が写っている画像で画質の良い 68 画像を選択した。Fig.2(1)に全 68 画像を、(2)に一例として個別果実の 2 画像を示す。

本検討の目的は、果樹園の全体画像から果実部分の画像を抽出して評価することであり、果実部分のみの画素を機械学習させたい。そこで、つぎの Step では Fig.2 のりんご全体画像をトリミングして、果実部分のみの画像に編集する。Fig.3 に、Fig.2(2)の個別果実をトリミング編集した 2 画像を示す。

なお、本節での留意点として、Web サイトから取得した 68 のりんご画像は、出荷が可能な成熟した品質の良い果実に相当するものと考え。

2.3 りんご果実の画素情報

(1) 果実部分の画素値抽出

画像ファイルは色情報を持つピクセルという最小単位で構成されており、各ピクセルは光の 3 原色である赤、緑、青の輝度(R,G,B 値)情報を有する。本論文では、この輝度情報を画素値と称する。R,G,B の各画素値は 0~255 の整数値で表される。汎用のプログラミング言語である Python と、インテルが開発した画像データを取り扱うライブラリーである OpenCV を併用することで、画素値とその組み合わせを容易に取得できる (Prateek Joshi)。

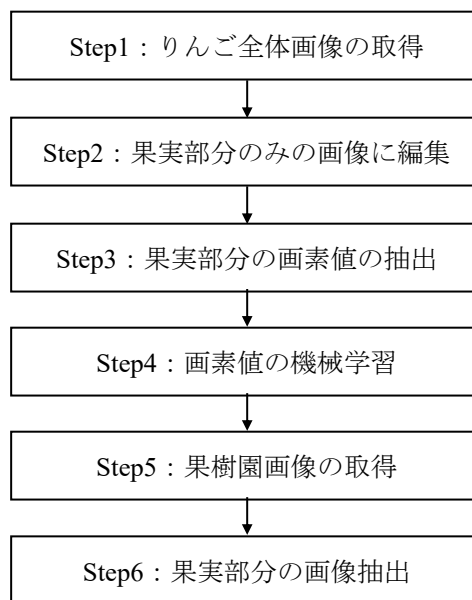
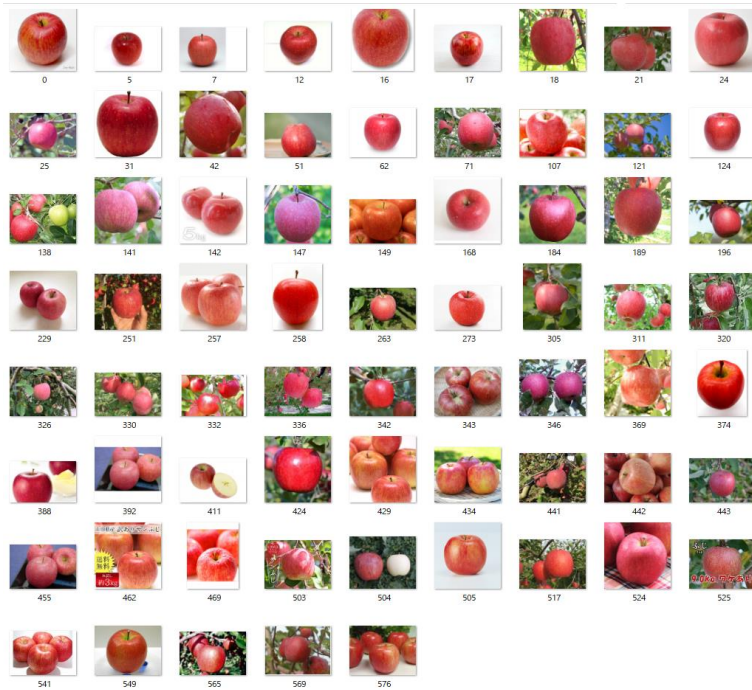


Fig.1 検討フロー図



(1) 全 68 画像



(2) 個別画像例

Fig.2 りんご果実の画像

画素値を読み込む手順を示す。Fig.3 の上段画像は横 166×縦 137 ピクセルであり、当画像のみで 22742 ピクセルで構成されている。全 68 トリミング画像の全画素値を読み込むと膨大な量となるので、無作為抽出により約 0.15%に相当する 4148 ピクセルの画素値を抽出した。抽出した全画素値について、各 R,G,B 成分の頻度分布を Fig.4 に示す。視覚的にも理解できるように、R 成分の数値が高く、G と B 成分では低い分布が得られた。

(2) 果実以外の画素値作成

AI により果樹園全体の画像から果実部分のみを抽出するためには、果実と果実以外の画素データ(画素値とその組み合わせ)を仕分けて機械学習させる必要がある。果実以外の画像を取り込んで画素値を取得しても良いが、本検討では下記の方法で果実以外の画素データを作成した。

Fig.5 上段の果実色は、前項(1)で抽出した果実部分の画素値の一例であり、R=220,G=40,B=90 の組み合わせである。R,G,B 成分の全配列を入れ替えた組み合わせは 2 種類であり、中段の他色 1 と下段の他色 2 が相当する。(1)で抽出した全 4148 ピクセルについて配列を入れ替えた 2 種類の配列を作成して、計 8296 ピクセルを果実以外の画素値とした。



Fig.3 トリミング画像

2.4 画素情報の機械学習

(1) 機械学習の概要

AI は現在、第 3 回目のブームを迎えていると言われており、既に社会の多くの分野において活用されている。第 2 回目のブームは 1980 年代を迎えており、強力なパターン認識能力を持つニューラルネットワーク(以下、NNW とする)を用いた機械学習が代表的な手法である。2006 年には、その NNW の中間

層を多層にした深層化手法(ディープラーニング)による機械学習が提案されて、現在に至っている。Fig.6に深層化学習の概念図を示す。入力層が1層、中間層が2層、出力層が1層の計4層で構成されるネットワークであり、中間層を1層とした場合がNNWである。

Fig.6のネットワークは、入力層が4ユニット、中間層は各層5ユニット(ユニット数は同一である必要はない)、出力層が1ユニットで構成されており、各層のユニットは隣接する層のユニットと重み係数で連結されている。各ユニットには、入力を変換する非線形関数が備わっており、式1のシグモイド関数が一般的に用いられている。入力層に説明変数を、出力層に目的変数を与えて、目的変数のデータと推定値の誤差が最小となるように各重み係数を最適化の必要があり、最適化の手法としてバックプロパゲーション(誤差逆伝播法)が用いられる。

$$f(x) = 1/(1 + e^{-x}) \quad \text{式 1}$$

x : ユニットへの入力値

f(x) : ユニットからの出力値

(2) 画像解析への応用

NNWのパターン認識能力は顔認識や文字判別等の画像解析の分野で威力を発揮しており、仮想検討では、りんご果実とその他の画素を判別学習して、果樹園全体画像の中から果実部分を抽出する場合を考える。りんご画像とその他画像の画素値と組み合わせが説明変数(入力層に与える)で、りんご画像とその他画像を区別する信号が目的変数(出力層に与える)である。本検討では目的変数として、りんご果実の画素値を1、その他の画素値を0と定義して、説明変数である画素データとの関係を機械学習する。

本検討の目的は、果樹園全体の画像の中からりんご果実部分のみを抽出することであり、下記の方法で機械学習させる(信岡, 2009)。概念図をFig.7に示す。

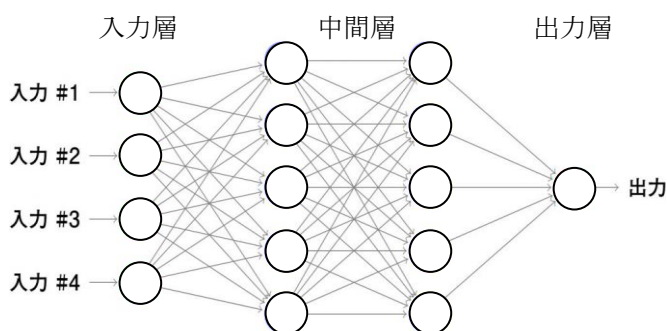


Fig.6 深層化学習の概念図

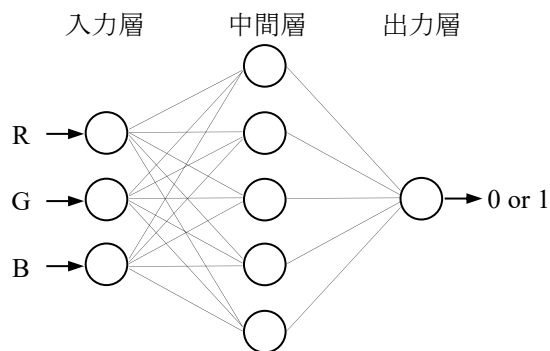


Fig.7 ニューラルネットワーク

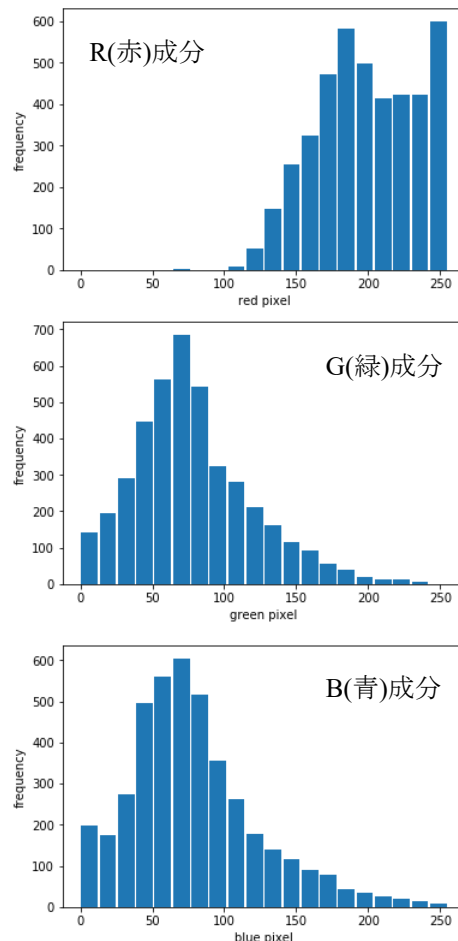


Fig.4 画素値の頻度分布図

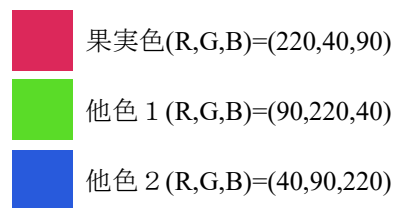


Fig.5 他色の画素値の組合せ

- 入力層：入力層は3ユニットで，R，G，Bの画素値を与える。
- 出力層：出力層は1ユニットで，果実とその他の画素を区別する出力信号を与える。
出力信号は，果実の画素値を1，その他の画素値を0とする。
- 中間層：中間層は1層，5ユニットとする。

以上のように，本検討では中間層を1層とし，ディープラーニングではなくニューラルネットワークで機械学習を行う。りんご果実の画素値データを4148組，その他の画素値データを8296組，合計12444組を機械学習させた結果をFig.8に示す。横軸がデータ番号(1~12444)，縦軸が出力信号であり，概ね精度良く仕分けられていると判断する。

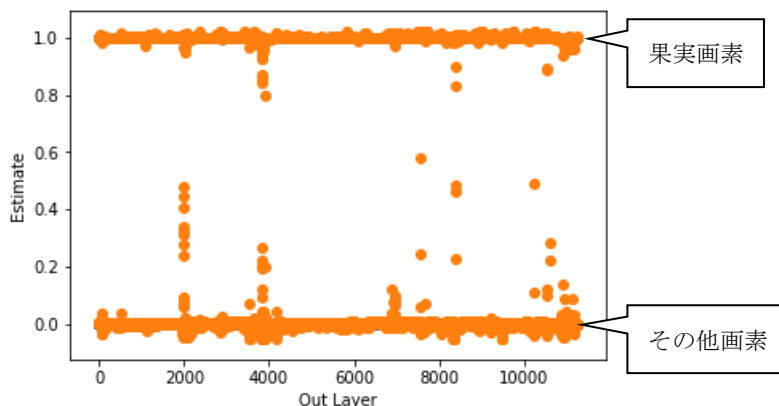


Fig.8 果実画素(1)とその他画素(0)の学習結果

2.5 果樹園全体画像からの果実画像の抽出

Webサイトから取得した果樹園の全体画像をFig.9に示す。同画像は，縦720ピクセル，横1080ピクセル，合計777600ピクセルで構成されている。前節2.4での機械学習結果を用いて，以下の手順で果実部分を抽出した画像に変換する。

- ①元画像の画素値を読み込んで，機械学習で得られた重み係数を乗じて出力値を求める。
- ②果実部分と判断する出力値の閾値 x を設定する。
- ③ $x \leq$ 出力値 の場合は，果実部分と判断してそのまま抽出する。
出力値 $< x$ の場合は，その他の部分と判断して画素値を黒(0,0,0)に変換する。
- ④以上を全ピクセル777600で行う。

機械学習の出力値として，果実部分の画素値を1，その他を0とした。ここでは，数値 x を0.50と0.90とした画像をFig.10に示す。元画像のFig.9において，各ピクセルが果実部分なのか否かを正確には仕分けられないので正解率を定量的には評価できないが， x が0.50の場合は果実以外の部分も若干抽出しているが，目視で判断する限りでは x が0.90の場合は太陽光が反射した箇所を含めて精度良く果実部分を抽出していると判断する。

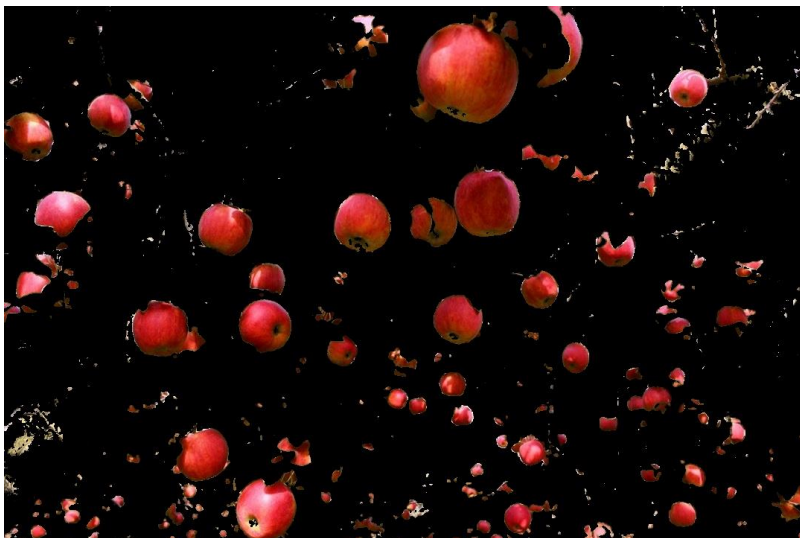
2.6 果樹園全体画像からの葉画像の抽出

果実の品質を管理する一つの指標として葉果比が挙げられる。前節2.5までに果樹園の全体画像の中から果実部分の画像を抽出する方法を示したが，併行して画像中から葉の部分抽出することで，リアルタイムでの葉果比の推定に寄与すると考える。そこで，Fig.10を抽出した方法と同様に，Webサイトから葉の画像を取得し，機械学習を経て全体画像から葉部分の画像を抽出した。Fig.11にWebサイトから取得した葉画像のトリミング画像を，Fig.12に全体画像から葉部分を抽出した画像を示す。

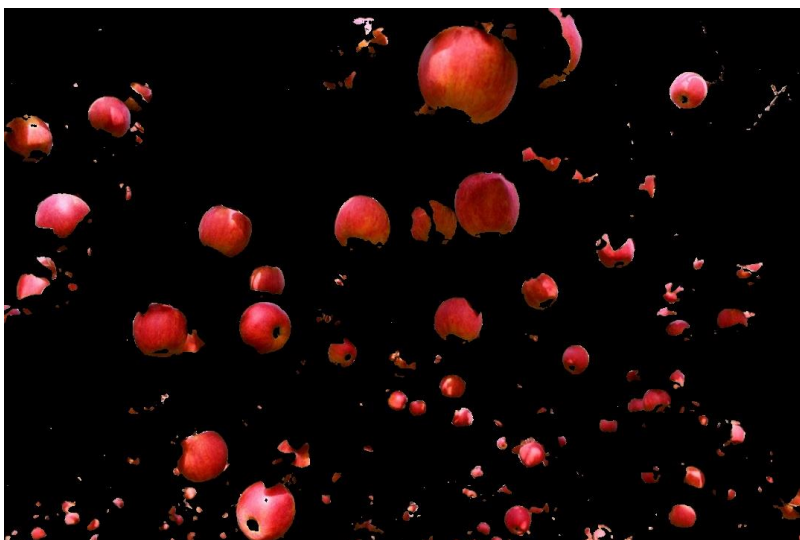
葉部分以外に幹や枝の部分も一部抽出しているが，Fig.10とFig.12で抽出したピクセル数を比べることで，葉果比の推定に寄与する可能性があると考えられる。



Fig.9 果樹園の全体画像



(1) 閾値が 0.50 の場合



(2) 閾値が 0.90 の場合

Fig.10 果実部分の抽出画像



Fig.11 葉のトリミング画像



Fig.12 葉部分の抽出画像，閾値 0.90

3. 仮想検討の課題点と実験計画

3.1 仮想検討の課題点

第2節では、Web サイトから入手した画像を用いて仮想検討を行い、全体画像から果実部分を抽出する方法を示した。果樹園の画像を継続的に撮影して果実部分を抽出し、画像全体に占める果実部分の面積比率や画素値の統計量を時系列で分析することで、リアルタイムでの作況評価に寄与できると考える。仮想検討の結果を踏まえて、今後の主な検討項目はつぎの2点である。

その1：Fig.2 に示すりんご果実画像と Fig.3 のトリミング画像，および Fig.9 に示す果樹園全体画像は、Web サイトから入手した中で意図的に良い画質のものを選択した画像であり、実際の果樹園や果実を対象として得られる画像を用いて同様の検討を行う。

その2：Fig.2 に示すりんご果実の画像は成熟した状態の良いと思われる果実であり、Fig.9 の果樹園全体画像も収穫時期付近での画像と考えられる。本検討の目的は、着果後から収穫に至るまでの作況をリアルタイムで評価する手法の開発であり、未成熟段階での画像も併せて分析する必要がある。

3.2 実験計画

前節で示した課題点に対応するために、茨城大学農学部の試験農園において現場実験を行なう。実験概要を以下に示す。

a) 果実個別画像

りんご(ふじ)果実の個別画像を9月中旬から収穫まで継続的に撮影する。果実の個数は7個で、太陽光と果実色彩との関係を把握するために、南側と北側の2面を撮影する。

b) 樹木全体画像

試験農園の中で、数本のりんご樹木を対象とした全体画像を10月初旬から収穫まで継続的に、適当な方向から撮影する。

c) 画像分析

a)とb)で撮影した果実の個別画像と樹木の全体画像を下記の3画像に分類して機械学習させる。

- 収穫以前の未成熟果実の画像
- 収穫時期付近の成熟果実の画像
- 枝と葉の画像

仮想検討と同じく、機械学習結果をもとに樹木全体画像中の果実部分や枝葉部分を抽出して、それらの経時変化を分析する。

4. 今後の展望

Webサイトから取得した画像を用いた仮想検討により、りんご果実の作況をリアルタイムで定量的に評価する可能性を提示した。画像データの利用方法として、農業従事者が果樹園の状況を直接視覚的に確認することに加えて、画像から果実や葉の領域を抽出して両者の比率や画素値を定量的に統計処理することで、より精度の高い作況評価と農業経営の効率化に寄与すると考える。画像解析の統計値と作況との関係として、下記のような視点が考えられる。

- 果実領域と葉領域の比率 → 葉果比への反映
- 画素値統計量の年度比較 → 過去年度との比較による作況の相対評価
- 果実部分の画素値統計量 → 糖度や糖酸比データとの連動

画像解析の有効性は、農業従事者の目視による作況判断と画像解析による統計量の経時変化を比較することで検証できると考える。今後は農業従事者へのアンケート調査を行ない、農業従事者の経験的作況評価と画像解析の分析値とを比較検討する予定である。

また、画像解析には以下のような適用案も考えられる。まず、作況評価に関する適用として、病虫害や雑草害の監視が挙げられる。果実や葉の変色や雑草の画像を学習することで、圃場全体の状況を適宜把握することが可能と考える。つぎに、筆者らは、気象リスクによる農作物被害を確率論的に評価する手法の構築に取り組んでいる。今年台風による果実の落下被害が多く報告されており、人の手を要さずに広範囲に亘る地域の被害率を把握する手法への適用などが考えられる。

引用文献

Prateek Joshi : Python による AI プログラミング入門,O'REILLY JAPAN

信岡卓 : 降雨の非正常性と地盤の不飽和特性を考慮した斜面安定性予測手法の研究,2009.06

タイ東北部の雨季米生産に対する気候変動影響と適応策の検討 Evaluation of Climate Change Impact on Wet-Season Rice Production and Adaptation Measures in Northeast Thailand

吉田貢士*・本間香貴**・牧 雅康***・前田滋哉*・黒田久雄*

*茨城大学農学部（〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1）

**東北大学農学研究科（〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

***福島大学農学群食農学類（〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地）

YOSHIDA Koshi*, HOMMA Koki**, MAKI Masayasu***, MAEDA Shigeya*, KURODA Hisao*

*College of Agriculture, Ibaraki University (3-21-1 Chuo, Ami-machi, Ibaraki, 300-0393)

**Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University (468-1 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-0845)

***Faculty of Food and Agricultural Sciences, Fukushima University (1 Kanayakawa, Fukushima-shi, Fukushima, 960-1296)

Abstract

In northeast Thailand, the irrigated agricultural land was only 7.6% (in 2012) of total and others were classified as rain-fed so that climate change makes agricultural production unstable and also makes negative impact to the societies and economics in rural area. In this study, we focused on weather induced economic damages and effectiveness of index-based insurance in Northeast Thailand. Firstly, we evaluated how affect the future seasonal rainfall amount and patterns on rice yield. 6-8% reductions were estimated in KhonKaen, MahaSarakham, RoiEt province. Through the regression analysis, 8 province had positive correlation $R>0.3$ with Jul-Sep accumulated rainfall. And then, probability analysis was applied to monthly rainfall which was employed for insurance index value. As a result, setting amount and periods of insurance index was suitable. Secondly, household survey was conducted to investigate farmer's conditions of income balance. In recent year, agricultural damage on farmer's income was not so large (less than 3%), because 65% of farmers income relied on non-agricultural sector. That might be the one reason of constraints of insurance sales.

Key words: climate change, agricultural damage, household survey, risk assessment

要 旨

灌漑率が7.6%と低く気候変動に脆弱なタイ東北部を対象に、雨季米の生産に対する気候変動影響を評価し、適応策としての天候インデックス保険の可能性を評価した。重回帰モデルを用いて将来の単収変化を求めた結果、コンケン・マハサラカム・ロイエト県で6-8%の減収が推計された。東北タイ17県の3ヶ月積算降水量と米生産量の関係から、インデックス保険に使用されている7-9月降水量と米生産量の相関は高く、また設定降水量の再現期間からもインデックスの期間および値は概ね妥当であると判断された。次に、雨季米の生産量変動と米価格の推移から各県・各年における被害額を求め、農家世帯収入に及ぼす影響を推定した結果、近年では被害割合は3%以下と小さかった。農家への世帯生計調査より、世帯収入の7割程度を農外収入が占めており農業収入の割合は比較的小さいことが天候インデックス保険普及の阻害要因と考えられた。

キーワード: 気候変動, 農業被害, 生計調査, リスク管理

1. はじめに

コメは長い間タイの伝統的な食用作物であり、主な輸出品であり続けてきた。相対的な重要性は減りつつあるとはいえ、いまだに農耕地の55%を米が占めている。タイの総人口の8割以上が米を主食とし、1人当たりの年間消費量は100キロにもなる。世界もタイ国の米に依存しており、国連食料農業機関FAOのコメ市場報告によるとタイは現在も世界有数の米輸出国である。タイでは1989年から2002年にかけて

て洪水、干ばつによって17億5000ドルの経済損失を被ったとアジア開発銀行ADBの報告は示している。その内訳の大半(12億5000ドル)が穀物生産の減少による。米の生長に影響を与える予測不能な事態(降雨分布と気温変化、害虫や疫病の種類と頻度の増加など)が気候変動により今後数年でますます増えるとみられている。このような状況の中、気候変動に適応したコメ生産システムの検討は極めて重要な課題となる。

例えば、タイ国のコメ生産量の変動実態については、既に内田ら(1981)が1968年までの約20年間を対象とした解析を行っている。彼らは東北タイ南西部で特異的に大きな年次変動が存在することを示すとともに、それには降雨量の少なさ、灌漑が行われにくい地形および人口の急増を背景にした水田面積の拡大が関係していることを指摘した。また、生産量の変動は単収・作付面積比(全水田面積中の作付面積割合)・収穫面積比(作付面積中の収穫面積割合)の変動によって決定され、熱帯諸国の稲作では、それらが生産量の変動に及ぼす割合は地域によってかなりの差があることを示し、そしてそのことこそ熱帯諸国の稲作の特徴であると述べている。白岩ら(2002)はタイ稲作の生産変動実態およびそれと時期別降雨量との関係を、1979-1998年の20年間における全県の稲生産統計および各地域を代表する6県の降雨データに基づいて解析し、乾季作ではどの地域においても雨季作に比べて生産変動が著しく大きく、また、降雨および水利環境に恵まれない地域では、雨季作・乾季作を通じて、生産変動は作付面積が降雨量に左右されることを介してもたらされるという結果を得た。このように、長期間の農業統計データと気象データより生産変動を分析する研究や手法がいくつか提案されているものの、その生産変動を金銭評価し被害額を評価する研究は未だ多くはない。

上記のような背景のもと、本研究ではコメ生産システムに対する気候変動影響を評価し、農業被害の将来予測を行うことを目的とする。そのため、現在気候における気象要因とコメ生産の関係性を明らかにし、将来の季節降水量の変化がコメ生産にどのような影響を与えるかを評価する。また、適応策としての天候インデックス保険の可能性についても検討する。

2. 対象地域

タイは世界最大のコメ輸出国であり、コメはタイ国にとって最も重要な作物である。コメの作付面積は国土の約2割、農地面積の約5割を占めるが、その半分強の水田がタイ東北部に集中している。タイ東北部における農業の大部分は天水農業である。稲作は灌漑が可能であれば、年2期作が可能であるが、タイ東北部においては農地の灌漑率が7.6%(2012年時点)と低く、気象要因に脆弱な地域と言える。タイ東北部は熱帯モンスーン気候に属し、明瞭な雨季と乾季が存在する。大別すると、5月~10月が雨季、11月~4月が乾季にあたる。西と南を山脈によって、北方向をメコン対岸の山塊によってさえぎられているために、東北タイの気候はタイの他の地域に比べて大陸的である。東北タイにおける各県の位置を図1に示す。この地域において、産業上最も大きな問題となるのは旱魃であり、実際に、損保ジャパングループのタイ現地法人である損保ジャパントイランドは、旱魃に対する天候インデックス保険の販売を、2010年1月よりKhon Kaen県で開始した(齋藤ら、2010)。その実際のインデックス値を表1に示す。多くの農家は作付前にタイ農業協同組合銀行(BAAC)から種子や肥料を購入するために借入を行う。その借入金の10%を保険代金として支払うことにより、降水量がインデックス値を下回った際に最大で借入金の65%まで保険金が受け取れる仕組みとなっている。90年代前半までは不作の際に借金が返済できず土地を売って小作に転じる農家が一定数存在した(室屋、2004)。また、貸し手の銀行にとっても不良債権化のリスクが減少するメリットがある。販売当初のインデックスには6-8月の3ヶ月積算降雨が使用されたが、その後農家の意見を取り入れて、7-9月積算降雨に修正され、さらに早期旱魃への対応の

ため 7 月と 8-9 月雨量とを別途扱うインデックスへと修正がなされた。なお、現在は東北タイ 9 県 (Buriram, Kalasin, KhonKaen, Maha Sarakham, Nakhon Ratchasima, Roi Et, Sisaket, Surin, Ubonratchathani) で天候インデックス保険が販売されているが、実際のインデックス値が入手できたのは KhonKaen 県のみであった。

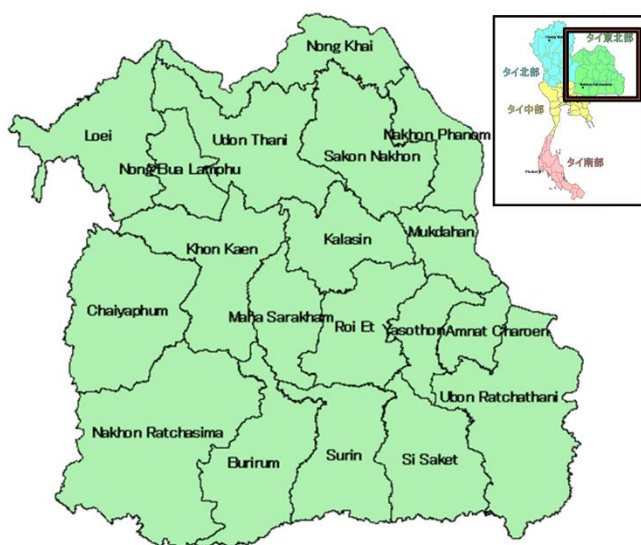


図 1 東北タイにおける各県の位置

表 1 現行のインデックスと支払われる保険金

渇水レベル	インデックス値	保険金額
早期渇水 (Early drought)	7月の月間降水量 100mm以下	借入金の10%
渇水 (Drought)	8～9月の積算降水量 320mm以下	借入金の15%
深刻な渇水 (Severe drought)	8～9月の積算降水量 220mm以下	借入金の40%

3. 重回帰モデルを用いた気候変動影響評価

3.1 重回帰分析および現在における被害額推計

タイ東北部全 17 県について、雨季米の単収を目的変数、月別降水量を説明変数とした重回帰分析を行った。また、各月の降水量が生産量の変動に及ぼす影響を標準偏回帰係数の大きさに評価した。解析期間は降水量データが得られた 1986～2013 年の 28 年間とした。ただし、近年の気象データが得られなかった Kalasin 県、Maha Sarakham 県、Yasothon 県の 3 県については解析を 1986 年～2004 年の 20 年間とした。

また、白岩ら(2002)の方法を参考に、各年の前 5 年平均生産量を平年値(\bar{x})として(1)式により被害額推計を行った。使用したデータはタイ国農業統計の 1981-2013 年である。

$$\text{被害額} = \text{作物価格} \times |\text{生産量の平年偏差}(X - \bar{x})| \quad (1)$$

ここで、各年における値(X)の平年値からの偏差を平年偏差($X - \bar{x}$)とする。また、被害を表すために $X > \bar{x}$ の場合は、 $|\text{生産量の平年偏差}| = 0$ つまり被害額をゼロとした。作物価格については、その年のタイ国全体の作物価格を使用した。

東北タイ各県における月別降水量の標準偏回帰係数を表 2 に示す。なお、表中の係数 > 0.2 以上を正の相関ありとして赤で、係数 < -0.2 を負の相関ありとして緑で表示した。白岩ら(2002)は 6-8 月の 3 か月積算降水量と雨季米の生産量との間に正の相関を見出したが、本研究においても 6 月が 17 県中 6 県、7 月が 17 県中 6 県で正の相関を示した。また、11 月降水量では 17 県中 5 県で洪水の影響を思われる負の相関がみられた。重回帰モデルの推定精度を表す重相関は 17 県中 10 県で 0.5 以上を示したが、0.4 以上が 5 県、0.3 以上が 2 県であった。

現在気候における被害額の推計結果を図 2 に示す。被害額は 1988 年の Udon Thani 県で最大 20 億 Baht に達し、近年においても毎年いずれかの県で 6 億 Baht 規模の農業被害が生じていることが分かる。な

お、2000 年における東北タイ全体の雨季米生産額は 435 億 Baht，また各県の生産額の範囲は 4.6 億 Baht (Mukdahan)～41.7 億 Baht (Surin)であり，6 億 Baht 規模の農業被害は十分に大きいと言える。

表-2 単収を目的変数とした月別降水量（5～11月）の偏回帰係数

	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	重相関 R
Buri Rum県	-0.01	-0.04	0.25	0.20	0.09	0.02	0.00	0.40
Chaiyaphum県	0.31	0.14	0.09	0.04	-0.03	-0.16	-0.16	0.48
Khon Kaen県	-0.15	0.05	-0.06	-0.14	0.27	0.44	-0.07	0.52
Loei県	0.18	0.02	-0.24	0.29	0.17	0.14	-0.28	0.63
Mook Zehnder Hahn県	0.25	0.00	0.11	0.44	0.17	-0.33	-0.27	0.57
Nakhon Phanom県	-0.19	0.24	0.09	-0.43	-0.21	-0.17	0.09	0.48
Nakhon Ratchasima県	0.05	0.12	0.33	0.00	0.28	-0.54	-0.22	0.62
Nong Khai県	-0.29	0.06	0.17	0.05	0.02	-0.07	0.15	0.36
Roi Et県	-0.35	0.49	0.15	0.55	-0.08	-0.27	0.05	0.75
Sakon Nakhon県	-0.08	-0.11	0.36	0.07	0.21	-0.06	0.04	0.53
Sisaket県	-0.05	0.25	0.08	0.18	-0.16	-0.13	0.01	0.43
Surin県	0.63	0.16	-0.71	-0.18	-0.15	0.19	-0.50	0.59
Ubonratchathani県	0.05	0.59	-0.05	-0.10	0.06	0.10	0.05	0.44
Udon Thani県	-0.41	-0.14	0.19	0.18	0.49	-0.18	-0.17	0.58
Kalasin県	-0.24	0.56	0.21	0.11	0.32	-0.07	-0.23	0.84
Maha Sarakham県	-0.07	0.34	0.20	0.56	0.13	-0.13	0.05	0.82
Yasothon県	-0.09	0.10	0.24	-0.03	0.07	0.27	-0.09	0.38

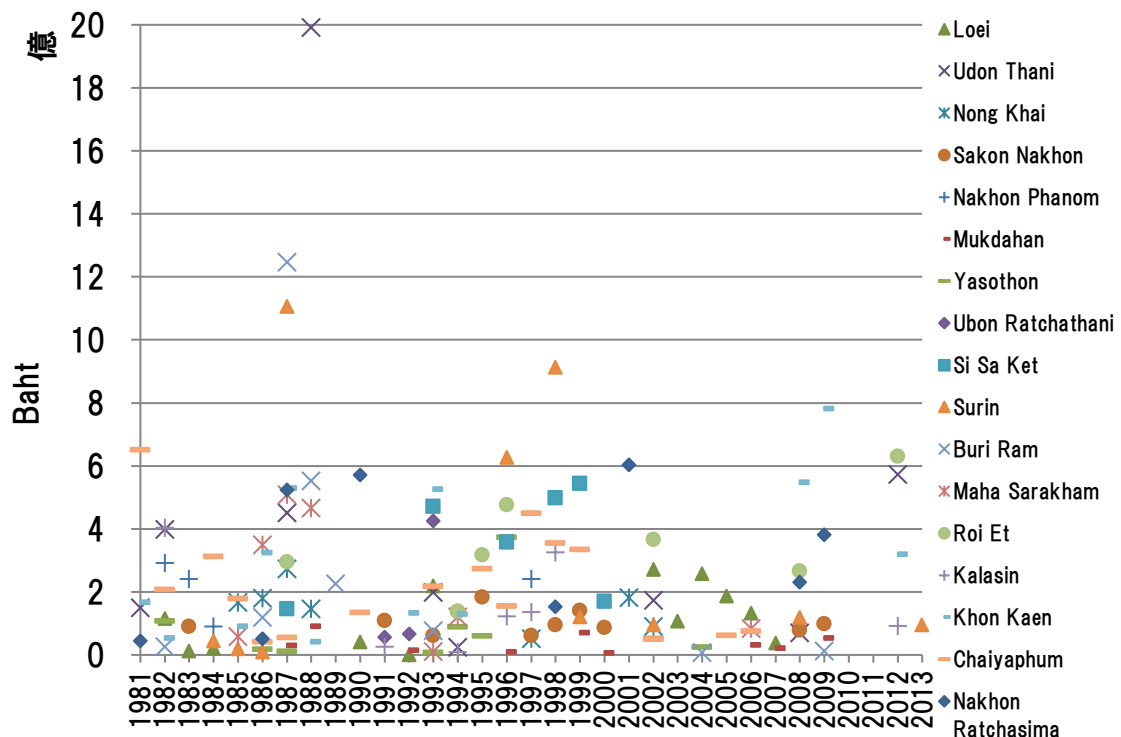


図2 各県における被害額の推移（1981-2013）

3.2 重回帰モデルによる将来予測

次に、2100 年までの将来気候下における降水量変動がコメ生産に及ぼす影響を評価した。IPCC 報告書によれば、熱帯・亜熱帯地域では気温が 1℃上昇するだけでコメ生産量が低下するとされる。しかし、対象地域である東北タイにおいて気温データが入手できたのは KhonKaen 県のみであった。そのため本

研究では、降水量の変動がコメ生産に及ぼす影響のみに着目することとし、気温変化については今後の課題とした。本研究では東京大学大気海洋研究所（旧・気候システム研究センター）、国立環境研究所、海洋開発研究機構で共同開発・維持管理されている全球気候モデル(MIROC5)の気候予測値を使用した。解析にはDIASデータベースにおいて公開されている空間解像度が1.4度×1.4度、時間解像度が月単位の、2006年～2100年の出力値を用いた。IPCC第5次評価報告書(2015)では、RCP(代表的濃度経路: Representative Concentration Pathways)シナリオが用いられている。RCPシナリオでは社会的・経済的な将来像は仮定せず、将来予測される多様な放射強制力の経路の中から、代表的なものを選択し、これに基づき気候を予測する。放射強制力に複数の社会経済シナリオを対応・比較させることで多様な将来像を仮定することが可能であり、様々な緩和策・適応策の施策に役立てることができるという利点がある。RCPシナリオでは、2100年における放射強制力(W/m²)が小さいものから2.6、4.5、6.0、8.5の4つのシナリオが存在するが、本研究では最も極端な将来気候条件であるRcp8.5シナリオを採用し、コメ生産に及ぼす影響を評価することとし、各県における2006年～2016年の観測データをもとに、月別降水量の平均値および標準偏差を一致させるようバイアス補正を行った。

図3に2006-2016年の平均単収に対する2090-2100年の平均単収変化を百分率で表示した。東北タイの中央部に位置するKhonKaen県、MahaSarakham県、RoiEt県において6-8%の減収が予測された。また、Loei県、NakonPhanom県において4-6%の増収が予測された。図4に東北タイ各県の年平均降水量(1986-2013)を示す。傾向として、相対的に降水量の少ない県において減収傾向、メコン川沿いの降水量が比較的多い県で増収傾向が見られた。

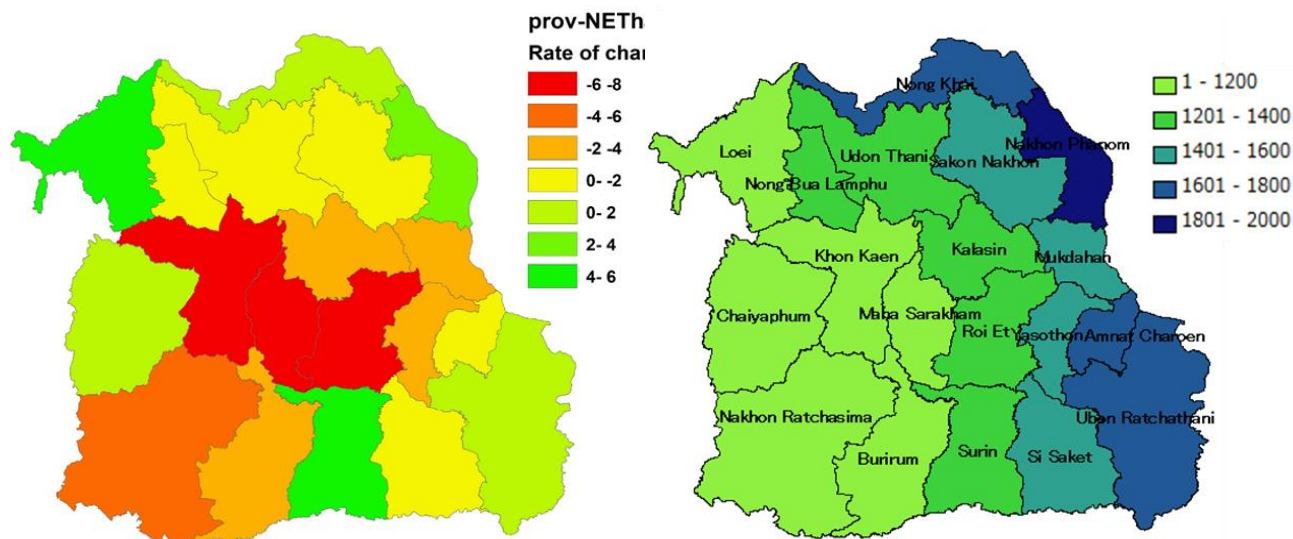


図3 2100年における単収の変化率(2010年比)

図4 各県における年平均降水量(mm/year)

4. 天候インデックス保険の有効性評価

4.1 インデックス採用期間の検討

天候インデックス保険の導入においては、トリガーとなるインデックス値(ここでは設定された基準降水量)が対象地域の農業生産特性を反映して適切に設定されているかが重要となる。ここでは、稲生産変動と降水量との関係を求め、生産量に關与する各生産要素の変動が、どの時期の降水量の変動に起因するかを示し、採用されているインデックス値の妥当性を評価する。

白岩ら(2002)の方法に従い、タイ東北部17県について、1ヶ月から6ヶ月まで積算期間を様々に変え、時期別の積算降水量を標準化したものと生産量の年平均偏差を標準化したものとの関係を求めることで、

生産変動が、どの時期の降水量の変動に起因しているかを評価した。

東北タイ 17 県において降水量と生産変動との関係を求めたところ、雨季作については 3 ヶ月間、乾季作については 4 ヶ月間の積算降水量を対象とした場合に比較的明瞭な関係が見られた。天候インデックス保険の対象である雨季作米における県別の 3 ヶ月積算降水量と生産量の相関係数を表 3 に示す。多くの県において 6-8 月降水量をインデックスとして採用することが最も信頼性の高い結果を与えることが示唆された。実際の天候インデックス保険も当初の設計では 6-8 月の積算降水量をインデックスとして使用しており、保険の設計には妥当性があった。一方、Sisaket や Buriram 県のように相関係数が低い県も存在した。今回の解析期間である 80 年代・90 年代当時においては、稲作の栽培方法は移植栽培が主流であった。しかし、2000 年以降、農家の労働力不足などを背景に、稲作の栽培方法が移植から直播へと変化した。実際に、損保ジャパンは使用するインデックスを 6-8 月降水量から 7-9 月降水量に修正したが、これは栽培方法の変化により 6 月の降水量よりも 9 月の降水量の方が重要という農家の意見を取り入れたためである。

表 3 雨季米の生産量と 3 か月積算降水量の相関係数

	5-7月	6-8月	7-9月	8-10月	9-11月	10-12月
Buriram	0.29	0.16	0.34	0.16	-0.01	-0.20
Chaiyaphum	0.44	0.43	0.21	0.09	-0.21	-0.17
Kalasin	0.45	0.54	0.34	0.23	0.12	0.15
Khon Kaen	0.25	0.45	0.45	0.56	0.50	0.48
Loei	0.55	0.38	-0.37	-0.17	-0.24	0.31
Maha Sarakham	0.21	0.54	0.57	0.43	0.33	0.23
Mook Zehnder Hahn	0.05	0.41	0.40	0.26	0.04	-0.28
Nakhon Phanom	-0.08	-0.37	-0.47	-0.34	-0.17	-0.01
Nakhon Ratchasima	0.26	0.26	0.43	0.20	0.03	-0.25
Nong Khai	0.07	-0.10	-0.04	-0.21	0.08	-0.17
Roi Et	0.37	0.51	0.30	0.11	-0.21	0.09
Sakon Nakhon	-0.03	0.04	0.13	0.46	0.32	0.24
Sisaket	-0.04	0.08	0.04	0.08	-0.20	-0.27
Surin	0.34	0.56	0.28	-0.01	-0.47	-0.44
Ubonratchathani	0.32	0.31	0.18	0.17	0.20	0.36
Udon Thani	-0.15	0.21	0.33	0.14	0.07	-0.20
Yasothon	0.32	0.11	-0.15	-0.26	-0.35	0.02

4.2 インデックス値の検討

インデックス値として設定されている降水量(期間ではなく、ここでは量)の妥当性を検討するため、各県における 7 月降水量および 8 + 9 月の 2 か月積算降水量に対する非超過確率降水量を正規分布、岩井法(対数正規)、グンベル法により計算した結果、渇水に対してはグンベル法が最も適合性が高かった(図 5)。グンベル法から得られた 7 月および 8 + 9 月の 2 か月積算降水量に対する再現年を表 4 に示す。Khon Kaen 県において実際販売されている保険インデックス値として設定されている降水量の再現確率を求めた結果、「早期渇水」: 7 月降水量 100mm では 3 年に 1 回、「渇水」: 8~9 月積算降水量 320mm では 4 年に 1 回、「深刻な渇水」: 8~9 月積算降水量 220mm では 30 年に 1 回の頻度で発生すると計算された。また、農家が受け取れる保険金の期待値は、5.75% となった。農家が支払う保険料はローンの 10% であるので、この割合は概ね妥当と考えられた。

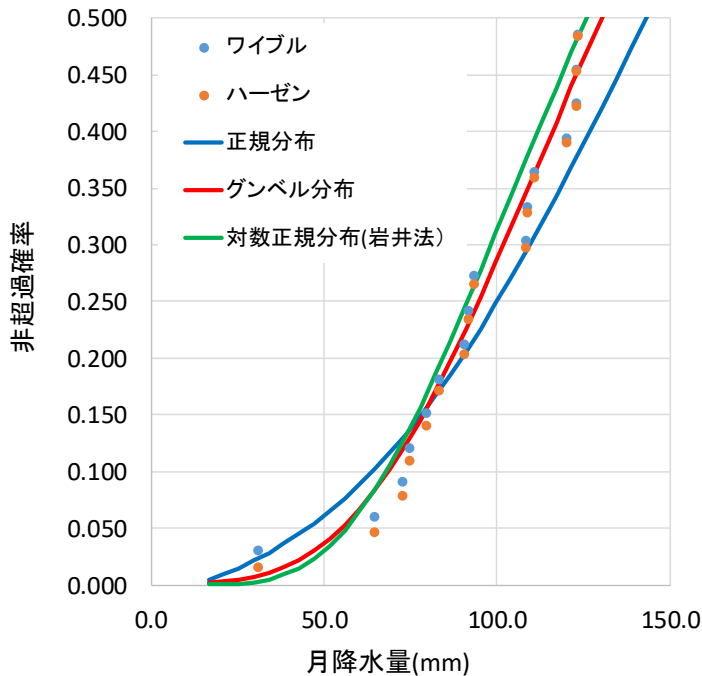


図5 7月降水量に対する確率分布関数のあてはめ

表4 コンケン県における7月および8+9月降水量の再現期間

再現年	7月(mm)	8+9月(mm)
50	41	208
30	48	224
20	55	239
16	59	248
12	65	260
10	67	269
8	74	281
5	87	311
4	95	328
3	107	354
2	130	407

4.3 農業被害が農家の世帯収入に与える影響の評価

天候インデックス保険の普及が滞っている要因の1つとして農家の『自己保険』的リスク回避が機能していることがあげられるが、実際、農家の環境適応能力についてはよくわかっていない。そこで、推計された農業被害額が実際の農家世帯収入にどの程度の影響があるかを評価するため、現地での農家世帯生計調査を行った。

現地での農家世帯生計調査はタイ東北部の農家65件に対して、2015年9月15日・18日・20日、2016年4月6日・8日、2016年9月8日の計6日間行った。農家世帯生計調査の方法は、現地の各農家に対してオーラルヒアリングにより項目ごとに説明と確認を取りながらアンケートを行ったため、正確なデータが得られたと考えられる。アンケートは農家の世帯構成、水利用状況、営農状況、家畜飼養状況、農業・農外収入およびその安定性、農業保険に関する質問、異常気象時の対応など様々な項目で構成されている。なお、raiはタイで一般に用いられる面積を表す単位で1rai=0.16haである。

農家全体で見ると一世帯あたりの平均世帯構成人数は4.2人で、就業者の人数は2.7人、平均年齢は44.7歳であった。平均所有農地面積は2.43haであり、灌漑農家で2.09ha、天水田農家で2.67haであった。生活用水の種類毎の利用率(重複回答可)は、水道水が80%、ボトルウォーターが72%、地下水が32%、雨水が16%であった。利用率が高かった水道水やボトルウォーターが生活用水として利用される理由の多くは、安定性や安全性のためであった。また、雨水以外の農業用水の種類毎の利用率は、ため池44%、地下水12%、灌漑用水40%であった。灌漑用水の利用率が高かった理由としては、今回の調査では水利用状況の把握に焦点を当てて作想的に一定数の灌漑農家を選抜してアンケートを行ったため、東北タイの平均灌漑農地面積率が7.6%程度であることを勘案すると実際の灌漑用水利用率はさらに低くなるものと考えられる。

また、全体の56%の農家がため池を所有し、家畜を持っている農家は全体の42%であった。ため池で養魚を行っている農家はごく少数であったが、家畜を飼養している農家のほとんどは売却して現金収入を得るためと回答し、緊急時の貯蓄財として機能していた。農業機械を所有している農家は80%を超

え、所有していないと回答した農家のほとんどが必要になった場合は賃借すると回答した。このことから、家畜を飼養する理由はかつてのように農業労役のためではなく、作物が不作となった場合のリスク分散としての意味合いが強くなっていると考えられる。

農家の平均世帯収入は 380,240 Baht/year であった。農業収入と農外収入別に見ると平均農業収入が 131,840 Baht/year、平均農外収入が 248,400 Baht/year であり、農業収入と農外収入の割合は約 1 : 2 であった。また、農業収入は安定していると回答した農家が 40% であったのに対して、農外収入は安定していると回答した農家は 70% を超えた。農家の子供世代の多くは、農業ではなく販売業や公務員などの職についており、毎月安定した収入が得られるようである。

2015 年の渇水時、何か問題が生じたと回答した農家は全体の 80% であり、多くの農家が渇水の被害にあっていた。中には 2015 年から 2016 年にかけての渇水の影響により、コメの収穫量が半減したと答えた農家もいた。渇水対策で最も多かったのが、栽培作物の変更や栽培スケジュールの変更である。また、76% の農家が農業保険を知っていると回答したが、500 Baht/rai で購入したいかという質問には全農家が『買わない』と回答した。10 分の 1 の価格の 50 Baht/rai で購入したいかという質問に対しても、なお 58% の農家が『買わない』と回答した。その大きな理由としては保険金が本当に支払われるか信頼ができないという回答が大半であった。

雨季作米の生産量変動による被害額が、農家世帯生計に対してどの程度の影響を与えるかを評価するために、農家世帯収入に占める被害額の割合を以下の式を用いて、各県毎に求めた。

$$\text{被害額の割合} = (\text{単位面積当りの被害額} \times \text{平均所有面積}) / \text{平均世帯収入} \quad (2)$$

平均所有農地は今回の農家世帯生計調査の結果である 2.43 ha を推計期間のすべての年度で使用した。図 5 に平均世帯収入の推移を示す。1999 年まではタイ国全体の値を示しており(農林水産省、2002)、2016 年は先述の世帯生計調査の結果である。平均世帯収入は推計期間内で大きく増加しているため、被害額の割合を求める際には各年度の平均世帯収入を使用した。データが不足している年度については線形近似値を使用した。図 6 に各県毎の農家世帯収入に占める被害額の割合の推移を示す。80 年代はいくつかの県で世帯収入の 20~40% にも及ぶ農業被害が見られた。しかし近年、農家世帯収入に占める被害額の割合は減少傾向にあり、その割合は 1994 年以降 10% に満たない。したがって、雨季作米の生産変動による被害額は、近年の農家世帯生計に大きな影響は与えないと考えられる。そのため、雨季作米を対象とする天候インデックス保険は加入の必要性自体が低いものと判断され、そのことが普及が滞っている一因であると考えられた。

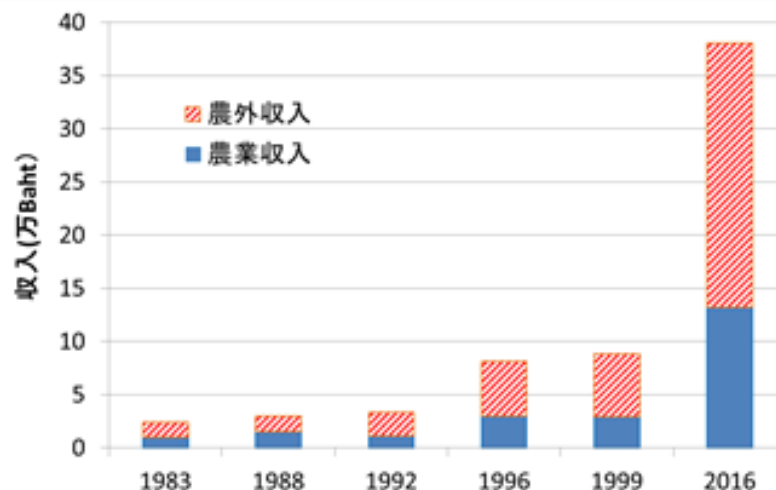


図 6 農業世帯収入の推移 (農業・農外収入別)

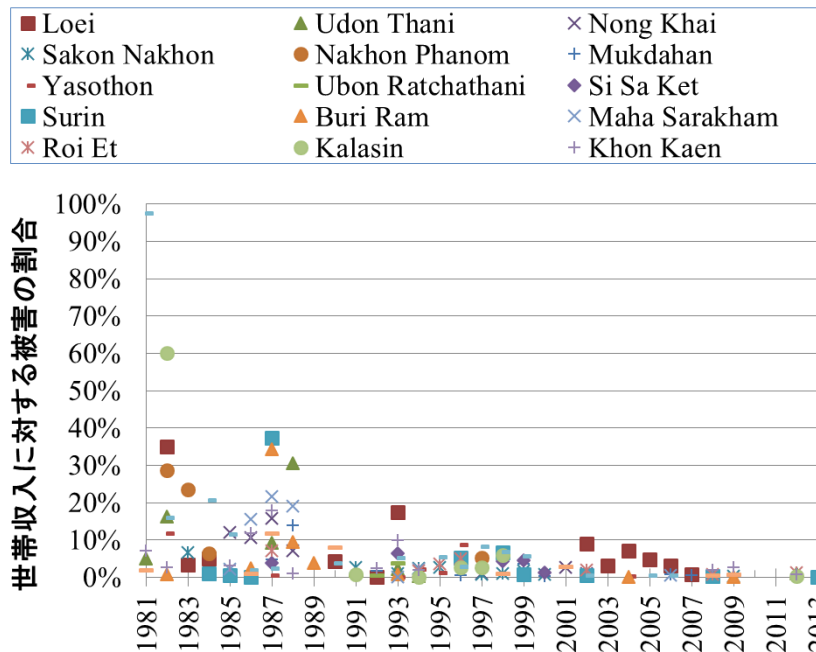


図7 世帯収入に対する被害割合の推移

また、タイの消費者物価指数は1988年から2016年にかけて約2.5倍となっており、それに対して、同期間において農家の世帯収入は約13倍になり、以前よりも農家の生活は相対的に豊かになっていると考えられる。今回の農家世帯生計調査では農家の世帯収入は農業収入：農外収入＝1：2であった。これは異常気象によって農家が最大で33%の収入を失う可能性があることを示唆しているが、農家の生活が豊かになっていることから、農業収入の減少が農家世帯生計に及ぼす影響は相対的に小さくなった。ゆえに、農家の相対的豊かさの向上も天候インデックス保険の普及が進まない要因の1つと考えられた。

一方、専業農家の世帯収入に占める雨季作米の被害額の割合は兼業農家に比べて大きく増加する。今回の調査では全体の24%の農家が専業農家であり、少数派ではあるが全世界帯収入を農業収入に依存する専業農家または大規模畑作農家にとっては天候インデックス保険の活用は有効であると考えられる。表5は単面積(1ha)あたりに得られる生産額と平均被害率を作物別にまとめたものである。また、コメを

表5 農地1haにおける作物別の農業生産額と被害率

作物 【転作農地割合】	平均生産額 (Baht/year)	コメとの比較	平均被害率 (%)	コメとの比較
コメ【100%】	37,424		1.84%	
サトウキビ【100%】	94,970	約2.5倍	8.41%	約4.6倍
キャッサバ【100%】	57,020	約1.5倍	4.79%	約2.6倍
トウモロコシ【100%】	47,688	約1.3倍	2.27%	約1.2倍
コメ【50%】	66,553	約1.8倍	4.15%	約2.3倍
サトウキビ【50%】	47,006	約1.3倍	2.38%	約1.3倍
キャッサバ【50%】	43,769	約1.2倍	1.56%	約0.8倍
トウモロコシ【50%】	76,429	約2.0倍	3.34%	約1.8倍
サトウキビ【50%】	68,991	約1.8倍	6.19%	約3.4倍
キャッサバ【50%】	51,730	約1.4倍	5.65%	約3.1倍
トウモロコシ【50%】				

100%生産した場合に対する比率も同表に示した。例えば、サトウキビを栽培した場合、単位面積当たりの生産額は2.5倍に増えるが、平均被害率も4.6倍に増加する。コメ生産農家と比較して、天候インデックス保険は大規模畑作農家に対するリスク回避手法としてより有効であると考えられる。

5. 結論

灌漑率が7.6%と低く気候変動に脆弱なタイ東北部を対象に、雨季米の生産に対する気候変動影響を評価し、適応策としての天候インデックス保険の可能性を評価した。重回帰モデルを用いて将来の単収変化を求めた結果、コンケン・マハサラカム・ロイエト県で6-8%の減収が推計された。東北タイ17県の3ヶ月積算降水量と米生産量の関係から、インデックス保険に使用されている7-9月降水量と米生産量の相関は高く、また設定降水量の再現期間からもインデックスの期間および値は概ね妥当であると判断された。

雨季作米の生産変動による被害額推計と農家世帯生計調査の結果から、農家世帯収入に占める被害額の割合は近年減少傾向であった。また、農家の生活が以前よりも豊かになっていることや、現地農家が独自のリスク分散手法を有していたことから農家世帯生計に対する農業被害の影響は小さいと考えられ、このことが天候インデックス保険の普及を妨げる要因の一つとして考えられた。一方で、専業農家の世帯収入に占める被害額の割合は兼業農家に比べて高く、全世帯収入を農業収入に依存する専業農家や被害額自体が大きくなる大規模経営農家にとっては、適切な保険設計により天候インデックス保険が有効となる可能性があると考えられた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム SATREPS「タイ国における統合的な気候変動適応戦略の共創推進に関する研究」(代表：沖大幹)および科研費(基盤 B：19H03069)の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 室屋有宏：タイ東北部における農民のリスク分散行動，調査と情報，Vol.9，pp.9-14，2004.
- 農林水産省：資料4 タイ国農業農村開発分野における協力の方向，平成14年度第1回農業農村整備部会国際小委員会，pp.14，2002
- 斉藤正彦：気候変動に対する適応策としての保険の活用--タイの稲作農家を対象とした天候インデックス保険の開発，海外投融資，Vol.19，pp.8-12，2010.
- 白岩立彦，中川博視，堀江武，松井勤，本間香貴：タイ稲作の生産変動実態ならびに降水量が生産変動に及ぼす影響，地球環境，Vol.6(2)，pp.207-215，2002.
- 内田春夫，福井捷朗，小林慎太郎，丸山利輔：タイ国における水稻生産量の変動に関与する自然的要因の分析，農業土木学会誌，Vol.49(5)，pp.389-396，1981.

1. 編集方針

「応用水文」は、「農業農村工学会 水文・水環境研究部会 規約」の下において、水文・水環境に関する学理と応用についての科学的研究を推進し、この分野の発展を期することを編集の基本方針とします。また、「応用水文」は、「論文編」(査読あり原稿)と「部会報告編」(査読なし原稿)から構成されます。このうち「論文編」(査読あり原稿)の原稿は、広く読まれている学術雑誌等に未発表であることが必要です。

2. 投稿資格

著者のうち少なくとも一名は水文・水環境研究部会の会員であることを投稿資格とします。ただし、招待原稿はこの限りではありません。

3. 原稿

原稿は、「農業農村工学会 水文・水環境研究部会シンポジウム」において発表されたものを対象とします。A4 サイズ 10 頁までで、題名の和文・英文、著者名・所属の和文・英文、abstract(250words 以内)、要旨(350 文字以内)、キーワード(5~7 個)、本文(原則 1 段組)の順とし、執筆に当たったの詳細な様式については、ホームページに掲載されている原稿論文テンプレート(http://www.jsidre.or.jp/suimon-mizukankyo_journal/)に従って下さい。

4. 掲載された論文等の著作権

「応用水文」に掲載された論文等の著作権(著作 財産権, copyright)は、水文水環境研究部会に帰属する。

5. 原稿提出先

水文・水環境研究部会事務局

6. 査読

編集委員会は、「論文編」に投稿された原稿について、「応用水文」に掲載されるにふさわしい内容であるかどうかを判定し、質的な向上をはかる目的で、複数(原則 2 名)の査読者による査読を行います。

査読は、原稿が部会誌「応用水文」としての体裁を整え、原稿中に重大な誤りがないようにするもので、良識ある建設的なものとします。なお、2 名の査読者の判定結果が「論文編」としては掲載不可であるが「部会報告編」としては掲載可となった原稿は、「部会報告編」に掲載します。

7. その他

論文の別刷は用意しませんが、希望者には印刷用 pdf ファイルを送付します。投稿から印刷までの手続き及び日程などの詳細は研究部会ホームページをご参照下さい。

(http://www.jsidre.or.jp/suimon-mizukankyo_journal/)

「応用水文」編集委員会

委員長

茨城大学農学部

黒田 久雄

委員 (研究部会現幹事)

寒地土木研究所

鵜木 啓二

岩手大学農学部

倉島 栄一

宇都宮大学農学部

松井 宏之

東京農工大学農学研究院

加藤 亮

農研機構農業農村工学研究所

吉田 武郎

新潟大学農学部

吉川 夏樹

石川県立大学

瀧本 裕士

内外エンジニアリング (株)

上野 裕士

大阪府立大学大学院生命環境科学研究科

堀野 治彦

神戸大学大学院農学研究科

多田 明夫

岡山大学大学院環境科学研究科

近森 秀高

九州大学大学院農学研究院

原田 昌佳

宮崎大学農学部

竹下 伸一

農業農村工学会水文・水環境研究部会規約

(名称)

第1条 この部会は、農業農村工学会水文・水環境研究部会と称する。

(目的)

第2条 この部会は、水文・水環境に関する学理と応用についての科学研究を推進し、この分野の飛躍的な発展を期するものである。

(事業)

第3条 この部会は、その目的の達成のために次の事業を行う。

- (1)研究発表会，討論会，見学会等の開催
- (2)共同研究の実施
- (3)研究資料の収集，配布
- (4)その他必要な事項

(部会員)

第4条 この部会は、農業農村工学会会員の中で、とくに水文・水環境について研究しようとする者であって、この部会の趣旨に賛同し入会を希望するものをもって構成する。但し、農業農村工学会会員以外で入会を希望する者については、学会員の推薦があれば、学会員に準じて扱う。

- 2 部会員の入退会は自由であるが、部会長に申し出ることが必要である。
- 3 部会員は必要に応じて部会費を負担する。

(役員)

第5条 この部会に次の役員を置く。

- (1)部会長 1名
 - (2)幹事（会計監査を含む）若干名
- 2 部会長は部会を代表する
 - 3 幹事は部会長を補佐し、部会運営上必要な企画，事業，その他の会部を担当する。
 - 4 役員の出選は部会員の互選とする。
 - 5 役員任期は2年とし再任を妨げない。

(幹事会)

第6条 この部会に幹事会を設け、実質的運営に当たる。

- 2 幹事会は、部会長と幹事によって構成され、部会長が必要に応じて召集する。

(経費)

第7条 この部会の経費は、農業農村工学会研究部会交付金、部会費及び寄付金などによる。

(事務局)

第8条 部会長の所属機関内に事務局を置き、運営上必要な事務を行う。

(所在地)

第 9 条 この部会は次の所在地に置く。

茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1 茨城大学農学部

付則

この規約は昭和 63 年 4 月 26 日より発効する。また、本部会の発足は昭和 63 年 4 月 26 日である。

(平成 14 年 8 月 8 日一部改正)

(平成 19 年 6 月 29 日一部改正)

(平成 26 年 10 月 31 日一部改正)

(平成 28 年 8 月 9 日一部改正)

(平成 30 年 5 月 25 日一部改正)

応用水文 第32号

Applied Hydrology No.32

2020年3月27日発行

編集兼発行者 農業農村工学会
水文・水環境研究部会

責任者 水文・水環境研究部会長
黒田 久雄
(茨城大学農学部)
茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1

印刷所 株式会社コームラ
岐阜県岐阜市三輪ふりとびあ3
TEL 058-229-5858