

リアルタイム減災システムとしてのGEONET

キーワード：GPS

リアルタイム

地殻監視

地殻監視課長補佐

山 際 敦 史

リアルタイム減災システムとしての GEONET

1. はじめに

宇宙技術を利用した地殻監視システムとして国土地理院が導入した GPS 連続観測システム（通称 GEONET）は、今年で運用開始から 10 年目を迎える。GEONET の前身である COSMOS-G2 時代には東海・南関東地域に 110 点しかなかった観測局も、今では全国をカバーする範囲に 1229 点がほぼ均等に配備され、全ての点において 24 時間絶え間なく連続観測が行われている。データの取得間隔もかつては 30 秒サンプリングデータを 1 日 1 回取得していたものが大部分の観測局において毎秒ごとのリアルタイムデータ取得へと移り変わり、ナビゲーション分野等での利活用の可能性も大幅に増大した。こうした背景をもとに、国土地理院では平成 14 年度に GEONET の解析部分に関して大改造を施し（測地観測センター、2004）、リアルタイムデータを利用した解析処理の効率化・高度化を図っており、平成 16 年 3 月からの本格運用以降、その成果は現在に至るまで着実に積み重ねられつつある。

本発表では、世界で最も稠密な GPS 観測ネットワーク GEONET の今の姿を概観し、地殻監視分野における最先端の挑戦と将来像について紹介する。

2. GEONET の現状

現在の GEONET についての紹介を行う前に、まず、GEONET とは何を指すかを定義しておきたい。我々が通常 GEONET と呼んでいるシステムは、大きく 2 つの部分に分けられる。一つは 1229 点の観測局から成る GPS 観測ネットワークであり、この観測局を電子基準点と呼んでいる。もう一つは観測データを集約し、解析処理を経て座標値を算出・表示する部分であり、これをデータ処理装置と呼んでいる。

電子基準点の外観は高さ約 5m のステンレス製ピラーである。GPS アンテナは頂上のレドーム内にあり、ピラー内部の収納箱に受信機・通信機器等が格納されている。現在では解析誤差軽減のためアンテナタイプを Dorne Margolin T Chorkering Antenna というアンテナに統一したが、ピラー形状は観測誤差軽減のために工夫を重ねてきた歴史をそのまま残しており、複数の異なる形状が存在する。このピラー形状は誤差要因の一つであるアンテナ位相特性にも影響を及ぼすため（Hatanaka et al., 2001a および Hatanaka et al., 2001b）、GEONET の解析では、ピラー形状ごとに独自のアンテナ位相特性テーブルを作成し、解析に用いている。

電子基準点とデータ処理装置とを結ぶ通信回線には IP-VPN 回線を用いており、全国の電子基準点の観測データをリアルタイムに国土地理院内のデータ処理装置に集約しているほか、配信機関を通じリアルタイムデータを位置情報サービス事業者に向けて開放している。

データ処理システムでは、リアルタイムに送られてきた生データを共通形式（RINEX）に変換・保存し、定常解析処理を行うとともに、必要に応じ生データから直接 RTCM 形式の標準ストリーミングデータを生成し、リアルタイム解析を実施する。この部分の構成

3. GEONET による長期地殻変動監視の例

約 10 年という時間の中で数々のノウハウと膨大な解析結果を蓄積した GEONET は、主に 2 つの大きな役割を果たす。

一つは国家基準点としての役割であり、2002 年 4 月の改正測量法施行以後、従来の三角点同様に公共測量の基準点として利用することができるほか、配信機関より提供しているリアルタイムデータは位置情報サービス事業への基準点データとしても活用されている。

そして、もう一つの重要な役割は、地殻監視分野における情報の提供である。各観測局の解析結果を時系列として並べると、その座標値は通常ある直線上に並ぶ。こうした直線的な傾向はプレート運動のような定常（あるいは長期）の地殻変動情報を与え、その傾向から外れた動きは異常変動として捉えられる。図-2 に 2003 年十勝沖地震時の座標変化後に現れた余効変動の様子、図-3 に浅間山周辺で観測局の距離が長期にわたり数 cm レベルで膨張-収縮を繰り返している様子を示す。いずれも現在変動が継続している地殻変動現象の実例であるが、これらは長期間連続観測を行って初めて発見できる極めて息の長い変動現象である。もちろん、図に示した時系列グラフは単に現象としてのみならず、そのメカニズム解明にも重要な情報を提供していることは言うまでもない。

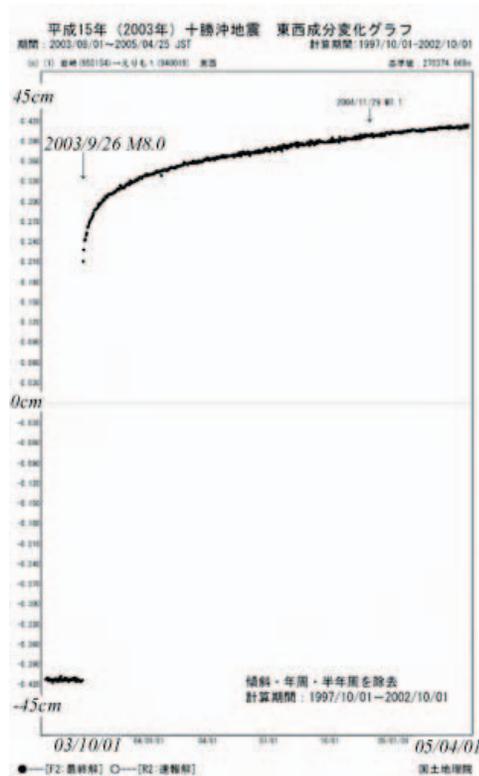


図-2 2003 年十勝沖地震における観測局「えりも 1」の変動(固定局「岩崎」)

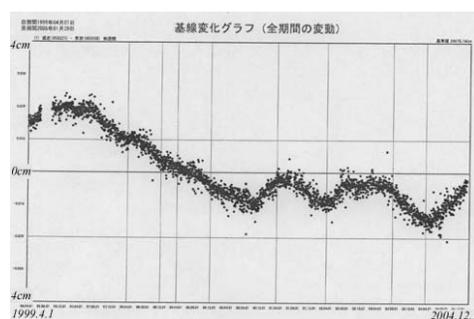


図-3 1999 年 6 月から 2004 年 12 月までの浅間山周辺の基線長変化(嬬恋-東部)

4. GEONET の新たな可能性—リアルタイム減災システムとしての活用

さて、前項では比較的長期にわたる地殻の変動監視例を紹介したが、今度は短時間スケールの地殻変動に注目してみよう。

既に表-1 で紹介した通り、現在の GEONET の解析処理には、緊急解析用にリアルタイム解析が組み込まれている。そして、まだ研究段階ではあるが、電子基準点常時接続化後に発生した地震（例えば 2004 年新潟県中越地震、スマトラ沖地震など）や火山活動に対して、後処理の形で 1 秒データを用いた解析を試み、その成果の一部を矢萩他（2005）等で紹介している。しかし、こうしたリアルタイム解析では解析時間上の制約から一度に解析を行える点数が非常に限られており、定常解析と同一の手法を利用して全

国分の解析を行うことは不可能である。とは言っても、事前に変動を予測し解析地域を限定できるケースは限られており、また、大規模地震のように広範囲に変動を生じるような地殻変動では、固定局そのものが動いてしまい、絶対的な変動量を把握することができないといった問題も他方で存在する。

こうした問題点を解決し、GEONETの定常解析に整合する座標系で全国の地殻変動を毎秒ごとに掌握する方法を、米国カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所の協力を得て開発した。

この手法はboot-strapping法といい、次のような単純な手続きに従って解析結果を結合していく(図-4)。まず、日本全国の電子基準点(一部の離島を除く)を119個の小さなグループ(クラスタ)に分割する(図-5)。各クラスタは最大11点の観測局より構成され、

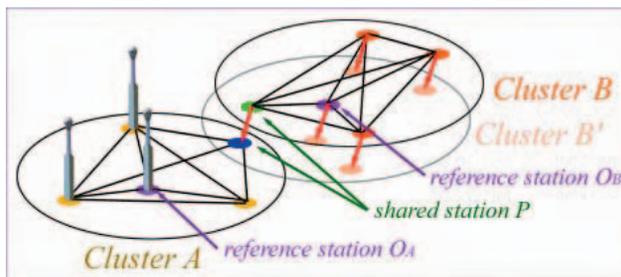


図-4 boot-strapping法のイメージ

隣接するクラスタ間で1つの観測局を共有する(図-4の点P)。これらの各クラスタに対して、各エポックにおける基線成分を計算する。続いて、ある一つのクラスタ(図-4のCluster A、地震時の場合、地震の影響が十分無視できるほど遠方にあるクラスタを採用する)での固定局における(ITRF系)座標値を基準として、共有観測局の座標値がともに整合するよう、先に計算された基線成分を用いて順次隣接クラスタの座標値を平行移動させる(図-4のCluster B → Cluster B')。この方法を用いれば、震源近傍における地点での地震に伴う変動を絶対的にリアルタイムに捉えることができる。

もちろん、これは極めて単純な結合方法であるため、計算時間が極めて早い代わりに、各クラスタの観測局が持つ座標推定値の誤差も次々と蓄積されていくという欠点も存在する。では、この手法ではどの程度の誤差を見積もっておけば良いのであろうか。

図-6は、2003年十勝沖地震発生時刻の1恒星日(23時間56分)前における10分間の観測データを用いて、上記の手法により後処理解析を実施して得た座標値のRMSである。用いたクラスタは、東北日本を中心とする54クラスタであり、各クラスタでの解析には、Geodetics社製RTDを使用した。横軸には基準局からの距離を、縦軸にはRMSをプロットしているが、両者の相関には大きく2つのトレンドが存在することがわかる。一つは短基線で見られる急な傾き、もう一つは長基線で見られる緩やかな傾きである。短基線の観測局とは要するに固定局が属するクラスタの構成局であり、急な傾きに見える部分は各クラスタで行ったリアルタイム解析起源の誤差、緩やかな傾きは、結合処理の過程で生じた誤差の伝播を見ているものと推測される。なお、Hatanaka et al. (2003)によると、GEONETにおける定常解析でも同様の傾向が見られ、短基線での誤差要因は主に大気遅延、長基線での誤差要因は主に衛星軌道誤差、両者の傾向の分岐点にあたる基線長は約150kmであると推察している。本研究の場合、各クラスタの解析は独立に行わ

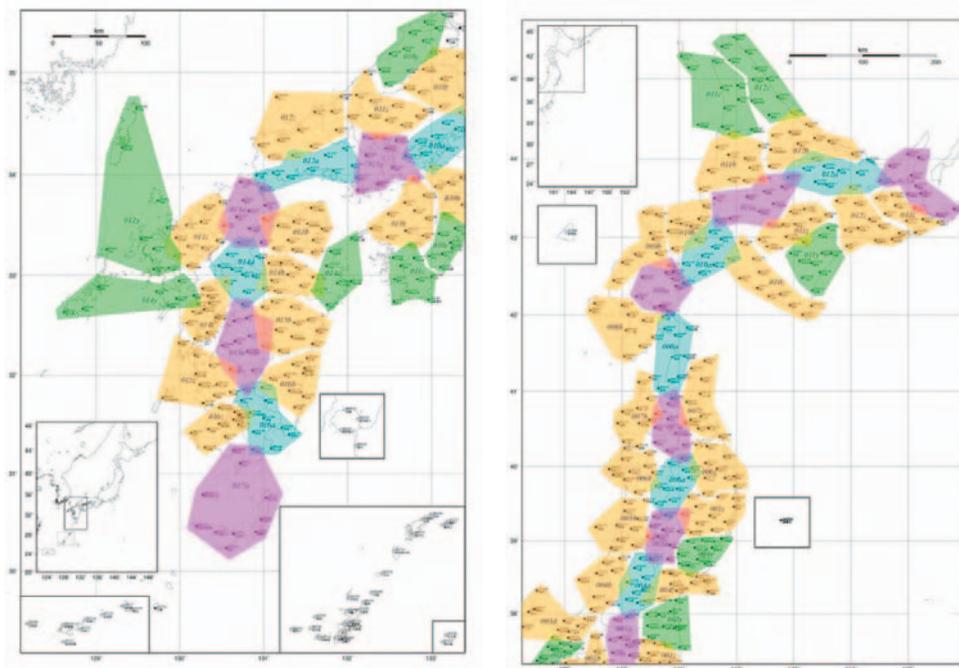
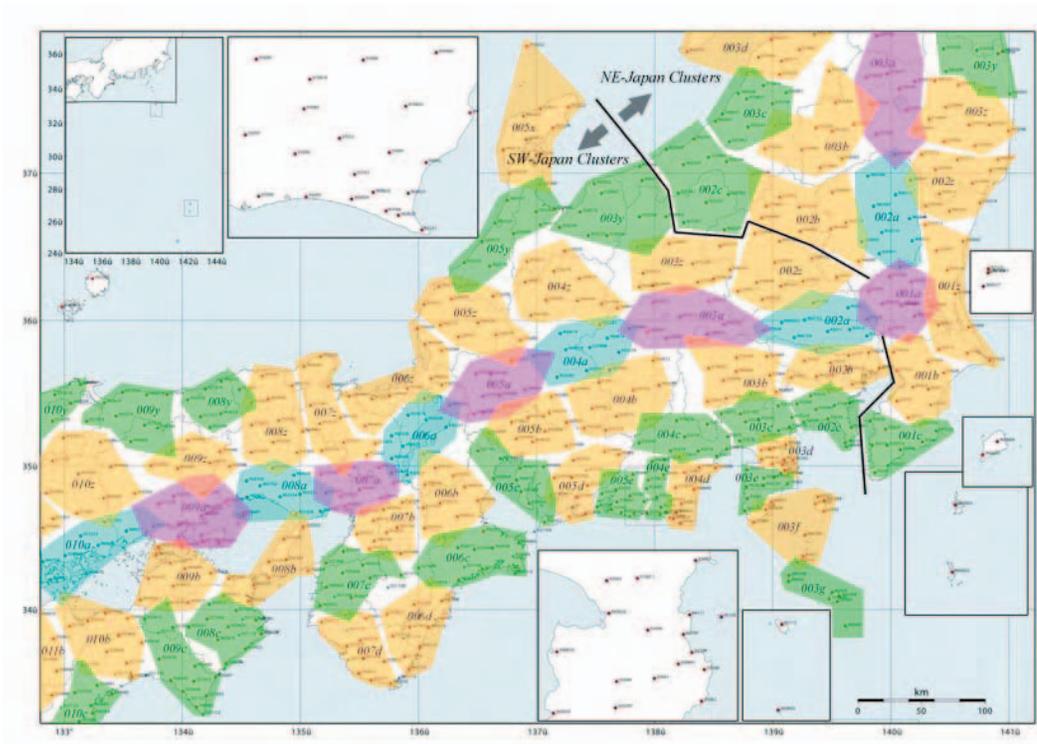


図-5 電子基準点配点図およびリアルタイム解析用クラスタ構成:この例では、つくば周辺を基準に、東北日本方向と西南日本方向のそれぞれにクラスタを展開させている。図中の4桁の番号がクラスタ番号で、末尾がaのものがメインクラスタ、それ以外はサブクラスタ。なお、2003年十勝沖地震における解析では、つくば付近でも地震による揺れが観測されたため、震度1未満であった大阪の箕面(西南日本クラスタ007a、観測局番号940067)を固定局に変更している。

れ、結合処理部分では出力された座標値のみを使用するため、クラスタ内の最大基線長が 100km に満たない本手法では、長基線に見られる誤差の中にも大気起源のものがある程度伝播していると考えられる。RTD を用いた今回の例では、54 クラスタから構成される長さ約 1300km のネットワークにおいて、RMS 誤差は最初のクラスタから最後のクラスタに至るまでに約 2~3 倍に増加し、水平方向で最大約 4cm、鉛直方向で最大約 25cm となることがわかった。この誤差は、今回のネットワークを西南日本も含め全点に拡大した場合にも適用可能であると考えられる。従って、少なくとも水平成分に関しては、被害をもたらすほどの大きな揺れの検出を行う上で十分実用に値する精度であると言ってよい。

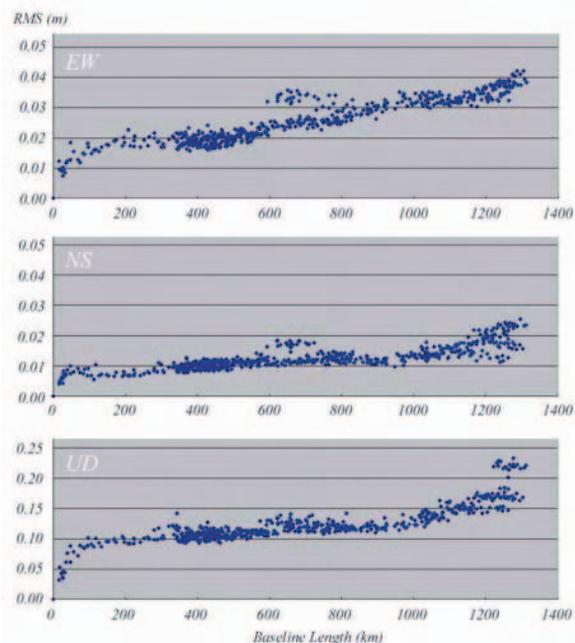
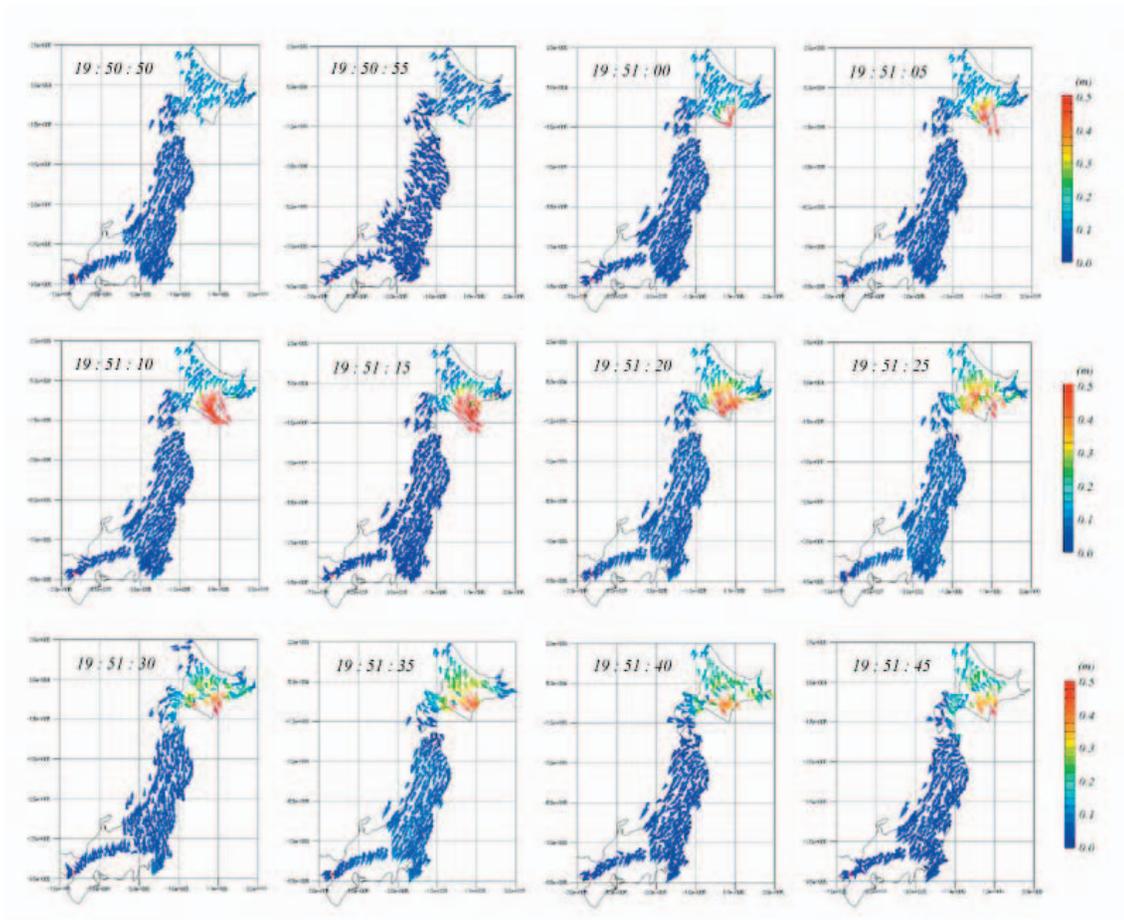


図-6 boot-strapping 法による平常時の結合データの RMS と基線距離との関係

この誤差の見積もりを念頭に置いて、2003 年十勝沖地震における東北日本の動きを同様に毎秒ごとに求めた結果が図-7 である。解析の固定点は大阪府の箕面（観測局番号 940067）に置き、GEONET の定常解析から得られる時系列を元に初期座標値を設定した。この図から、世界標準時（GPS 時刻）の 19 時 50 分 55 秒に地震波が観測局に到達し、30 秒以上かけて北海道全体に伝播したことが読み取れる。また、定常解析から得られた地震前後における観測局の変位も、定性的にはこの時点で捉えられたこともわかる。

なお、本結合システムは、現在のところ後処理でのみ結合可能な状態となっており、リアルタイム入力には対応していない。これについては、データの入出力インターフェイスを改造すれば、リアルタイム入力にも対応できると思われる。もしリアルタイムにこの解析結合が行えるようになれば、地震発生直後にはその変動を監視することが技術的に可能となる。図-7 および先に述べた地震波の伝播時間を考慮すると、この早期変動把握は広域の減災に多大な効果を発揮するものと期待される。

前述のとおり、この boot-strapping 法は極めて単純な結合方法であり、共有観測局や解析の固定局が欠測した場合の処理といった解決すべき問題も多々残されている。また、結合手法そのものの問題ではないが、大規模地震の際に生じる通信トラブルのような観測側の問題も今後の大きな課題である。これらについては、位置情報提供システムという視点からすれば当然解決すべき問題であるのは言うまでもないが、発想を転換させて減災システムという別の視点から見ると、必ずしも解決しなければ使えないというものでもない。以下に減災システムとしての現状における対応策の案を示す。



図一七 2003年十勝沖地震発生時の観測局の変動。地震発生前30秒間の平均値からの変位を5秒ごとにベクトル図にプロットした。大阪付近の赤丸はこのネットワーク全体の固定点(箕面、940067)。地震後数十秒のうちに、北海道のほぼ全域において変動が確認できる。伝搬の速度を見積もるのは難しいが、少なくとも19:51:45の時点では、青森県に地震波到達の痕跡が見られる。

(1) 共有観測局や解析固定局の欠測……観測データの欠落または解析の失敗によりこれらの観測局の解析結果が得られないと、結合処理そのものが不可能になってしまう。これは解決すべき問題であり、別のクラスタからバイパスさせる等結合処理プログラムの改良が必要である。

(2) 共有観測局における座標値のばらつき……多くのケースにおいて、共有観測局は各クラスタの解析固定局から最も離れた点であり、解析結果のばらつきも大きくなる。解析ソフトウェアによってばらつきの形態も様々であるが、凡その傾向として、日周変動のような時間スケールでの変動が大きい一方、数分といった短時間スケールでは比較的安定していることが経験的に判明している。従って、秒または分単位のスケールの地殻変動を検出の対象と定め、変位量を見積もる上での基準となる値を頻繁に更新していくことが必要である。また、明らかに地殻変動とは異なる座標値のジャンプが見られることがある

が、これは文字通り「明らかに地殻変動とは異なる」ため、ベクトル図から判断可能である。

(3) 通信トラブル等による観測中断……図-7に示した十勝沖地震の例でも明らかであるが、地震発生後、通信回線にトラブルが発生し、観測が一時的に停止してしまうケースが少なからず存在する。同様の問題は2004年新潟県中越地震でも起きており、リアルタイムに地殻監視を行う上での大きな障害となっている。この問題に対しては現在対策を講じつつあるが、通信障害を現地におけるインフラ停止の指標と捉えることもできる。つまり、欠測状況は被害地域を見積もる上での一つの参考になり得るというわけである。

5. 終わりに

GEONETは大改造を経て一つの区切りを迎えたが、これでシステムが完成されたというわけではない。地殻監視を行う上でのより高度な要求に応えるべく質量ともに改良を重ね、日々進化を遂げていくのがこのシステムである。もちろん、GEONETを利用した地殻監視にも終わりが訪れることはない。気まぐれな自然現象を相手に、常に「早く、正確に」情報を提供するため、より良い監視システムの姿を求めつつ、長期・短期双方の時間スケールでの地殻監視を今後も精力的に継続していく考えである。

《参考文献》

- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita, and M. Kusaka (2001a): Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET – Part 1: Measurement of phase characteristics, *Earth Planets Space*, 53, 13-21
- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita, M. Kusaka, J. M. Johnson, and C. Rocken (2001b): Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET – Part 2: Evaluation of the phase map by GEONET data, *Earth Planets Space*, 53, 23-30
- Hatanaka, Y., T. Iizuka, M. Sawada, A. Yamagiwa, Y. Kikuta, J. M. Johnson, and C. Rocken (2003): Improvement of the Analysis Strategy of GEONET, *Bulletin of Geographical Survey Institute*, 49, 11-34
- 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 No. 103, 2-51
- 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 年合同大会要旨