

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

高サンプリング GPS 観測・解析技術の高度化と火山観測への応用

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 新たな観測技術の開発

(2) 宇宙技術等の利用の高度化

ア. 宇宙測地技術

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-2) 火山噴火準備過程

ア. マグマ上昇・蓄積過程

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

GPS を火山噴火過程・地震震源過程解析等に定常的に用いることのできる超広帯域変位計として利用するために、現在明らかになっている、以下の問題点を本課題の 5 か年の到達目標に設定する。

(1) 全時間帯域におけるシグナルとノイズ、パラメータ間の分離困難性

(2) 数時間スケールの時間帯域における気象ノイズによる座標値の擾乱。

(1) に関しては、日本では高精度の潮汐モデルが得られている。このことを利用して、GPS で観測されている潮汐を潮汐モデルと比較し、GPS 解析における誤差要因を詳しく調べることで、解析精度を更に向上させることが可能と考える。すなわち、潮汐モデルをリファレンスとした客観的な精度評価手法の確立を行い、それに基づいた精度向上を目指す。目指す精度は、全ての時間帯域において潮汐モデルと観測値の 5 mm 以内での一致である。また、GPS による座標値時系列のノイズ低減のため、通常の GPS 解析では一般的ではない、気圧荷重による地表面変位の影響に関しても考慮した解析等を行い、精度向上を目指す。なお、GPS 以外の測位衛星 (GNSS) を解析に取り入れる事による精度向上も目指す。(2) は、座標値と気象ノイズ (大気遅延量) の同時推定がこの時間帯域では難しい事から生じる問題である。そのため数値予報モデルによる格子点値を先験情報とした大気遅延量の推定とその評価を行う。さらに、これらと平行して、本研究計画によって得られた知見を実際のデータで生かすため、桜島や岩手山等の火山地域において高サンプリング GPS 観測を行う。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度においては、(6) 本課題の 5 か年の到達目標の (1) に示した潮汐モデルに基づくシグナル・ノイズの分離精度評価の手法の確立を行う。また (2) に示した数値予報モデルに基づく大気遅延量の推定手法の構築、及びその評価を開始する。さらに、桜島・岩手山等での高サンプリング GPS 観測を開始し、データの蓄積を開始する。

平成 22 年度以降においては、平成 21 年度に開始した桜島・岩手山等での GPS 観測を継続して行い、安定したデータ蓄積に努める。また日本全国のデータに対して潮汐モデルに基づくシグナル・ノイズの分離精度評価を行い、その時空間的な不均質性を明らかにし、誤差要因の把握を進める。更に火山地域等、地形が急峻で数値予報モデルの適用が難しい地域における GPS 座標値の挙動の精査も行き、GPS データに含まれるシグナルとノイズの分離を目指す。

(7) 平成 24 年度成果の概要：

平成 24 年度に実施した内容は、(1) 開発中のリアルタイム GPS 時系列を用いた地震時変位の自動検知及び地震時変位量推定アルゴリズム (RAPiD: Real-time Automatic detection method for Permanent Displacement, Ohta et al., *JGR*, 2012) の可用性評価、(2) リアルタイム精密単独測位 (PPP) の精度評価、(3) リアルタイム GPS 時系列の可視化ツールの開発、の 3 項目である。以下に各項目の詳細を記す。

(1) 隣接観測点連携アルゴリズムの精度評価

H23 年度に開発した、隣り合う観測点でのイベント検知情報を共有することで地震時変位の誤検知を低減するアルゴリズム (以下、隣接観測点連携アルゴリズム) を 2011 年東北地方太平洋沖地震時のデータに適用し、その性能評価を行った。本アルゴリズムは、自身とそれに隣接する複数観測点で同時に永久変位を検知した場合に、初めて地震発生と判断するものである。

図 1 に RAPiD によってイベントが検知された観測点 (黒丸印) 及び隣接観測点連携アルゴリズムによって周辺観測点においてイベントが検知され、地震発生と判断された観測点 (赤丸印) の分布を、2 秒毎のスナップショットで示す。東北地方太平洋沖地震の発生 44 秒後、牡鹿半島先端の 0550 (宮城県牡鹿) で最初にイベントが検知され、その後イベントが検知される観測点が順次周辺に拡大している。そして地震発生後 60 秒が経過した段階で、「同時に全ての周辺観測点でイベント検知をする」という条件が 3 観測点で満たされ、「地震発生」と判断された。ただし、このアルゴリズムでは 3 点以上の観測点の、全ての隣接観測点でイベント検知されるという条件で「地震発生」の判断を行う。このため、最初に「地震発生」と判断された 3 観測点には、最初にイベントが検知された 0550 (宮城県牡鹿) が含まれておらず、迅速なイベント検知には寄与していないことが分かった。また今回の数値実験では、単純にドロネー三角形分割を採用したため、沿岸や半島部の先端に位置する観測点では極端に長い基線を持つ三角形が自動生成されている。図 1 の 0550 (宮城県牡鹿) では最も長い基線は福島県の観測点と結ばれてしまっているため、「地震発生」の判断が 62 秒後まで大幅に遅れている。こうした遅れは早期警報の観点から問題であり、事前に隣接観測点の定義を最適化する必要がある。

以上のような改善の余地はあるが、隣接観測点連携アルゴリズムを 2011 年東北地方太平洋沖地震に適用することによって、RTK-GPS のみで地震発生から 60 秒に「地震発生」と判定できることを示した。このような自動判定は、人間による判断を介すること無く次のステップである震源断層推定につながる事が可能であり、実運用を考える上でも有用である。また隣接観測点連携アルゴリズムは現在、国土地理院と東北大学の共同研究「津波予測支援のための GNSS リアルタイム解析に関する研究」の一環として、国土地理院において試験運用が進められているリアルタイム GPS 解析システム (プロトタイプ) に実装されている。

(2) リアルタイム精密単独測位 (PPP) の精度評価

GPS データを用いてリアルタイムに変位を得る手法は大別して基線解析と精密単独測位 (PPP) の 2 つに大別される。基線解析では 2 つの衛星間及び受信機間で搬送波位相の 2 重位相差を取ることでより衛星の時計誤差等を相殺可能であり、安定した精度を確保しやすい。一方で得られる結果は基準局と移動局の 2 点間の相対変位であり、なおかつ解析時には両局のデータが必須である。それに対して PPP では得られる変位は地球中心に対する絶対座標であり、解析時に基準局データを必要としないが、衛星の時計誤差情報をインターネット経由で外部から得る必要があること、精度が基線解析と比較して現時点ではそれほど高くないこと等のデメリットがある。そこでリアルタイム PPP 時系列の精度を検証するために、商用リアルタイム PPP 解析サービスである StarFire により得られる時系列の精度評価を行った。StarFire はその解析エンジンに GIPSY-OASIS II を採用した商用サービスであり、静止衛

星からリアルタイムで衛星軌道情報及び時計補正情報を受けることでインターネット環境が無い場所においても PPP 解が得られる。2012 年 10 月 24-28 日にアンテナを移動させずに静止状態で精度評価を行った結果、座標値の標準偏差は水平で 18mm, 上下で 41mm となった。また後処理 PPP によって推定された日座標値との差異は南北 14mm, 東西 5mm, 上下で 12mm となった。この結果を Ohta et al. (JGR, 2012) による RTK-GPS 測位の基線長依存性のグラフと比較すると、基線長が 600km 程度以上であれば、基線解析よりも StarFire の精度が良好になることが分かった。

(3) リアルタイム GPS 時系列可視化ツールの開発

リアルタイム GPS 時系列を用いて地殻/地盤変動監視を行う場合、ユーザ側で時系列を表示する必要がある。しかし一般的に、LINUX 上で運用されるリアルタイム GPS 解析の結果を図示するためにはコマンドラインベースでの図化作業が必要となり、特定のユーザ以外は参照が難しい。そこで Web サーバ上の可視化ツールの開発を開始した。使用したデータは国土地理院の GEONET リアルタイムデータ (国土地理院と東北大学による共同研究、「津波予測支援のための GNSS リアルタイム解析に関する研究」の枠組みに基づくもの) である。現段階では、任意の観測点の過去 1 分から 1 時間の間の時系列データを GUI によって描画可能である。現在は静止画のみであるが、将来的にはリアルタイムで時系列が描画されるシステムを構築する。

(8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

小林竜也, 太田雄策, 日野亮太, 三浦 哲, 藤本博己, 対馬弘晃, 出町知嗣, 立花憲司, 2012, 地震時永久変位即時推定手法の開発およびその 2011 年東北地方太平洋沖地震への適用, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会.

小林竜也, 太田雄策, 三浦 哲, 日野亮太, 藤本博己, 出町知嗣, 立花憲司, 2012, 隣接観測点の情報を用いた RTK-GPS による地震時永久変位自動検知アルゴリズムの改良, 測地学会誌, 58(2), 77-87.

Ohta, Y., R. Hino, H. Tsushima, and S. Miura, 2012, Quasi real-time fault model estimation based on RTK-GPS analysis, International Workshop of Special Project for Reducing Vulnerability for Urban Mega Earthquake Disasters.

Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, R. Hino, S. Miura, T. Inuma, and H. Fujimoto, 2012, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on real-time GPS analysis, Tsunami Workshop by Sentinel Asia.

Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Inuma, and H. Fujimoto, 2012, Newly Developed an Algorithm to Detect/Estimate Static Ground Displacements for Near-Field Tsunami Forecasting Based on the RTK-GPS Data, SSA 2012 Annual Meeting.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

これまでに開発を行ってきた RAPiD アルゴリズムの高度化を図る。また長距離基線リアルタイム GPS データ時系列の高精度化を図る。また、リアルタイム GPS 時系列可視化の高度化を進める。また平成 24 年度に実施予定であったが、成果が得られていない気象ノイズ低減のための数値予報モデルによる格子点値を先験情報とした大気遅延量の推定とその評価作業を進める。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

太田 雄策, 植木 貞人 他

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所 (三浦哲)、京都大学防災研究所 (井口正人)

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話 : 022-225-1950

e-mail : zisin-yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp

URL : http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：太田雄策

所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

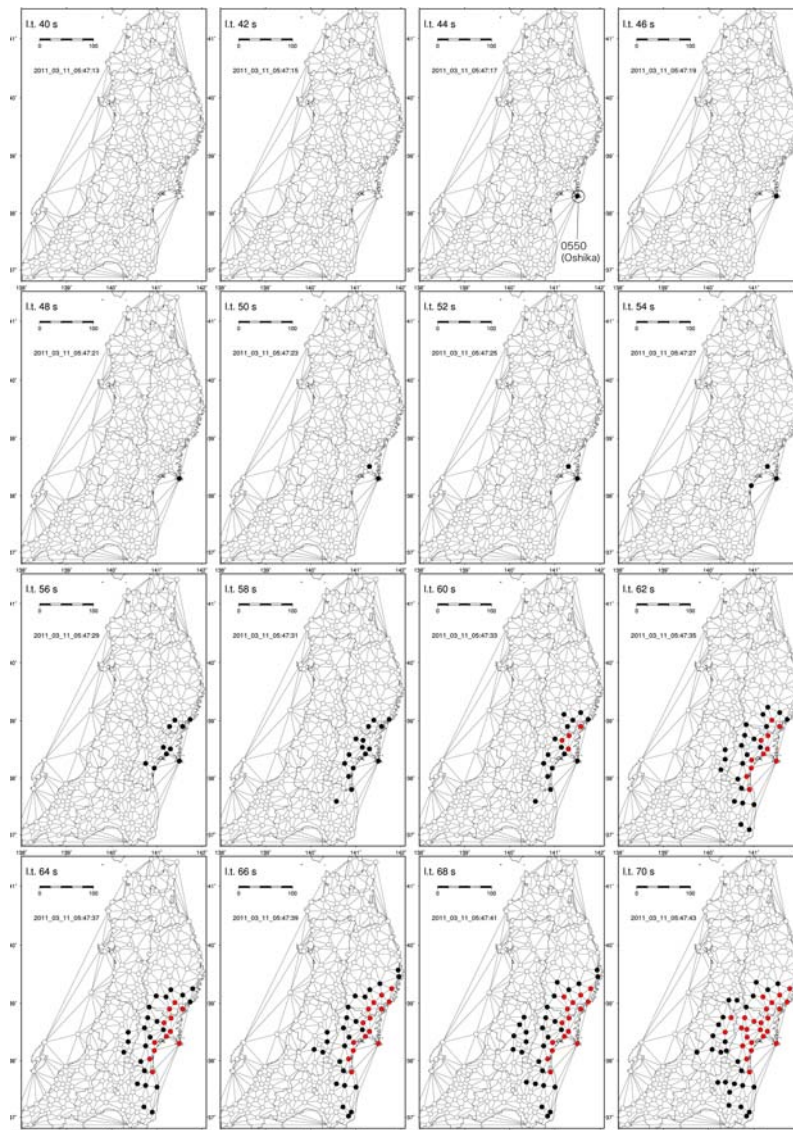


図 1

2011年東北地方太平洋沖地震時のデータに対し、隣接観測点連携アルゴリズムを適用した例。黒丸印が変位を検知した観測点、赤丸印が地震発生と判断された観測点。

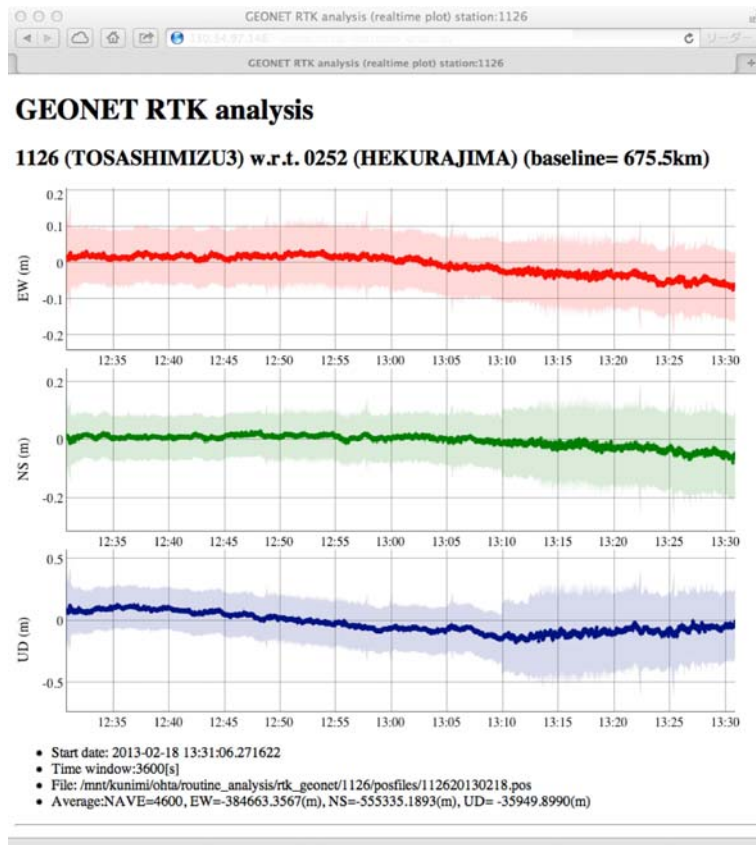


図 2

リアルタイム GPS データ可視化の例。 Web ブラウザ上で確認ができる。