

第33回日本情報地質学会講演会

講演要旨集

Geoinforum-2022 Annual Meeting Abstracts

日 時：2022年6月23日(木)・24日(金)

主 催：日本情報地質学会

目 次

一般講演

データベース

IODP「ちきゅう」の新しいデータベースの構築	1
木戸 ゆかり・Adam Wspanialy・Margaux Flores・青池 寛・Sean Toczko	

物理探査・装置開発

曳航・海底受信機で測定された CSEM データの統合逆解析による海底熱水鉱床の比抵抗イメージング向上	3
石須 慶一・笠谷 貴史・後藤 忠徳・小池 克明・シリボンバラボン ウィラシャイ・岩本 久則	
情報地質学の社会インフラへの展開 (1): 3次元弾性波・AE トモグラフィによる輪荷重試験下にある鉄筋コンクリート床板の劣化損傷進展評価	5
麻植 久史・塩谷 智基・福本 伸太郎・前島 拓	
情報地質学の社会インフラへの展開 (2): コンクリートのひび割れ深さ推定へのレイリー波の減衰理論の適用	7
奥出 信博・麻植 久史・山本 貴士・塩谷 智基	
情報地質学の社会インフラへの展開 (3): 三次元弾性波トモグラフィ法と BIM/CIM への適用によるダム門柱コンクリートの健全性評価	9
小椋 紀彦・サグラジャン アルトウル・麻植 久史・塩谷 智基	

数理・論理

生層序単元を表す座標図上のグラフ	11
山口 久美子・塩野 清治	

リモートセンシング

鉱物組成特定を目的とした可視・短波長赤外域の分光反射特性に基づく最適マルチスペクトルバンドの設計	13
岸本 将英・久保 大樹・小池 克明	
世界衛星画像データベース GRIAS を用いた鉱床関連鉱物の分布抽出と鉱量相関解析	15
若木 佑希也・久保 大樹・小池 克明	
A combination of satellite image, soil type, and topography data to delineate potential area of groundwater recharge	17
Tedi Atmapradhana・Katsuaki Koike	

解析手法・応用

3D スキャン技術の応用による資源関連岩石の形状と物性の非接触計測	19
久保 大樹・廣渡 響・小池 克明	
Physics-informed ニューラルネットワークを用いた地下深部の温度・浸透率構造の推定手法の開発	21
石塚 師也	
地熱系シミュレーションのパラメータ推定手法の開発: 深層学習を用いたアプローチ	23
嶋 章裕・石塚 師也・林 為人・Elvar K. Bjarkason・鈴木 杏奈	
地熱貯留層モデリングへの機械学習の適用	25
鈴木 杏奈・Shi Shuokun・橋田 俊之	
地熱資源探査とモデリングへの数理・情報地質学の貢献	27
小池 克明・富田 昇平	
傾斜方位-傾斜量合成図を用いた数値標高モデルの超解像	29
升本 眞二・水落 啓太・野々垣 進・根本 達也	
スパース辞書学習による海底地形図超解像・特徴抽出	31
金子 純二・日高 弥子・笠谷 貴史・木戸 ゆかり・石川 洋一・植木 俊明・木川 栄一	
マルチモーダル深層学習を用いた深層崩壊発生箇所における山体重力変形の特徴の検証	33
菊地 輝行・西山 哲	
地下汚染分布評価における地盤水理パラメータの逆解析手法の適用性検討	35
高井 静霞・島田 太郎・武田 聖司・小池 克明	
ボクセルモデルによる東青ヶ島カルデラ海底熱水活動域における船舶マルチビーム測深機のウォーターカラムデータの処理	37
金子 純二・笠谷 貴史	

GIS・Web-GIS

WebGL を用いたボーリングデータ 3 次元可視化システムの開発	39
..... 櫻井 健一・米澤 剛・根本 達也・升本 眞二	
WebGL を用いた都市地下浅部の地質サーフェスモデルビューア	41
..... 野々垣 進・中澤 努	
点群 PNG のポリラインへの応用	43
..... 西岡 芳晴・北尾 馨	
点群 PNG を用いた震源展開アプリケーションの試作	45
..... 北尾 馨・西岡 芳晴	
点群 PNG を用いたウェブ地図上での点群展開とポリライン群の描画	47
..... 北尾 馨・西岡 芳晴	

CONTENTS

General session

Database

- Construction of a new database for IODP “Chikyu”
..... Yukari Kido, Adam Wspanialy, Margaux Flores, Kan Aoike and Sean Toczko 1

Geophysical survey and observation system

- Improvement of resistivity imaging of seafloor massive sulfides by inversion of combined CSEM data of towed and ocean bottom receivers
..... Keiichi Ishizu, Takafumi Kasaya, Tada-nori Goto, Katsuaki Koike, Weerachai Siripunvaraporn and Hisanori Iwamoto 3
- Expansion of geoinformatics to social infrastructures (1): Fatigue damage characterization of RC slabs by means of 3D elastic wave & AE tomography Hisafumi Asaue, Tomoki Shiotani, Shintaro Fukumoto and Takuya Maeshima 5
- Expansion of geoinformatics to social infrastructures (2): Application of Rayleigh wave attenuation theory to depth estimation of surface-opening crack in concrete Nobuhiro Okude, Hisafumi Asaue, Takashi Yamamoto and Tomoki Shiotani 7
- Evaluation of concrete integrity of dam columns by three-dimensional elastic wave tomography and application to BIM/CIM
..... Norihiko Ogura, Artur Sagradyan, Hisafumi Asaue and Tomoki Shiotani 9

Mathematics and logic

- Graph on coordinates diagram for expressing biostratigraphic units
..... Kumiko Yamaguchi and Kiyoji Shiono 11

Remote sensing

- Optimal multispectral band estimation for mineral-composition specification using reflectance spectral data in visible and reflective-infrared regions Masahide Kishimoto, Taiki Kubo and Katsuaki Koike 13
- Detection of deposit-related minerals and correlation analysis with ore tonnage using global database of satellite images (GRIAS) Yukiya Wakaki, Taiki Kubo and Katsuaki Koike 15
- A combination of satellite image, soil type, and topography data to delineate potential area of groundwater recharge
..... Tedi Atmapradhana and Katsuaki Koike 17

Data analyses and applications

- Contactless measurement of shape and physical property of resource-related rocks using 3D scanning technology
..... Taiki Kubo, Hibiki Hirowatari and Katsuaki Koike 19
- Development of a method to estimate temperatures and permeabilities at depth using a physics-informed neural network
..... Kazuya Ishitsuka 21
- Development of a method to estimate hydrothermal simulation parameters: A deep learning approach
..... Akihiro Shima, Kazuya Ishitsuka, Weiren Lin, Elvar K. Bjarkason and Anna Suzuki 23
- Application of machine learning to geothermal reservoir modeling
..... Anna Suzuki, Shi Shuokun and Toshiyuki Hashida 25
- Contribution of geomathematics and geoinformatics to geothermal resource exploration and modeling
..... Katsuaki Koike and Shohei Albert Tomita 27
- Super-resolution of digital elevation model using aspect-slope image
..... Shinji Masumoto, Keita Mizuochi, Susumu Nonogaki and Tatsuya Nemoto 29

Sparse dictionary learning for super-resolution and feature extraction of ocean bathymetric maps	
..... Taku Yutani, Oak Yono, Tatsu Kuwatani, Daisuke Matsuoka, Junji Kaneko Mitsuko Hidaka, Takafumi Kasaya, Yukari Kido, Yoichi Ishikawa, Toshiaki Ueki and Eiichi Kikawa	31
Verification of deep-seated gravitational slope deformations at the location of deep-seated landslide using multimodal deep learning	
..... Teruyuki Kikuchi and Satoshi Nishiyama	33
Applicability of hydraulic parameter inversion for groundwater contaminant plume estimation	
..... Shizuka Takai, Taro Shimada, Seiji Takeda and Katsuaki Koike	35
Processing of water column data of shipboard multibeam echo sounders in Higashi-Aogashima knoll caldera submarine hydrothermal activity by voxel model	
..... Junji Kaneko and Takafumi Kasaya	37

GIS•Web-GIS

Development of a borehole data 3D visualization system using WebGL	
..... Kenichi Sakurai, Go Yonezawa, Tatsuya Nemoto and Shinji Masumoto	39
Surface-based geological model viewer for shallow subsurface in urban area using WebGL	
..... Susumu Nonogaki and Tsutomu Nakazawa	41
Application of Point Cloud PNG to polylines	
..... Yoshiharu Nishioka and Kaoru Kitao	43
Test development of application for plotting epicenters using Point Cloud PNG	
..... Kaoru Kitao and Yoshiharu Nishioka	45
Plotting point cloud and drawing polylines on a web map using Point Cloud PNG	
..... Kaoru Kitao and Yoshiharu Nishioka	47

IODP「ちきゅう」の新しいデータベースの構築

木戸 ゆかり・Adam Wspanialy・Margaux Flores・青池 寛・Sean Toczko*

Construction of a new database for IODP “Chikyu”

Yukari Kido, Adam Wspanialy, Margaux Flores, Kan Aoike, and Sean Toczko*

* 国立研究開発法人海洋研究開発機構 JAMSTEC, 2-15 Natsushima cho, Yokosuka, Kanagawa. E-mail: ykido@jamstec.go.jp

キーワード: IODP, 地球深部探査船「ちきゅう」, データベース, ER 図
Key words: IODP, D/V Chikyu, Database, Entity Relationship

1. はじめに

国立研究開発法人海洋研究開発機構 (以下, JAMSTEC) が運航する地球深部探査船「ちきゅう」(以下, ちきゅう) による国際深海科学掘削計画 (IODP) で得られたコア試料の分析データおよび物理検層データは, データ公開サイト「SIO7」(<http://sio7.jamstec.go.jp>) により国内外の研究者に提供されている (木戸ほか, 2018; 木戸, 2019)。「sio7」サイトは, 「ちきゅう」が国際的に活動を開始した 2007 年の調査航海から取得した 15 年間のデータを蓄積している。コア物理測定データ, XCT スキャン画像データ, 層位学検査データ等が含まれる。しかし, データ分布, 地図表示, データ相関, 検索などのデータベース機能を有せず, 国際的に利用されるデータ参照サイトとしては機能が不十分である。システムの老朽化と運用機能の陳腐化により, 新システムへの移行を検討した。他の IODP サイエンスフレームワークの傘下で公開されているデータベースと比較して, 同等のレベル, 表示, データ検索などの管理機能を提供することを目指した。2021 年度前半に, 国内外の科学掘削コミュニティから意見を聞き, データベースのコンセプトデザインとプロトタイプを作成した。その後, 概念設計とプロトタイプ開発に基づき, 運用版のデータベースサイトを構築し, 現在, 本格運用に向けた準備を進めている。

2. データベースの構成および仕様

2.1 データ管理機能

第 1 図にシステム概要図を示す。現行データサイトである「sio7」にすでに登録されているデータサーバに接続している赤い点線で示した Web サイトサーバーが, 今回開発したシステムである。まずは掘削孔情報 (航海情報, 掘削地, 時間, 深度, 掘削方式等) を新システムに登録するために, Entity Relationship (ER) 図を作成した。掘削孔では, コア試料が取得されている。個別試料データ (コア情報, セクション, 深度, 計測項目, 計測データ, 岩相記載, 個別試料情報等) を登録するための ER 図を作成し, 深度情報での紐付けを行なった。ライザー掘削 (掘削船と海底とを太いパイプで接続し, 泥水を循環させながら掘削する手法) 時には, 掘層であるカッティングス試料や泥水循環の物理情報も得られる。それらの深度データ, 時系列データの登録も行なった。また掘削孔で得られた物理検層データも深度および時

系列による登録作業を行い, 位置情報と紐付けし, 検索ができるような構成とした。コア試料については, 船上の実験室内にて X 線 CT 画像や半裁セクションの画像データが得られている。これらの深度情報をもとに画像データ登録を行なった。

2.2 WEB システム

ユーザーがデータを検索しやすいように地図画面上にデータ表示ができるような構成になっている。データ検索では, 航海名, 掘削地名, 掘削孔名等で掘削孔の位置と紐付けた。物理検層データでは, 特定のデータ項目 (計測機器, 計測項目, 記載データ等) が紐づく掘削孔を検索できる (第 2 図)。データ検索画面では, 航海名, 掘削地名, 掘削孔名, 掘削方式, 特定のデータ項目で検索ができる (第 3 図)。ユーザー管理機能としては, ユーザ情報 (氏名, メールアドレス, 国籍, 所属等) を登録する機能を有している。管理者, ログインユーザー, 一般ユーザー (未ログインユーザー) の 3 種類のユーザー権限を管理できる (データ取得後 1 年間はモラトリアム期間を設けているため)。管理者は各ユーザーの管理, データの公開, 非公開の設定を行うことができる。

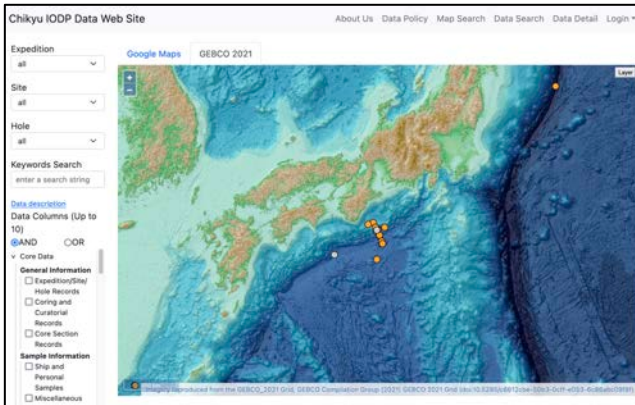
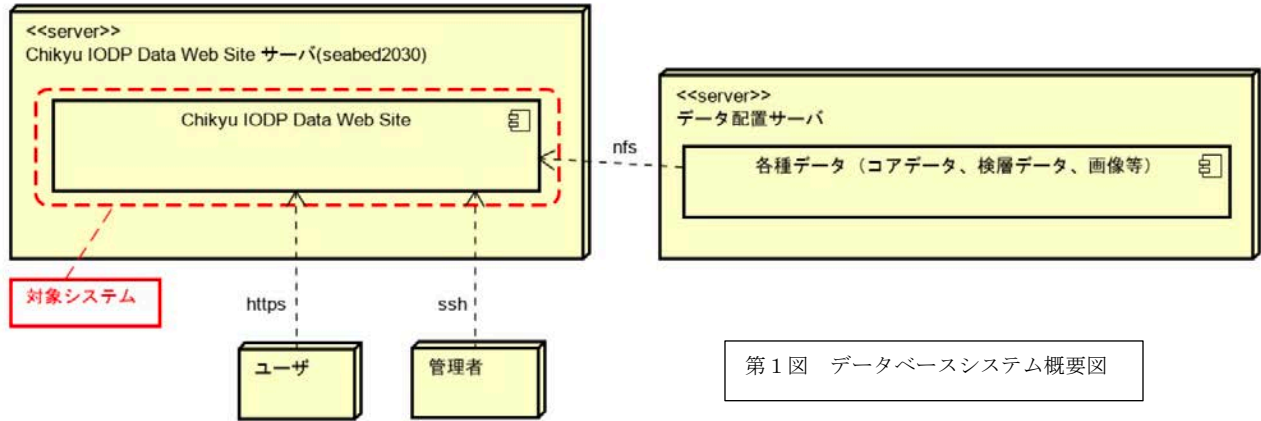
3. データベースの特色

本データベースの特色は, (1) プログラム作成にあたっては, オープンソースを利用, (2) 管理者がある程度のカスタマイズを可能とした, (3) 後々の機能追加が容易なプログラム構造となるような構成とした。今までになかった検索機能により掘削点の近い場所での異なる時期に取得したデータの比較や異なるデータ項目の比較, 抽出が可能となった。

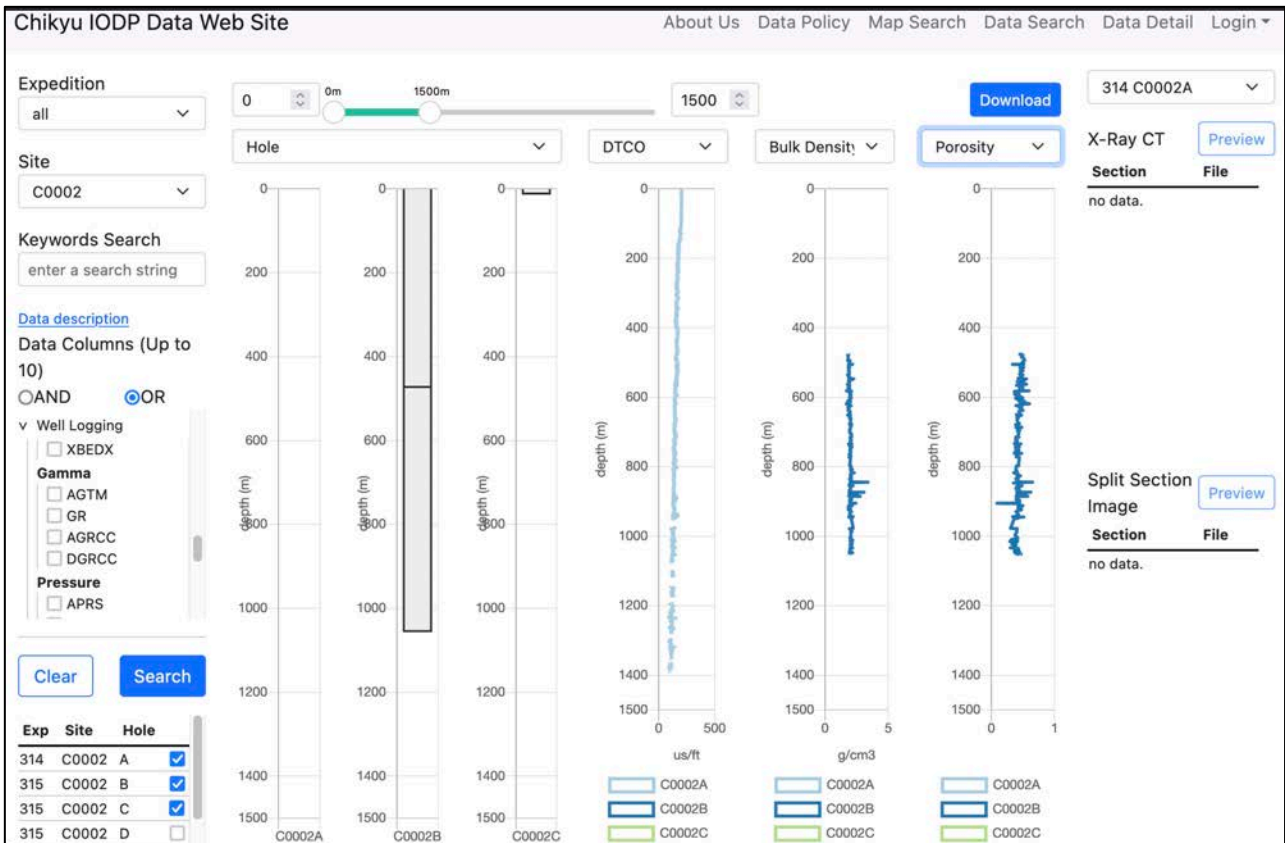
今後に向けた課題も多い。システムのバックアップ体制, 陸上と船上のデータベースの同期, オフラインの環境下での運用の方法の検討など, 本学会での先例等を見習いたい。

文 献

木戸ゆかり, 杉原孝充, 真田佳典 (2018) 地球深部探査船「ちきゅう」の物理探査・地質データの活用と今後の期待, 情報地質, 第 29 巻, 第 1 号, pp13-20.
木戸ゆかり (2019) 「ちきゅう」による 14 年間の検層オペレーションサービス, 第 30 回日本情報地質学会講演会, 講演会要旨集, pp3-4.



第3図 データ検索画面のイメージ図。左側で航海番号, 検索項目を入力すると, ヒットしたデータ情報, 詳細情報が表示される。



曳航・海底受信機で測定された CSEM データの統合逆解析による 海底熱水鉱床の比抵抗イメージング向上

石須慶一*・笠谷貴史**・後藤忠徳*・小池克明***・シリポンバラポンウィラシャイ****・岩本久則*****

Improvement of resistivity imaging of seafloor massive sulfides by inversion of combined CSEM data of towed and ocean bottom receivers

Keiichi Ishizu*, Takafumi Kasaya**, Tada-nori Goto*, Katsuaki Koike***, Weerachai
Siripunvaraporn**** and Hisanori Iwamoto*****

*兵庫県立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, University of Hyogo, 2167, Shosha,
Himeji, Hyogo 671-2280 JAPAN. E-mail: k.ishizu@sci.u-hyogo.ac.jp

**海洋研究開発機構海底資源センター Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
Research Institute for Marine Resources Utilization, Kanagawa, 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.

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

*****日本海洋事業株式会社 Nippon Marine Enterprises, Ltd., , 14-1, Ogawa-cho, Yokosuka, Kanagawa
238-0004, Japan.

キーワード：海底熱水鉱床, CSEM, 比抵抗, 電磁探査, 電気探査

Key words: Seafloor hydrothermal deposit, CSEM, Resistivity, Electromagnetic method,
Direct current resistivity survey

1. はじめに

人工電流源海洋電磁探査 (CSEM) 法は、石油貯留層、海底熱水鉱床などの探査に有効である。通常の CSEM 法では、送信機を曳航し受信機を海底に設置する。近年は、送受信機ともに曳航する観測配置も用いられてきた。前者では様々な送受信配置でのデータを取得でき、送受信距離を大きくすることで海底下深部まで探査できる。一方、後者では送受信距離がケーブルによって固定されているため、海底下浅部の探査に有効である。曳航および海底受信機で測定された CSEM データの統合により両観測配置の利点を活かすことができる。実際に統合 CSEM データの二次元逆解析によりガスハイドレートの分布が高解像度でイメージングされた (Attias et al., 2018)。しかし、二次元逆解析では、海底設置受信機で取得された三次元データの扱いや三次元比抵抗構造の再現は難しい。そこで、本研究では、曳航・海底受信機で測定された CSEM データに三次元逆解析を適用し、海底熱水域において浅部から深部までカバーした比抵抗構造イメージングを行う。

2. CSEM 法の概要と利点

海底に設置された受信機で曳航された送信機から生じた CSEM データを取得する観測配置では、様々な送受信配置のデータセットを取得できる (図 1)。送受信機間の距離を大きくすることで、海底下深部まで探査することも可能である。さらに、送受信配置を三次元的に分布させることで海底下の三次元構造を制約できる CSEM データを取得することができる。一方、送信機・受信機ともに曳航しながらデー

タ取得を行う観測配置では、水平方向に密なデータを取得できる (図 1)。送受信機の位置を固定するため、送受信距離が短いデータの測位誤差を軽減できる。その結果、送受信距離が短い CSEM データを用いることができるため、海底下浅部の探査に有効である。送受信機ともに曳航する海底電気探査も行われており、海底下浅部の比抵抗構造を高解像度で再現できることが示された (Ishizu et al., 2019)。

3. 仮想データへの適用結果

曳航および海底受信機で測定された CSEM データ三次元逆解析の有効性を仮想モデルを用いて検証する。仮想モデルは $0.1 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ の低比抵抗異常体および $10 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ の高比抵抗異常体が $1 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ の半無限媒質中に存在するモデルを仮定する (図 2)。低比抵抗異常体は海底熱水鉱床を、高比抵抗異常体は海底火山岩を模擬している。海底面の深度は $z=1000 \text{ m}$ とし、海面を $z=0 \text{ m}$ とする。海水および空気の比抵抗は、 $0.3 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ 、 $10^8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ とする。曳航受信機は送信機から 50, 100, 150 m 後方に設置され、6つの受信機が海底面に置かれた観測配置を考える。使用したデータの周波数は 0.125 と 1.0 Hz である。このモデルから順解析を行い得られたレスポンスに 3%のガウシアンノイズを加えて仮想データを作成した。三次元 Occam 逆解析コード (Ishizu et al., 2022) を用いて、作成した仮想データを海底下比抵抗モデルに変換した (図 3)。その結果、曳航データでは、海底面の低比抵抗異常体は真のモデルに近く再現できたが、埋没異常体は再現できなかった。海底受信機データでは、海底面および埋没異常体ともに再現できたが、海底

面の異常体は偽像とともに再現された。一方、これらのデータを統合した逆解析結果では、海底面および埋没異常体を真のモデルに近く再現できた。

4. 実データへの適用結果

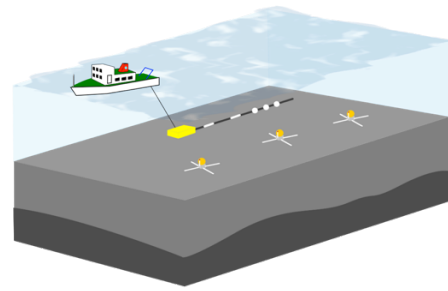
沖縄トラフ熱水域において、2017年10月に MEMSYS (Kasaya et al., 2018) を用いて CSEM 調査を行った。対象地域では熱水活動が確認されており、自然電位異常も観測されている (笠谷ほか, 2020)。そのため、本対象地域において硫化鉱物の存在が期待されている。MEMSYS で観測された曳航・海底受信機 CSEM データに三次元逆解析を適用した結果、海底面および海底下に低比抵抗異常が再現された。これらの低比抵抗異常体は自然電位異常が確認された領域と一致する結果が得られた。そのため、本低比抵抗異常は硫化鉱物をイメージングできたと考えられる。

5. おわりに

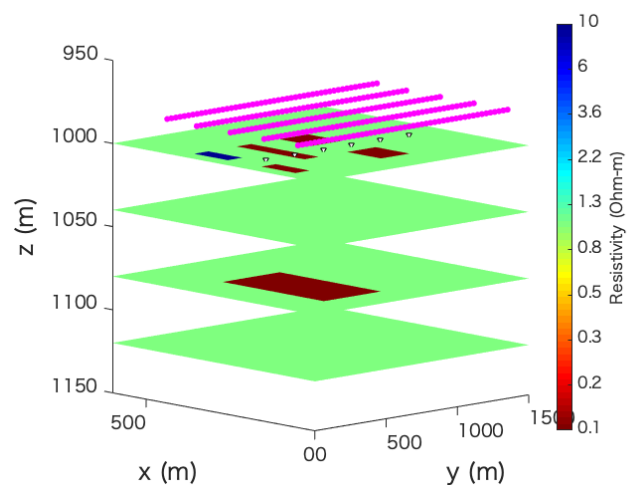
曳航・海底受信機で測定された CSEM データの三次元逆解析を開発した。仮想データを用いたテスト結果により、本逆解析は海底浅部および深部の比抵抗構造を真の構造に近く再現できることが明らかとなった。次に、本逆解析を沖縄トラフ熱水域で取得された CSEM 実データに適用した。再現された低比抵抗異常は、自然電位異常と整合する結果が得られた。この低比抵抗異常と自然電位異常の一致により、本逆解析は硫化鉱物を低比抵抗としてイメージングできたと考えられる。以上の仮想データと実データに適用した結果から曳航および海底受信機で測定された CSEM データの三次元逆解析は海底熱水鉱床周辺での海底下の比抵抗構造の推定に有効であることが示された。

文 献

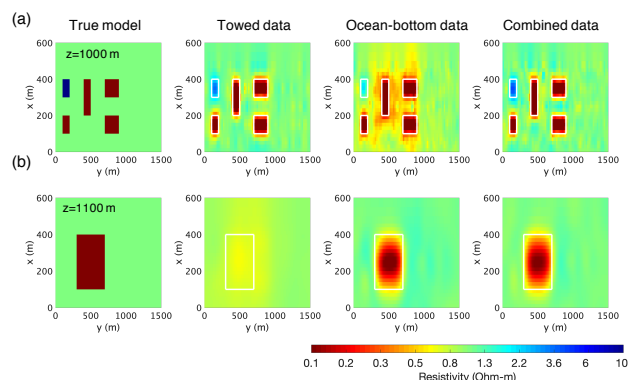
- Attias, E., Weitemeyer, K., Hölz, S., Naif, S., Minshull, T. A., Best, A. I., Haroon, A., Jegan, M., and Berndt, C. (2018) High-resolution resistivity imaging of marine gas hydrate structures by combined inversion of CSEM towed and ocean-bottom receiver data, *Geophysical Journal International*, 214, 1701-1714.
- Ishizu, K., Goto, T., Ohta, Y., Kasaya, T., Iwamoto, H., Vachiratienchai, C., Siripunvaraporn, W., Tsuji, T., Kumagai, H., and Koike, K. (2019) Internal structure of a seafloor massive sulfide deposit by electrical resistivity tomography, Okinawa Trough, *Geophysical Research Letters*, 46, 11025-11034.
- Ishizu, K., Siripunvaraporn, W., Goto, T. N., Koike, K., Kasaya, T., & Iwamoto, H. (2022) A cost-effective three-dimensional marine controlled-source electromagnetic survey: exploring seafloor massive sulfides. *Geophysics*, 87(4), 1-23.
- Kasaya, T., Goto, T. N., Iwamoto, H., and Kawada, Y. (2018) Development of multi-purpose electromagnetic survey instrument, In *The 13th SEGJ International Symposium, Society of Exploration Geophysicists and Society of Exploration Geophysicists of Japan*, 159-161.
- 笠谷貴史・金子純二・岩本久則 (2020) 音響調査と自然電位法を用いた海底熱水鉱床調査技術プロトコルに基づく調査とその検証, *物理探査*, 73, 42-52.



第1図 海洋 CSEM 探査の模式図。CSEM 探査では、深海に曳航したダイポールアンテナから海水中に時間的に変化する電流を流す。電磁場応答を海底に設置された受信機で記録する。



第2図 仮想データを用いた試験に使用した比抵抗モデル。丸印は送信機、三角印は受信機の位置を示す。仮想モデルは 0.1 ohm-m の低比抵抗異常体および 10 ohm-m の高比抵抗異常体が 1 ohm-m の半無限媒質中に存在するモデルを仮定する。低比抵抗異常体は海底熱水鉱床を、高比抵抗異常体は海底火山岩を模擬している。海底面の深度は $z = 1000$ m とし、海面を $z = 0$ m とする。



第3図 第2図の比抵抗モデルから作成した仮想データの逆解析結果。(a) $z = 1000$ m (海底面), (b) $z = 1100$ m における再現された比抵抗モデルの断面図。白実線は真の異常の境界を示す。

情報地質学の社会インフラへの展開（1）： 3次元弾性波・AEトモグラフィによる輪荷重試験下にある 鉄筋コンクリート床板の劣化損傷進展評価

麻植 久史*, 塩谷 智基*, 福本 伸太郎**, 前島 拓***

Expansion of Geoinformatics to Social Infrastructures (1): Fatigue Damage Characterization of RC Slabs by Means of 3D Elastic Wave & AE Tomography

Hisafumi Asaue*, Tomoki Shiotani*, Shintaro Fukumoto**, Takuya Maeshima***

*京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyotodaigaku-Katsura,
Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540, Japan.

E-mail: asaue.hisafumi.7a@kyoto-u.ac.jp

**IHI 検査計測 IHI Inspection & Instrumentation CO., Ltd.

***日本大学, Nihon University.

キーワード: 損傷評価, 可視化, 疲労破壊

Key words : Damage evaluation, Visualization, Fatigue failure

1. はじめに

現在, 我が国における橋梁の18%が建設後50年を経過しており, この割合は10年後に約42%と急増する¹⁾。この老朽化する橋梁 RC 床板を限られた予算の下で効率的に維持管理するには, 構造物に大規模な変状が生じる前に補修・補強を行い, 長寿命化を可能とする予防保全が重要である。そのため, RC 床板の劣化損傷がどのように進展するか把握する必要がある。なかでも, RC 床板内に水が浸入すると劣化損傷が促進することが問題となっているが, その促進過程や程度は明らかになっていない。そこで本研究では, 乾燥状態の RC 床板と, 上面を浸水させた RC 床板に対して輪荷重走行試験を実施した。同時に, 鉄球打撃により励起した弾性波と静的載荷で発生した AE を使用した 3次元弾性波・AE トモグラフィを適用した。これより, 水の影響を伴う RC 床板の劣化損傷進展と速度変化の関係を明らかにした。

2. 実験概要

乾燥状態と浸水状態の RC 床板供試体 (3.0 × 2.0 × 0.16 m) の中央長軸方向に輪荷重載荷を行った。両供試体の外観を図 1 に示す。輪荷重載荷は疲労限界まで実施した。走行回数と載荷荷重の関係を図 2 に示す。この供試体に対して, AE センサを上面に 10 個, 下面に 18 個, および側面に 4 個の計 32 個を設置した。AE センサの共振周波数は 60 kHz, 打撃時に用いた鉄球の直径は 35 mm (上限周波数 8.3 khz) である。AE センサの配置図と打撃点の位置関係を図 3 に示す。静的載荷と鉄球打撃による弾性波の計測は, 0 回,



乾燥状態 浸水状態

図 1 RC 床版供試体の外観

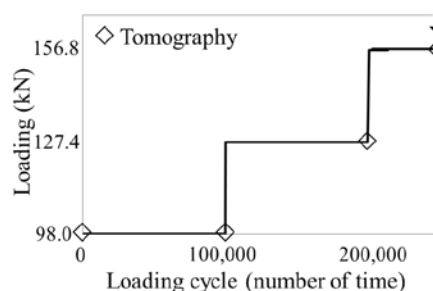


図 2 輪荷重走行プログラム

10 万回, 20 万回, および 25 万回の各段階で行っている。

3. 解析結果

各段階で得られたデータに対して, 3次元弾性波・AE トモグラフィ解析²⁾を行った結果を図 4 に示す。これより, 乾燥状態の RC 床版供試体では, 輪荷重走行前の結果である 0

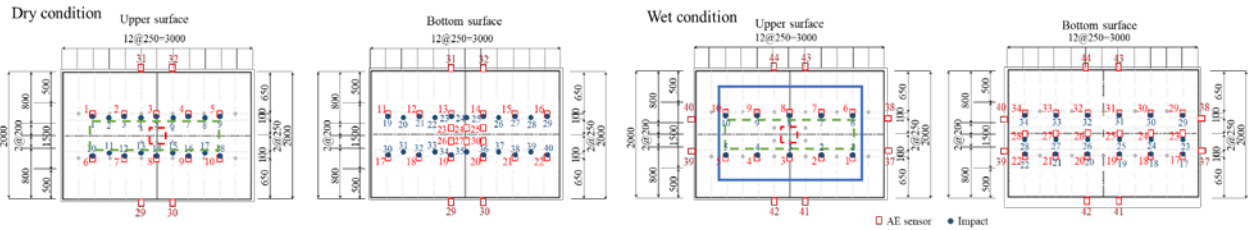


図3 センサと打撃点の位置（緑破線長方向は輪荷重走行位置，赤破線は静的載荷位置，青線内は浸水部）

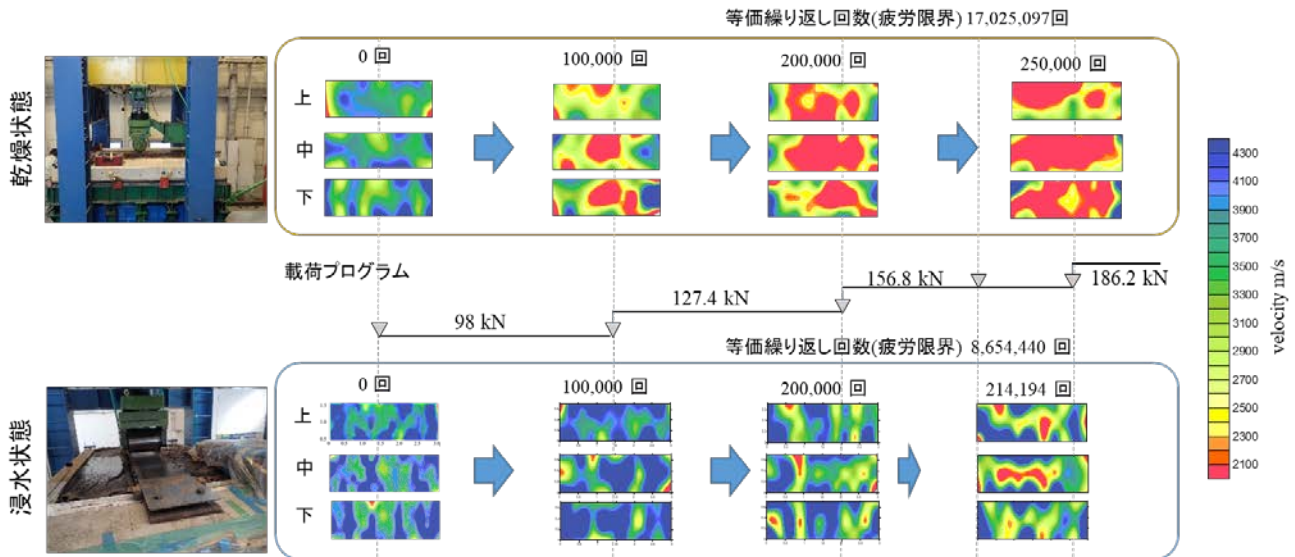


図4 乾燥状態と浸水状態におけるRC床版内部の速度変化

回で、供試体作製時の不均質性と思われる低速度領域が表れているが、全体的に 3500 m/s 以上の速度を示している。また、10 万回終了時から 2500 m/s 以下の低速度部が表れ始めており、これは内部損傷の大きい場所を示していると考えられる。疲労限界である 25 万回終了時の速度構造は全体的に 2500 m/s 以下を示しており、内部損傷が広範囲に進展していることが示唆される。

また、浸水状態における 0 回の速度分布を見ると、上面から底面にかけて 3300 m/s 以上の速度が広く分布している。やや低い速度分布が一部のみみられるが、全体の平均速度は 4400 m/s であり、基本的に健全であると言える。10 万回実施後の速度分布では、3000 m/s 以下の部分も多少明瞭になり、それらは短軸方向に連続するように現れている点特徴的である。平均速度も 4000 m/s となっている。20 万回実施後の速度分布では、3000 m/s 以下の速度が広く分布するようになり、損傷と判断できる 2700 m/s 以下の値も床板中央から下部に向けて表れ始めている。しかし、平均速度は 3800 m/s とやや高い値を示すため健全部と損傷部が明瞭に分かれていると判断できる。疲労限界である 214,194 回の速度分布では、2700 m/s 以下の低速度分布がより広い範囲で表れている。また、この低速度領域は中央部で明瞭である。また、平均速度は 3700 m/s であり、20 万回実施後と比べて平均速度の低下が小さい。

載荷荷重を 98 kN として輪荷重走行回数を等価換算すると乾燥状態と浸水状態の疲労限界は、それぞれ 17,025,097 回と 8,654,440 回となる。浸水状態では、乾燥状態の約半分の輪荷重走行回数で疲労限界に達する。

上記より、乾燥状態では、輪荷重による疲労破壊が全体的に進展するが、浸水状態では低速度分布に対応する一部の

位置で疲労破壊が促進されており、全体的な疲労破壊が生じる前に疲労限界に至るといえる。この理由として、浸水状態では、初期に生じた内部ひび割れに水が浸入し、その部分のひび割れ進展が加速して、早期に疲労限界に達してしまうと考えられる。

4. まとめ

本研究では、水の影響を伴う RC 床板の劣化損傷進展と速度変化の関係を明らかにするために、乾燥状態と上面を浸水させた RC 床板供試体に対して輪荷重走行試験下で、打撃による弾性波と、静的載荷による AE を信号源として加えた 3 次元弾性波・AE トモグラフィを実施した。その結果、浸水した RC 床板の疲労破壊機構を明らかにできた。

謝辞：本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「道路インフラマネジメントサイクルの展開と国内外への実装を目指した統括的研究」（管理人：国立研究開発法人科学技術振興機構）の支援を受けて行った。

文 献

- 1) 国土交通省：平成 26 年度道路メンテナンス年報 2015.
- 2) T. Shiotani, S. Osawa, Y. Kobayashi and S. Momoki, 'Application of 3D AE tomography for triaxial tests of rocky specimens', Proceedings of 31st conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), 2014 (CD-ROM).

情報地質学の社会インフラへの展開 (2): コンクリートのひび割れ深さ推定へのレイリー波の減衰理論の適用

奥出 信博*, 麻植 久史*, 山本 貴士*, 塩谷 智基*

Expansion of Geoinformatics to Social Infrastructures (2): Application of Rayleigh wave attenuation theory to depth estimation of surface-opening crack in concrete

Nobuhiro Okude*, Hisafumi Asaue*, Takashi Yamamoto*, Tomoki Shiotani*

*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, C3-b4S15, Nishikyo, Kyoto 615-8540
E-mail: okude.nobuhiro.2w@kyoto-u.ac.jp

キーワード: コンクリート, ひび割れ深さ, レイリー波, 減衰理論

Key words: concrete, crack depth, Rayleigh wave, attenuation theory

1. はじめに

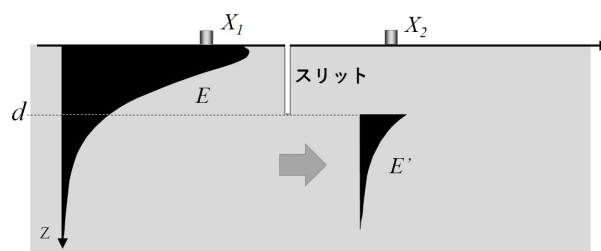
コンクリート構造物のひび割れは、必ずしも構造物としての性能を直ちに損なわせるものではないが、劣化因子の侵入や躯体の一体性を損なわせる要因となり得る。そのため、ひび割れの幅、深さなどの特徴を把握することは、構造物の適切な維持管理において重要であるといえる。ひび割れ幅については外観から判断できるが、ひび割れ深さについては外観からは判断できない。このため、ひび割れ深さの推定には非破壊検査手法、とりわけ弾性波を利用した手法が一般的に用いられる。最も代表的な手法は超音波法であり、 T_c - T_0 法、BS法、修正BS法、位相反転法など複数の手法がある。ただし、これら手法はP波（縦波）の初動部に着目した手法であるため、ひび割れ面の局所的な接触や鉄筋、水等の影響により、ひび割れ深さを過小評価してしまうことが知られている（平田ら、2000）。そこで、呉ら（2003）により、表面波を用いた新たな手法が提案されている。この手法は表面を伝わる弾性波の振幅が、ひび割れの深さに応じて減衰することを利用した方法である。本手法はP波を扱う従来法の欠点を補う手法として期待される。しかし、経験式に基づく評価手法にとどまっておらず、理論的考察が不足していることが課題として残る。

著者らは、ひび割れ深さに伴う弾性波の減衰挙動をレイリー波の減衰理論により説明できると考え、その実験的検証を行うとともに、この減衰理論を利用した新たなコンクリートのひび割れ深さ推定法について検討した。

2. レイリー波の減衰理論

第1図に示すように、材料表面に生じたレイリー波の伝播経路にスリットが存在する場合、スリット深さまでのエ

ネルギーのほとんどは反射し透過できない。そのため、スリットの通過後の表面で観測される弾性波の振幅 X_2 には、スリットよりも深い部分の入射波のエネルギー E' のみが寄与すると考えられる。つまり、スリット通過前後の表面における振幅比 $A' (= X_2/X_1)$ は、 E と E' に依存する。 E と E' は、レイリー波の上下振動の振幅分布関数 $W(z)$ から運動エネルギーとして理論的に計算することができ、振幅比 A' は、この運動エネルギーの比の平方根として式(1)のように近似的に得ることができる（江島ら、1980）。これはレイリー波の減衰理論として知られる。



第1図 レイリー波の減衰理論の概念図

$$A'(f) = \sqrt{\frac{\int_d^\infty W^2(z) dz}{\int_0^\infty W^2(z) dz}} \quad (1)$$

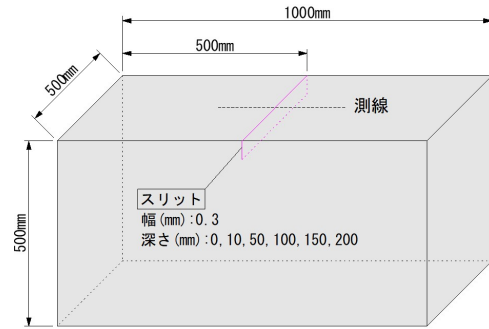
3. コンクリート供試体を用いた検証

コンクリートのひび割れ深さに伴う弾性波の減衰挙動をレイリー波の減衰理論により説明するため、第2図のような模擬的なひび割れを与えたコンクリート供試体を作製し、基礎的な実験を行うこととした。ひび割れを模擬したスリ

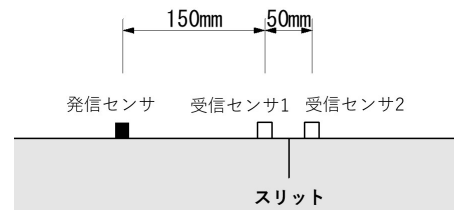
ットは、厚さ 0.3 mm の SUS 板をコンクリートの硬化後に抜き取るにより与えた。スリットの深さを 0 mm (スリットなし)、10 mm、50 mm、100 mm、150 mm、200 mm とした 6 種類の供試体を作製した (コンクリートの圧縮強度 44.8 N/mm²、ポアソン比 0.2、静弾性係数 37.6 kN/mm²)。各供試体の測線において、第 3 図に示すとおり発信および受信センサを配置した。センサはいずれも 30 kHz 共振型の圧電型 AE センサとし、ホットメルトボンドでコンクリート表面に接着した。発信センサからファンクションジェネレータを用いて、20 kHz、30 kHz、40 kHz、50 kHz、60 kHz、70 kHz、80 kHz の正弦波パルス 1 波長分を発信し、受信センサ 1,2 で検出波形を記録した。これらの各波形を Wavelet 変換し、受信センサ 1,2 の Wavelet 係数の比を振幅比 A として算出した。このとき、受信センサ 1 の Wavelet 係数は最大値を用い、受信センサ 2 では Δt における Wavelet 係数を用いた。ここで Δt とは、スリットのない供試体の受信センサ 1, 2 で得られた Wavelet 係数の最大値の時間差である。さらに、コンクリートの伝播における減衰を除外するため、得られた振幅比 A を、スリットのない供試体で得られた振幅比 A_0 で除した値をスリットに伴う振幅比 A' と定義づけた。第 4 図に、実験で得られた振幅比 A' と波長 λ との関係を示す。ここで、 λ は、 Δt とセンサ間隔 (50 mm) から算出される見かけのレイリー波速度 V_R を基に、 $\lambda = V_R / f$ の関係から算出した。 f はファンクションジェネレータで設定した発信周波数 (kHz) とした。図中に示す曲線は、各スリット深さ d および各波長 λ を用いて式(1)から求めた理論的な振幅比 A' を示す。理論曲線と実験値を比較してみると、若干の差異は認められるものの、いずれの d においても概ね似た傾向が示されていることがわかる。つまり、ひび割れ深さに伴う弾性波の減衰挙動をレイリー波の減衰理論を用いて概ね説明できているといえる。さらに、実験値と式(1)との最小二乗法によるフィッティングにより、ひび割れ深さ d を推定することを試みた。真値と推定値の比較を第 1 表に示す。スリット深さ 150 mm を除き、10 mm 以内の絶対誤差で推定できることが確認できる。誤差の要因については今後詳細に検討する必要があるが、例えば第 4 図が示すように、波長 λ によって理論値と実験値との誤差には差異が認められる。つまり、精度の高いひび割れ深さ推定において、対象とするひび割れ深さに対し、それに最適な波長を採用することなどが必要と考えられる。

4. まとめ

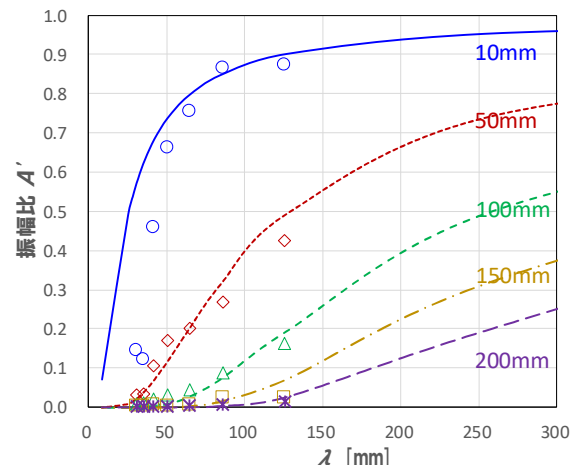
コンクリートのひび割れに伴う振幅の減衰挙動について、レイリー波の減衰理論により説明できると考え、ひび割れを模擬したコンクリート供試体を用いてその検証を試みた。その結果、理論値と実験値は似た傾向を示すことを確認した。つまり、本理論に基づき、コンクリートのひび割れ深さが推定できることを示した。本実験値と理論式とのフィッティングによりひび割れ深さを推定したところ、絶対誤差として概ね 10 mm 以内の範囲で推定できることがわかった。本研究の範囲では、誤差要因の明示や、実際のひび割れに対する適用性を示すには至らなかったが、これまで報告されてきた表面波法によるひび割れ深さ推定法の課題 (理論的考察の不足点) を補う一知見を示した。



第2図 コンクリート供試体



第3図 スリットとセンサの配置



第4図 実験値と理論値の比較

第1表 真値と推定値の比較

	真値 (mm)	推定値 (mm)	絶対誤差 (mm)
実験	10	16	6
	50	46	4
	100	92	8
	150	181	31
	200	208	8

文 献

平田隆祥, 魚本健人 (2000) 超音波法によるコンクリート構造物のひび割れ調査に関する研究(1), 生産研究, 第 52 巻, 10 号, pp.493-496
 吳佳擘, 堤知明, 江川顕一郎 (2003) 表面波を用いたひび割れ深さの新しい測定技術, コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集, 日本非破壊検査協会, pp.243-252
 江島淳, 吉岡修, 坂田英洋, 吉村正義 (1980) 空溝と地中壁による振動遮断効果, 土と基礎, 28-3, pp.49-55

情報地質学の社会インフラへの展開(3) : 三次元弾性波トモグラフィ法とBIM/CIMへの適用による ダム門柱コンクリートの健全性評価

小椋紀彦*・サグラジャン アルトウル**・麻植久史*・塩谷智基*

Evaluation of Concrete Integrity of Dam Columns by Three-Dimensional Elastic Wave Tomography and Application to BIM/CIM

Norihiko Ogura*, Artur Sagradyan**, Hisafumi Asaue*, Tomoki Shiotani*

*京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 インフラ先端技術産学共同講座 iTi Laboratory, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, C3-b4S15, Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-Ku, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail:ogura.norihiko.2z@kyoto-u.ac.jp

**株式会社 CORE 技術研究所 Department of Technology, CORE Institute of Technology Corp., 3-8-5 VORT Bld.8F, Asakusabashi, Taitou-ku, Tokyo 111-0053, Japan.

キーワード : 弾性波トモグラフィ法, ダム, 三次元点群化, BIM/CIM

Key words : Elastic wave tomography, Dam, 3D point cloud, BIM / CIM

1. はじめに

大型コンクリート構造物の維持管理においては、損傷の規模や分布を全体的にかつ効率的に把握したうえで、経済性を踏まえた詳細調査を策定し、長寿命化を図るための維持管理計画を策定することが重要である。

三次元弾性波トモグラフィ法は、計測対象内部を通過した弾性波から対象の健全性に関わる空間的な情報を同定する手法であり、経年劣化した大型コンクリート構造物の健全性を合理的かつ定量的に評価できる手法として期待されている(國居, 2021)。

本研究では、竣工後40年以上経過したダムの門柱コンクリートで確認されたひび割れを対象に、三次元弾性波トモグラフィ法を用いた健全性評価の適用性を検証した。さらに、その調査結果をBIM/CIMへ適用することを試みた。

2. 解析手法

2.1 弾性波トモグラフィ法

弾性波トモグラフィ法は、計測対象に複数の発信点と受信点を設けることで、多方向の走査線情報(弾性波伝搬時間)を取得し、対象領域をそれら走査線情報のすべてに整合する有限要素モデルで表す手法である。ある発信点と受信点までの弾性波伝搬時間(観測走時)は、次式で求められる。

$$T_{obs} = T_o - T_s$$

ここで、 T_{obs} : 観測走時, T_o : 受信時刻, T_s : 発信時刻である。

対象とする構造物を要素に分割し、発信点と受信点の位置情報を節点に与える。そして、分割された要素に初期値として伝搬速度の逆数であるスローネス s を与え、初期モデルを作成する。その結果、この要素分割モデルで得られる理

論走時 T_{cal} 、走時時差 ΔT は次式で求められる。

$$T_{cal} = \sum_j s_j^* l_j$$

$$\Delta T = T_{obs} - T_{cal}$$

ここで、 T_{cal} : 理論走時, s_j^* : 要素 j に初期値として与えたスローネス, l_j : 要素 j を横切る波線長, ΔT : 走時残差である。

得られた走時残差 ΔT が許容値内の範囲内かどうかをチェックする。残差が大きい場合には、各波線経路で得られる観測走時に対する理論走時の走時残差を解消するために各要素のスローネスを補正する。このアルゴリズムにより、各要素のスローネスを得ることにより、対象領域を弾性波速度で表すことができる。各要素の速度値の補間には、逆距離加重法を用いた。

2.2 波線追跡法

トモグラフィ解析において理論上の弾性波の伝搬経路を特定するため、本研究では、波動の伝搬経路の計算に波線追跡法を用いた。波線追跡法は、精度の高いトモグラフィ結果を得るために、異なる媒質の境界面における弾性波の屈折や回折を考慮したものである。

3. 計測方法

3.1 対象施設の概要

対象施設は、竣工後40年以上経過したフィルダム洪水吐きのオリフィスゲートの門柱側壁である。鉄筋かぶりは150mmであることが確認されており、鋼製のアンカレッジが埋設されている。左岸側壁には鉄筋軸方向に沿ったひび割れやエフロレッセンスの析出等が確認されており、アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張によってひび割れが

生じたものと推定されている。ひび割れ幅は、門柱側壁で 4 mm 程度、門柱下流端の突出部で 7 mm 程度確認されている。これらのひび割れがアンカレッジまで到達した場合、アンカレッジの鋼材腐食の進行や門柱コンクリート変形によりゲート操作に支障をきたすことが懸念されている。

3.2 計測方法

門柱内部に存在する損傷の三次元分布を確認するため、三次元弾性波トモグラフィを適用した。計測用センサは圧電型加速度センサを用い、サンプリング周波数は 200kHz とした。弾性波の励起方法には鋼球打撃ハンマを用い、10 回の打撃で得られた波形をスタッキングしたものを解析に供した。解析精度を考慮してセンサ間隔を 1.3m~1.5m とした。また、調査対象範囲を 3 ヶ所に分割し、解析結果を三次元トモグラフィ作成時に統合して表示することとした。なお、コンクリートの弾性波速度の初期値は 4000m/s とし解析した。

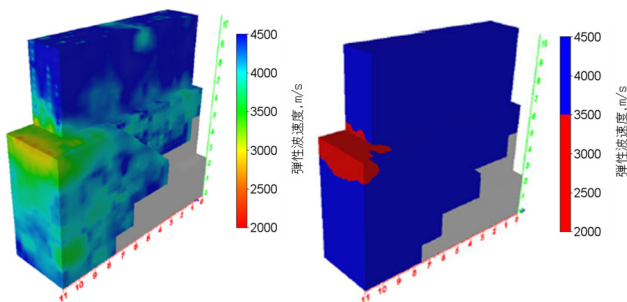
3.3 解析結果

第 1 図の左側に三次元弾性波トモグラフィの解析結果、右側に二値化表示した結果を示す。アルカリシリカ反応により劣化したコンクリートでは、弾性係数が顕著に低下するため、健全性評価に弾性波の速度変化を用いることは有効であると言われているが、本研究で行った三次元弾性波トモグラフィ法においても弾性波速度分布から低速度領域を捉えることができている。

ゲート室下流端突出部に 3000m/s 以下の低速度領域が現れている。これらの箇所は、外観目視調査でも顕著なひび割れが発生しており、低速度領域は概ねこの位置で整合している。

また、より健全性評価を明瞭にするため、弾性波速度の閾値を 3500m/s と仮定し、3500m/s 未満を損傷部として赤色、3500m/s 以上を健全部として青色の二値化で表示した。本研究における解析結果では、鉄筋のかぶりである 150 mm より深部には明瞭な低速度領域は見られず、門柱側壁の幅の広いひび割れは部材深部に至っていないと推定された。

大型コンクリート構造物の部材内部の健全性評価を合理的かつ効率的に実施できる可能性が示されたと考えられる。

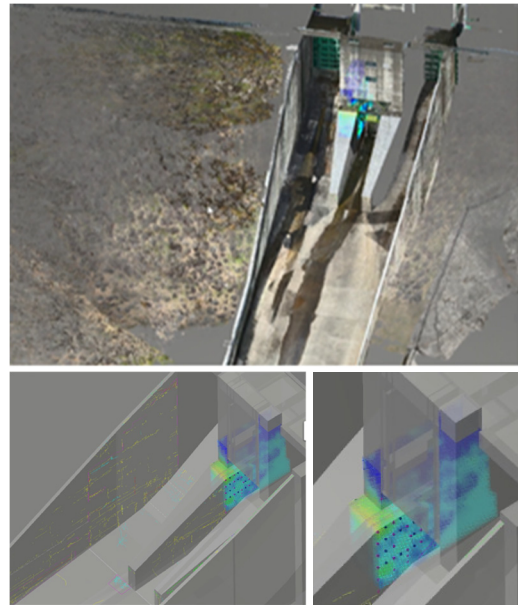


第 1 図 解析結果（左側：三次元表示，右側：二値化表示）

4. BIM/CIM と弾性波トモグラフィ結果の融合

クラウドサービスの三次元点群化技術を活用し、これまでに述べたオフィスゲートの門柱側壁で実施した弾性波速度分布の三次元弾性波トモグラフィのモデルに、ドローンで撮影した画像や動画データ、二次元の外観調査結果、および設計図面から作成した三次元 CAD モデルを全て重ね合わせる統合を試みた。詳細なデータがある箇所については、三次元 CAD 内に内部情報として定量的な数値を盛り込んでいる。

三次元点群化として統合したモデルの結果を第 2 図に示す。上段が三次元点群化の全体画像であり、360 度全方向の角度から観察が可能である。左下側が外観調査結果と静止画像をレイヤーとして重ね合わせた結果であり、変状の大きさや長さ、ひび割れ幅を含む情報が視覚的に捉えられる。さらに CAD 情報から定量的な数値を算出することも可能である。また、右下の三次元弾性波トモグラフィのモデルが、構造物内部に組み込まれることで、外観変状の結果と重ね合わせることができ、表面情報と内部情報の詳細な比較検討が可能となった。



第 2 図 三次元点群化として統合したモデル

5. まとめ

本研究では、ひび割れが顕在化した大型コンクリート構造物を対象に、三次元弾性波トモグラフィ法を用いた健全性評価を行い、それらを BIM/CIM へ適用させることによる有用性を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 大型コンクリート構造物の健全性評価手法として、三次元弾性波トモグラフィ法で得られる速度分布を利用した部材内部の概略評価が有効であることが示された。
- (2) 弾性波速度にコンクリートの損傷にかかる閾値を設定してトモグラフィ結果を二値化表示することで、部材内部の損傷範囲をより明確に表示できることが示された。これにより、既存構造物の補修の優先度を効率的に評価できるだけでなく、新設構造物の設計に際しての予防保全にかかる基礎資料に資することができ、大型コンクリート構造物の維持管理コスト縮減に大いに期待できると考えられる。
- (3) BIM/CIM に弾性波トモグラフィ結果を適用させることにより、表面情報と内部情報の詳細な比較検討が可能となった。今後、これら BIM/CIM モデルに、さらに AI 技術を反映して外観変状の自動判定などが導入できれば、インフラ維持管理分野において更なる省力化が期待できると考えられる。

文 献

國居史武(2021) 三次元弾性波トモグラフィ法による河口堰堰柱コンクリートの健全性評価。コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, vol.21, pp.478-483.

生層序単元を表す座標図上のグラフ

山口 久美子*・塩野 清治**

Graph on Coordinates Diagram for Expressing Biostratigraphic Unites

Kumiko YAMAGUCHI* and Kiyoji SHIONO**

* 5-3-5 Midorigaoka, Heguri Ikoma-gun Nara 636-0941, Japan. E-mail: qys05253@nifty.ne.jp

**大阪市立大学名誉教授 Professor Emeritus of Osaka City University, 5-10, Daido-cho Ibaraki-shi, Osaka 567-0844, Japan.

キーワード：化石種，生層序学，生層準，半開区間，論理地質学

Key words：Fossil Species, Biostratigraphy, Biohorizon, Semi-open Interval, Geology-Oriented Logical System

1. はじめに

地質情報の有効なアルゴリズムを考案するためには、地質学の概念を数学表現する必要がある。山口・塩野 (2022) は種の生存期間を 2 次元の座標図に表示して、生層序区分する種をいつでも選択できることを明らかにした。本研究はその続きで、生層序単元を導き出して 2 次元の座標図に表示してみる。

2. 生層序単元

2.1 タクソンの生存期間

時間軸はある時刻を原点 0 として、過去から未来に向かう方向を正とする。時刻を実数とする。生物の個体 x はある時刻 p に誕生して、生存し、ある時刻 q に死ぬものと仮定する。個体 x は、 q になるギリギリまで生存して、 q には生存しないとして、個体 x が生存する時刻の集合は、 p 以上 q 未満のすべての実数の集合で

$$[p, q) = \{t \mid p \leq t < q\} \text{ (ただし, } p < q)$$

と仮定する。 $[p, q)$ は半開区間である。個体が生存する時刻の集合を個体の生存期間とよぶ。

生物は上位から界，門，綱，目，科，属，種というタクソン (taxon: 生物の分類単位。複数形はタクサ taxa。) に分類される。タクソン Σ の生存期間 T を、 Σ のすべての個体の生存期間の和集合と定義する。個体の生存期間が半開区間であるから、タクソン Σ の生存期間 T は半開区間の和集合である。ここで、 T は半開区間であると仮定する。いま、 T は

$$T = [t_{\min}, t_{\max})$$

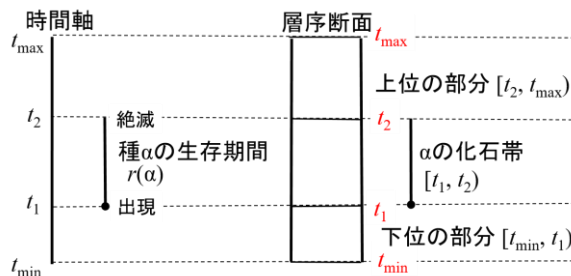
と仮定する。これは、タクソン Σ はある時刻 t_{\min} に出現して、生存し、ある時刻 t_{\max} に絶滅したと仮定することである。

2.2 生層序区分の基本

Σ は綱，目，科ぐらいのタクソンであるとする。 Σ をいくつかの種に分類する。種もタクソンである。種の生存期間も、同様に、種のすべての個体の生存期間の和集合と定義して、半開区間であると仮定する。

生層序区分の基本(八尾, 2004)を次のように記述する。

第 1 図のように、種 α がある時刻 t_1 に出現して、生存して、ある時刻 t_2 に絶滅したと仮定する。種 α の生存期間を $r(\alpha)$ と書くと、 $r(\alpha) = [t_1, t_2)$ であると仮定する。いま、時間軸上の $T = [t_{\min}, t_{\max})$ と 1 対 1 対応する層序断面があるとすると、層序断面は α の化石を含む区間 $[t_1, t_2)$ と、それよりも下位の部分 $[t_{\min}, t_1)$ と上位の部分 $[t_2, t_{\max})$ に分割される。層序断面中の化石を含む区間を化石帯とよぶ。



第 1 図 生層序区分の基本。

時間軸上の種の生存期間と層序断面中の化石帯の関係。

2.3 種の選択

種 α と種 β の前後関係 $\alpha \leq \beta$ を、生存期間の前後関係 \leq^* で次のように定義する。

$$r(\alpha) = [t_1, t_2), r(\beta) = [t_3, t_4) \text{ として,}$$

$$\alpha \leq \beta \Leftrightarrow r(\alpha) \leq^* r(\beta) \Leftrightarrow t_1 \leq t_3, \text{ かつ, } t_2 \leq t_4$$

すべての種の集合から次の 2 つの条件を満たす種の集合 S を選択して生層序区分する。

- 条件 1: (S, \leq) は全順序集合である
- 条件 2: T のどの時刻においても S の種が 1 つ以上生存する。

2.4 生層序単元

条件 1 より、 (S, \leq) 上の区間 $[\alpha, \beta]$ を

$$[\alpha, \beta] = \{x \mid \alpha \leq x \leq \beta, x \in S\}$$

と定義する。 T の時刻 t に生存する種の集合 $\sigma(t)$ は

$$\sigma(t) = \{\alpha \mid t \in r(\alpha), \alpha \in S\}$$

である。種の生存期間は半開区間であるという仮定と、条件 1 より、 $\sigma(t)$ は (S, \leq) 上の区間である。

(S, \leq) を $S = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$, $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_n$ とすると、 $\sigma(t)$ は

$$\sigma(t) = [\alpha_i, \alpha_j] \quad (\text{ただし, } i \leq j)$$

である。 $\sigma(t)$ の化石帯は、 $\alpha_k \in \sigma(t)$ ($i \leq k \leq j$)の化石帯 $r(\alpha_k) = [t_{k1}, t_{k2}]$ と、 α_i よりも古い種 α_l ($1 \leq l < i$)の化石帯より上位の部分 $[t_{l2}, t_{\max})$ と、 α_j よりも新しい種 α_m ($j < m \leq n$)の化石帯より下位の部分 $[t_{\min}, t_{m1})$ の共通集合である。 $\sigma(t) = [\alpha_i, \alpha_j]$ のとき、

$$\begin{aligned} \sigma(t) \text{の化石帯} &= (\cap_{i \leq k \leq j} [t_{k1}, t_{k2})) \cap (\cap_{1 \leq l < i} [t_{l2}, t_{\max})) \\ &\quad \cap (\cap_{j < m \leq n} [t_{\min}, t_{m1})) \end{aligned}$$

さらに、生存期間の前後関係 \leq^* から、上位の部分の共通集合 $\cap_{1 \leq l < i} [t_{l2}, t_{\max})$ は、 α_i の直前 α_{i-1} の化石帯より上位の部分 $[t_{i-1,2}, t_{\max})$ であり、下位の部分の共通集合 $\cap_{j < m \leq n} [t_{\min}, t_{m1})$ は、 α_j の直後 α_{j+1} の化石帯より下位の部分 $[t_{\min}, t_{j+1,1})$ であるから、

$$\sigma(t) \text{の化石帯} = (\cap_{i \leq k \leq j} [t_{k1}, t_{k2})) \cap [t_{i-1,2}, t_{\max}) \cap [t_{\min}, t_{j+1,1})$$

したがって、 $\sigma(t)$ の化石帯は半開区間の共通集合で、明らかに空集合でないから半開区間である。 $\sigma(t)$ の化石帯は

$$\sigma(t) \text{の化石帯} = [t_1, t_2)$$

と書ける。 $\sigma(t)$ の化石帯(半開区間)を生層序単位とする。

2.5 化石種の順序

$\sigma(t) = [\alpha_i, \alpha_j]$ であるとき、 $[\alpha_i, \alpha_j]$ が t を含む生層序単元の化石種である。化石種は新しい種が出現したとき、または、古い種が絶滅したとき、化石種は $[\alpha_{i+k}, \alpha_{j+l}]$ に変わり、次の生層序単位になる。ここで、 k, l は、それぞれ、絶滅種の数、出現種の数である。この化石種の順序は、 $r(\alpha) \leq^* r(\beta)$ と同様に定義して、

$$[\alpha_i, \alpha_j] \leq^* [\alpha_{i+k}, \alpha_{j+l}]$$

である。 $(\sigma(T), \leq^*)$ は全順序集合である。

2.6 例

第 2 図(a)は $S = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}$ を選択して生層序区分した例である。生存期間は $r(\alpha_1) = [t_{\min}, t_2)$, $r(\alpha_2) = [t_1, t_3)$, $r(\alpha_3) = [t_2, t_5)$, $r(\alpha_4) = [t_4, t_5)$, $r(\alpha_5) = [t_4, t_{\max})$ である。化石種は $\sigma(t_{\min}) = [\alpha_1] = [\alpha_1, \alpha_1]$, $\sigma(t_1) = \{\alpha_1, \alpha_2\} = [\alpha_1, \alpha_2]$, $\sigma(t_2) = \{\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\} = [\alpha_3, \alpha_5]$ などであり、 $(\sigma(T), \leq^*)$ の順序は

$$[\alpha_1, \alpha_1] \leq^* [\alpha_1, \alpha_2] \leq^* [\alpha_2, \alpha_3] \leq^* [\alpha_3, \alpha_3] \leq^* [\alpha_3, \alpha_5] \leq^* [\alpha_5, \alpha_5]$$

である。

$[\alpha_1, \alpha_1]$ の生層序単位は、

$$r(\alpha_1) \cap r(\alpha_2) \text{の 下位の部分} = [t_{\min}, t_2) \cap [t_{\min}, t_1) = [t_{\min}, t_1)$$

$[\alpha_1, \alpha_2]$ の生層序単位は、

$$\begin{aligned} r(\alpha_1) \cap r(\alpha_2) \cap r(\alpha_3) \text{の 下位の部分} \\ = [t_{\min}, t_2) \cap [t_1, t_3) \cap [t_{\min}, t_2) = [t_1, t_2) \end{aligned}$$

$[\alpha_2, \alpha_3]$ の生層序単位は

$$\begin{aligned} r(\alpha_2) \cap r(\alpha_3) \cap r(\alpha_1) \text{の 上位の部分} \cap r(\alpha_4) \text{の 下位の部分} \\ = [t_1, t_3) \cap [t_2, t_5) \cap [t_2, t_{\max}) \cap [t_{\min}, t_4) = [t_2, t_3) \end{aligned}$$

他の生層序単位も同様に半開区間である。

3. 生層序単元のグラフ

3.1 生層序単元のグラフ

通常、第 2 図(a)のように生層序単位は層序断面を区分した図で表す。本研究では、(b)のように $S \times S$ の座標図上に $(\sigma(T), \leq^*)$ の有向グラフを描いて生層序単位を表す。

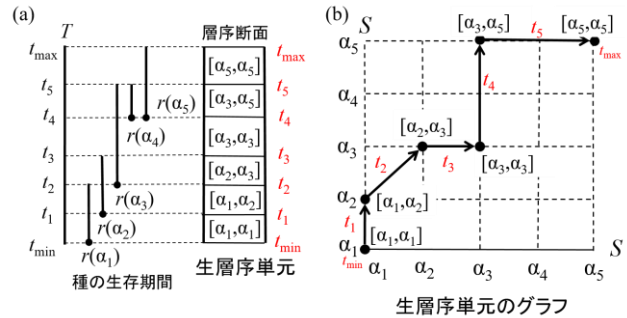
$S \times S$ の座標図の原点は (α_1, α_1) とする。縦軸、横軸、共に、 \leq の方向が正の方向であり、 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ の順に座標が並べられる。隣り合う座標 α_i と α_{i+1} の長さを 1 目盛りとする。

$\sigma(t) = [\alpha_i, \alpha_j]$ を座標図の点 (α_i, α_j) で表す。 $(\sigma(T), \leq^*)$ を有向辺で表示する。 $[\alpha_i, \alpha_j]$ の生層序単位が $[t_1, t_2)$ であるとき、点 (α_i, α_j) に向かう辺に t_1 、点 (α_i, α_j) から出る辺に t_2 とラベル付けをし

て生層序単元のグラフを完成する。河西(2012)と同様に、グラフの有向辺にラベル付けして生層序単位を表示する。

3.2 生層序単元のグラフの有向辺の性質

$(\sigma(T), \leq^*)$ のグラフの有向辺は、上向き、右向き、右上向きのいずれかである。上向きの有向辺は新しい種が出現したことを表す。右向きの有向辺は古い種が絶滅したことを表す。右上向きの有向辺は同時刻に新しい種の出現と古い種の絶滅があることを表す。いずれの有向辺も上向き成分、右向き成分の目盛りの数(長さ)は、それぞれ、出現種、絶滅種の数である。



第 2 図 (a) $S = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}$ を選択して生層序区分した例。
(b) 生層序単元のグラフ。

4. おわりに

時刻を実数として生層序単位を数学表現して座標図上のグラフで表示した。個体の生存期間は半開区間 $[p, q)$ であることから出発すると、タクソンの生存期間、層序断面中の化石帯とその上位の部分と下位の部分、生層序単位はすべて半開区間であった。

座標図に化石種の順序集合の有向グラフを描いて、有向辺に境界である時刻をラベル付けして生層序単位を表示した。有向辺の向きから新しい種の出現、古い種の絶滅が読み取れる。有向辺の上向き成分、右向き成分の目盛りの数から、それぞれ、新しい種の出現数、古い種の絶滅数が読み取れる。

時刻を実数とすると、同時刻に複数の種が出現したり、絶滅したりすることは無いだろうが、そのモデルで生層序単位を座標図上に表示することはできる。特に、同じ時刻に新しい種の出現と古い種の絶滅があった場合の化石種の順序が右上向きの有向辺で表示されることは、種の生存期間を半開区間としたことによる。

実数の時刻は測定されて数値で表示されるので、実際には本研究のような生層序単位は無い。しかしながら、時刻を実数とした数学表現は生層序単位を求めるアルゴリズムに何らかのヒントをあたえるだろう。

文 献

河西秀夫(2012) グラフ理論による露頭構造と層序の数学的表現. 情報地質, vol.23, no.3, pp.109-120.

<https://doi.org/10.6010/geoinformatics.23.109>

山口久美子・塩野清治(2022)種の生存期間と時間的順序のグラフ表現-座標図の提案と活用-. 情報地質, vol.33, no.1, pp.003-012.

https://doi.org/10.6010/geoinformatics.33.1_3.

八尾 昭(2004) 生層序学の基礎. 鎮西清高・植村和彦(編) 古生物の科学 5, 地球環境と生命史, 朝倉書店, pp. 53-59. ISBN-13: 978-4-254166453

鉱物組成特定を目的とした可視・短波長赤外域の分光反射特性に基づく 最適マルチスペクトルバンドの設計

岸本将英*・久保大樹*・小池克明*

Optimal multispectral band estimation for mineral-composition specification using reflectance spectral data in visible and reflective-infrared regions

Masahide Kishimoto*, Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

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

キーワード： クラスタ解析, 機械学習, 鉱物組成, リモートセンシング

Key words : Cluster analysis, Machine learning, Mineral composition, Remote sensing

1. はじめに

非接触非破壊で迅速かつ容易な鉱物組成の把握は、資源探査やトンネル掘削など、種々の分野で重要となる。ここに、衛星リモートセンシングで用いられる鉱物分布の推定手法が有効に応用できる。その代表的手法として、単一成分を端成分とし、線形混合モデルにより一画素中に含まれる存在量を推定する Linear Spectral Unmixing (LSU) (Settle & Drake, 1993) があげられる。現位置スケールにおけるリモートセンシングでは、主に RGB カラー画像、マルチスペクトル画像、ハイパースペクトル画像等が利用されている。その中でもマルチスペクトル画像はハイパースペクトル画像と比較してコストが小さいとともに、RGB カラー画像よりも多くの情報を得られるため実用性が高い。しかしながら、マルチスペクトル画像は、バンド幅や選択波長域によってその解析精度が異なり、いずれの組み合わせが現位置スケールでの解析に最適であるかは、詳細には検討されていない。そこで本研究では、まず室内試験で得られるデータを用いて機械学習による多クラス分類モデルを作成し、その感度分析を行った。多クラス分類モデルが重視する要素は LSU による端成分含有率推定でも重要であると考えられる。よって、寄与率の大きい要素にマルチスペクトルバンドを設計することを考案し、その妥当性を評価した。

2. 解析データと解析手法

2.1 解析データ

多クラス分類モデルの感度分析では、トンネル等のサイトでの一般的な鉱物である石英、モンモリロナイト、ハロイサイト、パオロファイライト、ディッカイト、カオリナイト、方解石、白雲母の 8 種類を選び、それらの 400~2500 nm の反射スペクトルデータを解析の対象とした。解析では USGS と産総研のスペクトルライブラリを使用した。データ数が少ないため、各クラスにおけるデータ間を内挿することによってデータ拡張を行い、さらに生成されたデータ

群にノイズを付加したのももデータに加えた。データ間内挿にはオーバーサンプリング手法の一つである Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) (Fernandez et al., 2018) を適用した。

設計したマルチスペクトルバンドの妥当性の検討では、室内実験によって得られた精製ベントナイトと石灰岩の反射スペクトルを用いた。精製ベントナイトはモンモリロナイト、石英、ハロイサイトが主成分で、石灰岩は方解石が主成分である。含有比を 20% ずつ変化させた精製ベントナイトと石灰岩の混合試料を作成し、それぞれの反射スペクトルを測定した。また、含水率 10%、20%、30% の試料も作成し、同様に測定した。

2.2 多クラス分類モデルの感度分析法

多クラス分類法として、ニューラルネットワークとランダムフォレストを用いた。ニューラルネットワークは入力層、一つの間層、出力層の三層構造とし、中間層のユニット数は 1280 と設定した。ランダムフォレストでは、感度分析しやすいように各決定木の数を試行錯誤的に設定した。学習後に SHapley Additive exPlanations (SHAP) (Lundberg & Lee, 2017) によって分類の寄与度が大きい波長帯を選出した。SHAP はモデル解釈法の一つであり、協力ゲーム理論に基づいている。協力ゲーム理論では複数のプレイヤーが連携できる前提の下でゲームを行う場合、各プレイヤーの行動と配分すべき利得の最適解を数理的に分析する。本研究では SHAP 値の絶対値の平均を重要特徴量として求めた。

2.3 設計したマルチスペクトルバンドの評価法

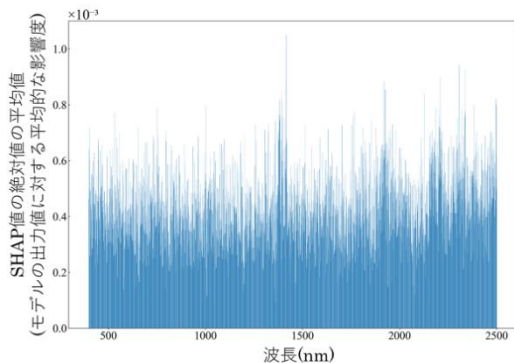
機械学習による分類の寄与度が大きい波長帯を用いて最適なバンドを設定し、設定されたバンド以外の情報を取り除いた。マルチスペクトルバンドの幅は 40 nm に固定した。バンドごとの反射率をそれぞれ平均化し、疑似的なマルチスペクトルデータを作り出し、LSU に基づく最急降下法による端成分含有率推定を行った。最急降下法では含有比が 0 以上 1 以下となるように制約条件を付した。実際の含有比

と推定含有比との二乗平均平方根誤差 (RMSE) を求め、その大小によって有効性を評価した。ここで、反射スペクトルデータに対する前処理として、リモートセンシングや信号処理で広く用いられる正規化処理、およびハルコーシェント処理 (以下、HQ 処理) (Tanaka et al., 2019) の 2 手法を選び、推定精度を比較した。地球観測衛星 Terra, Landsat 8 搭載の高分解能光学センサであるそれぞれ ASTER, OLI の可視・反射赤外域におけるバンドについても同様の処理を行い、比較の対象とした。

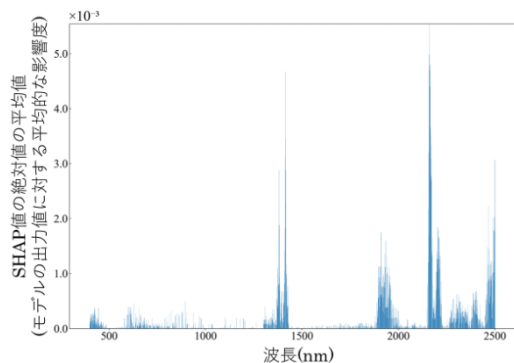
3. 結果と考察

3.1 多クラス分類モデルの感度分析結果

ニューラルネットワーク、ランダムフォレストともに学習精度は高く、得られた学習器より SHAP を用いて特徴重要度を求めた。ニューラルネットワーク、ランダムフォレストにおける重要特徴度分布をそれぞれ第 1 図、第 2 図に示す。いずれの手法でも 1400 nm 付近、1900 nm 付近、2100~2500 nm 付近の特徴重要度が高いことが示されているが、ランダムフォレストの感度分析の方がより明瞭に重要特徴量が現れた。よって、ランダムフォレストの波長域に対応するマルチスペクトルバンドを設定した。設定したバンドは 400-440 nm, 1300-1340 nm, 1390-1430 nm, 1430-1470 nm, 1890-1930 nm, 2120-2160 nm, 2160-2200 nm, 2200-2240 nm, 2380-2420 nm, 2420-2460 nm, 2460-2500 nm の 11 バンドである。



第 1 図 ニューラルネットワークにおける SHAP に基づく重要特徴分布

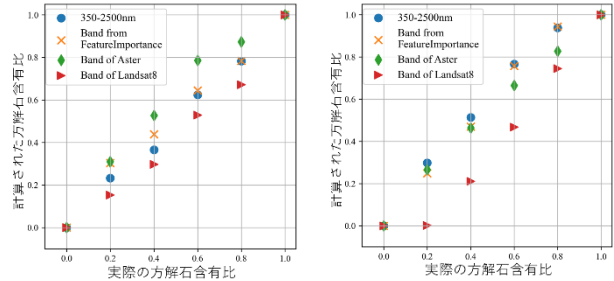


第 2 図 ランダムフォレストにおける SHAP に基づく重要特徴分布

3.2 設計したマルチスペクトルバンドの評価結果

正規化処理, HQ 処理による RMSE はそれぞれ 0.060, 0.115 であり、可視反射赤外域の全波長を用いた解析と同様の精度が得られたことがわかった。方解石の実際の割合と LSU に基づく端成分含有比の関係を第 3 図と第 1 表に示す。一方、含水状態に対しては RMSE が 0.4 以上となり、正確

な推定ができなかった。その原因として水酸基の伸縮および撓曲による反射光の吸収が考えられる。このような鉱物組成特定の際の諸条件の影響については今後の検討課題であり、影響が軽減できれば推定精度がさらに向上すると期待できる。



第 3 図 実際の方解石含有比, および各マルチスペクトルバンドに基づき最急降下法によって計算された方解石含有比の比較. 前処理として正規化処理 (左), HQ 処理 (右) を用いた結果.

第 1 表 方解石の実際と推定による含有比との RMSE による比較

Band type	RMSE	
	正規化処理	HQ 処理
350-2500 nm	0.028	0.132
重要特徴量	0.060	0.115
Terra ASTER	0.130	0.058
Landsat 8 OLI	0.092	0.155

4. まとめと今後の課題

ランダムフォレストの SHAP 値は特徴重要度が明瞭に表れることから、最適マルチスペクトルバンドの設計には決定木系のアルゴリズムの一つであるランダムフォレストを用いるのが良いと考えられる。また機械学習によって得られた重要特徴分布に基づくマルチスペクトルバンドは、元のハイパースペクトルデータよりも情報量が大きく損失しているが、ハイパースペクトルでの解析と同程度の精度で鉱物含有比推定を行うことが可能になった。しかし、含水状態では大幅に推定精度が低下した。前処理や解析手法による推定精度の違いについても検討し、より正確な鉱物含有比推定を行うことが今後の課題である。

文 献

- Fernandez, A, Garcia, S, Herrera, F & Chawla, NV (2018) SMOTE for learning from imbalanced data: progress and challenges, marking the 15-year anniversary, *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 61, pp. 863–905.
- Lundberg, SM & Lee, S-I (2017) A unified approach to interpreting model predictions, in *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, NIPS'17, Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, pp. 4768–4777.
- Settle, JJ & Drake, NA (1993) Linear mixing and the estimation of ground cover proportions, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, no. 6, pp. 1159–1177.
- Tanaka, S, Tsuru, H, Someno, K & Yamaguchi, Y (2019) Identification of alteration minerals from unstable reflectance spectra using a deep learning method, *Geosciences*, vol. 9, no. 5, 195.

世界衛星画像データベース GRIAS を用いた鉱床関連鉱物の分布抽出と 鉱量相関解析

若木佑希也*・久保大樹*・小池克明*

Detection of deposit-related minerals and correlation analysis with ore tonnage using global database of satellite images (GRIAS)

Yukiya Wakaki*, Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

* 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management Graduate School of
Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8450, Japan.
E-mail: wakaki.yukiya.87a@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード: リモートセンシング, ASTER, 鉱物指数, チリ, 斑岩銅鉱床

Key words: remote sensing, ASTER, mineral index, Chile, porphyry copper deposit

1. はじめに

金属資源は社会活動と産業に不可欠であり、さらなる発展と持続可能社会のためにはベースメタル、レアメタルの安定供給が求められる。ベースメタルの一つである銅については、その供給の大部分を海外の斑岩銅鉱床に依存しているが、近年は銅の鉱石品位の低下が問題となっており、継続的に銅を供給するためには新たな斑岩銅鉱床の発見が望まれる。2016年時点では銅の供給の約3割がチリによるものであり、同国には多くの斑岩銅鉱床が存在するため、鉱床有望地の新たな発見も期待できる。そこで本研究では、資源エネルギー庁によって整備された資源地質情報システム GRIAS (Geo-Resource Information Archive System: 藤田ほか, 2014) に収録されている鉱物関連データを活用し、鉱床の存在、および鉱量と熱水変質の程度との関連の解明を目的とした。

そのために、南アメリカ大陸の S11°~45°の範囲に存在する斑岩銅鉱床のうち、アメリカ地質調査所 (USGS) のデータベースに鉱量と品位が登録されている 53 鉱山を選び、それらの統計分析を行い、同地域における鉱床有望地の絞り込みへの応用を試みた。

GRIAS では極域を除く全陸域の ASTER センサー画像をデータベース化しており (藤田ほか, 2014; 2016)、画像解析前の前処理を省略できるため、広範囲で迅速な分析が可能である。

2. 解析手法

熱水変質による生成鉱物の代表として明礬石、カオリナイト、絹雲母、方解石、緑泥石、緑簾石の6種を選んだ。これらの鉱物の存在に起因して、短波長赤外域の特定の波長で電磁波の吸収が生じる (小池・小宇田, 2016)。これを強調するのが鉱物指数である。各鉱物に対する ASTER データでの鉱物指数 (Ninomiya, 2003) のうち代表的なものとして、カオリナイト指数 (KLI), 明礬石指数 (ALI), 方解石指数 (CLI) を以下に示す。

$$KLI = (\text{Band7} / \text{Band6}) * (\text{Band4} / \text{Band6})$$

$$ALI = (\text{Band7} / \text{Band5}) * (\text{Band7} / \text{Band8})$$

$$CLI = (\text{Band6} / \text{Band8}) * (\text{Band9} / \text{Band8})$$

ここで、Band 4, 5, 6, 7, 8, 9 の観測波長帯はそれぞれ 1.6~1.7, 2.145~2.185, 2.185~2.225, 2.235~2.285, 2.295~2.365, 2.36~2.43 μm である。

各鉱物指数に対して、対象鉱山を中心として直径 1000~10,000 m まで 500 m 刻みでバッファを発生させ、バッファ内のピクセルの鉱物指数を平均化した。また、各鉱山の生産量と品位の積を銅鉱量として扱い、これと鉱物指数の平均値との相関係数をバッファ直径ごとに求めた。

3. 結果と考察

3.1 鉱物指数と鉱量の相関、鉱山周辺での分布

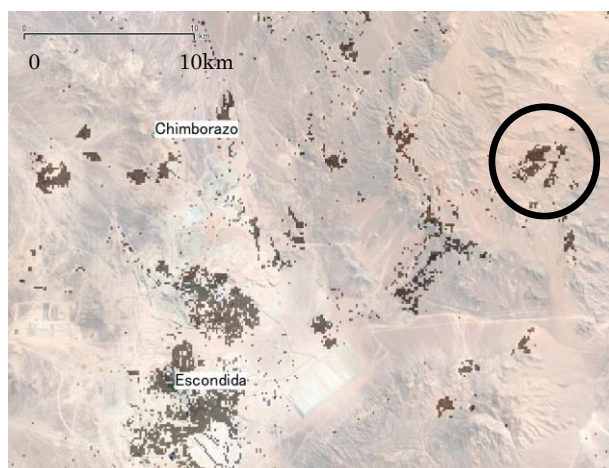
いずれの鉱物指数もバッファの大きさに関わらず、銅鉱量との相関は弱いものであった。これは採掘量が桁違いに大きい鉱山の影響により、銅鉱量が外れ値となったためである。そこで採掘量上位の 6 鉱山 (Chuquicamata, Collahuasi, El Teniente, Escondida, Los Bronces, Los Pelambres) を除いたところ、明礬石・カオリナイト・絹雲母指数 (SRI) は 0.4~0.6 の正の相関係数、方解石・緑泥石 (CHI)・緑簾石指数 (EDI) は -0.1~-0.4 の負の相関係数が得られた。後者の 3 つは斑岩銅鉱床の辺縁部のプロピライト変質帯に存在する鉱物であり、鉱床中央部には分布しないため、負の相関になったと考えられる。

鉱床有望地をより高い精度で抽出するために、正の相関を示した鉱物指数から負の相関を示した鉱物指数を引いた鉱物指数 PCI (Porphyry Copper Index)

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

を提案した。Escondida 鉱床付近を例として、PCI 分布を第 1 図に示す。黒い部分が指数の高い部分であり、鉱山の位置と概ね重なっていることがわかる。鉱山以外の高指数部は鉱床有望地の可能性もある。また、PCI は直径 2000 m

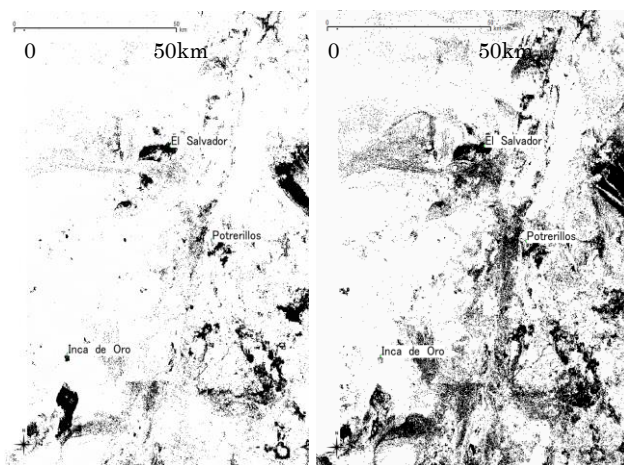
～2500 m で銅鉱量との相関係数が最大 (0.65) となるが、この大きさは斑岩銅鉱床の変質帯の一般的な大きさ (Silltoe, 2010) と調和的である。



第1図 本研究による斑岩銅鉱床に関連した熱水変質鉱物指数 (PCI) の分布

(チリ Escondida 鉱山周辺の例). 値が高い部分を黒色で表す. 丸は第3図での拡大域を表す.

第2図に El Salvador 鉱山周辺における PCI 分布, および単体の鉱物指数で最も相関が高かった絹雲母指数の分布を示す. 絹雲母指数単体よりも PCI の方が熱水変質帯を絞り込めており, Inca de Oro 鉱山周辺については, 高指数部がより集中していることが確かめられる.

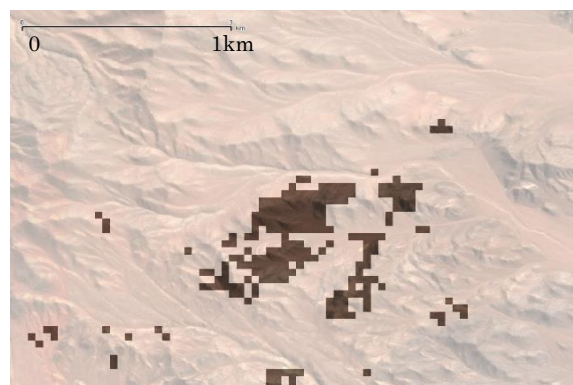


第2図 El Salvador 鉱山周辺の PCI 分布(左)と絹雲母指数 (SRI) 単体の分布(右)の比較. 値が高い場所を黒色で示す.

しかし, PCI では斑岩銅鉱床による熱水変質帯とそれ以外の熱水変質帯を分離できないことが問題点にあげられる. その一例が山頂付近に斑点状に分布する変質帯であり, これは火山活動に起因した熱水変質帯であると考えられる. 数値標高モデルや他の鉱物指数などのデータと組み合わせることで, 精度向上を図るのが今後の課題検討である.

3.2 鉱床有望地抽出の試み

PCI の応用として, PCI 値が高い部分のうち, 以下の4つの条件を満たすものを鉱床有望地と定義した.



第3図 Escondida 鉱山北東部での鉱床有望地

- ・山頂付近の変質帯ではない.
- ・鉱山として開発可能な地理条件にある.
- ・地質が周囲と同じ火成岩である.
- ・高指数部の面積がある程度の大きさをもつ.

これらを満たす部分として, Escondida 鉱山北東部が抽出でき (第1図の丸の領域), その拡大図を第3図に示す. 文献等をもとに抽出結果の妥当性について調査中である.

4. まとめ

世界衛星画像データベースである GRIAS を用い, 南アメリカ大陸の $S11^{\circ}\sim 45^{\circ}$ に位置する斑岩銅鉱床の 53 鉱山について熱水変質の程度と銅鉱量との相関解析を行った.

熱水変質に関連する 6 種の鉱物を選び, ASTER データに対する鉱物指数を適用した結果, 絹雲母・明礬石・カオリナイト指数は銅鉱量と正の相関を示したのに対し, 緑泥石・緑簾石・方解石指数は負の相関を示した.

鉱物指数単体で最も相関が高かったのは絹雲母であり, バッファ直径 2500m で相関係数が 0.53 となった. さらに相関を高めるために, 正の相関から負の相関を示した鉱物指数を差し引いた斑岩銅指数 PCI を提案したところ, PCI と銅鉱量の相関係数はバッファ直径が 2500 m で 0.65 と増加し, PCI の有効性が実証できた. さらに, PCI の応用として地理・地質・規模の制約条件を設定し, 鉱床有望地の特定を試みたところ, Escondida 鉱山北東部に該当箇所を見出した.

謝辞: 貴重な GRIAS システムをご提供いただいた宇宙システム開発利用促進機構の立川哲史, および鉱物指数について種々ご教示いただいた JX 金属探開(株)の三箇智二氏に深甚の謝意を表したい.

文 献

- 藤田 勝・汐川雄一・立川哲史・土田 聡・高木哲一・浦井 稔・大野哲二・児玉信介・山本浩万・両角春寿・矢島太郎・百瀬 敦 (2014) 資源地質情報システム GRIAS について, 資源地質, vol. 64(2), pp. 79-84.
- 藤田 勝・立川哲史・光畑裕司・中村英克 (2016) 資源地質情報システム GRIAS の更新, 資源地質, vol. 66(2), pp. 75-80.
- 小池克明・古宇田亮一 (2016) 金属鉱物・地熱資源探査へのリモートセンシング応用技術とその最近の動向, Journal of MMIJ, vol. 132(6), pp. 96-113.
- Ninomiya, Y. (2003) A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data, Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 3, pp. 1552-1554.
- Silltoe, R. H. (2010) Porphyry copper systems, Economic Geology, vol. 105, pp. 3-41.

A combination of Satellite Image, Soil Type, and Topography Data to Delineate Potential Area of Groundwater Recharge

Tedi Atmapradhana* and Katsuaki Koike*

*Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura

C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.

E-mail: tedi.atmapradhana.83a@st.kyoto-u.ac.jp

Key words: Land cover, Digital Elevation Model, Recharge area, Landsat-8 image

1. Introduction

Remote sensing technology has been successfully applied to Land Use and Land Cover classification (Moukana and Koike, 2008). Freely accessible remote sensing image data such as Landsat-8 and Digital Elevation Model data have been widely used for mapping land use and other spatial analyses. Landsat-8 launched in 2013, includes 11 spectral bands from visible to thermal infrared region. The satellite imagery is useful for mapping groundwater recharge areas (Masoud and Koike, 2006).

This study aims to specify groundwater recharge areas in the Madura Island area, East Java Province, Indonesia using Landsat 8 image set. The main reason of this selection is that this area needs much groundwater for agriculture and life necessities. However, groundwater system in this study area has not yet been clarified in detail.

2. Data and Methodology

2.1. Study area and data

The study area covers an area of approximately 5,379 km². As the main land cover types, five categories were selected: water bodies (W), tenuous vegetation (TV), settlement (S), bare land (B), and dense vegetation (DV). Soil types consist of four categories: chromic luvisols, lithosols, eutric fluvisols, and pellic verstisols.

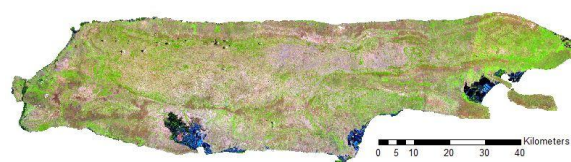


Figure 1. Landsat-8 image covering the study area.

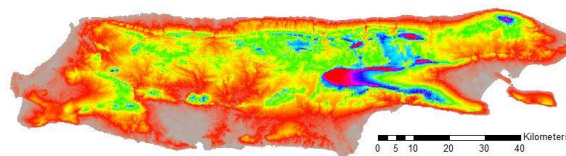


Figure 2. DEM data.

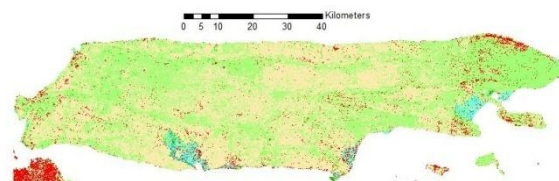


Figure 3. Land use/ land cover (LULC) map. Blue: agriculture, red: settlement, green: tenuous vegetation, yellow: bare land, purple: dense vegetation, and navy: water bodies.

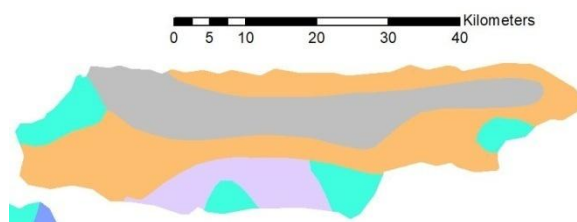


Figure 4. Soil type map. Orange: chromic luvisols, blue: eutric fluvisols, purple: pellic fluvisols, and grey: lithosols.

2.2 Methodology

Seven band data at 30 m spatial resolution (blue, green, red, NIR, SWIR 1, SWIR 2, Panchromatic) of Landsat-8 image acquired on 1st October 2019 and 29th September 2021 covering the study area (Fig. 1) are used for land cover mapping and visual interpretation for an object classification using Google Map. This remote sensing data is used to obtain various parameters of the groundwater potential. These parameters are then combined with other secondary data such as digital elevation model (DEM: Fig. 2), land use/land cover (LULC) map (Fig. 3), soil type (Fig. 4), and rainfall to produce a zoning map of groundwater potential. The above research flow is summarized in Figure 5.

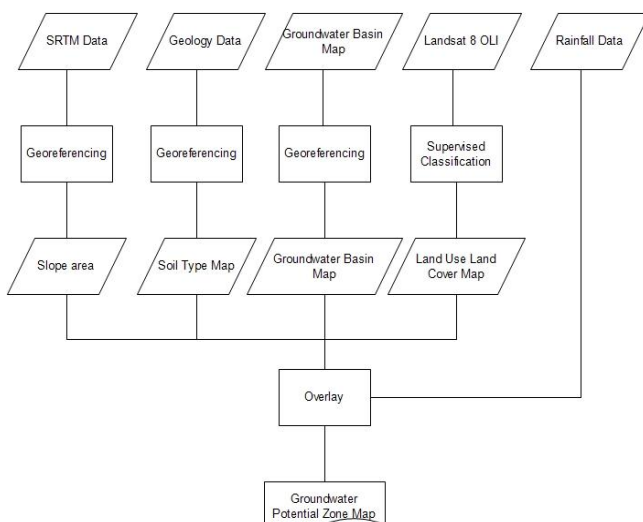


Figure 5. Research flowchart to produce a map of potential area of groundwater recharge.

3. Results

Based on the produced groundwater potential map (Fig. 6), it can be seen that Madura Island has a very high groundwater potential: 27.8%, high potential: 52.1%, relative low potential: 17.8%, low potential: 1.6% and very low potential: 0.64%. By this preliminary assessment, the study area has sufficient volume of groundwater to be used, which meets the needs of life and agricultural activities.

Moreover, the management of water resources

including groundwater must be carried out based on the river area by the Central River Basin. There is a distinction between river basins and groundwater basins, necessitating separate management with the groundwater basins. In the Madura Island, the map of groundwater recharge potential zone provides information about the areas with large volume of groundwater. This map provides limited information regarding potential groundwater recharge areas. Nonetheless, this data can indicate a starting point for site determination in a series of groundwater studies. This data can also determine policies, such as groundwater conservation and land use planning.

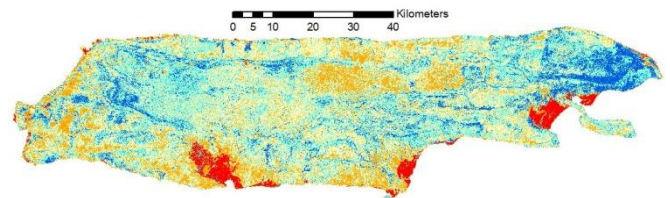


Figure 6. Potential recharge area map. Blue: very high potential, navy: high potential, yellow: relative, orange: low potential, and red: very low potential.

4. Summary

Our next step is use of field investigation data for accuracy improvement of the maps related to groundwater. The lack of field investigation data become the main reason of this low agreement value.

References

- Masoud, A. and Koike, K. (2006) Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 45, nos. 4/5, pp. 467-477.
- Moukana, J. A. and Koike, K. (2008) Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with changes in land cover detected from analyses of satellite images. *Computers & Geosciences*, vol. 34, no. 11, pp. 1527-1540.

3D スキャン技術の応用による資源関連岩石の形状と物性の非接触計測

久保 大樹*・廣渡 響*・小池 克明*

Contactless measurement of shape and physical property of resource-related rocks using 3D scanning technology

Taiki Kubo*, Hibiki Hirowatari* 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 C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

キーワード: 3D モデル, 非破壊検査, リモートセンシング, 岩石密度
Key words: 3D model, Nondestructive inspection, Remote sensing, Rock density

1. はじめに

3D スキャナは、近年急速に装置の小型化・高性能化が進んでおり、特に医療分野、土木・建築業界で積極的に導入が行われている（例えば、池田ほか, 2016; Woo et al., 2020）。さらには、Apple 社の iPhone に 3D スキャナの一つである LiDAR カメラが搭載されるなど、個人でも使用可能な程度まで低価格化と普及が進んでいる。3D スキャナは、資源地質分野でも有効に活用できる。例えば、風化が進んだ脆い岩石サンプルなどの体積を非接触で計測することでその密度が求められ、これは各種物理探査結果との比較や水理地質構造の把握に活用できる。また、露頭の 3 次元形状をデジタル化することで、鉱物脈や亀裂の走向・傾斜を自動判定するシステムの開発も期待される（遠竹, 2019）。このような非破壊・非接触な計測装置の活用は、人為的な影響を及ぼさずに対象物のデータを取得できるだけでなく、作業のオートメーション化につながり、人員コストの削減、安全性の向上に貢献できる。さらには、今後新たな資源開発の対象として期待される、深海、火山地域、さらには宇宙など、人の立ち入りが困難な領域で利用される無人機に搭載するセンサの一つとしても重要な役割を持つ。

そこで本研究では、市販されている比較的安価な 3D スキャナを使用し、様々な形状・特徴を持つ岩石サンプルを対象として分析を行い、その適用可能範囲と将来的に期待される技術について議論する。

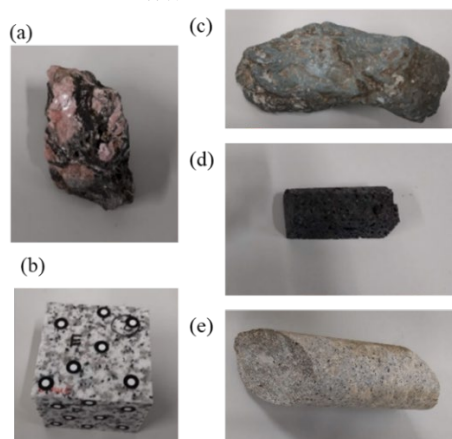
2. 測定装置

3D モデリング技術には複数の手法があるが、主要な原理は 3 種類に大別できる。すなわち、①赤外線などを照射してその反射を感知し、それに要した時間から距離計測を行う ToF(Time of Flight)方式、②複数台のカメラからカメラ間の距離、焦点距離、視差をもとに対象物までの距離を測定するステレオ方式、および③縦縞などパターン光を照射して、その歪みなどから対象の凹凸を計測するパターン光投影方式である。そのうち、本研究では目的に合致する小型性と細部までのスキャンが可能であるという利点から、①の ToF 方式を用いた Revopoint 社製の 3D スキャナ POP3D を使用した。POP3D は幅 15 cm、重量 200 g 程度の小型で可搬性に優れている。これは赤外線センサと光学式カメラを搭載し、前者で対象物の形状、後方で RGB 情報が取得される。

測定対象物、またはカメラ本体を移動させて複数の角度から撮影を行い、形状の特徴に基づいて画像の結合処理を行うことで 3D モデルが作成される。モデルの解像度は、最小で 0.3 mm である。

3. 岩石サンプルの 3D スキャン

3D スキャン技術が応用できる範囲を検討するため、花崗岩や菱マンガン鉱石など、異なる色彩や形状の特徴を持つ数種類の岩石サンプルの測定を行った。使用したサンプルの例を第 1 図に示す。撮影には第 2 図に示すように回転台（POP3D 付属）と、撮影ブースを使用した。さらにスキャナを 3 cm、7 cm、15 cm の台の上ののせて数パターンの角度をつけるとともに、対象物を回転台に乗せる際にスキャナが認識しない黒色のワイヤなどを用いて置き方の角度を変えることで、スキャンされない影の部分ができないように注意した。このような様々な角度からの撮影を含め、1つのサンプルに対して約 10 分程度の作業によって、点群データが取得される。点群データは、mm 単位に変換された xyz 座標と RGB 情報が格納されている。POP3D 付属の解析ソフトウェアを使用して点群データからメッシュデータへの変換と、欠損部分の穴埋め処理を行うことにより、Ply 形式の 3D ポリゴンデータが作成される。



第 1 図 測定に使用した岩石サンプルの例: (a)菱マンガン鉱石, (b)稲田花崗岩ブロック, (c)大葛変朽安山岩, (d)砥川溶岩, (e)土岐花崗岩ボーリングコア。

4. 3Dモデルの検証と応用

複数のサンプルで3Dスキャナによる撮影を行った結果、黒色の砥川溶岩や光沢のある黄鉄鉱などに対しては、適切なモデルの作成ができなかった。これは、形状の計測に使用する赤外線が吸収または散乱してしまうためと考えられる。また、ブロック成形された試料や表面に凹凸の少ないボーリング試料についても追跡できる表面の特徴が少なくスキャンが困難であったが、POP3D付属のマーカーを表面に貼り付けることで対処できた。ただし、当然ながらマーカー下の形状などは計測できず、ソフトウェアによって穴埋め処理が行われるため、測定誤差は大きくなる。作成された大葛変朽安山岩の3Dモデルを第3図に示す。各種3Dグラフィックソフトウェアを用いて、得られた3Dモデル(Ply形式)を編集や分析できる。モデリング精度を検証するため、3Dモデルから計測された体積と浮力法による実測体積を比較した。誤差は最大で2%程度であり、簡易測定でありながら十分な精度の結果が得られていることが確かめられた。

3Dスキャナによって得られたモデルの活用例として、点群データとともに記録されている光学カメラのRGB情報を基に、特定鉱物の抽出を行った。第4図(左)に示す菱マンガン鉱石サンプルの3Dモデルは454,978点の点群データで構成されており、各点にRGB値が関連付けられている。このデータ群からR(赤)の上位70%をしきい値として、母岩と菱マンガン鉱の区分を行った。第4図(右)が上位70%を抽出したモデルであり、点群データ全体の約10%となった。表面のみの情報ではあるが、このような特定の鉱物割合の抽出は、鉱石品位の概算などに利用できと期待される。

また、座標付きの点群データは、他の計測結果と統合することが容易な点も大きなメリットである。第5図は、第4図と同様にRGB値に基づいて菱マンガン鉱石の鉱物を数種類に区分し、それぞれに分光反射計で計測された各波長での反射率を関連付けたモデルである。この処理により Fe^{3+} 、OH、 H_2O 、 CO_3^{2-} などによる電磁波の吸収を表すことができるので、鉱物識別精度が向上する。このように物性データの3次元構造を可視化することにより、鉱物分布の異方性などを考慮した複雑な数値モデルの構築が容易となるだけでなく、インターネットを介した研究者間の情報共有や貴重なサンプルのライブラリ化などでも活用することができる。

5. まとめ

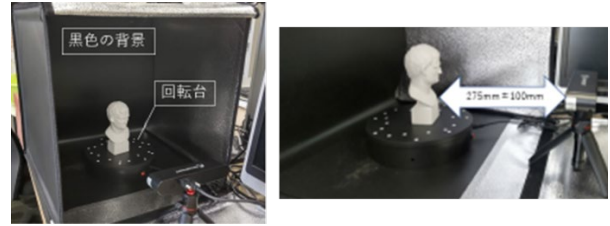
本研究では、性能の向上と普及が急速に進んでいる小型3Dスキャナの資源地質分野への活用を目的に、その適用可能性を検証した。岩石の種類によって適用の難しい場合もあるが、安価な小型3Dスキャナであっても誤差2%以内の精度の高い計測と3Dモデルの構築を行うことができた。得られた3Dモデルの点群データを利用し、特定の鉱物の抽出や他の計測データとの統合といった展開が可能であり、今後の資源探査分野で必要とされるコストの削減や無人機の活用に応用できる技術として期待される。

文献

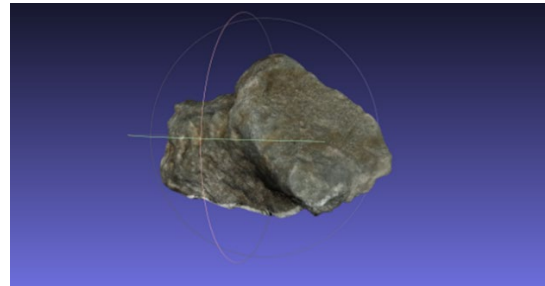
- 池田雄一, 金子智弥, 坂上肇 (2016) 建築工事における3次元点群データの活用効果の検証, 大林組技術研究所報, vol. 80, pp. 1-8.
- 遠竹行次 (2019) デジタル露頭モデルの技術動向と石油探鉱への応用, 石油技術協会誌, vol. 84, pp. 150-159.
- Woo, K. S. and Worboys, G. (2020) Geological monitoring in protected areas, *International Journal of Geoheritage and Parks*, vol. 7, pp. 218-215.

謝辞

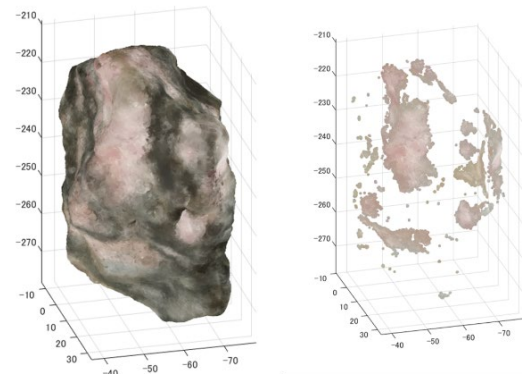
本研究の一部は、一般社団法人 資源・素材学会による長期テーマプロジェクト研究課題として助成を受けたものである。ここに謝意を表す。



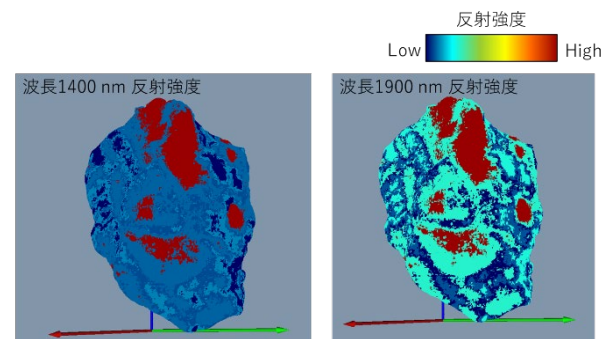
第2図 POP3Dによる撮影の様子



第3図 大葛変朽安山岩の3Dモデル



第4図 菱マンガン鉱石の3Dモデル(左)とRGB値のしきい値処理によって抽出された菱マンガン鉱の分布(右)



第5図 RGB値を基に分類した菱マンガン鉱石の各鉱物に、短波長赤外域での反射強度を重ねたモデル

Physics-informed ニューラルネットワークを用いた 地下深部の温度・浸透率構造の推定手法の開発

石塚師也*

Development of a method to estimate temperatures and permeabilities at depth using a physics-informed neural network

Kazuya Ishitsuka*

*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,
C1-1-108 KyotoUniversity-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: ishitsuka.kazuya.4w@kyoto-u.ac.jp

キーワード : Physics-informed ニューラルネットワーク, 温度, 浸透率

Key words : Physics-informed neural network, Temperature, Permeability

1. はじめに

地熱地域の地下の温度や浸透率分布を把握することは、地熱システムの理解や有望地域の選定において重要である。温度や浸透率を直接的に計測するために、坑井での温度検層や岩石コア試料からの物性測定が行われるため、それらの離散データを基にして空間分布を推定する手法の開発が求められる。このような目的で、ニューラルネットワークを用いた手法が提案されてきた。この手法は、坑井位置でのデータを訓練データとして、坑井位置以外での値を予測する手法である。この手法は、アイスランドの Hengil 地域や我が国の葛根田地域や九重地域等に適用され、効果を上げている。しかしながら、坑井データから離れた位置での予測精度の向上や、予測された温度や浸透率分布の物理的な妥当性について課題が残っている。

離散化されたデータから、物理的な法則で記述可能な状態量や物性値の分布を推定する問題は、多くの分野に関連し、このような問題に対して、ニューラルネットワークを用いて物理的に妥当な予測結果を得ることは課題となっている。Raissi et al. (2019)は、このような課題を解決し得る手法として、physics-informed ニューラルネットワークを提案した。この手法は、ニューラルネットワークの損失関数に微分方程式および境界条件を取り入れることで、微分方程式で記述される物理法則をある程度満たす予測値を得る手法である。地下の熱水システムにおいて、温度や圧力等の状態量や浸透率等の物性分布は、質量保存則およびエネルギー保存則を満たしていると考えられるため、physics-informed ニューラルネットワークのフレームワークを拡張することは意義のあることだと考えられる。そのため、本研究では、physics-informed ニューラルネットワークを熱水システムに適用できるように拡張し、地下の温度、浸透率および圧力の分布を推定する手法を開発した。また、開発した手法は、疑似データを用いて、物理法則を損失関数に用いないニューラルネットワークと比較することで、特徴を検証した。

2. 熱水システムにおける Physics-informed ニューラルネットワーク

Physics-informed ニューラルネットワークにおいて、微分方程式は、自動微分を用いて計算される。自動微分は、連鎖律によって、対象となる微分を計算可能な初等関数の微分に置き換えて微分を計算する。そのため、数値微分よりも、精度が良く計算負荷が小さいという利点がある。自動微分は、ニューラルネットワークで誤差逆伝播をするときにも用いられるため、一般的な深層学習フレームワークには実装されているが、ネットワークは自動微分を行いやすいアーキテクチャに設計する必要がある。本研究では、位置を入力として、温度、浸透率、圧力のそれぞれをアウトプットとするフィードフォワード型ニューラルネットワークを用いた。また、損失関数として、一般的なニューラルネットワークでも用いられる観測値と予測値の差の二乗誤差に加えて、以下に示す熱水系の質量保存則 (式(1)) とエネルギー保存則 (式(2)) を満たすようにした。

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{k\rho_w}{\mu_w} (\nabla P + \rho_w g \nabla z) \right\} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{k\rho_w c_w T}{\mu_w} (\nabla P + \rho_w g \nabla z) \right\} - \nabla \cdot \lambda_r \nabla T = 0 \quad (2)$$

ここで、 P と T は圧力および温度を表し、 k 、 ρ_w 、 μ_w 、 c_w 、 λ_r は浸透率、流体の密度、粘性、比熱、岩石の熱伝導率を表す。また、 ∇ および $\nabla \cdot \{ \}$ はそれぞれ勾配、発散のベクトル演算子として用いている。なお、これらは、流体が液相単相であり、外部からの質量の流入が無いときに成り立つ。本研究では、簡単のために地殻流体として純水を仮定した。なお、計算負荷を下げるため、式(1)および(2)は、均等に分布した一部の位置のみで満たすように設定した。また、境界条件として、ノイマン境界およびディレクレ境界を設定できるようにした。物理法則を損失関数に用いないニューラルネットワークとしては、観測値と予測値の差の二乗誤差のみを損失関数とした。

3. 疑似データ

疑似データは、熱水系シミュレータである TOUGH2 (Pruess et al., 1999) を用いて、自然状態の温度・圧力を計算することによって作成した。対象領域は、深さ、水平方向に各 1 km の正方形の 2 次元領域とし、上面は大気圧かつ 25°C で一定とし、深部から一定の熱流束を境界条件として与えた。側部は閉境界とした。浸透率は、Manning and Ingebritsen (1999) で示されている浸透率の深さ方向の変化の経験式に局所的な摂動を加えることで作成した (第 1 図 b)。その他の岩石物性は、簡単のため、全領域で一定としている。これから、自然状態の温度・圧力分布を得た (第 1 図 a)。

この自然状態シミュレーションの上端面から鉛直方向に坑井が掘削されており、坑井位置では温度、浸透率、圧力が既知であると仮定した。この疑似的な坑井は上端面から深度 660 m まで得られており、600 m までのデータを教師データとし、600–660 m のデータを検証用データとした。また、疑似的な坑井は等間隔に得られているとし、坑井の本数は 3 本および 5 本の場合を仮定して、それぞれ予測結果を比較した。

4. 結果および考察

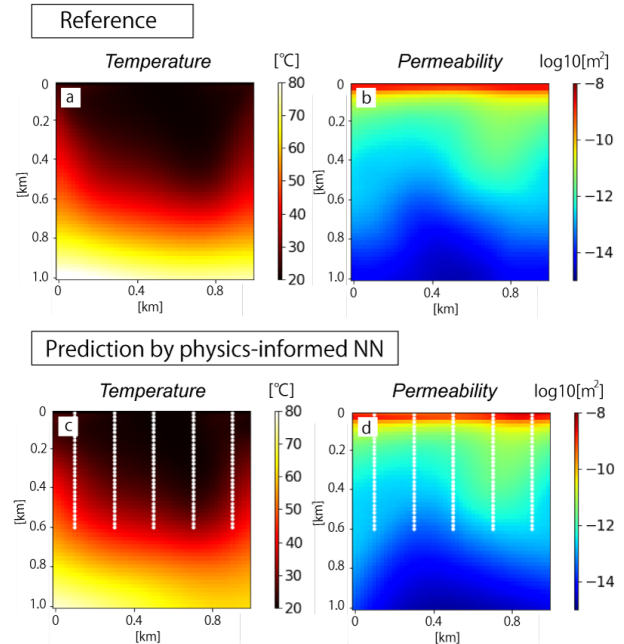
Physics-informed ニューラルネットワークを用いて予測した温度および浸透率の分布を第 1 図 c および d に示す。図 1c, 1d より疑似データと整合的な温度および浸透率の空間分布を予測できていることが分かる。物理法則を損失関数に用いないニューラルネットワークの予測値と比較しても physics-informed ニューラルネットワークの方が、疑似データとより整合的な温度および浸透率の分布を予測できている傾向にあった。

予測誤差を定量化するため、物理法則を満たす位置を乱数で変更させ、同一の訓練データで学習および予測を 10 試行行い、疑似データの値との差のパーセント誤差を計算した。深度 600 m 以深の訓練データに用いた教師データが分布していない深度区間 (外挿領域の深度区間) の誤差に着目すると、physics-informed ニューラルネットワークの予測温度の平均誤差は 6.7% (坑井 3 本) および 5.1% (坑井 5 本) であり、予測浸透率の平均誤差は 1.6% (坑井 3 本) および 0.8% (坑井 5 本) であった。一方、物理法則を損失関数に用いないニューラルネットワークでは、外挿深度区間の予測温度の誤差の平均は 10.3% (坑井 3 本) および 8.1% (坑井 5 本) であり、予測浸透率の誤差は 1.7% (坑井 3 本) および 0.9% (坑井 5 本) であった。これより、physics-informed ニューラルネットワークを用いることで、外挿区間の予測精度が向上できることが分かった。

Physics-informed ニューラルネットの訓練時のエポックごとの温度および浸透率の観測値と予測値との二乗誤差を見ると、浸透率の方が早く収束し、温度の方がより長いエポックで収束していることが分かった。これは、温度が質量保存則およびエネルギー保存則といった物理法則に与える影響を表していると考えられる。温度と浸透率の予測誤差を比較すると、温度の方がより改善が見られたが、この誤差の収束の傾向と関連があるかもしれない。

上記の結果のように Physics-informed ニューラルネットワークを用いることで、予測誤差を改善できると考えられるが、加えて、予測値が質量保存則、エネルギー保存則を一定程度満たすことも利点である。本研究の解析の結果、Physics-informed ニューラルネットワークを用いることで、物理法則を損失関数に用いないニューラルネットワークと

比べて、質量保存則およびエネルギー保存則の誤差の平均は約 0.08% も減少した。



第 1 図 疑似データとして熱水系シミュレーションによって作成した (a) 温度分布、温度分布を計算するために用いた疑似データの (b) 浸透率分布。physics-informed ニューラルネットワークによって予測された (c) 温度分布、(d) 浸透率分布。(c) および (d) の白点線は、疑似的な坑井位置を表し、この位置で温度、浸透率および圧力が得られていると仮定した。

5. 結論

本研究では、physics-informed ニューラルネットワークのフレームワークを基に熱水系システムを扱えるように手法開発を行い、プログラムを構築した。また、地下の温度および浸透率の予測問題への有効性を検証するため、2 次元の熱水系シミュレーションデータに適用を行った。解析の結果、坑井が得られていない深部の温度および浸透率の予測誤差を改善することができた。また、推定された温度、浸透率および圧力は、質量保存則およびエネルギー保存則を概ね満たすことを示した。

文 献

- Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis GE. (2019) Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.
- Pruess, K, Oldenburg, CM, Moridis, GJ. (1999) TOUGH2 user's guide version 2. https://tough.lbl.gov/assets/docs/TOUGH2_V2_Users_Guide.pdf
- Manning CE, Ingebritsen SE. (1999) Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems. *Review of Geophysics*, 37, 1998RG900002.

謝辞

本研究は JST ACT-X 「AI 活用で挑む学問の革新と創成」 (JPMJAX20A1) の支援を受けて行いました。ここに記して感謝申し上げます。

地熱系シミュレーションのパラメータ推定手法の開発： 深層学習を用いたアプローチ

嶋章裕¹・石塚師也²・林為人³・Elvar K. Bjarkason⁴・鈴木杏奈⁵

Development of a method to estimate hydrothermal simulation parameters: a deep learning approach

Akihiro Shima¹, Kazuya Ishitsuka², Weiren Lin³, Elvar K. Bjarkason⁴, Anna Suzuki⁵

- 1 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Kyoto University, Kyoto daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto. E-mail: shima.akihiro.26e@st.kyoto-u.ac.jp
- 2 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Kyoto University, Kyoto daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto. E-mail: ishitsuka.kazuya.4w@kyoto-u.ac.jp
- 3 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Kyoto University, Kyoto daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto. E-mail: hayashi.tameto.6s@kyoto-u.ac.jp
- 4 秋田大学大学院国際資源学研究科 Graduate School of International Resource Sciences, Akita University, 1-1 Tegatagakuen-cho, Akita. E-mail: elvar.bjarkason@mine.akita-u.ac.jp
- 5 東北大学流体科学研究所 Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi. E-mail: anna.suzuki@tohoku.ac.jp

キーワード：深層学習，ニューラルネットワーク，地熱システム，地熱系シミュレーション
Key words：Deep learning, Neural network, Geothermal system, Hydrothermal simulation

1. はじめに

地熱資源の開発にあたって，自然状態を表す地熱系シミュレーションモデルの構築は重要であり，実際これまでにシミュレーションモデルのパラメータ推定のための様々な手法が提案されてきた。しかし既存の手法，例えばベイズ推定を用いた地熱系シミュレーションのキャリブレーション手法については，シミュレーションを用いたサンプリングの計算負荷の大きさが課題であり，また iTOUGH2 のような数値シミュレーションの逆解析についても局所解に陥る可能性が指摘されている (Maclaren et al., 2020)。そこで本研究では，将来的にこれらの問題を解決しうる手法として，近年地下水流動や石油開発の分野でも活用されている深層学習に着目し，地熱系シミュレーションのパラメータ推定手法を新規提案する。深層学習は相関が複雑なデータ同士のモデル化に優れており，これまで困難であった観測データとパラメータの関係のモデル化が期待される。また特徴として，構築したモデルによる推定が高速である点も挙げられる。本研究では疑似的な温度検層データを用いて手法の特徴および有効性について評価を行った。

また深層学習において用いる教師データは，推定の精度や効率に大きな影響を与える。そこで本研究では特にこの教師データに着目し，対象とする地域のみで特化した教師データを作成することで，解析の効率化および推定精度の向上を目指す。

2. 解析の内容

2.1 パラメータ推定手法の概要

本研究では，深層学習を用いて温度検層データからシミュレーションのパラメータ (図 1(a)) を推定し，その結果を

もとにシミュレーションを行うことで地下温度分布 (図 1(b)) を推定する。

ここで，深層学習に用いる教師データは推定の精度および汎用性に大きな影響を与える。例えば教師データを作成する際，パラメータの範囲をあらかじめ定めて作成するが，深層学習の推定精度向上のためには，この範囲は狭いほうが良いことが判明している。しかし，解析前にはパラメータの取りうる範囲は不確定であることが多いため，初めから適用範囲が狭くかつ対象のテストデータに適用可能な教師データを作成することは困難である。そこで本研究では，まずパラメータがとる範囲の広い教師データを作成し，その後教師データのパラメータがとる範囲を狭めていくことで，少しずつ対象のテストデータに特化した教師データを作成することを試みる。具体的には，まず作成した教師データ全体を各パラメータの値の大きさに応じて 4 つのグループに分割する。次に多次元尺度構成法およびカーネル密度推定を用いて，テストデータがどのグループに属するか定量的な評価を行う。テストデータが属しないと判断したグループを棄却し，新たに選定した範囲で教師データを作成

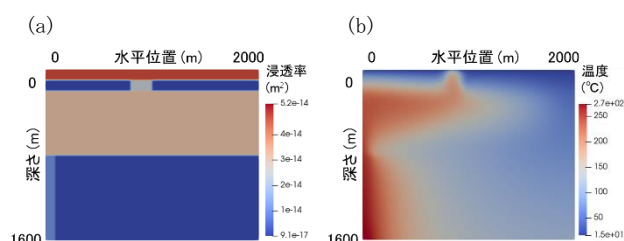


図1 浸透率および温度の分布例，(a)浸透率分布，(b)温度分布

する。この操作を繰り返すことによりパラメータの範囲を狭め、推定精度の向上を目指す。

以上の手順により作成した教師データを用いて、深層学習によるパラメータ推定を行う。本研究では多層パーセプトロンと呼ばれる順伝播型の深層ニューラルネットワークを用いた。また層数やノード数等のハイパーパラメータの組み合わせとして、18通りの解析を行い、目的関数の値が最も小さくなった設定を最終結果として用いた。

解析の内容として、作成したシミュレーションデータをそのまま教師データとして用いた場合と、提案した手法によりパラメータの範囲を1回削減し教師データを再作成した場合の2つを考え、それぞれのケースに対して解析を行った。

2.2 本研究で用いた教師データ

本研究では、深層学習に用いる教師データとして人工的に作成した深さ方向と水平方向からなる2次元シミュレーションデータを用いた。この2次元シミュレーションは、先行研究(Bjarkason et al., 2019)で用いられている浸透率の異なる6つの地層から構成されるものをベースに作成した。ここに15本の坑井が掘削されていると仮定し、坑井位置での温度を疑似的に観測される温度データとした。本解析では、この温度データを観測値とみなし、それぞれの地層の浸透率、底部境界条件、各地層の位置関係を定める変数をパラメータとして推定した。また比較のため、パラメータと温度との非線形性の度合いが異なる3つのケースを考えた。ケース1では浸透率のみを、ケース2では浸透率と底部境界条件を、ケース3ではこれら2つに加えて各地層の位置関係を定める変数をパラメータとした。

3. 結果と考察

ケースごとの解析における推定誤差を図2に示す。図の縦軸の値は、最終的に得られた地下温度分布の推定結果と真の地下温度分布を比較した結果であり、20mごとにプロットされた8000の地点の温度データの二乗平均平方根誤差(RMSE)で表される。またケース3における地下温度分布の推定結果を図3に示す。本解析ではそれぞれのケースでの解析において、500個の教師データを用いた。

図2より、全てのケースにおいて教師データを再作成した方が小さい推定誤差を示しており、提案した手法を行うことによる精度の向上が確認できた。またパラメータ範囲の選定を複数回行うことによって、さらに推定精度の向上が期待されることが示唆された。

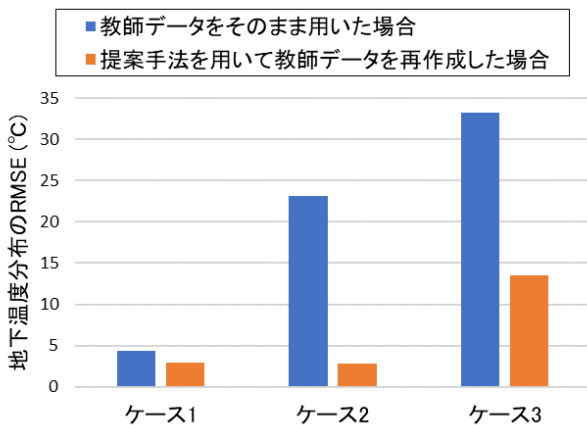


図2 提案手法を用いた場合と用いなかった場合の推定誤差の比較

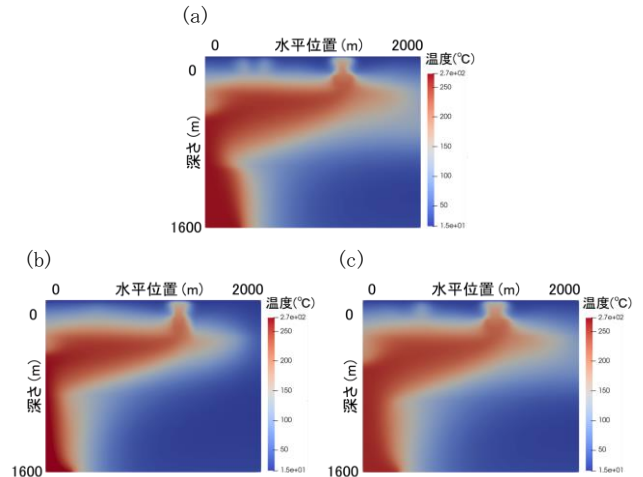


図3 ケース3における地下温度分布の推定結果, (a)真値, (b)教師データをそのまま用いた場合, (c)再作成した場合

また次の解析として、教師データの数による影響について評価を行った。新たに作成した2000個の教師データについて、解析に用いる数を100個から2000個まで8回に渡って変化させ、それぞれについて提案手法による教師データのパラメータ範囲の選定と深層学習による推定を行った。

パラメータ範囲の選定については、全てのケースで教師データの数による明らかな影響は確認できなかった。この結果より、100個程度の教師データがあれば今回の解析と同程度の範囲削減を行うことができ、より効率的に解析を進めることができる可能性が示された。

一方、深層学習による推定については、全てのケースにおいて教師データが増えるに従って推定精度も向上する傾向が確認できた。ただし、その上昇はデータの増加とともに緩やかになっており、ケース1やケース2では1500個程度である程度収束している様子も確かめられた。

4. まとめ

深層学習による地下温度分布の推定手法について検討を行った。特に深層学習において用いる教師データは推定の精度や効率に大きな影響を与えることから、対象とする地域のみに特化した教師データを作成する手法を提案し、その有効性を検証した。結果、提案手法を用いることによる推定精度の向上が確かめられた。また教師データの作成にかかる時間は解析の効率に大きな影響を与えることから、解析に用いる教師データの数についても検討を行った。結果、解析の段階によってはより少ない数の教師データで同程度の精度で推定が出来るという結果が得られ、解析の効率性向上に寄与する可能性が示唆された。

文 献

- Maclaren, O. J., Nicholson, R., Bjarkason, E. K., O'Sullivan, J. P. & O'Sullivan, M. J. (2020) Incorporating posterior-informed approximation errors into a hierarchical framework to facilitate out-of-the-box MCMC sampling for geothermal inverse problems and uncertainty quantification, *Water Resources Research*, vol. 56, 2018WR024240.
- Bjarkason, E. K., O'Sullivan, J. P., Yeh, A. & O'Sullivan, M. J. (2019) Inverse modeling of the natural state of geothermal reservoirs using adjoint and direct methods, *Geothermics*, vol. 78, pp. 85-100.

地熱貯留層モデリングへの機械学習の適用

鈴木杏奈*・Shi Shuokun**・橋田俊之**

Application of Machine Learning to Geothermal Reservoir Modeling

Anna Suzuki*, Shi Shuokun**, and Toshiyuki Hashida**

*東北大学流体科学研究所 Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan. E-mail: anna.suzuki@tohoku.ac.jp

**東北大学大学院工学研究科 Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University, 6-6-11-709 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan. E-mail: hashida@rift.mech.tohoku.ac.jp

キーワード：地熱開発，貯留層評価，自然状態シミュレーション，機械学習

Key words：Geothermal development, Reservoir evaluation, Natural state simulation, Machine learning

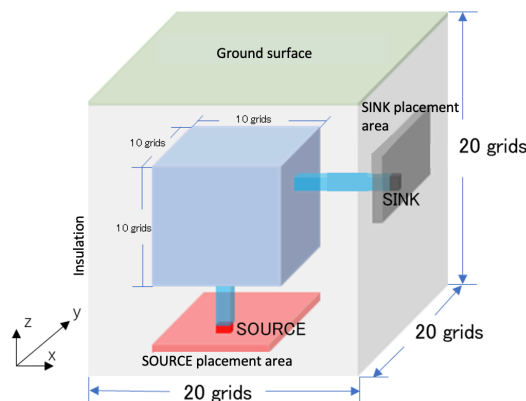
1. はじめに

地熱発電では，地下の熱で温められた熱水や蒸気を利用して発電を行うため，貯留層内における熱水の流動を把握することが重要である。貯留層評価では，資源調査や掘削・試験の結果を総合解析し，開発と管理のための貯留層シミュレーションを実施する。開発の初期段階では，開発前の貯留層の状況を把握する自然状態シミュレーションが行われるが，はじめに，地質や物理探査による計測結果に基づき概念モデルを作成し，貯留層の構造や境界条件を含めた数値モデルを構築する。そして，数値計算によって得られた結果と実測データを比較し，数値モデルを修正していく。数値モデルの更新は，限られたデータのもとで膨大な試行錯誤が必要で，また，解析者の主観に委ねられてしまうため，数値モデルのパラメータを効率的・客観的に推定できる手法が求められる。そこで本研究では，膨大な試行錯誤を事前に学習できる機械学習を利用し，自然状態シミュレーションの入力パラメータの効率的な推定手法の開発を目的とした。開発初期段階に得られる自然状態の温度・圧力分布を用いて，貯留層の境界条件と浸透率分布を推定する機械学習手法を検討した。

2. 手法

2.1 学習データの生成

多孔質媒体中の気液二相流と熱の流れを解析する貯留層シミュレータ TOUGH2 を用い，機械学習の学習データを作成した。手法の検証のため，2次元/3次元の貯留層領域を用意した。2次元の計算領域を第1図に，TOUGH2の入力パラメータを第1表に示す。領域中央の貯留層（高透水領域），熱水の流入域（SOURCE），流出域（SINK），それらをつなぐ断層帯を配置し，上面は温度圧力一定，周囲と底面は断熱境界とした。貯留層の浸透率と，SOURCE および SINK の条件を推定の対象とし，それらは乱数を用いて，5000パターンを用意した。浸透率と境界条件をターゲットとし，計算した温度分布，圧力分布から得られる値を特徴量として，学習用のデータセットを生成した。学習率は0.75とした。



第1図 シミュレーション領域。

第1表 入力パラメータ。

Data set	5000	Top temperature	25°C
Region	2 km x 2 km x 2 km	Top pressure	0.1MPa
Grid number	20 x 20 x 20	Bottom temperature	200°C
Density	2250kg/m ³	Bottom pressure	2MPa
Porosity	0.1	Permeability	
Heat conductivity	2.5w/m·k	Surrounding rock	10 ⁻¹⁸ m ²
Heat capacity	1000kJ/m ³ · °C	Fault	10 ⁻¹⁵ m ²
		Reservoir	10 ⁻¹³ - 10 ⁻¹⁷ m ² (random)
		SOURCE flow rate	0.2 - 0.8 kg/s
		SOURCE enthalpy	852-1345 MJ/kg

2.2 SOURCE/SINK の条件推定モデルの開発

Suzuki et al. (2022)では，固定した SOURCE/SINK の条件のもと，浸透率の推定に成功している。ここでは，SOURCE と SINK についての条件を推定する学習モデルを開発した。SOURCE と SINK の位置については，三つの分類の機械学習手法（K-近傍法（KNN），ロジスティック回帰（LR），ランダムフォレスト（RF））を用い，SOURCE の

比エンタルピーと SOURCE の流量については、回帰の機械学習手法（決定木の勾配ブースティングの一つである LightGBM）を用いた。

2.3 境界条件推定モデルの開発

特徴量には、温度分布、圧力分布の他、2.3 で推定した SOURCE, SINK の条件を含めた。機械学習手法には、2.3 同様、LightGBM を用いた。推定モデルの精度を上げるため、特徴量の入力方法として one-hot エンコーディング (Harris and Harris, 2012) を導入した。one-hot エンコーディングとは、カテゴリ変数を数値化する表現方法であり、決定木の使用頻度に基づいた重要な特徴量を選定し、計算量を大幅に低減することができる。

3. 結果および考察

テストデータを用いた推定精度の検証結果を第 2 表に示す。精度 (Precision) は、推定範囲の総グリッド数 (SOURCE の場合は下面のグリッド数, SINK の場合は側面のグリッド数) に対する推定に成功したグリッド数の割合であり、再現率 (Recall) は、SOURCE (または SINK) の総グリッド数に対する推定に成功したグリッド数である。両者とも、1 に近いほど精度が高いことを示している。検証結果より、三つの分類の機械学習手法 (KNN, LR, RF) はどれも精度が高いことを確認し、機械学習で SOURCE と SINK の位置を推定できる可能性が示された。また、回帰問題である SOURCE の比エンタルピーと流量の評価には、決定係数 (R^2) を用いた。検証結果より、比エンタルピーはよい精度で推定できることが確認できたが、流量はあまり良い精度が得られなかった。また、浸透率の推定も同様に行い、一定の精度が出ること確かめた。2次元のテストデータを用いた推定結果の一例を第 2 図に示す。SOURCE/SINK の位置は一致しており、また、浸透率の分布もよく推定ができていことがわかる。

続いて、模擬フィールドデータに対して、開発した推定モデルを適用した。模擬フィールドデータの浸透率分布の一断面と推定した浸透率分布を第 3 図に示す。推定結果は、模擬フィールドデータの傾向を捉えており、特に浸透率分布の輪郭を捉えることができてい。今回の学習データでは乱数によってモザイク模様のような浸透率分布を用いたが (第 2 図参照)、第 3 図に示されるような高透水性領域と低透水性領域が区別されるような任意の浸透率分布に対しても学習モデルが適用できる可能性がある。一方で、今回の学習モデルでは、3次元の温度分布、圧力分布を入力値とする必要がある。実際のフィールドでは、井戸での計測結果は必ず離散的となることから、離散的なデータでも推定が可能かどうかを検証することが今後の課題である。

4. 結言

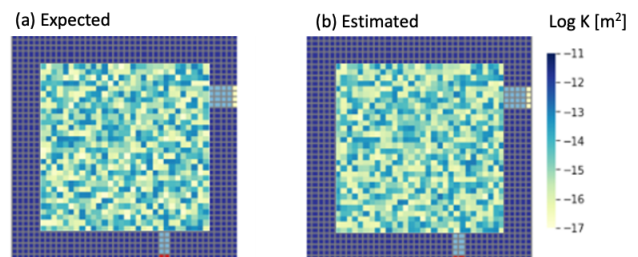
本研究では、地下温度分布および圧力分布に基づく地下境界条件及び浸透率分布推定手法を提案し、その実現可能性を検討した。定常状態の 2次元/3次元の温度および圧力分布により SOURCE/SINK の条件と浸透率分布を推定する機械学習推定モデルの開発に成功した。模擬フィールドデータの検証により、学習データと異なる分布を有するフィールドデータに対しても適用できる可能性を示した。本研究では、汎用的な機械学習手法を適用したが、深層学習を用いた貯留層パラメータの推定も試みられている (Ishitsuka et al., 2021)。多様な手法を適用し、よりよい

第 2 表 SOURCE /SINK の条件の推定精度。

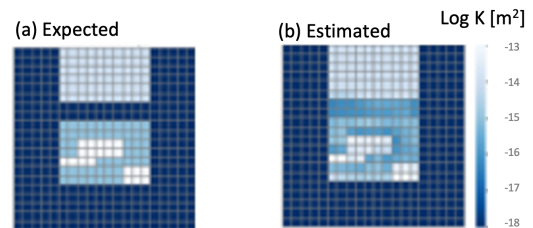
(a) SOURCE		2D	3D
Position (RF)	Precision	0.988	0.998
	Recall	0.990	0.960
Enthalpy (LightGBM)	R^2	0.984	0.830
Flow rate (LightGBM)	R^2	0.717	0.568

(b) SINK		2D	3D
Position (KNN)	Precision	1.000	0.999
	Recall	1.000	0.996

(c)		2D	3D
Permeability (LightGBM)	R^2	0.866	0.760



第 2 図 SOURCE/SINK 位置ならびに浸透率分布の推定結果. (a)真値, (b) 推定値。



第 3 図 SOURCE/SINK 位置ならびに浸透率分布の推定結果. (a)真値, (b) 推定値。

貯留層評価の可能性を検討することが期待される。

文 献

- Harris and Harris (2012) Digital design and computer architecture (2nd ed. ed.).
- Ishitsuka et al. (2021) Bayesian and neural network approaches to estimate deep temperature distribution for assessing a supercritical geothermal system: evaluation using a numerical model, Natural Resources Research, 30(5), 3289-3314.
- Suzuki et al. (2022) Data-driven geothermal reservoir modeling: estimating permeability distributions by machine learning, Geosciences, 12(3), 130.

地熱資源探査とモデリングへの数理・情報地質学の貢献

小池 克明*・富田 昇平*

Contribution of Geomathematics and Geoinformatics to Geothermal Resource Exploration and Modeling

Katsuaki Koike* and Shohei Albert Tomita*

*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

キーワード：地温，地球統計学，機械学習，リモートセンシング

Key words: Subsurface temperature, Geostatistics, Machine learning, Remote sensing

1. はじめに

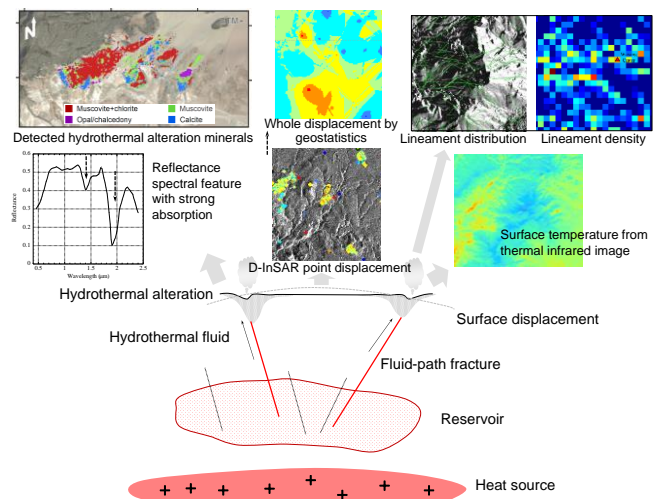
Springer社は種々の分野でのEncyclopediaシリーズを出版しており、数理地球科学でもSagarら4氏をエディターとして、Encyclopedia of Mathematical Geosciencesの編集が進められている。これに数理地球科学を網羅する数多くのトピックスが選ばれ、既に一部はオンライン出版されている(<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26050-7>)。筆頭著者は「Rock Fracture Pattern and Modeling」と「Geothermal Energy」の執筆を担当し、前者はオンライン掲載され、後者は受理後、印刷中である。「Geothermal Energy」では地熱資源の探査とモデリングのために、①地熱系での地質と地温分布、②リモートセンシングによる地表温度・熱水変質鉱物分布・断裂系分布・地表変位、③熱水流動解析に焦点を当て、これらへの数理・情報地質学の応用について述べた。本稿では、第1図に概要を示す②を中心として簡単に内容を紹介します。③はTomita *et al.* (2020)のような数値シミュレーションであり、地質、物性、亀裂の適切な分布モデル構築が重要になる。これに空間モデリング法を応用するが、本稿では省略する。

2. 地質と地温分布の3次元モデリング

地熱システム解明の一つに、ボーリング柱状図を用いた地質分布、検層データを用いた地温分布の推定があげられる。前者の例として、地質データを年代と岩相によって分類し、カテゴリーデータをバイナリーデータに変換するとともに、そのデータセットの空間モデリングから各地質の出現確率を求めることが行われている。各点で出現確率が最大となる地質を選ぶことで地質分布モデルを作成できる。これにより、断層の位置と形状、貯留層の分布などを推定できるようになる。

後者に用いられる方法は地球統計学、ベイズ推論(Ishitsuka *et al.*, 2021)、深層学習型ニューラルネットワーク(DNN)などの機械学習(Koike *et al.*, 2001)である。

DNNの応用として、各検層データの位置情報に加え、地温勾配、キュリー点深度などを入力データに用い、日本全域の標高-5000 mまでの地温分布を推定した例があげられる。対象領域の大きさに比べてデータ密度が格段に小さく、深度範囲も短いというスパースなデータ分布状態である。-5000mまで到達している坑井はわずか4地点であるにもかかわらず、超広域の地温分布を適切に推定でき、水の臨界点に到達する標高分布などを求められる。この成果は超臨界発電の適地選定などに利用できる。



第1図 リモートセンシングによる地表温度・熱水変質鉱物分布・断裂系分布・地表変位の概要

3. リモートセンシングの応用

3.1 地表温度異常の抽出

地熱資源探査への最も代表的なリモートセンシング応用は、熱赤外データ(TIR)を利用した地表温度の推定、および噴気帯、温泉湧出などの地表地熱兆候に起因した温度異常域の抽出である。地表温度推定に用いられる物

理はプランクの法則であり、物質の放射率がわかれば、黒体の分光放射輝度から地表温度に変換できる。これを利用し、多くのLandsat 8 TIR画像シーンを画像撮影日や標高の影響を軽減しながらモザイク処理して、北海道全域での地表温度分布を明らかにした例がある (Tian *et al.*, 2015)。温度異常域は活火山や温泉地などに対応した。

また、TIR データに基づく広域推定温度、観測点での実測データと推定温度をクリギング計算で組み合わせることで推定値を観測値と一致させられ、観測日の相違、大気効果などを軽減でき、温度異常抽出精度が向上する。

3.2 熱水変質鉱物の抽出と分布のマッピング

地熱フィールドでは高温で特有の化学成分をもった熱水・蒸気と岩石との化学反応により、変質鉱物が生成される。可視・反射赤外域における地表の反射スペクトルで、反射率が急低下する波長域と吸収パターンは、熱水変質鉱物を識別するのに最も重要な情報源となる。これは電子の電荷移動や分子の固有振動に起因し、これらに要するエネルギーと電磁波のエネルギーとが調和するためである。対象鉱物の標準反射スペクトルとのマッチングにより、鉱物を識別できる。しかし、Landsat シリーズや ASTER などのマルチスペクトル衛星データではバンド数が 10 以下と限られ、マッチングのための情報が少ない。一方、Hyperion などのハイパースペクトル画像は 200 以上のバンドを有するが、観測範囲は格段に狭い。

そこで、互いのメリットを活用するために、ハイパースペクトル変換法 PHITA (Hoang and Koike, 2017) が提案された。これは、マルチスペクトルとハイパースペクトルデータの各バンドでの反射率を多変量回帰式で関連付け、ベイズ推論、および誤差とパラメータ数のバランスから最適な関連式を選定する。変換精度を高めるために、地表地質情報も組み込む。PHITA をアメリカネバダ州の地熱資源域での Landsat TM, ETM+, OLI, EO-1 ALI データに適用し、これらを Hyperion データに変換した。白雲母・方解石・オパールなどの識別に必要な短波長赤外域のバンドは上記の衛星データには一つしかないため、これまで識別は不可能であった。しかし PHITA によれば、Hyperion の範囲外でも 95% 以上の正解率でこれらの鉱物分布を明らかにでき、その有効性を実証できた。

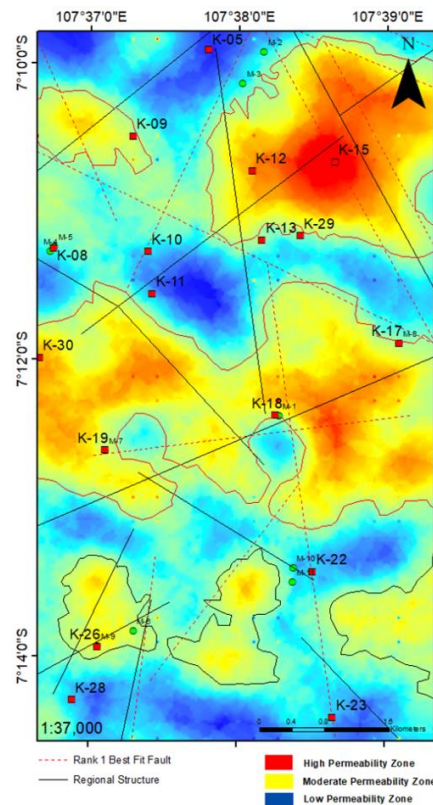
3.3 リニアメントに基づく断裂系解析

地熱資源は貯留層の断裂に胚胎することが一般的であるとともに、透水性の高い断裂は熱水の上昇パスを形成するので、方向、密度、連続性、透水性などに関する断裂系の解明は重要である。広域的な断裂系の把握にリニアメントが以前より用いられてきた。そのケーススタディとして、インドネシア西ジャワ州のWayang Windu地熱地区を対象とした。リニアメントは数値地形モデル (DEM) の多方位陰影画像から抽出した。次にリニアメント分布密度を求め、これを副変数とした共変量逐次ガウスシミュレーションを適用し、限られた測点でのラドン濃度データから領域全体にわたる濃度分布推定を行った (Heriawan *et al.*, 2021)。これと Fuzzy Logic Approach により、地表下浅層部の透水性を区分した (第2図)。比較的透水性の高いエリアは数カ所に大別でき、貯留層の断裂系卓越部と熱水の上昇域を推定できるようになる。

3.4 地表変位の連続化による貯留層タイプの推定

熱源であるマグマ周辺の温度・圧力変化は微小な地形変化をもたらす。また、地表変位の大きさは貯留層空隙

内の主な流体がガス、あるいは熱水かにも依存する。地表変位は差分干渉 SAR 処理 (D-InSAR) によって明らかにできる。上記の Wayang Windu 地区を対象として、PS-InSAR を Sentinel 衛星データに適用した。PS とは、散乱強度やマイクロ波の位相特性が常に一定している地表物体を意味する。しかし、植生に覆われた範囲での PS の点数は少なく、地表変位を計測できる画素は点在する。これに地球統計学を適用することで、コヒーレンスが小さく干渉していない部分でも地表変位を連続的に推定できるようになった (Sabrian *et al.*, 2021)。対象地区では、北部は沈降、南部は隆起と変動のパターンが異なることがわかった。これは北部-蒸気卓越型、南部-熱水卓越型という貯留層中の流体相の相違に起因すると解釈した。



第2図 インドネシア西ジャワ州Wayang Windu地熱地区でのラドン濃度とリニアメント密度を用いた Fuzzy Logic Approach による浅層部の透水性推定分布。Kはラドン濃度測定点、丸は地熱兆候地、点線は高透水性断層(推定)、実線は広域断層を表す。

4. まとめ

地熱系での地質と地温分布、広域的な地表温度・熱水変質鉱物分布・断裂系分布・地表変位、熱水流動シミュレーションに数理・情報地質学が貢献できる例を述べた。これらの解明は地熱資源の利用促進に加えて、地殻の構造や変動などに関する理解の深化に役立つと考えられる。

文献

- Heriawan, M.N., Syafi'i, A. A., Saepuloh, A., Kubo, T., and Koike, K. (2021) *Natural Resources Research*, vol. 30, pp. 2989–3015.
- Hoang, N. T. and Koike, K. (2017) *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 133, pp. 157–173.
- Ishitsuka, K., Kobayashi, Y., Watanabe, N. *et al.* (2021) *Natural Resources Research*, vol. 30, pp. 3289–3314.
- Koike, K., Matsuda, S., and Gu, B. (2001) *Mathematical Geology*, vol. 33, pp. 421–448.
- Sabrian, P. G., Saepuloh, A., Kashiwaya, K., and Koike, K. (2021) *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 416: 107272.
- Tian, B., Wang, L., Kashiwaya, K., and Koike, K. (2015) *Remote Sensing*, vol. 7, pp. 2647–2667.
- Tomita, S. A., Koike, K., Goto, T.-N., and Suzuki, K. (2020) *Geophysical Research Letters*, vol. 47, no. 20, e2020GL088681.

傾斜方位一傾斜量合成図を用いた数値標高モデルの超解像

升本 眞二*・水落 啓太**・野々垣 進***・根本 達也****

Super-Resolution of Digital Elevation Model using Aspect-Slope Image

Shinji Masumoto*, Keita Mizuochi**, Susumu Nonogaki*** and Tatsuya Nemoto****

* 大阪市立大学名誉教授 Professor Emeritus of Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan. E-mail: masumoto@omu.ac.jp

** 大阪市立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

*** 国立研究開発法人産業技術総合研究所 Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan.

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

キーワード : 数値標高モデル, 超解像, 傾斜量, 傾斜方位, 深層学習

Key words : Digital Elevation Model, Super-resolution, Slope, Aspect, Deep learning

1. はじめに

近年, 地球科学分野の基本情報である数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM) の深層学習による超解像技術を用いた高分解能化が試みられている (Chen *et al.*, 2016 ; 日高ほか, 2021 など)。升本ほか(2021)は, DEM から求めた傾斜方位と傾斜量を HSV 合成画像した画像に超解像 SRCNN (Dong *et al.*, 2014) を適応し, 面推定プログラムを用いて, DEM の分解能を 5 m から 1 m へと高分解能化する方法を開発した。また, この方法が超解像を DEM へ適応するより, 良い結果が得られることを示した。本研究では, この応用として, CAE (Convolutional Auto Encoder ; Mao *et al.* 2016 など) を用いた結果について述べる。

2. 高分解能化手法と利用データ

CAE はエンコーダ (圧縮する符号器関数) とデコーダ (復元する再構成器関数) からなる。本研究では 6 層のエンコーダと 6 層のデコーダ, および画像のボケを防ぐ 3 つのスキップコネクションでモデルを構成した。なお, 開発環境には TensorFlow, Keras, および Python を用いた。

データや超解像の流れは, 升本ほか(2021)と基本的に同じであるが簡単に述べる。データには 1 m メッシュの「兵庫県_全域 DEM (2010 年度~2018 年度) (兵庫県, 2020)」の兵庫県中部の 20×20 km の範囲の DEM を 200×200 m に分割した分解能 1 m の高分解能 DEM と, 分解能 5 m に間引いた低分解能 DEM とのセットを 10000 セット作成して用いた。学習用に 7200 セット, 検証用に 1800 セット, 残りを評価用とした。DEM の高分解能化の流れを第 1 図に示す。

学習モデルの構築は, つぎの 3 つのステップで行う。

1. 分解能 1 m の DEM と分解能 5 m の DEM をリサイズ (Bicubic 法) して 1 m にした DEM から, それぞれ傾斜方位と傾斜量を求める。
2. 傾斜方位を H (色相), 傾斜量を V (明度) に割当て, S (彩

度) を固定して HSV 色空間モデルを作成し, RGB に変換して傾斜方位一傾斜量合成図を作成する。

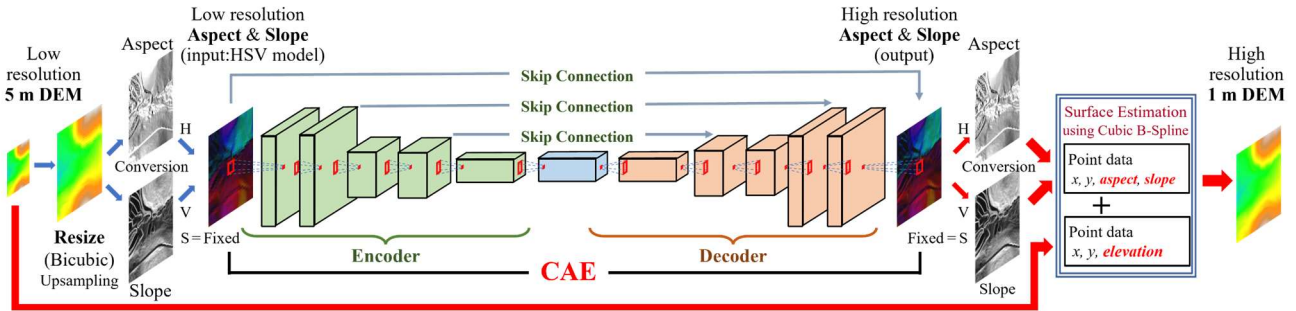
3. これらを用いて CAE で学習し, 学習モデルを構築する。学習は損失関数 (平均二乗誤差) や PSNR (ピーク信号対雑音比) などで最適化した。

高分解能 DEM の推定は, つぎの 4 つのステップで行う。

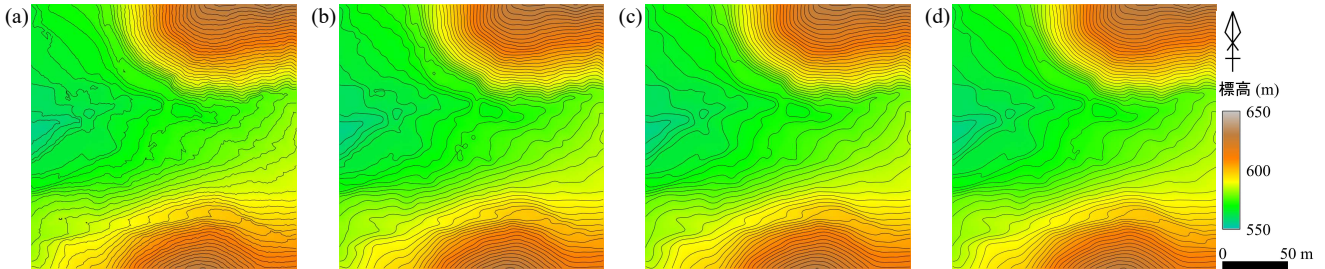
1. 学習モデルに分解能 5 m の DEM を傾斜方位一傾斜量合成図に変換して入力し, 高分解能化した分解能 1 m の傾斜方位一傾斜量合成図を得る。
2. 傾斜方位一傾斜量合成図から各座標での傾斜方位と傾斜量を求め, 地点データを作成する。
3. 5m 分解能の DEM の標高値から各座標での地点データを作成する。
4. 2 種類の地点データから, BS-Horizon (野々垣ほか, 2008) の Visual Basic 版である Terramod-BS (坂本ほか, 2012) を用いて 1 m の DEM を推定する。

3. 結果

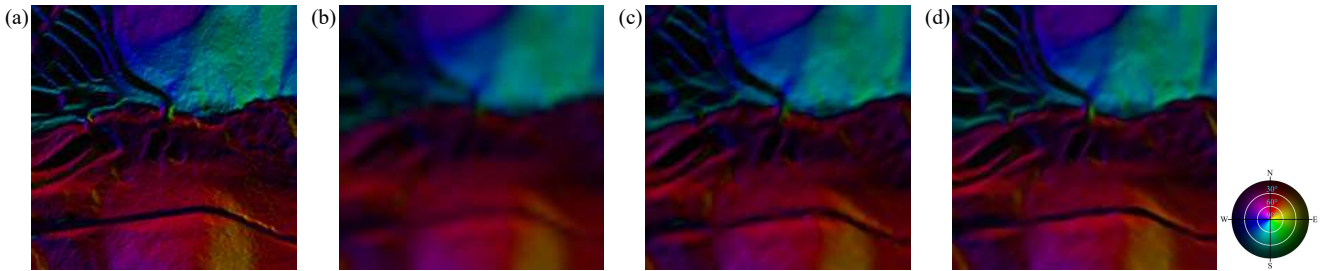
高分解能化のデータと結果の例の等高線図を第 2 図に示す。第 2 図 (a) は原データの分解能 1 m の DEM, (b) は分解能 5 m の DEM を分解能 1 m に合わせるために Bicubic 補間した DEM, (c) は SRCNN による高分解能化の結果, (d) は CAE による結果である。超解像に用いた傾斜方位一傾斜量合成図を第 3 図に示す。第 3 図 (a) は原データ, (b) は Bicubic 補間, (c) は SRCNN による結果, (d) は CAE による結果である。これらの結果を, GRASS を用いて 3 次元表示した例を第 4 図に示す。また, 第 1 表に補間を含めた高分解能化の評価結果を示す。これらの結果から, 両者とも崖などの地形的特徴は良く再現できており, CAE の方が, 道路や田などの平面的な連続性が高く, 段差も明瞭であることがわかる。また, 誤差は補間と超解像では, SRCNN で標高を高分解能化した結果を除くと, 大きな差ではないが, 全体的に超解像の結果が良く, CAE がより良いことがわかる。



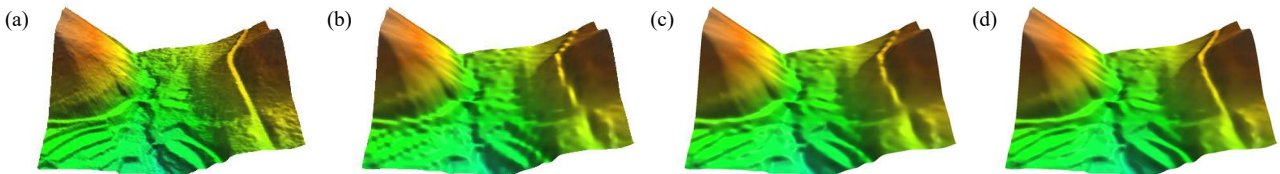
第1図 傾斜方位-傾斜量合成図を用いた CAE による DEM の高分解能化の流れ



第2図 高分解能化の例(等高線間隔は2m). (a)分解能1m, (b)Bicubic補間, (c)SRCNNの結果, (d)CAEの結果.



第3図 傾斜方位-傾斜量合成図の例. (a)分解能1m, (b)Bicubic補間, (c)SRCNNの結果, (d)CAEの結果.



第4図 3次元表示の例. (a)分解能1m, (b)Bicubic補間, (c)SRCNNの結果, (d)CAEの結果.

第1表 高分解能化の評価

		補間			超解像		
		Bilinear	Bicubic	BS-Horizon	SRCNN		CAE
					標高	傾斜方位-量	傾斜方位-量
差 (m)	max	1.98	1.87	1.82	1.80	1.86	1.66
	min	-1.96	-1.84	-1.80	-2.27	-1.62	-1.77
RMSE(m)		0.283	0.252	0.248	0.451	0.239	0.219
PSNR(dB)		77.00	77.99	0.25	0.451	0.239	0.219
SSIM		0.904	0.910	0.911	0.887	0.922	0.931

4. おわりに

傾斜方位-傾斜量合成図を超解像に用いることで、地形の平坦な部分や急な変化などの特徴を表す高分解能化を行えることがわかった。今後、SRGANなどの方法での検討も必要である。本研究はJSPS 科研費 19K04004, 21K11905 の助成を受けたものである。

文 献

Chen, Z., Wang, X., Xu, Z. and Wenguang, H. (2016) Convolutional neural network based DEM super resolution. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

Information Sciences, vol. XLI-B3, pp. 247-250.
 Dong, C., Loy, C. C., He, K. and Tang, X. (2014) Learning a deep convolutional network for image super-resolution. In: Fleet, D., Pajdla, T., Schiele, B. and Tuytelaars, T. (eds) *Computer Vision – ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, vol. 8692, pp. 184-199.
 日高弥子・松岡大祐・桑谷 立・金子純二・笠谷貴史・木戸ゆかり・石川洋一・木川栄一(2021)深層学習による海底地形図超解像の手法比較と検証. *情報地質*, vol. 32, no. 1, pp. 3-13.
 兵庫県(2020) 兵庫県 全域 DEM (2010 年度~2018 年度). <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2010-2018-hyogo-geo-dem> (2022 年 5 月 19 日)
 Mao, X., Shen, C. and Yang, Y. (2016) Image restoration using very deep convolutional encoder-decoder networks with symmetric skip connections. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)* 29, pp. 2802-2810.
 升本真二・水落啓太・野々垣進・根本達也(2021)超解像技術による傾斜方位と傾斜量を用いた DEM の高分解能化. 第 32 回日本情報地質学会講演要旨集, pp. 21-22.
 野々垣進・升本真二・塩野清治(2008)3 次 B-スプラインを用いた地層境界面の推定. *情報地質*, vol. 19, no. 2, pp. 61-77.
 坂本正徳・野々垣進・升本真二(2012)Terramod-BS: BS-Horizon を組み込んだ地層境界面推定・表示 Visual Basic プログラム. *情報地質*, vol. 23, no. 4, pp. 169-178.

スパース辞書学習による海底地形図超解像・特徴抽出

油谷拓^{1,2}、余野央行³、桑谷立¹、松岡大祐²、金子純二⁴、日高弥子²、笠谷貴史⁴、木戸ゆかり⁵、石川洋一²、植木俊明³、木川栄一^{2,6}

Sparse dictionary learning for super-resolution and feature extraction of ocean bathymetric maps

Taku Yutani^{1,2}, Oak Yono³, Tatsu Kuwatani¹, Daisuke Matsuoka², Junji Kaneko⁴, Mitsuko Hidaka², Takafumi Kasaya⁴, Yukari Kido⁵, Yoichi Ishikawa², Toshiaki Ueki³ and Eiichi Kikawa^{2,6}

- 1: 国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門 Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan. E-mail: taku_yutani@jamstec.go.jp
- 2: 国立研究開発法人海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 Research Institute for Value-Added-Information Generation (VAiG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3173-25 Showa-machi, Isogo-ku, Yokohama 236-0001, Japan.
- 3: 株式会社海洋先端技術研究所 Ocean High Technology Institute, Inc., 2-29-12 Honcho, Nakano-ku, Tokyo 164-0012, Japan.
- 4: 国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋機能利用部門 Research Institute for Marine Resources Utilization, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan.
- 5: 国立研究開発法人海洋研究開発機構 研究プラットフォーム運用開発部門 Institute for Marine-Earth Exploration and Engineering (MarE3), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan.
- 6: いであ株式会社国土環境研究所 IDEA Consultants, Inc., 2-2-2 Hayabuchi, Tsuzuki-ku, Yokohama 224-0025, Japan.

キーワード：海底地形図，超解像，辞書学習，スパースモデリング，機械学習

Key words: bathymetric map, super-resolution, dictionary learning, sparse modelling, machine learning

1. はじめに

海底地形は防災や資源探査，船舶の安全航行，海難救助，海洋生物のモニタリングなどをする上で重要な一次情報となる。しかしながら観測の困難さゆえ，詳細な海底地形図のデータ量は少ない。そのため，限られたデータを有効に活用し，高解像度の海底地形図を作成するための手法の開発が不可欠である。深層学習などの機械学習的手法を用いた海底地形図の超解像は近年試みられてきている（例えば伊藤，2019; Sonogashira et al., 2020; 日高ほか，2021 など）。本研究では，深層学習より少量な教師データからの学習が可能とされる辞書学習とスパースコーディングを利用した超解像手法（Sparse coding super-resolution, ScSR, Yang et al., 2010）を海底地形図へ適用できるよう改良し，海底地形図の超解像および特徴抽出に成功したので，ここに報告する（Yutani et al, 2022）。

2. 手法・データ

辞書学習を用いた超解像手法およびその検証に用いた沖縄トラフ海域の水深データについて説明する。

一般に二次元画像の小領域をパッチとして切り出すと，それは少数の単純な模様（基底）の線形和で近似することが可能である。充分量の基底を格納したデータセットを辞書と呼ぶ。一般に辞書学習による超解像は，「辞書学習」と「再構成」の2段階に分けられる（第1図）。「辞書学習」では

高・低解像度の画像のセットを学習データ（ \tilde{X}_0, \tilde{Y}_0 ）とし，高・低解像度の基底を格納した辞書（ D_H, D_L ）を学習する。「再構成」では低解像画像 Y_0 を低解像辞書 D_L を用いて近似し（スパースコーディング），

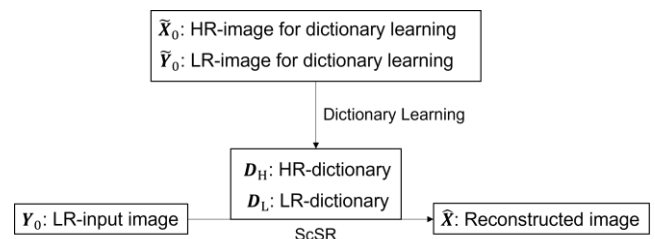
$$Y_0 \approx D_L \alpha \quad (1)$$

そこで得られた表現行列 α と高解像辞書 D_H を用いて低解像入力データ Y_0 に対応する高解像画像 \hat{X} を得る。

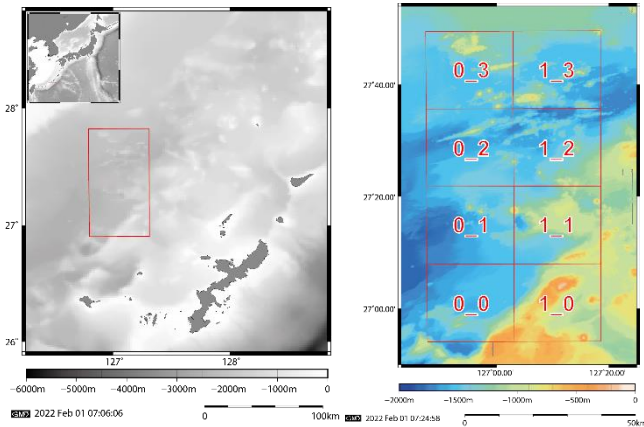
$$\hat{X} \approx D_H \alpha \quad (2)$$

本研究ではリニアメント構造等の海底地形に特徴的な情報を適切に学習するために，前処理として低周波成分の除去を施した学習データを用いて辞書学習を行った。

提案手法による超解像の効果を検証するために，沖縄トラフ中部の，伊平屋小海嶺や小海丘，断層群が確認されてい



第1図 ScSR（提案手法）の流れ。HR: 高解像，LR: 低解像。



第2図 中部沖縄トラフの海底地形図. 海域 0_0 で学習した辞書で海域 0_2 を再構成した.

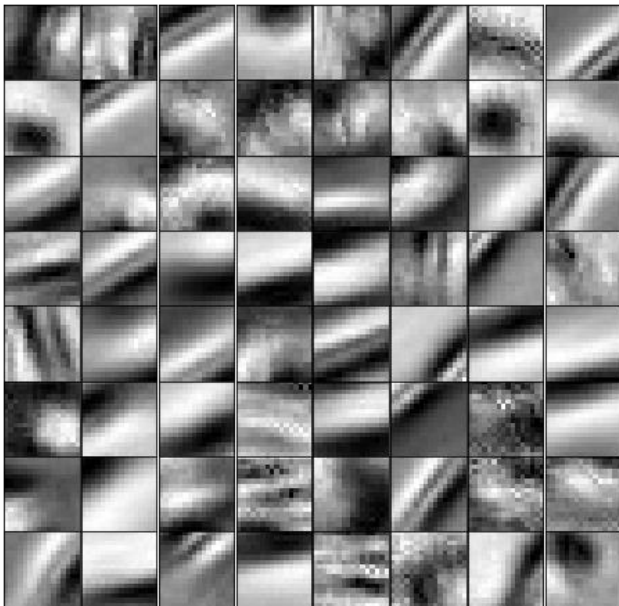
る海域 (Kasaya et al., 2015) の水深データを使用した (第2図).

本海域のメッシュ幅 50 m のグリッドデータを高解像画像, 同 100 m のものを低解像画像とし, 辞書学習, 再構成を行った. 本稿では海域 0_0 で学習した辞書を用いて海域 0_2 で再構成, 超解像を行ったものについて述べる. なお, いずれの海域も 25.6 km 四方である.

3. 結果・考察

3.1 辞書学習

海域 0_0 の水深データより抽出された高周波成分から学習された高解像基底の一部を第 3 図に示す. 学習海域の大

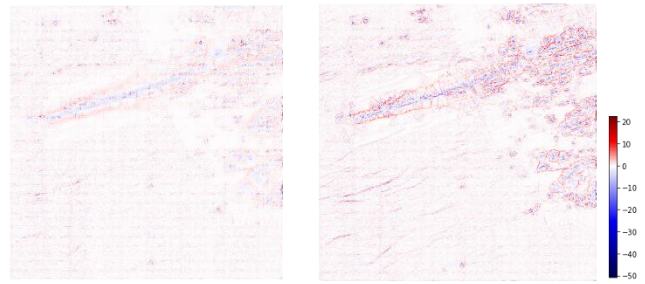


第3図 海域 0_0 で学習した高解像基底の一部. 一つの基底は 800m 四方である.

域的な地形の情報を含む低周波成分を除去したものを学習データとしたため, 数十~数百メートルスケールの地形的特徴が基底内に認められる. これらは尾根や谷, 小海丘などに相当するものであると考えることが可能である.

3.2 再構成

第3図に示されたような高解像辞書 D_H を用いて海域 0_2 の 100 m グリッドデータを 50 m グリッドに超解像し, 正



第4図 海域 0_2 における正解画像と超解像画像の差分画像. ScSR, 提案手法 (左) およびバイキュービック補間法, 従来手法 (右).

解画像との二乗平均平方根誤差 (RMSE) を算出したところ, バイキュービック補間と比較して 32.5%改善した. 提案手法および従来手法と正解画像との差分画像を第4図に示す. 従来手法と比較して, 提案手法は全体的に誤差が小さくなっているのもさることながら, 特に断層や海丘等の地形学上重要な特徴を持つ領域における超解像の性能が著しく向上していることが分かる. これは, 学習された辞書から地形的特徴に応じた適切な基底を選択して再構成をするという本手法の超解像過程の強みが生かされた結果であると考えられる.

4. おわりに

本研究では, ScSR を海底地形図に適用できるよう改良し, 超解像を行った. 辞書学習の前処理として海底地形画像を, 地形の起伏の情報に特化した高周波成分と, 大域的な情報を捉える低周波成分に分離し, 高周波成分に対して ScSR を実装した. 本手法を沖縄本島中部トラフの地図に適用したところ, 学習データ量は入力データと同じ面積相当でしかないにもかかわらず, RMSE はバイキュービック補間法と比較し 30%程度の改善が見られた. スパース辞書学習による基底抽出と再構成により, 超解像と地球科学的特徴抽出を同時に行うことができるということが示された.

文 献

- 日高弥子, 松岡大祐, 桑谷立, 金子純二, 笠谷貴史, 木戸ゆかり, ... & 木川栄一. (2021). 深層学習による海底地形図超解像の手法比較と検証. *情報地質*, 32(1), 3-13.
- 伊藤喜代志. (2019). 機械学習による超解像技術を活用した詳細な深海海底地形図の作成. *日本水産工学会誌*, 56(1), 47-50.
- Kasaya, T., Machiyama, H., Kitada, K., & Nakamura, K. (2015). Trial exploration for hydrothermal activity using acoustic measurements at the North Iheya Knoll. *Geochemical Journal*, 49(6), 597-602.
- Sonogashira, M., Shonai, M., & Iiyama, M. (2020). High-resolution bathymetry by deep-learning-based image superresolution. *Plos one*, 15(7), e0235487.
- Yang, J., Wright, J., Huang, T. S., & Ma, Y. (2010). Image super-resolution via sparse representation. *IEEE transactions on image processing*, 19(11), 2861-2873.
- Yutani, T., Yono, O., Kuwatani, T., Matsuoka, D., Kaneko, J., Hidaka, M., ... & Kikawa, E. (2022). Super-Resolution and Feature Extraction for Ocean Bathymetric Maps Using Sparse Coding. *Sensors*, 22(9), 3198.

マルチモーダル深層学習を用いた深層崩壊発生箇所における 山体重力変形の特徴の検証

菊地 輝行*・西山 哲**

Verification of deep-seated gravitational slope deformations at the location of Deep-seated landslide using multimodal deep learning.

Teruyuki Kikuchi * and Satoshi Nishiyama **

* J-POWER 設計コンサルタント J-POWER Design Co., Ltd., Sotokanda 2-16-2, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0021, kikuchi-t@jpde.co.jp

** 岡山大学学術研究院 Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University, Tsushimanaka 3-1-1, Kita-ku, Okayama 700-8530.

キーワード： 深層学習, 深層崩壊, 山体重力変形

Key words: Deep learning, Landslide, Deep-seated gravitational slope deformations

1. はじめに

深層崩壊発生箇所を予察して災害を軽減するためには、過去の崩壊事例を理解し、同じ事象が発生した場合に備える事が重要である。崩壊の挙動は、発生箇所の地質・地形の性状、降雨特性や地すべりの活動性などにより変化するため、条件を統一する議論は困難で、ケーススタディを蓄積することが有効である。

今回の深層学習の目的は、深層崩壊特有の山体重力変形を自動認識する可能性を見極めることである。仮説として、“崩壊した箇所が類似した地形を有しているとすれば、その地形は同規模の条件で次回崩壊する”とした場合、発生した崩壊発生前の地形を多数学び、周辺において同じ地形を見つけることで、次回同じ事象が発生した場合に崩壊する箇所を予測することができる。そのために、以下の検討を行った。

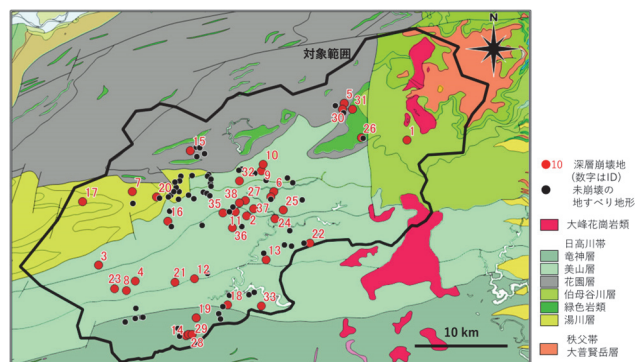
- 1) 崩壊事例を効果的に学習するため、広域の同一地質特性を持つデータセットを用いる
- 2) 画像解析に実績のある深層学習手法である畳み込みニューラルネット (CNN: convolutional neural network) を用いて深層崩壊発生箇所に共有する特性を新しい知見として提供する
- 3) 地質技術者の地形判読は多く視点を判断していることからデータセットには複数の影響要素 (Influence Factor) を使用

2. 崩壊発生箇所とデータセット

2011年9月2日から5日にかけて西日本を横断した台風第12号は、紀伊山地に2000mmを超える降雨をもたらし、Chigira et al (2013)によれば50箇所以上の深層崩壊が発生した。この地域の地質分布は、紀伊半島西部の四万十帯であり、御坊―萩構造線によって、白亜系の付加コンプレックスからなる北帯と主に古第三系の付加コンプレックスからなる南帯に区分される。本研究の対象となる十津川上流域は、北帯に相当し日高川帯と呼ばれ、ENE-WSW方向に帯状配

列をなす5つの層―北から花園層、湯川層、美山層、竜神層、丹生ノ川層に区分される。

崩壊の発生箇所は、奈良県災害データベース(2012)で確認した1,000m²以上の崩壊面積を有する38箇所である。この領域は崩壊(y0)とカテゴリ分けした。次に、崩壊発生箇所の周縁には、非崩壊でありながら山体重力変形の地形的特徴を有する箇所が認められた。この地形を非崩壊(y1)とカテゴリ分けし63箇所を領域抽出した。この領域外のカテゴリとして崩壊に関係しない地形(y2)を設定し、合計3つのカテゴリとした。



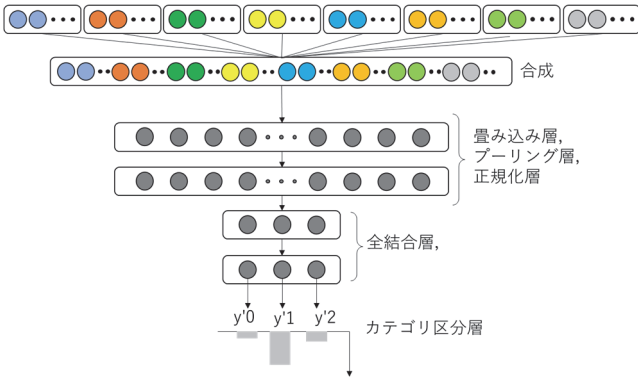
第1図 調査位置と教師データに用いた崩壊・非崩壊箇所 (産総研シームレス地質図に追記)

3. 深層学習解析手法

3.1 畳み込みニューラルネット (CNN)

山体重力変形を対象とした深層学習による画像認識は、多数ある画像の中から正解を選ぶような単純な判別ではない。複雑な履歴を持つ地表面の特徴量の違いは、一枚の画像では判断できない可能性が有る。そこで本研究は、同じ座標を有する画像に対して異なる解析図、同じ地点で多数の影響因子を用いた。(第2図)。この手法は、マルチモーダル手法と呼ばれる。

教師データ：影響因子（8種類）：同一座標を有する50×50pixelのRGB画像
カテゴリはy0,y1,y2の3区分



第 2 図 マルチモーダル手法による畳み込みニューラルネット (CNN) の概念図

3.2 教師データの作成とモデルの構築

本研究では、山体重力変形を表現可能な画像の種類を影響因子とし、以下の 8 種類からなる。①傾斜量、②固有値比、③曲率、④地上開度、⑤地下開度、⑥地形的湿潤指数、⑦ウェーブレット、⑧標高である。これらのラスターデータは、北東角を原点として 50×50pixel の jpg 画像 (以降タイルと呼ぶ) に切り分けた。50pixel は 50m に相当し、微地形を判読するうえで最低限の範囲を含んでいると判断した。各タイルは、90° に回転させたものと、鏡像反転させたものも作成した。最終的な崩壊(y0)タイルは 20,651、非崩壊(y1)、これら以外(y2)についても同様の処理を行い、タイル数は、4,041 枚、12,293 枚となり、合計 36,985 枚を使用した。

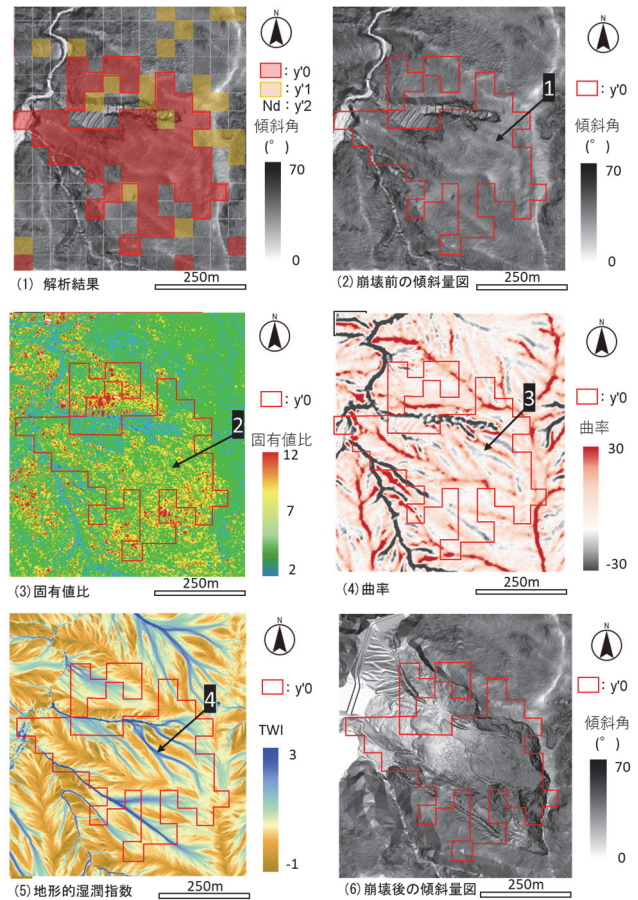
モデル構築方法は、ホールドアウト法を用いた。これは Kohavi (1995)によるモデル構築手法で訓練と検証からなる。訓練では、タイルの 7 割を用いて、重みづけパラメータを作成しながらモデルの構築を行う。次に検証では、タイルの残り 3 割を使い検証する。すなわち、新たに与えたタイルが正しく判断されるか模擬試験を行いながら各パラメータおよび層構造の再構築を行う。こうして作成されたモデルは学習済みモデルとなる。

4. 解析結果

学習済みモデルの評価は、深層崩壊の範囲が確実に選択され、かつその選択範囲の情報が、山体重力変形に関係する必要がある。これが有意であることが確認できた場合には、将来的な予測の基礎情報として活用できる。崩壊(y0)の事例として第 3 図に長殿谷深層崩壊を示す。Chigira et al(2013)により、崩壊前の画像について深層崩壊発生箇所の中央から上端部で円弧状の滑落崖が発達していること、斜面下部のガリ形成、凸の眉毛状の小断面の形成、が前兆現象すなわち山体重力変形として確認されている (第 3 図(1)参照)。

この解析結果のうち、崩壊(y0)と判定された箇所には、以下の特徴がある。第 3 図(2)傾斜量は、図中矢印 1 の箇所、崩壊中央から北側において、傾斜 30~40 度前後が主体で存在する。第 3 図(3)固有値比は、崩壊中央から北側 (図中矢印 2) を中心に、7~9 を示す。これは地表面のばらつきは小さく、傾斜地ながらも平坦な部分が多く占めている。第 3 図(4)曲率は、図中矢印 3 の箇所、曲率が変化して緩やかな谷を形成している。第 3 図(5)地形的湿潤指数は、図中矢印 4 に示すようにまとまった集水域が存在することを示す。しかし、ガリの形成は認められない。最後に示す第 3 図(6)崩壊後の傾斜量図は、崩壊した箇所を示す。概ね(y'0)の範囲

は崩壊と判定できている。紙面の都合上詳細を記載できないが、このような検討を複数箇所を実施し、共有できる事項について取りまとめを行った。



第 3 図 長殿谷深層崩壊の拡大図、特徴的な影響因子と崩壊予想範囲を図示

5. まとめ

崩壊(y'0)と判定された箇所は、傾斜量 40° 未満の緩傾斜であるが連続する明瞭な滑落崖を有していないこと、固有値比は 7 以上の緩やかな凸状地形が選択されている。曲率では、やや起伏があり、ガリに至っていないこと、地形的湿潤密度では、まとまった集水域を有していること、このような共通の特徴を有している傾向が認められた。今後は崩壊の発生していない未知領域を用いた分析を展開し適用性の評価を行う。

文 献

- Chigira M, Tsou CY, Matsushi Y, Hiraishi N, Matsuzawa M (2013) Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. *Geomorphology* 201(1):479–493.
- Kohavi R (1995) A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Ijcai* 14(2):1137–1145.
- 奈良県県土マネジメント部砂防・災害対策課：奈良県紀伊半島大水害 大規模土砂災害アーカイブ、ホームページ
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2007) 20 万分の 1 日本シームレス地質図データベース 2007 年 5 月 12 日版。産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。

地下汚染分布評価における地盤水理パラメータの逆解析手法の適用性検討

高井静霞*,**・島田太郎*・武田聖司*・小池克明**

Applicability of hydraulic parameter inversion for groundwater contaminant plume estimation

Shizuka Takai*, Taro Shimada*, Seiji Takeda* and Katsuaki Koike**

* 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195
 ** 京都大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto University Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540

キーワード: 統計的逆解析, 透水量係数, 汚染濃度
 Key words: Geostatistical inversion, Transmissivity, Contaminant concentration

1. はじめに

放射性核種や化学物質による汚染が地下で発生した場合、適切かつ効率的な環境修復のため、汚染濃度分布の高精度推定が不可欠である。その放出時刻歴が明らかでない場合にも汚染分布を推定できる手法として、地下水流動を考慮した地球統計学的手法が提案されているが (Shlomi and Michalak, 2007)、本手法は水理地質構造を既知とする。水理地質構造の把握は汚染の広がりを予測し、適切な対策を策定するのに重要だが、限られた原位置データからの水理地質構造の推定結果には一般に不確実性が含まれる。これに対し、経時的な測定データを用いた水理地質構造の逆解析手法が提案されており、揚水/注水試験とトレーサー試験のデータを組み合わせることで不均質な透水量係数分布を精度良く推定できる可能性が指摘されている (Lee and Kitanidis, 2014)。しかし汚染が生じている地盤での広範囲でのトレーサー試験の実施は、場の擾乱につながるため難しいことが想定される。一方汚染濃度に対しては、モニタリングのため経時的なデータが取得されている可能性がある。そこで本研究では、揚水/注水試験と汚染濃度の経時変化を組み合わせ、透水量係数分布と地下汚染分布の同時推定を行う手法を検討し、仮想的なモデルを用いて本手法により汚染分布推定精度が向上することを実証した。

2. 手法

2.1 評価の流れ

本手法の特徴は透水量係数分布と汚染分布を組み合わせ、これらを統計的逆解析で同時に推定することにある。そのため領域内の複数点で、汚染分布の経時変化と揚水/注水試験に伴う地下水位 (定常状態) のデータが得られていると仮定し、第1図に示すような反復計算を行った。



第1図 汚染分布と水理地質構造の同時推定の流れ

2.2 地下水流動を考慮した地球統計学的汚染分布推定

本手法では汚染源が既知で、地下水の定常流れを前提に、限られた測定濃度 z_{c0}^* から未知の放出量 s を次式で逆解析し、これを用いて領域全体の初期濃度分布を推定する。

$$z_{c0}^* = H_s^* s + v_s, \quad v_s \sim N(\mathbf{0}, R_s) \quad (1)$$

$$s = X_s \beta_s + \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s \sim N(\mathbf{0}, Q_s(\theta_s)) \quad (2)$$

ここで H^* は感度行列、 v は誤差を表す。各変数が平均 0 の正規分布 N に従うと仮定すると、放出量は事後確率分布

$$p(s|z_{c0}^*) \propto p(z_{c0}^*|s)p(s) \quad (3)$$

を最大とする s として求められる。以下では、 $R = \sigma_{R_s}^2 I$ ($\sigma_{R_s}^2$ は測定誤差分散、 I は単位行列) とし、ドリフト X_s と共分散 Q_s は時間 t (ms は時間方向の分割数) の関数で設定した。

$$X_s = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ t_1 & \dots & t_{ms} \end{bmatrix}^T, \quad Q_s(t_i, t_j|\theta_s) = \theta_s |t_i - t_j|^3 \quad (4)$$

2.3 主成分地球統計的逆解析による透水量係数分布推定

地下水流動・物質移行解析では、測定値 $z^* = [z_h^* \ z_c^*]^T$ (z_h^* : 水位、 z_c^* : 汚染濃度) は水理パラメータ r (本検討では透水量係数) に対する順解析 h_r の結果である。 r の微小な変化に対しては、2.2 と同様に

$$z^* = h_r(r) + v_r, \quad h_r(r) \sim H_r^* r, \quad v_r \sim N(\mathbf{0}, R_r) \quad (5)$$

$$r = X_r \beta_r + \varepsilon_r, \quad \varepsilon_r \sim N(\mathbf{0}, Q_r(\theta_r)) \quad (6)$$

と線形近似でき、水理パラメータは事後確率分布

$$p(r|z^*) \propto p(z^*|r)p(r) \quad (7)$$

を最大とする r として求められる。以下では、 $R_r = \sigma_{R_r}^2 I$ ($\sigma_{R_r}^2$ は測定誤差分散)、ドリフト X_r ・共分散 Q_r は次式の空間 x (mr はメッシュ分割数) の関数で設定した。

$$X_r = [1 \ \dots \ 1]^T, \quad Q_r(x_i, x_j|\theta_r) = \theta_r |x_i - x_j|^3 \equiv \theta_r h^3 \quad (8)$$

この解析は一般に、①共分散 Q_r の影響でメッシュ数に応じて解析負荷が増大し、② H_r の計算には順解析コードの書き換えが必要となるが、PCGA (Principal component geostatistical analysis) はこれらを以下で解決する：

①共分散を低ランク近似する。以下、 Q_{rK} は $K (\leq mr)$ 次元で近似した Q_r 、 λ_i は固有値、 V_i は固有ベクトルを示す。

$$Q_r \approx Q_{rK} = \sum_{i=1}^K \zeta_i \zeta_i^T, \quad \zeta_i = \sqrt{\lambda_i} V_i \quad (9)$$

② H_r に関連する項は直接 H_r を計算せず、テイラー展開と

順解析により求める。例えば、 $H_r \bar{r}$ は次式で近似する。

$$H_r \bar{r} \approx \frac{1}{\delta} [h_r(\bar{r} + \delta \bar{r}) - h_r(\bar{r})] \quad (10)$$

ここで、 \bar{r} は r の推定値、 δ は微小係数を表す。

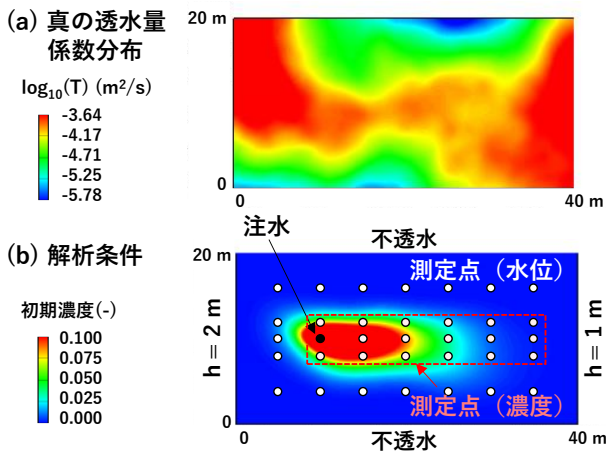
3. 仮想モデルに対する適用性検討

3.1 評価条件

本検討では2次元仮想モデル(40×20 m²)を対象とする。まず透水量係数分布の真値を第2図(a)のように仮定し、その空間的相関($Q_r = 0.002h^3$: h は2点間の距離)は既知とした。地下水流動解析用に側方の水位を固定し、領域西部で 1.5×10^{-4} m²/sを注水し、35点で水位が測定されると仮定した。汚染物質は収着・減衰がないものとし、初期の汚染分布(第2図(b))に対し、17点で半月ごとに計12回濃度が測定されると仮定した。水理地質構造推定では、濃度測定値を次式の平均移行時間 \bar{t} に置き換え、これを逆解析に用いた。

$$\bar{t}(x) = \frac{\int_0^\infty tz_c(x, t) dt}{\int_0^\infty z_c(x, t) dt} \quad (11)$$

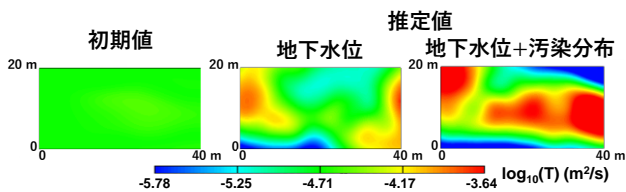
ここで、 t は測定時刻を表す。水理地質構造の逆解析において、透水量係数分布の分割数 mr は5000(1メッシュ:0.4×0.4 m²)であり、 $K = 96$ として低ランク近似した。浸透流・物質移行解析には3D-SEEPを用いた。測定誤差 σ_{Rr} は、地下水位は0.01 m、濃度は $0.1\bar{t}(x)$ とした。また微小係数 δ は、地下水位に対しては 1×10^{-2} 、濃度に対しては 1×10^{-4} とした。透水量係数分布の逆解析における初期値は、 $1 \times 10^{-4.5}$ m²/s(領域全体の平均値)での一様分布と設定した。



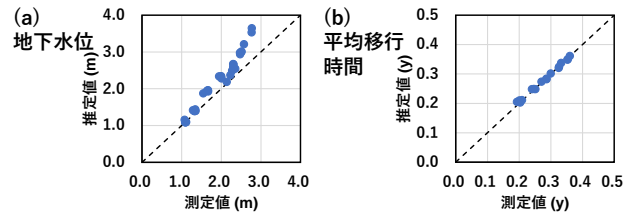
第2図 (a)透水量係数分布の真値と(b)解析条件

3.2 計算結果と考察

透水量係数の初期値分布と計算結果を第3図に示す。初期値(一様分布)に対し、地下水位のみを用いて推定した場合、真の透水量係数分布と傾向は類似するが、これよりも小さい結果となった。しかし、これに汚染濃度を考慮した場合、汚染の移行範囲において推定精度が向上し、測定値を概ね再現できることが確かめられた(第4図)。

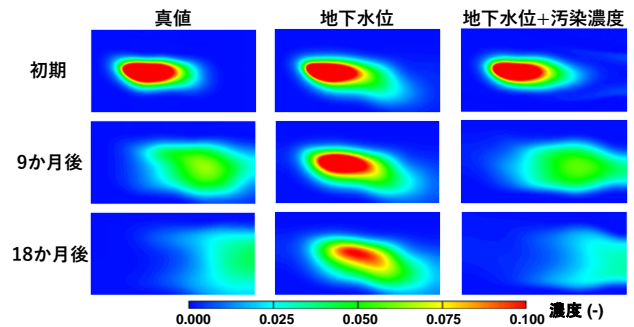


第3図 透水量係数分布の推定結果

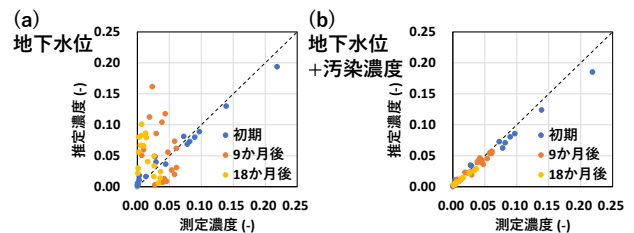


第4図 測定値の再現性 ((a)地下水位, (b)平均移行時間)

初期汚染分布評価と、これに基づく9, 18か月後の汚染分布の予測結果を第5図に示す。地下水位のみの推定でも、初期汚染分布は逆解析によって比較的良く再現できる。しかし汚染分布の予測まで対象とすると、真値との相関係数は地下水位のみでは0.52である一方、汚染濃度を考慮した場合は0.99であり(第6図)、地下水位と汚染濃度の同時推定により、推定精度が格段に向上することを実証できた。



第5図 汚染濃度分布の予測結果



第6図 汚染濃度分布予測の精度比較 (初期, 9, 18か月後)

4. まとめ

本研究では、揚水/注水試験と汚染濃度経時変化のデータを組み合わせ、透水量係数分布と汚染分布を同時推定する手法を検討した。汚染分布の仮想モデルでの評価から、測定値の不確かさが小さく、透水量係数分布の空間的相関構造を定義できれば、不均質な透水量係数分布と汚染濃度分布を精度良く推定できることを明らかにした。今後の課題は、事例検証を通して、測定誤差や季節変動等による非定常な地下水流動の影響を含め、本手法の適用性を評価することである。本研究は、原子力規制庁「令和3年度廃止措置リスク評価に関する検討」の成果の一部を含んでいる。

文献

- Shlomi, S. and Michalak, M. A. (2007) A geostatistical framework for incorporating transport information in estimating the distribution of a groundwater contaminant plume, *Water Resour. Res.*, vol. 43, pp. 1-12.
- Lee, J. and Kitanidis, P. K. (2014) Large-scale hydraulic tomography and joint inversion of head and tracer data using the Principal Component Geostatistical Approach (PCGA), *Water Resour. Res.*, vol. 50, pp. 5410-5427.

ボクセルモデルによる東青ヶ島カルデラ海底熱水活動域における船舶マルチビーム測深機のウォーターカラムデータの処理

金子純二*・笠谷貴史*

Processing of water column data of shipboard multibeam echo sounders in Higashi-Aogashima knoll caldera submarine hydrothermal activity by voxel model.

Junji Kaneko*, Takafumi Kasaya*

* 海洋研究開発機構海洋機能利用部門 Research Institute for Marine Resources Utilization, JAMSTEC, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa, 237-0061, Japan. E-mail: kaneko.j@jamstec.go.jp

キーワード：東青ヶ島海丘カルデラ, 海底熱水活動, ウォーターカラムデータ, ボクセル
Key words: Higashi-Aogashima knoll caldera, Hydrothermal activity, Water column data, Voxel model

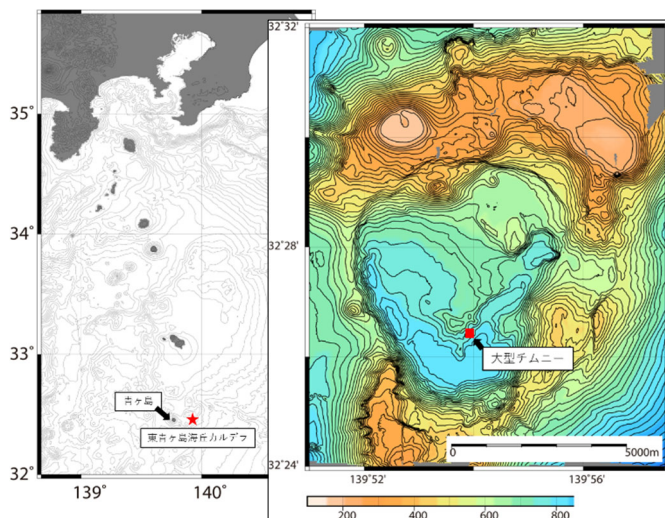
1. はじめに

陸域の資源探査では、人工衛星等を使用したりリモートセンシングによって広域探査が実施されるが、海域で行う海底熱水鉱床探査では、船舶や探査機などによって現場海域にて調査を実施する。2018年度まで実施された戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の次世代海洋資源調査技術(海のジパング)では「海底熱水鉱床調査技術プロトコル」として、地質学を基にした鉱床成因論によって調査候補海域(およそ数万 k m^2)を設定し、概査→準精査→精査と段階的に絞り込み調査を行い、最終的に鉱床開発の有望海域(およそ数千 k m^2)を選定する調査手順を策定した(木川編, 2018)。初期調査の概査は、船舶に搭載したマルチビーム測深機(Multibeam echo sounders: MBES)による海底地形調査ならびにブルーム調査(船舶ブルーム調査)が標準的であり、広範囲を低コストかつ効率的に掃海できることが特長である。

船舶ブルーム調査は、海底熱水活動を起源とし海底下から海中に向け噴出・上昇する熱水または二酸化炭素の液滴ブルームを、MBESの水柱部の音響散乱として検出し海底熱水活動の兆候を捉える調査であり(棚橋ほか, 2014)、国内では、中部沖縄トラフ海域を中心に成果を挙げている(Kasaya et al., 2015; Nakamura et al., 2015)。一方で、伊豆-小笠原弧の海底熱水活動域においては、これまで船舶ブルーム調査による水柱音響散乱の明確な報告事例はない。しかしながら、東青ヶ島海丘カルデラでは、自立型水中探査機(Autonomous underwater vehicle: AUV)「うらしま」に搭載されたMBES(seabat 7125, 発振周波数: 200kHz)による調査で、大型チムニーから噴出する熱水ブルームが観測されている(片瀬ほか, 2016)。伊豆-小笠原弧のブルームは中部沖縄トラフとは音響的性質が異なる可能性が考えられる。

2. 研究対象と現地調査

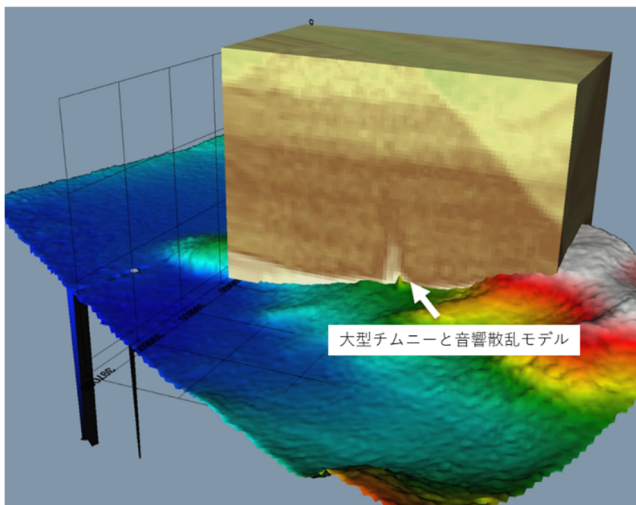
伊豆-小笠原弧の火山フロントに位置している東青ヶ島海丘カルデラは、東京の南方約350kmにある青ヶ島から東側に約12kmの海底に存在している(図1)。カルデラ床の範囲は、南北方向約7.2km、東西方向約4.5km、水深約600~800mであり、中央南部に高まり認められ、比高は約100m(水深700~800m)、中腹の水深750m付近に現在活動中の高さ約30mの大型チムニーが存在している(Iizasa et al., 2019)。通常、船舶に搭載される深海用MBESの発振周波数帯は12kHzが使用される。今回、我々は、海洋研究開発機構の海底広域研究船「かいめい」に搭載した高周波のMBES(EM712, 発振周波数: 40~100kHz可変)を用い、大型チムニーを1測線、北から南方向へ縦断し観測を行った。その結果、海底熱水活動域付近で音響散乱と考えられる現象を観測した。



第1図 東青ヶ島海丘カルデラと大型チムニー位置図。

3. ボクセルによるウォーターカラムデータ処理

「かいめい」の MBES で観測した音響散乱が海底熱水活動を起源とするプルームであるかを検証するため、ウォーターカラムデータ (Water column data : WCD) の解析手法を検討した。まず、デジタル収録した WCD を、地理空間情報を付与した XYZI (I は反射強度値) として出力し、水塊全体の 3 次元点群データを生成した。続いて、IDW 法に基づきボクセル間隔 10m, $IX \times IY \times IZ = 118 \times 94 \times 66$ セルの音響散乱ボクセルモデルを作成した (江藤ほか, 2008; 野々垣ほか, 2020)。散乱強度の閾値調整とレンダリングのうえ作成した Isosurface モデルを観察した。その結果、形状は活動中の大型チムニー周辺を基部とした高度約 190m (水深約 560m) の撓みをもつ円錐形状であること、音響的特性として、反射強度はモデル内部の基底部分が約 20 と高く、外側ならびに上方にかけて低くなりモデル境界面が約 10、境界海水が約 5~8 であることが判明した。



第2図 大型チムニー周辺の海底地形と音響散乱ボクセルモデル。

4. おわりに

船舶プルーム調査の WCD は画面再生や専用ソフトでの画像判別が一般的であるが、ボクセルによる水塊全体の処理を行った。ボクセルモデルの作成により、大容量点群データに比べ扱いやすさが向上した。また、3次元地理空間でのモデリングは、海底地形など地理情報との重ね合わせや反射強度の調整、定量的な解釈等により船舶プルーム調査の検証・評価方法として有効と考える。今後は、他海域での実践と他海底熱水活動域との対比が必要である。

また、今回、伊豆-小笠原弧において高周波 MBES による船舶プルーム調査を実施し、海底熱水活動を起源とするプルームによる音響散乱の可能性が示された。

文 献

木川栄一編 (2018) SIP『次世代海洋資源調査技術』(海のジパング計画) 海底熱水鉱床調査技術プロトコル (改訂版)。国立研究開発法人海洋研究開発機構時制大海洋資源調査技術研究プロジェクトチーム, pp.1-59.

棚橋道郎・上田哲士・近藤六夫・梶塚 (2014) 2周波数のマルチビームソナーで何がわかるか—新たな広域熱水探査ツールの可能性について—, 物理探査, 67 巻, 1 号, pp.17-24.

Kasaya, T., Machiyama, H., Kitada, K. and Nakamura, K. (2015) Trial exploration for hydrothermal activity using acoustic measurements at the North Iheya Knoll, *Geochemical Journal*, vol,49, no.6, pp.597-602.

Nakamura, K., Kawagucci, S., Kitada, K., Kumagai, H., Takai K., and Okino, K. (2015) Water column imaging with multibeam echo-sounding in the mid-Okinawa Trough: Implications for distribution of deep-sea hydrothermal vent sites and the cause of acoustic water column anomaly. *Geochemical Journal*, vol,49, no.6, pp.579-596.

片瀬冬樹・飯笹幸吉・水野勝紀・小島光博・斎藤悠太・月岡哲・大美賀忍・浅田昭 (2016) YK15-09 航海概要報告 音響探査を主として発見された東青ヶ島カルデラ海底熱水活動. *BlueEarth2016*, p15.

Kokichi Iizasa., Akira Asada., Katsunori Mizuno., Fuyuki Katase., Sangkyun Lee., Mitsuhiro Kojima., Nobuhiro Ogawa. (2019) Native gold and gold-rich sulfide deposits in a submarine basaltic caldera, Higashi-Aogashima hydrothermal field, Izu-Ogasawara frontal arc, Japan. *Mineralium Deposita*, 54:117-132.

江藤稚佳子・石原与四郎・田辺 晋・木村克己・中山俊雄 (2008), ボーリング柱状図資料を用いた N 値と岩相の 3 次元分布モデル—東京低地北部における沖積層の例—, *地質雑*, 114, 187-199.

野々垣進・升本眞二・根本達也・中澤努・中山俊雄 (2020), 大量のボーリングデータの位置情報に基づくボロノイ図を用いた岩相ボクセルモデルの作成, *情報地質*, 31, 1 号, p.3-10.

WebGL を用いたボーリングデータ 3次元可視化システムの開発

櫻井 健一*・米澤 剛**・根本 達也***・升本 眞二****

Development of a borehole data 3D visualization system using WebGL

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

* 産業技術短期大学情報処理工学科 Department of Information Engineering, College of Industrial Technology, 1-27-1 Nishikoya Amagasaki ,Hyogo 661-0047,Japan. E-mail:sakurai@cit.sangitan.ac.jp
**大阪公立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
*** 大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
**** 大阪市立大学名誉教授 Professor Emeritus of Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

キーワード：ボーリングデータ, 3次元可視化, Web-GIS, Web API
Key words : Borehole data , 3D visualization , Web-GIS , Web API

1. はじめに

「国土地盤情報検索サイト」(KuniJiban)を用いたボーリング柱状図や土質試験結果の公開は今年で13年が経過した。2009年の試験運用当初は、約7万4千本のボーリング柱状図や土質試験結果等の地盤情報が公開されていたが、今や14万7000本を超え誰もが全国の地盤情報を検索し閲覧出来るようになった(土木研究所,2022)。

また国土交通省では、2023年度に小規模を除く公共事業においてBIM/CIM (Building/ Construction Information Modeling,Management) の原則化を目指している。BIM/CIM の原則化によりこれまで以上に3次元モデルデータが作成、納品される。これら作成されたデータは今後無償公開される予定となっており、環境保全や災害対策等への活用が期待されている(国土交通省,2022)。

今回、「地質・土質調査成果電子納品要領(案)」で定められたボーリング交換用データ(XML)形式で公開されている地盤情報をサーバーに取り込むだけで、Webブラウザ上にボーリング情報を3D表示できるシステムの開発を行った。

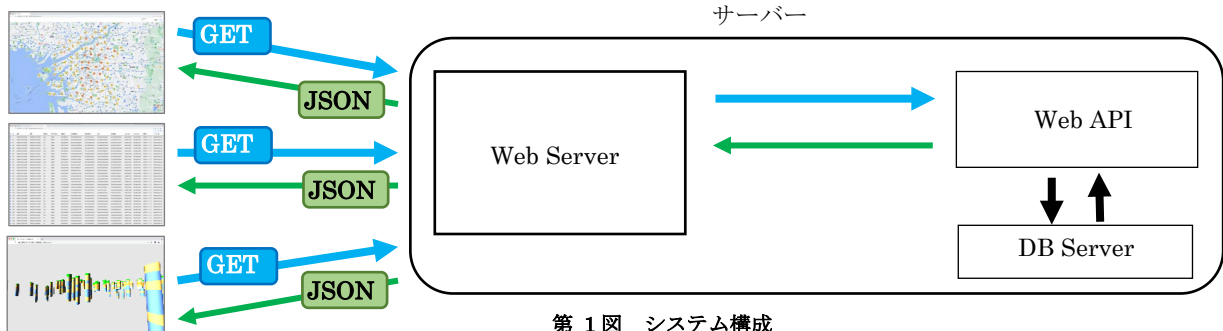
2. システムの構成

システムの全体構成図を第1図に示す。データベースに保存されているデータの参照や更新を行うためのWeb API サービスを作成した。

本Web API サービスにHTTP リクエストを送信すると、処理結果をHTTP レスポンスで受信できる。受信するデータはJSON形式にフォーマットされている。作成したWeb API サービス内容と主な出力データを第1表に示す。Web API を使用することでデータベースに保存されているボーリング情報をWeb-GIS上に表示できる。さらにWeb-GIS状で範囲を指定し、ボーリング情報を3D表示できる。

第1表 APIのサービス一覧

サービス内容	主な受信データ項目
1 Web-GIS 表示データの取得	全ボーリングデータの緯度・経度、ボーリングデータのID等
2 3D表示したい地点のボーリング情報データの取得	指定された範囲内のボーリングIDと緯度経度、ボーリング名等
3 表示したいボーリング情報データの取得	選択されたボーリングデータの緯度・経度、ボーリングデータのID等
4 表示したいボーリングコア情報の取得	選択されたボーリングID、ボーリングコアの土質情報等



第1図 システム構成

3. システムの流れ

3.1 ボーリング表示位置選択

Web-GIS を用いてデータベースに保存されているボーリングの位置を表示する(第2図)。ボーリングデータが多量な場合は、マーカークラスター機能を用い近隣にボーリングデータが何件あるかを表示できるようにした。

3D 表示したいボーリングの開始地点と終了地点をクリックすることにより、あらかじめ指定した幅の長方形が表示されその範囲内のボーリングデータをすべて選択することができる。選択したボーリングはオレンジ色で表示される(第3図)。

3.2 表示ボーリング選択

Web-GIS 上で選択したボーリング情報は決定ボタンをクリックすることにより一覧表示できる。この表示はデータベースの項目別にソートすることができる。また、3D 表示に用いたいボーリングデータはチェックボックスにて選択する(第4図)。

3.3 ボーリング表示

3.2 で選択したボーリングデータは第5図のように 3D 表示される。3D 表示はマウス操作により拡大、縮小、視点変更ができる。また、各ボーリングは土質データごとに色分けされている。

4. おわりに

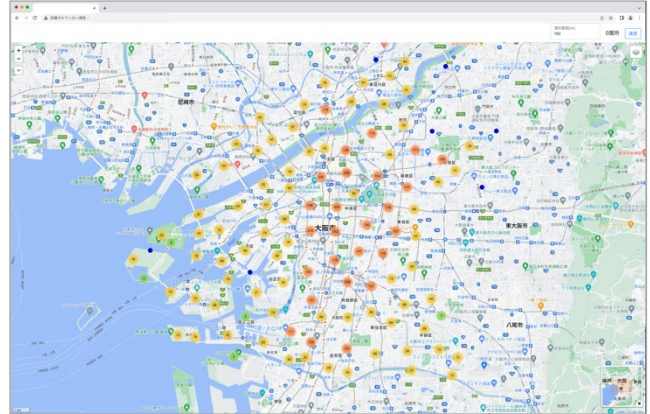
本システムには以下の特徴がある。

1. 「地質・土質調査成果電子納品要領(案)」で定められたボーリング交換用データの形式で公開されているボーリング情報をデータベースに保存し簡単に Web ブラウザ上で 3D 表示できるようになる。
2. システムの構築はすべて OSS(Open Source Software)を用いているためサーバー構築の知識さえあれば、オンプレミスサーバーやクラウドサーバー上に費用をかけず構築できる。
3. Web API を用いて HTTP レスポンスにてデータのやり取りを行うため開発言語や動作 OS に因らず活用しやすい。
4. Web API を用いている為、既存のシステムに組み込みやすい。

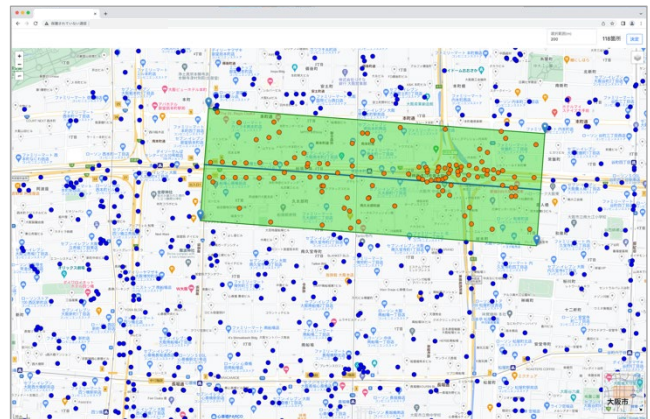
今後、本システムを用い岩相対比支援システム(櫻井ほか, 2008)、OCU ジオモデラー(升本ほか, 2009)において BS_Terramod を用いた曲面推定に利用する入力用データ作成が行えるよう改良を加えていきたい。

文献

土木研究所(2022)国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」。
URL : <https://www.kunijiban.pwri.go.jp/viewer/> (確認日 : 2022/05/20)
国土交通省(2022)技術調査サイト。
<https://www.mlit.go.jp/tec/> (確認日 : 2022/05/20)
櫻井健一・サラウット ニンサワット・塩野清治・升本真二(2009) ボーリングデータを用いた岩相対比支援システムー Web-GIS による 3 次元地質モデル構築に向けてー。情報地質, vol.19, no.2, pp.82-83。
升本真二・野々垣進・サラウット ニンサワット・岩村里美・櫻井健一・生賀大之・ベンカテッシュ ラガワン・塩野清治(2009) Web-GIS を用いた 3 次元地質モデル構築システム。情報地質, vol.20, no.2, pp.94-95。



第2図 Web-GIS を用いたボーリング位置表示画面



第3図 ボーリング選択画面

ID	名称	経度	緯度	深度(m)	地質データ	調査年度	調査機関	調査者	調査方法	調査機器	調査日時	調査場所	調査内容	調査結果	調査画像	調査データ
7	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
8	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.52	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
9	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.52	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
10	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
11	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
12	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
13	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
14	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
15	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
16	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
17	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
18	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
19	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
20	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
21	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
22	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
23	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
24	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
25	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
26	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
27	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
28	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
29	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
30	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
31	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
32	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
33	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
34	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
35	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
36	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
37	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
38	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
39	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
40	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
41	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
42	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
43	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
44	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
45	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
46	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
47	34E01010101010101	135.510101010101	34.010101010101	4.58	99999	6271000000	34E0101010101	135.5101010101	34.0101010101	100.00000000	2014/05/05 10:00:00	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府	大阪府
48</																

WebGL を用いた都市地下浅部の地質サーフェスモデルビューア

野々垣 進*・中澤 努*

Surface-based geological model viewer for shallow subsurface in urban area using WebGL

Susumu NONOGAKI* and Tsutomu NAKAZAWA*

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567 JAPAN.
E-mail: s-nonogaki@aist.go.jp

キーワード: WebGL, サーフェスモデル, ボーリングデータ, JavaScript

Key words: WebGL, Surface-based model, Borehole data, JavaScript

1. はじめに

産業技術総合研究所地質調査総合センター(以下,GSJ)では,経済産業省による知的基盤整備の一環として,“都市域の地質地盤図”の作成に取り組んでいる.この取り組みは,公共工事の際に作成された大量のボーリングデータと,学術研究で作成された層序学・堆積学的に詳細な情報をもつボーリングデータとを利用して,都市平野部の地下数十メートルを対象とした地質サーフェスモデルを作成し,都市地下浅部の地質構造を明らかにするものである.これまでに千葉県北部地域(納谷ほか,2018)と東京都区部(納谷ほか,2021)の地質地盤図を整備しており,GSJの「都市域の地質地盤図」ウェブサイト(URL:https://gbank.gsj.jp/urbangeol/)から公開している.本ウェブサイトでは,誰でも無償で地質サーフェスモデルとその作成に利用したボーリングデータとを合成した立体図を閲覧することができる.

「都市域の地質地盤図」ウェブサイトでは,これまで立体図を Virtual Reality Model Language (VRML) 形式で公開してきた.しかし,ウェブブラウザ上で VRML データを開くにはプラグインが必要である.また,VRML 対応のプラグインの多くは操作方法が極めて複雑である.このため,一般ユーザーは容易に立体図を閲覧できないという問題があった.本研究では,この問題を解決することを目的として,WebGL を用いた地質サーフェスモデルビューアを開発した.本発表では開発したビューアの概要について紹介する.

2. システム構成

本ビューアは,ウェブブラウザが標準装備する WebGL を利用して,地質構造の 3 次元コンピュータグラフィックス (3DCG) 描画を行うウェブアプリケーションである.開発言語には JavaScript を,WebGL プログラミングには 3DCG 描画用ライブラリのひとつである three.js を用いている.ビューア本体はアイコン等の画像,スタイルシートおよび JavaScript から構成される.これらは立体図で描画するオブジェクトのデータセットを納めたディレクトリ(データディレクトリ)とは別階層のディレクトリで管理される.ウェブブラウザ上への立体図描画にあたっては,データディ

レクトリに配置した HTML ファイルからビューアの JavaScript を呼び出す.データディレクトリには,地質サーフェスモデルを構成する地層境界面・地表面の数値標高モデル,ボーリングデータの位置情報リストとテキスト画像,凡例画像等を特定の階層構造で配置する必要がある.

本ビューアの利用に必要なソフトウェア環境はウェブブラウザのみである.従来のようなプラグインのインストールは必要ない.ウェブブラウザは Mozilla Firefox, Microsoft Edge, Google Chrome, Safari 等に対応しており,Windows (10 以上), MacOS および Linux 等の OS で利用できる.

3. 機能の概要

第 1 図にビューアの操作画面を示す.操作画面は,左上の表示設定ボタン,左下の凡例,それら以外の立体図描画部から構成される.画面上では単純なマウス操作により,立体図の回転,移動,拡大・縮小を行えることに加え,立体図の表示に関する各種設定を表示設定ボタンから行える.表示設定ボタンから利用できる主な機能を以下に記す.

① 高さ倍率の調整機能

描画している立体図の水平方向と鉛直方向の比率(高さ倍率)を調整する機能である(第 2 図(a)).上下方向のスライダー方式となっており,整数単位で倍率を調整できる.

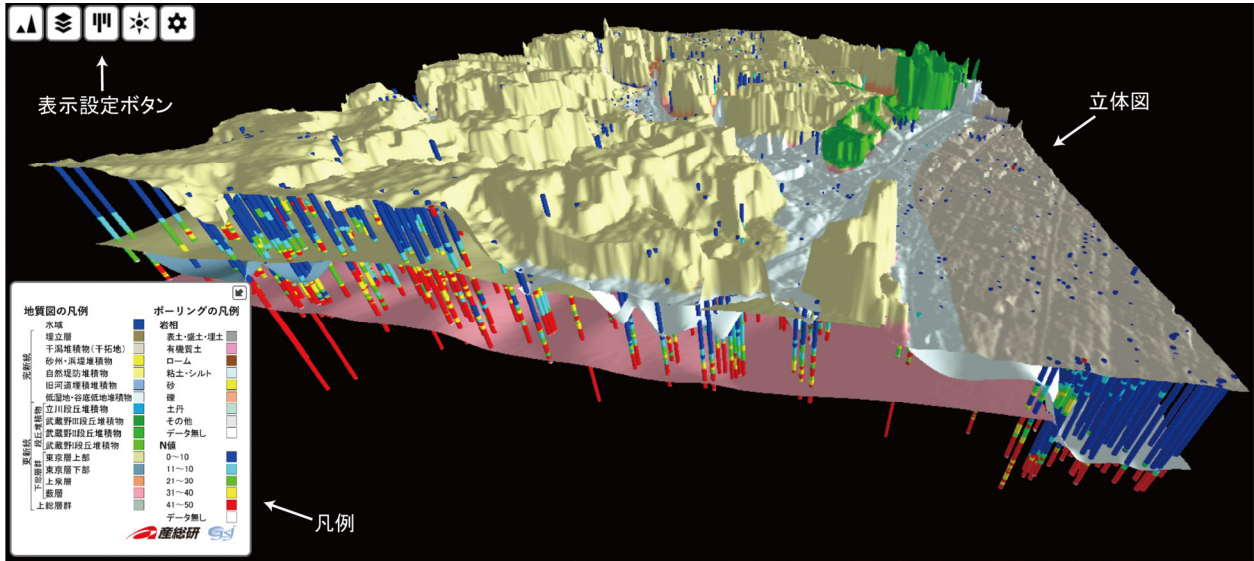
② サーフェスの表示切り替え機能

地表面および地層境界面の表示・非表示を切り替える機能である(第 2 図(b)).トグルボタン方式となっており,面ごとに表示・非表示の設定を切り替えられる.また,ワイヤースタイルによる描画を選択することも可能である.

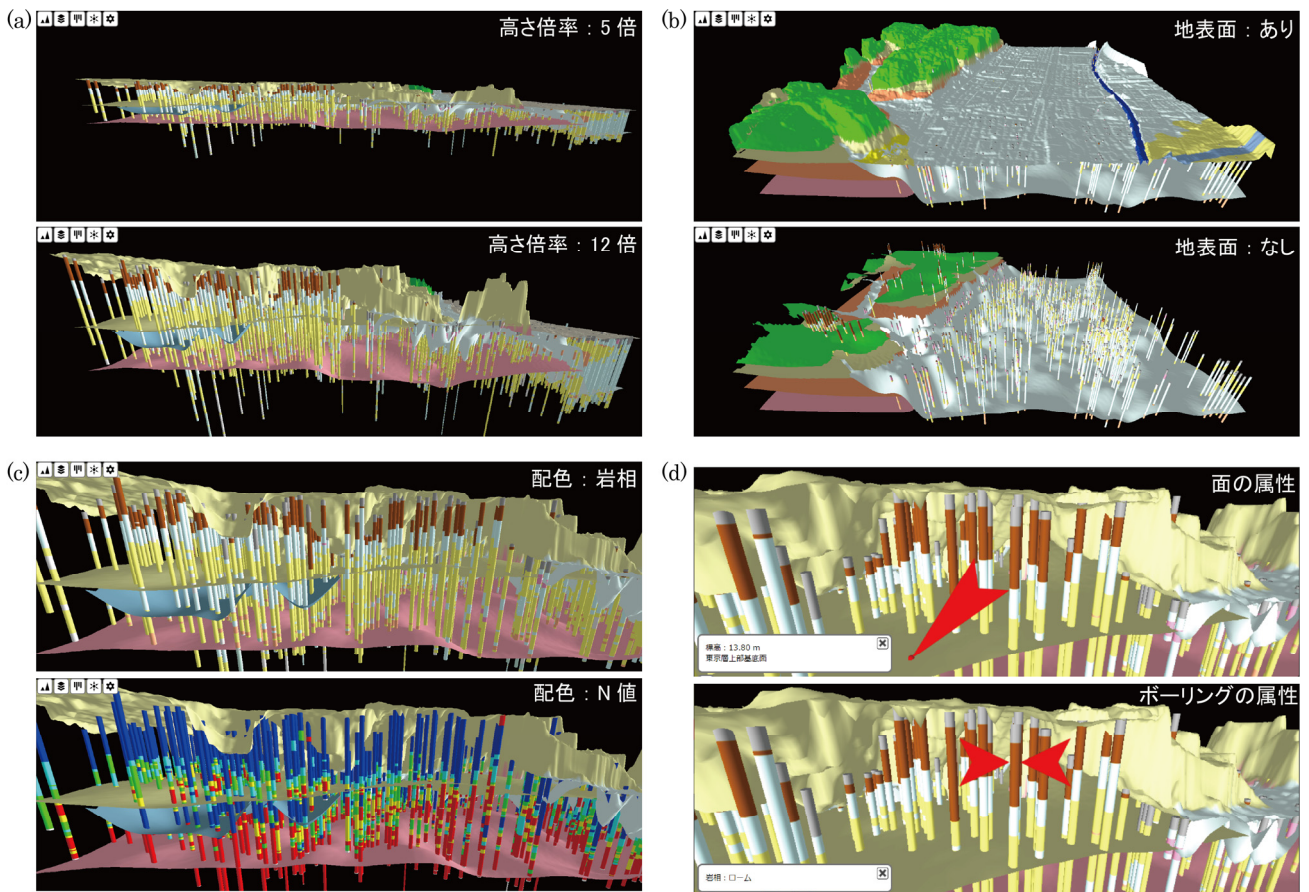
③ ボーリングデータの表示切り替え機能

ボーリングデータの配色および表示・非表示を切り替える機能である(第 2 図(c)).どちらの切り替えも,トグルボタン方式となっている.配色には,岩相または標準貫入試験結果(N値)によるものを利用できる.

このほか,描画オブジェクトをクリックすることにより,クリック点におけるオブジェクトの属性情報を取得する機能が実装されている(第 2 図(d)).クリックする対象が地表面・地層境界面の場合は標高値,ボーリングデータの場合は岩相または N 値の情報を取得できる.



第1図 地質サーフェスモデルビューアの操作画面.



第2図 ビューアの機能. (a)高さ倍率の調整, (b) サーフェスの表示切り替え, (c) ボーリングデータの表示切り替え, (d) 属性情報の取得.

4. おわりに

地質サーフェスモデルとボーリングデータを組み合わせた立体図をウェブ上で閲覧するためのビューアを、WebGLを用いて開発した。本ビューアでは、単純なマウス操作のみで地下浅部における地層の広がりや詳細を確認できるため、地下の地質構造に関する国民の理解の向上に貢献すると考えられる。2022年5月現在、「都市域の地質地盤図」ウェブサイトでは、本ビューアを利用して、千葉県北部地域と東京都区部の立体図を公開している。

文 献

納谷友規・野々垣 進・小松原純子・宮地良典・中澤 努・風岡修・塩崎翔一・香川 淳・吉田 剛・加藤晶子・八武崎寿史・荻津 達・中里裕臣 (2018) 都市域の地質地盤図「千葉県北部地域」(説明書). 産総研地質調査総合センター, 55p.
 納谷友規・小松原純子・野々垣 進・尾崎正紀・宮地良典・中澤 努・中里裕臣・鈴木毅彦・中山俊雄 (2021) 都市域の地質地盤図「東京都区部」(説明書). 産総研地質調査総合センター, 82p.

点群 PNG のポリラインへの応用

西岡芳晴*・北尾馨**

Application of Point Cloud PNG to polylines

Yoshiharu NISHIOKA* and Kaoru KITAO**

* 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

** 合資会社キューブワークス CubeWorks Inc., 4-1, Mizukino 2, Moriya, Ibaraki, 302-0121, Japan. Email: kitao@cubeworks.co.jp

キーワード：点群 PNG, ポリライン, Web, 地図

Key words：Point cloud PNG, poplyline, Web, map

1. はじめに

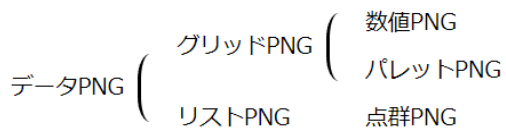
一般に地球科学に関する一次データは地図上の位置に関連付けられたポイントデータであることが多い。そして、それらのポイントデータは一連の地質踏査、物理探査等で取得できる場合が多く、各ポイントデータを連結したポリラインデータとして管理、表現できると有用な場合も多い。大量の地球科学的な一次データを公開し、活用する場合、ポイントデータやポリラインデータはまず第一に検討すべき課題である。

一方、官民データ活用推進基本法の施行を受けて、様々な機関からオープンデータが提供され始めており、これらには地図上のデータも多く含まれている。我々はポイントデータやポリゴンデータをウェブアプリケーション上で高速に処理する手法を検討しており、今回は、西岡(2021)で提案した点群 PNG を利用してポリラインを表現する手法を考案したので紹介する。

2. データ PNG とは

データ PNG とは、画像ファイルフォーマットである PNG(Portable Network Graphics)を使ってデータを表現するプロトコルであり、インターネットを使って大量データを高速に扱うために考案されたものである。PNG は標準で可逆圧縮されており、展開はウェブブラウザが行うため、圧縮されているにもかかわらず開発の際展開を考慮する必要がない。このため、特にウェブアプリケーションでの利用に優れている。主に地図データとしての利用を想定しているが、地図以外の分野でも活用可能である。データ PNG については以下のサイトで紹介されている。

<https://gsj-seamless.jp/labs/datapng/>



第1図 データ PNG に含まれるフォーマット

データ PNG にはグリッド PNG とリスト PNG が含まれ、さらにグリッド PNG には数値 PNG とパレット PNG が含まれる。これらのうち数値 PNG は、標高データですでに用いられている PNG 標高タイル(西岡・長津, 2015)を一般化し、標高データに限らず一般的な数値データに対応させたものである。また、リスト PNG は、西岡(2021)で示した点群 PNG のベースとなるフォーマットである。

データ PNG 及び派生フォーマットでは、個々の数値データを1つまたは複数のピクセルに変換して使用する。仕様上定義されるデータ型には以下の5種類があるほか、任意のデータ型を定義して使用することができる。

データ型		ピクセル数
RGB		1ピクセル
符号無し整数	24ビット符号無し整数	1ピクセル
	48ビット符号無し整数	2ピクセル
符号付き整数	24ビット符号付き整数	1ピクセル
	48ビット符号付き整数	2ピクセル

第2図 データ PNG 及びその派生フォーマットで使用できるデータ型

3. リスト PNG

リスト PNG は点群 PNG のベースとなる仕様であり、固定長レコードを表現する。通常は各フィールドは数値データのみを保持する。リスト PNG は数値データのみからなる大量データをウェブ上で扱う場合に有効である。なお、リスト PNG 自身は地図データに限定されるものではない。

リスト PNG の構造はデータベースのテーブルと似た概念であるが、各レコードが順序を持つものとして扱われる点がデータベースのテーブルとは大きく異なる。リスト PNG の各レコードはファイル内のその出現順序によって0からはじまる連番が与えられているとして扱われ、これを位置インデックスと呼ぶことにする。

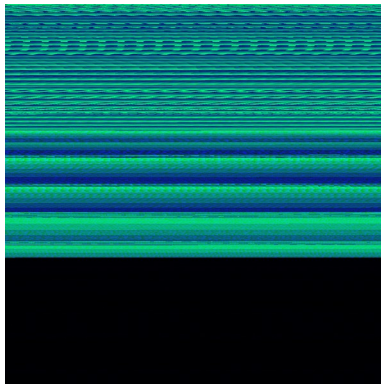
リスト PNG はその仕様上ヘッダー内にユーザー定義の任意の情報を持つことができる。また、ヘッダー情報でデータサイズが決定され、データサイズ以上の情報を含むことも許可されることから、一つのファイルのデータ本体の

あとに任意のデータを記述することもできる。このことを利用して1つのリストPNGファイル内に複数のリストPNGを埋め込むことができる。ファイル内の各リストPNGをリストブロックと呼ぶことにする。リストブロックは最初のリストブロックのヘッダーに埋め込んでも良いし、後ろに埋め込んでも良い。

4. 点群PNG ver.0.6

西岡(2021)で提案した点群PNG ver.0.4に対し、いくつかの改良を行い ver. 0.6 作成、公開している。

最も大きな改良点はファイル内のポイント情報の配列をポイント毎からカラム毎に変更した点である。このことにより値の近いピクセルが隣接する可能性が高まり、ファイル圧縮効率が上がることが期待できる。



第3図 点群PNGファイルの例

「明治時代初期土地利用・被覆デジタルデータベース」(農研機構農業環境変動研究センター)で公開されている迅速測図のGeoJSONポイントデータ(Iwasaki, 2017)をもとに作成

迅速測図を利用したテストでは、点群PNG ver. 0.4の利用により元のGeoJSONファイルに比べて約0.49%の1,876KBにまでファイルサイズを縮小されたが(西岡, 2021), ver. 0.6の利用によりさらにその44%の833KBにまで圧縮された(第4図)。

フォーマット	ファイルサイズ(KB)
点群PNG	833
GeoJSON	381,010
Mapbox Vector Tile	33,885

第4図 点群PNG ver.0.6による迅速測図ファイルサイズ

さらに、点群PNGは本来地図データに限った仕様ではないが、ver.0.6では地図投影法に関する情報をヘッダーに埋め込めるようになった。地図投影法にはウェブメルカトルと緯度経度を指定でき、またウェブメルカトルの場合は水平分解能を表す「ウェブメルカトル次数」(地球全体を表す地図の横幅の大きさを、2を底とする対数で表したもの)も記述できる。この改良により、点群PNGファイル単体でも地図上に表示することが可能になった。

5. ポリラインの表現

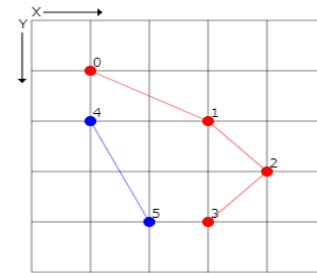
ポリラインの表現のために新たなフォーマットを規定する必要はなく、点群PNGをそのまま利用してポリラインを表現できる。ポリラインの表現には、点群PNGの各点

が順序を持っていることを利用する。特に一次データは時系列で扱うことが一般的であるからこの考え方と親和性が高い。

ポリラインの表現では、まず、点群PNG内に、ポリライン毎に、そして各ポリライン内のポイントは連結させる順序に従って配置する。

次に、各ポリラインに含まれる点の数を別のデータとして用意する(このデータをラインリストと呼ぶことにする)。ラインリストは点群PNGファイルとは別ファイルとしても良いが、点群PNGのヘッダーにリストブロックとして表現することも可能である。

(地図上のポイントとライン)



(ポイントデータ)

位置インデックス	X座標	Y座標
0	1	1
1	3	2
2	4	3
3	3	4
4	1	2
5	2	4

(ラインリスト)

位置インデックス	ポイント数	
0	4	(赤い線)
1	2	(青い線)

第5図 ポリライン表現の概念図

赤い線を構成する4点と青い線を構成する2点のデータを表現する例を示した概念図

さらに、ラインリスト内の位置インデックスを利用することにより、各ラインに関する追加情報(描画スタイルなど)を別ファイルで指定することもできる。

6. おわりに

標高データから始まって点群データ、ポリラインと、地図データのウェブアプリケーションでの活用技術の開発を続けてきた。技術的にはかなり期待のできる成果が上がってきていると考えているが、まだ実用例が少ない。今後、多くの機関に働きかけ、データ公開とアプリケーションの開発を両輪で進めてゆき、成果の普及を図りたい。

文 献

- Iwasaki, N. (2017) wata909/habs_test: Test repository for HABS point data. GitHub.
https://github.com/wata909/habs_test (確認:2022/05/23)
- 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 (2021) ウェブアプリケーションで点群を高速に扱うための仕様“点群PNG”の考案。情報地質, vol. 32. no. 2, pp. 39-42.

点群 PNG を用いた震源展開アプリケーションの試作

北尾 馨*・西岡 芳晴**

Test development of application for plotting epicenters using Point Cloud PNG

Kaoru KITAO* and Yoshiharu NISHIOKA**

* 合資会社キューブワークス CubeWorks Inc., 4-1, Mizukino 2, Moriya, Ibaraki, 302-0121, Japan. E-mail: kitao@cubeworks.co.jp

** 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.

キーワード：震源, 点群 PNG, WebGL, GPU, 並列処理

Key words: Epicenter, Point Cloud PNG, WebGL, GPU, Parallel processing

1. はじめに

気象庁は同庁が観測もしくは関係諸機関から提供を受けた 1919 年 1 月以降に発生した地震の情報について、2020 年 3 月以前は年単位を基本とした整理済みの情報として、2020 年 4 月以降は日単位の速報値として、それぞれウェブ上で公開している(気象庁, 2022)。本件では、整理済みとして公開されている 2020 年 3 月以前の全ての地震の震源(4,056,450 件)を三次元で一括表示することが可能なウェブアプリケーションを試作したのでこれを紹介する。

2. データ

気象庁が公開するデータは固定長テキスト形式であり、表 1 に示す情報を含む。本件ではアプリケーションの試作に必要な情報のみを抽出し(表 1)、西岡(2021)の仕様に改良を加えた点群 PNG の最新バージョンでファイル(以下、点群 PNG ファイルという)を作成し、これを使用した。気象庁が公開する当該期間の震源データはファイル数 45 点、合計容量約 394MB(展開時)であるが、本件で作成した点群 PNG ファイルは 33MB 弱の容量に抑えることが出来た。

震源の震央位置は元の地理座標である経緯度をウェブメルカトル図法(地球の緯度南北それぞれ約 85.1 度までの範囲を正方形に投影)の座標に変換して保持する。投影された震央位置は前述の正方形の南北と東西それぞれを 1,048,576 分割した際の格子位置であり、北緯 35 度における平面上での位置の精度は約 30m である。震源の深さはメートル単位、マグニチュードは小数第一位まで、地震発生日時は日本標準時(JST)をユニックスタイムスタンプに変換して 10 のマイナス 3 乗を乗じ、小数点以下を四捨五入した値としてそれぞれ格納している。値はすべて点群 PNG ファイル各ピクセルの色情報に変換して保持している。

アプリケーションでは震源と地表面との位置関係を明瞭にするため地表面の一部を三次元で表示している。表示画像には国土地理院が公開する地理院タイル標準地図を用い、地形表現には産業技術総合研究所が公開するシームレス標高タイル GEBCO 2020 GRID を用いている。

表 1. 気象庁が公開する地震の情報と本件で抽出した情報.

気象庁のデータに含まれる地震の情報	抽出した情報
震源認定機関	
地震発生日時	●
地震発生日時標準誤差	
震央緯度	●
震央緯度標準誤差	
震央経度	●
震央経度標準誤差	
震源深さ	●
震源深さ標準誤差	
マグニチュード	●
マグニチュード種別	
使用走時表	
震源評価	
震源補助情報	
最大震度	
被害規模	
津波規模	
大地域区分番号	
小地域区分番号	
震央地名	
観測点数	
震源決定フラグ	

※ 情報の名称は一部統合、簡略化等している。

3. アプリケーションの概要

アプリケーションは WebGL を容易に扱うことを可能とするライブラリ Three.js を用いて開発した(図 1)。アプリケーションは起動時に点群 PNG ファイルをダウンロードして解析し、震源の位置、マグニチュード、地震発生日時を示すピクセルとそれらのデータを元の値に復元するためのパラメータとなるピクセルの色情報を取得する。震源位置等を示すピクセルの色情報(RGBA 値)はそのまま、パラメータとして取得するピクセルの色情報は点群 PNG の仕

様に基づいてそれぞれ適切な値に変換して GPU に転送し、GPU による並列処理で描画に必要な値を計算する。点群 PNG ファイルから得られた各値とは別にフォームから得られる値も GPU に転送して使用することでアプリケーションにインタラクティブな機能を実装している。アプリケーションが装備する機能は以下の通りである。

- 400 万件を超える震源の三次元一括表示
- マグニチュードの上限と下限を指定した震源抽出表示
- 地震発生の様子の時系列アニメーション表示
- アニメーション速度の変更
- 登録された大地震発生日当日の震源抽出表示
- 指定日付の震源抽出表示
- 震源抽出の日付移動
- 標高(震源深さ)の誇張
- 地図の不透明度変更

4. 高速動作とその恩恵

点群 PNG ファイルはわずか 33MB 程度であり、ファイル取得に要する時間は一般的な光回線を使用している著者らの環境で概ね 10 秒以下である。取得したファイルは前述の通り CPU による解析等前処理を施した後に値を GPU に転送し、基本的に描画に必要な計算のほぼ全てを GPU による並列処理で実行する。これにより 400 万件を超えるデータを取り扱うにも関わらず、マグニチュードの範囲指定や地震発生日による震源抽出をほぼ瞬時に実現することが可能である。並列計算による高速処理の恩恵を受け、地震発生を時系列でアニメーション表示する機能もスムーズに動作する。アニメーション中は対象時間軸に応じて震源を抽出表示するとともに、震源の大きさを徐々に変化させる効果を与え、科学分野に関する知識の乏しい閲覧者でも興味をいただきやすいユーザエクスペリエンスを提供している。

また、主要な地震をリストアップして当該地震が発生した日付の震源を抽出表示する機能も実装している。この機能により、東北地方太平洋沖地震、兵庫県南部地震から関東大地震に至るまで 100 以上の巨大地震発生日の震源分布を即座に抽出表示することが可能である。

5. アプリケーションの意義

本件類似のアプリケーションとして防災科学技術研究所が Hi-net 高感度地震観測網で観測した地震の震源位置を三次元表示するアプリケーションを公開しているが(防災科学技術研究所, 2022), 5 年単位で震源位置を一括表示するのみであり、マグニチュードによる震源絞り込み等閲覧者の操作によるインタラクティブな機能を装備していない。本件で開発したアプリケーションは約 100 年分の震源を一括もしくは時系列でアニメーション表示することが可能であり、専門知識をもたない閲覧者でも興味をいただきやすく、試作した意義は十分大きいと言える。

6. おわりに

WebGL を用いた点群の取り扱いは一般的となりつつあるが、その場合の点群は点の位置と表示色のみを保持し、表示に特化したデータ構成となっていることが多い。本件アプリケーションでは表示に必要な位置と表示色を決めるための情報(マグニチュード)に加えて時間軸の情報も保持することでアニメーション表示を実現し、既存の点群展開アプリケーションとは一線を画している。

本件で開発したアプリケーションの高速動作は WebGL による並列処理、点群 PNG によるデータファイルの軽量化、点群 PNG と WebGL との親和性による効果大きい。著者らは今後も既存の技術にとらわれず、ウェブアプリケーションを高速に動作させる技術の研究を進める次第である。

文 献

防災科学技術研究所(2022) ウェブブラウザによる三次元震源分布表示。

<https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/ThreeJS/>
気象庁(2022)気象庁 | 地震月報(カタログ編)。

<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/>
西岡芳晴(2021)ウェブアプリケーションで点群を高速に扱うための仕様"点群 PNG"の考案。情報地質, vol.32, no.2, pp.39-42。

https://doi.org/10.6010/geoinformatics.32.2_39
(全てのウェブサイトの確認日 2022 年 5 月 20 日)

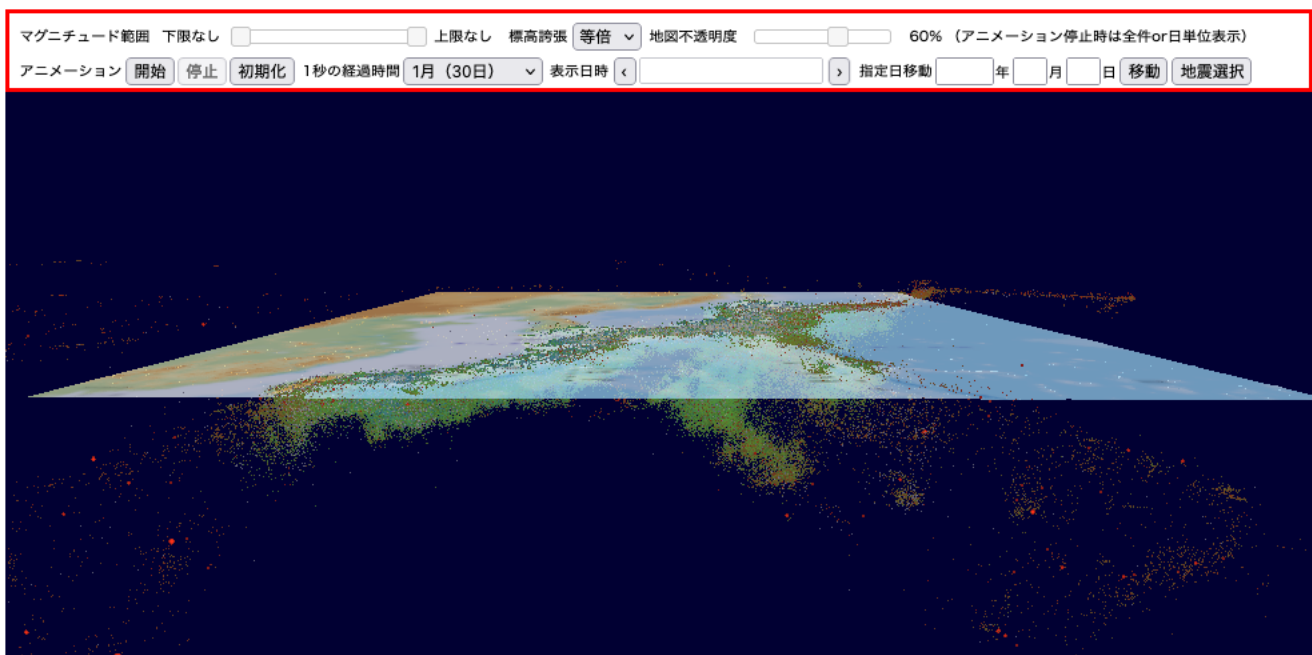


図 1. アプリケーション表示例。展開された点の一つ一つがそれぞれ震源を表す。地表面は日本付近のみ表示している。

点群 PNG を用いたウェブ地図上での点群展開とポリライン群の描画

北尾 馨*・西岡 芳晴**

Plotting point cloud and drawing polylines on a web map using Point Cloud PNG

Kaoru KITAO* and Yoshiharu NISHIOKA**

* 合資会社キューブワークス CubeWorks Inc., 4-1, Mizukino 2, Moriya, Ibaraki, 302-0121, Japan. E-mail: kitao@cubeworks.co.jp

** 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.

キーワード： 航跡, 点群 PNG, WebGL, GPU, フレームバッファ

Key words: Cruise tracks, Point Cloud PNG, WebGL, GPU, Frame buffer

1. はじめに

物理探査の探査測線や海域調査での船舶の航跡など、地質学では地図上にポリライン(折れ線)を表示して扱う機会が多い。ウェブ地図におけるポリライン描画は、MapServer等を用いてサーバサイドで生成した画像を出力する WMS, GeoJSON ファイルを使用してクライアントサイドで SVG に変換して描画する手法のいずれかを用いることが多い。屈曲点が多い場合、前者ではサーバの処理負荷が増し高速化は難しい。後者は屈曲点数増加がデータファイルの容量増加に繋がってデータ転送時間が増すとともに、SVG 変換処理にも時間を要する。よってこれらの手法でウェブ地図上での大量ポリライン高速描画を実現することは難しい。

本件では西岡(2021a)が提唱した点群 PNG を改良した新仕様を用い、それをポリライン描画に応用したウェブアプリケーションを開発したのでこれを紹介する。

2. データ

本件では産業技術総合研究所が公開する白嶺丸重磁力データ(石原, 2021)を使用し、点群 PNG の最新バージョン 0.6(西岡, 2021b)を用いてデータファイル(以下、点群 PNG ファイルという)を作成し、これを使用した。本件では磁気異常補正値を一切保持しない航海を除いた残りの航海の測定点をデータ化、点群 PNG ファイルを作成した。航海数は 79 件、測定点数は 5,646,957 件である。

点群 PNG ファイルは一つの測定点に対してその位置、磁気異常補正値、航海番号(航海情報を抽出するために新規で付した航海の連番)を保持している。各点は航海別、時系列順でその値をピクセルの色情報に変換して保持している。測定点の情報とは別に航跡描画用の情報として航海ごとに、航海番号、当該航海最初の測定点のインデックス値、測定点数、航跡表示用の色をそれぞれ保持している。

3. アプリケーションの概要

アプリケーションはウェブ地図ライブラリの Leaflet を用いて開発しており、測定点と航跡の描画には WebGL を利用している(図 1)。アプリケーションはウェブブラウザウイ

ンドウ内での地図全域表示を基本とし、画面左にアプリケーション操作のためのパネルを設けている。基本的な操作は全て地図上のマウス操作で完結する。

アプリケーションは測定点が保持する位置に基づき、各点を地図上に展開する。測定点の出力色は磁気異常補正値に応じて決定する。デフォルトでは点群 PNG ファイルに格納されたピクセル色をそのまま出力し、設定により別途用意したカラーパレットを用いた出力に変更する機能を装備する。

アプリケーションは測定点だけでなく航跡も描画する。航跡は航海ごとに分割して表示する。陸を横断する航跡が認められるが、これは航海中の回航時における測定がなく、屈曲点が省略されたことに起因すると推察する。

測定点は 3 ピクセル四方の正方形、航跡は幅 1 ピクセルのポリラインで描画する。

測定点をクリックするとその点が保持する地磁気異常補正値とその点を測定した航海に関する情報を表示する。アプリケーションは航跡のクリックにも対応し、航跡クリックの際は当該航海に関する情報を表示する。

航海を識別することが可能である利点を活かし、特定の航海のみを抽出してその航跡と保持する磁気異常補正値を表示する機能も装備する(操作パネルから選択する)。

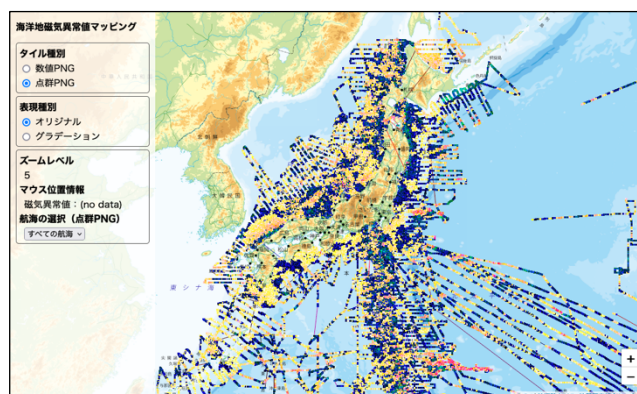


図 1. アプリケーション表示例。

4. アプリケーションの解説と動作原理

アプリケーションの動作原理について、WebGL による描画処理の概要を述べ、それに基づくアプリケーションの挙動について記述する。

4.1 WebGL による描画処理の概要

WebGL での描画は概ね以下の手順で実行される。

- (1) 頂点データの取得
本件における頂点とは測定点(航跡の屈曲点)を指す。
- (2) 出力先(フレームバッファ)の指定
ディスプレイ(デフォルトのフレームバッファ)に出力するだけでなく、仮想ディスプレイ(別途作成するフレームバッファ)を選択することが可能である。
- (3) 各頂点の位置座標をディスプレイ上の座標に変換
頂点シェーダ(プログラム)を用意し、取得した頂点の位置座標をディスプレイ表示で用いる座標に変換する。
- (4) 各頂点の出力色の決定
フラグメントシェーダ(プログラム)を用意し、出力する際の点(もしくはポリライン)の色を決定する。
- (5) 出力モード(プリミティブ)の指定
WebGL では点、線、三角形での描画が基本であり、これらを組み合わせて様々な事物を描画する。描画したい事物に応じて出力モードを指定する。
- (6) 出力
指定した出力先と出力モードで演算結果を出力する。

4.2 アプリケーションの処理手順

出力処理は地図の拡大・縮小の完了時、地図移動の完了時に実行し、地図が操作されていない時は不要な演算を実行しない。これにより大量の点を描画しているにも関わらず、アプリケーションは軽快に動作する。

アプリケーションは最初に頂点(測定点)データを受け取る。受け取ったデータに対して CPU による前処理を施して GPU に転送し、以降の処理は GPU で実行する。GPU での処理は以下の流れに沿う(図 2)。

- (1) フレームバッファでの描画その 1
フレームバッファを作成し、出力モードを点として各頂点を航海番号色で出力、その結果を保存、フレームバッファを破棄する。
- (2) フレームバッファでの描画その 2
フレームバッファを作成し、出力モードを線として航海ごとに航跡を航海番号色で一旦出力し、クリックを容易にするため線を拡張する(太くする)処理を施す。得られた結果を保存し、フレームバッファを破棄する。
- (3) フレームバッファでの描画その 3
フレームバッファを作成し、出力モードを点として各頂点を地磁気異常補正值色で出力、その結果を保存、フレームバッファを破棄する。
- (4) 航跡出力
デフォルトのフレームバッファ(ディスプレイ)に対して出力モードを線にし、航海ごとに航跡を航跡表示色で出力する。
- (5) 測定点の出力
デフォルトのフレームバッファ(ディスプレイ)に対して、(3)の結果を必要に応じて色変換、出力する。

最終的にはディスプレイへの出力の他に、(1)各点を航海番号で出力した結果、(2)航跡を航海番号色で出力した結果、(3)各点を磁気異常補正值で出力した結果の3つを得る。

地図クリックの際その位置座標を取得し、保存した各結果のどの位置に相当するかを計算する。得られた位置における各結果のピクセル色を調べ、(1)の結果でピクセル色が非透過であれば点をクリックしたとみなし、(1)と(3)から

航海番号と地磁気異常補正值をそれぞれ取得する。(1)の結果でピクセル色が透過で、(2)の結果でピクセル色が非透過である場合は航跡がクリックされたとみなし、(2)の結果で得られたピクセル色から航海番号を取得する。

いずれの出力結果でも当該位置のピクセル色が透過であった場合はデータの無い地点がクリックされたとみなす。

5. アプリケーションの意義

本件では 560 万件を超える点の数にも関わらず各測定点をその値に応じて色付けして出力するとともに、測定点を屈曲点とする航跡を描画することが可能であり、GPU による並列処理の恩恵を受け軽快な動作を実現している。アプリケーションは描画だけでなく、点やポリラインの属性値を保持し、それらをクリックすることで地磁気異常補正值や航海番号の取得を可能にしている。値の取得には GPU に転送された頂点データを用いており、別途 CPU のメモリ空間に膨大なオブジェクトを保持しておく必要もない。

本件の意義は上記の内容にとどまらない。これらの仕組みを応用して点やポリラインに識別子を保持させることで、それらに紐づくデータを別途データベースに保持し、必要に応じてそれらを引き出して表示させることも可能になることが予想できる。

6. おわりに

点群 PNG は現在正式公開に向けて仕様調整の最終段階にある。著者らは点群 PNG を用いて複数のアプリケーションを開発してその有効性を確認しているが、いずれも試作段階である。今後は実用的なアプリケーションや点群 PNG ファイルを簡便に扱うことができるライブラリ等を開発して公開し、点群 PNG の普及を図りたいと考えている。

文 献

- 石原丈実(2021)白嶺丸重磁力データ。産総研地質調査総合センター研究資料集, No.714, 産総研地質調査総合センター. 2p
- 西岡芳晴(2021a)ウェブアプリケーションで点群を高速に扱うための仕様“点群 PNG”の考案。情報地質, vol.32, no.2, pp.39-42.
https://doi.org/10.6010/geoinformatics.32.2_39
- 西岡芳晴(2021b)点群 PNG。
<https://gsj-seamless.jp/labs/pcpng/>
(確認日 2022 年 5 月 20 日)

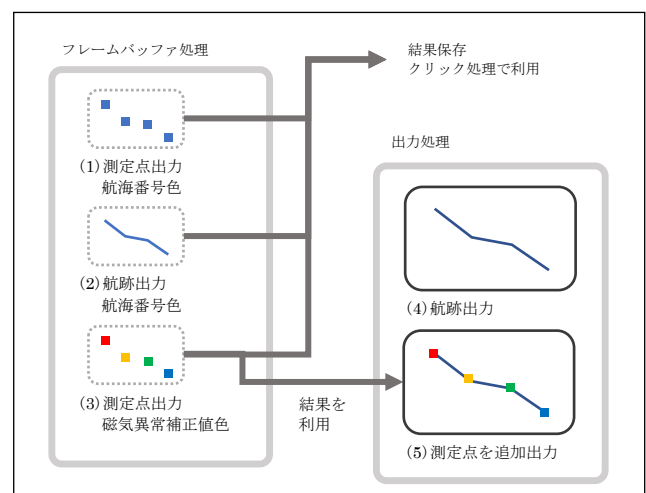


図 2. アプリケーションの挙動イメージ。

第33回日本情報地質学会講演会

講演要旨集

2022年6月5日 発行

発行 日本情報地質学会
〒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
