

Q30. 月の測地学

お隣の中国では有人宇宙飛行に成功したそうですね。一方日本では、月の無人探査計画があると聞きました。月にいってどんな研究をする予定なのですか。地球みたいに月の重力や回転を測ったりはしないのですか。

A30. 測地学の研究の対象は地球の形、回転、重力、それらの変動、それらを計測する技術などです。つまり、測地学の「地」は、本来は地球の地を意味していました。ですから「月」の形、回転、重力などを研究することを測月学という人もいます。ちょうど月でおこる地震のことを月震ということに対応しています。とはいえ、研究対象の星が変わるたびに、学問の名前が変わるのも不便なので、ここでは「月の測地学」と呼ぶことにしましょう。

ある星を測地学的に研究する場合、宇宙船を飛ばしてその星のまわりを回り、軟着陸してなにかを測ることで、本格的な研究がスタートします。わが国では、近い将来月に衛星を送り込む計画がいくつかあります。そのひとつ、月探査周回衛星計画 **SELENE** では、月を回る衛星にカメラ・高度計をとりつけて地形を調べたり、衛星の軌道追跡を通じて、月の重力の詳しい分布を調べたりします。

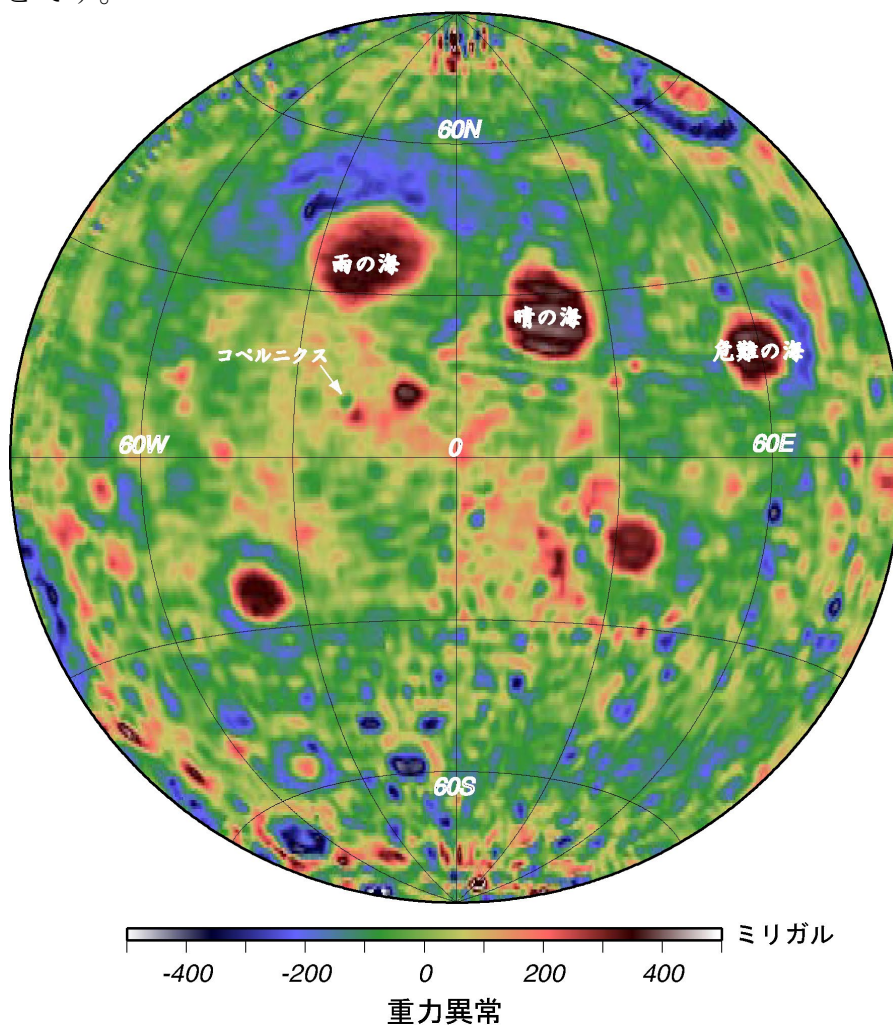
意外に思われるかもしれませんが、宇宙船を使ったときにいちばん測りやすいのは、その星の重力の分布です。宇宙船は星に到着すると、まずその星の引力にとらえられて、その星をまわる衛星になります。その星に凸凹がなければ、衛星の軌道は「ケプラーの法則」に従ってきれいな楕円になります。でも、地球と同じくどんな星でも、重力の分布に乱れがあります (**Q&A12**)。すると、場所によって重力が異なる分だけ、余分に加速されたり、逆に加速が足りなかったりして、半径や離心率 (つぶれ具合) で表わされる衛星の軌道が最初の値からずれて、少しずつ変化します (**Q&A28**)。といっても、変化の度合いは、衛星が重力圏から飛び出してしまったり、惑星に突入してしまったりするほど大きなものではありません。ごくわずかなものです。その変化の様子から、その天体の重力の強いところと弱いところの分布がわかるのです。

軌道を決めるのにはドップラー効果を使います。身近な例としては、近づく救急車のサイレンの音が高く聞こえ (周波数が高い)、遠ざかる救急車のサイレンが低く聞こえる (周波数が低い) のがドップラー効果です。救急車を衛星に置き換え、サイレンの音を衛星からの電波に置き換え、耳を地上のアンテナに置き換えるとどうなるでしょう (図 30-1)。地上で受信される電波の周波数は、衛星が地球に近づくときは高い方にずれ、遠ざかるときは低い方にずれます。この周波数のわずかなずれを分析すると、衛星がどのような軌道で回っているかがわかります。

地球以外の星では、1960年代に、月を周回する衛星の軌道変化から月のおおまかな重力分布が求められました。最近では同じ方法で、金星や火星の詳しい重力分布も調べられています。

月の重力からマスコン (**Mass Concentration** の略、質量集中の意味) という面白い事実が発見されました (カラー口絵 30)。月の海とよばれる黒っぽい地域のなかに、重力がまわりより異様に大きな目玉があるのです。月は地球の六分の

一しか重力がないのに、重力異常（Q&A12）は地球より一桁大きく、最大のマスコンである「晴れの海」「雨の海」「危難の海」で数百ミリガルもあります（ミリガルは重力の単位で、100ミリガルは、地球重力の約1万分の1に相当する）。このような大きな重力異常の原因は、マスコンの部分にある月の海の玄武岩の密度が、月の平均的な地殻岩石より大きいことと、マスコンの地下で地殻が薄くなっていて、地殻より密度の大きなマントル物質が浅部まで盛り上がってきていることです。



カラー口絵 30 ルナー・プロスペクター（米国の月探査船）の加速度データから計算された月の表側の重力異常。赤い大きい目玉が月の海（雨の海、晴の海、危難の海など）でしばしば見られる「マスコン」（強い正の重力異常）。それ以外ではクレーターの凹みに対応する負の異常（コペルニクスなど）が顕著に見られる（菅野貴之・日置幸介提供）。

地球では「アイソスタシー」が働くので(Q&A36)、大きな重力異常があっても時とともに小さくなってしまいます。月の内部は地球より冷たくて硬いので、アイソスタシーのはたらきが鈍く、こんなに大きな重力異常が存在できるのです。

わが国の月探査計画では、いままでのアメリカなどの計画でできなかったこ

とがいくつか計画されています。そのひとつが、月の裏側の重力をはじめて測ることです。月の自転周期は公転周期と同じ一カ月なので、地球から見るといつも同じ側が見えます。おなじみのうさぎが餅つきをしている「表側」ですね。重力の分布を測るには、衛星から送られてくる電波を受信して、ドップラー効果を測らなければなりません。しかし衛星が月の裏側に回ると、衛星からの電波は月にさえぎられて、地球に直接届きません。つまり、衛星の電波を地球で受信する限り、月の裏側の重力は測れないのです。

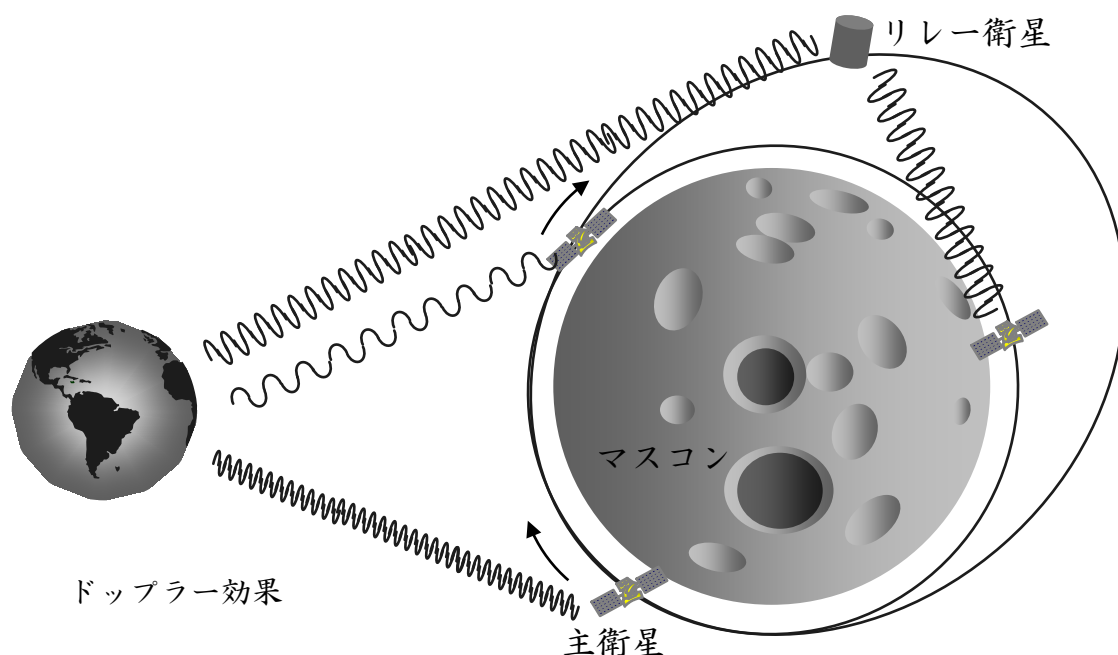


図 30-1 月を周回する衛星から送信される電波のドップラー効果から、衛星の軌道や月の重力分布を決める。「マスコン」などの月の重力異常のため、主衛星の運動が加速や減速される。それに応じて変化する送信電波の周波数から、重力の分布を求める。日本の月探査計画 SELENE では、裏側の主衛星からの電波をリレー衛星で中継して地球に送って、月の裏側の重力を測る計画がある（筆者注：この計画は「かぐや」として 2000 年代に実現しました）。

日本の SELENE 計画では、もうひとつ小さな月の衛星（リレー衛星）を飛ばし、そこで月の裏側にある主衛星から来る電波を地球へ中継して、裏側の重力分布を測ろうと計画しています（図 30-1）。月の表側と裏側はずいぶん様子が違います。裏側はほとんどが高地で、海がほとんどありません。衝突でできた巨大な凹みも、表側のように溶岩に埋められることなくそのまま残っています。重力によって表側と裏側の地下の様子の違いがわかれば、月の生い立ちに関する重要な手がかりが得られるでしょう。

1969 年 7 月にアポロ 11 号が月にはじめて軟着陸してからは、衛星で重力を測る以外の測地学的な研究も始まりました。ひとつは重力の「その場」（月面）での計測です。アポロの乗組員は、ばねばかりの原理の重力計を月面自動車にの

せて走り回りました。月全体からみたらほんの一部を垣間見たにすぎませんが、地球以外の星の表面で最初に行われた測地学的な計測という意味では、記念すべきことです。

もうひとつ、アポロは、月に反射板を置いてきました。これは地球から発射したレーザー光線を、正確に同じ方向に跳ね返す特殊な鏡です。これを用いてSLR(Q&A25)のように、数十年にわたって地球と月の距離を測り続けた結果(月レーザー測距)、月が地球から少しずつ離れていく様子が確認されました(Q&A43)。また、「物理秤動」と呼ばれる地球の歳差・章動(Q&A41)や極運動(Q&A42)にあたる回転の変動も明らかになってきています。将来は、月面に軟着陸して望遠鏡を設置し、月の回転をさらに詳しく調べる計画もあります。

(H)