

## 衛星重力ミッション

Q. 人工衛星を使って地球の重力が分かるということ聞いたことがあるのですが、本当ですか。GPSのように地球上の位置が分かるというのはなんとなく理解できるのですが、重力が分かるというのは理解できません。

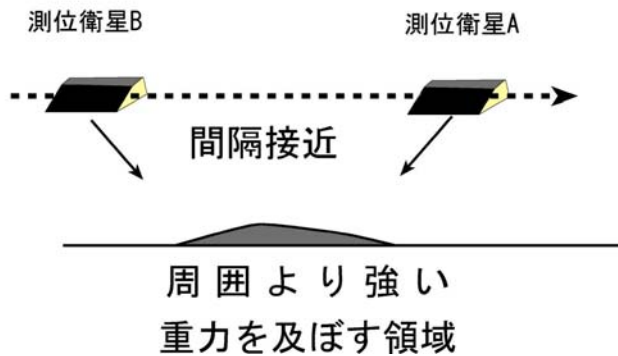
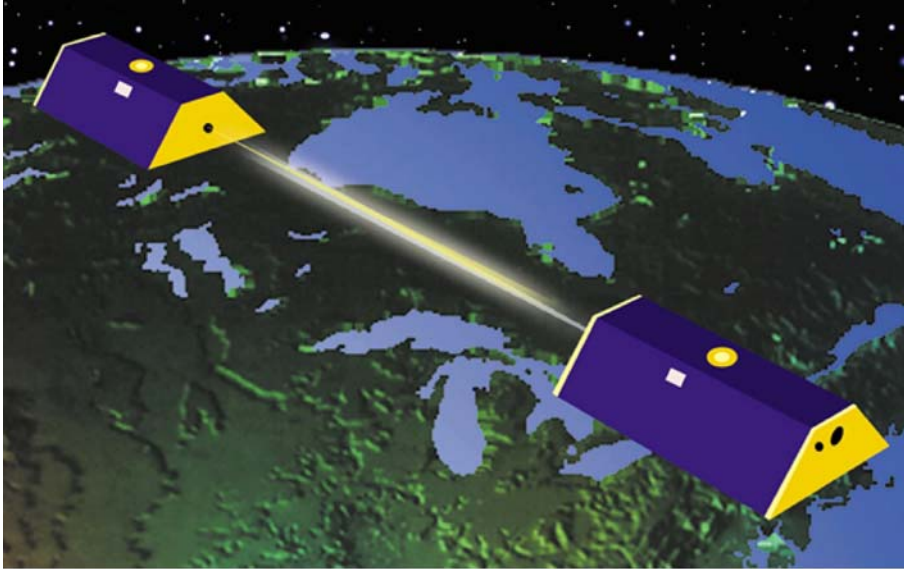


図 GRACE衛星の想像図。双子衛星の間隔を測る。重力の強い地域の上を飛ぶと、先行する衛星は後ろ髪を引かれ、後続する衛星は前方に引き寄せられるので、間隔が狭まる。間隔の伸び縮みを電波を使って測れば、重力の強弱が推定できる。

A. 人工衛星は、なぜ地球の周りを回るのでしょうか。それは地球に引力があるからです。地球に引力がなければ人工衛星は地球の周りを回らず、はるかかなたの宇宙の果てまで飛

んでいってしまいます。つまり、人工衛星は地球の引力に引かれて地球のまわりを回っているのです。だから人工衛星の飛び方を調べれば、地球の引力が分かることになります。

人工衛星は、地球や多くの惑星が太陽の周りを回ると同じ原理で地球の周りを回っています。惑星が太陽の周りをどのように回っているのか知っていますか。17世紀の初頭、ヨハネス・ケプラーが、25年にわたるティコ・ブラーエの観測データを整理し、ケプラーの法則と呼ばれる惑星の運動の基本的な法則を発見しました。ケプラーが発見した惑星の運動の法則は3つありますが、その1つが惑星は太陽を1つの焦点とする楕円運動をするというものです。

太陽を1つの焦点とするという意味がよく分からないかも知れません。楕円の描き方を知っていますか。まず、適当な長さの糸を一本用意します。そして二本の針を紙の上に立てます。このとき、針の間隔は、糸の長さより短くしておきましょう。ここで、糸のそれぞれの端を、2本の針で止めつけます。糸がぴんと張って三角形の二辺ができるように、糸の中間あたりに鉛筆の先を差し込んでください。そしてそのまま、糸がたるまないように鉛筆をスライドしていけば、ほら、できた。楕円が描けるのです。ですから、楕円上の点から2本の針までの距離を考えると、それらの和はある一定の値（糸の全長そのもの）になっています。この針を立てた2点を焦点と呼びます。このように楕円には焦点が2つありますが、惑星の軌道ではこのうちの片方に太陽があるということです。

17世紀後半になると、ニュートンが現れ、ケプラーの法則から、太陽と惑星の間には距離の2乗に反比例する力がはたらいているということを読み出しました。これが万有引力とよばれるもので、重力のおおもとです。

人工衛星も、基本的には惑星と同じように楕円運動をします。焦点には太陽の代わりに地球の重心が位置します。ただしこれは地球が完全な球形で、人工衛星に働く力が地球の重心からの距離の2乗に反比例している場合です。でも実際の地球は完全な球形ではありません。そのため、人工衛星にはたらいている力は、地球の重心からの距離の2乗に反比例する力から少しずれており、そのため人工衛星の軌道も楕円から少しずれています。このずれを調べることにより、地球の引力が地球の重心からの距離の2乗に反比例する力からどれだけずれているのかを調べることができます。これが人工衛星から地球の重力を調べることができる理由です。

このように、以前から人工衛星の軌道を調べることにより、地球の重力の分布が求められていたのですが、人工衛星の軌道は地上から観測したデータを基に決めるしかありませんでした。しかし、現在では、GPS受信機を人工衛星に積んでおくと、従来の地球からの観測よりずっと精度よく人工衛星の軌道を決めることができます。

このような考えに立って、2000年7月にドイツは、チャンプ(CHAMP)という衛星を打ち上げました。これは高度450kmを航行しますが、その軌道は衛星に搭載したGPS受信機を使って精度よく求めることができます。こうして得られた軌道の分析から、精密な重力の分布が求められるのです。これは地球の周りを回るチャンプ衛星が、地球を回りながら

地球の引力により連続的に自由落下しているのを測定していると言ってもいいでしょう。

さらに 2002 年 3 月には、高度 500 km に 1 対の双子衛星が打ち上げられました。これらの衛星はグレイス(GRACE)と呼ばれ、GPS でそれぞれの軌道を決めるだけでなく、お互いの間隔の伸縮を、電波を使って精密に測定しています。2 機の衛星が飛んでいる間の地域の重力が平均より大きいと、先行する衛星は後ろに引っ張られて速度が遅くなり、後続の衛星は前に引っ張られて速くなって、2 機の間隔が短くなります(図)。逆に重力の小さいところだと、前の衛星の速度が速くなり、後ろが遅くなって間隔が伸びます。このように、2 つの衛星の間隔を分析することによって、地上の重力が求まるのです。

さらにはゴース(GOCE)といって、重力偏差計と呼ばれる重力の傾きを測る計器を乗せた人工衛星を打ち上げ、より詳細な重力の変化を調べる計画もあります。

これらは、今までの人工衛星を使った重力の測定に比べて精度が格段にあがり、また地上の重力測定に比べれば、はるかに広範囲に精度の高い重力値が得られるため、地球規模での重力の時間変化が得られると期待されています。

地球規模の重力の時間変化を調べて、いったい何の役にたつのでしょうか？実は、現在、さまざまな分野の人たちが、この重力の時間変化の情報を期待しています。特に、海洋学、気象学や水文学といった、流体分野の地球科学の人たちからの期待が大きいようです。例えば、海洋変動。皆さんもよくご存知のように、二酸化炭素の増加による地球温暖化のため、南極の氷山やヒマラヤの氷河などが融けて、海面が上昇するのではないかと心配されています。これらはいずれも、重力の源となる氷や水の移動を伴いますから、場所によって重力が少しずつ変化するはずで、逆に、重力変化の様子を詳しく調べれば、氷や水の移動の様子が分かるのです。同じように、大きなダム貯水量や湖の水位変化、地下水のくみ上げによる地下水位変化、さらには水田に導かれた水の量までも、重力の変化から分かるのではないかと期待されています。

学問はそれぞれの分野の個別化、専門化が進んでいるといわれています。しかし、測定精度が上がると、今まではあまり関係ないとされていた学問分野(たとえば、陸水学、氷河学、測地学)の間に、新しいつながりができるものです。このような学問の総合化に測地学が役立つとしたら、測地学を研究している一人として、とても嬉しいことです。