

測位衛星 (GNSS) の反射波を使った海洋観測 Sea Surface Observations by GNSS Reflectometry

市川 香
Kaoru Ichikawa

九大 応力研
RIAM, Kyushu Univ.

1. はじめに

海水は導体なので、電磁波を使って内部構造を計測することはできない（代用として音波が使われる）。このため、電磁波による計測は、海面だけに限定されてしまう。にもかかわらず、電磁波による非接触型の計測（リモートセンシング）は、海洋学にとって必要不可欠なツールである。特に人工衛星などからのリモートセンシングは、広域の繰り返し観測を可能にするので、地球の7割を占める広大な表面積を持つ海洋を観測できる数少ない手法の一つである。

人工衛星に搭載できるアンテナはサイズに制約があるため、観測の空間分解能を確保するには高周波の電磁波（可視光・赤外線）を用いるのが望ましい。可視光は光源が太陽なので日中しか海色の観測ができないが、赤外線は海面水温に応じた熱放射を計測するので、夜間でも計測が可能である。ただし、ともに雲が存在すると宇宙からは雲の下の海面が見えなくなるという欠点がある。このため、雲を透過する性質のあるマイクロ波を赤外線の代わりに用いて、海面水温を全天候で計測するマイクロ波放射計も用いられている。

マイクロ波は、放射計のような受動型のセンサーだけでなく、衛星から海面に照射して反射波を用いて海面状態を計測する能動型センサーにも用いられる。導体である海水は海面でマイクロ波をよく反射するので、熱放射による微弱な射出よりも、はるかに強い強度でマイクロ波の計測が可能である。ただし、能動型のセンサーは送信機と受信機の両方を衛星に搭載しなくてはならないので、衛星の大型化・高電力化が避けられず、結果として受動型の衛星よりも価格が高くなって台数を増やしにくいという難点もある。

そこで、能動型センサーの送信機と受信機を異なる衛星に分けるバイスタティックなシス

テムが注目されている。能動型の海面反射計測でありながら、衛星は受信機のみを搭載なので台数を増やしやすという利点がある。

2. GNSSとは

バイスタティック計測の送信機として多く用いられているのが、米国のGPSなどを含む衛星測位システム（Global Navigation Satellite System; GNSS）である。そもそもGNSSとは、地球上空に配備された、位置が既知の時報衛星群で、地球上のほとんどの場所で数台の衛星が視野に入るように設計・構成されている。あるGNSS衛星からの信号を受信した時刻と、送信されてきた時報信号との時間差（遅延時間）から、その衛星と受信機との距離が求まる。複数の衛星との距離を使うことで、受信機自身の位置座標を求めている。

この測位では、GNSS衛星から受信機まで最短距離（直線）で電波が到達することが前提となっている（実際は、電離層や大気中の水蒸気によって経路がわずかに曲がる。仰角の低い衛星ほどこの効果が大きく、逆算して大気中の水蒸気量の見積もりに使われている；GNSS掩蔽観測）。しかし、ビルや海面などで反射した電波を受信してしまうと、本来の経路（直達波経路）よりも長い経路（反射波経路）を通ってきた電波で遅延時間を記録するため、測位上の誤差（マルチパスエラー）の要因となる。このため、測量目的では右旋円偏波アンテナを使うなど反射波を受信しないような工夫がなされている。

3. GNSS-Rとは

バイスタティック計測を用いるGNSS-R手法（GNSS-Reflectometry）では、通常は忌諱されている海面からの反射波を積極的に利用する。GNSS-Rでは、反射波の受信強度と遅延時間を

計測しており、海面で反射された際に各々に海面自身の情報が反映されている。

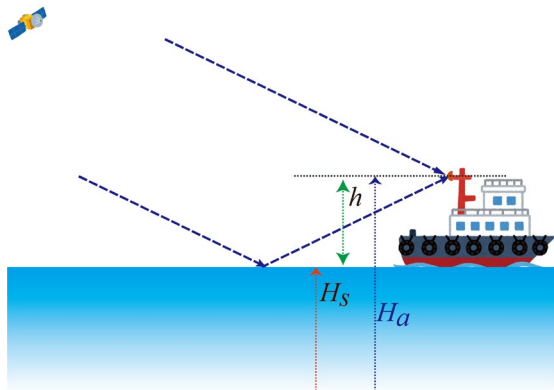


図1: GNSS-R海面高度計測の概念図

3.1 遅延時間

上述したように、反射波と直達波の遅延時間の差から経路長の差を計算し、幾何学的に受信機と海面の間の高さ h を求めることができる(図1)。受信機の高さ H_a も通常のGNSSで測位しておけば、逆に海面の高さ H_s を計測することが可能である。海面の高さは、津波や高潮などの防災目的に必要なほか、黒潮などの海流によって変化する成分(海面力学高度)があり、海面水温などと並んで海洋物理学では基本的な物理量の一つである。

3.2 反射強度

GNSS反射波の受信強度は、海面の粗度を求めるのに用いている。波が無い鏡面のような海面を考えると、光の反射と同じく、衛星からの入射角と反射角が等しくなる点(反射点)のみから強い反射を受ける。もし反射点の周辺に波浪があると、局所的に海面の傾きが変化するため、反射点からの反射信号が受信機に到達しなくなったり、逆に反射点から離れていて本来は受信機に届かない場所の反射波が到達したりする。局所的な海面の勾配は、波浪の波形分布によって統計的に決まるため、反射波の強度は波浪の存在量(海面粗度)に依存する。一方、波浪は風速の関数となるので、反射強度から海上の風速を推定することが可能となる。

この手法を使って、ハリケーンや台風などの風速を観測するのが、NASAのCYGNSS(Cyclone GNSS)ミッションである。GNSSの受信機は小型・軽量なため小型衛星でも搭載が可能で、CYGNSSでは8台の小型衛星群を編成して、高頻度に海上風速の観測を行っている。台風や爆弾低気圧などは短時間で急成長する

ので、高頻度観測によってその成長を追跡することが可能となり、今後の予報精度の向上が期待できる。

ちなみに、当初の目的とは異なるものの、陸上の洪水流域分布を計測するのにもCYGNSSは有効であった。陸地と水面の反射電波強度のコントラストを利用したもので、ここでも高頻度の観測が功を奏した。これらの功績により、後続のCYGNSS-2の打ち上が決定している。

3.3 位相干渉

2節では、測量目的では右旋円偏波アンテナによって反射波の混入を防ぐと述べた。これは、導体に対してほぼ垂直に(偏波面が導体表面と重なるように)入射した右旋円偏波のGNSS信号が、左旋円偏波の反射波となるからである。ただし海面の場合、水平に近い低仰角(20度くらいまで)で入射すると、反射波は右旋円偏波成分を持つと言われている。

従って、低仰角衛星の場合は、右旋円偏波アンテナで受信しても、直達波と反射波の混信は避けられない。通常の測量目的では低仰角衛星を使わないフィルタリングをかけて混信の影響を回避するが、GNSS-Rでは直達波と反射波の混信を利用して、位相干渉計として使用する場合がある。

潮汐などで海面の高さが時間とともに変化する場合や、GNSS衛星自身が移動する場合、反射点の位置が時間とともに変わり、直達波経路と反射波経路の経路長差も時間とともに変化する。経路長差が時間変化すれば、受信機に到達する直達波と反射波の位相差も時間変化することになり、GNSS電波の波長(Lバンドで15cmくらい)ごとに位相干渉縞ができる。つまり、低仰角衛星の反射強度の時系列に干渉縞が出れば、経路長差の時間変化を求めることができる。この手法は、海岸など低高度にGNSS受信機を設置した、GNSS-R潮位計として応用されている。

4. まとめ

GNSSの海面での反射波を利用して海面状態を計測するGNSS-R手法は、能動型の計測でありながら、受信機のみを準備すればよいパステティック計測である。反射波の遅延時間や反射強度の計測によって、海面高度や海上風速などが計測できるため、今後の発展・活用が期待されている。講演時には、具体的な観測例なども紹介する。