

氏 名（本籍）	AME THATO SELEPENG（ボツワナ）
専攻分野の名称	博士（工学）
学 位 記 番 号	工博甲第222号
学位授与の日付	平成28年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工学資源学研究科・資源学専攻
学 位 論 文 題 名	Three Dimensional Numerical Modeling of Loop-Loop Electromagnetic Data at Low Induction Numbers (インダクションナンバーが小さい時のループ・ループ電磁探査 による三次元地下構造モデリング)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教授 西谷忠師 (副査) 教授 内田 隆 (副査) 教授 大場 司 (副査) 准教授 筒井智樹

論文内容の要旨

Under certain geological conditions, low induction number electromagnetic (LIN-EM) instruments are known to produce negative apparent conductivity (σ_a) response. This is particularly the case when the shallow subsurface is characterized by highly conductive bodies, however little attention has been given to this issue in the research literature. To analyze negative σ_a anomalies and their causative structures, we make use of a 3-D integral equation forward modeling technique based on a 3-D weighting function. Two case studies were undertaken in Sugisawa and Kannondo where negative apparent conductivity anomalies were encountered, both study areas are in Akita Prefecture, Japan.

For the first case study, we present 3-D numerical modeling results over a volcanic tuff body intruded by several dacite dikes in Sugisawa, Akita prefecture, Japan. Apparent conductivity data were acquired using a *Geonics* EM-34-3 system in the horizontal magnetic dipole (HMD) and vertical magnetic dipole (VMD) operation modes. Our 3-D model resolved the horizontal and vertical extent of the dacite dikes and also delineated a high conductive zone between the volcanic tuff and the intrusive dacite dikes. This zone is the causative structure for the occurrence of negative σ_a response in the VMD data and is interpreted to be an alteration zone. Interestingly, the

negative σ_a response was absent when the coil alignment azimuth was changed, implicating an anisotropic effect on the EM signature in the study area. The true conductivity model achieved by 3-D forward modeling was shown to compare favorably with the DC resistivity data acquired in the same area.

We demonstrated how 3-D forward modeling of field σ_a measured by a *Geonics* EM-34-3, an electromagnetic induction instrument, can be used to detect and map the spatial conductivity distribution across dacite dike intrusions and better represent the 3-D nature of the geology in the study area.

For the second case study, an electromagnetic survey to detect sulphide mineralised veins and to map their spatial distribution using the *Geonics* EM-34-3 instrument was carried out in Kannondo area. Kannondo area exhibit some mineralised outcrops at the surface which are of significance to us because the area exhibits negative apparent conductivity response directly over the outcrop. The survey comprised six, roughly E-W and one N-S, EM profiles across the study areas. The collected EM data were subjected to rigorous forward modeling using our "*3-D LIN-EM Modeler*" code. Due to the non-uniform nature of the survey lines, we slightly modified our code to allow the rotation of the 3-D weighting function according to each profile azimuth.

The trial and error approach produced numerous models of which some showed good agreement with observed data and thus representative of the Kannondo area subsurface. Using simple 3-D model simulation, we were able to determine that, the Kannondo data suffered from a shallow conductor effect. That is, the highly conductive Kuroko outcrops successfully masked the response of deeper geological structures. Therefore, a shallow conductor model was chosen to be appropriate for this area.

To further validate our hypothesis, we examined other data from different geophysical method by various authors, i.e., Vertical Earth Soundings (VES), Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Induced Polarization (IP). The quantitative models of these methods correlate well with our shallow conductor model. Due to the masking effect of this anomaly, at depth our model shows relatively weak correlation with geological logs in the area because such structures are unaccounted for in our model. In our attempt to uncover the underground structure at Kannondo, the strong negative σ_a anomaly encountered was proven to be due to the highly conductive Kuroko mineralization.

Overall, the two case studies present a good opportunity to study the occurrence of negative σ_a in two natural and geologically different environments. The negative σ_a

response in LIN-EM instruments is due to the reversal of the secondary magnetic field at the receiver coil, produced by an inductively coupled conductor in the underground structure.

Keywords: Electromagnetics, Loop-Loop, Negative apparent conductivity, Low induction number, Forward modeling, 3-D weighting function, Sugisawa, Kannondo

論文審査結果の要旨

ループループ法は送信コイルと受信コイルをセットにして用いる電磁探査法の一つである。ループループ法の測定機材は軽量で操作も簡便であるため、短時間で広い範囲の測定が可能であり、その場で見掛け電気伝導度の値を得ることができる。また、さまざまな周波数やコイル間隔・コイル配置で測定することにより、複雑な地下構造解析を行うことが可能である。

本研究では、ループループ法により貫入岩および黒鉱床周辺で地下の電気伝導度構造解明を目的にして調査を行った。現場で得られた見掛け電気伝導度の値が負になる現象が何ヶ所か見つかった。ループループ法の測定では、地上の金属などの人工物、あるいは、地質構造に起因して、負の見掛け電気伝導度を得られる事例が報告されている。しかし、これまで負の見掛け電気伝導度のデータはノイズとして処理され、負の測定値を定量的に取り扱って地下構造モデルを推定した事例は公表されていない。本研究では負の見掛け電気伝導度を含むデータに対しても、物理法則にのっとった定量的な地下構造モデルを示すことが可能であることを明らかにした。

インダクションナンバーとは、コイル間隔と、使用する電磁波の地下への浸透深度（表皮深度）との比で定義される。インダクションナンバー自体は基本的には使用機材の仕様で決まる。インダクションナンバーを小さく設定した機材として EM34-3 (Geonics 社) がある。この装置を使って測定を行い、地下構造解析を行った。

地下の電気伝導度構造を与えて、地表で観測される見掛け電気伝導度を計算するために Pérez-Flores et al. (2012) による表現式を用いた。この表現式は、インダクションナンバーが小さいと仮定し、重み関数と電気伝導度の積を領域全体で積分する形で示されている。重み関数は送信・受信両コイルの位置関係で決まるが、この関数の積分は解析解がなく、数値積分で計算する必要がある。これまでの論文には計算結果は示されているが、計算方法は示されていない。ここでは、台形積分公式、ガウス積分、ロンバーグ積分の 3 種類の数値積分法を用いて、実際に三次元計算プログラムを Microsoft C# 言語でコード化した。作成した解析コードを用い、各積分手法による特徴を明らかにした。これまでに公表されている地下構造モデルと、このモデルから予想される見掛け電気伝導度の分布は、今回の計算による見掛け電気伝導度分布と良い一致を示した。McNeil (1980) による一次元構造

解析の結果と本研究による三次元解析の結果を比較して、数値積分を行う場合、積分領域の分割数に注意を払う必要があることを示すと共に、精度良く計算する方法を示した。

貫入岩のある地域、および、黒鉾床周辺で調査を行い、負の見掛け電気伝導度を含むデータに対し、作成した計算コードを用いて定量的な解析を行った。地下構造モデルを繰り返し更新する方法によって、負の見掛け電気伝導度のデータを説明することのできる、地下電気伝導度構造を得ることができた。

凝灰岩にデイサイトが貫入している場所では、低電気伝導度の貫入岩と凝灰岩の境界部が高電気伝導度となる地下構造モデルを得た。また黒鉾床地域での測定では、地下浅部の高電気伝導体が測定値に大きな影響を与えていることが判明した。定量的な解析を行うことにより、地下浅部の高電気伝導体が負の見掛け電気伝導度を示す原因であることを明らかにした。本研究により、これまでノイズとして削除されることが多かった負の見掛け電気伝導度データに対して、適切な解析手法を適用すれば、三次元の地下構造解析も可能であることを示した。

最終試験は平成28年2月9日開催の審査委員会、および、平成28年2月17日開催の博士論文公聴会において、質疑応答の形式で、口頭試問により行った。審査委員会と公聴会では、申請者による論文の説明の後、論文内容と関連事項に関して質疑応答を行い、学力の確認を行った。審査委員および公聴会出席者から次のような質問が出された。

- ・電気伝導度モデルは垂直方向であるが、傾斜したモデルで考えるべきではないのか
- ・貫入岩と母岩の間に電気伝導度の異なる層を入れているが、その理由は何か
- ・貫入岩付近の急冷部の形態はどうなっているのか
- ・デイサイトの貫入岩と凝灰岩の接触部が高電気伝導度である理由は何か
- ・人工構造物の存在する場所で、広範囲の負の電気伝導度がある理由は何か
- ・計算に用いたブロックサイズはどの程度か
- ・実際に見ている地下の深度はどれくらいか
- ・貫入岩が傾斜しているモデル構造の計算で、底部までの深度が浅すぎないか
- ・論文で示した処理プログラムは鉾床探査に有用なのか
- ・モデル構造を作成するユーティリティツールが必要ではないのか
- ・将来の展望はどうなっているのか

上記の質問に対して、申請者から明確な回答が得られた。また、予備審査委員会で指摘された事項も適切に改善されていた。これらのことから、学位審査委員会は Ame Thato Selepeng 氏が最終試験に合格し、博士（工学）として十分な資格があるものと判定した。