

第37回日本情報地球学会講演会

講演要旨集

GEOINFORUM-2026 Annual Meeting Abstracts

日 時：2026年6月18日(木)・19日(金)

会 場：北海道大学 学術交流会館(札幌)

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

一般講演

数理・論理

- 露頭断面中の試料に含まれる微化石から設定した化石帯の最小区間の和集合による離散表現 —タクソン区間帯と間隔帯— ……………山口 久美子・塩野 清治 1
- 地形面の変化に基づく斜面崩壊地形の数学表現……………植田 允教・根本 達也・サムブツダ ダル・ベンカテッシュ ラガワン 3

物理探査・装置開発

- 偏波特性を利用した地中レーダ探査法による浅部地下構造の推定精度向上……………飛田 和輝・久保 大樹・小池 克明 5

リモートセンシング

- 衛星画像の反射スペクトル情報に基づく鉱物・地熱資源の存在可能性評価への新たなアプローチ……………小池 克明・久保 大樹・池内 翔哉・藤田 佑希也・岸本 将英 7

画像処理

- ウェブブラウザのネイティブ画像処理における RGB 値不一致とその影響……………北尾 馨 9
- 360 度動画によるリアリティキャプチャ技術を用いた現地踏査の事例とその精度……………鏡原 聖史・立川 浩祥・塩谷 智基・麻植 久史・福地 良彦・久保 大樹 11
- 3D Gaussian Splatting を用いた現場の可視化と遠隔臨場への適用に関する有効性……………片平 大暉・立川 浩祥・石引 暖也・木下 大也・真柄 毅・松本 浩一 13
- BIM/CIM モデルから生成 AI を経由した 3D Gaussian Splatting の構築手法に関する研究……………石引 暖也・立川 浩祥・片平 大暉・木下 大也・真柄 毅・松本 浩一 15

地質モデリング

- 大賀の押被の解釈の変遷……………能美 洋介・鈴木 茂之 17

GIS・Web-GIS

- 疑似人流データを用いた大規模地震発生時における帰宅困難者の推定……………山本 大心・米澤 剛・杉本 賢二 19
- シームレス標高タイルバージョン 2 の公開……………西岡 芳晴 21
- 二次元地形図を三次元的に表現する際の留意点……………中田 文雄 23

データベース

- 信頼性評価を活用した地層対比支援システムの開発……………櫻井 健一・米澤 剛・根本 達也 25
- 地層処分事業のサイト調査を支えるデータマネジメントシステムの詳細設計……………西尾 光 27

解析手法・応用

- 漂流海洋ブイ位置データと海洋再解析データを用いた北太平洋における水平拡散係数値の推定……………杉山 徹・西川 悠・藤木 徹一・野口 真希・宮澤 泰正・木戸 晶一郎・飯沼 卓史・桑谷 立 29
- 三次元地形における地震応答解析 (FEM) 結果の評価手法に関する一考察……………吉田 力・片平 大暉・樋上 広篤・櫻井 稜太 31

Optimizing machine learning models for landslide susceptibility mapping in Yen Bai Province, Vietnam	
..... Tran Tung Lam · Tatsuya Nemoto · Sambuddha Dhar · Truong Xuan Quang · Venkatesh Raghavan	33
Spatial modelling of groundwater potential zones using GIS-based machine learning techniques: a case study of Abuja, Nigeria	
..... Danlami Ibrahim · Tatsuya Nemoto · Venkatesh Raghavan · Sambuddha Dhar	35
温泉析出の鉄ミョウバン石の SO ₄ イオンと温泉中の δ ¹⁸ O の比較による火山活動期での深部熱水混合率推定の試み.....	
.....山本 睦徳・柏谷 公希・小池 克明	37
地球統計学的手法を用いた斑岩銅鉱床の富鉱部の空間モデリングと形成要因の解釈.....	
..... 龍前 祥太郎・Vitor Ribeiro de Sá・小池 克明・田中 隆之	39
機械学習による熱水鉱床生成に関連した火成岩類の化学組成の相違.....	
..... 谷口 卓也・小池 克明	41
火山岩化学組成と基盤岩構造に基づく北鹿地域での黒鉱鉱床分布の特徴抽出.....	
..... 徳富 拓樹・小池 克明	43

ポスター発表

3D 都市モデルと疑似人流データを用いた都市活動分布と回遊性評価に関する研究	
.....金野 百花・米澤 剛・杉本 賢二	45
簡便な画像処理による砂岩岩脈の粒子配列解析法.....	
.....藪田 桜子・安邊 啓明・竹内 誠	47
Wave Glider の漂流データに基づく黒潮域の水平拡散係数の推定.....	
.....北代 達也・谷口 文菜・西川 悠・飯沼 卓史・杉山 徹・宮澤 泰正・木戸 晶一郎・吉田 毅郎・桑谷 立	49
灰色関連分析とクラスター分析の統合による避難所の適正性評価手法の開発ー高知市を対象としてー.....	
..... 楠 竜太郎・根本 達也・サムブッタ ダル・ベンカテッシュ ラガワン	51
階層分析法とクラスタリングを用いた地すべり危険度マッピング.....	
.....植田 允教・前田 敦・根本 達也・サムブッタ ダル・ベンカテッシュ ラガワン	53
Tensor Voting とハフ変換を用いた地形特徴量によるリニアメントの抽出	
..... 根本 達也・中村 公亮・サムブッタ ダル・ベンカテッシュ ラガワン	55

CONTENTS

General session

Mathematics and logic

- Discrete expression of taxon-range zone and interval zone established by micro fossils contents of specimens in an outcrop section in a form of unions of short intervals Kumiko Yamaguchi and Kiyoji Shiono 1
- Mathematical expression of slope failure features based on topographic surface transformation Mitsunori Ueda, Tatsuya Nemoto, Sambuddha Dhar and Venkatesh Raghavan 3

Geophysical survey and observation system

- Improving the estimation accuracy of shallow subsurface structures using a ground penetrating radar exploration method with polarization properties Kazuki Tobita, Taiki Kubo and Katsuaki Koike 5

Remote sensing

- New approaches to potential assessments of mineral and geothermal resources based on reflectance spectra information of satellite imagery Katsuaki Koike, Taiki Kubo, Shoya Ikeuchi, Yukiya Fujita and Masahide Kishimoto 7

Image Processing

- RGB value discrepancies in web browser image processing and their implications Kaoru Kitao 9
- Case study and accuracy assessment of field surveys using 360-degree video-based reality capture technology Satoshi Kagamihara, Hiroyoshi Tachikawa, Tomoki Shiotani, Hisafumi Asaue, Yoshihiko Fukuchi and Taiki Kubo 11
- Effectiveness of site visualization using 3D Gaussian splatting and its application to remote inspection Daiki Katahira, Hiroyoshi Tachikawa, Atsuya Ishibiki, Hiroya Kinoshita, Takeshi Magara and Kouichi Matsumoto 13
- Research on a construction method for 3D Gaussian splatting from BIM/CIM models via generative AI Atsuya Ishibiki, Hiroyoshi Tachikawa, Daiki Katahira, Hiroya Kinoshita, Takeshi Magara and Kouichi Matsumoto 15

Geologic modeling

- The changing interpretation of Oga Thrust Yousuke Noumi and Shigeyuki Suzuki 17

GIS•Web-GIS

- Spatiotemporal analysis of stranded commuters during large-scale earthquakes using pseudo people flow data Taishin Yamamoto, Go Yonezawa and Kenji Sugimoto 19
- Release of Seamless Elevation Tiles version 2 Yoshiharu Nishioka 21
- Points to consider when representing two-dimensional topographic map in three dimensions Fumio Nakada 23

Database

- Development of a stratigraphic correlation support system using reliability assessment Kenichi Sakurai, Go Yonezawa and Tatsuya Nemoto 25
- Detailed design of a data management system supporting site investigations for geological disposal projects Hikaru Nishio 27

Data analyses and applications

Estimation of horizontal diffusion coefficients in the North Pacific region using drifted buoy position data and ocean reanalysis data	Toru Sugiyama, Haruka Nishikawa, Tetsuichi Fujiki, Maki Noguchi Yasumasa Miyazawa, Shoichiro Kido, Takeshi Iinuma and Tatsu Kuwatani	29
A consideration of evaluation methods for the results of seismic response analysis (FEM) in three-dimensional topography	Chikara Yoshida, Daiki Katahira, Hiroshige Higami and Ryota Sakurai	31
Optimizing machine learning models for landslide susceptibility mapping in Yen Bai Province, Vietnam	Tran Tung Lam, Tatsuya Nemoto, Sambuddha Dhar, Truong Xuan Quang and Venkatesh Raghavan	33
Spatial modelling of groundwater potential zones using GIS-based machine learning techniques: a case study of Abuja, Nigeria	Danlami Ibrahim, Tatsuya Nemoto, Venkatesh Raghavan and Sambuddha Dhar	35
An attempt to estimate the mixing ratio of deep hydrothermal fluids in active periods of volcano based on a comparison of $\delta^{18}\text{O}$ values in SO_4 ions in jarosite deposits from hot springs with hot spring waters	Mutsunori Yamamoto, Koki Kashiwaya and Katsuaki Koike	37
Geostatistical spatial modeling of high-grade zone in a porphyry copper deposit and interpretation of its formation factors	Shotaro Ryumae, Vitor Ribeiro de Sá, Katsuaki Koike and Takayuki Tanaka	39
Differences in chemical compositions of igneous rocks related to generation of hydrothermal deposits by machine learning methods	Takuya Taniguchi and Katsuaki Koike	41
Characterizing distribution of kuroko deposits in the Hokuroku District based on chemical composition of volcanic rocks and basement structure	Hiroki Tokutomi and Katsuaki Koike	43

Poster session

Evaluation of urban activity distribution and excursion based on 3D city models and pseudo people flow	Momoka Konno, Go Yonezawa and Kenji Sugimoto	45
A method for analyzing the grain arrangement of sandstone dikes using simple image processing	Sakurako Yabuta, Noriaki Abe and Makoto Takeuchi	47
Estimation of horizontal diffusion coefficients in the Kuroshio Region using based on the drifted Wave Glider track	Tatsuya Kitadai, Ayana Yaguchi, Haruka Nishikawa, Takeshi Iinuma, Toru Sugiyama Yasumasa Miyazawa, Shoichiro Kido, Takero Yoshida and Tatsu Kuwatani	49
Development of an evaluation method for shelter suitability by integrating grey relational analysis and cluster analysis: a case study of Kochi City	Ryutaro Kusu, Tatsuya Nemoto, Sambuddha Dhar and Venkatesh Raghavan	51
Landslide susceptibility zonation using AHP and clustering approach	Mitsunori Ueda, Atsushi Maeda, Tatsuya Nemoto, Sambuddha Dhar and Venkatesh Raghavan	53
Lineament extraction based on topographic features using Tensor Voting and Hough transform	Tatsuya Nemoto, Kosuke Nakamura, Sambuddha Dhar and Venkatesh Raghavan	55

露頭断面中の試料に含まれる微化石から設定した化石帯の 最小区間の和集合による離散表現 —タクソン区間帯と間隔帯—

山口 久美子*・塩野 清治**

Discrete Expression of Taxon-Range Zone and Interval Zone Established by Micro Fossils Contents of Specimens in an Outcrop Section in a Form of Unions of Short Intervals

Kumiko YAMAGUCHI* and Kiyoji SHIONO**

* Midorigaoka, Heguri-cho, 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, Osaka 567-0844, Japan.

キーワード：生層序学，生層序单元，生層序区分，半開区間，論理地質学

Key words: Biostratigraphy, Biostratigraphic unit, Biostratigraphic classification, Semi-open interval, Geology-Oriented Logical System

1. はじめに

地質データを有効にコンピューター処理するために，地質学概念を離散表現する必要がある。生層序学の目的の1つは，層序断面の地層中の化石から化石帯(生層序单元)を編成することである。山口・塩野(2025)は露頭断面中の試料から設定した化石帯を最小区間の和集合で離散表現した。今回は，試料中のタクソン化石の分類結果が，化石帯の種類の中のタクソン区間帯および間隔帯の最小区間の和集合による離散表現に直結することを報告する。なお，タクソン(複数はタクサ)は種，属，科，目などの生物の分類群である。タクソン区間帯は層序断面中の特定のタクソン化石の産出範囲であるが，本研究で離散表現するタクソン区間帯は露頭断面中の放散虫など微化石のタクソン化石の産出範囲である。タクソン区間帯の最下限，最上限が，それぞれ，タクソン化石の初産出生層準，最終産出生層準であり，間隔帯は2つの特定の生層準間の化石を含む区間である(Amos Ed., 1994/日本地質学会訳編，2001)。

2. 露頭断面中の試料から暫定的に設定したタクソン区間帯の離散表現

この章は山口・塩野(2025)と同様である。

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。層序断面全体を， L 上の半開区間 $[x_0, y_0)$ ：

$$[x_0, y_0) = \{ p \mid x_0 \leq p < y_0, p \text{ は実数.} \} \quad (1)$$

とする。 Σ をある特定のタクソンとする。 Σ 区間帯を L 上の $[x, y)$ と仮定する。 $[x_0, y_0)$ 内の $[x, y)$ で Σ 化石が産出する。

2.2. 採取試料から暫定的に設定したタクソン区間帯

本研究では，層序断面は露頭断面あるいは深海掘削ボーリングで取り出したコアであり，これらを「露頭断面」とよぶ， Σ を放散虫などのタクソンとする。 Σ 区間帯 $[x, y)$ は不明

である。そこで， 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， p_i, p_{i+1}, \dots, p_j ($2 \leq i \leq j \leq n-1$) の試料に Σ 化石が含まれているとき(第1図(a))，暫定的に Σ 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， Σ 区間帯 $r(\Sigma)$ を

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

と設定する(第1図(b))。

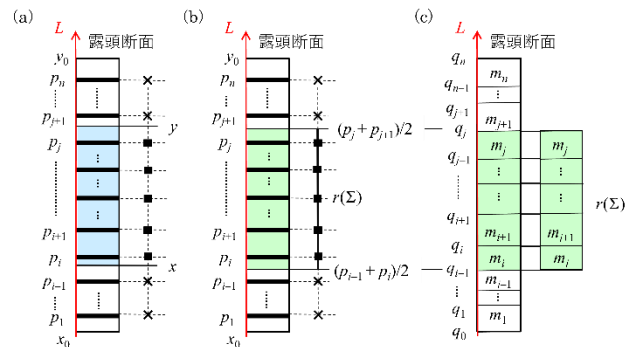
2.3. 最小区間の和集合によるタクソン区間帯の離散表現

p_i と p_{i+1} の中間地点 $1/2(p_i + p_{i+1})$ を q_i ， $[x_0, y_0)$ の x_0, y_0 をそれぞれ q_0, q_n とする。 p_i を含む最小区間 m_i を

$$m_i = [q_{i-1}, q_i) \quad (3)$$

と設定する。 p_i, p_{i+1}, \dots, p_j の試料中に Σ 化石が含まれているとき， $r(\Sigma)$ は最小区間 m_i, m_{i+1}, \dots, m_j の和集合である(第1図(c))：

$$r(\Sigma) = m_i \cup m_{i+1} \cup \dots \cup m_j. \quad (4)$$



第1図 (a) $[x_0, y_0)$ 内の地点 p_1, p_2, \dots, p_n の試料中の Σ 化石の有無。■の p_i, p_{i+1}, \dots, p_j の試料中に Σ 化石がある。図中の水色部分は Σ 区間帯 $[x, y)$ である。(b) 暫定的に設定した Σ 区間帯 $r(\Sigma)$ 。 $r(\Sigma)$ は $[1/2(p_{i-1} + p_i), 1/2(p_j + p_{j+1}))$ で，図中の緑色部分である。(c) 最小区間の和集合で離散表現した $r(\Sigma)$ 。 $r(\Sigma)$ は $m_i \cup m_{i+1} \cup \dots \cup m_j$ である。

3. 試料中の化石の分類結果から設定したタクソン区間帯の離散表現

3.1 Σ 化石を種に分類した結果

試料中の Σ 化石を種に分類する. 分類結果として, 採取地点 p_i と, 試料に含まれる Σ 化石の種を記号+でチェックする表を作る (例えば, 第1表). 表の1列目は地点 p_i で, 下の行から $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ と並べて上下関係を表す.

第1表 Σ 化石を種に分類した結果の例

地点 p_i	試料に含まれる Σ 化石の種					
	α	β	γ	δ	ε	ζ
p_9						
p_8						+
p_7				+	+	+
p_6		+		+	+	
p_5		+	+	+		
p_4		+	+	+		
p_3	+	+	+			
p_2	+	+				
p_1						

3-2. 分類結果から設定したタクソン区間帯の離散表現

第1表のチェックした記号+を最小区間に書き換えて緑色で示すと, (4)で離散表現した α 区間帯 $r(\alpha)$, β 区間帯 $r(\beta)$, γ 区間帯 $r(\gamma)$, δ 区間帯 $r(\delta)$, ε 区間帯 $r(\varepsilon)$, ζ 区間帯 $r(\zeta)$ を表示できる (第2表). 地点 p_i を表示する行の幅で, 最小区間 m_i が占める範囲を表すと, タクソン区間帯の範囲も表示できる. 例えば, α 区間帯 $r(\alpha)$ は $m_2U_{m_3}$ である.

第2表 最小区間の和集合で離散表現したタクソン区間帯.

地点 p_i	タクソン区間帯					
	α	β	γ	δ	ε	ζ
p_9						
p_8						m_8
p_7				m_7	m_7	m_7
p_6		m_6		m_6	m_6	
p_5		m_5	m_5	m_5		
p_4		m_4	m_4	m_4		
p_3	m_3	m_3	m_3			
p_2	m_2	m_2				
p_1						

4. 試料中の化石の種の集合で設定される区間帯の離散表現

4-1. 地点 p_i の試料に含まれる Σ 化石の種の集合 $f(p_i)$

地点 p_i の試料に含まれる Σ 化石の種の集合を $f(p_i)$ とする. 第3表は, 第2表の1列目の地点 p_i と2列目のタクソン区間帯の列の間に $f(p_i)$ を挿入した表である. 例えば, p_2 の試料に α 化石と β 化石が含まれて, $f(p_2) = \{\alpha, \beta\}$ である.

4-2. 化石帯 $U(f(p_i))$: $f(p_i)$ 区間帯

$f(p_i)$ の種の化石だけが産出すると設定する L 上の範囲を $U(f(p_i))$ とする. 山口・塩野(2025)より, $U(f(p_i))$ は,

$$U(f(p_i)) = (\bigcap_{\alpha \in f(p_i)} r(\alpha)) \cap (\bigcap_{\beta \in f(p_i)^c} r(\beta)^c). \quad (5)$$

(5)は最小区間の和集合であるから, $U(f(p_i))$ は $f(p_i) = f(p_i)$ であるすべての最小区間 m_j の和集合で離散表現される:

$$U(f(p_i)) = \bigcup_{j \in \{j | f(p_i) = f(p_j)\}} m_j. \quad (6)$$

$f(p_i) = \phi$ である $U(f(\phi))$ を無産出区間と設定する. $f(p_i) \neq \phi$, かつ, 1つの半开区間である $U(f(p_i))$ を化石帯と設定す

第3表 地点 p_i の試料の Σ 化石の種の集合 $f(p_i)$ とタクソン区間帯

地点 p_i	種の集合 $f(p_i)$	タクソン区間帯					
		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4表 $f(p_i)$ 区間帯で区分した Σ 生層序.

地点 p_i	Σ 生層序 $U(f(p_i))$	タクソン区間帯					
		α	β	γ	δ	ε	ζ
p_9	無産出区間						
p_8	$\{\zeta\}$ 区間帯						m_8
p_7	$\{\delta, \varepsilon, \zeta\}$ 区間帯				m_7	m_7	m_7
p_6	$\{\beta, \delta, \varepsilon\}$ 区間帯		m_6		m_6	m_6	
p_5	$\{\beta, \gamma, \delta\}$ 区間帯		m_5	m_5	m_5		
p_4	$\{\beta, \gamma, \delta\}$ 区間帯		m_4	m_4	m_4		
p_3	$\{\alpha, \beta, \gamma\}$ 区間帯	m_3	m_3	m_3			
p_2	$\{\alpha, \beta\}$ 区間帯	m_2	m_2				
p_1	無産出区間						

る. この化石帯の種類は区間帯である. 本研究では, この $U(f(p_i))$ を「 $f(p_i)$ 区間帯」とよぶ. $f(p_i) \neq \phi$ である $U(f(p_i))$ がすべて $f(p_i)$ 区間帯であるとき, $f(p_i)$ 区間帯で区分した Σ 生層序を設定する. 第3表の2列目の $f(p_i)$ を $U(f(p_i))$ の名称に書き換えて, $f(p_i)$ 区間帯で区分した Σ 生層序を表示した (第4表). 例えば, 第4表で, $f(p_2) = \{\alpha, \beta\}$ の $U(\{\alpha, \beta\})$ は, (6)より, m_2 であり, α あるいは β の初産出生層準と γ の初産出生層準間の区間で区間帯である. $U(\{\alpha, \beta\})$ は $\{\alpha, \beta\}$ 区間帯である.

5. おわりに

(3)で地点 p_i を含む最小区間 m_i を設定して, 試料中の化石の有無, 試料中の化石の種の集合 $f(p_i)$ は, それぞれ, (4)のタクソン区間帯, (6)の $f(p_i)$ 区間帯の離散表現につながる. また, 試料中の化石の分類結果を示す第1表, 第3表は, それぞれ, (4)のタクソン区間帯, (6)の $f(p_i)$ 区間帯の離散表現を表示する第2表, 第4表に直結する.

本研究では, 大阪公立大学国際基幹教育研究院の桑原希世子教授に, 生層序学の用語についてご教示いただきました. 深く感謝申し上げます.

文 献

- Amos Salvador (Ed.) (1994) *International Stratigraphic Guide: A Guide Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure, Second edition*. The Geological Society of America, Inc. 214p. ISBN: 0-137-7401-2 (アムス・サルヴァードル(編), 日本地質学会(訳編) (2001) 国際層序ガイド—層序区分・用語法・手順へのガイド. 共立出版, 238p. ISBN: 4-320-04638-2)
- 山口久美子・塩野清治 (2025) 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. 第36回日本情報地球学会 講演要旨集, pp.23-24.

地形面の変化に基づく斜面崩壊地形の数学表現

植田 允教*・根本 達也*・サムブッタ ダル*・ベンカテッシュ ラガワン*

Mathematical Expression of Slope Failure Features Based on Topographic Surface Transformation

Mitsunori UEDA*, Tatsuya NEMOTO*, Sambuddha DHAR* 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: so22000t@st.omu.ac.jp

キーワード：地形変化，局所座標系，斜面崩壊地，地形分類

Key words：Topographic transformation, Local coordinate system, Slope failure area, Terrain classification

1. はじめに

斜面崩壊は，世界中で発生する代表的な地質災害の一つであり，崩壊の発生によって形成される地形面は複数の形態的特徴に区分される (Schuster *et al.*, 1978). そのため，地形面の特徴は，崩壊地の識別に有効だけでなく，規模，形状，流下方向や移動土量を明らかにするための重要な情報を提供する。したがって，斜面崩壊地形を数学的に表現し，自動的に識別する手法の開発が重要である。

本研究では，斜面崩壊の発生域を斜面崩壊地とし，地形面の変化から崩壊地形を数学的に表現するとともに，崩壊地における形態的特徴の識別を行う。

2. 斜面崩壊地形の数学表現

2.1 斜面崩壊地形の定義

斜面崩壊地形は，斜面崩壊によって形成される地形であり，滑落崖とその直下にある移動体から構成される。斜面崩壊地の概念を第 1 図に示す。滑落崖は，斜面崩壊の地下にあるせん断面が地表に露出することで形成される急崖をなす地形面である。せん断面を境にして既存の斜面から切り離された領域を移動体と呼び，移動体における地形面を移動体上面とする。移動体上面をせん断沈降面と末端隆起面に分類する。せん断沈降面は，斜面の構成物質が移動することで標高が低下した地形面とし，末端隆起面は，崩壊による押出または崩積土の堆積により標高が上昇した面とする。

斜面崩壊地形は，滑落崖と移動体上面（せん断沈降面もしくは末端隆起面）に分類される。一方，変化が認められない地形面を不動域と定義する。

2.2 時間経過による地形面の変化

3次元空間を Ω とし， Ω には原点 O ，水平東向きに x 軸，水平北向きに y 軸，鉛直上向きに z 軸を持つ座標系 $O-xyz$ が設定されているとする。 Ω において，ある時間における地形面があるとし，一価関数 $z=f(x, y)$ で表現できるとする。ただし， $z=f(x, y)$ は任意の閉区間 $[a, b]$ で連続，開区間 (a, b) で微分可能であるとする。過去から現在に向かって時間を切り取って並べた離散的な数列を $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, n\}$ とし，斜面崩壊前のある時間 $t \in T$ における地形面を $S_t: z_t = f_t(x, y)$ ，崩壊後の地形面を $S_{t+1}: z_{t+1} = f_{t+1}(x, y)$ と定義

する。 S_t と S_{t+1} の局所的な相対的变化に着目する。鉛直方向における曲面の変化は，ある基準面からの変化であり，地形面では標高差に対応する (式 (1))。よって，地形面の変化は各地点において標高が上がった地点 P_u と標高が下がった地点 P_s に分けられる (式 (2) (3))。

$$\delta_t(x, y) = f_{t+1}(x, y) - f_t(x, y) \quad (1)$$

$$P_u(x, y, z) = \{P_{t+1}(x, y, f_{t+1}(x, y)) \in S_{t+1} | \delta_t(x, y) > 0\} \quad (2)$$

$$P_s(x, y, z) = \{P_{t+1}(x, y, f_{t+1}(x, y)) \in S_{t+1} | \delta_t(x, y) < 0\} \quad (3)$$

曲面の幾何的な変化を導入するため， S_{t+1} 上の点 P_{t+1} を含む近傍の領域 U をとり， P_{t+1} と同じ (x, y) 座標で S_t 上にある点 P_t を考える。 P_t における地上方向を向く単位法線ベクトルを b_{pt} とし，平行移動により始点を P_{t+1} に移したベクトルを b_{pt+1} と定義する。近傍の領域 U と $\phi(U)$ の間に同相写像 ϕ を定めると， U における局所座標系 $\phi(U) = (\mathbf{d}, \mathbf{s}, \mathbf{a})$ を定義できる。3つのベクトルは次の通りとする。

\mathbf{d} : 地形面の最大傾斜方向の単位ベクトル

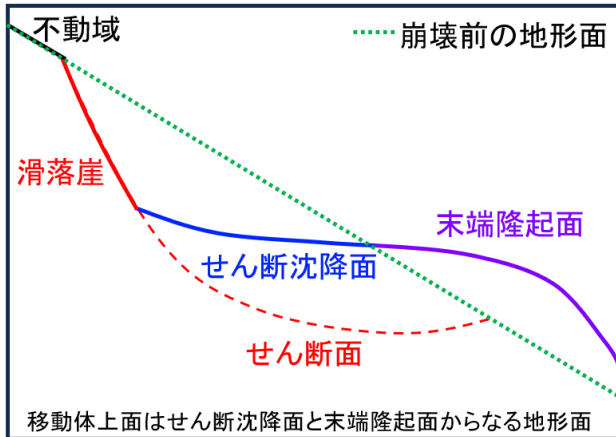
\mathbf{s} : 地形面の傾斜している方向からみて，水平右方向を向く単位ベクトル

\mathbf{a} : 地形面に垂直でかつ地上方向を向く単位法線ベクトル
各ベクトルはそれぞれ直交する関係にある。傾斜角 θ は， U に対する接ベクトル平面 \mathbf{ds} と水平面のなす角とする。傾斜角 θ を一定とした場合， $\phi(U)$ 上にあるベクトル b_{pt+1} は $|b_{pt+1}| = 1$ であるため， \mathbf{a} と b_{pt+1} 間の変化は $\phi(U)$ における天頂角と方位角により定まる。それぞれを相対傾斜角 ϕ と相対傾斜方位 μ と呼ぶ (第 2 図)。 ϕ は \mathbf{a} と b_{pt+1} のなす角， μ は \mathbf{d} と \mathbf{q} のなす角であり， \mathbf{q} は b_{pt+1} を \mathbf{ds} 平面上に投影したベクトルである。よって， S_t から S_{t+1} への局所的な変化は， δ ， θ ， ϕ ， μ により定まる。また，不動域は， $\mathbf{a} = b_{pt}$ が成り立つ地点であるため，次式により定まる。

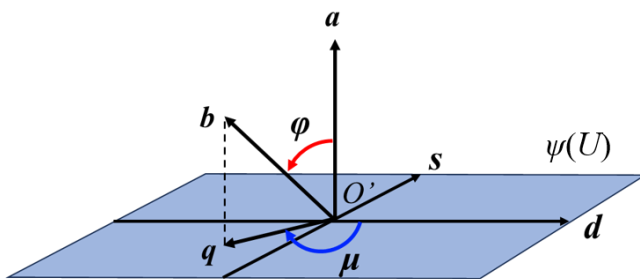
$$\mathbf{a} = \delta R b_{pt} \quad (4)$$

$$R\delta = \begin{bmatrix} R & \delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = I \quad (5)$$

ここで， δ は b_{pt} から b_{pt+1} への移動量， R は ϕ と μ からなる \mathbf{a} と b_{pt+1} 間の変化の大きさ， I は単位行列である。



第1図 斜面崩壊地形の概念



第2図 地形面における相対傾斜角と相対傾斜方位

2.3 地形面を分類する関数 F

地形変化から斜面崩壊地の滑落崖、せん断沈降面、末端隆起面を識別する。変化後の地形面 S_{t+1} 上の各点に対し、局所的な変化を示す $\delta, \theta, \phi, \mu$ に基づいて、地形 i が与えられるとする。各地点で地形 i を定める関数を F とすると次式のように定義できる。ただし、 S_{t+1} 上の各地点は必ずただ1つの地形に分類されるとする。

$$F: (\delta, \theta, \phi, \mu) \rightarrow L \quad (6)$$

$$L = \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \quad (7)$$

斜面崩壊地形を L と対応づけると変化の特徴から地形面を斜面崩壊地形に分類する関数 F は式 (8) となる。

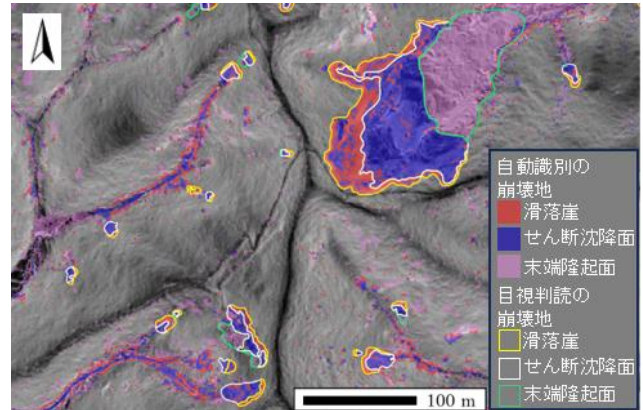
$$F(\delta, \theta, \phi, \mu) = \begin{cases} \text{滑落崖} \\ \text{せん断沈降面} \\ \text{末端隆起面} \\ \text{不動域} \end{cases} \quad (8)$$

これにより、地形面の変化から斜面崩壊地の特徴を分類することが可能になる。

3. 豪雨による斜面崩壊地の識別

3.1 斜面崩壊地の識別および評価方法

地形面の変化に基づいて定義された $\delta, \theta, \phi, \mu$ を用いて、斜面崩壊地の識別を行う。斜面崩壊が発生した領域内の各地点において $\delta, \theta, \phi, \mu$ を算出し、それぞれにしきい値を設定することで斜面崩壊地形に分類する。分類には Random Forest classifier を用いる。決定した各変数のしきい値により領域内の各地点が滑落崖、せん断沈降面、末端隆起面、不動域のいずれかに分類される。



第3図 斜面崩壊地抽出結果

第1表 評価結果

	滑落崖	せん断沈降面	末端隆起面	不動域
Precision	0.80	0.83	0.90	0.86
Recall	0.82	0.81	0.88	0.88
Accuracy	0.85			
Kappa	0.80			

識別結果は Accuracy, Precision, Recall および Cohen の κ 係数を用いて評価された (Wang *et al.*, 2021)。

3.2 対象崩壊地とデータ

対象崩壊地は 2014 年 8 月に兵庫県丹波市で豪雨により発生した斜面崩壊とした。使用データは、斜面崩壊前後の LiDAR DEM と目視の判読により作成された斜面崩壊地分布図である。2 時期の DEM から $\delta, \theta, \phi, \mu$ を算出し、学習特徴量とした。分布図は、学習と検証のための分類ラベルとして使用された。領域内の各分類において、1,000 点ずつランダムサンプリングを行い、データセットを構築した。データセットを 7:3 に分割し、70% を学習データ、30% を検証データとした。

3.3 結果

結果を第 3 図に示す。本手法により識別された斜面崩壊地の各特徴が目視で判読された分布図と良好に一致していることがわかる。各評価指標の検証結果を第 1 表に示す。すべての評価指標において、0.8 を上回っており高精度なモデルを構築できた。

4. おわりに

地形面の変化に基づいて斜面崩壊地形を数学的に表現した。また、地形面の変化と機械学習手法を用いて斜面崩壊地形の識別モデルを開発した。これにより、地形面の局所的な変化から斜面崩壊地の構造を識別し、より詳細な情報をもつ斜面崩壊地分布図の生成が可能になる。

今後、本手法が他地域で適用可能か検証を行う必要がある。

文献

- Schuster R.L. and Krizek R.J. (1978) *Landslides: Analysis and Control*, National Academy of Science, 234p.
- 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.

偏波特性を利用した地中レーダ探査法による浅部地下構造の推定精度向上

飛田 和輝*・久保 大樹**・小池 克明**

Improving the estimation accuracy of shallow subsurface structures using a ground penetrating radar exploration method with polarization properties

Kazuki Tobita*, Taiki Kubo** and Katsuaki Koike**

*東京ガス株式会社 Tokyo Gas Co., Ltd., 1-5-20 Kaigan, Minato-ku, Tokyo 105-8527, Japan.
**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: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

キーワード：空洞検知, 非破壊調査, 比誘電率, 透過測定, 埋設管

Key words: Cavity detection, Non-Destructive Inspection, Relative permittivity, Transmission method, Underground pipe

1. はじめに

近年、我が国では高度経済成長期に集中的に整備されたインフラの老朽化が急速に進行し、それに起因する事故が多数報告されている。地中レーダ探査 (Ground Penetrating Radar: GPR) は、浅部地下構造を高分解能で非破壊的に把握できる手法として広く利用されているが、一般的には反射波の到達時間の情報に基づく位置情報の推定にとどまり、反射体の形状や向き、さらには周辺地盤の物性評価までを同時に行うことは容易ではない。特に、陥没事故の予兆となる地盤内の水分量の変化を捉えるためには、体積含水率と密接な関係にある媒質の比誘電率を正確に推定する必要があるが、既存の研究は定性的な判定にとどまっており、具体的な比誘電率の算出には至っていない。

そこで本研究では、浅部地下構造の推定精度向上のため、送信アンテナと受信アンテナを分離し、透過波と複数の偏波を計測可能な地中レーダシステム POGRA (Polarimetry Ground penetration RADar System) を用いた手法について検討を行う。POGRA は送受信分離型のアンテナを採用し、回転による複数の偏波情報の取得のほか、反射波に加えて透過波の観測も可能である。本研究では実際に POGRA を用いた実験を行い、透過波の解析による比誘電率の高精度な算出手法の検証、ならびに偏波情報 (TE 波・TM 波) を利用した浅部地下構造推定の有効性について明らかにした。

2. POGRA の概要と基礎特性の評価

本研究で用いた地中レーダシステム「POGRA」(第1図) は、送受アンテナと受信アンテナが独立しており、入射面に垂直な電界を持つ TE 波 (水平偏波) と、入射面内に電界を持つ TM 波 (垂直偏波) を選択的に計測できる。まず POGRA の基礎特性を把握するため、正対させた送受信アンテナ間の距離を 0.2~2.0 m まで 0.2 m 刻みで変化させ、伝播速度とレーダ立ち上がり特性の検証を行った。各距離において計測された代表的な受信波形と読み取り値に基づき作成したアンテナ間隔と走時の関係を第2図に示す。

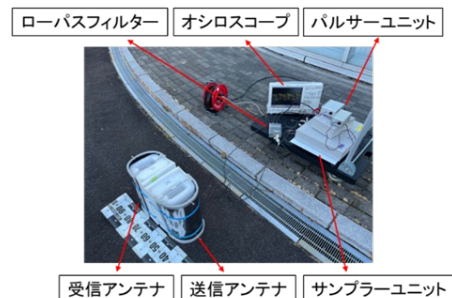
グラフの傾きから、伝播速度 $v_0=1.98 \times 10^8$ m/s と求められ、距離 0 における切片は 7.26 ns であった。これらの値は測定環境に起因するものではなく、システム内部の同軸

ケーブルの伝搬特性によるものと考えられる。したがって、以降の実験では、これらの値を補正值として採用した。

3. 透過波を用いた比誘電率の推定

物性値が既知である均質な媒質を対象に透過型の手法を適用し、厚さと遅延時間から比誘電率を推定し、妥当性を検証した。水槽を用いた実験では、水深を 1 cm から 5 cm まで変化させて透過波の到達時間の変化を計測した。水深と透過波の到達時間の関係から回帰直線を算出し、求められた比誘電率は理論値と比べて誤差 5.7% となり高い精度であった。また、厚さ 25 cm の屋外のコンクリート構造物を対象に計測した結果、比誘電率は 11.5 と求められた。乾燥したコンクリートの一般的な値よりも高くなったが、内部が湿気を含んでいた可能性や、電磁波が鉄筋を迂回して伝搬した影響が大きいと考えられる。湿潤状態のコンクリートの比誘電率の範囲内には収まっていることから、実構造物の計測値として妥当な結果であると判断した。

次に、比誘電率が未知かつ変動する不均質な媒質に対する透過型の手法の有効性を検証するため、内部に水分を保持可能なポリウレタンフォームを模擬地盤として用いた実験を行った。体積含水率が 5% から 30% まで 5% 刻みで均等に注水を行い、各体積含水率において取得した透過波の波形から伝播時間を読み取り、比誘電率を算出した。結果を見ると、体積含水率が増加するのに伴って計算された比誘電率も増加していく傾向が確認された。土壌の体積含水率と



第1図 地中レーダシステム POGRA の構成

比誘電率の関係を示す経験式である Topp の式 (Topp *et al.*, 1980) と比較すると、含水率が小さい状態においては両者はよく対応したが、含水率が増加するにつれて乖離がみられる結果となった (第 3 図)。これは、主に媒質の違いに起因すると考えられる。この結果から、漏水の発生初期などの含水率が低い段階において、透過波を用いて浅部地下構造の水分量の変化を定量的に評価可能であると考えられる。

4. 偏波および反射情報を利用した地下構造の推定

4.1 偏波特性を利用した埋設金属管の向きの推定

ウレタンフォーム中に金属管を設置し、アンテナの偏波面と金属管の軸のなす角度を 0° 、 45° 、 90° と変化させて透過型の配置で計測を行った。金属管がない状態の波形を基準波形として各角度の波形から差し引くことで反射体由来の波形成分を抽出した (第 4 図)。電界ベクトルが管と平行な 0° の場合に最も振幅が大きな反射波が観測され、直交する 90° の場合には反射波はほとんど確認されなかった。これは電界が管と平行な場合にのみ効率的に誘導電流が励起されて強い散乱波が発生するためであり (Balanis, 2016), POGRA の偏波特性を利用することで、単に埋設物の有無だけでなく、形状や向きの推定も可能であることが実証された。

4.2 TE/TM 波における反射特性の比較と空洞検知

アスファルト路面にてアンテナ間距離を変化させるワイドアングル測定を実施した。TM 波では、アンテナ間距離が離れて入射角が大きくなるにつれて反射波の振幅が急激に減衰し、反射波の識別が困難となった。これは TM 波には反射係数がゼロとなるブリュースター角が存在するためである。一方、TE 波では TM 波に比べて距離が離れても反射波は比較的明瞭に保たれていたため、空洞の検知には TE 波を用いることとした。

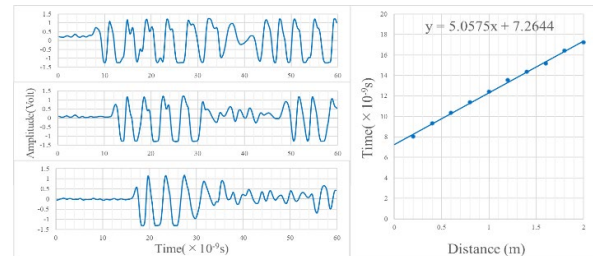
次に、路面下に暗渠があり、深度 75 cm 地点に空洞が存在する屋外の路面で計測を行った。「空洞あり」と「空洞なし」の二地点で、アンテナ間隔を 0.4 m、0.8 m、1.2 m と変化させて TE 波の波形を取得した。「空洞なし」地点の波形を基準波形として各波形から差し引くことで、空洞による反射波由来の波形成分を抽出した (第 5 図)。アンテナ間隔 0.4 m では目立った振幅の変化は見られなかったが、間隔を 0.8 m および 1.2 m に広げた場合は、18~26 ns の区間に他と比較して振幅の大きい特徴的な波形が出現した。この波形が出現した時間は、深度 75 cm の空洞までの往復走時と整合している。これは、アンテナ間隔を広げたことで入射角が大きくなり、空洞の境界面で全反射に近い強い反射が起きたためと考えられる。この結果から、TE 波の反射波形を用いて地下の空洞を検知できることを確認した。実際の現場への適用に向けては、距離による電磁波の減衰を考慮した最適なアンテナ間隔の選定や、地盤のばらつきの影響を取り除く処理の確立が必要である。

5. まとめ

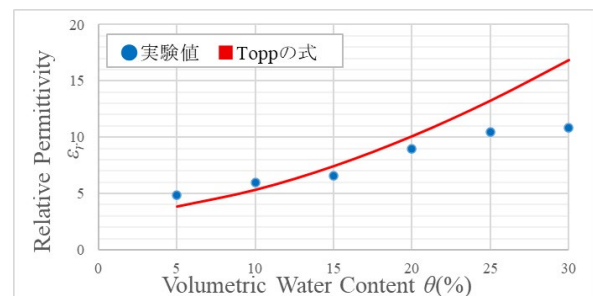
本研究では、地下構造の「位置」だけでなく「物性」や「詳細な形状」を定量的に評価するため、POGRA を用いた複数の探査手法を検討した。まず、透過波の遅延時間から算出された含水試料の比誘電率は Topp の式と良好に一致し、地盤や構造物の比誘電率の推定に有効であることを示した。次に、管の軸方向とアンテナの電界ベクトルが平行な場合に振幅が最大となる現象を利用し、単なる埋設物の有無だけでなく、形状や向きの推定も可能であることを実証した。さらに、距離が離れても反射波が比較的明瞭な TE 波を利用し、一定の精度で空洞の検知に成功した。今後は FDTD 法

による数値シミュレーション等の検討を加えることで、現場の複雑な地盤構造に対する適用性を高めていく。

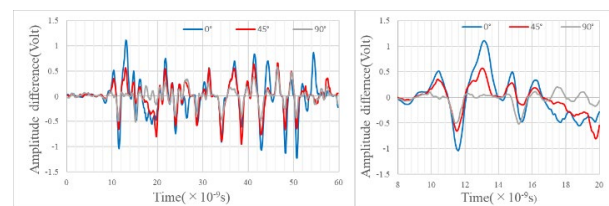
謝辞: 装置のセッティングやデータの解釈について多大なご協力とご助言を賜りました州計測器株式会社の吉田雄司様および兵庫県立大学の後藤忠則教授に深く御礼申し上げます。



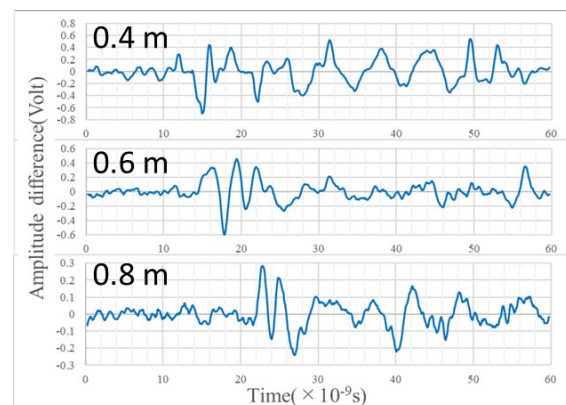
第 2 図 受信波形およびアンテナ間隔と走時の関係



第 3 図 体積含水率と比誘電率の関係



第 4 図 偏波面の回転角ごとの金属管波形



第 5 図 基準波形除去後の各アンテナ間隔での波形

文献

- Balanis, C. A. (2016) *Antenna Theory: Analysis and Design (4th Edition)*, Wiley, 1104p.
- Topp, G. C., Davis, J. L. and Anna, A. P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol.16, no.3, pp. 574–582.

衛星画像の反射スペクトル情報に基づく鉱物・地熱資源の存在可能性評価への 新たなアプローチ

小池 克明*・久保 大樹*・池内 翔哉**・藤田 佑希也***・岸本 将英*

New Approaches to Potential Assessments of Mineral and Geothermal Resources based on Reflectance Spectra Information of Satellite Imagery

Katsuaki Koike*, Taiki Kubo*, Shoya Ikeuchi**, Yukiya Fujita*** and Masahide Kishimoto*

*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: koike.katsuaki.5x@kyoto-u.ac.jp

**住友商事(株) Sumitomo Corp., Otomachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8601, Japan.

***INPEX(株) INPEX Corp., Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-6332, Japan.

キーワード: 植生指数, 斑岩銅鉱床, カオリナイト, 反射率吸収

Key words: Vegetation index, Porphyry copper deposit, Kaolinite, Reflectance absorption

1. はじめに

銅、ニッケルなどの金属資源や大規模出力で設備利用率が格段に高い再生可能エネルギーである地熱資源の需要は急増しており、今後ますます必要となる見通しである。一方で新規の鉱床発見は難しくなり、地熱資源の探査と発電可能性評価にも高いコストと長い時間を要するという問題も顕在化している。そのため広域から資源有望域を高精度で絞り込めるリモートセンシング技術の精緻化が一層求められる。そこで筆者らの研究グループでは、衛星画像の反射スペクトル情報を用いて鉱物・地熱資源の存在可能性を評価できる指標の開発を進めてきた。その中で本稿では新たな3つのアプローチを紹介し、それらの有効性と今後の発展性について検討する。

2. 植生ストレスの検知と鉱物・地熱資源域への適用

風化によって鉱床から溶出された金属成分が表層の土壌に濃集、あるいは地熱貯留層からの上昇流体によって土壌が酸性化という現象により、植物の生理的活性が阻害され、植生ストレスが生じることが以前より知られている。よって、植生ストレスを従来よりも高精度に検知できれば高植生被覆域でもリモートセンシングによる鉱物・地熱資源探査が可能になることが期待できる。

このアイデアのもと、ストレスによる葉の変色は可視域緑の反射率 G に、および葉の水分量の相違は短波長赤外域(SWIR)での反射率に顕著に現れることを考慮して、従来の正規化植生指数NDVI(可視域赤と近赤外域での反射率 R , N との差で、レッドエッジでの反射率増加の程度を表す)に、2つのSWIRバンド(観測波長帯)での反射率と N との差を加えた植生指数VIGSを提案した。黒鉱

床域で知られる秋田県北鹿地域の複数のLandsat ETM+シーンをを用いて、各画素でのVIGSの平均を標準偏差で除した比からトレンド成分を除き、残差成分を求めた。その結果、残差成分に基づく植生ストレスの高異常が鉱床形成に起因した環状構造を示し、黒鉱鉱床や鉱脈型鉱床の多くがそれに含まれるのが明らかになり、VIGSの有効性を確認できた(Hede *et al.*, 2017)。

VIGSはバンド数が限られているマルチスペクトル画像用であるが、バンド数が格段に多いハイパースペクトル画像に拡張したのが次式のVIBS(Kubo *et al.*, 2025)である。式中で R_x は波長 x nmでの反射率、 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、 ΔR_x は x nmの前後2バンドの波長を用いた一次微分を表す。

$$VIBS = \left(\frac{R_{2274} - R_{671}}{R_{2274} + R_{671}} - m_1 \right) / \sigma_1 + \left(\frac{\Delta R_{707} - \Delta R_{737}}{\Delta R_{707} + \Delta R_{737}} - m_2 \right) / \sigma_2$$

この式の第1項は水分欠乏によるSWIRでの反射率増加を強調し、第2項はレッドエッジの短波長側への移動、すなわちブルーシフトを強調する。VIBSをインドネシアの地熱地帯Patuhaに適用した結果、高VIBS値は地熱兆候地や断層の分布と調和的であることが確かめられた(第1図)。日本の地熱地帯でも同様の対応関係が見出された。

3. 鉱物指数の組み合わせと斑岩銅鉱床域への適用

斑岩銅鉱床は銅の主要な供給源であり、帯状の変質帯構造を示すという特徴がある。チリ・ペルーでの斑岩銅鉱床の熱水変質帯形成の顕著さと鉱床規模の関係を明らかにするために、世界 ASTER 衛星画像データベース GRIAS を用い、熱水変質鉱物として明礬石、カオリナイト、絹雲母、方解石、緑泥石、緑簾石の6種を選び、ASTER画像からこれらの分布を抽出するための鉱物指数

(Ninomiya, 2003)に注目した。これらを ALI, KLI, SRI, CLI, CHI, EDI と表す。銅鉱量と鉱物指数との相関性を求めたところ、主に鉱床中央部に分布する明礬石・カオリナイト・絹雲母は正、主に鉱床辺縁部のプロピライト変質帯に分布する方解石・緑泥石・緑簾石は負の相関性を示した。そこで、正の相関の鉱物指数から負の相関の鉱物指数を引き、これを斑岩銅鉱床指数 PCI と称した。

$$PCI = (ALI + KLI + SRI) - (CLI + CHI + EDI)$$

PCI は主要鉱山付近で高い値を示すとともに、銅鉱量が多いほど概ね増大するという傾向が確かめられた。さらに PCI 値の空間微分から勾配を求めた。その一例として大規模鉱床である Escondida 鉱山周辺での PCI 値と勾配の分布を第 2 図で比較する。PCI 値分布よりも勾配図の方が値のコントラストが大きくなり、急勾配の部分が鉱床主要部の境界に対応するという特徴が見出された。

4. カオリナイトの生成起源の識別と鉱床との関連付け

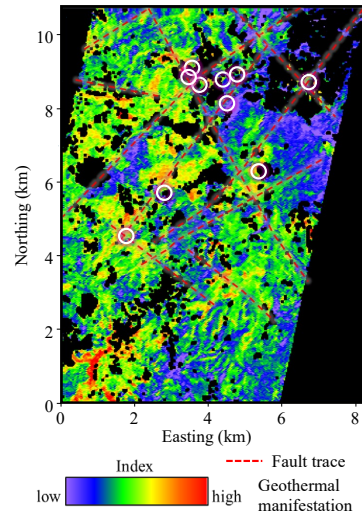
上記のようにカオリナイトは代表的な熱水変質鉱物であるが、風化による生成鉱物でもある。リモートセンシング画像から識別できるカオリナイトの生成起源：熱水変質か風化か、熱水変質であれば鉱床生成に伴うか否かが特定できれば、鉱物・地熱資源探査を精緻化できる可能性もある。このアイデアのもと、風化起源、熱水変質起源で菱刈鉱山などの熱水鉱床に伴う、伴わない地熱地帯での 20 種のカオリナイト試料を収集し、可視～SWIRIでの反射スペクトル測定と XRD 分析を行った。XRD スペクトルからはシェラー式による粒径指標、および回折ピーク強度比に基づく結晶性指標 AGFI を算出した。

解析の結果、Al-OH 吸収が生じる 2200 nm 付近での反射スペクトルの 2 次微分と 3 次微分は試料間で異なり、熱水鉱床起源試料では微分値のピーク高さや積分強度が増加する傾向が見出された。また、風化起源試料の粒径と AGFI は熱水起源よりも概ね小さく、結晶性が弱い。これらの結果に基づき、ピーク高さ、半値全幅、積分強度などをスペクトル指数として用い、これをハイパースペクトル EnMAP 画像に適用した。上記の Escondida 鉱山付近のスペクトル指数分布を第 3 図に示す。これから鉱床を中心に結晶性の高いカオリナイトが存在することが確認できる。風化起源のカオリナイト鉱床付近の EnMAP 画像ではスペクトル指数は全体的に低く、熱水鉱床の識別にカオリナイトに基づく本指数の有効性が示唆された。

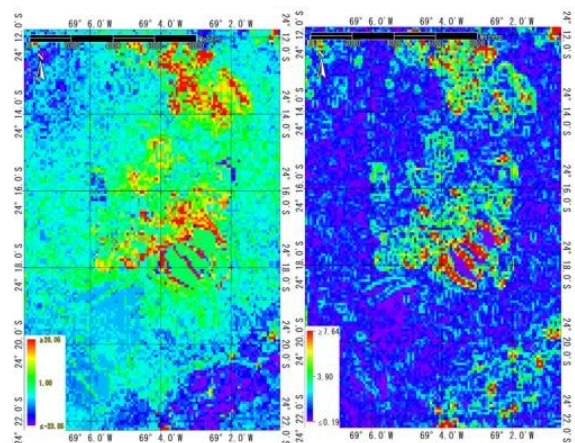
5. まとめ

潜在する金属鉱床や地熱貯留層に起因した植生ストレスを従来よりも高精度で検知できる植生指数、帯状変質帯の各帯の主な鉱物を抽出するバンド比演算を組み合わせた斑岩銅鉱床指数、および熱水鉱床に伴うカオリナイトを識別し、その結晶性を評価するためのスペクトル指数を提案し、マルチおよびハイパースペクトル衛星画像に適用することで 3 つの指数の有効性を実証できた。これらの適用事例を増やし、さらに精度向上を図るのが今後の課題である。

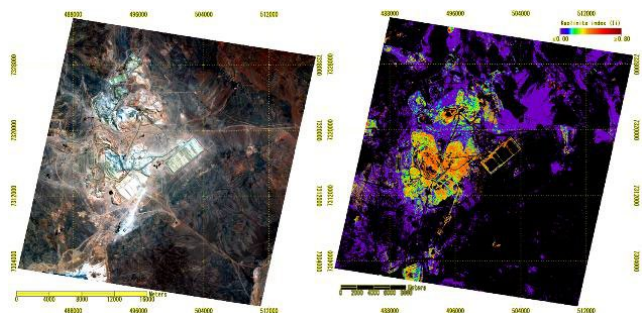
謝辞: GRIAS システムをご提供いただいた宇宙システム開発利用推進機構の立川哲史、鉱物指数について種々ご教示いただいた JX 金属探開(株)の三箇智二氏、および鉱山のカオリナイト試料をご提供いただいた北海道大学の米田哲郎名誉教授に深く御礼申し上げます。



第1図 インドネシア Patuha 地熱地帯での VIBS 値の分布 (Kubo *et al.*, 2025; 白丸は地熱兆候地, 破線は断層を表す)



第2図 Escondida 鉱山 (画像中央) 周辺域での PCI 値分布 (左) と勾配図 (右) の比較



第3図 Escondida 鉱山周辺の EnMAP の RGB 画像 (左) とスペクトル指数分布 (右: 寒色から暖色にかけて結晶性が增大する)

文献

- Hede, A. N. H., Koike, K., Kashiwaya, K., Sakurai, S., Yamada, R. and Singer, D. A. (2017) How can satellite imagery be used for mineral exploration in thick vegetation areas?. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.18, pp.1–13.
- 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*, vol.125, 103194.
- Ninomiya, Y. (2003) A stabilized vegetation index and several mineralogical indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol.3, pp.1552–1554.

ウェブブラウザのネイティブ画像処理における RGB 値不一致とその影響

北尾 馨*

RGB value discrepancies in web browser image processing and their implications

Kaoru KITAO*

* 合同会社うさぎ研究所 Laboratory of Web-based Service Technologies, LLC, 4-1, Mizukino-2, Moriya, Ibaraki 302-0121, Japan. E-mail: kitao@usaken.net

キーワード：色ズレ，色空間，データコンテナ，画像デコード

Key words：Color discrepancy, Color space, Data container, Image decoding

1. はじめに

ウェブによる地図表現において、画像は従来、表示を目的としたものでしかなかった。しかし近年では、標高データのように画像をデータコンテナとして利用する手法が一般化している。可逆圧縮な画像形式を用いることで、RGB 値をデータとして利用することが可能となり、その同一性を前提とする設計が採用されている。

画像のデータコンテナとしての利用は標高データに限らない。例えば産業技術総合研究所が提供する 20 万分の 1 日本シームレス地質図(産業技術総合研究所, 2025)では各地質単元に一意な色を割り当て、任意地点においてその色から凡例情報を取り出す手法を採用している。

しかし、近年のウェブブラウザの表示処理の影響により、特定の条件下に限り、取得された RGB 値がデータ作成時の RGB 値と一致しない事例が確認されている。この差分は視覚的には認識しにくい一方で、データとして扱う場合には値の再現性に影響を与える可能性がある。

本発表では、この色の不一致が生じる要因を整理し、利用方法によって影響の有無や重要性がどのように異なるかについて述べる。なお本件では、ウェブブラウザでの画像の取り扱いについて記述しているため、特段の指定がない限り、処理で使用する API はウェブブラウザの API、開発言語は JavaScript を使用する前提である。

2. 問題の顕在化

本発表の契機は、画像をデータコンテナとして利用する過程において、RGB 値が元データの値と一致しない現象(以下、色ズレという)に直面したことである。色ズレ問題は、同一の処理であっても当初は特定の環境でしか観測できず、実装上の問題やデータの不整合との切り分けが困難であった。このため、原因の特定および再現条件の整理に時間を要した。

本発表は、こうした背景から色ズレ問題を特定環境固有の問題ではない現象として捉え、その影響を体系的に整理することを目的とする。

3. 歴史的経緯

色ズレ問題は、ウェブブラウザにおける画像の内部保持

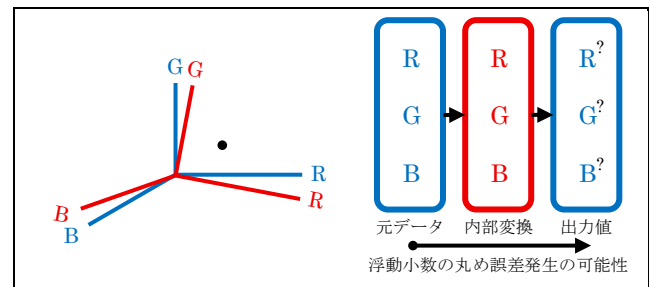
処理とそのための変換等に起因する。色の取得は Canvas API 等を通じて容易に実装可能であるが、色ズレ自体は新たに発生した不具合ではなく、ウェブ技術と表示環境の変化に伴って顕在化した現象である。

2000 年代から 2010 年代前半にかけては、sRGB がウェブにおける事実上の標準色空間(色の座標系)として扱われ、ディスプレイもそれに近い特性を持つものが主流であった。このため、画像の RGB 値は実務上ほぼそのまま扱われ、Canvas 経由で取得した RGB 値も元データと一致することが一般的であり、「色=値」として利用する前提が実務上成立していた(WebKit, 2016)。

その後、2010 年代後半になると、新たな色空間である Display-P3 等広色域ディスプレイが普及し、OS およびウェブブラウザにおけるカラーマネジメントが厳格に適用されるようになった。これにより、画像は表示環境に応じて内部色空間へ変換されることが前提となり、従来のように元の RGB 値をそのまま取得できるとは限らなくなった。さらに、内部処理で値を浮動小数点形式で扱った後、出力時に 8bit 整数へ変換する過程で丸め誤差が生じる。

第 1 図に色空間の違いと色ズレの概念図を示す。

このように、「RGB 値はそのまま取得できる」という従来の前提は、環境の変化によって徐々に成立しなくなり、結果として現在になって色ズレ問題が明確に顕在化したと整理できる。



第 1 図 色空間(色の座標系)の違いと色ズレの概念
同じ位置(色: 黒点で示す)でも座標系の違い(赤と青)で RGB の各値が異なり(左)、変換で色ズレが生じる(右)。

4. 顕在化の条件

Canvas における色ズレは、すべての環境で様に発生する現象ではなく、複数の条件が組み合わさったときに顕在化する。主な要因は、ウェブブラウザによる色空間変換と、その後の 8bit 整数化における丸め誤差であると考えられるが、実際に問題として観測されるかどうかは実行環境に依存する。具体的には、広色域ディスプレイやカラーマネジメントが有効な環境では、画像が内部色空間へ変換される過程で浮動小数点誤差が生じ、その後の丸め処理によって最終的な整数値の差として表面化する。一方で、sRGB に近い条件で動作している環境では変換の影響が小さく、色ズレは顕在化しにくい。また、画像側の条件として ICC プロファイル (画像に埋め込まれた色空間情報) の有無や種類も影響する。さらに、OS やウェブブラウザの実装、GPU による描画経路の違いも微小な差分を生む要因となる。これらの条件が重なり、丸め境界を跨ぐ場合に色ズレが明確な問題として顕在化することになる。

以下、具体的な色ズレの発生過程について整理する。

4.1 元となる可逆圧縮画像の色データ

一般にウェブで扱う画像の色は RGB 各チャンネル 8 ビットの整数値で表現され、各値はそれぞれ 0 から 255 の範囲を取る。この値は非線形なエンコード値であり、画像を Canvas に展開する際、処理に適した線形へ変換され、内部処理や描画処理で使用される。この値を再度非線形化すると理論上は元の値に戻る。

4.2 色ズレが発生する要因

理論上は元の値に戻るが、近似関数等の使用および精度や色空間変換等により微小誤差が生まれる。微小誤差混入の結果として変換の過程で元の値に誤差が生じ、その値が丸め境界を跨ぐか否かで誤差になるか決まる。微小誤差は値によって、以下の条件により丸め境界への近さが変わる。

暗部 (元の値で 0 に近い場合) では感度が高く同じ微小誤差でも最終的な変換結果への影響が大きくなる。

明部 (元の値で 255 に近い場合) では感度が小さく、同じ微小誤差でも最終的な変換結果への影響が小さくなる。

ここで「感度」とは非線形変換における誤差の増幅特性であり、非線形カーブの傾きによって誤差がどれだけ結果に影響するかを表す。変換の条件によって、値の小さい領域では傾きが大きく、同じ誤差でも結果への影響が大きくなりやすい。理論 (同一条件) 上、微小誤差は元の値に対して常に同じ値であるはずだが、以下の条件により微小誤差の現れ方にも差が生じる。

浮動小数演算の丸め順序の違い

内部浮動小数点精度の違い (32 ビット, 64 ビットなど)

使用するガンマ変換テーブルの違い

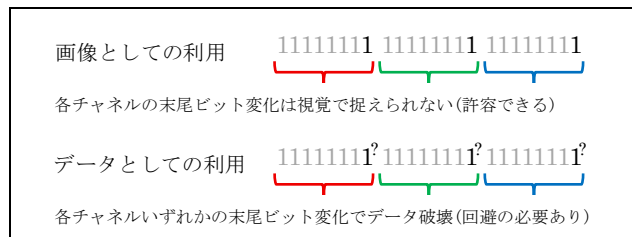
OS やブラウザによる実装差

加えて Canvas では、条件によって隣接ピクセルとの補間が行われる場合がある。これにより元の値との差 (前述とは異なる処理種別に起因する広義の誤差) が生じることがあり、色ズレ発生を増加させる要因となり得るが、この点については色ズレ頻度の差の主因であるとは断定できない。

これらに起因する誤差は RGB 各チャンネルで独立して現れるため、各チャンネルにおいて元の値とのズレが発生しうる。

5. 対処法

色ズレへの対処は、要求仕様に応じて段階的に整理できる。可視化用途などで誤差が許容できる場合は、従来通り Canvas を用いた処理でも問題が生じにくい。



第 2 図 用途別の対処法の違い

誤差を可能な限り抑制したい場合は、画像デコード API である `createImageBitmap` を介して Canvas で処理することで変換の影響を低減することが可能である。具体的なサンプルコードを以下に示す (参考: MDN Web docs, 2025)。

```
const bitmap = await createImageBitmap(blob, {
  colorSpaceConversion: "none",
  premultiplyAlpha: "none"
});
```

`blob` は画像データ本体、`colorSpaceConversion` は色空間変換の有無、`premultiplyAlpha` は透明度を RGB に乗算するかどうかを指定する。この結果を用いて Canvas に展開することで、より元データに近い RGB 値を取得できる。ただし、この方法でもウェブブラウザ内部の変換処理に起因する誤差を完全に排除することはできない。

RGB 値の完全一致が要求される場合には、Canvas を経由しない設計が必要となる。具体的には、JavaScript で記述された専用ライブラリや WebAssembly (ウェブブラウザ上で動作するバイナリ形式のプログラム) によって画像をデコードし、直接 RGB バイト列 (実際にはこれに不透明度を加えた RGBA バイト列) を取得する方法である。これらの手法を採用することにより、Canvas 由来の変換を介さない RGBA 値を取得できる。

このように、対処法は「許容する」「低減する」「回避する」の三段階に整理でき、要求精度に応じた使い分けが重要となる (第 2 図およびサンプルコード)。

6. おわりに

色ズレ問題は特定環境における不具合ではなく、カラーマネジメントの普及と表示環境の多様化に伴って、従来の前提が成立しなくなったことで顕在化した現象である。重要なのは、これを一律に問題と捉えるのではなく、用途に応じて適切に扱うことである。可視化用途では従来手法や若干の工夫を加える手法が引き続き有効である一方、色をデータとして扱う用途では設計の見直しが必要となる。

今後は、画像を「表示」として扱うのか「データ」として扱うのかを明確に区別し、それに応じた処理系を選択することが重要である。

文 献

- MDN Web Docs (2025) Window: createImageBitmap() メソッド - Web API | MDN. <https://developer.mozilla.org/ja/docs/Web/API/Window/createImageBitmap>
 - 産業技術総合研究所 (2025) 20 万分の 1 日本シームレス地質図. <https://gbank.gsj.jp/seamless/>
 - WebKit (2016) Introducing Wide Color on the Web. <https://webkit.org/blog/6682/improving-color-on-the-web/>
- 以上の URL は 2026 年 05 月 10 日に最終確認した。

360度動画によるリアリティキャプチャ技術を用いた現地踏査の事例とその精度

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

Case Study and Accuracy Assessment of Field Surveys Using 360-Degree Video-Based Reality Capture Technology

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

* 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

キーワード：リアリティキャプチャ技術, 現地踏査, 三次元点群化, 精度評価

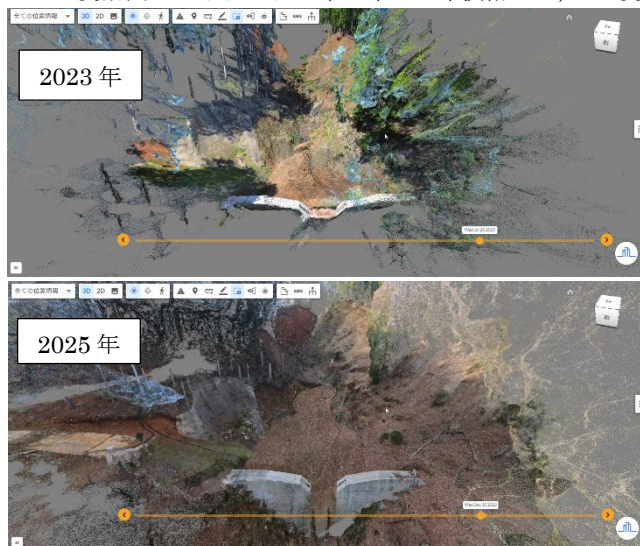
Key words: reality capture technology, Field survey, 3D point cloud, Accuracy Assessment

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を推進し, 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。鏡原ら(2024, 2025)は, 360度動画によるリアリティキャプチャ技術を用いた現地踏査情報の共有化や, 施設の経時情報の記録, 現地計測結果との融合事例について報告してきた。本稿では, 治山ダム背後の堆砂地を対象に, 転石を模した箱を設置する実験を行い, 同技術による三次元点群化の精度評価を行った結果を報告する。

2. 360度動画によるリアリティキャプチャ技術

360度動画によるリアリティキャプチャ技術とは, 180度



第1図 複数時期の現地状況図

以上の範囲を捉えられる超広角レンズを2枚搭載した全方向同時撮影可能な360度カメラをヘルメットに固定,あるいは手で持ちながら動画撮影することで全方位画像を3Dデータとしてデジタル空間上に再現する技術である。ただし, 撮影経路の始点と終点を一致させること, 歩行速度を一定に保つこと, 対象物に死角が生じないように撮影経路を適切に設定するなど, 撮影条件に十分留意する必要がある。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, 現地踏査, 施設点検への適用について検討を行っている。この技術は, 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オルソフォトが自動で作成され, 3D点群位置と画像データが自動で紐づけされるシステムで構成されている。このシステムを活用することで, 現地での360度動画撮影のみで簡単にデジタルツインが実現できる。

3. 現地踏査とリアリティキャプチャ技術の精度評価

3.1 調査地概要

調査地は, 治山ダムが施工されたダム背後の堆砂地である。2023年~2025年にかけて複数回撮影された360度カメラデータより作成された3D点群と画像データがクラウド上で共有化された(第1図)。これより, 上流部の侵食が進み, 治山ダムの背面の土砂の堆積量が増加して, ダムの水通し部分から土砂が流出している状況が確認できる。このように現地踏査した時期の情報がクラウド上に保存され, 複数時期の点群と画像データから目視でも状況の変化を把握できる。

3.2 精度評価のための実験概要

本システムの精度を評価するために, 堆砂域に転石が落下したことを模擬した段ボール箱の設置より評価実験を行

った(第2図). 評価に使用したデータは360度動画であり, これは設置前後でほぼ同様の経路により撮影した. カメラはInsta360X4を用いて, 設定を3,840×1,920の解像度, フレーム29.97fpsとした. また, 段ボール箱は, 縦0.27m, 横0.38m, 高さ0.35m(以降, 箱1と呼ぶ)のものと, 縦0.20m, 横0.27m, 高さ0.12mのもの(以降, 箱2と呼ぶ)を設置した. 箱の平面積比, 体積比, 高さ比は, それぞれ0.103:0.054(1:0.53), 0.036:0.006(1:0.18), 0.35:0.12(1:0.34)である. 撮影した動画に対してリアリティキャプチャ技術により3D点群化を行った.



第2図 箱1, 箱2の設置状況図

3.3 検証

箱設置前後の点群を目視で比較した結果を第3図に示す. 図より, 箱1は点群として表現されているものの, 箱2は不明瞭であった. 一方, 第4図の画像では, 箱1・箱2の両方を確認できた. 以上の結果から, 点群では箱1のエッジは不明瞭ながら認識可能であったものの, 箱2は認識できなかった. したがって, 縦0.27m, 横0.38m, 高さ0.35mの箱1程度の大きさの物体は点群として把握可能であると言える. 結果として, 対象物との距離を考えずに360度カメラで撮影する場合, 3D点群データのみで判定できる限界は箱1程度の大きさであり, それ以下の大きさのものを再現するには画像データの併用が不可欠であることが分かった.

4. おわりに

転石を模擬した箱を設置し, 360度動画を用いたリアリティキャプチャ技術の精度を評価した. 本システムにより縦0.27m, 横0.38m, 高さ0.35mの物体は写真だけでなく, 点群としても認識できたがエッジ部分は不明瞭であった. これより, 物体の変化把握には, 点群だけでなく画像のパターンマッチング技術を併用する必要性が示唆された. ただし, 撮影時のアングルや時期によって異なる色味・明るさにより, この精度は若干異なってくることに留意する必要がある. 本システムを用いることで第5図に示すようにおおよそ同じ画角での比較が可能であるため, 今後は, 3D点群データと画像データより一定の大きさを持つ対象物を自動抽出するシステムを導入して転石の自動検知と変状認知の高度化・効率化を実施したいと考えている.

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
 鏡原聖史, 立川浩祥, 塩谷智基, 麻植久史, 久保大樹, 福地良彦. (2024) 360度動画によるリアリティキャプチャ技術を用いた現地踏査の事例, 第35回日本情報地質学会講演会 講演要旨集, pp.027-028.
 鏡原聖史, 立川浩祥, 塩谷智基, 麻植久史, 久保大樹, 福地良彦. (2025) 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, 第36回日本情報地球学会講演会 講演要旨集, pp.031-032.

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.



第3図 箱1, 箱2の設置前後の点群



第4図 箱1, 箱2の設置前後の画像



第5図 箱1, 箱2の設置前後の対比画面

3D Gaussian Splatting を用いた現場の可視化と遠隔臨場への適用に関する有効性

片平 大暉*・立川 浩祥*・石引 暖也*・木下 大也**・真柄 毅**・松本 浩一**

Effectiveness of Site Visualization Using 3D Gaussian Splatting and Its Application to Remote Inspection

Daiki Katahira*, Hiroyoshi Tachikawa*, Atsuya Ishibiki*, Hiroya Kinoshita**, Takeshi Magara**, Kouichi Matsumoto**

* 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 001-0010Japan. E-mail: katahira_daiki@dcne.co.jp,
tachikawa_hiroyoshi@dcne.co.jp, ishibiki_atsuya@dcne.co.jp

** 株式会社ネクステラス NexTerrace Co.,Ltd.,
201, 5-1, Minami 7 Nishi 25,Chuo-ku,Sapporo,Hokkaido064-0807Japan.E-mail: k-matsumoto@nexterrace.com,
t-magara@nexterrace.com, h-kinoshita@nexterrace.com

キーワード： 3D Gaussian Splatting, NeRF, SfM, 遠隔臨場

Key words： 3D Gaussian Splatting, NeRF, SfM, Remote Inspection

1. はじめに

インフラ維持管理や建設プロジェクトにおいて、発注者や関係機関、あるいは図面等の専門知識を持たない非専門分野の方々に対する現況説明および円滑な合意形成は極めて重要である。しかし、従来の2次元図面や写真の組み合わせでは、複雑な現場の立体的な状況や物理的な取り合いを直感的に共有することが困難であった。

本研究は、現場の視覚的な共有（遠隔臨場）と正確な現況把握を両立するため、写真のように詳細な三次元表現が可能かつ、高速表示が可能な最新技術「3D Gaussian Splatting（以下、3DGS）」に着目し、現場の可視化と遠隔臨場への適用に関する有効性を検証したものである。

2. 3次元復元技術の比較と3DGSの新規性

2.1 各3次元復元技術について

現場の可視化に用いられる従来技術および最新技術の特徴と課題を第1表に整理する。

点群は寸法精度に優れるが、拡大時に生じる点間の隙間（裏透け）が目立ち、視覚的な状況共有には不向きである。画像処理技術である SfM は、複数の写真データがあれば広範囲のモデル化が可能であるが、複雑な形状や暗部・反射面等においてモデル形状が破綻しやすく、復元精度に欠ける。NeRF は、AI を活用し対象物の高精細な表現が可能であるがモデル構築や描画に時間がかかる。

これらの従来技術に対し、3DGS は 3D ガウシアンを用いた表現により、高い視覚的再現性とリアルタイム表示を両立できる点に新規性があると考えられる。

第1表 各3次元復元技術に関する比較

従来技術名	特徴	課題
点群	・ミリ単位の精度寸法を有する。	・亀裂や文字情報の判読が困難。

SfM	・多数の写真を用いることで広範囲の3次元化が可能。	・複雑な形状や暗部、反射面等が破綻しやすい。
NeRF	・複雑な形状や暗部、反射面等を再現可能。	・モデル構築・描画に時間を要する。
3DGS	・高精細な視覚表現と高速表示が可能。	・モデル構築に時間を要する。

2.2 3DGSの概要

3DGS は近年、開発された 3次元復元技術の一種である。3DGS は、空間を「3D ガウシアン（広がりを持つ楕円体）」の集合として配置する表現手法である。点群のような隙間や SfM における形状の破綻を自然に補い、NeRF のように学習済みニューラルネットワークを逐次評価する方式と比較して、描画処理が高速であるため、高速表示（リアルタイムレンダリング）と高い視覚的再現性を両立する。

しかしながら、3DGS 単体では絶対的なスケール情報を持たず、寸法計測に誤差が生じやすいという弱点がある。本稿では、前述した弱点を補うため、点群（LiDAR）と 3DGS 用のデータを取得可能な機器を選定し、対象箇所を取得を実施した。これにより、LiDAR が取得する正確な点群データを基盤とし、その上に 3DGS による高精細な画像表現を融合させることが可能となる。

3. 現地データの取得とモデル化

3.1 現地の3次元モデル化についての概要

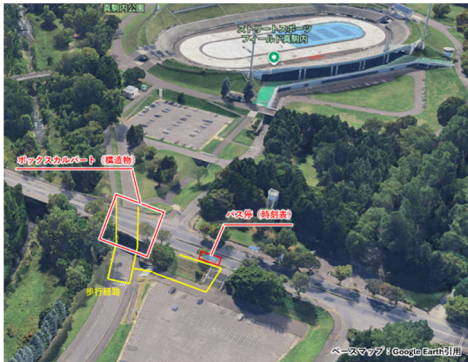
2.2 で述べた機器を使用し点群（LiDAR）と 3DGS の融合による復元手法の検証を実施した。現地の対象箇所は、北海道札幌市南区に位置する真駒内公園とし、計測方法は、先に述べた機器を使用して歩行による計測を実施した。

データの取得経路については、構造物上の亀裂や文字情報

などの細部まで現地を再現できるか検証するため、公園敷地内ボックスカルバートとバス停を網羅する経路とした。



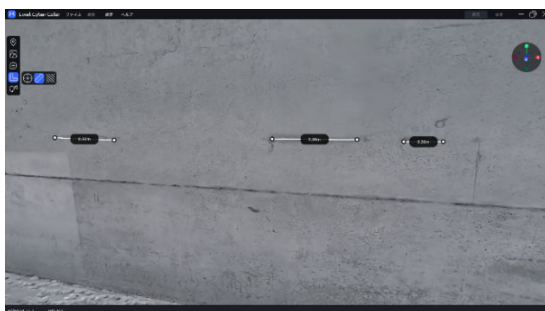
第1図 現地取得に使用した機器
(<https://digitaltwin.active-rt.com/portalcam>)



第2図 データ取得経路 (ベースマップ: Google Earth 引用)

3.2 取得データの現地再現性について

真駒内公園内で取得したデータについて机上にて確認をおこなった。経路上に位置していたボックスカルバートについては、カルバート内部に生じていた亀裂について、3DGS上で視認可能であり、ベースとして取得した点群上からおおよその寸法について計測が可能であった。また、バス停内の時刻表について、取得時に時刻表に近接することで文字情報の判読が可能であることが確認された。



第3図 ボックス内部の亀裂計測

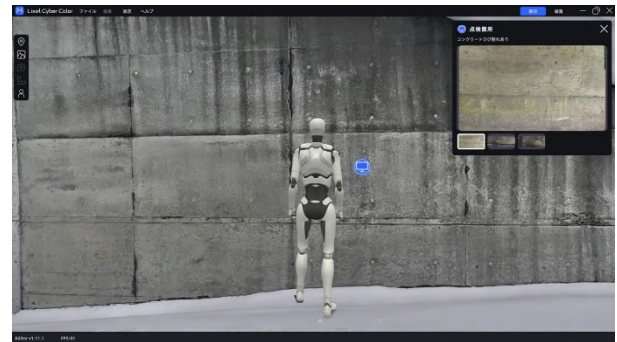


第4図 バス停の時刻表再現

4. 遠隔臨場に向けた空間データベース化

4.1 空間データベースへの応用

先の検証結果を基に、空間データベースへの応用が可能かの検証を実施した。検証の結果、特定の座標に対して外部データを紐付けることが容易であることが確認された。この特性を活かし、高精度な3Dモデル上の特定箇所、「点検調書」や「設計図書 (PDF/Excel)」, 「クローズアップ写真」などの関連情報を直接リンクさせることができ、単なる3Dモデルではなく、関係機関との協議等において実務で活用可能な「空間データベース」として応用が可能であると判断した。



第5図 クローズアップ写真のリンク表示

5. 実務適用に向けた有効性の評価

5.1 視覚的再現性と鮮明度

本研究で取得したデータより、3DGSを用いることで現場の状況を高精細に復元することが可能であり、現場の視覚的再現性が高いことが確認された。

また、文字情報などについても、十分近づいて撮影したデータを含めることで、PC画面上で明確に判読可能であることが確認された。

5.2 データ共有の容易さと操作性

モデルのビジュアル描写に3DGSを用いることで、描画負荷を抑えつつ、広範囲を取得したデータでもWebブラウザ上で閲覧可能な形式として出力できる。

このことから、Webブラウザを介して、関係者に容易に共有することができる。また、Webブラウザ内でデータを確認することができるため、一般的なノートPCやタブレット等でもデータ操作が可能である。

6. まとめ

本研究により、点群 (LiDAR) と3DGSを融合した現地復元手法は、正確なスケール感と極めて高い視覚的再現性を両立できることが確認された。さらに、属性情報を統合した空間データベースとしての運用により、空間を回遊しながら、任意の箇所をクリックし、その場の調書や関連書類を同時に確認できる。これにより、視覚的な現況把握と書類等の情報確認を同一画面上で完結でき、直感的な現場共有 (遠隔臨場) や関係機関との円滑な合意形成を支援する有効な手法となる可能性が示された。

文献

片平大暉, 立川浩祥, 天羽啓太, 星野諒. (2025) 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. 第36回日本情報地球学会講演会 講演要旨集 P.33-34

株式会社アクティブリテック: XGRIDS Lixel Series

URL: <https://digitaltwin.active-rt.com/portalcam>

BIM/CIM モデルから生成 AI を経由した 3D Gaussian Splatting の構築手法に関する研究

石引 暖也*・立川 浩祥*・片平 大暉*・木下 大也**・真柄 毅**・松本 浩一**

Research on a Construction Method for 3D Gaussian Splatting from BIM/CIM Models via Generative AI

Atsuya Ishibiki *, Hiroyoshi Tachikawa*, Daiki Katahira *, Hiroya Kinoshita**, Takeshi Magara**,
Kouichi Matsumoto**

* 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 001-0010Japan. E-mail: ishibiki_atsuya@dcne.co.jp,
tachikawa_hiroyoshi@dcne.co.jp, katahira_daiki@dcne.co.jp

** 株式会社ネクステラス NexTerrace Co.,Ltd.,
201, 5-1, Minami 7 Nishi 25, Chuo-ku,Sapporo,Hokkaido064-0807Japan.E-mail: h-kinoshita@nexterrace.com,
t-magara@nexterrace.com, k-matsumoto@nexterrace.com

キーワード： BIM/CIM, 3D Gaussian Splatting, 生成 AI

Key words： BIM/CIM, 3D Gaussian Splatting, Generative AI

1. はじめに

土木業界の DX 化に伴い、BIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management) モデルによる構造物の可視化が進んでいる。しかし、BIM/CIM モデルは、質感や陰影等のテクスチャの表現が実構造物と異なるため、現実の景観と視覚的な乖離が生じる場合がある。

そこで本研究では、この視覚的な乖離を解消する手段として、高い描写能力をもつ生成 AI に着目した。生成 AI の活用により、BIM/CIM モデルに基づき、対象構造物のテクスチャを現実空間に即して再現した動画像を生成できる。しかし、現在流通している生成 AI による出力は 2 次元の情報である。そこで、複数の 3 次元ガウス分布を空間上に配置することにより、動画像から 3 次元空間を作成可能な 3D Gaussian Splatting (以下、「3DGS」とする。)を使用する。これにより、生成 AI で作成した動画像をもとに、自由な視点移動が可能な 3 次元空間を構築する。

本研究では、生成 AI と 3DGS を使用することで、BIM/CIM モデルをもとに、現地における実構造物に近い視覚的認知を支援する 3 次元空間を構築可能か検証した。

2. 本研究で使った技術の概要

本研究では、BIM/CIM モデルを撮影した動画像を生成 AI により、実構造物に近い視覚的認知を支援する構造物の画像を生成し、3DGS により、3 次元空間を構築する。本研究で使った技術の概要を以下に述べる。

2.1 本研究で使った生成 AI

本研究では、被写体のテクスチャを編集することに特化した Web アプリケーション(以下、「画像生成 AI」とした。)を使用した。画像生成 AI は、実在する地物や構造物の微細なテクスチャを学習しているため、現実の土木構造物に即

したテクスチャの再現が可能である。

2.2 3DGS の概要

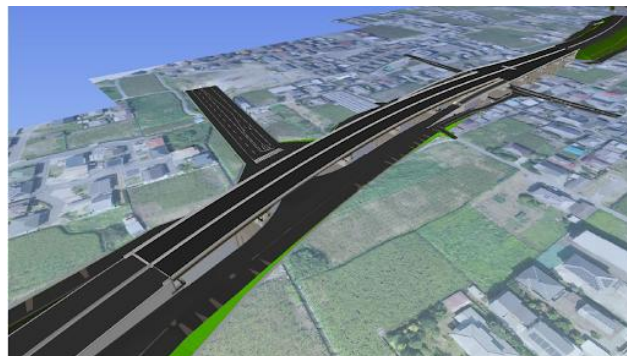
3DGS は近年、開発された画像から 3 次元空間を構築可能な 3 次元復元技術である。3DGS は、空間を「3D ガウシアン (広がりを持つ楕円体)」の集合として配置する表現手法であり、高速表示 (リアルタイムレンダリング) と高い視覚的再現性を両立する。ただし、3DGS 単体では絶対的なスケール情報を持たない。

2.3 本研究で使った 3DGS が可能なツール

本研究では、1 枚の画像を入力として、AI による未撮影部分の予測・補完を行い、3DGS 形式の 3 次元空間を構築可能な Web アプリケーションを使用した。

3. 研究の対象構造物

本研究では、山梨県和戸町で実施中の高架橋建設事業を対象に検証を実施する。検証にあたっては、第 1 図に示す設計段階で作成された詳細度 300 の橋梁 (382m) の



第 1 図 BIM/CIM モデルを現地地図に重ねた図

BIM/CIM モデルを使用する。本構造物を対象とした理由は、街中に作成される橋梁であり、景観上、特に配慮する必要があると考えたためである。

4. 検証方法

本研究では、まず第1図に示す画像を画像生成 AI に入力し、対象の構造物に対して現実空間のテクスチャを反映した画像を生成する。次に、生成した画像を 2.2 で述べた Web アプリケーションに入力することで、3 次元空間を構築する。最後に、第1図に示す BIM/CIM モデルと本研究で構築した 3 次元空間を比較することで、本手法の有用性を確認する。

5. 検証結果

第1図の BIM/CIM モデルの画像を画像生成 AI に入力し、生成した画像を第2図に示す。第2図から、生成 AI の活用により、入力した BIM/CIM モデルの幾何形状を保持しながら、周囲の環境や現実の質感を反映した橋梁画像を生成できていることを確認できた。また、2.2 で述べた Web アプリケーションに第2図を入力し、構築した 3 次元モデルを第3図に示す。第3図から、生成 AI と 3DGS を用いることで、1枚の BIM/CIM モデルの画像から実写に近い 3 次元空間を構築できることがわかった。

第1図と第3図を比較すると、従来の BIM/CIM モデルは表面が平滑で周囲景観から浮いた印象を与える一方、本研究で構築した 3 次元空間では、橋梁の質感や陰影等が再現され、完成後の姿をより具体的に想起させるものとなった。これにより、技術者のみならず専門的な知識を有しない住民や関係者に対しても、完成後の景観を直感的に共有することが可能となり、合意形成における意思決定プロセスの円滑化に寄与するものと考察する。



第2図 画像生成 AI で生成した画像



第3図 3DGS により作成した 3 次元空間

6. 検証結果から得られた課題

本手法で構築した 3 次元空間内の橋梁は、元の BIM/CIM モデルが持つ正確な寸法値ではない。このことから、本手法は、完成後のイメージの共有や住民説明などの合意形成のプロセスにおける視覚資料としての活用が適切と考える。また、今回は、少量の画像をベースに 3 次元空間を構築したため、元の画像に写っていない構造物の裏側や死角となる領域は、画像生成 AI が学習データに基づいてテクスチャや形状を補完している。そのため、補完された領域が実際の現地の地形や計画されている構造と異なる可能性がある。

今後、設計および施工管理へ適用や構造物の細部の構造まで把握する場合は、直接 BIM/CIM モデルを生成 AI に入力するなど BIM/CIM モデルの持つ詳細な構造や寸法データを反映させる手法が必要であると考えられる。

7. まとめ

本研究では、生成 AI と 3DGS を活用することで、BIM/CIM モデルをもとに、現地における実構造物に近い視覚的認知を支援する 3 次元空間が構築可能かを検証した。その結果、橋梁の質感や陰影等が再現され、実写に近い視覚表現を持つ 3 次元空間を作成することができた。また、従来の BIM/CIM モデルと比較し、完成後の姿をより具体的に想起させるものとなったことから、合意形成における意思決定プロセスの円滑化に寄与するものと考察する。本研究で構築した 3 次元空間は、VR デバイス等と組み合わせることで、今後、より現場に近い体験が可能になると考える。

一方で、構築した 3 次元空間の寸法値や、元の画像に写っていない領域は実際と異なる可能性がある。今後は、詳細な構造の再現と正確な寸法値を担保することなどを課題とし、本技術の発展に努める。

文 献

国土交通省:国土交通省における BIM/CIM の活用に向けた取り組み

URL : https://bimcim.org/wp/wp-content/uploads/2020/01/200115_-【HP用】国土交通省における BIMCIM 活用の取組について.pdf

Google : オンラインプラットフォーム「Nano Banana 2」
URL : <https://gemini.google.jp/overview/image-generation/?hl=ja-JP>

Tong Wu; Yu-Jie Yuan; Ling-Xiao Zhang; Jie Yang; Yan-Pei Cao; "Recent advances in 3D Gaussian splatting," in *Computational Visual Media*, vol. 10, no. 4, p p. 613-642, Aug. 2024.

World Labs Inc : オンラインプラットフォーム「Marble」
URL : <https://marble.worldlabs.ai/>

大賀の押被の解釈の変遷

能美洋介*・鈴木茂之**

The changing interpretation of Oga Thrust

Yousuke NOUMI* and Shigeyuki SUZUKI **

* 岡山理科大学 Okayama University of Science, Ridai-cho 1-1, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan
e-Mail : y_noumi@ous.ac.jp.

** 岡山大学 Okayama University, Tsushimanaka 3-1-1, Kita-ku, Okayama, 700-8530

キーワード：大賀の押被，解釈の変遷，説明モデル

Key words : Oga Thrust, Changing interpretation, Explanatory model

岡山県高梁市川上町仁賀地区にある「大賀の押被」は、見かけ上、石炭紀からペルム紀にかけての石灰岩体の下位に三畳系の成羽層群がある。小沢義明（1924）は、白亜紀に起こった押被によって地層の逆転が起こったと報告し、その時期を「大賀時階」と呼び、西南日本における広域的な地殻変動の存在を示唆した。小林貞一他（1937）は岡山県西南部を含む吉備高原地域の広域調査を実施し、大賀の押被を含む一連の地質構造形成過程を「大賀造山運動」と呼んでその時期をジュラ紀から白亜紀にわたる佐川造山輪廻の最初の変動期（白亜紀前期）とした。また、1937年に大賀の押被は国の天然記念物に指定された。

戦後、小林（1951）は、アルプス山脈で体系化された造山輪廻と横臥褶曲・衝上断層とを結びつけた地質構造発達史のアイデアを適用し、西南日本の地殻変動を体系化した。これにより、大賀の押被＝大賀デッケン説が一時定着した。しかし、その後も大賀の押被や、同様の地質構造を有する周辺地域の調査研究が行われ、押被を生じさせたとされる低角断層の否定や、不整合説の提案など、大賀の押被とその周辺の地質構造は長らく議論的になっていた。最終的には、大賀の押被の近傍で行われた農道開発により現れた露頭の詳細な観察から、横田他（1998）は上位の石灰岩体に関して、

隣接地域地質に関する新知見を適用した新たな解釈を与えた。また鈴木（2009）は当地を含む総説の中で大賀の押被に関しては衝上断層は存在しないことを記した。これ以降、大賀の押被を直接取り扱った報告は出ていないと思われる。結局、大賀の押被の押被構造は現在否定されるに至っている。

大賀の押被は、見かけ上古い地層が上位にあり新しい地層が下位にある場合、地質研究者がどのような地質モデルを立てて、現実の地質状況を説明するかを示す好例であると思われる。地向斜からプレートテクトニクスへと変遷した地質の見方が地質現象の説明モデルに多大な影響をあたえている例は各地で示されている。大賀の押被の研究者たちは、そのパラダイムの変遷を意識していたであろうが、解釈の変遷を見ると、オーソドックスな地質調査の結果を忠実に説明モデルに反映させようと努力している様子が伺える。西南日本に点在するとされる大賀の押被と同様の地質構造すべてについて同様の解釈が成立するとは考えられないが、観察事実に基づく地質モデルの構築において、改めて露頭段階での地質の記載が重要であると考えさせられる。

文 献

- 小林貞一・堀越義一・昭和11年度東大地質学科中期生一同（1937）吉備高原の地史に就いて。地質学雑誌，44，pp.797-821.
- 小林貞一（1951）第8章大賀造山運動と豊西統。日本地方地質誌 総説，pp.182-191，朝倉書店。
- 小澤義明（1924）中生代末期の大押被せ。地質学雑誌，31，pp.371-372.
- 鈴木茂之（2009）2.7 浅海-陸成（陸棚層）の中生界 2.7.1 トリアス系 c.成羽層群。日本地方地質誌 6 中国地方，88-92，pp.朝倉書店，2009.
- 横田修一郎・村松聡明・島内 健（1998）岡山県川上町における成羽層群とそれを覆う石灰岩体の構造関係。島根大学地球資源環境学研究報告，17，pp.31-47.



大賀の押被（岡山県高梁市川上町仁賀）

疑似人流データを用いた大規模地震発生時における帰宅困難者の推定

山本大心*・米澤 剛*・杉本 賢二*

Spatiotemporal Analysis of Stranded Commuters During Large-Scale Earthquakes Using Pseudo People Flow Data

Taishin YAMAMOTO*, 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：疑似人流データ、ネットワーク解析、帰宅困難者、GIS、防災

Key words : Pseudo People Flow Data, Network Analysis, Stranded Commuter, GIS, Disaster Prevention

1. はじめに

東日本大震災では、首都圏において公共交通機関が全面停止し、多数の帰宅困難者が発生し、都市機能の集積と交通網への依存がもたらす大都市の脆弱性を浮き彫りにした。今後想定される南海トラフ地震などの大地震においても、首都圏に限らず、鉄道網に依存する近畿圏や中京圏で同様の事態が懸念されるため、都市構造や交通特性を踏まえた事前の予測と防災対策の検討が重要である。

既往研究では、首都圏を中心に帰宅困難者数の推計や行動特性（大佛，2016）、支援施設需要に関する分析（吉田ほか，2021）が行われてきた。特に、人流データやアンケート調査、マイクロシミュレーションを用いた研究により、災害時の行動や施設混雑の実態が明らかにされている。一方で、時間帯別の人流変化を考慮し、将来的に帰宅困難者の数や空間分布を分析する研究は限定的である。そこで本研究では、大阪市の2区を対象に人流データとGISを用い、大規模地震発生時の帰宅困難者数を時間帯別に推定する手法を構築するとともに、その時空間的分布特性を明らかにすることを目的とする。

2. 使用データ

実際の人流データは入手が困難であり、かつデータ量も膨大であることから、本研究では東京大学空間情報科学研究センター（CSIS）が運営する共同研究支援システム JoRAS が提供する疑似人流データを用いた。本データは、公的統計及び商業データを基に、全国の典型的な平日における24時間の人流を再現した合成データである。本研究では疑似人流データの中の「疑似人流活動データ」を用いることとする。活動データには、個人ID、年齢、性別、活動開始時間、活動継続時間、活動場所（緯度・経度）、就業状態、活動内容、市区町村コードの項目が含まれている。

また本研究では、対象者に帰宅経路推定に用いる道路ネ

ットワークとして、住友電気工業株式会社の拡張全国デジタル道路地図データベース（DRM）を用いた。本データは道路をノード（結節点）とリンク（道路区間）として表現した構造を有し、ネットワーク解析が可能な構造となっており、DRMを用いたネットワーク解析により、個人ごとの帰宅経路の推定をGIS上で行う。

3. 研究対象

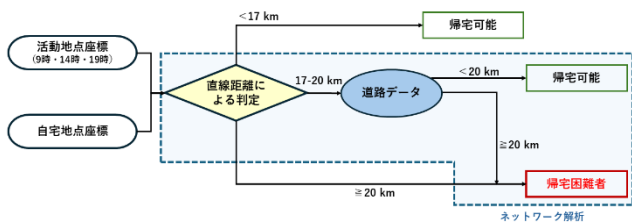
本研究では、データ量および解析負荷を考慮し、マイクロスケールでの分析を行うため、大阪市内において交通結節性と居住機能を併せ持つ地域である天王寺区・阿倍野区を対象地として設定した。当該地域は第1図のように複数の鉄道路線が集積する一方、住宅地を多く含み、時間帯による人口流動の変化を捉えやすい地域特性を有する。分析対象は、当該地域に居住する15~79歳の就業・就学者とした。対象時刻は、通勤・通学ピーク後を代表する9時、昼間の活動が活発な時間帯を代表する14時、帰宅行動が顕在化する19時の3時刻を設定した。

	天王寺区	阿倍野区
基本情報	<ul style="list-style-type: none">人口：88,889人(2026推計)人口密度：18.365(人/km²)(2026推計)昼夜間人口比：144.8(2020推計)※北区：301.6、中央区：443.1	<ul style="list-style-type: none">人口：113,377人(2026推計)人口密度：18.953(人/km²)(2026推計)昼夜間人口比：106.2(2020推計)
特徴	<ul style="list-style-type: none">データ人口：70633人対象人口：38289人※15-79歳の就業者	<ul style="list-style-type: none">データ人口：101140人対象人口：50779人
交通結節性	<ul style="list-style-type: none">主要駅：天王寺駅：JR大阪環状線・大和路線・阪和線、Osaka Metro御堂筋線・谷町線大阪阿部野橋駅：近鉄南大阪線阿倍野駅：Osaka Metro谷町線、阪堺電気鉄道（上町線）大阪市内外を結ぶ主要ターミナル地区のひとつ一日の平均利用者数：75万人（JR天王寺駅）	

「居住地×交通結節点」=時間帯別人流変化の分析に適した地区
第1図 天王寺区・阿倍野区の概要

4. 研究の流れ

本研究では、大規模地震発生時に公共交通機関が全面的に停止し、徒歩による帰宅のみ可能となる状況を想定し、疑似人流データを用いて帰宅困難者の推定を対象時刻ごとに行った。まず、Pythonを用いて各対象時刻における活動地点および個人ごとの自宅地点を抽出し、GIS上で可視化した。次に、活動地点と自宅地点の直線距離を算出し、20 km以上の対象者を帰宅困難者と判定した。さらに、直線距離が17 km以上20 km未満の対象者については、道路ネットワークを用いた経路解析により実際の帰宅距離を算出し、その距離が20 kmを超える場合に帰宅困難者と判定した。最後に、直線距離および道路距離による判定結果を統合し、帰宅困難者数および空間分布を時刻別に整理・可視化した(第2図)。



第2図 研究フローチャート

5. 研究結果

本章では、4章で構築した推定手法に基づいて推定された帰宅困難者の人数および空間分布を中心に、活動内容や就業状態といった属性別の特徴、さらに9時・14時・19時の各時間帯における新規発生・継続・解消といった遷移の構造について、定量的に整理した結果を第3図に示す。

第3図では、各対象時刻における帰宅困難者数とその内訳に加え、活動内容別構成、就業状態別構成、時間帯間の遷移状況、および2,500 mメッシュを用いた空間分布を統合的に示している。これにより、帰宅困難者数の時間帯に

よる変化だけでなく、帰宅困難者を構成する属性の違いや時間帯間における帰宅困難状態の継続・回復の傾向、さらに、空間的な集中状況について、多角的に把握することが可能となった。

6. 結論

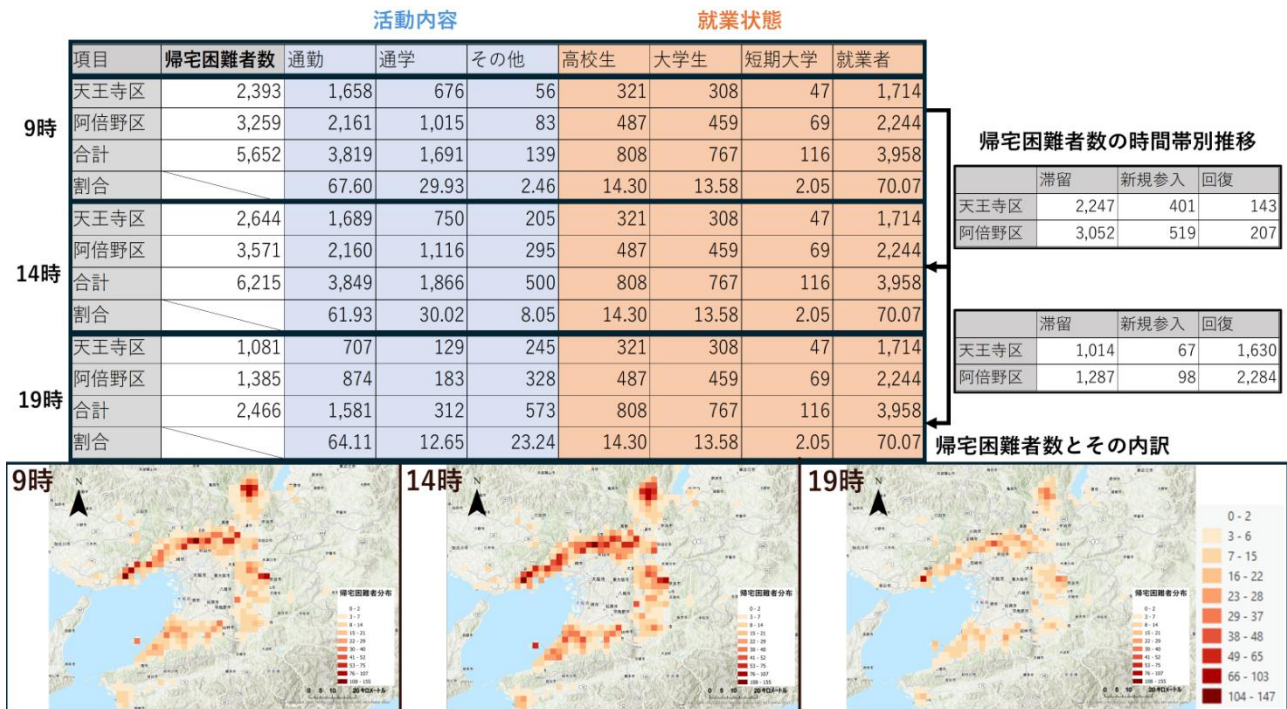
本研究では、疑似人流データと道路ネットワーク解析を組み合わせ、大規模地震時に公共交通が停止し徒歩帰宅のみとなる状況を想定して、天王寺区・阿倍野区居住者の帰宅困難者を時刻別に推定した。直線距離による一次判定と道路距離による帰宅経路の推定を段階的に用いることで、計算負荷を抑えつつ現実的な帰宅距離に基づく評価が可能であることを示した。また、帰宅困難者の発生構造を時間帯別かつ空間的の定量分析を行い、その特徴を明らかにした。

本手法は、対象地域や対象時刻を変更することで、他地域における帰宅困難者分析にも適用可能であり、帰宅困難者対策の優先地域や支援配置の検討などの防災対策に活用可能な基礎資料を提供するものである。また、将来的な都市防災施策の高度化に向けた基盤的手法の一つとなることが期待される。

文献

吉田慎也・薄井智貴・山本俊行・森川高行 (2021) 流動人口統計を用いた災害時の帰宅困難者数の推定, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 76巻, 5号, p. I_719- I_727.
 大佛俊泰 (2016) 東京都帰宅困難者対策条例を考慮した徒歩帰宅者数の推定, 日本建築学会計画系論文集, 81巻, 721号, p.705-711.
 東京大学空間情報科学研究センター (2023) 全国版疑似人流データ仕様書 Ver.2.0.
 住友電気工業株式会社 (2023) 拡張全国デジタル道路地図データベース標準 (ADF 標準) 2023年版.

謝辞: 本研究は東京大学 CSIS 共同研究 (No.1429, 1431) による成果の一部である。



第3図 研究結果 (単位: 人)

シームレス標高タイルバージョン2の公開

西岡芳晴

Release of Seamless Elevation Tiles Version 2

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, 地図タイル, タイルリスト, クラウドネイティブ
Key words : elevation, map tiles, tile list, cloud native

1. はじめに

近年、航空レーザ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、インターネットを通じて利用しやすい標高タイルに変換、提供するサービスとして、「シームレス標高タイル」を2020年10月1日から公開している。さらに、2025年10月1日に、「シームレス標高タイルバージョン2」の試験公開を開始した。本論では、この新サービスの特徴、改良点を紹介する。

2. シームレス標高タイルバージョン2

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で利用できる。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標高タイルに変換し、提供している。



第1図 シームレス標高タイル紹介ページ
<https://gbank.gsi.jp/seamless/elev/>

2.1 タイルURLテンプレート

タイルURLテンプレートは以下の通りである(第2図)。詳細は後述する。

<p>標準タイル</p> <p>標準で提供されるタイルセットは、画像サイズ512px、WebP形式の数値PNGタイルです。数値PNGタイルはグリッドPNGタイルの中で規定されているもので、これまでPNG標高タイルと呼んでいたものとほぼ同一です。</p> <p>タイルURLテンプレート <code>https://gbank.gsi.jp/seamless/elev2/{sourceID}/{z}/{x}/{y}.webp</code></p> <p>変換タイル</p> <p>標準のタイルセットのほか、Terrain-RGB形式及びTerrarium形式の標高タイルと、標高数値PNGタイルも含めたそれら3形式のタイルサイズ513pxのタイルも提供しています。ただし、サーバー側で標準のタイルセットから変換しているため、取得に若干時間がかかりますのでご了承ください。</p> <p>タイルURLテンプレート</p> <ul style="list-style-type: none"> 数値PNGタイル <ul style="list-style-type: none"> (513px) <code>https://gbank.gsi.jp/seamless/elev2/513/{sourceID}/{z}/{x}/{y}.webp</code> Terrain-RGB形式 <ul style="list-style-type: none"> (512px) <code>https://gbank.gsi.jp/seamless/elev2/terrainRGB/{sourceID}/{z}/{x}/{y}.webp</code> (513px) <code>https://gbank.gsi.jp/seamless/elev2/terrainRGB513/{sourceID}/{z}/{x}/{y}.webp</code> Terrarium形式 <ul style="list-style-type: none"> (512px) <code>https://gbank.gsi.jp/seamless/elev2/terrarium/{sourceID}/{z}/{x}/{y}.webp</code> (513px) <code>https://gbank.gsi.jp/seamless/elev2/terrarium513/{sourceID}/{z}/{x}/{y}.webp</code>

第2図 シームレス標高タイルバージョン2のタイルURLテンプレート
<https://tiles.gsj.jp/tiles/elev2/index.html>

以前のシームレス標高タイルが{z}/{y}/{x}の並びであったのに対して、国土地理院等で採用されている{z}/{x}/{y}に変更した。

2.2 タイルの種類

提供されるタイルセットには、標準タイルと変換タイルの2種類がある。いずれも画像ファイルフォーマットはWebPを利用する。

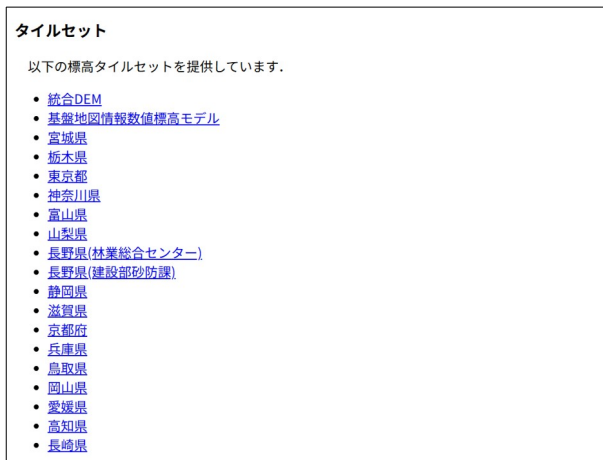
標準タイルはタイルサイズ512pxで、「グリッドPNGタイル仕様 0.1」(西岡, 2026)の数値PNGタイル形式を使用している。この数値PNGタイル形式は、PNG標高タイル(西岡・長津, 2015)に若干の改良を加えたものである。

変換タイルでは、Terrain-RGB形式及びTerrarium形式を含め、さらにそれら3者の513pxのタイルも提供する。これらはサーバー側で標準タイルを変換して提供している。

2.3 データソース

データソースは、国土地理院や各都道府県が公開するデータ、全国Q地図から提供いただいたデータに加えて、バー

ョン2では新たに林野庁が提供する各県の標高タイルセット(Forestgeo.info, 2026)を多く使用している(第3図)。



第3図 シームレス標高タイルバージョン2で公開しているタイルセット

<https://tiles.gsj.jp/tiles/elev2/index.html>

2.4 標高改定対応

国土地理院は2025年4月1日に電子基準点、三角点、水準点等の標高成果を衛星測位を基盤とする最新の値「測地成果 2024」に改定した(国土地理院, 2026a)。このため、2025年以前に測定・公開された標高データについては、シームレス標高タイルバージョン2では、「令和7年度全国の標高成果の改定に伴うパラメーターファイル」(測地成果 2024 移行のための水準点標高補正)(国土地理院, 2026a)を使用して補正している。

補正は、その点を囲む矩形4隅の補正パラメーターから、バイリニア補間でその点の補正パラメーターを求めて行っている。プログラムはNode.js上で実行させた。4点のうち1点でも補正パラメーターが得られない場合は補正は行わない。このため、島しょ部等では全く補正が行われないことがある。

2.5 地図タイルIDリスト

バージョン2では、あらたに地図タイルIDリストの提供を開始した。地図タイルIDリストは、標準タイルについてのみ提供される。

地図タイルIDリストは、そのタイルセットに含まれるすべての地図タイルのタイルIDを列挙したテキストファイ

ルである。ここで、地図タイルIDとは、「{z}/{x}/{y}」という文字列である。

地図タイルIDリストを取得するためのURLテンプレートは以下になる。

https://tiles.gsj.jp/tiles/elev2/{sourceID}/tileIDList_{sourceID}.txt

この地図タイルIDリストは、デジタル庁や国土交通省が推進している「3D空間ID(空間ID)」のz方向のインデックスを含まないバージョンと同一である。地図タイルIDリストは、サーバーへの空リクエストの削減に利用でき、リアルタイムタイル合成やタイル管理(合成、ダウンロード等)に利用できる。地図タイルIDリストの作成に当たって、Node.js環境のコマンドライン上で動作するプログラムMakeTileListを作成、利用した。

3. おわりに

シームレス標高タイル2では、前バージョンで提供されていた一部のタイルセット(ASTER GDEM, GEBCOなど)がまだ公開されていない。今後は、これらを整備しつつ、これまでに作成したプログラムとそのソースコードを順次公開してゆく予定である。

文 献

- Forestgeo.info (2026). 森林情報オープンデータの推進/利活用. <https://forestgeo.info/> (確認: 2026/05/18)
- 国土地理院 (2026a) 令和7年度 全国の標高成果の改定. <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/hyoko2024rev.html> (確認: 2026/05/18)
- 国土地理院 (2026b) 座標標高補正パラメーターファイル一覧 <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun41012.html> (確認: 2026/05/18)
- 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 (2026) 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: 2026/05/18)
- 静岡県 (2026) VIRTUAL SHIZUOKA. <https://www.pref.shizuoka.jp/machizukuri/1049255/index.html> (確認: 2026/05/18)

二次元地形図を三次元的に表現する際の留意点

中田 文雄*

Points to Consider When Representing Two-Dimensional Topographic Map in Three Dimensions.

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

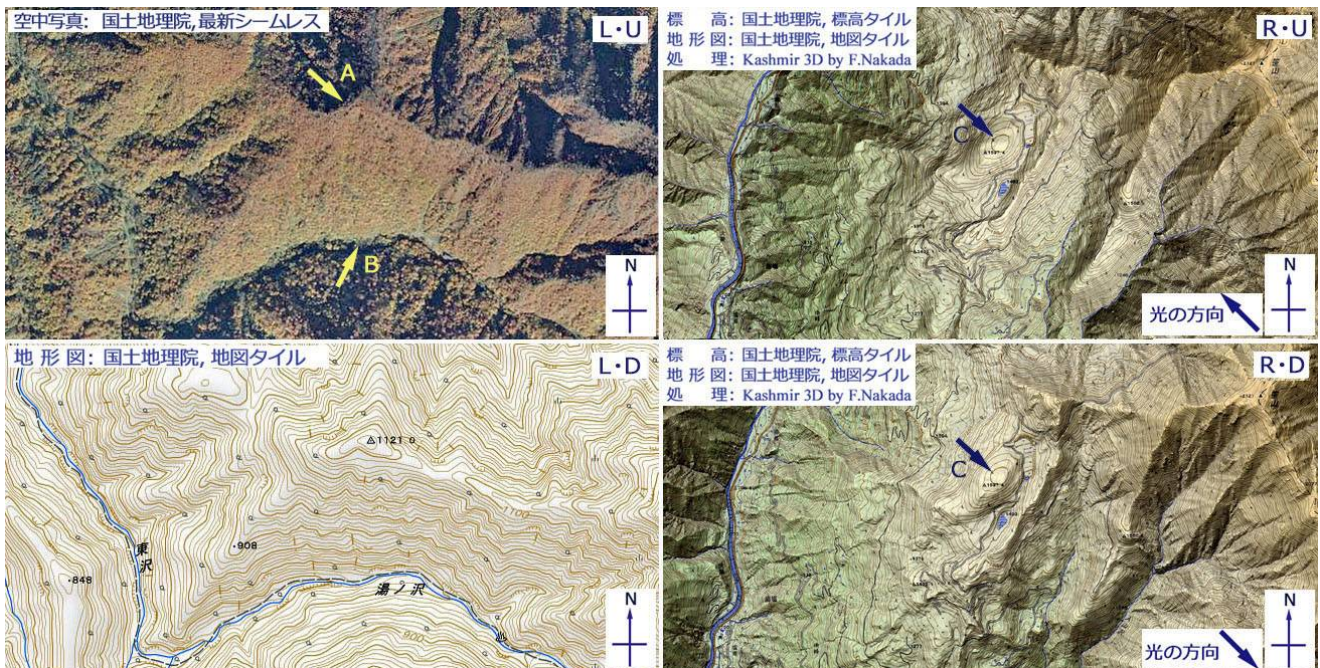
1. はじめに

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使用して三次元画像に加工して公開するページの制作・管理者を務めている。

三次元にレンダリングするツールは Kashmir3D (SUGIMOTO, 2025)、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 または 10m メッシュ、最も多いデジタル平面図は地理院タイルの標準地図である。

このような処理によって、立体視ができる地形図などを作成することになるが、その過程において太陽光線の当たり方 (時刻) によって、凹凸が逆に見える現象が発生することがあり、望ましい陰影効果が得られるまで何回かの試行錯誤を繰り返すことが多い。

2. 視覚的に地形の凹凸が逆転する平面図の例



第 1 図 四角的に地形の凹凸が逆転してしまう例 (左は空中写真, 右は陰影図)

① 空中写真の例・第 1 図 (L) : 第 1 図 (L・U) は、国土地理院から公開されている最新のシームレス空中写真である。筆者は、曲線「A」を「谷」として、また曲線「B」を「尾根」として認識してしまうのだが、読者諸氏はいかがであろうか。第 1 図 (L・D) は全く同じ場所の地形図であって、参照すると曲線「A」は「尾根」で、曲線「B」は「谷」であることがわかる。正しく尾根を尾根 (凸) として認識するためには、空中写真を 180° 回転させればよい。筆者の場合、凹凸が逆転してしまうのは、濃い日影が北側に延びている空中写真だけ、すなわち北半球の写真だけなので、地形判読上実は困っているのである。

② 陰影図の例・第 1 図 (R) : 第 1 図 (R・U) は、太陽光線を右下 (南東方向) から射すように作成した陰影図である。筆者は、矢印「C」の右側にある閉塞した等高線を窪地 (凹) と認識してしまうが、読者諸氏はいかがであろうか。一方、第 1 図 (R・D)

は、太陽光線を左上（北西方向）から射すようにした陰影図であって、尾根は尾根として、谷は谷として認識できるため、筆者が陰影図を作成する場合は、基本的にこの方角を採用することになっている。

3. 三次元化したデジタル平面図の例

① 地形図の例－1・第2図（L）：三次元化地形図のうち、第2図（L・U）は太陽の位置を14時30分とした作例、第2図（L・D）は同じく9時30分とした作例である。14時30分の作例は、やや西向きの地形のために太陽が正面から射しており、9時30分の作例は太陽がやや斜め下から射している。14時30分の作例は、幅の狭い谷が尾根のように見えることがあるため、午後の時間帯で三次元化地形図を作成する場合には、細心の注意が必要となる。

② 地形図の例－2・第2図（C）：三次元化地形図のうち、第2図（C・U）は、太陽の位置を9時00分とした作例、第2図（C・D）は同じく14時00分とした作例である。第2図（C）は、同図（L）とは異なって、午前の時間帯では谷が尾根として、尾根が谷として認識してしまう恐れがあるため、作成に当たっては注意が必要となる。なお、第2図（C）の中に

記入した方位記号（N）は、第2図（L）のそれとは約90° 違っていることに留意していただきたい。

③ 空中写真の例・第2図（R）：第2図（R）は、空中写真を対象とした作例である。作図時刻は、第2図（R・U）が9時00分で、第2図（R・D）が15時00分である。視点（又は北）の方角はほぼ第2図（C）と同じであることから、谷と尾根を誤認する恐れがあるのは、午前の時間帯であることがわかる。

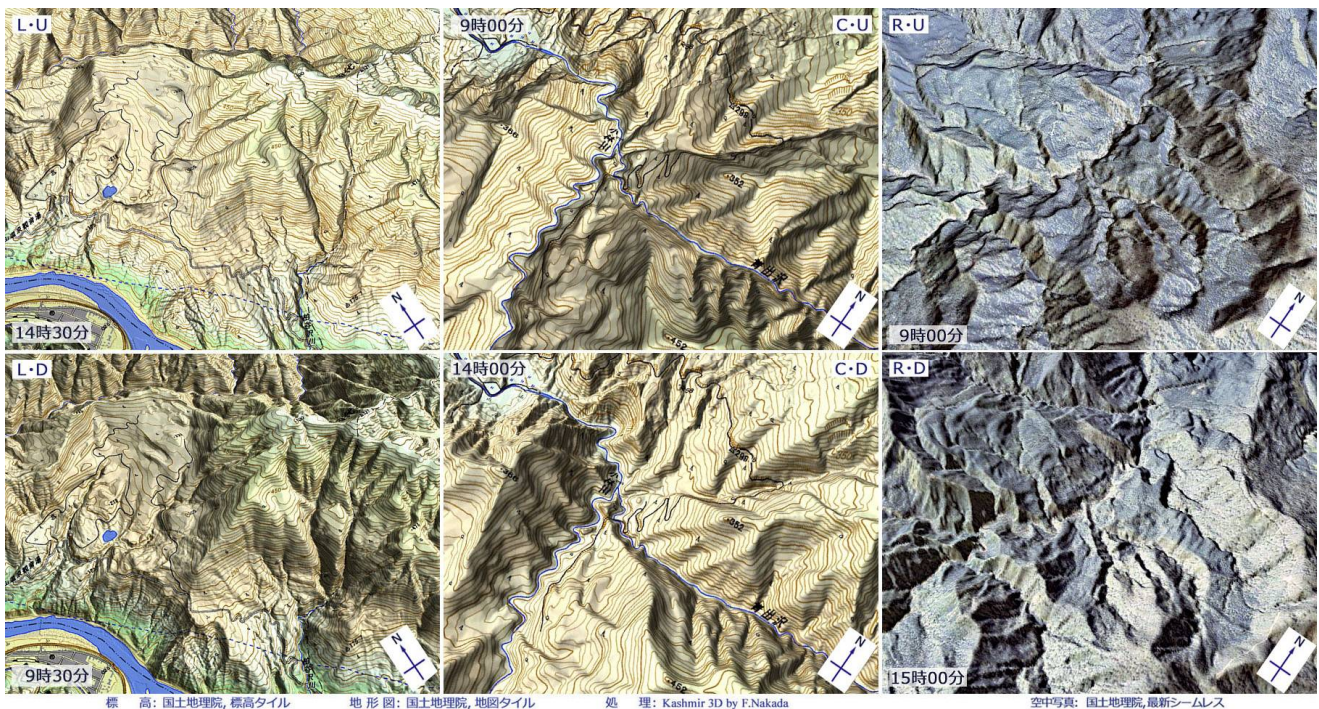
以上の例のように、DEMを利用して地形図などの平面図を三次元化する際には、時間帯（太陽の位置）に十分留意する必要があると言えよう。

4. おわりに

筆者が本ウェブサイトの運営に携わってから6年が経過した。「継続は力なり」という格言があるが、「リアス海岸 地図」や「トンボロ 地図」などのキーワードでGoogle検索に質問すると、当該ページがかなりの確率で上位にヒットするようになってきた。

長年地形や地質情報に携わってきた経験を生かし、ライフワークとして続けて行きたいと考えている。

なお、ウェブサイト「片目での立体視（中田，2026）」では、多くの作例を紹介しているので、興味のある方はアクセスしていただければ幸いである。



第2図 三次元化したデジタル平面図の例（左・中：地形図，右：空中写真）

文 献

- 国土地理院（2025）：地理院タイル一覧，URL: <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
 SUGIMOTO Tomohiko（2025）：カシミール3D，URL: <http://www.kashmir3d.com/index.html>
 中田 文雄（2025）：日本の地形千景：URL: https://www.web-gis.jp/GeoGuideMapping_V3.html?01
 中田 文雄（2026）：片目での立体視：URL: https://www.web-gis.jp/GS_Topics/Topography/Topo_Stereopsis_one_eye.html

信頼性評価を活用した地層対比支援システムの開発

櫻井 健一*・米澤 剛**・根本 達也***

Development of a Stratigraphic Correlation Support System Using Reliability Assessment

Kenichi SAKURAI*, Go YONEZAWA** and Tatsuya NEMOTO***

* 大阪公立大学大学院工学研究科, 〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3丁目 3番 138号. Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan. E-mail: sk22390b@st.omu.ac.jp; 産業技術短期大学情報処理工学科, 〒661-0047 兵庫県尼崎市西昆陽 1丁目 27番 1号. Department of Information Engineering, College of Industrial Technology, 1-27-1 Nishikoya, Amagasaki-City, Hyogo 661-7561, Japan.

** 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: yonezawa@omu.ac.jp

*** 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: nemoto@omu.ac.jp

キーワード: 地層対比, 信頼性評価, ボーリング交換用データ

Key words: Stratigraphic correlation, Data quality assessment, Borehole exchange data

1. はじめに

露頭が少ない都市部では, 地下構造を把握するうえでボーリングデータが重要な情報源となる. 近年, 公共事業で取得されたボーリング調査成果は, 国土地盤情報サイト「KuniJiban」(国土交通省ほか, 2008)や「国土地盤情報データベース」(国土地盤情報センター, 2019)などを通じてデジタルデータとして公開されており, 地盤情報を標準化した「ボーリング交換用データ」として多分野での二次利用が期待されている.

一方, これらのデータには不正確な情報が含まれる場合があり(国土地盤情報センター, 2021), 地層対比に利用するには信頼性の高いデータを優先して用いることが望ましい. しかしながら, データ数が限られる地域では, 信頼性に課題を含むデータも対比の検討材料として扱う必要が生じる. そこで本研究では, データの信頼性評価結果を地層対比作業に反映できる地層対比支援システムを開発した.

2. 地層対比における信頼性評価

本システムでは, 地層対比に用いるコア情報の信頼性を評価するため, 櫻井ほか(2026)によって作成された信頼性評価基準を用いた. 本章では, その概要を述べる.

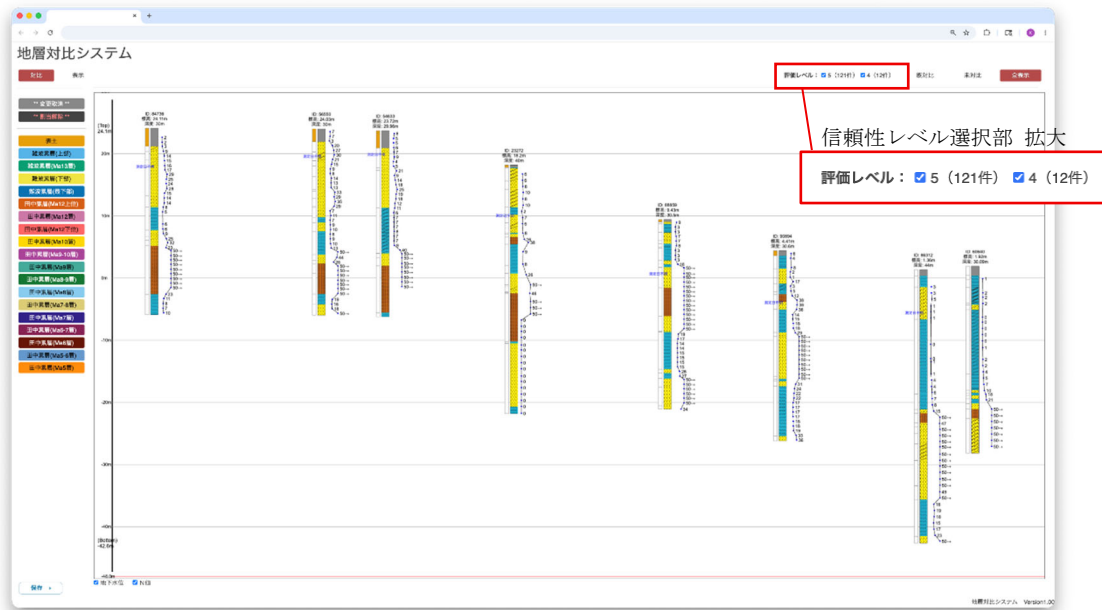
信頼性評価基準では, 第1表に示す通り, ボーリング交換用データのコア情報に記録された土質・岩種に関する情報を対象としている. 土質・岩種情報は, 砂・礫・粘土などを表す「名称」, 各名称に対応する「分類コード」, および「土質岩種記号」の3項目から構成される. これらは, 複数地点の地質情報を比較し, 層序の連続性を推定する際の基礎資料となる. なお, 「土質岩種記号」は登録必須項目ではない.

本来, これら3項目は相互に整合していることが望ましい. 3項目が一致しているデータは記録内容の整合性が高く, 地層対比に用いるデータとして信頼性が高いと判断できる.

一方, 実際のデータには, 項目の欠損や内容の不一致が見られる場合がある. また, 一部の項目に誤りがあっても, 他

第1表 地層対比支援システムに用いたコア情報の信頼性評価基準.

	項目			JIS名称	レベル (Version 2.10)	レベル (JIS A 0206)
	分類コード	土質岩種記号	名称			
完全一致	完全一致	完全一致	完全一致	-	5	5
2項目が一致	完全一致	完全一致	-	-		
	完全一致	-	完全一致	-		
1項目のみが一致 (誤りデータなし)	完全一致	-	データなし	-	4	4
	データなし	完全一致	データなし	-		
	データなし	-	完全一致	-		
1項目のみが一致 (誤りデータあり)	完全一致	-	誤り	-	3	3
	誤り	完全一致	誤り	-		
	誤り	-	完全一致	-		
JIS A 0206に準拠	-	-	-	完全一致	2	(該当なし)
	-	-	-	部分一致		
項目が部分一致	部分一致	-	-	-	2	2
	-	部分一致	-	-		
	-	-	部分一致	-		
変換不可	-	-	-	-	1	1



第1図 信頼性レベル選択機能を備えた地層対比支援画面

の項目から正しい土質・岩種を推定できる場合や、保存情報の一部を用いて補正できる場合がある。このようなデータも、補正内容や推定根拠を明確にすることで地層対比の検討材料となり得るが、3項目が整合しているデータに比べて信頼性は低い。

信頼性評価基準では、3項目の一致状況、誤りの有無、および補正の程度に基づき、コア情報を5段階の信頼性レベルとして評価している。この評価基準により、データを単に「使える／使えない」で区別するのではなく、信頼性の程度を踏まえて地層対比に活用できる。また、対比に使用したデータの信頼性レベルから、地層対比結果の妥当性を判断するための根拠を整理できる。

3. 信頼性評価を活用した地層対比支援システム

これまで開発を進めてきた地層対比支援システムは、ボーリング交換用データを用いて複数地点の柱状図を表示し、利用者が地質情報を比較しながら地層対比を行うことができる(櫻井, 2024)。本研究では、このシステムに、前章で述べた信頼性評価基準に基づくデータ表示機能を新たに実装した。

地層対比を行う際には、まず Web-GIS 上で対象範囲を選択し、次に対比に用いるボーリングデータを選択する。選択したボーリングデータは、第1図に示すように柱状図として表示される。

新たに実装した表示機能では、画面右上に各信頼性レベルを選択するためのチェックボックスを配置した(第1図拡大箇所)。チェックボックスには、現在表示されている柱状図に含まれる各レベルのコア件数が示される。利用者は表示したい信頼性レベルを選択することで、該当するレベルのコアのみを表示できる。これにより、信頼性の高いコアを優先的に参照できるだけでなく、必要に応じて信頼性に課題を含むコアも補助的な検討材料として表示できる。

また、柱状図上の各コアにマウスオーバーすることで、当該コアの詳細情報を表示できる(第2図)。詳細情報には、「信頼性評価レベル」、元データに記録された「名称」、「分類コード」、補正後の「分類コード」、「名称」、コアの「観察記録」などが含まれる。これらを参照することで、利用者は信頼性に課題を含むコアについても、欠損項目、不整合の内容、補正根拠を確認できる。

層序: 未対比
core_solid: 194713
下端深度: 40
評価レベル: 3
変換後岩石名: シルト質粘性土 (532100000)
元岩石名: 粘性土 (3030)
観察記事: 粘土自体は比較的均質。半固結状。¥n部分的に微細砂が葉脈状もしくはブロック状に混入。

第2図 コア詳細情報の表示例 (マウスオーバー時)

4. おわりに

本研究では、既存の地層対比支援システムを拡張し、ボーリング交換用データに含まれるコア情報の信頼性評価結果を表示・確認できる機能を実装した。これにより、利用者は信頼性レベルに基づいてコア情報を選択的に表示し、信頼性の高いデータを優先的に用いた地層対比を行うことが可能となった。

また、信頼性に課題を含むデータについても、元データや補正内容を確認することで、必要に応じて地層対比の検討材料として活用できる。本システムは、信頼性評価結果を利用者の判断に反映させることで、データの信頼性を踏まえた地層対比作業を支援するものである。

文 献

- 国土地盤情報センター(2019)国土地盤情報データベース(NGiC). <https://ngic.or.jp/> (確認: 2026/5/10)
- 国土地盤情報センター(2021)一電子納品の現状と対応について-. 37 p. <https://ngic.or.jp/etc/part/denshinouhin.pdf> (確認: 2026/5/10)
- 国土交通省・国立研究開発法人土木研究所・国立研究開発法人港湾空港技術研究所(2008)国土地盤情報検索サイト(KuniJiban). <https://www.kunijiban.pwri.go.jp/> (確認: 2026/5/10)
- 櫻井健一(2024)ボーリングデータを用いた3次元可視化および地層対比システムの構築 報告書. 令和5年度一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成報告書, 28 p. <https://www.jacic.or.jp/josei/R06/REP2023-07.pdf> (確認: 2026/5/10)
- 櫻井健一・米澤 剛・根本達也(2026)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信頼性評価に基づく活用手法. 情報地球学, Vol. 27, No.3 掲載予定.

地層処分事業のサイト調査を支えるデータマネジメントシステムの詳細設計

西尾 光*

Detailed Design of a Data Management System Supporting Site Investigations for Geological Disposal Projects

NISHIO Hikaru*

*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, サイト調査

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

1. はじめに

地層処分対象の放射性廃棄物(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。サイト調査では, 地表踏査, 物理探査, ボーリング調査, 室内試験, 地質環境モデルの構築など, 多様な調査・評価が段階的に進められ, 長期間にわたり膨大なデータが取得される。これらには, 取得値だけでなく, 取得目的や測定条件を示すメタデータ, 品質管理記録, 報告書類などが含まれ, 透明性や追跡性などを確保しつつ一貫したデータ管理が不可欠である。くわえて, 100 年に及ぶ地層処分事業では, 調査・評価の履歴と説明責任を長期的に維持するために, 体系的な情報基盤の整備が求められる。IAEA (2024) でも, 適切なデータ管理がサイト選定プロセスの信頼性確保において重要であることが示されている。

これらの課題に対応するために原子力発電環境整備機構(以下, NUMO)では, サイト調査で用いるデータマネジメントシステムとして「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)の整備を進めている(西尾ほか, 2025)。G3S は, サイト調査で取得される膨大かつ多様なデータを体系的に管理し, 評価プロセスを一貫して支える情報基盤である。また, 評価プロセスの再現性を確保し, 長期的な説明責任を支える枠組みとして位置付けられる。

本稿では, G3S のシステム開発について, 基本設計を踏まえ, 具体的な実装レベルへ落とし込んだ詳細設計の内容を示し, 長期的な情報基盤としての特徴と意義を述べる。

2. 詳細設計の方針

詳細設計では, 将来にわたる運用環境の変化に対して柔軟に適応できる実装構造の確立を目的とした。地層処分事業は 100 年に及ぶため, データ量の増加, 技術基盤の更新, 利用組織の変化など, 事業を取り巻く情勢の変化を考慮した拡張性・保守性が求められる。

G3S では, プレゼンテーション層, アプリケーション層, データ層からなる三層アーキテクチャを採用し, 機能追加時の影響範囲を限定した。また, 地質・水理・地球化学・自然環境など複数分野で利用されることから, 統一された操作体系を提供するユーザーインターフェース設計を重視した。

これにより, 異なる専門領域間でも一貫したデータの取扱いが可能となる。さらに, データ更新履歴や承認履歴を体系的に管理することで, 地質環境モデルの構築や解析結果がどのデータに基づいて得られたかを追跡可能とし, 評価過程の再現性を担保できる仕組みを構築した。

長期運用では, 技術基盤の陳腐化が避けられないため, アーキテクチャ選定においては将来的なサービス移行を容易にする疎結合構造を意識して設計した。

3. システムアーキテクチャとクラウド基盤設計

クラウドサービスには Amazon Web Services (AWS)を採用し, コンテナ基盤によるアプリケーションの統合管理, 冗長化, 運用の自動化を実現した。

プレゼンテーション層では Nuxt.js により地図表示, 検索, 承認操作, データ登録などの一貫したユーザーインターフェースを提供し, アプリケーション層では, 検索処理やデータセットの管理などを統合している。データ層では, Amazon Relational Database Service (Amazon RDS)の PostgreSQL/MariaDB, Amazon Simple Storage Service (Amazon S3)を役割に応じて利用し, 構造化・非構造化データを効率的に扱える構成とした。

くわえて, AWS のマネージドサービスを統合的に活用することで, ネットワーク, 認証, データ管理, 監視を一元的に運用でき, 障害復旧性の向上, バックアップの自動化, 及び負荷変動への柔軟な対応を実現した。さらに, 構成標準化を進めることで, 将来的な機能追加を共通の設計理念に基づき変更可能な運用構造とした。業務時間帯における安定稼働及び障害発生時の早期復旧を重視した可用性設計とした。災害対策として, 複数リージョンへの自動バックアップ及び任意時点への復旧機構を組み込んだ。さらに, 監視ログ・アクセス制御ログを統合管理し, サイト選定における説明責任及び透明性の向上にも寄与する設計とした。

これらの論理アーキテクチャとクラウド基盤を統合した設計により, G3S に求められる長期運用性, 拡張性, 信頼性の確保を図った。

4. 調査データ統合に向けたデータ管理設計

地層処分事業においてはサイト調査で取得されたデータ

はある時点でバージョンを固定し、処分場の設計や安全評価の担当者にデータ一式を引き渡す。そして、その後の調査で得られたデータは、次のデータフリーズに反映されることが一般的であり、IAEA (2024) でも重要であることが示されている。

G3S では、データフリーズ (第 1 図) とデータセットの概念を中心に、地質環境モデルの構築に使用したデータの範囲を管理可能とした。この枠組みにより、評価プロセスの再現性と説明性の向上を図る。

さらに、リンクファイル (第 2 図) による一括登録方式の導入、論理削除運用、手書き資料の OCR (Optical Character Recognition) 処理による全文検索、地図検索やグラフ作成 (第 3 図) など、空間データと属性データを関連付けた探索機能を整備し、調査地点から関連資料の探索を体系的にできる仕組みを構築した。

オンラインストレージ構築ソフトウェア Nextcloud によるファイル交換機能を実装し、組織間でのデータ流通の効率化と品質確保を両立する仕組みとした。また、G3S のシステム整備と併せて、調査会社から NUMO へ調査データを納品する際の標準テンプレートと統合インポート仕様の策定も検討しており、今後、調査業務の仕様書に反映を予定している。

5. まとめと今後の課題

本稿では、G3S の詳細設計として、三層アーキテクチャに基づく構造設計、クラウド基盤上での実装方針、及び調査データ統合に向けたデータ管理設計などを整理した。

特に、データセット及びデータフリーズ の概念を中核としたデータ管理の枠組みは、評価過程の再現性と説明責任を長期的に確保するために有効である。また、クラウド基盤の活用により、長期安定性、拡張性、信頼性の確保を図りつつ、可用性確保、負荷変動への対応、バックアップ自動化など、長期運用に必要な機能を体系的に整備した。

さらに、詳細設計では、実運用における業務フローの多様性に対応するため、データ登録や承認手順について、業務フローの違いに応じて設定可能な設計とすることで、標準化と運用上の柔軟性の両立を図った。調査会社とのデータの授受や組織横断的な利用を前提とし、ユーザインターフェースの統一性や履歴管理の自動化など、実務における課題への具体的な対応方針を設計段階から組み込んだ。これらの取り組みにより、G3S は地層処分事業における実務的基盤にとどまらず、調査データ管理の標準化や再現性確保に関する知見を提供する情報基盤としての実効性を高めている。

2026 年度は、本詳細設計の結果に基づき、G3S の開発を本格化する予定である。2027 年度以降は AI を活用したメタデータ作成支援機能や RAG (Retrieval-Augmented Generation) 機能の拡充を進め、調査データの検索性と利活用性の向上を図る。AI の適用範囲を拡大しつつも、データの解釈や評価に係る判断については、人による確認を前提とし、両者を適切に組み合わせることで、長期にわたり信頼性の高い情報管理体制の確立を目指す。

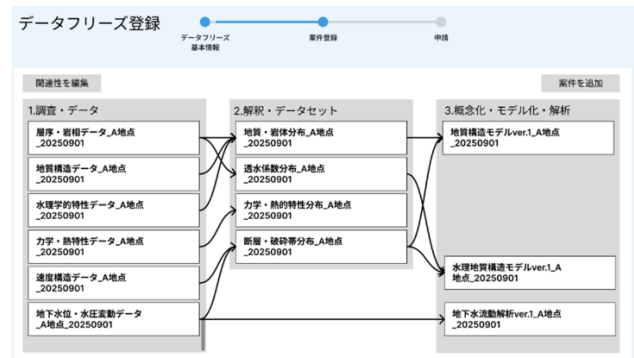
謝辞

本稿の検討に際して、要件定義・基本設計工程では、エヌ・ティ・ティ・データ CCS 株式会社、詳細設計工程では、データマネジメントシステムの詳細設計・開発 日本工営・インフォアース設計共同体にご支援をいただいたことを、深く感謝を申し上げます。

文 献

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

西尾光, 尾上博則, 大城遥一, 石橋梢 (2025) 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. 第 36 回日本情報地球学会講演会講演要旨集. pp.29-30, <https://www.jsgi.org/event/abstract/geoinform2025/13.pdf> (2026.4.1.閲覧)



第 1 図 データフリーズのイメージ
元データと解釈データを紐づけて、視覚的に表示する。



第 2 図 リンクファイルによる一括登録のイメージ



第 3 図 グラフ作成のイメージ
ユーザが選択したグラフの種類や条件を指定して作図する。

漂流海洋ブイ位置データと海洋再解析データを用いた 北太平洋における水平拡散係数値の推定

杉山徹*・西川悠*・藤木徹一*・野口真希*・宮澤泰正*・木戸晶一郎*・飯沼卓史*・桑谷立**

Estimation of horizontal diffusion coefficients in the North Pacific region using drifted buoy position data and ocean reanalysis data

Toru Sugiyama*, Haruka Nishikawa*, Tetsuichi Fujiki*, Maki Noguchi*,
Yasumasa Miyazawa*, Shoichiro Kido*, Takeshi Inuma* and Tatsu Kuwatani**

* (国研) 海洋研究開発機構, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC),
3173-25 Showamachi, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan, E-mail: tsugi@jamstec.go.jp
** (国研) 海洋研究開発機構, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC),
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

キーワード: 拡散係数, 海洋漂流物, 仮想粒子追跡, 海洋モデル,

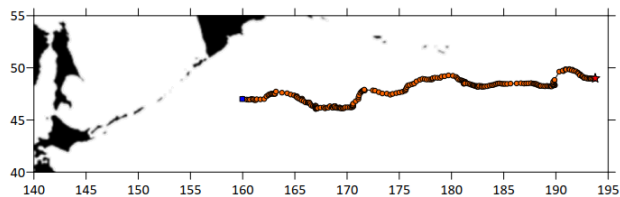
Key words: Diffusion Coefficient, Drifted matter, Virtual Particle tracking, Ocean model

1. はじめに

流体中に分布させたトレース可能な粒子を用いた流体運動のラグランジェ解析 (例えば粒子画像流速測定法 (PIV 解析)) は, 流体の循環場を解析するためのメジャーな手法である. 海洋物理においても, 例えば, 海底火山によって生じた軽石位置を追跡することで, 同様な解析が行われている (Kuwatani et al., 2025). さらに, 仮想粒子を海洋モデルで得られた海流場の中で追跡することで, モデル海洋場のラグランジェ解析も行われており, マイクロプラスチックの外洋における拡がりに威力を発揮している. このような背景の中, 観測やモデルにおけるラグランジェ解析の結果に大きな影響を与える要因の1つに, 追跡している粒子の拡散現象がある. いわゆる渦拡散, 乱流拡散に起因するこれら物理的な拡散は, モデル化された流体場では, レイノルズ分解によって記述されるものの, 離散化のため拡散係数はパラメータ化されて記述されており, 現在, 普遍的なパラメータ値を得るための研究が続けられている. 一方, 実海域において漂流物を追跡することにより実質的な拡散係数を推定することも行われている (Rühs et al., (2018) など). しかし, PIV 解析に匹敵するような多数の漂流物軌道を統計的に解析できるケースや場所は実海域では限られているため, 知見が得られるケースも偏りが見られる. そこで, 本研究では, たった1つの漂流物から拡散係数推定を試みた結果を報告する. 今回は, 漂流ブイの軌跡データと海洋モデルデータを組み合わせることで, 漂流した海域における表層水平拡散係数を推定した結果を報告する.

2. 使用したデータと海洋モデル及び解析手法

今回の解析では, 西部太平洋亜寒帯循環域 K2 点 (北緯 47 度・東経 160 度) の定点係留ブイが, 意図せず漂流してしまっ



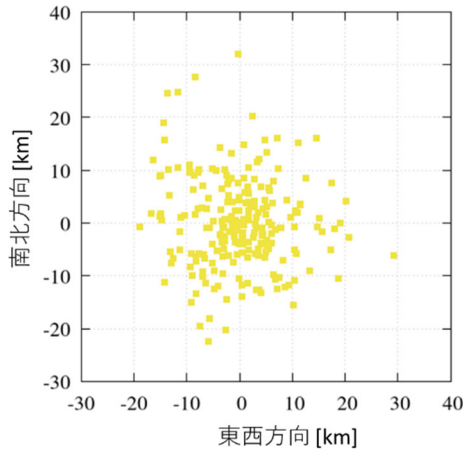
第1図 解析に用いたブイの軌跡. 海流により青四角点から赤星点へ東に移動する. 赤丸点は, GPS データの確定位置を示す.

間毎に位置データが取得されている. 海洋モデルは, JCOPE-FGO 再解析データを用いた (Kido et al., 2022). こちらも, 24 時間ごとに海表層における東西及び南北方向の流速データ (GPV データと呼ぶ) などが 0.1 度毎に全球の海域で算出されている.

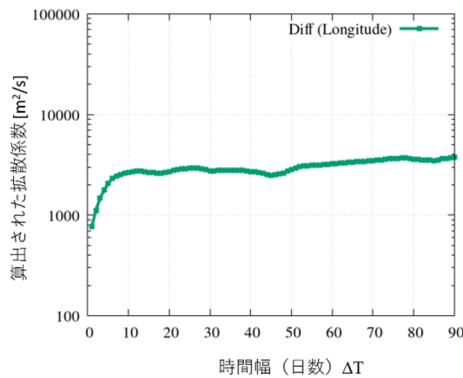
拡散係数は, 単位時間当たりの分散値から算出されるため, 次の手法を用いる. 任意の時刻 (T) の GPS ブイ位置 $\mathbf{X}_m(T)$ から, GPV データを用いて時刻 (T+ ΔT) におけるブイ位置 $\mathbf{X}_m(T+\Delta T)$ への移動を, 粒子追跡法を用いて算出推定する. その推定位置と実際のブイ位置 $\mathbf{X}_r(T+\Delta T)$ とのズレ (分散値) から, 東西と南北方向の拡散係数及び, 水平 2 次元の拡散係数を算出する. T と ΔT の値は約 200 日分の GPS データから多数の組み合わせで得られるため, これらの統計解析から拡散係数が算出されその特性が考察できる. なお, 海洋モデルである GPV データには, モデル特有の誤差やバイアスが内包されている. そのため, 算出される分散値, すなわち拡散係数は, 物理的な拡散に起因する量との合算値となる. しかし, 実海域において海洋モデルの値からラグランジェ解析を行う際には, その用いるモデル毎の合算拡散係数が実質的かつ有効的な拡散係数として振る舞うため, 本研究では, 合算値にこそ意味があるとする.

文 献

- Kido S., M. Nonaka, Y. Miyazawa (2022), JCOPE-FGO: an eddy-resolving quasi-global ocean reanalysis product, *Ocean Dynamics*, vol. 72, pp.599-619.
- Kuwatani T., H. Hino, H. Nishikawa, S. Akaho (2025), Data-driven proactive prediction of pumice drifting patterns using similarity search of the Kuroshio current axis, *Natural Hazards*.
- Rühs S. V. Zhurbas, I. Koszalka, J. Durgadoo, A. Biastoch (2018), Eddy Diffusivity Estimates from Lagrangian Trajectories Simulated with Ocean Models and Surface Drifter Data—A Case Study for the Greater Agulhas System, *J. Physical Oceanography*, vol. 48(1), pp. 175-196.



第2図 海洋モデルによって算出したブイの推定位置と実際のブイ位置との差. 東西・南北方向ともに正負方向への偏りが小さい.



第3図 算出された東西方向の拡散係数. ΔT が10日程度を超えると、変動が小さくなる

3. 結果

第2図に、 dT を最小の約24時間とした場合の「 $\mathbf{X}_k(T+\Delta T) - \mathbf{X}_m(T+\Delta T)$ 」の散布図を示す。海洋モデルが完全にブイの移動を予見した時の位置 (0,0) を中心に広がっており、東西方向及び南北方向ともに、正負方向への偏りが小さい。つまり、海洋モデル内の系統的なバイアスが小さいと考えられる。第3図に、算出された東西方向の拡散係数を ΔT に対して表示する。なお、開始時刻 T に関する平均値である。10日程度までは、拡散係数の単調増加が見られ、ブイの移流運動へ海流構造の過去の記憶(影響)が残っている様子が現れている。その構造として例えば、10~100km程度の中規模渦からの影響が挙げられる。その後は変動が小さくなり拡散が主となる様子が見られる。ここでは、約3000 [m²/s]の値が拡散係数として得られている。前述の Rühs et al., (2018) においては、 $O(10^3)$ m²/s と報告されており、同程度の値が得られている。講演では、ブイの軌跡追跡の開始時刻 T に対する拡散係数値の依存も議論する予定である。

三次元地形における地震応答解析 (FEM) 結果の評価手法に関する一考察

吉田 力*・片平 大暉*・樋上 広篤*・櫻井 稜太*

A Consideration of Evaluation Methods for the Results of Seismic Response Analysis (FEM) in Three-Dimensional Topography

Chikara Yoshida *, Daiki Katahira *, Hiroshige Higami *, Ryota Sakurai *

* 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 001-0010Japan. E-mail: yoshida_chikara@dcne.co.jp,
katahira_daiki@dcne.co.jp, higami_hiroshige@dcne.co.jp, sakurai_ryota@dcne.co.jp

キーワード： FEM, 地震応答解析, 三次元地形

Key words： FEM, Seismic Response Analysis, Three-Dimensional Topography

1. はじめに

近年、我が国では大規模な地震災害が頻発しており、南海トラフ巨大地震等のリスクを見据えた防災・減災対策の高度化が急務となっている。特に山間部のインフラや都市近郊の造成宅地においては、三次元的な地形特性に起因する局所的な揺れの増幅や斜面崩壊が深刻な問題となっている。

これまで多用されてきた二次元断面による簡略化解析では、これら複雑な地形効果を的確に評価することは困難であり、対策の過小評価や非効率な投資を招く懸念があった。

このような課題に対し、有限要素法を用いた三次元地形の地震影響解析は、三次元地形特有の地震波の集中現象や複合的な地滑り挙動を再現・予測できる有効な技術として重要性を高めている(佐々木, 2013)。本論文では、頻発する近年の地震災害への対応という観点から、三次元有限要素解析結果における評価手法として有効と考えられる要素と判断基準、さらに今後の展望について述べる。

2. 技術概要

2.1 地震応答解析技術の概要

地震応答解析技術とは、「過去の地震波」や「想定される地震動」を地形モデルに入力し、地盤や構造物がどのように揺れ、変形し、破壊するかをコンピュータ上で予測評価する技術である。耐震評価の妥当性を検証し、被害を予測するための重要な根拠である。解析技術は、主に「次元数(空間)」と「材料の特性(挙動)」の2軸で分類される。

2.2 「空間の次元数」による分類と特徴

① 一次元解析

地盤を水平な無限の層と仮定し、地震波が真下から真上へ伝わる挙動のみを計算する。計算負荷が極めて低く、揺れやすさを迅速に評価が、複雑な地形は考慮できない。

② 二次元解析

奥行き形状が長い同一断面形状モデルの解析に適した手法。一次元より破壊状態を把握し易く実務に使用実績が多いが、三次元的な波動伝播効果は考慮できない。

③ 三次元解析

地形、地層、構造物を三次元要素として解析する手法である。尾根での揺れの増幅やねじれを伴う複雑な崩壊挙動を

考慮できるがモデル作成と計算に時間と費用が掛かる。

2.3 「材料の特性(挙動)」による分類と特徴

① 線形解析 (Linear)

構造物や地盤をバネと扱い、強い力を加えても元に戻ると仮定して計算する手法である。計算がシンプルで高速であるが、地震影響の評価には適していない。

② 等価線形解析 (Equivalent Linear)

発生した最大変形(ひずみ)に見合った剛性と減衰でパラメータを修正して繰り返し計算する手法である。強い地震による液状化や土砂崩れは扱えない。

③ 非線形解析 (Non-linear)

地震の進行に伴い、材料がひび割れ崩壊していくプロセスをリアルタイムで追従計算できる手法である。地震時の崩壊状態を予測できるが、計算が極めて複雑である。

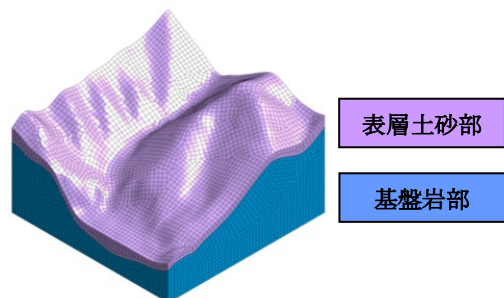
2.4 現代のトレンドと課題

現在の地震応答解析は、「三次元×地震応答解析(動的非線形解析)」へとシフトしている傾向にある。背景としてPCの高性能化により、従来は困難であった大規模な要素の解析が可能になったこと。さらに UAV や LiDAR 計測による高精度な三次元地形データの取得技術の進展が挙げられる。

3. 三次元地形における地震応答解析

3.1 解析モデルと各種定数

PCの高性能化が進んだと言えども、実際の解析時間を考えると通常の検討業務では、1日(24h)程度で解析が終了することが望ましく、現状では、30万要素程度が実用的である。



第1図 地形モデル

解析モデルは、予測崩壊部を網羅した範囲となるように、三次元形状を 250m×250m×160m とし、5m の六面体メッシュを基本として、地層は基盤岩部と表層土砂部に分けた解析モデルを作成した。使用物性値を第 1 表に示す。

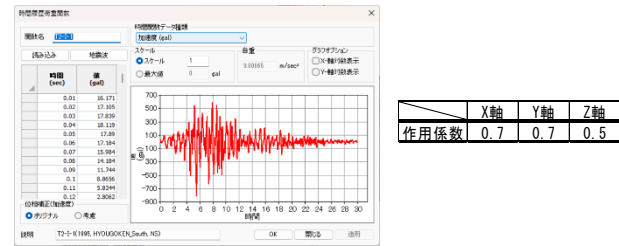
第 1 表 使用物性値

	物性値						
	ポアソン比 ν	ヤング率 E(kN/m ²)	単位体積重量 γ(kN/m ³)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 φ(°)	引張強度 σ _t (kN/m ²)	材料減衰 減衰比 h
表層土砂部	0.3	420000	19	300	25	20	0.02
基盤岩部	0.3	7500000	25	500	40	500	0.02

拘束条件とダンパー要素を考慮し、側面には自由地盤および自由地盤ダンパーを底版には底面ダンパーを設置した。

3.2 作用地震波形と作用係数

入力波形としては、道路橋示方書Ⅱ-I-1 の波形を三方向(X 軸東西, Y 軸南北, Z 軸上下)で係数低減し作用させた。



第 2 図 作用地震波形と作用係数

4. 評価項目と判断基準

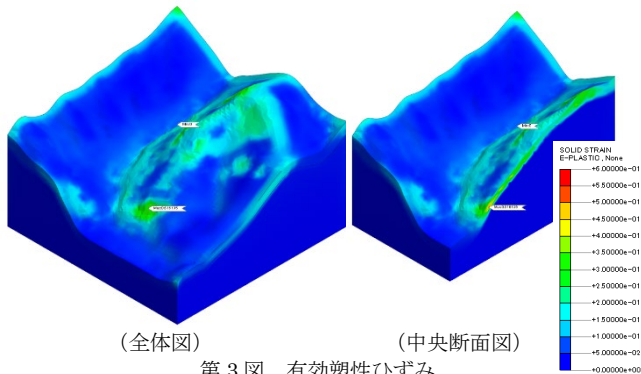
4.1 地震応答解析における評価項目

地震波形の影響は、解析要素が相互に異なる動きをした結果として要素内部の状態に表れた現象である。特に以下の項目に着目した。

- ①有効塑性ひずみ：微小な破壊による不可逆性のひずみ
- ②相 対 変 位：部位ごとの差分変位
- ③加 速 度：瞬間的な変動エネルギー

4.2 有効塑性ひずみ

突出尾根部を含む斜面の基盤岩盤と表層土砂部の境界に 30%以上の有効塑性ひずみの発生が確認された。

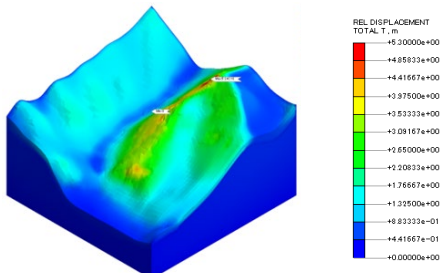


第 3 図 有効塑性ひずみ

突出した尾根部に有効塑性ひずみが生じる結果となった。

4.3 相対変位

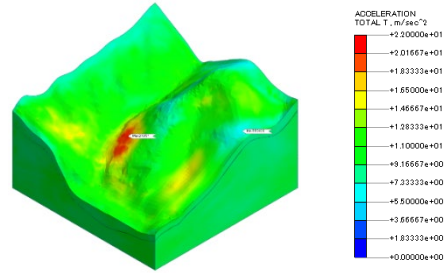
突出尾根部に合成相対変位が増大した。左側谷部の変位が小さく突出尾根部が最大約 5.2m 変位を示した。



第 4 図 相対変位

4.4 加速度

突出尾根部に約 2000gal の非常に大きな加速度が生じた。周辺部分の 700gal に比べて約 3 倍の増幅が確認された。



第 5 図 加速度

4.5 有効塑性ひずみによる判断基準

塑性ひずみの増加は、地盤物性の持つ力学的耐力を超過した外力が作用した結果であり、地盤物性に变化が生じていると考えられている(日外, 2016)。せん断ひずみの範囲は、ひずみレベル

- 0.01%未満：弾性
- 0.01%以上～1.0%未満：弾塑性
- 1.0%以上：破壊

本検討モデルでは、30%以上の有効塑性ひずみが基盤岩盤と表層土砂部の境界に発生しており、境界部を境に不安定化が進行すると判断した。相対変位および加速度の値も不安定化の進行評価の妥当性を否定しない結果となった。

5. 考察

地盤の有限要素法解析では、局所安全率による評価が一般的であるが、地震による斜面崩壊は、地震直後に発生する場合と、ある程度の時間経過後に発生する場合がある。局所安全率のみでの評価では、地震直後の評価は可能であるが、不安定化の兆候までは評価していない。

そのため、物性の変化状態を不安定化評価に活用することにより、崩壊予兆の見落としを防ぐことを考慮した。物性変化の状態を把握し評価できる要素として、有効塑性ひずみを採用した。ひずみレベル値から物性変化を推定する指標があるため、評価要素として適していると判断した。

有効塑性ひずみは、外力が除荷された後も残留し、その後に作用する外的要因によってさらに累積するため、物性変化の進展を評価できる可能性にも期待している。

6. まとめ

岩盤崩壊の原因として風化・劣化による亀裂の進展が挙げられている(日外, 2011)。一般に風化・劣化は、時間経過による物性変化として理解されているが、その要因となる事象は多岐にわたり、外力による微小な破壊も風化・劣化を加速させる要因の一つである。特に大規模な地震による影響は非常に大きいと考えられる。

本評価手法は地震動による不安定化の評価手法であるが、今後、この考えを発展させ、作用外力による風化・劣化の進行を評価する手法の確立を目指したい。

文 献

佐々木靖人, 浅井健一, 日外勝仁, 江口貴弘『ゆるみ岩盤の安定性評価法の開発』土木研究所 (2013 年)
 日外勝仁, 江口貴弘, 佐々木靖人『FEM を用いた進行性ゆるみ岩盤の解析モデル化方法と評価の流れ』公益社団法人土木学会 (2016 年)
 日外勝仁, 伊東佳彦, 佐々木靖人『岩盤斜面崩壊事例分析に基づく崩壊形態と崩壊分離面の関係』日本応用地質学会 研究発表会講演論文集 (2011 年)

Optimizing Machine Learning Models for Landslide Susceptibility Mapping in Yen Bai Province, Vietnam

Tran TUNG LAM*, Tatsuya NEMOTO*, Sambuddha DHAR*, Truong XUAN QUANG** 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: sp22872l@st.omu.ac.jp

** Vietnam National University, Hanoi School of Interdisciplinary Sciences and Arts, Hanoi, Vietnam.

Key words: Landslide, Susceptibility, Machine Learning, Bayesian Optimization

1. Introduction

Landslide hazard assessment is crucial for managing and mitigating landslide risks. Landslide Susceptibility Mapping (LSM) provides a practical and cost-effective tool for zoning areas prone to landslides. LSM expresses in the form of a probability of landslide risk in each pixel. This study implements Machine Learning (ML) models to generate Susceptibility Maps in Van Yen (VY), making them applicable to diverse topographic regions, particularly in areas significantly affected by human activities. The effectiveness of the method will be evaluated on the same dataset before and after applying Frequency Ratio (FR). ML models are trained in VY area, then validated on the dataset in Mu Cang Chai (MCC). The results indicate that Random Forest (RF) and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) achieved the highest and most consistent performance, along with the highest learning capacity.

2. Study Area and Methodology

2.1 Study area and data

Van Yen (VY) district is a mountainous district located in the northern part of Yen Bai province, with geographical coordinates ranging from 104°20'17" to 104°47'38" East longitude and 21°39'57" to 22°12'12" North latitude. It is one of the most affected areas indicating high and very high landslide occurrences in the province. In the northwest of the district, there are several moderately high mountains with rugged terrain and high slopes (Truong et al., 2023a).

2.2 Methodology

The Machine Learning tasks were performed Python GeoInformatics Lab Environment-Plus (PyGILE-Plus) environment (Awasthi et al., 2025). It is a comprehensive, headless Docker environment for geospatial research with algorithms across multiple GIS platforms plus a complete Python geospatial stack. For this study, landslides are mapped after landslide event occurred. To ensure all factors have the same range of values, all factors are standardized using Frequency Ratio (FR). The datasets are created by combining balanced numbers of landslide and non-landslide points with 17 contributing factors, including topographic, geological, hydrological, anthropogenic, and vegetation factors. Principal Component Analysis (PCA) and Pearson correlation

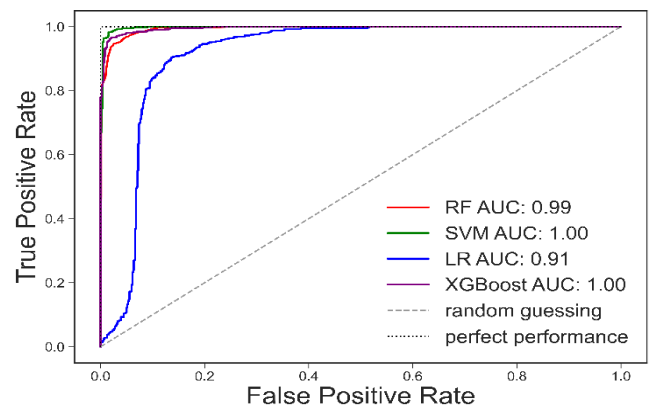


Figure 1: ROC curves for the three models in MCC before standardization

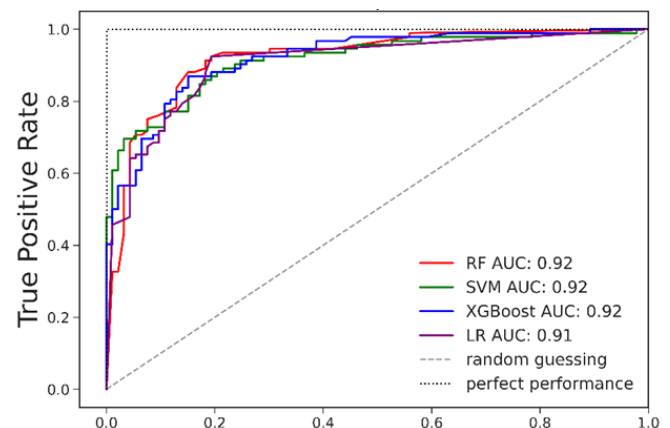


Figure 2: ROC curves for the three models in MCC after standardization

assess the independence and correlation of these factors. Feature importance evaluates the impact of each factor on the ML models performance. The factor with high correlation and least significant impact value was removed. Subsequently, four machine learning models—Random Forest, Support Vector Machine (SVM), Logistic Regression (LR), and XGBoost—are used on the same dataset before after standardization using FR. After

training with the VY dataset, external validation for the ML models is conducted in the MCC district with its own landslide inventory. Accuracy score, Kappa score, Receiver Operating Characteristic Curve (ROC) and Area under the ROC Curve (AUC) are utilized for models performance evaluation, while Efficient Global Optimization (EGO) is used to assess model learning capability (Alibrahim & Ludwig, 2021).

3. Results and Discussion

In MCC, the average accuracy score of all models was 0.83. Among the models, XGBoost achieved the highest accuracy score of 0.84, with RF slightly behind at 0.83 before and after standardization.

Before applying FR, SVM achieved highest AUC value at 0.94, as seen in Figure 1. After the standardization, the AUC value of SVM reduced to 0.92, the same as RF and XGBoost, while LR slightly jumped down to 0.91 from 0.92 (Figure 2). This minor difference in accuracy before and after standardization indicating stable model behavior across all models under both conditions, with Random Forest (RF) and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) performed comparably well.

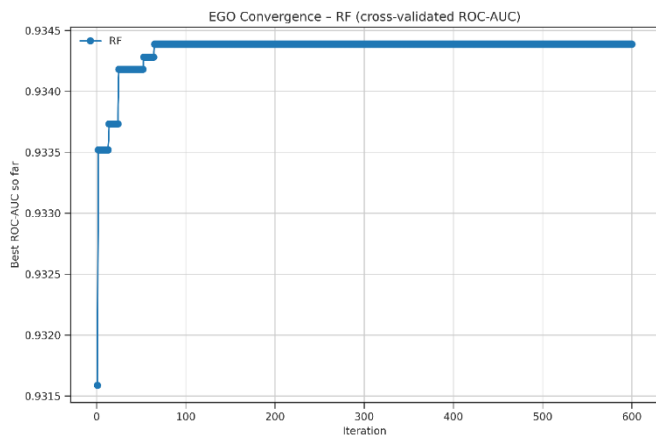


Figure 3: Convergence curves of all models during Bayesian Optimization

Figure 3 shows the model convergence curves for RF model. RF is the most stable ML model, hence, it was selected for this test. Within 600 iterations, RF achieved very high ROC-AUC (~ 0.934) early at under 100 iterations and stays flat since, suggesting it converges quickly and doesn't improve further after initial runs. Random Forest proved to be the most stable model with the highest learning capability.

The susceptibility maps represent the probability of each pixel experiencing a landslide, with susceptibility categorized into five risk levels: Very Low, Low, Medium, High, and Very High. A color gradient (blue, green, yellow, orange, and red) is used to illustrate these levels, following expert judgment criteria established in previous research). Each ML model generates a distinct LSM, where color-coded pixels indicate varying susceptibility levels. The resulting LSMs for RF and XGBoost in the study area are shown in Figure 4.

The trained models were validated on the MCC area to ensure their generalizability. The SVM and LR models do not generalize well on the unseen data. However, FR method shows some improvements across all metrics.

The study demonstrates that RF and XGBoost models achieved the highest of the four models tested, though RF is only slightly behind. RF continues to be a reliable ML.

4. Summary

FR has proven to be a useful method to standardize the dataset. From the results of the analysis, it can be concluded that the landslide inventories still contain bias from the method the landslide is collected. To cover a wider range of influence, climate factors (e.g., rain precipitations, wind and humidity...) will be included. The scope of the study will be expanded to other regions, including Japan, to assess the effectiveness of ML models across diverse geological and topographic settings. Many landslides happened on igneous, metamorphic rocks and limestone. This indicates there are moderate - thick layers of weathered soil on top of these rocks. Future research will integrate the weathered soil layer to further increase the impact value of geologic factors when using ML evaluation.

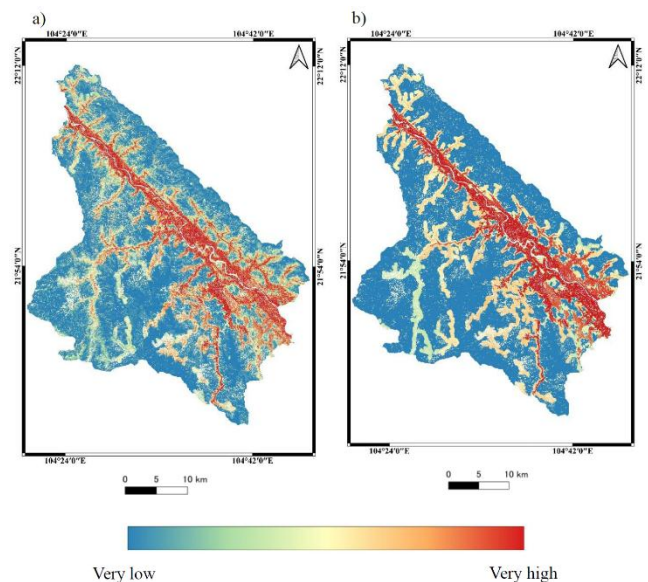


Figure 4: LSM of VY area generated by a) SVM and b) LR

References

- Awasthi, B., Ninsawat, S., Raghavan, V., & Nemoto, T. (2025). PyGILE-Plus: Python GeoInformatics Lab Environment-Plus [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16146572>.
- H. Alibrahim and S. A. Ludwig. (2021). Hyperparameter Optimization: Comparing Genetic Algorithm against Grid Search and Bayesian Optimization. 2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pp. 1551-1559, doi: 10.1109/CEC45853.2021.9504761.
- Truong, X. Q., H. V., T. Thuy, P. Q. Nhan, P. T. Thanh, T. X. Luan, V. A., B. N. Dung, T. T. Tran, N. T. Thanh, H. Y. N. Thi, D.V. Nam (2023) Integrating Artificial Intelligence and Earth Observation Technologies for Landslide Studying in the Northern Mountain of Vietnam. *Ministry of Science and Technology of Vietnam*. Project No. NĐT/IT/21/14.

Spatial Modelling of Groundwater Potential Zones Using GIS-Based Machine Learning Techniques: A Case Study of Abuja, Nigeria

Danlami IBRAHIM, Tatsuya NEMOTO, Venkatesh RAGHAVAN and Sambuddha DHAR

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: GWPZ; aquifer thickness; XGBoost; Random Forest; Support Vector Machine; depth to bedrock; ROC-AUC; ensemble learning algorithm

1. Introduction

Groundwater is an important global freshwater resource that supports domestic, agricultural, and industrial water needs, especially in developing countries. Groundwater potential refers to the likelihood of groundwater occurrence within a given hydrogeological setting. Increasing population growth, large-scale agricultural activities, urbanisation and industrialisation have intensified groundwater exploitation beyond natural recharge rates, threatening its sustainability (Sachdeva & Kumar, 2020). Groundwater occurrence is controlled by several hydrogeological and environmental factors, including lithology, slope, fractures, rainfall, drainage characteristics and land use/land cover (Sankar et al., 2023).

Conventional groundwater exploration techniques, although reliable, are often expensive, labour-intensive and unsuitable for large-scale applications in data-scarce regions (Ajay Kumar et al., 2020). Consequently, GIS and Remote Sensing (RS) techniques are increasingly applied in groundwater potential zone (GWPZ) mapping due to their efficiency in spatial analysis (Akter et al., 2020). Recent advances in machine learning (ML), particularly Random Forest (RF), XGBoost and Support Vector Machine (SVM), have improved groundwater modelling accuracy and reduced subjectivity compared to conventional multi-criteria decision-making (MCDM) approaches (Prasad et al., 2020).

This study aims to integrate geophysical data, GIS, RS, and ML techniques to delineate groundwater potential zones (GWPZ) in Abuja, Nigeria. The research will also evaluate the influence of groundwater conditioning factors and assess model predictive performance to support sustainable groundwater management.

2. Significance and Contribution

This research demonstrates the effectiveness of integrating GIS, RS and ML techniques for groundwater potential mapping in Abuja, Nigeria. The application of Random Forest (RF), XGBoost, and Support Vector Machine (SVM) models in this research improves mapping accuracy and reduces the subjectivity often associated with conventional methods. The generated GWPZ maps will support sustainable groundwater exploration, water resource management and long-term water security planning in the study area.

3. Study area

Abuja is situated between latitudes 8°21' – 9°18' N and longitudes 6°45' – 7°39' E and covers an area of approximately 8,000 km² with an average elevation of 476 m above sea level. The region is in a tropical climate with distinct wet and dry seasons. Geologically, around 85% of Abuja is underlain by the Precambrian basement complex rocks, while the remaining 15% consists of Cretaceous sedimentary rocks from the Bida Basin. Major lithological units include Migmatite-Gneiss, Schist, Amphibolites, Older Granites, and Sedimentary Deposits. Groundwater occurs mainly within weathered regolith and fractured basement aquifers, with its occurrence and movement controlled by lithology, soil properties, overburden thickness and fracture connectivity.

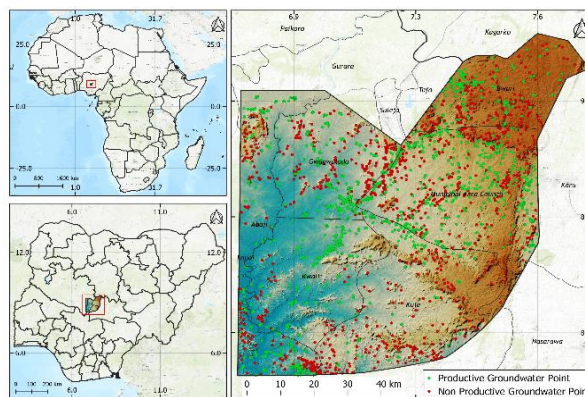


Figure 1: Location of the study area

4. Data and Methods

This study developed a groundwater database for Abuja, Nigeria, using borehole data obtained from FCT-RUWASSA, the FCTA's SDGs office, and private drilling companies. Productive boreholes represented groundwater presence points while abortive boreholes and rock outcrops represented absence points. A total of 2410 georeferenced points were divided into 80% training and 20% testing datasets. Groundwater potential mapping was conducted using nine conditioning factors: geology, depth to bedrock, aquifer thickness, slope, lineament density, drainage density, distance from rivers, rainfall, and land use/land cover (LULC).

Depth to bedrock and aquifer thickness were derived from Vertical Electrical Sounding (VES) data collected at 823 locations, while other thematic layers were generated from DEM, Landsat-8 imagery, CHIRPS rainfall data, and geological datasets within a GIS environment. RF, XGBoost and SVM models were developed and validated using ROC-AUC, confusion matrix metrics, stratified 10-fold cross-validation, and hold-out validation to ensure predictive accuracy and model reliability.

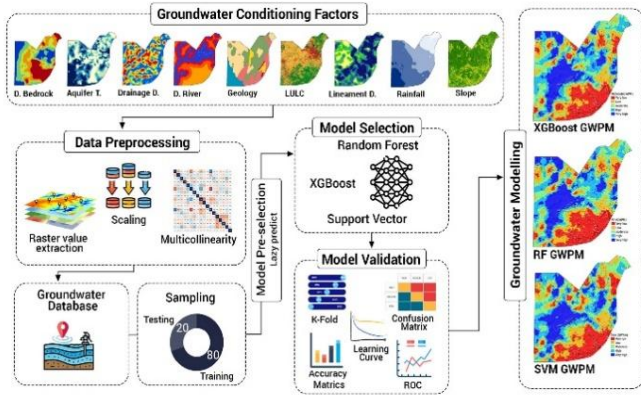


Figure 2: Methodology Flow Diagram

5. Results

The GWPZ maps generated using XGBoost, RF and SVM reflected the hydrogeological characteristics of Abuja. Very high to high GWPZ were mainly concentrated in the southwestern and western regions, where gentle slopes, thicker aquifer layers and favourable drainage conditions promote infiltration and groundwater storage. Conversely, the southeastern and northeastern areas exhibited low groundwater potential due to steep slopes, limited weathering and high runoff.

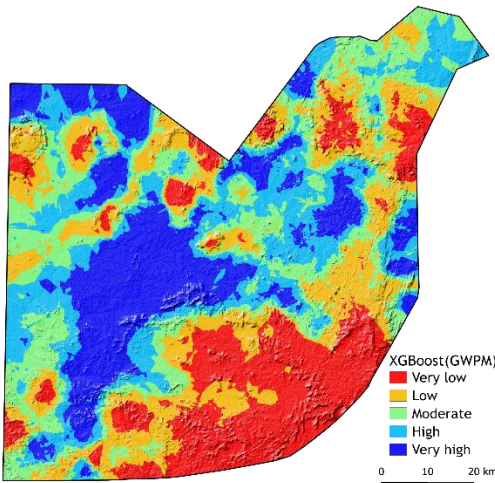


Figure 3: Groundwater Potential Zone Map

Feature importance analysis identified slope, land use/land cover, drainage density and proximity to rivers as the dominant groundwater controlling factors, while low pairwise correlations ($|r| < 0.5$) indicated minimal multicollinearity among predictors. The models demonstrated strong predictive performance with ROC-AUC values of 0.89 for XGBoost, 0.88 for RF, and 0.87 for SVM,

indicating good stability, reliability and generalisation capability for groundwater potential mapping.

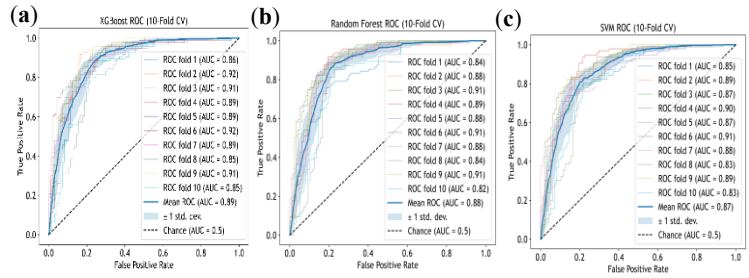


Figure 4: ROC-AUC curves of the ML models: (a) XGBoost model, (b) RF model, (c) SVM model.

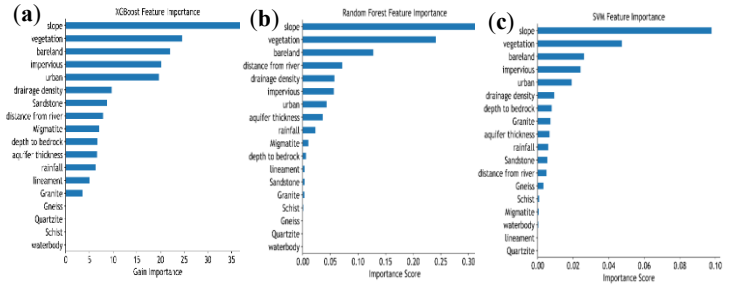


Figure 5: Variable importance of conditioning factors: (a) XGBoost; (b) Random Forest; (c) SVM.

References

Ajay Kumar, V., Mondal, N. C., & Ahmed, S. (2020). Identification of Groundwater Potential Zones Using RS, GIS and AHP Techniques: A Case Study in a Part of Deccan Volcanic Province (DVP), Maharashtra, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(3), 497–511. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01086-3>

Akter, A., Uddin, A. M. H., Wahid, K. B., & Ahmed, S. (2020). Predicting groundwater recharge potential zones using geospatial techniques. *Sustainable Water Resources Management*, 6(2), 24. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00384-w>

Prasad, P., Loveson, V. J., Kotha, M., & Yadav, R. (2020). Application of machine learning techniques in groundwater potential mapping along the west coast of India. *GIScience & Remote Sensing*, 57(6), 735–752. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1794104>

Sachdeva, S., & Kumar, B. (2020). Groundwater potential mapping using machine learning models for Northeastern Karbi Anglong district, Assam, India. *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, 116–121. <https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362869>

Sankar, K., Karunanidhi, D., Kalaivanan, K., Subramani, T., Shanthi, D., & Balamurugan, P. (2023). Integrated hydrogeophysical and GIS based demarcation of groundwater potential and vulnerability zones in a hard rock and sedimentary terrain of Southern India. *Chemosphere*, 316, 137305. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137305>

温泉析出の鉄ミョウバン石の SO_4 イオンと温泉中の $\delta^{18}\text{O}$ の比較による 火山活動期での深部熱水混合率推定の試み

山本 睦徳*・柏谷公希**・小池 克明**

An Attempt to Estimate the Mixing Ratio of Deep Hydrothermal Fluids in Active Periods of Volcano Based on a Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ Values in SO_4 Ions in Jarosite Deposits from Hot Springs with Hot Spring Waters

Mutsunori Yamamoto*, Koki Kashiwaya** and Katsuaki Koike**

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

**京都大学大学院工学研究科 都市社会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，鉄ミョウバン石，酸素同位体比，火山活動

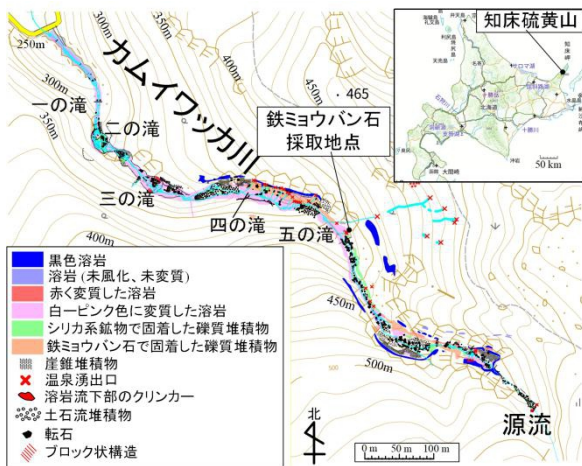
Key words: Shiretokoiozan volcano, Jarosite, Oxygen isotope ratio, Volcanic activity

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。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，硫黄を含む火山ガスが1号火口周辺に広がる帯水層中の地下水に溶解することで溶融硫黄が生成すると推測した。これまでに温泉水や火山ガスの分析も行っているが，1936年の溶融硫黄噴火が起こった活動期から90年が経ち，平穏期に移り変わって久しい。現在得られる温泉水や火山ガスは平穏期のものであり，これらの分析結果に基づいて溶融硫黄が噴出した活動期の環境を推定することは容易ではない。

が析出する際も，鉄ミョウバン石の硫酸イオンの酸素同位体比（以下「 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ja-SO}_4}$ 」と表記）に温泉水中の SO_4 イオンの $\delta^{18}\text{O}$ （以下「 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Htsp-SO}_4}$ 」と表記）が保存されているのではないかと考えた。仮にそうであれば，活動期に高温の温泉から沈殿した鉄ミョウバン石の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ja-SO}_4}$ を分析し，その値から鉄ミョウバン石を析出させた温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Htsp-SO}_4}$ を推定できる可能性がある。温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Htsp-SO}_4}$ が判明すれば，現在のカムイワッカ温泉水に混合していると考えられる深部熱水の酸素同位体比と比較することで，活動期の深部熱水の混合割合を算出することができるかと考えた。

そこで本研究では，温泉湧出口付近に沈殿している鉄ミョウバン石の酸素同位体比を分析し，温泉水の同位体比との比較を通して知床硫黄山の活動期の温泉水における深部熱水の混合率推定を試みる。本発表では予察的検討として，知床硫黄山・カムイワッカ五の滝上部の温泉で現在も析出と堆積が進んでいる鉄ミョウバン石の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ja-SO}_4}$ が温泉水の SO_4 の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Htsp-SO}_4}$ と一致すること，およびそこから温泉水の水分子の $\delta^{18}\text{O}$ （以下「 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Htsp-H}_2\text{O}}$ 」と表記）が推定できることを確認した。



第1図 知床硫黄山・カムイワッカ川の地質図と鉄ミョウバン石試料採取地点。

内海が干上がってできる蒸発岩の石膏に含まれる SO_4 の $\delta^{18}\text{O}$ は，石膏が析出したときの海水中の SO_4 イオンの $\delta^{18}\text{O}$ を保存しているとされている（酒井ほか，1996）。一方，研究対象地域のカムイワッカ川右岸では鉄ミョウバン石（ $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ）が温泉湧出口周辺に分厚く沈殿している。鉄ミョウバン石は90–100°Cで最適に析出するとされており（Asimi *et al.*, 2020），同様に温泉水から鉄ミョウバン石

2. カムイワッカ温泉の概要

温泉が湧出するカムイワッカ川は，知床硫黄山1号火口付近に源流を持ち，北西山麓を流れる。温泉の pH は0.47–2.0，温度は34.1–84.6°Cの範囲にある。30箇所以上ある湧出口は川の北側岸にあり，1号火口地下を通る帯水層が川の侵食により切断された箇所から温泉が湧出している。源流の温泉の温度は34°C（2021年10月8日）と低いが，河床に鉄ミョウバン石（30cm以上）が堆積していることから，かつては90–100°Cの温泉が湧出していたと考えられる。一方，本研究では鉄ミョウバン石と五の滝の上部から湧出する pH=0.89，82.1°Cの温泉を分析した（第1図）。湧出口付近に透明感のある赤茶色の新鮮な鉄ミョウバン石結晶が析出している。

3. 鉄ミョウバン石中の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ja-SO}_4}$ の分析

鉄ミョウバン石試料は，カムイワッカ五の滝上部の温泉湧出口付近で採取した。鉄ミョウバン石の表面にある赤茶色透明の自形結晶の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ja-SO}_4}$ と温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Htsp-SO}_4}$ の分析は，（株）地球科学研究所において，連続フロー型安定同位

体比質量分析装置 DELTA plus Advantage+FLASH2000 (Thermo Scientific 社) を用いて行った. 比較のため硫黄の同位体比 ($\delta^{34}\text{S}$) も分析した.

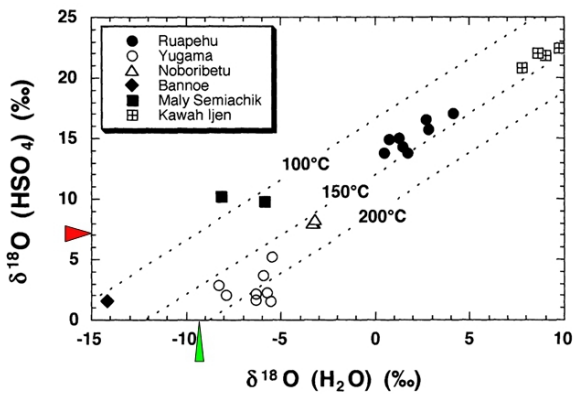
4. 結果と考察

分析結果を第1表に示した. 鉄ミョウバン石の $\delta^{18}\text{O}_{\text{ja-SO}_4}$ の値と温泉水中の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-SO}_4}$ は近い値を示した(第1表). $\delta^{34}\text{S}$ については若干異なる値が出たが, 概ね近い値が得られた.

第1表 カムイワッカ五の滝上の温泉湧出口の鉄ミョウバン石と温泉水中の SO_4 の同位体比.

測定結果				
日付	試料名	$\delta^{34}\text{S}$	$\delta^{18}\text{O}$	
		‰ V-CDT	‰ V-SMOW	
2021.09.26	五の滝上の温泉水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-SO}_4}$	+26.8	+7.0	
2020.09.01	五の滝上の温泉湧出口の鉄ミョウバン石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{ja-SO}_4}$	+24.4	+7.1	

カムイワッカ五の滝上の温泉湧出口付近の鉄ミョウバン石と温泉水の $\delta^{18}\text{O}$ は近い値を示したので, 温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-SO}_4}$ は鉄ミョウバン石に保存されていることが示唆された. 温泉水に含まれる SO_4 イオンの $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-SO}_4}$ と, 水分子の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}}$ の間には, 第2図に示す関係があるとされる(Kusakabe *et al.*, 2000). 第2図で, 温泉水の温度 82.1°C に近い 100°C の関係から, 今回の分析で得られた鉄ミョウバン石の $\delta^{18}\text{O}_{\text{ja-SO}_4} = +7.1\text{‰}$ から推定される温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}}$ は-9.4‰で, 実際の温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -9.8\text{‰}$ と整合的であった(第3図). 以上から, 鉄ミョウバン石の $\delta^{18}\text{O}_{\text{ja-SO}_4}$ から温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}}$ 値を推定できる可能性が確認された.

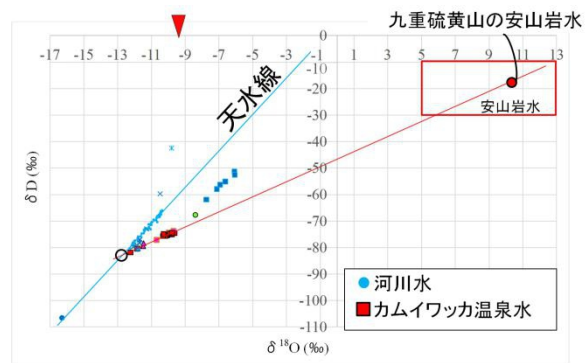


第2図 温泉水中の SO_4 中の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-SO}_4}$ と H_2O 中の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}}$ と温度の関係(Kusakabe *et al.*, 2000). 鉄ミョウバン石の $\delta^{18}\text{O}_{\text{ja-SO}_4}$ 分析で得た値+7.0‰を図にあてはめると(赤三角), 温泉水の水温が 100°C の場合 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}}$ は-9.4‰程度(緑三角)と推定できる.

今後は他の火山でも同様の推定ができることを確認し, さらに鉄ミョウバン石のコアサンプルから得られる過去の $\delta^{18}\text{O}_{\text{ja-SO}_4}$ から, 過去の温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}}$ を推定し, 過去の火山活動の履歴を復元する手法を確立したい.

5. まとめと今後の課題

温泉湧出口付近で堆積する鉄ミョウバン石は強酸性環境下 90-100°C の温度で析出する. 鉄ミョウバン石分子中に含まれる SO_4 の $\delta^{18}\text{O}_{\text{ja-SO}_4}$ を分析することで, その鉄ミョウバン石を析出させた温泉水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}}$ が推定できる可能性がある. これを基に地下水における活動期の深部熱水の混合率を推定する手法を確立し, 活動期の火山の状態を知る手法に発展させたい.



第3図 知床硫黄山周辺の河川水とカムイワッカ温泉水の水素酸素同位体比. 赤三角は $\delta^{18}\text{O}_{\text{Hsp-H}_2\text{O}} = -9.4\text{‰}$ を示す.

しかしながら, この目的達成には下記の課題が残されている. ①過去の活動を調べる上で, コア試料を採取し, その各部分で鉄ミョウバン石が析出した年代を測定する必要がある. 幸いカムイワッカ源流付近の鉄ミョウバン石は, 析出当時に取り込まれたと考えられる炭化木片が見つかっており, C14法により年代が判明するが, 炭化木片がコアの中で偏在しており, どの部分でも年代測定ができるわけではない. ②また何らかの方法で過去の温泉水の温度を推定する必要がある. ③知床硫黄山・カムイワッカ川五の滝温泉以外でも鉄ミョウバン石の中に析出当時の温泉水の同位体比が保存されているのかを今回と同様の方法で確認し普遍性を検証する必要がある. 以上が今後の課題である.

文献

酒井均・松久幸敬 (1996) 安定同位体地球化学. 東京大学出版会, 403p.
 Asimi, A., Gharibi, K., Abkhoshk, E., Mooskazemi, F., Chelgani, C.S., (2020) Effects of Operational Parameters on the Low Contaminant Jarosite Precipitation Process-an Industrial Scale Study. *Materials* 2020, 13, 4662, pp1-13.
 Kusakabe, M., Komoda, Y., Takano, B., Abiko, T., (2000) Sulfur isotopic effects in the disproportionation reaction of sulfur dioxide in hydrothermal fluids: Implications for the $\delta^{34}\text{S}$ variations of dissolved bisulfate and elemental sulfur from active crater lakes. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, vol. 97, pp.287-307.
 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. Shiretokoizan, Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, vol.346, pp.212-222.

地球統計学的手法を用いた斑岩銅鉱床の富鉱部の空間モデリングと形成要因の解釈

龍前祥太郎*・Vitor Ribeiro de Sá*・小池克明*・田中隆之**

Geostatistical Spatial Modeling of High-grade Zone in a Porphyry Copper Deposit and Interpretation of Its Formation Factors

Shotaro Ryumae*, Vitor Ribeiro de Sá*, Katsuaki Koike* and Takayuki Tanaka**

*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: ryumae.shotaro.22k@st.kyoto-u.ac.jp

**日鉄鉱業(株) Nittetsu Mining Co., Ltd. 2 Marunouchi Chiyoda-ku, Tokyo 100-8377, Japan.

キーワード: 斑岩銅鉱床, 熱水変質, 地球統計学, 主成分クリギング

Key words: Porphyry copper deposit, Hydrothermal alteration, Geostatistics, Principal component kriging

1. はじめに

近年, 再生可能エネルギーや半導体産業の発展などに伴い, 銅をはじめとする金属資源の需要が急増している. 一方で, 新規鉱山開発には多大なコストと時間を要し, 既存鉱山での鉱石品位が低下し続けており, 安定供給へのリスクが増大している. そのリスクを軽減させ, 金属資源の需要増大に対応するためには, ボーリング調査データから鉱石品位分布と変質帯分布を正確に予測し, 鉱量評価と鉱山開発計画の精度を高めることが不可欠である.

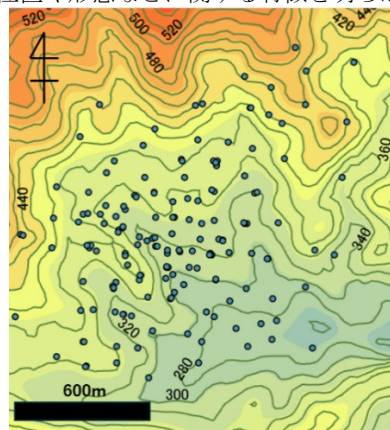
そこで本研究では, 主要な銅・金の供給元である斑岩銅鉱床に注目し, ボーリング調査データから地球統計学的手法によって 3 次元品位分布形態と変質帯分布を明らかにするとともに, これらを組み合わせ, 高品位部の特徴抽出とその形成要因の特定を行うことを目的とした. 解析対象として大規模鉱床の存在が推測されているフィジーのワイソイ斑岩銅鉱床 (田中ほか, 2003) を選んだ.

2. 解析対象地域と手法

南太平洋に位置するフィジーでのワイソイ鉱床はビティ・レブ島の中央ナモシ地区に位置する. 本研究ではワイソイの西側に注目し (以下, 西鉱床), 164 本のボーリング調査データを解析に用いた. 西鉱床域の地形とデータ位置を第 1 図に示す. 解析領域の大きさは東西 1200 m・南北 1600 m で, 標高 200 m から地表面までを 25 m×25 m×5 m のセルで分割した. ワイソイ鉱床の地質は, ワイニマラ層群とマンドゥラウスズ層群からなる安山岩類を主とする母岩, および石英閃緑岩・角閃閃緑岩・石英斑岩からなる貫入岩類で構成される (田中ほか, 2003). また, ボーリング調査により斑岩銅鉱床の一般的な変質帯 (カリウム, フィリック, プロピライト, 粘土化) および石英のストックワークで特徴付けられる珪化変質帯が確認されている.

解析には銅・金の品位データ, および変質鉱物の組み合わせから分類した 5 つの変質帯の位置データを用いた. 品位

データの空間モデリングには代表的な地球統計学的シミュレーション法である回転バンド法 (TBS) (de Sá *et al.*, 2024) と逐次ガウスシミュレーション (SGS) を用いた. また, 変質帯分布モデルには, 各変質帯間の空間的相関関係を考慮できる主成分クリギング (PCAK) を用いた (Koike *et al.*, 2022). これは主成分分析と通常クリギングの組み合わせによる. 得られた品位分布と変質帯分布モデルを統合し, 高品位部の形成位置や形態などに関する特徴を明らかにした.



第 1 図 ワイソイ西鉱床のボーリング地点 (青点) と地形.

3. 結果と考察

3.1 品位と変質帯分布のモデリング結果

TBS と SGS による品位分布シミュレーション結果の精度を検証したところ, TBS の方が高かったため以下では TBS の結果を用いる. まず, シミュレーション結果の累積分布に基づく上位 10%以上の品位を高品位と定義した. これによれば銅 0.4 wt%, 金 0.18 g/t 以上が高品位部となる. これらの 3 次元分布を真上から鳥瞰した第 2 図から, いずれも N20°E 方向に高品位部が連続するのが明瞭であり, この方向に断層あるいは亀裂が発達し, それに沿って高品位部が形成さ

れたことが示唆される。また、金の高品位部の方がこの方向により強い直線的に連続していることがわかる。

PCAK による変質帯分布の東西断面図(第 3 図)から、珪化変質帯は貫入岩体上部で形成されたと推察できるとともに、カリウム変質帯は珪化変質帯を取り囲むような形状であることがわかる。また、粘土化とプロピライト変質帯の分布は地下浅部や鉱床周縁部に見出される。

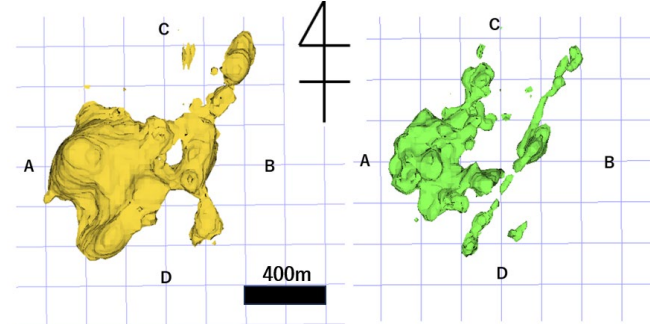
3.2 品位と変質帯分布の統合結果

TBS による品位分布と PCAK による変質帯分布を重ね合わせると、高品位部の大部分はカリウム変質帯とその周辺部、および珪化変質帯に重なることがわかった(第 4 図)。さらに、変質帯ごとの銅・金の品位分布をボックスプロットで表すと、いずれもカリウム変質帯と珪化変質帯で品位の中央値が最も高いことが示された(第 5 図)。斑岩銅鉱床では一般にカリウム変質帯とその周辺に高品位部が集中することが知られているのに対して、ワイソイ西鉱床ではカリウム変質帯に加えて珪化変質帯でも高品位部が形成されていることを明らかにできた。

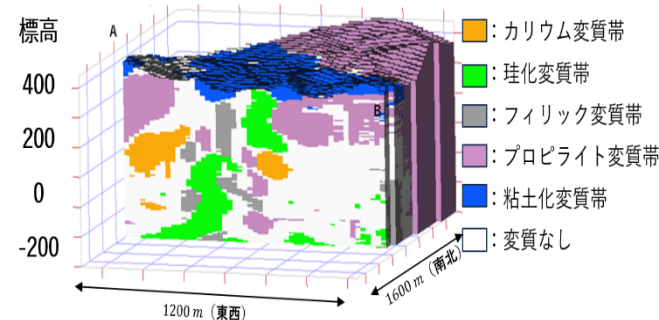
4. まとめと今後の課題

本研究では地球統計学的手法を用い、ワイソイ西鉱床における銅・金の品位と変質帯分布のモデリングを行い、これらの 3 次元分布の特徴、およびカリウム・珪化変質帯での高品位部の形成を明らかにできた。しかし、貫入岩体の詳細な位置や変質帯の化学的特徴などはまだ考慮していない。本研究で得られた結果をもとに、ボーリングコアの元素組成や岩相を解析し、ワイソイ鉱床全体の富鉱部の特徴とその形成要因を明らかにすることが今後の課題である。

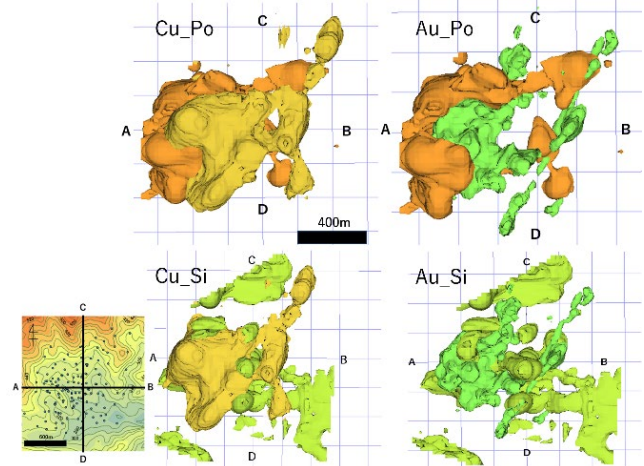
謝辞：ワイソイ鉱床のボーリング調査データを提供いただいた Newmont 社, Namosi Joint Venture, 日鉄鉱業(株), 三菱マテリアル(株)に深く感謝の意を表したい。



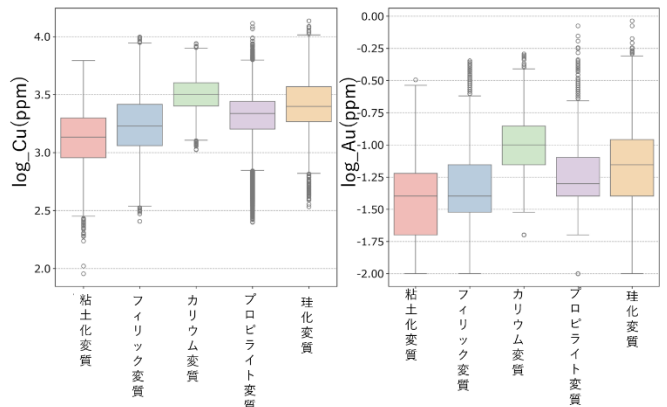
第 1 図 銅 (左) と金 (右) の高品位分布 (真上からの鳥瞰図, A~D の位置は第 4 図参照)。



第 3 図 変質帯分布の東西断面図 (断面図の位置は第 4 図の A-B)。



第 4 図 銅・金の高品位部 (黄と緑) とカリ変質帯 (Po : 橙)・珪化帯 (Si : 黄緑) の重ね合わせ (第 2 図と同じ視線方向)。



第 5 図 各変質帯における銅 (左) と金 (右) 品位分布 (対数値) のボックスプロット。

文 献

田中隆之・森田誠也・高畑裕之・安永健太郎・今井亮・石川信明 (2004) フィジー諸島共和国ナモシ地域ワイソイ鉱床の銅探鉱とその成果. 資源地質, vol.54(1), pp.1-12.
 de Sá, V. R., Muraoka, T., Koike, K., and Takahashi, H. (2024) Specification and formation process of enriched portions in Au veins in an epithermal deposit via clustering and geostatistical approaches. *Ore Geology Reviews*, vol. 166, 105891. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105891>
 Koike, K., Kiriya, T., Lu, L., Kubo, T., Heriawan, M. N., and Yamada, R. (2022) Incorporation of geological constraints and semivariogram scaling law into geostatistical modeling of metal contents in hydrothermal deposits for improved accuracy. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 233, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106901>

機械学習による熱水鉱床生成に関連した火成岩類の化学組成の相違

谷口卓也*・小池克明*

Differences in Chemical Compositions of Igneous Rocks Related to Generation of Hydrothermal Deposits by Machine Learning Methods

Takuya Taniguchi* and Katsuaki Koike*

*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, 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, 斑岩銅鉱床, 機械学習

Key words: Mineralized granitoids, Incompatible element, Hydrothermal deposit, Porphyry copper deposit, Machine learning

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, 多数の金属鉱床が分布している環太平洋ベルト上の国々において, 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. 日本に分布する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国内資源探査戦略において重要である. 一方, 中央アンデス地方のペルーおよびチリは世界有数の銅生産地域であり, 斑岩銅鉱床を中心に世界の銅生産量の約 40%を占める重要な供給拠点である (Selman *et al.*, 2023).

熱水鉱床は多くの場合, 火成岩を伴うマグマ活動により形成されるが, 日本列島に広く分布する花崗岩類や中央アンデスに分布する安山岩類の中には, 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地球化学的因子を特定することは, 鉱床探査精度の向上において不可欠である.

これまで, 日本の特定地域や鉱床周辺に分布する花崗岩類の化学組成については多くの研究が報告されている (例えば石原, 2002). また, 中央アンデスにおいても, 特定の斑岩銅鉱床に関連する火成岩の地球化学的特徴に関する研究も多い (Kay *et al.*, 2013). しかし, 地球化学データベース解析に基づき, 鉱床形成との関連性を機械学習によって網羅的に比較検討した研究は比較的限られている.

そこで本研究では, 岩石化学組成データベースを用いて, 日本の花崗岩類および中央アンデスの安山岩類の化学組成を機械学習によって網羅的に解析し, 鉱化作用をもたらした火成岩類の地球化学的特徴の差異を明らかにすることを目的とする.

2. 研究手法

2.1 鉱床・岩石データ統合と鉱化/不毛の分類

岩石化学組成データベースである GEOROC および DODAI database から, 日本の花崗岩類および中央アンデスの安山岩類データを抽出し, それぞれ熱水鉱脈・スカルン鉱床および斑岩銅鉱床の位置情報と GIS 上で統合した. 鉱床からの距離に基づき, 日本の花崗岩類では 10 km 以内,

中央アンデスの安山岩類では 20 km 以内を鉱化, それ以降を不毛岩類として分類した.

2.2 機械学習解析

鉱化/不毛岩類の化学組成の差異を明らかにするため, 化学組成データに対して教師あり機械学習法である Random Forest, AdaBoost, 勾配ブースティング決定木 (GBDT) を適用した. さらに, 元素濃度比の網羅的探索をロジスティック回帰モデルに基づいて行い, 鉱化判別に有効な元素比を抽出した.

3. 日本の花崗岩類解析の結果と考察

3.1 機械学習の結果

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, 花崗岩類データセットから抽出後, 前処理として検出限界値処理, 欠損値・外れ値除去を施した後, 合成オーバーサンプリングを訓練データに適応させることで各機械学習を行った. 本研究の機械学習で最も正解率が高かった手法は GBDT であり, これによる鉱化と不毛花崗岩類の分類に寄与した割合を示す重要度を第 1 図にまとめる. 3つの機械学習において, 特徴的な重要度は異なっていたが, 共通して U の重要度が高いという傾向を示した. U は熱水によって錯イオンの形で容易に輸送・沈殿する元素という特徴を持つため, U を含む熱水活動の影響が鉱化/不毛花崗岩類において表れていると考えられる.

3.2 元素比結果

機械学習と同様のデータ処理を実施し, ロジスティック回帰モデルを用いて, 最も顕著な特徴を示す元素濃度比を抽出した結果を第 2 図に示す. 全ての元素濃度比の組み合わせを網羅的に検討した結果, La/Nb と Rb/U の関連グラフにおいて, Rb/U が 25~50 の範囲で鉱化/不毛花崗岩類を明瞭に区別できることが明らかになった. Rb と U はいずれも花崗岩類中に取り込まれにくく, 高 SiO_2 岩に濃集する不適合元素としての性質を有するため, マグマ分化作用の進行度が鉱化/不毛花

崗岩類の判別指標となる可能性が示唆された。

4. 中央アンデスの安山岩類解析の結果と考察

4.1 機械学習の結果

日本の花崗岩類解析と同様の前処理を中央アンデスの安山岩類データセットに適用し、機械学習解析を行った。最も高い分類精度を示した GBDT の特徴量重要度を第 3 図に示す。3 つの機械学習において、特徴的な重要度は異なっていたが、共通して Nb が高い重要度を示した。Nb は高電荷高電場強度元素 (HFSE) であり、沈み込み帯環境ではスラブ由来熱水流体に取り込まれにくく、ルチルやチタン石などの残留鉱物に保持されやすいため、Nb の枯渇が顕著に現れることが多い (Foley *et al.*, 2000)。よって、鉍化安山岩類は Nb に乏しい地球化学的特徴を有することが示唆される。

4.2 元素比結果

機械学習と同様のデータ処理を実施し、ロジスティック回帰モデルを用いて、最も顕著な特徴を示す元素濃度比を抽出した結果を第 4 図に示す。全ての元素濃度比の組み合わせを網羅的に検討した結果、Sr/Hf と Y/Nb の関連グラフにおいて、鉍化/不毛安山岩類を明瞭に区別できることが明らかになった。Y/Nb は島弧マグマの Nb 欠乏の程度を反映する指標として用いられており (Pearce and Cann, 1973)、高い Y/Nb 比は、沈み込み帯深部における Nb を保持する鉱物の影響を反映している可能性があり、鉍床形成に必要な熱水活動との関連を示唆する。

5. まとめ

日本の花崗岩類および中央アンデスの安山岩類に対して機械学習およびロジスティック回帰モデルを適用した結果、鉍化/不毛岩の識別に有効な地球化学的特徴が抽出された。日本の花崗岩類では U および La/Nb-Rb/U 比が重要な識別指標であることがわかり、U の熱水移動性とマグマ分化過程が鉍床形成の指標となる可能性が示唆された。一方、中央アンデスの安山岩類では Nb および Y/Nb-Sr/Hf が高い識別性を示し、沈み込み帯深部における Nb 保持鉱物の影響と鉍床形成に関与する熱水活動との関連が示唆された。これらの結果は、機械学習を用いた広域地球化学解析が、鉍床生成要因の解明に有効な手法であることを示している。

文 献

Foley, S. F., Barth, M. G. and Jenner, G. A. (2000) Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 64, no. 5, pp. 933-938.

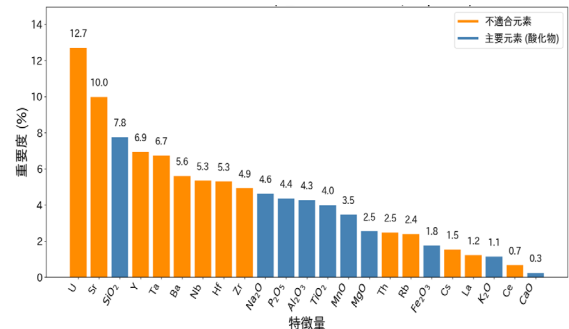
石原舜三 (2002) 鉍化花崗岩特性(I): 西南日本内帯のモリブデンとタングステン鉍床生成区。地質調査所研究報告, vol. 53, no. 9-10, pp. 657-672.

Kay, S. M., Mpodozis, C. and Gardeweg, M. (2013) Magma sources and tectonic setting of Central Andean andesites (25.5-28°S) related to crustal thickening, forearc subduction erosion and delamination. *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 385, pp. 304-334.

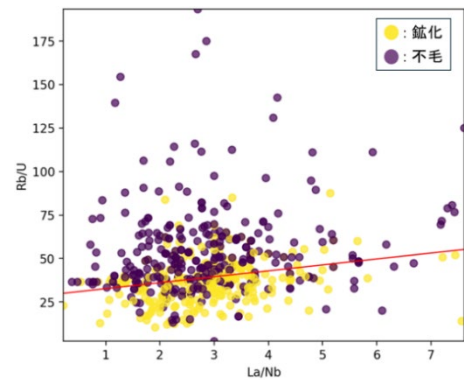
Pearce, J. A. and Cann, J. R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 290-300.

Selman, C., Marris, J. and Retamales Burford, V. (2023) Chile and Peru's copper for energy transition. *S&P Global Market Intelligence*. (accessed 14 May 2026).

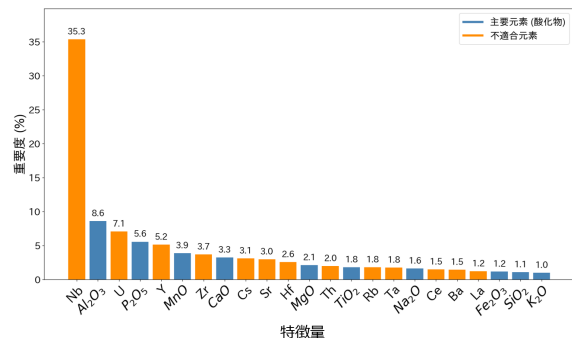
Watari, T., Nansai, K. and Nakajima, K. (2021) Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, 105107.



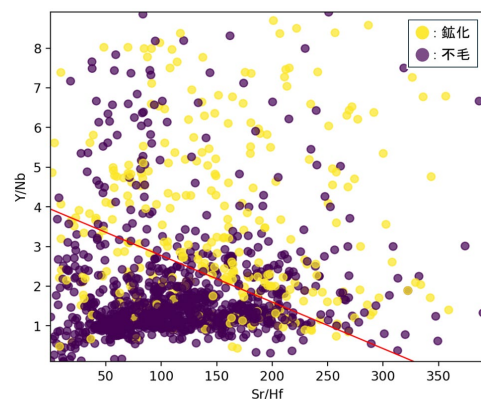
第 1 図 日本の花崗岩類データを用いた GBDT による特徴量の重要度



第 2 図 日本の花崗岩類データを用いた 鉍化/不毛花崗岩類における La/Nb と Rb/U の関係の比較



第 3 図 中央アンデスの安山岩類データを用いた GBDT による特徴量の重要度



第 4 図 中央アンデスの安山岩類データを用いた 鉍化/不毛安山岩類における Sr/Hf と Y/Nb の関係の比較

火山岩化学組成と基盤岩構造に基づく北鹿地域での黒鉱鉱床分布の特徴抽出

徳富拓樹*・小池克明*

Characterizing Distribution of Kuroko Deposits in the Hokuroku District Based on Chemical Composition of Volcanic Rocks and Basement Structure

Hiroki Tokutomi* 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: tokutomi.hiroki.47t@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード：黒鉱鉱床，機械学習，デイサイト，化学組成，ブーゲー重力異常
Key words: Kuroko deposit, Machine learning, Dacite, Chemical composition, Bouguer gravity anomaly

1. はじめに

黒鉱鉱床は有用金属の鉱物の集合体であり、1960年代をピークに日本の鉱業を支えてきた。また、近年注目されている海底熱水鉱床との類似性も知られ、鉱床の生成位置を支配する要因の解明が望まれている。そこで本研究では、多くの黒鉱鉱床が存在する秋田県北鹿地域を対象とし、鉱床生成と関連する火山岩の化学組成の特徴、および鉱床分布と基盤岩構造との関連を明らかにすることを目的とした。

2. 対象地域と使用データ

本研究では北鹿地域全体をほぼカバーする北緯40°-40.5°・東経140.45°-140.95°の長方形領域を解析の対象とし、火山岩の化学組成とブーゲー重力異常に関する解析を行った。化学組成解析には、通商産業省資源エネルギー庁(1983)による構造解析総合調査に収録されており、領域内の143地点でのボーリング調査から得られたデータを用いた。

重力異常解析にはICGEMによる公開データを用い、東西・南北方向ともに0.01°間隔でデータを抽出した。これは大気補正済みのフリーエア異常データであり、これに地形補正とブーゲー補正を適用し、重力異常データを求めた(第1図)。これらの補正には国土交通省の10mメッシュ標高データを用い、地形補正はArcGISに標準装備のPythonにより行った。さらにクリギングを用いた補間により、補正データを0.002°間隔の重力異常データに変換した。黒鉱鉱床の位置データはHede *et al.* (2017)による。

3. 手法

化学組成解析では黒鉱鉱床の生成に関連し、黒鉱胚胎層準である西黒沢階上部(山田, 2018)に含まれるデイサイトを選び、これらの鉱床近傍と遠方における化学組成の差異に注目した。複数の化学元素濃度の空間的相関性が3~4kmであったことに基づき、鉱床から3km以内の範囲を鉱床近傍と定義した。解析には、学習方法の異なるRandom Forests (RF)とXGBoostの2種の機械学習を用い、この不均衡データ処理としてSMOTEを導入した。また、これ

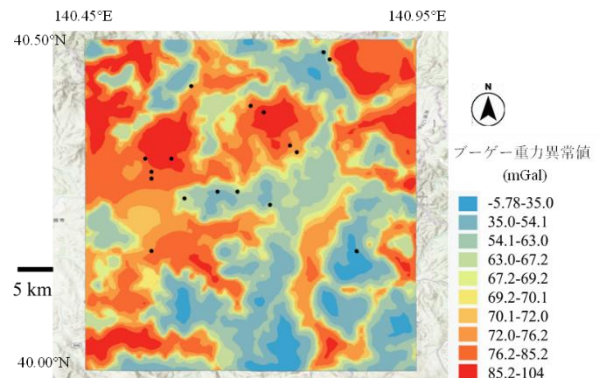
らの学習の正確性をF1 scoreで評価した。これは学習の正解率と再現率の調和平均により定義される。機械学習において設定するパラメータはF1 scoreが最良となるように最適化し、解析を行った。ここでは元データの70%を学習の教師データに用い、残りの30%をテストデータとしてF1 scoreを求めた。

ブーゲー重力異常解析では、対象領域の基盤岩構造を明らかにするために、ArcGISのハイパス・フィルターと曲率計算ツールを用いてカルデラ構造や断層分布に起因した重力異常の急変部を抽出した。

4. 結果と考察

デイサイトの化学組成解析結果(第1表)より、鉱床近傍と遠方ではCo濃度の差が大きく、また鉱床からの距離と濃度の関係を検討したところ、特に鉱床近傍でCo濃度が低い(第2図)という傾向を明らかにできた。この特徴はマグマ分化の程度に関連している可能性がある。

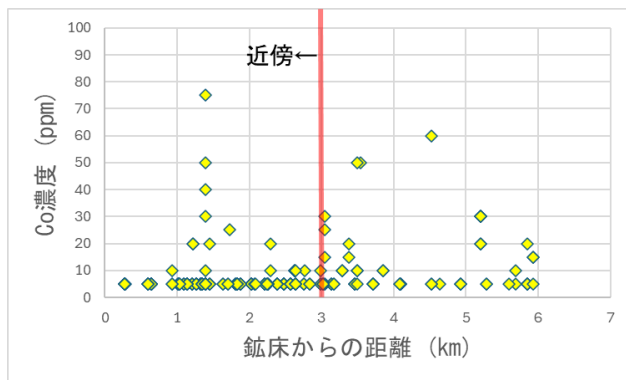
ブーゲー重力異常解析ではハイパス・フィルターと曲率計算の両方から類似した結果が得られ、これらによるマップに断層分布の影響が明瞭に表れた(第3図)。



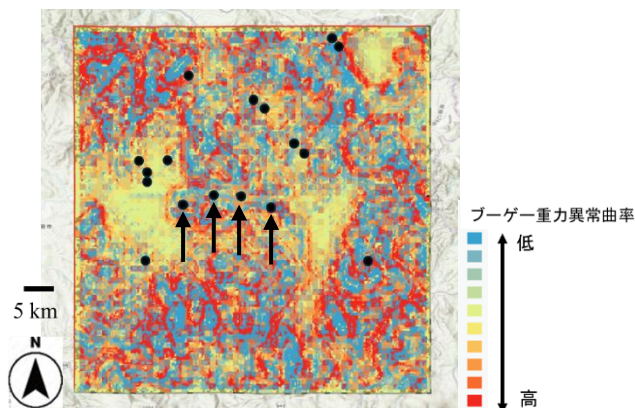
第1図 対象地域のブーゲー重力異常 (黒点は黒鉱鉱床の位置を示す)

第1表 鉱床近傍と遠方のデイサイトにおける化学組成の差異

RF		XGBoost	
元素	重要度	元素	重要度
Co	0.153	Co	0.182
Zn	0.078	Cr ₂ O ₃	0.110
Cr	0.060	MnO	0.059
BaO	0.056	Mo	0.059
CaO	0.055	Al ₂ O ₃	0.059
F1 score		F1 score	
遠方	0.44	遠方	0.51
近傍	0.82	近傍	0.83



第2図 Co濃度と鉱床からの距離の関係



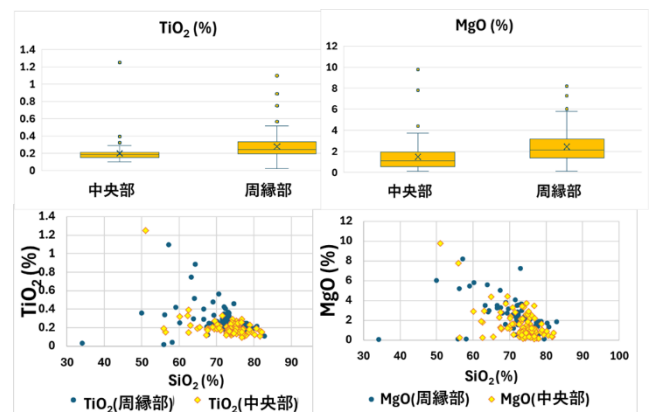
第3図 ブーゲー重力異常の曲率計算結果 (黒矢印は北鹿中央部の4鉱床を示す)

黒鉱鉱床は主に高異常域の周辺と断層が比較的少ない場所に分布するという傾向を明らかにできたが、北鹿地域中央の深沢などの4つの鉱床は断層が比較的多い低重力異常域に位置した。これらの4鉱床付近のデイサイトについて、鉱床から3 kmを基準に北鹿中央部と周縁部のデイサイトを区別し、同様に機械学習を用いて解析したところ、北鹿中央部のデイサイトは周縁部のそれに比べてTiO₂とMgO濃度が低い(第2表、第4図)という特徴も抽出できた。この特徴は鉱床生成時の熱水環境による可能性がある。また、Hede *et al.* (2017)によれば、これら4鉱床の鉱量は比較的小さい。

以上の結果から鉱床からの距離や位置によって鉱床生成関連のデイサイトの化学組成が異なっていると同時に、特定の基盤岩構造に鉱床が位置し、それらが鉱床の生成環境と関連していることが示唆された。

第2表 北鹿中央部4鉱床に対するデイサイトと周縁部のデイサイトとの化学組成の差異

RF		XGBoost	
元素	重要度	元素	重要度
TiO ₂	0.175	TiO ₂	0.149
Zn	0.121	MgO	0.113
MgO	0.113	Zn	0.094
Pb	0.083	Pb	0.087
P ₂ O ₅	0.046	Fe ₂ O ₃	0.087
F1 score		F1 score	
周縁部	0.83	周縁部	0.78
中央部	0.87	中央部	0.81

第4図 北鹿中央部と周縁部のデイサイトにおけるTiO₂とMgO濃度分布のボックスプロット図およびハーカー図

5. まとめと今後の課題

本研究では北鹿地域の黒鉱鉱床を対象に、鉱床生成に関する特徴を抽出するため、鉱床近傍と遠方のデイサイト化学組成、および北鹿地域のブーゲー重力異常について解析を行った。化学組成解析では、鉱床近傍のデイサイトは遠方のデイサイトに比べCo濃度が小さい傾向があることが明らかになった。ブーゲー重力異常解析では、黒鉱鉱床が主に高異常域の周辺に分布するが、黒鉱領域中央部に位置する深沢などの4鉱床付近では、比較的低異常かつ断層の多い地域に分布することが明らかになった。これら4鉱床付近のデイサイトについて同様に化学組成解析を行ったところ、TiO₂とMgOの濃度が小さい傾向があることがわかった。

今後の課題として、化学組成解析では各元素濃度のみでなく、元素濃度の組み合わせについて解析を行う。また、本研究では化学組成の空間的相関性により鉱床より3 kmを近傍と定義したが、これについて再検討したい。ブーゲー重力異常解析では曲率変化の大小のみでなく、重力異常の詳細な分布構造を用いて検討する。また、地磁気異常データなど他データの解析との総合的な解釈を行う。

文献

- Hede, A. N. H., Koike, K., Kashiwaya, K., Sakurai, S., Yamada, R. and Singer, D. A. (2017) How can satellite imagery be used for mineral exploration in thick vegetation areas?, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol. 18, pp. 1–13. doi:10.1002/2016GC006501.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1983) 昭和57年度広域調査報告書 構造解析総合調査.
- 山田亮一 (2018) 黒鉱鉱床の概要, *資源地質*, vol. 68(2), pp.79–102.

3D 都市モデルと疑似人流データを用いた 都市活動分布と回遊性評価に関する研究

金野 百花*・米澤 剛*・杉本 賢二*

Evaluation of Urban Activity Distribution and Excursion Based on 3D City Models and Pseudo People Flow

Momoka KONNO*, Go YONEZAWA* and Kenji SUGIMOTO*

*大阪公立大学大学院工学部 Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, 3-3-138
Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, 558-8585, Japan. E-mail: sg22316v@st.omu.ac.jp

キーワード：3D 都市モデル, 疑似人流データ, 回遊, 機械学習, ランダムフォレスト回帰
Key words: 3D City Model, Pseudo-human Flow Data, Excursion, Machine Learning,
Random Forest Regression

1. 研究背景と目的

現代の都市計画は、人口減少やモビリティの多様化といった複雑な課題に直面しており、従来の経験則に依存しない、データに基づく客観的な計画手法への転換が急務となっている。国土交通省が主導する「Project PLATEAU」によって整備された 3D 都市モデルは、従来の平面的な GIS では困難であった、高さや容積（建物体積）を加味した高度な空間解析を可能にした。一方で、中心市街地の活性化を評価する上では、単なる通行量ではなく回遊の質を把握することが不可欠である。しかし、GPS 等の実測データはコストが高く、未実施の施策の影響予測には不向きであるため、詳細な属性を持ち将来予測が可能な疑似人流データの活用が期待されている。

本研究の対象地である大阪府堺市の都心部は、南海本線堺駅と南海高野線堺東駅の二極構造を成しているが、東西軸の連携が弱く、賑わいが大阪都心部へ流出する「ストロー現象」が課題である。特に 2026 年 1 月の高島屋堺店の閉店は、地域の人流構造を変容させる象徴的な事象であり、新たな回遊パターンの創出が求められている。本研究は、3D 都市モデルが持つ物理情報と疑似人流データを統合し、都市空間の構造が活動分布や回遊性に与える影響を定量的に解明・予測するモデルを構築することを目的とする。

2. 研究手法

2.1 対象地と使用データ

分析対象は大阪府堺市堺区の都心部（堺駅～堺東駅間を含むエリア）である。

3D 都市モデル (PLATEAU): 建物用途および、LOD1 モデルから算出した建物体積を使用する。

疑似人流データ: 東京大学が提供する疑似人流データは、国勢調査やパーソントリップ調査などの統計情報を基に、個人を特定できない形で人の移動や活動を再現した仮想的な行動データである。今回使用する活動データとは、個々のエージェントが持つ属性（性別や就業状況等）に基づき、1日の生活の中で「いつ」「どこで」「どのような目的で」滞在し

ているかを時系列で記録した行動ログのことである。

2.2 予測モデルの構築

分析単位は「街区」とし、ランダムフォレスト回帰 (Random Forest Regressor) を用いた多出力モデルを構築した。

説明変数 (入力 34 項目): 街区面積, 最寄駅からの距離 (およびその逆数), 用途別の建物棟数, 用途別の建物体積などである。

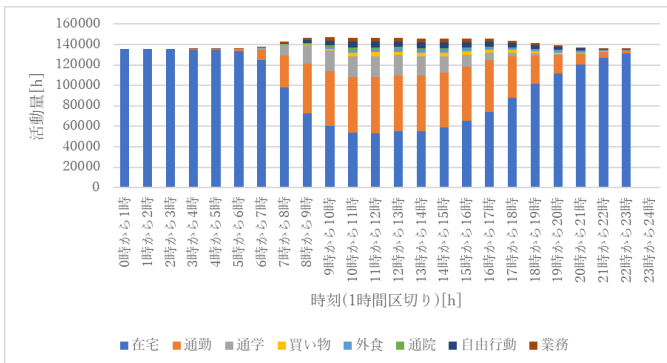
目的変数 (出力 18 項目): 活動目的別 (在宅, 通勤, 通学, 買い物, 外食, 通院, 自由行動, 業務, 合計) の「人数」および「滞在秒数」である。

3. 研究結果

3.1 都市活動の実態分析

堺区の 1 日の総活動量 [h] の推移 (第 1 図) を検証した結果、深夜帯 (135,353 [h]) と日中ピーク時間帯 (146,561 [h]) の増加幅は約 8.3%に留まった。大阪市中央区 (日中約 3.4 倍) のような爆発的な人口流入構造とは対照的であり、流入と流出が同規模で相殺する「流動の相殺構造」および中心市街地としての自律性の限界が示唆された。

「買い物・外食・自由行動」を合算した「回遊活動量」は、ピーク時でも総活動量の約 8.5%前後に留まっている。主要



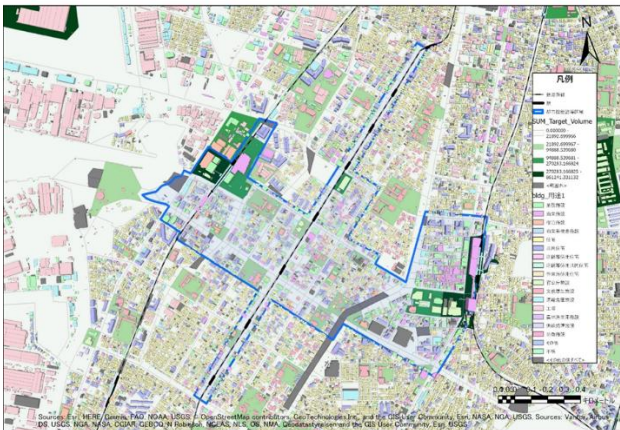
第 1 図 堺区の一日の活動量の変化 (用途別)

駅の利用客 (89,517 人) の多くが通勤・通学のみを目的にしており、周辺での「二次的な滞留」に結びついていない。さらに夕刻 (18 時～19 時) の退勤時、通勤活動の減少に伴い在宅活動が急速に回復する一方で、回遊活動量は 8,846 [h] から 4,972 [h] へと半減 (21 時台には 2,836 [h] まで減衰) しており、夜の賑わい取り込みが極めて脆弱であることが時間動態から定量的に証明された。

3.2 都市機能誘導区域の回遊行動と施設集積

対象区域への総流入人口は 43,992 人 であるのに対し、回遊人口は 18,313 人 (回遊実施率 41.6%, 平均回遊箇所数 1.1 箇所, 平均滞在時間 1.98 時間) であった。エージェント属性別では、小中学生や無職者の回遊率の高さ、大学生の長い滞在時間 (深い消費), 10 代後半～20 代の「溜まり」、高齢層の日常生活に伴うこまめな移動による U 字型動態が明らかになった。

回遊の核となる施設群の合計体積量の空間的分布 (第 2 図) を可視化した結果、施設集積は特定の拠点に局在していた。特に官公庁や大規模複合商業が集中する堺東駅周辺に最大区分 (270,283 超～861,241 [m³]) のセルが集中する一方、堺駅から大小路筋にかけては中規模区分の店舗等併用住宅が点在する。しかし、両拠点を結ぶ東西軸線上では合計体積量が「0.00 超～21,892 以下」まで著しく減衰する地点があり、これがホットスポット分析 (第 3 図) における活動密度の低下 (中だるみ現象) を招く物理的要因であることを明らかにした。



第 2 図 施設群 (合計体積量) の空間分布



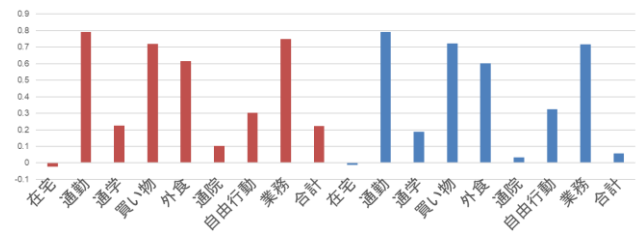
第 3 図 ホットスポット分析

3.3 機械学習による要因分析とモデルの精度検証

予測モデルの特徴量重要度を評価した結果、人流の発生

予測に最も支配的な寄与を示したのは「棟数 (合計)」であった。当初着目した建物の単体体積の寄与は相対的に低く、むしろ「街区面積」「周長」といったマクロな物理的集積度 (密度と規模) が主要因子であることが示された。

テストデータを用いた精度検証 (決定係数: R^2 , 第 4 図) では、「人数: 合計」が $R^2 > 0.8$ の高スコアを記録した。活動目的別でも、特定の建物用途と結びつきの強い「通勤」や「業務」で高い予測精度 ($R^2 > 0.7$) を達成し、街区レベルでの活動予測が可能であることを実証した。一方、流動的な「買い物」や「自由行動」の推定においては、静的空間指標だけでは時間変動を説明しきれずスコアが低下するというモデルの限界も浮き彫りとなった。



第 4 図 R^2 Score

3.4 人流予測 AI シミュレーションシステムの実装

モデルを実務や合意形成に活用するため、ウェブブラウザ上で動作するシステムを開発した。ユーザーが街区面積や駅距離、建物用途別 8 カテゴリーの「棟数」および「体積」を入力すると、①「予測合計人数」の自動試算、②最も支配的な「メイン活動の抽出・強調表示」、③活動目的別の「人数分布の棒グラフ可視化」がリアルタイムに表示される。これにより、施設変更や体積増加が人流に与える影響 (What-if 分析) を、非専門家でも直感的に試算できる客観的な意思決定支援基盤を確立した。

4. 考察と結論

本研究により確立された予測モデルは、建物用途と街区マクロ構造 (密度・規模) が都市活動の説明に有効であることを実証した。堺区の土地利用はコンパクト・プラス・ネットワークの構造を裏付けているものの、実態として堺東駅と堺駅の二極間における施設ボリュームの「分断」が回遊行動の減衰を招いている課題が明らかとなった。

謝礼: 本研究は東京大学 CSIS 共同研究 (No.1429, 1431) による成果の一部である。

文 献

- 国土交通省, “3D 都市モデルの整備・活用・オープンデータ化プロジェクト「Project PLATEAU」,” Available: <https://www.mlit.go.jp/plateau/> (確認日: 2026/05/18).
- 菊池雅彦, 岩館慶多, 羽藤英二, 是友修二, 石井良治, 茂木渉, 石神孝裕 (2018), “プローブパーソン調査データを用いた回遊性向上施策の実務的評価手法,” 土木学会論文集 D3(土木計画学), 74 巻 5 号 p. I_735-I_745.
- 忽那直哉, 西村純平, 小沢敬太郎, 田村将大, 田中貴宏 (2025), “回遊行動シミュレーションを活用したウォーカー空間づくりの方策検討手法の提案と評価,” 日本建築学会計画系論文集, 90 巻 829 号 p. 475-483.
- 円山琢也, 荒木雅弘 (2015), “まちなか回遊行動の詳細分析と政策シミュレーションのための予測モデル,” 土木学会論文集, 71 巻 5 号 p. I_323-I_335.

簡便な画像処理による砂岩岩脈の粒子配列解析法

藪田 桜子*・安邊 啓明*・竹内 誠**

A Method for Analyzing the Grain Arrangement of Sandstone Dikes Using Simple Image Processing

Sakurako YABUTA*, Noriaki ABE* and Makoto TAKEUCHI **

* 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: sakurako.yabuta@aist.go.jp

** 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601 JAPAN.

キーワード：粒子配列, 画像処理, ImageJ, 砂岩岩脈

Key words : grain arrangement, image processing, ImageJ, sandstone dike

1. はじめに

砂岩岩脈などの碎屑性岩脈は、形成メカニズムに基づき、大きく二つのタイプに区分される。一つは、海底面などに生じた割れ目に碎屑物が受動的に充填されることで形成される neptunian dike である (Smart et al., 1988 ; Hurst et al., 2021)。もう一つは、未固結な堆積物が流動化し、周囲の母岩 (上方・下方・側方など) に注入することで形成される injected dike である (Hurst et al., 2003 ; Jolly and Lonergan, 2002)。よって、碎屑性岩脈の形成メカニズムを知るためには、岩脈の注入方向を明らかにすることが重要である。しかし、露頭観察のみから注入方向を一意に判断することは困難な場合が多い。そのため、碎屑性岩脈内部の粒子配列から注入方向を推定する試みが行われている (安邊・佐藤, 2021)。安邊・佐藤 (2021) と同様の粒子配列解析を行うには、研究対象岩石の薄片写真を用意し、画像中から個々の粒子外形を抽出する必要がある。しかし、一般に岩石では、二次的な続成作用や変質作用によって粒子境界が不明瞭となることに加え、多様な種類の粒子が含まれるため、画像処理による粒子外形の抽出は容易ではない。そのため先行研究では、粒子外形の抽出を手作業で行っており、多大な時間を要している。そこで本研究では、画像解析ソフトウェア ImageJ (Rasband, 2018) を用いて、できるだけ単純な手法による粒子外形抽出を行い、手作業による結果との比較から、粒子配列解析における画像解析法の有効性を検討した。

2. 手法

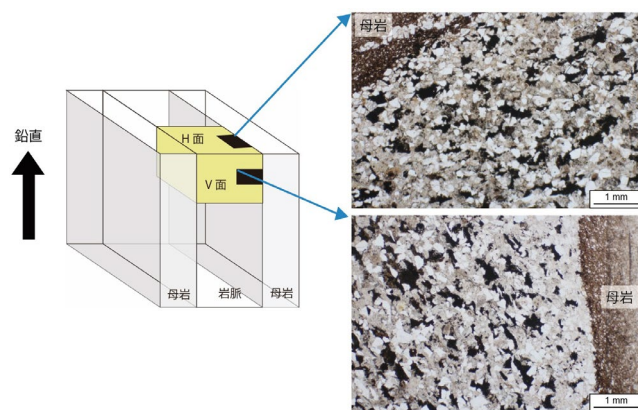
本研究では、愛知県北設楽郡東栄町に発達する砂岩岩脈群 (Yabuta et al. 2025) のうち、一枚の砂岩岩脈について、第 1 図に示した V, H 面の 2 面で岩石薄片を作成した。次に、これらの薄片の偏光顕微鏡画像を用いて、二種類の方法 (手法 1, 2) で粒子の外形を抽出した。手法 1 は、手作業で粒子の外形をトレースする方法である。手法 2 は、ImageJ を用いて、岩石薄片画像を 8-bit グレースケールに設定した後、輝度値に基づいて二値化し、粒子外形を抽出する方法で

ある。偏光顕微鏡クロスニコル下で撮影した画像は粒子を構成する結晶の方位によって同一鉱物であっても大きく輝度に変化する。よって、本研究では、方位によって輝度がほとんど変化しないオープンニコル下で撮影した画像を使用した。なお、低輝度領域の粒子 (斜長石, カリ長石など) は変質しており、基質部との輝度差が明瞭でないため、本研究では、比較的外形の認識が容易な高輝度 (210 以上) 粒子 (主に石英) を抽出対象とした。

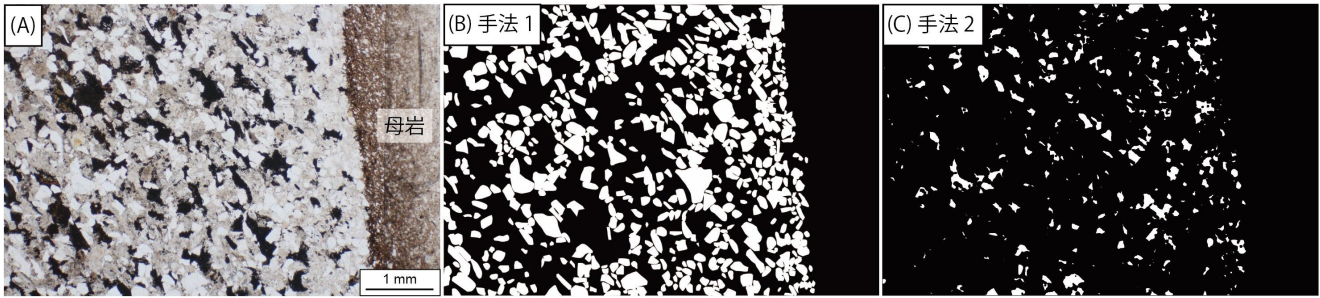
各手法で粒子を抽出した後は、ImageJ を用いて楕円近似を行った。粒子配列の分析には、安邊・佐藤 (2021) と同じく、楕円の長軸/短軸比が 1.5 より大きい粒子を用いた。また、長軸の配列がランダムでないかを検証するレイリー検定を行い、ランダムでない場合には、長軸の平均方向を算出した。

3. 結果および考察

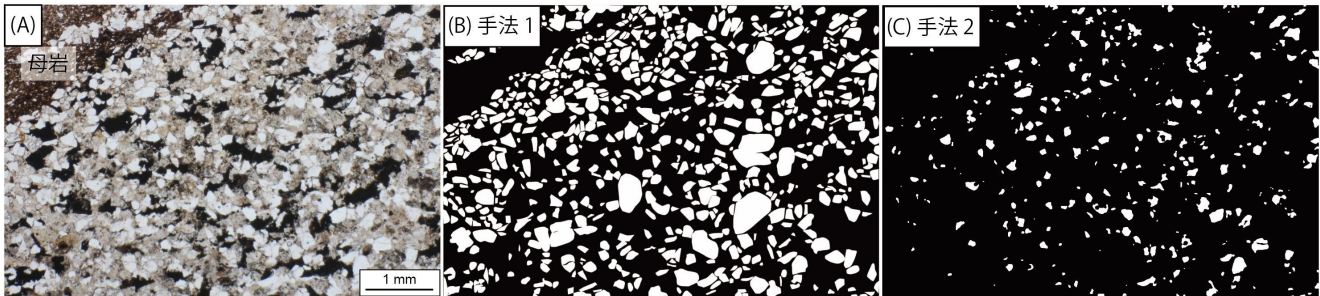
V 面について、手法 1 では 500 粒子を抽出したのに対し、手法 2 では 385 粒子を抽出した (第 2 図)。H 面については、手法 1 で 566 粒子、手法 2 で 340 粒子を抽出した (第



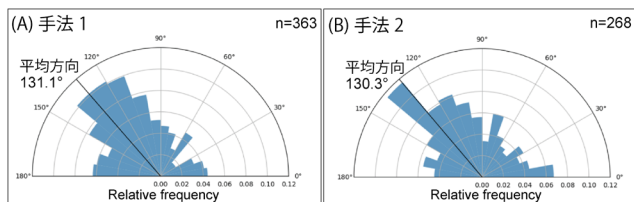
第 1 図 岩石薄片の作成位置と画像処理に使用した岩石薄片の偏光顕微鏡 (オープンニコル) 写真。



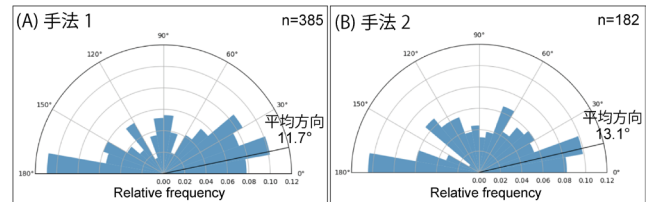
第2図 V面の薄片画像と粒子外形抽出結果。(A)薄片写真, (B)手法1の抽出結果, (C)手法2の抽出結果。



第3図 H面の薄片画像と粒子外形抽出結果。(A)薄片写真, (B)手法1の抽出結果, (C)手法2の抽出結果。



第4図 V面の粒子の長軸方向の相対頻度を示すローズダイアグラム。(A)手法1(手作業), (B)手法2(二値化)による結果。



第5図 H面の粒子の長軸方向の相対頻度を示すローズダイアグラム。(A)手法1(手作業), (B)手法2(二値化)による結果。

3図)。粒子抽出に要した作業時間は、手法1では各画像につきおよそ4時間であったのに対し、手法2ではおよそ5分であった。手法2では、手法1と比較して抽出粒子数は減少したものの、短時間で粒子抽出を行うことができた。

レイリー検定の結果、V面およびH面の両方で、いずれの手法でも粒子配列には有意な方向性があることが示された。また、平均方向はV面で手法1が131.1°、手法2が130.3°(第4図)、H面で手法1が11.7°、手法2が13.1°であり(第5図)、各面において両手法で概ね一致した。一方で、手法2による抽出では平均方向の95%信頼区間が大きくなる傾向がみられた。これは、二値化条件の影響によって手法1よりも抽出粒子数が減少したことに加え、画像処理によって抽出された粒子外形が実際のものとは一致していないためと考えられる。しかしながら、砂岩岩脈の形成メカニズムを検討する上では、粒子配列の卓越方向を把握できれば十分な場合も多い。卓越方向そのものは両手法で大きく変化しなかったことから、ImageJを用いた画像解析は、粒子配列の卓越方向を効率的に把握する手法として有効である可能性が示された。

4. まとめ

砕屑性岩脈の形成メカニズムの解明に必要な粒子配列の卓越方向を把握するため、画像処理による効率的な手法の検討を行った。偏光顕微鏡のオープンニコル下で撮影した岩石薄片画像から、ImageJを利用して粒子外形を抽出する手法は、粒子配列の卓越方向を効率的に把握する上で有効であることが示された。

文 献

- 安邊啓明・佐藤活志(2021)泥ダイアピル周辺の碎屑岩脈の方位解析による広域応力と局所応力の検出：中新統田辺層群の例。地質学雑誌, vol.127, no.12, pp.709-725.
- Hurst, A., Cartwright, J., Duranti, D. (2003) Fluidization structures produced by upward injection of sand through a sealing lithology. Geological Society, London, Special Publications, vol.216, pp.123-138.
- Hurst, A., Grippa, A., Silcocks, S., Huuse, M., Bowman, M. and Cobain, S. (2021) Introduction: subsurface sand remobilisation and injection. Geological Society, London, Special Publications, vol.493, pp.1-10.
- Jolly, R. J. H., Lonergan, L. (2002) Mechanisms and controls on the formation of sand intrusions. Journal of the Geological Society, London, vol.159, pp.605-617.
- Rasband, W. S. (2018) ImageJ. U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.net/ij/>
- Smart, P. L., Palmer, R. J., Whitaker, F., Wright, V. P. (1988) Neptunian dikes and fissure fills: an overview and account of some modern examples. In: James, N. P. and Choquette, P. W. (eds.) Paleokarst. Springer, pp.149-316.
- Yabuta, S., Takeuchi, M., Asahara, Y., Li, Q. (2025) Origin of the Sandstone Dikes Intruding Into the Miocene Shidara Group, Southwest Japan Based on Sandstone Composition and Detrital Zircon U-Pb Ages. Island Arc. <https://doi.org/10.1111/iar.70017>.

Wave Glider の漂流データに基づく黒潮域の水平拡散係数の推定

北代達也^{*,**}・谷口文菜^{*,**}・西川悠^{**}・飯沼卓史^{**}・杉山徹^{**}・
宮澤泰正^{**}・木戸晶一郎^{**}・吉田毅郎^{*}・桑谷立^{**}

Estimation of horizontal diffusion coefficients in the Kuroshio Region using based on the drifted Wave Glider track

Tatsuya Kitadai^{*,**}, Ayana Yaguchi^{*,**}, Haruka Nishikawa^{**}, Takeshi Iinuma^{**},
Toru Sugiyama^{**}, Yasumasa Miyazawa^{**}, Shoichiro Kido^{**}, Takero Yoshida^{*}, Tatsu Kuwatani^{**}

*日本大学理工学部海洋建築工学科, Department of Oceanic Architecture and Engineering,
College of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-City 274-0063,
Japan. E-mail: csta23040@g.nihon-u.ac.jp
**国立研究開発法人海洋研究開発機構, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
(JAMSTEC), 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan.

キーワード : 水平拡散係数, 黒潮域, Wave Glider, 漂流

Key words : Horizontal Diffusion Coefficient, Kuroshio Region, Wave Glider, Drifting,

1. はじめに

海洋における漂流物の移動予測は、漂流事故への対応、流出油や海洋ゴミの拡散予測、漂流軽石などの沿岸漂着リスク評価において重要である。このような漂流予測では、海流データに基づく移流計算が基本となる。しかし、実際の漂流挙動には海流モデルの誤差、未解像の乱流混合、サブグリッドスケールの変動、風や波の影響、および漂流物の形状に起因する不確実性が含まれる。

水平拡散係数は多くの場合、既往研究や経験的知見に基づいて設定されるパラメータであり、対象海域や使用する海流データに対してどの程度妥当な値を用いるべきかは必ずしも明らかでない。特に黒潮域周辺では、強い流れや流路変動、渦構造の影響により海流モデルと実際の漂流挙動の差が大きくなる可能性がある。したがって観測された漂流軌跡を用いて、海流モデルでは説明できない成分を定量化し、有効拡散係数として評価することは、漂流予測の不確実性を理解する上で重要である。

本研究では、2025年6月18日から同年8月26日にかけて黒潮周辺海域で取得された Wave Glider の漂流軌跡データを用い、気象庁による日本沿岸域海況監視予測システム GPV の流速データと比較した。そして、観測された位置変化から日本沿岸域海況監視予測システム GPV による移流成分を差し引いた残差増分に基づき、黒潮周辺海域における有効水平拡散係数を推定した。さらに、粗視化幅を変化させた解析により、推定される拡散係数の時間スケール依存性について検討した。

2. Wave Glider と使用データ

本研究では、黒潮周辺海域で漂流した Wave Glider の位置データを観測軌跡として使用した。Wave Glider は自律型無人水上機である。本機は海面のフロートと水中のグライ

ダーがアンビリアルケーブルで接続された構造を持つ。波浪に伴う海面フロートの上下運動を水中グライダーの翼の揺動へと変換することで、推進力を生成する。この推進機構の採用により、燃料を消費することなく長期間にわたる自律的な連続航行が可能である。さらに、機体上部に搭載された太陽光パネルによる発電電力を、各種観測機器の駆動、スラスタ、および通信システムの電源として充当している(Liquid Robotics, Inc., 2026)。

本研究は、制御不能後に漂流した期間の位置情報を、海面付近の漂流体の実観測データとして扱った。海流データとしては、気象庁による日本沿岸域海況監視システム GPV (以下 GPV 流速データと呼ぶ)の上層流速データを用いた。解析にあたっては、Wave Glider の位置データと GPV 流速データの時刻を対応させ、欠損地およびデータ統合を行った。

3. 解析方法

Wave Glider の位置を X_n 、GPV による流速ベクトルを $u_{GPV,n}$ 、時間間隔を Δt_n とすると、GPV による移流を考慮した漂流粒子の位置変化は、次式で表される。

$$X_{n+1} = X_n + u_{GPV,n}\Delta t_n + \lambda_n \quad (1)$$

ここで、 λ_n は、GPV 流速データでは説明できない残差増分であり、海流モデルの誤差、未解像過程、風・波の影響などを含む有効的な変動成分を表す。したがって、実データから残差増分は、以下の式で求められる。

$$r_n = X_{n+1} - X_n - u_{GPV,n}\Delta t_n \quad (2)$$

残差増分が独立的な白色拡散過程に従うと仮定すると、東

西方向および南北方向の残差増分の分散は、それぞれ $2A_x\Delta t_n$, $2A_y\Delta t_n$ に対応する。この関係に基づき、有効拡散係数 A_x , A_y を推定した。

$$A_x = \frac{\sum \lambda_{x,n}^2}{2\sum \Delta t_n} \quad (3)$$

$$A_y = \frac{\sum \lambda_{y,n}^2}{2\sum \Delta t_n} \quad (4)$$

ただし、実際の残差増分には、海流モデルの系統誤差や時間的に持続する誤差が含まれる可能性がある。この場合、残差増分は完全な独立増分とはならず、推定される拡散係数は観測時間間隔や粗視化スケールに依存する。そこで本研究では、 k ステップ分の残差増分を集約し、粗視化幅 k に対する有効拡散係数 $A^{(k)}$ を計算した。この解析により、推定される拡散係数が時間スケールに対してどのように変化するかを評価した。

4. 結果と議論

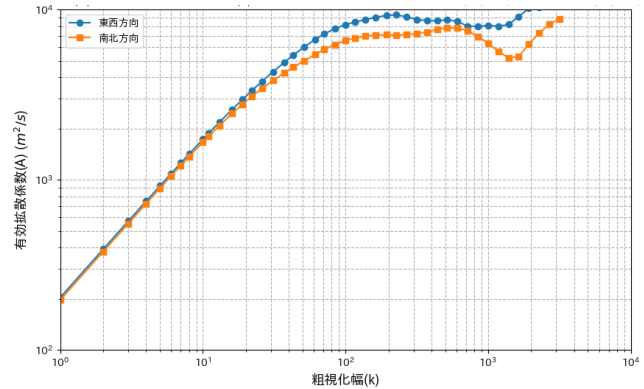
まず、粗視化を行わない $k=1$ (5min に相当) の条件において、Wave Glider の観測軌跡と GPV 流速データから計算した残差増分に基づき、有効水平拡散係数を推定した。その結果、東西方向の有効拡散係数は $A_x=203.4\text{m}^2/\text{s}$ 、南北方向の有効拡散係数は $A_y=196.6\text{m}^2/\text{s}$ となった。両者は同程度の値を示しており、本解析事例では、観測データの基本時間間隔において、東西方向と南北方向の残差増分の分散増加率に大きな差は見られなかった。このため、以降では代表的な有効拡散係数として、おおよそ $A\approx 200\text{m}^2/\text{s}$ の値が得られたと解釈できる。

$$A_x(k) = \frac{(\sum_{i=1}^k r_{xi}^2)}{2k\Delta t} \quad (5)$$

一方で、この値は $k=1$ における推定値であり、必ずしもスケールに依存しない普遍的な拡散係数を意味するものではない。本研究で推定している拡散係数は、理想的な乱流拡散係数ではなく、GPV 流速データで説明できない残差を統計的に表した有効拡散係数である。そのため、利用する海流データの時間解像度、観測間隔、および粗視化スケールに依存する可能性がある。

図 1 に、粗視化幅 k を変化させた場合の有効拡散係数の変化を示す。もし残差増分が完全に独立な拡散過程に従うならば、推定される拡散係数は k に依存せずほぼ一定となるはずである。一方、短時間スケールにおいて残差に時間相関が含まれる場合、 $A^{(k)}$ は k に依存して変化する。したがって、 $A^{(k)}$ の粗視化幅依存性は GPV 流速データと観測軌跡との差に含まれる時間相関や系統誤差の影響を評価する指標となる。

本解析では、 $k=1$ において $A\approx 200\text{m}^2/\text{s}$ の有効拡散係数が得られた。この値は、従来の漂流シミュレーションで代表的に用いられる値と比較すると異なる可能性があり、対象海域や使用する海流データに応じて拡散係数を評価する必要性を示している。ただし、本結果は単一の Wave Glider 漂流データに基づくものであり、黒潮域全体に普遍的に適用できる値であるかについては、さらなる検証が必要である。



第 1 図 有効拡散係数 A と粗視化幅 k の依存性

5. まとめ

本研究では、黒潮周辺海域で漂流した Wave Glider の観測軌跡と、GPV 流速データを比較し、海流モデルで説明できない残差増分に基づいて有効水平拡散係数を推定した。その結果、粗視化を行わない $k=1$ の条件では、東西方向で $203.4\text{m}^2/\text{s}$ 、南北方向で $196.6\text{m}^2/\text{s}$ の値が得られ、代表値として $A\approx 200\text{m}^2/\text{s}$ 程度の有効拡散係数が推定された。

また、粗視化幅 k を変化させた解析により、推定される有効拡散係数が時間スケールに依存する可能性を検討した。本研究で得られる拡散係数は、純粋な物理的拡散係数ではなく、GPV 流速データの誤差や未解像過程を含む有効的な統計パラメータである。したがって、漂流予測の精度向上に向けては、一律の拡散係数を用いるのではなく、対象海域、使用する海流データ、および解析時間スケールに応じて、有効拡散係数を評価することが重要である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K01139 の助成を受けたものである。また、Wave Glider の回収は東京大学大気海洋研究所研究船共同利用(新青丸, KS-25-11)の支援を受けて実施された。

文献

Liquid Robotics, Inc. (2026) The Wave Glider. How It Works. <https://www.liquid-robotics.com/wave-glider/how-it-works/>, (accessed 2026-05-18).

灰色関連分析とクラスター分析の統合による避難所の適正性評価手法の開発 —高知市を対象として—

楠 竜太郎*・根本 達也*・サムブッタ ダル*・ベンカテッシュ ラガワン*

Development of an Evaluation Method for Shelter Suitability by Integrating Grey Relational Analysis and Cluster Analysis: A Case Study of Kochi City

Ryutaro KUSU*, Tatsuya NEMOTO*, Sambuddha DHAR* 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: sl22095e@st.omu.ac.jp

キーワード：灰色関連分析, クラスター分析, 避難所, 適正性評価, 高知市

Key words: Grey Relational Analysis, Cluster Analysis, Evacuation Site,
Suitability Evaluation, Kochi City

1. はじめに

近年、南海トラフ地震などの大規模災害に対する懸念が高まり、自治体による避難所の整備が急がれている。特に高知市は、海に面した低地部と険しい山地部によって形成される複雑な地形を有しているため、津波や土砂災害などの多様な災害リスクを考慮した防災計画が必要とされている。自治体が避難所を指定する際に、施設の管理条件や構造条件に着目して選定を行っているが、実際の避難においては、周辺からの接続性や延焼リスク、標高といった外的な要因が避難の適正性に影響している。したがって、複数の基準を統合的かつ定量的に評価する方法の確立が課題である。

これらの背景を踏まえて、本研究では、高知市における避難所を対象に、灰色関連分析 (Grey Relational Analysis: GRA) とクラスター分析を組み合わせた新たな適正性評価手法を提案する。また、複数の評価指標をもとに算出した適正性スコアに基づき、避難所を類型化することで、地域ごとの特性と課題を明らかにすることを目的とする。

2. 手法

2.1 評価指標の選定

第1表 評価指標一覧

記号	指標名
x(1)	収容可能人数
x(2)	最寄りの病院までの距離
x(3)	病床数
x(4)	最寄りの消防施設までの距離
x(5)	計測震度
x(6)	不燃領域率
x(7)	戸建て住宅密度
x(8)	木防建べい率
x(9)	津波浸水深
x(10)	土砂災害警戒区域までの最短距離
x(11)	土砂災害特別警戒区域までの最短距離

避難所の適正性を決定する上で、物理的な収容能力だけでなく、周辺の主要拠点に対する近接性、災害時における環境的な安全性など、複数の側面を考慮する必要がある。そこで本研究では陳 (2015) に基づき、(1)有効性、(2)アクセス性、(3)安全性の3つの観点から第1表に示す11の指標を選定した。安全性に関する指標に、計測震度・津波浸水深・土砂災害警戒区域までの距離・火災リスク (不燃領域率・戸建て住宅密度・木防建べい率) を含めた。

2.2 灰色関連分析 (GRA)

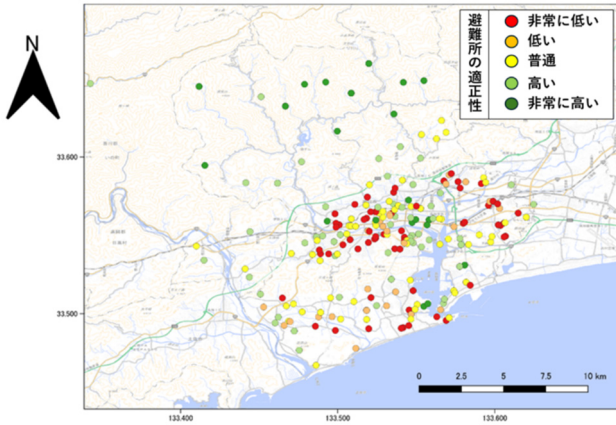
GRA は Deng (1982) が提案した灰色システム理論に基づく手法であり、不確定な要素を含むシステムにおいて、各要因間の相関の程度を定量的に分析する手法である。本手法はサンプルサイズが小さい場合や、データの分布が未知である場合においても有効に機能する。これにより、立地適正性評価における情報の不足や指標の不確実性に対応した評価が可能になる。指標は望大・望小特性に応じて正規化した。正規化した指標を用いて、各避難所と参照系列 (理想的な避難所) との差異を灰色関連係数 r として定量化する。また、式 (1) で j 番目評価指標の情報エントロピー E_j から重み w_j を算出した。最終的な適正性スコア R_i は式 (2) で求め、1に近いほど適正な立地を示す。ここで n は指標の数、 $r(x_0(k), x_i(k))$ は参照系列の第 k 項目と法案 i の第 k 項目の間の灰色相関係数である。

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n 1 - E_j} \quad (1)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) w_j \quad (2)$$

2.3 非階層型クラスター分析

多角的な評価指標から各避難所の特性を明らかにし、共通の特徴を持つ施設群から地域特性を確認するために、11指標を標準化した上で k -means 法による非階層型クラスター分析を実施した。本手法は階層型手法と比較して計算効率に優れており、大規模なデータセットに対して安定した分類が可能である。



第1図 避難所の位置と適正性区分

第2表 クロス集計結果 (施設数)

クラスター	非常に低い	低い	普通	高い	非常に高い
CL1 (延焼)	17	7	16	4	0
CL2 (津波)	1	4	15	25	8
CL3 (郊外)	51	17	54	26	5
CL4 (孤立)	0	0	4	10	20

3. 結果と考察

3.1 適正性スコアの分布

エントロピー法の結果, 病床数 ($w=0.424$), 計測震度 ($w=0.156$), 収容可能人数 ($w=0.148$) が上位の重みを示し, 医療アクセスと耐震性が評価に大きく寄与することが明らかになった. 各避難所の適正性スコア R を幾何学的間隔分類法で5段階に区分し, GISでマッピングした結果, 市街地中心部に「非常に低い」評価が集中し, 北部山間部では「非常に高い」評価が多く分布していた(第1図). 標高と適正性に正の相関が視覚的に確認された.

3.2 クラスタ分析結果

エルボー法とシルエット分析の両者が整合するクラスター数 $k=4$ でクラスター分析を実施した. 分類された4つのクラスターの特徴を把握するため, レーダーチャートの作成およびGIS上での標高データ・人口密度データとの重ね合わせを行った. 各クラスターの特徴を以下に示す.

クラスター1 (市街地延焼リスク型): 戸建て住宅密度・木防建ぺい率が高く, 不燃領域率が低い. 人口密度の高い都市中心部に集中する.

クラスター2 (沿岸部津波リスク型): 津波浸水深スコアが他クラスターと比べ突出して高く, 沿岸低地部に分布する.

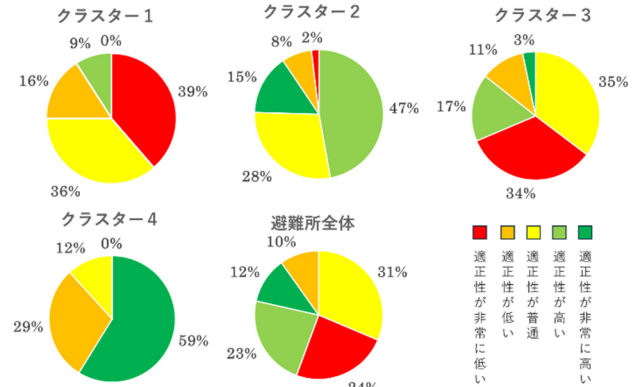
クラスター3 (郊外バランス型): 多くの指標が平均付近に収束し, 極端なリスク偏りが少ない.

クラスター4 (中山間部孤立リスク型): 病院・消防施設までの距離および土砂災害区域への距離が突出して大きく, 北部山間部に分布する.

3.3 統合評価—地域特性と施設ポテンシャルのミスマッチ

クラスターを外部環境の課題, 適正性スコア R を施設の内部的なポテンシャルとして両者をクロス集計した(第2表). それぞれのクラスターにおける適正性評価階級の構成比を第2図に示す.

クラスター1 (市街地延焼リスク型) では適正性「非常に低い」が39%に達し, 「非常に高い」が皆無であった.



人口が集中する都市環境下で, 既存施設が十分な防災ポテンシャルを確保できていない実態が定量的に示された. 対照的に, クラスタ4 (中山間部孤立リスク型) では「非常に高い」が59%を占め, 施設単体の適正性は極めて高い. しかし, 病院・消防施設への遠隔性という外部環境の課題は解消されておらず, 発災時の孤立リスクが依然として高い. クラスタ2 (沿岸部津波リスク型) は津波リスクが高いにもかかわらず「高い」以上が62.3%と比較的良好な評価であった. 以上より, 適正性スコア単体では見えにくい地域固有の課題が, クラスタ分析との統合によって明確化されることが示された. クラスタ1 (市街地延焼リスク型) は人口密集地でありながら施設の防災ポテンシャルが低く, 都市的脆弱性の改善が急務であることが定量的に示された. クラスタ4 (中山間部孤立リスク型) は施設単体の適正性は高いが, 医療・消防施設への遠隔性という外部環境の課題は解消されておらず, 発災時の孤立リスク軽減に向けた広域連携体制の整備が求められる. このような統合的な評価視点は, 各地域の実情に応じた効率的な防災計画立案の指針として有効である.

4. おわりに

本研究では, 灰色関連分析とクラスター分析を融合させた避難所適正性評価手法を高知市の285箇所に適用し, 地域特性(外部環境の課題)と施設ポテンシャルの間に顕著なミスマッチが存在することを定量的に明らかにした. GISを用いた可視化により, 標高と適正性との間に正の相関が視覚的にも確認された. 本手法は地域の災害リスク特性に応じた避難所の課題を浮き彫りにし, より実践的な地域防災計画の策定に寄与する有効なツールとなり得る.

本手法による評価は発災時の動的な避難行動や道路閉塞による動線変化までは完全に反映できていない. 今後の課題として, 昼間・夜間人口差を考慮した動的避難需要の算出, および避難行動シミュレーションなどとの連携による, より動的な評価手法への拡張が挙げられる. 本手法は, 不確実性を内包したまま客観的スコアを算出できる灰色理論の特性を活かした実践的な防災計画支援ツールであり, 他の都市・地域への適用も期待される.

文献

陳琳 (2015) 避難所立地の適正性に関する評価システム構築の試み. 九州大学大学院人間環境学府修士論文, pp.18-1-18-4.
 Deng, J.L. (1982) Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, 1(5), pp.288-294.

階層分析法とクラスタリングを用いた地すべり危険度マッピング

植田 允教*・前田 敦*・根本 達也*・サムブッタ ダル*・ベンカテッシュ ラガワン*

Landslide Susceptibility Zonation Using AHP and Clustering Approach

Mitsunori UEDA*, Atsushi MAEDA*, Tatsuya NEMOTO*, Sambuddha DHAR* 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: so22000t@st.omu.ac.jp

キーワード: 地すべり, 階層分析法, クラスタリング分析, 危険度マッピング

Key words: Landslide, AHP, Clustering analysis, Susceptibility mapping

1. はじめに

日本では地震や豪雨を誘因として地すべりが発生し、大規模な被害をもたらす可能性がある。そのため、危険箇所の特定が急務である。危険度の高い斜面を特定する手法として、階層分析法と数値地形モデル (DEM) を用いた地すべりの評価や危険度マップの生成が行われている (河野ほか, 2020; Kamp *et al.*, 2008 など)。しかし、評価手法が階層分析法のみである場合、主観的な要素を排除できない (Kamp *et al.*, 2008 など)。

本研究では、客観的な判断に基づく地すべり評価手法の開発を目的として、階層分析法とクラスタリング分析を組み合わせて地すべり危険度マッピングを行った。

2. 地すべり危険度評価方法

本手法では、主成分分析により地すべりとの関係性が高い評価項目を選定し、階層分析法およびクラスタリング分析を用いて地すべり危険度の評価を行なった。

2.1 主成分分析

主成分分析は多変量データの傾向を説明する新たな指標を生成し、次元圧縮を行う手法である。本研究では、階層分析法における評価項目の候補を用いて主成分分析を行う。第1～第3主成分において、主成分負荷量の絶対値が0.71以上のデータを地すべり危険度の評価項目として採用する。

2.2 階層分析法およびクラスタリング分析

階層分析法は、意思決定の過程を階層構造で表現し、評価を行う手法である。階層レベルIは分析目的であり、地すべり危険度マップの作成とする。その下位には評価基準として、面積占有率による評価と面積による評価を設定する。各評価基準の下位階層に評価項目を配置し、評価項目の下位階層に項目ごとの要素を設定する (第1図)。評価項目と要素の各階層で一対比較を行い、その結果からウェイトを算出して危険度マップを作成する。

クラスタリング分析は、類似したデータをグループ化する多変量解析の一種であり、グループ化されたデータの集合はクラスタと呼ばれる。本研究では、各階層における一対比較値の決定にクラスタ分析を使用する。一対比較値は相対的な重要度を表した値であり、各階層でクラスタリングを行い、分類されたクラスタごとで一対比較値を決定する。

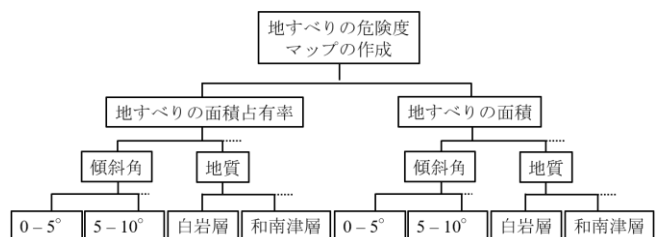
2.3 地すべり危険度マッピング

本研究では、最も下位にある要素の階層から評価を行う。各要素の領域に存在する地すべりの面積占有率、あるいは面積を求め、要素間の一対比較表を作成する。一対比較表を用いて、要素間の面積占有率あるいは面積の比を算出し、要素間の比を用いてクラスタリングを行う。比の値に応じて各クラスタに一対比較値を設定し、固有値法を用いて各要素のウェイトを算出する。次に、要素の上位階層にある評価項目に着目する。各評価項目における要素のウェイトから標準偏差と変動係数を算出し、評価項目間の一対比較を行う。評価項目間の標準偏差と変動係数を使用してクラスタリングを行い、各クラスタに一対比較値を設定する。その後、評価項目の一対比較表に基づき固有値法により評価項目のウェイトを算出する。算出したウェイトを用いて面積占有率のみを用いた場合と面積占有率と面積の両方を用いた場合の危険度マップを生成する。面積占有率のみを用いる場合、評価項目のウェイトと要素のウェイトの加重和を危険度評価点とする。面積占有率と面積の両方を使用する場合、2つの評価点の和を最終的な危険度評価点とする。

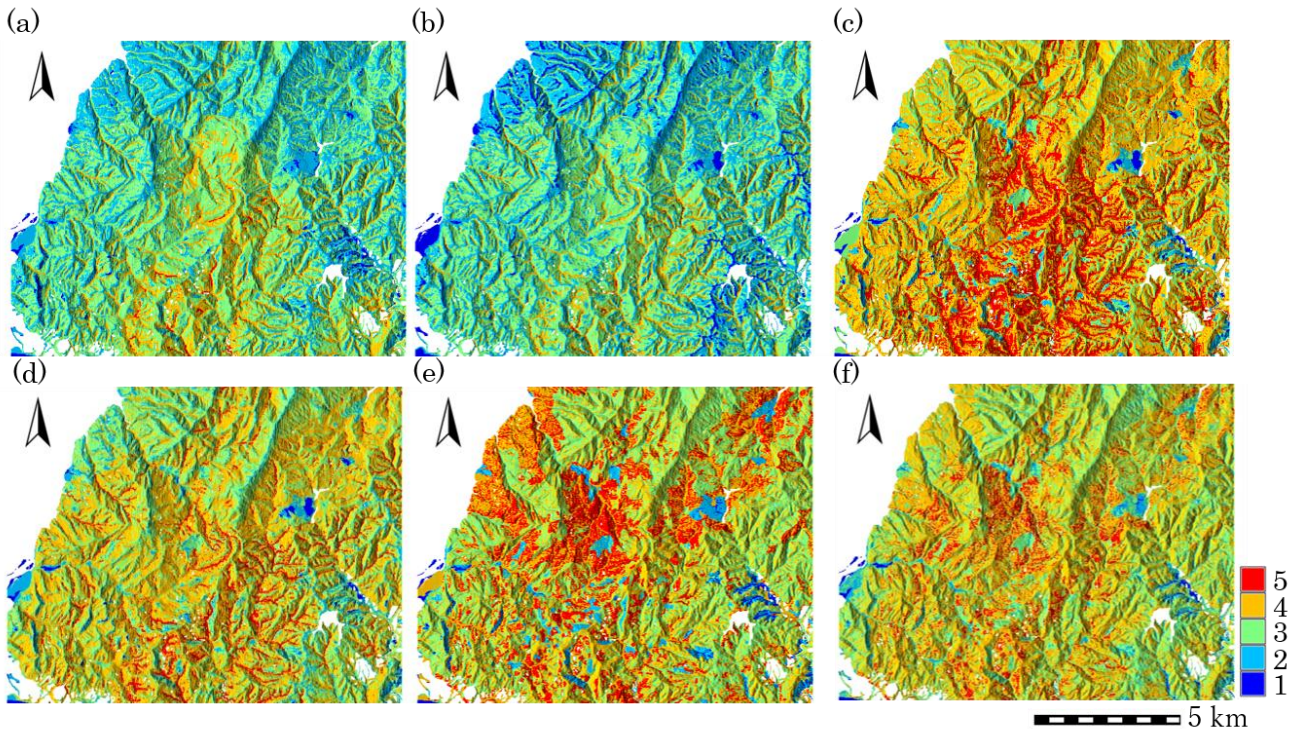
算出された各危険度評価点を等間隔に5段階で分類し、これを危険度ランクとした。ランクの値が大きいほど、危険度が高いことを示す。

3. 評価項目の候補と対象地すべり

評価項目の候補は地形情報 (標高, 傾斜角, 傾斜方位, 起伏量, 断面曲率, 水平曲率, 地形分類, 粗度, TPI, TRI, CI, TWI, 集水度), 地質情報 (地質分布, 背斜軸および向斜軸からの距離), 植生分布とした。地形情報は、10 m DEM (北海道地図作製 GISMAP) から算出された。地質情報は、



第1図 地すべり危険度マッピングの階層構造の例



第2図 滑落崖と移動体における地すべり危険度マップ。(a)標準偏差による移動体の危険度マップ(占有率のみ), (b)変動係数による移動体の危険度マップ(占有率のみ), (c)標準偏差による移動体の危険度マップ(占有率・面積), (d)変動係数による移動体の危険度マップ(占有率・面積), (e)標準偏差による滑落崖の危険度マップ(占有率・面積), (f)変動係数による滑落崖の危険度マップ(占有率・面積)

5万分の1地質図幅「小千谷」(柳沢, 1986)と「長岡」(小林ほか, 1991), 植生分布は, 5万分の1現存植生図(生物多様性センター)を用いた。地すべりデータは, 新潟県中越地震で発生した地すべり地(Yagi *et al.*, 2007)を使用した。地すべり地を7:3の割合で分割し, 70%を危険度評価, 残りの30%を検証に用いた。

3. 結果

3.1 主成分分析

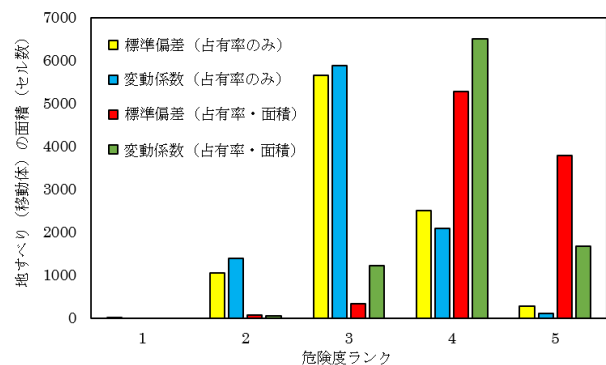
主成分分析の結果, 傾斜角, 起伏量, 地形分類, TPI, TRI, TWI, 地質分布, 背斜軸からの距離, 向斜軸からの距離, 植生分布が選択され, 階層分析法の評価項目とした。

3.2 地すべり危険度マップの生成

生成した地すべり危険度マップを第2図に示す。全体的な傾向として, 危険度は北部で低く, 中央から南部にかけて高くなった。これは, 地質に起因すると考えられ, 特に南部に存在する背斜軸と向斜軸が影響していると考えられる。いずれの危険度マップにおいても, 谷壁部や谷底部において危険度が高く, 尾根部では低くなる傾向があった。また, 評価基準を比較すると, 標準偏差を用いた場合の方が, 危険側に評価される傾向がみられた。移動体の危険度マップと検証用地すべり(移動体)の比較結果を第3図に示す。面積占有率と面積の両方を用いた場合の方が, 危険度分布と地すべり地との整合性が良好であった。特に, 面積占有率と面積の両方を併用し, 標準偏差により評価した危険度マップではランク4と5に地すべりが集中する結果となった。

4. おわりに

本研究では, 階層分析法とクラスタ分析を組合わせて地すべりの危険度マッピングを行うことで, 傾向の異なる評価項目を統合し客観的に危険箇所を特定できた。今後の



第3図 危険度ランクと検証(移動体)

課題として, 各評価項目の要素の数を一致させ, より合理的に危険度を決定できる手法の開発が必要である。

文 献

- Kamp U., Growley B.J., Khattak G.A. and Owen L.A. (2008) *GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region*, *Geomorphology* 101, pp.631-642.
- 河野勝宣・野口竜也・西村強 (2020) AHP 法および GIS を用いた中国地方における地すべりハザードマッピングの試み. *日本地すべり学会誌*, vol.57, no.1, pp.3-11.
- 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫 (1991) 5万分の1地質図幅「長岡」, 地質調査総合センター.
- 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一 (1986) 5万分の1地質図幅「小千谷」, 地質調査総合センター.
- Yagi, H., Yamasaki, T., and Arsumi, M. (2007) *Feature and distribution of landslides induced by the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, Japan*, U.S. Geological Survey data release.

Tensor Voting とハフ変換を用いた地形特徴量によるリニアメントの抽出

根本 達也*・中村 公亮*・サムブッタ ダル*・ベンカテッシュ ラガワン*

Lineament Extraction Based on Topographic Features Using Tensor Voting and Hough Transform

Tatsuya NEMOTO*, Kosuke NAKAMURA*, Sambuddha DHAR* 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: tnmoto@omu.ac.jp

キーワード：リニアメント, 数値標高モデル, ハフ変換, Tensor Voting, Geomorphon
Key words: Lineament, Digital Elevation Model, Hough transform, Tensor Voting, Geomorphon

1. はじめに

リニアメントは、地質構造の弱線部を反映した線状地形であり、谷地形や山麓地形として地表に形成される。リニアメントは、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)。

Raghavan *et al.* (1995) は、リニアメント抽出のために、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 and Rotation Transformation (START) を開発した。しかし、本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の影響を受けるという課題がある。また、中村ほか (2025) は、DEM から得られる地形特徴量を抽出し、Tensor Voting によって線構造の強度を算出した後、ハフ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。しかし、この手法には、地形特徴量の算出過程で地形発達の方位情報が失われるという課題がある。本研究では、DEM を用いて、地形発達の方位情報を保持したまま谷地形および山麓地形を抽出し、Tensor Voting, ハフ変換, 主成分分析を統合することで、構造的連続性を客観的に評価するリニアメント抽出手法を開発した。

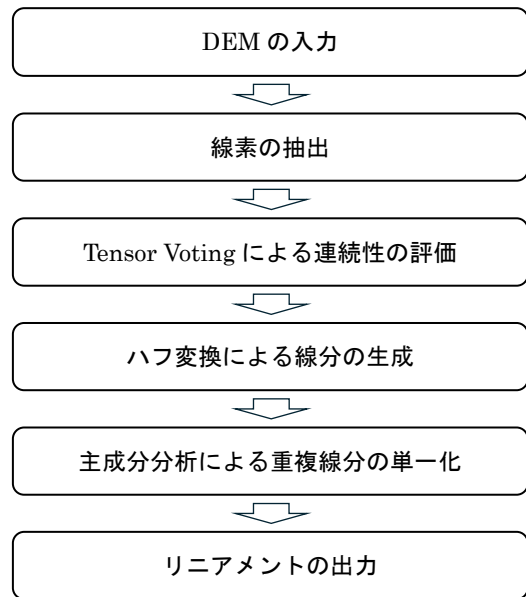
2. 手法

リニアメントとして判読される地形特徴は、主に谷、山麓、傾斜変換部、鞍部の4種類に分類される(三箇・荒川, 2005)。本研究では、とくに広域的な連続性が顕著に現れやすい谷地形および山麓地形を対象として抽出を行った。リニアメントを構成する谷地形は、山間部において谷が直線状に連続する地形であり、山麓地形は山地と平野の境界が直線状に連続する地形である。これらは地下の断層や地質構造の影響を受けやすく、地質構造解析において重要な指標となる。

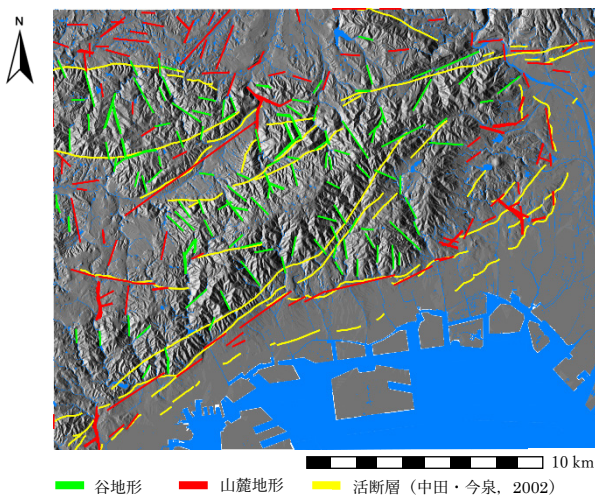
本研究では、地形分類手法である Geomorphon (Jasiewicz and Stepinski, 2013) に基づいて、谷地形および山麓地形の線素を抽出した。しかし、Geomorphon では、線対称・点対称の地形や、回転によって同じ形状となる地形が一つの

カテゴリとして分類されるため、地形発達の方位情報が保持されないという課題がある。また、そこで本研究では、谷地形と山麓地形に対応する地形パターンを独自に定義し、それらの地形が発達する方向を区別して線素を抽出した。これにより、地形発達の方向情報を保持した線素を抽出できる。

抽出した線素に対して Tensor Voting を適用し、線構造の連続性を幾何学的に評価した。Tensor Voting は、画像や点群データ中に存在する線構造の連続性を近傍点間の幾何学的関係に基づいて推定する手法であり、ノイズを含むデータから連続した構造を抽出する目的で用いられる。その後、ハフ変換を用いて線素を連結し、線分を生成した。さらに、重複する線分群については主成分分析を適用し、単一の線分へと統合した。処理の流れを第1図に示す。



第1図 リニアメント抽出までの流れ。



第2図 本手法によるリニアメントの抽出結果.

本研究では、DEM からリニアメントを自動抽出するために、既存の Python ライブラリを組み合わせるプログラムを開発した。解析環境にはクラウドベースの計算プラットフォームである Google Colab (Python3.12) を用いた。地理空間データの入出力および座標管理には Rasterio、画像処理および幾何学的特徴の抽出には OpenCV、統計解析の実装には Scikit-learn を用いた。これらのライブラリを用いることで、データの読み込みからリニアメントの出力までを一貫して実行可能な処理環境を構築した。

3. リニアメントの抽出

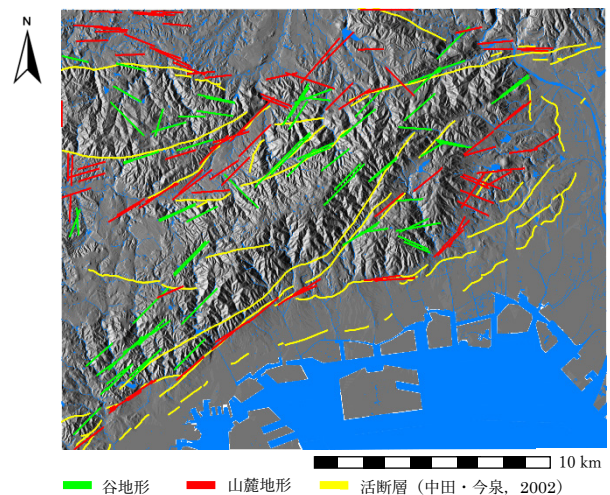
兵庫県南部の六甲山およびその周辺地域を対象として、基盤地図情報（数値標高モデル）10 m メッシュからリニアメントを抽出した。本地域では、六甲—淡路構造線に伴う北東—南西方向の活断層が卓越している。また、南北方向に明瞭な谷地形が発達しており、本手法によるリニアメント抽出結果の検証に適している。

解析の前に、DEM に含まれる微細な凹凸地形やノイズを除去することを目的とした前処理を行った。具体的には、11×11 格子のウィンドウサイズのガウシアンフィルタを用いて、標高値に対して畳み込み演算を適用した。この平滑化処理により、解析に不要な微地形由来のノイズを低減し、広域的な線状構造の連続性を捉えやすくした。

リニアメント抽出までの各処理では、複数のパラメータを設定する必要がある。線素の抽出では、地形パターンを探索する範囲を決定するために探索半径を設定する。また、平坦面と傾斜面を区分するために、傾斜角度の閾値を設定する。Tensor Voting による連続性評価では、線構造の連続性を判定するために線構造強度の閾値を設定する。さらに、ハフ変換による線分の生成では、極端に短い線分を除外するために最小線分長を設定する。これらのパラメータの設定は、抽出されるリニアメントの形状や連続性に大きく影響するため、適切な値の選定が重要である。

抽出結果の一例を第2図に示す。抽出されたリニアメントを中田・今泉 (2002) による活断層と比較したところ、諏訪山断層をはじめとする既知の断層位置と概ね一致することが確認された。また、山地内に発達する線状の谷地形についても、連続性を持ったリニアメントとして抽出された。

第3図に中村ほか (2025) による抽出結果を示す。本研究



第3図 中村ほか (2025) によるリニアメントの抽出結果.

の結果と比較すると、本手法では視認可能な谷地形がより明瞭かつ連続的に抽出されている。これは、地形の方位情報を保持したことで、同一の方向情報をもつ線素が連続的に連結されたためであると考えられる。

4. おわりに

本研究では、Geomorphon に基づき、地形発達の方向情報を保持した状態で線素を抽出する手法を構築した。さらに、Tensor Voting、ハフ変換、主成分分析を統合することで、方位情報を保持した線素からリニアメントを抽出する手法を開発した。本手法の特徴は、地形特徴の方位情報を保持したまま線状構造を抽出できることである。既知の活断層と比較した結果、抽出結果との間に一定の対応関係が確認された。活断層調査や地質構造解析の自動化・客観化に寄与するものと考えられる。

一方で、各処理におけるパラメータの設定には、依然として主観的な判断が含まれている。とくに、各処理における閾値の設定は抽出結果に大きく影響するため、客観的な最適化手法の導入が必要である。今後の課題としては、機械学習を用いたパラメータの自動最適化や、異なる地形条件への適用性の検証が挙げられる。

文 献

- Gill, A. (1976) *Applied algebra for the computer sciences*. Prentice-Hall, Inc., 524p.
- 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.
- 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 (2025) 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。情報地質講演要旨集, pp.65-66.
- Raghavan, V., Masumoto, S., Koike, K. and Nagano, S. (1995) Automatic lineament extraction from digital images using a segment tracing and rotation transformation approach. *Computers & 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.

第37回日本情報地球学会講演会

講演要旨集

2026年5月29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
