

構造カップリングを用いた4次元インバージョン

#伊藤 良介¹⁾, 宇津木 充²⁾

(¹⁾京大, (²⁾京大・理・地球熱学研究施設

4D inversion method using structural coupling

#Ryosuke Ito¹⁾, Mitsuru Utsugi²⁾

(¹Kyoto University, (²Institute of geothermal sciences, Kyoto University

In recent years, 4D analysis, or the attempt to detect temporal changes in the spatial distribution of fluids in the subsurface, has been widely used for resource development purposes or monitoring of active volcanoes. Several 4D analysis methods have been proposed, the simplest of which is parallel inversion. This method estimates temporal variations by separately inverting data at multiple observation times and taking their differences, and has been applied to many real data (e.g. Miller et al., 2008; Minami et al., 2018). Sequential inversion, which was proposed in Wirianto et al. (2010), uses the model estimated at the first observation time (baseline model) as the initial model for the inversion at the next observation time, and is mainly used for monitoring oil development (e.g., Asnaashari et al., 2014). However, these methods are very sensitive to differences in data noise and the distribution of observation points at each observation time, and it has been pointed out that apparent temporal changes can be easily detected (Kim et al., 2009; Karaoulis et al., 2010).

In this study, we propose a new 4D inversion method that uses structural coupling to detect time variations. Structural coupling is a constraint used in joint inversion where different physical models (magnetization structure and density structure, resistivity structure and seismic velocity structure) are combined to impose that each physical model has a high correlation. Specifically, cross-gradient (Meju and Gallardo, 2004), fuzzy c-means clustering (Pasche and Tronicke, 2007), and Group Lasso (Utsugi, submitted) have been proposed. By using these methods, each physical model has high correlation, while allowing the differences in structure to partially reproduce each data set. By applying this method to the estimation of time variation, the models at each observation time are highly correlated, so the time-invariant structure is in phase at each time, and as a result the detection of apparent changes is suppressed, and differences in structure, or temporal changes, can also be detected.

We have developed a 4D inversion code using structural coupling by Group Lasso for magnetic inversion, which is a linear problem. As a synthetic test, we subjected the data at each observation time to noise with different amplitudes and standard deviations, and performed a 4D analysis. The results suggest that our method has the effect of suppressing the apparent time variation compared to conventional methods, and may be able to detect the time variation more accurately. In the future, we will apply our method to resistivity inversion, which is a nonlinear problem.

近年、資源開発や火山活動のモニタリングを目的として、地下に存在する流体の空間分布の時間変化を検出する試み、すなわち4次元解析が盛んに行われている。4次元解析の方法はこれまでに複数提案されているが、そのうち最も単純な方法はparallel inversionである。この方法は、複数の観測時刻のデータを個別にインバージョンし、それらの差分を取ることで時間変化を推定するものであり、これまでに多くの実データに適用されている (e.g. Miller et al., 2008; Minami et al., 2018)。また、Wirianto et al. (2010) が提案した sequential inversion は、最初の観測時刻で推定されたモデル (ベースラインモデル) を初期値として、次の観測時刻のインバージョンを行うものであり、主に石油開発のモニタリングに使用されている (e.g. Asnaashari et al., 2014)。しかし、これらの手法は各観測時刻のデータノイズや観測点配置の違いに非常にセンシティブであり、見かけの時間変化が検出されやすいことが指摘されている (Kim et al., 2009; Karaoulis et al., 2010)。

そこで本研究では、構造カップリングを用いて時間変化の検出を行う新たな4次元インバージョン手法を提案する。構造カップリングとは、通常異なる物理モデル (例えば磁化構造と密度構造、比抵抗構造と地震波速度構造) を組み合わせた joint inversion で用いられる制約であり、これにより各物理モデルが高い相関を持つことが課される。この制約を与える具体的な手法としては、cross-gradient (Meju and Gallardo, 2004) や fuzzy c-means clustering (Pasche and Tronicke, 2007)、Group Lasso (Utsugi, submitted) などが確立されており、これらを用いることで各物理モデルは高相関を示しつつ、部分的には各データを再現するために構造の違いが許容される。この手法を時間変化の推定に応用することで、各観測時刻のモデルは高相関となるため、時間的に不変な構造は各時刻で同相となり、結果として見かけの変化の検出が抑制されるとともに、構造の違い、すなわち時間変化も検出可能となる。

これまでに、線形問題である磁気異常解析を対象として、構造カップリングを用いた4次元インバージョンコードを開発した。最小化すべき目的関数に Group Lasso に基づく構造カップリング項を導入し、計算アルゴリズムには交互方向乗数法 (Boyd et al., 2011) を用いた。各観測時刻のデータに異なる振幅・標準偏差のノイズを与えてモデル計算を行ったところ、本研究の手法には従来手法と比較して見かけの時間変化を抑制する効果があり、真の時間変化がより精度良く検出されることが示唆された。今後、非線形問題である比抵抗インバージョンにも本研究の手法を適用していく予定である。