

電子基準点精密単独測位キネマティック解析プロトタイプシステムの構築 A Prototype System for PPP Kinematic Positioning of Japanese GEONET Stations

地理地殻活動研究センター 宗包浩志
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Hiroshi MUNEKANE

要 旨

キネマティック GNSS 座標解には時間分解能が高い (1~30 秒) という利点があり, 現在国土地理院で行われている GNSS データの定常解析では困難である, 地震が連続して発生した際のそれぞれの地震時地殻変動の分離や火山活動に伴う急速な地殻変動の監視に対して有効であると期待されている. そこで, 精密単独測位法により電子基準点データから定常的にキネマティック GNSS 座標解を生成するシステムのプロトタイプを試作した. 本プロトタイプシステムでは, 解析のタイミングに応じて超速報解, 速報解, 最終解の 3 種類の解が計算される. 超速報解は, データ取得後 6~12 時間後, 速報解は 2 日後, 最終解では 2 週間後に座標解が算出される. 座標解のすべてが, 30 秒間隔のキネマティック解である. 生成された座標解の精度を評価したところ, すべての座標解で水平成分の座標再現性が 1cm 程度であることを確認した. このことは, 地震時地殻変動については 5mm 程度の変動が抽出可能であることを示す. また, 本プロトタイプシステムの座標解は, 適切な参照基準点をとることにより, 長期的な地殻変動の監視にも適用可能であることを確認した.

1. はじめに

国土地理院では, GNSS 連続観測システム (GEONET) で取得される GNSS データを定常的に解析し, 座標解を算出している. その結果得られる地殻変動データは, 地震調査委員会, 地震防災対策強化地域判定会において地震活動の評価等に利用されるとともに, 火山噴火予知連絡会においても活火山の山体の変化の監視や, 噴火時の噴火活動の推移監視における基礎的な資料として活用されている. 現在, 定常解析としては, 解析のタイミングに応じて Q3 解, R3 解, F3 解の 3 種類の解析が行われている (表-1). しかしながら, 地殻変動の監視においては現在の定常解析では不十分な場合もある. その原因の一つとして時間分解能の不足があげられる. 現状では, 最も時間分解能が高い Q3 解でも時間分解能は 6 時間である. ところが, 例えば平成 28 年熊本地震においては, 4 月 14 日の M6.5 の地震に続いて, 約 3 時間後に同等の規模の余震が発生したが, 定常解析では M6.5 の地震による地殻変動と余震に

よる地殻変動を分離できず, 地震像の把握に支障があった. また, 巨大地震後に発生する余効変動は, 地震発生直後から急速に減衰していくため, これを正確に見積もるためには地震直後から余効変動をとらえる必要があるが, 定常解析の時間分解能では抽出した地殻変動量に本震と余効変動の影響が両方含まれてしまい, 地震計による地震動から求めた断層モデルなどの他のモデルと比較が行えず, 地震活動の評価に問題をきたす可能性がある. さらに, 火山において噴火直前の山体膨張と, 噴火後の収縮を監視するには, 数分の時間分解能が必要であるが, 現状の定常解析ではそれは不可能である.

現状の定常解析よりも時間分解能を向上させ, かつ精度の劣化をきたさない解析法として近年注目されているのが精密単独測位 (Precise Point Positioning, 以下「PPP」という.) と呼ばれる手法である. PPP は, 国際 GNSS 事業 (International GNSS Service, 以下「IGS」という.) などの外部機関から提供される, GNSS 衛星の精密な軌道及び時刻情報を用いて, 各観測局で単独測位を行うものである. PPP を用いれば, 格段に少ない計算負荷で, 1 エポックごとの位置を算出できる. PPP は相対測位に比べ精度が若干劣っていたが, 近年, 衛星毎に異なる位相端数バイアス (Fractional Cycle Bias, 以下「FCB」という.) と呼ばれる補正情報を追加することで, 単独測位において波数の整数不確定性を決定する (Ambiguity Resolution; AR) ことが可能となり (以下「PPP-AR 法」という.), 相対測位に匹敵する精度を出せるようになった (例えば Ge et al., 2008). さらに PPP-AR 法には, 超巨大地震で広域な地殻変動が発生した場合についても, 電子基準点の変位を直接に算出でき固定点が不要であるという利点もある.

このような背景のもと, PPP-AR 法をベースに, より高い時間分解能をもつ GNSS の定常解析システムのプロトタイプとなる, 電子基準点精密単独測位キネマティック解析プロトタイプシステム (以下「本プロトタイプシステム」という.) を試作したので, 本稿ではその概要について報告する.

表-1 国土地理院で行われている定常解析

種類	間隔	データ取得後解が出るまでの時間	水平精度の目安※
Q3解	3時間	3~9時間	1cm
R3解	1日	2日	2mm
F3解	1日	2~3週間	2mm

※座標再現性の代表的な値

2. 本プロトタイプシステムの概要

今回試作した本プロトタイプシステムは、補正情報生成部及び測位部から構成される。補正情報生成部は、PPPに必要な補正情報（衛星位置、衛星時計及びFCB）を生成する部分である。また、測位部は、生成された補正情報を用いてGNSSデータのPPPキネマティック解析を行う部分である。

本プロトタイプシステムでは、補正情報生成部については宇宙航空研究開発機構が開発されたソフトウェアMADOCA（高須ほか、2013）を導入した。MADOCAは“Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis”の略称であり、マルチGNSS対応のPPP補正情報推定ソフトウェアである。また、測位部については、オープンソースの測位ソフトウェアRTKLIB version 2.4.3（Takasu, 2011）を導入した。

本プロトタイプシステムでは、解析のタイミングに応じて超速報解、速報解、最終解の3種類の解が計算される。超速報解は、データ取得後6~12時間後、速報解は2日後、最終解では2週間後に座標解が算出される。座標解のすべてが、サンプリング間隔30秒のキネマティック解である。

本プロトタイプシステムの概要を図-1に示す。まず補正情報生成部において、IGSの観測局60~90局を用いて補正情報の生成が行われる。補正情報の対象となるGNSS衛星はGPS及びGLONASSである。解析をスタートするタイミングは、超速報解においては1日4回（UTC 1:20, 7:20, 13:20, 19:20）、速報解、最終解においては1日1回（速報解：UTC 17:30, 最終解：UTC 2:00）である。解析窓は24時間である。補正情報の生成にかかる時間は計算機のスペックにも依存するが、現状では概ね1時間~1時間30分程度である。その結果、超速報解についてはデータ取得後概ね3時間後、速報解については2日後、最終解については2週間後に補正情報の計算が完了する。次に、測位部において補正情報を用いたPPP-AR法によるキネマティックGNSS解析が行われる。解析対象はすべての電子基準点で、用いるGNSS衛星はGPS及びGLONASSである。解析をスタートするタイミングは、超速報解においては1日4回（UTC 3:20, 9:20, 15:20, 21:20）、速報解、最終解においては1日1回（速報解：UTC 19:30, 最終解：UTC 4:00）

である。解析窓は、補正情報と同じ24時間である。全電子基準点のキネマティックGNSS解析にかかる時間は、計算機のスペックにも依存するが、現状では概ね2時間~2時間30分程度である。その結果、超速報解についてはデータ取得後概ね6~12時間後、速報解については2日後、最終解については2週間後に座標解が得られる。

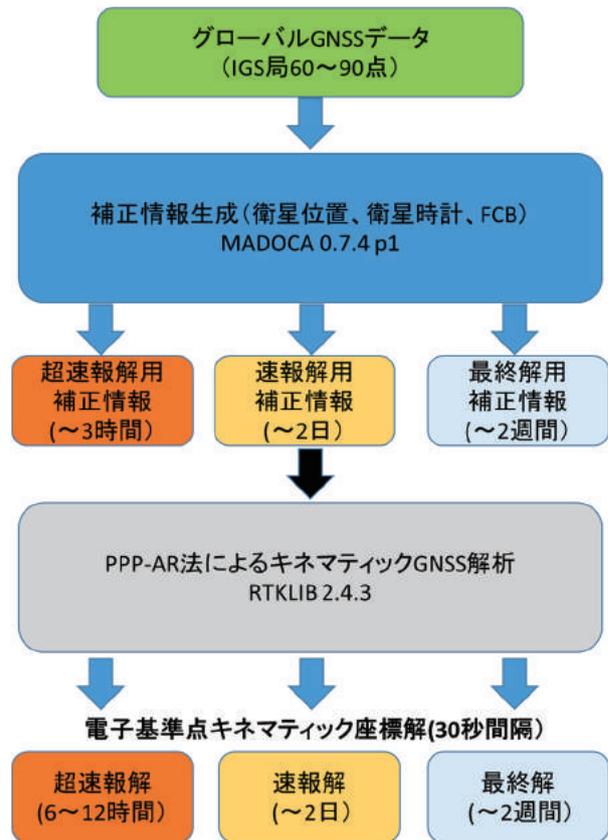


図-1 本プロトタイプシステムの概要

3. 座標解の特性について

まず本プロトタイプシステムで得られたキネマティックGNSS座標解の例を図-2に示す。図-2は、電子基準点稚内（940001）の平成28年9月6日から9月12日にかけての1週間の時系列である。最終解の平均値を基準座標値とし、そこからの差を示している。なお、超速報解については、1日に4回、6時間毎にずれた解が得られるが、重複部分については最新の解を採用することとして単一の時系列として示している。図-2で明らかなおとおり、座標解のすべての成分（東西、南北、上下）において、超速報解、速報解、最終解がほぼ重なっており、それぞれの座標解間のバイアスは小さいことが見て取れる。実際最終解を基準とした解のずれの平均値は、超速報解と速報解で、それぞれ（東西、南北、上下）（mm）=（4.8, 3.2, 1.8）,（0.7, -0.045, -0.3）であった。また、精度の指標となる座標解の再現性（標準偏差）は、

超速報解で（東西，南北，上下）（mm）＝（8.1，8.5，18），速報解で（6.8，7.5，16），最終解で（6.4，6.9，16）となり，最終解が最も小さいものの，すべての解でほぼ同等の精度が得られた。

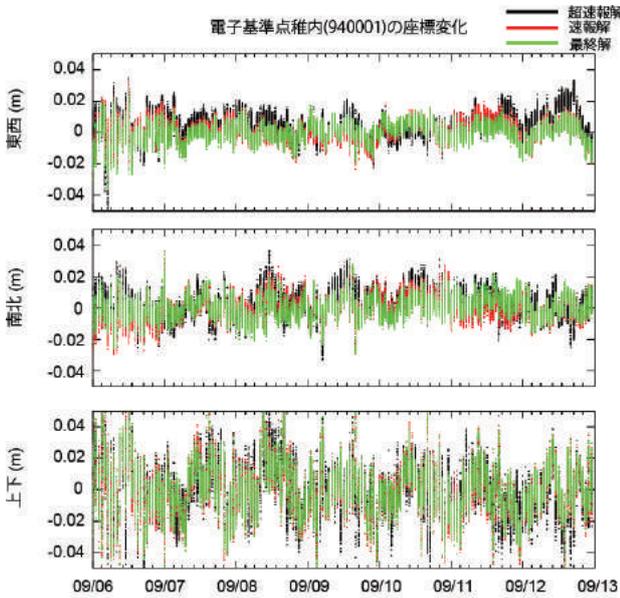


図-2 本プロトタイプシステムで得られた GNSS 座標解の例

次に，最終解を用いて，全電子基準点における座標再現性を統計的に評価する．図-3 は，2015 年のすべての日について，一日の中の座標値の再現性を計算し，その平均を取ったもので，観測点の緯度に対してプロットしている．ほとんどの観測点で座標値の再現性が水平成分では 1cm，上下方向では 3cm を切っている．ただし，図中黒丸で囲った点（電子基準点西淡（950362））のように，水平成分の座標値の再現性が数 cm を超えるような観測点も見られる．なお，全体的に低緯度ほど座標値の再現性が悪くなる傾向が見られるが，これは低緯度ほど気温が平均的に高く，GNSS 解析における誤差源である大気中の水蒸気の量が多くなるためであると考えられる（Munekane and Boehm, 2010）．

最後に，最終解を用いて座標解の長期安定性を検証する．図-4 は，電子基準点つくば 2A（022006）について，本プロトタイプシステムで得られたキネマティック座標解を一日平均したものと，IGS から公開されている座標解の中で最も精度がよい結合解を比較したものである．東西成分で 3-6 月にかけてややずれが目立つがそれ以外ではその差はほぼ一定であり，両者は概ね整合していると言える．両者の相対差の平均値は 6.4mm，そのばらつきは 3.3mm とごくわずかである．

以上を踏まえ，本プロトタイプシステムで得られる座標解の特性を表-2 にまとめる．

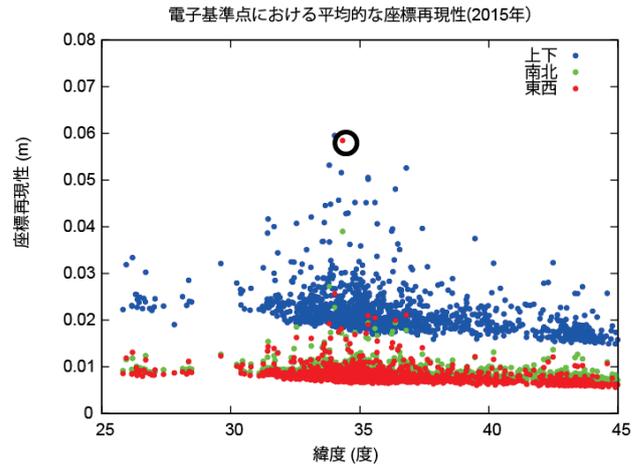


図-3 電子基準点における平均的な座標再現性．黒丸は電子基準点西淡（950362）

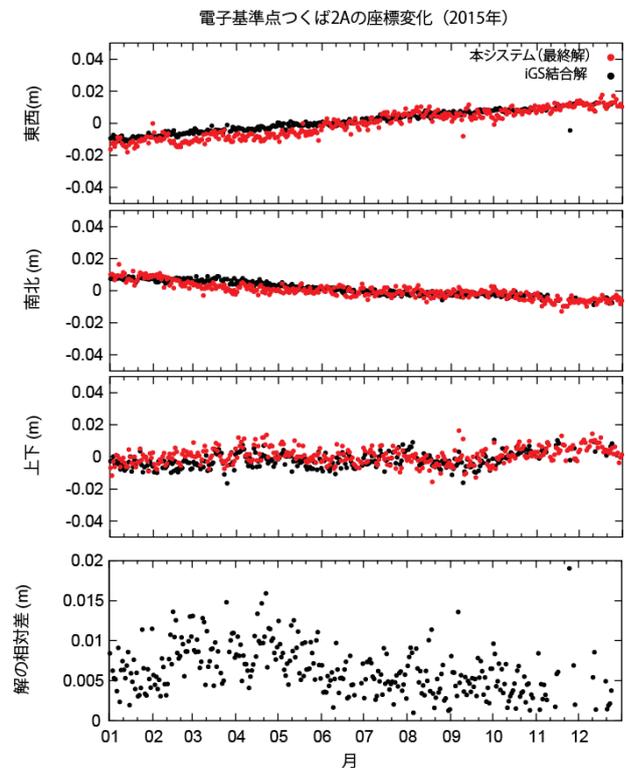


図-4 電子基準点つくば 2A（022006）における，最終解及び IGS 結合解の比較．最終解は 1 日毎の平均値

表-2 本プロトタイプシステムで得られる座標解

種類	間隔	データ取得後解が出るまでの時間	水平精度の目安※
超速報解	3 時間	6～12 時間	最終解と同程度
速報解	1 日	2 日	最終解と同程度
最終解	1 日	2 週間	1cm

※座標再現性の代表的な値

4. 地殻変動監視への応用例

4.1 平成 28 年熊本地震

平成28年4月中旬から熊本地方で活発な地震活動が発生し、一連の活動は気象庁により平成28年(2016年)熊本地震と命名された(以下「平成28年熊本地震」という.)。その中でも顕著な地震は、2016年4月14日21時26分に発生したM6.5の地震、4月15日00時03分に発生したM6.4の地震、そして最初の地震から2日後の4月16日01時25分に発生したM7.3の地震である。最初の2つの地震は日奈久断層帯の高野-白旗区間の活動、そして最も大きな3番目の地震は、布田川断層帯の布田川区間の活動によると考えられる(地震調査委員会, 2016)。

国土地理院では、地震発生直後より、GNSSの定常解析の座標解に基づきこれらの地震に伴う地殻変動を精査し、その結果を迅速にウェブサイト上で公表した。その内容については現在アーカイブページで確認できる(国土地理院, 2016)。ただし、最初の2つの地震(以下「前震群」という。)については、発生時刻がわずか3時間しか離れておらず、定常解析では時間分解能の不足からそれぞれの地震の寄与を分離することが不可能であったため、両者の寄与をまとめて公表している(檜山ほか, 2016)。一方、2章で見たとおり、本プロトタイプシステムの座標解の時間分解能は30秒であり、前震群について、それぞれの地殻変動を分離することが可能である。そこで、本プロトタイプシステムの座標解を用いてそれぞれの地殻変動を分離した上で、有限矩形断層モデルを仮定した断層モデルの決定を試みた。なお、平成28年熊本地震発生時期には、本プロトタイプシステムはまだ稼動していなかったが、地震発生後最終解のさかのぼり解析を実施し、その座標解を用いて解析を行った。

図-5 に本プロトタイプシステムで得られた平成28年熊本地震前震群発生前後の電子基準点城南(021071)の座標時系列を示す。定常解析では分離が難しかった前震群の2つの地震による変位がそれぞれ明瞭に捉えられていることが分かる。次に、座標時系列からそれぞれの地震発生時刻の前後5分間の座標値の平均の差を取ることで地震に伴う地殻変動を抽出した。さらにMCMC法(Foreman-Mackey et al., 2013)により抽出された地殻変動を説明する有限矩形断層モデルの推定を行った。

図-6 に抽出された地震時地殻変動と、推定された有限矩形断層モデルから計算される地殻変動をプロットしたものを示す。両者はよく整合しており、本プロトタイプシステムで推定された地震時の地殻変動が妥当であることを示す。また、図-7 に断層モデルのプロットを示す。両者ともよく似た走向を示し、ほぼ一直線上に並んでいる。このことは、この2つ

の地震が日奈久断層帯の高野-白旗区間の活動で生じたとする地震調査委員会の見解(地震調査委員会, 2016)と整合的である。断層の震源パラメータを表-3にまとめる。推定された断層パラメータは、地震波の解析から得られたCMT解と概ね整合的である(気象庁, 2016a)。

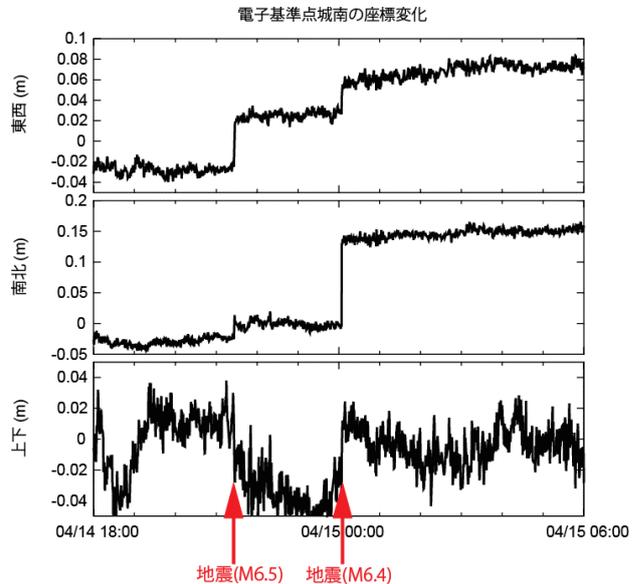


図-5 本プロトタイプシステムで得られた平成28年熊本地震前震群発生前後の電子基準点城南(021071)の座標時系列(最終解)

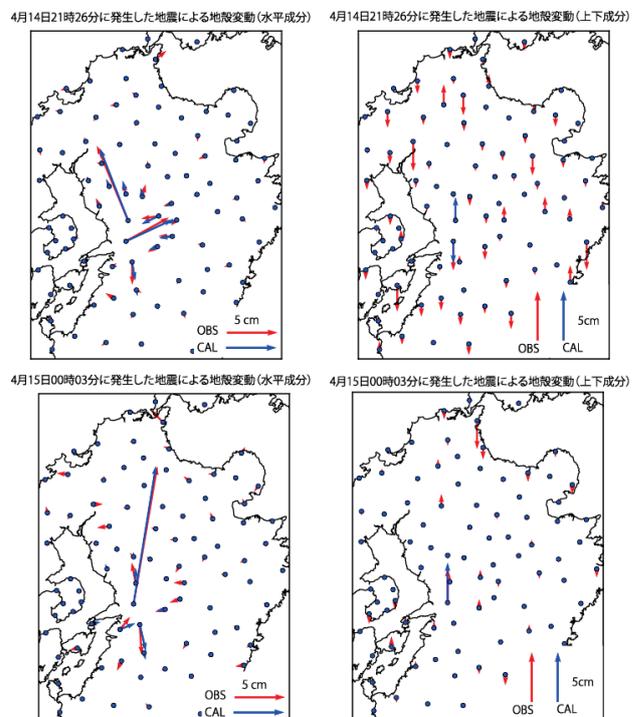


図-6 本プロトタイプシステムで得られた平成28年熊本地震前震群発生前後の電子基準点城南(021071)の座標時系列(最終解)

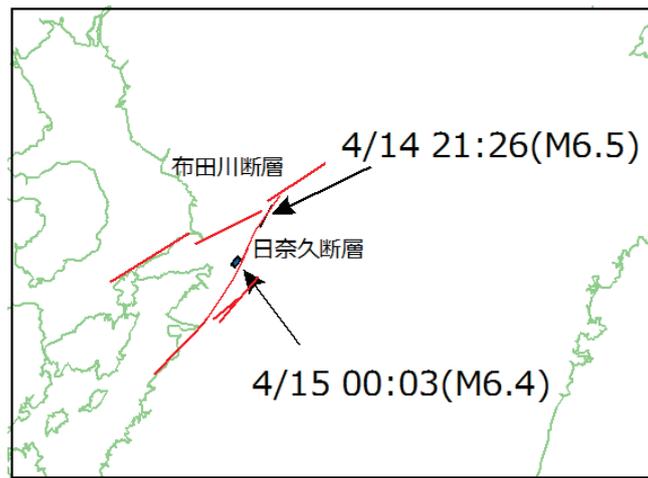


図-7 平成 28 年熊本地震の前震群それぞれの地震の有限矩形断層モデル。
赤線は、日奈久断層、布田川断層のトレース（地震調査委員会, 2016）

表-3 平成 28 年熊本地震の前震群の断層パラメータ。位置は断層の中央を表す。下限・上限は 95%信頼区間を表す。

	経度 [°]	緯度 [°]	深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	すべり角 [°]	すべり量 [m]	Mw
4 月 14 日 21 時 26 分の地震										
推定値	130.808	32.753	4.9	6.1	2.2	208.0	88.3	163.3	4.1	6.16
下限	130.790	32.740	3.8	3.4	1.3	202.4	76.1	151.4	1.9	
上限	130.821	32.766	6.2	8.3	4.2	211.6	89.7	177.4	9.5	
(参考) 気象庁※	130.780	32.588	11			210	77	177		6.2
4 月 15 日 00 時 03 分の地震										
推定値	130.727	32.647	2.6	2.5	1.7	216.1	45.8	183.6	10.5	6.10
下限	130.720	32.639	1.8	2.0	1.1	209.7	29.9	170.8	4.7	
上限	130.732	32.660	3.1	4.0	2.8	226.1	59.5	204.4	15.4	
(参考) 気象庁※	130.770	32.675	10.0			211	63	182		6.0

※気象庁（2016a）による CMT 解

4.2 平成 28 年 11 月福島県沖地震

平成 28 年 11 月 22 日 5 時 59 分頃、福島県沖を震源とする M7.4（暫定値）の地震が発生した。北西-南東方向に張力軸を持つ正断層型の地震で、最大震度は 5 弱であった。また、各地で最大 1m 弱の津波が観測された（気象庁, 2016b）。

本地震の発生時には、本プロトタイプシステムはすでに定常的に運用されていたため、地震発生後すぐに超速報解を用いた地殻変動の検出及び有限矩形断層モデルを仮定した断層モデルの決定を試みた。

図-8 に本プロトタイプシステムで得られた地震発生前後の電子基準点小高（950203）の座標時系列を示す。地震による変位が明瞭に捉えられていることが分かる。次に、座標時系列からそれぞれの地震発時刻の前後 5 分間の座標値の平均の差を取ることで地震時の地殻変動を抽出し、前節と同様に MCMC 法により地殻変動を説明する有限矩形断層モデルの

推定を行った。なお、モデルの推定に際しては、深さについての感度が低かったため、地震の CMT 解（気象庁, 2016a）で与えられた深さを固定して解析を行った。

図-9 に得られた地震時地殻変動と、推定された有限矩形断層モデルから計算される地殻変動をプロットしたものを示す。上下成分では地震時地殻変動のばらつきが多く、両者の整合性はあきらかではないが、水平成分では両者はよく整合しており、本プロトタイプシステムで推定された地震時の地殻変動が妥当であることを示す。また、図-10 に断層モデルのプロットを示すとともに、断層の震源パラメータを表-4 にまとめる。推定された断層パラメータは、地震が海域で発生したことから大きな誤差を含むが、概ね地震波解析から得られた CMT 解と整合的である（気象庁, 2016a）。

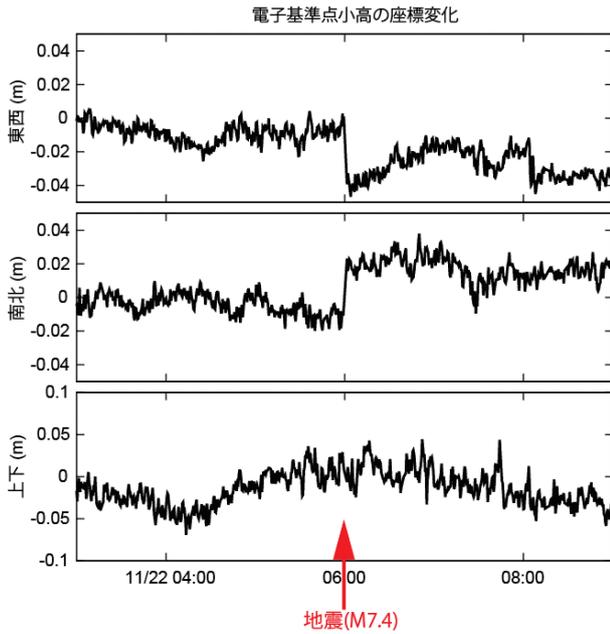


図-8 本プロトタイプシステムで得られた 2016 年 11 月 22 日福島県沖地震前後の電子基準点小高 (950203) の座標時系列 (超速報解)

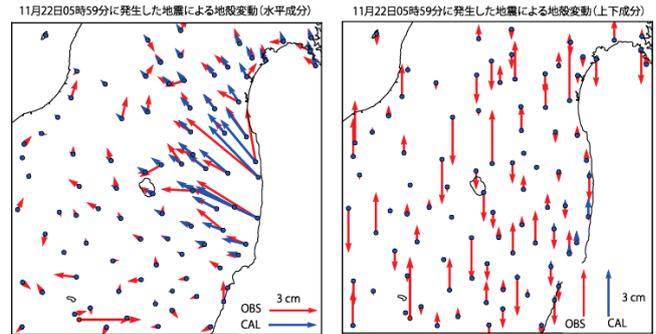


図-9 本プロトタイプシステムで得られた福島県沖地震に伴う地殻変動

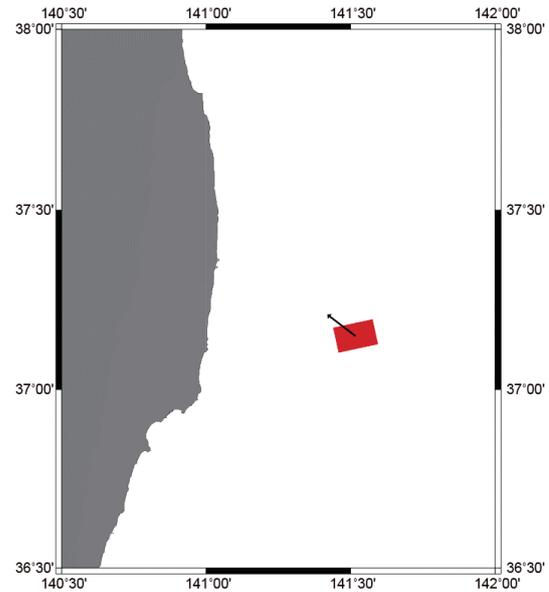


図-10 福島県沖地震の有限矩形断層モデル

表-4 平成 28 年 11 月福島県沖地震の断層パラメータ. 太字は気象庁の CMT 解の推定値に固定したことを表す.

	経度 [°]	緯度 [°]	深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	すべり角 [°]	すべり量 [m]	Mw
推定値	141.517	37.150	12	12.3	9.1	257.0	31.0	306.0	6.2	6.89
下限	141.440	37.088	-	8.3	4.1	214.8	13.5	241.4	3.2	
上限	141.662	37.190	-	19.2	13.9	262.1	44.9	313.0	15.7	
(参考) 気象庁※	141.600	37.217	12			212	40	243.		6.9

※気象庁 (2016a) による CMT 解

5. 議論及びまとめ

本稿では、まず 2 章と 3 章において本プロトタイプシステムの概要及び本プロトタイプシステムにより生成される座標解の特性を紹介するとともに、4 章において、本プロトタイプシステムが実際の地殻変動監視へ活用可能であることを示す事例を紹介した。

本プロトタイプシステムで得られる座標解の精度 (代表的な座標再現性) は表-2 にまとめたとおり、超速報解、速報解、最終解のいずれの座標解におい

ても概ね水平成分で 1cm 程度である。電子基準点西淡 (950362) のように、水平の座標再現性で数 cm を超えるような観測点も見られたが、このような観測点では、経験的にほとんどの場合 GNSS 電波の受信環境に問題があることが知られている。実際電子基準点西淡 (950362) の場合は受信アンテナ近傍の支障木によるマルチパスが原因であることが明らかになっており、支障木の伐木を行った後では座標再現性が他の観測点とほぼ同程度に落ち着いた。

キネマティック GNSS 時系列の誤差がほぼ白色雑音であると仮定すると、4 章で行ったように地震時

地殻変動を地震前後数分間の区間の平均的な座標の差として検知する場合、地震時地殻変動の誤差 d_{err} は以下の式で表すことができる：

$$d_{err} = \sqrt{2s/l}\sigma_w.$$

ただし、 l は区間幅、 s はサンプリング間隔、 σ_w は座標解の再現性である。本プロトタイプシステムでは $s=30$ (秒) であり、地震時地殻変動の区間平均を 4 章のとおり $l=300$ (秒) とする。また、本プロトタイプシステムで得られる座標解の代表的な座標再現性が、水平成分で 1cm 程度であったことから、仮に σ_w を 1cm とおくと $d_{err} \approx 5$ (mm) が得られる。

このことから、本プロトタイプシステムにより 5mm 程度の地震時地殻変動を検知可能であると言える。また、3 章で示したとおり本プロトタイプシステムの座標解は IGS 結合解にほぼ準拠したものであり、長期的な地殻変動監視にも使用可能である。ただし、PPP で得られる座標解には、地球回転パラメータなどのグローバルなパラメータの誤差に起因する Common Mode Error (CME) とよばれる広域で共通な誤差が含まれることが知られており、微小な地殻変動を議論する場合には、参照点をとるなどして CME を予め除去する必要がある (例えば Munekane, 2012 を参照のこと)。実際、IGS 結合解との比較 (図-4) において、2 月～6 月に渡って差がやや増大する現象が見られたが、この差がまさに CME に起因するもので、参照基準点との差をとることによって解消するものである。それを確認するため、図-11 に、図-4 と同じ観測点、同じ期間で、参照基準点を電子基準点小松 (950255) にとった場合の座標変化を示す。得られる座標変化は定常解析のものとはほぼ一致しており、つくばにおける季節的上下変動 (Munekane et al, 2004) を正しく捉えている。また、IGS 結合解との比較の際に見られた 3-6 月にかけてのずれの増大は確かに解消されている。このように、参照基準点を適切にとることで、本プロトタイプシステムの解は長期的な微小地殻変動の監視にも十分有効なものとなることが期待される。

キネマティック GNSS 解析は地震・火山現象の解明に多く用いられてきた (例えば Munekane, 2012)。しかしながら、その多くが地震時地殻変動などの短期的な現象を対象としており、余効変動などの長期的な現象の解析には、定常解析に代表されるスタティック解を別途用いることが多かった。本プロトタイプシステムで得られるキネマティック GNSS 解は、短期的な現象はもとより、平均値をとることで長期的な現象の監視にも十分使える精度をもつ。この特性を利用すれば、従来困難であった、地震と引き起こる余効変動、マグマの貫入と引き起こるマグマの移動など、短期的現象と引き起こる長期的な現象を、同一のデータから一連のプロセス

として連続的にモデル化できる可能性があり、今後の発展が期待される。

前述のとおり、本プロトタイプシステムのキネマティック座標解のサンプリング間隔は 30 秒であるが、本プロトタイプシステムで計算した補正情報は、そのまま 1 秒サンプリングのキネマティック GNSS 座標時系列の計算に利用可能である。そのことを例示するため、本プロトタイプシステムで計算した補正情報を適用して得られた 1 秒サンプリングのキネマティック座標解の例を図-12 に示す。座標再現性は (東西, 南北, 上下) (mm) = (12, 8.1, 20) で、30 秒平均をとると (東西, 南北, 上下) (mm) = (9.3, 6.8, 18) である。一方で、同じ補正情報を用いた 30 秒サンプリングのキネマティック座標解の座標再現性は (東西, 南北, 上下) (mm) = (7.3, 6.8, 19) となり、両者はほぼ同等である。すなわち、1 秒サンプリングのキネマティック GNSS 時系列を算出するためには、現在の補正情報生成部の変更は不要であり、測位部について、1 秒サンプリングの GNSS データを解析するように変更を加えるだけでよいことになる。

サンプリング間隔が 1 秒になると、地震波 (特に表面波) による変位を直接捉えられることから、加速度を計測する強震計を補完するものとして地震学的な活用が可能となる (例えば Larson, 2008)。そこで、今後、本プロトタイプシステムを改良し、1 秒サンプリングキネマティック座標解を算出できるようにする予定である。

また、本プロトタイプシステムでは、データ取得後解が出るまでの時間が超速報解でも 6～12 時間と、定常解析の Q3 解 (表-1 参照のこと) に比べてやや時間がかかっている。プロトタイプの改良にあたってはその点も解消し、超速報解においてデータ取得後 2 時間程度で解が出るようにすることを目標としている。

謝 辞

本プロトタイプシステムの構築に当たっては、宇宙航空研究開発機構から提供された MADOCA 及びオープンソースウェア RTKLIB を用いた。また、MADOCA の導入に際しては国土地理院測地観測センター電子基準点課の諸氏の協力を得た。ここに謝意を表す。

電子基準点つくば2Aの座標変化 (2015年)
 [参照点: 電子基準点小松、線形トレンド除去後]

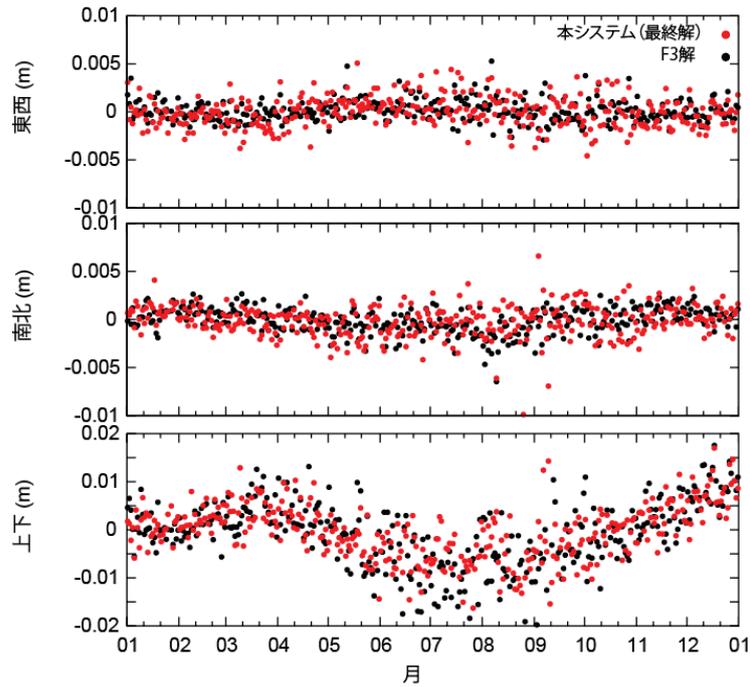


図-11 参照基準点 (電子基準点小松 (950255)) に対する電子基準点つくば 2A (022006) の 2015 年 1 年間の座標変化 (線形トレンド除去後).
 最終解については 1 日毎の平均を取っている.

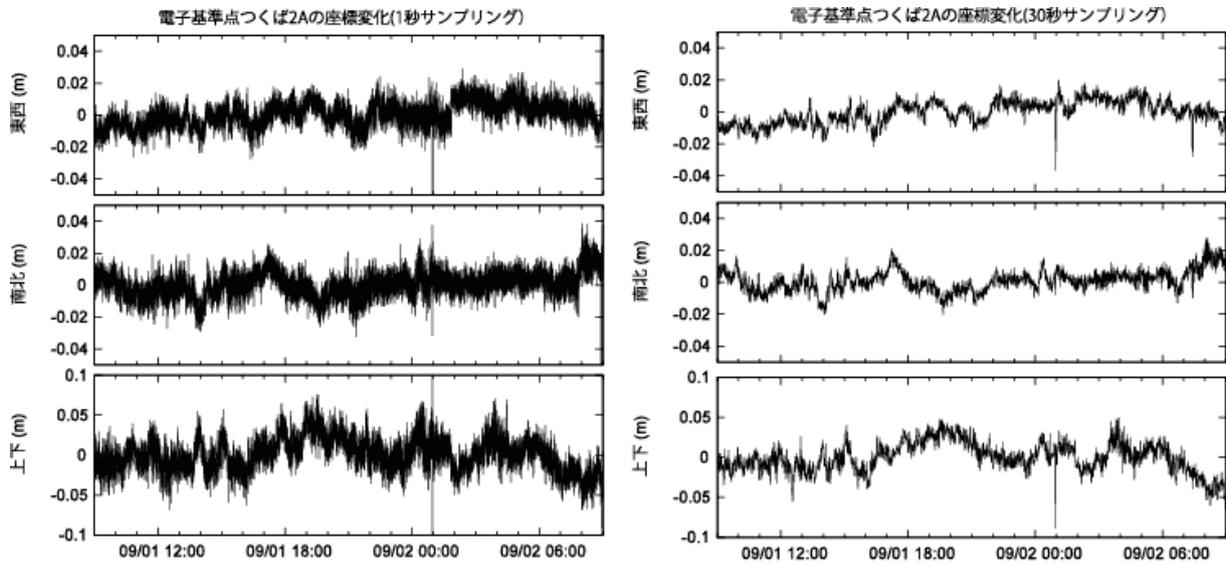


図-12 同一の補正情報を用いた 1 秒間隔の座標解 (上) と 30 秒サンプリングの座標解 (下) の例.
 電子基準点つくば 2A (022006) の, 2016 年 9 月 1 日の時系列を示している.

(公開日: 平成 29 年 3 月 2 日)

参考文献

Foreman-Mackey, D., D. W. Hogg, D. Land, and J. Goodman (2013): EMCEE: The MCMC hammer, PASP, 125, 306–312, doi:10.1086/670067.
 Ge, M., G. Gendt, M. Rothacher, C. Shi, and J. Liu (2008): Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in P

- recise Point Positioning (PPP) with daily observations, *J. Geod.*, 82, 389–399, doi: 10.1007/s00190-007-0187-4.
- 檜山洋平, 川元智司, 古屋智秋, 甲斐玲子, 山口和典, 鈴木啓, 菅富美男, 嵯峨諭 (2016) : GEONET による熊本地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 128, 163-168.
- 地震調査委員会 (2016) : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の評価, http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf (accessed 21 Dec, 2016).
- 気象庁 (2016a) : CMT 解リスト, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/top.html>, Accessed Dec 21, 2016.
- 気象庁 (2016b) : 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」について (第 78 報) —平成 28 年 11 月 22 日 05 時 59 分頃の福島県沖の地震—, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1611/22a/201611220800.html> (accessed 21 Dec, 2016).
- 国土地理院 (2016) : GEONET により地殻変動を観測した地震一覧, <http://mekira.gsi.go.jp/catalogue/index.html> (accessed 21 Dec, 2016).
- Larson, M. (2008): GPS seismology, *J.Geod.*, 83, 227–233, doi: 10.1007/s00190-008-0233-x.
- Munekane, H., M. Tobita, and K. Takashima (2004) : Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12608, doi:10.1029/2004GL020158.
- Munekane, H. and J. Boehm (2010) : Numerical simulation of troposphere-induced errors in GPS-derived geodetic time series over Japan, *J. Geod.*, 84, 405–417, doi:10.1007/s00190-010-0376-4.
- Munekane, H. (2012): Coseismic and early postseismic slips associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake sequence: The EOF analysis of GPS kinematic time series, *Earth Planets and Space*, 64, 1077–1091.
- Takasu, T. (2011): RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, <http://www.rtklib.com> (accessed 21 Dec, 2016).
- 高須知二, 安田明生, 小暮聡, 中村信一, 三吉基之, 河手香織, 平原康孝, 澤村寿一 (2013) : 複数 GNSS 対応高軌道時刻推定ツール MADOCA の開発, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集.

