

## GPS 連続観測データを用いた地殻監視支援装置の開発

## Development of Support System for Crustal Deformation monitoring using Continuous GPS Data

測地観測センター 小清水 寛・雨貝知美・石倉信広・根本盛行・納田俊弘・山口和典

Geodetic Observation Center Hiroshi KOSHIMIZU, Tomomi AMAGAI,

Nobuhiro ISHIKURA, Moriyuki NEMOTO, Toshihiro NODA and Kazunori YAMAGUCHI

国土交通省総合政策局 植田 勲

Ministry of Land, Infrastructure and Transport Policy Bureau Isao UEDA

## 要 旨

GPS 連続観測データの 24 時間解析解 (F2 最終解・R2 速報解) から、一定期間の基線変化量を歪曲的な発想を用いて三角網上に可視化し、自動的に電子国土 Web システム上にアップすることによって、地殻監視の障害となる異常観測点情報を日々効率的に検出し、地理情報として蓄積・提供するシステムを開発した。また、6 時間解析解 (Q2 迅速解) から、指定された基線網における基線変化を Web 上に自動掲載する、および直近期間の飛び・ばらつきをチェックし自動配信するシステムを併せて開発した。

検出した異常観測点のうち、観測点周辺環境の異常 (レドームへの積雪・樹木による受信障害等) に起因する可能性があるものについては、その影響を受けた衛星データをエポック毎に RINEX ファイルから除去する再解析支援プログラムを開発し、基線解析を行うことによって、異常原因を推定し、除去した。

異常観測点の検出の対象を、観測点周辺環境によるものだけでなく、時定数の長い緩やかな非正常地殻変動の検出や傾向変化の把握に広げるために、非正常速度変化監視プログラムを開発した。この結果、可視化された速度変化から、非正常地殻変動の開始・収束・傾向変化を容易に監視出来るようになった。

最後に、迅速解よりも更に時間分解能を増した定常解析解 (緊急解析解) の地殻監視へ向けた有効性を検証するために、2004 年紀伊半島南東沖の地震の再解析 (前震と本震の地殻変動の分離) を行った。その結果、地震活動に伴う地殻変動の主要部分は本震に伴うものである可能性が示された。

## 1 はじめに

GPS 連続観測データを用いて地殻変動の監視を行う上で、観測点周辺環境の変化に起因する解析座標値の異常について原因を究明し地殻変動と分離すること、および非正常な地殻変動を検出しその傾向変化を把握することが重要な課題である。これらの分析には、時系列データや地殻変動モデルを駆使した詳細な検討が必要であるが、GEONET を構成する GPS

観測点は今や 1200 点を超え、全点をくまなく見ることはできない。そこで、特に注意して監視すべき基線や地域を絞り込むために、客観的な基準を設けて、観測点周辺環境の異常や非正常の地殻変動を自動的に検出する支援装置を開発した。

観測点周辺環境の変化に起因すると思われる解析座標値の異常に対しては、日本全国の GPS 観測点を短基線で結ぶ三角網を構成し、歪曲的な発想で異常を検出・可視化するプログラムを作成した (第 2 章)。更には、RINEX ファイルを編集して擾乱を生じた衛星データのみを削除するプログラムを作成し、編集ファイルの再解析を通じて異常要因の推定および除去を試みた (第 3 章)。また、非正常地殻変動を検出し、その傾向変化を把握するために、非正常水平成分変化率を可視化して監視するプログラムを作成した (第 4 章)。これらのプログラム群からなる監視支援装置は、GEONET で運用されている 24 時間解析解 (F2 最終解・R2 速報解) および 6 時間解析解 (Q2 迅速解) を用いている。

また、GEONET にはそれ以外でも、解析時間をより短く設定することが可能な解析解 (S2 解・旧緊急解析解) が装備されている。2004 年紀伊半島沖の地震の再解析を行うことを通じて、同解析解が地殻監視にとってどの程度有効かを考察する (第 5 章)。

## 2 異常観測点の検出と表示・配信

GEONET で運用されている 24 時間解析解 (F2 最終解・R2 速報解) を用いて周辺環境の変化に起因する観測点の解析座標値の異常を検出し、表示するシステムを開発した。また、6 時間解析解 (Q2 迅速解) に関して、指定された基線網からグラフを Web に自動掲載し、直近期間の飛び・ばらつきを検出・自動配信するシステムも併せて開発した。

## 2. 1 24 時間解析解を用いた異常観測点の検出

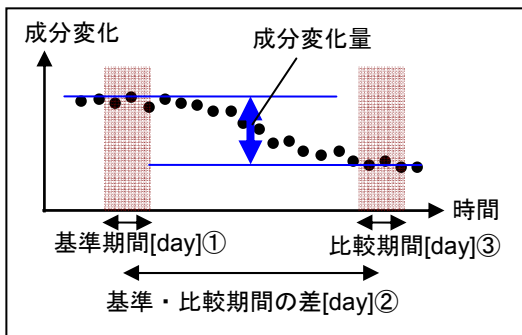
異常観測点の検出は異常のモデル化から始まる。観測点の異常は可逆な変動と非可逆な変動に大別される。可逆な変動では、レドームへの積雪・磁気嵐・豪雨等の一時的な気象擾乱による解析座標値の大きなばらつきを想定している。一定期間を過ぎると座

標値が元のレベルに戻るため、変動を捉えるには、座標値の飛びを検出する必要がある。非可逆な変動では、凍上によるピラーの傾斜・樹木の繁茂による受信障害や地殻変動による地盤のずれを想定している。これらは、その要因が取り除かれない限り、ほぼ一定の方向へ座標値が緩やかにずれる傾向があるため、一定期間の基線変化量を監視して、ノイズレベルを有意に超える変化を検出する必要がある。また、座標値のずれが長期間にわたる場合には、定常変動の寄与が無視できない。そこで監視期間を長期に設定する際には、その期間の基線変化を1年前の同期間の基線変化から差し引くことによって(差の差)、定常変動の寄与を除去する必要がある。以上を踏まえて、監視方法を表-1のように設定した。

表-1 監視期間としきい値の設定

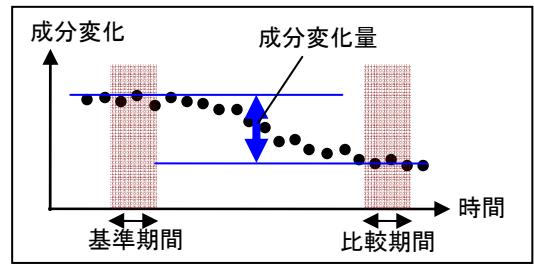
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
監視方法	1ヶ月監視	7	30	7	1.0	0.5	2.0	1.0
	3ヶ月監視 (差の差)	15	90	15	1.0	0.5	2.0	1.0
	飛びの監視	5	10	1	2.0	1.0	4.0	2.0

①~⑦については下図参照



- 水平変化量 > しきい値大[cm]④ → 警戒
- > しきい値小[cm]⑤ → 注意
- 上下変化量 > しきい値大[cm]⑥ → 警戒
- > しきい値小[cm]⑦ → 注意

常な変動を見落とす場合がある。従って、異常観測点を広範囲で効率的に検出するためには、基線毎の基線変化を取得し、変化量を可視化することによって、固定局の異常の有無や固定局からの距離に依存しない監視を試みるのが有効である。以上を踏まえて、基線長に依存するばらつきや定常変動の寄与を極力低減するために各観測点から最短6基線(離島部は距離300km以内に制限)を選択して基線網を構築し、基線毎の基線変化量を網図上に表すことを試みた(図-1)。



- 変化量 > しきい値(大) → 赤
- 変化量 > しきい値(小) → 緑

異常観測点の可視化

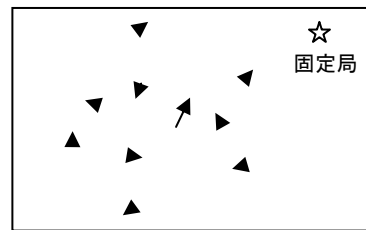
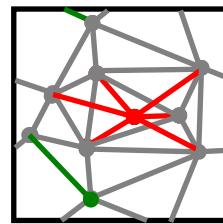


図-1 異常観測点検出の考え方

次に、異常観測点を効果的に検出する手法を考察する。従来は異常観測点の有無を基線の時系列やベクトル図を利用して検出していた。基線の時系列による検出の場合、特定の基線に飛びや傾向変化の異常が見出された場合には、さらに両端を含む複数の基線の時系列を目視し、異常観測点を絞り込む作業が必要であった。また、ベクトル図を作成して異常を見出す場合には、固定局の異常、固定局からの距離に依存するばらつきや定常変動に打ち消されて異

設定した監視方法で、異常観測点を迅速に検出する作業を、①～⑤の工程に分割した(表-2)。このうち①～④を実行するためのF2/R2解を用いたクラス・アプリケーション群をJava (sdk1.4.\*)を用いて作成し、⑤をPerlでコーディングした。最後に、一連の作業工程をシェルにまとめ、毎日検出結果を自動更新できるようにした。

表-2 異常観測点検出のスケジュール化

①	F2 最終解と R2 速報解データの結合とフォーマット変換 ・アンテナ交換等の保守に伴うオフセット補正 ・解析データ最終日 / 初日の取得
②	監視基線網の生成 ・各観測点から最短 6 基線派生 (距離 300km 以内)
③	監視期間・しきい値の設定 (表-1 参照)
④	しきい値超過基線の一斉検出
⑤	検出結果の電子国土 Web システムへの出力

## 2. 2 24 時間解析解を用いた検出結果の表示

検出した異常点 (異常基線) 情報を可視化するために、当初は、異常基線を地図上にラスター表示し、注意喚起すべき観測点を表示する GUI を、Java (Awt, Swing) を用いて構築した。しかしながら、異常点 (異常基線) 情報を検出する目的は、観測点周辺環境の変化に起因する変動を除去して地殻変動情報を速やかに提供することや、異常点情報を蓄積して調査や保守を行う作業主体に情報提供を行うことにある。そこで、異常観測点情報は「地理情報」として取り出されることが望ましい。

以上を踏まえて、検出した異常を表示し、情報提供を行うためのプラットフォームとして電子国土 Web システムを採用した。2. 1 (表-2) で示した工程の最終ステップ⑤は検出結果レポートを XML 形式へフォーマット変換することにより、電子国土 Web システムが提供する背景地図と重ね合わせ、異常観測点情報を可視化することを可能にしている (図-2)。

地殻監視第二係は、異常基線の可視化によって絞り込まれた各異常観測点について、座標値の時系列情報・データの品質情報・現地調査情報を用いた分析を通じて、監視詳細情報を作成する。この情報は、電子基準点現地調査の際の参考情報として提供される。現地調査と保守の結果報告された処置は、電子基準点属性データベースに、保守情報としてフィードバックされ、監視詳細情報と併せて生成されたサマリー情報が各電子基準点に対して電子国土上で属性 (吹き出し) として付与される (図-3)。

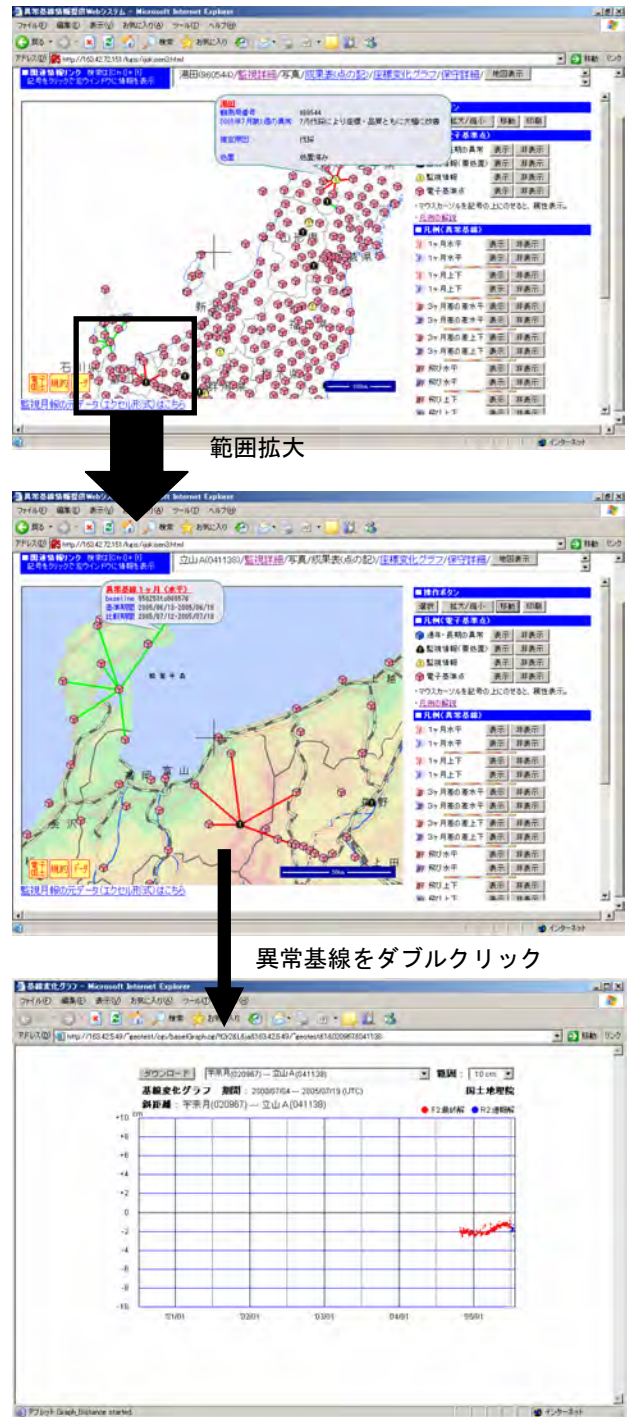


図-2 検出結果の可視化事例



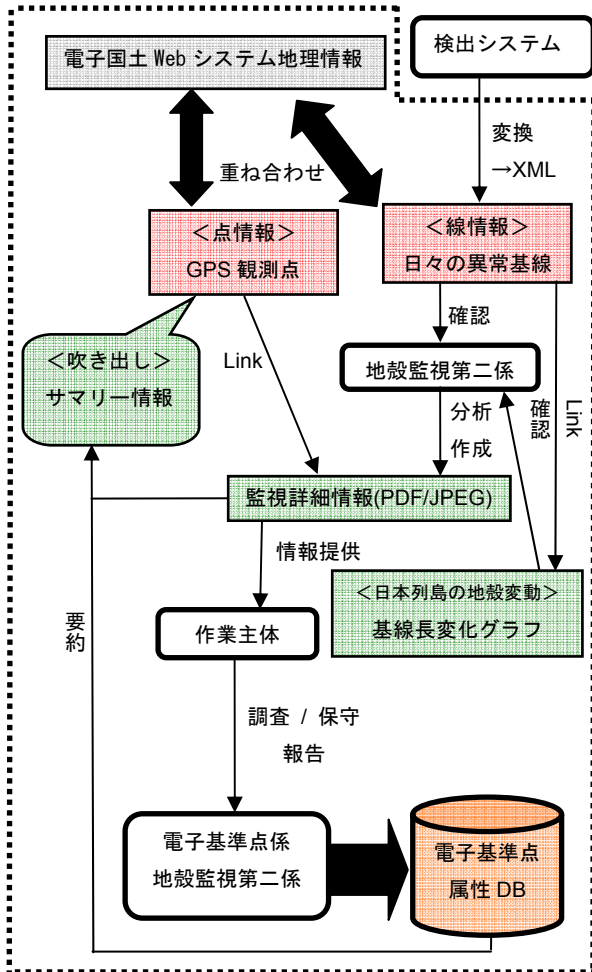


図-3 異常観測点情報提供システムの概念図

```

    発出人: kanshi2@kanshiv4esite.jp  発先:
    件名: [Q2監視]浅間地区  日時: Sat, 9 Jul 2005 23:40:01 +0900

    【監視地区】 /home/kanshi2/kosa/project/asama
    【監視方法】 基線変化量 基準値:2005/07/09 12:00:00 比較値:2005/07/09 18:00:00
    【監視閾値】 水平/上下各成分の超過閾値[cm]: 1.0/2.0
    【超過基線】 SiteA, SiteB, DH[cm], DN[cm], DE[cm], DV[cm],
    950221,049064,0.29,0.28,0.09,2.11
    950268,049064,0.63,0.46,0.42,2.47
    【監視方法】 標準偏差(直近8プロット)/連続8プロット標準偏差の平均値
    【監視閾値】 南北/東西/比高各成分の超過閾値: 1.5/1.5/1.5
    【超過基線】 SiteA, SiteB, DN, DE, DU,
    049065,049064,1.81,0.51,1.66
    【観測点一覧】 点名(点コード)
    嬭窓(950221)
    東部(950268)
    軽井沢(950269)
    佐久(960610)
    S:浅間山 1 (035046)
    M:浅間雑原(049064)
    M:浅間砂塚(049065)
    
```

図-4 Q2 迅速解を用いた異常基線検出・配信システム事例

### 3 異常要因の推定および除去

第2章では、異常観測点を検出することを自動化し、地理情報として表示・提供する枠組みを構築した。この情報をもとに現地調査や保守を行う際に、異常な座標変動を発生させるメカニズムを詳細に分析できれば、有効な対策を立てることが可能となる。さらに、現地調査や保守によって正常なレベルに回復する前の座標値についても、分析したメカニズムを手がかりとして、客観的な手法で異常を除去することが可能であれば、地殻変動監視にとって大きなメリットとなる。樹木による受信障害事例とレドームへの積雪による受信障害事例について、検証した結果を報告する（詳細は次号時報等で報告予定）。

## 2. 3 6時間解析解を用いた異常基線の検出と配信

2. 1と2. 2で開発した異常観測点の検出・表示の仕組みは24時間解析解(F2最終解・R2速報解)をベースとするものであり、最新の解析データは1日ないし2日前のデータである。従って、急激な地殻変動の前兆を捉えるための基盤を提供する性質のものではない。

そこで、GEONETで運用されている6時間解析解(Q2迅速解)を用いた監視支援装置の構築を試みた。同解析解で得られる基線変化は観測時間終了後数時間で解析結果が得られるが、24時間解析解より精度が劣り、長距離基線の監視には適さない。したがって、短距離基線で監視を行える火山地区の基線網をターゲットとして、各基線の直近の異常(飛び・ばらつき)を検出し、メールで自動配信するプログラムを作成した(図-4)。運用した結果、気象要因に伴うばらつきを数多く検出する結果となった。今後は、単純な飛びとばらつきに加え、想定される火山の膨張・収縮パターンを取り入れることで、より高度な監視を目指したい。

### 3. 1 樹木による受信障害の検証と除去の試み

測地観測センターでは電子基準点周辺の受信障害を推定するツールとして、衛星軌道に沿ってデータの品質情報(マルチパス・電離層遅延)をプロットしたスカイプロット図や、各観測点の遠景写真・上空視界写真を収録した電子基準点属性データベースが利用されている。これらと座標値の時系列情報等を組み合わせることにより、樹木によって受信障害の影響を被っている領域を特定できる場合がある。実際、電子基準点から見た障害樹木の方向と座標値(水平成分)のずれ動く方向がほぼ逆であることが経験的に分かっており、衛星からの搬送波が樹木に遮られて散乱し、遅延を生じている可能性を示唆している。そこで、受信障害領域を通過する衛星データを削除することによって、解析座標値から樹木の影響と思われる異常な変動が取り除かれるという仮説を提起する。

仮説を検証するために、①障害領域を含む最小のアジマス範囲・仰角範囲を特定、②エポック毎に補足衛星の仰角・アジマスをチェックし、特定した範囲の衛星情報をRINEXファイルの当該エポックから

削除, ③加工した RINEX ファイルを元に近傍の正常点との間で 24 時間解析を行う, という戦略をとる (図-5). ②を実現するために, RINEX ファイルをエポック情報・衛星数・衛星配列・各衛星のデータからなる構造体の配列として認識し, teqc で取得した仰角・アジマス情報を参照して障害領域の衛星データを削除するプログラムを Java で開発した. また, ③の基線解析には解析ソフト GAMIT (Ver. 10.1) を採用した.

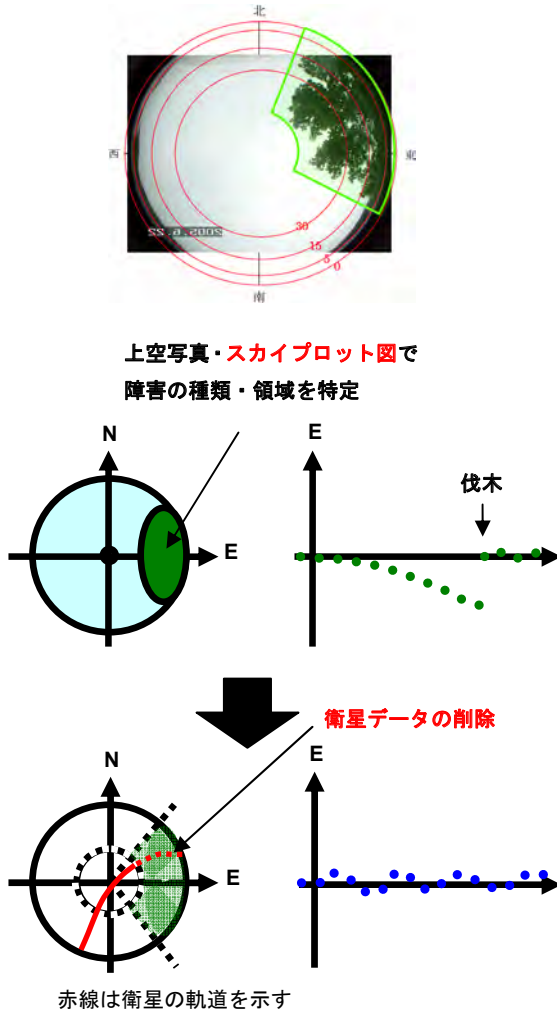


図-5 樹木による受信障害のモデル図

検証事例として, 電子基準点からみて北東方向に障害樹木があることが確認された湯田観測点の基線変化 (横手観測点固定) を用いる. 図-6 の基線変化で青は通常基線解析, 赤は障害領域の衛星データを削除した基線解析に基づく時系列を表す. この図より, 障害樹木とは逆の南西方向にずれ動く変動をきれいに除去できることが分かる.

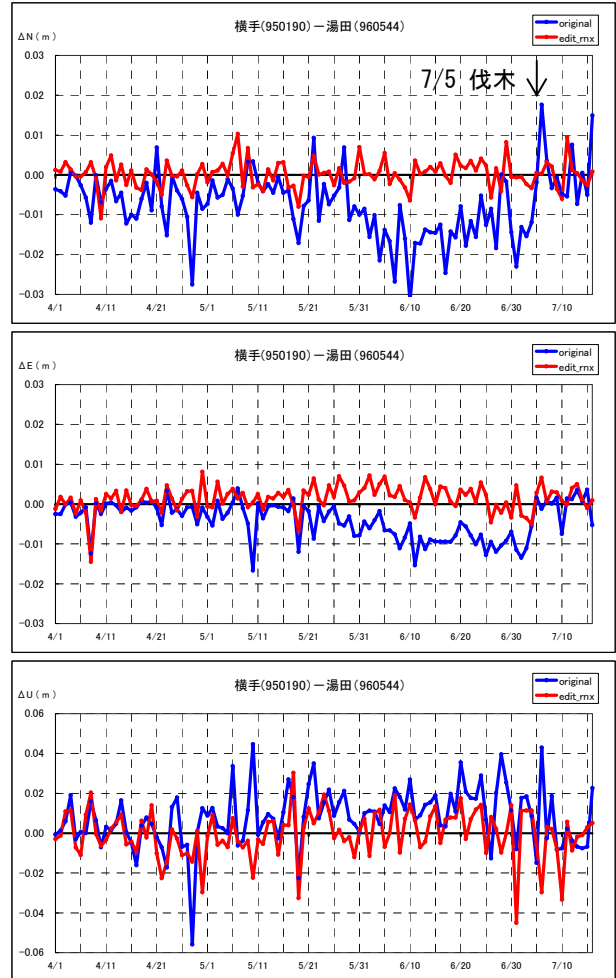


図-6 樹木による受信障害の検証・補正事例

ただし, 解析条件の変化によって, 座標値が変わる可能性を生じる. そこで, 伐木後 (2005/07/07-16) の通常解析による三次元地心座標の平均値と, 障害領域の衛星データを削除した基線 (以下, カットオフ基線という) 解析による三次元地心座標の平均値の差から, 両者のずれを求めた. 図-6 では, ずれの成分値 ( $\Delta N=+0.04[\text{cm}]$ ,  $\Delta E=+0.2[\text{cm}]$ ,  $\Delta U=-0.3[\text{cm}]$ ) をカットオフ基線時系列の全期間に対して, 補正值として与えている. これらの補正值は, 通常解析のばらつきの範囲内であり, この事例では観測条件の変化による有意なずれはないと言える.

以上のように樹木によると思われる座標値の擾乱を取り除き, なおかつ解析戦略の変更に伴う補正值が定量化できることは, 樹木伐採前の座標値の擾乱を障害領域の特定という客観的な手法で除去し, 地殻監視に資するデータを復元できる可能性を示している.

### 3. 2 レドームへの積雪による受信障害の検証

北海道、東北地方、および中部地方にかけての脊梁山脈沿いでは、冬季に電子基準点の解析座標値が一時的に5~10cm程度沈下して元に戻るような変動が広域に観測された。擾乱時期と気象条件を比較検討すると、冬型の気圧配置によって山間部を中心に大雪が降った時期と符合する。また、座標値の擾乱と積雪の因果関係については、畑中・藤咲(1999)がレドームへの積雪に伴う位相特性の変化という観点から研究している。そこで、我々は一時的にレドーム頭頂部に積もったと想定される雪の屈折率効果によって、高仰角衛星の搬送波が遅延し、解析座標値に見かけ上の沈降が生じたという仮説を立て、これを検証する。

積雪範囲を特定することが難しいため、①衛星データを削除する高仰角範囲を何パターンか設定、②エポック毎に補足衛星の仰角を検査し、設定した範囲の衛星情報をRINEXファイルの当該エポックから削除、③編集したRINEXファイルを元に近傍の正常点との間で3時間ずらしの12時間解析を行う、という作業を行う。①の仰角範囲の設定については、削除する範囲を徐々に増やすという戦略をとる(図-7)。一時的な沈降傾向を徐々に解消できれば、仮説の検証および積雪範囲の特定ができること期待される。

検証事例として、M浅間砂塚観測点の基線変化(近傍の嬬恋観測点固定)を用いる。同観測点の近傍測候所では、2005/03/21は終日晴れ、最高気温も5℃程度を観測したが、2005/03/22午後から夜にかけて氷点下での降水量が観測された。これより、2005/03/21はレドームへの積雪はなく、2005/03/22午後からの積雪が想定される。この想定を基に、2005/03/21 JST15:00プロットを基準とした比高変化を検証する(図-8)。この時系列からは、解析座標値の沈降が、衛星データを削除する高仰角領域の増加とともに漸減し、仰角42-43度付近で沈降が解消したことが見て取れる。ただし、解析座標値の標準偏差(高さ成分)は、衛星データを削除しない場合が0.006m程度、仰角50度以上の衛星データを削除した場合が0.012m程度、仰角40度以上を削除した場合が0.018m程度と、データ数の減少とともに大きくなる。レドームへの積雪の場合は環境の厳しさに加え、影響が主として比高成分に現れることから、このような事例が常に再現できるとは限らず、レドームへの積雪防止の対策が望まれる。

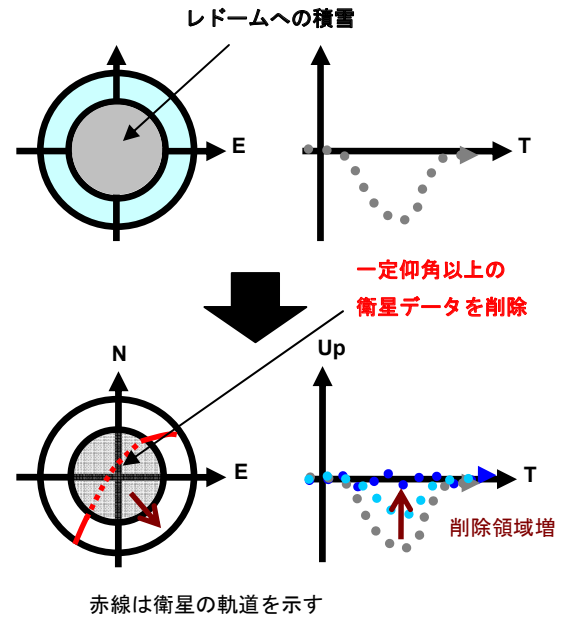
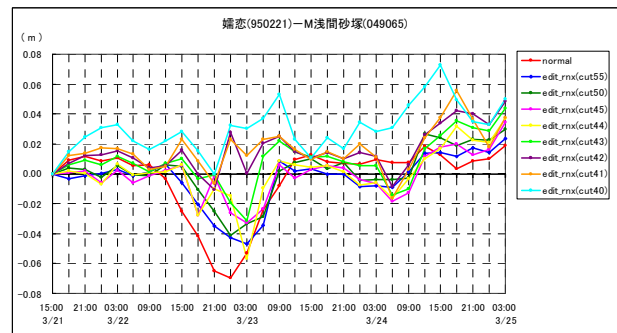


図-7 レドームへの積雪による受信障害のモデル図



横軸：観測時間帯の中央値  
 縦軸：最初のセッションで得られた座標値からの相対変位量  
 normal：未補正の場合  
 edit\_rnx(cut##)：##度以上の仰角を持つ衛星の信号を削除した場合  
 図-8 レドームへの積雪による受信障害の検証事例

#### 4. 非定常な地殻変動の速度監視

陸地測量部による近代的な測量記録以降、GEONETによるGPS連続観測に至る長期的な地殻変動監視によって、プレート境界の結合度は空間的にも時間的にも一様ではないことが明らかになってきた。特に、最近のGEONET網の精度向上の成果(測地観測センター, 2004)として、従来は精度良く観測できなかった非定常変動の複雑なパターンが浮き彫りとなってきた。

最近の事例では、2004年10月23日新潟県中越地震(Mj 6.8)後の地殻変動が挙げられる。この動きは、同地域が歪集中帯に位置することを背景とした定常変動を差し引いても、大きめの変動パターンが震源域周辺に残り、新たな滑りが発生した可能性を示している(国土地理院, 2005b)。また、房総半島では、2004年春以降、定常的な変動を差し引いても東向きの変動パターンが観測されており、三重会合点付近における太平洋プレート上面の緩やかなすべりが懸念されている(国土地理院, 2005a)。

非定常地殻変動の発生や時間変化は、プレート境界の結合状況や地殻内の歪みに変化をもたらし、将来の地震発生サイクルに影響を与える可能性があるため、地殻監視項目として重要である。そこで、非定常地殻変動の発生を検出し、その傾向変化の把握を容易化するために、定常時のトレンドを補正した時系列データの水平変化率を監視するプログラムを作成した。

##### 4. 1 非定常地殻変動の検出戦略

監視を行う基線の時系列データを取得し、定常的な地殻変動や年周・半年周的な変動を差し引く。これによって、時系列データから、非定常部分のみを抽出することが期待できる。補正された時系列データの成分変化(東西・南北)について、1日ずらしでN日間データの水平変化率[m/yr]を計算し、計算期間の中間日にプロットすることによって、非定常な地殻変動の時間推移を把握することが出来る。図-9がその概念図であり、理想化された定常変動は、一点(原点)に集約され、原点からの乖離が定常的な水平変動からのずれを表している。

このずれを非定常地殻変動の監視に繋げるには、定常時の水平変化率のばらつきを掌握する必要がある。このばらつきのレベルを以下で述べるような共分散楕円として定式化し、水平変化率がある大きさの共分散楕円より外に出た場合に非定常地殻変動発生の注意喚起を促し、水平変化率がある大きさの共分散楕円の内側に収束した場合には、非定常地殻変動が収束したと見なすことを考える。

定常時の東西成分と南北成分の水平変化率(理想的には0)がそれぞれ正規分布に従う誤差をもち、

それぞれの標準偏差を $\sigma_E$ 、 $\sigma_N$ 、相関係数を $\rho_{NE}$ とすると、確率分布が一定の曲線は楕円となる(共分散楕円)。以下では、その内側に水平変化率を観測する確率が99%となるような共分散楕円を「99%共分散楕円」、50%となるような楕円を「50%共分散楕円」と呼ぶ。非定常すべりの検出は、長期間(数ヶ月程度)の移動データ平滑化が要求され、迅速性よりも確実性が求められることから、本プログラムでは、非定常地殻変動発生の注意喚起の目安として「99%共分散楕円」を採用し、非定常地殻変動終息の判定の目安として「50%共分散楕円」を採用することとする。

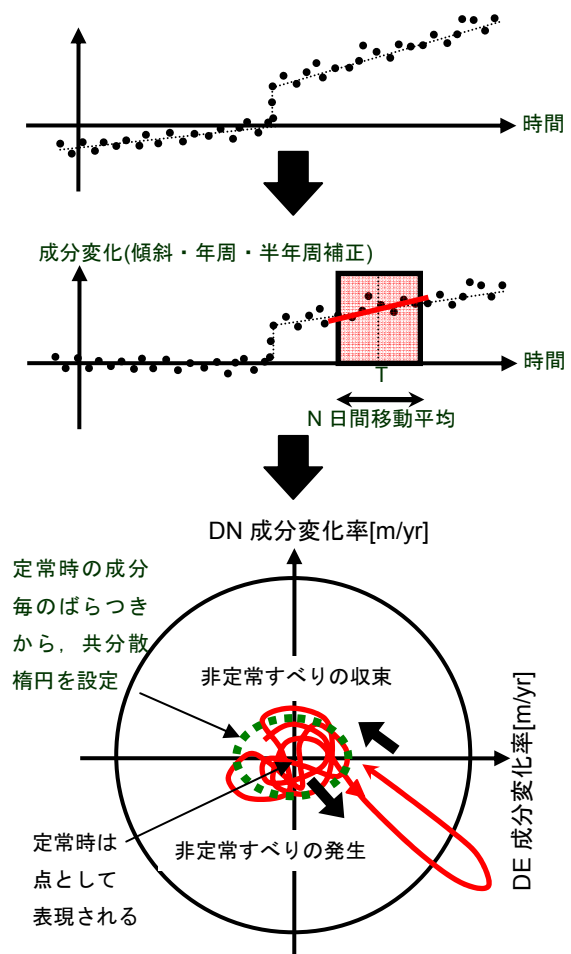


図-9 水平変化率(トレンド補正)



4. 2 監視事例 ( I )

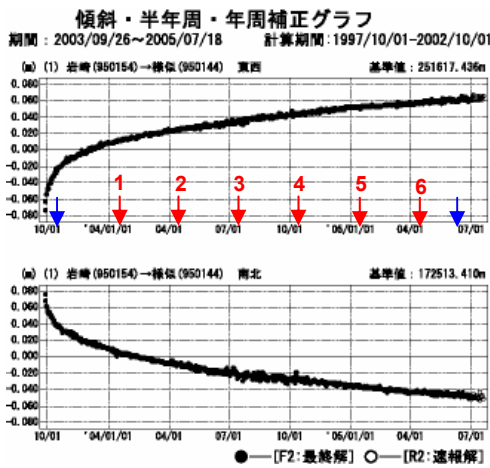
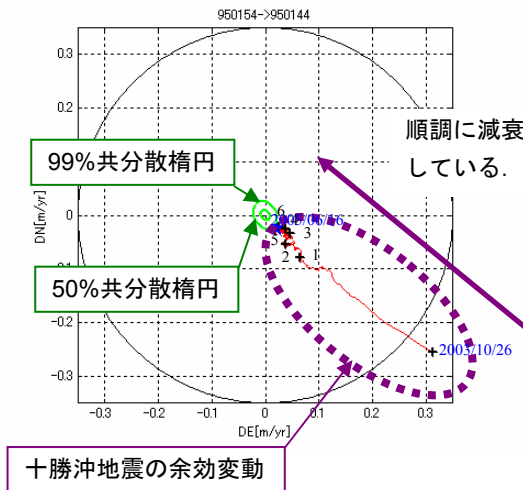


図-10 非正常地殻変動の検出例 ( I )

青森県日本海側に位置する岩崎観測点 (950154) と北海道襟裳岬に位置する様似観測点 (950144) の基線変化から得られる水平変化率 (トレンド補正) を図-10 (上段) に提示する. ここでは変化率計算日数Nを60日に設定している. 当該基線 (下段) に見られる2003年9月26日十勝沖地震 (Mj8.0) 後の南東方向への変動 (定常変動からのずれ) は, 十勝沖地震の発生に伴う余効変動である. 上段の水平変化率からは, 余効変動が若干のゆらぎを伴いつつ順調に減衰していることが分かり, 下段の時系列の時間推移と調和的である. 更に, 上段の水平変化率のプロットが, 50%共分散楕円はもちろん, 99%共分散楕円にも入っていないことから, 余効変動が完全には収束していないことを見て取ることができる.

4. 3 監視事例 ( II )

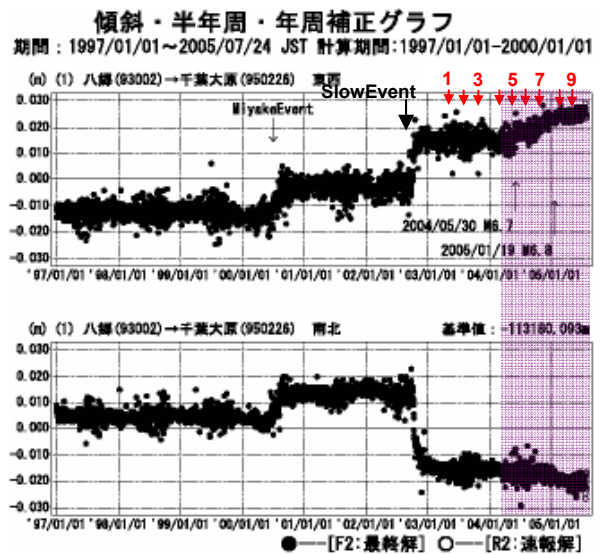
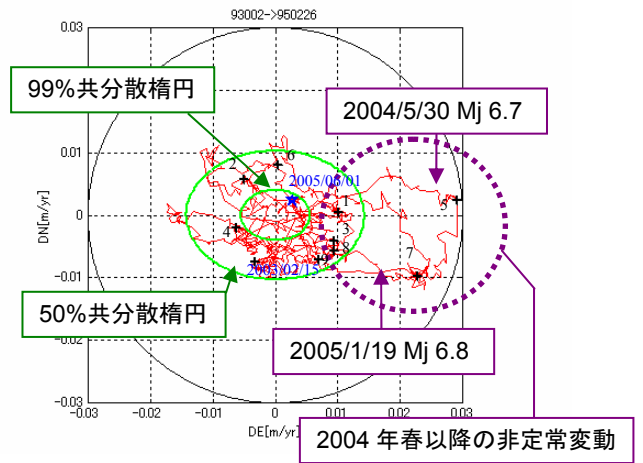


図-11 非正常地殻変動の検出例 ( II )

茨城県八郷観測点 (93002) と房総半島の千葉大原観測点の基線変化から得られる水平変化率 (トレンド補正) を図-11 (上段) に提示する. 着目している基線変化 (下段) は非常に緩やかであるため変化率計算日数Nを90日に設定してばらつきを低減している. 2004年春頃 (ステップ⑤) に定常時と比較して東方向に変動する傾向が観測され, 2004年秋頃 (ステップ⑦) 以降に再び東方向への変動が観測された. この傾向の二つのピーク⑤・⑦に, 三重会合点付近で発生した二つのM6後半の地震が対応しているように見える. なお, 地震時の変動はいずれも観測されていない.



## 5. 2004年9月5日紀伊半島沖の地震の再解析

GEONET でルーチン化されている最短時間の定常解析解は Q2 迅速解であり、3 時間ずらして 6 時間解析データを提供している。このような解析戦略では、イベント後のみで解析された最新データを出力するのに 8～11 時間を必要とする。そこで、イベント発生時に定常解析レベルで地殻変動を迅速に検出し、速報を出すことを目的として、緊急解析解（S2 解・旧緊急解析解）が運用されている。とくに GEONET に装備されている S2 解は、昨年度、福岡県西方沖の地震において有意な地殻変動を迅速に検出することができた。S2 解析戦略の詳細は観測センター報告（矢萩他、投稿中）に譲ることとし、地殻変動監視の観点から緊急解析解の有効性を検証するために、2004 年紀伊半島沖の地震に対して、再解析を実施した結果を報告する。

### 5. 1 再解析の動機と目的

2004 年紀伊半島沖の地震活動は、前震（2004/9/5 19:07, Mj7.1）と本震（2004/9/5 23:57, Mj7.4）が時間的に近接していること、余震分布がトラフ軸に沿う方向とそれに直交する北西－南東方向に分布することによって特徴付けられる。2005 年現在では、これらの地震の特徴と地殻変動を説明するモデルとして、国土地理院（2004）、山中（2004b）などが提案されている。上記のモデルに至るまで何パターンか派生モデルが考案されているが、基本的に、測地観測データはトラフ軸に沿う方向に大きなすべり域を想定し、地震波形データはトラフ軸と直交する方向に大きなすべり域を想定している。

この乖離の背景として、GEONET で運用されている定常解析解の時間分解能では、前震と本震（時間差約 4 時間 50 分）を分離できないことが問題提起された。そこで、旧緊急解析解を用いて、一連の地震活動の前震と本震の寄与を分離する試みを行った。

### 5. 2 解析戦略

前震と本震の寄与を分離するポイントは、変動量の比較に加えて、どちらがよりよく震源断層モデル（国土地理院、2004）を近似するか検討することである。同震源断層モデルは、主破壊面をトラフ軸に沿った方向にもち、紀伊半島南端から和歌山付近にかけて、震源から遠ざかるような変動の空間パターンを与える。このパターンを前震ないし本震がどの程度反映するかを見るために、以下のように解析手法を設定した。

解析時間に関しては、前震前を連続 4 セッション（6 時間解析の 3 時間ずらし）、前震後本震前を 1 セッション（4 時間 35 分解析）、本震後を連続 6 セッション（6 時間解析の 3 時間ずらし）取得する（表

－3）。前震前後の変動はセッション 1－4 の平均とセッション 5 の差から、本震前後の変動はセッション 5 とセッション 6－11 の平均値の差から、前震前－本震後のトータルの変動はセッション 1－4 の平均とセッション 6－11 の平均値の差から取得する。

基線網に関しては、① 1 セッション 4:35 解析という制約に伴う精度劣化を補うこと、② ポイントとなる紀伊半島南端から和歌山沿岸部の変動を、精度を確保して見積もること、を目的として、奈良県奈良吉野観測点（940068）を解析上の固定局とした。なお、暦は IGS 最終暦を採用し、渥美半島から和歌山にかけての沿岸部の観測点 22 点を用いた。

表－3 再解析の時間設定戦略

Session	観測日	観測時間(JST)	解析時間	備考
1	09/05	03:00-08:59	05:59	前震前
2	09/05	06:00-11:59	05:59	
3	09/05	09:00-14:59	05:59	
4	09/05	12:00-17:59	05:59	
5	09/05	19:15-23:50	04:35	前震－本震間
6	09/06	00:00-05:59	05:59	本震後
7	09/06	03:00-08:59	05:59	
8	09/06	06:00-11:59	05:59	
9	09/06	09:00-14:59	05:59	
10	09/06	12:00-17:59	05:59	
11	09/06	15:00-20:59	05:59	

### 5. 3 解析結果と考察

上記の解析戦略によって得られた水平変動ベクトル（観測値）と、国土地理院（2004）モデルの計算変位を比較する。ここで、表示上の固定局をマキノ観測点（950318）としたため、あらかじめ各点の計算変位から、マキノ観測点における計算変位を差し引いている。

図－12 では、観測値が前震前－本震後のトータルな変動を表現しており、図－13 では、観測値が前震前後（赤矢印）ないし本震前後（青矢印）の変動を各々表現している。図－12 の観測値と計算値を比較すると、計算値は渥美半島から紀伊半島東部にかけての観測ベクトルの大きさと方向、および紀伊半島南端部から和歌山にかけての観測ベクトルの方向を概ね近似している。

図－13 の前震前後の観測値については、常滑 1・松坂・南島・紀伊長島観測点等一部の観測点で大きな変動が見られるが、これらを解析時間が短いことによる擾乱とみなせば、全般的にトータルな変動（図－12）と比較して向きが一定ではなく、変動量も概ね小さめである。

図－13 の本震前後の観測値については、渥美半島

から紀伊半島東部にかけて震源域に引き寄せられるような南向きの大きな変動パターン、および紀伊半島南端部から和歌山にかけて震源域から遠ざかるような変動パターンが観測されているが、これらはトータルの変動パターン(図-12)と概ね調和的である。

以上によって、前震の寄与が本震と比較して小さく、測地モデル(国土地理院, 2004)の解析結果が、概ね本震の変動を表していると推定される。

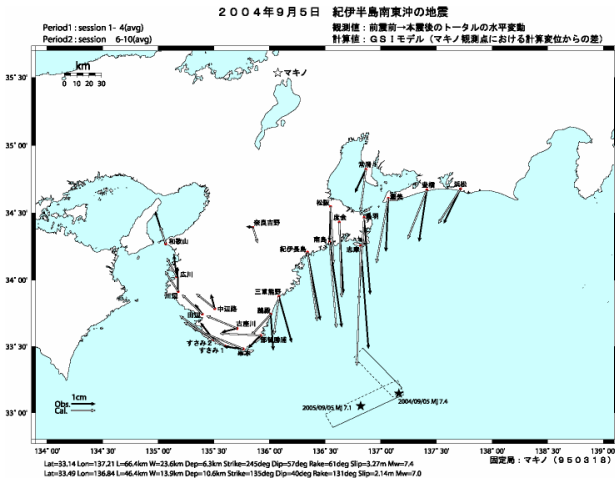


図-12 解析結果(前震前→本震後)と国土地理院(2004)の比較

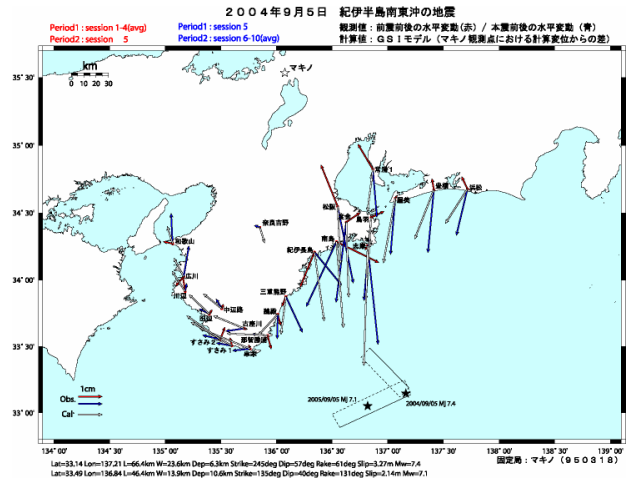


図-13 再解析結果(前震前後・本震前後)と国土地理院(2004)の比較

6. まとめ

GEONETの定常解析(F2最終解・R2速報解・Q2迅速解・S2解)を監視業務に最大限に利活用するための試みを監視支援装置の作成を通じて行った。

第一に監視業務にとって障害となる異常点情報の検出・蓄積・情報提供を容易化するためのプログラムを作成した。また、再解析を支援するRINEX編集プログラムを作成することによって、異常な解析座標値の原因推定、および再解析を通じた異常の除去を試みた。第二にトレンドを補正した基線の水平変化率を可視化するプログラムを作成し、非定常的な地殻変動をきめ細かく監視する手法を構築した。第三に定常解析の時間分解能の限界を探るために、本震と前震が近接した紀伊半島南東沖の地震の再解析を行い、本震すべりが、一連の地震活動を代表している可能性を示した。

参考文献

国土地理院(2004): 2004年9月5日 紀伊半島南東沖地震 断層モデル, 第161回地震予知連絡会資料, 167.  
 国土地理院(2005a): 房総半島の地殻変動に関する資料, 第143回地震調査委員会資料, 27-32.  
 国土地理院(2005b): 新潟県中越地震後の地殻変動に関する資料, 第144回地震調査委員会資料, 27-39.  
 地震調査委員会(2005): 2005年1月の地震活動の評価,  
<http://sparc1038.jishin.go.jp/main/chousa/05feb/index.htm> (accessed 9 Feb. 2005).  
 測地観測センター(2004): 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.  
 畑中雄樹, 藤咲淳一(1999): GEONETにおける積雪の影響について, 日本測地学会第92回講演会要旨, 111-112.  
 矢萩智裕, 湯通堂亨, 小島秀基, 畑中雄樹(2005): GEONETにおける緊急解析の現状, 国土地理院時報, 108, 投稿中.  
 山中佳子(2004a): 紀伊半島南東沖の地震 Mj6.9, Mj7.4, Mj6.4, Mj6.2,  
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/Jhome.html> (accessed 11 Sep. 2004).  
 山中佳子(2004b): 紀伊半島南東沖の地震(本震:Mj7.4)の再解析, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/Jhome.html>  
 (accessed 22 Oct. 2004).