

令和元年6月10日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13883

研究課題名（和文）潮汐観測データに基づく海底地形の逆推定

研究課題名（英文）Inverse estimation of bottom topography using tide observation data

研究代表者

広瀬 直毅（HIROSE, NAOKI）

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：70335983

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：衛星高度観測データを拘束条件として、海洋潮汐モデルを逆計算することによって、黄海の平均水深を44.9～45.7m程度の狭い範囲で推定することができた。一方、沿岸潮位計データを拘束条件とした場合の推定結果は不安定であった。

さらに、単純な水路の浅水波モデルを用いて、凹凸地形に対する海流の応答を数値実験した。振動流（潮汐流）を与えたときは海山直上に感度があるが、定常流を与えた場合は海山の斜面に影響が出やすい。海底地形に対する応答は、定常流の方が強かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が進化することによって水深マップの信頼性が向上し、船舶の航行や漁業活動、資源調査、港湾整備など実社会で直接的に有益である。海底地形データの精度向上は、特に沿岸域の海況予測の計算精度にも直結し、気象予報や海洋エネルギーなどさらに多分野への波及効果が想像できる。

研究成果の概要（英文）：The area-mean depth for the Yellow Sea was accurately estimated within the narrow range between 44.9 and 45.7m by the inverse calculation of ocean tide model with the constraint of satellite altimeter data. But the estimation results were unstable using coastal tide gauge data.

Numerical experiments were performed for the sensitivity of the fluid motion to various bumps and dimples using a shallow water model with a simple channel topography. The maximum sensitivity was found at the top of the bump (dimple) with the oscillating case but shifted left (right) hand side of the bump(dimple) with the steady flow. The response to the topographic anomaly was stronger with the steady flow.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海底地形 黄海 浅水波モデル モデルグリーン関数 対馬海峡

## 1. 研究開始当初の背景

海洋の水深データは、船舶の航行や漁業活動、資源調査、港湾整備など実社会で直接的に利用されるほか、海洋学の現場観測や数値実験においても決定的に重要な境界条件である。しかし、未だ測深データが不十分であり、海底地形図の精度に問題があることは、あまり知られていない。例えば Hirose (*J. Oceanogr.*, 2005)は、複数の海底地形データセットを比較し、データセット間の rms 差が水深の数%にも達することを示した。さらなる数値実験を通じて、長江流出水の分布は海底地形によって左右されることも確認した。急潮や高潮など、さらに高解像度の沿岸海況変動予測を精度よく実施するためには、特に浅海域の海底地形が支配的要因といえる。そこで、海況予測の精度を根本的に向上させるためには、海底地形データの再整備が必要であると考え、本課題である海底地形の逆推定を着想した。直接的な測深データ以外の情報から海底地形を推定する試みとして、Smith and Sandwell (*Science*, 1994)は人工衛星で計測された平均海面高度から重力異常分布を求め、南大洋などの測深空白域の水深を逆推定し、新たに海山を発見する成果を得た例がある。その成果はアメリカ海洋大気庁(NOAA)の公式な全球地形データセット(ETOPO2)にも収録されたが、間宮海峡や渤海で 100m を超える異常水深が見られるなど、彼らの手法では浅海域での推定精度に問題がある。同様の傾向は、日本近海の水深データ(JTOPO30)にも散見される。

一方、Hirose (*J. Oceanogr.*, 2005)は、対馬暖流のシミュレーションを通じて、最小二乗法で海底地形の最適な組み合わせを探った。僅か自由度 4 の逆推定であったが、海流の海底地形依存性を逆手にとって浅い海底地形を推定できる可能性を示したものである。さらに、Nakamura et al. (*J. Univ. Comp. Sci.*, 2006)は沿岸潮位計測値から大和堆付近の海底地形を修正し、津波伝搬のシミュレーション精度を向上させたが、粒子フィルターという高コスト手法であったため、広域の海底地形を逆推定することができなかった。

## 2. 研究の目的

真値として用いられることの多い海底地形データだが、その誤差は意外に大きい。特に実測データの不足する東シナ海や日本海西部では水深データセット間の差異が大きい。本研究では、高密度な衛星海面観測に着目し、中でも精度の良い潮汐成分を利用して、海底地形を逆推定する斬新な手法を開発する。特に、従来法(衛星重力異常データ利用)では不安定な推定結果となりがちだった陸棚や沿岸付近における地形情報の刷新を目指す。検証実験として、潮汐変動のみならず沿岸～縁辺海域における幅広い海況変動のモデル再現性を確認する。

## 3. 研究の方法

### 【平成 28 年度】

大型画面を備えた高性能 Linux PC を 2 機購入し、MPI 並列フォートランや科学演算ライブラリ、可視化ソフト、各種解析ソフトを導入する。経費節減のため、原則としてすべてフリーソフトを利用する。Yoshida and Hirose (*Pac. Oceanogr.*, 2008)の浅水波モデルを改変し、本研究の対象海域である東シナ海・日本海に合わせた順圧(成層の影響を考慮しない)潮汐モデルを構築する。開境界条件として与える各分潮の入力条件は、Matsumoto et al. (2000)を最適化した Moon et al. (2012)に従う。既存の海底地形データとして、JTOPO30(日本)、ETOPO1(アメリカ)、SKKU(韓国)等の最新版を収集し、モデル分解能に変換する。大学院生がポスター版海図を数値化し、上原(研究協力者)は電子海図のデータと併せて格子化する。こうした海底地形データの整備作業において、スキャナー及び大型モニターが必須である。沿岸潮位計データと衛星海面高度計データから、潮汐成分を抽出する必要もある。内部波の影響を避けるため、陸棚上の海水がよく混合している冬季の観測データのみを使用し、最小二乗法で主要 8 分潮の順圧成分を特定する。

初年度後半には、観測データとの残差分散を最小化するように不確定性の高い海底摩擦パラメータを最適化する。さらに、海底地形データに対する感度実験を行い、潮汐の分潮毎に地形依

存性を調査する。どの分潮に対しても水位の地形依存性が認められない(統計的な有意水準以下の)区域については、次年度以降の地形逆推定の対象から除外する必要がある。潮位変動を指標とした海底地形データセットの精度評価を行い、年度末の海洋学会などで成果報告する。

#### 【平成29年度以降】

初年度の研究成果をとりまとめ、学術論文として報告する傍ら、モデルグリーン関数および適応カルマンフィルターを用いた逆推定アルゴリズムを作成する。最終的に本研究で制御される海底地形の分解能はモデル格子の3倍( $1/4^\circ \times 1/5^\circ$ )、つまり数値モデルや衛星観測データの実質的な解像度と同等となることを目指す。ただし、前年度に特定した低感度の区域は、制御変数から除外する。数値モデルの分解能よりも制御変数の自由度を節約する縮小近似法としては、Hirose et al. (*J. Oceanogr.*, 1997)や Hirose et al. (*J. Geophys. Res.*, 2001)などで実績のある浅水波モデル用の近似カルマンフィルターを採用する。本来は時間的に不変の海底地形を状態変数に組み込む(適応する)ことで、水深の逆推定が可能となる。グリーン関数法は Moon et al. (2012)の手法を100程度までの自由度に拡張して構築する。先験的に必要となる海底地形の誤差共分散特性は、各データセット間の残差分散に基づいて決定する。

逆推定(最適化)された海底地形は、研究期間後半において、3つの異なる視点で評価する。

1. 上述した逆推定においては、潮位変動のみが同化されており、潮流成分は独立データとみなされる。データ同化の有無により、過去の潮流観測値との整合性が向上することを確認する。
2. 今推定の結果、修正量の大きかった地点付近を航行する予定の海洋観測船に現場の測深を依頼する。面的な計測装置を備えていることが理想的であるが、航路直下のみの計測値だけでも十分有効な実証データとなる。
3. 最適推定された海底地形を DREAMS 海況予測システムに入力し、短周期変動(数十日以内)の予測精度の変化を観察する。特に、衛星海面高度データとの相関係数や残差分散に着目する。DREAMS モデルの数値実験は計算負荷が大きいため、大型計算機で行う必要がある

以上の事後検証で満足できる結果が得られない場合は、

- ・プログラムのデバッグ
- ・初期条件や誤差共分散行列の与え方などの修正
- ・制御変数の変更(分解能や制御区域等)
- ・同化アルゴリズムの見直し(最適スモーカーや四次元変分法の検討)

等々、途中の計算過程に問題がないか、上原(研究協力者)とともに一つずつ検証する。従来の経験に基づくと、こうしたデータ同化システム全般の調整には、数ヶ月から1年程度の時間を要すると予想される。

#### 4. 研究成果

まず、黄海海域において、SKKU, GEBCO, ETOPO1の各水深データセット間に有意な水深差を確認した(図1)。特に中国大陸沿岸においては、データ間で平均水深が10mにもおよび大きな差があった。浅水波モデルでM2分潮をシミュレーションし、モデルグリーン関数を用いることで、黄海の平均水深は44.9~45.7m程度の狭い範囲で逆推定することに成功した(図2)。K1分潮の最適化では推定結果が過大評価となる傾向があったが、両分潮の同時最適化によって、適切な推定結果を得ることができた。結果的に黄海において、全体的にSKKUは深め、GEBCOとETOPO1は浅めの海底地形データであるといえる。

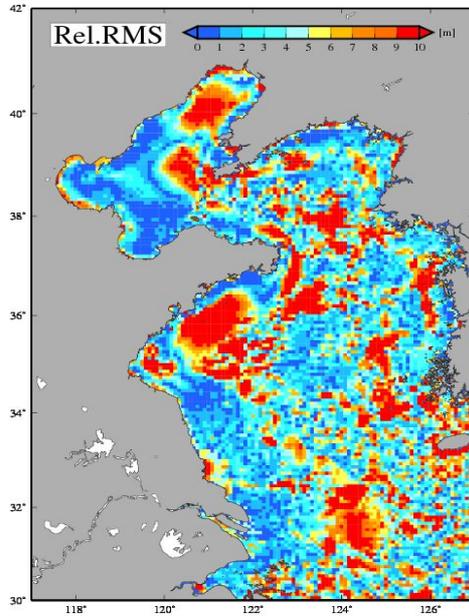


図 1. 水深データセット SKKU, GEBCO, ETOPO1 の相対 RMS 差

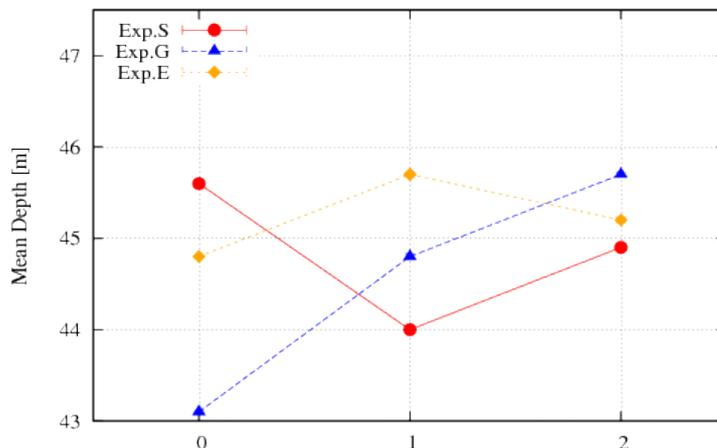


図 2. SKKU, GEBCO, ETOPO1 を使った数値実験での相対 RMS 差  
繰り返し計算により、推定値が収束している。

一方、沿岸潮位計データを拘束条件として用いた場合の水深スケールの推定結果は不安定であった。有限差分の数値モデルでは、沿岸付近の大きな潮汐変動を再現することが困難であったためと考えられる。したがって、潮汐モデルを用いて海底地形データを逆推定する場合は、比較的潮汐変動が表現しやすい沖合データ（衛星高度計データ）を用いることが望ましいといえる。

さらに、対馬海峡の3次元高分解能モデル（東西 1 分×南北 0.8 分）を作成し、種々の海底地形データセットを比較的に利用した。対馬海峡北部（韓国沿岸）では、韓国海洋開発（株）の電子海図データを利用することによって、より正確な格子化地形データを作成することができた。この最新データと比較することによって、従来のほとんどの地形データセットにおいて、戦前の不正確な測深データの影響が見出された。この違いは西水道を通過する対馬暖流の再現性に直結する。

対馬海峡の海底地形を調査する過程で、海峡横断フェリーの基準線が必ずしも最頻航路を代表していないことが判明し、最小二乗法によって基準航路を見直したところ、海底地形もまた大きく修正された。旧線と比較して全体的に水深が浅くなり（断面積が小さくなり）、対馬暖流の流量も 2.2 ~ 2.4Sv と従来値(2.65Sv)よりも下方修正された。

津軽海峡の海底地形もまた通過流に対して強く作用していることが分かった。複雑な海底地形を単純化した場合、日本海からの流出のほとんど（90%以上）は津軽海峡を通過するが、実際には津軽海峡の形状抵抗の効果により、かなりの割合（全流出量の約 1/3）が宗谷海峡に振り分けられている。

小スケールの海底地形を検出・修正する逆問題を解くため、まず順問題として周期境界条件を課した単純な水路の2次元浅水波モデルを用いて、凹凸地形に対する海流の応答を数値実験した。対馬海峡を想定した順圧モデルの場合、海山・海盆のスケール(1~10km程度)に応じた、海流の蛇行度が大きく異なることが判明した。

対馬海峡を模した単純地形の2次元浅水波モデル実験を繰り返し、特に海山の有無の差(海山に対する感度)に注目した。潮汐流を意図した振動流を与えたときは海山直上に感度があるが、定常流(通過流)を与えた場合は海山の斜面に影響が出やすい(図3)。海底地形に対する応答の強さは、定常流の方が大きかった。定常流の強さが30cm/sを超えると非線形性が強くなり、海山への感度(地形性渦)が下流へ押し流されて見えにくくなることも分かった(図4)。海山の標高に対する渦流の依存性は良好だったが、海山の半径を変化させた場合でも、発生する渦半径はほとんど変わらなかった。

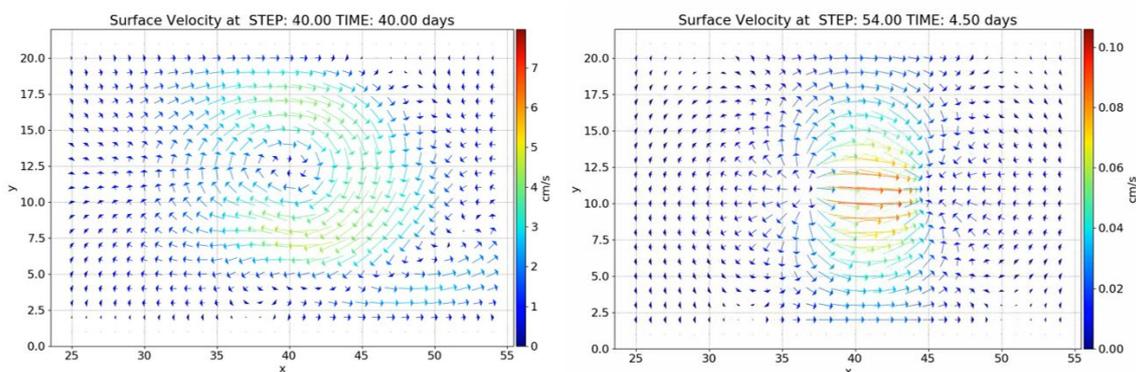


図3. 中央の海山に対する(左図)定常流と(右図)振動流の応答の違い。

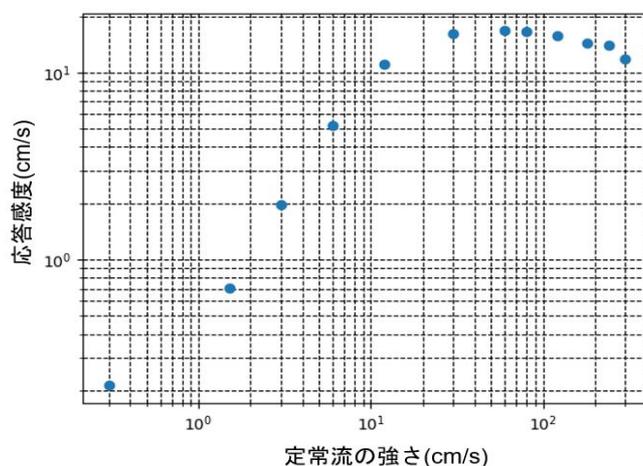


図4. 定常流の強さに対する地形応答感度の依存性。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Tianran Liu, Bin Wang, Naoki Hirose, Toru Yamashiro, Hiroshi Yamada, High-resolution modeling of the Kuroshio current power south of Japan, *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 10.1007/s40722-017-0103-9, 4, 1, 37-55, 2018.02.

Sooyeon HAN, Naoki Hirose and Shinichiro Kida, The role of topographically induced form drag on the channel flows through the East/Japan Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 10.1029/2018JC013903, 123, 9, 6091-6105, 2018.08.

〔学会発表〕(計 15 件)

広瀬 直毅, 海峡力学過程の統合と解剖に関する研究計画, 低温研共同利用研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2016.06.30.

Sooyeon Han, Naoki Hirose, Finite volume modeling of channel transports for the

- East/Japan Sea, 低温研共同利用研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2016.07.01.
- Jae-Hun Park, Ye Sol Kim, Ho Jin Lee, Hee-Yeol Lee, Ho Kyung Ha, Young-Gyu Park, Chanhyung Jeon, Naoki Hirose, Internal tide-induced enhancement of the Korea Strait Bottom Cold Water intrusion, 低温研共同利用研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2016.07.01.
- 広瀬 直毅, 日本海沿岸帯域海況予測モデルの西方拡大, 日本海及び日本周辺海域における環境急変現象(急潮)のモニタリング、モデリング及びメカニズム解明に関する研究集会, 2016.08.04.
- 広瀬 直毅, 韓 修妍, 津軽海峡の過大なモデル流量を修正する方法, 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」, 2016.12.15.
- Naoki Hirose, Coastal Ocean data assimilation experiment interacting with local fisheries, PAMS 2017 19th Pacific Asian Marginal Seas Meeting, 2017.04.
- Hong-Ryeol Shin, Jihoon Lee, Kwangwoo Cho, Tetsutaro Takikawa, Naoki HIROSE, Volume transport trough the Korea Strait Estimated from Sea Level Difference and Current Data, PAMS 2017 19th Pacific Asian Marginal Seas Meeting, 2017.04.
- Sooyeon Han, Naoki Hirose, The East/Japan Sea throughflow controlled by form drag of the Tsugaru Strait, PAMS 2017 19th Pacific Asian Marginal Seas Meeting, 2017.04.
- 広瀬 直毅, 海峡力学過程の統合と解剖, RIAM フォーラム, 2017.06.
- Sooyeon Han, Naoki Hirose, Effect of form drag on the channel flow in the East/Japan Sea, 研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2017.06.
- 広瀬 直毅, Sooyeon Han, 上原 克人, 滝川哲太郎, 吉川裕, 海峡通過流のデータ同化へ向けて, 研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2017.06.
- Sooyeon Han, 広瀬 直毅, 木田 新一郎, The role of topographically induced drag on the channel flow through the Japan Sea, 日本海洋学会 2017 年度秋季大会, 2017.10.
- Naoki HIROSE, HAN SOOYEON, Liu Tianran, 黒潮と対馬暖流の高分解能モデリングから分かったこと, 「海洋大循環の力学-エクマン層から中深層循環迄」, 2017.10.
- Sooyeon Han, Naoki Hirose and Shinichiro Kida, Topographically induced form drag on the channel flow through the East/Japan Sea, American Geophysical Union 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018.02.
- Naoki Hirose, Periodic corrections of major parameters of a coastal ocean model using approximate Green's functions, American Geophysical Union 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018.02.

〔図書〕(計 0 件)  
なし

〔産業財産権〕  
○出願状況(計 0 件)  
なし

○取得状況(計 0 件)  
なし

〔その他〕  
ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

(1)研究分担者  
なし

(2)研究協力者  
研究協力者氏名: 上原 克人  
ローマ字氏名: Katsuto Uehara

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。