

GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握（第3年次）

実施期間

令和元年度～令和3年度

測地観測センター電子基準点課

大野 圭太郎 高松 直史

阿部 聡

多田 直洋

村松 弘規

川元 智司

1. はじめに

国土地理院は、全国約1300点の電子基準点から得られたリアルタイムデータを解析し、得られた各電子基準点の変位量から震源断層モデルを推定する電子基準点リアルタイム解析システム（以下「REGARD」という。）を運用している。本システムは、2011年（平成23年）東北地方太平洋沖地震を契機に東北大学との共同研究により開発が行われ、2016年から運用されている。

REGARDは、地殻変動の量及び空間分布から震源断層モデルを推定し、地震規模 M_w （モーメントマグニチュード）を求める。この手法には、単一矩形断層モデルとすべり分布モデルの2種類を用いる。前者は、日本全国を対象に、震源位置毎に事前設定した震源メカニズムを拘束条件として1枚の断層を推定する手法で、後者は、震源が特定のプレート境界の範囲内にある場合にのみ推定が実施され、三角形のメッシュで近似したプレート境界面におけるすべり量を推定する手法である。いずれの方法においても、推定結果の信頼性を示す指標としてVariance Reduction（以下「VR」という。）が計算される。VRは、推定された断層モデルから計算された地殻変動と、観測された地殻変動の整合性を示す指標であり、値が高いほど整合性が高い。しかし、この指標だけでREGARDの断層推定結果の信頼性を判断するには2つの問題があった。1つは、断層推定結果の不確実性が十分に考慮されていないことであった。もう1つは、断層推定に使用された地殻変動の妥当性が評価されていないことであった。一方で、地震後の初動対応の中でREGARDが推定した地震規模の信頼性を直感的に理解するために、可能な限り信頼性の指標は少なくする必要があった。そこで、現行の指標であるVRを補強する形で、不確実性を表現可能な断層推定手法の開発と、入力データの品質（妥当性）をチェックするアルゴリズムを開発した。

2. 研究内容

2.1 MCMC法を用いた単一矩形断層モデルの改良

REGARDで使用されている単一矩形断層モデルは、非線形最小二乗法を前提とした手法で、初期値への依存性が高く、多様な震源断層モデルの推定が難しい。Ohno et al. (2021)はMCMC法（マルコフ連鎖モンテカルロ法）を応用し、高速かつ初期値依存性の低い単一矩形断層モデルの推定手法を開発した。この手法では各断層パラメータの事後確率分布を計算することができるため、分布から断層推定結果の信頼性の評価や、多様な震源断層モデルの存在可能性を認識することができる。この手法をREGARDに取り込み、実際に発生した地震に適用させた。

2.2 地殻変動量の妥当性点検アルゴリズムの開発

REGARDでは全国の電子基準点の地殻変動量がリアルタイムに計算され、断層推定に用いられる。しかし、観測点環境やランダムノイズ等により、この値には揺らぎが発生するため、特に規模の小さな地殻変動を捉えることは難しい。一方、非常に稀ではあるがノイズレベルの変位やスパイク状の飛

びが地殻変動と誤認され、高い VR で断層推定が実施されてしまうことがある．そこで、過去 5 年間の運用実績を分析し、地殻変動量の妥当性を判断するアルゴリズムを開発し、REGARD に導入した．

3. 得られた成果

3.1 MCMC 法を用いた単一矩形断層モデルの改良

Ohno et al. (2021) の手法を REGARD の単一矩形断層推定に導入し、試験的にリアルタイムで運用した．その結果、1 回のインバージョン解析に要した時間は概ね 10 秒程度（マルコフ連鎖数： 4×10^5 連鎖）で、安定した MCMC サンプリングが自動的に実行された．これにより、現行 REGARD と同程度の計算時間で、断層モデルのみだけでなくその誤差情報を得られることを確認できた．

MCMC 法の利点は、推定結果の不確実性を定量的に把握できることである．その具体例として、図-1 に 2021 年 2 月 13 日福島県沖の地震（M7.3）の推定結果を示す．これは事後的に手動で解析した結果であるが、使用したデータは REGARD によって実際に地震発生後約 1 分で得られた変位場である．断層パラメータの事後確率分布（得られた多数サンプルの度数分布）をみると、確率分布の範囲やその形状として、パラメータの不確実性が定量的に表現されることがわかる．特に走向の事後確率分布は 2 つのピークを持ちつつ、その代表値は地震波形による推定結果に整合的な南東に傾き下がる逆断層を示した．推定された地震規模は Mw 6.99（範囲：4.22~7.73）となり、定量的な幅とともに、単一のピークを持った分布が推定された．これらの結果は、入力した地殻変動データから Mw はある程度収束するが、単一矩形断層モデルの幾何は一意に定まらずに様々な可能性があることを示唆する．このように、各パラメータの推定幅や、入力データからどの程度モデルが絞られるのか、という情報は、MCMC 法を用いたからこそ得られる付加情報である．

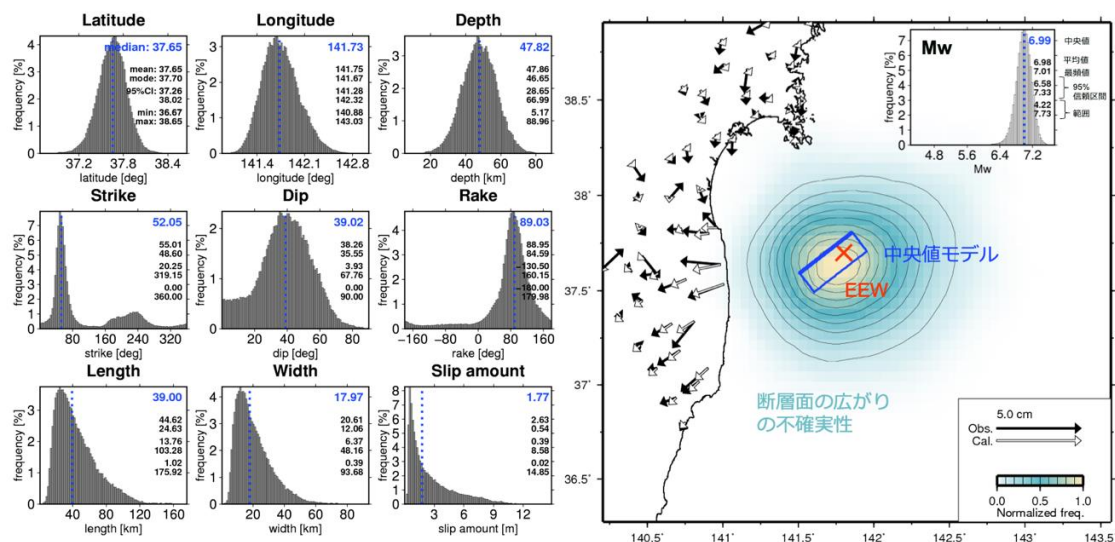


図-1 MCMC 法を用いた単一矩形断層モデルの改良：2021 年 2 月 13 日福島県沖地震の例

（左：単一矩形断層モデルの事後確率分布．図中の数値は、上から中央値・平均値・最頻値・95%信頼区間・最小値・最大値をそれぞれ示す．

右：事後確率分布の中央値による断層モデル（青色矩形断層）および全サンプルの存在範囲を正規化して示したコンター．挿入図は Mw の確率分布を示す．）

3.2 地殻変動量の妥当性点検アルゴリズムの開発

過去5年間のREGARDの動作事例を分析したところ、高いVRが得られるノイズ事例の傾向は、主に「震源近傍での大きなノイズ変位」「並進ノイズ」「全国的な大荒れ」の3パターンに分類できた。REGARD動作時にこれらのノイズを検知し、解析結果にデータ品質として定性的な表現（Good/Bad）を付記する処理フローを構築した（図-2左）。①データ不足、②ノイズレベル、③外れ値、④並進成分卓越、⑤低FIX率、の検知処理を順番にかけ、全ての処理を通過したデータをGoodとする。

構築した処理フローを、2018年以降の地殻変動データに適用した（図-2右）。色付きの点は、個別調査の段階で顕著なノイズとして分類した事例を表している。着目しているノイズ事例（赤・緑・黄点）が全てBad判定となり、特にVR80%を超えるノイズ事例を排除できた。一方で、地殻変動事例（青点）は、GoodまたはBad（ノイズレベル）（②）に分類された。後者の処理については、5cm未満の観測点変位はBad判定させているため、5cm未満の地殻変動事例はBadに分類された。REGARDで使用しているリアルタイム解析では5cm未満の地殻変動を確実に捉えることは難しいため、この閾値を設定している。最終的には、Good判定の入力データかつVRが高いことがREGARDの結果として理想的であるため、より高い精度で、かつ、ノイズ事例を出さないようなシステムの高度化が必要である。

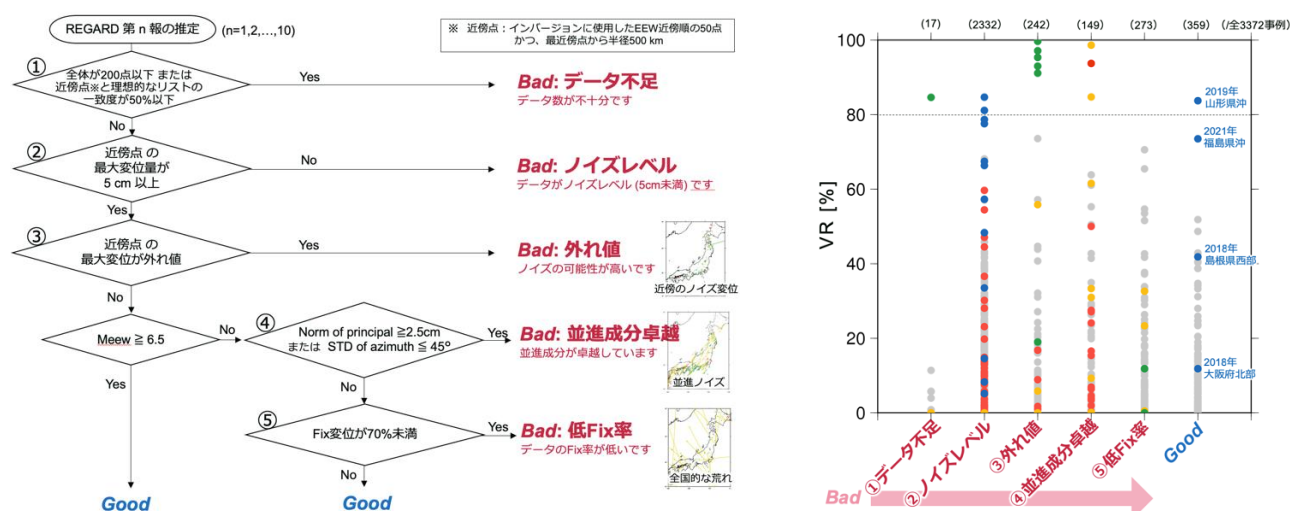


図-2 地殻変動量の妥当性点検アルゴリズム

（左：処理フローの詳細）

右：2018年以降の地殻変動データへの適用結果。青・赤・緑・黄点はそれぞれ、地殻変動・並進ノイズ・震源近傍での大きなノイズ変位・全国的な大荒れ、に個別に分類した事例を示す。）

4. 結論

REGARDによる推定結果の信頼性を評価する指標であるVRを補強する形で、MCMC法を用いた単一矩形断層モデルの推定手法と、地殻変動量の妥当性を点検するアルゴリズムを開発した。これにより、不確実性が十分に考慮されていなかった推定結果に対して定量的な誤差情報が付加され、入力データの品質が多面的に評価されることで、推定結果およびその信頼性評価の安定性が向上する。今後、REGARDの実運用に対して実装していく予定である。

参考文献

Ohno, K., Y. Ohta, S. Kawamoto, S. Abe, R. Hino, S. Koshimura, A. Musa, and H. Kobayashi (2021): Real-time automatic uncertainty estimation of coseismic single rectangular fault model using GNSS data, *Earth Planet Space*, 73:127.