

つくばの季節的上下変動：精密計測，機構解明，およびその監視手法について

Seasonal Vertical Motions in TSUKUBA: Measurements, Mechanism, and Monitoring

地理地殻活動研究センター 畑中雄樹・宗包浩志・石本正芳・高島和宏・黒石裕樹
Geography and Crustal Dynamics Research Center

Yuki HATANAKA, Hiroshi MUNEKANE, Masayoshi ISHIMOTO, Kazuhiro TAKASHIMA,
and Yuki KUROISHI

要 旨

つくば市では，農業用の地下水くみ上げに伴い，地盤が季節的な上下変動をしていることが知られている．そこに置かれている VLBI 観測点および GPS 観測点について，本研究では，様々な観測手段を投入して上下変動の精密計測を行い，得られた結果に基づいて上下変動の機構解明とモデル化を図り，これら観測点における上下変動の精密な監視手法を検討した．国土地理院の近傍では，地表の季節的上下変動は空間的に少なくとも 1 km 以上の範囲でほぼ一様であり，VLBI 基台の季節的上下動の振幅が地表よりも小さいこと，VLBI 観測局が経年的に隆起していることなどが明らかとなった．季節的上下変動は表層地盤に分布する帯水層における間隙水圧変化に伴う弾性変形をメカニズムとしてほぼ説明できることが分かり，地下水位観測に基づいて定量的に推定するモデルを構築した．また，各種観測およびモデルを用いて，VLBI 観測点および GPS 観測点の上下変動を監視する手法をとりまとめた．

1. はじめに

茨城県つくば市の国土地理院構内には，VLBI 観測点や複数の GPS 連続観測点（国際 GNSS 事業 (IGS) 観測点，電子基準点等）が設置され，定常的に運用されている．これらの観測点は，国際地球基準座標系 (ITRF) や国内の測地基準座標系の構築・維持，両者の結合，VLBI と GPS という異なる宇宙測地技術間のコロケーション，電子基準点測量のための基準局など，測地基準系に関する重要な役割を果たしている．これら複数の電子基準点の変動時系列には，他の電子基準点に対して，振幅 1～2 cm 程度の上下季節変化が見られ，それが水田涵養のための地下水くみ上げに伴う実際の変動であることが，構内に設置されている地盤沈下計や地下水位計等による観測で確認された (飛田ほか，2004; Munekane et al., 2004)．

今後の地球科学に求められる様々な要請に応えるために，宇宙測地技術をはじめとする種々の測地観測を統合し，時間変化を含めた，精度の高い総合的な測地基準系を構築する取り組みが，全地球的測地観測システム (Global Geodetic Observing System;

GGOS) として，国際測地学協会 (IAG) のもとに進められている (Plag and Pearlman, 2009)． 10^{-9} 以上とされている GGOS の目標精度は，当然，その基盤となる測地基準系にも求められるものである．その実現において，異なる宇宙測地技術の組み合わせに必須なコロケーションの精度向上は重要な課題の一つとなっている．

我が国においても，世界測地系への移行 (国土地理院・海上保安庁海洋情報部，2007) や，セミ・ダイナミック補正の導入 (檜山ほか，2010) など，測地基準系の高度化が行われてきた．世界測地系に準拠する GPS を用いた測量や測位の普及，電子基準点測量や長距離を高い精度で測量するネットワーク型 RTK 等の新たな測量技術の出現など，測量技術の高精度化が，その背景の一つとなっている．

つくばの宇宙測地基準局の季節的上下変動は，ITRF および国内測地基準系にとって，安定性を損なう要因の一つであり，これを精密に監視し把握することは，今後の測地基準系の応用の高度化への対応を考えるための前提として必要なことである．

本稿では，国土地理院特別研究課題「測地基準系精密保持手法に関する研究」として取り組んだ本研究の成果の一部を紹介する．つまり，種々の観測手段を用いてつくばの季節的上下変動を精密に測定し，そのメカニズムを解明するとともに，VLBI 観測局および GPS 連続観測点の上下変動を精密に監視する手法を提案する．

2. 観測手法とその概要

国土地理院構内の測地基準点の上下変動の把握およびそのモデル化のために，地盤沈下計による観測，構内/構外水準測量，GPS 連続観測，地下水位観測果を用いることができる．以下に各観測手法の概要を，その本研究における主な目的とともに記述する．

2. 1 地盤沈下計観測

国土地理院では，構内の深井戸に設置された地盤沈下計を用いて，深さ約 190m の地盤 (以下，「190 m 深地盤」と記す) を基準にした地表の上下動を定常的に測定している (国土地理院，2008)．そこで，

この観測を用いて、地表付近の約 190mの層厚の変化を精密に把握し、地下水位観測データと合わせて、そのメカニズムを明らかにし、定量的なモデルを構築する。

地盤沈下計が設置された深井戸は、内壁である外管の中に、深さ約 190mの地盤に基礎を持ち、外管から切り離された内管を地表まで通した構造になっている。地盤沈下計では、地面に対する内管の上下動を地表で測定することによって、190m深地盤を基準とした地表面の上下動が測定される。この計器には自記記録装置が取り付けられ、記録紙に記録するペンの位置をデジタル処理することで観測データが記録されるが、地震動によってペン位置がずれたり、変動量が装置の記録レンジを超えそうな場合に、ペンの位置調整が必要となる。こうして記録される観測データに対しては、自記記録装置とは独立に併設されているダイヤルゲージを用いた校正がなされるものの、手動で行われるペンの位置調整は測定の誤差要因の一つとなっていた。そこで、平成 21 年 3 月に、地盤沈下計にレーザー距離計を用いたセンサー部を新たに設置した。これは、地盤沈下計内管に固定されたアームの上下動を、地表に固定されたレーザー距離計によって、測定するものである。

レーザー距離計、自記記録装置、および校正用のダイヤルゲージによる測定結果の比較を、図-1 上図に示す。ダイヤルゲージの値は、目視により、ほぼ週 1 回の頻度で読み取られたものである。レーザー距離計の測定値には、室内気温の変化に比例するスケール変化がわずかに認められるため、補正を加えた。補正には線形関係を仮定し、ダイヤルゲージの読み取り値を基準として次の経験式を得た。

$$\Delta L = 0.0288(T - 26.39) \quad (1)$$

ここで、 T は室温(°C)、 ΔL は地表の沈下量に加算する補正值(mm)である。

3 種類の測定値は大局的にはほぼ同じ変化を示しており、大局的にはいずれの測定手法によっても変動が正確に計測されていると考えられる。その変動には、7 月と 10 月に 1 回ずつ跳びがみられ、そのうち 7 月の跳びについては同一時刻につくばで地震動が観測されている。跳びの原因は特定できていないが、その向きと大きさが 3 者にほぼ共通であることから、個々の計測手法以外の部分に求められるべきである。このような跳びは過去のデータにもしばしば見られ、その多くは地震動に伴って発生したものである。2004 年 7 月～2010 年 11 月の期間の自記記録について調査した結果、49 例の跳びが確認され、その最大値は 1.9mm、RMS は 0.7mm であった。49 例の全てについて、地盤が沈降する期間(5 月～8 月)には沈

降の、それ以外の期間には隆起の向きに跳びが生じている。この特徴は、何らかの摩擦による内管の引掛かりが地震動によって解放される機構によって現象論的かつ定性的な説明が可能である。以上に記述した観測値の跳びとその性質から、地盤沈下計の測定値のバイアスには、平均 1mm 程度の揺らぎがあるものと考えられる。なお、摩擦による引掛かりが原因であるとする、季節的上下変動の実際の振幅は測定されたものよりも 1mm 程度大きい可能性がある。

自記記録とレーザー距離計の差(図 1 下図)には、地震時とオフセット調整時に 0.2～0.3mm 程度の跳びが見られる。ダイヤルゲージとレーザー距離計の差にはこのような変化が見られないので、この跳びは自記記録装置の記録に生じているものと思われる。後者の差は 0.2mm 以内で安定しており、計測の安定性はレーザー距離計の方が、自記記録装置よりも高いことが分かる。

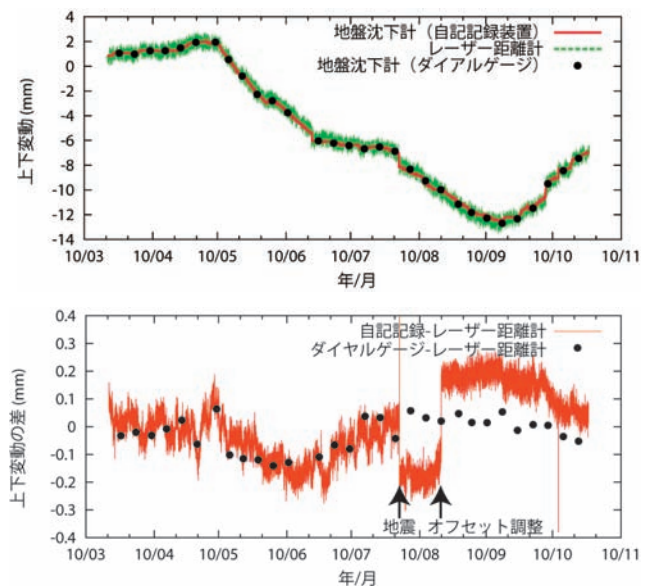


図-1 (上図)自記記録装置(赤)、レーザー距離計(緑)、ダイヤルゲージ(黒)による地盤沈下測定値の比較。(下図)レーザー距離計を基準とした差。

2. 2 構外水準測量

季節的上下変動の空間的な広がりの特徴を把握するため、国土地理院構内の一等水準点を出発点として、南東方向に約 1 km の地点までの路線について、水準測量を実施した(図-2)。観測は平成 18 年度から平成 21 年度までの 4 年間に亘り、年 3 回の頻度で行った。なお、国土地理院から南東方向約 1 km の地点にある測点「井戸ポンプ」は、深井戸のポンプのボルトを測定点としており、その基礎は深く(150 m 程度)まで届いているため、周囲の地表面とは異なる変動を示すことに注意が必要である。

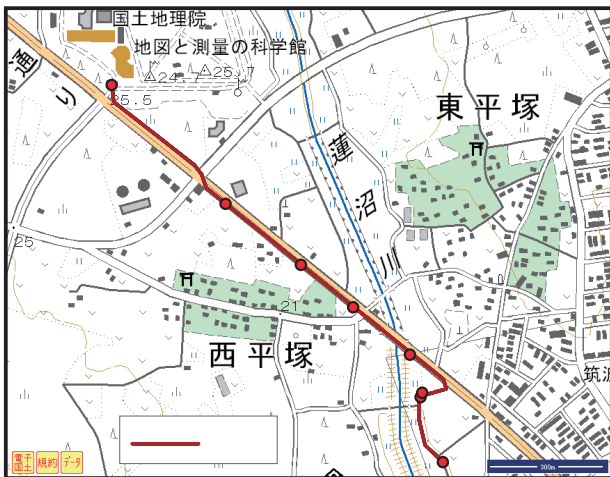


図-2 構外水準測量の路線図

2. 3 構内水準測量

構内の基準点の季節的上下変動，および，その基準点間の違いを把握するために，GPS 連続観測点，一等水準点，地盤沈下計内管，つくば原点，VLBI アンテナ基台間の比高を，2005年4月より水準測量により月1回の頻度で観測した．地盤沈下計内管に固定されたマーカーを測点に含めたことにより，190m深地盤を基準とした各基準点の上下動を，水準測量によって直接測定することができる．

構内水準測量による3点のGPS連続観測点(92110, 960627, 022006)の間の比高測定結果を用いて，測定精度を評価した．点間の比高測定値の変化は，そのほとんどが水準測量の誤差に起因し，実際の地盤変動の寄与は小さいものと仮定する．その上で92110に対する022006(路線長：63m)および960627(路線長：467m)の比高時系列のRMS値(mm)を求め，それが路線長S(m)の平方根に比例するものと仮定して比例定数を推定すると，経験式として，

$$\text{RMS}=0.02\sqrt{S} \quad (2)$$

を得た．ただし，電子基準点間の比高測定値のばらつきには地盤変動が含まれる可能性があるため，真の測定誤差はこれよりも小さいものと考えられる．

2. 4 GPS 連続観測

構内には，GPS 連続観測点として，電子基準点(92110, 960627)，軌道追跡局(022006)，IGS 観測点(TSKB)，および次節に述べる地盤沈下計内管に直結させたGPSアンテナによる観測点(06S061)がある．これらの観測点間の比高変化を，水準測量よりも高い時間分解能で把握するために，GPS 連続観測データの基線解析結果を用いる．

これらの観測点は GEONET の定常解析の対象となっているので定常解が得られるが，その定常解析においては，電離層線形結合の使用，大気遅延パラメータの推定等，長基線に適した解析戦略(以下「長基線戦略」と総称する)がとられている．しかし，基線が短く，位相差をとることによって電離層遅延や対流圏遅延量のほとんどが消去される場合には，長基線戦略の利点は小さく，むしろ観測量のSN比が低いなどの欠点がそれを上回るため，2周波観測量の線形結合を組まず，大気遅延パラメータの推定も行わずに解析する(以下「短基線戦略」と記す)のが一般的である．そこで，今回の目的には，構内のGPS 連続観測点間の比高を高精度に測定するために，GEONET の定常解析とは別に，短基線戦略による解析を行う．このとき，2周波のデータを独立な観測量として基線解の推定に用いる．

図-3に，92110-960627 基線について，短基線戦略による日々のGPS解析結果と構内水準測量結果を示す．GPS解析結果には長周期的な変化が認められる．その一部は水準測量結果にも共通しており，実際の変動を含んでいる可能性があるが，水準測量結果には対応する変化が見られないものもあり，その差は最大2~3mmに及ぶ．(2)式から水準測量結果の誤差のRMSが高々0.43mmと見積もられるので，この差の大部分はGPS観測の誤差を表しているものと考えられる．この基線の短基線戦略によるGPS観測の評価結果(Munekane et al., 2010)によると，2009年3月から12月までの期間について，10日幅の移動窓による平均値のばらつきは，最大値が1.6mm，RMSが1.0mmである．

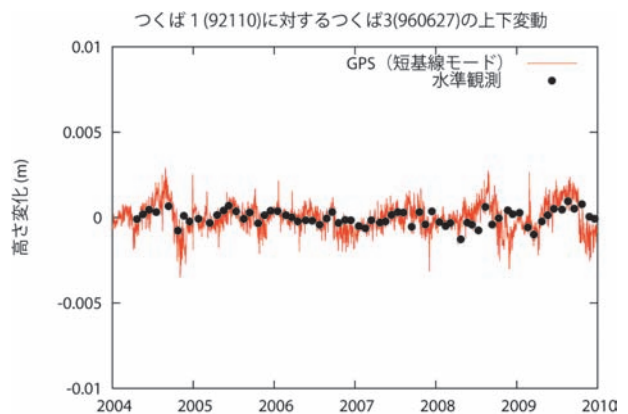


図-3 短基線戦略による日々のGPS解析結果の基線上下成分(赤)と水準測量結果(黒点)の比較の例(92110-960627 基線)．

2. 5 190m深地盤に基礎を持つGPS連続観測点

190m深地盤を基準として構内のGPS連続観測点の上下動を測定する手段としては地盤沈下計内管と

の間で水準測量を実施する方法があるが、その時間分解能は水準測量の頻度によって制約される。190m深地盤に基礎をもつGPS連続観測点があれば、この上下動をGPS観測によって、直接的かつ連続的に測定することが可能となる。

そこで、我々は、190m深地盤に固定された地盤沈下計内管の頂部にGPSアンテナを設置し、2007年4月より連続観測を開始した。初期観測の分析においてマルチパス等によるノイズが観測の障害となっていることが判明したため、2009年3月に、アンテナのかさ上げ等の改修を施し、対策を講じた(Munekane et al., 2009)。

図-4に、電子基準点92110に対する06S061の基線上下成分を、水準測量結果および地盤沈下計データと共に示す。両者の一致はよく、季節的上下変動を同じように捉えている。06S061-92110および06S061-960627の2基線について、GPS観測(10日幅の移動平均値)と水準測量との差を評価した結果によると、2009年3月から12月までの期間について、両者の差は最大2.0mm、RMSが1.4mmである(Munekane et al., 2010)。(2)式に06S061-92110間の路線長を代入すると水準測量の誤差のRMSが高々0.56mmと見積もられるので、この差の大部分はGPS観測の誤差を表しているものと考えられる。

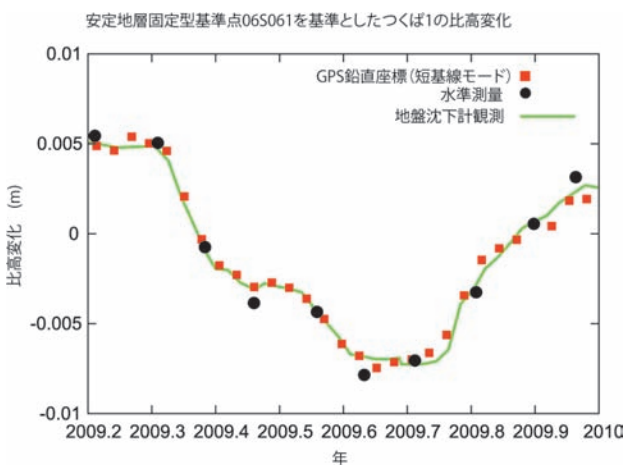


図-4 06S061を基準とした電子基準点92110の、GPS観測と水準測量による比高変化測定と比較。GPS観測結果は10日毎の平均値である。参考のために、地盤沈下計観測結果を緑線で記す。

2. 6 地下水連続観測

構内には深さが5m、20m、52m、190mと異なる4つの地下水観測井があり、取水するスクリーン(ストレーナ)の深さは、それぞれ3-5m、10-20m、50m未満、139-150mである(飛田ほか, 2004)。国土地理院地理調査部により、1980年代以降、それぞれの観測井において地下水位の計測が連続して行われて

いる。

190m井の掘削時に行われた検層から、構内の地盤はいくつかの粘土層(不透水層)で分けられた複数の砂礫層(帯水層)で構成されていることが明らかにされている。5m井は不圧地下水を観測するが、他の3つの井戸は、いずれも、被圧地下水に対応している。飛田ほか(2004)は、つくば市における水田涵養を中心として使用されている農業用井戸の深度と揚水時期を調査した。それによると、井戸の深さは全て199m以下であり、最も深い二つの井戸の地下水位にみられる最大-最小の差7mに及ぶ季節的な変化が、地盤沈下計による表層190mの層厚変化と非常によく対応を示すことを明らかにした。

Munekane et al. (2004)は、観測井における地下水位が対応する帯水層の間隙水圧変化を示しており、上下変動は間隙水圧変化に伴って帯水層が内部的に弾性変形して表層190mの層厚変化するという機構を提唱した。さらに、190m井の地下水位変化をパラメータとする上下変動をモデル化した。

本研究では、構内の地盤の上下変動について、表層190mと190m深基盤よりも深い部分に分け、地表に対するVLBI基台の変化とあわせて、詳細に計測し、それぞれの機構の解明とモデル構築を目的としている。そこで、異なる深さに分かれて分布する帯水層の間隙水圧変化を捉える観測として、これら4つの井戸における地下水位計測を扱う。

3. 観測から得られた知見と変動のモデル化

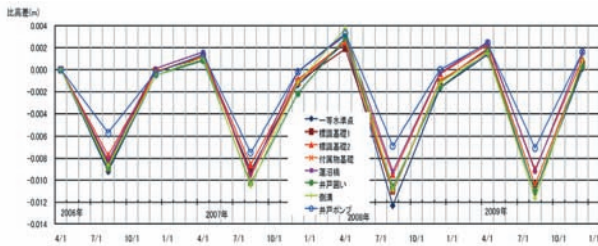
前節による観測データをもとに、国土地理院構内の基準点の季節的上下変動の様相を明らかにし、その変動を定量的にモデル化する。

3. 1 表層190mの地盤変動

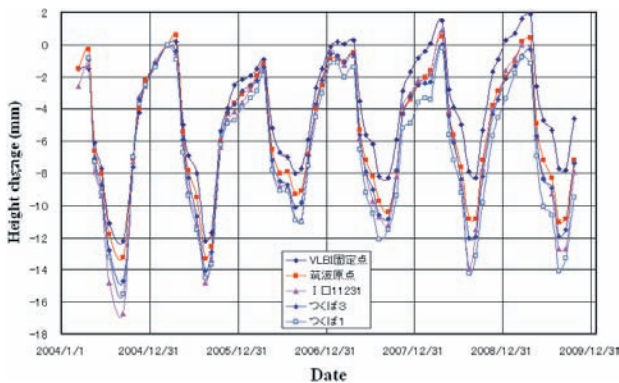
3. 1. 1 季節的上下変動の空間的な広がり

図-5に、年3回の構外水準測量による各測点の上下変動の時系列を示す。変動は地盤沈下計内管を基準とする比高として示されているので、190m深基盤に対する変動を表している。全ての測点において同様の年周変動をしており、その大きさは、測点「井戸ポンプ」(図中の青線)を除き、概ね2mm以内で一致している。したがって、季節的上下変動は国土地理院から少なくとも約1km程度の範囲に及んでおり、この範囲において地表の変動はほぼ一様である。そのため、国土地理院付近の季節的上下変動機構として、水平方向の物理過程の違いを考慮せずに、水平成層的応答を仮定することは妥当と考えられる。

なお、「井戸ポンプ」の上下動振幅は他の測点よりも明らかに小さいが、これは基礎が深いために地表よりも変動の小さな深い層のみの変動を反映しているものと考えられる。



図－5 構外水準測量による，各測点の比高時系列（2006～2009年）．地盤沈下計内管を基準とする比高について，2006年4月に対する差を示している．縦軸の1目盛りは2mm．



図－6 構内水準測量による，地盤沈下計内管に対するその他の測点の比高変化．（2004～2009年）．縦軸の1目盛りは2mm．電子基準点「つくば1」については，2008年11月4日の事故に伴う跳びを補正した．

3. 1. 2 190m深地盤に対する地表設置基準点の変動

図－6に，構内水準測量による，地盤沈下計内管に対するその他の測点の比高変化を示す．構外水準測量の測点と同様に，構内の基準点の190m深地盤に対する上下変動も，地下45mに基礎をもつVLBI基台を除き，ほぼ同様な季節的上下変動をしていることがわかる．VLBI基台では，季節的変動の振幅が他の測点よりも小さく，経年的な隆起傾向が見られる．

Muneknae et al. (2004)は，地盤が安定していると考えられる電子基準点「八郷」に対するIGS点(TSKB)の上下変動が深い帯水層から取水している190m井の地下水位と，また，TSKBとVLBIアンテナの比高変化が，浅い帯水層から取水している20m井の地下水位と，いずれも高い相関を示すことから，深さの異なる複数の帯水層の間隙水圧変化による弾性変形が季節的上下変動に寄与していることを示唆した．

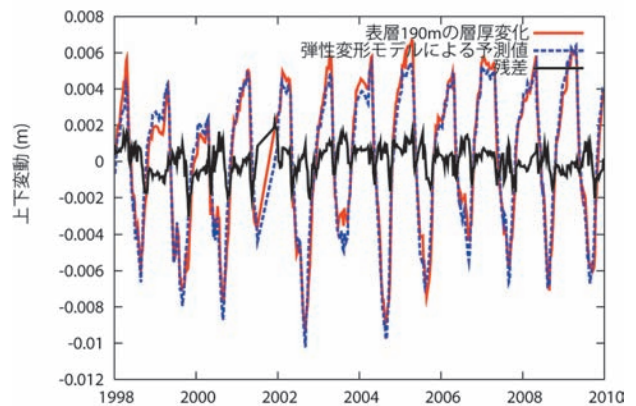
ここでは，同様の手法を用いて，190m深地盤に対する地表（つまり，表層190m）の上下動 h を，浅い帯水層を代表する20m井と深い帯水層を代表す

る190m井の地下水位変化への線形応答と線形トレンドの和として，次式でモデル化する．

$$h(t) = c_{20}\Delta w_{20}(t) + c_{190}\Delta w_{190}(t) + a(t - t_0) + b \quad (3)$$

ここで， $\Delta w_{20}(t)$ および $\Delta w_{190}(t)$ は，それぞれ，20m井および190m井の地下水位変化測定値の基準エポック t_0 における値からの偏差， c_{20} および c_{190} は，それぞれに対する高さ変化の応答係数，係数 a は隆起速度， b はバイアスである．1998年から2009年までの12年間の地盤沈下計測定値（ダイヤルゲージ読み取り値）に(2)式を適合させ，パラメータ c_{20} ， c_{190} ， a と b を最小二乗法で求める．

求められた係数とその標準偏差を表－1に，地盤沈下計測定値，モデル予測値，残差の時系列を図－7に示す．残差は最大2mm程度であり，上下変動の分散の96%がこのモデルにより説明される．これは，表層190mの上下動の主要因が，190mよりも浅い帯水層の水圧変化に伴う層厚変化にあるとする機構モデルの妥当性を証明している．



図－7 地盤沈下計による表層190mの上下変動測定値（赤），モデル計算値（青），およびその差（黒）．

表－1 表層190mの上下変化モデルの係数の推定値と標準偏差

係数	c_{20} (m/m)	c_{190} (m/m)	a (mm/year)
推定値	0.00234	0.00161	0.000018
標準偏差	0.00012	0.00002	0.000047

つくば市においては，2005年のつくばエクスプレス開業に伴い，沿線開発が進められている．地盤上下変動の様相に開発に伴う変化がないかどうかを調べるため，データを1998～2001年，2002～2005年，2006年～2009年の3つの期間に分け，各期間につい

てモデル推定を行った。隆起速度は誤差の範囲内でいずれも零であり(図-8), この期間には地盤沈下を含め変動の様相に特段の変化は検出されなかった。

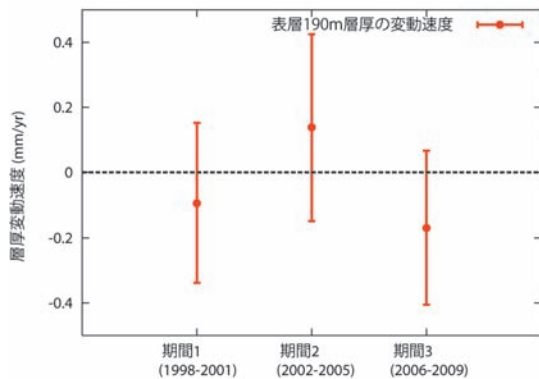


図-8 1998~2001年, 2002~2005年, 2006~2009年の3つの期間について推定されたモデルの変動速度の比較.

3. 1. 2 地表に対するVLBI基台の変動

VLBI基台の上下変動の振幅は他に比べて有意に小さい(図-6)。この違いは、約45mの深さに基礎をもつVLBI基台がそれよりも浅い帯水層の層厚変化の影響を受けにくいためと考えられる。

構内水準測量によるVLBI基台と地上観測点の上下変動の差(図-9の赤線)には、地下水位との相関が認められる振幅2~3mmの季節的な変動とともに、長期的な隆起傾向が見られる。過去12年間の地盤沈下計データには顕著な長期トレンドがみられないので、この長期的変化は190m深基盤に対するVLBI基台の長期的な隆起を表しているものと考えられる。地下水位データには顕著なトレンドが認められないので、少なくともこの長期的隆起を季節的な変動と同様の機構で説明することはできない。

地表(地盤沈下計附属標)に対するVLBI基台の上下変動 dh を、20m井および52m井の地下水位変化に対する線形応答としてモデル化する。このとき、VLBI基台の長期的隆起については、原因が不明であるため、隆起速度を一定と仮定し線形速度を併せて推定する。

$$dh(t) = k_{20}\Delta w_{20}(t) + k_{50}\Delta w_{50}(t) + a(t - t_0) + b \quad (4)$$

ここで、 k_{20} および k_{50} は、それぞれ、20m井および52m井の地下水位変化に対する比高変化の応答係数である。 $\Delta w_{20}(t)$ および $\Delta w_{50}(t)$ は20m井および52m井の地下水位変化測定値であり、ここでは、基準エポック t_0 に対する偏差を用いる。このとき、

線形速度の傾斜 a はVLBI基台の隆起速度、バイアス b は基準エポックにおける比高を意味する。VLBI基台の基礎の深さが45mであり、5m井の地下水位はノイズが大きいものの季節変動成分について20m井との相関が高いことから、パラメータとして20m井と52m井の地下水位変化を採用した。なお、52m井については、VLBI基台の基礎深(45m)よりも深い地盤まで掘削されているが、採水するストレナ位置が不明であり、それが45m以深ならば対象とする比高変化に寄与しないが、45m深付近の帯水層の水位と50m井の水位とは相関が高いと考え、入力として採用した。

2005年5月18日から2010年7月10日までの構内水準測量および地下水位データから最小二乗法で推定されたパラメータの値と標準偏差を表-2に示す。モデルによる比高変化の値(図-9の青線)は、観測値の時間変化の特徴をよく表現している。残差のRMSは0.3mmで、相対的上下変動の分散の87%がモデルによって説明される。したがって、VLBI基台と地表の季節的上下変動の機構は、浅い帯水層の水圧変化に伴う層厚変化と考えられる。

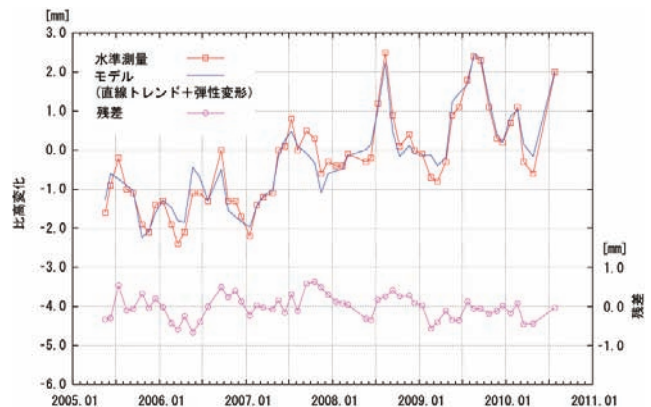


図-9 地上観測点(地盤沈下計附属標)に対するVLBI基台の比高変化。水準測量結果(赤), モデル計算値(青), および、その差(桃色)

表-2 地上観測点(地盤沈下計附属標)に対するVLBI基台の比高変化モデルの係数の推定値とその標準偏差(基準エポック:2006年1月1日)

係数	k_{20} (m/m)	k_{50} (m/m)	a (m/yr)	b (m)
推定値	-0.00160	-0.000347	0.000621	1.81082
標準偏差	0.00019	0.000032	0.000028	0.00011

3. 2 190m以深の地盤変動とそのモデル化

Munekane et al. (2010)は、各種の誤差要因を考慮して、グローバル参照基準系を基準とするGPS解析によって得られた、IGS点(TSKB)の座標解の上下成

分から地盤沈下計による表層 190mの層厚変化を差し引くことによって，190m深地盤のグローバル参照基準系における上下変動の時系列を求め，その中に190m井の地下水位変化と相関の高い季節変動成分を見出した．国土地理院構内から南東に約7 km離れた位置にある，(独)産業技術総合研究所の300m井の地下水位変化(大谷ほか，2008)と190m井との相関係数が大きい(約0.92)ことから，座標変動には地下190mよりも深い帯水層の水圧変化による層厚変化を要因とする地盤変動が含まれていることは確実と考えられる．地下水位変化に相関する成分の全てが実際の地盤変動であると仮定すると，190m井の地下水位に対し周波数応答を考慮して構築されたモデルから，その大きさは両振幅で約1 cmに達する．

4. 基準局の変動の監視手法(案)

以上の観測結果とその解釈を踏まえ，つくばの宇宙測地基準局(VLBI観測局，GPS連続観測点)の上下変動を監視する手法を提案する．表-3に監視の対象と利用可能な観測手法を整理し，それらを組み合わせた監視手法の概念図を図-10に示す．

以下の節において，個々の監視対象について，監視手法の詳細等を記載する．

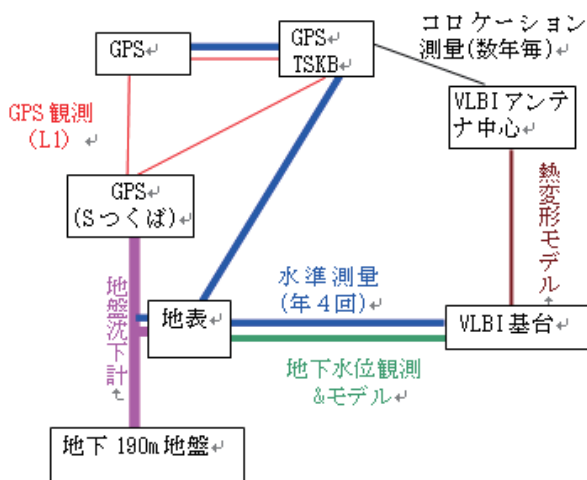


図-10 つくばにおけるVLBI，GPS観測点の変動監視手法と監視対象の概念図

4.1 表層190mの変動の監視手法

表層190m，つまり，190m深地盤に対する地表の上下変動の監視には，最も直接的かつ精密な計測値の得られる地盤沈下計を用いるのが適当である．190m井の異なる深さ6点に設置した温度計による測定に基づき，熱伝導理論から見積もられる，季節的な地温の変化による地盤沈下計内管の熱変形の大きさは，高々0.3mm程度である．また，2.1.1の議論から，計測装置の精度は1mm程度と見積もられる．

4.2 190m深地盤の安定性の監視手法

190m以深の地盤の変動については，測定の基準として用いることのできる不動点が現時点では定められないため，局所的な観測手段を用いて測定することはできない．そのため，3.2に記載したように，つくばのGPS連続観測点について，IGS観測データ等と共にグローバル解析を行って得られる，グローバル参照基準系における座標解の上下成分を用いる．このとき，地盤沈下計内管に固定されたアンテナを持つ06S061を解析対象とすることにより，地盤沈下計データによる補正を行うことなく，190m深地盤の上下変動を直接求めることができる．ただし，GPSグローバル解析の精度は，短基線戦略の精度に比べて劣り，独立な観測による季節変動振幅の校正手段がないため，見かけ上の季節変動が含まれていないことをミリメートル・レベルで検証することは困難である．このようにグローバル解析結果には不確定性があるため，190m深地盤の安定性について，グローバル解析による190m深地盤の上下座標変化は，その不確定性の目安を示すものとするのが妥当である．

現在のGEONETのルーチン解析戦略(F3戦略，最終解析)においては，固定点とするつくばの電子基準点の座標値をグローバル解析により求めている(小谷ほか，2009)．そのため，この最終解は，グローバル参照基準系と整合するものとなっている．06S061はルーチン解析の対象となっているため，190m深地盤の安定性は，GEONETのルーチン解における，06S061の鉛直座標を用いることによって監視が可能である．ただし，この解析においては，非潮汐海洋荷重や陸水の荷重による地盤変形が考慮されていない．したがって，これらの効果は別途評価することが望ましい．

なお，GEONETのルーチン解析で得られる06S061の鉛直座標解は，地表のGPS連続観測点よりも季節的上下動の小さな190m深地盤の変動を表しているため，これを，ルーチン解析における固定点座標値の推定の安定性を監視するために利用することも可能であろう．

4.3 構内GPS連続観測点間の比高変化の監視手法

構内のGPS連続観測点間の比高については，水準測量または局所的なGPS観測を用いて，高い精度で監視することが可能である．観測点間の距離が短いので，GPS観測のデータ解析には短基線戦略を用いる．GPS観測は連続観測であるため時間分解能が高いが，日ごとの解の上下成分の精度は，水準測量に比べてやや低い．長周期的なノイズの低減には効果がないが，移動平均やローパスフィルタによって，

表-3 つくばにおける VLBI, GPS 観測点の変動監視手法とその監視内容

監視対象	監視手法	頻度	精度 (上下)	備考
190m深地盤に対する地表 (GPS 点等) の変動	地盤沈下計	連続	0.3mm+1mm (内管熱変形+計測誤差)	
190m深地盤の安定性	GPS 観測	連続	?	GPS グローバル解析
構内 GPS 連続観測点間の比高変化			1.4mm (RMS, 10日平均)	短基線モードによる GPS データの解析
VLBI 基台の経年的上下変動	水準測量	年4回	RMS (mm) =0.02 \sqrt{S} (m)	
地表および 190m深地盤に対する VLBI 基台の季節的上下変動				
弾性変形モデルの妥当性	地下水位観測 (深度: 20m, 52m, 190m)	連続	0.3mm	水準測量を補完.
VLBI 基台~VLBI アンテナ中心間の比高変化	温度測定, 熱変形モデル	連続	?	アンテナの熱変形
VLBI アンテナ中心と GPS (IGS 点) のアンテナ参照点の相対位置	コロケーション観測	数年毎	1.1mm (RMS)	

短周期的なばらつきを低減させることは可能である。

構内にある電子基準点のひとつ 92110 (「つくば1」)は、構内の他の GPS 連続観測点に対して、定常的・非定常的にわずかに変動していることが知られている (Hatanaka et al., 2003)。その原因は、観測点が法面に近い盛り土の上であり、安定性がやや劣るためと考えられる。実際、図-6を詳細に見ると、「つくば1」の上下変動の時系列には、他の基準点に対して、わずかな経年的沈降が認められる。また、この電子基準点の土台は、2008年11月4日の事故により、わずかに傾斜したことが判明している。

(この傾斜に伴うデータの跳びの大きさを、構内水準測量結果から3点との比高時系列を用いて推定した結果は、-0.74mmの沈下であった。図-6の「つくば1」のプロットは、この跳びを補正してある。)このような基準局の局所的な動きは、測地基準系の性能を制約する問題点の一つであり、それを監視し、把握することは、基準系の構築・運用にとって重要である。例えば、一般に、GPS 観測局の局所的な変動は空間的な相関がないので、セミ・ダイナミック補正 (檜山ほか, 2010)における地殻変動場の内挿における誤差要因となる。また、基準局の非定常的な変動は、ITRFの構築において行われているような、線形トレンドによる変動モデルの適用にとって誤差要因となるため、線形モデルの期間を分割するなどの対応が必要となる。このような局所的な変動の監視を全ての基準点について行うのは困難であるが、つくばのように、複数の GPS 連続観測点が隣接する場合には、短距離戦略を用いた GPS 基線解析の適用による監視が可能である。

なお、地盤沈下計内管に設置された GPS アンテナによって観測が行われる 06S061 を参照局として用いることによって、他の GPS 連続観測点の 190m 深地盤に対する上下変動を、GPS 観測により直接測定することができる。その結果は、4.2に付記したグローバル解析による方法と共に、GEONET のルーチン解析で得られた固定点座標値の信頼性を監視するための手法として、利用することが可能である。

4.4 VLBI 基台の上下変動の監視手法

VLBI 基台の上下変動は、季節的変動と経年的隆起の2種類の成分に分けることができる。

地表及び190m深地盤に対する VLBI 基台の季節的上下変動については、連続的に観測される地下水位変化をパラメータとして、観測される変動をよく説明するモデルを3.1において構築した。これを、比較的頻度の少ない水準測量と補完的に組み合わせることで、より高い時間分解能で監視することが可能である。しかし、モデルは限られた期間の水準測量データに適合させて求められたものであることから、長期的に安定して適用可能な監視手法とするためには、例えば、仮に地下水利用状況の変化等に伴って変動機構の様相に変化が生じたとしても、それを検出し、観測に基づいてモデルを修正することが可能である必要がある。十分な精度でモデルを検証し、校正するために利用できるデータは、水準測量において他にない。つくばにおいては降水と水田涵養用の地下水くみ上げ状況に従ってやや複雑な上下変動を示すため、水準測量を毎月行うのが理想的であるが、最低年4回程度の頻度があれば、季節変動

の振幅を校正するために必要なピーク値と、異なる深さにおける帯水層の水圧変化を反映する、異なる深さを持つ観測井の地下水位の変化の寄与を分離するために必要となる時系列上の特徴の違いを把握することができると考えられる。

3. 1. 2において、VLBI 基台の経年的な隆起について、隆起速度が一定であるとの仮定の下に、線形トレンドとして経験的に推定した(表-2)。2005年春から2010年夏までの約5年間について、モデルの適合はよく、隆起速度を一定とする仮定は妥当であったと考えられる。しかし、隆起の機構は不明であり、今後も同じ速度で隆起し続けると仮定する十分な根拠が得られないため、モデルの妥当性を監視することが望まれる。水準測量が、現時点において十分な精度でこれを確認できる唯一の手段である。具体的には、モデルによる水準測量結果の残差(図-9の桃色のプロット)を監視し、その中に有意なトレンドや長期ドリフトが検出された場合には、モデルの見直しを検討するべきと考えられる。

4. 5 弾性変形モデルの妥当性の監視手法

表層 190mの上下動については地盤沈下計による精密な連続観測があるので、これに対してモデルを用いて監視する必要はない。弾性変形モデルを監視する意味は、むしろ、季節的上下変動の機構の変化の有無を把握することにある。

季節的上下変動の機構に変化が生じた場合には、地盤沈下計データに対するモデルによる計算値の適合の良否に変化が生じる可能性がある。モデルの残差を監視し、その中にドリフトあるいは何らかの有意なシグナルが検出された場合には、モデルの見直しを検討するべきである。

4. 6 VLBI アンテナ中心の変動の監視について

VLBI 観測によって直接求められるのは、VLBI 基台ではなく、VLBI アンテナ中心の位置であるが、VLBI 基台と VLBI アンテナ中心間の距離は、気温の変化や日照によるアンテナの熱変形によって変化している。したがって、測地基準系の精密な保持を目的として VLBI 観測結果を地上の基準点や GPS 観測点の座標値と精密に関係付けるためには、VLBI 基台に対するアンテナ中心の変動を考慮しなければならない。

本稿は、VLBI 観測局の位置変化として VLBI 基台観測局の上下動を議論の対象としているので、ここでは、VLBI アンテナ中心の上下動の監視についての議論には立ち入らない。監視手法の例として、数年に一回の頻度で行われるコロケーション観測による VLBI アンテナ中心と GPS 連続観測点のアンテナ底面

の基線測定(三浦ほか, 2009)や、VLBI アンテナの熱膨張モデル(例えば、Nothnagel, 2009)によるアンテナの熱変形の推定などの手法があることを記すにとどめる。なお、後者の場合、モデルには仮定や近似が含まれるので、モデルの妥当性を実測によって検証する必要がある。

5. まとめ

様々な観測手段を用いて、つくばの VLBI 観測点および GPS 観測点の季節的上下変動の精密計測を行い、得られた結果を分析して上下変動の様相を明らかにした。190m深地盤に対する地表の季節的上下変動は、国土地理院から少なくとも 1 km 以上の範囲では空間的に一様であるが、地下 45mに基礎をもつ VLBI 基台については、季節的変動の振幅が小さめである。また、VLBI 基台は地表および 190m地盤に対して、長期的に年間約 0.6mm 程度の速度で隆起していることが明らかとなった。VLBI 基台と地表の IGS 点の季節的変動の振幅の違いは、この2点間のコロケーション測量の結果にも影響する。そのため、コロケーション観測によって得られる取り付けベクトルの上下成分に、1 mm の精度で意味を持たせるためには、座標値を付与する基準位置の定義について、その時間変化を考慮に入れて明確化した上で、さらに、弾性的変形など基準位置において物理的過程で生じている季節的上下変化を補正する必要がある。

さらに本稿では、つくばにおける季節的上下変動の機構について、異なる深さにある帯水層内の水圧変化に伴う弾性変形として解明し、観測で得られた上下変動情報をもとに定量的な評価を行った。その結果、構内にある複数の井戸で観測されている地下水位の変化をパラメータとして上下変動を定量的に説明するモデルを構築することに成功した。また、解明された変動機構の特徴、各種観測と開発したモデルの特性を検討し、これらを組み合わせることにより VLBI 観測点および GPS 観測点の上下変動を監視する手法を取りまとめた。

謝辞

季節的上下変動の機構解明の過程において、(独)産業技術総合研究所の高橋誠氏と松本則夫氏には、同所の深井戸における地下水位観測データをいただいた。ここに感謝いたします。

参考文献

- 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.
- 檜山洋平, 森下 遊, 山尾裕美, 湯通堂亨, 越智久巳一(2010) : セミ・ダイナミック補正の導入について, 国土地理院時報, No. 120, 55-61.
- 国土地理院(2008) : 国土地理院における地下水位観測 2003 年~2007 年, 国土地理院技術資料 D・1-No. 506, 85pp.
- 国土地理院, 海上保安庁海洋情報部(2007) : 世界測地系への円滑な移行, 測地学会誌, 53, 1-12.
- 小谷京湖, 吉田賢司, 畑中雄樹, 宗包浩志(2009) : GPS 連続観測システム (GEONET) 解析固定点座標算出手法について, 国土地理院時報, 118, 17-21.
- 三浦優司, 栗原 忍, 吉田賢司, 川元智司, 小谷京湖(2009) : VLBI-GPS コロケーション測量について, 国土地理院時報, 119, 71-85.
- Munekane, H., M. Tobita, and K. Takashima(2004): Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan, Geophys. Res. Lett., Vol. 31, L12608, doi:10.1029/2004GL020158.
- Munekane, H., Y. Kuroishi, Y. Hatanaka, K. Takashima, M. Ishimoto and M. Tobit(2009) : An Ultra-deeply anchored GPS station in Tsukuba, Japan preliminary report , Bulletin of Geographical Survey Institute, 57, 11-17.
- Munekane, H., Y. Kuroishi, Y. Hatanaka, K. Takashima, and M. Ishimoto(2010): Groundwater-induced vertical movements in Tsukuba revisited: installation of a new GPS station, Earth Planets Space, Vol. 62, 711-715, doi:10.5047/eps.2010.08.001.
- Nothnagel, A. (2009) : A short Note: Conventions on thermal expansion modeling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI, J. Geod. 83:78-792, DOI 10.1007/s00190-008-0284-z.
- Plag, H.-P. and M. Pearlman (eds.) (2009) : Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer Berlin, 332pp.
- 大谷 竜, 小泉尚嗣, 高橋 誠, 松本則夫, 佐藤努, 北川有一, 板場智史(2008): 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2007 年 11 月~2008 年 4 月)(37), 地震予知連絡会報, 80, 360-368.
- 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, 27-37.