

川崎市のGPS水準測量の導入効果について



田中 穰¹ 新出 陽平¹ 相京 幸一¹ 藤井 陽一郎¹ 平野 優²

1. はじめに

高さ決定の測量として長い間水準測量が実施されてきたが、水準測量は、労力を要するもので、しかも決定すべき点の相互位置が1000km以上にも及ぶ場合には、その累積誤差は、ときに数10cmにもなって、精度の点でも問題を残してきた。一方、GPSによる高さ決定は、水準測量にくらべ労力は軽減されるものの、比較的近い距離間の高さ決定では、精度の点で、水準測量におよばないものと考えられてきた。しかしながら、地盤沈下の監視では水準測量に替わり得るものとしてGPSの応用は早くから試みられてきた[たとえばChrzanowski et al (1990)、Sharif et al (1997)、Heus (1998)]。最近数年間にGPS観測の精度はさらに一段と向上し、これを背景に米国では1997年に2~5cmの精度でのGPS楕円体高決定のマニュアルを策定し、「ジオイドモデル99」の改良もあって、地盤沈下の監視などへの応用はもちろん大陸的規模の水準測量にもGPSを導入した[Zilkoski (1999)]。

GPSによる高さ決定に、ジオイドモデルを統合して正標高を得る測量技術を「GPS/ジオイド・水準測量」という。この基本理論は、Kostakis and Sideris (1999) によって完成されている。今回、地盤沈下監視へのGPSの応用を目的としてもっと簡潔にした技法を検討することとし、川崎市において、2003年より2007年までの期間、毎年度の2~3月に市

内においてGPS観測および水準測量を繰り返し実施し、実用的な「GPS/ジオイド・水準測量」の開発を試みて来た。ようやく実用化の見通しを得たのでこの結果について報告する。

2. 簡略化されたGPS水準測量

GPS水準測量は、測量を実施する地域のジオイドが判っていることが前提である。このジオイドを求める方法としては、重力異常の積分から求める方法があり、この結果を「重力ジオイド」という。一方、正標高の分かっている水準点でGPS観測をして楕円体高を求めればジオイドがわかる。これを「GPS/水準・ジオイド」という。ところが本来一致すべきこの二つのジオイドが実は、なかなか一致しないのである。この理由は、今日では、二つの方法において準拠している基準面が実は異なるからであると考えられるようになった。これらの事情を考慮して開発された方式が現在では広く「GPS/ジオイド・水準測量」の基礎と認められている。とはいえこの「Kostakis・Siderisの理論」はなかなか数式表現も複雑で実用化にはなお問題を残している。そこで、一つの行政区のような比較的狭い範囲の地域において応用できる、簡易化された「GPS/ジオイド・水準測量」の方式の開発を試みた。以下、この簡略化された方式をGPS水準測量ということにする。

ある水準測量実施区域で正標高が分かっている点が*i*点あるとする。ジオイド高もわかっているとする。ここでGPS観測を実施すれば

¹ 株式会社日豊

² 川崎市環境局公害部

i点について次の式が成立する。

$$h_i^g = H_i^g + N_i^g + \Delta N_i^g$$

ここで

h_i^g : i点の楕円体高

H_i^g : i点の正標高

N_i^g : i点のジオイド高

ΔN_i^g : i点のジオイド高に加えるべき定誤差 (未知)

である。正標高が正しくジオイドからの高さであり、ジオイド高や楕円体高の依拠している基準面が一致しておれば ΔN_i^g はゼロであるが、一般にはそうになっていない。この理由をジオイド高の定誤差によるとした。この項は、他の項が与えられているか観測やモデルによって得られる量であるので、計算できる量である。

さらに水準測量予定区域でその正標高が分かっていない点がj点あるとする。ここでは次が成立する。

$$h_j^u = H_j^u + N_j^u + \Delta N_j^u$$

ここで

h_j^u : j点の楕円体高

H_j^u : j点の正標高 (未知)

N_j^u : j点のジオイド高

ΔN_j^u : j点のジオイド高に加えるべき定誤差である。 ΔN_i^g は水準点の位置している場所の関数と考えると、他の任意の点での値は何らかの補間法で推定できる量であって、この

結果が ΔN_j^u である。これが推定できれば他の量は観測またはモデルによって得られる量であり、未知の H_j^u が求められる。

上記の二つの未知量を同時に解く推定法としては最小二乗コロケーション (least squares collocation) がよく使われる。「Kostakis・Siderisの理論」は、地球の基準面を地球楕円体として最小二乗コロケーションにより問題の一般解を与えたものである。

これは高級な方法なので、地盤沈下の監視のような地球の基準面を平面として取り扱ってもよいような場合、もっと簡易な正標高既知点と未知点の間の距離の逆数で重みをつける重み付き平均によって未知量を得ることとする。

すなわち

$$\Delta N_j^u = \frac{\sum_i \omega_i \Delta N_i^g}{\sum_i \omega_i}$$

ここに重み ω_i は

$$\omega_i = \frac{1}{S_{ij}}$$

であり

: 2点i、j間の平面直線距離

である。iとしてはj点のまわりの数点をとる。

3. 川崎市におけるGPS水準測量

3.1 各年度におけるGPS水準測量の実施

国土地理院の電子基準点「神奈川川崎」(93026) を基点として、川崎市内の計10数点



図1 (a) 平成14年度・平成17年度川崎水準GPS観測図



図1 (b) 平成15年度川崎水準GPS観測図

において平成14、15、16、17、18年の毎年度の末に、連続GPS観測を実施して楕円体高を決定し、これに「GSIGEO2000」によるジオイド高の補正を加えて、GPS測量正標高を決定した。また通常の水準測量結果をもちいて「神奈川川崎」の正標高を起点として水準測量正標高を決定した。

図1 (a)、(b)、(c) にそれぞれ平成14、15、16、17、18年度の観測網図を示す。年度ごとに観測点の数には増減がある。GPS観測には2周波受信機であるトリンプル4000SSEを用いた。データ取得間隔は30秒、衛星最小高度角は15度、観測時間は12時間～24時間である。また年度によっては、重力測量も実施し、正標高を得るための水準測量結果への重力補正量が小さいことを確かめた。

結果解析には「商用ソフト」のGPSurvey Ver2.35を利用しているが、照査として「学術ソフト」である Bernese Ver4.2及びGamt Ver10.1を使用した。衛星軌道情報はIGS最終

精密暦を使用した。最終的な網平均を行う際には、既知点として国土地理院の電子基準点「神奈川川崎」(93026)を1点固定で使用し、また5点固定では足立・市原・秋川・横浜泉を加えた場合も計算した。2004年7月に電子基準点の標高成果の改訂があったが、比較のため今までの値を使って解析した。

GPS測量で出した楕円体高からジオイドモデルで出したジオイド高を引くことにより正標高を算出できる。ジオイドモデルとしてはGSIGEO2000を用いた。こうしてそれぞれの年度ごとにGPS測量正標高と水準測量正標高を定め、相互の比較を行った。図3には平成16年度のGPS測量正標高と水準測量正標高の差を示した。この結果によれば、GPS標高から水準標高を引いた値は、最大で+30mm最小は3mm以内、平均値は+12mmでその標準偏差は $\pm 8.6\text{mm}$ となり利用したジオイドモデルが高精度モデルであることが確認できた。差はほとんどの場合正の符号である。このような差

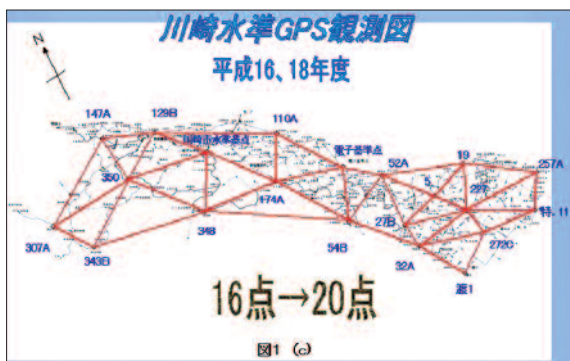


図1 (c) 平成16年・平成18年度川崎水準GPS観測図

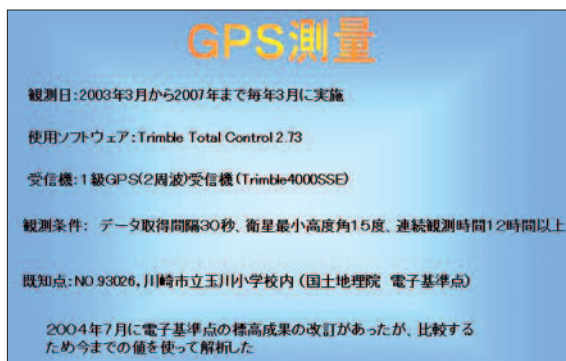


図2 GPS観測要綱

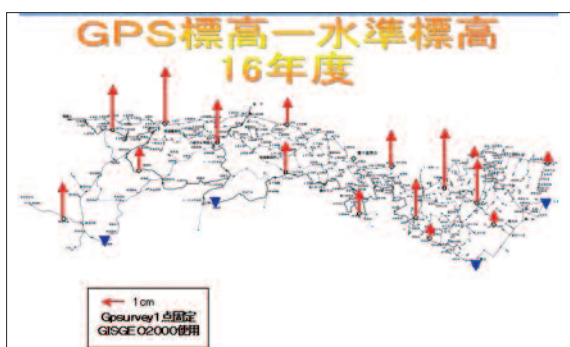


図3 GPS正標高と水準正標高 (平成16年度)

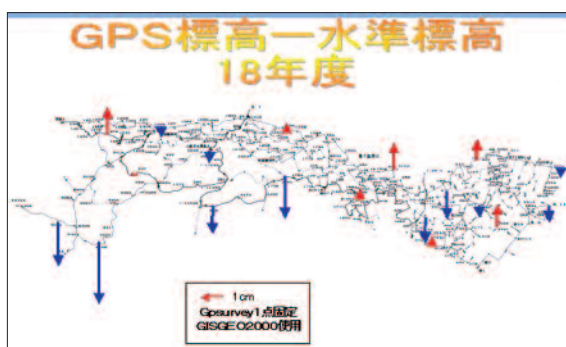


図4 GPS正標高と水準正標高 (平成18年度)

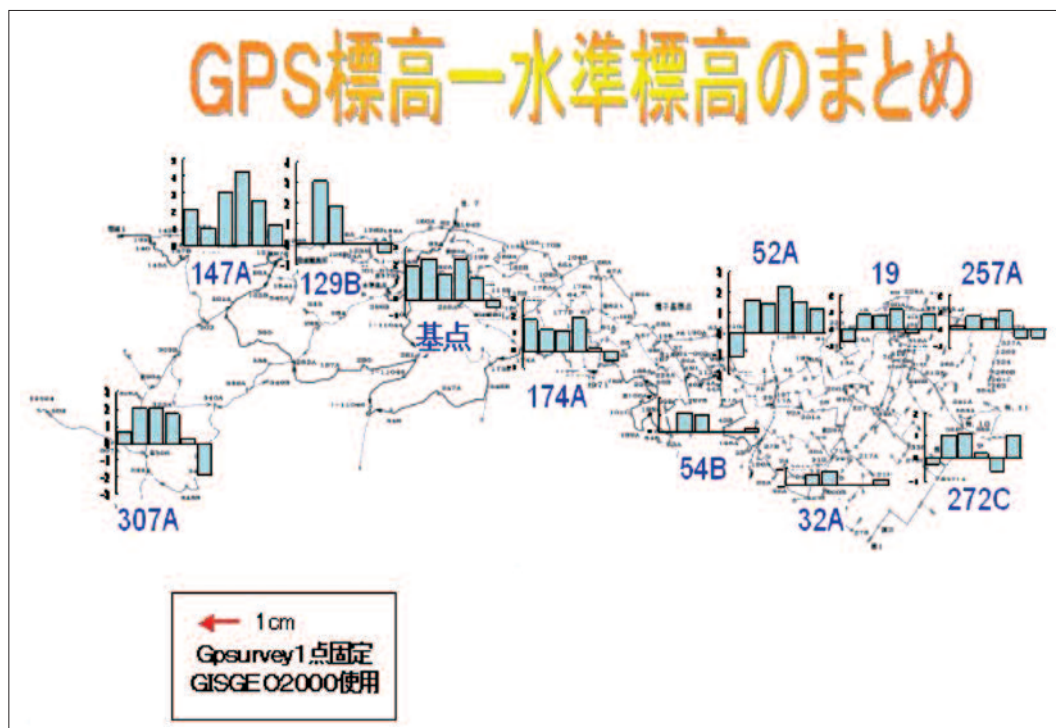


図5 各年度のGPS標高と水準正標高の差（凡例では矢印）のまとめ

は一つの高さを他の高さに変換する系統的な定数とも考えられ、これを補正面（corrector surface）というが、川崎市内のような狭い範囲ではこれは一定値であるとする+12mm程度と考えられる。すなわちGPS水準測量結果に-12mmの補正を加えれば従来の高さシステムに適合した正標高が得られる。

なお、図4は平成18年度の例であるが、図3とは逆にマイナスの数値が多くなっている。

図5は観測点ごとに利用できるすべてのデータをまとめたものである。全体としてはマイナスになっている。

楕円体高よりGPS正標高を求める場合には採用するジオイドモデルにより標高が異なる。GPS観測が依拠しているWGS-84座標系に対応する国際標準のジオイドモデルとしてはEGM96というモデルがある。川崎市内の観測点ごとにGSIGEO2000とEGM96とによるジオイド高を求めその差[GSIGEO2000-EGM96]を計算し、その結果を図6に示した。図6を見ると川崎市北西部では+0.28mであり南東

部では+0.16mである。

正標高を求める場合にはジオイドモデルによる差は川崎市内でもこの程度の違いがあることことに注意しなくてはならない。

3.2 比高差の比較

以上の議論は、GPS測量正標高と水準測量正標高ともに標高の絶対値についての議論であるが、2点間の二つの標高の差についても検討してみる。地盤変動の場合にはある仮定の不動点からの高さの差について議論するこ

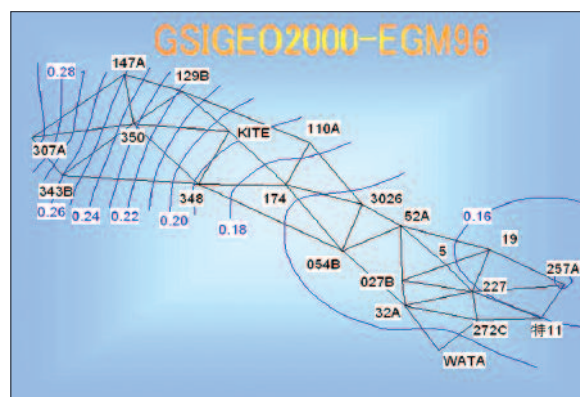


図6 GSIGEO2000とEGM96によるジオイド高の差の分布

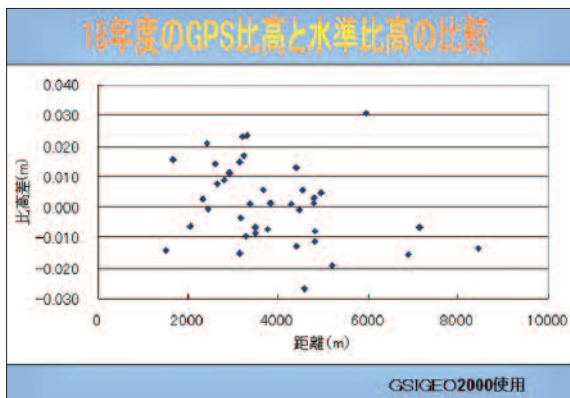


図7 平成18年度におけるGPS比高と水準比高の比較

とが多いからである。図7は、縦軸が比高差で、川崎は細長いので端と端とで比高差をとった場合もふくむが、距離を長くとることによって2級水準測量の制限値である $5\text{mm}\sqrt{S}$ (S はkm単位の距離)に入っている。水準測量で10日ほどかかるものがGPSによって2日ほどに短縮できる可能性があることが分かる。

3.3 標高の差の時間変化

全地球にわたるジオイド高の時間変化についてはArdalan and Grafarend (2001)によれば $+0.2\text{mm}/\text{年}$ とされているので、補正面の時間変化は考えなくてもよいとすると、GPS測量標高と水準測量正標高の時間変化は同じと考えてよい(図8参照)。

まず電子基準点「神奈川川崎」(93026)の動きを調べるために国外の点であるIGS点を使って解析してみた。水平成分と垂直成分ともに算出した。「神奈川川崎」は年間 1mm で沈下していることが分かった。

「神奈川川崎」を固定したとき、平成15～16年度の標高の差の時間変化は $-0.010\text{m} \sim +0.015\text{m}$ に及んでいる。平成16年度と平成17年度の標高の時間変化は $-0.012\text{m} \sim +0.018\text{m}$ に及んでいる。こうしていままでの結果では、二つの標高の差の時間変化は $1.5\text{cm}/\text{年}$ 以内で一致した。

4年間の標高変動量を地図にプロットした

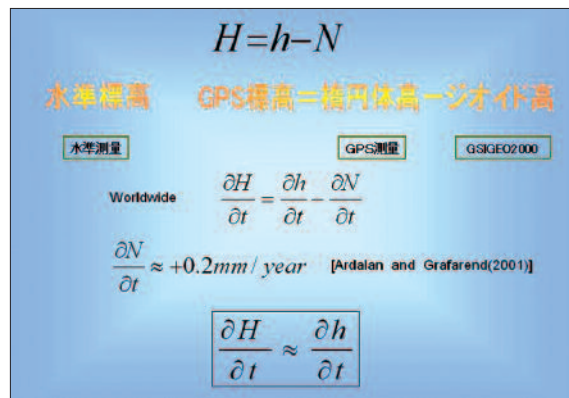


図8 GPS標高と水準正標高の時間変化の同一性

(図9)。赤系統がGPS変動量で青系統が水準変動量である。両者とも大凡の傾向はあっているが、GPSがより大きい傾向にある。

4. GPS観測による水平変動の検出

繰り返しGPS観測を実施することは高さの変化のみならず水平変動の検出も可能なはずである。IGS点を基準にして各時期の水平位置を決定しそれから各時期の変動ベクトルを算出した。図10では「神奈川川崎」を固定したときの結果を示す。点307Aは異常な動きを示しているが、これは点の故障によるものであろう。東方の東京湾によった地域での257A,272C,19などは北向きの 2cm ほどの変位を示している傾向が見られる。この地域は最も新しい埋立地であり、検出された水平変位はこのような地域では表面層の横滑りが進行していることを示すのかもしれない。

5. まとめ

今日までの結果は、地盤沈下の監視を目的とした場合には、 $\pm 1.5\text{cm}$ の精度でGPS水準測量が実用化できる可能性があることを示している。これは在来の2級水準測量の精度であり、1級水準測量の精度に接近するにはなお精度向上が必要であるが、労力の点を考えると、GPS水準測量は水準測量に替わり得る。また水平変動も検出できることがわかった。



図9 各年度の水準正標高（青色）とGPS標高（赤色）の変動量

GPS水準測量は地盤変動の監視に限らず工事測量などでも在来水準測量にかわって準用できるが、この際に水平変動も検出できるので、いろいろな場合に四次元モニタリングが可能である。

発表日：2007年6月22日

■ 謝辞

静岡大学の里村教授にはとりわけ重力測量に関しご指導を頂きました。

また、国土地理院様から提供されている電子基準点を利用させて頂きました。

感謝致します。

■ 参考文献

- 1) Chrzanowski, A., en, Y.Q.Leal, J.: Monitoring of ground subsidence from a combination of GPS and leveling surveys, Global and Regional Geodynamics (IAG Symposium No.101), 182-191, 1990.
- 2) Heus, H.M.: Subsidence monitoring with GPS in the Netherland, Proc. Current



図10 GPS観測によって検出された水平変動

Crustal Movements and Hazard reduction in East Asia and Southeast Asia, 184-195, 1998.

- 3) Kostakis, C., Sideris, M.G.: On the adjustment of combined GPS/leveling/geoid networks, Journ.Geod., 73,412-421, 1999.
- 4) Sharif, A., Majid Kadir, K.O.: Modelling of land subsidence induced by ground water withdraw using GPS, Proc. ION-97, 1207-1214, 1997.
- 5) Zilkoski, D. B.: NGS GPS height modernization activities, ION GPS, 99, 943-953, 1999.