

# 地震波や電磁波など波動現象のフルウェーブフォーム解析による探査法の研究

三ヶ田 均\*・武川順一\*<sup>1</sup>・亀井志織\*<sup>2</sup>

## 1. 研究の目的

地震波動場の計算では弾性体の運動方程式が、電磁場の計算では電信方程式が用いられる。弾性体の運動方程式が、実係数の減衰振動の方程式であり、現象として比較的扱いやすいのに対し、電信方程式は複素係数の減衰振動の方程式となり、その扱いでは位相に関する注意が必要となる。波動現象を利用したフルウェーブフォーム解析（以下 FWI と略称する）は、地震波動を用いた速度解析が一般的な適用範囲となる。しかし電磁波を利用する FWI は、あまり適用例がない。本研究では、電磁波に関しては今後の FWI への移行を目指し、電信方程式から得られる解の性質の理解を調査した。地震波動に関し、石油増進回収法という新しい分野への応用を行い、最小化手法適用の時間的負担を抑える手法の開発を行った。

## 2. 研究の方法

電磁波の解析では、TM モードでの反射波を用いる手法に着目した。図 1 に見られるような電磁波の反射現象を用い、その反射係数の周波数依存性を調査した。図の電流源で紙面に直交する電流を流し、地中に電磁波を射出すると、地下の物性の変化する場所で反射波を生じる。このとき、受振点位置で記録される、電流源から直達する電磁波と地下の反射面からの反射波を比較することで得られる反射係数は、振幅反射率と位相変化を用い、次式(1)の複素反射係数となる。

$$r^* = |R|e^{i\Delta\phi} = r_R + ir_I \quad (1)$$

一方で、Wong (1979) による複素反射係数は以下のように表される (Wong, 1979)。

$$f(i\omega) = \frac{\sigma_m^* - \sigma}{\sigma_m^* + 2\sigma} \quad (2)$$

得られる反射波には、下層媒質の物性に周波数依存性が含まれており、式(1)および(2)の比較から、下層媒質の複素導電率を推定することができる。式(3)および(4)は、それぞれ反射係数の実部および虚部を示している。

$$\sigma_R = \frac{(1 - r_R)(2r_R + 1) - 2r_I^2}{(1 - r_R)^2 + r_I^2} \sigma \quad (3)$$

$$\sigma_I = \frac{3r_I}{(1 - r_R)^2 + r_I^2} \sigma \quad (4)$$

電源周波数を 80~120Hz とし、深さが 8, 10, 12m の場合の入射角 15° に対する複素反射率を、それぞれ Case-1~3 として、図 2 に示す。周波数を変化させることで反時計回りに弧を描く一方、入射角すなわちオフセットが大きくなると径が伸びながら時計回りに弧を描く性質が見られる。即ち、周波数変化

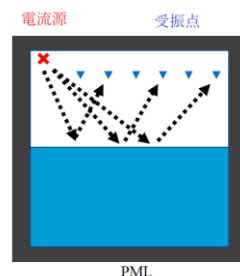


図 1 電磁波の反射現象を扱う地下 2 層モデル

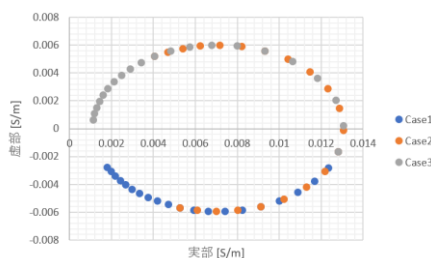


図 2 周波数を 80~120Hz に変化させた際の入射角 15° に対する深さ 8m (Case-1), 10m (Case-2), 12m (Case-3) の反射面に対する複素反射係数。

から、地表からは見えない第2層の電磁気学的な性質を推定することが可能である。

地震波を用いたFWIでは、これまでVirieux and Operto (2009)により詳細に説明されているように、Hessian計算という負荷の重い計算を軽減するため、多くの試みが行われてきた。中でもComplete Hessianではなく、Jacobianの計算で近似を行うApproximate Hessian (Pratt et al., 1998 など) や、Hessianの非対角成分を無視するPseudo Hessian (Shin et al., 2001) を利用する試みが一般化に行われ、イメージング効率と最小化の収束安定性が大幅に向上した (Brossier et al., 2009)。しかし、これらの方法では、モデル空間におけるパラメーターの変動に対する応答である感度行列を取得する必要がある。Virieux and Operto (2009) では、感度がWavepath (Woodward, 1992) に由来するため、地震一次散乱理論の使用を提案した。一次散乱理論は一次ボルン近似、つまりミスフィット関数の勾配の計算に使用されるものと同じ近似を想定しているため、パラメーターの摂動そのものが理論の定式化における *ab initio* 変数となる。本研究では、散乱理論に基づくPreconditioningを数値実験に導入し、結果を検証した。

### 3. 得られた成果

電磁気学的な探査では、例えばマグネトテルリクス法など、周波数応答を深度変換する試みが行われてきた。本研究では電磁波の反射現象という周波数依存性のある現象を用いることにより、高精度にIP探査を行うことが可能であることを示しただけでなく、今後Adjoint State Methodを用いた解析が可能であることを示した。地震波を用いたタイムラプス調査の差分波形を用いた解析では、昨年度の受託研究で指摘した孔隙内流体の置換によって起こる物性変化のモニタリングだけでなく、弾性波の一次散乱理論を導入することで、定量的な物性変化を推定可能であることを示した。地震波のFWIでは、一次散乱理論を導入することにより、FWIに効果的なPreconditioningを適用可能であることが判明した。石油増進回収法へのFWIの適用という数値実験においては、回収に伴い石油から発泡した流体に置換された位置（即ち注入した流体の前線）の推定のみでなく、置換による貯留層物性の変化を定量的に評価できる可能性が示唆された。

### 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る。

### 発表論文

- Kimura, K., Mikada, H., and Takekawa, J., 2019. Theoretical analysis of electromagnetic property estimation in the subsurface using dielectric relaxation in electromagnetic waves reflection, Proc. Recent Adv. Explor. Geophys., 4pp. doi:10.3997/2352-8265.20140240
- Tamura, R., Mikada, H., and Takekawa, J., 2019. Feasibility Study of Time-Lapse Monitoring of Foam-Assisted EOR Using RTM, 81th EAGE conference & exhibition. doi:10.3997/2214-4609.201900741

### 参考文献

- Brossier, R., Operto, S., and Virieux, J., 2009. Geophysics, **74**(6), WCC105-WCC118, doi: 10.1190/1.3215771.
- Pratt, R. G., Shin, C., and Hicks, G.J., 1998. Geophys. J. Int., **133**, 341-362. doi: 10.1046/j.1365-246X.1998.00498.x
- Shin, C., Jang, S., and Min, D.J., 2001. Geophys. Prosp., **49**, 592-606. doi: 10.1046/j.1365-2478.2001.00279.x
- Virieux, J., and Operto, S., 2009. Geophysics, **74** (6), WCC1-WCC26. doi: 10.1190/1.3238367
- Wong, J., 1979. Geophysics, **44**, 1245-1265. doi: 10.1190/1.1441005
- Woodward, M.J., 1992. Geophysics, **57**, 15-26. doi: 10.1190/1.1443179