

(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、解析精度をさら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、およ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) 平成 22 年度成果の概要：

平成 22 年度にはリアルタイム GPS 解析の精度評価およびそれら時系列の高度利用についての研究を実施した。以下に各実施項目について詳細を述べる。

(1) リアルタイム GPS 時系列の長期安定性およびノイズの基線長依存性

近年、リアルタイムキネマティック-GPS (RTK-GPS) 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試みが進展しつつある(例えば西村(2008), Blewitt et al.,(2009))。地震計ではなく GPS データを用いる最大の利点は変位そのものを捉えることである。しかし、その精度は基線長に依存し、特に RTK-GPS の応用範囲として期待が大きい噴火活動の推移変化と、海溝型巨大地震等では必要とされる基線長が数 km-千 km スケールと全く異なる。例えば海溝型巨大地震を捉えるためにはその変位範囲が広範に及ぶために RTK-GPS 解析を行う際に中-長基線解析 (>100km) を行う必要があり、放送暦を使う場合、特に精度劣化が避けられない。また、RTK-GPS 時系列から自動的に変位を検出するためには、前提としてその長期的な安定性評価を行いそのノイズ特性を把握する事が、変位の誤認識等を避ける上で非常に重要である。こうした背景から、平成 22 年度は特に RTK-GPS 時系列の長期安定性評価とそのノイズ特性評価を行った。解析に用いたデータは国土地理院が提供する GEONET 30 秒サンプリングデータである。基準点としては 0036 (宮城県女川)、移動点側として 0033 (山形県新庄) を選択した。基線長は 103km である。解析には rtklib 2.4.0 (高須, 2010) を用いた。解析期間は 2009 年 1 月から 12 月末までの 1 年間で 30 秒毎解析で行い、衛星暦にはリアルタイム解析を念頭におき、放送暦を用いた。得られた結果は、103km 基線での年間を通じた標準偏差 (SD) で東西成分 3.9cm, 南北成分 4.2cm, 鉛直成分 12.9cm となった。太田 他 (2006) と同様の時系列表記を行い時系列のパターンを調べたところ、顕著な衛星軌道周回に伴う 1 恒星日毎に繰り返されるノイズ (sidereal noise) が確認できた。これは RTK-GPS においても sidereal filter 処理を行って S/N の向上を図ることが可能なことを示唆する結果である。また、得られた時系列には顕著な季節性が認められ、通算日 (冬期に相当) 1-100 日の SD は東西で 1.8cm と良好であるが、夏期に相当する通算日 200-300 日の SD は 5.7cm と約 3 倍悪化した。これは各成分共通の傾向を持つが特に鉛直成分の夏期の SD は 19cm にも達する。夏期と冬期のノイズパターンを調べるために、パワースペクトルを取って比較すると、特に 1,000 秒前後より長周期のノイズが夏期に増加しており、これは対流圏等の推定誤差等が原因と考えられる。より短基線 (13km) の 0918 との解析では水平成分で冬期において SD で 1cm を切る精度を持つものの、夏期の精度劣化は長基線と同様に認められる。次に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った。解析の際には GEONET 全点 1,240 点を用い、固定点には宮城県女川 (0036) を用いた。衛星暦として放送暦と IGS 予報暦 (IGUP) を用いて 2009 年 1 月 1 日 24 時間を 30 秒サンプリングで解析した結果、放送暦を利用した結果では顕著な基線長依存誤差が認められた。その値は東西成分で 3-4mm/100km, 上下成分で 7.4mm/100km となった。対照的に IGUP を用いた結果では水平成分で 1mm/100km, 上下成分でも 3.2mm/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 (図 1)。得られた結果を詳細に見ると、特に基線長が 150km 以下では放送暦および予報暦でその精度の差はほぼ無く、基線長が比較的短い場合 (例えば火山監視等) では各観測点で得られる放送暦で十分な精度があることが分かった。

最後に、より早いサンプリング間隔での精度を検証するためにゼロ基線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

口基線解析では、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 1mm、鉛直で 2mm 程度であることが明らかになった。

(2) リアルタイム GPS 時系列に基づく永久変位検出手法の開発

RTK-GPS 時系列データに基づき自動的に永久変位を検出することは、噴火活動の推移や地震時地殻変動を知る上で極めて重要である。こうした観点から平成 22 年度は RTK-GPS 時系列データから特に地震時永久変位を検出するアルゴリズムを開発した。永久変位の自動検知アルゴリズムは、地震波の P、S 波の自動検出に用いられている STA (短時間平均)・LTA (長時間平均) による判定法 (例えば、松村・他, 1988) を参考にした。具体的には、1Hz RTK-GPS 時系列に対して判定式: $D=(LTA-STA)-SD(LTA)$ を 1 秒ごとに計算し、D があらかじめ設定した閾値 K を越えた場合、永久変位検知と判断した。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., 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された (図.2)。

(3) キネマティック GPS 解析による日座標値以下の火山山体膨張の検出

日座標値以下の変動を噴火活動に伴う地盤変動および長期的なマグマ供給経路の変化を検出するために、2009 年度より設置されている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。諏訪之瀬島山体南麓の GPS 観測点のデータは、昨年 9 月の設置以来、長期的に見ると有意な山体変形は示しておらず、この期間中、地下からのマグマ供給はほぼ一定であることが考えられる。一方、比較的大きな爆発的噴火に先立つ山体の膨張、噴火後元に戻る事例をキネマティック解析によって検出した。例えば 2011 年 2 月 5 日 11 時 5 分 (日本時間) に発生した爆発的噴火では基線長 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が 30 秒キネマティック解析によって捉えられた。これは噴火前の山体膨張現象と噴火後の収縮過程を見ている可能性がある。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ものである。

参考文献:

Blewitt et al., J. Geod, 83, 335-343, 2009.

松村・他, 防災センター研究報告, 41, 44-64, 1988.

西村・他, JPGU2009 年大会予稿集, S150-002, 2009.

太田 他, 測地学会誌, 52(4), 309-318, 2006.

Ohta et al., EPS, 60, 1197-1201, 2008.

Takasu, T., IGS Workshop 2010, 2010.

==== 平成 23 年度の成果 ====

「課題番号: 9100」

平成 23 年度は、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震が発生したため、本地震に関して平成 22 年度中に開発したリアルタイム GPS 時系列における変位の自動検知および変位量推定アルゴリズムを適用する数値実験を主に行った。またリアルタイム GPS 時系列による変位自動検知アルゴリズムの実リアルタイムデータへの適用のためのプロトタイプを開発し、運用を開始した。以下に各項目について詳細を述べる。

1) リアルタイム GPS 時系列に基づく地震時断層面即時推定手法の開発

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 程度の差異で変位量の推定が可能であることを示した。日座標値による変位には余効変動や余震等による地震時変動が別途含まれていることを考慮すると、リアルタイム処理で推定された変位量はほぼ正確に地震時変位を捉えていると考えられる。さらに推定された地震時変動場を説明する断層面推定を Matsu 'ura and Hasegawa (PEPI, 1987) のインバージョン手法により逐次 (20 秒毎) 推定し、地震規模を迅速に把握する手法を開発した。その結果、地震発生後から約 180 秒間で M_w が 8.7 に到達することをほぼリアルタイムで把握可能なことが分かった (図 3)。これは、リアルタイム GPS データを用いることによって、地震発生後、極めて早い段階 (数分以内) で巨大地震 ($M8$ 超) の規模推定が可能であることを示す結果である。

(2) リアルタイム GPS 時系列の常時監視システムのプロトタイプ開発および試験公開

上記で述べたリアルタイム GPS 時系列に基づく変位自動検知アルゴリズムの実運用に向けて、実際に長距離リアルタイムキネマティック解析を行いつつ、変位自動検知を行うシステムのプロトタイプを開発した。一部解析結果に関しては WEB 上 (<http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/ohta/rtk/>) において準リアルタイムでの試験公開を開始した。

(8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
太田雄策, 三浦哲, 松村信介, 森俊行, 低価格 2 周波 GPS 受信機とデータロガーを用いた GPS 観測システムの構築, 測地学会誌, 56(3), 101-106, 2010.

太田雄策, 植木貞人, 井口正人, 桜島火山山腹における GPS 連続観測点の増設 (2009 年度). 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成 21 年度分報告書, 2010.

Kobayashi, T., Y. Ohta, and S. Miura, Development of an auto-detection technique for coseismic displacement using RTK-GPS, G-COE Symposium 2010 Dynamic Earth and Heterogeneous Structure, Sendai, Sendai City War Reconstruction Memorial Hall, July 13-15, 2010 .

Ohta, Y., T. Kobayashi, S. Miura, and T. Takasu, Can we detect the aseismic slip at plate boundary based on the RTK-GPS ?, G-COE Symposium 2010 Dynamic Earth and Heterogeneous Structure, Sendai, Sendai City War Reconstruction Memorial Hall, July 13-15, 2010 .

太田 雄策, 小林 竜也, 三浦 哲, 高須 知二, 中・長基線 RTK-GPS 時系列の長期安定性とそのノイズ特性評価, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 千葉, 幕張メッセ, SGD001-P02, 2010.

小林竜也, 太田雄策, 三浦哲, RTK-GPS データによる地震時永久変位自動検出手法の開発, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, SSS014-08, 2010.

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

平成 22 年度に一定の目処がついたリアルタイム GPS 時系列に基づく永久変位検出手法の開発を更に進め、地震時のような早い変動だけではなく火山活動等に伴うゆっくりした変動に対しても適用が可能なアルゴリズムへと発展させる。また平成 22 年度には観測点の電源環境・ネットワーク等の環境面からリアルタイム解析が困難であった桜島や岩手山などの観測点においてリアルタイム解析を可能なように整備を行う。平行して、平成 22 年度に実施ができなかった気象ノイズの軽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開始する。

(10) 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)

(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

電話 : 022-225-1950

FAX : 022-264-3292

e-mail : ohta@aob.geophys.tohoku.ac.jp

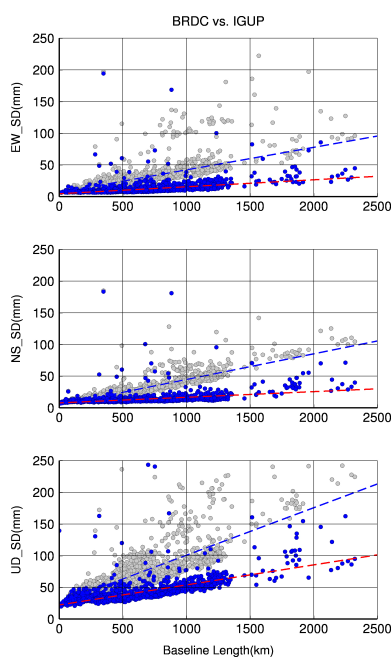


図.1.

2009年1月1日における GEONET 全点に対する 30 秒 RTK-GPS 解析による時系列の標準偏差の基線長依存性 . 上から東西, 南北, 上下各成分を示す . 固定点は宮城県女川 (0036). 灰色丸が放送暦を用いた場合, 青色丸が予報暦を用いた場合をそれぞれ示す . 横軸に固定点からの基線長を, 縦軸に各基線長における時系列の標準偏差を示す . 青色破線・赤色破線はそれぞれ灰色丸・青色丸に近似した回帰直線を示す .

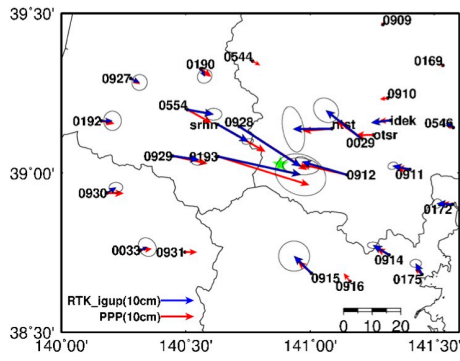


図.2. 2008年岩手・宮城内陸地震による地震時地殻変動の後処理キネマティック解析による水平変位量 (Ohta et al., 2008) (赤色) と本研究で開発した変位量自動検出アルゴリズムによって推定された水平変位量の比較 (青色) .

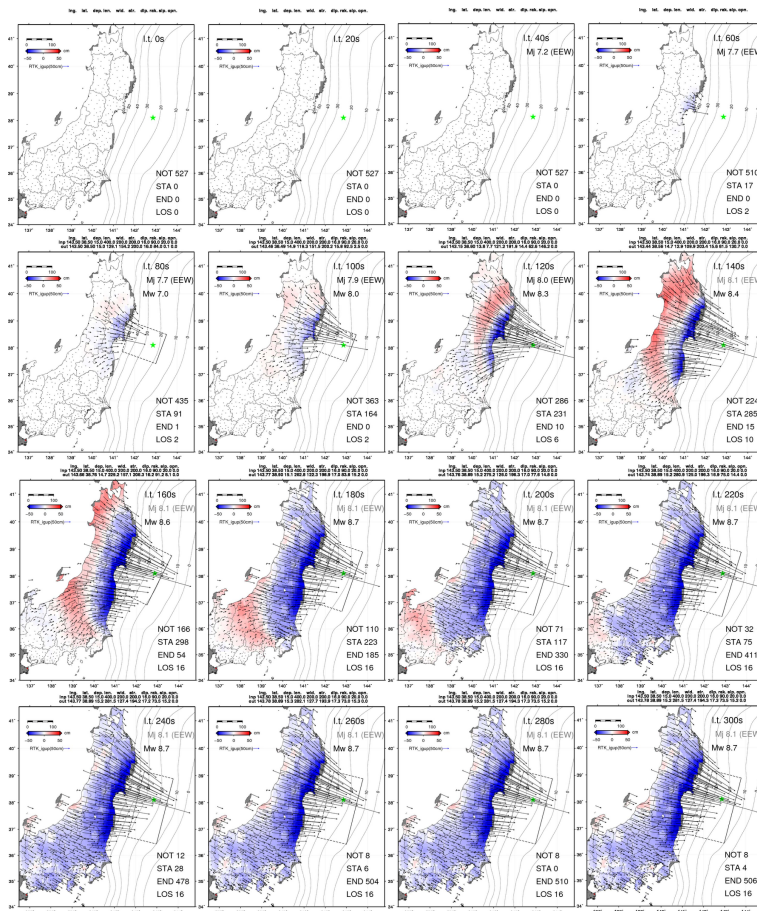


図.3. RTK-GPS 時系列に対して LTA/STA を用いた変位の自動検知, 変位量の自動推定アルゴリズム (Kobayashi et al., 2010) を適用して得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の水平 (矢印), 上下変動場 (赤, 青色) のスナップショット. 図中黒矩形が得られた変動場から推定された震源断層モデル. 図中に気象庁緊急地震速報による M と本手法で推定される Mw を併記した. 地震発生後 430 秒時点で中部日本に広く現れている南東向きの水平変動は, 変位量の自動推定を行う際に地震波の影響を受けて誤推定しているために生じており, 変位量推定アルゴリズムの改良が今後必要である.