

ニュージーランド北島における長周期MT観測の概要 — 位相テンソル解析および一次元比抵抗構造解析 —

Overview of Long-period Magnetotelluric Surveys in the North Island of New Zealand - Phase Tensor Analysis and One-dimensional Resistivity Structure Analysis -

畑 真紀・Grant CALDWELL⁽¹⁾・上嶋 誠⁽²⁾・Alex CALDWELL⁽¹⁾・小川 康雄⁽³⁾・
Ted BERTRAND⁽¹⁾・Stewart BENNIE⁽¹⁾・Wiebke HEISE⁽¹⁾・吉村 令慧

Maki HATA, Grant CALDWELL⁽¹⁾, Makoto UYESHIMA⁽²⁾, Alex CALDWELL⁽¹⁾, Yasuo OGAWA⁽³⁾,
Ted BERTRAND⁽¹⁾, Stewart BENNIE⁽¹⁾, Wiebke HEISE⁽¹⁾ and Ryohei YOSHIMURA

(1) ニュージーランド地球科学研究所

(2) 東京大学地震研究所

(3) 東京科学大学総合研究院

(1) Earth Sciences New Zealand, New Zealand

(2) Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan

(3) Institute of Integrated Research, Institute of Science Tokyo, Japan

Synopsis

In subduction zones, the movement and distribution of fluids brought into the Earth's interior by the subducting plate influence igneous/volcanic activity and seismic events. When these fluids reach specific temperature and pressure conditions in the mantle, the subducting plates (slabs) release them through a dehydration reaction. The additional fluids in the mantle lead to partial melting, resulting in the formation of magma sources for island arc volcanoes. Consequently, a volcanic chain or belt forms along the depth contour lines of the subducting plate. However, some volcanic chains in island arcs do not extend continuously. The reasons behind the discontinuity of volcanic chains within a single island arc are not entirely understood. This study aims to investigate and compare subsurface heterogeneity in different island arcs using electromagnetic methods, which will help to clarify the mechanisms behind island arc volcano formation.

キーワード: マグマ供給系, 島弧火山, 火山・非火山地域の変遷域, 長周期MT観測

Keywords: Magma and fluid systems, Island arc volcanoes, Transition areas between the volcanic and non-volcanic regions, Long-period MT surveys

1. はじめに

沈み込み帯では, 沈み込むプレート (スラブ) とともに地球内部に流体が持ち込まれる. 持ち込まれた流体の分布や移動は, 沈み込み帯での火成・火山活動や地震活動において重要な役割を担う. スラブに

含まれる流体は, 一定の温度-圧力状態に達すると脱水反応によりスラブから放出され, マントルに付加すると部分溶融を引き起こし, 島弧火山のマグマの素をつくるとされる. そのため概ね, 沈み込むプレート等深度線上に火山列 (火山フロント) が形成される. 一方で, 島弧の火山列上には, 九州やニュージ

ーランド北島で見られるように100km程度に亘って活動的火山（第四紀の火山）の存在しない非火山地域が存在する。

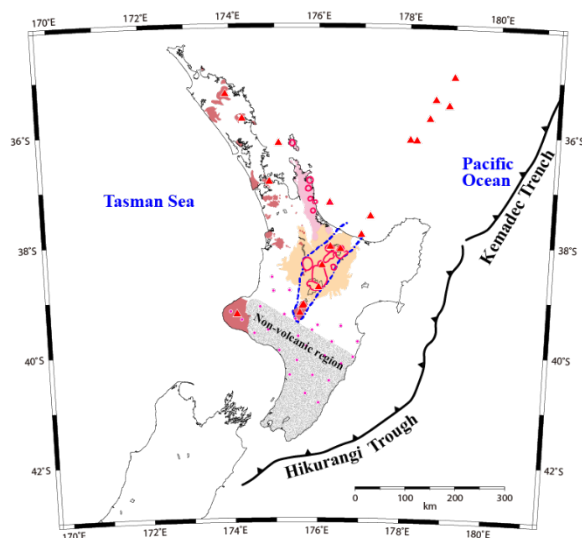


Fig. 1 Location of long-period MT sites, shown in pink dots, and representative geographic features in the North Island. Red triangles and magenta outlines indicate active Quaternary volcanoes and caldera rims, respectively. Orange area shows the distribution of pyroclastic flow deposits of ignimbrite and rhyolite, and brown area shows pyroclastic flow deposits of basalt and andesite. Blue broken line represents the edges of the Taupo volcanic zone (e.g., Briggs et al., 2005; Williams et al., 2013). Grey area represents a non-volcanic region.

我々は、火山地域と非火山地域を有する九州地域において、地下の不均質構造の相違点を電磁気学的な観点から研究してきた（e.g., Hata et al., 2015; 2018; 2020）。そして、火山地域の地下（地殻およびマントル）には、電気比抵抗値が低く電気が流れやすい状態の領域が存在しており、非火山地域に比べて流体（マグマ）に富んだ領域が存在することを明らかにした。このように、沈み込み帯に形成された島弧列島である日本では、地球内部に持ち込まれた流体によって火成・火山活動が活発になる領域が存在する。一方、島弧には火成・火山活動の不活性な領域（非火山地域）も共存する。しかしながら、大局的には同一の地勢状況（沈み込み帯というテクトニクス場）にある一つの島弧（例えば、九州やニュージーランド

北島）に火山地域と非火山地域が形成される明確な要因は解明されていない。従って、沈み込み帯での火山形成メカニズムの解明を目指すならば、火山地域のみならず非火山地域をも含めた沈み込み帯の大局的な地下構造を捉えることが必要不可欠だと考えられる。

そこで我々は、地下の不均質構造の相違点を異なる島弧で抽出して比較・議論することを目指し、日本の九州と似た火山性構造物を有するニュージーランド北島の火山地域と非火山地域を覆う領域において、電磁探査法の一つであるmagnetotelluric法（MT法）観測を実施した（Fig. 1）。

2. 長周期MT法観測の概要

観測は、ヒクランギ沈み込み帯に位置するニュージーランド北島のタウポ火山帯南端部と非火山地域を覆う300 km × 150 km四方の領域（Fig. 1）において、自然電磁場を利用したMT法のうちマントルの深度に至るような大規模な構造解析に有利な長周期MT法を用いて行った。MT観測装置には、長期観測に適したウクライナ製LEMI-417Mシステムを採用し、電場測定のための電極には、鉛-塩化鉛電極を使用した。そして、2023年7月から2024年1月の期間に設定した4サイクルの機動観測キャンペーンにより、対象領域内に適正配置した28サイトで良質な1秒サンプリングの磁場3成分および電場2成分データを取得した。観測点の情報は、Table 1 に記した。

3. 時系列処理および解析

MT法によって取得した電磁場データは、一般的に、時系列データ解析を行い地下の電気比抵抗情報を示すMT応答関数（インピーダンス4成分とティッパ-2成分）へと変換される。本研究の時系列解析では、BIRRPコード（Chave & Thomson, 2003; 2004）を利用してリモートリファレンス処理（Gamble et al., 1979）を適用した。そして、5~245,760秒までの32周期についてMT応答関数を精度よく求めた。

続いて、三次元比抵抗構造解析によって詳細な地下構造を求めるには多分の時間を要することから、予察的な解析として地下の空間分布を把握するために、位相テンソル解析（Caldwell et al., 2004）および一次元比抵抗構造解析（e.g., Constable et al., 1987）を実施した。Fig. 2 には、MT応答関数から導出した各サイトのフェーズテンソルを3つの代表的な周期について示した。どの周期のフェーズテンソルも扁平度が高く二次元または三次元的な影響を受けていることが分かる。また、浅部の比抵抗構造の指標とな

る短周期側のフェーズテンソルは、タウポ火山帯南端部と前弧側の沿岸地域とで楕円の長軸方向が変化することから、構造境界があることを示唆している。この沿岸地域の構造境界は、当該地域で発生するスロースリップ地震（SSE）の分布に関連している可能性がある（e.g., Wallace, 2020）。

Fig. 3 には、ガルバニック・ディストーションの影響を軽減するためにMT応答関数の回転不変量（SSQ インピーダンス；e.g., Rung-Arunwan et al., 2016）を用いて求めた各サイトの一次元比抵抗構造を面的にプロットした結果を示した。タウポ火山帯

南端部と非火山地域の比抵抗値には、明らかな差異が認められる。また、非火山地域下のマントルウェッジに、顕著な高抵抗異常が分布することが確認できる。この地域では、プレート間の固着が強い領域が深部まで存在することが報告されており（e.g., Bassett et al., 2022），流体分布が希薄であることが示唆される。さらに、タウポ火山帯の火山群からは孤立して非火山地域の背弧側に形成されているタラナキ火山の地殻は、周辺地域に比べて低比抵抗領域として表現されており、その要因としてマグマ供給系の存在が考えられる。

Table 1 The description sheet of the long-period MT. (Note: The surveys adopt magnetic north.)

Site ID	Serial ID of LEMI	Dipole length (m)		Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Recording Period (yyyy/mm/dd)
		N-S	E-W				
N01	B39	70	65	S40.07185	E176.81709	257	2023/11/30 - 2024/01/23
N02	C79	70	70	S39.78898	E176.92721	314	2023/11/30 - 2024/01/24
N03	C27	70	70	S39.79779	E176.31501	55	2023/11/29 - 2024/01/23
N04	C32	70	70	S39.50949	E176.52247	29	2023/10/13 - 2023/12/06
N05	B31	56	70	S39.58401	E175.85088	493	2023/08/28 - 2023/10/12
N06	B31	70	70	S39.49464	E175.97975	873	2023/12/01 - 2024/01/24
N07	C31	65	57	S39.38220	E175.46219	77	2023/07/16 - 2023/08/28
N08	B31	50	50	S39.01932	E175.77699	612	2023/10/13 - 2023/11/28
N09	C28	70	70	S39.30305	E175.20295	24	2023/07/15 - 2023/08/29
N10	C33	70	70	S38.86643	E175.32352	25	2023/08/30 - 2023/10/11
N11	C33	70	70	S38.87386	E174.95014	17	2023/07/14 - 2023/08/29
N12	C79	70	70	S38.62391	E174.91608	63	2023/07/13 - 2023/08/30
C01	C28	63	70	S40.49840	E176.25122	13	2023/12/02 - 2024/01/25
C02	B32	70	70	S40.19308	E176.54184	94	2023/11/30 - 2024/01/25
C03	B39	65	70	S40.40181	E175.86449	90	2023/10/09 - 2023/10/31
C04	B32	70	70	S39.87623	E175.71678	190	2023/10/12 - 2023/11/27
C05	C31	65	70	S40.13313	E175.49429	10	2023/09/02 - 2023/10/09
C06	C28	70	52	S39.69716	E175.52471	32	2023/10/12 - 2023/11/27
C07	C27	65	66	S39.95307	E175.07926	5	2023/09/02 - 2023/10/09
C08	C79	29	65	S39.57895	E174.82017	236	2023/10/10 - 2023/11/23
C09	C79	70	70	S39.63536	E174.50079	223	2023/09/01 - 2023/09/09
C10	C28	71	70	S39.15686	E174.63928	20	2023/08/31 - 2023/10/11
C11	B32	66	70	S39.39146	E174.21046	322	2023/09/01 - 2023/10/10
C12	C32	60	70	S39.24314	E173.95098	33	2023/08/31 - 2023/10/11
C13	C33	65	65	S40.04999	E176.14850	46	2023/12/02 - 2023/12/14
S01	C31	60	70	S40.90042	E176.00430	10	2023/12/03 - 2024/01/25
S02	C33	70	70	S40.73426	E175.68823	24	2023/10/15 - 2023/12/01
S03	C31	70	70	S40.39783	E175.32280	0	2023/10/09 - 2023/10/15
Ref	C35	-	-	S38.68169	E176.39312	62	2023/07/11 - 2024/01/31

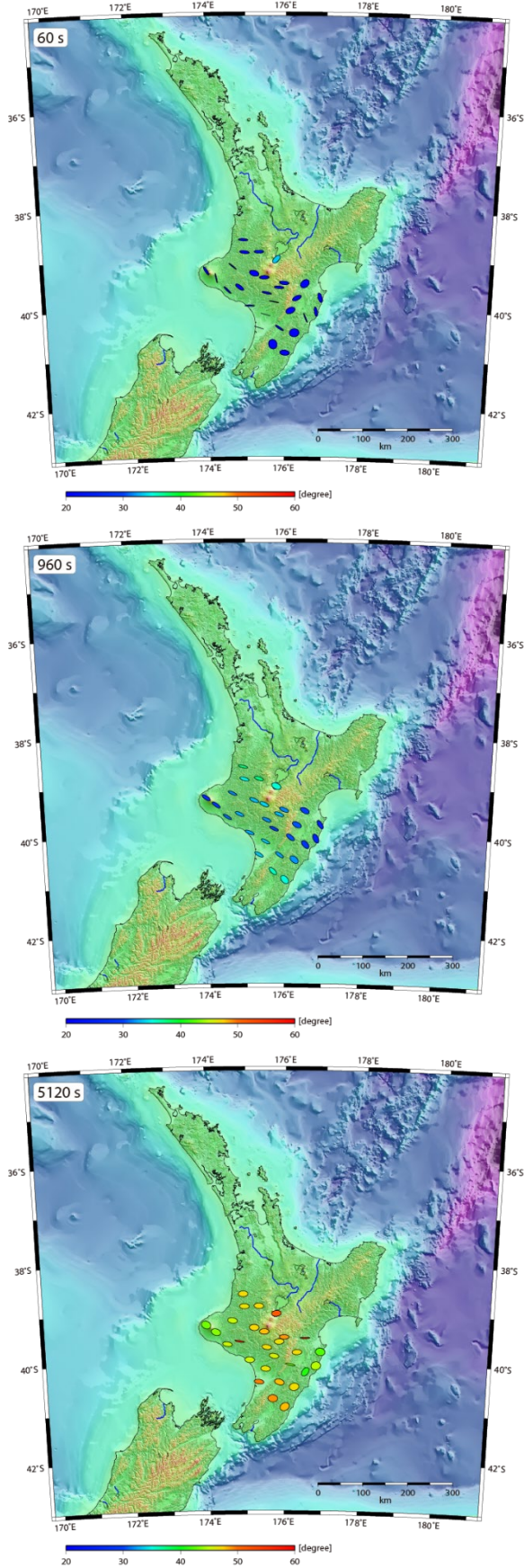


Fig. 2 Phase tensor derived from three periods (60, 960, and 5120 seconds) of the MT

response function (Caldwell et al., 2004). The color of the phase tensor is the geometric mean of the major and minor axes (Φ_{max} and Φ_{min}) and represents the resistivity gradient with depth. Warmer colors correspond to higher phase values and indicate a decrease in resistivity with increasing depth. The difference in the major axis of the phase tensor is an indicator of subsurface structural boundaries.

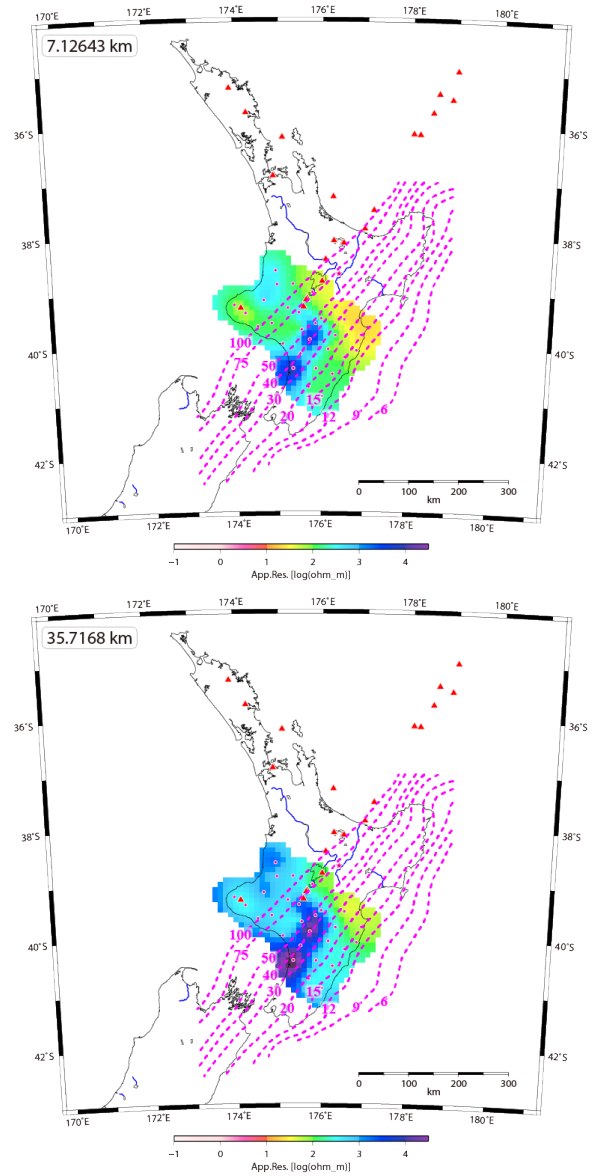


Fig. 3 (continued on next page)

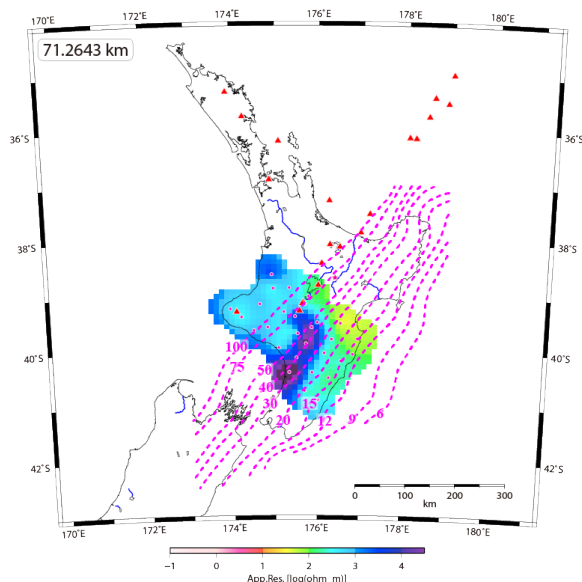


Fig. 3 3-D style plots at three depths of 1-D resistivity structure models for 28 sites calculated using the rotational invariant of the MT response function; SSQ impedance (e.g., Rung-Arunwan et al., 2016). Red triangles represent active volcanoes. Pink broken lines represent isodepth contours of the upper surface of the subducting Pacific Plate (Williams et al., 2013).

4. おわりに

沈み込み帯での火山形成メカニズムを解明することを目指し、異なる島弧の火山地域と非火山地域を覆う領域での地下比抵抗構造の相違点を比較・議論するために、ヒクラング沈み込み帯に位置するニュージーランド北島において、大規模3次元比抵抗構造の求めるための長周期MT法観測を行った。予察的に実施した位相テンソル解析および一次元比抵抗構造解析の結果、ヒクラング沈み込み帯に位置するニュージーランド北島の火山地域と非火山地域の地下には、顕著な不均質性があることが明らかになった。一方で、一次元構造解析では、比抵抗構造に大きな影響を与える可能性がある周辺の海の存在を考慮出来ないという課題がある。従って、今後は、周辺海域の存在を含め二次元・三次元的な影響を考慮できる三次元比抵抗構造解析を進め、沈み込み帯での火山形成メカニズム解明に繋げる研究を展開していきたいと考える。

謝 辞

本研究は日本学術振興会（JSPS）科研費基盤研究（B）JP21H01175の助成を受けている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- Bassett, D., Arnulf, A., Henrys, S., Barker, D., van Avendonk, H., Bangs, N., et al. (2022): Crustal structure of the Hikurangi margin from SHIRE seismic data and the relationship between forearc structure and shallow megathrust slip behavior, *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL096960.
- Briggs, R., Houghton, B., McWilliams, M. and Wilson, C. (2005): 40Ar/39Ar ages of silicic volcanic rocks in the Tauranga-Kaimai area, New Zealand: dating the transition between volcanism in the Coromandel Arc and the Taupo Volcanic Zone, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48, pp. 459–469.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M. and Brown, C. (2004): The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 158, pp. 457-469.
- Chave, A.D. and Thomson, D.J. (2003): A bounded influence regression estimator based on the statistics of the hat matrix, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 52, pp. 307-322.
- Chave, A.D. and Thomson, D.J. (2004): Bounded influence estimation of magnetotelluric response functions, *Geophysical Journal International*, 157, pp. 988-1006.
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G. (1987): Occam's inversion-a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52, pp. 289-300.
- Gamble T.D., Goubau, W.M. and Clarke, J. (1979): Magnetotellurics with a remote magnetic Reference, *Geophysics*, 44, pp. 53-68.
- Hata, M., Oshiman, N., Yoshimura, R., Tanaka, Y. and Uyeshima, M. (2015): Three-dimensional electromagnetic imaging of upwelling fluids in the Kyushu subduction zone, Japan, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, 120.
- Hata, M., Uyeshima, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Oshiman, N. and Yoshimura, R. (2018): Three -

- Dimensional Electrical Resistivity Distribution Beneath the Beppu - Shimabara Graben with a Focus on Aso Caldera, Southwest Japan Subduction Zone, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, 123.
- Hata, M., Munekane, H., Utada, H. and Kagiya, T. (2020): Three - dimensional electrical resistivity structure beneath a volcanically and seismically active island, Kyushu, Southwest Japan Arc, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB017485.
- Rung-Arunwan, T., Siripunvaraporn, W. and Utada, H. (2016): On the Berdichevsky average, *Phys. Earth and Planet.Int.*, 253, pp. 1-4.
- Wallace, L.M. (2020): Slow slip events in New Zealand, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(1), pp. 175-203.
- Williams, C., Eberhart-Phillips, D., Bannister, S., Barker, D., Henrys, S., Reyners, M., et al. (2013): Revised interface geometry for the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Seismological Research Letters*, 84(6), pp. 1066-1073.

(論文受理日 : 2025年8月29日)