

第32回日本情報地質学会講演会

講演要旨集

Geoinforum-2021 Annual Meeting Abstracts

日 時：2021年6月17日(木)・18日(金)

主 催：日本情報地質学会

目 次

一般講演

データベース

国連海洋科学の10年と日本財団-GEBCO-Seabed2030 project	
.....木戸 ゆかり・日高 弥子・松岡 大祐・桑谷 立・金子 純二・笠谷 貴史・石川 洋一・木川 栄一	1

地質モデリング

OSGeoLiveを用いたGeo-Vox 3次元地質モデル可視化フレームワークの実装	
.....根本 達也・野々垣 進・升本 眞二・ベンカテッシュ ラガワン	3

物理探査・装置開発

準リアルタイム水質観測のためのフリーオープンソースプラットフォームの開発	
.....ニロシャン バンダラ・田端 秀行・植田 允教・吉田 大介・ベンカテッシュ ラガワン	5

数理・論理

区間を表示する座標：タクソンにもとづいた生層序単元のための数学ツール	
.....山口 久美子・塩野 清治	7

リモートセンシング

機械学習によるSentinel-2およびLandsat-8画像の土地被覆分類比較：ベトナム・ラオカイ市を対象として	
.....ハン ティ ド・米澤 剛・ベンカテッシュ ラガワン	9
ハイパースペクトル衛星画像解析とラドン測定による高植生被覆地域での地熱流体上昇地点の絞り込み	
.....久保 大樹・権守 宏明・Mohamad Nur Heriawan・Irwan Iskandar・小池 克明	11

解析手法・応用

火成岩の白金族元素の含有量	正路 徹也	13
地球統計学による岡山市北西部日応寺花崗岩体中の α 石英の構造シフトパラメーター分布のモデリング		
.....山川 純次		15
物理探査データと岩石物理学の統合に基づく海底下金属資源賦存量推定の試み		
.....大田 優介・後藤 忠徳・小池 克明・柏谷 公希・笠谷 貴史・熊谷 英憲・町山 栄章		17
波長走査型X線回折法による薄片試料の結晶構造精密化の可能性	松浦 優介・萩谷 健治・後藤 忠徳	19
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		
.....升本 眞二・水落 啓太・野々垣 進・根本 達也		21
沖積層を対象とした補間方法の違いによる地質境界面の変化	梶山 敦司・阿南 修司	23
兵庫県丹波市における斜面崩壊による地形変化の検出		
.....植田 允教・根本 達也・田端 秀行・ベンカテッシュ ラガワン		25
Machine learning application to delineating metal-rich veins	Vitor Ribeiro de Sá・Katsuaki Koike	27
ベイズ統計モデリングを用いた地熱地域の深部温度の推定		
.....石塚 師也・山谷 祐介・渡邊 教弘・小林 洋介・茂木 透・浅沼 宏・梶原 竜哉・杉本 健・齋藤 遼一		29
熱水の上昇経路特定を目指した地熱地帯での地球統計学的3次元亀裂分布モデリング		
.....池本 龍平・久保 大樹・Mohamad Nur Heriawan・小池 克明		31
鉱石試料分析に基づく日本の熱水鉱床のタイプと生成年代による金属濃度の特徴		
.....下地 悠・大田 優介・小池 克明・白勢 洋平		33

浅熱水性鉱脈型鉱床における富鉱部の分布形態モデリングと鉱床生成プロセスの解釈	35
地下水流動を考慮した地球統計学的手法による汚染物質濃度分布の推定	37
Testing of drill core permeability and porosity in fault zones: Implications for groundwater flow under basins and geothermal resource mapping	39
空間的分布則を考量した機械学習による日本全域3次元地温分布モデリングと地熱資源量評価への応用	41

CONTENTS

General session

Database

- UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development to the NIPPON FOUNDATION-GEBCO Seabed2030 project
..... Yukari Kido, Mitsuko Hidaka, Daisuke Matsuoka, Tatsu Kuwatani, Junji Kaneko,
Takafumi Kasaya, Yoichi Ishikawa and Eiichi Kikawa 1

Geologic modeling

- Implementation of Geo-Vox three-dimensional geologic model visualization framework using OSGeoLive
..... Tatsuya Nemoto, Susumu Nonogaki, Shinji Masumoto and Venkatesh Raghavan 3

Geophysical survey and observation system

- Development free and open source platform for near real-time acquisition of water quality parameters
..... Niroshan Bandara, Hideyuki Tabata, Mitsunori Ueda, Daisuke Yoshida and Venkatesh Raghavan 5

Mathematics and logic

- Coordinates for expressing intervals: Mathematical tool for biostratigraphic unites based on a taxon
..... Kumiko Yamaguchi and Kiyoji Shiono 7

Remote sensing

- Comparison machine learning-based land cover classification derived from Sentinel-2 and Landsat-8 images: A case study in Lao
Cai, Vietnam Hang T. Do, Go Yonezawa and Venkatesh Raghavan 9
- Specification of upflow points of geothermal fluids in highly vegetated area by hyperspectral satellite imagery analysis and radon
survey Taiki Kubo, Hiroaki Gonnokami, Mohamad Nur Heriawan, Irwan Iskandar and Katsuaki Koike 11

Data analyses and applications

- PGE contents of igneous rocks Tetsuya Shoji 13
- Modeling of a distribution of structural shift parameter of alpha-Quartz in the Nichioji granite body on the Northwest part of
Okayama city by the Geostatistics Junji Yamakawa 15
- Evaluation of the amount of subseafloor metal resources based on the integration of geophysical data and rock physics
..... Yusuke Ohta, Tada-nori Goto, Katsuaki Koike, Koki Kashiwaya,
Takafumi Kasaya, Hidenori Kumagai and Hideaki Machiyama 17
- Possibility of crystal structural refinement of thin-section samples by using wavelength scanning X-ray diffraction method
..... Yusuke Matsuura, Kenji Hagiya and Tada-nori Goto 19
- Improving spatial resolution of DEM using slope and aspect by super-resolution technology
..... Shinji Masumoto, Keita Mizuochi, Susumu Nonogaki and Tatsuya Nemoto 21
- Changes in geological boundary surface due to differences in interpolation methods for alluvium
..... Atsushi Kajiyama and Shuji Anan 23
- Detection of terrain form changes due to rainfall induced slope failures in Tamba city, Hyogo prefecture, Japan
..... Mitsunori Ueda, Tatsuya Nemoto, Hideyuki Tabata and Venkatesh Raghavan 25
- Machine learning application to delineating metal-rich veins Vitor Ribeiro de Sá and Katsuaki Koike 27

Estimation of deep temperatures around a geothermal field using a Bayesian statistical modeling	
..... Kazuya Ishitsuka, Yusuke Yamaya, Norihiro Watanabe, Yosuke Kobayashi, Toru Mogi, Hiroshi Asanuma, Tatsuya Kajiwara, Takeshi Sugimoto and Ryoichi Saito	29
3D geostatistical modeling of fracture distribution in geothermal area for specifying ascent fluid-flow paths	
..... Ryuhei Ikemoto, Taiki Kubo, Mohamad Nur Heriawan and Katsuaki Koike	31
Characterization of metal contents of ore samples in hydrothermal deposits in Japan depending on type and geologic ages	
..... Yu Shimoji, Yusuke Ohta, Katsuaki Koike and Yohei Shirose	33
Spatial modeling of enriched zones in an epithermal vein-type deposit and interpretation of deposit-formation process	
..... Toshiki Muraoka, Vitor Ribeiro, Shohei Tomita, Katsuaki Koike and Hiroshi Takahashi	35
Estimation of contaminated materials concentration by a geostatistical method with groundwater flow	
..... Shizuka Takai, Taro Shimada, Seiji Takeda and Katsuaki Koike	37
Testing of drill core permeability and porosity in fault zones: Implications for groundwater flow under basins and geothermal resource mapping	
..... Jacek Scibek, Taiki Kubo and Katsuaki Koike	39
3D temperature-distribution modeling over Japan Island by machine learning considering spatial correlation law with application to geothermal resources assessment	
..... Yusei Ieki, Katsuaki Koike and Taiki Kubo	41

国連海洋科学の 10 年と日本財団-GEBCO-Seabed2030 project

木戸ゆかり*・日高弥子・松岡大祐・桑谷立・金子純二・笠谷貴史・石川洋一・木川栄一*

UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development to the NIPPON FOUNDATION-GEBCO Seabed2030 Project

Yukari Kido*, Mitsuko Hidaka, Daisuke Matsuoka, Tatsu Kuwatani, Junji Kaneko, Takafumi Kasaya, Yoichi Ishikawa and Eiichi Kikawa *

* 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: 国連海洋科学の 10 年, NF-Seabed2030, GEBCO2020, 海底地形データ, DARWIN 航海データサイト

Key words : UN Decade of Ocean Science, NF-Seabed2030, GEBCO2020, Bathymetry, DARWIN data site

1. はじめに

11 月の Geoinforum2020 では The NIPPON FOUNDATION-GEBCO Seabed2030 Project (以下, Seabed2030) に向けた海底地形データ提供について報告した(木戸, 2020a). 本年 1 月に GEBCO WEEK, 3 月末に Crowd Sourced Bathymetry Working Group (CSBWG) No.10 が開催され, 世界の海底地形データの一元化「Map the Gaps」が進んでいる(木戸, 2021). 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (以下, JAMSTEC) の“数値海底地形科学”研究プログラムでも過去の海底地形データを提供する項目が含まれている(木戸, 2020b). 本稿では, 本年 1 月より始まった国連海洋科学の 10 年との連携や GEBCO へのデータ提供, 各国の CSB 活動について紹介する.

2. 国連海洋科学の 10 年

「持続可能な開発のための国連海洋科学の 10 年 (以下, 国連海洋科学の 10 年)」とは, 2017 年 12 月に国連教育科学文化機関 (ユネスコ, UNESCO) の政府間海洋学委員会

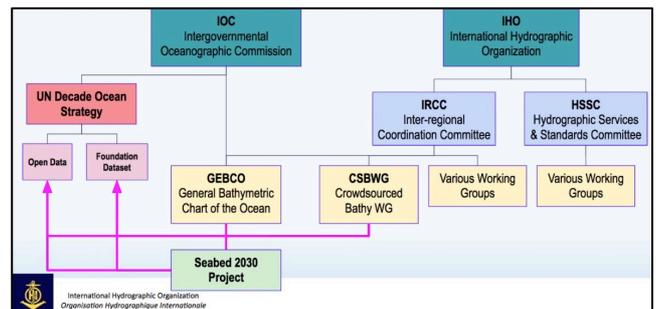
(Intergovernmental Oceanographic Committee, IOC) からの提案を受けて国連総会において決議された開発目標である. 本年 2021 年 1 月から 2030 年の 10 年間の間に貧困や飢餓, エネルギー, 気候変動, 平和的社会など地球規模の課題を解決する 17 の具体的な行動目標が定められている. 海洋に関する達成すべき目標 SDG14「海の豊かさを守ろう」等, 集中的に取り組む項目を掲げている(第 1 図). 海洋の持続的な開発に必要な科学的知識, 基盤やパートナーシップを構築し, 海洋政策に反映し, 全ての持続可能な開発に向けて貢献する(文部科学省日本ユネスコ国内委員会資料, 2020; JAMSTEC コラム, 2021). 未知の部分が多く残される海洋底マッピング「Seabed2030」に注力する取り組みを, SDG14「海の豊かさを守ろう」の実現に含めるようにスタートし後押ししたこととなる.

3. Seabed2030 の位置づけ

国連海洋科学の 10 年と足並みを揃えるように IOC および International Hydrographic Organization (IHO) が推進する世界の海底地形データの一元化 GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans: 大洋水深総図) が実施中である. IOC, IHO, GEBCO, CSBWG および Seabed2030 Project の体制を第 2 図に示す.



第 1 図 JAMSTEC 国連海洋科学の 10 年のポスター



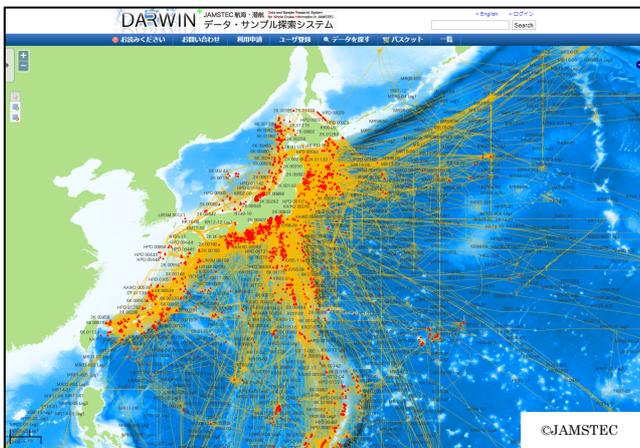
第 2 図 国連海洋科学の 10 年, GEBCO, CSBWG, Seabed2030 の関係図

GEBCO ウェブサイトには、最新の「GEBCO_2020 Grid」アクセスサイトがある：
https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

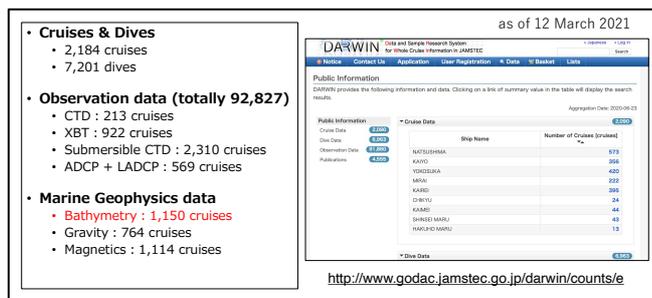
Seabed2030 プロジェクトは、2030年までに全世界の海底を水深1500mまでは、基本として100m x 100m間隔のグリッドデータ作成を目指す。1500-3000mは200m x 200m, 3000-5750mは400m x 400m, 5750m以深は800m x 800mの解像度で海底地形図を作成する。北太平洋・北極海・大西洋・インド洋・西/南太平洋・南極海といった海域ごとに取りまとめ機関があり、年2回の会合時に進捗状況を報告している。ニュージーランドのNIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd, New Zealand) が日本周辺海域を含む太平洋域の取りまとめ機関であり、次のGEBCO_2021 Gridの作成を手掛けている。

4. DARWIN データサイトを通じたデータ提供

JAMSTECでは、DARWINという航海データベースから研究調査データを公開している(第3図)。3月12日の段階でのデータ登録数を第4図に示す。日高(2021)では、様々な機械学習による海底地形データの高解像度化を比較検証している。この手法による“Map the Gap”は、数理海底地形科学の大きな柱の一つである。粗い実測データを入力値とし機械学習による高解像度の出力と詳細な実測値の比較検討を繰り返し、少ないデータから詳細図へ作図フローの確立を目指す。また自走型ロボットを用いたデータ自動取得化の方向性も探っている。なお日本の海底地形データ取りまとめ機関は海上保安庁海洋情報部であり、JAMSTEC船舶で取得したデータは海洋情報部へ提出されている。



第3図 DARWIN map viewerによる日本周辺の海底地形測線図

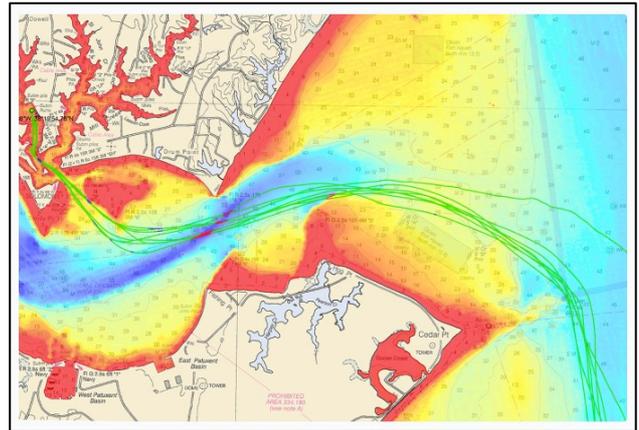


第4図 DARWIN データベースサイトのデータ収録状況(3月12日)

5. 世界のCSBの動向

1月のGEBCO WEEKでは、一般向けのシンポジウム、

海底地形データ解析ソフトウェア講習、各機関の更新状況などの話題提供が行われた(木戸, 2021)。そして3月末のCSBWG10ではクラウドソースに特化した集中審議が行われた。依然として世界の20%程度の範囲しか実測データが得られていない現状を9年の年月でどのように埋めていくのか。民間のヨットやプレジャーボート、海底ケーブル会社、観光航路、漁船等、広範囲に協力を求めて、ギャップを埋めていく戦略が紹介された。海洋調査会社の協力を得て、データロガーを貸し出しデータ取得に協力をしてもらうという草の根作戦である。第5図では、NOAAからの参加者が紹介したCSBによる作図例である。



第5図 NOAAの「The power of the crowd」のサイト：
<https://www.ncei.noaa.gov/news/power-crowd>
 日本にはこうしたクラウドソースの文化がないため、草の根的にデータ収集をする試みを標準化するのは難しい。研究活動で取得したデータ提供の呼びかけや機械学習や自動化が進み、測量の粗いエリアをカバーしていく方向性が妥当ではないか。本学会でのデータロガーやマッピングの専門家にもお知恵を拝借したい。

文 献

GEBCO grid data

https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

日高弥子ほか(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.

https://doi.org/10.6010/geoinformatics.32.1_3/

JAMSTEC トピックス: コラム

http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20210426/JAMSTEC航海・潜航データ・サンプル検索システム

(DARWIN). <http://www.godac.jamstec.go.jp/Darwin/>, (2021年3月中旬以降クローズ中)

木戸ゆかり(2021) 海底地形図週間「GEBCO WEEK」について, 情報地質, vol.32, no.1, pp.19-20.

https://doi.org/10.6010/geoinformatics.32.1_19/

木戸ゆかり(2020a) Seabed2030に向けた試み-日本周辺の海底地形データの提供について-, 第31回日本情報地質学会講演会講演要旨集2020年, pp.1-2.

木戸ゆかり(2020b) JAMSTECの新研究プログラム“数理海底地形”始動. 情報地質, vol.31, no.1, pp.13-15.

https://doi.org/10.6010/geoinformatics.31.1_13/

文部科学省日本ユネスコ国内委員会 <http://www.mext.go.jp/unesco/index.htm>

NOAA/NCEI “The power of the crowd”

<https://www.ncei.noaa.gov/news/power-crowd>

(全てのwebサイトの確認日2021年5月17日)

OSGeoLive を用いた Geo-Vox 3次元地質モデル可視化フレームワークの実装

根本 達也*・野々垣 進**・升本 眞二*・ベンカテッシュ ラガワン***

Implementation of Geo-Vox Three-dimensional Geologic Model Visualization Framework using OSGeoLive

Tatsuya NEMOTO*, Susumu NONOGAKI**, Shinji MASUMOTO* and Venkatesh RAGHAVAN***

* 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. E-mail: tnmoto@osaka-cu.ac.jp

** 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

*** 大阪市立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan

キーワード： ボクセルモデル, 3次元可視化, 地質断面, FOSS4G, Live USB

Key words: Voxel model, Three-dimensional visualization, Geological cross section, FOSS4G, Live USB

1. はじめに

地質構造を理解するためには、地質情報を3次元地質モデルとして表現し、可視化することが有効である。Nemoto *et al.* (2020) は3次元地質モデルをWeb上で共有・可視化することを目的に、オープンスタンダードを用いたWeb可視化フレームワーク Geo-Voxを開発した。

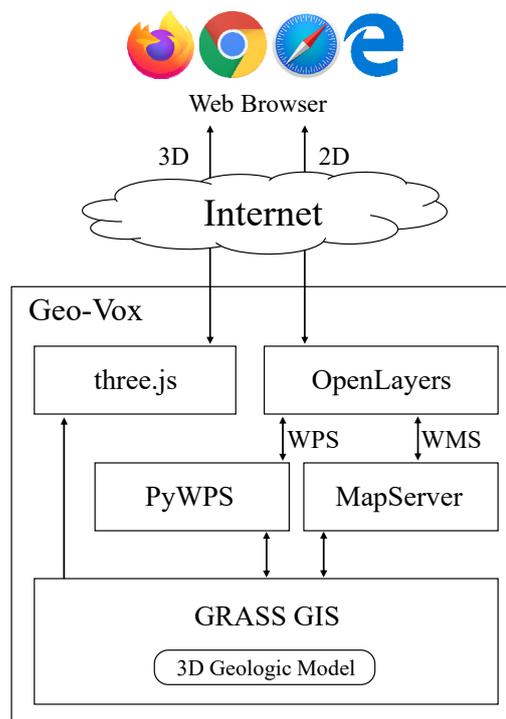
本研究では、Geo-VoxをOSGeoLiveに実装し、どのようなコンピュータ環境でも3次元地質モデル可視化のフレームワークを利用できるようにした。また、OSGeoLiveにプリインストールされているFOSS4G (Free Open Source Software for GeoSpatial) にあわせてGeo-Voxを改良した。

2. OSGeoLiveの概要

OSGeoLiveはLinuxディストリビューションのひとつであるLubuntuをベースに様々なFOSS4Gがインストールされたパッケージであり、OSGeo財団によって公開されている (<https://live.osgeo.org/>)。OSをコンピュータにインストールすることなくUSBメモリ等から起動し、デスクトップGISのGRASSやQGIS, WebマッピングサービスのMapServerやGeoServer, 地理空間ライブラリのGDAL/OGRやProj.4等の多くのFOSS4Gを利用できる。また、VirtualBox等を用いて仮想環境でそれらのソフトウェアを使用することも可能である。OSGeoLiveはすべてフリーソフトで構成されており、自由に複製、配布できる。本研究では、OSGeoLive 13.0上で動作するようにGeo-Voxを改良した。

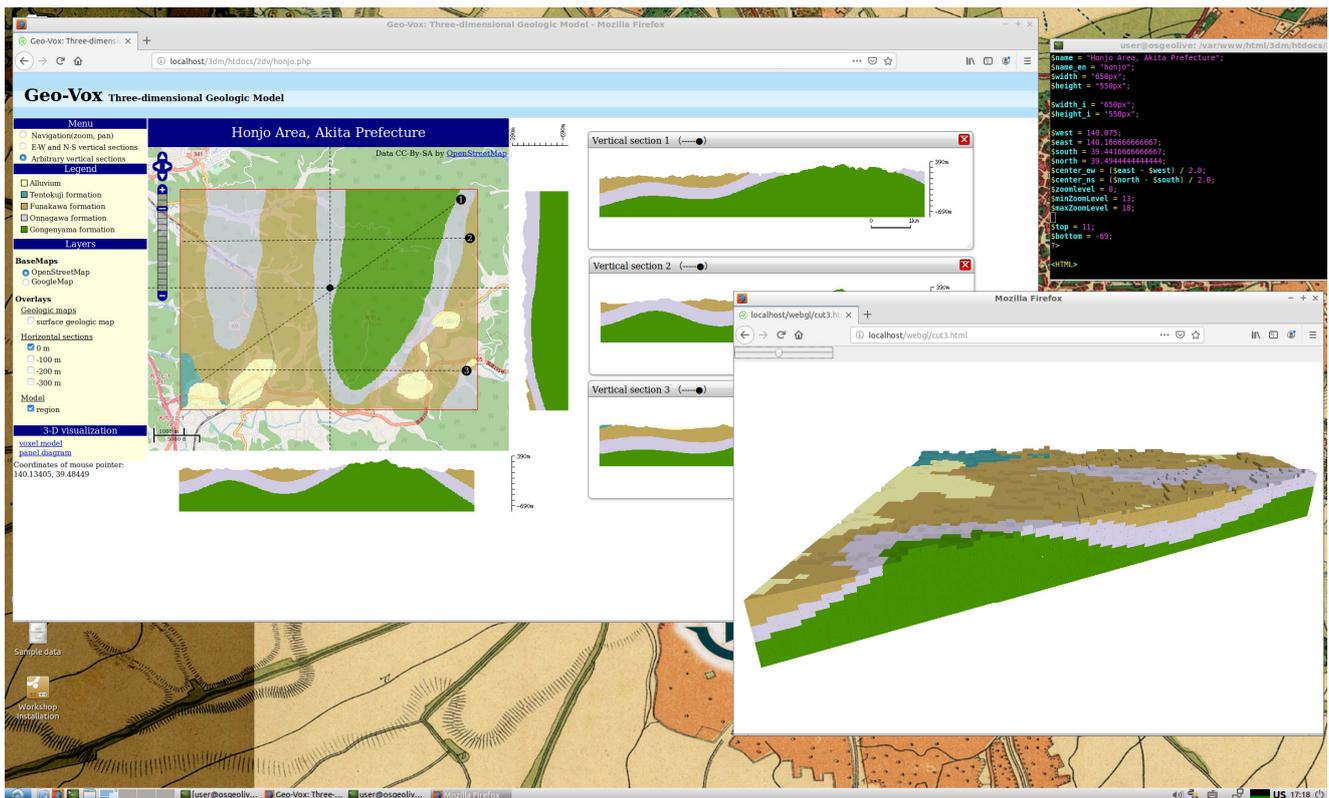
3. Geo-Voxのシステム構成

Geo-Voxのシステム構成を第1図に示す。3Dライブラリthree.js以外のソフトウェアはすべてOSGeoLiveにプリインストールされているFOSS4Gである。



第1図 Geo-Voxのシステム構成。

Geo-Voxはクライアント・サーバ環境で動作し、WebサーバにはApacheを使用している。3次元地質モデルを管理し、地質断面図等を出力するためにGRASS GISを使用した。地質モデルのデータ形式は3Dラスタである。OGC (Open Geospatial Consortium) 標準のWPS (Web Processing Service) でGRASSコマンドを実行するためにPyWPSを使用した。また、水平断面図をWMS (Web



第2図 OSGeoLive 上での Geo-Vox の動作画面。

Map Service) で配信するために Web マッピングエンジンの MapServer を使用した。

地質モデルの鉛直断面図と水平断面図を2次元表示するための Web クライアントには OpenLayers を使用している。3次元表示には、Web ブラウザでコンピュータグラフィックスを表示させるための標準仕様である WebGL を採用し、JavaScript ライブラリの three.js を使用した。利用者は特別なソフトウェアを必要とせず、一般的な Web ブラウザを用いて3次元地質モデルを可視化できる。

4. Geo-Vox の基本機能

OSGeoLive 上での Geo-Vox の動作画面を第2図に示す。Geo-Vox では、ボクセル形式の3次元地質モデルを2次元および3次元で可視化できる。第2図の3次元地質モデルは、升本ほか(2002)による手法を用いて、地質構造の論理モデルと境界面データから構築した。ボクセルモデルのデータ形式は GRASS GIS の3D ラスタデータ ASCII 形式とした。以下に、Geo-Vox の基本機能を示す。

2次元表示機能

Open Street Map や Google マップ等の地図上に、水平断面図を重ね合わせて表示できる。マウス操作で地図を拡大・縮小、移動して表示することも可能である。また、地図上をクリックすることで、クリックした地点を通る東西と南北の鉛直断面図を表示したり、クリックした2点間の鉛直断面図を表示したりできる。

3次元表示機能

地質モデルを3次元で表示し、マウス操作により視点の移動やモデルの拡大・縮小表示を動的に行える。また、モデルを鉛直にカットし、任意の断面を表示することもでき

る。同様に、複数の東西・南北断面からなるパネルダイアグラムも表示可能である。

地質境界面の出力機能

地質境界面を3角メッシュで出力し、CAD 等で利用可能な DXF 形式で保存できる。3角メッシュデータの作成には、Nemoto *et al.* (2005) による手法を用いた。

5. おわりに

OSGeoLive 上に、3次元地質モデル可視化フレームワーク Geo-Vox を実装した。Geo-Vox を容易に使用したいときや可視化環境とセットで地質モデルを配布したいときに有効である。

今後は Geo-Vox に加えて、境界面の推定プログラム等も動作可能にし、モデルの作成から可視化までを行える環境を構築する予定である。本研究は JSPS 科研費 21K11905 の助成を受けたものである。

文 献

- 升本真二・根本達也・ベンカテッシュ ラガワン・塩野清治 (2002) 地質関数を用いた3次元地質モデルのボクセル化と可視化. 情報地質, vol.13, no.2, pp.86-87.
- Nemoto T., Masumoto S., Raghavan V., Nonogaki S. and Nakada F. (2020) Development of Open Source Web-GIS Platform for Three-dimensional Geologic Modeling and Visualization. *Spatial Information Research*, vol.28, no.6, pp.645-653.
- Nemoto T., Masumoto S. and Shiono K. (2005) Extraction of Geologic Boundary: Proposal of Neighbourhood Function. *International Journal of Geoinformatics*, vol.1, no.1, pp.41-50.

準リアルタイム水質観測のための フリーオープンソースプラットフォームの開発

バンダラニロシャン*・田端秀行**・植田允教**・吉田大介**・ラガワンベンカテッシュ**

Development Free and Open Source Platform for Near Real-Time Acquisition of Water Quality Parameters

BANDARA Niroshan*, TABATA Hideyuki**, UEDA Mitsunori**, YOSHIDA Daisuke** and RAGHAVAN Venkatesh**

*大阪市立大学大学院創造都市研究科, Graduate School for Creative Cities, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: niroshansnj@gmail.com

**大阪市立大学工学部研究科, Graduate School of Engineering, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan.

キーワード: 水質監視システム, 無線センサネットワーク, オープンソースプラットフォーム

Key words: Water Quality Monitoring, Wireless Sensor Network, Open Source Platform

1. Introduction

Access to Open Source software and low-cost sensors have opened new opportunities for the design of real-time monitoring systems in several application needs. Water quality monitoring is crucial for effective environmental management. Therefore, it is necessary to design near real time water quality monitoring system for unattended data acquisition (Jiang *et al.*, 2020).

Geo-IoT platform with Android device for in-situ water quality measuring has been developed and tested in the previous study (Bandara *et al.*, 2020). The attempt of this study is to design an Open Source platform that is extendable and customizable for water quality monitoring. Therefore, in this study we provide an integrated solution for collection of water quality parameters for both human assisted in-situ measurements and continuous unattended monitoring.

We describe the framework of Open Source software tools that were implemented to collect, process, and visualize the data received by sensor devices in near real-time. The current platform was tested for monitoring four physio-chemical water quality parameters namely, pH, Oxidation Reduction Potential (ORP), Electrical Conductivity (EC) and Temperature.

The presented architecture can be exploited for various monitoring scenarios for both surface water and groundwater monitoring to identify trends of key parameters and provide alerts when recorded data values are beyond normal threshold situations.

2. Material and Methods

The sensor device comprises of a Raspberry Pi Zero W single-board computer (www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero-w), Atlas Scientific pH, ORP, EC, Temperature sensors and Tentacle T3 extension board (atlas-scientific.com). The data are logged locally on SD-card. Real-time data transmission is enabled using

CANDY Pi Lite+ communication board (candyline.com/portfolio/candy-pi-lite-lte-m) and IJmio IoT SIM (www.ijmio.jp/mit). Sensor device leverages above mentioned components to develop data logging system. Connectivity between each of the peripheral and single-board computer is illustrated in Figure 1.

In the continuous unattended monitoring scenario, the sensor device sends data directly to the ThingsBoard (thingsboard.io) platform over the internet. In the human assisted water quality monitoring scenario, the sensor device connects to Android phone via Bluetooth. Open Data Kit (ODK, getodk.org) is as an interface for field data collection. ODKSensor app is newly developed to integrate data from water quality sensors with ODKCollect data collection form.

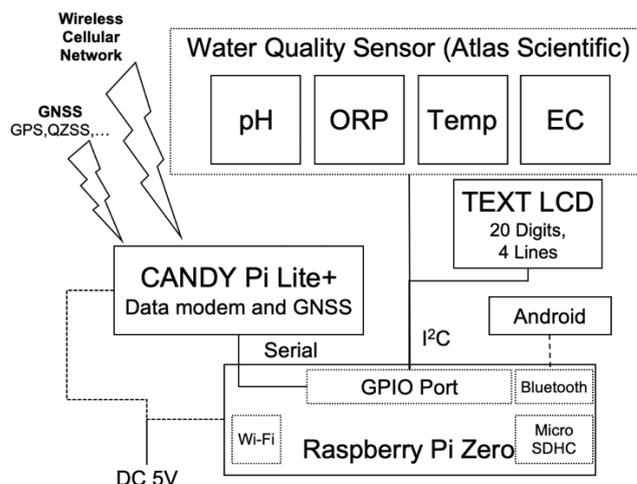


Figure 1: Details of data logging system

3. System Design and Workflow

Overall system design consists of assembling sensor devices with single board computer, implementing

wireless transmission, software integration and development. The functions of system can be broadly be divided as client and server components. The client side for unattended continuous data acquisition consists of main sensor device and communication module. The client side for human assisted data collection includes the same sensor device without CANDY Pi Lite communication board. Android device is connected to sensors via inbuilt Bluetooth module in Raspberry Pi Zero W single-board computer for data transmission. ODKSensor app is integrating sensor values into ODKCollect form fields.

At the Server side, the ThingsBoard Open Source IoT platform is deployed for device management, data collection, processing and visualization. The data collection via Android mobile is supported using ODK-Central Server.

A middleware solution was deployed to facilitate communication and interoperability between ThingsBoard and ODK-Central. The middleware provides as a hidden translation layer for seamless data visualization on the Thingsboard dashboard.

PostgreSQL (www.postgresql.org) is used as a backend database for both ThingsBoard and ODK-Central. Integration of server side components is shown in Figure 2.

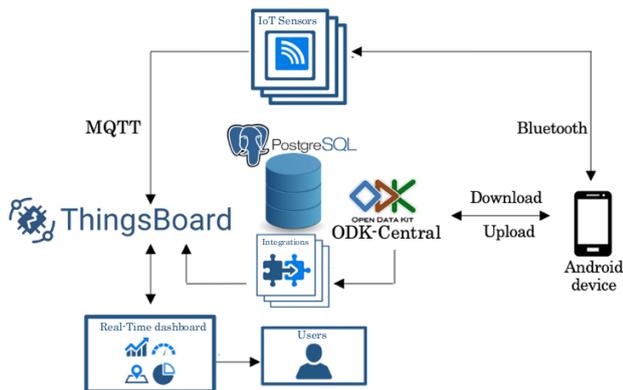


Figure 2: Software integration and system architecture

Current sensor device is configured to collect data in at predefined intervals for continuous monitoring scenario. The timestamp from the sensor device and recorded sensor readings are uploaded to the server using MQTT (mqtt.org) messaging protocol for IoT. Data stored in the PostgreSQL database is instantaneously displayed on ThingsBoard dashboard.

In the human assisted data collection scenario, the data is gathered using ODKCollect mobile application. First, the fields for sensor data is defined in the XLS form (xlsform.org). The developed XLS form is uploaded to ODK-Central server. Subsequently, the data collector can download XLS form to an Android phone. The ODKSensor app connects to sensor device via Bluetooth and populates the ODKCollect form with the sensor readings. Data from mobile phone can be uploaded to the server individually or as a collection of data points once the internet is available. The middleware application is triggered when ODK-Central receives data form Android device and data is automatically displayed on ThingsBoard dashboard.

4. Results

Numerous experiments were carried out to monitor the

system's behaviors and functions. The system kept in continuous operation for 48 hours. Data received from the sensor device can be visualized on a customizable web-based dashboard. Figure 3 depicts the screenshot of the Thingsboard dashboard.

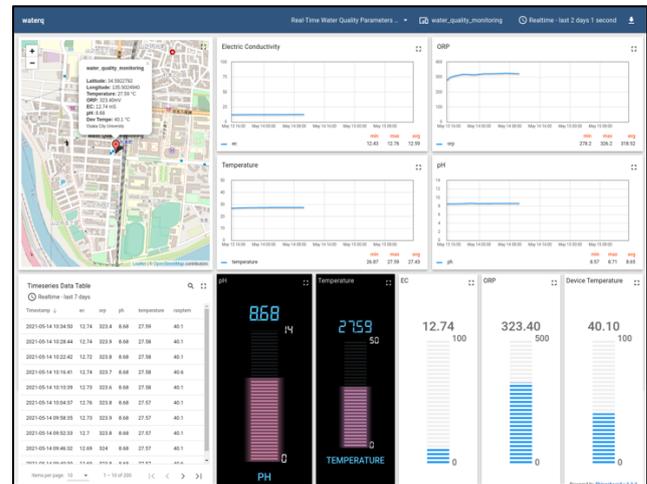


Figure 3: Data visualization on ThingsBoard dashboard

Users can visualize present data or set the dashboard to visualize past data with a given hour or date. Information that supports the interpretation of water quality data is visualized as time series line charts, digital gauges and tables with timestamps in the panel. The spatial location of data collection is shown on the map with background OpenStreetMap layer.

5. Conclusion

Survey of available water quality monitoring solutions reveals that existing platforms are either designed for field data collection or to support unattended continuous monitoring. Few systems permit multi-purpose uses (Skarga-Bandurova *et al.*, 2020). However, these systems are not capable of fulfilling the requirements of complete client-server platforms to support data management needs. The system developed in this research provides a comprehensive, generic, and multi-purpose solution for remote data collection needs. Moreover, the system can be easily customized for a variety of real-time environmental monitoring.

Reference

- Bandara, N., Ueda, M. and Raghavan, V. (2020) Development of Geo-IoT Platform for Water Quality Monitoring. GEOINFORUM-2020. Vol. 31, pp 21-22.
- Jiang, J., Tang, S., Han, D., Fu, G., Solomatine, D. and Zheng, Y. (2020) A Comprehensive Review on The Design and Optimization of Surface Water Quality Monitoring Networks. Environmental Modelling & Software. Vol. 132, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104792>.
- Skarga-Bandurova, I., Krytska, Y., Velykzhanin, A., Barbaruk, L., Suvorin, O. and Shorokhov, M. (2020) Emerging Tools for Design and Implementation of Water Quality Monitoring Based on IoT. Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly. Vol. 24, pp 1-14, <https://doi.org/10.7250/csimq.2020-24.01>.

区間を表示する座標：タクソンにもとづいた生層序単元のための数学ツール

山口 久美子*・塩野 清治**

Coordinates for Expressing Intervals : Mathematical Tool for Biostratigraphic Unites Based on a Taxon

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：生層序区分，生存期間，種の順序，群集帯，論理地質学

Key words : Biostratigraphic Classification, Range, Order of Species, Assemblage Zone, 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，地質学概念を数学表現することが必要である．塩野・山口(1997)は古生物の生存期間にもとづいた年代区分を表現して，全順序集合の区間を2次元の座標で表示することを手短に述べた．本研究では，塩野・山口(1997)を振り返り，座標を用いてタクソンにもとづいて年代区分する．

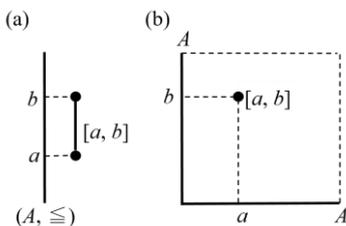
2. 全順序集合上の区間を表示する座標

2.1 全順序集合上の区間

直観的に，全順序集合 (A, \leq) とは，集合 A のすべての要素が順序 \leq で並べられる集合である．全順序集合 (A, \leq) 上の区間 $[a, b]$ を， $a \leq b$ である $a, b \in A$ に対して，

$$[a, b] = \{x \mid a \leq x \leq b, x \in A\} \quad (1)$$

と定義する． (A, \leq) 上の $[a, b]$ を， $A \times A$ の座標図上の点 (a, b) で表す(第1図参照)．



第1図 (a)全順序集合 (A, \leq) 上の区間 $[a, b]$. (b) $[a, b]$ を表す点 (a, b) .

2.2 区間の順序

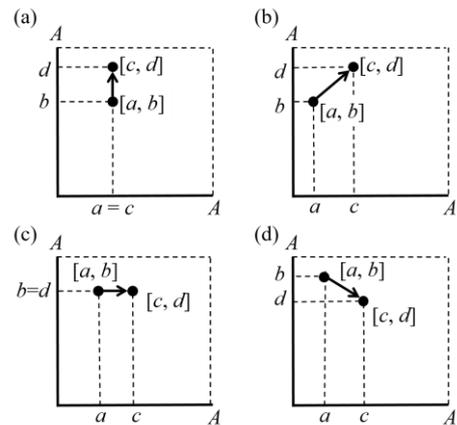
全順序集合 (A, \leq) 上のすべての区間の集合を A^* と書くことにする． A^* 上の全順序 ρ^* を次のように定義する．

$[a, b] \rho^* [c, d] \Leftrightarrow a < c$, または, $(a = c, \text{かつ}, b \leq d)$ (2)
塩野・山口(1997)は， A^* 上の順序 \leq^* を次のように定義した．

$$[a, b] \leq^* [c, d] \Leftrightarrow a \leq c, \text{かつ}, b \leq d. \quad (3)$$

第2図は $[a, b] \rho^* [c, d]$ を点 (a, b) から点 (c, d) の矢印で示し

た4通りの座標図である．第2図(a), (b), (c)は $[a, b] \leq^* [c, d]$ も表す．第2図(d)は \leq^* で比較できない関係を表す．



第2図 $[a, b] \rho^* [c, d]$ を表す4通りの矢印. (a)上向き矢印. (b)右上向き矢印. (c)右向き矢印. (d)右下向き矢印.

3. 種の生存期間を表す座標

3.1 タクソンの生存期間

時間軸上の或る時期を0(原点)とし，未来へ向かう方向を正とする．時期を100万年，あるいは，1万年などの単位で測定して，その数値の小数点以下を切り捨てた整数で表記する．時期 p から時期 q までの期間を

$$[p, q] = \{t \mid p \leq t \leq q, t \text{は整数}\} \quad (4)$$

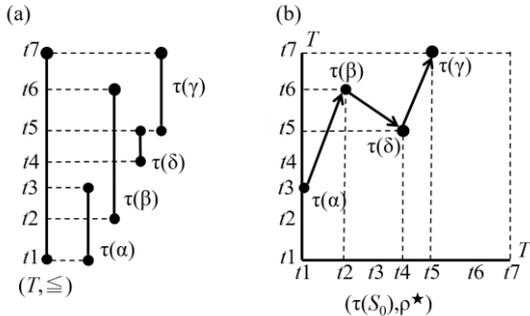
で表す．

生物は上位から界，門，綱，目，科，属，種というタクソン(taxon, 複数形はタクサ taxa)に階層的に分類される．タクソンの生存期間は(4)のような期間であると仮定する．

3.2 種の生存期間

上位のタクソン Σ の種の集合を S_0 とする．上位のタクソン Σ の生存期間を T とすると，種の生存期間は(1)の例で全

順序集合 (T, \leq) 上の区間である。種 α の生存期間を $\tau(\alpha)$ とする。種の生存期間の集合 $\tau(S_0) = \{\tau(\alpha) \mid \alpha \in S_0\}$ 上の全順序 ρ^* を(2)で定義する。第3図の例のように、種の生存期間が全順序 ρ^* で並べられる。 $T \times T$ の座標図に $\tau(\alpha)$ を点 $(\min \tau(\alpha), \max \tau(\alpha))$ で表して、全順序集合 $(\tau(S_0), \rho^*)$ のグラフを書く。



第3図(a) $S_0 = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta\}$ の種の生存期間。(b) $(\tau(S_0), \rho^*)$ のグラフ。

4. 座標を応用した種の選択

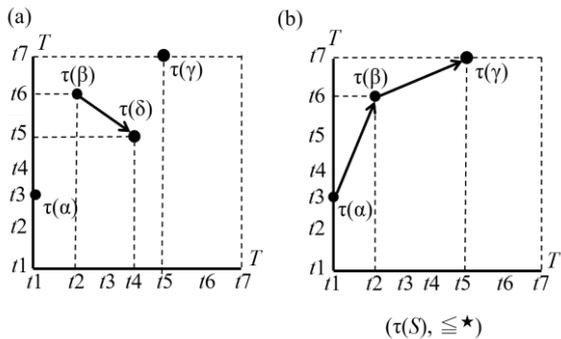
S_0 上の κ を $\tau(S_0)$ 上の \leq^* , すなわち, (3)で定義する。次の2つの仮定を満たす種の集合 S を S_0 から選択する。

仮定1 (S, κ) は全順序集合である。

仮定2 $T = \cup_{\alpha \in S} \tau(\alpha)$

第2図, 第4図より, 次の S は仮定1, 2を満たす。

$S = S_0 - \{\beta \mid T \times T$ の座標図の点 $\tau(\alpha)$ から点 $\tau(\beta)$ への矢印の向きが右下向きである。} (5)



第4図 S の数式表現を説明する図。(a)点 $\tau(\beta)$ から点 $\tau(\delta)$ への矢印が右下向きである。(b) $(\tau(S), \leq^*)$ のグラフ。

5. 年代の生存種のグラフ

5.1 年代の生存種

第5図(a)のように, 仮定1, 2を満たす S を選択して T を年代区分する。 T の時期 p に生存する種の集合 $\sigma(p)$ は,

$$\sigma(p) = \{\alpha \mid p \in \tau(\alpha), \alpha \in S\}$$
 (6)

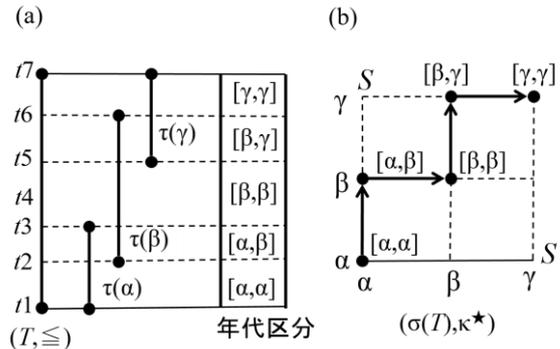
で, (1)の例で (S, κ) 上の区間である。(3)で定義した $(\sigma(T), \kappa^*)$ は全順序集合であり, 年代の生存種の順序を表す。第5図(b)のように, $S \times S$ の座標図に $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフを書く。

5.2 $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフの上向き矢印

上向き矢印は新しい種の出現を表す。矢印の長さに対応する目盛りの数は出現種の数である。出現時期 t の場合, 点 $\sigma(t-1)$ から点 $\sigma(t)$ への矢印が上向きである。 $\sigma(t-1) \cup \sigma(t) = \sigma(t)$ であり, 出現時期 t で $\sigma(t-1)$ と $\sigma(t)$ の年代に区分する。

5.3 $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフの右向き矢印

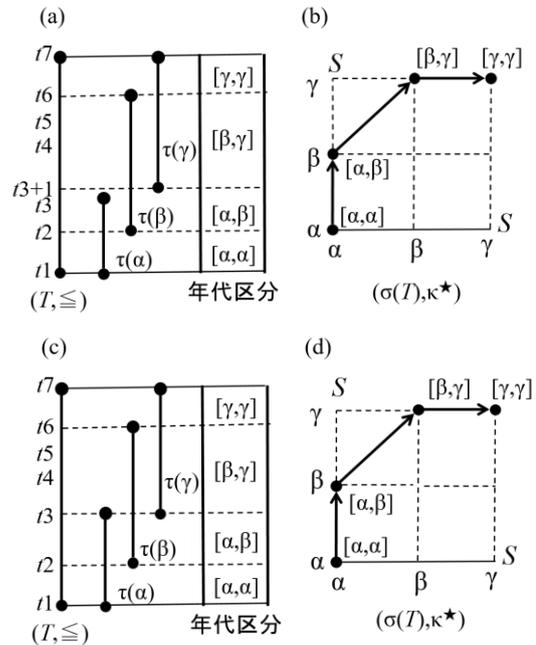
右向き矢印は古い種の絶滅を表す。矢印の目盛りの数は絶滅種の数である。絶滅時期を t とすると, 点 $\sigma(t)$ から点 $\sigma(t+1)$ への矢印が右向きである。 $\sigma(t) = \sigma(t) \cup \sigma(t+1)$ であり, 絶滅時期 t で $\sigma(t)$ と $\sigma(t+1)$ の年代に区分する。



第5図 (a) $S = \{\alpha, \beta, \gamma\}$ である場合の年代区分の例。(b) $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフ。

5.4 $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフの右上向きの矢印

第6図のように, 右上向きの矢印は同時期に種の出現と絶滅がある場合の生存種の順序を表す。矢印の右向き成分, 上向き成分の目盛りの数は, それぞれ, 絶滅種, 出現種の数である。(a)のように絶滅の直後に出現がある場合, その絶滅時期を直後の時期に改めて出現時期で年代区分する。(c)のように同時期 t に出現と絶滅がある場合, $\sigma(T)$ を改めて $\sigma(T) = \sigma(T) - \{\sigma(t)\}$ として t で年代区分する。



第6図 $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフに右上向きの矢印がある2つの場合。(a)種 α の絶滅時期 t_3 の直後の時期 t_3+1 に種 γ が出現する場合。(b) $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフ。(c)種 α の絶滅時期と種 γ の出現時期が同時期 t_3 の場合。(d) $\sigma(T) = \sigma(T) - \{\sigma(t_3)\}$ と改めた $(\sigma(T), \kappa^*)$ のグラフ。

6. おわりに

タクソンにもとづいた年代は層序断面中の生層序単元に相当する, 区間を座標で表示することは, 生層序単元を求めるアルゴリズムの手がかりをあたえるだろう。

文献

塩野清治・山口久美子(1997)生層序学的方法を形式表現するための数学的基礎-古生物の生存期間と年代区分-. 情報地質, vol.8, no.4, pp.227-237.
https://doi.org/10.6010/geoinformatics11990.8.4_227

機械学習による Sentinel-2 および Landsat-8 画像の土地被覆分類比較： ベトナム・ラオカイ市を対象として

ド テイ ハン・米澤 剛・ラガワン ベンカテッシュ

Comparison Machine Learning-based Land Cover Classification Derived from Sentinel-2 and Landsat-8 Images: A Case Study in Lao Cai, Vietnam

Do T. HANG, YONEZAWA Go and RAGHAVAN Venkatesh

大阪市立大学工学研究科, Graduate School of Engineering, Osaka City University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: dohanghum@gmail.com

キーワード：土地被覆, 畳み込みニューラルネットワーク, Sentinel-2, Landsat-8

Keywords: Land Cover, LCNN, Sentinel-2, Landsat-8

1. Introduction

A machine learning model Light Convolutional Neural Network (LCNN) has been successfully applied on Land Cover (LC) classification (Song *et al.*, 2019; Do *et al.*, 2020). Freely accessible Remote Sensing (RS) data such as Sentinel-2 and Landsat-8 has been widely used for mapping LC.

The multispectral Sentinel-2 is launched in 2015 which provides 13 spectral bands. Landsat-8 launched in 2013 includes 11 spectral bands. The two images are useful for agriculture, forestry and environmental monitoring. This study aims to compare the capability of the two RS data on LC classification for Lao Cai area in Vietnam.

2. Data and Methodology

2.1. Study area and data

The study area covering an area of approximately 525 km² is located in Lao Cai province in the North of Vietnam. Seven main LC categories of the area which are Water (W), Built-up (B), Mining/Bare land (MB), Rice Terrace (RT), Paddy Field (PF), Non-Forest Vegetation (NFV) and Forest (F) are classified in this research.

In this study, 4 bands at 10 m resolution (blue, green, red, NIR) of Sentinel-2 image captured on 3rd November 2018 and 6 bands at 30 m spatial resolution (blue, green, red, NIR, SWIR 1, SWIR 2) of Landsat-8 image obtained on 9th October 2014 covering the study area are distinguished for LC mapping. Reference polygon samples of the seven LC classes of the area are collected based on referring the samples used in Do *et al.* (2020) and visual interpretation of Sentinel-2 images with verification using Google Map.

The LCNN model employed in this study is as same as in Do *et al.* (2020). It includes 3 convolutional layers: The first layer with 20 filters of size $3 \times 3 \times n$, where n is number of input bands of the RS data, the second and third layers have 20 filters of size $2 \times 2 \times 20$. A Softmax layer is used for providing a probability distribution over 7 LC classes. Zero padding and stride equals 1 are

employed. ReLU activation function and Adam optimizer with a learning rate of 10^{-5} are used. The number of epochs equals to 100, early stopping is applied. The LCNN model is implemented using Google Colaboratory framework. Finally, the classified LC maps extracted from the two RS data are evaluated and compared.

Comparison of training and validation for Sentinel-2 indicates drastic decreases in the first 10 epochs (Figure 1 (a)) and subsequently shows a slow decrease and remains steady value after 100 epochs. The loss for validation set fluctuates above loss for training set. Accuracy of training set increases in the first 10 epochs and subsequently almost stable. On the other hand, accuracy of validation set fluctuates below the values of training set (Figure 1 (b)). In case of Landsat-8, loss and accuracy for training and validation data are the similar to Sentinel-2 (Figure 1 (c) and (d)) but very little fluctuations observed for validation data is much less. The model terminates after 100 epochs. It is suggested that the model produces reliable results after 100 epochs.

3. Results

Figures 3(a) and 3(b) show the classified maps using Sentinel-2 and Landsat-8, respectively. Landsat-8 produces higher User's Accuracy (UA), Producer's Accuracy (PA) and Overall Accuracy (OA) for all LC classes, except PA value of water class (Figure 2). While Sentinel-2 image attains total OA value of 91%, Landsat-8 shows higher OA value of 97%.

OA of all LC classes of Landsat-8 are higher than 92%. RT and F are classified at the highest OA, at 98%. In contrast, the OA values of Sentinel-2 are lower: NFV class is observed at the lowest accuracy, at 83%, while the highest accuracy is only 94% for B and F.

In general, higher resolution RS image could provide better LC classification result than lower resolution data. However, Korhonen *et al.* (2017) reported that the estimation accuracy of Landsat-8 is similar to Sentinel-2 (2017). This study also confirms that Landsat-8 image achieves better LC classification than Sentinel-2.

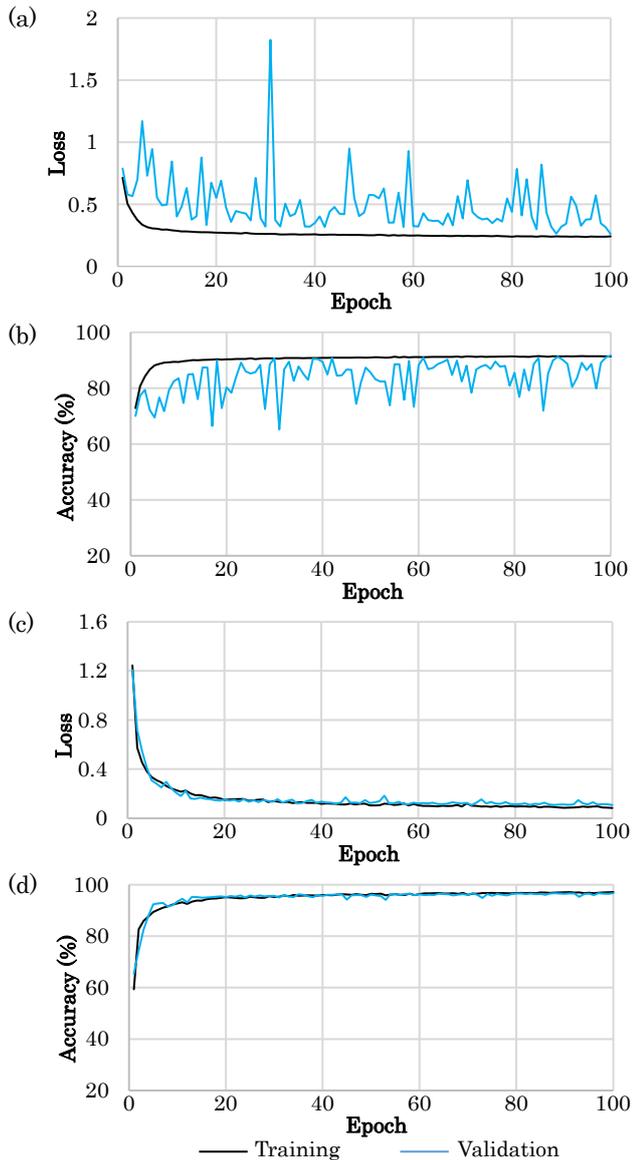


Figure 1: (a) Loss (b) Accuracy for Sentinel-2; (c) Loss (d) Accuracy for Landsat-8

Table 1. Classification accuracy

LC class	Accuracy (%)					
	Sentinel-2			Landsat-8		
	PA	UA	OA	PA	UA	OA
Water	98	76	86	94	97	95
Built-up	97	91	94	98	92	95
M/B	82	89	85	94	98	96
Paddy Field	81	91	86	93	96	95
Rice Terrace	90	94	92	100	96	98
NFV	83	83	83	96	88	92
Forest	95	94	94	98	99	98
Total OA	91			97		

UA: User's Accuracy, PA: Producer's Accuracy, OA: Overall Accuracy.

The reason for lower classification accuracy of Sentinel-2 could be due to fewer used spectral bands (4 bands) than Landsat-8 (6 bands). Moreover, the level LC details recorded at different resolutions could affect the classification accuracy. For example, Built-up class is the combination of road, building and factory sub-classes which are displayed at different spectral information in 10 m resolution Sentinel-2 image, leads to mixed-spectral

in Built-up class, while at coarser resolution of 30 m Landsat-8 image, the sub-classes are shown at the same spectral detail. As a result, Landsat-8 provides better classification result over Sentinel-2.

The obtained results suggest that Landast-8 image is more useful than Sentinel-2 on LC classification. Moreover, not only spatial resolution of RS images, but spectral bands selected and the level of details of LC classes could be important factors affect to LC classification result.

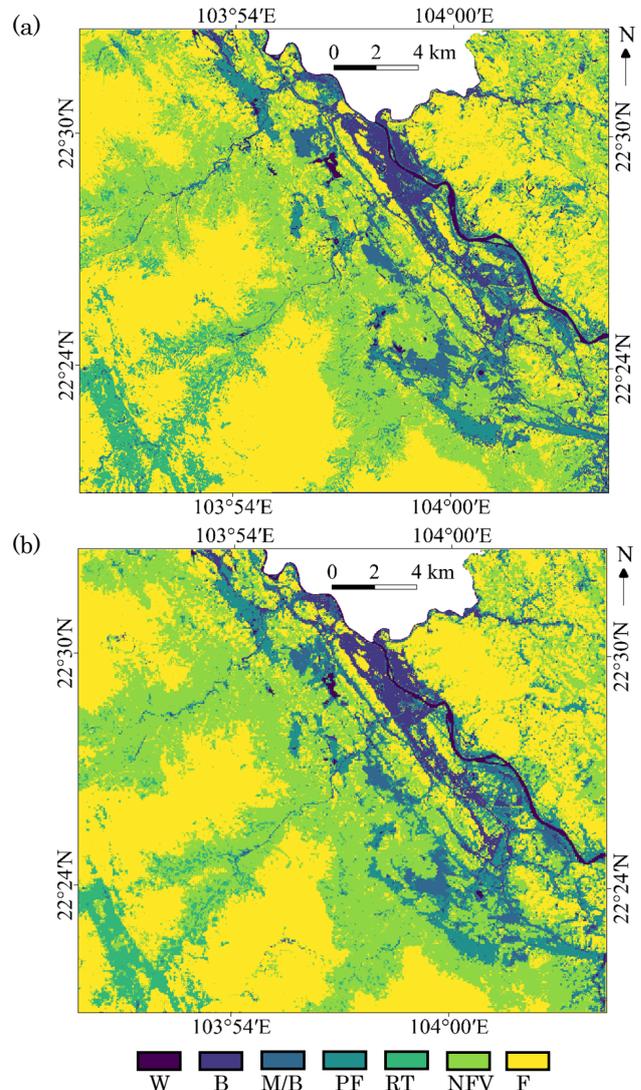


Figure 2: LC classification maps (a) Sentinel-2, (b) Landsat-8

Reference

- Do, H. T., Raghavan, V. and Yonezawa, Go. (2020). Land use/land cover classification using Light convolutional neural network: a case study in Lao Cai, Vietnam. *GeoInformatics*, vol. 31, pp. 19-20.
- Korhonen, L., Hadi, Packalen, P. and Rautiainen M. (2017). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 195, pp. 259-274.
- Song, H.; Kim, Y. and Kim, Y. A. (2019) Patch-Based Light Convolutional Neural Network for Land-Cover Mapping Using Landsat-8 Images. *Remote Sensing*. no. 11, 114.

ハイパースペクトル衛星画像解析とラドン測定による 高植生被覆地域での地熱流体上昇地点の絞り込み

久保 大樹*・権守 宏明*・Mohamad Nur Heriawan**・Irwan Iskandar**・小池 克明*

Specification of upflow points of geothermal fluids in highly vegetated area by hyperspectral satellite imagery analysis and radon survey

Taiki Kubo*, Hiroaki Gonnokami*, Mohamad Nur Heriawan**, Irwan Iskandar** 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)

**バンドン工科大学, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10, Lb. Siliwangi, Cobleng,
Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia.

キーワード：熱水変質，リニアメント，リモートセンシング，スペクトル分解，植生指標

Key words: Hydrothermal alteration, Lineament Remote sensing, Spectral unmixing, Vegetation index

1. はじめに

地熱地帯では地熱貯留層に繋がる透水性亀裂を通して地熱流体が上昇することにより，温泉や噴気などの地熱兆候地が生じる。また，熱水や蒸気によって変質した岩石の分布も，地熱系の広がりや過去の活動履歴を把握するのに重要な情報となる。そのため地熱資源探査の広域概査において衛星リモートセンシングは極めて有効な手段となる。しかしながら植生の厚い地域では，衛星搭載型光学センサの空間分解能の制限から，衛星画像の1ピクセル中に植生などの複数の地表物質の情報が混在し，目的とする変質鉱物の情報を抽出するための画像処理法が必要となる。またピクセルの大部分を植生が占める場合には，その下に分布する地形や地質の情報を取得することは困難である。

そこで本研究では，厚い植生で覆われた地熱地域から地熱兆候地を抽出することを目的とし，波長分解能の高い衛星画像を用い，変質鉱物および植生の分光反射特性を利用する2つの手法を植生被覆量に応じて適用した。さらに，地熱流体の上昇に伴って濃度が増加すると考えられる地殻ガス中のラドン濃度と組み合わせることにより，地熱流体パスを形成している亀裂分布の特定を試みた。

2. 測定地域とデータの概要

本研究では，インドネシア国内の代表的な地熱兆候地域である西ジャワ州の Patuha 地熱地域（以下，PaGF）を対象とした。PaGF では，Patuha 山山頂付近に噴気帯や mud pool を伴う火口湖の Kawah Putih が存在する。他にも複数の温泉や噴気帯が確認されており，明礬石やカオリナイトで主に構成される熱水変質帯が広く分布する。また山地の大部分は樹木で覆われ，平地では茶などのプランテーション農業が盛んな高植生被覆地熱地域である（第1図）。

解析には衛星搭載型ハイパースペクトルセンサ Hyperion により撮影された衛星画像を用いた。Hyperion は資源探査で広く用いられるマルチスペクトルセンサ画像に比べて波長分解能が高く，356–2577 nm の波長域に 242 もの連続するバンドを有する。本解析で用いたシーンは，2003年1月10日撮影の path : 122, row : 65 で，雲量は 0% である。

3. ハイパースペクトル画像解析

ノイズ除去を含む前処理を施した Hyperion 画像に対し，SMACC を用いて各画素の反射スペクトルを構成する端成分を特定し，それらを教師データとして代表的なスペクトル分離法である線形分離法（LSU）を適用した。ここで得た植生スペクトルの重み係数に閾値を設定することで，対象地域を植生域と非植生域に分類した。

生育環境のストレスを受けた植生は反射スペクトル異常を示すことが知られており，720 nm 付近の急激な反射率増加であるレッドエッジが短波長側に移動するというブルーシフト，可視域のクロロフィル吸収帯における反射率増加，および近赤外・短波長赤外域での反射率増加が現れる。一方で Hyperion 画像では植生の種類や斜面方向の違いによっても反射スペクトルは変化し，特に可視・近赤外域におけるこれらの影響は顕著である。そこで本研究では，ブルーシフト，および短波長赤外域での反射率増加を強調する新規植生指数（VIBS: Vegetation Index considering Blue shift and Shortwave infrared）を考案し，次式のように定義した。

$$\text{VIBS} = \left(\frac{\rho_{2274} - \rho_{671}}{\rho_{2274} + \rho_{671}} - m_1 \right) / \sigma_1 + \left(\frac{\Delta\rho_{707} - \Delta\rho_{737}}{\Delta\rho_{707} + \Delta\rho_{737}} - m_2 \right) / \sigma_2 \quad (1)$$



第1図 Patuha 地熱地区 (PaGF) の位置 (左)，地熱発電所と代表的な噴気帯である Kawah Putih (右)。

ここで m_1 , σ_1 は $\frac{\rho_{2274}-\rho_{671}}{\rho_{2274}+\rho_{671}}$ の平均と標準偏差, m_2 , σ_2 は $\frac{\Delta\rho_{707}-\Delta\rho_{737}}{\Delta\rho_{707}+\Delta\rho_{737}}$ の平均と標準偏差を表す. 対象地域内の植生域では VIBS により植生異常帯を抽出, 非植生域では LSU により変質鉱物の重み係数から熱水変質帯を抽出した.

植生域での VIBS 値, 非植生域でのカオリナイトの重み係数分布を, 同地域の熱水流動モデルと合わせて第 2 図で比較する. 第 2 図(a)の赤色で示す地域は地熱兆候が地表付近に現れていることを示唆し, 黒円で示した地熱兆候地の多くがこれに整合する. また第 2 図(b)には, Kawah Putih では地熱貯留層から鉛直方向に上昇する熱水が供給されており, その熱水が標高 1500~2000 m の領域で北西方向(図中の B)へ水平に流れていることが確認できる. 比較的高温の温泉である Cimanggu や Walini では, この湧出により植生がストレスを受け, 顕著な反射スペクトル異常を起こしていると考えられる. 一方で, 解析結果でも Cimanggu や Walini に対応する箇所で広範囲に植生異常帯と熱水変質帯が抽出されており, これらの結果は地質情報と整合的である.

また, VIBS 値の高い領域は対象領域の既知の断層上に部分的に重なっていることから, 断層全体ではなくその一部が高透水性のパスとして機能している可能性が示唆される.

4. 熱水上昇地点の推定

ハイパースペクトル画像解析によって得られた地表の地熱兆候を他種の解析結果と組み合わせることにより, 熱水上昇地点の抽出を試みた.

まず, インドネシア地理空間情報局によって公開されている解像度 7 m の数値地形モデル『DEMNAS』から多方位陰影図を作成し, 線素追跡アルゴリズム (STA : Masoud and Koike, 2011) を適用することでリニアメント抽出を行った (第 3 図). 得られたリニアメント分布図から, グリッド間隔 400 m の密度分布マップを作成し, ハイパースペクトル画像の解析結果と比較する. その結果, カオリナイト指数が高い値を示す対象地域北東部はリニアメント分布密度の大きい領域と一致していることがわかり, 深部からの地熱流体の流動経路となる透水性亀裂の存在が示唆された.

また, PaGF では 2020 年 7 月より, 半導体型ラドン測定器である RAD7 (DURRIDGE 社) を用いた地殻ガス中のラドン濃度のモニタリング測定を継続的に実施している. 計測箇所は 17 点で, 温泉など既知の地熱兆候点や断層交点などに深度約 2 m の計測井を設置した. 全測点での平均ラドン濃度は約 2500 Bq/m³ であり, 同じく西ジャワ州の主要な地熱地帯である Wayang Windu 地熱地域と比較すると半分程度の値を示している (Heriawan *et al.*, 2020). ラドン濃度の分布は, 対象領域北部の温泉地帯周辺が全体平均よりも高い値を示しており, これはハイパースペクトル画像解析やリニアメント抽出の結果と整合的である. 以上の結果をまとめると, PaGF においては領域北部が主要な地熱流体上昇域である可能性が高い.

5. まとめ

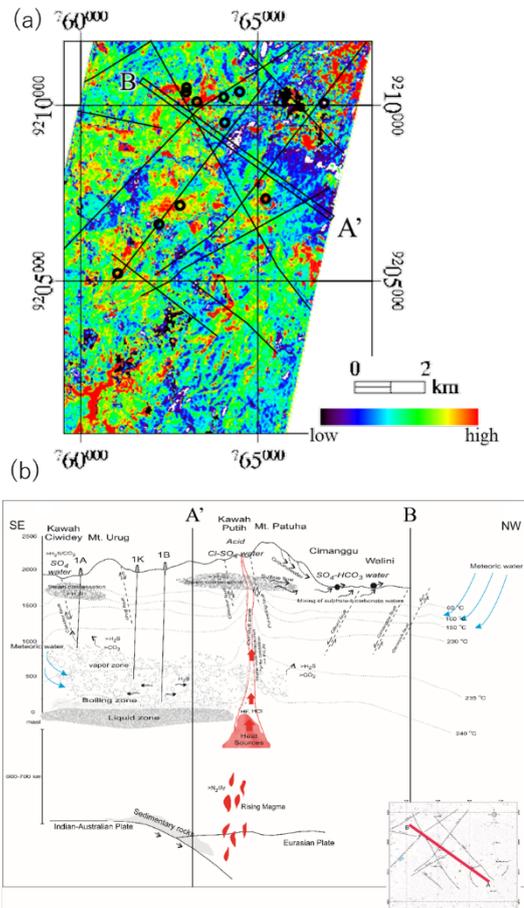
本研究では, 衛星画像解析により植生の厚い地域での地熱兆候地を高精度に抽出することを目的とし, 植生の反射スペクトル異常を強調する新規の植生指数 VIBS を考案し, その有効性を検証した. VIBS と LSU を統合した解析により抽出した地点は多くの既知の地熱兆候地と一致し, 同地域の熱水流動モデルとの比較からも, 地質情報に整合していることが確認できた. さらにリニアメント抽出やラドン濃度測定の結果との統合により, 対象地域北部が主要な地熱流体の上昇域であることが示唆された.

文献

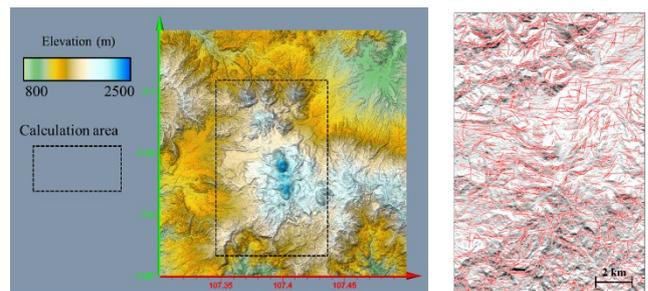
Heriawan, M. N., Syafi'i, A. A., Saepuloh, A., Kubo, T. and Koike, K. (2020) Detection of near-surface permeable zones based on spatial correlation between radon gas concentration and DTM-derived lineament density. *Natural Resources Research*, <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09718-z>.

Masoud, A. and Koike, K. (2011) Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, no. 6, pp. 818–832.

Rahayudin, Y., Kashiwaya, K., Tada, Y., Iskandar, I., Koike, K., Atmaja, R. W. and Herdianita, N. R. (2020) On the origin and evolution of geothermal fluids in the Patuha Geothermal Field, Indonesia based on geochemical and stable isotope data. *Applied Geochemistry*, vol. 114, pp. 1–13.



第 2 図 PaGF における解析結果 (a) VIBS 値およびカオリナイトの重み係数分布 (黒円は既知の地熱兆候地) と (b) Rahayudin *et al.* (2020) による熱水流動システムの概念図.



第 3 図 DEMNAS による PaGF の地形図 (左) と抽出されたリニアメント分布 (右) .

火成岩の白金族元素の含有量

正路 徹也

PGE contents of igneous rocks

Tetsuya Shoji*

* 東京大学 The University of Tokyo, Tokyo 113-8639, Japan. E-mail: t-t_shoji@jcom.home.ne.jp

キーワード：火成岩，白金族，地殻存在度

Key words: Igneous rocks, PGE, Crustal abundance

1. はじめに

金鉱床の品位と高品位側から累積した鉱量との関係は、3つの指数関数の和で近似でき、片対数グラフで下に凸の滑らかな曲線を描く「典型的パターン」を示す。この典型的パターンは、鉱石価値 (OV = ore value : 金属品位 × 金属価格の和) と累積鉱量との間では、白金族 (PGE = platinum group elements) 鉱床を含むか含まないかに関係なく成り立つ。これに対し、富化比 (ER = enrichment ratio : 金属品位 / 地殻存在度の和) と累積鉱量との間では、白金族鉱床を含まない場合は成り立つが、含む場合には局部に上に凸の異常なパターンが現れる。その理由を Shoji (2020) は PGE 鉱床の富化比が他の鉱種の鉱床に較べて異常に高いためとし、その原因として、1) PGE 鉱床の地質学的特異性と、2) PGE の地殻存在度が低すぎる可能性を挙げた。本研究では、第2の可能性を探るために、既発表の PGE の分析データを使ってその統計的特性を調べた。なお、今回の解析対象には、Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd, Re の PGE 7 元素以外に Ag と Au も加えた (順序は最も多い分析値の表記配置で、周期表では、第5周期の8~12族の Ru, Rh, Pd, Ag, 第6周期の7~12族の Re, Os, Ir, Pt, Au)。

2. 解析データ

今回の研究の目的は、PGE 鉱床の富化比が他の鉱種のそれに較べて異常に高いことの原因究明である。したがって、火成岩や堆積岩という岩石種に関係なく、データを集めることが妥当なように思える。しかし堆積岩の PGE を分析する目的は、その濃集の結果が採掘対象となり得るか否かの判定に使う場合が多いのに対し、火成岩に関してはその形成過程の解明に利用しようとする場合が多くなってきている。また、堆積岩は二次性の産物で、初生的には火成岩を起源とする。そこで、今回の解析対象は、火成岩中の PGE に絞った。さらに、南アフリカの Bushveld 複合岩体中の鉱床に代表されるように、PGE は火成岩そのものの形成過程で濃集した場合が多いと考えられている。しかし、今回の研究目的は、PGE の地殻存在度を決めた背景を解明することなので、このような PGE 鉱床となっている火成岩の分析値は対象から除外した。

解析データを得るために参照した論文の数は31、そのうち SiO₂ あるいは MgO の分析値を含む論文が24篇、PGE デ

ータのみの論文が7篇である。SiO₂ の分析値が与えられている論文のほとんどは全岩分析値が与えられているのに対し、PGE 以外に MgO の分析値のみが与えられている論文が5篇あった。これらの論文で分析値が与えられていた試料の総数は792である。

3. 統計分布

各 PGE について分析値データの累積頻度図を第1図に示す。各点列とも、左端の横軸の値が該当する元素の検出限界である。分析値で「検出限界以下」と記されている試料が示す累積頻度は、これより左にプロットされると仮定して、試料の総数に加えた。したがって、この左端の点より上の縦軸の長さがその割合を示す。しかし、実際の検出限界は文献によって異なり、左端より右の場合もある。これは、左端の値と当該検出限界の間の値をもつ試料が、この間の頻度としては計数されていないことを意味し、それがいくつかの点列で左端に近づくにつれて傾斜が緩くなっている理由かもしれない。

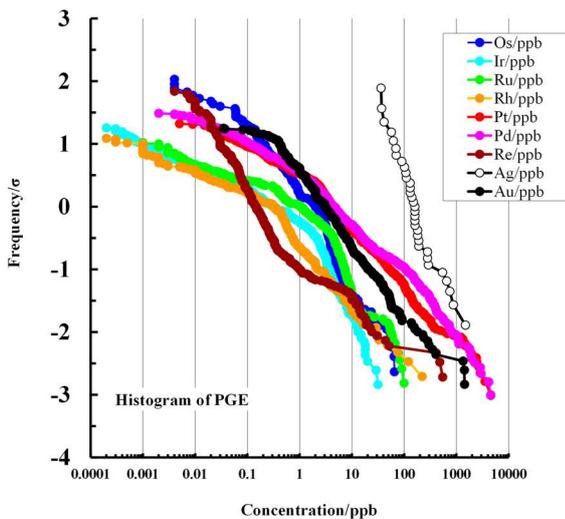
第1図は、正規確率紙で、横軸が各元素の濃度の対数である。したがって、図上で点列が直線的に並べば、そのデータは対数正規分布をなすと結論できる。各点列とも直線状に並んでいるとはいえないが、直線で近似することは許されるであろう。実際、点列の決定係数 (相関係数の2乗) は、Os が 0.94, Ir が 0.87, Ru が 0.86, Rh が 0.97, Pt が 0.99, Pd が 0.99, Re が 0.92, Ag が 0.95, Au が 0.99 と高い。そこで、各点列を直線で近似し、その近似式から得られる対数正規分布の平均を求めた。得られた平均 (ppb) は、Os が 1.3, Ir が 0.3, Ru が 0.7, Rh が 0.2, Pt が 3.9, Pd が 3.5, Re が 0.2, Ag が 255000, Au が 3.5 である。これらを、Shoji (2020) の Table 6 で引用される16篇の文献の値 (引用されているのは Pt, Pd, Au の3元素だが、ここでは上記の9元素) と比較する。ただし、Ag は極端に高いので議論から外す。他の8元素それぞれについては、今回得られた値すべてが、それらの最小と最大の間に入る。各文献値と今回の値の差の平方の平均を見ると、理科年表2000年版が引用している Taylor and McLennan (1985) の値が最小で、6.6 ppm² であった。

3. SiO₂ および MgO との相関

SiO₂あるいはMgOを横軸に、各PGEの含有量の対数を縦軸に散布図を描いた。それらの間の相関係数は、横軸がSiO₂の場合、Osが-0.53、Irが-0.42、Ruが-0.40、Rhが-0.47、Ptが-0.05、Pdが-0.07、Reが-0.05、Agが0.67、Auが-0.09、MgOの場合、Osが0.62、Irが0.71、Ruが0.68、Rhが0.49、Ptが0.16、Pdが0.00、Reが-0.20、Agが-0.70、Auが0.07である。相関係数の絶対値が0.5を越えたのは、SiO₂に対してはOsのみで、MgOに対してはOr、Ir、Ru、Agの4元素である。いずれにしても最も相関が高かったのはMgO-Irの組合せの0.71で、主成分元素とPGEとの間の相関は全体として低いと結論される。

第2図にSiO₂-MgOの散布図を示す。一般的に描かれているこの種の図と比較すると、SiO₂とMgOが負の相関を示す点は同じであるが、SiO₂が低くMgOが高い(SiO₂<50でMgO>10)部分にプロットされている点が多い。これは、試料の多くが、苦鉄質および超苦鉄質岩に属することを意味する。実際、SiO₂の分析値が与えられた391試料のうち、SiO₂>60%が9%、SiO₂>70%が1%である。また、MgOに関しては、MgO<10%が52%、MgO>40%が19%で、その間の濃度の試料が少ない。

4. まとめと今後の課題



第1図. PGE分析値の頻度図.

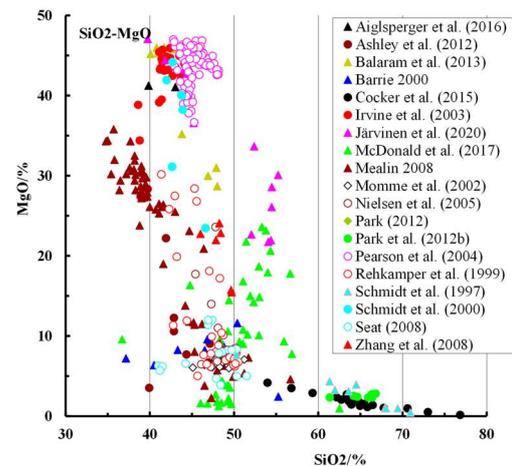
31の既発表論文から引用したPGEの分析データを基に、その統計的特性を調べ、次の結論を得た。

- 1) 各PGEデータに対数正規分布を当てはめて得られた平均(ppb)は、Osが1.3、Irが0.3、Ruが0.7、Rhが0.2、Ptが3.9、Pdが3.5、Reが0.2、Agが255000、Auが3.5である。
- 2) SiO₂濃度と各PGE含有量、MgO濃度と各PGE含有量との間の相関は低い。

今回参照した論文の数は31と限られている。また、本文中で言及したように、試料のSiO₂やMgO含有量は自然界に分布する岩石のそれらに較べてかなり偏っているようである。全体的傾向を把握するためには、これらの点を考慮して、さらに多くの文献を参照する必要がある。

引用文献

- Shoji, T. (2020): PGE deposits are peculiar: is the cause crustal abundances or formation mechanism? *Natural Resources Research*, <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09650-2>.
- Taylor, R. S., and McLennan M. (1985). *The Continental Crust*. Blackwell Scientific Pub., Oxford, 312p.



第2図. SiO₂-MgO図.

地球統計学による岡山市北西部日応寺花崗岩体中の α 石英の構造シフトパラメーター分布のモデリング

山川純次*

Modeling of a distribution of structural shift parameter of alpha-Quartz in the Nichioji granite body on the Northwest part of Okayama city by the Geostatistics

Junji Yamakawa*

* 岡山大学 学術研究院 自然科学学域 Academic Field of Natural Science and Technology, Okayama University, Japan, 3-1-1, Kita-ku ward, Tsushima-Naka, Okayama 700-8530, Japan. E-mail: ufeq0285@cc.okayama-u.ac.jp

キーワード：クリギング法，結晶構造解析， α 石英，花崗岩，日応寺花崗岩体

Key words：Kriging method, Crystal structure analysis, alpha-Quartz, Granite, Nichiouji granite body

1. はじめに

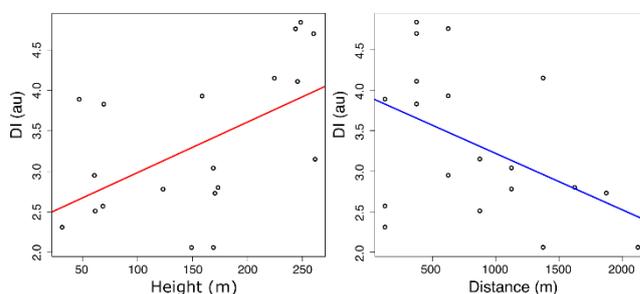
岡山市北西部に産出する日応寺花崗岩体から分離した α 石英の構造シフトパラメーター(DI)の分布を地球統計学を用いてモデリングした。その結果、 α 石英の DI が岩体の南西部から北東部に向けて漸進的に増加する傾向を示すモデルが得られた。このモデルは岩体周辺の地質構造および地史と調和的であると考えられたので報告する。

2. データと手法

α 石英を含む花崗岩のサンプルは日応寺花崗岩体の露頭から採集した。各サンプルから分離した α 石英の DI は RIETAN-fp (Izumi and Monma, 2007) を使用して解析した。DI の空間構造はバリオグラムを用いて推定した。花崗岩体における DI の分布はドリフトを持つと仮定し普遍クリギング法 (Mathéron, 1973) を使用してモデリングした。ドリフトには地質境界からのバッファ距離モデルおよび標高データを同時に用いた。予測グリッドデータとバッファ距離モデルは 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 (産総研地質調査総合センター, 2021) による岩体境界データから生成した。標高データは基盤地図情報数値標高モデル 10m メッシュ (国土地理院, 2021) から生成した。バッファ距離モデルと標高データは α 石英の DI データと予測グリッドデータそれぞれに結合した。全てのデータは日本測地系 2000 第 IV 系に投影した。クリギング法は R (Ikaha and Gentleman, 1996) と gstat パッケージ (Pebsma, 2004) を用いて実行した。得られた構造シフトパラメーターモデルは Google earth (Google, 2021) で表示した。

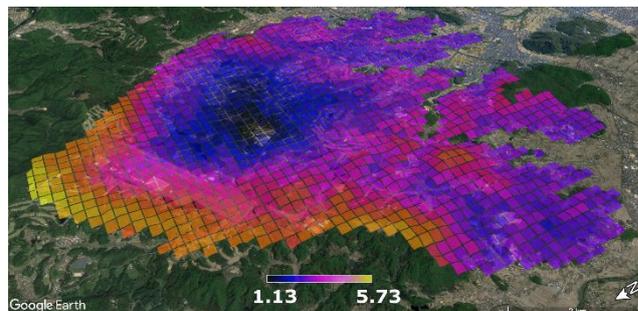
3. 結果

日応寺花崗岩体のサンプル (19 個) から分離した α 石英の DI は 2.06~4.84 となった。 α 石英の DI と各ドリフトの相関を第 1 図に示す。



第 1 図 DI と共変量の相関。左: DI と標高の相関。右: DI とバッファ距離の相関。

岩体内部の 1422 点について DI を普遍クリギング法で予測した結果、 $DI = 1.131 \sim 5.723$, $Var = 0.1946 \sim 0.3601$ となった。DI 分布モデルを Google earth で表示した結果を第 2 図に示す。



第 2 図 Google earth で表示した DI 分布モデル。

4. 議論

日応寺花崗岩体は岡山県中・南部分布する白亜紀花崗岩類である広島型花崗岩類に属する狭義の花崗岩である。北部および東部のルーフペンダントはペルム系と三畳系、夜久野岩類を含む先第三紀堆積岩類である。石英の斑状～集斑状結晶が丸みを帯びており半深成岩である可能性が指摘されている(濡木・浅見・光野, 1979)。77.1 \pm 2.5 M.y.の K-Ar 黒雲母年代を示す(柴田, 1979)。西部は、より古いと推定されているトータル岩から花崗岩までの岩相変化を示す墨帯深成岩体である日近花崗閃緑岩体と隣接している(多賀・村田・草地, 2004)。中央部では 34.0 \pm 2.7 Ma の FT 年代が得られている富良層および 27.4 \pm 1.9 Ma と 27.1 \pm 1.5 Ma の FT 年代が得られている津高層と不整合する(鈴木, 2003)。日応寺花崗岩体の北端には日応寺衝上断層(今村, 1966)が存在し岡山空港が位置している。

α 石英の DI 標高と正の相関を示し岩体境界からのバッファ距離と負の相関を示した。

普遍クリギング法で得られた DI 分布モデルでは岩体南東部から北西部にかけて DI が漸進的に高くなった。これはこの方向にマグマが陥入し既存の岩体と衝突した結果、最先端である北西部に向けて DI が大きくなったと解釈できる。またこの陥入方向は日応寺断層が衝上型であることと調和的である。

文 献

- Google (2021) Google earth.
- Ihaka, R. and Gentleman, R. (1996) R: a language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, vol.5, pp.299–314.
- Izumi, F. and Momma, K. (2007) Three-Dimensional Visualization in Powder Diffraction. *Solid State Phenomena*, vol.130, pp.15–20.
- Matheron, G. (1973) The intrinsic random functions and their applications, *Advances in Applied of Probability*, vol.5, pp.439–468.
- Pebesma, E. (2004) Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, vol.30, pp.683–691.
- 今村外治(1966) 岡山県津高町日応寺より Miogypsina kotoi HANZAWA の発見と岡山市周辺のいわゆる第三系の地質時代。岡山大学地学研究報告, vol.1, pp.1-10.
- 国土地理院(2021) 基盤地図情報数値標高モデル。
- 産総研地質調査総合センター(2021) 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2
- 柴田賢(1979) 東中国における花崗岩類の K-Ar 年代。地質学論集, vol.17, pp.69-72.
- 鈴木 茂之, 檀原 徹, 田中 元(2003) 吉備高原に分布する第三系のフィッシュン・トラック年代, 地質学雑誌, vol.112, pp.35-49.
- 多賀優, 村田守, 草地功(2004) 岡山市北西部, 日近花崗閃緑岩体の岩石記載および全岩化学組成, 岩石鉱物科学, vol.33, pp.33-45.
- 濡木輝一, 浅見正雄, 光野千春(1979) 岡山県中・南部の花崗岩類。地質学論集・中生代酸性火成作用, vol.17, pp.35-46.

物理探査データと岩石物理学の統合に基づく海底下金属資源賦存量推定の試み

大田優介*・後藤忠徳**・小池克明***・柏谷公希***・笠谷貴史****・熊谷英憲****・町山栄章****

Evaluation of the amount of subseafloor metal resources based on the integration of geophysical data and rock physics

Yusuke Ohta*, Tada-nori Goto**, Katsuaki Koike***, Koki Kashiwaya***, Takafumi Kasaya****, Hidenori Kumagai**** and Hideaki Machiyama****

*名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
E-mail: ohtay@seis.nagoya-u.ac.jp (Ohta)
**兵庫県立大学大学院生命科学研究科 Graduate School of Life Science, University of Hyogo
***京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University
****海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-earth Science and Technology

キーワード: 海底熱水鉱床, 岩石物理モデル, 電気伝導度
Key words: Seafloor massive sulfide deposits; rock physics model; electrical conductivity

1. 研究の背景

金属資源の需要がますます増加している現状にあって、我が国の排他的経済水域内に多数存在する海底熱水鉱床の開発が望まれている。鉱床開発には規模・品位についての詳細な地質情報が必要となるが、海底での踏査・掘削調査は困難でありコストも高いため、物性分布を広域に明らかにできる物理探査の活用が不可欠である。

物理探査は掘削試験等の直接的情報収集技術と比較すると安価であり広域の地下構造を拘束に抽出できる手法であるが、反面、取得できるのは物性情報のみであり、元素濃度や鉱物組成といった化学情報に直接的に結びつかない。実際の物理探査結果から地質情報を取得するためには、対象地域の岩石の性状に即した岩石物理モデルを構築し、その種々のパラメータを適切に決定する必要があるが、海底熱水鉱床においては岩石物理モデルの選定、その最適パラメータの決定は未発展の課題である。そこで本研究では、海底下比抵抗トモグラフィーと岩石物理モデルを用いた海底下金属資源量の新規定量的解釈を試みた。

2. 研究対象

本研究の解析対象は、日本の海底熱水活動域（硫化鉱物胚胎地域）において実施された海底電気探査の結果である Ishizu *et al.*, (2019)の比抵抗トモグラフィーである。

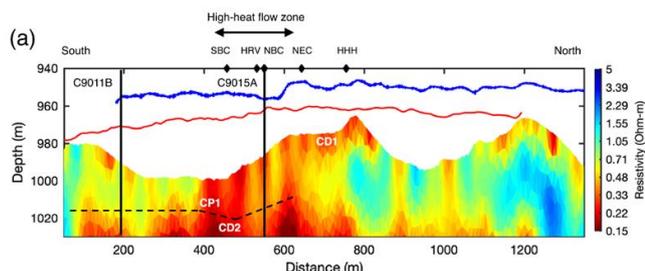


図 1. 海底熱水活動域比抵抗トモグラフィー(Ishizu *et al.*, 2019)

3. 解析手法

Ishizu *et al.*, (2019)の比抵抗断面から比抵抗要素を抽出し、各比抵抗要素に対し Pelton の式 (Pelton *et al.*, 1978) と修正 Archie の式 (Katsube and Hume, 1983) を統合した下記の岩石物理モデル (式(1)) を適用することで式(2)の資源量基準を計算した。

$$\sigma_R^* = \left[\left(1 - x \frac{F}{\sigma_w} + \frac{x F}{\sigma_w + x F (j\omega \epsilon)^c} \right)^{-1} + \sigma_c \right] \quad (1)$$

$$SME [\text{mol}/\text{cm}^3] = 0.0004 \exp(3.39x). \quad (2)$$

ただし、 $|\sigma_R^*|$ は岩石の複素電気伝導度の大きさ、 F は岩石の内部間隙形状に関する定数であり間隙率 ϕ と定数 m を用いて $F = \phi^{-m}$ で与えられる。 σ_w は間隙内流体（塩水）の電気伝導度 [S/m]、 σ_c は修正 Archie の式の過剰導電項に相当するパラメータである。 ω は角周波数、 ϵ は硫化物の粒径等と関連する比誘電率、 c は Cole-Cole parameter であり、 x は間隙流体と硫化鉱物が岩石内で互いに接触する範囲に関するパラメータであり、単純に硫化鉱物の存在量に比例する。 SME (Summation of metal elements: 金属元素の合算量)に関する式(2)は海底熱水鉱床の岩石試料 39 サンプルに対する実験から得られた経験式である。

比抵抗トモグラフィーの比抵抗要素は式(1)の $|\sigma_R^*|$ の逆数であると解釈できるので、本研究では x を求めるために式(1)の他のパラメータを決定する必要がある。 ϕ には掘削調査で得られている間隙率の代表値の深度プロファイルを線形近似して与えた。 σ_w は温度の関数であるため、海底下の温度構造を仮定し、Sinmyo & Keppler (2017) の実験結果を参考に温度-電気伝導度の相関関係式を取得して求めた。 ω は物理探査の観測周波数から求めた。 σ_c や c は岩石試料に対する式(1)の最適パラメータの最適値を基準に定められた。

決定論的に定めるのが難しいパラメータである、温度構造仮定における構造中の温度の最大値 $\max T$ [°C], m , および ϵ には以下の複数のパターンを与えた。

表 1. 解析パラメータ

	$\max T$	m	$\log_{10}(\epsilon)$
Analysis 01	350	2.67	0.956
Analysis 02	2	2.67	0.956
Analysis 03	350	2.67	2.000
Analysis 04	2	2.67	2.000
Analysis 05	350	1.78	0.956
Analysis 06	2	1.78	0.956
Analysis 07	350	1.78	2.000
Analysis 08	2	1.78	2.000

4. 解析結果

表 1 の各解析パラメータに基づく対象海域（断面）全体の金属資源量推定結果は表 2 に示すとおりである。

表 2. 解析結果. Fe, Cu, および Pb はそれぞれ「海域中の金属元素が全て単一の元素である場合」の単位奥行き当たり資源量を示す

	SME [mol/m]	Fe [t/m]	Cu [t/m]	Pb [t/m]
Analysis 01	510.555	2.85E+04	1.62E+04	1.06E+05
Analysis 02	609.785	3.41E+04	1.94E+04	1.26E+05
Analysis 03	379.914	2.12E+04	1.21E+04	7.87E+04
Analysis 04	521.543	2.91E+04	1.66E+04	1.08E+05
Analysis 05	298.232	1.67E+04	9.48E+03	6.18E+04
Analysis 06	495.994	2.77E+04	1.58E+04	1.03E+05
Analysis 07	158.091	8.83E+03	5.02E+03	3.28E+04
Analysis 08	363.627	2.03E+04	1.16E+04	7.53E+04

このうち、最も資源量が多く推定された結果と、最も少なく推定された結果である表 2 中の Analysis 02 と 07 について、解析された資源構造図を図 2 に示す。

5. 考察

Analysis 02 と 07 の資源量の比は表 2 の通り 4 倍弱である。このように推定値が大きな変動を示す原因は、式(1)で示される岩石の電気伝導度が主として {1} 間隙水（熱水）による電気伝導 {2} 硫化物による電気伝導の 2 系統の電気伝導によって規則されているためであると考えられる。

Analysis 02 の各パラメータ条件は、水温が低く、間隙の形状が間隙水による電気伝導を阻害しており、また硫化鉱物の導電性の特性値である比誘電率も低い状態を意味する。このような条件下では、熱水による電気伝導の値は小さくなり、金属量を増加させることによる電気伝導度の向上も十分ではないため、物理探査結果を説明するために至る所で金属量が最大化される。一方、Analysis 07 の条件では、熱水の温度は高く、形状定数は間隙水による電気伝導を比較的阻害せず、比誘電率も高いため、熱水の電気伝導だけでも断面内の一部領域の導電性を説明することが可能であるほか、金属量を増加させることで電気伝導度は飛躍的に向上するため、比較的少ない金属量で海底下比抵抗構造が説明できていると考えられる。

6. まとめ

本研究では地球物理学的手法による海底熱水鉱床の金属資源量推定手法開発を目的に、海底下比抵抗トモグラフィを試験的に資源量に変換する手法を構築した。その結果、物理探査手法のみにより海底下の金属資源分布を描画することが可能となり、その推定精度は低いものであったものの、「熱水-硫化鉱物」のトレードオフが金属資源量の大小を規則していることが明らかとなった。さらに精緻な資源量推定のためには、式(1)の各パラメータの妥当性検証、ならびに資源量の上下限を求める手法の開発などが必要である。

文献

- Ishizu, K., Goto, T., Ohta, Y., Kasaya, T., Iwamoto, H., Vachiriatienchai, 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, vol. 46, no. 20 pp.11025-11034.
- Pelton, W., H., Ward, S., H., Hallof, P., G., Sill, W., R., and Nelson, P., H. (1978) *Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP*. Geophysics, vol. 43 pp. 588-609.
- Katsube, T., J., and Hume, J., P. (1983) *Electrical resistivities of rocks from Chalk River*. In Proceeding Geophysical and Reuted Geoscientific Research at Chalk River, pp. 105-114, Ontario.
- Sinmyo, R., and Keppler, H. (2017) *Electrical conductivity of NaCl-bearing aqueous fluids to 600° C and 1 GPa*. Contributions to Mineralogy and Petrology, vol. 172, no. 1, pp.4.

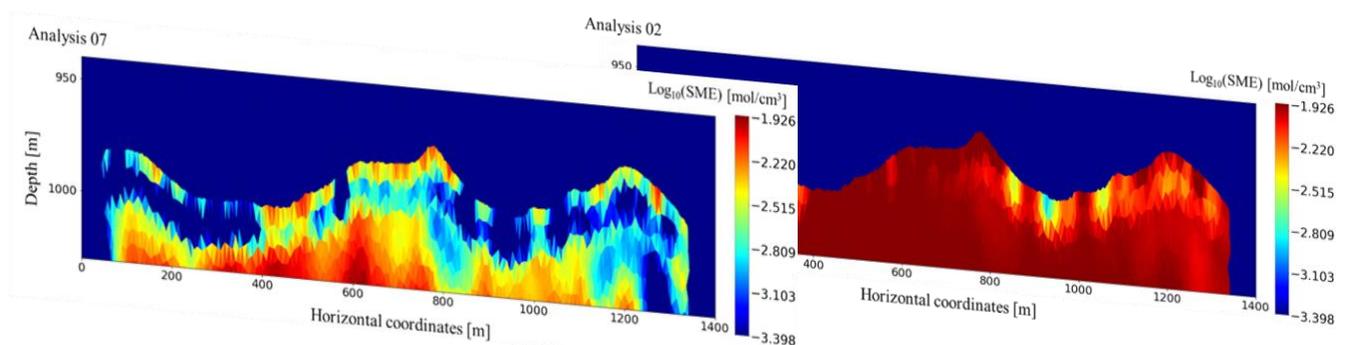


図 2. 推定された海底下金属元素濃度分布図 (右) Analysis 02 (左) Analysis 07

波長走査型 X 線回折法による 薄片試料の結晶構造精密化の可能性

松浦優介*・萩谷健治*・後藤忠徳*

Possibility of crystal structural refinement of thin-section samples by using wavelength scanning X-ray diffraction method

Yusuke Matsuura*, Kenji Hagiya*, Tada-nori Goto*

*兵庫県立大学理学研究科 Graduate School of Science, University of Hyogo 2167 Syosya, Himeji, Hyogo 671-2280, Japan, E-mail: t.n.goto@sci.u-hyogo.ac.jp

キーワード : X線回折, 格子定数, 構造精密化,

Key words : X-ray diffraction, Lattice constant, Structural refinement

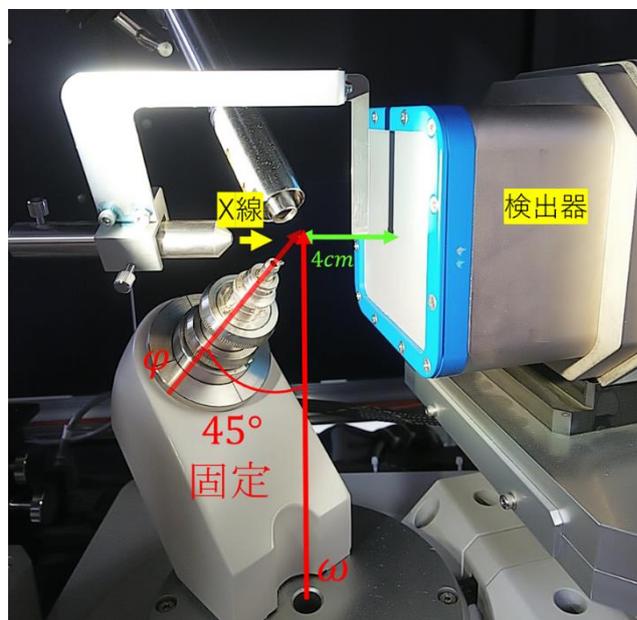
1. はじめに

波長走査型 X 線回折法は岩石・隕石試料や複雑な組織の一部を狙い撃つことができるため、薄片試料のまま非破壊で回折実験が可能である。実際に SPring-8 を用いて、対象鉱物の格子定数の決定に用いられている (Hagiya et al., 2010)。しかし、本手法は通常の単結晶法とは異なり、全空間の回折強度を測定することができないため、回折強度を部分的にしかな測定できない。このため、格子定数の決定が可能であっても、構造精密化が可能かどうかは不明であった。

そこで本研究では、直径 0.3mm の Forsterite (Mg_2SiO_4 , 直方晶系) 単結晶試料に対して、全空間の回折強度と、その一部のみを用いた場合で構造精密化を行い、両者の精度について比較、議論を行うこととした。

2. 手法

結晶を取り付ける φ 軸は鉛直方向から 45° 傾いていて、この軸ごと鉛直の ω 軸で回転する。まず $\varphi = 0^\circ$ で固定し、 ω 軸を 0.5° ずつ回転させながら露光し、 -105° から 75° までの範囲で 360 枚の回折写真を撮影した。露光時間は一枚につき 15 秒である。これを 1 セットとし、 φ を 60° , 120° , 180° , 240° , 300° と変えて合計 6 セット 2160 枚の回折写真を撮影した。



第1図 回折計と検出器

得られた全空間の回折強度のうち、消滅則で消えるものを除外し、測定構造因子 $|F_0|^2$ が誤差 $\sigma(|F_0|^2)$ の 3 倍より小さいものも除外した。その後重複するものを平均し、平均値と誤差の 4 倍以上離れているものも除外した。残った重複する強度で再び平均し、各面指数の代表値を決定した。Forsterite の直方晶系は mmm のラウエ群をもつので、等

価点は 8 個ある。等価なものはすべて平均し、これを全空間の回折強度として構造精密化に用いた。

等価なものを平均する前の全空間の回折強度データから、SPRing-8 のフラットパネル上に取りうる回折点のみを選択した。フラットパネルの大きさは 100mm×100mm とし、左下を原点として横 50mm、縦 40mm の点をビーム中心に想定した。エネルギー範囲は 20keV~30keV (波長 0.4133~0.6199 Å) とした。結晶格子 a, b, c ベクトルをそれぞれ x, y, z 軸上に置き、これを初期位置とした。 z 軸を X 線の入射方向に設定し、 x 軸、 y 軸をそれぞれ r_x, r_y 回転させて結晶方位を変更した。カメラ半径 R_{mm} の変更も含め、できるだけ反射数が多い条件を探した。

3. 結果および考察

回折実験の結果、格子定数は $a=4.7587(18)$ Å, $b=10.202(4)$ Å, $c=5.986(2)$ Å, $V=290.59(19)$ Å³ を得た。全空間のデータ (反射数 304) で構造精密化した結果と、カメラ半径 90mm 結晶方位 $r_x = 13^\circ, r_y = 38^\circ$ のデータ (反射数 50) で構造精密化した結果を比較したところ、一般位置の酸素原子の z 座標のみが標準偏差の 3.4 倍となり、3 倍を超えた。

		全空間	90mm	差
Mg1	B	0.43(5)	0.52(13)	-0.09(14)
Mg2	x	0.9914(3)	0.9915(8)	-0.0001(9)
	y	0.27739(17)	0.2777(3)	0.0003(3)
	B	0.44(5)	0.43(15)	0.01(16)
Si	x	0.4264(3)	0.4252(10)	0.0012(10)
	y	0.09415(12)	0.0940(3)	0.00015(12)
	B	0.32(5)	0.38(16)	-0.06(17)
01	x	0.7672(8)	0.765(3)	0.002(3)
	y	0.0917(3)	0.0932(7)	-0.0015(8)
	B	0.48(7)	0.8(2)	-0.32(7)
02	x	0.2225(7)	0.2222(17)	0.0003(18)
	y	0.4469(3)	0.4460(6)	0.0009(7)
	B	0.44(6)	0.34(19)	0.1(2)
03	x	0.2778(5)	0.2765(16)	0.0013(17)
	y	0.1631(2)	0.1631(5)	0.0000(5)
	z	0.0332(5)	0.0280(15)	0.0052(16)
	B	0.49(6)	0.63(17)	-0.14(18)

第 2 図 全空間と限定空間の構造精密化結果の比較 (標準偏差が (20) 以上のものは四捨五入して 1 桁にしている)

限定空間の構造精密化の結果生じた一般位置の酸素の z 座標の差異がどの程度のものかを評価するために、全空間のデータ (反射数 304) で構造精密化した結果と、カメラ半径 90mm 結晶方位 $r_x=13^\circ, r_y=38^\circ$ のデータ (反射数 50) で構造精密化した結果から各原子間の結合距離を求めて比較した。すると、すべての結合距離の差が標準偏差の 3 倍の範囲内に収まった。

		全空間	90mm	差
Mg1	01×2	2.084(3)	2.095(7)	-0.011(8)
	02×2	2.068(2)	2.070(6)	-0.002(6)
	03×2	2.135(2)	2.127(6)	0.008(6)
Mg2	01	2.173(4)	2.168(9)	0.005(10)
	02	2.049(4)	2.038(8)	0.011(9)
	03×2	2.214(3)	2.228(8)	-0.014(9)
	03'×2	2.068(3)	2.043(8)	0.025(9)
Si	01	1.622(4)	1.616(13)	0.006(14)
	02	1.661(4)	1.664(7)	-0.003(8)
	03×2	1.637(3)	1.661(8)	-0.024(9)

第 3 図 全空間で構造精密化したときの原子の結合距離と限定空間で構造精密化した時の原子の結合距離との比較

このことから、結晶方位によっては限られた回折点での構造精密化は可能であると考えられる。

精度をさらに上げるには、カメラ半径をさらに短くする、あるいはフラットパネルを増設するなどの工夫が必要であると思われる。

文献

- Hagiya, K., Mikouchi, T., Zolensky, M. E., Ohsumi, K., Terada, Y., Yagi, N., & Takata, M. (2010). Derivation of the cell parameters of meteoritic olivine in a thin section by energy-scanning X-ray diffraction with synchrotron radiation. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 73, 5083.
- Hushur, A., Manghnani, M. H., Smyth, J. R., Nestola, F., & Frost, D. J. (2009). Crystal chemistry of hydrous forsterite and its vibrational properties up to 41 GPa. *American Mineralogist*, 94(5-6), 751-760.

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

升本 眞二*・水落 啓太*・野々垣 進**・根本 達也*

Improving Spatial Resolution of DEM using Slope and Aspect by Super-Resolution Technology

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

* 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. E-mail: masumoto@osaka-cu.ac.jp

** 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.

キーワード：数値標高モデル, 超解像, 深層学習, 傾斜量, 傾斜方位

Key words : DEM, Super-resolution, Deep learning, Slope, Aspect

1. はじめに

DEM(数値標高モデル)は高分解能なものほど高精度の解析が可能で、高分解能化のための高密度測量や補間方法の開発などが行われている。近年、深層学習による超解像技術の応用として、DEMの高分解能化が試みられている。例えば、陸域でのChen *et al.* (2016)やXu *et al.* (2019)、海域での伊藤(2019)や日高ほか(2021)などがある。本研究では、超解像技術にSRCNN(Super-Resolution Convolutional Neural Network, Dong *et al.* (2014))を用いて、DEMの分解能を5mから1mへと高分解能化する手法を開発した。

2. 高分解能化の手法とデータ

SRCNNはCNNを用いて低解像度の画像と高解像度の画像の関係を学習することにより、低解像度の画像から高解像度の画像を得る手法である。SRCNNは特徴抽出(カーネルサイズ9×9, フィルター数64), 非線形マッピング(1×1, 32), 再構築(5×5, 1)の役割をもつ3層の畳込み層で構成される(第1図)。SRCNNのフレームワークにはTensorFlow, コアライブラリにはKeras, プログラム開発にはPythonを用いた。高分解能化には、DEMを直接用いるのではなく、DEMから傾斜方位と傾斜量を求めてHSVの色空間モデルに変換し、高分解能化して、DEMを再計算する間接的な方法を用いた。データには兵庫県が公開している分解能1mのDEM(兵庫県, 2020)を200×200mの範囲に分割したものと、間引いて5mの分解能にしたものを学習用に9000セット、評価用に1000セットを作成して用いた。

学習の準備として、5m分解能のDEMをBicubic法により1m間隔に補間したDEMを用意した。これと元の1m分解能の2種類のDEMの傾斜方位と傾斜量を求め、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色空間データを作成し、RGBの3chに仮想的に変換してSRCNNの学習に用いた。これらは画像に変換すると各chが256階調に整数化されて情報が落ちるため、0.0から1.0までの実数で内部処理した。モデルの学習後に評価用の5m分解能のDEMを同様に交換して入力し、結果として得られた高分解能のHSVデータから傾斜方位と

傾斜量を求め、各座標での地点データとした。これに5mメッシュのDEMの標高値を変換した地点データを加えて、面推定プログラムBS-Horizon(野々垣ほか, 2008)のVB版であるTerramod-BS(坂本ほか, 2012)で1mのDEMを推定した。また、比較のために面推定法を使わずに傾斜方位や傾斜量と標高から直接DEMを計算する方法(第2図(e), 第3図(e))やDEMの標高を直接SRCNNにより高分解能化する(第2図(d), 第3図(d))なども行った。

3. 結果

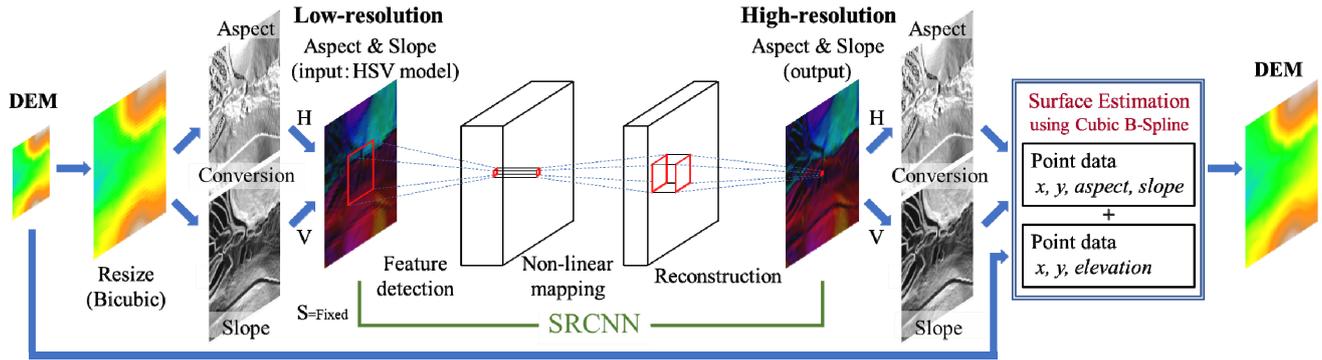
高分解能化の結果の例を第2図に示す。第2図(g)から(i)は、傾斜方位と傾斜量を表すHSVデータを画像化したものである。第1表にRMSE(Root Mean Square Error)とPSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)の例を示す。DEMを直接的に高分解能化した結果は誤差が大きいが、それ以外はあまり変わらず、傾斜方位と傾斜量に変換し補間した方が精度は少し良いことがわかった。第3図に3次元可視化例を示す。傾斜方位と傾斜量に変換した方が他の結果より、崖などの地形的特徴が良く再現できていることがわかる。なお、高分解能化した傾斜方位と傾斜量から標高を直接計算した結果では、部分的に連続性の悪い所があることがわかった。

4. おわりに

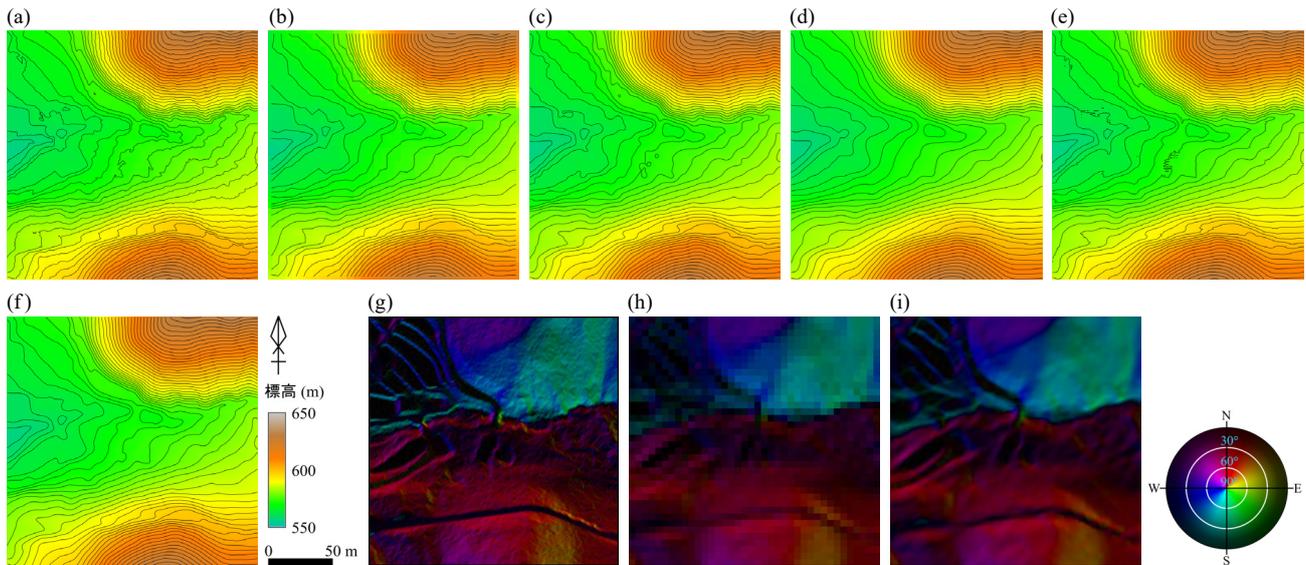
これらの結果からは、地形の標高が滑らかに連続して変化することを前提とする補間と、標高の急な変化等の特徴として表すことを前提とする超解像による高分解能化との根本的な違いが表れたものと考えられる。今後、日高ほか(2021)などにあるような多様な方法での検討が必要である。本研究はJSPS科研費21K11905の助成を受けたものである。

第1表 高分解能化の評価例

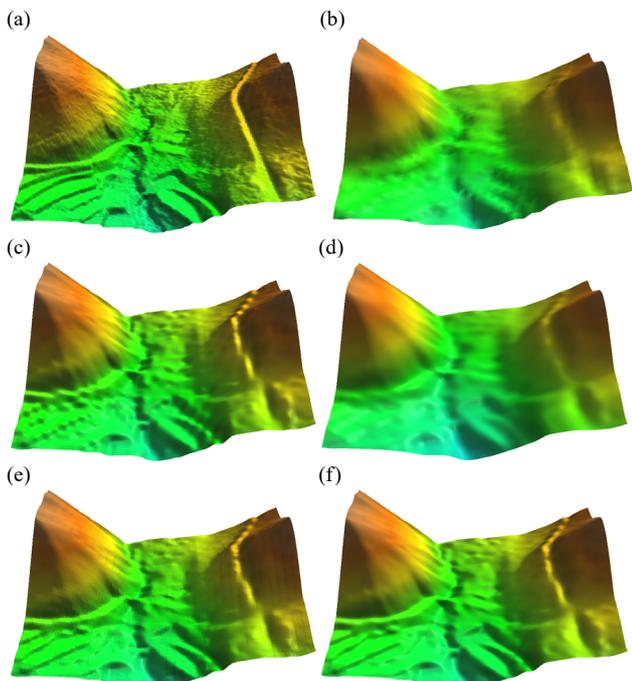
	補間			SRCNN		
	Bilinear	Bicubic	BS-Horizon	標高	傾斜方位・量と標高	傾斜方位・量と標高からTerramod-BS
RMSE(m)	0.252	0.283	0.248	0.451	0.250	0.239
PSNR(dB)	77.99	77.00	78.13	72.94	78.08	78.47



第1図 傾斜方位と傾斜量をHSV変換して用いたSRCNN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のDEM, (b) 5mのDEM, (c) Bicubic補間, (d) 高分解能化結果(標高), (e) 高分解能化結果(傾斜方位・量と標高から計算), (f) 高分解能化結果(傾斜方位・量と標高から面推定), (g) 分解能1mのHSV画像, (h) 5mのHSV画像, (i) 高分解能化の結果のHSV画像.



第3図 結果の3次元表示例. (a) 分解能1mのDEM, (b) 5mのDEM, (c) Bicubic補間, (d) 高分解能化結果(標高), (e) 高分解能化結果(傾斜方位・量と標高から計算), (f) 高分解能化結果(傾斜方位・量と標高から面推定).

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. 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> (2021 年 5 月 11 日)

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. *水産工学*, vol. 56, no. 1, pp. 47-50.

野々垣進・升本眞二・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・升本眞二(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.

Xu, Z., Chen, Z. and Yi, W.(2019)Deep gradient prior network for DEM super-resolution: Transfer learning from image to DEM. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 150, pp. 80-90.

沖積層を対象とした補間方法の違いによる地質境界面の変化

梶山 敦司*・阿南 修司**

Changes in geological boundary surface due to differences in interpolation methods for alluvium

Atsushi KAJIYAMA* and Shuji ANAN **

*国立研究開発法人土木研究所 Public Works Research Institute, 1-6, Minamihara, Tsukuba, Ibaraki, 305-8516 Japan.. E-mail: kajiyama-at573bt@pwri.go.jp

**国立研究開発法人土木研究所 Public Works Research Institute, 1-6, Minamihara, Tsukuba, Ibaraki, 305-8516 Japan.. E-mail: anan-s@pwri.go.jp

キーワード： 三次元地質モデル, CIM, アイコンストラクション, データ補間

Key words : Three-dimensional geological model, CIM, i-Construction, data interpolation

1. はじめに

近年、国土交通省が実施する土木事業において、計画構想段階・調査設計段階から三次元モデルを導入することにより、施工段階・維持管理段階などにおいて三次元モデルを用いて関係者間の情報共有を容易にする取り組みが進められている。地質・地盤に関する調査結果についても三次元化する必要があるため、国土交通省（2020）によって「CIMガイドライン（案）第1編共通編」として三次元地質モデルの作成方法などが記載されている。同ガイドラインでは、三次元地質モデルを作成する際に利用する地質境界面の補間方法として、NURBS、最適化原理、Minimum Curvature、Kriging等が適用例として挙げられている。しかし、境界面推定方法の適用性については触れられていない状況である。

そこで、本研究では沖積平野で実施されたボーリング調査結果をもとに、補間方法によってどの程度推定結果に変化が生じるかを比較した。「CIMガイドライン（案）第1編共通編」に挙げられる補間方法である最適化原理、Minimum Curvature、Krigingの3種類と地形などの補間に利用されるIDWを加えた4つの補間方法を用いどの程度推定結果に違いがあるかを比較した。

2. 対象としたデータ

沖積層の分布する平野部を対象とした。対象としたボーリングデータの分布を第1図(a)に各推定結果とともに示した。対象範囲は2.5km×2.5kmの範囲であり、推定に用いたボーリングは243本である。

3. 境界面推定方法と各種パラメータ

地質境界面推定に用いた補間方法、補間に使用したソフトウェアおよび補間時に設定したパラメータを示す。なお、計算は格子間隔5m×5m、格子数500×500とした。

・**Kriging** : Surfer(GOLDENSOFTWARE,2021)を用い、推定には以下のパラメータを用いた。

drift type : none, data : all

・**Minimum Curvature** : Surfer(GOLDENSOFTWARE,2021)を用い、推定には以下のパラメータを用いた。

Residual : 0.01, Iteration : 100000,

Relaxation factor : 1

・**最適化原理** : Terramod-BS(坂本ほか, 2012)を用い、推定には以下のパラメータを用いた。

Mx : 50, My : 50, α : 100

・**IDW** : Surfer(GOLDENSOFTWARE,2021)を用いた、推定には以下のパラメータを用いた。

weight : 4, smoothing : 0

4. 推定結果

推定した等高線図を第2図(a)に示し、ボーリングが連続する区間において断面図を作成した結果を第2図(b)に示し、推定結果とボーリング地点における差分のヒストグラムを第2図(c)に示す。

断面形状はいずれの計算結果においても大きな変化は認められない。ヒストグラムにおいても、IDWが最もボーリング地点を通ることを示すが、概ね同様の傾向を示す。一方、平面図は推定方法によってその形状が大きく異なる。

5. おわりに

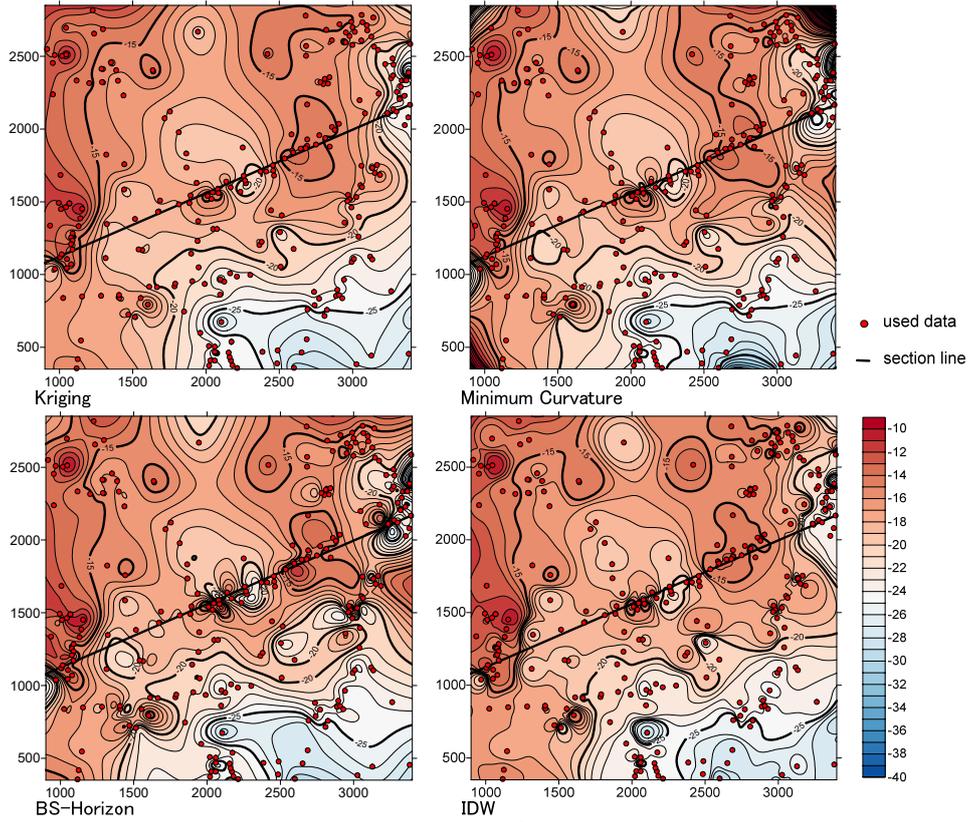
本研究では、沖積平野におけるボーリング調査結果を対象として、4つの補間方法を用いて推定結果にどのような違いがあるかを比較した。その結果、ボーリング地点の多い断面位置では同様の傾向を示すが、ボーリング地点がない場所では大きく異なることが分かった。今後、各推定方法のパラメータを変化させた場合などの比較を行い、最適な推定方法の提案を行う予定である。

文 献

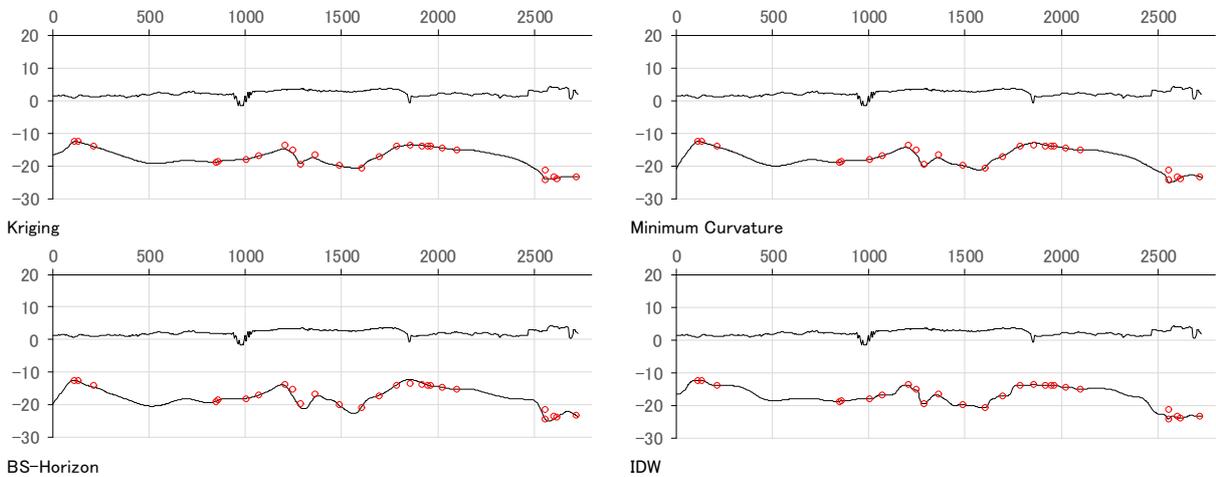
GOLDENSOFTWARE(2021) : Surfer.URL : <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>. (確認日 : 2021/5/17)

国土交通省(2020)CIM 導入ガイドライン(案), 国土交通省, 120 p.

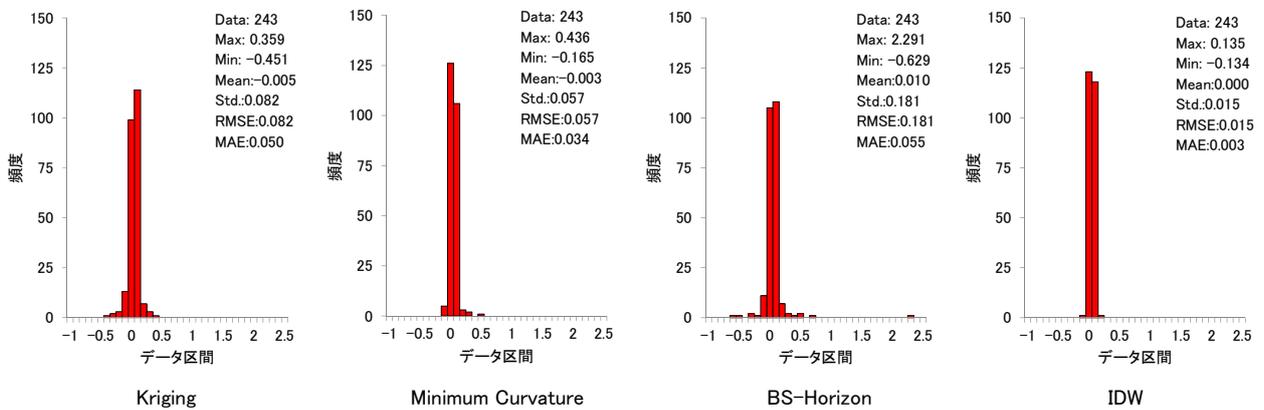
坂本正徳・野々垣進・升本真二(2012)Terramod-BS : BS-Horizonを組み込んだ地層境界面推定・表示 Visual Basic プログラム, vol.23, no.4, pp.169-178.



(a) 等高線図



(b) 断面図



(c) ヒストグラム

第1図 各種推定結果

兵庫県丹波市における斜面崩壊による地形変化の検出

植田 允教*・根本 達也**・田端 秀行*・ラガワン ベンカテッシュ*

Detection of Terrain Form Changes due to Rainfall Induced Slope Failures in Tamba City, Hyogo Prefecture, Japan

UEDA Mitsunori*, NEMOTO Tatsuya**, TABATA Hideyuki* and RAGHAVAN Venkatesh*

* 大阪市立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: m.ueda.rapide@gmail.com

** 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 558-5858, Japan.

キーワード：DEM, 斜面崩壊, 地形解析, Geomorphons

Key words：DEM, Slope Failure, Terrain Analysis, Geomorphons

1. はじめに

兵庫県丹波市では、2014年8月16日～17日の豪雨により多数の斜面崩壊が発生したことが報告されている(松村ほか, 2015)。また、現地の被災状況確認のため、災害後直ぐに航空レーザ測量が実施されている。航空レーザ測量データは、上空から地上へ向けてレーザパルスを照射することで、作成される詳細な地表面の3次元情報である。

本研究では、斜面崩壊前後で航空レーザ測量により取得、生成された解像度1mの数値標高モデル(以下、1m DEM)を基に、地形解析を実施し、斜面変動による地形変化について確認する。

2. 対象地域

本研究の対象地域は、兵庫県丹波市市島地区の南北3km、東西4kmとする。当領域は、災害前(2012年)の航空レーザ測量データも存在しており、災害前後の地形変化を確認するのに適している。対象地域における災害前後の差分図を、第1図に示す。

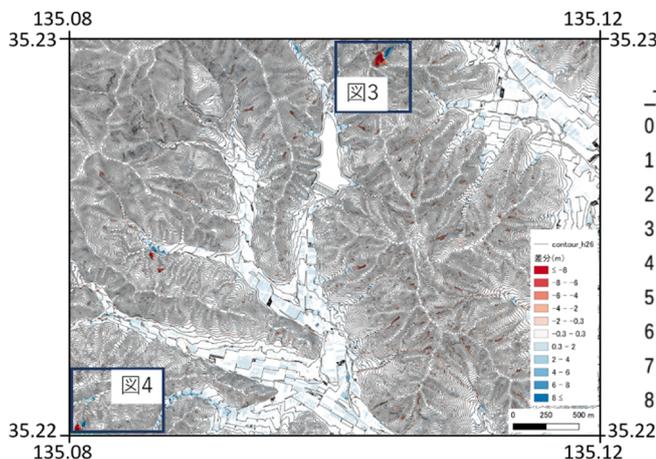
市島地区は、標高600～800mの山地と標高100m程の谷

底平野からなり、山腹斜面や谷頭部での崩壊が確認できる。差分に着目すると、発生した斜面崩壊の多くは、2～3mの崩壊深であるが、規模の大きな崩壊は、5m以上の地形変化も認められる。

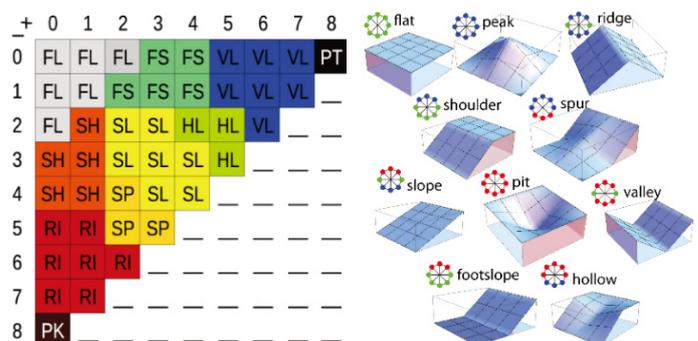
3. 解析手法

斜面崩壊による地形変化を捉えるため、1m DEMより地形情報を算出し、崩壊の前後で比較を行った。抽出した地形情報は、斜面の傾斜角と地形形状である。斜面の傾斜角は、Horn (1981)により算出した。

地形形状は、該当地域に Geomorphons を適用した。Geomorphons は、地形分類の手法の一つである。中心セルに対して、最大検索範囲を設定する。中心セルと検索範囲内の8方向の全てのセルを別々に比較することで、8方向の最小天頂角及び最小天底角が算出される。その後、各方位における3つの値のいずれか(+= "higher", 0 = "same", -= "lower")を中心セルに返す。これにより、1つのセルが8つの情報を持つことになり、地形をパターンとして特徴付け、パターン認識的に地形を分類することが可能である。最終的に、10個の地形パターンに分類する(Jasiewicz *et al.*, 2013) (第2図)。



第1図 対象地域の災害前後差分図



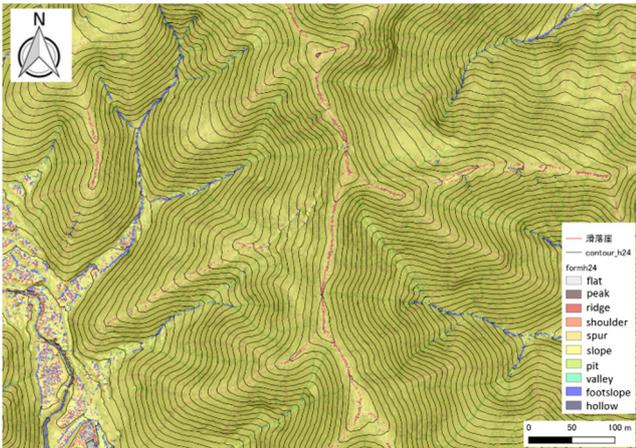
第2図 Geomorphonsの説明図 (左：地形分類表、右：地形特徴)

地形変化を捉えるため、作成した斜面の傾斜角と Geomorphons を、透過合成を行うことで、視覚的に把握できるようにした。その後、目視で判読を行った。

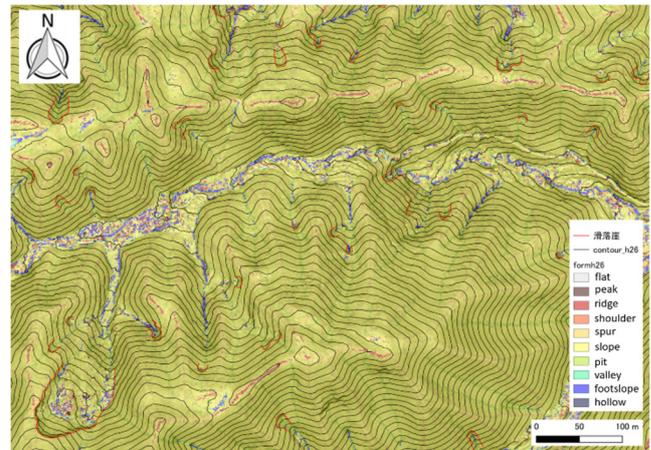
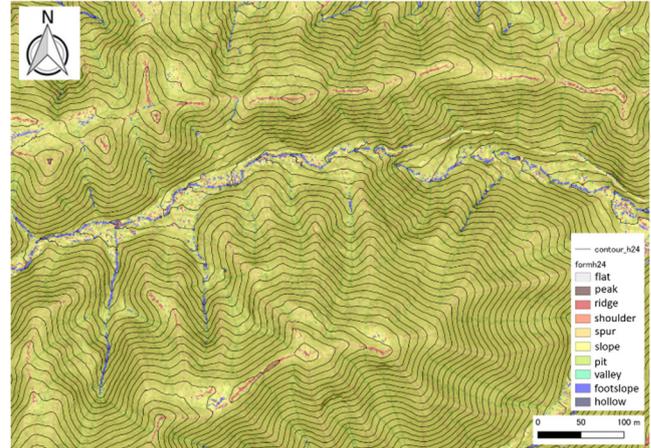
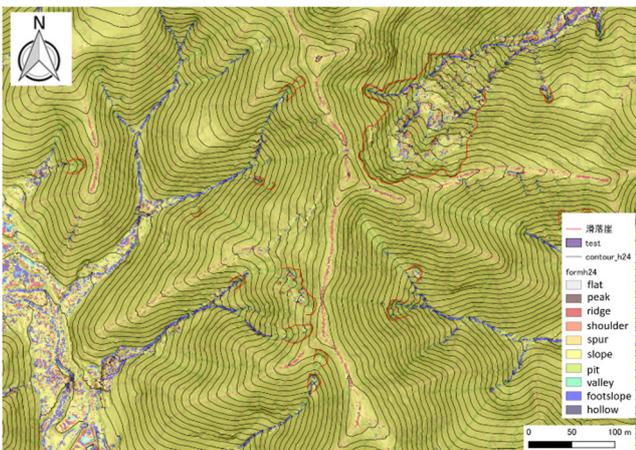
4. 結果

斜面崩壊の地形変化状況を示した例を第 3 図と第 4 図に示す。第 3 図では、斜面崩壊が発生したことにより、連続性を持っていた平行斜面に、滑落崖としての遷急線、土砂堆積域上端に遷緩線が形成されていることがわかる。また、堆積域において、地形が明瞭に変化していることが確認できる。崩壊前は slope (平行斜面) が全体的に存在し、pit (窪地) や valley (谷底斜面), footslope (麓部斜面) が溪流として線状に分布する。しかしながら、崩壊後は、shoulder (上部谷壁斜面) や spur (支脈) が微地形として発達し、崩壊前と比較して溪流の上流まで麓部斜面が形成されている。これは、第 3 図の右上でみられるような規模の大きな崩壊で顕著であった。

第 4 図では、溪流の源頭部における斜面崩壊で、崩壊規模も比較的小規模である。その場合、図 3 で確認できたような堆積域の微地形などは確認できなかった。また、崩壊があった箇所やその下流の溪流内に麓部斜面が連続して存在しており、溪岸浸食があったことが確認できる。このことから、源頭部にあたる 0 字谷で発生する崩壊は崩壊土砂が下流まで流出することで、斜面上に土砂が残らなかったため、土砂堆積による微地形は発達しなかったと考える。



第 3 図 大規模な斜面崩壊を含む地形変化 (上：崩壊前，下崩壊後)



第 4 図 大規模な斜面崩壊を含む地形変化 (上：崩壊前，下崩壊後)

5. おわりに

本研究から、高精細 DEM を用いて斜面崩壊前後の複数の地形情報を比較することにより、詳細な地形条件の変化を捉えることがわかった。今回は、手作業と目視での判読を行ったが、今後は機械学習を用いて地形の高精細な変化状況を自動的に検出する方法を検討していきたい。

高精度な斜面崩壊の抽出が可能になれば、迅速な被災状況把握ができると共に、砂防計画の一次資料を提供できるなど大いに役立つものであると期待できる。

最後に、今回用いたデータは、兵庫県県土整備部砂防課よりご提供いただきました。大変貴重なデータであり厚くお礼申し上げます。

文 献

- 松村 和樹・長谷川 祐治・藤本 将光・中谷 加奈・西川友章・笠原 拓造・柳崎 剛・鏡原 聖史・加藤 智久・岡野 和行・鈴木 崇・平岡 伸隆 (2015) 2014 年 8 月の豪雨による兵庫県丹波市で発生した土砂災害。砂防学会誌, vol. 68 (1), pp. 60-67.
- 栗本 史雄・牧本 博 (1990) 福知山地域の地質。5 万分の 1 地質図幅, 京都 (11) 第 13 号, 地質調査所。
- Horn, B. K. P. (1981) *Hill Shading and the Reflectance Map*. Proceedings of the IEEE, vol. 69 (1), pp. 14-47.
- Jasiewicz, J. and Stepinski, T. (2013) *Geomorphons - A Pattern Recognition Approach to Classification and Mapping of Landforms*. Geomorphology, vol.182, pp. 147-156.

Machine Learning Application to Delineating Metal-rich Veins

Vitor Ribeiro de Sá* and Katsuaki Koike*

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

E-mail: ribeirodesa.vitor.7c@kyoto-u.ac.jp; koike.katsuaki.5x@kyoto-u.ac.jp

Key words: Hierarchical clustering, Epithermal deposit, Au–Ag mineralization, Geologic model

1. Introduction

Geological/geostatistical domain definition plays a pivotal role in mineral resource modeling. Machine learning (ML) techniques, such as cluster analysis, has been gained notoriety in earth science for their versatility to furnish tools to handle sparse information in wide areas. ML and field studies can act in concert to improve the understanding of geological phenomenon.

This study aims to apply hierarchical clustering analysis (HCA) to a real geochemical data set from a low-sulfidation gold deposit. Such type of deposits account for significant occurrences of Au and Ag, besides base metals (i.e. Cu–Pb–Zn) (Pirajno, 2009). HCA can yield categories that assemble data with similar characteristics, chemical-wise. As it turns out, veins and veinlets, where higher Au–Ag concentrations are hosted in this deposit, can be identified. Highlighting these features aids effective field survey and provide elements to carry out geostatistical models in order to delineate target areas for future exploration in the study area.

The next sections introduce the study area and set out the methodology and its perks to the current study case. Besides, the results are presented and discussed. Although the methodology is applied to a specific environment of this study, HCA can be widely used for a myriad of geological contexts.

2. Study Area and Dataset

The Sirawai deposit, Mindanao, Philippines was selected as a case study area. The target zone is set in a 200 m × 210 m hilly field, elevation 280–330 meters above sea level (masl), where 56 drill sites (black dots) collected samples to analyze Au, Ag, Cu, Pb and Zn grades (Fig. 1a). This field is marked for several subparallel sulfide-quartz veins of 300–500 m length, which their strike 20–30° NW and dip 60–70° SW with the 1.0–5.1 m width and the average 2.5 m can be observed. Such structures host the greatest Au and Ag grades in the area.

The proposed methodology uses Au and Ag grade measurements, given in g/t, in varied depths. Fig. 1b shows the location of 56 drill sites and the length of the drill holes, 46 vertical holes (5 – 50 m depth) and ten inclined holes (70 m length) at dip 60°. The samples are separated by 1 m interval. Both precious metals are correlated in this deposit (linear correlation coefficient $\rho = 0.69$). Au grades varies from nearly zero to 183.3 g/t (average 0.46). Ag presents wider variation, from 0.01 to 1141 g/t (mean 12.75 g/t). According to the highest values

of log (Au), the main occurrences of Au–Ag mineralized bodies are situated in the middle study area.

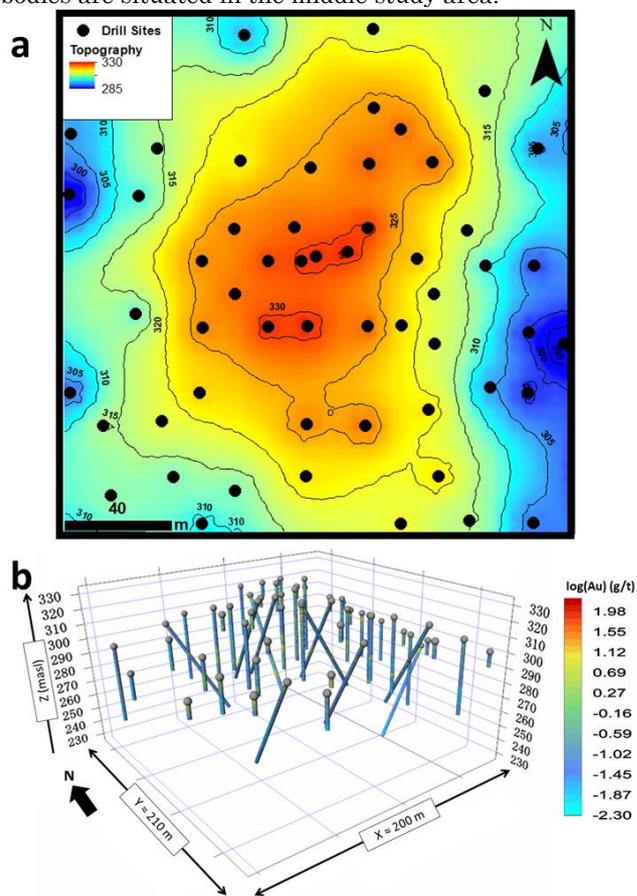


Figure 1. Dimension of study area and its spatial distribution of drill sites. (a) Detailed topography of the study area with 56 drill sites (black dots), and (b) 3D representation of the drill sites and holes lengths and log (Au) concentrations.

3. Methods

3.1. General structure of methodology

The proposed methodology assembles Au–Ag available data into relatively homogeneous groups or clusters. The members of a cluster are at once alike and at same time unlike members of other groups. To attain this goal, firstly, Au–Ag data are log-transformed, and their correlation is statistically verified. In sequence, HCA is applied to assign samples that are Rich, Intermediate and Poor in Au and Ag grades. The following subsection

briefly describe the main HCA characteristics and the cluster number selection criterion.

3.2. Hierarchical Clustering Analysis (HCA)

HCA is an unsupervised machine learning technique which joins the most similar observations, then successively connects the next most similar observations to these. The similarities of all pairs of observations are calculated in a square matrix. Those pairs that share more similarities are merged, and the matrix is recomputed. Such procedures are run by averaging the similarities that the combined observations have with other observations. This process iterates until the similarity matrix is reduced to 2x2 (Davis, 2012). The “elbow” method is used to select the optimal number of clusters. Such method consists in graphically observing the magnitude of inertia considering number of clusters. Inertia is the sum of squared distances of samples to their closest cluster centers.

4. Results and Discussion

The point after which the inertia start decreasing in a linear fashion is deemed the elbow point (Fig. 2a). Thus, for the given data, we conclude that the optimal number of clusters is three: Poor (purple), Intermediate (yellow) and Rich (green) (Fig. 2b).

Poor cluster is impoverished in both precious metals and represents roughly 31% of the samples. Gold grades range from 0.001 to 0.2 g/t (mean 0.02 g/t) while silver values vary from 0.01 to 5.0 g/t (average 1.85 g/t). Cluster considered as Intermediate occurrence of these metals has minimum grades approximately 0.1 g/t and its maximum grade is 0.8 g/t, mean 0.11. Intermediate grades of Ag ranges from 0.9 to 74 g/t, mean 8.07 g/t. These samples are the most representative among the data, approximately 57%. The most enriched samples in Au and Ag are encompassed by cluster Rich and accounts for nearly 11% of the total data. Au minimum grade is 0.15 g/t and reaches 183 g/t, averaging 3.54 g/t. Ag ranges from 5.9 to 1141 g/t, mean 67.65 g/t.

Cluster Rich is more conspicuous in shallow parts over the area. However, in the central region of the study area its occurrence takes place in deeper parts, which suggest the nested geological structures (i.e. veins and veinlets). Impoverished samples (cluster Poor) are relegated to deeper portions and more predominant in peripheral zones of the study area. These extreme clusters have no direct contact in the entire area. Cluster Intermediate plays as a buffer zone between Rich and Poor clusters.

We interpret the cluster Rich as possible evidence of the sulfide quartz veins in central area and deeper zones. When this cluster takes place in shallow zones and adjacent regions of the study area, it can be soil enriched by weathering. Cluster Intermediate is regarded as hydrothermal alteration halos when it is situated near Au–Ag rich veins whereas regions or zones slightly affected by hydrothermal activity, otherwise. On the other hand, Cluster Poor stands for the regions or zones where hydrothermal did not take place or its influence was weak.

5. Conclusion

The HCA application is demonstrated to be effective

for classifying the samples of precious metals (gold and silver) grades. In addition, this methodology aids to gain insight into vein continuities in subsurface. HCA can contribute to (a) yield categorical data and (b) support the construction of geological models using geostatistical methods, e.g. sequential indicator and pluri-Gaussian simulations as de Sá *et al.* (2021).

Acknowledgement: We sincerely thank Dr. Hiroshi Takahashi of Itochu Mineral Resources Development Corp. for providing the geological and metal analysis data of the Sirawai mine.

References

- Davis, J. C. (2012) *Statistics and data analysis in geology*. Wiley, New York, 646 p.
- de Sá, V. R., Koike, K., Goto, T.-N. *et al.* (2021) 3D geostatistical modeling of metal contents and lithofacies for mineralization mechanism determination of a seafloor hydrothermal deposit in the middle Okinawa Trough, Izena Hole. *Ore Geology Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104194>
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal processes and mineral systems*, Springer, Berlin, 1250 p.

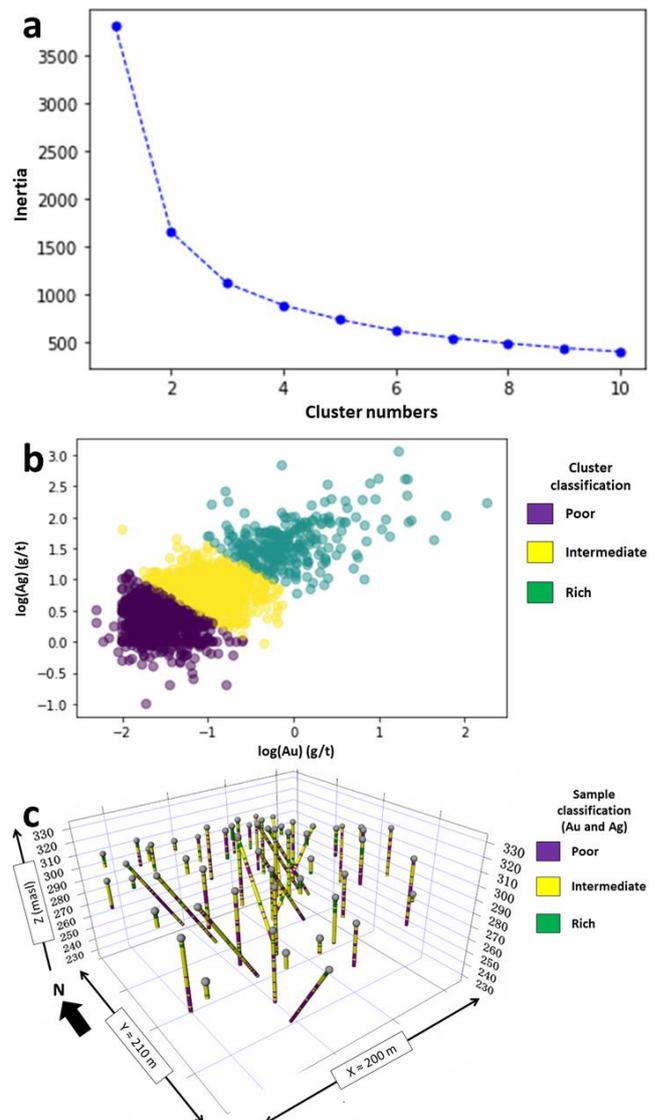


Figure 2. (a) Plot of inertia gains of hierarchical clustering results, (b) Biplot of $\log(\text{Au})$ and $\log(\text{Ag})$ showing cluster features, and (c) 3D representation of the cluster spatial distribution.

ベイズ統計モデリングを用いた地熱地域の深部温度の推定

石塚師也*・山谷祐介**・渡邊教弘**・小林洋介***・茂木透****・浅沼宏**・
梶原竜哉****・杉本健****・齋藤遼一****

Estimation of deep temperatures around a geothermal field using a Bayesian statistical modeling

Kazuya Ishitsuka*, Yusuke Yamaya**, Norihiro Watanabe**, Yosuke Kobayashi***, Toru Mogi****,
Hiroshi Asanuma**, Tatsuya Kajiwara****, Takeshi Sugimoto**** and Ryoichi Saito****

*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

**産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所

Fukushima Renewable Energy Institute,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

***室蘭工業大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology

****東京工業大学理学院火山流体研究センター

Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

****地熱エンジニアリング株式会社 Geothermal Engineering, Co., Ltd.

キーワード：温度推定，超臨界地熱，ベイズ統計モデリング，比抵抗，葛根田地熱地域

Key words : Temperature estimation, Supercritical geothermal resources, Bayesian statistical modeling, Resistivity, Kakkonda geothermal field

1. はじめに

近年，深部に存在すると考えられる超臨界地熱資源の開発に向けて研究開発が進められている．超臨界地熱資源は，脆性延性遷移領域に存在すると考えられ，地熱資源は超臨界状態となっていることが予想される．この超臨界地熱資源のポテンシャル評価において，地下深部の温度分布の把握は重要であるが，対象深度まで掘削されている坑井は限られる．そのため，既存の温度検層データに加え，マグネトテルリク法で得られた比抵抗や地質情報を統合して，温度推定を行う方法が考えられる．

本研究では，温度検層データと比抵抗を統合して温度を推定する手法としてベイズ統計モデリングを用いた手法の開発を行った．この手法では，ベイズの定理によって，岩石物理モデルを介して，比抵抗等の観測値から温度等を対象とする値の推定を行う．ベイズの定理を用いることによって，既存のデータを基に把握されている先験情報や観測誤差等に対して，柔軟に解析で考慮することができる．

手法の特徴や推定誤差について把握するため，初めに疑似データを用いて解析を行った結果について述べる．続いて，実データに適用し，推定した温度の誤差を評価した結果を述べる．実データは，葛根田地熱地域で取得されたデータを用いた．葛根田地熱地域で掘削された坑井 WD-1a では約 3700 m の深さで 500°C 以上もの温度が観測されており (Ikeuchi et al., 1998)，このような深部で得られている温度データを用いて手法の検証を行った．

2. 温度推定手法の概要

マグネトテルリク法で得られている 3 次元的に得られている比抵抗 γ は岩石物理モデル f_{RPM} と岩石物理モデルに含まれるパラメータ x ，観測誤差 ε によって式(1)のように表すことができる．

$$\gamma = f_{RPM}(x) + \varepsilon \quad (1)$$

本研究では，岩石物理モデルは Glover et al. (2000) で提案されているモデルを用いた．このモデルでは，含水岩石の比抵抗は乾燥岩石および地殻流体の比抵抗と空隙率の関数となっている．先行研究での実験値を基に，乾燥岩石の比抵抗は温度に依存し，地殻流体の比抵抗は温度と圧力，塩濃度に依存する値とした．

観測された比抵抗 γ からパラメータ x を推定する問題は，ベイズの定理を用いて，以下のように書き表すことができる．

$$P(x|\gamma) \propto P(\gamma|x)P(x) \quad (2)$$

ここで， $P(x|\gamma)$ は比抵抗 γ が得られた場合のパラメータ x の事後確率分布を表し， $P(x|\gamma)$ を求めることで，パラメータ x の取り得る範囲や最も発生確率の高い値 (最大事後確率推定値) を得ることができる． $P(\gamma|x)$ は尤度と呼ばれ，パラメータ x が与えられた場合の比抵抗 γ の確率分布を表す． $P(x)$ はパラメータ x の事前確率分布であり，パラメータの取り得る範囲などの先験情報を組み入れることができる．一般的に式(2)は解析的に解けない場合が多いため，マルコ

フ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法等を用いて数値的に解かれる。本研究では、MCMC 法の 1 つであるハミルトニアンモンテカルロ法を用いた。

ただし、岩石物理モデルに含まれる全てのパラメータを比抵抗から求めることは、劣決定性のために難しい。また、比抵抗と温度の関係は一意には決まらず、温度推定を行う全ての深さ領域において式(2)を適用すると、多峰性分布が得られることが予想される。そのため、推定するパラメータは温度と空隙率とし、それ以外のパラメータは先験情報を基に与えた。また、既存坑井が得られている深さまでは温度検層データの空間補間によって温度分布を得て、それ以降の深さではベイズ統計モデリングにより温度を求めた。

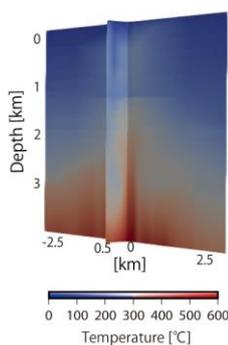
3. 疑似データを用いた手法の妥当性の検証

3.1 疑似データの作成

開発した手法の妥当性を検証するため、葛根田地熱地域の自然状態の温度分布を模擬した数値シミュレーションモデル (Sakagawa et al., 2000) を基に疑似観測データを作成し、手法を適用した。疑似観測データとして比抵抗分布を作成し、温度検層データが得られている坑井位置は乱数で生成した。このとき坑井数の異なる疑似データセット (25, 50, 100 本) を作成することで、坑井数の違いによる推定誤差への影響を調べた。また、先験情報の不確かさによる推定誤差を調べるため、塩濃度等の確からしさが異なる先験情報を基に解析を行い、推定誤差の違いを調べた。

3.2 検証結果

上述の疑似データを用いて解析を行ったところ、温度検層データの存在しない 3000 m 以深の温度推定誤差は約 11–20% となった (例えば、第 1 図)。また、高温域の位置等、全体的な温度分布は、数値シミュレーションモデルの温度と整合的であった。坑井数の異なる疑似データの推定結果を比較したところ、坑井数の増加に伴い、誤差が増加することが分かった。また、先験情報の確からしさは温度の推定誤差に影響を与えることが分かった。特に深部の地殻流体の塩濃度の先験情報が不正確な場合、本研究の検討では、温度推定誤差が 5–7% 増加した。



第 1 図 疑似データを用いて推定した温度分布の例 (坑井数 25 本の場合)。

4. 葛根田地熱地域への適用

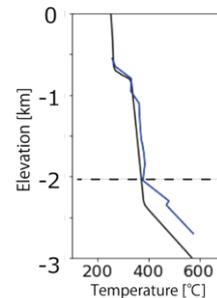
4.1 用いたデータの概要

葛根田地熱発電所を含む約 4.3 km × 4.0 km の範囲を解析対象とした。また、深さ方向は、本研究で用いた岩石物理モデルの適用可能な温度圧力条件を考慮して標高・2.7 km までを推定対象とした。比抵抗データはマグネトテリク法によって得られた 3 次元比抵抗分布を用いた。塩濃度は、浅部では天水の影響を考慮して 0.5wt% とし、深さとと

もに上昇し、最大で 6.0wt% となると仮定した。

3.2 温度推定結果

開発した手法を適用したところ、解析範囲中央部から東部にかけて比較的浅部に高温域が位置している箇所が推定された。また、ベイズ統計モデリングによって温度と同時に推定された空隙率分布は、深部では全体的な傾向として 0 から 0.05 の値を示しているものの、低比抵抗域と対応して若干高い空隙率を示すことが示唆された。また、推定した温度と深部まで掘削されている坑井の温度データとの比較を行ったところ、誤差の平均は 15.4% であった。また、WD-1a の標高・2.35 km 以深での温度推定誤差は 13.9% であった (第 2 図)。推定した温度は一定のバイアスはあるものの、WD-1a の温度の傾向を再現できていることが分かる (第 2 図)。



第 2 図 葛根田地熱地域 WD-1a 坑井での参照温度 (黒実線) および提案する手法によって推定された温度 (青実線)。図の点線以浅を空間補間によって推定し、点線以深をベイズ統計モデリングにより推定した。

5. まとめ

本研究では、ベイズ統計モデリングを用いて、地熱地域の深部の温度分布を推定する手法を開発した。開発した手法を疑似データに適用し、手法の妥当性の検証を行った。また、葛根田地熱地域のデータに適用を行い、深部の温度分布の推定を行った。今後、本研究で得られた知見を基により実用的な手法の開発が求められると考えている。

文 献

- Ikeuchi, K., Doi, N., Sakagawa, Y., Kamenosono, H., and Uchida, T. (1998) High-temperature measurement in well WD-1a and the thermal structure of the Kakkonda geothermal system, Japan, *Geothermics*, vol.27, no.5/6, pp.591-607.
- Glover, P. W. J., Hole, M. J., and Pous, J. (2000) A modified Archie's law for two conducting phases. *Earth and Planetary Science Letters*, vol.180, pp.369-383.
- Sakagawa, Y., Aoyama, K., Ikeuchi, K., Takahashi, M., Kato, O., and Doi, N. (2000) Natural state simulation of the Kakkonda geothermal field, Japan. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, pp.2839-2844.

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「超臨界地熱発電技術研究開発/超臨界地熱資源への調査井掘削に関する革新的技術開発/IAI による超臨界地熱資源評価・掘削技術」の一環として行われた。葛根田地熱地域のデータの多くは東北自然エネルギー(株)よりご提供頂いた。関係機関に厚く御礼申し上げる。

熱水の上昇経路特定を目指した 地熱地帯での地球統計学的 3次元亀裂分布モデリング

池本 龍平*・久保 大樹*・Mohamad Nur Heriawan**・小池 克明*

3D geostatistical modeling of fracture distribution in geothermal area for specifying ascent fluid-flow paths

Ryuhei Ikemoto*, Taiki Kubo*, Mohamad Nur Heriawan** and Katsuaki Koike*

* 京都大学工学研究科, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto University Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540. E-mail: ikemoto.ryuhei.33e@st.kyoto-u.ac.jp

** バンドン工科大学, Bandung Institute of Technology, Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132

キーワード: 亀裂系, 地球統計学, シミュレーション, 熱水流動, インドネシア

Key words: Fracture system, Geostatistics, Simulation, Hydrothermal fluid flow, Indonesia

1. はじめに

資源探査や地層処分など岩盤の工学的利用を行う様々な分野において、対象とする岩盤の亀裂分布の評価は重要とされている。特に低透水性岩盤では、透水性亀裂が水理特性に支配的な影響を及ぼすため、岩盤中の亀裂の空間分布を推定することは重要な課題の1つである。しかしながら、亀裂の観測情報は範囲・量ともに限られており、少ない観測情報を適切に補完しながら空間分布推定を行うことが必要とされている。情報を補完しつつ広域的な亀裂分布モデリングを可能にする手法として GEOFRAC (GEOstatistical FRACture simulation method)が提唱されている (Koike *et al.*, 2012)。この手法はボーリングや坑井調査などにより得られた亀裂の直接観測データから、地球統計学的手法を応用して亀裂の密度と方向(走向・傾斜)の空間分布を推定する。本研究では、GEOFRACを用い3次元亀裂分布モデリングを行うことで、地熱地帯における主要な熱水流動の上昇経路の推定を試みた。

2. 対象地域と解析データ

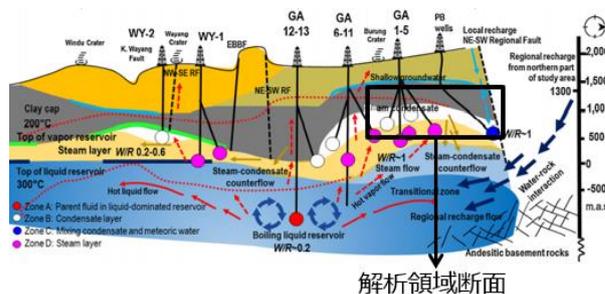
本研究では、インドネシアの西ジャワ州の州都である Bandung の南方約 35 km の標高 1500 m から 2000 m ほどの連山帯に位置している Wayang Windu 地熱地域(以下、WWGF)を対象に選んだ(第1図)。WWGFは、インドネシア国内最大級の地熱発電所(Star Energy Geothermal Ltd., 発電設備容量 227MW)が稼動しており、周辺には噴気や温泉など明瞭な地熱兆候が確認される活発な火山地域である。また、当地域では後期更新世の安山岩を基盤とした低透水性岩盤が多く分布している (Bogie *et al.*, 2008)。さらに、Alzwar *et al.* (1992)や Shoedarto *et al.* (2020)により断層分布、貯留層分布、熱水流動システム(第2図)が推定されており、これに基づくと解析領域内に蒸気卓越型の貯留層が存在すると考えられる。

解析領域は、東西 2000 m、南北 2800 m、垂直方向 900 m (標高 500 m~1400 m) の範囲と設定し、ボーリング調査

においてボアホールテレビ (BTV) 画像で観測された 4897 本の亀裂データ (位置座標, 方向) を使用した。



第1図 インドネシア ジャワ島での対象地域 (WWGF) の位置。



第2図 Shoedarto *et al.* (2020)に基づく WWGF での熱水流動システムモデル (白色部が蒸気卓越型の貯留層)。

3. GEOFRAC による亀裂分布モデリングと考察

まず、観測データから計算した亀裂密度を測定値とし、逐次ガウスシミュレーション (SGS) によって亀裂密度分布モデルを作成した。このモデルに基づいて各セル内に得られた亀裂密度と同じ数の面素中心点を発生させた。

次に、観測データを走向により4つのグループに区分し、各データに所属クラスを表すバイナリーデータセットを与えた。これに主成分分析を適用し、面素中心点において主成分値を普通クリギング (OK) により補間することで、所

属クラスタを決定した。グループごとに計算した亀裂方向の積算確率分布とモンテカルロ法により、各面素中心点の方向（走向と傾斜）を割り当てた。

さらに、決定した座標と方向を基に直径 10 m の亀裂面素を作成し、2つの亀裂面素の中心間距離が 200 m、なす角が 12° 以下の条件で 2つの面素を連結させた。この操作をすべての面素に対して行い、亀裂面を形成した。

第 3 図に GEOFRAC により得られた亀裂空間分布モデル、およびシミュレーション亀裂分布と断層分布との比較を示す。ただし、ここでは結合面素数 150 個以上で、亀裂長が概ね 100 m 以上となる相対的に連続性の良いシミュレーション亀裂のみを表示している。さらに、視認性を高めるために、シミュレーション亀裂面はランダムに着色した半透明なポリゴンとして表現している。

亀裂の方向が断層に調和するような分布形態が第 3 図に表されている。このような亀裂は断層形成に関連していると推測され、シミュレーション亀裂と断層分布との整合性を確認できた。シミュレーション亀裂分布（第 3 図）と Heriawan *et al.* (2020)に基づくリニアメント密度分布（第 4 図）との比較では、リニアメントの高密度分布と亀裂分布の対応が一部で現れているので、亀裂系の一部が侵食地形として現れていると考えられる。

さらに、シミュレーション亀裂分布と地熱貯留層分布とを比較する（第 5 図）。上図はシミュレーション亀裂分布を西側から見た図であり、可視化条件を結合面素数 250 個以上、亀裂長 150 m 以上に限定している。下図は第 2 図の解析領域断面における蒸気卓越型の貯留層分布を簡略化したものである。シミュレーション亀裂分布は貯留層分布と対応していることがわかる。よって、既知の地質情報とシミュレーション結果との関連性から、シミュレーションの妥当性を検証できた。また、貯留層部に高角度の亀裂が密集していることから、亀裂分布の密集部が熱水流動の主要な上昇経路を形成していると解釈できる。

4. まとめと今後の課題

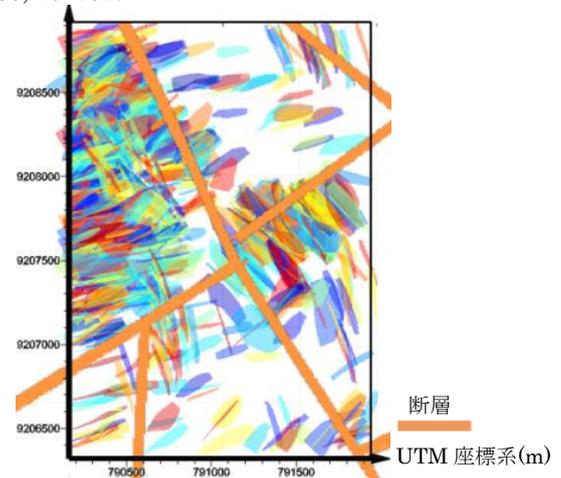
本研究では、インドネシアの地熱地帯を対象として、BTV 画像から得られた亀裂データを用い、地球統計的手法を応用した亀裂シミュレーション法である GEOFRAC により 3次元亀裂分布モデリングを行った。得られた亀裂分布モデルは既知の断層構造やリニアメント密度分布、地熱貯留層分布と整合しており、シミュレーションの妥当性を実証できたとともに、熱水流動の主要な上昇経路を推定することができた。今後は、亀裂分布モデリングをさらに精緻化できるようにプログラムを改善するとともに、亀裂分布と温度・圧力分布を統合し、熱水流動形態の解明を目指す。

文 献

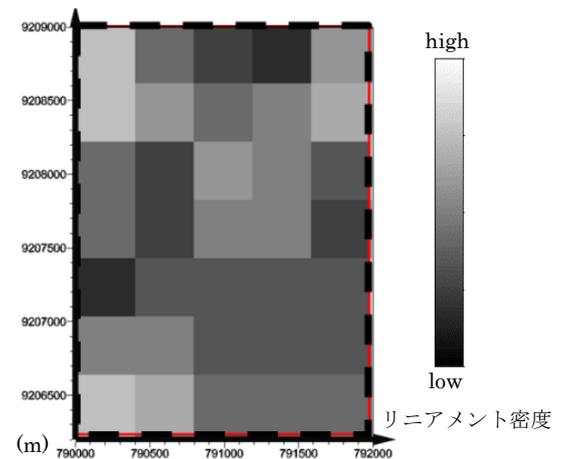
Alzwar, M., Akbar, N. and Bachri, S. (1992) Geological map of the Garut and Pameungpeuk quadrangle, Jawa. Geological Research and Development Center.
 Bogie, I., Kusumah, Y. L. and Wisnandary, M. C. (2008) Overview of the Wayang Windu geothermal field, West Java, Indonesia. *Geothermics*, vol. 37, pp. 347-365.
 Heriawan, M. N., Syafi'i, A. A., Saepuloh, A., Kubo, T. and Koike, K. (2020) Detection of near-surface permeable zones based on spatial correlation between radon gas concentration and DTM-derived lineament density. *Natural Resources Research*, <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09718-z>.
 Koike, K., Kubo, T., Liu, C., Masoud, A., Amano, K., Kurihara, A., Matsuoka, T. and Lanyon, B. (2015) 3D

geostatistical modeling of fracture system in a granitic massif to characterize hydraulic properties and fracture distribution. *Tectonophysics*, vol. 660, pp. 1-16.

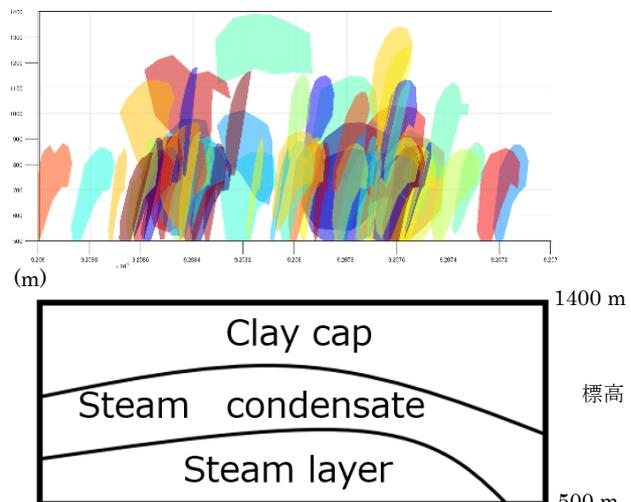
Shoedarto, R. M., Tada, Y., Kashiwaya, K., Koike, K. and Iskandar, I. (2020) Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction. *Geothermics*, vol. 86, 101797.



第 3 図 断層分布とシミュレーション亀裂分布との重ね合わせ。



第 4 図 Heriawan *et al.* (2020)に基づくリニアメント密度分布。



第 5 図 連続性の良いシミュレーション亀裂分布 (上) と貯留層モデル (下) との比較。

鉱石試料分析に基づく日本の熱水鉱床のタイプと生成年代による 金属濃度の特徴

下地 悠¹・大田 優介²・小池 克明¹・白勢 洋平³

Characterization of metal contents of ore samples in hydrothermal deposits in Japan depending on type and geologic ages

Yu Shimoji¹・Yusuke Ohta²・Katsuaki Koike¹・Yohei Shirose³

- 1) 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: i.am.you718@gmail.com (Shimoji)
- 2) 名古屋大学環境科学科 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furou D2-1, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan.
- 3) 愛媛大学理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 10-13 Dogo-Himata, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan.

キーワード：金属鉱床，鉱物組成，金属元素濃度，主成分分析，対数比変換

Key Words : metal deposits, mineral composition, metal element content, principal component analysis, logratio transformation

1. はじめに

世界的に金属資源の需要が増加し，供給リスクが高まっている(原田ほか，2007)．この状況において，新たな金属鉱床の探査・開発は重要な課題である．鉱床学の分野においても金属元素の分布形態の把握や鉱床の成因解明のために，分析データや数理統計解析を活用するデータ駆動型解析の適用が注目されている．日本ではかつて多種多様な鉱石(金・銀・銅・鉛・亜鉛・タングステン等)を対象とした複数のタイプの鉱山が採掘されていた．これらの鉱山からの鉱石を分析することで，これまでとは異なる観点から資源の分布，鉱床の成因，鉱床形成支配要因などに関する情報を抽出できれば，日本列島における鉱床形成の理解に繋がり，類似の変動地域や新たな探査領域での活用も期待できる．

そこで本研究では，熱水鉱床に分類される日本の94ヶ所における金属鉱山に注目し，それらの鉱石の元素濃度と鉱物組成分析を行い，データ解析を通して資源地質学的な観点から元素濃集の特徴，およびこれと鉱床のタイプや生成年代との関係を明らかにすることを目的とした．

2. 対象鉱石試料

本研究では，京都大学総合博物館に収蔵されている日本の94鉱山の鉱石の中で，主要鉱脈や高品位部に位置する2～5個を選び，カッターで一部を切断して分析に用いた．試料数は合計で343である．分析した鉱山の鉱床タイプはキースラガー，スカルン鉱床，浅熱水鉱脈型鉱床，ゼノサーマル型鉱床，黒鉱型鉱床といずれも熱水性鉱床である．各鉱床の生成年代は，中生代のジュラ紀から新生代の新第三紀・第四紀にわたり，浅鉱脈型鉱床とゼノサーマル型鉱床は古第三紀と新第三紀，第四紀，スカルン鉱床はジュラ紀から新第三紀，黒鉱型鉱床はすべて新第三紀，キースラガーはすべてジュラ紀に生成されており(下中，1996)，鉱床タイプによ

って生成された年代には偏りがある．

3. 鉱石試料分析とデータの解析手法

試料の分析の前処理として，粉碎機を用いて各試料を粉末化し，鉱物組成はXRD(X線回折分析装置)，元素濃度はXRF(蛍光X線分析装置)を用いて定性・定量分析を行った．

元素濃度と鉱物組成の分析結果を用い，それぞれに対して統計分析を行った．その後，14種類の元素の濃度データに主成分分析を適用した．この際，元素濃度データがもつ定数と制約を除去するために，各変数を共通して一つの規格化変数との比に置き換え，その比の対数をとる対数比変換を用いた．その規格化変数として，風化作用で移動・分解されにくく，熱水変質においても移動性が低いという特徴をもつため，元素移動の基準となるAl濃度を用いた．

4. 元素濃度と鉱物組成の統計解析結果

元素濃度分析データの統計解析から，以下の鉱床タイプ別の元素濃集の特徴が明らかになった．キースラガーは他の鉱床タイプと比較してMg, Fe, Coの濃度が高く，Mn, W, Pbは極端に低い．スカルン鉱床は高いFe, Mn濃度によって特徴付けられる．また，生成年代によって濃度分布の特徴が変化する元素は少ないが，ジュラ紀の鉱床は他の年代よりもFe, Co濃度が高い．白亜紀の鉱床はやや高いFe, Al濃度を示すが，Cu, Zn, Pbでは他の年代の鉱床よりも著しく低い濃度を示す．

鉱物組成分析の結果からは，Fe, Cu, Zn, Pb等の元素は鉱床タイプに関わらず硫化物として生成されることが多いことがわかった．その中でもキースラガーは高い黄鉄鉱と黄銅鉱の含有比で，黒鉱型鉱床は高い閃亜鉛鉱と方鉛鉱の含有比で特徴付けられる．また，浅熱水鉱脈型とスカルン鉱

床では、磁鉄鉱や赤鉄鉱などの酸化鉱物や珪酸塩鉱物が高い含有比を示す場合もみられた。

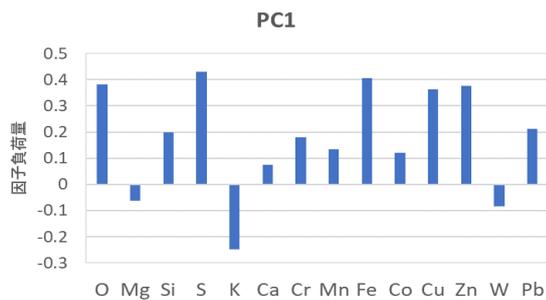
5. 主成分分析の結果と考察

主成分分析の結果、第1主成分(以下 PC1)、第2主成分(PC2)、第3主成分(PC3)までの合計で約60%の寄与率をもつことがわかった。

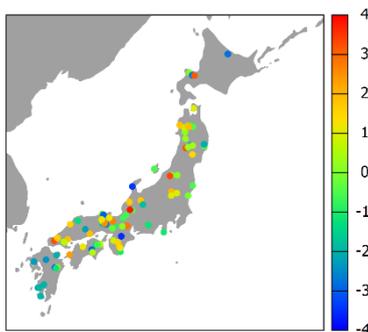
寄与率約30%のPC1における各元素の因子負荷量を第1図に示す。高い負荷量をもつ Fe, Cu, Zn の鉱物は硫化物が最も多いこと、および本研究で用いた試料はすべて熱水性鉱床に属することから、PC1 は「熱水による鉱化作用に伴う成分の挙動、特に硫化鉱物の生成」を表すと考えられる。

寄与率約17%のPC2の因子負荷量として、珪酸塩鉱物との親和性が高い Cr, W, および国内の鉱床において石英や灰鉄輝石との共生例が報告されている Co が高い値を示すことから、「熱水による鉱化作用に伴う酸化鉱物の生成」を表すと解釈できる。

さらに、寄与率約14%のPC3として、接触交代反応を伴うスカルン鉱床の母岩に多く含まれる Ca, Mg が高い因子負荷量を示すことから、PC3 は「スカルン鉱物生成の顕著さ」を表すと考えられる。実際にスカルン鉱床のみが高い PC3 値をもち、その他の鉱床タイプでは低い値であることから妥当な解釈といえる。



第1図 PC1における各元素の因子負荷量。

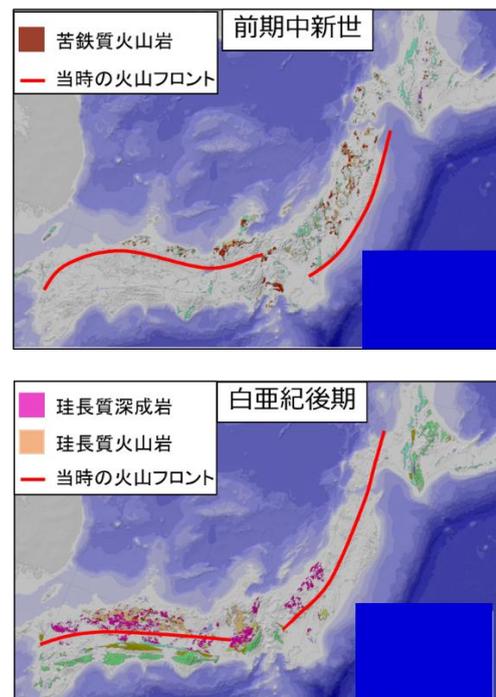


第2図 PC1の主成分スコア分布図。

第2図に示したPC1のスコア分布図から、PC1のスコアが高い地域は、黒鉄型鉱床の多い東北地方および浅熱水、ゼノサーマル、スカルン鉱床が多い西南日本(近畿・中国地方)であることがわかる。火山性塊状硫化物の一種である黒鉄型鉱床において高いPC1スコアを示すことは、上記のPC1の解釈と整合する。このPC1スコアが高い2つの地域のうち、東北地方のPC2スコアは西南日本と比較すると低い。この特徴は、第3図に示した白亜紀後期における西南日本の火成活動、前期中新世における東北地方付近の火成活動という時期の相違に起因すると考えられる。火山フロントの背弧側に位置し、酸化度が低い火成岩が分布する東北地方ではPC2が低い。一方、火山フロント付近で酸化度が高

い火成岩が分布する西南日本ではPC2が高くなり、これは上記のPC2の解釈と整合し、妥当性が確かめられる。また、熱水による鉱化作用の硫化鉱物/酸化鉱物のバランスは、鉱床生成期における鉱床と火山フロントとの位置関係を反映しているという可能性が示唆された。

以上の考察から、日本の金属鉱床の元素濃度の全体的特徴は鉱床生成に関与した火山フロントとの位置関係、およびそれに起因する熱水の酸化度が最も重要な要素であるということを明らかにできた。



第3図 前期中新世(上)と白亜紀後期(下)の岩石分布、および当時の火山フロントの一(日本列島の地質編集委員会, 1996に一部加筆)。

6. まとめ

日本の94鉱山の鉱石試料343個を用いて鉱物組成・元素濃度分析を行い、主要な構成鉱物、および鉱床タイプや生成年代による元素濃度の特徴を明らかにした。Alを規格化元素として対数比変換を行い、これによる元素濃度データに主成分分析を適用した結果、寄与率が大きい主成分から、「熱水による鉱化作用に伴う成分の挙動、特に硫化鉱物の生成」、「熱水による鉱化作用に伴う酸化鉱物の生成」、および「スカルン鉱物生成の顕著さ」という特徴を抽出することができた。さらに、全体的な特徴として、日本の金属鉱床の元素濃度は、鉱床生成に関与した火山フロントとの位置関係とそれに起因する熱水の酸化度に支配されていると考えられ、火山フロントの位置と熱水の酸化度が最も重要な要素であることを明らかにできた。

謝辞: 本研究にあたって貴重な鉱石試料を提供いただいた京都大学総合博物館に深甚の謝意を表したい。

文献

- 原田幸明・島田正典・井島清(2007) 2050年の金属使用量予測. 日本金属学会誌, vol. 71, no. 10, pp. 831-839.
 下中 弘 (1996) 新版地学辞典 付図付表・索引. 平凡社: pp. 46-47.
 日本列島の地質編集委員会 (1996) コンピューターグラフィックス 日本列島の地質, 丸善出版。

浅熱水性鉱脈型鉱床における富鉱部の分布形態モデリングと 鉱床生成プロセスの解釈

村岡 俊季*・Vitor Ribeiro de Sá**・富田 昇平**・小池 克明**・高橋 洋***

Spatial modeling of enriched zones in an epithermal vein-type deposit and interpretation of deposit-formation process

Toshiki Muraoka*, Vitor Ribeiro**, Shohei Tomita**, Katsuaki Koike**, Hiroshi Takahashi***

* 京都大学大学院総合生存学館, Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University. Kyoto University Yshida, Sakyo-ku, Kyoto 606-8306, Japan. E-mail: muraoka.toshiki.86e@st.kyoto-u.ac.jp

** 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, Japan.

*** 伊藤忠鉱物資源株式会社, Itochu Mineral Resources Development Corporation, 2-5-1 Aoyama, Minato-ku, Tokyo 107-0061, Japan.

キーワード: 冷水トラップ, 地球統計学, 浅熱水性鉱床, 鉱脈, シラワイ鉱床

Key words: Cold-water trap, Geostatistics, Epithermal deposit, Vein, Sirawai 鉱床

1. はじめに

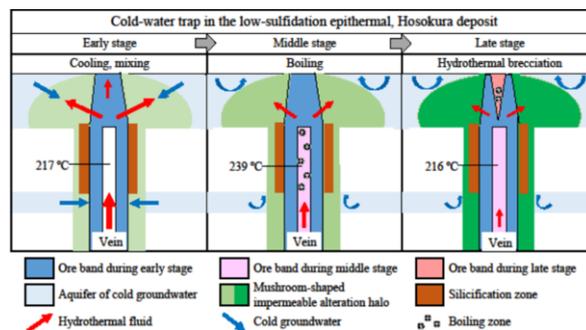
近年, 世界的な経済拡大や人口増加に伴って金属需要が急増しており, 金属資源枯渇の危惧や価格の高騰, 採掘に伴う環境負荷の増大などにより, 安定供給に対するリスクが高まっている。そのため, 未発見の金属鉱床の探査, 開発を促進することにより, 金属資源問題の解決につながることを期待できる。そこで本研究では, 主要な金・銀資源の産出元である浅熱水鉱脈型鉱床に注目し, 富鉱部の分布形態とその生成プロセスを明らかにすることを目的とする。Takahashi *et al.* (2021)により, 第1図に示すような熱水と地下水との混合による「冷水トラップ」が熱水鉱床の生成要因であることがわかったが, 富鉱部と熱水流動, 熱水の沸騰・冷却・混合というプロセスの関連性は明らかになっていない。

本研究では, 地球統計学的手法によって富鉱部の分布形態をモデル化し, それと熱水流動・地質分布とを統合することにより, 鉱床生成の主要な要因とプロセスの解明を目指す。

2. 研究対象と解析データ

代表的な浅熱水性鉱脈型鉱床であるフィリピン人のSirawai 鉱床(第2図)を研究対象に選び, 調査ボーリングデータ69本を解析に用いた。対象地域はミンダナオ島の西部, サンボアング半島に位置し, 比高60m(標高275m~335m)の丘陵地であり, 水平方向250m×250m, 垂直方向90mの領域を5m×5m×1mのセルで区切った。解析対象データは, 金・銀・銅・鉛・亜鉛の品位(ppm), 鉱化ステージ, 岩相, 粘土変質・珪化変質の強度である。

Sirawai 鉱床地域の地質は, 白亜紀の基盤岩類とそれを覆う中新世~更新世の火山岩類・堆積岩類から成る。本研究では, 岩相を新規火山砕屑岩(高透水性), 新規溶岩(中透水性), 古期火山砕屑岩(中透水性), 古期溶岩(低透水性)の4種類に分類して考察に加える。なお, これらの岩相(水理地質区分)は, 熱水の侵入しやすさを示す指標となる。また, 鉱床域中央部



第1図 「冷水トラップ」の概念図 (Takahashi *et al.*, 2021) .

に多数分布する石英脈の露頭から, 鉱脈の走向は第2図の赤線のように N15°~25°W で, 65°~75°西側傾斜であった。また, 7本の鉱脈の中で最長はV3であり, 500mに及んでいる。それにV4・V5と続き, これらは400mほどの連続性である。鉱脈の幅は1.0~5.1mで, 最大はV5の平均幅2.9mである。

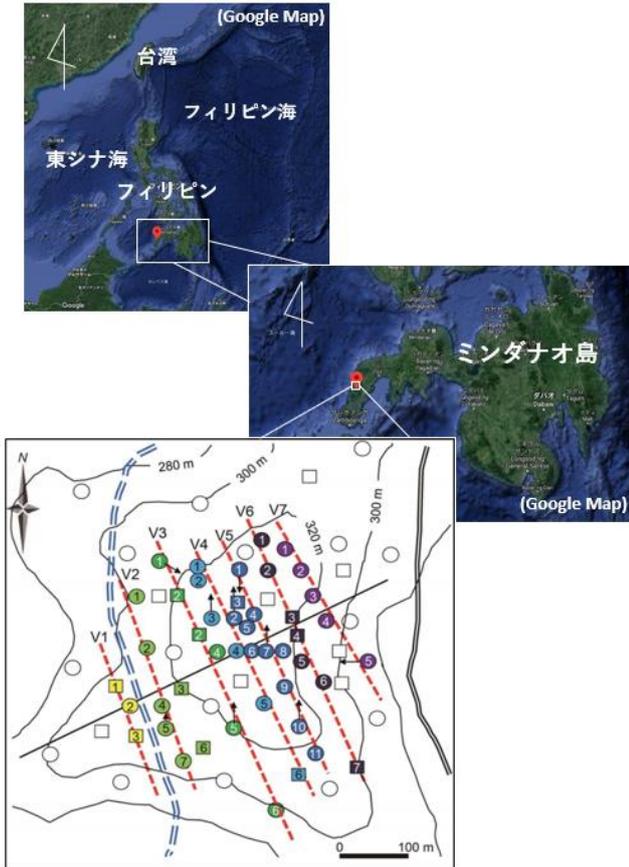
3. 手法

金属の品位分布モデリングには次式に示す通常クリギング(OK), およびシミュレーション法である逐次ガウスシミュレーション(SGS)と回転バンド法(TB)を用い, 各手法の精度を比較した。

$$z_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (\text{ただし, } \sum \lambda_i = 1)$$

ここで, z_k^* は推定値, λ_i は重み係数, n はデータ数を表す。

これに加えて, 岩相分布モデルを複数ガウスシミュレーション(PGSIM)によって作成し, 金属品位分布, TOUGH2による熱水流動シミュレーション結果と統合し, 鉱床の生成プロセスを解釈した。

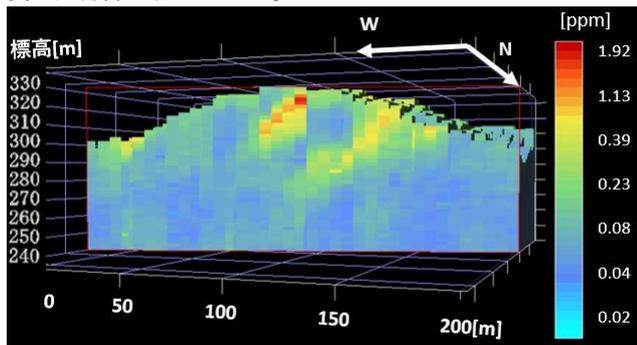


第2図 主要鉱脈(V1-V7)に沿ったボーリング位置とその番号。東北東-西南西の線分は第3・4・5図での垂直断面の位置を表す。

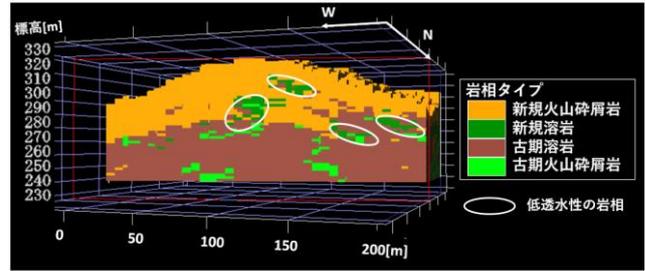
4. 結果と考察

領域中央で、7本の主要鉱脈の走向に直交する方向の測線(第1図の黒線)を例にとり、TBによる金の品位分布の垂直断面図を第3図に示す。これは、OKおよびSGSによる品位分布と比較して、TBが最も平滑化効果の影響が少なく、濃度変化がよく表れていたためである。第3図には走向N20°W・傾斜60°SW程度の高品位部が明瞭に5条現れており、この方向は鉱脈と調和する。また、第4図のPGSIMによる地質分布図では、鉱床域の大部分を古期溶岩と新規火山砕屑岩が構成し、標高280m付近を境に古期溶岩の卓越から新規火山砕屑岩の卓越した地層へと変化しているのがわかる。この地域は白亜紀の基盤岩類を中新世~更新世の火山岩類が覆っているため、この推定結果は妥当といえる。

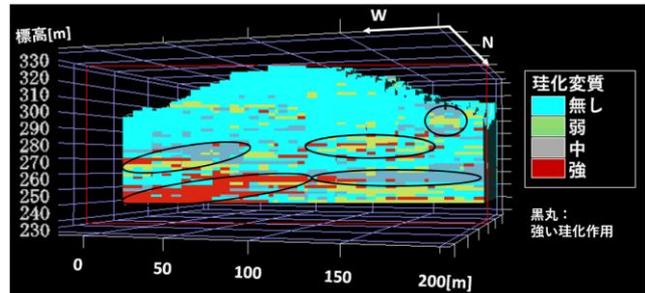
第5図では、珪化変質の強度別でPGSIMを行い、珪化変質の度合いの分布を求めた。この図でも標高280m付近を境として、珪化変質の有無が明瞭に分かれており、上部は未変質が大部分を占めている。



第3図 TBによる金の品位分布モデルの垂直断面図。



第4図 PGSIMによる地質分布モデル。



第5図 PGSIMによる珪化強度の推定分布。

次に第3図と第4図・第5図をそれぞれ比較する。第3図と第4図と統合することで、第4図でマークした低透水性の部分と金を高品位部が分布しているという特徴を見出せる。これから熱水が透水性の比較的高い第四紀新規火山砕屑岩と古期溶岩の層を浸透し、鉱脈を形成したと解釈できる。

第3図と第5図の比較では、鉱脈は珪化変質部を通っているが、高品位部と珪化変質部は重なっていないことがわかる。鉱脈生成は珪化変質と関連すると考えて珪化変質の情報が取得されたが、統合結果は予想に反している。しかしながら、鉱床域には水長石($K \cdot Na)AlSi_3O_8$)が分布することから、高品位部が密集する鉱脈上部では、珪化変質よりもアルカリ熱水変質が卓越していることが推測される。ここから、熱水が鉱脈を下部から上昇する過程で母岩との交代作用が生じ、熱水の化学的性質が酸性からアルカリ性へと変化したと解釈できる。しかし、現段階では熱水と母岩の化学組成に関するデータが不足しているため、具体的な化学反応については今後の検討課題である。

さらに、シミュレーションによる熱水の温度・圧力と比較すると、鉱化作用が生じたと解釈できる位置と高品位部とが概ね対応し、富鉱部生成の熱水の温度・圧力条件を推定できた。

5. まとめ

フィリピンの浅熱水性鉱脈型鉱床を対象とし、回転バンド法によって富鉱部の分布形態をモデル化し、それと熱水流動・地質分布モデルとを統合した結果、熱水が透水性の比較的高い岩相を浸透して鉱脈を形成したと解釈できること、および鉱化作用が生じたと解釈できる位置と高品位部とが概ね対応することなどを明らかにできた。

文献

Takahashi, H., Tomita, S. A., Koike, K. and Yoshiyama, H. (2021) A cold-water trap as an essential process for the generation of low-sulfidation epithermal deposits: Geological and numerical studies of the Hosokura deposit, northern Japan. *Ore Geology Reviews*, vol. 128, 103780. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103780>

地下水流動を考慮した地球統計学的手法による汚染物質濃度分布の推定

高井静霞*・島田太郎*・武田聖司*・小池克明**

Estimation of contaminated materials concentration by a geostatistical method with groundwater flow

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: 汚染物質, 地球統計学, 地下水流動, ギブスサンプリング

Key words: Contaminated materials, Geostatistics, Groundwater flow, Gibbs sampling

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、汚染濃度分布の解明が必要となる。しかし汚染が帯水層に移行していると、限られた測定データの単なる内外挿では適切に濃度を推定できない可能性がある。さらに、汚染の放出時刻歴は明らかでない場合も多い。このような場合に対し、これまで地下水流動を考慮した地球統計学的手法による汚染分布推定が提案されている (Shlomi and Michalak, 2007)。

本研究ではこれよりも物理的に適切で高精度な解を求めるために、地下水流動を考慮した地球統計学的手法にギブスサンプリングによる非負の制限を設け、適用可能性を仮想的なモデルおよび実際の地下汚染事例に対して検証した。

2. 手法

2.1 地下水流動を考慮した地球統計学的な汚染分布推定

本手法では汚染源が既知かつ定常な流れを前提条件に用い、限られた測定濃度 \mathbf{z}^* から未知の放出量 \mathbf{s} を逆解析し、これを用いて領域全体の濃度分布を推定する。

$$\mathbf{z}^* = \mathbf{H}^* \mathbf{s} + \mathbf{v}, \quad \mathbf{v} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}) \quad (1)$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{X}_s \boldsymbol{\beta}_s + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_s(\theta_s)) \quad (2)$$

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

$$p(\mathbf{s} | \mathbf{z}^*) \propto p(\mathbf{z}^* | \mathbf{s}) p(\mathbf{s}) \quad (3)$$

を最大とする \mathbf{s} として求められる。以下では、 $\mathbf{R} = \sigma_R^2 \mathbf{I}$ (σ_R^2 は測定誤差分散、 \mathbf{I} は単位行列)、ドリフト \mathbf{X}_s ・共分散 \mathbf{Q}_s は時間 t (m は時間方向の分割数) に対し(4)式のように設定した。

$$\mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ t_1 & \dots & t_m \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{Q}_s(t_i, t_j | \theta_s) = \theta_s |t_i - t_j|^3 \quad (4)$$

2.2 ギブスサンプリングによる非負の制限

ギブスサンプリングでは、2.1で求まる推定放出量を初期値とし、時刻ごとに式(5)・(6)の切断正規分布からサンプリングを繰り返すことで、非負の制限を設けた条件付き事後確率分布を求める (Michalak, 2008)。

$$p(\mathbf{s}_i | \mathbf{z}^*) \propto p(\mathbf{z}^* | \mathbf{s}_i) p(\mathbf{s}_i) \mathcal{H}(\mathbf{s}_i) \quad (5)$$

$$\mathcal{H}(s_i) = \begin{cases} 1 & s_i > 0 \\ 1/2 & s_i = 0 \\ 0 & s_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

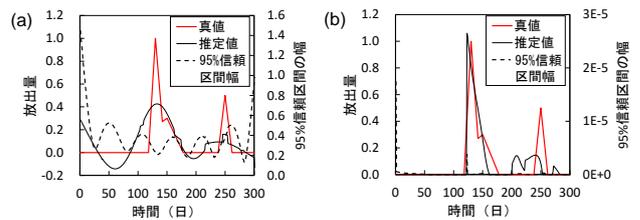
3. 核種移行 (仮想モデル) に対する適用性検討

3.1 評価条件

^3H (半減期 12.33 y) を対象に、2次元均質媒体中 ($300 \times 60 \text{ m}^2$) の一様な流れ (1 m/day) による汚染を仮定した。 ^3H は300日間に複数のピークをもって原点から放出されるとし、330日後に ^3H 濃度を等間隔に18点で測定するとした。分散長は縦1 m, 横0.1 m, 遅延係数は1と設定した。

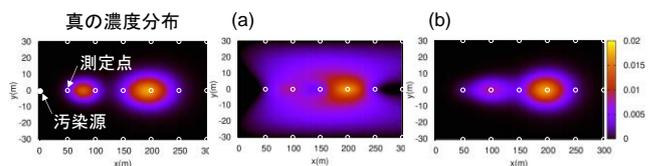
3.2 計算結果

各時刻の放出量の推定結果を第1図に示す。非負の制限により推定精度が向上し、不確かさが 10^{-5} まで低減した。



第1図 放出量の真値および推定値 ((a)非負の制限無, (b)有)

濃度分布の推定結果を第2図に示す。測定値の内挿のみ (トレンド付きクリギング) では再現性が低いが、本手法では絶対誤差平均 2.8×10^{-9} と高精度で測定値を再現できた。



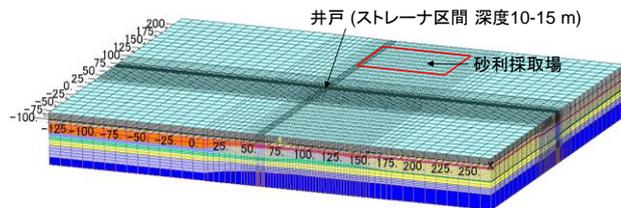
第2図 濃度分布(330日後)の真値および推定値 (左図: 真の濃度分布, (a)トレンド付きクリギング, (b)本手法 (非負の制限有))

4. 実際の汚染事例に対する適用性検討

実際のケースとして、茨城県神栖市における地下汚染事例を対象に選んだ。汚染物質は有機ヒ素 (As) 化合物のジフェニルアルシン酸 (DPAA) であり、1993 年以降に深度数 m に投棄されたコンクリート塊が汚染源であると推測されているが、放出量の時間変化は明らかでない。本研究では汚染源から周辺の揚水井までの範囲を対象に、初期調査時 (2004 年) の濃度分布および汚染放出総量の推定を行った。

4.1 評価条件

水理地質構造は、環境省 (2007) でのボーリング調査と揚水試験に基づく検討に基づき、第 3 図および第 1 表のように設定した。境界条件は、上面は降雨浸透量 0.92 mm/y (1993~2009 年の有効雨量の平均値 (浸透率 50%))、側方境界は平均的な地下水位 (2005 年 6 月)、砂利採取場は周囲より 9 cm 低い水位、底面は不透水とした (環境省, 2013)。揚水量は 1993~2003 年の平均値 5.3 m³/day と設定した。浸透流・物質移行解析には Dtransu-3D を使い、1993~2004 年までの非定常解析を行った。DPAA の比重は 3200 ppm で 1.012 とし、既往評価と同様収着は考慮しなかった。



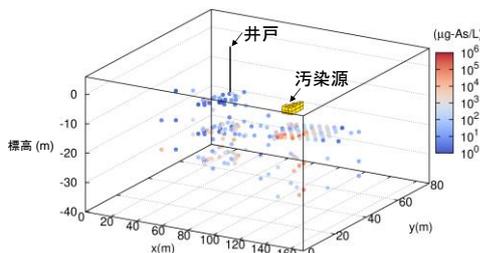
第 3 図 地質構造モデル

第 1 表 水理特性および移流分散特性

地層	透水係数 (cm/s)	比貯留係数 (1/m)	有効間隙率 (-)	分散長 (m)		分子拡散係数 (m ² /s)
				縦	横	
Dc	1.00E-06	2.00E-03	0.2	1	0.01	1.00E-09
Dg2	1.00E-01	5.00E-05	0.2	1	0.01	1.00E-09
Ds	3.00E-03	4.00E-03	0.2	1	0.01	1.00E-09
Dg1	5.00E-03	1.00E-04	0.2	1	0.01	1.00E-09
Ag	7.00E-03	1.00E-04	0.2	1	0.01	1.00E-09
As	5.00E-03	2.00E-03	0.3	1	0.01	1.00E-09
B2	1.00E-03	2.00E-03	0.4	1	0.01	1.00E-09
B1	5.00E-04	2.00E-03	0.4	1	0.01	1.00E-09

4.2 測定データ

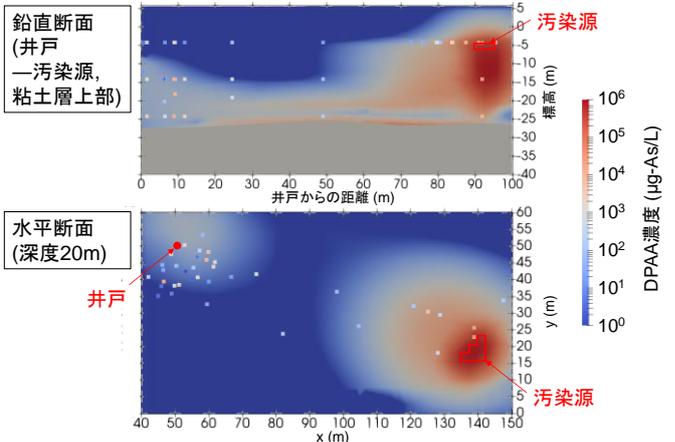
2004 年初期に測定された地下水中 DPAA 濃度を第 4 図に示す。地下水中 DPAA 濃度は、電気伝導度と pH が安定した段階で深度約 10m ごとに採水した約 10mL に対し、液体クロマトグラフ-誘導結合プラズマ質量分析法により四半期ごとに測定されている。DPAA 濃度は汚染源および井戸周辺で高く、その中間で低い傾向が見られる。ただし、深度 10m では採水時の濃度が安定しない (環境省, 2003)。また、測定濃度には隣接する位置・測定時期であっても数桁以上のばらつきがみられる。そこで本検討では、汚染源が除去される 2004 年冬季までの変動が 2 桁以内 (20m 以深) の測定値 (計 32 点) に限定して、計算を実行した。



第 4 図 地下水中の DPAA 濃度 (µg-As/L)

4.3 計算結果と考察

汚染源から井戸までの範囲 (110×60×40 m³) における濃度分布の推定結果を第 5 図に示す。感度行列は初期濃度を 10⁵ mg-As/L として計算した。濃度分布の推定結果は、汚染源直下および井戸周辺での高い測定値の傾向を再現していることがわかるとともに、評価に用いた 32 点の測定値に対する絶対誤差平均は 3.0 mg-As/L に抑えられた。



第 5 図 濃度分布の推定結果

また環境省 (2007) では地下水中の総ヒ素量を、測定濃度 (≥1 µg-As/L) と地下水体積の積として、2004 年初期で 40.89 kg と推定している。本評価では地下水に放出した汚染総量は 2.9 kg と推定された。推定結果のずれは、隣接する位置であっても測定濃度にばらつきが生じたことに加え、季節変動に伴う経時変化を地下水流動解析の境界条件では考慮していないこと、および収着特性の不確かさなどに起因すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、地下水流動を考慮した地球統計学的手法により、地下の 3 次元汚染分布推定を行った。仮想的な汚染分布での評価から、測定値の不確かさが小さく水理地質構造が適切に把握されていれば、少ないデータから精度良く濃度分布が推定できることを確認した。

一方、実際の汚染事例では測定された濃度分布の傾向を定性的に再現したが、総量の推定結果は測定値との乖離が見られた。今後の課題は、水理地質構造の不確かさを計算で考慮することである。

なお本研究は、原子力規制庁「令和 2 年度廃止措置・クリアランスに関する検討」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 Resources Research*, vol. 43, pp. 1-12.
 Michalak, M. A. (2008) A Gibbs sampler for inequality-constrained geostatistical interpolation and inverse modeling, *Water Resources Research*, vol. 44, pp. 1-14.
 環境省 (2003) (2007) (2013) 国内における毒ガス弾等に関する総合調査検討会、茨城県神栖町における汚染メカニズム解明のための調査。(2003) 中間報告書, (2007) 地下水汚染シミュレーション等報告書, (2013) 高濃度汚染対策等報告書。

Testing of Drill Core Permeability and Porosity in Fault Zones: Implications for Groundwater Flow Under Basins and Geothermal Resource Mapping

Jacek Scibek*, Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

*Department of urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail: jacek.scibek2@mail.mcgill.ca (J. Scibek)

Key words: Fault zones, Permeability, Porosity, Permeameter, Drillcore, Geothermal resources, Groundwater resources

1. Introduction

In Japan, it is recognized that much of the geothermal water resources are channeled through fracture zones that occur along tectonic lines or faults. Many wells that produce thermal water (e.g. onsen or hot spring bath water, heating water, and high-temperature water and steam for power production), either source the thermal water from permeable sedimentary or volcanic strata that cover the fracture zones in the crystalline basement, or directly from faulted crystalline rocks. There is always a significant interest in the hydro-physical properties of such fault zones, because it can help with modelling and calculations of water flow and heat transfer.

2. Data Sources and Methods

Permeability to gas or water is recognized as the main physical property of rocks for controlling the rate of fluid flow through low-porosity rocks. Porosity of rocks is directly related to the poro-elastic or storative properties of any aquifers in rocks, and also correlated with permeability. However, the sampling and results of these properties depend on the scale of investigation and various methods exist (Fig. 1).

One of the major sources of information is the drill core from exploration boreholes and wells. At Kyoto University, we have been testing the drill core from active fault zones and from granitic rocks, using practical N₂ gas probe permeameter directly on spots on drill core (Scibek, 2019; Scibek and Annesley, 2021).

One fault is the Tsukiyoshi normal fault at Mizunami, Gifu (granite), part of a pull-apart zone in a small basin. That research site has been studied by JAEA and Kyoto University for two decades, as an analog site for radioactive waste repository in granitic rocks.

The second research site is the drill hole and drill core from the Nojima fault zone on Awaji Island, Hyogo. That fault cuts granitic rocks on the edge of Osaka basin, is linked to the active fault system in that region, recently displaced during the 1995 Kobe earthquake. The exploration hole was drilled after that disaster to study the fault structure and properties.

3. Example from Nojima fault

Form our studies on active faults, such as Nojima fault at NIED drill hole from Awaji Island, we study how the rock deformation and alteration appear to relate to rock

porosity and permeability. The more detailed results allow us to map the rock permeability continuously along the drill core, correlate it to detailed rock deformation and mineralogical properties, porosity, and in-situ interval

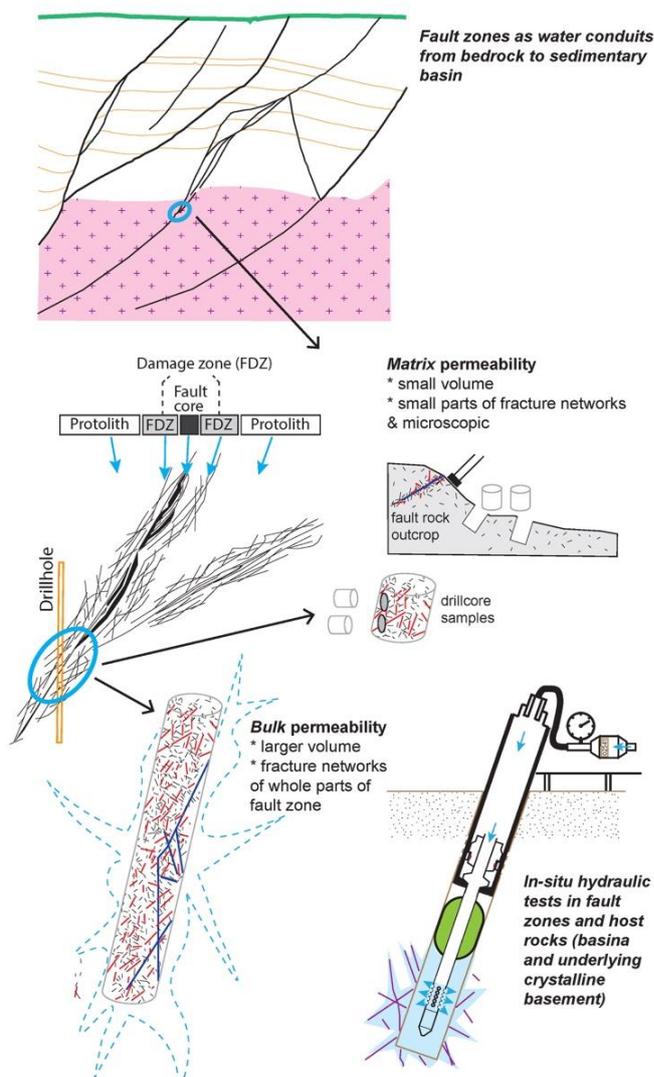


Figure 1. Conceptual diagram of permeability and porosity testing scales on drill core and in-situ in fault zones under sedimentary basins that may host geothermal resources. Modified after Scibek (2019, 2020).

hydraulic tests. Such data can be used to relate these physical properties and to model the hydrogeologic system there. The local structure, downhole probe porosity estimates, and our recent rock drill core matrix permeability results in the NIED Hirabayashi drill hole can be briefly illustrated (Fig. 2). In 1999, NIED and USGS tested only a few small core plug samples for permeability (Lockner *et al.*, 2009).

The downhole Neutron probe gives an initial estimate of in-situ porosity. Across the Nojima fault zone, the porosity is surprisingly high, compared to the host granite (<1% porosity). We noted that a much more porous and permeable 100 to 200m thick "aquifer" has formed along the steeply-dipping fault zone over a period of tectonic activity (Fig. 3). The drill core samples shown consist of weakly pulverized and hydrothermally altered granite of high porosity at present time, compared to low-porosity original host granite rock. The porosity type was examined under digital microscope at 50 to 200 × magnification directly on drill core at many test spots and around the test spots.

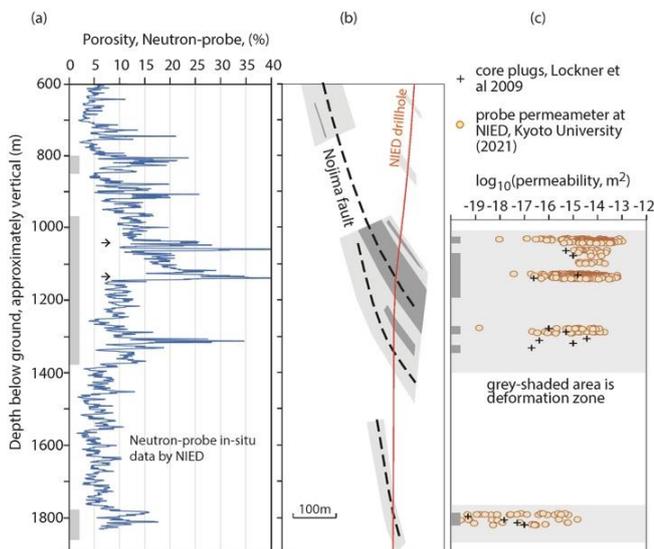


Figure 2. Example of fault zone properties at NIED drill hole, Hirabayashi drill site, Awaji Island. (a) Neutron-probe in-situ porosity, NIED data, and (b) drill core rock matrix permeability tested by Kyoto University.

4. Discussion

In mature tectonic fault zones, the fault activity appears to create highly porous and locally permeable "aquifers" in the crystalline host rocks that the fault cuts. Later hydrothermal alteration may partly seal the pore spaces that were created during deformation in parts of the fault zones. Such "fault aquifers" may exist in geothermal areas, in addition to channels in fractured more fresh rocks. Furthermore, porosity can be sensed by electrical geophysical methods at regional scale, while permeability is difficult to test and requires many in-situ and drill core measurements.

Hot spring flow systems along fault zones, and we are working on integrating historical data with the newest databases of thermal springs in Japan (Sakaguchi and Murata, 2020). Thermal spring flow systems in fracture zones in the brittle crust offer one method of estimating the permeability of these structures in the brittle crust (e.g. Muraoka *et al.*, 2006). The work on hot springs



Figure 3. NIED Hirabayashi drill core at about 1050m depth. Photo by authors in 2021 at NIED facility in Tsukuba, Ibaraki.

requires GIS analysis, analytical calculations of upflow velocity and permeability, and we work toward numerical modelling of sub-regions.

The regional geostatistical modeling efforts of geothermal gradients, rock properties, hot spring occurrence, and structure, will help in the overall understanding. Regional and world-wide data of hydraulic properties of fault zones are also available in various rock types (Scibek, 2020). We use these data to compare our site-specific results.

Acknowledgement: The authors thank Dr. Kentaro Omura at National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), Tsukuba, for help with drill core access and testing.

References

- Lockner, D. *et al.* (2009) Geometry of the Nojima Fault at Nojima-Hirabayashi, Japan – I. A Simple Damage Structure Inferred from Borehole Core Permeability. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 166, pp. 1649–1667.
- Sakaguchi, K. and Murata, Y. (2020) Hot spring analysis value data, geothermal information database, June 2020 edition, Geological Survey of Japan, AIST.
- Muraoka, H., Sakaguchi, K., Nakao, S. and Kimbara, K. (2006) Discharge temperature–discharge rate correlation of Japanese hot springs driven by buoyancy and its application to permeability mapping. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L10405.
- Scibek, J. (2019) Global compilation and analysis of fault zone permeability. PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/2n49t631d>
- Scibek, J. (2020) Multidisciplinary database of permeability of fault zones and surrounding protolith rocks at world-wide sites. *Scientific Data*, vol. 7, 95.
- Scibek, J. and Annesley, I. R. (2021). Permeability testing of drill core from basement rocks in the fault-hosted Gryphon U deposit (eastern Athabasca Basin, Canada): Insights into fluid-rock interactions related to deposit formation and redistribution. *Natural Resources Research*, <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09811-x>

空間的分布則を考量した機械学習による 日本全域 3 次元地温分布モデリングと地熱資源量評価への応用

家木優成*・小池克明*・久保大樹*

3D temperature-distribution modeling over Japan Island by machine learning considering spatial correlation law with application to geothermal resources assessment

Yusei Ieki*, Katsuaki Koike* and Taiki Kubo*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.
Email: ieki.yusei.73v@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード：ニューラルネットワーク，温度検層データ，キュリー点，臨界点
Key words: neural network, temperature logging data, curie point, critical point

1. はじめに

温室効果ガス排出量削減のために，日本では再生可能エネルギーの 1 つである地熱を用いた発電の促進が重要な課題となっており，特に発電量の大きい超臨界発電が注目されている．しかしながら，長いリードタイムや開発コストとリスクの大きさなどがこの促進を阻害しているとともに，超臨界発電に適した場所の特定も困難な状況にある．これらの解決を図るには，日本列島全域で地下深部までの地温分布を明らかにすることが不可欠であり，これは地熱資源賦存量の正確な評価と開発コスト低減に貢献できる．地温分布推定には温度検層データが用いられるが，データの深度範囲と地点数が限られており，クリギングなどによる従来の推定法では，深部まで適切には推定できない．これを可能にするために，本研究では Deep Neural Network (DNN) に注目し，この有効性を検証した．

2. 解析手法

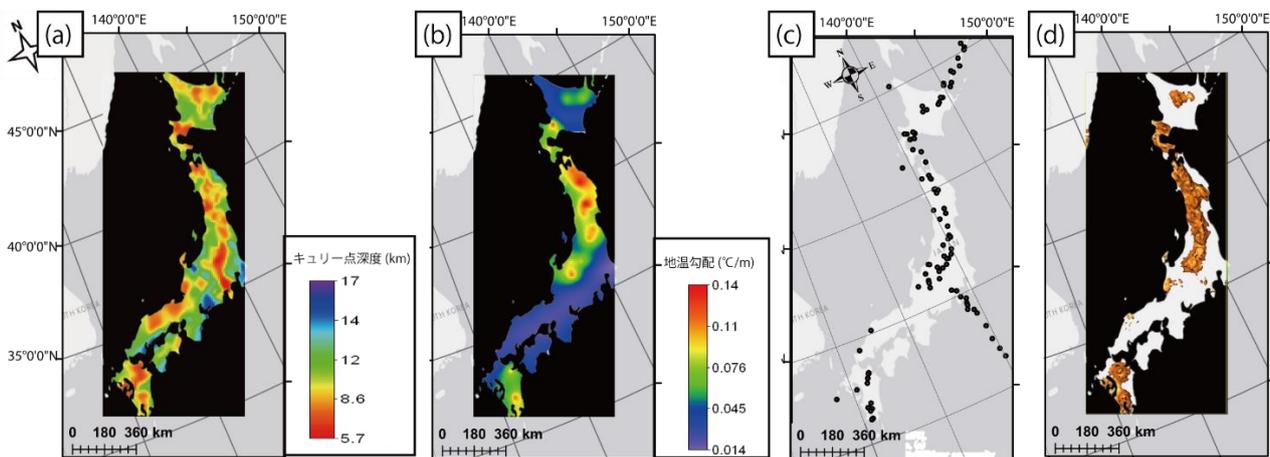
2.1 Deep Neural Network

本研究における DNN は入力層，3 つの中間層，出力層の 5 層構造とし，中間層のユニット数はいずれも 128 と設定した．Gu ほか(1997)によれば，座標を入力データ，測定値を出力データとするネットワークを構築することで，任意の地点での値を推定できる．そこで，本研究でも入力データには (x, y, z) 座標をそれぞれ標準化した値，教師データには対数変換した温度検層データを標準化して用いた．最適化手法には Adam，活性化関数には ReLU を選んだ．

DNN における学習では，教師データ（温度検層データ） t_i と出力値 t_i^* の誤差が最小となるようにユニット間を繋ぐ重み係数を更新する．その誤差は損失関数 E と呼ばれ，式 (1) で定義される．

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_i^*)^2 \quad (1)$$

ここで n はデータ数である．



第 1 図 (a)キュリー点深度分布，(b)地温勾配分布，(c)活火山分布，および DNN による (d)臨界点等値面図。

2.2 精度評価方法

得られた結果の推定精度を、本研究では Hold-out 法を用いて評価した。Hold-out 法とはデータを訓練用データと検証用データに分け、訓練用データでモデル学習を行い、検証用データでモデルの性能を評価するという方法である。また、訓練用データと検証用データの分割法としては 2 つの方法を採用した。すなわち、内挿評価として、ボーリング地点ごとにランダムで訓練用の温度検層データ (90%) と検証用データ (10%) に分割する方法、および外挿評価として、検層データの浅い部分 (90%) と深い部分 (10%) をそれぞれ訓練用、検証用データに分割する方法である。評価関数としては二乗平均平方根誤差である RMSE (Root Mean Square Error) を利用した。

2.3 キュリー点深度

岩石は一般に磁性を有しており、岩石の磁気的性質は誘導磁化のほかに、岩石そのものに存在する磁気成分である残留磁化がある。岩石の磁化は温度の上昇とともに減少し、キュリー点と呼ばれる温度を超えると磁性を失う。すなわち、キュリー点深度とは、岩石が磁性を失う温度に達する深度を意味する。キュリー点深度は、最も一般的な強磁性鉱物である磁鉄鉱のキュリー点温度 (約 580°C) に支配されると考えられている。すなわち、キュリー点深度を明らかにすることで、約 580°C に到達する深度を求めることができる。本研究では、新エネルギー総合開発機構 (NEDO) の調査によって得られたキュリー点等深線図を利用し、普通クリギング (OK) による補間で日本全体のキュリー点深度分布を明らかにした。これを DNN の訓練用データに追加し、キュリー点深度を考慮した地温分布の推定を試みた。

2.4 特徴量エンジニアリング

本研究では DNN の入力層に位置情報である (x, y, z) 座標に加えて、標高データ、ボーリング深度、地温勾配、火山からの距離、キュリー点深度、最近傍点の地温といった 6 つの特徴量をそれぞれ標準化して追加した。位置情報の一つである z 座標は、標高データとボーリング深度の差である相互作用変数とみなせる。また、地温勾配は、温度検層データの深度方向変化の傾きを最小二乗法によって求め、OK により補間した。火山からの距離としては、第 1 図(c)に示す活火山からの最短距離を用いた。キュリー点深度については、第 1 図(a)に示すキュリー点深度分布の深度を入力した。最近傍点の地温については、空間的に近い地点ほど値が類似しているという一般的特徴をモデルに組み込むために、推定点・実測点において最も近傍にあるデータの地温を入力した。

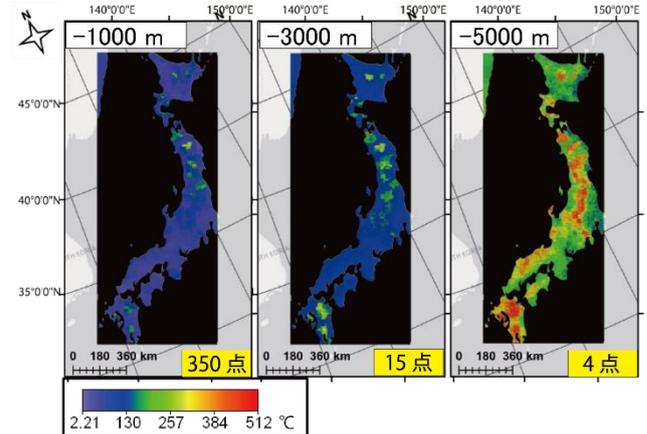
3. 結果

キュリー点深度の考慮と特徴量エンジニアリングの有効性を検証するために、第 1 図(d)に水の臨界点 (374 °C, 22.1 MPa) の推定等値面図、第 2 図に標高別推定地温分布図とそれぞれの標高まで到達しているボーリング地点数を示す。推定に DNN を用いた結果を以下では model_1 と称す。推定臨界点等値面図からは、キュリー点深度を考慮することで、検層データを大きく超えた高温域の地温も推定できていることがわかる。このモデルにより、那須火山帯付近が最も浅く、標高-3800m で臨界点に到達することを明らかにできた。

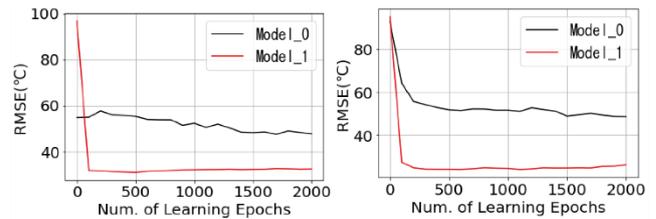
また、標高別推定地温分布図により、-3000m まで到達しているボーリング地点数がわずか 15 点であるにもかかわらず、-3000m 以深でも適切に推定できていることが明らかである。さらに、第 1 図(a)のキュリー点深度分布と第 1 図(b)の地温勾配分布、第 1 図(c)の活火山分布と比較すると、

それぞれの特徴を考慮できていることがわかる。

次に、特徴量を位置情報である (x, y, z) のみとし、キュリー点深度を考慮していない DNN モデル (これを model_0 と称する) と model_1 の内挿・外挿評価の学習曲線を比較する (第 3 図)。これによると、内挿、外挿のいずれにおいても、キュリー点深度の考慮と特徴量エンジニアリングによって推定精度が格段に向上していることが確かめられる。



第 2 図 DNN による標高別推定地温分布図と各標高まで到達しているボーリング地点数。



第 3 図 内挿(左)と外挿(右)に対する検証用データの学習曲線。

4. まとめ

本研究ではキュリー点深度の考慮と特徴量エンジニアリングを行った DNN を用いて、日本全域における三次元地温分布推定を試みた。その結果、キュリー点深度と特徴量エンジニアリングの有効性を確認できたとともに、地点数や深度範囲が限られた温度検層データから地下深部までの地温分布の推定が適切に行えることがわかった。また、このモデルにより那須火山帯付近が最も浅く臨界点に到達し、その位置は標高-3800m 程度であり、これ以外でも活火山付近において臨界点に到達すると推定できた。

文 献

- 大久保泰邦 (1984) 全国のキュリー点解析結果. 地質ニュース, no. 362, pp. 12-17.
- Gu, B., Koike, K. and Ohmi, M. (1997) Distribution analysis of metalliferous vein using artificial neural network. 情報地質, vol. 8, pp. 15-21.
- JOGMEC 地熱データベース: <https://geothermal-db-web.jogmec.go.jp/>
- Koike, K., Matsuda, S. and Gu, B. (2001) Evaluation of interpolation accuracy of neural kriging with application to temperature-distribution analysis. *Mathematical Geology*, vol. 33, pp. 421-448.
- (独)日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター: 日本の坑井温度プロフィールデータベース(データ集) <http://www.jaea.go.jp/04/tono/siryou/welltempdb.html>

第32回日本情報地質学会講演会

講演要旨集

2021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
