

国土地理院の重力測量の歴史—観測技術と重力基準の変遷— The History of Gravity Measurement in Geospatial Information Authority of Japan —Evolution of Observational Technique and Gravity Standard—

測地部 山本宏章¹・宮原伐折羅²・吉田賢司³・菅原安宏²
 Geodetic Department Hiroaki YAMAMOTO, Basara MIYAHARA,
 Kenji YOSHIDA and Yasuhiro SUGAWARA
 地理地殻活動研究センター 松尾功二・宮崎隆幸⁴
 Geography and Crustal Dynamics Research Center
 Koji MATUSO and Takayuki MIYAZAKI

要 旨

文部省（現文部科学省）の測地学審議会が、1952年に建設大臣（現国土交通大臣）宛てに国内外の重力測定を推進するため「重力測定等のための国際基準点設定について」建議したことを受けて、国土地理院の前身である地理調査所は、日本の重力の測定を開始した。重力測量は、現在まで、広く国内に重力の基準を整備し、維持することを目的に続いている。国土地理院は、基準となる重力点を設けて日本の重力の基準を構築、維持するとともに、水準点や三角点などの国家基準点等で重力測量を行い日本の重力分布を把握してきた。

この建議は、測地学における国際協力の重要性を認識して、日本の重力を世界と結合して地球の形状を把握することを目的に、国際的に統一された重力の基準に準拠して地理調査所が国内外で重力の測定を行うというものである。また、重力測量は、国土に重力の基準を与えると同時に、重力分布を把握して正確な標高を決定することによって、測量法に基づいて国土に正確な位置と高さの基準を与えるという国土地理院の使命の遂行に不可欠である。国土地理院は、重力測量によって高さや重力の正確な基準を維持するために、絶え間なく進歩する重力の測定技術や高度化する機器を重力測量に取り入れ、国際的に整合した高精度な重力値を国土に展開することを継続してきた。また、重力分布は標高の基準となるジオイド・モデルの構築に必須であることから、衛星測位の発展に伴うジオイド・モデルを用いた標高決定への需要拡大を受けて、高さの基盤の整備を実現する重力測量の意義が高まっている。国土地理院が 60 年以上実施してきた重力測量について、測定機器の性能、観測技術及び達成精度を述べるとともに、社会的な意義を解説する。

1. はじめに

地球上の物体に働く重力は、地球質量による万有引力と地球の自転による遠心力の合力からなる。地

球の自転による遠心力は、地球の回転軸に直交して外向きに働き引力を弱める方向に働く。地球の形状は赤道方向に膨れた回転楕円体で近似されることから、重力は北極・南極で最大、赤道で最小となる。また、重力の働く方向は赤道と極を除いて地球の中心を向かない。そして、重力が働く方向に直交する面を水平面と定義している。

陸上で重力を測る方法は、大きく絶対重力測定と相対重力測定の二つに分けることができる。前者は測定点の重力値を測定する方法、後者は測定点間の重力の差を求める方法である。現在、国土地理院では、絶対重力測定によって基準点の重力値を決定する一連の作業を基準重力測量と呼び、基準重力測量で設置した基準点を基準重力点（FGS : Fundamental Gravity Station）と呼んでいる。一方、相対重力測定では、ある地点の重力値を求めるために、重力値が分かっている基準点からの重力の差を「相対重力計」を用いて測定する。作業の手法と測量を行う基準点の種類によって、一等重力測量と二等重力測量に分けており、一等重力測量で設置した基準点を一等重力点（GS : Gravity Station）と呼んでいる。二等重力測量では、新たな重力点は設置せず、三角点、水準点など既存の基準点を用いる。なお、一等重力測量でも測定の諸条件を考慮して一等重力点を設置せず水準点等を用いる場合がある。

絶対重力測定では、測定値から潮汐、極運動、大気圧変化などで生じる重力の変化を取り除いた重力値を基準の値とする。一方、相対重力測定では、基準重力点を基準にして、適切な路線を設け、その路線上に重力点を設けて路線上の重力点の重力差を求め、路線の網平均計算の結果から重力点の重力値を求める。このように、相対重力測定を実施した路線に対して網平均計算を行うことで、測定値を結合して求めた一連の重力の最確値を重力基準網と呼んでいる。重力基準網を構成する全ての重力値は基準に用いた重力値に準拠させるため、国際標準と整合した網を国内に展開するためには国際的な基準に準拠

現所属：¹九州地方測量部、²地理地殻活動研究センター、³企画部、⁴測地観測センター

する重力値を基準とすることが重要であり、日本の重力基準網も国際標準を基準に構築されている。これにより、地球規模で整合した精密な重力分布を把握することが可能となる。

日本の重力基準網は、国際標準、観測技術及び機器の高度化に伴って高精度化が図られてきた。国土地理院は、1976年に国際重力基準網 1971 (International Gravity Standardization Net 1971, 以下「IGSN71」という.)に準拠した日本重力基準網 1975 (The Japan Gravity Standardization Net. 1975, 以下「JGSN75」という.)を構築した。JGSN75は、長く日本の基準として用いられてきたが、技術や機器などの高度化に伴ってさらに精度の良い重力基準網の構築が可能となったため、国土地理院は、2016年に新しい重力基準網「日本重力基準網 2016 (The Japan Gravity Standardization Net. 2016, 以下「JGSN2016」という.)」(吉田ほか, 2018)の構築を行った。JGSN2016は、国際比較観測と整合する国土地理院の FG5 絶対重力計で求めた基準重力点を基準としているため、高精度な国際標準と整合する重力基準網である。

本稿では、国土地理院の重力測定の歴史を、1952年の測定の開始から JGSN2016 の構築までの機器、測定方法及び目的を中心に解説する。

2. 重力測定の意義

2.1 地球物理学的な意義

「重力を測る」ことには、様々な意義がある。重力は、第1章で述べたように地球の形状と運動に応じて不均一な空間分布を持つ。また、緯度、高さ、地形、地下の質量分布の違いによって複雑な空間分布を示す。さらには、時間の経過とともに変化する。

「重力を測る」ことには、重力の空間分布や時間変化を把握することによって地下構造を探索するという地球物理学的な意義がある。重力分布から推定された地下構造は、現在は地下の活断層の位置や形状の推定などの研究に活用されるなど、地震や火山防災の基礎資料となっている。また、重力分布から地下資源や鉱床の分布が探査できることから、物理探査の手段として産業的にも重要な意義を持っている。

2.2 標高決定に必要な重力値

「重力を測る」ことは、地球の形状を把握する上でも重要である。地球は幾何的には滑らかな回転楕円体で近似することができるが、普段我々が用いる物理的な「高さ」は重力に応じて表面の幾何的な高低とずれるため、GNSS 測位や水準測量で幾何的な高低を測定しただけでは決まらない。GNSS 測位で求めた高さが同じ、すなわち幾何的には平坦で高さ

が同じ場所でも、一方で他方より重力が大きい場合には物体は重力が大きいほうに移動することから、物理的な「高さ」は重力が大きい地点の方が低いことがわかる。我々に必要な正確な「高さ」は幾何的な高さに重力を反映することではじめて求められ、「高さ」の空間分布は重力の空間分布を把握することではじめて把握が可能となる。測地学では、重力の測定は地球の形状、特に「高さ」とその変化を把握するために重要な手段の一つである。

我が国の標高には、長い間、「正規正標高 (normal orthometric height)」が用いられてきた。これは、水準路線に沿った詳細な重力分布が測定されていない際に、回転楕円体の重力を用いた正規重力値を近似的に用いて高さを求めるシステムである。日本はプレート境界に位置しているため、地形の起伏が激しく、重力場の変動も大きいので、正規重力値によって補正された標高は特に山岳部で系統的な誤差を有していた(黒石, 1998)。これに対して、水準点もしくはその周辺で重力が測定されていれば、その場所の重力の測定値を反映して正確な標高を求めることが可能となる。こうして求めた標高を「正標高 (orthometric height)」と呼ぶ。国土地理院では2002年4月から施行された改正測量法を機に、正標高で高さを記述するように改めた(黒石, 2003)。近年では衛星測位技術の急速な発展に伴って、「高さ」の基準面を高精度に決めることを可能とする高精度ジオイド・モデルの需要と利活用が高まっているため、その構築に必要な重力分布の稠密な測定の意義が増大している。

2.3 社会生活・経済活動への寄与

社会・経済活動においても、「重力を測る」ことは、重力に対する正確な基準を与える意義がある。例えば、商取引において商品を正確に授受するためには、質量の正確な計測に基づいてどれだけの商品を授受したかを把握する必要がある。正しい計測を可能とするにははかりの正確な校正が必須であるが、はかりの測定値は測定を行った場所の重力に応じて異なる。そのため、測定を行った場所の正確な重力で校正を行うことで初めてどのはかりで測定しても同じ値を得ることが可能となる。気圧計など重力に依存して測定値が異なる全ての計測機器において、正確な重力で校正を行うことは機器同士が同じく正確であることを確認するためにも必要である。「重力を測る」ことで整備される重力の正確な基準は、このような計量の基準を確保する上で社会生活には欠かせない。「重力を測る」ことは、重力に影響を受ける全ての社会・経済活動に等しく同じ基準を与える意義を持っている。

地球規模で協働が進む精密な地球観測でも、希少

金属や高額な薬品の取引など緻密な計測が必要となる経済活動でも、国際的に整合した正確な値を与えるためには正確に「重力を測る」ことが必須である。このように、近年「重力を測る」ことの意義はさらに増している。

3 重力測定の歴史

3.1 重力測定の概要

17世紀、フランスの天文学者リシェ (Jean Richer) は、緯度の違いによって振り子時計の進み方に遅れがあることを発見し、これに基づいてニュートン (Sir Isaac Newton) は、時計の遅れは気温差による振り子の伸縮では説明がつかず、地球が楕円体であることに起因すると考えた (萩原, 1976)。振り子の周期は重力の平方根に反比例することから、時計の遅れは、重力が小さくなったこと、つまり、地球の中心から遠くなったことによると考えたのである。

「重力を測る」歴史は古く、例えば、フランスのボルダ (Jean-Charles de Borda) が考案した単振子は、錘をつけた糸の長さから振子の周期から重力を求めるもので、近年も物理の実験などで利用されている。この測定で得られる重力の精度は高々数十 mGal 程度である²。1880年頃からは、可逆振子を用いた重力の測定が行われるようになった。日本では、1900年前後 (明治時代中後期) に重力の測定が開始された。この間、専ら振り子によって重力の測定が行われてきたが、振り子がゆれる際に支点に生じる摩擦、振り子の運動を妨げる空気の抵抗等が高精度の重力測定に大きな壁となっていた。その後、スプリング式の重力計の登場によって、1950年代に簡便にかつ従来に比べ精度良く「重力を測る」ことができる時代が到来した。これにより空間的に稠密な測定が可能となったことから、「重力を測る」ことに、重力の空間分布から地下構造を探索するという地球物理学的な意義が加わることとなった。重力分布から推定された地下構造は、現在は地下の活断層の位置や形状の推定などに活用されるなど、地震や火山防災の基礎資料となっている。また、重力分布から地下資源や鉱床の分布が探査できることから、物理探査の手段として産業的にも重要な意義がある。1980年代以降は、真空中で物体を投げ上げ又は落下させて重力の絶対値を測定する機器が登場し、さらに重力測定技術の高度化に伴って、重力の空間分布に加えて時間変化が求められるようになった。ここに至って、重力の空間分布は、「高さ」の測定に重要な役割を果たすことが可能となった。

3.2 ポツダム重力系

初めて国際的に広く合意された重力の基準は、国際測地学協会 (International Association of Geodesy, 以下「IAG」という。) が1909年にロンドンで開催した第16回総会で採択したポツダム重力系である。ポツダム重力系は、1898~1904年にドイツのポツダムにある測地研究所において振り子を用いて測定した重力基準点を原点とし、その重力値を最も信頼できる基準重力値と認め、世界各地の重力値をこれに基づいて表すとした重力系である (中川, 1994)。ポツダム重力系の基準重力値は $981,274 \pm 3 \text{ mGal}$ であった。日本では、1899~1901年に長岡半太郎らが東京の理科大学 (東京大学理学部の前身) 物理学教室の地下実験室の重力点 (以下「Tokyo-A」という。) とポツダムとの間で重力振子 (単振子ではなく、重力を測定するために開発された特殊な振子) を用いた重力測定による比較観測を行い、ポツダム重力系に準拠した重力値が決定された (大久保, 2009)。なお、Tokyo-A は、1904年7月9日に理科大学構内に「基線尺室並振子室」が落成し、そこに移転したことがわかっている (以下「Tokyo-B」という。)

1911年、重力振子を用いてポツダムと重力比較測定を行った Tokyo-A を含む世界20地点に対して、最小自乗法の重力網平均計算でポツダム重力系に準拠した重力値が定められた (Borress, 1911)。世界の重力網の基礎はここで確立され、各国でポツダム重力系に準拠する重力基準網の構築が可能となった。決定された東京の重力値は、 $979,801.2 \pm 1.08 \text{ mGal}$ であった (鈴木, 1957)。

3.3 国土地理院が日本の重力観測を担う背景

日本では、1915年までに文部省の測地学委員会 (現文部科学省科学技術・学術審議会測地学分科会) が中心となって国内の122点で重力振子を用いた重力測定を完了した (測量・地図百年史編集委員会, 1970)。なお、国土地理院の前身である参謀本部陸地測量部も重力測定を計画して振子の素材である熔融水晶を準備したが、第二次世界大戦に阻まれて実行されなかった (鈴木, 1967)。

また、各地で行われた重力比較測定の結果からポツダム重力系の誤差が明らかになったことを受けて、国際測地学・地球物理学連合 (International Union of Geodesy and Geophysics, 以下「IUGG」という。) 及び IAG は、1951年にブリュッセルで開催された第9回総会で、測地学における国際協力の重要性を認識して IAG が重力測定事業を推進することを決議した。決議では、IAGのもとに国際的な重力測定を推

² ミリガル。国際単位系 (SI) では、重力加速度の単位は ms^{-2} で示されるが、Gal は政令で使用が認められている CGS 単位

系。1 Gal = $1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 。1 mGal = 10^{-3} Gal 。

進する国際重力委員会（International Gravity Commission, 以下「IGC」という。）を設立するとともに、国際重力基準網の構築を目的として“世界重力網”プロジェクトを進めることが採択され、これを受けてIGCのもとで基準網の構築に向けた観測が開始された。また、世界の重力データのデータベースを作成するため、IUGGが国際重力局（BGI: Bureau Gravimétrique International）の設立を決定した。これらの決議を受けて、日本では、1952年に、文部省の測地学審議会長が「重力測定等のための国際基準点設定について」を建設大臣宛てに建議し、日本国内の数箇所に国際（重力）基準点を設置するとともに、建設省がそれを担当するよう勧告した³。これにより国土地理院の前身である地理調査所が国内外の重力測定を担当することとなり、同年地理調査所は測量第一部測量第一課に重力係を設置し、全国の重力測定及び国際重力網を結合するための測定を実施する組織を整備した。実は重力測定を担当する係として1951年に測量第一部測量第一課に測地係を設置している。建議の前に重力測定を担当する係が存在していた経緯については史料が残っておらず不明であるが、実質的な必要性は既に認識されており、1952年の建議により公式に重力係の設置が認められたであろうことが推察できる。

3.4 国土地理院の相対重力観測

3.4.1 重力振子による重力測定

国土地理院は、1951年に振子型重力測定装置（GSI型重力振子、写真-1）の開発を独自に開始し、茨城県新治郡柿岡町（現石岡市）での試験測定を経て、1952年に完成させた（測地第一課、1953）。

GSI型重力振子は、当時世界で標準的に用いられていた、振子の周期を精密に測定して2点間の重力差を求める相対重力計である。国土地理院は、1952年からGSI型重力振子を用いた測定を開始し、前述の建議で定められた日本の国際重力基準点5点（京都、札幌、水沢、柿岡及び熊本）の重力値を、当時の地理調査所実験室内に設置した重力点「千葉」（以下「Chiba」という。）を基準に観測し決定した。なおこれらの重力値の決定方法の詳細は3.4.1(3)で述べる。同時にスプリング式の相対重力計であるノースアメリカンAG1重力計（米国North American Geophysical社製、以下「AG1重力計」という。）を併用して、北海道から順次、主として水準点で重力測定を開始し、重力基準網構築のために本格的な重力測定を開始した。重力値は観測点の高さが変化すると重力値も変化することから、高さが既知である

点で測定することが重要となる。空中での重力の平均的な鉛直勾配は、正規楕円体を作る正規重力値では、楕円体高が1m高くなると0.3086 mGalほど小さくなる（黒石、2003）。このため、重力測定は、水準点がない場合は三角点で実施され、三角点がない場合は駅舎など地図から標高と位置が判読できる箇所で行われていた。

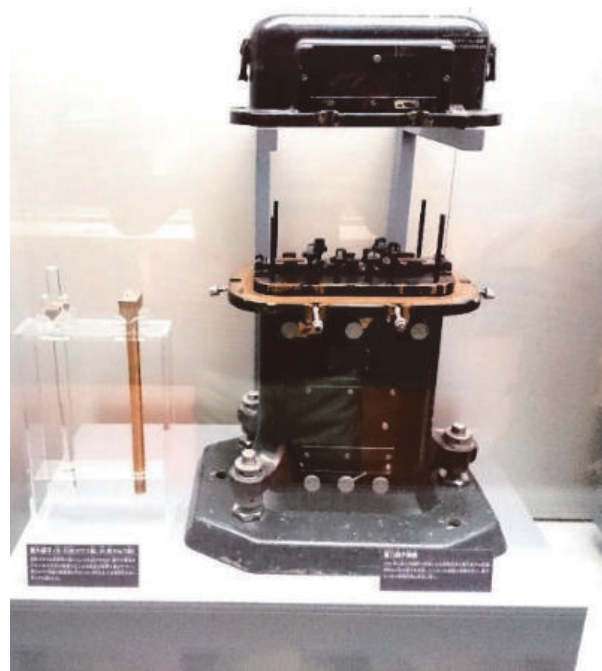


写真-1 GSI型重力振子（国立科学博物館展示）。左の2本が振子。左の振子は溶融石英ガラス製で長さは約43cm、重さは約1kg。右は真鍮製（長さ等は不明）。

(1) GSI型重力振子の装置と精度

GSI型重力振子の測定精度は、1) 振子周期の測定精度、2) 振子の膨張係数、3) 重力以外の力の作用の3つの要素で決まり、0.2~0.3 mGalとされる（坪川ほか、1956）。図-1に装置の模式図を示す。3本の同形の振子を吊るし、両端の振子は等振幅、逆位相で振らせることで台に及ぼす影響を打ち消し、中央の振子はただ自由にぶら下げておいて、これと両端の振子を組み合わせることにより、地面の微振動の影響を除く仕組みで装置の安定を確保している。また、振子の支点には高速度鋼のナイフエッジを用い、光学平面に仕上げられたメノウの座で受けることで摩擦力を低減させている。振子の素材は溶融石英ガラスで、熱膨張率は約 $1 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$ と、水準測量や基線測量で用いていた熱膨張の小さいインバールの $1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ と比べて一桁小さい。空気抵抗を減らして振子周

³ この建議の写しは広島大学文書館のWEBに公開されている：<http://home.hiroshima-u.ac.jp/~hua/catalog/morito.html>

期の安定性を向上させるために、装置内部は約 0.13 Pa の中真空状態に保たれ、温度変化による振子の変形を防ぐために、装置全体を綿入りの布でできた恒温槽で覆って測定を行った（測地第一課，1953）。このように、振子の周期の測定には、可能な限り誤差要因を軽減するために当時の先端技術を用いて様々な措置が施されていた。

振子の周期は、光を装置に発射し、振子から反射した半周期毎の光束を光電管で増幅するとともに、JJY 標準電波（後に水晶時計）を受信して両者をペンレコーダー（後に放電クロノグラフ）で記録することで測定する。記録の際のテープの速さは、1 ms が約 0.5 mm に対応するように設定され、1 回の重力測定を 20 分程度とすることで、振子の周期を 10^{-7} 秒の精度で求めることができる。この記録から振子の周期を計算することで 0.1 mGal の桁までの重力差を求めている。

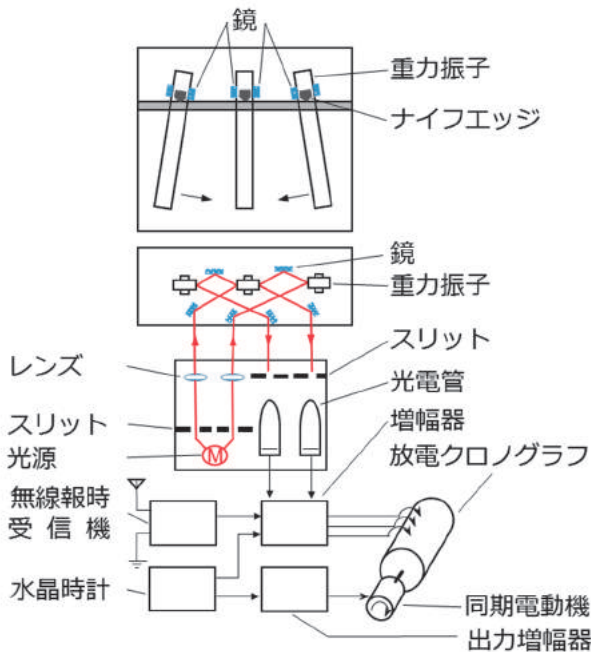


図-1 GSI 型重力振子の測定の模式図。赤矢印は光の経路。光源が発した光は、振子の左右に取り付いた鏡に反射して光電管へ戻る。

(2) GSI 型重力振子の測量方法

GSI 型重力振子は相対重力計であるため、基準とする重力点 A と測定点 B の間の測定は、 $A \rightarrow B \rightarrow A$ と往復で重力測定を行い、往復の測定が整合的であることを確認していた。また、測定の再現性の確保と信頼度の向上を目的に、異なる 2 組以上の振子を用いて周期を求めることで測定の期間中に振子の周期に変化がないことを確認していた。なお、測測の日数や測定の回数は定められておらず、いずれの測

定点でも数日間で GSI 型重力振子による 15~30 回の繰り返し測定が行われた（坪川ほか，1956）。作業報告書では、GSI 型重力振子による測量が終焉する 1978 年頃では、振子 1 組につき 20 回の測定を 1 セットとした 10 セットの測定を振子 2 組で行ったことが記載されている。

(3) GSI 型重力振子による重力測量

1952 年 5 月、Chiba を基準として、京都市の京都大学理学部地質学鉱物学教室の地下室に新設した国際重力基準点（以下「Kyoto」という。）の重力値を求める重力測量が GSI 型重力振子を用いて行われ、ポツダム重力系に準拠した重力値が 979,721.4 mGal と求められた。Chiba の重力値 $979,789.8 \pm 1.08$ mGal は、1911 年に Borrass が求めた Tokyo-A の重力値 979,801.0 mGal に、後述するスプリング式の相対重力計（AG1 重力計及びウォルドン重力計）で国土地理院と東京大学地震研究所によって測定した Chiba—Tokyo-B 間の重力差 -11.2 mGal を加えて求めた値である（Gravity Survey, 1957）。なお、1956 年には Chiba—Tokyo-B 間で GSI 型重力振子を用いた重力測量を行い、スプリング式相対重力計による値と 0.5 mGal で整合的な -10.7 mGal の重力差が求められた。GSI 型重力振子の測定精度は、1 回の測定精度が 0.5 mGal 以内、数回の繰り返し測定で 0.2 mGal の精度が達成されることから（Suzuki, 1974）、想定される GSI 型重力振子の精度とスプリング式の相対重力計で求められた重力差は、整合した結果であることが確かめられた。Kyoto は、IGC の決議を受けて 1953 年に国際 1 等重力点に登録された。

前述の Kyoto での測量の後、1952 年に札幌、水沢及び熊本で、1954 年に柿岡で GSI 型重力振子を用いて重力測量を行った。こうして日本の国際重力基準点 5 点で測量が完了すると、1955 年からは名古屋、鹿野山、高知、高松、福岡、鹿屋及び新十津川で順に GSI 型重力振子を用いた測定を行い、1974 年までに、Kyoto、札幌、水沢、柿岡及び熊本で複数回の測量を行った。1978 年の那覇での測量を最後に GSI 型重力振子は 26 年間の役割を終えた。

GSI 型重力振子を用いた重力測量は、国際重力網と日本の重力基準網の結合を目的に国外でも行われた。1955 年 9~12 月には、米国ワシントンの沿岸測地測量局（USCGS、現 NOAA）及び連邦標準局（NBS、現 NIST）の重力基準点と Chiba の間で、国際重力比較測定を実施した（奥田ほか，1956）。測定では、USCGS—Chiba 間で、 -329.8 ± 0.3 mGal、NBS—Chiba 間で、 $+310.4 \pm 0.3$ mGal の重力差が求められた。NBS のポツダム重力系の重力値 980,100.0 mGal を基準とすると、Chiba の重力値は 979,789.6 mGal、更に前述の国内の測定を用いて Chiba を基準に Tokyo-A 及び

Kyoto の値を求めると, Tokyo-A の重力値は 979,800.8 mGal, Kyoto の重力値は 979,721.3 mGal となることから, Borass によるポツダム重力系の Tokyo-A の重力値は, GSI 型重力振子の測定と -0.2 mGal で整合的であった (測地部, 1957). 測定の精度を考慮すると二つの測定の整合性は十分に良いと言える.

国内の国際 1 等重力点は Kyoto であったが, 国土地理院による GSI 型重力振子を用いた重力測量は, その基点を Chiba 及び Tokyo-B とすることで, 1967 年までに 12 年間で 6 か国及び上記の 1 地域をあわせた 15 か所において表-1 の測定を行い, 後述する国際重力基準網の構築に大きく貢献した (鈴木, 1967).

表-1 GSI 型重力振子による国際重力観測

観測年	基点	国・地域	測定場所
1955 年	Chiba	アメリカ	ワシントン
1957～		シンガポール	シンガポール
1958 年		南アフリカ	ケープタウン
1959 年	Tokyo -B	オーストラリア	メルボルン
1961～		南アフリカ	ケープタウン
1962 年		南極	昭和基地
1963 年		タイ	バンコク
1965 年		アメリカ	ホノルル
			サンフランシスコ
			デンバー
1965 年		アメリカ	フェアバンクス
1966 年		フィリピン	マニラ
		シンガポール	シンガポール
1967 年		オーストラリア	シドニー
			キャンベラ

3.4.2 スプリング式重力計による重力測量

現在最も一般的に使用されている相対重力計はスプリング式重力計で, 重力の違いに応じてスプリングに生じる伸びを計測して重力の差に換算する. スプリング式の重力計で正確な重力差を得るためには, スプリングの物理的特性, すなわち重力変化に対するスプリングの応答を正確に把握する必要がある. スプリングに固有のスケールファクター (以下「SF」という.) は, 経年変化する可能性があるため, 正確な重力差が与えられた二点間であらかじめ校正を行って正確な SF を決める必要がある. さらに, スプリングには, 時間の経過に伴って短期的な伸び (以下「ドリフト」という.) が生じるため, 測地学に有意な精度で測定が可能となったのは, 1950 年代の機

器開発でスプリングの応答係数とドリフトの課題がある程度解消されてからである.

(1) AG1 重力計

国土地理院は, GSI 型重力振子の開発より一足早く, 1949 年に AG1 重力計 (写真-2) を導入している (この時期に導入した経緯は史料が残っておらず不明). GSI 型重力振子では, 観測が屋内に限られ, 操作に熟練が必要で多くの測量日数を要するのに対し, スプリング式重力計は, 持ち運びが容易で, 野外で簡単に重力測量ができるため, 一定の精度で高密度に測量を行える利点がある. 国土地理院の重力測量では, 国際基準重力点で測定を行って地球形状の把握に貢献するだけでなく, 国内の詳細な重力分布を標高の基準に活用することも視野に入れ, 可搬性に優れたスプリング式重力計の活用を開始した. 高い可搬性によるスプリング式重力計の優位性は現在も変わらず, スプリング式のラコスト G 型重力計は, 現在も国土地理院の重力測量で使用する機器の一つである.



写真-2 AG1 重力計による重力測量

AG1 重力計の最小目盛は約 0.1 mGal で, 読定は約 0.01 mGal まで可能である (図-2). スプリングは, 熱膨張が小さくかつ弾性係数の変化が小さいエリンバー合金が使われ, 温度によるスプリングの伸縮を防ぐため, 蓄電池を用いた二重の恒温槽で内部温度を 49℃に保つ構造である. このような構造から重量は約 12.5 kg と重い. 測定レンジ (一回の測定で測定が可能な範囲) は, 90~100 mGal で, これを超える重力差を測定する場合は, リセット機能を用いて複数回に分けて測定を行う必要があった.

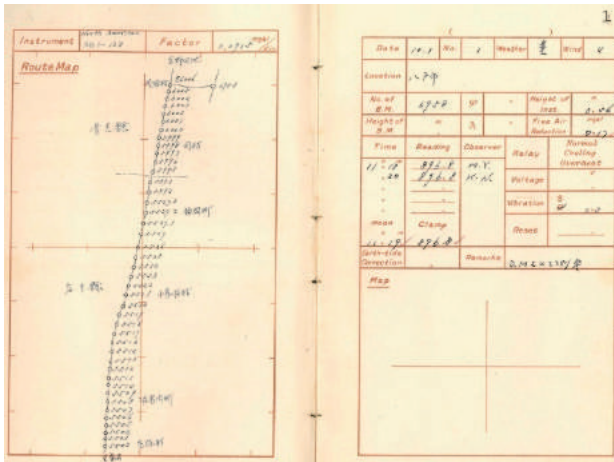


図-2 AG1 重力計 AG1-133 の観測手簿の一部（1954 年東北地方二等重力測量）。SF（スケールファクター）は 0.09150 mGal / div., 読定は 0.1 mGal 単位で 2 回。

国土地理院は、AG1 重力計による試験観測を行い、ドリフトの影響を軽減させかつ測量作業の能率を考慮に入れ、当時は次のような方法で測定を行っている。1) その日の測定に入る前に、AG1 重力計を積載した状態で少し作業用自動車を走らせてから測量する。2) 半日又は 1 日で測定点を往復 2 回観測し、その日のドリフトを算出する。3) 地球潮汐の重力への影響を計算によって補正する。4) 測定をつなぎ合わせてできた重力網を水準測量の網平均計算に準じて平均計算し閉合差を配分する。5) 最後に GSI 型重力振子で測定した重力観測点で重力値を比較し異常を確認する、などである（井上, 1954）。こうして測られた AG1 重力計による精度の見積りは、AG1 重力計の温度が適切に保たれれば、ドリフト量は 0.1～0.2 mGal/日以下に安定するため、野外で約 0.05 mGal、室内など比較的安定した場所で 0.03 mGal、総合では 0.1 mGal 程度とされている（松田, 1956）。

1952 年に重力測量を開始した当初は、水準路線に沿って水準点 1 点おきに重力測量を行い、折り返し点で 2 回観測を行い、復観測は往観測で行った同じ水準点で重力測量を行った。往復観測は、一往復が 2 日以内となるように測量を行い、往復差が 0.15 mGal を超えた場合は再測を行ったと記録がある。これを二等重力測量として北海道から九州まで一等水準路線に沿って測量を行った（井上ほか, 1955）。また、重力の測定に要する時間は僅か数分で、測定点から次の測定点へ移動する時間の方が長い。こうして 1 日に 40 点近くの重力測量を行い、約 80km を走行する重力測量では、当時の劣悪な道路状況から作業用車両（当初は積載量 3/4 t 米軍払下げトラック）に故障が続出し、測量官が重力計の運搬と蓄電池の容量低下に配慮しながら作業用車両の故障や悪路対

策に対処したことが記載されており、重力点の高密度化に多くの苦労があったことが伺える。

AG1 重力計は、1952 年に二等重力測量を開始した際に主力として活躍し、1960 年 12 月には 1 回目の国内二等重力測量が完了した。AG1 重力計で測量した基準点は、9,513 点で、そのうち、一等水準点は 6,488 点、二等水準点は 1,239 点、大学・気象庁関係施設は 116 点で、重力網平均計算は、北海道、東北、関東・中部、中部・近畿・中国、四国及び九州の 6 地域毎にそれぞれ実施した（GSI, 1955; GSI, 1957; GSI, 1964; GSI, 1965a, 1965b; GSI, 1969）。二等重力測量の成果は、地域毎に国土地理院報告（1955～1969 年）にまとめられ、報告には、重力観測点の情報（経緯度（0.1 分単位）、標高（水準点は 0.01 m 単位、他は m 単位）、観測日、点間重力差の測定値（補正済み 0.01 mGal 単位）と関連パラメータ（SF、地球潮汐補正（潮汐ポテンシャルに対する地球の弾性応答の係数 = 1.20）、ドリフト及び器械高補正）、環閉補正量（点間距離の平方根を測定値に重みとして配分）、点間重力差（網平均後）、重力値、フリーエア異常、ブーゲー異常（密度 $\rho = 2.67\text{g/cm}^3$ 、地形補正なし）に関する一覧表がフリーエア及びブーゲー異常図とともに掲載された。なお、重力測量で SF は、後述する東京（目黒）－柿岡の重力検定基線で毎年求めていたが、その距離は約 100km、重力差は約 190 mGal しかないため、これを参照値とし、Chiba を起点とした作業地域までの重力差から SF を単純平均計算した値を使用した。

1961 年からは北海道地方の 2 回目の二等重力測量を開始したが、1964 年 9 月に AG1 重力計が故障したのを最後に、後述のラコスト G 型重力計を使用することとなった。なお、国土地理院の 12 年間に及ぶ測量の蓄積から評価した AG1 重力計による重力測定値の標準偏差は $\pm 0.05\text{ mGal}$ である（Suzuki, 1974）。

(2) ウォルドン重力計

国土地理院は、1957 年にウォルドン重力計（米国 Texas Instruments 社製、写真-3）を導入した。この重力計は、温度調整機能がなく、代わりに主スプリングを熱膨張率が異なる熔融シリカと金属の二本で支えることで、温度変化に対する依存性をバイメタルのように軽減している。急激な温度変化を避けるため、装置は魔法瓶の中に格納されている。AG1 重力計と同様に、最小目盛は 0.1 mGal で、0.01 mGal まで読定できる。国土地理院の測量から評価したウォルドン重力計による測定の標準偏差は、 $\pm 0.05\text{ mGal}$ である（Suzuki, 1974）。

ウォルドン重力計は、測定レンジが 70～80 mGal と狭いが、重量が 2.3 kg と非常に軽く携行性に優れるため、圧倒的な可搬性を活かして地盤変動調査、

震災復興調査及び離島の二等重力測量等に使われた。国外では、1958年に昭和基地周辺の海氷域でウォルドン重力計を用いた重力測量を実施した(原田ほか, 1958)。しかし、ドリフトが約0.3~1 mGal/日とAG1重力計に比べて大きく、さらに不規則であることから、測量の際にドリフトの扱いに留意が必要であったため、AG1重力計と比べて使用は少なく、ラコストG型重力計の導入以降は使用されていない。



写真-3 ウォルドン重力計

(3) ラコストG型重力計

国土地理院は、AG1重力計を用いて二等重力測量を稠密に実施していたが、SFの経年変化や大きなドリフトが生じるといった課題は依然として解決されていなかった。この欠点を補うべく、より安定した相対重力計への需要が高まる中、米国を中心に物理探鉱を目的とした高精度なスプリング式重力計の開発が盛んに行われた。ドリフトが小さく一様であること、テア(測定値の急激な変化)が生じないこと、SFが安定していること、消費電力が小さく温度変化への補償が完全なこと、小型で携帯性が高いこと、測定レンジが広いことなどを求め、従来の測定機器の様々な改良を行うとともに、新しい相対重力計の開発が進められた。

国土地理院は、1962年5月にこうした条件に応じて開発された相対重力計として、ラコストG型重力計(米国LaCoste Romberg社製、写真-4、以下「ラコスト重力計」という。)の製造番号No.29(以下「G-29」という。)を新たに導入した。ラコスト重力計は、測定レンジが約7,000 mGalと地球上で生じる重力差をほぼ網羅できるほど広いため、AG1重力計やウォルドン重力計のように測定レンジが狭い重力計が必要であったリセットが不要で、さらにドリフトが小さいため、ドリフトを線形で表現ができるとともに、

SFが比較的安定していることから、1959年に米国で製造が開始されると急速に普及したスプリング式相対重力計である。読定目盛は0.01 mGal、本体の重量は4 kg、ニッカドバッテリー等で恒温槽の内部が常に一定の温度(G-29では約50℃、製造番号毎に異なる。)に保たれる仕様である。図-3にラコスト重力計の内部構造を示す。錘とつながった水平ビームが斜め吊りのエリンバー合金製の零長スプリングで支えられている。エリンバー合金は、温度変化に対しても弾性率が安定している性質を持つ鉄、ニッケル、クロムで組成された合金である。零長スプリングとは、ある加重までは伸びを生じず、伸び始めるとフックの法則に従い、加重がゼロの時にバネの長さもゼロになるよう製造時に自ら縮もうとする応力を与えられたスプリングである。スプリングは重力変化により変位するので、測定ダイヤルを回転させ、この量をギアボックスにあるギアの組合せやテコを使って縮小し重力値の変化量を読定できる仕組みになっている。



写真-4 ラコスト重力計(G-554, 1980年購入, 中央)とキャリングケース(手前)。2015年10月、一等重力点「旭川」(旭川地方気象台地震計室の基台)で撮影(右奥は地震計)。

ラコスト重力計は、可搬性ではウォルドン重力計に劣るが、国土地理院の重力測量に適した性能を多く有していたため、相対重力計を用いた重力測量の主力として、1960年代に4台(1962年G-29, 1965年G-83, 1966年G-118, 1969年G-223。)が追加購入された。G-29以外の3台のラコスト重力計は、2018年現在、国土地理院の重力測量で活躍している。

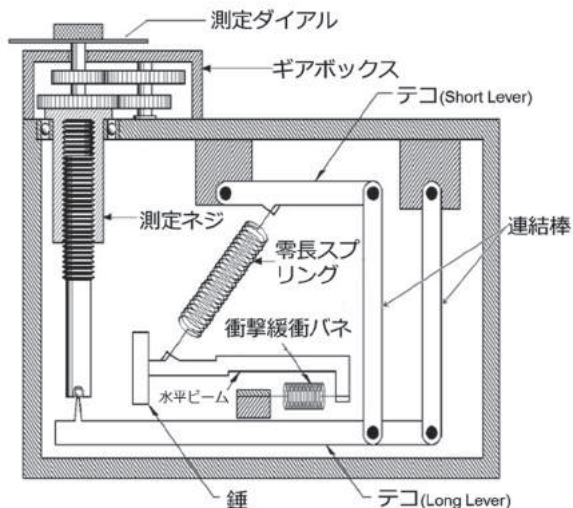


図-3 ラコスト重力計の内部模式図 (LaCoste & Romberg Instruction Manual から引用, 一部付記)

1962年にG-29を購入した際の試験記録によれば、3週間のドリフト調査で、0.2 mGalのドリフト量が報告されており、1日のドリフトは約0.010 mGalとなることから、ラコスト重力計の当時のカタログ値0.017 mGal / 日と比べて安定が良いことが確認された。また、AG1重力計による従来の重力測量で得られていた箱根—東京（目黒）間、同じく柿岡—東京（目黒）間で屋外の比較測定を実施し、製造者が提供するSFを用いて重力差を求め、従来の重力差と比較したところ、それぞれ+0.07 mGal, +0.08 mGalの差が得られた（藤井ほか, 1964）。当時の測定の精度が0.1 mGal程度であることを考慮すると十分に整合的な値である。またラコスト重力計の測定は、1観測点で5回の読定を行い、1回の読定終了毎に、測定ダイヤルを回して（水平ビームのバランスを人為的に崩して）次の読定を行うとともに、いずれも往復観測（ただし、当時は作業効率を優先して出発点に1日では戻らない）を行って平均の重力差を求めた。読定値の最大値と最小値の差は ± 0.02 mGalで、従来の重力計と比較すると、より高い精度で測定が行えることが確認された。

同じく1962年には、東京（目黒）—①—Kyoto—②—福岡—③—熊本間でGSI型重力振子との比較測定も実施した。比較測定では、鉄道と自動車を用いて移動し、途中で一等重力点の設置を行ったため、往復に22日間を要したが、GSI型重力振子の測定で求めた重力差との差は、順に①-0.03, ②-0.21, ③-0.05 mGalであった。Kyoto—②—福岡間での差が大きい理由は記録されていないが、当時の測定の精度を考慮するとほかの重力差は良い整合性を示している。このように試験測定で従来の測定と整合性を確認した上で、1963年にラコスト重力計を用いて北海道地区から一等重力測量を開始した。測量に用いる

ラコスト重力計は1台で、基準となる重力点Aを出発し、他の一等重力点、例えば2点B, Cを測量する場合は、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ の順に数日間かけて往復する手順で測定を行った。また、一等重力点が亡失した際に簡単に再設ができるように、一等重力点の周辺の水準点を補助点として一等重力点から放射状に測定を行う取付観測も実施した。読定の方法は確立していなかったが、試験測定からラコスト重力計に特有の歯車の遊び（バックラッシュ）が認識されていたため、試験測定と同様に1読定毎に測定ダイヤルを左右いずれかの方向に1回転させ、常に同じ方向に回して次を読定している。読定回数は、重力点では5回、水準点などの補助点では1回で、いずれも0.01 mGal単位で読定していた。

一等及び二等重力測量は、1968年頃まではラコスト重力計1台で実施した。その後、重力値の信頼度の向上を目的として、複数（2〜3台）のラコスト重力計を用いた測定方法が検討され、4台のラコスト重力計を保有した。一等重力測量では、1970年からラコスト重力計3台を用いた測量を開始した。また、前述の補助点を重力点の中間に設けて補助点を含む往復観測を実施するようになった。この方法を導入したことで、重力点での測定から求めていたドリフト補正量が、補助点の測定からも求められるようになった。これによって、測定値の良否や重力計のテアの発生などの判別を、作業中に現地で行うことが容易になり、問題が生じた測定に対して作業期間中の再測などが可能となって重力値の信頼度が向上するとともに作業効率も上がった。さらに、道路事情の改善や重力計の保有台数の増加に伴って、近隣の一等重力点から一等重力点の再設を直接行うことが可能となったため、補助点に二等重力測量で測定した水準点を用いるようになった。これによって二等重力点の一部が一等重力測量に結合され、後述する日本重力基準網を構築する際に、二等重力点の重力値を規正する役割を果たすこととなった。

ラコスト重力計を用いた二等重力測量は、1965年に開始された。当初の目的は、重力点の高密度化であったため、自動車で容易に到達できる一等及び二等水準点を中心に測定を行った。二等重力測量では、折り返し点での測定は1回のみであるため、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ のように1日で閉じる方法で測定を行った。この方法は機動性が高いため、1日で多くの点を測定することが可能で、平均して1日10点以上の測定が行われた。1969年には、東京大学地震研究所及び京都大学と共同で二等重力測量を行い、同一測定点で重力計を一定方向に向けて整置して磁場の影響を除く手法や、従来1回の読定回数を5回に増やす手法等、測定精度の向上手法の検討が行われた（東京大学地震研究所ほか, 1970）。これらは、

標準的な重力測定の手順を定めた作業規程（案）の作成に活用された。

(4) アスカニア重力計

1957～1958 年に行われた国際地球観測年（IGY : International Geophysical Year）では、地球物理学に関する様々な国際共同観測が行われ、国土地理院はこの一環として、1957 年にアスカニア Gs11 相対重力計（ドイツ Askania-Werke A. G 製, No.105, 写真-5, 以下「アスカニア重力計」という。）を用いて千葉市の地理調査所重力実験室で重力の連続測定を実施して地球潮汐の分潮成分（ M_2 , S_2 , K_1 , O_1 ）の検出を試みた（細山・中川, 1958）。アスカニア重力計は、当時の他のスプリング式重力計にはなかった重力の連続記録装置を備えた画期的な重力計で、重力の時間変化の測定に用いられた。一方、計測系統に安定した電力供給が必要で、測定の精度を保つために常時安定した電源が必要であった。国土地理院は、1958 年、鹿野山測地観測所の構内に重力測定室を整備し、アスカニア重力計の管理は、同観測所が行った。1968 年 8 月 30 日～11 月 17 日、天体の起潮力の作用に対する重力計の応答を調べるため、国土地理院、東京大学理学部、京都大学理学部及び緯度観測所（現国立天文台水沢 VLBI 観測所）の 4 機関が所有するアスカニア重力計 4 台に、ラコスト重力計 2 台を含めた 6 台の重力計を用いて、緯度観測所の観測室で連続測定が行われた（重力計比較グループ, 1969）。なお、ラコスト重力計では、30 分間隔で目視による読定が行われた。この報告では、「重力計を用いて重力の潮汐変化を連続観測する場合において、1 台の重力計を用いている限り、信頼のおける結果を常に求めることは不可能である。」とされ、これがアスカニア重力計による国土地理院の最後の測定となった。

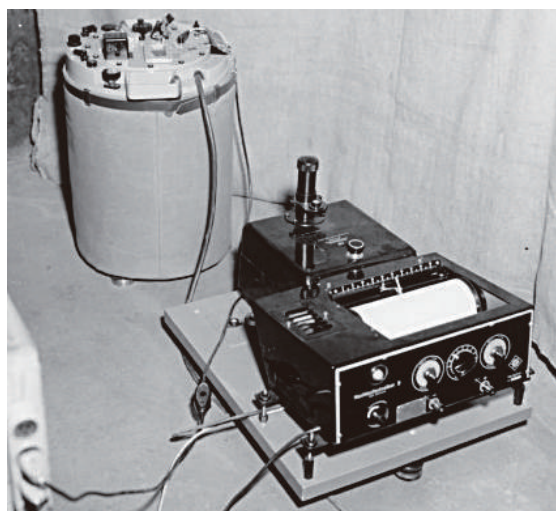


写真-5 アスカニア Gs11 重力計（奥）と連続記録装置（手前）（撮影年、撮影場所不明）

(5) その他（海上重力計、海底重力計）

1960 年、ヘルシンキで開催された第 12 回の IUGG 総会において、地球のマントル上部に関する総合的研究を国際協力で行うことが決議された。これを受けて 1962 年に国際地球内部開発計画（UMP : Upper Mantle Project）が開始された。測地部門では、地殻変動の検出を目的とした測地測量と重力測量が行われ、国土地理院は、その一環として 1964 年 8 月に海上保安庁水路部（現海洋情報部）と共同で日本海溝付近の三陸沖で海上重力測量を実施した（田島, 1966）。測定は、海上保安庁水路部の観測船「拓洋」（約 750t）に国土地理院が製作した動揺体上重力計の G.S.I.型海上重力計（写真-6）を搭載して実施し、海上 121 点で重力を測定した。作業報告書では、G.S.I.型海上重力計のドリフトは 10 日間で +225 mGal, 作業途中でうねりが大きくなり、特に波に立ち向かうこととなった東向きデータは、瞬間的に鉛直加速度が 10^5 mGal を超える場合が多々あり、データの過半数は不良であったと報告されている。その後、1964～1965 年に小笠原海溝、マリアナ海溝、西南諸島海溝、フィリピン海等で、1966～1968 年に第 8～9 次南極地域観測で、1969 年に日本近海で海上重力測量を行った。測定の精度は 10 mGal と見積もられ、これらの測定から測線の重力異常図が作成された（石井, 1970）。測定から見積もられた G.S.I.型海上重力計のドリフトは 1～1.5 mGal/日程度で、観測記録装置の自動化など改良も行われた。

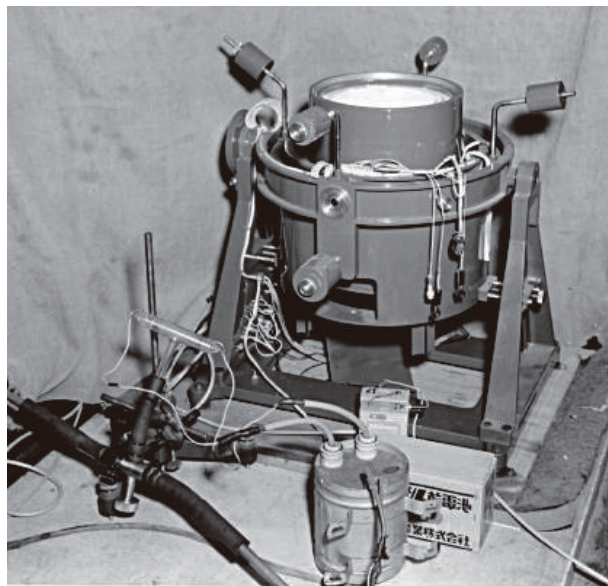


写真-6 国土地理院が製造した動揺体上重力計「G.S.I.型海上重力計」（撮影年、撮影場所不明）

国土地理院は、1971 年と 1973 年の 2 回、海上保安庁の潜水調査船「しんかい」に 2 台のラコスト重力計（G-123 及び G-223）を搭載し、水深 100～500

m にかけて 100 m 毎に海底重力測量を実施している。1971 年の作業報告書では、「潜水調査船が安定せず、ラコスト重力計のクロスヘアが大きく振り切れ、測定が困難であった」とあり、調査船が着底後には、「クロスヘアのふれ幅は $\pm 3 \sim 4$ 目盛から ± 1 目盛になった」とされ、着底後の振れ幅は小さくなったとは言え、測定の困難さが伺える。一方、1973 年の作業報告書では、「読定値が ± 0.05 mGal で得られたので陸上の測定精度と比較できる」とされている。この測量は、海中の重力鉛直勾配の測定、海底重力分布の調査を目的に実施されたが、潜水艇の与圧が重力計に与える影響、測定地点周辺の海水と陸地が重力値に及ぼす影響、潜水艇の測定位置の測位精度など、課題が多い重力測量だったと記録されている。なお、この測量が国土地理院による唯一の海底重力測量である。また海上保安庁水路部は、1970 年に同様の測量を実施している（東原，1973）。

3.4.3 相対重力計の検定

スプリング式相対重力計では、スプリングに吊した錘が、重力とスプリングの復元力で釣り合う位置を測定して重力を求める。SF が測定をしていない期間は一定と仮定すると、鉛直に下げたスプリングの先端に吊した質量 m の錘は、フックの法則により加重がない時より $s = kmg$ だけ伸びて平衡を保つ。ここで s はスプリングの伸び、 k はスプリングの弾性定数、 g は重力値である。同じスプリングと錘を用いた相対重力計であれば k と m は一定で、この km が SF である。SF は重力計毎に製造者から与えられ、安定していると言われていたが、この安定性が十分でないことが測定を積み重ねることで判ってきた（鈴木，1962）。SF は重力値 g が既知の 2 点以上で s を測定することで検定することができる。スプリング式相対重力計で期待される精度、例えば 0.1 mGal より高い精度が必要な場合には、この桁で生じる誤差要因を測定の際に出来る限り除く必要がある。SF は、大きな誤差要因であるため、重力計に用いるスプリングを膨張係数が小さい材質で作製する、恒温槽を用いて温度変化を防ぐ、といった処置を行って SF の変化を防ぐよう努めている。また、測定者は重力計に大きな振動を与えて SF が変化することがないように慎重に機器を扱う必要がある。精度の良い測定を達成するためには、SF の検定を行って重力計のスプリングの重力に対する応答を正確に求めることが非常に重要である。

国土地理院は、1952 年には、この年に導入した AG1 重力計の SF を求めるため、GSI 型重力振子で重力値が求められていた Chiba、柿岡及び札幌の重力点を往復で経由する二等重力測量を実施して検定を行った（井上ほか，1955）。この検定では、いずれ

も片道の測定で SF を求めたうえ、往復の間に北海道地方の二等重力測量を実施したため、決定した SF は、作業中に生じたドリフト、テアによる誤差を含む可能性が高い。また、GSI 型重力振子で決定した値で校正したため、GSI 型重力振子及び AG1 重力計の測定誤差をあわせた 0.7 mGal に達する誤差を持つことが想定された。この測定では、往復の SF の整合から判断すると、検定で求めた SF に期待できる精度は 10^{-3} （重力差 200 mGal で約 0.2 mGal の誤差）程度である。国土地理院では、SF の検定の信頼性を向上させるため、1954 年、重力差が約 200 mGal ある Chiba－柿岡間（地理調査所の目黒移転後は東京（目黒）－柿岡間）に検定路線を定めて、以降は毎年測量を実施して AG1 重力計とウォルドン重力計の SF の検定を行って重力測量に用いた。そのほか、箱根、鹿野山及び川越を結ぶ検定路線も設置された。

ラコスト重力計を導入した 1965 年以降も、同じく東京（目黒）－柿岡間の検定路線で SF の検定を実施した（山本ほか，2018）。検定から、ラコスト重力計では SF の経年変化が小さいことが確認されたため、製造者が定めた SF を用いて重力測量を行った。また、ラコスト重力計に特有の周期誤差（測定ダイヤルの回転をバネに伝えるギアの中心が偏ることと生じる誤差）を調査するため、1965 年には検定路線を細分化し、重力差が約 10 mGal 毎に測定点を設けて検定を実施したが、路線全体の重力差が 200 mGal でラコスト重力計の測定レンジを網羅できず、路線を分割したことで読定回数が増えて読定誤差が累積する可能性が高いといった課題があったため、周期誤差の検定としては、有意な測定とはならなかった。

後述の可搬型の GA60 型絶対重力計が導入され、絶対重力測定が可能となったことで、1989～1992 年には、新十津川、弘前、筑波、京都、鹿屋、那覇など主に表-2 の基準重力点の間に検定路線を設けて SF の検定を行った（山本ほか，2018）。これらの路線では、重力差が大きいところでは 900 mGal に達するため、重力差の大きな路線で絶対重力測定を基準とした正確な SF の決定が期待されたが、ラコスト重力計を迅速に運搬するため航空機を用いたことで気圧応答によるテアが発生する、自動車や電車を利用した移動距離が長い原因不明のテアが発生するなど、機器が安定しないものも多く信頼性の高い重力差の測定は困難であった。そのため、最も安定した検定では 10^{-5} で整合する SF が求められたものの、検定のみで全ての測定に用いることができるほど信頼性の高い値は決定できなかった。これらの測定は、後に SF をパラメータとして網平均計算で推定する際に活用された。

表-2 GA-60 による国内の測定値

測定点 (FGS)	測定年月	測定数	測定値 (mGal)	単観測の SD (mGal)
筑波	1985. 6	178	979,951. 252 ± 0. 005	0. 064
柿岡	1985. 9	82	979,966. 837 ± 0. 005	0. 047
鹿屋	1986. 1	82	979,443. 685 ± 0. 007	0. 056
	1993. 2	75	979,443. 636 ± 0. 004	0. 038
新十津川	1986. 8	63	980,495. 604 ± 0. 005	0. 039
京都	1986. 12	126	979,707. 693 ± 0. 003	0. 036
	1991. 7	144	979,707. 686 ± 0. 003	0. 041
江刺	1987. 7	144	980,121. 799 ± 0. 003	0. 036
御前崎	1987. 12	129	979,741. 126 ± 0. 006	0. 065
那覇	1988. 1	99	979,096. 029 ± 0. 006	0. 061
松江	1988. 12	100	979,795. 104 ± 0. 011	0. 106
	1993. 7	134	979,794. 845 ± 0. 004	0. 047
弘前	1989. 6	51	980,261. 204 ± 0. 008	0. 055
釧路	1990. 7	202	980,634. 749 ± 0. 003	0. 041
高知	1990. 12	102	979,470. 617 ± 0. 004	0. 044
金沢	1992. 11	138	979,841. 606 ± 0. 006	0. 075

ラコスト重力計の検定は、SF の決定の他にも、検定路線での比較、機器の水平を確保する気泡管の調整など、相対重力測定の信頼度の向上を目的として、1968 年以降、年度の当初に重力計の点検及び調整を継続している。現在の検定路線は、筑波山に設置した 10 点の筑波山点検線で実施している（山本ほか、2018）。

4. 日本重力基準網の構築と絶対重力測定

4.1 日本重力基準網 1975 構築と背景

1971 年にモスクワで開催された第 15 回の IUGG 総会では、IGSN71 の構築が採択され、1974 年には、各国の協力のもと IGSN71 が公表された（Morelli et al., 1974）。IGSN71 は、1960 年以降に行われたラコスト重力計による相対重力測定約 12,000 個、1967 年までに行われた重力振子による相対重力測定約 1,200 個、1969 年頃から実用が始まった落体法（落下式）の絶対重力測定 8 地点 10 回の重力の絶対値に基づいて構築され、これには、国土地理院が GSI 型重力振子で測定した国際結合（前述）も含まれている。測定に使用された重力振子（GSI 型重力振子を含む）は、3 本の国際的な重力検定線（アメリカ検定線、ヨーロッパ・アフリカ検定線、西太平洋検定線）で検定され、検定線での比較測定、重力計相互の比較測定から重力網の骨格が構築されている。IGSN71 では、前述の 10 回の絶対重力測定に最も良く整合的な重力の絶対値を決定したのち、絶対測定及び重力振子の測定から網の重力差を決定し、ラコスト重力計による長距離測定によってこれらに整合的な網の大部分の値を決定している。IGSN71 は地

球上の実用上の全範囲において標準偏差 0.1 mGal 以下を達成しており、0.1 mGal に近いのは主要網との結合が弱い島や高緯度地方に散見されるにすぎない。日本では最大 0.037 mGal で、国内ではこの程度の相対的な確からしさがあることが想定されている（鈴木、1976）。

一方、国土地理院は、第 3 章で述べた重力計を用いて基準重力点 8 点（Tokyo-B など GSI 型重力振子による重力点で厳密には現在一等重力点）、一等重力点 89 点及び二等重力点 10,369 点を測定し、ポツダム重力系に基づく日本の重力基準網を構築していた（Suzuki, 1974）。これらを改訂することで国内の 122 点に対して新たに IGSN71 に準拠する重力値を与えて JGSN75 を構築した。IGSN71 は、前述のように絶対値の精度は 0.1 mGal 程度、日本国内では相対的に 0.037 mGal 程度の精度とされているが、IGSN71 に準拠した JGSN75 は、絶対値では IGSN71 と同じく ±0.1 mGal、相対的には ±0.035 mGal の精度とされている（国土地理院、1976）。

4.2 絶対重力測定の背景

国土地理院が構築した JGSN75 は、国際的な基準である IGSN71 に準拠した基準値を国内の全ての重力の利用者に提供する画期的な重力基準であるが、国内では絶対重力測定が行われていない。また、国内の相対重力測定が高密度かつ高精度に行われるようになったことを受け、IGSN71 に準拠した相対重力測定の基準値も精度の向上が必要になった。これらの課題を解決するために、国内でも絶対重力測定が必要とされるようになった。

1978年3月、国土地理院は目黒から茨城県筑波郡谷田部町（現つくば市）への移転に伴い、構内に重力測定棟を建設して、地下1階から地上1階まで吹き抜けの観測室を設置した。この観測室は、吹き抜けの高い天井を必要とする大がかりな落下型の重力計を据え付け、絶対重力測定を行うために設けられた。国土地理院はこの時、絶対重力計を保有していなかったが、日本重力基準網の精度を維持し、相対重力計の検定の基準とするとともに、重力の時間変化を検出するために絶対重力測定の必要性を認識していた。海外では、実用化された絶対重力計で測定が開始されており、国内では、東京大学地震研究所が絶対重力計の実用化試験を進めていた。重力測定棟は、このような絶対重力測定への需要、実現可能性の高まりを受けて設置された。なお、重力測定棟の吹き抜けの観測室は空間が広く空調で温度を一定に保つことが困難であったため、現在は地上1階部分に仕切りが設置され、吹き抜けを塞いでいる。

4.3 国土地理院の絶対重力測定

(1) GA60 型絶対重力計

1980年3月、国土地理院は、国際度量衡局（Bureau International des Poids et Mesures、以下「BIPM」という。）の佐久間晃彦が製作した、GA60 型絶対重力計（フランス Jaeger 社製、写真-7、(Sakuma, 1971)、以下「GA60」という。）を導入した。



写真-7 GA60 型絶対重力計（撮影年不明、国土地理院重力測定棟地下1階）

GA60 の構成を図-4 に示す。GA60 は、真空中に投げ上げた試験落体（投げ上げ用コーナーキューブ）

の自由落下をマイケルソン干渉計で測定する装置である。真空中に投げ上げられた試験落体は、重力のみを受けて自由運動するため、落体の位置（高さ）の時間変化を測定することで、落体に働く重力を求めることができる。試験落体の位置と時刻の測定は、安定した波長のヨウ素安定化 He-Ne レーザと、周波数安定度が高いルビジウム原子時計を用いて行う。光源から出たレーザ光は、干渉計内部のハーフミラーで2つに分離され、一方は投げ上げ用コーナーキューブへ、もう一方は参照用コーナーキューブへ向かう異なる光路を通過した後、再び重なり合う。重なり合ったレーザ光には干渉縞が生じるため、それをフォトマル（光電管）で計数し、一定の縞の数ごとに時間を計測することで、落体の位置の変化とそれに要する時間が求まる。このようにして複数の位置で落体を測定し、測定した位置と時間の組合せから最小二乗法により重力の最確値を求める。

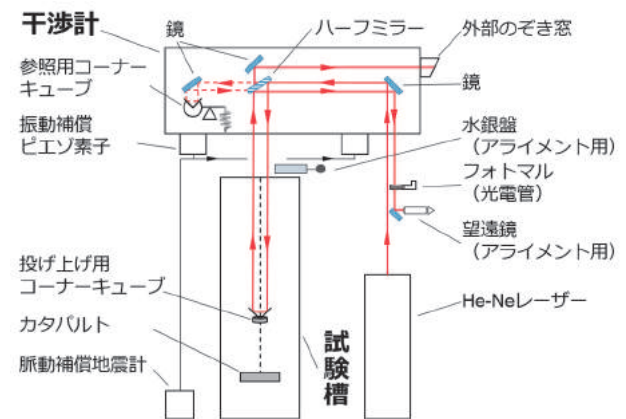


図-4 GA60 による測定の概念図

国土地理院は、GA60 を導入した直後の1980年4月3日から22日間の8日間、重力測定棟の基準重力点「筑波」（以下「筑波 FGS」という。）で試験的な測定を実施して102のデータを取得した。この測定は、標準偏差は0.040 mGal 程度であるものの、日間の較差は0.1 mGal に達し、IGSN71 との差は約0.060 mGal に達した（村上・太島, 1981）。その後、1984年までの4年間でGA60 が稼動したのは、前述の測定を含めた3回である。GA60 は精密器械の集合体で、複雑な電気回路、真空技術及びレーザ発振技術など、従来の重力計の運用の経験とは異なる技術や知識を要したため、不具合の特定、修理の際のフランスの製造者との調整に長期間を要した。こうした中、装置の一部を自ら改造し、不具合を修理して、1985年に重力測定棟で再稼働に至り、同年9月には柿岡 FGS で初めての移動観測に成功した。測定で得た筑波 FGS－柿岡 FGS 間の重力差は-15.585 mGal で、ラコスト重力計で測定した重力差-15.589

mGal と 0.004mGal の差で一致している (佐々木, 1986). GA60 は可搬型とされるが, 装置一式は体積, 重量ともに大きい (体積は約 5.9m³, 重量は約 980kg), 組み立てに 3~4 人が必要で, 移動には精密器械運搬車 (4t ロングトラック) を用いた.

国土地理院は, 1985~1994 年の 9 年間で GA60 を用いて国内 13 か所で移動観測を延べ 16 回行った (表-2). 1992 年には, 第 33 次日本南極地域観測隊に参加して昭和基地で初めて絶対重力測定を行った (藤原・渡邊, 1992). 1994 年には機器固有の系統誤差を検証するため, BIPM に重力計を輸送して各国計量機関の絶対重力計と比較測定を実施した. 国土地理院の GA60 は, この測定で 336 の有効データを得たが, 他の絶対重力計と平均値で 0.055 mGal の乖離が見られた (Sasagawa et al., 1995). その後, GA60 が測定の際に用いる特注の投げ上げ用コーナーキューブが入手困難となったこと, 装置全体が改良を重ねており, 熟練に相当の時間を要すること, 後述する FG5 絶対重力計が製品化されたことを受けて, この比較測定が GA60 による最後の測定となった.

GA60 の導入時には, 国内に存在する絶対重力計は, 東京大学地震研究所が試作中であった落下式重力計と緯度観測所の固定式の佐久間式絶対重力計の二つのみであり, 国土地理院の可搬型の GA60 が, 国内 13 か所に重力の絶対値を与えたことは, 国土地理院が JGSN75 に代わる高精度な重力基準網の構築を進める重要な基盤となった.

(2) FG5 絶対重力計

国土地理院は, 1993 年に FG5 絶対重力計 (米国 AXIS 社 (現 Micro-g LaCoste 社) 製, 写真-8, 以下「FG5」という.) の製造番号 104 番 (以下「#104」という.) を導入した. 投げ上げ式の GA60 に対して, FG5 は自由落下式の絶対重力計で, 真空状態の落下槽の中にある試験落体 (自由落下コーナーキューブ) を格納した容器 (ドラッグフリー槽) ごと上昇させ, 駆動ベルトを使って容器を落下させることで, 試験落体は容器からわずかに浮上し, 真に重力のみで自由落下することになり, 落下した距離と落下に要した時間から重力の絶対値を精密に測定する, ドラッグフリー槽方式で測定を行う装置である (図-5). FG5 は, GA60 と比べて小さく軽量で組み立ても容易な上, 設置調整後は多くの連続測定が可能である. 装置は, 試験落体を真空中で自由落下させる落下槽, ヨウ素安定化 He-Ne レーザを用いて干渉縞を検出する干渉計, 地盤振動を取り除くスーパースプリング, ルビジウム原子時計で落下時間を計測するとともに装置全体を制御するコントローラーの四つの機器で構成される. 落下槽, 干渉計, スーパースプリングは三つで干渉縞を発生させる干渉計の役目を果たし

ている. 重量は全体で 170kg 程度と中型貨物自動車による運搬及び移動が可能で GA60 と比べてはるかに機動性に優れている. なお, FG5 を用いた測定では, それ以前の測定と比べて精度が 1 桁高くなったことから, これ以降, 重力値の単位を mGal から μ Gal ($1\mu\text{Gal} = 10^{-3} \text{mGal}$.) に変更して表記する.



写真-8 導入直後の FG5 絶対重力計#104

国土地理院は, 1993 年 4 月に FG5 (#104) の本格運用に向けて, 重力測定棟で特性・性能試験を行うとともに, 国土地理院の GA60 とアメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 以下「NOAA」という.) グループの FG5 (#102) との間で, 三つの重力計間の相互比較測定を重力測定棟で実施した. 測定の際には, FG5 の製作に携わった米国の国家測地測量局 (National Geodetic Survey) から技術者が来院し, 解析ソフトウェアの更新や部品の交換といったメンテナンスの習得とともに, 測定の際の機器の調整方法など, 運用ノウハウを学ぶ機会となった. 測定では, NOAA の FG5 (#102) と国土地理院の GA60 は $8\mu\text{Gal}$ で整合したが, FG5 (#102) と FG5 (#104) では $23\mu\text{Gal}$ の乖離が生じた. この試験の時点では, FG5 は開発途上であったため, NOAA は, FG5 (#102) に対して落下槽を支える脚部と測定基台との間に振動吸収ラバーを装着, スーパースプリングの温度変化を防ぐための断熱布の装着など, 精度向上のために独自の工夫をしていた. 同程度の精度で実運用を行うためには, 国土地理院の FG5 (#104) にも同様の改良が必要であることが明確になった.

FG5 (#104) を導入してから, 国内での重力測定は前述の試験観測だけという実績であったが, 1994 年 2 月に FG5 (#104) を GA60 と併せて BIPM に輸送し, 他国の機関が所有する絶対重力計と国際比較観測を実施した. なお, 他国の機関の測定は, 2 月ではなく同年 9 月に実施されている. FG5 (#104) の

総測定数は約 12,000 個、有効測定数は 833 個で、同地点で他機関が行った測定と比較すると有効測定数が少ないが、測定値は他機関の FG5 と $3.6\mu\text{Gal}$ で整合し、同一地点で高さ 90cm に化成した FG5 (#104) を含まない平均の重力値とは、 $13.3\mu\text{Gal}$ で整合的であった (Sasagawa et al., 1995)。

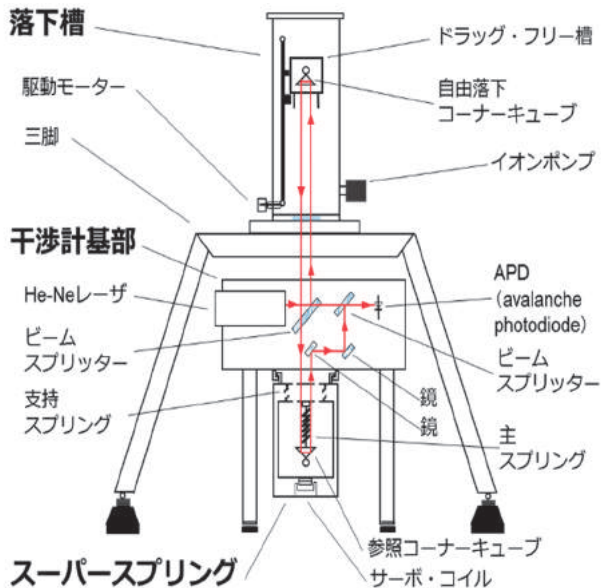


図-5 FG5 の機器構成図

帰国後に重力測定棟で行った試験測定では、測定の標準偏差が $\pm 60 \sim 100 \mu\text{Gal}$ と GA60 と比べて大きかったため、機器を製造者へ送ってレーザの交換や調整等を行った後に、重力測定棟で改めて測定を行ったところ、標準偏差が $\pm 50\mu\text{Gal}$ 以下となり、ばらつきには改善が見られた。しかし、測定値は、前述の GA60 と NOAA が保有する FG5 (#102) の値と比較して $+20\mu\text{Gal}$ の乖離があったため、1994 年に計画していた国内での移動観測は行わず、重力測定棟で調整を継続し、南極観測のために昭和基地へ輸送した。

国土地理院は、1994 年に第 36 次日本南極地域観測隊に参加し、昭和基地に設置された国際絶対重力基準点網 (International Absolute Gravity Station (Boedecker and Fritzer, 1986), 以下「IAGBN」という。) のランク A 観測点で FG5 (#104) を用いた絶対重力測定を行った (山本, 1996)。IAGBN は、1987 年にバンクーバーで開催された第 19 回 IUGG 総会で IAG が行った決議に基づく、重力の時間変化の監視と世界の重力基準の維持を目的とする、絶対重力測定による重力基準点網である。第 36 次隊での測定は、1995 年 1 月 20 日～2 月 11 日の 21 日間、延べ 429 時間にわたって連続して行い、45,386 個の測定数を得た。昭和基地は地盤動が小さいため、国内と比べて精度の良い連続測定が実施できたことで、

国内では検出できなかった海洋潮汐による振幅 $5\mu\text{Gal}$ の重力の微小な時間変化が検出された。FG5 (#104) ではじめて重力値を決定したのは昭和基地の測定値で、 $982,524.3269 \pm 0.0144 \text{ mGal}$ (Kaminuma et al., 1997) は、現在も IAGBN の公表値である。第 33 次隊で GA60 の測定から求められた重力値とは $-74.9\mu\text{Gal}$ の乖離があったが、時間変化と判断するには差が大きいため、機器の信頼性などを考慮して FG5 (#104) の測定値を採用した。国土地理院は、その後も極地研究所、京都大学等と共同して昭和基地で FG5 の絶対重力測定を継続している (菅原ほか, 2018)。

4.4 FG5 による絶対重力測量

1995 年 8～9 月、国土地理院は、熊本 FGS において FG5 を用いた国内初の移動観測を実施した。単観測の標準偏差は $63.5\mu\text{Gal}$ 、有効落下数は 7,036 個であった。FG5 のレーザアンプが故障したため、東京大学地震研究所が所有する FG5 のアンプを空輸して測定を行った。同年 10 月には、京都 FGS で 2 か所目の移動観測を実施した。京都 FGS では、GA60 を用いた測定を 2 回行っていたため、この観測によって、筑波 FGS 以外の国内の基準重力点ではじめての FG5 と GA60 の比較となった。比較では、1986 年の GA60 の測定との差が $-21.6\mu\text{Gal}$ 、1991 年の GA60 の測定との差が $-14.6\mu\text{Gal}$ で、いずれも FG5 が小さい値を示した。

国土地理院は、1995 年 10 月に新たに 1 台の FG5 (#203)、同 12 月にはさらに 1 台の FG5 (#201) を購入して 3 台の FG5 を用いた重力測量を開始した。1996 年 2 月には、西太平洋地域の海面変動と重力変化に関する研究の一環として、2 台の FG5 (#104 及び #201) をオーストラリアに空輸して Mt. Stromlo, Tidbinbilla, Mt. Pleasant で絶対重力測定を実施した。国内の測定では、標準偏差は約 $50\mu\text{Gal}$ と比較的大きかったが、オーストラリアの測定では、標準偏差は $12 \sim 27\mu\text{Gal}$ と小さく、#104 と #201 の差は、Mt. Stromlo では $0.5\mu\text{Gal}$ と非常に小さく、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) 所有の FG5 (#110) との差は、最大で $0.7\mu\text{Gal}$ と FG5 間の整合は非常に高かった (Murakami et al., 1997)。

FG5 を導入した後の 3 年間には、海外の測定では標準偏差が小さく、海洋潮汐による振幅 $5\mu\text{Gal}$ の重力の微小な時間変化を検出するなど、精度の良い安定した測定が達成された。一方、国内の測定では標準偏差は海外の測定に比べて大きく、同様の精度に追いついていなかった。この原因は、国内では活発な人間活動によって不規則な地盤動が大きいこと、周囲を海に囲まれているために波浪の影響を受ける

こと等があげられ、重力係がこうした要因を取り除く測定手法を工夫し続けることで、徐々にではあるが、標準偏差は小さくなっていった。

1996年4月からは、3台のFG5を用いて、国内の重力基準網を高精度化するとともに、重力の時間変化の把握を目的として、国内50点の基準重力点の整備を目標に絶対重力測量を開始した。2015年までの22年間には、FG5を用いて基準重力点30点を新設（移転及び再設を含む。）し、GA60で測定を行った基準重力点7点で再測を行った。1996年からは、駿河湾地域の重力変化の監視を目的に、御前崎FGSで東京大学地震研究所と共同して絶対重力測量を開始し、2015年までに62回（うち国土地理院は41回）の測定を実施した。1998年に岩手山の火山活動が活発化すると、火山活動の監視を目的に7回の絶対重力測量を実施した。2011年に平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震が発生すると、地震に伴う重力変化の把握を目的に東北・関東地方で6回の絶対重力測量を実施した（山本ほか, 2018）。また前述した西太平洋地域での研究等、海外では、1993～2005年の間に、6か国、12か所でFG5を用いて絶対重力測定を実施した（Takemoto et al., 2006）。この時期、国土地理院は、FG5を用いて高精度な絶対重力測定を行えるアジア地域で唯一の機関であったため、中国やマレーシアなど東アジアの国々で国土地理院のFG5を用いて測定を行い、基準となる絶対重力値を与えることでアジアの重力基準の構築を進める国際協力を行った。

国土地理院は、導入してから22年間、FG5に多くの改良を施し、最適な測定手法を確立したことで、現在では、2～10 μ Gal程度の精度で測定が可能となり、重力の時間変化を議論するために必要な測定精度を達成している。また、FG5の精度は、製造者が示すカタログでは、FG5間の整合で2 μ Gal、確度は、振動が小さい場所で測定した場合に1 μ Galとされている。国土地理院の測定では、100～160回の落下を1セットとした際の標準偏差は、測定環境、FG5の個体差に依存して数 μ Gal～数十 μ Galのばらつきがあるが、測定の絶対値は、FG5間で概ね5 μ Galの範囲で整合している。FG5は感度が高いため、観測の精度を維持するためには、測定に影響する要因をできるだけ除去する必要がある。測定の際の機器の設置・調整は、主な誤差要因の一つである。FG5の操作手順書は、製造者が提供しているが、手順書が示す理想的な状態に機器を設置することは困難で、機器の構成や役割、測定原理を理解したうえで調整を行うことで、はじめて期待される精度を達成する状態で測定を行うことができる。国内外の実際の観測においても、十分な調整ができず測定値がばらつき、

有意な測定が行えなかった事例が存在することから、信頼できる測定を行うためには、経験から得た知見を活かして技術を習熟し、最新の注意を払って測定を行うことが必須となる。

5. まとめ

国土地理院は、広く国内に重力の基準を整備し、世界の標準と整合した基準を維持することを目的として、1952年から半世紀以上にわたって重力測量を継続してきた。国土地理院の重力測量では、図-6に示すように、世界の重力測定の動向を把握し絶えず進み測定技術と重力計の高度化を随時取り入れることによって、精度の良い重力測定を実現している（山本ほか, 2018）。こうした取組に基づいて、1976年には、国際的な重力の基準であるIGSN71に準拠した日本の重力基準網JGSN75を整備し、全国に均一な精度の重力の基準を提供することが可能となった。また、可搬性の高い効率的な測定が可能となったことで、稠密な重力分布の把握が進展し、重力の影響を正しく反映した精度の良い標高が全国に展開されるとともに、近年では、GNSSを用いた標高決定に不可欠なジオイド・モデルの整備、高精度化に貢献している。一方、精度の向上に伴い、新たな課題も明らかになってきた。具体的には、FG5絶対重力計を用いて重力測量を行うことで重力の絶対値を数 μ Galの精度で求めることが可能となったため、重力の基準を与えるにあたって、安定した“標準”の状態の重力から数 μ Gal～数十 μ Galで生じる局所的な重力の時間変化を適切に分離できるかが課題となった。JGSN2016は、こうした課題認識に基づいて、誤差要因の除去や測定方法の改善などを継続して行うことで実現した新しい重力基準網である。重力計の開発は日々進んでおり、さらに精度の良い効率的な測定の実現が視野に入ってきたことから、国土地理院は、今後もこれらを効果的に取り入れて測定の精度を向上させるとともに、諸々の課題を考慮して効果的で効率的な重力測量を行うことで、国内に重力の基準を与えていく。

（公開日：平成30年12月27日）

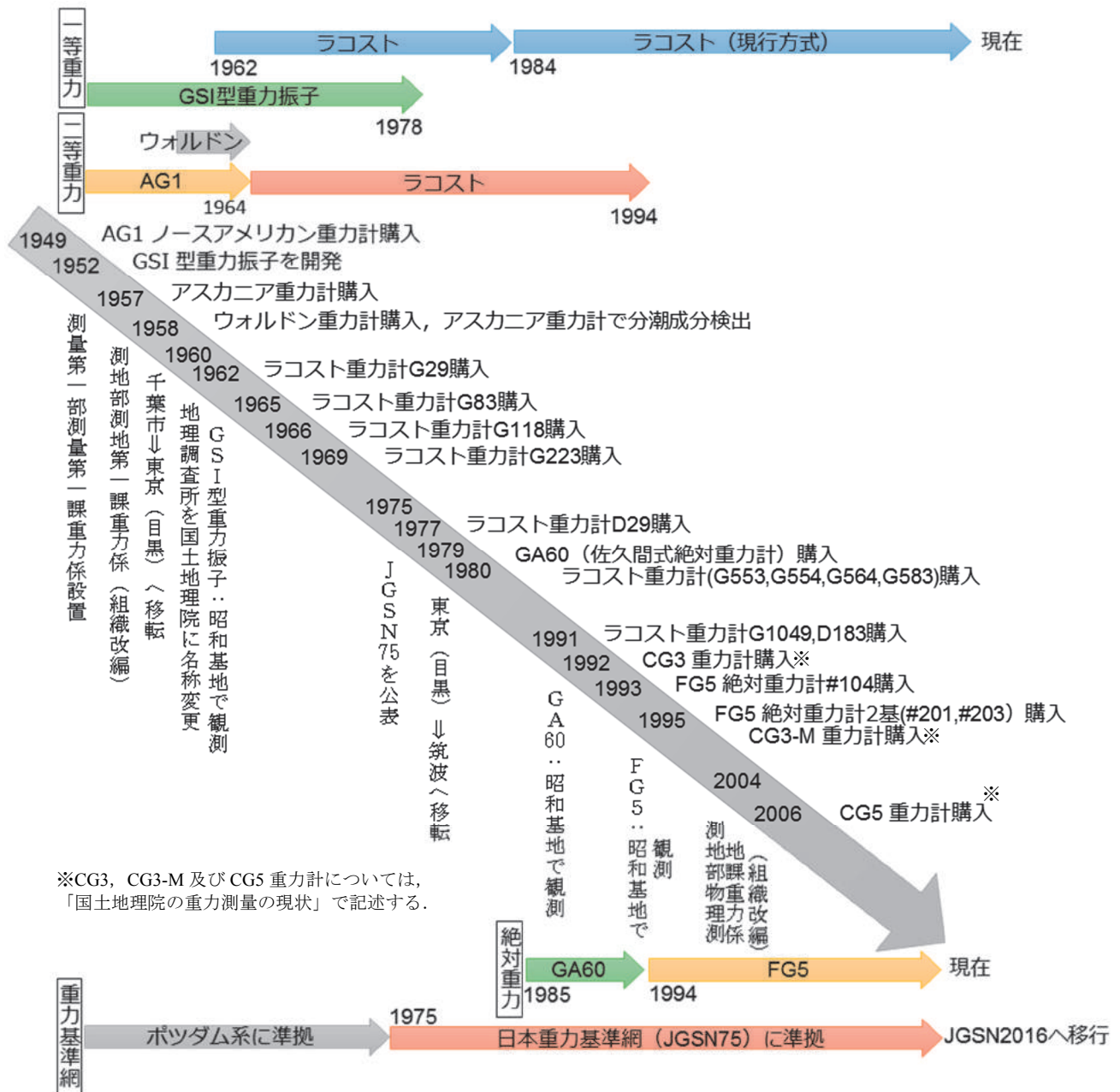


図-6 国土地理院の重力測量の歴史

参 考 文 献

- Boedecker G. and Fritzer T. (1986): International Absolute Gravity Basestation Network. IAG-SSG 3.87 Status Report March 1986, Veröff. Bayer. Komm. f. d. Int. Erdmessung d. Bayer. Akad. D. Wiss., Astron.-Geod. Arb., Nr. 47, München.
- Borrass E. (1911): Bericht über der relativen Messungen der Schwerkraft mit Pendelapparaten in der Zeit von 1808 bis 1909 und über ihre Darstellung im Potsdamer Schweresystem, Comptes rendus des séances de la seizième conférence générale de l'Association géodésique internationale, Rapport spécial sur les mesures relatives de la pesanteur, Spezialbericht über die relativen Schweremessungen.
- 藤井陽一郎, 小暮三郎, 斎藤努, 井上員男, 村田一郎 (1964): ラコスト重力計 G-29 の読定値の精度と定数の信頼度, 測地学会誌, 10, 1, 36-45.
- 藤原智, 渡邊和夫 (1992): 南極・昭和基地における絶対重力測定, 国土地理院時報, 76, 1-6.
- Geographical Survey Institute (1955): Gravity survey in Japan (1) I. Gravity survey in Hokkaido district, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 4, 23-99.

- Geographical Survey Institute (1957): Gravity survey in Japan (2) II. Gravity survey in the Tohoku district, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 5, 1-94.
- Geographical Survey Institute (1964): Gravity survey in Japan (3) III. Gravity survey in the Kanto and Chubu district, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 9, 155-342.
- Geographical Survey Institute (1965a): Gravity survey in Japan (4) IV. Gravity survey in the Chubu, Kinki and Chugoku district, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 10, 55-184.
- Geographical Survey Institute (1965b): Gravity survey in Japan V. Gravity survey in the Shikoku district, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 11, 125-72.
- Geographical Survey Institute (1969): Gravity survey in Japan (6) VI. Gravity survey in the Kyushu district, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 14, 1-82.
- Gravity Survey (1957): Report of the Gravity in Japan for the Period from Jan. 1954 to Dec. 1956, 測地学会誌, 3, 1, 118-122.
- 萩原幸夫 (1976): 地球重力をさぐる, 株式会社講談社, 27-28.
- 原田美道, 鈴木弘道, 大橋伸一 (1958): Singapore, Cape Town 及び南極地域に於ける重力測定, 測地学会誌, 5, 2, 53-60.
- 細山謙之輔, 中川一郎 (1958): 国際地球観測年における重力観測, 測地学会誌, 4, 4, 125-130.
- 井上英二 (1954): 日本における重力測量の現況, 地理調査所時報, 17, 10-13.
- 井上英二, 鈴木弘道, 米内優, 寺尾巖, 林比出子 (1955), NORTH AMERICAN 重力計の定数, 測地学会誌, 2, 1, 18-20.
- 石井晴雄 (1970): 日本近海の海上重力測量, 測地学会誌, 15, 4, 130-141.
- 重力計比較グループ(1969): 多数の重力計による地球潮汐の同時比較観測, 測地学会誌, 15, 2・3, 53-67.
- Kaminuma K., K. Tsukahara and S. Takemoto (1977): Absolute Gravity Value Measured at Syowa Station, Antarctica, Bureau Gravimétrique International, Bulletin D' Information, 80, 26-29.
- 国土地理院 (1976): 日本重力基準網 1975 の設定, 測地学会誌, 22, 2, 65-76.
- 黒石裕樹, 村上真幸, 海津優 (1992): 絶対重力測定による重力網の高精度化, 測地学会誌, 38, 1, 63-74.
- 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, 4, 223-236.
- 黒石裕樹 (2003): 宇宙測地における座標系の取り扱いについてーその 1 標高基準ー, 国土地理院時報, 102, 21-32.
- 松田武雄 (1956): North American 重力計の精度, 測地学会誌, 3, 2, 51-54.
- Morelli C., C. Gantar, T. Honkasalo, R. K. McConnell, J. G. Tanner, B. Szabo, U. Uotila and C. T. Whalen (1974): The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71), Publication special - International Association of Geodesy, 1-194.
- 村上亮, 太島和雄 (1981): 可搬型絶対重力計について, 国土地理院時報, 53, 35-40.
- Murakami M., M. Murakami, K. Nitta, K. Yamaguchi, H. Yamamoto, M. Karasawa, Y. Nakahori, K. Doi, B. Murphy, R. Govind M. Morse and M. Gladwin (1997): Absolute Determination of Gravity in Australia for the Purpose of Establishment of Precise Reference Frame for Mean Sea Level Change Monitoring in Southwestern Pacific, International Association of Geodesy Symposia, 117, 32-39.
- 中川一郎 (1994): 現代測地学 1994 年, 日本測地学会, 425-465.
- 奥田豊三, 井上英二, 鈴木弘道 (1956): 千葉ーWashington D.C. 間の国際重力比較測定について, 測地学会誌, 3, 2, 27-33.
- 大久保修平 (2009): 第 9 回発掘理学の宝物: 三四郎の置き土産 重力基準点, 東京大学理学系研究科・理学部ニュース, 41 (3), 6-7.
- Sakuma A. (1971): Recent developments in the absolute measure of gravitational acceleration, Nat. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ., 343, 447-456.
- 佐々木與四夫 (1986): 絶対重力計による重力測定の結果, 国土地理院時報, 63, 44-47.
- Sasagawa S., F. Klopping and T. M. vanDam (1995): Analysis of data from the 1994 International Comparison of Absolute Gravimeters with a single computational protocol, Metrologia, 32, 3, 185-192.
- 測地部 (1957): 東京・ワシントン間の重力比較測定, 地理調査所時報, 21 集, 10-11.
- 測地第一課 (1953): 新しく地理調査所で製作した振り子型重力測定装置について, 地理調査所時報, 16, 40-

41.

測量・地図百年史編集委員会（1970）：年表，国土地理院時報，39，1-39.

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.

鈴木弘道（1957）：日本の重力基準点とその重力値について，測地学会誌，4，2，43-58.

鈴木弘道（1962）：LACOSTE 重力計，測地学会誌，8，2，79-85.

鈴木弘道（1967）：国際重力測定について，国土地理院時報，33，12-24.

Suzuki H. (1974): Establishment of the Gravimetric Network in Japan, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 20, 1-150.

鈴木弘道（1975）：国際重力基準網の完成と日本の重力値，国土地理院時報，47，1-11.

鈴木弘道（1976）：国際重力基準網 1971 と日本重力基準網 1975，測地学会誌，22，2，112-129.

田島稔（1966）：海上重力測量について，国土地理院時報，31，10-15.

Takemoto S., Y. Fukuda, T. Higashi, I. Kimura, Y. Hiraoka, Y. Hiyama, H. Nakagawa, M. Honda, T. Tanaka, H. Aoki, M. Hashizume, H. Amemiya, A. Suzuki, H. Sun, Y. Wang, H. Xu, Y. Zhu, W. Zhang, J. J. F. Huang, T. Yeh, H. Yu, C. Hwang, S. Dwipa, D. Suryakusuma, P. Manurung, T. C. Hua, M. Y. Bakar, SH. Tahir, K. Wattananikorn, R. M. Agaton, and E. Macaspac (2006): Establishment of an Absolute Gravity Network in East- and Southeast-Asia, J. Geod. Soc. Japan, 52, 1, 51-59.

東京大学地震研究所，京都大学理学部物理学教室，国土地理院（1970）：三浦・房総半島における精密重力測量，測地学会誌，16，1，16-22.

坪川家恒，井上英二，鈴木弘道（1956）：地理調査所型重力測定装置の高速度記録機，測地学会誌，1，21-26.

束原和雄（1973）：潜水調査船「しんかい」，写真測量，12，1，40-45.

山本宏章（1996）：可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定，国土地理院時報，85，18-22.

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

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.