精密単独測位（PPP-AR）を用いた GNSS 定常解析システムの開発
Development of a GNSS Routine Analysis System using Precise Point Positioning (PPP-AR)

地理地殻活動研究センター　中川弘之，宮原伐折羅，宗包浩志
Geography and Crustal Dynamics Research Center
NAKAGAWA Hiroyuki, MIYAHARA Basara and MUNEKANE Hiroshi

要　旨

国土地理院が現在運用している GEONET 定常解析の結果は，我が国の地殻変動の基礎的な情報として防災関係の各種会議に活用されているが，迅速性や時間分解能の面で不十分な場合がある．そこで，整数不確定性を推定する精密単独測位法（PPP-AR 法）を用いて現在の解析より迅速に，1 秒間隔で電子基準点の 24 時間の座標時系列を算出する手法を開発し，それを実装したプロトタイプシステムを構築した．本システムでは，データ取得後およそ 2 時間半で電子基準点全点の座標時系列を得られた．

システムで得られた座標時系列の安定性を評価するため，外的要因による観測データの品質劣化が明確な点を除いた全電子基準点について，1 年の試験期間の時系列解の水平成分で日々の標準偏差を求めたところ，平均値は約 1cm となった．この精度は国土地理院が現在運用する RTK 法による電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）よりも高く，GEONET 定常解析で最も迅速な Q3 解における座標のばらつきの代表的な値にほぼ等しいことから、従来よりもばらつきの少ない座標値をより迅速に算出できることが示された．また，標準偏差には季節変化があり，夏期に大きく冬期に小さくなることを示した．

次に，地殻変動監視への有効性の評価として，平成 28 年（2016 年）熊本地震に伴う地殻変動の検出を試みた．地殻変動の水平成分は，本震（M7.3）では，概ね 10cm よりも大きな地殻変動の水平成分は従来の解析と整合的であり, 10cm より小さな地殻変動では，従来の RTK 法（REGARD）よりも GEONET 定常解析と高い整合性を示した．また，本震の 2 日前に発生した最初の前震（M6.5）とその 2 時間半後に発生した同等規模の前震（M6.4）では，GEONET 定常解析では時間分解能が足りずに分離できなかった地殻変動が，本システムでは分離できることが示された．さらに，この二つの地震を含む 4 時間程度の期間内では，本システムが REGARD よりも安定した座標時系列を算出することが示された．

1. はじめに

国土地理院は，全国の電子基準点からなる GNSS 連続観測網「GEONET」の観測データを定常的に解析（以下「GEONET 定常解析」という.）し，その位置を算出している（中川ほか, 2009）. GEONET 定常解析の解析手法はスタティック法による相対測位であり，F3 解（最終解；データ取得の 2～3 週間後算出される 1 日単位の解），R3 解（速報解；データ取得の 2 日後に算出される 1 日単位の解），Q3 解（迅速解；3 時間ごとに算出される 6 時間単位の解）の 3 種類の解を算出している．解の迅速性と精度には，解析に使用できる衛星軌道情報等の精度に依存してトレードオフがあり、その精度は, F3 解が最も高く，R3 解，Q3 解の順に低くなる．

GEONET 定常解析で求めた地殻変動情報は，地震調査研究推進本部の地震調査委員会や気象庁の南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会において地震活動の評価等に利用されるとともに，気象庁の火山噴火予知連絡会で活火山の山体の変化の監視や噴火時の火山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．しかし，急激な地殻変動の時間的推移をタイムリーに把握するには，迅速性や時間分解能が不十分な場合がある．

GEONET 定常解析では、最も迅速な Q3 解析でも，地殻変動情報が得られるのは，地震発生から約 8～11 時間後となる．例えば平成 28 年（2016 年）熊本地震（以下「熊本地震」という.）では，4 月 14 日 21 時 26 分に発生した前震（M6.5）の地殻変動情報が得られたのは翌 15 日の朝であった. 地震活動の評価を行う政府の地震調査委員会臨時会は早ければ大地震発生の半日後に開催されるため，地震発生のタイミングによっては，地殻変動情報の提供が間に合わない可能性がある．

最も時間分解能が高い解も同じく Q3 解であるが，6 時間より短い変動は分解できない．前述の熊本地震では, 最初の前震の約 2 時間半後の 15 日 0 時 3 分に同等規模（M6.4）の前震が発生し，この地震による地殻変動も予想されたが，GEONET 定常解析に基づいて 15 日の臨時会に提出した地殻変動情報では，この二つの地震による地殻変動を分離できず、詳細な地震像の把握が困難であった．また，噴火直前の山体膨張や噴火後の急速な山体収縮といった詳細な火山活動をとらえるためには数分の時間分解能が必要であるが, 現状の GEONET 定常解析解では難しいため，火山活動の評価への貢献が限定される可能性がある．

地殻変動監視における迅速性と時間分解能を向上するため，これまで国土地理院では複数の研究開発を実施してきた. 一つは平成 28 年度より運用が始まった，電子基準点リアルタイム解析システム（以下「REGARD」という.）である（川元ほか，2016；Kawamoto et al., 2018）. REGARD は巨大地震の震源断層及び津波の規模の即時推定を目的としたシステ

ムであり，GEONET の 1 秒間隔の GNSS 観測データを用いてリアルタイムキネマティック（RTK）解析を行い地殻変動量を算出し，それを用いて震源断層モデルを自動推定する．REGARD の測位解の精度は，固定点からの基線長 1000km 以下の電子基準点については，一日の座標時系列の標準偏差が，冬（2017 年 2 月 1 日）は 3cm 以下，夏（2017 年 9 月 1 日）は 3～5cm と報告されている（Kawamoto et al., 2018）．

一方，宗包（2017）はより安定したキネマティックな測位解を得ることを目的として，整数不確定性を推定する精密単独測位法（以下「PPP-AR 法」という．）の後処理解析を用いて，定常的に電子基準点の 30 秒間隔の座標時系列を生成するシステムのプロトタイプ（以下「後処理 PPP システム」という．）を試作した．このシステムの水平成分について，平均値の周りの座標のばらつき（以下「座標再現性」という．）は REGARD よりも良好であり，Q3 解の座標再現性の代表的な値に匹敵する 1cm 程度で計算できることを示した．後処理 PPP システムは GEONET 定常解析に準じた 3 種類のタイミングの解を算出する戦略をとっており，最も早いタイミングの解ではデータ取得後に解が求まるまで 6～12 時間である．

以上をまとめると以下のようになる．

・GEONET 定常解析は，精度は高いが，地殻変動監視において迅速性と時間分解能に課題がある．
・REGARD は迅速性と時間分解能に優れているが，座標再現性は GEONET 定常解析より低い．
・後処理 PPP システムは時間分解能に優れており，解の再現性は Q3 解に匹敵するが，迅速性は GEONET 定常解析よりやや劣る．

そこで本研究では，これらの GEONET 定常解析や既存の GNSS 解析システムが地殻変動監視においてカバーし得ない領域を補完することを目的として，GEONET 定常解析と同等の精度でかつ迅速性と高い時間分解能を有する解析手法の開発，及びそれを実装したプロトタイプシステムの構築を行う．具体的には，

・精度：水平成分の座標時系列の標準偏差約 1cm（GEONET 定常解析解（迅速解（Q3））と同程度）
・迅速性：データ取得後，解の算出まで約 2 時間（地震調査委員会臨時会に震源断層モデルの提出が間に合うのに十分な時間）
・時間分解能：1 秒間隔の座標時系列

を性能目標とする．

国土地理院が運用・研究開発中の GNSS 解析システムの仕様及び本研究のプロトタイプシステムの仕様・性能目標値を表-1 にまとめる．

表-1 国土地理院の従来の GNSS 解析システムの特徴及び本研究の仕様と目標
（◎：非常に優れている ○：優れている △：やや劣る）

解析システム		解の間隔	時間分解能	地震発生後に変動が捉えられるまでのタイミング	水平精度（代表的な座標値の再現性）
運用中					
GEONET 定常解析	F3（最終解）	△ 1 日		△ 約 2～3 週間後	◎ 約 2～3mm
	R3（速報解）	△ 1 日		△ 約 2～3 日後	◎ 約 2～3mm
	Q3（迅速解）	△ 3 時間	△ 6 時間	△ 約 8～11 時間後	○ 約 1cm
REGARD		◎ 1 秒		◎ リアルタイム	△ 約 3～5cm
研究開発中					
後処理 PPP システム *		○ 30 秒		△ 約 12～18 時間後	○ 約 1cm
本研究					
本研究のプロトタイプシステムの仕様・目標		◎ **1 秒**		○ **約 2～3 時間後（目標）**	○ **約 1cm（目標）**

* 最も解析タイミングが早い解（超速報解）．

2. プロトタイプシステム概要

精密単独測位（Precise Point Positioning，以下「PPP」という．）は GNSS 衛星の精密な軌道情報及び時刻情報を用いて各観測局で単独測位を行う手法であり，少ない計算負荷で，1 エポックごとの観測点の位置を算出できる．さらに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，波数の整数不確定性の決定（Ambiguity Resolution ; AR）が可能となり，相対測位に匹敵する精度の達成が期待できる．これを PPP-AR 法という．

本プロトタイプシステムは，PPP-AR 法の解析に必要となる衛星の精密軌道情報，時刻情報，地球回転パラメータ及び FCB（以下，これらの 4 つの情報を「補正情報等」という．）を推定する「補正情報等生成部」と，それを用いて全国の電子基準点約 1300 点の 24 時間長の 1 秒間隔の座標時系列を算出する「測位部」から構成した（図-1）．

補正情報生成部では，国際 GNSS 事業（IGS）及び米国 GPS 大学連合（UNAVCO）が世界各地で運用している GNSS 観測局，並びに宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」という．）の複数 GNSS モニタ局ネットワーク（以下「MGM-net」という．）及び国土地理院の GEONET から，観測点の配置が均質になるように考慮して選点した約 100 局（以下「グローバル観測局」という．図-2）の GNSS 観測データ（以

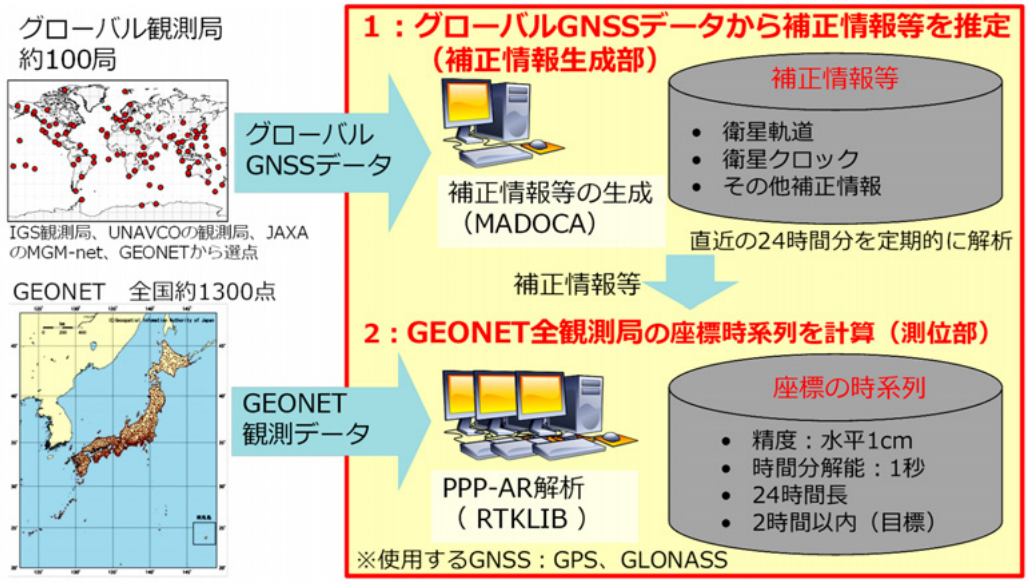

図-1　プロトタイプシステムの概要

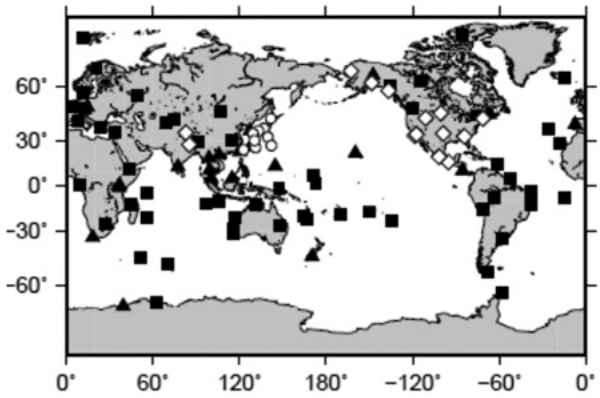

図-2　使用したグローバル観測局（IGS（■：56 点），UNAVCO（◇：14 点），JAXA（MGM-net）（▲：22 点），国土地理院（GEONET）（○：9 点））

下「グローバル GNSS データ」という.）を使用する．グローバル観測局のデータはアメリカ航空宇宙局の Crustal Dynamics Data Information System（以下「CDDIS」という.），UNAVCO，JAXA 等からリアルタイムで配信されており，これを 1 時間長の RINEX ファイルとしてアーカイブしておき，定期的に直近の 24 時間の補正情報等を推定する．補正情報等の推定には JAXA が開発したソフトウェア MADOCA（高須ほか, 2013）を用いた．

高品質な測位解の算出には安定した補正情報等が必要であるが，使用する GNSS 観測データに大きな欠測があると補正情報等の品質が低下する．そこで，解析に使用する 24 個の 1 時間長 RINEX ファイルが 1 個でも欠けた局は，補正情報等の推定から除外した．

また，衛星時刻情報を推定する際には，グローバル観測局の中から時計情報の基準に用いる局を指定する必要があるが，この時計情報が不安定だと推定された衛星時刻情報も不安定になり，算出した座標時系列に揺らぎや跳びが生じる．そこで，グローバル観測局の中から時計情報が比較的安定した候補局をあらかじめ複数選定しておき，補正情報等を推定するたびに，以下の手順により時計が最も安定している局を用いて衛星時刻情報を推定することとした．①候補局から GNSS データ取得率の上位 2 局を選ぶ．②選んだ 2 つの候補局の時計をそれぞれ基準時計とした 2 種類の衛星時刻情報を推定する．③②で推定した 2 つの衛星時刻情報を用いて，ある 1 点の電子基準点の GNSS データを PPP-AR 法で解析する．④③で求めた 2 つの座標時系列のうち，標準偏差が小さい方の解析で使用した衛星時刻情報を採用する．

測位部では, 推定された補正情報等と GEONET の GNSS 観測データを用いて, PPP-AR 法により全電子基準点の直近 24 時間の 1 秒間隔の座標時系列を算出する．解析には，オープンソースの測位ソフトウェア RTKLIB version 2.4.3（Takasu, 2011）を改良したものを使用した．また，複数の計算機に観測点を振り分けて並列して解析を行うことで処理時間の短縮を図った．

このプロトタイプシステムによって全電子基準点の 24 時間長の座標時系列が定常的に得られる．解析時間は補正情報生成と座標時系列の計算の合計で 2 時間半程度を要し，1 日 8 回の解析を行うことが可能であるが，解析結果を保存するサーバ容量の限界から，長期間の品質評価を優先して 1 日 1 回（0 時から翌日 0 時）の試験解析を行った．

3. 推定した衛星軌道情報の評価

GNSS 衛星の軌道情報で最も品質が良いのは, IGS が 12～18 日後に 1 週間分をまとめて提供する「IGS 最終暦」である．この軌道情報と本研究で推定した

表-2　IGS が提供している衛星軌道情報と本研究で推定した軌道情報との比較

名称	時間遅れ	更新頻度
IGS 超速報暦（予測部分）	リアルタイム（24 時間後までの予測値）	6 時間毎
本研究	15～20 分程度	1 時間毎が可能
IGS 超速報暦（観測部分）	3～9 時間後	6 時間毎
IGS 速報暦	17～41 時間後	毎日
（参考）IGS 最終暦	12～18 日後	毎週

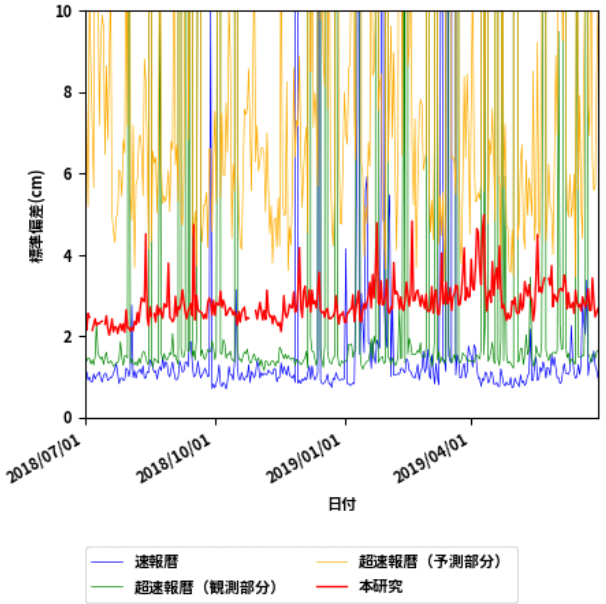

図-3　IGS 最終暦との差の標準偏差

GPS 衛星軌道情報との差分を 15 分ごとに取り，その標準偏差を指標に品質を評価した．比較のため，IGS が提供している「IGS 超速報暦（観測部分の終了から 24 時間分の予測部分）」（以下「IGS 超速報暦（予測部分）」という．），「IGS 超速報暦（観測部分）」及び「IGS 速報暦」についても同様に IGS 最終暦との差分の標準偏差を示した（図-3）．

この比較に用いた衛星軌道情報はさかのぼり解析で求めているが，推定に使用したグローバル GNSS データはリアルタイムデータストリームをダンプした，実運用で使用しているものと同等のものである．したがって，衛星軌道情報も実運用で求められる物と同じである．

比較した衛星軌道情報の使用可能となるタイミングと更新頻度を表-2 に示す．本研究では 15～20 分程度で衛星軌道情報の生成が完了するため，時間遅れのない IGS 超速報暦（予測部分）には劣るものの，IGS 超速報暦（観測部分）（時間遅れ 3～9 時間）や IGS 速報暦（時間遅れ 17～41 時間）よりは迅速に使用できる．

図-3 に示した 1 年間の標準偏差の時系列では，本研究の成果と IGS 最終暦の差の標準偏差は 2～4cm 程度を推移しており，IGS 最終暦との整合性は，観測データから予測された IGS 超速報暦（予測部分）（数～十 cm 程度）よりも高い．一方，実際の観測データに基づいて生成された IGS 速報暦と IGS 超速報暦（観測部分）はいずれも約 1～2cm 弱となっており，本研究の結果は IGS 超速報暦（予測部分）と，IGS 超速報暦（観測部分）及び速報暦の中間にあり，軌道情報の時間遅れとトレードオフの関係にあることがわかる．

4. 座標時系列の評価

4.1 再現性

本プロトタイプシステムの安定性の指標として，2018 年 7 月 1 日から 2019 年 6 月 30 日の 1 年間，毎日の 0 時から翌 0 時までの 24 時間単位で 1 秒間隔の電子基準点の座標時系列を計算し，その東西，南北，上下各成分の標準偏差を調査した．その際，電子基準点の保守作業の記録や GEONET 定常解析の際に行われるデータ品質の評価結果に基づいて，不良な観測環境等の外的な要因による影響が疑われる観測局を評価から除外した．すなわち，この期間において

- 受信機やアンテナの不調による機器の交換をおこなった電子基準点
- 樹木による遮蔽等，不良な観測環境の影響が観測データに表れている電子基準点
- 近隣の電波干渉源（携帯電話の基地局等）の影響が観測データに表れている電子基準点

の計 136 点を除外し，残りの 1170 点を対象として評価を行った．

図-4 に，全期間における座標時系列の水平成分（東西成分，南北成分）の標準偏差の度数分布を示す．全体のおよそ 85%の座標時系列は標準偏差が 1.2cm 以下でありその平均値は 1.00cm，最も頻度の大きい区間は 0.8～1.0cm であった．すなわち，本システムの水平成分の座標再現性は，全体としては 1cm 程度

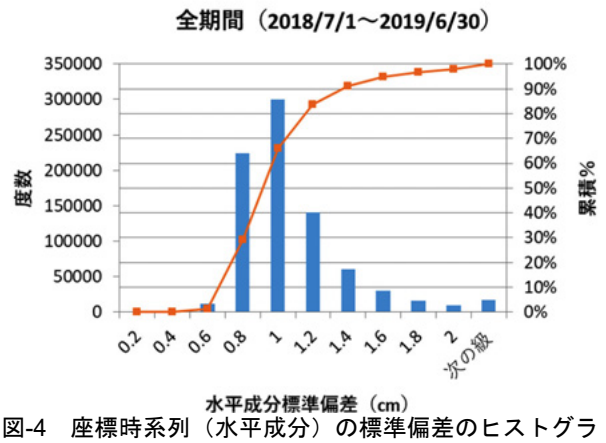

図-4　座標時系列（水平成分）の標準偏差のヒストグラム．（2018 年 7 月 1 日～2019 年 6 月 30 日）
青は度数，オレンジは累積相対度数

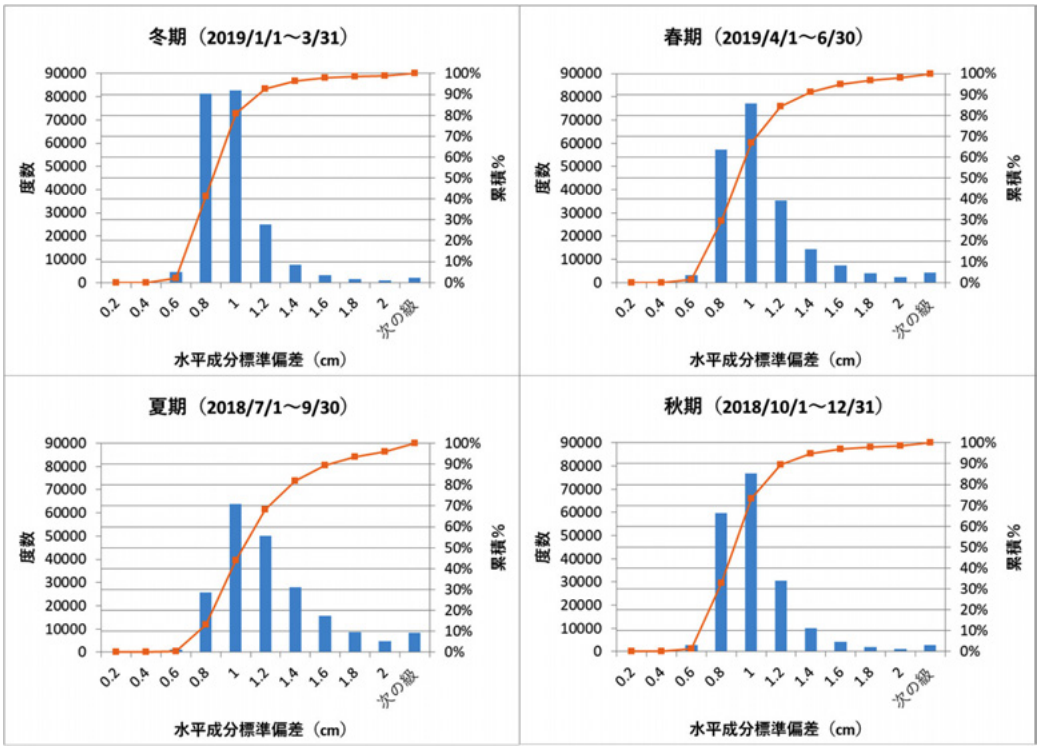

図-5　季節ごとの座標時系列（水平成分）の標準偏差のヒストグラム．青は度数，オレンジは累積相対度数

であるといえる．

次に，この試験期間を 3 か月毎の期間に分割して標準偏差の季節依存性を調査した（図-5）．その結果，いずれの季節も標準偏差のピークは 0.8～1.0cm の期間にあるものの，夏期（2018 年 7 月～9 月）は他の季節に比べてピークが低く，より大きな方向に標準偏差の分布が広がっている．標準偏差が 1.0cm 以下になる時系列は冬期（2019 年 1 月～3 月）には全体の約 81%，春期（2019 年 4 月～6 月）は約 67%，秋期（2018 年 10 月～12 月）は約 73%と過半であるのに対して，夏期には半分以下の約 44%に減少している．逆に，全体の約 9 割の時系列が含まれる範囲は，秋期と冬期が 1.2cm 以下，春期が 1.4cm 以下であるが，夏期は 1.6cm 以下となっている．

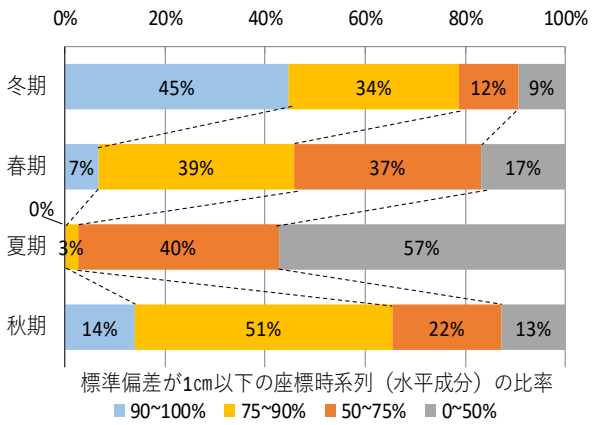

図-6　標準偏差が 1cm 以下の 24 時間長座標時系列（水平成分）の比率と，電子基準点の割合
（冬期：2019 年 1～3 月，春期：2019 年 4～6 月，夏期：2018 年 7～9 月，秋期：2018 年 10～12 月）

夏期における座標再現性の低下をより詳細に調査するために，電子基準点ごとに標準偏差 1cm 以下の座標時系列の割合を調査した．図-6 に，水平成分の標準偏差が 1cm 以下の座標時系列の割合がそれぞれ 90～100%，75～90%，50～75%および 0～50%である電子基準点の割合を季節ごとに示す．冬期においては標準偏差 1cm 以下の座標時系列が 90%以上となる電子基準点は全体の 45%にのぼるが，夏期においては 0%と大幅に低下する．一方で，夏期には 6 割近くの電子基準点では，標準偏差 1cm 以下の座標時系列の割合が 50%以下となる．このことは，もともと座標再現性が悪い観測点において夏期にさらにばらつきが大きくなるのではなく，他の季節には座標再現性が比較的高い電子基準点においても夏期には座標再現性が低下するということを示唆している．

4.2 海外の解析サービスによる解との整合性

現在，海外の複数の機関によってオンラインの GNSS-PPP 解析サービスが運用されている．そこで，その中からオーストラリアの測量地図当局である Geoscience Australia が提供している「AUSPOS」（Geoscience Australia, 2019）とカナダ天然資源省が提供している「CSRS-PPP」（Natural Resources Canada, 2019）を用いて GEONET のデータを解析し，本研究で求められた解との整合性を調査した．これらの 3

表-3　本研究，AUSPOS 及び CSRS-PPP の解の比較

	本研究	AUSPOS	CSRS -PPP
解析手法	PPP-AR		
	キネマティック	スタティック	
解析ソフトウェア	RTKLIB	BERNESE	独自ソフトウェア
衛星軌道・時刻情報	独自推定	IGS 最終暦	
基準系	ITRF2014		

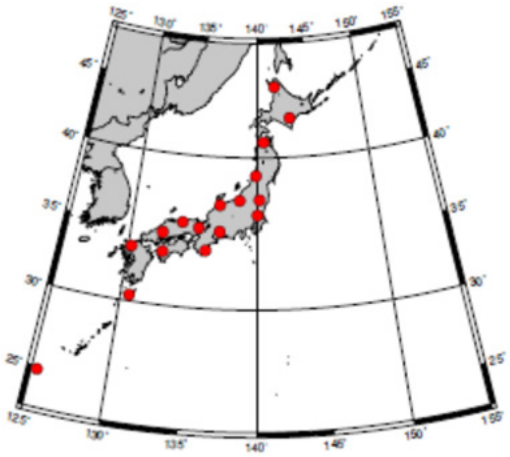

図-7　比較に使用した電子基準点

つの解は，準拠する測地基準座標系は ITRF2014 で共通であるが，解析手法，解析ソフトウェア，使用する衛星軌道情報・時刻情報は異なっている（表-3）．

解の整合性評価は以下の手順で実施した．まず，2018 年 3 月 1 日から 14 日の 14 日間，日本全体に分布するように選んだ電子基準点 17 点（図-7）について日々の解（本研究については 24 時間の座標時系列の平均）を算出する．その際，AUSPOS と CSRS-PPP は位相特性モデルに電子基準点の架台タイプに応じた固有のモデルを選択できないことから，本プロトタイプシステムでも架台タイプを考慮せず解析を行った．次に，3 つの解の平均値からの各々の解の日々の南北，東西，上下方向の差を求め，その差を 14 日間にわたって平均した．

その結果を図-8 に示す．これらの 3 つの解は，解析ソフトウェアや衛星軌道等が異なるにも関わらずどの成分も約 1cm の範囲内で一致しており，本研究の結果は他の機関の解析サービスによる解と遜色のない精度を達成しているといえる．

5. 地殻変動監視への応用：平成 28 年（2016 年）熊本地震の事例

熊本地震では，平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分の M6.5 の最初の前震の後，翌 15 日 0 時 3 分にこれと同程度の規模の M6.4 の前震が発生した．さらに最初の地震から 2 日後の 4 月 16 日 1 時 25 分に M7.3 の本震が発生した．本震では GEONET 定常解析により非常に大きな地殻変動が検出された（檜山ほか，2016）．また，最初の前震とその 2 時間半後の前震に

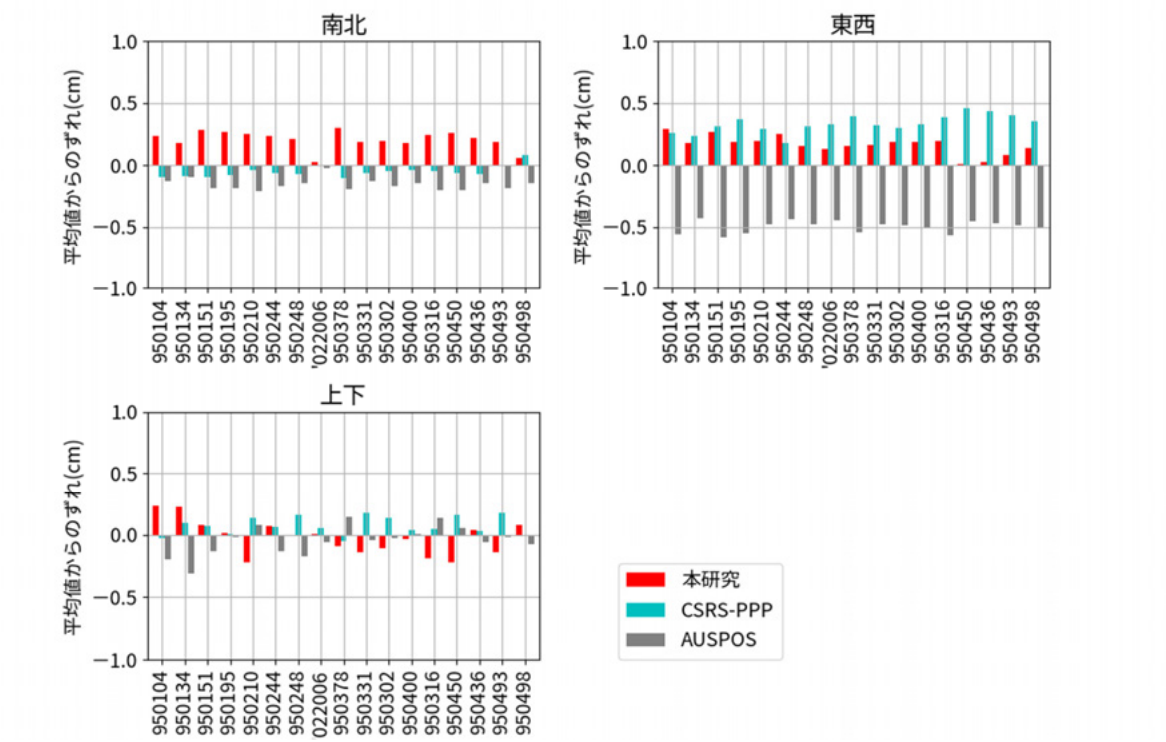

図-8　本研究，AUSPOS 及び CSRS-PPP による解の比較．縦軸は各電子基準点における 3 つの解の平均値からのずれ．横軸は電子基準点点番号．北から南の順で並んでいる．

伴う地殻変動は GEONET 定常解析では分離できなかったものの，REGARD と後処理 PPP システムではそれぞれの地震に伴う地殻変動が分離して捉えられている（Kawamoto et al.，2016；宗包，2017）．そこで，本研究の成果を用いて検出した熊本地震本震，最初の前震及びその 2 時間半後の前震に伴う地殻変動を，GEONET 定常解析，後処理 PPP システム及び REGARD による結果と比較することにより，本研究成果の地殻変動監視への有効性を評価する．

なお，熊本地震発生時には本研究はまだ開始していないため，補正情報等の推定にはリアルタイムストリームではなく CDDIS 等のアーカイブサイトからグローバル観測局の GNSS 観測データファイルを取得して使用した．そのため，リアルタイムデータストリームのアーカイブを用いた場合よりもデータの欠損が少なく，その結果，推定された補正情報等や，それを用いて計算された座標時系列の品質が，実運用状態のものよりも高いと思われる

5.1 本震

図-9 は本研究（赤），後処理 PPP システム（緑），REGARD（青），そして GEONET 定常解析（黒）により算出した熊本地震本震に伴う地殻変動の水平成分である．これを見ると，変動量がおおよそ 10cm を超える電子基準点においては，4 者の変動ベクトルはよく一致していることがわかる．変動量がそれよりも小さい変位においては，本研究の結果と GEONET 定常解析，後処理 PPP システムの結果の 3 者は一致しているものの，REGARD の結果だけが若干ずれているように見受けられる．すなわち，本研究の結果は GEONET 定常解析の結果と整合的であり，特に比較的小さな地殻変動については REGARD よりも整合性が高いといえる．

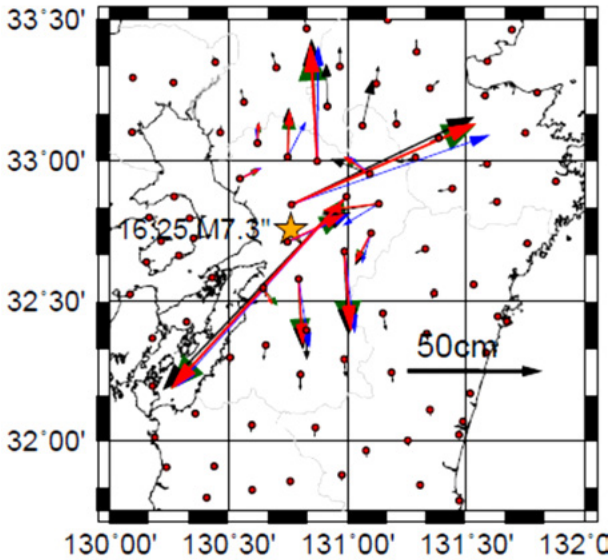

図-9　熊本地震本震（4 月 16 日 1 時 25 分　M7.3）に伴う地殻変動の水平成分.（赤：本研究，緑：後処理 PPP システム，青：REGARD，黒：GEONET 定常解析）

5.2 最初の前震とその 2 時間半後の前震

図-10 に熊本地震の最初の前震とその 2 時間半後の前震に伴う地殻変動の水平成分について，本研究（赤），後処理 PPP システム（緑），及び REGARD（青）の結果を示す．本震と同様に，本研究と後処理 PPP システムの結果はほぼ一致しているが，REGARD ではずれが見られる．この二つの地震による地殻変動量がいずれもおよそ 10cm 以下であることを考えると，この結果は本震の結果と整合的である．

図-11 に，最も変動量が大きかった電子基準点「城南」について，この二つの前震を含む 4 時間における変位の時系列を示す．赤が本研究，緑が後処理 PPP システム，青が REGARD による結果である．時系列の水平成分ではいずれの結果でも，前震とその 2 時間半後の前震の発生時刻において時系列にステップが生じており，二つの地震の変動を分離できていることがわかる．しかしこの期間の時系列全体を見る

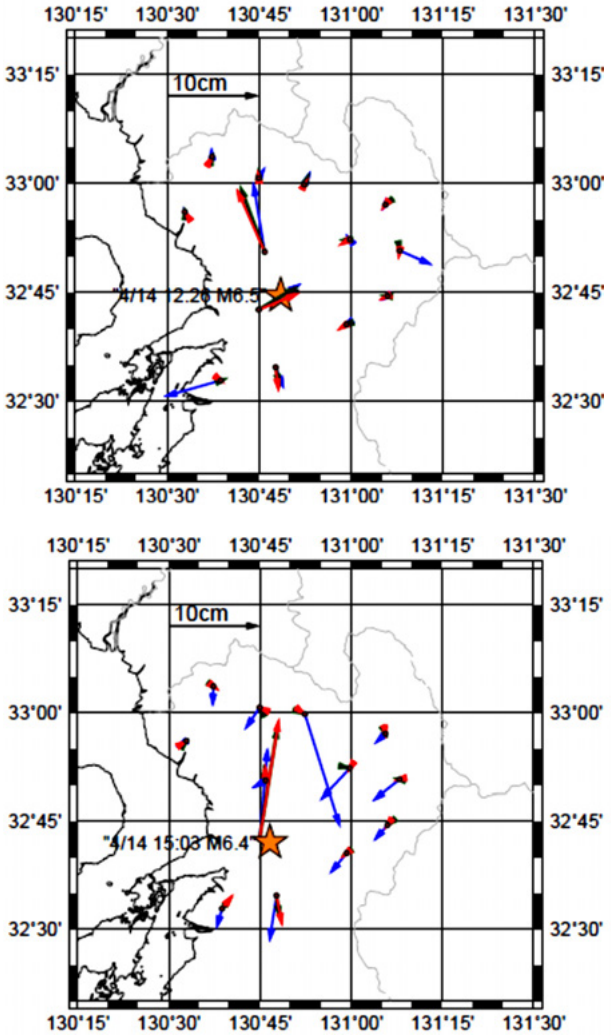

図-10　熊本地震の最初の前震（4 月 14 日 21 時 26 分 M6.5）（上図）及びその 2 時間半後の前震（4 月 15 日 0 時 3 分　M6.4）（下図）に伴う地殻変動の水平成分.（赤：本研究，緑：後処理 PPP システム，青：REGARD）

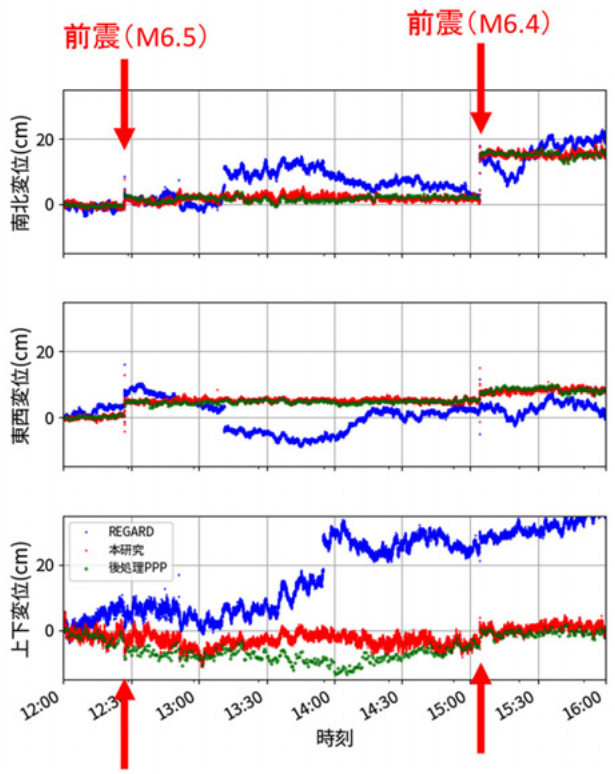

図-11 電子基準点「城南」についての，熊本地震の最初の前震とその 2 時間半後の前震を含む 4 時間の変位の時系列．参照点は電子基準点「福江」．
なお，横軸は GPS 時刻（日本標準時−約 9 時間）（赤：本研究，緑：後処理 PPP システム，青：REGARD）

と，本研究と後処理 PPP システムの東西成分，南北成分のグラフはほぼ一致しており，かつ地震の前後で一定値を示しているのに対して，REGARD の時系列は大きく揺らいでいる．すなわちこのグラフに示した 4 時間の期間内においては，本研究の結果は REGARD よりも 安定性が高かったということを示している．

6. 議論及びまとめ

最後に，本研究の結果について迅速性，精度，時間分解能の 3 つの観点から議論を行った後，実用化に向けた課題を取りまとめる．

6.1 迅速性

現在のプロトタイプシステムでは，電子基準点の GNSS 観測データ収集後 2 時間半程度で座標時系列を算出することができる．これはリアルタイム監視を行っている REGARD には劣るものの，現行の GEONET 定常解析（Q3 解析）や後処理 PPP システムよりも迅速である．

しかし，当初の性能目標の「2 時間」には達していない．この目標を達成するためには，測位部で並列に計算を行う計算機の台数を増やすことが必要である．ただし，並列処理を増やせばディスク入出力の負荷も増えるため，計算機台数と解析時間とは比例しない．分散ファイルシステムの導入による負荷軽減などもあわせて検討する必要がある．

6.2 精度

6.2.1 座標再現性と地殻変動の検出

1 年間の試験解析の結果，座標時系列水平成分の標準偏差は平均 1.0cm であった．これは Q3 解の座標再現性の代表的な値と同程度であることから，おおむね Q3 解と同程度の精度で地殻変動を検出できる可能性があることを示唆している．しかし標準偏差が 1.0cm 以下になる時系列は冬期には約 8 割，春期や秋期でも約 7 割であるのに対して，夏期には約 44%であり，ばらつきが夏期に大きく冬期に小さいという季節依存性が顕著にみられる．すなわち，夏期には他の季節よりも地殻変動検出精度が低いことが予想される．

なお，個々の電子基準点の座標時系列のばらつきの大小や季節変化からその観測環境の良否についての情報をフィードバックできる可能性もある．

また，本研究成果を用いて熊本地震の地殻変動を算出した結果からは，以下のことがいえる．

① 地震時の地殻変動の検出に関して，本研究の結果は GEONET 定常解析の結果と整合的である．特に 10cm 程度よりも小さな変動については，REGARD よりも整合性が高い．

② 本研究の解は GEONET 定常解析よりも時間分解能が高いため，短時間に連続して発生した地震による地殻変動を分離することができる．

③ 4 時間程度の期間内の時系列グラフを見ると，本研究による地殻変動の時系列は REGARD よりも安定していた．

これらのことから本研究で開発した手法は，迅速性では REGARD のリアルタイムには劣るものの，同程度に地震に伴う地殻変動を高い時間分解能で検出することができるといえる．さらに，REGARD に比べ本研究の方がより小さな地殻変動までとらえられると思われる．そこで，大地震が発生して大きな地殻変動が予想される場合には，発災直後の地殻変動の概要を REGARD で捉えて情報提供を行い，その後に本研究で開発した手法を用いてより詳細な地殻変動情報を発表する，また，比較的小さい規模の地震については本研究による手法を用いる，といった運用が考えられる．さらに上記の③からは，余効変動や火山の山体の変動など，ある程度の期間に渡って継続するような現象を高い時間分解能で詳細に観測する場合には，本研究の手法を用いる方が適している可能性がある．

6.2.2 座標値

座標値の精度については，本プロトタイプシステムの解は，使用している衛星軌道や解析ソフトウェアが異なる既存の他の機関の PPP 解析システムによる解と cm レベルで整合している．すなわち，座標値自体においてもこれらに比べて遜色のない精度が

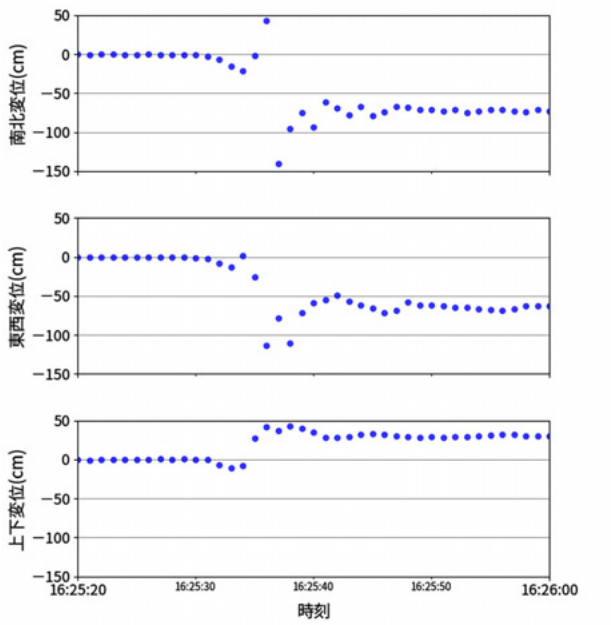

図-12　熊本地震本震前後における電子基準点「長陽」の地殻変動の時系列．参照点は電子基準点「福江」．なお，横軸は GPS 時刻（日本標準時−約 9 時間）

出ているといえる．

6.3 時間分解能

本研究により，1 秒間隔で全電子基準点の 24 時間座標時系列を定常的に算出できる目処が立った．これにより，地震直後の余効変動の監視や余効滑り域の推移把握，あるいは火山噴火前後の山体変動の詳細な検出等の高い時間分解能が必要な分野への活用が期待される．

また，1 秒間隔で地殻変動時系列が求まることの利点として,「地震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」（宗包，2017）ということが挙げられる．例えば，図-12 は本システムによってとらえられた熊本地震本震前後における電子基準点「長陽」の，南北，東西，上下成分の変動量の時系列であるが，地震後において変位の振動がみられることがわかる．

6.4 実用化への課題

今後，本システムを実運用に移行するにあたっては，以下の 3 つの課題がある．

一つ目は，使用するグローバル GNSS データや GEONET 観測データの品質検証の実装である．まず，グローバル GNSS データについて品質評価の確保である．補正情報等の品質はそれを用いた全ての解の品質に影響するため，その生成に使用するグローバル GNSS データについて，補正情報等を推定する前に不良なデータを棄却する仕組みが必要である．さらに，GEONET 定常解析では解の品質を確保するために，解析の前に観測データの品質評価を行って一定の基準を満たさない観測局は解析を行わない手順になっている．GEONET 定常解析の場合はスタティック解析なので短周期のノイズの影響は 24 時間（あるいは 6 時間）で平均化されるが，本システムの場合は 1 秒間隔のキネマティック解析なのでノイズの影響をより大きく受けることが予想される．したがって，本システムの実用化にあたっては，GEONET 定常解析を参考に観測データの品質評価を行う必要がある．そのうえで，キネマティック解析に適した評価基準を設定し，データ品質が不良な解にはフラグを立てる等の仕組みが必要であろう．

次に，迅速性をさらに向上させるためのシステムの増強である．現在のプロトタイプシステムでは，解析にかかる時間は 2 時間半程度であり，3 時間ごとにシステムを稼働させれば，1 日に 8 回，全電子基準点の座標時系列を得ることができる．この場合，地震発生後に地殻変動情報が得られるまでの時間は，解析開始までの待ち時間が最大 3 時間と解析時間約 2 時間半とで約 5 時間半ということになる．

一方で，当初のデータ取得後 2 時間以内という目標は達成されておらず，さらなる迅速化が必要である．これについては前述のとおり，測位部の計算機台数を増やすともにディスク入出力の負荷軽減を図れば，解析時間はさらに短くなることが期待される．

さらに，仮に上記の方法により解析時間が 2 時間まで短縮されれば，測位部を 2 系統もうけて各々を 1 時間ごとに交互に稼働させることにより，座標時系列を 1 時間ごとに算出できるようになる．この場合にはいつ地震が発生しても，最大待ち時間 1 時間と解析時間 2 時間のおおむね 3 時間以内には地殻変動が検出できることになる．

迅速性が高まれば，例えば大地震後の余効滑り域の移動の監視や，火山活動時における山体変動の監視等，防災への貢献が期待できる．システムをどこまで高速化するかは，その効果と必要な資源（予算等）とを勘案したうえで検討していく必要があろう．

三点目としては GPS と GLONASS 以外の衛星系への対応である．現在は算出される座標時系列には不安定なものもまだみられる．それに対して，本システムを他の衛星系（準天頂衛星システム、Galileo）に拡張（他の衛星系の補正情報等推定およびこれを用いた PPP-AR の実施）すれば，解析の安定性をより向上させることができると考えられる．マルチ GNSS-PPP による解析手法の開発については，令和 2 年度から開始した特別研究「災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究」（令和 2〜6 年度）の中で実施していく予定である．

謝辞

MADOCA 及び MGM-net のデータは，JAXA と国土地理院の包括的協力の協定書に基づき JAXA より貸与を受けたものである．

（公開日：令和 2 年 12 月 24 日）

参 考 文 献

Geoscience Australia（2019）: AUSPOS - Online GPS Processing Service, https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos (accessed 22 Apr, 2020).

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.

川元智司，檜山洋平，古屋智秋，佐藤雄大，太田雄策，西村卓也，等々力賢（2016）: 電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）プロトタイプの開発，国土地理院時報, 128, 55-66.

Kawamoto, S., Hiyama, Y., Ohta, Y., and Nishimura, T. (2016)：First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto earthquakes, Earth, Planets and Space, 68:190, DOI:10.1186/s40623-016-0564-4

Kawamoto, S., Ohta, Y., Hiyama, Y., Todoriki, M., Nishimura, T., Furuya, T., Sato, Y., Yahagi, T., and Miyagawa, K., (2017)：REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, Journal of Geophysical. Research. Solid Earth, 122, 1324-1349.

Kawamoto, S., Takamatsu, N., Abe, S., Miyagawa, K., Ohta, Y., Todoriki, M., and Nishimura, T. (2018)：Real-Time GNSS Analysis System REGARD: An Overview and Recent Results, Journal of Disaster Research, Vol.13, No.3, 440-452.

Munekane, H. (2018)：A GNSS Kinematic Analysis System for Japanese GEONET, Journal of Disaster Research, Vol.13, No.3, 433-439.

宗包浩志（2017）: 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，国土地理院時報, 129, 1-9.

中川弘之，豊福隆史，小谷京湖，宮原伐折羅，岩下知真子，川元智司，畑中雄樹，宗包浩志，石本正芳，湯通堂亨，石倉信広，菅原安広（2009）: GPS 連続観測システム（GEONET）の新しい解析戦略（第 4 版）によるルーチン解析システムの構築について，国土地理院時報, 118, 1-8.

Natural Resources Canada（2019）: Precise Point Positioning, https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php (accessed 22 Apr, 2020).

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.

Takasu, T. （2011）: RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, http://www.rtklib.com (accessed 22 Apr, 2020).