

絶対重力計測の現場から —神岡編—

杉原光彦¹⁾

1. 緒言

ニュートリノに質量があることを神岡坑内での観測によって発見した業績を評価されて梶田隆章氏が2015年のノーベル物理学賞を受賞した。そこで同じ神岡坑内での観測経験を交えて絶対重力計測の課題を検討してみたい。「絶対重力計測の現場から」の記事(杉原, 2010)を書いたから5年が経過し、この間、産業技術総合研究所内外で絶対重力計を共同で使用する機会が増えた。その一方で最近導入した超伝導重力計の活用に時間をとられて、絶対重力計測に関しては、ややおざなりになっていたことが気になってしまったのである。

産業技術総合研究所地圏資源環境部門では、地熱貯留層変動探査技術の開発に適用するために2001年に絶対重力計FG5-L/003を導入し、翌年FG5/217にアップグレードした。以後、現在に至るまで一貫して地圏資源環境研究部門で維持・管理・運用してきたが、主たる使用目的には変更があり、現在はCO₂地中貯留モニタリングの目的に使用している。東京大学地震研究所が絶対重力計測と可搬型相対重力計による計測を組み合わせたハイブリッド重力モニタリングを提唱し(大久保, 2001)、火山活動モニタリング等で成果をあげた(Furuya *et al.*, 2003など)のにならって、我々も地熱貯留層変動探査にハイブリッド重力モニタリング手法を適用した(Sugihara and Ishido, 2008)。一方、CO₂地中貯留研究においては、超伝導重力計による高感度連続重力測定の実用化を始めた(相馬ほか, 2014; 杉原ほか, 2014)。超伝導重力計は1990年代前半には国内にすでに5台導入されていて、日本は超伝導重力計大国と称されたほどであった(瀬川, 1994)。超伝導重力計は他の重力計に比べて圧倒的に高感度・低ドリフトであるが、それでも相対重力計であるので、ドリフト評価は必要である。最も直接的なドリフト評価法は絶対重力計との並行測定であり(Imanishi *et al.*, 2002)、我々もその目的で絶対重力計を使用している。

東京大学地震研究所では松代と神岡の坑内で超伝導重力

計による高感度連続測定を実施している(Imanishi *et al.*, 2007, Imanishi, 2009)。超伝導重力計のドリフト評価、感度評価を目的とした絶対重力計との並行測定を行うために、我々の絶対重力計FG5/217を利用したいという希望が伝えられた。これに対して、機器の有効活用という意義に加えて、超伝導重力計と絶対重力計の両方の活用に豊富な実績のある東京大学地震研究所から計測法を学ぶ良い機会になることも期待して共同での計測を実施することとなった。日程調整の結果、まず松代観測点で並行測定を実施したあと、神岡観測点に移動して並行測定を実施することになった。産業技術総合研究所からは、松代での計測には地質情報研究部門の名和一成と宮川歩夢が参加し、途中で名和と杉原が交代して杉原は松代の撤収作業から、神岡への移動、計測に参加することとなった。

2. ノーベル街道をゆく

2013年7月10日朝、前夜からの計測を終了し、絶対重力計一式を解体・梱包・積載して松代を出発した宮川と杉原は、富山インターチェンジで北陸自動車道を下りて国道41号線、通称ノーベル街道に入った。2002年に富山市出身の田中耕一氏がノーベル化学賞を、神岡町で研究していた小柴昌俊氏がノーベル物理学賞を受賞したのを機に、富山市から神岡を経て高山に至る国道41号線をノーベル街道と称することを地元で提唱されるようになった。2000年にノーベル化学賞を受賞した白川英樹氏が小学生から高校生までの期間を高山市で過ごしたこと、1987年にノーベル生理学賞を受賞した利根川進氏が富山市で小中学時代を過ごしたことも加味された。また、名古屋大学にゆかりのある受賞者が相次いだことから、延長して名古屋市までをノーベル街道と称することもあるようだ。

富山県南端の猪谷までは道路、鉄道、神通川は並走してきたが、ここで左右二手に分かれる(第1図)。道路は左がノーベル街道(越中東街道)、右は国道360号線(越中西街道)に。神通川は左が支流の高原川、右は本流だが、

1) 産総研 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門

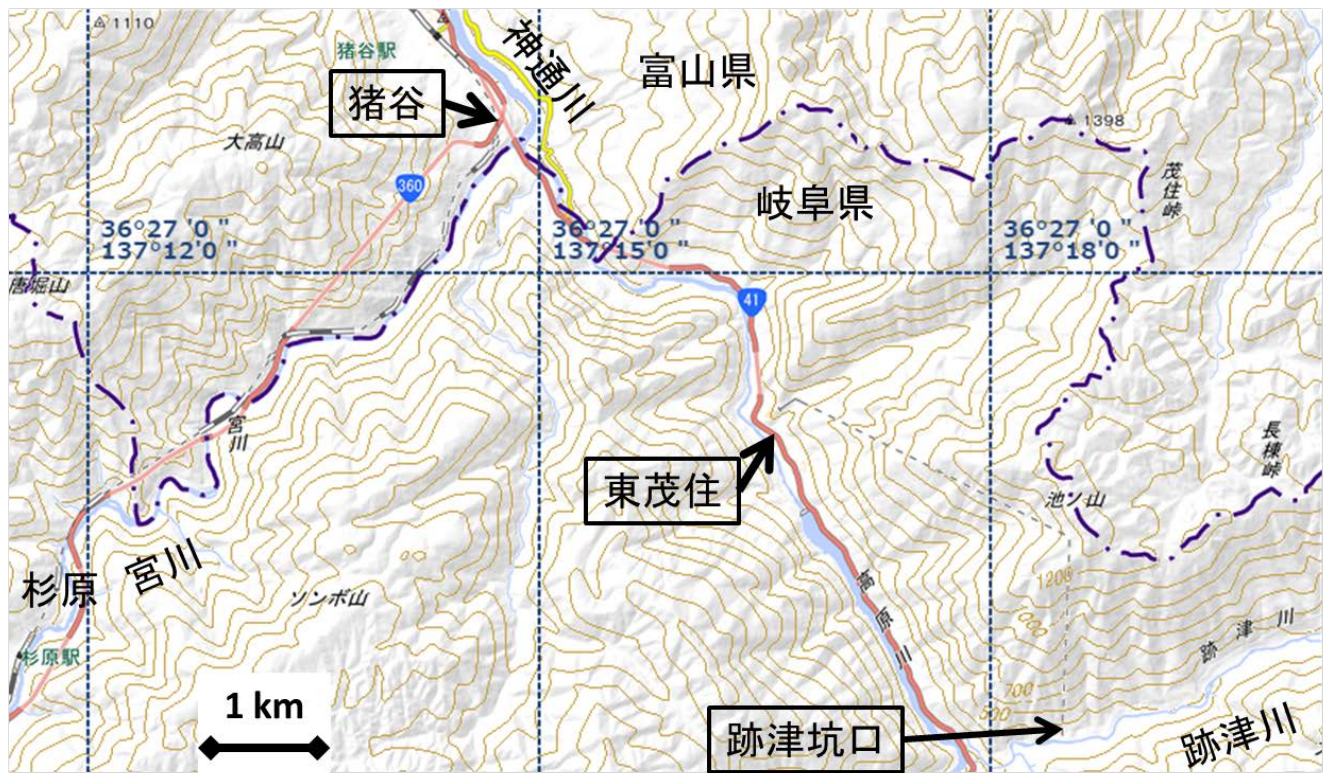
キーワード：神岡、ノーベル賞、絶対重力計、ノーベル街道、重力波、干渉計、司馬遼太郎

通称は宮川に変わる。鉄道については猪谷駅で左方向に分岐していた神岡線が廃線となった後は高山本線だけが右方向に続く。ノーベル街道をそれて右に行けば宮川町杉原地区にある飛驒最北端の杉原駅に到着するはずだが、宮川と杉原はノーベル街道を進み、約4 km 走って東京大学宇宙線研究所重力波推進室神岡分室がある東茂住^{ひがしむすみ}に到着した。近くにはノーベル街道散策路の看板があった。

司馬遼太郎の街道をゆく「飛驒紀行」(司馬, 1990)の最後に東茂住が登場する。高山から越中東街道を北上して東茂住に到着した後、その日のうちに高山市に戻って「飛驒紀行」を終えている。16世紀末からの飛驒高山の繁栄を支えた鉱山開発を主導した茂住宗禎に、司馬遼太郎は強い興味をいだいて所縁の地、東茂住を訪れたのだった。司馬(1990)によれば、16世紀のある時期までの日本では金は専ら川などで採り、鉱石を採って精錬することはしなかった。茂住宗禎は露頭の発見や採掘・冶金についての新技術を持っていて1586年に池之山で銀の鉱脈を発見した。以後20年間にわたって鉱山開発し、飛驒高山に巨万の富をもたらした。その功績で商人出身の茂住宗禎は領主金森氏の一族一門の扱いとなり、茂住には高山をものぐほどの人が集まった。その後、幕府は金森氏を出羽に国替えして飛驒は天領となったが、神岡諸坑の銀の生産量は

落ちて銅山となった。衰退の原因は茂住宗禎の関与がなくなったからとも考えられる。幕末に銅山が衰退したあと明治期に洋式精錬法が導入されて銀と鉛が主となった。その後、亜鉛と鉛が主な生産物となったあと、2001年に閉山した。司馬遼太郎は神岡の鉱山開発史を辿り、20年間の最盛期を茂住にもたらした茂住宗禎の技術力を讃えた。当時は広大だったという茂住宗禎の住居の痕跡のうち司馬遼太郎が確認できたのは所縁のある寺だけだった(第2図)。

余談だが、司馬遼太郎が亡くなった1996年にはノーベル街道の呼称はなかった。存命であれば司馬遼太郎による「ノーベル街道をゆく」が実現していたはずだ。様々な逸話(前向きで技術的な話題が多い)を余談として綴っていくのが司馬遼太郎の流儀に思えるが、ノーベル街道にはそれに適した逸話が多い。2002年の小柴昌俊氏の物理学賞に関しては、カミオカンデのセンサー開発に貢献した製造会社の社長の発言が話題になった(辻, 2015)。茂住宗禎の異能に注目して東茂住に足を運んだ司馬遼太郎であれば熱心に取材して様々な逸話に溢れた紀行文を著したことだろう。東茂住に係る2回目のノーベル物理学賞の報も大いに喜んだに違いない。



第1図 富山県猪谷から東茂住、および神岡坑口の位置図。地理院地図(電子国土 Web, <http://maps.gsi.go.jp/#5/35.36222/138.731389>)から引用。



第2図 茂住宗禎邸跡を示す看板(上)と付近の風景(下)。

3. 神岡坑内へ

東茂住からノーベル街道を高原川に沿ってさらに上流方向に進むと断層で有名な跡津川との合流点に至る。ここで支流の跡津川に沿った道路を1 km進むと跡津坑口がある。坑内には登録された車両しか入れない。絶対重力計一式と我々自身もチャーターした車両に乗り移って坑内に入った(第3図)。年に1度の一般公開を週末に控えて、坑内各所で展示の準備作業が行われていた。跡津坑口から北に向かって伸びる坑道は道幅もあり、通常のトンネルを走行する感覚だった。跡津坑口から北に約1.5 km進むとSK入り口前交差点に達する。SKはスーパーカミオカンデの略称である(第4図)、2日後の絶対重力計測終了後に、研究代表者の東京大学地震研究所の今西祐一氏はスーパーカミオカンデを見学する機会を設けてくださった。廊下にはこれまでに見学に訪れた要人のサインや研究成果を説明するポスター展示があった。その中には2015年ノーベル物理学賞の対象となった研究についての説明もあった。光電子増倍管の実物展示もされていた。スーパーカミオカンデ実験水槽室に入ると頭上の空間は広がるが、床下にあるはずのさらに大きい水槽内部を覗くことはできなかった。意

外に大きい光電子増倍管が数多く暗闇の水中で静かに鎮座して、その瞬間を待機している光景を想像して厳粛な気持ちになった。

SK入り口前交差点には入退室をチェックするボードがあり、今西氏が車を降りた(第5図)。ここからゆるい上り坂を約150 m進んだところが駐車場になっている。駐車場で車を降りてすぐそばのドアを開けると実験室だった。実験室を奥に進むと超伝導重力計室があり、部屋の奥に超伝導重力計が設置されていた。ここは以前、プロトタイプの重力波観測用20 m干渉計が設置されていた場所であった(大橋, 2001)。

4. 絶対重力計測

稼働中の超伝導重力計は旧型でヘリウムが少量、漏洩する。ヘリウムは絶対重力計FG5に内蔵されているルビウム原子時計に悪影響を及ぼすことが知られているので、それを避けるために少し離れた入口付近に絶対重力計を設置した(第6図)。その地点では2005年から2008年にかけて京都大学のFG5/210による計測が行われていた(東ほか, 2009)。



第3図 機材一式を積み替えた車（上）と坑口（下）.



第4図 坑内位置を示す看板と重力観測点の位置.



第5図 スーパーカミオカンデ交差点.



第6図 2台の重力計（左：手前が超伝導重力計で右奥が絶対重力計； 右：絶対重力計（写真提供は東京大学地震研究所の今西祐一氏.））.

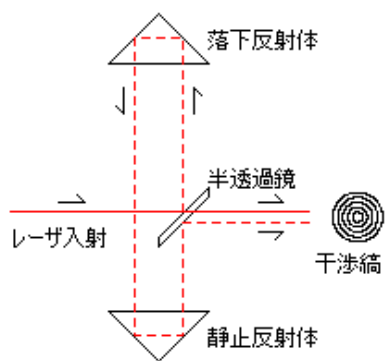
すでに松代観測点での絶対重力計測の際に地震研究所のノウハウの一部を伝授されていた。例えば、鉛直性調整に際しては、干渉計の上下の光路上にアルコールプールを差し入れてアルコール面での反射光を直進光と比較して各々の光点が一致するように調整する（第7図）。鉛直からのずれがあれば重力計測値には、ずれの角度の余弦に比例した誤差が生じる。光点が一つ分ずれていれば4マイクロガル（ μ Gal）相当の誤差が生じ、二つ分ならば16マイクロガルもの誤差になる。地震研究所ではアルコールプールの中心に光線があたるように差し入れる位置を考慮していた。アルコール面が表面張力で水平面からずれることの影響を懸念していたのだ。アルコールの表面張力は水の表面張力よりもかなり小さいが、それでもなお気にしていたのだ。

その一方で私たちが行っている手順もほめていただいた。絶対重力計の原理は真空中の自由落下過程が重力値で定まることを利用して、自由落下する落体の軌跡を計測して重力値を推算する。FG5型絶対重力計の場合は落下槽内で20 cmの真空中を0.2秒で自由落下する反射体と、その直下に設置してある静止反射体での反射後のテストビームと直進した参照ビームによって生じる干渉縞を数えて自由落下過程を計測する。静止反射体は地動の影響を除くためにスーパースプリングと呼ばれるバネで吊るされている。落下反射体が放たれる際の振動の影響を避けるために落下槽を支える台とスーパースプリングを支える台は、各々切り離されており、独立に水準調整する（第8図）。したがって、計測時の水準調整操作によって落下槽の台の

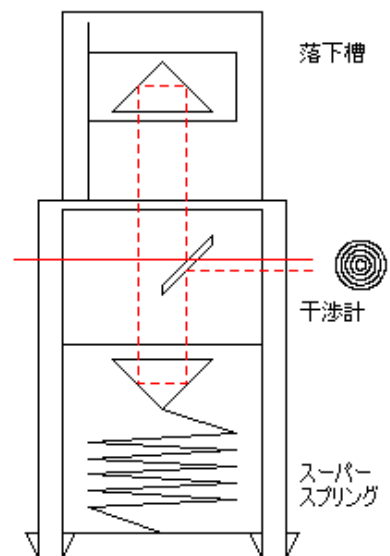
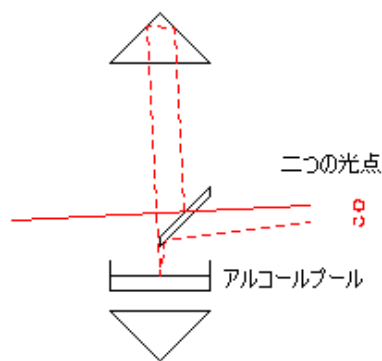
高さとしスーパースプリングの台の高さが変化する。微小量ではあるが、この高さを設置時だけでなく、終了時にも計測していることを評価していただいたのである。これは大学教官ならではの教育的配慮だったかもしれない。

神岡ではノイズレベルの非常に低い測定データが得られた（第9図）。FG5/217にとっては数日前に計測を実施した松代観測点が国内で最も静かな地点だったが、神岡観測点で早速更新された。通常、観測に際しては極力ノイズレベルが低い場所を探して行く。重力波観測の場合は、よりよい環境を求めてプロトタイプの20 m干渉計を東京都三鷹市から神岡の地下に移設した（大橋，2001）。地震研究所の超伝導重力観測点もノイズの少ない地点を選んだ。松代の地点は茨城県石岡市から移設したものだ（Imanishi *et al.*, 1998）。これに対して、私たちが通常実施している観測は、ノイズの大きい場所であっても、そこで計測する必要があって行っている。テキサス州ファンズワースでのデータと比較すれば（第10図）、神岡とのノイズレベルの違いは一目瞭然である。余談だが、「ファンズワース、重力」をキーワードとして検索するとノーベル賞級の有名建築家ミースの代表作ファンズワース邸（重力の制約を感じにくい建築）を差し置いて杉原（2015）が上位に現れる。誠に恐縮だがこれは密かな喜びでもある。

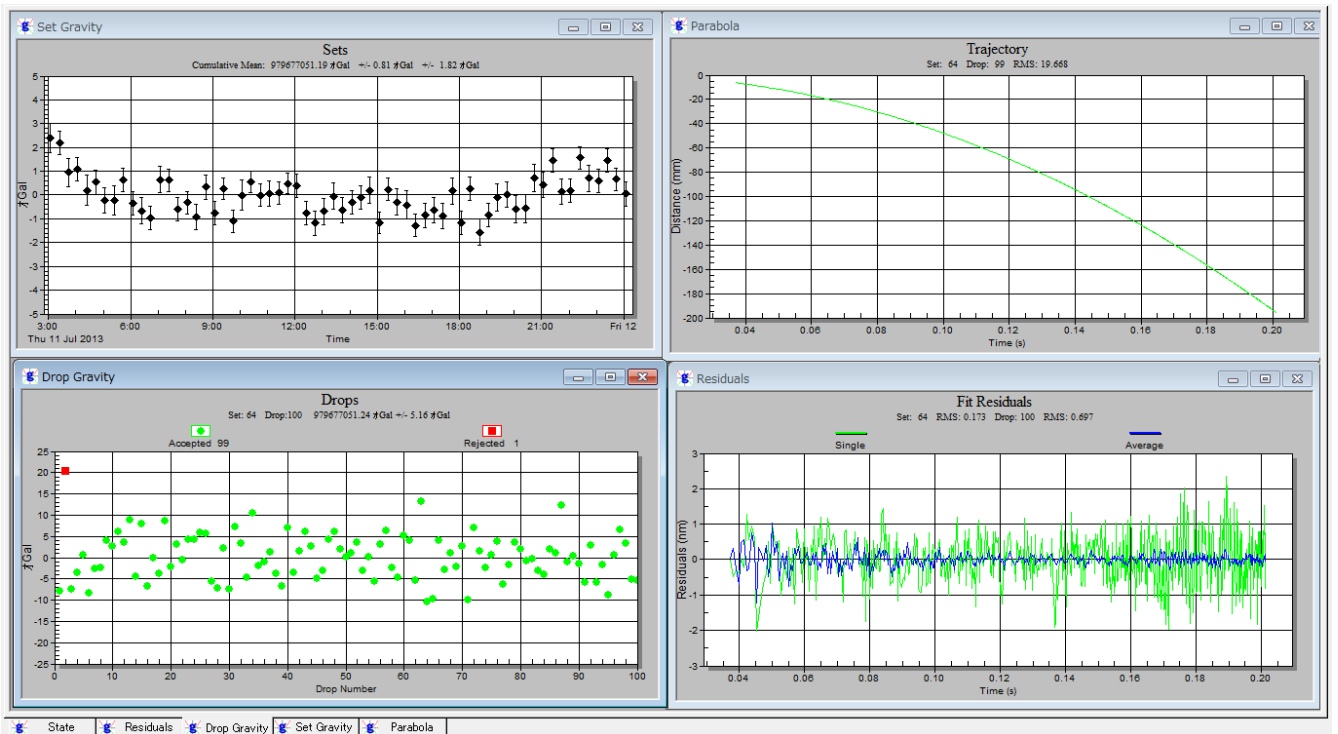
2015年にも神岡で再度計測を行った結果ドリフトが評価され、なかなか興味深い結果が得られた（今西ほか，2015）。以前の計測結果（東ほか，2009）と比べると2011年東北地方太平洋沖地震を機に神岡観測点での重力経年変化の傾向が大きく変わったように見える。これは



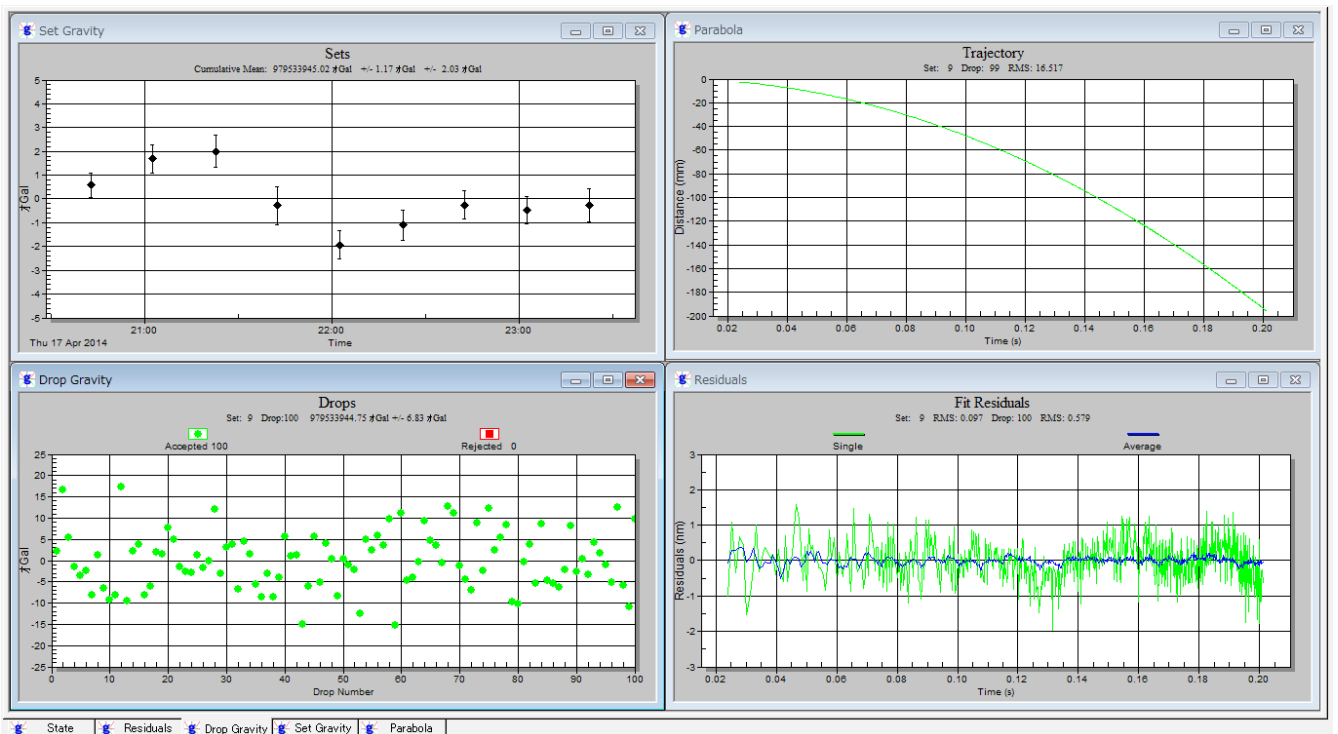
第7図 絶対重力計FG5の干渉計（左：計測時；右：鉛直性調整時）。



第8図 絶対重力計FG5の構成図。



第9図 神岡での記録例。絶対重力計 FG5 による計測中の画面の例。右上：1 回の落下試験で計測された自由落下の軌跡。0.2 秒間で 20 cm 落下する。右下：自由落下の軌跡から重力加速度 g を推定した計算値と観測値のずれ。横軸は 0.2 秒間全体、縦軸は ± 3 nm の範囲で示した。左下図：100 回の落下試験で求められた重力値の分布。 ± 25 μ Gal の範囲で示す。左上図：100 回毎の落下試験による推定値と推定誤差の時間変化。 ± 5 μ Gal の範囲で示す。



第10図 テキサス州ファンズワースでの記録例。表示形式と測定範囲は同じ。神岡の結果と比べると 100 回の落下試験による重力値のばらつきが大きさが目に付く。

是非、今後も観測を継続して追求したい課題だ。この結果もさることながら、私には絶対重力計の価値を再認識するデータでもあった。最近、導入して間もない超伝導重力計の高感度連続記録の特徴に目を奪われ、絶対重力計は超伝導重力計の検定用の装置として、超伝導重力計記録を評価する上での参考データとして見るようになっていた。しかし神岡での観測事例によって両方の記録が各々の特徴を反映した同等の価値を持っていることを再認識した。

5. 神岡に係る3回目のノーベル賞への期待

2015年ノーベル物理学賞受賞で神岡に関しては2回目のノーベル賞となった。二度あることは三度あるという。早くも3回目のノーベル賞への期待もささやかれている。それは残念ながら私たちではない。今西ほか(2015)は確かに有望な計測結果ではあるが、ノーベル賞候補研究とはカテゴリーが異なる。今後さらに目覚ましい展開があったとしても受賞者数には3名までという制限がある。またほとんどの場合は対象となる成果が出てから数10年経過しての受賞となり、その時に存命でなければならない。したがって私が受賞になる可能性は限りなくゼロに近い。そもそも地球物理学の分野はノーベル物理学賞の対象になりにくい。1980年代にわずかに可能性を感じられたことがあった。第5の力の可能性が議論され、検証実験として我々に馴染み深い規模での貯水池や塔での計測実験もなされた(大槻, 1988)。実験上の問題点について私なりに突っ込みどころがあったが、それではいかにも心もとない。第5の力の話は立ち消えになったようだ。このときには絶対重力計の開発チームも関わっていた(Faller, 2005)。

神岡での3回目のノーベル賞の可能性があるのは1つではない。いずれも目標が達成されれば物理学の根幹に係る大発見となる。例えば、ハイパーカミオカンデ。最初のノーベル賞を生み出したカミオカンデ、今回のノーベル賞を生み出したスーパーカミオカンデとスケールアップした検出器をさらに20倍大きくしたハイパーカミオカンデ計画がある。そもそもカミオカンデ計画の目標だった陽子崩壊の検出をねらう。ただし2025年の実験開始予定でまだ先だ(赤谷, 2015)。これは神岡での4回目のノーベル物理学賞の候補と言えるかもしれない。3回目のノーベル賞は暗黒物質検出(中島, 2015)についても可能性があるが、私が最も期待するのは重力波の検出だ。検出器が干渉計ということもあるし、「重力」同士で親近感があるからだ。

アインシュタインが1916年に一般相対性理論を提唱してから100年になる。一般相対論によれば重力は時空の歪みで生ずるが、時空の歪みが伝搬する波動現象が重力波だ。検出器は干渉計だ。原理的には絶対重力計の干渉計と同じだ。神岡で建設中の重力波検出用の干渉計の感度は銀河系のサイズに対して1cmの歪みの検出レベルと聞くと、人智を超えた試みに思えてにわかには可能性を信じられないが、複数の国際チームによって進められている(国立天文台, 2014)。神岡の現場付近で行きかう大型トラックに、その熱気を感じたし、掘進率の新記録を作って完成を急いでいるという報道(鹿島建設, 2013)に2017年の観測開始に向けて総力を上げて取り組む強い意志を感じた。

小出(1984)は地下空間利用に関して、日本は地下街など、すでにかなり活用している一方で、地下へのアレルギーのようなものがあると述べた。小出(1984)には最後に当時建設中だった神岡の陽子崩壊実験施設(後年のカミオカンデ)の図が示されているが、神岡での2回のノーベル賞受賞の明るいニュースは地下へのアレルギーを払拭したのではないだろうか?小出(1984)は、また地下利用技術は歴史的にも国家の技術レベルを端的に示すとも表現した。日本の坑井掘削技術が米国・ロシア(当時はソビエト連邦)に比べて見劣りがすることを指摘した。神岡での地下実験施設工事は、この点でも貢献しているように思える。

重力波検出のターゲットの可能性もいくつかあるが、注目したいのは金・銀等の重い元素を作るrプロセス(金井, 2012; 田中, 2015)の検証だ。rプロセスが実現する場として最近、有力視されているのは2つの中性子星の合体だ。この際に重力波も射出される。神岡鉱山は閉山直前は亜鉛鉱山として有名だったが、その前は銅(新田ほか, 1973)、江戸時代の最盛期には銀が主産品で金も採掘された(司馬, 1990)。銀を生産していた神岡で金銀生成の瞬間を検出できれば、それは素晴らしいことだと思う。神岡で3回目のノーベル賞も間違いのないだろう。

6. ノーベル賞研究と先達の教え

ノーベル賞受賞報道では梶田隆章氏の穏やかな人柄の一方にある観測に対する厳しい姿勢を讃えている。中でも保坂(2015)の記事が印象的だ。『ニュートリノは、きわめて物質を透過しやすい。だから、たまにしか検出器に引っかからない気まぐれなこの素粒子を、こちらは、つねにベストな状態で待ち続けなければならない。「実験」のように、てきぱきと装置を整備して、次から次へと作業をこなすと

いうわけにはいかない。観測は、自然相手の「待ち」の作業なのだ。毎日が、この緊張感の繰り返し。勝算だって、十分にあるわけではない。世界の科学者が納得するデータがたまるまで、それが何年も続く。それだけではない。梶田さんたちがあきらかにした「ニュートリノには質量（重さ）がある」という事実は、当時の理論とは相いれないものだった。理論的に「たぶんこうだろう」と予測されていたものを観測で確認した、というタイプの研究ではないのだ。（中略）新しい結果が出てきたら、それを徹底的に疑う。疑って疑って、それでも否定できなかったものが、科学的真実として生き残る。この科学の流儀を、社会学者のロバート・マートンは、科学を構成する大切な要素として「系統的懐疑」と名づけた。だから、「ニュートリノに質量がある」と主張する梶田さんたちは、当時の物理学界では、期待されつつも疑いの目で見られるのが当然だったのだ。頼りになるのは、自分たちが集めた観測データだけ。これが、「観測データが私を支えてくれた」という梶田さんの言葉のほんとうの意味だ。自分の絶対重力計測と比べると観測の厳しさには雲泥以上の差があるにしても、共感できる言葉だ。観測の厳しさと向き合うために先達から受けた教えを振り返ってみる。

東京大学地震研究所から学んだことはすでに述べた。絶対重力計測に関して困難が生ずると、色々な人に助言を求めたが、やはり製造元に問い合わせることが多かった。製造元のD氏には懇切丁寧に教えていただいた。辛抱強く調整する必要がある場合などは根気よく励ましてもいただいた。調整のための赤いスポットが見えない場合など、まず接眼レンズが機能しているかどうかの確認方法から教えてくれた。接眼レンズをはずして星を見るように言われて、オリオン座の一番明るい赤い星に狙いを定めた。接眼レンズを覗くが見えず。接眼レンズに問題があったのか？と思った時に赤い光が視野に入り、「ベテルギウスが、いつもより大きく見えました。膨張したかもしれません」と連絡すると、「私もベテルギウスの行方が心配です」という返信があった。表現するのが難しい奥義のような手法をかみくだいた表現で教えていただいたこともある。D氏が言っていたことで、まだ実行を躊躇していることがある。それは1日1回の計測毎に絶対重力計を組み立て直すことだ。

国土地理院の歴代の重力係の方々にも大変お世話になってきた。特に導入初期にお世話になったことは杉原(2010)に書いた。担当者は人事異動によって2~3年で入れ替わっていくのだが、ノウハウは丁寧な記録によって引き継がれている。私はといえば、導入以来、係って

きたことでかえって記録をおろそかにしてしまい、トラブル発生時には国土地理院のトラブル対応集を度々確認させていただき始末だった。国土地理院が主催して年に1度筑波山麓で行われる比較観測会も貴重な情報交換の場なので、できるだけ参加することにしている。

以前、絶対重力計測を含む2週間ごとのハイブリッド計測を半年間、外注作業として行ったことがあった。実際の測定作業を担当したのは、確かな水準測量技術を買われて調査の度に臨時で九州から出向いてきていたK氏で、私よりも年長だが謙虚な方だった。測量器具以外の計測器を扱った経験がなくて、オシロスコープもデジタル電圧器も初めて使用されるとのことだったが、手順書に忠実な上に気付いたことは細かくメモして測定作業時に参照していた。手順書に出てきた機材には「オシロ」「デジボル」というようにいちいちラベルを付けていた。得られた計測結果は良好だった。私は、ラベルをそのままにして使用していたのだが、時の経過とともに剥がれ落ち、私の計測も雑になった。絶対重力計導入直後は、事実上、一人で新しい装置を扱って行かなければならないということで、英文マニュアルと導入時に受けた取扱い説明時に撮影したビデオ記録を参考にして手順書とチェックシートを作り、それをいちいち確認記入しながら計測していた。その後に手順書の中身が変更しても修正が追いつかず、やがてチェックシートへの記入も省略して記憶に頼って行うようになってしまっていた。

手順書を作成した時に意味を良く理解せずに書き写していたことがある。絶対重力計を設置する際に目印を南向きに合わせることになっている。その場合はアルコールプールを使う調整作業などは東側から行うことになるが、現場によっては東側に十分な作業空間を確保できないことがある。なぜ南向きにするのかという理由を理解すれば対応方法が見えてくる。それはコリオリ力による影響を最小限にするためだった(Niebauer *et al.*, 1995)。北向きでも同じ効果があることを理解していれば現場計測の際の選択肢は広がる。

こうした先達の教えと自分の経験を反映させるには、手順書・チェックシートの改訂が有効だ。この機会にぜひ、取り組みたいと思っている。

7. 結語 —名だたる方の教えを承けて—

この稿を書いている今日は旧暦の重陽の節句にあたる。平安時代には、菊の花の露を染み込ませた綿で顔を拭いて不老長寿を祈ったと言われ、とりわけ名だたるお宅の菊

の花ならば効果が大きいとして尊重されたい(中島, 2011)。名だたる宿の露ならぬ、名だたる場所の空気に触れたことで絶対重力計 FG5/217 の寿命が延びることを期待したい。実際には前述のように名だたる方々の教えを継承することが計測の寿命を延ばす効用があるのだと思う。

本稿執筆を中断していた。米国の製造会社での点検を終えて戻ってきた絶対重力計の調整に手間取っていたのだ。出張予定日が近づいても不安定な動作の原因がつかめずにいたが試行錯誤してやっと回復したところだ。思い返せば、こういう不安とは常に隣り合わせだった。FG5 はいつでも誰でもすぐ使えるという装置ではない。汎用の測定器とまではまだ言えない。使用者の努力を要する装置だ。このようなつきあいはこれからも続くだろう。不断の努力までは要しないが普段の努力は必要だ。絶対重力計の移送後に不安定な挙動を示すことはよくあり、米国からの返送直後に顕在化することもあった。購入後の数年間は私の装置ではトラブルはなかったが、比較観測会場で、米国から戻ったばかりの絶対重力計がどうしても作動せずに送り返されたこともあった。FG5/217 も、調整時にどうしても光が見えず、中を開けたらレンズがころがり落ちていたのを見つけて接着剤で固定し直したこともあった。

メンテナンス費用もかかる。基本的には年に1回、米国の製造会社での点検を行ってきた。その予算の確保のために色々な研究テーマに係ったし、維持を断念すべきではないかと迫られたこともあった。しかし地圏資源環境研究部門だったからこそ、絶対重力計を導入できて、維持してこられたということも意識する必要がある。今ならば、精度はやや劣るが計測環境には強い A10 型絶対重力計を使用しないのかという批判もあるかもしれないが、FG5 と同じくらい高価な A10 を簡単に導入はできないので、既存の FG5 を活用する方法を工夫する必要がある。

私自身が FG5 によって鍛えられてきたという側面がある。臆面もなく私自身を振り返れば、記憶は良いが感度は低い子供だった。小学生の頃に「湯川少年は石を二つに割って、さらに二つに割って、それを繰り返していったら、どうなるのだろうと考え続けて大人になって中間子を発見しノーベル物理学賞を受賞しました」という伝記を読み、物理学はありえないと思った。中学生の頃、今は国際政治学者として活躍している同級生が授業の合間に周囲の級友の将来を占ったことがあった。物理学方面かなと言われた私は、湯川少年を思い出して困惑した。高校の地学の授業で「新しい地球観」(上田, 1971) の感想文を書くことが課題として出された。生き生きとした研究活動の記述に魅了されると共に地球物理学という分野の存在を知った。し

かし地球物理学科進学を決意しても相変わらず文芸書を読み流す日々だった。大学の教養課程で天文学を受講した時(杉本・浜田, 1975)、星の中では最後に鉄ができます、と聞いても、「鉄より重い金・銀はどうしてできるのか?」という疑問を持つことはなかった。そんな私でも観測経験を通して少しずつ実践的に考えられるようになった。特に絶対重力計との付き合いは効果的だったように思う。しかし手抜きもあった。

輸送によって不安定になりやすいことは手抜きをせずにトラブル対応を整理して経験を積み自分の技術力をつければ克服しうる問題だとも考える。自分の技術力が向上して米国製造社での点検頻度を減らせられれば輸送のリスクを減らすこともできるしメンテナンスコストも抑えられる。絶対重力計は簡単に扱える装置ではないが、大久保(2005)が主張するように極めて有用な装置であることには違いない。FG5/217 は測定環境が良くない場所で使う機会が多いという特殊な事情がある。ノイズレベルが大きい私たちの計測では、静かな場所での計測とは異なる工夫が必要になる。ファンズワースでの計測の際の鉛直性の調整時には、接眼鏡を覗いても2つの光点は見えないことがある。テストビームの方は地動の影響でぼやけてしまっただけで光点とならず、参照ビームを黄身に見立てると目玉焼きのように見えるのだ。したがって鉛直性の調整はどうしても甘くなる。これに対しては計測値の評価は時間を細かく区切って行い、得られた計測値の分布を調べて、大きい数値に重みをつけて評価する。鉛直性調整が甘かったために鉛直からのずれが残っていれば、計測値は小さく出ることを考慮した評価法だ。こうした独自の工夫を先達の教えに加えて、手抜きせずに根気よく取り扱えば、絶対重力計の性能を十分に引き出す観測ができるだろう。

謝辞

神岡における重力測定・観測は、東京大学宇宙線研究所共同利用プログラムの一環として実施された。神岡坑内での測定作業にあたって便宜を図っていただいた東京大学宇宙線研究所、坑内計測の機会を与えていただき、写真も提供していただいた研究代表者の東京大学地震研究所の今西祐一氏、一緒に計測に係った地質情報研究部門の名和一成氏と宮川歩夢氏、神岡での計測について情報を提供して下さった筑波大学の池田博氏と京都大学の東敏博氏に感謝いたします。

文 献

- 赤谷拓和 (2015) ニュートリノの“変身“という大発見. ニュートン, **35**, 12月号, 24-33.
- Faller, J. E. (2005) The Measurement of Little g: A Fertile Ground for Precision Measurement Science. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, **110**, 559-581.
- Furuya, M., Okubo, S., Sun, W., Tanaka, Y., Oikawa, J., Watanabe, H. and Maekawa, T. (2003) Spatiotemporal gravity changes at Miyakejima volcano, Japan: Caldera collapse, explosive eruptions and magma movement. *J. Geophys. Res.*, **108**, B4, 2219, doi:10.1029/2002JB001989.
- 東 敏博・福田洋一・田村良明・佐藤忠弘・竹本修三・早河秀章・由井智志・大橋正健・内山 隆 (2009) 神岡鉱山における繰り返し絶対重力測定と重力季節変化. 測地学会誌, **55**, 87-93.
- 保坂直紀 (2015) 天国の戸塚さんに届け 梶田さんのノーベル賞受賞の報. YOMIURIONLINE 2015年10月08日10時30分, <http://www.yomiuri.co.jp/fukayomi/ichiran/20151008-OYT8T50033.html> (2015年10月08日参照)
- Imanishi, Y. (2009) High-frequency parasitic modes of superconducting gravimeters. *J. Geodesy*, **83**, 455-467.
- Imanishi, Y., Segawa, J., Furuya, I., Kashiwabara, S., Takayama, H. and Nishimae, Y. (1997) Gravity observation by means of a superconducting gravimeter at Matsushiro, Japan. *International Association of Geodesy Symposia*, **117**, 115-122.
- Imanishi, Y., Higashi, T. and Fukuda, Y. (2002) Calibration of the superconducting gravimeter T011 by parallel observation with the absolute gravimeter FG5 #210 a Bayesian approach. *Geophys. J. Int.*, **151**, 867-878.
- Imanishi, Y., Sato, T., Higashi, T., Sun, W. and Okubo, S. (2004) A network of superconducting gravimeters detects submicrogal coseismic gravity changes. *Science*, **306**, 476-478.
- Imanishi, Y., Tamura, Y., Ikeda, H. and Okubo, S. (2009) Permanent gravity changes recorded on superconducting gravimeters from earthquakes in central Japan – The Noto Hanto and Niigataken Chuetsu-oki events in 2007. *Journal of Geodynamics*, **48**, 260-268.
- 今西祐一・名和一成・杉原光彦・宮川歩夢・田村良明・池田 博 (2015) 神岡における絶対重力測定と長期的重力変化. 日本測地学会第124回講演会, 37.
- 鹿島建設 (2013) 長孔発破を用いて NATM 工法での国内最高記録・月進 359m を達成～東京大学大型低温重力波望遠鏡施設工事 (神岡トンネル) ～, <http://www.kajima.co.jp/news/press/201312/19c1-j.htm> (2015年11月5日参照)
- 金井 豊 (2012) 地質学と環境放射能 (2) —放射性核種の観測と挙動—. GSJ 地質ニュース, **1**, 335-342.
- 小出 仁 (1984) アンダーグラウンド, —隠れたフロントニア—. 地質ニュース, no. 363, 38-55.
- 国立天文台 (2014) 国立天文台ニュース, 特集「重力波天文学が拓く宇宙」, no. 247, http://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/data/nao_news_0247.pdf (2015年11月5日参照)
- 中島林彦 (2015) 暗黒物質を捉える. 日経サイエンス, **45**, no. 10, 48-55.
- 中島輝賢 (2011) 伊勢. 笠間書院, 東京, 131p.
- Niebauer, T.M., Sasagawa, G.S., Faller, J.E., Hilt, R. and Klopping, F. (1995) A new generation of absolute gravimeters. *Metrologia*, **32**, 159-180.
- 新田富也・深堀康昌・山田 毅 (1973) 神岡茂住鉱山の銅鉱について. 鉱山地質, **23**, 99-110.
- 大橋正健 (2001) 神岡 20m レーザー干渉計. 天文月報, **94**, 464-471.
- 大久保修平 (2001) ハイブリッド重力観測で追う, 地震・火山活動—2000年三宅島火山活動と伊豆諸島群発地震活動. 地震ジャーナル, **31**, 47-58.
- 大久保修平 (2005) 重力変化から火山活動を探る—観測・理論・解析. 火山, **50**, S49-S58.
- 大槻義彦 (1988) 第五の力. 日本放送出版協会, 東京, 194p.
- 瀬川爾朗 (1994) 超伝導重力計大国日本. 現代測地学, 日本測地学会, 茨城, 96-101.
- 司馬遼太郎 (1990) 街道をゆく 29 秋田県散歩, 飛騨紀行. 朝日新聞出版, 東京, 345p.
- 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 (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 (2015) テキサス州ファンズワースでの重力計

- 測の手記. GSJ 地質ニュース, 4, 251-258.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics*, 73, WA37-WA47.
- 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.
- 杉本大一郎・浜田隆士 (1975) 宇宙地球科学. 東京大学出版会, 東京, 236p.
- 田中雅臣 (2015) 星が「死ぬ」とはどういうことか. ペレ出版, 東京, 202p.
- 辻 篤子 (2015) 人の力を生かす環境を作るには. 化学と工業, 68, 電子版, <http://www.chemistry.or.jp/opinion/doc/ronsetsu1506.pdf> (2015年11月5日参照)
- 上田誠也 (1971) 新しい地球観. 岩波書店, 東京, 197p.
-
- SUGIHARA Mituhiko (2016) A field report of absolute gravity measurements with the FG5/217, Episode II Kamioka.
-
- (受付: 2015年11月9日)