

アルチメーター（高度計）－ 人工衛星で海面の起伏をはかる

Q 海面の高さに凹凸があることは、これまでの説明で分かりました。では、人工衛星を使って観測するという凹凸の測り方について、教えてください。宇宙からだと、わずかな凹凸が見えるようになるのですか。

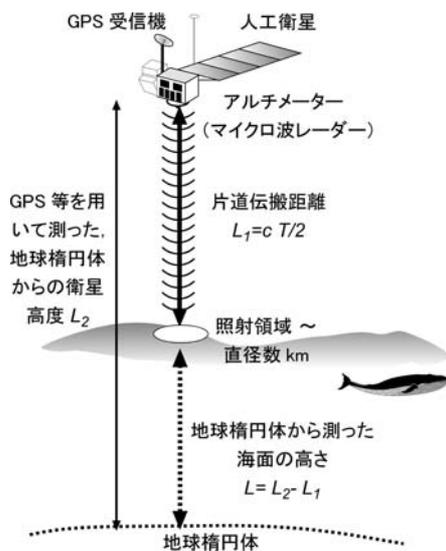


図1. アルチメータ搭載の人工衛星を用いて、地球楕円体から測った海面の高さを求める原理

A. 凸凹を見つけるということは、科学的に言い換えると次のようになります（実に科学者というのは、変な人種ですね）。「まず、どこかに基準となる点か面を定め、そこから海面までの距離をはかる。得られた距離が、一定値ではなくて空間的に変化するなら、凸凹しているといえる」。ここで、海にそのような基準点をつくるのは難しそうなので、発想を転換して、宇宙に基準点を設けることを考えたらどうでしょう？ そう、軌道がきちんとわかった人工衛星を標識として使うのです。人工衛星は普通の標識と違って、じっと静止していないという点は違いますが、地球の中心から衛星までの距離もわかるので、標識としての役割を立派に果たすことができます（図1）。この宇宙の標識から、鉛直下向きに海面までの距離を測ってみましょう。それには、まず、マイクロ波という、電子レンジでも使われている波長の電波を海面にむけて照射し、電波が海面で反射して衛星に戻ってくるまでの往復時間 T を計っておく必要があります。この往復時間 T に、電波の伝わる速さ c = 秒速 30 万キロ（光の速さと同じ

だ、と気づいた読者もおられるでしょう。電波は目で見ることはできませんが、光も電波も同じ電磁波なのです）をかければ衛星と海面の間の往復距離が得られます。その半分 $ct/2$ が衛星と海面の間の距離 L_1 ということになります。このようにして高さを測るセンサーのことを、アルチメーター (Altimeter 高度計) といいます。

一方、地球中心から衛星までの距離は、衛星の軌道計算や衛星搭載の GPS 受信機によって求めることができます。この距離から、さきほど測定した衛星から海面までの距離 L_1 を差し引くと、地球中心から海面までの距離がわかるという仕掛です (図 1)。現在の測定精度は、1~2 センチとされていますから、かなり細かい凸凹がわかりますね。

海域ごとの海面の起伏を詳細に表現するために、地球中心から測った海面までの距離の代わりに、地球の平均的な形状を表わす地球楕円体から測った海面までの距離が、よく使われます。表紙の図は、地球楕円体から測ったジオイドの起伏を誇張して表示したものでしたのです。

ところで、衛星から発射される電波は最初は細いビームですが、それが海面に達するときには、直径数キロメートル程度の広がりをもってしまいます (図 1)。これは、電波と同じ電磁波である光 (たとえば懐中電灯や灯台から発する光) が、遠くに進むほど広がってしまうのと同じです。衛星から見ると、直径数キロメートルの範囲の海面が電波で等しく照らされるので、実際に測定される距離は、その範囲内の海面のあちこちまでの距離を平均した値になります。この平均化のおかげで、波浪のために、衛星の直下点の海面が揺れ動いている影響は、取り除くことができます。

ところで、高精度でジオイドが決定できるようになると、「海面」=「ジオイド」という関係がだんだん怪しくなってきます。海流や渦などの海水の運動や、季節風による吹き寄せなどの影響で、海面は常に変動します。したがって、正確に言えば、海面は必ずしもジオイド面を表しません。お風呂の中でお湯をかき回して遊んだことがあるでしょう。その時中心部が水位が低く、周りで水位が高い渦が出来たでしょう。それと同じように、実際の海においても海面はジオイド面とずれることがあるのです。最先端の研究では、逆に海面のジオイド面からのずれを精密に測定することで、潮流や渦の動きなどを推定しようという試みが盛んに行われています。

人工衛星アルチメーターは、また、海洋環境の監視などに使われます。環境問題で良く耳にする、エルニーニョというのは、南米沖の赤道付近の海域に、普段よりも数°C も温暖な海水が集まってくる現象です。温かい水は、当然、熱膨張で膨らんでくるの

で、海面が数十センチも盛り上がってしまうのです（膨らんだ分、密度は軽くなるので、盛り上がった水が両脇に流れ去ることはありません）。南米沖で、こんな風に海面が盛り上がり始めたら、エルニーニョの開始の可能性があります。このように、測地学は環境問題にも貢献しています。

ちょっと変わった人工衛星アルチメータの応用としては、海山の拾い出しがあります。陸上地形にくらべると、広い海の海底地形図はまだ不完全で、あちこちに海山の見落としがあります。未知の海山があると、そこでは海面が盛りあがります。逆に海面が盛りあがっている所がみつければ、その海底には海山が隠れている可能性があります。詳しく音響測深で調査をすれば存在するかどうかを確認できます。

さて、アルチメータは、地球楕円体から計った海面の高さを求めるのに使われてきましたが、陸地の高さを求めるのには残念ながら適していません。というのは、陸上地形の凸凹はとても激しく、小さな斜面が無数にあるのと同じ状況だからです。このため、衛星「直下」に向けて照射された電波は、地表の細かい斜面に当たると真上ではなくて斜めの向きに反射してしまいます。これでは、真上で待っている衛星に、明瞭な反射が返ってこないで、信号が受信できません。とはいえ、南極やグリーンランドの氷河・氷床の場合は例外で、海面からほどではないにしても、ある程度の強さの反射が返ってきます。ですから、海面の高さを求めるのと同様にして、南極の氷床の高さも求めることができます。何年もの間、氷床の高さを繰り返して測っていると、地球温暖化の影響をみたりすることもできます。これも環境問題への測地学的な貢献の一つです。

人工衛星から発射される電波がマイクロ波である理由は、光と違ってマイクロ波が地表付近の雲の影響を受けなくて、地表まで到達できるからでした。最近ではマイクロ波のかわりに、雲の下を飛ぶ航空機から、レーザー光を陸地上に照射するレーザー高度計も使われるようになりました。航空機の位置はGPS受信機で時々刻々決定していきますから、人工衛星海面高度計と同じように陸地の起伏も決めることができます。国土地理院では、このような方式での地図作成も開発運用を始めたとのこと。また、日本の月探査計画では、月を周回する衛星にレーザー高度計を搭載して、月の地形図を作成する予定です。