

測地基準系精密保持手法に関する研究（第3年次）

実施期間 平成17年度～平成21年度
地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室 矢来博司 畑中雄樹
宗包浩志
地理調査部環境地理課

1. はじめに

国土地理院（つくば市）構内には、VLBI観測局、GPS連続観測点があり、一体となって国内観測の中央局および国際観測網の宇宙測地基準局として、世界測地系および地球基準座標系（合わせて「測地基準系」）の構築・維持に重要な役割を担っている。これらの観測点の位置データに含まれている上下季節変動は、外国局の季節変動のように従来理論では説明できなかったが、2003年、日本固有の変動機構であるらしいことがわかってきた。

近年、宇宙測地技術による測位精度の急速な向上に伴い、宇宙測地基準局の正確な位置が必要とされるようになった。そのため、この局にみられる上下成分の季節変動および経年的変動をこれまでにない精度で定量的に測定して、その変動機構を明らかにし、宇宙測地基準局としてふさわしい位置精度を確保することが課題となっている。

国土地理院構内には、深度190mの二重管式地盤沈下計があり、0.02mm精度の地盤上下変動データが蓄積されてきた。変動機構を解明するためには、地下水温変化の計測やGPS・水準測量等他の測地技術との継続的な比較など、より精密な調査・研究が必要となる。

また、つくばエクスプレス（TX）沿線開発に伴う地下水涵養量の変化により、宇宙測地基準局の上下位置が変動する可能性があり、その変動量を定量的に計測・監視することが測地基準系維持にとって欠かせない。

そこで、次の4つの目標を通して、特に上下方向について、測地基準系精密保持手法を確立することを目的として、本研究を行う。

1. 上下変動機構（表層地盤弾性変形）の解明
2. 宇宙測地基準局の上下季節変動量精密計測
3. 経年的地盤変動の中長期的モニタリング
4. 安定地層固定型基準点の技術開発

2. 研究内容

昨年度までに、地盤沈下計の温度変化監視のための水晶式精密温度計の設置、地盤沈下・地下水観測棟の温度環境安定化工事、地盤沈下計内管上部へのGPSアンテナの設置等を行い、上下変動の精密計測のための環境を整備した。

平成19年度は、水晶式精密温度計による地盤沈下計内管の温度変化監視、国土地理院構内および構外の水準測量による精密上下変動観測、地盤沈下計内管上部に設置されたGPSアンテナを用いた連続観測によるつくばの上下変動把握、SAR干渉解析によるつくば周辺の地盤変動領域調査を実施する。

3. 得られた成果

3. 1 地盤沈下計の温度変化監視

地盤沈下観測井内管の6箇所に水晶式精密温度計を設置し、地盤沈下計の設置環境における温度変化の監視を平成18年度より行っている(設置条件等の詳細はH17年度調査研究年報を参照)。観測結果を図-1に示す。水温変化は年周成分が卓越していることが分かる。また、図-2は水温変化の年周成分の振幅の対数をとって、深さ毎にプロットしたものを示す。図-2からは、深さ75mまでは年周振幅の対数は深さに対してほぼ線形に減少するが、深さ75mから190mにおいてはその関係が成立せず、年周成分の振幅はほとんど減少しなくなることが分かる。

一般に、土壌温度の年周成分の振幅の対数は深さに対して線形に減少することが知られている。これは地表から土壌への熱の浸透が拡散方程式に従うことによるものである。仮に地下水と土壌が熱的平衡状態にあるならば、水温と土壌温度は一致する。従って、水温に関しても年周成分の振幅の対数と深さとの間に線形関係が成立するはずである。しかし、今回の観測では、深さ75m以深ではその関係が成立しないことから、この部分では地下水と土壌が熱的平衡にないことが示唆される。この原因は今のところ明らかではないが、この部分からは農業用の地下水が大量に取水されていることから、汲み上げによる帯水層の間隙水圧の減少に応じて浅部から深部への水の移流が起こっていることが原因かもしれない。

次に温度変化による観測井内管の長さ変化量を見積もる。水温変化は年周変化が卓越することから、温度変化として年周成分に着目することとする。まず、深さ75mまでは地下水と土壌は熱的平衡状態にあり、両者に挟まれた内管も同一の温度をとると仮定する。一方で、深さ75mから190mでは、地下水と土壌とは熱的平衡になく、両者は異なる温度をとる。この場合、内管がどちらの温度に従うかは境界条件に依存するが、ここでは内管の長さ変化の上限を抑えるため、内管は地温よりも変化幅の大きい地下水と熱的平衡にあると仮定し、さらにこの部分で最も水温変化が大きい141m深における水温変化と同じ温度変化をすると仮定する。

以上の仮定のもと内管の温度変化を計算すると、内管の線膨張係数として鉄の値 $11.8 \times 10^{-6}/K$ を採用した場合、その年周振幅は高々0.3mmであり、地盤沈下計内管の安定性は高いと考えられる。

3. 2 水準測量

国土地理院構内の相対的な地盤高の季節変動を調べるため、毎月1回、構内の水準測量を実施した。電子基準点、一等水準点、地盤沈下計、測地観測塔、VLBIアンテナ基台を含む7つの固定点間の比高を観測した(路線図についてはH17年度調査研究年報を参照)。地盤沈下計内管を不動と仮定し、他の固定点の比高変化を求めた(図-3)。昨年度までと同様な年周変動が検出されており、国土地理院構

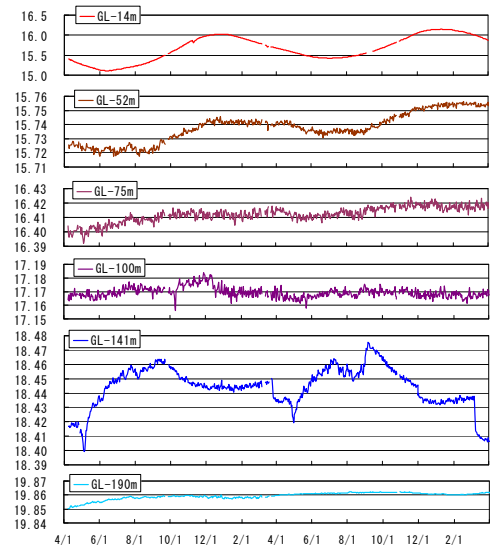


図-1 地盤沈下観測井内の温度変化

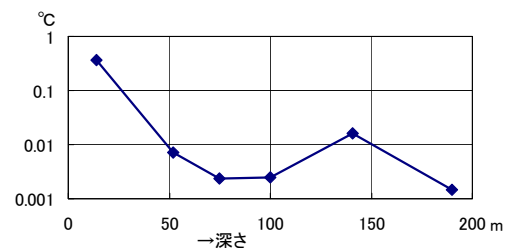


図-2 地盤沈下観測井内の深さによる水温変化年周振幅

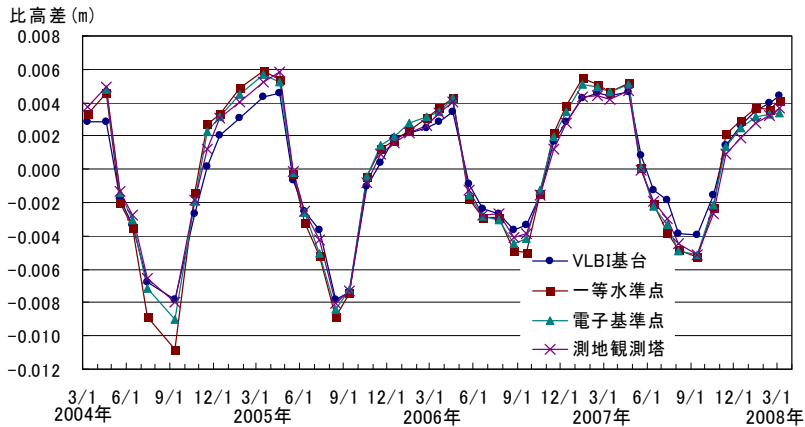


図-3 国土地理院構内水準測量結果. 地盤沈下計内管を不動と仮定して求めた各点の上下変動.

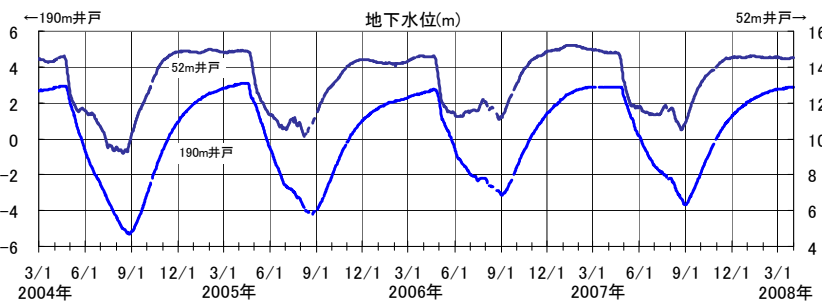


図-4 国土地理院構内の地下水位観測井で得られた地下水位変動

内での地下水位（図-4）の変化と、振幅、位相ともよい相関を示している。図-4は、それぞれ地下40～50m（52m井戸）と130～150m（190m井戸）にある帯水層の水位変化を示しており、これらの帯水層の水位変化は水田灌溉用の揚水が主な原因である（飛田ほか、2004）。

この上下変動の空間的広がりの特徴を把握するため、国土地理院構内から水田灌溉用の揚水井戸（深さ 150m）までの構外水準測量を平成 18 年度より実施している（図-5）。観測時期は揚水が開始される直前の4月下旬、揚水が停止される8月中旬を含め、4ヶ月毎の年3回である。固定点の比高を観測し、構内水準測量と同様に地盤沈下計内管を不動と仮定して比高変化を求めた（図-6）。



図-5 構外水準路線図

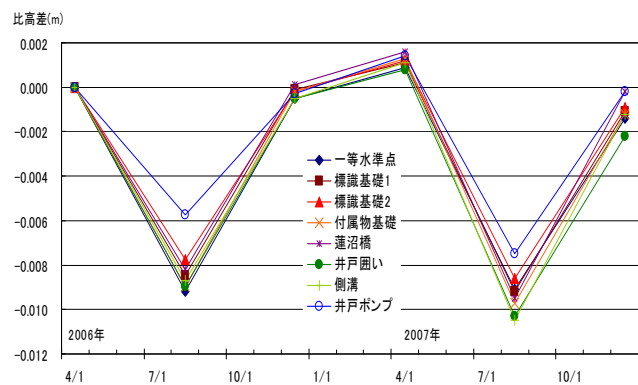


図-6 構外水準測量結果（地盤沈下計内管基準）

「井戸ポンプ」を除き、ほぼ同じ変動を示す。井戸からの距離と沈下量の間に関係は見られず、この水準測量路線（約 1.1km）の範囲でほぼ一様に沈下しているといえる。「井戸ポンプ」の変化量が小さい理由としては、ポンプが深さ 150mの帯水層に設置されており、それより上部の帯水層で生じている収縮の影響を受けていないためと考えられる。

3. 3 GPS 連続観測

地盤沈下計内管の上部に設置されたGPSによる連続観測を実施した。観測によって得られた上下成分の変化を図-7に示す。「Sつくば」は地盤沈下計内管上部に接続して設置されており、上下変動がほぼ生じないと予想されるが、今回の解析結果では、国土地理院構内にある他のGEONET点と同様な上下変動を示す。調査の結果、つくばの上下変動と同期して「Sつくば」の位相特性が年周変化しており、電離層補正線形結合により天頂方向の対流圏遅延量を推定して解析した場合に、その影響がほぼ上下変動の年周変化と同じ大きさとなるためであることが判明した。このノイズの要因としては、GPSアンテナと屋根との位置関係が変化することによる、マルチパスまたはレドームの影響の時間変化の可能性が考えられる。今後、原因を特定し解決を図る予定である。なお、「Sつくば」で冬季に見られる解析結果の乱れについては、今のところ原因は分かっていない。

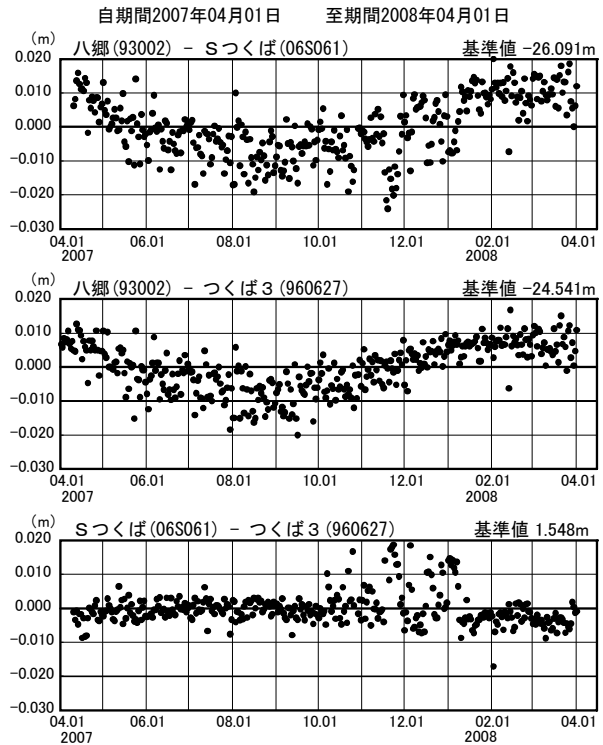


図-7 GPS 連続観測による上下成分の変化。「Sつくば」が地盤沈下計内管上部に設置された観測点。

3. 4 SAR 干渉解析

上下変動の空間的広がりを把握するため、SAR 干渉解析を実施した。解析には C-band マイクロ波を用いる ENVISAT、および L-band マイクロ波を用いる ALOS「だいち」のデータを用いた。夏季の沈降の空間的広がりを捉えるために冬季と夏季の短期間のペア、および長期間にわたる地盤安定性評価のために1年以上の間隔で同じ季節のペアの解析を行った。解析結果の例を図-8に示す。

捉えようとする夏季の沈降水量は約1~2cmであるが、大気中水蒸気による位相遅延ノイズの大きさが同程度に達することがあるため、通常のSAR干渉解析のみではこのような小さな変動量の抽出は難しい。そこで、SAR干渉画像の位相変化の空間分布に着目し、変動域の把握を行った。

長期間ペア(図-8a:2003年2月~2006年12月)では、沈降水量が1cmを超える沈降域が渡良瀬遊水地周辺(古河市、野木町など)、大宮市、下妻市~石下市、房総半島に見られるが、国土地理院周辺には特段の長期的変動は見られない。

冬季-夏季の短期間ペア(図-8b:2006年12月~2007年7月)では、渡良瀬遊水地の東(野木町付近)、筑波山西麓(真壁市付近)、つくば市の桜川流域、霞ヶ浦南側(阿見町、稲敷市周辺)に沈降域が見られる。夏季の国土地理院周辺の沈下をもたらしている変動の中心は、国土地理院から約5km北東の桜川流域付近に位置している。この地域には水田が多く、つくば周辺の沈下は水田へ水を供給するための揚水が原因であるとする説を支持する結果となっている。

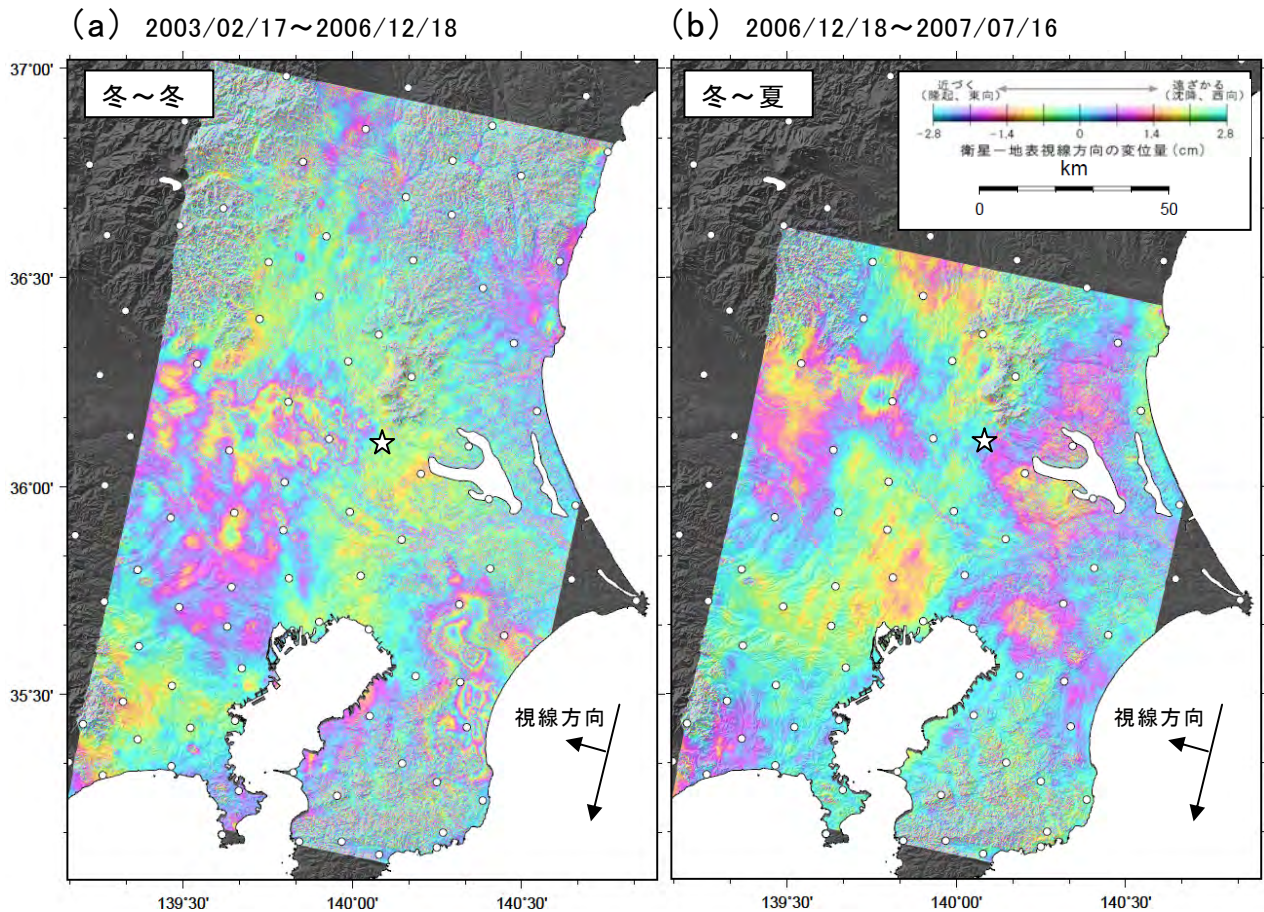


図-8 ENVISAT データの SAR 干渉解析結果の例. 色の 1 周期が衛星視線方向の 2.8cm の変位量に相当する. 白丸は GEONET 観測点, ☆は国土地理院の位置を示す. (a)同季節の長期間ペア: 2003 年 2 月 17 日~2006 年 12 月 18 日; (b)冬季-夏季短期間ペア: 2006 年 12 月 18 日~2007 年 7 月 16 日.

4. まとめ

水準測量および干渉SAR解析の結果から, 上下に年周変動は国土地理院から 1 km 程度の範囲ではほぼ一様な変動であること, 変動領域の中心が国土地理院から約 5 km 北東の付近に位置することがわかった. また, 地盤沈下計の内管の温度変化による熱膨張は mm レベルでは無視できる大きさであることが確認された. 一方, 内管の頂上に取り付けた GPS アンテナには何らかの原因による位相特性の変化が見られ, これが高さの年周変化の観測にとって無視できないノイズとなっていることが判明した. これについては, 次年度に原因の特定・対策に向けた試験観測を行う予定である.

参考文献

- 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, 第 50 巻, 27-37.
- 飛田幹男, 福崎順洋, 宗包浩志, 環境地理課, 構内水準測量チーム (2006): 測地基準系精密保持手法に関する研究 (第 1 年次), 調査研究年報 (平成 17 年度), 国土地理院技術資料 A・4-No. 4, 225-228.