

縁辺海の海底地形データ作成手法について

上原, 克人
九州大学応用力学研究所 : 助教

<https://doi.org/10.15017/1924416>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 153, pp.80-95, 2017-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

縁辺海の海底地形データ作成手法について

上原 克人*¹

(2017 年 7 月 31 日受理)

Compilation of bathymetric data covering marginal seas

Katsuto UEHARA

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

Abstract

This report describes procedures taken to compile two sets of bathymetric grid data covering the South China Sea and the East China Sea, respectively, which refer to about 6.5 million sounding data. The products differ from existing DEMs in three points: (1) incorporated latest sounding data including multibeam profiles and electronic navigational charts the areal coverages of which have extended markedly in the last decade, (2) did not use a smoothing filter explicitly so that the data precision varied among regions while reproduced detailed bathymetric features such as elongated ridges and abrupt depth changes along continental margins at areas where sufficient amount of data were available, and (3) conducted an extensive quality control to eliminate artificial features caused by erroneous source data. Characteristics of the products were verified at several sites by comparing with existing products.

Key words: South China Sea, East China Sea, water depth, bottom topography

1. はじめに

海底地形は海洋の物理現象を規定する主要パラメタであり、その精度は潮汐をはじめとする諸量の推算結果に大きく影響する。例えば、東シナ海と北西ヨーロッパ陸棚を対象に地形以外の設定条件がほぼ同じ潮汐シミュレーションを実施したところ^[1-2]、モデル結果と観測値との間の二乗平均偏差が、前者では M2 振幅で 17cm、位相で 15 度であったのに対し、後者ではそれぞれ 5.6cm と 6.5 度と半分以下であった。地形データの精度がモデル精度を左右していた可能性が高い。

海底地形データには、約 20 年前から船舶による音響測深結果に加え、人工衛星搭載の海面高度計の情報が反映され^[3]、外洋における水深データの精度は飛躍的に向上しているが、沿岸域については大きな改善が見られていない。海面高度計データは衛星の進行方向の解像度が高い反面、衛星軌道間隔が 75km~300km と沿岸の地形スケールより広く、データの特性上海岸線付近や浅海域での精度が高くないことによる。

筆者は、自らの数値モデルの精度向上を目的として地形データの整備が遅れている東シナ海、南シナ海について測

深データから格子海底地形データを作成するとともに、etopo、gebco など既存の地形データとの比較・検証を行ってきた^[4-6]。背景としては、約 10 年前からインドネシア、韓国、中国など沿岸各国・地域による新版海図の刊行が相次ぐとともにマルチビーム測深が本格化するなど、測深データが質量ともに近年急増しているにもかかわらず、既存の海底地形データにはそれらの新情報が十分に反映されていない、既存の地形データの多くは全球を対象としており個々の海域のデータ検証が不十分なため、特に浅海域の水深の信頼度が明確ではない、などの点が挙げられる。

格子地形データの作成にあたっては、補間に使用する測深データの取舍選択が欠かせない。海図に示される水深は航海の安全の観点から選ばれ、海域の代表値とは限らないことから、電子海図の水深を機械的に全て用いて格子データを生成しても、多くの場合、実際よりも浅めの水深が得られてしまう。加えて断層や孤立海山、細長い巨大砂州など通常の補間スキームが前提とする滑らかな曲面に当てはまらない地形については、特別な取り扱いが必要である。

本稿は、従前の報告^[4-6]以降に得られた測深データを反映した新版の東シナ海(Tecs v2)・南シナ海(Tscs v3)海底地形データを作成するとともに、これまでの経験を踏まえ、縁辺海にて 10 キロ程度の地形を解像する海底地形データを作成する手順をまとめたものである。

*1 九州大学応用力学研究所

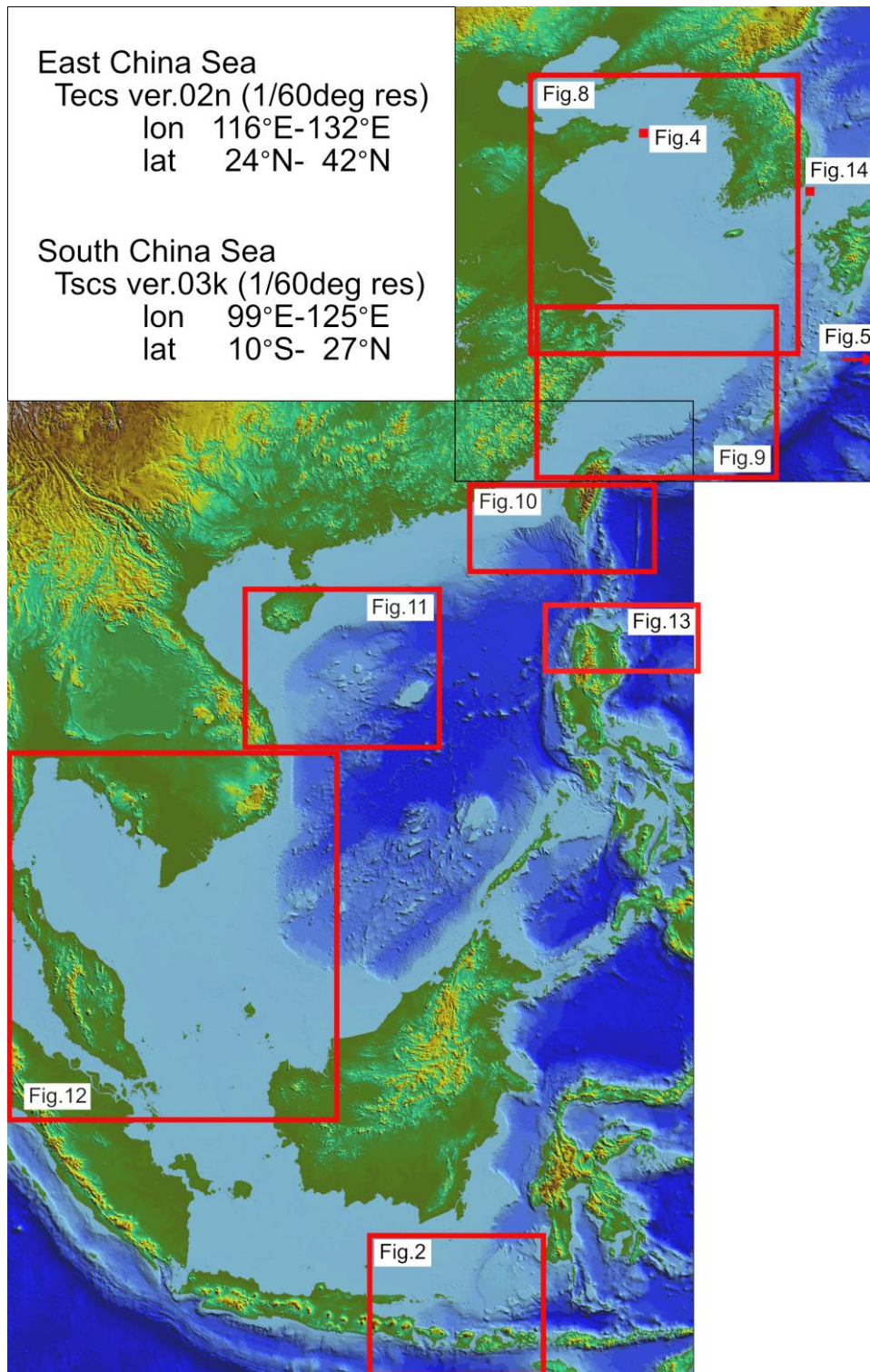


Fig.1. Map of two bathymetric datasets, Tecs and Tscs, created in this study.

ここでは縁辺海スケールの潮汐現象を再現するのに適した地形データの生成を目指し、平滑化フィルターを用いていない。そのため海域ごとの精度にばらつきが見られるが、測深データが密な海域では、陸棚縁部や海底谷など水深が急変する場所の形状が同種の海底地形データより詳

細に表現されている。さらに対象海域が限られているという利点を生かし、最新の測深データを可能な限り導入するとともに、多様なデータを相互に比較し、異常値の検出を行うことで精度の向上が図られている。本稿後半では、このようなデータの特性を、既存の地形データとの比較により示す。

2. 使用データ

作成する2つの海底地形の水深は、緯度・経度座標に沿う矩形格子の中心点にて定義され、範囲は東シナ海が北緯24度～42度、東経116度～132度、南シナ海が南緯10度～北緯27度、東経99度～125度である(図1、北緯24度～27度、東経116度～125度は重複)。本節ではデータ作成に用いた資料の概要を説明する。併せて、資料の発行機関別一覧を表1に示す。

2.1 紙海図

紙媒体の海図には測量年や測地系、水深の信頼度など、後述の電子海図には掲載されていない情報が含まれ、発行国が管轄する海域外の水深も記されていることが多い。そのため水深データ取得にあたっては紙海図(可能な限り25万分の1より大縮尺の図幅)を積極的に利用した。海図の発行主体には、沿岸国・地域のほか、世界各地の海図を刊行している英国、米国、ロシアなどの水路機関が含まれる。通常は海域を管轄する国の海図が水深を最も詳細に記しているが、黄海中央部のように第三国の海図が水深情報を最も多く載せている事例もある。

2.2 電子海図

東シナ海、南シナ海では約10年前から電子海図の発行数が急増し、現在でも毎月のように新たな図幅が刊行されている。海底地形データ作成には、各国水路機関並びにNavionics社が刊行する主にCoastal(縮尺1:30万)、Approach(1:8万)、Harbour(1:2.5万)区分の電子海図を使用した。南シナ海ではEast Asia Hydrographic Commissionが刊行するscsencも参考にした。台湾沿岸のように外国人による入手が困難な海域、カンボジアやブルネイのように自国では電子海図を扱っていない海域は、英国水路部発行の電子海図を使用した。

2.3 シングルビーム測深

複数の機関が観測航海単位で公表しているシングルビーム音響測深データを利用した。原則として1980年代後半以降のデータを採用し、他データとの整合性が低い船舶の情報は使用しなかった。WGS84以外の座標系を使用していると推測されるデータもあったが、水平測位の精度との兼ね合いから座標変換は行っていない。

2.4 マルチビーム測深

船舶の航路直下のみならず、進行方向と直角に一定幅の水深が得られるマルチビーム測深結果についても各機関が配布するデータを使用した。測量時期は最も古いもので1995年、多くは2007年～2013年である。異常値が多い一部航海のデータは除外した。

2.5 gebco2014 地形データ

海洋部分の地形は原則として上記測深データのみを用いて作成したが、データ数が少ないインド洋の一部海域(東経99度～103度)だけはgebco2014の水深を援用した。

2.6 陸地標高データ

今回のバージョンより、陸上部分の標高及び海陸分布の元データをJAXAが配布するALOS全球数値地表モデル(解像度1/60分)に変更した。2006年から2011年にかけて運用されたALOS衛星の観測結果に基づくデータセットで、gebco2014などが使用しているSRTMなどの類似データと比べ、メコンデルタや蘇北平原など沿岸低地の再現性が良く、精度が非常に高い海陸分布データを同梱しているためである。ただし、本データは衛星観測に拠るため、市街地などでは地上高ではなく、構造物上面の高さが示されていることがある点に留意する必要がある。

欠測などのため衛星データが存在しない箇所はgebco2014データ(解像度0.5分)で補っている。大部分は狭い領域であるが、インドネシアのロンボク島のように数十キロ四方に渡って陸地標高、海陸分布マスクの双方が欠落していることもある(図2)。

2.7 その他

海上保安庁が公開しているJ-EGG500(格子データ)、日本水路協会が配布する海底地形データ(等深線データ)などの加工データを比較検証の際に参照した。

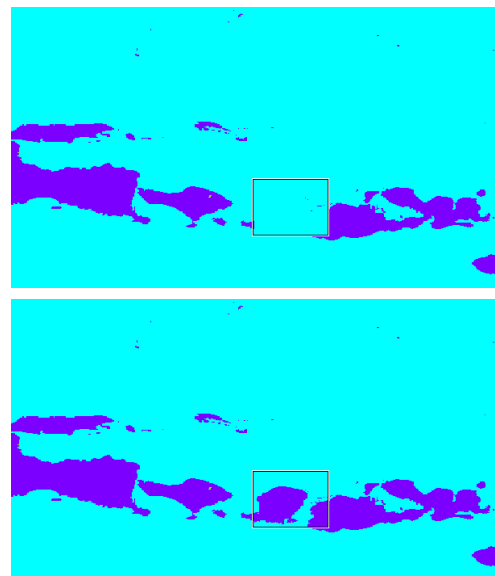


Fig.2. Land-mask data derived from ALOS World 3D 30m DEM: (upper) the original data lack land info around Lombok Island, Indonesia, (lower) data corrected with an aid of gebco2014 dataset.

Table 1. List of data source and data type used in this study.

	C/R	Authority/Organization	P	E	S	M	L	R
1	au	Australian Hydrographic Service (AHS)	X	X				
2	cn	海道測量局 (CNHO)	X	X				
3	de	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)				X		
4	fr	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (ifremer)			X			
5	hk	Hong Kong Hydrographic Office		X				
6	id	Pusat Hidro-Oceanografi		X				
7	jp	海洋研究開発機構 (JAMSTEC)			X	X		
8	jp	宇宙航空研究開発機構 (JAXA)					X	
9	jp	海上保安庁海洋情報部 (JCG-JODC)	X	X	X			X
10	jp	日本水路協会 (JHA-MIRC)						X
11	kr	국립해양조사원 (KHOA)	X	X				
12	kr	한국지질자원연구원 (KIGAM)						X
13	kr	성균관대학교 (SKKU)						X
14	my	Pusat Hidrografi Nasional	X	X				
15	ph	Hydrography Department (NAMRIA)	X	X				
16	ru	Upravlenie navigatsii i okeanografii (UNiO)	X	X				
17	sg	Maritime and Port Authority of Singapore (MPA Singapore)		X				
18	th	Hydrographic Department (HDRTN)	X	X				
19	uk	United Kingdom Hydrographic Office (UKHO)	X	X				
20	us	National Centers for Environmental Information (NCEI)			X	X		
21	us	National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)	X					
22	vn	Hải quân nhân dân Việt Nam	X	X				
23	-	East Asia Hydrographic Commission (EAHC-scsenc)						X
24	-	General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (*)					X	X
25	-	Navionics ENC		X				

Legends: C/R=Country/Region, P=Paper Chart, E=Electronic Chart (ENC)

S=Singlebeam survey, M=Multibeam survey, L=Land data, R=Reference use

(*) gebco2014 bathymetric grid was employed at the Indian Ocean west of 103°E and south of Sumatra Island.

3. 手法

海底地形データ作成の流れを図3に示す。各種水深情報を xyz (緯度・経度・水深)形式の数値データに変換し、一次データとして統合した後、重複値の除去、不規則データの補間による格子データへの変換、データのチェック、陸域標高情報の統合を経て、3種類の解像度(緯度・経度それぞれ 1 分、2分、5分間隔)の格子データを作成した。元とな

る水深データの取舍選択は、水深情報が十分揃っている海域では、水平方向には 10 キロ程度の地形を解像出来ること、鉛直方向には水深誤差が5%又は5mの大きい方に収まることを目安として行った。

なお、一定範囲内のデータの平均を算出する際には、異常値の影響を避けるため、原則としてデータを昇順(水深であれば深い順)に並べた場合の上位・下位1/4を棄却した残り(第2、第3四分位数)から求めている。

3.1 水深データの作成

3.1.1 紙海図・電子海図

紙海図は、スキャナにて読み取った後、緯度・経度情報を加えて geotiff 形式の画像に変換した。一般的な GIS(地理情報システム)ソフトは geotiff 画像に対応しており、地理座標を元に複数の画像を透過的に重ねて表示させることが可能である。作成した海図画像を GIS ソフト上で表示させ、水深点の座標をマウスで読み取り、水深値を手入力することで xyz データを作成した。

電子海図に含まれる水深情報は著作権保護の制約から機械的に読み取ることが出来ない。そのため GIS ソフトに表示させた後は、紙媒体と同様、手入力で水深を読み取った。水深点の位置は、紙海図の場合には文字の大きさ分の任意性があるのに対し、電子海図では点要素として一意に定義されている。

デジタイザを用いて紙海図から直接読み取る従来の手法に比べ、今回の方法は複数の海図を比較しながらの作業が可能で、座標系の変換が容易、図面を任意に拡大・縮小して表示出来るなど、さまざまな利点がある。複数の海図を同時参照することで、深さの単位(メートルと尋)の取り違いによると思われる海図上の水深の誤りや、座標系の変換ミスと見られる位置のずれ、公的海図からの二次生成物である Navionics 電子海図でのデータ入力ミスに起因すると見られる水深エラーなど、海図を個別に参照しては発見が難しい異常値の検出が可能であった。

海図の水平座標は、海図に記載された情報や他の海図との比較から、極力 WGS84 座標系に統一した。近年刊行される海図のほとんどは WGS84 座標系を採用しているため変換の必要は無いが、ベトナムの VN2000 座標系のように独自の体系を採用している例もある。海図記載の水深には GPS など信頼度の高い測位手段が無い時代に得られたものも含まれる。特に沖合の測点の位置情報はかなりの誤差を含んでいる可能性がある。

一部の電子海図は古い紙海図のデジタル化により作成されており、注意が必要である。例えば、電子海図 GB301965 (ベトナム北部、英国水路部発行 2013 年版)の元となった英国海図 1965 号は 1949 年までの旧海図に基づく白黒の海図である。古色蒼然とした紙海図からは変化の激しい紅河河口周辺の海岸線位置や水深値が昔の測量によることが一目瞭然であるが、電子海図単独では判断が難しい。座標系についても元の紙海図に準拠し、WGS84 によらない事例が散見され、確認が欠かせない。使用する座標系の違いに伴う位置のずれは通常数百メートルで、一般的なデータ解像度が 5 分(10 キロ弱)程度だった時代には問題とならなかったが、格子間隔が 1 分(緯度方向で約 1.8 キロ)以下にまで狭まっている近年では、無視出来なくなっている。

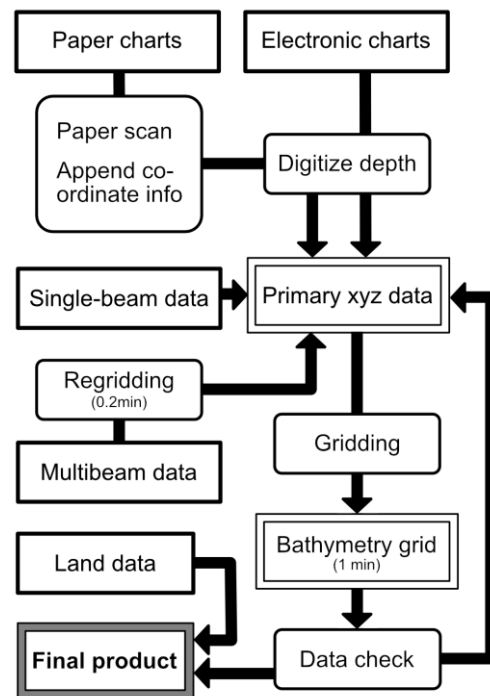


Fig. 3. Workflow of the data compilation process.

海図は航海での使用を第一に想定しており、掲載された水深は海域の代表値とは限らず、浅瀬の位置など航海の安全上の観点からも選ばれている。そのため電子海図掲載の全水深を用いて格子データを作成すると、多くの場合、実際より浅めの水深が得られてしまう。そのため水深読み取りにあたって取捨選択を行った。特に 1:7.5 万より小縮尺の海図では周囲より極端に浅い水深値は採用しなかった(図4)。

メコンデルタ沿岸のように水深変化が激しく、しかも水深点が多く存在する場所では、地形の整合性を保つために極力単一資料による水深値を採用した。メコンデルタの場合、1960 年代の米軍による測量結果を基本として、河口周辺(米露製海図は 1920 年代のフランスによる観測値を掲載)はベトナム海図、沖合部分(米国製の現行海図は 1950 年代に刊行)はロシア海図の値を使用し、異なる時期に得られたデータの混在による見かけの地形が生じないように注意した。

海図記載の等深線は原則として使用していない。等深線は発行機関や縮尺の異なる海図間で位置が異なることが多い、引き方の根拠が不明瞭で信頼度が明確ではない、新たな測深データを追加した場合、そのデータを使用していない既存の等深線との間で齟齬が生じてしまうなどの理由による。但し、極端に細長い海底地形や水深が急変する場所、測深点が非常に少ない海域などでは例外的に等深線情報も採用した。電子海図の場合、等深線の精度に比べて線を構成する点要素の間隔が細かいため、測点を間引いて入力している。

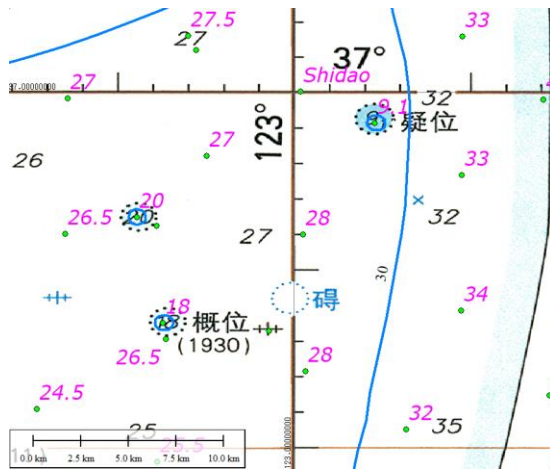


Fig.4. Overlay of a paper chart (Chinese F10504, scale 1:550k; black labels and lines) and an electronic chart (Chinese C1312100, scale 250k; depth points indicated by green dots with purple labels and depth contours by blue lines). We did not adopt non-representative shallow depths marked with blue circles, such as 9.1 m found in the upper-right portion, 20 m and 18 m in the left-hand side. While these depths are labeled in the paper chart as “suspicious” or “approximate (reported in 1930)”, it is not easy to detect such conditions solely from electronic charts.

3.1.2 シングルビーム測深

各機関が配布するシングルビームデータは MGD77 形式にて提供されているため、Fortran プログラムを用いて xyz 形式に変換した。元データに異常値フラグの情報が含まれる場合にはその値に従い棄却した。周囲の測深データと水深が有意に異なる場合は原則として使用していないが、他データとの比較から、水深が本来の半分 (又は倍) であると推定される場合は、補正を施した後に採用した。

3.1.3 マルチビーム測深

マルチビームデータは観測航海、もしくは観測日単位のファイルで構成されるが、データの形式には2種類存在し、データ提供機関によって異なる。

バイナリ形式の生データが提供される場合(BSH, NCEI)は、処理ソフト MB-System^[7]を用いて xyz データに変換した。デフォルト設定は狭い海域の地形解析を想定しており、縁辺海規模の用途には空間解像度が必要以上に高く、扱いにくいいため、観測航海単位で集約したデータを緯度・経度 0.2 分 (1/300 度) 間隔で出力するようオプションを指定した。さらに、その結果を提供機関ごとに緯度・経度 0.5 分間隔の格子にまとめ、格子内の平均値を最終データとした。

処理済みのデータがアスキー形式で提供される場合 (JAMSTEC)には、単一の提供機関のデータを緯度・経度 0.2 分間隔の格子ごとに集約した上で、平均処理を施して水深データを作成した。

マルチビーム測深は、高解像度の二次元情報が得られる反面、異常値の混入も多く、扱いには注意が必要である。特に、信号の弱い帯状測定域の端で実際より極端に深い水深値が現れることが多い。また多くの船舶では、深海用の機器を使用しているため、水深 100m 以浅ではデータの信頼度が低い場合が少なくなかった。センサ取付位置と船の喫水の間のずれを補正していない事例も散見され、特に浅海域では影響が大きいため、他データとの比較が不可欠である。本解析では初期段階のチェックとして、画像表示ソフト Gnuplot を用いたスパイクノイズの検出・除去を行っている (図5)。この図に示した事例では、水深が 2000m に達しない海域であるにもかかわらず、10,000m を超える水深が頻出している。水深データ作成時の平均操作 (上位・下位 1/4 のデータを棄却) は、初期チェックだけでは取り切れない異常値の影響を低減する意味合いもある。

3.2 一次データの作成、重複値の除去

前節で作成した xyz 形式の水深データ (元データ) は、事後の修正・追加が行いやすいようデータ種別や発行時期など様々な単位で作成されている。これらのファイルを Fortran プログラムにより統合して一次水深データを作成した。元データは鉛直方向の符号 (正の方向) が統一されておらず、しかも地形データ作成に必要な海域以外の場所の水深を含んでいる。そのため統合プログラムでは、鉛直座標の向きを揃えらるとともに、各ファイルの使用データ範囲を指定しておく、範囲外のデータは統合ファイルに含まれないようにした。統合後のファイルは緯度・経度でソートし、uniq コマンドを用いて重複を除いた後、Fortran プログラムにより、距離が近接した同一水深のデータを除去した。

陸上の標高データは、海洋部分の格子データ作成に使う xyz データと最終データの陸上部分として用いる格子データの2種類を作成した。前者は水深値を補間する際の陸の影響を抑えるため、標高の最大値を 5m とした上で一次データに含めた。

以上のようにして集約された一次データは、東シナ海は単一のファイル、南シナ海は補間に使用するソフトの制約から緯度帯で分けられた3つのファイル (南緯 10 度～北緯 15 度、北緯 15 度～20 度、北緯 20 度～27 度) で構成される。

3.3 格子データの作成

前項で作成した一次データは、データ処理ソフト Surfer 12 の Natural Neighbor 補間スキームにより、格子データに変換した。作業は C# 互換のプログラム言語で記述した Surfer スクリプトにより行い、複数の解像度 (格子間隔 1 分、2 分、5 分、12 分) のファイルを同時に作成している。格子データのフォーマットは Surfer grd 形式である。画像処理ソフト GMT や主要 GIS ソフトに対応しているほか、仕様が公開されているので Fortran プログラムでも操作可能である。

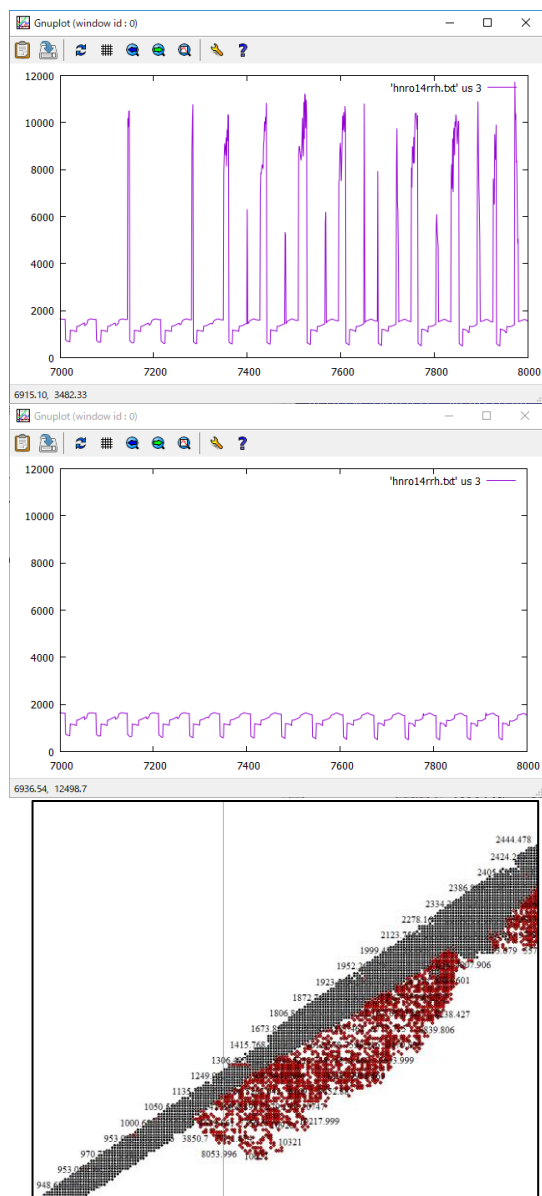


Fig.5. Removal of erroneous values from multibeam data. The original data (upper panel) displayed in a sequential manner contain depths as deep as 10,000 m whereas the corrected data (middle) indicate actual depths shallower than 2,000 m. Lower panel indicates the geographic distribution of adopted (black dots) and rejected (red dots) depth points.

3.4 データチェック

作成した格子データを GIS ソフトに読み込ませると、特別な操作無しで図1のような段彩図が表示される。この段彩図と補間前の一次データ(水深が数値で表示される)を重ねて表示させることで、問題箇所がないか調べた。画面上の不自然な起伏からデータ入力時のミスや元データの異常値を検出するほか、検索機能を用いて、不適切な水深値(陸棚上で 1000 メートルを超える深みや、沖合での水深 0 メートルの地点、後者の多くは入力ミスに起因)がないかを調べ、

問題がある場合には元データの修正を行った。多くの場合は、水深の修正や異常値の除去によって対応したが、水深点が少なく、補間の過程で細長い谷や尾根が途切れてしまっている場合などには、水深点を追加した。必要に応じ、このようなデータ修正と格子データ生成の操作を繰り返した。この時点では標高 5m を超える陸上地形は含まれていない。

3.5 最終データの作成

データチェック完了後、Fortran プログラムを用いて最終データを作成した。この過程で陸上標高データの組み入れや南シナ海の3分割されていたファイルの統合を行っている。新たな測深データを入手するなど、元データの追加・修正が生じた場合には、一次データの作成をはじめとする一連の作業をやり直す。

併せて、数値モデルで使用する海陸分布データを最終データと同じ解像度で作成した。縁辺海スケールでは、高潮時の海水到達範囲・高さが場所により大きく異なる上、東アジア、東南アジアでは標高が平均海面以下の低地と海とが格子データ上では解像出来ない狭い浜堤で仕切られていることが多く、標高(例えば 0m や 2m)だけを基準に海域と陸域を分けることが難しいためである。海陸分布の情報は、特に潮間帯の干出に対応した潮汐モデルでは重要となる。ここでは、ALOS 全球数値地表モデルに付属する海陸分布データを基本に、今回作成した地形データに適合するよう微修正を行った。

4. 結果

4.1 一次測深データの分布

今回の海底地形データ作成に使用した一次データは、東シナ海が約 270 万点、南シナ海が約 420 万点(台湾周辺の重複部分、約 40 万点を考慮すると計 650 万点)に及ぶ。

用いた元データの数を緯度・経度5分のメッシュごとに示したのが図6(東シナ海)と図7(南シナ海)である。左側が旧バージョン、右側が今回作成したバージョンの集計結果を表す。白色は5分メッシュ内に一次(水深)データが1つも存在しない格子、赤色は25点以上(多い場所では2万点以上)の水深データが含まれる格子を示している。

東シナ海(図6)では、前バージョンと比べ、新たな電子海図の刊行や複数の紙海図の新規導入により、黄海中央部、東シナ海北西部、日本海西部のデータ空白域が大きく減少している。さらに南西諸島周辺ではマルチビーム測深データ数の増加、九州西方海域では等深線データの利用などにより、データ数の多い赤色の領域が増えている。反面、九州北方沖や東シナ海陸棚縁部では、他の水深データとの整合性が良くない一部のシングルビームデータの使用を取りやめた影響でデータ数が減少している。

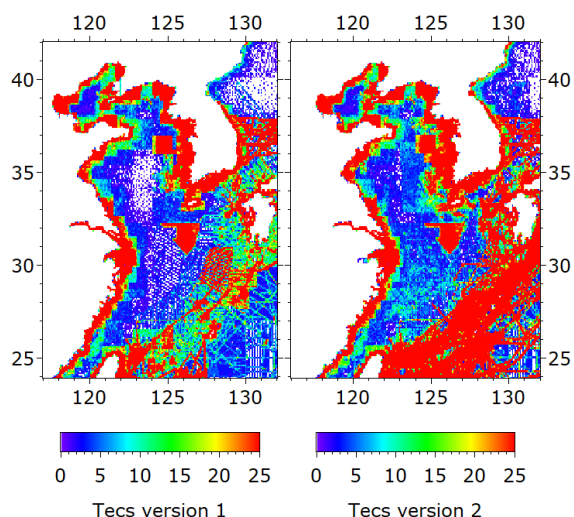


Fig.6. Distribution of number of sounding data within 5 min (ca.10 km) bins used to compile bathymetric data of the East China Sea: (left) Tecs ver.1 (previous version) and (right) Tecs ver.2 (current version). White color denotes areas where no data exist whereas red shadings represent bins in which the number of data exceeds 25 (up to about 22,000).

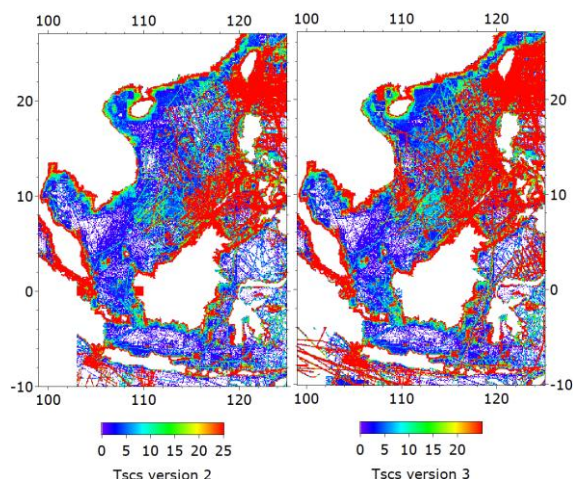


Fig.7. Same as Fig.6 except for the case of the South China Sea: (left) Tscs ver.2 (previous version) and (right) Tscs ver.3 (current version).

東シナ海陸棚中央部では、データが増えて(水色の領域が拡大して)いるものの、その多くが海図等深線を水深データとして採用したことに伴うものである。この陸棚では、既存の海図に記載されている水深と、全体の整合性を優先して今回採用しなかった ifemer や JAMSTEC によるシングルビーム測深結果との間に1割前後の系統的な差が見られた。これらのシングルビームデータは、比較対象の多い深海域では他データと良い整合性を示すことから、今回作成した地形データでは、水深80m~150mの陸棚域の水深が実際より浅めである可能性がある。

渤海北東部の遼東湾中央部は、データ数こそ多いものの、中国海図の記載によれば、多くが1950年代の測量によるも

のである。黄河由来の土砂供給や潮流などの影響が強い海域であり、海図上の水深は現在とは異なっている可能性がある。黄海北東部の北朝鮮沿岸域の水深データも、新旧海図の比較や紙海図の記載から判断する限り、多くが旧日本海軍による古い測量に由来していると見られる。

データ数が相対的に少ない場所としては、各国・地域が管轄する海域の中間線周辺海域が挙げられる。例えば、対馬海峡では、中間線よりやや南寄りにデータ数が少ない青色の分布が帯状に存在する(図6)。南シナ海においてもトンキン湾など各地で同様の傾向が見られる。

南シナ海(図7)のデータ数の増加は、新たに入手したマルチビーム(ルソン島西方、セレベス海南部、トンキン湾南部)、シングルビーム(ベトナム南東沖)測深データ、並びに紙海図(トンキン湾北部)の情報によるところが大きい。図では明確ではないが、新たな電子海図の刊行に伴い、南シナ海中央部から北東部にかけての海域やジャワ海東部などでも、空白域が大きく減少している。南シナ海では電子海図が整備されている範囲が、前バージョン作成後のわずか2年足らずで急速に拡大し、ベトナム沿岸、タイ湾中央部、ジャワ海中央部などを除くほぼ全域を Coastal (縮尺 1:30 万)区分の電子海図が網羅するようになった。

その反面、南シナ海では浅海域を中心にデータ空白域がまだ広く残っている。主要空白域であるタイ湾中部から南部にかけての湾軸周辺やスラウェシ島中部のトミニ湾(赤道付近)は、天然ガスの鉱区が設定されている関係で、詳細な測量が行われているにもかかわらずデータが公開されていない。また沿岸各国ではこの10年間、新たな測量を進める機運が急速に高まっているが、沖合に関しては空白を埋めるに至っていない。

4.2 既存海底地形データとの比較

今回作成した海底地形データの特性を明らかにするため、本節では既存の地形データと比較を行う。東シナ海については Tecs ver.2、gebco 2014 並びに韓国成均館大学が配布する skku データセットの三者を、南シナ海については Tscs ver.3 と gebco 2014 を比べる。過去の報告^[4-6]では etopo5、etopo2、etopo1(v2)、gebco00、gebco08 などを含めた東シナ海、南シナ海の地形データの相互比較を行ったが、今回取り上げる skku(東シナ海のみ、解像度 1 分)と gebco2014(全球データ、解像度 0.5 分)が、それらの中でも測深データとの対応が比較的良好であったためである。

4.2.1 黄海・東シナ海北部

図8は黄海並びに東シナ海北部の海底地形について、3種類のデータを比較したものである。大陸棚に相当する水深 200m 以浅の海域については、別途水深に応じた彩色を行うとともに、20m 間隔の等深線を追加した。白色の等深線は水深 100m を示す。

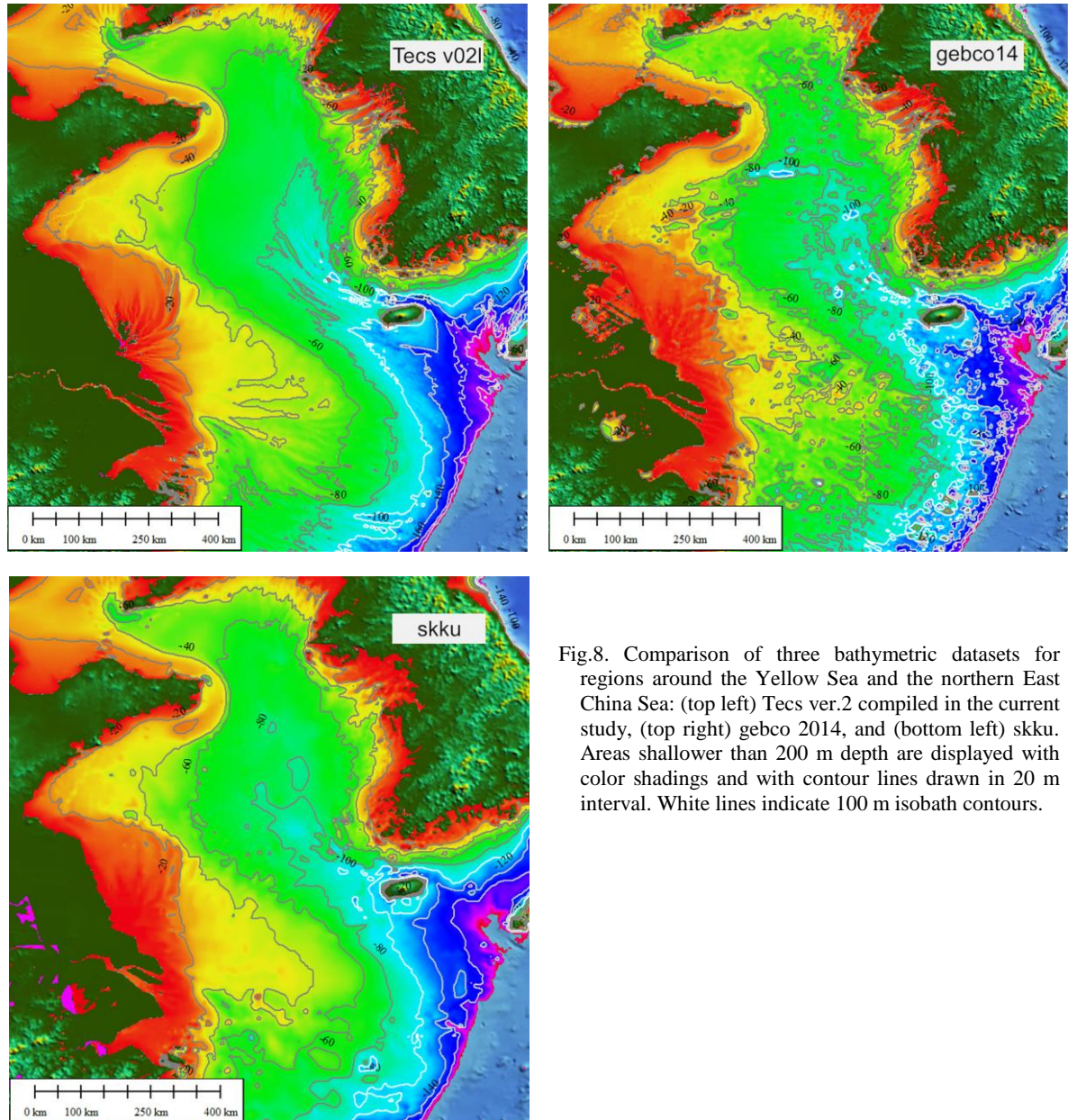


Fig.8. Comparison of three bathymetric datasets for regions around the Yellow Sea and the northern East China Sea: (top left) Tecs ver.2 compiled in the current study, (top right) gebco 2014, and (bottom left) skku. Areas shallower than 200 m depth are displayed with color shadings and with contour lines drawn in 20 m interval. White lines indicate 100 m isobath contours.

等値線のおおまかな分布はデータ間で大差ないが、skkuは済州島南方の100 m等深線や黄海中央部の80 m等深線の分布に見られるように、他と比べ水深がやや浅めである。これは作成時期が2000年前後で測深データが急増する前の古い海図に基づいているためであると考えられる。一方gebco2014には細かい空間スケールの水深変化が随所に認められた。

測深データと比較する限り、長江河口沖の浅瀬(揚子堆)は、gebco2014よりskkuやTecsの方がより正確な地形を示しているとみられる。黄海北部の地形に関してはgebco2014の方が実際の地形に近い可能性があるものの、検証データが少ないため断定は出来ない。黄海北部の水深分布がTecsとskkuで似通っているのは、この海域の測深データが少なく、ほぼ同じデータに基づいているためである。

Tecsの等深線は、全体としてはskkuと似た滑らかな形状であるが、60mや80mなど主要等深線の位置はgebco2014と似通っており、両者の中間的な性質を示している。加えてデータ数の多い海域では、既存地形データでは明瞭でない細かい地形構造が見られる。例えば、近年体系的な測量が実施され、詳細な電子海図が公開された韓国西海岸沿岸では潮流の向きと並行に伸びる砂堆地形が詳細に再現されている。

gebco2014は全体的な精度は良いものの、潮汐モデルで使用するには二つの問題が見られた。一つはノイズに起因するとみられる極端な凹凸地形の存在である。例えば、山東半島南方の水深100m超の深みや、その南西にある浅瀬は海図上には見られず、実在していない可能性が大きい。図8下部にて谷を横切るように東経125度線に沿って伸び

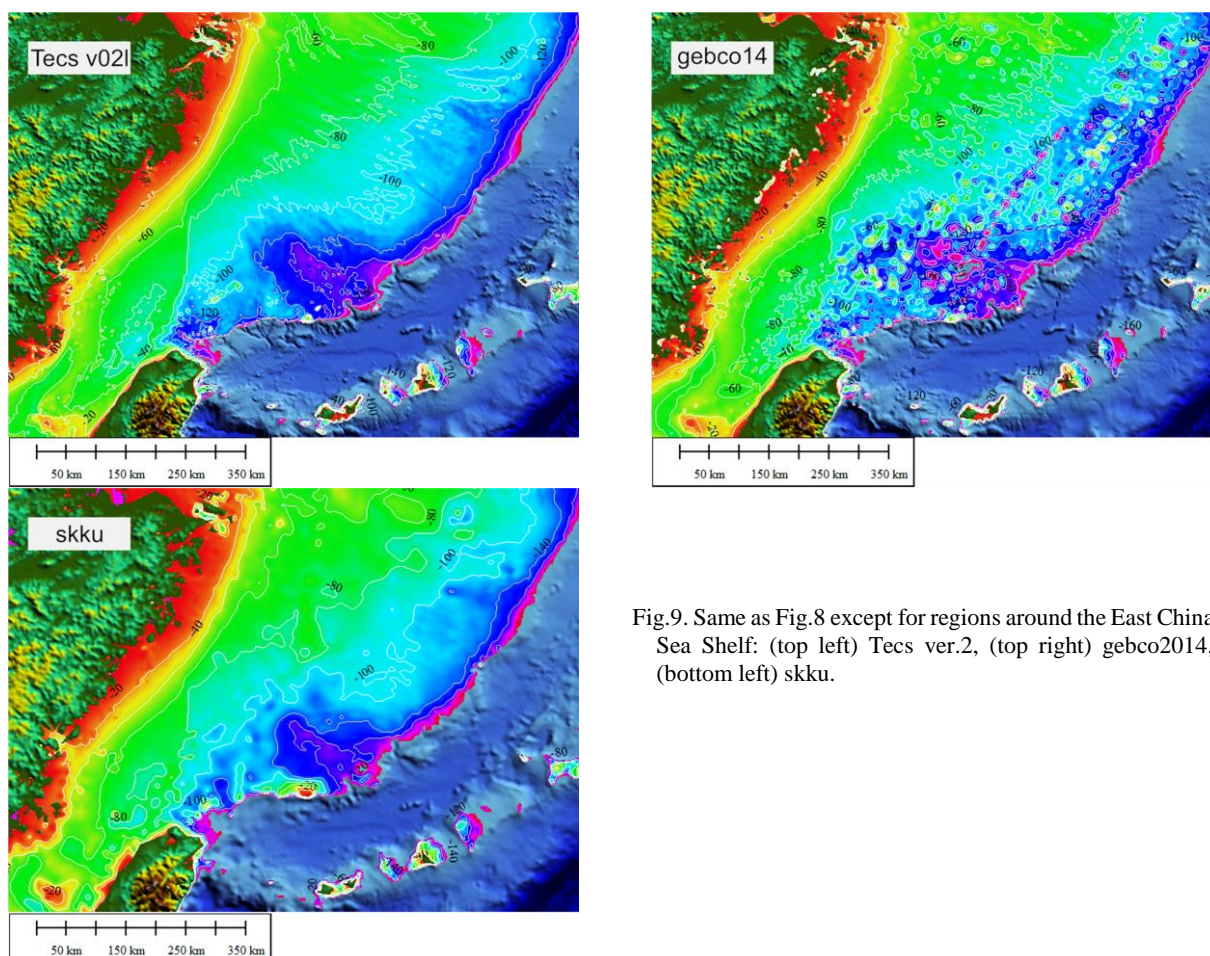


Fig.9. Same as Fig.8 except for regions around the East China Sea Shelf: (top left) Tecs ver.2, (top right) gebco2014, (bottom left) skku.

る尾根地形や山東半島北岸の(黄色の帯状領域で示された)深さも、補間操作時に生じた人為的なものである可能性が高い。海洋大循環モデルで使用する海底地形は事前に平滑処理を行うことが多く、このような細かいノイズの影響は小さいと見られるが、地形の平滑化を行わない潮汐モデルの場合は支障が大きい。もう一つの問題は、江蘇省沿岸低地のように海岸線の位置が正確に表現されていない地域がある点である。異常値が少なく、海岸線の再現性が高いという観点からは、gebco2014 よりは、Tecs や skku の方が潮汐モデルでの使用に適していると考えられる。

比較対象とした3データの中で Tecs だけが異なる点としては、湖などの陸水域の再現性が悪いこと点が挙げられる。Tecs が元とした陸域データは、陸水域の標高を水底ではなく、水面標高の形で提供している。そのため、図8においても Tecs だけが太湖(杭州湾北西の円形の湖)などの陸水地形を再現していない。もっとも、既存の地形データにおいても、例えば太湖の水深は skku では全域で 0m、gebco2014 では西南部において 50m を超えており、特に後者については実際的水深(数メートル程度)を反映しているとはいえない。水深値は参考程度にとどめておくほうが良いと考えられる。一方、陸水域であっても長江のように海図による水深が得られている一部地域については Tecs でも地形が再現

されている。特に長江河口の長興島・横沙島沖の中州など新しい地形が含んでいる点は、他の2つのデータにない Tecs の特徴である。

4.2.2 東シナ海陸棚域

浙江省沖から台湾海峡北部にかけての東シナ海大陸棚の地形を比較したのが図9である。skku に関しては、Tecs に比べ台湾海峡北部や西部の谷地形の向きが異なるほか、台湾海峡中部や尖閣諸島の浅瀬の範囲が広い。この海域は skku が主眼とする韓国周辺から離れており、使用データ数が相対的に少なかったため生じた可能性が高い。一方、gebco2014 と Tecs とを比較すると、平均的な水深分布は変わらないが gebco2014 では 100m 以深の陸棚域を覆うように細かい凹凸地形が広がっていた。当該海域では、砂堆が岸沖方向に伸びていることが知られており、gebco2014 の微細地形は見かけのものである。さらに gebco2014 には直線状の地形が散見されるが、その位置は Tecs 作成にあたり、周囲と異なる水深値を示すため採用しなかった(4.1 節で示したデータとは別の)シングルビームデータの測線と重なる。水深 200m 以浅の陸棚上で振幅が 100m に達する偽地形が広がっていることから、この海域について gebco2014 を使用する場合は平滑化処理が不可欠である。

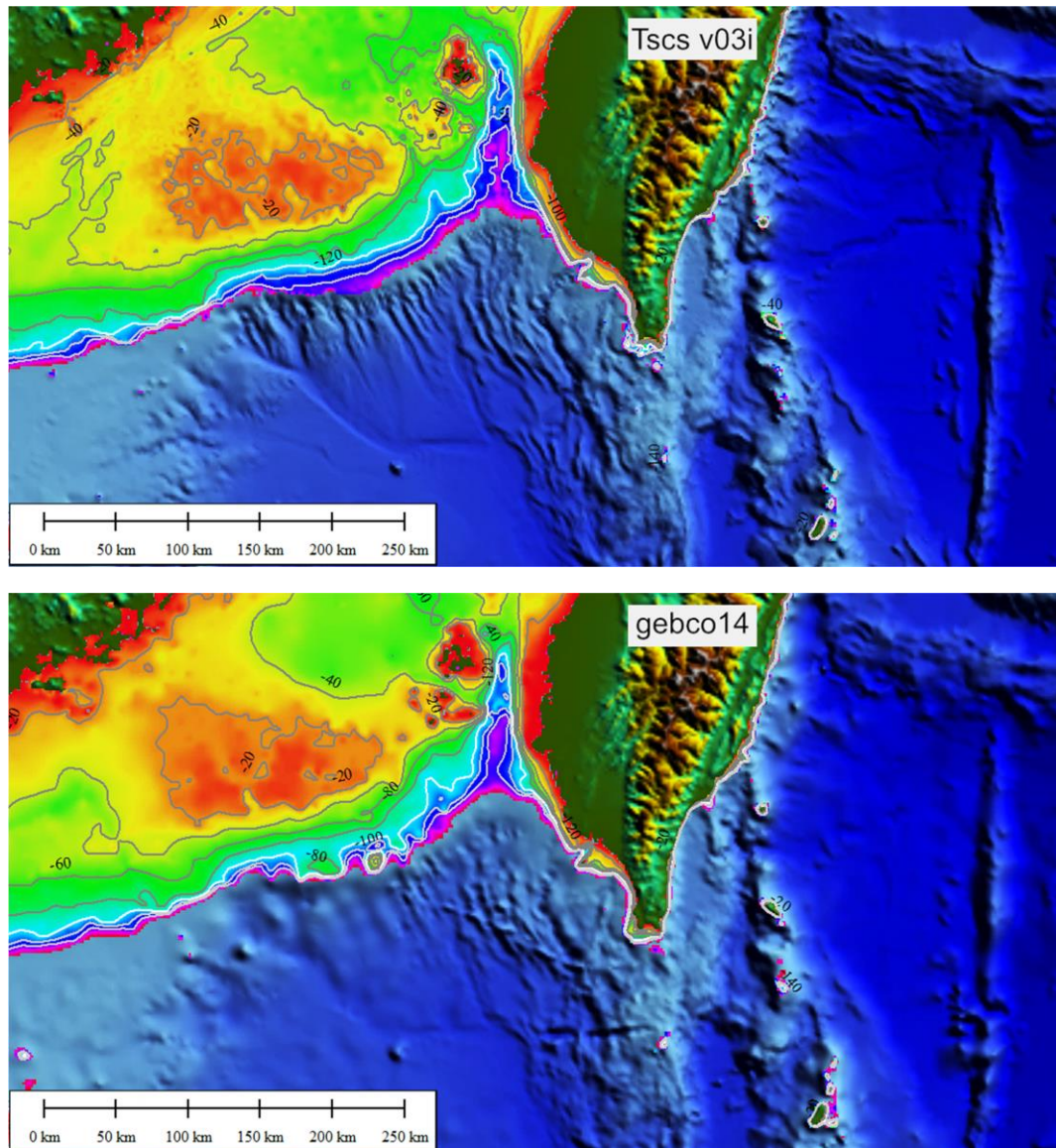


Fig.10. Comparison between (upper panel) Tscs ver.3 and (lower panel) gebco2014 datasets for the northeastern South China Sea. Areas shallower than 200 m depth are displayed with color shadings and with contour lines drawn in 20 m interval. White lines indicate 100 m isobath contours.

Tscs に関しては、岸近くでは中国の文献などに見られる地形が比較的詳細に表現出来ているが、水深 100m を超える沖合部分については、使用データ数が少ないため、本来の線状の尾根地形ではなく、パッチ状の凹凸が見られるなど、再現性が十分でない。さらに 4.1 節で述べたとおり、この海域では採用した水深値の信頼性が明確でないことから、使用にあたっては注意が必要である。

4.2.3 南シナ海北東部

図 10 は、台湾南部周辺海域について Tscs(上)と gebco2014(下)を比較したものである。この海域の深海部では非常に多くのマルチビーム測深が行われており、水深データが豊富であることから、Tscs、gebco2014ともに台湾南西

沖や西方沖から琉球海溝南方にかけての複雑な地形を詳細に再現出来ている。但し gebco2014 では、台湾南方に伸びる海嶺を東西に横切る谷地形や南東から北西に伸びる直線状の尾根地形など、マルチビームデータの異常値に伴う実在しない地形が散見される。

前報^[4]では、当時の最新版であった gebco2008 の台湾西方の陸棚縁辺海域に多数存在した凹凸地形がデータ補間の際に生じた見かけの地形であることを指摘した。改訂版である gebco2014 では、当該海域に平滑フィルターを施すことで凹凸地形は解消され、測深結果に近い平坦な地形が再現されている。反面、平滑化の代償として、Tscs にて見られるような陸棚縁辺部の詳細な地形情報が失われている。このように、平滑化は全体的な精度向上には役立つが、水深

が急変する地形を記述するのには向いていない。

中国本土の福建省沿岸海域では、gebco2014 の方が Tscs より3割程度水深が浅くなっている。Tscs が比較的最近発刊された大縮尺海図の情報を使用しているのに対し、gebco2014 は水深分布を見る限り、古い米国海図を参照しており、水深差は使用データの違いに起因すると見られる。

図10の南東端では、gebco2014 には浅瀬が2つ認められる一方、tscs ではそのような浅瀬は存在しない。十分な検証データがないため、どちらが正しいか現段階では不明であるが、Tscs の場合、海図に記載された水深であっても、周囲と比較して極端に浅い場合には採用しないことが多いことから、この海域に限らず、地形データ作成にあたって実存する孤立海山を見落としている可能性がある。

4.2.4 南シナ海北西部

図11は、トンキン湾南東部、パラセル(西沙)諸島(図面中央の環礁群)、マックスフィールド堆(図面右側の巨大環礁、中沙諸島の一部で、常時水没)にまたがる北西南シナ海について比較したものである。これまで比較した海域同様、全体的な深度分布は Tscs と gebco2014 との間で大きく変わらないが、細かい違いがいくつか見られる。

図11においてベトナム沿岸や海南島北西岸の等深線分布から判別出来るとおり、gebco2014 の海底地形は、トンキン湾の水深が Tscs より全体的に浅いほか、パラセル諸島東北沖にはシングルビーム測深の異常値に起因する線状の偽地形が現れている。深海部では、凹凸地形の水平スケールが Tscs に比べて大きい、地形作成に使用したデータ数が少なく、浅瀬の水深値がより広範囲まで影響しているため、もしくは地形データに関して平滑化フィルターが施されているためであると推測される。陸棚部分についても、等深線の形状から gebco2014 の方が Tscs より滑らかであることがうかがえる。

パラセル諸島は水深 1000m 前後、マックスフィールド堆は水深 3000-4000m の海洋底上にそびえ立つ環礁群であるが、補間の影響からか gebco2014 では環礁周辺の深海部の水深が海図に示される値より全体的に浅めである。さらにマックスフィールド堆内部では、実在しない水深 200m 以深の領域(図11にて無彩色の海域)も見られる。対照的に Tscs の場合、水深の急変部に水深点を追加していることもあり、海図と比較的良く対応している。これらの違いは、環礁の間を通過する潮流の推計に影響する可能性がある。

反面、パラセル諸島やマックスフィールド堆の環礁部を縁取る浅瀬の幅は今回作成した地形データの格子幅と同程度であるため、Tscs では環礁内外の海水交換を制限する環礁周縁地形が実際よりも途切れた形で表現されている。そのため、数値モデルで使用する場合には、gebco2014 のように環礁の水深が実際よりも浅めに示され、環礁内外が分離されている方が、良い結果が得られる可能性もある。

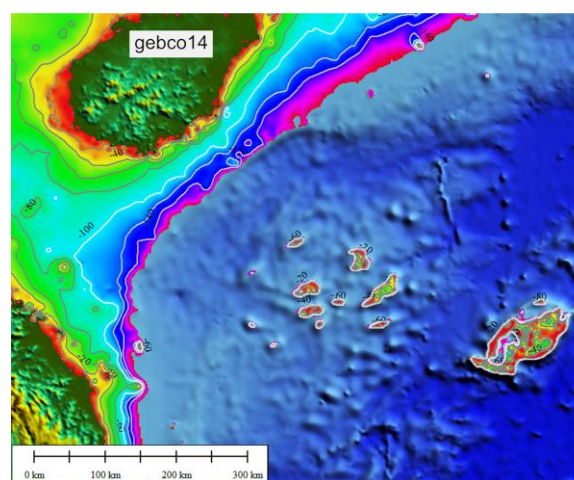
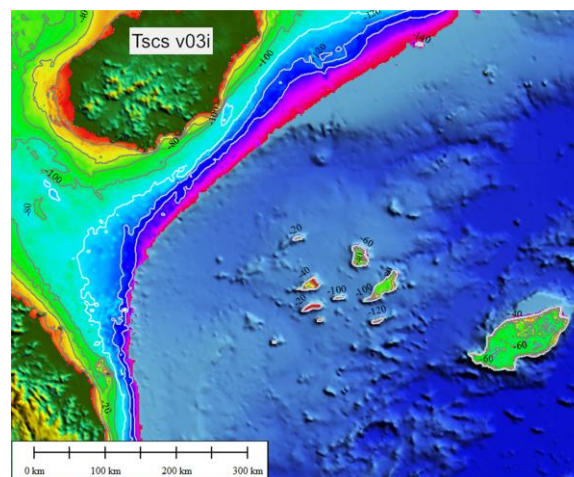


Fig. 11. Same as Fig. 10 except for the northwestern South China Sea: (top) Tscs ver.3 and (bottom) gebco2014.

4.2.5 南シナ海西部

図12は、タイ湾を中心とする南シナ海西部の陸棚域の海底地形を Tscs と gebco2014 で比較したものである。全体的な水深分布は、両者とも似通っており、ナトゥナ島の北方、南方の水深 100m を超える海溝や、北側の海溝と接続する水深 80m 以深の海盆、マラッカ海峡東部の水深など、海図に見られる主要な地形を両者とも再現している。

gebco2014 の前バージョンである gebco2008 では、前報^[4]の通り、ベトナム南方や陸棚縁辺部を中心に細かい凹凸地形が卓越していたが、gebco2014 では、平滑化を施すことで、比較的滑らかな地形となっている。その結果、陸棚縁辺水深 100m 以深の海域では、Tscs の方が細かい地形変化を示している。

このように gebco2014 には改善した部分も見られるが、問題も残っている。ベトナム南方のコンソン島西方に広がる水深 50m 前後の深い海域は、海図上の分布よりもかなり広いほか、メコンデルタの海岸線が実際よりも陸側に位置している。特に後者は潮汐の数値計算の際に大きな問題となる。

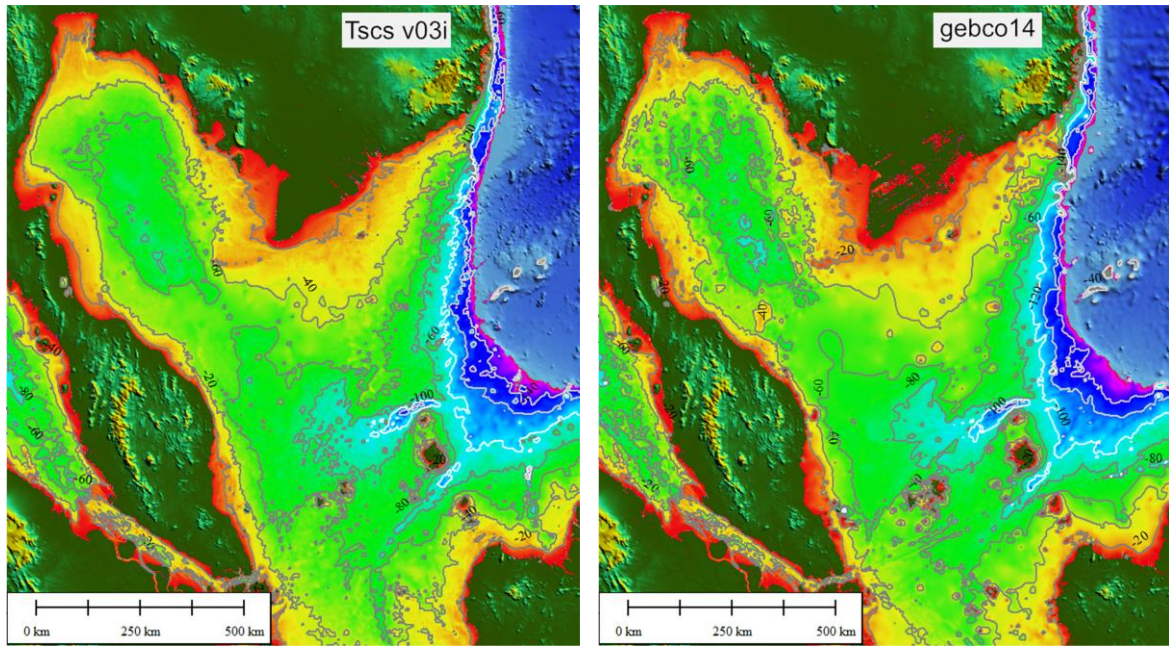


Fig.12. Same as Fig.10 except for the eastern South China Sea: (left) Tscs ver.3 and (right) gebco2014.

Tscs はデータの豊富なサイゴン湾東方沖では、gebco2014には存在しない陸棚縁辺へ向けて伸びる海底谷が再現されているほか、ボルネオ島西北部(サラワク州西部)やカリマタ海峡(カリマンタン島西方)においても gebco2014とは異なり、細長い海底谷が南北に発達している。但し、後の2つの海底谷については、検証データが不足しているため、どの程度正確に再現されているか明らかではない。

南シナ海西部で水深データが比較的多い海域としては、他に奥タイ湾(タイ湾最北端)周辺域が挙げられる。四角形の湾内では Tscs の方が gebco2014 より海図に示される地形と類似している。

その一方、水深データが極端に少ないタイ湾やマラッカ海峡西部などでは、衛星データを併用する gebco2014 の方が実際に近い地形を表している可能性がある。タイ湾について見ると、gebco2014 には湾軸と並行に伸びる尾根地形や谷地形が多く現れているほか、マレー半島側を中心に水深 40m 以浅の浅瀬が発達しているなどの違いがある。

図12右端の陸棚縁辺の南半分については利用可能な水深データが少なかつたため、gebco2014 の地形の方が精度が高い可能性がある。反面、北半分は、今バージョンの Tscs にて新たな水深データを追加したため、1950 年代以前の測量結果しか使用していない前バージョンより改善していることが期待される。この海域では、今回作成した Tscs は、gebco2014 とだけでなく、更新が進んでいない現地の海図とも陸棚縁辺に沿った谷地形の位置などが違っていた。

4.2.1 節にて東シナ海について示したように、Tscs は陸水域を正確に表現出来ていない。例えば、タイ南部ソクラー湖の形は gebco2014 の方が再現性が良い。

このように、南シナ海西部の Tscs の地形には改善も見られるが、全体的には課題が多い。精度向上にはさらなる水深データが必要である。

カリマタ海峡の南側に位置するジャワ海東部についても、沖合の水深データが不足しており、Tscs は精度面で問題がある可能性が高い。但し、以前の報告で示した通り^[4]、南シナ海西部と異なり、gebco2008 から gebco2014 への改訂の際にも補間の際に生じた凹凸地形が修正されていないことから、ジャワ海東部海域に関しては、gebco2014 よりは Tscs の方がモデルでの使用に適していると考えられる。

4.2.5 ルソン島東方沖

図13はルソン島北部周辺の海底地形について、Tscs (中段)と gebco2014(下段)を比較したものである。さらに上段の図にて Tscs 生成に使用した 1 次データの分布を緑色の点で示している。ルソン島西岸・北岸沿いには海図由来の水深点があるが、太平洋側の東岸沖合では、マルチビーム測線以外の測点が極端に少ない。

使用データ数を反映して、ルソン島西岸、北岸では Tscs では gebco2014 に比べ、凹凸がやや詳細に示されている。例えば、北岸から伸びる海底谷やその北側の島々の間の海盆の形状などは Tscs の方が明瞭に表現されている。西岸沿いでは Tscs に不自然な細かい凹凸が認められるが、地形を十分解像するために必要なデータが不足しているためなのか、データの質に問題があるためなのか、現時点では検証出来ないため、データの取捨選択を行っていない。gebco2014 は、平滑化を施しているため地形がぼやけて見えるものの、谷地形がより自然な形で示されている。

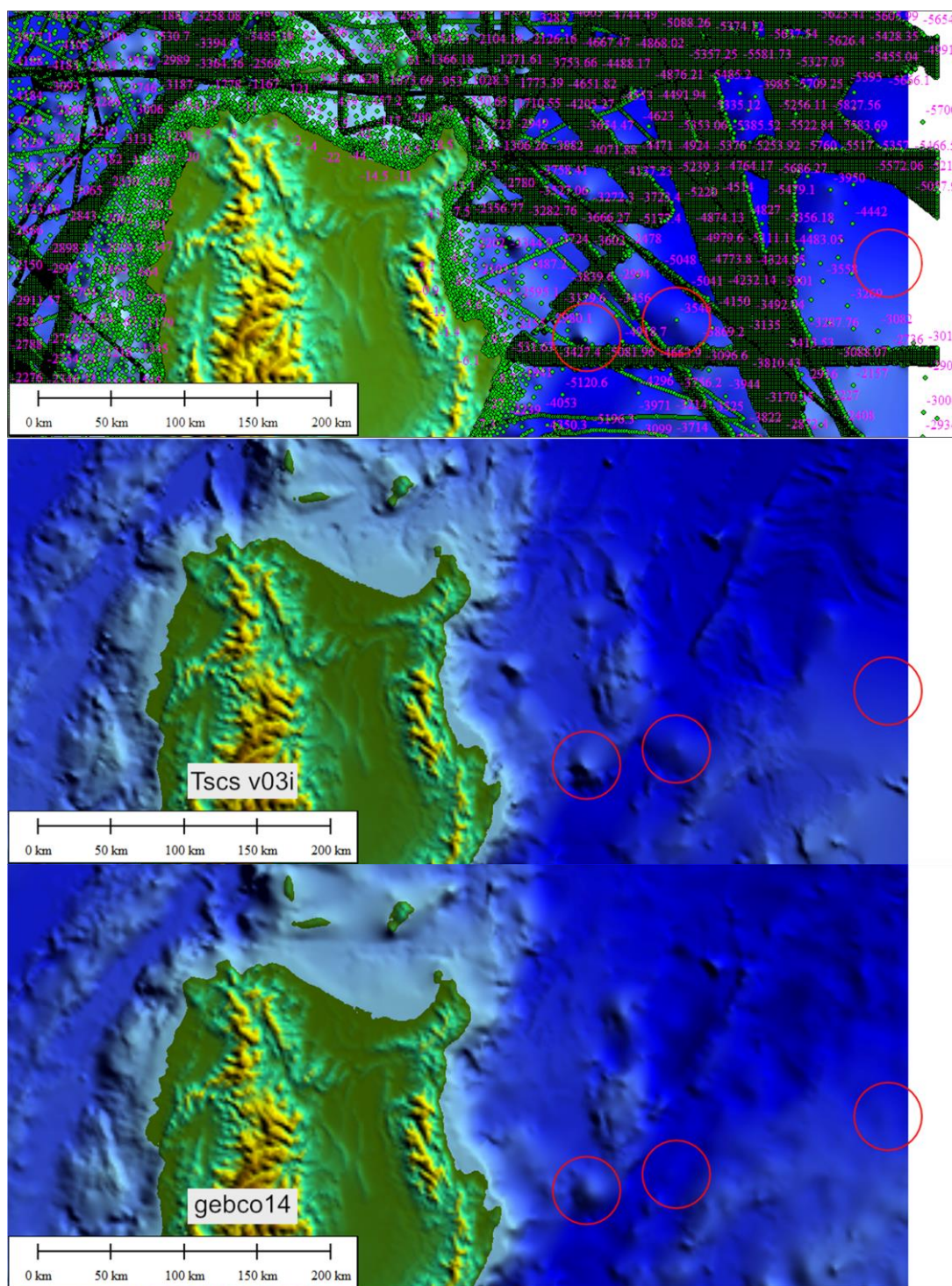


Fig.13. Comparison of bathymetric products for regions around the northern Luzon Island: (upper) distribution of source sounding data shown in green dots and three focusing areas marked with red circles where the data were sparse, (middle) Tscs ver.3, (lower) gebco2014.

図13に記された3つの赤丸は、ルソン島東方沖でも1次データが少ない場所の例である。マルチビームデータが存在する左端の赤丸の下半分を除き、Tscsはデータ数の不足のため、滑らかな地形をしている。中央の赤丸の海域では、gebco2014では谷地形が北北東から南南西へ伸びてい

るのに対し、Tscsでは、赤丸中央の浅い水深点に引きずられ、谷を塞ぐように円錐型の海山が存在している。右側の赤丸領域では、水深データが全く存在せず、gebco2014より浅めの地形が広がっている。今回作成したデータは、このようにデータ数が極端に不足する部分では信頼度が低い。

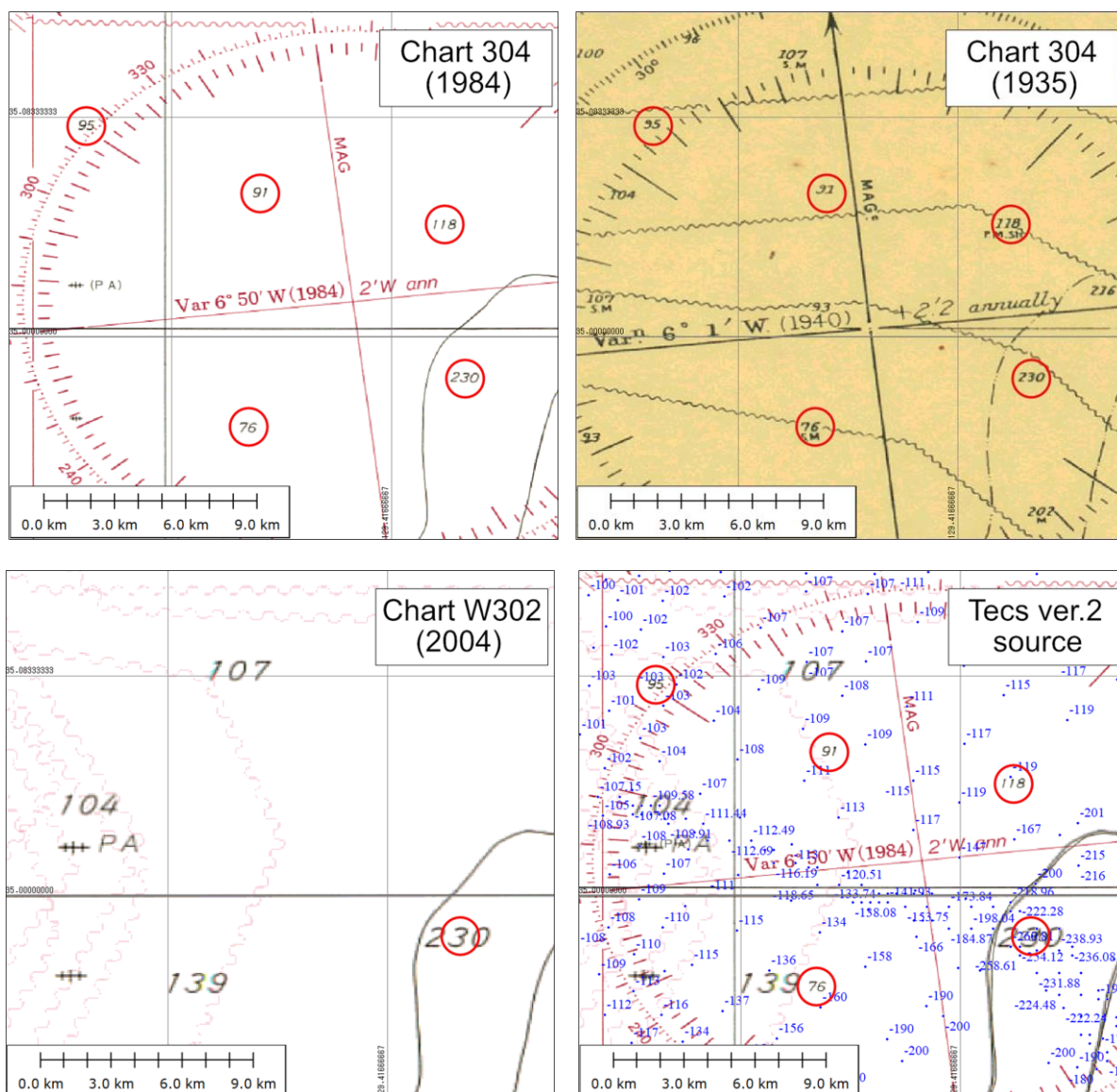


Fig.14. Water depth at the northeastern East China Sea (the Tsushima Strait, west channel) appear in different navigational charts, (upper left) Japanese Chart 304 (1984 edition; Tokyo datum), (upper right) Chart 304 (1935 edition; Tokyo datum), (lower left) Chart W302 (2004 version; WGS1984), and (lower right) Charts 304 and W302 overlaid with the source sounding data used to compile Tecs Ver.2). Red circles denote depth points that originally appear in the chart issued in 1935.

5. 考察

本稿では、東シナ海・南シナ海の海底地形の作成手法について説明するとともに、既存の地形データと比較しながら今回作成した海底地形データの特性を示してきた。本節では、対馬海峡西水道を例に、水深データの選択が地形データ作成に及ぼす影響を論じる。

図14は、北緯 35 度、東経129度20分周辺の海域について3つの日本海図を抜粋したものである。上段左は 1984 年刊行の海図 304 (縮尺25万分の1、東京測地系)、右は同じ海図の 1935 年版(1940 年に小改正)、下段左は 2004 年

刊行の海図 W302 (縮尺50万分の1、WGS84 測地系)を示し、下段右は海図 304(1984 年版)と W302、並びに Tecs (ver.2)の 1 次データを重ねたものである。

図中の細い黒直線は、GIS ソフトにより 5 分間隔で引かれた緯線と経線である。前世紀に刊行された上段の2つの海図は東京測地系を採用しており、GIS ソフト(WGS84 測地系)と海図(太線)の緯線・経線の間にずれが見られる。

図14に示された赤丸は、1935 年の海図とその後発刊された海図の両方で共通に使われていた水深点を表している。図中で 1984 年の海図に記載された5つの水深点は全て半世紀前の海図と同じものであった。1935 年の海図には「明

治30年(1897年)から大正7年(1918年)の間の測量結果に昭和9年までの資料を追加」と記載されている(原文は文語体)ことから、海図発刊時より70年以上前、本稿執筆時より100年以上前の測量結果に基づいていた可能性がある。

図14右下の図に示された青色の数値は、Tecs作成に使用した1次データの水深である。大縮尺の韓国電子海図とマルチビームデータを中心に構成され、水深点の数は今回取り上げた紙海図よりもかなり多い。1984年の海図の水深と周辺の1次データの水深を比べると、図の右側3分の1の領域では良く対応しているが、左側では海図の水深が一次データの値よりかなり浅い。特に南側の水深点(76m)の値は、周囲の水深値(136m-160m)とかけ離れている。海図水深の1.82倍(尋とメートルの換算比)が138mで、隣接の水深値に近いことから、大昔に76尋と報告された水深値がメートル表記と誤解されていた可能性が高い。その後発刊された海図W302では、これら浅めの水深は採用されておらず、全て1次データの値と良く対応している。

1935年の海図掲載の水深値であっても、近年の測深値と大差ない地点(例えば、図中上部の107m水深など)も存在することから、古い観測値全てに問題があるとは言えないが、極力新しい水深情報入手することが望ましい。同時に、最新の海図でも、かなり古い情報が含まれていることがあることを留意し、海図記載事項から情報の出所を確認するとともに、他のデータとの比較を行うことが不可欠であるを今回の例は示している。

地形データ作成に使用した元データを管理することは、品質保持以外のメリットもある。例えば、元データがあれば一部海域について、より空間解像度の高い海底地形を作成したり、緯度・経度座標ではなく、他の座標系や非構造格子を採用する地形データを作成することも容易になる。

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過程をまとめたものである。インド洋の一部海域を除き、収集した約650万の水深点から解像度1分(60分の1度)の格子データを作成している。潮汐モデルへの適用を念頭に、地形急変部などの再現性を考慮している。過去10年ほどの間に、この海域の水深データは質・量とも飛躍的に向上しており、特に韓国西海岸や南シナ海北東部では、既存の格子地形データよりも詳細な地形形状を再現することが出来た。さらに、最終データの精度向上には、複数の水深情報の比較・検証が不可欠であることを具体例を通して明らかにした。

反面、水深データが不足する東シナ海陸棚や南シナ海浅海部などの海域においては、精度に改善の余地があることが示された。特に南シナ海の浅海域は、古い海図の限られた水深情報に頼らざるを得ない現状にある。今後、測量やデータ公開が一層進むことが望まれる。

謝辞

海底地形作成に使用した各種データは表1に掲載した諸機関から提供を受けました。ここに謝意を表します。

Acknowledgements

Author would like to thank organizations and authorities listed in Table 1 for maintaining and providing datasets used in this study.

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.
- 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.
- 4) 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.
- 5) Uehara, K.: Compilation of bathymetric data for the South China Sea 2: High resolution dataset based on multiple sources, Vol. 37 (2016), 12-18.
- 6) Uehara, K.: Compilation of bathymetric data for the East China Sea, *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.*, Kyushu Univ., No.150, (2016) 6-13.
- 7) Caress, D.W., Chayes, D.N.: New software for processing sidescan data from sidescan-capable multibeam sonars, *Proceedings of the IEEE Oceans 95 Conference*, (1995) 997-1000.