

# 衛星高度計を用いた海面形状の高精度決定に関する研究（第4年次）

実施期間 平成28年度～令和元年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 松尾 功二

## 1. はじめに

人工衛星搭載の海面高度計（以下「衛星高度計」という。）の台頭により、地球上のあらゆる海域の表面形状を効率的かつ高精度に計測できるようになった。衛星高度計とは、衛星直下にマイクロ波を照射し、地表で反射して再帰するまでの時間を計測することで、衛星－地表間の高度を測る計測機器である。その精度は、海面変動が穏やかな海域であれば1-2cmに達する。しかしながら、海面変動が激しい海域や沿岸地域では、照射したマイクロ波の反射波形が乱れてしまい、計測精度が大きく低下してしまう。また、衛星の回帰周期が周期的な海面変動と同期してしまうと（例えば周期23時間56分のK<sub>1</sub>分潮）、エイリアシング（折り返し雑音）が生じ、計測精度が低下することもある。

海面は標高の基準面となる。そのため、海面形状の高精度な決定は、精密な高さ基準系の実現に直結する。また、海面変動は、質量再分配や地殻荷重変位を通じて、地上の測地観測データ（GNSS、水準、重力）に顕著な影響を及ぼす。そのため、測地データに海洋由来の物理擾乱の補正を施すことで、地震や火山活動に関連した微細な地殻・重力変動をより正確に捉えることができる。日本周辺の海面形状とその変動は、これまで主に験潮観測で計測されてきたが、観測点数は数十点と限られているため、これのみで全容を把握することは不可能である。

そこで本研究では、衛星高度計を活用し、日本周辺の海面形状およびその変動を高精度かつ網羅的に計測することを試みる。最新の衛星高度データに最先端の解析手法や物理補正モデルを適用することで、沿岸部を含む全ての海域の海面形状を高い精度で導出する。そして、そのデータに基づき、日本周辺の海面高分布を正確に把握するとともに、海面変動が測地データに及ぼす影響を詳細にモデル化すること試みる。また、得られた海面高データをもとに、日本の標高の基準面である東京湾平均海面とその他の海域の海面高との間の乖離を評価する。さらに、日本周辺の海面変動の原因について、地球物理的な考察を行い、その特徴とメカニズムの解明を試みる。

これまでは、(1)日本の沿岸域における衛星高度データの精度検証、(2)日本周辺海域の数年から十数年周期の海面変動の調査、(3)日本周辺の海洋質量変化に伴う地殻荷重変位の調査、について研究を行った。(1)については、衛星高度データが日本の沿岸域で平均7cm程度の誤差を有することを明らかにした。(2)については、日本周辺の年々周期の海面変動が黒潮の活動度と高い相関を有することを明らかにした。(3)については、黒潮の活動によって日本列島の近くが最大1cm変形することを明らかにした。

## 2. 研究内容

本年度は、衛星高度計をベースに日本周辺の力学的海洋地形（DOT: Dynamic Ocean Topography）の空間分布を詳細に決定するための予備的研究として、験潮データを用いたDOTの決定に係る研究を行った。

地球が完全に静止している場合、平均海面はジオイド面と一致する。しかしながら、現実の地球は自転しており、その海面には恒常的な海の流れである海流が存在する。そのため、現実の海面はジオ

イド面と一致しない。このような平均海面のジオイド面からのずれは、海面の傾きと海流との間の力学的平衡（地衡流平衡）によって生じることから、力学的海洋地形（DOT）と呼ばれる。平均海面高（SSH: Sea Surface Height）と、DOT、ジオイド高の関係は、以下のように表現される。

$$\text{SSH} = \text{ジオイド高} + \text{DOT} \quad (1)$$

DOT の精密決定は、海洋学と測地学にとって重要な役割を果たす。海洋学では、DOT は海流の定常成分である地衡流の推定に活用され、大規模な海洋循環モデルの解明などに貢献している。一方、測地学では、DOT はジオイド面に準拠した標高を平均海面に準拠した標高（海拔）へと変換するのに活用され、ローカルな海面地形が考慮された精密な高さ基準系の構築に貢献している（ICSM, 2018）。日本は 2024 年に高さ基準系をジオイドに基づく仕組みへ移行することを計画しているが、津波浸水域の予測や港湾管理など沿岸域の国土管理においては地物とローカルな海面との高低差が重要である。そこでジオイドに基づく標高とローカルな海拔の乖離である DOT を把握することが必要となる。

式(1)において、SSH は衛星高度計や験潮儀で得られる海面高データの長期平均を取ることで導出できる。ジオイド高は GNSS/水準測量や重力データの空間積分（重力ジオイド・モデリング）によって導出できる。そして、DOT は SSH とジオイド高の差分によって導出できる。そこで本年度は、SSH を験潮データから、ジオイド高を重力ジオイド・モデリングから導出し、SSH とジオイド高の差分から験潮場における DOT を導出することとした。

まず、日本列島と離島に設置された 40 点の験潮場における SSH を導出した。各験潮場の名前と位置を、表-1 と図-1 に示す。験潮観測は、導水管を通じて測井戸に出入りする海水の昇降を、験潮場内に設置した固定点を基準として計測する。つまり、験潮観測により、固定点と測井戸の海水位との間の高低差が得られる。固定点の楕円体高（および経緯度）は GNSS 測量や TS 測量等によって得られている。SSH は測井戸内の海面の楕円体高に相当することから、固定点の楕円体高から固定点-海面間の高低差を差し引くことで SSH が得られる。本研究では、2004 年 1 月から 2017 年 12 月までに計測された験潮データを用いて、SSH を導出した。験潮場におけるジオイド高は、重力ジオイド・モデリングによって計算した。計算手法は JGEOID2019（Matsuo & Kuroishi, 2020）と同じであり、固定点の経緯度を用いてポイント計算でジオイド高を導出した。

### 3. 研究結果

以上のようにして導出した SSH とジオイド高から、式(1)の関係を用いて各験潮場における DOT を計算した。その結果を表-1 に示す。なお、本研究では、日本の標高とローカルな海拔との間の乖離を評価するため、東京湾平均海面（油壺）を基準（ゼロ）として各験潮場の DOT を計算した。

図-1 に表-1 の空間分布を示す。まず、関東の太平洋側（⑱, ⑲, ⑳, ㉑, ㉒）と中部・近畿の太平洋側（㉓, ㉔, ㉕, ㉖, ㉗）の平均的な DOT は、それぞれ約-3.9cm と約 1.5cm であり、東京湾平均海面とほぼ同じ値であった。四国の太平洋側（㉘）の DOT は 8.4cm であり、正の値を持つ。九州周辺（㉙, ㉚, ㉛, ㉜, ㉝）の平均的な DOT は約 18.7cm であり、大きな正の値を持つ。本州西部から中央部の日本海側（⑮, ⑯, ⑰, ⑳, ㉑, ㉒）の平均的な DOT は約 11.5cm であり、やや大きな正の値である。本州東部の日本海側（⑧, ⑨, ⑩, ⑬, ⑭）の平均的な DOT は約 6.5cm であり、正の値を持つ。東北の太平洋側（⑦, ⑪, ⑫）の平均的な DOT は約-16.0cm であり、大きな負の値を持つ。北海道周辺（①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥）の平均的な DOT は約-20.9cm であり、この地域も大きな負の値である。離島に関しては、沖縄周辺（㉞, ㉟）の平均的な DOT は約 80.8cm, 父島では 69.2cm であり、

かなり大きな正の値であった。

全体的な傾向を見ると、日本周辺の DOT は東京湾と比べて、北部に行くほど負の傾向を持ち、南部に行くほど正の傾向を持つ。また、本州の日本海側では正の傾向（平均 9.2cm）を持ち、太平洋側では負の傾向（約-2.2cm）を持つ。本州周辺を見ると、日本海と太平洋との間の平均的な DOT の差は、約 11.4m となる。北海道と九州周辺の平均的な DOT の差は特に顕著で、約 39.6cm の差が見られた。

表-1 験潮場の SSHと重カジオイド高によって決定された日本周辺の DOT.

番号	験潮場名	DOT(cm)	番号	験潮場名	DOT(cm)	番号	験潮場名	DOT(cm)
①	油壺	0	⑭	柏崎	+7.8	㉘	田後	+14.1
②	稚内	-18.3	⑮	輪島	+7.9	㉙	浜田	+12.7
③	網走	-26.0	⑯	富山	+7.4	⑳	須佐	+12.0
④	釧路	-32.7	⑰	仮屋	+14.9	㉑	久礼	+8.4
⑤	忍路	-10.0	⑱	勝浦	-6.8	㉒	仮屋	+14.9
⑥	奥尻	-15.2	㉚	布良	-1.3	㉓	長崎	+17.5
⑦	函館	-22.9	㉛	伊東	-3.0	㉔	阿久根	+20.2
⑧	浅虫	-10.9	㉜	田子	-5.0	㉕	細島	+18.8
⑨	男鹿	+5.9	㉝	焼津	-3.1	㉖	油津	+21.9
⑩	飛島	+10.7	㉞	鬼崎	-2.3	㉗	那覇	+79.8
⑪	鼠ヶ関	+6.7	㉟	熊野	-8.3	㉘	沖縄	+81.7
⑫	大船渡	-18.3	㊱	串本	+10.2	㉙	父島	+69.2
⑬	相馬	-18.7	㊲	御坊	+4.8			
	小木	+1.5	㊳	海南	+3.0			

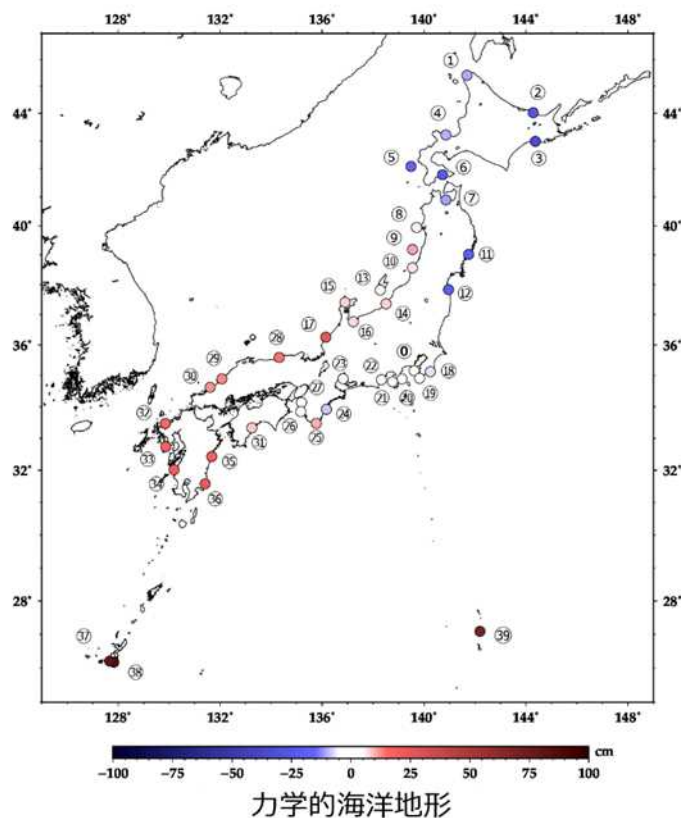


図-1 験潮場の SSHと重力ジオイド高によって決定された日本周辺の DOT の分布図.

#### 4. 結論

日本周辺の 40 点の験潮場における SSH と重力ジオイド高から DOT を計算した。その結果、東京湾平均海面と比べて、北海道周辺の DOT は約 20cm 低く、九州周辺の DOT は約 20cm 高いことが分かった。つまり、東京湾を基準とする日本の標高は、北海道と九州において、ローカルな海拔と平均で約 20cm の乖離を持つことが示唆される。日本海沿岸域においても乖離は大きく、平均で約 10cm の乖離が見られる。日本は、南からは黒潮が流れ、北からは親潮が流れており、世界でも特に顕著な DOT の変化が見られる。今後、衛星高度計による SSH データも同化させることで、さらに詳細な DOT 分布を導出する予定である。

日本の高さ基準系は、2024 年に水準測量に基づく仕組みからジオイドに基づく仕組みへの移行を計画しているが、今回算出された DOT 分布をジオイド・モデルに足し加えることで、ローカルな海拔が反映された高さ基準系を構築することが可能である。これにより日本全国で正確な標高を得られるようになり、津波浸水域の予測や港湾管理などへの活用が期待できる。

#### 参考文献

- ICSM (2018): Geocentric Datum of Australia 2020 Technical Manual, Version 1.2, <https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/GDA2020TechnicalManualV1.1.1.pdf>, (accessed 15 May.2020).
- Matsuo, K. and Kuroishi, Y. (2020): Refinement of a gravimetric geoid model for Japan using GOCE and an updated regional gravity field model, *Earth Planets Space* 72, 33.