

氏 名 高根澤 隆

学位（専攻分野） 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第348号

学位授与の日付 平成10年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 Dynamical Response of Global Ocean to Long
Period Tidal Force

論文審査委員 主 査 教 授 笹尾 哲夫
教 授 木下 宙
教 授 大江 昌嗣
助 教 授 内藤 勲夫
教 授 瀬川 爾朗（東海大学）

Dynamical Response of Global Ocean to Long Period Tidal Force

本論文は、長周期海洋潮汐のうち、特にMf、Mm分潮（周期はそれぞれ13.66、27.55日）についての研究をまとめたものである。海洋潮汐はそれ自体、海洋の力学的特性を知る上で重要であり、また、海水の質量移動に伴う重力変化および地殻の変形を引き起こすため、超伝導重力計、VLBIなどの高精度の観測、人工衛星の軌道予測などにも大きな影響を与える。特に長周期海洋潮汐は、海水準変動などの長期にわたるわずかな変化を捕らえる上でのノイズ源になる一方、固体地球においては、上部マントルの力学特性などを知るための有効な手段ともなっている。近年の計算機環境の発展および人工衛星高度計の広範囲にわたるデータにより、短周期海洋潮汐に関しては、外洋において数cmオーダーの精度での予測が出来るようになってきた。それに対して長周期海洋潮汐は、それ自体の潮位の変化が非常に小さく、周期も長いことから、他の海洋の現象による影響を受けやすいという、観測データの解析上の困難さもあり、現在まで十分な精度を持った予測値が得られるモデルはない。本論文では、流体力学方程式に基づいた数値モデルおよびTOPEX/POSEIDON海洋衛星高度計データの解析の2つのアプローチで、低緯度の海洋間の振幅・位相差に代表される、Mf、Mm分潮の明らかな平衡潮からの逸脱を示した。また、従来のモデルを超える精度でMf分潮の予測値を求めた。

今研究で構築した数値海洋潮汐モデルは、高解像度（0.5度メッシュ）かつ全海洋にわたるグローバルな予測値を得ることが出来る（Mm分潮に関しては1度メッシュ）。このモデルはSchwiderski（1980）のモデルと同様に、barotropicなモードのみを表現するものであるが、短周期潮汐の潮汐流の影響を考えた新たな海底摩擦項の導入、海水の自己引力および荷重による固体地球の変形の影響の厳密な見積もり、などの改善を図っている。

このモデルにより得られたMf海洋潮汐はzonalな振幅・位相分布を持つ一方、明らかに平衡潮とは違う特徴を持っている。各海洋の低緯度での振幅・グリニッジ位相を見てみると、大西洋が最も大きな振幅および小さなグリニッジ位相を持ち、インド洋、太平洋と順に小さな振幅、大きなグリニッジ位相を持つことが分かる。特に位相に関しては各海洋内においても経度依存性を示す。これらはMiller等（1993）の驗潮データの解析および、数値モデルによる結果とほぼ一致し、北極海起源の重力波が大西洋・インド洋・太平洋と伝搬した結果、生じたものであるという彼らの議論を支持する。

精度の面では、主に低緯度に分布した驗潮データの解析値との比較で約2mm以内での一致を得ており、これまで多くの研究および応用に用いられてきたSchwiderski（1982）の予測値よりも良い一致を示している。また、緯度平均したアドミッタンスが示唆する、南半球高緯度の他の研究に比して大きな振幅も、南極の昭和基地の驗潮データと比較から、現実の海洋の応答を示したものであると考えられる。

高い精度が期待されるこの予測値を利用して、Mf分潮の重力潮汐から固体地球自身の粘性の程度を表すQ値の見積もりも試みた。昭和基地での超伝導重力計による3年間の重

力データから求められた重力潮汐の観測値と、固体地球を完全弾性体と仮定した上で海洋の効果を見積もった予測値との位相差は非常に大きく、この位相差を固体地球自身によるものであるとしてQ値を見積もると、地震観測などから見積もられている値とはかなり異なり、非常に粘性的であることを示す非現実的な値になった。これは、この位相差の殆どが固体地球自身の非弾性によるものではなく、Zschau (1978) が示唆したように荷重潮汐の位相遅れによる可能性がある。

一方、Mm分潮でもMf分潮同様、zonalな振幅・位相分布、および低緯度における海洋間での振幅・位相差が見られた。緯度平均したアドミッタンスではMf分潮よりも平衡潮に近く、Proudman (1960) の予想に従っている。また大西洋においては、Mf分潮に比べて広範囲で負のグリニッジ位相が見られるが、これは潮汐流が遅いためコリオリ力の影響が小さくなり、北極海と大西洋間で、スムーズに海水の流出入が行われているためと考えられる。

実際の長周期海洋潮汐の様相を知るため、約3年分のTOPEX/POSEIDON海洋衛星高度計データを解析した。解析には観測システムの差を避けるため、TOPEXデータのみを扱い、調和解析法を用いた。解析結果からも、Mf、Mm分潮とも、モデルから予測されたzonalな振幅・位相分布、低緯度での海洋間の振幅・位相差が見られた。また、緯度平均したアドミッタンスは、Mf分潮で非常にモデルの結果と一致し、大域的にはモデルが現実の海洋の応答をよく表現している。一方、Mm分潮では北半球ではモデルの値と良く一致しているが、南半球では系統的な差が見られ、むしろSchwiderskiの値に近い。これは、Schwiderskiのモデルが驗潮データを含んでいるためによるものと考えられる。

アドミッタンスの虚数部に対応し、平衡潮からの差を表す、起潮力ポテンシャルに対するquadrature成分の分布は、Mf分潮ではオーストラリア南西部に局在し、Mm分潮では中・高緯度で海嶺および海盆に対応している。このMm分潮での海底地形に依存するような分布は、baroclinic tideによるものであると考えられるが、更なる解析による確認が必要である。

Mf分潮については、この解析結果を海洋潮汐モデルの境界値として用いる一種の同化を行った。しかし、驗潮データとの比較では、同化による明らかな効果は見られなかった。これは、高度計データ自体の精度の限界、解析上の問題、さらに同化の手法が簡略過ぎることなどが原因と考えられるが、一方では数値モデルのみで十分に現実の海洋潮汐を表現できているとも言える。

また、より正確な解析を実現するため、海面気圧に対する海洋の応答の補正、すなわちIB補正に注目し、その改善も試みた。一般にこの補正には、気圧の1hPaの上昇に対し海面が1cm下がるという、非圧縮流体の静水力学的な応答を仮定した近似が用いられているが、現実の海洋では、海水の粘性、内部波の存在、熱による海水膨張などのため、必ずしもこの近似は妥当ではない。そこで、現実の海面気圧で数値モデルを駆動することで得られる海面高を用いることで、IB補正に静水力学的な近似に従わない成分を導入することにした。気圧値には気象庁客観解析データの値を、モデルは海洋潮汐モデルを改造したものをを用いた。東太平洋海膨付近など幾つかの領域では、この新たなIB補正によって解析上の見積もり誤差が減少したが、その効果は全海域にわたっては低く、まだ改善が

必要である。これは客観解析データ自体の時間・空間解像度の粗さ、およびその補間法によるローカルな気圧値の精度の低さが原因と考えられる。

近年のVLBI等による地球及び宇宙の高精度計測は、海洋潮汐の影響を補正するために1 cmないしそれを切る精度の高精度海洋潮汐モデルを必要としている。このうち振幅の大きい短周期潮汐（半日、1日等）については、ほぼ上記の精度に近い全海洋のモデルが得られている。一方、長周期潮汐（半月、1月等）は、海洋の力学的平衡のクリティカルな周期に近く、海洋の流体力学にとって興味深い現象であり、また地球及び宇宙の高精度計測への補正や海洋における他の長周期現象（海水準変動や海洋循環等）を正確に把握する上できわめて重要であるにも関わらず、まだ使用できるモデルは確立されていなかった。その理由は、振幅が小さい（短周期潮汐よりも一桁小さい）ために観測結果によるモデルの検証がしにくかったことに加えて、海底摩擦、海洋中の波動等モデル化が容易でない効果の影響を受けやすいものだったからである。

本申請者は、これらの困難を克服するために、現実的な境界条件と海底摩擦モデルのもとで流体力学方程式を全海洋について高精度に数値的に解く手法を新たに開発し、その方法をMf（約13.7日）とMm（約27.6日）の2つの長周期潮汐成分に適用して、世界で最も高精度のモデルを作成した。本研究の独創性並びに得られた成果は、以下の通りである。

（1）1層モデルによる線形流体力学方程式を0.5度というかつてない細かいメッシュで全海洋にわたって積分する高速並列計算機用コードを開発し、高い時間及び空間分解能による高精度モデル計算を可能にした。また、従来主流であったモデルが、境界条件として沿岸の験潮データを使用する半経験的なものであったのに対して、本研究では、海岸線でノーマル方向の流速をゼロ、接線方向の流れを自由とするきわめて自然な条件を用いた純粋に流体力学的なモデルを構築した。さらに、線形な渦粘性係数と短周期潮汐の平均流速の影響を含めた現実的な海底摩擦係数を用いた。

（2）外洋での験潮データとの比較から、本研究で作られたモデルの精度は2 mm程度と見積もられ、従来のモデルよりも遙かに高精度であることが明らかになった。

（3）本研究のモデル計算によって、低緯度の海洋間に、振幅と位相の系統的な差が現れることが明らかになった。これは、先にMiller等が唱えた、北極海起源の重力波が大西洋を経てインド洋、太平洋と伝搬するという説を裏付ける結果である。また、申請者は、TOPEX/POSEIDON海洋衛星の高度計データの解析からもそのことを確認した。

（4）本研究によって、Mf海洋潮汐は平衡潮から有意に外れていることが示された。特に、振幅が赤道海域と南極周辺で平衡潮より小さいという結果は、南極昭和基地での験潮データ等との比較で正しいことが確認された。

（5）本モデルによって海洋潮汐効果を補正した昭和基地の超伝導重力計による長周期重力潮汐観測値の位相は、平衡潮の位相からの予想を超える有意な遅れを示した。これは、荷重潮汐に対する上部マントルの粘弾性的応答を示唆する結果である。

（6）本申請者は、約3年分のTOPEX/POSEIDON海洋衛星高度計データを解析し、Mf、Mm成分について、モデル計算結果と比較した。その際、海面気圧に対する海洋の応答の効果を補正するために、独自の考察によって、従来よりも物理的に合理的なモデルを作って補正を実行した。その結果、本研究のモデル計算結果と高度計データは、海洋の全域で、

おおむね良好な一致を示すことが明らかになった。

一方、M f 分潮については、高度計解析結果を海洋潮汐モデルの境界値として用いる同化法を試みたが、験潮データとの比較からは、同化による明らかな改善は認められなかった。このことは、現在の衛星高度計データの精度の範囲内では、純粹に流体力学的な数値モデルのみで現実の海洋潮汐を十分に表現できていることを示している。

本申請者の以上の成果は、長周期潮汐への海洋の応答特性について、ほかの方法では得難い貴重な知見と質的に優れたモデルデータを提供し、関連分野における研究に重要な貢献をしたものと評価される。

以上を勘案して本審査委員会は、全員一致により、本論文が博士（学術）の学位を受けるにふさわしい内容をもつものと判定した。