

2026年9月14日(月)

一般セッション(口頭講演) | 気候変動・地球環境

10:40 ~ 11:10 | 2Fホール(2F)

[OS-02] 気候変動・地球環境

座長: 田代 悠人(秋田県立大学 生物資源科学部)

10:40 ~ 10:55

[OS-02-01] 全国版d4PDFダウンスケーリングデータを用いた日本の将来の水資源量解析と既往データセットとの比較

*田坂 彰英¹、田中 賢治²、峠 嘉哉³、萬 和明² (1. 京都大学大学院工学研究科、2. 京都大学防災研究所、3. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター)

10:55 ~ 11:10

[OS-02-02] 北東シベリア・コリマ川における永久凍土融解に伴う風化由来イオン(Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-})の濃度上昇：長期傾向および熱波による極端な高濃度化

*田代 悠人¹、檜山 哲哉²、金森 大成³、Lebedeva Lyudomila⁴、朴 昊澤、Makarieva Olga⁶、Nikitina Polina⁶、Fassnacht Steven⁷、Zemlianskova Anastasiia⁶、Zhunusova Oksana⁶、鈴木 和良⁵ (1. 秋田県立大学 生物資源科学部、2. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所、3. 神戸学院大学 経営学部、4. メリニコフ永久凍土研究所、5. 海洋研究開発機構 地球環境研究部門、6. サンクトペテルブルク大学、7. コロラド大学)

2026年9月15日(火)

一般セッション(口頭講演) | 流出/降雪・融雪/水災害

9:00 ~ 10:00 | 2Fホール(2F)

[OS-06] 流出/降雪・融雪/水災害

座長:菅原 快斗(京都大学 防災研究所)

9:00 ~ 9:15

[OS-06-01] 物理的パラメータに基づく貯留・流出関係式の開発と分布型水文モデルへの適用

*菅原 快斗¹、佐山 敬洋¹ (1. 京都大学 防災研究所)

9:15 ~ 9:30

[OS-06-02] 気象庁タンクモデルとCaMa-Floodの結合によるバックウォーターを考慮した内水氾濫解析

*太田 琢磨¹、池田 翔¹、山崎 大² (1. 気象研究所 応用気象研究部、2. 東京大学 生産技術研究所)

9:30 ~ 9:45

[OS-06-03] 河川氾濫に伴う高速流浸水に関するLarge-Eddy Simulations—市街地内の水流速および建物に作用する水圧力の分析—

*石田 泰之¹、濱嶋 亮登¹、平賀 優介¹、持田 灯¹ (1. 東北大学)

9:45 ~ 10:00

[OS-06-04] 東京大学工学部社会基盤学科における集中型演習の取り組み：哲学的抽象論の議論をいかに深めるか？

*木野 佳音¹、北原 優²、栗原 遼大³、安田 昌平⁴、小林 里瑳⁵、鈴木 貴大⁶、松葉 義直⁷、南出 将志⁶、森本 時生⁶、渡邊 萌⁶、デルバリオアルバレ ダニエル⁷、デュック ル⁶、高橋 佑弥⁶、長山 智則⁶ (1. 東京大学 生産技術研究所、2. 北海道大学 大学院工学研究院、3. 長岡技術科学大学 工学研究院環境社会基盤系、4. 神戸大学 大学院海事科学研究科、5. 東京理科大学 創域理工学部、6. 東京大学 大学院工学系研究科、7. 東京大学 大学院新領域創成科学研究科)

一般セッション(口頭講演) | 国際交流セッション

16:20 ~ 17:50 | 2Fホール(2F)

[IS] 国際交流セッション

座長:手計 太一(中央大学 理工学術院 社会理工学部 都市環境学科)

16:20 ~ 16:35

[IS-01] CLASSIFYING SEQUENTIAL DEVELOPMENT OF FLOOD WAVE TYPES IN A SINGLE FLOOD EVENT

*Kim Dongsu¹ (1. Civil & Environmental Engineering, Dankook University)

16:35 ~ 16:50

[IS-02] A Hybrid Approach for River Flood Forecasting by Combining a Hydrodynamic Flow Model and Artificial Neural Networks

*Kyung Soo Jun¹、Jae Gyeong Lee¹、Li Li¹ (1. Sungkyunkwan University)

16:50 ~ 17:05

[IS-03] Evaluating Water Reuse and Pico-scale Hydropower in High-rise Buildings: A Water-Energy-Carbon Nexus Approach

*Park Daeryong¹、Kim Sanha¹、Jang Juyeon¹、Shin Seoyoung¹、Kim Jieun¹、Kwon Sojeong¹、Kang Hyeonmin¹ (1. Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University)

17:05 ~ 17:20

[IS-04] Assessment of Hydraulic Stability for Floodplain in Compound Meandering Channel

*Kim Young Do¹ (1. Division of Smart Infrastructure Engineering, Myongji University)

17:20 ~ 17:35

[IS-05] Concurrent Snow Depth and Snow Load Measurements for Snow Water Equivalent Estimation under Maritime Wet-Snow Conditions in South Korea

*Chung Gunhui¹、Lee Hyeongjoo²、Lee Hyunsuk³、Song Inhong⁴ (1. Department of Civil Engineering, Hoseo University、2. Research Institute for Fine Dust and Carbon Neutrality, Hoseo University、3. HQTech Co., Ltd.、4. Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University)

17:35 ~ 17:50

[IS-06] Duration- and Rarity-Dependent Scaling of Extreme Precipitation with Warming: Insights from Stochastic Storm Transposition of Large Climate Ensembles

*Wasitha Randeepa Ranga Dilshan¹、Yusuke Hiraga¹、Daniel Wright² (1. Department of Civil and Environmental Engineering, 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison)

2026年9月16日(水)

一般セッション(口頭講演) | 森林水文学

9:00 ~ 10:15 | 2Fホール(2F)

[OS-07] 森林水文学

座長:井手 淳一郎(公立千歳科学技術大学 理工学部)

9:00 ~ 9:15

[OS-07-01] 北方冷温帯シラカンバ林における樹冠通過雨中溶存有機物の時空間変動に関する解析

*井手 淳一郎¹、小林 稜英¹、加藤 雅悠¹、小山田 凌¹、遠藤 いず貴^{1,2,3}、西村 裕志⁴、大橋 瑞江³ (1. 公立千歳科学技術大学、2. 北海道立総合研究機構、3. 兵庫県立大学、4. 京都大学)

9:15 ~ 9:30

[OS-07-02] 水の蒸発メカニズム再考

—樹冠遮断蒸発は既存理論の限界を浮き彫りにしている—

*村上 茂樹¹ (1. 森林総合研究所 九州支所)

9:30 ~ 9:45

[OS-07-03] タワー観測によるスギ壮齢人工林の樹冠通過雨量の鉛直分布と降雨・気象条件の影響

*安川 律基¹、五味 高志¹、小谷 亜由美¹、南光 一樹²、村上 茂樹³ (1. 名古屋大学大学院 生命農学研究科、2. 東京農工大学 大学院農学研究院、3. 森林総合研究所)

9:45 ~ 10:00

[OS-07-04] 堆積岩山地の森林小流域における降雨前の乾湿状態の違いが洪水流出規模に及ぼす影響

*小島 永裕¹、谷 誠² (1. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター、2. 元京都大学大学院農学研究科)

10:00 ~ 10:15

[OS-07-05] 豪雨時の空気押し出し流仮説とリチャーズ式への組み込みに関する数値実験

*白木 克繁¹、森貞 完太¹ (1. 東京農工大学大学院)

一般セッション(口頭講演) | 降水

10:25 ~ 11:40 | 2Fホール(2F)

[OS-08] 降水

座長:大野 哲之(関西大学社会安全学部)

10:25 ~ 10:40

[OS-08-01] 線状降水帯をもたらす大気の川の物理的特徴

*平賀 優介¹、只木 想太¹、田原 亮太郎¹ (1. 東北大学大学院工学研究科)

10:40 ~ 10:55

[OS-08-02] 梅雨前線および前線低気圧に伴う水蒸気同位体比の変動

*田上 雅浩¹、一柳 錦平²、朴 昊澤³ (1. 気象庁気象研究所、2. 熊本大学大学院先端科学研究部 (理学系)、3. 国立研究開発法人海洋研究開発機構)

10:55 ~ 11:10

[OS-08-03] インド亜大陸北東部の雨量計・気象レーダーデータの利用可能性について

*上米良 秀行¹ (1. 防災科学技術研究所)

11:10 ~ 11:25

[OS-08-04] デュアルドップラー解析を用いた線状対流系における上昇流のスケール階層構造

*國見 純太郎¹、山口 弘誠² (1. 京都大学大学院工学研究科、2. 京都大学防災研究所)

11:25 ~ 11:40

[OS-08-05] 雨量計からの降水場復元のためのアナログ法：データ同化と推薦システムへの応用

*塩尻 大也¹、武藤 裕花¹、岡崎 淳史¹、小槻 峻司¹ (1. 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター)

一般セッション(口頭講演) | 流域水管理・開発/水資源・水環境社会学

14:40 ~ 16:10 | 2Fホール(2F)

[OS-10] 流域水管理・開発/水資源・水環境社会学

座長:渡部 哲史(九州大学)

14:40 ~ 14:55

[OS-10-01] 河川水温の将来変化の地域的特徴の分析

*星野 剛¹、西村 宗倫² (1. 寒地土木研究所、2. 国土技術政策総合研究所)

14:55 ~ 15:10

[OS-10-02] 政府による災害対策によって各世帯の生計向上投資がどう変化するのか
～ガーナ沿岸の海岸災害被災地を対象としたケーススタディ～*森 利紗子¹、川崎 昭如^{1,2} (1. 東京大学大学院工学系研究科、2. 東京大学未来ビジョン研究センター)

15:10 ~ 15:25

[OS-10-03] SSPシナリオを用いた2099年までの二国間仮想水貿易予測

*津田 和樹¹、佐野 太一²、飯泉 仁之直³、沖 大幹¹ (1. 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻、2. 神戸大学大学院工学系研究科、3. 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構)

15:25 ~ 15:40

[OS-10-04] 中小規模流域における水循環の客観的評価に向けた課題整理

*井垣 智貴¹、山崎 由理²、清水 克之² (1. 鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科、2. 鳥取大学農学部)

15:40 ~ 15:55

[OS-10-05] 将来変化を踏まえた農業用ため池の管理・活用に関する市町村間比較

*渡部 哲史¹、五三 裕太² (1. 九州大学、2. 山梨大学)

15:55 ~ 16:10

[OS-10-06] 南海トラフ地震後の洪水リスクと将来需要を考慮した治水投資判断モデルの構築

*川村 泰誠¹、川崎 昭如² (1. 東京大学大学院 工学系研究科、2. 東京大学未来ビジョン研究センター／デジタルオブザーバトリ研究推進機構)

一般セッション(口頭講演) | 河川・湖沼/リモートセンシング

16:20 ~ 17:05 | 2Fホール(2F)

[OS-11] 河川・湖沼/リモートセンシング

座長:辻本 久美子(岡山大学)

16:20 ~ 16:35

[OS-11-01] 土壌放射伝達モデルにおける鉛直不均質性とcoherent/incoherent近似の影響評価

*辻本 久美子¹、太田 哲²、開発 一郎³ (1. 岡山大学、2. 研究技術開発支援機構、3. 広島大学)

16:35 ~ 16:50

[OS-11-02] 浅い富栄養湖を対象とした衛星画像解析と機械学習の統合によるメタン排出量推定

*小田 理人¹、楊 偉²、岩田 拓記³ (1. 千葉大学大学院融合理工学府、2. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター、3. 信州大学理学部)

16:50 ~ 17:05

[OS-11-03] 河道測量横断面を用いたCaMa-Floodの水位バイアスの改善

*日置江 桂¹、山崎 大² (1. 株式会社ウェザーニューズ、2. 東京大学生産技術研究所)

一般セッション(口頭講演) | 気候変動・地球環境

2026年9月14日(月) 10:40 ~ 11:10 | 2Fホール(2F)

[OS-02] 気候変動・地球環境

座長: 田代 悠人(秋田県立大学 生物資源科学部)

10:40 ~ 10:55

[OS-02-01] 全国版d4PDFダウンスケーリングデータを用いた日本の将来の水資源量解析と既往データセットとの比較

*田坂 彰英¹、田中 賢治²、峠 嘉哉³、萬 和明² (1. 京都大学大学院工学研究科、2. 京都大学防災研究所、3. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター)

10:55 ~ 11:10

[OS-02-02] 北東シベリア・コリマ川における永久凍土融解に伴う風化由来イオン(Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-})の濃度上昇：長期傾向および熱波による極端な高濃度化*田代 悠人¹、檜山 哲哉²、金森 大成³、Lebedeva Lyudomila⁴、朴 昊澤、Makarieva Olga⁶、Nikitina Polina⁶、Fassnacht Steven⁷、Zemlianskova Anastasiia⁶、Zhunusova Oksana⁶、鈴木 和良⁵ (1. 秋田県立大学 生物資源科学部、2. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所、3. 神戸学院大学 経営学部、4. メリニコフ永久凍土研究所、5. 海洋研究開発機構 地球環境研究部門、6. サンクトペテルブルク大学、7. コロラド大学)

全国版 d4PDF ダウンスケーリングデータを用いた日本の将来の水資源量解析と
既往データセットとの比較

京都大学大学院工学研究科 ○田坂彰英
京都大学防災研究所 田中賢治
千葉大学環境リモートセンシング研究センター 峠嘉哉
京都大学防災研究所 萬和明

1. はじめに

気候変動の影響は水資源分野でも懸念されている。例えば田中ら¹⁾や田中²⁾は年降水量から年蒸発散量を差し引いた年水資源賦存量を指標に、日本域を対象として気候モデルの現在気候と将来気候下の水資源量を算出し、将来気候下では水資源量が減少する地域・流域があることを示している。

先行研究の課題として、いずれも当時の最新の気候予測データセットに基づく評価が行われており、データセット間の水資源量評価結果の違いに言及している研究は少ない点が挙げられる。今後も新しいデータセットの公開や水資源量評価手法の精緻化が進んでいくと考えられるが、わが国の水資源分野の気候変動適応策を策定するにあたっては、各研究結果のコンセンサスを取るために研究間の相違点を明らかにすることも重要な課題である。

以上の背景の下、本研究では、最新の気候予測データセットの全国版 d4PDF ダウンスケーリングデータ³⁾を用いて水資源賦存量を評価し、さらに田中ら¹⁾の d4PDF 領域モデル実験⁴⁾ならびに田中²⁾の全球 150 年連続実験データ⁵⁾を用いた評価結果と比較することで、データセット間の評価結果の相違点を明らかにする。

2. 使用データと評価手法

本研究で利用・比較する気候予測データセットを表-1 に示す。水資源賦存量は、これらのデータセットの気象要素を陸面過程モデル SiBUC⁶⁾へ入力して年蒸発散量を計算し、年降水量から差し引くことで評価する。気候変動影響評価は、d4PDF_5km と d4PDF_20km は気候シナリオごとのアンサンブル平均値の差、150 年連続ランは 1950-2009 年の平均値と 2070-2099 年の平均値の差をもとに行う。なお、解析時の格子は、d4PDF_5km と 150 年連続ランはそれぞれ最近傍法と逆距離荷重法で共通の 5km メッシュ格子へ格子変換する。d4PDF_20km は 20km メッシュ格子で解析を行った後、比較のために 5km メッシュ格子へバイリニア法で空間内挿する。

3. 結果とまとめ

図-1 に、表-1 のデータセットごとの将来気候と現在気候の年水資源賦存量の差を示す。本研究で新たに解析した d4PDF_5km の 4K 上昇実験（図-1(b)）では、道央をはじめとした北海道と近畿から九州地方太平洋側沿岸部、九州地方などで過去実験に比べて年水資源賦存量が増加している。紙面の都合上詳細は割愛するが、北海道では 12-4 月、先に挙げたその他の地域では 7-10 月の増加が顕著で、その要因は降水量の増加である。一方、東北から山陰地方にかけての日本海側山間部では水資源賦存量の減少が目立っており、特に 11-2 月の減少が顕著で、その要因は降水量の減少である。

表-1 本研究で利用・比較する気候予測データセット諸元

	全国版d4PDF ダウンスケーリングデータ	d4PDF領域モデル実験	全球150年連続実験データ
本研究における略称	d4PDF_5km	d4PDF_20km	150年連続ラン
既往研究	新規データセット	例えば田中ら（2019）	例えば田中（2021）
データセット作成手法	60km解像度のd4PDF全球モデル実験を 5km解像度に力学的ダウンスケーリング	60km解像度のd4PDF全球モデル実験を 20km解像度に力学的ダウンスケーリング	20km解像度の 全球大気大循環モデル実験
アンサンブルメンバ数と 気候シナリオ	過去実験12メンバ×60年, 2K上昇実験12メンバ×60年, 4K上昇実験12メンバ×60年	過去実験50メンバ×60年, 4K上昇実験90メンバ×60年 (60年のうち、25年を利用)	1メンバのみ 1950年から2099年まで、 4K上昇シナリオを計算
バイアス補正	なし		

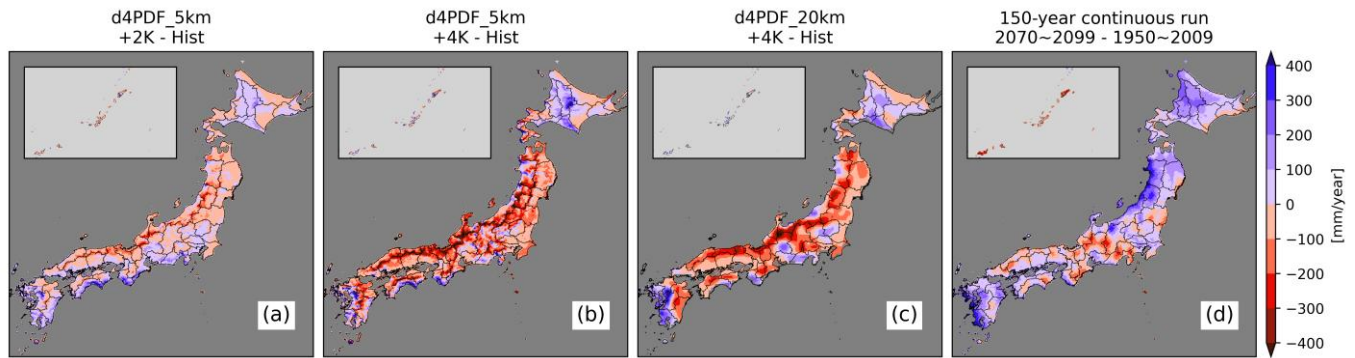


図-1 気候予測データセットごとの将来気候と現在気候の年水資源賦存量の差. (a)d4PDF_5km の 2K 上昇実験と過去実験の差, (b)同 4K 上昇実験と過去実験の差, (c)d4PDF_20km の 4K 上昇実験と過去実験の差. (a)-(c)はいずれもアンサンブル平均値間の差. (d)150 年連続ランの 2070-2099 年平均値と 1950-2009 年平均値の差.

気候予測データセット間の評価結果を比較すると, d4PDF_5km の 4K 上昇実験 (図-1(b)) と d4PDF_20km の 4K 上昇実験 (図-1(c)) の過去実験に対する年水資源賦存量の増減傾向は概ね一致している. 具体的には, 両データセット間で年水資源賦存量の増減の符号が一致しているメッシュ格子は全格子の 80%で, 増減値の相関係数は 0.63 である. また, 図-1(b)と図-1(c)の比較からは, d4PDF_5km の方が d4PDF_20km よりも山岳地形を細かく表現していることが読み取れる. d4PDF_5km の評価結果は, d4PDF_20km のそれを高解像度化したものと言える.

一方, 150 年連続ランの世紀末と過去の差 (図-1(d)) は d4PDF_5km の 4K 上昇実験と過去実験の差とは明らかに異なる傾向を示している. 両データセットの違いは冬季の日本海側で d4PDF_5km は降水量の減少を, 150 年連続ランは増加を予測している点や, 梅雨期の西日本で d4PDF_5km は降水量の減少を予測する地域が多いが, 150 年連続ランは多くの地域で増加を予測している点などにあり, 日本の特徴的な気象条件で予測傾向が異なっている. その要因としては, 例えば 150 年連続ランは 1 メンバのみの実験のため, d4PDF シリーズと比較して予測傾向に不確実性を伴う可能性などが考えられる.

今後, 水資源分野の気候変動適応策を策定していくためには, このような気候予測データセット間の水資源量評価結果の違いについても議論を深める余地がある.

【謝辞】本研究は, 文部科学省気候変動予測先端研究プログラム領域課題 4 (JPMXD0722678534) と科学研究費補助金 (24H00336) の成果により実施された. 謝意を示す.

参考文献

- 1) 田中賢治, 田中茂信, 正木隆大: 気候変動が日本の水文循環に及ぼす影響評価-d4PDF の活用-, 水文・水資源学会 2019 年度研究発表会要旨集, 2019
- 2) 田中賢治: 超高解像度気候モデルと将来土地利用変化を用いた日本の水資源量の長期変化予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.77, No.2, pp.211-216, 2021
- 3) Kawase, H., *et al.*, Identifying Robust Changes of Extreme Precipitation in Japan From Large Ensemble 5-km-Grid Regional Experiments for 4K Warming Scenario. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 128(18), 2023
- 4) Mizuta, R., *et al.*, Over 5,000 Years of Ensemble future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(7), 1383-1398, 2017
- 5) Mizuta, R., *et al.*, Extreme Precipitation in 150-year Continuous Simulations by 20-km and 60-km Atmospheric General Circulation Models with Dynamical Downscaling over Japan by a 20-km Regional Climate Model, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 100(3), 523-532, 2022
- 6) Tanaka, K., Development of the new land surface model scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, *doctoral dissertation*, Kyoto University, 2004
- 7) Yoroazu, K., *et al.*, The Simple Biosphere including Urban Canopy model (SiBUC): Development and Verification, in prep.

キーワード: Water Resources, Climate Change, d4PDF, Long-Term Analysis, Japan

北東シベリア・コリマ川における永久凍土融解に伴う風化由来イオン(Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-})の濃度上昇：
長期傾向および熱波による極端な高濃度化

秋田県立大学 生物資源科学部	○田代悠人
名古屋大学 宇宙地球環境研究所	檜山哲哉
神戸学院大学 経営学部	金森大成
Melnikov Permafrost Institute	L. Lebedeva
海洋研究開発機構 地球環境研究部門	朴 昊澤
St. Petersburg State University	O. Makarieva
St. Petersburg State University	P. Nikitina
Colorado State University	S. R. Fassnacht
St. Petersburg State University	A. Zemlianskova
St. Petersburg State University	O. Zhunusova
海洋研究開発機構 地球環境研究部門	鈴木和良

1. はじめに

近年の北極圏における急速な気温上昇は、海氷の減少や降水量の増加を招くとともに、陸域では永久凍土の融解を加速させている。永久凍土の融解は活動層（夏季に融解する表層土壌層）の深化や地下水貯留量の増大をもたらし、北極域河川の水文学的・生物地球化学的プロセスに大きな変容を及ぼす。例えば、永久凍土の融解に伴い鉱物層が露出することで、活動層内の化学的風化が促進されることが指摘されている。実際、北米やシベリアの河川では、風化由来イオンであるカルシウムイオン (Ca^{2+})、マグネシウムイオン (Mg^{2+})、硫酸イオン (SO_4^{2-}) の濃度や負荷量が長期的に上昇傾向にあることが報告されてきた¹⁾。しかし、既存の河川水質モニタリングの多くは河口付近での観測に限定されている。そのため、河口の水質変化から「流域全体で一様に永久凍土融解が進行している」という全論的な考察に留まる傾向にあり、広大な流域内のどのエリアがこれらの成分の流出に寄与しているかという空間的なホットスポットの詳細は不明であった。特に連続永久凍土帯に位置する北東シベリアのコリマ川では、風化由来イオン負荷量が近年増加傾向にあると報告されているものの²⁾、そのホットスポットや駆動メカニズムは十分に解明されていなかった。そこで本研究では、1980年から2022年までの40年以上にわたるコリマ川の河川水質データに加え、気温、降水量、地温、活動層厚 (ALT) などの水文気象データを統合的に解析した。本発表では、上記イオン濃度の長期変動と流域内の水文気象データとの関連性を明らかにすることで、流域内の主要なホットスポットや駆動メカニズム、ならびに熱波年における水質と陸域環境の特異的な応答について報告する。なお本内容は2026年3月にGlobal Biogeochemical Cycles誌に掲載された内容に基づくものである³⁾。

2. 対象流域ならびに使用データ

コリマ川は、オホーツク海北方に広がる北東シベリアを代表する大河川である（流域面積：約 650,000 km²）。南側のコリマ山脈を水源とし、中下流域に広がるコリマ低地を北流し、最終的に東シベリア海へと注ぐ。流域全体の年平均気温は-10.7°C、年平均降水量は約 330 mm であり、流域全域が連続永久凍土帯（凍土被覆率 90%以上）に属している。特にコリマ低地には「Yedoma」と呼ばれる含水率が高い永久凍土が分布している⁴⁾。

コリマ川下流のKolymskoyeにおける風化イオン (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) の濃度データ（1980–2022）は、世界の水質モニタリングプラットフォームであるGlobal Environment Monitoring System for Freshwater (GEMStat) から取得した。観測は例年4月から10月にかけて概ね月1回の頻度で実施されている。また流域内の気温と降水量の解析には、Global Historical Climatology Network (GHCN) v4 (0.5° × 0.5°) および Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) v2.8 (0.1° × 0.1°) を用いた。さらに、同期間の上流・中流・下流の気象観測地点におけ

る深度別（20cm、40cm、80cm）の地温データ、および下流域の活動層厚観測データ⁵⁾についても併せて解析を行った。

3. 結果と考察

1980年から2022年にかけて、コリマ川における Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} の年平均濃度は有意な上昇傾向を示し、2020年にピークに達した。また流域内の年平均気温は全域で上昇傾向にあるが、特に北側のコリマ低地で顕著であり、同地域では夏季（7-9月）の降水量も有意に増加していた。また地温に関しても、南側のコリマ山脈では融解期の地温（5-10月）には有意な上昇傾向が見られなかったのに対し、北側のコリマ低地では有意な上昇傾向が認められ、この傾向は特に活動層深部（80 cm 深度）で顕著であった。これらの結果は、流域内でも特にコリマ低地において、気温上昇に伴う永久凍土（Yedoma）の融解が進行していることを示唆する。実際、コリマ低地で観測された活動層厚も有意な深化傾向を示した。さらに、コリマ川における $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 濃度（化学的風化強度の指標）の長期変動は、コリマ低地における 80 cm 地温および活動層厚と有意な正の相関関係を示した（図-1）。この結果は、コリマ低地の Yedoma 融解によって未風化の鉱物が新たに露出し、活動層深部での化学的風化が進んだことで、河川へのイオン流出が増大したことを示唆する。

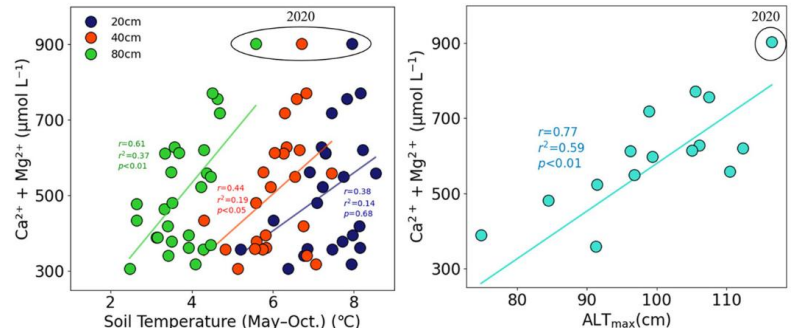


図-1 コリマ川における $\text{Ca} + \text{Mg}$ 濃度と、コリマ低地における深度別地温(左)および活動層厚(右)との相関関係

丸枠は記録的な熱波を観測した 2020 年の値を示している。

また各成分の年平均濃度がピークに達した 2020 年は、北東シベリアで冬から春にかけて記録的な熱波が発生していた。同年、コリマ川流域における冬季（1-3 月）の平均気温は、平年値と比較して 10℃以上も高い異例の値を記録した。さらにコリマ低地では、深さ 80 cm における融解期平均地温が過去最高の 5.6℃（平均：3.8℃）に達し、活動層厚も過去最大の 116.5cm（平均：100.3 cm）を記録した。これらの結果は、冬から春にかけての強烈な熱波が夏季の極端な地温上昇と Yedoma 融解を引き起こし、多量の風化由来イオン流出につながったことを示している。すなわち、長期的な温暖化だけでなく、熱波のような極端現象もまた、北極圏河川における風化由来イオン流出を加速させる重要な誘因であることが示唆された。

【謝辞】

本研究は、以下の研究助成の支援を受け実施されました。記して感謝の意を表します。

- ・ JSPS 科研費 JP22H03758
- ・ JSPS 科研費 JP19H05668
- ・ 北極域研究強化プロジェクト (ArCS-3) JPMXD1720251001
- ・ Saint Petersburg State University, research project 124032900007 - 8
- ・ Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, research project 126020516689 - 6

【参考文献】

- 1) 例えば、Toohey et al., Multidecadal increases in the Yukon River Basin of chemical fluxes as indicators of changing flowpaths, groundwater, and permafrost. *Geophys. Res. Lett.* 43(12) 120–130, 2016.
- 2) Wang et al., Climate warming enhances chemical weathering in permafrost-dominated eastern Siberia. *Science of the Total Environment*, 906, 167367, 2024.
- 3) Tashiro et al., Long-term increases in Ca^{2+} , Mg^{2+} , and SO_4^{2-} concentrations in the Kolyma River (1980–2022) due to Yedoma degradation. *Global Biogeochemical Cycles*, 40, e2025GB008825, 2026.
- 4) Schirrmeister et al., Yedoma: Late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of Beringia. In *Encyclopedia of quaternary science* (2nd ed., pp. 452–552), 2013.
- 5) Streletskiy, Thaw depth measurements from the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) project for site ‘Lake Akhmel, Kolyma’ (R21), North East Siberia, Russia from 1996–2018 [Dataset], 2019.

キーワード：Arctic River Biogeochemistry, Climate Change, Permafrost Degradation, Chemical Weathering

一般セッション(口頭講演) | 流出/降雪・融雪/水災害

2026年9月15日(火) 9:00 ~ 10:00 | 2Fホール(2F)

[OS-06] 流出/降雪・融雪/水災害

座長:菅原 快斗(京都大学 防災研究所)

9:00 ~ 9:15

[OS-06-01] 物理的パラメータに基づく貯留・流出関係式の開発と分布型水文モデルへの適用

*菅原 快斗¹、佐山 敬洋¹ (1. 京都大学 防災研究所)

9:15 ~ 9:30

[OS-06-02] 気象庁タンクモデルとCaMa-Floodの結合によるバックウォーターを考慮した内水氾濫解析

*太田 琢磨¹、池田 翔¹、山崎 大² (1. 気象研究所 応用気象研究部、2. 東京大学 生産技術研究所)

9:30 ~ 9:45

[OS-06-03] 河川氾濫に伴う高速流浸水に関するLarge-Eddy Simulations－市街地内の水流速および建物に作用する水圧力の分析－

*石田 泰之¹、濱嶋 亮登¹、平賀 優介¹、持田 灯¹ (1. 東北大学)

9:45 ~ 10:00

[OS-06-04] 東京大学工学部社会基盤学科における集中型演習の取り組み：哲学的抽象論の議論をいかに深めるか？

*木野 佳音¹、北原 優²、栗原 遼大³、安田 昌平⁴、小林 里瑳⁵、鈴木 貴大⁶、松葉 義直⁷、南出 将志⁶、森本 時生⁶、渡邊 萌⁶、デルバリオアルバレ ダニエル⁷、デュック ル⁶、高橋 佑弥⁶、長山 智則⁶ (1. 東京大学 生産技術研究所、2. 北海道大学 大学院工学研究院、3. 長岡技術科学大学 工学研究院環境社会基盤系、4. 神戸大学 大学院海事科学研究科、5. 東京理科大学 創域理工学部、6. 東京大学 大学院工学系研究科、7. 東京大学 大学院新領域創成科学研究科)

物理的パラメータに基づく貯留・流出関係式の開発と分布型水文モデルへの適用

京都大学防災研究所 ○菅原快斗

京都大学防災研究所 佐山敬洋

1. はじめに

日本の洪水予測に広く用いられている **Kinematic Wave** モデルは、山地斜面における流出機構を側方の飽和・不飽和浸透流に基づいて簡便に記述する。近年では、**Richards** 式と同様のパラメータで計算を行える **Kinematic Wave** モデルも提案されており、その物理性を向上させるための改良が進んでいる。しかし、このような側方浸透流を洪水時の主たる出水とするモデルでは、飽和透水係数を実態よりもオーダー単位で大きくしなければ洪水流出を再現できないといった課題が残っている。現地の土壌物性値といったパラメータを用いて洪水流出を再現可能な真に物理的な降雨流出モデルの開発には、より実態に即したプロセス表現が求められる。

これに対し、谷²⁾は洪水時の流出応答は側方浸透流ではなく鉛直不飽和浸透によってもたらされると主張している。すなわち、降雨流出変換は表層土層の降下浸潤過程が担い、側方方向の輸送は風化基盤境界付近のパイプ・フラクチャーによって速やかに行われる。このような仮定の下で、谷²⁾が開発した鉛直一次元 **Richards** 式に基づく **VZ** モデルは、現地で測定された土壌物性値に近い範囲で洪水時の流出応答を再現することに成功している。一方で、このモデルの適用は森林流域の源頭部に限定されており、流域全体での洪水解析への適用性については十分に議論されていない。洪水解析に広く利用される分布型水文モデルの応用先は、単一流域に留まらない領域スケールでの解析や気候変動影響評価など多岐にわたり、計算効率の良いモデル開発が求められている。

本研究では、鉛直一次元 **Richards** 式に従う不飽和浸透過程を簡便に記述する貯留・流出関係式の導出及びその分布型水文モデルへの適用を目的とした。関係式は **Richards** 式と同じパラメータで構成され、空間離散化を伴わずに洪水流出を計算可能である。構築した分布型モデルを実流域へと適用し、実測土壌パラメータを利用した再現計算を行う。

2. モデルと計算条件

鉛直不飽和浸透過程を記述する貯留・流出関係式は、ダルシー則を準定常仮定の下で近似して導出した。風化基岩境界深さを通過したフラックスがパイプを通して排水されるものとして、斜面の流出プロセスを集中化した。鉛直方向の貯水量と斜面流出量の関係は解析的に記述され、連続式に基づいて空間的な離散化を伴うことなく洪水流出を計算可能である。導出した関係式を **Rainfall-Runoff-Inundation(RRI)**モデルの改良版³⁾へと適用した。このモデルでは、流域をグリッドセルに分割したうえで、その各セルの代表斜面からの流出量を計算する。

構築したモデルを三重県安濃川の安濃ダム流域(28 km²)へと適用した。過去の 4 つの大規模出水イベントを対象として、これらの **Nash-Sutcliffe** 指標を目的関数としたパラメータ最適化を行った。この時、一部の土壌パラメータについては流域内でサンプリングされた土壌物性値を拘束条件として用い、すべてのパラメータを最適化したケースと比較した。なお、サンプリング地点は流域内の 1 地点のものであり、これが流域代表性を有すると仮定した。測定された土壌パラメータは、飽和透水係数 $k_s = 68$ [mm/hour]、飽和体積含水率 $\theta_s = 0.65$ 、残留体積含水率 $\theta_r = 0.36$ 、**Brooks-Corey** モデルの空気侵入圧 $\psi_e = -0.088$ [m]、非線形のパラメータ $\lambda = 0.35$ である。それ以外のパラメータは、流域の勾配に応じて 3 種類の土層厚を設定した。パラメータ最適化プログラムには **pestpp-glm**, **ies**⁴⁾を用いて、最適パラメータを推定するとともにパラメータ分布の不確実性を求めた。

3. 結果

図 1 に再現計算のハイドログラフを示す。**Pestpp-glm** の結果から、構築したモデルはパラメータの一部に実測値の拘束を加えても既往洪水を精度よく再現可能なことが確認できた。また、**pestpp-ies** の結果から、モデルパラメータに拘束条件を付すことによってハイドログラフの不確実性(色付きの幅)が小さくなっていることが確認できる。図 2 に **Leave-One-Out** 交差検証の結果を示す。実測土壌パラメータを拘束条件とした場合の結果は、全最適化の場

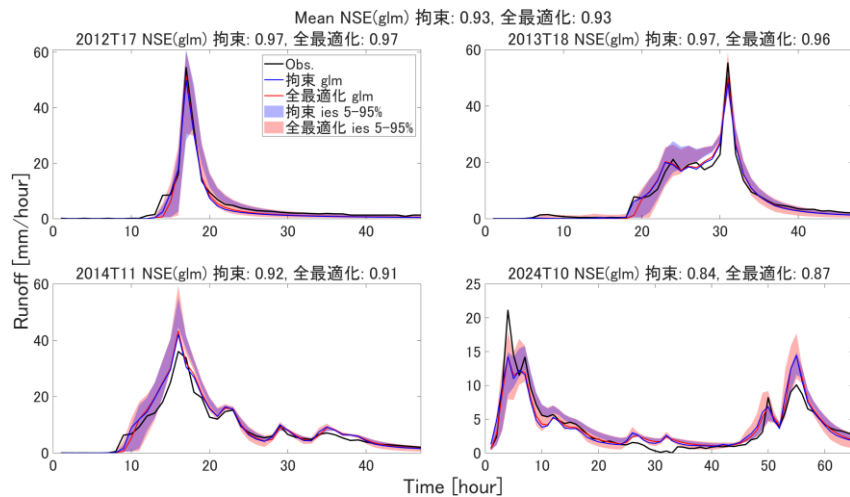


図1 再現計算のハイドログラフ

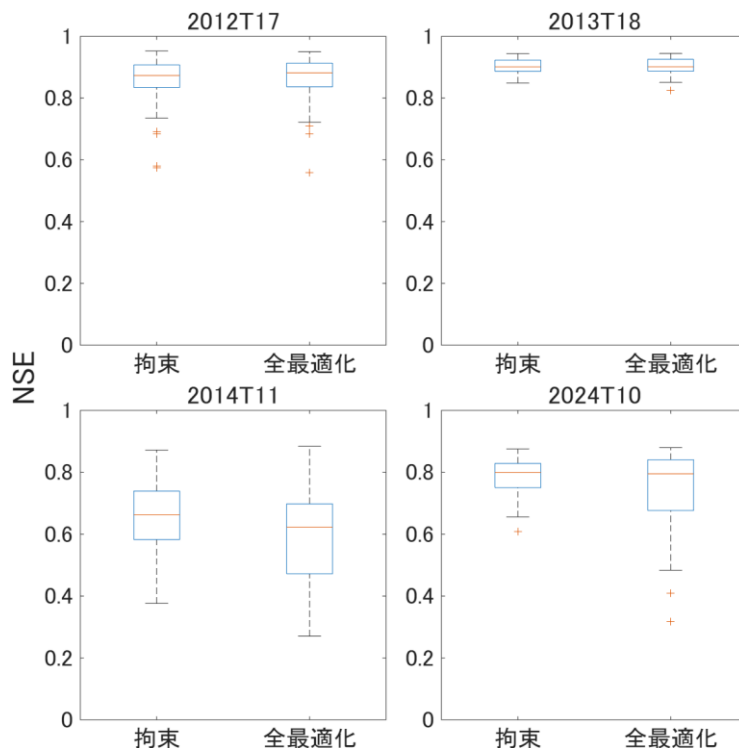


図2 Leave-One-Out 交差検証(pestpp-ies)の結果

合と比較して NSE の中央値が同程度であるとともに四分位数の範囲が小さくなっている(特に 2014T11, 2024T10)。これは、適切な土壌物性値(またはその範囲)が得られれば、モデルの精度を損なうことなく不確実性を低減させた、頑健なモデル開発が可能であることを示唆するものである。また、全最適化(glm)で得られた土壌パラメータは $k_s = 150$ [mm/hour]、 $\psi_e = -0.042$ [m]、 $\lambda = 0.32$ であり、サンプリング値と同じオーダーにあった。これらのパラメータはサンプリング値とは異なるものの、土層厚の

最適化によって、拘束及び全最適化の glm のハイドログラフは非常に類似したものとなった。これは、水文モデルの等結果性を示しているが、実測されたパラメータを利用することが等結果性の解消につながる可能性を示唆している。

4. まとめ

本研究では、山地斜面の鉛直不飽和浸透過程を簡便に記述する貯留・流出関係式を導出して、それを分布型水文モデルへと適用した。構築したモデルを用いて、安濃ダム流域の洪水再現計算を行った。パラメータ最適化を行うにあたって、現地の土壌物性値を拘束条件として用いることがモデルの精度・不確実性に与える影響を分析した。その結果、実測されたパラメータを用いることによって、モデルの精度を損なうことなく不確実性を低減できる頑健なモデル構築が可能であることが示唆された。

【謝辞】

本研究は、内閣府 SIP「流域内の貯留機能を最大限活用した 被害軽減の実現」(代表:角哲也)の支援を受け実施されました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 菅原快斗, 佐山敬洋. (2021). 水分保持曲線を反映する流量流積関係式の導出と分布型流出モデルへの適用. 土木学会論文集 B1 (水工学), 77(1), 124-135.
- 谷誠. (2023). 鉛直不飽和浸透に基づく新しい洪水流出モデルの適用による山地小流域の流出機構の再検討. 水文・水資源学会誌, 36(1), 20-51.
- 佐山敬洋, 菅原快斗, 田中智大. (2026). 令和 6 年能登半島地震の地殻変動が奥能登豪雨の洪水氾濫に及ぼした影響. 土木学会論文集, 82(16), 25-16113.
- White, J. T. (2018). A model-independent iterative ensemble smoother for efficient history-matching and uncertainty quantification in very high dimensions. *Environmental Modelling & Software*, 109, 191-201.

キーワード : Hillslope runoff, Storage-runoff relationship, Flood modeling, Soil properties, Richards equation

気象庁タンクモデルと CaMa-Flood の結合によるバックウォーターを考慮した内水氾濫解析

気象研究所応用気象研究部 ○太田琢磨

気象研究所応用気象研究部 池田翔

東京大学生産技術研究所 山崎大

1. はじめに

気象庁では、全国の中小河川を対象とした洪水危険度情報「キキクル」を、タンクモデルに基づく流域雨量指数などの簡易的な水文指標に基づいてリアルタイムで提供している。しかし、流域雨量指数の計算では河道水位を明示的に扱わないため、本川水位の上昇に起因する背水（バックウォーター）や、それに伴う湛水型内水氾濫を直接表現することは困難である。特に、本川と支川の合流部や低平地では、本川水位の高まりによって支川からの流下や排水が阻害され、降雨が弱まった後も湛水や浸水が長時間継続する事例が多く報告されている。

この課題に対し、昨年度は短期的な改善策として、事前に特定した背水区間を対象に、本川の流域雨量指数に基づく簡易的な判定基準を導入することで、背水の影響を考慮した洪水危険度の可視化手法を提案した¹⁾。この手法は、現行モデルの枠組みを維持したまま全国展開が可能であるという利点を有する一方で、バックウォーターや内水氾濫の発生・拡大過程そのものを物理的に再現するものではないという課題が残されている。

一方、全球河川モデル CaMa-Flood²⁾ は、局所慣性方程式に基づく河道水位計算により、バックウォーター効果を含む河道内水理および氾濫過程を明示的に表現することが可能である。しかし、日本域において、内水氾濫（湛水型）を独立した事象として捉え、観測水位や実際の浸水状況と比較しながら CaMa-Flood の適用性を検証した事例は依然として限られている。

本研究では、将来的な洪水・内水氾濫予測の高度化を見据えた次世代モデル構築の第一段階として、気象庁タンクモデルと CaMa-Flood を結合し、バックウォーターを考慮した内水氾濫解析を試みる。特に、本川水位の上昇が支川下流域の水位変動および浸水発生に及ぼす影響に着目し、観測水位および浸水分布との比較を通じて、本手法の適用性を検証する。

2. 手法

本研究では、流域スケールの降雨流出過程を気象庁タンクモデルにより計算し、各時間ステップにおける流出量を CaMa-Flood に入力する一方向結合型のモデル構成を採用した。タンクモデルは気象庁の現業モデルと同一の枠組みに基づいて構築されており、解析雨量を入力として、1 時間間隔・1 km メッシュ単位で流出量を算出する。

CaMa-Flood では、流域を細分化した単位集水域（unit catchment）ごとの水収支計算と局所慣性方程式に基づく河道水位計算により、河道内の水理過程およびバックウォーター効果を表現する。また、サブグリッド地形パラメータを用いることで、河道を含む氾濫原（floodplain）上の浸水深を診断的に算出することが可能である。

本研究では、1 時間間隔で算出されるタンクモデルの流出量を CaMa-Flood に入力し、河道水深（rivdph）および河道を含む氾濫原上の浸水深（flddph）を解析した。なお、浸水深については 15arcsec 解像度でダウンスケーリングを実施し、空間分布解析に用いた。

3. 平成 30 年 7 月豪雨での検証

手法の適用性を確認するため、平成 30 年 7 月豪雨を対象とした試験的な事例解析を行った。本事例では、全国各地で河川氾濫および内水氾濫が発生し、バックウォーターの影響による長時間の湛水が報告されている。

図 1 に、一級河川江の川の支流である八戸川（近原水位観測所）における観測水位、CaMa-Flood による河道水深、および流域雨量指数の時系列を示す。図 1(a)に示す近原地点の観測水位は、江の川本川に設置された近傍の水位観測所の水位変化と酷似しており、近原地点が江の川本川のバックウォーターの影響を強く受けていたことを示している。図 1(b)に示す CaMa-Flood による河道水深は、立ち上がりやピークのタイミング、ならびに増水・減水過程の変化傾向において観測水位と概ね整合した挙動を示している。この結果は、本川水位の上昇が支流である八戸川の水位変動に及ぼす影響を、CaMa-Flood が再現していることを示唆している。一方、図 1(c)に示す流

域雨量指数は、上流域からの流下過程のみを考慮した指標であるため、下流側の水位変動の影響を反映できず、基準Ⅰ（注意報基準）を超過するには至らなかった。また、ピーク時刻も観測水位や CaMa-Flood による河道水深と比較して、半日程度のずれが生じている。

図2は、平成30年7月7日12時の江の川下流域における浸水深分布を示している。図中では、江の川本川沿いに比較的大きな浸水深が分布するとともに、浸水被害が報告された支川下流域、特に合流部付近で浸水深が面的に広がっている。これらの支川下流域は、本川水位の上昇に伴うバックウォーターの影響を受けやすい地形条件にあり、河道水位の高まりが周辺の氾濫原へと波及した結果であると考えられる。

以上の結果は、図1で示した河道水深および観測水位の時間変化と空間的にも整合的であり、現業モデルで用いられる上流流下のみを仮定した簡易的な指標では表現が困難であった湛水型内水氾濫について、河道水位と氾濫過程を明示的に扱う物理モデルを用いることで、一定の再現が可能であることを示している。

4. まとめと今後の展望

本研究では、気象庁タンクモデルと CaMa-Flood を一方向に結合し、バックウォーターを考慮した内水氾濫解析の初期的検討を行った。平成30年7月豪雨を対象とした事例解析から、本川水位上昇に起因する河道水位変動や、それに伴う湛水型内水氾濫について、物理モデルにより一定の再現が可能であることを示した。

従来、内水氾濫は簡易的な水文指標や局所的な詳細モデルを用いて評価されることが多かったが、本研究で示した枠組みは、河道水位と氾濫過程を一体的に扱うことで、バックウォーターに起因する湛水型内水氾濫を表現する点に特徴がある。このようなモデル構成は、全国展開やリアルタイム予測への応用を視野に入れた次世代の洪水・浸水キキクルの基盤となり得る。

今後は、複数の洪水事例に対する検証や定量的な再現性評価を進めるとともに、水門・樋門操作等の人為的影響を考慮した解析への拡張を行う予定である。これにより、本川と支川の相互作用を考慮した内水氾濫予測の高度化に向けた検討を進めていく。

参考文献

1) 太田琢磨, 三浦大輔, 芦田裕子, 岡部裕己: 背水の影響に伴う支川の洪水危険度の推定と洪水キキクルでの可視化. 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 2025. https://doi.org/10.11520/jshwr.38.0_265

2) Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., & Oki, T. (2011): physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. Water Resources Research, 47, W04501. <https://doi.org/10.1029/2010WR009726>

キーワード : Backwater effect, Pluvial flooding, CaMa-Flood, Rainfall-runoff modeling

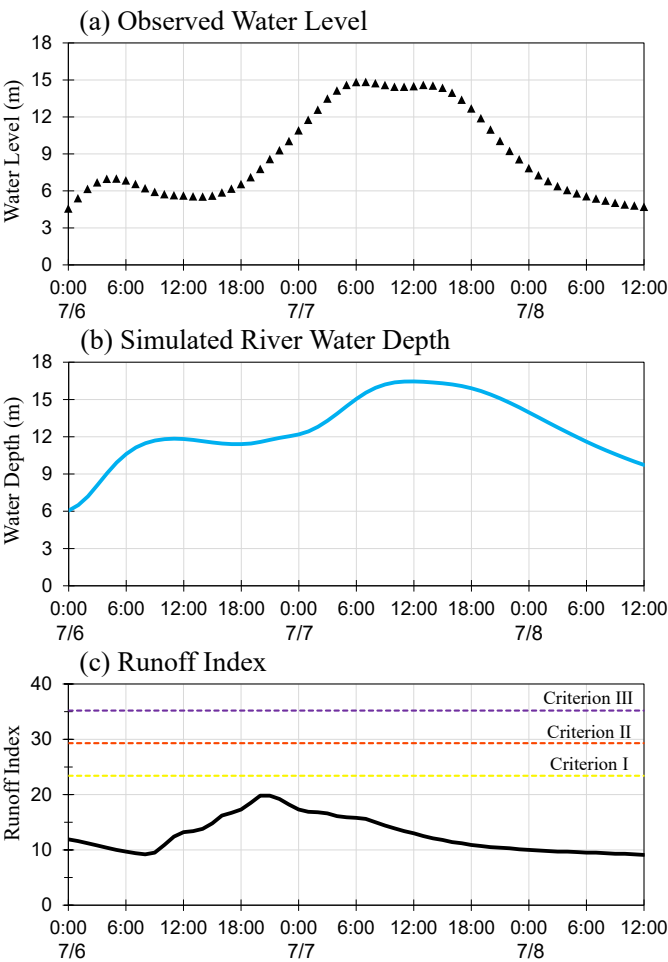


図-1 平成30年7月豪雨における江の川水系八戸川（近原水位観測所）の(a)観測水位、(b)CaMa-Floodによる河道水深、(c)流域雨量指数の時系列。

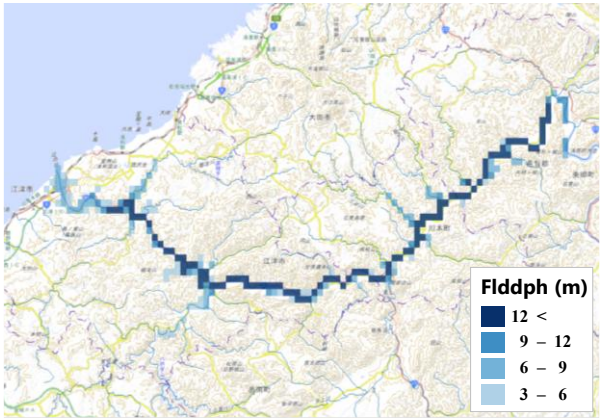


図-2 平成30年7月7日12時の江の川下流域における浸水深分布。

河川氾濫に伴う高速流浸水に関する Large-Eddy Simulations

ー市街地内の水流速および建物に作用する水圧力の分析ー

東北大学大学院工学研究科 ○石田泰之

東北大学大学院工学研究科 濱嶋亮登

東北大学大学院工学研究科 平賀優介

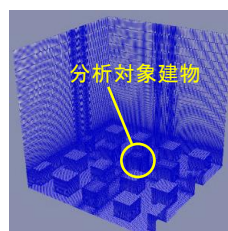
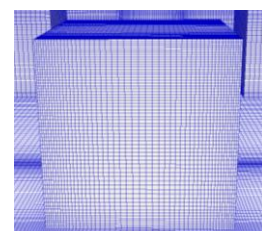
東北大学大学院工学研究科 持田 灯

1. はじめに

豪雨災害の激甚化への対応として河川氾濫を前提とする流域治水の概念に基づく対策が進められる¹⁾。また、氾濫時の水流速に応じて低速流浸水と高速流浸水に分けて対策検討を行うことの重要性が示されている²⁾。後者の高速流浸水は、建築物を破壊・流出させ得るものであり、街区スケール・建物スケールの対策を検討する上では、市街地内の流速や建物に作用する水圧力を3次元流体解析により詳細に予測することが有効と考えられる。しかしながら、数値解析による氾濫被害の予測は平面2次元流体解析が主に用いられ、建築・街区スケールの高速流浸水を対象とする3次元流体解析は殆ど行われていないのが現状である。本研究では、高速流浸水時の流れ場に関する基礎的な知見の蓄積を目的とし、3次元の Large-Eddy Simulation により建物群のグロス建蔽率(以降、 λ_p)の違いが市街地内の水流場および建物に作用する水圧力、さらに建物群の流体抵抗特性に及ぼす影響を分析した結果を報告する。

2. 解析概要

解析対象は1辺15m(=H)の立方体を $\lambda_p = 11\%, 25\%, 44\%$ で千鳥状に配置した3つのモデル街区とした。また、本研究では Volume of Fluid 法を用いた。表面張力項は CSF モデル³⁾、Sub-Grid Scale モデルは WALE モデルとした。なお、非圧縮性流体を仮定している。各記号は[記号]参照。図-1に解析格子を示す。水圧力の分析対象は文献4)に従い格子分割を行った。主流方向と主流直交方向の

(a) $\lambda_p = 25\%$ の例

(b) 分析対象建物近傍

図-1 解析格子

解析領域境界に周期境界条件を課し、 $0 \sim 0.2H$ を浸水させて主流方向の平均圧力勾配を与え、流れを駆動させた。駆動力は最も λ_p の低い11%の体積平均流速が高速流浸水($1 \sim 2 \text{m/s}^2$)に相当し、かつ平均流速が最大となる高さのフルード数 $F_r > 1$ となるように決定し、各ケース同じ駆動力とした。諸量を $\langle u_{water} \rangle$ およびHで基準化した。他条件は[注釈]参照。

3. 結果

高さ $0.1H(=1.5\text{m})$ の水平面およびA-A'面内の時間平均流速を図-2, 3に示す。図-2より、上流側コーナー部には流れの剥離および加速が、下流側の低速域には旋回流が確認でき、 λ_p が高いほど剥離域における加速が弱まる。 $\lambda_p = 11\%$ のA-A'面(図-3(a))をみると上流側壁面の $0.1H$ 高さより低い位置に淀み点があり主に上昇流が生じており、 $\lambda_p = 25\%$ では約 $0.1H$ 、 $\lambda_p = 44\%$ では約 $0.15H$ と位置が上方に変化する。 $\lambda_p = 44\%$ (図-3(c))では主に下降流となっており地表付近には逆流が発生している。下流側の低速域には主流方向逆向きの流れがみられる。

次に、平均水圧係数(C_p)(1式)により壁面に作用する水圧力を分析する。なお、壁面水圧力は壁面に接する解析格子の圧力値とした。また、水流体の混相率0.9以上となる格子の体積平均圧力からの差圧とし、静水圧は差し引いた。

$$\langle C_p \rangle = \langle p \rangle / \langle q_H \rangle \quad (1) \quad \langle q_H \rangle = 0.5\rho \langle u_{water} \rangle^2 \quad (2)$$

図-4に図中に示すライン上の $\langle C_p \rangle$ を、図-5に建物前後の水圧力差から求めた形状抵抗 F_{form} を示す。図-4より、 λ_p が高いほど上流側の正圧、下流側の負圧とも弱まる。上流側壁面において比較的強い水圧が作用する高さは接近流速の傾向(図-3)と概ね一致する。また下流側壁面について、 $\lambda_p = 44\%$ (図-3(c))では、下流側にかけての剥離流れが弱いことで負圧が弱まり、かつ上流側コーナー部の剥離流同士が衝突し、その流れが下流側壁面に作用したことで、他のケースよりも高い値となったと考えられる。

さらに、建物群の流体抵抗特性を、建築物の開口部等の換気流路における流体抵抗の評価手法を応用し分析する。

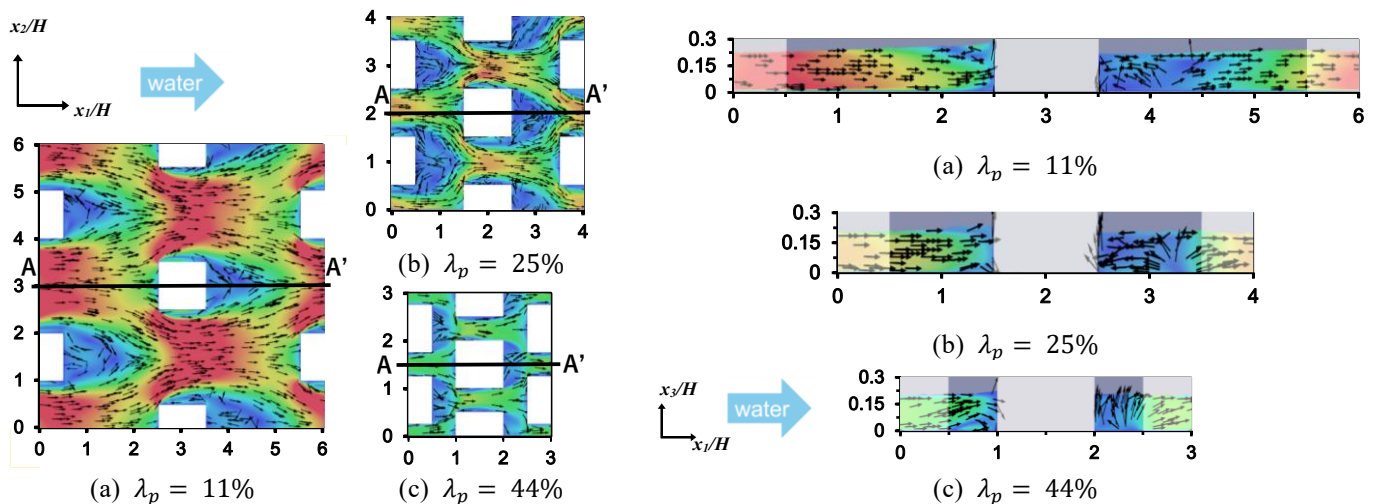
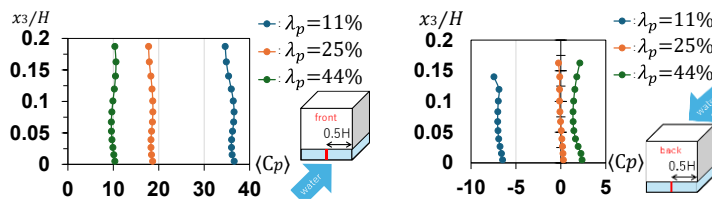
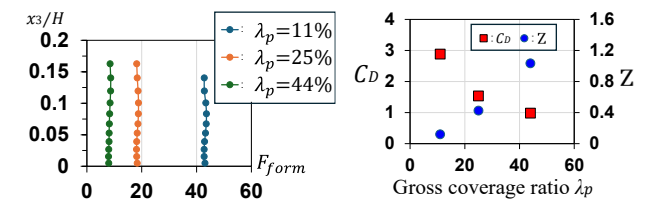


図-2 0.1H 高さの流速分布 (0~5.0[-])

図-3 A-A'面内の流速分布 (0~5.0[-])

図-4 建物中心ライン上の $\langle C_p \rangle$ (左: 上流面, 右: 下流面)図-5 F_{form} の鉛直分布図-6 C_d および Z

開口前後の圧力差が $\Delta\langle p \rangle$ のとき、流体の圧力損失は流路内流速 $\langle u \rangle$ と抵抗係数 Z を用いて(3)式となる。また、動圧に関する係数 Z と流速に関する流量係数 C_d との関係((4)式)から、通過流量 Q は(3)式、(4)式を用いて(5)式で表される。

$$\Delta\langle p \rangle = 0.5Z\rho\langle u \rangle^2 \quad (3) \quad Z = 1/C_d^2 \quad (4) \quad Q = \langle u \rangle A = C_d A \sqrt{2\Delta\langle p \rangle / \rho} \quad (5)$$

以上を建物群の水流体抵抗評価に適用し、体積平均水流速を $\langle u \rangle$ 、0.2H高さまでの流路の断面積を A 、流れの駆動力を $\Delta\langle p \rangle$ として Z と C_d を求め、建物群による流体抵抗を Z 、街区内の水流の通りやすさを C_d に基づき分析する。図-6に λ_p と C_d および Z の関係を示す。 λ_p の増加に伴って建物群による流体抵抗が増えることが Z の増加に表れている。 Z の増加は C_d の減少を意味し((4)式)、これにより、流量及び平均流速が減少した(図-2, 3)。 C_d について、 $\lambda_p = 25\%$ は $\lambda_p = 11\%$ の約4~5割、 $\lambda_p = 44\%$ は $\lambda_p = 25\%$ の約3~4割に減少した。

4. まとめ

グロス建蔽率 λ_p の異なる3つのモデル街区に対してLESを実施した。 λ_p の増加により流れの干渉が強まり、鉛直方向の流れにも強く影響を及ぼした。それに応じ、建物壁面に作用する水圧力の分布が変化する。また抵抗係数 Z と流量係数 C_d により、 λ_p に応じた水流場の変化が建物群としての流体抵抗に及ぼす影響を分析した。

[注釈] solver: OpenFOAM-v2412. 移流項: 空気は2次中心差分(95%)+1次風上差分(5%)、水はvan Leer(TVD)。拡散項: 2次中心差分。時間微分項: 2次精度陰解法。圧力解法: PIMPLE。上面境界条件: Slip。個体壁面境界条件: Spalding 則。平均化時間: 300s。
[記号] $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値, x_i : 空間座標の3成分($i=1$:主流方向, $i=2$:主流直交水平方向, $i=3$:鉛直方向)[m], u_i : 流速の3成分[m/s], p : 圧力[N/m²], ρ : 流体密度[kg/m³], $\partial\langle p \rangle / \partial x_1$: 平均圧力勾配(=60)[N/m³], $\langle u_{water} \rangle$: 平均圧力勾配から求まる速度(= $\sqrt{2 \times (0.2H/\rho) \times (\partial\langle p \rangle / \partial x_1)}$), A : 流路の断面積[m²], D : 管径[m], l : 管長[m], λ : 摩擦抵抗係数[-], ζ : 形状抵抗係数[-]

【謝辞】本研究は、JSPS 科研費(23K26255)および JST 創発的研究支援事業(JPMJFR2419)による助成により行われた。また、解析結果の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムを利用して得られた。

参考文献

- 1) 国土交通省, 気候変動を踏まえた水害対策のあり方について, 2020
- 2) 日本学術会議 気候変動と国土分科会 流域治水に資する建築物の耐水設計検討小委員会, 流域治水に資する建築物の耐水設計検討小委員会の活動の記録, 2023
- 3) Blackbill, et al., A continuum method for modeling surface tension, Journal of computational physics, 100, 2, 335-354, 1992, DOI 10.1016/0021-9991(92)90240-Y
- 4) 日本建築学会, 建築物荷重指針を活かす設計資料 2, 319-343, 2017

キーワード: Flooding, High water speed, Volume of fluid, Large-Eddy Simulation, Gross coverage ratio

東京大学工学部社会基盤学科における集中型演習の取り組み：哲学的抽象論の議論をいかに深めるか？

東京大学生産技術研究所	○木野佳音
北海道大学大学院工学研究院	北原優
長岡技術科学大学工学研究院環境社会基盤系	栗原遼大
神戸大学大学院海事科学研究科	安田昌平
東京理科大学創域理工学部	小林里瑛
東京大学大学院工学系研究科	鈴木貴大
東京大学大学院新領域創成科学研究科	松葉義直
東京大学大学院工学系研究科	南出将志
東京大学大学院工学系研究科	森本時生
東京大学大学院工学系研究科	渡邊萌
東京大学大学院新領域創成科学研究科	デルバリオアルバレ・ダニエル
東京大学大学院工学系研究科	Le DUC
東京大学大学院工学系研究科	高橋佑弥
東京大学大学院工学系研究科	長山智則

1. はじめに

東京大学工学部社会基盤学科の必修科目「フィールド演習」では、社会基盤学の根幹にある価値観や哲学を醸成することを目的とした演習を毎年実施している。我々は、2023・2024 年度のフィールド演習において、コルブの経験学習理論（Experiential Learning Theory: ELT；図 1）に則った演習を新たに構築した。本発表では、2 年間の取り組みのうち、難しい内容の議論を 4 日間という限られた期間内で実施させるための工夫について紹介する。なお、本予稿の内容は北原・木野・栗原・安田ほか（2026）に掲載済みであり、図表は当該論文から引用して示している。

2. 手法

2.1. 演習の概要

演習は、山梨県山中湖村内で実施され、約 50 名の学部 3 年生（及び一部の 4 年生）が受講した。2023・2024 年度では、災害対策に関する議論とそれを抽象的に発展させた「社会基盤（学）の在り方」を大テーマとしたグループワークを実施した。

両年度ともに、1・2 日目（前半）には山中湖村における具体的な災害対策の立案（①「具体的経験」）、3・4 日（後半）目には抽象的な

「社会基盤（学）の在り方」（③抽象的概念化）へと展開する構成とした。前半の具体的な課題は、後半の抽象的な課題に実感をもって取り組みやすくする効果をもつ。ただし、前半の課題に取り組んでいる間、受講者たちは、後半の課題がどのようなものか具体的には知らされず、目の前の課題に注力することが求められた。前半の最後には中間発表、後半の最後には成果発表が実施された（②「省察的観察」）。演習終了後の個人レポートでは、演習内容の振り返りや追加的な調査も踏まえつつ、各受講者が「社会基盤（学）の在り方」についての見解を記述した（④「能動的実験」）。

2.2. 演習における工夫と効果測定の手法

まず、特に後半において多様な視点に基づいた議論を促すため、前半と後半で班編成の組み替えを実施した。受講者は、前半においては班ごとに異なる発災シナリオについて具体的なリスクの抽出や対策立案に集中して取り組んだ。そして後半には、異なる発災シナリオについて議論してきた班員が混在する新しい班において、シナリオの制約を取り除いて総合的な災害対策計画を検討しつつ、「社会基盤（学）の在り方」について議論した。2024 年度

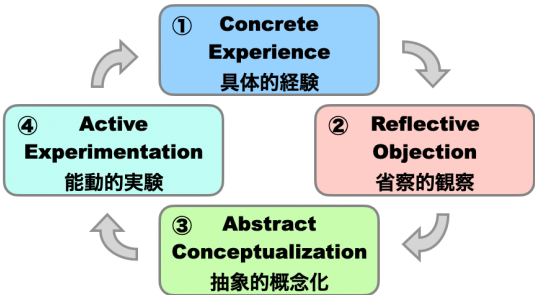


図1. コルブのExperiential Learning Theoryによる学習サイクル (Christie and Graaff, 2017をもとに作成)

には、前年度の反省を踏まえて追加的な工夫を施した。具体的には、事前資料の配布・初日の講演を実施することで、「馴染みのない地域の災害対策を短時間で練る」ことの困難さを低減させた。また、プレゼンテーションやレポートの形式をあらかじめ提示することで、議論に方向性を与えるとともに理工系学生としてのレポートの質の底上げを図った。

以上の工夫に関する効果測定は、個人レポート 105 件に対する LLM(OpenAI 社が提供する GPT-5.1) による分析によって実施した。

3. 結果と議論

前半と後半での班の組み替えについて、全受講者の 1 割強が班の組み替えを肯定的に捉えていた (Positive) 一方、Negative 判定は 0 件であった (表 1)。分析対象は、組み換えの是非を問うアンケートではなく、演習後の振り返りの文脈の中で肯定的に捉えた受講者が一定数存在したことから、班の組み替えは一定の効果を持ったと考えられる。なお、2023 年度と 2024 年度で Neutral 判定に大きな差が生じているのは、2024 年度に提示したレポート形式において、演習の経過を事実として淡々と記載することを求めたためである。

事前資料の配布・講義について、多くの受講生が実際に活用し (表 2)、議論のきっかけを得ていた。一方で、自分たちの考えた対策案の実現可能性が配布資料によって否定されてしまい議論の行き詰まりに直面する班も少なからず見受けられた。配布資料が足枷として機能してしまったことは反省すべき点である。そのような班に対しては、資料にある情報が絶対ではないこと、正解を探そうとしないことなどを演習の中で適宜助言した。

レポート形式の提示について、「論理的整理」と「事実と議論の区別」のそれぞれについて、1-3 点の 3 段階評価を行った結果を図 2 に示した。「論理的整理」については、両年度ともに 2-3 点の分布が中心で、一定の受講者が論理的な記述を行えていたのが、2024 年度にはさらに向上したといえる。一方、「事実と議論の区別」については、2023 年度から 2024 年度にかけて分布が大きく変化した。レポート形式が自由だった 2023 年度には 1 点が約 80% を占めたのに対し、章立てが指定された 2024 年度には 1 点がみられなくなり、「どの視点で何を書くべきか」を自然に意識させることに一定程度成功したといえる。ただし、時系列上は混在する「班での活動・議論の内容」と「他班・教員との議論の内容」について、提示した形式での記述を諦め 2 項を結合して時系列に記述しているレポートも散見された。課題を出した意図としては、単なる時系列の報告ではなく、演習全体を振り返ったときに自分たちの議論してきたことは何だったのか、言語化することを求めたのだが、この点の確実な伝達方法については今後改善が必要である。

4. まとめ

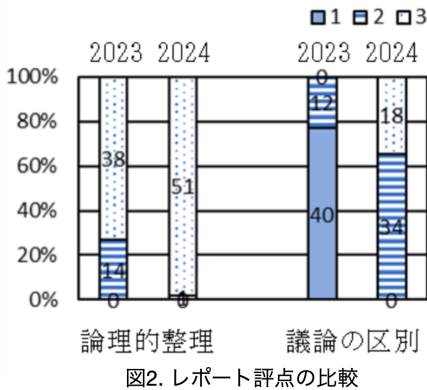
演習の工夫のいずれについても、受講者の主体的な活動を促進する効果が概ね得られたと言える。今後の課題として、哲学という個人の思想に近い領域において、短時間のグループワークで結論を出させる方式には、引き続き改善・工夫の余地がある。

表1. 班の組み替えに対する感情分析結果

	2023 年度	2024 年度
Positive	5	7
Negative	0	0
Neutral	2	35
No mention	45	11

表2. 事前資料・講義の活用度判定結果

	事前資料	講義
Active	16	14
Superficial	1	14
Mentioned	2	7
No mention	34	18



参考文献

(1) 北原・木野・栗原・安田ほか (2025) . 災害対策の具体論から哲学的抽象論へ：社会基盤学の価値を見出す集中型演習の一手法. 土木学会論文集. <https://doi.org/10.2208/jscej.25-00098>

(2) Christie and De Graaff (2017). The philosophical and pedagogical underpinnings of active learning in engineering education, *European Journal of Engineering Education*. <https://doi.org/10.1080/03043797.2016.1254160>

キーワード：philosophy of civil engineering; intensive lecture; engineer ethics; group work; report writing

一般セッション(口頭講演) | 国際交流セッション

2026年9月15日(火) 16:20 ~ 17:50 | 2Fホール(2F)

[IS] 国際交流セッション

座長:手計 太一(中央大学 理工学術院 社会理工学部 都市環境学科)

16:20 ~ 16:35

[IS-01] CLASSIFYING SEQUENTIAL DEVELOPMENT OF FLOOD WAVE TYPES IN A SINGLE FLOOD EVENT

*Kim Dongsu¹ (1. Civil & Environmental Engineering, Dankook University)

16:35 ~ 16:50

[IS-02] A Hybrid Approach for River Flood Forecasting by Combining a Hydrodynamic Flow Model and Artificial Neural Networks

*Kyung Soo Jun¹、Jae Gyeong Lee¹、Li Li¹ (1. Sungkyunkwan University)

16:50 ~ 17:05

[IS-03] Evaluating Water Reuse and Pico-scale Hydropower in High-rise Buildings: A Water-Energy-Carbon Nexus Approach

*Park Daeryong¹、Kim Sanha¹、Jang Juyeon¹、Shin Seoyoung¹、Kim Jieun¹、Kwon Sojeong¹、Kang Hyeonmin¹ (1. Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University)

17:05 ~ 17:20

[IS-04] Assessment of Hydraulic Stability for Floodplain in Compound Meandering Channel

*Kim Young Do¹ (1. Division of Smart Infrastructure Engineering, Myongji University)

17:20 ~ 17:35

[IS-05] Concurrent Snow Depth and Snow Load Measurements for Snow Water Equivalent Estimation under Maritime Wet-Snow Conditions in South Korea

*Chung Gunhui¹、Lee Hyeongjoo²、Lee Hyunsuk³、Song Inhong⁴ (1. Department of Civil Engineering, Hoseo University、2. Research Institute for Fine Dust and Carbon Neutrality, Hoseo University、3. HQTech Co., Ltd.、4. Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University)

17:35 ~ 17:50

[IS-06] Duration- and Rarity-Dependent Scaling of Extreme Precipitation with Warming: Insights from Stochastic Storm Transposition of Large Climate Ensembles

*Wasitha Randeepa Ranga Dilshan¹、Yusuke Hiraga¹、Daniel Wright² (1. Department of Civil and Environmental Engineering, 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison)

CLASSIFYING SEQUENTIAL DEVELOPMENT OF FLOOD WAVE TYPES IN A SINGLE FLOOD EVENT

Dongsu Kim

Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, Gyeonggi, South Korea

email: dongsu-kim@dankook.ac.kr

email: 32183438@dankook.ac.kr

ABSTRACT

Hysteresis significantly affects the accuracy of hydrological measurements in rivers, especially during unsteady flow conditions caused by flood events. Traditional stage-discharge curves often fail to account for these dynamic complexities, resulting in substantial errors. This study presents a novel method named as Hysteresis Diagnostic Index (HDI) for diagnosing the degree of severity of stage-discharge hysteresis enabling to classify flood wave types during development of a flood event whereby using the free-surface slope. The proposed method denoted that a single flood event can be developed with the sequence of kinematic, diffusive, and dynamic waves depending on its hysteretic severity. The methodology was applied to in-situ data from the Naju gaging station on the Yeongsan River located in South Korea, a site characterized by low gradients where the prominent hysteresis during large flood events is present. The results, visualized through color-coded wave type classification, could demonstrate hysteresis severity and subsequent type of flood wave.

Keywords: unsteady flow, flood wave, free-surface slope, hysteresis, diagnosis.

A Hybrid Approach for River Flood Forecasting by Combining a Hydrodynamic Flow Model and Artificial Neural Networks

Jae Gyeong LEE, Li LI, Kyung Soo JUN
Sungkyunkwan University

Abstract

Climate change is driving worsening flood events worldwide. In this study, a hybrid approach based on a combination of the optimization of a hydrodynamic model and an error correction modeling that exploit different aspects of the physical system is proposed to improve the forecasting accuracy of flood water levels. In the parameter optimization procedure for the hydrodynamic model, Manning's roughness coefficients were estimated by considering their spatial distribution and temporal variation in unsteady flow conditions. In the following error correction procedure, the systematic errors of the optimized hydrodynamic model were captured by combining the input variable selection method using partial mutual information (PMI) and artificial neural networks (ANNs), and therefore, complementary information provided by the data was achieved. The developed ANNs were used to analyze the potential non-linear relationships between the considered state variables and simulation errors to predict systematic errors. To assess the hybrid forecasting approach (hydrodynamic model with an ANN-based error correction model), performances of the hydrodynamic model, two ANN-based water-level forecasting models (ANN1 and ANN2), and the hybrid model were compared. Regarding input candidates, ANN1 considers the historical observations only, and ANN2 considers not only the historical observations that used in ANN1 but also the prescribed boundary conditions required for the hydrodynamic forecast model. As a result, the hybrid model significantly improved the forecasting accuracy of flood water levels compared to individual models, which indicates that the hybrid model is able to take advantage of complementary strengths of both the hydrodynamic model and the ANN model. The optimization of the hydrodynamic model allowing spatially and temporally variable parameters estimated water levels with acceptable accuracy. Furthermore, the use of PMI-based input variable selection and optimized ANNs as error correction models for different sites were proven to successfully predict simulation errors in the hydrodynamic model. Hence, the parameter optimization of the hydrodynamic model coupled with error correction modeling for water level forecasting can be used to provide accurate information for flood management.

Evaluating Water Reuse and Pico-scale Hydropower in High-rise Buildings: A Water–Energy–Carbon Nexus Approach

Sanha Kim, Juyeon Jang, Seoyoung Shin, Jieun Kim, Sojeong Kwon,

Hyeonmin Kang and Daeryong Park

Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University

1. Introduction

The water, energy, and carbon (WEC) nexus has become a pressing concern as climate change and resource scarcity intensify¹⁾. Because these three are tightly coupled on both the supply and demand sides, building-scale measures that treat them together offer strong potential for carbon reduction and water security. Rainwater harvesting and greywater reuse cut freshwater demand^{2),3)}, while the hydraulic head available in tall buildings can drive pico-scale turbines below 5 kW that recover energy from downward water flow.

In South Korea, buildings above 30 floors are classified as high-rise, and Seoul and Busan alone hold more than 570 and 630 buildings exceeding 31 floors. Yet studies that integrate rainwater harvesting, greywater reuse, and small-scale hydropower in such buildings remain scarce. This study builds six scenarios that combine rainwater and greywater for pico-scale electricity generation and water reuse, applies them to Seoul and Busan, and compares reused water volume, generated electricity, CO₂ reduction, and cost savings. It also examines how the greywater tank installation floor and the roof catchment area shape these outcomes.

2. Method

Hourly rainfall for 2012 to 2023 came from the KMA ASOS stations 108 (Seoul) and 159 (Busan). Direct greywater discharge data were unavailable, so national per capita water use from the Ministry of Environment was downscaled to hourly resolution to synthesize greywater generation. Water uses were classified by reusability, and reusable sources such as the washing machine, bathtub, and wash basin were matched to reuse demand for toilet flushing, with laundry excluded for water quality and public acceptance reasons. Six scenarios were defined by the presence of electricity generation, water reuse, greywater use, and rainwater use (Figure 1). Scenarios 1 to 3 include generation and Scenarios 4 to 6 focus on reuse. Scenario 1 uses both rainwater and greywater; Scenarios 2 and 3 isolate the greywater and rainwater parts. Scenario 4 meets toilet demand with greywater supplemented by rainwater, and Scenarios 5 and 6 isolate greywater reuse and rainwater reuse. A 31-floor residential building with a 2.4 m floor height was assumed, and for the base comparison the roof area and tank floor were fixed at 500 m² and the 16th floor, then varied to test their effect.

3. Results

Under the base case, the reuse scenarios gave the most favorable outcomes. Scenario 5, greywater reuse only, reached an average reused volume of 5096.8 m³, about 11.1 times the rainwater-only scenarios in Seoul and 8.6 times in Busan. For electricity, Scenario 2, greywater, generated 501.1 kWh, roughly 29 times Scenario 3 in Seoul and 22 times in Busan. Pico-hydropower produced modest cost savings but substantial CO₂ reduction, because the Korean grid emits about 491 g CO₂ per kWh.

Break-even came earliest for Scenarios 5 and 4, while Scenario 2, generation only, did not recover its cost within the study period. Scenario 4 passed Scenario 5 in cumulative savings after about three years and ended roughly 2566 USD in Seoul and 2466 USD in Busan higher per building, so Scenario 4 is preferred for long-term return in wetter regions.

Electricity generation peaked when the tank sat near mid-building height, following the product of flow and head in the governing equation. Water reuse, CO₂ reduction, and cost savings peaked when the tank was near two-thirds of building height, about the 22nd floor of 31, where greywater supply and toilet demand were balanced; available greywater was about twice the toilet demand. Busan consistently exceeded Seoul owing to higher and steadier rainfall.

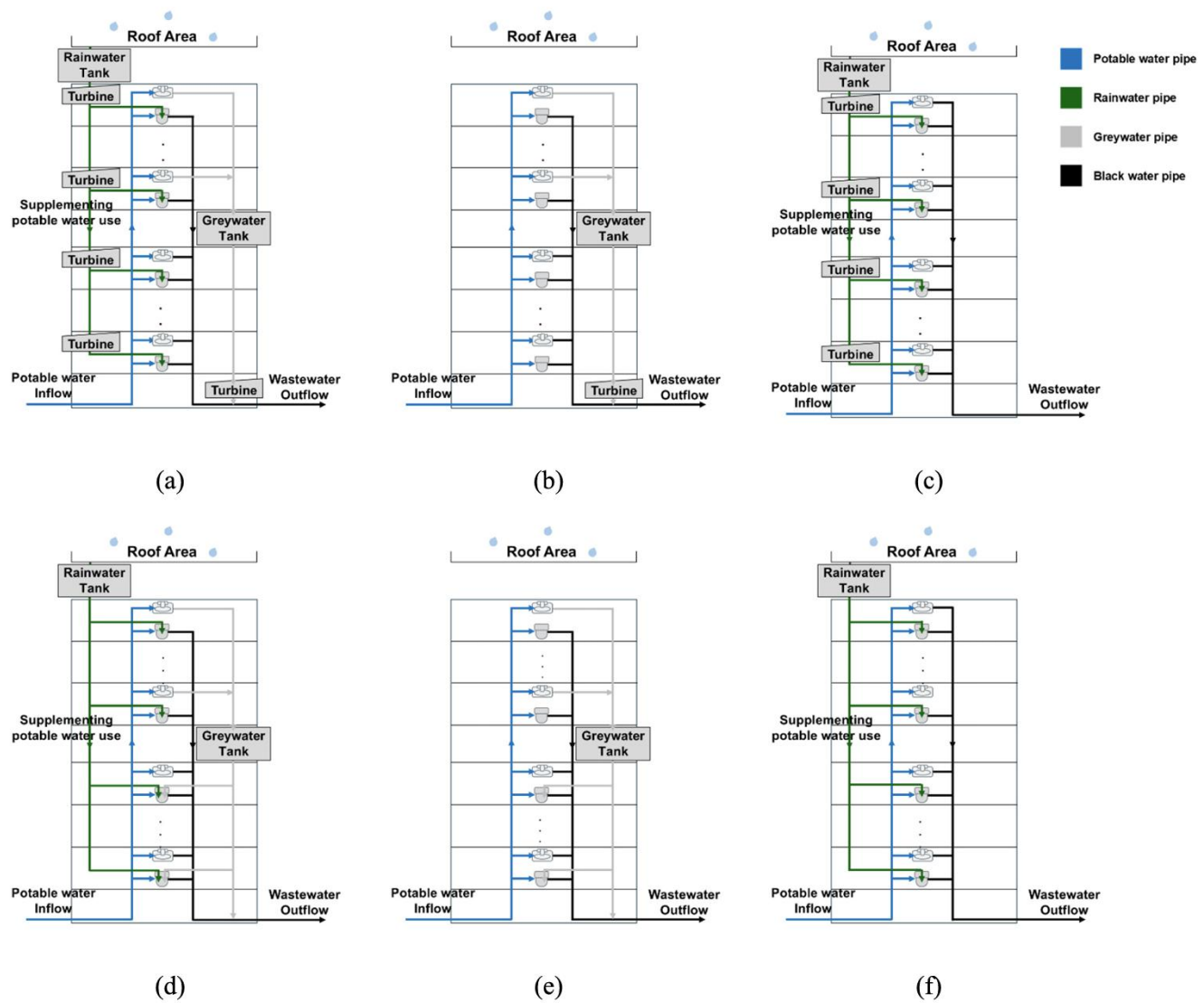


Fig. 1 Design layouts of the six scenarios. (a) Scenario 1; (b) Scenario 2; (c) Scenario 3; (d) Scenario 4; (e) Scenario 5; and (f) Scenario 6.

4. Conclusion

A building-scale water reuse and pico-hydropower strategy was evaluated with a WEC nexus using twelve years of data for Seoul and Busan. Water reuse outperformed hydropower in CO₂ reduction, cost savings, and payback, yet hydropower still gave meaningful carbon benefit given the high grid emission factor. Scenario 4, which integrates rainwater and greywater reuse, cut CO₂ by about 1304 kg in Seoul and 1333 kg in Busan per building each year, comparable to roughly 30 street trees, and saved about 2948 and 3015 USD. The best greywater tank floor depends on the goal, mid-building for electricity and about two-thirds height for water reuse. Collecting rainwater and greywater in high-rise buildings and relying on gravity flow enables low-cost and low-carbon water use and supports carbon neutrality and water security.

Acknowledgments

This work was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute(KEITI) through Water Management Program for Drought, funded by the Korea Ministry of Climate, Energy and Environment(MCEE)(2480000378) and Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through Climate Resilient R&D Project for Water-Related Disaster Management, funded by the Korea Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (RS-2026-25501231).

References

- 1) Liu X, Vu D, Perera SC, Wang G, Xiong R. Nexus between water-energy-carbon footprint network: multiregional input-output and coupling coordination degree analysis. *J Clean Prod* 2023;430:139639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139639>.
- 2) Lepcha R, Kumar Patra S, Ray R, Thapa S, Baral D, Saha S. Rooftop rainwater harvesting a solution to water scarcity: A review. *Groundw. Sustain. Dev.* 2024;26: 101305. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101305>.
- 3) Khor CS, Akinbola G, Shah N. A model-based optimization study on greywater reuse as an alternative urban water resource. *Sustain. Prod. Consum.* 2020;22: 186–94. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.03.008>.

Keywords: Water–energy–carbon nexus, High-rise building, Greywater reuse, Pico-hydropower, Rainwater harvesting

Assessment of Hydraulic Stability for Floodplain in Compound Meandering Channel

Division of Smart Infrastructure Engineering, Myongji University Young Do Kim

1. Introduction

Compound meandering channels, in which a sinuous main channel is flanked by floodplains, are among the most common forms of natural rivers. During floods, these floodplains carry a large share of the discharge and increasingly host recreational, ecological, and infrastructural functions, making their stability a central concern in river engineering.

Yet the floodplain is also where flow behaves most unpredictably. Interaction between the meandering main channel and the shallower floodplain produces complex three-dimensional currents that continually reshape the bed. Where these forces concentrate, the bed erodes, often where it goes unrecognized, quietly compromising stability.

Traditional evaluations, however, describe the flow in averaged, section-scale terms, overlooking the local variability that ultimately determines where a floodplain fails. A more spatially resolved, physically grounded approach is needed, one linking the underlying flow mechanics to a practical measure of erosion risk.

To this end, this study proceeds in three stages: laboratory ADV experiments characterize the local bed shear stress and turbulence structure; a shear-stress-based erosion index ($SEDI_{cp}$) is developed and validated to quantify erosion risk; and the framework is finally applied to a real river, the Musim Stream, through a FaSTMECH model.

2. Method

This study integrates laboratory experiments, numerical modeling, and field application. The main experiments were conducted in a compound meandering channel flume (14 m × 3.30 m) containing one full meander wavelength, two bend apexes and one inflection point, with a 0.30 m-wide main channel and five cross-sections (CS1–CS5) arranged by meander phase. At each section, three-dimensional velocities were measured with an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) across the main channel and floodplain, over eight cases spanning floodplain depths of 0.25–0.50 m under subcritical, fully turbulent flow. Bed shear stress was estimated from the ADV profiles by the log-law and turbulent-kinetic-energy methods and, at the same points, measured directly with a shear plate that served as the reference. Because point measurements are spatially sparse, a three-dimensional model (FLOW-3D HYDRO; RNG $k-\epsilon$, VOF, FAVOR; ≈ 6.53 million cells), validated against the ADV data, supplied continuous shear-stress fields. From this combined dataset, a shear-stress-based erosion index ($SEDI_{cp}$) was developed and finally applied to a meandering reach of the Musim Stream, where flow fields from a FaSTMECH model, validated against velocity and depth at six field sites (NSE 0.87 and 0.95), were evaluated over the floodplain, with region-specific critical shear stresses assigned from the literature (≈ 0.47 Pa for the main-channel bed, based on the site grain size, and a conservative ≈ 5 Pa for the grass-covered floodplain), and compared with post-flood field observations of erosion.

3. Results

Bed shear stress. Validated against direct shear-plate measurements at 18 locations, the TKE method showed the strongest agreement ($R^2 \approx 0.90$), far exceeding the log-law and numerical-model estimates ($R^2 \approx 0.17$). The discrepancy was concentrated in the outer-bank floodplain downstream of the meander inflection point (CS3): there, cross-over flow amplified the local bed shear stress to as much as 1.46–1.68 Pa, whereas the wall-function-based model predicted only 0.11–0.17 Pa, an underestimation

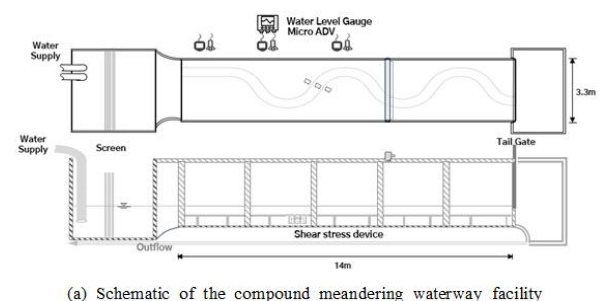


Fig. 1 Compound meandering channel experimental facility.

of 84–93%. Elsewhere the model agreed well ($R^2 \approx 0.82$ with these points excluded), confirming that its limitation is confined to the turbulence-driven cross-over zone. Erosion index. Applying region-specific critical-shear corrections, the model-based $SEDI_{cp}$ collapsed the separate main-channel and floodplain trends onto a common 1:1 relationship ($R^2 \approx 0.80$), and remained stable across flow velocities and channel sinuities. The TKE-based $SEDI_{cp}$, calibrated on turbulence-derived shear ($N = 58$), achieved $R^2 = 0.93$ (RMSE 0.031); its cross-over indicator amplified the predicted shear by a factor of ≈ 3.66 , and removing it dropped R^2 to 0.18, confirming the cross-over term as a physically meaningful, non-redundant control. Field application. Applied to the Musim Stream, the three indices told a clear story. The conventional SEDI flagged 75.7% of the floodplain (3,342 of 4,414 cells) as erosion-prone, an obvious over-prediction, since the post-flood survey found the floodplain to be largely deposition-dominated. Correcting for the floodplain's higher critical shear stress, the model-based $SEDI_{cp}$ swung the other way: it reclassified almost the entire floodplain as deposition, leaving only 5 cells as erosion. This removed the false alarm, but went too far. It also erased the one genuinely hazardous area, the cross-over zone along the outer bank downstream of each inflection point, because the underlying model underestimates the shear there by 84–93%. The TKE-based $SEDI_{cp}$ restored it: by adding the measured turbulence effect, it retained 410 cells forming continuous erosion bands exactly along those outer-bank floodplains, matching the erosion features actually observed in the field.

4. Conclusion

This study established an integrated framework, linking flume experiments, three-dimensional modeling, and field application, for assessing floodplain erosion hazards in compound meandering channels, with the improved index $SEDI_{cp}$ as its core. Validation against direct shear-plate measurements showed that the TKE method most effectively captured the localized floodplain shear stress, and revealed that the outer-bank floodplain downstream of the meander inflection point, where the floodplain flow crosses the main-channel flow, undergoes a pronounced turbulence-driven intensification of bed shear stress. This high-shear zone is not apparent from the mean velocity field and is substantially underestimated by conventional wall-function-based models. This physical insight was formalized into a two-tier index that combines rapid, domain-wide screening with a turbulence-based correction that recovers the erosion-prone zones the model overlooks. Applied to the Musim Stream, the framework reproduced erosion patterns consistent with post-flood field observations, demonstrating its practical value for identifying where erosion hazards concentrate within compound meandering floodplains. By connecting laboratory measurement, numerical modeling, and field application into a single consistent workflow, this work provides a physically grounded and practically useful basis for evaluating the hydraulic stability of floodplains and supporting their sustainable management.

References

- 1)Pope et al., Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach-A comparison of annular flume and field data. *Continental Shelf Research*. 26(8), 959–970, 2006, DOI:10.1016/j.csr.2006.02.010
- 2)Park et al., Direct measurement of bed shear stress using adjustable shear plate over a wide range of Froude numbers. *Flow Measurement and Instrumentation*. 65, 122–127, 2019, DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2018.11.018
- 3)Shiono and Knight, Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*. 222, 617–646, 1991, DOI:10.1017/S0022112091001246
- 4)Song et al., Floodplain stability indices for sustainable waterfront development by spatial identification of erosion and deposition. *Sustainability*. 9(5), 735, 2017, DOI:10.3390/su9050735

Keywords: Compound meandering channel, Floodplain, Bed shear stress, Hydraulic stability assessment

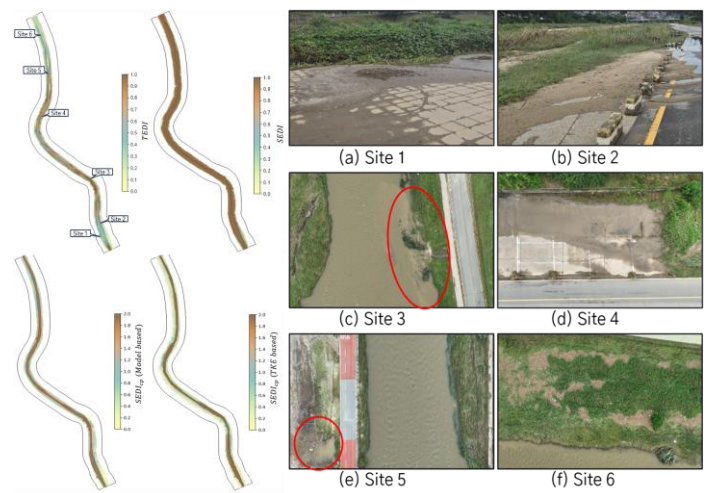


Fig. 2 Erosion–deposition index distributions in the Musim Stream and post-flood field observations.

Concurrent Snow Depth and Snow Load Measurements for Snow Water Equivalent Estimation under Maritime Wet-Snow Conditions in South Korea

Department of Civil Engineering, Hoseo University, South Korea	Gunhui Chung
Research Institute for Fine Dust and Carbon Neutrality, Hoseo University	Hyeongjoo Lee
HQTech Co., Ltd. South Korea	Hyunsuk Lee
Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University	Inhong Song

1. Introduction

Reliable estimates of snow water equivalent (SWE) are essential for snowmelt-runoff forecasting, water resources management, and flood risk assessment. Because direct SWE observations are scarce, SWE is usually derived from snow depth, and the accuracy of this conversion depends almost entirely on the bulk density assumed for the snowpack. Most widely used density models, however, were calibrated on deep seasonal snowpacks in continental and alpine climates, in which prolonged compaction and metamorphism cause bulk density to increase with snow depth.

Snowfall over the Korean Peninsula occurs largely under maritime, near-freezing conditions that produce wet snow with a high initial density and a short event timescale. Whether the reported depth dependence also applies to this snow type has not been verified by direct measurement, because concurrent, co-located observations of snow depth and snow mass remain rare. The objectives of this study are to (1) quantify the bulk density of Korean maritime wet snow from direct co-located measurements, (2) test whether it depends on snow depth once the mathematical coupling inherent in the density definition is removed, and (3) evaluate how the choice of density model affects depth-to-SWE conversion.

2. Method

Snow depth and snow load were observed concurrently at three sites representing the principal snowfall environments of mainland South Korea: Daegwallyeong (Gangwon; mountain plateau in the East Sea snowfall zone), Gubyeong-ri on Mt. Songnisan (Chungbuk; mountain valley), and the Hoseo University campus in Asan (Chungnam; inland plain). Snow load was recorded at 1-min intervals by a circular load-cell snow plate (0.40 m diameter; area 0.1257 m²) set flush with the ground. Meteorological variables and operational ground snow depth were taken from the nearest KMA ASOS station. Load-cell monitoring has continued since the 2023 winter; the concurrent depth-load dataset analysed here is from the 2025 winter, when all three sites operated simultaneously.

Snow depth was read from time-stamped photographs of a graduated staff beside the plate (Fig. 1). Because wet snow accumulates on the circular plate as a rounded dome, the photographed height was converted to an equivalent uniform depth by an ellipsoidal shape correction, so that depth and weighed mass refer to the same snow volume.

Because bulk density is defined as mass divided by depth, regressing density on the same depth introduces a spurious correlation through the shared denominator. Depth dependence was therefore evaluated from the directly measured snow load, which contains no depth term, by fitting $P = ad^b$ in logarithmic



Fig. 1 Field measurement of snow depth and snow load

space: $b > 1$ indicates progressive densification, whereas $b \approx 1$ implies a depth-independent bulk density. Constant, linear, and square-root models of unit weight were compared by leave-one-site-out cross-validation (LOSO) to assess spatial transferability.

3. Results

After quality control, 78 concurrent depth–load pairs were obtained, of which 70 were wet snow (snowfall-to-rainfall ratio $SRR < 10$). Plate snow depth ranged from 1.5 to 29.0 cm and SWE from 4.6 to 70.2 mm. Bulk density averaged $0.248 \pm 0.080 \text{ g cm}^{-3}$ ($2.43 \pm 0.79 \text{ kN m}^{-3}$) and ranged from 0.068 to 0.381 g cm^{-3} , three to five times the $0.05\text{--}0.10 \text{ g cm}^{-3}$ typical of fresh continental dry snow. Site means differed systematically (Daegwallyeong 3.05, Hoseo University 2.60, Gubyeong-ri 2.09 kN m^{-3}), indicating that the snowfall environment governs the level of density rather than its dependence on depth.

The directly measured snow load increased almost proportionally with plate snow depth (Fig. 2): $b = 0.82$ (95% CI 0.70–0.93), $r = 0.94$. Because the exponent is close to, and not greater than, unity, there is no evidence of progressive densification over the observed range, so the bulk density of event-scale wet snow is essentially independent of depth. The constant model also gave the lowest LOSO prediction error, and a representative bulk density of 0.265 g cm^{-3} (2.60 kN m^{-3} ; 95% CI 2.46–2.74) is proposed.

The consequences for depth-to-SWE conversion are considerable. Event-scale accumulation densities derived from ASOS precipitation and snow-depth increments were about 0.10 g cm^{-3} at Daegwallyeong, 0.06 at Boeun, and 0.03 at Cheonan, that is 2.5 to 8 times lower than the directly measured bulk density, so gauge-based SWE is severely underestimated. This reflects undercatch of solid precipitation and the fact that a gauge measures falling precipitation rather than the snow retained on the ground. Plate and operational ground snow depths were also weakly correlated ($r = 0.21$), showing that ASOS depth is a poor surrogate for the snow actually weighed.

4. Conclusion

Concurrent load-cell and image-based observations at three Korean sites show that the bulk density of maritime wet snow averages $0.248 \pm 0.080 \text{ g cm}^{-3}$ and is essentially independent of snow depth ($P \propto d^{0.82}$, $r = 0.94$), a constant model outperforming depth-dependent alternatives under leave-one-site-out cross-validation. A representative value of 0.265 g cm^{-3} (2.60 kN m^{-3}) is recommended for converting operational snow-depth observations into SWE.

Because snow type rather than depth controls the density of maritime wet snow, and because precipitation-based estimates underestimate snow water storage by a factor of 2.5 to 8, a directly measured representative density should improve snow water storage estimation, snowmelt-runoff modelling, and the validation of satellite SWE retrievals. The dataset is limited to shallow ($< 0.3 \text{ m}$), event-scale snow from a single winter; extension to deeper seasonal snowpacks and to other maritime regions, including the Sea of Japan side of Japan, is needed.

References

- 1) Izumi, H., Kazama, S., Totsuka, T., and Sawamoto, M. (2005). Estimating the distribution of snow water equivalent, snow depth and snow density in Japan. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 49, 301–306.
- 2) Jonas, T., Marty, C., and Magnusson, J. (2009). Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 378, 161–167.
- 3) Kazama, S., Izumi, H., Sarukkalgige, P. R., Nasu, T., and Sawamoto, M. (2008). Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources. *Hydrological Processes*, 22, 2315–2324.
- 4) Ro, Y., Chang, K.-H., Cha, J.-W., Chung, G., Choi, J., and Ha, J.-C. (2019). A study of quantitative snow water equivalent (SWE) estimation by comparing the snow measurement data. *Atmosphere (Korea)*, 29, 269–282 (in Korean).
- 5) Sturm, M., Taras, B., Liston, G. E., Derksen, C., Jonas, T., and Lea, J. (2010). Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes. *Journal of Hydrometeorology*, 11, 1380–1394.

Keywords: Wet snow; Snow water equivalent (SWE); Snow bulk density; Load-cell measurement; Depth-to-SWE conversion

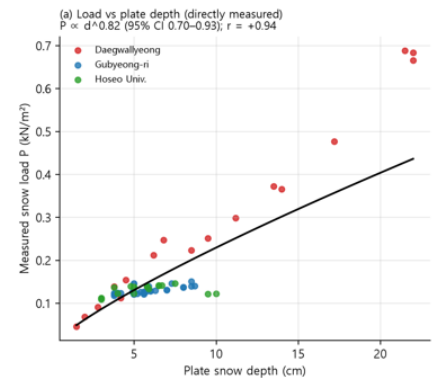


Fig. 2 Load-based analysis of depth dependence (wet snow)

Duration- and Rarity-Dependent Scaling of Extreme Precipitation
with Warming: Insights from Stochastic Storm Transposition of Large Climate Ensembles

Department of Civil Engineering, Tohoku University
Department of Civil Engineering, Tohoku University
Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison

Wasitha Dilshan
Yusuke Hiraga
Daniel B. Wright

1. Introduction

Climate change is intensifying extreme precipitation, posing direct risks to critical infrastructure such as dams, levees, and spillways. The Clausius–Clapeyron (CC) relationship predicts atmospheric moisture capacity increases of $\sim 7\%/K$, setting a thermodynamic baseline for precipitation scaling under warming. For moderate return periods, global ensembles consistently yield near-CC scaling ($\sim 6\text{--}7\%/K$) for daily extremes, while sub-daily events often exhibit super-CC rates ($>10\%/K$) driven by dynamic amplification within convective systems (Fowler et al., 2021). However, how these scaling rates evolve toward extremely rare events with annual exceedance probabilities (AEPs) below 10^{-3} , relevant to probable maximum precipitation (PMP) design, remains poorly characterized. Observational records are too short to directly sample such extremes, while conventional statistical extrapolation introduces compounding uncertainty at the tail. Recent guidance (NASEM, 2024) calls for a probabilistic redefinition of PMP, yet quantitative tools at these AEPs are lacking (Hiraga et al., 2025). This study addresses that gap by coupling Stochastic Storm Transposition (SST) with the d4PDF high-resolution large-ensemble dataset to systematically quantify, for the first time, warming-dependent scaling rates across storm duration (1–48 h) and event rarity (AEP 10^{-1} to 10^{-5}) over the Mogami watershed, northern Japan.

2. Method

The Mogami watershed ($\sim 7,040\text{ km}^2$, northern Japan) provides a demanding test domain with diverse storm mechanisms such as typhoons and frontal rainfall, as well as high infrastructure exposure. The d4PDF dataset supplies 12 ensemble members of 5 km dynamically downscaled hourly precipitation (~ 720 years per scenario) under historical, +2K, and +4K warming (Kawase et al., 2023), combining spatial resolution and ensemble depth for probabilistic analysis at extremely low AEPs. Validation against 35 years of Radar/Rain Gauge-Analyzed (RA) data supports reliable reproduction of observed rainfall frequency across all durations.

SST, implemented via the open-source RainyDay tool (Wright et al., 2020), spatially transposes simulated storms across a meteorologically homogeneous region, multiplying realizations while preserving each event’s structure. The Western Tohoku region ($\sim 28,800\text{ km}^2$) serves as the transposition domain and is also relevant to current operational flood-risk and PMP-related practice in Japan. For each of five durations (1, 6, 12, 24, 48 h) and each ensemble member under all three warming scenarios, the 600 largest storms are catalogued (winter excluded; Poisson occurrence $\lambda \approx 10/\text{year}$). Synthetic records of 100,000 years are generated per member per scenario, repeated 100 times to bound uncertainty, and Annual Maximum Series are extracted to estimate precipitation depths from AEP 10^{-1} to 10^{-5} .

For each duration–AEP combination, a linear regression through depth estimates at 0, +2, and +4K yields 12 scaling rate

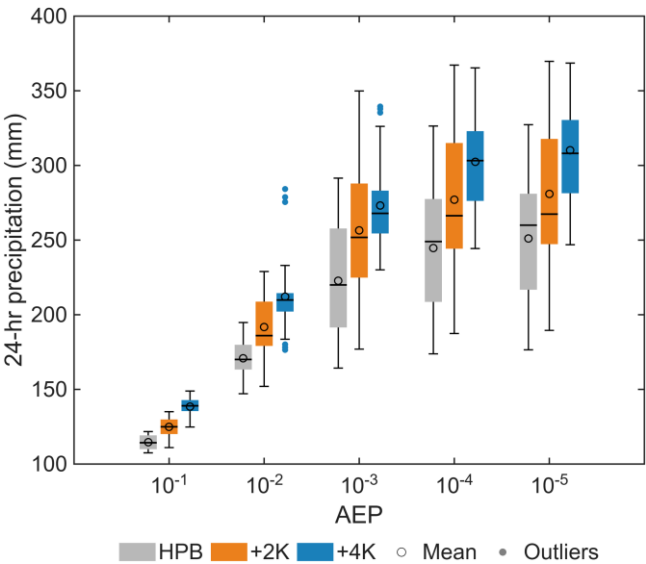


Fig. 1 Comparison of 24-h Extreme Precipitation Estimates Across Exceedance Probabilities Under HPB, +2 K, and +4 K Climate Conditions.

estimates (%/K) per ensemble member. Ensemble mean, minimum, and maximum are reported, mapping warming-induced intensification across the full duration–rarity space.

3. Results

Figure 1 presents boxplots of SST-derived extreme precipitation depths under HPB, +2K, and +4K climates, for 24-hour rainfall accumulation. A clear and systematic climate signal is evident across all AEPs: median depths increase with warming, and the inter-quartile spread widens under higher warming levels, indicating both greater median extremes and increased ensemble variability at the rarest events.

Table 1 quantifies these shifts as warming-dependent scaling rates (%/K) across all five durations and AEPs 10^{-1} to 10^{-5} . Ensemble means remain near or below CC ($\sim 4\text{--}7\%/K$) for all durations, while ensemble maxima are consistently super-CC. For 1-hour events the maximum peaks at $\sim 24\%/K$ near AEP $10^{-3}\text{--}10^{-4}$, with the mean flat at $\sim 6\text{--}7\%/K$ throughout, reflecting high inter-member spread from convective variability. The 6-hour and 12-hour durations show maxima rising to ~ 18 and $\sim 14\%/K$ respectively, with the 12-hour response the most AEP-stable. The 24-hour duration is notably distinct: the ensemble maximum rises sharply from $\sim 8\%/K$ at 10^{-1} and sustains $\sim 19\text{--}20\%/K$ across the full rare tail, suggesting a persistent large-scale dynamic amplification. For 48-hour events, the maximum peaks at $\sim 21\%/K$ near AEP 10^{-3} then moderates, while the mean declines below CC ($\sim 4\%/K$) at rarer events. Across all durations, ensemble minima become negative at the rarest AEPs, underscoring the irreducible tail uncertainty that only large-ensemble sampling can capture.

4. Conclusion

This study delivers the first systematic, two-dimensional characterization of warming-dependent precipitation scaling across storm duration and event rarity using an SST–large-ensemble framework. Three key findings emerge: first, ensemble-mean scaling rates are near or below CC ($\sim 4\text{--}7\%/K$) for all durations, but ensemble-maximum rates are consistently super-CC, reaching up to $23\%/K$ for short durations; second, the 24-hour duration exhibits a distinct pattern of sustained, rarity-intensifying super-CC maxima, while 48-hour means decline below CC at the rare tail; and third, ensemble spread widens markedly toward lower AEPs, revealing irreducible uncertainty that only large-ensemble approaches can quantify. Storm duration and event rarity must both be explicitly incorporated into probabilistic PMP frameworks and infrastructure design standards under warming.

[Acknowledgement]

This study was supported by Kajima Foundation and Tohoku Chiikizukuri Kyokai

References

1) Fowler, H.J. et al., 2021. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. Nat. Rev. Earth Environ., 2(2): 107–122.

2) Hiraga, Y. et al., 2025. Climate change effects on probable maximum precipitation (PMP) of mesoscale convective systems: Model-based estimation and large ensemble-based frequency analysis. J. Hydrol., 661: 133724.

3) Kawase, H. et al., 2023. d4PDF 5 km dynamical downscaling dataset. Hydrol. Res. Lett.

4) NASEM, 2024. Modernizing Probable Maximum Precipitation Estimation. National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/27460>

5) Wright, D.B., Yu, G., and England, J.F., 2020. Six decades of rainfall and flood frequency analysis using stochastic storm transposition. J. Hydrol., 585: 124816.

Keywords: Extreme Precipitation Scaling; Large-Ensemble Climate Simulation; Stochastic Storm Transposition.

Table 1. Climate Warming–Induced Change in Extreme Precipitation Depth per Degree Kelvin (%/K) for Durations 1–48 h Across AEPs.

Duration	Mean / Max (%/K) — AEP				
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
1 hr	6.7/ 12.9	6.7/ 17.9	6.5/ 20.0	6.3/ 23.3	6.0/ 19.9
6 hr	5.3/ 9.1	5.8/ 14.5	6.3/ 18.4	5.3/ 16.5	5.0/ 13.9
12 hr	5.2/ 7.5	5.7/ 12.7	6.4/ 14.0	6.0/ 13.6	5.9/ 13.2
24 hr	5.3/ 8.6	6.2/ 17.9	6.5/ 19.1	6.9/ 19.3	6.8/ 18.8
48 hr	4.6/ 8.3	5.4/ 10.9	4.7/ 21.5	3.9/ 15.9	3.6/ 17.2

一般セッション(口頭講演) | 森林水文学

2026年9月16日(水) 9:00 ~ 10:15 | 2Fホール(2F)

[OS-07] 森林水文学

座長:井手 淳一郎(公立千歳科学技術大学 理工学部)

9:00 ~ 9:15

[OS-07-01] 北方冷温帯シラカンバ林における樹冠通過雨中溶存有機物の時空間変動に関する解析

*井手 淳一郎¹、小林 稜英¹、加藤 雅悠¹、小山田 凌¹、遠藤 いず貴^{1,2,3}、西村 裕志⁴、大橋 瑞江³ (1. 公立千歳科学技術大学、2. 北海道立総合研究機構、3. 兵庫県立大学、4. 京都大学)

9:15 ~ 9:30

[OS-07-02] 水の蒸発メカニズム再考

—樹冠遮断蒸発は既存理論の限界を浮き彫りにしている—

*村上 茂樹¹ (1. 森林総合研究所 九州支所)

9:30 ~ 9:45

[OS-07-03] タワー観測によるスギ壮齢人工林の樹冠通過雨量の鉛直分布と降雨・気象条件の影響

*安川 律基¹、五味 高志¹、小谷 亜由美¹、南光 一樹²、村上 茂樹³ (1. 名古屋大学大学院 生命農学研究科、2. 東京農工大学 大学院農学研究院、3. 森林総合研究所)

9:45 ~ 10:00

[OS-07-04] 堆積岩山地の森林小流域における降雨前の乾湿状態の違いが洪水流出規模に及ぼす影響

*小島 永裕¹、谷 誠² (1. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター、2. 元京都大学大学院農学研究科)

10:00 ~ 10:15

[OS-07-05] 豪雨時の空気押し出し流仮説とリチャーズ式への組み込みに関する数値実験

*白木 克繁¹、森貞 完太¹ (1. 東京農工大学大学院)

北方冷温帯シラカンバ林における樹冠通過雨中溶存有機物の時空間変動に関する解析

○井手淳一郎（公立千歳科学技術大理工），小林稜英（公立千歳科学技術大理工），
加藤雅悠（公立千歳科学技術大理工），小山田 凌（公立千歳科学技術大理工），
遠藤いず貴（道総研），西村裕志（京都大生存研），大橋瑞江（兵庫県立大環境人間）

1. はじめに

近年の人間活動に伴う森林の改変は単に森林面積の減少を意味するだけでなく、森林の空間構造を変え、とりわけ、森林伐採等によって生じる森林の境界域（林縁）において水・物質循環の顕著な変化をもたらす。例えば、林縁においては林内よりも大気由来の汚染物質や栄養塩の沈着量が増加する場合がある¹⁻³。Spangenberg and Kölling¹は、農業活動に起因するアンモニア排出が林縁における窒素沈着量を増加させ、土壌のC/N比を森林内部のそれよりも低下させ、窒素飽和のリスクを高めることを指摘した。このような、林縁において生じる水・物質循環の顕著な変化を“エッジ効果”と呼び、森林の改変はエッジ効果を介して森林の衰退を招く可能性がある。

溶存有機物（DOM）は森林の物質循環において中心的な役割を担っている。なぜなら、DOMは金属や栄養塩等、様々な物質と複合体を形成し、土壌から水域への物質を輸送するからである。また、DOMは物質変換の主要な担い手である微生物のエネルギー源でもある。さらに、DOMは森林を通過する雨水や河川水等の天然水の色や酸性度も規定する。DOMは雨水を介して樹冠と相互作用し、森林生態系内にもたらされる。この際、樹体から雨水へ様々な有機物が溶解するため、樹種によって樹冠通過雨のDOMの質は異なることが知られている⁴。一方、林縁や林内等の樹木の立地条件が樹冠通過雨中DOMの質に及ぼす影響については十分にはわかっていない。加えて、冷温帯林などの寒冷地の森林には多くの落葉樹林が存在するが、こうした樹木の生物季節性は立地条件と樹冠通過雨中DOMの質との関係に影響を及ぼす可能性がある。

本研究では、北方冷温帯林において樹木の立地条件や季節によって樹冠通過雨中DOMの質がどのように異なるのかを検討することを目的とした。このため、北海道の森林に群生する先駆樹種のシラカンバを対象として、林縁と林内において樹冠通過雨を季節ごとに採取し、そのDOMの量と質を計測し、時間的・空間的に比較した。

2. 方法

本研究は北海道千歳市の美々公園の森林（42°47'N, 141°41'E）において行われた。本試験地は冷温帯に属し、周辺の年平均気温と年平均降水量はそれぞれ、7.4°C、984.7 mm（2003年－2020年）である。本試験地は主に落葉広葉樹林から構成され、ミズナラ、カシワ、シラカンバ等が自生している。

本試験地のシラカンバ（*Betula platyphylla* var. *japonica*）が群生する道路に面した林縁と林内に10 m×10 mの方形プロットを設置した。シラカンバ林の平均樹高、平均胸高直径、および立木密度は林縁プロットでそれぞれ、10.6±4.1 m、16.6±7.8 cm、1200本 ha⁻¹であり、林内プロットでそれぞれ、12.0±7.2 m、12.0±9.9 cm、2500本 ha⁻¹であった。雨水採水器をそれぞれのプロットに3個ずつ、計6個設置した。当プロットにおいて2024年5月～11月の期間において3週に1回の割合で雨水採水器に貯留された樹冠通過雨（TF）を採水し、同時にTF量を計測した。また、2025年の8月と10月に集中的な採水を行い、TF量を計測した。TF試料水を採水する際には、全天球カメラ（RICOH製THETA SC）で雨水採水器の直上の樹冠を撮影し、フリーウェアのCanopOn 2⁵を用いて開空度を算出した。

採取したTF試料水はガラス繊維ろ紙（Whatman製GF/F）でろ過後、全有機体炭素計（島津製作所製TOC-L）に供し、溶存有機炭素（DOC）濃度を計測した。また、分光光度計（島津製作所製UVmini-1240）に供し、254 nmの吸光度を測定し、DOC濃度で除して試料水の紫外線吸光特性（SUVA）を算出した。2025年度のTF試料水についてはろ過したものを、スチレンジビニルベンゼンポリマーのカートリッジ（Agilent Technologies製Bond Elut PPL）を用いて固相抽出した後、フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴型質量分析計（FT-ICR-MS; Bruker Daltonics製solariX 7.0T）に供してマスペクトルを取得した。

3. 結果と考察

2024年の観測期間中のDOC沈着量の合算値は林縁と林内のプロット間で差がなかった。一方、DOM沈着量の時系列データから、DOC沈着量は林縁と林内とに関わらず、開空度が大きいと減少することがわかった。また、DOC沈着量が同等の場合、SUVAは春季・夏季（5月～8月）の方が秋季（9月～11月）よりも有意に高かった。これは、春季・夏季は秋季に比べ樹木の代謝が活発であり、樹体からのDOMの溶脱量が多く、樹冠通過雨（TF）のDOMに植物組織由来の芳香族性化合物が豊富に含まれていたことを示唆する⁶。このことは2025年に取得したFT-ICR-MSによるDOM構成分子種の結果によっても支持される。すなわち、TFのDOM構成分子種は林縁と林内のプロット間では差異は認められなかったものの、夏季（8月）と秋季（10月）との間では明確に異なった（PERMANOVA, $p < 0.01$ ）。

一方、秋季においては林縁プロットのTFのSUVA ($2.4 \pm 0.3 \text{ l mg}^{-1} \text{ m}^{-1}$) は林内プロットのそれ ($2.8 \pm 1.1 \text{ l mg}^{-1} \text{ m}^{-1}$) よりもわずかに低かった。このことはSUVAと開空度との負の相関関係 ($r = -0.51, p < 0.05$) から説明されうる。すなわち、開空度は林縁プロットで林内プロットよりも大きかったことから、秋季では林縁で落葉がより早く進行し、林縁では雨水と樹冠との接触の機会が減少し、その結果としてTFのSUVAが低かったと考えられる。本研究の結果から、北方冷温帯のシラカンバ林では、TFのDOMの質は立地条件というよりは生物季節性に左右されるものの、秋季においては林縁の早期の落葉進行により、樹体から雨水へのDOMの供給が減ることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は科学研究費助成事業（20KK0241; 21K18113; 23K23650; 24H00057; 24K01815; 24K01016）および京都大学生存圏研究所ADAM共同利用・共同研究（R6-ADAM-13; R7-ADAM-10; R8-ADAM-9）の援助を受けておこなわれたことを記して謝意を表します。

引用文献

1. Spangenberg, A. & Kölling, C. Nitrogen Deposition and Nitrate Leaching at Forest Edges Exposed to High Ammonia Emissions in Southern Bavaria. *Water, Air, Soil Pollut.* **152**, 233–255 (2004).
2. Weathers, K. C., Cadenasso, M. L. & Pickett, S. T. A. Forest Edges as Nutrient and Pollutant Concentrators: Potential Synergisms between Fragmentation, Forest Canopies, and the Atmosphere. *Conserv. Biol.* **15**, 1506–1514 (2001).
3. Wuyts, K. *et al.* Comparison of forest edge effects on throughfall deposition in different forest types. *Environ. Pollut.* **156**, 854–861 (2008).
4. Stubbins, A., Silva, L. M., Dittmar, T. & Van Stan, J. T. Molecular and Optical Properties of Tree-Derived Dissolved Organic Matter in Throughfall and Stemflow from Live Oaks and Eastern Red Cedar. *Front. Earth Sci.* **5**, 1–13 (2017).
5. 竹中明夫. CanopOn2. *TAKENAKA's Web Page* (2003).
6. Ide, J., Makita, N., Jeong, S., Yamase, K. & Ohashi, M. The contribution of coniferous canopy to the molecular diversity of dissolved organic matter in rainfall. *Water (Switzerland)* **11**, (2019).

キーワード : Biogeochemical cycle, Deciduous broad-leaved forest, Edge effect, Molecular diversity, Optical properties

Rethinking the mechanism of water evaporation
— Canopy rainfall interception highlights the limitations of existing theories —

Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute Shigeki Murakami

1. Introduction

Water vapor flux E is proportional to the vertical gradient of moisture content in the air, which is the driving force of evaporation. However, some studies showed that canopy rainfall interception CI , evaporation of rainwater from the canopy, increases with rainfall intensity due to increase in splash droplets^{1), 2)}, and CI does not appear to be promoted by the increase in the gradient. Moreover, some studies showed that the majority of CI occurs under the canopy where there were few leaves and branches during rainfall by splash droplet evaporation^{2), 3)}. Those observational facts have the potential to overturn conventional wisdom on water evaporation.

In this study CI was measured at three different heights under the canopy of a Japanese cedar stand along with relative humidity RH and air temperature T at two heights to evaluate the contribution of the vertical gradient of moisture content to water vapor transport, i.e. CI , under the canopy.

2. Materials and Methods

The measurements were conducted in February and March in 2026 in the cedar stand planted in 2013^{2), 4)} with an average tree height of some 12 m, the height of living branches of some 6 m, the stand density of 5700 trees/ha and LAI of 6.7. Gross rainfall GR was measured using a raingauge with 0.1 mm per tip. Throughfall TF collectors consisting of five 60-cm square funnels were installed at heights of 1.0 m, 2.7 m and 4.3 m above the ground level. Stemflow SF collectors were set on eight representative trees at heights of 1.0 m and 4.3 m. Since the difference in SF between 1.0 m and 4.3 m was the same as the measurement error, the average value of SF at the two heights was regarded as SF at 2.7 m. TF and SF were measured using tipping-bucket flowmeters. CI was calculated as, $CI = GR - TF - SF$.

Thermohygrometer sensors (HMP 155 with warmed probe, Vaisala, Helsinki, Finland) set in forced ventilation shields were installed at 1.0 m and 4.3 m above the ground level. The calibration was conducted

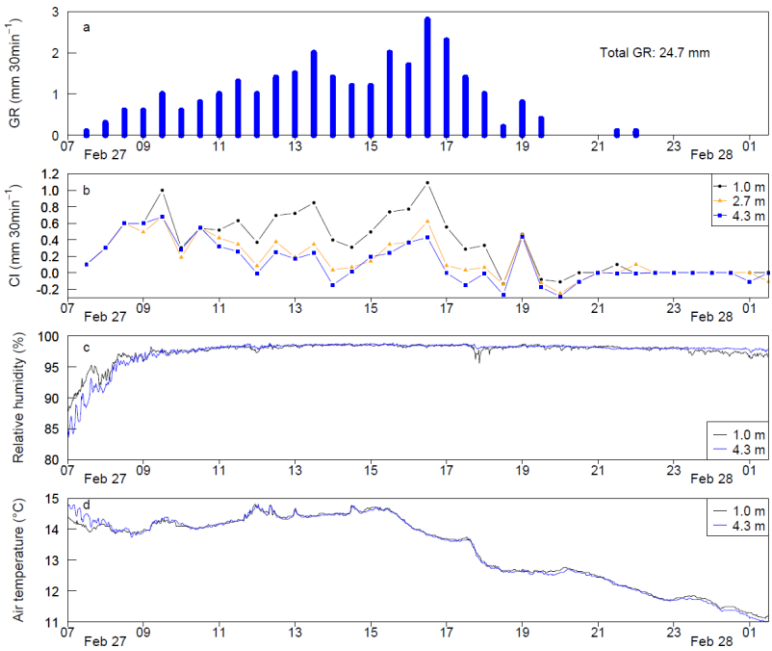


Fig.1 Gross rainfall GR , canopy rainfall interception CI , relative humidity RH and air temperature T for rain event 27 Feb 2026.

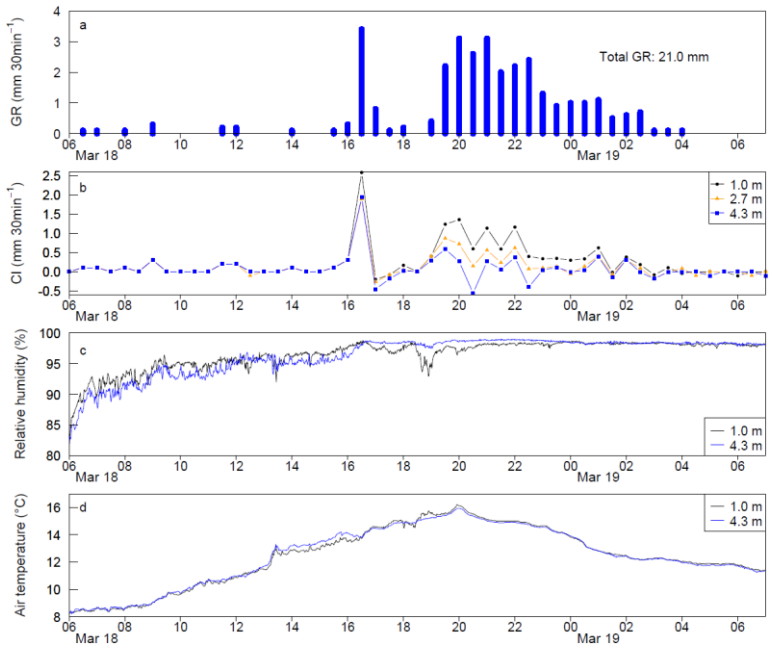


Fig. 2 Gross rainfall GR , canopy rainfall interception CI , relative humidity RH and air temperature T for rain event 18–19 Mar 2026.

Table 1 Measured gross rainfall *GR*, canopy rainfall interception *CI*, air temperature *T* and relative humidity *RH* and specific humidity *q* at each height .

Date Time	<i>GR</i>	<i>CI</i> at 1.0 m	<i>CI</i> at 2.7 m	<i>CI</i> at 4.3 m	<i>T</i> at 1.0 m ¹⁾	<i>T</i> at 4.3 m ¹⁾	<i>RH</i> at 1.0 m ¹⁾	<i>RH</i> at 4.3 m ¹⁾	<i>q</i> at 1.0m ¹⁾	<i>q</i> at 4.3m ¹⁾
	(mm 30min ⁻¹)	(mm 30min ⁻¹)	(mm 30min ⁻¹)	(mm 30min ⁻¹)	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)
2026/2/27 16:00 – 16:30	2.8	1.1	0.6	0.4	14.0	14.0	98.5	98.4	9.70	9.69
2026/3/18 19:30 – 20:00	3.1	1.4	0.7	0.3	15.8	15.7	97.5	98.7	10.84	10.86

1) A 30-min average.

by the manufacturer for thermometers and hygrometers at several reference *T* and *RH*. For the reference *T* at 23.90°C and *RH* at 94.7%, the discrepancies of measurements were 0.0°C for *T* and ≤ 0.1% for *RH*, respectively.

Based on *T* and *RH* data, it was examined whether the measured *CI* can be interpreted using conventional concept.

3. Results and discussion

For rain events on 27 February 2026 and 18 to 19 March 2026, *GR* measured at the open site, *CI* at heights of 1.0 m, 2.7 m and 4.3m above the ground level, *RH* and *T* at 1.0 m and 4.3 m were shown in Figs. 1 and 2, respectively. In Fig. 1 *GR*, *CI* at 1.0 m, 2.7 m and 4.3 m were 24.7 mm, 10.6 mm, 5.7 mm and 4.4 mm, respectively, while in Fig. 2 they were 21.0 mm, 13.1 mm, 7.3 mm and 3.9 mm, respectively. For both rain events *CI* measured at lower position is higher than at higher as shown by previous studies ^{2), 3)}.

In Fig. 1, the maximum *GR* was observed between 16:00 and 16:30, with a value of 2.8 mm/30min (Table 1). The differences in *CI*, *T* and *RH* between 1.0 m and 4.3 m were 0.7 mm/30min, 0.0°C and 0.1%, respectively. Sensible heat flux *H* between the two heights was zero as the difference in *T* was zero, and *E* was also zero considering the measurement error of *RH*. Both net radiation *R_n* and the ground heat flux *G* can be assumed to be zero since it was raining under the canopy. Despite *H* = *E* = 0, *R_n* ≈ 0, and *G* ≈ 0, measured *E* between 1.0 m and 4.3 m was as much as 0.7 mm/30min, i.e. 951 W/m².

For the rain event from 18 to 19 March (Fig. 2), I focus on the *GR* peak between 19:30 and 20:00 with the amount of 3.1 mm/30min as shown in Table 1. The difference in specific humidity *q* between 1.0 m and 4.3 m was −0.02 g/kg (< 0). The negative value means *E* is downwards, which is opposite to the direction of measured *E*.

The results imply the water vapor gradient is not major driver of evaporation. Molar weight of water, 18, is considerably smaller than dry air, 29, and water vapor has a nature to rise by itself (evaporative force) ⁵⁾. It is similar how methane gas (major component of liquified natural gas) with molar wight of 16 rises and accumulates near the ceiling when it leaks into a room. On a larger scale, when water vapor condenses and forms clouds the volume reduces drastically. That also generates updraft and promotes evaporation ⁶⁾. Neither mechanism has been discussed in the meteorological literature to date.

4. Conclusion

Atmospheric dynamics during rainfall have been largely unstudied. *CI* is the key phenomenon for understanding it and at the same time, it serves as a useful tool to verify a series of theories on biotic pump proposed by Makarieva.

References

1) Murakami, S. 2006 J. Hydrol., 319, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.002>
2) Murakami, S. 2024 SSRN, <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5007516>
3) Murakami, S. and Kitamura, K. 2023 Proc. of 2023 Annu. Conf. Jpn. Soc. Hydrol. Water Resour./Jpn. Assoc. Hydrol. Sci., Session ID: OP-1-01. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jshwr/36/0/36_5/_article/-char/en
4) Murakami, S. 2023 J. Hydrol., 634, 131100. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131100>
5) Makarieva, A.M. and Gorshkov, V.G. 2007 Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1013–1033. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007>
6) Makarieva, A.M. et al. 2013Atmos. Chem. Phys., 13, 1039–1056. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1039-2013>

Keywords: canopy rainfall interception, water evaporation, splash droplet evaporation, evaporative force, biotic pump

タワー観測によるスギ壮齢人工林の樹冠通過雨量の鉛直分布と 降雨・気象条件の影響

名古屋大学大学院生命農学研究科 ○安川律基・五味高志・小谷亜由美
森林総合研究所 村上茂樹
東京農工大学 南光一樹

1. はじめに

森林の降雨は樹冠に衝突した後にその 70～80%が樹冠通過雨として地表へ到達する(Carlos et al.,2024)。樹冠通過雨は、雨滴が葉や枝に貯められて大粒となり落ちる滴下雨、雨滴が樹冠に衝突して飛散した後に落ちる飛沫雨、樹冠のすき間を通り抜ける直達雨のような形態で地表に到達しており、その粒径分布は林外雨に比べて小規模群と大規模群の二群に大別される(Levia et al.,2017)。この小規模な雨滴の一部は落下中に蒸発していると示唆され(Murakami,2006)、実際にスギ若齢林で樹冠直下と林床の樹冠通過雨量に林外雨量に対して 14%の差が生じていることが確認された(村上,2023)。しかし、より樹高の高く一般的な壮齢林の研究例は不足しており、また、この樹冠通過雨量の差が降雨量や降雨強度、降雨時間のような降雨特性条件、温度や湿度、風速のような気象条件でどのように量が変化するかは未解明である。

そこで本研究では ①スギ壮齢林での樹冠直下と林床の樹冠通過雨量の変化の把握②通過雨量に変化が生じた際の降雨特性と気象条件の比較を通して樹冠通過雨量の高さ間の変化とその変化が発生する条件を推測することを目的とした。

2. 調査方法

本研究は、愛知県豊田市名古屋大学稲武演習林月ヶ平に位置する立木密度 1322 本/ha、平均樹高 25.4m、枝下高 17～18m の 53～57 年生スギ人工林分内のタワー(高さ 15m)で観測を実施した。このタワーの 15m 地点(枝下 2m)、高さ 0.5m の林床、林外において樋型雨量計(集水面積 1.34 m²)と貯水型雨量計(集水面積 0.10 m²)により雨量を、温湿度計や風速観測機器により温湿度と風速を定点観測した。降雨イベントの 6 時間の無降雨状態を降雨イベントの区切りとして解析を行い、各イベントの林外雨量(mm)、イベント最大降雨強度(mm/10 分)、降雨継続時間(h)、平均気温(°C)、平均相対湿度(%), 平均風速(m/s)の気象情報を集約した。そして、15m から林床までの樹冠通過雨減衰量($\Delta TF = TF_{15} - TF_{0.5}$)を算出し、集約した降雨特性・気象条件の情報と比較を行った。

3. 結果

2025 年 6 月～12 月に観測を行い、合計 22 イベント(総雨量 0.9～51.0mm)で TF 鉛直分布を把握し、降雨量に対して樹冠通過雨量が増加したことを確認した。21 イベントで $\Delta TF = 0.1 \sim 4.2 \text{ mm/event}$ が発生し、樹冠直下と林床の樹冠通過雨量は林外雨量に対して 7%の違いが生じていた(図-1)。また、貯水型雨量計では 2.5 年に 1 度の豪雨(日合計降水量 136mm)を 2 高度で観測でき、 ΔTF が林外雨量の 27%を占めた。

次に、イベント最大降雨強度別の ΔTF の平均を比較すると、強度 < 1 (n=11)、1～2 (n=5)、2～3 (n=3)、 ≥ 3 (n=3)で 0.3、0.5、0.7、2.4mm であり、降雨強度の増加とともに ΔTF が増加する傾向が見られた(図-2)。

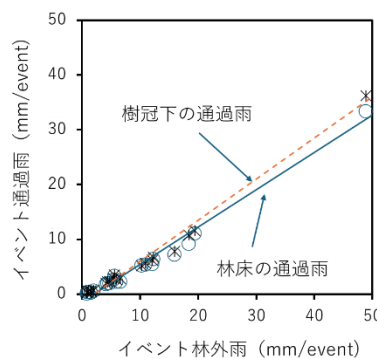


図-1 高度別のイベントごとの林外雨量と通過雨量の関係

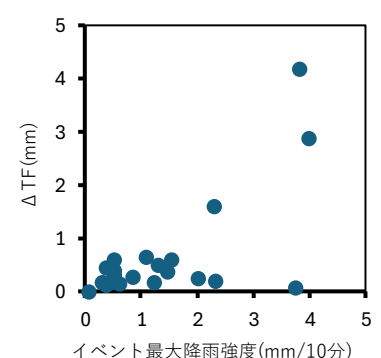


図-2 イベント別の最大降雨強度と ΔTF の関係

さらに、同一降雨強度でも降雨継続時間の違いにより鉛直差が変動し、降雨時間が短いときに ΔTF が減少する傾向が見られた(図-3)。また、 ΔTF の値と気象条件(温度、湿度、風速)に相関関係はみられず、 ΔTF の生じたイベントの相対湿度の平均は 100%であった。

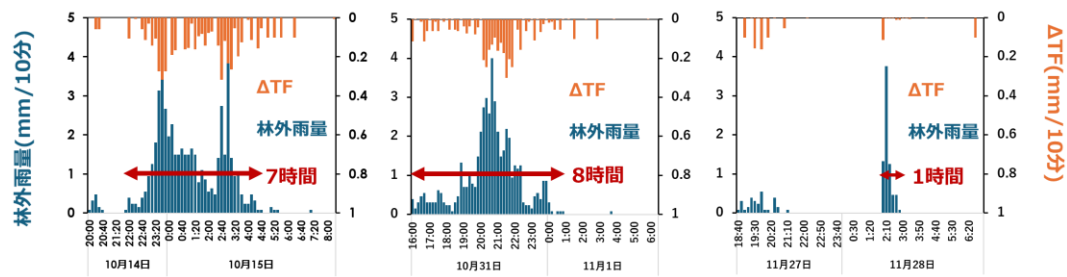


図-3 降雨時間の長い 2 イベントと短い 1 イベントの
林外雨量と ΔTF の時系列変化

4. 考察

降雨規模の増加は、落下する微小雨滴の増加と消滅に影響し、それが ΔTF の発生に影響すると考えられた。降雨強度の増加により樹冠に衝突する雨滴の数や運動エネルギーが増大し、その結果、飛沫化する雨滴が増加する。飛沫化した雨滴は単位体積当たりの表面積が大きく、蒸発が生じやすくなるため、降雨強度の増加による雨滴の飛沫化は ΔTF の増加に影響していると示唆される。また、降雨時間の増加は樹冠表面を継続的に濡れさせ、樹冠の雨滴捕捉力を低下させる。捕捉できなくなった雨滴は滴下雨として落下し飛沫化する、また樹冠表面の捕捉されている雨滴を継続的に衝突させることで、飛沫が生じやすくなると考えられる。よって、降雨時間の増加もまた雨滴の飛沫化に影響し、 ΔTF を増加させると示唆される。実際、2.5 年に 1 度の大規模な雨が生じた期間で ΔTF が増加しており、近年多発しているゲリラ豪雨や線状降水帯のような豪雨時に ΔTF が樹冠遮断現象に与える影響がさらに大きくなると推測された。

さらに、 ΔTF が生じたイベント中の気象条件は、多量の水滴が蒸発できるものではないと推測される。本研究から、水滴の蒸発しにくい条件下で ΔTF の発生が確認され、樹冠への衝突で生じる微小雨滴が蒸発とは別のプロセスでも消滅している可能性が考えられた。その別のプロセスとして考えられるのが「微小雨滴の浮遊」である。降雨後の森林から霧が立ち上る現象が生じるように、微小雨滴は蒸発せずに液体のまま浮遊して森林外へ除去されている可能性がある。この現象を理解するためには、雨滴の動態についてさらに検証が必要であり、雨滴の大きさや速度を詳しく調べなければならない。

参考文献

- 1) Carlos, R. de Mello. et al. (2024). Deciphering global patterns of forest canopy rainfall interception (FCRI): A synthesis of geographical, forest species, and methodological influences. Journal of Environmental Management, 358, 120879
- 2) Levia, F. D. et al. (2017). Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research. WIREs Water 2017, 4, e1225
- 3) Murakami, S. (2006). A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation. Journal of Hydrology, 319, 72-82.
- 4) 村上茂樹, 北村兼三. (2023). 樹冠遮断はどこで生じるのか?. 水文・水資源学会研究発表会要旨集, OP-1-01.

キーワード：樹冠遮断、樹冠通過雨、雨滴飛沫の消滅、降雨強度

堆積岩山地の森林小流域における降雨前の乾湿状態の違いが洪水流出規模に及ぼす影響

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター ○小島永裕
元京都大学大学院農学研究科 谷 誠

1. はじめに

山地森林流域の降雨流出過程において、大規模な降雨では流出総量が降雨総量と一致するようになり、このとき流域全体が洪水流出に寄与していることが推察される。この場合は有効降雨分離を略すことができ、降雨から流出への波形変換が単純化するので、筆者らは大規模な降雨イベントを中心に降雨流出過程の解析を進めてきた(小島・谷, 2018)。そのうえで、降雨前が乾燥している場合は洪水流出規模が小さくなると考えられ、降雨前の乾湿状態の洪水流出応答に及ぼす影響の解析が重要である。

筆者らは、森林小流域の一斜面において土壌水分の時空間分布を詳細に観測し、降雨イベントにおける土壌水分の変化と洪水流出の関係を調べ、降雨前の乾湿状態が洪水流出に及ぼす影響を検討した。

2. 試験地と観測の概要

観測研究は、滋賀県甲賀市の信楽試験地 C 流域で行った。C 流域の集水面積は 4.71 ha、平均斜面長は 75.0 m、平均勾配は 40.6°である。地質は中生代後期ジュラ紀の付加体堆積岩で、この堆積岩は砂岩、泥岩、チャートの混在岩で成り立っていて、圧力変成のために薄く割れやすくなっている。土壌は褐色森林土であり、貫入試験の結果からその厚さは、60.7~184.0 cm であった。植生は、斜面中部から下方はヒノキ、スギの人工林で、上方はアカマツとコナラ主体の混交林である。

C 流域の下流端には量水堰(本流)を設けて流出強度を計測した。また、本流右岸側の平滑な谷壁斜面を試験斜面とした。斜面の下端付近の基岩の割れ目から地下水が湧出しており、この流出強度を量水堰(湧水)で計測した。斜面の最大傾斜方向に測線を設定し(測点は下部から順に P1~P8)、土壌水分の動態をテンシオメータ及び TDR 土壌水分センサーで計測した。

3. 結果と考察

図 1 に総降雨量と総洪水流出量の関係を示した(小島・谷, 2018)。総降雨量が約 50 mm 以上になると総洪水流出量は急に大きくなり、総降雨量の増加に対してほぼ直線的に増加する傾向がみられた。この場合、総降雨量の増加量に対して総洪水流量の増加量がほぼ等しくおり、降雨の増加がすべて洪水の増加に参与しているといえる。こうした傾向は、降雨前流出強度が大きい場合に大きい、一方で、降雨前流出強度が小さい場合は、総洪水流量が小さくなる傾向がみられ、降雨前の乾燥状態が洪水流出に影響を及ぼしていると考えられる。以下では、総降雨量がほぼ同じで総洪水流出量が異なる 2 つのイベント(図 1 中の●, ■)について比較した。

降雨イベント R19(図 1 中の●)では、土壌水分の詳細な観測を行い、降雨の流出メカニズムの検討をした(小島ら, 2025)。総降雨量は 168 mm であったが、本流の洪水流出総量は 57 mm(図 1)で洪水流出率は 34 %と小さかった。R19 の降雨前流出強度は 0.005 mm h^{-1} であり、降雨前の土壌の乾燥の影響によると考えられる。

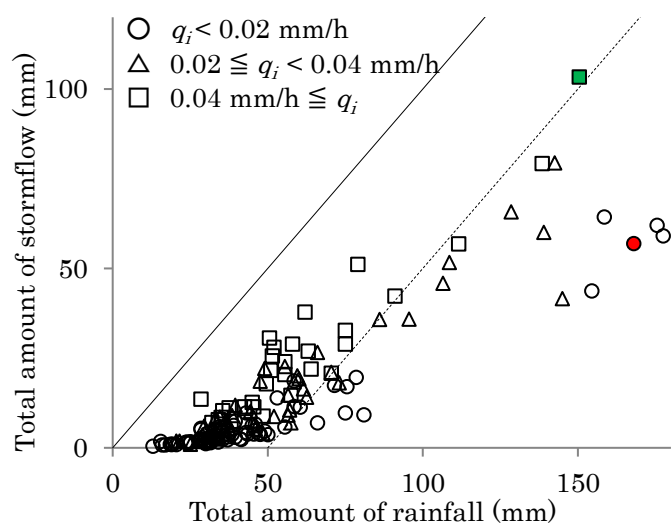


図 1 一降雨における総降雨量と総洪水流出量の関係 (q_i は降雨前流出強度)

図 2 には、降雨強度、本流と湧水の流出強度、及び試験斜面全体にわたる土壌層底面の圧力水頭(ψ)の変化を示した。降雨開始後は概ね斜面下部から順に ψ の値が上昇し、降雨開始約 10 時間後には斜面中部より下方の測点 P1~P5 の土壌層底面は湿潤になった。一方、それより斜面の上部については、P7 では降雨ピーク時付近に湿潤となったが、P6、P8 では ψ の 0 付近までの上昇はみられなかった。土壌層の厚さが P6(160 cm)、P8(180 cm) で P7 の 95 cm よりも厚いことから、湿潤にならなかった可能性が高い。流出寄与域は斜面中部から下方に偏り、中部から上方の土壌層の厚い部分では乾燥状態が残って寄与域にはならなかったと考えられた。

以上の圧力水頭と流量の観測結果は、鉛直不飽和浸透による波形変換を基本に置く VZ モデル (谷, 2023) によって再現された (Kojima and Tani, 2025)。

R19 イベントでは、湧水、本流ともに計算値と観測値が一致するシミュレーション結果が得られた。湧水では、とくに溪流沿いの成分が早く流出し、その後、斜面下部・中部の成分がゆっくり流出してくることがわかった。次に、この結果を踏まえて FX1 (図 1 中の■) の計算を試みた (図 3)。

FX1 の総降雨量は 151 mm で R19 とほぼ同じであったが、洪水流出総量は 103 mm と大きく、降雨前流出強度が 0.052 mm h^{-1} だったことから、湿潤な条件による影響だと考えられた。FX1 では湧水流出強度、土壌水分の観測がなされていないことから、まず、R19 と同じ初期条件でシミュレートした結果、このピーク時の計算流出強度は、観測流出強度よりも低い 4.1 mm h^{-1} となり、R19 のピーク時の観測流出強度 (4.2 mm h^{-1}) とほぼ一致した (図 3(A))。一方、図 3(B)のように初期条件を湿潤にした場合は、斜面中部 (ZM) と上部 (ZU) からの排水の寄与が大きく、ピーク時の流出強度が 7.0 mm h^{-1} となるハイドログラフが描かれ、良好な結果が得られた。

以上のように、降雨前の流域の乾湿条件によって、降雨規模が同じでも流出寄与域が大きく変化して、洪水流出の規模、ピーク強度が大きく異なること、その観測結果が VZ モデルで再現されることが示された。よって、降雨前の乾湿条件が流出寄与域の変動と流出メカニズムに及ぼす影響が、鉛直不飽和浸透を基礎とするモデルの仮定で的確に説明できることが明らかになった。

引用文献

小島・谷：水文・水資源学会誌 31, 95-106, 2018.

小島・谷・正岡：水文・水資源学会誌 38, 231-248, 2025.

キーワード

洪水流出特性、降雨規模、乾湿状態、森林小流域、堆積岩山地

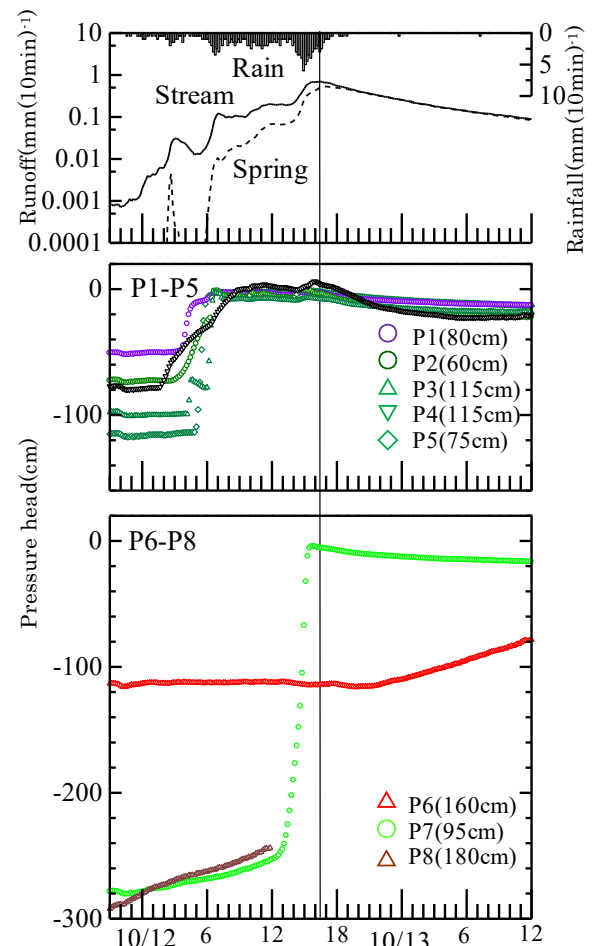


図 2 R19 における降雨、流出強度と土壌層底面の圧力水頭の経時変化 (P1~P5: 下部~中部, P6~P8: 上部 () 内は土壌厚さ)

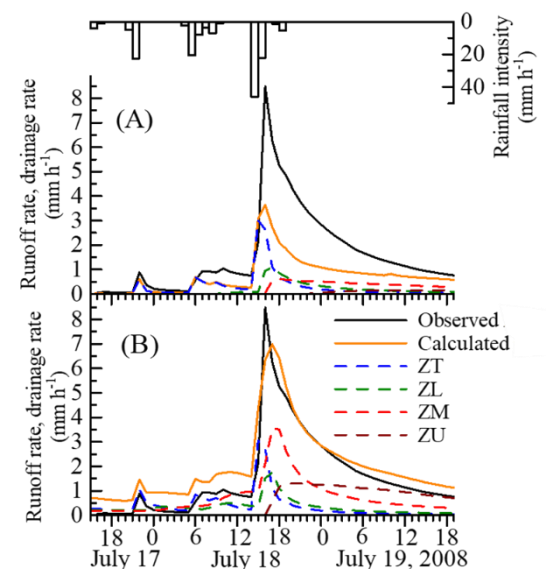


図 3 FX1 における観測結果と VZ モデルによる計算結果の比較 (ZT: 溪流近傍, ZL: 下部, ZM: 中部, ZU: 上部)

Kojima and Tani: J. Hydrol., 133464, 2025.

谷：水文・水資源学会誌 36, 20-51, 2023.

豪雨時の空気押し出し流仮説とリチャーズ式への組み込みに関する数値実験

東京農工大学大学院

○白木克繁

元 東京農工大学大学院（現 札幌市役所）

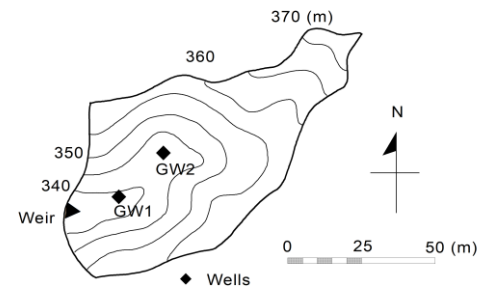
森貞完太

1. はじめに

降雨時に土壤中に封入された空気は土中の雨水が下方浸透する際の通水抵抗となり、土中水の鉛直浸透速度を低下させることが知られている。この現象は同時に土層内の間隙空気圧の上昇をもたらし、豪雨時の洪水流出、斜面崩壊に影響を与えていると指摘されている¹⁾。本報告では次のような仮説を設定し、現地で観測された流出現象の再現性が向上するかを数値実験することを試みた。仮説とは、**a**: ある程度降雨強度の強い降雨では地表面での空気の移動が阻害され、土中に封入された空気が圧縮される。**b**: 圧縮された間隙空気は、圧力として速やかに地下水帯に影響し、地下水を押し出す効果をもたらす。**c**: この地下水の押し出しは、見かけ上の透水係数の増加として近似できる、というものである。今回の試みでは、実効降雨を指標とし、その数値が閾値を超えたときに解析領域全層において透水係数の数字が増加するという簡略化をすることで、上記の仮説の代用方法とした。このことで、本仮説を容易にリチャーズ式に組み込むことを可能としている。

2. 方法

本報告では、Shiraki ら²⁾の試験流域（図－1）、計算方法を準用し、リチャーズ式を離散化して数値計算を行った。解析対象流域は東京大学生態水文学研究所、白坂流域内、南谷谷頭部流域（0.45ha）である。2)の計算方法と異なる点としては、流域の分割単位を高さ 0.25m、縦横 2.5m のブロック体としている点である。このブロックをコントロールボリュームとして、ブロックの積み重ねとして流域内で測定された表層土層厚分布を含め、流域形状を再現している。総ブロック数は 10,446 個となった。土壌の物理性については、400mL 土壌サンプル等を用い



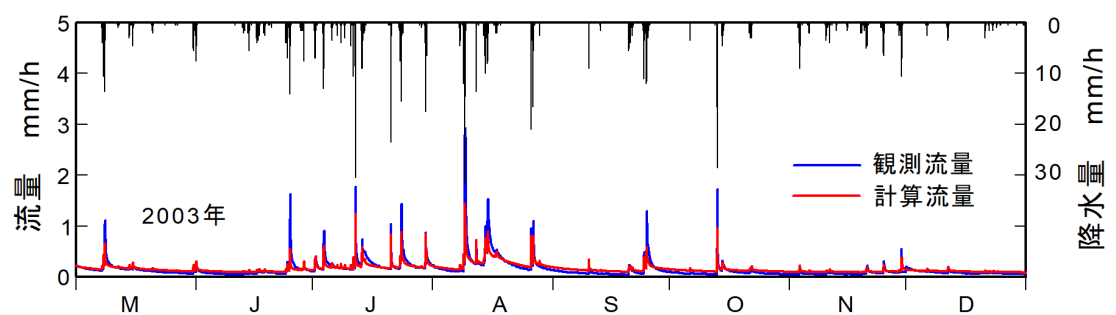
図－1 解析対象試験地・地形

て測定された θ - ϕ 、 k - ϕ の結果を van Genuchten-Mualem の式にあてはめて、深度別に算出している。蒸発量、降雨の樹冠遮断量の算出については、2)と同様、蒸散損失は2月を最小とするサインカーブ、樹冠遮断量は降水量の一律 25%が損失するという簡便化をしている。実効降雨の計算は、半減期を1時間とする計算で、実効降雨が 5mm を超えた場合に透水係数を2倍、5倍、10倍とする3つのパターンの計算を試行した。以降これらの計算を透水係数の倍数から、それぞれの計算パターンをケース2、ケース5、ケース10とする。またケース1は実効降雨による透水係数の変化を行わない計算手法とする。解析対象期間は2003年5月から2003年12月で、流出量およびGW1、GW2（図－1参照）の地下水位変化を検証項目とした。

3. 結果と考察

図－2にケース1の流量計算結果を、観測結果と合わせて図示した。豪雨時の計算再現性を強調するため、流量は実スケールで表

示してある。計算結果はおおよそ観測流量を良好に再現できているが、降雨時のピーク流量については過小評価をしていることが分かる。



図－2 ケース1での計算結果（観測流量の比較）

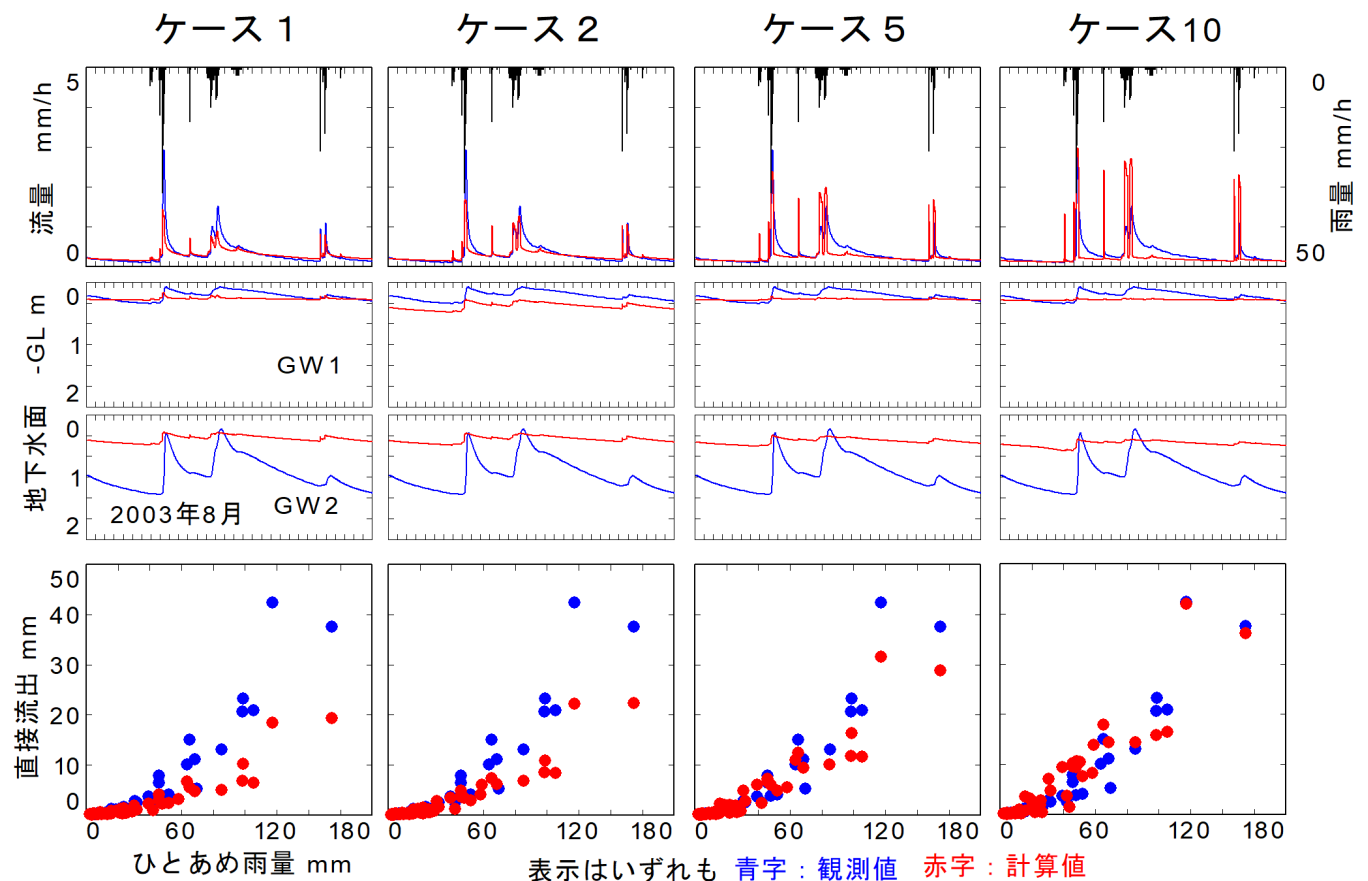


図-3 2003年8月の各ケース計算結果、および解析期間中の直接流出分離

図-3には、解析期間で最も多い流出量を記録した2003年8月の計算結果について、それぞれのケースでの流出量、地下水位変化の結果を示した。また、解析対象期間における、降雨イベントごとの直接流出量についても図示した。直接流出量は、計算流量においても観測流量と同様にハイドログラフから直接流出成分を切り出す作業で求めている。図-3 ケース1を見ると、地下水位計算結果はGW1では地表面近くまで地下水位が上昇しているが、GW2ではやや深い位置に地下水面があるという観測結果と整合性がある結果を示していることが分かる。

ケース10ではピーク流量の再現性が良く、解析期間中の直接流出量の再現においても、観測結果により近い結果となっている。ただしケース10では比較的降水量の少ない降雨イベントについては、計算流量が過大になることがあり、それが直接流出量の取りまとめ結果にも表れていると言える。ケース10では直接流出量の再現性が比較的良いと考察したが、では実効降雨によらず常に透水係数が10倍であるケース10'ではどのような計算結果になるであろうか？図-4にケース10'流出計算結果を直接流出取りまとめ図で示す。ケース10とは異なり、ケース10'では直接流出の再現性は悪いことが読み取れる。すなわち、豪雨時のみ透水係数が大きくなるという計算上の仮定条件は、リチャーズ式ベースで実際の流域での流出過程を総合的に再現できる可能性を潜ませていると考えられる。以上の考察は、大雨時においても”古い水”が流出成分の大部分を占めるという解析結果³⁾とも整合性がとれるものと考えている。

参考文献

- 1) Iwagami S.ら 2024、Hydrological Processes、DOI : 10.1002/hyp.15235 2) Shiraki K.ら 2006、JFR、DOI : 10.1007/s10310-006-0242-7 3) Sakakibara K.ら 2019 Hydrological Processes、DOI : 10.1002/hyp.13398

キーワード : Trapped air, Hillslope hydrology, Flood flow, Richards' equation, Numerical simulation

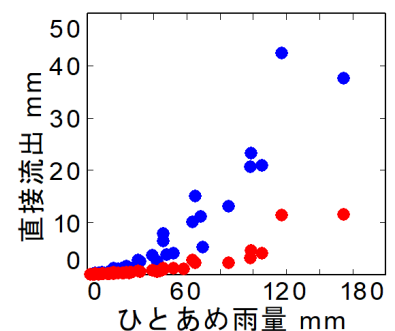


図-4 ケース10'での直接流出分離結果

一般セッション(口頭講演) | 降水

2026年9月16日(水) 10:25 ~ 11:40 | 2Fホール(2F)

[OS-08] 降水

座長:大野 哲之(関西大学社会安全学部)

10:25 ~ 10:40

[OS-08-01] 線状降水帯をもたらす大気の川の物理的特徴

*平賀 優介¹、只木 想太¹、田原 亮太郎¹ (1. 東北大学大学院工学研究科)

10:40 ~ 10:55

[OS-08-02] 梅雨前線および前線低気圧に伴う水蒸気同位体比の変動

*田上 雅浩¹、一柳 錦平²、朴 昊澤³ (1. 気象庁気象研究所、2. 熊本大学大学院先端科学研究部 (理学系)、3. 国立研究開発法人海洋研究開発機構)

10:55 ~ 11:10

[OS-08-03] インド亜大陸北東部の雨量計・気象レーダーデータの利用可能性について

*上米良 秀行¹ (1. 防災科学技術研究所)

11:10 ~ 11:25

[OS-08-04] デュアルドップラー解析を用いた線状対流系における上昇流のスケール階層構造

*國見 純太郎¹、山口 弘誠² (1. 京都大学大学院工学研究科、2. 京都大学防災研究所)

11:25 ~ 11:40

[OS-08-05] 雨量計からの降水場復元のためのアナログ法：データ同化と推薦システムへの応用

*塩尻 大也¹、武藤 裕花¹、岡崎 淳史¹、小槻 峻司¹ (1. 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター)

線状降水帯をもたらす大気の川の物理的特徴

Physical characteristics of Atmospheric Rivers causing quasi-stationary linear rainbands in Japan

東北大学大学院工学研究科 ○平賀優介

東北大学大学院工学研究科 只木想太

東北大学大学院工学研究科 田原亮太郎

1. はじめに

大気の川 (Atmospheric Rivers; ARs) は、一般的に大気中に細長く伸びる強い水蒸気流として定義され、世界各地における豪雨および洪水災害の主要な起因メカニズムとして注目されている¹⁾²⁾。アジア、特に日本地域においても、梅雨期をはじめとする暖候期の大雨イベントの大部分が AR に伴って発生していることが先行研究により示されており、気候変動の進行に伴い水蒸気輸送量およびそれに伴う降水強度の増加が予測されている³⁾。

ここで、これまでの研究では、過去に発生した豪雨事例を対象として、そのうちどの程度が AR に伴うものであったかという「大雨に対する AR の寄与度」の評価が多くなされてきた。一方、「どのような AR が大雨を引き起こすのか」という AR 側を起点とした特徴分析は十分に体系化されていない。特に湿潤な気候を持つ日本や東アジア諸国では、AR の上陸が大雨に直結するとは限らず、顕著な降雨に至らない事例も多く存在する。そこで本研究では、過去の長期気再解析データから日本に上陸した AR を体系的に抽出し、そのうち高い降水効率を示し、特に線状降水帯をもたらす AR の物理的特徴を明らかにすることを目的とする。

2. データセットと手法

本研究では、ERA5 に基づく全球大気河川データベース tARget v4⁴⁾ を活用し、1940 年から 2023 年までの 84 年間に於いて、夏季 (6-8 月) に日本に上陸した計 1,775 イベントの AR を抽出した。これら AR の物理的特徴のパラメータとして、ERA5 に基づく相対湿度 RH、鉛直積算水蒸気輸送量 IVT、可降水量 PW、対流有効位置エネルギーCAPE、対流抑制エネルギーCIN、鉛直積算水蒸気フラックス収束 MVIMC、その他 AR の走向や継続時間、静的変数を用いた。自己組織化マップ (SOM) を用いて、AR の経路を 4 つの代表的クラスターに客観分類し、Mann-Kendall 検定により発生頻度の長期トレンドを分析した。降水データには気象庁の解析雨量を用いた。本研究は東北・北陸地方 (以下北日本) に着目し、AR の物理的特徴と降水量の関係分析を実施した。具体的には、IVT を説明変数、降水量を目的変数とした Huber 線形回帰モデルを基に「降水効率が高い正の残差群 (上位 20%)」と「降水効率が低い負の残差群 (下位 20%)」を定義し、2 群間の AR の物理的特徴を比較した。また、Hirockawa et al. (2020)⁵⁾ の手法で線状降水帯を客観的に抽出し、AR の物理的特徴と線状降水帯の発生の関係を分析した。

3. 結果と考察

日本に上陸する AR について、IVT の東西・南北方向成分を基に 2×2 ノードに分類した結果を図-1 に示す。最も卓越するのは Cluster D (44.7%) であり、南西からの強い水蒸気流が本州を縦断して上陸する、梅雨前線や秋雨前線と整合した典型的な構造である。Cluster A (10.7%) と Cluster C (17.6%) は、太平洋高気圧の縁に沿って湾曲して上陸する経路である。特に、太平洋高気圧の西への張り出しが顕著な Cluster C においては、北日本への強

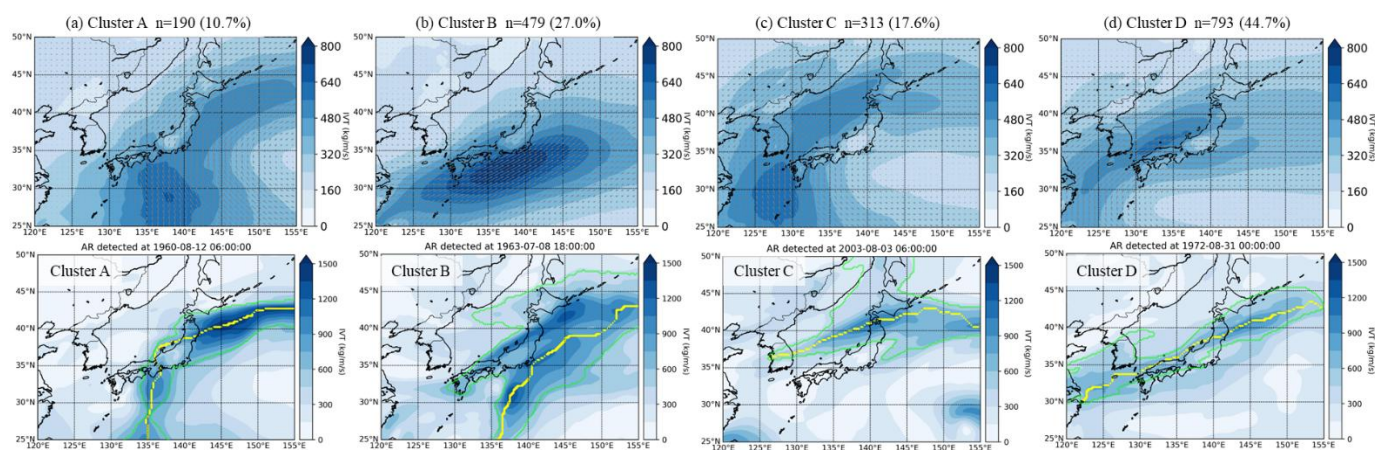


図-1. 日本に上陸する大気の川 (AR) の SOM による分類

キーワード：大気河川 Atmospheric Rivers, 線状降水帯 Senjo-Kousuitai, 降水効率 Precipitation Efficiency

い水蒸気流入がもたらされることが分かる．Cluster B (27.0%) は、日本の南海上において東西方向に卓越する強い下層ジェットに伴う水蒸気流と考えられる．

図-2 は、北日本において降水効率が低い AR (赤) と降水効率が低い AR (青) の物理的特徴を比較したものである．降水効率が低い AR は、水蒸気フラックス収束(図-2e)、中層の相対湿度(図-2f)が有意に高く、CIN(図-2d)が有意に低い特徴が見られた．同地域の大雨発生のメカニズムとして、下層の収束や中層の湿度の重要性は既往研究においても指摘されており、整合的な結果である．さらに、AR の流入経路がより南寄りに位置し、標高の高い地形へと流入する事例ほど、降水効率が高くなる傾向が認められた(図-2g, j)．また、北日本に上陸した AR 事例のうち、線状降水帯を伴った事例群と、同等の降水強度を持ちながら線状降水帯を伴わなかった事例群を比較した．その結果、両群間において可降水量に有意な差が認められた．これは、線状降水帯のような組織化した降水帯が形成・維持されるためには、多量の水蒸気が持続的に流入し続けることが重要であることを改めて示唆している．

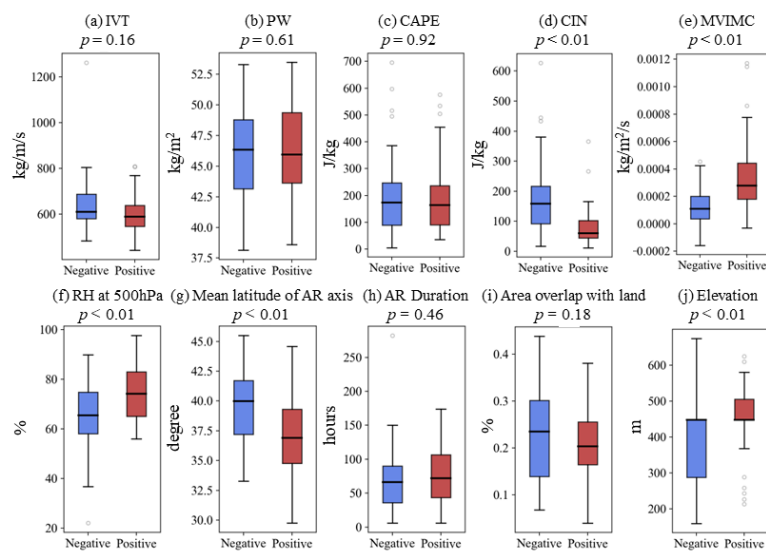


図-2 降水効率が低い大気の流れ (赤) と降水効率が低い大気の流れ (青) の物理的特徴の比較

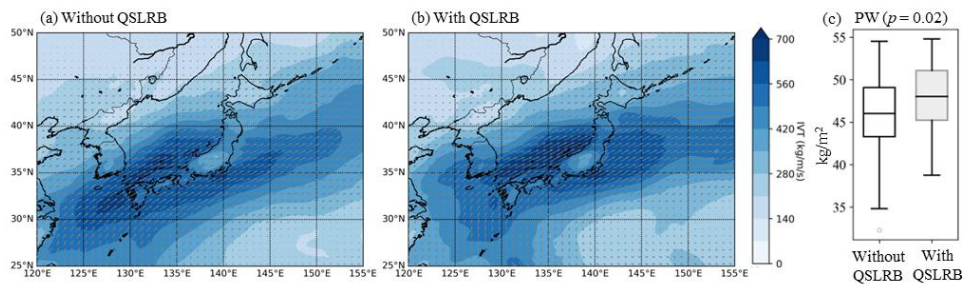


図-3 線状降水帯 (QSLRB) を伴う/伴わない大気の流れの合成図(a,b)とその可降水量(c)の比較

謝辞：本研究は JSPS 科研費 24K17350 の助成を受けたものである．ここに謝意を表する．

参考文献

- 1) Ralph, F. M. et al. (2006). Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 33(13). <https://doi.org/10.1029/2006GL026689>
- 2) Hiraga, Y. et al. (2021). Estimation of long-duration maximum precipitation during a winter season for large basins dominated by atmospheric rivers using a numerical weather model. *Journal of Hydrology*, 598, 126224. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126224>
- 3) Kamae, Y. et al. (2021). Atmospheric rivers bring more frequent and intense extreme rainfall events over East Asia under global warming. *Geophysical Research Letters*, 48(24), e2021GL096030. <https://doi.org/10.1029/2021GL096030>
- 4) Guan, B., & Waliser, D. E. (2024). A regionally refined quarter-degree global atmospheric rivers database based on ERA5. *Scientific Data*, 11(1), 440. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03258-4>
- 5) Hirockawa, Y. et al. (2020). Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 98(4), 835-857. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-043>

キーワード：大気河川 Atmospheric Rivers, 線状降水帯 Senjo-Kousuitai, 降水効率 Precipitation Efficiency

梅雨前線および前線低気圧に伴う水蒸気同位体比の変動

気象庁気象研究所 気象観測研究部 ○田上 雅浩
熊本大学大学院先端科学研究部（理学系） 一柳 錦平
国立研究開発法人海洋研究開発機構 朴 昊澤

1. はじめに

近年、線状降水帯をはじめとする豪雨災害が頻発している。これらを高精度に予測するためには、水蒸気輸送や水蒸気の蒸発起源に関する理解が不可欠である。水の安定同位体比は、蒸発・凝結・混合などの相変化過程の履歴を記録する天然トレーサーであり、大気水循環を診断する有力な指標として注目されている。近年では、衛星観測技術の進展により全球規模で対流圏中層の水蒸気同位体比が取得可能となり、それらを利用したデータ同化研究により、気温・風・水蒸気場の解析および予報精度の向上が報告されている。

その一方、豪雨をもたらす梅雨前線帯における地表付近の水蒸気同位体比変動については、十分な理解が得られていない。従来、水蒸気同位体比の観測には大気中の水蒸気を捕集し、質量分析計で分析する必要があったが、近年では水同位体アナライザーの発展により、高い時間解像度（1時間間隔）の自動連続観測が可能となった。

本研究では、熊本において梅雨期の地表水蒸気同位体比連続観測を実施し、梅雨前線の南北変動や前線低気圧通過に伴う水蒸気同位体比の変動特性を解析する。また、全球雲システム解像モデルによるナッジングシミュレーションを用いて、モデルが再現可能な変動スケールや変動要因を検証する。さらに、地表付近の水蒸気同位体比がデータ同化に利用可能な時空間スケールについて議論する。

2. 研究方法

本研究では、梅雨期における地表付近の水蒸気同位体比変動を捉えるため、2024年6月24日から7月25日にかけて熊本大学理学部に水同位体アナライザー（Picarro社製）を設置し、水蒸気中の δD および $\delta^{18}O$ を連続観測した。装置は外気を吸引し、水蒸気密度および同位体比を1-2秒間隔で測定する。本研究では、梅雨前線スケールの変動に着目するため、短周期変動や測定ノイズの影響を低減する目的で1時間平均値を解析に用いた。さらに、機器ドリフトを補正するため、約18時間ごとに同位体比の異なる2種類のラボスタンダードを測定し、二点校正によって大気中水蒸気の同位体比を補正した。

気象要素を観測するため、水同位体アナライザー設置地点から約200 m離れた位置に自動気象観測装置を設置した。また、梅雨前線帯の位置や総観場を解析するため、京大大学生存圏研究所データベースより気象庁メソ解析データを取得した。メソ解析の空間解像度は0.1度である。

地表付近における水蒸気同位体比変動を再現するため、水同位体過程を組み込んだ全球雲システム解像モデルNICAM-WISO（Tanoue et al., 2023）を用いたナッジングシミュレーションを実施した。まず、1979年1月から2024年5月まで低解像度設定（GL05、約224km）で長期ナッジング計算を行い、2024年6月1日の結果を初期値として高解像度設定（GL09、約14 km）にダウンスケールした。ダウンスケールした初期値を用いて、同年7月25日までナッジングシミュレーションを実行した。境界条件にはERA5の海面水温および海水分布を使用し、ナッジング外力にもERA5を用いた。ナッジングは気温および水平風速場に対して適用した。

3. 結果

熊本における水蒸気 δD の時間変動は、梅雨前線の南北移動と明瞭に対応していた。観測初期（6月下旬）には梅雨前線が熊本の南側に位置し、 δD は観測期間中で最も低い値を示した。その後、7月上旬に前線が北上すると δD は増加し、以降は前線の南北振動に伴って大きく変動した。さらに、約1日スケールで δD が40-80%程度急減

した後に回復するイベントが3回（6/27、7/1、7/12ごろ）確認された。同位体比の急減時には、水蒸気d-excessが10‰から30‰程度まで増加しており、これらのイベントは梅雨前線低気圧の熊本付近通過時期と一致していた。水同位体質量収支モデルによる解析の結果、この δD 低下は落下雨滴の蒸発過程に伴う同位体分別の影響を受けていた可能性が示唆された。

ナッジング実験の結果を図2に示す。初期解析では、鉛直積算水蒸気量およびその同位体比の時間変動を比較した。モデルで計算された鉛直積算水蒸気の同位体比は、観測で見られた季節内変動を十分には再現していなかった。これは、地表付近の局所的な変動が鉛直積算値では平滑化されているためと考えられる。一方で、モデルでも同位体比の急激な低下イベントがしばしば再現され（6/27、6/29、7/12ごろ）、その発生時期は観測結果と概ね対応していた。特に、6/27および7/12頃のイベントは良く再現されていた。しかし、7/1頃のイベントは再現されなかった。

これらの結果は、梅雨前線低気圧の通過に伴う雨滴蒸発過程が、地表付近の水蒸気同位体比変動に重要な役割を果たしている可能性を示唆している。今後は、モデル内における梅雨前線構造や水蒸気輸送過程を詳細に解析するとともに、地表付近の水蒸気同位体比がデータ同化へ利用可能な時空間スケールについて検討する。

参考文献

TANOUE, M. et al. (2023). Modeling water isotopes using a global non-hydrostatic model with an explicit convection: Comparison with gridded data sets and site observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2021JD036419.

キーワード：水蒸気同位体比、全球雲システム解像モデル、ナッジングシミュレーション、梅雨前線、梅雨前線低気圧

【謝辞】：本研究は、科研基盤研究（C）「物理・仮想トレーサー同時データ同化による線状降水帯の水蒸気起源の推定」（23K11398）の支援を受け実施されました。また、計算資源としてスーパーコンピュータ富岳を利用しました（hp230067, hp240098）記して感謝の意を表します。

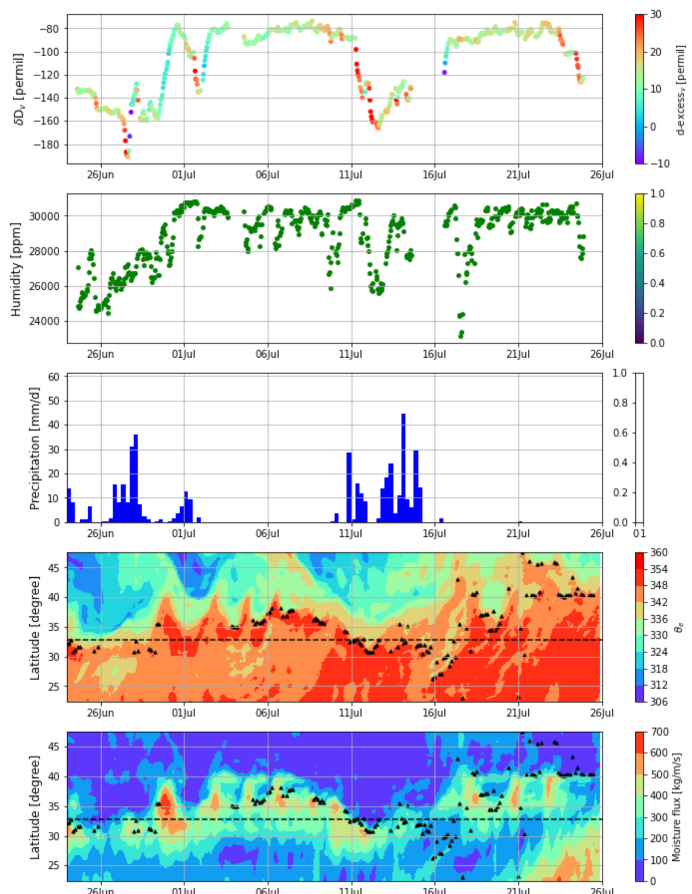


図1．観測された水蒸気同位体比、水蒸気密度、降水量、下層相当温位の南北時間断面、水蒸気フラックスの南北時間断面。黒点は相当温位の南北勾配が最大となる位置を示

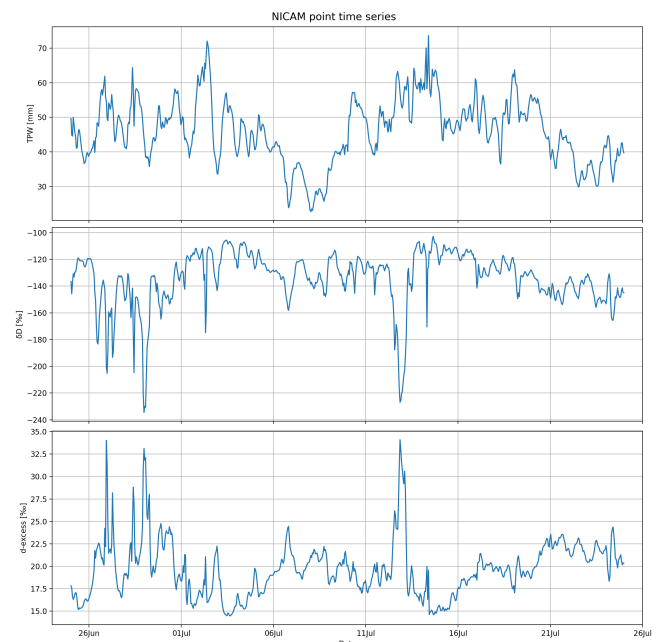


図2．シミュレーションされた熊本における鉛直積算水蒸気量、 δD 、d-excess の時間変化。

インド亜大陸北東部の雨量計・気象レーダーデータの利用可能性について

防災科学技術研究所 ○上米良秀行

1 目的と背景

本研究の目的は、インド亜大陸北東部の雨量計および気象レーダーの現業観測データの利用可能性を明らかにすることである。

本研究の対象とするインド亜大陸北東部は、世界有数の多雨地域である。インド・メガラヤ州は12か月雨量 $1,041.78 \text{ in (12 month)}^{-1}$ ($26,461 \text{ mm (12 month)}^{-1}$)をはじめとする雨量の世界記録を複数有している。この地域には、合計1,100を超える地点に雨量計が展開されている(図1)。そのうち、インド北東部の7つの州には539地点にインド気象局(IMD)の雨量計が展開されている(2025年5月19日現在)。また、隣国バングラデシュには、582地点にバングラデシュ水開発庁(BWDB)の雨量計が展開されている(2026年2月26日現在)。さらには、バングラデシュ気象局(BMD)の雨量計も合わせると、この地域ではひじょうに多くの雨量計が配備されており高密度の観測網が形成されている。これら多数の雨量計の観測データを集約し解析することで、また、IMDやBMDの気象レーダー(図1)の観測データと組み合わせて、例えば日本の気象庁による解析雨量と同様のデータセットを作成し解析することで、この地域の降雨の実態を詳細に把握することが可能と考えられる[1]。

2 雨量計データの利用可能性

IMDの雨量計データは同局のウェブサイトData Service Portal (DSP)¹を通じて取得できる。DSPの運用は2019年3月に開始された。データ取得の手続きはDSPにおいて利用者情報を登録することから始まる。利用者のカテゴリーはD (department), G (central/state government organizations), I (research and educational institutes), S (students), C (commercial), F (foreign) の6つに区分されている。IMDの職員(D)、中央政府や州政府の職員(G)、学生(S)は無償でデータを取得できるが、その他のカテゴリーの利用者がデータを取得する場合は有償である。大学や研究所などの研究・教育機関の職員(I)は費用の半額を負担、民間企業の職員(C)は原則として全額を負担、外国人(F)も費用の全額を負担する必要がある。取得できる雨量データは日雨量および月雨量のデータである。我々日本人を含む外国人にとって最大の問題はデータ取得の費用がひじょうに高額となることである。1地点1年分の日雨量データを取得する費用は2,820 ルピー(1 ルピー 1.6 円として、約4,500 円)、539 地点3年分のデータを取得する費用は2,652,620 ルピー(約424 万円)である。

BWDBの雨量計データは同庁のウェブサイト²を通じて取得できる。上述の観測地点数582の内訳は、手動観測の地点307 (manual stations)、自動観測の地点275 (real-time stations) である。手動観測の地点については、データ取得費用が公表されている。1地点1年分の日雨量データを取得する費用は200 タカ(1 タカ 1.3 円として、260 円)、307 地点3年分のデータを取得する費用は184,200 タカ(約24 万円)である。自動観測の地点のデータ取得費用は公表されていない。

BMDの雨量計データについては、本稿執筆時点で調査未着手であるが、今後進める予定である。

3 気象レーダーデータの利用可能性

先行研究[1]が示すように、対象地域には多数の気象レーダーが配備されている。

IMDのレーダーはAgartalaとMohanbariにあり、同局のウェブサイト³において実時間で公開されているレーダー反射強度の観測画像データの取得を進めている。図2に示すように10分ごとの観測画像データを逐次取得しており、2023年2月中旬の取得開始[2]以来、これまでにおよそ3年分のデータを蓄積している。Mohanbariのレーダーは、2023年においては日中(概ね朝6時から夕方18時まで)のデータのみ公開されていたが、2024年以降は夜間のデータも公開されるようになり、その状況は現在も継続している。ただし、2025年8月中旬から2026年1月上旬までの期間はデータの公開が中断していたため、データは欠損している。

IMDのレーダーの生のデータについては、上述のDSPとは別にRadar Data Supply Portal⁴が用意されているものの、リンク切れのため、利用者ガイドをみることも、利用者情報の登録もできない(2026年5月8日現在)。

BMDの稼働中のレーダーはDhakaとRangpurにある。聴取り調査の結果によると、データの取得には対価の支払いが必要となる見込みであるが、具体的な金額やデータポリシーなど、詳細は未決定である。

¹<https://dsp.imdpune.gov.in>

²<http://www.hydrology.bwdb.gov.bd>

³<https://mausam.imd.gov.in>

⁴<https://radarapi.imd.gov.in>

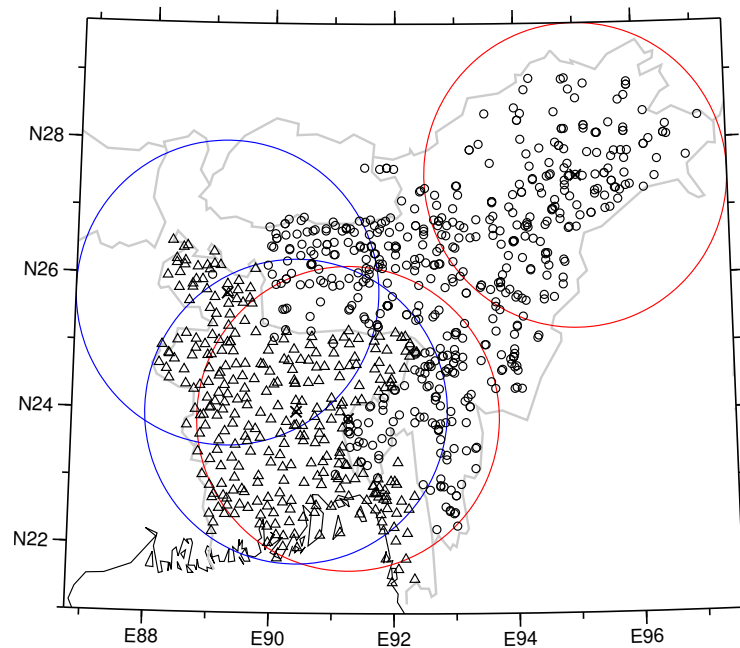


図 1 インド亜大陸北東部の雨量計・気象レーダー観測網。4つの大きな円は気象レーダーの観測範囲を示す。目安としてレンジ 250 km の範囲を示している。赤がインド気象局 IMD の Agartala (南西側) と Mohanbari (北東側) のレーダー、青がバングラデシュ気象局 BMD の Dhaka (南東側) と Rangpur (北西側) のレーダーの範囲を示している。小さな丸印が IMD の雨量計、小さな三角印がバングラデシュ水開発庁 BWDB の雨量計の位置を示している。灰色の実線は国境を示す。

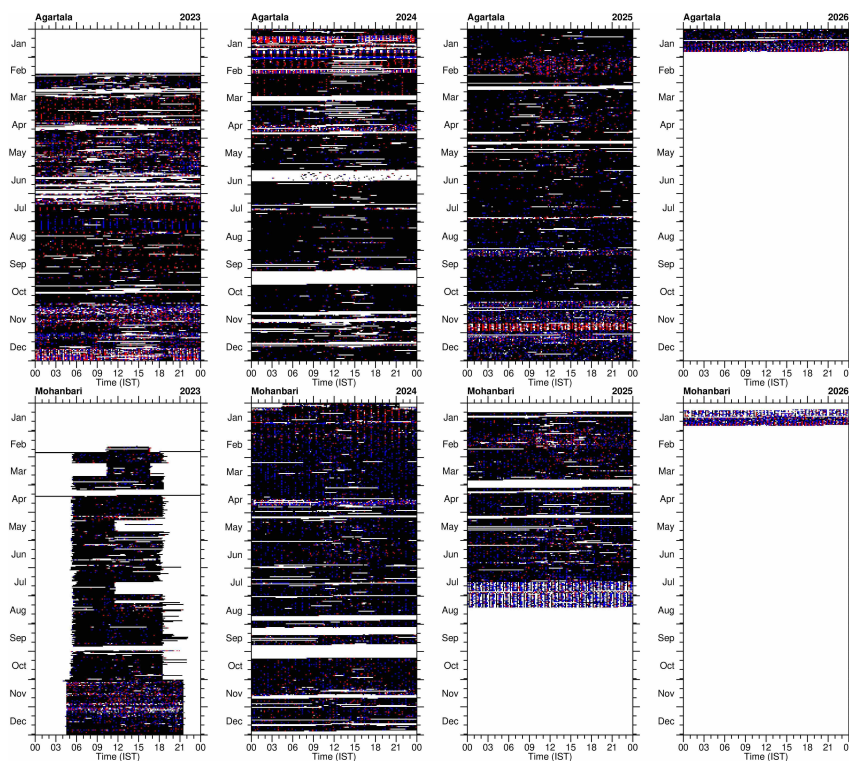


図 2 インド気象局 IMD の気象レーダーの観測画像データの利用可能性。上段が Agartala のレーダー、下段が Mohanbari のレーダーの状況を示す。左側から順に 2023 年から 2026 年までの 4 年間の状況を示している。

謝辞: 本研究は、JAXA EO-RA4 (代表: 上米良 秀行, PI 番号: ER4GPF018)、JST/JICA SATREPS (代表: 寺尾 徹)、京都大学防災研究所共同研究 (代表: Rahul Mahanta, 課題番号: 2026IG-01) の一環である。

参考文献: [1] Kamimera and Yamane, 2025: *Severe Storms*, pp. 107–126. [2] 上米良ら, 2023: 水文・水資源学会 2023 年度研究発表会要旨集, OP-11-05.

キーワード: バングラデシュ、インド、降雨、雨量計、レーダー

デュアルドップラー解析を用いた線状対流系における上昇流のスケール階層構造

京都大学大学院工学研究科 ○國見純太朗

京都大学防災研究所

山口弘誠

1. 研究背景と目的

近年、梅雨期において日本各地で停滞前線に伴う線状対流系による豪雨災害が甚大な被害をもたらしている。線状対流系は、前線付随型の A タイプと孤立局所型の B タイプに分類できることが明らかになっている。仲ら¹⁾は、これらの線状対流系豪雨の過去事例の発生場所及び発達環境場を網羅的に解析し、A タイプは梅雨前線に伴う大規模な外部強制力をもとに発達する前線性が強いものに対して、B タイプは外部からの強制力ではなく自ら次々に積乱雲を生み出すことで発達する自己組織性が強いと示した。また、自己組織的な発達には鉛直方向の風向変化が必要であるとした。しかし、線状対流系の初期積乱雲が生成してから自己組織化に至るまでの力学的なメカニズムは未解明な点が多いのが現状である。本研究では、X バンド MP レーダで観測したドップラー風速を用いてデュアルドップラー解析を行うことで、線状対流系の発達過程における上昇流のスケール階層構造を明らかにすることを目的とする。また、A タイプと B タイプの上昇流を比較することでその違いについて考察する。

2. 対象事例と解析手法

仲ら¹⁾の分類をもとにして、B タイプの事例として 2012 年 7 月 15 日に発生した亀岡豪雨を、A タイプの事例として 2012 年 8 月 14 日に発生した宇治豪雨を選択した。レーダ雨量を図 1 に示す。解析対象とする時刻は、初期積乱雲発生から線状雨域が十分発達するまでが入るように、亀岡豪雨を 00:00~04:00、宇治豪雨を 01:00~05:00 とした。近畿地方に設置され

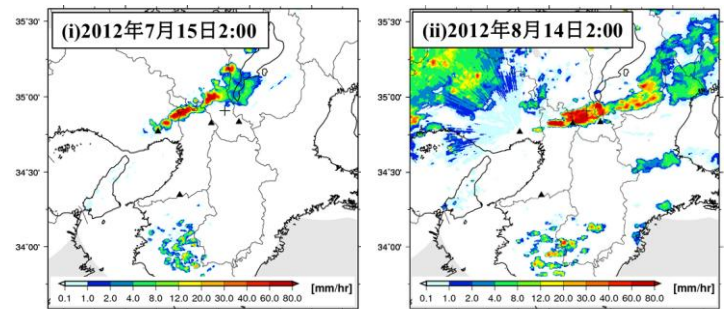


図 1 亀岡豪雨(左図)と宇治豪雨(右図)のレーダ雨量

た 4 つの X バンド MP レーダ (鷲峰山, 六甲, 葛城, 田口) の観測データを用いてデュアルドップラー解析を行い、3 次元風速場を推定した。ここで、時間解像度は 5 分であり、空間解像度は $1\text{km} \times 1\text{km} \times 500\text{m}$ とした。各時刻において推定した 3 次元風速場の中で上昇流が 0.5ms^{-1} 以上の領域に着目し、これを上昇流セルとして追跡することで線状対流系の発達過程における上昇流の空間スケール変化および上昇流の強さの時間変化を明らかにした。上昇流セルの検出には画像処理方法である CCL(connected component labeling)を 3 次元に用いた。追跡手法は大屋ら²⁾の手法を参考にしており、連続する 2 時刻における上昇流セルの検出結果を重ね合わせたときに、重心距離が 5km 以内である場合または重複する領域が存在する場合、それらを同一の上昇流セルとみなして追跡した。また、同一とみなせる上昇流セルが複数存在する場合については併合・分離を判定した。併合・分離の処理については体積の大きな上昇流セルを優先して行った。ここで上昇流セルの体積とは 0.5ms^{-1} 以上の格子数のことであり、線状対流系の発達への寄与が大きい上昇流を解析するために体積の大きな上昇流セルを優先している。

3. 結果と考察

上昇流セル検出・追跡結果において発生順に番号を振り、25 分以上存続した上昇流セルにおける最大上昇流の時間変化を図 2 に示す。25 分以上存続した上昇流セルの数は亀岡豪雨では 6 個、宇治豪雨では 9 個である。また、亀岡豪雨では最大上昇流が全体を通して強くなる傾向があり 03:00~04:00 頃には 15ms^{-1} に達する上昇流が存在するのに対して、宇治豪雨では全体を通して $5 \sim 10\text{ms}^{-1}$ の最大上昇流が存在するという違いが確認できる。最も長く存続した上昇流セルは、亀岡豪雨ではセル 19、宇治豪雨ではセル 37 であり、それぞれの追跡記録図を図 3 に示す。ここで追跡記録図とは追跡結果を

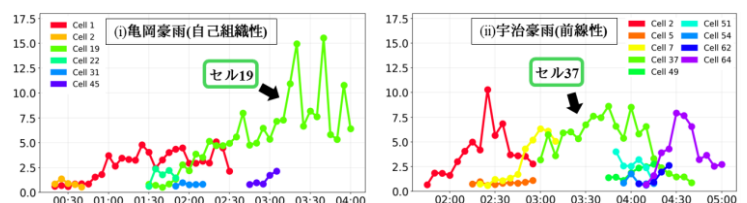


図 2 亀岡豪雨(左図)と宇治豪雨(右図)の上昇流セルの最大上昇流の時間変化

最大上昇流の時間変化を図 2 に示す。25 分以上存続した上昇流セルの数は亀岡豪雨では 6 個、宇治豪雨では 9 個である。また、亀岡豪雨では最大上昇流が全体を通して強くなる傾向があり 03:00~04:00 頃には 15ms^{-1} に達する上昇流が存在するのに対して、宇治豪雨では全体を通して $5 \sim 10\text{ms}^{-1}$ の最大上昇流が存在するという違いが確認できる。最も長く存続した上昇流セルは、亀岡豪雨ではセル 19、宇治豪雨ではセル 37 であり、それぞれの追跡記録図を図 3 に示す。ここで追跡記録図とは追跡結果を

もとにしており、そのセルから併合や分離で繋がっている上昇流セルを樹形図のように表すことで、どの時刻において何番の上昇流セルが発生・併合・分離しているかを示している。上昇流セルの空間的な位置関係や体積の大きさは考慮していない図であることに注意されたい。亀岡豪雨のセル 19 は関係しているセルが 33 個であるのに対して、宇治豪雨のセル 37 は関係しているセルが 60 個であり約 2 倍の差があるとわかる。

このことから、亀岡豪雨は比較的少数の時空間スケールの小さい上昇流が併合や分離を繰り返すことで、空間スケールの大きな一つの強い上昇流が発達するという特徴があるといえる。一方、宇治豪雨はセル 2 やセル 7 といった長時間存続するセル同士も関係しており、多数の上昇流セルが複雑に併合や分離をすることで継続的に上昇流が発達し続けるといえる。

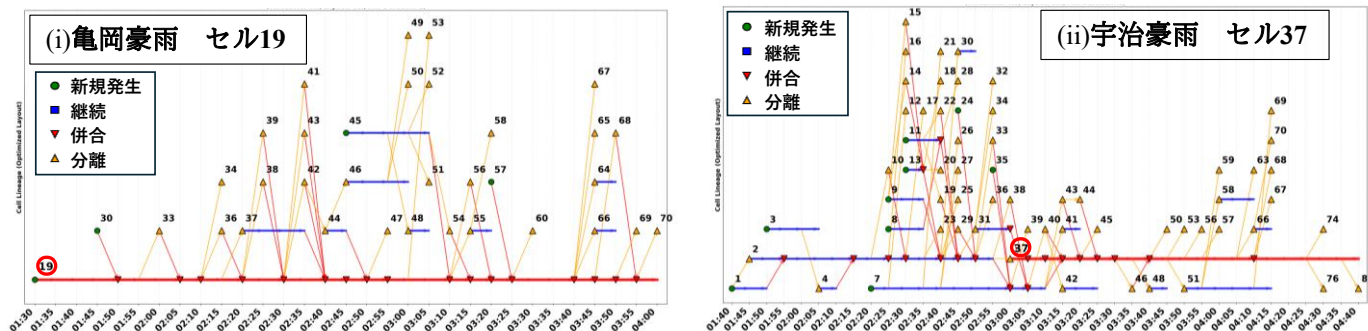


図3 亀岡豪雨のセル 19(左図)と宇治豪雨のセル 37(右図)の追跡記録図

デュアルドップラー解析で推定した上昇流を 3 次元に図示したものを図 4 に示す。黄色が 0.5ms^{-1} 以上、赤が 2.0ms^{-1} の上昇流である。亀岡豪雨、宇治豪雨ともに空間スケールの大小の上昇流が連なっていることが確認できる。また、亀岡豪雨は一つの大きな上昇流塊が確認できるのに対して、宇治豪雨では比較的空間スケールの小さな上昇流の塊が散在している傾向にあるといえる。

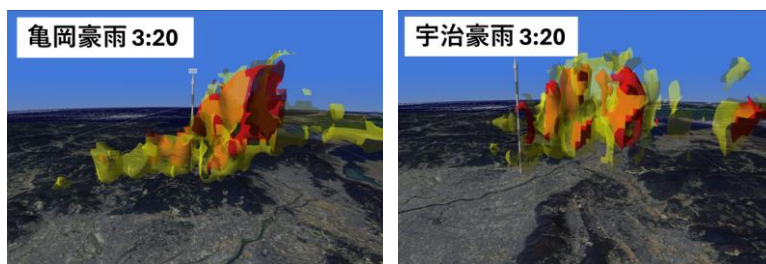


図4 亀岡豪雨(左図)と宇治豪雨(右図)の上昇流の3次元図

4. まとめ

それぞれの事例の上昇流の解析結果から、B タイプ(自己組織性)は少数の上昇流セルによって空間スケールが大きな強い上昇流塊が発達するのに対して、A タイプ(前線性)は多数の上昇流セルが分散して発達するということが推察される。A タイプは停滞前線による収束域が空間的に広がりを持っているため、上昇流が様々な地点から発生し、離れた位置で別々の上昇流塊が発達すると考えられる。一方で、B タイプは自己組織性によって線状対流系の上流側の地点で上昇流セルが発生し、下流側にかけてそれらが一つの大きな上昇流塊となって発達すると考えられる。本研究では AB タイプをそれぞれ 1 事例ずつ比較した結果であるが、今後は他の事例においても同様であるか明らかにしていきたい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 24H00291(基盤研究 A)の助成を受けて行われたものである。また、利用した XRAIN データは、国土交通省により運用・収集され、データ統合・解析システム (DIAS) を通じて提供されたものである。

参考文献

- 1) 仲・福田・中北(2024): 時空間特性を考慮した停滞前線性線状対流系過去事例における発生・発達条件統合的解析, 土木学会論文集, Vol.80, No.16, 23-16006, 2024.
- 2) 大屋・山田(2024): XRAIN を用いた降水セル追跡手法による線状降水帯内部の降水時空間特性の定量化, 土木学会論文集, Vol.80, No.16, 23-16076, 2024.

キーワード: line-shaped convective system, self-organization, Dual-Doppler Analysis, XRAIN

雨量計からの降水場推定のためのアナログ法のデータ同化・推薦システムへの応用

千葉大学環境リモートセンシング研究センター ○塩尻大也、武藤裕花、岡崎淳史、小槻峻司

1. はじめに

近年、気候変動の影響が顕在化する中、水文モデルによりその影響評価が様々に行われてきた。その際、適切な影響評価にはできるだけ長期に渡る均質な気象データが利用可能であることが望ましい。特に降水量は水文モデルにとって重要な変数であり、過去にさかのぼって、長期にわたる均質な降水量データセットを作成することの意義は大きい。そのようなデータセットの構築に、過去から継続的に観測が続けられてきた雨量計観測を使用することは有望な手段である。実際、雨量計ベースの降水量プロダクトとして、GPCC (Schamn et al. 2014) や APRODITE (Yatagai et al. 2012) が開発された。これらは全球・大陸スケールのプロダクトであるが、日本域では APHRO_JP (Kamiguchi et al. 2010) や Hatono et al. (2022) がより高解像度で作成されている。これらのプロダクトは、雨量計観測値を逆距離加重法 (inverse distance weighting; IDW) とその発展形や、通常クリギング (ordinary kriging; OK) といった手法によって空間内挿することで構築されている。これらの補間手法は、基本的に観測からの距離に応じた重み付平均として内挿する手法であり、平滑化された降水分布を出力する傾向をもつ。しかしながら降水現象は地形等の影響により強い局所性を持つため、空間内挿により平滑化された降水分布は視覚的に現実には即したものではない場合がある。そこで、本研究では雨量計観測から空間内挿を行った場合でも、局所的な降水分布を推定可能な手法として、アナログ法をベースとした空間内挿手法を提案する。

アナログ法とは、限られた観測データから空間パターンを推定・予測する際、過去の膨大なデータベース (カタログ) から、現在の断片的な観測と最もよく一致する過去の事例 (アナログ) を探し出し、その過去の完全な空間情報を現在の推定に利用する手法である。この手法の利点として、カタログが実際の観測に基づいているため、得られる空間パターンは物理的にあり得ない数値 (極端な不連続など) になりにくいことが挙げられる。また、複雑な動的モデルを回さずとも、多様なアンサンブルを用いることができる点も利点である。本研究では、アナログアンサンブルを用いたうえで、補間手法としてアンサンブルデータ同化と組み合わせる手法と、行列分解を推薦システムに応用した Funk-SVD を補間手法として応用する手法 (Chen et al. 2021) の 2 種類を用いる。

2. アンサンブルデータ同化による補間

データ同化手法の一つであるカルマンフィルタの解析の式は、下記の式 (1) で表される。

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}(\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^b) \quad (1)$$

ここで、全グリッド数を N 、雨量計数を P として、 $\mathbf{x}^a \in \mathbb{R}^N$ は解析値、 $\mathbf{x}^b \in \mathbb{R}^N$ は背景値、 $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ は背景誤差共分散行列、 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{P \times N}$ は雨量計位置行列、 $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{P \times P}$ は観測誤差共分散行列、 $\mathbf{y}^o \in \mathbb{R}^P$ は観測値である。背景値 $\mathbf{x}^b$ と背景誤差共分散行列 $\mathbf{B}$ 以外の行列は適切な値を事前に設定可能であり、背景値 $\mathbf{x}^b$ にアナログアンサンブルのアンサンブル平均を、背景誤差共分散行列 $\mathbf{B}$ をアナログアンサンブルによって近似し、アンサンブルカルマンフィルタのアルゴリズムを用いることで、補間結果としての解析値 $\mathbf{x}^a$ をアンサンブル平均として求めることができる。本手法を以降 analog offline ensemble Kalman inversion (AOEnKI) と呼称する。また、アンサンブルカルマンフィルタで用いられる局所化を本研究でも使用し、アナログアンサンブル構築・補間を 1 ピクセルごとに行う。これはアンサンブルのサンプリングエラーにより、本来影響しないはず遠く離れた地点の観測が強い共分散を持つことを防ぐ目的である。

3. Funk-SVD による補間

Funk-SVD は推薦システムとして提案された行列分解手法である。推薦システムとは、ユーザーの嗜好と商品の特徴という欠測の多い巨大な行列から、未知の値を予測して商品の推薦を行うためのシステムである。特に Funk-SVD は 2006 年の Netflix の映画推薦コンペティションで好成績を残した手法である。本手法は、ユーザーごと・商品ごとの潜在因子ベクトルを抽出し、低ランクの 2 つの行列の積で元の巨大な行列を反復計算を通して近似する手法である。元の巨大行列に欠測があっても、利用可能なデータから最適化された 2 つの低ランク潜在因子ベクトル

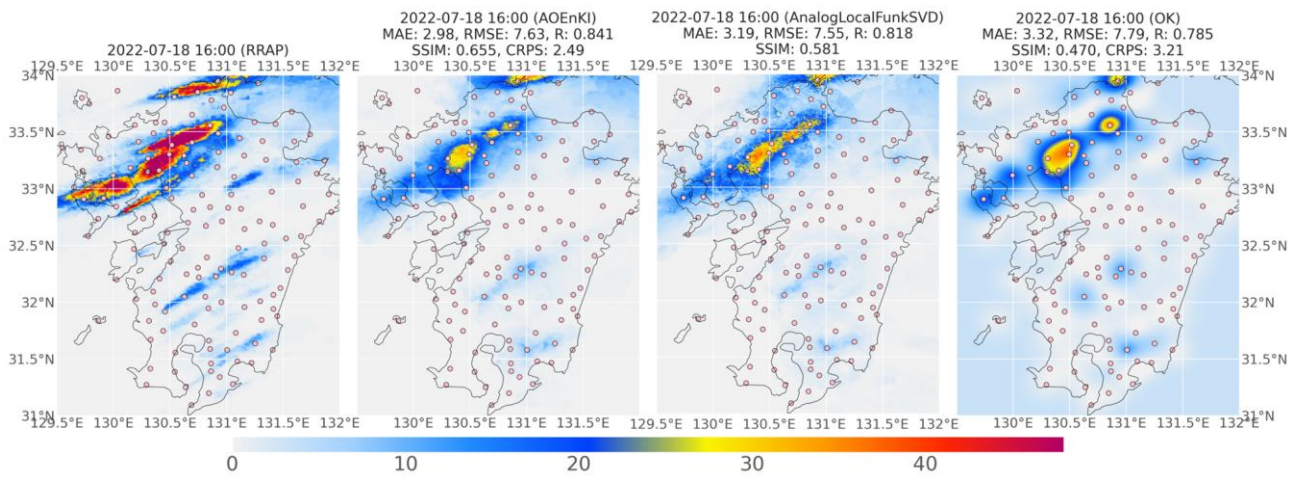


図1 OKのStructural Similarity (SSIM)が低く、AOEnKI・Funk-SVDのSSIMとの差が最大となった事例。左端は解析雨量(参照)、その右側に左から順にAOEnKI、Funk-SVD、OKによる補間結果。単位はmm/h

の積により、欠測値は補間される。本研究においては、ユーザーがピクセル、商品が各降水イベント(時刻)に対応するものとしてとらえることで、降水分布の補間に応用する。ここで、Funk-SVDの実行は補間対象時刻の降水量観測値だけでは不可能なため、アナログ法で十分なサンプル数を補う。またFunk-SVDによる補間でも、AOEnKIで用いる局所化のアイデアを使用する。

4. 実験・議論

九州のAMeDAS観測点からの降水場推定を行った。AOEnKIとFunk-SVDの比較対象として、通常クリギング(OK)を用いる。そこで評価指標の一つであり、視覚的な再現度の指標であるStructural Similarity (SSIM)が、OKで低くAOEnKI・Funk-SVDとの差が最大となった事例での復元結果を図1に示す。これらの図より、雨量計でとらえられておらずOKでは推定に失敗したライン上の降水域が復元できたことが分かる。また、他の多数のイベントに対してもこれらの補間手法の比較を行い、平均的にOKよりも優れた評価指標が得られることを確認している。

アナログ法により、物理的に妥当な補間が可能であることが分かった。降水量は極端イベントのサンプル数が少ない現象であるため、教師有機械学習を用いる場合にはサンプル数が不足しがちであるが、アナログ法は適切に動作することが確認できた。また、選択されたアナログアンサンプルを確認可能で、補間過程の解釈可能性も高い。これらは近年様々な用途で用いられるディープラーニングにはない特長である。十分な訓練データが必要である点は共通であるが、アナログ法はディープラーニングの有望な代替手法足りうと考える。

【謝辞】本研究は、JSPS 科研費(24K17351)の支援を受け実施されました。

参考文献

- Hatono, M., M. Kiguchi, K. Yoshimura, S. Kanae, K. Kuraji, and T. Oki, 2022: A 0.01-degree gridded precipitation dataset for Japan, 1926-2020. *Sci. Data*, 9, 422.
- Kamiguchi, K., O. Arakawa, A. Kitoh, A. Yatagai, A. Hamada, and N. Yasutomi, 2010: Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years. *Hydrol. Res. Lett.*, 4, 60-64.
- Schamm, K., M. Ziese, A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, U. Schneider, M. Schröder, and P. Stender, 2014: Global gridded precipitation over land: a description of the new GPCP First Guess Daily product. *Earth Syst. Sci. Data*, 6, 49-60.
- Yatagai, A., K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi, and A. Kitoh, 2012: APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 1401-1415.
- Chen, H., S. Sheng, C.-Y. Xu, Z. Li, W. Zhang, S. Wang, and S. Guo, 2021: A spatiotemporal estimation method for hourly rainfall based on F-SVD in the recommender system. *Environ. Model. Softw.*, 144, 105148.

キーワード : analog method, rain gauge, interpolation, ensemble data assimilation, Funk-SVD

一般セッション(口頭講演) | 流域水管理・開発/水資源・水環境社会学

■ 2026年9月16日(水) 14:40 ~ 16:10 | 2Fホール(2F)

[OS-10] 流域水管理・開発/水資源・水環境社会学

座長:渡部 哲史(九州大学)

14:40 ~ 14:55

[OS-10-01] 河川水温の将来変化の地域的特徴の分析

*星野 剛¹、西村 宗倫² (1. 寒地土木研究所、2. 国土技術政策総合研究所)

14:55 ~ 15:10

[OS-10-02] 政府による災害対策によって各世帯の生計向上投資がどう変化するのか
～ガーナ沿岸の海岸災害被災地を対象としたケーススタディ～

*森 利紗子¹、川崎 昭如^{1,2} (1. 東京大学大学院工学系研究科、2. 東京大学未来ビジョン研究センター)

15:10 ~ 15:25

[OS-10-03] SSPシナリオを用いた2099年までの二国間仮想水貿易予測

*津田 和樹¹、佐野 太一²、飯泉 仁之直³、沖 大幹¹ (1. 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻、2. 神戸大学大学院工学系研究科、3. 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構)

15:25 ~ 15:40

[OS-10-04] 中小規模流域における水循環の客観的評価に向けた課題整理

*井垣 智貴¹、山崎 由理²、清水 克之² (1. 鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科、2. 鳥取大学農学部)

15:40 ~ 15:55

[OS-10-05] 将来変化を踏まえた農業用ため池の管理・活用に関する市町村間比較

*渡部 哲史¹、五三 裕太² (1. 九州大学、2. 山梨大学)

15:55 ~ 16:10

[OS-10-06] 南海トラフ地震後の洪水リスクと将来需要を考慮した治水投資判断モデルの構築

*川村 泰誠¹、川崎 昭如² (1. 東京大学大学院 工学系研究科、2. 東京大学未来ビジョン研究センター／デジタルオブザーバトリ研究推進機構)

河川水温の将来変化の地域的特徴の分析

土木研究所寒地土木研究所
国土技術政策総合研究所

○星野剛
西村宗倫

1. はじめに

河川水の温度は河川の水質、水性生物、農業等にとっての重要な指標である。気候変動による河川水温の上昇は魚類の生息場の消失やその分布の北方や上流域へのシフトを招くなど水性生物への影響はとりわけ大きいと考えられている。河川水温は気温や日射量、上流や支川の流量や水温、河道形状や流量、湧水の量やその温度など気象、地形、水文的な物理量の影響を受けて決まる。積雪地域では融雪のタイミングと量も水温に大きく影響する。それらの要素を適切に取り込んだ水温の将来予測が求められている。本研究では気温と流量のみを入力データとする物理的な水温予測モデルを用い、d4PDF¹⁾の気温と流量から将来の水温変化の特徴を明らかにする。

2. 使用モデル・データ

本研究では水温予測モデルに air2stream モデル²⁾を用い、将来の気候における河川水温を予測した。同モデルは熱収支に基づいた水温予測モデルでありながら、予測計算に要する物理量は気温と流量のみであることから極めて実用性が高いモデルである。モデルには 8 つのパラメータがあり、パラメータ推定には水文水質データベースで公開されている流量と水質自動観測の水温およびアメダスの気温を用いた。なお、流量と気温は水温観測地点に最も近い観測点の値を用いた。水温の過去・将来予測には d4PDF のバイアス補正された気温³⁾と流量予測結果⁴⁾を用い、過去、2℃上昇、4℃上昇の 3 つの気候条件において水温を予測した。

3. 結果

本研究では多雪地域の代表地点として石狩川伊納観測所（以下、石狩川）、少雪地域の代表地点として重信川出合橋観測所（以下、重信川）における水温の将来変化を予測した。予測された水温および流量、気温、水温の変化を図-1, 2 にそれぞれ示す。両地点とも水温の年変化の傾向は同じであり、石狩川は過去気候で最低 0℃、最高 19℃程度、重信川は過去気候で最低 10℃、最高 26℃程度の範囲で変動する。石狩川の流量の変化に着目すると、2℃上昇と 4℃上昇ともに石狩川では 12-3 月に流量が増加しており、5 月は減少している。特に 3 月の減少量、減少率および 5 月の増加量、増加率はともに大きく、これは気温上昇に伴う融雪の早期化および降雪から降雨への変化を意味している。重信川では夏季に流量の減少量が大きいものの、変化率は 50%以下であり、多雪地域ほどの月流量の変化は見られない。気温の変化量は高緯度に位置する石狩川の方が大きい。水温は両地点ともに全ての月で上昇する。石狩川では流量の増加する 12-3 月の水温上昇量は相対的に小さいものの、4, 5 月の昇温量は大きいことがわかる。これは流量変化の影響を強く受けているためであり、将来気候では 12-3 月は融雪水を中心とする冷たい水の流出が増加することから水温上昇は抑制され、流量の減少が顕著な 5 月は河川の熱容量が小さくなり昇温量も増大する。4 月は流量変化は小さいが気温上昇量が大きいため昇温量も卓越すると考えられる。このように、石狩川では水温上昇は強い季節性を有するが、重信川での水温上昇量は年間を通して変化が小さいことがわかる。これは石狩川と比べて重信川は流量変化率が小さく、気温変化量も年間を通して変動が小さいためだと考えられる。また、全体的に昇温量は重信川が大きいがこれは河川の流量が石狩川と比べて小さいためと考えられる（年平均流量は石狩川：136 m³/s、重信川：9 m³/s）。

4. まとめ

本研究では気温と流量のみを入力データとする実用的な水温予測

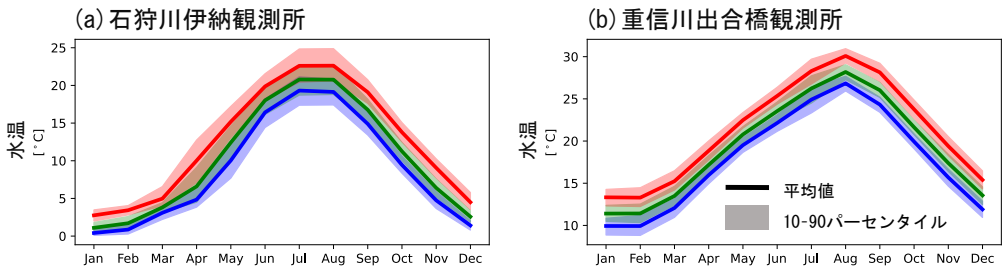


図-1 予測された水温（青色は過去気候、緑色は 2℃上昇気候、赤色は 4℃上昇気候）

モデルを用い、将来気候における気温と流量から将来の河川水温を予測した。その結果、多雪地域では融雪の早期化や降雪から降雨への変化に伴う流量変化の影響を受け、水温上昇量は冬季で小さく、融雪末期の5月で大きくなることわかった。一方で、少雪地域では年間を通し

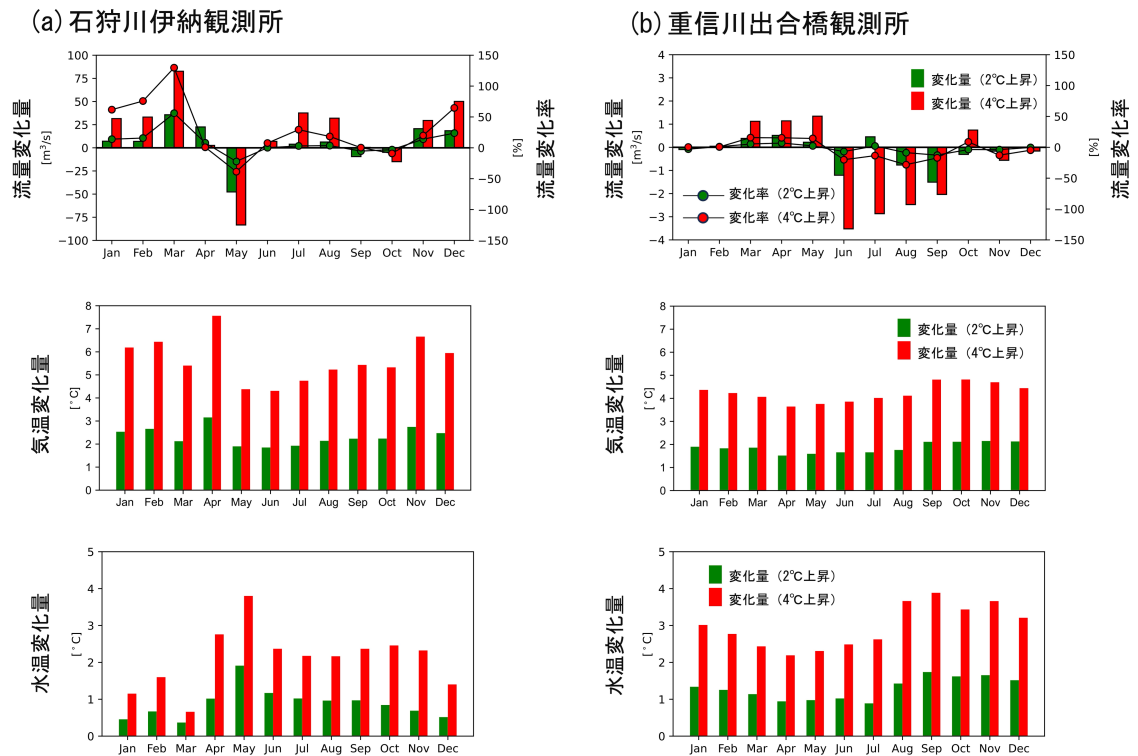


図-2 流量、気温、水温の将来変化。

て水温変化量は相対的に小さいことがわかった。多雪地域では既に融雪の早期化が生じていることが確認されており⁵⁾、融雪末期の流量減少による水温上昇が既に生じていることが予想される。近年の気温上昇による水性生物への影響が報告されているなど⁶⁾、モニタリングや水温予測に基づく対策の検討の重要度は増している。また、本研究では月平均の水温変化のみを検討対象としたが、気候変動により渇水の頻度と強度の増大が予想されており⁴⁾、渇水時の極端な水温は非常に高くなると考えられる。このため、本研究で対象とした「平均的な水温変化」とともに「極端水温の変化」の両方の観点から水温変化や生物への影響を予測することが重要になると思われる。

【謝辞】

本研究では、文部科学省による複数の学術研究プログラム(「創生」,「統合」,「先端」(JPMXD0722680734), SI-CAT, DIAS) 間連携および地球シミュレーターにより作成された d4PDF を使用した。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kawase et al., Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. J. Geophys. Res. Atmos, Vol.128, e2023JD038513, 2023, DOI 10.1029/2023JD038513.
- 2) Toffolon and Piccolroaz, A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. Environ. Res. Lett. 10, 114011, 2015, DOI 10.1088/1748-9326/10/11/114011.
- 3) 西村ら, 全国版 d4PDF ダウンスケーリングデータのバイアス補正データの開発と公開, 河川技術論文集, Vol.31, 2025, DOI 10.11532/river.31.0_421.
- 4) 西村ら, WBC-d4PDF5km(2022)を用いた気候変動による渇水への影響のマクロ的評価, 土木学会論文集, Vol.81, 2025, DOI 10.2208/jscej.25-27035.
- 5) Hoshino, Annual patterns of mountain runoff and its long-term trends in Japan based on dam inflow data. Hydrological Research Letters, Vol.19(3), 149–155, 2025, DOI 10.3178/hrl.25-00009.
- 6) Kuroda et al., A heatwave-related mortality event of endangered Sakhalin taimen Parahucho perryi in northern Hokkaido, Japan. Ichthyol Res, 73, 170–176, 2026. DOI 10.1007/s10228-025-01026-x.

キーワード : Stream temperature, Climate change, d4PDF, Flow regime

政府による災害対策によって各世帯の生計向上投資がどう変化するか
～ガーナ沿岸の海岸災害被災地を対象としたケーススタディ～

東京大学大学院工学系研究科 ○森利紗子

東京大学未来ビジョン研究センター，東京大学大学院工学系研究科 川崎昭如

1. はじめに

開発途上国では、災害と貧困は密接に関連しているが、災害対策の政策評価において貧困削減や生計向上の便益が定量的に評価されることは少ない。気候変動による災害の激甚化や予算制約の強まりを背景に、災害対策投資が世帯の生計に与える影響を定量的に把握する重要性は高まっている。

世帯による生計向上のための投資は、貧困削減において重要な役割を果たす¹。災害常襲地域において、世帯の投資は①災害リスクを低減するための投資と②生計向上を目的とした生産的投資に分類され、これらの意思決定は災害に対するリスク認知に影響される。既存研究では、リスク認知の高まりが防災投資の増加につながる事が示されている²³。一方で、リスク認知が生産的投資にどのような影響を与えるかについての実証的知見は限定的である。例えば、リスク認知の高い個人は短期的かつ高利の借入に依存しやすくなる傾向が指摘されている⁴⁵が、借入にとどまらず、災害へのリスク認知が生産的投資や消費行動に与える影響については十分に解明されていない。

ガーナでは、海岸侵食や海岸洪水が長年深刻な問題となっており、住宅や漁業など、沿岸の生計に大きな影響を及ぼしている。政府による対策は十分とは言えず、効果検証と今後の政策設計が急務である。既存研究において海岸災害対策の評価は行われているが、多くは国・地域レベルの分析で、世帯レベルの生計への影響評価は不十分⁶⁷である。また、対策の検討は防波堤などのハード対策に偏っており、ソフト対策の効果については十分に議論されていない⁸。

本研究では、ガーナの海岸侵食被災地域の世帯訪問調査データを用い、政策がリスク認知を通じて世帯の生産的投資に与える影響を分析する。さらに、世帯の経済状況、リスク嗜好、災害経験などを組み込んだ意思決定モデルを構築し、ハードおよびソフトを含む多様な政策が世帯の生計向上に与える影響を評価する。

2. 手法・使用データ

本研究には、2025 年 12－2026 年 1 月と 2026 年 4－5 月に行われた世帯訪問調査のデータを用いた。調査地はガーナ海岸部の Keta および Densu delta の二地域で行われた（図 1）。調査では、訓練を受けた調査員による対面式アンケートを通じて、世帯の社会経済属性、災害経験、リスク認知、投資行動などの情報を収集した。



図 1 調査地（Densu delta & Keta）

分析には、ガーナ沿岸部の海岸侵食被災地域における世帯のリスク認知と投資行動の関係を明らかにするため、世帯訪問調査データを用いた実証分析とシミュレーション分析を組み合わせる。まず、投資や生計向上に関わる行動の仮説となる意思決定モデルを作成する（図 2）。次に、回帰分析や構造方程式モデリングにより、リスク認知が投資行動に与える影響など、モデルの主要な因果関係を推定し、リスク認知の変化を通じた適応行動のメカニズムを分析する。さらに、推定結果をもとに、経済状況、リスク嗜好、災害経験などの変数を含めてパラメータを調整し、世帯の意思決定モデルを構築する。

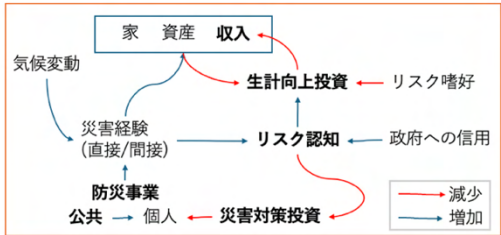


図 2 仮説の意思決定モデル

作成したモデルを用いて、異なる気候変動シナリオおよび政策（ハード・ソフト）の下でシミュレーションを行い、各政策が世帯の生計や投資行動に与える影響を評価する。

3. 結果

世帯訪問調査データに基づく暫定的な分析結果を報告する。現在、データ収集を終え、主要な因果関係を調査するための因果推論

	Accra	Keta
サンプル数	411	394
被災世帯数	206	236
家族の人数	5.99	7.46
世帯主の非教育割合	19.95%	29.70%
女性の世帯主割合	32.36	41.12
平均世帯収入	4494.83	10560.47

表 1 調査地の基礎情報

を進行中である。表 1 に調査対象世帯の主要な属性に関する記述統計量を示す。

図 3 に、第 1 回調査のデータをもとにしたリスク認知と投資行動の関係図を示す。図からは、リスク認知と生計向上投資について明確な傾向は見られなかった。リスク認知の指標が異なると、分布が変化した。被災の有無と分布の違いを見ると、非被災世帯は生計向上投資の割合が比較的高くなる傾向にあることが読み取れる。

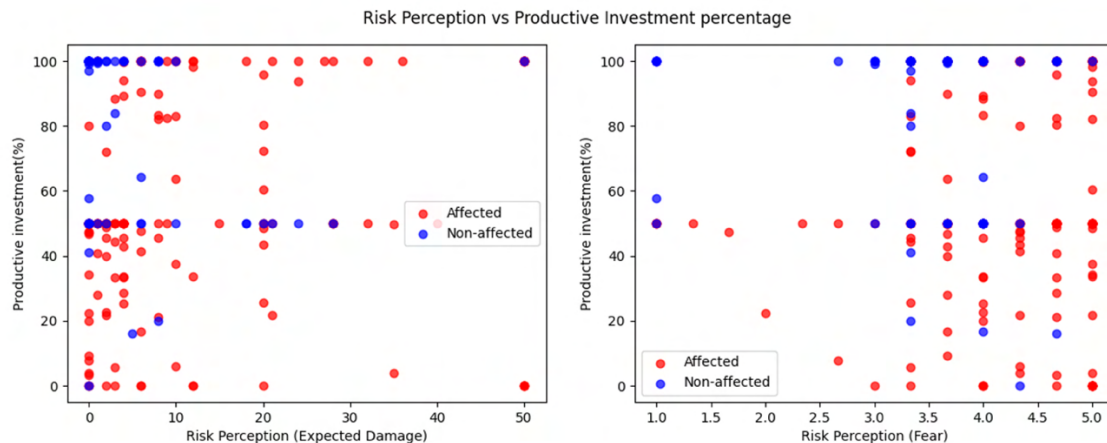


図 3 リスク認知と生計向上投資の割合の関係；赤は被災世帯で、青は非被災世帯（投資を全く行わなかった世帯は除外）。左図が将来の被災状況の予想、右図は災害に対する恐怖をそれぞれリスク認知の指標としている。

4. 議論

リスク認知と投資行動の傾向を簡易的に分析した結果から、リスク認知の測り方によって関係が大きく変化することがわかった。また、将来の被災状況の予想はその後の行動に影響を及ぼさず、恐怖感情や被災の有無がより強い影響を与えるという研究結果もある⁹。このことから、2 回目の調査ではリスク認知のスケールを増やし、より多角的な指標を用いた分析を予定している。

【謝辞】本研究は JST および JICA が共同実施する SATREPS 事業として実施した。

【参考文献】

- ¹ *Building stable livelihoods for low-income households*. (2023, October 1). The Abdul Latif Jameel Poverty Action Lab (J-PAL). <https://www.povertyactionlab.org/policy-insight/building-stable-livelihoods-low-income-households>
- ² Ehsan, S., Abdul Maulud, K. N., Begum, R. A., & Mia, M. S. (2022). Assessing household perception, autonomous adaptation and economic value of adaptation benefits: Evidence from West Coast of Peninsular Malaysia. *Advances in Climate Change Research*. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2022.06.002>
- ³ Adade, R., Dukiya Jehoshaphat Jaiye, Ama, N., & Okhimamhe, A. A. (2023). Adapting to Changing Climate: Understanding Coastal Rural Residents' Relocation Intention in Response to Sea Level Rise. *Climate*, 11(5), 110–110. <https://doi.org/10.3390/cli11050110>
- ⁴ del Valle, A., Scharlemann, T., & Shore, S. (2022). Household Financial Decision-Making After Natural Disasters: Evidence from Hurricane Harvey. *Finance and Economics Discussion Series*, 2022(015), 1–47. <https://doi.org/10.17016/feds.2022.015>
- ⁵ Lahiri, S., & Biswas, S. (2024). (Im)balance in household balance sheet in the aftermath of a natural disaster. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 100, 104174. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.104174>
- ⁶ Adu-Gyamfi, B., Shaw, R., & Yan, W. (2020). Assessment of housing exposure to accelerated coastal erosion in Keta Municipality of Ghana. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 44, 101450. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101450>
- ⁷ Addo, K. A. (2013). Assessing Coastal Vulnerability Index to Climate Change: the Case of Accra – Ghana. *Journal of Coastal Research*, 165, 1892–1897. <https://doi.org/10.2112/si65-320.1>
- ⁸ Blessing Charuka, Donatus Bapentire Angnuureng, & Samuel. (2023). Mapping and assessment of coastal infrastructure for adaptation to coastal erosion along the coast of Ghana. *Anthropocene Coasts*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s44218-023-00026-6>
- ⁹ Wachinger, G., Renn, O., Begg, C., & Kuhlicke, C. (2012). The Risk Perception Paradox-Implications for Governance and Communication of Natural Hazards. *Risk Analysis*, 33(6), 1049–1065. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01942.x>

キーワード：Risk Perception, Investment, Household Survey, Coastal Disaster, Climate Adaptation Policy

SSP シナリオを用いた 2099 年までの二国間仮想水貿易予測

東京大学大学院工学系研究科 ○津田和樹

神戸大学大学院工学系研究科 佐野太一

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 飯泉仁之直

東京大学大学院工学系研究科 沖大幹

1. はじめに

仮想水貿易 (Virtual Water Trade; VWT) は、農産物に内包された水資源を国際的に移転する仕組みであり、グローバル食糧貿易が各地域の水資源利用可能性にどのような影響を与えているかを考えるうえで有用な考え方である。近年の将来仮想水貿易推計に関する研究では、気候変動や人口変化を考慮した将来の農業生産・貿易構造の推計に Integrated Assessment Model (IAM) が用いられている。例えば Graham et al. (2020) のような部分均衡モデルを用いた研究では、将来の土地利用や農業生産量・人口の変化から農作物の市場均衡を解き、それに基づいて仮想水移転量を評価している。しかし、この研究では世界市場を単一市場として扱っており、二国間輸出入依存構造を明示的に評価することが難しい。

ほかにも、仮想水貿易の将来推計に関する研究としては、Dalin et al. (2012) や Sartori et al. (2017) のように仮想水貿易構造の特定国への集中などに関するネットワーク分析を通じて、将来的に仮想水貿易構造がどのようになるかを推定しているものがある。しかし、これらの将来推計は仮想水貿易網が過去のトレンドと同じ増加率で今後も拡大していくという強い前提を置いて議論をしているという問題点がある。

そこで本研究では、現在の貿易構造をある程度維持しつつ、各国の将来需要・供給変化を反映した SSP シナリオ別の二国間仮想水貿易ネットワークを構築することを目指した。対象作物はコメおよび小麦とし、2099 年までの将来変化を推計した。これにより、将来的な国際食糧貿易によって、水資源の相対的に豊かな地域から相対的に不足している地域へ、仮想水貿易を通じて疑似的な水資源の移転が行われるかどうかの分析が可能になる。

2. 使用データと手法

まず、各グリッドにおける収量と耕作面積の積を国ごとに集計することで、国別生産量を算出した。コメについては、粳から精米への換算係数として 0.65 を乗じた。次に、各国の現在の生産量に占める輸出割合を用いて、将来における輸出可能量を推計した。需要に関しては、各国の一人当たり消費量に人口を掛けたものとした。この際、一人当たり消費量は基準年の生産量から輸出入を調整し、それを基準年の各国の人口で割ったものを用いている。

需要量が供給量を上回る国については、その不足量を輸入需要として定義した。しかし、将来シナリオによっては、世界全体の輸出可能量と輸入需要量が一致しない場合がある。これは、使用しているデータが異なるモデルに基づいて推計されていることに起因する。本研究では全球整合性を保つために、世界全体の輸入需要量が輸出量に比べて過剰になっている場合は、各国の輸入需要量を世界全体の輸出量と整合するように比例的に補正した。

その上で、二国間貿易量の推計には Iterative Proportional Fitting (IPF) を用いた。これにより、各国の輸出量および輸入量の制約を満たしながら、基準年における貿易シェアを可能な限り維持した二国間貿易ネットワークを構築した。基準年の二国間貿易構造のデータとしては、FAO によるデータを用いている。最後に、各国での作物生産の際に発生する蒸発散量から求めた水フットプリントを用いることで、二国間の農産物貿易量を仮想水貿易量へ換算した。

3. 結果

図1に、代表例として SSP1 と SSP5 でのコメの仮想水貿易ネットワークの違いを示した。SSP シナリオによるネットワークの違いが確認できる。

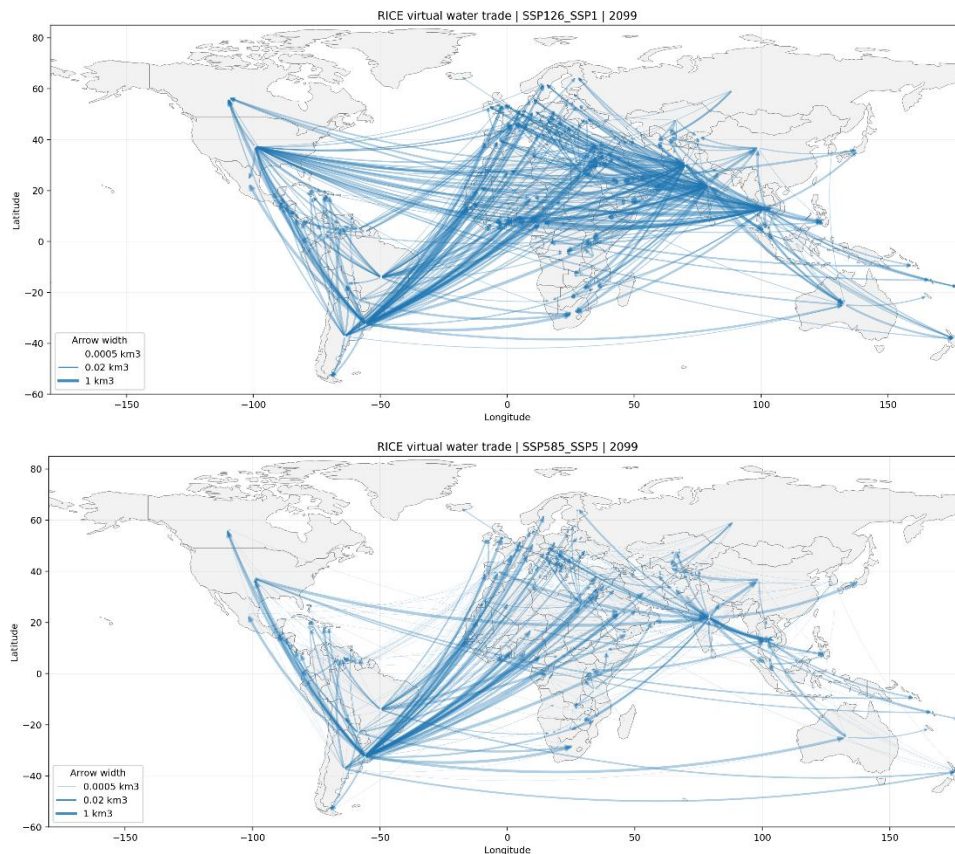


図1 2099 年における SSP シナリオ間のコメの仮想水貿易ネットワークの違い

4. まとめ

本研究では、SSP シナリオごとの二国間将来仮想水貿易ネットワークを構築し、将来の国際食糧貿易の各地域の水資源利用可能性にどのような影響を与えるかに関してのより直接的な分析を可能にした。ただ、異なるモデルから得られたデータを用いていることによる総生産量と総需要量の齟齬や、原則的に輸出国はもっぱら輸出をし、輸入を一切しないという設計にしていることによる総貿易量の過小評価などの課題があると考えられる。

参考文献

- 1) Graham, N.T., Hejazi, M.I., Kim, S.H. et al. Future changes in the trading of virtual water. Nat Commun 11, 3632 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17400-4>
- 2) Dalin, C., S. Suweis, M.Konar, N.Hanasaki, and I.Rodriguez-Iturbe (2012), Modeling past and future structure of the global virtual water trade network, Geophys. Res. Lett., 39, L24402, doi:10.1029/2012GL053871.
- 3) Sartori, Martina, et al. "Modeling the future evolution of the virtual water trade network: A combination of network and gravity models." Advances in Water Resources 110 (2017): 538-548.
- 4) FAO (2024). FAOSTAT Detailed Trade Matrix. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/>

キーワード：Virtual Water Trade, Bilateral trade, Future projection, SSP scenarios

中小規模流域における水循環の客観的評価に向けた課題整理

鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科 ○井垣智貴
鳥取大学農学部 山崎由理
鳥取大学農学部 清水克之

1. はじめに

近年、気候変動の進行や生物多様性の損失を背景として、流域の水管理には、利水・治水に加えて環境を含めた総合的な視点が求められている。日本では、健全な水循環の維持または回復に向けて水循環基本法が制定され、水循環基本計画に基づく施策が推進されている。また、2020年より水循環の健全度や流域マネジメントの効果を把握するため、AHPを用いた評価指標・評価手法の検討も行われてきた。AHPは、複数の要素が関係する課題に対して、アンケート等による一対比較をもとに相対的な重要度を整理する手法であり、水循環の健全度や流域マネジメントの効果の「見える化」に用いられた¹⁾。しかし、この手法は主観的情報に基づく側面が強く、その妥当性や政策効果を定量的に評価するためには、水量・水質・ハビタットなどの客観的指標に基づく検証が必要である。

しかし、日本の流域では、流域規模や河川区分によって観測体制や利用可能なデータが大きく異なり、特に中小規模流域では客観的評価の実施が容易ではない。そこで本研究では、流域総合水管理の観点から、利水・治水・環境の三要素に着目し、中小規模流域における水循環の客観的評価に向けた課題を整理することを目的とした。

2. 流域総合水管理に基づく水循環評価要素と相互関係

流域総合水管理は、利水・治水・環境の三要素の便益を最大化し、流域全体として健全な水循環を確保しようとする考え方である²⁾。利水では安定的な水供給、治水では水災害による被害の最小化、環境では流域環境の保全が主要な評価対象となる。

これら三要素はそれぞれ独立ではなく、相互に影響し合う関係にある。例えば、水量に着目すると、利水の増大は河川流量を通じて環境に影響を与え、洪水緩和のための空き容量の確保は利水可能量や環境維持に利用できる水量と関係する。(図1)。このように、利水・治水・

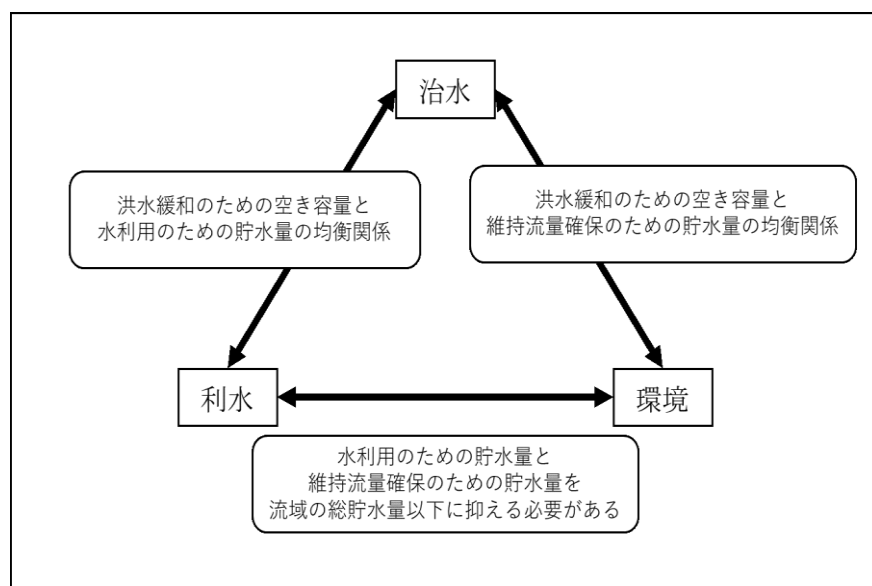


図 1 3要素間の相互関係

環境の三要素は、流域内の有限な水資源をめぐって相互に制約し合う関係にある。したがって、水循環の客観的評価においては、個別要素ごとの評価のみではなく、要素間の均衡関係を踏まえて整理する必要がある。

3. 河川区分及び流域規模による観測体制の違い

日本の河川では、河川区分や流域規模により管理主体や観測体制が大きく異なる。1級河川では、流域内に多様な利害関係者が存在し、水位・流量・水質などの観測も比較的高頻度・高密度に実施されているため、客観的評価の基盤が整いやすい。一方で、流域内の関係者が多いため、アンケート等による主観的評価の実施負担は大きいと考えられる。

これに対し、中小規模流域や農業用水路では、関係者が比較的限定されるため主観的評価は実施しやすい一方で、水位・流量観測が未整備であることが多く、水質観測も低頻度または未実施である場合が多い。そのため、

客観的評価を支える観測基盤が脆弱である。

このように、流域規模が大きいほど主観的評価の負担が大きいのが客観的評価は行いやすく、逆に流域規模が小さいほど主観的評価は行いやすいが客観的評価の実施は難しいという構造がみられる。

しかし、評価の必要性は観測のしやすさや流域規模の大きさだけでは決まらない。特に環境・生態系の観点では、中小規模河川であっても評価の重要性は高い。近年の環境用水への注目に際して、中小規模河川の観測需要は今後さらに増加することが予想される。これは、治水や利水では流域規模に応じて需要が増加しやすい一方で、環境・生態系においてはその関係が必ずしも支配的ではないためである。例えば、Freeman et al.³⁾ は、小河川に生息する種の喪失が、流域または地域全体における特定分類群の多様性低下につながることを指摘している。

4. 水文観測と課題

水位・流量観測は、利水・治水・環境のいずれにおいても重要な基礎情報である。しかし、一般に流量の把握には、水位の観測に加えて水位－流量曲線の作成が必要であり⁴⁾、継続的な観測と現地作業を伴うため観測負担が大きい他、出水時を含む複数条件下での現地観測を要するため、中小規模流域では安定した流量系列を得ること自体が容易ではない。

また、水質観測についても、生態系保全や生活環境の維持において重要であるが、高頻度観測や連続観測には機材費や設置・回収・水質分析の労力を要する。そのため、中小規模流域では定期的な採水観測に限定されやすく、降雨時流出など短時間の水質変動や負荷流出を捉えにくい。このことは、平常時の観測値に基づいて流域の状態を評価することにつながり、実際の流況変動や水質変動の把握に偏りを生じさせる可能性がある。

さらに、水量・水質・生態系はそれぞれ求められる観測頻度や時間スケールが異なるため、三要素を統合した客観的評価を行う際には、各データの時間的・空間的整合をどのように確保するかが課題となる。一方で、中小規模流域は生態系保全の観点から重要であり、流域全体の健全性を把握するうえで無視できない対象である。したがって、今後の中小規模流域における水循環評価では、単に観測点数を増やすだけでなく、限られた観測条件のもとで何を優先的に計測し、どの情報をモデル等で補完するかを整理する必要がある。

5. まとめ

本研究では、流域総合水管理の観点から、利水・治水・環境の三要素に基づいて水循環の客観的評価に必要な視点を整理した。その結果、三要素は相互に制約し合う関係にあり、個別の要素ごとの評価のみではなく、それらの均衡関係を踏まえた整理が必要であることを示した。

また、日本の河川では、流域規模や河川区分により制度的条件と観測体制が大きく異なることを示した。特に中小規模流域では、主観的評価は比較的实施しやすい一方で、客観的評価を支える流量・水質データが不足しており、評価基盤が脆弱である。このように、流域規模に応じて主観的評価と客観的評価の実施しやすさが異なる点は、今後の評価方法を検討するうえで重要な論点である。

以上より、中小規模流域における水循環の客観的評価においては、観測データの不足を前提とした現実的な評価枠組みの検討が必要である。今後は、観測水準や利用可能なデータに応じて、どの評価項目を観測し、どの項目をモデル等で補完するかという観点から、適用可能な評価フレームを構築する必要がある。

参考文献

1)澤田（2021）リバーフロント研究所報告 第 32 号 pp13-20

2)国土交通省 ホームページこれからの「流域総合水管理」の推進, 2024 年 11 月 1 日（オンライン）

URL: <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/content/001842732.pdf> 参照日 2026 年 5 月 1 日

3) Freeman（2007）. JAWRA, vol. 43 No.1, pp5-14

4)木下(2010) 河川流量観測の新時代, 2010 年 9 月

キーワード：River basin management, Flood control, Water utilization, Environment, Hydrological monitoring

将来変化を踏まえた農業用ため池の管理・活用に関する市町村間比較

九州大学 ○渡部哲史, 山梨大学 五三裕太

1. 背景と目的

農業用ため池は、我が国における稲作を支える水資源施設として、河川水の利用が困難な地域を中心に古くから築造されてきた。農林水産省による推計では、全国に約 15 万箇所の農業用ため池が存在し、その約 7 割が築造後 200 年以上を経過している。これらのため池は、灌漑用水の貯留という本来の機能に加え、里山景観を構成する水辺環境として生物多様性の保全や文化的景観の形成にも寄与してきた。また、池干しに代表される維持管理作業は、堆積土砂の除去や水質管理だけでなく、地域住民の共同作業や交流の機会としても機能してきた。農業用ため池は農業水利施設にとどまらず、地域の水循環、生態系、コミュニティを支える重要な地域資源である。

一方で、近年は人口減少や高齢化、営農形態の変化に伴い、農業用ため池の維持管理を担う主体が弱体化しつつある。多くのため池は個人や地域の集団によって管理されており、その維持管理は地域住民の経験や共同作業に大きく依存してきた。しかし、農業水利用の減少や管理者の高齢化が進む中で、今後すべてのため池を従来と同様に維持し続けることは困難になると考えられる。その一方で、生物多様性や文化的価値の観点から保全が求められるため池も存在する。さらに、気候変動に伴う降水パターンの変化は、渇水対応のための水資源としてのため池の重要性を高めるとともに、洪水緩和など新たな機能への期待も生み出している。

このように、農業用ため池をめぐる課題は、水資源利用、維持管理、防災、環境、地域社会の変容が重なり合う複合的な問題である。しかし、全国に膨大な数が存在するため池について、個々の実態を詳細に把握することは容易ではない。そのため、まずは全国規模のデータに基づき、どの地域でため池の利活用可能性が高いのか、またどの地域で維持管理の困難性が高まるのかを把握することが重要である。以上の背景を踏まえ、本研究では、全国の市町村を対象として、気候変動と人口減少を考慮しつつ、農業用ため池の水資源としての利用可能性と維持管理の持続可能性を比較することを目的とした。

2. 手法

本研究では、農林水産省が公開する農業用ため池一覧を用いた。このデータには、2023 年 3 月時点で登録された全国約 15 万箇所の農業用ため池について、位置情報に加え、堤体長、堤高、貯水量などの諸元が整理されている。ため池の分布や形態は地域の地形条件や歴史的経緯により大きく異なることから、日本を 8 地域に区分し、市町村単位で全国的な傾向を比較した。

市町村ごとのため池の特徴を評価するために、本研究では「ため池水資源利用性 (Reservoir Water Availability: RWA)」および「維持管理困難性 (Dam Maintenance Difficulty: DMD)」の二つの指標を設定した。RWA は、各市町村に存在する農業用ため池の総貯水量を、10 年確率渇水降水量と市町村面積の積で除すことにより算出した。これは、渇水時に得られる降水量に対して、ため池がどの程度の貯水能力を有するかを相対的に示す指標である。一方、DMD は、各ため池の堤高の二乗と堤体長の積を市町村ごとに合計し、市町村人口で除すことにより算出した。これは、堤体の草刈り等の維持管理負担に対して、地域人口がどの程度存在するかを相対的に示す指標である。両指標は、全国の市町村間で比較できるように、対数正規分布に基づき正規化した。

さらに、将来の気候変動および人口減少の影響を考慮するため、将来降水量と将来人口を用いて両指標の将来値を推計した。現在気候の降水量には APHRO_JP の日降水量データを用い、1981 年から 2010 年までの年降水量から 10 年確率渇水降水量を算出した。将来降水量には、日本域 5 km 解像度の大規模アンサンブル気候実験データを用い、全球平均気温 4 度上昇実験と過去実験の差から 10 年確率渇水降水量の変化率を求めた。将来人口については、2020 年国勢調査の市町村別人口を基準とし、国立社会保障・人口問題研究所が公表する生残率、純移動率、出生率等を用いたコーホート要因法により 2050 年頃の人口を推計した。

3. 結果

現在気候・現在人口に基づく指標を比較した結果、RWA は瀬戸内海沿岸および北部九州で高い値を示した。これらの地域では、ため池数が多いことに加え、降水量が相対的に少ないことにより、渇水時におけるため池の水資源としての重要性が高く評価された。一方、DMD は中国地方内陸部および東北地方内陸部で高い値を示した。これは、人口密度が低い地域において、堤体の維持管理に対する

る地域人口の規模が小さいことを反映している。また、四国および近畿の太平洋側でも比較的高い DMD が認められ、急峻な地形条件のもとで堤防の高いため池が多く、維持管理負担が大きいことが示唆された。

RWA と DMD の関係を市町村ごとに比較すると、地域ごとの位置づけに明確な差異が見られた。北海道では RWA が低く、農業用ため池の水資源としての相対的な重要性は低い傾向を示した。一方、東京圏を含む関東地方では人口規模が大きいことを反映して DMD が低い傾向を示した。また、ため池が多い西日本の中でも、中国地方や四国では、近畿や九州に比べて、水資源としての利用可能性に対して維持管理の困難性が相対的に高い市町村が多く分布していた。この結果は、同じ「ため池が多い地域」であっても、水資源としての利活用が主な課題となる地域と、維持管理の持続性が主な課題となる地域が異なることを示している。

将来推計の結果を図に示す。RWA は多くの地域で上昇する傾向を示した。これは、将来の 10 年確率渇水降水量が減少する地域において、ため池の貯水能力が相対的に重要になることを意味している。一方、DMD も人口減少に伴い全国的に上昇する傾向を示した。特に、現在すでに DMD が高い四国では、将来さらに維持管理困難性が高まることが示された。また、ため池をめぐる課題は、従来からため池の集中地域として認識されてきた瀬戸内海沿岸や北部九州に限られず、能登半島や東北地方内陸部など、全国各地に散在する市町村にも広がる可能性が示された。さらに、関東地方のような人口規模の大きい地域においても、気候変動に伴い水資源としてのため池の重要性が高まる可能性がある。

以上の結果から、農業用ため池の管理・活用に関する市町村の課題は、少なくとも三つの類型に整理できると考えられる。第一は、人口減少の進行により維持管理の持続性確保が中心課題となる地域である。第二は、渇水対応の観点から水資源としての有効利用が中心課題となる地域である。第三は、維持管理の困難性と水資源としての重要性が同時に高い地域である。これらの課題類型は、内陸山間部と沿岸部の差異としても現れており、上流側の管理負担と下流側の水利用を一体的に捉える流域的な連携の必要性を示している。今後のため池政策や地域実践においては、全国一律の基準によってため池の存続や廃止を判断するのではなく、市町村ごとの自然条件、社会条件、将来変化を踏まえた管理・活用方針を検討することが求められる。本研究は、農業用ため池をめぐる課題が西日本に限定された地域問題ではなく、気候変動と人口減少のもとで全国的に顕在化しうる水資源管理上の課題であることを示すものである。

【謝辞】本研究は文部科学省科学研究費助成事業(21H05178, 25H00408, 25K21512, 26K01057)により実施された。

【参考文献】 Y. Itsumi, E. Higotani, T. Dozono, S. Watanabe, A municipality-level comparison of agricultural reservoirs in Japan considering climate change and population decline, *HRL*, 20(1), 24-30, 2026.

キーワード : agricultural reservoir, climate change, depopulation, water resource management, sustainability

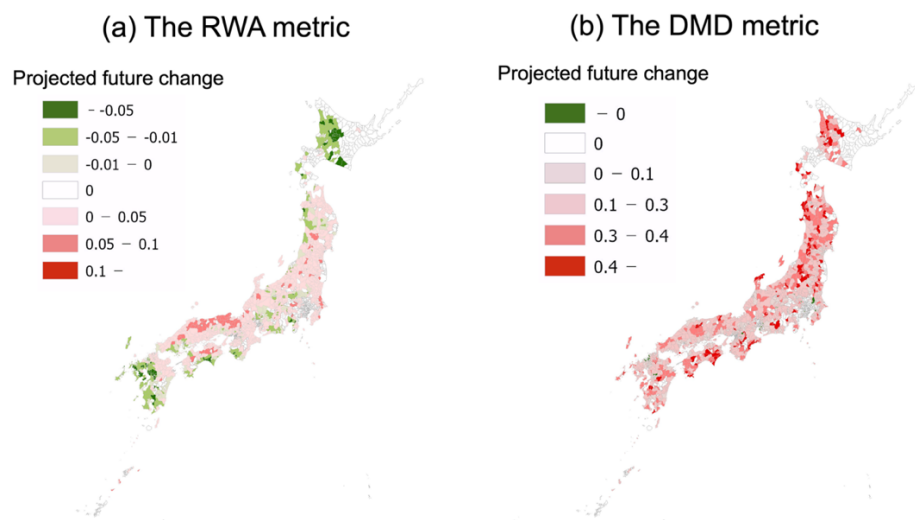


図 気候変動と人口減少を考慮した 2 指標の将来変化: 将来の値－現在の値

南海トラフ地震後の洪水リスクと将来需要を考慮した治水投資判断モデルの構築

東京大学大学院工学系研究科 ○川村泰誠

東京大学未来ビジョン研究センター／デジタルオブザーバトリ研究推進機構 川崎昭如

1. はじめに

南海トラフ巨大地震では広域かつ甚大な被害が想定され、被災前後にすべての地域で同時に復興まちづくりや治水施設の復旧・強化を進めることは、予算、人員、施工能力の面で困難である。加えて人口減少下では、将来需要が縮小する地域に対して従来と同じ規模の復旧・復興を行うことが過大復興につながる可能性がある。そのため、被災前から限られた治水・復興資源をどの水系へ重点的に配分するかを検討する意思決定支援モデルの構築が重要である。

本研究では、この判断を図-1 に示すように、縦軸に洪水リスク、横軸に持続可能性を置く二軸で捉える。既往研究では、災害曝露人口と人口減少を重ねた全国評価¹⁾、気候・人口変動を考慮した曝露人口評価²⁾、流域単位での洪水曝露人口と将来変化の分析³⁾、洪水浸水想定区域内人口の経年変化の把握⁴⁾が行われている。しかし、これらの多くは通常時の洪水リスクを扱うものであり、地震によって治水施設の機能が低下した後に洪水リスクが増幅する可能性は十分に考慮されていない。

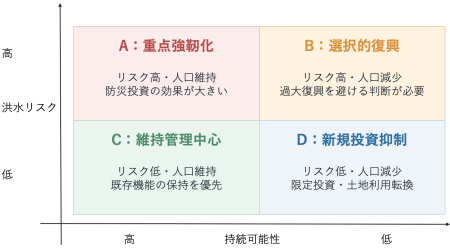


図-1 治水投資判断支援モデルの基本的枠組み

南海トラフ地震後には、地震動によりダム、水門、樋門・樋管等の治水機能が低下し、地震前とは異なる脆弱な状態が生じる。これは地震と洪水が連鎖するカスケード的な複合災害の危険性も示しており、洪水リスクは地震前と比べて大きく変化することが考えられる。故に、治水投資判断における洪水リスクの評価に際して、近い将来起こり得る南海トラフ地震後の洪水リスクとして捉えることは非常に重要である。一方、横軸の持続可能性は、将来的にその水系へ復興・治水投資を継続する妥当性を表す軸であり、人口減少だけでなく資産価値、維持管理費、重要施設等を考慮する余地がある。

2. 使用データと手法

本研究では、全国 109 の一級水系を対象として分析を行う。洪水リスクは、国土数値情報の洪水浸水想定区域と 2020 年人口メッシュを GIS 上で重ね合わせ、流域内人口に占める曝露人口割合として算出する。浸水深については複数の閾値を試行しているが、本稿では想定最大規模の洪水浸水想定区域のうち、床上浸水に相当する浸水深 50cm 以上の区域に居住する人口を曝露人口として示す。

人口減少率については、国土交通省のメッシュ別将来人口推計を用い、2020 年から 2050 年にかけての流域人口減少率で評価した。南海トラフ地震外力は、250m メッシュ震度分布を流域界と重ね合わせ、流域平均震度として整理する。また、治水インフラの脆弱性は、社会資本情報プラットフォームに含まれるダム、水門、樋門・樋管の供用開始年から経過年数を算出し、流域平均老朽度として評価する。

地震後の治水機能低下率は、非木造建物の全半壊率曲線の考え方を参考に、流域平均震度と流域平均老朽度から算出した。老朽度が高い流域ほど、同じ震度でも機能低下が生じやすいように被害率曲線を変化させる。得られた機能低下率を通常時洪水リスクに反映し、地震後洪水リスクを算出した。したがって、本稿で

は図-1 の縦軸である洪水リスクに関して、南海トラフ地震外力とインフラ脆弱性を考慮する形でその解像度を高めている。一方、横軸は既往研究と同様に人口減少率を用いた簡易評価とした。

3. 結果

図-2 に、四国・九州 28 水系における人口減少率と洪水リスクの関係を示す。白抜きの点は地震前、塗りつぶしの点は地震後を示し、矢印は地震後の治水機能低下を考慮したことによるリスク上昇を表す。分析の結果、吉野川、那賀川、仁淀川、物部川などで地震後洪水リスクが比較的大きく上昇することが確認された。これは、通常時の洪水曝露人口評価のみでは把握しにくい、南海トラフ地震後の複合的なリスクの増幅を示している。

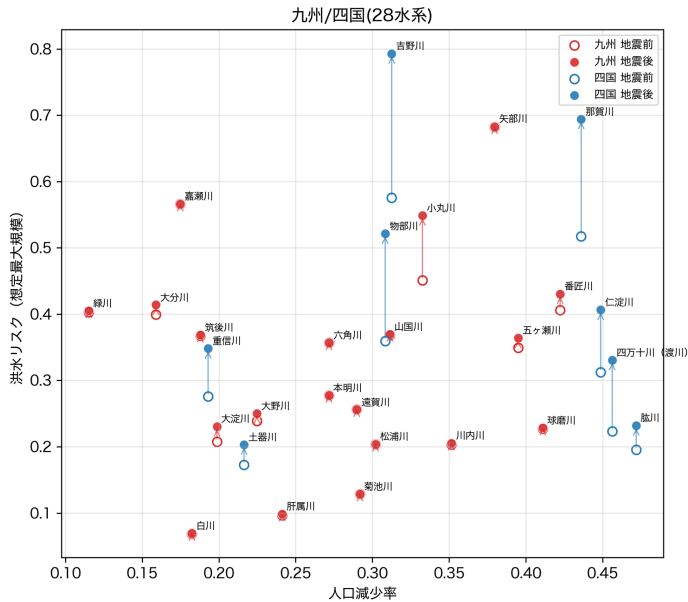


図-2 人口減少率と地震前後の洪水リスク（四国・九州 28 水系、暫定結果）

また、流域ごとの政策意思決定についても図-1 のように四象限に分割して整理すると、物部川では、地震前のみでの評価では維持管理中心の方針を採用すべきであるが、地震後の治水機能低下を考慮することで、治水施設の脆弱性を踏まえて重点的な投資方針が必要となることがわかる。ただし、象限分類は閾値の設定等に依存するため、境界付近の流域は慎重に解釈する必要がある。

4. おわりに

本研究では、人口減少下の治水投資判断を支援するため、洪水リスクと持続可能性の二軸に基づく流域評価の枠組みを示し、そのうち洪水リスクについて南海トラフ地震後の治水機能低下を考慮する方法を提案した。暫定分析から、地震後にリスクが大きく上昇する水系を抽出できる可能性が示された。今後は、全国 109 水系へ対象を拡張するとともに、分類閾値等に対する感度分析を行う。また、治水施設の点検評価や補修履歴を用いた脆弱性評価の精緻化、資産価値、重要施設等を含む持続可能性指標の高度化を行っていく。

【謝辞】

本研究は東京大学デジタルオブザーバトリ研究推進機構の支援を受けて実施した。

参考文献

1) 池永知史・大原美保：全国を俯瞰した災害リスク曝露人口分布の分析，地域安全学会論文集，No. 25，pp. 45-54，2015.
2) 松浦智亮・柳原駿太・池本敦哉・風間聡・川越清樹：日本全域における気候・人口変動を考慮した洪水氾濫・内水氾濫・斜面崩壊の曝露人口評価，土木学会論文集，Vol. 81，No. 16，2025.
3) 中川晃太・中村晋一郎：日本 109 水系の上下流人口バランスによる分類と将来変化，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 75，No. 2，I_67-I_72，2019.
4) 秦康範・前田真孝：全国ならびに都道府県別の洪水浸水想定区域の人口の推移，災害情報，Vol. 18，No. 1，pp. 107-114，2020.

キーワード：南海トラフ地震，洪水リスク，治水インフラ老朽度，人口減少，一級水系

一般セッション(口頭講演) | 河川・湖沼/リモートセンシング

2026年9月16日(水) 16:20 ~ 17:05 | 2Fホール(2F)

[OS-11] 河川・湖沼/リモートセンシング

座長:辻本 久美子(岡山大学)

16:20 ~ 16:35

[OS-11-01] 土壌放射伝達モデルにおける鉛直不均質性とcoherent/incoherent近似の影響評価

*辻本 久美子¹、太田 哲²、開発 一郎³ (1. 岡山大学、2. 研究技術開発支援機構、3. 広島大学)

16:35 ~ 16:50

[OS-11-02] 浅い富栄養湖を対象とした衛星画像解析と機械学習の統合によるメタン排出量推定

*小田 理人¹、楊 偉²、岩田 拓記³ (1. 千葉大学大学院融合理工学府、2. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター、3. 信州大学理学部)

16:50 ~ 17:05

[OS-11-03] 河道測量横断面を用いたCaMa-Floodの水位バイアスの改善

*日置江 桂¹、山崎 大² (1. 株式会社ウェザーニューズ、2. 東京大学生産技術研究所)

土壌放射伝達モデルにおける鉛直不均質性と coherent/incoherent 近似の影響評価

岡山大学 ○辻本久美子

研究技術開発支援機構 太田 哲

広島大学（名誉教授） 開発 一郎

1. 研究の背景および目的

マイクロ波放射計を用いた土壌水分推定では、観測された輝度温度 $T_{B,p,f}$ [K]（周波数 f および偏波 p に依存）から、放射伝達モデル（Radiative Transfer Model, RTM）を介して土壌水分推定値を得る。 $T_{B,p,f}$ は放射率と物理温度の積で表されるため、最も単純には、地表面放射率 $\varepsilon_{p,f|surf}$ と土壌表層温度 T_1 から $T_{B,p,f}$ を推定できる（ $T_{B,p,f} = \varepsilon_{p,f|surf} \times T_1$ ）。実際には地表面からの放射には下層土壌からの寄与も含まれるため、この効果を有効放射温度 T_{eff} として組み込み、 $T_{B,p,f} = \varepsilon_{p,f|surf} \times T_{eff}$ として表現するモデルも多くの先行研究で採用されている。具体的には、土壌を $i = 1, 2, \dots, N$ 層に離散化してモデル化すると、このモデルは次式(1)によって表される。

$$T_{B,p,f} = \varepsilon_{p,f|surf} \times T_{eff,f}; \quad T_{eff,f} = \sum_{i=1}^N S_{f,i} \exp(-\tau_{above(i,f)}) + T_{N+1} \exp(-\tau_{tot}); \quad S_{f,i} = T_i [1 - \exp(-\Delta\tau_{f,i})] \quad (1)$$

ここで、 T_i は層 i の温度、 $S_{f,i}$ は層 i からの体積放射、 $\Delta\tau_{f,i}$ は層 i の光学的厚さ、 $1 - \exp(-\Delta\tau_{f,i})$ は層 i の吸収率（ $\exp(-\Delta\tau_{f,i})$ は層 i の透過率）である。この式は、局所熱平衡のもとでの Kirchhoff 則に基づき、吸収と放射が対応することを想定している。 T_{N+1} は離散化最深層以深の温度（ $= T_N$ と仮定）、 $\tau_{above(i)}$ は層 i より上層全体の光学的厚さ、 $\exp(-\tau_{tot})$ は離散化層全体に対する光学的厚さである。

地表付近の土壌水分プロファイルが滑らかである場合には上記の近似的なモデルで十分とされるが、蒸発によって表層に乾燥層が形成される場合など、鉛直方向の水分勾配が大きい場合には、誘電率の急激な変化により土層内で反射が生じる。このとき、ある層から上向きおよび下向きに放射された電磁波は、その上層および下層で多重反射を受けながら地表面に到達するため、これによる多重反射効果 C_i を考慮する必要があるが生じる。各層からの S_i が地表面に到達するまでの減衰効果を P_i とおくと、土層内部反射を考慮したモデルは、次式(2)で表される。

$$T_{eff,p,f} = \sum_{i=1}^{N+1} (S_{f,i} C_{p,f,i} P_{f,i}); \quad P_{f,i} = \prod_{j=1}^{i-1} \exp(-\Delta\tau_{f,j}); \quad C_{p,f,i} = \frac{1}{1 - \rho_{p,f,i}^{\uparrow} \rho_{p,f,i}^{\downarrow} \exp(-2\Delta\tau_{f,i})} \quad (2)$$

ここに、 $\rho_{p,f,i}$ は各層 i から見た上下方向の有効反射率であり、多層構造における内部反射を扱うため、 $\rho_{p,f,i}^{\uparrow}$ は表層から下層に向かって、 $\rho_{p,f,i}^{\downarrow}$ は最下層から上層に向かって、それぞれ再帰的に求める。すなわち、

$$\begin{aligned} \rho_{p,f,1}^{\uparrow} &= \Gamma_{p,f}; \quad \rho_{p,f,i}^{\uparrow} = R_{p,f,i}^{\uparrow} + \frac{(1 - R_{p,f,i}^{\uparrow})(1 - R_{p,f,i-1}^{\downarrow}) \rho_{p,f,i-1}^{\uparrow} e^{-2\Delta\tau_{f,i-1}}}{1 - R_{p,f,i-1}^{\downarrow} \rho_{p,f,i-1}^{\uparrow} e^{-2\Delta\tau_{f,i-1}}} \\ \rho_{p,f,N}^{\downarrow} &= 0; \quad \rho_{p,f,i}^{\downarrow} = R_{p,f,i}^{\downarrow} + \frac{(1 - R_{p,f,i}^{\downarrow})(1 - R_{p,f,i+1}^{\uparrow}) \rho_{p,f,i+1}^{\downarrow} e^{-2\Delta\tau_{f,i+1}}}{1 - R_{p,f,i+1}^{\uparrow} \rho_{p,f,i+1}^{\downarrow} e^{-2\Delta\tau_{f,i+1}}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $R_{p,f,i}^{\uparrow}$ および $R_{p,f,i}^{\downarrow}$ は、それぞれ、各層 i の上端（ $i|i-1$ 界面）で生じる上向き、下端（ $i|i+1$ 界面）で生じる下向きの単一界面反射率である。 $\Gamma_{p,f}$ は地表面反射率（ $= 1 - \varepsilon_{p,f|surf}$ ）であり、粗度モデルなどで推定される。

辻本（2026）は、実験区画により得られた土壌鉛直プロファイルデータを用いて、表層（ $i = 1$ ）のみの情報から $T_{B,p,f} = \varepsilon_{p,f|surf} \times T_1$ として計算した結果と、式(1)-(3)によって下層土壌の影響（ $i = 1, 2, \dots, 10$; 層厚は1cm）も考慮して計算した場合との比較を1.4GHz（Lバンド）および6.9GHz（Cバンド）に対して示した。その結果は、基本的な理論と整合的に、Cバンドに対してLバンドでは比較的深い土壌の影響を受けているという内容であった。

一方で、鉛直プロファイルを考慮して各層 i から放射された電磁波の地表到達成分を積算する方法には、議論の余地がある。式(2)-(3)の方法では、各層から放射される電磁波のエネルギー（強度）を求めて積算しているが、実際には、それぞれの層からその地温に応じて放射される電磁波は異なる位相をもち、それらが干渉しあいながら地表面で合成されるはずである。つまり、式(2)-(3)は incoherent 近似であるが、実際には、各層 i から放射された電磁波

を複素振幅として扱い、反射・減衰などの層内伝播に伴う位相変化を保持させたいと、最終的な地表面放射を求める過程でエネルギーへと変換する方が現象に即しているように考えられる。そこで本研究では、辻本（2026）の incoherent モデルに対し、新たに coherent モデルを構築し、それらの計算結果を比較した。

2. coherent モデルの構築

完全に coherent に解くためには、 $T_{B,p,f} = |\sum_i a_i^*|^2$ として、振幅 a_i^* を層間で積算してからエネルギーに変換する必要があるが、本研究では、各層からの熱放射は統計的に独立で相互干渉しないと仮定し、層内伝播および多重反射のみに位相を保持した準 coherent 計算を行った。この場合、式(2)は次式(4)のように書き換えられる。ここで、上付きの*は複素数を表す。

$$T_{B,p,f} = \sum_{i=1}^{N+1} \left| l_{p,f,surf}^* \sqrt{S_{f,i}} C_{p,f,i}^* P_{f,i}^* \right|^2; \quad P_{f,i} = \prod_{j=1}^{i-1} [\exp(-\alpha_{f,j} \Delta z_j - j \beta_{f,j} \Delta z_j)]; \quad C_{p,f,i}^* = \frac{1}{1 - \rho_{p,f,i}^* \uparrow \rho_{p,f,i}^* \downarrow \xi_{f,i}} \quad (4)$$

ここに、 $\xi_{f,i} = \exp(-2\alpha_{f,i} \Delta z_i - j 2\beta_{f,i} \Delta z_i)$ は厚さ Δz_i の土層を 1 往復する際の複素伝播因子であり、 $\Delta \tau_{f,i} = 2\alpha_{f,i} \Delta z_i$ として求まる光学的厚さに対応するものである。 $\alpha_{f,i}$ および $\beta_{f,i}$ は、複素伝播定数の鉛直成分を $k_{z,f,i}^*$ として、複素誘電率 $\epsilon_{f,i}^*$ (層 i の土壌水分および電気伝導度 EC により決まる) から式(5)によって求まる。 $\rho_{p,f,i}^*$ は式(3)と同様の有効反射であるが、式(3)がエネルギーベースに $R_{p,f,i} = |r_{p,f,i}^*|^2$ を用いて求めることにに対し、 $\rho_{p,f,i}^*$ は振幅反射係数 $r_{p,f,i}^*$ から求められる (式は省略)。地表面透過 $l_{p,f|surf}^*$ については、 $l_{p,f|surf}^* \approx \sqrt{1 - \Gamma_{p,f}}$ によって近似できるものと仮定した。

$$k_{z,f,i}^* = k_0 \sqrt{\epsilon_{f,i}^* - \sin^2 \gamma} = \beta_{f,i} - j \alpha_{f,i} \quad (j \text{ は虚数単位、} k_0 \text{ は真空中の波数、} \gamma \text{ は観測入射角}) \quad (5)$$

3. 結果および考察と今後の展望

本研究に用いた鉛直プロファイルを図-1、計算結果を表-1 に示す。本研究による coherent モデルによる計算では、L バンドよりも C バンドにおいて鉛直プロファイルの影響が顕著に現れるケースが散見された。これは、短波長である C バンドでは減衰が大きく、単純な浸透深さの議論では表層寄与が支配的と考えられるにもかかわらず、誘電率の急変化に伴う層間反射および多重反射の影響が相対的に強調されるためと解釈される。特に、表層に乾燥層が形成されるような強い水分勾配条件では、誘電率コントラストの増大により反射係数が大きくなり、層内での往復伝播が増幅される。このとき、coherent 的な位相効果を考慮すると、単純な減衰に基づく寄与の重み付けとは異なり、干渉および多重反射を通じて特定層の寄与が相対的に強調される。その結果として、C バンドにおいても鉛直プロファイルの影響が無視できないレベルで現れると考えられる。以上より、従来の incoherent 近似に基づく「低周波ほど深部感度が高い」という理解は、強い鉛直不均質条件においては必ずしも成り立たない可能性が示唆された。本研究で構築した coherent モデルは、このような条件下での土壌放射特性の理解に有効であり、衛星観測データの解釈に新たな視点を与えるものと考えられる。今後は、観測データとの比較を通じて、どのような条件下で coherent 効果が支配的となるかを定量的に明らかにするとともに、土壌水分推定アルゴリズムへの影響評価を進める必要がある。

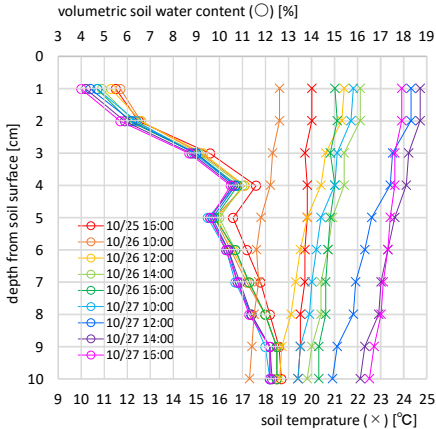


図-1 実験区画で計測された地温 (○) と水分 (×) の鉛直プロファイル
表-1 輝度温度計算結果の差 (プロファイル考慮－表層のみ)

【謝辞】 本研究は JSPS 科研費 (JP19K04619, JP23H01515/JP23K26209, JP25H00760)、JAXA 地球観測研究 (ER4AMF103)、中国電力技術研究財団試験研究(A)助成、木下記念事業団学術研究活動助成の支援を受けて実施しました。 参考文献 1) 辻本久美子, 土壌構造と地温・水分鉛直プロファイルが土壌面からのマイクロ放射に与える影響のモデル化, 令和 8 年度農業農村工学会大会講演会, 農業農村工学会全国大会発表要旨集, 2026.

観測日時	表層 SMC [%]	Cバンド (6.9GHz)				Lバンド (1.4GHz)			
		incoherent		coherent		incoherent		coherent	
		土層内部反射の考慮							
		無		有		無		有	
		ΔTB [K]				ΔTB [K]			
10/25 10:00	5.5	-0.2	-0.1	-0.2	-2.8	-0.4	-0.4	-0.4	0.8
10/26 10:00	5.7	-0.3	-0.3	-0.3	-2.9	-0.9	-0.8	-0.9	0.6
10/26 12:00	5.3	-0.8	-0.8	-0.8	-3.2	-1.9	-1.9	-1.9	-0.5
10/26 14:00	4.9	-0.6	-0.6	-0.6	-2.6	-1.5	-1.5	-1.5	-0.2
10/26 16:00	4.7	-0.1	-0.1	-0.1	-1.8	-0.4	-0.4	-0.4	0.6
10/27 10:00	4.7	-0.7	-0.7	-0.7	-2.5	-1.6	-1.6	-1.6	-0.6
10/27 12:00	4.4	-0.9	-0.9	-0.9	-2.4	-2.2	-2.2	-2.2	-1.0
10/27 14:00	4.2	-0.7	-0.6	-0.7	-1.6	-1.7	-1.7	-1.7	-0.7
10/27 16:00	4.0	-0.3	-0.3	-0.3	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	0.2

キーワード : soil moisture, radiative transfer model, microwave radiometer, dielectric model, satellite remote sensing

浅い富栄養湖を対象とした衛星画像解析と機械学習の統合によるメタン排出量推定

千葉大学大学院融合理工学府 ○小田理人

千葉大学環境リモートセンシング研究センター 楊 偉

信州大学理学部 岩田拓記

1. はじめに

湖沼をはじめとする淡水域は、自然起源における最大のメタン排出源であり、その排出量および発生メカニズムの解明が急務となっている。しかし、メタンフラックスの直接観測地点は限定的であり、湖沼全域からの排出量を広域的に推定する手法は確立されていない。本研究では、日本の代表的な富栄養湖である長野県・諏訪湖を対象とし、衛星リモートセンシングデータと現地観測データを組み合わせた機械学習モデルを構築した。これにより、湖沼全域からのメタン排出量の推定およびその季節変動の解明を目的とする。さらに、構築したモデルを特性の異なる他の湖沼へ適用し、モデルの汎用性を検証した。

2. 対象地域の概要と方法

諏訪湖畔の観測点において渦相関法により得られたメタンフラックスデータを目的変数とし、衛星観測に基づく複数の指標を説明変数とした推定モデルを構築した。メタン排出量の推定は、2種の非機械学習手法（線形重回帰、PLS）と3種の機械学習手法（Random Forest, 勾配ブースティング決定木, XGBoost）において行い、結果の比較を行った。説明変数には、MODISによる湖表面温度（LST）に加え、PlanetScope データから算出した水生植物繁茂面積、および植生指標（NDVI, NDAVI,）、Sentinel2 より算出した植生指標（NDCI）を用いた。なお、水生植物の分類には別途 RF による画像分類を実施した。

推定に際しては、諏訪湖上に現地観測のフットプリント相当のグリッドを設定し、グリッド単位で排出量を算出することで、湖全域の空間分布および季節変動を可視化した。また、モデルの汎用性検証のため、兵庫県の布池（ため池）、米国のアクトン湖（貯水池）、カナダのビッグベアー湖に対しても同様の手法を適用した。

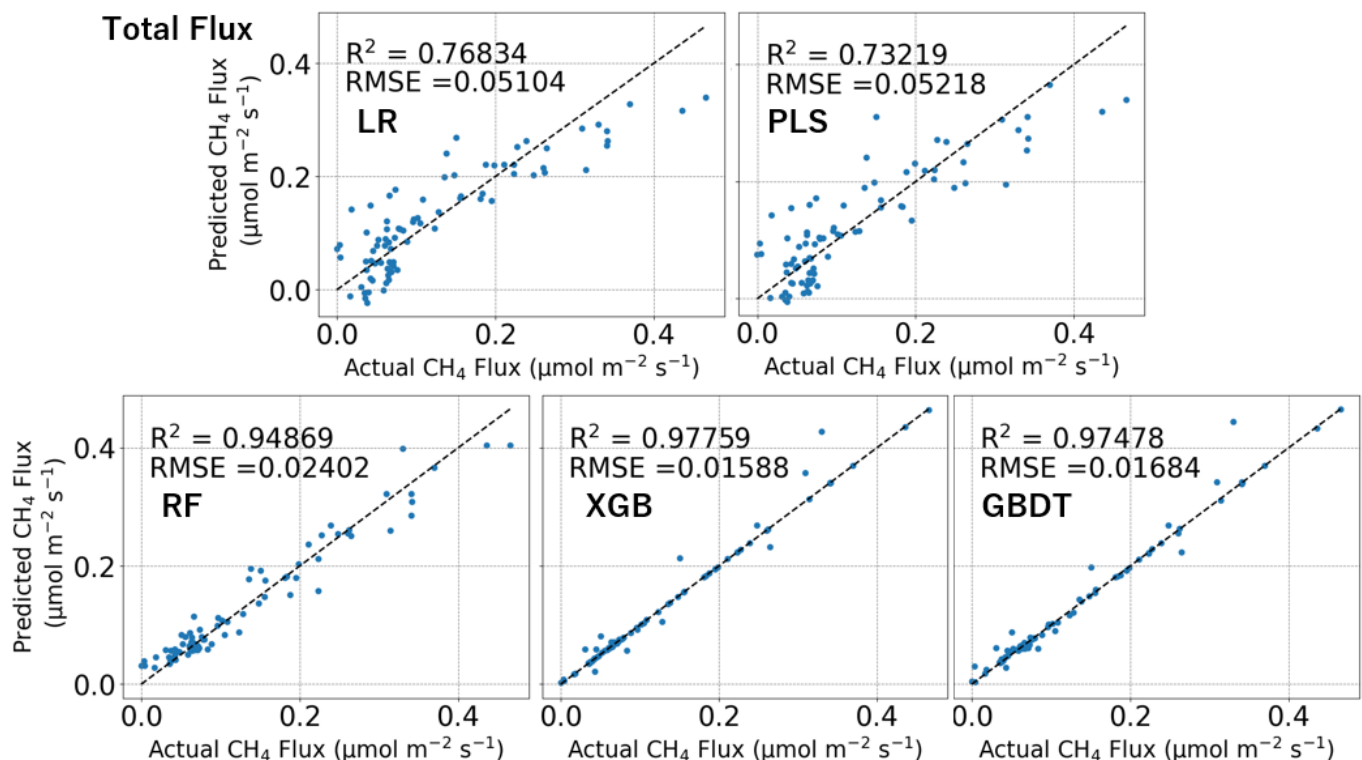


Figure 1. Verification results of each model algorithm for total flux

3. 結果と討論

データセットを月平均、16 日間平均、8 日間平均の 3 種類の時間解像度で作成し、各種推定手法で結果を比較した。その結果、RF を用いた月平均データセットが最も高い推定精度を示した。

一方で、冬季の結氷や夏季の水生植物の繁茂といった短期的な現象とメタン排出量の相関については、8 日間平均のデータセットを用いた推定値の方が実際の現象に即した挙動を示した。このことから、解析の目的に応じて最適なタイムスケールを選択する必要性が示唆された。

他湖沼への適用実験では、布池において最も高い推定精度が得られた。これは、モデル構築に使用した諏訪湖と布池が類似した気候帯に位置していることが要因と考えられる。

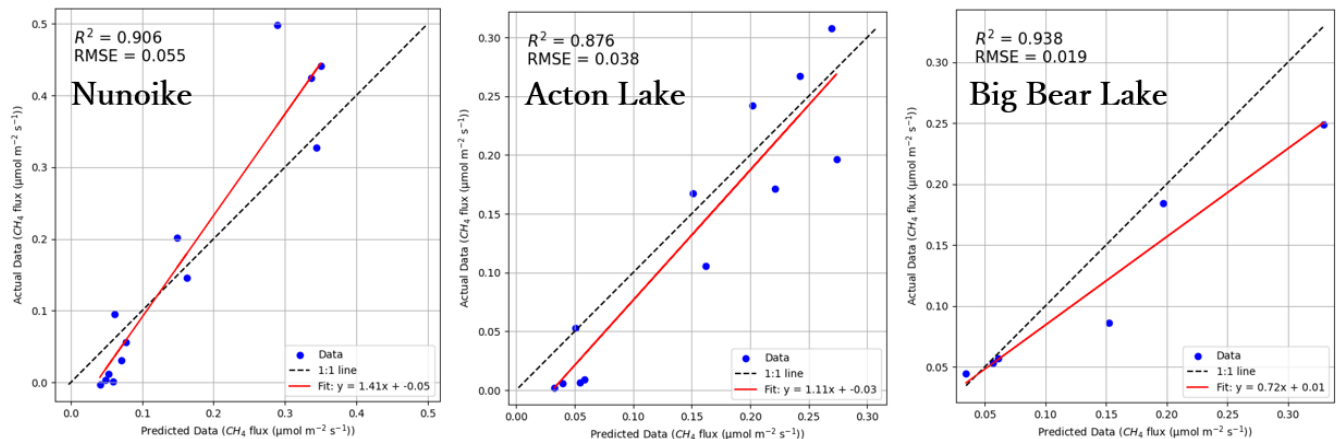


Figure 2. Model verification results across validation sites (Nunoike Pond, Acton Lake, and Big Bear Lake).

4. おわりに

本研究により、衛星画像解析と機械学習を統合することで、湖沼からのメタン排出量を一定の精度で広域推定できる可能性が示された。今後は、モデルを適用する湖沼のサンプル数を拡充し、水深や水質、気候区分などの異なる環境下における検証を進め、モデルの汎用性をさらに高める必要がある。

【謝辞】

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2109 の支援を受けたものです。

参考文献

- 1) Duan, H., Xiao, Q., Qi, T., Hu, C., Zhang, M., Shen, M., Hu, Z., Wang, W., Xiao, W., Qiu, Y., Luo, J., Lee, X., 2023. Quantification of Diffusive Methane Emissions from a Large Eutrophic Lake with Satellite Imagery. *Environmental Science & Technology* 57, 13520–13529. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03223>
- 2) 小田理人, 楊偉. 2025. 高空間分解能・高時間分解能衛星データを用いた湖沼の水生植物活性度と気象・水質指標との関連性の検討. *日本リモートセンシング学会誌*, 45(1), 12-28.
- 3) Sakabe, A., Itoh, M., 2025. JapanFlux2024 JP-Nap Nunoike Agricultural Pond, Version 1.00. Arctic Data archive System (ADS), Japan. <https://doi.org/10.17592/001.2024121025>
- 4) Iwata, H., 2025, JapanFlux2024 JP-SwL Suwa Lake Site, 1.00, Arctic Data archive System (ADS), Japan, <http://doi.org/10.17592/001.2024102219>

キーワード : Methane emissions, Shallow eutrophic lakes, Satellite remote sensing, Eddy covariance method, Machine learning

河道測量横断面を用いたCaMa-Floodの水位バイアスの改善

株式会社ウェザーニューズ ○日置江 桂
 東京大学生産技術研究所 山崎 大

1. はじめに

河川モデル内部で用いられる河道の幅や深さ（以下、河道パラメータ）は、河川水動態計算において重要なパラメータであり、バイアスを発生させる一因である(Yamazaki, 2025). 全球河川モデルであるCaMa-Floodでは、河道パラメータの広範な直接計測が現実的ではないことから、解析値等の流出量の気候値から経験則を用いて河道パラメータを決定している (Yamazaki, 2011). 但し、日本においては河道測量横断面データ（以下、断面データ）が整備され、高解像度の2次元河川氾濫モデルに断面データを組み込むことで精度向上することが確かめられている (山田ら, 2022). 一方で、より解像度が粗い広域河川モデルでの断面データの活用方法は確立されておらず、それを導入した場合の精度改善の効果も議論されていない。本研究では、広域河川モデルであるCaMa-Floodに断面データを組み込む方法を検討し精度改善効果を確認することを目的とする。

2. 手法

本研究では、山田ら(2022)により整備され日本域表面流向マップ上に配置された断面データを用いた。断面データの間隔は200~500mである。CaMa-Floodを空間解像度1分（約1.6km）でシミュレーションした後に、推定水位を解像度1秒（約30m）にダウンスケールし観測データと比較した。

CaMa-Floodは、Catchment-based Macro-scale Floodplain (CMF) 手法を採用しており、各単位流域 (Catchment) の出口（以下、outlet）の水面標高を明示的に定義でき、水面勾配に基づき河川水位を直接計算することが可能である。故に理想的には、各outletと同じ格子に位置する断面データから求めた河道パラメータを、そのoutletの値として設定すれば良い。しかし、実際にはoutletと断面データが同じ格子であることが少ない。さらに川の合流点の上流もしくは下流で断面形状が変化する可能性があることも考え、outletの上流流域面積に最も近い断面データを用いてoutletの河道パラメータを計算することとした。

最初に各outletの上流流域面積に最も近い断面データを特定した (図1). 断面の位置と上流流域面積は、断面上に位置するCaMa-Floodの地形データ（空間解像度1秒）の格子うち、上流流域面積が最大となる格子の値と定義した(図2). 次に、断面データの河床高と水面標高の交点から河道幅を決定した。その後水面から河床までの面積を求め、河道形状を矩形と仮定し河道深さを計算した。水面標高はCaMa-Floodで定義されている値を用いた。なお、河床高と水面標高の交点は2点以上となる場合があるため、最低河床を中心に最も内側の場合と最も外側の場合の2つを計算し、Google Earthで目視確認のうえ確からしい方を選択することにした。断面データがない区間のoutletについては、defaultの河道パラメータを設定した。

今回解析対象とした河川は、都市河川である鶴見川と、大河川でかつ河床変動が大きい石狩川とした。新しい河道パラメータを設定したoutletの数は鶴見川が12、石狩川が111であり、そのうち手動設定した数が鶴見川が1、石狩川が29であった。

計算の対象期間は、2019年から2024年の間で高水位事例を含む1ヶ月を1事例として、鶴見川と石狩川でそれぞれ3事例ずつ選択した。鶴見川と石狩川の各対象期間について、CaMa-Floodでシミュレーションおよびダウンスケールした後に1ヶ月間の平均バイアスを計算した。CaMa-Floodの入力には、空間解像度0.1度、時間解像度1時間のERA5-landのrunoffを用いた。

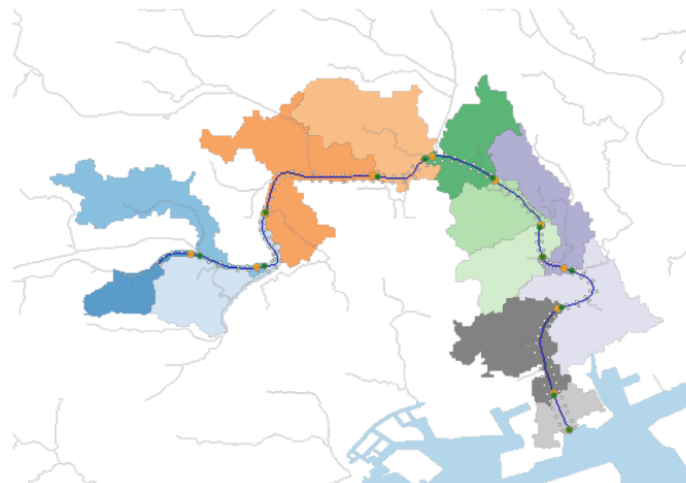


図-1. 鶴見川のoutlet, 単位流域, 断面の位置
 青線が鶴見川の断面データが存在する区間、灰色線が河川、白丸印が断面データの距離標、緑丸印がoutlet、オレンジ丸印がoutletに上流流域面積が最も近い断面の位置を示す。色付けした面はoutletに対応する単位流域を示す。断面間隔は200m。

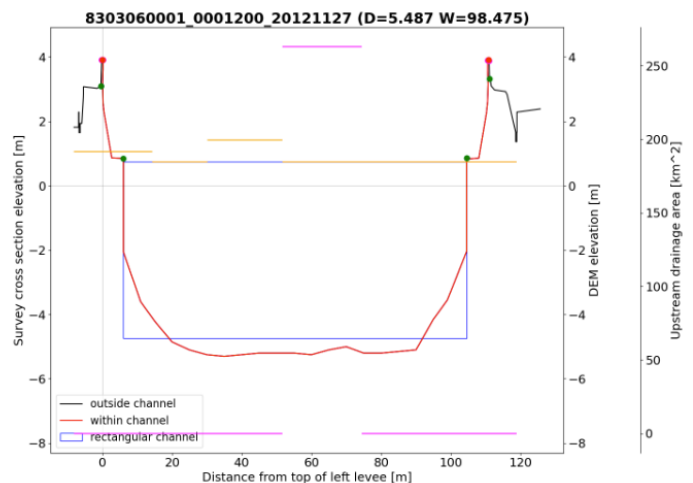


図-2. 鶴見川の河口からの距離1200mでの断面データと矩形の河道深さ (D), 河道幅 (W)

左縦軸が断面データの標高[m], 右縦軸がCaMa-Floodの地形データの標高[m], 最右縦軸が上流流域面積[km²], 横軸が左岸堤防天端からの距離[m]を示す。黒線と赤線が測量による河道、赤線が河道の内側、オレンジ線が河道上のCaMa-Floodの地形データの標高、ピンク線が上流流域面積、青線が求めた河道の矩形を示す。

3. 結果

鶴見川と石狩川の河道深さ、河道幅、水位のバイアスの計算結果を図3に示す。新しい河道深さは、鶴見川、石狩川ともにdefaultより下流が大きく上流が小さい。新しい河道幅は、鶴見川ではdefaultよりも大きい、石狩川ではdefaultと概ね一致している。これは、defaultの河道幅が大きな河川については衛星データから定義されており、断面データから求めた河道幅に近いのである。新しい河道パラメータを用いた場合のバイアスは、ほとんどの地点でdefaultの河道パラメータを用いた場合よりも小さく1m以内である。但し、石狩川の2地点では、新しい河道パラメータを用いてもバイアスが1m以上の場合がある。これら2地点については断面データが測量時点から変化している可能性があると思われる、今後の課題である。

図4に鶴見川の亀の子橋の水位の観測値と推定値の時系列図を示す。最も水位が高い12日の増加のタイミングは、defaultの河道パラメータを用いた場合、新しいパラメータを用いた場合ともに観測とほぼ同じであり、さらにピークの大きさも観測との差が1m以内と精度良い。但し、ピーク後の水位低下時にdefaultの河道パラメータを用いた場合では水位低下量が観測に比べ小さく、2日程の時間をかけて平常水位に戻る。一方、新しいパラメータを用いた場合では水位低下量が大きく半日以内に平常水位に戻っており、非常に良く観測値と一致している。このピーク後の水位低下については、他の日時のピークでも同様の傾向が見られる。なお、平常時の水位（例えば4日～11日）に0.5m程のバイアスがあるが、これは初期水位に課題があると思われる。

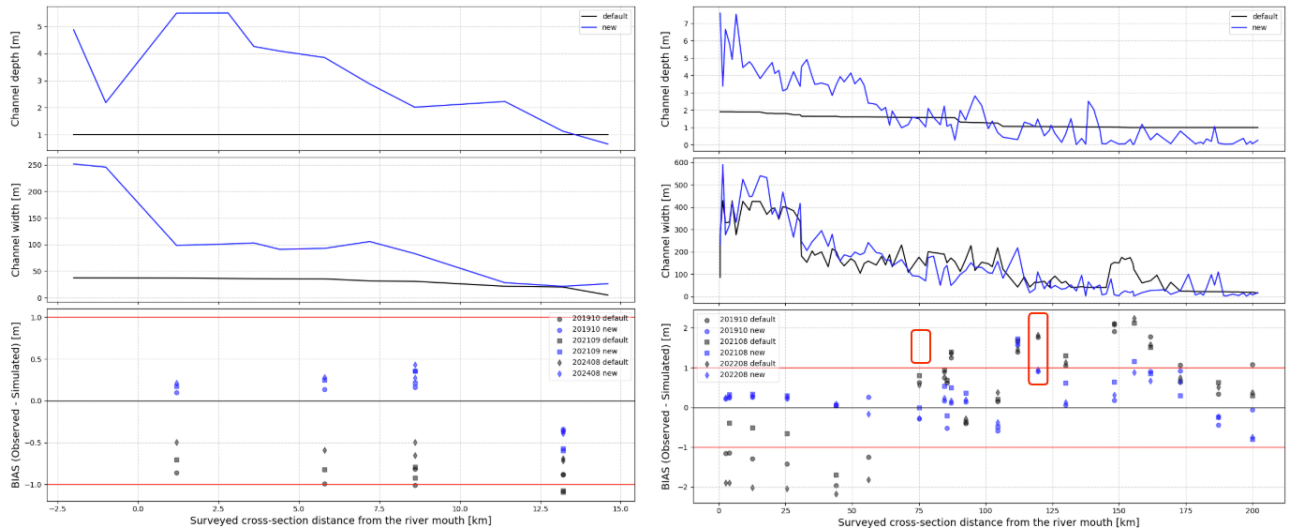


図-3. 鶴見川 (左) と石狩川 (右) の河道深さ(上), 河道幅 (中央), 水位のバイアス (下) の計算結果

defaultの河道パラメータは、2000年から2020年のERA5-landのrunoffと経験式を用いて計算(Yamazaki, 2011)した河道幅と深さに、河道幅は衛星から求めた河道幅 (Yamazaki, 2014) を重ね合わせたものである。横軸は河口からの距離、黒線・黒点はdefaultの河道パラメータを用いた場合、青線・青点は新しい河道パラメータを用いた場合である。

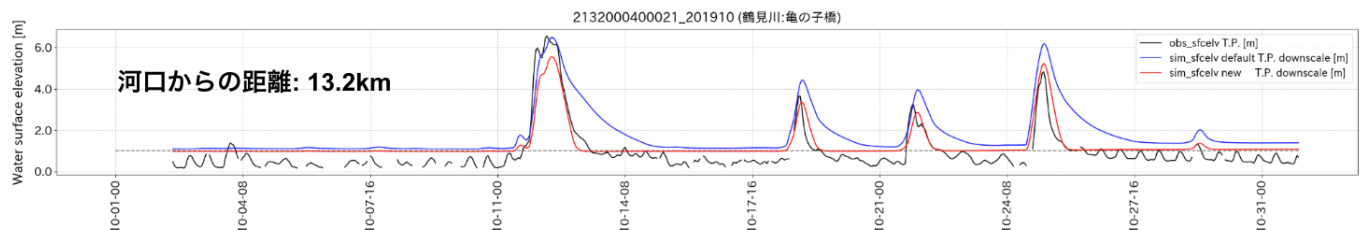


図-4. 2019年10月の鶴見川の亀の子橋 (下) の水位の時系列図

縦軸は水位 [m], 横軸は時間 (1ヶ月分, 月-日-時, 毎時)。黒線が観測値, 青線がdefaultの河道パラメータを用いた場合, 赤線が新しい河道パラメータを用いた場合の推定値。1日0時からCold-Start。月初数日は推定水位が低い状態が続く(2日まで除外)。

4. まとめ

断面データを用いCaMa-Floodの河道パラメータを設定し、鶴見川と石狩川についてシミュレーションを行い、観測水位ならびにdefaultの河道パラメータを用いた場合の推定水位と比較した。その結果、ほとんどの地点で水位のバイアスを1m以内に低減させることができた。特に水位のピーク後の減水部や、河口付近において、バイアスが著しく改善されることが分かった。課題として、断面データと現実河道との差、初期水位の設定、入力流出量の精度 (図省略) などが考えられ今後対応を検討していく。

参考文献

- 1) Dai Yamazaki: Advancing global river hydrodynamics simulations by catchment-based macro-scale floodplain modeling approach, Geoscience Letters 12 (72), 2025
- 2) Dai Yamazaki, Shinjiro Kanae, Hyungjun Kim, Taikan Oki: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, Water Resource Research 47(4), 2011
- 3) 山田真史, 佐山敬洋, 山崎大, 渡辺恵: 日本全域分布型水文モデルへの河道測量横断面反映手法の開発と水位再現性の検証, 土木学会論文集B1 (水工学) 78 (1), 2022
- 4) Dai Yamazaki, Fiachra O'Loughlin, Mark A. Trigg, Zachary F. Miller, Tamlin M. Pavelsky, Paul D. Bates: Development of the Global Width Database for Large Rivers, Water Resource Research 50(4), 2014