

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

小田巻 実, 中村 啓美 : 海洋研究室

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.

Minoru ODAMAKI and Hiromi NAKAMURA : Ocean Research Laboratory

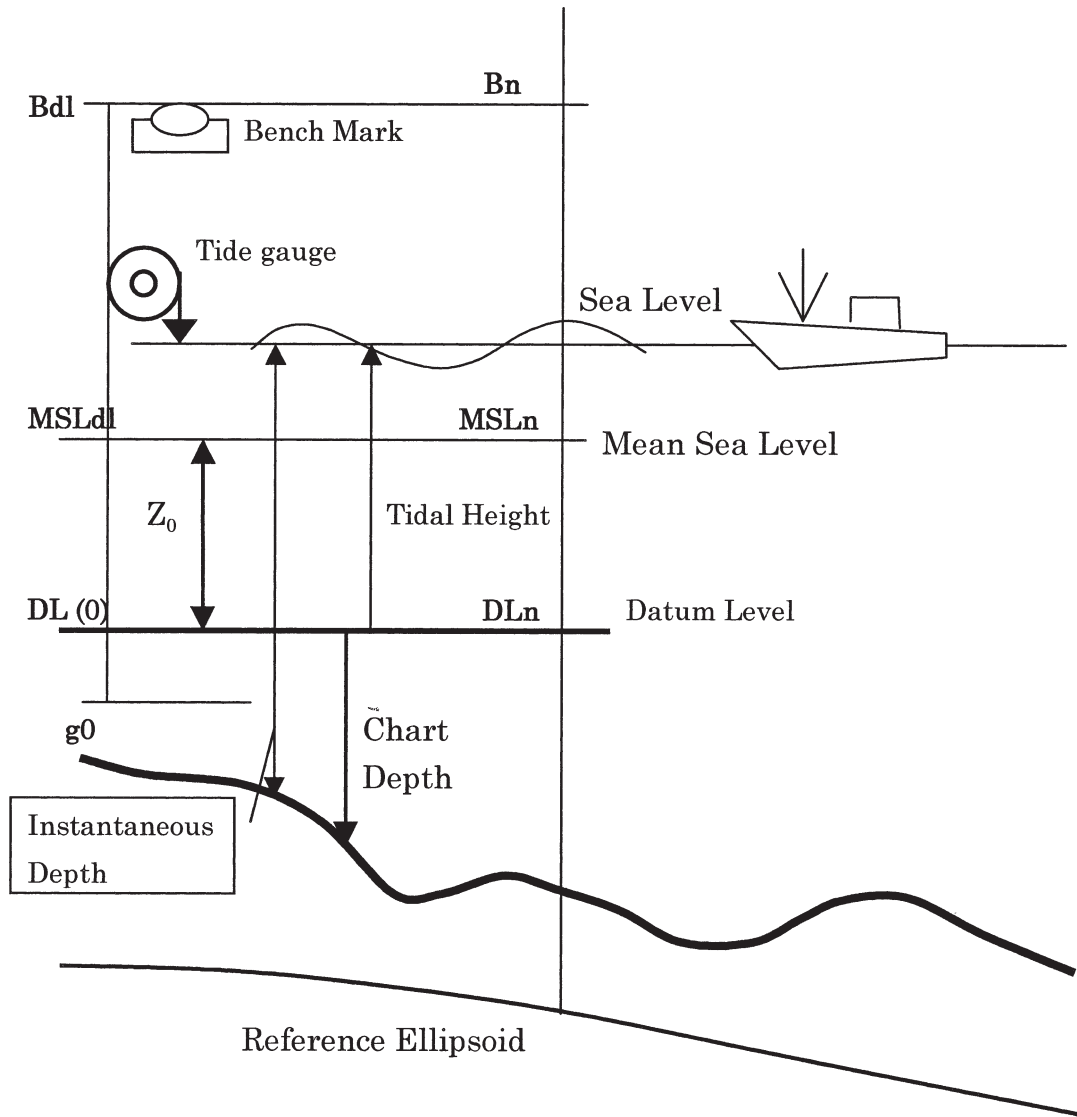
1 はじめに

K-GPS (Kinematic Global Positioning System) の出現は、刻々と変化する海上での測量に革命的な変化をもたらした。K-GPS は、基準局と移動局の二つの GPS 受信機によって、搬送波による位相干渉測位を行うもので、リアルタイムで移動局の測位を行う RTK (Real Time Kinematic) などがある。K-GPS の測位精度は、基準局から約10km以内の測位で水平誤差 2-4 cm, 高さはその 2-3 倍とされている。すなわち、洋上の船や海面の高さが、約10cm以内の精度で測れる可能性が出てきたのである。最近の測量船による評価実験においても、数cm以内の精度が達成されている (寺井孝二, 2003)。

水路測量では、現在まで、洋上の鉛直位置については、音響測深機によって海底から海面までの相対的な距離しか測れなかった。ところが、K-GPS では、地球重心に準拠した位置が測定され、鉛直位置についても準拠楕円体基準の高さとして表現される。すなわち、海底に対する相対的な海面高ではなく、その時の海面の鉛直座標位置がわかるのである。従来の測深データは、近辺の験潮所で測った潮高を使って潮高改正を行い、水深基準面からの相対的な深さとして表現されていた (第1図)。すなわち、測量範囲内 (Z_0 区分内) の海面は、験潮所の海面とまったく同じに上下すると仮定され、験潮所における水深基準面と海面の関係によって潮高改正されていた。しかるに K-GPS によって準拠楕円体基準の海面高が測定されるようになれば、準拠楕円体基準の海底面高も確定されるので、海底地形の測量に関しては

潮高改正も Z_0 区分の仮定も不要となる。逆に、平均水面や水深基準面の分布そのものを、準拠楕円体上で明らかにすることが要求される。つまり、K-GPS による測量では、基準面や海面、水深などの概念を準拠楕円体基準で再整理し、相互の関係を明らかにしておく必要がある。以下では、K-GPS による水路測量の時代に合わせ、基準面や水深、海面高の概念を整理するとともに、今後のデータベースのあり方について議論する。

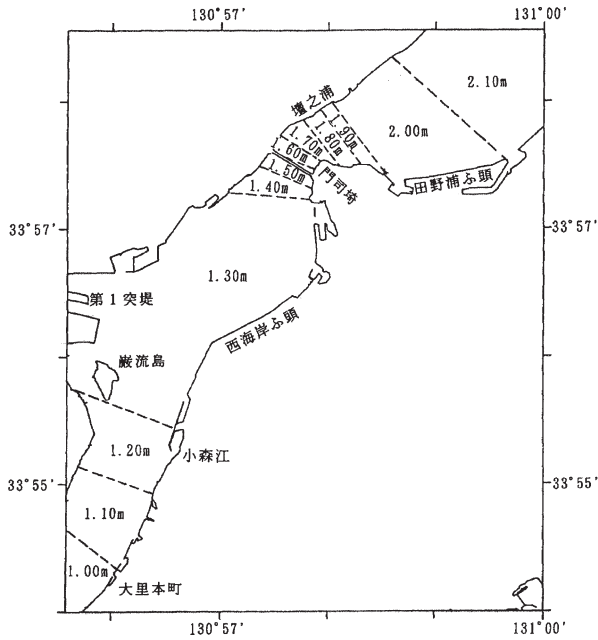
一方、航海者は、ある時刻ある場所の水深を知りたい場合は、海図で水深値を調べて、そこに近い港の潮汐表を引き、潮汐推算値を水深値に加えて予想する (第1図)。ここでも、従来の水深測量と同じく、ある範囲 (Z_0 区分, Z_0 については2節参照) の潮汐と平均水面は同じという仮定に立脚して計算されている。最近では、電子海図時代に合わせ、潮汐推算値そのものを電子海図表示装置に組み込み、ある時刻を設定したら自動的に潮汐推算値が水深に加えられて表現される「ダイナミック水深」も提案されている。 Z_0 区分内で同一の基準面、同一の潮汐の場合は、全体の水深に一律に潮汐を加えるだけなので、等深線を引き直すようなこともなく、その指示値を変えるだけであり、システム設計についても大きな問題はない。ハンブルクなど特定の港域を対象としたシステムも試作されている (B. Pillich 私信)。しかるに対象区域の Z_0 が様々に区分されているような場合は、一つ一つの水深に対して、どのような Z_0 を持ち、どのような潮汐推算値を使うべきか判別して掛からねばならず、さらには等深線そのものも時刻毎に引き直さなければならない。 Z_0 が狭い海域内



第1図 験潮所で固定された各基準面と楕円体高。
 Fig. 1 Various levels fixed in tide station.

で変わることは往々にしてあることで、例えば関門海峡では、西口の80cmから東口の210cmまで変化し、中でも門司崎周辺の早鞆瀬戸では約4kmの間に210cmから130cmまで変化する(第2図)。潮汐そのものも場所によって様々に変化するので、いくら計算機が高性能になっても、とても「ダイナミック水深」は実現できそうにない。何が問題を難しくしているのだろうか。一つには、時間変化しないはずの海底地形を、時間変化する海面、あるいは段差のある水深基準面からの相対的な深さで表現しようとするに由来する。すなわち、段差が無く時間変化をしない基準面を導入し、それを基準に海底地形を表現

すれば、等深線は描き直さなくてすむ。一方、時間空間ともに変化する海面高分布についても同じ基準面を使って時刻毎に描くようにすれば、少なくとも海底と海面は二つの事象として分離して扱うことができるので、「ダイナミック水深」表現も不可能ではないと考えられる。実は、ここで考えた「段差が無く時間変化をしない基準面」、それに基づく海底地形の水深データベースとは、K-GPSを使った水深測量と表裏一体を為すものである。単純には、準拠楕円体そのものを基準面にしてしまえば、測量成果をそのまま使うことも可能である。しかし、いくら準拠楕円体が地球の形状に準拠しているとはいえ、数十



第2図 Z₀区分の例
 Fig.2 An example of Z₀ area map, Hayatomo-Seto in Kanmon-Strait.

mのズレがあるのが普通なので、相互に換算可能になっていけば、ほかの基準面を使うことも考えられる。本稿では、「ダイナミック水深」の実現に向けて、採用すべき基準面、水深や平均水面、潮汐分布のデータベースについて議論するとともに、Z₀区分のある現状の電子海図及び水深のデータベースを使った「時間変化する水深」表示開発の試みについて紹介する。

2 基準面の概念の整理

2.1 今までの基準面

Z₀（ゼットゼロ）とは、陸上物標の高さの基準となる平均水面（MSL, Mean Sea Level）と水深の基準面（DL, Datum Level）の距離（DL=MSL-Z₀）のことで、高さのゼロと深さのゼロとのズレ（Zero to zero）を指す（第1図）。Z₀は、これまで主要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され、平均水面、最高水面及び最低水面は海上保安庁長官から公示されることになった。すなわち、水深の基準DLは、水準標

識（BM, Bench Mark）を固定点として平均水面MSLと潮汐Z₀を測量し、MSLからZ₀だけ下方と定義される。各海図には、水深基準DLの鉛直位置が、BM基準で記されている。これは、陸図では、東京湾平均海面（TP, Tokyo Peil）を基準に水準原点（BM）の標高を24.414mとして固定し、各地の標高をTP基準で測るのと同じである。違いは、陸図の標高の基準がすべてTPに統一されているのに対し、海図では海図毎あるいは測量範囲毎にMSLとDLが定義され、統一されていないことである。これは、陸図の標高では、地面の傾斜や川の流れを見る上で、静止水面としての水準面がたいへん重要であるのに対し、海には常に流れがあるため、平均水面は静止水面ではなく、また潮汐も海域毎に異なるので、各地のMSL, DLを統一することは無意味であったことによる。

2.2 最低水面及び天文最低潮位

最低水面は、法令上ではどのような状態を指すのか明文規定はないが、「通常の状態で海面がそれ以下に下らない面」と解される。潮汐は、いつでも存在するので、津波やたか潮などの異常潮位を除いて、普通に推算される最低推算潮位が最低水面ということになる。国際水路機関では、最低水面として天文最低潮位（LAT, Lowest Astronomical Tide）の採用を勧告している。現在の略最低低潮面は、潮汐計算や長期の観測が困難であった時代に便宜的に決めた実用上の基準なので、当然、通常の状態でも年に何度かはそれ以下に潮位が低下することはある。これに対し、LATは、長期間の潮汐推算を行った最低水面とされるので、当然のことながら推算潮位がLAT以下に下がることはない。LATの計算方法は厳密には規定されていないが、常識的には、1年以上の潮汐観測データに基づいて算出された調和定数を使って、月の昇交点周期18.6年以上の計算で求めた最低水面、とされる。このようにして求められたLATで潮汐による海面変動を考慮したとしても、実際的水深を測る基準とするには、平均水面をどこに取るかが問題である。現在では、5年ないし10年以上の平均水面を採用することになっている。これは、1年程度の平均水面では、数cmから10

cm程度まで変動することは希ではないからである。このようにして算出・決定された平均水面を、資料整理上の日平均や月平均、年平均水面と区別するため永年平均水面と呼ぶが、水路測量では平均水面と略されることも多いので注意が必要である。このように長年にわたる潮汐観測で求めた永年平均水面とLATによって水深の基準面DL即ち最低水面を決めるのが字義に適っていると思われる。しかしながら、現在のところは、まだ、NLLWで定義されたDLが多方面で使われているため、LATに変更とは行かないのが実状である。

2.3 標高と準拠楕円体高

一方、平成14年の水路業務法改正では、世界測地系が採用されることになり、水平位置は、経緯度原点から展開された日本測地系に代わってWGS84準拠の経緯度で示されるようになった。鉛直位置についても、水準測量で求められるTP準拠の標高Htpとともに、GPS測量によってWGS84準拠楕円体上の幾何学的な高さHnも求められるようになった。ここで、添字は高さの基準を表し、添字nは準拠楕円体、添字tpは東京湾平均海面TPを表している。TPの準拠楕円体高をTPnとすると、

$$Htp = Hn - TPn \dots\dots\dots(1)$$

と表される。逆に、このGPS測量と水準測量を組み合わせればTPnもわかる(第3図c)。TPは、「東京湾平均海面」を水準面(静止水面)に沿って延ばしたものである。地球全体の平均水面であるジオイドとは厳密には異なるが、近似的なジオイドと見なされる。すなわち、TPnは、ジオイド高Nとほぼ等しい。このようなジオイド高測量データと、重力ジオイドモデルを統合して構築された日本周辺のジオイドモデル「日本のジオイド2000」「GSIGEO2000」が国土地理院から公表されている(安藤ほか、2002、<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geoid/>)。このジオイドモデルを使えば、水準測量によらなくても、GPSで経緯度とともに楕円体高を測定するだけで標高Htpが求められることになる。すなわち、今まで陸上物標の高さは、Htpがわかっている水準点から水準測量や高低測量によって求めるしかなかったが、

GPS測量で直接、楕円体高を求め、ジオイドモデルで標高がわかることになる。今のところ、GPSによる鉛直位置の精度が10cm程度のこともあり、GPS+ジオイドモデルで求めた標高の精度は20cmぐらいと言われ、まだまだ水準測量による標高の精度には達していないが、持ち運びが簡単なGPSでどこでもいつでも標高が求められるようになったことは、たいへん有意義と考えられる。

2.4 水準標識の楕円体高測定

海洋情報部でも、このようなGPSによる楕円体高測量の意義に鑑み、数年前から平均水面や水深の基準面を固定している水準標識BMの楕円体高Bn測定を開始している。BMに対する水深基準面や平均水面の高さはわかっているため、Bnを介して、それぞれの楕円体高DLnやMSLnもわかる(第1図)。

いま、準拠楕円体上の高さを添字n、基準面DL上の高さを添字dlで表すことにすると、BdlとMSLdlは、

$$Bdl = Bn - DLn \dots\dots\dots(2)$$

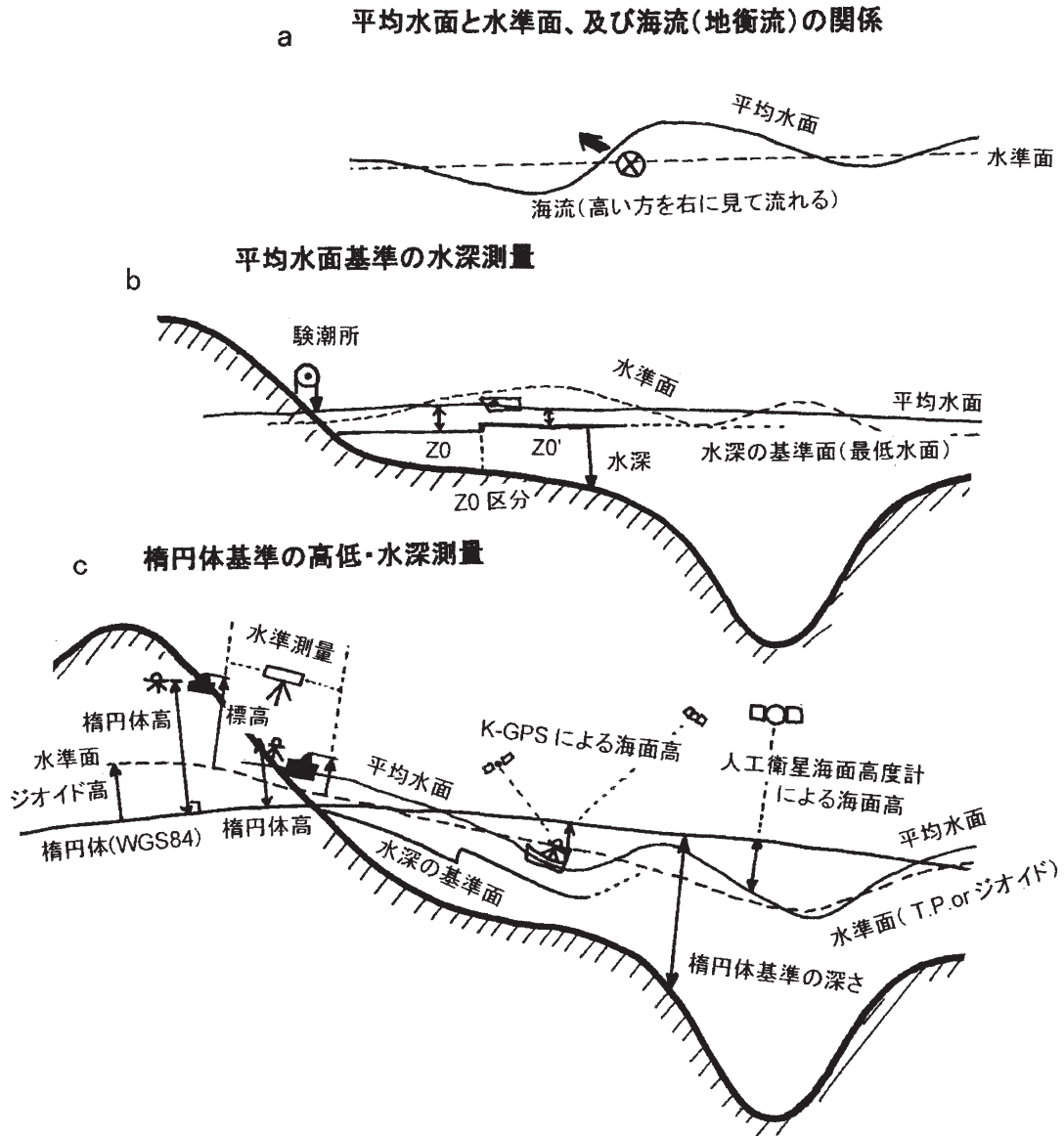
$$MSLdl = MSLn - DLn (=Z_0) \dots\dots\dots(3)$$

と表すことができる。(2)と(3)を引き算すると

$$Bmsl = Bdl - MSLdl = Bn - MSLn \dots\dots\dots(4)$$

となる。通常、水路測量のたびに副標観測など験潮を行ってBmslを検査・確認している。BmslとBdlは験潮から既知なので、(3)式と(4)式から平均水面高MSLnと基準面高DLnがわかり、DLもMSLも地球重心に関係づけることができる。このようにして、ある地点のDLやMSLの高さはBMに対してだけでなく、準拠楕円体を基準にして確定することができる。従って、BMが移動したとしても準拠楕円体からDL及びMSLを再現することができる。

しかしながら、準拠楕円体は平均水面MSLと平行とは限らないので、MSLnは場所毎に異なる(第3図c)。従って、GPS測量で準拠楕円体上の海面高を測り、平均水面MSL基準の高さで比較しようとすると、あらかじめ平均水面高の分布MSLn(ϕ, λ)を知っておく必要がある。平均水面は、静止



第3図 平均水面基準の水深測量と橢円体基準の水深測量. a: ジオイドと平均水面の関係, b: 平均水面基準の水深測量(平均水面は験潮所で固定されている), c: 橢円体基準の水深測量並びに陸上の高低測量.

Fig. 3 Depth sounding referred to Mean Sea Level, and that referred to the geodetic ellipsoid. a: Relation between Geoid and MSL, b: Depth sounding referred to MSL fixed in the tide station, c: Depth sounding and height survey referred to the geodetic ellipsoid.

水面ではないのでジオイドやTPとは異なるが、河川のような恒常的な強い流れがなければ、かなり似ているものと考えられる。そこで3節で水路測量の際の基準面分布を論ずる前に、TPnとMSLnの違いを見ておくことにする。

2.5 平均水面高 MSLtp の分布

MSLnとTPnとの差MSLtpは、

$$MSL_{tp} = MSL_{dl} - TP_{dl} = MSL_n - TP_n = MSL_n - N \dots\dots\dots(5)$$

となり、DLから測っても準拠橢円体から測っても同じである。水路測量の水準標識は、通常、国土地理院の水準点網に対して取付水準測量が行われ、TPdlが算出され、さらにMSLdl (Z0) も与えられているのでMSLtpがわかる。

第1表 各地の平均水面の標高 MSLtp (海洋情報部のHPより)

Table 1 Some datum levels and mean sea levels around Japan. Bdl: Bench mark height, MSLdl: Mean sea level height, TPdl: Tokyo Peil surface height, referred to the datum level. MSLtp: MSL heights referred to TP.

地名	Bdl	MSLdl	TPdl	MSLtp
	(m)	(m)	(m)	(cm)
本州東岸				
白糠	3.51	0.9	0.92	-2
八戸	6.11	0.85	0.86	-1
釜石	2.17	0.86	0.86	0
鮎川	3.41	0.88	0.97	-9
塩釜	3.15	0.92	0.9	2
仙台	2.57	0.93	0.84	9
東京湾				
千葉	3.82	1.2	1.21	-1
横須賀	3.94	1.1	1.17	-7
本州南岸				
網代	3.73	0.92	0.9	2
清水	2.84	0.95	0.91	4
浦神	3.29	1.05	0.94	11
串本	3.34	1.05	0.96	9
御坊	10.44	1.1	0.96	14
四国南岸				
室戸岬	3.16	1.1	1.06	4
高知	5.34	1.08	0.94	14
須崎	3.57	1.12	1.01	11
瀬戸内海東部				
海南	4.33	1.11	0.96	15
洲本	2.06	0.95	0.92	3
尼崎	0.55	0.95	0.86	9
垂水	2.59	0.8	0.74	6
明石	3.3	0.7	0.67	3
高砂	4.26	0.9	0.86	4
九州南岸				
佐伯	3.79	1.05	0.9	15
細島	5.59	1.06	0.96	10
枕崎	4.58	1.5	1.35	15
九州北西岸				
佐世保	4.1	1.65	1.49	16
唐津	3.08	1.18	1.05	13
博多	3.6	1.1	0.97	13
本州北西岸				
萩	2.95	0.48	0.31	17
江津	3.69	0.24	0.1	14
田後	3.18	0.2	0.05	15
宮津	1.73	0.18	0.05	13
舞鶴	1.31	0.19	0.06	13
敦賀	3.29	0.18	0.05	13
七尾	1.27	0.2	0.05	15
魚津	1.23	0.22	0.06	16
柏崎	0.98	0.21	0.02	19
秋田	1.66	0.19	-0.15	34
船川	2.68	0.18	-0.12	30
能代	4.59	0.2	-0.12	32
深浦	3.8	0.18	-0.01	19
鱒ヶ沢	1.38	0.2	-0.08	28

第1表は、海洋情報部のインターネット・ホームページで公開されている平均水面等一覧から抜き出して作成したMSLtp等の分布である。ただし、近隣の値と比べて10cm以上もの相違があるものは省いている。なぜならば、10cmもの水位差 Δ があれば、トリチェリーの法則 ($V = \sqrt{g \cdot \Delta}$) から概略1 m/sもの流れが存在することになり、これが恒常的にあるとすれば大きな河川のようなものしか考えられないからである。

MSLtpの分布は、東京湾では湾外に向かって低くなっている。本州南岸～四国南岸～九州南岸では、MSLは、TPよりも10cm程度高い。九州西岸から北岸に掛けては15cmぐらい高く、日本海沿岸では北上するにつれて高くなり、秋田・能代付近でTPよりも30cm高くなる。本州東北沿岸では、TPよりも低くなっており、津軽海峡では西から東に20cm以上の落差がある。

このように、MSLtpは、普通、10cm内外であり、大きくても30cm程度である。一方、ジオイド高Nは、日本周辺で数十mの高低分布を示すことから、(5)式からMSLnもNに追随して同様の高低差があると考えられる。

なお、第1表は、取付水準測量時期やMSLを採用した時期もまちまちなので、今後、GPS測量が進めば、MSLn、TPnが改訂されて信頼性の高いものができると期待される。

3 シームレスな基準面と各種水深データベース

3.1 平均水面と水準面並びに海流（地衡流）の関係

水準面とは、水を静止させたときの水面（静止水面）のことで、平均水面とは、観測した水位に対して時間平均した水面のことである。海面水位を時間平均したものを平均海面と呼ぶこともあるが、平均水面と同じである。東京湾平均海面を通る水準面がTP面で、地球全体の海水を静止させたと仮定した水準面がジオイド面である。時間平均した期間中、継続して流れがあれば、水面が傾いているので、必ずしも平均水面は静止水面ではない。従って、平均水面と水準面のずれは、流れの指標となる。第3図

a は、海流と水準面並びに平均海面の関係を示す。黒潮などの海流があると、平均海面は水準面からずれて高低分布が生じ、地衡流の関係から北半球では海面の高い方を右に見て海流が流れている。平均海面は等圧面と見なされるので、言い換えると、海面近くの水準面上で圧力勾配が生じ、その圧力勾配とコリオリの力が釣り合うように海流が流れている。従来は、洋上の海面高は求められなかったので、各層観測によって密度/比容の分布を求め、深度1000m ぐらいに等圧面と水準面が一致した無流面を仮定し、比容を積分することによって平均海面高を求めていた。このようにして求めた平均海面を力学的海面高 (Dynamic Height) という。しかし仮定された無流面との関係から平均水面の相対的な高低分布がわかるだけで、高さを測量する固定点はどこにも無い。

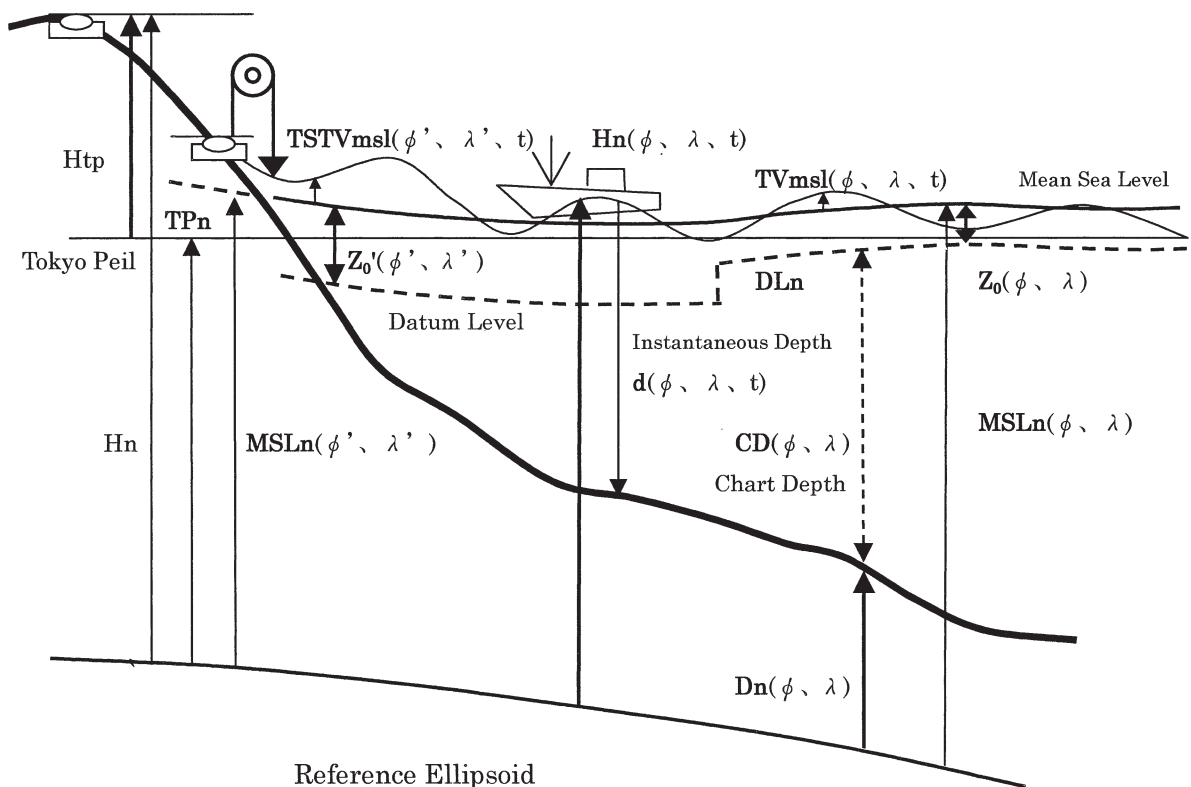
3.2 平均水面を基準とした水深測量

第3図bは、平均水面とDLを基準とした水深測量を表している。平均水面は、験潮所の水準標識で

固定されている。潮汐の異なる海域に測量が及ぶ場合には、臨時験潮所を設置、観測値から新たに平均水面と Z_0 を決定し、DLを設定し直す。短期の験潮所の場合、平均水面は、基準験潮所における短期平均水面と永年平均水面の関係で補正する。すなわち、第3図bでは、水深基準面は Z_0 分布の区切りで段差があり、平均水面は連続していると見なしているものの、水準測量で高低差を確認しているわけではないので、TP面(水準面)との関係は必ずしも明らかではない。つまり、各測量区域の平均水面とDLは、その地の験潮所の水準標識に対して固定されているだけで、相互の関係は必ずしも明らかではない。

3.3 楕円体を基準とした水深測量

GPS測量の高さは、準拠楕円体に下ろした垂線の距離で定義される。測量船で測られるのは、時刻 t における経緯度 (ϕ, λ) 並びに K-GPS による海面の楕円体高 $H_n(\phi, \lambda, t)$ と音響測深機による海面から海底までの測得水深 $d(\phi, \lambda, t)$ である(第4図)。この時、海底面の楕円体高 $D_n(\phi, \lambda)$ は、



第4図 新しい統合水深データベース

Fig. 4 Proposed integrated depth database $\{MSL_n, Z_0, D_n\}$ referred to the geodetic ellipsoid, and height $\{H_n\}$ survey by K-GPS and instantaneous depth $d(\phi, \lambda, t)$ sounding by echo-sounder.

$$Dn(\phi, \lambda) = Hn(\phi, \lambda, t) - d(\phi, \lambda, t) \dots\dots\dots(6)$$

となり、K-GPS と音響測深を組み合わせることによって Dn が直接測量できる。つまり、海底の地形そのものが、海面高に関係なく測量できるのである。従って、問題は、水深を確定する基準面を、楕円体基準でどのように設定・測量するのかに帰着する。

いま、永年平均の計算を $\langle \dots \rangle$ で表すことにして $Hn(\phi, \lambda, t)$ に施すと、

$$\langle Hn(\phi, \lambda, t) \rangle = MSLn(\phi, \lambda) \dots\dots\dots(7)$$

$$Hn(\phi, \lambda, t) = TVmsl(\phi, \lambda, t) + MSLn(\phi, \lambda) \dots\dots(8)$$

となり、TVmsl は、平均水面 MSL から測った海面高で潮汐などによる時間変化部分、MSLn は、楕円体基準の平均水面高で時間変化しない部分を示している。(8)式の Hn を(6)式に代入すると、

$$d(\phi, \lambda, t) - TVmsl(\phi, \lambda, t) = MSLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda) \dots\dots\dots(9)$$

$$d(\phi, \lambda, t) = TVmsl(\phi, \lambda, t) + MSLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda) \dots\dots\dots(10)$$

となる。(9)式の右辺は、平均水面 MSLn を基準面とした水深を表している(第4図)。いま、 $\{A\}_{\phi_{0west}}$ を A の最低値を表す記号として、(10)式の両辺に施すと

$$\begin{aligned} \{d(\phi, \lambda, t)\}_{\phi_{0west}} &= \{TVmsl(\phi, \lambda, t) + MSLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda)\}_{\phi_{0west}} \\ &= \{TVmsl(\phi, \lambda, t)\}_{\phi_{0west}} + MSLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda) \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

となる。左辺は、海面が最も低下したときの海底までの距離だから、最低水面から測った海底すなわち海図の水深を表している。これを $CD(\phi, \lambda)$ 、平均水面から最低水面までの距離を $Z_0(\phi, \lambda)$ とすると、(11)式は

$$CD(\phi, \lambda) = -Z_0(\phi, \lambda) + MSLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda) = DLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda) \dots\dots\dots(12)$$

$$(ただし、DLn(\phi, \lambda) = MSLn(\phi, \lambda) - Z_0(\phi, \lambda))$$

となり、DLn(ϕ, λ) が、海図の水深基準面すなわち最低水面を表している。 $Z_0(\phi, \lambda)$ は、別途設定して所与

条件として与えることができるので、NLLW でも LAT でもかまわない。いずれにしても、何らかの方法で MSLn が確定できれば、DLn は確定する。GPS 測量で Hn、測深で d が与えられれば、(6)式から海底地形 Dn がわかるので、海図水深 CD は、(12)式から $CD = DLn - Dn$ として求められる。すなわち、GPS 測量以前は、海面と海底の相対距離 d しか測定できず、驗潮に基づく潮高改正によって水深基準面からの高さに統一する必要があったが、GPS 測量による Hn の測定によって海底の楕円体高 Dn をいきなり求めることができるようになった。海図水深 CD に換算するには、平均水面 MSLn 及び Z_0 、もしくは水深の基準面 DLn を適当に設定してやればよいのである。つまり、あらかじめ DLn を設定しておけば、その都度、潮高改正をする必要はなくなるのである。

MSLn の求め方としては、常設驗潮所などでは、長期間の観測データから直接求めることができるが、他の場所では観測期間が限られるので、別の方法を考える必要がある。瀬戸内海各地の驗潮所の MSLn を内挿補間して、全域の MSLn(ϕ, λ) を作る試みも行われている(日本水路協会, 2001)。潮汐変動が卓越するならば、潮汐数値モデルを使って $TVmsl(\phi, \lambda, t)$ を見積もり、海面高 Hn に対して補正し、

$$MSLn(\phi, \lambda) = Hn(\phi, \lambda, t) - TVmsl(\phi, \lambda, t) \dots\dots(13)$$

の関係から MSLn を求めることも考えられる。衛星高度計の海面高データの処理には、このような方法が使われることもある。また、

$$MSLn = MSLtp + TPn \dots\dots\dots (再掲) (5)$$

の関係から、ジオイド高 N(TPn) をもとに、MSLtp を加えて MSLn とすることも考えられる。第1表のように沿岸部の MSLtp の変化は、高々30cm程度であり、TPn の空間変化に較べて十分小さい。例えば、東京湾では、MSLtp が10cmしか変化しないのに対し、TPn は東西15km程度で約1.5mも変化する。従って、沿岸部で測量された MSLtp を沖合まで外挿し、N(TPn) のモデルと組み合わせて MSLn とすることが考えられる。しかしながら、あまりに沖合にな

ると、黒潮が流れて第3図 a のように MSL_{tp} に 1 m 以上の高低差があることがわかっており、適用範囲に注意する必要がある。

3.4 従来の験潮・潮高改正による水深測量

いま、験潮所(φ',λ')で観測された潮汐を TSTV_{mssl'} とすると、(10)式は、

$$\begin{aligned} d(\phi, \lambda, t) &= TV_{mssl}(\phi, \lambda, t) + MSL_n(\phi, \lambda) - D_n(\phi, \lambda) \\ &= TSTV_{mssl}'(\phi', \lambda', t) + (TV_{mssl} - TSTV_{mssl}') + MSL_n - D_n \\ &= TSTV_{mssl}' + MSL_n - D_n + \Delta TV \quad \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

(ただし、 $\Delta TV = TV_{mssl} - TSTV_{mssl}'$)

となる。TSTV_{mssl'} は、(φ',λ')の平均水面 MSL' から測定した海面高で、 ΔTV は現場と験潮所の潮汐の違いを表している。潮高改正では、測得水深 d に Z₀ と験潮所の潮汐 TSTV_{mssl'} を補正するので、(14)式は、

$$\begin{aligned} d(\phi, \lambda, t) - Z_0(\phi, \lambda) - TSTV_{mssl}'(\phi', \lambda', t) \\ &= MSL_n(\phi, \lambda) - Z_0(\phi, \lambda) - D_n(\phi, \lambda) + \Delta TV \\ &= CD(\phi, \lambda) + \Delta TV \quad \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

と表すことができる。従って、(12)式の水深値 CD とは、 ΔTV だけの差がある。測量区域の海面の昇降がどこでも験潮所とほぼ同じとみなせる場合、 ΔTV は小さくなるものの、大きな副振動や急潮流が生じている様な場合には、 ΔTV は無視できないほど大きくなる可能性がある。その意味で K-GPS と測深機による新しい水深測量は、H_n の測定精度がまだ不十分であることや、洋上の MSL_n の求め方が確立されていないなどの問題点が残るものの、 ΔTV の曖昧さのない分、見通しがよいと考えられる。

このようにして求めた水深値を CD*(=CD+ ΔTV) とし、D_n の近似値 D_n* (=D_n- ΔTV) を求めるには、(15)式の関係から、

$$\begin{aligned} D_n^*(\phi, \lambda) &= MSL_n(\phi, \lambda) - Z_0(\phi, \lambda) - CD^*(\phi, \lambda) \\ &= DL_n(\phi, \lambda) - CD^*(\phi, \lambda) \quad \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

となり、平均水面 MSL_n(φ,λ)の分布から Z₀だけ下方に取った DL_n に対して、CD*だけ下のところが

D_n*ということになる。ここで注意しなければならないのは、MSL_n(φ,λ)は、現場の平均水面であって、験潮所の MSL_n(φ',λ')ではないことである。既述のように MSL_n(=MSL_{tp}+TP_n) の変化のほとんどを占める TP_n が準楕円体に対して変化しているため、Z₀区分内の Z₀ は一定であっても MSL_n は変化しており、験潮所の MSL_n(φ',λ') を現場の MSL_n(φ,λ) に流用するわけにはいかないのである。もちろん、狭い範囲ならば MSL_{tp} の変化は小さいので、験潮所の MSL_{tp}(φ',λ') を使って

$$MSL_n(\phi, \lambda) \sim MSL_{tp}(\phi', \lambda') + TP_n(\phi, \lambda) \quad \dots(17)$$

と近似することはできよう。このようにして MSL_n(φ,λ)を見積もることができれば、既存の水深値 CD*から(16)式を使って海底高 D_n*を得ることができる。

3.5 これからの水深データベース

現在作成されているほとんどの水深のデータベースは、海図あるいは測量原図から読みとられた水深データを経緯度と組み合わせた(φ,λ,CD)のデータから構成されている。これは、今までの水深データベースが、紙海図作成のためのデータベースを目的にしていたためと考えられる。しかしながら、航海情報の表現媒体は、紙に印刷した海図から電子海図表示システム(ECDIS)に変化を遂げ、紙海図には載せることができなかった多様な情報でも ECDIS は取り込むことができるようになった。水深データについても、今までのような最低水面から測った水深値だけでなく、例えば Z₀ 値なども属性として持たせることもできるのである。同時に、今までの音響測深機による測深に加えて、K-GPS で楕円体上の鉛直位置も得られるようになった。このような時代の要請から、K-GPS と ECDIS を前提とした水深並びに関連データベースのあり方について、いろいろな方面から検討されてきた。カナダ水路部は、特に水深を表す統一的な基準面の検討を New Brunswick 大学に委託し、そのような条件を満たす「無継ぎ目(シームレス, Seamless)鉛直基準面」として準楕円体を採用し、他の基準面との関連付け並びに相互変換可能なデータベースとすべきだ、との回答を

得た(D.Wellsほか, 1996). 2002年4月に開かれた国際水路機関総会でも, 米国からこのような鉛直準拠基準面採用の提案がなされ, 潮汐委員会に諮問, 検討されることになっている. 以下では, 今後の水深データベースの条件とあり方について考える.

現在の水深データは, 水深基準面から海底までの相対距離 CD なので, 水深基準面が異なれば, 水深の高低を直接比較することができない(第3図b). また, 水深値が変化したとしても, 海面 MSLn (基準面 DLn) が変化したのか海底 Dn が変化したのか判別できない. Z₀区分を参照して平均水面基準の水深に直したとしても, 平均水面を規定している験潮所が異なれば平均水面がずれている可能性があり, TP などの別の基準を参照して比較する必要がある

(第3図c). すなわち, 現在の水深データベースは, 見かけ上, 等質なデータが並んでいるように見えるが, 継ぎ目(Seam, シーム)のあるデータとなっている. 特に, 陸上の標高と水深の基準が Z₀分だけずれているため, Z₀を加減しなければ陸の地形と海の地形を接続することができない, など, 混乱の元になっている. すなわち, 海陸一体で, 継ぎ目のない一貫した基準で表現されている必要がある.

このような一貫性・連続性を持つことを前提として, 今後の水深データベースに必要な条件をまとめると,

- a, 時間変化せず, 空間的にも一貫性のある統一基準面上での定義.
- b, GPS や音響測深機などによる測量手法の明示.
- c, 他の高さデータとの換算及びそれに必要なデータの用意. 特に海図水深との換算.

a, b の条件を満たす基準面は, すでに3.3で述べたように世界測地系準拠楕円体であり, 整理されるべき水深や標高のデータは, 海底の楕円体高 {Dn} 並びに陸の楕円体高 {Hn} である(第4図). これらは幾何学的な高さなので, 重力ポテンシャルとしての標高のような物理的意味はないものの, 一体の地形として連続かつ統一的に扱うことができる. しかし, 陸上の土地の高低としては, 水が高いところから低いところに流れるように, 水準面からの高さ, すな

わち標高 {Htp} が必要である. 両者を換算するには, (1)式のように TP 面の楕円体高 TPn がわかればよい. 2.2節, 2.3節で述べたように, GPS 測量と水準測量で水準点や電子基準点の {Hn, Htp} がわかれば, (1)式から {TPn} がわかる. これらの {TPn} の点データを空間的に内挿してジオイド高 {N} モデルが作られており, 緯度経度 (ϕ, λ) が与えられれば, どこでも N がわかるようになっている. すなわち, ユーザーは, GPS さえ持っていれば, (ϕ, λ) と Hn がわかるので, その点の TPn をモデルで検索すれば, 標高 Htp がわかる. このように陸上の高さのデータベースとしては, {Hn, Htp} の測量結果, 成果としてジオイドモデル {N} があれば, 必要十分と考えられる.

一方, 海上で必要なのは, 海面から海底までの深さ d である(第4図). (10)式のように, d は, 時間変動 TVmsl と平均水面 MSLn, 海底高 Dn で表されるが, TVmsl は, 時間変化するので, 変動の最低 {TVmsl}_{t_{0west}} を適当に取ることにして, {MSLn, Z₀, Dn} のデータセットが考えられる. Dn は, (6)式のように K-GPS で Hn, 音響測深機で d を測れば, 確定する. MSLn は, 験潮所では BM の楕円体高 Bn から験潮成果を使って求められる. 験潮所のない海上の MSLn は, 直接的には求められないが, 3.3や3.4節で述べたように MSLtp や TPn を使って補間し, 近似的に求めることにする. 水深基準面 DLn や海図水深 CD は, このデータセットに(12)式や(16)式の次の関係を使って換算することができる.

$$DLn(\phi, \lambda) = MSLn(\phi, \lambda) - Z_0(\phi, \lambda)$$

$$CD(\phi, \lambda) = MSLn(\phi, \lambda) - Z_0(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda)$$

既存の水深資料の場合は, CD, Dn の代わりに CD*, Dn* とすればよい.

3.6 時間変化する水深の推定方法

ある時ある場所の水深値 d は, (6)式や(10)式から

$$\begin{aligned} d(\phi, \lambda, t) &= Hn(\phi, \lambda, t) - Dn(\phi, \lambda) \\ &= TVmsl(\phi, \lambda, t) + MSLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda) \end{aligned}$$

と表され, TVmsl が推定できれば水深値が予報できる. すなわち, 俗に言う「ダイナミック水深」と

は、海面 TVmsl の予報方法に帰着する。この海面の時間変化 TVmsl のほとんどは潮汐なので、調和定数が与えられれば概略、予報することができる。しかしながら、現在のところは、主要港の調和定数が求まっているだけで、海上の潮汐は同時潮図などで推定するしかない。将来は、潮汐の数値モデルが開発され、任意の (ϕ, λ, t) に対して TVmsl が計算できるようになると思われるが、現段階では、分潮数が少なかったり、地形分解能が悪く沿岸の詳細な分布は再現できないなど、限定的な予報モデルしかできていない。潮汐表の補助港などで使われている推定方法を利用して、標準港の推算値 PTSTVmsl' に対して、現場の推算値 PTVmsl を求めることにすると、

$$PTVmsl(\phi, \lambda, t) = C \cdot \{PTSTVmsl'(\phi', \lambda', t + \Delta t)\} \dots\dots\dots(18)$$

$$PTHdl(\phi, \lambda, t) = C \cdot \{PTSTHdl'(\phi', \lambda', t + \Delta t) - Z_0(\phi', \lambda')\} + Z_0(\phi, \lambda) \dots\dots\dots(19)$$

となる。ここで、 Δt と C は潮時差と潮高比、PTSTHdl' は標準港の推算潮高、PTHdl は補助港のそれを表している。潮汐表には、各補助港の潮時差・潮高比・ Z_0 の表が掲載されている。(19)式と(14)式を使って水深の予報値 $Pd(\phi, \lambda, t)$ は、

$$\begin{aligned} Pd(\phi, \lambda, t) &= PTVmsl(\phi, \lambda, t) + MSLn(\phi, \lambda) - Dn(\phi, \lambda) \\ &= C \cdot \{PTSTHdl'(\phi', \lambda', t + \Delta t) - Z_0(\phi', \lambda')\} + MSLn - Dn \dots\dots\dots(20) \end{aligned}$$

となる。つまり、推算対象海域の潮時差 Δt ・潮高比 C が与えられれば、(20)式で予報できる。次節で説明する「ダイナミック水深」の計算方法は、 Z_0 区分に対応した標準港を選び、 Z_0 区分内ではその潮高をそのまま PTVmsl に使う方式 ($C=1, \Delta t=0$) となっている。

水深予報値 Pd は前もって計算することができ、現場で水深 d を測れば、その差 ΔPd すなわち誤差を把握することができる。もちろん、この差 ΔPd には潮汐予報の誤差や潮汐以外の変動成分が含まれているが、津波やたか潮のような短期的な現象でなく、

異常潮位のように数日以上続くような現象であれば、 Z_0 区分の範囲を越えて広い範囲で同様と考えられる。従って、予報値 Pd に ΔPd を補正してやると、

$$\begin{aligned} Pd^*(\phi, \lambda, t) &= Pd(\phi, \lambda, t) + \Delta Pd \\ &= Pd(\phi, \lambda, t) + (d(\phi', \lambda', t') - Pd(\phi', \lambda', t')) \dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

となる。験潮所がテレメータ化されている港の周辺では、 $\Delta Pd (= O - P)$ をリアルタイムに監視することができるので、より信頼度の高い Pd^* を得ることができる。

4 「時間変化する水深表示」の考え方

印刷された海図には、水深 CD のほか、潮汐記事として Z_0 や大潮升・小潮升、潮時差などが掲載されている。また、潮汐表から任意の日時の潮高 PTHdl (ϕ, λ, t) を知り、CD に加えれば海底までの深さ $d(\phi, \lambda, t)$ を知ることができる。ところが、電子海図には、現在のところ、これらの情報は含まれておらず、電子潮汐表についても標準的なものはない。その原因の一つは、電子海図表示装置 ECDIS 上で、潮汐のような時間変件事象を表現する方法についてまだ標準的なものができていないためと思われる。しかしながら、航海の効率化と安全性の向上にとっては必要不可欠の情報であり、ここでは、潮汐を加味した「時間変化する水深表示」について考える。

現在の電子海図の水深データ CD には、前節まで述べたような水深の基準面や潮高改正の情報は含まれていない。そこで Z_0 区分に対応して水深基準面や潮汐を与えることにする。すなわち、水深データの経緯度から対応する Z_0 区分を割り出し、対応する潮汐 PTHdl を考える。つまり、電子海図データ CD 以外に Z_0 区分データと対応する潮汐推算データを用意する。 Z_0 区分毎に潮汐推算値があるとは限らないので、標準港の推算値 PTSTHdl' と Z_0' を考えて、(20)式をさらに変形すると、

$$\begin{aligned}
 Pd(\phi, \lambda, t) &= C \cdot \{PTSTHdl' - Z_0'\} + MSLn - Dn - Z_0 + Z_0 \\
 &= C \cdot \{PTSTHdl' - Z_0'\} + CD + Z_0 \dots\dots\dots(22)
 \end{aligned}$$

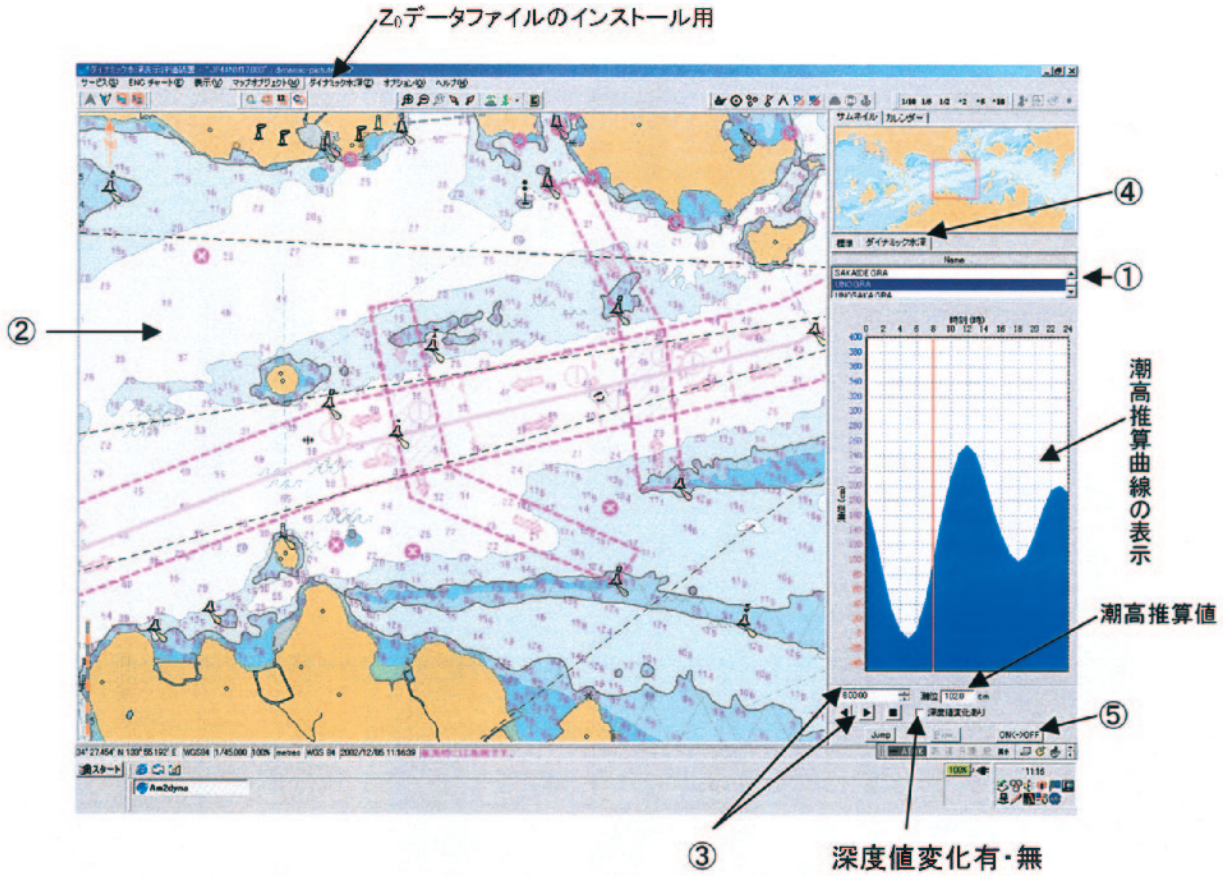
となる。Cは標準港に対する潮高比である。つまり、Z₀区分ごとに、Z₀そのもの並びに対応する標準港PTSTHdl'の指定及び潮高比Cを用意すれば、(21)式から任意時刻の即時的な水深の推算値Pdを得ることができる。

現在、海図や電子海図の等深線は、水深データCDに対して描かれている。Z₀区分内では平らな海面が平行的に昇降すると仮定すれば、時刻毎に等深線の指示値を変えるだけで等深線データは同じものを使うことができるが、Z₀区分をまたがるところでは、等深線に段差が生じるため、使うことができない。等値線を描くソフトウェアを使えば、指定時刻毎に即時水深Pdに対して等深線を描くことは不可能ではないが、ECDIS上の実時間で行うことは不可能で

あるとともに、あまり意味がない。つまり、時間変化する海面と時間変化しない海底面の二つの面があるので、等深線のような2次元平面で表示するのはもともと困難であり、鉛直軸を持つ鳥瞰図のような3次元立体表示が適していると思われる。しかしながら、3次元表示は電子海図表示プログラムの基本に関わるので、簡単にはできない。そこで、ここでは、現在の2次元的なECDIS画面表示を基礎に、海面昇降グラフの付加、さらに水深毎に色分けした即時水深Pd表示を考えた。一方、水深値CDには、最低水面基準の海底という意味があるため、変化させて表示するのは適当ではないということから、水深値の色付けだけを潮汐に合わせて変化させることを考えた。

5 試作した表示の例

第5図は、潮汐振幅が大きい瀬戸内海・備讃瀬戸東部をモデル海域とした「ダイナミック水深表示」



第5図 「ダイナミック水深表示」の例
 Fig.5 An example of ECDIS-like display for time variable depth with tide.

の試作例である。潮汐推算曲線のグラフとともに、潮汐を加味した即時水深 P_d の10cm毎色分け表示、または10cm毎の潮高での水深値 CD 色分け表示の機能が選択できる。これは、パソコンを利用した小型船用電子海図表示装置の上に、上述の時間変化する水深表示機能を付加したものである。○付き番号で示された部分は、以下の機能表示及び操作選択位置を示している。

- ①参照潮汐推算値データファイル
 - ②任意の位置情報（経緯度）と時刻から Z_0 データファイルと対応する潮汐推算値ファイルを参照、基本水準面上の潮汐を計算し、潮汐値によって10cm毎の色分けでENC水深値の表示色を変化させて、「ダイナミック水深表示」とする。
 - ③メニュー画面で、現在または近未来の時刻を選択。
 - ④ENC水深表示と「ダイナミック水深」表示の選択
 - ⑤潮汐推算情報（曲線・推算値）表示のON/OFF
- 小型船用電子海図表示装置は、ECDISに準じた仕様になっており、入力されたGPSによる位置情報に従って画面が切り替わってゆく。 Z_0 区分を跨ぐ海域でも、 Z_0 データファイルに基づいて各水深は「ダイナミック水深表示」となっている。

なお、この「ダイナミック水深表示」ソフトは、テラ㈱に外注して開発した。

6 まとめ

従来の水深とは、水深基準面と海底までの相対距離のことを指している。水深基準面は、水準標識に対して固定されてはいるものの、潮汐や平均水面が海域毎に異なるため、海域それぞれで異なった基準となっている。特に、平均水面を基準とした陸上の標高とは、おおよそ Z_0 分だけズレが生じている。このため港湾や海岸施設の造成など、海陸一体の地形を扱う際には、統一した基準面からの高さ・深さにする必要がある。一方、K-GPSの出現で、海上でも準拠楕円体を基準とした鉛直位置が測られるようになってきた。本稿では、今後の水深データベースとして、準拠楕円体を統一基準面とした $\{MSL_n, Z_0,$

$D_n\}$ のデータセットとすることを提案した。海図上の水深などは、このデータセットから算出することができる。また、海底が楕円体高で表現されていることから、陸上物標の楕円体高データと接続すれば、海陸一体で扱うことができる。港湾工事関係の測量では、このような海陸一体化した測量をすでに試みているようである（東京都，2001）。今後、海洋情報部の測量でも、航空レーザー測深が計画されている浅所や汀線周辺の測量では、必須のデータセットと考えられる。さらに Z_0 を NLLW から LAT に変更する際も、スムーズに行うことができる。なぜなら、 MSL_n や D_n は変更する必要がないからである。

一方、浅所周辺を航行する船舶上で、その時刻の潮汐を加味した水深表示とする「ダイナミック水深」の構想があり、その際にも単に水深値に潮高推算値を加えるだけでなく、 Z_0 の違いを補正することなどが必要である。そのためにも $\{MSL_n, Z_0, D_n\}$ を組み合わせたデータセットが必要である。現在の電子海図データには、MSL や Z_0 の情報が含まれていないので、 Z_0 区分をベースとした Z_0 データファイルで代用することにして、本稿の後半では、データファイルと潮汐推算データファイルによる「ダイナミック水深」電子海図表示の試作結果を紹介した。

以上、提案した $\{MSL_n, Z_0, D_n\}$ のデータセットのうち、平均水面 MSL_n のデータは、直接には与えられないので検討する余地がある。取りあえずは、既存の MSL_{tp} と TP_n を適当に内挿・補間して MSL_n とすることが考えられる。ただし、MSLとして採用した観測期間や固定水準標識の測量時期の整合などに注意する必要がある。将来、K-GPSや人工衛星高度計による海面高測定データが蓄積され、潮汐モデルや海面変動の研究が進めば、より信頼度の高い MSL_n が得られると期待される。

本稿が、以上のような平均水面・水深・ Z_0 の関係の整理を通して、新しい統一水深データベースの構築や「ダイナミック水深表示」開発の一助となれば幸いである。

参 考 文 献

安藤久，佐々木正博，畑中雄樹，田中和之，重松宏

美, 黒石裕樹, 福田洋一: 「日本のジオイド2000」の構築, 国土地理院時報, **97**, 25-30, (2002)

日本水路協会: K-GPS を用いた水路測量の研究, 全82頁, (2001)

寺井孝二: 船舶におけるキネマティック GPS 観測による高さ方向の精度評価と船体運動把握の試み, 海洋情報部技報, **21**, 印刷中, (2003).

東京都東京港建設事務所浚渫工事課: 東京都港湾局の深浅測量システムの紹介, 「測量」2001. 3, 19-23, (2001)

Wells, D., A. Kleusberg and P. Vanicek: 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, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada*, 64pp., (1996)