

( 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を行い、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 ) 計画期間中 ( 平成 21 年度 ~ 25 年度 ) の成果の概要 :

本研究課題においては、主に高サンプリング GPS 解析の高度化を主に実施してきた。その中でも特に、リアルタイム GPS (GNSS) 解析の高精度化および、それらを用いて巨大地震規模を即時に推定する手法の開発・高度化に特に注力してきた。さらにそれら開発した技術を現業機関 (国土地理院) へ移転し、実際の地殻変動監視に使用可能なシステムにするための技術協力を進めてきた。以下に、計画期間中の成果の概要を年次進行に沿って示す。

平成 21 年度では、潮汐モデルに基づくシグナル・ノイズの分離精度評価手法確立の一環として、南アラスカにおける高精度海洋潮汐モデルとキネマティック GPS 解析時系列から抽出された潮汐成分の比較を行った (Inazu et al., 2009)。その結果アラスカ南東部にある QUIC 観測点での事例では M2 分潮の振幅で 9mm、位相で 1 度以下的一致という結果を得た。この結果は、高精度な海洋潮汐モデルが GPS 時系列の精度評価をする上で重要な指標になりうることを示す結果である。さらにキネマティック GPS 時系列のノイズ特性をより詳細に精査するために GPS 時系列推定時の相関係数に着目した解析も同時に行った。特に精密単独測位 (PPP 法) では波数不確定性推定 (AR) が通常は難しいため、各推定パラメータ間の分離精度が悪い事が指摘されている。そのため PPP 法後に基線解析を改めて行う手法によりそれら分離精度向上が図られるかを検討した。その結果、座標値パラメータでは南北-東西間・東西-上下間の相関係数が AR を行った場合に大幅に小さくなる事が分かり、それらは特に年周・半年周成分の低減に効果的である事を明らかにした。

平成 22 年度では、リアルタイムキネマティック GPS (RTK-GPS) 解析を地震時・噴火活動時地殻変動等の実時間把握に利用するために、RTK-GPS 時系列の長期安定性およびノイズレベルの基線長依存性についての評価を実施した。具体的にはリアルタイム解析において使用可能な放送暦および IGS 予報暦を用いた際の精度の差異について検討を行い、放送暦を利用した結果では東西成分において 2-3mm/100km、上下成分で 8.4mm/100km の基線長依存性が確認された。対照的に IGUP を用いた結果では東西成分で 1mm/100km 以下、上下成分でも 2.2mm/100km という極めて低い基線長依存性しか無いことが明らかになった。また RTK-GPS 時系列のノイズフロアを調べるためにゼロ基線長における基線解析を行い、その精度評価を行った。解析時には同一のアンテナを 2 つの GPS 受信機に接続し、2010 年 5 月 20 日 12:00 (GPS 時間) より 10 時間分の 20Hz サンプリング RINEX データを取得したデータを用いた。その結果、各座標成分の標準偏差は、東西成分で 0.85mm、南北成分で 1.17mm、鉛直成分で 1.62mm となった。ゼロ基線解析では、アンテナマルチパスの影響や対流圏・電離層遅延が完全に相殺されるため、得られる時系列は RTK-GPS 時系列のノイズフロアを示すことになる。これらの結果より、RTK-GPS のノイズレベルは水平で約 1mm、鉛直で約 2mm 程度であることを明らかにした。さらに、RTK-GPS 時系列データから時系列の長時間平均 (LTA) と短時間平均 (STA) の比較によって地震時永久変位を検出するアルゴリズム (RAPiD: Real-time Automatic detection method for Permanent Displacement) を開発した。開発したアルゴリズムを 2008 年岩手・宮城内陸地震の際の 1Hz 時系列に適用した結果、使用した 27 観測点のうち 20 の観測点において永久変位量の推定に成功し、推定完了までの所要時間は約 80 秒であった。本手法による変位量推定結果は、後処理キネマティック解析による地殻変動場 (Ohta et al., EPS, 2008) と水平成分で 2cm 内の精度で一致し、RTK でも地震時変動検出のための実用的な精度が得られていることが確認することができた。また、鹿児島県諏訪之瀬島火山の GPS 観測点において 1 日以下の時定数を持つ火山山体膨張による地盤変動を検出した。2011 年 2 月 5 日 11 時 5 分 (日本時間) に発生した爆発的噴火において、基線長 2.1km の GPS 観測点間で噴火 10-12 時間程度前から基線長が 1-2cm 程度ゆっくり短縮し、噴火後急速に元の基線長に回復する様子

を 30 秒毎のキネマティック基線解析によって捉えた。この結果は、日座標値では変化が捉えられない急速な変動に対して、高サンプリング GPS 時系列が有効なツールであることが示す結果となった。

平成 23 年度では、平成 22 年度に開発を進めてきたリアルタイム GPS 時系列データから永久変位を自動的に検出する手法 (RAPiD アルゴリズム) を、2011 年東北地方太平洋沖地震時の国土地理院 GEONET 1 秒サンプリング GPS データに対して適用し、精度評価を行った。その結果、東北日本全域における東向きの変位および沿岸地域の顕著な沈降を自動検知することができた。また変位量推定では、日座標値との比較から水平成分において 10cm 程度の精度で変位量推定が可能であることを示した。さらに得られた永久変位データから矩形断層を逐次推定することで地震発生から 275 秒後に Mw8.7 という地震規模および断層面の広がりを推定することができた。さらに RAPiD アルゴリズムによってどの程度、正確に永久変位検知を行うことができるかを確かめるために、1 年間の時系列を用いて、永久変位が検知された時間帯、すなわち誤検知率を調べた。なおデータには国土地理院の電子基準点データ (30 秒サンプリング、2010 年 1 12 月) を用いた。なお当該期間には大きな変位を生じる様な地震は発生していない。基準点に依存した誤差を軽減して一般的な傾向を見るために、基準点を適宜変えながら基線長 87 1010 km の 102 基線について解析を行った結果、誤検知率は平均で 0.25% であることを確認した。さらにこの誤検知率をより低減させるために、隣り合う観測点での変位検知情報を共有することで正確な地震時変位を検出するアルゴリズム (隣接観測点連携アルゴリズム) を開発した。

平成 24 年度では、平成 23 年度に開発した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。その結果、地震発生後 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」と判断することが可能であることが分かった。これによって、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げることを可能にするため、実運用への展開を考える上でも重要な成果となった。また、これまで使用してきた基線解析による位置座標の推定ではなく、基準点を取らないリアルタイム精密単独測位 (PPP) の精度および安定性評価を実施した。具体的には商用リアルタイム 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。さらに、リアルタイム GPS 時系列を用いた地殻/地盤変動監視を行うための時系列可視化システムの開発を行った。また、平成 23 年度以降開発を進めてきた RAPiD アルゴリズムおよびリアルタイム GPS 解析技術等を国土地理院における地殻変動監視業務において使用するために、東北大学大学院理学研究科と国土地理院の間で共同研究協定を結び、開発した技術の移転等を進めた。

平成 25 年度は、平成 24 年度中に開発を行ったリアルタイム GPS 時系列の可視化システムの高度化、RAPiD アルゴリズムがアウトライズ地震に対してどの程度有効かについて数値実験による検討、および低消費電力 GPS 受信/記録システムの開発を行った。リアルタイム GPS 時系列の可視化システムの高度化では、昨年度の機能に加えて、準リアルタイムで時系列表示を可能にする機能の実装を進めた。開発した可視化システムは、国土地理院におけるリアルタイム GNSS 解析システムへの組み込みが決定し、2013 年度中に実装が完了する予定である。RAPiD アルゴリズムの可用性検証では、RAPiD アルゴリズムのプレート境界型地震以外の巨大地震に対する有効性を検証するために、1933 年昭和三陸地震を対象とした数値実験を行った。まず、相田 (1977, BERI) による断層モデル (Mw8.1) が

ら期待される GEONET 観測点における地震時変位を水平・上下の 3 成分で計算し、それらに対して RAPID アルゴリズムで検知が可能と考えられる変位量（水平 60mm, 上下 130mm）に基づいたランダムノイズを加えることで地表変位データを作成した。そして、それら変位データから先験情報付きの非線形インバージョン (Matsu'ura and Hasegawa, 1987) によって震源断層を再推定した。この時、インバージョンの際の初期値による結果のばらつきを見るために震源断層の位置、深さ、断層の長さ、幅、傾斜角、滑り量の各初期値に対して大きなランダム誤差を与え、それら初期値にもとづくインバージョンを 300 回試行した。その結果、推定された断層面の内、観測値をよく説明するグループの多くが真の断層位置よりも陸側に系統的にずれた場所に推定されていることが分かった。一方で推定されたマグニチュードは観測値をよく説明した上位 130 モデルの平均値で Mw8.2 となり、おおむねその地震規模を再現できることが分かった。これらは Mw8.0 を超えるようなイベントであれば、アウトライズ域でもリアルタイム GPS データと RAPID アルゴリズムによって変位を検知し、その震源断層を不確定性はあるものの推定可能であることを示す結果である。また、高サンプリング GPS データを多点展開するために必要となる低消費電力 GPS 観測/記録システムを新規に開発した。できる限り消費電力を抑えるために機能を最低限に絞ることによって受信機単体での平均消費電力を 1.5W 程度にまで抑えることに成功した。作成したプロトタイプ機は厳冬期の蔵王火山山頂における越冬用 GPS 受信機として 2013 年 11 月に設置し、良好なデータが 2014 年 1 月現在取得できていることを確認済みである。さらに熊野灘に 2014 年 1 月に設置した地殻変動・津波監視用係留ブイへも搭載し、データ取得を継続している。

- ( 8 ) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：  
山本淳平，長田幸仁，太田雄策，平原 聡，出町知嗣，中山貴史，立花憲司，佐藤俊也，木戸元之，藤本博己，日野亮太，三浦 哲，内田雅之，2013，衛星通信を活用したリアルタイム GPS 解析 - 地上通信障害時に地殻変動を実時間で把握するために - ，測地学会誌。  
山本淳平，長田幸仁，太田雄策，平原聡，出町知嗣，佐藤俊也，木戸元之，藤本博己，内田雅之，2013，セミリアルタイム海底地殻変動観測に向けた GNSS 測位精度評価，日本地球惑星科学連合 2013 年大会。  
出町知嗣，太田雄策，三浦哲，立花憲司，佐藤俊也，2013，リアルタイム GPS 解析結果可視化ツールの開発（序報），日本測地学会第 120 回講演会。  
川元智司，宮川康平，山口和典，西村卓也，宮原伐折羅，古屋智秋，酒井和紀，畑中雄樹，根本悟，辻宏道，太田雄策，日野亮太，木戸元之，飯沼卓史，藤本博己，三浦哲，2013 新しい GEONET リアルタイム解析システムの開発，日本地球惑星科学連合 2013。  
Ohta, Y., S. Miura, R. Hino, T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Kawamoto, K. Miyagawa, T. Yahagi, K. Yamaguchi, and H. Tsuji, and T. Nishimura, 2013, Real-time crustal deformation monitoring based on RTK-GPS: Application to 2011 Tohoku earthquake and its improvement for implementation to actual GPS network, IAG Scientific Assembly 2013 .

- ( 9 ) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

太田 雄策，三浦 哲，植木 貞人 他  
他機関との共同研究の有無：有  
京都大学防災研究所（井口正人）

- ( 10 ) 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/

( 11 ) 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