

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Real-time coseismic fault model estimation based on RTK GNSS analysis using the Japanese nationwide continuous GNSS network (GEONET)

(GEONETにおけるリアルタイム・キネマティック GNSS 解析を用いた震源断層即時推定に関する研究)

氏 名 川元 智司

論 文 内 容 の 要 旨

This dissertation presents a practical scheme for a Global Navigation Satellite System (GNSS) analysis system to estimate finite fault models in real-time. The GNSS analysis measures the receiver's position on the ground surface by analysing signals from the GNSS satellites. Continuous GNSS observation provides continuous ground displacements, thus it has widely used to investigate the mechanisms of crustal deformations. In recent years, the geodetic community has recognized the importance of the application of real-time GNSS analysis to tsunami warnings because the GNSS analysis enables the estimation of finite fault model for a large earthquake from the ground displacements without any saturation. On the other hand, rapid magnitude estimates based on seismographs saturate for large earthquakes with magnitude of over 8. Furthermore, seafloor deformation required for tsunami simulations can also be derived from the finite fault model based on GNSS analysis. However, there had not been a real GNSS based system for disaster prevention because the noise level of the GNSS analysis is dramatically larger than the seismographs and a finite fault model estimation algorithm with low computational cost capable to real-time usage had not been developed.

In this dissertation, I develop a realistic algorithm to estimate finite fault models based on the GNSS analysis in real-time, and it is assessed through a real system implementation. The performance of the proposed scheme will be demonstrated through a

real-time experimental operation and posterior analyses using the real and simulated GNSS data for past large earthquakes. Furthermore, rough limitations of GNSS-based rapid finite fault modeling for large subduction-zone earthquakes around Japan are discussed. The scheme has been implemented in a real system based on the GNSS Earth Observation Network System (GEONET), and the new system "REGARD (Real-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation monitoring)" has been operational since April 2016. The REGARD system has already experienced the 2016 Kumamoto earthquakes (Japan Meteorological Agency [JMA] magnitude [Mj] 7.3) and provided a finite fault model with a high variance reduction (VR) of 96.2%.

In Chapter 2, the detailed algorithm implemented to the REGARD system is shown. The REGARD system consists of real-time GNSS positioning, automatic detection of coseismic displacement by the event, and quasi real-time finite fault model inversion routines. The 1Hz real-time displacements are estimated using RTKLIB software. Then the estimated real-time displacements are checked to detect earthquake events. If significantly large displacements are occurred, the finite fault models including single rectangular fault model and slip distribution model on the plate boundary are estimated. The performance of the automatic event detection subsystem is tested through experimental real-time operation based on GEONET data for 2 months and threshold values for the event detection are evaluated to be capable of enough low false detection rate and efficient detection of M8-class earthquakes. However, even if there are false detection, they should be properly ignored by some criteria. Therefore, I introduced a variance reduction and found it applicable to the validation of finite fault models for large earthquakes with the magnitude of over 8.

In Chapter 3, the reliability of the finite fault modeling routines in real-time situation using real raw GNSS data observed for past large earthquakes is tested: the 2003 Tokachi-oki earthquake (moment magnitude [Mw] 8.3), the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0), and the 2011 off-Ibaraki earthquake (Mw 7.7). A simulated 1707 Hiei-type Nankai Trough earthquake (Mw 8.7) is also tested. The real-time experimental operation shows that real-time GNSS positioning is precise enough to detect all the tested earthquakes, and the inversion results demonstrate that the REGARD can reliably estimate the finite fault models within 3 minutes after the event origin time. However, the fault slip around the trench could not be resolved clearly based solely on the onshore GNSS data.

In Chapter 4, the results during the 2016 Kumamoto earthquake (Mj 7.3) is shown. The 2016 Kumamoto earthquake (Mj 7.3) is the first large earthquake the REGARD system experienced. I present the rapid finite fault estimate for the 2016 Kumamoto earthquake provided by the REGARD system. I also assess the coseismic displacements due to the two large foreshocks on April 14 (Mj 6.5) and April 15 (Mj 6.4) observed by the REGARD system,

and simulate the real-time fault modeling for the foreshocks though these earthquakes are smaller than the pre-assigned system threshold of $M > 7$. The real-time finite fault estimate ($M_w 6.85$) is obtained within 1 minute and converged to $M_w 6.96$ with VR of 96.2% within 5 minutes of the origin time of the mainshock ($M_j 7.3$). The finite fault estimate shows right-lateral strike-slip fault along the Futagawa fault segment, which is consistent with the finite fault model inferred from post-processed GNSS and InSAR analysis. Furthermore, significant coseismic displacements were observed due to the April 14 and April 15 foreshocks at nearby sites, however, the estimated finite fault models show auxiliary fault planes. Although further improvements are required for modeling M6 class earthquakes, the results demonstrate the potential of the GNSS-based earthquake early warning system for inland earthquakes.

In Chapter 5, I conclude the overall results, and discuss the future prospects of the REGARD system. Firstly, the application of the REGARD system to disaster prevention including the cooperation with the Cabinet Office and JMA is discussed. Secondly, important aspects for more robust system is summarized, especially the positioning precision of the GNSS analysis. Possible technologies to improve the GNSS analysis is reviewed, and the effect of multi-path noise reduction methods using phase residual data are demonstrated. The possible observation techniques other than GNSS to improve the low sensitivity around the trench are also discussed. The application of the REGARD system to other phenomena is reviewed, e.g., volcano activities and ionospheric perturbations. Finally, the dissertation is concluded with reviewing international activities for the GNSS augmentation to the tsunami warnings.

(和訳)

本論文は、衛星測位システム (GNSS) を用いて有限断層モデルを即時推定するための実用的な手順について述べたものである。GNSS 測位は、GNSS 衛星からの測位信号を GNSS 受信機で記録し、それを解析することにより GNSS 観測点の地球上の位置を求める手法である。GNSS 連続観測は、地表変位を連続的に観測することが可能であることから、これまでも地殻変動研究に広く活用されてきた。さらに近年では、リアルタイム GNSS 解析の津波予測への重要性が指摘されている。これは、地震計のみではマグニチュード 8 を超える巨大地震に対しては推定される地震規模が飽和してしまうことが知られているが、GNSS 解析で得られる地表変位から有限断層モデルを推定すれば、このような巨大地震に対しても地震規模を飽和することなく求めることが可能となるためである。さらに、津波予測に必要な海底面変動も正確に与えることができる。しかし、これまで実用防災システムとしてリアルタイム GNSS 解析が実装された例はない状況であった。理由としては、GNSS 解析で得られる変位は地震計よりもノイズが非常に大きく誤報を防ぐ手法が必要であったこと、計算コストの低いリアルタイム運用に適した断層モデル推定手法が未開発であったことが挙げられる。

そこで、本論文では、リアルタイム GNSS 解析を用いて即時的に有限断層モデルを推定するためのアルゴリズムを開発するとともに、実システムとして実装し検証する。そして、リアルタイム解析試験を通してシステム全体の性能を検証する他、過去の巨大地震発生時のデータ及びシミュレーションデータを用いて断層モデル推定性能を検証する。さらに、日本周辺の沈み込み帯で発生する巨大地震を、GNSS 観測に基づいて即時断層モデル推定した際の制限についても議論することとする。また、今回開発した手順は GEONET に基づく実際のシステムに実装し、2016 年 4 月から運用が始まっており、システム名称は REGARD と命名された。その後、REGARD システムはすでに 2016 年熊本地震 (気象庁マグニチュード 7.3) を経験し、96.2% という高い Variance Reduction (VR) で有限断層モデルを推定するなどの実績を残している。

第 2 章では、REGARD システムに実装されたアルゴリズムの詳細をまとめる。REGARD システムは、リアルタイム GNSS 測位サブシステム、イベント検知サブシステム、及び断層モデル推定サブシステムの 3 つのサブシステムからなる。まず、リアルタイム GNSS 測位サブシステムにおいては、GEONET 観測局の一秒毎の変位が RTKLIB ソフトウェアによってリアルタイムで計算される。次に、イベント検知サブシステムが得られた測位結果をリアルタイムで確認し、もし有意な変位が発生したと判断された場合は、断層モデル推定サブシステムを起動する。そして、断

層モデル推定サブシステムは、得られた変位から、断層位置及び形状を固定しない矩形断層モデル、プレート境界面上に固定したすべり分布モデルの二種類を推定する。イベント自動検知性能については、GEONET データを2か月間リアルタイム処理することで、試験を実施し、誤検出数が十分に少なくなるようイベント検知の閾値を決定した。同時に、M8クラスの地震を見逃すことがないような値に調整している。また、仮に誤検出があったとしても、断層モデル推定時にそれを適切に除外することが可能となるようにする必要がある。そこで、VRを閾値として導入し、これによってM8以上の地震に対して推定した有限断層モデルを適切に検証できることを確認した。

第3章では、リアルタイム環境における断層モデル推定の信頼性について、過去のデータを用いた検証を行う。対象としたのは、2003年十勝沖地震(Mw 8.3)、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)、そしてその最大余震である茨城県沖の地震(Mw 7.7)である。さらに、1707年宝永型南海トラフ地震(Mw 8.7)を想定した試験も行った。その結果、GNSS解析でこれらの地震を十分検知可能であることを確認した。また、これらの地震全てについて、地震発生後3分以内で精度良く断層モデル推定を行うことが可能であった。しかし、海溝沿いの断層すべりについては陸上のGNSS観測点のみでは十分な解像度を得ることが難しいことも明らかとなった。

第4章では、REGARDシステムによる2016年熊本地震(Mj 7.3)時の結果を示す。2016年熊本地震(Mj 7.3)は、REGARDシステムが運用開始後初めて経験した巨大な内陸地震である。この際には、REGARDシステムにより迅速に断層モデルを推定することに成功した。さらに2016年熊本地震に先立って発生した二つの前震(4月14日の地震(Mj 6.5)及び4月15日の地震(Mj 6.4))についてもREGARDシステムで得られた地震時変位を検証するとともに、後処理的にこれら前震のモデル推定を行い、その精度を検証した。後処理としたのは、REGARDシステムで自動モデル推定対象とする地震をM7以上の規模のもののみとしていたためである。結果として、2016年熊本地震についてはリアルタイムの断層モデル推定により、地震発生後1分でMw 6.85の解を、そして5分後にはMw 6.96(VR 96.2%)の解を得ることに成功した。得られた解は布田川断層に沿った右横ずれのすべりを示しており、これは後処理によるGNSS及びInSAR解析から得られた解ともよく整合していた。ただし、4月14日の前震及び4月15日の前震については、これらに伴い有意な変位が検出されたものの、推定した断層モデルは布田川断層の共役断層に推定されてしまった。このようにM6クラスの規模の地震をモデル化するにはまだ課題が残るものの、上記の結果はGNSSデータを基にした内陸地震に対しての地震警報の新たな可能性を示すこととなった。

最後に、第5章で、これまでの結果を踏まえ、REGARDシステムの将来性につ

いて議論する。まず、内閣府や気象庁との連携による REGARD システムの防災利用について述べる。次に、今後のシステムの堅牢性をさらに高めていくために重要となる事項をまとめる。特に測位精度の向上手法は極めて重要である。ここでは考えられる GNSS 測位精度向上手法をレビューするとともに、最も大きなノイズ源であるマルチパス誤差の低減手法については、位相残差データを利用した手法を検討し、その具体的な効果を含めて論じる。さらに、海溝沿いの断層すべりの検出精度の改善のために、GNSS 以外のデータ利用についても可能性、そして、REGARD システムの他の現象への適用の可能性について、例えば、火山活動、電離層擾乱について述べることとする。最後に GNSS 観測を用いた津波警報の強化に関する国際動向についても述べる。