

キュリー点深度推定における 区分線形関数を用いたノイズ除去アルゴリズムの実装

上田 大輝*・根本 達也*・ベンカテッシュ ラガワン*

Implementation of Denoising Algorithm for Curie Point Depth Estimation Using Piecewise Linear Function

Daiki UEDA*, Tatsuya NEMOTO* and Venkatesh RAGHAVAN*

* 大阪公立大学大学院理学研究科地球学専攻 Department of Geosciences, Graduate School of Science,
Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
E-mail: sy23073o@st.omu.ac.jp

キーワード：地熱資源，キュリー点深度，区分線形関数，スペクトル解析

Key words: Geothermal resource, Curie Point Depth, Piecewise Linear Function,
Spectral Analysis

1. はじめに

近年，カーボンニュートラルの実現のために，地熱エネルギーは有望な資源として注目されている。しかし，地熱は目に見えない地下資源であり，複数の掘削調査が必要となるため，時間を要し，開発コストおよびリスクが高いという現状がある。これらの問題を解決するためには，物理探査等のデータ処理や解析技術の向上が不可欠であり，これらは地熱有望地の特定，地下深部の温度分布の解明及び開発コスト低減に貢献できる。

地熱探査では，磁気異常データを解析してキュリー点深度に相当する深度をもとめるキュリー点深度解析法がある。岩石は一般に磁性を有しており，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。キュリー点深度は最も一般的な強磁性体鉱物である磁鉄鉱のキュリー点（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 の深度を求めることができる。

Mather and Fulla (2019) はキュリー点深度推定プログラム「PyCurious」を用いて推定を行った。しかし，このプログラムは実測値を扱う際のノイズを考慮しておらず，適切に推定できない。そこで，本研究では区分線形関数を用いたノイズ除去アルゴリズムを実装した。

2. キュリー点深度解析法の概要

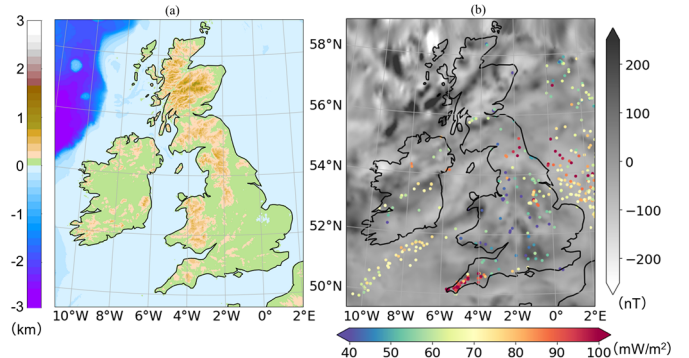
磁性体の深度は，磁気異常のスペクトル解析から推定される。Bouligand *et al.* (2009) は動径方向のパワースペクトルの対数の平均 RAPS (Radially Averaged Power Spectrum) を次の式 (1) で表される磁性体の統計モデルを提案しており，PyCurious に実装されている。

$$\Phi(k) = C - 2kz_t - (\beta - 1) \ln(k) + [-k\Delta z + \ln(\frac{\sqrt{\pi}}{\beta} (\frac{\cosh(k\Delta z)}{2} \Gamma(\frac{1+\beta}{2}) - K_{\frac{1+\beta}{2}}(k\Delta z) (\frac{k\Delta z}{2})^{\frac{1+\beta}{2}}))] \Gamma(1 + \frac{\beta}{2}) \quad (1)$$

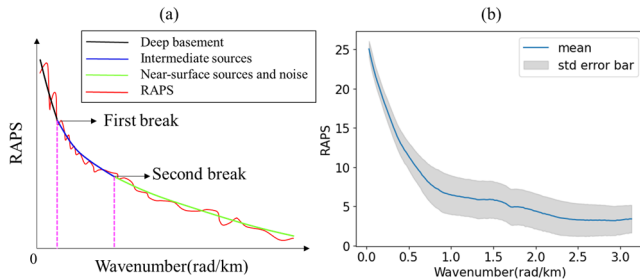
ここで， k は波数， $\Phi(k)$ は磁気異常のパワースペクトル， B は磁化のフラクタルパラメータ， z_t は磁性体の上面深度， Δz は磁性体の厚さ， C は磁場定数である。式 (1) は独立変数 k とその関連した従属変数 $\Phi(k)$ を結びつけている。また，このモデルは 4 つのパラメータ ($B, z_t, \Delta z, C$) において非線形であるが，その他の点では任意である。キュリー点深度は最適化アルゴリズムを適用して，計算値とモデルの残差の二乗和が最小となる ($B, z_t, \Delta z, C$) を推定したのち， $z_t + \Delta z$ で求められる。

3. 対象地域と解析データ

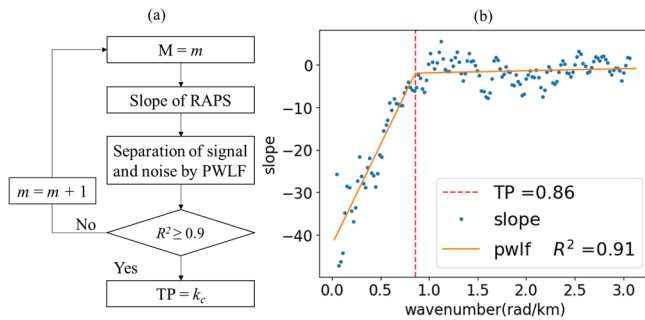
本研究では，ブリテン諸島を含む (10.8°W, 49.5°N) - (2°E, 59°N) の領域を対象に選んだ。この地域は Mather and Fulla (2019) と同じ調査地域である。使用データは NOAA が公開している地球磁気異常グリッド EMAG2v3 の Upward Continued, 標高グリッドとして ETOPO2022 の 60 秒角 bedrock, また，IHFC が公開している地表の熱流量データである (第 1 図)。ブリテン諸島を覆うように 20 km 間隔で計 3233 個の格子点を作成し，各格子点を中心にスペクトル解析を行った。ウィンドウサイズは 300 × 300 km²，データ間隔は 1 km とした。



第 1 図 対象地域の (a) 標高データ。 (b) 磁気異常と熱流量。



第2図 RAPSの(a)概略図と(b)対象地域の統計結果。



第3図 ノイズ除去アルゴリズム (a) フローチャート (b) 区分線形関数による回帰分析の例。

4. ノイズ除去アルゴリズム

4.1 実測値を扱う際のノイズ

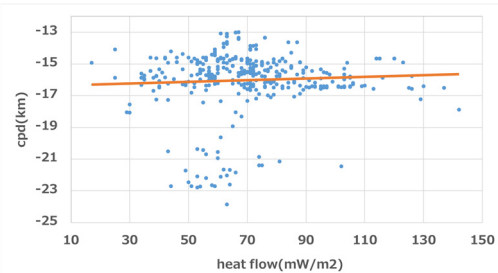
Bouligand *et al.* (2009) のモデルの特徴はウィンドウサイズとデータ間隔によって決定される波数範囲の全てのデータを使用してパラメータが推定されることである。しかし、実測値を扱う際、統計モデルにおいてすべてのデータが望ましい値であるとは限らない。RAPSは第2図(a)のように3つに区分することができ、モデルに不適切な地表付近のデータやスペクトル解析処理によるノイズが高波数域に存在する。また、ノイズは平均スペクトルが一定のホワイトノイズであらわされるため、変化が小さいという特徴がある(Zeng *et al.*, 2020)。実際にブリテン諸島の全地点でのRAPSに対する各波数ごとの統計結果も同じく、高波数域で変化が小さい特徴がみられた(第2図(b))。また、最適化アルゴリズムを適用し、推定した結果、上面深度 z_c がブリテン諸島全域で負の値を示した。上面深度はRAPSの高波数域に強く影響されるため(Bouligand *et al.*, 2009)、高波数域のノイズが強く影響していると考えられる。本研究ではこれらのノイズを除去する低域フィルタ処理を行った。

4.2 区分線形関数を用いた低域フィルタ処理

RAPSに低域フィルタ処理を行うため、しきい値を決定する必要がある。第2図(a)のSecond breakをしきい値として決定することが望ましいが、磁性体モデルとノイズが混在しており、明確な区分をすることが難しい。そこで本研究ではRAPSの傾きに注目し、区分線形関数を用いたしきい値 k_c を決定する反復アルゴリズムを作成した(第3図(a))。このアルゴリズムは m 回目に、RAPSを1点ずつずらしながら $2m+1$ 点の区間で分割し、各区間の回帰直線の傾きを求める。次に、傾きに対して2つの線分で構成される区分線形関数による回帰分析を行う(第3図(b))。区分線形回帰における決定係数が0.9以上の条件を満たしたとき、区分線形関数の線分の転換点をしきい値として決定し、低域フィルタ処理を行う。ノイズ除去後のRAPSに最適化アルゴリズムを適用し、最良なパラメータ ($\beta, z_b, \Delta z, C$) を推定した。

第1表 従来のプログラムと本研究の上面深度 z_c (km)の統計結果

	Traditional Program	This study
count	3233	3233
mean	-1.01	4.22
max	0.05	8.15
min	-1.98	0.78
std	0.40	0.95



第4図 熱流量 (mW/m²) とキュリー点深度 (km) の相関図。

5. 結果

5.1 磁性体の上面深度 z_t

実装したアルゴリズムを適用したところ、磁性体の上面深度がブリテン諸島全域で正の値を示した。また、本研究結果は従来のプログラム結果よりも上面深度のばらつきが大きい。これは従来のプログラムでは、ノイズが最適化アルゴリズムの適用に対して影響を与えているためと考えられる。

5.2 熱流量とキュリー点深度の比較

キュリー点深度 Z_b は次の式を用いて熱流量 q と関連付けることができる (Hsieh *et al.*, 2014)。

$$q = \lambda(dT/dZ) = \lambda(580^\circ\text{C}/Z_b) \quad (2)$$

ここで、 λ は熱伝導率、 dT/dZ は温度勾配である。本研究で推定した地表を基準とするキュリー点深度と地表の熱流量との相関係数は0.011であった。

6. おわりに

本研究では、区分線形関数を用いてキュリー点深度推定におけるノイズ除去アルゴリズムを実装し、推定を行った。その結果、上面深度の結果が改善された。しかし、熱流量との相関がみられなかった。今後、統計モデルを適用する際、より実用的なRAPSの波数範囲の制約条件が求められると考える。

文 献

- Bouligand C., Glen J.M.G., and Blakely R.J. (2009) Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization. *Journal of Geophysical Research*, 114, 1-25.
- Hsieh H.H., Chen C.H., and Yen H.Y. (2014) Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in Taiwan. *Journal of Asian Earth Science*, 90, 26-33.
- Mather B. and Fullea J. (2019) Constraining the geotherm beneath the British Isles from bayesian inversion of curie depth: integrated modeling of magnetic, geothermal, and seismic data. *Solid Earth*, 10, 839-850.
- Zeng X., Li X., Liu J., and Niu C. (2020) Simultaneous potential field data interpolation, border padding, and denoising via projection onto convex sets algorithm. *Journal of Applied Geophysics*, 175, 103983, 1-10.