

GEONETにおける高さ情報の高精度化に向けて

キーワード：GEONET

高さ情報

季節変動

大気遅延

荷重変形

宇宙測地研究室主任研究官

宗 包 浩 志

GEONET における高さ情報の高精度化に向けて

1. はじめに

国土地理院が運用する GPS 連続観測網 (GEONET) は、平成 8 年に本格運用が開始されて以降、測量の基準となる電子基準点として、ネットワーク型 RTK 測位に代表される位置情報サービスのためのインフラとして、また、地殻変動の監視の道具として活用されている。さらに、国土地理院では全国の GEONET の座標値を定常的に解析しており、その座標値の変動から得られる地殻変動情報は、地震予知連絡会をはじめ、防災関係機関に報告されるとともに、ホームページなどを通じて一般に公開され、広く活用されている (測地観測センター, 2004)。

国土地理院における GEONET の解析戦略は、GPS の解析戦略の世界的な進歩の動向を踏まえつつ、たゆみなく改善されている。最近では、2009 年 4 月 1 日より解析戦略第 4 版に基づく新しい解析が行われている。解析戦略第 4 版においては、解析ソフトウェアの更新とともに、1) 大気遅延勾配の推定、2) GPS アンテナと GPS 衛星アンテナの絶対位相特性モデルの採用、3) 座標系の ITRF2005 への変更、4) 解析の際の固定点 (電子基準点「つくば 1」) の座標値について、固定処理から日本および周辺の IGS 観測点を用いた取り付け解析による推定値導入への変更、5) 電離層遅延高次効果の補正の導入、などの大幅な改良が行われた。その結果、停滞前線・台風等の大規模な大気の不均質に起因する系統的な誤差が大きく軽減される、年周変動やばらつきが軽減される、など座標解の品質および安定性を向上することに成功した。これにより、年周変動や解のばらつきのため従来検出が困難であった、微小な地殻変動やゆっくりとした地殻変動などをより明瞭にとらえることが可能となった (中川ほか, 2009)。

一方、解析戦略第 4 版の採用によっても、電子基準点位置の高さ情報については、なお、原因不明の年周変動が残っており、改善の余地がある。電子基準点位置の高さ決定においては、GPS 衛星からの電波が地上に届くまでに大気により受ける遅延 (大気遅延) による誤差の影響を受けやすく、また、大気や雪、陸水や海水などの移動による、地表にかかる重みの変化のため、地面が主に上下方向に変動する効果 (荷重変形) が重なることから (例えば Heki, 2004), 誤差の原因分析や補正手法の開発が長らく困難な状況にあった。

ところが、近年、その状況が一変し、高さ情報に含まれる誤差の分析や補正方法の検討が一気に進んだ。その要因としてはまず、大気遅延を補正するために用いられてきた手法が不十分であることが認識

され、数値気象モデルを活用した新しい補正手法が発展したことが挙げられる。すなわち、大気遅延による誤差を低減するため、通常の GPS 解析では、大気遅延を単純なモデルで仮定した上で座標解と同時推定するという手法が用いられる。そこで用いられる大気モデルに対し、数値気象モデルから得られる情報を用いて改良することにより、大気遅延による誤差のうち、季節成分について大幅に低減できることが分かってきた (例えば Boehm et al., 2006a)。他方、荷重変形に関しても、衛星重力ミッション GRACE (Tapley et al., 2004) などの宇宙測地技術を活用し、地球表層の荷重に関するデータベースが整備されてきたこともあり、その大きさを定量的に分析することが可能となってきている。

本講演では、上記の進展を踏まえ、電子基準点位置の高さ情報について、現在含まれている誤差の大きさがどの程度のものであるか、また、最先端の解析技術を応用すると、どの程度まで品質が向上できるか、シミュレーションと実観測による評価を併せて検討した結果について紹介する。なお、本講演で用いられた手法の技術的な詳細については、Munekane and Boehm (2010) をご覧いただければ幸いである。

2. 電子基準点の高さ情報に含まれる誤差の評価

本講演では、まず、電子基準点の高さ情報に含まれる誤差の要因の中から、1) 大気遅延の推定誤差、2) 大気による荷重変形、3) 海水による荷重変形、の 3 つの要素を取り上げ、その大きさについて定量的な見積もりを行う。

2. 1 要因毎の分析

2. 1. 1 大気遅延の推定誤差

既に述べたように、GPS 衛星から送信される電波は、地上の観測局に到達するまでに、大気による遅延を受ける。GPS 衛星の仰角が低いほど、大気の中を通る距離が長くなるため、遅延量も大きくなる傾向がある (図-1)。観測データのみから視線方向の遅延量 (視線遅延量) を決めることはできないため、通常の GPS 解析では、天頂方向の遅延量 (天頂遅延量) と視線遅延量との関係が、衛星の仰角で決まるある関数 (マッピング関数) で表されると仮定し、天頂遅延量を観測局の位置と同時推定することで、大気遅延による誤差を軽減している。

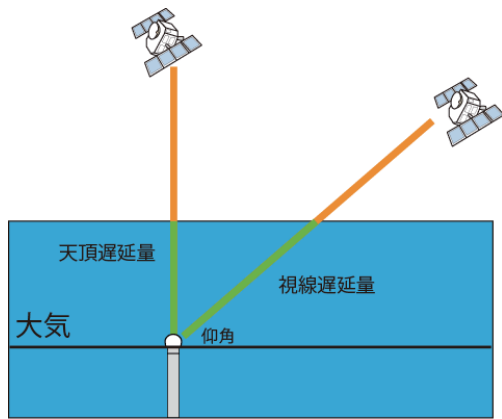


図-1 衛星仰角と大気遅延量の関係

マッピング関数は、大気の状態によって変わり、従って、場所・時間により刻々と変化するものである。しかしながら、従来は、マッピング関数を正確に決定するためのデータに乏しかったため、少数のラジオゾンデのデータから単純な緯度・季節依存性を取り入れて構築されたマッピング関数 NMF (Niell, 1996) が標準的に用いられている。GEONET の解析戦略第4版においても、このマッピング関数が用いられている。

近年、数値気象モデルの精度が向上したこともあり、数値気象モデルを用いて観測点のマッピング関数を直接計算するという試みが提案された。Boehm and Schuh (2004)・Boehm et al. (2006a) は、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) で解析された数値気象モデルから6時間毎にマッピング関数を作成し (VMF, VMF1), VLBI の解析に適用した結果、基線解の再現性が向上するなどの成果を示した。また、彼らが作成したマッピング関数 (VMF1) は GPS 解析にも適用され、その有効性が示されている (例えば Tregoning and Watson, 2009)。

そこで、NMF に代えて、数値気象モデルに基づくマッピング関数を用いることで、GEONET の高さ情報に含まれる大気遅延による誤差がどの程度軽減されるかを調べる数値シミュレーションを行った。そのため、まず、気象庁から発表されている数値気象データの一つであり、10km, 6時間毎と高い空間・時間分解能を有するメソ客観解析データを用いて GPS 衛星の視線方向の大気による遅延量を計算し、それを付与した擬似 GPS 観測データを作成した。次に、擬似 GPS 観測データについて、NMF と数値気象モデルに基づく VMF1 の2種類のマッピング関数を用いて解析し、高さ情報に含まれる誤差がどう変化するかを調べた。

GPS 解析には、米国ジェット推進研究所で開発された GPS 解析ソフトウェアである GIPSY-OASIS II (ver5.0) により、精密単独測位法を適用した。精密単独測位法は、精密な衛星軌道および時計を用い、

基準局を用いずに、観測点毎に独立した座標解を算出する手法であり、基準局の観測データに含まれる誤差の影響を受けないという利点がある。

推定された高さ情報に含まれる誤差の年周成分について、その振幅を緯度に対して示したものが図-2である。NMF を用いると、年周の振幅で最大で3mm を超すような大きな見かけ誤差が生じていることが分かる。一方、数値気象モデルに基づくマッピング関数である VMF1 を用いることで、年周誤差は、ほぼすべての点で1mm 以下に低減される。

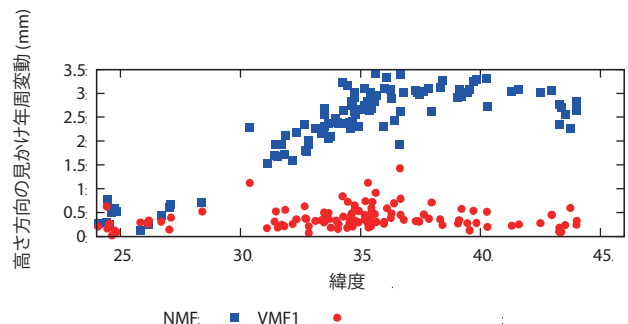


図-2 マッピング関数の違いによる、電子基準点における高さの見かけ年周変動の振幅の違い

2. 1. 2 大気による荷重変形

大気が地面を押すことにより、地面は弾性的に変形する。これを大気圧による荷重変形と言う。大気圧による荷重変形は、高さ情報に顕著に表れることが知られている。大気圧が常に一定ならば、それによる変動は一定のバイアスを生み出すだけであり、地殻変動の監視等の目的には影響しないが、現実には、大気圧は日々変動しており、それに伴って荷重変形もある平均値の周りに日々ばらつくため、地殻変動のシグナルを覆い隠すノイズとなりうる。

ある観測点における大気荷重による変形は、観測点の周りの気圧変化に、観測点での変動に対する寄与を表す関数 (グリーン関数) を乗じて足し合わせることで計算される。この場合、大気による荷重は、海域では海水の流動によりキャンセルされることが知られており、足し合わせは陸域のみで行われる。

大気による荷重変形には、その周囲のおよそ1,000km スケールの気圧分布が関係しており、その計算には広域に渡る気圧分布の情報が必要である。そのため、今回は、空間分解能1.25度、時間分解能6時間を有する気象庁のグローバル客観解析モデルで与えられる気圧分布を用いた。

大気荷重変形による高さの年周変動の見積もりを図-3に示す。振幅は中緯度で大きく、最大で3mm 程度にも達することが明らかになった。

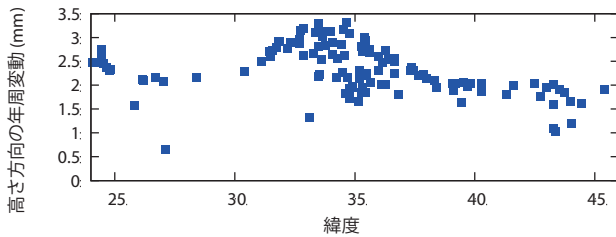


図-3 大気荷重による電子基準点の高さの年周変動の振幅

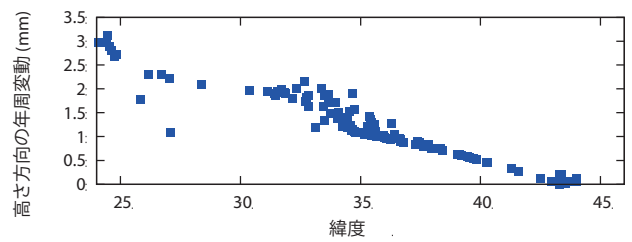


図-4 海洋荷重による電子基準点の高さの年周変動の振幅

2. 1. 3 海洋による荷重変形

海洋による荷重変形のうち、潮汐による荷重変形については、例えば、海面高度計観測や潮位計に基づくモデル（例えば NA0.99Jb (Matsumoto et al., 2000)）が整備されており、容易に補正できる。しかしながら、(風による吹き寄せなどの) 潮汐以外の要因による海水の移動による荷重変形については、そのような海水の荷重分布を知るすべがなかったことから、従来、見積もりが困難であった。

ところが、2002年3月に打ち上げられた重力観測衛星 GRACE により状況は一変した。GRACE は上空 400 km を周回する双子衛星であり、衛星間の距離の変化を精密に測定することで、重力の時間変化を全球的に明らかにすることができる。得られた重力変化を地球表層の質量分布の変化に焼きなおすことで、従来困難であった、地球の表層に存在する海洋・陸水等の流体による荷重の全球分布の時間変化を面的に観測することが可能となった。

ただし、上空からの衛星観測という制約から、空間分解能がおおよそ 500 km、時間分解能が 10-30 日であり、大気圧モデルに比べると、時間と空間の分解能では劣る。そのため、本来、GRACE は海水だけでなく積雪などの陸水による荷重変形をもとらえる能力を持つが、残念ながら日本域においては、空間分解能の問題で陸水に対する感度はほぼない。しかしながら、従来不可能であった、海水による荷重変形の見積もりが可能になったことは日本域においても大きな進歩である。

今回、テキサス大学オースチン校宇宙研究センターにおいて処理された、GRACE による重力変化の球面調和係数モデルを用い、電子基準点での荷重変形を計算した。前述のとおり、この荷重変形はほぼ海洋によって引き起こされたと考えてよい。図-4 に推定された高さ方向の年周変動の振幅を示す。南ほど振幅が大きく、南西諸島では 3 mm に達することが分かる。

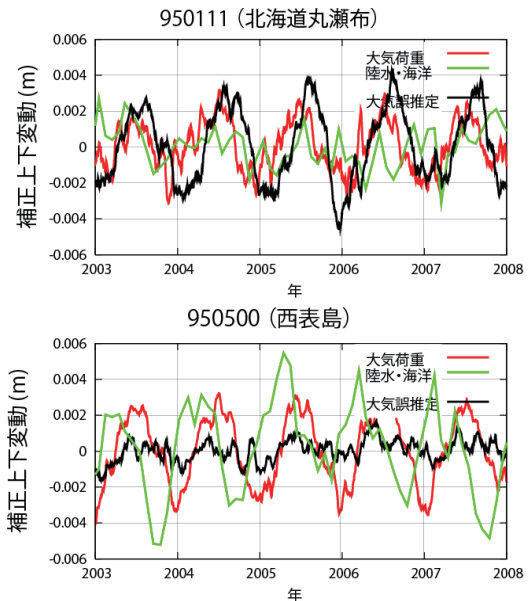


図-5 さまざまな誤差(変形)要因による電子基準点の高さの変動の例

2. 2 時系列としての特徴

2. 1 では、電子基準点の高さ情報における誤差(ないし変形)の年周成分の振幅について調べた。次に、それぞれの誤差(変形)が時系列としてどのように現れるかについて検討する。

図-5 に、2か所の代表的電子基準点(北海道、南西諸島)の高さ情報に含まれる誤差(変形)の時系列を示す。図-2 にあるとおり、マッピング関数の違いによる大気遅延の誤差の影響が大きくなる高緯度にある丸瀬布(北海道)では、NMF を用いた場合、冬季に見かけの沈降を生じることが分かる。また、大気荷重の影響も大きく、冬季に沈降する変動を与えることが見て取れる。これは冬季において、気温が低下することにより大気の密度が増大し、高気圧が(特に大陸部で)特徴的に見られることに起因している。また、図-4 で分かるとおり、海洋の荷重の影響は小さい。一方、図-2 にあるとおり、大気遅延誤差の影響は小さい低緯度にある西表島(南西諸島)においては、大気荷重および海洋による荷重変形が卓越することが分かる。大気荷重は、

北海道の場合と同じく、冬に沈降する変形を与える。また、海洋の荷重は、9月末に沈降する変形を与える。

3. 実観測データに対する補正の適用

2. において、大気遅延の推定誤差，大気荷重による変形，海洋荷重による変形が，電子基準点の高さ情報に大きな季節的な誤差を与えることが分かった。そこで，GEONET の実データの解析において，これらの誤差（変形）に対する補正を適用し，その効果を調べた。

解析には，2. 1. 1と同様に GIPSY-OASIS II (ver5.0) を使用し，マッピング関数は VMF1 を用いた。大気荷重に関しては，一日以下の変動の影響も考慮するため，2. 1. 2に述べた手法により各観測点における6時間毎の大気荷重変形の時系列を作成した上で，RINEX データにおいて直接補正することで，観測量レベルでの補正を行うこととした。また，海洋の荷重については，時間分解能が30日と低いため，2. 1. 3の手法により，まず，各観測点における海洋荷重の時系列を作成した上で，時間軸において線形補間することにより1日毎の値を計算し，電子基準点の1日毎の高さ情報から差し引くことで補正した。

補正前後の高さ座標の年周変動成分を図-6に示す。図の矢印の大きさが年周変動の振幅を表し，矢印の方向が，一年のうち最も沈降するタイミングを表す。補正前には，全国ほぼ一様に5mm以上の年周変動が現れているが，補正後では，図中赤実線，青実線で囲んだ地区以外では，ほとんどの場所で顕著な年周変動が見られなくなっている。赤実線で囲んだ地区は，Heki (2001) で最初に指摘されたとおり，積雪による荷重により地面が冬季に沈降していることを表している。また，青実線で囲んだ点は，つくばにあり，同点で見られる地下水の農業用くみ上げに伴う地盤上下変動に対応する（飛田ほか，2004；Munekane et al., 2004）。このように，補正を行うことによって，高さの年周変動の物理的解釈が容易になった。

電子基準点の高さ情報の時系列に現れる補正の効果の一例として，北海道にある電子基準点 950140（長万部）における補正前後の高さ情報の時系列を図-7に示す。補正前に見られる大きな季節的な年周変動が，補正後にはほぼ見られなくなっていることが分かる。したがって，補正後の時系列を用いることで，従来，季節的な変動に埋もれたために見えなかった地震・火山活動に伴う微小な変動が検知可能になり，より精度の高い防災情報を提供できるようになると期待される。

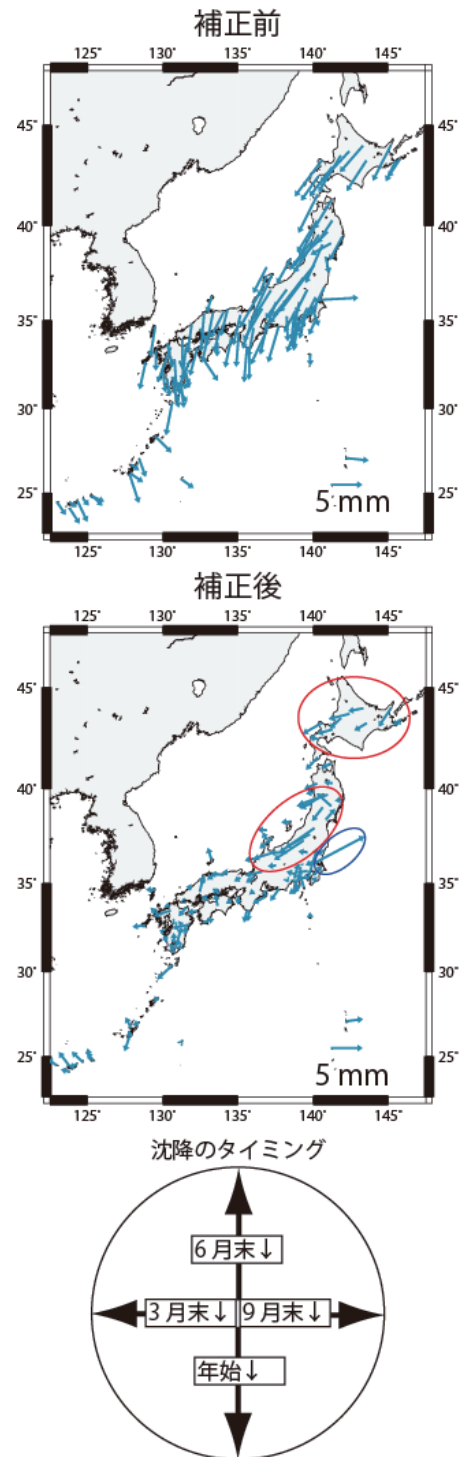


図-6 電子基準点の高さ情報に含まれる年周変動の補正前後での比較。矢印の向きが最大の沈降の時期，大きさが振幅を示す。赤実線で囲んだ地区は，積雪荷重による冬季の沈降がとらえられている。また，青実線で囲んだ点はつくばにあり，地下水の農業用くみ上げに伴う夏季の沈降がとらえられている。

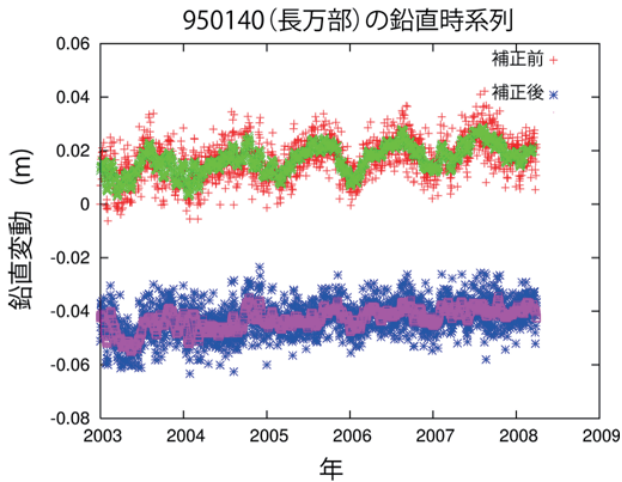


図-7 電子基準点の高さ情報の時系列にみられる補正効果

4. おわりに

本講演では電子基準点の高さ情報に含まれる誤差の要因として、1) 大気遅延による誤差、2) 大気による荷重変形、3) 海洋による荷重変形、の3つのメカニズムを考慮し、その影響の大きさを定量的に見積もった。次に、1)～3)に対する補正をGEONETの実データの解析に適用することで、電子基準点の高さ情報の季節変動成分がほぼ除去できること、また、残存する季節成分についても、例えば積雪荷重によるものなど、物理的解釈が容易になることを示した。

今回の評価においては、GPS解析ソフトウェアとして、米国ジェット推進研究所で開発されたGIPSY-OASIS II (ver5.0)を用いた。一方、国土地理院のGEONETのルーチン解析(解析戦略第4版)では、スイスのベルン大学で開発が行われたBERNESE 5.0を用いており、補正の効果として、今回の評価結果をそのまま当てはめることはできない。しかしながら、1)については誤差の大きさがソフトウェアにあまり依存しないことが確かめられており、2)と3)については実際の地面の変動を表していることから、現在の国土地理院のGEONETルーチン解析における電子基準点の高さ情報にも同等の影響が含まれていると考えられ、今回の補正を適用することにより、高さ情報の季節変動成分を大幅に低減することができるかと期待される。

今回検討した1)～3)の補正をGEONETルーチン

解析に取り入れることを考えた場合、技術上考慮しておくべき点がある。まず、1)に関して、現在のBERNESE 5.0がVMF1マッピング関数に対応していない、という問題がある。この点に関しては、現在、ソフトウェアの改修が進められており、次期リリースのver5.1において対応されることが決められているので、そのリリースを待っている状況である。また、VMF1マッピング関数には各地点における6時間毎の係数が必要であるが、現在ウィーン工科大学がその係数をほぼ1日の遅れで公開しており、それを利用することができる。一方、多少精度が落ちるものの、そのような外部データに依存しないマッピング関数GMF (Boehm et al., 2006b)も構築されており、これを利用することも選択肢の一つである。次に、2)の大気による荷重変形をどのように与えるかという問題がある。これについては、各観測点での荷重変形を計算するための格子モデルが、米国ゴダード宇宙飛行センターより提供されている。それらは平均して3日程度の遅れで入手できるため、ルーチン解析において用いることができる。さらに、3)の海洋による荷重変形をどのように与えるかについては、現在、各解析センターから公表されるGRACEのデータには2カ月程度の遅れがある上、時間分解能も30日(ないしは10日)と悪いため、ルーチン解析に取り入れるメリットはあまりなく、補正を適用したいユーザーは自ら電子基準点の高さ情報に対し、後処理的に補正することになるだろう。

一方、本講演で検討した補正のそれぞれについて、GEONETのルーチン解析に採用することの是非については、そのメリット・デメリットを慎重に見極めたうえで、国際的な流れも踏まえつつ検討する必要がある。例えば、2)に関しては、国際GNSSサービス(International GNSS Service; IGS)では、現在のところ、まだ、補正モデルの精度が不足していることなどを理由として、地球表層流体による荷重変形を定常的に補正することには反対しており、大気荷重についても、精度よくモデル化できる潮汐成分(日周潮S1; 半日周潮S2)についてのみ補正を行うことを提案している。このような事情を鑑みると、2)については、IGSと同様、ルーチン解では補正は潮汐成分にとどめ、それ以外の気圧変動による高さ変動については、ユーザー側で事後的に補正すること等も選択肢として考えられる。

参考文献

- Boehm, J. and H. Schuh (2004): Vienna mapping functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 31:L01603, doi:10.1029/2003GL01894.
- Boehm, J., B. Werl and H. Schuh (2006a): Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J. Geophys. Res.*, 111:B02406, doi:10.1029/2005JB003629.

- Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning and H. Schuh (2006b): Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33:L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Heki, K. (2001): Seasonal modulation of interseismic strain buildup in northeastern Japan driven by snow loads, *Science*, 293, 89–92.
- Heki, K. (2004): Dense GPS array as a new sensor of seasonal changes of surface loads, in *The State of the Planet: Frontier and Challenges in Geophysics*, edited by R. S. K. Sparks and C. J. Hawkesworth, *Geophys. Monogr.*, 150, 177–196, American Geophysical Union, Washington.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, *J. Oceanogr.*, 56(5), 567–581.
- Munekane, H., M. Tobita and K. Takashima (2004): Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 31:L12608, doi:10.1029/2004GL020158.
- Munekane, H. and J. Boehm (2010): Numerical simulation of troposphere-induced errors in GPS-derived geodetic time series over Japan, *J. Geod.*, doi:10.1007/s00190-010-0376-4, in press.
- 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.
- Niell, A. E. (1996): Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelength, *J. Geophys. Res.*, 101(B2), 3227–3246.
- 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.
- Tapley, B. D., S. Bettadpur, J. C. Ries, P. F. Thompson and M. M. Watkins (2004): GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 503–505.
- 飛田幹男, 宗包浩志, 海津優, 松坂茂, 黒石裕樹, 眞崎良光, 加藤敏 (2004): つくば市周辺の地下水位と地盤の季節変動, *測地学会誌*, 50(1), 27–37.
- Tregoning, P. and C. Watson (2009): Atmospheric effects and spurious signals in GPS analyses, *J. Geophys. Res.*, 114:B09403, doi:10.1029/2009JB006344.