

RURSS

Research Unit for Realization of Sustainable Society

令和6年度 研究成果報告書

Research Report FY2024

京都大学 研究連携基盤
持続可能社会創造ユニット
Kyoto University



持続可能社会創造ユニット 令和6年度 研究成果報告書

目次

化学研究所

環境調和型のエネルギー変換を志向した金属硫黄触媒の開発

Development of Metal-Sulfur Catalysts for Environmentally Benign Energy Conversion Reactions

伊豆 仁, 近藤 美欧, 正岡 重行, Sameera W. M. C. 5

ラジカルケージド技術

Radical Caging Technology

隅田 有人, 新井 敏, 大宮 寛久 7

天然・合成漆試料の合成と特性評価：伝統的・革新的用途の発展のための知識ギャップを埋める
Synthesis and characterization of natural and synthetic lacquer samples: closing the knowledge gap for the advancement of both traditional and novel applications

ピンチェラ フランチェスカ, 吳 钊玲, 峰尾 恵人, 中村 正治, 下出 祐太郎,
フォルテ エリカ, タンブリーニ ディエゴ, ボナドゥーチェ イラリア 9

エネルギー理工学研究所

統合バイオリファイナリーのための先進的で環境に優しい方法論の開発

Development of an advanced, eco-friendly methodology for an integrated biorefinery

Sadat Mohamed Rezk Khattab, 八木 勇成, 永田 崇,
渡辺 隆司, 片平 正人 12

熱・電力可変併給によるバイオマス改質と電力需給平滑化

Biomass Reforming and Smoothing of Electricity Supply-Demand by Variable Combined Heat and Power Supply

八木 重郎, 向井 啓祐, 小西 哲之, 田宮 裕之, 高山 定次, 梅澤 俊明 16

生存圏研究所

Char および液化物の同時生産に向けたバイオマス熱分解技術の開発

Development of Biomass Pyrolysis Technology for the Simultaneous Production of Char and Liquefied Products

畑 俊充, 本間 千晶, 渡辺 隆司 18

福島県における環境放射能解析と環境回復のための未来開拓研究の模索

Exploration of Transdisciplinary Future Research for Environmental Radiation Analysis and Recovery in Fukushima Prefecture

上田 義勝, 谷垣 実, 二瓶 直登 20

防災研究所

ドローンを用いた二酸化炭素濃度鉛直分布の観測

Observation of Vertical Distribution of CO₂ Concentration Using Drone

井口 敬雄, 高橋 けんし, 榎本 剛, 吉田 聡 22

ベトナムのメコンデルタにおける地形および堆積物収支に対する砂採掘活動の影響を定量化、評価、予測するための総合的なアプローチ

A holistic approach to quantify, assess, and predict the impact of sand mining activities on geomorphology and sediment budget in the Vietnamese Mekong Delta

サメ カントウシュ, 角 哲也, モハメド セイバー, 柳沢 雅之,
ドアン バン ビン, フォン マイ グエン, ザキ アーメドメンナ 26

山地流域における風化帯成立と水流出過程の統合モデリング

Integrated modeling of hillslope regolith development and subsurface hydrology in mountainous watersheds

松四 雄騎, 佐山 敬洋, 松崎 浩之 29

インドネシアの熱帯泥炭地における洪水・火災リスクに関する研究

Flood and Fire Risk in Tropical Peatland in Indonesia

山本 エヴァ, 佐山 敬洋, 山本 浩大, 甲山 治 33

土石流扇状地における土砂災害リスク評価

Sediment disaster risk assessment in debris flow fan

竹林 洋史, 藤田 正治, メグ ビシュワカルマ, ウメシュ シン 37

森林流域を対象とした水・土砂動態の統合的把握

Integrated understanding of water-sediment dynamics in forest catchment

萬 和明, 呉 映昕, 田中 智大, 山野井 一輝, 宮田 秀介, 高瀬 恵次,
橋口 浩之, 山口 弘誠, 石田 祐宣, 佐藤 嘉展, 市川 温, 中北 英一 39

東南アジア地域研究研究所

インドネシア熱帯泥炭地の火災防災に向けた大気観測研究とその実用化

Atmospheric observation study and its practical application for fire disaster prevention in tropical peatlands in Indonesia

小川 まり子, 甲山 治, 吉位 優作, アワルディン, ヌルディア,
アルバート スレイマン, 山本 エバ ミア シスカ, 山本 浩大, 佐山 敬洋 42

ヒトから霊長類への感染の特定：B型肝炎ウイルスの起源の解明に向けて

Unraveling the origin of hepatitis B virus from human-primates transmission

オフィンニ ユディル, ラトナンガナ リマ, ラハルジョ クリスノアディ,
山田 千佳, 藤澤 道子, 坂本 龍太, 山崎 渉 48

学術情報メディアセンター

持続可能社会実現のための教育ビッグデータ収集・分析基盤システムの開発

Development of a platform for collecting and analyzing educational big data to realize a sustainable society

緒方 広明, 許 嘉瑜, 堀越 泉

53

環境調和型のエネルギー変換を志向した金属硫黄触媒の開発

Development of Metal-Sulfur Catalysts for Environmentally Benign Energy Conversion Reactions

伊豆 仁¹, 近藤 美欧², 正岡 重行³, Sameera W. M. C.⁴

Hitoshi IZU¹, Mio KONDO², Shigeyuki MASAOKA³ and W. M. C. SAMEERA⁴

1京都大学 化学研究所

Institute for Chemical Research, Kyoto University

2東京科学大学 理学院化学系

Department of Chemistry, School of Science, Institute of Science Tokyo

3大阪大学 工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

4イェーテボリ大学 化学分子生物学科

Department of Chemistry and Molecular Biology, University of Gothenburg

Carbon dioxide (CO₂) is a major greenhouse gas contributing to climate change, and its reduction and effective utilization are key to achieving carbon-neutral activities. Electrochemical CO₂ reduction to hydrocarbons or chemical feedstocks could significantly advance this goal. In this study, we introduce a carbazole-based ligand as both a polymerization initiator and charge transfer site into metal-sulfur clusters for CO₂ reduction, and polymerize it on an electrode to create a modified surface. This approach aims to improve electron transport efficiency and develop a catalytic system for CO₂ reduction and hydrocarbon production.

Key Words : CO₂ reduction, environment friendly, energy conversion

1. はじめに

多数の金属と硫黄から構成される金属-硫黄錯体は、あらゆる生物に存在し、うち幾つかは高難度なN₂やCO₂の還元反応(酵素反応)を触媒する。研究代表者が所属するチームでは、金属-硫黄錯体の合成と反応の研究で実績を残しており、N₂還元酵素を模倣する立方体型の[Mo₃S₄Fe]錯体を設計・合成し、N₂を還元できることを世界で初めて実証してきた^{1,2}。代表者がチームに加わった後、酵素による炭素固定から着想を得て[Mo₃S₄Fe]錯体をCO₂還元反応に利用したところ、代表者らのチームが従来用

てきた金属-硫黄錯体^{3,4}より一桁以上高い触媒回転数でCO₂からCH₄へ直接変換できることが判明した(図1-先行検討, unpublished)。代表者以外の研究を含めても、従来の錯体触媒ではCO₂からCH₄への直接変換が可能なものがほとんどなく、最高の触媒回転数は79回だった⁵。一方で代表者らが用いている[Mo₃S₄Fe]錯体は、一度の反応で最大2,000回の触媒回転数を実現できるだけでなく、錯体触媒としては異例な繰り返し使用も可能であることを予備的に確認している。このレベルまで到達したことを受けて、純科学的な興味を超えて将来的な実用化を視野に入れた第一歩を踏み出すことを、本研究では目指す。

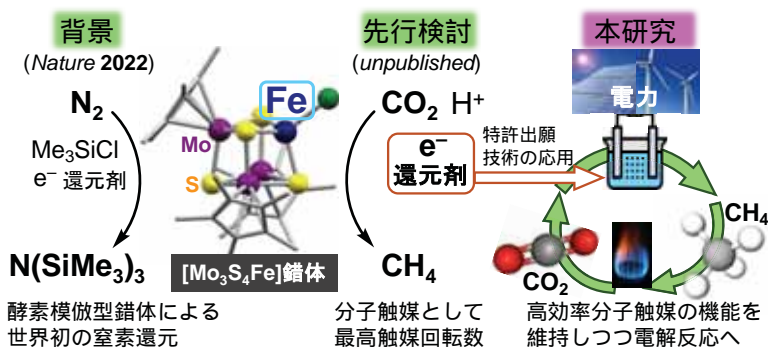
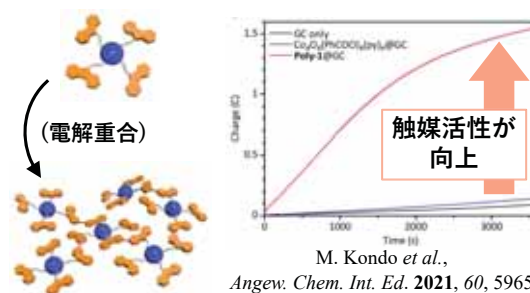


図1. 本研究の背景と目的

2. 研究手法

先行研究では化学還元剤を電子源としており実用化には適していない。実用化を視野に入れた第一歩を踏み出すには電力駆動化し、再生可能エネルギー（再エネ）等由来の電力を有効利用できる技術への展開が求められる。この目標を達成するには、金属-硫黄錯体の触媒機能を維持しつつ電極上へ固定化し、多電子輸送を高効率化する必要がある。また金属-硫黄クラスターは一般に凝集して機能を失いやすい問題も抱えているので、目的達成には金属-硫黄錯体の凝集の抑制も求められる。

そこで本研究では、カルバゾールの電解酸化による二量化を活用した修飾電極の作成技術⁶に着目した。この技術は、金属錯体触媒に対しカルバゾール修飾された配位子を導入した後、錯体を電解重合することで、触媒活性中心の周囲に電荷伝達サイトを配置した修飾電極を作成するというものである。この方法で作成された修飾電極は、電子伝達サイトの配置によって電子移動効率が上昇し、均一系条件と比較して飛躍的な触媒能の向上が観測されている。さらに、錯体間を適度に離しつつ重合可能なこともわかっている。この手法を金属-硫黄錯体に展開することで、(i) 金属-硫黄錯体の機能を維持しつつ電極上への固定化、(ii) 活性点への多電子輸送の高効率化、(iii) 金属-硫黄錯体の凝集等による失活の抑制、を一度に満たすことができる（図2）。



M. Kondo et al.,
Angew. Chem. Int. Ed. **2021**, *60*, 5965.

- (i) 金属錯体の機能を維持しつつ電極上への固定化が可能。
- (ii) 活性点への多電子輸送の高効率化が可能。
- (iii) 金属錯体の凝集等による失活の抑制が可能。

図2. 本研究で着目する電極作成技術の利点

3. 結果と考察

ポリ(ピラゾリル)メタンを金属への配位部位、カルバゾールを重合起点ならびに電化伝達サイトとして機能する新規配位子を合成し、それを $[\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Fe}]$ 錯体と反応させることで、新規配位子を有する $[\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Fe}]$ 錯体の合成を行なった。得られた錯体に対してジクロロメタン中で酸化電位を印加したところ、カルバゾールの2量化を起点とする重合反応が進行し、金属-硫黄錯体が固定化された修飾電極が得られた。この修飾電極を用いて還元側の酸化還元能を調査したところ、 $[\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Fe}]$ 錯体由来のピークが観測され、金属-硫黄錯体が分解せずに電極上に担持されたことを確認した。さらに電極上に担持された $[\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Fe}]$ 錯体に対してFeイオン（反応点として機能）を導入することで、酸化還元挙動の変化が観測されFeイオンの導入に成功した。

$[\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Fe}]$ 錯体を担持した修飾電極を用いて CO_2 還元能を評価したところ、2%ほどのファラデー効率で炭化水素（メタン、エチレン、エタン）を生成していることが明らかとなった。また、 $[\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Fe}]$ 錯体のみを担持した修飾電極では炭化水素の生成は確認されなかった。このことから、 CO_2 を電気化学的に還元し炭化水素を生成可能な触媒材料の開発に成功した。

この結果から、(i) 金属-硫黄錯体の機能を維持しつつ電極上への固定化、(ii) 活性点への多電子輸送の高効率化、(iii) 金属-硫黄錯体の凝集等による失活の抑制、を一度に満たすことができる（図2）。

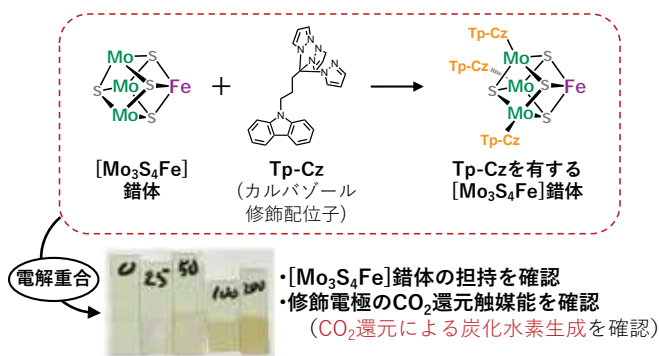


図3. 本研究の成果

参考文献

- 1) Y. Ohki, K. Munakata, Y. Matsuoka, R. Hara, M. Kachi, K. Uchida, M. Tada, R. E. Cramer, W. M. C. Sameera, T. Takayama, Y. Sakai, S. Kuriyama, Y. Nishibayashi, K. Tanifuji, Nitrogen Reduction by the Fe Sites of Synthetic $[\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Fe}]$ Cubes, *Nature* **2022**, *607*, 86.
- 2) Y. Ohki, K. Uchida, M. Tada, R. E. Cramer, T. Ogura, T. Ohta, N_2 activation on a molybdenum–titanium–sulfur cluster, *Nat. Commun.* **2018**, *9*, 3200.
- 3) K. Tanifuji, N. Sickerman, C. C. Lee, T. Nagasawa, K. Miyazaki, Y. Ohki, K. Tatsumi, Y. Hu, M. W. Ribbe, Structure and Reactivity of an Asymmetric Synthetic Mimic of Nitrogenase Cofactor, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 15633.
- 4) M. T. Stiebritz, C. J. Hiller, N. S. Sickerman, C. C. Lee, K. Tanifuji, Y. Ohki, Y. Hu, Ambient conversion of CO_2 to hydrocarbons by biogenic and synthetic $[\text{Fe}_4\text{S}_4]$ clusters, *Nat. Catal.* **2018**, *1*, 444.
- 5) H. Rao, L. C. Schmidt, J. Bonin, M. Robert, Visible-light-driven methane formation from CO_2 with a molecular iron catalyst, *Nature* **2017**, *548*, 74.
- 6) H. Iwami, M. Okamura, M. Kondo, S. Masaoka, Electrochemical Polymerization Provides a Function-Integrated System for Water Oxidation, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 5065.

ラジカルケージド技術

Radical Caging Technology

隅田 有人,¹ 新井 敏,² 大宮 寛久³

Yuto SUMIDA,¹ Satoshi ARAI,² Hirohisa OHMIYA³

¹東京科学大学

Institute of Integrated Research, Institute of Science Tokyo

²金沢大学

WPI Nano Life Science Institute (NanoLSI), Kanazawa University

³京都大学 化学研究所

Institute for Chemical Research, Kyoto University

Caged compounds are temporarily inactivated molecules conjugated to a bioactive compound with a photoremovable moiety. We have previously developed caged acetylcholine with boron-ate complexes that allow the generation of alkyl radicals by visible light excitation. In this study, we redesigned the molecular structure to develop higher performance of caged acetylcholine.

Key Words : Photocaged, C-B bond cleavage, Acetylcholine, Choline esterase

1. はじめに

光イメージングとして知られるケージド技術は、光照射に伴う化学結合の切断により、所望の時空間にて、生理活性物質を放出する(生物機能を回復する)ことができることから、生命現象の機構解明のために広く利用されている。しかし、ケージド化合物の多くは、連結部位に基質由来の求核性官能基(ヘテロ元素官能基)を必要とするため、その適用が、ごく一部の生理活性物質に限られている。我々は、有機ホウ素を従来困難であった炭素上での「光分解性保護基」として活用し、あらゆる生物活性化合物に適用できる網羅的ケージド技術の開発を行っている。そして、生物機能分子に多く存在する N-メチル基における C(sp³)-H 結合のケージド技術を開発した(図 1)¹。直接光励起可能なヨードメチルホウ素アート錯体に対し、アセチルコリン前駆体を作用させることで、ケージド化とメチル化を同時に実現した。アセチルコリンをケージド化し、培養細胞やハエの脳組織を用いて生理的条件下で機能することを示した。

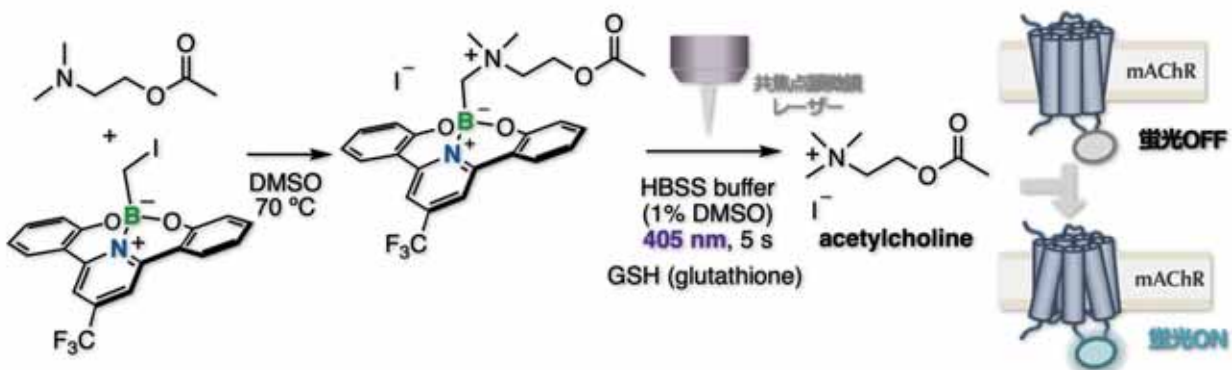


図 1. アセチルコリンのケージド化

一方で、内在性神経伝達物質の多くは非常に高濃度で生体内に存在するため、内在性神経伝達物質の質の

良いイメージングを達成するには少なくとも生体内濃度で利用できるプローブが必要となる。本研究では、独自の分子設計に基づいて高濃度で利用可能な水溶性ケージドアセチルコリン（アセチルコリンのケージド化合物）を開発し、細胞実験による高精細イメージングを目指した。

2. 結果と考察

光除去保護基にスルホン酸基や PEG リンカーの導入による水溶性の向上を図った（図 2）。その結果、従来のケージドアセチルコリンが 50 μM 水溶液（5%DMSO）を限界としていたのに対し、本研究で開発した化合物は 100 μM 水溶液中での使用を可能にした。さらに、開発したケージド化合物の光物性および化学反応性の詳細な評価を行った。具体的には、光反応効率を示す指標であるアンケージング断面積を算出し、核磁気共鳴装置および質量分析装置を用いた脱ケージド化の速度論解析を実施した。また、量子化学計算に基づき、HOMO/LUMO エネルギーレベルと切断速度や効率の相関を明らかにした。この結果、量子化学計算による性能予測を基にした合理的な分子設計が可能であることが示された。開発したケージドアセチルコリンの機能性をさらに検証するため、共焦点顕微鏡を用いた細胞イメージングを実施した。405 nm レーザー励起により脱ケージド化を誘導し、細胞内での光薬理的機能を評価した。これらの成果は、コリン作動薬の光機能制御を可能にする新たな分子技術を提供するとともに、広範な生物活性分子へのケージド化の適用を促進する基盤技術となる。



図 2. ケージドアセチルコリンの機能化

参考文献

- 1) Nakamura, R.; Yamazaki, T.; Kondo, Y.; Tsukada, M.; Miyamoto, Y.; Arakawa, N.; Sumida, Y.; Kiya, T.; Arai, S.; Ohmiya, H. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 1065.

天然・合成漆試料の合成と特性評価：伝統的・革新的用途の発展のための知識ギャップを埋める

Synthesis and characterization of natural and synthetic lacquer samples: closing the knowledge gap for the advancement of both traditional and novel applications

ピンチェラ フランチェスカ¹, 吳 钺玲¹, 峰尾 恵人¹, 中村 正治¹, 下出 祐太郎², フォルテ エリカ³, タンブリーニ ディエゴ⁴, ボナドゥーチェ イラリア⁵

Francesca PINCELLA 1, Beiling WU 1, Keito MINEO 1, Masaharu NAKAMURA 1, Yutaro SHIMODE 2, Erika FORTE 3, Diego TAMBURINI 4, Ilaria BONADUCE 5

¹京都大学・化学研究所

Institute for Chemical Research, Kyoto University

²京都産業大学・文化学部 京都文化学科

Faculty of Culture, Kyoto Sangyo University

³ 京都大学・人文科学研究所 教授

Institute for Research on Humanities, Kyoto University

⁴ Department of Scientific Research, British Museum

⁵ Department of Chemistry, University of Pisa

Urushi has long been known and appreciated as a coating and adhesive material for its many qualities such as durability, stability, natural beauty and gloss. The main limitations to its widespread use are its cost, the time-consuming extraction and treatment processes, and the complex nature of this cross-linked and heterogeneous material. With this work, we aim to improve our knowledge of this complex material by developing new urushi-like materials through the replacement of natural urushiol with synthetic analogs. The chemical and physical properties of the new artificial urushi will then be characterized by state-of-the art techniques.

Key Words : *urushi, lacquer, total synthesis*

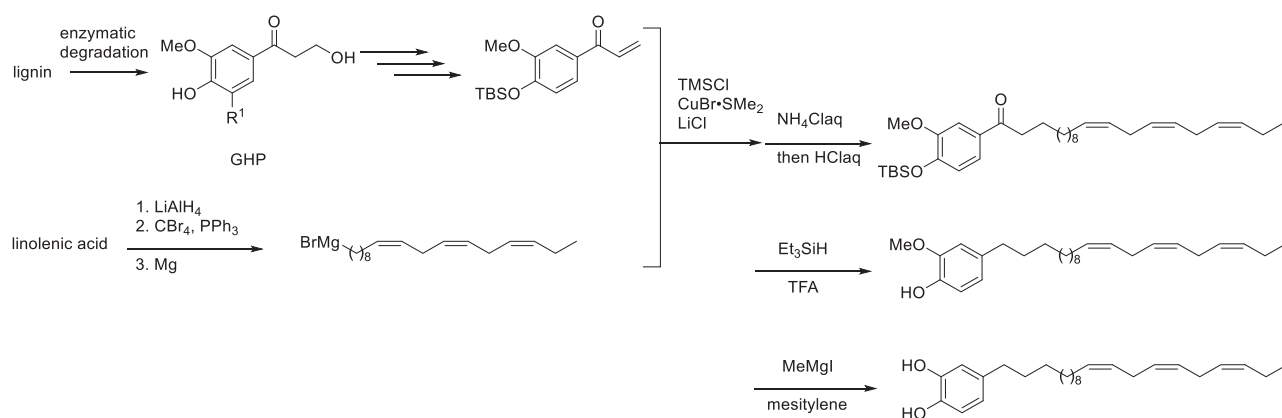
1. Introduction

The need for sustainable materials to replace petroleum-derived ones has renewed the interest toward a traditional resin that has long been used in Asian countries, *urushi* (漆) or Asian lacquer, originating from the sap of *Toxicodendron vernicifluum*. Urushi is a natural product, a water-in-oil emulsion composed of urushiol (60-80%), water (10-30%), gum (3-6%) and enzymes (2-3%). Urushi has a long history as a natural material for coating and adhesive applications with both practical and aesthetic advantages, but more recently applications of urushi in fields such as biomedical and electronics have been demonstrated.^[1-3] The durability, high stability and aesthetic beauty of urushi, combined with its renewable nature, have rekindled the interest in this material as a potential building block for a more sustainable society. Nevertheless, several issues limit the large scale production and widespread use of the material, namely the expensive, time-consuming extraction and refining process and the requirement for highly skilled labor to collect the raw sap and process it. Moreover, the poorly-understood and complex polymerization process that controls the hardening of this material and the fact that urushi formulations often include mixtures of several other components have also hindered industrial applications of this material. With this work we aim to overcome the aforementioned limitations by replacing natural urushiol with synthetic urushiol analogs, deepen our understanding of the composition and chemical processes in natural urushi samples and develop new optimized urushi-based materials for art conservation (conservation of urushi-based artifacts, especially outside Asia, is still very challenging) and novel applications.

2. Results

The researchers at ICR have been working on the improved synthesis of simple urushiol analogs from renewable resources,^[4] according to Scheme 1.

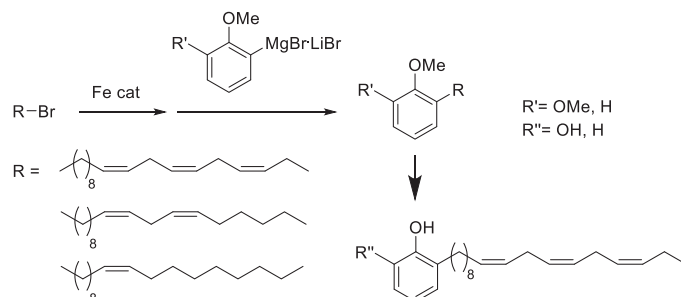
Scheme 1. Synthesis of Urushiol analogs, adapted from ref [4]



The researchers at ICR are now focusing on the research on iron-catalyzed synthesis of 3-substituted

urushiol analogs, as shown in Scheme 2.

Scheme 2. Current strategy to synthesize Urushiol analogs



Furthermore, the efforts towards the total synthesis of the target main component of natural urushiol, (8*Z*, 11*E*, 13*Z*)-trienyl pentadecylcatechol, are still ongoing, with the development of new methods for the stereocontrolled synthesis of the intermediates.

3. Future Plans

The researchers at ICR will continue to synthesize new urushiol analogs and then mix them with enzymes, proteins and gum to obtain new artificial urushi material. The researchers will also continue their work on the retrosynthetic approach to urushiol and other phenolic lipids, found in urushi and other Asian lacquers. Tamburini and Bonaduce will also continue the characterization of the new artificial lacquer films by analytical pyrolysis and thermoanalytical techniques.

References

- 1) Jeong, H. *et al.*: Intrinsic Hydrophobic Cairnlike Multilayer Films for Antibacterial Effect with Enhanced Durability, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, 7, 26117.
- 2) Zhao, Y. *et al.*: Synthesis of an urushiol derivative and its use for hydrolysis resistance in dentin adhesive, *RSC Adv.* **2021**, 11, 18448.
- 3) Qi, Z. *et al.*: Synthesis and Evaluation of C15 Triene Urushiol Derivatives as Potential Anticancer Agents and HDAC2 Inhibitor, *Molecules* **2018**, 23, 1074.
- 4) Isozaki, K. *et al.*: Synthetic urushiols from biorenewable carbon resources: chemical conversion of enzymatic degradation products of wood lignin to an ancient yet future coating material, *RSC Sustain.* **2024**, 2(5), 1358-1362.

統合バイオリファインリーのための先進的で環境に優しい方法論の開発
Development of an advanced, eco-friendly methodology for an integrated biorefinery

Sadat Mohamed Rezk Khattab^{1,2}, 八木 勇成¹, 永田 崇¹,
渡辺 隆司², 片平 正人¹

Sadat Mohamed Rezk Khattab^{1,2}, Yusei Yagi¹
Takashi Nagata¹, Takashi Watanabe² and Masato Katahira¹

¹京都大学 エネルギー理工学研究所
Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Japan

²京都大学 生存圏研究所
Research Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University, JAPAN.

Key Words: *Biomass conversion, Microwave, Glycerolysis, Acid Catalysis, glycerol fermentation, Xylose fermentation, Hyper-fermenting Saccharomyces cerevisiae, Bioethanol production, Antivirals.*

1. Introduction

The urgent need for sustainable fuels and chemicals, coupled with the imperative to mitigate climate change, has driven extensive research into the utilization of renewable resources such as lignocellulosic biomass. This challenge is further intensified by the global threat of viral pandemics, necessitating innovative solutions that address both environmental and human health concerns. At the Biomass Conversion Laboratory, RISH, Kyoto University, significant progress has been made in developing advanced pretreatment methods for woody biomass, such as acid-glycerolysis assisted by microwave irradiation (1, 2). Glycerol, a green solvent and a byproduct of the biodiesel industry, is utilized in this process to delignify biomass, producing lignin-derived antiviral substances (3). This delignification step enhances the saccharification process of the cellulosic fraction, releasing sugars for downstream applications. The co-conversion of glycerol with the sugars released from biomass after glycerolysis not only increases the available resources for ethanol production but also reduces the burden of component separation. To further optimize this biorefinery system, we engineered yeast strains capable of fermenting glycerol (4) to be mixed with another xylose-fermenting strain (5). This integrated biorefinery approach was successfully applied to sugarcane trash, enabling the production of antiviral lignin and bioethanol using mixed engineered strains (3).

2. Aim of the second stage

Further enhancement of this scenario by focusing on:

- 1- Developing another environmentally friendly delignification approach using versatile peroxidase (VP) for lignin removal.

- 2- Engineering Baker's yeast to co-utilize acetic acid and convert it to bioethanol, replacing the use of sulfuric acid with acetic acid.
- 3- Expanding this scenario to produce other bio-based chemicals, such as 2,3-butanediol.
- 4- Generating a single-cell yeast capable of converting acetic acid, xylose, glycerol, and glucose into bioethanol, eliminating the need for mixed engineered yeast cultures.
- 5- Utilizing RNA-transcriptomic analysis to identify key limiting factors during the co-fermentation of glycerol, acetic acid, xylose, and glucose in hyper-engineered strains.

3. Results and Discussion

- 1- The delignification of rice straw using versatile peroxidase (VP) in a membrane bioreactor is an environmentally friendly approach that removes 35% of lignin during pretreatment. This process resulted in improvements in glucose and bioethanol production, increasing yields by up to 1.5-fold and 1.4-fold, respectively, as depicted in Figure 1 (6).

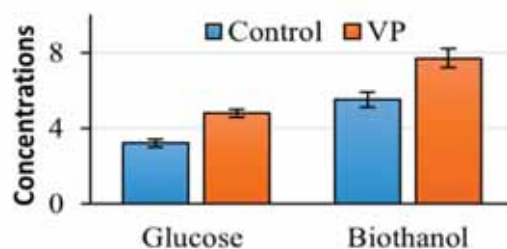


Fig. 1. Improvement of saccharification, and fermentation yields, glucose, and ethanol, respectively, using VP treatment.

- 2- Co-utilization of acetate and its conversion to bioethanol using engineered baker's yeast to replace the uses of sulfuric acid with acetic acid was studied. The engineered strain accelerated glucose fermentation by 342% while co-utilization of acetic acid. In addition, near theoretical ethanol production was obtained (Fig. 2). The engineered strain enhanced flocculation to be separated by

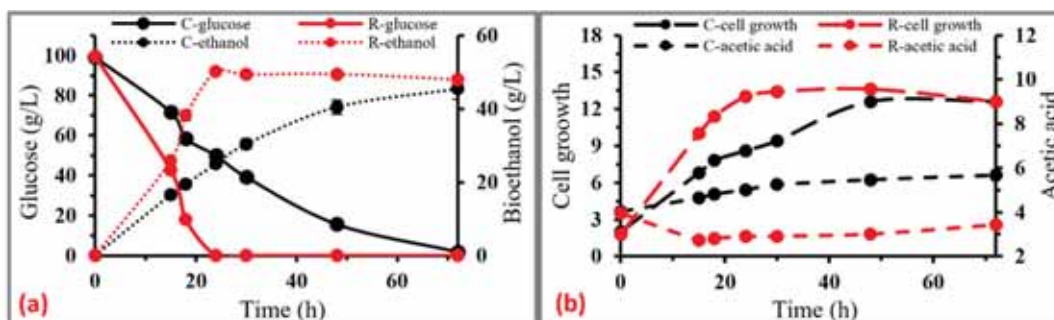


Fig. 2. Time course profiles of co-utilization of acetate while glucose fermentation between native yeast (black) and engineered strain by this study (red). Glucose consumption, and bioethanol production (a), acetate, and cell growth (b). The control strain was abbreviated to C, while the recombinant strain was R.

normal gravity, which enhanced the production process (7).

3- The biorefinery scenario was further expanded to explore the production of other bio-based chemicals, including 2,3-butanediol. In this context, the development of the first recombinant baker's yeast capable of converting glycerol in combination with glucose into 2,3-butanediol marked a significant milestone. The efficiency and capability of this engineered yeast strain are illustrated in Figure 2, showcasing its potential in biotechnological applications for sustainable chemical production (8).

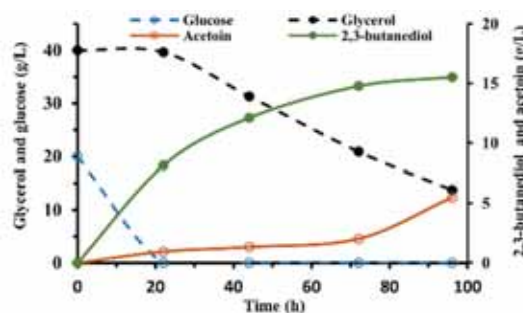


Fig. 3. Conversion of glucose and glycerol to 2,3-butanediol by engineered *S. cerevisiae*.

4- We further engineered a hyper-yeast capable of converting acetic acid, xylose, and glycerol along with glucose into bioethanol, achieving a conversion efficiency exceeding 95%. This hyper-yeast was developed by heterologously integrating acetic acid and xylose metabolic pathways into a glycerol-fermenting yeast. The resulting strain eliminates the need for the mixed cultures used in the previous work. Figure 4 illustrates an example of the co-fermentation

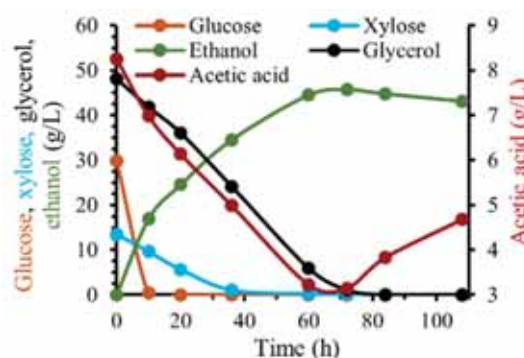


Fig. 4. Time course profile of fermentation capability of hyper yeast to ferment glucose, glycerol, xylose, and acetic acid simultaneously.

progress of acetic acid, xylose, and glycerol with glucose (9). The hyper-yeast presents a promising solution for the application of an acetic acid-catalyzed glycerolysis biorefinery scenario.

5- RNA-transcriptomic analysis is a valuable tool for identifying limitations in fermentation rate and efficiency. Through this approach, we identified several transcription factors that constrain glycolysis and fermentation rate in the hyper-yeast during the simultaneous conversion of glycerol, xylose, acetic acid, and glucose. We anticipated that overexpressing these transcription factors will further enhance the fermentation rate (Ongoing study).

4. Conclusion

We have developed a promising biorefinery scenario utilizing acid-catalyzed glycerolysis. Following glycerolysis, antiviral lignin is produced through a simple precipitation step using acetone. This acid-catalyzed glycerolysis process enhances saccharification, allowing the hydrolyzed sugars and glycerol to be efficiently converted into bioethanol. This conversion is facilitated by an engineered hyper-yeast capable of simultaneously fermenting glycerol, xylose, acetic acid, and glucose.

Acknowledgments

A part of this study was supported by e-Asia project “Integrated biorefinery of sugarcane trash.”

5. References

- 1- Liu J, Takada R, Karita S, Watanabe T, Honda Y, Watanabe T. 2010. Microwave-assisted pretreatment of recalcitrant softwood in aqueous glycerol. *Bioresour Technol* 101(23): 9355–9360. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.023>.
- 2- Ohashi Y, Watanabe T. 2018. Catalytic Performance of Food Additives Alum, Flocculating Agent, Al(SO₄)₃, AlCl₃, and Other Lewis Acids in Microwave Solvolysis of Hardwoods and Recalcitrant Softwood for Biorefinery. *ACS Omega* 3(11): 16271–16280. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01454>.
- 3- Khattab, S.M.R., Okano, H., Kimura, C. et al. Efficient integrated production of bioethanol and antiviral glycerolysis lignin from sugarcane trash. *Biotechnol Biofuels* 16, 82 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02333-z>
- 4- Khattab SMR, Watanabe, T. 2021. Efficient conversion of glycerol to ethanol by an engineered *Saccharomyces cerevisiae* Strain. *Appl Environ Microbiol* 87(23): e0026821 <https://doi.org/10.1128/AEM.00268-21>
- 5- Khattab SMR, Saimura M, Kodaki T. 2013. Boost in bioethanol production using recombinant *Saccharomyces cerevisiae* with mutated strictly NADPH-dependent xylose reductase and NADP(+)-dependent xylitol dehydrogenase. *J biotechnol.* 165(3-4): 153–156. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.03.009>.
- 6- Teo, K.S.K., Kondo, K., Khattab, S.M.R., Watanabe, T., Nagata, T., Katahira, M., 2024. Enhancing Bioethanol Production from Rice Straw through Environmentally Friendly Delignification Using Versatile Peroxidase. *J. Agric. Food Chem.* 72(5), 2657–2666. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c07998>
- 7- Khattab, SMR, Oksh, M., Nagata, T., Watanabe, T., Katahira, M. Engineering *Saccharomyces cerevisiae* for Enhanced and Fast Ethanol Production Through Co-Utilization of Acetic Acid and Glucose with Hypoxic Tolerance and Improved Flocculation. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5049050>
- 8- Khattab SMR, Abdel-Rahman MA, Katahira M, Watanabe T (2024) Engineering *Saccharomyces cerevisiae* and controlling conditions for 2,3-butanediol production from glycerol. *Sustain Energy Fuels* 8:4297–4310. <https://doi.org/10.1039/D4SE00912F>

熱・電力可変併給によるバイオマス改質と電力需給平滑化

Biomass Reforming and Smoothing of Electricity Supply-Demand by Variable Combined Heat and Power Supply

八木 重郎¹, 向井 啓祐¹⁻², 小西 哲之³, 田宮 裕之⁴,
高山 定次², 梅澤 俊明³

Juro Yagi ¹, Keisuke Mukai ¹⁻², Satoshi Konishi ³, Hiroyuki Tamiya ⁴, Sadatsugu Takayama ² and Toshiaki Umezawa ³

¹京都大学 エネルギー理工学研究所

Institute of Advanced Energy, Kyoto University

²核融合科学研究所

National Institute for Fusion Science

³京都大学 生存圏研究所

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

⁴京都大学 エネルギー科学科

Graduate School of Energy Science, Kyoto University

This study focused on converting biomass resources with heat/electricity from nuclear energy. Specifically, microwave pyrolysis/gasification experiments of biomass in a steam atmosphere were conducted, assuming that heat generates steam and electric power is used for microwave oscillation. Cellulose was used as a simulated biomass sample, heating via microwave at 800 °C for 2 hours in steam atmosphere. As a result, secondary char formation in the reaction vessel was obviously less, compared to the campaigns without steam or heated by electric furnace. Magnetite, used as a microwave susceptor is found to be functional and reusable when it is used in the steam atmosphere.

Key Words : Biomass, microwave pyrolysis, steam, fusion

1. はじめに

ゼロエミッションの視点で原子力エネルギーの利用は有効であるが、そのエネルギーを有効利用するという視点では廃熱が有効に利用できていない。これは熱利用の観点で有効な人口密集地への設置が容易でないことに起因し、先進エネルギーとして期待される核融合も同様の問題に直面すると予想される。一方で、そうした地域においては農業・林業に由来するバイオマス資源が潤沢でもある。バイオマス資源の熱・マイクロ波処理等による改質は先行研究例があるが、ここに廃熱を併給することにより、基本的に吸熱反応であるガス化等の反応の底上げが期待できる。近年では太陽光発電の大幅な拡充により、日中の電力が余剰となることも多い。日中の余剰電力の有効活用の視点でもバイオマスの改質は有効であるが、電力グリッド内に分散する余剰電力の発生源から有効にエネルギーを回収・集約するには、大型電力システムの根元にあたる大型発電所の近傍は電力インフラの追加整備を要しない有効な立地といえる。そこで本研究では、核エネルギーによる熱/電力の可変併給により、外部電力の消費/供給の負荷・環境変動を吸収し、バイオマス資源の改質を行うシステムの構築を目指す。熱をバイオマス資源の水蒸気発生、電力をマイクロ波発振のエネルギーに利用することを想定し、水蒸気雰囲気におけるバイオマスのマイクロ波熱分解・ガス化実験を実施する。

2. 実験手法

本実験では、粉末状セルロース (~38 μ m) をバイオマス資源の模擬試料として用いた。また、マイクロ波熱分解・ガス化においてバイオマス資源を効率よく加熱するためにマイクロ波吸収材料が多用される。本実験

ではマイクロ波吸収能力が高く、バイオマス資源及びガスの改質反応効果が期待されるマグネタイトをマイクロ波吸収材料として用いた。実験装置の概要を図1に示す。セルロース粉末とマグネタイト粉末（粒径1 μm以下）の混合粉末は石英管（内径36 mm）内に装荷した。この石英管をマイクロ波加熱装置内に設置した後、石英管内の空気をパージするためにArガスを500 scc/minで導入した。石英管内雰囲気Arガス置換ののち、マグネトロン（2.45 GHz, 最大出力1500 W）4台の出力を1台あたり200 Wに設定し、マイクロ波加熱を開始した。このとき同時に150 °Cの水蒸気（約300 scc/min）とArガスの混合ガスを石英管内に供給した。マイクロ波加熱は2時間実施し、パージガスは水冷却器（5 °C）と-45 °Cの冷却器（2台）を通した後にガスクロマトグラフィー（TCD型）に導入して分析した。なお、前年度までにトラップを通過できる生成ガスは主にH₂, CO, CO₂, CH₄のみであることが確認されたため、ガス分析はこれらに集約した。マイクロ波加熱時は放射温度計を用いて测温し、800 °Cで推移するように発振電力を調整した。

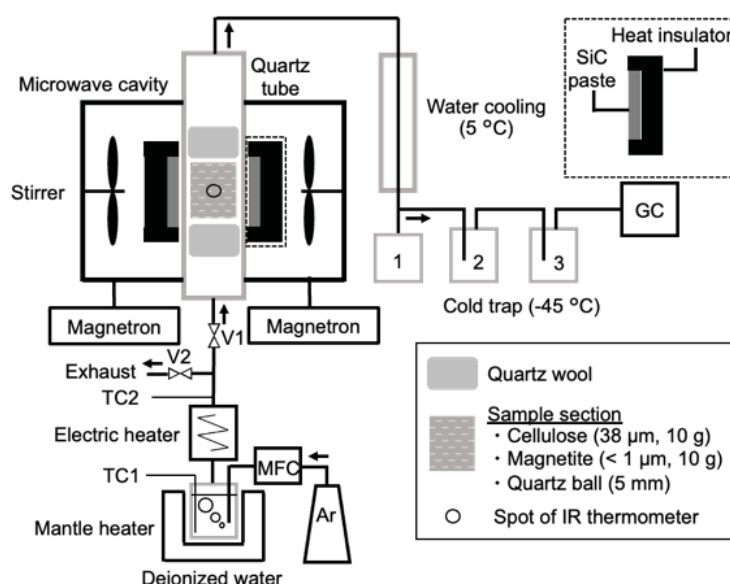


図1：セルロースのマイクロ波熱分解・ガス化実験装置の概略

図2にマイクロ波加熱および通常電気炉加熱（ともに800 °C）における、水蒸気添加の有無ごとの炉心管の外観変化を示す。水蒸気添加のマイクロ波加熱のみ、顕著に炉心管上部への固着物の低減が認められ、ターレットラブルの抑制の観点で本手法が有効であることが示された。

昨年度までに、水蒸気を供給しない環境ではマグネタイトが還元され（α FeやFeOの生成）、繰り返しの伴う改質率の低下が発生することが確認された。水蒸気添加のターレット生成への影響に加え、マグネタイトの再酸化と再利用および、グラファイトを吸収材料として利用（マグネタイトに代用）した試験などを実施した。

3. 結果・考察

図2にマイクロ波加熱および通常電気炉加熱（ともに800 °C）における、水蒸気添加の有無ごとの炉心管の外観変化を示す。水蒸気添加のマイクロ波加熱のみ、顕著に炉心管上部への固着物の低減が認められ、ターレットラブルの抑制の観点で本手法が有効であることが示された。

また、バイオマスとの繰り返し加熱により還元されたマグネタイト（および残留炭素成分）をマイクロ波加熱すると、マグネタイトが再生できること、また再生されたマグネタイトを用いたマイクロ波加熱では初期と同程度のガス化率に到達することが確認された。

実プラントを検討した際に、マグネタイトではその分離回収（および再利用）が必要となるが、バイオマス炭化物をマイクロ波吸収体として利用すればこれは省略できる。これを模擬した、グラファイト添加での試験において、ガス生成量はマグネタイト添加時に比較して概ね半減するという結果をえた。グラファイト

はマイクロ波の吸収特性が良好である一方で、浸透深さが浅くなってしま（被加熱試料による内部断熱効果が弱まる）と予想されることから、加熱エネルギー効率の面からはマグネタイトが優れると見込まれる。

4. 今後の展望など

バイオマスとしてセルロース粉末を用いた実験を進めてきたが、よりターレット類の生成も多いと見込まれる実バイオマスを用いた水蒸気供給下でのマイクロ波加熱実験についても、今年度内に試行する予定である。

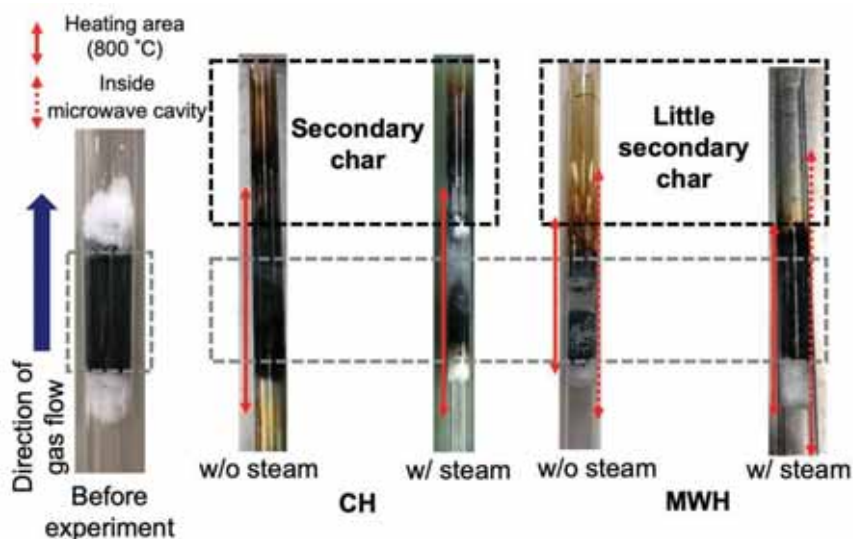


図2：水蒸気添加の有無および加熱手法（電気炉 CH/マイクロ波 MWH）ごとの、反応後炉心管の外観変化

Charおよび液化物の同時生産に向けたバイオマス熱分解技術の開発

Development of Biomass Pyrolysis Technology for the Simultaneous Production of Char and Liquefied Products

畑 俊充¹, 本間千晶², 渡辺隆司¹

Toshimitsu Hata 1, Sensho Honma 2, Takashi Watanabe 1

¹京都大学 生存圏研究所

Kyoto University, Research Institute for Sustainable Humanosphere,
²北海道立総合研究機構林産試験場

Hokaido Research Organization, Forest Products Research Institute

In response to the depletion of fossil resources and growing environmental concerns, rapid pyrolysis technology utilizing unused woody biomass has gained significant attention. This study investigated the applicability of liquefied products and pyrolysis residues obtained through the thermal treatment of *Abies sachalinensis* wood powder mixed with copper or titanium powders. The results demonstrated that copper addition increased pyrolysis residue yield, while titanium addition enhanced weight loss. These findings highlight the distinct roles of copper and titanium catalysts in woody biomass pyrolysis and provide valuable insights for the efficient utilization of pyrolysis residues and liquefied products.

Key Words : rapid pyrolysis technology; woody biomass; copper and titanium catalysts; pyrolysis residues

1. はじめに

化石資源の枯渇と環境劣化が深刻化する中、化石資源に依存せずに有用な化学物質を生産する技術への関心が世界的に高まっている。その中でも、未利用の植物資材を活用して化石資源の代替となる化学物質を生産する技術が注目されている。木質バイオマスの急速熱分解に触媒を組み合わせることで、石油化学の原料やガソリン成分に匹敵する芳香族化合物を生成できるだけでなく、熱分解残渣（チャー）を機能性材料として再利用する可能性もある。この技術によって、未利用バイオマスを有用な植物由来の化学物質に転換し、さらに熱分解残渣を環境材料として活用することで、ゼロエミッション型の循環型社会の構築が可能となる¹⁾。

豊富な木質バイオマスを原料とした化学品の製造において、バイオマスを効率的かつ迅速に化学品へ変換するためには炭素化が重要な技術である。炭素化技術は、化学産業における化石由来の炭素を再生可能資源由来の炭素で代替する動きを支える基盤技術である。炭素化は、再生可能な資源を活用した持続可能な化学生産の推進において極めて重要である。

本研究は、木質バイオマスの熱分解によるチャーおよび液化物の同時生産を目標とし、触媒の種類や昇温速度が熱分解生成物に及ぼす影響を明らかにするものである。これにより、木質バイオマスの効率的な利用と、ゼロエミッション型社会の実現に向けた知見を提供することを目指している。

2. 実験方法

本研究では、北海道産トドマツ (*Abies sachalinensis*) の木粉と、銅粉末 (75 μ m、99.9%)、

チタン粉末（45 μm 、99.9%）を原料とした。トドマツ木粉と銅粉末、トドマツ木粉とチタン粉末をそれぞれ重量比 7:3 で混合し、メノウ乳鉢を用いて均一に混合した。この処理により、熱処理に適した試料を調製した。

熱処理は窒素気流下（200ml/min）で行い、昇温速度を 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の 3 条件に設定した。試料を 500 $^{\circ}\text{C}$ または 800 $^{\circ}\text{C}$ に加熱後、3 分間保持し、自然放冷を行った。これにより、異なる温度および昇温速度の条件が熱分解残渣（チャー）に与える影響を評価した。

熱処理後の試料について、熱重量分析（TG-DTA）、元素分析（CHN 分析）、FT-IR スペクトル測定、SEM 観察、および TEM 像の画像解析を実施した²⁾。特に、熱分解残渣の化学組成や微細構造の解析に重点を置き、触媒添加（銅およびチタン）および昇温速度がこれらに与える影響を詳細に検討した。化学構造および表面特性の分析も行った。

2. 結果と考察

熱分析の結果、昇温速度の変化による顕著な重量減少率の変動は、木粉単体では 500 $^{\circ}\text{C}$ および 800 $^{\circ}\text{C}$ のいずれの条件でも確認されなかった。一方、銅を添加した場合、500 $^{\circ}\text{C}$ において木粉単体と比較して熱分解残渣の量が増加することが示された。このことから、熱分解残渣の生成を優先する場合には、銅の添加が適していると考えられる。また、チタンを添加した場合には、500 $^{\circ}\text{C}$ および 800 $^{\circ}\text{C}$ のいずれの条件でも重量減少率が増加する傾向が観察された。これにより、ガスや液化物の生成を優先する場合には、チタンの添加が適していることが示唆された。

電子顕微鏡による観察では、500 $^{\circ}\text{C}$ の条件下で銅を添加した熱分解残渣の断面に触媒反応後の痕跡が確認された。また、チタンを添加した熱分解残渣は細かく均一に分散している様子が観察された。800 $^{\circ}\text{C}$ の条件では、銅添加残渣の断面に銅がサンプル全体を覆うような状態が確認され、チタン添加残渣では接触領域に触媒反応の痕跡が見られた。

これらの結果から、銅とチタンの添加が木質バイオマスの熱分解において異なる効果をもたらすことが明らかになった。銅は熱分解残渣の増加に寄与し、チタンは重量減少率の増加に寄与することが示された。また、電子顕微鏡の観察により、これらの元素が触媒として示す挙動が具体的に明らかにされた。

参考文献

- 1) Honma, S.; Hata, T. et al; Ohashi, Y.; Sulisty, J.; Watanabe, T.; Yoshimura, T., J. of Chemical Technology & Biotechnology, 92 (3), pp. 522-529 (2017)
- 2) Oshida, K. et al: Structural analysis of nano structured carbon by transmission electron microscopy and image processing, Applied Surface Science 275, pp. 409-412 (2013)

福島県における環境放射能解析と環境回復のための未来開拓研究の 模索

Exploration of Transdisciplinary Future Research for Environmental Radiation Analysis and Recovery in Fukushima Prefecture

上田 義勝¹, 谷垣 実², 二瓶 直登³

Yoshikatsu UEDA¹, Minoru TANIGAKI², and Naoto NIHEI³

¹京都大学 生存圏研究所

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

²京都大学・複合原子力科学研究所

Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science

³福島大学・食農学類

Faculty of Food and Agricultural Sciences, Fukushima University

The Fukushima nuclear accident, triggered by the Great East Japan Earthquake, has underscored the enduring need for research on environmental radioactivity. Since 2011, we have held 14 interdisciplinary symposia to foster collaboration among researchers and discuss disaster prevention and mitigation strategies. In 2024, the 538th RISH symposium, renamed in 2021 as the "Support for Fukushima and Radiation Mapping Research Meeting," convened in a hybrid format, featuring 84 participants from Japan and abroad. Topics included innovative projects such as a Space Balloon initiative and international research collaborations, alongside updates on the KURAMA-II (Kyoto University Radiation Mapping System-II), a tool for real-time environmental radioactivity measurement. To address challenges in GPS-denied environments, such as forests and mountainous areas, we are exploring the integration of Sony's SPRESENSE multi-IMU add-on board. This technology, featuring 6-axis sensors, enables precise posture and positional tracking, promising to enhance KURAMA-II's applications for monitoring environmental radioactivity in remote regions.

Key Words : Fukushima, Radioactivity, KURAMA-II, Real-time monitoring

1. はじめに

東日本大震災による原発事故の影響で、福島県周辺の環境放射能問題は現在も支援すべき研究課題となっている。我々は福島県における連携支援のため学際的な研究者同士の交流も兼ねたシンポジウム（生存圏シンポジウム）を震災当初から計14回行ってきた。このシンポジウムにより、将来の防災・減災に向けた新たな研究課題について活発に議論してきている。また、環境放射能解析のため、歩行サーベイ(KURAMA-II, Kyoto University RADIATION MAPPING system-II) による環境放射能のリアルタイム測定をこれまで行ってきた。本研究テーマでは、これまでの我々の活動と、今後の研究課題について報告を行う。

2. 連携支援のためのシンポジウム開催

2011年3月の東日本大震災をテーマとしたシンポジウム「東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて」は、これまでに計13回開催され、延べ815名が参加してきた。今年度は京都リサーチパークを会場に、オンライン併催の形式で実施した。2018年度からは複合原子力科学研究所との共同開催を続けているが、2021年度より名称を「福島県への支援取り組み及び放射線マッピング研究会」に統一し、名称統一後では今回が4回目の開催となる。今年度の新たな試みとして、愛知県立旭丘高校天文部によるスペースバルーンプロジェクトの講演が行われた。この講演は福島県での取り組みとは直接関係しないが、本シンポジウムでのソニーセミコンダクタソリューションズと京都女子大学名誉教授・水野先生の交流がきっかけで実現したものであり、継続的なシンポジウム開催の成果の一つでもある。

さらに、震災という共通課題をテーマに、スリランカで活動する東京大学の土田氏による講演が行われ、今後の新たな研究活動についての提案があった。継続的な研究として、新潟大学、高知工科大学、福島大学による発表に加え、企業や研究機関からの講演もあり、多岐にわたる分野から知見が共有された。特に環境放射能計測器「KURAMA-II」に関しては、国内での多数の設置事例に加え、米国での共同研究事例の紹介があり、今後の展開について非常に興味深い内容が示された。また、会場では例年通り装置類のデモ展示が行われ、講演の合間にも活発な議論が繰り広げられた。

今年度の参加者は84名に上り、アメリカやスリランカからのオンライン参加に加え、石川県、茨城県、福

井県、青森県、北海道など広域からの参加があった。オンライン開催の利点を生かし、震災復興に関する議論の意義を改めて確認できる機会となった。



図 1. 第 538 回生存圏シンポジウムの様子

3. 歩行サーベイのリアルタイム位置検出技術開発の現状

福島県周辺の環境放射能汚染の経時的変化について、これまで生存圏研究所と福島大学、複合原子力科学研究所と共同で、歩行サーベイ（KURAMA-II, Kyoto University RAdiation MApping system-II）による環境放射能のリアルタイム測定を行ってきた。森林や山間部における歩行サーベイでは、GPS からの電波が届きにくく、計測位置がずれてしまう事が多い。また、山間部にはホットスポットと呼ばれる環境放射能が傾斜面にて集積している場所などがあり、傾斜状態の状況を確認できれば、新しい計測技術としても非常に有効な手法となる。この問題解決のため、新しくソニーセミコンダクターソリューションズ株式会社が開発している SPRESENSE マルチ IMU アドオンボードの使用を検討している。このボードには、3 軸加速度センサーと、3 軸ジャイロスコープが搭載された 6 軸 IMU ボードであり、姿勢制御や位置補足を高精度で検出が可能である。先に述べた生存圏シンポジウムにてその詳細が発表され、今後森林圏での KURAMA-II 利用に向けて、検討を開始している。

参考文献

- 1) 早川 知伸, Spresense の最新情報, ソニーセミコンダクターソリューションズ, 第 538 回生存圏シンポジウム



図 2 SPRESENSE IMU アドオンボード外観図 (<https://raspberrypi.ksyic.com/news/page/nwp.id/146>)

ドローンを用いた二酸化炭素濃度鉛直分布の観測

Observation of Vertical Distribution of CO₂ Concentration Using Drone

井口 敬雄¹, 高橋 けんし², 榎本 剛¹, 吉田 聡¹

Takao IGUCHI 1, Kenshi TAKAHASHI 2,
Takeshi ENOMOTO 1 and Akira Yoshida 1

¹京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

²京都大学 生存圏研究所

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Measurements of vertical CO₂ profile were tried by using drone and tower. From the observed data at the tower, vertical CO₂ profile could not be deduced because the bias between sensors measured separately appears to be unusable. To investigate the effect of the rotors of the drone and the time lag of the response of the sensor to the observed data using drone, accurate vertical CO₂ profile must be deduced from the observed data at the tower. Measurements using drone were implemented at several different ascent speeds. When the ascent speed exceeds 1m/sec, abnormally high concentrations were recorded at the beginning of the flight. This trial identified several issues that need to be resolved for the next.

Key Words : carbon dioxide, CO₂, sensor, drone, tower

1. はじめに

大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度は上昇の一途をたどっており(IPCC, 2021)¹、その温室効果による地表面の温暖化とそれが人間社会に及ぼすと予想される様々な影響が懸念されている。持続可能社会の実現のためにはCO₂排出量の削減が必須であるが、削減量に応じた将来の濃度変化を予測するためには、大気中CO₂の収支を明らかにする必要がある。大気中CO₂の主な放出源/吸収源は化石燃料消費、土地利用、海洋、陸上生態系であるが、このうち化石燃料消費を除いてはまだ不明な点が多い。特に陸上生態系については、植生の活動が気候の変動に敏感なこともあり、現在の大気との炭素交換量についても推定値の誤差が依然として大きい。

地表面からの炭素フラックスの推定方法として現在最も有効なものの一つが逆転法である。この手法では地球上を網羅した正確なCO₂濃度観測データを必要とするが、地上観測データですらまだ十分ではなく、推定誤差の大きな要因となっている。上空のデータについてはさらに少なく、これらの不足しているデータを補うことは、大気中CO₂収支の実態解明に寄与するものと思われる。

上空のCO₂濃度を測定する従来の方法は航空機、気球、タワーなどがあるが、継続性、最大高度、鉛直解像度などの点でそれぞれ一長一短であり、いずれもコストの問題を抱えている。そこで近年注目されるようになったのがドローンである。すでに気象の分野でも観測に取り入れられるようになっており(佐々木他, 2020²; 山路他, 2023³; Inoue et al., 2025⁴)、CO₂観測に用いることができれば、比較的低いコストで許可された高度(150mまたは特別に許可されればそれ以上)までで高い頻度と鉛直解像度でデータを収集することができる。

以上の理由から、井口他(2024)⁵は昨年度の本ユニットの研究として、ドローンを用いた上空のCO₂観測を実施した。その結果、いくつかの課題が浮かび上がってきた。中でも重要な課題点はCO₂濃度の変化に対するセンサーの応答の遅れ(タイムラグ)とドローンのプロペラによる空気のかき混ぜ効果である。ドローンの上昇速度が速過ぎると外気の濃度変化にセンサーの応答が追いつかず、逆に遅すぎるとプロペラのかき混ぜ効果によってドローン周辺の濃度が変動してしまうことが観測から明らかになった。

以上の結果を受け、本研究では、観測に最も相応しいドローンの上昇速度を見つけるとともに、得られたデータから実際のCO₂濃度鉛直プロファイルを導き出す手法を開発することを目的とし、鉄塔を用いた観測とドローンを用いた観測を同時に行い、その結果の比較を行った。

2. 観測手法

(1) 鉄塔による観測

本研究では、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリの鉄塔（図 1）を用いて CO₂ 濃度の観測を行った。

観測には CO₂ センサーとワンボードコンピュータ（ラズベリーパイ）を組み合わせた観測装置（図 2）を図 1 の①（地上）、③（地上からの高さ約 25m）、⑤（同約 40m）の 3 か所に設置した。CO₂ センサーはドローン観測に用いているセンサーと同じまたは同等の製品（村田製作所製）を揃えるつもりだったが、1 個故障してしまったため、ELT 社のセンサーを⑤の位置に設置することで代用した。

(2) ドローンによる観測

鉄塔での観測と並行して、その横でドローンによる観測も行った。手法は昨年度の本ユニット研究（井口他, 2024）⁵と同様、DJI 社の Matrice 600 Pro にそれぞれ CO₂、風速、および気温・湿度等を測定するセンサーとロガーの役割を果たすラズベリーパイ、そしてそれらの機器に電力を供給するバッテリーを搭載して観測を行った。

観測の際は、上昇速度を変えながら数回行ったが、手動によるコントローラー操作で一定の上昇速度を保つのは容易ではなく、今後は自動運転の可能性も探っていきたい。

3. 観測結果

今回行った観測のうち、4 つのドローン飛行の観測値を鉄塔における同時刻の観測値と比較した結果を図 3 に示す。図 3 の 4 つのプロットについて、ドローンの上昇速度はそれぞれ(a)0.28m/sec、(b)0.46m/sec、(c)0.98m/sec、(d)2.65m/sec である。(a)~(d)のいずれも、破線がドローンに搭載したセンサーによる CO₂ 濃度の測定値である。高度帯によって色分けしており、離陸時、橙から緑に変わる瞬間、緑から青に変わる瞬間がそれぞれ上記①、③、⑤の位置に設置したセンサーとの比較の対象となる。

尚、プロットしたデータはドローンの上昇時のみである。下降時の測定値はダウンウォッシュ（下向き噴射）による空気攪拌の影響が強いと考えられるため（井口他, 2024）⁵、考察の対象としていない。



図 1 宇治川オープンラボラトリの鉄塔。

4. 考察

(1) センサー間のバイアスについて

今回の観測では、ドローンにセンサーを搭載して測定した CO₂ 濃度鉛直プロファイルの測定値と、鉄塔に観測装置を設置して測定したデータとを単純に比較することができなかった。その理由は別途求めたセンサー間のバイアス補正值に疑義が生じたためである。

複数のセンサーを用いて観測を行う場合、機器間のバイアス補正は必要不可欠な作業である。そこで本研究でも、観測に使用したすべてのセンサーについてバイアスを調べるための室内実験を行った。その結果を図 4 に示す。



図 2 鉄塔に設置された CO₂ 観測装置。向かって右側が CO₂ センサー、左側がロガー代わりのラズベリーパイ。

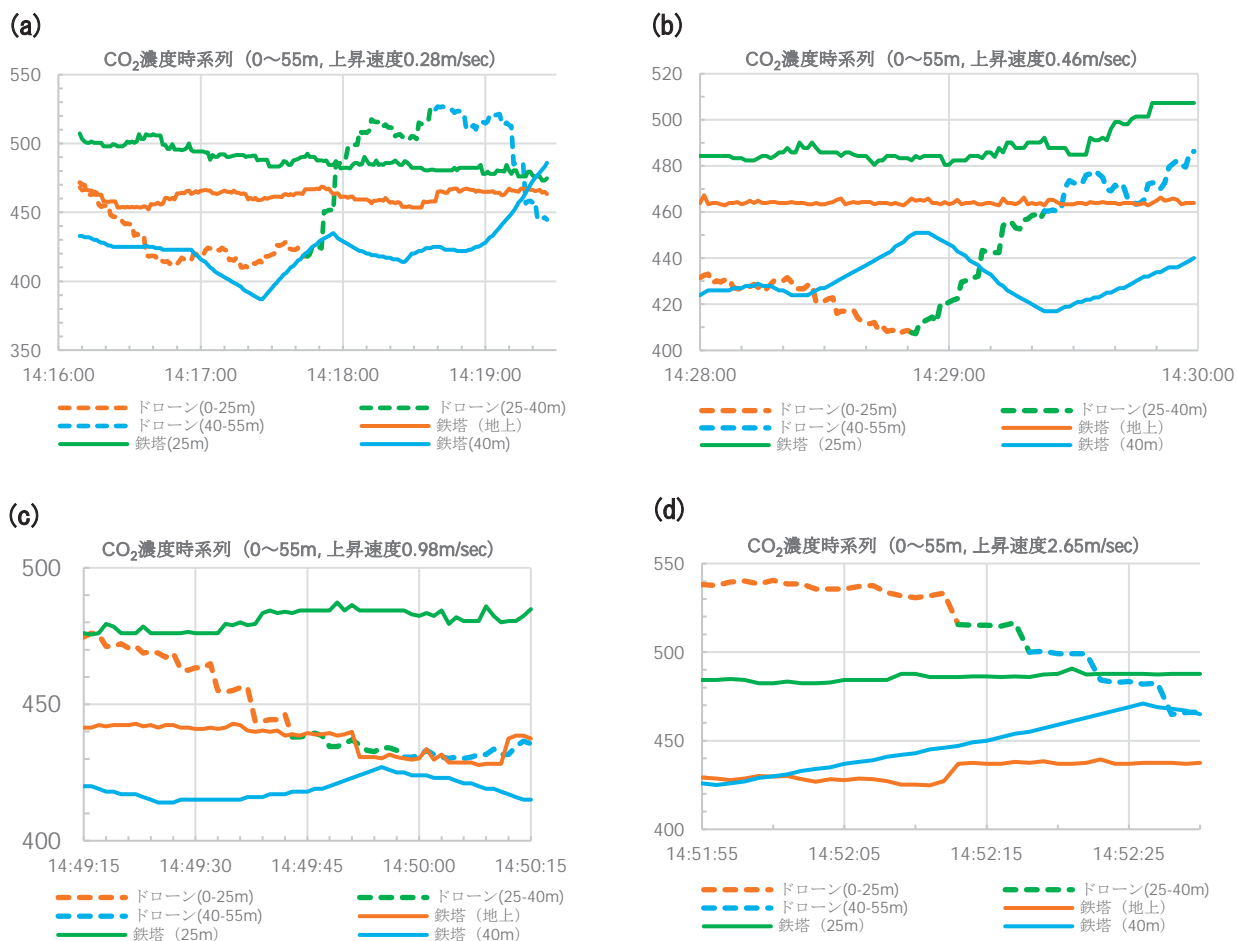


図3 ドローン（破線）および鉄塔の各階（①橙、③緑、⑤青）に設置されたCO₂センサーによる測定値の時間変化。ドローン測定値の時系列は高度帯によって色分けしてある。

図4ではドローンに搭載したセンサーの測定値を基準とし、他のセンサーの測定値から引いた値（1時間移動平均値）をプロットしている。プロットの線色は、図3における同じセンサーを用いた測定値と同一にしている。図4を見ると、センサー間のバイアスも一定ではないことが判る。激しく変動している時間帯は人が同じ部屋で作業していた時間帯で、部屋内の位置によって濃度の違いが大きかったことがバイアスの変動の要因であったと思われる。人がいない時間帯においてバイアスは比較的コンスタントな値で推移しているが、途中二度、バイアスが大きく変わりセンサーの校正が行われたような形跡がある。どちらも午前0時に変化している点も注目し値する。1月25日で青い線だけが大きく変化しているのはE3（ELT社製）を除く3つのセンサー（村田製作所製）が同程度変化したためである。村田製作所のセンサーは電源を入れた際

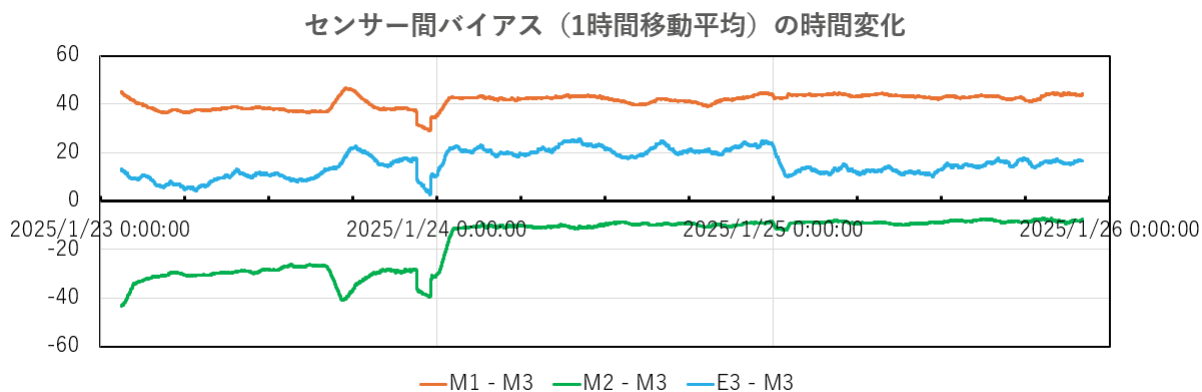


図4 室内実験で調べたセンサー間バイアス（1時間平均したもの）の時間変化。

に校正を行っているが、稼働中も自動校正を行っているのであれば、どのようなタイミングで行われるのか、また、校正のタイミングをユーザー側でコントロールすることは可能なか確認しておく必要がある。

図3は鉄塔観測のデータにバイアス補正を行っておらず、そのままではドローン観測のデータと整合性が取れず、矛盾を感じるものとなっている。しかし、図4で得られたバイアス値で補正を行っても矛盾点は解消されなかった。従って、初期校正の度にバイアスは変化している可能性もある。今後はバイアスについてより詳しく調べるとともに、次回以降の観測では測定開始前に同じ場所でセンサーを起動してその日のバイアスをチェックしておく必要がある。

(2) ドローンを用いて測定したデータについて

ドローンを用いた観測において、プロペラによるかき混ぜ効果とCO₂センサーの応答タイムラグがどのような影響を及ぼすかについては、比較対象とすべき鉄塔観測データのバイアス補正ができなかったため、今回は知見を得ることができなかった。

それ以外で注目したのは、図3(d)における離陸時の異常に高い濃度である。速い上昇速度で観測を行った時に同様な濃度変化が記録されるのは昨年度の観測（井口他, 2024）⁵でも見られたが、今回はそれを再確認する結果となった。なぜこのような濃度が記録されるのか、把握しておくべきセンサーの特性につながる事と思われるので今後重点的な調査を行いたい。

5. まとめ

今回の観測では、センサー間のバイアスをいかに把握して管理するか、またドローンの上昇速度が速過ぎる場合に記録される、センサーの応答タイムラグだけでは説明できないと思われる高濃度の解明という新たな課題が見つかった。今後はこの課題を調べて対策を行い、次回の観測に活かしていきたい。

謝辞

今回の観測では宇治川オープンラボラトリーの技術職員の方々にご協力をいただきました。また、使用したドローンは昨年度に引き続き防災研究所気象水文リスク情報研究領域に貸与していただきました。以上の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report, 2021.
- 2) 佐々木寛介, 志村智也, 井口正人, 井上実: ドローンによる上空の風観測手法の検討, 京都大学防災研究所年報, 第63号B, pp. 282-290, 2020.
- 3) 山路昭彦, 呉映昕, 井上実, 佐々木寛介: ドローンを用いた上空の気象場および火山噴煙の観測, 水文・水資源学会/日本水文学会 2023 年度研究発表会要旨集, PP-1-1-08, 2023.
- 4) Inoue, Jun, Hiromu Seko, Kazutoshi Sato, Tetsu Sakai : Operational Capability of Drone-Based Meteorological Profiling in an Urban Area, Journal of Geographic Research, 10.1029/2024JD041927, 2025.
- 5) 井口敬雄, 高橋けんし, 榎本剛, 吉田聡: ドローンを用いた二酸化炭素観測手法に関する基礎研究, 京都大学 研究連携基盤 持続可能社会創造ユニット 令和5年度 研究成果報告書, pp. 18-21, 2024.

ベトナムのメコンデルタにおける地形および堆積物収支に対する砂採掘活動の影響を定量化、評価、予測するための総合的なアプローチ

A holistic approach to quantify, assess, and predict the impact of sand mining activities on geomorphology and sediment budget in the Vietnamese Mekong Delta

サメ カントウシュ 1, 角 哲也 1, モハメド セイバー 1, 柳沢 雅之 2, ドアンバンビン 3, フォンマイグエン 4, ザキアーメドメンナ 1

Sameh KANTOUSH 1, Tetsuya SUMI 1, Mohamed SABER 1, Masayuki YANAGISAWA 2, Doan Van BINH 3, Phuong Mai NGUYEN 4, Zaki Ahmed MENA 1

1京都大学 防災研究所

Kyoto University, DPRI, Professor

2京都大学 東南アジア研究所

Kyoto University, CSEAS, Associate Professor

3ベトナム語 - ドイツ大学

Vietnamese – German University, VGU, Lecturer

4トゥイロイ大学

Thuy Loi University, Lecturer

The Vietnamese Mekong Delta (VMD) is one of the world's most important rice-exporting regions but faces several water-related challenges, including sand mining activities and severe riverbed erosion. Previous studies primarily relied on cross-sectional bathymetric data from a single-beam acoustic Doppler current profiler (ADCP) to investigate these riverbed changes. However, the distance between two adjacent cross-sections often ranged from hundreds to thousands of meters, leading to potentially low accuracy in the interpolated results. To improve this accuracy and better understand the impact of sand mining on riverbeds, we utilized a multibeam echosounder to measure riverbed elevations along 40 km of the Tien River in the VMD in June 2024. This reliable measurement examined riverbed elevation's spatial variation and determined optimal cross-sectional intervals for bathymetric measurements. The deepest point, located near the right bank, was found approximately 1 km upstream of the My Thuan Bridge, with a water depth reaching nearly 53 meters. Notably, deep scour holes were often found near areas experiencing significant riverbank erosion. This research is a valuable reference for selecting appropriate cross-sectional intervals for future geomorphological studies using single-beam ADCP methods.

Key Words : *Riverbed elevations, bathymetry, riverbed incision, scour hole, Vietnamese Mekong Delta.*

1. Introduction

The Vietnamese Mekong Delta (VMD) is one of the most important rice exporters in the world. However, it is threatened by several pressures, such as riverbed incision, riverbank erosion, water shortages, and salinity intrusion (Binh et al., 2020, 2021; Loc et al., 2021; Vu et al., 2024). Riverbeds in the VMD have rapidly incised, from 16 cm/yr in 1998–2014 to 50 cm/yr in 2014–2017 (Binh et al., 2021). Drivers that cause large-scale riverbed incisions include river damming (Binh et al., 2020) and sand mining (Hackney et al., 2020; NG and Park., 2021). The Vietnamese government predicted demand for sand from riverbeds in VMD to be around 2.1 to 2.3 billion m³ in the 2016 – 2020 period and projections stand at 1.5 billion m³ by 2040. However, how to accurately estimate sand extraction in the VMD remains a big question and scientific literature shows that the volume of sand mined is likely to differ significantly from official statistics. Therefore, there is an urgent need to examine novel approaches to assess heavily anthropogenic activities such as sand mining for sediment budgeting in VMD. There are various contradictory numbers evaluated by conventional approaches, in which the most common method is from official statistics through mining licenses. Government reports often do not include illegal mining, so the total volume is often underestimated compared to reality. Other research used remote sensing

data, but the available time, resolution of the image, and validation data from the field survey have also limited the applicability of this method.

Previous studies of riverbed incisions in the Mekong region have used mainly cross-sectional bathymetric data measured from single-beam acoustic Doppler current profilers. Thus, Riverbed bathymetry was generated by interpolating riverbed elevations from hundreds to thousands of meters apart cross-sections. Consequently, the accuracy of the results is limited, which can be improved by using a multibeam echosounder. To improve this accuracy and better understand the impact of sand mining on riverbeds, we utilized a multibeam echosounder to measure riverbed elevations along 40 km of the Tien River in the VMD in June 2024. We aim to 1) examine the spatial variation in riverbed elevation and 2) determine appropriate cross-sectional intervals in bathymetric measurements in the VMD with reliable interpolated geometric results. This reliable measurement examined riverbed elevation's spatial variation and determined optimal cross-sectional intervals for bathymetric measurements. These will be important input datasets for various deep learning models to predict geomorphology change and sediment budget. It will support authors in quantifying and assessing the sand mining budget; predict the impact of sand mining on the bank collapse, geomorphology, and sediment budget; and assess the impact of sand mining and its related consequences on people's livelihoods in the economic and social aspects.

2. Study area and methods

We measured riverbed elevations along 40 km of the Tien River from Cao Lanh to My Thuan Bridge (Fig. 1) via a multibeam echosounder in June 2024. The swath of each measurement line in the longitudinal direction ranged from 20 m to 100 m, depending on the water depth. The measured data were quality-checked and processed to determine the water depth. Riverbed elevations were calculated by subtracting the water surface elevations from the water depths. The results represent the geometry of the riverbed in raster format.

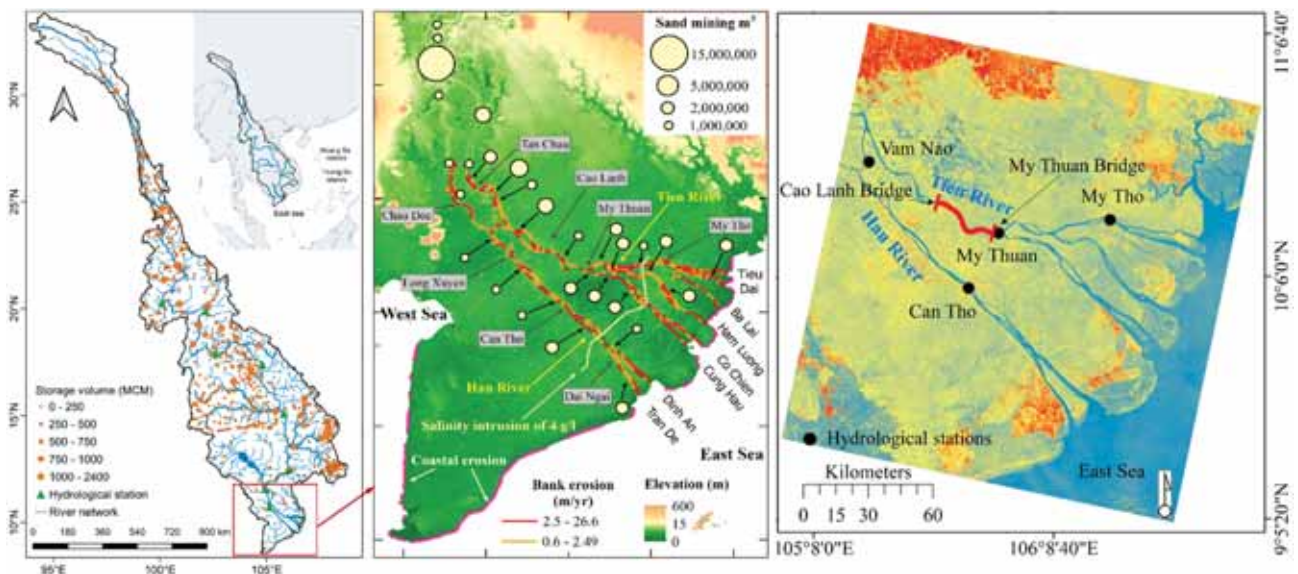


Figure 1. The highlighted study area in the VMD from Cao Lanh to My Thuan Bridge.

3. Results

The river was shallow near the riverbank and deeper toward the thalweg, depending on the setting of the river sections (i.e., the thalweg tends to be in the middle of straight river sections but toward the outer bank of meandering river sections). The mean cross-sectional depths in the study area varied from over 10 m to over 50 m. The deepest location was approximately 1 km upstream of the My Thuan Bridge, with a water depth of almost 53 m (Fig. 2). Some deep scour holes of variable sizes were detected. The locations of scour holes coincided with the locations of severe riverbank erosion. This confirmed the numerical results of Binh et al. (2022).

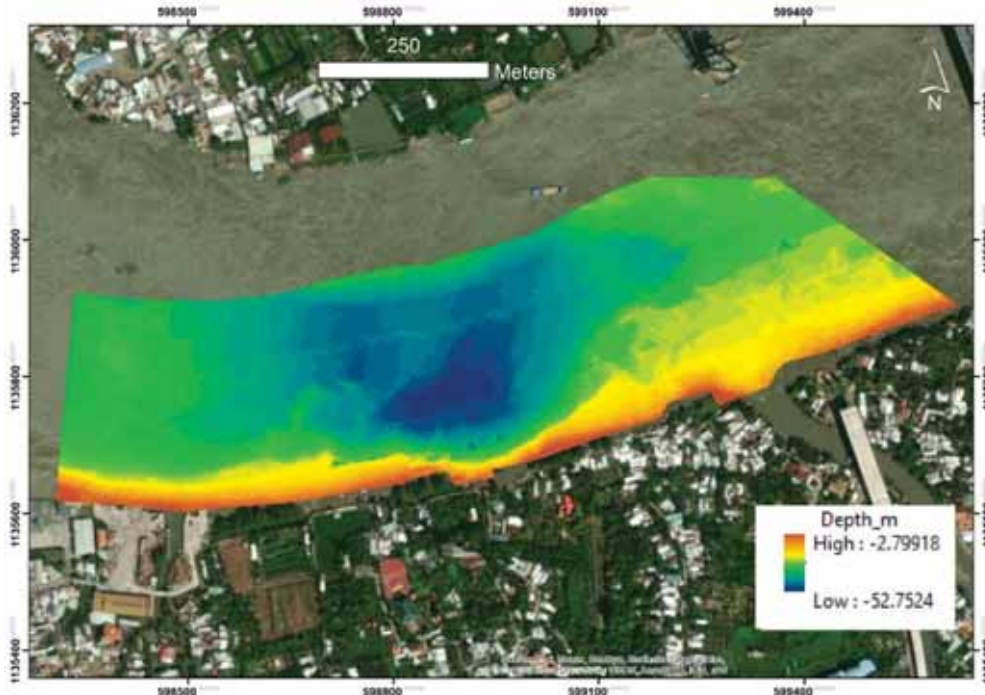


Figure 2. River depth variation around the deepest scour hole in the study area approximately 1 km upstream of the My Thuan Bridge.

References

- 1) Bullen KE, Bolt BA (1985) *An Introduction to the Theory of Seismology*, Cambridge, 400 pp. (in the case of a book)
- 2) Mrokowska MM, Rowiński PM, Kalinowska MB (2015) A methodological approach of estimating resistance to flow under unsteady flow conditions, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 4041-4053 (in the case of a journal article).
- 3) Binh DV, Kantoush S, Sumi T (2020) Changes to long-term discharge and sediment loads in the Vietnamese Mekong Delta caused by upstream dams, *Geomorphology*, 353, 107011.
- 4) Binh DV, Kantoush SA, Sumi T, Mai NP, Ngoc TA, Trung LV, An TD (2021) Effects of riverbed incision on the hydrology of the Vietnamese Mekong Delta, *Hydrological Processes*, 35, e14030.
- 5) Binh DV, Kantoush SA, Ata R, Tassi P, Nguyen TV, Lepesqueur J, El kadi Abderrezzak K, Bourban SE, Nguyen QH, Phuong DNL, Trung LV, Tran DA, Letrung T, Sumi T (2022) Hydrodynamics, sediment transport, and morphodynamics in the Vietnamese Mekong Delta: field study and numerical modeling, *Geomorphology*, 413, 108368.
- 6) Hackney CR, Darby SE, Parsons DR, Leyland J, Best JL, Aalto R, Nicholas AP, Houseago RC (2020) River bank instability from unsustainable sand mining in the lower Mekong River, *Nature Sustainability*, 3, 217–225.
- 7) Loc HH, Binh DV, Park E, Shrestha S, Dung TD, Son VH, Truc NHT, Mai NP, Seijger C (2021) Intensifying saline water intrusion and drought in the Mekong Delta: from physical evidence to policy outlooks, *Science of the Total Environment*, 757, 143919.
- 8) NG WX, Park E (2021) Shrinking Tonle Sap and the recent intensification of sand mining in the Cambodian Mekong River, *Science of the Total Environment*, 777, 146180.
- 9) Vu TH, Binh DV, Tran HN, Khan MA, Bui DD, Stamm J (2024) Quantifying spatiotemporal river morphological change and its consequences in the Vietnamese Mekong Delta using remote sensing and geographical information system techniques, *Remote Sensing*, 16, 707.

山地流域における風化帯成立と水流出過程の統合モデリング

Integrated modeling of hillslope regolith development and subsurface hydrology in mountainous watersheds

松四 雄騎¹, 佐山 敬洋², 松崎 浩之²

Yuki MATSUSHI¹, Takahiro SAYAMA¹, Hiroyuki MATSUZAKI²

¹京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

²東京大学 総合研究博物館 タンデム加速器分析室

Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo

This study established a model for weathering zone development with aim of incorporating ground conditions into hydrological modeling to express rainfall-runoff characteristics of a mountainous watershed. By formulating the mechanical strength reduction of bedrock due to weathering and linking it to topographical proxies that can be analyzed via a geographic information system, thickness mapping of the weathered bedrock became possible. Verification of the spatial distribution of the thickness as well as physicochemical properties of the weathering zone remains as a future task.

Keywords: weathering zone, strength reduction, rainfall-runoff characteristics, hydro-geomorphic modeling

1. はじめに

山地流域における水の貯留・流出と斜面構成物の風化・侵食は、時間スケールの異なる現象であるが、同じ空間の中で相互作用し、降水に対する応答としての洪水流出や斜面崩壊による土砂生産に影響する。これまで、洪水流量を予測するための水流出モデルと斜面崩壊による土砂生産量を算定するための風化帯形成モデルは、それぞれ水文学および地形学的な知見を基に、別々に構築され、発展してきた。しかし、本来これらは、流域がもつ降雨流出特性の多様性を説明したり、水と土砂の同時流出現象に対する予測の精度を高めたりするためには、流域モデルとして統合されて然るべきものであるとあってよい。本研究では、統合流域モデル構築に向けて、流域観測と試料分析に基づき風化帯の性状を定量的に評価し、空間分布をモデル化したうえで、その水文学的機能を水流出モデルの中に明確に位置付けることを目的とする。

陸域水循環の結果として成立した風化帯と森林生態系は、近年、地表近傍境界域（クリティカルゾーン）と呼ばれ、人類の生存基盤たる地球表層環境の持続可能性の評価やその機能保全において重要な研究対象となっている。本研究で提案するような、クリティカルゾーンの機能理解に基づく流域モデリングは、流域毎の降雨流出特性をより良く説明し、洪水流出波形の再現精度を向上させるものと期待される。また、例えばある利水ダムへの土砂の流入・堆積量が、これまでなぜ、そのような経時変化を辿ってきたか、そして将来気候下においてどのように増大するか、あるいは土砂生産量がなぜ降水・洪水イベントに対して大きな非線形性を持つのか、ということに対して解を与える。このように、本研究が目指す統合流域モデリングは、地域社会の水・土砂減災や、河川構造物の機能保持と利活用に寄与するものである。

2. 研究方針

この研究は、理学的地形学と工学的水文学の研究者が協力し、フィールドでの実証的研究を展開しようとする点に特色がある。土層-風化岩盤ボーリングコアが得られている流域を対象に、レゴリスの水理的な物性の鉛直方向変化を測定する。元素・鉱物組成の変化についても分析し、化学的な風化が物理的な物性にどのように影響しているかを検討する。また、風化岩盤表層あるいは溪流堆砂中に含まれる宇宙線由来の同位体を分析し、岩盤の風化・削剥速度を定量する。これらのデータをパラメータとして使うことにより、地形発達モデルとカップリングさせたレゴリスの空間分布モデリングが可能となる。具体的には、流域の中で、どこに、どのような透水係数と水貯留容量をもつ土層と風化岩盤が、それぞれどのような厚みで存在しているかを、デジタル地形モデル上に定量表現できるようになる。次に、これを用いて、斜面に供給された降水の貯留・流動計算を行う。計算の結果は、間隙水圧計を用いた浸透観測や、ボーリング孔での水位観測、そし

て、堰を用いた流出観測のデータに照らして妥当性を検証する。これにより、河道に近く、土層と岩盤の物性に不連続性が大きい場や、尾根に近く、風化岩盤が厚くて深度方向に漸移的な物性変化がある場の、水文学的機能（水の貯留や流出に対する寄与）が明らかになる。本報告では、地下水の貯留媒体となる風化岩盤の厚みと物性の空間分布を推定する数理モデルについて概説し、現実の山地流域を対象に試算を行った結果を示す。

3. 岩盤風化モデリング

モデルは筆者らによって提案されたもの^{1),2)}を原型としている。風化帯の発達には岩盤の強度低下と土層生成および物理化学的剝削を伴う。風化に伴う岩盤の強度低下は、その特性を踏まえて、

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -rS = -a \left(1 - \frac{Z}{Z_{WF}}\right)^{b-1} S$$

と表現できる。ここで、 S : 岩盤の力学的強度 (kN m^{-2})、 t : 時間 (yr)、 r : 風化による強度低下速度係数 (yr^{-1})、 Z : 深度 (m)、 Z_{WF} : 風化フロント深度 (m)、 a (yr^{-1}) および b : 風化様式パラメータ (>0) である。この式は、時間とともに深度依存性をもって岩盤の強度が低下することを意味し、閾値まで強度低下した岩盤が侵食されることによって出現する動的平衡は、

$$-a \left(1 - \frac{Z}{Z_{WF}}\right)^{b-1} S + \frac{E}{\rho} \frac{\partial S}{\partial Z} = 0$$

と表すことができる。ここで、 E : 風化岩盤上面の侵食速度 ($\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)、 ρ : 風化岩盤最上部の密度 (g m^{-3}) である。未風化岩盤 ($Z \geq Z_{WF}$) での強度を S_{FB} (kN m^{-2}) と与えて、これを解くと、

$$S = S_{FB} \exp \left[-\frac{a \rho}{b E} Z_{WF} \left(1 - \frac{Z}{Z_{WF}}\right)^b \right]$$

を得る。これが、付与された侵食速度環境下における風化岩盤の定常強度プロファイルである。土層と風化岩盤の境界深度 ($Z = Z_{SBB}$) における強度を S_{ET} (kN m^{-2}) と与えれば、上式は

$$E = \rho \frac{a}{b} \frac{H_{sap}^b}{Z_{WF}^{b-1}} \left[\ln \left(\frac{S_{FB}}{S_{ET}} \right) \right]^{-1}$$

と書ける。ここで H_{sap} (m) は風化岩盤の厚み ($Z_{WF} - Z_{SBB}$) である。この式において、 $b=1$ (すなわち深度方向への一様風化) を仮定すると、この関係は

$$H_{sap} = \frac{1}{a} \frac{E}{\rho} \left[\ln \left(\frac{S_{FB}}{S_{ET}} \right) \right]$$

と単純化され、その場の侵食速度および、未風化岩盤と土層直下の風化岩盤の強度比が推定できれば、風化岩盤の厚みを計算することができるようになる。

4. モデルの適用

ここでは、花崗岩類を基盤とする山地流域への適用を試みた。対象としたのは、三重県中部の布引山地北縁に位置する安濃川流域である (図 1A)。この流域の岩盤は中生代の花崗閃緑岩体で構成され、モデルのあてはめが可能と期待できる地質条件である。宇宙線生成核種分析は未実施であるが、地形およびテクトニクスの条件から、日本の花崗岩類山地における宇宙線生成核種濃度に基づくデータベースに照らして、侵食速度は $500 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 程度と類推される。

図 1B には、この流域における局所勾配と集水面積の関係を示した。両者にはべき関係が認められ、いわゆる掃流力則と呼ばれる次式のような、流域地形の侵食法則による定常状態が示唆される。

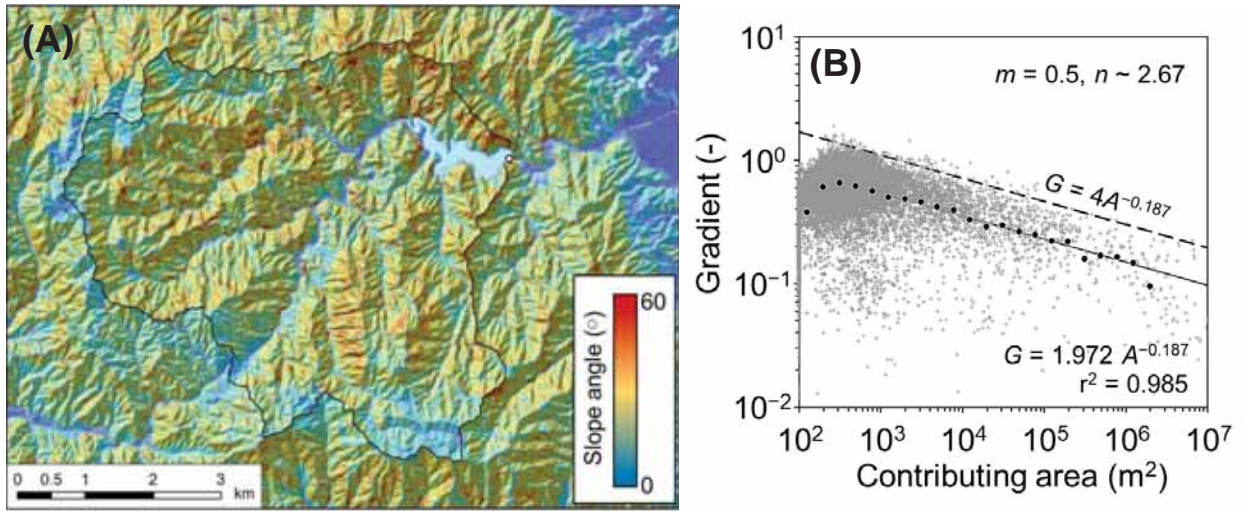


図1. 検討対象地と流域地形特性.

$$E/\rho = kA^m G^n$$

ここで A : 集水面積(m^2), G : 勾配($m m^{-1}$), k : 岩盤の受食性 ($m^{1-2m} yr^{-1}$), m および n : 地形特性パラメータ (> 0)である. この式は,

$$G = (E/\rho/k)^{1/n} A^{-m/n}$$

と整理でき, 対数瓶平均プロットに対する回帰として,

$$G = 1.927A^{-0.187}$$

が得られるため, $m = 0.5$ とすると, $n \approx 2.67$ となる. いま, 流域のいずれの場所でも侵食速度が同等とすると, 同集水面積における局所勾配のばらつきは, 岩盤の受食性の大小に帰着する. すなわち局所勾配の上限包絡線は,

$$G_{\max} = 4A^{-0.187}$$

であり, これがとりうる最小の岩盤受食性すなわち最大の (未風化岩盤の) 強度を反映しているはずである. よって,

$$\frac{G_{\max}}{G_i} = \left(\frac{k_i}{k_{\min}} \right)^{1/n}$$

であり, 岩盤の受食性は強度の逆数に比例すると考えることができるため,

$$\frac{S_{FB}}{S_{ET}} = \left(\frac{G_{\max}}{G_i} \right)^n$$

として, 未風化・風化岩盤の強度比を集水面積で正規化した局所勾配という地形パラメータで代替させて定量化することができるとの発想が得られる. 最終的に, この流域に対する具体的な風化岩盤の厚み推定関数は, $\rho = 2 \times 10^6 g m^{-3}$, $a = 1 \times 10^{-4} yr^{-1}$ とおくと,

$$H_{\text{sap}} = 2.5 \ln \left[\left(\frac{4A^{-0.187}}{G_i} \right)^{2.67} \right]$$

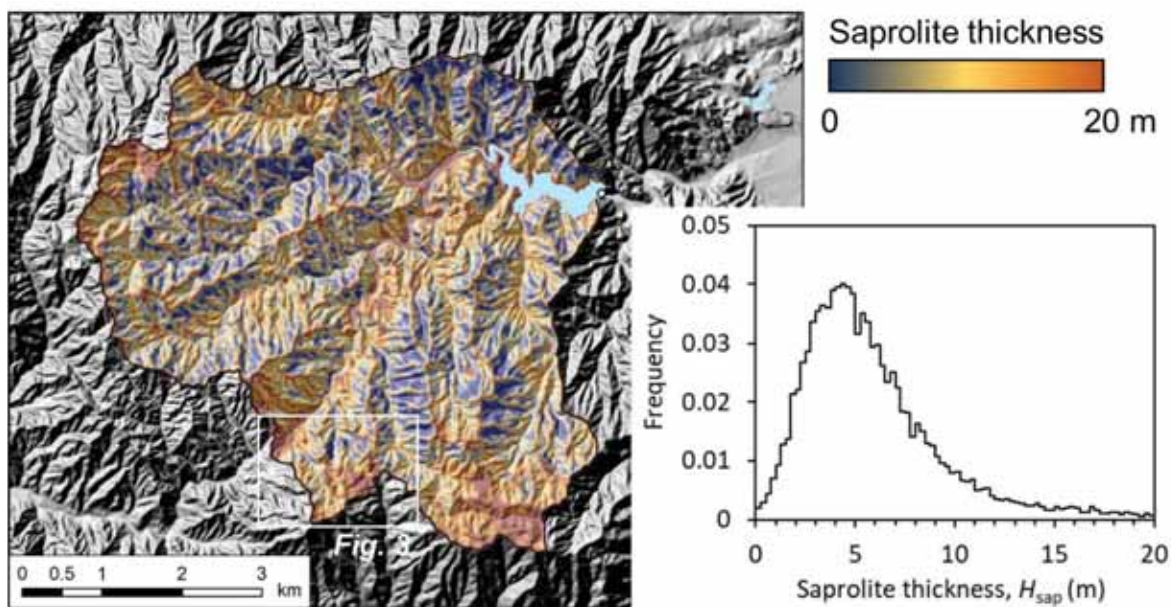
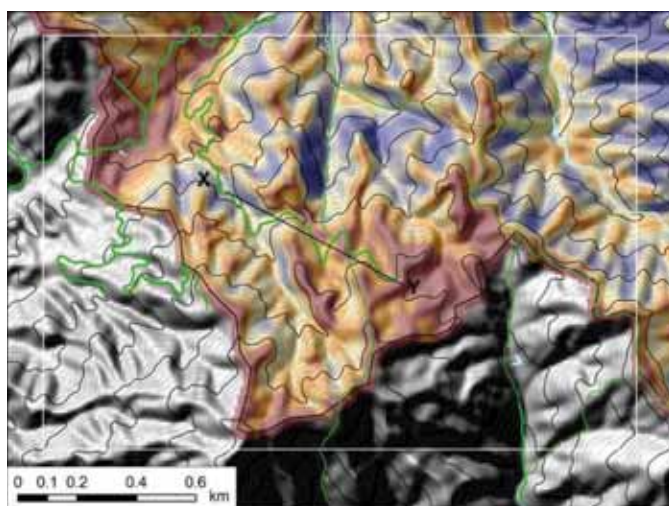


図2. モデルにより計算された風化岩盤の厚みの空間分布



と定式化される。これにより、宇宙線生成核種濃度に基づく侵食速度ならびに地理情報システムを用いた解析に基づく任意地点の局所勾配と集水面積データから、風化岩盤の厚みの空間分布が得られる。

図2に計算結果を示す。風化岩盤の厚みは、その大部分が0から15mの範囲にあり、5m付近に最頻値をもつ。また、高標高域にある小起伏面上で厚く、急勾配の山腹斜面で薄い傾向が読み取れる。小区域を拡大すると(図3)、風化岩盤の厚みは斜面部位に依存して有意に空間変化し、地下水の貯留場としての空間多様性がもたらされ、降雨流出特性にも影響を及ぼすであろうことが予想される。今後は、風化岩盤の厚みをボーリング等によって検証すること、水理的物性の空間分布を得ること、それを降雨流出モデリングに反映させること、等が課題となる。さらに、そうした地盤構造とその水理的性質を考慮した水文モデルが、洪水流出の予測精度を向上させることができるのか、どのファクターがどれほどの感度で影響するのか、といった点が主たる焦点となる。

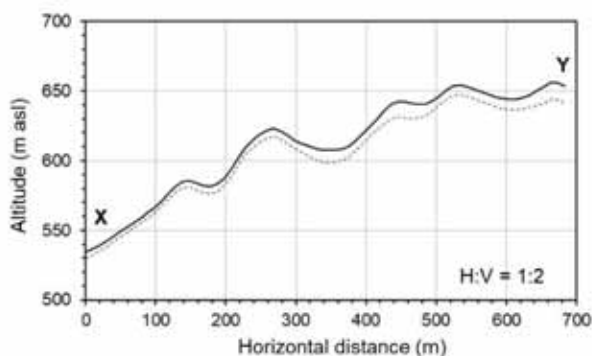


図3. 風化岩盤厚みの斜面部位による変化

引用文献

- 1) 松四雄騎 (2017), 宇宙線生成核種を用いた岩盤の風化と土層の生成に関する速度論 —手法の原理, 適用法, 研究の現状と課題—. 地学雑誌, 126, 487–511.
- 2) Matsushi, Y., Matsuzaki, H. and Matsukura, Y. (2008): Potential of in situ-produced cosmogenic nuclides for quantifying strength reduction of bedrock in soil-mantled hillslopes. Quaternary Geochronology, 3, 262–267.

インドネシアの熱帯泥炭地における洪水・火災リスクに関する研究

Flood and Fire Risk in Tropical Peatland in Indonesia

山本 エヴァ¹、佐山 敬洋¹、山本 浩大¹、甲山 治²

Eva YAMAMOTO¹, Takahiro SAYAMA¹, Kodai YAMAMOTO¹, and Osamu KOZAN²

1 京都大学 防災研究所

Kyoto University, DPRI

2 京都大学 東南アジア研究所

Kyoto University, CSEAS

Tropical peatlands in Indonesia, predominantly situated in lowland areas of major river basins, are facing escalating risks of consecutive flooding and fire disasters in the recent decades. However, compounding disasters, where floods and fires happened at the same place in the same year, rarely happened – about once in 10 to 20 years. The NEX-GDDP-CMIP6 projects the increasing consecutive dry days (CDD) and 15-day rainfall and as such the compounding disasters are likely to be intensified in the future. This report presents the field survey and monitoring to verify the occurrences of compounding flood and fire on the ground as well as to understand the uncertainties in the future climate datasets on the intensification of compounding floods and fires in the future

Key Words : tropical peatlands, floods, fires, compounding disasters, climate change

1. Introduction

Tropical peatlands in Indonesia cover approximately 11% of the country's lowland area. The majority of these peatlands have been drained and converted to croplands, primarily for oil palm plantations and acacia cultivation. Due to their high carbon content, drained peatlands are highly susceptible to fire. Conversely, as part of large river basins on the islands of Sumatra and Kalimantan, tropical peatlands are periodically subjected to flooding. Interannual variability, such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole (IOD), amplifies the magnitude of floods and fires, typically occurring once or twice per decade.

Our observations, based on satellite imagery and fire data provided by the Ministry of Forestry of Indonesia, reveal that floods and fires can co-occur in the same location within the same year (Figure 1), a phenomenon observed approximately once every 10–20 years.

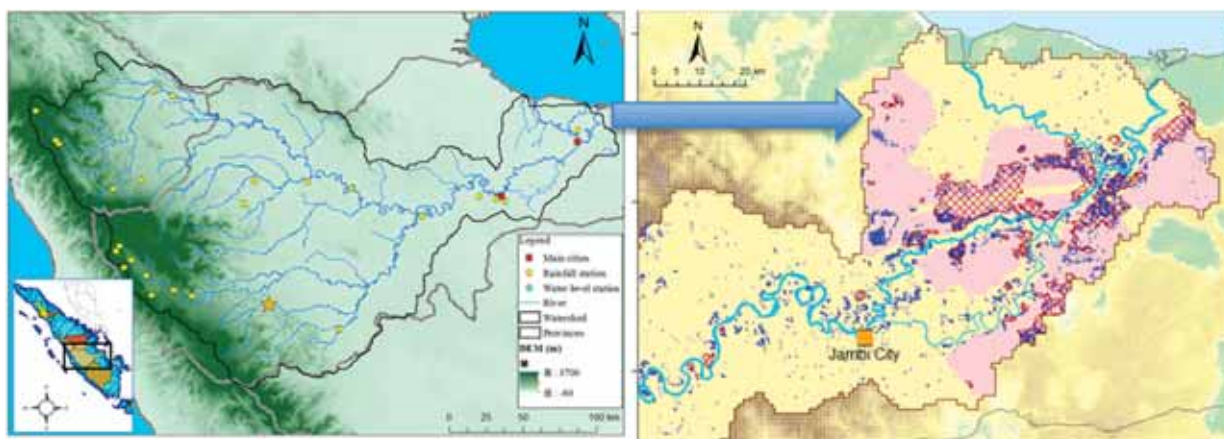


Figure 1. Batanghari River Basin (left); flooded areas (blue) and peat fire areas (red hatching) at the downstream section of the Batanghari River Basin during the rainy and dry seasons of 2015, respectively. The pink background indicates peatlands (right).

In a previous report, we presented preliminary findings on rainfall analysis using the NEX-GDDP-CMIP6 SSP3-7.0 dataset and river basin-scale simulations to understand the intensification of floods and fires as compounding disasters in tropical peatlands. The SSP3-7.0 scenario indicates a robust increase in consecutive dry days (CDD) and maximum 15-day rainfall (RX15d), suggesting an escalation in compounding disasters from 1–3 events under present conditions to 5–6 events in the future.

This report builds on those findings by presenting the results of field surveys conducted to verify the occurrence of compounding disasters in tropical peatlands, focusing on the Batanghari and Musi River Basins

2. Methodology

To confirm the occurrence of compounding disasters in tropical peatlands in Sumatra, Indonesia, we used remote sensing data (Figure 2) to identify recent instances of such events in the Batanghari and Musi River Basins. Between September 20 and 27, 2025, we visited these basins and conducted Focus Group Discussions (FGDs) with local authorities and fire watchers to better understand the nature and impact of these events.



Figure 2. (Left) Inundation and Fire Extent in downstream Batanghari River in 2024 based on Remote Sensing data
(Right) Location of monitoring tools in Seponjen Village

During the field survey, we installed some instruments to monitor hydrological conditions and the connectivity between peatlands and rivers. Some of the instruments were installed for a year and collected some data. The instruments installed so far are 2 rain gauges, 1 river water level gauge, 6 observation wells, 5 soil moisture sensors and 1 flow meter located in the canal (Figure 2).

3. Results and Discussions

We conducted a one-hour FGD in Seponjen Village to gather insights into disaster knowledge and societal behavior, particularly among farmers, after extreme events. Participants noted that extreme events, such as major floods or fires, occur approximately once every ten years. After such events, crops often fail, and farmers may need time to recover financially, leaving their land untended. However, some farmers emphasized the importance of replanting immediately after a disaster, believing that another major event is unlikely within the next decade.

In early 2024, the downstream area of the Batanghari River Basin experienced a three-month flood. Although the average flood depth was less than 1-meter, significant crop losses occurred. During the dry season, many areas were covered with dried vegetation, increasing the risk of fire.

We visited two locations where floods and fires occurred within the same year:

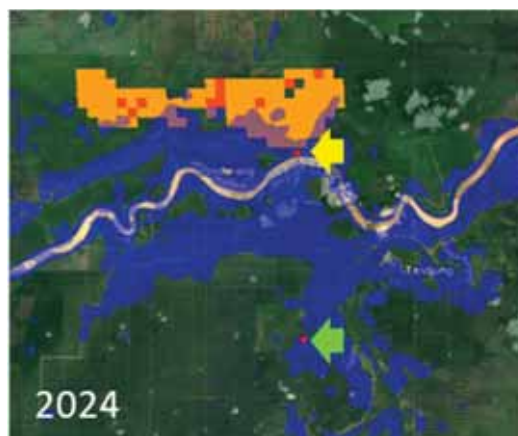


Figure 3. Survey Location based on FGD and remote sensing data.

1) Location near Kumpeh River, a tributary of Batanghari River (marked by a green arrow in Figure 3):

This area experienced prolonged flooding in early 2024, leaving visible flood marks on oil palm trees. Fire marks were also observed on untended land adjacent to well-maintained oil palm plantations. FGDs revealed that the fire originated from the untended land but was contained due to canal-blocking measures and fire suppression efforts such as installing sandbags by plantation managers.

2) Location near Batanghari River (marked by yellow arrow in Figure 3):

This area also experienced prolonged flooding in early 2024, followed by fires during the dry season. Fires affected three villages, covering a total area of approximately 927 hectares. The burned area showed clear flood and fire marks, with the peat surface hardened and forming a charred crust (Figure 4). The area appeared unsuitable for cultivation, though its maintenance status could not be determined.

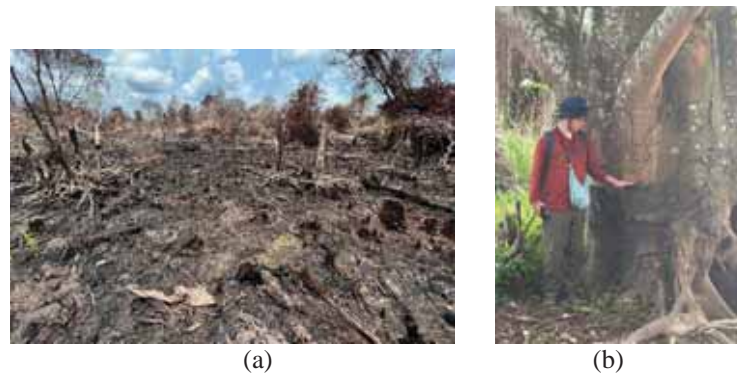


Figure 4. (a) Fire scene (b) Flood mark in the survey location near Batanghari River

To understand the connectivity between Kumpeh River (peat river) and groundwater in the peat, we collected data during the dry season the prolonged flood. The data shows that the peat river oscillated daily with water level difference more than 1 meter during dry season, most probably due to tidal effect. During the high flow and floods, the river water level did not oscillate. Some small canals with depth about 60 cm and bigger ones with 1-meter depth were built in the monitoring sites. These canals were built by the local farmers mainly to define boundary of their farming lands. During our visit these canals were filled with water, however, the water did not flow.

Based on the groundwater observation in the area with distance about 175 m from big drainage canal and 1 km from the peat river, the average groundwater level was around 20 cm below the ground. In dry season when monthly rainfall was less than 100 mm, the groundwater level dropped below 30 cm and in prolonged dry season where monthly rainfall was less than 100 mm in two consecutive months, the groundwater level dropped below 50 cm. In short period of river flooding, the groundwater level is relatively stable and does not fluctuate following the river water level. Only during the prolonged flooding where the river water inundated the ground uniformly, groundwater level was following the river water level.

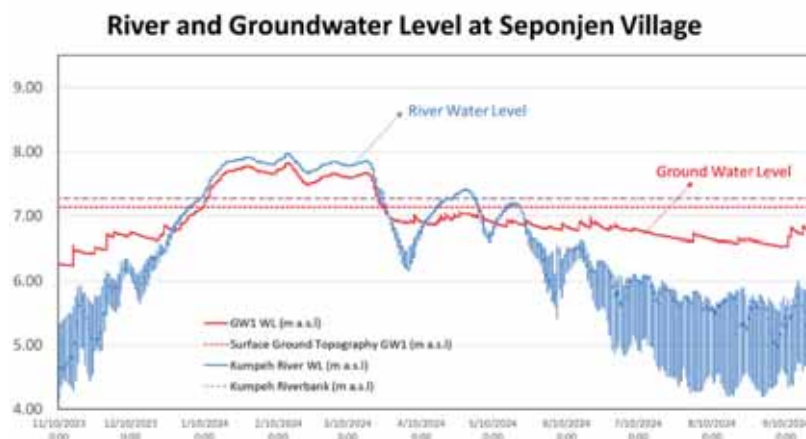


Figure 5. Observation data at Seponjen Village

4. Conclusions

Based on the field survey in September 2024, we verified the occurrences of compounding flood and fire disasters in the peatlands in Sumatra Island, Indonesia. The inundation and fire extent from remote sensing data was useful to understand the location of disasters. It is, however, could not detect a smaller fire event. Whether or not the human

activities are intensifying the flood and fire cycle, should be further investigated through questionnaire survey.

The observation data shows that the groundwater level 1 km inland from the peat river is relatively stable and does not follow the fluctuations of river water, except when it was uniformly inundated by the river water. The connectivity of peat and peat river should be analyzed further using data from other monitoring wells.

土石流扇状地における土砂災害リスク評価

Sediment disaster risk assessment in debris flow fan

竹林 洋史¹, 藤田 正治², メグ ビシュワカルマ², ウメシュ シン³

Hiroshi TAKEBAYASHI¹, Masaharu FUJITA², Meg B. BISHWAKARMA³
and Umesh SINGH³

¹京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

²京都大学 東南アジア地域研究所

Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University

³ハイドロラボ

Hydro Lab

In this study, a method for evaluating the spatial distribution of the risk of damage within a sediment disaster warning area is discussed, and the optimal evacuation method for debris flows is also discussed. As a result, the spatial distribution of the risk of damage from debris flows based on the results of numerical simulations of debris flows under multiple conditions with different sediment discharge volumes by varying the maximum erosion depth is shown. The possibility of selecting the optimal evacuation method for each individual house is suggested using the spatial distribution of the risk of damage from debris flows.

Key Words : Debris flow, Sediment disaster, Risk assessment, Evacuation, Numerical simulation

1. はじめに

土石流の流動深・流速は、氾濫域において空間的に分布している。これは、土石流扇状地内においても土砂災害リスクが空間的に分布していることを示しており、リスクの大きさによって避難方法や構造物の構造などを考えることが可能となる。本研究では、土石流扇状地内における土砂災害リスクを数値シミュレーションで明らかにし、土石流扇状地における持続的な生存基盤の維持の方法について検討する。

2. 土石流被災リスクの評価方法

2014年8月に線状降水帯による豪雨による土石流によって甚大な被害が発生した広島市安佐南区八木三丁目を対象とする。最大浸食深を変化させて3ケース (0.1m, 0.3m, 0.5m) の土石流の数値シミュレーションを実施した。各シミュレーションで土石流の最大流動深が0.5m以上となる領域を危険領域とし、3ケースの結果を重ね合わせ、Level4 (3ケース全てで危険と判定された領域) ~Level1 (3ケース全てで危険と判定されなかった領域) の4段階で評価した。なお、ここで用いた最大流動深によるリスク評価方法は一つのリスク評価方法に過ぎず、家屋の破壊応力などを用いた評価方法なども考えられる。これらについては、何をもち「被災」と判断するかによって選択されるものと考えている。

数値シミュレーションには、一般座標系による平面二次元流れの土石流の数値シミュレーションモデル¹⁾であるiRIC-Morpho2DHを用いる。iRIC-Morpho2DHは、水と土砂の混合物を一つの流体として取り扱った一流体モデルであり、エネルギー散逸機構として、降伏応力とともに、流体運動に起因したエネルギー散逸 (土砂の粒子と粒子の間隙内の水の乱れによるエネルギー散逸, 土砂の粒子と粒子の非弾性衝突によるエネルギー散逸) を考慮している²⁾。

3. 結果と考察

被災リスクは、Level 4 が紫、Level 3 が赤、Level 2 が黄、Level 1 が色なしで表示した。

図1に被災リスクの空間分布を示す。Level 4 の領域は最大浸食深0.1mの解析結果とほぼ重なり、Level 3とLevel 2の領域もそれぞれ最大浸食深0.3m, 0.5mとした解析結果と重なっている。図より、最大浸食深を深くすることで土石流の規模が大きくなり、それに従い流出土砂量が増えて危険領域も広がっていることが分かる。また、Level 2とLevel 3の領域に対してLevel 1の領域はかなり狭い。これは、最大浸食深が0.1mの



図1 土石流による被災リスクの空間分布



図2 土砂の堆積量の空間分布 (最大浸食深: 0.3m)

場合は流出土砂量が少なく、広範囲に土石流が流れることなく堆積するためである。

図2に、最大浸食深0.3mとした数値シミュレーションによって得られた土砂の堆積量の空間分布を示す。図2より、家屋の上流側で土砂が多く堆積していることがわかる。その結果、下流部に流れる土砂の量が減少し、下流部の危険領域が狭まる結果となった。図では示していないが、0.1m、0.5mの解析結果でも同様の結果となった。この点は、水のみでの氾濫とは大きく異なる点である。つまり、水のみであれば、一時的に家屋の上流域で流れが滞留したとしても対象地点のような急傾斜地の宅地であれば、最終的にほぼ全ての水は下流に流れる。しかし、土石流の場合は宅地を流下するに従って土石流の流量が減少し、氾濫域が狭くなる。

図8を用いて各家屋の避難方法を検討する。紫で表示されているLevel4の領域内及びLevel4の領域に接している家屋については、小規模の土石流であっても土石流が流れてくる可能性があり、豪雨が予想されている時は他の場所への避難が必須である。豪雨発生前に早めに避難できる場合は、土砂災害警戒区域外の避難所に避難するのが望ましいが、避難の初動が遅くなり雨が強くなった後の場合は、家の近くで被災リスクが低い場所へ避難することにより、生存確率が上昇する。例えば、図8に緑で示したA地点のように、Level1の領域の知人の家などに避難できるのであれば、避難のための移動距離がわずか数10mで避難が可能である。Level1の領域への避難が困難な場合は、Level2やLevel3の領域であっても自宅に留まるよりも生存確率が上昇する。

図1と図2を比較すると、Level3の領域は土砂の堆積厚が比較的厚いが、Level2の領域は土砂の堆積厚が非常に薄い。これらのことから、豪雨中に急傾斜地を遠方の避難所まで移動するリスクを考えると、Level2の領域の家屋については、自宅の高階への垂直避難の方が安全で生存リスクが高くなる。

4. まとめ

様々な条件（本研究では流出土砂量に着目）で土石流の数値シミュレーションを実施することによって、急傾斜地に存在する宅地における土石流被災リスクの空間分布を示すことができる。また、被災リスク分布を用いることによって、個々の家屋ごとに最適な避難方法を選択できる可能性を示した。

5. 参考文献

- 1) Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita, Koichiro Ohgushi (2022): Numerical modeling of debris flows using basic equations in generalized curvilinear coordinate system and its application to debris flows in Kinryu River Basin in Saga City, Japan, *Journal of Hydrology*, 615, Part A, 128636.
- 2) Egashira, S., Ashida, K. (1992): Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, in: *Stud. Appl. Mech.* Elsevier 31, 391-400.

森林流域を対象とした水・土砂動態の統合的把握

Integrated understanding of water-sediment dynamics in forest catchment

萬 和明¹, 吳 映昕¹, 田中 智大¹, 山野井 一輝¹, 宮田 秀介², 高瀬 恵次³, 橋口 浩之⁴, 山口 弘誠¹, 石田 祐宣⁵, 佐藤 嘉展⁶, 市川 温⁷, 中北 英一¹

Kazuaki Yorozu 1, Ying-Hsin WU 1, Tomohiro TANAKA 1, Kazuaki YAMANOI 1, Shusuke MIYATA 2, Keiji TAKASE 3, Hiroyuki HASHIGUCHI 4, Kosei YAMAGUCHI 1, Sachinobu ISHIDA 5, Yoshinobu SATO 6, Yutaka ICHIKAWA 7, Eiichi NAKAKITA 1

1京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2京都大学 農学研究科

Graduate school of Agriculture, Kyoto University

3石川県立大学 生物資源環境学研究所

Graduate School of Bioresource and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University

4京都大学 生存圏研究所

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

5弘前大学 理工学研究科

Graduate school of science and technology, Hirosaki University

6愛媛大学 農学研究科

Graduate School of Agriculture, Ehime University

7京都大学 経営管理大学院

Graduate School of Management, Kyoto University

This study aims to establish observation system at Shigaraki forest catchment for understanding integrated water-sediment dynamics. A hydrological and meteorological observation system has been already installed at the target area in 2012. In this study, timelapse cameras were newly installed to monitor slope surface flows on hillslopes. It was successfully observed that slope surface flow was generated during heavy flood event. Regarding understanding sediment dynamics, a LiDAR launched on an UAV was utilized in this study. Several trial experiments were already carried out and a digital elevation model was created. The result was highly comparable with the existing DEM and the former one may tend to capture more detail feature of elevation.

Key Words : *water-sediment dynamics, surface flow, UAV LiDAR*

1. はじめに

流域治水の推進により、洪水流出には河川本流など流域の一部だけでなく流域全体で対応する方針となったため、河川整備計画は大きく変化しつつある。これに伴い、水管理は土砂管理と一体となった統合流域管理への変換が求められている。これは、洪水時における斜面崩壊等の土砂災害のみならず、平常時の土砂堆積に関しても、ダムでは貯水容量を減少させ河道では河床変化を引き起こし、治水能力を低下させることから、水と土砂を統合的に管理する必要があるためである。このような現状をふまえると、水・土砂動態をそれぞれ別個の事象ではなく一体として捉える必要があり、水文分野と砂防分野のより一層の協働が不可欠である。この問題意識から、同一流域において水・土砂動態を一体として観測できる体制の確立を目指した研究活動が必要とされている。

流域全体を対象とする流域治水の観点に立つと、流域からの総土砂排出量の管理では不十分であり、流域内部の土砂の空間分布の把握が必要である。近年はドローンによるライダー測量を利用した地形測量が実施され、流域最上流部などの立ち入り困難な区域においても詳細な標高データが収集でき、平常時も含めた土砂動態の把握が可能となりつつある。以上より、流域治水に資する統合流域管理の実現に向けて、同一流域において水・土砂動態の統合的かつ面的な観測体制を確立することを本研究課題の目的とする。

2. 研究対象領域と研究手法

筆者らは、生存基盤科学研究ユニットのサイト型機動研究として、生存圏研究所の信楽 MU 観測所に近接する 24.6ha の森林流域に、森林と大気との間の水・熱・二酸化炭素の交換を観測するタワーを建設した。現在に至るまで 10 年以上の観測実績があり、かつ、水・熱・二酸化炭素の交換のモデル化にも取り組んできた¹⁾。

本研究課題ではこの取り組みを継続しつつ、流域内部での物質循環として土砂動態の解明を目的に、その観測とモデル化に取り組む。水動態の観測は、既往の体制を維持しつつ新たに地表面流撮影の可能性を検討する。土砂動態の観測には、最新技術としてドローンに搭載したライダー観測を実施する。ドローン搭載ライダー観測では、植生が繁茂する森林域においても数 cm の誤差で地表面標高の計測が可能である。

3. 洪水流解析のための地表面流撮影の検討

(1) 降雨流出解析における斜面地表流

降雨流出解析は流域をメッシュに分割し、各メッシュにおいて斜面要素と河道要素を考慮して斜面からの流出量を河道に受け渡すことによって上流から下流に掛けての河川流量の集積を計算する。斜面要素は下流に向かうにつれて土壌水分量が増加し、土壌が飽和したところで地表面流が発生する。通常はこうしたモデルの個別要素には着目せず、最下流で計算された河川流量を国土交通省の行政機関もしくは研究者自身で観測された河川流量と比較することで精度検証を行う。本研究では、森林斜面にも着目し、斜面要素モデルで計算される地表面流の発生をタイムラプスカメラによって撮影された結果と比較することによって分布型降雨流出モデルの精度を検証する。



図 1. 使用するタイムラプスカメラ



図 2. 2022 年 8 月の豪雨時に気象タワー傍の水みちの (a) 下流部および (b) 中流部に設置したタイムラプスカメラによって撮影された表面流の一例。

(2) タイムラプスカメラによる表面流の撮影結果

斜面地表面流の撮影に使用するタイムラプスカメラを図 1 に示す。同カメラは単三電池 12 本による電池式であり、電池の容量と撮影時期（夏季）の電池の消耗を考慮して撮影間隔は 10 分間としている。空間解像度 5 m の標高データを使用することですべての主要な水みち（集水面積の小さな斜面の集まりで、常時流れは見られない地形）を捉えることが可能であることから、降雨流出モデルが沢と判断している場所をカメラの設置場所の候補とする。予備検討において、十分に斜面表面流を捉えることが可能な水みちの集水面積の大きさを参考に、無理なくアクセスが可能な範囲に存在する 4 つの沢を対象に撮影用カメラを設置することにした。

過去に一部の水みちに設置したカメラを用いた撮影結果の一例を図 2 に示す。写真のように、水みち上で洪水時に強い流れが見られること、水みちより上流の斜面ではそのような地表面流が明確に見られないことがわかる。このような流れはある程度強い降雨強度の際に必ず見られることから、降雨量を入力として降雨流出計算において精度検証に有用な観測データとなることが示唆された²⁾。

4. ドローン搭載ライダーを用いた土砂動態観測

土砂動態の把握に使用する機材は、ドローンが DJI 社の Matrice 350 RTK、ライダーが GreenValley International 社の LiAir X3 である。これまでに、現地での飛行経路の事前確認、離着陸試験、複数回におよぶ予備観測と飛行経路の確認を実施している。これら試験飛行により、対象流域全体を走査するためには、ドローンの操縦者は観測タワー上から操縦を行う必要があることがわかった。これは、操縦者が地上に滞在しているとドローンとコントローラの通信が途絶してしまうためである。

流域内部の土砂動態を把握するためには、ドローンの飛行高度を地表から 50m 程度に設定する必要がある。しかし、対象流域には 30m を超える樹高の常緑樹が存在するため、安全面を考慮すると既存の標高データに基づいてドローンの飛行高度を決定することはできない。そこで、まずはドローン搭載ライダーにより、対象流域における Digital Surface Map を作成することを試みている。すでに観測は終えており、得られたデータの解析を進めている。

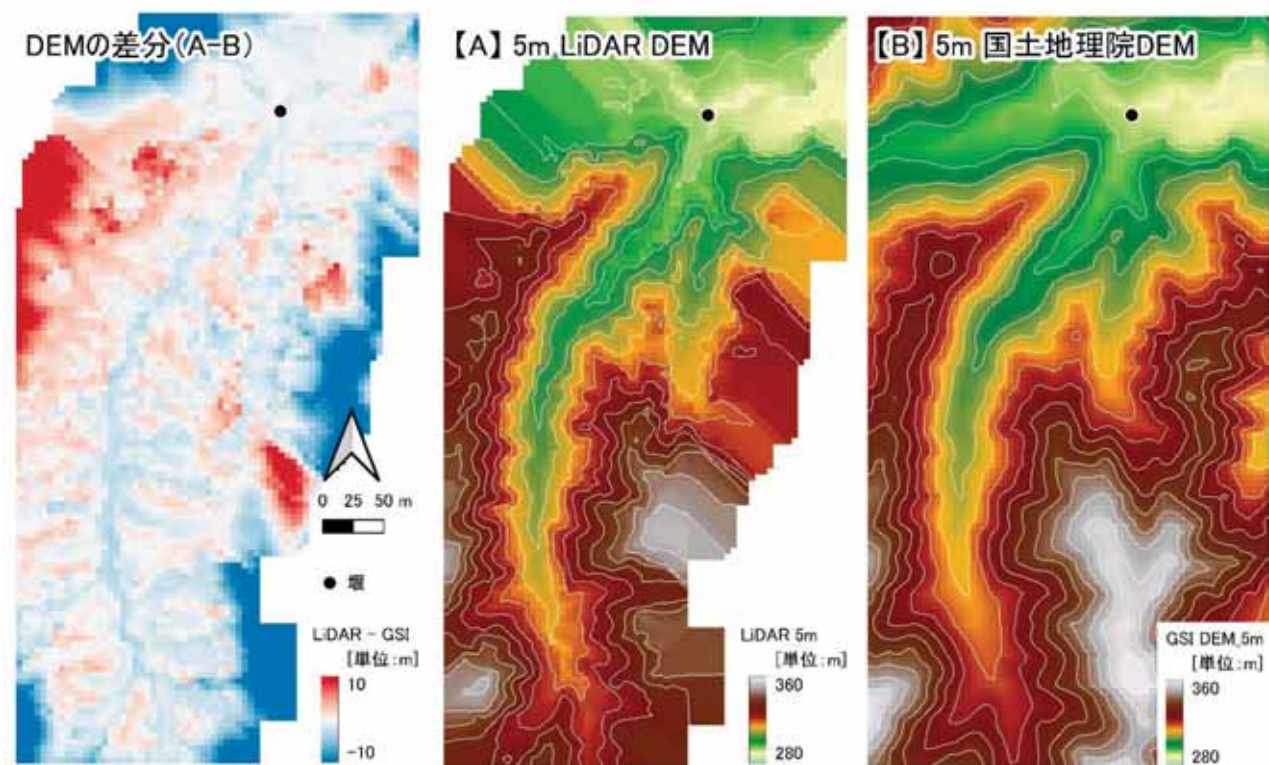


図3. ドローン搭載ライダーと国土地理院の Digital Elevation Model (DEM) とそれらの差.

一方で、標高データ (Digital Elevation Model: DEM) の試験観測も実施している。これは流域全体が対象ではないが、簡易解析の結果として、図3に国土地理院が公開している5m解像度のDEM³⁾との比較を示す。同図から、国土地理院のDEMと比べてドローン搭載ライダーによるDEMは、谷筋で過小評価、尾根筋で過大評価傾向にあることが見てとれる。また、ドローン搭載ライダーによるDEMの方が、より詳細な地形を表現できているようにも見受けられる。今後、より詳細に分析する予定である。

5. おわりに

信楽 MU 観測所に近接する森林流域において、水文観測を継続するとともに、新たな観測として表面流撮影を開始し、ドローン搭載ライダーによる土砂動態の把握に関する研究を開始した。表面流撮影は有効性が確認できたことから、数値モデルを用いた降雨流出計算における精度検証に使用できるよう観測知見を蓄積していく予定である。ドローン搭載ライダーによる観測は開始したばかりであるが、土砂動態の把握に応用しうる精度での標高データの観測が当面の目標である。さらなる水文・砂防の分野融合を進め、簡易貫入試験による土層条件の把握や、TDR法による流域末端での土砂流出観測の実施に向けた準備にも着手している。今後は、得られた観測知見を他流域での結果と比較しつつ、洪水流出と土砂の生産・流出プロセスを統合的に予測可能な数値モデルを開発し、水・土砂を一体と捉えた統合流域管理と流域治水の推進に資する情報を発信していく予定である。

参考文献

- 1) 信楽プロジェクト: <https://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/fluxsites/index.html>, (2025/01/14 確認)
- 2) Choi Seonjun, 田中智大, 萬和明, 立川康人: Difference of slope runoff characteristics in equifinal parameters of a rainfall-runoff model: A case study in the Shigaraki experimental catchment, 水文・水資源学会 2024 年度研究発表会要旨集, PS-2-45, doi: 10.11520/jshwr.37.0_307, 2024.
- 3) 国土地理院: <https://www.gsi.go.jp/>, (2025/01/14 確認)

インドネシア熱帯泥炭地の火災防災に向けた 大気観測研究とその実用化

Atmospheric observation study and its practical application for fire disaster prevention
in tropical peatlands in Indonesia

小川 まり子¹, 甲山 治¹, 吉位 優作², アワルディン³, ヌルディアン³,
アルバート スレイマン³, 山本 エバ ミア シスカ⁴, 山本 浩大⁴, 佐山 敬洋⁴
Mariko OGAWA¹, Osamu KOZAN¹, Yusaku YOSHII², AWALUDDIN²,
NURDIANSYAH², Albertus SULAIMAN², Eva Mia Siska YAMAMOTO²,
Kodai YAMAMOTO², and Takahiro SAYAMA²

- 1 京都大学 東南アジア地域研究研究所
Center for Southeast Asian Studies, Kyoto University
- 2 京都大学大学院 アジア・アフリカ地域研究研究科
Graduate School of Asian and African Area Studies, Kyoto University
- 3 インドネシア国立研究革新庁 気候大気研究センター
Climate and Atmosphere Research Center, National Research and Innovation Agency
- 4 京都大学 防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

This study conducted atmospheric and hydrometeorological observations at 10 private homes and surrounding areas in Riau Province of eastern Sumatra, Indonesia. We discussed a relationship between areas that do not receive frequent rain during a dry season and fire cases by using a weather radar with high spatio-temporal resolution. It was found that the areas where it rarely rains during dry seasons in March 2023 and 2024 vary from year to year depending on the direction of the wind, and that this also characterizes the locations of fires. We compared atmospheric and hydrometeorological conditions in areas where there were reports of fires and in areas where there were no reports of fires during a dry season in July 2024. It was found that the air was hotter and drier in the areas surrounding the fires, although the calculated evapotranspiration was slightly lower. A relationship between rainfall information and air pollution caused by peatland fires was analyzed. In the case of fire in March 2024, it was found that there was a possibility of detecting peatland fires earlier than the timing reported to the local fire department, by using air pollutants and rainfall values. In the future, we will consider an effective air pollution monitoring network for the early detection of peatland fires, while also monitoring air pollution using smartphone apps in conjunction with air pollution measurement equipment.

Key Words : tropical peatlands, fire, atmospheric observation, hydrometeorological observation, air pollution

1. はじめに

近年、季節の移り変わりが曖昧になってきている。熱帯泥炭地の広がるスマトラ島東部では、通常は2月の小乾期を経て3月には雨が降り始めるが、2024年は3月まで乾期が長引き、ブンカリス県防災局によると、ブンカリス県では森林・泥炭地火災の焼失面積が34.33haに達した。エルニーニョが発生し火災が多発した2015年の周辺では、ブンカリス県タンジュンルバン村では前年の2014年2月に村面積の約25%の4,500haが焼ける壊滅的な状況を経験した。泥炭地火災で発生した大気汚染物質は季節風に乗って120kmほど離れた南東にあるプカンバル市まで到達した¹⁾。泥炭地火災は地中で長期間くすぶり続け、広範囲に広がるため、初期火災のうちに対処することが重要である。2014年2月の火災では野焼きが行われていた中で発生したが、現在は土地をある一定の広さまで延焼させると違法になる。木を伐採して出たゴミや家庭ゴミに対して日常的に火が使われているのが現状である。ゴミを燃やして燃え広がったという火災事例も聞く。大気・水文気象の観点から、火の扱いに特に注意を払う時期を十分に理解しておくことが重要である。

インドネシア海洋大陸には海岸線に集中的な降雨をもたらす降雨日周期の現象²⁾がある。スマトラ島東部は地理的に特徴のある雨が見られる。気象レーダー観測³⁾によると、10分以内の早い降雨移動、海岸線・内陸での局地的な雨、ライン状⁴⁾の降水が見えてきている。本研究では高時空間分解能な気象レーダーを用いて雨の降りやすい地域・降りにくい地域と火災事例との関係について把握する。また本研究はスマトラ島東部リアウ州10地点の民家にて大気汚染観測を行う。火災報道や住民への聞き取り調査を基に生活活動と泥炭地火災による大気汚染状況を区別しながら、乾期の大気汚染状況を理解する。火災報道がみられた周辺地域と

そうでない地域の気象・水文気象状況を比較する。地下水位の変動を左右する蒸発散と雨に着目する。熱帯泥炭地の火災リスク指標の研究では、Taufikら⁵⁾は雨と気温、地下水位、土壌サンプリングにより得られた土壌物性のパラメータなどを用いて火災リスクを算出している。雨については前日の日降雨の履歴を用いており、日降雨が約5mm以下がしきい値となっている。本研究では火災リスク指標で用いられる、このような雨量情報が、泥炭地火災から発生する大気汚染とどのように関連しているのかを明らかにする。

2. データ

2023年7月11日～2024年11月6日（以下、すべて現地時刻）にかけてインドネシア・スマトラ島リアウ州の10箇所の民家にて大気汚染観測機器および雨量計による観測を実施した⁶⁾（図1）。アイデック社製のP-Sensorを用いて粒子状物質PM2.5を、LASCAR Electronics社製のEL-USB-COを用いて一酸化炭素を測定した。2箇所にフィールドプロ社製の小型転倒ます雨量計RFT25（以下、雨量計）を設置した。時間解像度はCOとPM2.5の測定が5分ごと、雨量データが10分ごとである。本研究ではアイデック社製のP-SensorによるPM2.5のデータを用いて、日中（8-20時）と夜間（21-7時）で平均する。PM2.5の日変動は同様の解析により、気象条件や人間活動、また都市部や農村部など土地利用によっても異なることが知られているためである⁷⁾。

鹿児島大学が製作した小型浮遊微粒子計（以下、PM baru計）が6地点に設置されている（図1黄色いピン）。Panasonic社製レーザー式PMセンサ（SN-GCJA5）が内蔵されており、GPSの数、気温、湿度、気圧、粒子状物質（PM2.5、PM10、PM1.0）の濃度や個数を10秒ごとに計測している。またインドネシアの現地業者とインドネシア国立研究革新庁が製作した大気汚染物質を測定する機器（以下、PM online計）が5地点に設置されている（図1赤いピン）。気温、湿度、気圧、PM2.5やCOが1分ごとに計測され、通信回線（SIM）を介してリアルタイムで伝送される。ブンカリス島にはFURUNO社製のXバンド気象レーダーWR2100（以下、気象レーダー）が設置されている³⁾。

本研究では、ペンマン式⁸⁾から日単位の蒸発散位を計算する。気温、湿度はPM baru計から取得した日平均値を、風速はNASAによる再解析データMERRA2から地上2kmの日平均風速を用いる。日照時間は、気象衛星ひまわりの可視バンドのBand03（波長0.64μm）から物理量換算済みの分光反射率（%）を用いる。空間分解能は4kmである。10分ごとのデータから前1時間平均値が35%以下のときを日照があるとす。ただし、ブンカリス島で山口大学が計測している、フィールドデータクラウド伝送サービスSESAMEから得られた日射量を検証データとした。本研究で用いる火災情報はNASAのFIRMSのウェブサイト⁹⁾から得られる衛星画像によるホットスポット、ブンカリス県防災局ウェブサイトで公開されている消火活動の記録¹⁰⁾、ならびに現地報道記事である。

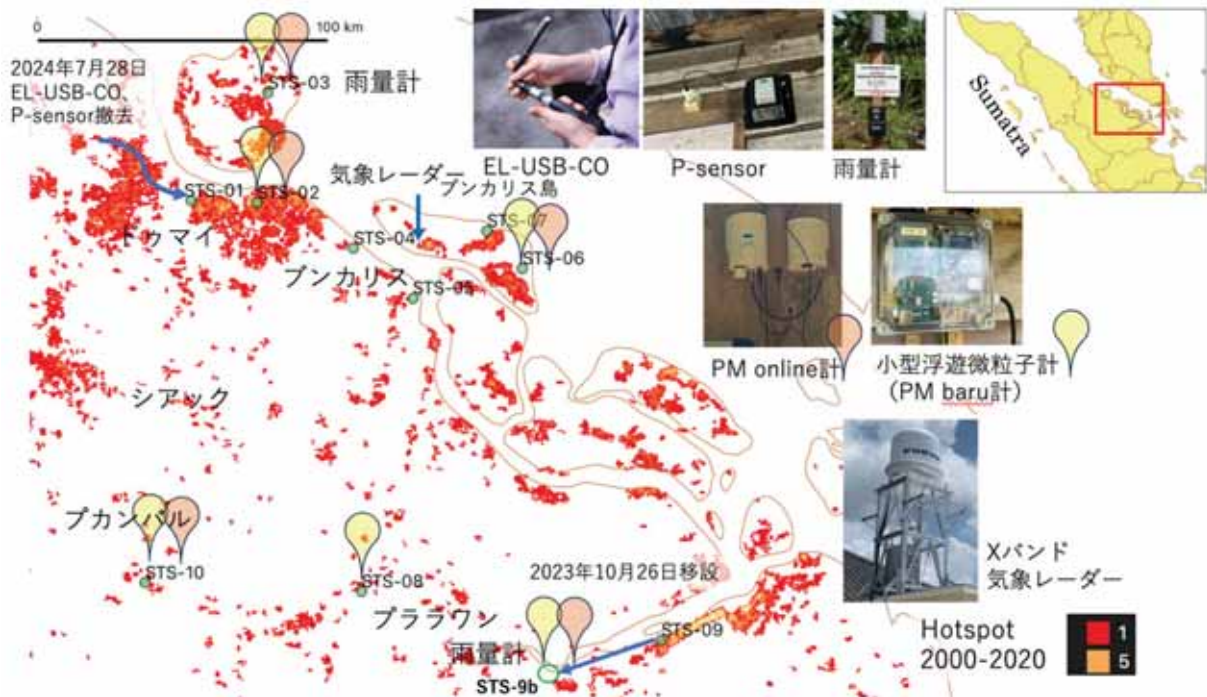


図1 研究対象地域。緑丸は大気汚染観測機器が設置された10地点の場所。すべての10地点にP-SensorとEL-USB-COが設置され、STS-03、9bの2箇所には雨量計が設置されている（2024年11月時点）。6地点にPM baru計（黄色いピン）、5地点にPM online計（赤いピン）が設置されている。赤色とオレンジ色のコンターは、2000～2020年に衛星で検出されたホットスポットの数を示し、それぞれ1個と5個を示す

3. 結果と考察

(1) 乾期における雨の降りにくい場所と火災事例の関係

乾期に雨が降りやすい場所、降りにくい場所について火災情報とともに調査した。対象期間は2024年3月8日～4月7日(A)と2024年3月1日～3月18日(B)の乾期である。図2は雨の頻度分布を示す。気象レーダー³⁾で得られた5mm/day以上の日数を風向きで分け、ホットスポットと重ね合わせた。風向きはMERRA2データで得られた気象レーダー設置場所近辺における地上2mの日平均風向を用いた。対象期間中に、より卓越した北より(315-45度)と東より(45-135度)の風成分の結果を図2に示す。各風成分の回数(日数)をコンター図の右上に示す。

Aの乾期はスマトラ本島沿岸地域において2024年3月下旬に火災情報が得られた。スマトラ本島沿岸地域では北よりの風のととき、雨の日がほとんどなかった。Bの乾期は2023年3月18日にブンカリス島東で火災情報が得られている。周辺地域では東よりの風のととき5mm/day以上の雨の日が1日だけ局所的に観測されたものの、ブンカリス島東は全体的に雨の日がほとんどみられなかった。風向きごとの雨の降りにくい場所は年によって変わり、それによって火災場所も特徴づけられることがわかった。火災リスクをより詳細に検討していくためには、雨と風向きだけでなく、地下水位低下に影響する蒸発散も把握する必要がある。

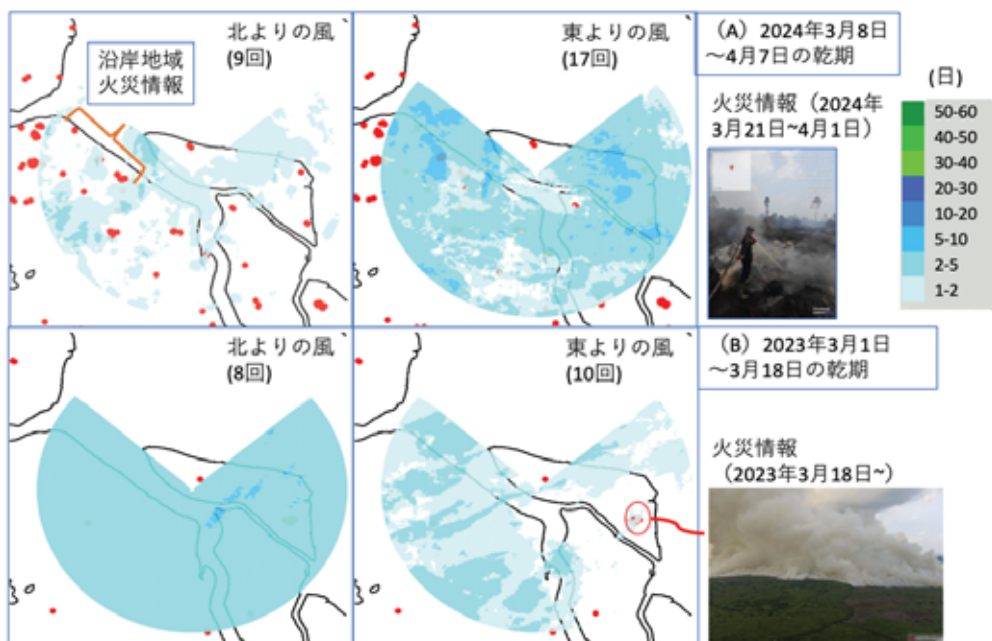


図2 乾期における雨の頻度分布。左列と右列のコンター図は気象レーダーで得られた5mm/day以上の日数を風向別に分類したもの。赤い点は対象乾期中のホットスポット。上段は2024年3月8日～4月7日(A)、下段は2023年3月1日～3月18日(B)の乾期。Aは2024年3月21日～4月1日にブンカリス県防災局の消防記録¹⁰⁾から3件の火災情報がスマトラ沿岸地域で得られた。いずれも5～15haほどの延焼範囲である。Bは2023年3月18日にブンカリス島東で1件の火災記事¹¹⁾が得られた。延焼範囲は25haほどである。写真は一部の火災現場を示す

(2) 火災報道がみられた地域とそうでない地域の気象・水文気象状況の比較

研究対象地域(図1)の北東側であるドゥマイ市東側からブンカリス県周辺にかけて(STS 02～07)、また南側にあるプララワン県において(STS 08、9b)、2024年7月後半の乾期の火災状況と蒸発散位、大気の状態について整理した。

住民への聞き取り調査や報道からは2024年7月の乾期はドゥマイ市東側やブンカリス県周辺(STS 02～07)の火災情報は得られなかった。ただし、住民からの情報より、さらに西側のドゥマイ市中心部 STS-01 から約45m離れた場所では2024年7月20日頃に火災が発生した(図3[3])。STS-01は機器設置先の住民が転居のため未計測)。ブンカリス島東のSTS-06、07ではPM2.5の平均値が夜間・日中ともに5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度以下となった。ここは民家が点在し、近くに大きな道路や工場のない地域である。付近にオイルパーム園があり大型トラックも往来する道路のある STS 02～04 では夜間と日中のPM2.5の平均値が5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下から15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度であった。

プララワン県周辺では火災情報が少なくとも2件報道されている。1件はSTS-08から南に約33kmの地点である。2024年7月26日頃から20haの土地が延焼し¹³⁾ホットスポットでも確認された(図3[2])。もう1

件は STS-08 から南東に 25km ほど離れた地点で 0.7ha の土地が燃えた小規模火災である¹⁴⁾。ホットスポットは確認されていない。2024 年 7 月後半はリアウ州のやや南側で火災が多発し、ブンカリス県のすぐ南にあるシアック県でも 27ha が燃える火災が 2024 年 7 月 26 日以降に発生した¹²⁾。ホットスポットでも確認できている (図 3[1])。STS-08 において 2024 年 7 月 19~30 日の日中・夜間の PM2.5 の平均値は 10~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度を推移していた。プララワン県にある STS-9b でも同様の傾向が見られた (7 月 21 日以前は停電によりデータが欠損)。

ドゥマイ市東側の STS-02 とプララワン県の STS-08 において、2024 年 7 月 15~31 日の蒸発散位を算出したところ、STS-02 は最大 6mm/day 程度となり、STS-08 は最大で 5.5mm/day 程度となった。両者ともアルベドは草地レベルの 0.2 とした。STS-02 のほうが蒸発散位は若干高い。しかしアルベド値や日射時間によっても蒸発散位は変動するため、結果は参考程度とする。地上観測値はすべて PM baru 計を用いており、気温は STS-02 が日平均で最大 32.1 $^{\circ}\text{C}$ 、STS-08 は 34.5 $^{\circ}\text{C}$ となった。湿度の日平均は STS-02 が 80% 程度、STS-08 が 60-70% 程度となった。STS-08 のほうが、空気が暑く乾燥していることがわかる。地表面付近の土壌はドゥマイ市東側よりもプララワン県周辺のほうが乾燥していた可能性がある。MERRA2 で得られた日平均風速は海岸付近の STS-02 で 2m/s 程度、内陸部の STS-08 で 0.5m/s 以下であった。雨についてはプララワン県にある STS-9b の雨量計によると、7 月 31 日に 64.5mm が観測されたが他の日はすべて無降水であった。ブンカリス県周辺では気象レーダーの範囲内である STS-04 で 2024 年 7 月 18 日、30 日にそれぞれ 1.2mm と 0.2mm が観測されたが、それ以外はすべて無降水であった。両者の地域ともに 7 月後半は火災リスク指標⁵⁾ で用いられる 5mm/day 以下の少雨が長期間続いていたことがわかる。

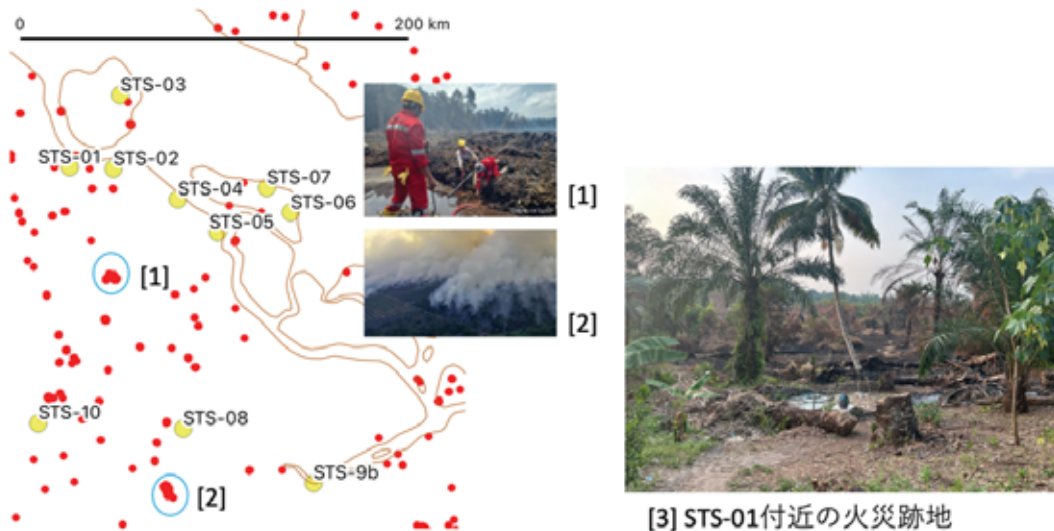


図 3 2024 年 7 月 1 日~7 月 31 日におけるホットスポット。[1]、[2]はホットスポットが検出され、かつシアック県¹²⁾とプララワン県¹³⁾でそれぞれ記事になった火災現場。[3]の画像は STS-01 付近における火災から約 1 週間後の火災跡地。[3]の火災は、ホットスポットは検出されず報道記事もみられなかった。近隣住民によると企業の土地でありゴミを燃やした後に燃え広がったとされている

(3) 雨量情報と大気汚染との関係 - 火災防災に向けて

2024 年 3 月 21 日~4 月 1 日の火災事例¹⁰⁾ を取り上げる (ホットスポットは図 2 上段)。図 4 は STS-04 において気象レーダーで得られた雨量と PM2.5 の濃度のグラフを示す。火災の情報があった期間中は、夜間の PM2.5 が 5~25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度であった (同年 1~2 月の普段の PM2.5 は 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下が多く、高くても 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度である)。2024 年 4 月 9 日は断食明け大祭日の周辺であり、1 時間だけ最大値 158 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と大きくなっていた。調理による影響が考えられる。

図 4 の結果から地元防災局が消火活動を行った 1 週間ほど前の 2024 年 3 月 13 日から、すでに夜間の PM2.5 が 10~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度かつ 5mm/day 以下の少雨が 3~4 日間ほど見られた (その後 2~3 日間は気象レーダーが停止中)。大気汚染物質や火災リスク指標⁵⁾ で用いられる約 5mm/day 以下の雨のしきい値によって泥炭地火災をより早く検知できる可能性がみえつつある。しかし、火災場所の特定までは難しい。STS-04 は火災場所から約 2km と近い場所に位置している。火災場所からさらに離れた STS-02 では夜間の PM2.5 が概ね 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下となっていた。火災規模や風向きにもよるが、5~15ha 程度の火災を早い段階で検知するには火災場所から 2km 程度近くには大気汚染計測機器を設置しておくことが望ましい。

今回は大気汚染計測機器をリアウ州の 10 地点に設置したが、火災を早期に検知するには、より密に大気汚染をモニタリングする必要がある。現在、スマートフォンアプリ (以下、アプリ) で現地の天気や煙霧・火

災の様子を住民が撮影しアップロードして、ユーザーが相互に情報共有できる取り組みを進めている(図5)。2024年11月からは大気汚染計測機器を設置している10軒の民家を中心に現地の天候情報を毎日報告をお願いしている。今後、ユーザーの住民を対象にアンケート調査を行い、当該アプリのフィードバックを行う。大気汚染計測機器とあわせて人の目による監視も行いながら、泥炭地火災の早期発見に向けた効果的な大気汚染の監視ネットワークを検討していく。

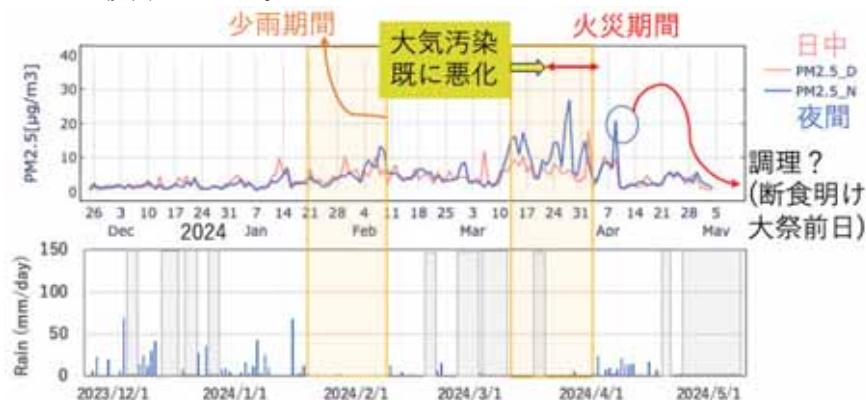


図4 STS-04におけるPM2.5濃度と日雨量。上：赤線と青線はそれぞれ日中(8~20時)と夜間(21~7時)のPM2.5濃度の日平均値。下：気象レーダーで得られた日雨量の棒グラフ。オレンジ箇所は雨量5mm/day以下が比較的長く続いた期間。灰色箇所は気象レーダーが熱さや停電などで停止中の期間



図5 左・右上：気象・泥炭火災・大気汚染監視アプリ「SIMOCAKAP」の画面。右下：アプリのレクチャーを受ける住民

4. まとめ

インドネシア・スマトラ島東部リアウ州10地点の民家とその周辺地域にて大気・水文気象観測を行った。高時空間分解能な気象レーダーを用いて乾期における雨の降りにくい地域と火災事例との関係について議論した。2023年と2024年の3月頃の乾期において風向き別の雨の降りにくい場所は年によって変わり、それによって火災場所も特徴づけられることがわかった。2024年7月の乾期において、火災報道がみられた周辺地域とそうでない地域で大気・水文気象状況を比較した。火災報道がみられた周辺地域のほうが算出した蒸発散位は若干低いものの、空気はより暑く乾燥していたことがわかった。雨量情報と泥炭地火災による大気汚染との関連を分析した。2024年3月頃の火災においては、大気汚染物質や雨の値によって泥炭地火災を地元消防局に報告されたタイミングよりも早く検知できる可能性があることがわかった。今後、大気汚染計測機器とあわせて、スマートフォンアプリを活用した監視も行いながら、泥炭地火災の早期発見に向けた効果的な大気汚染の監視ネットワークを検討していく。

参考文献

- 1) Kuwata, M. et al., 2018: Constraining the Emission of Particulate Matter From Indonesian Peatland Burning Using Continuous Observation Data, *J. Geophys. Res., Atmospheres*, 123, 17, 9828-9842.
- 2) Yamanaka, M. D. et al., 2018: Maritime continent coastlines controlling Earth's climate, *Prog. Earth Planet Sci.*, 5(21), 1-28. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0174-9>
- 3) Ogawa, M. et al., 2023: Study on diurnal variation of rainfall observed by X-band polarimetric radar in peatlands over Bengkalis

- Island, eastern Sumatra, Indonesia, Proceedings of the INCREASE, Springer Proceedings in Physics, 290, 33-44, Springer, Singapore.
- 4) Ripai, A. et al, 2024: On the Atmospheric Solitary Waves Propagation Over Bengkalis Island, Proceedings of the INCREASE, Springer Proceedings in Physics, 305, 475–484, Springer, Singapore.
 - 5) Taufik M. et al., 2022: An improved drought-fire assessment for managing fire risks in tropical peatlands. Agricultural and Forest Meteorology, 312, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108738>
 - 6) 小川まり子ら, 2024: インドネシア熱帯泥炭地の火災防災に向けた大気観測研究, 京都大学持続可能社会創造ユニット 令和5年度 研究成果報告書, 35-38.
 - 7) Cholianawati, N. et al. 2024: Diurnal and Daily Variations of PM2.5 and its Multiple-Wavelet Coherence with Meteorological Variables in Indonesia. Aerosol Air Qual. Res. 24, 230158. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230158>
 - 8) Penman, H. L. 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc., London, A, 193, pp.120-145
 - 9) FIRMS, <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (2025年1月10日閲覧)
 - 10) BPBD, <https://bpbd.bengkaliskab.go.id/index.php/web/link/data-bencana> (2025年1月10日閲覧)
 - 11) ANTARA, <https://www.antaraneews.com/berita/3448431/tim-gabungan-padamkan-api-akibat-karhutla-di-bengkalis> (2025年1月10日閲覧)
 - 12) RIAU AKTUAL, <https://m.riauaktual.com/news/detail/96564/kebakaran-hutan-dan-lahan-landa-suaka-margasatwa-giam-siak-kecil> (2025年1月10日閲覧)
 - 13) METRO TV, <https://www.metrotvnews.com/read/kqYCxRQ2-kebakaran-lahan-di-riau-meluas-dengan-puluhan-titik-api> (2025年1月10日閲覧)
 - 14) TRIBUNNEWS.com, <https://www.tribunnews.com/regional/2024/07/29/lahan-07-hektar-di-pelalawan-riau-terbakar-puluhan-personel-dari-lintas-sektor-diterjunkan> (2025年1月10日閲覧)

ヒトから霊長類への感染の特定：
B型肝炎ウイルスの起源の解明に向けて
Unraveling the origin of hepatitis B virus from human-primates transmission

オフィンニ ユディル¹, ラトナンガナ リマ²,
ラハルジョ クリスノアディ², 山田 千佳¹, 藤澤 道子²,
坂本 龍太¹, 山崎 渉¹

Youdiil OPHINNI¹, Rima RATNANGGANA², Krisnadi RAHARDJO²,
Chika YAMADA¹, Michiko FUJISAWA³, Ryota SAKAMOTO¹,
Wataru YAMAZAKI¹

¹京都大学東南アジア地域研究研究所

Center for Southeast Asian Studies (CSEAS), Kyoto University

²アイルランガ大学熱帯病研究所

Institute of Tropical Disease, Airlangga University

³京都大学野生動物研究センター

Wildlife Research Center (WRC), Kyoto University

Hepatitis B virus (HBV) is a serious health issue for humans and has also been found in non-human primates (NHPs). However, it is not clear how often HBV jumps between species or the risk it poses to humans. In this study, we tested 237 NHPs from 10 species and 65 of their human caretakers across four Indonesian islands for HBV infection. For the first time, we found HBV in East Javan langurs (*Trachypithecus auratus*), with 2 out of 46 langurs testing positive. HBV was also commonly found in gibbons (17/68), less so in orangutans (6/50), and humans (5/65), and absent in macaques (0/73). Genetic analysis showed that the HBV found in langurs is closely related to HBV in gibbons, suggesting recent transmission between these species. The fact that langurs and gibbons are distantly related genetically but still share a similar virus hints that HBV might be able to infect a wider range of hosts than previously thought. These results highlight the risk of HBV spreading between species, including to humans, and the need for strategies that protect both humans and primates, especially in areas where they interact closely, such as in Indonesia.

Key Words : *Hepatitis B virus, non-human primates, langur, cross-species viral spillover, One Health, Indonesia*

1. Introduction

While global vaccination efforts have reduced its burden, hepatitis B virus (HBV) remains a major global health concern in humans, causing severe liver disease and cancer with high mortality rates. HBV belongs to the *Hepadnaviridae* family and has a unique, circular DNA genome that evolves rapidly, giving rise to 10 genotypes (A-J) and over 40 sub-genotypes (1). These genotypes differ in their geographic distribution, disease progression, and clinical outcomes.

HBV is not limited to humans; infection has been documented in a variety of non-human primates (NHPs), including chimpanzees, gibbons, orangutans, baboons, macaques, and even New World monkeys in the Amazon. Among hepadnaviruses, primate HBV is considered the youngest lineage in the family tree. HBV-related viruses are also found in bats, rodents, and birds, in a more diverse phylogeny. The *Hepadnaviridae* family is estimated to have been infecting vertebrates for over 200 million years, and evidence of ancient HBV in humans dates back 4,500 years (2). In addition to its long evolutionary history, HBV appears capable of crossing species barriers. For example, crane HBV can infect duck hepatocytes, while human HBV can infect chimpanzees, tree shrews, baboons, and Barbary macaques. Cross-species genetic mixing of HBV has also been reported, such as between chimpanzees and humans in East Africa.

Indonesia, known for its rich primate biodiversity and close human-primate interactions, is considered an

HBV-endemic region. Hepatitis B surface antigen (HBsAg) prevalence in the general population ranges from 2.1% to 10.5%, with carrier rates between 5% and 20% (3). Since 1997, the country has implemented universal infant vaccination programs to control HBV infections. However, the cultural and ecological proximity between humans and NHPs in Indonesia raises concerns about cross-species HBV transmission. For instance, human HBV genotype J, discovered in a Japanese individual who lived in Kalimantan during World War II, is the closest human strain to those found in NHPs (4).

In this study, we screened HBV infection in 10 NHP species and their human caretakers across four major Indonesian islands, aiming to uncover evidence of cross-species HBV spillover and assess its potential risks.

2. Methods

Samples were collected from NHPs and their human caretakers at three distinct facility types: zoos, ex-situ conservation centers, and in-situ conservation areas within national parks. The locations spanned the Indonesian islands of Java, Bali, Sumatra, and Kalimantan. The NHP species sampled in this study included langurs, gibbons, orangutans, and macaques. Langurs were housed in ex-situ conservation centers dedicated to langurs, residing in enclosures without the presence of other species. Gibbons were kept in enclosures accommodating either pairs or family groups, although some centers were not exclusively for gibbons. Orangutans lived separately in individual enclosures. Macaques were sampled from both zoos and ex-situ conservation areas within national parks. Samples were also collected from human caretakers in conservation centers.

Blood samples of 3-5 mL were drawn from each subject and stored at 4 °C for at most 72 hours before being transported to the laboratory. Sera were separated and stored at -80 °C until analysis. DNA was extracted from 200 µL of serum. Sample DNA was subjected to nested PCR method using primers reported previously (5). All HBV DNA was quantified using quantitative PCR (qPCR) (6). Amplicons were sequenced and complete genomes were assembled from PCR fragments and curated manually. Phylogenetic trees were constructed using the neighbor-joining Tamura-Nei method, with bootstrap resampling performed 1,000 times.

Ethical approval for this study was obtained from the Health Research Ethical Clearance Commission of the Faculty of Dental Medicine Airlangga University.

3. Results

We collected a total of 237 blood serum samples from non-human primates (NHPs) and 65 from their human caretakers. The samples were tested for HBV infection using a nested PCR, which targets specific regions of the HBV genome. HBV DNA was detected in langurs (2 of 46 samples), gibbons (17 of 68), orangutans (6 of 50), and humans (5 of 65), but no infections were found in macaques (0 of 73). Additionally, follow-up samples were collected from a small number of individuals (five langurs, one gibbon, and one orangutan) 1–6 months after the initial tests. One langur, which initially tested positive for HBV, later tested negative, suggesting the infection was temporary and resolved on its own. None of the animals showed clinical symptoms, and none of the human participants reported signs of liver disease, such as nausea or jaundice.

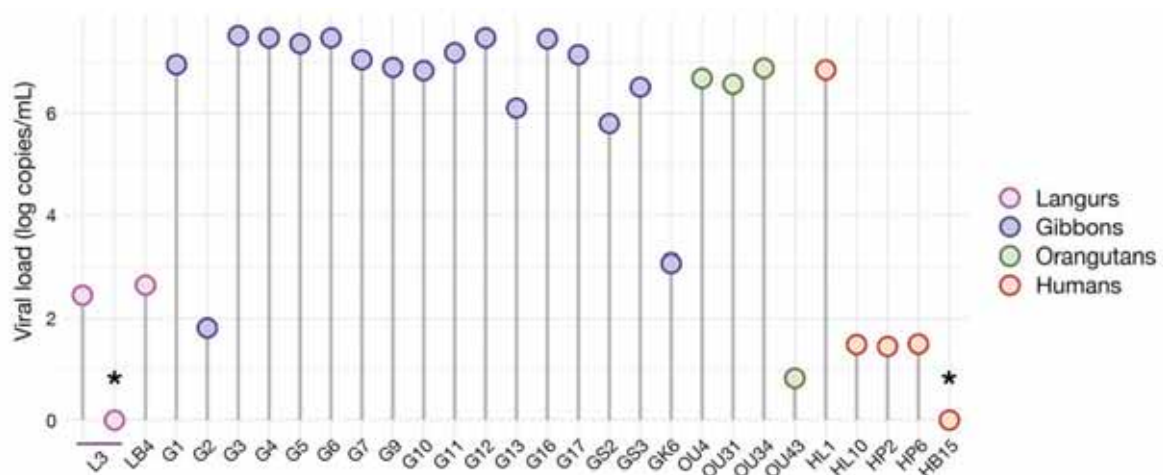


Figure 1: HBV viral load (log copies/mL) in all samples that tested positive by nested PCR, grouped by species. An asterisk (*) indicates an undetermined viral load. The second L3 sample, collected approximately six months after the first, also tested negative for HBV by nested PCR.

When we measured the viral load, langurs had relatively low levels (mean \pm SD: 2.55 ± 0.14 log copies/mL) (Figure 1). In contrast, gibbons and orangutans exhibited much higher viral loads (6.49 ± 1.62 and 5.25 ± 2.95 log copies/mL, respectively). Human samples generally showed low viral levels (2.82 ± 2.69 log copies/mL), except for one individual with a very high viral load (6.8 log copies/mL) and another with undetectable levels, which could indicate occult infection.

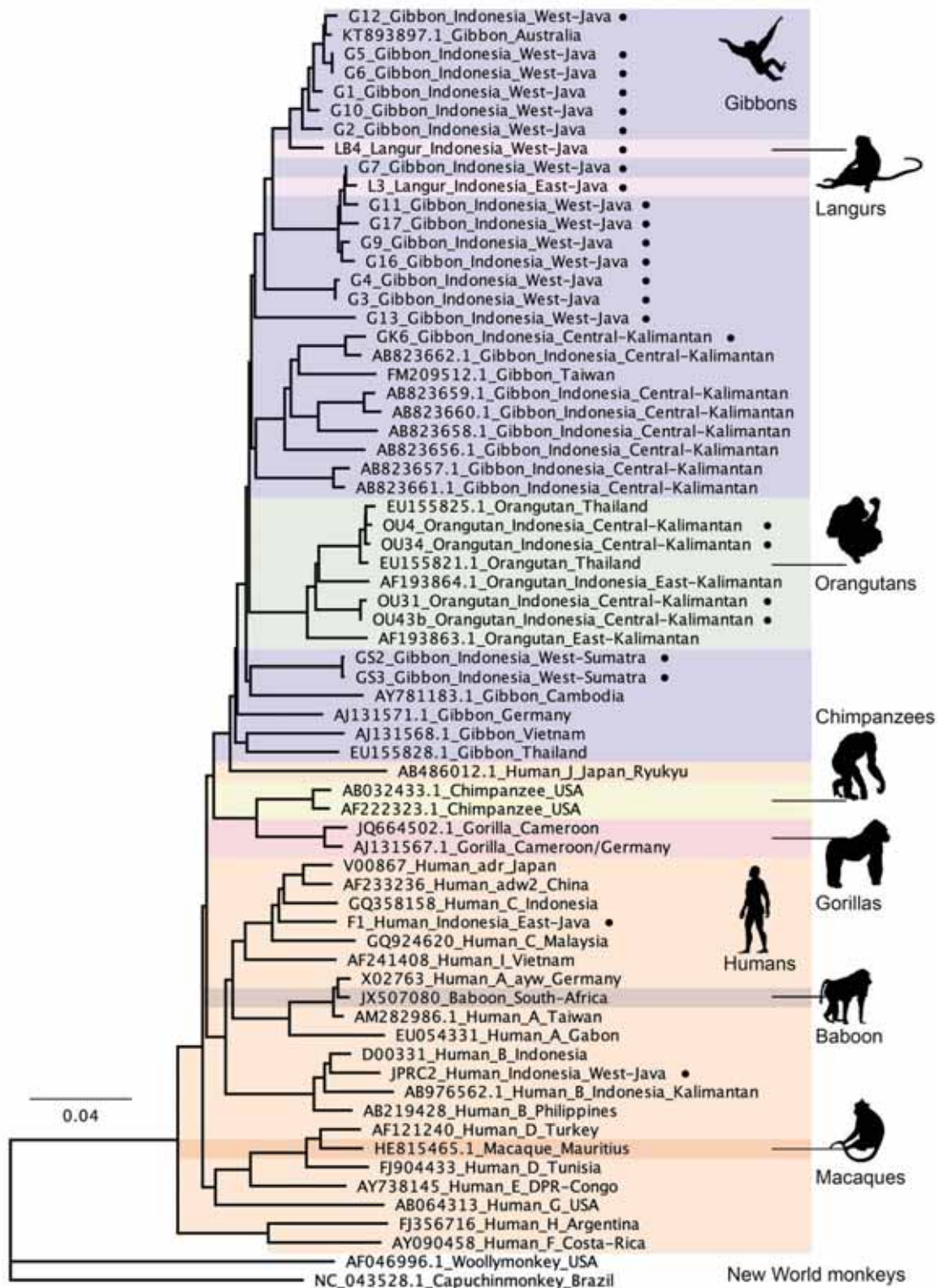


Figure 2: Phylogenetic tree of full-length HBV genome sequences from NHPs and humans in this study, alongside representative sequences from GenBank. These include all known NHP species naturally infected with HBV and all human HBV subgenotypes. Horizontal lines and the scale bar represent the number of nucleotide substitutions per site. The tree is organized by decreasing branch order, with background colors indicating the host species. Samples from this study are marked with black circles, while GenBank sequences are labeled with their accession number, host species, and country of origin.

We amplified the full HBV genome from all langur and gibbon samples, four of six orangutan samples, and two of five human samples. This is the first time the complete HBV genome has been sequenced for langurs. Interestingly, the langur HBV sequences were closely related to gibbon HBV, indicating a recent transmission event between these species (**Figure 2**). The genetic tree we constructed for Javan gibbon HBV revealed two major clusters, with each cluster including one of the langur HBV sequences. Javan gibbon HBV formed a distinct group separate from Kalimantan gibbon HBV and was similar to a sequence from a gibbon sampled at Perth Zoo, whose parents were captured in the wild in Java in 1959 (34).

Kalimantan gibbon HBV, on the other hand, was positioned between Javan gibbon and orangutan HBV. We also report the first HBV sequences from Sumatran gibbons, which were distinct from Javan gibbon HBV and instead grouped with strains from wild and captive gibbons in mainland Southeast Asia. Orangutan HBV sequences from our study clustered with previously identified HBV from Bornean orangutans in East Kalimantan. Lastly, the two human HBV isolates were identified as genotypes B and C, the most common genotypes found in Indonesia.

4. Conclusions

Our discovery of HBV infection in langurs marks the third documented case of HBV in an Old World monkey species in the wild, following reports in macaques and baboons. Old World monkeys are generally resistant to HBV infections, making such cases exceptionally rare. In contrast, gibbons consistently exhibit high HBV prevalence, as confirmed in this and previous findings (7). Their high viral loads suggest a heightened susceptibility to HBV replication. In captive environments, the clustering of infected gibbons can amplify outbreaks; for instance, one primate center in our study reported an HBV prevalence of 82.3% among sampled gibbons. Although it remains unclear whether HBV transmission occurred from gibbons to langurs or vice versa, the higher prevalence and viral load observed in gibbons suggests them as the more probable source.

Although our study did not detect HBV transmission between humans and non-human primates (NHPs), zoonotic risks remain significant, particularly in regions like Indonesia, where human-primate interactions are frequent. Laboratory studies have shown that HBV strains from gibbons and orangutans can infect human liver cells (8), emphasizing this potential risk. Reverse zoonosis is also a concern, as evidenced by human HBV genotype A2 infecting a South African baboon (9) and genotype D infecting a Mauritian macaque (10). Routine surveillance is critical, especially for primates rescued from human settlements or kept as pets, as well as their caretakers in zoos and rehabilitation centers. Despite conservation efforts, illegal wildlife trade continues, with surveys in 2014 revealing the sale of langurs and gibbons in major cities in Java (11). A smuggling attempt involving East Javan langurs was intercepted as recently as November 2024 (12). Strengthening enforcement and expanding surveillance are essential to mitigating these risks.

Our findings emphasize the need for cross-species HBV risk mitigation using a One Health approach. Recommendations include HBV vaccination for individuals living or working closely with NHPs and for animals in captivity or rehabilitation, particularly gibbons, to reduce the likelihood of viral spillover.

References

1. Kurbanov F, Tanaka Y, Mizokami M. Geographical and genetic diversity of the human hepatitis B virus. *Hepatol Res Off J Jpn Soc Hepatol.* 2010 Jan;40(1):14–30.
2. Rasche A, Sander AL, Corman VM, Drexler JF. Evolutionary biology of human hepatitis viruses. *J Hepatol.* 2019 Mar;70(3):501–20.
3. Creati M, Saleh A, Ruff TA, Stewart T, Otto B, Sutanto A, et al. Implementing the birth dose of hepatitis B vaccine in rural Indonesia. *Vaccine.* 2007 Aug 10;25(32):5985–93.
4. Tatematsu K, Tanaka Y, Kurbanov F, Sugauchi F, Mano S, Maeshiro T, et al. A genetic variant of hepatitis B

virus divergent from known human and ape genotypes isolated from a Japanese patient and provisionally assigned to new genotype J. *J Virol.* 2009 Oct;83(20).

5. Sugauchi F, Mizokami M, Orito E, Ohno T, Kato H, Suzuki S, et al. A novel variant genotype C of hepatitis B virus identified in isolates from Australian Aborigines: complete genome sequence and phylogenetic relatedness. *J Gen Virol.* 2001;82(4):883–92. 31.
6. Sun S, Meng S, Zhang R, Zhang K, Wang L, Li J. Development of a new duplex real-time polymerase chain reaction assay for hepatitis B viral DNA detection. *Virology.* 2011 May 14;8:227.
7. Utsumi T, Wahyuni RM, Lusida MI, Yano Y, Priambada NP, Amin M, et al. Full genome characterization and phylogenetic analysis of hepatitis B virus in gibbons and a caretaker in Central Kalimantan, Indonesia. *Arch Virol.* 2015 Mar 1;160(3):685–92.
8. Sa-Nguanmoo P, Tanaka Y, Ratanakorn P, Sugiyama M, Murakami S, Payungporn S, et al. Cross-species transmission of gibbon and orangutan hepatitis B virus to uPA/SCID mice with human hepatocytes. *Virus Res.* 2011 Jun;158(1–2):209–15.
9. Dickens C, Kew MC, Purcell RH, Kramvis A. Occult hepatitis B virus infection in chacma baboons, South Africa. *Emerg Infect Dis.* 2013 Apr;19(4):598–605.
10. Dupinay T, Gheit T, Roques P, Cova L, Chevallier-Queyron P, Tasahsu S i, et al. Discovery of naturally occurring transmissible chronic hepatitis B virus infection among *Macaca fascicularis* from mauritius island. *Hepatology.* 2013 Nov 1;58(5):1610–20.
11. Nijman V, Spaan D, Rode-Margono EJ, Wirdateti, Nekaris K a. I. Changes in the primate trade in Indonesian wildlife markets over a 25-year period: Fewer apes and langurs, more macaques, and slow lorises. *Am J Primatol.* 2017;79(11):e22517.
12. Ayu C. Indonesian customs arrest Indian national who smuggled langurs, parrots as family gifts. *Tempo* [Internet]. 2024 Nov 6 [cited 2025 Jan 11]; Available from: <https://en.tempo.co/read/1937728/indonesian-customs-arrest-indian-national-who-smuggled-langurs-parrots-as-family-gifts>

持続可能社会実現のための教育ビッグデータ収集・分析基盤システムの開発

Development of a platform for collecting and analyzing educational big data to realize a sustainable society

緒方 広明¹, 許 嘉瑜¹, 堀越 泉¹

Hiroaki OGATA 1, Chia-Yu HSU 1 and Izumi HORIKOSHI 1

¹京都大学 学術情報メディアセンター
Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

Education plays a crucial role in realizing a sustainable society. This study aims to achieve this goal through “Sustainable Development of Education (SDE)” and “Education for Sustainable Development (ESD).” Specifically, for SDE, improvements in education are carried out by utilizing an educational data collection and analysis system. For ESD, data-driven SDGs education is implemented. In particular, advancements in AI technologies, such as generative AI, are expected to provide interactive support for both SDE and ESD.

Key Words : Education for Sustainable Development, Educational Big Data, Learning Analytics

1. はじめに

持続可能な社会の実現において、教育は重要な鍵となります。持続可能な社会の実現には、教育は非常に大事となる。本研究では、そのために「教育の持続可能な発展(SDE: Sustainable Development of Education)」と「持続可能な開発のための教育(ESD: Education for Sustainable Development)」を通して持続可能な社会を実現する。具体的には、「教育の持続可能な発展」のためには、教育データの収集・分析基盤システムを用いて教育改善を行い、「持続可能な開発のための教育」のためには、データ駆動型のSDGs教育を実現する。特に、生成AIなどのAI技術の進展により、SDEとESDの双方においてインタラクティブな支援が期待できる。

本研究が対象とする教育は、2015年に国連で採択された、2030年までの持続可能な開発目標(SDGs)の全17目標の実現の鍵としても捉えられている。このSDGsの達成のため、これまでフィールドワークやワークショップなど、数多くの取り組みがなされてきたが、各取り組みは単発で経験が積み上がらず、教科学習との接続性や文化間の比較などは不十分という課題があった。

そこで、本研究では、GIGAスクール構想やコロナ禍の影響で一人一台の情報端末によって蓄積される教育データを用いて教育の質の向上に貢献する点で独創的である。さらに、持続可能な開発のための教育(ESD)では、教育データを用いて教育の改善を継続して行える枠組みを研究する。



図1. 本研究で取り組む研究課題

2. ESDシンポジウムの開催

以上の課題を克服するためには、データを活用して学習履歴を記録し分析することや、教育プロセス全体を可視化することが不可欠である。その際、国際的な視点を取り入れ、多様な文化や教育システムとの交流を通じて知見を深めることが重要である。このたび、ESDをテーマとしたシンポジウムを開催した。本シンポジウムでは、教育データの利活用に関する最前線の研究に焦点を当て、基盤システムを活用して教育の質を向上させる取り組みや、データ駆動型教育の実現について議論を深めた。招待した専門家との活発な議論を通じ、「教育の持続可能な発展」および「持続可能な社会構築」に向けた具体的な道筋を探った。

今回のシンポジウムでは、台湾の研究者から示された事例がその一例として挙げられる。具体的には、シンポジウムは2025年1月11日に京都大学学術情報メディアセンターにて開催され、大規模データ教育の発展に長年取り組んできた経験を共有し、日本と台湾の教育分野における相互交流と学びの深化の重要性を強調した。さらに、一つの研究は、学習分析（LA）技術が学習履歴を記録する「ポートフォリオ」の分野で大きな可能性を持つことを示している。ポートフォリオ作成は学習者の自己調整学習（SRL）戦略を反映し、これが学校教育だけでなく生涯学習にも寄与する重要なプロセスであることが明らかになっている。これにより、単発的な取り組みを超えて学びの蓄積を可能にするとともに、文化間の比較や教科学習との接続性を高める基盤を構築できる。また、教育におけるビッグデータ分析の分野では、「ユビキタス学習」や「マルチモーダルデータ分析」に関する研究が進展しており、これらは自己主導型学習（SDL）や学習と身体活動データの活用にも応用可能である。これらの成果は、国際的な協力を通じて共有されることで、持続可能な教育と社会構築に向けた新たな道筋を切り開く力となる。

このように、本シンポジウムは、教育データ活用における最前線の取り組みを学ぶだけでなく、国際的な交流を通じて知識と経験を共有し、教育の持続可能な発展に向けた連携を深化させる重要な機会となった。

3. 教育ビッグデータ収集・分析基盤システムの開発

ESD実現のためには、学びをデータに基づいて改善する仕組みが必要不可欠である。その一環として、本研究では「持続可能社会実現のための教育ビッグデータ収集・分析基盤システム」の開発を進めている。このシステムは、教育データを効率的かつ包括的に収集・分析することで、教育現場の持続可能な改善を支援するための基盤を提供するものである。

具体的に、教育データ収集・分析情報基盤システムである LEAF システム¹⁾を用いて、ESD の目標達成をサポートしている。LEAF は、デジタル教材配信システム BookRoll と、データ分析ダッシュボードであるログパレからなる。BookRoll はデジタル教科書や問題集を PDF 形式で配信し、学習者のページ遷移やマーカー使用、メモ記録などのログデータを蓄積する。これらのデータを基に、ログパレではページ閲覧履歴を可視化する機能を提供し、さらに AI 技術を用いて学習者間のグループ編成や問題推薦を行うことで、個々の学習効果を最大化する仕組みを備えている。

こうした基盤システムは、「データに基づく学習習慣の育成」²⁾を目指す具体的な取り組みの基盤となっている。この取り組みでは、学習者が最適な学習計画を立て、継続的なフィードバックを受けながら学習行動を習慣化できる仕組みを提案した。この仕組みにより、学習者は学びへの意欲を高めるだけでなく、よりバランスの取れた生活を送り、単なる知識や理解の習得を超え、自分ごととして問題に取り組む実践力を育む教育の実現が期待される。

4. まとめ

本研究では以下の2つの視点を通じてSDGsにおける「質の高い教育」への貢献を目指して、教育データ収集分析情報基盤システム LEAF を用いて学習習慣の獲得支援システムを構築した。これは（1）学校で行われているSDGs活動の記録と改善を通じて、ESDを推進し、持続可能な社会を実現する。（2）教育データを活用して教育の質を向上させ、「教育の持続可能な発展（SDE）」を実現する。これらの取り組みにより、教育に「持続可能な社会の構築」という観点を取り入れることで、児童・生徒の価値観にポジティブな変容を促すことが可能となる。このような価値観の醸成は、持続可能な社会を支える基盤づくりに直結し、データ駆動型教育を通じた持続可能な社会構築に寄与するものである。

参考文献

- 1) Ogata, H., Yin, C., Oi, M., Okubo, F., Shimada, A., Kojima, K., & Yamada, M. (2015, January). E-Book-based learning analytics in university education. In International conference on computer in education (ICCE 2015) (pp. 401–406).
- 2) Hsu, C. Y., Horikoshi, I., Li, H., Majumdar, R., & Ogata, H. (2025). Designing data-informed support for building learning habits in the Japanese K12 context. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 20, 014.

持続可能社会創造ユニット 令和6年度 研究成果報告書 (2025年3月発行)

Research Report FY2024 / Research Unit for Realization of Sustainable Society (issued in March 2025)

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学 持続可能社会創造ユニット

Research Unit for Realization of Sustainable Society, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, JAPAN

TEL: +81-774-38-4936 <https://rurss.iae.kyoto-u.ac.jp/>

持続可能社会創造ユニット広報委員会 / 中村 正治, 野平 俊之

Public Relations Committee of RURSS / M. Nakamura, T. Nohira