# 第31回日本情報地質学会講演会

# 講演要旨集

Geoinforum-2020 Annual Meeting Abstracts

- 日 時:2020年10月23日(金)
- 主 催:日本情報地質学会

目 次

一般講演

# データベース

	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	1
解	析手法•応用	
	新型コロナによる地震検知能力の変化	3
	地球統計学に基づく MT 応答関数の空間分布の把握とその活用」山下 凪・後藤 忠徳・山口 覚	5
	数値シミュレーションによる低硫化系浅熱水性鉱床の生成プロセス解明へのアプローチ	
	富田 昇平・小池 克明・高橋 洋・義山 弘男	7
	スパースデータの内挿・外挿に適したニューラルネットワークと広域地温分布モデリングへの応用	
	家木 優成・久保 大樹・小池 克明	9
	Pluri-Gaussian simulation combined with principal component analysis for delineating mineralized zones and ore solution flow	vs··
	······ Vitor Ribeiro de Sá • Katsuaki Koike	11
	Identification of meteoric water incursion to a high-temperature geothermal reservoir by rare earth elements and isotope oxyg	gen-
	18 analyses ······Riostantieka M. Shoedarto · Yohei Tada · Koki Kashiwaya · Katsuaki Koike	13
	Comparative evaluation of urban growth models	••••
	······Pavithra Jayasinghe • Lakshmi N. Kantakumar • Venkatesh Raghavan • Go Yonezawa	15

# リモートセンシング

航空機ハイパースペクトル画像を用いた衛星画像の波長・空間分解能の向上と金属鉱床域での鉱物マッピングへの	
応用	17
Land use/land cover classification using light convolution neural network: a case study in Lao Cai, Vietnam	•••
Hang T. Do • Venkatesh Raghavan • Go Yonezawa	19

# 物理探査·装置開発

Development of Geo-IoT platform for water quality monitoring	
······Niroshan Bandara, Mitsunori Ueda and Venkatesh Raghavan	21

# **CONTENTS**

# **General session**

#### Database JAMSTEC bathymetry data contribution to Seabed2030 project ......Yukari Kido 1 Data analyses and applications The change of detection ability for earthquakes by the new coronavirus ......Yuzo Ishikawa 3 Understanding and utilizing the spatial distribution of MT response functions based on geostatistics Nagi Yamashita, Tadanori Goto and Satoru Yamaguchi 5 Numerical simulation approach to clarification of generation process of low-sulfidation epithermal deposits ..... ..... Shohei Albert Tomita, Katsuaki Koike, Hiroshi Takahashi and Hiroo Yoshiyama 7 Neural Networks for interpolation and extrapolation of sparse data and its application to regional modeling of subsurface temperature Yusei Ieki, Taiki Kubo and Katsuaki Koike 9 Pluri-Gaussian simulation combined with principal component analysis for delineating mineralized zones and ore solution flows Vitor Ribeiro de Sá and Katsuaki Koike 11 Identification of meteoric water incursion to a high-temperature geothermal reservoir by rare earth elements and isotope oxygen-18 analyses ...... Riostantieka M. Shoedarto, Yohei Tada, Koki Kashiwaya and Katsuaki Koike 13 Comparative evaluation of urban growth models..... ······ Pavithra Jayasinghe, Lakshmi N. Kantakumar, Venkatesh Raghavan and Go Yonezawa 15 **Remote sensing** ..... . .. C . 11'. ' • • . . . Ŧ

# Geophysical survey and observation system

Development of Geo-IoT platform for water quality monitoring	••••
······Niroshan Bandara, Mitsunori Ueda and Venkatesh Raghavan	21

# Seabed2030 に向けた試み 一日本周辺の海底地形データの提供について一

木戸ゆかり\*

# JAMSTEC bathymetry data contribution to Seabed2030 project

# Yukari Kido\*

\* 国立研究開発法人海洋研究開発機構研究プラットフォーム運用開発部門 JAMSTEC, 2-15 Natsushima cho, Yokosuka, Kanagawa. E-mail: ykido@jamstec.go.jp

**キーワード**: Seabed2030, GEBCO2020, 海底地形データ、DARWIN 航海データサイト、 **Key words**: Seabed2030, GEBCO2020, Bathymetry, DARWIN data site

# 1. はじめに

国立研究開発法人 海洋研究開発機構(以下, JAMSTEC) では、2019年10月より分野融合型の"数理海底地形科学" 研究プログラムが立ち上がった(木戸, 2020). その中に過 去の海底地形データを提供し、世界の海底地形データの一 元化「Seabed2030」プロジェクトへ貢献する項目が含まれ ている.本稿では、プロジェクトの概要, JAMSTECの所 有するデータベースサイト「DARWIN (Data and Sample Research System for Whole Cruise Information in Jamstec)」の概要とそのデータベースから提供可能な海底 地形データについてご紹介する.

### 2. Seabed2030 にむけて

Seabed2030 プロジェクトとは何か. これは、GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans: 大洋水深総図) の国際水路機関と国際連合の共同プロジェクトの延長線上 に求められた提案である. GEBCOは,全世界の海底地形図 の作成と海底地形名称の標準化を行っている。その資金提 供団体より 2030 年までに全世界の海底を 100m の解像度 で海底地形図を作成する、という提案が「Seabed2030」で ある. ニュージーランドの NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd, New Zealand) ガミ 日本周辺海域を含む太平洋域の取りまとめ機関であり、す でに 200m グリッドの GEBCO2020 の作成を手掛けてい る. 今年6月に NIWA 主催で「The Nippon Foundation -GEBCO Seabed2030 Project- South West Pacific Regional Mapping Conference」がオンライン開催された. 日本から は、海上保安庁海洋情報部、JAMSTEC からの参加があっ た. 管轄域である太平洋域における活動状況の報告がなさ れた. NIWA はじめ, Geoscience Australia, NOAA/IHO, Seabed2030関係者など,25名ほどが参加した.Seabed2030 に向けての進捗、データ共有やマネジメントについての議 論があったが、南半球はまだデータカバレッジが少ない状 況である. そうした海域を埋めるため, 機械・深層学習やべ イズ理論,スパースモデリング手法などを用いる,というチ ームも JAMSTEC 内では形成されている(木戸, 2020). データ密度差がある場合、不十分な量のデータから解像度 の高い画像を合成し,既存の教師データから,より鮮明な海

底地形図を作成する,といった研究テーマに取り組んでいる(例えば Hidaka et al., 2020; 桑谷, 2018).

# 3. 日本周辺の海底地形データ

### 3.1 DARWIN データベースサイト

JAMSTEC では、DARWIN という航海データベースによ り研究船舶データを公開している(第1図).7 隻の船舶の 調査航海の基礎情報であるメタデータ、海底地形、重力、地 磁気といった航走中のデータ、潜航データ、岩石や堆積物サ ンプルデータなどが登録され、検索や描画ができる.航跡図 や潜航データからは、クルーズレポート、文書カタログ、画 像データとも紐づけられており、双方向のデータ検索が可 能である(第1図).



第1図 DARWIN データベースサイトとデータベース間連携図



第2図 研究航海策定から航海実施,モラトリアム期間を経て データが公開されるまでのプロセスフローを示す.

第2図では、左から順に、研究航海の提案書が出され、採 択後、様々な準備期間を経て、実施に至り、取得データの処 理が済んで公開されるまでの一連のプロセスを示したもの である.取り扱うデータや文書ごと、運用側の支援内容ごと に色を変えた表示となっている.研究航海の提案から、最適 なツールの選択や実施に向けての航海準備、航海実施中の データ取得、一次処理、データのQAQC、後処理、データベ ースへの登録、一定期間を経てデータ公開まで、2年から5 年といった年月がかかっていることを示す.なお海底地形 データに関しては、取得後、海上保安庁海洋情報部へ提出す ることが義務付けられている.

### 3.2 航跡図マップ表示

Seabed2030 プロジェクトへ貢献するためには、どのくら いの海底地形データがどの海域にあるのか表示し、検索に より抽出作業が必要である.米国の NOAA/IHO (National Oceanic and Atmospheric Administration, International Hydrographic Organization) のデータサイトでは、世界の 関連機関のマップ表示がまとめられている.かねてよりこ のサイトに DARWIN での表示も統合したい、という依頼が あったが、お互いのマップ表示図法が異なるため、統合化が できなかった.第3回に示す NOAA/IHO の DCDB (Data Center for Digital Bathymetry) サイトで用いられている マップ図法は、EPSG:3857 (Spherical Mercator Projection) であるのに対し、第4回の DARWIN サイトでは、 EPSG:4326 (Equidistant Cylindrical Projection) である.



第3図 NOAA/IHO DCDB のマップ表示.緑色の線は, 日本周辺の日本以外の国による海底地形航跡図を示す.



第4図 DARWIN のマップ表示. 黄色の線は, 海底地形 航跡図を示し, 赤い点は潜航調査点を示す.

上記のようなマップ表示図法の違いから統合表示ができな かった. 今回, NOAA/IHO の側で, EPSG: 4326 を EPSG:3857 に変換するコードを付記し, 第5図に示すよう な統合表示が可能となった. 図中の左側のレイヤー一覧に 「Japan」の項目が加わり, 選択すると, DARWIN に収録 されている航跡図がオレンジ色にて表示されるようになっ た. 統合表示が可能になり, 今後のデータ提供がよりスムー スになることが期待される. 本講演では, DARWIN サイト から抽出したデータから日本周辺の海底面の断層分布抽出 例を紹介する.

#### 4. 今後の課題

DARWIN サイトには,2008年の運用開始以来,1000 航 海数を越える海底地形調査航海が登録されている。今後も 定期的に増加していくことが予想される。そのため、外部か らのアクセスに対して、ネットワークやサーバーに負荷の かからないよう表示が軽く、高速処理ができるような改善 が望まれる。観測線に沿って、詳細な航海情報が表示され、 検索や抽出機能の向上についても今後の課題となっている。



第5図 NOAA/IHO DCDB サイトの左側の国別表示の中に 「Japan」のレイヤーが加わり, DARWIN データが統合表示され ている.オレンジ色の線は, DARWIN に登録されているデータ, 緑色の線は,日本以外の国による海底地形航跡図を示す.

# 5. 謝辞

DARWIN サイトと NOAA/IHO のデータサイトの統合表 示化にあたっては、本学会員の合資会社キューブワークス の北尾馨氏、産業技術総合研究所の西岡芳晴氏にアドバイ スをいただいた.北尾氏には、プログラムコード変換にもお 世話になった.この場をお借りして深謝申し上げたい.

# 文 献・サイト情報

- 木戸ゆかり (2020) 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.
- 桑谷立 (2018) 地球科学プロセス解明のためのデータ駆動 型解析・地質学分野における応用例・. 情報地質, vol.29, no.2, pp.49-60. https://doi.org/10.6010/geoinformatics.29.2\_49/, (確認日 2020 年 10 月 9 日)
- 海洋研究開発機構 (2016) 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/ (確認日 2020 年 10月9日)
- Hidaka, M., Matsuoka, D., Kuwatani, T., Kido, Y., Kaneko, J., Kasaya, T. and Kikawa, E. (2020) Super-resolution for seafloor topography using deep convolutional neural networks. *JpGU-AGU Joint Meeting*, 12-16 July.
- NOAA/IHO DCDB: https://www.ngdc.noaa.gov/iho/(確認 日 2020 年 10 月 9 日)
- 数理海底地形科学サイト:

http://www.jamstec.go.jp/msg/j/ (確認日 2020 年 10 月 9 日)

# 新型コロナによる地震検知能力の変化

# 石川有三

# The change of detection ability for earthquakes by the new coronavirus

# Yuzo Ishikawa

2. 地震検知力の変化

石川ほか(2008)では、日本、台湾、中国、スペインの地

震カタログを利用して, 検知力が日変化, 季節変化などを

すること示し、それらのパターンがそれぞれの地域の社会

風習と密接に関連していることを示した. その際, 微小な

今回, イタリア国立地球物理・火山研究所 (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) の地震カタログを

利用した. 第1図に今年1月1日から7月31日まで、マ

グニチュード 0.0 から 0.5 まで,深さ 30km 以浅の震源の

分布を示した. イタリア中央部の震源群を切り出して(第

地震ほど社会活動による影響を受けやすいことを示した.

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 つくば市東 1-1-1 E-mail:catfish@wa2.so-net.ne.jp

**キーワード**: 地震検知能力、新型コロナ **Key words**: detection ability of earthquake, new coronavirus

# 1. はじめに

人間はいろいろな活動によって地盤に震動を与えており 地震観測に携わる者は、そのようなノイズを避けるため, 鉄道や道路,工場が存在するところから離れた場所に観測 機器を設置してきた.地上でのノイズが避けにくいところ では,深井戸を掘って地中深くセンサーを設置するなどの 努力をしてきた.しかし,それでも地震の検知能力が人間 の社会活動によって変化することは指摘されていた(石川 ほか,2008).今回は新型コロナの影響で国によってはロ ックダウンが行われたり,非常事態宣言が発令されたりと 社会活動が大きな成約を受けた.その影響は世界的に地動 ノイズが低下したと指摘されている(Lecocq et.al,2020). ここでは震源カタログからその影響を調べて見た.



図の長方形枠の中の)累積数の時間変化を第2図に示した.イタリアでは、全国ロックダウンが3月12日から行われ、5月4日から段階的解除された.第2図の左側の青色縦線が3月12日0時を示している.累積地震数はこの青線の少し後からそれまでの増え方の倍以上のペースで増え方の倍以上のペースで増えるようになっている.

第2図の右側青色縦線は, 5月4日0時を示している. 震源数の急増のペースはこの 頃まで続き,その後は増加の ペースが少し落ちている.た だ落ちてはいるがロックダウ ンが行われる以前のペースよ りかなり速い.このことから 5月4日以降にロックダウン は徐々に解除されてはいるも のの,社会活動自体のレベル は、ロックダウン以前の状態 にはもどっていないと地震観 測網で決定される震源数の変 化から言える.

第1図. イタリアの震源分布. 今年1月1日から7月31日まで.

// SEIS-PC //

![](_page_6_Figure_0.jpeg)

第2図.第1図の枠の中の震源の累積数の時間変化.1月1日から7月まで.縦軸の目盛りは100個毎.

このような検知力の変化は、日本の一元化震源でも若干 見られる.気象庁一元化震源データで東京東部周辺の 2020 年4月9日から6月9日24時00分まで(非常事態宣言が 出された期間),M1.0以下,Mマイナス2.0以上,深さ60km 以浅の震源は87個.2019年の同じ期間,同じ条件の震源 数は57個.2018年の同じ期間,同じ条件の震源数は74 個であった.したがって,非常事態宣言が出されていた期 間は、2018年、2019年の同じ期間で比べるとやや増えて いたと言えるかも知れない.これは、日本ではロックダウ ンのような強制力を持った社会活動の制限を行わず、自粛 というやや弱い制限で行った為かも知れない.

しかし,非常事態宣言の間は,東京の地動のノイズレベルはかなり低下していた.第3,4図に東京の気象庁地震 観測点の地動を13時00分00秒から1時間を示している (図は防災科技研のホームページから取得した).第3図

は非常事態宣言が出される前の3月9日で,第4図は非常 事態宣言が出されている4月13日である.両者の地動ノ イスの差は一目瞭然である.

### 文 献

- 石川有三・安藤雅孝・中村浩二(2008)震源カタログから見 える社会活動の特徴,地球惑星科学関連学会連合大 会,S143-012.
- Lecocq et.al(2020), Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures, Science 11 Sep.,Vol. 369, Issue 6509, pp.1338-1343.DOI: 10.1126/science.abd2438

![](_page_6_Figure_8.jpeg)

第3図. 気象庁東京観測点上下成分の3月9日13:00:00から1時 間の記録.

![](_page_6_Figure_10.jpeg)

第4図. 気象庁東京観測点上下成分の4月13日13:00:00から1 時間の記録.

# 地球統計学に基づく MT 応答関数の空間分布の把握とその活用

山下凪\*, 後藤忠徳\*(兵庫県立大), 山口覚\*\*(大阪市立大)

# Understanding and utilizing the spatial distribution of MT response functions based on geostatistics

Nagi Yamashita\*, Tadanori Goto(Univ of Hyogo), Satoru Yamaguchi (OCU)

**Abstract:** In the MT method, the underground resistivity structure has been estimated from the characteristics of the MT response function that changes with frequency. Furthermore, in order to reduce the influence of resistivity anomalies near the surface of the earth, analysis using the rotational invariant (Zssq) of impedance is progressing. However, the spatial distribution characteristics of Zssq have not been discussed. In this study, the spatial resistivity and phase spatial distribution of Zssq obtained by numerical calculation using a two-dimensional resistivity model were obtained and the characteristics were quantified. Here, we investigated the spatial correlation of MT response functions using a geostatistic variant. Comparing the range of the variogram and the spatial wavelength in advance, there is a tendency that the range is about 1.5 to 4.5 times the spatial wavelength, and the spatial wavelength can be calculated from the variogram of the MT response function. As a result, a gentle positive correlation was found between the apparent resistivity and the spatial wavelength of the phase. Focusing on the similarity of the spatial distributions of both, we verified whether static shift can be discussed.

\*兵庫県立大学生命理学研究科地球科学講座 Earth Science Laboratory, Graduate School of life Science, University of Hyogo 2167 Syosya, Himeji, Hyogo 671-2280, Japan. \*\*大阪市立大学理学研究科都市地盤構造学研究室 Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi, Osaka 558-5858, Japan.

キーワード:MT 法, 比抵抗, 回転不変量, ヴァリオグラム **Key words**:MT method, Resistivity, Rotation invariant, Variogram

# 1. はじめに

MT 法では、周波数に伴って変化する見掛け比抵抗や位相(MT 応答関数、MT レスポンス)の特徴に基づいて、地下の比抵抗構造の推定を行ってきた。特に近年では、地表付近の小スケール不均質による影響(スタティック・ディストーション)を低減するために、インピーダンスの回転不変量(Zssq)に基づいた地下比抵抗構造の解析が進められつつある。

しかしながら、Zssq の空間分布の特性、特に水平方向の分布特性については、議論されていない。

そこで本研究では、2次元的な比抵抗構造を仮定して、 数値計算よって得られた MT レスポンス(Zssq)の空間的 な分布を求め、これらの分布の特徴の定量化を行った。 ここでは地球統計学的手法のうちのヴァリオグラムを用 いて、MT レスポンスの空間相関性を調査した。またヴァ リオグラムモデルから得られる「レンジ」と空間分布の 波長を予め比較し、双方の関係を調べた。本研究では合 計4種類の地下構造モデルを想定し、3種類の異なる周波 数に対して、それぞれの Zssq の見掛け比抵抗分布や位相 分布について空間波長を算出し、比較を試みた。

# 2. 回転不変量 Zssq

MT 法探査でのデータを解析して得たインピーダンステ ンソルから、その座標の取り方や、比抵抗構造の異方性 を考慮しないインピーダンスの回転不変量、Zssq (Rung-Arunwan et al., 2016, 2017)が存在する。地表付 近浅部の不均質構造の影響を軽減するため、Zssq を用い た比抵抗構造の解析行われている。本研究では、MT 応答 関数の水平方向の空間分布に注目すべく、座標系などの 考慮を省くため、Zssq のMT 応答関数を検証に利用した。

# MT 応答関数の空間分布特性検証

回転不変量 Zssq の水平方向の空間分布特性を、以下の 4つの二次元地下比抵抗モデルを用いて調べた。モデル から MT 応答関数を求める Forward 計算には、ABIC 最小化 による平滑化拘束付き二次元 MT インバージョンコード (Uchida, 1993)のを使用した。比抵抗モデルの計算範囲 は、水平距離 71.200km、鉛直距離 55.465km である。

ABIC最小化による平滑化拘束付き二次元MTインバージョンコード(Uchida, 1993)のForward 計算で、4 種類の比 抵抗モデルのMT応答関数を求めた。そのうちの2050Hz、 128Hz、8Hzの見掛け比抵抗と位相の水平方向の空間分布 を求めた。4 モデルでの3 周波数のZssq 見掛け比抵抗と 位相の、全24の空間分布に関して地球統計学の手法であ るヴァリオグラムを用いて空間相関性の範囲を調べ、MT 応答関数の空間分布特性の議論を試みた。

# 4. MT 応答関数のヴァリオグラム

地球統計学的手法のヴァリオグラムについて、端的に 説明する。ヴァリオグラムはデータの空間的連続性の把 握に用いられる。MT 応答関数のヴァリオグラムは、その 形状からガウスモデルでの表現が最適であった。

# 5. 結果

4 モデルの MT 応答関数の空間分布の共通した特徴とし て、比抵抗異常体の影響は、その異常体の幅よりも広い 範囲に影響が及んでいた。また、高周波数の MT 応答関数 ほど水平方向の構造の変化がすぐに反映されていること がわかった。4 比抵抗モデルの MT 応答関数の空間分布の ヴァリオグラムは、すべてガウスモデルでの表現が最適 であった。ガウスモデルでの表現の際に、モデルのシル の値と、ヴァリオグラムのシルの値を一致させるという 条件の下で行った。見掛け比抵抗は一般的に常用対数を とった値で議論に用いられる。また、見掛け比抵抗の空 間分布のレンジは、真数と対数の場合でも、大きな差異 はほとんどなかった。従って本研究では、見掛け比抵抗 の対数の値と、位相のレンジの関係を図 5.1 に示した。 見掛け比抵抗と位相の空間分布のレンジは、単純な相関 性はないが、±0.4kmの範囲内で双方のレンジが収まるこ とがわかった。

![](_page_8_Figure_6.jpeg)

# 6. まとめ

本検証に用いた二次元比抵抗モデルから数値計算で ZssqのMT応答関数を求め、その水平方向の空間分布を決 定した。水平方向への比抵抗異常体の影響は、異常体の 水平幅よりも広い範囲に及んでいた。また、高周波数の MT応答関数ほど水平方向の構造の変化がすぐに反映され ることがわかった。また、Zssqの見掛け比抵抗と位相の 空間分布のヴァリオグラムは、ともにガウスモデルで表 現できることがわかった。図 6.1のZssqの見掛け比抵抗 と位相のレンジの関係図から、それらは単純な相関性は ないが、位相のレンジは±0.4kmの範囲内で見掛け比抵抗 のレンジと一致することがわかった。同じヴァリオグラ ムのガウスモデルで表現できることから、見掛け比抵抗 と位相の空間分布の形は似ており、ある程度のズレはあ るものの、空間分布の広がりの大きさも相関性があると 考えられる。

# 7. 参考文献

TawatRung-Arunwan,WeerachaiSiripunvaraporn, HisashiUtada, On the Berdichevsky average, 2016, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 253, Pages 1-4

T. Rung - Arunwan, W. Siripunvaraporn and H. Utada ,2017, Use of ssq rotational invariant of magnetotelluric impedances for estimating informative properties for galvanic distortion , al. Earth, Planets and Space 69:80

上嶋誠, 2009, MT 法による電気伝導度構造研究の現状, 地 震 第二輯, 61 225-238

Toshihiro Uchida and Yasuo Ogawa, 1993, Development of FORTRAN Code for Two-Dimensional Magnetotelluric Inversion with Smoothness Constraint, 地質調査研究資料集,1993-205

正路徹也,小池克明 2007,「地球統計学」 ヴァリオグ ラム―データの空間的連続性の解析日本地熱学会誌,第 29巻,第3号,125-140頁

物理探査学会, 2016, 物理探査ハンドブック 増強改訂版, 物理探査学会

図 5.1 見掛け比抵抗と位相のレンジの関係

# 数値シミュレーションによる低硫化系浅熱水性鉱床の 生成プロセス解明へのアプローチ

冨田 昇平\*・小池 克明\*・高橋 洋\*\*・義山 弘男\*\*\*

# Numerical simulation approach to clarification of generation process of low-sulfidation epithermal deposits

Shohei Albert Tomita\*, Katsuaki Koike\*, Hiroshi Takahashi\*\* and Hiroo Yoshiyama\*\*\*

\*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,

Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail: tomita.shohei.57n@st.kyoto-u.ac.jp

E-man. tomita.shohel.57n@st.kyoto-u.ac.jp

\*\* 伊藤忠鉱物資源開発株式会社 ITOCHU Mineral Resources Development Corporation, 5-1, Kita-Aoyama 2-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0061, Japan.

\*\*\*西日本技術開発株式会社 West Japan Engineering Consultants, Inc., Denki-Bldg., Sunselco Annex 8F, 1-1, 1-Chome, Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka, 810-0004, Japan.

キーワード: TOUGH2, 熱水変質, 鉱物沈殿, 冷却, 沸騰 Key words: TOUGH2, Hydrothermal alteration, Mineral deposition, Cooling, Boiling

# 1. はじめに

浅熱水性鉱床(エピサーマル鉱床)は斑岩銅鉱床などと 同様に主要な金属源であるが、その詳細な生成メカニズムは 十分に解明されていない。低硫化系浅熱水性鉱床の鉱物沈 澱メカニズムとして、熱水の冷却、混合および沸騰などがあげ られ、そのうち沸騰が最も重要な役割を果たすと考えられてい る(例えば、Simmons *et al.*, 2005; Clark and Gemmell, 2018)。これらの研究は、浅熱水性鉱床の生成が複数のプロ セスによって引き起こされることを示唆しているが、それらの時 間的・空間的な関係を明らかにした例はまだない。本研究で は、これらを明らかにすることを目的に、低硫化系浅熱水性 鉱脈型鉱床の典型例である宮城県細倉鉛・亜鉛鉱床を対象 に、鉱床生成モデルを構築し、数値計算により検証を行った。

# 2. 鉱床生成モデル

Takahashi (2017) は、細倉鉱床の変質鉱物の定量的研究により、細倉鉱床の形成過程を次の3つのステージに区分した。前期では、鉱脈に沿って上昇した熱水が帯水層で低温地下水に冷却されることにより、鉱物が沈殿する。中期では、熱水変質作用によって鉱脈周辺の透水性が低下することで低温地下水の鉱脈への侵入が抑制され、その結果、鉱脈中の熱水温度が上昇して沸騰し、鉱物が沈殿する。後期では、熱水変質作用に伴うさらなる透水性の低下に起因して鉱脈内の圧力が上昇し、やがて鉱脈頂部で角礫化が生じ、その結果、再び流体圧力が低下することで沸騰が生じ、鉱物が沈殿する。このような浅部帯水層の低温地下水が関連して引き起こす一連の鉱物沈殿プロセスを「冷水トラップ」と称した。

# 3. 研究方法

冷水トラップのメカニズムを数値計算により検証する。解析 には、ダルシー則と質量・エネルギー保存則を支配方程式と する気液二相流と熱の3次元流れの解析ソフトTOUGH2を 用いた。解析は前期,中期,後期に分けて行ったが、本要旨 では紙面の都合上,前期と中期についてのみ説明する。

#### 3・1 前期の解析条件

数値モデルは細倉鉱床の主要鉱脈である富士脈を中心と して、幅 542m,奥行 1km,鉛直方向 1200m とし、グリッド数 は幅方向,奥行方向,鉛直方向にそれぞれ 9,2,10 区分と した(図 1)。また、境界の影響を小さくするために解析領域 の四方に 10km の緩衝領域を設けた。岩石区分は地質層序 や熱水変質帯分布などから推定される水理地質区分を基に 設定した(表 1)。岩石の物性値は、形成年代および岩相が 細倉鉱床の岩石と類似する地熱地域の岩石物性値(例えば、 Kato et al., 2006)を使用した。

初期条件として、変質鉱物の安定温度を基に初期温度を 20-130℃に設定し、地下水面を深度 350m に設定し、それ 以深では静水圧を与え、表層は大気圧とした。境界条件とし て、側面を透水性境界、底面を不透水性境界とし、表層には 20℃の水を 400mm/年(日本の平均地下水涵養量)の割合 で流入させた。鉱脈の底面からは 300℃の熱水を 3.6kg/s の 割合で流入するように設定した(図 1)。

#### 3・2 中期の解析条件

中期では,前期の鉱化作用・熱水変質作用により岩石 の空隙率と浸透率が低下したことに起因して,鉱脈1が 鉱脈2に,透水層・断層破砕帯・断層角礫帯が低透水性 変質帯(Low-Permeability Alteration Halo, LPAH)に 変化したことを想定している(表 1)。岩石の物性値は前 期と同様に類似の地熱地域における岩石物性値を参考に 設定し,初期条件として前期の温度・圧力結果を与え, 前期と同様の境界条件を設定した。ただし,中期におけ る透水性の低下を考慮して,底面からの熱水の流入量を 2.6kg/s とした。

Rock classification	Density	Porosity	Permeability (m <sup>2</sup> )		conductivity	Specific heat	
	(kg m <sup>-3</sup> )		horizontal	vertical	(W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$(J \text{ kg}^{-1} \circ \text{C}^{-1})$	
Vein 1	2600	0.7	5.0E-	-13	3.0	1000	
Fault-breccia zone	2600	0.2	1.0E-13		3.0	1000	
Fault-damage zone	t-damage zone 2600 0.1 2.0E-14		2.7	1000			
Permeable layer	2600	0.2	1.0E-13	1.0E-15	3.0	1000	
Semi-permeable layer	2600	0.2	8.0E-14		2.5	1000	
Low-permeability layer	2600	0.1	2.0E-17		2.0	1000	
Vein 2	2600	0.2	5.0E-13		2.0	1000	
LPAH stalk 1	2600	0.1	2.0E-14		2.0	1000	
LPAH stalk 2	2600	0.1	1 1.0E-14		2.5	1000	
LPAH cap 1	LPAH cap 1 2600 0.1 2.0E-14 1.0E-15		1.0E-15	2.0	1000		

第1表 岩石区分と岩石物性値

![](_page_10_Figure_3.jpeg)

第1図(a)前期および(b)中期での地質モデル,岩石区分,お よびセル番号

# 4. シミュレーション結果と考察

### 4·1 前期鉱化作用

富士脈周辺の温度分布と熱水流動形態の推定結果を図2 に示す。前期シミュレーションは地質観察から示唆された次 の3点:(i)低温地下水の流入による浅部での鉱脈内の熱水 の温度低下(図2a),(ii)深度750-800mでの深部透水層か ら鉱脈への低温地下水の流入,(iii)浅部帯水層における熱 水の側方流動を再現している。計算による温度分布は熱水 変質帯分布とそれらの形成温度から推定される温度分布と 整合的である。圧力はほぼ静水圧状態であり,沸騰は生じて いない。鉱脈内部の深部(セル番号#68~#59)および浅部 (#32~#23)では顕著な温度減少,それらの中間のセル (#59~#32)では緩やかな温度低下が現れた。鉱石の品位 分布と比較すると,鉱脈内に緩やかな温度減少が生じた場 所では,珪化を伴って高品位の鉛・亜鉛が沈殿するのに対し て,温度減少が大きい浅部では珪化を伴わず低-中程度の 品位の鉛・亜鉛が沈殿したと考えられる。

以上の結果から,前期では熱水の冷却によって鉱化作用 が生じたことが確かめられる。

### 4・2 中期鉱化作用

中期では、LPAHの形成に伴って、熱水が鉱脈内により集

8

中して流れることが明らかになった(図2b)。鉱脈周辺の圧力 は静水圧に比べて0.2 MPa程度上昇したものの,それ以外 の場所ではほぼ静水圧であった。

また, LPAHの保温・遮水効果に起因して鉱脈およびその 周辺で最大27℃温度が上昇し,その結果,鉱脈内(#32, #41,#50)において沸騰が生じ,中期鉱化作用が生じたと解 釈できる(図2b)。中期における沸騰は最も品位の高い鉱石 サンプルの流体包有物分析からも確認されており,沸騰の位 置とそこでの温度はシミュレーションと整合的である。

![](_page_10_Figure_14.jpeg)

第2図(a)前期,(b)中期における温度分布・熱水流動形態。凡 例は(a)と(b)で共通。

#### 5. まとめ

細倉鉱床をケーススタディとして,浅熱水性鉱床の形成プロセスを数値シミュレーションで復元し,鉱物沈殿を誘発する冷却,沸騰,および角礫化の3つのイベントからなる冷水トラップのメカニズムを検証した。その結果,前期鉱化時には熱水は鉱脈を上昇し,浅部帯水層の低温地下水と混合して冷却されたが,中期鉱化時になると熱水変質の進行に伴って形成される低透水性変質帯の遮水・保温効果により鉱脈内で沸騰が生じた。これらの結果から,冷水トラップは浸透率などの物性値の変化によって生じ,鉱脈形成において重要な役割を果たしていることを明らかにできた。なお,後期に関してはTakahashi et al. (2020)を引用されたい。

#### 文 献

- Clark, L.V., and J. Bruce Gemmell, J.B. (2018) Vein stratigraphy, mineralogy, and metal zonation of the Kencana low-sulfidation epithermal Au-Ag deposit, Gosowong Goldfield, Halmahera Island, Indonesia. Econ. Geol., vol.113, no.1, pp.209-236.
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D. (2005) Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. Econ. Geol., 100th Anniversary vol., pp.485-522.
- Kato, H., Ariki, K., Kudo, S., and Abe, Y. (2006) Reservoir modeling of the Appi geothermal field, geothermal development promotion survey (NEDO). Geochemical Journal, vol.28, pp.19-36.
- Takahashi, H. (2017) Cold-water traps in epithermal veintype deposits (abs.). Abstracts with Programs, the Society of Resource Geology, vol.67, p.55.
- Takahashi, H., Tomita, S.A., Koike, K., and Yoshiyama, H. (2020) 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 (in press), Ore Geology Reviews.

# スパースデータの内挿・外挿に適したニューラルネットワークと 広域地温分布モデリングへの応用

家木優成\*·久保大樹\*·小池克明\*

# Neural Networks for interpolation and extrapolation of sparse data and its application to regional modeling of subsurface temperature

Yusei Ieki\*, Taiki Kubo\* and Katsuaki Koike\*

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

キーワード:ニューラルネットワーク, ニューラルクリギング, 温度検層データ, 伝導型, 対流型, 臨界点

Key words: neural network, neural kriging, temperature logging data, conductive type, convective type, 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,バリオグラムにより DNN の学習規準に空間的相 関構造を考慮する Neural Kriging(NK; Koike et al., 2001) を適用した.

### 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 128-128 と設定 した. Gu ほか(1997)により座標を入力データ, 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 点での値が推定できることが明らかとされている. そこ で, 本研究でも入力データは位置情報である(x, y, z)座標 をそれぞれ標準化した値, 教師データとなる計測データは その地点の地温を常用対数変換した後, 標準化した値を用 いた. 最適化手法は Adam, 活性化関数は ReLU と設定し た. また, DNN における学習では, 教師データt<sub>i</sub>と出力値 t<sup>\*</sup><sub>i</sub>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)で表され る.

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

ここで n はデータ数である.

# 2.2 Neural Kriging

地球統計学の基本的な手法の一つとして、セミバリオグ ラムがある.セミバリオグラムはデータの空間的連続性の 把握に使用される.これによりデータ間の距離と値の分散 との関係が求められ、データの空間的な相関関係を定量化 することができる.上記のように DNN により、任意の地 点での値が推定できることがわかっているが、この推定値 が測定値の空間分布則を満たすとは限らない.そこで、 NK では DNN の損失関数に推定値の誤差とセミバリオグ ラムの誤差の両方を考慮する(辜ほか、1997).この場合の 損失関数Eを式(2)に示す.

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (t_i - t_i^*)^2 + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \{\gamma(h_j) - \gamma^*(h_j)\}^2$$
(2)

ここで、 $\gamma(h_j)$ : 測定値に基づくセミバリオグラム、 $\gamma^*(h_j)$ : 推定値に基づくセミバリオグラム、m: 2 つの推定点の組み 合わせ数、 $h_i: j$ 番目のデータ組間の距離である.

本研究においてはさらに損失関数に閾値用の関数,および地温が深くなるにつれて増加する特徴を考慮するための 関数を追加したものを NK の誤差関数と定義した.

#### **2.3 物理則の考慮**

地温の深度方向の変化には伝導型と対流型の二つのパタ ーンが存在する. 伝導型は熱が伝導のみによって伝えられ るパターンであり,深くなるにつれて一定の割合で増加す る.また,対流型は水やガスの対流により熱が伝えられるパ ターンであり,ある深度まで地温が増加するが,それ以深で はほとんど変化しない. このような物理則を DNN, NK に 考慮するためにボーリング地点(実測点)および推定点を伝 導型と対流型に分割する必要がある.一般に深度 10 km ま での平均地温勾配は 25~30 K/km とされている.そこで, 多田隈ほか(2011)に従い,実測点においてはそれぞれの検層 データに対し最小二乗法により傾きを求め,その傾きが 30 K/km より大きく活火山の周囲 50 km 以内に分布している 場合を対流型,それ以外を伝導型と設定した.また,推定点 に対しては実測点の対流型を1,伝導型を0として普通クリ ギングを行った.DNN,NKの入力層に1ユニット追加し, 普通クリギングの出力値を入力することで物理則の考慮を 行った.

#### 2.4 精度評価方法

得られた推定結果に対して、本研究では Hold-out 法を用 いて精度評価を行った. 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、訓練データでモデルの学習を 行い、評価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の方法と しては 2 つの方法を採用した. 1 つ目は内挿評価として、検 層データのボーリング地点ごとにランダムで訓練用データ (90%)、検証用データ(10%)に分割する方法、2 つ目は外挿評 価として検層データの浅い部分(90%)を訓練用データ、深い 部分(10%)を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.

#### 3. 結果

### 3.1 NK の有効性検証

DNN, NK を利用した三次元地温分布推定結果を比較し, NK の有効性の検証を行う. 第1図に内挿・外挿それぞれに おける検証用データの学習曲線を示す. これによると, 内挿 評価,外挿評価のいずれにおいても NK により推定精度が 上昇していることがわかる.

![](_page_12_Figure_6.jpeg)

### 3.2 NK による標高別地温分布と臨界点分布

NKを用いた標高別推定地温分布図を第2図に示す.活火 山分布図と比較すると,地温が高いと推定された地点が活 火山分布に概ね対応していることがわかる.また,・2000m まで到達しているボーリング地点数がわずか20点であるの にもかかわらず,・2000m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 NKを用いて臨界点(374℃,22. 1MPa)の等値面図を描いた.その結果を第3図に示すが,・ 4000mで最も浅く那須火山帯や雲仙岳,霧島山付近におい て臨界点への到達が推定できる.

### 4. まとめ

本研究では DNN, NK と温度検層データを用いて日本全 域における三次元地温分布推定を行った.その結果,NK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行 えることがわかった.また,NKにより標高・4000mの那須 火山帯や霧島山,雲仙岳付近で最も浅く臨界点に到達し,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.

![](_page_12_Figure_11.jpeg)

第2図 活火山分布と NK による標高別地温分布

![](_page_12_Figure_13.jpeg)

#### 文 献

- Gu, B., Koike, K. and Ohmi, M. (1997) Distribution analysis of metalliferous vein using artificial neural network. *Geoinformatics*, 8, 15–21.
- 辜 彬・小池克明・大見美智人 (1997) 空間的分布則を考慮 したニューラルネットワークによる不規則配置データの 補間.情報地質, 8, 269–279.
- 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*, **33**, 421–448.
- 日本の構成温度プロファイルデータベース(データ集),(独) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター: http://www.jaea.go.jp/04/tono/siryou/welltempdb. html
- 多田隈直幸・麻植久史・小池克明(2011)日本列島全域にわたる3次元地温分布のモデリングと考察.情報地質,22, 72-73.

# Pluri-Gaussian simulation combined with principal component analysis for delineating mineralized zones and ore solution flows

Vitor Ribeiro de Sá\* and Katsuaki Koike\*

\*Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1–2, Kyoto 615–8540, Japan. E–mail: koike.katsuaki.5x@kyoto–u.ac.jp (K. Koike)

**Key words:** Geostatistics, Stochastic simulation, Principal component analysis, Pluri-Gaussian simulation, Geological model

# 1. Introduction

Sparsity and shortage of information is inherent to most geostatistical projects. This pitfall makes modelers puzzle over approaches to mitigate the setbacks and optimize the available information. The combination of data-characterization and geostatistical methods can be a plausible way to minimize the problem.

This study aims to apply a combination of methods, such as principal component analysis (PCA), and spatial modeling techniques using conditional geostatistical simulations, turning bands (TBSIM) and pluri-Gaussian (PGSIM), to a real geochemical data set and lithologic log data. The goal is to construct plausible 3D models of geochemical compositions and lithotypes in the study area in order to identify the zones with more occurrence of mineralization and propose a geological interpretation of fluid circulation in the study area.

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

# 2. Model Domain and Dataset

Following our preceding study (de Sá et al., 2020), a 200m×700m×250m domain, located around 1500m below the sea level (mbsl) was selected (Fig. 1). Previous geochemical studies have indicated that this area is rich in Ba-Zn-Pb. The proposed methodology uses a multi-variate geochemical set (52 elements) and visual core description information alongside X-ray diffraction (lithotypes) as input data for TBSIM and PGSIM implementations, respectively. These data were sampled from six boreholes (black dots) spread along the E-W direction, with variable lengths from 46m (borehole I) to 180m (borehole III). The lithotypes classification is broadly based on whether polymetallic sulfide minerals and hydrothermal alteration are present.

Borehole I was drilled in a mound and is regarded as a discharge zone of the hydrothermal system. Borehole VI presented little evidence of sulfide and altered material in its sample core descriptions and geochemical analysis, being more likely a recharge zone. In addition, a seismic survey of the area identified the development of a fault between boreholes V and VI (dashed line).

![](_page_13_Figure_12.jpeg)

Figure 1: Dimension of study area and its spatial distribution of boreholes. The black line shows the location of cross-section for geostatistical results in Figure 2. The dashed line shows the location of fault identified by a geophysical survey.

#### 3. Methods

The proposed methodology integrates geochemical measurements and lithotypes. Firstly, the entire multivariate geochemical data is centered log-ratio (clr) transformed and eight moderate-highly correlated elements are selected, such as Zn, Pb, Cu, Ag, Ba, Cd, Sn and Mn. These elements are not only statistically correlated but also are the most representative ones in mineralized zones in hydrothermal systems (Pirajno, 2009). Next, this subset is used as input to apply PCA, which main products are principal component values (PC values). TBSIM uses this variable to spatially locate highly mineralized zones and set iso-surfaces to separate the sulfide-rich zones from impoverished materials. Finally, PGSIM is individually run in each zone. The following subsections briefly describe the main characteristics under PCA, TBSIM and PGSIM.

# 3.1. Principal component analysis (PCA)

PCA is a powerful tool to examine the interactions between the various variables and find the most efficient linear combination of them. Its efficiency stems from its capability of the first two or three principal components, PCs, to gather the greatest amount of total variance. PCA method reduces the dimensionality of data with many measured variables by transforming these to a new, considerably smaller set of variables, PCs.

### 3.2. Turn bands simulation (TBSIM)

The principle of TBSIM is to produce a non-conditional

simulation at first. That is, yielding a map that reflects the variogram, but the data is not honored. Afterwards, in order to correct it, a map is obtained by interpolating the experimental error between the measured data and non-conditional simulated value at each data point (Chilès and Delfiner, 1999).

### 3.3. Pluri-Gaussian simulation (PGSIM)

This methodology aims to simulate categorical variables by combining multiple multi-Gaussian variables using multiple thresholds. The gist of PGSIM is to yield two continuous Gaussian fields using standard multi-Gaussian techniques. Therefore, these fields are truncated to produce categories, which the thresholding relies on the value of both Gaussian fields (Mariethoz and Caers, 2015).

### 4. Results and Discussion

Three cross-sections along E-W were selected to depict a conceptual model for an expected lithotypes distribution (Fig. 2a).

By applying PCA considering the eight geochemical elements, the eigenvalues and total variance of eight PC's are computes. PC1 retains most of the information of the input data and accounts for 73% of total variance whereas PC2's variance is 12.3% and the sum of the variances from PC3 to PC8 is as small as 14.7%. Therefore, only PC1 was selected for TBSIM to locate high-metal-content zones and interpret the sulfide/sulfate mineralization process.

The TBSIM result is shown as an E-W vertical cross-section (Fig. 2b) with iso-planes of the PC1 values which reveal that PC values greater than PC1 = 4 are thickly distributed underneath the sulfide mound. suggesting stockwork formation, and a horizontal and stratiform mineralization seems to occur from the mound toward the east until the inferred fault. Considering the stratiform mineralization and effects of hydrothermal activity from the western boundary to the inferred fault, this subarea was divided into three zones following the iso-plane of PC1 = 4 for PGSIM. The top zone is mainly unrelated to hydrothermal alteration and composed of primary and reworked sediments. The middle zone is a major mineralization zone containing the massive sulfide mound, stockwork, and horizontal and stratiform subseafloor sulfide layer. The bottom zone mainly consists of pervasively altered rock.

These results resize the model domain to optimize the PGSIM application. The easternmost limit was rearranged to suit the distal edge of the polymetallic sulfide body, shortening the E-W length from 700 to 500 m, while the vertical range remained unaltered.

The results of the PGSIM in each zone defined by TBSIM are shown in the resized domain (Fig. 2c). According to this model, the distribution of sulfide rock suggests two fluid flows with high probability (red arrows). The ascent flows toward the sulfide mound and the lateral flows from the stockwork zone toward its adjacent permeable layers. The former flow may be predominant because mineralization is concentrated on the seafloor and in the shallow subseafloor. The latter flow induces large heat loss without forming a chimney or mound and causes horizontal and stratiform alteration and mineralization.

#### 5. Conclusion

The combination of PCA and two geostatistical simulations, TBSIM and PGSIM are very efficient to clarify geologic structure and 3D distribution of metal contents in the model domain. They can contribute to (i) construction of proper geologic and mineralization models and (ii) identification of hydrothermal fluid-flow systems and the accumulation mechanism of base metals in seafloor hydrothermal fields.

**Acknowledgement:** We sincerely thank Dr. Tatsuo Nozaki and Dr. Yutaro Takaya for providing the chemical analysis data obtained by D/V Chikyu.

#### References

- Chiles, J. P., Delfiner, P. (1999) Geostatistics: Modeling spatial uncertainty. Wiley.
- de Sá, V. R., Koike, K., Goto, T.-N., Nozaki, T., Takaya, Y., Yamasaki, T. (2020) A combination of geostatistical methods and principal components analysis for detection of mineralized zones in seafloor hydrothermal systems. *Natural Resources Research*. https://doi.org/10.1007/s11053-020-09705-4
- Deutsch, C. V. (2002) Geostatistical reservoir modeling. Oxford, Oxford University Press.
- Mariethoz, G., Caers, J. (2015) Multi-point geostatistics: Stochastic modeling with training images. Wiley.
- Pirajno, F. (2009) Hydrothermal processes and mineral systems. Springer.

![](_page_14_Figure_18.jpeg)

Figure 2: Cross-sections along E-W showing (a) a conceptual model of study area, (b) E-W vertical cross-section along the line in Figure 1, and (c) spatial modeling results of lithotype by PGSIM. The arrows in (c) show the interpreted hydrothermal fluid flows.

# Identification of meteoric water incursion to a high-temperature geothermal reservoir by rare earth elements and isotope oxygen-18 analyses

Riostantieka M. Shoedarto, Yohei Tada, Koki Kashiwaya, Katsuaki Koike

Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail: riostantieka.mayandari.7x@kyoto-u.ac.jp

Key words: Rare earth element, oxygen-18, geothermal monitoring

# 1. Introduction

In this study, we use Principal Component Analysis (PCA) to establish a relationship among rare earth elements (REE),  $\delta^2$ H, and  $\delta^{18}$ O for clarifying mixing process in the reservoir from previous recharge study by Shoedarto et al. (2020). PCA has been frequently applied to processing geochemical and other types of geoscience data to enhance the interpretability of the components as combinations of multiple variables (Grunsky, 1997; Cheng et al., 2009). Amongst several geochemistry methods, the H<sup>2</sup> and O<sup>18</sup> are widely known to identify meteoric mixing in the reservoir. On the other hand, REEs have been well studied as geochemical tracers in aqueous environments (e.g., Willis and Johannesson, 2011).

The samples were obtained from seven active geothermal wells in a high-temperature transitional liquid to vapor reservoir, that is located geothermal field in the Southern Bandung, West Java, Indonesia. This power plant has been generating 275 MWe over the past twenty years. Monitoring of the reservoir performance is critical to minimize any undesirable effects in a timely manner.

# 2. Methods

All of the samples were taken from the transitional zone except for the GA-12 (Fig. 1) which was sampled from the liquid zone. They were analyzed for the REEs using an Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (ICP-MS, Agilent 7500cx, Agilent Technologies, U.S in Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto) and for  $\delta^2 H$  and  $\delta^{18} O$  analyses in Kyoto University using water isotope analyzer based on cavity ring-down spectroscopy (L2130-i, Picarro Inc., U.S.). The  $\delta$  denotes the ratio of the sample to the standard VSMOW.

The variations in Ce, Eu, and total REEs are the result of inherited source rock signatures and water rock interaction (WRI) through the recorded sorption and from their REEs anomalies. To identify the anomalies by considering the geological setting, normalization to known materials such as Post Archean Australian Shale (PAAS; McLennan, 1989) is indispensable.

The REEs,  $\delta^2 H$  and  $\delta^{18}O$  data compositions were converted into real number space by log-ratio transform. By applying PCA function in the Origin program, the data were reoriented to the greatest axis of variances which becomes the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> principal components (PCs) in a bivariate plot (Fig. 3).

### 3. Calculation

The isotopic shift ratios for both  $\delta^2 H$  and  $\delta^{18}O$  from the surface to the reservoir,  $\delta_i$ , can be calculated as follow (D'Amore et al., 1993):

 $\delta_{\rm i} = \delta_{\rm l} - x_v \times 1,000 \ln a$ 

where  $x_v$  and *a* denote vapor fraction and fractionation factor of the isotope at a specific temperature between liquid and vapor, respectively.

The  $\delta^2 H$  and  $\delta^{18} O$  fractionations between liquid and vapor in the reservoir can be expressed as:

 $\delta^2 \mathbf{H}_{\rm res} = \delta^2 \mathbf{H}_{\rm sep} - x_v \times 1,000 \ln \alpha \left( \delta^2 \mathbf{H}_{\rm sep} \right)$ 

 $\delta^{18}O_{res} = \delta^{18}O_{sep} - x_v \times 1,000 \ln \alpha (\delta^{18}O_{sep})$ 

where the subscripts "res" and "sep" denote the reservoir and separator, respectively. In the temperature range from 0 to 374.1 °C, ln *a* values for  $\delta^2$ H and  $\delta^{18}$ O are approximated by polynomial equations of temperature *T* (in K, Horita and Wesolowski 1995) as:

1,000 ln  $\alpha$  ( $\delta^{2}$ H) = 1,158.8 ( $T^{3}/10^{9}$ ) - 1,620.1 ( $T^{2}/10^{6}$ ) + 794.84 ( $T/10^{3}$ ) - 161.04 + 2.9992 ( $10^{9}/T^{3}$ ); 1,000 ln  $\alpha$  ( $\delta^{18}$ O) = -7.685 + 6.7123 ( $10^{3}/T$ ) - 1.6664 ( $10^{6}/T^{2}$ ) + 0.35041 ( $10^{9}/T^{3}$ ).

# 4. Results and Discussion

The results of  $\delta^2$ H and  $\delta^{18}$ O analyses reveal that there are two groups of well fluids in Fig. 1. WY-1, GA-11, and GA-12 wells had undergone water-rock interaction (WRI), with GA-12 at the most advanced stage. The waters of PB-1, GA-3, GA-13, and WY-2 are on the mixing line with PB-1 as the most diluted well as it is located near to the Local Meteoric Water Line (LMWL).

![](_page_15_Figure_23.jpeg)

Figure 1. Two groups of water-rock interaction (WRI) and mixing are characterized by the  $\delta^2 H$  and  $\delta^{18}O$  analyses.

Fluids that had been contacted with oxic environment (recent meteoric recharge) usually show negative Ce anomalies. From the spider diagram in Fig. 2, surprisingly the most diluted PB-1 and GA-3 have no sign of negative Ce anomalies. Normalizing to PAAS gives a clear anomaly of HREE (heavy REE) enrichments relative to LREE (light REE) as well as negative Ce anomalies and positive Eu anomalies for most of the well samples (Fig. 2). Enrichments in HREE are resulted from stable complexes forming with some ligands and stay longer in the solutions. This implies that all the fluid samples had interacted longer with reservoir rocks.

![](_page_16_Figure_1.jpeg)

Figure 2. All samples showing HREE enrichments relative to LREE, negative Ce (except for PB-1, GA-2, GA-3, and GA-5 wells) and positive Eu anomalies.

GA-12, GA-3, and PB-1 are well spread out along the PC1 axis in Fig. 3A, meanwhile a factor-loading plot in Fig. 3B shows that the most significant variables for the component 1 are the HREE and wells from the WRI group. Gd, Dy, Er, Tm, Yb, and Lu are better distributed along the PC1 axis. Eu including the rest of the REEs and  $\delta^{18}$ O are spread out along the PC2 axis in Fig. 3B.

![](_page_16_Figure_4.jpeg)

Figure 3. The mixing wells PB-1 and GA-3 are well plotted in the PC1 of the bivariate  $\mathcal{B}$ H and  $\mathcal{S}^{8O}$  plot (A), meanwhile the WRI wells, GA-13 and WY-2 are located along the PC2. Based on the REEs, the loading plot of the WRI group strongly influences PC1, while the mixing wells have more influences in PC2 (B).

Positive Eu anomalies in the WRI group from Fig. 2 show that reservoir fluids had undergone hydrothermal alteration and removal of Eu from the hot fluids during the precipitation of secondary minerals. This is in agreement with the finding that Eu and Tm account for the most influential elements in the WRI group. From the score plot in Fig. 3B, the mixing group GA-3, GA-13, and PB-1 are positively correlated to only the middle REEs (Sm, Tb, and Ho). Conclusively, the mixing and WRI groups are responsible for clustering their REEs and  $\delta^{18}O$  samples.

### 5. Conclusion

Even though the  $\delta^2$ H and  $\delta^{18}$ O analysis present signs for probable meteoric incursion for the wells in the mixing line, there is still no correlation with the oxic environments from Ce anomalies. It seems that the mixing process in the  $\delta^2$ H and  $\delta^{18}$ O diagram are dominated by non-meteoric water fluids such as condensate fluids. Mixing of meteoric recharge in PB-1 and GA-3 was confirmed with the score plot of PC1 that covered 77% of the variation. For this reason, the linear mixing in Fig. 1 is not supposed to pass through the GA-13 and WY-2 as there are more complex process other than mixing with colder fluid in those wells.

On the other hand, oxic environment from the negative Ce is oppositely correlated with the WRI group. Hence, wells in the WRI group have no contact with recent meteoric water in the great depth. The HREE enrichments from the spider diagram suggest solid hint of hydrothermal alteration and WRI for all the samples. The WRI process in the reservoir that is reflected the WRI group have positive correlation with not only Eu, but also Gd, Dy, Er, Tm, Yb, and Lu. Those HREE could be significant for WRI in the next research. The approach using PCA for reservoir monitoring to ascertain whether colder water incursion could be predicted from the classification groups was explored.

Acknowledgement: We sincerely thank Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd. for the collaboration on the Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS, Grant No. JPMJSA1401) Project with JST, JICA, and Institute Technology of Bandung team.

#### References

- Cheng, Q., Bonham-Carter, Greame., Wang W., Zhang, S., Li, W., Qinglin, X., 2011. A spatially weighted principal component analysis for multi-element geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China. Comput. Geosci. 37 (5), 662–669.
- D'Amore, F.D., Ramos-Candelaria, M, Seastres, J., Ruaya, J., Nuti, S., 1993. Applications of gas chemistry in evaluating physical processes in the Southern Negros (Palinpinon) Geothermal Field, Philippines. Geothermics 22, 535-553.
- Grunsky, E.C., 1997. Strategies and methods for the interpretation of geochemical data. In: Current Topics in GIS and Integration of Exploration Datasets, Short Course, Exploration'97 Workshop, 145.
- Horita, J., Cole, D.R., Wesolowski, D.J., 1995. The activity composition relationship of oxygen and hydrogen isotopes in aqueous salt solutions: III. Vapor-liquid water equilibration of NaCl solutions to 350°C. Geochim. Cosmochim. Acta 59, 1139-1151.
- McLennan, S. M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. Rev. Min. 21, 169–200.
- Shoedarto, R.M., Tada, Y., Kashiwaya, K., Koike, K., 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 86, 101797.
- Willis, S.S., Johannesson, K.H., 2011. Controls on the geochemistry of rare earth elements in sediments and groundwaters of the Aquia aquifer, Maryland, USA. Chem. Geol. 285, 32-49.

# Comparative Evaluation of Urban Growth Models

# Pavithra JAYASINGHE<sup>\*</sup>, Lakshmi N. KANTAKUMAR<sup>\*\*</sup>, Venkatesh RAGHAVAN<sup>\*\*\*</sup>, Go YONEZAWA<sup>\*\*\*</sup>

\*Graduate School for Creative Cities, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: pavipj89@gmail.com

\*\*Bharati Vidyapeeth Deemed University, Institute of Environment Education and Research, Pune, India.

\*\*\*Graduate School of Engineering, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan.

Key words: Urban Simulation, Urban Growth Models, FUTURES, SLEUTH, MOLUSCE

#### 1. Introduction

Models are useful tools for simplifying complex socioeconomic and biophysical forces that influence the rate and spatial pattern of landuse change and for anticipating future evolutions. The landuse change driven urban expansion is one of the most influential transformation that can affect the natural and social cohesion (Kantakumar et al., 2020). This may be reasoning the use of urban growth models to predict urban expansion and its forms increasing gradually in the scientific literature. However, several open source urban growth models are available and comparative analysis of these models is still missing. The attempt of this study is to evaluate the outputs of three urban growth models FUTURES (FUTure Urban-Regional namely, Environment Simulation), MOLUSCE (Modules for Land Use Change Simulations) and SLEUTH to construct quantitative, spatially explicit urban simulation using Colombo as study area with identical inputs.

#### **2**. Data and Methodology

This study uses the urban area maps derived from 30m spatial resolution Landsat data as input for model calibration and validation. The data used along with the data sources are shown in Table 1. FUTURES and MOLUSCE models require a site suitability surface and an estimate of the quantity of future urban growth. SLEUTH model requires urban extents, roads and a user defined exclusion layer that denotes the site suitability. FUTURES model uses past population trends and projected population to estimate per capita land demand when estimating the amount of future urban growth.

Table 1. Input data used in this study					
Data	year	Data source			
Landsat 5 TM	1997,2005,2008	USGS			
Landsat 8 OLI	2019	USGS			
Population	1991,2001,2012	Dept of Census			
		and Statistics			
Road network	2013	JICA			
Water bodies	2013	JICA			
DEM	2000	SRTM 30m			
Social infrastructure	2004	Survey Dept			
(Hospitals, schools)					
Growth centers	2010	Survey Dept			
Administrative	2010	Survey Dept			
boundary		• •			

FUTURES model is a multilevel modelling framework consists of three sub models namely, POTENTIAL, DEMAND and PGA (Meentmayer *et al.*, 2013). POTENTIAL sub-model quantifies the site suitability based on hypothesized environmental, infrastructural, and socioeconomic factors. FUTURES model uses logistic regression to estimate transition potential. DEMAND sub-model quantifies per capita land demand. PGA is a stochastic patch-growing algorithm that determines the shape, size and distribution of urban patches.

SLEUTH is a cellular automata (CA) based urban growth model (Clarke *et al.*, 1997). The name of the model is an acronym of inputs used namely, Slope, Land use, Exclusion, Urban, Transport and Hillshade. SLEUTH uses four growth rules namely, spontaneous, new spreading center, edge and road-influenced growths. These four urban growth rules are performed sequentially in each growth cycle and are controlled by five-growth coefficients dispersion, breed, spread, road gravity, and slope resistance coefficients. These growth coefficients need to determine by using model calibration with historical urban growth. Brute force calibration method using Monte Carlo simulations with POP metric has been used to determine these five coefficients in this study.

MOLUSCE is a CA based model developed as a plugin for QGIS. MOLUSCE uses historical urban maps to calculate area of change as a first step. One method can be selected among four available methods; Artificial Neural Network (ANN), Weight of Evidence, Logistic Regression or Multi Criteria Evaluation to estimate the transition potential in second step. We have applied ANN for estimating the transition potential using distance to roads, growth centers, water bodies, schools, hospitals and slope as explanatory variable. CA use the area of change and transition potentials derived in first and second step to simulate the urban growth.

In order to facilitate a fair comparison of simulation capability of three models under study, the urban area maps of 1995, 2005, 2014 and 2019 were used for calibration/training. After calibration, we used 2008 urban area map to initiate the simulation to predict urban extent of 2019. The simulation maps of three models were validated by comparing it remote sensing derived urban area map of 2019 using a confusion matrix.

Table 2: Validation matrices for three models

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

Figure 1: (a)Observed urban area map and validation maps of (b)FUTURES, (c) SLEUTH and (d) MOLUSCE models

# 3. Results and Discussion

The urban growth models are approximation of complex urban system. Thus, the validation of an urban growth model is essentials to determine whether the model is capable of representing city growth with sufficient accuracy (Kantakumar *et al.*, 2019). The results of validation are presented in form of hits, misses, false alarms and correct rejections are presented in Figure 1 and the validation metrics in Table 2.

The results show that the, overall accuracies of all three models are over 90% indicates the higher agreement of simulated pixels both urban and nonurban at correct locations. The overall accuracy of MOLUSCE model is the highest compared to SLEUTH and FUTURES. It is important to note, the use of overall accuracy cannot be interpreted as a direct method of model capability, due to persistence of non-urban area is higher in the study area in comparison to urbanized area (Kantakumar et al., 2019). Therefore, Matthews correlation coefficient (MCC) was used to avoid unbalanced effect of persistence and change. The MCC is higher for SLEUTH (0.26) compared to FUTURES and MOLUSCE. The Producers accuracy of SLEUTH model is comparatively higher than other models which explicit a higher capability of the model to simulate urban pixels at the correct locations. Compared to urban area growth 127.37sq.km during 2008-2019, FUTURES, SLEUTH and MOLUSCE models simulated 148.91, 250.55, 77.10sqkm respectively. Among simulated quantities, SLEUTH model showed over estimation and MOLUSCE model showed an under estimation while FUTURE model simulated closely correct quantity of urban growth. As FUTURES uses sub region wise urban change and population growth to determine per capita land demand which could be the reason for better estimation of urban growth. The over estimation of SLEUTH model simulations might be due to the reason of only excluding water bodies from the development and allowing unrestricted growth at all locations without considering site suitability. The underestimation of urban growth by MOLUSCE model might be the reason for higher accuracy in contrast with other two models.

# 4. Conclusion

Considering easy implementation with limited data requirement, MOLUSCE could be identified as a model with an acceptable accuracy. FUTURES is a robust, easily customizable model with flexibility in incorporation of complex policy scenarios. As SLEUTH model is extensively used for urban growth studies, continuous development of new extensions and usability has widely explored. The aim of the study was to use identical inputs to evaluate the performance of FUTURES, SLEUTH and MOLUSCE models in their simplest status. The present results reveals that keeping the variations of implementation techniques and procedures involved in these models, it is not fair to conclude which model is performed better than other based on the current stage of study. Thus, we are interested to carryout the study further by customizing the models by using the same method for estimating the transition potential modelling.

#### Reference

- Clarke, K.C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area. Environment and Planning B: Planning and Design, vol.24, no.2, pp.247–261.
- Kantakumar, L.N., Kumar, S., & Schneider, K. (2020). What drives urban growth in Pune? A logistic regression and relative importance analysis perspective. Sustainable Cities and Society, vol.60, 102269.
- Kantakumar, L.N., Kumar, S., & Schneider, K. (2019). SUSM: a scenario-based urban growth simulation model using remote sensing data, *European Journal of Remote Sensing*, vol.52, no.S2, pp.26-41.
- Meentemeyer, R., Tang, W., Dorning, M., Vogler, J., Cunniffe, N. & Shoemaker, D. (2013). FUTURES: Multilevel Simulations of Emerging Urban-Rural Landscape Structure Using a Stochastic Patch-Growing Algorithm. *Annals of the Association* of American Geographers, vol.103, no.4, pp.785-807.

# 航空機ハイパースペクトル画像を用いた衛星画像の波長・空間分解能の向上と 金属鉱床域での鉱物マッピングへの応用

久保 勇也\*・グエン ホアン\*\*・小池 克明\*・野田 周帆\*\*\*・淺野 友紀瑛\*\*\*・川上 裕\*\*\*・ 増田 一夫\*\*\*

# Increases in spectral and spatial resolutions of satellite imagery using airborne hyperspectral imagery with an application to mineral mapping in a metal deposit area

Yuya Kubo\*, Hoang Nguyen\*\*, Katsuaki Koike\*, Shuho Noda\*\*\*, Yukie Asano\*\*\*, Yu Kawakami\*\*\* and Kazuo Masuda\*\*\*

- \* 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
- \*\* 総合地球環境学研究所 Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Kamigamo Honzan, Kita-ku, Kyoto 603-8047
- \*\*\* 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, JOGMEC, Toranomon Twin Building, 2-10-1 Toranomon, Minatoku, Tokyo 105-0001

**キーワード**: リモートセンシング, ASTER, HyMap, ハイパースペクトル画像 **Key words:** remote sensing, ASTER, HyMap, hyperspectral image

# 1. はじめに

観測衛星を利用したリモートセンシング解析は,金属鉱 床の存在に関連する熱水変質鉱物を広域から抽出できるた め,資源の一次探査法として広く適用されている.ASTER などのマルチスペクトル画像は全地球をカバーしているも のの,可視域から短波長赤外域にかけてのバンド数が少な く,地表物質の識別精度が低いことに加えて,空間分解能が 30 m 程度という欠点がある.一方,Hyperion などのハイ パースペクトル画像はスペクトル分解能が高く,鉱物の識 別精度は高いが,観測は軌道直下の狭い範囲に限られ,広域 調査には適していない.このような両者の欠点を補完し,マ ルチスペクトル画像のスペクトル分解能の高解像度化を行 う手法として PHITA (Pseudo-Hyperspectral Image Transformation Algorithm)が提唱されている (Hoang and Koike, 2017; 2018).

本研究では、PHITAを拡張し、空間およびスペクトル分 解能の両方のダウンスケーリングを目的として、航空機ハ イパースペクトル画像への適用を行った.

### 2. 研究対象と解析データ

本研究では、オーストラリア・クイーンズランド州北部の 領域を対象に選んだ. 2006~2007年にかけて、次世代鉱物 マッピング (NGMM) プロジェクトの一環として、クイー ンズランド州北部から 25,000 km<sup>2</sup>のデータを収集するため にハイパースペクトル調査が実施された.

このプロジェクトでは、ハイパースペクトルセンサとして HyMap が使用され、幅 15 km で延長の異なる 25 の領域が調査された. ASTER および HyMap の取得範囲を第1 図に示す.2 つの画像が重複している領域から Training

area, Near North area, South area を切り出し, Training area のデータに PHITA を適用し, Near North area, South area を精度検証用に使用した. 解析に用いた ASTER と HyMap の諸元を第1表に示す.

![](_page_19_Figure_16.jpeg)

第1図 対象領域とした Queensland 州 Mount Isa 地区東部.

第1表 解析に用いた光学センサの諸元

	ASTER	НуМар
分解能	15 m, 30 m, 90 m	4.6 m
観測幅	60 km	2.3 km
バンド数	14	125

# 3. 手法

#### 3.1 前処理

USGS 提供の Earth Explorer を利用して取得した ASTER 画像には, DN (digital number) が格納されてい る. DN を放射輝度に変換した後に,大気補正を行い,大気 の影響を取り除いて地表面の反射率データに変換した.次 に幾何補正によって ASTER 画像と HyMap 画像の位置合 わせを行った.また ASTER 画像を HyMap 画像の1ピク セルのサイズ(4.6m)と一致させるため Bilinear 法により, 画像補間を行った.

# 3.2 PHITA

PHITA では、あるバンド*i*で位置*j*のハイパースペクト ル画像の反射率 $\rho_{ij}^{H}(\lambda)$ を、マルチスペクトル画像で*n*バンド 分の反射率 $\rho_{bi}^{M}(\lambda)$ の線形結合として以下のように表す.

$$\rho_{ij}^{H}(\lambda) = \beta_{0i} + \sum_{b=1}^{n} \beta_{bi} \cdot \rho_{bj}^{M}(\lambda) + \sum_{c=j}^{m} \beta_{ci} \cdot INDEX_{cj} + \varepsilon_{ij}$$

ここで*INDEX<sub>cj</sub>*は反射率データの補助情報を意味し, ASTER 画像でよく用いられる以下の 4 つ鉱物指数を選ん だ.

> OHI = (Band7/Band6) \* (Band4/Band6) KLI = (Band4/Band5) \* (Band8/Band6)

> ALI = (Band7/Band5) \* (Band7/Band8)ALI = (Band7/Band5) \* (Band7/Band8)

> CLI = (Band6/Band8) \* (Band9/Band8)

多変量回帰に加え、オーバーフィッティングとモデルの 正確性を評価するために、ベイジアンモデル平均法(BMA) を適用した.

### 4. 解析結果

ASTER 画像に PHITA を適用することによって生成され た擬似的な HyMap 画像と HyMap オリジナル画像の類似 性を評価するために、以下の3つの比較検証を行った.

# 4.1 色調による比較

3 つのバンドを (R, G, B) に割り当てたカラー合成画像 により, 色調を比較した(第2図). これにより類似した色調 が得られたことがわかる。

![](_page_20_Picture_17.jpeg)

ASTER Pseudo HyMap Original HyMap 第2図 カラー合成画像の比較.

#### 4.2 統計指標による比較

2 つの画像の類似度評価に 3 つの統計的指標を適用した. 3 つのエリア(Training area, Near north area, South area) ごとに各指標を計算し, 第2表にまとめた.

各指標は以下の式で定義される. ピアソンの相関係数は2 変量の相関を表す.

$$PCC_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (\rho_{ij}^{H}(\lambda) - \mu_{i}^{H})(\rho_{ij}^{H}(\lambda) - \mu_{i}^{H})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} (\rho_{ij}^{H}(\lambda) - \mu_{i}^{H})^{2}} \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (\rho_{ij}^{H}(\lambda) - \mu_{i}^{H})^{2}}}$$
  
RMSE (二乗平均平方根誤差) は回帰モデルの誤差を評価

t3.

$$\text{RMSE}_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \sqrt{(\rho_{ij}^{\hat{H}}(\lambda) - \rho_{ij}^{H}(\lambda))^{2}}}{n}.$$

**PSNR**(ピーク信号対雑音比)は画像復元の質の指標を表す.

$$PSNR = \frac{\sum_{i=1}^{h} 10 \log_{10}\left(\frac{MAX_i}{MSE_i}\right)}{h}, \quad MSE_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\rho_{ij}^H(\lambda) - \rho_{ij}^H(\lambda))^2$$

第2表 擬似的 HyMap 画像とオリジナル HyMap 画像の類似度.

Area	PCC	RMSE	PSNR
Training	0.67	0.0413	19.96
Near North	0.71	0.0408	19.68
South	0.61	0.0442	19.45

#### 4.3 Spectral reconstruction

反射率スペクトルが再現されているかを確認するかため に、2×2=4ピクセルを抽出し、スペクトルを平均した結果 を第3図に示す.ピクセルは植生部分を選択した.これから 高い再現性が確かめられる.

![](_page_20_Figure_31.jpeg)

第3図 2×2=4 ピクセル上での Original HyMap と Pseudo HyMap の反射率スペクトルの比較 (South area での例).

#### 5.考察とまとめ

第3図よりスペクトルの形状や特徴的な吸収帯は再現で きているといえる.よって、スペクトル分解能は概ね向上し たと評価できる.しかし、第2表のPCCとPSNRの数値 によると、擬似的なHyMap 画像は元のHyMap 画像を十分 に再現しているとはいえない.これはASTERとHyMapの 空間分解能が大きく異なることに起因する.よって、単にマ ルチスペクトル画像を補間し、PHITAを適用するのみでは、 高解像度なHyMap 画像の特性を反映することができない. 空間分解能を向上させる手法をPHITAと同時に用いるこ とが不可欠になり、現在その手法開発に取り組んでいると ことである.

# 文 献

- Hoang, N. T. and Koike, K. (2017) Transformation of Landsat imagery into pseudo-hyperspectral imagery by a multiple regression-based model with application to metal deposit-related minerals mapping. *ISPRS J. Photogram. Rem. Sens.* vol. 133, pp. 157-173.
- Hoang, N. T. and Koike, K. (2018) Comparison of hyperspectral transformation accuracies of multispectral Landsat TM, ETM+, OLI and EO-1 ALI images for detecting minerals in a geothermal prospect area. *ISPRS J. Photogram. Rem. Sens.* vol. 137, pp. 15-28.

# Land Use/Land Cover Classification using Light Convolution Neural Network: a Case Study in Lao Cai, Vietnam

Hang T. DO\*, Venkatesh RAGHAVAN\*\* and Go YONEZAWA\*\*\*

\*Graduate School for Creative Cities, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan \*\*. \*\*\* Graduate School of Engineering, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan

Email: \*dohanghumg@gmail.com, \*\* raghavan@osaka-cu.jp , \*\*\* yonezawa@osaka-cu.jp

Key words: LULC, LCNN, Remote sensing, RapidEye, Object-based

# 1. Introduction

Convolution Neural Network (CNN) is currently the state of the art for many remote sensing image classification tasks. By learning with multiple hidden layers, CNN models have shown outstanding accuracy in various applications (Masi et al., 2017, Rezaee et al., 2018). Traditional CNN models which include numerous convolutional layers are very time-consuming and require a huge training data and computational resources. In comparison, Light CNN (LCNN) with only few convolutional layers can achieve high accuracy in a short processing time by using a small number of training samples (Song et al., 2019). In this study, pixel-based and object-based LCNN is applied to establish Land Use/ Land Cover (LULC) map of Lao Cai area in Vietnam.

# 2. Methodology

# 2.1. Data and study area

The study area, a part of Lao Cai province, located in the North of Vietnam covers an area of approximately 525 km<sup>2</sup>. The study area is the settlement area for ethnic minorities. The main LULC classes are water, built-up, mining/bare land, rice terrace, paddy field, non-forest vegetation and forest.

RapidEye's sensors produce imagery in five spectral bands at 5m resolution. In this study, 5 bands of RapidEye image acquired on 9<sup>th</sup> September 2014 covering the study area are used for LULC extraction. Reference polygon samples of the 7 LULC classes were collected based on visual interpretation of RapidEye image with verification using Google Map (Figure 1). The reference samples cover 82.29 km<sup>2</sup>, which equals 14.9% study area.

### 2.2. Methodology

In CNN model, convolutional layer is the first layer to extract feature maps from an input image. In convolution, the filter moves through the entire input image with the moving step decided by setting stride hyperparameter. If the stride is 1, the filter is moved to 1 pixel at a time. Sometimes the filter does not perfectly fit the input image size. Zero-padding is to pad the input image with zeros so that the filter will fit the image.

Pooling layers are used to progressively reduce the number of parameters when the images are too large. In fully connected layer, the feature maps extracted from previous layer are flattened into one-dimensional vector and fed to a fully connected network. While the convolutional layers learn the spatial features, the fully connected layers learn the classification rule to extract feature vectors by using an activation function. The output of full connected layer is determined by using an activation function.

#### 2.2.1. PBIA and OBIA convolutional layer

Basically, in first convolutional layer, large filter sizes could obtain better classification result than smaller filter sizes considering the relation of a number of neighbor pixels of input image. In this case, it is considered as patch-based approach, or OBIA. However, when large filter sizes are used, such as 5×5 and 7×7, the number of parameters and computation cost increase drastically. To resolve the problem, a 1×1 filter which generates only a single parameter or weight for each channel of the input image, and small filter size 3x3 were employed (Lin, et al., 2013). The 1×1 filter does not involve any neighbor pixels in the input but works with the individual pixel itself. In this case, the convolutional layer could be considered as PBIA However, the layer needed to be combined a nonlinearity with other convolutional layers, allowing the projection to perform non-trivial computation on the input feature maps. In this study, CNN model with PBIA convolutional layer is considered as PBIA-CNN, while the model with OBIA convolutional layer is named OBIA-CNN.

![](_page_21_Figure_18.jpeg)

Fig 1. Reference map of this study

# 2.2.2. LCNN and OBIA-LCNN

In CNN model, when the number of network layers increase, the information in the neurons of the network is continuously combined. Eventually, the network extracts deep concepts and expresses abstract semantic features (Song et al., 2019). However, a deep network can lead to time-consuming and overfitting. To ignore these drawbacks, LCNN is applied for LULC classification in this study. The workflow of PBIA-LCNN and OBIA-LCNN are displayed in Figure 2. The two models have 3 convolutional layers. The first convolutional layer of PBIA-LCNN filters the 3D input with 20 filters of size 1×1×5. In case of OBIA-LCNN, the first convolutional layer includes 20 filters of size 3×3×5. The second and third convolutional layers of PBIA-LCNN and OBIA-LCNN have 20 filters of size 2×2×20. Zero padding and stride equals 1 are employed. The last Softmax layer which provides a probability distribution over 7 LULC classes. Fully connected layers and pooling layers are not employed. Instead, ReLU activation function and Adam optimizer with a learning rate of  $10^{-5}$  are used. The number of epochs equals to 100 and early stopping technique is applied, the training processing stops when the different between two consecutive loss (r) is lower or equals to 10<sup>-6</sup>. Google Colaboratory framework is selected to implement the models in this study.

![](_page_22_Figure_2.jpeg)

Fig 2. Architecture of (a) PBIA-LCNN, (b) OBIA-LCNN

Table 1: Classification accuracy (MB: Mining/bareland, NF: Non-forest vegetation)

	Accuracy (%)						
LULC class	PBIA			OBIA			
	PA	UA	OA	PA	UA	OA	
Water	97	96	96	98	96	97	
Built-up	94	91	92	94	92	93	
MB	90	88	89	90	91	91	
Paddy field	83	88	88	85	90	87	
Rice terrace	95	94	95	97	94	95	
NF	90	88	89	89	91	90	
Forest	96	97	97	98	96	97	
OA		94			94		

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

#### References

- Lin, Min, Chen, Qiang, and Yan, S. (2013) Network in network. arXiv preprint arXiv:1312.4400.
- Masi, G., Cozzolino, D., Verdoliva, L. and Scarpa, G. (2017) CNN-based pansharpening of multi-resolution remotesensing images, 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), pp. 1-4.

Figure 3 shows the result LULC maps of PBIA-LCNN and OBIA-LCNN using RapidEye image. Table 4.1 gives producer's, user's and overall accuracy of the classification.

In PBIA, all LULC maps extracted from RapidEye image produce high overall accuracies (Table 1). Among them, water, rice terrace and forest achieve excellent accuracies, at 96%, 95% and 97%, respectively. Mining/bare land, built-up, paddy field and non-forest vegetation attain lower accuracies, at 89%, 92%, 88% and 89%, correspondingly. The difference between producer's accuracies and user's accuracies of all classes are small, less than or equal to 5%. Overall accuracy of the classification is 94%.

Classification accuracies of all LULC classes in OBIA are more than 87%. Similar to the PBIA, water, rice terrace and forest are the most accurate classes, at 97%, 95%, 97%, respectively, followed by mining/bare land, built-up, paddy field and non-forest vegetation, at 91%, 93%, 87% and 90%, respectively. In general, the difference between producer's and user's accuracies of individual LULC classes are small, no more than 5%. Overall classification accuracy is equal to PBIA, at 94%.

The result shows that both PBIA-LCNN and OBIA-LCNN are effective classification techniques for LULC mapping. Moreover, the LCNN models have capability of handling large RS datasets to aid in monitoring LULC change on a local as well as regional scale using RS images.

![](_page_22_Figure_15.jpeg)

- Rezaee, M., Mahdianpari, M., Zhang, Y. and Salehi, B. (2018) Deep convolutional neural network for complex wetland classification using optical remote sensing imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations* and Remote Sensing, vol. 11, no. 9, pp. 3030-3039.
- 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.

# Development of Geo-IoT Platform for Water Quality Monitoring

Niroshan BANDARA\*, Mitsunori UEDA\* and Venkatesh RAGHAVAN\*\*

\*Graduate School for Creative Cities, Osaka City University,

3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: niroshansnj@gmail.com

\*\*Graduate School of Engineering, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku,

Osaka 558-5858, Japan.

Key words: Water Quality, Mobile Data Collection, Open Data Kit (ODK), IoT

# 1. Introduction

Water Quality Monitoring (WQM) is identified as a major discipline in the field of environmental monitoring. Numerous challenges in WQM have identified in recent scientific literature (Kamaruidzaman et al., 2019). Conventional methods for WQM are time consuming and expensive task (Chen et al., 2020). Proliferation of mobile phones and development of the Internet of Things (IoT) have increased ubiquity of data collection by integrating sensors and smartphones. Major development from this study is to develop a platform by integrating mobile phones and sensors which can measure the chemical parameters of water. The quality of water bodies such as rivers, ponds, and lakes can be evaluated by monitoring parameters such as pH, temperature, and Electrical Conductivity (EC), which are the most commonly used indicators to monitor water quality. These parameters are recoded along with the location information. The system consists of spatial data acquisition, analysis and sharing and by following OGC standards which enables spatial data proliferation.

# 2. Method and System Components

Open Data Kit (ODK, https://opendatakit.org/) that provides tools to facilitate collection and transmission of georeferenced data to a centralized server is used for data collection and aggregation. ODK consists of three modules; namely ODK Build, ODK Collect and ODK Aggregate. ODK collect is capable of recording GPS location, text, multi-media content such as image, video, audio and barcodes. External sensor recordings are inserted to ODK Collect using Sensor app (https://github.com/niroshansb/sensors\_app) which is an Android mobile application developed by this study.

The system consists with sensor device which includes microcontroller, sensor signal converter modules and Bluetooth module. Components and the connectivity of devices are illustrated in Figure 1. Conventional glass electrode sensor has been used to measure pH (Stock Keeping Unit (SKU): SEN0161 from dfrobot.com). The pH sensor is capable of measuring values from 0 to 14 with  $\pm 0.1$  (25 °C) accuracy. The DS18B20 temperature sensor (SKU:DFR0198 from dfrobot.com) which provides 9 to 12-bit temperature readings with  $\pm 0.5^{\circ}$ C accuracy for  $-55 \sim 125^{\circ}$ C ranges over a 1-Wire communication bus is selected to measure the temperature. EC is measured using analog electrical conductivity meter (SKU:DFR0300 from dfrobot.com). EC k=1 sensor is selected due to its suitability in water culture, aquaculture for inland water bodies with the detection range of 0 to 2,000mS/m along with ±5% accuracy (DFRobot EC Sensor wiki, 2020). Recommended detection range for EC sensor is 100~1500 mS/m.

![](_page_23_Figure_14.jpeg)

Figure 1: Schematic diagram of system components

Obtained sensor measurement values of physiochemical parameters of water and were first transferred via Bluetooth from sensor device to the mobile phone. Transferred data were inserted into the fields in ODK Collect form. The data is achieved in ODK Aggregate using the PostgreSQL database backend. A Web-GIS client was implemented for visualization of field data with the integration of GeoServer and OpenLayers JavaScript library. Furthermore, the collected data is published using OGC WFS standard. The workflow of the developed system is elaborated in Figure 2.

![](_page_23_Figure_17.jpeg)

![](_page_23_Figure_18.jpeg)

#### **3**. Performance and Accuracy Assessment

Laboratory experiment was carried out to evaluate system performance and accuracy as shown in Figure 3. Ten water samples were collected randomly from ponds and Yamato river near Osaka City University. The sensors are calibrated as per the instructions given by the manufacturer. Values were recorded using ODK Collect app. Completed ODK Collect forms were uploaded to the server. Furthermore, same samples were measured using Horiba-D-74 water quality instrument. The measurements show high coefficient of determination ( $R^2$ ) for both pH (0.99) and EC (0.89). The experiment reveals the suitability of the system for field data collection.

![](_page_24_Picture_2.jpeg)

Figure 3: Experiment setups in the laboratory

#### 4. Data Collection and Results

The system is deployed to measure physiochemical parameters of water in different locations along the Yamato river, as a field experiment. Total 20 samples were measured on the site from both the developed system and Horiba-D-74.

Locations and data collection method is shown in Figure 4. Samples were collected in a standard method for water sample collection. The correlation between pH, EC and temperature values obtained from Horiba-D-74 and developed system is illustrated in Figure 5. pH values are varying from 7 to 9 while EC has a significant variation. The temperature show consistent values for all 20 samples. Considerable changes and low  $R^2$  (0.55) is noticed while measuring the EC with DFRobot sensor due to degradation of probe. Therefore, the EC sensor probe was replaced with Atlas Scientific EC (ENV-40-EC-K1.0 from atlas-scientific.com) which has ±2% accuracy for 0.5 to 20,000 mS/m measuring range and data were collected again from the same experiment sites. Data from Atlas EC probe consistent measurement and high R<sup>2</sup> (0.92) compared to Horiba-D-74.

![](_page_24_Figure_7.jpeg)

Figure 4: (a) Sample collections and measuring method (b) Data collection points displayed on Web interface-GIS Client

![](_page_24_Figure_9.jpeg)

Figure 5: (a) pH values, (b) Electric conductivity in mS/m, (c) Temperature in Celsius

### 5. Conclusion

This study was conducted to identify the user experience and limitations of the developed system when using for field data collection. Developed system has several advantages such as capability of visualizing readings on the interactive web interface based on different locations near real-time. It enables monitor and identify the changes from remote locations to the field. Moreover, sensors can be replaced or added easily to the system. Additionally, data can be recorded and sent on site. Similarly, data can be recorded offline as well. In such situation, data can be transmitted when the internet is available. More importantly, this system has the capability of changing and adding parameters in data collection from both human observation and external sensor input data simultaneously.

# 6. Future Development

This system allows the fast and automated data aggregation, sharing and visualization. Study identified that in-situ water quality monitoring is not adequate to investigate water quality changes. Therefore, the capability of the system will be extended by adding continuous water quality measuring devices. The data will be recorded in the same system from both in-situ and continuous monitoring.

### Reference

- Bandara, N., Raghavan, V., Yoshida, D. (2016) Development of Field Data Monitoring and Evaluation Platform using Customizable Mobile Application and Web-Mapping Tool, Geoinformatics., vol.27, no.2, pp.114-115.
- Chen F. L., Yang B. C., Peng S. Y., Lin T. C., (2020) Applying a deployment strategy and data analysis model for water quality continuous monitoring and management, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol.16, no.6.
- Kamaruidzaman N. S., Rahmat S. N., (2020) Water Monitoring System Embedded with Internet of Things (IoT) Device: A Review, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, vol.498, pp.12068-12074.

第31回日本情報地質学会講演会

# 講演要旨集

2020年10月15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