

# 超伝導重力計で地球の変形を測る

神沼克伊

総合研究大学院大学極域科学専攻／国立極地研究所

超伝導重力計はゾウの上にアリが1匹乗ると検知されるほどの感度をもつ。世界で約30台が稼働。地球深部構造の解明や地殻変動の検出、潮汐現象や極運動の観測などに利用されている。全地球規模の研究を目的とした国際プロジェクトGGPでは、総研大・共同研究のメンバーが中心的役割を果たしている。

## ポツダムから始まった重力測定

リングが木から落ちるのを見てニュートンは万有引力（重力）に気がついたという逸話は有名であるが、それは力に加速度に比例するという法則とは別の概念から生じたと言われる。万有引力や重力という言葉は中学校時代から教えられているのに、大学の物理学科の4年生にニュートンの万有引力の法則を問うと、私の経験では正解者は100%どころか70%にも達しない大学が少なくない。基礎教育の欠如が心配されている昨今であるが、物理学の基礎教育

にも同様な心配があるようだ。

重力は地上の物体が地球から受けている力で、地球との間に働く万有引力と地球の自転による遠心力との合力である。したがって重力は、遠心力が0となる両極点で最大、遠心力が最大となる赤道上で最小となる。赤道上の遠心力は $3.4\text{cm/s}^2$ であるから、全重力 $g \approx 980\text{cm/s}^2$  ( $9.8\text{m/s}^2$ )の0.3%にすぎず、広い意味では万有引力と重力を同義にしている。

ところで重力加速度の単位 $\text{cm/s}^2$ はgalで表すことがあり、近年は大地震で励起された振動の加速度を表すときにもこの

gal (Gal) が使われていたりする。

galはガリレオの名に由来する。ガリレオは教会のランプが揺れるのを見て振り子の等時性に気づいたと言われ、振り子の振動周期を測定することによって重力が求められる。支点の摩擦がないように工夫を凝らしたホルダーの振り子を使えば $g=979.0\text{cm/s}^2$ と4桁程度の測定は容易で、19世紀末にはドイツのポツダムでの10年間の測定結果から $g=981.274 \pm 0.003\text{gal}$ の値が得られた。

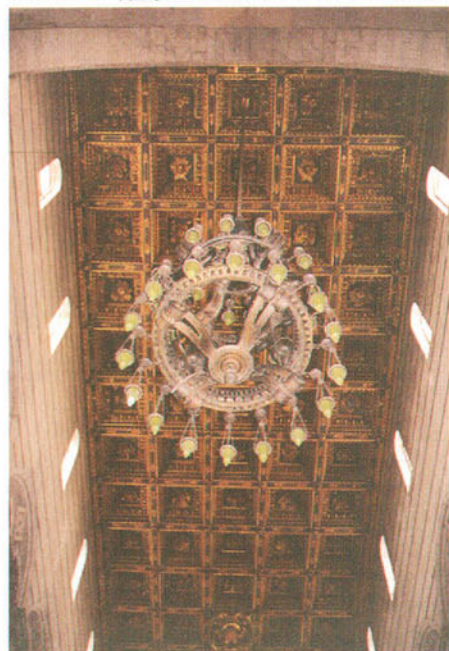
このポツダムの重力値を基準点にすると測定したい地点の重力値が求められる。振り子の長さ $l$ と周期 $T$ 、重力 $g$ との間には $T=2\pi\sqrt{l/g}$ の関係が成り立つ。ポツダムと測定したい地点で同じ振り子を使えば $l$ は一定となり、周期 $T$ の差から一方の地点の $g$ が測定される。こうして世界各地の重力値が測定されていったのである。

日本の重力値も1901年、長岡半太郎によってポツダムとの比較測定により初めて決定された。そして東京大学安田講堂の裏手にあったこの測定点が日本の重力基準点の1つとなり、国内の重力値が測定されていった。

## 「地球は西洋ナシ形」の発見

重力は場所によって異なる。地球上の標準的な重力を与える式は「正規重力式」と呼ばれ、地球の形や大きさを示す楕円体とともに、測地学の国際会議で決定される。その値は『理科年表』

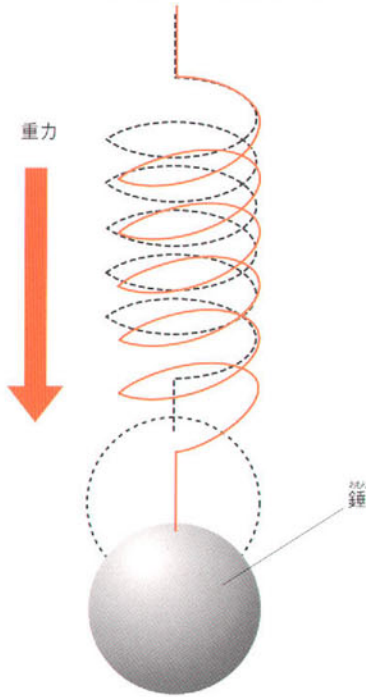
ガリレオが落下の法則の実験をしたピサの斜塔（右の写真）と「ガリレオのランプ」（左の写真）。このランプ（蠟燭を立てたシャンデリア）の揺れから、ガリレオは振り子の等時性を発見したと言われる。



## 重力計の原理

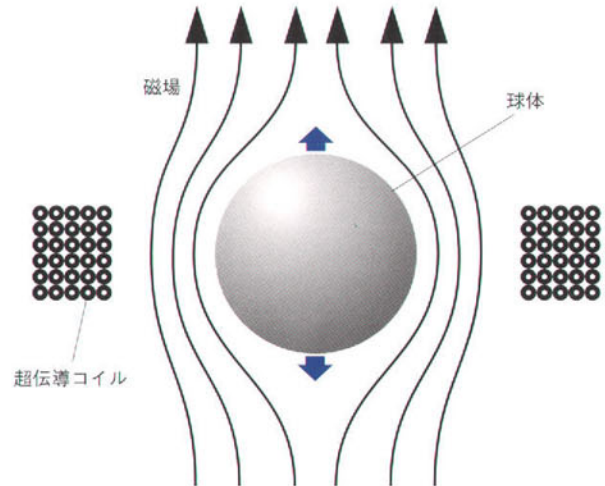
### ●ばね式重力計

重力の変化による錘の位置変化をばねの伸縮として測定する。



### ●超伝導重力計

超伝導体を流れる電流によって生じる磁場を利用して球体を浮かせ、その位置変化から重力を測定する。



(丸善) に示されている。測定した重力値に対して測定地点の高さ、海面より上の部分の質量、地形などの補正を加えるとほぼ正規重力式で得られた値に近い値になるが、多少の差は出る。この差を「重力異常」と呼び、地下構造や地球の形(ジオイド)に対する重要な情報源となっている。日本では東京大学地震研究所の仕事として坪井忠二により列島全体の重力が測定され、1960年頃には重力異常図が完成していた。

こうして地球上のあちこちで重力が測定され、それぞれの地点での重力異常がわかってしまうと、重力に関する研究は一段落したと思われる時期があった。しかし、そうではなかった。宇宙技術の導入、点から面への測定範囲の拡大、より高精度な重力計の開発などによって、重力研究は新たな学問分野として復活したのである。

まず1957年に第1号人工衛星スプートニクが打ち上げられたのを契機とし

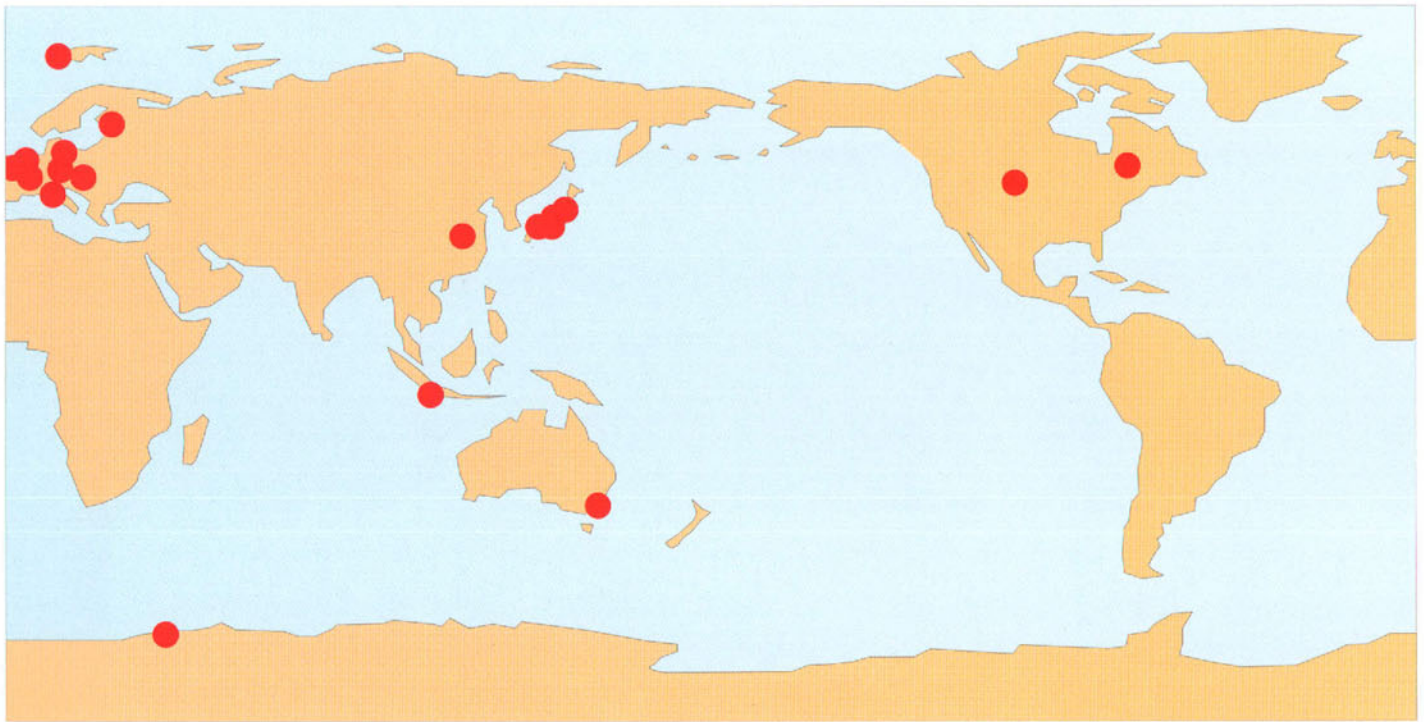
て、地球の重力ポテンシャルについての議論があらためて始まり、地球の形を決める議論へと発展した。

東京天文台(現在の国立天文台)の古在由秀は、人工衛星の軌道を追跡して地球のジオイド面を求めた。人工衛星の軌道は地球の重力の影響を受けているので、その軌道を調べると重力の等ポテンシャル面が求まる。したがって地球楕円体に接した等ポテンシャル面が、表面の凹凸も考慮した地球の真の形に最も近いジオイド面となるのである。それまでのジオイド面は、日本列島全体といったような地球上の部分部分での重力測定から求められていた。人工衛星軌道という1組のデータから地球の形を決めたことに、古在の先見性が高く評価される。

こうして決められた地球の形は北極が凸、南極が凹の「西洋ナシ形」と言われる。しかし凹凸とはいっても数十mのことで、地球が球形に見えることに



昭和基地の超伝導重力計。超伝導重力計はセンサー部を極低温に保っておく必要があり、液体ヘリウムデュアー(円筒形の部分)が使われている。



GGPとGGP-Japanの超伝導重力計ネットワーク。  
GGPは世界12か国、17か所の超伝導重力計観測点を結んだ国際プロジェクトで、1997年から6年計画で進められている。  
日本のグループはGGP-Japanネットワークとしてこれに参加している。

変わりはない。その後、地球の形はさらに精密に測定されるようになり、現在では地球表面の地形を反映したより複雑な形（ジオイド面）が求められている。

一方、1957年の国際地球観測年を契機として地球物理学者の目は海洋へと拡大し、海洋域での重力の連続測定が可能になった。それまでは重力計を潜水艦にのせて潜航し、海底に停止して

測定を行った。当時の潜水艦は電池式だったので、振動が少なく測定が容易だったのである。しかし、この方法で広い海底を測定していくのでは測定点の数がなかなか増えない。そこで開発されたのが、航行中に連続して測定できる海上重力計であった。船の揺れそのものが加速度であるから、これをノイズとして除去するのにいろいろな工夫がなされ、今日では6~7桁の精度で

重力値が得られるまでになっている。また、より効率よく重力測定を行う手段として航空重力計の開発も進んでいる。

#### 超伝導重力計ネットワークの結成

重力の絶対値を直接測定しようという努力も続けられていた。「重力は鉛直方向に働く加速度である」という本来の定義に基づくと、物体がある距離を自由落下する間の時間を精密に測定することによって重力値が求められる。この原理は中学校や高校の理科で教わることだが、実際の測定は難しく、近年になってようやく $1 \mu \text{gal}$  ( $10^{-8} \text{m/s}^2$ )、つまり8桁のオーダーの測定が可能になり、9桁を目指している。

相対測定用の重力計は近年、振り子にかわってばね秤の原理が使われることが多くなった。ばね秤が錘の質量の変化をばねの伸びの変化として測定するのに対し、重力計では錘の質量は一定で、重力の変化に伴う錘の位置変化をばねの伸びの変化として測定するものである。

1980年代前半に開発が進み、後半に

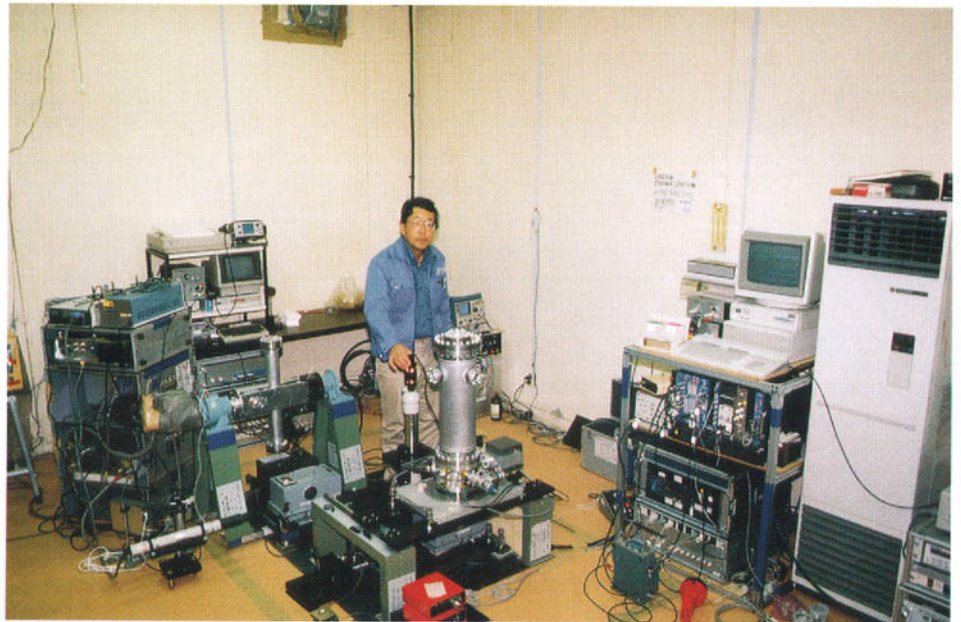
#### Globalな重力変化 重力測定の補正項目

現象	周期	重力変化の大きさ
地球潮汐	半日・日周	100 $\mu \text{gal}$
海洋潮汐	半日・日周	10 $\mu \text{gal}$
大気	日~数日	~数 $\mu \text{gal}$
陸水（地下）	年周	10 $\mu \text{gal}$
陸水（グローバル）	年周	1~2 $\mu \text{gal}$
海洋変動	日~年周	1~2 $\mu \text{gal}$
極運動	年周・14か月	数 $\mu \text{gal}$

実用化された超伝導重力計も、原理的にはばね式重力計と同じ相対測定用の重力計である。ばねのかわりに超伝導現象の特徴の1つであるマイスナー効果(完全反磁性)による磁気反発力を利用している。重力の変化を永久電流磁場による磁気浮上力と釣り合った超伝導体の「錘の位置変化」として検知するものである。永久電流によりつねに安定した復元力が得られること、極低温状態ではすべての物質が安定になり超伝導重力計全体として低ノイズとなることなどにより、ばね式重力計より感度が2~3桁向上し、長期間安定した測定・観測が可能となった。

実用の器械ではそこまでの精度は得られていないが、超伝導重力計の精度は1ngal ( $10^{-11}m/s^2$ ) レベル、9~10桁は可能とされている。これは1トンのゾウの上にアリアが1匹乗ったら、それが検知されることに相当する。

アメリカで開発・製作されたこの超



昭和基地の絶対重力計 写真提供：坪川恒也(国立天文台水沢観測センター)

伝導重力計を日本は8台輸入した。世界で30台ほどが稼働しているのも、そのおよそ4割は日本が購入・設置したことになる。超伝導重力計のデータを使って国際協力で研究を推進するため、

1997年7月には地球の大規模な変動の解明を目的とした6年計画「国際地球ダイナミクス計画(GGP:Global Geodynamics Project)」が始まっている。

日本では、それ以前の1994年に総合

南極さざし浜の隆起汀線。地殻の隆起は今も続いており、超伝導重力計の連続観測による検出が試みられている。

写真撮影：三浦英樹(国立極地研究所)



研究大学院大学の極域科学と天文科学専攻による超伝導重力計データを使った共同研究（代表：神沼克伊、大江昌嗣）が始まった。これは両専攻を中心にして日本国内の超伝導重力計研究者を結集させるもので、「地球深部の研究」と「地球変形の研究」という2つのテーマで6年間研究が続けられた。それが核となってGGPの国内対応母体GGP-Japanが結成され、事務局は東京大学海洋研究所に置かれた。

1993年には、文部省科学研究費重点領域「地球中心核」の費用で購入した日本5台目の重力計を南極の昭和基地に設置。1997年には文部省新プログラムの費用で購入した7台目をオーストラリアのキャンベラに、1999年には同じ費用で購入した8台目をスピッツベルゲン島のニーオルスンに設置した。京都

大学がインドネシアのバンドンに設置した1台を含めると、日本独自で北極—北半球中緯度—赤道—南半球中緯度—南極にわたる超伝導重力計ネットワークが完成されたのである。

この超伝導重力計ネットワークを使った研究成果は、「常時地球自由振動」「海洋潮汐モデリングと重力の海洋潮汐効果」「地球潮汐と章動」「極運動と重力変化」として発表されている（『月刊地球』vol.21, No.8所載）。

### 地球システムとしての重力変化

最近「地球システム」という言葉がよく使われているが、重力はその代表的な構成要素であり、地球上で起こるいろいろな現象の影響を受ける。したがって重力の測定結果から地球の諸現象を知ることができる。何を求めるか

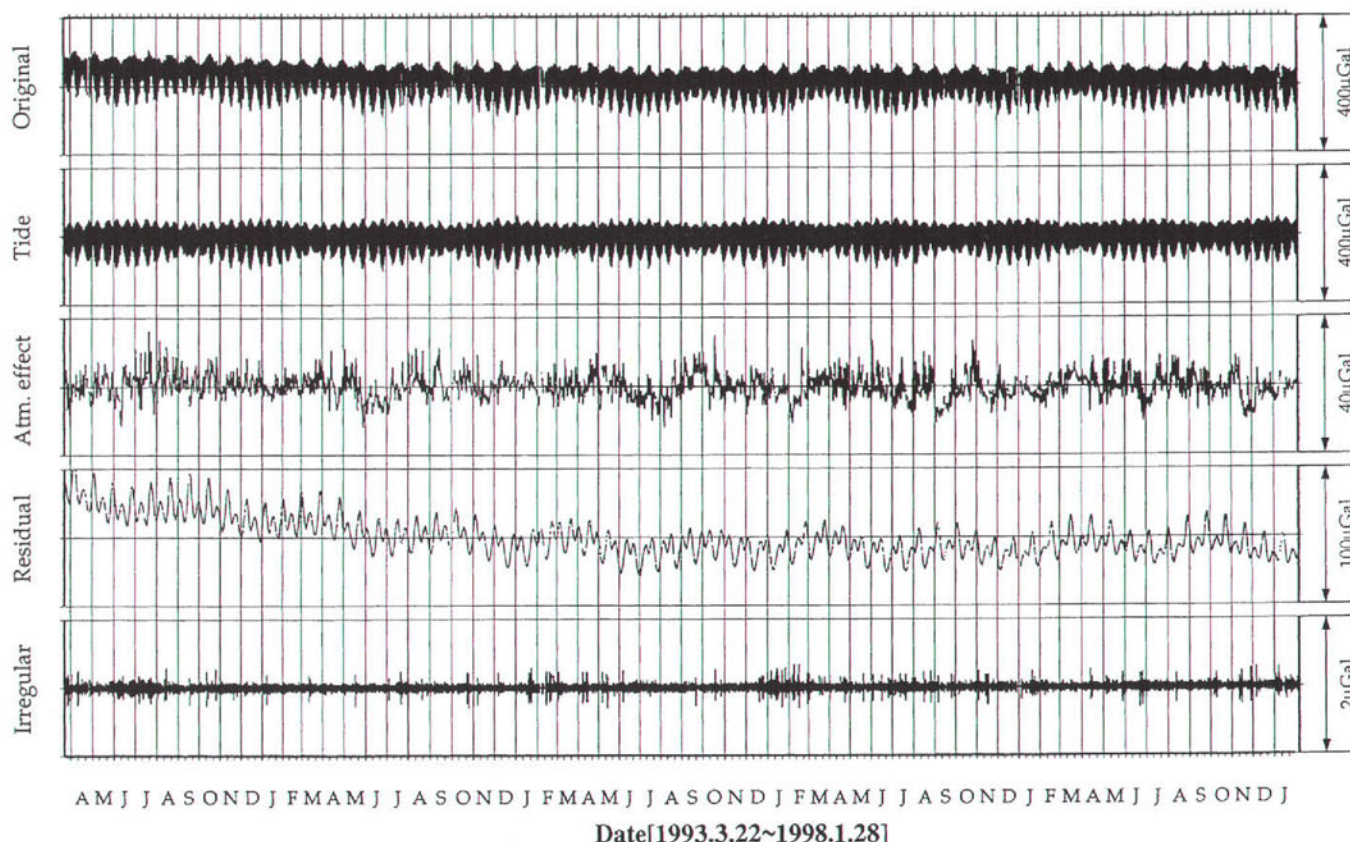
によって必要な精度が決まり、「測定値にどんな補正をしなければならないか」ということになる。必要な補正をすべて行った残りの値の中に求める情報が隠されているわけである。

重力値の補正に必要な事項はいろいろあり（20ページ下の表）、たとえば海洋潮汐の影響を除去するためには正しい海洋潮汐モデルが必要であるように、それぞれの補正をするためにはそれぞれについて正しいモデルが必要となる。補正が正しく行えることにより、得られた値も精度が高まる。共同研究で新しく開発した「海洋潮汐モデル」はこのように目的に合致するもので、そのモデルの構築に超伝導重力計のデータが使われている。

GGP-Japanの研究の中で多いものの1つが、南極で観測されたデータの解析

昭和基地で観測された超伝導重力計の出力データ（1993年3月22日～98年1月28日）。最上段が観測データで、地球潮汐（2段目）と大気補正（3段目）を差し引いたのが4段目の残差。最下段は重力異常。地殻が隆起したとすれば重力の値が減少するはずだが、データ上には現れていない。

### Results of the decomposition with BAYTAP-G at Syowa



神沼克伊（かみぬま・かつただ）

専門は固体地球物理学。東京大学地震研究所から国立極地研究所に移って以来、南極の地震活動、南極・エレバス火山の地球物理学的研究に携わる。近年は南極の微小地震活動と氷床後退に伴う地殻隆起との関係に着目。地殻変動の観測のために測地学の観測にも力を入れている。超伝導重力計の観測もその1つで、国立天文台水沢観測センターの教官とともに共同研究を推進するとともに、GGP-Japanの育成を行った。



である。それは昭和基地のある東オングル島が固体地球物理学観測の最も充実した観測地点の1つであるからで、地磁気の3成分の連続観測をはじめとして地震の3成分観測、海洋潮汐の連続観測、重力の相対測定と絶対測定、GPSやVLBIなどの宇宙技術を使った測地観測など多種多様な観測が行われている。筆者が昭和基地に超伝導重力計を設置する目的の一つとして「最終氷期以後の氷床後退による地殻の隆起の検出」を提唱したのも、日本列島以外の地域でこのような研究が自由にできるフィールドだからこそであった。

南極大陸沿岸域では、昔の海岸線が隆起した地形（隆起汀線）が見られる。昭和基地付近のオングル諸島では、海生動物の化石から過去6000年間に最大20m前後の隆起が認められている。地形学的には南極大陸沿岸域では3~6mm/yの隆起量と推定されている。また昭和基地では、南極で唯一30年間以上も海洋潮汐の観測（検潮儀による）が継続されている。そのデータから、年平均4.5mmの海面低下が報告されている。これは地殻の隆起を示すものと推定される。そのほか、水準測量による地殻の傾斜変動、微小地震活動などのデータからも、オングル諸島は現在も地殻の隆起が続いていると予測される。

そこで超伝導重力計のデータを重力の絶対測定で補正することにより、そ

の隆起現象を確実に測定できると考え、1993年から観測を始めたわけである。

定期的な絶対測定の繰り返しから、重力変化（地殻の隆起）の検出は可能であると考えているが、現在得られている絶対測定の精度は10 $\mu$ gal程度であるから、年数mmの隆起の検出は短期間では難しい。超伝導重力計データの精度（数ngal）から考えて、5mm/yの隆起量は1.5 $\mu$ galの重力変化に相当し、原理的には検出可能なはずである。このような隆起が1~2か月継続すれば検出できる。

しかし実際には、1993年から98年までの5年間にわたる超伝導重力計の連続データ（22ページの図）からもわかるように、計器のドリフトのほかに潮汐変化、極運動といったかなり大きな変動が重なっている。それら既知の変動を除去しながら、隆起現象によって起こる重力変化を検出することが課題である。データを見るかぎり、地殻の隆起を示す重力の大きな減少は認められない。平均5mm/yの隆起が10年間続けば総隆起量は5cmとなり、15 $\mu$ galの重力変化が期待される。隆起とそれに付随する現象の検証にはまだ十数年のデータ蓄積が必要なようである。

### 長期観測の必要性

このように重力は地球を1つのシステムとして考えるときにきわめて大きな手がかりを与えてくれる。一方で宇宙

技術による観測が充実されているが、より高度な「地球システム」を構築するうえで重力観測が重要であることに変わりはない。重力はいわば地に足をつけた計測だからである。

とくに地球の中心に位置する流体核（外核）とその外側の固体地球、また固体の内核と流体の外核がすべて同じように自転してはいないと推定される。しかし、スリヒターモードと呼ばれるその自転のずれはまだ検出されるに至っていない。地球の極が地球表面に対し移動する（したがって緯度に変化する）極運動で卓越する周期12か月や14か月の成分（チャンドラー周期）の検出もまだ完全ではない。このような周期の長い現象を完全に捕捉し分離するには、少なくとも6~7年の観測は必要となる。

近年の学界の風潮は数年という短い期間で新しい成果を要求している。しかし大気や海水の変化に比べると、地球の固体部分の変形は変化量も小さく、タイムスケールの長い現象である。このような現象は高精度の観測を長期間継続することにより、初めて検出可能となる。

地球を相手にする学問分野では目先の成果にとらわれない10年、20年先を見据えた観測が必要である。その中で超伝導重力計データの果たす役割はますます重要となるであろう。

（編集担当 福島佐紀子）

### 【文献】

- ・神沼克伊「超伝導重力計による地殻変動の検出」、松本晃治ほか「海洋潮汐モデリングと重力の海洋潮汐効果」、名和一成・須田直樹、「常時地球自由振動」、佐藤忠弘「地球潮汐と章動」、青山雄一・佐藤忠弘「極運動と重力変化」、『月刊地球』vol.21, No.8(1999)
- ・佐藤忠弘・福田洋一・青山雄一、「海洋変動による重力変化」福田洋一編、シンポジウム論文集「人工衛星マルチメーターを用いた海洋及び固体地球の研究」、135-147(1999)
- ・K.Kaminuma, "Crustal uplift around Syowa Station, Antarctica," *Geodesy on the Move*, eds. Forberg et al. Springer-Verlag Berlin, 536-540(1998).