

諸外国の事例にみる鉛直基準面モデル構築の取り組み[†]

松本良浩^{*1}, 土屋主税^{*2}, 山野寛之^{*3}, 住吉昌直^{*1}

Overview of foreign projects for the development of vertical datum separation models[†]

Yoshihiro MATSUMOTO^{*1}, Chikara TSUCHIYA^{*2},
Hiroyuki YAMANO^{*3}, and Masanao SUMIYOSHI^{*1}

Abstract

This paper overviews several foreign projects for the development of vertical datum separation models as well as integrated datum transformation tools between reference ellipsoids, the Chart Datum, tidal datums including the Mean Sea Level (MSL), and height datums. These projects have been initiated with the objective of either enabling an ellipsoid-based hydrographic survey or supporting the creation of a seamless bathymetric-topographic digital elevation model (DEM). The common procedure to develop vertical datum separation models is firstly to model the MSL surface with respect to the reference ellipsoid, and then to create other tidal datum surfaces with respect to the MSL via hydrodynamic modelling. Satellite altimetry is commonly utilised to derive the MSL model, while its accuracy is deteriorated within a distance of approximately 15 km from the coast. The challenge in this area is how to complement the spatially sparse on-shore tide gauge data.

1 はじめに

従来水路測量では、海底面の鉛直位置は水深、すなわち海水面からの相対位置として計測されてきた。これは、錘測や音響測深がともに船上で海水面から海底面までの距離を決定する計測法であったことによる。ただし、実際の海水面は当然潮汐その他の要因で高さが時間変化していることから、基本水準面 (CDL: Chart Datum Level; 海洋情報部では通例 DL: Datum Level と呼ぶことが多い)、また諸外国では CD: Chart Datum とのみ記載されている例が多いが、本稿では CDL

と表記する。) を定め、近辺の験潮所で測った時間毎の潮高を用いて、測得水深は CDL から海底面までの距離に改正して表現される。この操作は潮高改正と呼ばれる。

CDL は平均水面 (MSL: Mean Sea Level) に潮汐による下方への変化分 (これを Z_0 と呼ぶ) を減じた水位 (すなわち $CDL = MSL - Z_0$) である。わが国では元来 Z_0 は主要 4 分潮の振幅和 ($H_m + H_s + H' + H_o$) を目安とし、水深の基準面は略最低低潮面 (NLLW: Nearly Lowest Low Water) とされてきたが、平成 14 年 4 月に改正

[†] Received September 21, 2018; Accepted October 25, 2018

* 1 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

* 2 環境調査課 Environmental and Oceanographic Research Division

* 3 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division

施行された水路業務法では、水深の基準は同施行令によって「最低水面」と呼ばれ、平均水面、最高水面及び最低水面は海上保安庁長官から告示されることとなった。

CDLはこれまで実用的には上記の定義で与えられる海域毎の平坦な水準面として与えられ、その適用範囲は Z_0 区分という形で定義されてきた。このため、 Z_0 区分をまたがる測量を実施すると、水深分布には Z_0 区分に対応した人為的な段差が現れることとなる。MSLは現実には平坦な静止水面ではなく、気圧、風、海水の密度、海流などの要因により変動し、空間的に連続変化する「シームレスな」形状をもつはずである。平坦なMSLから Z_0 を減じて得られる最低水面もやはり平坦面であり、現実の潮位面の形状とは乖離がある。これは計測された海底地形にも影響を及ぼす。これは、マルチビーム測深や航空レーザー測深（ALB：Airborne LIDAR Bathymetry）、衛星画像推定水深（SDB：Satellite Derived Bathymetry）のように広範囲を面的に効率よく測量する技術の普及に伴って顕著な問題となる。 Z_0 区分による基準面の最大の段差は10 cmであるが、近年の水路測量では、KGPS測位の利用により鉛直方向にもセンチメートルオーダーの精度が実現しており、またマルチビーム測深データの高密度化により、浅海域では数十 cm 程度の密度で水深の点群が得られるようになってきている。こうした進歩により、測量データにおける Z_0 区分の境界に沿った段差は以前よりも明瞭に現れる。この段差を解消するとともに、 Z_0 区分境界の不連続の処理を要しない効率よい測量作業を行うには、グリッド内の補間も考慮された鉛直基準面モデルの構築が望まれる。

小田巻・中村（2003）は、潮汐推算値を加味することで任意の時刻の水深が電子海図上に表現される「ダイナミック水深」実現という目的で、準拠楕円体を統一基準面とした「MSLの楕円体高、 Z_0 、海底面の楕円体高」のデータセットを新しい水深データベースとすることを提案した。これは従来水深値に内包されている時間変化や参照する

験潮所により違いの出るMSLおよび Z_0 を分離し、海底面を連続かつ統一的な基準である楕円体高で表現する考えである。ひとたび海底面が楕円体高で表現されれば、楕円体基準で決定された各種の潮位面や基準面に対する高さ・深さは容易に算出できる。

陸地測量の基準面について現況を対照すると、国土地理院は衛星測位を用いた測量業務の効率化の一環として、楕円体高と標高を結びつける高精度なジオイドモデルを構築してきた。これは重力ジオイドモデルJGEOID2008（Kuroishi et al., 2009）を基に実測されたジオイド高データを用いて較正を行ったものであり、現行のモデルは「日本のジオイド2011」（Ver.1およびVer.2）（兒玉・他, 2014；小板橋・他, 2018）と呼ばれる。これを用いると、航空レーザー測量などで得られる楕円体高のデータから3級水準測量に相当する標高の決定が可能となっている。モデルは1分×1.5分グリッドで作成されており、標準偏差2 cm程度でジオイド高データと整合している。

諸外国では、シームレスな水深の基準面や潮位面モデルを構築するとともに、準拠楕円体、CDLおよびMSLをはじめとする各種の潮位面と陸地測量の基準面の相互間で高さ・深さの変換を一体的に実現するツールを開発するなどの取り組みが進められている。本稿では、こうした諸外国の取り組み例を概観し、楕円体高で与えられ高精度・高密度化した水路測量に適したシームレスな鉛直基準面モデルを今後わが国で実現するためにとりうる方法を考察する。

2 楕円体基準によるCDL作成の必要性

近年GNSSの普及、とりわけキネマティックGNSS測位の実現と精度向上により、センチメートルオーダーの精度で船や海面の高さを計測することが可能となっている。測深データと結びつけば測深時の水位とは無関係に楕円体基準による海底面の位置座標を決定することも可能である。とりわけ、海洋情報部が2014年に運用を開始した航空レーザー測深機CZMILは、グリーンレー

ザーがスキャンする海底面の位置座標を楕円体基準で決定しており、もはや海水面と海底面の間の距離を測定するものではない。こうした楕円体基準の測量に対応できるように、海図水深を算出するための CDL を楕円体高で与える方法を統一的に整備することが望まれる。

また、CDL が楕円体高で与えられることにより、水深データと陸域の標高データを楕円体高を介して一体化することが可能となる。海陸一体の地形データは津波あるいは高潮による浸水のシミュレーションをはじめとする沿岸域の防災施策への利用が期待できる。また、海陸一体の地形データから潮位面（最高水面に限らない）に対応する海岸線を抽出するといった利用も行われている。このような目的で、海陸一体の DEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) の作成を可能にするための高さ・深さ変換ツールを作成して公開している事例は後述する。

このほか、わが国はプレート収束帯に位置することから、概して地殻変動が顕著であり、規模の大きい地震の発生の際にはコサイスミック変動やその後の余効変動が CDL に影響を及ぼす。平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の発生の際には、岩手県から千葉県に至る広い範囲で沿岸部は大きく地盤が沈降し、牡鹿半島で最大の 1.2 m の沈降量が観測された (例えば政春・長山, 2011)。一方海上保安庁の海底地殻変動観測によれば、牡鹿半島の東約 100 km 沖合の「宮城沖 1」海底基準点が約 3 m の隆起を示したのを最大に、海溝軸に向かってプレートの跳ね上がりに伴うと予想される上下変動が観測された (例えば海洋調査課航法測地室, 2012)。こうした大規模な地殻変動が起きると、新たな水路測量の実施のためには、近辺の験潮所のベンチマークと最低水面の関係を 32 昼夜の潮汐観測により再決定することが必要であった。CDL を楕円体高で与えておくことは、地震災害後の水路測量を迅速に実施する上で有利である。

3 鉛直基準面モデル構築への諸外国の取り組み

本節では、諸外国における鉛直基準面モデル構築への取り組み事例を概観する。本稿ではモデル構築のために使用した観測データと、取り扱っている基準面および潮位面モデルの種類に主眼を置き、モデリング手法の詳細については個別の参考文献に譲りたい。

3.1 カナダ-HyVSEPs

3.1.1 背景

楕円体基準での CDL のモデルの作成に先行した国の一つはカナダである (International Federation of Surveyors, 2006)。カナダ水路部 (CHS: Canadian Hydrographic Service) は、1990 年代初めから、多数ある験潮所で順次 GNSS 観測を実施して CDL の楕円体高を決定していき、GNSS を活用した新時代の水路測量へと対応を進めていった (O' Reilly, 1996)。1996 年には、GNSS の性能の現状と将来を見据えて、水深を表す統一的な基準面の検討をニューブランズウィック大学に委託し、その結果、水深と高さの共通の鉛直基準面として準拠楕円体を採用し、準拠楕円体と CDL の間の変換式を構築すべきであるとの勧告を得ている (Wells et al., 1996)。これを受けて CHS は、2000 年代初めには空間的に連続した CDL の楕円体高分布のモデリングを実施した (Robin et al., 2016)。こうした準拠楕円体と CDL などの基準面・潮位面の距離を二次元的な分布として表現するモデルは SEP (separation surface) と呼ばれる。

その後 2010 年に CHS は、験潮、衛星高度計および GNSS データをジオイドモデルおよび力学的海面高モデルと結合して、更に空間分布を向上した SEP を整備する CVDCW (Continuous Vertical Datum for Canadian Waters) と呼ばれるプロジェクトを開始した (Robin et al., 2016)。この新しい SEP は HyVSEPs (Hydrographic Vertical Separation Surfaces) と呼ばれ、カナダ領海の全面をカバーする。

以下の概説は、Robin et al. (2016) を参照した。

3.1.2 使用データと潮位面のモデリング

潮位観測点は1272点あり、うち435点で楕円体高と関係づけられている。このうち短期の観測が実施されたのみで、短周期の調和定数のみを決定した観測点も多いが、空間分布を確保するためにこうした観測点もCVDCWに採用している。そのため、3年以上の観測が実施された観測点を長期観測点と定め、欠けている長周期の調和定数は長期観測点から内挿して与えている。また、海面上昇と地殻変動の補正を行い、2010年を共通のエポックとしてこれに揃えている。

衛星高度計データは、AvisoのMSSプロダクト(Aviso, 2011)を平均海水面モデルとして使用している。

ジオイドは、カナダの現行の鉛直基準系CGVD2013(Canadian Geodetic Vertical Datum)を定義している高解像度のジオイドCGG2013(Canadian Gravimetric Geoid model of 2013)を使用している。

海洋力学モデル(DoM: Dynamic Ocean Model)は、CHSが所属するカナダ水産海洋部(DFO: Department of Fisheries and Oceans)海洋科学課で開発されたものを海域毎(Pacific, Arctic, Hudson Bay, Northwest Atlantic & Gulf of St. Lawrence, St. Lawrence Estuary)に選んで使用している。

HyVSEPsの算出に用いられたグリッドは、浅水波の速さ(水深の1/2乗に比例)と海底の傾斜に応じて密となるようなTIN(Triangular Irregular Network)である。

3.1.3 構築された基準面・潮位面

CDLはカナダではLLWLT(Lower Low Water Large Tide: 19年間の推算により年毎の最低低潮位を求め、平均したもの)と定められているが、過去の験潮によって決定された値で験潮所毎に固定されている。多くは1960年代に決定されたものであるが、験潮所毎に観測期間や使用機器・手法が様々である。さらに、経過年数に応じて長期的な海面上昇の影響が加わるため、共通エポック

におけるLLWLTとの間には乖離がある。そのためHyVSEPsにおけるCDLにはこうした験潮所毎に一様ではない乖離を補正する項(warpと呼ばれる)が加算される。

HyVSEPsにより、各潮位面は以下のような層構造で表現される。

- ・ジオイド高: N
- ・力学的海面高(Dynamic Ocean Topography): DOT
- ・平均水面MSLと各潮位面との距離: sep

平均水面 $MSL = N + DOT$ となる。CDLについては、LLWLTのモデルを構築した上で

- ・LLWLTからCDLへの補正項: $warp$

が加わる。Warpとは、Blend Zone(BZ)と呼ばれる海岸線に沿った帯状の領域(幅は5-25kmで、海域により異なる)を設定し、沖側の境界上では $warp = 0$ 、海岸線沿いには験潮所の地点で $warp = CDL - LLWLT$ とする境界条件を与えてBZ領域内でLaplace補間した値である。BZ領域外では $warp = 0$ である。

CDLとLLWLT、MSLのほか以下の5種の潮位面モデルがNAD83(CSR)系のGRS80楕円体基準で構築された。

- ・HHWLT(Higher High Water Large Tide: 19年間の推算により年毎の最高高潮位を求め、平均したもの)
- ・MHHW(Mean Higher High Water: 平均高高潮面)
- ・MHW(Mean High Water: 平均高潮面)
- ・MLLW(Mean Lower Low Water: 平均低低潮面)
- ・MLW(Mean Low Water: 平均低潮面)

LLWLTのHyVSEPの誤差は $\sigma_{total}^2 = \sigma_{geoid}^2 + \sigma_{DOT}^2 + \sigma_{tidal}^2$ と計算され、海域により6.6-17.7cmとなった。

3.2 米国-VDatum

3.2.1 背景

VDatumとは高さ・深さの基準を変換するソフトウェアの名称である。米国海洋大気庁(NOAA:

National Oceanographic and Atmospheric Administration) の国立測地測量局 (NGS : Office of National Geodetic Survey), 沿岸測量部 (OCS : Office of Coast Survey) および海洋プロダクト・サービス運用センター (CO-OPS : Center for Operational Oceanographic Products and Services) が共同して開発しており, 無償で公開されている. VDatum は多様な潮位面, 鉛直基準面, 水平位置座標系, 楕円体, ジオイドモデルの相互間での高さ・深さの変換に対応し, 海陸の地形データを統合することが可能となる (NOS, 2018).

VDatum は, フロリダ州 Tampa Bay において NOAA の海底地形データと米国地質調査所 (United States Geological Survey : USGS) の地形データを統合して海陸シームレスな DEM を作成する実験的プロジェクトで初めて使用された (Parker, 2002).

対象地域の拡張とデータの改良が進んでおり, 現在は米国本土東海岸・西海岸の全域と五大湖, プエルトリコおよびバージン諸島で利用可能である (Fig. 1). 適用範囲は MHW による海岸線の 1-2 km 内陸から距岸 25 海里までとされている.

以下の概説は, 特記がない限り Myers et al. (2007) を参照した.

3.2.2 使用データと潮位面のモデリング

潮位面モデルの作成の第一段階には力学モデル ADCIRC (Luettich et al., 1992) を用いる. モデルの算出には, 浅海域および海岸線沿いに密となるような TIN が用いられる. はじめに北東太平洋あるいは北西大西洋といった広域のグリッド (regional grid と呼ばれる) において域内の験潮記録を最も満足するような M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1 の調和定数を算出し, これを外海の境界条件として用いて, VDatum 作成対象である海域 (グリッド) について海底地形を含むモデルパラメータの調整を繰り返し計算により行う. 最終的に得られた結果においてモデルと験潮データとの差を TCARI (Tidal Constituent and

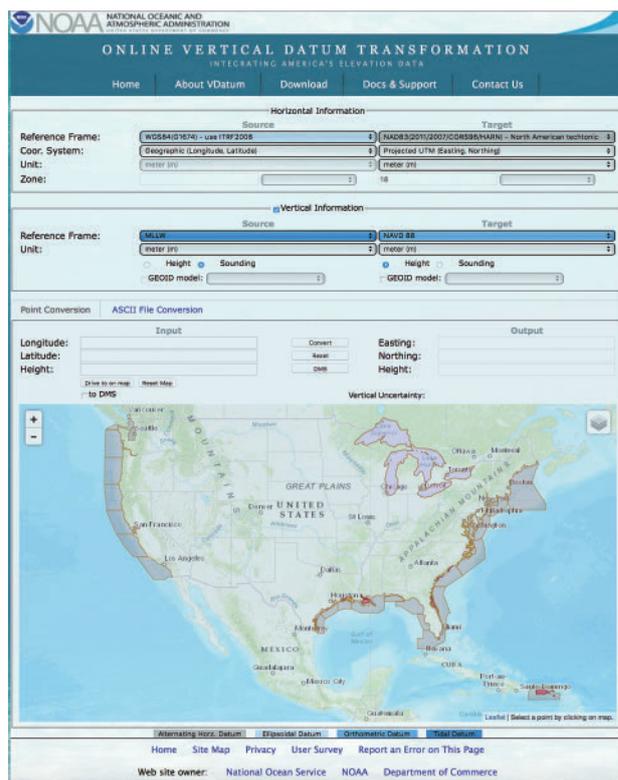


Fig. 1. Interface of the online version of the vertical datum transformation software. The map at the bottom shows the area where the datum transformation is available, indicated in polygons. The particulars of the source/target datums of the topography data can be configured in the top two panes.

図 1. オンライン版の VDatum 変換ソフトウェアのインターフェース. 下の地図には変換対象の地域がポリゴンで表示されている. 地形データの変換元・変換先の基準系がウインドウの上部で細かく設定できる.

Residual Interpolation ; Hess et al, 1999 ; Hess, 2002) で補間し, 潮位面のモデルを得る.

VDatum では, 海面形状 (Topography of the Sea surface : TSS) のグリッドデータを用いている. TSS は NOAA の各験潮所で決定した北米鉛直基準面 NAVD88 (North American Vertical Datum 1988) と MSL の差を空間的に補完し, NAVD88 に結合された各ベンチマークにおいて潮位モデル値による較正を行って作成されている.

3.2.3 構築された潮位面

MLLW, MLW, LMSL (Local Mean Sea

Level：該当海域のローカルな平均水面), DTL (Diurnal Tide Level：MHHW と MLLW の平均), MTL (Mean Tide Level：MHW と MLW の平均), MHW, LWD (Low Water Datum：無潮区域で使用され, MSL 下 1.5 フィート), MHHW に対応する。なお, 米国の CDL は MLLW である。また, 潮位面ではないが, IGLD85 (International Great Lakes Datum 1985) という五大湖の平均水面にも対応する。

3.2.4 変換可能な基準系

VDatum は多様な海陸の地形データの統合ができるよう, 基準面・潮位面を含む鉛直基準系はもとより座標系, 水平基準系, 楕円体, ジオイドモデル, 全球重力ポテンシャルモデルについても選択肢が豊富であることに特色がある (Fig. 1 および Table 1)。各種の基準系は 3D Datums (楕円体高), Orthometric Datums (標高) および Tidal Datums (潮位面基準の高さ) のクラスに分類さ

Table 1. Coordinate systems, horizontal datums, vertical datums, geoid models, and EGM models supported by VDatum transformation software. Compiled from NOS (2018).

表 1. VDatum で座標変換が可能な座標系, 水平基準系, 鉛直基準系, ジオイドモデル, 全球重力ポテンシャルモデルの種類。NOS (2018) から編集した。

座標系		地理座標(経緯度) UTM SPC (State Plane Coordinate System: 米国を 124 区域に区分した平面直角座標系) 地心直交座標
水平基準系		NAD27, NAD83(1986), NAD83(HARN); 楕円体基準系の ITRF, WGS84, NAD83 の各シリーズ
鉛直基準系	楕円体高	NAD83, WGS84, ITRF88, ITRF89, ITRF90, NEOS 90, PNEOS 90, ITRF91, ITRF92, SIO/MIT 92, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, IGS97, ITRF2000, IGS00, IGS05, ITRF2005, IGS05, ITRF2008, IGS08, WGS84(transit), WGS84(G730), WGS84(G873), WGS84(G1150), WGS84(G1674), NAD83(PACP00), NAD83(MARP00)
	標高	NAVD88, NGVD29, PRVD02, VIVD09, ASVD02, GUVD04, NMVD03, HAWAII EGM2008, EGM1996, EGM1984
	潮位面基準	MLLW, MLW, LMSL, DTL, MTL, MHW, LWD, MHHW
	その他	IGLD85 (五大湖の平均水面による基準)
ジオイドモデル		GEOID12B, GEOID12A, GEOID09, GEOID06 (アラスカのみ), GEOID03, GEOID99, GEOID96
全球重力ポテンシャルモデル		EGM2008, EGM1996, EGM1984

れており, クラス内での変換ができる。各クラスには代表メンバが決まっており, クラス間の変換は上記の順にこの代表メンバの基準系を介して行われる。3D Datums では NAD83 (NSRS2007/CORS96), 標高は NAVD88, 潮位面は対象地域のローカルな平均水面 (LMSL: Local Mean Sea Level) が代表メンバである。このため WGS84 (G1150) 楕円体高から MLLW 基準の高さへの変換は WGS84 (G1150) → NAD83 (NSRS2007/CORS96) → NAVD88 → LMSL → MLLW という手順で行われる。

変換に伴う誤差の評価は NOS (2016) に示されている。楕円体高から潮位面基準の高さへと変換を行った場合, 上記の変換手順に応じて蓄積される誤差の最大は概ね 10 cm 前後であり, 海域により 8.0–22.6 cm となる。

3.3 英国-VORF

3.3.1 背景

英国では, GPS を利用した楕円体基準の水路測量を主目的として, ETRF89 (European Terrestrial Reference System 89) の GRS80 楕円体を基準とした各種の基準面・潮位面モデルのセットを作成し, これを VORF (Vertical Offshore Reference Frames) と呼んでいる (Turner et al., 2010)。VORF プロジェクトは, UKHO (United Kingdom Hydrographic Office) がスポンサーとなり, POL (Proudman Oceanographic Laboratory) および DNSC (Danish National Space Centre) の協力を得て UCL (University College of London) の主導により 2005 年 10 月に開始し, 2008 年 1 月に完了した。VORF は英国とアイルランドの大陸棚までを全面カバーしている。

以下の概説は, 特記がない限り Turner et al. (2010), Adams et al. (2008) および Howlett (2009) を参照した。

3.3.2 使用データと潮位面のモデリング

英国では「LAT (Lowest Astronomical Tide :

天文最低潮)に可能な限り近い基準面」を CDL としている。まず LAT およびその他の潮位面のモデルは次の 2 段階の操作によって構築している。

- (1) ETRF89 基準による MSL のモデル構築。
- (2) MSL-LAT (および MSL-他の潮位面) の SEP を決定。

第一段階として、ETRF89 基準による MSL のモデルを構築するため、DNSC の 1 分グリッド衛星高度計から得られる海面形状 (SST: Sea Surface Topography) を沖合に用いている。衛星高度計による SST は陸地から 15 km より近い範囲では精度が劣化するため、沿岸部は験潮データ 460 点により SST を決定している (Iliffe et al, 2007a)。これには常時観測されている験潮所と短期観測のみの験潮観測点が含まれる。各験潮観測点は ETRF89 (楕円体は GRS80) と共通エポック (epoch 2000.0) で関係づけられた。OSGM05 ジオイドモデルのジオイド高を差し引いて、沿岸各観測点での SST を決定した。

第二段階の MSL-LAT (および MSL-他の潮位面) の SEP の作成には Admiralty Tide Tables (ATT) (UKHO, 2009) に収録された対象海域の沿岸約 700 点に加え、UKHO から提供された沖合の験潮データ 180 点を用いた。これには常時観測されている験潮所も短期観測のみの験潮観測点も含まれる。広域潮汐モデルは、以下のものを用いた。

- ・ North and Irish Sea and English Channel (NISE10) hydrodynamic tide-surge model (Flather and Williams 2004)
- ・ Center for Space Research version 4.0 (CSR4.0) global ocean tide model (Eanes and Bettadpur 1995)
- ・ Global Tide Finite Element Solution (FES2004) global ocean tide model (Lefèvre et al. 2002)
- ・ TOPEX/Poseidon crossover solution (TPXO 7.0) global ocean tide model (Egbert and Erofeeva 2002)
- ・ Goddard Ocean Tide (GOT00.2) global ocean

tide model (Ray 1999)

各験潮観測点で決定されている既存の CDL は、多くが短期間の験潮観測によるものであり、LAT の近似値にすぎない。このため LAT から CDL を導く補正量のモデルも作成されている。

3.3.3 構築された基準面・潮位面

VORF では CDL, LAT, MLWS (Mean Low Water Springs: 大潮平均低潮), MSL, MHWS (Mean High Water Springs: 大潮平均高潮), HAT が ETRF89 系の GRS80 楕円体基準により構築されている。このほか 16 の陸上の基準系に対応している。0.008 度グリッドで構成されており、地形の複雑な沿岸域においては 0.003 度グリッドが追加される。精度は沿岸域で 10 cm, 外海で 15 cm (1σ) である (Iliffe et al, 2007b)。

3.4 フランス-Bathyelli

3.4.1 背景

フランス水路部 (SHOM: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) は、GPS を利用した楕円体基準の水路測量を目的として、GRS80 楕円体を基準とした各種の基準面・潮位面モデルのセットと高さ・深さの変換ソフトウェアを作成する「BATHYELLI (for BATHYmetry referred to the ELLipsoid) プロジェクト」を実施した。ステージ 1 として、2009 年末に CDL のモデルである Bathyelli 基準面 Ver.0.0 が完成し、2011 年以降はステージ 2 として改良が進められている。

以下の概説は、特記がない限り Pineau-Guillou and Dorst (2011) および Tanguy (2013) を参照した。

3.4.2 使用データと潮位面のモデリング

MSL モデルは、験潮、衛星高度計、および測量船による KGPS 観測により決定したものを最小自乗的に結合している。

衛星高度計データによる MSL モデルは、衛星のサンプリングの偏りによる潮汐成分の混入を除

去するため、通常グローバル潮汐モデルを用いているが、水路測量には精度が不十分である。このため、SHOMの潮汐モデルを用いた。また、験潮記録との整合性を保つため、気圧補正 (Inverse barometer correction) を施さないモデルを水路測量向けに算出し直した。このモデルを Hydrographic Mean Sea Surface と呼んでおり、従来の MSL モデルとの差は最大 25 cm に達する。1992–2005 年の TOPEX/POSEIDON, ERS1, ERS2, GFO の衛星高度計データが用いられている。衛星高度計による MSL モデルは距岸 10 マイル以上を適用範囲としている。

沿岸部の験潮データと沖合の衛星高度計データとの間の空白域を補完するために、測量船による KGPS 測量を実施して MSL の楕円体高分布を決定している。この測量は、はじめに験潮所ベンチマークで 24 時間以上の GPS 観測により MSL および CDL の楕円体高を精密に決定し、その後験潮所近傍に GPS 基準局を設置して、測量船で験潮所周辺 15 マイルの範囲を 3 日程度航走して、後処理 KGPS により cm 精度での海水面の測位を

行うものである。

LAT は潮汐モデリングにより導出される。

3.4.3 構築された基準面・潮位面

MSL (験潮によるものと衛星高度計によるものの 2 種), LAT および CDL のモデルが GRS80 楕円体基準で構築されている。上記基準面・潮位面のほか、フランスにおける陸地測量の基準面 (IGN69), ジオイド (EGG97) からの高さ・深さの相互の変換が可能である。

フランスでは CDL は「LAT と概ね同一」とされているが、フランス本土沿岸域を 15 の潮汐区域に分割して区域毎の LAT と CDL の差が決定されている。この差は -5 cm から 50 cm で、ほとんどの区域で LAT が CDL の上にある。SHOM ではこの差が航海の安全上重要な意味を持つようになった場合にのみ CDL を改定することとしている (NSHC Tidal Working Group, 2010)。このため、LAT が CDL より上にある場合には、CDL は積極的に改定されていないとみられ、完成した CDL のモデルには、不連続な境界を見いだすこ

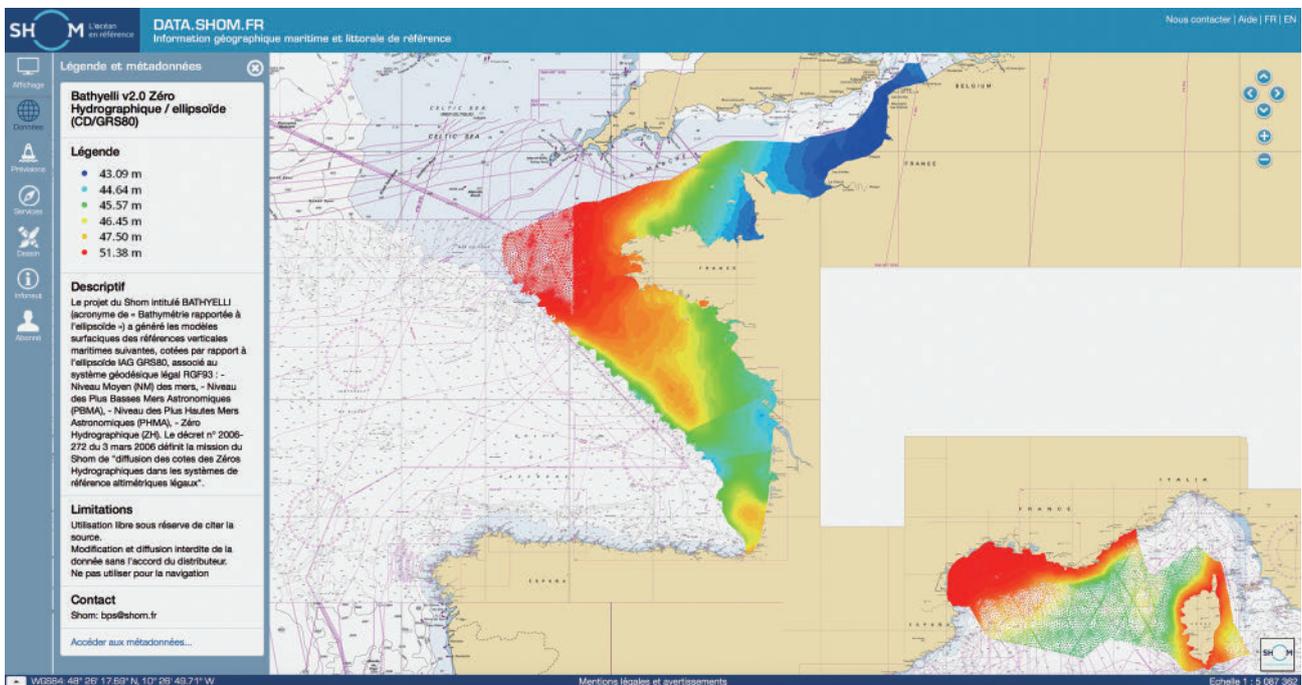


Fig. 2. Ellipsoidal height distribution of Bathyelli datum Ver. 2.0, shown at the DATA.SHOM.FR web site (<https://data.shom.fr/>). Discontinuities on the CDL surface can be distinguished.

図 2. Bathyelli 基準面 Ver. 2.0 による CDL の楕円体高分布を SHOM のデータウェブサイト (<https://data.shom.fr/>) で表示したところ。高さの不連続な境界が見られる。

とができる (Fig. 2).

ステージ1として2009年末にKGPS測量データ11海域を同化したBathyelli基準面Ver.0.0が完成した。その後2011年以降はステージ2として改良が進められ、2013年には9海域のKGPS測量データを新たに同化してVer.1.0が作成された。その後更にKGPS測量データ3海域を追加し、過去のKGPSの再解析を行ってVer.2.0の作成が継続されている (Tanguy, 2013)。

3.5 北海-BLAST

3.5.1 背景

北海沿岸にはベルギー、ドイツ、デンマーク、フランス、オランダ、ノルウェー、英国が位置するが、それぞれ異なる陸上の高さの基準面とCDLをもっている。これらの基準面を統一的に変換できるツールを作成するためのBLAST (Bringing Land and Sea Together) というプロジェクトが、欧州連合 (EU: European Union) および欧州委員会 (EC: European Commission) の下で実施された開発プロジェクト North Sea Region Programme 2007-2013 (Interreg IVB) の一環として、ノルウェー水路部 (Norwegian Hydrographic Service) の主導で実施された。

3.5.2 使用データとモデリング

BLASTでは、沿岸域を特に考慮した精密なジオイドを算出し、ジオイド基準で平均力学的海面高 (MDT: Mean Dynamic Topography) とLATのモデルを与えるところが、楕円体基準で実施された他の取り組みとは異なっている。これは、元々ジオイドが陸地測量の基準面として用いられていることに加えて、北海沿岸にはMSLが決定できない海域があるがジオイドの算出は至る所可能であるから (Slobbe and Klees, 2012)、としている。

ジオイドの算出には European gravity model EGG08 (Denker et al., 2008) を初期モデルとして、陸上、船上及び航空重力計のデータのほか、ERS-1/2, Envisat, Geosat, GFO-1, Jason-1/2,

TOPEX Poseidon による衛星高度計データを加えている。

MDTのモデル構築には、extended Dutch continental shelf model version 5 (DCSM) (Slobbe et al., 2012) の浅海流動モデルを用いている。

LATのモデルもジオイド基準により構築されている (Strykowski et al., 2011; Slobbe and Klees, 2012)。

3.5.3 変換可能な基準系

上記のように構築されたジオイド基準によるMDTおよびLATのモデルがBLASTの変換ツールに組み込まれている (Einarsson, 2011)。ジオイドにMDTを加算するとMSLが算出される。

BLASTの変換ツールは、上記のBLASTで構築したLAT、MSLのほか、北海沿岸7カ国がローカルに決定したLATと英国のCDLに対応する。このほかヨーロッパ共通 (ただし国毎にオフセット値がある) の陸地の高さの基準系 EVRF07 (European Vertical Reference Frame 2007)、EGG08 ジオイドおよび楕円体高にも対応し、これらの相互の変換が可能である。

3.6 オーストラリア

3.6.1 背景

オーストラリアでは、沿岸域の管理に資する海陸シームレスなDEM作成を主目的として、2010年頃から楕円体基準で海陸の基準面の変換を可能にするための取り組みが始まっている。Keysers et al. (2013) によれば、オーストラリアでは国土の広さに比して験潮所の分布が不十分であることから、全土で統合的に基準面変換を扱えるようにすることは現時点で不可能であるとしながらも、シドニーからブリスベンに至る東海岸約800kmの沿岸部を実験区域として開発を始めている。

3.6.2 使用データと潮位面のモデリング

以下のデータを使用してMSLモデルを作成した。

- ・衛星高度計データを用いたDTU10 MSS(Danish Technical University Mean Sea Surface) (距岸 22 km 以上)
- ・験潮観測 67 点による MSS (距岸 4 km 以内).
- ・距岸 4–22 km の範囲を補間.
- ・陸上は外挿.

LAT, MHWS, HAT は潮汐力学モデル GEMS (Global Environmental Modelling Solutions Tide Model) より導出されている. なお, MSL モデルが陸上に外挿されているのは, 浸水予測モデルへの利用を考慮しているためである.

3.6.3 構築された基準面・潮位面

GDA94 (Geocentric Datum of Australia 1994) 系の GRS80 楕円体を基準として, MSL, LAT, MHWS, HAT のモデルが構築されている. なお, オーストラリアでは CDL として LAT を採用している. これらの潮位面のほか, AUSGeoid09 に準拠した陸地測量の基準面 (AHD: Australian Height Datum) との間で高さ・深さの変換が可能である.

モデルのグリッドサイズは 1 分である. 海岸線から 20 km 内陸の陸上から 2000 m 等深線に至るまでの範囲での基準面変換を対象としている.

本節では, 特記がなければ Keyzers et al. (2013) を参照した.

4 各事例の比較

これら諸外国の取り組みは, 主たる動機が潮位面を介さない楕円体基準の水路測量の実現か, 海陸の地形データの接続・統合であるかによって, 対応する基準面・潮位面の組み合わせや CDL の実装のしかたにそれぞれの特徴がでてくる. 特に VDatum と BLAST は, 海陸の地形データの接続・統合に主眼を置き, 対応できる陸上の基準系が多岐にわたる.

各国で CDL が LAT 等の潮位面に準拠すると定められていても, 実際には近似値であったり, 験潮所によっては何らかの事情で異なる CDL が採用されていたりして, 自然現象として実際に決定

される潮位面とは乖離していることがあり, この乖離を整合させる補正量をモデルに取り入れる必要があることが HyVSEP, VORF, Bathyelli の事例からみることが出来る. これは, CDL が港湾における工事基準面としても用いられる場合があることから, 従来の実用上の基準面との整合をとりつつ, 沖合に向かって自然現象に即した CDL のモデルを構築する必要があるためと思われる.

CDL および潮位面モデルの構築に際しては, BLAST を除いては, 楕円体基準の MSL モデルを構築した後, 力学モデルを用いて他の潮位面 (SEP) のモデリングを行うというのが共通の流れといえる. MSL モデルの構築には, 衛星高度計データが広く利用されているが, 精度面で不利となる距岸 15 km 程度以内の沿岸域を, 散在する験潮データ以外にどう補完するかが課題となる. この点で, 測量船を用いた KGPS 測量により沿岸域の MSL 分布のデータを取得した Bathyelli の事例は特徴的である.

また, 時期の大きく異なる験潮データを利用するため, 長期的な海面上昇の影響を考慮して MSL モデルの決定にエポックという考え方が取り入れられていることにも注目すべきであろう.

5 まとめ—わが国で使えるデータとアプローチ

わが国では日本水路協会 (2001, 2002, 2003) による「K-GPS を用いた水路測量の効率化の研究」の一環として瀬戸内海の CDL モデルを実験的に構築した事例がある. この実験では (1) 基本水準標地点の平均水面楕円体高とジオイドモデルを基に MSL モデルを構築し, (2) 瀬戸内海 123 点の Z_0 データと瀬戸内海潮汐調和定数シミュレーションの結果を基に Z_0 モデルを構築することにより, 100 m メッシュでの CDL の分布を求めている. この CDL モデルを用いて, 一部海域で多少の差が見られたものの, 広範囲にわたり従来の潮高改正と一致する潮高改正量が得られたことを確認している. これは海域の全周と島嶼で験潮データが利用可能な閉鎖性海域の事例であるが, こうした取り組みをその他の海域へと拡張し

ていくには、諸外国の例に倣い、外洋に向かっては KGPS 観測データや衛星高度計データも利用してモデルの構築を行うこととなろう。その際、楕円体基準による NLLW と LAT のモデルが最低限必要と考えられ、海陸で地形データの接続・統合を目指すならば T.P. (東京湾平均海面) 基準の標高との間での高さ・深さの変換が可能となることが望まれる。

衛星高度計が精度面で不利となる距岸 15 km 程度以内の沿岸域は、験潮データが主力である。全国的には、国土地理院の海岸昇降検知センターの登録験潮場 144 点は、水準や水位の管理が十分に行われており、MSL モデルの構築やその後の維持のための基礎となろう。諸外国の事例ではこうした常設験潮所に加えて、短期観測であっても臨時験潮所の記録を可能な限り多数取り入れ、モデルの精度を高めようとしており、参考になる。沿岸部の験潮所と沖合の衛星高度計の間を補完することが期待できる観測技術として、海上保安庁では 2016 年に自律型海洋観測装置 (AOV: Autonomous Ocean Vehicle) の運用を開始しており、潮位観測に向けた取り組みが進められている (松永・他, 2018)。AOV 観測によって求められる平均水面は臨時潮汐観測による短期平均水面に相当すると考えられるが、面的に充実したデータが今後利用できるようになると期待できる。

また、2 節で述べたとおり、わが国は概して地殻変動が顕著であることから、MSL モデルにエポックという考え方を取り入れることは一層必要と考えられる。

ところで、ジオイドは元々平均水面と極めてよく一致する等重力ポテンシャル面であるから、高精度の海域ジオイドモデルを構築することは、高精度の鉛直基準面モデルを構築する上で有利であり、今後必要になると考えられる。最近に構築された日本周辺における海域ジオイドモデル MGM2008 (笹原・他, 2008) は 1 分グリッドのモデルであり、その精度は標準偏差 0.09 m と評価されている。将来的に陸域のジオイドモデルに近い高精度のモデルの構築が望まれるが、このた

めには高品質かつ空間的に一様な重力データが求められる。国土地理院は、精密重力ジオイドモデルを新たに構築し、GNSS 測量から高精度な標高を直接決定できる仕組みを整備しており、航空重力測量の実現に向けて取り組んでいる (平岡・他, 2018)。既存の船上重力データの密度が疎な海域やデータがあっても観測年の古い海域を質量ともに充実させることができる新しい観測技術として今後が期待できる。

謝 辞

匿名の査読者には多くの重要なご指摘と有益な改訂のご提案をいただき、本稿は大きく改善されました。記して感謝いたします。

文 献

- Adams, R., J. Iliffe, M. Ziebart, J. Turner, and J. Oliveira (2008) Joining up land and sea - the UKHO/UCL Vertical Offshore Reference Frame, Hydro International, 10 (10), 7-9.
- Aviso (2011) MSS_CNES_CLS11 <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mss.html>.
- Denker, H., J.-P. Barriot, R. Barzaghi, D. Fairhead, R. Forsberg, J. Ihde, A. Kenyeres, U. Marti, M. Sarrailh, and I. Tziavos (2008) The Development of the European Gravimetric Geoid Model EGG07, in Sideris M. G. (eds) Observing our Changing Earth, International Association of Geodesy Symposia, vol 133, pp. 177-185, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Eanes, R. and S. Bettadpur (1995) The CSR 3.0 global ocean tide model. Center for Space Research, pp.25, Tech. Memo.CSR-TM-95-06.
- Egbert, G. D. and S. Y. Erofeeva (2002) Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides, J. Atmos. Oceanic Technol., 19, 183-204.
- Einarsson, I. (2011) BLAST height transformation tool. <http://blast-project.eu/media>.

- php?file=623, Accessed 2 August 2018.
- Flather, R. and J. Williams (2004) Future development of operational storm surge and sea level prediction, pp. 70, POL Internal Doc. 165.
- Hess, K.W., R.A. Schmalz, C. Zervas, and W.C. Collier (1999) Tidal Constituent And Residual Interpolation (TCARI): A New Method for the Tidal Correction of Bathymetric Data, NOAA Technical Report NOS CS 4, 99 pp., U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland.
- Hess, K.W (2002) Spatial interpolation of tidal data in irregularly-shaped coastal regions by numerical solution of Laplace's equation, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 175-192.
- 平岡喜文・矢萩智裕・松尾功二・大森秀一 (2018) 日本での航空重力測量実現に向けた国土地理院の取り組み, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SGD01-12, <https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2018/SGD01-12/public/pdf?type=in&lang=ja>, Accessed 18 October 2018.
- Howlett, C. (2009) VORF: A model for surveying to the ellipsoid, *Proceedings of the 2009 Hydrographic Society Meeting*, Scotland.
- Iliffe, J. C., M. K. Ziebart, and J. F. Turner (2007a) A new methodology for incorporating tide gauge data in sea surface topography models, *Mar. Geod.*, 30, 271-296.
- Iliffe, J. C., M. K. Ziebart, and J. F. Turner (2007b) The derivation of vertical datum surfaces for hydrographic applications, *Hydrographic Journal*, 125, 3-8.
- International Federation of Surveyors (2006) FIG guide on the development of a vertical reference surface for hydrography, FIG Publication No. 37, 28pp, the International Federation of Surveyors (FIG), Frederiksberg, Denmark, September 2006.
- 海上保安庁, 平均水面, 最高水面及び最低水面一覧表, http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/enkan/Suijun_hyo/Pub.No741/Top.htm, Accessed 14 September 2018.
- 海洋調査課航法測地室 (2012) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動—海底地殻変動観測, GPS 観測, 人工衛星レーザー測距観測—, 海洋情報部研究報告, 49, 135-144.
- Keysers, J. H., N. D. Quadros, and P. A. Collier (2013) Vertical datum transformations across the littoral zone, Report prepared for the Commonwealth Government of Australia, Department of Climate Change and Energy Efficiency, pp. 110, <https://www.crcsi.com.au/assets/Uploads/Files/Vertical-Datum-Transformations-Across-the-Littoral-Zone-v1-3.pdf>, Cooperative Research Centre for Spatial Information, Australia, Accessed 3 August 2018.
- 兒玉篤郎・宮原伐折羅・河和 宏・根本 悟・黒石裕樹 (2014) ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.1) の構築, *国土地理院時報*, 126, 67-85.
- 小板橋勝・小島秀基・根本 悟・宮原伐折羅・平岡喜文・矢萩智裕 (2018) ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.2) の構築, *国土地理院時報*, 126, 67-85.
- Lefèvre, F., F. H. Lyard, C. Le Provost, and E. J. O. Schrama (2002) FES99: A global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 1345-1356.
- Luetlich, R. A., J. J. Westerink, and N. W. Scheffner (1992) ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model of shelves, coasts and estuaries, Report 1: theory and

- methodology of ADCIRC-2DD1 and ADCIRC-3DL, Technical Report DRP-92-6, Department of the Army, Vicksburg, MS, USA.
- 政春尋志・永山 透 (2011) 東日本大震災への国土地理院の対応, 写真測量とリモートセンシング, 50 (4) : 179-184.
- 松永智也・山崎哲也・糸井洋人・加藤弘紀・増田貴仁・西村一星・土屋主税・佐藤勝彦・田中友規・野坂琢磨・石田雄三・下田 力・楠本仁麦 (2018) 自律型海洋観測装置 (AOV) の運用, 海洋情報部研究報告, 56, 68-78.
- Myers, E., K. Hess, Z. Yang, J. Xu, A. Wong, D. Doyle, J. Woolard, S. White, B. Le, S. Gill, and G. Hovis (2007) VDatum and strategies for national coverage, Marine Technology Society / IEEE OCEANS Conference. Vancouver, BC, Canada.
- National Ocean Service (NOS), NOAA (2016) Estimation of vertical uncertainties in VDatum, https://vdatum.noaa.gov/docs/est_uncertainties.html, Accessed 31 July 2018.
- National Ocean Service (NOS), NOAA (2018) Welcome to VDatum!, <https://vdatum.noaa.gov/welcome.html>, Accessed 31 July 2018.
- 日本水路協会 (2001) K-GPS を用いた水路測量の効率化の研究, 日本水路協会, 東京.
- 日本水路協会 (2002) K-GPS を用いた水路測量の効率化の研究その2, 日本水路協会, 東京.
- 日本水路協会 (2003) K-GPS を用いた水路測量の効率化の研究その3, 日本水路協会, 東京.
- NSHC (North Sea Hydrographic Commission) Tidal Working Group (2010) Merging and comparison of reference surfaces for the North Sea area, Annex D to the report of the 17th meeting of the NSHC-TWG to the 29th NSHC Conference, NSHC29-E1.2, 24pp, 29th Meeting of NSHC, Brest, France.
- 小田巻 実・中村啓美 (2003) 新しい統一水深データベースの考え方と「ダイナミック」電子海図表示の試み, 海洋情報部技報, 21, 15-28.
- O'Reilly, C., S. Parsons, and D. Langelier (1996) A seamless vertical reference surface for hydrographic data acquisition and information management, Canadian Hydrographic Conference, 26-33.
- Parker, B. (2002) The integration of bathymetry, topography, and shoreline and the vertical datum transformations behind it, International Hydrographic Review, 3 (3): 35-47.
- Pineau-Guillou, L. and L. Dorst (2011) Creation of vertical reference surfaces at sea using altimetry and GPS, Annales hydrographiques, 8.
- Ray, R. (1999) A global ocean tide model from Topex/Poseidon altimetry, GOT99.2, 58pp, NASA Tech. Memo. 209478.
- Robin, C, S. Nudds, P. MacAulay, A. Godin, B. de Lange Boom, and J. Bartlett (2016) Hydrographic vertical separation surfaces (HyVSEPs) for the Tidal Waters of Canada, Marine Geodesy, 39 (2), 195-222, DOI:10.1080/01490419.2016.1160011.
- 笹原 昇・工藤宏之・藤田雅之 (2008) 日本周辺における海域ジオイドモデルの精度検証, 海洋情報部研究報告, 44, 43-55.
- Slobbe D.C. and R. Klees (2012) Establishing a consistent vertical reference frame for the North Sea area, <http://blast-project.eu/media.php?file=623>, Accessed 2 August 2018.
- Slobbe, D. C., M. Verlaan, R. Klees, and H. Gerritsen (2012) Obtaining instantaneous water levels relative to a geoid with a 2D storm surge model, Continental Shelf Research, 52, 172-189, DOI:10.1016/j.csr.2012.10.002.
- Strykowski, G., O. B. Andersen, I. Einarsson, R. Forsberg, L. L. Dorst, and T. Ligteringen (2011) BLAST vertical datums: Overview, conventions and recommendations, <http://>

- blast-project.eu/media.php?file=568, Accessed 2 August 2018.
- Tanguy, Y.-M. (2013) Les surfaces de référence verticale BATHYELLI « bathymétrie rapportée à l'ellipsoïde », Journées REFMAR 2013, SHOM, Saint-Mandé, France, 20 June 2013.
- Turner, J.F., J.C. Iliffe, M.K. Ziebart, C. Wilson, and K.J. Horsburgh (2010) Interpolation of Tidal Levels in the Coastal Zone for the Creation of a Hydrographic Datum, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27 (3): 605–613, DOI: 10.1175/2009JTECHO645.1.
- UKHO (United Kingdom Hydrographic Office) (2009) Admiralty Tide Tables, Vol. 1, 366pp, United Kingdom Hydrographic Office.
- Wells, D. E., A. Kleusberg, and P. Vanicek (1996) A seamless vertical-reference surface for acquisition, management and ECDIS display of hydrographic data, Final contract report for Canadian Hydrographic Service, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No.179, 64pp, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, March 1996.
- れといえる。平均水面モデルの構築には、沿岸部の験潮データに加えて衛星高度計データが広く利用されているが、精度面で不利となる距岸 15 km 程度以内の沿岸域をどのように補完するかが課題となる。

要 旨

諸外国では、シームレスな水深の基準面や潮位面モデルを構築するとともに、準楕円体、海図基準面および平均水面をはじめとする各種の潮位面と陸地測量の基準面の相互間で高さ・深さの変換を一体的に実現するツールを開発するなどの取り組みが進められている。こうした取り組みの目的としては、潮位面を介さない楕円体基準の水路測量を目指すものと、海陸の地形データの接続・統合を図るものがある。本稿ではこうした諸外国の取り組み例を概観する。海図基準面および潮位面モデルの構築に際しては、楕円体基準の平均水面モデルを構築した後、力学モデルを用いて他の潮位面のモデリングを行うというのが共通の流