

人工衛星で海洋と地球を測る

京都大学大学院理学研究科

福 田 洋 一

(fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp)

目 次

[ジオイドとは](#)

[G P S 測量による高さ](#)

[ジオイドの形はなにで決まる](#)

[海の高さをはかる](#)

[衛星高度計の測定原理](#)

[衛星高度計で海底をみる](#)

[海洋の地形 海面形状と海流](#)

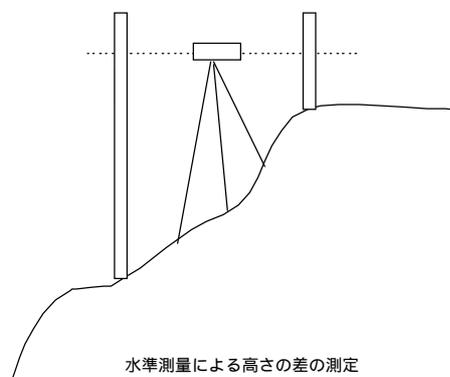
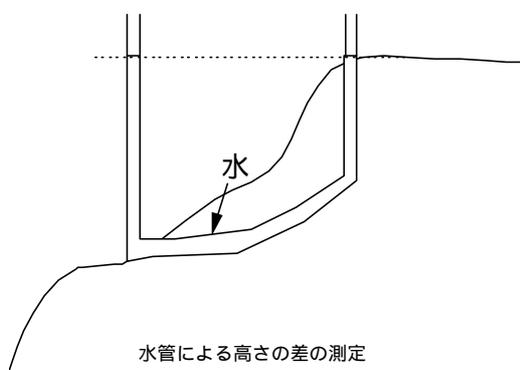
[衛星高度計と海洋の変動](#)

[双子衛星が測る重力 - 衛星重力ミッション](#)

ジオイドとは

ジオイドとは何か？

この問いに答える一番素朴な方法は、高さについて考えてみることです。



高さをはかるときには、長さの測定と違って、必ず、「同じ高さ」という概念が必要になります。この「同じ高さ」をどのように考えるかいうとき、ものは上から下へ落ちるといふ日常的な常識がたいへん重要です。「同じ高さ」のところでは、ものは転がらない、水は流れない、・・・といった直観的ことです。最も正確に高さを測る水準測量は、ひと続きの水面は「同じ高さ」にあるという、この「常識」を利用しています。

「同じ高さ」がわかったら、次ぎに、そこから「真上」（または、「真下」）にはかった長さが、「高さの差」になります。この「真上」とか「真下」というのも、たいへん大切な概念ですが、これもあまり難しく考えないで、直感的に、ものが落ちる向きを「真下」、その反対が「真上」というのがよさそうです。

これだけの準備ができれば、だいたい、高さを測れると思いますが、少し、不便なのは、「同じ高さ」というのはいっぱいあって、そのうちのどの「同じ高さ」からの差をはかればよいか迷うことです。そこで、いっぱいある「同じ高さ」の内のひとつを、基準として、「0 mの高さ」とすることにしましょう。このようにすると、どこかで高さをはかるときには、そこでの「0 mの高さ」から、「真上」または「真下」に、その点までの長さをはかればよいことになります。

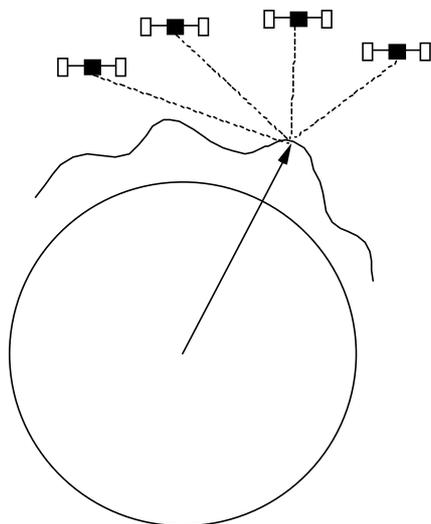
ジオイドというのは、いっぱいある「同じ高さ」のうち、この「0 mの高さ」をつないだ面のことです。

質問：「同じ高さ」の面と「真下」あるいは「真上」の向きの関係を考えてみましょう。

GPS測量による高さ

水準測量による高さの話は十分に直感的だと思いますが、地球のある点の高さを決めるもっと直接的な方法として、地球の中心からの距離をはかってはどうでしょうか？

このような測定は、つい最近まで、まったく非現実的だったのですが、現在のGPS測量による高さは、まさに、地球の中心からの距離をはかっていることと同じです。

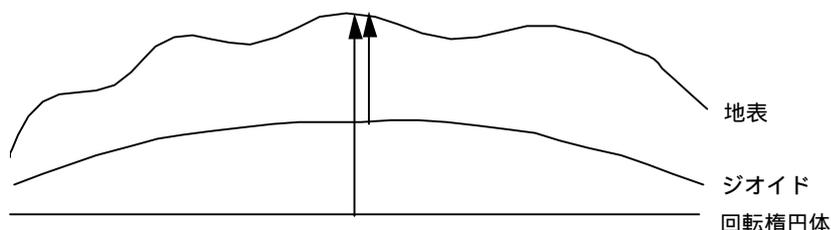


GPSによる高さ

もっとも、地球の中心からの距離をそのまま高さとする、値が大きくなりすぎるので、地球の形に最も近く、幾何学的に簡単に表現できる回転楕円体を考え、その表面から「真上」へはかった距離をGPS測量での高さとしましょう。

このようにすると、地表の一つの場所で、水準測量で決めた高さと、GPSで決めた高さの2つの高さが存在することになります。

実は、水準測量だけからは、地表面とジオイド間の距離はわかりませんが、ジオイドの幾何学的な形は決まりません。ところが、GPSによる高さがわかると、これらの2つの高さの差として、回転楕円体を基準としたジオイドの幾何学的な形そのものを知ることができます。

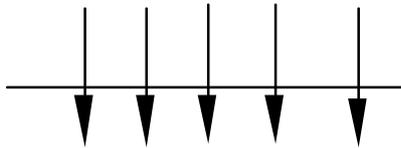


質問：地球の中心から測って世界で一番高い山はどこでしょう？

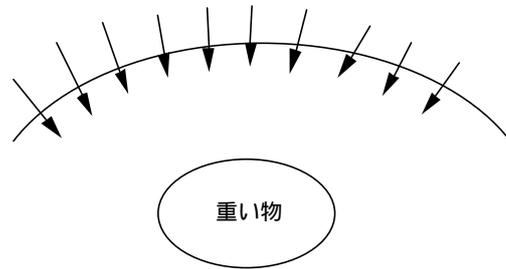
ジオイドの形はなにで決まる

実際のジオイドの形は、地表面の形（地形）に比べるとずっとシンプルですが、それでも、かなり凸凹していることがわかっています。それでは、どうしてジオイドに凸凹が出来るのでしょうか？

ジオイドは、「同じ高さ」の面のうち、0 mのものでした。「同じ高さ」の面は、ものが落ちる方向、すなわち、「真下」に直交しているはずですが、ところで、ものが落ちるのは、もちろん引力のためですから、地下に重い物があると、ものはそちらの方へ引っ張られて落ちていくはずですが、すなわち、ジオイドの凸凹は、地下にあるものの重さ（質量）の違いで出来るのです。



地下に特になにもない場合



地下に重い物質のある場合

高さの基準としてばかりでなく、ジオイドの形を知ることのもう一つの重要な意味は、このような地球の内部を知る重要な手がかりを与えてくれることにあります。

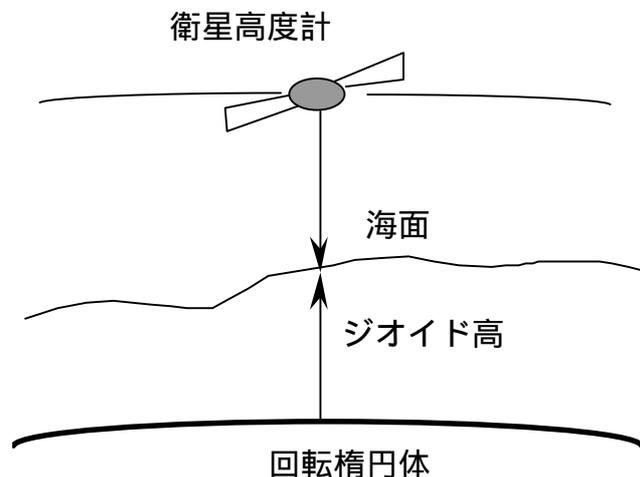
地下に重い物質があると、重力も大きくなりますから、重力測定でも調べることができます。というより、地上では、GPSと水準測量からジオイドを求めるより、重力測定の方がずっと簡単です。測定方法の問題はともかく、重要なことは、重力の値を変えることと、ジオイドに凸凹ができることは、どちらも同じ原因によるということで、実際、重力がジオイドかどちらかがわかれば、もう一方は、計算で求めることもできます。

質問：どのようなところでジオイドが高くなるとおもいますか？

海の高さをはかる

さて、海は、当然、海水で覆われているわけですから、水準測量による高さの測定を思い起こすと、すべて「同じ高さ」のように思われます。実際、海面はほとんど「同じ高さ」（後述するように、ほんとうは少し違います）で、普通、海面の高さは0 mですから、海面の形は、ほぼ、ジオイドの形そのものと考えて差し支えありません。従って、もし、GPS測量と同じように、海面の、地球の中心（あるいは回転楕円体）からの距離をはかることができれば、それはそのまま、ほぼ、ジオイドの形を表すことになります。

人工衛星マイクロ波レーダー高度計（衛星高度計と呼びましょう）では、上のような意味での「海の高さ」（一般に「海面高」と呼ばれています）、すなわち、ジオイド高を直接はかることができます。



海でのジオイド高をはかることのもっとも大きなメリットは、それをもとに、海での重力異常が求められることです。陸上と違い、海上での重力測定はそれほど簡単ではなく、長い間、多くの測定空白域が残っていました。ところが、衛星高度計が利用できるようになった1970年代後半から、衛星高度計によるジオイド高から重力異常が求められるようになり、今や、陸域よりも均質なデータが得られるようになっていきます。

このようにして得られた海域の重力異常は、海底地形の推定や、テクトニクスの研究などに利用されています。

質問：海面は海流の影響で正確にはジオイドと同じではありません。

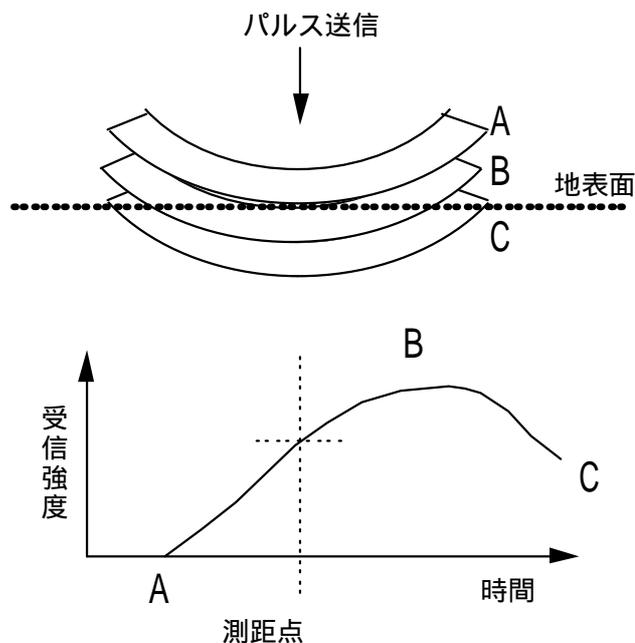
さて、どの程度凸凹していると思いますか。

衛星高度計の測定原理

現在，衛星高度計による海面高の測定精度は，3～4 cmといわれています．衛星の軌道の高さは，700 km～1400 km程度ですから，東京と九州程度の距離を，この精度ではかれることになります．

実際に距離をはかるのには，マイクロ波レーダーが利用されています．すなわち，衛星アンテナからレーダーを発射して，それが，海面に反射して帰ってくるまでの時間をはかり，距離を求めます．このようなレーダーを利用した距離測定で，測定精度を上げるためには，反射時間を出来るだけ正確にはかる必要があります．そのためには，レーダーを出来るだけ鋭いパルスにして発射することが望ましいのですが，逆に，パルスが鋭くなればなるほど，送信パワーは小さくなり，反射強度も弱くなってしまいます．

実際の測定装置ではこのような矛盾を克服するためにパルス圧縮という特殊な技術が使われています．また，高度計では，個々のパルスについて距離をはかるわけではなく，多数のパルスを重ね合わせて使用し，平均的な距離を測定しています．このため，海面高度計による測定距離は，衛星から海面のある一点までの距離というわけにはいかず，ある広がり（およそ数 km）をもった海面までの平均的な距離ということになります．このことは，衛星高度計による測定の一つの限界になりますが，逆に，平均値を求めるためのパルスの反射強度の推移から，海面での波高や海上風の強さなどの情報も得ることができます．

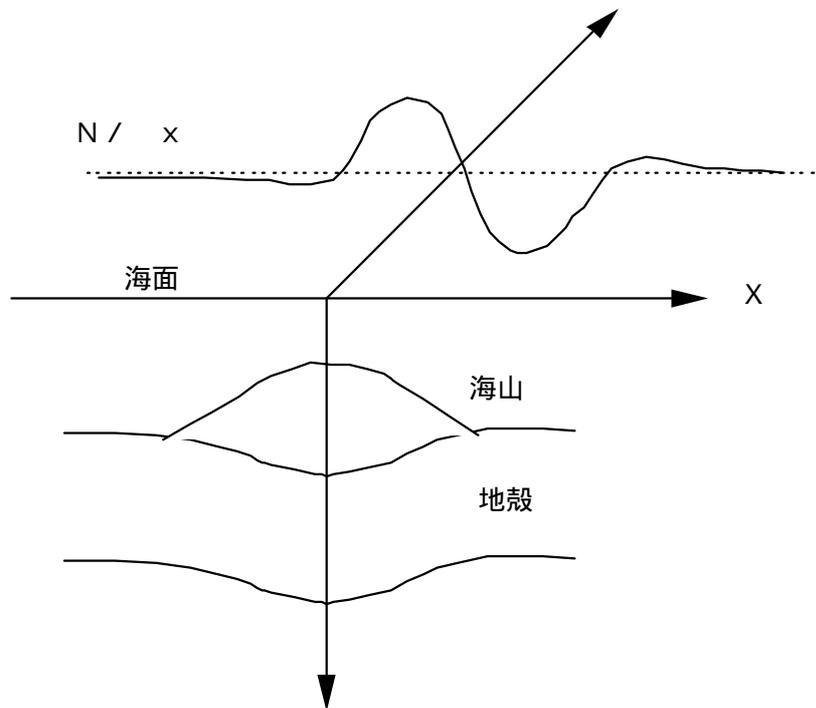


質問：衛星高度計では1秒間に何発ぐらいパルスを出すとおもいますか？

衛星高度計で海底をみる

衛星高度計で、海の重力がわかるという話をしましたが、高度計のデータから、もっと直接的に、海底を覗くこともできます。そのひとつの例は、衛星高度計を使って海山を探するというはなしです。陸上では、もう新しい山を見つけることは不可能でしょうが、海底には、まだ発見されていない海山がたくさん残っているかもしれません。

下の絵の N/x は、隣り合った海面高の測定データの差をとったもので、軌道に沿っての垂直線偏差（真下からのズレ）と呼ばれています。この図のように、もし海底に海山があると、 N/x は、図の上のような特徴的な変化をするので、高度計データからこのような変化のある部分を探し、海山を見つけることができます。プレートテクトニクスでは、海底は常に更新されていることになっていますので、このようにして得られた海山の分布は、プレートの運動等を考える上でも重要な情報を与えてくれます。

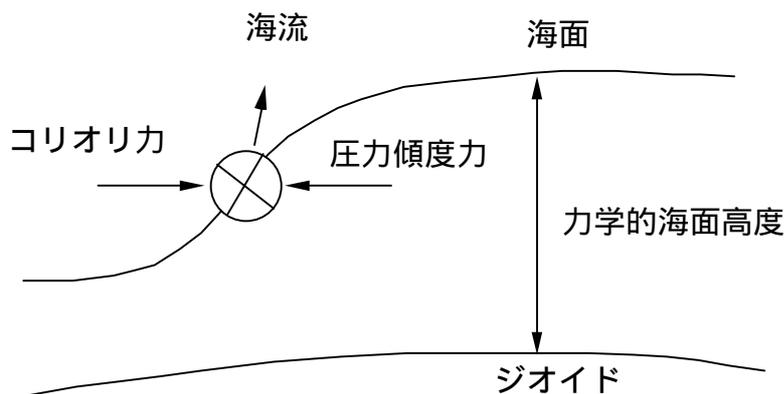
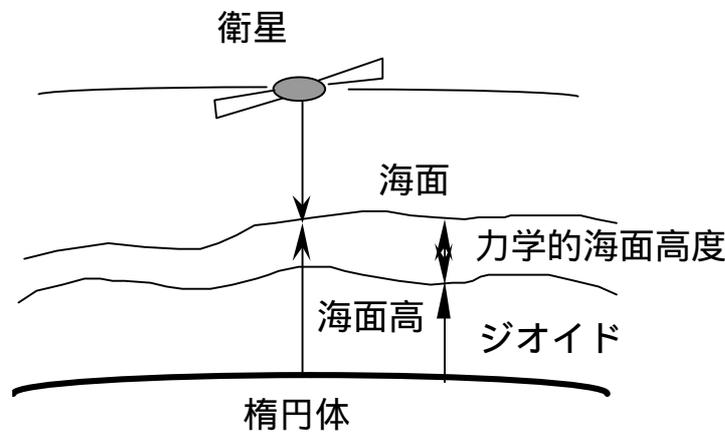


質問： N/x が上の図のようになる理由を考えてみましょう。

海洋の地形 海面形状と海流

今までの話は、海面の形はほぼジオイドの形ということで進めてきました。しかし、実際の海洋には、海流や波、潮汐などがあり、とてもその形が一定とは思えません。また、海洋のこのような変動にはさまざまな周期が含まれていますが、仮に、長い時間かけて、海面の変動の平均値をとったとしても、海には定常的な流があるため、海面とジオイドが正確に一致することはありません。このようなジオイド面からのずれとしての海面の形は、陸上での地形とジオイドの関係と同じです（ただし、海面の起伏はせいぜい1～2m程度ですが）、海洋地形と呼びたいところですが、普通、海面形状あるいは、その原因が力学的な海洋の流にあることを明らかにして、力学的海面形状などと呼ばれています。

この力学的海面形状を決めるためには、高度計データだけでは不可能で、海洋でのジオイドの形を、全く別の方法で決めてやる必要があります。



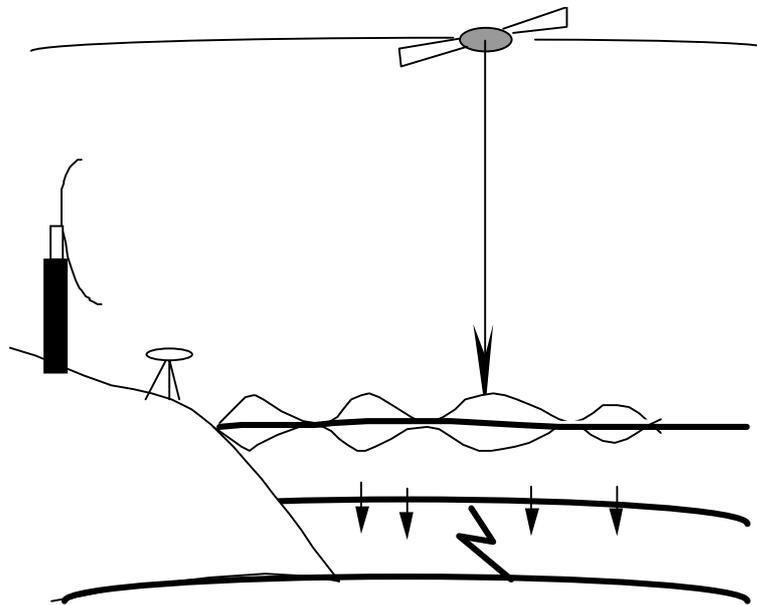
質問：海面形状が得られれば何がわかりますか

衛星高度計と海洋の変動

海洋のジオイド，あるいは重力異常を明らかにしたことは，測地学あるいは固体地球物理学での衛星高度計を利用した研究で，最大の成果でした．これらの研究は，もちろん現在でも，新しいデータを用いて続けられています，最近では，衛星高度計を利用して，海洋の変動に関連したさまざまな研究が行われるようになってきました．もちろん，衛星高度計による海洋変動の研究は，海洋学における高度計利用の中心をなすもので，一部では，すでに定常的な海洋監視の手段にしようとする研究も始まっています．

このような試みとは別に，陸上で多くの測地観測でも，最近の測定精度の著しい向上で，海洋の変動が無視できず，特に，地球潮汐の観測では，同じ周期の海洋潮汐の影響は，なんとしても取り除かなくてはなりません．また，重力の連続観測，GPS観測，地殻変動観測など，ほとんどすべての測地観測で，多かれ少なかれ，海洋潮汐の影響を受けています．衛星高度計のデータは，このような海洋潮汐モデルの改良に，たいへん大きく寄与しています．

このほか，VLBI，SLR，GPSなど，陸上における全球的な測地測量と協力して，今，問題となっている長期的な海水面変動を監視しようとする試みや，大地震の際の海でのジオイドそのもの変化を検出しようとする試みなど，衛星高度計の利用範囲は，これからも，どんどん広がっていくことでしょう．

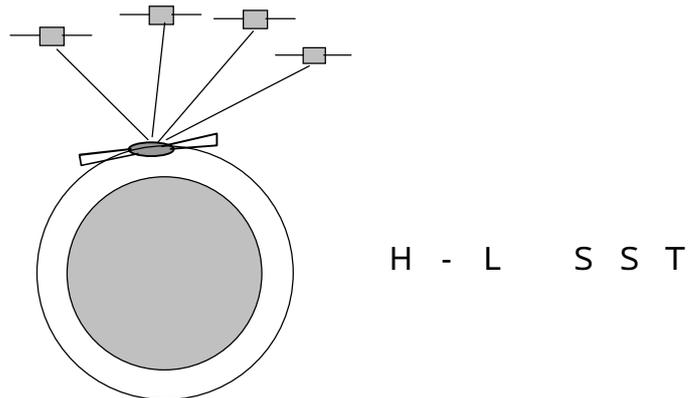


質問：衛星高度計の新しい利用方法を考えてください．

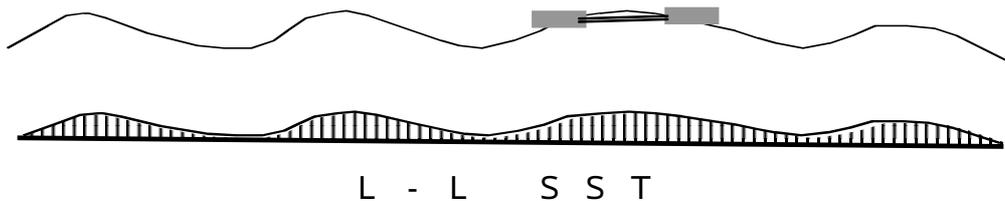
双子衛星が測る重力 - 衛星重力ミッション

衛星高度計では衛星から海面までの距離をはかることで海洋の変動や重力場を知ることができましたが、2つの衛星の距離やその変化（速度）を測ることでもっと直接的に地球の重力を測ることができます。

人工衛星は、実は地球に落ちているのですが、それが遠心力とつりあって地球の周りを飛んでいる（落ち続けている）ことになります。ですから、衛星の位置（軌道）をGPSで正確に測ってやれば、重力の絶対測定をすることができます。



一方、同じ軌道で少し離れた双子衛星の相互の距離の変化（速度）を測ってやれば地球の重力の微妙な変動を測ることもできます。これは、エネルギーの保存則で、衛星の位置エネルギー（重力ポテンシャル）の変化が運動エネルギー（速度）となるため、ちょうどジェットコースターに乗っているのと同じことです。



このような双子衛星のアイデアそのものはもう20年以上も前からあったのですが、ようやく、今年の秋に、GRACEとして実現する予定です。GRACEは、海洋だけでなく陸上の重力場の測定も可能ですし、なによりも、その感度は、大気や海洋、陸水などの運動による重力の時間的な変化も検出できるというもので、21世紀の地球科学の研究に不可欠な地球計測技術となることでしょう。

質問：海洋や大気の変動でジオイドはどれくらい変化するとおもいますか。