

AQG 等による新たな基本重力測量及び重力基準に関する調査・検討

実施期間 令和5年度～令和7年度
測地部物理測地課 山本 康生 小柳 拓真
瀧 修一 平岡 喜文

1. はじめに

当院では、2020年にフランス Exail 社製の量子型絶対重力計 AQG (Absolute Quantum Gravimeter) (以下「AQG」という.) を調達し、基本重力測量への導入に向けての検証を実施している。AQG は米国 Micro-g LaCoste 社製の絶対重力計 FG5 (以下「FG5」という.) と同様に、落体を自由落下させることで重力加速度を観測する装置であるが、FG5 では落体としてコーナークューブプリズムを使用した光干渉技術を利用しているのに対し、AQG では落体として $2\text{ }\mu\text{K}$ 以下まで冷却したルビジウム原子を使用した原子干渉技術を利用しているという違いがある。これにより、AQG は、FG5 と異なり機械的に駆動する構造をほとんど持たず、摩耗する金属部品等が少ないことから長期間の連続観測が可能とされている。また、AQG は観測前の調整をソフトウェアでほぼ自動で実施するため、機器の操作という観点では観測者の熟練を必要としないとされている。

これらの利点を持つ AQG を基本重力測量へ導入するため、FG5 との器差の確認、連続観測の安定性、重力値の再現性、設置方向による重力値の変化等の検証を実施してきた。所有する AQG の器械番号 B11 (以下「AQG#B11」という.) は、2025年にフランス Exail 社にて、内部コンピュータの交換及びソフトウェアのアップデートを実施した。今回はこの AQG の内部機器更新作業による重力値への影響を調査したので、その結果を報告する。また、これまでに得られた知見と合わせて、基本重力測量への導入を検討したので、併せて報告する。

2. 使用した重力データ

今回の調査では AQG#B11 のほか、FG5 器械番号 201 (以下「FG5#201」という.) を加えた2台の重力データを使用した。重力データはいずれも石岡測地観測局重力測定室 (以下「石岡」という.) にて取得している。また、石岡には基準重力点「石岡」 (以下「石岡 FGS」という.) のほかに点 A～E の五つの測点が設置されている。重力値は測点の場所により異なることから、2台の重力計の重力値を比較するには、同一測点で比較しなければならない。また、重力値は地殻変動等により時間変化することから、2台の重力値は同一時期に取得することが望ましい。本調査では重力データの中から、異なる測点に設置して観測した2台の観測時期が近いペアを選び、これまでの調査で得られた測点間の重力差を使用して石岡 FGS の重力値に化成して比較することにした。本調査に使用した重力データを表-1 に示す。

表-1 本調査に使用した重力データ

重力計	AQG#B11		FG5#201	
観測開始日	2023-06-06	2026-02-04	2023-06-15	2026-01-16
観測期間	10 日間	15 日間	6 日間	6 日間
測点名	D 点	D 点	B 点	石岡 FGS

AQG はコリオリの力により、センサーヘッドの設置向きに従って重力値が変化することが確認されている（山本ほか，2025）。今回使用した AQG#B11 の重力値は，Exail 社が推奨する向きにセンサーヘッドを設置して観測されている。

3. 重力値の計算方法

重力値の計算では，両重力計とも，表-2 に示すソフトウェアや情報を使用して補正処理を施した。

また，AQG#B11 の重力値は，次のとおり算出した。まず，0.5 秒間隔で取得した重力値の 10 分間分の平均値をセット値として，観測期間全体のセット間平均値を求めた。次に，セット間平均値からの偏差がセット値の標準偏差の 3 倍を超えたセットは外れ値とみなして削除した。最後に，残りのセット値から平均値を求めて，その観測点における重力値とした。AQG#B11 による 2023 年の観測のセット値の時系列を図-1 に示す。FG5#201 の重力値は，基本重力測量作業規程（国土地理院，2023）に従って算出した。

AQG と FG5 は器械の高さが異なり，基準とする高さが異なる。そこで，2016 年に石岡 FGS にてラコスト重力計で観測したデータから算出した重力鉛直勾配 $-366.5 \mu\text{Gal}/\text{m}$ を使用して，両重力計とも，測量標直上 1.300 m の重力値に化成した。

表-2 各種補正処理

地球潮汐補正	ETGTAB（Wenzel, 1996）
海洋潮汐補正	GOTIC2（Matsumoto et al., 2001）
極運動補正に必要な 地球回転パラメータ（EOP）	国際地球回転・基準系事業（IERS）が提供する最 確値（Bulletin-B）

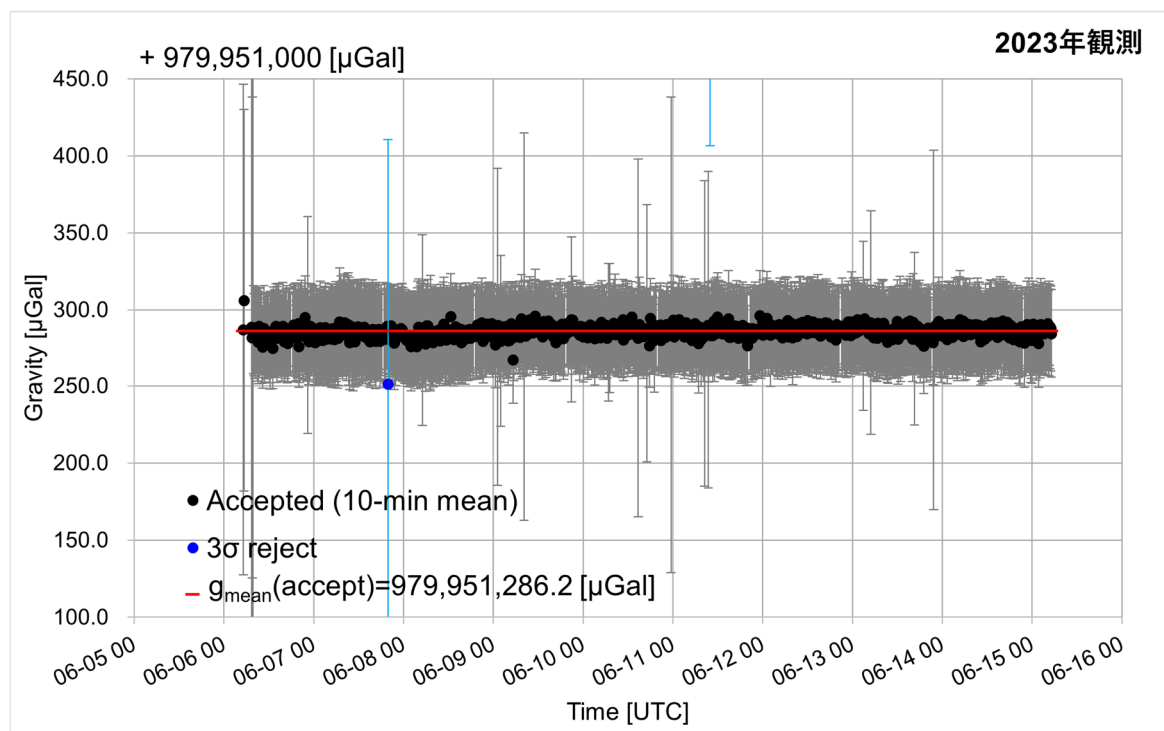


図-1 2023 年の AQG#B11 の観測結果（エラーバーは各 10 分平均値の標準偏差）重力値は石岡 FGS 上 1.300 m に化成している。

4. 重力値の比較

石岡 FGS 直上 1.300 m に化成した、それぞれの重力計による重力値とその比較を表-3 及び図-2 に示す。AQG の重力値の不確かさは、複数の FG5 との比較観測による結果から 8.0 μGal 程度と見積もられており (Julian et al., 2025)、この値を AQG#B11 の重力値の拡張不確かさ (95%信頼区間) とした。また、FG5#201 の重力値の拡張不確かさ (95%信頼区間) は、レーザ周波数やコリオリ効果等の器械による不確かさ、鉛直勾配計算等の補正計算による不確かさ及び測定値のばらつきによる不確かさを二乗和の平方根で合成した合成標準不確かさとした。

まず、年ごとに 2 台の重力計の重力値を比較すると、2023 年には 15.1 μGal 、2026 年には 9.8 μGal 、AQG#B11 の重力値が FG5#201 の重力値と比べて大きい。ただし、図-2 のとおり、両重力計の重力値の拡張不確かさ (95%信頼区間) で示すエラーバーは、2023 年については僅かに重なっていないものの、2026 年については重なっている。したがって、この結果をもって両重力計に有意な器差があると断定することは難しい。次に、重力計ごとに 2 時期の重力値を比較すると、2023 年から 2026 年にかけて AQG#B11 については 27.5 μGal 、FG5#201 については 22.2 μGal 小さくなった。この差は各重力値の不確かさよりも大きく有意である。また、どちらの重力計とも同程度の差であることから、その原因の一つに測点の重力変化による影響が考えられる。

重力値の変化の主な原因としては、高さの変化と地下の密度変化の二つが挙げられる。本調査では、高さ変化の重力値に与える影響について検証を実施した。石岡測地観測局には電子基準点「石岡」が設置されており、GEONET F5 解 (村松ほか, 2021) を用いて楕円体高の変化を調査した。その結果、図-3 に示すように、2023 年から 2026 年の間では、3.7 mm/yr の僅かな隆起の傾向が見られた。この高さ変化による重力変化について、フリーエア勾配 (308.6 $\mu\text{Gal}/\text{m}$) を仮定すると約 3.4 μGal の減少、また、ブーゲー勾配 (196.6 $\mu\text{Gal}/\text{m}$) を仮定すると約 2.2 μGal の減少となり、減少の傾向は観測された重力値と同様であるものの、F5 解の年周・半年周変動の影響を考慮しても実際の重力変化を説明するには不十分である。今後、FG5#201 以外の FG5 でも観測するなどして、重力変化を引き続き調査していく。

表-3 石岡 FGS 上 1.300 m に化成した重力値とその比較

観測年	AQG#B11		FG5#201	
	重力値 +979,951,000 [μGal]	重力値の 拡張不確かさ (95%信頼区間) [μGal]	重力値 +979,951,000 [μGal]	重力値の 拡張不確かさ (95%信頼区間) [μGal]
2023 年	286.2	8.0	271.1	6.1
2026 年	258.7	8.0	248.9	4.9

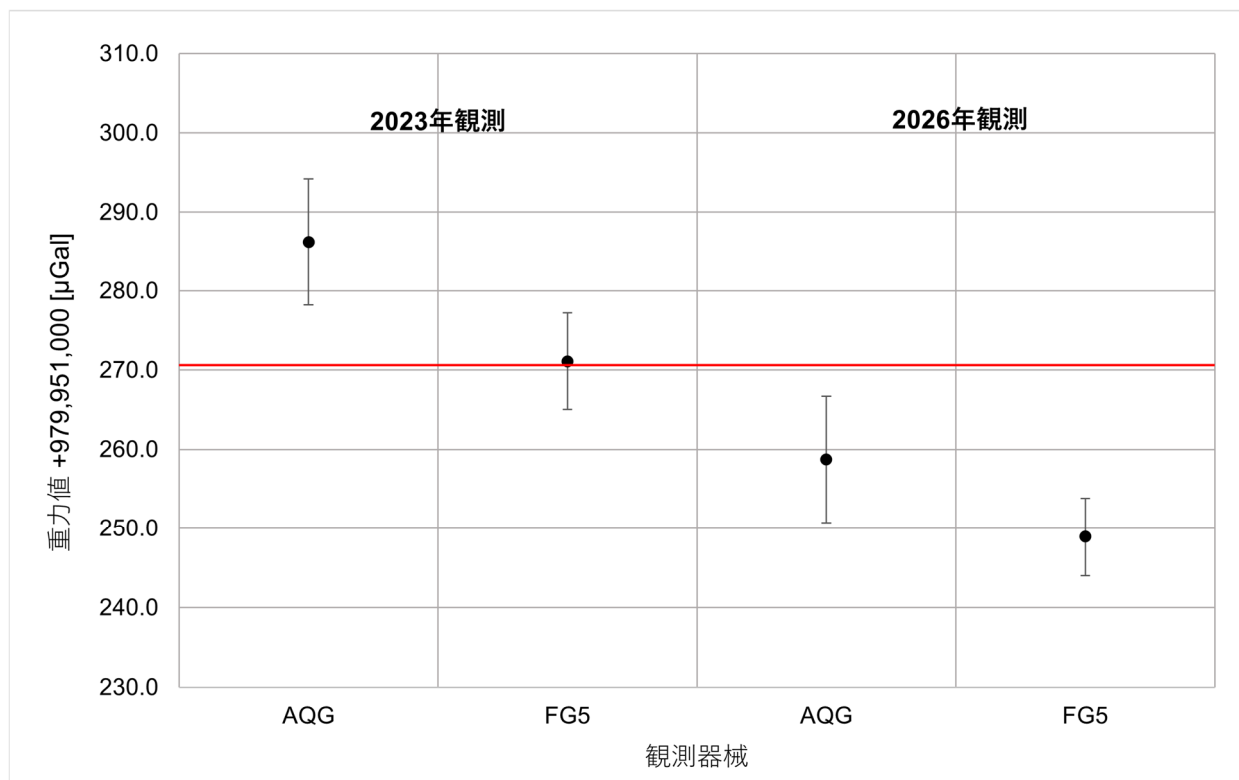


図-2 2 時期の AQG#B11 と FG5#201 の重力値（エラーバーは重力値の拡張不確かさ（95%信頼区間））いずれも石岡 FGS 上 1.300 m に化成した重力値であり，赤線は成果値を表す．

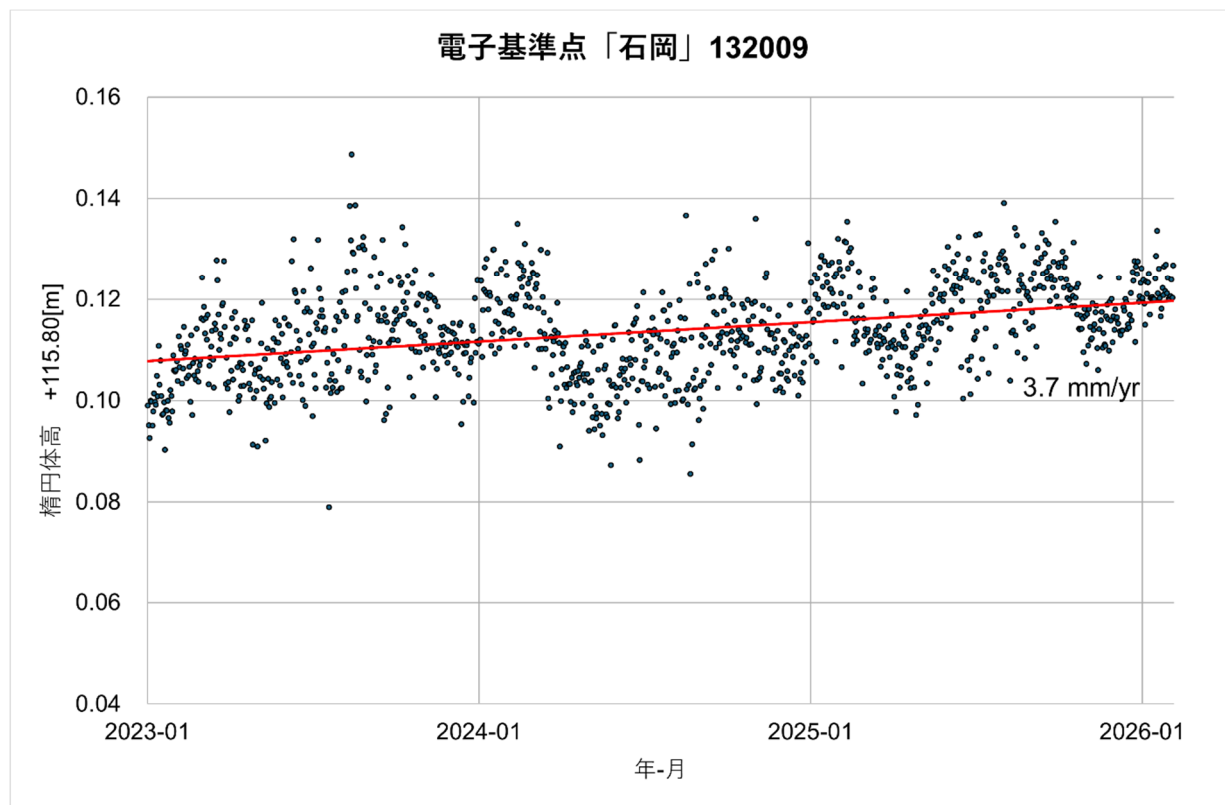


図-3 電子基準点「石岡」における楕円体高の時系列変化（赤の実線は線形近似）
3.7 mm/yr は線形近似の傾きを示す．

5. まとめ及び基本重力測量への導入の検討

AQG#B11 の内部機器更新作業による重力値への影響を調査した結果、作業前の 2023 年と作業後の 2026 年の同地点における重力値で比較すると有意な差が見られた。この重力値の差は FG5#201 でも同程度見られており、原因の一つに測点の重力値の変化による影響が考えられるものの、高さ変化だけでは今回観測された重力変化を説明できなかった。今後、FG5#201 以外の FG5 でも観測するなどして引き続き調査していく。

当院で導入した AQG は野外観測が可能な機種ではあるが、過年度の試験観測において、AQG では振動等の観測・周辺環境が重力値にバイアスを与える可能性が示唆されている。したがって、まずは環境の良い屋内での観測から導入していくことが適切と思われる。また、今回の FG5 との重力値の比較では、2 台の重力計の重力値の差が最大で $15.1 \mu\text{Gal}$ あったものの、明確に重力計間の器差があるとは断定することは難しい。したがって、今後も比較観測により FG5 と AQG の重力値の差を確認していくことが必要である。

参考文献

- Julian Glässel, Hartmut Wziontek, Ezequiel Antokoletz, Erik Brachmann, Reinhard Falk and Jan Müller. (2025): Evaluation of the Exail absolute quantum gravimeters AQG-A02 and AQG-B10 by comparison to a precise gravity reference, *Journal of Geodesy*, 99, 73. doi:10.1007/s00190-025-01995-x
- 国土地理院 (2023) : 基本重力測量作業規程.
- Matsumoto Koji, Sato Tadahiro, Takanezawa Takashi and Ooe Masatsugu . (2001): GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *J. Geod. Soc., Japan*, 47, 243–248.
- 村松弘規, 高松直史, 阿部聡, 古屋智秋, 加藤知瑛, 大野圭太郎, 畑中雄樹, 攪上泰亮, 大橋和幸 (2021) : 新しい GEONET 解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解) の公開, *国土地理院時報*, 134, 19–32. doi:10.57499/JOURNAL_134_03
- Wenzel, H.-G. (1996): The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30, *Bulletin d'Informations Mareés Terrestres*, 124, 9425–9439.
- 山本康生, 小柳拓真, 菅原安宏, 平岡喜文, 小川拓真 (2025) : AQG を基本測量へ導入するための調査検討, *令和 6 年度調査研究年報*, 24–27.