

縁辺海海底地形データに対する潮高補正の適用

Uehara, Katsuto
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/2740962>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 157, pp.12-26, 2020-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

縁辺海海底地形データに対する潮高補正の適用

上原 克人*¹

(2020 年 1 月 31 日受理)

Impact of applying tidal correction to marginal-sea bathymetry dataset

Katsuto UEHARA

E-mail of corresponding author: uehara@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

A method to convert the reference level of chart depths from the lowest tide level to the mean sea level was developed to improve the quality of bathymetry datasets of the East and South China seas. The conversion was made by referring to a newly compiled database of the offset value (Z_0) derived from that listed in tide tables. Numerical simulations using the revised East China Sea bathymetry revealed that the depth correction lead to 40% reduction of the RMS difference between the predicted and observed M_2 tidal amplitudes, mainly due to the changes at regions with shallow depths and large tidal range such as the Korean west coast and the Southwestern Yellow Sea. It was also found that the global bathymetry dataset GEBCO2019 uses chart depths without applying the correction and the mismatch between the zero level for the land and sea seems to have caused erroneous depths at intertidal zones.

Key words: Bottom topography, tidal model, East China Sea, South China Sea

1. はじめに

潮汐モデルの精度を左右する主要な要素に海底地形がある。例えば、東シナ海と北西ヨーロッパ陸棚を対象にほぼ同じ設定で行った2つの潮汐シミュレーションの結果^[1-2]を比較すると、モデル推計値と観測値との間の二乗平均偏差が前者では M_2 潮振幅で 17cm、位相で 15 度であったのに対し、後者はそれぞれ 5.6cm、6.5 度と半分以下であった。似通った潮汐振動特性を持つ両海域においてモデル間の精度の差がここまで開いた要因の一つとして、計算に使用したモデル地形の精度の違いが考えられる。このように、潮汐シミュレーションの精度向上には海底地形データの信頼性が重要な意味を持つ。

近年は空間分解能の高い全球地形データセットが公開され^[3-5]、最新の GEBCO2019^[5]では世界各地の水深が緯度・経度ともに 0.25 分 (1/240 度、赤道で約 460m) 間隔で提供されている。しかし解像度の向上に品質が伴っているとは必ずしも言えない。外洋については 1990 年代から利用可能となった衛星海面高度計データの採用により水深の精度が飛躍的に向上したが、高度計データの適用が難しい沿岸域に関しては、測深データの不足や検証の不十分さなどから

非現実的な水深値や海底地形を示す場所が少なくない。

そのため、筆者はアジア縁辺海潮汐モデルの精度向上を目的とした独自の海底地形グリッドデータを、東シナ海と南シナ海を対象に構築してきたが^[6-9](Fig.1)、作成した地形データを使って潮汐モデルを駆動したところ、計算値と観測値との差がむしろ増加してしまった。検証の結果、地形データ作成時に使用した海図由来の水深値の取り扱いに問題があり、岸近くの水深を過小評価していたことがその原因の一つとして浮上した。

海図水深のゼロ点は低潮時の水面高度(最低水面)に準拠しており、平均水面から測定した水深とは同じではないが、従来のデータ作成時にはその差を考慮してこなかった。最低水面と平均水面の差はたかだか数メートルであり、沖合では問題にならないが、岸近くの浅海域では無視できない可能性がある。

本稿は海図水深を平均水面準拠の水深に変換する簡便な手法を開発し、変換後の水深を用いた海底地形データを作成するとともに、修正の効果について潮汐モデルを駆動することにより検証したものである。さらに既存の全球地形データにおいても、近年では浅海域の地形情報を電子海図収録の水深で積極的に補う傾向が見られることから、同様の問題が生じていないか、確認を行った。

*1 九州大学応用力学研究所

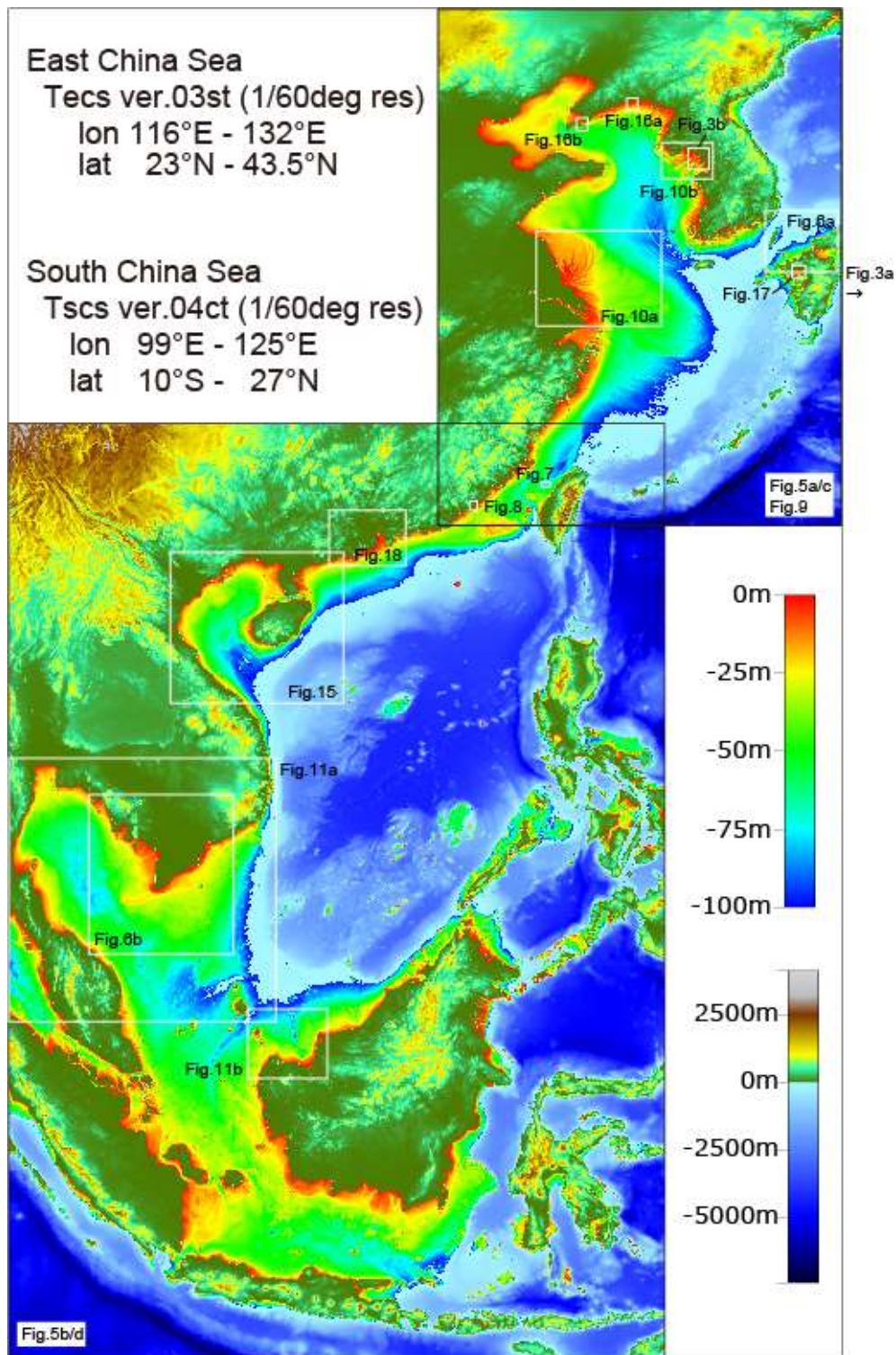


Fig.1. Map of two bathymetric datasets, Tecs and Tscs, created in this study.

2. 海図水深

最初に海図に記載されている水深の定義と、本稿にて行う水深変換の概要を述べる。海図は航海目的で発行されていることから、陸上の地形図が基準としている平均水面

(MSL=Mean Sea Level)からではなく、座礁の危険性が高まる低潮時の最低水面(Chart datum)から測った深さを水深として採用している。この海図水深 H_c と一般的な水深の定義である平均水面から測った水深 H_M は同一視されることが多いが、Fig. 2 に示すような違いがある。

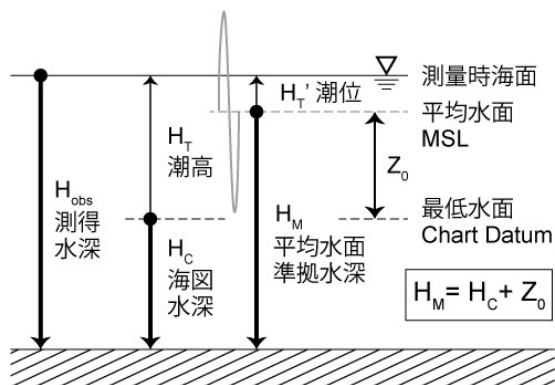


Fig.2. Relation between depths actually measured (H_{obs}), depths that refer to chart datum (H_M) as indicated in navigational charts, and those refer to mean sea level (H_M). Z_0 denotes offset between the two reference levels, H_T "height of tide" shown in tide tables and H_T' an instantaneous level above the mean sea level (MSL).

本稿で扱う「平均水面」と「最低水面」は、観測結果に基づいているものの、あくまで海図編集時に使用される観念的な量である。測地的な厳密さは必ずしも持たない。ここでは、どちらの海面高度も場所ごとに变化するが、時間的には不変であると仮定する。

これら平均水面ならびに最低水面に準拠した水深は

$$H_M = H_C + Z_0 \quad (1)$$

の関係にある。ここで Z_0 は平均水面と最低水面との差であり、慣習的に正值で表される。最低水面は、それ以上下がることのない海面高度であり、具体的な定義は国によって異なる。日本では略最低低潮面（平均水面から潮汐の主要4分潮の振幅の和だけ低い高度）として定められ^[11]、国内各地の潮位観測に基づく Z_0 の値が海上保安庁のホームページにて公示されている^[12]。 Z_0 については、験潮所における値が潮汐表や海図にも記載されている。

さらに、水深測量時の海面から計測した測得水深 H_{obs} と海図水深 H_C との間には以下の関係がある。

$$H_{obs} = H_C + (Z_0 + H_T') = H_C + H_T \quad (2)$$

ここで、 H_T' は測量時の平均水面の上の潮位であり、 H_T' に前述の Z_0 を加えた量、すなわち最低水面を基準とした水面の高さを潮高 H_T と呼ぶ。測得水深を海図水深に変換する作業を潮高補正と呼び、水深測量に際して原則として水深200m以浅の場所ではこの補正を行うこととされている。本稿では、この潮高補正適用後の海図水深を扱い、測得水深は使用しないことから、以下では H_T' を考えず、(1)式に基づく H_M と H_C の間の変換を潮高補正と呼ぶことにする。

海図において最低水面を基準とした水深を記載するのは世界共通の手法で、古くから行われている^[13]。例えば、Fig.3a は1924年刊行の海図第60号「品川湾」の一部を示したものである。今日の晴海地区や豊洲地区にあたる隅田川河口の広い範囲に描かれた網掛けは、最低水面より上に位置する潮間帯を表している。海図では下向きを正にとることから、最低水面より高い場所にあるこれらの海域の水深は負値（下線付きの数字）として記されている。このような記法は、今日の海図でも使われている。

浅瀬では、基準面に最低水面と平均水面のどちらにとるかで、見かけの水深が大きく変わる。例えば Fig.3a の隅田川河口の潮間帯の水深は $-0.3\text{m} \sim -0.1\text{m}$ と記されているが、これは最低水面から測った値である。この海図では海域の平均水面の高さを最低水面上 1.1m と規定していることから、平均水面下の水深で表すと $0.8 \sim 1.0\text{m}$ と符号が反転する。同様に Fig.3a 中央下側の滞筋（白く表示された深い溝）の水深は $0.2\text{m} \sim 0.6\text{m}$ と記載されているが、平均水面準拠水深 (H_M) に換算すると $1.3\text{m} \sim 1.7\text{m}$ である。水深の定義によって値が2~6倍変わってしまうことになる。

海図水深と平均水面準拠水深の差 Z_0 は、潮差が大きい場所では特に顕著となる。大潮差で知られる韓国の仁川港では Z_0 が 4.6m 、潮間帯の幅は 10km 以上に及ぶ (Fig.3b)。

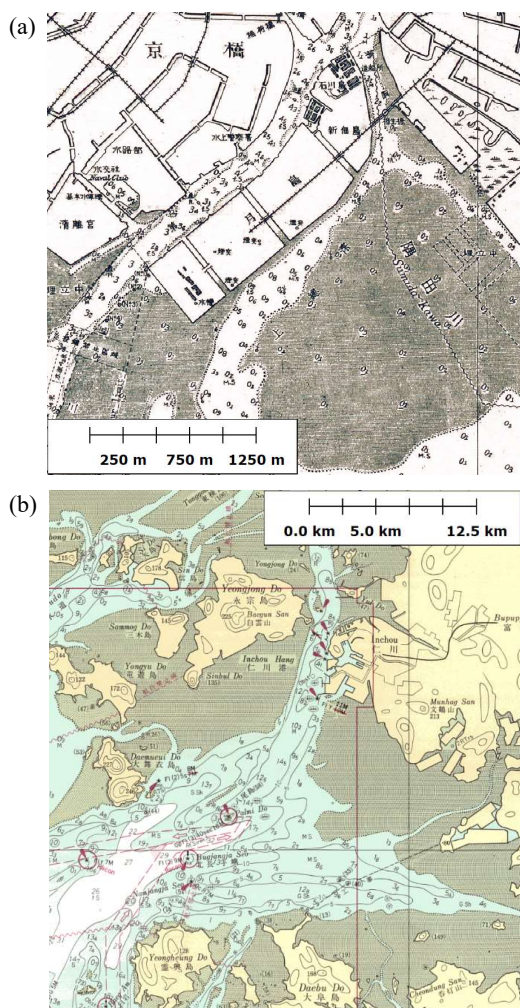


Fig.3. Examples of navigational charts showing intertidal zones with shadings. (a) Tokyo Port (Japanese Chart #60 issued in 1924. Courtesy of Institute of Geography, Tohoku University) and (b) Incheon Port, Korean west coast (Japanese chart #326 issued in 1986).

数値モデルでは、暗黙のうちに水位のゼロ点を平均水面と仮定し、水深 0m の位置を海陸境界と仮定していることが多い。従って浅い沿岸域では潮高補正の有無が計算結果に大きく影響している可能性がある。

これまで示してきた平均水面や最低水面などの算出は一定期間の水位観測が必要であり、実際に水深測量が行われる沖合では正確な値が得られないことが一般的である。そのため補正量 Z_0 の決定には、測量従事者の判断に伴う任意性が介在する。近年では潮汐モデル結果を活用して沖合の Z_0 を推定する試みも進められているが^[14, 15]、現状では測深点近くの験潮所の Z_0 を援用することが多い。この前提に立ち、海図水深を平均水面準拠水深に変換する新たな手法を次節以降で示す。

3. 手法

地形データの作成手順を Fig.4 に示す。最低水面に準拠する一部の水深データを、平均水面準拠の水深に変換する過程が加わるとともに、変換に必要な Z_0 に関するデータベースを用意する点が従来の版とは異なる。以下では今回の変更点の詳細並びに検証に用いた潮汐モデルについて説明する。水深データの取得法など、旧版から変更がない事項については、前回の報告^[9]を参照されたい。

3.1 Z_0 データベースの作成

平均水面と最低水面の差である Z_0 の算定には一定期間の潮位観測が必要であり、験潮所以外ではごく限られた地点でしか値が得られていない。そのため、ある場所での水深を変換するには、何らかの手段でその場所の Z_0 を推定する必要がある。

略最低低潮面を最低水面として用いる場合、 Z_0 はその場所の主要4分潮の振幅和に相当する。このことから当初は数値モデルによって見積もられた主要4分潮の振幅の和を Z_0 として使うことを検討したが、縁辺海スケールの数値モデルでは潮間帯を横切る濡筋を解像できないこともあり、潮間帯近くの験潮所での Z_0 の推計値が、観測から得られた値より小さめに出てしまうことがわかった。さらに現時点の海図に記載されている水深の大部分は数値モデルが普及する前の時代に測深・潮高補正がなされたものであり、モデルで推定した Z_0 との親和性が低い可能性が高い。

これらの背景から、本稿では水深測量の際の潮高補正が最寄りの験潮所での観測値を参照して行われたとの前提に立ち、潮汐表に記載された岸近くの Z_0 を nearest neighbor 法により沖合の海域にも適用することで、水深変換時に参照する Z_0 のデータベースを構築した。データ形式は解像度 1分(1/60 度)の緯度・経度グリッドデータである。

Fig.5a と 5b は、 Z_0 データベースの作成に使用した潮位観測点の位置と Z_0 の値をそれぞれ東シナ海と南シナ海につ

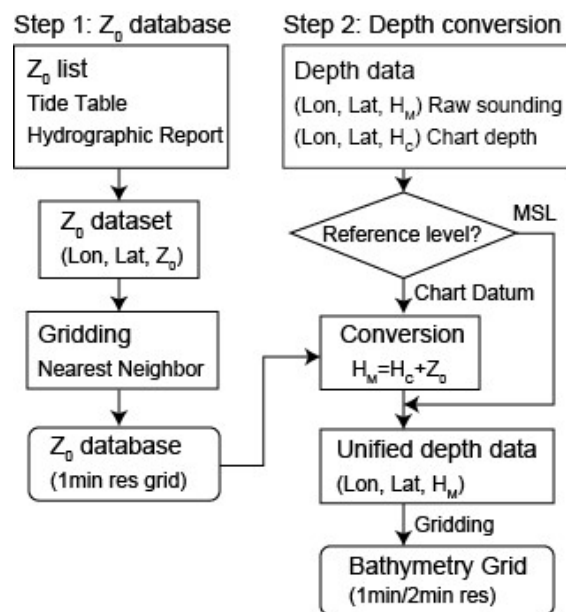


Fig.4. Flow scheme to compile a bathymetry grid from depth data. Depths derived from navigational charts were converted to those refer to the mean sea level by adding an offset Z_0 .

いて示したものである。東シナ海 1577 地点、南シナ海 1138 地点(台湾周辺海域の重複分を含む)における値は日本の海上保安庁の一覧表^[12](赤丸)、韓国潮汐表(2019 年版、黄丸)、中国潮汐表(Vol.1-3: 2019 年版、緑丸)並びに英国潮汐表(Vol.3: 2004 版、Vol.4: 2000 年版、橙丸)から採録したものである。観測点によっては、複数の資料で異なる値が示されていることがあるが、その場合は原則として地元の水路機関による値を使用した。

測点の大部分は岸沿いに位置し、インドネシアやベトナム、北朝鮮など一部地域を除けば概ね数十キロ、ないしはそれ以下の間隔で並んでいる。 Z_0 は最大潮差の約半分に相当し、韓国西岸で約 450cm、西朝鮮湾や中国江蘇省沿岸、台湾海峡西岸、ボルネオ島北西部などで約 350cm と大きな値を示す一方、日本海のように 15cm 前後と値が小さい海域も見られる。日本沿岸では有明海周辺や瀬戸内海の一部と日本海沿岸を除けば、多くは 70~170cm である。

これらの観測点における Z_0 を用いて作成した Z_0 データベースの空間分布を東シナ海と南シナ海についてそれぞれ Fig.5c、5d に示す。海図水深の潮高補正は 200m 以浅で行われるため、得られた Z_0 のうち、実際に補正で使われるのは 200m 等深線(図中の沖側の白線)よりも内陸側の領域に限られる。従って、ルソン島北部や宮崎沿岸など、水深が岸から急に深くなる場所では補正が適用されない。

nearest neighbor 補間法の特性から、得られた格子データは一定領域内で同じ値をとり、隣接する海域間では値が不連続に変化する。日本の海上保安庁では、東京湾や関門海峡、瀬戸内海など特定の海域には、実際に Z_0 をそのような空間的に不連続に変化する量として面的に指定しており、

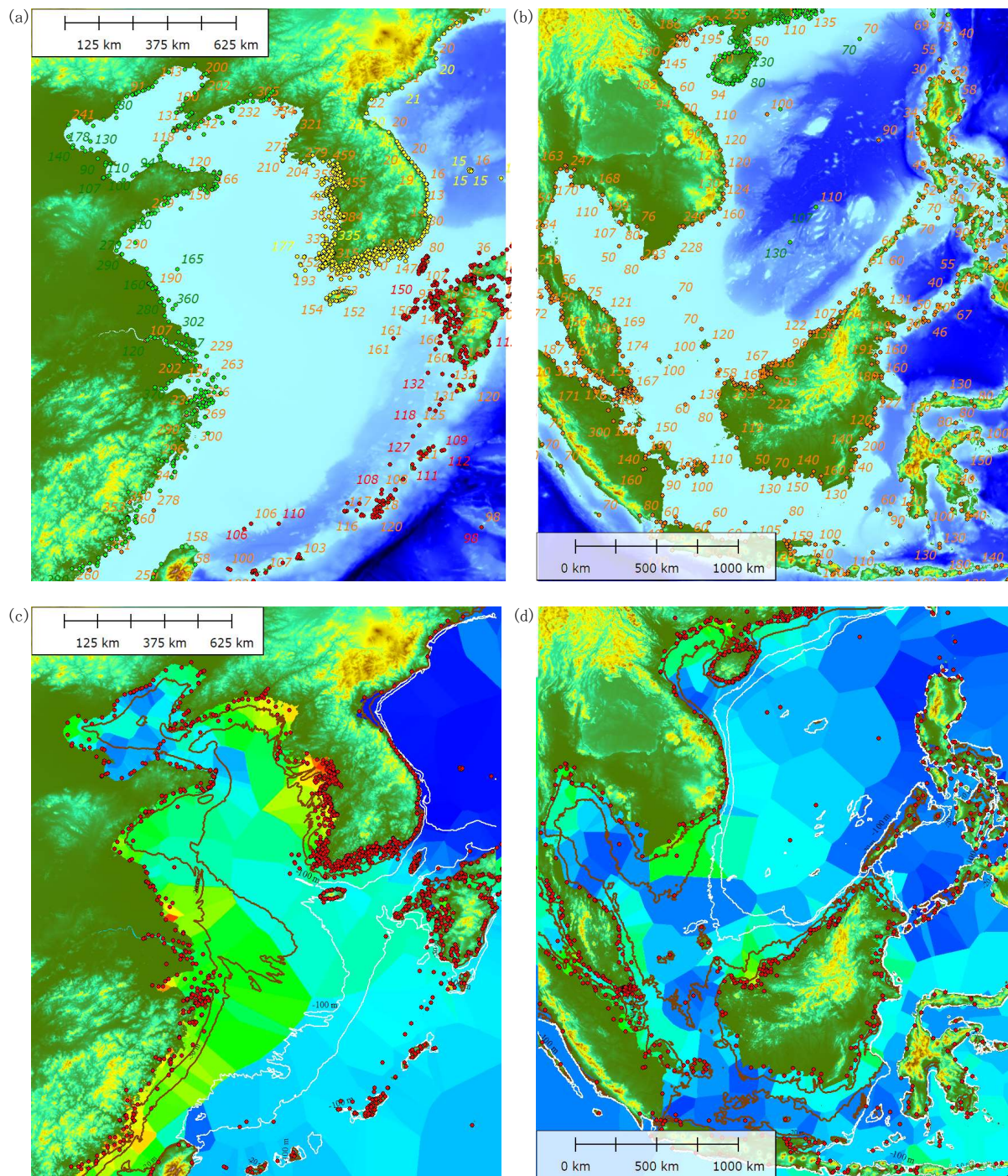


Fig.5. (a-b) Distribution of tidal stations used to compile z_0 -value gridded database: (a) the East China Sea and (b) the South China Sea. Colors of the circles denote the data source: red—Japanese, yellow—Korean, green—Chinese and orange—British tide tables. Numerals indicate the z_0 values in centimeter. (c-d) The distribution of z_0 values made by applying nearest neighbor gridding method to the data shown in (a-b). White contours show 100m and 200m isobaths whereas brown lines represent 20m and 50m depth contours.

今回採用した補間法は測量時の作業過程と親和性が高いと考えられる。

Fig.6a 右側の関門海峡周辺海域では、験潮所が密に存在することもあり、 z_0 値が 80cm 前後の日本海側の海域から、全長 10km 足らずの海峡を挟んで 200cm 以上に急変する様子が正しく再現されている。反面、測点がまばらにしか存

在しない海域では z_0 値の分布に若干のずれが生じることがある。Fig.6b に示したベトナム南端のカマウ半島周辺では測点間隔が広い為、 z_0 値が急変する場所が、本来の半島先端位置より東に 40km ほどずれている。このように、得られた z_0 値の分布は全体としては妥当であると考えられるが、測点数の少ない一部海域では扱いに注意を要する。

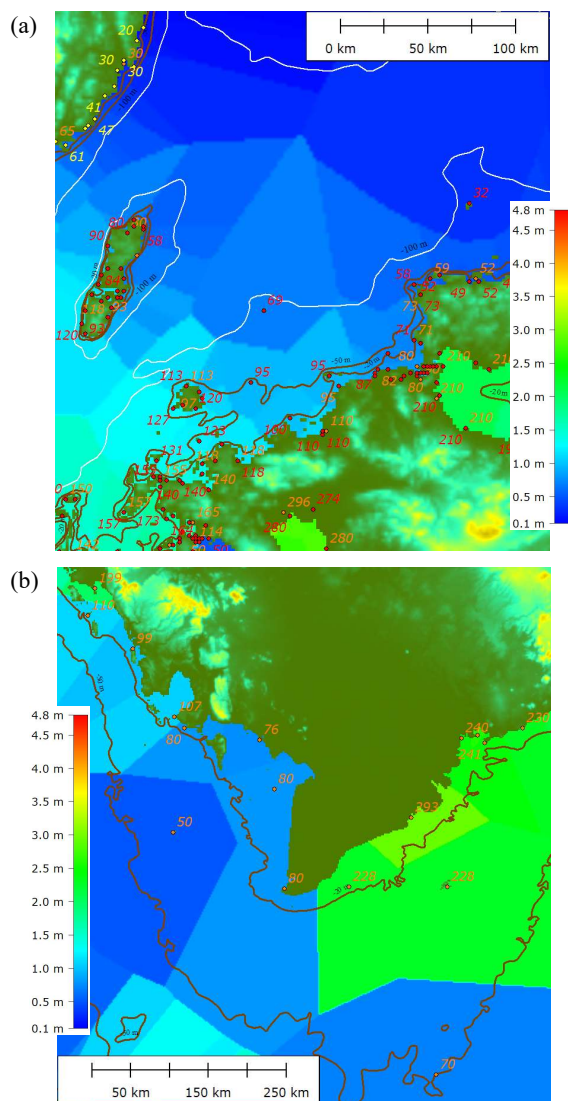


Fig.6. Close-up view of the Z_0 distribution shown in Fig.5. (a) Area north of the Kyushu Island in the NE East China Sea and (b) region around the Camau Peninsula at the southernmost part of Vietnam. Brown lines indicate 20m and 50m depth contours, whereas white lines denote isobath contour of 100m and 200m.

3.2 地形データの作成

今回作成した海底地形データは、東シナ海(北緯 23 度～北緯 43.5 度、東経 116 度～東経 132 度)および南シナ海(南緯 10 度～北緯 27 度、東経 99 度～東経 125 度)を対象とし(Fig.1)、水深は空間解像度が緯度・経度両方向に 1 分(1/60 度)または 2 分(1/30 度)の格子セルの中心で定義されている。前回の報告^[9]からの主な変更点は、(a) 将来日本海を連結したモデル計算を行うことを念頭に、東シナ海データの北限を 1.5 度北へ移動、(b) ベトナム沿岸、台湾沿岸をはじめとした新たな電子海図水深の取り込み、(c) 日本沿岸デジタル等深線データ(日本水路協会、m7000)の参照、

(d) 陸域データとして用いた ALOS-DEM(JAXA)^[16]を v1 から v2.2 へ変更、(e) 本稿で扱う潮高補正導入、の 5 点である。

地形データは、東シナ海で約 1045 万点、南シナ海で 988 万点(台湾周辺海域の重複分を含む)の測深データを Surfer 16(Golden Software 社製)の natural neighbor 法により格子データに変換することで作成しており、スマトラ島以南、東経 103 度以西のインド洋で GEBCO2019 データ^[5]を利用している点を除けば、既存の全球海底地形データの情報は使用していない。深海部の水深は主としてシングルビーム、マルチビームの生測深データによるが、水深 200m 以浅の沿岸域に関しては水深情報の大部分を海図に依存している。他の地形データと比較して、最新の測深データ・海図水深の積極的な導入、測深データのクロスチェックの実施、海陸分布データの同時提供、などの特長を持つ。

今回の改訂版から、水深データのうち、海図水深などの最低水面準拠の水深データについては、前節にて構築した Z_0 データベースを参照することで、平均水面準拠水深への変換を行い、補間に使用する水深は基本的には平均水面を基準とした値に統一している(Fig.4)。但し、マルチビーム測深データについては、技術上の問題から測得水深をそのまま使用している。

水路機関による指針では水深 200m 以浅にて潮高補正を行うことと規定しているが、特に衛星データや数値モデル結果が利用できなかった時代には現実問題として岸から遠く離れた沖合の正確な潮位・潮高を求めることが難しく、潮高補正が行われなかった事例が少なくなかったと考えられる。そのため、水深値変換の対象となる範囲を、岸から水深 20m、50m、100m、200m までの範囲に限定した 4 パターンの地形データを作成し、次節で紹介する潮汐モデルを用いた検証を行っている。

海図は、航海の安全への寄与が第一の目的であること、そしてスペースの関係で掲載可能な水深値の数に制約があることから、海域の代表水深よりも、航海に支障がある浅い場所の水深が優先して掲載されることが多い。そのため電子海図の水深をすべて読み取り、機械的に地形データを作成しても、全体として実際より浅めの水深となることが少なくない。特に水深情報がまばらな海域で小縮尺の海図情報を用いる場合は、注意が必要である。

今回の地形改訂で使用データ数が大幅に増えた台湾海峡東部を例にとると、従来は利用可能な水深が少なく、しかも隣接点より水深が 2～3 割浅い 2 測点(45m と 54m)の存在により、データ補間後の海底地形には幅 6km 以上の浅瀬が現われていた(Fig.7a)。しかし、最新の台湾電子海図の水深情報を追加したところ、45m 水深点から数百メートル離れた場所の水深がいずれも 70m より深く、補間後の格子データには 60m 以浅の箇所が見られなかった(Fig.7b)。旧版小縮尺海図に掲載されていた 45m 水深値は、沈船など障害物上端の深さを示していたか、誤測定であった可能性が高い。

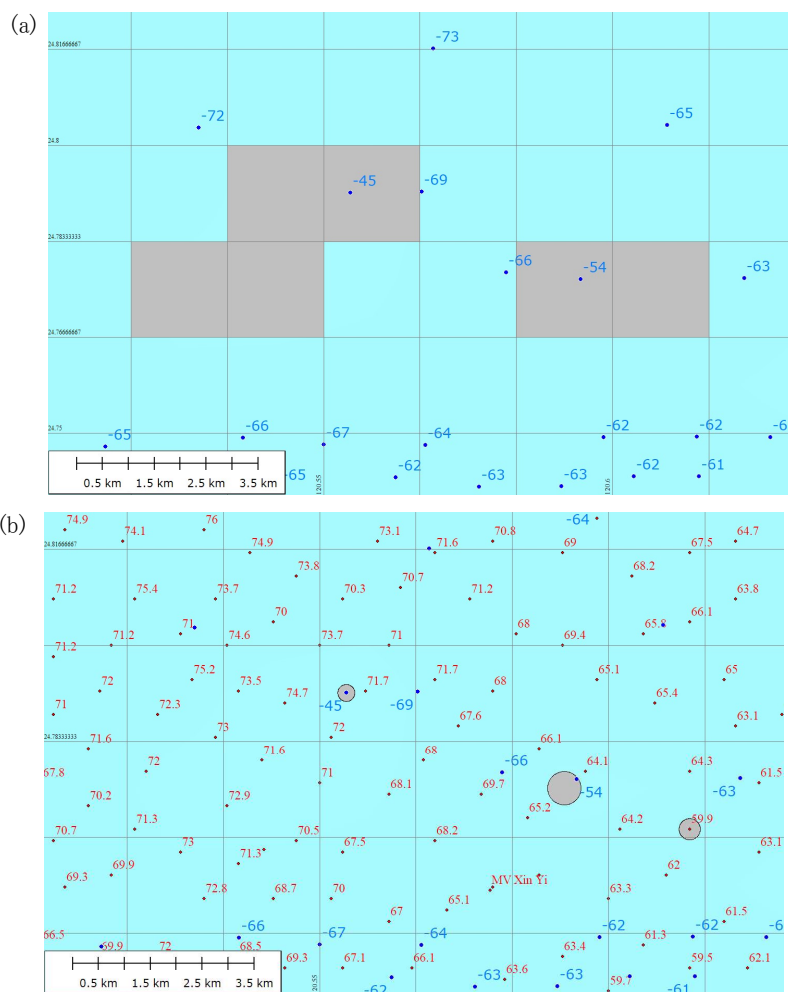


Fig.7. Disappearance of area shallower than 60m (gray shadings) from the bathymetry-grid product as a result of an increase in the number of sounding data used to compile the grid data: (a) Previous version (Tecs v02n) compiled from sparsely distributed sounding data indicated with blue figures and (b) current version (Tecs v03st) which incorporates additional depth information shown in red. Note that the shallow area in the left-hand side of Fig.7a was emerged by the presence of a single shallow depth point indicating 45m depth. Gridlines are identical to the border of the bathymetry grid cells and their spacing are 1 min (ca.1.8km), both in zonal and meridional directions.

陸域については、解像度 1 秒(1/3600 度)の ALOS-DEM 標高データから、2種類のデータを作成した。1つは、測深データと合わせて海域地形の補間に用いる 0.5 分(1/120 度)間隔の xyz データ(経度、緯度、標高)、もう一つは、海域格子データと組み合わせて最終プロダクトを作成するための陸域格子データで、空間解像度は 1 分(1/60 度)または 2 分(1/30 度)である。

前者の xyz データは、海域の地形データ作成に使われることから、海域に隣接する格子点の標高が 5m を超える時は標高 5m に、それより内陸の格子点では標高を最大 10m に制限した。これは、水深数メートルの遠浅の海と標高数百メートルの陸地形が隣接している時などに、補間後の海側の水深が陸の標高値に引きずられて実際より浅くなることを防ぐためである。また、標高の閾値を 5m としたのは、東シナ海、南シナ海の Z_0 値の最大が 4.5m 程度で、最高水面より低くなることのない標高であることによる。

後者の陸域格子データを作る際には、海域格子点を 1、陸域格子点を 0 とする、2値の海陸分布格子データも同時に作成した。ALOS-DEM データは、標高値に加えて海陸の識別情報を含んでおり、地形格子のセル内における ALOS データの陸地比率(格子点数の比率)が 50%を超えた場合を陸と判定した。

海陸分布データは、海洋モデルでの利用を念頭に一部地域では追加の修正を行っている。例えば Fig.8 に示した福建省沿岸の半島狭窄部の格子点(図中 2m 地点)では、セル内の陸域比率が低いため、海域格子点と判定されるが、半島を横切る流れは存在しないことから物理的には不適切である。このような場合には手で海陸分布データの値を修正し、陸域グリッド点に定義を変更した。これらの修正は手作業で行っているが、量が多いことから、海陸格子点の判定基準をさらに細分化し、判別の自動化を一層進めることが今後の課題である。

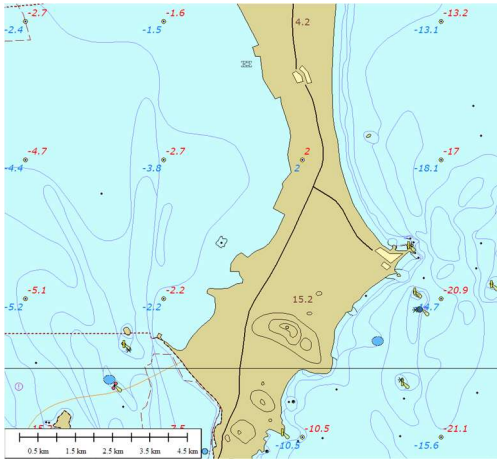


Fig.8. An example of revising land-sea index data, modifying a grid point on a narrow land bridge at the Fujian coast west of the Taiwan Strait. Grid points with circles and red/blue figures denote *sea* grids while those with brown figures indicate *land* grids, which were primarily identified by whether land points of the source DEM (ALOS-DEM v2.2, 1/3600 deg res.) are more than 50% of the total points within a grid cell (1/30 deg res. in this case). The *sea* grid point on the land bridge, indicated as 2 m, was modified manually as *land* by changing the land-sea index value from 1 to 0, because water exchange across this land bridge is obviously not permissible.

ALOS-DEM の海陸識別子は、幅の狭い堤防を挟んで海辺に低地や養殖池などが広がり、標高だけからでは海陸境界の識別が難しい渤海西岸や、江蘇省沿岸、メコンデルタ沿岸などでも、陸域の分布を比較的正確に再現しており、SRTM など他の標高データにはない長所となっている。さらに ALOS-DEM のバージョンが v1 から v2.2 に上がったことに伴い、台湾やインドネシアなどでのデータ欠損がなくなり、今回から陸域で他のデータを援用する必要がなくなった。

反面、v2.2 では旧バージョンに含まれていた湖や河川などの陸水域に関する識別子がなくなったため、正確な位置が判別できなくなった。河川については第一段階として、潮汐場への影響が大きい主要河川のうち、長江および杭州湾に注ぐ钱塘江の2河川について、流路位置を海図から読み取り、海陸分布データに反映させている。

水深・標高データに加えて海陸分布データを用意することは、近年の潮間帯スキームを備える潮汐モデルを動かす上で有用である。従来の海洋モデルでは、標高 0m 以下の地点を海域とみなして計算していたが、モデルの格子間隔が総じて潮間帯のスケールより粗かったこともあり、特に問題とはならなかった。しかし、潮間帯を陽に扱う近年の高解像度潮汐モデルでは、平均水面より高い場所も計算領域に含まれるため、標高 0m の等高線を海陸境界として用いることができない。特に縁辺海規模のモデルの場合、場所によって潮間帯上端の高さが大きく異なることから、標高だけで

海陸の識別を行うことは難しい。しかし、海陸分布データがあれば、モデルの中で海水の浸入を許容する範囲を明確に規定することが可能である。

3.3 潮汐モデル

本稿では、作成した地形データの検証を行うため、東シナ海の解像度2分の地形を用いて2次元潮汐シミュレーションを実施した。使用モデルは Uehara and Saito (2019)^[17] とほぼ同じで、天体の起潮力を加味した点と主要4分潮ではなく、8分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , P_1 , O_1 , K_2)で潮汐を駆動した点が異なっている。モデルでは海面変位 η と鉛直平均流速 $\mathbf{u} = (u, v, 0)$ を得るため、下記の浅水方程式系を導入した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{U} - f \mathbf{k} \times \mathbf{U} \\ = -g D \nabla (\eta - \eta_a) - c_D |\mathbf{u}| \mathbf{u} + A_h \nabla \cdot (D \nabla \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{U} = D \mathbf{u}$ は水平流量、 $D = H + \eta$ は水柱の厚み、 H は平均水面からの深さ、 η は平均水面上の海面変位、 η_a は起潮力、 $f = 2\Omega \sin \theta$ はコリオリ係数、 Ω は自転角速度、 θ は緯度、 \mathbf{k} は鉛直単位ベクトル、 g は鉛直加速度($=9.806 \text{ m/s}^2$)、 ∇ は水平勾配演算子、 c_D は底摩擦係数($=0.0018$)、 A_h は水平渦拡散係数($=100 \text{ m}^2/\text{s}$)である。モデルの範囲は東シナ海海底地形(Tecs)と同じで、東経 116 度～132 度、北緯 23 度～43.5 度である。海面変位と流速は c-grid 上で定義され、開境界において水位を設定することで内部領域の潮汐を駆動した。モデルには、潮間帯を扱う計算スキームも備わっている。計算は 5 秒間隔で 45 日間行い、最後の 29.53 日間(朔望月、月の満ち欠け周期)を解析対象とした。

開境界の水位には、東側境界の一部区間を除き、空間解像度2分の全球潮汐モデル結果 TPX09-atlas^[10] 収録の調和定数から計算した値を適用した。この全球モデルは衛星海面高度計データを参照しているため、外洋域における誤差は数センチにとどまるが、衛星データの信頼性が低い岸近くでは観測値から外れることがある。今回の場合、東経 132 度線に沿った東側境界のうち、本州南方の周防灘から宮崎沖(北緯 30.65 度～33.9166 度)にかけての区間が沿岸の験潮所の値と食い違っていたことから、日本周辺に特化した潮汐モデル nao99Jb^[18] の値で置き換えている。nao99Jb は空間解像度が5分と低いものの、衛星データに加えて日本沿岸の験潮データも同化しており、当該区間の M_2 振幅は TPX09-atlas より 20cm 以上小さかった。

地形および開境界値以外で変更可能なパラメータには、式(3)の底摩擦係数 c_D と水平粘性係数 A_h がある。後者は狭い水路などを除けば、設定値の違いが結果にさほど影響しなかったが、前者に関しては、潮汐振幅や位相の推計結果に一定の影響が認められた。そのため底摩擦係数を 0.0015～0.0025 の間で変えた検証実験を行っている。

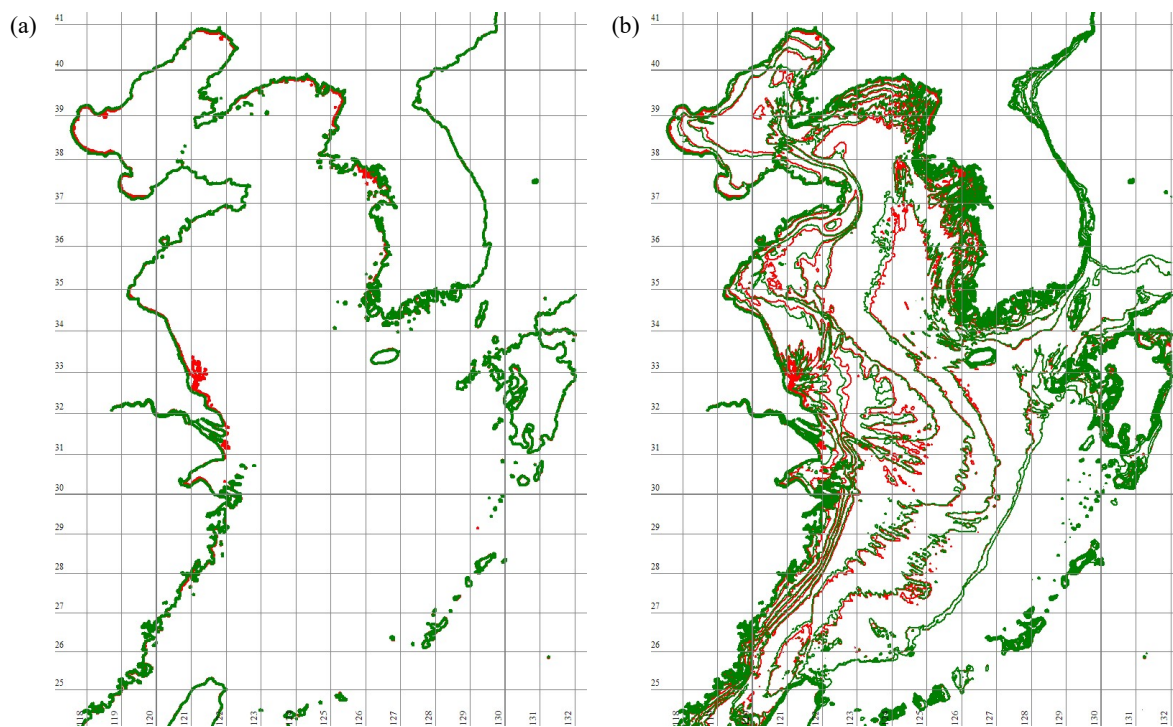


Fig.9. Impact of tidal correction on Tecs bathymetry: (a) Coastlines (defined as zero depth or altitude) and (b) coastlines and contours for 10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 75m, 100m, 150m and 200m depths obtained from bathymetries compiled with (green lines) and without (red lines) considering the tidal correction.

4. 結果

4.1 潮高補正の地形作成結果への影響

Fig.9 は海図水深の潮高補正を考慮して作成した海底地形(緑線)と考慮せずに作成した従来型の海底地形(赤線)との違いを東シナ海に関して海岸線および等深線の位置で示したものである。簡単のため、ここでは水深 0m(平均水面)の等深線を海岸線とみなしている。

潮高補正を考慮しない場合、水深は平均水面と最低水面との差 Z_0 だけ浅く見積もられ、海岸線や等深線は沖方向にずれる。海岸線の位置は、渤海東北岸・南西岸、黄海北岸・東岸・南西岸、長江河口沖、杭州湾南岸などで視認できる程度のずれが生じていた(Fig.9a)。等深線の位置に関しても、主に水深 100m(済州島を通過する等深線)以浅の海域で差が認められた。

補正の有無に伴う水深差 Z_0 の相対的な影響は浅い海域ほど大きい点に留意する必要がある。例えば Z_0 が 2m であるとする、潮高補正の影響は水深 200m の場所では 1%しかないが、水深 5m の場所では 40%に達する。海底地形作成時に使う測深データの目標相対精度(この基準を超えると推定されるデータは、ごく浅い海域や使用可能なデータが極端に少ない海域を除き、原則として棄却している)を 5%と設定していることから、沖合では潮高補正の有無に伴う差よりも、測深誤差の方が大きい可能性が高い。

Fig.9b に示された等深線のずれは、海底斜面の勾配が小さい海域において大きくなる傾向がある。長江河口沖の水深 20m-40m の浅瀬(北緯 33.5 度、東経 123 度周辺)や、黄海中央部の水深 75m 等深線(北緯 36 度、東経 124 度周辺)は、その典型である。逆に、日本沿岸や日本海沿岸に関しては、比較的岸から近い場所で水深が深くなることから、潮差が大きい有明海や瀬戸内海西部以外では、等深線の位置に顕著な違いは見られなかった。

海岸線位置の差が特に大きいのは、長江河口の北に位置する黄海南西岸(江蘇省沿岸、Fig.10a)と黄海東岸(朝鮮半島西岸、Fig.10b)である。潮差が大きく、 Z_0 値(平均水面と最低水面の差)の最大値が 4m を超えることによる。

黄海南西岸(Fig.10a)では、海図の潮高補正を考慮せずに作成した地形の海岸線(赤太線)が、陸上地形図の海岸線や補正を加味した海底地形の海岸線(緑太線)よりも最大 20km 以上沖側にずれているほか、沖には岸に沿う向き(長さ)が 45km に達する浅瀬が見られる。平均水面を標高 0m とする陸上地形図に、このような浅瀬が記載されていないことから、浅瀬は平均水面より低い高度にあると考えられる。

黄海東岸(Fig.10b)においても、潮高補正を考慮しない地形では、数十キロに渡る区間で海岸線が沖側へ 10km 程度移動するとともに、等深線も大きく動いていることがわかる。図に示した韓国仁川沖の京畿湾は、半日周潮の共鳴が起こることで知られており、これらの湾の奥行きや水深の差が潮汐モデル結果に影響する可能性がある。

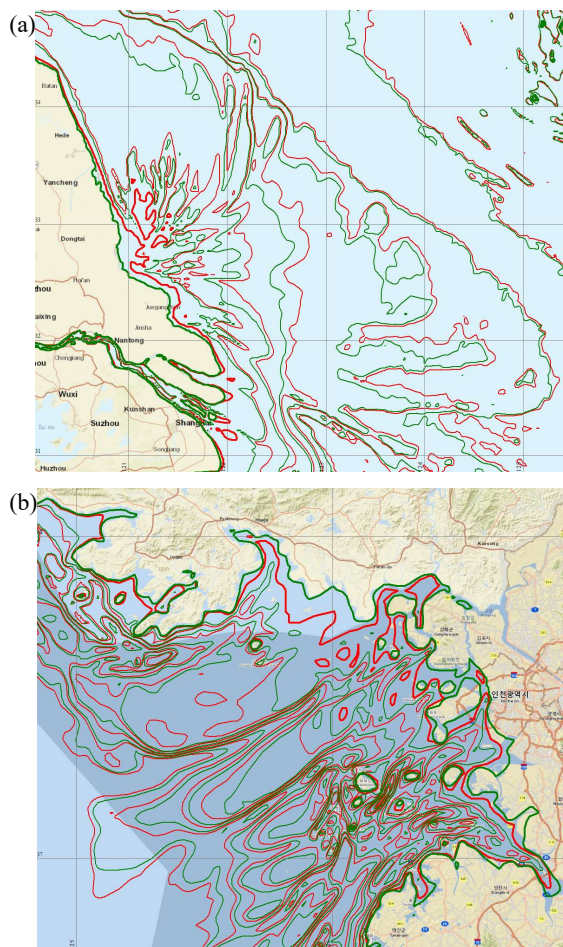


Fig.10. Same as Fig.9b except that close-up views of the region around (a) the SW Yellow Sea and (b) the E Yellow Sea.

以上の結果から、日本沿岸のように海底斜面勾配が急で潮差が小さい場所では、海底地形に対する潮高補正の影響がそれほど大きくない一方、陸棚内部の比較的平坦で潮差が大きい海域では、海岸線のずれや水深の相対的な変化が無視できない可能性があることが明らかになった。

南シナ海においても、比較的水深が浅く、海底の勾配が緩やかな南西部などでは潮高補正を有無による水深や海岸線の位置のずれが認められた (Fig.11a)。ボルネオ島北東部のクチン湾の奥部では、潮差が大きいので、等深線の移動量が Fig.11b に 10m おきに引かれた等深線の間隔の半分近くまで達している。この湾においても、半日周潮の共鳴が顕著であることから、海底地形データの作成に当たっては、潮高補正を考慮することが大切である。

4.1 潮高補正の潮汐モデル結果への影響

海図水深の潮高補正を加味して作成した海底地形データの特性を検証するため、東シナ海を対象とした潮汐モデル計算を行い、地形の妥当性の指標として、英国潮汐表に記載された北緯 24 度以北の 228 測点における M_2 振幅と位

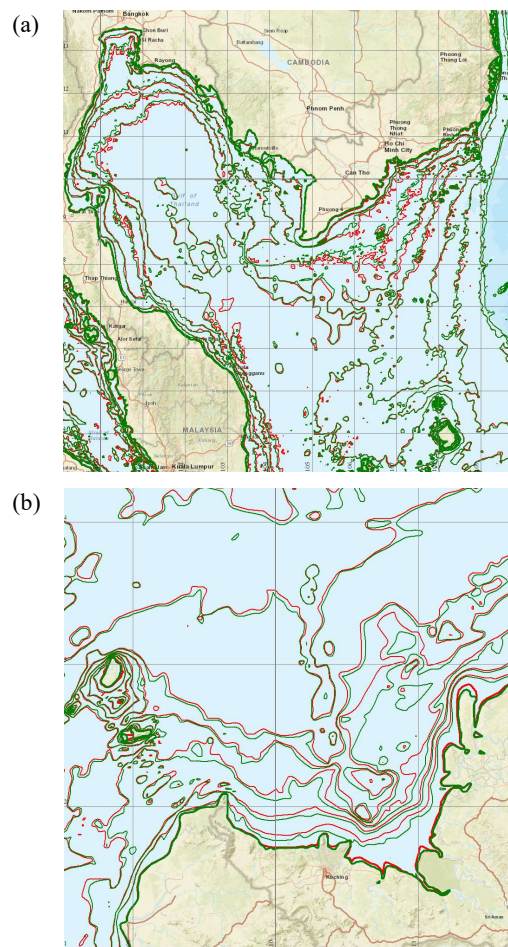


Fig.11. Same as Fig.9b except that close-up views of (a) the SW South China Sea and (b) area around NW Borneo Island.

相を、観測結果と計算結果との間で比較した。

数値実験は、潮高補正の最大適用深度を5段階(0m=補正なし、20m、50m、100m、200m)に変えて行っている。水路機関の規定では、水深測量時には陸棚縁辺に相当する水深 200m まで潮高補正を行うことになっているが、実際の現場で、どの程度の水深まで行っているか定かではないためである。水深 20m は沿岸域の代表水深、50m は黄海など陸棚内部で水深が急変する典型的な深さである。

さらに、今回のモデルの空間解像度(2分)や地形条件に適合した底摩擦係数 c_D の値を探るため、 c_D の値を変えた計算も行った。補正なしと最大補正深度 50m の実験では、0.0015、0.0018、0.0020、0.0025 の4種類、その他の実験では 0.0018 と 0.0020 の2種類について調べている。

Fig.12 は、 M_2 振幅に関する観測値とモデル予測値との間の二乗平均偏差(RMS 偏差)を、すべての実験について示したものである。最大補正深度を一定に保ったまま、底摩擦係数を変えた場合、いずれの事例でも多くの沿岸海洋モデルで用いられる底摩擦値 0.0025 より低い、0.0018 前後で M_2 振幅に関する RMS 偏差が最小となった。

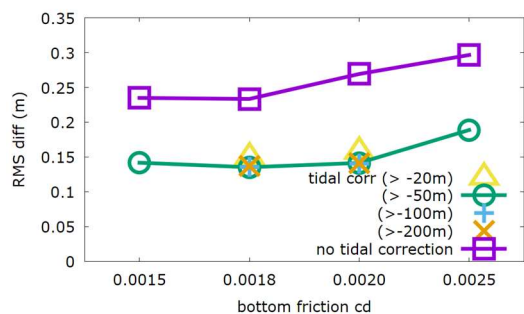


Fig.12. Root-mean-squared (RMS) discrepancies between the observed and numerically predicted M_2 tidal amplitudes at 228 stations in the East China Sea derived from Admiralty Tide Table (Vol. 4, UK Hydrographic Office, 2000). The model runs were made with applying five types of model bathymetries: one without applying tidal correction as for the case of the previous version, and other four compiled by implementing tidal corrections for depths less than 20m, 50m, 100m and 200m. For the no-correction and 50m cases, experiments were made by changing the value of the bottom friction c_D from 0.0015 to 0.0025, whereas two values 0.0018 and 0.0020 were tested in the other cases.

Fig.12 にて同じ底摩擦値を用いた実験を比較した場合、潮高補正を考慮しない従来型の地形データを使った計算では、補正を加味した地形を使った実験より、RMS 偏差が 0.1m 程度大きくなった。最大補正深度を 20m から 50m に増やすと RMS 偏差は 0.02m 程度縮小したが、50m より深くしても偏差の違いは 0.001m 以下で、ほとんど変わらなかった。底摩擦係数を 0.0018 とした場合、補正なしと最大補正深度 50m の両実験における M_2 振幅の RMS 偏差は、それぞれ 23.3cm と 13.5cm であり、潮高補正を考慮することで、約 4 割の改善が見られた。

以上の結果から、少なくとも今回の東シナ海モデルに関しては、より正確な潮汐予測結果を得るためには海図水深の潮高補正を考慮した海底地形を使う必要があること、そして潮高補正の最大適用水深は 50m 程度あれば十分であることが示唆された。

観測値と計算値との違いをより詳しく調べるため、底摩擦が 0.0018 の時の各観測点における M_2 振幅(位相)の差を Fig.13 (Fig.14) に示す。Fig.13a(14a)は潮高補正に関する全実験の結果を、Fig.13b(14b)はそのうち補正なしと最大補正水深 50m の結果のみを抜き出したものである。

図中の測点の順番は観測値の参照元である英国潮汐表に従ったため、一部不規則となっている。測点番号 1-64 は山東半島北東端から渤海を時計回りに巡った後、北朝鮮の西海岸へ達する順路上の測点、77-105 は中国本土を台湾海峡北西部(北緯 24 度)から北上して山東半島南側まで、106-129 は韓国西岸、130-134 は済州島、135-151 は韓国南岸、152-168 は韓国東岸、169-197 は九州周辺、198-221 は南西諸島、222-228 は台湾の測点を示す。

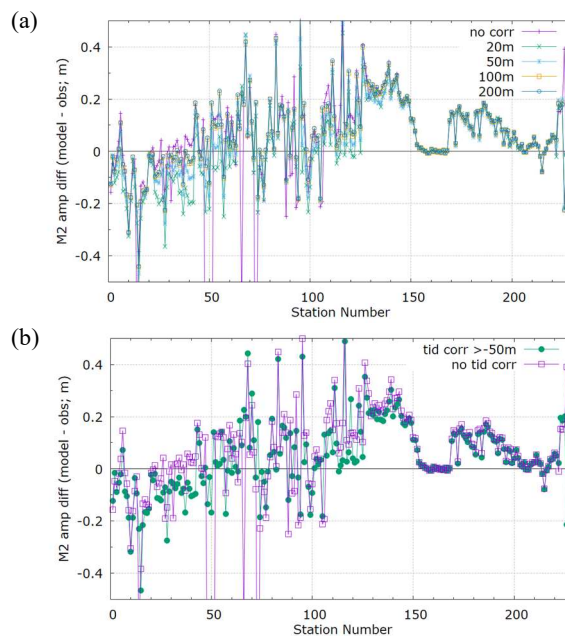


Fig.13. Difference between predicted and observed M_2 amplitude at 228 stations listed in the Admiralty Tide Table. (a) All cases conducted with $c_D=0.0018$, (b) for the case with tidal correction applied to depths shallower than 50m and for the case without applying the tidal correction.

List of Stations (area north of 24°N)

Stn1-50: N Yellow Sea (China) and Bohai Sea in clockwise direction (41-46: central Yellow Sea), 51-64: N Korea (W), 65-76: Fujian (E China Sea), 77-91: Zhejiang to Changjiang Estuary, 92-105: Jiangsu to Shandong (S), 106-129: S Korea (W), 130-134: Jeju Is., 135-151: S Korea (S), 152-168: Korea (E) (159: Ulleung Is.), 169-172: Tsushima Is., 173: Iki Is., 174-178: Goto Is., 179: Meshima Is., 180-185: Kyushu Is. (N), 186-197: Kyushu Is. (W), 198: Senkaku Is., 199-221: Ryukyu Is., 222-226: Taiwan (W), 227-228: Taiwan (E).

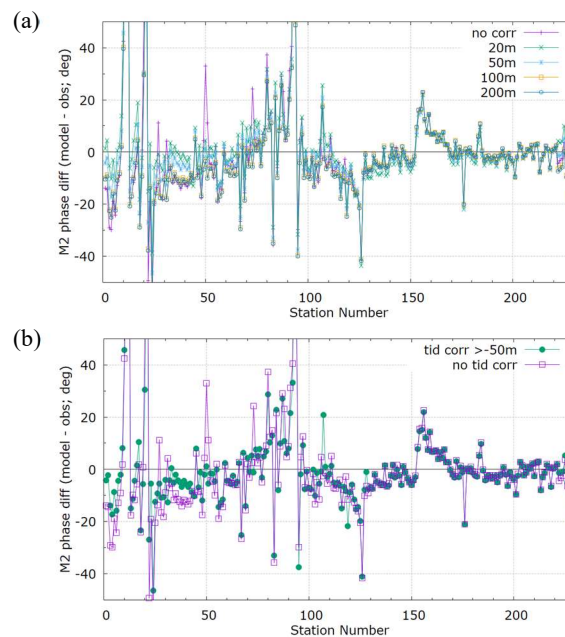


Fig.14. Same as Fig.13 except for M_2 phase.

各地の験潮所における M_2 振幅を比べると、モデル計算値は観測値より、渤海沿岸では系統的に小さめ、韓国南岸と九州西岸で大きめの値を示した(Fig.13)。日本海沿岸では振幅差の絶対値が非常に小さかったが、元の振幅が小さいためであり、位相の差は周辺海域と比べ逆に大きくなっている(Fig.14)。その他の海域では、概ね計算値が観測値を上回っていたが、その度合いは測点ごとに大きく異なっていた。

実験間で比べると、多くの測点では潮高補正の最大適用水深が増加するにつれて、振幅が大きくなる傾向が見られたが、逆の傾向や最大水深との相関が見られない測点も存在した。

その一方、各測点における実験間での M_2 振幅差のばらつきには明瞭な地域差が認められた(Fig.13a)。渤海東北部から朝鮮半島西岸・済州島(測点 21-64, 106-134)にかけての区間では振幅差のばらつきが比較的大きく、その幅が 10cm を超える測点が少なくないのに対し、台湾海峡や韓国南岸の西側、日本海岸、並びに日本沿岸での実験による違いはいずれも数 cm 以内であった。

特に韓国南岸と日本沿岸に関しては、実験間の差よりも実験値と観測値との間の系統的な差(10~20cm 程度)の方がはるかに大きく、観測値との差は主として潮高補正以外の要因(開境界値など)によって生じた可能性が高い。

潮高補正を考慮した場合としなかった場合の結果の差をより詳細に比べるため、最大補正深度を 50m とした時の実験結果と 0m(補正なし)の場合のみの結果を Fig.13b に再掲した。前述の実験間のばらつきの小さい地域では、変化の絶対量自体は小さいものの、潮高補正を考慮することにより、モデル結果が観測値に近づく傾向が見られた。さらに朝鮮半島西岸、特に韓国沿岸では、全体として大きな改善傾向が見られた。中国沿岸に関しては、渤海や振幅差が 20cm を超える一部の測点では差が拡大していたが、全体としては、潮高補正を加味することで振幅差は縮小する傾向が見られた。特に、モデル結果が観測値を 50cm 以上下回る極端な事例がなくなり、そのことが全体の RMS 偏差を大きく引き下げる結果につながっている。

潮高補正の有無がもたらす影響は、位相にも現れている(Fig.14)。モデル結果と観測値との差のばらつきは、振幅同様に地域差が見られ、 M_2 潮の位相差のばらつきが大きい区間は振幅差のばらつきが大きい場所とほぼ一致していた。ただし渤海に関しては、補正最大水深が 100m と 200m の場合の実験結果が、20m、50m の実験結果よりも、補正なし地形を使用した実験結果に近いという、 M_2 振幅の場合とは異なる特徴が見られた(Fig.14a)。渤海の入り口の水深が 70m 前後であることから、湾口の地形条件、もしくは湾内に入射する潮汐波の特性の変化が、湾全体の潮汐に影響していた可能性がある。

最大補正水深 50m の実験結果と補正なしの実験結果を比較すると、前者の方がスパイク状の位相差の発生頻度が

少なく、全体として観測値により近い値を示していた(Fig.14b)。これは験潮所近傍の水深の過小評価が解消され、潮汐波の伝播状況が改善されたことによると考えられる。

5. 考察

5.1 潮高補正と最大適用水深

前節で示したとおり、海図水深の潮高補正を加味した海底地形を使うと、岸近くの潮汐のモデル再現性が大きく改善されることが明らかになった。その改善の効果は、潮差が大きい黄海西南部や朝鮮半島西岸などで大きい反面、日本沿岸などでは明確ではなかった。潮高補正の適用水深を変えた場合、主に黄海など沖合の水深が概ね 100m 以浅の海域(Fig.13、14 の測点番号 1-134、222-226)において振幅・位相の計算値に変動が見られることから、今回検討した補正は、比較的水深が浅い場所の潮汐を調べる際には考慮する必要があると考えられる。

適用最大水深は、モデル結果と観測値との RMS 偏差によれば、50m もしくはそれ以上に設定することが適切である。その一方、潮高補正の影響は大水深では小さいこと、そして実際の水深測定の現場では、岸から 400km も離れた水深 200m まで潮高補正が行われたとは考えにくいことから、今後の海底地形データ作成にあたっては、当面、適用最大水深を 50m とする。ただし、適用水深の閾値を一定にすることの妥当性については、中国沿岸では改善効果が韓国沿岸ほど顕著ではなかった点などを踏まえ、潮高補正以外のモデル誤差要因も考慮しながら、さらに検討する必要がある。

5.2 GEBCO2019 の浅海域水深の検証

全球海底地形データの水深値に潮高補正がどの程度影響しているかを、最新の GEBCO2019 データについて検証した。Fig.15 は、南シナ海の中越国境付近における T_{scs} (潮高補正あり、なし)と GEBCO2019 の等深線を比較したものである。海南島の北に位置する雷州半島の東側の等深線は、GEBCO2019 と補正なし地形で良く合っており、GEBCO2019 でも海図水深に使用している海域では、潮高補正を考慮していないことがわかる。半島の西側、トンキン湾西部では、3種類の等深線はいずれも一致していない。 T_{scs} の等深線が GEBCO2019 よりやや複雑で、水深も全体的に深い。これは、 T_{scs} が最近発行されたベトナム電子海図の水深を使用していることによると考えられる。

Fig.16 は黄海北岸の2地点の T_{ecs} (潮高補正あり、なし)と GEBCO2019 の等深線を示したものである。GEBCO2019 の等深線は T_{ecs} 補正なし地形のものに近いが、海岸線は T_{ecs} 補正ありの結果に近い。このことから、GEBCO2019 では、海図水深を使用しつつ、標高 0m 以上は陸上地形図の

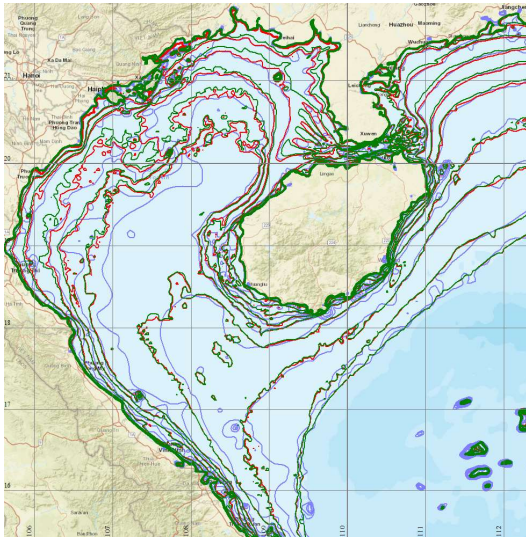


Fig.15. Same as Fig.9b except that a close-up view around the Gulf of Tonkin and the Hainan Island. Purple lines denote depth contours of the GEBCO 2019 topography.

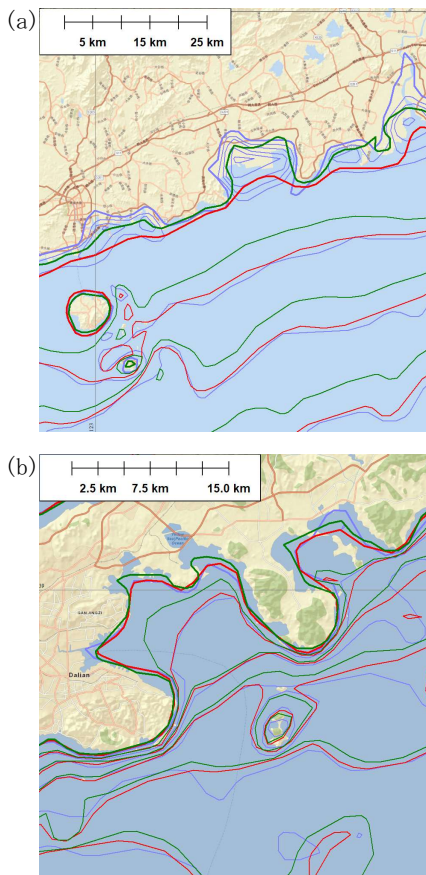


Fig.16. Same as Fig.15 except for (a) the north coast of the Yellow Sea and (b) Dalian Port.

情報を使用していることが示唆された。その結果、Fig.16bの大連港のように岸近くまで水深が深く、最低水面と平均水面の汀線位置が近接している場合は問題ないが、Fig.16a

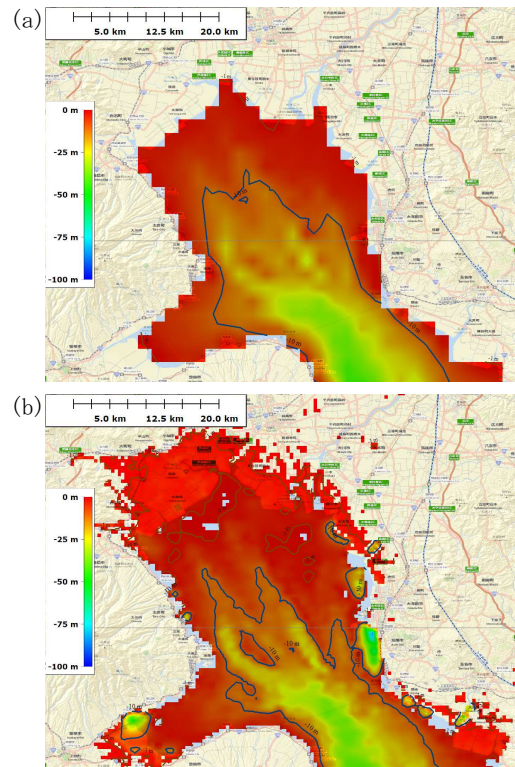


Fig.17. Distribution of area with the depth lower than 0m at around the Ariake Bay: (a) Tecs and (b) GEBCO 2019 bathymetry datasets. Note that the spatial resolution of the former is 1 min while that of the latter is 0.25 min, and depths of some intertidal zones are erroneously deep (indicated with green to blue shadings) in the latter.

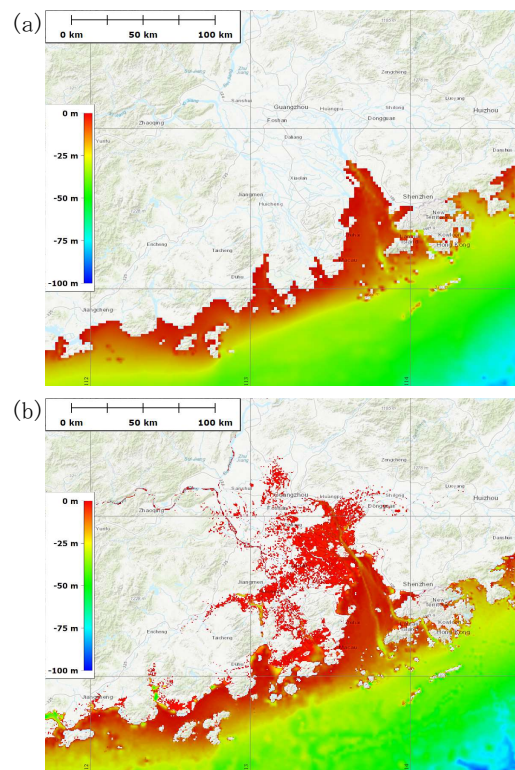


Fig.18. Same as Fig.17 but around the Pearl River Estuary.

の湾内部のように両汀線の位置に差がある場合は、陸側、海側双方のデータが存在しない空白域が生じ、円周状の多数の等深線で表される極めて深い水深が各所で発生してしまう。このような潮間帯での異常値は、有明海など、他の潮差が大きい海域でも散見される(Fig.18b)。

5.3 海陸分布データの有用性

Fig.17 は有明海北方の佐賀平野、Fig.18 は中国南部の珠江デルタの水深 0m 以下の場所を Tecs/Tscs と GEBCO2019 について比較したものである。いずれの地域も低地が広がっており、GEBCO2019 では標高がマイナスの範囲が陸地にも広く及んでいる。これらの陸地の標高は実際に海面下にある可能性が高いが、海洋モデルに使用する場合には、海の範囲を誤って拡大してしまうため、注意が必要である。このような問題の解決には、標高データとは別に、海陸分布に関する情報を用意することで解決する。

中国広東省沖の水深分布を見ると、Tscs は非常に滑らかな分布を示す一方(Fig.18a)、GEBCO2019 では細かな凹凸が見られる(Fig.18b)。前者については、元データとして用いた海図水深に平滑化が施されている可能性が高い反面、現地のシングルビーム水深データを参照する限りでは、後者に関しても、一部地形は実際とは異なっている可能性がある。今後さらなる検証が必要である。

6. まとめ

本稿は、東シナ海・南シナ海の海底地形データ作成に用いた海図水深の潮高補正値を考慮することで、岸近くの水深の精度向上をめざしたものである。潮汐表記載の Z_0 値から海域全体の修正データを簡便に作成する手法を開発したほか、修正の妥当性を調べるため、東シナ海潮汐モデルを使用した。

1) 潮高補正値を加味することで、特に朝鮮半島西岸や黄海南西部など、水深が浅く、潮差が大きい場所では、潮汐モデルの精度が大きく改善することが明らかになった。モデル結果と観測値との RMS 偏差から、今回検討した東シナ海においては、修正適用範囲を岸から水深 50m までの範囲とすることが妥当であると判断されたが、さらなる検証が必要である。

2) GEBCO2019 データについても、海図水深が潮高補正を加味せずに使われていることを確認した。さらに、陸地の 0m 標高と海図水深 0m との間の空白域で、異常値が生じており、扱いに注意が必要である。

3) 水深・標高値のデータと合わせ、海陸分布を定義するデータを用意することで、地形データを海洋モデルにて使用する上での利便性が高まることが明らかになった。

謝辞

Fig.3a 掲載の海図画像は、東北大学大学院理学研究科地理学教室・東北大学附属図書館「外邦図デジタルアーカイブ」から提供を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Uehara, K., Saito, Y., Hori, K., 2002: Paleotidal regime in the Changjiang (Yangtze) Estuary, the East China Sea, and the Yellow Sea at 6 ka and 10 ka estimated from a numerical model, *Mar. Geol.*, Vol. 183, (2002) 179–192. doi:10.1016/S0025-3227(01)00255-9
- 2) Uehara, K., Scourse, J.D., Horsburgh, K.J., Lambeck, K., Purcell, A.P.: Tidal evolution of the northwest European shelf seas from the Last Glacial Maximum to the present, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, (2006) 15pp. doi:10.1029/2006JC003531
- 3) Smith, W.H.F., Sandwell, D.T.: Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings, *Science*, Vol. 277, (1997) 1956–1962. doi:10.1126/science.277.5334.1956
- 4) Amante, C., Eakins, B.W.: ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, (2009) 19pp. <https://ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html> (accessed Jan. 25, 2020), doi:10.7289/V5C8276M
- 5) GEBCO Compilation group: GEBCO 2019 Grid, (2019). https://gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data (accessed Jan. 25, 2020) doi:10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e
- 6) Uehara, K.: Compilation and validation of bathymetric data for the South China Sea with an emphasis on shallow region, *Eng. Sci. Rep.*, Kyushu Univ., Vol. 35, (2014) 7–13. doi:10.15017/1398515
- 7) Uehara, K.: Compilation of bathymetric data for the South China Sea 2: High resolution dataset based on multiple sources, *Eng. Sci. Rep.*, Kyushu Univ., Vol. 37 (2016), 12–18. doi:10.15017/1560668
- 8) Uehara, K.: Compilation of bathymetric data for the East China Sea, *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.*, Kyushu Univ., No. 150, (2016) 6–13. doi:10.15017/1660357
- 9) 上原克人: 縁辺海の海底地形作成手法について, 九州大学応用力学研究所所報, Vol. 153 (2017), 80–95.

- (English title) Uehara, K.: Compilation of bathymetric data covering marginal seas, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., No. 153 (2017), 80-95.
- 10) Egbert, G.D., Erofeeva, S.Y.: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, J. Atmos. Ocean. Technol., Vol. 19, (2002) 183-204.
<https://tpxo.net/global/tpxo9-atlas> (accessed Jan. 25, 2020), doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2
- 11) 布施孝志, 大矢紀之: 陸上・海底地形の高さの基準に関する歴史的経緯, 土木学会論文集D2(土木史), Vol. 70, No. 1, (2014) 1-8.
 (English title) Fuse, T., Oya, N.: History of datum levels of elevation and water depth in Japan, J. J.S.C.E. Ser. D2 (Hist. Stud. Civil Eng.), Vol. 70, No. 1, (2014) 1-8.
 doi:10.2208/jscejhsce.70.1
- 12) 海上保安庁海洋情報部: 平均水面、最高水面及び最低水面一覧
 (English title) Hydrogr. Oceanogr. Dept., Japan Coast Guard: List of mean, highest and lowest sea levels,
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/datum/index.html> (accessed Jan. 25, 2020).
- 13) 佐藤敏: 明治の水路部の験潮, 海洋情報部研究報告, No. 46, (2010) 47-61.
 (English title) Sato, S.: Activities on Tides at Hydrographic Department in Meiji Era, Rep. Hydrogr. Oceanogr. Res., Japan Coast Guard, No. 46, (2010) 47-61.
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/KENKYU/report/rhr46/rhr46-sa06.pdf> (accessed Jan. 25, 2020)
- 14) 堀内大嗣, 西下厚志: 海洋潮汐モデルに基づく潮位補正方法の検討, 海洋情報部研究報告, No. 46, (2010) 8-86.
 (English title) Horiuchi, D., Nishishita, A.: Examination of tidal correlation method based on ocean tide model, Rep. Hydrogr. Oceanogr. Res., Japan Coast Guard, No. 46, (2010) 78-86.
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/KENKYU/report/rhr46/rhr46-tr03.pdf> (accessed Jan. 25, 2020).
- 15) 小田巻実, 中村啓美: 新しい統一水深データベースの考え方と「ダイナミック水深」電子海図表示の試み, 海洋情報部技法, Vol. 21, (2003) 15-28.
 (English title) Odamaki, M., Nakamura, H., Proposal on Integrated Database of Sounding Depth, Height and Mean Sea Level on Reference Ellipsoid, and A Trial of Time Variable Depth Display on ECDIS, Tech. Bull., Hydrogr. Oceanogr., Japan Coast Guard, Vol. 21, (2003) 15-28.
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/KENKYU/report/tbh21/tbh21-03.pdf> (accessed Jan. 25, 2020).
- 16) Tadano, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H.: Precise global DEM generation by ALOS PRISM, ISPRS Annals of the Photogrammetry Spatial Information Sciences, Vol. II-4, (2014) 71-76.
https://eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d30/index_j.htm (accessed Jan. 25, 2020).
- 17) Uehara, K., Saito, Y.: Tidal amplitude decreases in response to estuarine shrinkage: Tokyo Bay during the Holocene, Estuarine, Coastal, and Shelf Science, Vol. 225, 106225 (2019) 10pp.
 doi:10.1016/j.ecss.2019.05.007.
- 18) Matsumoto, K., Takanezawa, K., Ooe, T.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, J. Oceanogr., Vol. 56, (2000) 567-581.
<https://miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index.html> (accessed Jan. 25, 2020),
 doi:10.1023/A:1011157212596