

モンゴル国における絶対重力測定 Absolute Gravity Measurements in Mongolia

測地部 小柳拓真・小川拓真・平岡喜文・菅原安宏
Geodetic Department KOYANAGI Takuma, OGAWA Takuma, HIRAOKA Yoshifumi
and SUGAWARA Yasuhiro

要 旨

国土地理院は、モンゴル国土地行政管理・測地・地図庁と締結した協力覚書に基づき、2024 年 8 月～9 月にかけてモンゴル国内の 3 都市で絶対重力測定を実施した。測定には、国際標準との整合性を確認した当院所有の絶対重力計 FG5 (#203) を使用した。同庁によれば、モンゴル国の重力基準網は、1980 年代に当時のソヴィエト社会主義共和国連邦が実施した重力測定の結果に基づき構築されている。しかしながら、当時の測定や解析に関するレポートは一切残されておらず、これまで重力値の信頼性を確認することができなかった。今回得られた新しい重力値は、3 都市とも旧重力値と比べて 0.05 mGal 程度小さい結果となった。国際標準と整合した重力値が得られたことで、モンゴル国において信頼性のある重力基準網を構築することが可能となった。

1. はじめに

絶対重力測定とは、ある地点における重力加速度（以下「重力値」という。）を直接求める方法である。現在、世界で広く使用されている米国 Micro-g LaCoste 社製の絶対重力計 FG5（以下「FG5」という。）は、真空を保った落下槽内において自由落下コーナークューブ（以下「落体」という。）を落下させ、その落下距離をレーザで、落下に要した時間を原子時計でそれぞれ精密に計測することによって、数 μGal の精度で重力値を求めることができる。

国際測地学協会（IAG）が 2015 年に採択した決議では、それまで用いられてきた国際重力基準網 71（以下「JGSN71」という。）に代わり、絶対重力計の国際比較に基づいた国際重力基準網を構築することが採択された（IAG, 2015）。したがって、国際標準と整合した重力基準網を構築する際は、トレーサビリティが確保された絶対重力計を使用して測定を行うことが極めて重要である。

現在最も信頼性が高く国際的に認められた重力測

定のトレーサビリティは、国際度量衡委員会及び国際測地学協会が協力して定期的に開催される絶対重力計の国際比較観測に基づいている。国土地理院では、国際比較観測に参加している産業技術総合研究所計量標準総合センター所有の FG5 (#213) と国内比較観測を実施することで、当院の所有する FG5 が国際標準と整合していることを毎年確認している（山本ほか、2018）。

モンゴル国土地行政管理・測地・地図庁（以下「GALAGaC」という。）によれば、モンゴル国では、1980 年代に当時のソヴィエト社会主義共和国連邦（以下「ソ連」という。）により重力測定が行われ、これらの結果に基づき一等、二等重力基準網が構築されている。しかしながら、当時の重力測定に関するレポートは一切残されていないため、使用した器械、測定方法及び解析方法はいずれも不明である。したがって、これまでモンゴル国で測定された重力値の信頼性を確かめることができず、国際標準と整合した重力値が求められていた。

以上の背景から、2024 年、国土地理院及び GALAGaC は、モンゴル国における絶対重力測定のための協力覚書を締結した。国土地理院は同年 8 月～9 月にかけて職員 2 名を同国に派遣し、当院所有の FG5 で絶対重力測定を実施した。

2. 測定及び計算の手法

2.1 重力点

ソ連が重力測定を行った重力点 3 点において、絶対重力測定を実施した。ソ連による測定以降、重力点は移転しておらず、当時と全く同じ場所で測定することができた。各重力点の諸元情報は表-1、概略位置は図-1 のとおりである。3 点とも建物の地下に設置されていたため、1 日を通じて室温が 20℃～24℃で安定しており、FG5 の稼働に適した環境だった。

表-1 重力点の諸元情報

都市名	点番号	重力点の種別	緯度（北緯）	経度（東経）	標高（m）
ウランバートル	0001	重力原点	47° 55' 27"	106° 56' 12"	1317
チョイバルサン	0033	一等基準重力点	48° 4' 32"	114° 31' 57"	743
ダランザドガド	0017	一等基準重力点	43° 34' 25"	104° 25' 38"	1465



図-1 重力点が位置する各都市の概略位置図。外務省ホームページ
(<https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/mongolia/index.html>) より引用した地図に加筆。



写真-1 ウランバートルの重力点での測定の様子



写真-3 ダランザドガドの重力点での測定の様子



写真-2 チョイバルサン重力点での測定の様子

2.2 絶対重力測定

絶対重力測定には、国土地理院所有の FG5 (#203) を使用した。落体の落下間隔は 15 秒とし、落下 160 回を 1 セットとして 40 分間の連続測定を行った。1 セット終了後は測定を 20 分間停止して次のセットを開始するようにした。電源供給にあたっては、停電や過電流による機器の故障や測定値への影響を避けるため、整流器及び無停電電源装置を介するとともに、接地（アース）を確保した。

重力値の補正にあたっては、時間変動成分と潮汐力の永年成分は除去するが固体地球の永年変形は保存する zero tide 系を採用した。初めに、ソフトウェア g9.0 (Micro-g LaCoste, Inc., 2012) を用いて測定値から固体地球潮汐、気圧及び地球の極運動による変動を除去した。続いて、海洋潮汐荷重の効果を推定するソフトウェア GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001)

を用いて海洋潮汐による変動を除去した。補正に使用したモデル及び式は表-2 のとおりである。

測定値の平均処理では、セット内、セット間それぞれの値のばらつきを指標として、外れ値の判定を行った。これは、重力点の環境等に起因するノイズを除去するためである。初めに、セット内平均値に対して標準偏差の3倍以上外れた測定値を外れ値として除去した。続いて、分散分析により、統計的に有意でないセットを除去した。採用された各セットの平均重力値に対し、採用測定数で重み付けした平均値を重力値の最確値とした。

最後に、絶対重力測定で直接測定される重力値は、重力点直上約 1.3 m の地点における重力値であるため、重力鉛直勾配の測定値を用いて、重力点標識上面の値に重力値を化成した。重力鉛直勾配の測定は、2.3 節のとおり行った。

なお、重力値の算出方法は日本重力基準網 2016 (JGSN2016) と同一であるため、詳細は吉田ほか (2018) を参照されたい。

表-2 重力値の補正方法

補正項目	補正方法
固体地球潮汐	ETGTAB (Wenzel, 1996) 永久潮汐の δ ファクターは 1.0
海洋潮汐	GOTIC2 のグローバルモデル
標準大気圧	国際重力局 (BGI : International Gravimetric Bureau) の勧告式 (IGC-WG II, 1988)
極運動	国際地球回転・基準系事業 (IERS : International Earth Rotation and Reference System Service) Bulletin B (Petit and Luzum, 2011)

2.3 重力鉛直勾配の測定

相対重力計 2 台を使用して、重力点上で高さが異なる 2 点 (0.00 m 及び 1.20 m) 間の重力差を測定し、重力鉛直勾配を算出した。使用した相対重力計は、カナダ Scintrex 社 (現 Micro-g LaCoste 社) 製の相対重力計 CG5 である。15 秒間の連続測定 60 回を 1 セットとし、上下の相対重力計を 4 回入れ替えて合計 5 セットの測定を行った。

重力鉛直勾配の補正計算では、ETGTAB による固

体地球潮汐補正、GOTIC2 による海洋潮汐補正、器械高補正に加えて、ドリフト (測定中の時間変化に伴うスプリングの伸び) 補正を行った。ドリフト速度については、潮汐及び器械高の補正を行った後の重力値の時間変化から、線形的に推定した。器械ごとに算出された重力鉛直勾配に対し、測定値の分散の逆数で重み付けした平均値を重力鉛直勾配の最確値とした。

3. 結果及びまとめ

各重力点における測定結果を表-3 に、ソ連が求めた旧重力値との比較結果を表-4 に示す。今回得られた重力値は、3 点とも旧重力値に比べて 0.050 mGal 程度小さい結果となった。

重力値には、測定方法や解析方法等、重力基準網自体が持つ系統的な誤差が含まれていることがある。例えば、日本では、2017 年に重力基準網を更新した際、重力値が全国平均で 0.040 mGal 減少する傾向が見られた (吉田ほか, 2018)。更新前の重力基準網 (日本重力基準網 75) は IGSN71 に準拠していたため、この重力値の減少傾向は IGSN71 が持つ系統的な誤差に起因すると考えられる。

モンゴル国の重力値についてはレポートが残されていないため、重力値が一様に減少した理由は定かではないが、旧重力値には系統的な誤差が含まれていた可能性がある。

また、累積平均重力値とその標準偏差の時間推移をそれぞれ図-2 及び図-3 に示す。累積平均重力値は、3 地点とも測定終了までに 0.001 mGal の範囲内で十分に収束している。なお、ウランバートルでは、27 セット目の測定後に機器トラブルが発生した。その時点で十分信頼できる重力値が得られたため、機器の復旧にかかる時間や移動スケジュール等を勘案し、ウランバートルでの測定を終了とした。実際、ウランバートルの測定では、最初の数セットで標準偏差が 0.004 mGal 程度に落ち着き、その後ほとんど変化していないことから、重力点における振動ノイズ等が極めて小さかったと考えられる。

今回の測定によって、国際標準と整合した重力値を得ることができたため、モンゴル国において信頼性のある重力基準網を構築することが可能となった。

(公開日 : 令和 7 年 3 月 17 日)

表-3 絶対重力測定の結果

都市名	測定期間	測定 セット数	有効 測定数	重力値 (mGal)	1 落下当たりの 標準偏差 (mGal)	重力鉛直勾配 (mGal/m)
ウランバートル	2024-08-23～ 2024-08-25	27	2497	980,430.565	0.004	-0.2837
チョイバルサン	2024-08-31～ 2024-09-03	65	7894	980,646.265	0.009	-0.2874
ダランザドガド	2024-09-06～ 2024-09-11	117	11534	980,010.830	0.004	-0.2921

表-4 新旧重力値の比較

都市名	重力値 (mGal)		新重力値－旧重力値 (mGal)
	新重力値	旧重力値	
ウランバートル	980,430.565	980,430.623	-0.058
チョイバルサン	980,646.265	980,646.31	-0.04
ダランザドガド	980,010.830	980,010.88	-0.05

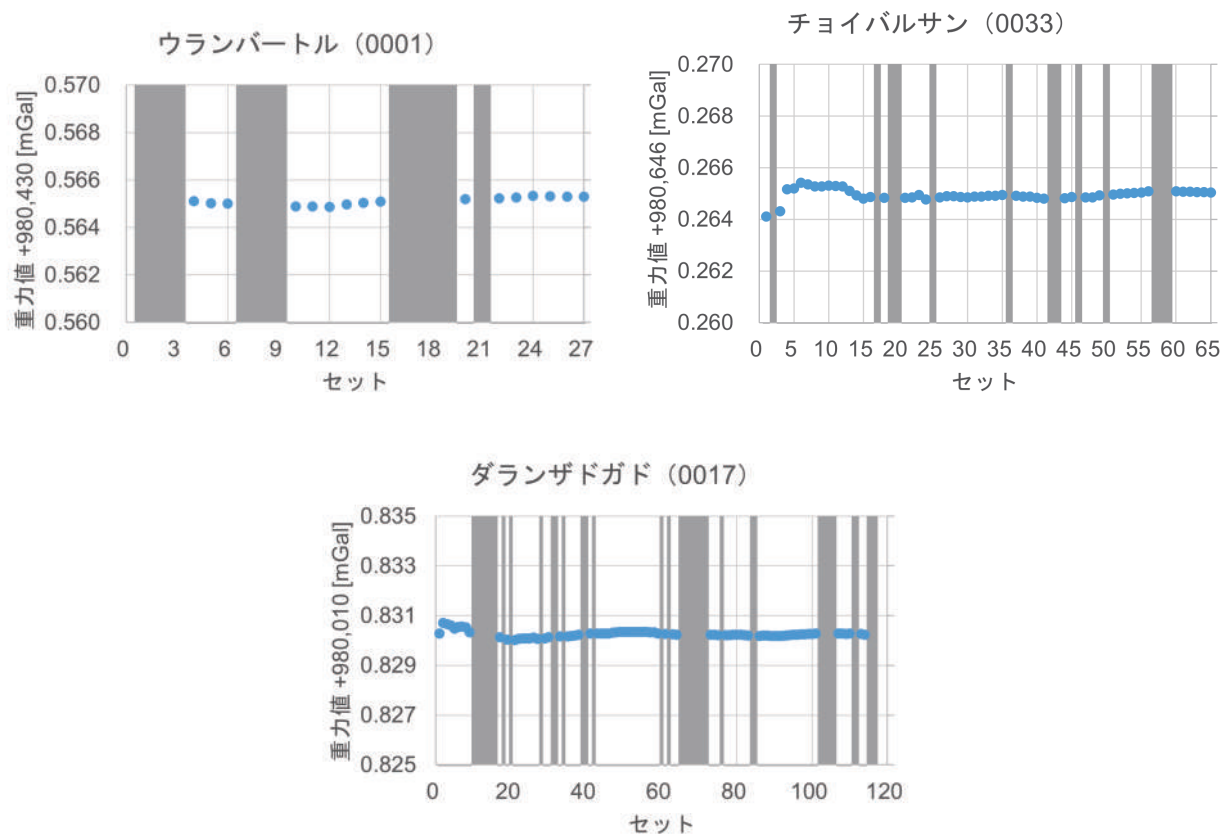


図-2 累積平均重力値の時間推移. 網掛けは、分散分析により計算から除外したセットを示す.

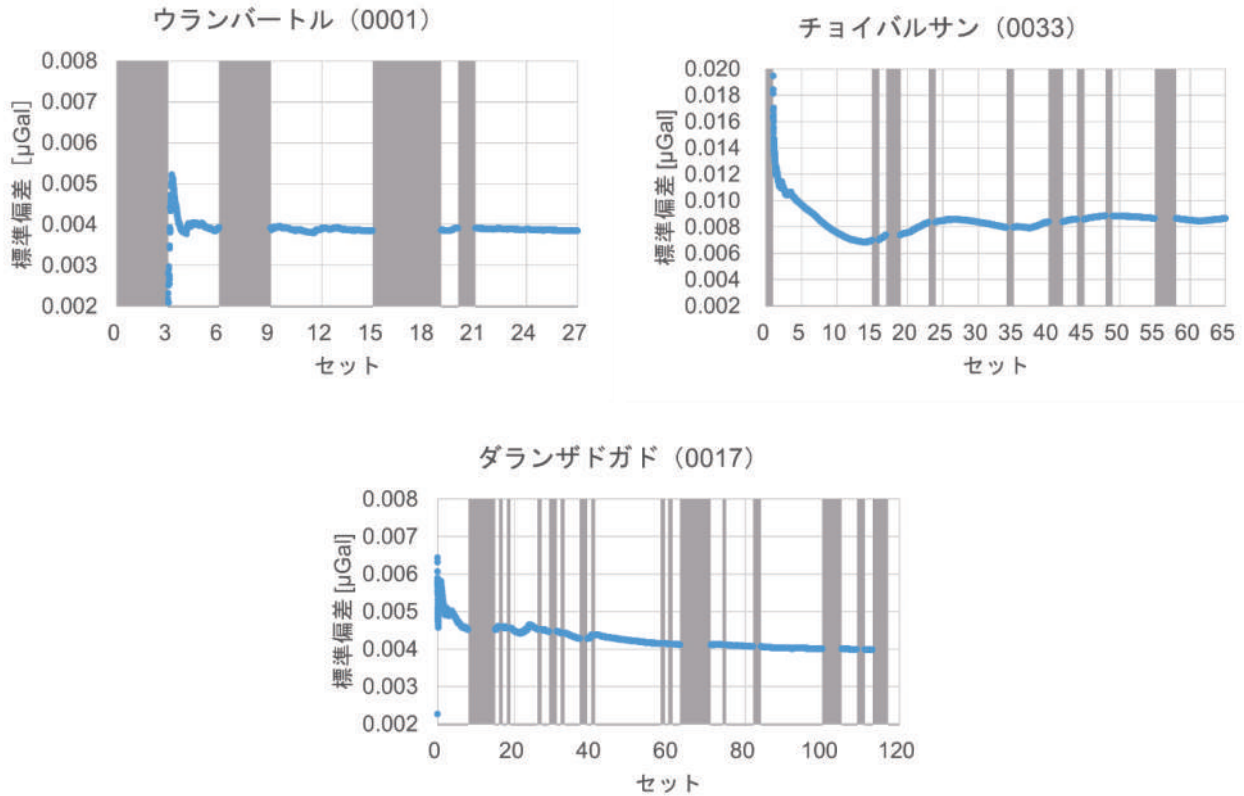


図-3 累積平均重力値の標準偏差の時間推移。網掛けは、分散分析により計算から除外したセットを示す。

参考文献

- International Association for Geodesy (2015): IAG Resolution (No.2) for the establishment of a global absolute gravity reference system, <https://office.iag-aig.org/doc/5d7b8fd9d31dc.pdf> (accessed December 23, 2024) .
- International Gravity Commission-Working Group II (1988): IAGBN Absolute Gravity Observation Data Processing Standards and Station Documentation, Bull. d'Inform. BGI, 63, 51–57.
- 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, Journal of Oceanography, 56, 567–581. doi: 10.1023/A:1011157212596
- Micro-g LaCoste, Inc. (2012): g9 User's Manual, <https://microglacoste.com/download/g9-users-manual/g9Help.pdf> (accessed January 21, 2024) .
- Petit, G. and B. J. Luzum (eds.) (2011), IERS Conventions (2010): IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 179.
- Wenzel, H. G. (1996): The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30, Bulletin d'Informations Mareés Terrestres, 124, 9425–9439.
- 吉田賢司, 矢萩智裕, 平岡喜文, 宮原伐折羅, 山本宏章 (2018) : 日本重力基準網 2016 (JGSN2016) の構築, 国土地理院時報, 131, 53–93. doi: 10.57499/JOURNAL_131_03
- 山本宏章, 宮原伐折羅, 吉田賢司, 菅原安宏 (2018) : 国土地理院の重力測量, 国土地理院時報, 131, 21–52. doi: 10.57499/JOURNAL_131_02