

第36回日本情報地球学会講演会

講演要旨集

GEOINFORUM-2025 Annual Meeting Abstracts

日 時：2025年6月26日(木)・27日(金)

会 場：大阪公立大学 サイエンスホール（大阪）

主 催：日本情報地球学会

後 援：日本地質学会 情報地質専門部会

目 次

特別講演

A coupled hydrologic modeling framework for drought evaluation in New Mexico	Huidae Cho・Abdullah Azzam	1
情報地球科学・工学：これまでの道のりとこれからのトレンド		
	村田 健史・深沢 圭一郎・野々垣 進・木戸 ゆかり	3

一般講演

GIS・Web-GIS

5 万分の 1 地質図幅ベクトルデータ整備の現状	川畑 大作・宮崎 純一・齋藤 英二・内藤 一樹	5
シームレス標高タイルと標高ダウンローダー	西岡 芳晴	7
三次元地形情報公開サイト「日本の地形千景」について	中田 文雄	9
龍ノ口山の地形・地質と植生の関係	福島 史大・能美 洋介	11
オープンソースとオープンデータを利用した路線斜面災害リスクの判読事例	木下 三郎	13
動的視点での点群データのステレオペア表示とその裸眼閲覧技法の習得	領木 邦浩	15

リモートセンシング

マルチスペクトルカメラを用いたナラ枯れ被害抽出		
	米澤 剛・武田 智喜・吉田 大介・山中 遂統・藤井 太基・吉峯 主税・伊達 直己	17
植生リモートセンシングを用いたカルデラ地形における地熱構造の推定		
	宮崎 翔・福田 直也・久保 大樹・小池 克明	19
空間情報を考慮した非線形スペクトル分離法の地質リモートセンシング画像への応用と精度検証		
	岸本 将英・久保 大樹・小池 克明	21

数理・論理

露頭断面中の試料に含まれる微化石から定めた種の区間帯と生層序単元の離散表現		
	山口 久美子・塩野 清治	23
地形断面における斜面崩壊地の滑落崖と移動体の数学表現		
	植田 允教・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン	25

データベース

地層対比に向けたボーリング交換用データの現状分析と活用手法	櫻井 健一・米澤 剛・根本 達也	27
地層処分事業のサイト調査におけるデータマネジメントシステム		
	西尾 光・尾上 博則・大城 遥一・石橋 梢	29

画像処理

360 度動画によるリアリティキャプチャ技術を用いた施設点検の事例		
	鏡原 聖史・立川 浩祥・塩谷 智基・麻植 久史・久保 大樹・福地 良彦	31
自由視点画像生成技術 (NeRF) を用いた現地復元と解析について		
	片平 大暉・立川 浩祥・天羽 啓太・星野 諒	33

物理探査・装置開発

Illuminating 3-D rheology of weak volcanic arc of NE Japan from postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake	Sambuddha Dhar・Youichiro Takada・Jun Muto	35
---	--	----

解析手法・応用

Assessing slope failure susceptibility in volcanic ash terrain of southeastern Hokkaido	
..... Zichito Jomane • Daisuke Miura • Tatsuya Nemoto • Venkatesh Raghavan	37
Multi-criteria evaluation of groundwater potential zones in Abuja (FCT) using Analytical Hierarchy Process: A pathway to sustainable water management	
..... Danlami Ibrahim • Tatsuya Nemoto • Venkatesh Raghavan	39
Evaluating shoreline prediction models with pre- and post-2024 Noto Peninsula earthquake satellite imagery	
..... Job Thomas • Tatsuya Nemoto • Venkatesh Raghavan	41
修正 Berggren 式を用いた凍結深さの解析—Kersten (1949) 式を (1948) 式と間違えたことによる結果—	
..... 高見 雅三	43
軽石漂流シミュレーションに基づくハザード評価	
..... 桑谷 立 • 西川 遥	45
スタッキング法を使用した中国全域の熱流量分布予測	
..... 韋 潤乾 • 久保 大樹 • 小池 克明	47
日本の熱水鉱床形成に関連する花崗岩類の化学組成的特徴の抽出	
..... 谷口 卓也 • 江夏 道晴 • 小池 克明	49
反応性化学輸送シミュレーションによる熱水鉱床の形成プロセスの推定	
..... 須山 傑 • 江夏 道晴 • 富田 昇平 • 小池 克明	51
Uncovering vertical controls on tin mineralization through PCA and MAF analysis: Toward future applications in geometallurgy	
..... Raharisolonjanahary Rindraniaina Sylvie • Katsuaki Koike • Vitor Ribeiro de Sá Mohamad Nur Heriawan • Slamet Sugiharto • Nur Rochman Nabawi • Anton Murtono	53
空中写真判読と時間領域電磁探査に基づく活火山中腹の地質構造の推定：北海道知床硫黄山での例	
..... 山本 睦徳 • 後藤 忠徳 • 小池 克明	55
シャープな不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現可能な逆解析法の開発	
..... 石須 慶一 • 後藤 忠徳 • 深畑 幸俊 • 小池 克明 • Chatchai Vachiratienchai • Weerachai Siripunvaraporn	57
コンクリート表面波減衰トモグラフィにおけるスパース逆解析手法の提案	
..... 孫 文旭 • 麻植 久史 • 桑谷 立 • 塩谷 智基	59

ポスター発表

活火山熱水系における不均一系地球化学平衡に関する理論的ならびに観測的研究	
..... 穂山 拓実 • 大沢 信二	61
フラクタル次元を用いた令和 6 年能登半島地震に伴う地形変化の解析	
..... 高橋 陽希 • 根本 達也 • ベンカテッシュ ラガワン	63
Tensor Voting を用いた DEM に基づく地形特徴からのリニアメントの自動抽出	
..... 中村 公亮 • 根本 達也 • ベンカテッシュ ラガワン	65
都市洪水シミュレーションを用いた動的経路決定アルゴリズムの実装	
..... 酒井 勇希 • 根本 達也 • ベンカテッシュ ラガワン	67
ハイキング関数を用いたマルチエージェントシステムによる避難シミュレーション	
..... 平田 萌瑛 • 根本 達也 • ベンカテッシュ ラガワン	69
画像解析による砂岩中石英粒内亀裂の自動検出手法の開発	
..... 中川 愛珠 • 上原 真一	71
Sentinel-2 衛星データを用いた NDCI によるサンゴの健康状態の評価	
..... 服部 快成 • 根本 達也 • ベンカテッシュ ラガワン	73
海洋 STEAM 推進事業の立ち上げと日本情報地球学会への寄与〜デジタル教材を契機とした新たな学際的挑戦〜	
..... 木戸 ゆかり • 市原 盛雄	75
Web ベース 3 次元地質地盤モデルビューアの改良：地図・スケール・方位の表示機能の実装	
..... 野々垣 進 • 藪田 桜子	77
液状化リスク評価のための大阪平野における地下水の 3 次元分布把握に関する研究	
..... 堂脇 拓海 • 米澤 剛 • 杉本 賢二	79

自然災害がもたらす太陽光パネル廃棄物の発生予測と埋立地の埋立地容量への影響.....	
.....上田 一嘉・杉本 賢二・米澤 剛	81

CONTENTS

Special session

A coupled hydrologic modeling framework for drought evaluation in New Mexico	Huidae Cho and Abdullah Azzam	1
Geo-informatics: A road we have walked and will walk		
..... Ken T. Murata, Keiichiro Fukazawa, Susumu Nonogaki and Yukari Kido		3

General session

GIS•Web-GIS

Progress and current status of vectorization of 1:50,000 Geological Map		
..... Daisaku Kawabata, Junichi Miyazaki, Eiji Saito and Kazuki Naito		5
Seamless Elevation Tiles and Elevation Downloader	Yoshiharu Nishioka	7
About the 3D topographical information website "Japan's Topographical Landscapes"	Fumio Nakada	9
The relationship between geology, topography and vegetation of Mt. Tatsunokuti-yama		
..... Fumiharu Fukushima and Yousuke Noumi		11
A case study of interpreting potential disaster risks on road slopes using open source and open data	Saburo Kinoshita	13
Skill acquisition to display stereo pairs for point cloud data from dynamic viewpoints and to view them with the naked eyes		
..... Kunihiro Ryoki		15

Remote sensing

Extraction of oak wilt disease using multispectral camera		
..... Go Yonezawa, Tomoki Takeda, Daisuke Yoshida, Michito Yamanaka, Taiki Fujii, Chikara Yoshimine and Naoki Date		17
Estimation of geothermal structure using vegetation remote sensing in a caldera topography		
..... Kakeru Miyazaki, Naoya Hukuta, Taiki Kubo and Katsuaki Koike		19
Application and accuracy verification of a nonlinear spectral unmixing method for geologic remote sensing imagery by considering spatial information	Masahide Kishimoto, Taiki Kubo and Katsuaki Koike	21

Mathematics and logic

Discrete expression of species range zones and biostratigraphic units estimated by micro fossils content of samples in an outcrop section	Kumiko Yamaguchi and Kiyoji Shiono	23
Mathematical expression of scarp and main body of slope failure area in geometric section		
..... Mitsunori Ueda, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan		25

Database

Current analysis and utilization methods of borehole data exchange for stratigraphic correlation		
..... Kenichi Sakurai, Go Yonezawa and Tatsuya Nemoto		27
Data management system for site investigation in geological disposal projects		
..... Hikaru Nishio, Hironori Onoe, Yoichi Oshiro and Kozue Ishibashi		29

Image Processing

Case study of civil engineering structure inspection using reality capture technology with 360-degree video		
..... Satoshi Kagamihara, Hiroyoshi Tachikawa, Tomoki Shiotani, Hisafumi Asaue, Taiki Kubo and Yoshihiko Fukuchi		31
On-site reconstruction and analysis using free-viewpoint image generation technology based on Neural Radiance Fields (NeRF) ..		
..... Daiki Katahira, Hiroyoshi Tachikawa, Keita Amo and Ryo Hoshino		33

Geophysical survey and observation system

Illuminating 3-D rheology of weak volcanic arc of NE Japan from postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake	Sambuddha Dhar, Youichiro Takada and Jun Muto	35
---	---	----

Data analyses and applications

Assessing slope failure susceptibility in volcanic ash terrain of southeastern Hokkaido	Zichito Jomane, Daisuke Miura, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	37
Multi-criteria evaluation of groundwater potential zones in Abuja (FCT) using Analytical Hierarchy Process: A pathway to sustainable water management	Danlami Ibrahim, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	39
Evaluating shoreline prediction models with pre- and post-2024 Noto Peninsula earthquake satellite imagery	Job Thomas, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	41
Analysis of frost depth using modified Berggren formula - Result caused by mistaking Kersten (1949) for (1948) formula	Masazo Takami	43
Hazard assessment based on pumice drift simulation	Tatsu Kuwatani and Haruka Nishikawa	45
Modeling of terrestrial heat flow distribution throughout China using stacking method	Wei Runqian, Taiki Kubo and Katsuaki Koike	47
Extraction of chemical compositional features of granitoids related to formation of hydrothermal deposits in Japan	Takuya Taniguchi, Michiharu Enatsu and Katsuaki Koike	49
Estimation of formation process of hydrothermal deposits through reactive chemical transport simulation	Suguru Suyama, Michiharu Enatsu, Shohei Tomita and Katsuaki Koike	51
Uncovering vertical controls on tin mineralization through PCA and MAF analysis: Toward future applications in geometalurgy	Raharisolonjanahary Rindranaiaina Sylvie, Katsuaki Koike, Vitor Ribeiro de Sá, Mohamad Nur Heriawan, Slamet Sugiharto, Nur Rochman Nabawi and Anton Murtono	53
Inferred geological structures on the flanks of active volcanoes based on aerial photographs and time-domain electromagnetic surveys: A case study of Shiretokoiozan Volcano, Hokkaido, Japan	Mutsunori Yamamoto, Tada-nori Goto and Katsuaki Koike	55
Development of an inversion method for reproducing subsurface resistivity structures with sharp discontinuous boundaries	Keiichi Ishizu, Tada-nori Goto, Yukitoshi Fukahata, Katsuaki Koike, Chatchai Vachiratischenchai and Weerachai Siripunvaraporn	57
Sparse inversion approach for surface wave attenuation tomography in concrete	Wenxu Sun, Hisafumi Asaue, Tatsu Kuwatani and Tomoki Shiotani	59

Poster session

Theoretical and observational research on heterogeneous geochemical equilibria in the hydrothermal system of active volcanoes	Takumi Akiyama and Shinji Ohsawa	61
Fractal dimension analysis of topographic changes caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake	Haruki Takahashi, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	63
Automatic lineament extraction from DEM-derived terrain features using Tensor Voting	Kosuke Nakamura, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	65
Implementation of a dynamic routing algorithm using urban flood simulations	Yuki Sakai, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	67
Evacuation simulation using a multi-agent system with hiking functions	Moe Hirata, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	69
Development of an automated method for detecting intragranular cracks in quartz grains in sandstone using image analysis	Ayumi Nakagawa and Shin-ichi Uehara	71

Assessment of coral health by NDCI using Sentinel-2 satellite data	
..... Kaisei Hattori, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	73
The launch of the marine STEAM initiative and its contribution to the Geoinformatics - A novel interdisciplinary challenge initiated by digital teaching materials -	
..... Yukari Kido and Morio Ichihara	75
Enhancing a web-based 3D geological model viewer: Implementation of map, scale, and orientation	
..... Susumu Nonogaki and Sakurako Yabuta	77
3D distribution analysis of groundwater for liquefaction risk assessment in the Osaka Plain	
..... Takumi Dowaki, Go Yonezawa and Kenji Sugimoto	79
Prediction of solar panel waste generation caused by natural disasters and its impact on landfill capacity	
..... Kazuhiro Ueda, Kenji Sugimoto and Go Yonezawa	81

A Coupled Hydrologic Modeling Framework for Drought Evaluation in New Mexico

Huidae CHO and Abdullah AZZAM

Department of Civil Engineering, College of Engineering, New Mexico State University,
3035 S Espina St, Las Cruces, NM 88003-8001, United States E-mail: hcho@nmsu.edu

Key words: Surface-subsurface hydrologic coupling, Hydrologic modeling framework, Open source.

1. Introduction

New Mexico is the sixth fastest-warming state in the United States and faces increasing challenges in managing its water resources amid growing hydroclimatic variability, including more frequent and severe droughts (Union of Concerned Scientists 2016). In regions like the Rio Grande Basin, where snowmelt-driven surface flows and groundwater withdrawals serve as the primary sources of water for both municipal and agricultural needs, understanding the dynamic interactions between surface and subsurface hydrology is critical for sustainable water resources management and planning. Despite the critical need for integrated water resources modeling, there are, to our knowledge, no existing efforts in New Mexico that couple surface and subsurface hydrologic models. To address this need, we developed a coupled modeling framework that integrates the Variable Infiltration Capacity (VIC) model (Hamman, et al. 2018) with MODFLOW 6 (Langevin, et al. 2017). In this abstract, we highlight the methods used to implement this new coupled modeling framework, which is still under active development.

2. Coupling Methods

We used data from two existing models: (1) a Contiguous United States (CONUS)-scale VIC model (Yang, et al. 2019) and (2) a Lower Rio Grande groundwater model (Hanson, et al. 2018).

Yang, et al. (2019) developed the 1/8-degree VIC model and calibrated its parameters. They then downscaled the calibrated model into 1/16-degree for evaluation. However, this downscaled resolution is still insufficient for statewide analysis, so we further increased the spatial resolution to 1/32-degree (approximately 3.375 km) by subdividing each 1/16-degree grid cell into four smaller ones after clipping the original model to the state hydrologic boundary. Their calibrated parameters were spatially interpolated using GRASS (Neteler, et al. 2012). We used the Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM) and Mountain Microclimate Simulator (MTCLIM) to generate weather forcing data for the simulation period.

Hanson, et al. (2018) used the MODFLOW One-Water Hydrologic Flow Model (MF-OWHM) to develop the Rio Grande Transboundary Integrated Hydrologic Model (RGTIHM) for groundwater modeling of the transboundary region between the United States and

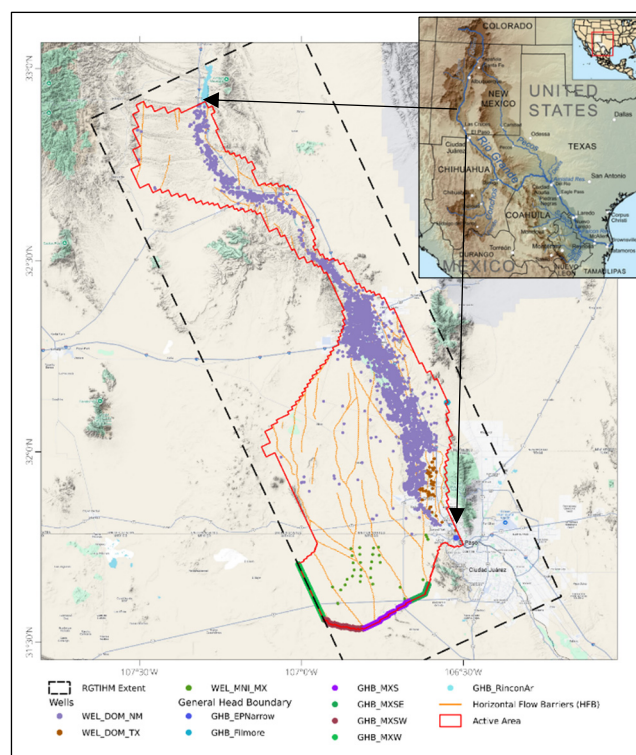


Figure 1. Modeling extent of the RGTIHM with general head boundary, wells, and horizontal flow barrier packages. The inset map is available at https://en.wikipedia.org/wiki/Rio_Grande under CC BY-SA 3.0.

Mexico near the Lower Rio Grande Basin. Figure 1 shows the spatial extent of the RGTIHM. The spatial resolution of this model is 201 m. We migrated the RGTIHM to the latest version of MODFLOW (MODFLOW 6), which provides two important capabilities compared to its previous versions: (1) parallel simulations and (2) the eXtended Model Interface (XMI). The scope of this project covers the entire state of New Mexico, making computational efficiency essential for effective coupling and parameter calibration. MODFLOW 6 supports distributed computing via the Message Passing Interface (MPI), enabling large-scale groundwater simulations in High-Performance Computing (HPC) environments. Its XMI is based on the Basic Model Interface (BMI), originally designed to standardize model interfaces across different modeling systems. This interface exposes the

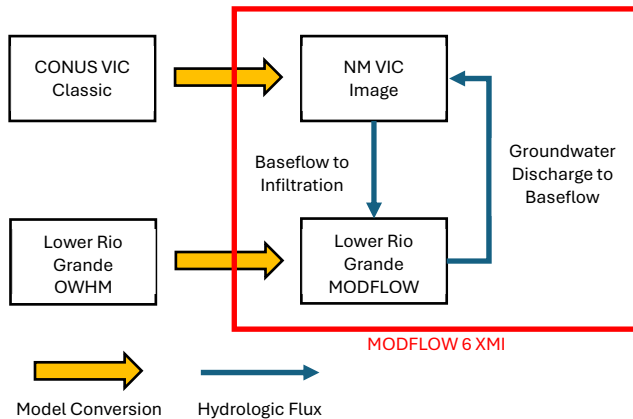


Figure 2. Conceptual diagram of VIC-MF6 coupled hydrologic modeling.

internal components of MODFLOW 6 so modelers can control simulations both between and during timesteps. We used this capability to tightly integrate the VIC model within the MODFLOW 6 modeling framework. Figure 2 shows the overview schematic of the VIC-MODFLOW 6 (VIC-MF6) framework for coupled surface-subsurface hydrologic modeling.

VIC supports two different input and output data formats “driven” by the classic and image drivers. The classic driver uses text files for input and output, whereas the image driver uses the NetCDF format. Beyond data formats, the key distinction between the two drivers lies in their processing order: the classic driver iterates over all timesteps for each grid cell (i.e., time over space), while the image driver iterates over all grid cells for each timestep (i.e., space over time). The coupled modeling framework requires the space-over-time processing order because both models must advance synchronously in time, exchanging hydrologic fluxes at each timestep for the entire modeling domain.

We used Python to implement the coupled modeling framework. Because the spatial resolutions of both models are different, we incorporated a geospatial procedure within the framework for upscaling and downscaling of hydrologic fluxes from both models. This hydrologic scaling procedure involves a spatial join of the two model grids, distributing coarser-resolution VIC fluxes to the MODFLOW grid, and lumping finer-resolution MODFLOW outputs for VIC input. The procedure was implemented using various GRASS GIS modules.

3. Future Work

Both VIC and MODFLOW 6 models support multi-node distributed modeling using MPI. However, the current implementation of the coupled modeling framework does not yet support parallelization because incorporating parallel execution while maintaining synchronized time stepping and data exchange between the two models introduces additional complexity that is still under development. Figure 3 presents the proposed architecture of the planned distributed modeling framework, extending beyond the basic coupling of surface and subsurface hydrology. In this figure, the entire spatial domain is split into multiple tiles for distributed modeling. Each modeling tile is simulated on one computing node independently.

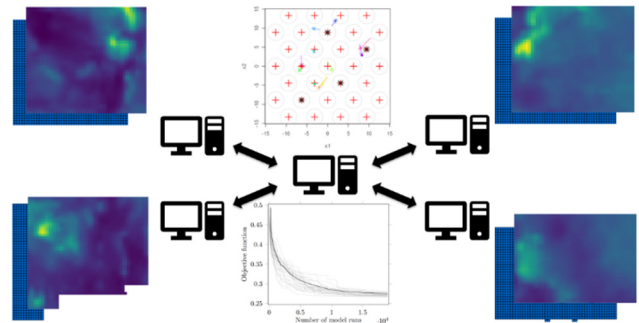


Figure 3. Proposed architecture of the parallelized coupled hydrologic modeling framework.

Although we began with calibrated surface and subsurface hydrologic models, the process of converting and coupling them can alter their hydrologic behavior. For this reason, we plan to recalibrate the model parameters using the Isolated-Speciation-based Particle Swarm Optimization (ISPSO) (Cho, et al. 2011) following the integration of parallel modeling capabilities into the coupled framework in the future.

Acknowledgments and Disclaimer

This project is funded by the U.S. Geological Survey (USGS) Water Resources Research Act 104(b) grant through the New Mexico Water Resources Research Institute (NM WRI) under award GR0007017, as part of USGS Grant/Cooperative Agreement No. G21AP10635, along with an additional internal award from the NM WRI. The views expressed in this abstract are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the USGS or NM WRI.

References

- Cho, H., D. Kim, F. Olivera, and S. D. Guikema. 2011. "Enhanced speciation in particle swarm optimization for multi-modal problems." *European Journal of Operational Research* 213 (1): 15–23.
- Hamman, J. J., B. Nijssen, T. J. Bohn, D. R. Gergel, and Y. Mao. 2018. "The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): Infrastructure improvements for new applications and reproducibility." *Geoscientific Model Development* 11 (8): 3481–3496.
- Hanson, R. T., A. B. Ritchie, S. E. Boyce, I. Ferguson, A. E. Galanter, L. E. Flint, and W. R. Henson. 2018. *Rio Grande Transboundary Integrated Hydrologic Model and Water-Availability Analysis, New Mexico and Texas, United States, and northern Chihuahua, Mexico*. U.S. Geological Survey.
- Langevin, C. D., J. D. Hughes, E. R. Banta, A. M. Provost, R. G. Niswonger, and S. Panday. 2017. *MODFLOW 6 Modular Hydrologic Model: U.S. Geological Survey Software*. U.S. Geological Survey.
- Neteler, M., H. M. Bowman, M. Landa, and M. Metz. 2012. "GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS." *Environmental Modelling and Software* 31: 124–130.
- Union of Concerned Scientists. 2016. "Confronting Climate Change in New Mexico." 1–14.
- Yang, Y., M. Pan, H. E. Beck, C. K. Fisher, R. E. Beighley, S. Kao, Y. Hong, and E. F. Wood. 2019. "In quest of calibration density and consistency in hydrologic modeling: Distributed parameter calibration against streamflow characteristics." *Water Resources Research* 55 (9): 7784–7803.

情報地球科学・工学：これまでの道のりとこれからのトレンド

村田健史*・深沢圭一郎**・野々垣進***・木戸ゆかり****

Geo-informatics: A road we have walked and will walk

Ken T. Murata *, Keiichiro Fukazawa **
Susumu Nonogaki *** and Yukari Kido ****

* National Institute of Information and Communications Technology, 2-1-3, Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-0812, Japan, E-mail: ken.murata@nict.go.jp, murata4stars@gmail.com

** The Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto, 603-8047 JAPAN, fukazawa@chikyu.ac.jp

*** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tukuba, Ibaraki 305-8567 JAPAN, E-mail: s-nonogaki@aist.go.jp

**** Japan Agency for Marine-earth Science and Technology, 3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama-city, Kanagawa 236-0001 JAPAN, E-mail: ykido@jamstec.go.jp

キーワード：日本地球惑星科学連合，情報地球惑星科学

Key words：JpGU (Japan Geoscience Union) , Geo-Informatics

1. はじめに

筆者らが日本地球惑星科学連合 (JpGU) において「情報地球惑星科学と大量データ処理」セッションを提案したのは 2014 年のことである。当時、「地球科学一般・情報地球科学」カテゴリには本セッションしかなく、地球惑星科学の現場において先端的な情報処理技術を議論する風潮はなかった。しかし、当時すでに地球惑星科学分野の観測および数値シミュレーションによって生成される数値データは観測技術の高度化や計算スケールの大規模化に伴って複雑化しており、新しい観測・計測手法、大規模データ処理および数値シミュレーション技法、データ保存・公開技術、データ転送および収集などのデータ技術が求められていた。本セッションは、地球惑星科学への先進的な情報処理・情報通信技術の導入が必須と考える有氏がオープンサイエンス、オープンデータといった開かれたサイエンスデータの利活用を含めて分野にこだわらず情報交換を行い、融合化した技術開発への議論が進められることを期待して提案し、10 年間連続で JpGU のセッションとして採択されてきた。本講演ではこの 10 年間について議論し、我々の提案が地球惑星科学の中でどのように位置づけられるのかについて議論する。

2. 情報地球惑星科学セッション

2025 年度のセッションは幕張メッセ国際展示場において 5 月 27 日に開催された。情報地球惑星科学に関して情報処理技術およびそれらを活用する科学研究に関する様々な発表があった。これらの発表を図 1 に示す情報地球学プラットフォームの視点から紹介したい。「赤色立体地図による湯之奥金山遺跡の人工地形評価」は 3 次元 WebGIS の視点から地形を評価したものであり、「点群データを用いた高精度地形モデルによる斜面崩壊危険度予測システムの開発」「大量点群データを公開するための点群 PNG タイルツールの開発」ではこれまで容易ではなかった 3 次元空間データを点群を用いて高速可視化する手法の紹介である。「XR デバイス用可視化フレームワーク VisAssets の開発と可視化アプリケーションの構築」は 3 次元空間 (例えば都市空間) を

メタバースとして閲覧する XR 可視化技術であり、点群データのプラットフォームとなりえる。可視化の有効性や先進的 3 次元可視化 Web の重要性が「高解像度デジタル露頭モデルを用いた三次元地質構造調査—三浦層群三崎層の例—」「CVA とランダムフォレストを用いた斜面崩壊地自動抽出手法の精度評価」「ボーリングデータを用いた埼玉県南東部の 3 次元地質情報整備」により指摘された。また、「移動式カメラによる時系列データとリアルタイムデータの 3 次元 GIS (地理情報システム) における統合の検討」「Towards Active Flood Risk Assessment and Prediction through Automated River Level Monitoring」「Towards the Detection and Monitoring of Hyper-Local Weather Phenomena in Chikuma City」「カメラ映像からの波の打ち上げ高検出と定常モニタリング」「リモートセンシングによるカオリナイトの生成起源識別と鉱床可能性評価への応用」では図 1 の映像データや衛星データを情報地球学プラットフォームに取り込んで可視化・処理する技術とその成果についての紹介である。「LPWA (LoRa) と映像 IoT 技術開発 (6): WoR 型 LoRa 通信ツールによるフィールド実験」はフィールド観測を行うセンサーデータの収集方法を提案している。一方、「大気シミュレーションの PINNs によるサロゲートモデルの評価」「全球大気シミュレーションを利用した特定地表面構造による大気温度変化の数値実験」「GPU 並列化の地球物理系シミュレーションへの実装と評価」では、図 1 に示す大規模数値計算技術や地球規模でのシミュレーションの成果を報告している。

データベース構築とデータ標準化・オープン化およびその利活用について、「DARWIN (航海・潜航データ・サンプル探索システム): 海洋研究開発機構での研究航海データオープンアクセス基盤」「Improvement of the Research Vessel Status Information Database」「太陽フレアの地上災害影響におけるオープンデータを用いた解析の試み」の報告がなされた。

プラットフォーム構築に関わる発表として、「レジリエント自然環境計測プロジェクト (5): 複数時系列可視化ツール同期」では図 1 の OSS 化された共通データ可視化 Web

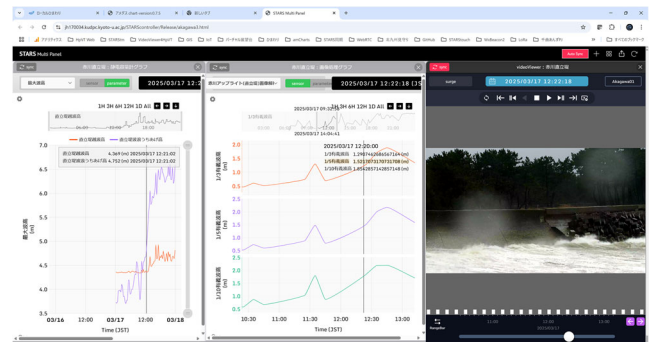
アプリケーションを時空間データの視点から紹介した。同プロジェクトでは基盤となる映像伝送プロコルを OSS 化し、同時に様々な OSS ライブラリを用いたアプリケーション開発を行っている（図 2）「大規模データを活用する科学研究を加速する研究基盤」はプラットフォームの研究基盤となりえるアカデミッククラウドを提案したが、「HpFP：高速データ伝送アプリケーション開発（5）：HpFP プロトコル（バージョン 2）の改良」はその基盤となる大規模データの高速通信技術である。「学会の新たな展開に向けての情報地球学の始動」は、図 1 のシステムを通じて我々が目指すべき方向を明確に示した。

3. 情報地球学プラットフォーム

筆者（村田）は情報通信研究機構において、情報地球学プラットフォームの一つである時空間データ GIS プラットフォームの開発及び運用に寄与してきた。特に時空間データを同期可視化するためのライブラリ開発に重点を置き、たとえば WebGIS などでも利用できる汎用性の高いタイムラインツールを Web コンポーネントとして開発した。

さらに、図 2 のシステムを時空間データ GIS プラットフォームに実装し、長野県千曲市あんずプロジェクト、内閣府第 3 期 SIP スマート防災、国土交通省受託「海岸堤防・護岸におけるリアルタイム波浪うちあげ高観測手法の開発」などを進めてきた。図 3 はその事例であり、映像 IoT シス

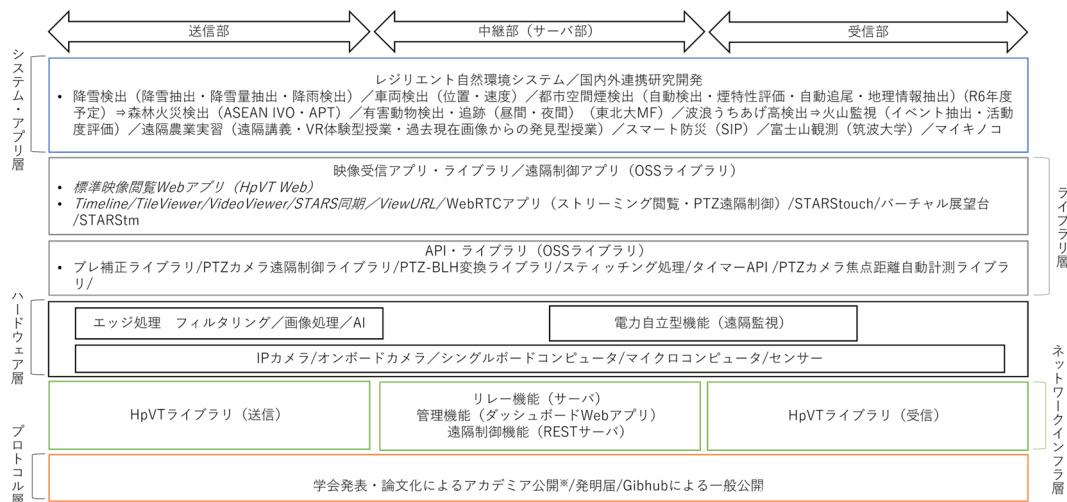
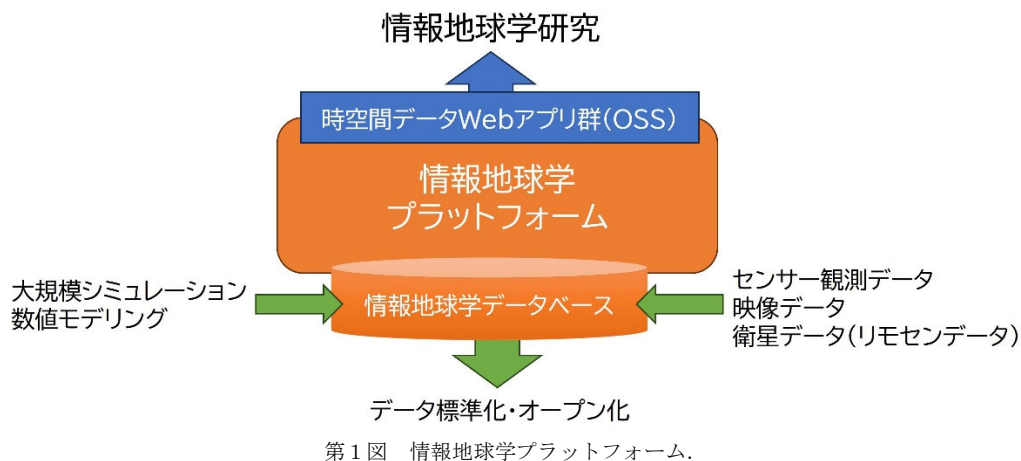
テムによる動画像、同システムからの画像解析、および徳島大学・上野勝利教授による静電容量計データをデータベース化し、時間同期アプリケーションで解析している様子である。



第 3 図 時空間データ GIS プラットフォームを活用した情報地球学（映像データ解析）事例。

文 献

2025 年度日本地球惑星科学連合地球科学一般・情報地球科学 (GI) M-GI31 情報地球惑星科学とデータ利活用, 2025. https://www.jpogu.org/meeting_j2025/sessionlist_jp/detail/M-GI31.html.



第 2 図 映像 IoT システムの技術スタック図。

5 万分の 1 地質図幅ベクトルデータ整備の現状

川畑大作*・宮崎純一*・齋藤英二*・内藤一樹*

Progress and Current Status of Vectorization of 1:50,000 Geological Map

Daisaku Kawabata*, Junichi Miyazaki*, Eiji Saito* and Kazuki Naito*

* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター Geological Survey of Japan, National Institute of Advances Industrial Science and Technology (AIST), Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail: d-kawabata@aist.go.jp

キーワード：5 万分の 1 地質図幅, GIS, ベクトルデータ, シェープファイル

Key words：1:50,000 Geological Map, GIS, Vector data, Shape file

1. はじめに

産業技術総合研究所（以下、産総研）では、1882 年に前身である地質調査所の設立以降、様々な縮尺に合わせた精度の地質図を整備しており、1946 年以降は全国の 5 万分の 1 地質図幅整備を実施している（地質調査所百年史編集委員会, 1982）。5 万分の 1 地質図幅整備の詳細な背景や方針の変遷については、宮崎(2018)で報告されている通り、目的に応じて年間整備数が変化しながらも現在まで継続的に出版している。最近の年間整備数は減少傾向ではあるが、合計では日本全国で、旧北海道開発庁の整備分を除くと 556 面の 5 万分の 1 地質図幅が出版され、整備開始時から基本的に紙媒体にて出版されている。

地理空間情報の普及と同時に地質図に関するデジタルデータのニーズも高まり、1995 年に初版が公開された 100 万分の 1 日本地質図（地質調査総合センター, 2003）や 20 万分の 1 地質図幅集、例えば「関東甲信越及び伊豆小笠原諸島」（地質調査総合センター, 2004）などの図幅類と同様に 5 万分の 1 地質図幅のラスターデータやベクトルデータ整備も 2006 年時点で検討されていた（牧本ほか, 2006）。しかし、実際公開が始まったのは 2013 年になってからである。公開開始後もデータ整備には多くの時間を要し、現在も 5 万分の 1 地質図幅ベクトルデータ整備を継続している。

本報告では、5 万分の 1 地質図幅ベクトルデータ整備開始から 10 年以上経過した現在の整備状況と課題、今後の展望について紹介する。

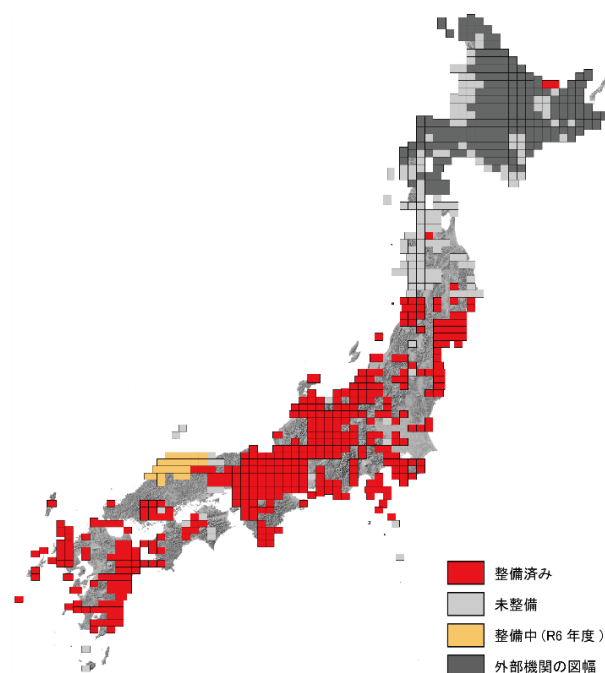
2. 5 万分の 1 地質図幅ベクトルデータについて

5 万分の 1 地質図幅ベクトルデータ（以下、ベクトルデータ）の構成や内容の詳細については、牧本ほか(2006)や川畑ほか(2014)で報告されている通りである。改めて整理すると、ベクトルデータは走向・傾斜やサンプリング地点、坑口などのポイントデータや、断層、褶曲軸、地質境界などのラインデータ、地質凡例区分に基づく面的な地質分布のポリゴンデータから構成されている。凡例情報の詳細は、表計算ソフトなどで読み込み可能な Microsoft Excel のフォーマットに格納している。図幅の説明書については XML 形式で整備している。

3. 整備の現状と課題

2013 年のベクトルデータ公開から 10 年以上が経過し、整備データは出版済みの多くをカバーし 400 面を超えている。基本的なベクトルデータ整備計画は経済産業省がとりまとめている知的基盤整備計画に基づいているが、ベクトルデータのニーズがさらに高まってきたことから、ここ数年整備ペースを加速し、2025 年現在では、北海道地方、東北地方の一部、島嶼部、近年整備された地域を残すところとなっている（第 1 図）。

一方で、冒頭で述べた通り、ベクトルデータの元図となる 5 万分の 1 地質図幅は、地理空間情報の普及していない 1946 年以降整備が始まっており、現在も基本的な出版過程は大



第 1 図 ベクトルデータの整備状況

きくは変わっていない。ベクトルデータ作成手法としては、印刷原稿をスキャニングしたラスタ画像を基にトレースしベクトルデータを作成している。特に初期の図幅については、基図となる地形図の情報を含めて位置精度が現在と大きく異なる場合がある。近年では画像ソフトウェアの利用が一般的になってきたため、印刷原稿もデジタルデータになってきた。これを利用すればラスタ画像のトレースよりは原図に近いベクトルデータになるが、印刷原稿であるためそのまま地理空間情報として利用することはできない。地理空間情報にするためには、ジオリファレンスを行わなければならない。位置精度が必ずしも出版時の地質図幅通りになるとは限らない。また、印刷原稿は出版用に最適化したデジタルデータであるため、地質境界線や断層線等にトポロジーの概念が含まれておらず、地理空間情報として編集作業が必要になる。これらは、最新の出版図幅が完成してもすぐにベクトルデータを生成できない理由になっている。

4. 5万分の1地質図幅ベクトルデータの展望

デジタル技術が普及する前に大半が整備された地質図のような基盤情報の整備には、以上の理由から多くの時間がかかるが、それに対して地理空間情報の利活用ニーズは、公開当初から大きく変わりつつある。様々な機関等が整備している地理空間情報を集めて新しい情報を生み出す環境が整いつつある。GIS (Geographic Information System; 地理情報システム)を活用した空間解析に加え、インターネットの普及に伴って、一例として地震や豪雨などの自然災害発生時の地質情報収集や災害対策のための基礎情報として活用される機会が増えつつある。産総研では、ウェブサイトで多くのコンテンツを提供しているが、ベクトルデータは地質図カタログ(第2図)やビューアである地質図 Navi (<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>) など複数の導線を準備し普及を推進している。ベクトルデータの活用例として、川畑ほか(2023)では、将来的な流れ盤・受け盤の解析に向けて整備済みの走向傾斜データをまとめて公開する試みを行っている。

いる。

5万分の1地質図幅は、現地調査の情報成果から作成される。1図幅あたり3年以上の時間がかかり、隣接する図幅を作成する頃には地質学の発展も重なり空間的に接合できないことも多い。全国整備されている20万分の1地質図においても同様の問題が生じていた。20万分の1スケールでは凡例を構造化し全国統一凡例を作成した20万分の1シームレス地質図(産総研地質調査総合センター, 2023)が公開されている。5万分の1地質図幅においても、整備状況を考慮すると全国統一凡例の作成は難しいものの、特定の地域における5万分の1シームレス地質図を作成することは可能であり、このためにベクトルデータは基図として必要である。

機械読可能な情報の流通も進みつつある。それぞれの公的機関で公開している情報を機械的に収集することができるデータ構造が必要になってきた。ベクトルデータに関しては、説明書のXML整備が機械読可能な情報の流通につながる第一歩になる(内藤ほか, 2023; 内藤ほか, 2024)。

5. おわりに

本稿では、2013年から公開を始めたベクトルデータについて現状と課題、今後の展望について述べた。ベクトルデータ整備は400図幅以上を整備し現在も継続している。デジタル技術普及以前のデータの整備には、複数の課題があるため効率化が難しい。整備されたベクトルデータは、地理空間情報の一つとして利用することができるが、今後は、機械学習などの自動化が進んでいく中でデータ流通の仕組みを整えつつ、ベクトルデータに含まれる凡例情報を構造化していくことで更なる活用が期待できる。

文 献

- 地質調査所百年史編集委員会編(1982)地質調査所100年史。162pp.
- 地質調査総合センター(2003)100万分の1日本地質図 第3版 CD-ROM 第2版。数値地質図 G-1.
- 地質調査総合センター(2004)20万分の1数値地質図幅集「関東甲信越及び伊豆小笠原諸島」。数値地質図 G20-4.
- 川畑大作・宮崎純一・齋藤英二・牧本博・青木加代子・亀谷暁人・柿内慎二(2014)5万分の1地質図幅のベクトルデータ整備と公開。情報地質。Vol.2, no.2, pp.104-105.
- 川畑大作・阪口圭一(2023)斜面災害リスク評価のための地質情報集 - その1: 全国走向傾斜データ -。地質調査総合センター研究資料集 no.747.
- 牧本博・宮崎純一(2006)地質図のベクトル化整備とその利活用。地質ニュース。No.625, pp.29-33.
- 宮崎一博(2018)我が国における5万分の1地質図幅整備 - 地質図整備における全体シナリオと個別シナリオ。Synthesiology, vol. 11, no. 2, pp. 55-68.
- 内藤一樹・川畑大作(2023)相互運用性の高い地質情報の整備。令和4年度防災減災のための高精度デジタル地質情報の整備報告書。地質調査総合センター速報, no.84, pp.145-148.
- 内藤一樹・川畑大作・齋藤英二(2024)相互運用性の高い地質情報の整備(2)。令和5年度防災減災のための高精度デジタル地質情報の整備報告書。地質調査総合センター速報, no.86, pp.149-151.
- 産総研地質調査総合センター(2023)20万分の1日本シームレス地質図 V2, オリジナル版。<https://gbank.gsj.jp/seamless/> (閲覧日: 2025年5月1日)



第2図 産総研の地質図幅カタログのウェブサイト

参考例として5万分の1地質図幅カタログサイトを表示したもの:
<https://www.gsj.jp/Map/Jp/geology4-11.html>

シームレス標高タイルと標高ダウンローダー

西岡芳晴

Seamless Elevation Tiles and Elevation Downloader

Yoshiharu NISHIOKA

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 Institute of Geology and Geoinformation, AIST,
Tsukuba Central 7, 1-1, Higashi 1, Tsukuba Ibaraki, 305-8567, Japan. E-mail: y-nishioka@aist.go.jp

キーワード： 標高, ダウンロード, Web, グレースケール, マインクラフト

Key words: elevation, download, Web, gray scale, Minecraft

1. はじめに

近年, 航空レーザー計測の発達等により大量の三次元点群データの収集が可能となり, 都道府県単位でそれらから標高データを生成して公開する事例が増えてきた(静岡県, 2025 など). 国土地理院もこれまでの 10m・5m メッシュに加えて, 1m メッシュの標高データを基盤地図情報として公開を開始している. 産総研では, それらを含む他機関が整備公開した標高データを収集し, インターネット通じて利用しやすい標高タイルに変換, 提供するサービス「シームレス標高タイル」を行っている. 本論では, このシームレス標高タイルの最新情報, 加えてこのサービスを利用して簡便に標高データを取得できるウェブアプリケーション「標高ダウンローダー」を紹介する.

2. シームレス標高タイル

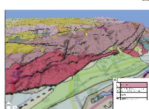
シームレス標高タイルは, 標高データをウェブ地図の一般的なタイルセット形式で提供する無料のサービスである(第1図). これらのタイルセットはそのまま 3D 表示等で利用できるほか, 各種演算を行って加工したり, 様々なタイル地図と重ね合わせることでウェブサイトやインターネットを利用したアプリケーション開発に利用できる. シームレス標高タイルでは, 他の機関等が公開する標高データを数値 PNG タイル (西岡・長津, 2015) に変換し, 提供している. 紹介ページは, 標高データだけではなく, それを利用した簡単なウェブアプリケーション等も公開している.

シームレス標高タイル

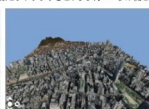
シームレス標高タイル

シームレス標高タイルでは, 標高データをウェブ地図の一般的なタイルセット形式で提供します. これらのタイルセットはそのまま 3D 表示等で利用できるほか, 各種演算を行って加工したり, 様々なタイル地図と重ね合わせることでウェブサイト構築やインターネットを利用したアプリケーション開発に利用できます.

シームレス標高タイルを使った 3D 表示サンプル
画像をクリックするとサンプルページが開きます



神戸市河辺20分30秒のシームレス標高タイル
サンプルページでダウンロードしたタイルセットを表示しています
(詳細はこちら)



神戸市三宮付近の建物
山形県山形市 標高タイル (地形) を使用
(詳細はこちら)



ハワイアップ島
ASTER GDEM 300, OpenStreetMap を使用
(詳細はこちら)

※サンプルページでは5mメッシュを使用しています.

ファイルフォーマットとしては, 標高タイルは「グリッド PNG タイル 仕様 0.1」(西岡, 2025) を使用している. また, これらのフォーマットをサーバー上のプログラムで変換するサービスも提供している. このサービスでは, 257 ピクセル, Terrain-RGB, 257 ピクセル Terrain-RGB が利用できる.

3. 標高ダウンローダー

標高ダウンローダーは, 指定範囲内の標高データをグレースケール画像に変換してダウンロードするためのウェブアプリケーションである(第2図). このグレースケール画像は, 標高値をピクセルの明るさで表現したモノクロの地図画像で, マインクラフト用の実在地形ワールド作成等に利用できる. 本アプリケーションは JavaScript で記述されており, 主要なライブラリとしては Leaflet を使用している.

標高ダウンローダーはシームレス標高タイルを利用して, データセットメニューからシームレス標高タイルで公開されている様々な標高データを選択して使用することができる.

ダウンロードしたい範囲の設定は, [範囲枠設定] ボタンで行うことができる. 赤い枠でデフォルトの範囲表示されるので, 四隅をドラッグすることにより範囲を変更できる(第3図).

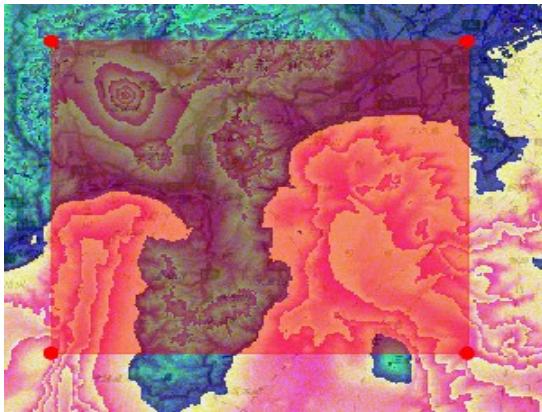


第2図 標高ダウンローダー解説画面

<https://gsj-seamless.jp/seamless/elev/downloader.html#sample>

第1図 シームレス標高タイル紹介ページ

<https://gbank.gsj.jp/seamless/elev/>



第3図 標高ダウンローダーの範囲変更画面

第4図 標高ダウンローダーの範囲変更画面

[ダウンロード]ボタンを押すとパラメータを設定する画面となる(第4図)。データ密度、ファイル名、標高をグレースケールに変化する際に使用するスケール、オフセットを指定できる。

4. マインクラフトでの利用

マインクラフトはスウェーデンの Mojang 社が開発した3D サンドボックスゲームである(現在はマイクロソフト社が提供)。標高ダウンローダーで出力したファイルは、無料の地形編集アプリである WorldPainter を使って、マインクラフト Java 版で利用できるワールドファイルに変換するこ



第5図 マインクラフトで利用した例。
標高ダウンローダーでダウンロードしたファイルを使ってマインクラフトのワールドファイルを作成
長崎県雲仙岳平成新山を南側から眺めたもの

とができる。標高ダウンローダーと WorldPainter を組み合わせれば、日本中・世界中に実在する地形ワールドを生成して、マインクラフトユーザーに提供することができる。長崎県雲仙岳平成新山においてワンプルデータ作成し(第5図)、標高ダウンローダー解説ページに掲載している。

5. おわりに

シームレス標高タイルは、現在、PNG の代わにより圧縮効率の良い WebP 形式を採用した新バージョン(バージョン2)の公開準備中である。また、標高ダウンローダーは Tiff ファイルへの出力機能を追加する予定である。さらにそれらの構築で作成したライブラリ等も提供していきたいと考えている。

文 献

- 西岡芳晴・長津樹理(2015) PNG 標高タイル—Web 利用に適した標高ファイルフォーマットの考案と実装—。情報地質, vol. 26, no. 4, pp. 155-163.
- 西岡芳晴(2025) グリッド PNG タイル。シームレス地質図ラボ。
<https://gsj-seamless.jp/labs/datapng/gridpngtile.html> (確認:2025/06/06)
- 静岡県(2025) VIRTUAL SHIZUOKA。
<https://www.pref.shizuoka.jp/machizukuri/1049255/index.html> (確認:2025/06/06)

三次元地形情報公開サイト「日本の地形千景」について

中田 文雄*

About the 3D topographical information website "Japan's Topographical Landscapes"

Fumio NAKADA*

*元（NPO）地質情報整備活用機構 former Geological Information Utilization and Promotion Initiative
URL: <https://www.web-gis.jp/> E-mail: nakadafumio@web-gis.jp

キーワード：地形情報，ウェブサイト，三次元レンダリング，カシミール 3D

Key words：Topographical Information, Website, Three Dimensional Rendering, Kashmir 3D

1. はじめに

筆者は，ウェブサイト「地形・地質情報ポータルサイト」の中に「日本の地形千景（中田，2025）」という，地形図や地質図などのデジタル平面図（ラスターイメージ）を，5mあるいは10mメッシュの標高データを利用して三次元画像に加工して公開するページ（以下，千景ページ）の管理者を務めている．

元々は，古今書院刊の『日本の地形レッドデータブック第1集（絶版）』，『同第2集』やそして刊『地図の風景全20巻（絶版）』に掲載されている地形の最新状況を三次元化して紹介するために始めたものであったが，最近では独自に選定した地形も含めることにしている．

2. 地形図の種類と3Dレンダリングツール

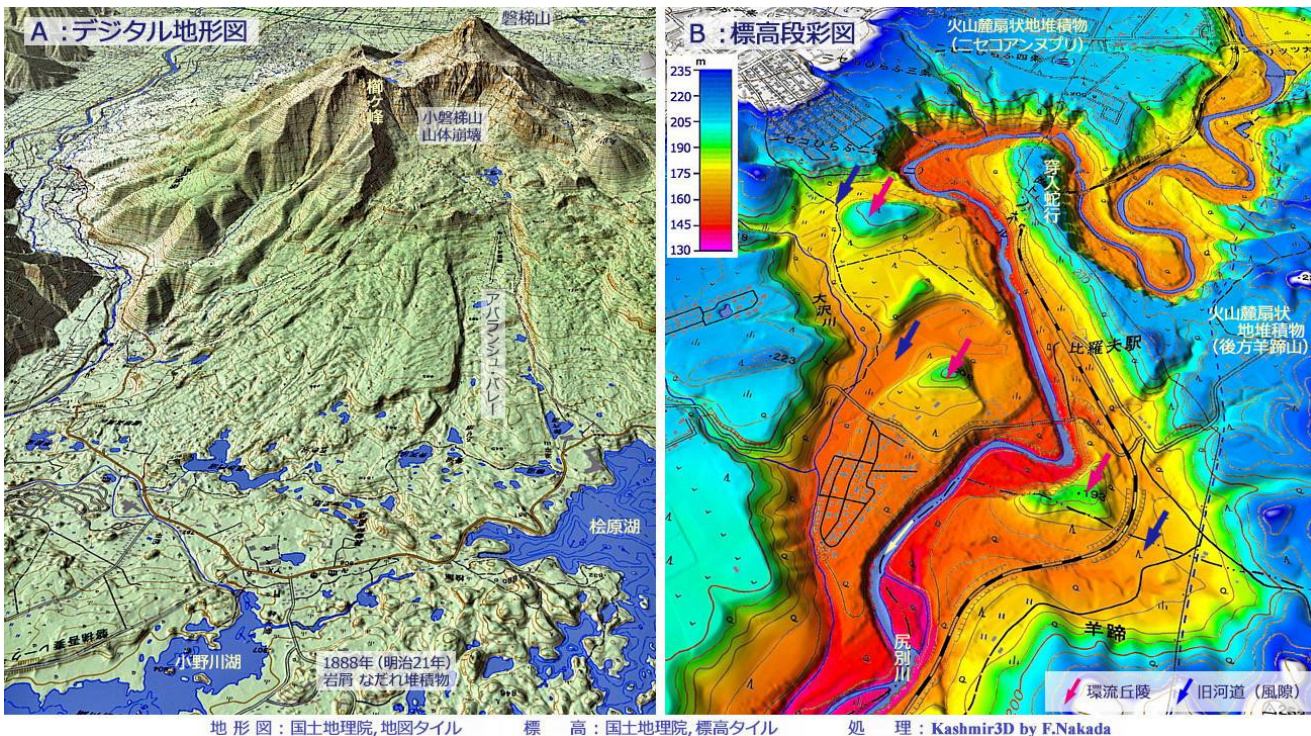
第1表は千景ページで公開している地形の種類と公開数である．各種類における個々の採用は様々な地形の中から管理者が任意に選定した結果であって，統計的手法などを利用したものではない．

第1表 地形の種類と公開数（本文執筆時）

種 類	公開数	種 類	公開数	種 類	公開数
海食崖	191	地すべり	87	カルデラ	47
河成段丘	164	砂州	61	陸繋砂州	37
穿入蛇行	141	サンゴ礁	57	岩屑なだれ	37
火山地形	138	リアス海岸	57	滝	25
環流丘陵	130	集落	57	カルスト	22
海成段丘	96	断層変位	48	流れ山	21
波食棚	91	潟湖	47	火山島	20

地形図などのデジタル平面図を三次元にレンダリングするツールはKashmir3D（SUGIMOTO, 2025）を使用し，標高データはKashmir3Dの支援サイトから有料で公開されている「スーパー5m（10m）メッシュ」と呼ばれているデータを使用している．

Kashmir3Dは，5mDEMあるいは10mDEMによるワイヤーフレームモデルを作成し，デジタル平面図（ラスターイメージ）をテクスチャとしてそれに張り付ける方法



第1図 日本の地形千景で公開している三次元で可視化したデジタル地形図と標高段彩図の例

龍ノ口山の地形・地質と植生の関係

福島史大*・能美洋介**

The relationship between geology, topography and vegetation of Mt. Tatsunokuti-yama

Fumiharu Fukushima* and Yousuke Noumi**

*. 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科 Okayama University of Science Faculty of Biosphere-Science Department of Biosphere-Geosphere Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005. E-mail:fumiharu3312380@icloud.com

** 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科 Okayama University of Science Faculty of Biosphere-Science Department of Biosphere-Geosphere Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005. E-mail:y_noumi@ous.ac.jp

キーワード：DEM, 植生, 平均連結, STRIPE 法, GIS 解析

Key words: DEM, Vegetation, Average linkage clustering, STRIPE method, Average linkage method, GIS analysis

1. はじめに

龍ノ口山は岡山県岡山市中区に位置し、砂岩泥岩が主体の本峰 256m と凝灰岩が主体の北峰 210m から成り立つ。

地形は、本峰側で丸みを帯びる一方で、北峰側は尖峰状である(藤本, 2023MS)。

植生は 1980 年頃のマツ枯れ以降に成立したコナラが優占する二次林であり(細田, 2023)、冬季には幹が剥き出しになった景観を示す。この時、凝灰岩側でアラカシが顕著に現れ、地質と植生に何らかの関係があることが示唆されている(波田, 2004)。

地形は、微気象、水文環境など、植物の生育条件に影響を与える(菊池, 2001)。これらの関係解析においては、地形情報としてデジタル標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)が利用される(松浦・鈴木 2013)。

本研究では、植生に影響を与える複数の因子関係を平均連結により求め、それら属性情報の関係を平面図に示し、地形、地質、植生の関係を考察した。

2. 手法と解析データ

2.1 平均連結を用いた解析

植生に影響を与える複数の因子関係を解析するため平均連結を用いた。平均連結は群平均法を用いたボトムアップ型の階層化クラスタリングで、距離の概念を利用し、似た要素同士をグループ化する。また、クラスタリングの工程を、樹形図(Dendrogram)として表現できる。群平均法は次式で表される。

$$\frac{1}{|R_i||R_j|} \sum_{x \in R_i} \sum_{x' \in R_j} dist_{euclid}(x, x') \quad (1)$$

ここで、 R_i は定量データ*i*の集合、 x は R_i の要素、 R_j は定量データ*j*の集合、 x' は R_j の要素、 $dist_{euclid}(x, x')$ は各要素間の標準化ユークリッド距離を表す。

本研究では、DEM の位置関係をもとに複数の因子(集合)の要素間の距離を用いて、空間をグループ化し、その樹形図の関係を平面図に示した。なお、DEM は国土地理院の地形図より、STRIPE 法(Noumi, 2003)で求めた。

2.2 解析データ

地質は、龍ノ口山の本峰と北峰を囲む範囲(990×1485m)をタイル化させ利用した(各タイルの範囲は 165m×165m)。

地形において傾斜量(Mitasova and Hoferka, 1993)と凹凸度(Pitas, 2000)を STRIPE 法で作成した DEM より求め、タイルの範囲ごとに平均し、解析で利用した。

植生において個体群密度を利用した。龍ノ口山で優占するコナラのほか、クヌギ、アラカシ、ヤブニッケイかつ樹高 2m 以上の個体を対象とした。個体群密度は、各タイル内に 20m×20m のコードラットを作成し、区画法により取得した。

3. 結果と考察

傾斜量と凹凸度を解析した平面図、傾斜量とコナラの個体群密度を解析した平面図、傾斜量とアラカシの個体群密度を解析した平面図には、凝灰岩側に集中するグループが現れるという共通点が現れた(第 1 図)。

傾斜量を固定し、凹凸度をコナラまたはアラカシの個体群密度に置き換えて解析した際、平面図の模様共通点が見られることから、この 2 種は傾斜量や凹凸度に対し、個体数の増減パターンが類似していることが示唆される。

また、各属性情報に対し偏差値(平均 50、標準偏差±10)をとり、地形量に対する 2 種の個体群密度の対応関係を比較した。この時、コナラは地形量に対し、波形的なグラフを示し、アラカシは直線的なグラフを示した(第 2 図)。

アラカシは露岩地などを適地として優占することが知られており(京都府環境部自然環境保全課, 2015)、属性情報のグラフ上での関係は地形量の影響の受けやすさを表し、直線的であるほどその影響を受けにくいことが示唆される。

以上を踏まえて考察する。コナラとアラカシは傾斜量や

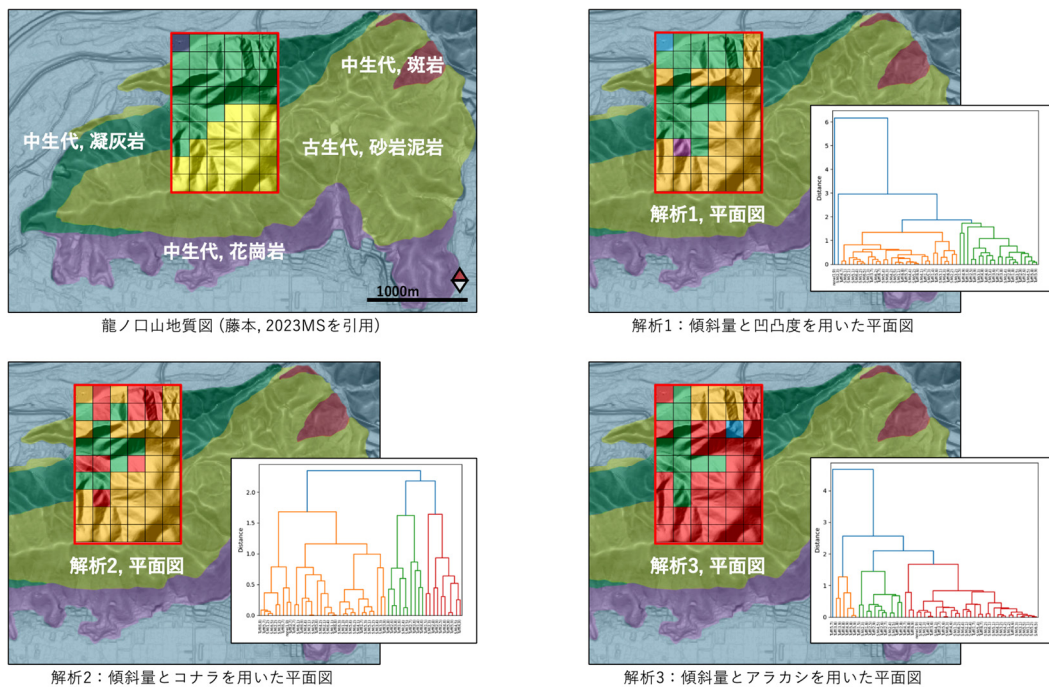
凹凸度に対し、個体数の増減パターンが類似しているが、影響の受けやすさに違いがある。龍ノ口山の凝灰岩側では両種の個体数が減少する地形的要素を含んでおり、コナラはアラカシに比べて影響を受けやすく、相対的にアラカシが景観を独占する。よって、龍ノ口山では地質によって植生が異なって見えることが示唆された。

4. まとめと今後の課題

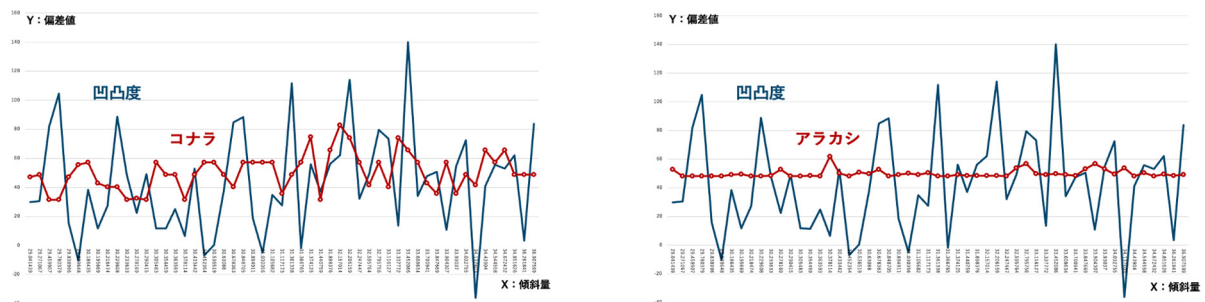
龍ノ口山では地質と植生に何らかの関係があることが報告されていたが、地質によって地形が大きく異なることで、植生を構成する主な樹種の割合に大きな違いが生じたためと考えられ、龍ノ口山の地質と地形の関係を明らかにすることが今後の課題である。

文 献

- 太田謙, 能美洋介, 波田善夫(2004) 岡山県笹尾山の植生流紋岩質岩地域の地形・土壌と植生-. Naturalistae, no. 9, pp. 1-14.
- 菊池多賀夫(2001), 地形植生誌 東京大学出版会 220pp.
- 藤本ひより(2023MS) 龍ノ口山の登山地質図作成. 令和5年度岡山理科大学卒業論文.
- 細田育広(2023) 竜ノ口山森林試験地観測報告. 森林総合研究所研究報告 (Bulletin of FFPRI) Vol.22-No.2 (No. 466) pp. 89-107.
- Noumi Yousuke(2003) Generation of DEM using Inter-Contour Height. Information Topographic Map. Journal of Geosciences, Osaka City University, Vol.46, Art.14, pp. 217-230.
- Toshiya Matsuura, Wajiro Suzuki(2013) Analysis of topography and vegetation distribution using a digital elevation model: case study of a snowy mountain basin in northeastern Japan. Landscape and ecological engineering, 9, pp.143-155.



第1図 平均連結で作成した平面図の関係



第2図 各タイルの地形量とコナラ, アラカシの対応関係

オープンソースとオープンデータを利用した路線斜面災害リスクの判読事例

木下 三郎*

A Case Study of Interpreting Potential Disaster Risks on Road Slopes Using Open Source and Open Data

Saburo Kinoshita*

* 株式会社日航コンサルタント コンサルタント事業部 Department of Civil Engineer, NIKKO-CONSULTANT CO.,LTD., 3-13-26 Koihonmachi, Nishi-ku, Hiroshima City 733-0812, Japan. E-mail:s-kinoshita@nikkocot.co.jp

キーワード：オープンデータ、三次元点群データ、CS 立体図、路線斜面災害リスク

Key words: Open Data, Point Cloud Data, CS Map, Potential Disaster Risks on Road Slopes

1. はじめに

三次元点群データを用いて地形情報を取得することが技術的・経済的に容易になっており、その利用を発展させることが求められる。地盤情報(三次元点群データを含む)のオープン化を進めている。高機能のオープンソース GIS アプリ(QGIS)により、このデータを活用した CS 立体図を作成し、災害要因を判読し、広島市所管の路線斜面災害リスク箇所の抽出を行った事例を紹介する。

2. 路線斜面災害リスク箇所の抽出

第1図に路線斜面災害リスク箇所の抽出の流れ(全地連, 2021)を示す。同箇所の抽出は、机上調査と現地確認からなる。机上調査では、「既存資料による地域特性の把握」及び「災害要因の判読」を実施する。このうち「災害要因の判読」は三次元点群データを用いて作成されたレーザ測量地形図等による判読を基本とする。現地確認は「机上調査」により判読した災害要因が現地においても見られるかを確認するものである。

ここでは、第2図に示すオープンデータの 0.5m メッシュ DEM による CS 立体図を用いて災害地形判読(戸田, 2018)を行った。

3. 調査結果

調査・確認結果として、分布地質別に路線斜面災害リスク箇所抽出図(第3図)を示す。後続作業となる「リスク箇所の評価」を行う安定度調査の点検対象項目(以下、点検項目という)について次に述べる。

3.1 花崗岩分布地域

第3-1図の地区は花崗岩分布地域で、路線は浸食が活発で全体的に急傾斜面の中腹を大・小規模に切土し通る。地形は痩せ尾根でかつ深い谷となる。曲率は-0.1697~0.1731を示す。痩せ尾根に壁岩体が分布する。0次谷は谷頭に集水地形があり、その下方の路線沿いに崖錐地形が認められる。切土のり肩が遷急線となっている。未対策のり肩で岩盤の緩みによる落石や土砂崩壊が認められる。また、S字カーブ状路線は両切で、のり高約30m(A-A'断面参照)となる。の

り面対策のモルタル吹付工に湧水と低木着生があり、モルタル剥離・剥脱が著しい。

点検項目は、高さ15m以上の壁岩体(B-B'断面参照)の岩盤崩壊、及び路線沿いのり肩付近と0次谷急斜面の落石・崩壊となる。さらに、モルタル剥離・剥脱箇所は構造物点検を加える。

3.2 砂岩・頁岩混在岩分布地域

第3-2図の地区は砂岩・頁岩混在岩分布地域で、路線はその山麓部を小規模に切土し通る。地形は比較的開析作用が進み、尾根は丸み帯びて、谷は浅く広い。曲率は-0.1079~0.0985を示す。路線上方斜面は、馬蹄形状の移動ブロックと滑落崖を伴う、複数の地すべり地形(C-C'断面参照)を示す。山腹で工事中的林道路肩には開口キレツが連続的に確認される。一方、地すべり移動ブロックに、一部の樹木根曲がり認めるものの、その末端のブロック擁壁に顕著な変状は認められない。ただし、側溝を埋める土砂は顕著である。工事中的林道沿いに表層崩壊や開口クラックがあり、市道に影響する恐れがある。また、谷には崖錐地形が広く分布し、下流の路線との出合は溪床堆積地形が認められる。

点検項目は、判読されたブロックの地すべり、荒廃した谷の土石流、工事中的林道沿いの崩壊・開口キレツに留意した落石・崩壊となる。

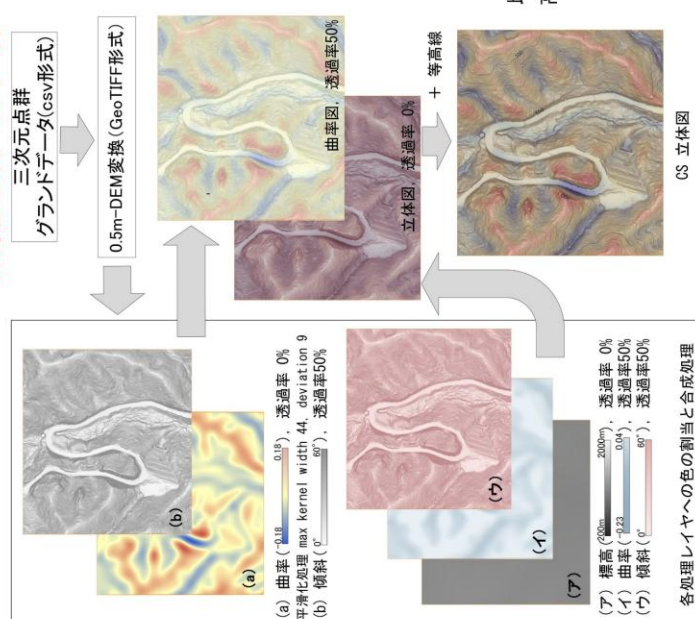
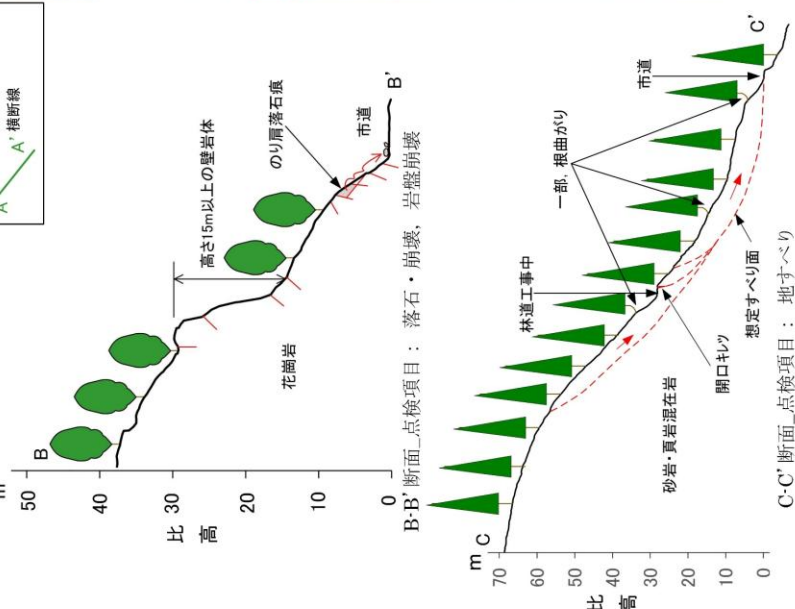
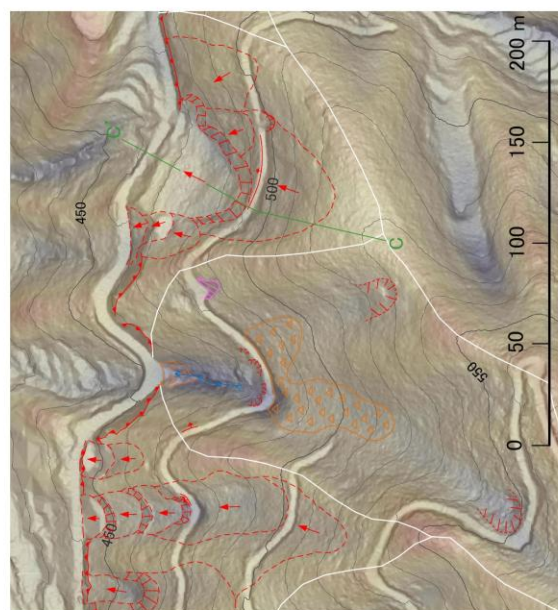
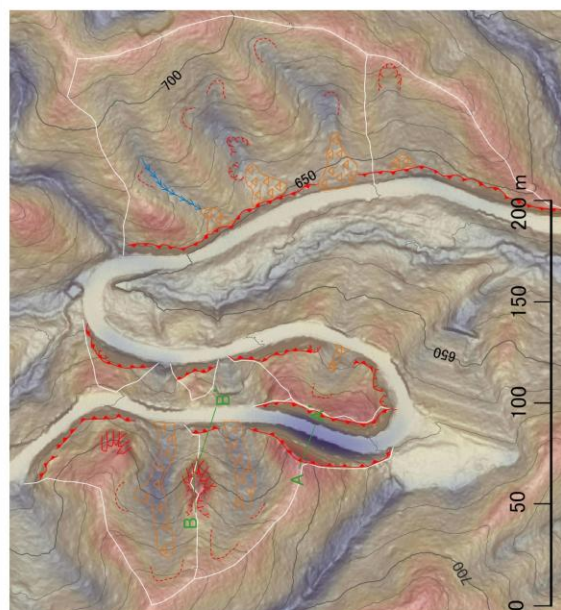
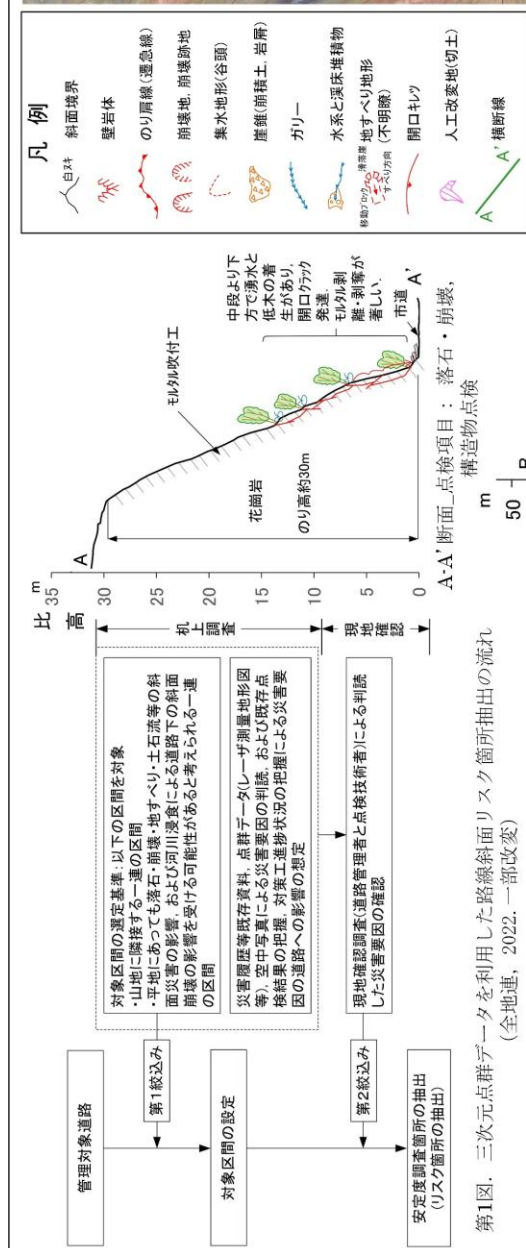
4. おわりに

CS 立体図による路線斜面災害リスク箇所抽出のメリットは次の点である。1)災害要因の判読が容易となる。2)mobile 端末に CS 立体図データを導入できるので、現場確認が容易となる。3)オープンソース・オープンデータを活用すれば、コストを抑えることができる。

文 献

一般社団法人全国地質調査業協会連合会(2022)道路防災点検の手引き(豪雨・豪雪等)[改訂版]—DX 時代に向けたチャレンジャー, p71

戸田堅一郎(2018)安全な路網計画のための崩壊危険地ピンポイント抽出技術—CS 立体図を用いた崩壊危険地形判読技術の開発—。長野県林総セ研報第32号



動的視点での点群データのステレオペア表示とその裸眼閲覧技法の習得

領木邦浩*

Skill acquisition to display stereo pairs for point cloud data from dynamic viewpoints and to view them with the naked eyes

Kunihiro Ryoki*

* 八田荘地球学研究所調査研究部門, Research Division, Hattaso Institute of Geophysics and Geosciences, 251-18 Handaiji, Naka-ku, Sakai, Osaka, 599-8267, Japan, Email: higgs-ryoki@ares.eonet.ne.jp

キーワード: クラウドコンペア, 立体視, 平行法, 交差法, 3D コンテンツ

Key words: Cloud Compare, Stereopsis, Parallel method, Crossing method, 3D contents

1. はじめに

地理院地図 Globe(国土地理院, 2022)をステレオペアとして表示する Web ツールである Stereoscopic Viewer (SVw (領木(2019))), 並行移動または回転する被写体が映写されたコンテンツをステレオペア化して再生する Stereoscopic Video (SVd (領木(2023)))がこれまでに公開され, これらを裸眼で立体視する技法を習得するための補助具・練習具(領木, 2024)が考案されてきた. ここでは, 注視点を任意の位置へ移動させながら点群データを Side by Side 方式の立体視用画像(ステレオペア)として表示し(第1図), これを裸眼で閲覧する技法について報告する.

2. 点群データのステレオペア表示

点群データを表示するツールに Cloud Compare (Cloudcompare.org, 2024)がある. その特徴を次に示す.

- 複数の点群(cloud data)画像をタイル表示可能
- 視点(カメラ位置や向き)がマウス操作で変更可能
- 複数画像を表示した際に視点の連動が可能
→ Side by Side 方式の立体視用画像として閲覧可能
- × データファイルの規模が大きいため, 点群データのステレオペア操作にはたくさんの PC リソースが必要

Cloud Compare を用いれば, 次の手順に依って点群データをステレオペアとして動的に閲覧することが可能となる. ①二つのビューを用意②それぞれに点群を読み込③双方をタイル表示 ④双方に視差(水平に 1° 程度)を付けてステレオ

ペア化 ④双方をカメラリンク ⑤いずれかのビューをマウスで動かすと双方がステレオペアとして連動する.

第1図に, 連動中のステレオペアの一例を示す.

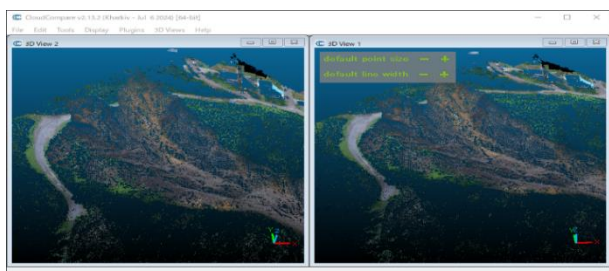
3. 裸眼立体視技法の習得訓練

著者はこれまで応用地質学技術者や地球関係諸学を専攻する学生およびその指導に携わる教員の方々と接する機会があり, 裸眼立体視の技法伝承が絶えつつあることを知った. そこで, 第2図に示す補助具・練習具を考案し, 次の場でこの技法を紹介した.

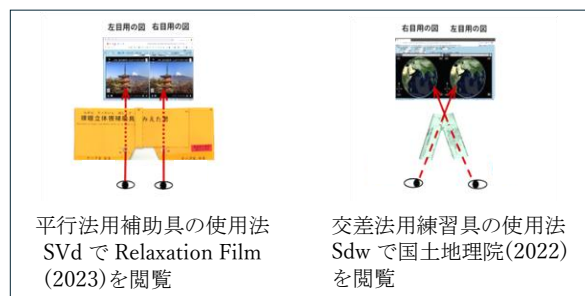
- (1) 職業能力開発指導員および応用地質学技術者を対象とする技能・技術実践研修での展開
 - ・2023年度: 裸眼だけの実習 → 技能習得成果: 不良
 - ・2024年度: 平行法用補助具使用 → 技能習得成果: 良好
- (2) 一般向けイベントでの実践
 - ・第23回こどものためのジオ・カーニバル(2023.11.4-5) 来場者や応用地質学会関西支部ブースの若手技術者や他ブースの教員等に技法紹介と練習具使用法の伝達

4. 点群データの透視図表示

点群データのステレオペアを透視図表示にすると, 第3図のように地物を透過させた向こう側の表示も可能となる. こうして地塊を横断させて観察すれば, 露頭の状況と地形との関係の理解を一層深めることができる.



第1図 2021年7月3日静岡県熱海市土石流災害ドローンALB計測データ(静岡県, 2021)の点群データを Side by Side として CloudCompare (Cloudcompare.org, 2024)で描画.



第2図 立体視の練習具と補助具(領木, 2024)

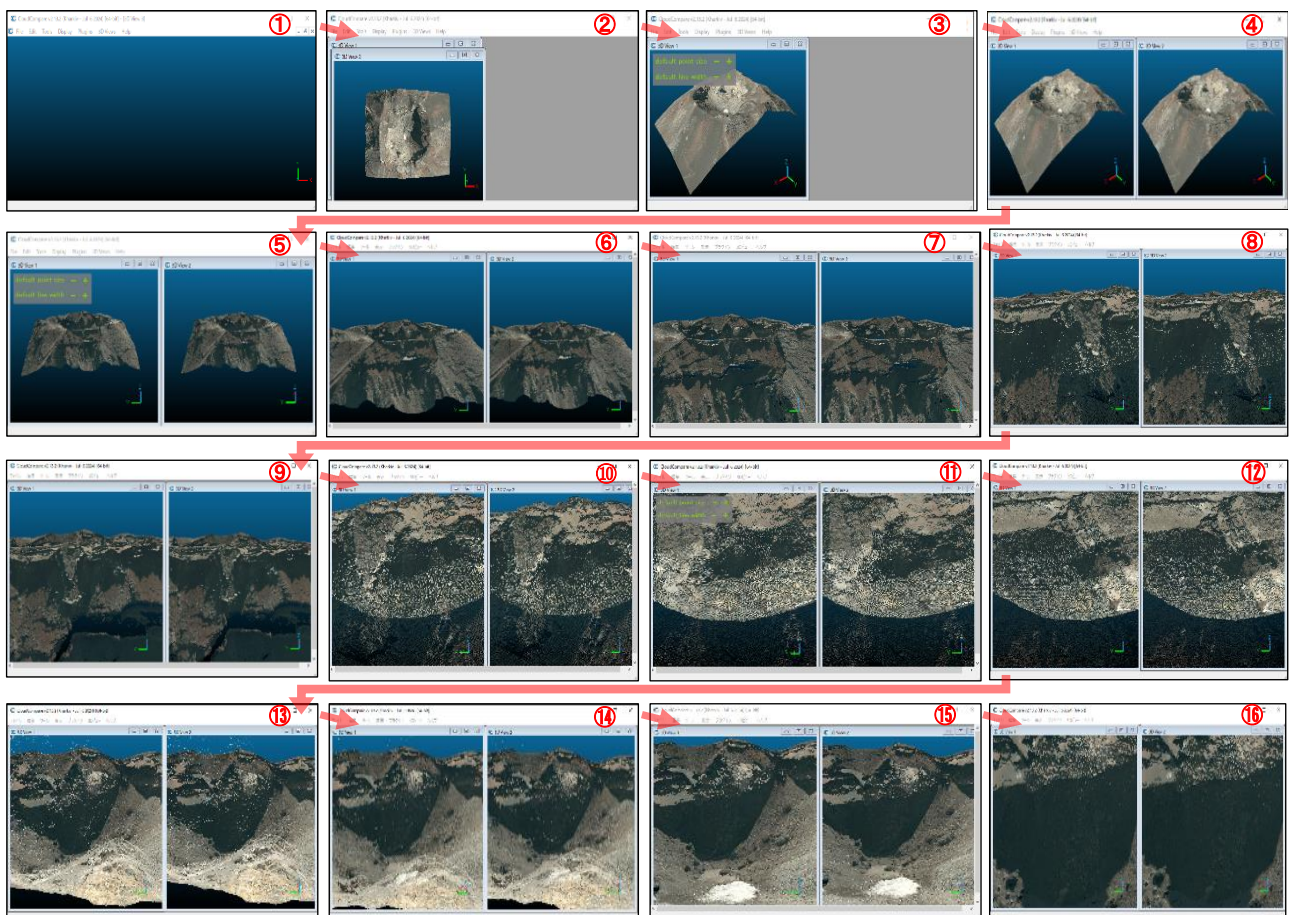
5. まとめ

本報では動視点での点群データのステレオペア表示とその裸眼閲覧技法の習得例について述べた。点群データの取得は専用機器のほか、赤外線カメラを内蔵するスマートフォンでも可能であり(農林水産省, 2023), 点群データの立体視技法は情報地球学の教育研究での利活用が期待できる。

文 献

- Cloudcompare.org(2024) *CloudCompare, 3D point cloud and mesh processing software*. <https://www.danielgm.net/cc/index.html> (2025.5.10.閲覧)
- 国土地理院(2022)地理院地図 Globe トップページ. <https://maps.gsi.go.jp/globe/> (2025.5.10.閲覧)
- 静岡県(2021)2021年7月3日静岡県熱海市土石流災害ドローン ALB 計測データ. <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/20210703-atami-dronealb> (2025.5.10.閲覧)
- 静岡県(2022)VIRTUAL SHIZUOKA 静岡県 富士山および静岡東部点群データ. G 空間情報センター, <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/shizuoka-2021-pointcloud-> (2025.5.10.閲覧)
- 領木邦浩(2019)地理院地図 Globe を利用したシームレス

- 地理情報ステレオビューワー. 第30回日本情報地質学会講演会講演要旨集, pp.31-32, <https://www.jsgi.org/event/abstract/geoinform2019/16.pdf> (2025.5.10.閲覧)
- 領木邦浩(2023)情報地球学におけるソーシャルメディアコンテンツと3D-Movieの裸眼立体視Webアプリケーションによる利活用. 第34回日本情報地質学会講演会講演要旨集, pp.55-56, <https://www.jsgi.org/event/abstract/geoinform2023/28.pdf> (2025.5.10.閲覧)
- 領木邦浩(2024)情報地球学のためのVR映像立体視アプリケーションと裸眼閲覧技法の習得. 第35回日本情報地質学会講演会講演要旨集, pp.49-50, <https://www.jsgi.org/event/abstract/geoinform2024/25.pdf> (2025.5.10.閲覧)
- Relaxation Film (2023) *Relaxing Piano Music “Dreams of Japan” for Studying*. Spa, Coffee, Work, Sleeping, https://www.youtube.com/watch?v=opyly_WViq0, 8:48:19 (2023.10.6.閲覧(2025.5.10.現在リンク切))
- 農林水産省(2023)スマートフォン等による三次元データの活用, スマートフォン等による三次元データを活用した災害復旧の効率化マニュアル(案). pp.10-27. https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_hukkyuu/attach/pdf/index-46.pdf (2025.5.10.閲覧)



第3図 ステレオペアの作図手順とズームインの例 富士山頂の点群データ(静岡県, 2022)を CloudCompare (CloudCompare.org, 2024)で描画. 図中の番号に沿った手順を経るとステレオペア表示となり, 山頂部をズームインしてゆくと岩壁を通り抜けて山頂の火口が見える様子を示している. ①Cloud Compare を開く ②点群データを読み込む(複数データファイル可) ③表示の初期設定を行って entities ファイル(*.bin)として保存 ④新規ビューを用意して③を読み込み, 二つのビューをタイル表示. 視差(水平に1°程度)を付けてステレオペアにし, 二つのビューをカメラリンクする ⑤いずれかのビューをマウスで動かすとステレオペアとして連動(左ドラッグで回転, 右ドラッグで移動, ホイールでズームイン・フェードアウト) ⑥以後は透視図表示において接近(ズームイン)を続けたい時に前面の地物を透過して反対側の地物が見えてくる様子を順次示している.

マルチスペクトルカメラを用いたナラ枯れ被害抽出

米澤 剛*・武田 智喜*・吉田 大介**・山中 遂統***・
藤井 太基****・吉峯 主税****・伊達 直己****

Extraction of Oak Wilt Disease using Multispectral Camera

Go YONEZAWA*, Tomoki TAKEDA*, Daisuke YOSHIDA**, Michito YAMANAKA**,
Taiki FUJII***, Chikara YOSHIMINE**** and Naoki DATE****

* 大阪公立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, 558-8585, Japan. E-mail:yonezawa@omu.ac.jp
** 大阪公立大学大学院情報学研究科 Graduate School of Informatics, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, 558-8585, Japan.
*** 株式会社オオバ OHBA Co., Ltd., 8th Floor, Nittochi Sakaisuji Building, 1-7-3 Awajimachi, Chuo-ku, Osaka-shi, 541-0047, Japan.
**** 大阪府環境農林水産部 Department of Environment, Agriculture, Forestry and Fisheries, Osaka Prefectural Office, 3-13-2 Nodacho, Kishiwada-shi, Osaka, 596-0076, Japan.

キーワード：ナラ枯れ，マルチスペクトルカメラ，ドローン，植生指標

Key words：Oak wilt disease, Multispectral camera, Drone, Vegetation index

1. はじめに

「令和6年度森林及び林業の動向（森林・林業白書）」（農林水産省，2025）によると1980年代末以降，コナラやミズナラなどのナラ類，シイ・カシ類が夏から秋にかけて大量に枯死する現象，いわゆる「ナラ枯れ」が日本の各地で報告されていたが，近年その報告件数が広範囲に広がってきている．ナラ枯れによる森林生態系の破壊や倒木による人的・物的被害リスクの増大は深刻な社会問題となっている．ナラ枯れの主な原因は，カシノナガキイムシ（いわゆるカシナガ）による病原菌の媒介であり，感染した樹木内で菌が繁殖することで急速に樹木が衰えて枯死に至る．このような伝染性の高い森林病害に対して，早期発見と迅速な管理対応が求められている．しかしながら，森林管理者，とくに行政による広範囲な地域での現地観測には人的かつ時間的コストが高く，一元的な監視には限界がある．

そこで本研究ではドローンに搭載したマルチスペクトルカメラを用いたNDVI（Normalized Difference Vegetation Index：正規化植生指数）等の植生指標を活用した被害樹木の有効的な抽出方法および分析方法を検証した．

2. 調査対象地域と使用機器

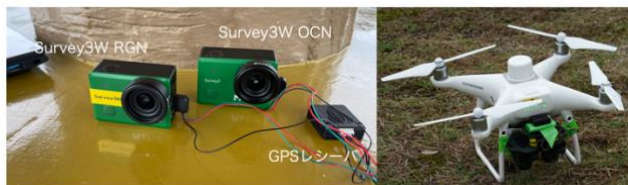
2.1 対象地域

調査対象地域は大阪府環境農林水産部が管轄する大阪府泉南郡熊取町に位置する奥山雨山自然公園内の約300 m²の地域である（第1図）．同地域はナラ類やシイ・カシ類などの広葉樹が多く分布しているため，ナラ枯れの潜在リスクが高いと考えられる．

調査は2024年10月29日の午前（気温18.2℃，湿度75%，曇り・小雨）に大阪府環境農林水産部の立ち会いのもとでおこなわれた．フライトは標高約270 mの奥山雨山自然公園第2展望台を起点に対象地域を2分割（2回のフラ



第1図 調査対象地域（画像は2024年9月26日に観測されたSentinel-2衛星画像）．



第2図 使用したマルチスペクトルカメラ（左）とカメラをドローンに搭載した画像（右）．

イト）しておこない，ドローンには標準搭載カメラ1台とマルチスペクトルカメラ2台，GPSレシーバーを搭載して撮影をおこなった．

2.2 使用機器と処理ソフトウェア

ドローンはDJI社のPhantom 4 RTKを使用し，マルチスペクトルカメラはMAPIR社のSurvey3W RGNとSurvey3W OCNの2台を使用した（第2図）．Survey3は小型かつ軽量で多種のドローンに装着が可能であり，マル

チバンド（3つのバンド）を組み合わせることができる．ここでは植生分析を目的とした RGN（赤 653-668 nm・緑 543-558 nm・近赤外線 835-865 nm）と OCN（橙 598-640 nm・青 476-512 nm・近赤外線 798-848 nm）のバンドを組み合わせたものを選択した．両者の解像度は 5.5 cm/px（高度 120 m）・2.3 cm/px（高度 50 m）である．

3. 分析方法と植生指標

3.1 分析方法

第3図にフライトルートと標準カメラ画像から作成したオルソモザイク画像を示す．撮影は2回のフライトでおこなわれ、①のフライトについては Survey3W RGN で 263 枚と Survey3W OCN で 304 枚撮影し、②のフライトについては Survey3W RGN で 219 枚と Survey3W OCN で 225 枚撮影した．高度は 100 m，撮影間隔は 1.5 秒である．

撮影した画像は、MAPIR Camera Control (MCC) でレンズ補正および画像補正等をおこない、Pix4Dfields を用いてオルソモザイク画像の作成と NDVI 値等の植生指標計算処理をおこなった．

3.2 分析で使用した植生指標

ナラ枯れの被害樹木抽出のため、植生指標として下記の NDVI 値、NDVI2 値、宇都ほか（2010）の NWI 値（Normalized Wilt Index：ナラ枯れ指標）を検討した．

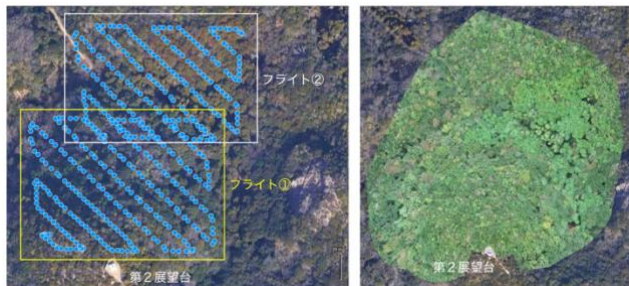
$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

$$NDVI2 = (NIR - ORANGE) / (NIR + ORANGE) \quad (2)$$

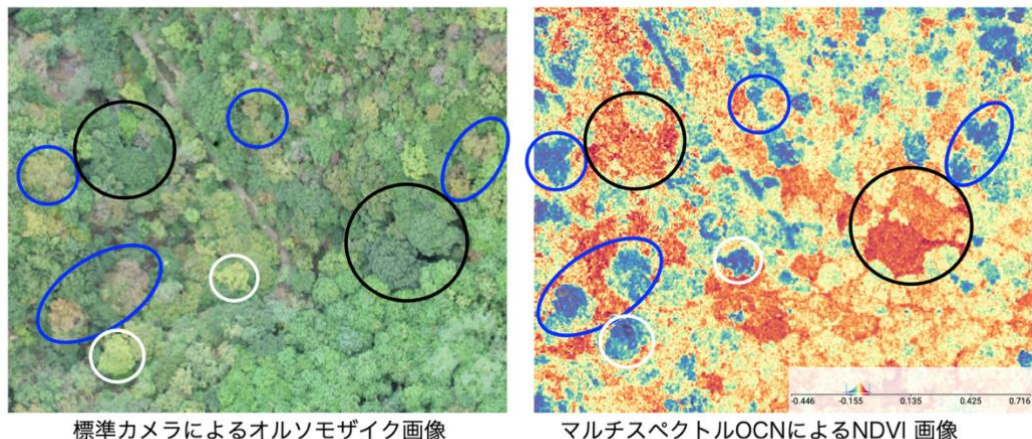
$$NWI = -NDGI^* \times (NDVI + NDGI^*) \quad (3)$$

$$NDGI^* = (GREEN - RED) / (GREEN + RED) \quad (4)$$

式（2）は式（1）の赤を橙に置き換えたものであり、Survey3W OCN で撮影した画像から算出する．式（4）は式（3）を算出するための指標であり、もともと塩害被害水稻を抽出するために作成された指標である（Minekawa *et al.*, 2005）．



第3図 ドローンのフライトルート（左）と標準カメラから作成したオルソモザイク画像（右）．



第4図 Survey3W OCN から算出した NDVI 画像による活性度の低い樹木（青い丸）の抽出例．

4. 結果

いくつかの植生指標を比較した結果、Survey3W OCN による NDVI 画像が活性度の低い樹木を抽出できていた．第4図に一例を示す．青い丸は NDVI 値が低い樹木、黒い丸は高い樹木を抽出した例である．白い丸は NDVI 値は低いが褐葉が見られない樹木である．全体的に NDVI 値は低下しており、天候による反射量の減衰が大きく影響している可能性があるが、相対的な傾向は保持されており一定の有効性はあると考えられる．一方で、本研究で用いた植生指標のみでは时期的に枯葉と紅葉の識別が困難である．また、反射特性の異なる樹種の混在により誤判別の可能性もある．そのため樹種別の反射特性情報の整備やナラ枯れサイクル初期の撮影画像を用いて検証をおこなう必要がある．

5. おわりに

本研究ではマルチスペクトルカメラによる植生指標を用いた分析を通じて、ナラ枯れ被害樹木の抽出を検討した．今回の調査では橙と近赤外線によるバンドの組み合わせが有効であることが示されたが、ナラ枯れサイクルにおける複数時期の撮影画像を用いることで有効な植生指標も変化すると考えられる．今後もモニタリングを継続し、樹種別の反射特性によるフィルタリング等を用いて抽出精度をあげる必要がある．また、ドローンを用いた撮影から画像処理、植生指標の可視化までの一連のワークフローが比較的短時間で完了することから、行政による森林管理としても実用性の高い手法であると考えられる．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 25K04614 の助成を受けたものである．

文 献

- Minekawa, Y., Uto, K., Kosaka, N., Kosugi, Y., Ando, H., Sasaki, Y., Oda, K., Mori, S., Saito, G. (2005) Salt-damaged paddy fields analysis using high-spatial-resolution hyperspectral imaging system, *Proceedings of IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3, pp.2153-2156.
- 農林水産省・林野庁（2025）森林及び林業の動向．令和6年度森林・林業白書，244p.
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r6hakusyo/attach/pdf/250530-27.pdf>（確認：2025/06/06）
- 宇都都昭・小杉幸夫・尾方俊成・小田川信哉（2010）可視/近赤外ハイパースペクトルデータに基づくナラ枯れ指標 NWI に関する研究．写真測量とリモートセンシング，vol.49, no.5, pp.294-309.

植生リモートセンシングを用いたカルデラ地形における地熱構造の推定

宮崎翔*・福田直也*・久保大樹*・小池克明*

Estimation of Geothermal structure Using Vegetation Remote sensing in a Caldera topography

Kakeru Miyazaki*, Naoya Hukuta*, Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.
Email: miyazaki.kakeru.77x@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード：ハイパースペクトル画像, 植生指数, 地熱資源探査, HISUI

Key words: hyperspectral image, vegetation index, geothermal exploration, HISUI

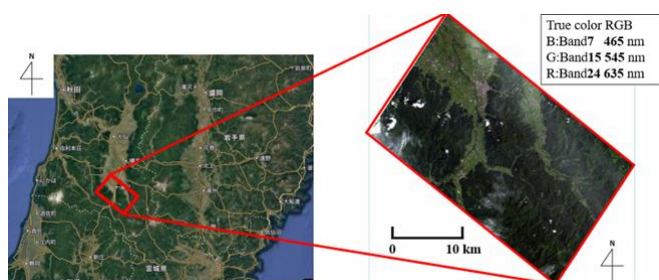
1. はじめに

日本の地熱資源量は 2,347 万 kW と世界第 3 位の地熱ポテンシャルを持ち、再生可能エネルギーとしての活用が期待されている。しかし、地熱発電設備容量は 2022 年 4 月時点で 51 万 kW と世界第 10 位にとどまっている(経済産業省, 2022)。地熱資源の利用が進んでいない一因として、調査・開発コストの高さがあげられる。その改善策として低コストかつ広域的な解析が可能な衛星リモートセンシングの活用が考えられる。しかしながら、日本の地熱地域の多くは植生に覆われており、衛星画像によって直接的に地表物性を解析することは困難である。

そこで本研究では、断層をパスとして上昇したガスや、地温・土壌の変質が植生に及ぼす影響に着目し、植生異常から地下に潜在する熱源の位置と広がりを見極めることを試みた。特に国内において地熱開発有望地となるカルデラ域に注目した。陥没型カルデラはその構造から中心部は堆積層に覆われて地熱兆候が少ないが、外縁部には断層が地表近くまで到達し、地熱兆候が現れている、という不均質な構造を示すことが想定される。植生リモートセンシングを用いてその不均質な地熱構造を捉える手法について検討した。また、植生の種類の違いや地形が本手法の有効性に及ぼす影響についても検討した。

2. 解析対象地域

本研究では秋田県湯沢市を解析対象に選んだ(第 1 図)。本地域は三途川カルデラと呼ばれる南北 20 km、東西 10 km



第 1 図 秋田県湯沢市南部と HISUI データの解析範囲

に及ぶ大規模な陥没型カルデラに位置しており、複数の地熱発電所が稼働しているという活発な地熱地域である。特に解析範囲南部に位置する上の岱・下の岱地域周辺の地熱域に注目した。南側に位置する上の岱地域では、多数の噴気帯や温泉が存在し、上の岱発電所が稼働するなど活発な地熱活動が確認されている。一方、北側の下の岱地域では、地表に明瞭な地熱兆候がほとんど見られないという不均質な地熱構造となっている。

3. 解析手法

3.1 植生指数

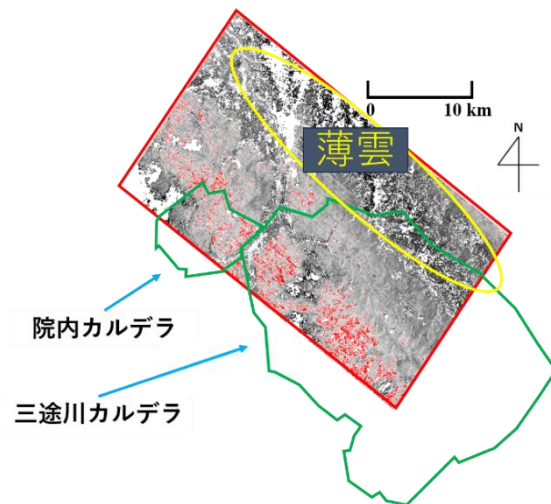
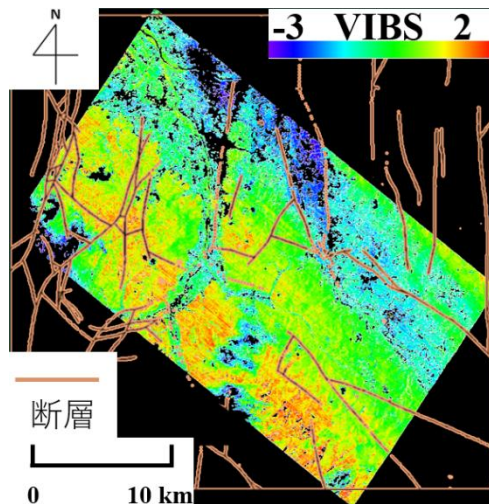
衛星画像として、ISS の日本実験棟「きぼう」に搭載されているハイパースペクトルセンサ HISUI (Hyperspectral Image SUite) の画像を用いた。HISUI データに、放射校正・大気補正・不良バンド除去・ノイズ除去・植生域抽出などの前処理を行った後に、植生ストレスの大小を評価する植生指数である VIBS (Vegetation Index considering Blue shift and Shortwave infrared: Kubo et al., 2025) を適用した。VIBS は式(1)によって求められる。ここで ρ_x は x nm の波長における反射率、 m_i は i 番目の項のバンド比の平均で σ_i はその標準偏差を表す。 $\Delta\rho_x$ は x nm の前後 2 バンドの波長を用いて一次微分を求めたものである。

$$\left(\frac{\rho_{2274} - \rho_{675}}{\rho_{2274} + \rho_{675}} - m_1 \right) / \sigma_1 + \left(\frac{\Delta\rho_{707} - \Delta\rho_{737}}{\Delta\rho_{707} + \Delta\rho_{737}} - m_2 \right) / \sigma_2 \quad (1)$$

植物は水分の欠乏により短波長赤外域 (SWIR) 全体で反射率が増加する (Yu et al., 2000)。VIBS の第 1 項は SWIR の長波長側のピークにおける反射率の強調を目的とする。波長 2274 nm は水分子による電磁波吸収に敏感なバンドである。 $(\Delta\rho_{707} - \Delta\rho_{737}) / (\Delta\rho_{707} + \Delta\rho_{737})$ の部分はブルーシフトと呼ばれる現象を強調する。ブルーシフトとは、植生がストレスを受けた際に生じる変化で、レッドエッジと呼ばれる 720nm 付近の反射率の急激な増加が短波長側、つまりブルー側へ移動する現象であり、クロロフィルの減少などが原因とされている (Rock et al., 1988)。

3.2 VIBS の解析対象地域への適用性

VIBS はインドネシアの地熱地域を対象として実験的に



第2図 (a)VIBS 値の分布と産総研地質 Navi による断層の重ね合わせ、および(b)VIBS 値の上位 5 %分布 (赤) とカルデラとの位置関係

求められた指標である。日本で適用する場合、その他の要因が VIBS の値に影響を与える可能性がある。そのため、インドネシアと異なる植生、および解析対象が山岳域であることを考慮し、異なる植生 (ブナ、ミズナラ、スギ・ヒノキ) の分布域ごとの VIBS 値を集計した結果、有意な差はみられなかった。次に HISUI 付属の DEM データに基づく標高や傾斜方位・傾斜量と VIBS 値にも有意な相関はなかった。よって、本地域における VIBS 分布は、植生の種類や地形にはよらず、地熱システムを反映するものと考えられる。

4. VIBS の適用結果および考察

VIBS 適用結果と産総研地質図 Navi による断層分布との重ね合わせを第2図(a)に示すが、断層と VIBS 値の高い部分が整合的であることがわかる。これより断層をパスとして地下深部から地熱流体が上昇し、地表の植生に熱的・化学的なストレスを及ぼしていることが示唆される。第2図(b)では VIBS 値の上位 5%と特に高い部分に該当する高ストレス域を強調し、カルデラ地形との位置関係を示す。VIBS 値の高い部分は院内カルデラと三途川カルデラの外縁部に広く分布する傾向が見られた。これはカルデラ地形での地熱兆候は外縁部に限られるという上記の特徴に合致する結果である。

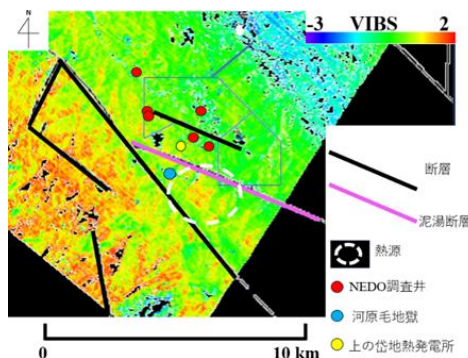
本研究で特に注目する上の岱・下の岱地域付近の VIBS 値分布を第3図に示す。黒色の領域は非植生域として除外した箇所である。泥湯断層を境として VIBS 値の低い北東部と高い南西部に区分されるという明瞭なコントラストが現れている。この要因として、断層と下の岱地域付近の湖底堆積層である三途川層の存在が考えられる。本地域の深部に

は MT 比抵抗構造から熱源の存在が推定されており (Ishizu et al., 2021), 付近の断層をパスとし地表まで地熱流体が上昇している可能性がある。すなわち、第3図南西部には断層が地表近くまで連続し、それらを流動パスとする地熱流体が地表の植生にストレスを及ぼすことで高い VIBS 値となったと考えられる。これに対して北東部は透水性の低い三途川層に覆われているため、地熱流体が地表近くまで上昇できず、低植生ストレスの低い VIBS 値となる。

以上により、植生指数 VIBS を用いた植生リモートセンシングによって、植生の種類や地形特徴の違いによる影響を軽減させながら、カルデラ特有の不均質な地熱構造を把握できる可能性が示された。

文 献

- Rock, B. N., Hoshizaki, T., and Miller, J. R. (1988) Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment*. 24(1), 109–127.
- Ishizu, K., Ogawa, Y., Nunohara, K. et al., (2022) Estimation of spatial distribution and fluid fraction of a potential supercritical geothermal reservoir by magnetotelluric data: A case study from Yuzawa Geothermal Field, NE Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), e2021JB022911.
- 経済産業省: 地熱資源開発の現状について
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/022_04_00.pdf (accessed 2025-05-29)
- 産総研地質図 Navi
<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php> (accessed 2025-01-26)
- Kubo, T., Gonnokami, H., Hede, A. N. H. and Koike, K. (2025) Combining vegetation index with mineral identification for detection of high-geothermal-potential zones using hyperspectral satellite data. *Geothermics*, 125, 103194
- Yu, G. R., Miwa, T., Nakayama, K., Matsuoka, N. and Kon, H. (2000) A proposal for universal formulas for estimating leaf water status of herbaceous and woody plants based on spectral reflectance properties. *Plant Soil*, 227, 47–58.



第3図 上の岱・下の岱地域の VIBS 値の分布

空間情報を考慮した非線形スペクトル分離法の 地質リモートセンシング画像への応用と精度検証

岸本将英*・久保大樹*・小池克明*

Application and Accuracy Verification of a Nonlinear Spectral Unmixing Method for Geologic Remote Sensing Imagery by Considering Spatial Information

Masahide Kishimoto*, Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

* 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-214, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail:
kishimoto.masahide.75z@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード： 非線形スペクトル混合モデル，リモートセンシング画像解析，可視・反射赤外分光画像

Key words： Nonlinear spectral mixture model, Remote sensing image analysis, Visible and reflective infrared spectroscopic image

1. はじめに

地球観測衛星を用いたリモートセンシングは、広範囲にわたる金属鉱床や熱水変質鉱物の兆候を効率的に検出するために広く応用されている。新しい鉱床の発見が年々困難になる中で、地表面鉱物のより精密な識別が求められている。光学センサの空間分解能の制限から、一般にスペクトル画像の画素中には複数の地表物質が混在するため、地表面鉱物のより精密な識別には、観測されたスペクトル情報からどのような鉱物が混在しているかを逆解析的に求める画像処理法が必要となる。この画像処理法はスペクトル分離と呼ばれ、基本的なLSU (Linear Spectral Unmixing: 線形スペクトル分離)の他に、非線形的なスペクトル変動を考慮した手法についても注目されている (Bioucas-Dias et al., 2012)。また、TV 正則化やL2,1 正則化 (協調スパース正則化) のように、空間情報を融合した、より高度なスペクトル分離法も開発されている。

そこで本研究では、熱水変質鉱物をより正確に識別する手法を確立し、ハイパースペクトル画像データ活用の可能性を広げることを目的とする。そのため、熱水変質鉱物が顕著に分布する地域を対象に 3 種類のハイパースペクトル画像およびマルチスペクトル画像を用い、熱水変質鉱物の非線形的なスペクトル混合および空間情報に対応する新たなスペクトル分離法を適用した。対象地域の熱水変質鉱物の推定分布を比較することで、スペクトル画像と新たなスペクトル分離法の有効性を検証した。

2. 研究対象地域と解析データ

米国ネバダ州中部 Cuprite 地域を解析対象地域に選んだ。Cuprite 地域周辺は、乾燥した気候で植生が疎な半砂漠地帯であり、金銀銅を含む有用鉱物が産出されてきた。表層地質は、カンブリア紀から新第三紀までの種々の岩石からな

り、特に明礬石、カオリナイト、オパールなどの熱水変質鉱物が広範囲に分布する (Swayze et al., 2014)。Cuprite 地域では、地質調査や多くのリモートセンシング解析によって表層地質の詳細な調査が行われており、解析手法を検証するのに最適である。

解析データとして、Hyperion, HISUI, AVIRIS の光学センサによって撮影された 3 種類のスペクトル画像を用いた。Hyperion 画像はアメリカ合衆国地質調査所(USGS)が提供するオンラインプラットフォーム「EarthExplorer」を経由して、雲量が最も少ない 2011 年 9 月 19 日撮影で、地形補正を含む幾何補正が施された L1T 画像を取得した。HISUI 画像は雲量が最も少ない 2021 年 10 月 1 日に撮影され、地形補正を含まない基本的な幾何補正が施された L1G 画像であり、経済産業省の取り組みとして開発された衛星データプラットフォーム「Tellus」を経由して取得した。AVIRIS 画像は衛星画像解析ソフトウェア ENVI に付属するものであり、2011 年 8 月 8 日に撮影された地表面反射スペクトル画像を使用した。ピクセルサイズはそれぞれ 30 m, 20 m, 15.5 m である。比較を行いやすくするため、3 種類のハイパースペクトル画像が重なる領域を解析領域に設定した。対象地域と解析領域および地表面鉱物分布を第 1 図に示す。また、スペクトル分離のために、USGS によって公開され、400 nm~2500 nm の波長範囲のスペクトルライブラリを利用した。このスペクトルデータを対象ハイパースペクトル画像のバンドに合わせるために、線形補間によってリサンプリングを行った。

3. 解析手法

3.1 スペクトル画像前処理法

本研究で使用した Hyperion 画像と HISUI 画像に対し、それぞれの画像に特有の gain と offset を利用し、放射輝度変

換および大気上端反射率(TOA : Top of Atmosphere)への変換を行った。gain は Hyperion で VNIR : 2.5×10^{-2} , SWIR : 1.25×10^{-2} , HISUI で VNIR : 1.0×10^{-2} , SWIR : 3.2×10^{-3} であり, offset は Hyperion で VNIR : 0, SWIR : 0, HISUI で VNIR : -10.0, SWIR : -3.2 である。次に ENVI の解析モジュールの一つである FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)を用い, 大気の影響を除外した地表面反射スペクトルに変換した。さらに MNF (Minimum Noise Fraction)を用いてノイズ除去を行い, 解析データとした。AVIRIS 画像の提供データはすでに前処理が施されているため, 直接解析に用いた。

3.2 スペクトル分離法

基本的なスペクトル分離法である LSU は, 観測されたスペクトル情報が各端成分スペクトルの地表面鉱物含有率を重みとする線形結合であると仮定する。LSU はアルゴリズムが簡便で, 計算効率性に優れているという利点があるが, 地形や太陽照度による非線形効果に精度が大きく影響されるという欠点もある。例えば室内実験によって, 照度の変化で LSU の推定精度が異なることが実証されており, センサプローブと対象試料の距離を 3 mm 離れただけの照度の変化が, RMSE (Root Mean Square error)基準で 7 倍以上の精度の差を生じさせる (岸本ほか, 2024)。このような非線形効果を補正したスペクトル分離法として, 自然対数演算と連続体除去を組み合わせた LCR-CLSU (Log and Continuum Removal-Constrained Least Square Unmixing)が提案されている (Zhao et al., 2019)。LCR-CLSU は電磁波の吸収が吸収物質の濃度と電磁波の経路長に正比例するというランベルト・ベールの法則を適用した自然対数演算, および非線形効果を効果的に補正しながら吸収特性を強調できる連続体除去が前処理として実施され, 前処理後のデータを用いて制約付きスペクトル分離を行う。本研究では, USGS スペクトルライブラリを端成分として, L1 正則化によるスペクトル分離と画像全体の端成分を統一する性質を持つ L2,1 正則化によるスペクトル分離の比較を行った。また, ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers : 交互方向乗数法)を計算アルゴリズムに用い, 計算負荷を軽減させた。

4. 結果および考察

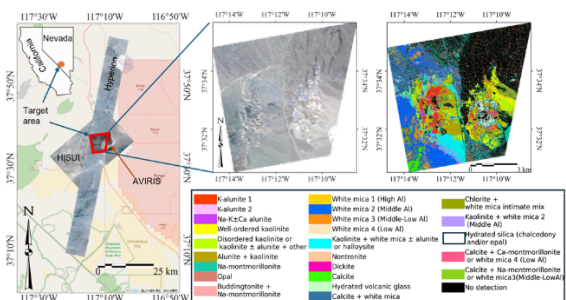
解析結果の一例として, Swayze et al. (2014)に基づくカオリナイトの地表分布と本研究による推定結果を第 2 図で比較する。いずれにおいても, Hyperion 画像による解析結果には線状のノイズが全体に現れているが, HISUI 画像と AVIRIS 画像による解析結果では, ノイズの少ない明瞭なカオリナイト分布が得られた。この結果は, Hyperion 画像の信号雑音比が HISUI 画像や AVIRIS 画像よりも大幅に小さいことに起因する。

一方, HISUI 画像と AVIRIS 画像を用いた解析結果にはカオリナイトなどの一部の鉱物において, 存在量の過小・過大推定の傾向が現れた。L2,1 正則化を用いた結果でも同様であった。カオリナイト抽出の困難さは Vezanzones et al. (2014)でも指摘されており, 明礬石やその他の鉱物とカオリナイトの反射スペクトルの吸収パターンが類似していることが原因と考えられる。他にも画像の不十分な前処理, あるいは衛星画像固有のノイズの影響も原因の可能性もある。Hyperion 画像は, 前処理に関する研究が蓄積されていることから, 不良バンドの除去や大気補正にセンサ情報をより詳細に組み込むことが可能であり, そのためセンサノイズの影響はあるものの, 比較的良好にカオリナイト分布を推定できたと考えられる。よって, 前処理をより精緻化するこ

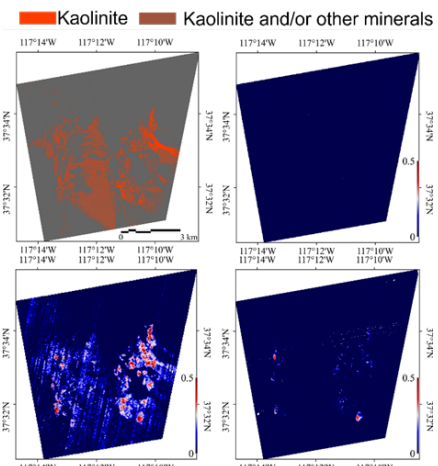
とで HISUI 画像からの推定精度を向上できる可能性はある。

5. まとめ

本研究では, ハイパースペクトル画像を用いて地表面鉱物の識別精度向上を目指し, 新たなスペクトル分離手法を適用した。その結果, 既知の鉱物分布と整合する識別結果が得られたが, 一部鉱物については存在量の過小評価や過大評価が認められた。この要因として, 反射スペクトルの類似性や衛星画像に対する前処理の不十分さが考えられる。これらの要因特定やさらなる改善手法を模索し, より正確な鉱物識別手法を確立することが今後の課題である。



第 1 図 対象地域と解析画像のまとめ。(a) Hyperion, HISUI, AVIRIS 画像データの CIE 1931 等色関数を用いた RGB 画像, (b) 解析対象領域における HISUI データの拡大画像, (c) Vezanzones et al. (2014)による地表面鉱物分布図を(b)に重ねた図



第 2 図 Vezanzones et al. (2014)に基づくカオリナイトの地表面鉱物分布 (a), および L1 正則化手法によるカオリナイトの地表面鉱物含有率分布 (b: Hyperion, c: HISUI, d: AVIRIS)

- Bioucas-Dias, J.M., Plaza, A., Dobigeon, N., Parente, M., Du, Q., Gader, P., Chanussot, J. (2012) Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, pp. 354–379.
- 岸本将英・久保大樹・小池克明 (2024) 可視・反射赤外スペクトルからの特徴量選択による複合試料中の端成分鉱物含有率の推定精度向上. *情報地質*, vol. 35, pp. 67–82.
- Swayze, G.A., Clark, R.N., Goetz, A.F.H., Livo, K.E., Breit, G.N., Kruse, F.A., Sutley, S.J., Snee, L.W., Lowers, H.A., Post, J.L., Stoffregen, R.E., Ashley, R.P. (2014) Mapping advanced argillic alteration at Cuprite, Nevada, using imaging spectroscopy. *Economic Geology*, vol. 109, pp. 1179–1221.
- Zhao, H., Zhao, X. (2019) Nonlinear unmixing of minerals based on the log and continuum removal model. *European Journal of Remote Sensing*, vol. 52, pp. 277–293.

露頭断面中の試料に含まれる微化石から定めた 種の区間帯と生層序単元の離散表現

山口 久美子*・塩野 清治**

Discrete Expression of Species Range Zones and Biostratigraphic Units Estimated by Micro Fossils Content of Samples in an Outcrop Section

Kumiko YAMAGUCHI* and Kiyoji SHIONO**

* Midorigaoka, Heguri Ikoma-gun Nara 636-0941, Japan. E-mail: qys05253@nifty.ne.jp

**大阪市立大学名誉教授 Professor Emeritus of Osaka City University, Daido-cho Ibaraki-shi,
Osaka 567-0844, Japan.

キーワード: 生層序学, 生層序単元, 小区間, ブール代数, 論理地質学

Key words: Biostratigraphy, Biostratigraphic Unit, Short Interval, Boolean Algebra,
Geology-Oriented Logical System

1. はじめに

地質情報の有効なアルゴリズムを考案するためには、地質学の概念を離散表現する必要がある。

生層序単元は地層の含有化石にもとづく層序単元である。タクソン (taxon, 生物の分類単位。複数形はタクサ taxa.) によって設定される。塩野・山口(2023)は生層序単元の基礎となる時間軸上のタクソンの生存期間を半開区間 $[t_1, t_2)$:

$$[t_1, t_2) = \{t \mid t_1 \leq t < t_2, t \text{ は実数}\} \quad (1)$$

であると仮定して、最小区間およびブール代数を用いて離散表現した。タクソンの生存期間を半開区間であると仮定することで、ブール代数による離散表現が可能になる。

山口・塩野(2024)では、露頭断面中の採取試料に含まれる放散虫などの微化石からタクソン区間帯(化石帯)を半開区間で定めて、塩野・山口(2023)による最小区間による離散表現をタクソン区間帯に適用した。これに加えて、本研究では、 $B^n = \{0, 1\}^n$ の元(タプル)でタクソン区間帯を離散表現して、生層序単元を区間帯の集合演算およびブール演算で求める原理を示す。

2. タクソン区間帯

2.1 タクソン区間帯の仮定

層序断面の測線 L は下位の地層から上位の地層に向く方向を正とする。層序断面全体は、 L 上の半開区間 $[x_0, y_0)$ とする。

仮定: $[x_0, y_0)$ 内のタクソン Σ の化石の産出について、

- ・ $[x, y)$ より下位の部分 $[x_0, x)$ でタクソン化石が産出されない
 - ・ $[x, y)$ でタクソン化石が産出される
 - ・ $[x, y)$ より上位の部分 $[y, y_0)$ でタクソン化石が産出されない
- と仮定する(第1図(a)).

$[x, y)$, x, y は、それぞれ、タクソン区間帯、タクソン化石の初産出生層準、最終産出生層準に相当する。

2.2. 露頭断面中の試料から定めたタクソン区間帯

層序断面は露頭断面あるいは深海掘削ボーリングによって取り出されたコアとし、「露頭断面」とよぶことにする。 L 上の地点から試料を採取してタクソン Σ の微化石の有無を調査する。

定義: L 上の $[x_0, y_0)$ 内の下位から順に n 地点 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ で試料を採取して、タクソン Σ の微化石の有無を調査した結果が

・ $p_1, p_2, \dots, p_{i-1}$ で微化石が産出されない

・ $p_i, p_{i+1}, \dots, p_j$ で微化石が産出される

・ $p_{j+1}, p_{j+2}, \dots, p_n$ で微化石が産出されない

であったとき、タクソン Σ の微化石の初産出生層準を p_{i-1} と p_i の中間地点、最終産出生層準を p_j と p_{j+1} の中間地点とし、タクソン区間帯 $\hat{r}(\Sigma)$ を

$$\hat{r}(\Sigma) = [\tilde{x}, \tilde{y}) = [(p_{i-1} + p_i)/2, (p_j + p_{j+1})/2) \quad (2)$$

と定める(第1図(b)).

2.2 最小区間によるタクソン区間帯の離散表現

p_i と p_{i+1} の中間地点 $1/2 (p_i + p_{i+1})$ を l_i , $[x_0, y_0)$ の x_0, y_0 をそれぞれ l_0, l_n とすると、 p_i を含む最小区間 m_i を $m_i = [l_{i-1}, l_i)$ と設定できる。 $p_i, p_{i+1}, \dots, p_j$ で微化石が産出されるとき、 $[\tilde{x}, \tilde{y})$ は $m_i, m_{i+1}, \dots, m_j$ の和集合である(第1図(c)):

$$\hat{r}(\Sigma) = [\tilde{x}, \tilde{y}) = m_i \cup m_{i+1} \cup \dots \cup m_j. \quad (3)$$

2.3 タプルによるタクソン区間帯の離散表現

集合 $B = \{0, 1\}$ の n 個の直積集合 $B^n = B \times B \times \dots \times B$ は

$$B^n = \{(a_1, a_2, \dots, a_n) \mid a_k = 0, 1; k = 1, 2, \dots, n\}.$$

B^n の元 $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ をタプルとよぶ。

最小区間 $m_1, m_2, \dots, m_n$ の幾つかの和集合の集合 L_M を

$$L_M = \{v_1 \cup \dots \cup v_i \cup \dots \cup v_n \mid v_i = \emptyset, m_i; i = 1, 2, \dots, n\}$$

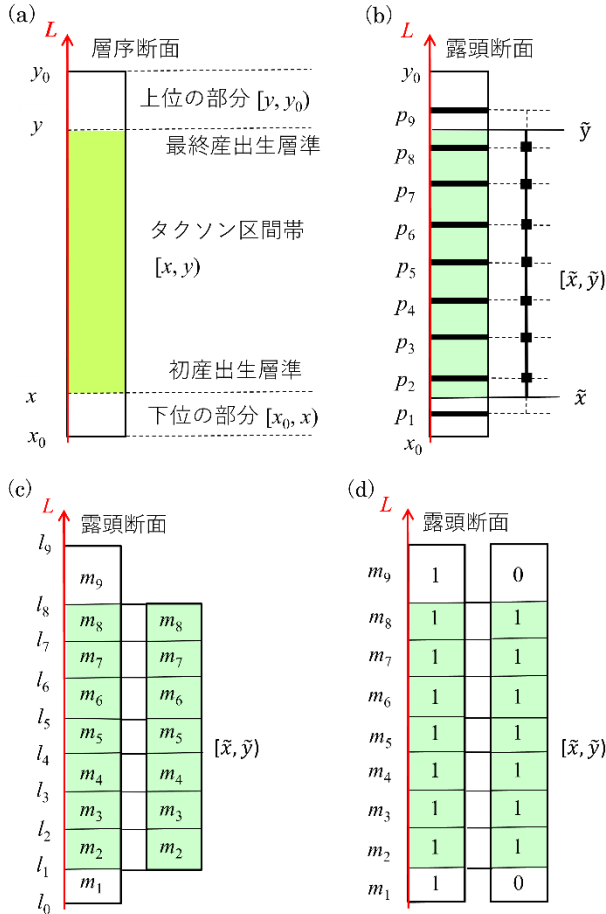
とする。塩野・山口(2023)と同様に、全単射 $h: B^n \rightarrow L_M$ を

$$v_i = \begin{cases} m_i & (a_i = 1 \text{ のとき}). \\ \emptyset & (a_i = 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (4)$$

と定義する。(3)と(4)より、 $p_i, p_{i+1}, \dots, p_j$ でタクソン Σ の化石が産出されるとき、 $[\tilde{x}, \tilde{y})$ は、

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_2 = \dots = a_{i-1} = 0 \\ a_i &= a_{i+1} = \dots = a_j = 1 \\ a_{j+1} &= a_{j+2} = \dots = a_n = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

という成分からなるタプル $(a_1, a_2, \dots, a_n) \in \mathbf{B}^n$ に対応付けられる(第1図(d)).



第1図 (a)タクソン区間帯 $[x, y)$. (b)露頭断面中の試料から定めたタクソン区間帯 $[\tilde{x}, \tilde{y})$. (c)最小区間によるタクソン区間帯 $[\tilde{x}, \tilde{y})$. (d)タプルによるタクソン区間帯 $[\tilde{x}, \tilde{y})$.

3. 種の区間帯と生層序単元の離散表現

3.1 種の区間帯の離散表現

微化石でタクソン Σ を下位の種に分類する. 地点 p_i で産出する微化石の種の集合を $f(p_i)$ とする(第1表). (3)と(5)の原理で種の区間帯が離散表現される(第1表, 第2表).

第1表 分類結果と最小区間による種の区間帯.

地点 p_i	種の集合 $f(p_i)$	種の区間帯					
		α	β	γ	δ	ε	ζ
p_9	$\emptyset$ (空集合)						
p_8	$\{\zeta\}$						m_8
p_7	$\{\delta, \varepsilon, \zeta\}$				m_7	m_7	m_7
p_6	$\{\beta, \delta, \varepsilon\}$		m_6		m_6	m_6	
p_5	$\{\beta, \gamma, \delta\}$		m_5	m_5	m_5		
p_4	$\{\beta, \gamma, \delta\}$		m_4	m_4	m_4		
p_3	$\{\alpha, \beta, \gamma\}$	m_3	m_3	m_3			
p_2	$\{\alpha, \beta\}$	m_2	m_2				
p_1	$\emptyset$ (空集合)						

第2表 種の区間帯の離散表現.

種	産出地点	種の区間帯	
		最小区間	タプル
ζ	p_7, p_8	$m_7 \cup m_8$	(0,0,0,0,0,0,1,1,0)
ε	p_6, p_7	$m_6 \cup m_7$	(0,0,0,0,0,1,1,0,0)
δ	p_4, p_5, p_6, p_7	$m_4 \cup m_5 \cup m_6 \cup m_7$	(0,0,0,1,1,1,1,0,0)
γ	p_3, p_4, p_5	$m_3 \cup m_4 \cup m_5$	(0,0,1,1,1,0,0,0,0)
β	p_2, p_3, p_4, p_5, p_6	$m_2 \cup m_3 \cup m_4 \cup m_5 \cup m_6$	(0,1,1,1,1,1,0,0,0)
α	p_2, p_3	$m_2 \cup m_3$	(0,1,1,0,0,0,0,0,0)

3.3 生層序単元の離散表現

各 $f(p_i)$ のすべての種の微化石だけを産出する L 上の範囲 $\tilde{U}(p_i)$ を生層序単元とする(第3表). 定義または(3)で定まる種 α の区間帯 $\tilde{r}(\alpha)$ を用いて, $\tilde{U}(p_i)$ は区間帯の集合演算で

$$\tilde{U}(p_i) = (\cap_{\alpha \in f(p_i)} \tilde{r}(\alpha)) \cap (\cap_{\beta \notin f(p_i)} \tilde{r}(\beta)^c). \quad (6)$$

塩野・山口(2023)より, $\langle L, \cup, \cap, ^c, \emptyset, [x_0, y_0] \rangle$ と $\langle \mathbf{B}^n, \vee, \wedge, ', 0, 1 \rangle$ はブール同型である. $\tilde{r}(\alpha)$ に対応するタプルを $\tilde{r}(\alpha)$ と書くとき, $\tilde{U}(p_i)$ を表現するタプルは, (6)に対応するタプルの演算式で

$$(\bigwedge_{\alpha \in f(p_i)} \tilde{r}(\alpha)) \wedge (\bigwedge_{\beta \notin f(p_i)} \tilde{r}(\beta)'). \quad (7)$$

単純には, 定義と m_i の設定より, $f(p_i) = f(p_{i+1}) = \dots = f(p_j)$ のとき, $\tilde{U}(p_i)$ は,

$$\tilde{U}(p_i) = m_i \cup m_{i+1} \cup \dots \cup m_j. \quad (8)$$

この $\tilde{U}(p_i)$ に対応するタプル $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ の成分は,

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_2 = \dots = a_{i-1} = 0 \\ a_i &= a_{i+1} = \dots = a_j = 1 \\ a_{j+1} &= a_{j+2} = \dots = a_n = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

第3表 最小区間およびタプルによる生層序単元.

地点 p_i	種の集合 $f(p_i)$	生層序単元	
		最小区間	タプル
p_9	$\emptyset$	$m_1 \cup m_9$	(1,0,0,0,0,0,0,0,1)
p_8	$\{\zeta\}$	m_8	(0,0,0,0,0,0,0,1,0)
p_7	$\{\delta, \varepsilon, \zeta\}$	m_7	(0,0,0,0,0,0,1,0,0)
p_6	$\{\beta, \delta, \varepsilon\}$	m_6	(0,0,0,0,0,1,0,0,0)
p_5	$\{\beta, \gamma, \delta\}$	$m_4 \cup m_5$	(0,0,0,1,1,0,0,0,0)
p_4	$\{\alpha, \beta, \gamma\}$	m_3	(0,0,1,0,0,0,0,0,0)
p_3	$\{\alpha, \beta, \gamma\}$	m_3	(0,0,1,0,0,0,0,0,0)
p_2	$\{\alpha, \beta\}$	m_2	(0,1,0,0,0,0,0,0,0)
p_1	$\emptyset$	$m_1 \cup m_9$	(1,0,0,0,0,0,0,0,1)

4. おわりに

露頭断面中の試料から種の区間帯を定めて, 採取地点 p_i を含む最小区間 m_i を設定して, 種の区間帯を最小区間の和集合, タプルで離散表現した. 地点 p_i で産出する微化石の種の集合 $f(p_i)$ ごとに生層序単元を, 区間帯の集合演算, ブール演算で, あるいは, 単純に求めて離散表現した.

文 献

塩野清治・山口久美子(2023) 種の生存期間を離散的にデータ処理するためのブール代数—タプルの式への変換—. 情報地質, vol. 34, no. 1, pp.3-11.

https://doi.org/10.6010/geoinformatics.34.1_3

山口久美子・塩野清治(2024) 露頭断面中の試料中の微化石から推定される種の区間帯を表現する半開区間. 第35回日本情報地質学会講演要旨集, pp.25-26.

地形断面における斜面崩壊地の滑落崖と移動体の数学表現

植田 允教・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン

Mathematical Expression of Scarp and Main Body of Slope Failure Area in Geometric Section

Mitsunori UEDA, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

大阪公立大学大学院理学研究科地球学専攻 Department of Geosciences, Graduate School of Science,
Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan.
E-mail: so22000t@st.omu.ac.jp

キーワード：斜面崩壊地判読，地形変化，地形断面，法線ベクトル，外積

Key words: Slope Failure Identification, Topographic Changes, Geometric Section, Normal Vector, Cross Products

1. はじめに

斜面崩壊は，斜面上の土砂や岩石が滑り落ちる現象であり，都市計画・環境保全・防災の観点から非常に重要な現象である．そのため，統計的手法や機械学習手法を活用した斜面崩壊地の自動識別に関する研究が進められている (Wang *et al.*, 2021)．しかし，これらの研究は，地形・地質などの多数のデータから各種解析手法を用いて行われており，使用データの精度や解像度に大きく依存する．そのため，対象となる時期や地域の違いにより使用されるデータやモデルの構築に重要となる情報が異なる．より普遍的な識別モデルを実現するためには，斜面崩壊地とその構造 (滑落崖や移動体など) を数学的に表現する必要がある．

植田ほか (2024) は，ランダムフォレストを用いて，斜面崩壊地の抽出を行い，斜面崩壊地のもつ滑落崖と移動体の識別には地形的条件よりも幾何的情報が重要であることを示した．本研究では，法線ベクトルの外積を導入することで，斜面崩壊地の構造である滑落崖と移動体を数学的に表現する方法を提案する．

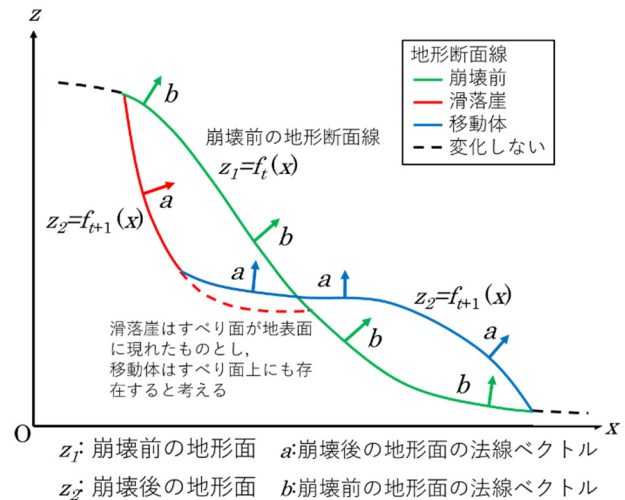
2. 滑落崖と移動体の表現方法

2.1 斜面崩壊による地形面の変化

斜面崩壊地の構造である滑落崖と移動体を地形断面の変化から表現する．

ある点 O を原点とし，水平方向に x 軸，鉛直上向きに z 軸をもつ 2 次元空間が設定されているものとする (第 1 図)．また， x 軸は原点 O から斜面の流下方向にとられる．ある時間における地形断面線を一価関数の曲線 $z=f_t(x)$ とすると，地形断面線は時間発展により， $z_1=f_t(x)$ ， $z_2=f_{t+1}(x)$ ，…と変化していく．斜面崩壊により地形断面線が $z_1=f_t(x)$ から $z_2=f_{t+1}(x)$ に変化したとすると，斜面崩壊を侵食堆積現象として考え，差分により式 (1) の判別式で分類できる．

$$\text{event} = \begin{cases} \text{erosion} & z_2 - z_1 < 0 \\ \text{non change} & z_2 - z_1 = 0 \\ \text{deposition} & z_2 - z_1 > 0 \end{cases} \quad (1)$$



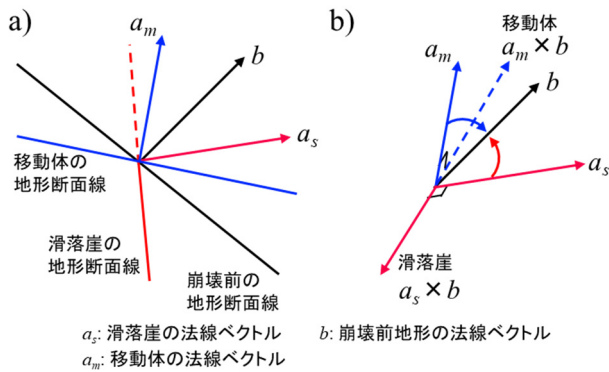
第 1 図 崩壊前後の地形面の変化の関係

滑落崖は侵食領域の一部であり，すべり面が地表面に現れたものとする地下にすべり面が形成され，すべり面の上位にも移動体が存在する．そのため，移動体は侵食領域と堆積領域の両方に含まれる．崩壊後と崩壊前の地形断面線に対して垂直で地上方向を向く単位ベクトル a ， b で表すと，斜面崩壊地の滑落崖と移動体を分類するためには，侵食領域に存在する 2 つの要素を地形形状の違いから分類することになる．また，堆積領域については斜面形状に関わらず移動体となることがわかる．

2.2 地形面の法線ベクトルの変化

崩壊前と崩壊後における地形断面線の関係は，崩壊前後の地形断面線の変化として説明することができる (第 2 図)．崩壊後と崩壊前の地形面に対する法線ベクトル a ， b で表すと，崩壊後と崩壊前の地形面の変化は，2 つの法線ベクトルの外積 $a \times b$ により表現できる (式 (2))．

$$a \times b = (a_x b_z - a_z b_x) \quad (2)$$



滑落崖の法線ベクトルを a_s 、移動体の法線ベクトルを a_m とすると、地形断面線は一価関数かつその法線ベクトルは地上方向に向いているため、外積の方向より斜面崩壊地の滑落崖と移動体を分類することができる（第2図）。よって、式（2）の解の正負により滑落崖と移動体の分類が可能である。ただし、外積のみで表現した場合、地形断面線の角度が変化せず、そのままずり落ちるようなタイプの斜面崩壊は、同方向のベクトルから外積を求めることになるため、表現できない。

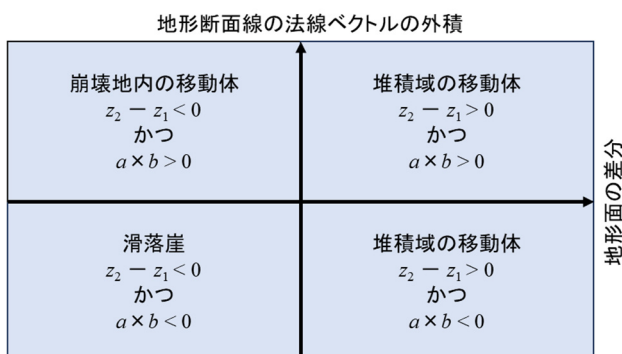
3. 地形断面線における滑落崖と移動体の分類

3.1 分類基準

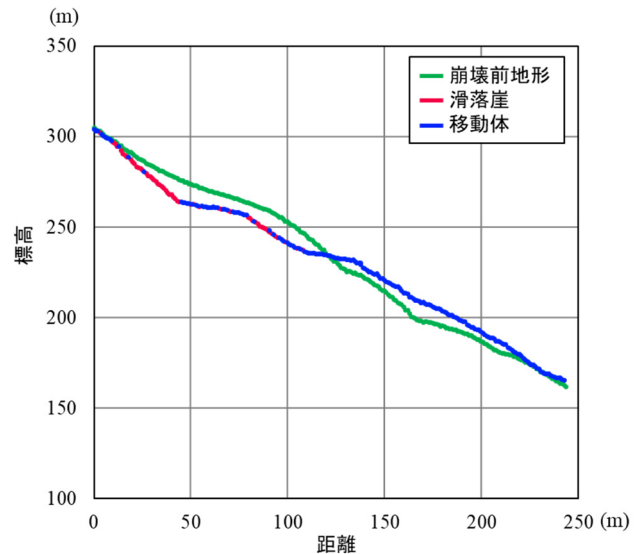
斜面崩壊地の地形変化である式（1）と相対的な地形面の法線ベクトルの外積である式（2）から、滑落崖と移動体を分類するための基準を構築した。分類基準は、 xy 軸の2次元空間で設定され、 x 軸は式（1）である地形の差分、 y 軸は式（2）により求められた地形断面線の法線ベクトルの外積とする。ここで、外積の向きは第2図の $a_m \times b$ 方向を正とした関係を第3図に示す。これにより斜面崩壊地の滑落崖と移動体を分類できることがわかる。差分では、崩壊前より崩壊後の標高が高ければ、形状に関わらず堆積域であるため移動体となり、低ければ滑落崖もしくは移動体とされる。崩壊後における地形断面線の法線ベクトル a から崩壊前の地形断面線に対する法線ベクトル b の外積をとると、標高が低くなった領域において0を基準とし負の値であれば滑落崖、正の値であれば移動体となることがわかる。

3.2 斜面崩壊地の自動抽出

兵庫県丹波市の北部地域で発生した斜面崩壊地を対象に地形断面線の滑落崖と移動体の自動分類を行った（第4図）。地形データは斜面崩壊の前後に取得された航空レーザ測量データから1 m DEMを作成し使用した。作成した1 m



第3図 斜面崩壊地分類のための特徴空間



第4図 地形断面線における滑落崖と移動体の自動分類

DEMを用いて地形断面線を作成し、差分と法線ベクトルの外積を求め、自動的に滑落崖と移動体を分類した。斜面崩壊地の滑落崖と移動体が数値的に表現されたことで、概ね斜面崩壊地の地形断面線が滑落崖と移動体に分類されていることがわかる。

4. おわりに

本研究では、崩壊前後の地形断面線から法線ベクトルの外積を用いることで、斜面崩壊地の滑落崖と移動体が数学的に表現できることを示した。これにより、滑落崖と移動体を数値的に取り扱うことができるようになり、2つの特徴を地形断面線から自動的に分類できるようになった。

しかし、次の問題が残る。

① 3次元への拡張

本研究では、地形断面線という2次元での滑落崖と移動体の分類について議論したが、より一般的に考えるためには3次元への拡張する必要がある。そのためには、斜面方位の問題を解決しなければならない。本研究で示した原理は、 x 軸を流下方向に固定することで、外積における座標軸を決定している。しかし、3次元に拡張した場合、相対的な面同士の関係を表現する必要がある。

② 地形の差分と外積の関係

滑落崖と移動体の自動分類において、地形の差分と法線ベクトルの外積を用いて分類基準を設定したが、2つの要素の関係は厳密ではない。そのため、地形面の差分と地形面の法線ベクトルの外積の関係を数学的にまとめる必要がある。

①と②の問題を解決することで、3次元における斜面崩壊地の滑落崖と移動体を数値的に取り扱うことができるようになる。

文 献

- 植田允教・根本達也・ベンカテッシュラガワン(2024) ランダムフォレストと Change Vector Analysis を用いた斜面崩壊地における地形変化の抽出. 第35回日本情報地質学会講演会 講演要旨集, pp.29-30.
- Wang H., Zhang L., Yin K., Luo H., Li J. (2021) *Landslide identification using machine learning*, Geoscience Frontiers, vol.12, no.1, pp.351-364.

地層対比に向けたボーリング交換用データの現状分析と活用手法

櫻井 健一^{*}, ^{**}・米澤 剛^{**}・根本 達也^{***}

Current Analysis and Utilization Methods of Borehole Data Exchange for Stratigraphic Correlation

Kenichi SAKURAI^{*,**}, Go YONEZAWA^{**} and Tatsuya NEMOTO^{***}

^{*} 産業技術短期大学情報処理工学科 Department of Information Engineering, College of Industrial Technology, 1-27-1 Nishikoya Amagasaki-City, Hyogo 661-7561, Japan.

E-mail: sakurai@cit.sangitan.ac.jp

^{**} 大阪公立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

^{***} 大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

キーワード: ボーリング交換用データ, 地層対比, データベース

Key words: Borehole Data Exchange, Stratigraphic Correlation, Database

1. はじめに

近年の建築業界における DX(デジタルトランスフォーメーション)の進展に伴い、従来以上に多くの情報がデジタルデータとして記録・保管されるようになってきている。また、国土交通省や地方自治体が発注する地質調査業務においては、「地質・土質調査成果電子納品要領」(国土交通省, 2016)に基づき、調査成果の電子納品が義務付けられている。

電子納品された地質調査成果物のうち、ボーリング調査に関するデータは、国土地盤情報サイト「KuniJiban」(土木研究所)や「国土地盤情報データベース」(一般財団法人国土地盤情報センター)などを通じて、デジタルデータとして一般公開されている。

これら公開されているボーリングデータを地層対比に活用するためには、信頼性の高いデータを用いる必要がある。しかしながら、データの中には不正確な情報も含まれているため、利用可能なデータと排除すべきデータを精査することが求められる。

本研究では、2024 年 8 月末時点で国土地盤情報サイトに公開されているボーリングデータのうち、国土交通省が提供する 19 万 1,717 本のデジタルデータを対象とし、地層対比への有効性を検証した。

2. ボーリング交換用データの現状分析

2.1 ボーリング交換用データのバージョン

本研究で対象としたボーリング交換用データは、現在 6 種類のバージョンに分類される。各バージョンのファイル数と構成比を第 1 表に示す。ボーリング交換用データのうち、約 97.7%が Version 2.10 以降のバージョンで構成されており、その中でも Version 2.10 が約 57.0%を占めている。

ボーリング交換用データでは、バージョンごとにデータ項目の追加・削除や、使用されるコード体系の変更が行われている。そのため、異なるバージョンのデータを一括してコンピュータ処理するには、各バージョン間で異なるデータ項目やコード体系を統一する必要がある。

第 1 表 ボーリング交換用データのバージョンとファイル数

バージョン	ファイル本数と割合
1.10	878 (0.5%)
2.00	2,397 (1.3%)
2.01	1,117 (0.6%)
2.10	109,349 (57.0%)
3.00	31,446 (16.4%)
4.00	46,530 (24.4%)
合計	191,717

2.2 調査実施時期

本研究で対象としたボーリング交換用データを、調査終了年ごとに集計した。

対象データは 1950 年代から存在しており、1960 年代以降、件数が徐々に増加した。2000 年代以降は、10 年間ごとに 4 万本を超えるボーリングデータが公開されており、2000 年以降のデータは全体の約 63.7%を占めている。一方で、調査実施時期が不明確なデータも存在し、その件数は 67,402 本(全体の約 35.2%)にのぼる。これらには、調査時期の記録に誤記があるものや、調査開始または終了日のいずれかを誤って記録されたと推定されるケースが含まれている。このように調査時期が不明確なデータについては、地層対比への活用の際に慎重な判断が求められる。

3. ボーリング交換用データの活用手法

3.1 Version 2.10 以前のデータ

ボーリング交換用データでは、バージョンによって情報構造やコード体系に差異が見られる。その一例として、土質岩種区分に関する表記が挙げられる。Version 2.10 以前のデータでは、旧版の「地質・土質調査成果電子納品要領(案)付録資料」に掲載された「土質区分コード表」に基づくコードが採用されていた(第 1 図)。一方で、Version 3.00 以降のデータは、JIS A 0206「地質図-工学地質図に用いる記号、色、模様、用語及び地層・岩体区分の表示とコード群」に準拠した岩相コード体系が導入されている(第 2 図)。

本研究では、Version 2.10 以前のコア情報に含まれる分類コードを、JIS A 0206 に準拠したコードへ変換する処理を

```
<土質岩種区分>
<土質岩種区分_下端深度>17.50</土質岩種区分_下端深度>
<土質岩種区分_土質岩種区分1>砂</土質岩種区分_土質岩種区分1>
<土質岩種区分_土質岩種記号>S</土質岩種区分_土質岩種記号1>
<土質岩種区分_分類コード1>02100</土質岩種区分_分類コード1>
<土質岩種区分_土質岩種区分2>
<土質岩種区分_土質岩種記号2>
<土質岩種区分_分類コード2>
</土質岩種区分>
```

第1図 Verison2.10 における砂の記録例

```
<岩石土区分>
<岩石土区分_下端深度>10.90</岩石土区分_下端深度>
<岩石土区分_岩石土名>砂</岩石土区分_岩石土名>
<岩石土区分_岩石土記号>S</岩石土区分_岩石土記号>
<岩石土区分_岩石群>
<岩石土区分_岩石群コード>1</岩石土区分_岩石群コード>
<岩石土区分_岩石土コード>
<岩石土区分_岩石>531211000</岩石土区分_岩石>
<岩石土区分_変成岩岩相>
<岩石土区分_変成岩岩石>
</岩石土区分_岩石土コード>
</岩石土区分_岩石群>
</岩石土区分>
```

第2図 JIS A 0206 における砂の記録例 (Version3.00)

第2表 土質・岩種区分コード変換実施結果

変換手法	項目			JIS名称	件数
	分類コード	土質岩種記号	区分		
完全一致	完全一致	完全一致	完全一致	-	239,540 (25.6%)
2項目が一致	完全一致	完全一致	-	-	80,311 (8.6%)
	完全一致	-	完全一致	-	366,737 (39.1%)
1項目のみが一致	完全一致	部分一致	-	-	96 (0.0%)
	完全一致	-	-	-	94,240 (10.1%)
	-	完全一致	-	-	6,661 (0.7%)
	-	-	完全一致	-	14,949 (1.6%)
JIS A 0206に準拠	-	-	-	完全一致	83 (0.0%)
	-	-	-	部分一致	24,901 (2.7%)
項目が部分一致	部分一致	-	-	-	95,661 (10.2%)
	-	部分一致	-	-	991 (0.1%)
変換不可					12,940 (1.4%)
合計					937,110

行った。さらに、変換が困難であったデータについては補正・補完を試み、地層対比に用いることが可能な形式に変換する手法について検討した。

本研究で使用したボーリング交換用データの変換結果を第2表に示す。「－」と記載された箇所は、該当データが保存されていないか、他項目との整合が取れなかったことを示している。

変換処理は、分類コード、土質岩種記号、区分の3項目の一致状況に基づき、以下の5つのケースに分類される。変換された結果は、各手法によって信頼度が異なる。

① 3項目すべてが完全一致

分類コード、土質岩種記号、区分のいずれも正確に一致し、JIS A 0206に基づく分類コードへの変換が可能であったデータは、情報の整合性が確保されており、信頼性の高いものと判断できる。

② 3項目のうち2項目が一致

分類コードが一致しており、かつ土質岩種記号または区分のいずれかが一致しているデータは、一致した2項目間で内容の整合性が確認できることから、情報の整合性はおおむね確保されていると判断できる。

③ 3項目のうち1項目のみが一致

3項目のうち、有効な情報が1項目のみであるデータについては、その情報を基にJIS A 0206に準拠した岩相コードへの変換が可能な場合がある。このようなデータでは、他の2項目が欠損または誤って記録されている可能性が高く、残された1項目の情報が正確であるかどうかを判断することが困難である。

④ JIS A 0206に準拠した名称を用いて変換

Version 2.10以前の区分データと、JIS A 0206に準拠した名称を比較することによって、JIS A 0206に基づく岩相コードへの変換が可能な場合がある。ただし、区分データは、データ作成者が自由に記述して保存できることから曖昧さや誤記が発生している。そのため、データの利用は慎重な判断が求められる。

⑤ 3項目のいずれかが部分的に一致

分類コード、土質岩種記号、区分の情報が記録されているにもかかわらず、JIS A 0206に対応するデータが存在しない場合がある。このようなケースでは、分類コードや土質岩種記号をそのまま用いるのではなく、登録されているデータの部分一致を行うことで、変換が可能となる場合がある。この方法により、研究で用いたデータ全体の96,652件(約10.3%)で変換が可能であった。

この場合、正確な情報が変換後のコードから読み取れなくなるが、元データを適宜参照できる仕組みを整備しておくことで、元の情報が持つ意味を保持したまま、変換後データとして活用することが可能となる。一方で、このように一部の情報に基づいて変換を行ったデータについては、他の信頼性の高いデータと組み合わせる用いることにより、補助的な参考情報としての活用が期待できる。

3.2 Version 3.00以降のデータ

JIS A 0206の準拠した分類コードを使用しているボーリング交換用データ Version 3.00 および Version 4.00 について信頼度を検証した。

3項目すべてが完全に一致しているデータは、Version 3.00では全体の約56.5%、Version 4.00では約85.0%を占めていた。これらのデータは情報の整合性が確保されており、信頼性の高いものと判断できる。一方、JIS A 0206を基準とした分類コードを用いて記録されたボーリング交換用データであっても、情報に不整合が含まれている可能性があり、地層対比などへの活用の際には、利用者自身が慎重に可否を判断する必要がある。

4. まとめ

本研究では、国土地盤情報サイトに公開されているボーリング交換用データ19万1,717件を対象に、地層対比への活用を目的としたデータの整合性と変換可能性について検証を行った。

Version 2.10以前のデータでは、JIS A 0206に準拠した岩相コードへの変換にあたり、分類コード・土質岩種記号・区分の3項目の一致状況に応じて、5つのケースに分類した変換手法を検討した。また、Version 3.00以降のデータでは、情報の整合性は大幅に向上しているが、依然として一部に不整合が存在することから、活用にあたっては慎重な判断が求められる場合がある。

謝辞：本研究は、(一財)日本建設情報総合センター研究助成の助成を受けて行った。助成番号:2023-7。

文 献

国土交通省(2016) 地質・土質調査成果電子納品要領。

国土交通省。

国土交通省地盤情報検索サイト KuniJiban。

URL : <https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/> (確認日 : 2025/06/01)。

一般財団法人国土地盤情報センター 国土地盤情報データベース。URL : <https://ngic.or.jp/> (確認日 : 2025/06/01)。

地層処分事業のサイト調査におけるデータマネジメントシステム

西尾 光*・尾上 博則*・大城 遥一*・石橋 梢*

Data Management System for Site Investigation in Geological Disposal Projects

NISHIO Hikaru*, ONOE Hironori*, OSHIRO Yoichi* and ISHIBASHI Kozue*

*原子力発電環境整備機構 Nuclear Waste Management Organization of Japan, 1-23, Shiba 4-Chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan. E-mail: hnishio@numo.or.jp

キーワード：地層処分，データマネジメントシステム，処分地選定調査

Key words: Geological Disposal, Data Management System, Site Investigation

1. はじめに

地層処分の対象とする放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物）は、地下 300m 以深の安定した岩盤に地層処分を行うこととなっている。この処分地を選定するためには、段階的な調査を実施し、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい変動を回避し、地温や地下水などの地質環境特性が好ましい場所を選定する。このため現地調査においては、地表踏査、物理探査、ボーリング調査、室内試験に加えて、地下調査施設においても、様々なデータを取得する。また、これらのデータを用いて地質環境モデル（地層や断層などの形状や分布、岩盤や地下水の熱的・水理学的・力学的・化学的な性質の状態などを可視化したもの）を構築する。さらに、これらのデータの取得目的や方法といったメタデータや品質管理記録の PDF ファイルなども併せて記録・保管する。

処分地選定調査で取得するこれらのデータの量や関与する多様なユーザーを考慮すると、データマネジメントが非常に重要であり、併せてそれを支援するデータマネジメントシステムの設計・構築が必要である（IAEA, 2024）。また、原子力規制委員会（2022）では、「各調査段階において行われるボーリング等の調査によって得られた情報は、長期間にわたる埋設事業の期間中、保存しておく必要がある。」としている。

本稿では、処分地選定調査における活用を目指して設計・構築を進めているデータマネジメントシステム（名称：サイト特性評価支援システム（Geo-Synthesis Support System）、略称：G3S（ジースリーエス）、以下、G3S）の整備の進捗状況を紹介する。

2. データマネジメントシステムの整備

処分地選定調査において G3S を活用することで、データの透明性、信頼性、追跡性、検索性、保護及び情報セキュリティを確保しつつ、一元的に管理することを目標としている。G3S で取り扱う調査・試験の種類は 250 程度と多く、また構造化データと非構造化データを取り扱うことに加えて、電子承認によるデータ登録機能、地図上やキーワードによるデータの検索機能なども実装する。そのため、要件定義、

基本設計、詳細設計、開発と段階的に整備に取り組む。

2024 年度は要件定義及び基本設計を実施した。ユーザーの UI（User Interface）・UX（User eXperience）を重視し、想定ユーザーへのインタビューやワークショップの実施、ペルソナやカスタマージャーニーの設定等を行った。IAEA（2024）では、データの登録、保存、表示を容易に実施できる機能とともに、適切なアクセス権限の設定による保護策などの機能の必要性が示されている。また、OECD/NEA（2018）では、長期間にわたりデータを検索可能にし利用するためには、適切なメタデータの付与が重要とされている。これらを参考にしながら、G3S に必要な機能を検討した。

基本設計では、データモデル（Entity Relationship Diagram）やデータ定義書を作成しつつ、将来的に G3S と連携する可能性があるモニタリング装置について情報収集を行った。また、データを登録する際に用いる様式（帳票）や米国 Figma 社の Figma を用いて主要な画面イメージの作成を行った。

3. データマネジメントシステムの構成

3.1 「G3S」のシステム概要

G3S は、処分地選定調査で取得したデータ及び構築した地質環境モデル、それらのメタデータなどを保存するデータレイクに相当する領域、NUMO と調査会社などの関係者間でデータの速報性を重視して情報共有することを目的とする領域、各種モニタリングデータを保存する領域の 3 つから構成される（第 1 図）。以下では、主にデータレイクに相当する領域について紹介する。

3.2 機能

テーブル形式のデータの登録時には、記載済みの CSV 形式の帳票を G3S に読み込ませた後に、必要に応じて NUMO の担当者がメタデータを入力する。その後、NUMO の責任者などによる承認の後に他のユーザーから検索が可能な状態となる。長期にわたる事業を鑑み、組織改編などに容易に対応できるよう、この承認ルートは任意な設定を可能とした。手書きの資料は、データの登録時に OCR を実施し、全文検索の対象とする。

データの検索時には、入力したキーワードによる全文検索や各種条件を設定した絞り込み検索、地図上に調査地点を表示させる地図検索などを機能として実装する。

地質環境モデルを構築する際には、複数のデータを整合的かつ調和的に解釈する。その際には、プロジェクト管理やモデルのバージョン管理、評価の一貫性の観点から、地質環境モデルの構築に用いるデータを特定の時点で固定し（以下、データフリーズ）、その後取得したデータは適用できないようにすることが重要である。その支援として、地質環境モデルの構築時に使用したデータをデータセットとして整理する機能やデータフリーズを定義する機能、データフリーズのバージョンを検索する機能などを実装する。併せて、ツリー構造でデータを表示することで、データ間の関連性を視覚的に描画する。

3.3 非機能

情報処理推進機構（2018）やデジタル庁（2024）を参考にしつつ、G3S の想定ユーザーやデータ量などを考慮して非機能要件を検討した。G3S はクラウドサービスを活用してシステムを構築し、ソフトウェア製品は広く市場に流通し、利用実績を十分に有する製品を活用する。また、アプリケーションプログラムの動作、性能等に支障をきたさない範囲において、可能な限りオープンソースソフトウェア製品の活用を図る。

G3S の主なユーザーは NUMO 職員と調査会社の関係者などであることから、同時アクセス数は最大でも 100 以下であり、高負荷となるような同時、大量アクセスは発生しない見込みである。一方で、データ量については、特に物理探

査では調査の進展に応じて十数 TB 単位で増加する見込みのため、容易に拡張できる構成とする。

4. 今後に向けて

データマネジメントは、長期間にわたる地層処分事業にとって必要不可欠である。2025 年度・2026 年度は詳細設計及び開発を実施する。以降はデータの拡充を図りつつ、保守・運用を行う。また、実運用に基づいたニーズに応じてシステムの改良を行うことを計画している。

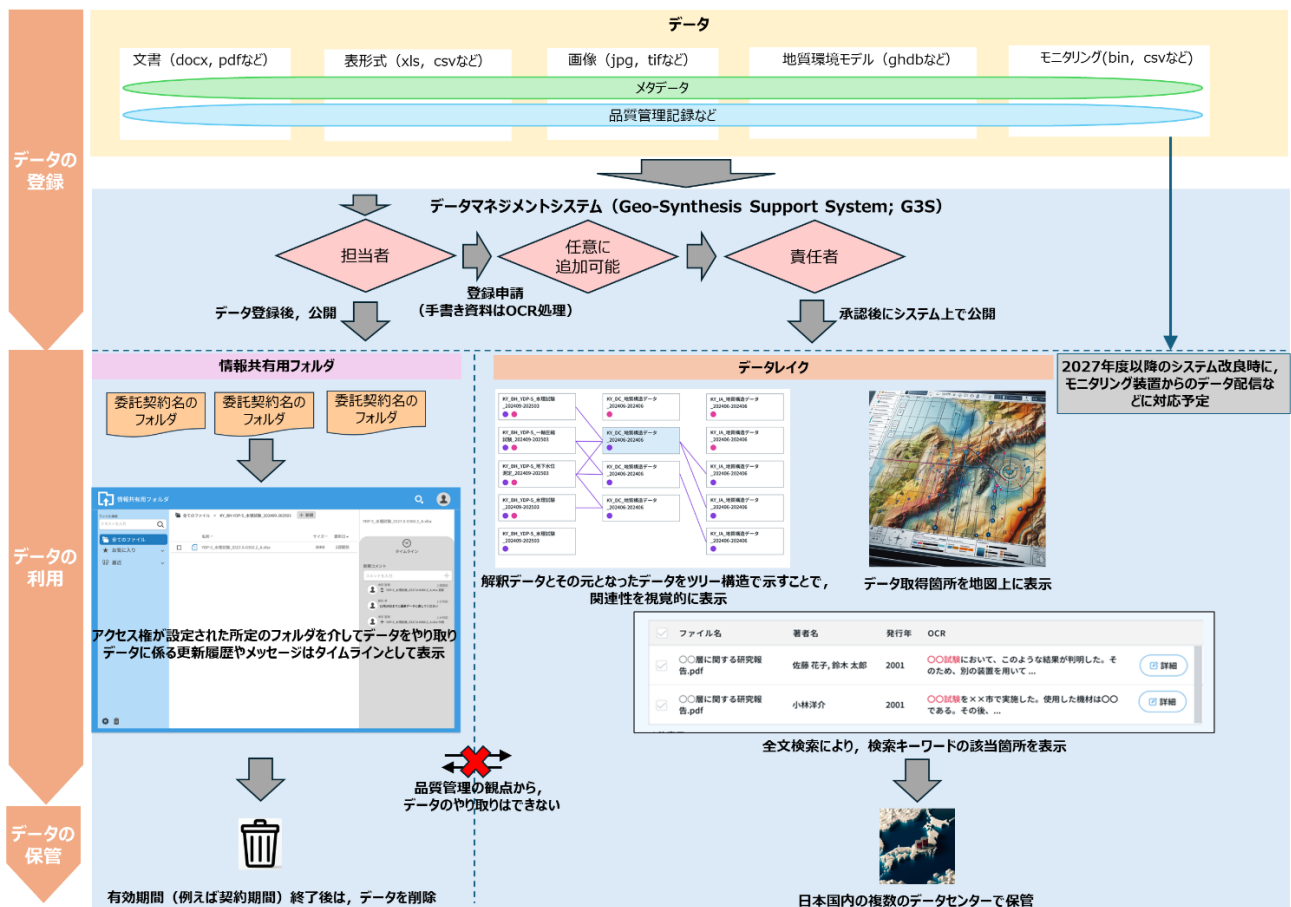
文 献

IAEA(2024) Management of Site Investigations for Radioactive Waste Disposal Facilities, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.40.

原子力規制委員会（2022）特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項。原規規発第 2208241 号原子力規制委員会決定。

OECD/NEA(2018) Managing Information and Requirements in Geological Disposal Programmes, NEA/RWM/R (2018)2.

情報処理推進機構（2018）非機能要求グレード 2018, システム基盤の非機能要求に関するグレード表, 2018 年 4 月。デジタル庁（2024）デジタル・ガバメント推進標準ガイドライン 実践ガイドブック, デジタル社会推進実践ガイドブック DS-120, 2024 年（令和 6 年）5 月 31 日。



第 1 図
データマネジメントシステムの概要

360 度動画によるリアリティキャプチャ技術を用いた施設点検の事例

鏡原聖史*・立川浩祥*・塩谷智基**・麻植久史**・久保大樹***・福地良彦****

Case Study of Civil Engineering Structure Inspection Using Reality Capture Technology with 360-Degree Video

Satoshi Kagamihara*, Hiroyoshi Tachikawa*, Tomoki Shiotani**, Hisafumi Asaue**, Taiki Kubo***
and Yoshihiko Fukuchi****

* 大日本ダイヤコンサルタント株式会社 Dia Nippon Engineering Consultants Co.,Ltd.,
3-2-5 Hachiman-dori,Chuo-ku,Kobe,Hyogo 651-0085, Japan.E-mail:kagamihara_satoshi@dcne.co.jp,
tachikawa_hiroyoshi@dcne.co.jp

** 京都大学 成長戦略本部 インフラ先端技術産学共同研究部門, iTi Laboratory, Office of Institutional
Advancement and Communications (IAC), Kyoto University, 202, Innovation Plaza Kyoto, Nishikyo,
Kyoto 615-8245, Japan. E-mail:shiotani.tomoki.2v@kyoto-u.jp, asaue.hisafumi.7a@kyoto-u.ac.jp

*** 京都大学大学院 Department of Urban Management,Graduate School of Engineering, Kyoto
University, Katsura C1-2-214, Kyoto 615-8540, Japan.E-mail: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp

**** オートデスク株式会社 Autodesk Inc., Mori Tower 8F, Toranomon Hills, 1-23-1 Toranomon,
Minato-ku, Tokyo 105-6308, Japan. E-mail: Yoshihiko.fukuchi@autodesk.com

キーワード：リアリティキャプチャ技術，施設点検，三次元点群化

Key words : reality capture technology, Structure Inspection, 3D point cloud

1. はじめに

近年、Society 5.0 の実現を目指して、土木業界においても DX が推進され、業務効率化を図る取り組み（国土交通省，2022）が進められている．土木施設，例えば橋梁や砂防堰堤などを対象とし，さまざまなデジタル技術を用いた点検手法が提案されている（例えば，小椋ら，2023）．

一方で、道路の擁壁などの小規模な線状構造物については、その数が膨大であり、施設延長も長いことから、デジタル技術を用いた点検の事例は少ないのが現状である。これまで、道路の防災施設の管理は、道路防災点検や道路土工構造物点検などによって定期的 to 実施されており、着目箇所の経時変化を写真で記録し、点検者がコメントを記載するなどしている。

本報告では、道路施設の点検における DX を推進する取り組みの一つとして、360 度動画によるリアリティキャプチャ技術を用いて施設の経時情報の記録・共有を行い、さらに着目箇所における現地計測結果を融合させた事例について紹介する。

2. 施設点検の現状と DX を推進するための課題

施設点検のうち、道路防災点検要領（国土交通省，2006）によると，あらかじめ設定した点検調査区間で安定度調査を行い，箇所別記録表（第1図参照）を整理し，あらかじめ決められている評価項目に沿って点数付けを行い，その評定点をもとに総合評価を行う．その結果，対策が必要と判断される要対策箇所や，防災カルテを作成して点検を継続し経過観察を行うカルテ点検箇所，さらに特に新たな対応を必要としない箇所を決定し，対応を行っている．擁壁にかかわる箇所別記録表は，第1図に示すように，擁壁の

[illegible]

第1図 箇所別記録表（擁壁）記入例（国土交通省，2006）

展開図および変状箇所、位置図、所見、予想災害規模、想定対策工などが記載されており、変状箇所では定点撮影や簡易な計測を行い、変状の進行を監視するための調書となっている。

防災カルテ点検を行う場合、スケッチ図をもとに着目箇所を探し、その場所の変化を定点で撮影や計測して変状の進行程度を評価している。そのため、周辺の地形や構造物の配置状況、および着目点以外の変化などは点検調書では把握できない。さらに、定点撮影のため、撮影するアングルをなるべく同じにするなどの工夫が必要である。

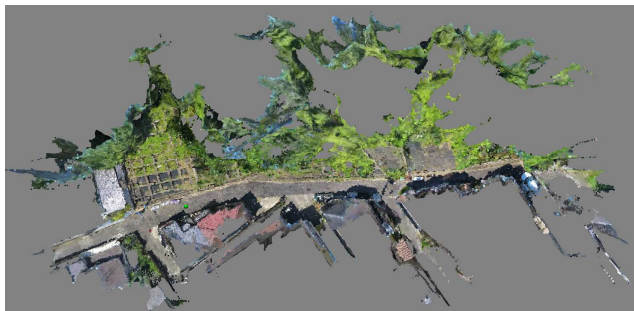
3. 360 度動画によるリアリティキャプチャ技術

今回実施した点検は、通常の点検に加えて、180 度以上の範囲を捉えられる超広角レンズを 2 枚搭載し、全方向を

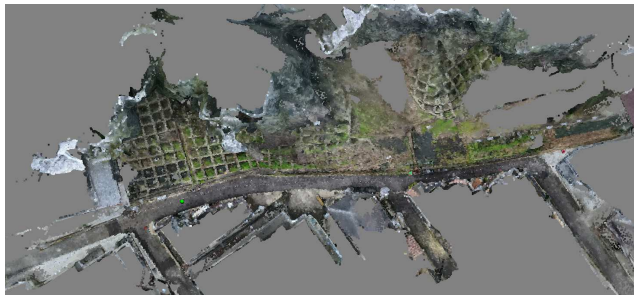
同時に撮影できるカメラをヘルメットに固定する、あるいは手で持ちながら動画を撮影するだけである。ただし、スタート地点とゴール地点を同じにすることや、歩調を一定に保つこと、対象物に死角ができないように工夫しながら歩くことなど、動画から点群を作成する上で注意が必要である。なお、リアリティキャプチャ技術は、Lin et al. (2022) の技術をもとに、施設点検箇所への適用を進めている。この技術を用いることで、撮影した 360 度動画をクラウドサーバーにアップロードすると、3D 点群、2D オルソフォト、および 3D 点群と関連付けられた複数ポイントにおける 360 度画像が自動で作成される。

4. 時系列変化の記録と着目点の計測

変状している石積み擁壁を対象に、複数回リアリティキャ



2023 年 7 月 27 日撮影



2025 年 3 月 28 日撮影

第 2 図 360 度動画から作成した点群



2023 年 7 月 27 日撮影

第 3 図 360 度動画から作成した点群(上)と 360 度画像 (下)

ャプチャ技術を用いた点検を行った。第 2 図に示すように、複数時期の点群が同じ位置で自動生成される。また、第 3 図のように、360 度画像をウェブ上で確認できるため、現地点検の全体像や個別箇所の状況を容易に把握できる。さらに、これらの図から着目箇所の状況をウェブ上で複数時期の写真画像として確認することで、小さな変化の把握は難しいが、土地利用の変化や新たな構造物の設置など、目視で確認できる変化については把握できる。これまでの防災カルテ点検では、変状箇所に対して定点撮影を行い、経時変化を確認し、調書を整理していたが、本技術を活用すれば、ウェブ上で同様の確認を行うだけでなく、変状箇所以外についても、動画撮影されている範囲内であれば確認できるため、非常に情報量が多く、維持管理に有用なツールであると言える。次に、該当箇所の変状部（石積みのはらみ出し箇所）では、石と石の間隔をクラックゲージで観測している。その結果、大きいところで 2.5 mm/年 と、非常にわずかな変化である。この変化を点群差分で表現することは難しいため、変状箇所についてはリアリティキャプチャ技術に頼らず、計測機器等による計測値に基づいて変化の傾向を把握し、安定性について評価する必要があると言える。

5. 道路防災点検 DX に必要な事項の検討方法

これまで実施してきた道路防災点検を DX する方法の一つとして、着目箇所の点検のみならず、全体像の変化もデジタル技術で確認することが必要である。これには、着目箇所の画像や計測値などの数値情報も併せて、360 度動画によるリアリティキャプチャ技術とクラウド上でのデータ管理・閲覧が可能な本手法は有用であると考えられる。また、データはクラウドサーバー上に保存されるため、BIM/CIM 情報や長期的な点検、補修、維持管理等の情報も一元管理できる点でも優れている。一方で、管理者側が過去から蓄積している記録との整合性を図るため、従来の点検様式に合わせた調査出力のニーズもあることから、点検様式に準じた出力が可能なプログラムを実装することで、完全なデジタル管理への移行期間にも対応可能である。

6. まとめ

道路防災点検は、1996（平成 8）年から行われており、これまでのデータ蓄積がある。管理上、過去の様式に合わせて記録せざるをえないところがあるものの、新しいデジタル技術を付加することで、点検時の状況をバーチャルで確認したり、GIS と連携したりすることによって、位置情報とも関連付け、いつでもどこでも施設状況が確認でき、変状の経過が把握できるような仕組みづくりが重要であると考えられる。

文 献

- 国土交通省. (2023) インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション(DX)施策
- 小椋紀彦・小西雄治・福地良彦・塩谷智基. (2023) 360 度カメラ撮影による点群化と橋梁の定期点検支援技術開発, 第 34 回日本情報地質学会講演会 講演要旨集, pp.019-020.
- 国土交通省.(2006) 点検要領
- Lin,J.J.,Ibrahim,A.,Sarwade,S.,Golparvar-Fard,M.(2022) Bridge Inspection with Aerial Robots: Automating the Entire Pipeline of Visual Data Capture, 3D Mapping, Defect Detection, Analysis, and Reporting. Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 35, issue 2.

自由視点画像生成技術（NeRF）を用いた現地復元と解析について

片平 大暉*・立川 浩祥*・天羽 啓太*・星野 諒*

On-Site Reconstruction and Analysis Using Free-Viewpoint Image Generation Technology Based on Neural Radiance Fields (NeRF)

Daiki Katahira*, Hiroyoshi Tachikawa*, Keita Amo*, Ryo Hoshino*

* 大日本ダイヤコンサルタント株式会社 北海道支社 Dia Nippon Engineering Consultants Co.,Ltd.,
2-13-2 Kita10-jonishi Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 001-0010 Japan. E-mail: katahira_daiki@dcne.co.jp,
tachikawa_hiroyoshi@dcne.co.jp, amo_keita@dcne.co.jp, hoshino_ryo@dcne.co.jp

キーワード： NeRF, SfM, 自由視点画像生成技術, 3次元モデル

Key words： NeRF, SfM, Free viewpoint image generation technology, 3D model

1. はじめに

近年、3次元空間情報の取得と可視化技術は、都市計画・防災・林業など多くの分野において重要性を増している。

従来は、レーザー計測器や UAV 搭載型 LiDAR などの高価な専用機材が必要であったが、近年では、スマートフォンをはじめとした一般向け機器を活用した低コストな手法が注目されている。本稿では、小型 UAV による空撮映像を基に、自由視点画像生成技術の一つである Neural Radiance Fields (NeRF) を用いた、3次元モデル化手法を提示し、その解析応用の可能性について示す。

2. 技術概要

2.1 自由視点画像生成技術の概要

自由視点画像生成技術とは、任意の視点（カメラ位置）から、実際に撮影していないシーンをコンピュータで生成する技術である。近年では深層学習（AI）を用いることで急速に技術が進歩し、高精度に画像の生成が可能となった。

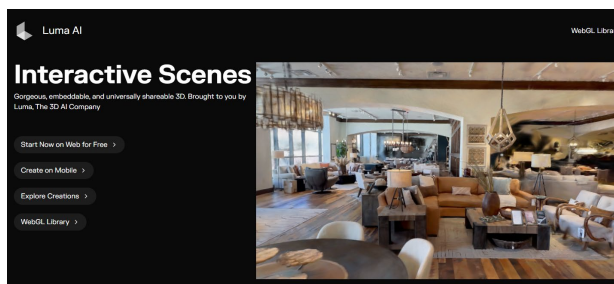
2.2 NeRF の概要

NeRF は、動画や複数の画像から取得された視点情報を基に、3次元空間上の各点における「光の色（光度）」と「密度（物体の不透明度）」を学習する。これにより、任意の視点からその空間を見たときのシーンを予測・合成することで、視覚的に高精度な 3次元モデルの生成を可能としている。特に、従来技術の SfM¹や MVS²が 3次元モデル上で再現することができない、透明・反射面の表現や詳細な陰影の再現などが可能である。^{1)Structure from Motion, ^{2)Multi-View Stereo}}

3. 現地の 3次元モデル化手法と実験プロセス

3.1 現地の 3次元モデル化手法についての概要

本稿では、NeRF を用いた現地の 3次元モデル化を目的とし、現地にて動画撮影を実施した。取得した動画データは、Luma AI, Inc が提供するオンラインプラットフォーム「Luma AI」にアップロードし、NeRF での 3次元モデル化を実施した。



第1図 Luma AI

3.2 対象箇所と撮影条件

対象とした箇所は、樹木や起伏など、LiDAR センサーを用いた点群取得が困難な条件を含む地点である。スマートフォンでの動画撮影が難しいことも想定し、小型 UAV による空撮を採用した。



第2図 対象箇所

3.3 小型 UAV での撮影と NeRF でのモデル生成

選定した現地において、小型 UAV を用いた空撮を実施した。

第3図（左）は、対象を直線経路で複数回往復する飛行方法で、対象範囲全体を網羅するように飛行して撮影した。しかし、この飛行方法では、生成した 3次元モデルの構造に

複数箇所の欠損や歪みが確認された。

上記の問題を改善するため、対象を周回し、常に対象全体が画角に収まるように再度撮影を行った。

その結果、生成された 3 次元モデルは細部形状まで高精度に再現され、全体的なモデルの品質も大きく向上した。



(左) 当初撮影時、(右) 再撮影時
第 3 図 撮影方法による生成モデルの違い

3.3 座標整合とスケーリング

生成されたモデルには座標およびスケール情報が付与されていないため、対象範囲内に対空標識を設置し、撮影後のモデルに対して標定点として活用することで座標付与とスケール調整を行った。

4. 従来技術との比較分析

4.1 SfM で作成したモデルとの比較

再撮影時に取得した動画データを用いて、従来手法である SfM (Polycam) でも 3 次元モデルを作成し、生成したモデル同士の比較を実施した。

本比較では、両手法の対象物のエッジ部分や樹木の陰部における形状の再現性を評価した。

結果として、NeRF で生成したモデルは SfM で生成したモデルと比較して、樹冠端部の形状の表現や光の届きにくい箇所 (例: 樹冠下部) の再現性において、高い精度を示し、陰影や滑らかな形状の表現において優位性が見られた。



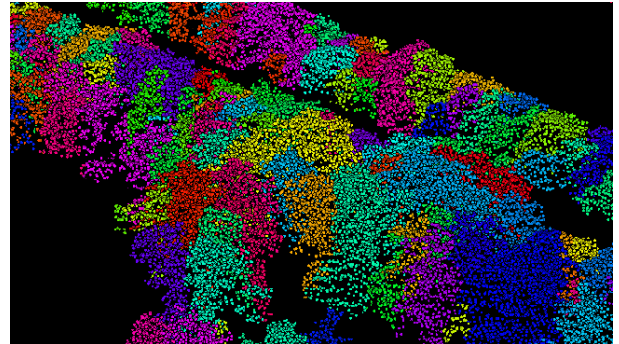
(上) NeRF によるモデル、(下) SfM によるモデル
第 4 図 生成 3 次元モデル比較

4.2 応用事例：樹木解析への展開

NeRF によって生成された 3 次元モデルから点群データを抽出し、オンライン点群処理ソフトウェアである ScanX に読み込ませ、樹木解析を実施した。ScanX は深層学習 (AI) による樹木の自動抽出機能を有しており、樹木の位置・本数・樹高の算出を可能としている。

解析結果は、現地での目視による算出と概ね一致することが確認された。

前述した解析結果により、NeRF による生成 3 次元モデルが都市緑地や山林管理などにおける環境モニタリングへの応用と発展に資する可能性が示された。



第 5 図 樹木解析結果

4. 考察

NeRF は、低コストなデバイスによっても高精度な 3 次元モデルを生成でき、従来の SfM や MVS 手法と比較して、現地の視覚的な再現性が高いことが分かった。

特に、陰影や反射面の描写において優位性があること、また、深層学習 (AI) により対象物の構造などを学習して空間を再構成するため、細部の形状も高精度に表現可能であることが分かった。

一方で、生成されたモデルは座標やスケールを持たないため、現状の実運用には後処理工程が必須である。

また、クラウド上での処理には時間がかかる点や、撮影機材や環境、方法などによっては、モデルの品質にばらつきが生じる点について留意が必要であり、対象に応じて適宜撮影方法を検討する必要がある。

5. まとめ

本稿では、NeRF を用いた現地再現手法について実践的なアプローチを示し、その有効性と課題を明らかにした。その結果として現地で撮影した動画を用いることで、従来手法よりも容易に詳細な 3 次元モデルを構築できる可能性が示された。

一方で、測地的精度を確保するためには、LiDAR センサーなどの補完技術との組み合わせが前提となる。

今後は自動標定やスケール補正の自動化、処理時間の短縮などを課題とし、本技術の発展に努める。

文 献

Luma AI, Inc. : オンラインプラットフォーム「Luma AI」

URL : <https://lumalabs.ai>

Polycam Inc : オンラインプラットフォーム「Polycam」

URL : <https://poly.cam/>

ローカスブルー株式会社 (Locus Blue) : オンライン点群処理ソフトウェア「ScanX」

URL : <https://scanx.jp/>

Illuminating 3-D rheology of weak volcanic arc of NE Japan from postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake

Sambuddha Dhar^{1,2}, Youichiro Takada³, Jun Muto²

¹International Research and Education Center, Dept. of Geoscience, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan. Email: sambuddha.dhar@omu.ac.jp

²Department of Earth Science, Tohoku University,

6-3 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-Ku, Sendai, Miyagi 980-8578 Japan

³Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University, N10 W8 Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

Key words: low-viscosity zone, Quaternary volcanoes, viscoelastic relaxation, postseismic deformation, 2011 Tohoku earthquake

1. Introduction

Past geodetic studies in the 2000s have indicated localized concentrations of high crustal strain rate along the volcanic front of NE Japan (Miura et al., 2004). These local anomalies of strain rate are often correlated to low viscosity zone (LVZ) beneath the Quaternary volcanoes along the volcanic front of NE Japan. The LVZ refers to the small-scale bodies of weak mantle material in the lower crust-upper mantle. Following the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake, InSAR observations and GNSS analysis detected local ground subsidence in and around the five Quaternary volcanoes of NE Japan: Mt. Akitakoma, Mt. Kurikoma, Mt. Zhao, Mt. Azuma, and Mt. Nasu (Takada & Fukushima, 2013; Muto et al., 2016). Although several studies hypothesized the LVZ causes these local ground deformations beneath Quaternary volcanoes, the dimension and rheology of such LVZ are still poorly understood. Here, we analyzed the GNSS observations after the 2011 Tohoku-oki earthquake and identified localized areas of postseismic strain around the five volcanoes. To explain such localized postseismic strain, we investigated the three-dimensional structure and rheology of LVZs related to the five volcanoes (Dhar et al., 2025).

2. Localization of postseismic strain rate

To understand the spatial distribution of the postseismic strain rate in NE Japan after the 2011 Tohoku-oki earthquake, we extracted the short-wavelength strain rate from the GNSS measurements (2012-2014) provided by GEONET stations. We applied a moving average filter (Meneses-Gutierrez & Sagiya, 2016) to the postseismic GNSS velocity field to remove their long-wavelength components. Then, we used the remaining short-wavelength components to calculate the strain rate field by the method of Shen et al. (1996). The spatial distribution of postseismic strain rate (short-wavelength) illustrates the localization of (dimension of 80 km in both arc-parallel and arc-normal direction) postseismic contraction near five

Quaternary volcanoes, embedded in the background of extension (areas marked in blue side of colormap, Figure 1, Dhar et al., 2025). This localization of strain contraction is due to the faster relaxation of coseismic stress changes than the surrounding areas. Such anomaly in stress relaxation rate indicates the presence of low viscous material (as in LVZ), which has a shorter relaxation timescale.

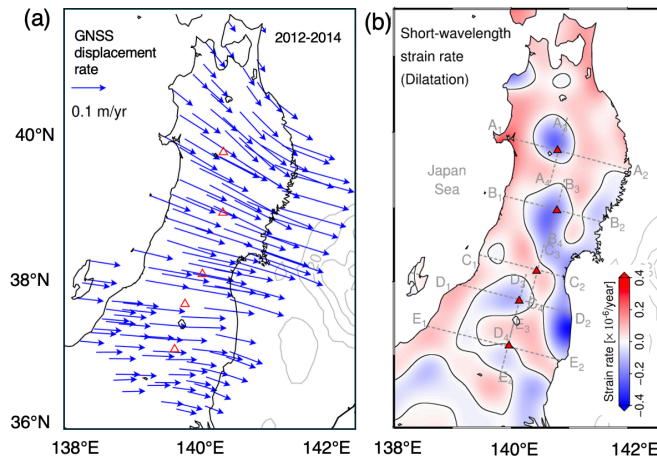


Figure 1: (a) GNSS observations after the 2011 Tohoku-oki earthquake (b) Short-wavelength postseismic strain rate (after Dhar et al., 2025).

3. Three-dimensional LVZ model

To explain the localized postseismic strain near the five Quaternary volcanoes, we constructed the three-dimensional rheological model of LVZ near the five volcanoes (Figure 2). We discretized the LVZ into cuboid elements to calculate the earthquake-induced deformation strain based on the semi-analytical Green's functions (see details in Dhar et al., 2022 and references therein). We consider the LVZ to be a viscoelastic material whose deformation behavior is defined by power-law Burgers rheology. Using the postseismic strain rate as a constrain,

we explored the dimension, shape, locations, and effective viscosity of LVZs beneath the five volcanoes. The key findings of our study are as follow: (1) Our results suggest that most LVZs are located at depths of 15 to 55 km in the lower crust-upper mantle. These LVZs may represent viscoelastic heterogeneities which is a deeper extension of shallow elastic heterogeneities (< 5 km) inferred by previous studies (Takada & Fukushima, 2013). (2) Most LVZ models exhibit narrow tops (~ 20 -40 km width) and wider roots (~ 100 km width). Such arc-normal shape of LVZ is also inferred by past seismological studies (Nakajima et al., 2013). Furthermore, the LVZ shapes vary from volcano to volcano and the LVZ dimensions are limited to ~ 80 km in arc-parallel direction. Therefore, our result infers an arc-parallel heterogeneity in subsurface rheology along the volcanic front of NE Japan. (3) The effective viscosity of LVZ is estimated to be $\sim 10^{17}$ Pa-s and $\sim 10^{18}$ Pa-s in the transient and steady-state postseismic deformation, respectively. The effective viscosity of LVZ ($\sim 10^{18}$ Pa-s) is one order of magnitude lower than the average viscosity of the lower crust-upper mantle.

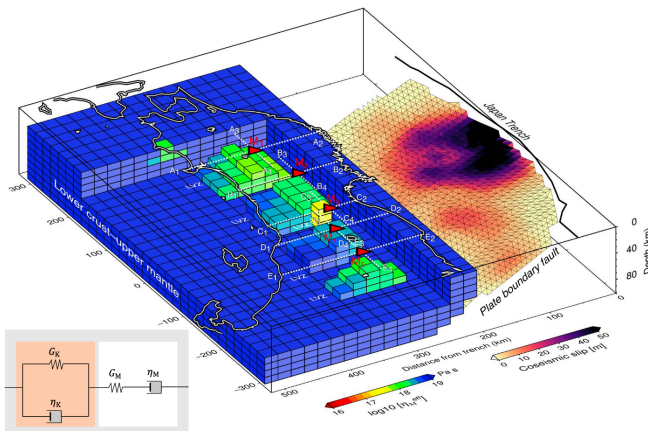


Figure 2: The 3-D rheological model of LVZ near five Quaternary volcanoes (after Dhar et al., 2025). Inset shows the spring-dashpot representation of power-law Burgers rheology model.

4. Conclusion

We found the localized postseismic strain rate near the five Quaternary volcanoes of NE Japan, utilizing the two years of GNSS observations after the 2011 Tohoku-oki earthquake. To explain such localized postseismic strain, we developed a 3-D rheological model of LVZ near those five volcanoes. Our results suggest that these LVZs have narrow tops, wider roots, and ~ 80 -km arc-parallel dimension. They are located at the 15-55 km depth beneath the volcanoes. As their shape and viscosity vary among themselves, they highlight the arc-parallel rheological heterogeneities of the volcanic arc of NE Japan.

5. References

Dhar, S., Takada, Y., & Muto, J. (2025). Inferring 3-D Rheology of Low - Viscosity Zone Around Quaternary Volcanoes of NE Japan From Postseismic Deformation of the 2011 Tohoku - Oki Earthquake. *Journal of*

- Geophysical Research: Solid Earth*, 130(4), e2024JB029939. <https://doi.org/10.1029/2024JB029939>
- Dhar, S., Muto, J., Ito, Y., Miura, S., Moore, J. D. P., Ohta, Y., & Iinuma, T. (2022). Along-arc heterogeneous rheology inferred from post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Geophysical Journal International*, 230(1), 202–215. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac063>.
- Meneses-Gutierrez, A., & Sagiya, T. (2016). Persistent inelastic deformation in central Japan revealed by GPS observation before and after the Tohoku-oki earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 450, 366–371. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.055>.
- Miura, S., Sato, T., Hasegawa, A., Suwa, Y., Tachibana, K., & Yui, S. (2004). Strain concentration zone along the volcanic front derived by GPS observations in NE Japan arc. *Earth, Planets and Space*, 56(12), 1347–1355. <https://doi.org/10.1186/BF03353360>.
- Muto, J., Shibasaki, B., Iinuma, T., Ito, Y., Ohta, Y., Miura, S., & Nakai, Y. (2016). Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku - Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4971–4978. <https://doi.org/10.1002/2016GL068113>.
- Nakajima, J., Hada, S., Hayami, E., Uchida, N., Hasegawa, A., Yoshioka, S., Matsuzawa, T., & Umino, N. (2013). Seismic attenuation beneath northeastern Japan: Constraints on mantle dynamics and arc magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(11), 5838–5855. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2013JB010388>
- Shen, Z., Jackson, D. D., & Ge, B. X. (1996). Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B12), 27957–27980. <https://doi.org/10.1029/96JB02544>.
- Takada, Y., & Fukushima, Y. (2013). Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan. *Nature Geoscience*, 6(8), 637–641. <https://doi.org/10.1038/ngeo1857>.

Assessing Slope Failure Susceptibility in Volcanic Ash Terrain of Southeastern Hokkaido.

Zichito JOMANE, Daisuke MIURA, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University,
3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585, Japan E-mail: su25163e@st.omu.ac.jp

Key words: Volcanic ash, Digital Elevation Model, Multiple Criteria Evaluation, Slope Failures

1. Introduction

Slope failures in volcanic ash terrains pose a significant hazard in Hokkaido, especially in the Iburi prefecture, where a recent slope failure with volcanic ash materials was triggered by the 2018 Ibura-Tobu earthquake in the region (Kawamura *et al.*, 2019). Up to 40% of the Hokkaido area is covered by pyroclastic materials (Machida *et al.*, 2002). Pyroclastic layers typically have lower strength than the underlying rocks, therefore, slope stability is compromised, leading to devastating consequences. Excessive rainfall or strong earthquakes collectively trigger the occurrence of these events. Slope failures occurring in such unstable volcanic ash terrains pose significant threats to human life, infrastructure, economic assets, and long-term damage to the regional ecosystem (Kawajiri *et al.*, 2024). Although there is a widespread application of GIS-based slope failure modelling in Japan (Kohno and Higuchi, 2023), there is limited research focusing specifically on volcanic ash dominated terrains especially using AHP-based spatial analysis. This gap is critical given the unique geotechnical behavior of tephra deposits (volcanic ash) and their vulnerability during heavy rains or seismic events.

The study aims to:

- Derive topographic and hydrological factors using a Digital Elevation Model
- Assess and integrate the influence of volcanic ash characteristics (cohesion, shear strength, ash thickness factors contributing to slope failure.
- Map areas susceptible to slope failure in pyroclastic terrain.
- Develop a Web-Map service for geo-visualization.

2. Significance and Contribution

Our study aims to assess slope failure susceptibility in pyroclastic environments using a GIS-based AHP framework to support disaster risk mitigation. The results will clarify the relationship between rock and soil strength in relation to tephra deposits. Practical outcomes include: (a) tools for identifying high-risk areas for use by governments, planners, and developers, and (b) support for implementing early warning systems. Future research may integrate additional data sources such as remote sensing and ground-based sensors.

3. Study area

The study area covers approximately 645 km², consisting of the towns of Abira and Atsuma in the Iburi Subprefecture, southwestern Hokkaido. The region is highly vulnerable due to its steep terrain, active tectonic features, and thick Quaternary tephra deposits overlying basement rocks.

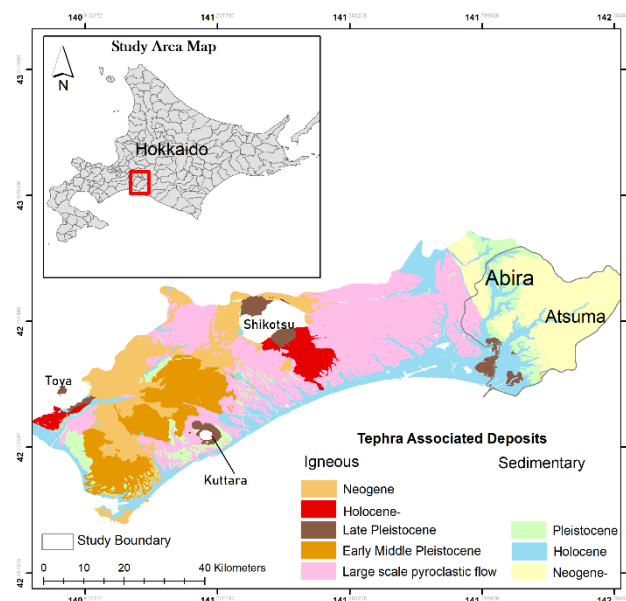


Figure 1: Study area map and associated volcanic fields, highlighting the Toya, Shikotsu, and Kuttara calderas.

3.1 Data and Methods

Lithological data were obtained from the Geological Survey of Japan's Seamless Digital Geological Map. The landslide inventory from the September 2018 earthquake created by Kita (2018) is available on https://github.com/koukita/2018_09_06_atuma. The 10m Digital Elevation created in 2019 was obtained from the Geospatial Authority of Japan. This study will utilize a GIS-based multi-criteria decision analysis framework, employing the Analytical Hierarchy Process (AHP), to facilitate weighting of factors. There is no single factor that exclusively influences the event. Therefore, each

factor will be weighed based on its importance. QGIS and Jupyter Notebook environment will be utilized to achieve objectives.

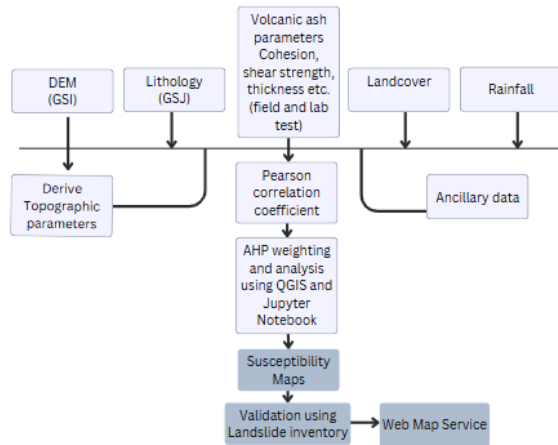


Figure 2: Methodology Flow Diagram

4. Preliminary results

The 10m resolution DEM was used to derive key terrain factors (1), specifically the Topographic Position Index (TPI), to identify landforms such as ridges and valleys. TPI values in Fig.3 range from -106 to 166m. Higher values correspond to ridge tops and peaks. In contrast, the strong negative values correspond to deep valleys. The mid-range values correspond to gently sloping terrain.

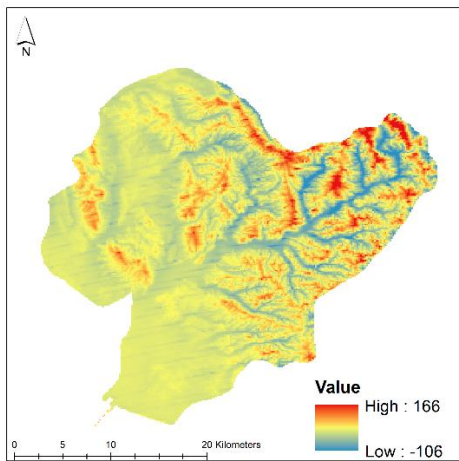


Figure 3: Topographic Position Index

(2) Topographic Wetness Index (TWI) was used to estimate potential water accumulation and soil saturation. As shown in Fig. 4, high TWI values are concentrated along river basins and low-lying terrain, indicating hydrological convergence zones where water tends to accumulate. These areas are likely to exhibit increased soil moisture and reduced shear strength, making them more susceptible to slope failures. In contrast, low TWI values, represented in blue, are predominantly observed on upper slopes, which are typically drier and thus less prone to saturation-induced failures.

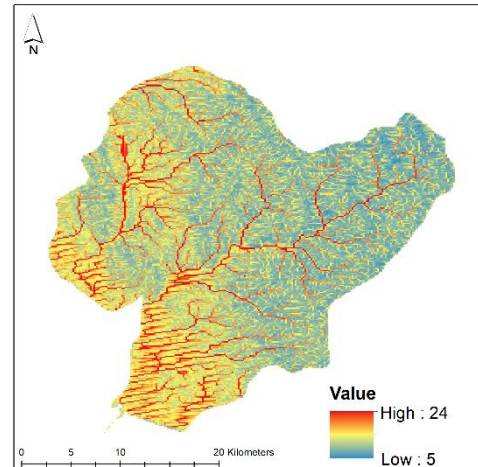


Figure 4: Topographic Wetness Index

5. Plan of Action

The next step involves collecting substantial data (geotechnical, etc.), refining and pre-processing it, and conducting fieldwork to collect samples, as well as performing laboratory testing.

References

- Amma-Miyasaka, M., Miura, D., Nakagawa, M., Uesawa, S. and Furukawa, R. (2020) Stratigraphy and chronology of silicic tephra in the Shikotsu-Toya volcanic field, Japan: Evidence of a Late Pleistocene ignimbrite flare-up in southwestern Hokkaido. *Quaternary International*, 562, 58–75. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.11.019>
- Kawajiri, S., Watanabe, T., Yamaguchi, K., Minabe, Y., Nakamura, D., Kawaguchi, T., & Yamashita, S. (2024). Geotechnical characteristics and seismic stability evaluation of pumice-fall deposits soil on collapse slope by the 2018 Hokkaido eastern Iburi earthquake. *Natural Hazards*, 120: 5233–5255. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06418-2>
- Kawamura, S., Kawajiri, S., Hirose, W., Watanabe, T. (2019). Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake. *Soils and Foundations*, 59 2376–2395. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.08.00>
- Kita K (2018) An inventory of landslides triggered by Hokkaido Eastern Iburi earthquake, September 2018. <https://www.gsi.go.jp/kikakuchousei/kikakuchousei40182.html>.
- Kohno, Y., & Higuchi, H. (2023). Landslide susceptibility assessment in the Japanese Archipelago based on a landslide distribution map. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(2), 37. <https://doi.org/10.3390/ijgi12020037>
- Machida, H. (2002). Volcanoes and tephra in the Japan area. *Global environmental research-English edition-*, 6(2), pp.19–28.

Multi-Criteria Evaluation of Groundwater Potential Zones in Abuja (FCT) Using Analytical Hierarchy Process: A Pathway to Sustainable Water Management

Danlami IBRAHIM, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University,
3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585, Japan E-mail: sp23519y@st.omu.ac.jp

Key words: Groundwater Potential Zones, Remote Sensing, GIS, Analytical Hierarchy Process (AHP), Area Under the Curve (AUC), Success Rate Curve (SRC) and Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve

1. Introduction

The global demand for freshwater is increasing due to climate change and anthropogenic activities (Döell et al., 2012). A significant portion of global water needs for domestic, agricultural and industrial use, is met using groundwater, which makes it essential, especially in Sub-Saharan Africa. While Africa holds vast groundwater reserves, rising population growth and rapid urban development, particularly in Nigeria, are putting considerable stress on this crucial resource. Abuja, the Federal Capital Territory (FCT), has seen its population grow by over 400% in the past twenty years, leading to an increased reliance on groundwater, especially in rural communities where surface water is scarce (UN DESA, 2022). Previous assessments of groundwater in the FCT have mainly utilised Vertical Electrical Sounding (VES) methods without incorporating comprehensive hydrogeological and climatic datasets, which restrict their spatial accuracy and reliability when considered on a large scale. This study presents an improved methodological framework by integrating eight essential factors, such as rainfall, depth to bedrock, geology, elevation, landuse/landcover (LULC), distance from river, drainage density, and lineament density, using Geographic Information system (GIS) technology and the Analytical Hierarchy Process (Saaty, 1980).

An important innovation in this study is the validation of the groundwater potential zone (GWPZ) map by utilising actual borehole yield data, thereby enhancing its empirical reliability. Remote sensing and GIS facilitate effective spatial analysis across complex terrains at a minimal cost.

The main objective of this research is to:

1. Integrate geophysical, climatic and geospatial datasets for groundwater potential zone mapping
2. Use AHP for multi-criteria decision-making analysis.
3. Validate the GWPZ findings through empirical borehole yield data.

2. Significance and Contribution

This research presents a validated method for identifying groundwater potential zones (GWPZ) in Abuja, Nigeria, by integrating geophysical data, geological information, and environmental factors using GIS and the Analytical Hierarchy Process (AHP). A significant element is the empirical validation of the GWPZ map through borehole yield data using the SRC Curve and ROC curve analysis, which enhances model reliability.

The study addresses gaps in previous methodologies, particularly in areas of subsurface integration and validation. It offers a scalable, cost-effective framework for other complex and data-limited regions.

By aiding groundwater exploration and management, this research directly supports the achievement of Sustainable Development Goal (SDG) 6 (Clean Water and Sanitation) by providing a valuable tool for decision-makers in managing water security in rapidly urbanising settings.

3. Study area

Abuja, which serves as the Federal Capital Territory (FCT) of Nigeria, is situated between latitudes 8°21' - 9°18' N and longitudes 6°45' - 7°39' E, covering an area of approximately 8,000 km² and featuring an average elevation of 476 m above sea level. The region is part of the savannah ecological zone and experiences a tropical climate characterised by a dry season from November to March and a wet season from April to October, with temperatures ranging between 30°C and 37°C during the dry months.

Geologically, around 85% of Abuja is underlain by the Precambrian Basement Complex, while the remaining 15% consists of Cretaceous sedimentary rocks from the Bida Basin. Key lithological units present include the Migmatite-Gneiss Complex, metasedimentary belts (such as schists and amphibolites), Older Granites, and the sedimentary deposits of the Bida Basin. The study area features a dual-aquifer system comprising weathered regolith and fractured basement rocks. The

distribution and movement of groundwater are affected by lithology, soil characteristics, the thickness of overburden, and the connectivity of fractures.

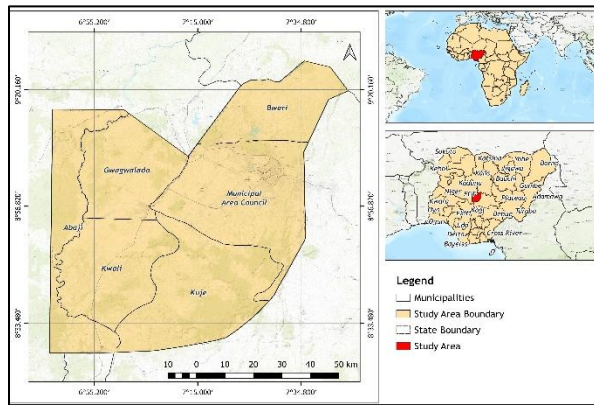


Figure 1: Study area

2.1 Data and Methods

This study utilized various datasets to identify groundwater potential zones in Abuja, Nigeria. Thematic layers were created from multiple sources: depth to bedrock from geophysical surveys, elevation and drainage density from the SRTM Digital Elevation Model (DEM), geological data from the Geological Survey of Nigeria, lineament density from Landsat imagery, and rainfall data from NIMET and CHIRPS datasets. Additionally, land use and land cover (LULC) information was sourced from Sentinel-2 imagery via Google Earth Engine (GEE). Eight groundwater-controlling factors were selected and ranked based on literature, expert input and field relevance. Their impacts were assessed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) via pairwise comparisons. The weighted layers were integrated using overlay analysis in GRASS GIS and classified into five groundwater potential zones using the Natural Breaks (Jenks, 1967) Method. Model accuracy was validated with borehole data from 722 locations, confirming its effectiveness for groundwater resource planning and management.

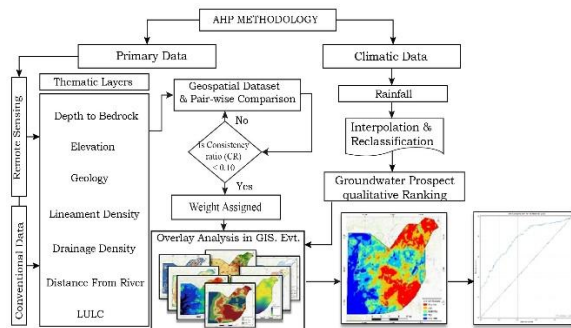


Figure 2: Methodology Flow Diagram

3. Results

The Groundwater Potential Zone (GPZ) map was created using the Analytic Hierarchy Process (AHP) by integrating essential hydrogeological factors. The study area was classified into five levels of groundwater potential: Very Low, Low, Moderate, High, and Very High. The resulting spatial distribution reveals a varied landscape, with high and very high potential zones primarily located in the central and southeastern regions. This pattern is likely due to favourable geological and structural characteristics in these areas. In contrast, the low potential zones are mostly found in the eastern and southwestern regions, indicating less permeable conditions. The distribution of area across the different categories is relatively balanced, suggesting that the model's output is fair and unbiased. This AHP-based mapping approach provides a valuable spatial tool for groundwater exploration, resource management, and sustainable development planning in regions with basement terrain.

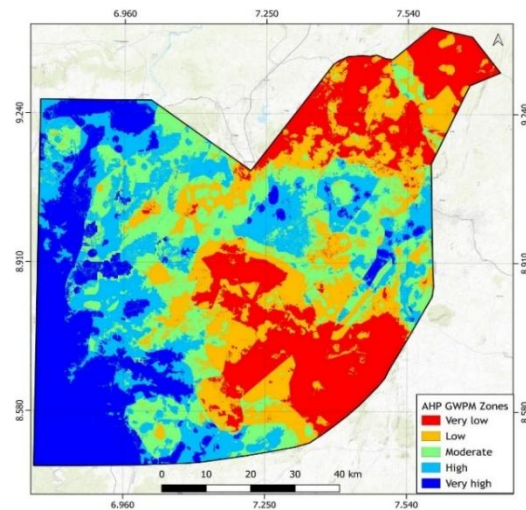


Figure 3: Groundwater Potential Zone Map

References

- Döell, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F. T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., Strassberg, G., & Scanlon, B. R. (2012). Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Elsevier*, 59, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.05.006>
- Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186–190.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*.
- UN DESA. (2022). *World population prospects 2022: Summary of results*. United Nations.

Evaluating Shoreline Prediction Models with Pre- and Post-2024 Noto Peninsula Earthquake Satellite Imagery

Job THOMAS, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University,
3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585, Japan E-mail: sw23079s@st.omu.ac.jp

Key words: Shoreline prediction, Change analysis, 2024 Noto Peninsula Earthquake, Open source.

1. Introduction

Change in shoreline, driven by human activities near coastal areas and natural forces, impact coastal ecosystems, human settlements and economic activities significantly. Therefore, accurately predicting shoreline dynamics and monitoring is essential for effective coastal management, disaster preparedness and hazard mitigation. The traditional methods used for calculating shoreline change are often time-consuming, expensive, and temporally unreliable. This study integrates open-source tools, CoastSat and AMBUR (Analyzing Moving Boundaries Using R), to streamline shoreline extraction, tidal correction, and future shoreline predictions. The research focuses Wajima, Japan, to assess the accuracy of shoreline predictions before and after the 2024 Noto Peninsula Earthquake.

2. Materials and Methods

2.1 Data & Study Area

The study area used was Wajima, Ishikawa, Japan as displayed in Figure 1. The data used for this study are 28 years of shorelines from 1987 to 2014, 2018, & 2023 to 2024, where shoreline of 2023, 2024 were used for validation. These Shorelines were extracted from optical satellites, where beach slope and shoreline elevation were calculated using DEM, and tidal data was obtained from Geospatial Information Authority of Japan (GSI). Table 1 shows the detailed description of the data and its sources.

2.2 Methodology

The CoastSat (Vos *et al.*, 2019) extract shorelines and perform tidal corrections, achieving around 10-meter accuracy. It processes multispectral images from Sentinel-2 and Landsat via Google Earth Engine, applying cloud masking and pan-sharpening. With the help of MNDWI, and Otsu's threshold (Otsu, 1979), it segments images into land and water pixels and extracting shorelines with the Marching Squares Algorithm (Cipolletti *et al.*, 2012). Tidal correction, including tidal data, beach slope, and shoreline elevation, normalizes the shoreline positions to mean sea level, providing an accurate long-term shoreline analysis.

The AMBUR (Jackson Jr *et al.*, 2012) toolkit was used to calculate shoreline change rates and predict future shorelines. It starts from collecting baselines along with shorelines, then generates transects at regular intervals. For this study 5 different intervals of 1 m, 25 m, 50 m,

Table 1: Input data used in this study.

USGS: United States Geological Survey, GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans

Data	Year	Data Source
Landsat 5 TM	1987-1998, 2004-2011	USGS
Landsat 7 ETM	1999-2003	USGS
Landsat 8 OLI	2013-2014, 2018, 2023-2024	USGS
Photogrammetry DEM	2018	GSI
Bathymetry	2023	GEBCO
Tide Data	1987-2014, 2023, 2024	USGS

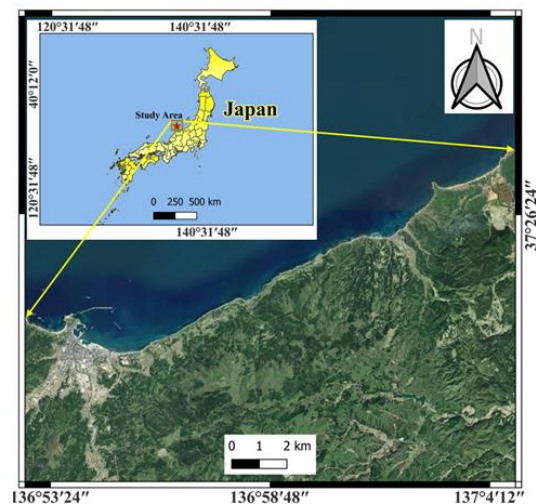


Figure 1: Study Area, Wajima, Ishikawa, Japan.

75 m, and 100 m were used along the shoreline. Two transect types are used: perpendicular and near transects. These transects help measure shoreline positions over time. Shoreline positions are analysed by calculating intersection points and measuring distances from the baseline. Statistical methods, including End Point Rate (EPR), Linear Regression Rate (LRR), and Weighted Linear Regression (WLR) are used to calculate change rates. Predicting future shorelines depends on factors like shoreline change rates calculated using

Table 2: Accuracy Assessment of Pre- and Post- Earthquake Shorelines Prediction

D I: Distance Intervals, T M: Transect Methods, N: Near, MAE: Mean Absolute Error, LRR: Linear Regression Rate, WLR: Weighted Linear Regression

D I	T M	MAE for Pre-Earthquake Shoreline using LRR	MAE for Post-Earthquake Shoreline using WLR
1 m	N	8.19	54.18
25 m	N	8.21	54.30
50 m	N	8.49	54.08
75 m	N	9.01	54.15
100 m	N	9.68	53.60

statistical methods (EPR, LRR, WLR), transect azimuth, offshore correction values, latest shoreline, and the forecast period for which the future shoreline position needs to be predicted.

3. Results and Conclusions

In this study, EPR, WLR, LRR statistical method was performed on the shorelines with different transects intervals of 1 m, 25 m, 50 m, 75 m, and 100 m, using the near transect method. Table 2 shows the Mean Absolute Errors (MAE) at various distance intervals where the shorelines were predicted for the period before and after the 2024 Noto Peninsula Earthquake.

The predicted shoreline for Wajima before 2023 earthquake was based on the shorelines change which were derived using shoreline positions for 28 years from 1987-2014. Among the 3 statistical method, LRR method demonstrated the best accuracy, with MAE of 8.19 m to 9.68 m. The 1-meter interval showed the lowest error of 8.19 m (MAE). The histogram of Figure 3a shows the distribution of distances between predicted and observed shorelines for the 1-meter transect interval. The mean distance was 8.19 m, with the median distance of 4.98 m, this indicates that most of the deviations were small. The spatial distribution of shoreline prediction errors shows 62% of the prediction had an error below 6.90 m, while 27% was in the range from 6.90 m to 17.0 m range. Only 0.4% exhibited a deviation exceeding 95.50 m. These findings confirm that the LRR-based shoreline predictions for 2023 aligned well with observed shorelines, demonstrating high model reliability under stable coastal conditions.

For post-earthquake shoreline prediction, the results show significant differences between the predicted and the observed shorelines for 2024. From the 3 statistical methods WLR exhibited the lowest MAE, with a value of 53.6 m at the 100-meter interval as shown in Table 2 and Figure 3b. The spatial distribution of shoreline prediction errors, shows 35% of the shoreline's shifts were within 27.1 m, followed by 24% between 27.10 and 57.50 m, 20% between 57.50 and 88.80 m, 13% between 88.80 and 121.70 m, and 8% exceeding 121.70 m.

To further investigate the shoreline extraction accuracy, observed shoreline shifts were validated against data from GSI, where they conducted a study using Synthetic Aperture Radar (SAR) images, assessed land emergence and deformation following the earthquake. Their findings revealed a significant seaward shift of 150 to

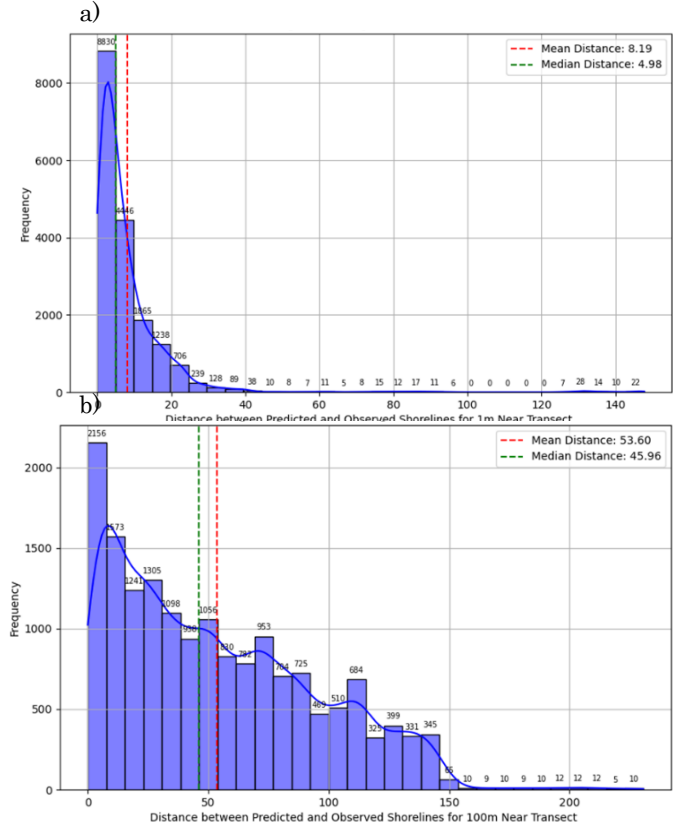


Figure 3: a) Accuracy Plot for Pre- Earthquake Shoreline Prediction, b) Accuracy Plot for Post- Earthquake Shoreline Prediction

200 m due to tectonic uplift. The observed shoreline shifts of this research showed a maximum shifts of 243 m. These findings were validated with the report from Geospatial Information Authority of Japan (2024) identifying substantial land emergence. This validation confirmed the accuracy of the shoreline extraction results.

References

- Cipolletti, M. P., Delrieux, C. A., Perillo, G. M., and Piccolo, M. C. (2012) Super resolution border segmentation and measurement in remote sensing images. *Computers & Geosciences*, vol.40, pp.87-96.
- Geospatial Information Authority of Japan. (2024). Coastline change caused by the 2024 Noto Peninsula Earthquake detected by ALOS-2 SAR satellite image., from <https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/uchusokuchi-e31001.html> (accessed in August 2024).
- Jackson Jr, C. W., Alexander, C. R., and Bush, D. M. (2012) Application of the AMBUR R package for spatio-temporal analysis of shoreline change: Jekyll Island, Georgia, USA. *Computers & Geosciences*, vol.41, pp.199-207.
- Otsu, N. (1979) A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.9(1), pp.62-66.
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., and Turner, I. L. (2019) CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, vol.22, 104528.

修正 Berggren 式を用いた凍結深さの解析 —Kersten(1949)式を(1948)式と間違えたことによる結果—

高見雅三*

Analysis of frost depth using modified Berggren formula - Result caused by mistaking Kersten(1949) for (1948) formula-

Masao Takami*

* ㈱開発工営社 (道総研フェロー) KAIHATSU KOEI Co.,Ltd. (HRO Fellow) 13F ASTY45 Bldg., 5-1, Kita 4-jo nishi, Chuo-ku, Sapporo Hokkaido, 060-0004, Japan. E-mail:m:465_takami@kai-koei.co.jp

キーワード: 凍結深さ, ケルステン式, 修正ベルグレン式, 熱伝導率

Key words: Frost depth, Kersten formula, Modified Berggren formula, Thermal conductivity

1. はじめに

凍結深さを求める方法としては, 高見(2006)で報告した修正 Berggren (別名 Aldrich, 1956) 式が一般的に用いられる。その際, 熱伝導率を求めるには, 実験式から求めた Kersten 式が用いられる。Kersten は土の種類をシルト・粘土と砂質土に 2 分し, それぞれに未凍結と凍結の熱伝導率を求める式を 1948 年に報告した。

その後, Kersten(1952)は Kersten(1948)で発表した凍結時の熱伝導率式に誤りがあり, Kersten(1949)式に修正したと公表した。しかし, 日本ではそのことに気づかず土質工学会(1982)や日本道路協会(1987)などで Kersten(1948)式が掲載された。また, 多くの論文や報告書で Kersten(1948)式が利用された。その後, 土質工学会(1982)の改訂版となる土質工学会(1994)では Kersten(1948)を Kersten(1949)式に修正したにも関わらず, 日本道路協会(2009)や地盤工学会(2009)は, 誤って Kersten(1948)式を用いた。

ここでは, 改めて Kersten(1949)式とそれによる一般的な道路材料の熱定数表を示すとともに, Kersten(1948)式と Kersten(1949)式ではどのぐらいの凍結深さに差が生じるのかについて報告する。

2. 熱定数

2.1 熱伝導式の計算 (Kersten(1949)式の熱伝導率式)

Kersten 式は, 0.05mm より細かな粒子が 50%未満の土を砂質土, 0.05mm より細かな粒子が 50%以上の土を粘土質土と定義し, それぞれに未凍結・凍結時における熱伝導率式を示した。Kersten 式は飽和度が 90%以上の凍結細粒度には良い結果を示すが熱伝導率に大きな影響を与える石英量が多く含まれる場合と少ない場合の粗粒粘土には適さないことが知られている(土質工学会, 1994)。

SI 単位系で熱伝導率を求める Kersten(1949)式は,

○粘土質土

未凍結: $\lambda_u = 0.1442053 \times (0.9 \times \log_{10} w - 0.2) \times 10^{0.62428 \rho_d}$ (1)

凍結: $\lambda_f = 0.1442053 \times (0.01 \times 10^{1.37342 \rho_d} + 0.085w \times 10^{0.49942 \rho_d})$ (2)

未凍結: $\lambda_u = 0.1442053 \times (0.7 \log_{10} w + 0.4) \times 10^{0.62428 \rho_d}$ (3)

○砂質土

凍結: $\lambda_f = 0.1442053 \times (0.076 \times 10^{0.81156 \rho_d} + 0.032w \times 10^{0.91145 \rho_d})$ (4)

で示される。

Aldrich (1956)は, 土の熱伝導率 λ を凍結時・未凍結時の平均値として求めた。

$$\lambda = \frac{\lambda_u + \lambda_f}{2} \quad (5)$$

ここで, λ_u , λ_f : 未凍結土, 凍結土の熱伝導率 (W/m・K)

w : 含水比 (%)

ρ_d : 乾燥密度 (g/cm³)

砂質土: 0.05mm より細かい粒子が 50%未満の土

粘土質土: 0.05mm より細かい粒子が 50%以上の土

なお, 予備的な調査に用いる一般的な土の熱伝導率は, 約 1.67 W/(m・K)(土質工学会, 1994)で, また, 押出し発泡ポリスチレンのような断熱材の熱伝導率は, 一般に 0.028 ~ 0.040 W/(m・K) が用いられる (土質工学会, 2006)

2.2 凍結潜熱の計算

0°C の氷 1g を凍結させるのに必要な凍結熱は 79.7 cal=80cal である。土の単位体積当たりの凍結潜熱 L は, 次式から求められる。

これらの式に基づいて, 熱定数を求めると以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} L &= 80 \cdot \frac{w}{100} \cdot \rho_d \quad (\text{cal/cm}^3) \\ &= 80 \times 4.186 \times 10^6 \cdot \frac{w}{100} \cdot \rho_d \end{aligned} \quad (6)$$

w : 含水比 (%)

ρ_d : 乾燥密度 (g/cm³)

2.3 熱定数表

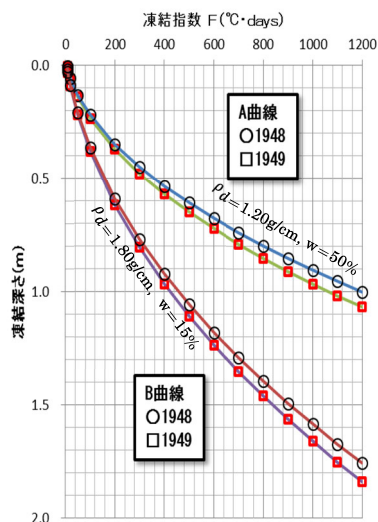
熊谷・有田(1985)が示した各材料の熱定数表を SI 系に変換し、熱伝導率には Kersten(1949)式を用い、高見(2006)で報告した方法を用いて一般的な熱定数を表 1 に示す。なお、熱容量と融解潜熱の M の単位は 10^6 を示す。

表 1 各材料の一般的な熱定数表

材 料 名	乾燥密度			熱 定 数		
	ρ_d (g/cm^3)	ρ_t (g/cm^3)	含水比 w (%)	熱伝導率 K ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	熱容量 Q ($\text{M}/\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$)	融解潜熱 L ($\text{M}/\text{J}/\text{m}^3$)
押出し発砲ポリスチレン				0.033	0.0013	0
アスファルトコンクリート				1.448	1.8753	0
セメントコンクリート				0.938	2.0093	0
切込砕石	2.00	2.10	5	2.133	1.737	33.5
切込砂利	2.00	2.14	7	2.571	1.863	46.9
砂	1.65	1.90	15	2.168	1.951	82.9
凍上性 細粒火山灰	0.95	1.43	50	1.304	2.167	159.1
平均的火山灰	1.20	1.51	26	1.358	1.833	104.5
粗粒火山灰	1.35	1.57	16.5	1.344	1.660	74.6
粘性土	1.15	1.73	50	1.678	2.624	192.6
普通土	1.425	1.95	37	1.910	2.669	176.6
凍上性 軟弱土	0.90	1.53	70	1.604	2.618	211.0
A 曲線 (土)	1.20	1.80	50	1.788	2.738	200.9
B 曲線 (粗粒)	1.80	2.07	15	2.843	2.129	90.4

3. Kersten(1948)式と(1949)式の誤差

代表的な例として、凍結する A 曲線と凍結しない B 曲線について Kersten(1948)式と(1949)式の凍結深さの差について以下に示す。



第 1 図 凍結指数と凍結深さの関係(Kersten(1948)式と(1949)式の違いによる凍結深さの差)

A 曲線：凍上を起こしやすい細粒土
B 曲線：凍上を起こしにくい粗粒土

第 1 図に、Kersten(1948)式と Kersten(1949)式を用いて、高見(2006)で発表した方法で計算した結果を示す。なお、参考にした A 曲線は凍上を起こしやすい細粒土で、B 曲線は凍上を起こしにくい粗粒土の結果を示す。

結果的に、凍結深さは Kersten (1949)の方が Kersten

(1948)より深い結果を示す。第 1 図に示す $F=1000^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ を例にとると、A 曲線では、Kersten(1948)式に比べて約 6cm、B 曲線では約 8cm 深く解析されることが判明した。

4. おわりに

日本道路協会(2009)などは、誤って Kersten(1948)式を用いた。道南のように凍結指数の小さな地域では第 1 図に示したように、両式による差は少なく凍上対策設計上では問題にはならない。しかし、道東のように凍結指数が大きな地域では両式による差は大きく、凍上対策設計上より凍結が深くなるため、凍害が発生してしまう危険性がある。また、一般には近接する AMeDAS の気温データを使って、凍結指数を求めることが多いが、AMeDAS の観測点よりも標高が 200m 以上高い地点で、凍結期間が 100 日を超えるような地域は、AMeDAS の気温データから求めた凍結指数よりも $200^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ 以上大きくなることになる。

このため、近接する AMeDAS の気温データに基づいた凍上対策設計を施しても凍害が発生する可能性がある。外気温度が低い地域でかつ標高が高い地点では、凍害をできるだけ発生させないためには、安全性の観点から近接する AMeDAS の気温データを用いず、できるだけ現地での気温観測が必要不可欠と考える。

現在、日本道路協会(2009)の改訂版が出版される情報は入手していないが、今後、改訂版を出版させる場合には、Kersten(1949)式を採用するとともに、外気温度が低く標高が高い地域では近接する AMeDAS の気温データではなく、現地観測を行うことが望ましいと追記されることを望む。

5. 謝辞

Kersten(1948)式と Kersten(1949)式の違いについてご指摘頂きました山口大学大学院創成科学研究科の中島伸一郎教授にはこの場を借りてお礼申し上げます。

文 献

- 熊谷茂樹・有田政博(1985)：マイクロコンピュータによる凍結深さ推定プログラムについて，土木試験月報，no.380，pp.25-30.
- Aldrich, H.P.(1956) Frost penetration below highway and airfield pavements, *Highway Research Board* Washinton, D.C., Bulletin 135, pp124-149.
- 熊谷・有田(1985)
- Kersten, M.S.(1948) The thermal conductivity of soils. *Highway Research Board*, Proceedings. No.28, pp91-92.
- Kersten, M.S.(1949) Thermal properties of soils. (Engineering experiment station : bulletin / Samuel C. Lind, director, no. 28) University of Minnesota, pp91-92.
- Kersten, M.S.(1952) Thermal properties soils., Frost action in soils symposium, Proceedings, *Highway Research Board Special report*, No.2, pp161-166.
- 土質工学会(1982)土質基礎工学ライブラリー23 土の凍結-その理論と応用-. 土質工学会, pp.108.
- 土質工学会(1994)土質基礎工学ライブラリー23 土の凍結-その理論と実際-第一回改訂版. 土質工学会, pp.34-35.
- 地盤工学会(2009)寒冷地地盤工学-凍上被害とその対策-. 地盤工学会北海道支部, pp.35.
- 高見雅三(2006)excel/VBA による凍結深さの推定について-修正 Berggren 式を用いた場合-. 情報地質, vol17, no.2, pp141-145.
- 日本道路協会(1987)道路土工 排水溝指針. 丸善, pp.388.
- 日本道路協会(2009)道路土工要綱(平成 21 年度版). 丸善, pp.388.

軽石漂流シミュレーションに基づくハザード評価

桑谷立*・西川遥**

Hazard Assessment Based on Pumice Drift Simulation

Tatsu Kuwatani* and Haruka Nishikawa**

*海洋研究開発機構海域地震火山部門 Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 236-0071, Japan. E-mail: kuwatani@jamstec.go.jp

**海洋研究開発機構付加価値情報創生部門 Research Institute for Value-Added-Information Generation (VAiG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3173-25 Showa-machi, Yokohama 236-0001, Japan.

キーワード：漂流軽石，粒子追跡実験，ハザード評価，データ駆動

Key words: Pumice drift, Particle tracking experiment, Hazard assessment, Data-driven

1. はじめに

海域火山噴火により放出された大量の軽石は、海面に浮遊し、海流とともに広範囲に漂流する。大規模な軽石の漂流・漂着現象は、港湾機能や漁業、海上交通、観光、インフラなど、沿岸部において多方面への被害を及ぼす。実際に2021年の福岡県ノ場の噴火の際には、大量の軽石が黒潮反流に乗って西進し約2か月後に軽石が沖縄沿岸に到達して重大な社会問題となった。本講演では、著者らのグループがこれまでにやってきた研究を紹介し、今後、軽石漂流のハザード評価に向けて必要な事項を整理する。

2. 漂流シミュレーションと可視化システムの構築

軽石漂流の挙動は、海流などの速度場中にあるラグランジュ粒子の移動を追跡する数値シミュレーションによって予測できる。本手法は海洋ごみや浮遊生物の移動予測にも数多く利用されており、2021年の福岡県ノ場軽石漂流にも適用され、その有効性が示されている。

Nishikawa et al. (2023)では、法整備や事前対策のために事前のハザード評価が重要であると考え、日本近海の7つの候補海域火山からの軽石噴出を想定した軽石漂流シミュレーションを行った。本シミュレーションでは過去数十年間の海流データを用いることで、今後起こりうる漂流のシナリオを計算している。重要な成果の一つとして、伊豆諸島の明神礁（ベヨネーズ岩礁）から大量の軽石漂流が起きた場合、1週間程度という短期間で首都圏沿岸に達するという新たなハザードの可能性が明らかとなった。

得られた膨大なシミュレーション結果について、非専門家のステークホルダーに対してもハザードを直感的に理解・利用できるように、点群PNGを用いたWebベースの可視化システムを開発した（桑谷ほか、2023）。今後は、以下で述べるリアルタイム予測やハザードマップなどの表示機能の追加を予定している。

3. データ駆動型リアルタイム予測

漂流シミュレーションは、海流速度場に基づき漂流パターンを精度良く予測することが有効であるものの、計算

量・人的コストなどの面から、リアルタイム運用には不向きである。つまり、噴火発生直後に、現在の海流状況を反映した漂流パターンを即時予測することは困難である。

Kuwatani et al. (2025)では、海上保安庁からおおよそ毎日の頻度で公開される黒潮流軸（黒潮の最速部を結ぶ曲線パターン）を用いた類似検索により、既存シミュレーション結果から、予想される漂流シナリオを即時に出力する手法を開発した。Nishikawa et al. (2023)で得られたデータセットを用いた検証により、黒潮流軸間の類似度指標としてDTW（動的時間伸縮法）が最も精度が高く、類似度のトップ4~7の漂流パターンを出力することで、予測の網羅性と精度のバランスを保てることを明らかにした。本手法は2024年9月の須美寿島周辺での噴火警戒事例において実際に運用され、速報として政府機関に報告された実績がある。

4. 議論

現状において、海流モデルの空間解像度の低さや、表層風の影響の無視など、今後のシミュレーション予測精度の改善が必要である。また、実際の沿岸部での被害を想定したリスク評価という観点では、漂流軽石の総体積や個々の軽石粒径の予測も求められる。今後、実際の軽石漂流に関する衛星観測データ・地質学的な観察結果、室内実験データなどを利用することで改善を進めていく予定である。

文 献

Kuwatani, T. et al. (2025) Data-driven proactive prediction of pumice drifting pattern using similarity search of the Kuroshio current axis. *npj Natural Hazards*, 2, 34

桑谷立ほか (2023) 点群 PNG を用いた軽石漂流シミュレーション結果の可視化：漂流軽石のハザード評価システムの構築に向けて。情報地質 vol.34, pp. 61-68

Nishikawa, H. et al. (2023) Simulated distributions of pumice rafts in Japan following eruptions at volcanic islands and submarine volcanoes” *Progress in Earth and Planetary Science*, 10, 21

スタッキング法を使用した中国全域の熱流量分布予測

韋 潤乾*・久保 大樹*・小池 克明*

Modeling of Terrestrial Heat Flow Distribution throughout China Using Stacking Method

Wei Runqian*, Taiki Kubo * and Katsuaki Koike*

* 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540.
E-mail: wei.runqian.25m@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード：地熱資源，特徴量エンジニアリング，地質物性，機械学習

Keywords: Geothermal Resource, Feature Engineering, Geological Properties, Machine Learning

1. Introduction

Geothermal energy is recognized as a valuable renewable resource in various fields, including electricity generation, agriculture, and aquaculture. Although the utilization of geothermal energy as a heat source in China accounts for the largest proportion worldwide, the usage of geothermal electricity is still under development. As committed in the 13th and 14th Five-Year Plans, China is moving forward in utilizing geothermal energy as an alternative energy source, especially in the middle-to-deep geothermal and hot dry rock categories.

Although it is essential to clarify the subsurface

temperature distribution throughout China to specify preferable sites for geothermal electricity generation, the data points containing such information are limited. Thus, a stacking method is utilized to predict the distribution of heat flow, which is strongly related to temperature, and its effectiveness is discussed.

2. Methods

2.1 Stacking Method

The stacking method is a machine learning technique that integrates the outputs from variable machine learning methods, termed base models. The outputs of

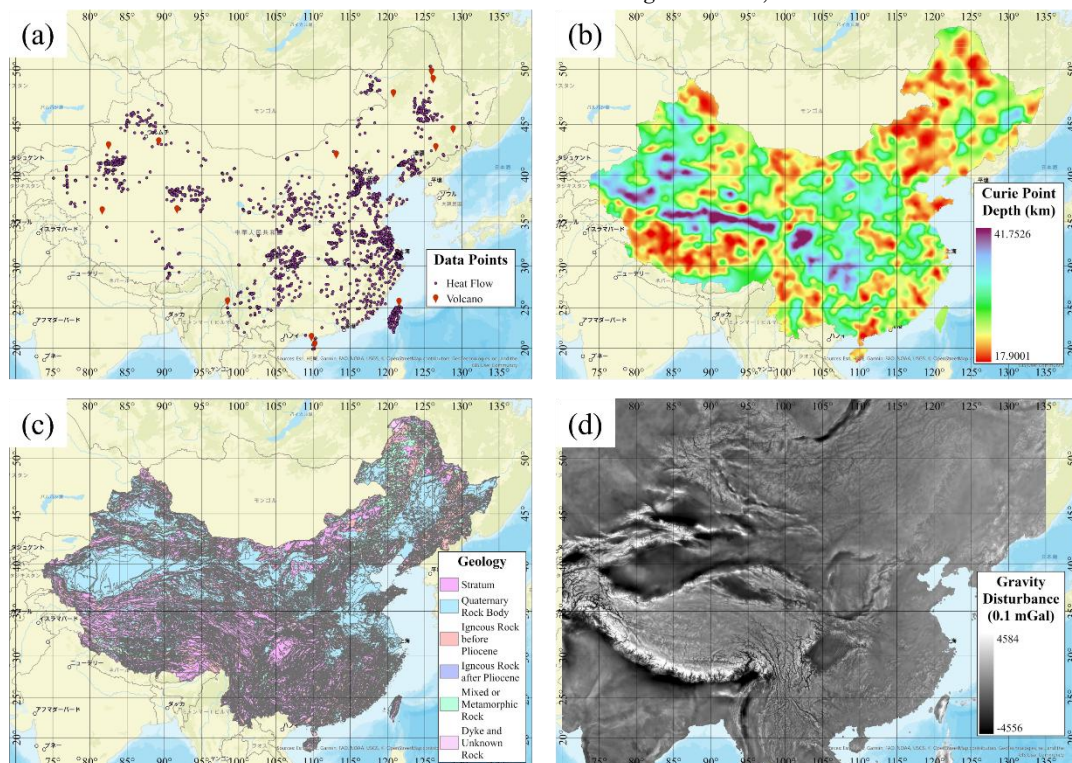


Fig. 1 Datasets used for machine learning: (a) heat flow and volcano data points, (b) Curie point depth, (c) rock type, and (d) gravity disturbance.

base models are used as the input of the metamodel to predict the target value. This method is known to be beneficial for improving the versatility of machine learning models and preventing overfitting. In this study, XGBoost, LightGBM, and Random Forest are chosen as the base models of the stacking model, and Linear Regressor is utilized as a metamodel following Ieki et al. (2025).

As the input data, deduplicated dataset from the China Heat Flow Database and International Heat Flow Commission (2024) in the form of heat flow value were linked to the related data point coordinates. For the estimation, the target area was divided into $1\text{km} \times 1\text{km}$ cells and the center of each cell was targeted for the calculation.

2.2 Feature Engineering

Along with the input data, feature data composed of Curie point depth (Xiong et al., 2016), rock type (Pang et al., 2017), surface temperature, volcano location, gravity acceleration, and gravity disturbance were added at the input data and estimation points. For volcano location data, the Euclidean distance from the closest volcano was used, and for the other data in raster form, data extracted at the data points was used directly. Part of the datasets are shown in Fig. 1.

2.3 Accuracy Evaluation

For accuracy evaluation, K-fold cross-validation was utilized. In the process, input data are split into training and test data, and the accuracy is evaluated by the difference between the observed values in the test data and output values from the learned model using the training data. For the loss function, the root mean squared error (RMSE) by Equation (1) was used.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

where y_i is an observed value, $\hat{y}_i$ is a predicted value, and n is the number of observations. The benchmark for the stacking method is shown in Fig. 2, and the RMSE for each base model included in the stacking model is also plotted for comparison. It can be concluded from the result that the combination of multiple machine-learning methods can reduce the estimation error.

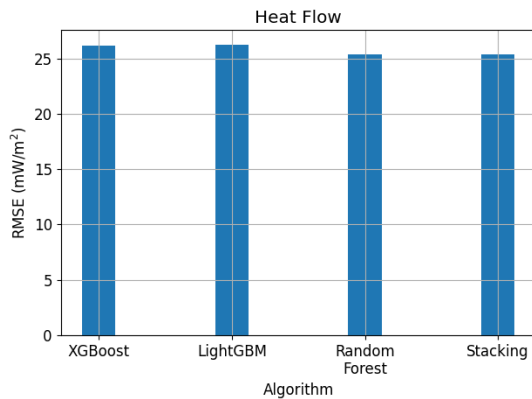


Fig. 2 RMSE benchmark of Stacking method with comparison of three base models.

3. Results

The predicted heat flow map by the stacking method is shown in Fig. 3. The result reveals high heat flow values in Tibet and the Eastern Coast of Taiwan, where the

orogenic belts are distributed nearby, whereas low values in Sinkiang and Northeastern China. These regional trends may be verified partly from the geothermal utilization in China including the Yangbajain geothermal site in which the only geothermal electric powerplant in China is under operation. However, the stacking result show unrealistic large-scale circle patterns and straight-banded distributions that are closely related to the original dataset feature, particularly the Curie point depth. This implies that the stacking method is insufficient to capture promising geothermal resource sites with high spatial resolution.

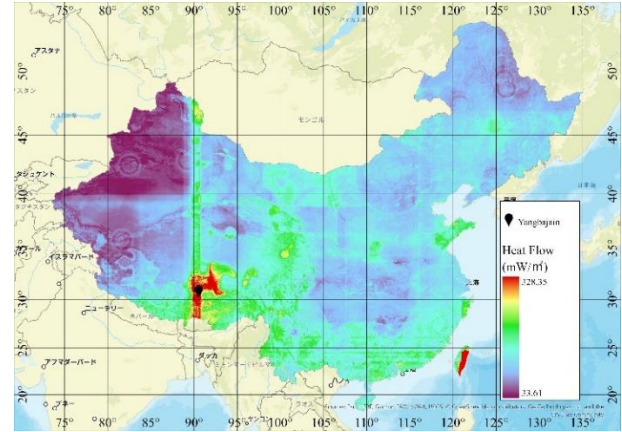


Fig. 3 Produced heat flow map by the stacking method.

4. Discussion and Conclusion

In this study, a stacking method considering several geological features was used to produce a heat flow map from point-measurement data in continental China. The result showed a general agreement with the high heat zones in China but was not sufficient to accurately specify promising geothermal resource sites.

As our next step, a prediction of heat flow values through a deep neural network (DNN) is in progress. Furthermore, the result by DNN will be used to simulate the temperature-at-depth distribution by a physics-informed neural network that sets the surface temperature and Curie point depth as boundary conditions, which is expected to clarify a 3D subsurface temperature distribution to great depths throughout China and estimate geothermal power generation.

References

- Ieki Y., Koike K. and Kubo T. (2025) Deep learning-based three-dimensional terrestrial temperature modeling throughout Japan incorporating multiple crustal properties and spatial correlation with an application to critical point distribution. *Geothermics* (in press). doi:10.1016/j.geothermics.2025.103403.
- 中国科学院地質與地球物理研究所, 成都理工大学 China Heat Flow Database. <https://chfdb.xyz>
- International Heat Flow Commission (2024) The Global Heat Flow Database: Release 2024 <https://doi.org/10.5880/fidgeo.2024.014>
- Xiong S., Yang H., Ding Y. and Li Z. (2016) Characteristics of Chinese continent Curie point isotherm. *Chinese Journal of Geophysics*, vol.59, pp.3604-3617.
- Pang J., Ding X., Han K., et al. (2017) The National 1:1000000 Geological Map Spatial Database. *Geology in China*, vol. 2017A01, pp125-138.

日本の熱水鉱床形成に関連する花崗岩類の化学組成的特徴の抽出

谷口 卓也*・江夏 道晴*・小池 克明*

Extraction of Chemical Compositional Features of Granitoids Related to Formation of Hydrothermal Deposits in Japan

Takuya Taniguchi*, Michiharu Enatsu* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: taniguchi.takuya.22i@st.kyoto-u.ac.jp (Taniguchi)

キーワード：鉱化花崗岩類, 不適合元素, 熱水鉱床, 機械学習, ランダムフォレスト

Key words: Mineralized granitoids, incompatible element, Hydrothermal deposit,
Machine learning, Random Forest

1. はじめに

世界的な金属資源需要の増加(Watari et al., 2021)に伴い、新たな金属鉱床の探査・開発は資源工学における喫緊の課題となっている。日本の金属鉱床の多くは熱水鉱床であり、その形成メカニズムの解明は資源開発戦略において極めて重要である。熱水鉱床は多くの場合花崗岩を伴って形成されるが、日本全土に広く分布する花崗岩の中には鉱床を伴わないものも多数存在する。この差異を支配する要因を特定することは、熱水鉱床の生成プロセスの解明、および効率的な鉱床探査において不可欠である。

そこで本研究では、岩石データベースを利用して日本国内に広く分布する花崗岩類の化学組成を詳細に分析し、鉱床形成への関連の有無によって花崗岩類の化学的特徴がどのように異なるのかを明らかにすることを目的におく。これまで、特定の地域や鉱床付近の花崗岩類の化学組成に関する研究報告は多いものの(例えば石原, 2002 など)、日本全土を対象とした花崗岩類の化学組成に関する網羅的な議論は少なく、鉱床形成との関連性についての知見は限られている。この問題に対し、本研究は機械学習を用いて熱水鉱化作用をもたらした花崗岩類の元素や化学成分を特定するとともに、岩石試料の分析によりそれを検証することを目指している。

2. 研究手法

2.1 花崗岩類データの解析

本研究は岩石化学組成データベースである DODAI database と GEOROC に注目し、これから花崗岩類のデータを抽出し、日本の熱水鉱脈およびスカルン鉱床の位置情報と GIS で統合した。これらの熱水鉱床からの距離に応じて花崗岩類を分類し、10 km 以内を鉱化、その範囲外を不毛の花崗岩類と定義した。日本全土の鉱化／不毛花崗岩類の分布を第 1 図に示す。鉱化／不毛花崗岩類の化学組成の相違を明らかにするために、化学組成データに教師あり機械

学習の一つである Random Forest (RF) を適用した。また、火成岩類の化学組成を議論するのに有効なハーカー図を用いた。この図は横軸に SiO_2 濃度(wt%)と縦軸に元素濃度(wt%)をとり、これらの濃度関係を表す。

2.2 分析対象試料

本研究では、鉱化花崗岩類の試料として 9 種(釜石, 船津, 広瀬, 行者山, 沢入, 笠木, 苗木, 仁堀, 万成), および不毛花崗岩の試料として 8 種(稲田, 土岐, 武節, 金勝山, 大文字山, 人形峠, 広島, 竜門ダム)の計 17 種の花崗岩類試料を収集した。すべての試料の主要元素を XRF で分析し、一部の試料に対しては ICP-AES と ICP-MS で微量元素を分析した。得られた化学組成データをハーカー図で特徴付けた。

3. 結果と考察

3.1 RF の結果

まず、主要元素の酸化物(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5)と不適合元素(Cs, Rb, Ba, Th, U, Nb, Ta, La, Ce, Sr, Hf, Zr, Y)に注目し、鉱化と不毛花崗岩類の分類に寄与した割合である重要度を第 2・3 図で比較する。第 2・3 図からわかるように、RF の結果では主要元素の酸化物の特徴量はほぼ同じであったが、不適合元素である Ta, Hf, Cs が鉱化／不毛花崗岩での差が大きいことがわかった。Ta, Hf, Cs はいずれも周期表で第 6 周期の原子量が大きい元素であり、Cs はイオン半径が大きく、Ta と Hf はイオンの酸化数が大きいという特徴がある。そのため鉱物中に取り込まれにくいという性質があるため、これらは鉱化／不毛花崗岩類の指示元素となり得ることを明らかにできた。また、Nb も同様に特徴量が少し大きい、これは Nb が同族である Ta と花崗岩中の挙動が類似しているためと解釈できる。

3.2 ハーカー図での特徴

次にハーカー図を第 4・5 図に示すが、本研究では最も特徴が現れた Fe_2O_3 と TiO_2 を SiO_2 との関連付けに選んだ。

鉍化／不毛花崗岩類それぞれにおける濃度関係を表す回帰直線を最小二乗法で求め、それぞれの図に描いている。第4・5図より鉍化／不毛花崗岩類のいずれも SiO_2 の増加とともに線形的に Fe_2O_3 と TiO_2 が減少するが、同じ SiO_2 濃度に対して鉍化花崗岩類の方が Fe_2O_3 を 0.3wt%, TiO_2 を 0.1wt%程度多く含むという傾向を明らかにできた。この傾向は 17 個の岩石試料の分析結果からも得られた。鉍化花崗岩類で Fe_2O_3 , TiO_2 濃度が不毛花崗岩類より高いことから、花崗岩質マグマ活動期において Fe_2O_3 と TiO_2 が主要金属元素に代わって花崗岩類に濃集され、金属元素が熱水により多く分配されることで鉍床を形成したと考えられる。これにより、花崗岩類中に Fe^{3+} , Ti^{4+} の存在量が少ない、あるいは鉍種となる金属元素と置換し難い状態であることが鉍床を形成しない要因の一つである可能性が示唆された。

4. まとめ

RF の結果から鉍化関連の花崗岩類においては、原子量が大きく、イオン半径が大きい、またはイオンの酸化数が大きい元素が濃集しやすいという特徴が見出された。また、鉍化過程を経た花崗岩類では、 Fe_2O_3 と TiO_2 相対的に多いという傾向にあり、熱水鉍床形成において Fe_2O_3 と TiO_2 は共に濃集しやすいという可能性が示唆された。さらに、岩石試料の解析結果は、サンプル数が少ないにもかかわらず、データ解析結果と同様のトレンドを示していたため、データ解析から抽出できた特徴の妥当性を確認できた。

本研究の成果は、鉍化／不毛花崗岩類の特徴の差を明らかにすることで、鉍床未発見域において鉍床形成に関連する花崗岩類であるか否かを判定する指標となり、鉍床形成の要因の特定において重要な役割をもつ可能性がある。熱水鉍床を伴う花崗岩類の化学組成的特徴を十分に把握することによって新たな熱水鉍床の探査に繋がると考えられる。

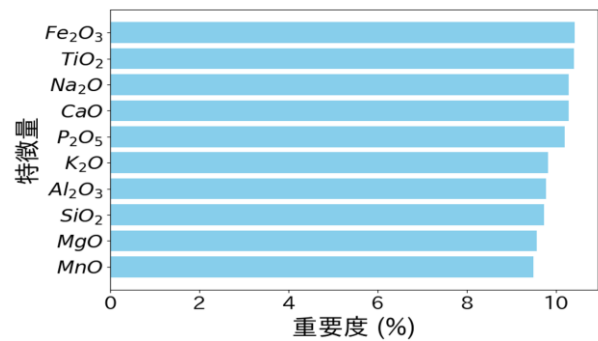
文 献

石原舜三 (2002) 鉍化花崗岩特性(I): 西南日本内帯のモリブデンとタングステン鉍床生成区。地質調査所研究報告, vol.53, no.9-10, pp.657-672.

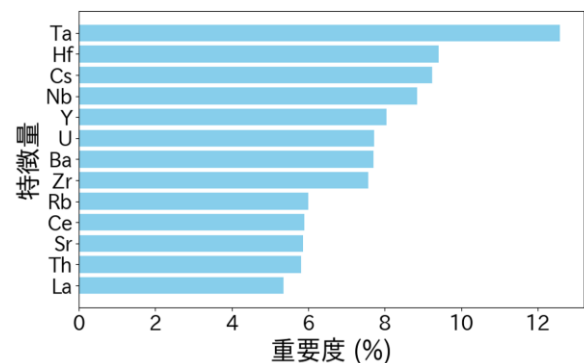
Watari, T., Nansai, K. and Nakajima, K. (2021) Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol.164, 105107.



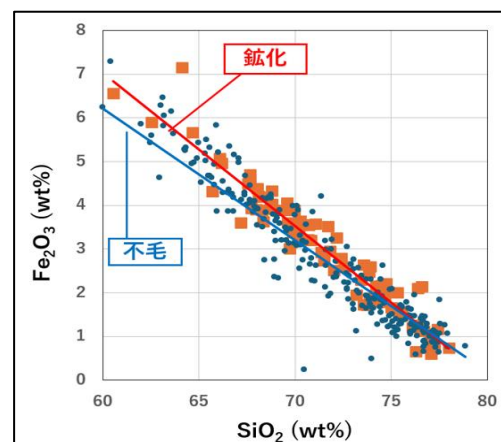
第 1 図 鉍化／不毛花崗岩類での化学組成データの位置



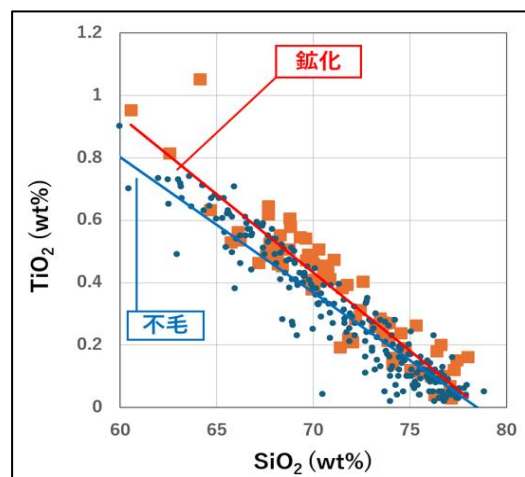
第 2 図 RF による主要元素の酸化物の重要度



第 3 図 RF による不適合元素の重要度



第 4 図 ハーカー図による鉍化／不毛花崗岩類での Fe_2O_3 濃度の比較



第 5 図 ハーカー図による鉍化／不毛花崗岩類での TiO_2 濃度の比較

反応性化学輸送シミュレーションによる熱水鉱床の形成プロセスの推定

須山 傑*・江夏 道晴*・富田 昇平**・小池 克明*

Estimation of Formation Process of Hydrothermal Deposits through Reactive Chemical Transport Simulation

Suguru Suyama*, Michiharu Enatsu*, Shohei Tomita** and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-214, Kyoto 615-8540, Japan.

E-mail: suyama.suguru.37e@st.kyoto-u.ac.jp

**金沢大学理工学研究域地球社会基盤学系 School of Geoscience and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan.

キーワード：熱水鉱床，熱水変質，熱・水理・化学連成解析

Key words: Hydrothermal deposit, Hydrothermal alteration, Thermal-Hydrological-Chemical coupled analysis

1. はじめに

日本の陸域には多くの熱水鉱床が存在しており，排他的経済水域 (EEZ) 内にも海底熱水鉱床有望地の分布が報告されている。混沌とする世界情勢や高まる金属資源の需要を踏まえれば，熱水鉱床の成因や形成プロセスへの理解の深化は，今後の鉱床開発事業ひいては日本の資源政策に多大に貢献し得る。

これまで熱水鉱床の形成プロセスに関して様々な議論がなされている。このプロセスを解明するためには，熱水流体の物理的挙動と水-岩石反応による化学的反応が相互に影響し合う複雑な系を研究の対象にする必要がある。そこで，このような系の地質学的時間スケールにおける地殻内部の変化を把握するために，本研究では数値シミュレーションの手法を用い，鉱床形成に重要な影響を及ぼす因子の特定を試みた。

2. 手法

本研究では，熱・水理・化学連成解析コードの一つである TOUGHREACT-v4.13 を用い，熱水の流動および岩石との化学反応を計算する。複数の条件設定のモデルを用意するために，計算領域に単純な一次元垂直モデルを作成し，パラメーターとして熱水の化学組成・浸透率・モデルサイズの3つに限定した。TOUGHREACT では境界条件として，深部熱水の化学組成を設定する必要があるが，一般に地下深部での熱水の化学組成を観測することは不可能である。そこでまず，熱水の混合のない独立した熱水循環系を仮定し，モデル上部から海水が涵養されて深部熱水に変質する過程(涵養域)，および深部熱水が上昇して母岩と反応する過程(反応域)を再現した。同様に天水起

源のモデルを作成し，熱水の起源が異なる場合の熱水の化学組成や鉱物の析出量を比較した。

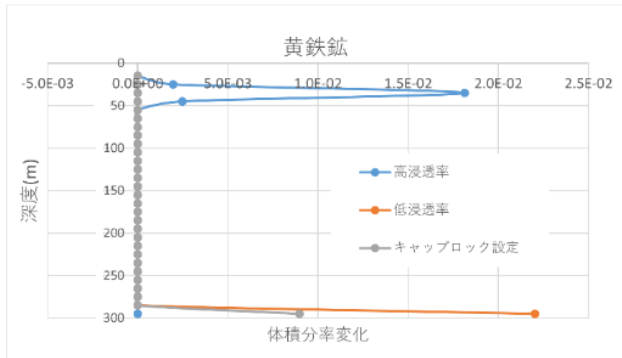
次に，反応域における母岩の浸透率の影響を検討した。浸透率が高い場合，低い場合，モデル上部の浸透率のみが低い場合の3通りを用意し，鉱物の析出状態を求めた。さらに，陸域鉱床を模するため，深度範囲 3000 m の大規模サイズと初期条件を設定した一次元垂直モデルを作成し，海底熱水鉱床モデルと熱水変質鉱物の析出量の相違を明らかにした。

3. 結果と考察

天水由来の熱水と海水起源の熱水にはイオン強度に差があり，本モデルにおいては海水起源の熱水の方が鉱床形成に有効に作用すると考えられた。第1図は，浸透率の大きさによって硫化鉱物の析出が異なることを示す。高浸透率モデルでは，沸騰が生じた領域において，母岩に占める硫化鉱物の体積分率変化が 2.26×10^{-2} であったのに対し，低浸透率モデルにおいては 1.17×10^{-7} と格段に小さかった。これは浸透率が低いことで流体圧が増加し，沸騰し難い環境になるためである。一方，モデル上部の浸透率のみが低い場合も 7.10×10^{-8} と小さいままであった。これは本モデルが一次元モデルであり，上昇した熱水の流体圧が上昇したことで黄鉄鉱の析出が小さかったためと考えられる。

以上より，沸騰が生じる条件下で黄鉄鉱が多く生成されることがわかった。また高浸透率層の存在が重要であり，海底熱水鉱床の噴出孔付近ではキャップロックが形成されることで，鉱物の沈殿が促進されると考えられる。このような海底熱水系における

高浸透率層の存在は、ボーリングコアデータを用いた先行研究においても見出されている(de Sá et al., 2021).



第1図 黄鉄鉱の体積分率変化

陸域鉱床を模したモデルにおいては、温度変化に従って析出する鉱物に違いがみられた。第2図から第5図は高温なモデル下部からカリ長石-イライト-白雲母-カオリナイトの順に体積分率変化にピークが表れていることを示す。このような累帯配列の形成は鹿児島県菱刈金鉱山の浅熱水鉱脈型鉱床においても確認されている(Shikazono et al., 2002)。また、アルカリおよびアルカリ土類交代反応による雲母鉱物やケイ酸塩鉱物の変質もシミュレーションで得られた。これは、沸騰が生じたモデルにおいて顕著に現れたことから、沸騰により熱水変質が促進されることが示唆される。

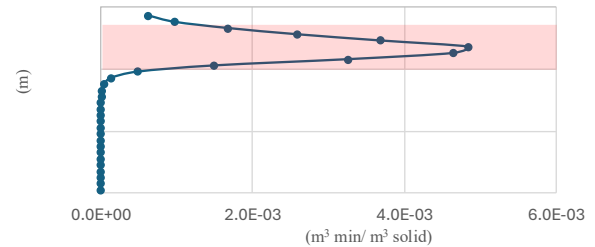
4. まとめと今後の課題

本研究では数値シミュレーションにより熱水上昇に伴う岩石の熱水変質を再現することができた。また、沸騰が生じることで硫化鉱物の沈殿が促進されること、アルカリおよびアルカリ土類交代反応が顕著にみられることがわかった。しかしながら、海底熱水系で観察されているようなキャップロックを設定したモデルでは硫化鉱物が析出しなかった。この要因として、モデル内の流体圧が高まり、沸騰が生じなかったことが考えられる。この問題を解決するためには、モデルを2次元あるいは3次元に拡張し、熱水の側方流動を再現することが必要である。本研究で得られたいくつかの単純なモデル設定を組み合わせ、スカルン鉱床、斑岩銅鉱床、海底熱水鉱床など、種々の熱水鉱床タイプの形成プロセスの全体像を明らかにすることが最終目標である。

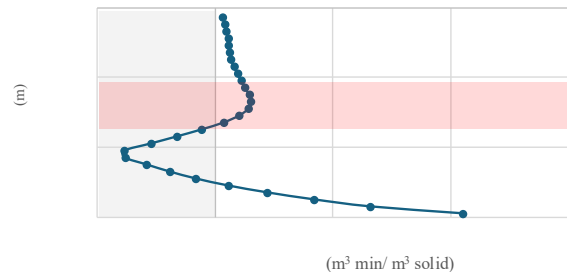
文 献

- de Sá, V. R., Koike, K., Goto, T. N., Nozaki, T., Takaya, Y., and Yamasaki, T. (2021) A combination of geostatistical methods and principal components analysis for detection of mineralized zones in seafloor hydrothermal systems. *Natural Resources Research*, vol. 30, no. 4, pp. 2875-87, <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09705-4>.
Shikazono, N., Yonekawa, N., and Karakizawa, T. (2002) Mass transfer, oxygen isotopic variation and gold

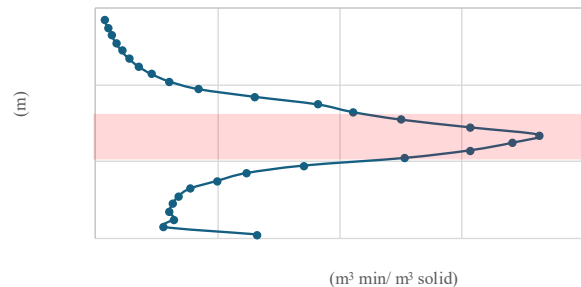
precipitation in epithermal system: a case study of the Hishikari deposit, southern Kyushu, Japan. *Resource Geology*, vol. 52, no. 3, pp. 211-22, <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2002.tb00131.x>.



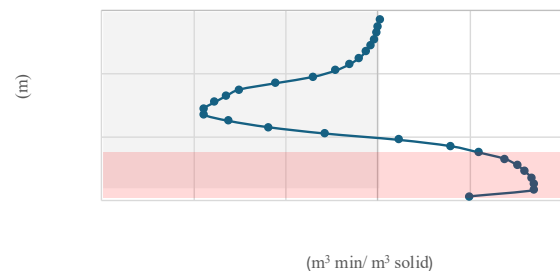
第2図 カオリナイトの体積分率変化



第3図 白雲母の体積分率変化



第4図 イライトの体積分率変化



第5図 カリ長石の体積分率変化

Uncovering Vertical Controls on Tin Mineralization through PCA and MAF Analysis: Toward Future Applications in Geometallurgy

Raharisolonjanahary Rindraniaina Sylvie*, Katsuaki Koike*, Vitor Ribeiro de Sá*, Mohamad Nur Heriawan**, Slamet Sugiharto***, Nur Rochman Nabawi*** and Anton Murtono***

*Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.

**Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Bandung Institute of Technology, Basic Science Center B Building, 4th Floor, Jalan Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.

***PT Timah Jl. Medan Merdeka Tim. No.15, RT.6/RW.1, Gambir, Kecamatan Gambir, Kota Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10110, Indonesia. Indonesia.

E-mail: raharisolonjanahary.sylvie.66x@st.kyoto-u.ac.jp; koike.katsuaki.5x@kyoto-u.ac.jp

Key words: PCA-MAF method, Tin mineralization, Geologic model

1. Introduction

Geometallurgical domain definition plays a crucial role in resource extraction and processing. Geological domains and geometallurgical domains can reduce metallurgical variability within a deposit by delineating units that share similar texture, mineralogy, and composition, which are expected to have similar metallurgical performance (Johnson and Murno, 2008; Tiu et al., 2023). Variability remains a challenge due to its intrinsic properties. However, few studies have been conducted on grouping and modelling the characteristics of complex ore.

This study aims to apply minimum/maximum autocorrelation factors (MAF) to data set from a tin deposit. MAF can yield categories that assemble data with similar characteristics. Decorrelation techniques, such as PCA (Principal Component Analysis)-MAF proposed by Switzer and Green (1985), have the flexibility to furnish tools to handle geological information. There are unique characteristics that we should consider as geometallurgical input data without considering the output, identifying and clarifying units such as Rock Quality Designation (RQD), tin grade, vein and having similar characteristics can help constrain the variability within a tin deposit.

2. Methods and materials

PCA-MAF is decorrelation methods including minimum/maximum autocorrelation factors and PCA.

The data used in this research are from Indonesia tin deposit composed of 25 inclined boreholes including grade, RQD, mineralization, vein percentage, and depth to examine vertical zoning patterns.

First, all variables were log-transformed to correct for skewness and normalized before analysis. After that, PCA was used to reduce dimensionality and identify the major components, while MAF analysis was applied to minimize spatial autocorrelation and isolate meaningful spatial structures. Finally, variogram analysis was conducted on PCA and MAF outputs to assess spatial

continuity.

The methodology is described in the flowchart in Fig. 1.

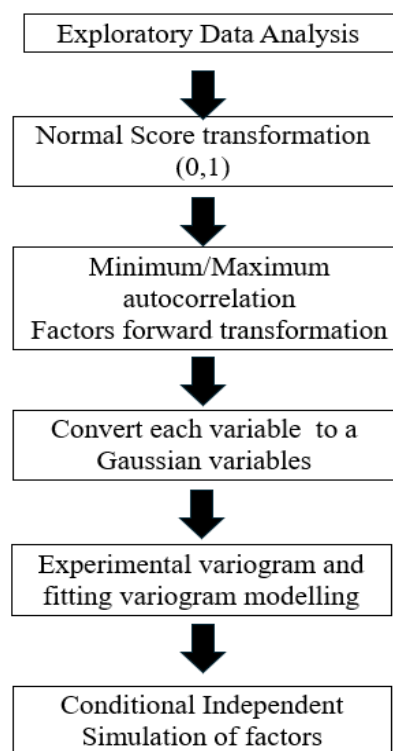


Figure 1. Flowchart of the methodology.

3. Results and Discussion

From Table 1, PC1 dominated mineralization and vein contribution from Sn indicated the structural control on the mineralization, and PC3 indicated independence of vein. PC1 and PC2 are used to build MAF due to it is correlation with Sn. The field orientation is based on in-situ measurements, with isotropy aligned along strike: N66° and dip: 53°NE.

Table 1. Result of PC (NS means Normal Score).

Variable	PC1	PC2	PC3
NS Mineralisation	0.85	-0.14	0.03
NS Sn	0.55	0.34	0.72
NS Vein	0.71	-0.31	-0.48
NS RQD	-0.18	-0.88	0.44

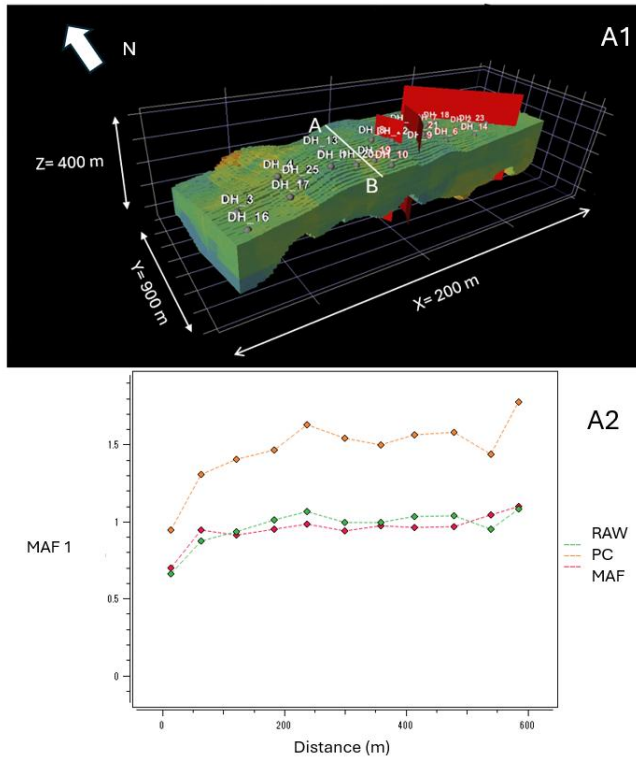


Figure 2. 3D representation of the MAF spatial distribution (A1) and plot variogram with raw (A2).

The MAF1 in Fig. 2 shows that the variogram increases gradually and smoothly with distance. The MAF1 captures strong spatial continuity better than raw and PC data. Based on the field research, it suggests a structural vertical trend reflecting lithological control. In the transition from variables to factors, Factor 1 (F1) exerts a strong influence on both Sn and RQD. These variables exhibit spatial inversion, making their detection and interpretation within the model challenging.

By aligning statistical output with lithology, tin grade, pyrite content, and RQD, we can pinpoint particularly important intervals. The enrichment of tin often coincides with sulfide mineralization and zones where the structural characteristics of the rock change.

Fig. 3 demonstrates the vertical distribution of Sn, pyrite, RQD and MAF attribute to representative borehole. Notably, high tin concentration aligns with increased pyrite content and specific MAF score intervals at approximately 50-120 and 200-250 m.

The downhole composite log provides the clearest visualization of geological reality with statistical analysis. The aligned scores with tin grade, pyrite, lithology, and RQD revealed key intervals. Tin enrichment coincided with sulfide occurrence and

structural variable zones. Vertical examination of the borehole data reveals that the mineral deposit is controlled by both the host rock lithology and depth.

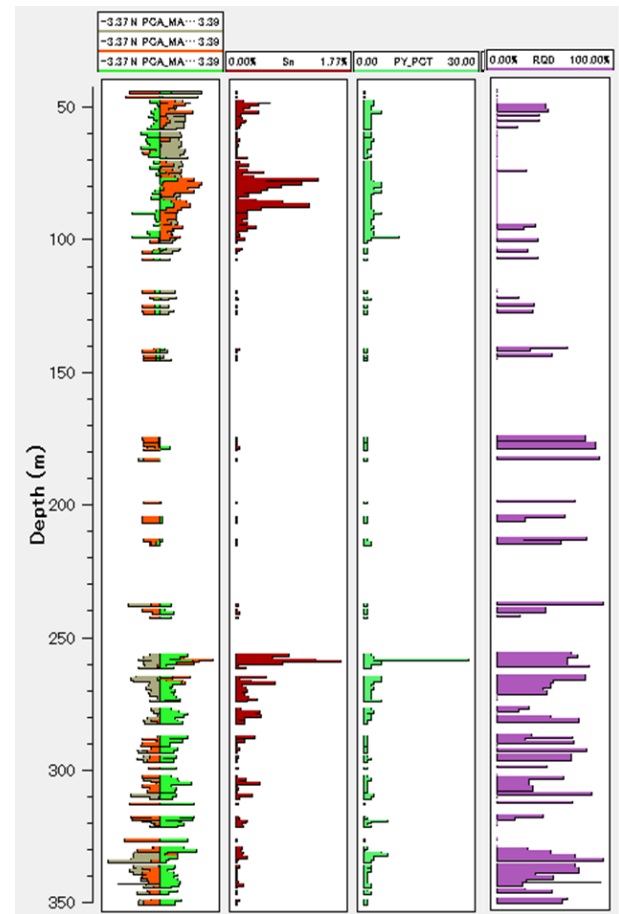


Figure 3. Representative sample of borehole composite log showing correlation with PCA-MAF, tin, RQD and mineralization.

4. Conclusion

PCA or MAF component could not fully explain tin distribution vertically, their integration with the borehole provides the clearest visualization of geological reality, with statistical analysis enabling the identification of key trends and the foundation for defining domains and guiding future geometallurgical models.

An additional dataset could help strengthen the model for predictive applications. This illustrates the challenge of operating in geometallurgical modeling and reinforces the practical value of multivariate methods in early geometallurgical investigations.

References

- Tiu, G., Ghorbani, Y., Jansson, N., Wanhainen, C. and Bolin, N.-J. (2023) Quantifying the variability of a complex ore using geometallurgical domains. *Minerals Engineering*, vol.196, 107129.
- Switzer, P. and Green, A.A. (1985) Min/max autocorrelation factors for multivariate spatial imagery. *Comput. Sci. Stat.*, vol.16, p.13–16

空中写真判読と時間領域電磁探査に基づく活火山中腹の地質構造の推定： 北海道知床硫黄山での例

山本 睦徳*・後藤 忠徳**・小池 克明***

Inferred Geological Structures on the Flanks of Active Volcanoes Based on Aerial Photographs and Time-Domain Electromagnetic Surveys: A Case Study of Shiretokoiozan Volcano, Hokkaido, Japan

Mutsunori Yamamoto*, Tada-nori Goto** and Katsuaki Koike***

*大阪市立自然史博物館 Osaka Museum of Natural History, Email: yamamoto@earthscience.jp

**兵庫県立大学 大学院理学研究科 地球科学講座

Earth-Science Laboratory, Graduate School of Science, University of Hyogo

***京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻地球資源学講座地殻環境工学分野

Laboratory of Environmental Geosphere Engineering,

Department of Urban Management Graduate School of Engineering, Kyoto University

キーワード： 知床硫黄山, TEM 探査, 溶融硫黄噴火, 火山活動域

Key words: Shiretokoiozan volcano, TEM exploration, Molten sulfur eruption, Active volcanic area

1. はじめに

知床硫黄山は北海道知床半島に位置する第四紀の活火山で、中腹 1 号火口（新噴火口）から大量の溶融硫黄を噴出することで知られている（第 1 図）. Yamamoto et al. (2017) は自然電位探査と電気探査、地質調査等を行い、1 号火口の東側斜面に火山ガスの上昇域があり、そのために噴気活動が活発である可能性を示した。本研究では、さらに地下構造調査を行って、より深部での火山ガスや地下水の上昇過程を推定するために、2022 年と 2023 年に TEM(Transient Electro Magnetic Survey)探査を行った。TEM 探査は人工磁場変動を用いた探査方法であり、地下の比抵抗分布を探査するために使われている。本研究では、空中写真による地表面の熱水変質帯の判読、赤外線空中写

真、自然電位と TEM 探査結果を相互に比較し、地表下に埋没した過去の噴気域の検出も含め、噴気活動域について明らかにした。

2. 調査地の概要

調査地である 1 号火口は知床硫黄山の北西山麓の標高 600m 地点に位置し、周辺は熱水変質の影響により植生が薄く地表が露出している。第 2 図の赤線の北西側は、過去に活動していたと推察されている地域であるが、一部を除いて現在はほとんど活動していない。一方、第 2 図の赤線の東側から南東部にかけては、現在も火山活動が活発である（Yamamoto et al., 2017）。知床硫黄山北西山麓は全体が数枚のシート状溶岩によって覆われており、1 号火口周辺は溶岩が熱水変質により玉ねぎ状風化が生じ、数十 cm から大きなものでは数 m のコアストーンが全体を覆っている。また、カムイワッカ川の源流（温泉）、大広間の陥没、1 号火口、噴気帯は曲線上に並んでいる。

3. TEM 探査法

TEM 探査では各地点で 20m × 20m の正方形のコイルを地面に設置し、Applied ElectroMagnetic Research 社製 TEM-FAST 48 HPC (Model: 13W32-38K-2012/S2)および同社製の解析ソフトウェア TEM-RES を使用した。送信ループアンテナ（コイル）と受信ループアンテナは共通であり、1 次磁場遮断後に同じコイルを使って 2 次磁場を観測した。調査地には直径数 m 以下の転石やハイマツなどの障害物が多かったが、できる限り地面に接するようにケーブルを設置した。

4. 結果

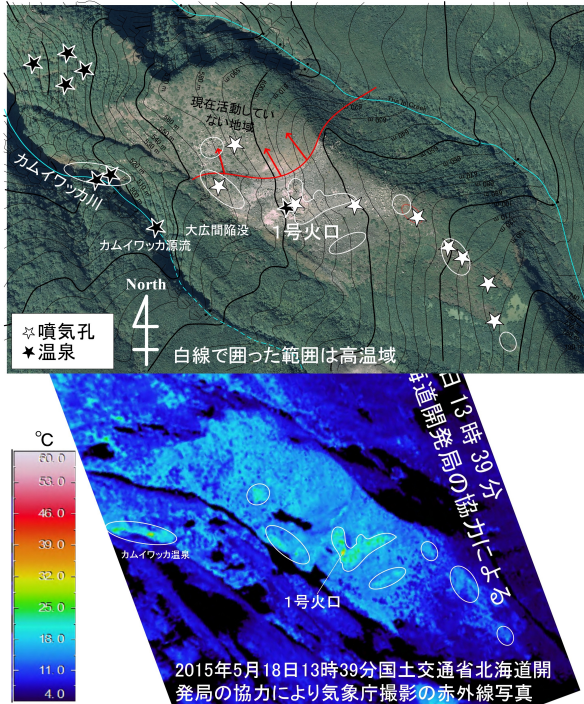
4.1 空中写真と赤外線写真の判読

地表状態と地表面の温度を比較するために、空中写真（2014 年 9 月 21 日林野庁撮影）と赤外線空中写真（2015 年 5 月 18 日気象庁撮影）を比較した（第 2 図）。空中写真



第 1 図 知床硫黄山の位置

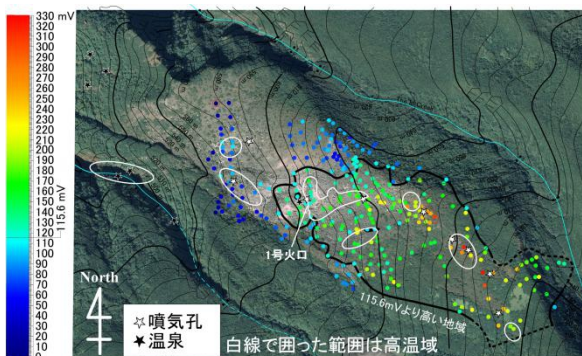
の赤線より北西側は、一部を除いて火山活動がほとんど見られないことが地表踏査より判明しているが、過去に熱水変質した砂礫とコラストーンで覆われている。一方、赤線の南東側は赤外線写真で比較的温度が高い領域が現れている。1号火口内の噴気は第2図では約35℃であるが、現地で計測した噴気の温度は98.3℃（2024年8月21日）であった。このことから、高温領域は赤線の南東側に集中しており、噴気活動が活発であることが確かめられる。



第2図 空中写真（2014年9月21日林野庁撮影）と赤外線空中写真（2015年5月18日気象庁撮影）。1号火口周辺は、植生が薄く熱水変質岩が露出している。現在活動しているのは、赤い線より南東側（右下）である。

4.2 自然電位探査と空中写真との比較

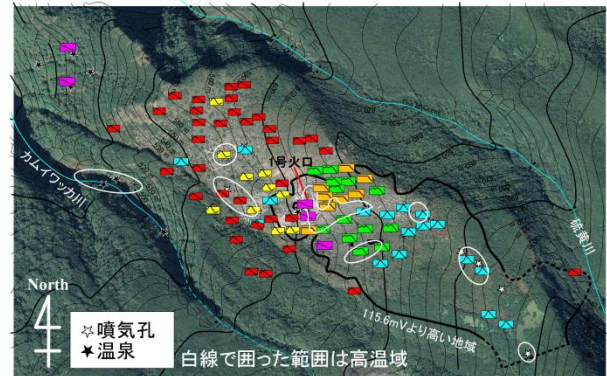
Yamamoto et al. (2017)による自然電位探査の結果と空中写真とを重ね合わせると（第3図）、1号火口の東方に自然電位が高い領域が広がっている。また、地表面の高温域と噴気帯の位置、および自然電位が相対的に高い地点は概ね一致しており、特に115.6mVの等電位線の内側で噴気活動が活発である（Yamamoto et al., 2017）。



第3図 自然電位探査結果（Yamamoto et al., 2017）と空中写真の重ね合わせ。噴気が見られる地点で最も低い自然電位は115.6mVで、太い黒線は115.6mVの等電位線を表す。

4.3 TEM 探査結果

探査結果の表示法として、各地点での比抵抗－時間グラフの形状の類似性を基にグループ分けし、空中写真上に各測定地点を色分けした結果を第4図に示す。



第4図 TEM 探査結果の比抵抗－時間グラフを簡略化したもの。特徴に基づいて形状で分類・色分けし、各計測地点に示した。

噴気地域とそうでない地域とではTEMの波形の特徴が異なる。特に、活動が活発な1号火口の東側では、100 μ s付近で極性が反転する特徴（極性反転、水色）が現れた。この極性反転の出現する地域は、噴気域の北西部でも認められた。また1次元地下比抵抗構造解析から、本地域での探査深度は概ね数十mであることが分かった。

5. 議論

1号火口東側は噴気の多くが集中し、自然電位が噴気活発な地域であることが確認されており（Yamamoto et al., 2017）、赤外線空中写真でも高温域が確認された。この地域でのTEM探査結果は極性反転を示したが、これは地下に低比抵抗・高充電率の岩体が分布する場合にしばしば認められる。従って、噴気の活発な地域の地下10m以深に、硫化鉱のような高い充電率の岩石が分布すると推測される。

また、1号火口の西側にも、TEM探査結果に同様の波形が現れている場所が2カ所あり、そこは周囲より自然電位が若干高く、赤外線空中写真でも周囲より温度が高い。またガス放出量が少ないながらも噴気孔が存在する。これらから、地下からのスポット的な火山ガス・熱水流体の供給がこの地域に分布している可能性が高い。

6. まとめ

知床硫黄山北西中腹1号火口周辺では、温度と自然電位が高く噴気が盛んな活動域でTEM探査の比抵抗－時間グラフで100 μ s付近に極性反転が現れるという現象を見出すことができた。これは火山体の地表下10m以下の火山ガス・熱水上昇域の広域マッピングと、これらの流体上昇プロセスの理解に貢献できる。今後は他の火山でも同様の統合調査を行う。

文 献

- Yamamoto, M., Goto, T., Kiji, M. (2017) Possible mechanism of molten sulfur eruption: Implications from near-surface structures around of a crater on a flank of Mt. Shiretokoiozan, Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 346, 212–222.

シャープな不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現可能な逆解析法の開発

石須慶一*・後藤忠徳**・深畑幸俊***・小池克明****・Chatchai Vachiratienchai^{*5}・Weerachai Siripunvaraporn^{*6}

Development of an inversion method for reproducing subsurface resistivity structures with sharp discontinuous boundaries

Keiichi Ishizu*, Tada-nori Goto*, Fukahata Yukitoshi***, Katsuaki Koike***, Chatchai Vachiratienchai^{*5} and Weerachai Siripunvaraporn^{*6}

*九州大学工学研究院 Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Fukuoka, 819-0395, Japan. E-mail: ishizu@mine.kyushu-u.ac.jp

**兵庫県立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, University of Hyogo, 2167, Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280 JAPAN.

***京都大学防災研究所 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan.

****京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto 615-8540, Japan.

*5Curl-E Geophysics Co., Ltd., Nakhon Pathom, Thailand.

*6 マヒドン大学理学部 Faculty of Science, Mahidol University, Rama VI Rd., Rachatawee, Bangkok 10400, Thailand.

キーワード：逆解析，シャープ境界，比抵抗，電気探査

Key words：Inversion, Sharp boundary, Resistivity, Direct current resistivity survey

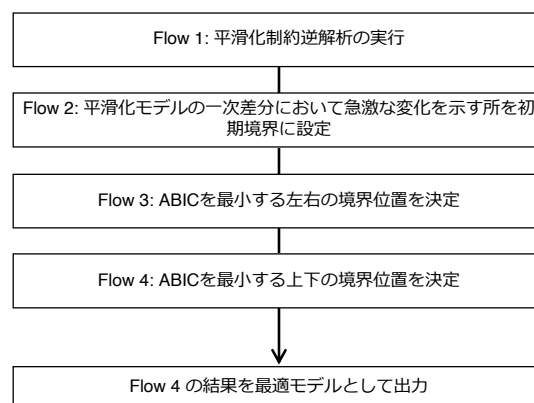
1. はじめに

電気探査は、直流電流を用いた電位差測定によって地下比抵抗構造を把握するための技術である。比抵抗は流体、粘土、金属に敏感な物性値のため、電気探査は土壌特性、地下水、海水侵入、埋立地、火山構造、地滑り、空洞などの調査に広く活用されている。電気探査逆解析では、測定データとモデルから計算されたデータとの残差を最小化することで地下比抵抗構造を推定する。電気探査の逆解析は悪条件問題のため、平滑化制約を適用し、安定した解を得ることが通常行われる。しかし、平滑化制約は隣合うモデルパラメータが滑らかに変化するという条件を課すため、比抵抗分布が直線的に不連続となる境界（以下シャープ境界）を含む地下比抵抗構造を正しく再現できない。このような問題のため、地質境界、人工物、金属鉱床などのシャープ境界を示す対象物への探査精度が低かった。本問題を解決するため、シャープな不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現可能な逆解析法を開発する。具体的には、平滑化制約をシャープな境界が予測される場所で弱め、この最適化を Akaike Bayesian Information criterion (ABIC)を用いて行うアルゴリズムを提案する。本発表の内容は、Ishizu et al. (2025)で発表された内容に基づいている。

2. 手法

シャープな不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現可能な逆解析法 (SBI: sharp boundary inversion) について述べる (第1図)。SBIでは、まず従来法である平滑化制約逆解析を行い、滑らかな比抵抗モデルを推定する (Flow 1)。この滑らかな比抵抗モデルに関して一次差分を計算し、急

激な変化を示す所を初期境界に設定する (Flow 2)。この初期位置から探索を開始し、ABICを最小化する左右の境界位置を決定する (Flow 3)。Flow 3で決定した左右の位置を固定し、ABICを最小化する上下の境界位置を決定する (Flow 4)。Flow 4で得られた結果を最適モデルとして出力する。



第1図 SBI アルゴリズムの概要 (Ishizu et al., 2025 を改変)。

3. 仮想・野外データへの適用結果

開発した SBI アルゴリズムの有効性をシャープ境界を含む仮想比抵抗モデルを用いて検証する。仮想モデルは 10 ohm-m の低比抵抗異常体が 100 ohm-m の半無限媒質中に存在するモデルを仮定する (第2図 a)。低比抵抗異常体は、地下に埋没している人工物を模擬している。データ取得は、2m の電極間隔のダイポールダイポール配置を用いた 54m のプロファイルで行われ、合計 172 データポイントを取得

したものとする。第2図aのモデルから順解析を行い得られたレスポンスに2%のガウシアンノイズを加えて仮想データを作成した。まずは、従来法である平滑化制約逆解析を用いた結果を示す(第2図b)。人工物は滑らかな比抵抗分布として再現され、実際のシャープ比抵抗境界は再現できていない。一方で、SBIでは人工物の真の境界位置と同じ場所にシャープ比抵抗境界を再現できた(第2図c)。これは平滑化制約を真のシャープ境界位置で弱めることで、ABICが最小値を示したことに起因する。

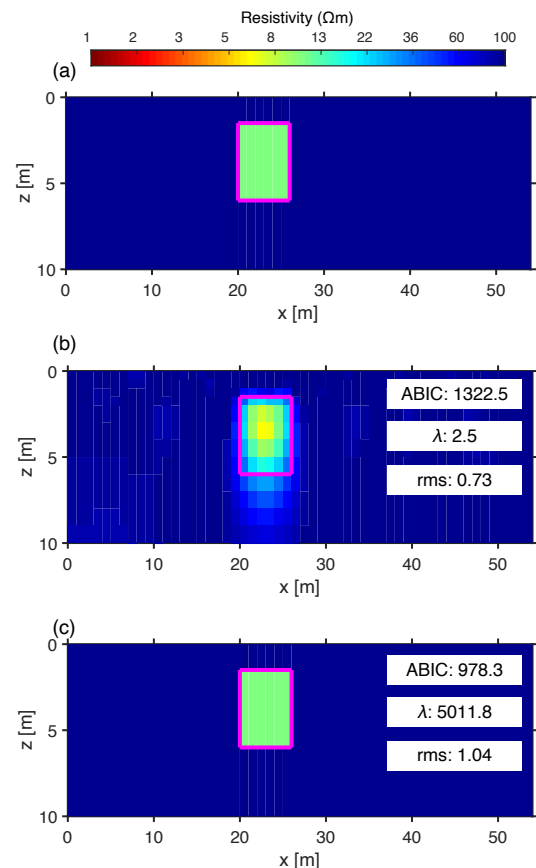
SBIを野外データに適用し、野外環境での適用性を実証する。探査対象は、枠が金属で形成された人工物のトンネルである。仮想データと同じく2mの電極間隔のダイポールダイポール配置を用いた54mのプロファイルでデータ取得が行われた。平滑化制約逆解析の結果、トンネルが滑らかな分布を持つ比抵抗構造として再現された(第3図a)。一方、SBIの結果では、シャープな境界が再現され、設計図を基に知られているトンネルの水平位置と整合的な結果が得られた(第3図b)。この結果は、実際の野外環境においてもSBIがシャープな比抵抗構造再現できることを示している。

4. おわりに

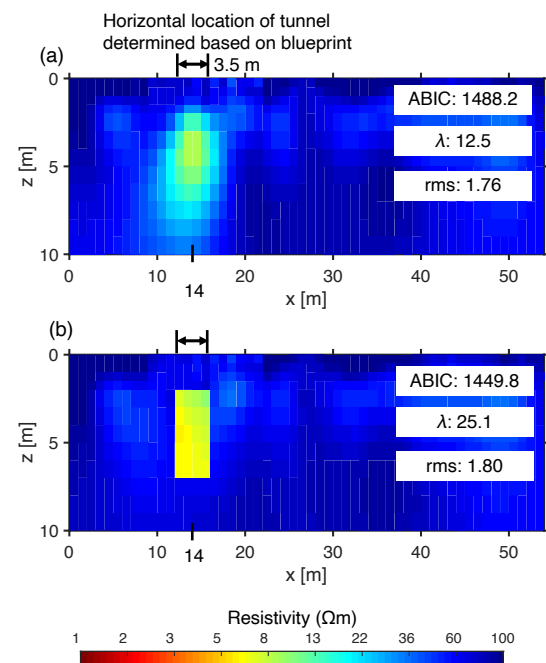
シャープ不連続境界を含む地下比抵抗構造を再現できる逆解析法(SBI)の開発を行った。シャープな不連続境界を再現することは、地質境界、人工物、金属鉱床などの探査精度向上に必要である。SBIは平滑化制約をシャープ境界が予想される場所で弱め、この最適化をABIC最小化で行うという手法である。仮想データを用いた実験により、SBIでは人工物の真の境界位置と同じ位置にシャープ比抵抗境界を再現できることが示された。一方、従来法である平滑化制約逆解析では、人工物の境界は滑らかな比抵抗分布として再現され、シャープ比抵抗境界は再現できていない。SBIを野外データに適用した結果、トンネルのシャープ境界を再現でき、その境界位置は設計図で知られている位置と整合的であった。SBIは、境界位置を解析者が他の先験情報から決めることなく、データ駆動型の方法で決定できるため、多くのデータに適用できる可能性がある。また、SBIは電気探査のみならず、重力探査、磁気探査など多くの物理探査データ逆解析に応用可能であり、実装も比較的容易であるという高い汎用性も有する。

文 献

Ishizu, K., Goto, T. N., Fukahata, Y., Koike, K., Vachiratienchai, C., & Siripunvaraporn, W. (2025) Inversion algorithm determining sharp boundaries in electrical resistivity tomography, *Geophysics*, 90, WA221-WA233.



第2図 仮想データによる検証実験 (Ishizu et al., 2025 を改変)。(a) 真のモデル。本モデルは、10 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ の低比抵抗異常体が 100 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ の半無限媒質中に存在するモデルを仮定する。(b)平滑化制約逆解析の結果。(c) SBIによる最適結果。マゼンタの線は、人工物の真の境界を示す。



第3図 野外データによる検証実験 (Ishizu et al., 2025 を改変)。(a) 平滑化制約逆解析による結果、(b) SBIによる最適結果。黒の矢印は、設計図から知られている人工物の真の境界を示す。

コンクリート表面波減衰トモグラフィにおけるスパース逆解析手法の提案

孫 文旭*, 麻植 久史*, 桑谷 立**, 塩谷 智基*

Sparse Inversion Approach for Surface Wave Attenuation Tomography in Concrete

Wenxu Sun*, Hisafumi Asaue*, Tatsu Kuwatani**, Tomoki Shiotani*

*京都大学成長戦略本部 インフラ先端研究部門 Laboratory on Innovative Techniques for Infrastructures,
Institutional Advancement and Communication, Kyoto University, Kyotodaigaku-Katsura,
Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8245, Japan.

E-mail: sun.wenxu.3c@kyoto-u.ac.jp

**国立研究開発法人 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 火山・地球内部研究センター
Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.

キーワード: 損傷評価, 可視化, 劣化・損傷, インフラ構造物, シミュレーション

Key words: Damage evaluation, Visualization, Deterioration, Infrastructure, Simulation.

1. はじめに

橋梁・トンネルなどのインフラ構造物を安全に供用するためには健全性評価が重要である。特にコンクリート構造物では、ひび割れなどの劣化・損傷進展が構造耐力に影響するため、それらが顕在化する前に非破壊で検知することが望まれている。内部損傷を検知する手法として、表面波速度トモグラフィが良く用いられる。また、速度に比べて振幅減衰特性の方が劣化・損傷に対して高感度であることが示されている¹⁾。しかし、この減衰を利用した表面波トモグラフィでは、供試体を対象としており逆解析で誤差項のみ考慮しており、実構造物での適用では解析の発散や虚像が生じる可能性が高い。そのため、本研究では、表面波減衰トモグラフィにおけるスパースモデリング手法を提案し、高精度な可視化方法の開発を目的とした基礎的検討を実施した。

2. 減衰トモグラフィ理論式

表面波が媒体中を伝播する際、その振幅 $A(l)$ は距離に応じて指数的に減衰する。伝播距離を l 、送信点での振幅を A_0 、減衰パラメータを m としたとき、波形減衰比は次式で表される:

$$A(l)/A_0 = l^{-0.5} \cdot e^{-ml} \quad (1)$$

ここで、 $l^{-0.5}$ は距離減衰、 e^{-ml} は粘性減衰を表す項である。両辺の自然対数を取ることで、線形和の形に変換でき、逆解析に利用しやすい形となる:

$$\ln(A(l)/A_0) = -0.5 \sum \ln l_i - \sum m_i l_i \quad (2)$$

このように、各セルの波線長 l_i は既知であり、減衰パラメータ m_i の空間分布を推定変数とすることで、損傷部の高感度な可視化が可能となる。式(2)の左辺は観測された振幅から直接計算可能であり、右辺第1項は既知の幾何モデルに基づく既知量であるため、本研究では、右辺第2項のみに着目する。このため、式(3)のように整理できる。

$$d = Gm + \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 d は観測振幅から得られる有効減衰量ベクトル(幾何項を差し引いたもの); m はセルごとの減衰パラメータ; G は各観測においてセル i を通過する波線長さ l_i を成分とする感度行列; ε は観測ノイズである。

3. シミュレーション実験

本研究では、劣化・損傷を模擬した2次元表面を伝搬する表面波の減衰特性から、その劣化・損傷位置の再現を試みた。具体的には、正則化項および制約条件の導入効果を検討するため、以下の3条件において数値シミュレーションを実施して、その精度を検証した: ① 正則化項なし, ② L2 正則化項付き, ③ スパースモデリング (L2 正則化と制約条件の併用)。パラメータ推定には最小二乗法による最適化を行った。ここで、許容誤差は 1.0×10^{-6} 、最大反復回数は100回に設定した。解析モデルは、 $650 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$ の正方形領域を 50 mm 間隔で格子分割し、各格子には、減衰率 m が設定されている。計16点にセンサ(送受信点)を 200 mm 間隔で配置している(図1)。すなわち、合計240本の波線(センサ間の伝播経路)が対象内に存在する。モデル内には大小3カ所の劣化・損傷が模擬されており、健全部は $m = 1.0$ 、劣化・損傷は $m = 50$ と、を明示的に区分した。このとき、ノイズフリーおよび5%ランダムノイズの2条件で解

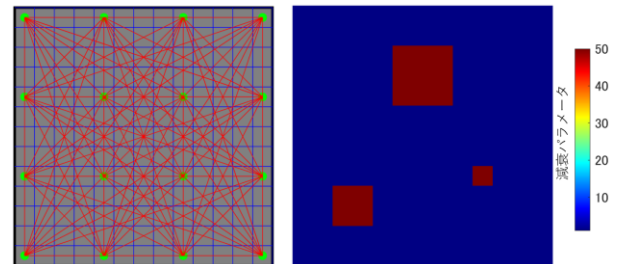


図1 センサ配置と欠陥の位置

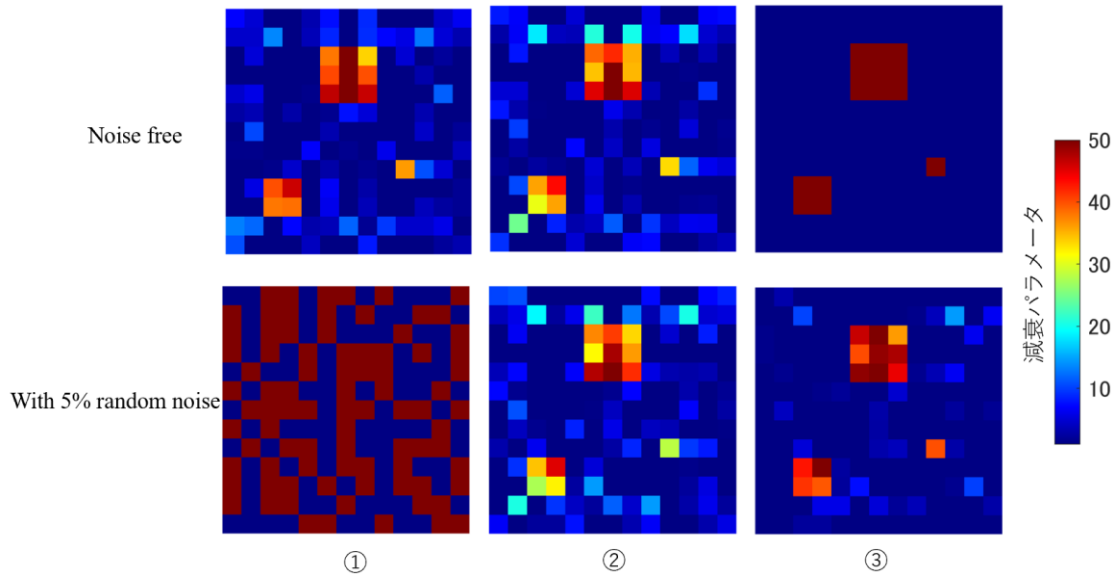


図2 推定結果. ① 正則化項なし, ② L2 正則化項付き; ③ スパースモデリング.

析精度の比較を行った。

①と②では式(4)を目的関数とした。①では $\alpha=0$, $\beta=1$ に固定, ②では, の以下の条件で解析を実施した。

$$\min_m \beta \|Gm - d\|^2 + \alpha \|Lm\|^2 \quad (4)$$

ここで, α, β : ハイパーパラメータ; L : モデル空間のスミージング演算子である。③では式(4)に示す目的関数に対し, 制約条件 $m \geq m_{\min}$ を加えた。ここで, $m_{\min}$ を1に設定した。ハイパーパラメータの推定には, 桑谷ら³⁾が提案した解像度行列を用いたベイズ推論に基づくハイパーパラメータ推定手法を用いた。

4. 解析結果

①～③の各手法について, ノイズフリーおよび5%のランダムノイズでの解析結果を示す。結果の精度評価には, 真値との相関係数 (Correlation Coefficient: CC) および, 二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) を用いた。ノイズフリーの条件において, ③が最も良好な結果を示し, CC および RSME はそれぞれ 1.0 と 0.0 となった。一方, ①および②の結果では, 両者とも CC と RSME がそれぞれ 0.92 および 0.88, 5.28 および 6.36 となっており, モデルの推定結果 (図2) も③に比べて再現度が低くなった。次に, 5%のランダムノイズを加えたデータに対する解析結果は, ③で CC と RMSE が 0.98 と 2.45 となり高精度を維持した。これに対して①の CC と RMSE が 0.08, と 1830, ②では 0.86 と 6.88 となった。結果として, 表面波減衰トモグラフィの逆解析においてスパースモデリングの導入は効果的であることが示された。

5. まとめ

本研究では, コンクリート構造物の内部劣化・損傷を高感度に評価するため, スパース逆解析アルゴリズムを導入した表面波減衰トモグラフィを提案し, その性能を数値シミュレーションにより検証した。ここで, 正則化項なし, L2 正則化項付き, および正則化項と制約条件を効果的に組み

込んだスパースモデリングの3条件で比較した。

その結果, スパースモデリングは, ノイズフリーで CC 1.0, RMSE 0.0 という高精度を示し, 5%のランダムノイズが存在する条件下でも CC 0.98, RMSE 2.45 と高精度を維持した。一方, L2 正則化付き最小二乗法はノイズ条件下で一定の推定能力を示したが, スパースモデリング手法に比べて精度が劣り, 正則化なしの最小二乗法はノイズに対して極めて脆弱であった。

これらの結果から, 表面波減衰トモグラフィの逆解析手法におけるスパースモデリングの導入は, 表面波伝搬における減衰特性からの劣化・損傷位置の検出に優れた性能を有し, 現場応用に向けた信頼性の高い劣化・損傷可視化が可能であることが確認された。今後は社会実装を見据え, 実構造物から取得された計測データを用いた検証に取り組む予定である。

謝辞

本研究の一部は, 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第3期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187 (研究推進法人: 土木研究所) によって実施した。本研究にあたりご協力いただいた関係各位に感謝の意を表す。

文 献

- 1) H.K. Chai et al., Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound, NDT & E International, 44 (2), pp.206-215, 2011.
- 2) 桃木昌平, 蔡 華堅, 塩谷智基, 小林義和. 弾性波の減衰特性を用いたコンクリート内部損傷可視化の開発とびしめ技法 No.58, 2009.
- 3) Tatsu Kuwatani et al., Hyperparameter estimation using a resolution matrix for Bayesian sensing, *Inverse Problems* 38 124004, 2022.

活火山熱水系における不均一系地球化学平衡に関する理論的ならびに観測的研究

穂山 拓実^{1,2}・大沢 信二¹

Theoretical and Observational Research on Heterogeneous Geochemical Equilibria in the Hydrothermal System of Active Volcanoes

Takumi Akiyama^{1,2} and Shinji Ohsawa¹

1. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 Beppu Geothermal Research Laboratory
Noguchibaru, Beppu City, Oita, 874-0903, Japan. E-mail: ohsawa.shinji.3w@kyoto-u.ac.jp
2. 京都大学大学院工学研究科（現所属）Kyoto University, Graduate School of Engineering (Current)
C1-2, Katsura Campus, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540, Japan.

キーワード：九重硫黄山，水蒸気噴火，熱水系，低温噴気

Key words：Kuju Volcano, Phreatic Eruption, Hydrothermal System, Low-temperature Gas

1. はじめに

突発的に発生する水蒸気噴火に伴う人的被害の軽減には、火山性地震や地殻変動、マグマ性ガスの検知のみならず、噴火の直接的な原因となる火山体内の熱水系の挙動に対する理解が必要不可欠である。

九重火山では1995年に、火山ガスを継続的に放出している噴気地「九重硫黄山」の南東にある星生山山頂の東方尾根部で、水蒸気噴火が発生した。現在は、新たに生じた噴火口群からの火山ガス放出はおさまり、硫黄山における火山ガスの放出量も低下しているが、火山活動は依然として続いている。総合科学技術会議の火山噴火予知計画により、九重硫黄山は「活動的火山及び潜在的爆発活力を有する火山」に指定されており、数10年～100年間隔で水蒸気噴火を起こしているため、過去の九重硫黄山の水蒸気爆発の原因を探り、未来の噴火に備えることは非常に重要である。

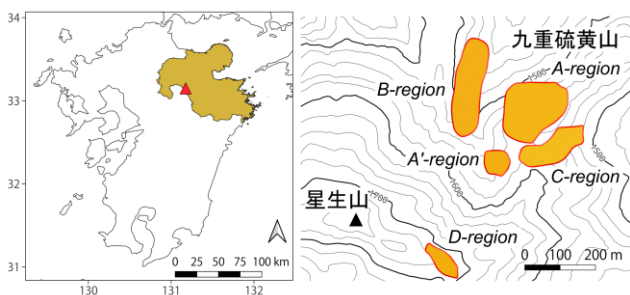
本研究では、高温噴気（火山ガス）だけでなく、熱水系に結びつく低温の噴気や、温泉水の地球化学観測データが得られている九重火山に焦点を当て、気液二相系の物理化学の理論に基づいて噴気の水同位体組成やガス組成から、水蒸気噴火を引き起こす火山熱水系の重要な情報である、温度や蒸気分率などの抽出を試みた。水同位体組成の分析では、既存資料を参照して解析を行ったが、低温噴気ガス組成の解析では、既存資料に加え、2023年10月23日に実施した現地調査時の得られたデータも解析を行った。

2. 噴気の地球化学的調査

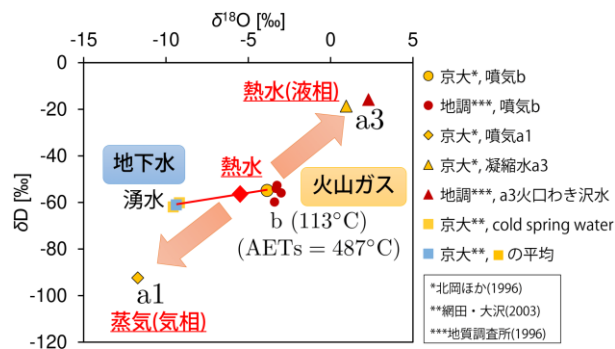
2023年10月23日に九重硫黄山A-regionにおいて、熱水系に結びつく低温の噴気の採取を行った。まず注射器にチューブを接続しテフロン系のグリースで密封性を高めた上で、真空抜気した後、5mol/LのKOH水溶液を充填した。噴気温度が100℃以下かつSO₂が検出されない噴気について、パイプの先端にアルミ製ロートを取り付け、ロートの開口部を噴出口にあてがい、周縁を土封し噴気を導入した。その際、氷水で注射器を冷却しつつKOH水溶液中に蒸気を凝縮させ、SO₂などの成分を溶解して採取した。これを実験室に持ち帰り、ガスクロマトグラフィー、CO₂ガス電極、イオンクロマトグラフィーを用いて分析を行った。

3. 研究1：地球化学-地球熱学連成的解析

九重火山の1995年噴火（主として水蒸気噴火）は、既存の噴気地帯から300mほど離れた噴気活動の無いD-regionで発生した。既存資料等を参照し、噴火以前に地下水とマグマ性水蒸気の混合により新たな熱水が形成されていたとして、既往研究の噴気凝縮水や湧水の水同位体組成 δD - $\delta^{18}O$ の解析から地下水とマグマ性水蒸気の混合率を求めると、およそ37:63であった。この結果を用いて、熱量保存則により、水蒸気噴火の原因となった熱水温度を計算すると、372℃と臨界温度付近に推定された。



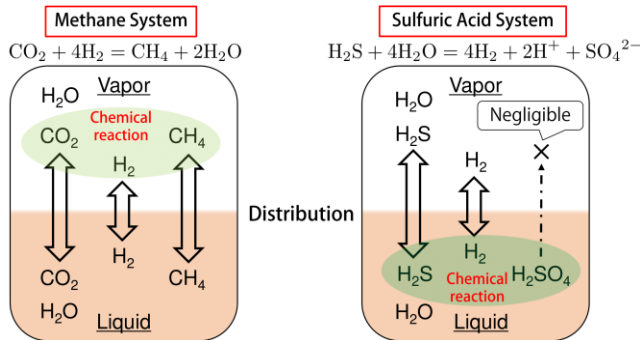
第1図 九重硫黄山の位置及び噴気地の分布



第2図 熱水が生じ同位体分別を起こす過程

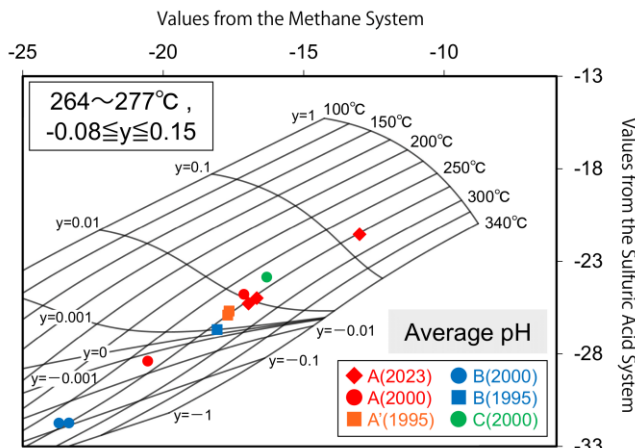
4. 研究2：低温噴気ガス組成の不均一化学平衡解析

火山噴気ガスの先行研究の多くは、気相一相由来と考えられる高温噴気を対象とし（例えば、AETsによるマグマと平衡状態にあった火山ガスの温度解析）、気液二相を想定した不均一地球化学平衡に基づく研究はほとんどみられない。本研究では、火山体内にある気液二相系の熱水貯留層で、 $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ （メタン系と呼称）と、 $\text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 4\text{H}_2 + 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$ （同様に硫酸系）の2つの化学平衡の成立を想定し、気相・液相間のガス成分の分配を考慮して、熱水貯留層の温度と蒸気分率等を計算する手法を新たに構築した。



第3図 熱水が生じ同位体分別を起こす過程

既存の噴気地帯（A,B,C・region）から水蒸気噴火の前後にわたって継続的に放出されていた比較的低温（95℃程度）かつ $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の低い噴気を計算対象とした。その結果、古くから存在したが水蒸気噴火の場とならなかった活発な噴気地の地下にある気液二相の熱水貯留層は、pH や SO_4 濃度に多少左右されるものの、噴火前後を通し、熱水卓越状態（蒸気分率はほぼ0.1未満）で、温度は264℃～277℃程度と解析された。また、本研究の温度推定手法を検証するため、地熱調査井での噴気組成と貯留層温度（実測最高温度）が揃っているデータに着目して、先述と同様の温度推定解析を行い、実測値と比較した結果、酸性熱水では実測温度と近い値が推定値として得られており、本研究の解析手法の妥当性が示されている。



第4図 メタン系と硫酸系を用いた地化学温度計

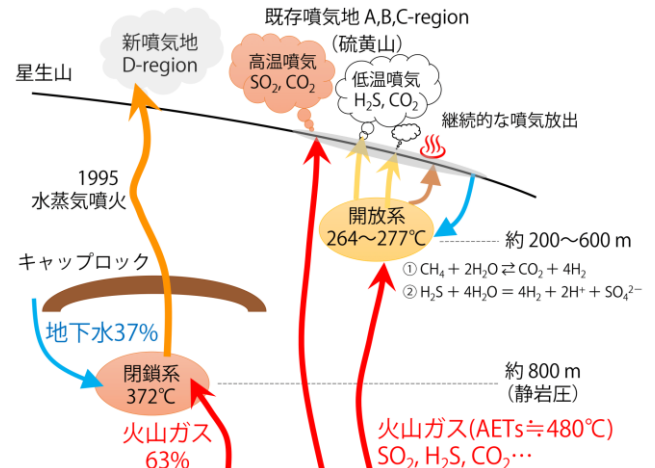
5. 考察

研究1により示された熱水温度372℃は、気液二相状態にある熱水のものであることから、水蒸気噴火発生場の地下に形成された熱水貯留層の圧力は一意的に212atmとな

り、静岩圧下では深度814mと換算できる。この結果は、1995年九重火山噴火に伴う地殻変動の原因となる浅部力源が海拔500m（約1000m深）にあるという結果（西ほか、1996）と整合的であり、その圧力源はマグマ性水蒸気によって臨界温度近くまで昇温した地下水であった可能性がある。また、北岡ほか（1996）においても、水同位体の分析により、活火山体における天水の浸透経路として、天水が臨界点まで熱せられる部分があると述べられていることから、本研究の結果は整合的であると考えられる。

一方、研究IIによる既存の噴気地帯（A,B,C-region）の温度推定結果（264℃～277℃）から、噴火前から継続的に火山体内に存在していた気液二相貯留層は、今回の研究でD-region下に知られたものに比べ低圧（49atm～60atm）で、浅い深度（静岩圧平衡では深度189m～231m）に存在する別の熱水系であると推定される。既存噴気地では、熱水の水蒸気圧力の低さに加え、継続的な噴気放出による封圧緩和や、気液二相貯留層を安定に存在させる岩盤の強度が関係して、熱水系が安定に維持された結果、水蒸気噴火に至らなかったと想像される。水蒸気噴火に関わる熱水が強酸性である限り、本研究で構築した噴気ガス組成の地球化学的解析で導出される熱水系の温度や蒸気分率の情報は、噴火の予測だけでなく、活火山における他の分野の研究にも活用できる重要な情報となり得る。

今回の研究対象である九重硫黄山では、1995年水蒸気噴火時の噴気の地球化学データは、水同位体でしか存在しておらず、低温かつ $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の低い噴気については、噴気孔が大きく、大気の混入などの理由から、ガス組成は得られていない。従って、同位体のデータから推定した温度372℃を本研究で構築・提案した噴気ガス組成データの不均一化学平衡解析から検証することはできなかったが、今後低温の SO_2 を含まない噴気に対して継続的な観測を続けることによって、水蒸気噴火に至る高温の熱水系が検出できると考える。



第5図 新噴気地と既存噴気地の熱水系の差異

文 献

西潔, 小野博尉, 中坊真, 平林順一 (1996) 「地殻変動観測から推測される九重火山の浅部力源」, 1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動推移の調査・研究, 研究成果報告書, 文部省科学科研費 (No.0730017), 突発災害調査研究成果, 105-113.

北岡豪一, 大沢信二, 由佐悠紀, 日下部実 (1996) 「九重硫黄山における深部循環熱水の沸騰による化学及び同位体組成の変化」, 温泉科学, 46, 156-175.

フラクタル次元を用いた令和 6 年能登半島地震に伴う地形変化の解析

高橋 陽希*・根本 達也*・ベンカテッシュ ラガワン*

Fractal Dimension Analysis of Topographic Changes Caused by the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Haruki TAKAHASHI*, Tatsuya NEMOTO* and Venkatesh RAGHAVAN*

* 大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: sq25330y@st.omu.ac.jp

キーワード： 地形変化, 令和 6 年能登半島地震, フラクタル

Key words: Topographic Changes, 2024 Noto Peninsula Earthquake, Fractal

1. はじめに

フラクタルは様々な自然科学分野で研究対象とされ、地球科学もその対象である(大野, 1997)。

木村(1998)は3次元 Box-Counting 法(以下, BC 法)のアルゴリズムを作成し、フラクタル次元の算出プログラムを開発した。しかし、対象領域に対する最適なボックスのサイズの検討がされていなかった。また、解析を行う対象領域は正方形の領域に限られていた。そこで、ボックスの大きさを変えてフラクタル次元を算出し、対象領域のサイズに対する最適なボックス一辺の変化幅に関する検討を行い、対象領域が正方形でない地形に対しても使用できるようプログラムを改良した。

また、地形面に大きな変化を及ぼす地震に着目し、地震発生前後のフラクタル次元の変化を確認した。

2. 手法

フラクタル次元の算出方法として、BC 法を用いた。

三次元空間内に三次元格子を設定する。地形面を三次元空間に分布する面として、数値標高モデル(以下, DEM)を用いた。三次元格子の一辺の長さと、DEM が通る三次元格子の個数を計測し、両対数グラフにプロットする。三次元格子の長さを適宜変えると、それに応じて DEM が通る三次元格子の個数も変化する。複数の点が両対数グラフにプロットされ、プロットされた点に対して最小二乗法を用いて回帰直線を求める。この回帰直線の傾きの絶対値が、BC 法によって得られるフラクタル次元に相当する。

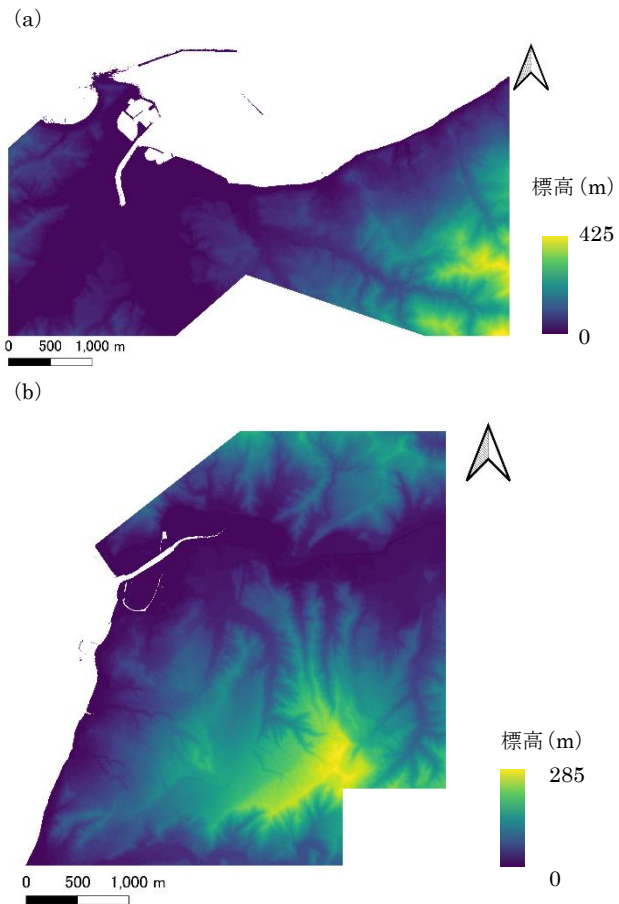
3. 対象地域と使用データ

3.1 対象地域

本研究では、令和 6 年能登半島地震によって隆起が確認された輪島市河井町(第 1 図(a))と門前町(第 1 図(b))を対象とした。輪島市河井町は、河原田川と鳳至川の 2 つの川によってつくられる扇状地地形が中央部にあり、標高の高い地域が南部に見られる。一方、輪島市門前町は北部を八ヶ川が東西方向に流れており、標高の高い地域が東部に見られる。

3.2 使用データ

地震発生前の標高データとして国土地理院基盤地図情報の数値標高モデル 5 m メッシュを、地震発生後の標高データとして国際航業レーザ計測の 0.5 m メッシュを使用した。



第 1 図 輪島市門前町の数値標高モデル
(a) 輪島市河井町 (b) 輪島市門前町

4. 結果と考察

地震発生前のデータに関しては、ボックスのサイズを 5 m から 50 m まで 5 m 間隔または 10 m から 100 m まで 10 m 間隔で設定した。地震発生後のデータに関しては、ボックスのサイズを 1 m から 10 m まで 1 m 間隔で設定したもの、5 m から 50 m まで 5 m 間隔で設定したもの、及び 10 m から 100 m まで 10 m 間隔で設定したものでそれぞれのサイズごとにボックスの個数を求めた（第 1 表）。

河井町と門前町の両地域では、地震発生前より後のほうがフラクタル次元の値が大きい。このことから両地域の地形が地震によって複雑化したと考えられる。また、地震発生前の 2 地域、地震発生後の 2 地域をそれぞれ比べると、ともに門前町のフラクタル次元の方が河井町のフラクタル次元よりも大きい。このことから、河井町より門前町の方が複雑な地形であることが分かる。

第 2 表に、2 地域の領域全体のフラクタル次元の誤差と 2 地域のそれぞれの分割領域ごとのフラクタル次元の誤差を示す。2 地域のフラクタル次元の差を比較すると、最も次元値の差が小さくなるのはボックス一辺のサイズの変化幅が 1 m のものを用いたときであった。このとき、フラクタル次元の値の差は 0.0021 であるが、2 地域のフラクタル次元の標準誤差はフラクタル次元の差分に比べて十分に小さなものである。ゆえに、フラクタル次元の値の差が最小の場合でも有意な差であることが分かる。

最後に、対象地域である輪島市河井町を小領域に分割した地図と、それぞれのボックスサイズを 1 m ずつ変化させたときのフラクタル次元の値を示す（第 2 図）。主に沿岸部分ではフラクタル次元の値が小さくなっている一方、内陸部ではフラクタル次元の値が相対的に高くなっており、最大値は領域 07ED8344 の 2.0297 であった。この領域は周辺のフラクタル次元の値が大きく、沿岸からも離れているが小さな値となった。この領域は河原田川と鳳至川という 2 つの川の合流地点であり、川の終着点であることから平野となっている。凹凸の少ない（複雑でない）領域であるため、周囲と比べて平坦な地形であったことがフラクタル次元の値が周囲と比べ小さくなったと解釈される。

5. おわりに

本研究では、令和 6 年能登半島地震に伴う地形面のフラクタル次元の変化を解析し、地震前後の地形の複雑さを定量的に評価した。フラクタル次元を用いることで地形面の粗さ、自己相似性の度合いを明らかにし、地震による地形変動の影響を理解するための有力な手法であることが示された。また、河井町と門前町において地震前後でフラクタル次元の変化が確認され、地震が地形の複雑化に影響を与えることが明らかとなった。

第 1 表 ボックス一辺の変化幅に対するフラクタル次元

(a) 地震発生前 (b) 地震発生後

ボックス一辺の 変化幅 (m)	地震発生前	
	河井町	門前町
5	2.3652	2.4644
10	2.4154	2.5646

ボックス一辺の 変化幅 (m)	地震発生後	
	河井町	門前町
1	2.0100	2.0121
5	2.3688	2.4694
10	2.4187	2.5722

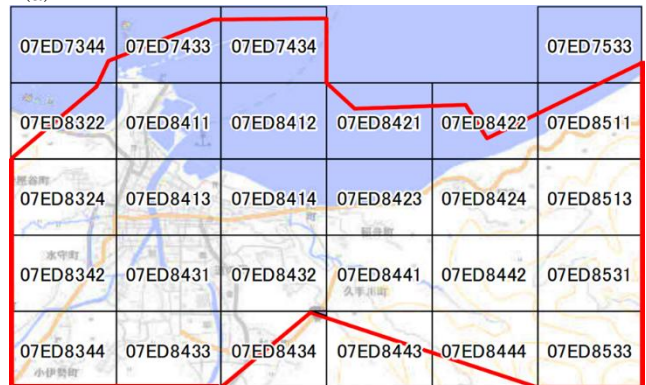
第 2 表 ボックス一辺の変化幅に対するフラクタル次元の誤差

(a) 地震発生前 (b) 地震発生後

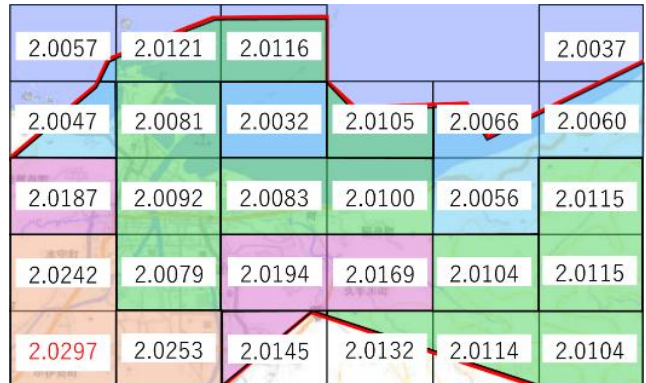
ボックス一辺の 変化幅 (m)	地震発生前	
	河井町	門前町
5	0.0000074323	0.0000798876
10	0.0000020199	0.0000037410

ボックス一辺の 変化幅 (m)	地震発生後	
	河井町	門前町
1	0.0000021020	0.0000034720
5	0.0000228530	0.0000986881
10	0.0000005903	0.0000002051

(a)



(b)



第 2 図 輪島市河井町の分割領域（国際航業レーザ計測）

(a) 分割領域の番号 (b) 分割領域ごとのフラクタル次元の値

フラクタル次元はその地形の複雑さを示す指標であり、地形によってさまざまな値を示す。そのため、異なる地域によるフラクタル次元の変化を比較し、地形の複雑さがどのように変化するかをより広範囲にわたって調査する必要がある。また、地形断面におけるフラクタル次元との比較や実際の谷密度や起伏量等の地形量との比較、フラクタル次元における誤差の影響をさらに検討し、精度を高める方法を模索することも課題である。

文 献

- 木村彰宏 (1998) 地形のフラクタル次元を求めるための 3 次元 Box-Counting 法を用いたプログラムの開発. 大阪市立大学理学部地球科学士論文.
- 大野博之 (1997) 地球科学分野へのフラクタルの応用. 応用地質, Vol. 38, No. 3, pp. 159-173.

Tensor Voting を用いた DEM に基づく地形特徴からの リニアメントの自動抽出

中村 公亮・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン

Automatic Lineament Extraction from DEM-Derived Terrain Features Using Tensor Voting

Kosuke NAKAMURA, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: sg24108q@st.omu.ac.jp

キーワード: Geomorphon, Tensor Voting, 数値標高モデル, リニアメント

Key words: Geomorphon, Tensor Voting, Digital Elevation Model, Lineament

1. はじめに

リニアメントは、地質構造の弱点が反映された線状の地形であり、谷地形や山麓地形として地表に形成され、空中写真や陰影図から抽出される。リニアメントの抽出は、活断層の予察的調査や原子力発電所の建設の指標に用いられており、地質災害評価などにおいて重要な調査基準である（原子力土木委員会地盤部会・地質・地盤の調査・試験法標準化分科会, 1985）。

リニアメント抽出手法として、Raghavan *et al.* (1995) は、衛星画像や DEM (Digital Elevation Model) から作成した陰影図を用い、反射強度の変化量に基づいて線素を追跡する Segment Tracing Algorithm (STA) を開発した。しかしこの手法では、反射強度が光の照射方位に依存するため、閾値の設定が照射条件によって変化してしまうという問題がある。また、Han *et al.* (2018) は、衛星画像および DEM に対してフィルタ処理を行うことで標高の変化を抽出し、それに対して Tensor Voting を適用することでリニアメントを抽出した。この手法は線構造の抽出精度に優れる一方、具体的な地形特徴を十分に考慮していない。中村ほか (2024) は、DEM から得られる地形特徴量を直線的に抽出し、それらを Hough 変換により統合することでリニアメントの抽出を試みた。この手法では、多数のパラメータ設定が必要であり、線構造としての連続性が十分に考慮されていない。

本研究では、DEM から Geomorphon を用いて谷や山麓などの地形特徴を直線的に抽出し、Tensor Voting により線構造の発達度合いを評価した上で Hough 変換することで、リニアメントを抽出する手法を提案する。

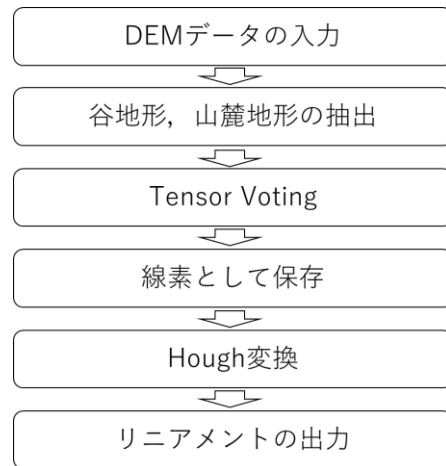
2. 手法

リニアメントは、連続性の高い地形特徴を線素として抽出し、これらを連結することで検出される (Raghavan *et al.*, 1995; 中尾ほか, 2019)。地形特徴は、谷・山麓・傾斜変換部・鞍部の 4 種に分類される (三箇ほか, 2005)。本研究では、Geomorphon による地形分類の結果から Footslope を山麓地形、Valley を谷地形として抽出した。抽出した地形特

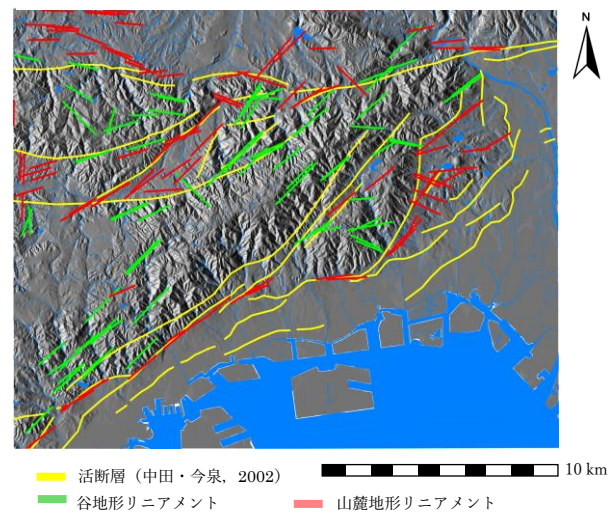
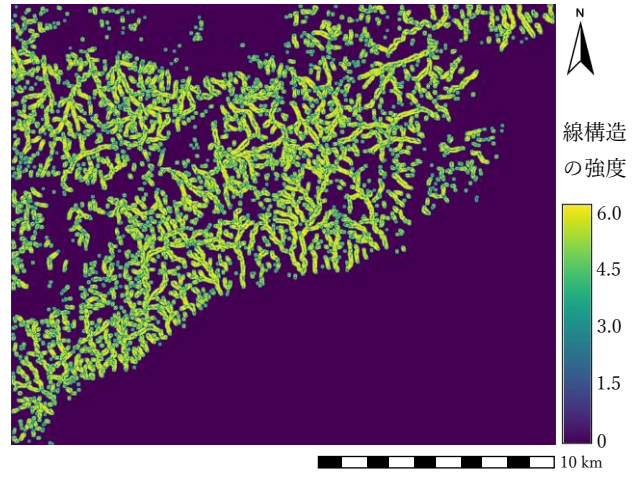
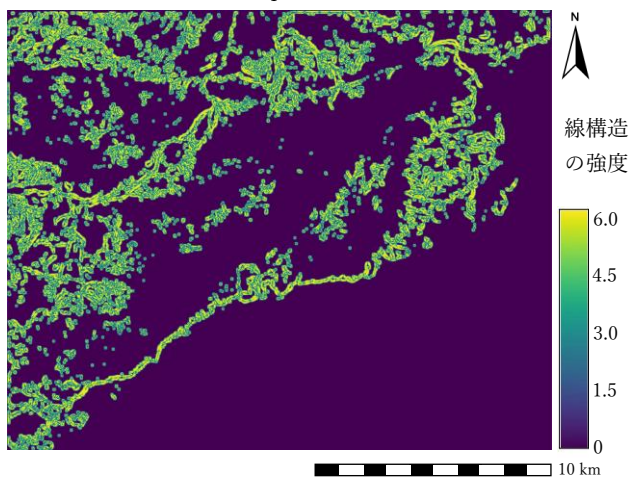
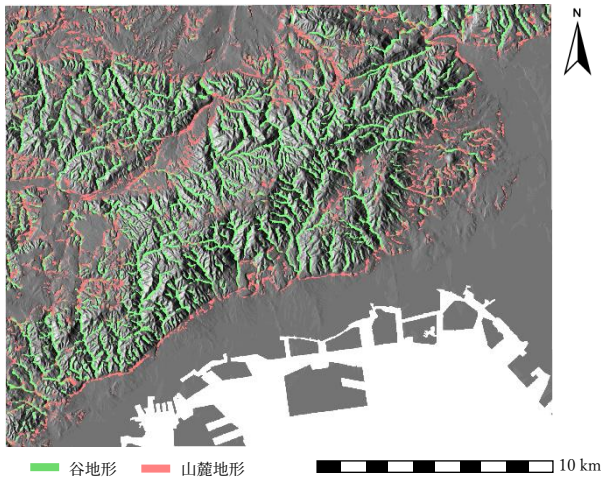
徴に対して Tensor Voting を適用し、線構造の強度を評価したうえで、閾値を決め、線素とした。得られた線素を Hough 変換で連結し、これをリニアメントとした。Geomorphon の処理には GRASS GIS を用い、Tensor Voting と Hough 変換は Python ライブラリを用いて実装した。処理の流れを第 1 図に示す。

3. リニアメントの抽出

本手法を用いて、基盤地図情報（数値標高モデル）10 m メッシュから、兵庫県南部の六甲山およびその周辺地域においてリニアメントを抽出した。対象地域の陰影図を背景とし、Geomorphon による地形分類結果を第 2 図に示す。赤色は Footslope であり、平野部と山地の傾斜変換部に多く分布している。緑色は谷地形であり、地形の凹部と概ね一致する。第 3 図および第 4 図に、Tensor Voting による線構造の強度分布を示す。強度は 0~6.2 の範囲で表されており、数値が高いほど、線構造が発達していることを意味する。リニアメントの抽出結果の一例を第 5 図に示す。



第 1 図 リニアメント抽出の流れ。



4. 考察

本地域は視認可能な谷地形や山麓地形、さらに複数の活断層が分布しており、リニアメント抽出手法の検討に適している。また、六甲―淡路構造線が北東―南西方向に存在し、これに平行するように断層が存在する。

第5図に示す活断層マップ（中田・今泉，2002）およびDEM から作成した陰影図を参照し、抽出結果を検証する。緑色は谷地形リニアメント、赤色は山麓地形リニアメントを表す。抽出されたリニアメントの一部は、六甲山地南部に位置する諏訪山断層などの活断層と一致している。特に北東―南西方向のリニアメントが顕著に抽出された。これは、Tensor Voting によって線構造の方向性が明瞭に強調され、連続的な構造が捉えられたことを示すものと考えられる。また、Tensor Voting に用いるパラメータの値によって、線構造の強度評価が変化するため、適切なパラメータ決定が必要と考える。

5. おわりに

本研究では、Geomorphon による谷地形、山麓地形の抽出、Tensor Voting による線構造の強調、および Hough 変換を組み合わせ、DEM からリニアメントを効率的に抽出する手法を提案した。抽出結果は活断層や地形とよく対応し、Tensor Voting の適用により線構造の方向性が明確になった。一方で、パラメータ設定が複数存在するため、今後は機械学習を用いた自動調整の方法を検討する必要がある。

文 献

- 原子力土木委員会地盤部会・地質・地盤の調査・試験法標準化分科会(1985)原子力発電所地質・地盤の調査・試験法。土木学会論文集, vol.358, no.3-3, pp.11-26.
- Han, L., Liu, Z., Ning, Y. and Zhao, Z. (2018) Extraction and analysis of geological lineaments combining a DEM and remote sensing images from the northern Baoji loess area. *Advances in Space Research*, vol.62, no.4, pp.2480-2493.
- 中田高・今泉俊文(2002)活断層デジタルマップ。東京大学出版会, 60p.
- 中村公亮・根本達也・ベンカテッシュラガワン(2024)Canny Edge 検出と Hough 変換を用いた地形特徴からのリニアメントの自動抽出。情報地質講演要旨集, pp.57-58.
- 中尾大樹・升本眞二・根本達也(2019)数値標高モデルを用いた地形特徴と Segment Tracing Algorithm (STA) 法に基づくリニアメント抽出法の開発。情報地質, vol.30, no.3, pp.87-100.
- Raghavan, V., Masumoto, S., Koike, K. and Nagano, S. (1995) Automatic lineament extraction from digital images using a segment tracing and rotation transformation approach. *Computer & Geosciences*, vol.21, no.4, pp.555-591.
- 三箇智二・荒川泰(2005)地形特徴によるリニアメント認識。情報地質, vol.16, no.2, pp.128-131.

都市洪水シミュレーションを用いた動的経路決定アルゴリズムの実装

酒井 勇希・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン

Implementation of a Dynamic Routing Algorithm Using Urban Flood Simulations

Yuki SAKAI, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: sq25333b@st.omu.ac.jp

キーワード：洪水，シミュレーション，動的，最短経路，避難

Key words : Flood, Simulation, Dynamic, Shortest Route, Evacuation

1. はじめに

平成 30 年 7 月に発生した前線及び台風 7 号により、西日本の広範囲で記録的な降雨が長期にわたってつづき、岡山県倉敷市真備町では死者数 51 名という甚大な被害が発生した（国土交通省，2018）。倉敷市による洪水・土砂災害ハザードマップと実際の浸水範囲がほぼ一致していたのにもかかわらず、このような被害が発生した。ハザードマップには浸水想定区域や避難所についての情報が記載されているが、静的なマップからは洪水の進行していく様子を読み取りにくい。そこで本研究では洪水に対する最適な避難経路を時間経過に応じて示すことを目的に、Itzi を用いて洪水シミュレーションを行った。シミュレーションにおいて、国土地理院の浸水想定図を参考に浸水範囲や浸水深の再現性を検討した。また、シミュレーション結果を用いて、経過時間に応じて最適な避難経路の検索を行い、動的ハザードマップ作成の有効性を検討した。

2. 手法

本研究では、洪水シミュレーションのために浅水方程式を使用する。シミュレーションで得られた浸水域ラスタマップを用いて通行できる道路を制限し、ダイクストラ法を用いた経路検索を行う。

2.1 洪水シミュレーション

本研究では、特に都市部での洪水や表面流のシミュレーションを行うためのフリーソフトウェアである Itzi を使用した。Itzi では Almeida and Bates (2013) によって提案された簡略化された浅水方程式が用いられている。これによって計算が簡素化され、都市部において必要とされる高解像度での計算を可能にしている。Itzi はオープンソースである GIS ソフトウェア GRASS GIS 上で動作する洪水モデリングに特化したツールである。地形情報や降雨量、粗度係数を入力することにより降雨による水の流れをシミュレーションし、浸水の様子について計算を可能にする。浸水の様子を GRASS GIS 上でアニメーション表示できるため、出力されたマップデータの扱いが容易である。入力データには時系列変化するラスタデータ、strds (space time raster datasets) の入力が可能であるため過去の降雨についての情報を入力することにより、過去の洪水を再現することが可

能である。

2.2 経路検索

経路検索には pgRouting を用いた。pgRouting は PostgreSQL の地理拡張空間の Post GIS 上で構築された経路検索ツールであり、最短経路検索や到達圏分析などの解析を可能にする。pgRouting のメリットとして、GIS データを用いたネットワーク解析をデータベース内で直接実行することができることにより、洪水シミュレーション結果の扱いが容易であること、経路検索結果を QGIS 上で出力できるため視覚的に確認しやすいことがあげられる。道路データをエッジ、道路の交差している部分（交差点）をノードとして扱い、始点と終点のノードを選択して最短経路を検索する。道路長をコスト（重み）とし、ダイクストラ法を用いて最短経路検索計算を行った。ダイクストラ法とは始点から終点までの最短経路を求めるためのアルゴリズムであり、始点終点間の各道路の重み和が最小となる経路を計算する。

2.3 浸水域の変化による最短経路の導出

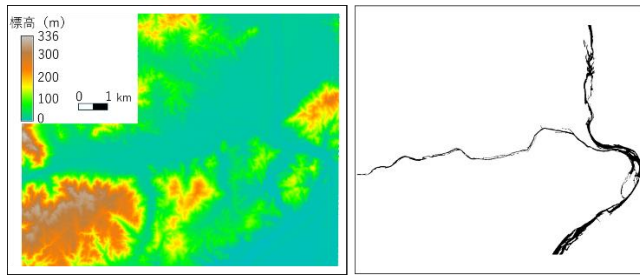
任意の時刻における浸水域ラスタデータについて浸水深 0.5 m よりも大きい領域を抽出し、浸水域ポリゴンデータを作成する。この数値は成年男性の場合安定して歩行可能な浸水深は約 0.5 m までであるとされるためである。（国土交通省，2007）。作成された浸水域ポリゴンデータと交わるエッジの通行コストを極端に高い値に設定することにより実質通行不可とする。時間の経過とともに浸水域が広がるため、浸水前に使用可能であった最短経路内のエッジが浸水域に含まれ使用不可となり、最短経路が変化する。

3. 使用データ

本研究では平成 30 年 7 月の岡山県倉敷市真備町の豪雨における浸水被害をもとにして洪水シミュレーションを行った。洪水シミュレーションの実行時間は 7 月 5 日 8 時から 7 月 7 日 12 時とした。

3.1 洪水シミュレーション使用データ

標高データとして、岡山県倉敷市真備町地域（約 8500 × 10700 m）の基盤地図情報 5 m メッシュ（標高）を用いた。河川域の値を河床標高にするため、対象時期の基盤地図情報の水域から主要河川範囲を示すラスタデータを作成し、



第1図 対象地域のDEMデータ(左)と水域データ(右)

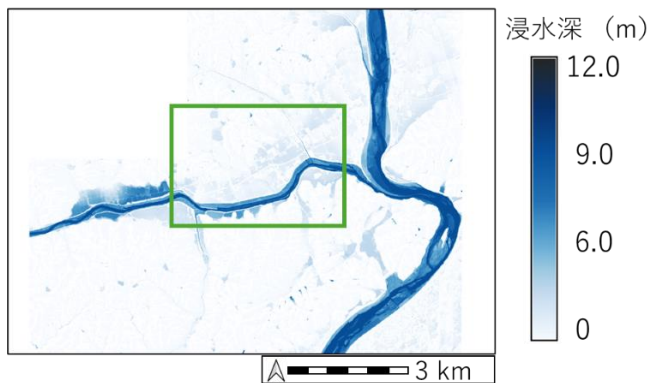
その範囲に1 m掘り下げた標高値を割り当てた(第1図)．降雨量として、気象庁のアメダス観測所倉敷地点のデータを用いた．土地利用データとしてJAXAの高解像度土地利用土地被覆図10 mメッシュ【2018～2020年】、水深データとして矢形橋水位観測所、川辺水位観測所、酒津水位観測所のものを用いた．また、Chow (1959)を参考に粗度係数を与えた．

3.2 経路検索使用データ

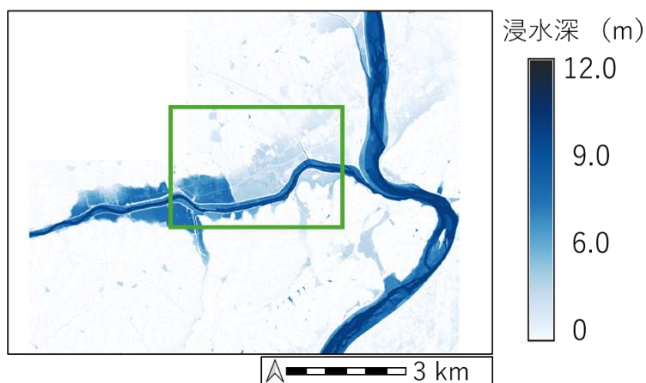
道路データには対象地域内吉備真備駅周辺(約2300 m×3300 m)のOpenStreetMapのマップデータを用いた．また倉敷市洪水ハザードマップに記載している計画規模洪水で利用可能な指定緊急避難所を避難先として用いた．

4. 結果

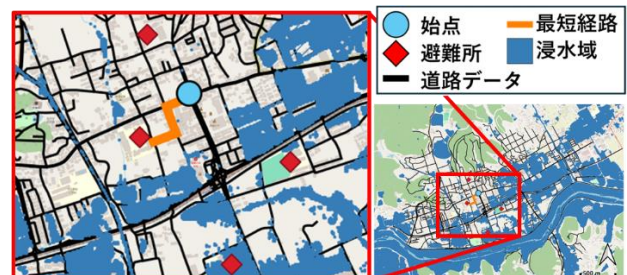
第2図と第3図に7月7日23時0分と8日0時20分での洪水の進行の様子をそれぞれ示す．第4図と第5図に、第1図の緑枠線内のそれぞれの時刻の浸水範囲と最短経路計算結果を示す．最短となる経路をオレンジ線で示す．



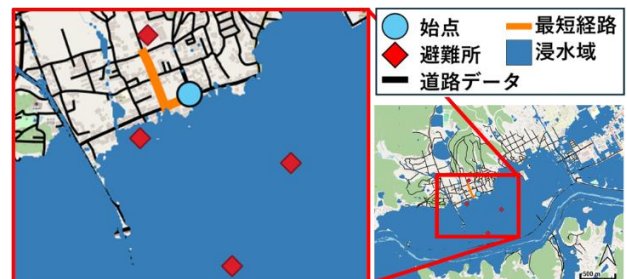
第2図 7日23時0分における洪水シミュレーション結果



第3図 8日24時20分における洪水シミュレーション結果



第4図 7日23時0分における最短経路検索結果と拡大図



第5図 8日0時20分における最短経路検索結果と拡大図

5. 考察

洪水シミュレーションにおいて時間ごとの河川の越水による都市部の浸水の様子が示せた．本研究の洪水シミュレーションにおける再現度を、国土地理院の「平成30年7月豪雨による倉敷市真備町周辺浸水推定段彩図」と比較したところ、シミュレーション結果の浸水範囲とほぼ一致していた．また最短経路検索では浸水状況に応じて異なる結果がえられた．これは時間が経過すると洪水により通行可能な道路が限定的となり、避難場所までに行く経路が限られてくるためである．しかし、河川の浸水以外にも小さな浸水域ポリゴンが点在し、そのポリゴンにある道路も使用不可となるため、経路検索に適切でない影響を及ぼす可能性がある．

6. おわりに

本研究では洪水シミュレーションの結果を用いて、経過時間に応じて最適な避難経路の検索を行った．より詳細な条件を設定することで洪水シミュレーションと最短経路検索の正確性を高めると同時に、避難時における道路の使用頻度を調べることで避難時における道路の重要性を定量的に評価することが可能となる．

文 献

- Chow, V.T. (1959) Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, pp.179-184.
- Gustavo A. M. de Almeida (2013) Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling, Water Resources Research, Volume 49, Issue 8, pp.4833-4844.
- 国土交通省 (2007) 地下空間における浸水対策ガイドライン
https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/saigai/tisiki/chika/tech.html
- 国土交通省 (2018) 平成30年7月豪雨の概要
https://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigai_dosyaworking/pdf/dai3kai/sankosiry01.pdf
- 国土地理院 (2018) 平成30年7月豪雨による倉敷市真備町周辺浸水想定段彩図
<https://www.gsi.go.jp/common/000208572.pdf>

ハイキング関数を用いたマルチエージェントシステムによる 避難シミュレーション

平田 萌瑛*・根本 達也*・ベンカテッシュ ラガワン*

Evacuation simulation using a multi-agent system with hiking functions

Moe HIRATA*, Tatsuya NEMOTO* and Venkatesh RAGHAVAN*

* 大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-Ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: sq25298r@st.omu.ac.jp

キーワード： ハイキング関数, マルチエージェントシステム, 避難シミュレーション

Key words: Hiking function, Multi-agent system, Evacuation simulation

1. はじめに

日本は地震大国であり、繰り返し大規模な地震に見舞われてきた。今後も南海トラフ巨大地震などによる津波被害が懸念されており、その被害軽減に向けた対策は急務である。津波襲来時に迅速に安全な場所へ避難できるように、地域の特性に応じた避難対策を講じる必要がある。

本研究では、石川県輪島市臨港区(東西4km×南北4km)を対象にマルチエージェントシステム (Multi-Agent Simulation; MAS) による津波災害時の避難シミュレーションを行った。対象領域内に人に見立てたエージェントを配置し、各エージェントはダイクストラ法を用いた最短経路検索により、避難場所へ移動する避難者の行動をシミュレートした。避難者となるエージェントの移動はハイキング関数を用いて傾斜による歩行速度補正を行った。また、指定緊急避難場所の収容人数と避難者数を算出し、傾斜による歩行速度補正の有無における結果の比較も行った。

2. マルチエージェント・シミュレーション

マルチエージェントシステム (Multi-Agent System) とは、自ら周囲の状況を認識し、それに基づいて判断・行動する主体が、複数存在するシステムであり、それを用いたシミュレーションをマルチエージェント・シミュレーション (Multi-Agent Simulation; MAS) という。

3. ハイキング関数

本モデルでは、トブラーのハイキング関数 (Tobler, 1993) を用いて歩行速度の補正を行う。ハイキング関数を式 (1) に示す。ここで d は傾斜角が計算される角度であり、 e は自然対数の底である。基本の歩行速度を傾斜の緩い下り坂 (約 -3 度) を移動する際の速度である 6 km/h としている。

$$W(d) = \frac{6}{e^{3.5|\tan(d) + 0.05|}} \left[\frac{km}{h} \right] \quad (式 1)$$

4. シミュレーションモデルの作成

4.1 使用データ

本研究には、道路情報、標高情報、浸水情報のデータを用いた。

道路情報データとしてオープンデータの OpenStreetMap から取得した中心線の情報を使用した。道路データの交差点の座標は、緯度経度座標系から直角座標系へ変換した。

標高データは、国土地理院の基盤地図情報データを利用し、GRASS GIS を用いて変換を行い、取得した。

浸水情報データには、平成 23 年度石川県津波浸水想定調査 (石川県, 2011) を用いた。津波到達時間には最大津波高となる日本海東縁部の数値を用い、津波想定到達時間は 50 分とした。

4.2 開発環境

本研究では、(株) 構造計画研究所の artisoc4.0 を用いて MAS を行った。このソフトウェアは MAS に特化したシミュレーションプラットフォームであり、Visual Basic ライクなコンピュータ言語による行動ルールの作成が可能である。artisoc では、道路ネットワークである道路と交差点はそれぞれリンクとノードで表され、エージェントはこのノードとリンクの上を移動する。

4.3 エージェントの設定

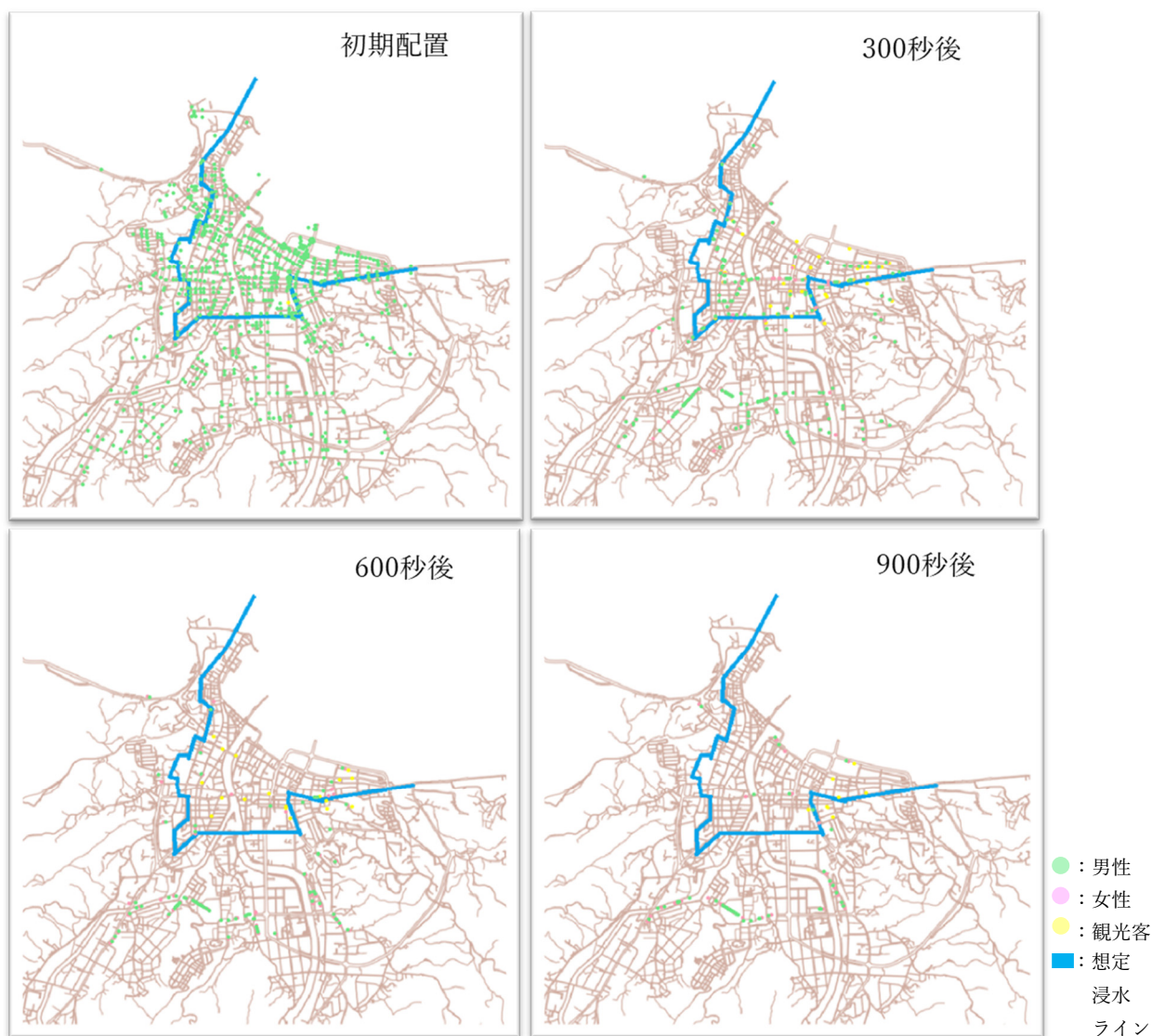
エージェントは、ダイクストラ法によって算出されたコストのなかで、最小となるコストのルートを選択する。佐藤 (2022) に基づいて、エージェントの属性は男性、女性、観光客の 3 種類とし、それぞれの避難速度を、1.30 m/s, 1.25 m/s, 1.14 m/s と設定した。また、平日の昼間の避難を想定して、エージェントの総数を平成 24 年の輪島市の人口と観光客数から 12,456 人とした。

4.4 ハイキング関数による歩行速度の補正

本研究では、歩行速度への高低差の影響を考慮した。各ステップにおいて、現ノードからすすむ対象である目的ノードへの距離と標高の差を用いて求める。標高データは各 ID と紐付いている。それぞれの点の標高差を求め、ふたつの点の X,Y 座標を用いて 2 点間の距離を求める。ふたつの値から $\tan(d)$ が求まる。その値をハイキング関数へ代入し、補正値を求める。傾斜による補正値に、基本の歩行速度を掛け合わせ、最終的な歩行速度を計算する。

5. 結果

シミュレーションの結果、2028 秒後に全エージェントの



第1図 歩行速度補正を行った場合のシミュレーション結果

避難が完了した。300秒ごとのシミュレーションの結果、300秒後に避難を完了した人数は6,705人、600秒後に避難を完了した人数は11,075人、900秒後に避難を完了した人数は11,711人であった。9割の避難者が約600秒後には避難を完了できていない。しかし、全エージェントの避難が完了する手前の結果をみると、避難者数12,250人に達するのにかかる時間は、1362.0秒、12,444人に達するのにかかる時間は、1995.0秒であった。

標高データを用いて歩行速度の補正を行った場合と標高データを用いず歩行速度の補正を行わなかった場合の結果を比べると、避難場所の収容人数を考えない場合、どちらもすべてのエージェントの避難が完了した。どちらも、全エージェントの避難完了にかかった時間が2028秒であり、地形に関しては、対象領域の標高差が少ない地域であったことから、避難時間にあまり変化が見られなかった。

各避難所の収容人数と比較すると、避難人数の偏りから、収容人数を大幅に超えてしまうところが見られた。

6. おわりに

本研究では、ハイキング関数を用いて歩行速度を補正し、マルチエージェントシステムによる避難シミュレーションを行った。

今後の課題として、より傾斜による影響が大きい地域でのシミュレーションが必要である。また、歩行速度の区分に関しても、より細分化したシミュレーションが必要である。本研究では道幅を考慮しなかったため、混雑による渋滞や倒木などによって塞がってしまう道路などの検討を行うことができていない。実際の避難状況を考えるためには、これらについても検討する必要がある。

文 献

- 石川県 (2011) 平成 23 年度石川県津波浸水想定調査. pp.13-24.
- 川村日成 (2018) 最適行動に基づく津波避難行動解析を用いた避難経路に係る諸要因の分析. 高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻修士論文.
- 佐藤葵 (2022) マルチエージェントシステムによる避難シミュレーションと避難所の妥当性に関する検討. 大阪市立大学理学部学士論文.
- Tobler, W. (1993) Three presentations on geographical analysis and modeling: non-isotropic geographic modeling; speculations on the geometry of geography; and global spatial analysis (93-1). Technical report, UC Santa Barbara.

画像解析による砂岩中石英粒内亀裂の自動検出手法の開発

中川 愛珠*・上原真一*

Development of an automated method for detecting intragranular cracks in quartz grains in sandstone using image analysis

Ayumi NAKAGAWA* and Shin-ichi UEHARA*

*東邦大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Toho University, 2-2-1 Miyama, Funabashi, Chiba 274-8510, Japan. E-mail: 6624010n@st.toho-u.ac.jp

キーワード：画像解析, 粒内亀裂, 機械学習, 石英

Key words: Image analysis, Intragranular cracks, Machine learning, Quartz

1. はじめに

岩石中の亀裂密度は、断層活動や変形履歴の指標として用いられており、特に劈開が少ない石英は、自然な破壊を偏りなく保持できること観察対象として適している (e.g., Mizoguchi & Ueta 2013). しかし、従来の微小亀裂密度の測定は、薄片画像上での手作業による観察に依存しているため、解析に時間を要するうえ、観察者の主観的判断の影響を排除することが難しい。近年、岩石表面やコンクリート構造物の亀裂検出においては画像処理や機械学習を用いた手法が報告されている (Arena *et al.* 2014; 山根・全邦釘 2019) が、鉱物粒内の微小亀裂を対象とする方法は未だ確立されていない。

本研究では、砂岩の薄片画像を対象に石英の粒内亀裂を自動検出する手法を構築することを目的とする。

2. 解析対象と画像の前処理

解析対象は 650°C で加熱後急冷処理を施し、亀裂を生じさせたインド産砂岩である。粒径は 0.02~0.1 mm、鉱物組成は石英約 68 %, カリ長石約 18 %, 斜長石約 10 %, 不透明鉱物等約 4 %, 間隙率は 13.2 % である。解析には SEM 反射電子像、偏光顕微鏡直交ニコル像、および SEM 二次電子像の 3 種類の画像を用い、SEM 反射電子像を基準に他像をアフィン変換で位置合わせをした。位置合わせおよび Trainable Weka Segmentation による石英領域検出は中川・上原 (2025) で報告されている。本研究ではそれらを前提とした前処理済み画像を使用した。

3. 解析手法

以下の一連処理は最終的に 3 種類の情報を統合して石英粒内の亀裂を検出するプロセスの一部である。検出の流れを第 1 図に示す。

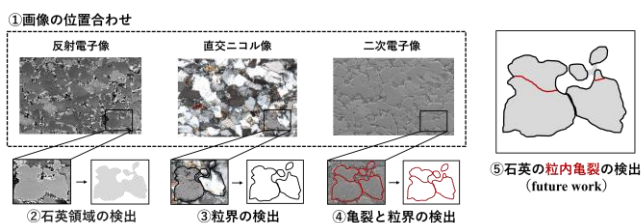
直交ニコル像で粒界、二次電子像で亀裂と粒界をエッジ検出した後、モルフォロジー演算により境界線を補完した。この際、Canny 法 (標準設定)、LoG 法 ($\sigma=2.0$)、Prewitt 法 (閾値 0.2)、Gabor フィルタ (波長 4 ピクセル、方位 90°) の 4 手法を偏光像および二次電子像のそれぞれに適用して境界情報を取得した。

次に、得られた複数のエッジ候補のうち視覚的に最も精度が高いと判断した Canny 法を選択し、その出力画像にモルフォロジー演算のクロージングを適用した。クロージングには diamond, disk, octagon, line, square の 5 種類の構造要素を用い、境界線の連続性を保ちつつノイズを抑制できるか比較検討した。評価では、ひび割れや粒界が細線状構造として途切れずに補完されているか、粒界とひび割れが近接する部分で誤結合が生じていないか、SEM 像特有の凹凸やノイズによって輪郭が断続的になる領域がどれだけ改善されているか、を中心に視覚的に検証した。

4. 結果

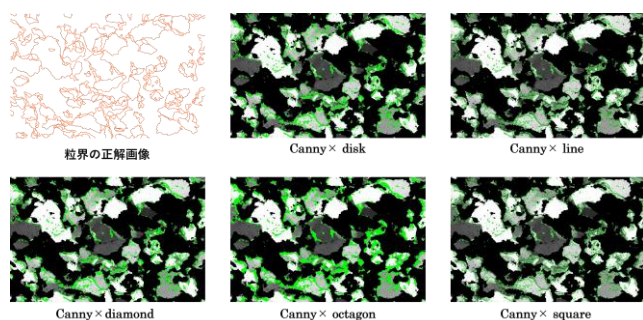
得られた輪郭候補を視覚的に比較した結果、Canny 法が最も安定して細線状構造を連続的に検出できた。二次電子像中央部にある長い亀裂では、Canny 法適用後の輪郭が途切れず、主要な亀裂パターンがほぼ忠実に再現されていると判断した。ただし、直交ニコル像から検出された粒界では微細凹凸ノイズやわずかなコントラスト変動により輪郭が途切れ、亀裂と粒界の区別が困難となる場合があった。LoG 法は滑らかな輪郭を得られるものの細い分岐で途切れやすく、太めの線がノイズと重なることで誤検出が生じた。Prewitt 法は斜め輪郭の感度不足により鋭角分岐が欠落し、Gabor フィルタは方向変化部で輪郭が途切れ、ノイズが多く残存することが確認された。

これらを踏まえ、Canny 法で得た亀裂と粒界にモルフォロジー演算 (クロージング) を適用し、構造要素として diamond, disk, octagon, line, square を比較した (第 2 図, 第 3 図)。disk および octagon は閉じた形状ゆえに輪郭

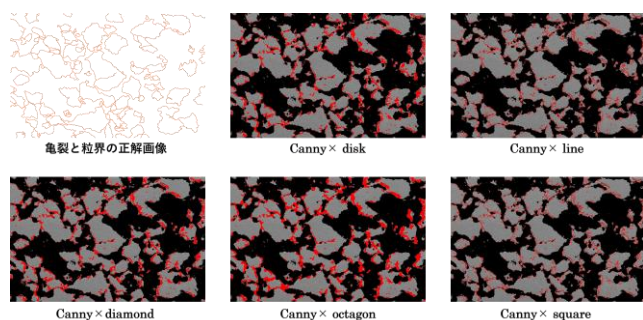


第 1 図 石英粒内亀裂検出の流れ

が過度に膨張し、粒界や隣接亀裂と一体化しやすかった。line は境界線で連続性を確保するものの、分岐部や粒界近傍で誤結合が生じた。diamond はあらゆる方向で膨張できるものの、先端部や曲がり角で実線とずれるため形状再現性に課題があった。直交ニコル像にある粒界では亀裂と粒界が一体化するケースが残った（第2図）。最も安定して実用性が高いと判断されたのは square であり、二次電子像にある長い亀裂中心線を途切れず補完しつつ、線幅を比較的均一に維持できた（第3図）。これらの結果から、視覚的検証に基づいて Canny 法+square を組み合わせる手法が最も有効とされたが、粒界と亀裂が誤って結合される点や分岐部の検出漏れ、SEM 像ノイズに起因する偽線検出などの問題が依然として解決されていないことが示された。



第2図 ③粒界の検出：直交ニコル像を用いたモルフォロジー演算（クロージング）の構造要素別結果（緑）



第3図 ④亀裂と粒界の検出：二次電子像を用いたモルフォロジー演算（クロージング）の構造要素別結果（赤）

5. 考察

粒界と亀裂が近接する領域では、わずかな輪郭ずれが Canny 法単体の出力に現れ、ひび割れの一部が途切れたり、粒界に沿った線形構造と誤結合したりするケースが散見された。

これに対して、モルフォロジー演算によるクロージングを組み合わせることで、連続性を改善できるが、構造要素の形状や方向性が適用結果に大きな影響を与えることが明らかとなった。disk や octagon では、輪郭を太く膨張させる特性により、実際の線形から大きく外れた領域が加わりやすかった。とくに粒界やノイズ領域では、隣接する線形がまとめられ、一つの太い構造として観察されるため、真の亀裂中心線を捉えているとは言いがたい。また、line は、まっすぐな亀裂を補完する点で有利であるものの、亀裂の方向が変化する分岐部では線が分断され、しかも粒界接近部では構造要素の向きと亀裂方向が一致せず誤結合が生じる。一方、diamond ではあらゆる方向に対応するが、角張った膨張形状が実線とずれを生じさせるため、細かな形状再現には不向きであった。これに対し、square は上下左右に均等に膨張すると同時に線幅をほどよく維持できるため、長い亀裂

中心線の連続性を確保できた。しかし、粒界近傍では square 形状がひび割れと粒界をまとめてしまい、結果として実線とは異なる一本化された線状構造が観察された。

以上より、視覚的検証を通じてどの手法・構造要素が実際の亀裂形状を再現しうるかを判断することが、本研究の本質的な評価基準であると認識した。

混同行列による定量評価では、Canny 法+square 構造要素の組み合わせにおいて正解率 87.07%、適合率 33%、再現率 16.4%、F1 値 0.2191 を得た。しかし、これらの数値は SEM 像特有のノイズや線幅の変化、粒界誤結合の影響でピクセル単位の一貫性が低く算出される傾向がある。たとえば正解画像における亀裂や粒界はあくまでも1ピクセル幅の線状であるのに対し、エッジ検出後やクロージング適用後の検出結果は領域（太さを持つ線）として出力されるため、その厚み分のズレを考慮しなければ、適合率や再現率が著しく下がるのは当然である。したがって、混同行列のみで亀裂中心線をどの程度正確に再現しているかを評価するのは不十分であり、視覚的評価によってどの領域が本当に正しく検出されているかを確認するほうが実用上有益であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、砂岩薄片中の石英粒内における亀裂および粒界を自動検出する手法として、偏光顕微鏡直交ニコル像および SEM（二次電子像・反射電子像）を対象に、Canny 法、LoG 法、Prewitt 法、Gabor フィルタの4手法でエッジを候補取得し、得られた複数のエッジ画像の中から視覚的に最も優れている Canny 法を選択してモルフォロジー演算によるクロージングを適用した。クロージングに用いた diamond, disk, octagon, line, square の五種の構造要素を比較した結果、視覚的には Canny 法+square 構造要素の組み合わせが亀裂および粒界を最も忠実に再現し、線幅もほどよく維持されていると判断された。しかし、同組み合わせでも粒界と亀裂が近接する部分では構造要素形状の影響で誤結合が生じるほか、ノイズ由来の偽線が残存する問題があった。したがって、亀裂および粒界を区別し検出するうえで、視覚的に検出結果を評価し、どの領域が正しく検出できているかどの領域で誤検出や欠落が生じているかを具体的に示すことが不可欠である。

今後は、視覚的評価を補完するために亀裂中心線間の距離誤差や分岐点再現性を評価する指標を導入し、より石英粒内亀裂の検出性能向上を検討する予定である。

文 献

- Arena, A., Delle Piane, C., and Sarout, J. (2014) A new computational approach to cracks quantification from 2D image analysis: Application to micro-cracks description in rocks. *Computers & Geosciences*, Vol.66, pp.106–120.
- Mizoguchi, K. and Ueta, K. (2013) Microfractures within the fault damage zone record the history of fault activity. *Geophysical Research Letters*, Vol.40, pp.2023–2027.
- 中川愛珠, 上原真一 (2025) 機械学習による粒内亀裂の自動検出方法の開発. 日本地球惑星科学連合 2025 年大会発表要旨.
- 山根達郎, 全邦釘 (2019) Deep learning による Semantic Segmentation を用いたコンクリート表面ひび割れの検出. 構造工学論文集, Vol.65A, pp.130–134.

Sentinel-2 衛星データを用いた NDCI によるサンゴの健康状態の評価

服部 快成・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン

Assessment of Coral Health by NDCI Using Sentinel-2 Satellite Data

Kaisei HATTORI, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan. E-mail: sq25305w@st.omu.ac.jp

キーワード: NDCI, Sentinel-2, サンゴ, リモートセンシング

Key words: NDCI, Sentinel-2, Coral, Remote sensing

1. はじめに

近年、地球温暖化や水質汚染によりサンゴの健康状態が悪化しており、サンゴの健康状態をモニタリングすることが重要である。しかし、従来の健康状態調査方法では主観的であることや調査コストが高いという課題が挙げられている。このような背景から斉藤ほか(2008)は水中で撮影したサンゴの健康状態を簡便かつ客観的に調査するため、NDCI (Normalized Difference Coral Index) という指標を開発した。しかし、水中カメラを使用する場合、広域かつ定期的にデータを取得することは困難である。そこで、本研究では、人工衛星データを用いてサンゴの健康状態を評価する手法を開発した。NDCI が適切にサンゴの健康状態を評価できるのか調査するため、生物多様性センターによる被度データと NDCI との相関を複数の時期で確認した。

2. 手法

2.1 NDCI の算出法とデータの補正

NDCI は、サンゴが含有するクロロフィルの濃度を反映する指標である。健康なサンゴほどクロロフィルの含有量が多く、NDCI 値は 1 に近づく。逆に不健康なサンゴはクロロフィル含有量が少なく、NDCI 値は-1 に近づく。本研究では、Sentinel-2 の Band 2 (青色: 490 nm) および Band 5 (近赤外: 705 nm) の反射率を用いて、以下の式で NDCI を算出した。

$$NDCI = \frac{(IR - B)}{(IR + B)}$$

ここで、 IR は近赤外線、 B は青色光である。

本研究では、サンゴの健康状態を調べるために、サンゴの反射率、すなわち海底反射率を求める必要がある。しかし、人工衛星が取得するデータは、大気および水中での太陽光の減衰の影響を受けている。そのため、大気補正については、Sentinel-2 の L2A データを使用した。水中における光の減衰は、日本水路協会(2017)を参考に人工衛星 Sentinel-2 の Band 2 (青色光) および Band 5 (近赤外光) のバンド値に対して減衰補正を行った。これらの補正を施すことでサンゴの反射率(海底反射率)を求めた。以上の補正をかけた

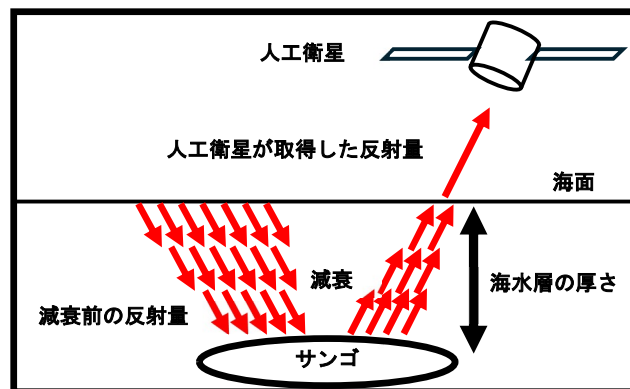
データを用いて、NDCI は計算されるが、補正後データをそのまま用いて計算すると NDCI の値が特定の範囲に偏る問題が発生する。そのため、減衰補正後のデータを正規化し、各バンドのスケールを統一した後、NDCI を計算した。

2.2 NDCI の機能検証

本研究の目的は NDCI が人工衛星データを用いた場合でも適切に機能するのかを調査することである。そのため、NDCI 計算後、NDCI と被度の相関を調査した。各被度が占める領域の NDCI 平均値を求めることで被度と NDCI の相関を調査した。被度階級と NDCI 平均値に正の相関が確認できた場合、人工衛星データを用いた NDCI はサンゴの健康状態を適切に評価することが可能であるとした。

2.3 NDCI の閾値設定と地域別評価

NDCI 計算後、サンゴが健康か不健康かを判断する閾値を設定した。環境省自然環境局 生物多様性センター(2019)によると 2018 年の宮古島本島のサンゴ被度は 20 %、八重干瀬のサンゴ被度は 10 %である。これはそれぞれの地域において健康なサンゴが占める割合を示している。この情報を基に、NDCI 値の分布から健康なサンゴに相当する上位の割合から 0.62 を閾値として設定した。また、この閾値を用いて被度と NDCI の比較を行った。



第1図 サンゴの反射と光の減衰

3. 対象地域と使用データ

3.1 対象地域

川越 (2017) は 2016 年に宮古諸島周辺に属する八重干瀬で平均白化率 70.1 % の大規模白化が起きたことを述べている。このことを背景に本研究では対象地域を宮古諸島とした。

3.2 使用データ

本研究で使用したデータは主に 2 種類である。1 つ目はサンゴの被度データである。被度は 5 % 未満, 5 ~ 25 %, 25 ~ 50 %, 50 ~ 100 % の 4 種類に分けられる。2 つ目は Sentinel-2 によって取得された地表面反射率のデータである。被度データは 2018 年 10 月 11 日から 16 日の間に取得されたものを, 地表面反射率のデータは同月 2 日および 22 日に取得されたものを使用した。本研究では教師データとしてサンゴの被度データを, NDCI の計算に Sentinel-2 の地表面反射率データを用いた。

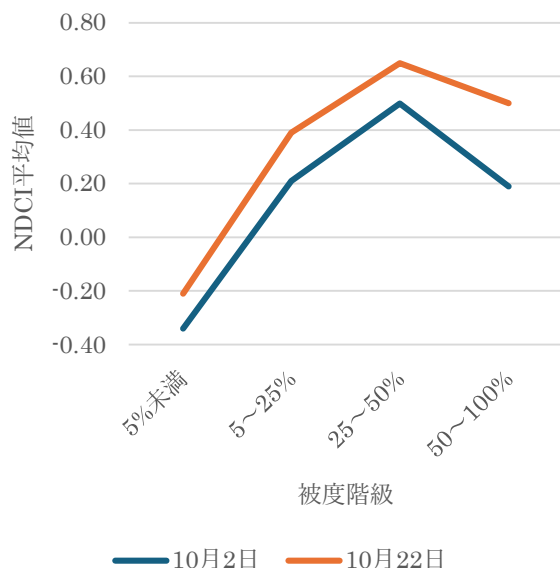
4. 結果と考察

4.1 NDCI と被度の相関関係

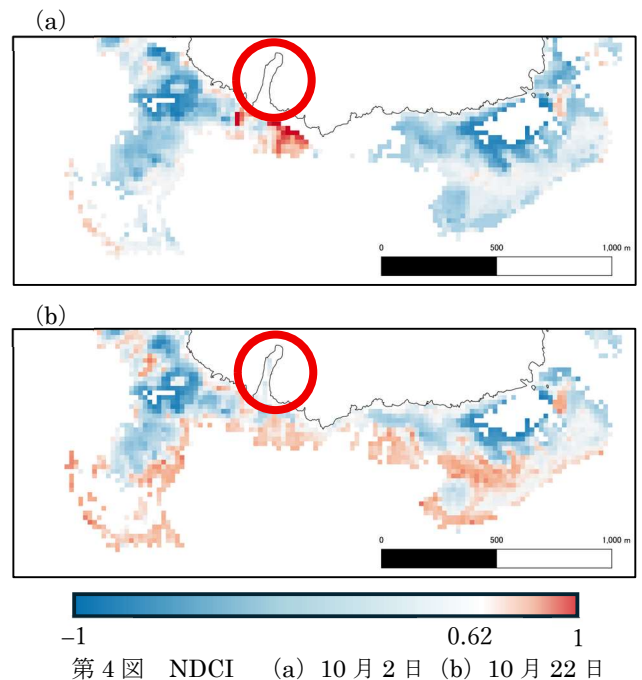
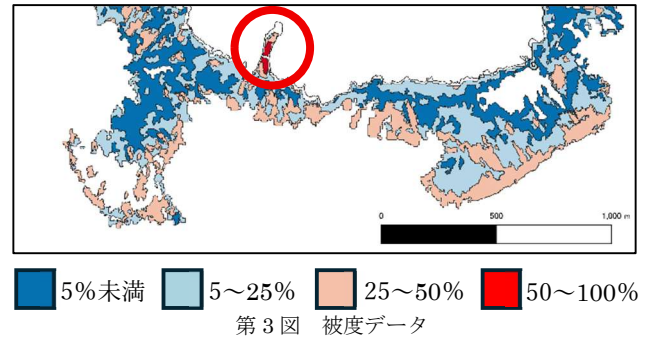
第 2 図より, 10 月 2 日, 10 月 22 日のどちらの日付においても被度の階級が 5 % 未満, 5 ~ 25 %, 25 ~ 50 % と上昇するにつれて NDCI の平均値も上昇していることが確認できる。しかし, どちらの日付においても被度 50 ~ 100 % の範囲で平均値の減少が確認された。これは被度 50 ~ 100 % の領域が極端に少ないため, 誤差が大きくなったことが原因だと考えられる。

4.2 NDCI とサンゴ被度の比較

第 3 図の被度データと第 4 図の NDCI を比較すると, 被度の階級が高い部分は NDCI も高く, 被度の階級が低い部分は NDCI も低くなる傾向にあることが確認できる。しかし, 第 3 図と第 4 図の赤丸の部分では, サンゴ被度と NDCI の相関が確認できなかった。国立環境研究所 (2004) は, サンゴと海草・海藻類は類似した反射特性を持つため, サンゴと藻類を区別することが困難であると述べている。本研究においても, 藻類とサンゴの区別が正しく行われていないため, 被度データとの対応が確認できなかった可能性がある。



第 2 図 各被度の領域における NDCI 平均値



5. 終わりに

本研究では, 宮古諸島を対象に人工衛星データから NDCI を算出し, サンゴの健康状態の評価に有効かを検証した。その結果, NDCI はサンゴの健康状態を適切に評価可能であること, 設定した閾値により健康・不健康の判別が概ね可能であることがわかった。今後, 設定した閾値の他地域への適用性を検証する必要がある。また, NDCI ではサンゴと藻類との区別が難しいため, ハイパースペクトルカメラの活用による識別精度の向上について検討する必要がある。

文 献

- 川越久史 (2017) モニタリングサイト 1000 からみた 2016 年のサンゴの大規模白化. 日本サンゴ礁学会誌, vol.19, no.1, pp.21-28.
- 環境省自然環境局 生物多様性センター (2019) 平成 30 年度モニタリングサイト 1000 サンゴ礁調査報告書. 146p.
- 国立環境研究所 (2004) サンゴ礁の白化現象をリモートセンシングでとらえる—— 検出, 回復過程監視, そして予測に向けた試み. 国立環境研究所ニュース, vol.22, no.2, pp.5-7. 日本水路協会 (2017) 衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究. 調査研究資料, no.156, pp.1-262.
- 斉藤 宏・岸野元彰・石丸 隆・灘岡和夫, 工藤 栄 (2008) 可視, 近赤外画像によるサンゴの健康度モニタリング手法の開発. 日本サンゴ礁学会誌, vol.10, no.1, pp.47-57.

海洋 STEAM 推進事業の立ち上げと日本情報地球学会への寄与 ～デジタル教材を契機とした新たな学際的挑戦～

木戸ゆかり*・市原盛雄*

The Launch of the Marine STEAM Initiative and Its Contribution to the Geoinformatics – A Novel Interdisciplinary Challenge Initiated by Digital Teaching Materials –

Yukari Kido* and Morio Ichihara*

*国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 海洋 STEAM 推進課, JAMSTEC, 3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa, 236-0001, Japan, E-mail:ykido@jamstec.go.jp

キーワード：海洋 STEAM 推進事業, デジタル教材, STEAM 教育

Key words: Marine STEAM Initiative, Digital Teaching Materials, STEAM Education

1. はじめに

国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が主導する「海洋 STEAM 推進事業」は、令和 5 年度 (2023 年) よりスタートし、海洋科学と STEAM (科学, 技術, 工学, 芸術, 数学) 教育の融合を目指して様々な取り組みを展開している。実践的体験と最先端デジタル技術を取り入れた新たな試みは、次世代の地球科学教育や社会課題の解決に向けた革新的なアプローチとして位置付けられている。本事業は「日本情報地球学会」およびその関連研究コミュニティと密接に連携することで、学際的な交流と知見の深化を図り、学会活動の新たな推進力となることが期待される。

2. 方法・取り組み

本取り組みでは、以下のような具体例を通じ、教室と現場 (地球深部探査船「ちきゅう」) との双方向連携を初めて実施した。

- ・実践授業と遠隔ライブ授業の統合: JAMSTEC と八戸市教育委員会が共同制作した「海洋 STEAM 教材第 3 巻『海の地震と防災 海底下の地層』」を用い、担当教諭が前半の授業を展開。児童生徒は「地震の予測はできるのか」という問いに対して多角的な意見を交わし、水槽実験や模型を使った深海探査演習により理解を深めた。
- ・遠隔ライブ中継による現場体験: 後半は、吹上小学校 (八戸市立) の小学生約 160 名が「ちきゅう」船上とライブ中継で繋がり、船上スタッフによる現場解説と児童からの積極的な質問 (例: 「南海トラフ地震の予測」や「乗船に必要な資格」など) を通じ、直接的な学びが実現した。
- ・地域と学会の連携: 本イベントは、教育委員会, PTA, 地域保護者の参加もあり、教室での授業と船上での研究活動との連携が、温かい心の交流を促進。後日、吹上小学校 156 名の直筆応援メッセージを大型ポスターとして船上に掲示するなど、学会活動との融合を実感させる成果が得られた。

3. 主な成果等

初回の取り組みにより、参加校や地域の広範な連携が実

現し、実践授業では学習意欲および探求心の向上が顕著となった。特に、従来は控えがちだった児童が積極的に意見を表明し、皆の前で発表するなど、教育効果が実感された。これらの成果は、情報地球学分野における研究成果の新たな視点の創出や、教育現場からのフィードバックをもとにした研究展開を後押しし、本学会の学際連携と研究の深化の基盤を考える一助となりうる。

4. 考察・意義

海洋 STEAM 推進事業は、海洋科学と STEAM 教育の先進的融合により、実践的体験とデジタル技術の革新を通じた学際的知識の伝播を実現した。

・学会活動との融合: GEOINFORUM-2025 を契機に、参加する高校、大学、各研究機関との連携が深まり、本学会が促進する情報地球学の枠組みの拡大と研究の深化に寄与している。

・地域とのシナジー効果: 地元の教育現場や保護者、地域コミュニティとの交流が、学会誌やシンポジウムを通じた情報共有のプラットフォームと連動し、広範な知見の横展開を支える重要な要素となっています。これらのシナジー効果により、情報地球学分野に新たな発展の可能性が示唆され、今後の持続可能な地球科学教育モデルの構築に大きく貢献することが期待される。

謝辞: 本事業の実践では、八戸市教育委員会、吹上小学校の先生方に教材作成からたいへんお世話になったことをここに記して謝辞としたい。

文 献

- 市原盛雄(2024)海洋リテラシーを深める STEAM 教材, 理科教育ニュース第 1252 号。
木戸ゆかり・市原盛雄(2025)海洋 STEAM 教育始動 -次世代の地球科学教育を拓く-, JpGU2025。



図：海洋 STEAM 教材の制作 学習指導要領に沿い、学齢にマッチした教材を体系的に企画制作し、ウェブから無償でダウンロード可能とした。

第1巻 海の生き物と環境の変化

第2巻 海洋プラスチックとわたしたちの生活

第3巻 海の地震と防災 海底下の地層



左図：児童向けの
テキストの
第1巻, 2巻, 3巻。

第1：海の生き物
と環境の変化

第2：海洋プラス
チックとわたした
ちの生活

第3：海の地震と
防災 海底下の地
層

【小テーマ】
・豊かで美しい海
・海の変化
・わたしたちの生活と海
・海洋酸性化
・海の生き物の異変
・海の多様性を守る

【小テーマ】
・深海と深海の生き物
・人間社会とプラスチック
・海洋プラスチックがもたらす影響
・プラスチックとわたしたちの生活
・プラスチックごみの行方
・プラスチックの将来

【小テーマ】
・地震の被害
・地震・津波が起こる理由
・「ちきゅう」の探査技術
・防災のために
・地層探査とコア
・防災の未来



写真：海洋 STEAM 授業と船上中継イベントの様子
東北地方太平洋沖地震の断層掘削から 12 年。海から地球の謎を探る-みんなの知らない世界へ-
左上：1 コマ目の授業風景、左下：水槽実験の様子、右上：体育館での船上中継の様子、右下：質問タイム

Web ベース 3 次元地質地盤モデルビューアの改良： 地図・スケール・方位の表示機能の実装

野々垣 進*・藪田 桜子*

Enhancing a Web-Based 3D Geological Model Viewer: Implementation of Map, Scale, and Orientation

Susumu NONOGAKI* and Sakurako YABUTA*

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567 JAPAN.
E-mail: s-nonogaki@aist.go.jp

キーワード：3次元モデル, Web, サーフェスモデル, ボクセルモデル, 可視化, 都市

Key words: Three-dimensional model, Web, Surface-based model, Voxel model, Visualization, Urban area

1. はじめに

産業技術総合研究所地質調査総合センター（以下、産総研）では、経済産業省による知的基盤整備の一環として、自治体と協力しながら“都市域の3次元地質地盤図”の整備に取り組んでいる（野々垣・中澤, 2025）。この取り組みでは、ボーリングデータを利用して、都市域の地下数十メートルにおける地層や物性の詳細な分布を表現する3次元モデル（3次元地質地盤モデル）を構築するとともに、得られた3次元地質地盤モデルを、GSJのWebサイト「都市域の地質地盤図」（URL: <https://gbank.gsj.jp/urbangeol/>）で公開する。本Webサイトでは、地層境界面を重ね合わせることで地層の3次元分布を表現するサーフェスモデルを公開している。また、サーフェスモデルとボーリングデータから作成した、地層内における岩相やN値などの物性の3次元分布を表現するボクセルモデルについての公開も検討中である。

上記Webサイトでは3次元地質地盤モデルを可視化するにあたり、野々垣・中澤（2022, 2023）によるWebベースのサーフェスモデルビューアおよびボクセルモデルビューアを用いている。これらのビューアには、単純なマウス操作のみで地層や物性の広がりや詳しく確認できるという利点がある一方、地理座標や目盛りなどの表記がないため、表示している3次元地質地盤モデルの地理的な位置や大きさが認識しにくいという課題が残されている。本研究ではこの課題を解決するために、両ビューアに対して地図、スケール、および方位といった、3次元地質地盤モデルの地理的な位置や大きさの把握を支援する参照要素の表示機能を実装した。本発表では、野々垣・中澤（2022, 2023）による3次元地質地盤モデルビューアのシステム構成を振り返るとともに、実装した機能の概要について説明する。

2. システム構成

3次元地質地盤モデルビューア（野々垣・中澤, 2022, 2023）は、Webブラウザに標準装備されるWebGLを利用してそれぞれサーフェスモデルとボクセルモデルを可視化

するWebアプリケーションである。開発言語にはJavaScriptを、WebGLプログラミングには3DCGライブラリのひとつであるthree.jsを用いている。どちらのビューアもシステム本体は、各機能のJavaScriptコード群やスタイルシートなどから構成され、3次元地質地盤モデルデータを納めるデータセットディレクトリとは別階層のディレクトリで管理される。一方、データセットディレクトリは、3次元地質地盤モデルデータのほか、凡例画像やビューアを起動するためのHTMLファイルなどから構成される。

3. 機能の概要

第1図に改良した3次元地質地盤モデルビューアの操作画面を示す。地図表示機能、スケール表示機能、および方位表示機能は、いずれもビューア操作画面左上に配置された表示設定ボタン群の右端に位置する「その他」アイコンから利用可能である。また、各参照要素の表示・非表示の切り替えは、トグルボタン方式となっている（第1図(c)）。以下に、各機能の概要を記す。

1) 地図表示機能

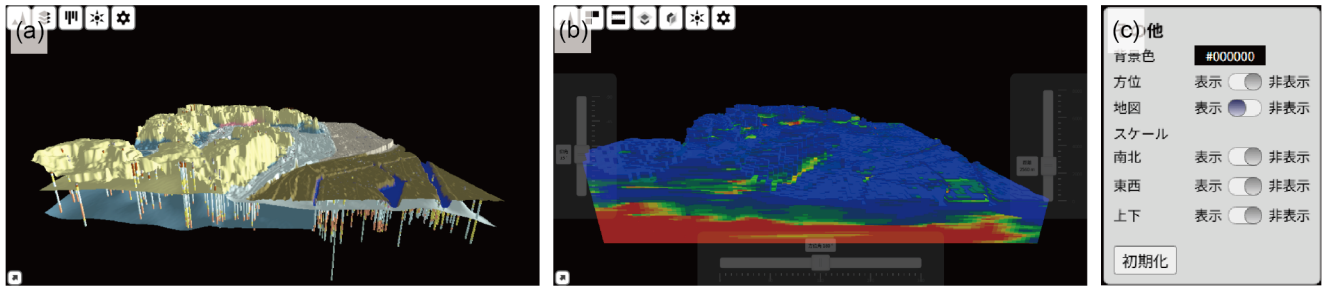
地表面に地図画像を表示する機能である（第2図）。利用可能な地図画像は、国土地理院による地理院タイルのような地図タイル形式でWeb配信されているものに限る。地図画像の範囲や種類は、3次元地質地盤モデルごとに設定することが可能である。

2) スケール表示機能

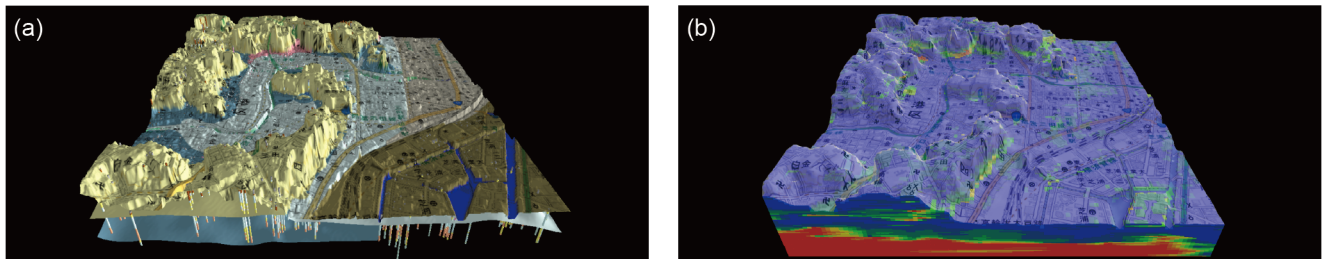
格子状のスケールを表示する機能である（第3図）。東西・南北・上下方向のスケールの表示・非表示の切り替えは、個別に行うことが可能である。スケールの表示範囲や格子の幅は定義ファイルで、あらかじめ指定する必要がある。

3) 方位表示機能

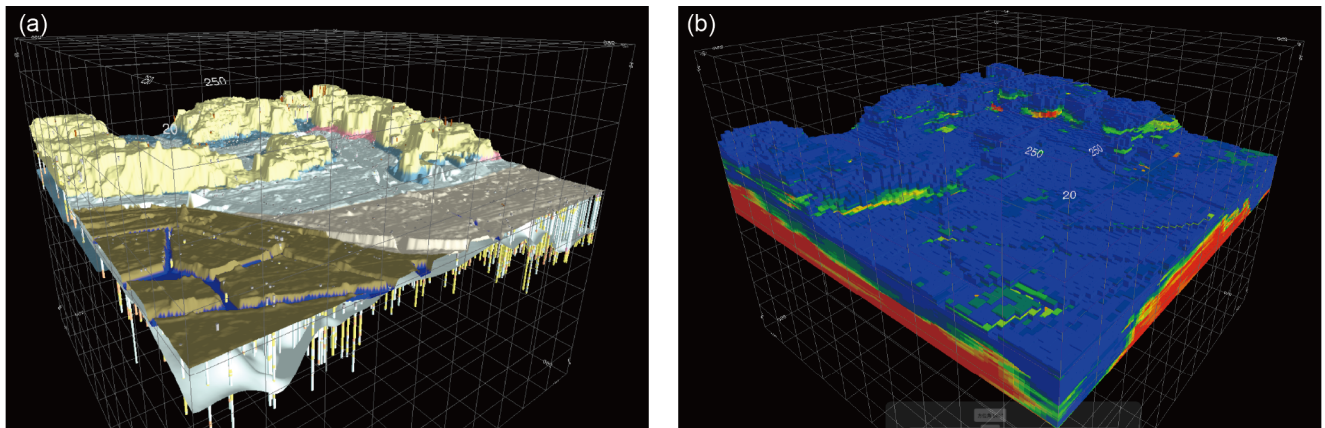
東西南北の4方位に方位を示すマーカーを表示する機能である（第4図）。方位マーカーの表示・非表示は、方位単位での切り替えではなく、一括での切り替えとなっている。また、各方位マーカーは、3次元地質地盤モデルの分布域の内側からは見えるが、外側からは見えない。



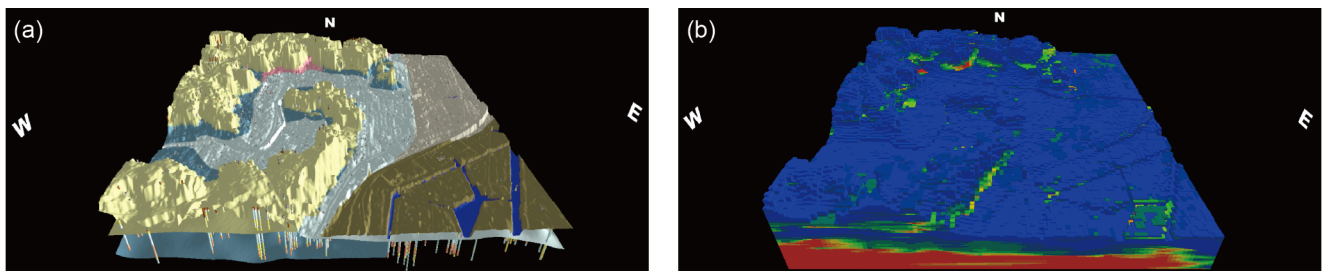
第1図 3次元地質地盤モデルビューアの操作画面。(a)サーフェスモデルビューア、(b)ボクセルモデルビューア、(c)その他の表示設定。



第2図 地図の重畳例。(a)サーフェスモデル、(b)ボクセルモデル (N値)。地図には地理院タイル「淡色地図」を利用。



第3図 スケールの表示例。(a)サーフェスモデル、(b)ボクセルモデル (N値)。



第4図 方位の表示例。(a)サーフェスモデル、(b)ボクセルモデル (N値)。

4. おわりに

都市地下浅部における地層や物性の広がりを出す3次元地質地盤モデルのWebビューアに、地図、スケール、および方位を表示する機能を実装した。これらの機能を用いれば、ビューア上に表示される3次元地質地盤モデルの地理的な位置や大きさを容易に把握できるため、従来よりも正確に地層や物性の分布形態を理解することが可能になる。

本研究で実装した地図表示機能のように、他機関が公開しているGISデータを重畳する機能は、3次元地質地盤モデルの視認性を向上させるだけでなく、分野を超えたデータ連携の強化にもつながると考える。今後は、本研究で実装した機能の公開準備を進めるとともに、どのようなGISデータとの連携が3次元地質地盤モデルの利活用促進に有効

であるかを見極めながら、ビューアの改良を継続していく予定である。

文 献

- 野々垣 進・中澤 努 (2022) WebGLを用いた都市地下浅部の地質サーフェスモデルビューア, 第33回日本情報地質学会講演会 講演要旨集, pp.41-42.
- 野々垣 進・中澤 努 (2023) WebGLを用いた都市地質地盤情報のボクセルモデルビューア, 第34回日本情報地質学会講演会 講演要旨集, pp.39-40.
- 野々垣 進・中澤 努 (2025) 都市平野部における3次元地質地盤図の整備と利活用. 応用地質, Vol.65, no.6, pp. 259-266.

液状化リスク評価のための大阪平野における 地下水の3次元分布把握に関する研究

堂脇 拓海*・米澤 剛*・杉本 賢二*

3D Distribution Analysis of Groundwater for Liquefaction Risk Assessment in the Osaka Plain

Takumi DOWAKI*, Go YONEZAWA *and Kenji SUGIMOTO *

*大阪公立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan
University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
E-mail:sr25491d@st.omu.ac.jp

キーワード： 液状化リスク, 地下水位, 数理最適化, 空間解析, 3次元モデリング, 防災

Key words: Liquefaction Risk, Groundwater Level, Mathematical Optimization, Spatial
Analysis, 3D Modeling, Disaster Prevention

1. はじめに

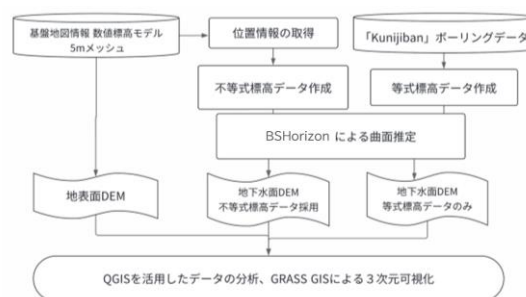
大阪平野は国内有数の地下水貯存地域である。高度経済成長期に過剰な汲み上げが進み、地盤沈下が深刻化した。対策として汲み上げに対する法規制が導入され、地下水位は回復したが、同時に地震時の液状化リスクの増大が指摘されている。

先行研究として、春日井(2023)は250 m メッシュの地盤モデルにより各地層の分布特性、地下水位の深度分布、液状化リスクに関する N 値, PL 値などの指標の分布を可視化し、地下水位低下による地盤沈下量および液状化対策効果の予測を行った。しかしながら、250 m メッシュのモデルでは地下水の分布把握に関して断片的である。液状化は地下水位以深で起こる現象であり、詳細な地下水位把握は液状化リスクを考慮する上で必要不可欠である。

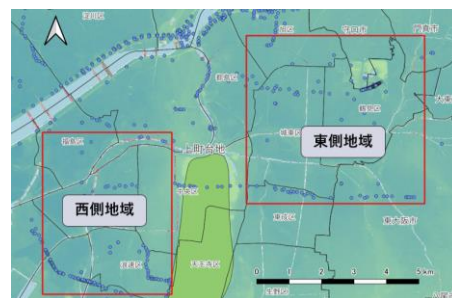
そのため本研究では、地下水面のサーフェスモデルを作成し、地表面の数値標高モデル（以降、DEM）と合わせて表層地盤の3次元モデルの構築を行う。これにより地下水位分布を空間的に把握し防災分野での貢献を目的とする。

2. 研究手法

研究のフローを第1図に示す。本研究では地下水位情報には国土交通省による「Kunijiban」のボーリングデータ、地表面の位置情報およびDEMには国土地理院の提供する「基盤地図情報 数値標高モデル5 m メッシュ」を使用した。ボーリングデータの初期孔内水位が地下水位と強い相関関係があることが示されている（國分ら, 2013）。このため、本研究では初期孔内水位を使用した。研究の対象領域は、先行研究による液状化リスク評価の必要性やデータの分布を考慮して、第2図に示す大阪平野内の2つの領域（東側地域と西側地域）とした。これは大阪平野の地質構造が上町断層を境に東西で大きく異なるためである。



第1図 研究フロー



第2図 研究対象地

3. 曲面推定手法

本研究では Nonogaki *et al.*(2012)の曲面推定プログラム BS-Horizon を用いて地下水面を数値標高モデル (DEM) の形式で作成した。BS-Horizon は双三次スプライン補間と最適化問題の解法の一つである外点ペナルティ関数法を組み合わせた曲面推定手法である。曲面の滑らかさを評価する $J(F)$ とデータの充足度を評価する $R(F)$ を組み合わせた拡大目的関数 $Q(F)$ を(1)式とし、 $Q(F)$ を最小とする最適な曲面 F を最適解とする。ここで、 α は曲面の滑らかさとデー

タ充足度のバランスを調整するパラメータである。

$$Q(F) = J(F) + \alpha R(F) \quad (1)$$

ここで滑らかさを評価する $J(F)$ は、推定する曲面の曲率（第二次導関数）と増減（第一次導関数）により評価され、曲率と増減の重みづけをパラメータにより調節できる。パラメータの設定は、TRAN *et al.* (2017) の研究を参考に調節した。本研究で、この手法を採用したのは制約条件として不等式標高データを採用できるためである。ボーリングデータによる地下水位情報には限りがあり、推定領域内にデータが分布しない空白の領域が多くなってしまう。不等式標高データを用いることで地表面の情報を地下水位よりも高い位置にある測定点として利用することができ、空白領域においても地下水面が地表面より低い位置に推定される長所がある。

4. 研究結果

第3図に推定した地下水面のコンター図、また第4図に西側地域の地下水面を GRASS GIS により 3 次元で可視化したモデルを示す。コンター図の比較から不等式標高データを採用することで、地下水面が地表面より低い位置に推定される。一方で、データがない領域で鉛直下向きに膨らむ傾向にあることがわかった。滑らかさについて、曲率と増減の重みづけにより、推定曲面の形状に差がみられた。特に西側地域において、曲率に重みを置いて滑らかになるように推定すると地表面に沿って推定される傾向が見られた。

また、液状化リスク評価と地下水面の関係を検討するために不等式標高データを採用した地下水面により算出した深度分布図（第5図）と研究対象範囲における液状化指数分布（第6図）を比較した。西側地域では、地下水位が浅い場所で液状化指数が高くなっているが、東側地域では、液状化指数の高いエリアはまばらに分布し、地下水位が浅い場所でも液状化指数が低い場合があることがわかる。

5. 考察および課題

推定した地下水面と既に明らかにされている大阪平野の堆積状況から、液状化リスクに関する考察を述べる。地下水位が浅い地盤では、間隙水圧が高まり有効応力が低下する。これにより、せん断強さを失い地震時に液状化が起りやすくなるため、液状化と地下水位は密接な関係にある。しかし、 N 値や細粒分含有率など表層地質の物性値も液状化に影響する。春日井 (2023) の構築したモデルから、東側地域において、表層の砂層が西側地域と比較して、薄く堆積し、細粒分を多く含んでいることが明らかにされている。東側地域で、地下水位が浅い場所でも液状化リスクが低く推定されるのは、細粒分が多い砂層の下に、粘土層が堆積しているため透水性が悪く、液状化しづらいためであると考えられる。

本研究では、ボーリングデータの孔内水位から大阪平野の一部を対象に地下水面の推定を行い、地下水面の空間的な分布を可視化した。より詳細に液状化リスクを評価するには地下水位のみならず、地盤の情報を踏まえたモデルの構築が必要であり、本研究の課題といえる。

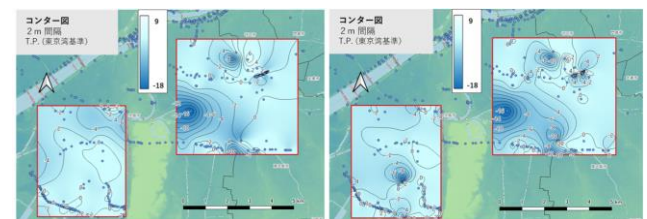
謝辞：本研究は JSPS 科研費 25K04614 の助成を受けたものである。

文 献

春日井麻里(2023)大阪・神戸地域における 250m メッシュ浅層地盤モデルの構築と地下水位低下による地盤沈下量、液状化対策効果の予測、大阪市立大学大学院博士論文。
國分邦紀・石原成幸(2013)地盤情報データを用いた孔内水位と地層厚分布について、平 25.都土木技術支援・人材育成セ

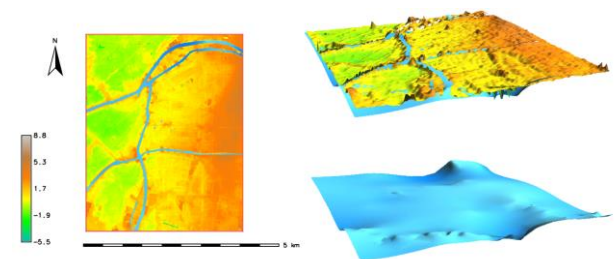
ンター年報。

- Nonogaki, S., Masumoto, S. and Shiono, K. (2012) Gridding of geological surfaces based on equality-inequality constraints from elevation data and trend data. *International Journal of Geoinformatics*, vol.8, no.4, pp.49-60.
Tran T.A., Masumoto S., Raghavan V., Nonogaki S., Yonezawa G. and Nemoto T. (2017) Evaluating Parameters for BS-Horizon Surface Generation Using Elevation Data. *Geoinformatics*, vol.28, no.2, pp.031-050.
国土地理院(2025). ハザードマップポータルサイト.
<https://disaportal.gsi.go.jp/hazardmap/>



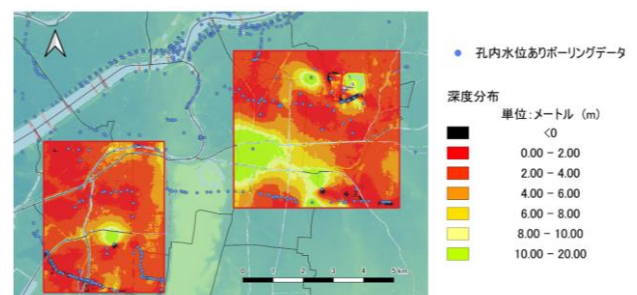
第3図 地下水面のコンター図

左図：等式標高データのみ 右図：不等式標高データ採用

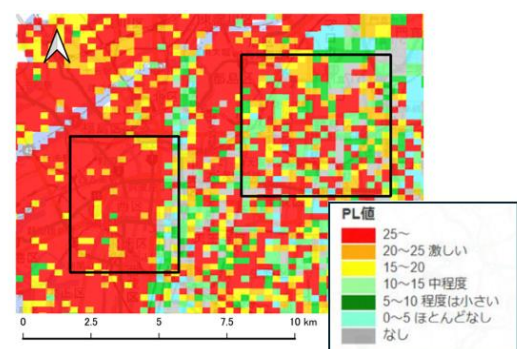


第4図 3次元可視化例（西側地域）

左図：2D表示 ※右図は高さ倍率30倍で表示
右上図：地下水面と地表面 右下図：地下水面のみ表示



第5図 深度分布図



第6図 液状化指数分布
（「ハザードマップポータルサイト」を一部改変）

自然災害がもたらす太陽光パネル廃棄物の発生予測と 埋立地の埋立地容量への影響

上田一嘉*・杉本賢二*・米澤剛*

Prediction of Solar Panel Waste Generation Caused by Natural Disasters and its Impact on Landfill Capacity

Kazuhiro Ueda* and Kenji Sugimoto* and Go Yonezawa*

* 大阪公立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
E-mail: sr25448h@st.omu.ac.jp

キーワード： 地理情報システム, 太陽光発電, 災害廃棄物, 埋立地

Key words: GIS, Solar power generation, Disaster waste, Final disposal sites

1. 背景・目的

2012年に固定資産買い取り制度（FIT）が導入され、太陽光発電施設（以下、PVパネル）が急速に普及されたが、日本は大規模なPVパネルの設置に適した平地が限られており、自然災害のリスクが高い場所に配置されているところもある。また、自然災害による廃棄物は様々な地点において発生する恐れがあるため、災害時の円滑な廃棄物処理には空間分布を踏まえた検討が必要であると考えられる。

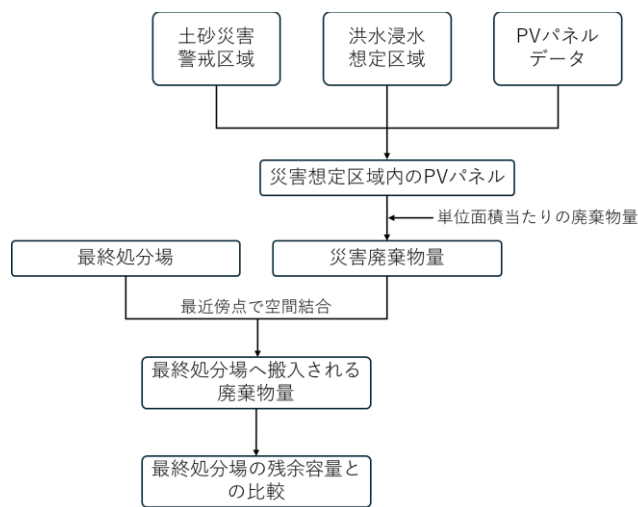
先行研究として福田ら（2021）は、使用済みPVパネルが最終処分場（埋立地）の残余容量へ与える影響を検討しているが、対象地が北海道のみであり日本全国において推計はされていないことが課題である。また、田畑（2019）は自然災害におけるPVパネルの廃棄物発生量を推計しているが、埋立地の残余容量への評価をしていないことが課題である。さらに、Haoら（2021）は、日本を対象地として災害想定区域のデータとPVパネルの立地データを比較し、災害リスクのある地域に位置するPVパネルの数を調査している。しかし実際の被害規模は推計されていないことが課題である。

そこで本研究では、土砂災害及び水害によって発生する廃棄物量を部材別に推計する。その後、廃棄物が各埋立地の残余容量へ与える影響を評価する。本研究の目的は、太陽光パネルが土砂災害や水害などの自然災害により破損した場合における廃棄物量を予測し、輸送先を予測することで、廃棄物処理の迅速な対応に貢献することである。

2. 研究の流れ

研究フローチャートを第1図に示す。まず、災害廃棄物量の推計を行う。これに使用するデータのの一つであるPVパネルデータは、Kimら（2020）の「Solar PV data」を利用する。本データは、500 kw以上のPVパネルのみを対象としている。リモートセンシングによる衛星画像と位置補正されたPVパネルの点データを用い、デジタル化することで作成されている。また、洪水浸水想定区域については、想定最大規模を使用する。本研究では、土砂災害警戒区域と洪水浸水想定区域を総称して災害想定区域と呼ぶ。その後、PVパネルから発生した廃棄物が最も近い埋立地に搬入される

と仮定し、最近傍点で空間結合を行う。埋立地には不燃ごみのみが運ばれると仮定する。



第1図 研究フロー

3. 研究方法

3.1 廃棄物の発生予測

災害想定区域に該当するPVパネルの廃棄物量は式(1)で算出する。

$$Z = kSn \quad \dots (1)$$

ここで、 k , S , n はそれぞれ「傾きを考慮した補正係数」「災害想定区域に位置するPVパネルの面積」「単位面積当たりの部材別廃棄物量」である。予測の際、部材別に単位面積当たりの廃棄物量と比重を仮定する。その数値は経済産業省の太陽光発電システムの構造設計例を基にする。部材にはセル、ガラス、アルミニウム、プラスチック、銅はんだ、鋼鉄、コンクリートが含まれる。仮定した諸量を第1表に示す。また、PVパネルは傾斜をつけて設置するため、推計にあたり傾斜を考慮した係数 k を用いる。 k を式(2)に示す。

$$k = \frac{1}{\cos 30^\circ} \quad \dots (2)$$

第1表 仮定した諸量

部材	面積当たりの 廃棄物量(kg/m ²)	比重(t/m ³)
セル(結晶シリコン)	0.48	2.3
ガラス	8.76	2.5
アルミニウム	2.19	2.7
プラスチック	2.48	1.0
電極(銅 はんだ)	0.11	8.5
鋼鉄	16.70	7.8
コンクリート	107.07	2.3

3.2 埋立地容量への影響

本研究では、被災した PV パネルが最近隣の埋立地に運ばれると仮定し、不燃ごみのみを運ぶものとするため、コンクリートを埋立地の残余容量分析からは除外する。その後、最近傍点による空間結合を用いて PV パネルと埋立地の属性データを結合する。空間結合とは、フィーチャの位置関係に基づいて属性を結合する手法である。その後、廃棄物量の残余容量に対する割合 X を式(3)で求める。

$$X = \frac{\text{搬入される廃棄物量}}{\text{埋立地の残余容量}} \quad \dots (3)$$

4. 結果

第2図に土砂災害による廃棄物量の予測結果を示す。廃棄物量の合計は約 102 万 t となった。分布傾向としては、関東平野や四国、日本海側は被害規模が小さいことが分かった。第3図に水害による廃棄物量の予測結果を示す。廃棄物量の合計は約 522 万 t となった。自然災害による廃棄物量の合計は約 250 万 m³ となった。このうち、不燃ごみとして分析に使用されるものはコンクリート以外の部材であるので、約 40 万 m³ となる。

第4図に埋立地に与える影響の割合 X を色分けした分布図を示す。廃棄物量の残余容量に対する割合が 0%以上 50%未満の埋立地は 495 個、50%以上 100%未満の埋立地は 29 個、100%以上の埋立地は 42 個である。容量超過する埋立地は全国的に分布していることが特徴である。

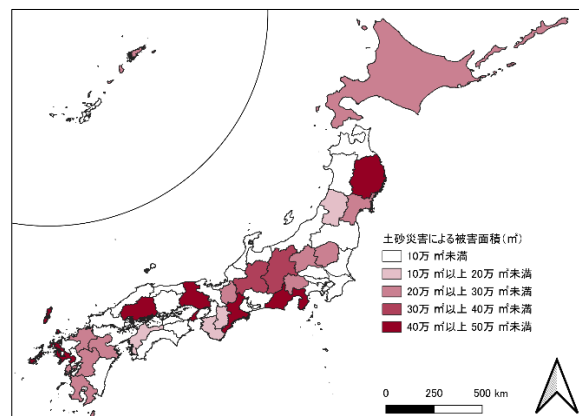
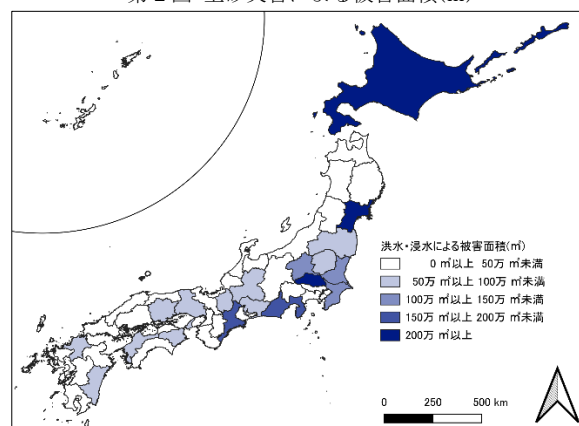
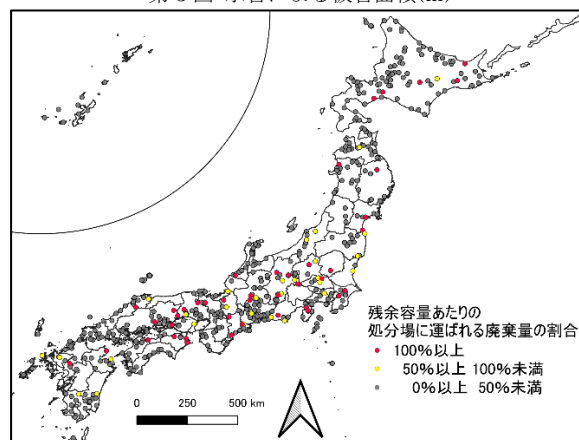
5. まとめ

本研究は、PV パネルが土砂災害や水害により破損した場合の迅速な対応に貢献することを目的とした。そのために、オープンデータを用いた自然災害によって発生する廃棄物発生予測と最寄りの埋立地へ運ばれる際の残余容量に与える影響を評価した。

分析結果からわかるのは、多くの埋立地が廃棄物の受け入れに対応できる一方で、一部では容量を超える廃棄物が存在していることである。これにより、最近隣の埋立地に搬入するといくつかの埋立地が過負荷状態になるため、最適な廃棄物の分散輸送が求められることが分かった。

6. 課題

今後の課題は、使用したパネルのデータが 500 kw 以上のみに限定されているため、小規模の PV パネルを検出し、被害規模を推計することである。次に、土砂災害警戒区域が民家や住宅の存在する場所に設定されるため、居住地から遠い山間部に設置されている PV パネルの被害規模を評価することである。最後に、実際の自然災害は家屋等の廃棄物量も発生させることから、それを踏まえた分析も必要である。

第2図 土砂災害による被害面積(m²)第3図 水害による被害面積(m³)

第4図 埋立地の分析結果

文 献

- 福田陽一朗, 山口勝透, 朝倉賢 (2021) 北海道における使用済み太陽光パネルが最終処分場の残余容量へ与える影響の検討. 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集
- 田畑智博 (2019) 自然災害に伴う太陽光発電システムの被害, 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集
- Kazuki Hao, Dimiter Ialnazov, Yosuke Yamashiki (2021) GIS Analysis of Solar PV Locations and Disaster Risk Areas in Japan, *Frontiers in Sustainability*, Vol.2, p.1-9
- Kim JY, Koide D, Ishihama F, Kadoya T, and Nishihiro J. (2020) Solar PV data: Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats, *Science of the Total Environment*, Vol.770, 146475

第36回日本情報地球学会講演会

講演要旨集

2025年6月17日 発行

発行 日本情報地球学会
〒225-0003 横浜市青葉区新石川3-22-1
国学院大学 人間開発学部内
