

東京スカイツリーと東京の地下駅での重力計測記

杉原 光彦¹⁾

1. 緒言 —東京スカイツリーに到着するまで—

2016年12月9日に東京スカイツリーと東京都心部の地下駅などで可搬型重力計シントレクス CG5 (シリアル番号 352: 以下 CG5 重力計) を用いて重力計測を行った。CG5 重力計にはクランプ機構が無く、移動中でも記録 ON にすれば重力と傾斜 2 成分の記録が得られる。好奇心から飛行機・フェリー・新幹線での移動中に記録 ON にしてみたところ傾斜が安定していた一部分では考察可能なデータが得られた。次に意図的に台車・観覧車・エレベータ(杉原, 2011)での計測を試みて、各々興味深いデータを得た。そこで次は国内最長級の大井町駅のエスカレータでも計測したいと思っていた。東京では、ほかに東京スカイツリーと地下駅構内でも CG5 重力計で計測したいと考えていた。CG5 重力計は可搬型と言っても約 8 kg の本体重量があるので通常は自動車で測定地点間を移動する。しかし測定したいと考えている場所へは公共交通機関での移動の方が便利である。しかも場所柄、通常の作業服よりもスーツ姿の方が違和感なさそうに思えた。そこで、午後に秋葉原で開催される地圏資源環境研究部門の研究成果報告会に出席するためにスーツ姿での日帰り出張を予定していたこの日を計測日に選んだ。さらに、午後は報告会に参加する必要が

あるのと、エスカレータでの計測には早朝の人が少ない時間帯が好ましいと考えて、始発電車で東京に向かい、まずは大井町駅のエスカレータ、そして開館一番に東京スカイツリー、余った時間で数か所の地下駅巡り、と大雑把な予定を立てた。

当日は山菜採り用の大きいリュックに CG5 重力計を押し込んで背負い、スーツ姿で TX (つくばエクスプレス) の始発電車に乗った。JR 秋葉原駅構内のエスカレータが途中で平らになる特殊な構造だったのを見て、「ここでエスカレータ計測の予行演習を」と思いつき、重力計をリュックから取り出してエスカレータでの計測を試みた。エスカレータに乗ってから重力計を静置して水準を合わせている間に水平箇所にはさしかかってしまったが測定手順は確認できた。大井町駅での本番計測でも重力計の水準合わせに時間を要して当初思い描いていたような長区間計測は必ずしも達成できなかった。しかし秋葉原の予行演習で難点を知ったおかげで徒に長居することなく 1 往復半の計測で見切りをつけて次の観測地点、東京スカイツリーに向かった。

東京スカイツリー到着後、逸る気持ちを抑えて、まず館外の歩道の標石上で計測してから受付に向かった。意外にも行列は無く、エレベータの乗客は僅かだった。エレベータ内での計測も行えそうだったが、ここで怪しまれては元



写真 1 東京スカイツリー天望フロア 350 での CG5 重力計による計測風景。

1) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

キーワード：東京スカイツリー、地下駅、重力計測、CG5 重力計、超伝導重力計、重力モニタリング、住吉駅

も子もない、と自制した。天望フロア 350 に到着してから近くにいた職員と思しき人に計測希望を伝えると、どこかに連絡したあとで「人の流れの邪魔にならない場所であれば」と承諾してくれた。スーツ姿が効果的だったかもしれない。写真映りも考慮して外が見渡せる窓際に CG5 重力計をセットして計測を始めた(写真 1)。CG5 重力計の背景に隅田川が見えた。かつて在原業平が通り、謡曲「隅田川」所縁の地でもある渡し場跡はわかったが、その奥に見えるはずの筑波山は靄っていた。西方に目を向けると三ノ輪・浅草界限、そして午後に参加予定の報告会会場がある秋葉原も見えた。東京スカイツリーのマスコット人形ソラカラちゃんとの記念撮影会を予告する館内放送が聞こえて少し惹かれたが、この後の地下駅での計測時間確保を優先して撮影会の待行列には並ばなかった。

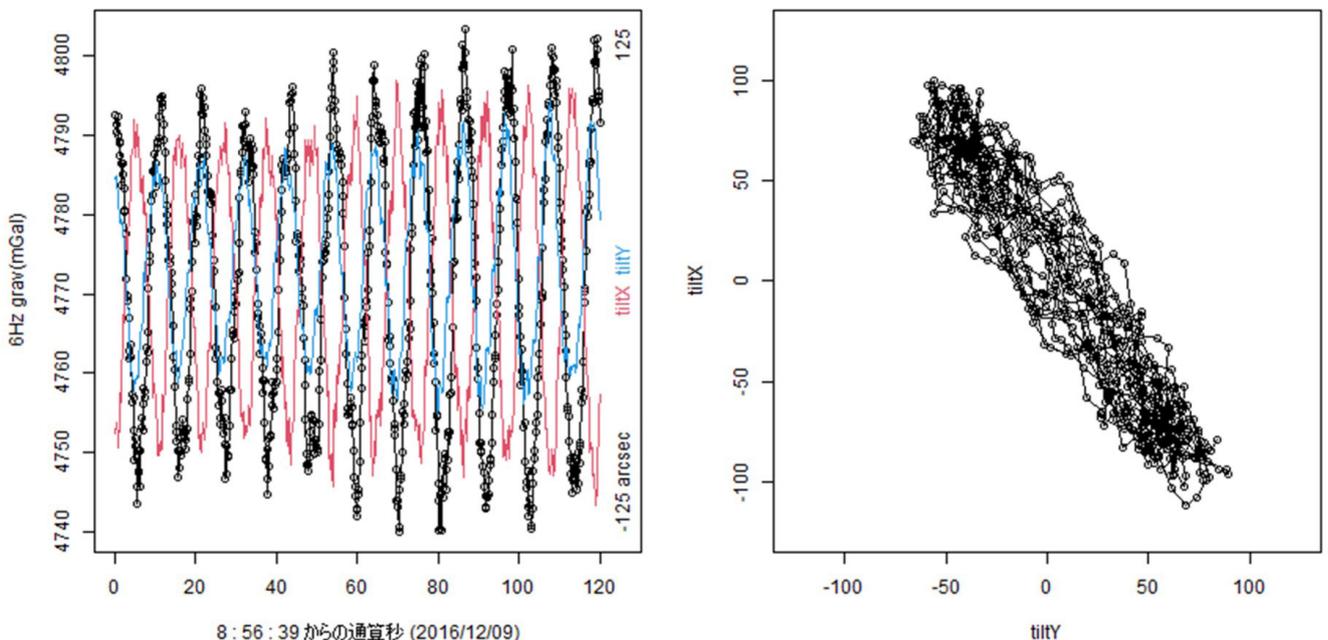
2. スカイツリーでの計測結果 —固有振動は見えた—

大きいリュックを背負ったスーツ姿で講演会場に現れた私を見て訝しんだ同僚に経緯を説明した。東京スカイツリーで重力計測した目的を聞かれて「そこに東京スカイツリーがあるからさ」と答えた。その時点では未だデータを確認していなかったが念願の計測を済ませた高揚感が残っていた。翌日、ダウンロードしたデータを見ると興味深い

特徴を確認できた。

CG5 重力計の標準的な使用方法では予め設定した秒数の重力平均値が記録される。測定回数を設定すると自動的に計測を繰り返す。重力値の他に傾斜 2 成分と内部温度も記録される。この点は前身の CG3/CG3M 重力計も同じだったが CG5 重力計には Raw データ記録機能がある。この機能を ON にすると 6 Hz サンプリングの重力値、傾斜 2 成分と内部温度も記録される。ただし記録長に応じて欠測も生じる。欠測時間はデータ長に依存する。東京スカイツリーと地下駅での計測では記録長を 120 秒としたが、この場合の欠測時間は 20 秒だった。以下で示すのは、この 6 Hz サンプリングデータである。

天望フロア 350 での CG5 重力計の記録を見ると重力成分も傾斜 2 成分も周期 10 秒程度の振動成分が目立つ(第 1 図左)。傾斜 2 成分について軌跡を追うと縦軸(Tilt-X 方向)から反時計回りに約 30 度方向に軸をもつ振動であることがわかる(第 1 図右)。計測時の写真(写真 1)と位置図(第 2 図)を比較してわかるように CG5 重力計はほぼ北向きに置かれていたので CG5 重力計の X 軸は概ね北向きに一致する。従って傾斜 2 成分の軌跡図が意味するのは NNW-SSE 方向の揺れである。最寄りのアメダス観測地点「江戸川臨海」の記録によれば、天望フロア 350 での計測時間帯は南東～南方向からの数 m/s の風が吹いていた。この風に



第 1 図 東京スカイツリー天望フロア 350 で計測した重力データ。6 Hz サンプル記録。左図：黒が重力値(スケールは左縦軸に表示)、赤と青は傾斜 2 成分(スケールは右縦軸に表示)。右図：傾斜 2 成分のパーティクルモーション図。縦軸は重力計の X 方向(写真 1 右で重力計に向かって手前から奥への方向)。



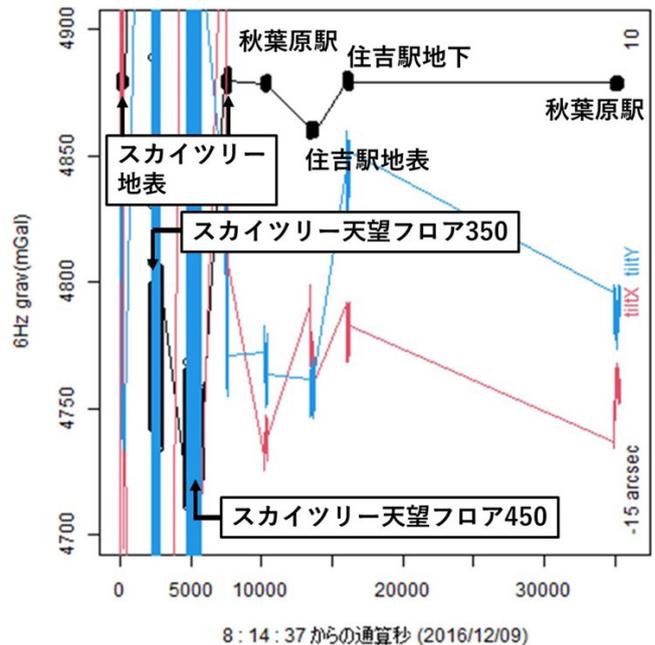
第2図 重力計測点(東京スカイツリー, 秋葉原駅, 住吉駅)および周辺の位置図。地理院地図から編集した。

励起された東京スカイツリーの固有振動が見えていると考えれば辻褄が合う。

もう一つ確認できたことがある。東京スカイツリー館内での計測の前と後に東京スカイツリー館外近傍の歩道の標石上で計測していた(第3図)。そこでの計測値を基準にすると天望フロア350での平均重力値は109.5 mGal, 天望フロア450での平均重力値は139.5 mGalと、地表での値よりも小さい値が得られた。各々の高度差350 m, 450 mで割ると重力鉛直勾配値は各々-0.313 mGal/m, -0.310 mGal/mとなる。標高差の数値が概数値であることを考慮すれば、いずれも標準的なフリーエア重力勾配値に一致していると評価できる。各々のフロアでは振動の影響が大きかったものの重力計測値の平均値が各々のフロアでの平均重力値として意味のある値が得られたと言えるだろう。

3. 地下駅での計測結果 —重力記録は意外にフツーだったが謎も残った—

東京メトロの国会議事堂前駅と新御茶ノ水駅は大学生の時に通学に使っていたが、どちらも地下深部のプラットフォームに向かう長いエスカレータが印象的だった。「東京、深い、地下駅」で検索するとランキングが出てくる(日本経済新聞, 2016)。深い地下駅といっても地表からの相対深度が深い駅と海拔深度が深い駅とは異なる。地表からの相



第3図 東京スカイツリー地上部での最初の計測を行った2016年12月9日8時14分37秒から10時間の重力計測記録。6 Hz サンプル記録。黒が重力値(スケールは左縦軸に表示), 赤と青は傾斜2成分(スケールは右縦軸に表示)。

対深度最深駅は42.3 mの(都営)大江戸線の六本木駅(港区)で、次いで37.9 mの(東京メトロ)千代田線の国会議事堂駅(千代田区), 33.6 mのTX秋葉原駅(千代田区)と続く。一方、海拔深度最深は33 mの住吉駅(江東区)で、

ここは地上口付近が海拔 0 m なので相対深度も 33 m である。そこで地下駅の計測場所に TX 秋葉原駅と住吉駅を選んだ。深度に加えて秋葉原と東京スカイツリーからのアクセスの良さが決め手だった。東京スカイツリーでの計測後に一旦、TX 秋葉原駅に寄り、地下駅計測シリーズの手始めとしてプラットフォームで計測を行ってから住吉駅に向かった。住吉駅の地上出口と地下駅の半蔵門線プラットフォームでの計測を終えたところで 12 時 43 分。そこで地下駅計測シリーズを中断して都営新宿線で岩本町駅に行き、徒歩で会場に向かい、13 時 30 分の報告会開始に間に合った。

深い地下駅で重力計測しようと思ったのはアクセスが良く、ノイズレベルが小さい環境を求めたからだ。実際に取得した記録を比較すると、TX 秋葉原駅地下プラットフォーム、住吉駅地下プラットフォーム、住吉駅地上出口付近、いずれの記録も見かけは良く似ていた(第 4 図)。ノイズレベルの差が目立たなかったのは意外だったが、地下プラットフォームでは自然のノイズレベルが低いとしても電車と乗客の出入りによる人工的ノイズがあり、一方で住吉駅地上出口が面していた道路の当日の交通量は予想よりも少なかった。

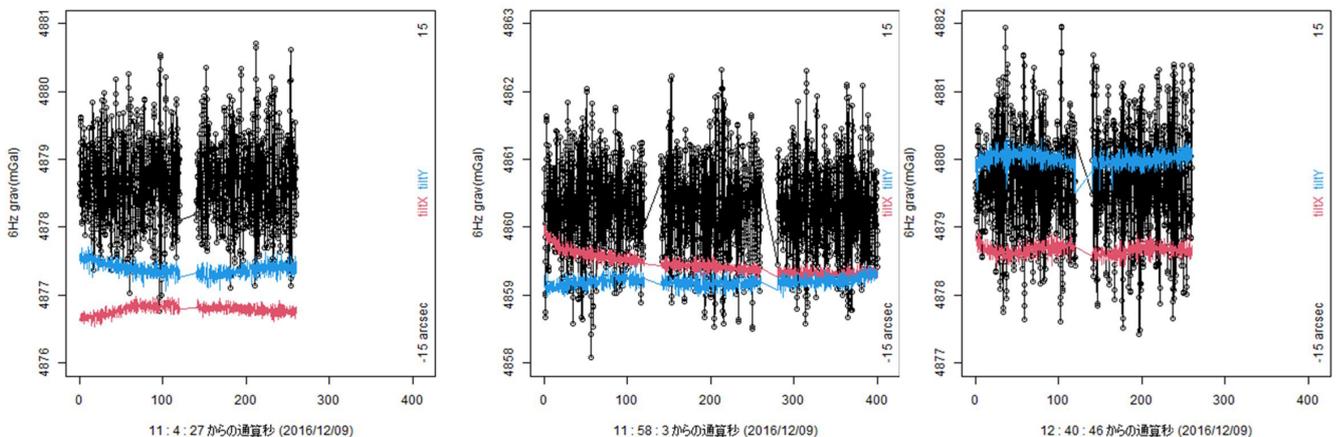
次に 3 か所での平均重力値を比べてみる(第 3 図)。まずは地表からの相対深度がほぼ等しい秋葉原駅プラットフォームと住吉駅プラットフォームでは重力値の差が約 1 mGal であった。2 つの地点で重力差がほぼ無いのは水平重力差と鉛直重力差がほぼ相殺した結果と考えられる。一方、住吉駅の地上出口と地下プラットフォームでは約 19.4 mGal の重力差があった。この値は両地点の相対深度差が 33 m であることから推定される鉛直重力差の効果よりかなり大きい。見かけの重力鉛直勾配値は、地下物質の密度を考慮し

ないフリーエア勾配(約 0.31 mGal/m)よりも大きい絶対値になってしまう。地下駅の構造は複雑なので、地上口と地下駅プラットフォームの計測地点の 3 次元の位置関係を正確には把握できていないが水平重力差の影響にしては大きすぎる。この値の解釈は悩ましい。CG5 重力計の各信号成分の挙動に不自然さは認め難い(第 4 図)が、計測時刻を眺めていると疑問が湧いてきた。①なぜ住吉駅では地上出口の計測後に地下駅プラットフォームで計測したのか?②住吉駅では地上口での計測後、プラットフォームでの計測開始までに 38 分も要したのはなぜか?

疑問①については、秋葉原からの移動は地下鉄日比谷線、地下鉄半蔵門線と乗り継いだので、住吉駅到着後は改札口を出ずに一階下の最深地点があるプラットフォームに移動して計測するのが自然な動線のはず。住吉駅では当初、地上出口と最深地点の往復測定を予定していたが、講演会開始時刻の 13 時 30 分までに秋葉原に戻ることを意識して、計測手順に迷ったけれどもそれが影響したのだろうか。疑問②については正直なところよくわからない。結局、謎は残った。

4. 結語 —都会の地下での重力定点観測構想—

部門研究成果報告会を終えて TX 秋葉原駅の改札を抜けて駅構内に入った。地下駅プラットフォームで約 7 時間ぶりの再測を行ってこの日の重力計測は完了した。TX に乗車して、まだ確認していないデータに思いを馳せた。東京スカイツリーの固有振動は見えただろうか、地下駅でのデータのノイズレベルはどの程度だっただろうかと思っているうちに TX 浅草駅を過ぎた。間もなく三ノ輪の「三層の家」



第 4 図 左図: TX 秋葉原地下駅ホームでの CG5 重力計の 6 Hz サンプル記録。黒が重力値(スケールは左縦軸に表示), 赤と青は傾斜 2 成分(スケールは右縦軸に表示)。中図: 住吉駅地上出口での CG5 重力計の 6 Hz サンプル記録。成分対応は左図と同じ。右図: 住吉駅地下駅ホームでの CG5 重力計の 6 Hz サンプル記録。成分対応は左図と同じ。

の真下を通過することに気づいた。三層の家の内部を実見したことはないが紹介記事(藤森・普後, 2016)を読んで建築の概要は知っていた。敷地内から出土した被災遺品を展示し「コンクリートの壁の内側にひそかに大地をムキ出し、井戸のようにして地と天のあいだに空間の垂直軸を通して」建物、その直下を通過することは、地下駅構内と東京スカイツリーでの重力計測を終えた帰路に相応しいと思った。東京スカイツリーはこの日の計測で一段落だとしても地下駅構内の方は今後も展開する可能性があると考えた。出張先からの帰路、飛行機等での移動中の楽しみは出張を回想しつつ今後の計測計画を夢想すること(杉原, 2000)だが、この日、帰路のTX車内で考えたのは都会の地下での重力定点観測構想だった。数か所だけ異なる2枚の図を見比べて違いを探すゲームがしばしばTV 娯楽番組に登場する。重力定点観測は、このゲームに似ている。漠然と眺めては気づきにくいシステム的に見比べると微小な違いを発見できる。時間の経過とともに変化する重力成分を精度よく抽出して、重力変化を引き起こす原因となった質量分布変化等を探るのが定点観測による重力モニタリングの手法だ。何をターゲットにするかが問題だが、例えば地下水分布の把握である。一昔前は地下水の過剰汲み上げによる地盤沈下が各所で問題となっていたが、最近は逆に地下駅での浮力対策が検討課題になっているらしい。この日に行ったような可搬型重力計による計測を後日再び行って重力変化を評価する方法もあるが、より有効なのは定点での重力連続計測だろう。桁違いに高感度でドリフトが小さい超伝導重力計を使用すれば実現可能と思われる。我々は2012年以降、CO₂ 地中貯留テストサイトで超伝導重力計によるモニタリング技術開発を試行していた(相馬ほか, 2014; 杉原ほか, 2014)。その成果はこの日の部門研究成果報告会でも紹介された、まさにその手法だ。都会の地下に限らずトンネル周囲の地下水挙動把握にも役立つかもしれない、それは以前、神岡観測坑内で見たオーソドックスな超伝導重力計による観測(杉原, 2016)に近い状況でないかなどと考えていた。

東京スカイツリーと地下駅での計測から5年経過した今でも、この構想は有望だと思う。超伝導重力計は高感度な精密観測用機器なので、通常は極めて静かな観測所などに設置されているが、我々はある程度のノイズレベルがある環境下でも適用可能な重力モニタリング技術を開発してきた。最近、CO₂ 地中貯留研究グループの後藤宏樹らが超伝導重力計を用いたモニタリングを精力的に行っている(Goto *et al.* 2019, 2020, 2021)ことで、構想は確信に変わったとさえ言えるかもしれない。最近5年間で変わった

ことは他にもある。CO₂ 地中貯留研究グループにCG5 重力計の後継機CG6 重力計が入った。こちらは10 Hz サンプリング重力データを欠測なく記録できる。サイズがCG5 重力計の半分程度になったので山菜採り用ではない普通のリュックでも運べる。地下での重力定点観測構想にとって、より重要そうな進展としては量子型重力計の登場(杉原, 2021)がある。約10年間、超伝導重力計の高分解能データを見てきた私の超伝導重力計への信頼は揺るがないが、量子型絶対重力計には取扱いが手軽そうなこと、絶対重力計であることという別の利点がある。計測器として選択肢になりうるかも知れない。

重力計測しているとノーベル賞級の研究現場に近づけることがある(杉原, 2016)。東京スカイツリーでも最近、光格子時計による計測結果が報告された(Takamoto *et al.*, 2020)。東京スカイツリーの方は一段落と書いたが、光格子時計の研究はこれからいよいよ佳境に向かうのだろう。

文 献

- 藤森照信・普後 均 (2016) 現代住宅併走 34 霊が通る家 三層の家. TOTO 通信 2016 年夏号, https://jp.toto.com/tsushin/2016_summer/modernhouse.htm (閲覧日: 2021 年 11 月 30 日)
- Goto, H., Sugihara, M., Ikeda, H., Nishi, Y., Ishido, T. and Sorai, M. (2019) Continuous gravity observation with a superconducting gravimeter at the Tomakomai CCS demonstration site, Japan: applicability to ground-based monitoring of offshore CO₂ geological storage. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, **9**, 934–947.
- Goto, H., Ikeda, H., Sugihara, M. and Ishido, T. (2020) Laboratory test of a superconducting gravimeter without a cryogenic refrigerator: implications for noise surveys in geothermal fields. *Exploration Geophysics*, **51**, 494–505.
- Goto, H., Sugihara, M., Nishi, Y. and Ikeda, H. (2021) Simultaneous gravity measurements using two superconducting gravimeters to observe temporal gravity changes below the nm s⁻² level: ocean tide loading differences at different distances from the coast. *Geophysical Journal International*, **227**, 1591–1601, doi:10.1093/gji/ggab300
- 日本経済新聞 (2016) B8 には何が…知られざる地下の背比べ、トラベルセレクション, 日本経済新聞朝刊

- 2016年1月14日付 <https://style.nikkei.com/article/DGXMZO96054960T10C16A1TBQ000/>(閲覧日: 2021年11月30日)
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討. GSJ 地質ニュース, **3**, 137-142.
- 杉原光彦 (2000) 2000年GRC年次大会参加記. 地熱, **37**, 331-336.
- 杉原光彦 (2011) 孔内重力計測の疑似体験. 地質ニュース, no. 679, 32-39.
- 杉原光彦 (2016) 絶対重力計測の現場から —神岡編—. GSJ 地質ニュース, **5**, 9-20.
- 杉原光彦 (2021) 絶対重力計測の現場から, 石岡編. GSJ 地質ニュース, **10**, 198-204.
- 杉原光彦・名和一成・相馬宣和・石戸経士・西 祐司 (2014) テキサス州ファーンズワース CO₂ 地中貯留調査サイトでの超伝導重力計の導入. GSJ 地質ニュース, **3**, 129-132.
- Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N., Yahagi, T., Kokado, K., Shinkai, H. and Katori, H. (2020) Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nature Photonics*, **14**, 411-415. doi:10.1038/s41566-020-0619-8
-
- SUGIHARA Mituhiko (2022) A field report of gravity measurements in TOKYO SKYTREE and at underground stations, Tokyo.
-

(受付: 2021年12月1日)