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 5 年次）

実施期間　平成 28 年度～令和 2 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（再現性）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_1 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を試みる．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．

昨年度まで，(1)日本の沿岸域における衛星高度計の海面高時系列データの精度検証，(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，(4)日本周辺海域の験潮場における力学的海面形状（DOT）の決定，について研究を行ってきた．(1)については, 衛星高度計の海面高時系列データと国土地理院が持つ 25 点の験潮時系列データを比較し, 両者が標準偏差 7cm 程度で一致することを確認した．(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地殻が最大 1cm 変形することを明らかにした．(4)については，油壺験潮場の DOT と比べて北海道の験潮場における DOT は約 20cm 低く, 九州の験潮場における DOT は約 20cm 高いことが分かった．

2. 研究内容

本年度は，重力データを元に算出された重力ジオイド・モデルを基準面として，衛星高度計によって計測された平均海面高（MSSH: Mean Sea Surface Height）の差分をとることで，日本周辺の DOT の空間分布を求めた．そして，その空間的特徴を分析するとともに，4 の海域（東シナ海，日本海，東

海沖，東北沖）での平均的な DOT を算出した．

松尾（2020）でも述べられているように，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．海洋学的側面としては，地衡流の推定や海洋大循環モデルの構築などに寄与する．一方，測地学的側面としては，精密な高さ基準系の構築などに寄与する．特に，高さ基準系の構築に関しては，DOT 成分を考慮することによって地物とローカルな海面との間の高低差がより正確に把握されることから，津波浸水域の予測や港湾管理といった沿岸域における国土管理への貢献が期待される．

DOT は，MSSH とジオイド高の差分として得られる．MSSH は，験潮観測や衛星高度計観測によって計測されるが，本研究では，1993-2018 年の期間における TOPEX/Poseidon 衛星，JASON-1 衛星，JASON-2 衛星，Sentinel-3A 衛星，Cryosat-2 衛星の海面高度データをもとに導出された DTU18MSS モデルを使用した（Anderson et al., 2018）．ジオイド高は，重力ジオイド計算によって導出された JGEOID2019 モデルを使用した（Matsuo & Kuroishi, 2020）．なお，それぞれのモデルの空間分解能は 2km である．

3. 研究結果

図-1 に，(a)衛星高度計による MSSH，(b)重力ジオイド・モデルによるジオイド高，(c)MSSH とジオイド高の差分である DOT の空間分布を示す．なお，MSSH の基準面は GRS80 楕円体であり，ジオイド高の基準面は全球平均海面（W0 値は 62,636,853.4 m^2/s^2）である．また，今回計算した空間範囲は，経度 122 度～149 度，緯度 23 度～47 度である．

DOT の空間的特徴としては，太平洋側の北緯 36 度以南で DOT が高く，太平洋側の北緯 36 度以北や，オホーツク海，日本海，東シナ海で低いことが分かる．また，DOT の急勾配が見られる境界線が，黒潮流軸の形状と類似している様子も見て取れる．太平洋側の北緯 36 度以南で DOT が高くなる理由として，黒潮を含む北太平洋亜熱帯循環によって，絶えず海流が流れ込み水位が高くなるためであると考えられる．また，水温は赤道に近づくほど（緯度が低くなるほど）高くなる傾向にあることから，DOT の空間変化には海水の体積膨張率の影響も含まれるだろう．

DOT の定量的な空間変化を見るため，図-1(c)の四角の点線で示す 4 の海域について，平均的な DOT を算出した．各海域の空間範囲は，東シナ海は経度 124～128 度，緯度 29～32 度，日本海は経度 132～136 度，緯度 37～41 度，東海沖は経度 136～140 度，緯度 30～33 度，東北沖は経度 143～147 度，緯度 37～41 度，に設定した．その結果，今回設定した空間範囲での平均的な DOT は，東シナ海で約 0.96m，日本海で約 0.72m，東海沖で約 1.7m，東北沖で約 0.57m となった．

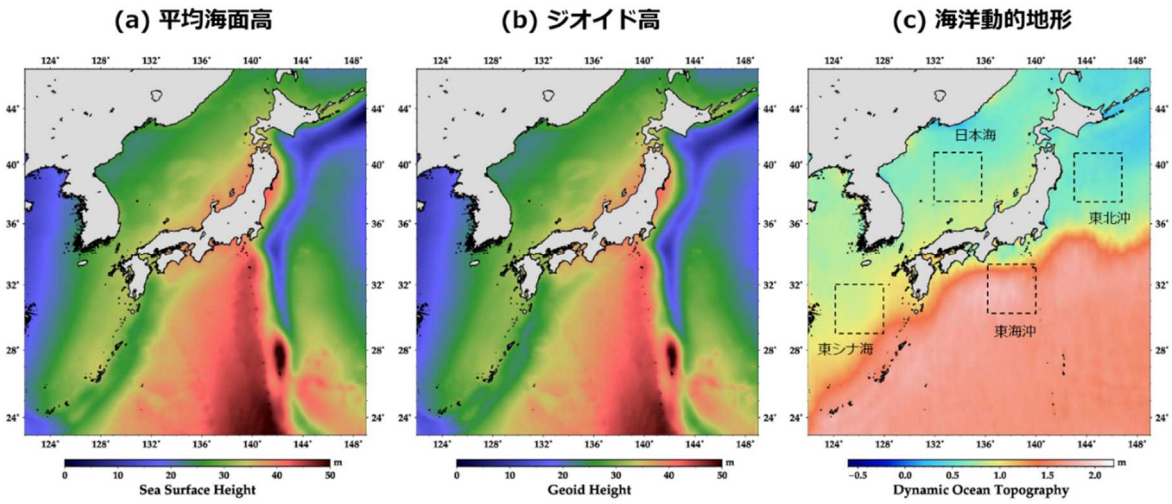

図-1 (a)衛星高度計による MSSH，(b)重力ジオイド・モデルによるジオイド高，(c)衛星高度計による MSSH[と重力ジオイド・モデルの差分から求めた DOT の空間分布図.

4. 結論

衛星高度計データと重力ジオイド・モデルを用いることで，日本周辺海域の DOT の空間分布を導出した．得られた DOT は，実に空間変化に富んでおり，今回研究を行った空間範囲では 0.5m～2.0m にも及ぶ変化が見られた.

衛星高度計データは，再現性としては，外洋地域では 1～2cm の精度で海面高を計測できるが，沿岸地域では精度が数 10cm ほどと著しく悪くなることが知られている.そのため,あらゆる海域の DOT を絶対量としてセンチメートル精度で導出するためには，今後，衛星高度計データによる DOT と験潮データによる DOT を適切に同化させる手法の開発を進める必要があるだろう．また，高さ基準系の構築において、DOT 成分の影響を考慮する必要性についても，今後議論と検討を進めていく必要があるだろう.

参考文献

Andersen, O., Knudsen, P., and Stenseng, L. (2018): A New DTU18 MSS Mean Sea Surface – Improvement from SAR Altimetry. 172. Abstract from 25 years of progress in radar altimetry symposium, Portugal.

松尾功二（2020）: 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），令和元年度国土地理院調査研究年報，142-145.

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.