

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601
研究種目：若手研究
研究期間：2018～2020
課題番号：18K13613
研究課題名（和文）マルチスケールの潮汐共鳴を考慮した九州西岸におけるM2潮汐振幅減少の原因解明

研究課題名（英文）Long-term decrease in the M2 tide on the west coast of the Kyushu Island and its relation to changes in the tidal amplification of the Bohai, Yellow and East China Seas

研究代表者
堤 英輔（Tsutsumi, Eisuke）
東京大学・大気海洋研究所・特任助教

研究者番号：70635846
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：九州西岸の半日周期潮汐の振幅は年々減少しており、特に有明海内部でそれが顕著であることが知られていたが、そのメカニズムと原因は不明であった。本研究では九州沿岸の験潮所潮位観測データの解析と数値海洋モデルを用いた実験を行い、有明海の半日周期潮位振幅減少のうち約9割が東シナ海東岸の潮汐減少に由来すること、1割は有明湾内の地形の改変に起因した共鳴の弱化および海底摩擦抵抗の弱化による共鳴の強化の複合的な効果に由来することを湾共鳴の力学に基づいて明らかにした。数値モデル実験結果から東シナ海東岸の潮汐変化には内部潮汐を通じた成層の変動が影響している可能性が示唆されたが、原因の究明には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究では東シナ海沿岸の半日周期潮汐について長期変化の実態を示し、特に有明海内部の変化については力学的な解釈を伴った定量的な評価を初めて示した。潮汐の変化について、湾の地形変化などのローカルな要因と縁辺海や海盆スケールの要因を分離して評価することは現代海洋潮汐研究の課題として挙げられており、当該研究分野の進展に寄与する成果だと考えられる。また有明海的环境変化に関する一連の研究において、湾共鳴の力学とその長期変化を明らかにした点、海洋環境を支配する物理的要因である鉛直混合の長期変動の評価につながる海底摩擦に関する結果を示した点は当該研究分野の進展に貢献する成果だと考えている。

研究成果の概要（英文）：Semi-diurnal tide along the west coast of the Kyushu Island, Japan has been decreasing in recent years, especially in the Ariake Sea. The mechanism and cause of the decreasing tide have been unknown. In this study, I conducted tide gauge data analysis and numerical model experiments using a three-dimensional general circulation model, and found that in the Ariake Sea about 90% of the decrease originated from that in the East China Sea, and 10% originated from the combined effect of the weakening of the bay-resonance due to the coastline modification and the strengthening of the resonance due to the weakening of the frictional drag of the seabed within the Ariake Sea. The results of numerical model experiments suggested that stratification changes over the northwestern Pacific region may have affected the changes in tidal amplitude along the east coast of the East China Sea through internal-tide generation and propagation, but the definitive cause of the changes could not be identified.

研究分野：海洋物理学

キーワード：M2潮位振幅 東シナ海 湾共鳴 内部潮汐 成層 黒潮 北西太平洋 ルソン海峡

1. 研究開始当初の背景

潮汐は海洋学の最も古典的な主題であり、海面の満ち引きがいつでも起こるかは数年先まで精度良く予測できる。しかし、10年を超える長期的な変動に関しては不明な部分が多い。最も良く分かっていない問題は、潮位変動振幅の長期変化の原因であり、将来的な海面上昇に伴う沿岸域の洪水リスクと海岸の侵食問題、および海面水温の上昇に起因する気象災害リスクの高まりに関連して、現在世界各地で原因究明のための研究が勢力的に進められている。その成果として、平均海面の上昇・下降と地形の変化に伴う潮汐共鳴特性の変化や成層構造の変化に伴う内部潮汐の変化、および潮汐間の非線形エネルギー輸送の変化が潮汐振幅の長期変化に影響している可能性が指摘されている。いずれの研究例においても、潮汐の長期変化は地域依存性の強い現象であり、その原因は場所ごとに異なっている。海域の力学特性を正しく理解することが、潮汐の長期変化研究に必要とされている。現在、日本沿岸域で最も顕著な潮位振幅の変化は、日本沿岸域で卓越する主太陰半日周潮 (M_2) 成分に見られ、九州の西岸域、特に有明海で潮位変動の M_2 振幅が過去 30 年以上にわたって有意に減少している。このことは、1990 年終わりから 2000 年代に生じた有明海の問題に関連して多くの研究者に認識され、振幅減少の原因究明のための研究が実施されてきたが、根本的な原因は今もなお分かっていない。ただし、長期的な海面上昇が潮汐振幅減少の直接的な原因である可能性は否定されつつある。

2. 研究の目的

本研究は、九州西岸の M_2 潮汐振幅の長期減少を引き起こしている原因を明らかにすることを目的とする。潮汐システムから見ると、九州西岸の潮汐は西部北太平洋の潮汐に駆動される東シナ海-黄海-渤海の振動系という縁辺海スケールの現象の影響下にある。一方で九州西岸の潮汐は有明海をはじめとする内湾潮汐の駆動源でもある。有明海のように湾の自然周波数と M_2 潮周波数の相似性から共鳴が生じ、かつ底摩擦によって共鳴が制御される潮汐系については湾内のローカルな変化が湾外の潮汐へ影響を及ぼし得ることが知られており、このような振動系の変化が湾外である九州西岸の潮汐へ及ぼす影響も考えられる。これらマルチスケールに及ぶ潮汐現象について調べることが本研究の主要な狙いである。

3. 研究の方法

九州西岸を含む東シナ海 黄海 渤海および西部北太平洋の M_2 潮位振幅の過去 30 年にわたる変動・変化の実態を明らかにし、データ解析と数値シミュレーションによりその原因を検討した。

(1) 既往文献調査

日本国外、特に中国・韓国沿岸の潮位データは公開されていない。そのため、これらの国沿岸の潮位変化については研究論文等で発表されている結果を調査・整理した。

(2) 潮位観測データ解析

九州・沖縄沿岸に位置する気象庁、国土地理院、港湾局所管の験潮所、国土交通省所管の河川水位観測所、および University of Hawaii Sea Level Center 所蔵の台湾沿岸 2 験潮所における潮位 (水位) データを解析した。年毎の潮位データに調和解析を行い M_2 潮位振幅の振幅と位相を得た後、それらの時系列解析を行った。特に有明海については、データ解析の対象期間を 1980 年から 2019 年までと過去 50 年に拡張するとともに、底摩擦を組み込んだ一次元湾共鳴の理論モデル (Sutherland et al. 2005) を用いることによって、潮位振幅の調和定数から湾の自然 (共鳴) 周波数および海底摩擦係数 (潮流振幅に比例する) を非線形回帰によって推定し、湾の共鳴・エネルギー散逸の力学とその湾外への影響 (back effect) を評価した。

(3) 数値実験

東シナ海 黄海 渤海潮汐振動系の外力と成層の長期変化に対する応答を調べるために数値実験を行った。3次元数値海洋循環モデル MITgcm (Marshall et al. 1997) を用いて、東シナ海 黄海 渤海を計算領域とする縁辺海スケール潮汐実験 東シナ海 黄海 渤海とルソン海峡や伊豆・小笠原海嶺を含む西部北太平洋を計算領域とする北西太平洋潮汐実験を行った。実験では地形変化の影響を解像できるように有明海周辺の領域で格子幅を細かくする可変格子幅を設定し、実験では内部潮汐を解像できるように一定の格子幅 (水平 $1/30^\circ$) を設定した。実験では、有明海の地形の変化 (諫早湾堤防の有無)、成層の有無、地衡流場の有無、風応力の有無に対する東シナ海 黄海 渤海の潮位振幅の応答を調べた。成層・地衡流は北西太平洋長期再解析 FORA-WNP30 (Usui et al. 2017) を、風

応力は気象庁 55 年長期再解析 JRA-55 (Kobayashi et al. 2015) を基に与えた。一方での実験ではより現実的な成層場・地衡流場の変化に対する M_2 潮位振幅の応答を調べるため、FORA-WNP30 から得られた水温・塩分、海面高度、流速の年々変動場から 14 ケースを与えた実験を行った。

4. 研究成果

以下で主な研究トピック毎に成果を示し、最後に総括と展望を述べる。

(1) 東シナ海 黄海 渤海沿岸潮位振幅の長期変化の実態

九州・沖縄沿岸潮位の調和解析と中国および韓国沿岸潮位変化の文献調査の結果、以下の海域において 1980 - 2016 年の M_2 潮位振幅変化傾向が認められた。

東シナ海東岸 (九州西岸および韓国済州島): 一貫して有意な減少傾向が認められる。

黄海東岸 (韓国西岸): 地形改変の影響により海域によって傾向が異なる。地形改変の影響が比較的小さいと推察される南部海域の験潮所では有意な増加傾向が認められる。

東シナ海・黄海・渤海西岸 (中国東岸): 各地で地形改変の影響もあり得るが、有意な増加傾向が概ね一貫して認められる。

東シナ海 太平洋間境界域 (琉球列島): 一貫して有意な変化が認められない。

以上より、東シナ海 黄海 渤海振動系における M_2 潮位振幅変化の大きな特徴として、西岸で増加、東岸で減少、太平洋との境界部付近で有意な変化なしという傾向が示された。

(2) 有明海の潮位振幅変化の力学的解釈とその湾外潮汐への影響

有明海沿岸とその湾口周辺に位置する験潮所の調和定数の解析と 1 次元湾共鳴モデルによる力学的解釈から以下の点が明らかとなった。

有明海湾奥部の潮汐を代表する大浦における M_2 潮位振幅・位相には、月の昇降点黄経の 18.6 年変動に伴った変動および線形的な減少傾向が認められた。18.6 年周期変動の大きさは平均振幅に対して 3.44 % であり、平衡潮汐論から予測される値 3.73 % を有意に下回った。この原因として、有明海の海底摩擦の非線形性が考えられた。振幅の減少トレンドは $-11.5 \text{ \% century}^{-1}$ であった。一方で、湾口周辺の潮汐を代表する長崎における M_2 潮位振幅の 18.6 年変動振幅は 3.76 % であり、平衡潮汐の値と有意な差が認められないことから、長崎における潮汐は摩擦の影響を受けていないことが推察された。振幅の減少トレンドは $-10.5 \text{ \% century}^{-1}$ であった。

湾の固有周期 (自然周波数) は 1997 年に急増しており、その大きさは、平均値 8.51 h に対して、0.09 h であった。これは諫早湾の締め切りに伴う湾長の減少が主たる原因と考えられる。一方で線形の海底摩擦係数は 2000 年以前に比べてそれ以降は平均的に約 3% 減少していた。このことから湾内の M_2 潮流振幅が同程度減少したことを示され、平均的な潮汐エネルギー散逸が 2000 年以降は以前に比べて約 10% 減少したと見積もられた。固有周期の減少は湾の潮汐共鳴機構が弱まったこと、摩擦が減少したことは共鳴機構が強まったことをそれぞれ意味する。これら互いに相殺する 2 つの効果の重ね合わせとして、共鳴機構は 1990 年から 2010 年代にかけて正味で弱まっていた。その効果は正味の減少トレンド $-11.5 \text{ \% century}^{-1}$ のうちの約 1 割であり、残りの 9 割 (約 $10 \text{ \% century}^{-1}$ の減少トレンド) は有明海の潮汐を駆動する東シナ海東岸の潮汐の減少に起因すると見積もられた。

上述の有明海の海底摩擦・固有周期パラメタの変化から、陸棚 内湾潮汐系の理論モデル (Zimmerman 1993, Gerkema 2019) を用いて、湾外の九州西岸域の潮位振幅に対する影響を見積もった。その結果、有明海の共鳴機構の弱体化は湾外の潮汐をわずかに (50 年で数パーセント程度) 増加させることが示唆された。したがって、有明海の共鳴の変化が湾外九州西岸の潮汐変化に与える影響は観測からは検出できない程度であると考えられた。

(3) 東シナ海 黄海 渤海の潮位振幅の変動機構

数値モデルを用いた一連の潮汐実験の主要な結果を以下に示す。

有明海湾内の地形改変 (諫早湾堤防の建設) は、上述のデータ解析から示唆された通り、九州西岸域の潮汐をわずかに増加させる。その大きさは成層の有無に関わらず 1% に満たない。

風応力の有無、地衡流の有無に比べて成層の有無が東シナ海 黄海 渤海の潮位振幅を大きく変化させる。成層があることで琉球列島周辺の海底斜面で順圧潮汐 (海表面の上下動) が内部潮汐 (または傾圧潮汐、海洋内部の密度面の上下動) へと変換され、東シナ海 黄海 渤海に入射する順圧潮汐エネルギーが減少するためである。その減少分は気候値的な水平一様の成層の場合、振幅比で 5~10% であった。気候値的な地衡流 (黒潮と対馬暖流) がある場合は水平一様な成層の場合に比べて、東シナ海南部 (北部) において潮位振幅が 1~2% 減少 (増加) した。

西部北太平洋域の成層・地衡流場の年変動に対して、ルソン海峡、台湾海峡、および台湾東方海域における M_2 潮位振幅が顕著に応答した。これはルソン海峡における黒潮流路の年変動に応じてそこでの内部潮汐の生成・伝搬が変動するためだと考えられた。また、台湾

海峡の潮位振幅の年変動は中国東岸（東シナ海西岸）の振幅の年変動と概ね同期しており、東シナ海西岸域で年とともに増加傾向を示すという M_2 潮位振幅の観測事実に合致する傾向が認められた。一方で九州西岸（東シナ海東岸）においては、成層・地衡流場の年変動に対して潮位振幅の年変動の応答は小さく、明瞭な長期傾向を示さなかった。

以上のように、本研究では東シナ海 黄海 渤海沿岸の M_2 潮位振幅の長期変化の実態を整理し、そのうち九州西岸（東シナ海東岸）の潮位振幅変化、特に有明海内部の変化について力学的な解釈を伴った定量的な評価を初めて示した。潮汐の変化について、湾の地形変化などのローカルな要因と縁辺海や海盆スケールの要因を分離して評価することは近年潮汐変化研究の課題として挙げられており（Haigh et al. 2019）当該研究分野の進展に寄与する成果だと考えている。また有明海の環境変化に関する一連の研究において、湾共鳴の力学とその長期変化を明らかにした点、海洋環境を支配する物理的要因である鉛直混合の長期変動の評価につながる結果（海底摩擦）を示した点は新規的な成果だと考えられる。一方で、当初の研究目的であった九州西岸の潮位振幅減少の原因に関しては、解明に至らなかった。本研究で用いた数値モデルで考慮されておらず、この原因となり得る過程として、成層の強化に伴った鉛直渦粘性の弱化・潮流による体積輸送量の減少プロセス（Kang et al. 2002, Muller et al. 2012）が挙げられる。このプロセスを数値モデル内で再現するためには、海底境界層乱流の成層依存性を適切にパラメタライズし、数値モデルに組み込む必要があり、今後の課題としたい。当初予想していなかった成果としては、ルソン海峡周辺の黒潮・成層場の挙動と東シナ海西岸域の M_2 潮汐振幅間の関連である。東シナ海西岸域の M_2 潮汐振幅の長期変化の原因は解明されておらず（Feng et al. 2015）本研究ではルソン海峡の潮汐過程にその可能性があることが初めて示唆された。ルソン海峡における黒潮流路変動の実態とその海洋再解析での再現性の検証を含め、この仮説の検証も今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsutsumi Eisuke, Matsuno Takeshi, Itoh Sachihiko, Zhang Jing, Senjyu Tomoharu, Sakai Akie, Lee Keunjong, Yanagimoto Daigo, Yasuda Ichiro, Ogawa Hiroshi, Villanoy Cesar	4. 巻 10
2. 論文標題 Vertical fluxes of nutrients enhanced by strong turbulence and phytoplankton bloom around the ocean ridge in the Luzon Strait	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-74938-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 堤英輔、松野健、伊藤幸彦
2. 発表標題 有明海におけるM2潮の潮位振幅と湾共鳴およびエネルギー散逸の1980-2019年間の年変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 E. Tsutsumi, T. Matsuno, T. Nagai, D. Hasegawa, H. Nakamura, A. Nishina, T. Senjyu, T. Endoh, M.-H. Chang, Y. J. Yang, S. Jan, S. Itoh, X. Guo
2. 発表標題 Flow-topography interaction within the Kuroshio and energy dissipation: observation and numerical simulation in the Tokara Strait southwest of Japan and the I-Lan Ridge east of Taiwan
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 E. Tsutsumi, T. Matsuno, T. Senjyu, T. Endoh
2. 発表標題 Estimating internal tidal current in a tidally-energetic shallow estuary, Ariake Sea, Japan
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Matsuno and Eisuke Tsutsumi
2. 発表標題 Investigating vertical mixing in estuarine pycnocline: a case study in the Ariake Sea, Japan
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eisuke Tsutsumi
2. 発表標題 Strong turbulent mixing induced by Kuroshio-topography interaction and its tidal modulation at the I-Lan Ridge: observation and numerical simulation
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所 共同研究集会 「Workshop on turbulent mixing in the Kuroshio current over the topography」 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堤 英輔
2. 発表標題 トカラ海峡と台湾東方I-Lan Ridge上における乱流の生成過程とエネルギー収支
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所 共同研究集会 「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堤 英輔
2. 発表標題 有明海における潮汐の長期変動: 湾共鳴に対する地形変化と摩擦抵抗の効果
3. 学会等名 日本海洋学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------