

# 地震・電磁気探査データ処理におけるフルウェーブフォーム利用法の研究

三ヶ田 均\*・武川順一\*\*・亀井志織\*\*\*

## 1. 研究の目的

伝播する媒質を通過した弾性波や電磁波は、速度など媒質のキネマティックな性質、媒質の孔隙率や孔隙に含まれる流体などダイナミックな性質の影響を受け波形が変化する。この性質を利用し、群列で取得された波形を用い、地震波動を用い地下構造を推定する手法はフル・ウェーブフォーム・インバージョン(Tarantola, 1984)と呼ばれている。昨年までの本委託研究では、弾性波を用いた弾性定数2つ及び密度という3種類のキネマティック・パラメータの推定能力に関する検討を行った。今年度の研究では、更なる手法の高度化を目指した。

海底熱水鉱床を対象とする調査に主眼の置かれた本委託研究では、これまで Maxwell 方程式を仮想領域法で解く方法に重きを置いてきた。この手法の導入により、時間領域 EM 法 (TDEM: Time Domain Electro-Magnetics) により得られた地下構造応答をリバース・タイム・マイグレーション (RTM: Reverse Time Migration) 法によりイメージングする可能性を検証できた。今年度は、さらにこれまでの比抵抗異常のイメージングに加え、比誘電率という、もう一つの重要な電磁気学的パラメータの導入について検討を行った。

また地震学的な手法に関しては、昨年度の研究内容を発展させ、MARMOSI2 のモデルを用いた反射法探査データのフル・ウェーブフォーム・インバージョンを行った。想定したモデルは、フォーム・アシスト増進回収法 (Foam-assisted EOR) により地下の流体掃攻が発生した場合、フル・ウェーブフォーム・インバージョンによる流体移動の検知可能性について検討した。

## 2. 研究の方法

電磁気学的な応用では昨年度まで、主として地下の比抵抗異常を検知するためのフル・ウェーブフォーム・インバージョン研究を行ってきた。今年度は、比抵抗に加え比誘電率というパラメータを導入するための基礎研究を実施した。電磁波の反射を利用し、その振幅反射率および位相の変化からターゲットとする媒質の複素比誘電率を計算することにより、Cole-Cole プロット (Cole and Cole, 1941; 1942) を用いて媒質の物性値を推定できる可能性がある。しかしながら、実際の地下に存在する媒質に対する誘電緩和現象を考慮した実験があまり行われていない現状では、その推定値と真値との誤差を評価することが難しい。本研究では、一般に導電率のない真空状態を仮定して扱われる電磁波の基本方程式を、導電率を考慮する形に再構成し、4つの Cole パラメータを推定する方程式を導出した。得られた理論解と実際の測定結果とを比較し、その妥当性を評価した。

地震学的な応用では、石油生産の現場において、石油の回収率向上のため行われる石油増進回収法 (Enhanced Oil Recovery: EOR) を取り上げ、フル・ウェーブフォーム・インバージョン手法による解析をさらに現実的なモデルに適用し、その有用性を確認した。

## 3. 得られた成果

電磁気学的解析では、緩和時間  $\tau$  の推定結果については、真値との間で大きな誤差が生じたが、静的誘電率  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_\infty$  および緩和時間分布パラメータ  $\alpha$  の推定において、真値との良い一致を示す推定が可能であることが判明した。このことは電磁波の反射現象のみから地下浅部に存在する対象の物性値を推定できる可能性が示されており、今後フル・ウェーブフォームを用いた解析に応用可能であると考えられた。Maxwell 方程式から導かれる電信方程式には、拡散現象を記述する時間 1 階微分と波動現象を記述する時間 2 階微分双方が含まれている。高い周波数を用いる地中レーダー (GPR: Ground Penetrating Radar) では時間 1 階微分項を無視できるが、通常の MT や CSEM などの例では、波動として扱うには困難な状況がある。そのため、地震学で行われ一般的な地中レーダ探査において用いられる周波数帯が数十 MHz から数百 MHz であるのに対して、誘電緩和現象が生じる周波数帯が数百 GHz から数 THz と非常に大きいことから、 $\tau$  の推定に関しては特定の周波数帯においてのみ

\*京都大学・教授, \*\*同・助教, \*\*\*同・教務補佐員

可能となることが示唆される。本研究で用いた手法では、比抵抗と比誘電率という電磁気学の媒質パラメータを電磁波反射波のみで推定可能であることを示した。今後フル・ウェーブフォーム・インバージョンの適用など波動という現象を用い、地震波動のデータと併せ処理する方向性を示していると考えられる。

地震学的解析では、図1に見られる地下の石油貯留層構造モデルにおいて、Foam-assisted EORが行われていると仮定する。この構造の左側から注入される水の圧力増加に伴い、水と原油の境界に存在する発泡ゾーンが右側に50m移動したとする。発泡ゾーンの移動前と移動後に、地表から反射法探査を行うと、見かけ上ほとんど差のない結果が得られるが、実は図2のような波形の差異が存在する。この波形の差異は、地下における発泡ゾーンの移動に伴って発生しているため、リバースタイムマイグレーションを行うと、地下の発泡ゾーンの変化の発生した領域を推定することが可能である。実際にリバースタイムマイグレーションを適用した結果、図3のような図を得ることができる。図中、原油が発泡ゾーンに置換された位置、そして発泡ゾーンの前進により、発泡ゾーンから注入水に置換された部分双方を認めることができる。

これらの信号の強度や極性は貯留層の物性変化を反映した結果であるため、これらを解析することで、貯留層の物性変化を把握する情報を得られると考えられる。

#### 4. 謝辞

本研究は、株式会社地球科学総合研究所の委託研究として遂行された。関係各位に篤く御礼申し上げます。

#### 発表論文

Kimura, K., Mikada, H., Takekawa, J. (2018) : The estimation of the physical properties of subsurface objects using Cole-Cole equation. The 22nd International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG 2018). doi: 10.3997/2352-8265.20140226

Tamura, R., Mikada, H., Takekawa, J., [2018a] Fundamental study for monitoring sweep front in foam-assisted EOR using seismic AVO analysis, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 37, 659-663. doi:10.1190/segam2018-2997522.1

#### 参考文献

Cole, K.S., and Cole, R.H. (1941) : Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. *J. CHEM. PHYS.*, **9**, 341-351.

Cole, K.S., and Cole, R.H. (1942) : Dispersion and Absorption in Dielectrics II. Direct Current Characteristics. *J. CHEM. PHYS.*, **10**, 98-105.

Tarantola, A., Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophysics*, 49 (8), 1259-1266, 1984.

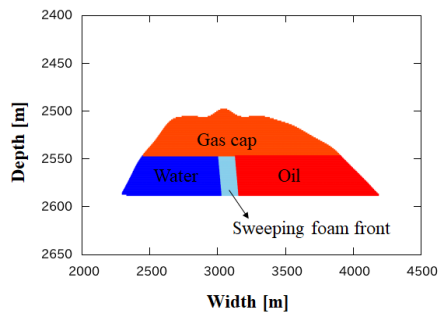


図1 地下の石油貯留層モデル。左側から水が圧入され、右側の原油が掃攻される。

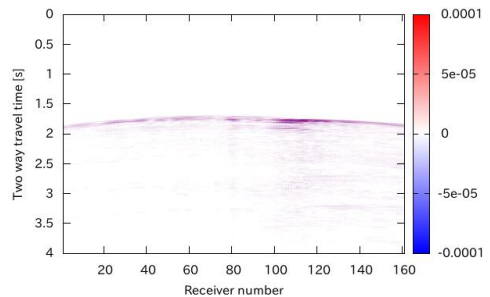


図2 ショットギャザーの残差波形

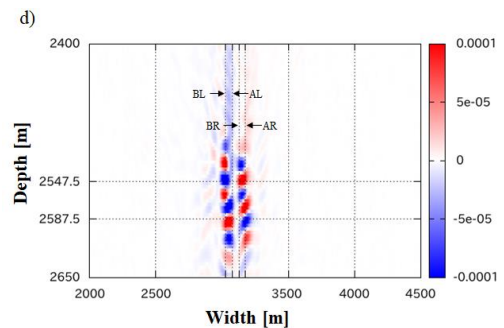


図3 残差波形リバースタイムマイグレーション結果