

絶対重力計測の現場から，石岡編

杉原 光彦¹⁾

1. 緒言 —やどりして春の山辺に寝たる夜は—

絶対重力計は鉛直重力加速度(いわゆる重力)を計測原理に則って、高精度で測定する装置である。ごく簡単に言うと重力によって加速しながら自由落下する物体の軌跡を正確に計測するものである。かつてガリレオはピサの斜塔で重さの異なる2つの玉が同時に着地することを確認したと言われているが実際には空気中では空気抵抗を受けるので、絶対重力計では落下物(FG5では反射鏡)を真空中で落下させることとし、更に真空残留空気の影響を少なくする工夫をこらしている。ただし実際の現場計測では様々な計測誤差要因がある。個々の絶対重力計の調整状態に加えて計測者の習熟度も全体の計測誤差に効いてくるが、それを評価するには比較計測が有効である。産総研地質調査総合センター(GSJ)では地熱地域での重力モニタリングに活用する目的で2001年に小型版の絶対重力計FG5L(シリアル番号3)を導入し、2002年2月にそれを標準型絶対重力計FG5(シリアル番号217)にアップグレードした(杉原, 2010)。2002年度は国内4か所の地熱地域に約20回も計測のために出張したが、その合間に国土地理院の重力棟に度々持ち込んで比較計測させていただいた。そこには筑波重力基準点を含む4つの絶対重力計測用基台があり、国土地理院が保有する3台のFG5絶対重力計で頻りに計測されていた(吉田ほか, 2018)ので比較評価がほぼいつでも可能で、計測に未熟だった私は大いに助けられた。

国土地理院が絶対重力計を保有する国内各機関に呼びかけて毎年開催する絶対重力計比較計測会(山本ほか, 2018a)には2002年から参加した。当時の会場は八郷町立国民宿舎「つくばね」(第1図)の会議室だった。比較計測会は4月半ばに開催されることが多く、会場周辺では満開の桜が美しかった(写真1)。FG5導入後しばらくは一人で担当していたので5日間の計測期間中、日中の都合が悪い日には宿泊して対応したこともあった。夜間、人の気配がない会議室で5台ほどのFG5から10秒ごとに響く乾いた落下音は、寝床についてからもしばらく耳奥に残り、夢の中で桜が舞い散る場面のBGMになった。「やどりして春の山辺に寝たる夜は、夢のうちにも花ぞ散りける(古今集

117)」。明け方の窓から東方を眺めると朝靄の中に形がいびつな竜神山が浮かんでいた(写真1)。竜神山の辺りには史跡の井戸(師付の田井)や常陸国府跡があるのだが、その近くに国土地理院の石岡測地観測局が開設され、2016年に以降はそこで比較計測会が開催されることになった。

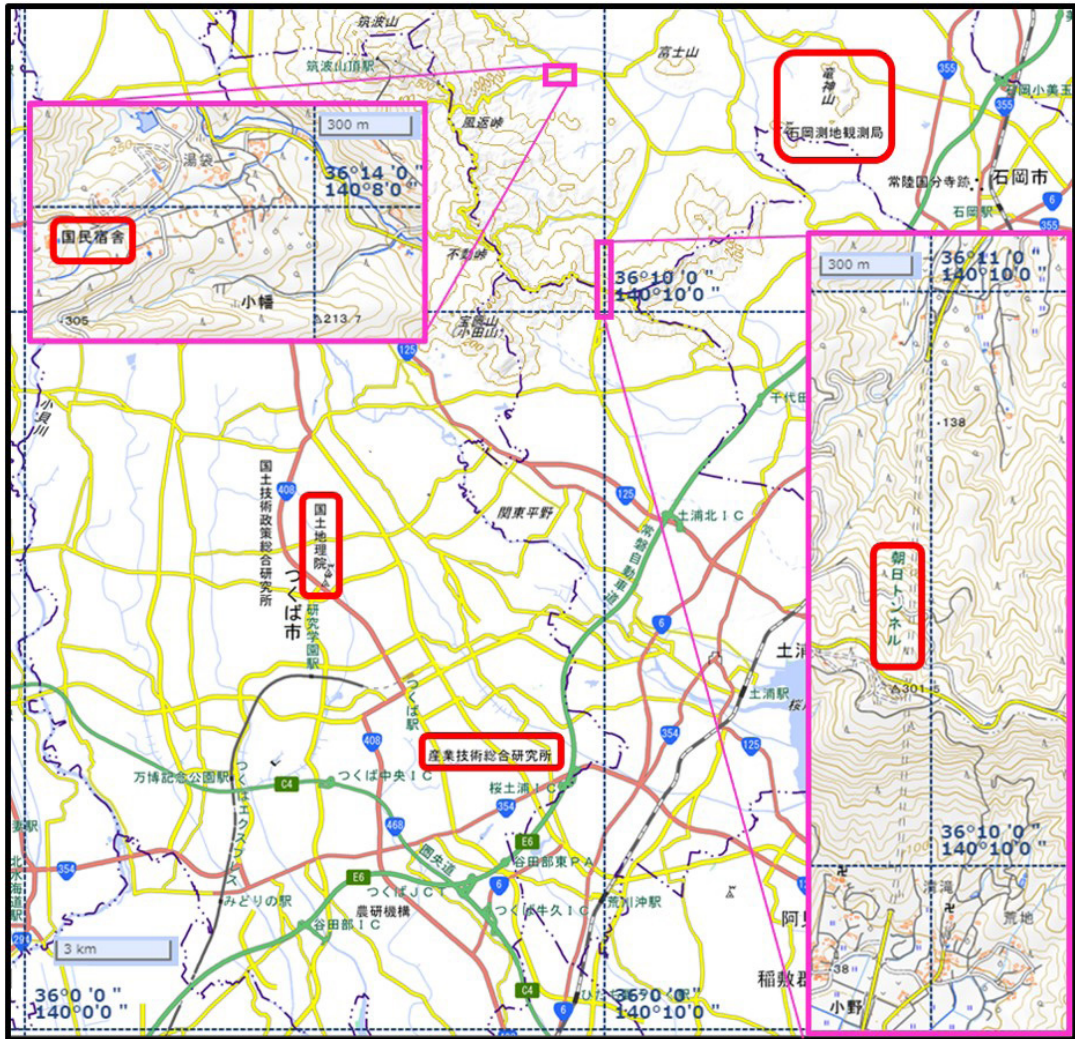
2. 石岡測地観測局 —気まぐれな重力計に惑う杉原，トラブルの解決探りオシロ手取る—

2016年4月18日に初めて石岡測地観測局に入った。重力測定室には石岡基準重力点を含む6つの計測用基台があった(山本ほか, 2018a)。FG5絶対重力計の本体部分は成人一人程度の大きさがある(写真2)が、落下槽、干渉計等の部品(第2図)ごとにコンテナに収納した状態で運搬する。早速、割り当てられた基台Dの周囲にコンテナを搬入してFG5を組み立て始めた。いつの計測でも最初に落下音を聞くまでは不安だが、この日は、すぐに計測開始できた。しかし安心したのも束の間、FG5はモニターにエラーメッセージを表示して停止してしまっただけで、いつものことだがFG5のエラーメッセージは曖昧でトラブル解決の役に立たない。オシロスコープで信号を確認し、指差しながらケーブル接続などを再確認しても不調の原因がわからないので、一度解体して組み直した。それでも解決しないのでオシロスコープを前にして考えこんでいたら、比較計測会に東京大学地震研究所から参加されていた大久保さんがオシロスコープを覗きこんで、「これは電源が原因かな」と言った。電源電圧を計測すると確かに少し低かった。一つの電源コンセントに集中しすぎたために電圧が低下したようだ。実は石岡測地観測局の電源は「つくばね」の会議室の電源に比べてはるかにしっかりしているように思えたのいいことに、運び込む労を惜しんで安定化電源装置は車に残っていた。接続を改め、安定化電源装置を接続して電源電圧を調整するとFG5は動き出した。6つの基台すべてに絶対重力計が設置された様子はなかなか壮観だった(写真2)。

恒例通り比較計測会期間中日の3日目に測定場所を移動した。移動先の基台AでFG5は順調に動き始めた。4日

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：絶対重力計，国土地理院重力係，比較計測会，石岡測地観測局，量子型絶対重力計，重力モニタリング，FG5，スーパースプリング，AQG，旋頭歌



第1図 位置図(地理院地図から編集)。文中で参照した場所(石岡測地観測局と竜神山, 国土地理院, 産業技術総合研究所, 国民宿舎, 朝日トンネル)の地名を赤線枠で囲い示す。国民宿舎と朝日トンネルは桃色で囲んだ挿入拡大図内に示した。



写真1 国民宿舎「つくばね」から4月半ばの東方に見えた景観。手前は満開の桜、左奥に見える歪な形の山は竜神山。

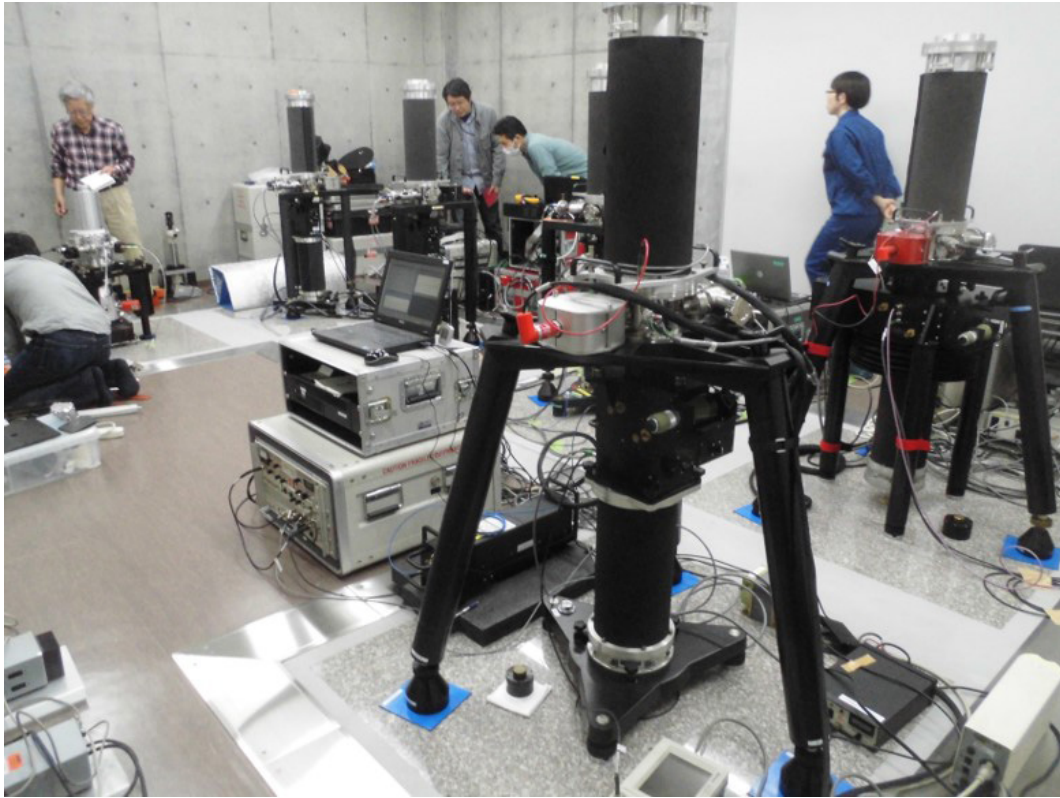
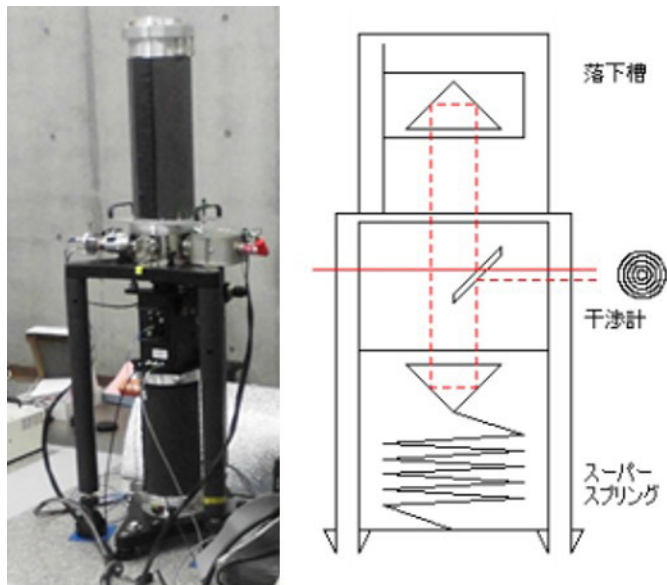


写真2 石岡測地観測局重力測定室内での2016年の絶対重力計比較計測会の様子。6つの計測用基台上に絶対重力計が1台ずつ設置された状態。手前が基台A、右端が石岡FGS(重力基準点)。左奥は基台E。基台Eの右隣が基台D。石岡FGSと基台Dの間に基台Bと基台Cがある。左奥の基台Eには東京大学地震研究所が開発中の小型絶対重力計、それ以外はFG5絶対重力計。右端の石岡FGSには国土地理院の旧型FG5絶対重力計(スーパースプリングは吊られている)。新型FG5には三脚が直立と斜めの2種類あり、手前A基台には斜めの三脚の新型FG5。



第2図 絶対重力計FG5本体部分の写真と機構図。機構図は杉原(2016a)による。

目の朝，基台 A での一晩のデータが得られたのを確認してから，FG5 を一度解体してスーパースプリングを入れ替えた。スーパースプリングは FG5 の重要な構成品の一つで，干渉計の下に組み込むことで地動によるノイズを大幅に減少させる（第 2 図）。実は比較計測会の前の出張準備中に付属のスーパースプリングの不調に気づいたが解決できなかったため国土地理院のスーパースプリングを借用していた。FG5 は GSJ が導入する前にモデル変更があり，GSJ では新型を導入したが，国土地理院は 3 台の旧型機を使用し続け，2016 年頃に 1 台を新型に入れ替えた。そのスーパースプリングを一時借用させていただいた。無事に出張先での計測を終え，比較計測会でも基台 D での計測中は借用器を使用していた。移動した基台 A での計測値を得たタイミングで本来のスーパースプリングを戻したのだが，やはり作動しなかった。しかしスーパースプリングを設置する際に気づいたことがあった。スーパースプリングを載せる台には簡易な丸形水準器が取り付けられていて，それで粗く合わせた後に，載せたスーパースプリングに装着されている二つの気泡水準管で精密に水準を合わせる。借用器スーパースプリングを外した後の台に本来のスーパースプリングを載せると水準管の気泡の位置はずれていた。そこで台の傾きを調整したのだが，もしかしたらスーパースプリング付随の気泡水準管に問題があるのでないか？ この気泡水準管自体を使用者が調整することは禁止事項だが，何らかの原因で水準管がずれてしまっていたのでないか？ そこで試しに再度，借用スーパースプリングを使って台の傾きを合わせてから本来のスーパースプリングに入れ替え，水準管の気泡がずれたままの状態を組み立てると果たして計測できた。その後，禁断の水準管調整を行って以後の計測に備えた。

このように構成部品の入れ替えテストを行ってトラブルの原因を追究する場合にも比較計測会は便利だが，何よりの効用は，総合評価を自分で認識できることだった。比較計測によって同一地点での計測値の機械ごとの差がわかる。多くの場合，調整が甘いと計測値は値が低くなるので，2 台の比較でもどちらが正しい値に近いかわかる。5 台の重力計を相互に入れ替える比較計測会ならば，正解値からのずれの量も推測できる。ずれは機器の状態だけが原因ではなく計測者の技量をも反映する。計測者が技量不足を自覚すれば，助言を求めたり，見様見真似で技量の向上に努めることができる。

今から思えば大変に厚かましいことだが，私は FG5 導入直後の 2002 年に国土地理院重力棟に 8 回通い比較計測した。そのおかげで初心者だった私も平均的な計測技量を身

に着けることができたのだと思う。

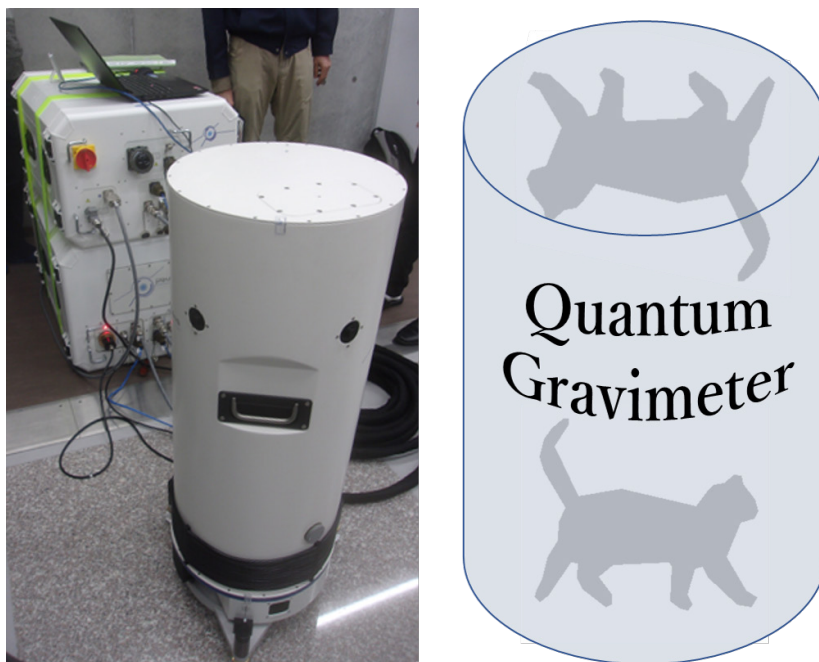
3. 量子型絶対重力計 —フランス人の器械では，量子が落ちて g 値知る—

例年は 4 月に開催される比較計測会がコロナ禍により 2020 年に続いて 2021 年も 9 月に延期されることになった。延期の連絡の際に，国土地理院が最近導入したフランス製の量子型絶対重力計 AQG の見学対応についての案内があった。9 月では AQG を見学できない可能性が大きいので見学希望者には今のうちに日程調整して対応することだった。早速，連絡したところ，石岡測地観測局で 4 月 7 日に見学できることになった。

石岡測地観測局に到着すると新任の国土地理院測地部物理測地課重力係長が出迎えてくださり，名刺交換後に重力測定室に入った。量子絶対重力計 AQG はすでに基台 D に設置されていた（第 3 図左）。宮原ほか（2018）の写真で見えていたが実物を見たのは初めてだった。FG5 よりはやや小さいが，FG5 の製造社が提供する屋外用絶対重力計 A10（杉原，2016b）と似た大きさ・形状だった。FG5 と比べると真空槽内での自由落下過程を計測するのは共通だが落下する物が異なる。FG5 では反射鏡が落下するが AQG ではルビジウム原子が落下する。FG5 で反射鏡を繰り返し落下させる（落下後に持ち上げることを繰り返す）機械的構造が AQG には無いために誤差要因が減り，計測時のトラブル要因も減るので操作も維持も容易だという触れ込みだ。しかし FG5 の気まぐれな挙動は必ずしも落下槽回りだけが原因ではない。FG5 の遠距離移動後に起動しないトラブルが多かった。製造社での定期保守から比較計測会の場合に直接搬入された FG5 がどうしても起動せずに結局送り返されてしまったことがあった。私の経験では干渉計のレンズが転がり落ちていたこともあった。前述の気泡水準計のずれも想定外のトラブルだったが，想定外のトラブル時の対応でこそ力が試される。AQG が喧伝されているほどの安定性・頑健性があるかどうかは使用経験を経て今後明らかになるだろう。

AQG にはスーパースプリングのような機構は無く，地震計のようなセンサーの記録で補正しているらしい。この点は最初に導入した FG5L 絶対重力計に似ている。ただし AQG は FG5L よりかはるかにバラツキが小さい計測値を出す。

AQG のマニュアルは薄くて参考論文（Ménoret *et al.*, 2018）の方が詳しいという。最初に FG5L を導入した時のマニュアルも薄かったので製造社に問合せを凌いだ。FG5



第3図 量子型絶対重力計 AQG 本体部分の写真とイメージ図。写真の左奥は AQG のコントローラ部分。

にアップグレード後、マニュアルは徐々に内容が充実していったが国内の経験者への問合せも役立った。国土地理院重力係が作成したトラブル対策ファイルにも何度も助けられた。国土地理院重力係のメンバーは2～3年で交代しても計測技量は引き継がれるが、その秘訣の一つは、このトラブル対策ファイルだと思っている。なお国土地理院では2018年に重力測量についてまとまった報告を発表した(宮原ほか, 2018; 菅原ほか, 2018; 山本ほか, 2018a; 山本ほか, 2018b; 吉田ほか, 2018)。歴代の国土地理院重力係の方々が書いた各論文の分量はかなりのものだが中身はさらに重厚だ。

私が主に関心するのは長期間の重力変動観測によるモニタリングへの適用だ。参考論文にはモニタリングへの適用可能性も示されているが、実験的計測が必要だろう。GSJがシントレクス重力計CG3Mを導入して間もない1997～1998年に、天文台水沢の江刺観測坑内で連続計測を行い、超伝導重力計データの解析結果と比較したことがあった。潮汐解析プログラムBAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991)の開発者でもある田村さんは解析結果の差がシントレクス重力計の記録の最小単位 μGal 以下であることに感心していた。私は、その結果も含めて地熱地域での重力モニタリングでの連続計測の利用可能性を発表(Sugihara, 1999)して好反応を得た。新しい装置の導入は困難もあるが期待以上に活躍することもある。AQGも有望な装置だとは感じられたので、今後モニタリング目的でも導入されることを期待し

たい。

量子力学と聞くと、私はシュレーディンガーの猫(第3図右)の話などを思い出して身構えてしまい、参考論文を読んでもなかなか理解が進まないのだが、国土地理院重力係の方々には屈託なく操作して色々と説明して下さった。世代の差だろうかと思った時に、今の国土地理院重力係のメンバー全員が自分よりも恐らく30歳以上若いのだと自覚した。若くても経験知はしっかり引き継がれており、FG5の経験に基づいた質問をしても的確な答えが返ってきた。

重力計測室に入るときに廊下で見かけたシントレクス重力計携行用鞆が多数並んでいたことが気になっていたので聞いてみると、航空重力計の導入に伴って効率的な計測のために補助計測用の地上可搬型重力計測にシントレクス重力計を活用し始めたとのことだった。1990年代に登場したシントレクス重力計は自動重力計の手軽さが受けて急速に普及したが、国内では今でも地上用可搬型重力計としてラコスト重力計を使用している会社が多い。デジタル式のシントレクス重力計の製品寿命が短いことが理由の一つだが、国土地理院でもラコスト重力計を主力機として使い続けていた。こちらはいち早くシントレクス重力計を導入して性能評価をした上で、熟練者が扱うならばラコスト重力計の方が良い計測値が得られると判断していた(山本, 2018b)。絶対重力計比較計測会にも多数のラコスト重力計を持ち込み、空き時間に計測技術の引継ぎを行っていたのはラコスト重力計の計測技術を習得できなかった私には

羨ましい光景だった。そのラコスト重力計の出番が減るのは残念に思ったが説明には納得した。

4. 結語 —新治、筑波をすぎて幾度—

つくばから石岡への行き来には朝日トンネル(第1図)を通る。朝日トンネルが2012年に開通する前は朝日峠を越えるか、筑波山から東に続く尾根筋を迂回していた。かつて小野小町が朝日峠を往復したという伝説が地元にあるが、私が推測する伝説の真相は、石岡・つくば間を2往復した^{ひな}鄙には稀な風情の娘たち。小町の時代と約250年の時差があるが、祖母が伝説的歌人の伊勢大輔で叔母も勅撰歌人となれば伝説が生まれても不思議ではない。叔母達の問答歌を^{せどうか}旋頭歌風に切り取れば、「東路にこちのかえしの風のつけしは、身にしみき都の花のしるべと思うに(後拾遺集1133と1134)」：私が依拠する宇治拾遺物語では、駆落ちして都人から田舎人になった母の哀話でありながらも「ゆゆしかりける者どもの心の大きさ広さかな」と東国人を感嘆したくだりが興味深い。

都人ではない筑波在住の私では立ち位置が異なるが、この挿話は絶対重力計比較計測会への思い出につながる。比較計測会は外の風を感じる良い機会だった。東京大学地震研究所や京都大学理学部などからの参加者の豊富な経験談やノウハウを見聞きした。期間中に都合をつけて顔を出す国土地理院重力係OBの方々との再会も楽しみだった。緒言の中で「FG5導入後しばらくは一人で担当」と書いたが、実は国土地理院重力係に大いに助けていただいた。福島県の現場で計測不能となったFG5を国土地理院に直接持ち込んで相談したことがあった。原因が落下槽のドライブベルトの破断であることをすぐに見抜き、落下槽を開けてドライブベルトを交換し、真空引きまでしてくださった。そのおかげで、すぐに現場に戻って再測定できた。FG5が製造会社での初めてのメンテナンスから戻ってきた時にも、長距離輸送直後のトラブル発生を危惧して、国土地理院に持ち込んだ。素早く真空引きして動作確認し、直後の九州出張に備えることができた。その結果は、地熱地帯でのハイブリッド重力モニタリングの成果につながった(Sugihara and Ishido, 2008)。そうした時に「新型装置も扱ってみたいから」と言いながらテキパキと支援してくださったのだ。当時は気遣いの言葉と思って「心の大きさ広さかな」と感嘆したのだが、進取の気質も現れた言葉だと今は思う。FG5を早い時期に導入して実績を重ねてきたこと、そして今回のAQGの導入、さらに各種新技術への目配り(宮原ほか, 2018)も、進取の気質が引き継がれてきた

証左だろう。

AQGを見学した帰り道、朝日トンネルの両側に点在する梨畑の白い花が美しかった。次に石岡に向かう9月には梨が実っているだろう。私にとっては次回は最後の比較計測会になる。新治、筑波を過ぎて幾度か？旧筑波町を越えた八郷では13回、旧新治村を越えた石岡では4回、参加してきた。これまで20年間、絶対重力計測に関わってきた中で比較計測会から得たものは大きく、主催者の国土地理院重力係にはとりわけお世話になった。求められて当方から調整用機器やノウハウ情報を提供したこともあったがGive/Take比は高々数%だろう。

感慨を今風言葉で表せば、「ただ感謝しかありません」。

文 献

- Ménoret, V., Vermeulen, P., Le Moigne, N., Bonvalot, S., Bouyer, P., Landragin, A. and Desruelle, B. (2018) Gravity measurements below 10^{-9} g with a transportable absolute quantum gravimeter. *Scientific Reports*, **8**. doi:10.1038/s41598-018-30608-1
- 宮原伐折羅・吉田賢司・山本宏章・松尾功二・宮崎隆幸・宗包浩志(2018)国土地理院の重力測定の展望—測定技術と重力基準の将来像—。国土地理院時報, **131**, 95-108.
- 菅原安宏・宮原伐折羅・吉田賢司・山本宏章・福田洋一(2018)南極地域における国土地理院の重力測量—地球規模の重力場測定への貢献—。国土地理院時報, **131**, 109-121.
- Sugihara, M. (1999) Continuous gravity measurements for reservoir monitoring. *Proceedings, 24th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University*.
- 杉原光彦(2010)絶対重力計測の現場から。地質ニュース, no. 665, 53-62.
- 杉原光彦(2016a)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(2016b)絶対重力計測の現場から—屋外計測・輸送編—。GSJ地質ニュース, **5**, 80-83.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics*, **73**, WA37-WA47.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophysical Journal International*, **104**, 507-516.

山本宏章・宮原伐折羅・吉田賢司・菅原安宏・宮崎隆幸
(2018a) 国土地理院の重力測量. 国土地理院時報,
131, 21-52.

山本宏章・宮原伐折羅・吉田賢司・菅原安宏・松尾功二・
宮崎隆幸(2018b) 国土地理院の重力測量の歴史一観
測技術と重力基準の変遷一. 国土地理院時報, 131,
1-19.

吉田賢司・矢萩智裕・平岡喜文・宮原伐折羅・山本宏章・
宮崎隆幸(2018) 日本重力基準網 2016 (JGSN2016)
の構築. 国土地理院時報, 131, 53-93.

SUGIHARA Mituhiko (2021) A field report of absolute
gravity measurements, episode IV, Ishioka.

(受付：2021年5月27日)