光周波数標準の測地的利活用技術に関する共同研究

実施期間	令和 3 年度		
測地部計画課	宮原　伐折羅		
測地部	山本　宏章		
測地部物理測地課	中島　正寛	深谷　俊太朗	
	豊福　隆史	越智　久巳一	
	加藤　知瑛	畔柳　将人	
	半田　優実		
地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室	松尾　功二		

1. はじめに

光格子時計は，安定度が非常に高い時刻周波数標準を与えるだけでなく，リンクした時計 2 台の歩度差から 2 地点間の重力ポテンシャル値の差を与えることができる．光格子時計の性能の向上はめざましく，センチメートルの高さの差に相当する重力ポテンシャル差の計測が可能となっている．これにより，国際測地学協会（IAG）が 2015 年の総会で決議した「重力ポテンシャル値を用いて高さを記述し，ジオイド面の重力ポテンシャル値を基準として，高さを維持・管理する基準座標系」に光格子時計を活用することが可能となりつつある（宮原ほか，2018）．本共同研究は，光格子時計を用いた測地的利活用及び光格子時計間での高精度比較技術の発展に貢献することを目的に実施する．

2. 研究内容

2.1 研究内容の概要

光格子時計のような安定度の高い時計では，時計の高精度比較において重力赤方偏移による時刻周波数シフトの補正が欠かせず，補正には重力ポテンシャル値とその不確かさが必要となる．重力ポテンシャル値は，GNSS 測量とジオイド・モデル，重力測量を用いて計測することが可能である．そこで，本研究では，情報通信研究機構（NICT）に設置された 2 台の光格子時計（図-1）における重力ポテンシャル値とその不確かさを，GNSS 測量とジオイド・モデル，重力測量を用いて決定した．

図-1　情報通信研究機構が所有する 2 台の**光格子時計**(NICT1, NICT2)**の設置位置の概略図**

2.2 重力ポテンシャル値の決定手法

地点 P における重力ポテンシャル値W(P)は，以下の式により決定できる（Sánchez et al., 2021）.

$$W(P) = W_0 - [H(P) - N(P)]\bar{g}(P)$$

$$\bar{g}(P) = g(P) + 0.424 \times 10^{-6} \times [H(P) - N(P)]$$

W_0は 2015 年の IAG 決議で定義されたジオイド面上の重力ポテンシャル値（$62{,}636{,}853.40\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$），Hは楕円体高，Nはジオイド高，gは重力値である．$\bar{g}$は計算点とジオイド面との間の平均重力値であり，上式の通り，ポアンカレ・プレイ化成の式を用いて導出した（Heiskanen and Moritz, 1967）．光格子時計の楕円体高は，電子基準点「小金井」の楕円体高に，「小金井」と光格子時計との間の比高差を加えることで求めた．「小金井」の楕円体高には 2020 年 6 月 19 日から 2021 年 6 月 19 日までの F5 解（村松ほか, 2021）の平均値，「小金井」と光格子時計との間の比高差には 2021 年 1 月 13 日から 2021 年 1 月 14 日に測地基準課が実施した水準測量の結果を用いている．光格子時計のジオイド高は，Matsuo and Forsberg (2021)の手法を用いて構築した重力ジオイド・モデル（JGEOID2021b）から求めた．光格子時計の重力値は，2021 年 4 月 23 日に物理測地課が実施した重力測量の結果を用いた．

2.2 重力ポテンシャル値の不確かさの推定手法

決定した重力ポテンシャル値の不確かさu_Wは，誤差伝搬の法則を用いて以下のように推定した．

$$u_W = \sqrt{{u_{W_o}}^2 + (H - N)^2 {u_{\bar{g}}}^2 + \bar{g}^2({u_H}^2 + {u_N}^2)}$$

$$u_{\bar{g}} = \sqrt{{u_g}^2 + (0.424 \times 10^{-6})^2({u_H}^2 + {u_N}^2)}$$

u_{W_o}はW_0の不確かさであり，その不確かさは $0.02\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$と見積もられている（Sánchez et al., 2016）．u_Hは楕円体高の不確かさであり，「小金井」の F5 解の座標値変化の標準偏差と一等水準測量の制限値（$2.5(\text{水準測量の観測距離 km})^{1/2}$ mm）から見積もった．u_Nはジオイド高の不確かさであり，JGEOID2021b と GNSS/水準法で得られた実測ジオイド高との較差の標準偏差を用いた．u_gは重力値の不確かさであり，網平均計算の標準偏差を用いた．

3. 得られた成果

表-1 に，光格子時計の楕円体高，ジオイド高，重力値，重力ポテンシャル値の結果とその不確かさを示す．重力ポテンシャル値の不確かさは NICT1，NICT2 ともに$\pm 0.50\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$であり，これを高さに換算すると±5.1cm となることから，本研究で得られた重力ポテンシャル値の精度は高さ換算で約 5cm といえる．

表-1　光格子時計(NICT1,NICT2)の楕円体高，ジオイド高，重力値，重力ポテンシャル値とその不確かさ

	楕円体高 H [m]	ジオイド高 N [m]	重力値 g [$\mathrm{m/s^2}$]	重力ポテンシャル値 W [$\mathrm{m^2/s^2}$]
NICT1	114.830 (±0.008)	38.180 (±0.050)	9.79757865 (±0.00000006)	62,636,102.41 (±0.50)
NICT2	114.771 (±0.008)	38.180 (±0.050)	9.79757895 (±0.00000008)	62,636,102.99 (±0.50)

（）内は不確かさを示す

4. 結論

測地学的な手法を用いて，NICT が所有する 2 台の光格子時計の重力ポテンシャル値とその不確かさを決定し，NICT1 の重力ポテンシャル値は 62,636,102.41±$0.50\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$，NICT2 の重力ポテンシャル値は 62,636,102.99±$0.50\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$という結果が得られた．今回の結果は，測地学的手法による重力ポテンシャル計測の一例であるだけでなく，光格子時計の時刻周波数の校正や国際比較に貢献することが期待される．

5. 今後に向けて

当面においては，石岡測地観測局において国土地理院が所有する絶対重力計と NICT が所有する連続観測用相対重力計（Micro-g LaCoste 社製 gPhoneX）との比較観測を行う予定である．NICT は，潮汐や質量分布の時間変化に伴う重力変化が時刻周波数変動へ与える影響を把握するために gPhoneX を導入しており，その長期運用には絶対重力計との比較観測によるドリフト量及び感度検定を行う必要がある．この比較観測は，gPhoneX の検定を行うだけでなく，長期の重力連続観測を行うことによって，石岡測地観測局での重力の季節変動調査（冨山ほか，2019）をはじめとする重力の時間変化の調査への gPhoneX の有用性を確認する基礎研究となる．

参考文献

Heiskanen W. and Moritz H. (1967): Physical Geodesy, W. H. Freeman and Company, San Fransisco, 364p.

黒石裕樹（1998）：日本における Helmert 高決定のための地表重力値の推定とその誤差の影響，測地学会誌，44，223–236.

Matsuo K. and Forsberg R. (2021): Gravimetric geoid and quasigeoid computation over Colorado based on the Remove Compute Restore Stokes Helmert scheme. Journal of Geodesy, Special Issue on Reference Systems in Physical Geodesy (Submitted).

宮原伐折羅，吉田賢司，山本宏章，松尾功二，宮﨑隆幸，宗包浩志（2018）：国土地理院の重力測量の展望−測定技術と重力基準の将来像−，国土地理院時報 131，95-108.

村松弘規，髙松直史，阿部聡，古屋智秋，加藤知瑛，大野圭太郎，畑中雄樹，撹上泰亮，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.

Sánchez L, Čunderlík R, Dayoub N, Mikula K, Minarechová Z, Šíma Z, Vatrt V, Vojtíšková M (2016): A conventional value for the geoid reference potential W0 . J Geod 90, 815–835.

Sánchez L, Ågren J, Huang J, Wang Y M, Mäkinen J, Pail R, Barzaghi R, Vergos G, Ahlgren K, Liu Q (2021): Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRS). J Geod 95, 33.

冨山顕，兒玉篤郎，大森秀一，平岡喜文，矢萩智裕（2019）：石岡測地観測局における重力値の季節変動（第 1 年次），平成 30 年度調査研究年報，40-41.