

GPS リアルタイム 1 秒データを用いた震源断層即時推定手法の開発 Development on the Rapid Estimation for an Earthquake Fault Model Using Real-time 1-second Sampling GPS Data

地理地殻活動研究センター 西村卓也・今給黎哲郎・飛田幹男
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Takuya NISHIMURA, Tetsuro IMAKIIRE, and Mikio TOBITA

要 旨

電子基準点の 1 秒サンプリングデータを用いて、リアルタイムに地殻変動を算出し、大地震発生時に緊急地震速報を受信して迅速に震源断層モデルの自動推定を行うシステムを試作した。このシステムを関東地方南部を対象として試験運用し、リアルタイム GPS 解析の精度評価と誤差軽減手法の検証、震源断層モデルの自動推定に関する検証を行った。大地震が解析地域内で発生しなかったため、このシステムによる実際の地殻変動検出例はないが、後処理による岩手・宮城内陸地震を対象とした震源断層モデルの自動推定手法の検証では、断層モデルが地震後 15 分程度で推定できることが確かめられた。リアルタイムの GPS データを用いた地殻変動の検出と震源断層の推定は、数 cm 以上の地殻変動を伴う内陸地震に対しては、有効であると考えられるが、大気擾乱時など GPS 解析精度が大幅に悪化する場合もあり、精度と信頼性向上のためにさらなる研究が必要である。

1. はじめに

GEONET の整備により、従来の測地測量と比較して地殻変動を観測し、変動量を算出する時間は劇的に短くなった。しかし、地殻変動の監視に通常用いられる GPS 相対測位によって地殻変動量を計算するためには、GPS データを基線解析する必要がある。GPS データの通信や基線解析に要する時間を含めると、観測された地殻変動を実際に算出するためには数時間以上が必要である。このような時間遅れは、GEONET の解析戦略の更新（中川ほか、2009）により、徐々に改善されつつあるが、数時間かかる状況は依然として続いている。

火山においては、噴火直前あるいは噴火中に地殻変動が急激に進行することが知られている。国土地理院でも静岡県伊東市沖で度々発生する伊豆半島東方沖の群発地震や 2000 年の有珠山、三宅島の噴火では、GEONET によって進行中の地殻変動を監視し、火山活動の現状把握と予測に大きく貢献した。しかし、光波測距儀による距離変化や傾斜計・歪計による連続観測では、ほぼリアルタイムの地殻変動監視が実

現している中で、GPS を用いた地殻変動監視には解析等に要する時間遅れが大きな問題であった。地震においても同様で、地震発生後 GEONET による基線解析結果が算出され地殻変動量が得られるまでに数時間以上が必要である。

地殻変動以外の地殻活動の監視では、気象庁が、震源近くの地震計で捉えた地震波を即時に解析し、震源からある程度離れた場所では実際に地面が揺れる前に地震動に関する警報を出す緊急地震速報の一般への提供を 2007 年 10 月から開始した。防災科学技術研究所でも、地震計データを用いて震源、マグニチュード、メカニズム解を即時に推定し公開する AQUA システムが運用されている。このように、リアルタイムあるいは短時間で地震データを処理するシステムは、既に実用段階に入っており、その社会的ニーズも高い。その点、現状の GEONET による地殻変動監視情報は、災害情報としての鮮度が低下することは否めない。地理地殻活動研究センターでは、大地震発生時に地震時地殻変動から震源断層モデルを推定しているが、GEONET による基線解析結果算出までの時間が早まれば、断層モデル推定までの時間も短縮することができる。内陸地震においては、新潟県中越地震のように強震動やそれに伴う土砂崩壊等により、震源断層直上で被害が集中する傾向があるため、迅速な復旧対策のためにも震源断層モデルの早期推定が望まれる。また、火山性地殻変動監視の監視についても、基線解析の迅速化により今以上に効果的な情報が発信できることは疑いない。

GEONET では、2002 年度までにほとんどの観測点において、従来の電話回線とモデムを用いたデータ収録システムから IP-VPN 網による常時接続の通信システムへと変更された。これにより、GPS 1 秒サンプリングデータがリアルタイムに GEONET 中央局まで転送されるようになり、リアルタイムの地殻変動監視システムへ向けての条件は整いつつあった。そこで地理地殻活動研究センターでは、2003 年度より火山活動に関わる地殻変動をリアルタイムに検出することを主目的として「リアルタイム地殻変動監視システム」の開発を開始した（今給黎、2007）。当初の目標を火山性地殻変動にしたのは、火山の地殻変

動がどこでどのように発生しているかは、噴火を含む火山活動の推移を予測する上で非常に重要な情報であり、想定される地殻変動も局所的に大きく、短距離のGPSの基線解析でも有効だと考えられるからである。2003年度から2005年度までに開発されたこのシステムでは、GPS1秒サンプリングデータをリアルタイム解析するソフトウェアとして、米国Geodetics社製のRTDを採用した。その理由は、RTDでは1エポックのデータのみで座標値を推定することができ、時間方向のスムージングは行わないことから、地震等の急激な変動やデータの欠測に強いという利点を重視したためである。開発においては、GEONETのデータ管理装置からリアルタイムデータを取得する機能、RTDを用いた最大30観測点のリアルタイムGPS基線解析、解析結果の時系列グラフ表示や電子国土を利用して地図上にベクトル図を表示する機能を実現するため、各種ハードウェアとソフトウェアの両面において整備を行った。

2007-2009年度には、GPSデータから地震に伴う地殻変動の迅速な検出と震源断層モデルの即時推定を主目的とした国土地理院特別研究「緊急防災情報としての震源断層即時推定手法の開発に関する研究」が実施された。この研究成果として「広域リアルタイム地殻変動監視システム」が試作され、試験運用が行われている。このシステムは、「リアルタイム地殻変動監視システム」をベースに、最大60観測点のリアルタイム基線解析が出来るように拡張するとともに、緊急地震速報を導入することによって、

監視対象の観測点周辺で大きな地震が発生した際には自動的に地震時地殻変動を算出し、震源断層モデルの推定を行うものである。

本稿は、「広域リアルタイム地殻変動監視システム」の概要を紹介し、「緊急防災情報としての震源断層即時推定手法の開発に関する研究」で行われた震源断層即時推定手法の開発や上記システムのリアルタイムGPS解析結果の報告と考察を行うものである。

2. システムの概要

広域リアルタイム地殻変動監視システム（以下、本システムと呼ぶ）は、3年間の特別研究期間中に様々な改造や設定変更を行ってきたが、2010年4月現在の全体の構成を、図-1に示す。システム構成は、GEONETからGPSリアルタイムデータを受信し、基線解析を行うGPSデータ解析部分と緊急地震速報配信業者から緊急地震速報を受信し地震時の地殻変動解析等を行う震源断層即時解析部分に大別される。以下に、この2つの部分の役割や動作目的を示す。

2.1 GPSデータ解析部分

GPSデータ解析部分は、データ中継プロキシ、リアルタイムGPS解析装置、GPSデータ保存サーバの3つの装置から構成される。データ中継プロキシは、GEONETのリアルタイムデータ通信管理装置（測地観測センター、2004）の一部であるRTCM(Radio Technical Commission for Maritime services)データサーバとリアルタイムGPS解析装置の間のデータ

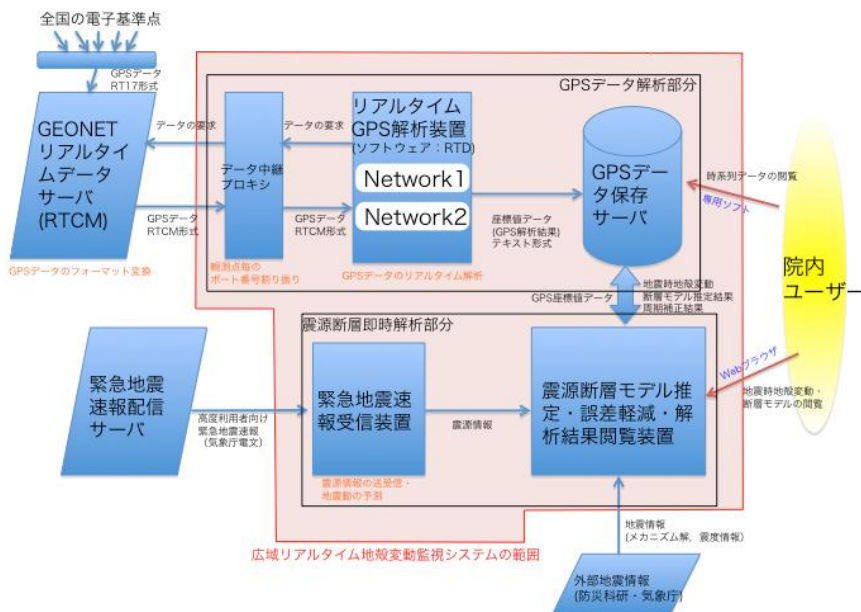


図-1 広域リアルタイム地殻変動監視システムの構成

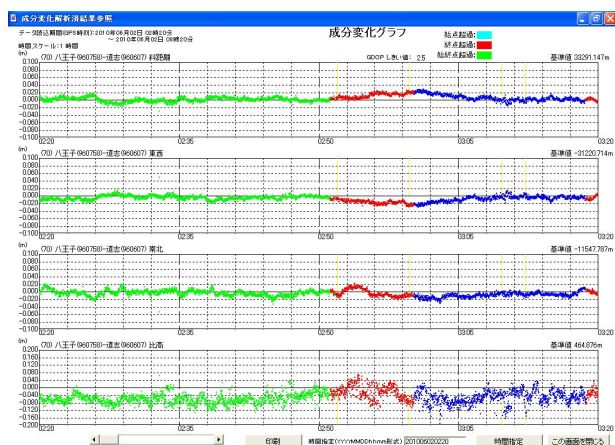


図-2 リアルタイム GPS 解析結果の表示例.

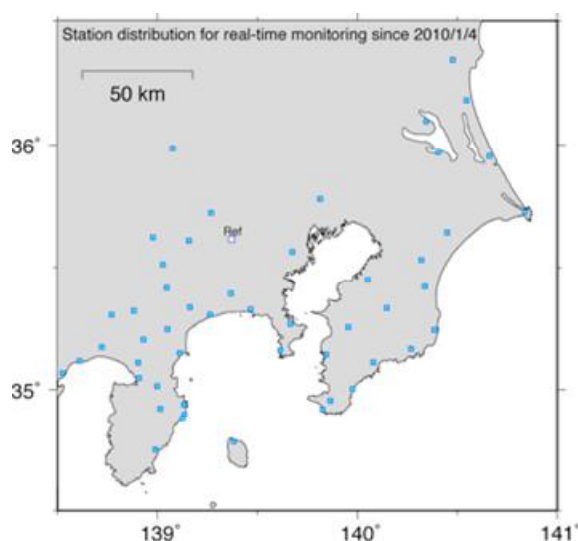


図-3 リアルタイムデータの解析を行っている GEONET 観測点分布 (2010 年 11 月現在).

の中継を行うものである。RTCM データサーバ側では、複数観測点の GPS リアルタイム 1 秒サンプリングデータ (RTCM2.3 形式) を 1 つのポート番号で通信する仕様となっているが、リアルタイム GPS 解析装置側では、GPS 解析ソフトウェアの仕様により観測点毎に異なるポート番号が必要なため、データ中継プロキシは観測点毎のポート番号への割り振りを行っている。

リアルタイム GPS 解析装置は、GPS データのリアルタイム基線解析を行うもので、基線解析ソフトウェアはリアルタイム地殻変動監視システムと同じ RTD である。基線解析に用いる GPS 軌道情報は、IGS 超速報暦であり、最低仰角 7° 以上の衛星を使用している。RTD では、1 ライセンスあたり、同時に 30 点分のデータしか解析できないという制限がある。また、座標値の推定には、1 点を基準点としてその座標を完全に固定し、残りの観測点の座標値を算出

する方法がとられている。解析する基線は、基準点からの放射状の基線のみを解析するモードと全ての基線を解析するネットワークモードが選択できるが、ネットワークモードではおおむね 17 点以上になると動作が重くなり、測位解が求まらない場合が多い。また、ネットワークモードでも、座標値の再現性が大幅に向上するわけではないため、試験運用では放射状の基線のみを解析するモードを選択した。基線解析結果は、リアルタイム GPS 解析装置内で基線解析ソフトウェアから本研究で開発した表示兼ファイル出力ソフトウェアへと送られ、解析結果の閲覧と観測点毎の座標時系列ファイルとして出力される。なお、座標時系列ファイルは、GEONET 観測点の定常解析結果の出力として広く用いられている三次元直交座標及び緯度、経度、楕円体高をテキストで記した POS 形式、POS 形式の内容に GDOP を追加した EXPOS 形式、基線毎に 2 点分の EXPOS 形式の内容を含む RAW 形式の 3 種類で出力している。なお、POS 形式と EXPOS 形式は観測点毎、RAW 形式は基線毎に別ファイルとしている。また、各ファイルは毎正時から 1 時間分を 1 ファイルとして、1 ファイルあたりのファイルサイズが過大にならないようにした。

GPS データ保存サーバは、約 10TByte の容量を持つ RAID 装置となっており、リアルタイム GPS 解析装置などとネットワーク上でファイル共有されている。GPS 解析結果である座標時系列ファイルは、1 日 50 観測点分で 3 つの形式を合わせると 2.4GByte となるため、大容量のファイルサーバは必須である。GPS データ以外にも、後述する緊急地震速報による震源情報や震源断層モデル推定結果など本システムの主な解析結果のファイルは、本サーバに格納される。また、本サーバは、Windows のファイル共有機能を使って、国土地理院内の LAN に接続されている PC でもファイルの共有が可能となっている。国土地理院内のユーザーは、RAW 形式のファイルを読み込んで時系列表示するソフトウェアを各自の PC にインストールすることにより、現在及び過去の 1 秒時系列データを閲覧できる (図-2)。

2010 年 11 月現在、リアルタイム解析を行っている観測点は、電子基準点八王子 (960758) を固定局として 53 点 (52 基線) である (図-3)。なお、前述のように GPS 解析ソフトウェアの同時解析観測点数には制限があるため、観測点を東西に分け、2 台の PC で分散して基線解析を行っている。また、解析を行う観測点については RTCM データサーバよりデータが配信可能であれば、60 点を上限として変更可能であり、そのためのデータ中継プロキシとリアルタイム GPS 解析装置の設定を簡便に変更できるユーザーインターフェイスが用意されている。

2. 2 震源断層即時解析部分

震源断層即時解析部分(図-1)は、緊急地震速報受信装置と震源断層モデル推定・誤差軽減・解析結果閲覧装置(以下、モデル推定装置)から構成される。緊急地震速報受信装置は、気象庁が発表する高度利用者向け緊急地震速報を受信し、モデル推定装置へと緊急地震速報の電文を転送する装置で、国土地理院における地震動の予測と震源情報の表示も行うことができる。これらの機能を実現するソフトウェアとして、(株)先端力学シミュレーション研究所のASU-QUICKをカスタマイズしたものを採用している。緊急地震速報は、気象庁が発表しているものであるが、本システムでは研究という性格上、経済性を重視し、二次配信業者によるインターネット回線(インターネットVPN)を用いた配信を利用している。

モデル推定装置は、緊急地震速報の転送を受けて、起動条件を満たした地震が発生した場合に、地震時地殻変動の計算、震源断層モデルの推定、防災科学技術研究所F-net及びHi-netによる地震のメカニズム解情報の収集、気象庁による震度情報の取得を行う本システムの中核とも言える装置である。さらに本装置では、GPS時系列のフィルター処理による誤

差軽減処理と解析結果を表示するWebページの自動作成を行っている。緊急地震速報は、1つの地震に対して逐次的に震源情報が更新され、その度に電文も配信される。最終的な情報は、最終報と明示された電文が配信されることになっている。最終報の配信までに要する時間は、本震発震時から1分程度であることが多く、地殻変動検出のためには十分な時間的猶予がある。よって、本システムでは緊急地震速報の最終報を受信した時点でその震源位置及びマグニチュードが起動条件を満たした場合に地震時地殻変動の計算と震源断層モデルの推定プログラムを起動することとした。地震時地殻変動の計算と震源断層モデルの推定手法については、3.1節で詳述する。

解析結果のWebページの自動作成機能とは、震源断層モデルの推定が終わった時点で、地震時地殻変動のベクトル図や震源断層モデルを図示したページを作成し、国土地理院内LANに接続されたPCより閲覧できるようにしたものである(図-4)。また、緊急地震速報の各地震に対する実際の各地の震度に関する情報(気象庁発表、震源に関する情報も含む)を取得し、データベース化することで、過去に発生した地震の検索もWeb上で容易に行うことが出来る。

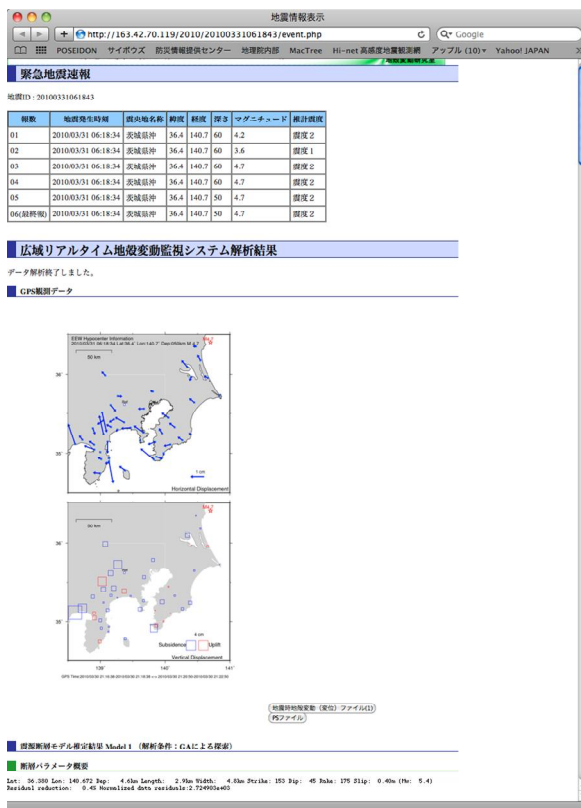


図-4 震源断層即時推定結果のWebページによる閲覧例(2010年3月31日6時18分、茨城県沖の地震、M4.6)。

3. システムにおける自動解析手法

3.1 地殻変動の自動検出と震源断層即時推定手法

2010年11月現在、リアルタイムGPS解析結果を用いた地震時地殻変動の算出と震源断層の即時推定は、緊急地震速報により北緯33-38度、東経137-144度に深さ100km以浅でM4以上の地震が発生したと伝えられた場合に行っており、その具体的な手順は以下のようなになる。まず、地震時地殻変動の算出であるが、緊急地震速報最終報の震源要素を用いて、発震時の131秒前から11秒前までの1秒毎座標値の中央値と発震時からマグニチュードに応じた時間を経過した後の121秒間の中央値の差を計算し、地震時地殻変動とする。マグニチュードに応じた時間とは、震源断層の破壊(すべり)継続時間、地殻変動がGPS観測点へ到達するのに要する時間を考慮したものである。断層の破壊継続時間は、標準的な地震の断層パラメータ(宇津, 2001)によるマグニチュードとの関係式を用いて計算している。地殻変動がGPS観測点へ到達するのに要する時間は、S波速度の伝搬時間に等しいが、リアルタイム解析しているGPS観測点分布(図-3)や想定される震源位置から一律に2分と仮定した。マグニチュード7の地震が発生した場合のマグニチュードに応じた時間は137秒となる。なお、ここで算出した地震時地殻変動とは、リアルタイムGPS解析での固定局に対する相対的な変

動であり、絶対的な変動量ではないことに注意する必要がある。

震源断層の即時推定には、上記のように算出された地震時地殻変動を用い、通常 5 通りの震源断層モデルを推定している。なお、ここで推定する震源断層モデルとは、半無限均質媒質を仮定した 1 枚の矩形断層 (Okada, 1985) であり、9 個のパラメータ (緯度、経度、深さ、長さ、幅、走向、傾斜、すべり角、すべり量) からなる。

1 番目のモデルは、遺伝的アルゴリズムを用いて試行錯誤的にパラメータ探索 (高野, 私信) を行うものである。パラメータの探索範囲は、長さ、幅、滑り量に関しては緊急地震速報のマグニチュードを用いて標準的な地震の断層パラメータ (宇津, 2001) の 2-3 倍の範囲とした。緯度、経度、深さについても、緊急地震速報の震源要素と長さ、幅の探索範囲から決めている。走向、傾斜、すべり角については、取り得る値全てを探索範囲としている。この手法は、震源のメカニズム (走向、傾斜、すべり角) に関する事前の情報がない場合でも推定できるという長所がある。実際には、計算時間を 1 分程度に押さえるために十分にデータに適合するモデルを探索できない場合はあるが、真のパラメータから大きく外れた解が探索されることは少ないようである。ただし、探索候補を乱数で決めているため毎回同じ解が探索されるとは限らない。

2 番目と 3 番目のモデルは、あらかじめ震源メカニズム (走向、傾斜、すべり角) を、震源の位置に応じて仮定し、それを初期値として Matsu'ura and Hasegawa (1987) による非線形インバージョン手法によりパラメータ推定を行うものである。設定した震源メカニズムは、関東地方のテクトニクスや過去に発生した地震のメカニズム解から推定された応力場 (寺川・松浦, 2009) を参考に、図-5 のように仮定した。リアルタイム解析を行っている地域の近傍である北緯 34 度から 37 度、東経 138 度から 142 度までは、0.5 度毎に設定し、メカニズム解の 2 つの節面をそれぞれ初期値として、モデル 2 とモデル 3 の推定を行っている。この方法の長所としては、推定に要する時間が短いという点が挙げられるが、非線形性が強いと、初期値が適切でないと局所的な極小値に解が収束してしまい、適当なパラメータが得られないという短所がある。

4 番目と 5 番目のモデルは、震源メカニズム (走向、傾斜、すべり角) を、防災科学技術研究所 F-net Project による広帯域地震波形を用いたメカニズム解析結果 (<http://www.fnet.bosai.go.jp/>) を初期値とする方法である。F-net メカニズム解の取得は、Web 上に公開されている情報を取得するスクリプト (石本, 私信) を利用しており、設定変更により防災

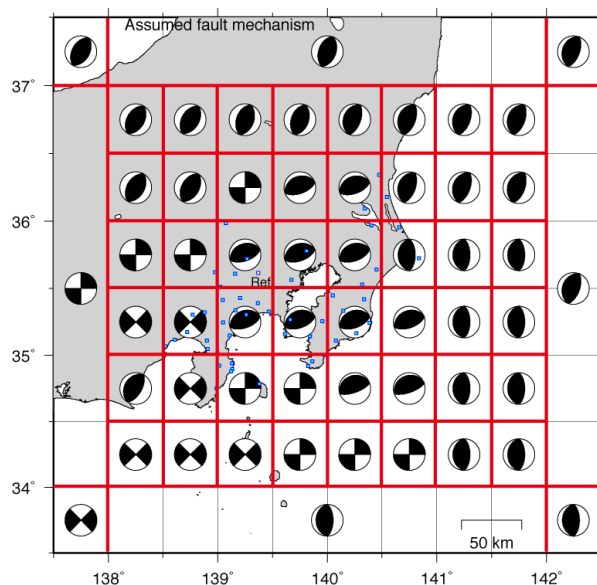


図-5 震源断層モデル推定時 (2, 3 番目のモデル) に仮定したメカニズム解。赤線を境界として、震源位置により異なるメカニズム解を初期値とした。

科学技術研究所 Hi-net AQUA システム (松村ほか, 2006) によるメカニズム解を取得することも可能である。メカニズム解の 2 つの節面をそれぞれ初期値としたものが、4 番目と 5 番目のモデルに対応する。この方法の長所としては、地殻変動とは独立のデータである地震波形による推定結果と調和的なモデルが得られる点が挙げられる。防災科学技術研究所による地震のメカニズム解の推定は、10 年以上の実績があり、その信頼性も高い。地殻変動から断層モデルを推定する際には、観測網の外側に発生した地震に対して、上手く推定できない場合がある。そのような場合でも、震源メカニズムがわかっている場合、地殻変動の大きさに合わせた震源位置や規模が推定できることが多く、地震波解析によるメカニズム推定結果を用いることは有効である。一方、短所としては F-net 解が Web 上に公開されるまで発震時から十数分の時間がかかるため、本推定もそれ以降でないと行えないという点である。

これら 5 つのモデルについては、データへの適合度を示す指標として、残差二乗和と Residual reduction ($= ([データの二乗和] - [断層モデルの残差二乗和]) / ([データの二乗和])$) を計算する。残差二乗和が小さく、Residual reduction が大きいモデルが GPS データをよく説明するモデルとなるが、地殻変動データの誤差や計算時間の制約から必ずしも残差の小さいモデルが現実的なモデルとは限らない。よって本システムでは 5 つのモデルを全て出力し、

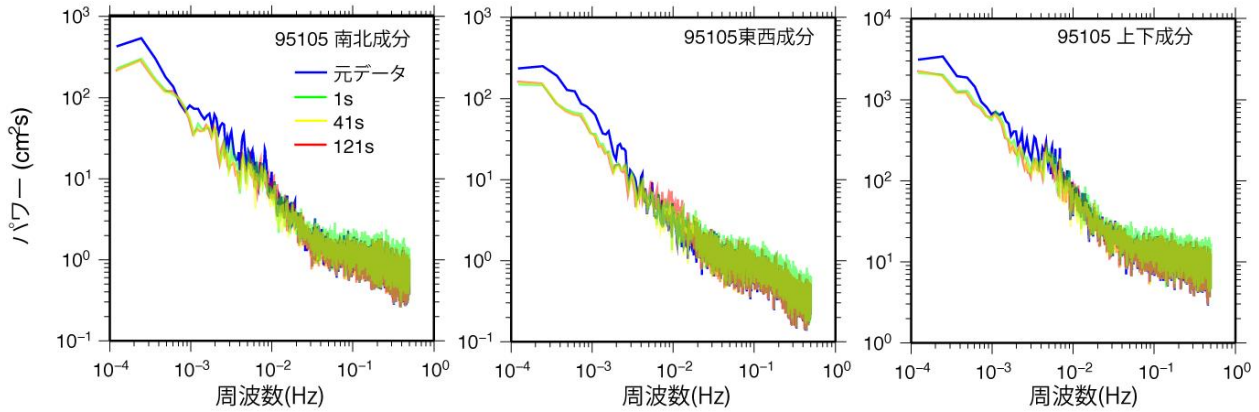


図-6 リアルタイム1秒 GPS データのパワースペクトル密度. 2009年2月25日の93086-95105間(基線距離56km)の1秒時系列に対して恒星日フィルター処理を行った場合のスペクトルを比較した. 緑, 黄色, 赤は, 恒星日周期成分の移動中央値の時間幅を, 1秒, 41秒, 121秒に変えた場合のスペクトルを示す.

最終的なモデルの優劣は人間が判断することとしている.

3. 2 恒星日フィルターによるGPS時系列の誤差軽減手法

GPSの測位精度は、衛星の軌道誤差、衛星や受信機の時計誤差、大気や電離層での電波遅延、GPSアンテナの位相特性、マルチパスなどに影響されることが知られている(例えば、ホフマン-ウェレンホフほか, 2005)。これらの誤差要因のうち、一日毎の座標値推定では、24時間の平均を取るにより軽減されるものも多いが、高サンプリングのGPSキネマティック解析では、平均による誤差軽減効果は期待できない。ある地点におけるGPS衛星の上空配置は、1恒星日(23時間56分4秒)周期で繰り返すとされており、マルチパスなど衛星配置に依存する誤差は1恒星日周期で繰り返すと考えられる。そのため、1恒星日前の座標値を差し引くことにより、測位誤差を軽減する手法が提案されており、恒星日フィルター(例えば、Genrich and Bock, 1992)と呼ばれている。

最近の研究によるとGPS衛星の軌道は、軌道の調整等によって必ずしも一定ではなく、上空での衛星配置の周期の平均も1恒星日より短いことがわかってきた(Choi et al., 2004; Agnew and Larson, 2007)。そこで、本システムでは、Agnew and Larson(2007)による衛星配置の平均周期(23時間55分53秒)を用いて、41秒の移動中央値をとった過去4周期分の平均周期成分を時系列から差し引くことにより恒星日フィルターを実現することとした。フィルター処理を行った時系列は1時間毎に計算され、GPSデータ保存サーバにRAW形式で保存される。このような恒星日フィルター処理を行うことによる誤差軽減の実例を時系列のパワースペクトルで示したのが図-6である。元の1秒毎座標値のスペクトルを青で示す

が、長周期側で平坦で、0.0005-0.01Hzの周期帯では傾きが-1、0.03Hzよりも短周期側では傾きが緩くなるような特徴を示す。恒星日フィルターによる補正を行う際に、周期成分の移動中央値を取る時間幅を1秒、41秒、121秒と変えてスペクトルを取ると、どの時間幅でも長周期側で元データよりスペクトル密度が小さくなっており、誤差が軽減されていることがわかる。一方、0.03Hzより短周期側では、1秒の時間幅、すなわち移動中央値を取らない場合は、スペクトル密度が大きくなっている。これは、短周期側では、元データのスペクトルも傾きが小さくホワイトノイズに近い誤差特性があるため、恒星日フィルターでは誤差が軽減されないためであると考えられる。このようなスペクトルの特徴及び恒星日フィルターの有効性については、カリフォルニアのGPSネットワークを用いた研究例(Genrich and Bock,

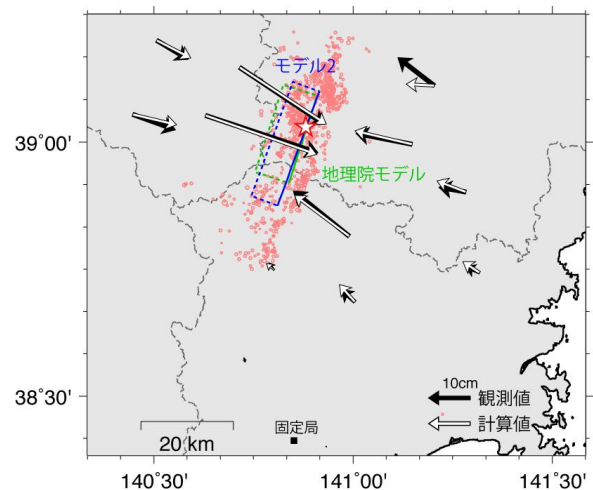


図-7 岩手・宮城内陸地震の後処理1秒地殻変動データを用いた震源断層モデル即時推定結果. 星印は、本震の震央で、薄い赤丸は余震分布を示す.

表-1 岩手・宮城内陸地震の後処理 1 秒地殻変動データを用いた震源断層モデル即時推定の結果一覧

モデル名	緯度 (°N)	経度 (°E)	上端深さ (km)	長さ (km)	幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	滑り角 (°)	滑り量 (m)	M_w	RR ¹ (%)
モデル1	38.97	140.98	0.3	24	14	52	41	125	2.4	6.9	90.9
モデル2	39.10	140.92	0.0	27	8	200	43	89	3.1	6.8	97.1
モデル3	39.91	140.77	0.0	22	10	6	39	65	3.2	6.8	97.0
モデル4	39.10	140.97	0.0	30	10	206	35	98	2.4	6.8	97.1
モデル5	38.89	140.76	0.9	27	7	16	44	84	3.6	6.8	97.0
地理院モデル ²	39.05	140.91	0.7	20	9	198	31	74	4.6	6.9	

¹RR: Residual Reduction. ²地理院モデルは、小沢・他(2008)による矩形断層モデル。

2006) と調和的である。

なお、移動中央値が 41 秒と 121 秒の場合で顕著な差はないが、0.01Hz 前後のスペクトル密度は 41 秒の方がやや小さい傾向がある。また、周期成分を過去何周期分まで用いて計算するかについては、1-7 周期分の平均周期成分を差し引いて、振幅の二乗和を計算した結果、1 周期から 4 周期までは残差が小さくなり、それ以上ではほとんど変化がなかった。これらの理由と計算に要する時間をなるべく短くするという観点から 41 秒と 4 周期を採用した。

4. システムの解析結果と議論

4.1 地殻変動の自動検出と震源断層即時推定手法

本システム及びその前身のシステムにおいては、2005 年度以降断続的に電子基準点 1 秒データのリアルタイム解析を行っているが、実際に地震に伴う地殻変動が検出できたのは、2006 年 4 月 21 日に伊豆半島東方沖で発生した $M_{JMA}5.8$ の地震だけである。ただ、当時は、地殻変動の自動算出は行っていなかったため、地震後しばらくたってリアルタイム測位結果を検証するまで、変動を捉えたことは確認されていなかった。2009 年 8 月 11 日の駿河湾の地震($M_{JMA}6.5$)においては、本システムに実装された機能により緊急地震速報による地殻変動の自動算出が行われた。しかし、この地震に伴う地殻変動は最大でも 1 cm 程度であるのに対し、駿河湾南方を台風が通過しているという悪条件のため時系列のばらつきが 10cm 程度あり、地震に伴う地殻変動を見出すことは出来なかった。よって、実際に本システムによる地震時の地殻変動検出で有意な地殻変動を検出した例はまだない。

そこで、本システムの有効性を検証するため、過去に発生した大地震発生前後の 1 秒 GPS データを用いて、本システムと同じ手順でどのような断層モデルが推定されるのかを確かめてみた。用いた地震は、平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震である。地震時地殻変動データとして、震源域周辺の 13 点の GPS 1 秒データを後処理で解析した時系列から本シ

ステムと同様の基準で算出したものを用いた。なお、震源域直上の電子基準点栗駒 2 のデータは、地震直後にデータが途絶えてしまったため、本検証でも使用していない。岩手・宮城内陸地震の気象庁一元化震源による震源要素は、北緯 39.03 度、東経 140.88 度、深さ 8 km、 $M_{JMA}7.2$ であるが、ここでは緊急地震速報の最終報による震源要素(北緯 39.0 度、東経 140.9 度、深さ 10km、 $M7.0$)を用いた。震源断層モデルの即時推定結果を表-1 に示す。表-1 の地理院モデルは、本震発生から四日後に報道発表された矩形断層モデルを地震調査委員会への提出資料として更新したもの(小沢ほか, 2008)であり、栗駒 2 のデータも使用している。このモデルは、地震による断層運動の特徴を正しく示していると考えられるが、本システムで推定された 5 つのモデル全てでモーメントマグニチュード(M_w)が 6.8-6.9 であることや、上端深さが極めて浅いこと、滑り方向が東西方向であることなどにおいて共通点がある。モデル 1 を除いて、モデル 2-5 では、Residual Reduction も甲乙つけがたいが、その中でも最小の残差を示したのがモデル 2 (図-7) である。このモデルは、地理院モデルと同じ西傾斜の逆断層というモデルであり、地図上で見た断層位置もほぼ重なっている。他のモデルについても、西傾斜と東傾斜の違いはあるが南北方向に長い逆断層で、余震域に断層面が含まれており、本研究の主目的の 1 つである本震断層面の概略位置と広がり の推定は、概ね正しく行われていると言える。

ここで行った検証は、モデル 2, 3 で仮定している震源メカニズム(図-5)と実際のメカニズムが似ている点と震源を取り囲むように GPS 観測点が配置されている点から、理想的な条件と言えるかも知れない。他の地震に関しても後処理キネマティック解析で地震時地殻変動が検出できるかどうか確認したところ、2007 年新潟県中越沖地震($M_{JMA}6.8$)や 2005 年福岡県西方沖の地震($M_{JMA}7.0$)など数 cm 以上の地殻変動が伴った地震であれば、断層モデルの推定に耐えうる精度で地殻変動が検出可能であった。よって、最大 5 cm 以上の地殻変動が期待され、周囲に観

測点が十分あるような M7 クラスの内陸地震に関しては、本システムによる震源断層即時推定結果は、地震直後の防災情報としては有効に活用できる精度を備えていると言える。

4. 2 リアルタイム 1 秒解析の測位精度

本システムで採用したリアルタイム GPS 解析ソフトは、RTD であるが、本システムによる 2008 年 1 年分の 1 秒毎座標時系列を太田ほか(2006)の表示にならって図-8 に示す。この基線では有意な地殻変動はないと考えられるので、色が濃いところが座標値の基準値からのずれが大きく誤差が大きな時刻を示すことになる。なお、通算日 84-185 日などに見られる白い領域は欠測によるものである。この図から、(1) 上下成分の誤差が水平成分に比べてかなり大きいこと、(2) 通算日 200 日前後に誤差が大きくなり、特にこの時期の 12 時頃 (GPS 時刻) に大きな誤差が出る傾向にある、(3) 左上から右下に向かう斜めの縞模様で現れる誤差がある、ことが読み取れる。縞模様の誤差については、マルチパス等による周期的に繰り返す誤差と考えられ、その周期は、3.2 節で述べたように 1 恒星日よりやや短いことがわかる。このような斜めの縞模様は、本システムに実装された恒星日フィルター処理をすることにより、かなり軽減することができた。

図-9 は、約 3 年分の時系列に対する日別座標値再現性を表したものである。再現性は、1 日分のデータの平均値に対する二乗和平方根 (RMS) で表した。3 年間で基線解析する観測網を 2 回変更したため、同一図中に 3 つの基線の RMS が示されていることに注意する必要がある。図-9 (a) が基線距離約 90-100km の 93086-93024 (2009 年 3 月以前、図中の期間①)、950297-93044 (2009 年 4 月から 12 月まで、図中の期間②③)、960758-93024 (2010 年 1 月以降、図中の期間④⑤⑥)、図-9 (b) は基線距離約 30-40km の 93086-93062 (2009 年 3 月以前、図中の期間①)、950297-95105 (2009 年 4 月から 12 月まで、図中の期間②③)、960758-93026 (2010 年 1 月以降、図中の期間④⑤⑥) となっている。また、RTD の基線解析時の設定で測位解に大きく影響する項目は、初期座標値に対する 2 種類の拘束の強さと天頂遅延量の推定の有無が挙げられるが、これらの項目も図中の各期間で異なっていることに注意する必要がある。2 種類の拘束とは、通常の座標値推定時に用いる拘束と整数値バイアス推定時だけに用いる拘束である。このうち、通常の座標値推定時に用いる拘束に関しては、大きな数値 (例えば、100m) を用いても、あまり解析結果に影響を与えないが、バイアス決定時の拘束は、座標値の再現性に大きく影響する。

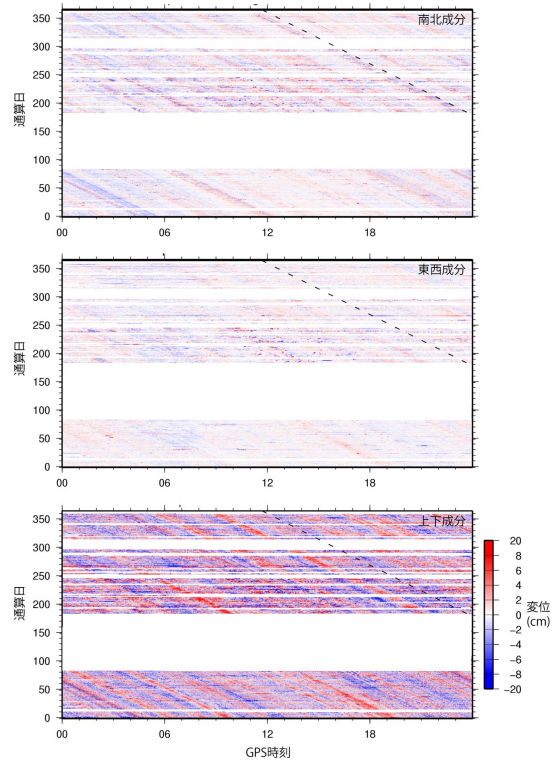


図-8 リアルタイム GPS 解析による座標時系列の例。93086-95105 基線 (距離 56km) の 2008 年 1 年分の解析結果を示す。縦軸が通算日で横軸が 1 日中の時刻を示し、座標値の基準値からのずれをカラースケールで表す。図中右上の破線は、1 恒星日周期の同位相の時刻を示す。

期間①では、通常の拘束を 100m、バイアス推定時の拘束を 0.3m (水平成分) と 0.6m (上下成分)、天頂遅延量の推定を有としているが、期間②では、通常の拘束 100m、バイアス推定時の拘束 0.5m (全成分共通)、天頂遅延量の推定無、期間③④では、天頂遅延量の推定を有にした他は期間②と同じとした。期間⑤は、期間③④のバイアス推定時の拘束を 1m と変えたものである。現在を含む期間⑥では、通常の拘束を 10m、バイアス推定時の拘束を 0.5m、天頂遅延量の推定を有としている。

これらの基線と解析条件の変更に留意して図-9 の特徴を挙げると、まず第一に、夏季は大幅に RMS が大きくなることである。水平、上下成分とも 1.5 倍から 2 倍程度大きくなっており、誤差が大きいことがわかる。時系列そのもの (図-8) でも、夏季に座標値が乱れていることから、誤差が大きいことは明らかとも言える。この原因は、夏季には空気中の水蒸気量が増え、大気遅延量が大きくその時間変化も激しくなるためだと考えられる。また、通年的に上下成分の RMS は、水平成分の 3 倍程度大きくなっている。

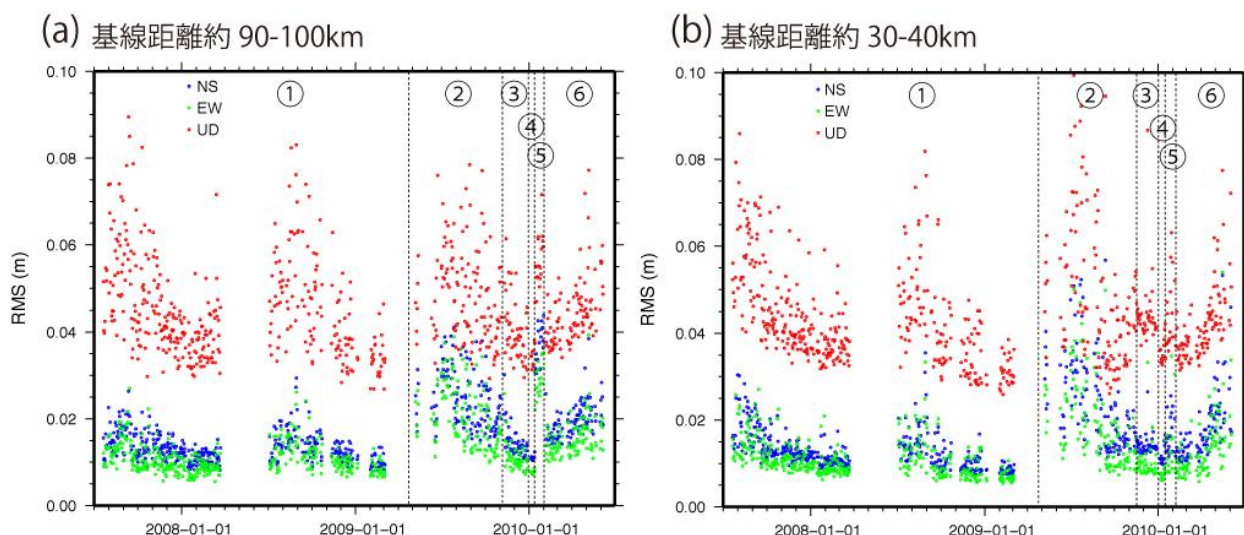


図-9 リアルタイム GPS 解析による座標値再現性。再現性は1日の平均値に対する二乗和平方根(RMS)で表す。期間①から⑥で解析条件や基線が異なる(本文参照)。(a)約90-100kmの基線の例。(b)約30-40kmの基線の例。

天頂遅延量の推定の有無に関しては、期間②と③の違いとなって現れているが、再現性は大きく変わっていないように見える。詳細に見ると、水平成分の再現性は若干向上するものの、上下成分については、ほぼ同じか悪くなる傾向がある。上下成分の再現性が悪くなるのは、天頂遅延量と座標値の上下成分間で両パラメータを分離して推定することが困難なためであると考えられる。バイアス推定時の拘束の大きさに関しては、期間①がそれ以外の期間と比べて水平成分のRMSがかなり小さいことからわかるように、再現性と大きく関係している。期間⑤のRMSは期間④⑥に比べて大きくなっているが、その影響は基線距離が約90-100kmの場合(図-8(a))の方が大きい。1秒座標値の時系列を見ても、長基線の場合は、バイアスの誤推定により、座標値が一定値の整数倍シフトする現象が見られる。座標値の拘束を小さくすれば、座標値の再現性は良くなるが、地震等により初期座標値から実際の座標値がずれた場合には正しい座標値を推定できない。よって、座標値の拘束は小さい方が精度上のぞましいが、想定される地殻変動量よりも大きくしなければならぬ。このような相反する条件を勘案して、0.5mという拘束の強さを用いている。

4.3 伊豆半島東部における地殻変動観測例

本システムの試験運用期間中に、地震について有意な変動が得られた例がないことは既に述べたが、火山活動については伊豆半島東部において有意な地殻変動を観測することが出来た。伊豆半島東方沖ではしばしば群発地震活動が発生し、その原因はマグマの貫入に伴う火山活動であり、顕著な地殻変動を伴うことで知られている(例えば、西村, 2002)。2009

年12月にもそのような群発地震活動があった。地震活動は、2009年12月17日より伊豆半島東方沖で始まり、17日の23時45分に M_{JMA} 5.0、18日8時45分に M_{JMA} 5.1の地震が発生した。その後、19日23時以降、地震活動は低調となった。

この活動に伴って、群発地震震源域周辺では最大

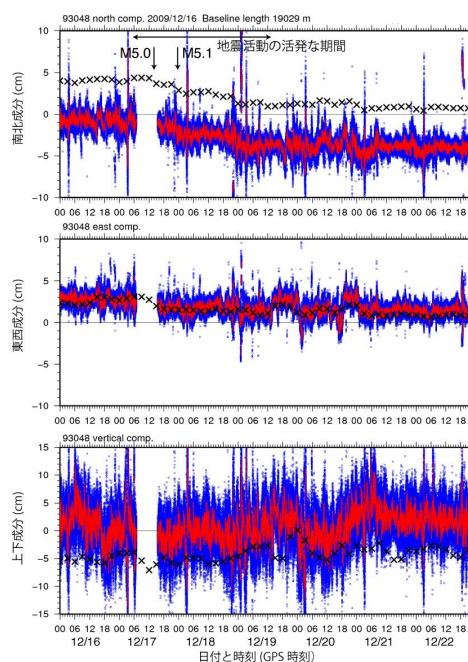


図-10 2009年12月の伊豆半島東方沖群発地震に伴う地殻変動の観測例。950297-93048(小室山)基線のリアルタイム解析による1秒データ(青)と41秒移動中央値(赤)、GEONET Q3解析(x印)を示す。横軸はGPS時刻のため、日本時間より約9時間遅れている。

約 3 cm の地殻変動が観測された。最大の変位を記録した 93048 (小室山) 観測点の時系列を示したのが図-10 である。41 秒の時間幅で移動中央値をとると、17 日から 18 日にかけて有意な南向きの変動が見られることがわかる。その時間変化は、GEONET の Q3 解析 (6 時間分データを 3 時間毎に解析) 結果と調和的である。ただし、この程度の変化量の場合、1 秒データのばらつきと同程度のため、ローパスフィルター処理や長期的なデータの見極めがないと、有意な変動かどうかの判断は難しい。実際、著者の一人が群発地震発生中に画面上で 1 秒データを確認していたが、その時点で有意な変動かどうかを判断することは極めて難しかった。

4. 4 今後の課題

国土地理院特別研究の一環として開発を行った「広域リアルタイム地殻変動解析システム」であるが、本システムの運用を定常業務として実施していくためには、解決すべき課題がある。一番大きな問題は、夏季に多く現れる GPS のリアルタイム解析精度が大幅に劣化して、地殻変動の検出が難しい時間帯があることが挙げられる。さらに、長距離の基線について実用的な精度が得られるのは、最長で 150km 程度であり、日本全国の地殻変動を監視するためには、短距離の基線をリアルタイムに網平均処理して繋いでいく必要がある。また、リアルタイム GPS 解析ソフトが非常に高価な点もより大規模な解析を行うための障害となっている。これらの点については、本システムで採用した RTD 以外のリアルタイム GPS 解析ソフトウェアの採用についても検討していく必要がある。恒星日フィルターによる誤差軽減も、前日までのデータから周期成分を 1 時間毎に機械的に計算するような現手法では、実際の地殻変動が連続的に生じた場合に問題がある。2009 年 12 月の伊豆半島東方沖の群発地震活動の場合にも、実際の変動が 18 日までにほぼ収束しているのに、恒星日フィルター処理をした時系列では、12 月 20-22 日に見かけ上の変化が現れてしまう。そのため、周期成分をあらかじめ地殻活動が穏やかな期間において

計算しておき、補正に用いるような方式が望ましい。さらには、マルチパスによる周期的な誤差を軽減するためには、方位角と仰角に依存する GPS 搬送波の位相残差を計算し、基線解析時に補正して (Munekane et al., 2010) 座標値を推定することも有効だと考えられる。

また、システムの安定性にも課題があり、現状では 1 ヶ月程度であれば安定した動作を行う場合もあるが、それより短い期間でシステムの再起動が必要な場合もある。その原因は、電子基準点リアルタイムデータの断絶やリアルタイム GPS 解析装置におけるソフトウェアや OS の異常終了、地理院内のネットワークの不調、IGS の超速報暦の配信遅れなど様々である。

本システムでは、地震後 5 分程度での地殻変動検出と 15 分程度での震源断層モデル推定を実現することができたが、地殻変動検出までの時間が数十分で良い場合には必ずしも GPS データをリアルタイム解析する必要性はない。緊急地震速報を受信してから、キネマティック解析を行う電子基準点を選択し、1 秒データの後処理解析を行うことによっても数十分での地殻変動検出は十分可能であると考えられる。地殻変動検出後には、本研究で開発した震源断層即時推定手法を用いることにより、10 分程度で震源断層モデルを推定することが可能であり、地震発生後 1 時間以内には震源断層モデルの推定が行えることになる。今後、震源断層即時推定手法のさらなる改良を進めると共に、後処理キネマティック解析による地殻変動データを用いた震源断層推定の迅速化に関する研究も行う予定である。

謝 辞

本研究で、GEONET リアルタイムデータを利用するにあたり、測地観測センター諸氏の協力を得た。また、本システムには、石本正芳氏 (地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室)、高野和友氏 (企画部企画調整課) 作成のスク립トを使用させて頂いた。ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

- Agnew, D. C., and K. M. Larson (2006): Finding the repeat times of the GPS constellation, *GPS Solution*, **11**, 71-76.
- 小沢慎三郎, 今給黎哲郎, 飛田幹男, 矢来博司, 西村卓也, 水藤 尚 (2008): 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震による地殻変動と地震断層モデル, *国土地理院時報*, **117**, 79-80, <<http://www.gsi.go.jp/REPORT/JIHO/vol117-main.htm>>.
- 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.
- Genrich, J. F., and Y. Bock (1992): Rapid solution of crustal motion at short ranges with the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **97**, 3261-3269.

- Genrich, J. F., and Y. Bock (2006): Instantaneous geodetic positioning with 10–50 Hz GPS measurements: Noise characteristics and implications for monitoring networks, *J. Geophys. Res.*, 111, B03403, doi:10.1029/2005JB003617.
- ホフマン-ウェレンホフ B., H. リヒテネガー, J. コリンズ (2005): GPS 理論と応用, 435pp. シュプリンガーフェアクラーク東京.
- 今給黎哲郎 (2007): 火山噴火・地震などの発生予測のための準リアルタイム地殻変動状況把握技術の開発-災害情報を活用した迅速な防災・減災対策に関する技術開発及び推進方策の検討-, 国土地理院時報, 111, 137-141, <<http://www.gsi.go.jp/REPORT/JIHO/vol111-main111.htm>>.
- Matsu'ura, M. and Y. Hasegawa (1987): A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 47, 179-187.
- 松村 稔, 伊藤善宏, 木村尚紀, 小原一成, 関口渉次, 堀 貞喜, 笠原敬司 (2006): 高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)の開発, 地震 2, 59, 167-184.
- Munekane, H., Y. Kuroishi, Y. Hatanaka, K. Takashima, M. Ishimoto, and M. Tobita (2010): An Ultra-deeply anchored GPS station in Tsukuba, Japan - preliminary report -, *Bull. Geograph. Surv. Inst.*, 57, 11-17, <<http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/Bulletin57.html>>.
- 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, <<http://www.gsi.go.jp/REPORT/JIHO/vol118-main.html>>.
- 西村卓也 (2002): 伊東沖と岩手山における火山性力源による地震のトリガリング, 地学雑誌, 111, 166-174.
- 太田雄策, 鷺谷 威, 木股文昭 (2006): PPP キネマティック GPS の長期安定性評価, 測地学会誌, 52, 309-318.
- Okada, Y. (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- 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, <<http://www.gsi.go.jp/REPORT/JIHO/vol103-main.html>>.
- 寺川寿子, 松浦充宏 (2009): 地震学における応力インバージョンの新展開 -CMT データインバージョン法による応力場の推定-, 地震 2, 61, S339-S346.
- 宇津徳治 (2001): 地震学第 3 版, 376pp, 共立出版.