

GEONET における緊急解析の現状 Status of Emergency Analysis of GEONET

測地観測センター 矢萩智裕・湯通堂 亨・小島秀基・畑中雄樹

Geodetic Observation Center

Toshihiro YAHAGI, Toru YUTSUDO, Hideki KOJIMA and Yuki HATANAKA

要 旨

GEONET で行っている解析には、定常解析と緊急解析がある。定常解析は、F2 解析、R2 解析、Q2 解析の 3 種類が解析スケジュールにより自動的に行われている。緊急解析は、地震などの地殻変動が発生したときに緊急に行うもので、任意の時刻に手で解析をスタートさせる。緊急解析には S2 解析と後処理 1 秒データ解析がある。

S2 解析は、解析時刻と観測時間を任意に指定できること以外は、基本的に Q2 解析と同じ条件で処理を行うものである。S2 解析を観測時間 3 時間で行った場合、Q2 解の 2～3 倍程度のばらつきの RMS で解を求めることができる。

後処理 1 秒データ解析とは、リアルタイム解析ソフトにより 1 秒サンプリングデータの後処理解析を行い、エポック毎の座標を算出するものである。現在のソフトでは、地震時に急激かつ大きな地殻変動が起きた際にアンビギュイティの Fix 率が低下し、解が不安定になるという問題がある。しかし、ある程度時間が経過すれば再び解が安定し、その状態では概ね定常解析と整合的な値が得られており、地殻活動の監視に通用するといえる。

1. はじめに

現在、GEONET に導入されている緊急解析には、S2 解析と、リアルタイム解析装置で行なう後処理 1 秒データ解析の 2 種類がある。

平成 14 年度の GEONET 改造前の緊急解析は、予報暦を使用した 30 点余りの地域解析で、解析開始時刻と観測時間も任意に指定できた(測地観測センター、2001)。GEONET 改造時に導入された S2 解析は、改造前の緊急解析と同様時刻指定を任意にできるほか、定常解析と同じ解析戦略で解析するという特徴を持つ。これにより定常解析による結果と直接比較可能な結果を短時間で得ることができるようになった。

解析結果と観測時間の関係は、GEONET 改造前の緊急解析を用いて精度評価が行われており、地殻監視には 6 時間以上の観測データを使用することが妥当であるという結論を得ている(畑中他、2003)。GEONET 改造時に導入された S2 解析についても解析結果と観測時間について精度評価を行う必要があるが、今

回はより迅速に結果を得るために、観測時間を Q2 解析の半分である 3 時間にした場合の精度評価について示す。

リアルタイム解析装置は、GEONET 改造時に新たにシステムに組み込まれたものである。現在は後処理による解析を主としており、1 秒サンプリングデータからエポック毎の座標を算出する。リアルタイム解析の最大の魅力はその即時性と時間分解能にある。データ数が少ないため解の精度低下は否めないが、精度検証の結果から現時点で最も有効と考えられる解析戦略とその根拠とした精度検証の結果を示す。

2. S2 解析

2. 1 S2 解析について

S2 解析は、基本的に Q2 解析と同じ解析戦略を取っており、違いは開始時刻(正時)と観測時間(1 時間以上、1 時間単位)を任意に指定できる点である。S2 解析では、データが得られる全点を用いて解析を行い、暦には超速報暦を使用する。処理に要する時間は、6 時間の観測データを使用する場合は Q2 解析と同じ 1.5 時間程度、3 時間の観測データの場合には 1 時間程度である。Q2 解析と同じ解析戦略を用いるということは、結果を他の定常解析結果と比較する際に、解析手法の違いによるバイアスがないことを意味し、従って S2 解は直接 Q2 解(及び R2 解、F2 解)と比較することができる。

2. 2 S2 解の精度評価と即時性

地震等による急激な地殻変動が無かった約 1.5 日分の観測データを用い、S2 解の精度の基線長依存性を評価する。具体的な S2 解の基線時系列の例として、3 基線を示す。また、地震時における S2 解析の事例として平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震(以下、「新潟県中越地震」と表記する)及び、福岡県西方沖の地震を取り上げ、基線時系列の例を示す。さらに、S2 解析の即時性についても検討する。

2. 2. 1 S2 解の精度評価

はじめに、S2 解精度の基線長依存性について評価する。また、比較のために Q2 解析についても載せる。評価した期間は、地震等による地殻変動の無い 2005

年5月16日11時(UTC)から2005年5月18日2時(UTC)までである。八郷(93002)観測局に対する各観測局への基線ベクトルの時系列から2005年5月17日(UTC)のF2解による基線ベクトルを真値として引き算し、各成分について残差のRMSを求める。ここで、S2解析は解析開始時刻を1時間ずつずらしながら3時間観測の解析を行っている。また、各基線の成分の残差で異常に大きな値が含まれている基線が多数あるセッションは除外している。Q2解析については、6時間観測の解析を自動解析スケジュールにより解析開始時刻を3時間ずつずらしながら行っている。また、S2解析と同じ期間の解析結果を用いているため、残差のRMSを計算する上でS2解析とサンプル数が異なっている。

結果を図-1に示す。図の横軸は基線長L (km)で基線ベクトル各成分のRMS (mm)を縦軸にプロットしている。図-1からS2解の残差のRMSは基線長300kmで南北成分は3mm程度、東西成分は4mm程度、上下成分は18mm程度である。これらの値は地域スケールで地殻変動監視を考えた場合に検出できる変動量の目安となる。

次に、基線長によるRMSの変化を評価するためにS2, Q2各々のプロットについて $RMS = \alpha L + \beta$ で表される回帰直線を当てはめ、基線長に対する傾き α と定数項 β を推定してまとめた。結果を表-1に示す。S2解の回帰直線の傾きは、南北成分で約5ppb、東西成分で約13ppb、上下成分で約27ppbであった。

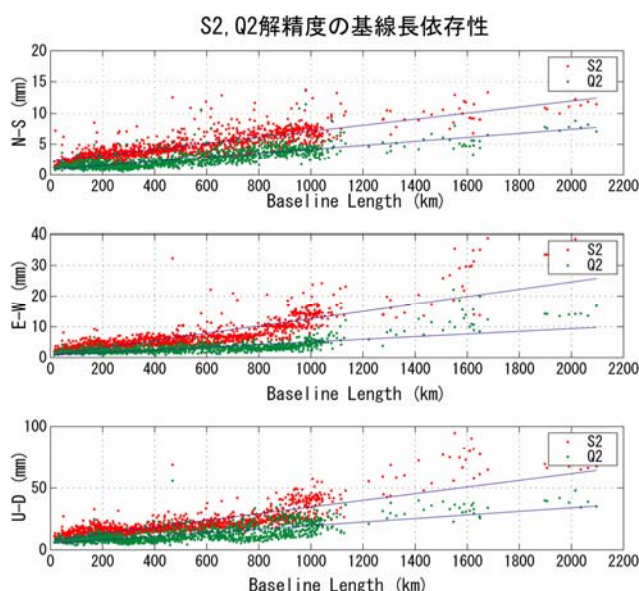


図-1 S2, Q2 解精度の基線長依存性。F2 解を基準として各解の残差のRMSを求めてプロットし、回帰直線に当てはめている。上から順に南北、東西、上下成分を表す。横軸は基線長(km)であり、縦軸はRMS(mm)を表す。

Q2解の傾きは、南北、東西、上下の各成分でそれぞれ約3ppb、約4ppb、約14ppbであり、双方を比較すると、S2解の傾きはQ2解に比べて南北成分で1.5倍、東西成分で3倍、上下成分で1.9倍程度それぞれ大きいことが分かる。実際に地震等のイベントがあった際には、Q2解によるイベント前の座標値とS2解によるイベント後の座標値を比較することになる。このため、地殻変動の有意性を議論する際には上記のような精度の違いに留意する必要がある。

実際のS2解の基線時系列の例を図-2に示し、比較のためQ2解も同時に載せる。解析した期間は上記と同様、2005年5月16日11時(UTC)から5月18日2時(UTC)までである。またS2解析については、解析開始時刻を1時間ずつずらしながら3時間観測の解析を行っている。また、Q2, S2解析共に2005年5月17日(UTC)のF2解を真値として、それからの差をプロットしている。プロットの位置は各解析時間帯の中心時刻である。

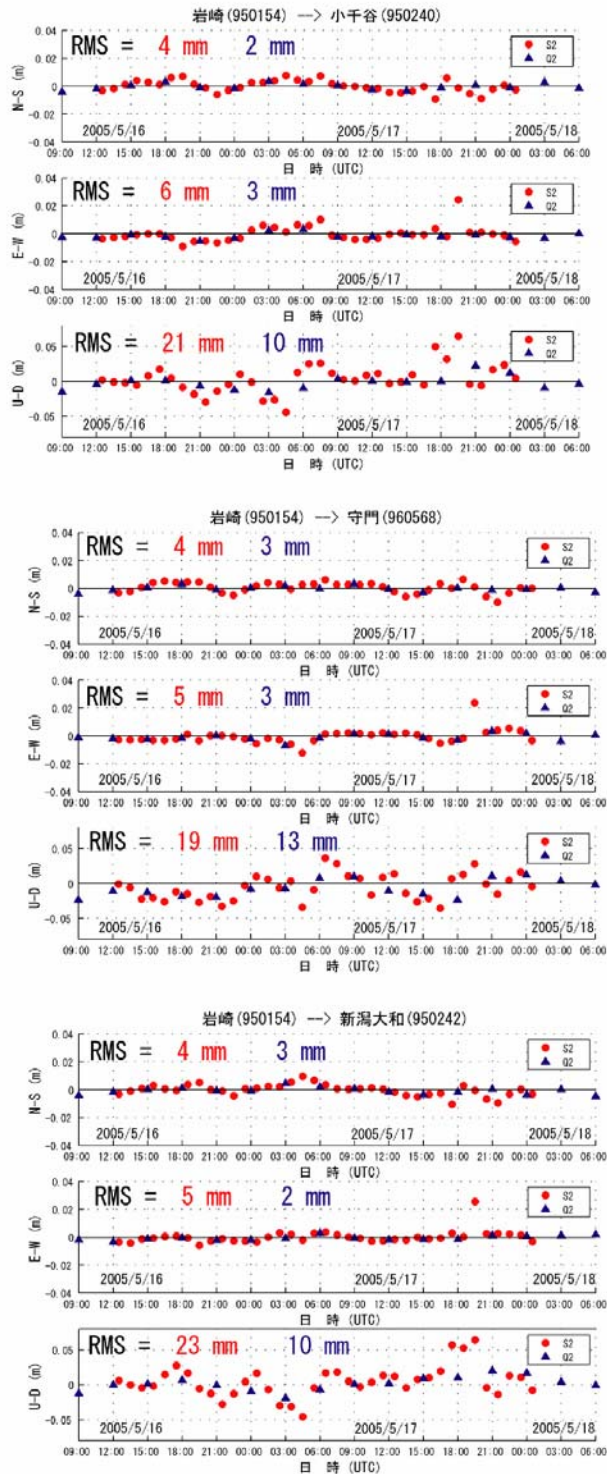
図-2について、各基線長は約370kmであり、F2解との差のRMSは前述とほぼ同程度であるが、時間帯によっては東西成分で約25mm、また南北成分で約60mmを超えるプロットも見られる。このように、時として図-1で評価したRMSを大きく超える解になる場合もあるので、解析結果を評価する際には、結果を空間的に捉えて判断するなど、注意深い検査が必要である。

表-1 回帰直線のパラメータ

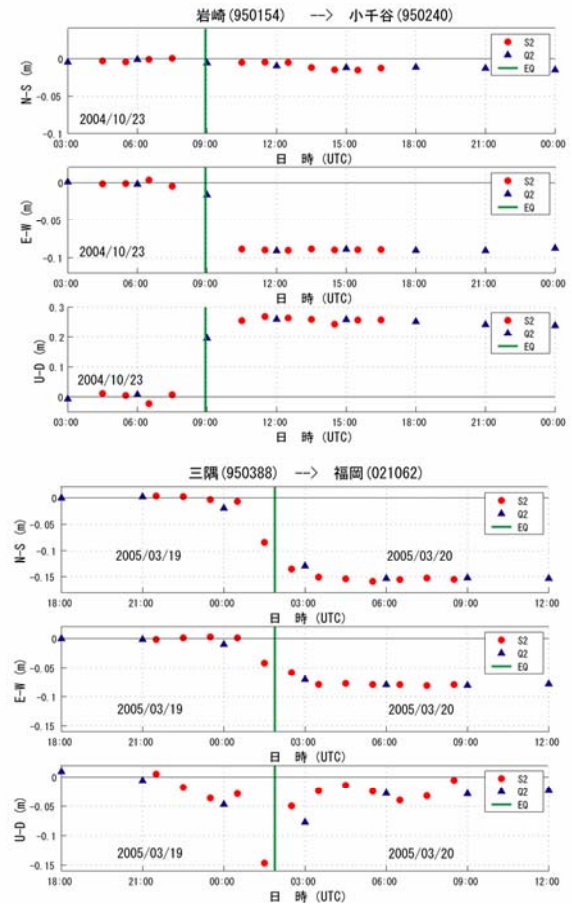
	成分	α (ppb)	β (mm)
S2	南北	4.9	2.2
	東西	12.9	0.8
	上下	26.8	7.7
Q2	南北	3.3	0.9
	東西	4.3	0.8
	上下	14.4	5.1

2. 2. 2 地震時のS2解析の事例

新潟県中越地震、福岡県西方沖の地震を例にS2解析の基線時系列及び即時性について議論する(図-3)。S2解は3時間観測の解析を地震発生数時間前から始めて1時間ずつ解析開始時刻をずらしながら行った結果である。地震時の観測データを含まない時間帯では前項と同等の精度で解が得られており、S2解はこれらの事例の地殻変動検出に対し、十分な精度を持っていることを示している。



図－2 S2, Q2 解析による基線時系列の例。F2 解を真値とした差をプロットしている。各基線について上から順に、南北、東西、上下成分を表す。プロットの時刻は解析時間帯の中心値である。赤丸は S2 解、青三角は Q2 解を表す。また、各解析について残差の RMS をプロット同様に色分けして表示する。この期間に大きな地震は発生していない。S2 解析は 3 時間観測で解析開始時刻を 1 時間ずつずらしながら行っている。



図－3 新潟県中越地震、福岡県西方沖の地震時の S2, Q2 解析による基線時系列の例。赤丸は S2 解を、青三角は Q2 解を表す。また、緑線は本震の発生時刻である。S2 の結果は図－2 と同様の解析手法で求めている。

新潟県中越地震	S2解析	観測時間(3時間)	解析など	約 4.5 時間後
	Q2解析	観測時間(6時間)	解析など	約 8 時間後
福岡県西方沖地震	S2解析	観測時間(3時間)	解析など	約 4.5 時間後
	Q2解析	観測時間(6時間)	解析など	約 9 時間後

■ は観測待ち時間

図－4 S2, Q2 解析で地震後に地震時の観測データを含まない解析結果を得るまでに必要とする時間の例。S2 解析は 3 時間観測である。

図－4 は S2, Q2 解析について地震後に地震時の観測データを含まない解析結果を得るまでに必要な時間を説明したものである。例えば、新潟県中越地震の場合、地震発生後に、地震時の観測データを含まない解析結果が最初に得られるのは、S2 解析（3 時間データ使用）では約 4.5 時間後、Q2 解析では約 8 時間後（各々処理時間を含む）である。また、福岡

西方沖の地震の場合では、S2 解析では約 4.5 時間後、Q2 解析では約 9 時間後である。このように S2 解析は Q2 解析と比べて迅速に結果を求めることが可能である。Q2 解析はスケジュールにより 3 時間毎に 6 時間データを使用して解析を行うため、地震発生のタイミングによっては、図-4 で青色に示す処理に使用する観測データの最初の時刻までの待ち時間（最大で 3 時間）が発生する。S2 解析では、この待ち時間を大幅に減らすことができる。

2. 3 まとめ

S2 解析の導入により、Q2 解析の 2～3 倍程度の RMS で迅速に解が得られることが分かった。これは、新潟県中越地震、福岡県西方沖の地震といった、水平成分で 10cm、上下成分で 20cm を超える地殻変動を捉えるには十分な精度である。しかし時間帯によっては、今回評価した RMS を大きく超えるばらつきも認められるため、S2 解による変動量を空間的に捉えて結果の検査をすることが重要である。

3. リアルタイム解析

3. 1 概要

リアルタイム解析は、平成 14 年度に導入された新 GEONET システムの機能の一つである。現在、全国に整備された約 1,200 点の電子基準点のほぼ全点で 1 秒毎の観測が可能となっており、リアルタイム解析により、絶え間ない地殻活動の監視や、災害時の迅速な対応が可能になると期待されている。

現在の GEONET システムには、GPS Solutions 社製の RTNET が組み込まれており、電子基準点からの 1 秒データを直接処理することが可能となっている。一方、システムとは独立に Condor 社製の 3D Tracker も導入しており、こちらは主に検証用として運用している。本稿では主に RTNET による解析結果を取り上げ議論していく。

国土地理院のリアルタイム解析装置については、ソフト自体の改良や解析戦略の構築等によりチューニングを行い、現在では多くの問題が改善されつつある。以降の各節で、装置環境や導入以来の取り組み、及び事例解析結果等について報告する。

3. 1. 1 リアルタイム解析環境

RTNET はエポック毎にアンビギュイティ推定を行うが、一度解かれたアンビギュイティは、強い拘束条件によってサイクルスリップが起きるまで一定の整数値とし、エポック間の連続性を保持する。このようにして求めた整数値アンビギュイティを基にエポック毎の座標値を算出する。また、クラスタリングにより座標値をネットワーク解として求める。解析は選んだ点の最短基線を繋いで行い、複数グルー

プに分割して処理する場合には、グループ間で共有する点の座標値が同じになるようにマージする。

解析の設定及び実行は電子基準点管理装置で行う。要求を受けたリアルタイムデータ解析処理装置は、常時接続された電子基準点のデータを扱うリアルタイムデータ通信管理装置に接続し、該当する観測局の RTCM 形式データを取得して解析を行う。リアルタイム解析の他に、後処理による解析も可能である（以後、後処理 1 秒データ解析と呼ぶ）。装置の主な解析環境を表-2 に示す。詳細については国土地理院時報第 103 集(2004)を参照のこと。

表-2 RTNET の主な解析設定

最大解析点数	50 点*
観測量	C/A, L1, L2
仰角マスク	15°
入力データ形式	RTCM 2.2
暦情報	IGS 予報 (IGU) 暦又は放送暦
フィルタリング パラメータ	$\sigma = 1.0E-7$ (m/s)

*多点解析時には 10 点程度の小グループに分割し分散処理を行う。

3. 2 リアルタイム解析の精度評価及び解析戦略

リアルタイム解析の最大の魅力はその即時性にあるが、GPS 解析において観測時間と解析精度はトレードオフの関係にあり、データ数の少ないリアルタイム解析時における解の精度低下は否めない。その理由としては、ソフト自体の問題と解析手法の問題が挙げられるが、解析面における最適条件を決めるため、精度検証結果から現時点で最も有効と考えられる解析戦略を構築した。現在採用している解析戦略と、根拠とした精度検証の結果を以下に示す。

3. 2. 1 短基線（～50km）の結合による解析

全国的に大気が安定し、また電離層の状態も静穏だった 2005 年 4 月 13 日 00:00:00～23:59:59UTC の 24 時間分の 1 秒データを用いて、基線長と解の精度の関係について検証した。検証に用いた点は、つくば 1 (92110) から半径約 200km 内に位置し、さらに標高が 500m 以下の 218 点である。

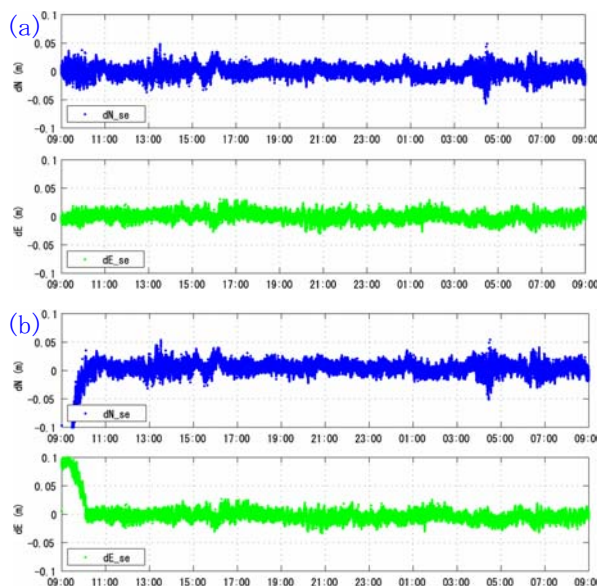
図-5 は、つくば 1 (92110) を基点とした各点の基線ベクトルの時系列から残差 RMS を求め、横軸を基線長にしてプロットしたものである。まず、つくばからの単基線で解いた結果が図-5 (左) であるが、基線長と共に精度劣化が起こり、特に南北、上下成分では 100km、東西成分では 50km を超えた辺りで顕著になる。この要因については様々なものが考えられるが、一つには、基線長が長くなるにつれア

ンビギュイティのミスフィックスが増えることが考えられる．一方，200km 以上離れた基線を 50km 以下の短基線で繋いで解析した結果が図－5（右）である．単基線で解いた結果と比べ解の安定性が向上しており，長基線を解く場合の有効性を示している．これらの結果から，リアルタイム解析結果の平常時のノイズレベルは，最大で水平成分が 4 cm，上下成分が 10cm 程度と見積もられる．

3. 2. 2 解の初期値依存性

一般に GPS の解析では，初期値を与え，観測データを元に最小二乗法等を用いることで座標の最確値を求めるが，初期値の精度が悪い場合に解の収束が悪くなることがある．特に RTNET においてはその傾向が強く，初期座標の精度は解析結果の安定度に大きく影響することが分かった．

導入当初，リアルタイム解析に採用していた初期値の精度はそれほど良くはなく，大きい点で F2 解と数十 cm 程度の差があった．図－6 は，初期座標値を変えた時の静岡 2 (93078) から大島 1 (93051) への基線解析結果(南北・東西成分)である．解析期間は図－5 と同様 2005 年 4 月 13 日の 24 時間で，後処理 1 秒データ解析による結果である．図－6 (a) の初期値は前日の R2 値，図－6 (b) は GEONET 初期値(速度考慮なし)であり，図－6 (b) の値は F2 解と比較して各成分で 10cm 以上のずれがある．精度の悪い初期座標を用いた場合には，解が安定するまで(つまり最適なアンビギュイティ推定がされるまで) 2 時間弱を要しているが，一旦安定した後は両者の結果はほぼ同じ振る舞いを示しており，安定な解を迅速に求める上で初期座標の精度が重要であることが分かる．他の観測局についても同様の結果が得られ

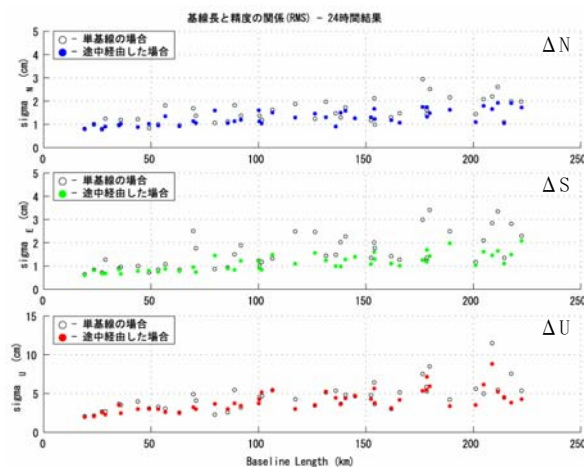
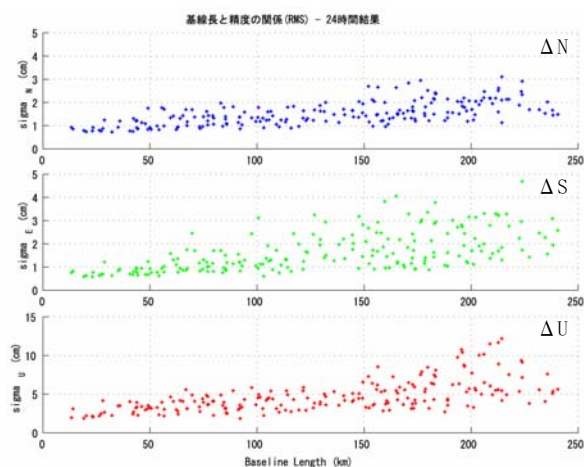


図－6 初期座標値を変えた時の静岡 2－大島 1 間の基線変化時系列．(a)には前日の R2 解，(b)には GEONET 初期座標(速度考慮なし)を初期値として用いている．各図において，青が南北成分，緑が東西成分を示す．

ており，これらを踏まえ，現在はリアルタイム解析を行う際の初期座標値には直近の R2 値を採用するように変更している．

3. 2. 3 解析の分散処理

解析する点数の増加に伴い推定パラメータ数が指数関数的に増加するため，多点の場合には非常に多くの処理時間を要する．GEONET に導入されたリアルタイム解析装置については，多点解析を行う際に，当初以下のような問題が存在していた．



図－5 つくばからの基線長を横軸にした，RTNET で 24 時間解析(2005 年 4 月 13 日 UTC0:00～翌 24:00)を行った際の残差 RMS のプロット．上から南北，東西，及び上下成分．左がつくばからの単基線で解析した結果，右が 50km 以下の基線で繋いだ 7 基線分(中継点を含む)の結果で，単基線で解いた結果(黒丸)の上に重ねて表示している．

- 1) 後処理解析を行う際、全点を一つのプロセスで処理しようとするために、解を得るまで非常に多くの時間を要した。
- 2) リアルタイムで解析を行う際には、プログラムの中で自動的に小グループに分割して分散処理を行い、実時間に間に合うような設計になっていた。但し、ユーザーが任意に小グループの設定をすることはできなかった。

表－3に、後処理1秒データ解析実行時に要した処理時間の一例を示す。イベント時の衛星環境やマシン環境にもよるが、10点を超えると大幅に処理時間が増大し、20点を超えると解析が途中でストップしてしまう。即時性を求められる以上、この問題は非常に致命的であった。また、リアルタイム処理の際にも、小グループを任意に設定できないために、解析の中で用いている網の形状の影響を考慮できないという問題があった。

これらの状況を踏まえ、現在はユーザー側で任意の小グループを組んで解析ができるように改良し、後処理の場合でも処理時間は大幅に短縮されている。なお小グループ間の結合をする場合には、グループ間で共有する点を指定し、その点の座標が一致するように、クラスタの固定点から見て下位にあたるグループ全体を平行移動する

表－3 2004年に発生した地震時における後処理1秒解析時の解析時間、点数、処理時間の関係。

地震名	解析時間	点数	処理時間
新潟県中越 (10/23)	6h	13	3.5h
釧路沖(11/29)	2h	14	8.5h
		22	—
根室半島南東沖 (12/6)	2h	10	3.5h
		20	—

3. 2. 4 解析戦略

以上の検証結果等を踏まえ、現在リアルタイム解析（後処理解析も含む）実行時にいくつかの解析戦略を立てて行っている。その内容を以下にまとめる。

- 1) 多点時には10点程度毎の複数グループに分割
- 2) 各観測点間の基線長は約50km以下にする
- 3) 初期座標値には直近のR2解を採用

ソフト自体の改良による面もあるが、これらの方針を採用することで現在では導入当初よりも解の安定度が大きく増している。実際に緊急解析を行う際には、固定点の異なる複数のクラスタでの解析を行い、相互の結果を比較することで妥当性を検討する等の方法も有効であると考えられる。

3. 3 事例解析結果

3. 3. 1 福岡県西方沖の地震 (2005/3/20)

2005年3月20日10:54JST頃、福岡県西方沖を震源とするマグニチュード(M)7.0の直下型地震が発生し、福岡市で震度5強を記録した。この地震に際し、鹿児島大(950485)を固定点とした16点のクラスタを組み(図－7)、後処理1秒データ解析を行った。解析は20日9:30～13:30JSTの4時間で行った。

解析結果のうち、玉名(950464)から前原(950450)間の基線変化時系列(9:30から3時間分)を図－8に示す。地震発生時刻と同時に、水平方向、特に南北方向に変動している様子が明確に捉えられており、変位量もQ2解やF2解と整合的である(表－4)。1秒データ解析結果のノイズレベルが最大で4cm程度あるため(3.2.1)、有意な議論のためには変動量が最低5cm程度必要であるが、新潟県中越地震等他の地震時の事例解析結果からも同様にQ2解等と整合的な変動が捉えられており、中規模な地殻変動を伴うような直下型地震に対して、1秒データ解析が十分に通用すると言える。

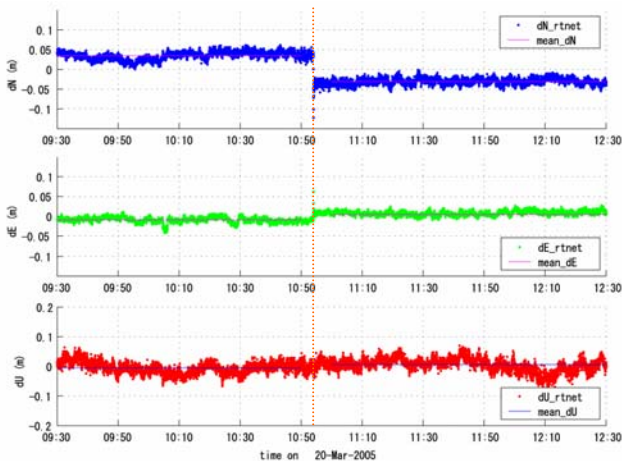


図－7 福岡県西方沖地震時の解析クラスタ図。F2解から求めた水平変動量をベクトルで示す。

表－4 玉名-前原間の基線変位量(単位:cm)

成分	RTNET 解	Q2 解	F2 解
南北	-6.58±1.82	-6.55	-7.99
東西	1.36±1.43	2.95	1.95
上下	1.15±3.88	0.12	0.45

*RTNETの結果は地震前後約1時間の平均から、Q2及びF2の結果は地震発生前後のセッション値から求めている。



図－8 玉名-前原間の基線変化時系列．南北(青)，東西(緑)，上下(赤)成分を示す．また地震発生時刻を橙破線で示す．

3. 3. 2 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震

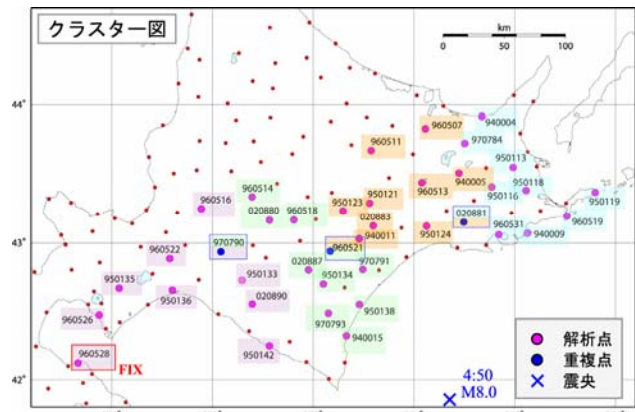
平成 15 年十勝沖地震 (9 月 26 日 4:50JST, M8.0) に対し、砂原 (960528) を固定点とした 37 点のクラスタを組み (図－9)，後処理 1 秒データ解析を 26 日 3:00～6:00JST の 3 時間で行った．解析には通信障害等による長期のデータ欠損のない点を選び，さらに多点のため複数の小グループに分割して処理を行った．

図－10 は，本別 (020883) 及び帯広 (960521) の座標変化時系列である．地震発生直後に解は非常に不安定になるが，約 30 分後には再び落ち着いており，同様の傾向は他の点についても見られた．地震前後の安定な 45 分の平均から得られた水平変動量は，本別で南方に約 27cm，東方に約 11cm，帯広で南方に約 39cm，東方に約 27cm で，F2 解から求めた変動量とほぼ同程度であった．

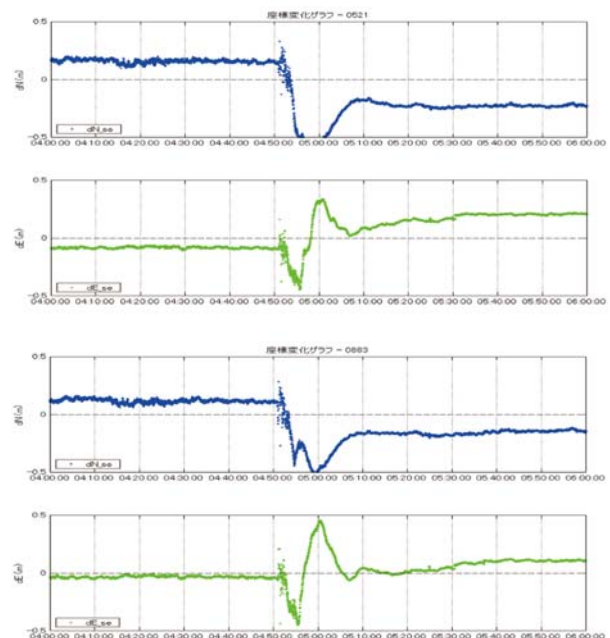
この事例で地震直後に解が不安定になった理由として，次のような可能性が考えられる．

- 1) 3. 1. 1 で述べたように，RTNET では一度解かれたアンビギュイティをサイクルスリップが起こるまで一定値に拘束するが，変動が大きかったため，ソフト内で衛星データのサイクルスリップ発生と誤認し，アンビギュイティのミスフィックスが起きた．
- 2) 地震直後に複数の点で発生した一時的なデータ欠測に伴い，その点を含む基線の結合が弱まった．
- 3) 基線間の相関を考慮しているため，1) や 2) で示したような地震直後の問題が網全体に影響した．
- 4) 分割処理した小グループを結合する際に重複させている点に含まれるノイズが，それ以降のグループの解析結果に直接反映されてしまった．

図－11 は，解析時間全体で見た時の帯広の南北成



図－9 2003 年十勝沖地震時の解析クラスタ図．解析時に分割したグループ毎に色をつけている．青四角はグループ間で共有する点．



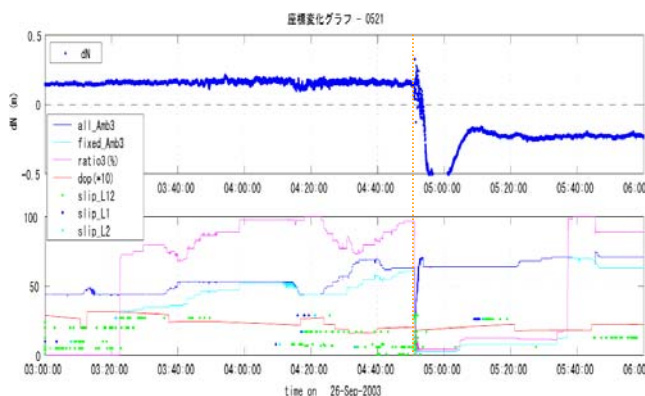
図－10 十勝沖地震時の解析結果．上より本別，帯広の座標時系列であり，それぞれ南北(青)，東西(緑)成分を示す．橙破線は地震発生時刻．

分の変動及び解析状況の時系列を示したものである．下段図中で，桃線で示しているアンビギュイティ Fix 率に注目すると，解析開始直後の他に，座標値が不安定になった地震発生直後にも大きく低下しており，地震前の水準に戻るまでに約 40 分を要していることが分かる．また，地震発生時刻にほぼ全ての衛星でサイクルスリップが発生しており，これらは上述した 1) の可能性を支持するものと言える．

この事例のように複数の小グループに分割して処理する場合，グループ間の結合は，共有する点の座標値が一致するように，クラスタの固定点から見て

下位のグループ全体を平行移動することにより行っている。しかし、グループ間の相関は考慮していないため、下位のグループには、上位グループのノイズが蓄積されていく可能性があることに注意する必要がある。

以上のように改善の余地はまだあるが、地震の変動により一旦解が不安定になったとしても、ある程度時間が経過すれば再び解が安定し、また安定化後には実際の地殻変動と整合的な結果が得られることを考えれば、1秒データ解析は広域型地震の場合においても有効であると言える。



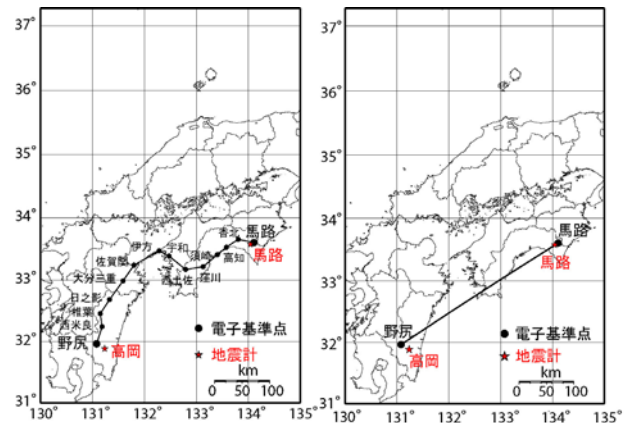
図一11 解析期間全体の帯広の南北成分の座標時系列(上段)、及び解析状況(下段)。下段図中の青、水色、桃の各線はそれぞれこの小グループの全アンビギュイティ数、解かれたアンビギュイティ数、FIX率を、赤線はDOP情報(10倍)を、また各ドットはサイクルスリップの発生状況を示す(縦軸が衛星番号に対応)。橙破線は地震発生時刻。

3. 3. 3 スマトラ島沖の地震 (2004/12/26)

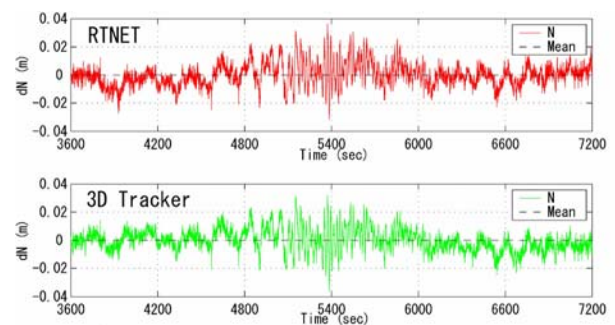
2004年12月26日スマトラ島沖の地震(M9.0)を試験的に解析したところ、この地震による地震波を検出することができた。

解析は、宮崎県野尻観測点から高知県馬路観測点にかけて線状に連なる14点の観測点を選び(図一12)、1秒データをRTNETによって後処理で解析した。検証のため、3D Trackerでも解析を行っている。図一13に比較結果の一例(野尻ー馬路基線の南北成分)を示す。ドリフトに若干の差が見られるが、両ソフトの結果は概ねよく一致している。

野尻ー馬路基線の相対変位の時系列(図一14)は、ノイズによる揺らぎはあるものの、15分~40分付近を中心として周期20秒程度の波形を各成分で明瞭に捉えており、その振幅はpeak-to-peakで最大7cmに達する(南北成分)。これは基線長(約340km)の約0.2ppmに相当する。また、より低周波の成分が重なり合っているようにも見えるが、全体に、数分~数十分程度のタイムスケールのノイズが目立って



図一12 RTNETによる解析では観測点間が短い基線で結ばれるように14点を選んだ(左)。3D Trackerによる解析では、長距離の基線を直接解いた(右)。



図一13 2種類のソフトウェア(RTNETと3DTracker)による座標時系列の比較。(横軸は0時UTからの時間)

おり、はっきりとはわからない。東西成分には15分付近からS波と見られるシグナルも捉えられている。

GEONET点の近隣にあるF-net観測点(TKOおよびUMJ)のデータ(防災科学研究所)を用いてGPSとの比較を行った(図一14)。野尻-TKO間、及び馬路-UMJ間の距離は、それぞれ16.6kmおよび7.1kmである。地震計データは地震計の特性を補正した後、時間積分をして変位波形に直し、2点間の差をとって相対変位を求めた。15分~40分付近の顕著なシグナルは、振幅・位相共によく合っている。後処理1秒データ解析結果のノイズが数cmあり、地震計に比べて圧倒的に大きい、ランダムではない。数分から数十分程度時間で相関を持つノイズが卓越している。これが、マルチパスなどの観測ノイズならば、Modified sidereal filter (Choi et al., 2004)を用いたノイズの軽減が可能であろう。また、上下成分のドリフトは大気遅延が主な要因と考えられるが、今回は推定しなかった。この点には工夫の余地がある。

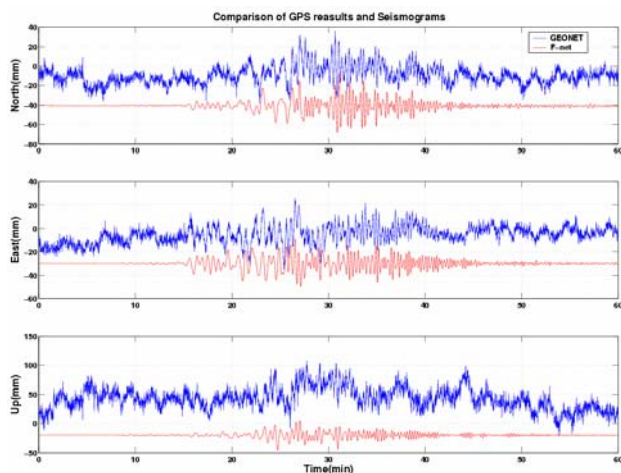


図-14 RTNET による解析結果（横軸は発震時からの時間）と F-net の広帯域地震計との比較。

3. 4 結論

新 GEONET 構築に伴うリアルタイム解析装置導入以来取り組んできた、ソフト自体の改良や検証作業を基にした解析戦略の構築等の作業により、以前見られたいくつかの問題については改善されてきた。安定して解析ができていない時間帯のみを見れば、GEONET の定常解析結果と整合的な結果を得るまでに至っている。また直接の地殻変動ではないが、2005 年スマトラ沖地震に関しては、日本付近まで到達したと考えられる長周期の地震波も検出している。しかし一方で、地震時の変動が大きい場合にアンビグニティ Fix 率が低下し、解が不安定になる時間帯が発生するという問題も残っている。

リアルタイム解析は現在も発達過程の分野であり、

今後もソフトのバージョンアップを含めた改良作業を続けていく必要がある。

4. まとめ

S2 解析の精度評価について、Q2 解析以上の即時性を考慮して、その観測時間の半分である 3 時間観測の場合について行った。その結果、S2 解析により Q2 解によるばらつきの RMS の 2～3 倍程度で解が得られることが分かった。しかし、例としてあげた基線時系列の中には、今回評価した RMS を大きく超えるばらつきも認められるため、S2 解による変動量を空間的に捉えて結果の検査をすることが重要である。

リアルタイム解析に関しては、導入当初に比べて解析精度が非常に向上し、安定して解が得られている時間帯のみを見れば定常解析とも整合的な結果を得るまでに至っている。中規模の地殻変動であれば、地震発生直後からその変動をきれいに追うことが可能である一方、変動量が大きくなった場合に、アンビグニティ Fix 率の低下により一時的に解が不安定になるという問題もあり、この点については改良作業を続けていく必要がある。

地震等の災害の際には、いかに精度を落とさずに、しかも迅速に状況を把握できるかが問われる。本稿の結果より、GEONET における緊急解析はある程度その要望を満たせるものと期待される。

謝 辞

GPS との比較に用いた地震波形は、防災科学技術研究所の F-net のデータを使用しました。

参 考 文 献

- 測地観測センター，近畿地方測量部(2001)：GPS 連続観測による有珠山の地殻変動監視について，国土地理院時報，95，29-36.
- 畑中雄樹，松村正一，山際敦史，丸山一司，菅富美男，石本正芳(2003)：GEONET 解析システムの高度化に関する研究，国土地理院技術資料 A・4-No. 1，113-114
- 畑中雄樹，矢萩智裕，湯通堂亨，小島秀基，雨貝知美，岩田昭雄，山際敦史(2005)：GEONET が捉えたスマトラ島沖の地震の地震波，地球惑星科学関連学会 2005 合同大会予稿集，J113P-006.
- 矢萩智裕，湯通堂亨，小島秀基，雨貝知美，岩田昭雄，畑中雄樹(2005)：GEONET のリアルタイム解析における成果，地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集，D008-005.
- 測地観測センター(2004)：小特集 電子基準点 1,200 点の全国整備について，国土地理院時報，103，1-51.
- Choi, K, A. Bilich, K. M. Larson, and P. Axelrad (2004)：Modified sidereal filtering: Implications for high-rate GPS positioning, Geophys. Res. Lett., 31, L22608, doi:10.1029/2004GL021621.