

平成 27 年 11 月 10 日
日本測量者連盟
第 5 分科会委員長
宮原 伐折羅

「実用的な高さ基準座標系に関する技術セミナー」参加報告

本セミナーは、測地基準座標系の構築と維持に関する実務者の人材育成・能力開発を目的に、国際測量者連盟 (FIG)、国連地球規模の地理空間情報管理に関するアジア太平洋地域委員会 (UN-GGIM-AP)、国際測地学協会 (IAG)、衛星航法システムに関する国際委員会 (ICG) が共同開催する技術セミナーである。2012 年から継続して開催されており、報告者は、講師としてフィリピンに続き、2 回目の参加を行った。第 3 回目の今回は、高さ基準座標系に焦点を絞り、基礎理論から、航空重力測定を用いたジオイド・モデル作成、地殻変動の高さ基準系への組み入れといった先進国の先端事例まで、幅広く講演が行われた。日本からは、日本の高さ基準系の現状と電子基準点網を活用した効率的な高さ基準系の維持管理、日本のジオイド・モデルを紹介することで日本の取組みへの理解を促進するとともに、日本の高さ基準系のあり方を検討するにあたって有益となる、国際連携の動向、豪州、ニュージーランド等の先進的な取組みに関する情報収集を行った。

1. 開催概要

日時：平成 27 年 7 月 26 日 (月) ～7 月 27 日 (火)

場所：シンガポール共和国

主催：FIG、UN-GGIM-AP、IAG、ICG、シンガポール土地管理局 (SLA)

参加者：日本、オーストラリア、ニュージーランド、シンガポール、フィリピン、インドネシア、ナイジェリアなどから 30 人程度

2. 日本の発表

発表名：日本の高さ基準座標系の現状と課題

発表者：第 5 分科会委員長 (国土地理院測地部物理測地課長) 宮原伐折羅

内容：水準測量の繰り返しを平均計算することで実現してきた日本の高さ基準座標系の現状を紹介するとともに、地震等に伴う高さの変動は今後も水準測量で改定すること、その改定は電子基準点網と干渉 SAR (ALOS-2) を活用して効率的に行うこと、さらに、電子基準点網を用いて高さの時間変化を把握することで高精度な高さ基準座標系を効率的に実現する新たな試み、高精度なジ

オイド・モデルの標高決定への活用について紹介し、日本の高さ基準系の現状と課題への取組みに対する理解を促進した。

3. 他機関の発表

○ 高さ基準系の定義、高さの時間変動、高さ系の統一

(オーストラリア ニューサウスウェールズ大学 : Chris Rizos 教授 前 IAG 会長)

高さの定義と基準（標高ゼロ）、基準面（ジオイド面）の定義について、その選択肢と実例をあわせて講義があった。潮汐等による高さの時間変動とその補正、さらにジオイド・モデルの概念と作成の流れ、高さ基準系の統一の取組みに関する現状と展望についても講義された。現在の高さは、国によって正規高、正規正標高、正標高と異なるが、GNSS が普及した現在ではジオイド面を基準として重力ポテンシャルで表現することによって混乱なく扱うことが可能であることが述べられた。高さ基準系の統一は、同じ基準を全ての国が用いるのではなく、それぞれの国が用いている基準を集約して最適な地球規模の基準を作成し、その基準と各国の基準との関係を明確にすることで行う、という考えが示された。

○ 香港の高さ基準系の近代化（香港土地局 : Simon CW Kwok）

香港の実施した高さ基準系の近代化について紹介があり、水準点の高さの再計算および重力観測に基づくジオイド・モデルの作成が報告された。1092 点の水準点に対して内部整合性に基づいて残差が収束するまで繰り返し平均計算を実施し、457 点については、他の 635 点と整合性が悪いことから、網全体と整合するように標高値を改訂して新たな高さ基準系 Vertical Control Network 2013 を構築した。101 点の GNSS/水準のデータとシントレックス 相対重力計 CG-5 による重力観測を用いて 2km 解像度のジオイド・モデルを構築した。

○ シンガポールにおける GNSS 標高決定と利活用（シンガポール土地管理局 : Victor Khoo）

シンガポールの高さ基準系は、過去の水準測量のデータを用いて 1994 年に実施した再平均計算で実現されている。ジオイド・モデル Sgeoid09 は、2004～2009 年に実施した 450 点のジオイド測量のデータで構築された。三次元座標は、GNSS の連続観測網 SiReNT で実現されており、2015 年には 8 点の観測点が追加され、リアルタイムでデータが配信されている。GNSS による測位結果から標高を求めるオンラインサービスを実施しており、測量事業以外の利用者も SiReNT とオンラインサービスから標高を求めることが出来る。

○ 地殻変動の高さ基準系への組み込み（ニュージーランド土地情報局 : Nic Donnelly）

ニュージーランドの高さ基準系に地殻変動による基準系の時間変化をどのように組み込むか、取組みの報告があった。セミダイナミック測地系で実現した高さ基準系に地震で生じた

地殻変動を反映する場合に、地殻変動を基準エポックに遡って改定（リバース）するか、セミダイナミックの速度モデルに地殻変動を追加（フォワード）するか、二つの選択肢を検討している。クライストチャーチの地震の地殻変動データを用いて、この二つの手法で地震前後の測定のデータを解析したところ、地震後では残差はほぼ同じであったが、地震以前のデータをリバースの手法で解析すると残差が大きくなることが報告された。

○ 高さ基準系のための航空重力（ニュージーランド土地情報局（LINZ）：Nic Donnelly）

ニュージーランドが行った NZ 全土を網羅する航空重力測定とその結果から得られた NZ 全域の重力異常について報告された。航空重力測定は、重力衛星、地上・海上重力測定と比較すると、中波長（10～20km）の空間解像度を把握できる、沿岸域のデータを取得できる、測定に要する期間が短く観測データに地殻変動等による重力の時間変化を含みにくい、観測点に機器設置が不要、というメリットがあるため、高精度なジオイド・モデルを作成する際に必須となる、全国を網羅した高解像度の重力異常データを作成するにあたって大きな精度向上が期待できる。測定は、航空機のトータルの垂直加速度に対して行い、GPS を用いて航空機の動きを正確に把握して動きに伴って生じた加速度を測定値から分離することによって、有意な重力値を得る。航空機の位置と速度は、DGPS/PPP を用いて正確に求め、垂直加速度の分離を行う。測定に用いた重力計は、 10^{-9} の感度を持つバネ式の相対重力計（Micro-g LaCoste 社製 Air-Sea II 重力計）で、海上重力観測に用いていたものを航空機に搭載した。搭載機器は、GPS 機器一組で姿勢計測（IMU）は行っていない。試験観測では、3,400 フィートの高度で 12×50 km の 10km 間隔の測線でフライトを行い、可能な限り低い高度、低速度で飛行することによって品質のよいデータが得られることが確認された。NZ 全域を網羅する重力データを国内 4ヶ所の飛行場を基地にして取得した。また、地上に、航空機の測線と対応する 30km、50km の測線を設け、測線に沿って同時に地上で重力観測（および水準・GNSS 測定）を行ってキャリブレーションすることにより、地上観測との整合性を向上した。同一測線で飛行高度が変わると重力値が変動するため、測線内では同じ高さを保つ必要があることから、山間部では最も高い場所にあわせて高く飛行し、平野部では可能な限り低く飛行した。基準面上の重力異常を求める必要があるため、観測データは、一度 5000m の高さに化成した後、標高差による重力値の変化を補正（下方接続）することで基準面における重力異常を求めた。データは短波長の成分に大きな誤差を含むため、そのままでは有意な重力異常を得ることが出来ないことから、下方接続の際に 20km の空間フィルターをかけることで誤差を軽減した。今回作成した重力異常と全球モデル EGM2008 との比較では、航空重力測定の結果から得た重力異常は、長波長の重力異常を整合的に再現しており、ニュージーランドに特徴的な既知の詳細な重力異常もおおむね再現していることが確認された。この重力異常データを用いて、2016 年にはニュージーランドのジオイド・モデルを作成する予定である。

○ ニュージーランドの高さ基準系（ニュージーランド土地情報局（LINZ）：Graeme Blick）

ニュージーランドの高さ基準系の現状と高度化の取組みについて報告があった。NZの高さ基準系は、13のパッチに分かれた地域毎に水準測量によって実現された正規正標高で、地域毎にその地域の験潮場の平均海面に結びついている。NZのジオイド・モデル NZGeoid2009は、EGM2008とDNSC08（海面高度計による海上重力異常）を基盤に、150万点の陸上・海上重力データから作成されており、NZの高さ基準系 NZVD2009はこのモデルを基準に定義されている。13の地域の高さ系とNZVD2009は完全には整合せず、ずれ（オフセット）があり、このオフセットを与えることで整合させているが、現在のところ、オフセットの精度（ばらつき）は8cmである。高さの情報をより高度に活用するためには、精度の向上が必要であることから3cmを目標にモデルの改善に取り組んでいる。ジオイド・モデルの改良は、航空重力測定データを組み込むことで実施する。測定は、企業（GNS Science）、大学（Victoria University of Wellington）、政府（LINZ）の三者が協定を結んで実施した。企業は重力計を含む機器の調達・開発を行い、大学は観測データを処理して重力異常の計算を、政府は観測を運用する予算とジオイド・モデルの作成を分担した。2014年に観測が完了し、2015年はデータの処理を行って精度を評価したうえで、2016年に新たなジオイド・モデルを作成する予定である。観測に用いた重力計は、L&R Air-Sea II 重力計、航空機は、Piper Cheiftainで、航空機は借り上げて運用した。総飛行距離は、50,000km、120回の飛行を10km幅で425時間かけて実施した。観測は、2013年8～10月、2014年2～6月の二回に分けて国内4ヶ所の基地から行った。観測ブロック間は150km間隔の20本の共通測線で結合し、地上との整合性は、二つのキャリブレーション測線で調整した。飛行高度は、3,500～13,500フィートで、高度の増加による観測精度の有意な低下は認められなかった。データ品質に重要なのは、安定した観測の条件で、擾乱の少ない観測日に可能な限り低速でまっすぐ飛行することが望ましい。航空重力から作成した重力異常の精度は評価中であるが、13の地域に対するオフセットを3cmの精度で求めるために必要な精度を満たすと考えている。

○ オーストラリアの高さ基準系（Geoscience Australia：John Dawson）

オーストラリアの高さ基準系の現状と展望について報告があった。オーストラリアの高さ系は、97,230kmの往復水準測量を用いて、30の験潮場を基準として正規正標高で実現している。この高さ系は、EGM2008を基盤に140万点の地上重力データとDNSC2000（海面高度計による海上重力異常）を用いて作成したオーストラリアの重力ジオイド・モデルに対して南北に1mの傾斜、局所的に50cmに達する歪があるため、オーストラリアのジオイド・モデル AUSGeoid09は、この重力ジオイド・モデルに30点の験潮場の平均海面と6871点のGNSS/水準のジオイド高を用いて最小自乗コロケーション法で計算したオフセットを加えることで作成した。モデルの残差は、95%の信頼区間で絶対不確かさは±6cm、相対精度は12mm/√kmで

ある。今後の高さ基準系の展望としては、水準測量で実現、ジオイド・モデルで実現、両者を複合して実現、という選択肢がある。水準測量は、長距離で系統誤差が大きい、離島に結合できない、費用が大きい、という課題がある。一方、ジオイド・モデルは、地上施設が不要、地域・地球規模の基準と整合する、という利点があるが、重力データが必要、海岸・山間部で精度が低い、という課題がある。水準測量・ジオイドの混合は、水準測量が必要という課題はあるが、精度と費用において最もバランスが良い。ジオイド面を標高の基準とすることで、験潮場を標高の基準とした際に生じる、海面変動で長期的に標高の基準が変化するという問題も回避できる。オーストラリアでは、高さの時間変化の監視に干渉 SAR も用いており、Perth で地盤沈下を監視しているほか、TerraSAR-X の画像を用いて Surat 堆積盆地の地下水くみ上げによる地盤沈降を監視している。40 点の 1.5m、2.5m のコーナーリフレクターを設置するとともに GNSS と干渉 SAR を統合する技術の試験を実施している。

○ 国連における ICG の活動（ICG 事務局：Sharafat Gadimova）

ICG の経緯と現在の活動について報告がなされた。ICG は、測位衛星の提供国と今後提供国になりうる国からなる組織で、現在 9 カ国と EU から構成される。現在の活動計画では、互換性と相互運用性、GNSS 性能の強化と能力開発、基準座標系・時刻・利活用の三つが大きな柱で、それぞれ作業部会が設置されている。IAG、FIG とは座標基準系の取組みで協力を行っている。これらの柱にそってブックレットの作成、実証実験など具体的に様々な活動を実施し、地域に対しては、GNSS の利活用に関する地域ワークショップを開催する予定である。

4. その他

FIG 第 5 分科会の WG5.2 「三次元基準座標系」の座長 LINZ の Nic Donnelly から、次年度の技術セミナーは、NZ で開催される FIG ワーキングウィーク 2016 に合わせて、地域の測地基準座標系と基準系の統合をテーマに行うと報告された。巨大地震を経験したクライストチャーチで開催されることから、次回のセミナーでも、巨大地震からの測地基準系の復興など、引き続き日本の知見を報告することで貢献してほしいと要請があった。

5. 所感

セミナーでの発表、その間の議論から、高さ基準系に関する課題が、科学者だけでなく、行政、測量従事者をはじめ広く共有されていることを感じた。水準測量は費用が大きいこと、ジオイドを基準とする GNSS 標高決定は効率が非常によいことから、参加国のほとんどが高精度なジオイド・モデルの構築を実施、もしくは検討している。ニュージーランドの事例から航空重力測定は、地殻変動が大きく、周囲を海に囲まれた日本においてジオイド・モデルの高精度化を行うために非常に効果的であると感じた。この事例では、航空重力測定によって

短い観測期間、費用で解像度の高い精度のよい重力異常が得られている。我が国でも航空重力測定とそれに基づく高精度なジオイド・モデルの実現可能性の検討が有益と思われる。



会場 (Marina Bay Sands)



報告者 (宮原第5分科会委員長) の発表



Chris Rizos 前 IAG 会長の発表



Nic Donnelly WG5.3 座長の発表



集合写真