

### 潮高改正に単一の常設験潮所を使用できる範囲<sup>†</sup>

土屋主税<sup>\*1</sup>, 佐藤 敏<sup>\*2</sup>

Coverage of a tide gauge for water level reduction<sup>†</sup>

Chikara TSUCHIYA<sup>\*1</sup> and Satoshi SATO<sup>\*2</sup>

#### Abstract

In this study, we proposed criterion for the “same” tidal variation as a means of determining the acceptable range of the water depth error based on the water level reduction. The proposed criterion is 9 cm of the standard deviation of the difference between the observed tidal levels and the tidal levels in the survey area. In order to investigate the geospatial coverage where the criterion is acceptable, the standard deviation of the tidal level difference from 2013 to 2017 using the tide gauge data from the Japan Oceanographic Data Center was calculated. In most areas along the coast of the Japan Sea from Susa to Wakkanai, the standard deviation of the difference of the tidal level between the two adjacent tide gauges is less than 9 cm. However, this does not apply to the Tsugaru Strait and the Pacific Ocean from Shibushi to Hanasaki or the area where the Kuroshio gets closer to the coast, or when the difference of the astronomical tide is large. This criterion can be interpreted as being within the permissible range of the water depth required for the Special Order of hydrographic surveys. In these areas, data from the reliable permanent tide gauge nearest to the survey area, instead of a temporary tidal observation just in front of the survey area, should be used for water level reduction.

#### 1 はじめに

海域での測深を行った場合、海水位は常に変化するので、測深値を最低水面から海底までの鉛直距離、すなわち、水深値に変換するためには、測深時における最低水面から海面までの鉛直距離を測深値から引く必要がある。これを潮高改正と言うが、それを行うためには、水路測量実施時の潮汐観測データが必要となる。

通常、この潮汐観測は測量海域に近い海岸に簡

易験潮器を設置して実施するか、あるいは、近くに常設験潮所が存在する場合は、その験潮所での観測値が使われる場合もある。

測量海域に「近い」と表現したが、遠い近いに客観的な基準があるわけではない。港湾の埠頭のすぐ前面の海域を測量する場合、水位と陸上の BM（ベンチマーク）等の固定点と関係をつける必要があるため、必ずしもその埠頭に簡易験潮器が設置されるわけではなく、固定点に近いところ

<sup>†</sup> Received September 16, 2020; Accepted October 21, 2020

\* 1 沿岸調査課 Coastal Survey Division

\* 2 情報利用推進課 Chart and Marine Information Division

に験潮器が設置されることが多い。また、常設験潮所が都合よくその埠頭に存在することも極めて稀なことである。

沖合の水路測量の場合も、通常は沖合の測量海域に簡易験潮器が設置されるわけではない。この場合も水位と陸上の固定点との関係をつける必要があるため、近くの陸地にある常設験潮所の観測値を利用するか、近くの海岸に簡易験潮器が設置されることになる。

「近い」と言っても、常設験潮所や簡易験潮器と測量海域とは離れているので、厳密にはそれら2つの場所の水位は異なるが、日本では通常、2つの場所の水位はほぼ同じだと考えて潮高改正が行われている。「同じ」ではなく「ほぼ同じ」と表現したのは、潮高改正に使われる潮汐観測値は平滑化され数十分程度の短い周期の水位変化は除去されているからである。周期が短い水位変化はその空間的変化の度合いを表す波長も短いため、測量海域と潮汐観測地点で同じではないと認識されて平滑化処理が行われると考えられる。もし、埠頭の前面海域の測量において埠頭で潮汐観測を行っていれば、波浪やうねりの影響のみを除去したほうが、数十分までの周期の変化を除去するよりも優れた潮高改正になると考えられるが、自記験潮器で観測する場合に、測量海域と潮汐観測地点の距離に応じて潮汐観測のサンプリング間隔や測得値の処理方法を変えるようなことは行われていないと思う。

数十分よりも長い周期の顕著な海水位変化は潮汐によるものであり、その周期は半日または1日である。潮高改正ではもちろんこれら周期の変化は除去しないので、潮汐周期の水位変化は測量海域と潮汐観測点において同じだとみなしていることになる。実際は2か所の潮汐による水位変化は全く同一ではないが、同じであるとみなしているのである。しかし、どの程度の違いまでを同じとみなすことができるのかについての基準はないのが現実である。強いて言えば、前例である。以前に潮高改正を行った潮汐観測点であれば、測量海域と水位差は同じだとみなすことができると考え

られる。関門海峡は、両端の周防灘と響灘の潮差が大きく異なるため、強い潮流が発生し、海峡内の潮差は東から西に向けて急速に小さくなるが、関門海峡の早鞆瀬戸の東側においては、全域で九州地方整備局所管の北九州港青浜検潮所の観測値を使って潮高改正が行われている。この事例は「同じ」とみなす範囲の限界を示す基準になると考えられる。

日本周辺の潮差は地域によって異なる。日本海沿岸の潮差は極めて小さいが、瀬戸内海では比較的大きい。一般的には、潮差が小さいと遠く離れた地点との潮汐による水位差は小さく、潮差が大きくと離れた地点との水位差は大きくなると考えられる。しかし、潮差が大きくと、潮差が同じで位相も同じであれば、水位差は発生しないことになる。逆に位相差が大きくと大きな水位差が発生することになる。例えば、鳴門海峡では播磨灘側と紀伊水道側では5時間の潮時差があるように、強い潮流が発生する海峡の両端の位相差（潮時差）は大きいことが多く、その水位差も大きくなる。このため、一方側の潮汐観測で反対側の潮高改正を行うことは難しい。

潮差が極めて小さいか、あるいは、潮差がある程度の大きさであっても潮差が同じで位相差が極めて小さければ、潮汐観測点が測量海域からある程度離れていても、測量海域と水位の変化は同じだとみなせることになる。潮高改正のための潮汐観測は、その付近の潮差が極めて小さいか、あるいは、位相の変化の度合いが小さければ、測量海域から離れた地点でも可能になる。

ところで、日本では主要港湾の港内航路においても50年以上海図に採用できるような水路測量が実施されていない場所がたくさん存在する(Sato, 2018)。成果を海図に採用できるような水路測量が長い間実施されない原因にはいろいろな事情が絡んでいると思われるが、水路測量のコストが高いことが多少は関わっているかもしれない。もしそうであるならば、新たな水路測量機器の開発やデータ処理技術の進展を考慮して、関係する規則の不断の見直しを行い、必要性の乏しく

なった作業は極力排除し、いまよりも水路測量が短時日での完了を可能にして、コストを低減できるようにしていく必要がある。

水路測量に係る潮汐観測に関しては、簡易験潮器の近年の信頼性向上等を踏まえ、2019年度末に水路測量業務準則施行細則が改正され、過剰な同時験潮を実施する必要がなくなった。同時験潮が過度に実施されてきたのは、120年近く前の本多光太郎による画期的な験潮器の開発に由来するものである（佐藤，投稿中）と考えられる。1世紀以上の時を経て、その呪縛から解かれて規則の見直しが行われたのである。

一方、国外では、国際水路機関（IHO）により、水路測量に関する標準（S-44）の第6版が2020年9月14日付で発効した。従来は、最も厳しい水深の許容誤差はSpecial Order（特級）の25 cmである。これよりも厳格な基準としてExclusive Orderが設定され、15 cmとなった。日本にはExclusive Orderはないものの、水位変化が「同じ」とみなせるかどうかは、これらのSpecial OrderやExclusive Orderと比較して考慮されるべきだろう。

東京港の港湾区域内においては東京晴海に設置されている気象庁東京検潮所の観測値で潮高改正が行われている。愛媛県の東予港においては、壬生川地区では愛媛県が所管する東予港検潮所の観測値で潮高改正が行われているが、西条地区での水路測量では簡易験潮器が設置されている。壬生川と西条の距離よりも、晴海から離れている海域は東京港内に多く存在するにもかかわらず東京港では東京検潮所の観測値で潮高改正が行われている。距離の長短だけで、水位変化が「同じ」かどうか判断できるわけではないが、東京港は全域「同じ」で、東予港は「同じ」ではないとみなす明確な基準があるわけではない。

水位変化が「同じ」とみなすことができる基準が策定され、常設験潮所の観測値を潮高改正に使用できる範囲を決めることができれば、従来、簡易験潮器を設置していた海域の水路測量において、近くの常設験潮所の観測値で潮高改正を行

い、水路測量のコストを削減できる可能性もある。

本稿は、水位変化を「同じ」とみなすことができる範囲の日安を示し、水路測量のコストを少しでも減らすことを目指し、さらには、海上交通の安全性の向上を目的としている。

## 2 誤差の考え方

水路測量により得られた各測点の測定誤差は、総伝播不確かさ（TPU：Total Propagated Uncertainty）により評価される（住吉・他，2020）。そのうち、潮高改正は鉛直成分であるTVU（Total Vertical Uncertainty）に含まれる。潮高改正の作業により誤差を生じる部分は、(1) 観測基準面、(2) 平均水面、(3) 験潮器、(4) 潮位変動の4つに大別できると考えられる。(1)の観測基準面の誤差は、験潮器を設置した面の高さの決定に際し行う水準測量に伴う誤差であるが、通常、1 cmにも満たない。(2)の平均水面の誤差は5年間の平均水面の算出に伴うものである。観測基準面が長期間維持された基準験潮所では、観測潮位を平均して求める。その場合考えられるのは、平均水面算出期間の違いにより現れる温暖化等の海水面の長期変動に伴う年数mmの変動に伴う誤差と、地盤変動に伴う誤差である。また、同じく(2)の平均水面の誤差として、短期平均水面比較の手法に伴う誤差がある。測量地に簡易験潮器等を設置する場合、5年平均水面を直接求めることは出来ないため、短期平均水面比較の手法により測量地の平均水面を求める。この手法は短期間の観測から5年間の平均水面を推定できるというメリットがあるものの、測量地と基準験潮所との間の長期変動トレンドの違いや、季節変動の違いにより、平均水面に10 cm程度の誤差を生じさせる（佐藤，2020）。(3)の験潮器による誤差は、複数の機器のカタログスペックを元に数mmと推定される（林王，私信）。潮高改正に伴う誤差として本稿で扱うのは、(4)の潮位変動、すなわち、観測期間中の測量地と験潮所との間の潮位差である。

海上保安庁告示第 102 号では、水路測量により得られた水深の誤差の限度を定めている。そのうち水深に依存しない項は、特級海域では 25 cm、一 a 級及び一 b 級海域では 50 cm、二級海域では 1 m となっている。TPU の考え方では誤差の限度を示すことは出来ないものの、不確かさが正規分布するとして、95% 以上のデータが上記の誤差の限度に収まっているのは、誤差の標準偏差が、特級海域で 12.5 cm、一 a 及び b 級海域で 25 cm、二級海域で 50 cm 以下のときである。誤差の標準偏差が 7.5 cm 以下であれば、S-44 の改訂により出現した Exclusive Order を満たすとしてよいだろう。

特級海域は極めて限られた海域に設定されている。一方で、音響測深で得られる水深の精度自体は特級の精度を実現しているといつてよいだろう。重要港湾の多くは、未測深幅について制限が厳しくない一 b 級海域であるが、未測深幅の発生は水深の精度とは関係がない。従って、潮高改正に伴う誤差が許容される範囲は、特級海域に求められる精度を満たすかどうかで議論されるべきだろう。本稿で、測量海域と潮高改正に用いる験潮記録の水位変化が「同じ」とみなすことができる基準を考えるにあたっては、許容される誤差の目標を、特級海域の標準偏差のおよそ半分の 9 cm ( $\equiv \sqrt{12.5^2/2}$ ) とする。半分としたのは、潮高改正における潮位変動以外の観測基準面、平均水面、験潮器によるもののほか、レバーアームの測定や音速度改正に伴う誤差等の他の要因も TPU に存在するためである。

### 3 データ解析の方法と結果の解釈の方法

潮高改正に使用する験潮記録が持つ測量海域の潮位からの誤差を見積もるにあたり、本稿では段階ごとに測量海域について 2 つの別々の仮定を置く。

一つ目の仮定は、データ解析の方法に関するものである。ある常設験潮所 S のすぐ目の前の海域が測量海域であり、かつ、その潮位は常設験潮所 S の潮位と全く同じ変動をすると仮定する。

この仮定をおけば、測量海域から少し離れた常設験潮所 R の潮位データを使って潮高改正した場合、潮高改正に伴う誤差は、常設験潮所 R と S の観測潮位の差の標準偏差で評価できる。

水路測量の期間は通常数日から十数日であり、測量地における簡易験潮はたいてい 32 日間程度行われるが、本稿では、季節性や年々変動を考慮せず、全国の海域の状況を俯瞰するため、5 年間の観測潮位を比較することとした。観測基準面と平均水面による誤差は別途計算されるので、今回は、短期平均水面比較の考え方と同様に、測量地における観測潮位に、測量地と比較対象の常設験潮所の 5 年間の観測潮位の平均値の差を加えた。

二つ目の仮定はこの方法で得られた潮位の差の標準偏差の解釈に関するものである。第 1 章で述べたとおり、測量海域の水位は、最も近い常設験潮所 R の潮位とは異なる。測量海域は、この最も近い常設験潮所 R と、別の常設験潮所 R' の間に位置するとする。最も近い常設験潮所の潮位と測量海域の潮位の差は、常設験潮所 R と R' の観測潮位の差よりは小さいとするのは妥当性を損わないだろう。すなわち、本稿で示した隣接する常設験潮所の潮位の差の標準偏差は、その間の海域の水位と常設験潮所の潮位の差の標準偏差の最大値を与えると期待できる。

本稿で示す標準偏差  $a$  と、告示で示す誤差の限度  $b$  の間の数値の関係は次のようにまとめることができる。本稿で示す隣接する常設験潮所 R 及び R' の潮位の差の標準偏差が  $a$  [cm] の場合、常設験潮所 R と R' で挟まれた海域での水路測量の潮高改正の誤差の標準偏差が最大でも  $a$  [cm] と仮定できるので、海上保安庁告示第 102 号で定めるような水深の誤差の限度  $b$  [cm] が  $b \leq (25/9) a$  であるような精度を満たすことが期待できる。

### 4 日本海洋データセンター登録の常設験潮所間の潮位差分布

データは日本海洋データセンター (JODC) に登録された常設験潮所のうち、2013 年から 2017

年の5年分の毎時潮位が登録されている173箇所の常設験潮所を使用した。隣接する験潮所と距離が大きく離れている父島、南鳥島、南大東島は解析対象から外している。また、のちに、誤差のうち天文潮位の差により説明できる部分について考察するため、気象庁のウェブサイトにて主要四分潮の調和定数が掲載されていない第二海堡、久里浜、輪島（港湾局）も除いている。解析対象の常設験潮所を、北海道沿岸（H）、本州・四国・九州の太平洋沿岸（P）、九州の東シナ海沿岸から本州の日本海沿岸（J）、東京湾（T）、伊勢湾（I）、瀬戸内海（S）、関門海峡（K）、有明海及び八代海（A）、南方諸島（N）、南西諸島（W）にわけ、海域ごとに、括弧書きしたアルファベットとともに、Table 1に示すように海岸線に沿うように連番を付した。

Figs. 1 (a) - 1 (d) には、それぞれ北海道沿岸及び離島、太平洋・東シナ海・日本海沿岸、東シナ海・日本海沿岸離島、及び東京湾・伊勢湾・関門海峡・有明海・南方諸島・南西諸島の隣接常設験潮所の潮位差の標準偏差と、国土地理院の距離と方位の計算のウェブサービス (<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>) で計算した直線距離を示した。観測された潮位差の標準偏差は黒色の縦のバーで示してある。その前面に重ねた灰色の縦のバーは、隣接験潮所間の天文潮位の差の標準偏差である。ある験潮所 R とそれに隣接する験潮所 S の天文潮位の差の標準偏差は、各分潮  $i$  の振幅  $H_i$  と遅角  $\kappa_i$  によって次のようにあらわすことができる。

$$\left[ \sum_i \frac{(H_{iS} + H_{iR})^2}{2} \left\{ \left( \frac{H_{iS} - H_{iR}}{H_{iS} + H_{iR}} \right)^2 \cos^2 \left( n \frac{l_S - l_R}{2} - \frac{\kappa_{iS} - \kappa_{iR}}{2} \right) + \sin^2 \left( n \frac{l_S - l_R}{2} - \frac{\kappa_{iS} - \kappa_{iR}}{2} \right) \right\} \right]^2$$

ここで、 $l$  は経度、 $n$  は分潮  $i$  が  $n$  分の一日周潮のグループであることを表す。この式からは、第1章でも述べたように、潮差が極めて小さい ( $H_{iS} + H_{iR}$  が十分小さい) か、あるいは、潮差が大きいとしても、潮差が同程度かつ位相差が極めて小さい ( $(H_{iS} - H_{iR}) / (H_{iS} + H_{iR})$  と  $\kappa_{iS} - \kappa_{iR}$  がい

ずれもほぼゼロである) とき、潮汐観測点が測量海域からある程度離れていても、天文潮位の差は小さくなるのがわかる。地点間の距離のうち式に現れるのは経度であるが、本稿は  $l_S - l_R$  が大きいような相当離れた地点は考察の対象としていない。本稿では天文潮位の差を気象庁のウェブサイトに掲載されている主要四分潮のみの振幅と遅角を用いて算出した。

Fig. 1 (a) の北海道沿岸では、験潮所略称 H5 の稚内から H12 の江差港までが日本海側に位置する。これらの験潮所間と、本州の日本海沿岸 (J13 の須佐から J33 の深浦まで) では、もともと潮汐の振幅は小さいことが知られているが、殆どの験潮所間で、標準偏差はおおむね 5 cm 以内である (Fig. 1 (b))。天文潮位の差の標準偏差は 1 cm にも満たない。北海道沿岸の太平洋側に位置する森 (H15) から花咲 (H24) では、日本海側よりは潮位差の標準偏差が若干大きいものの、潮位差の標準偏差が 9 cm を超えることはない。本州・四国・九州の太平洋沿岸では、おおむね潮位差の標準偏差が 9 cm 以内に収まっているが、銚子漁港 (P11) から勝浦 (P12)、御前崎 (P23) から赤羽根 (P25) の間の 2 つの区間、御坊 (P31) から海南 (P32)、志布志 (P43) から大泊 (P44) で標準偏差が 9 cm を超えていた。潮汐の振幅の大きい九州の東シナ海沿岸 (J1 から J13) では、一部の験潮所間を除き標準偏差が 9 cm を下回ることはなかった。

東シナ海・日本海側には、九州、本州、北海道本島から数十 km 離れた離島にも常設験潮所が設置されている。Fig. 1 (c) にはそれらの離島と最も近い本島側の常設験潮所の間で潮位差の標準偏差を示しているが、福江 (J37) 皇后 (J6) 間及び対馬 (J38 から J40) を除き標準偏差が 9 cm 以内に収まっていることがわかる。

東京湾と伊勢湾の内部では、隣接験潮所間の潮位差の標準偏差は 9 cm 以下である。潮汐の振幅が大きく変化している関門海峡の特に東部では、隣接する験潮所間でも潮位差の標準偏差は 9 cm を超えている。八代海と有明海は標準偏差が大きく

Coverage of a tide gauge for water level reduction

Table 1. Tide gauges used to analyze their water level difference.

表 1. 潮位差を解析に使用した常設験潮所.

験潮所名	略称	所管	JODCコード	離島
根室港	H1	港湾局	0133	
網走	H2	気象庁	MA02	
紋別港	H3	港湾局	1609	
枝幸港	H4	港湾局	1615	
稚内	H5	気象庁	MA01	
留萌港	H6	港湾局	0132	
石狩港	H7	港湾局	0145	
小樽	H8	気象庁	MA77	
忍路	H9	地理院	GS04	
岩内港	H10	港湾局	0137	
瀬棚港	H11	港湾局	1603	
江差港	H12	港湾局	0140	
松前港	H13	港湾局	0121	
函館	H14	気象庁	MA06	
森港	H15	港湾局	0139	
室蘭港	H16	港湾局	1626	
白老港	H17	港湾局	1625	
苫小牧西港	H18	港湾局	0136	
苫小牧東港	H19	港湾局	0146	
浦河港	H20	港湾局	1612	
十勝港	H21	港湾局	0122	
釧路	H22	気象庁	MA04	
霧多布港	H23	港湾局	1618	
花咲	H24	気象庁	MA03	
杓形港	H25	港湾局	0129	離島
奥尻港	H26	港湾局	1621	離島
奥尻	H27	地理院	GS24	離島
下北	P1	気象庁	MA74	
むつ小川原港	P2	港湾局	0110	
八戸	P3	港湾局	2001	
久慈港	P4	港湾局	0111	
釜石	P5	海保	HD05	
大船渡	P6	気象庁	MA10	
鮎川	P7	気象庁	MA11	
石巻	P8	港湾局	2003	
仙台港	P9	港湾局	0112	
小名浜	P10	気象庁	MA12	
銚子漁港	P11	気象庁	MA64	
勝浦	P12	地理院	GS11	
布良	P13	気象庁	MA14	
油壺	P14	地理院	GS01	
小田原	P15	気象庁	MA83	
伊東	P16	地理院	GS19	
下田	P17	港湾局	5001	
石廊崎	P18	気象庁	MA78	
田子	P19	地理院	GS22	
内浦	P20	気象庁	MA18	
清水港	P21	気象庁	MA19	
焼津	P22	地理院	GS23	
御前崎	P23	気象庁	MA20	
舞阪	P24	気象庁	MA21	
赤羽根	P25	気象庁	MA81	
尾鷲	P26	気象庁	MA24	
熊野	P27	気象庁	MA65	
浦神	P28	気象庁	MA25	
串本	P29	気象庁	MA26	
白浜	P30	気象庁	MA27	
御坊	P31	気象庁	MA68	
海南	P32	地理院	GS05	
和歌山	P33	気象庁	MA28	
小松島	P34	気象庁	MA36	
阿波由岐	P35	気象庁	MA69	
室戸岬	P36	気象庁	MA37	
高知	P37	気象庁	MA38	
久礼	P38	地理院	GS13	
土佐清水	P39	気象庁	MA39	
細島	P40	地理院	GS02	
宮崎港	P41	港湾局	0113	
油津	P42	気象庁	MA41	
志布志	P43	港湾局	0114	
大泊	P44	海保	HD20	
鹿児島	J1	気象庁	MA42	
枕崎	J2	気象庁	MA43	
阿久根	J3	地理院	GS15	
苓北	J4	気象庁	MA84	
長崎	J5	気象庁	MA49	
皇后	J6	港湾局	9025	
佐世保	J7	海保	HD19	
平戸瀬戸	J8	港湾局	9042	
仮屋	J9	地理院	GS17	
唐津	J10	港湾局	9023	
博多	J11	海保	HD18	
南風泊	J12	港湾局	9008	
須佐	J13	地理院	GS16	
浜田	J14	気象庁	MA66	
境	J15	気象庁	MA53	
田後	J16	地理院	GS10	
舞鶴	J17	気象庁	MA55	
三国	J18	地理院	GS12	
金沢港	J19	港湾局	0105	
輪島	J20	地理院	GS03	
能登	J21	気象庁	MA80	
七尾港	J22	港湾局	0106	
伏木富山伏木	J23	港湾局	4002	
伏木富山港	J24	港湾局	0107	
富山	J25	気象庁	MA56	
柏崎	J26	地理院	GS08	
新潟港西港	J27	港湾局	0103	
新潟港東港	J28	港湾局	4001	
鼠ヶ関	J29	地理院	GS07	
酒田港	J30	港湾局	0102	
秋田	J31	港湾局	2002	
男鹿	J32	地理院	GS14	
深浦	J33	気象庁	MA57	
亀飛	J34	海保	HD27	
青森港	J35	港湾局	0104	
浅虫	J36	地理院	GS06	
福江	J37	気象庁	MA50	離島
郷ノ浦	J38	港湾局	9027	離島
巖原	J39	海保	HD23	離島
対馬比田勝	J40	気象庁	MA85	離島
西郷	J41	気象庁	MA54	離島
小木	J42	地理院	GS20	離島
佐渡	J43	気象庁	MA79	離島
粟島	J44	海保	HD25	離島
飛島	J45	地理院	GS25	離島
千葉	T1	海保	HD06	
東京	T2	気象庁	MA15	
横浜	T3	海保	HD29	
京浜	T4	港湾局	3003	
横須賀	T5	海保	HD08	
鳥羽	I1	気象庁	MA23	
三河	I2	港湾局	5002	
鬼崎	I3	地理院	GS09	
名古屋	I4	気象庁	MA22	
淡輪	S1	気象庁	MA29	
大阪	S2	気象庁	MA30	
神戸	S3	気象庁	MA31	
洲本	S4	気象庁	MA32	
高松	S5	気象庁	MA35	
宇野	S6	気象庁	MA33	
与島	S7	港湾局	7315	
多度津	S8	港湾局	7319	
青木	S9	港湾局	7318	
松山	S10	気象庁	MA34	
呉	S11	海保	HD13	
広島	S12	海保	HD14	
徳山	S13	海保	HD15	
宇部港	S14	港湾局	8412	
苅田	S15	港湾局	9018	
別府	S16	港湾局	9031	
大分	S17	海保	HD16	
宇和島	S18	気象庁	MA40	
佐伯	S19	気象庁	MA86	
長府	K1	港湾局	9004	
青浜	K2	港湾局	9009	
門司	K3	港湾局	9010	
弟子待	K4	港湾局	9005	
田ノ首	K5	港湾局	9006	
大山の鼻	K6	港湾局	9007	
砂津	K7	港湾局	9012	
日明	K8	港湾局	9011	
八代	A1	港湾局	9029	
本渡瀬戸	A2	港湾局	9047	
口之津	A3	気象庁	MA48	
熊本	A4	港湾局	9028	
大浦	A5	気象庁	MA47	
岡田	N1	気象庁	MA17	
神津島	N2	海保	HD09	
三宅島(阿古)	N3	海保	HD10	
三宅島(坪田)	N4	気象庁	MA71	
八丈島	N5	海保	HD11	
西之表	W1	海保	HD21	
種子島	W2	気象庁	MA75	
中之島	W3	海保	HD28	
名瀬	W4	海保	HD22	
奄美	W5	気象庁	MA73	
中城湾港	W6	港湾局	0701	
沖縄	W7	地理院	GS21	
那覇	W8	気象庁	MA44	
平良	W9	港湾局	0151	
石垣	W10	気象庁	MA45	
与那国	W11	気象庁	MA76	

(a) 北海道沿岸及び離島

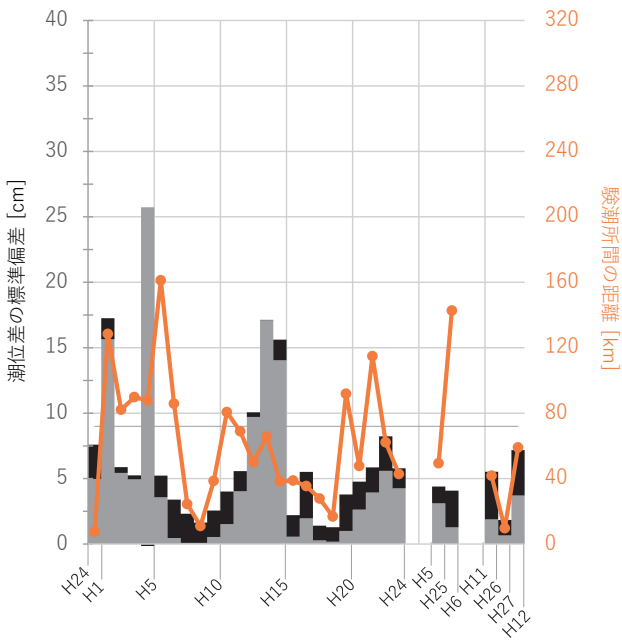


Fig. 1 (a). The standard deviations and the distance of the tidal level data between adjacent tide gauges in Hokkaido coasts and surrounding the remote islands. The black and grey bars respectively show the standard deviations of the observed tidal level data and of the astronomical tides between adjacent tide gauges. Orange bars and lines describe the distance to the adjacent tide gauges. The grey line shows the standard deviation of 9 cm. The left and right vertical axes show the scale of the standard deviation and the distance, respectively. The tide gauges are sorted by the number in the abbreviation shown in Table 1 from the left.

図1 (a). 北海道沿岸及び離島の隣接常設験潮所の潮位差の標準偏差と距離. 黒色及び灰色のバーでそれぞれ観測潮位及び天文潮位の差の標準偏差を, オレンジ色の点と線で隣接する常設験潮所の距離を示した. 灰色の線で潮位差の標準偏差9 cmを示した. 縦軸は, 潮位の差の標準偏差については左側に, 験潮所間の距離については右側にそのスケールを示した. 常設験潮所は左から Table 1 に示した略称の順に並べた.

(b) 太平洋・東シナ海・日本海沿岸

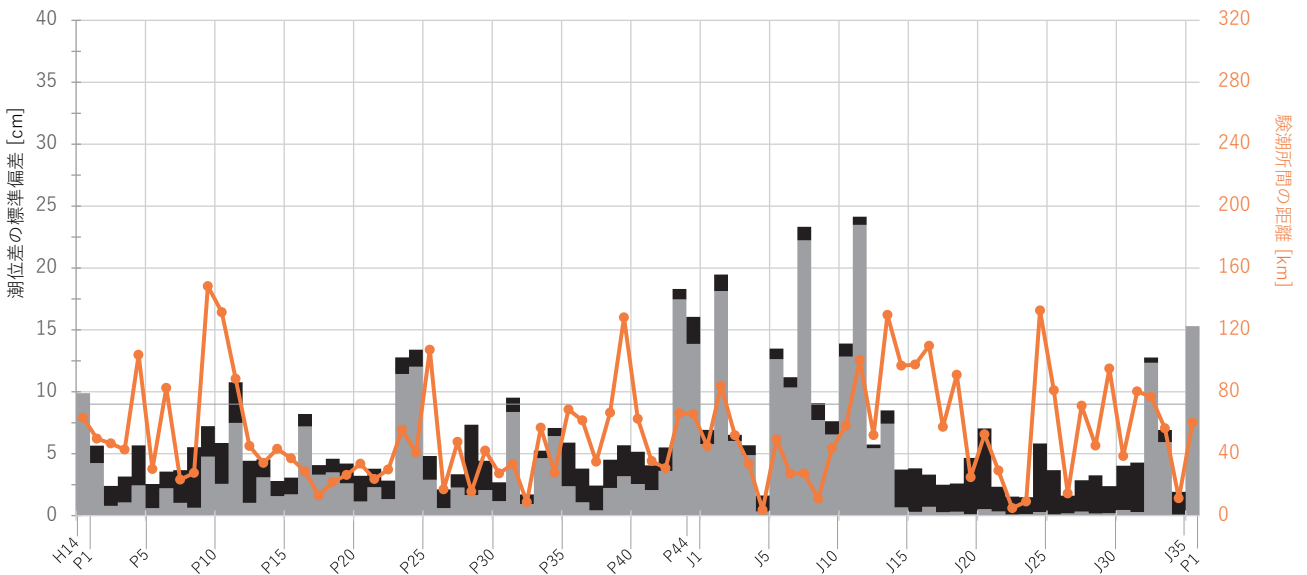


Fig. 1 (b). The standard deviations of the tidal level data between adjacent tide gauges in the Pacific Ocean, the East China Sea, and the Japan Sea coasts, and the distance of these tide gauges.

図1 (b). 太平洋・東シナ海・日本海沿岸の隣接常設験潮所の潮位差の標準偏差と距離.

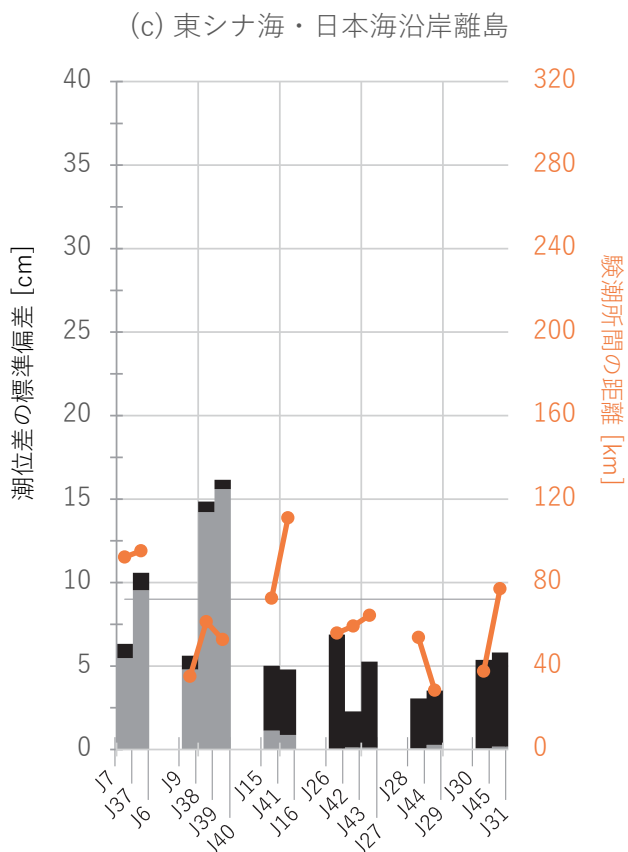


Fig. 1 (c). The standard deviations of the tidal level data between adjacent tide gauges in surrounding remote islands of the East China Sea and the Japan Sea and the distance of these tide gauges.

図1 (c). 東シナ海・日本海沿岸の離島の隣接常設験潮所の潮位差の標準偏差と距離。

く、潮位差の標準偏差が9 cm 以内に収まるのは本渡瀬戸 (A2) と口之津 (A3) の間のみである。南方諸島は隣接験潮所間の潮位の差の標準偏差が大きい。南西諸島は、島の間の距離が大きいため潮位変動が同じとは言えないというのは想像に難くない。ここでは、距離が近い名瀬 (W4) 奄美 (W5) 間、中城湾港 (W6) 沖縄 (W7) 間、沖縄 (W7) 那覇 (W8) 間の3区間に触れておく。名瀬・奄美間と沖縄・那覇間は、太平洋側と東シナ海側の験潮所のペアであり、距離が近いにもかかわらず標準偏差は9 cm を超える。一方、中城湾港と沖縄は、いずれも太平洋側に位置しており、標準偏差は3 cm 程度である。このような違いは、南西諸島で太平洋側と東シナ海側では潮汐の特性

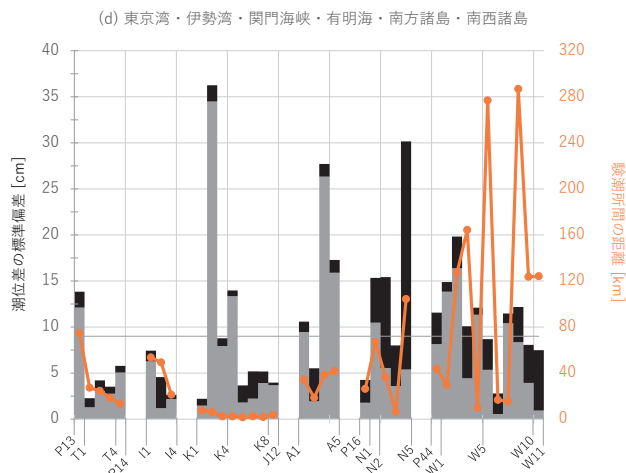


Fig. 1 (d). The standard deviations of the tidal level data between adjacent tide gauges in Tokyo Bay, Ise Bay, Kanmon Strait, Ariake Sea, Southern Islands, and Nansei Islands coasts, and the distance of these tide gauges.

図1 (d). 東京湾・伊勢湾・関門海峡・有明海・南方諸島・南西諸島の隣接常設験潮所の潮位差の標準偏差と距離。

が大きく異なることに由来しているかもしれない。

Figs. 2 (a) - 2 (e) は、それぞれ北海道周辺、東日本、西日本、南西諸島、及び関門海峡について、標準偏差が4.5 cm 未満、9 cm 未満、18 cm 未満、それ以上の隣接験潮所間をそれぞれ青、緑、橙、赤線で表して、水位変化を同じとみなせる地理的な範囲を与えている。図の解釈にかかる仮定によれば、この線の描かれた海域では、線の両端のどちらの験潮所の潮位記録を潮高改正に用いても、その誤差は線の色で示したような標準偏差で見積もることができる。

北海道沿岸では、知床岬を挟んだ根室 (H1) と網走 (H2) の間、宗谷岬を挟んだ枝幸港 (H4) と稚内 (H5) の間、津軽海峡の西端及び東端を挟んだ松前港 (H13) から森港 (H15) のそれぞれの間で潮位差が大きく橙色や赤色に表示されている。同じ様に、岬を挟んだ験潮所間で潮位差が大きくなっている様子は、深浦 (J33) からむつ小川原港 (P2) の間の津軽海峡の本州側の各験潮所間、銚子漁港 (P11) と勝浦 (P12) の間、



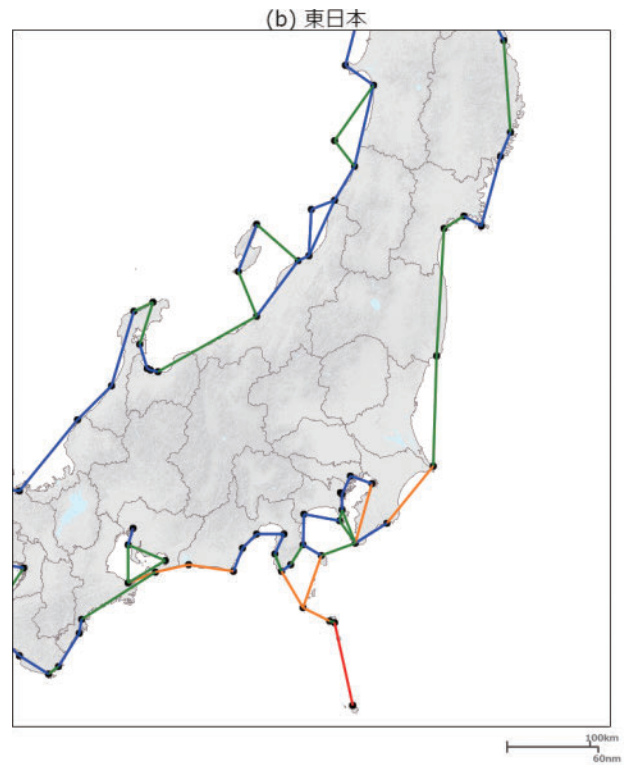
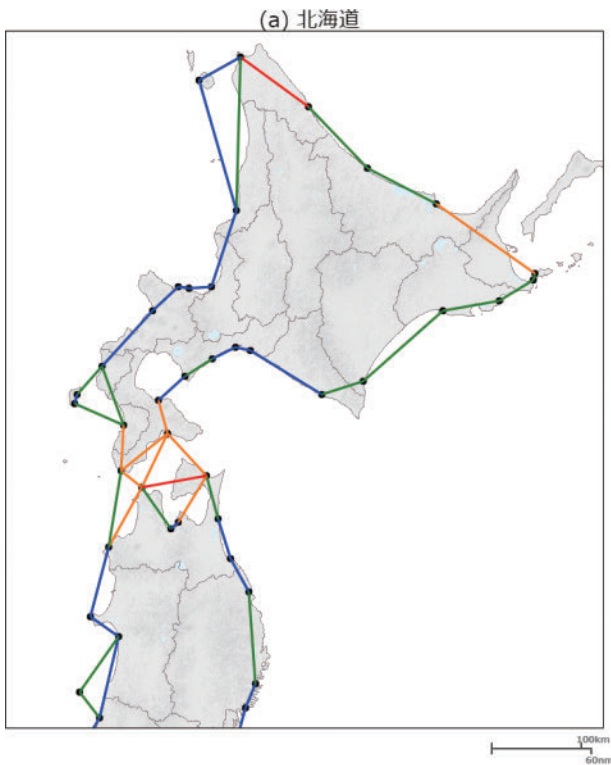


Fig. 2 (a). The distribution of the standard deviations of the tidal level data between adjacent tide gauges in Hokkaido. The blue, green, orange, and red lines show the standard deviations less than 4.5 cm, 9 cm, 18 cm, and more than 18 cm, respectively.

図 2 (a). 北海道における隣接する常設験潮所の潮位の差の標準偏差の分布。標準偏差が 4.5 cm 未満, 4.5 cm 以上 9 cm 未満, 9 cm 以上 18 cm 未満, 18 cm 以上の区間をそれぞれ青線, 緑線, 橙線, 赤線で示した。

布良 (P13) と千葉 (T1) の間, 御坊 (P31) と海南 (P32) の間, 豊後水道周辺の験潮所間でもみられる。

寄高・花輪 (2020) は, 日本沿岸の平均水面分布を力学的に考察し, 岸に沿う水位の水平傾斜は, 岬に海流がぶつかるように流れる場合のみ生じることを示した。毎時潮位には, 潮汐に伴う水位の大きな時間変化がある。海流の接近に伴う潮位の水平傾斜は, 天文潮汐による潮位差のほかに大きく寄与していると考えられる。

Fig. 2 (b). The distribution of the standard deviation of the tidal level data between adjacent tide gauges in Eastern of Japan.

図 2 (b). 東日本における隣接する常設験潮所の潮位の差の標準偏差の分布。

瀬戸内海は, 灘などが複雑に分布しているにもかかわらず, 近接する常設験潮所が JODC に複数登録されている海域が少ないことから, 本稿では詳細な検討を行うことができなかった。今後自治体等が所管する常設験潮所の潮位データを取得し, 同様の解析を行いたい。

## 5 天文潮位による補正の試行

Figs. 1 (a) - 1 (d) には, 黒色の観測潮位の差の標準偏差の上に, 灰色で天文潮位の差の標準偏差を示している。北海道の枝幸港 (H4) ・稚内 (H5) 間は, 天文潮位の差の標準偏差が 25.73 cm で, 観測潮位の差の標準偏差 24.83 cm を上回っているが, それ以外の隣接験潮所間では, 観測潮位の差の標準偏差が天文潮位の差の標準偏差を上

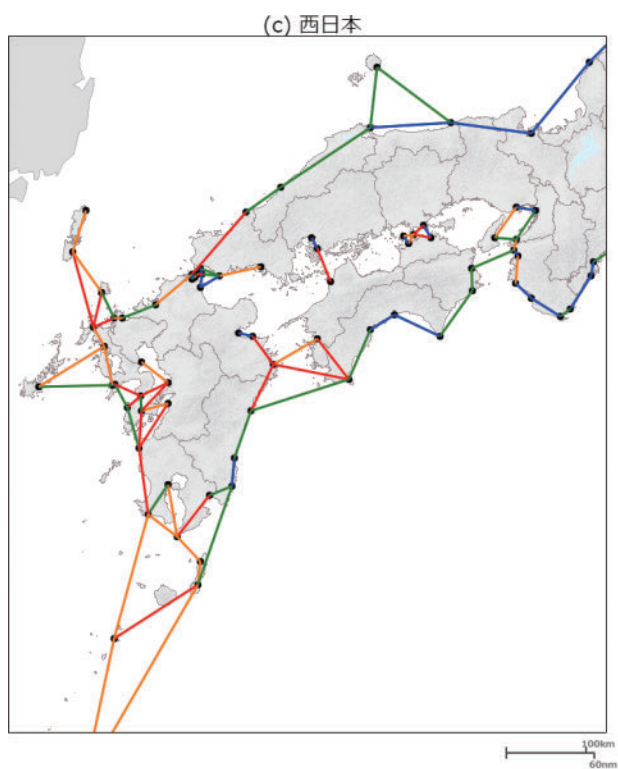


Fig. 2 (c). The distribution of the standard deviation of the tidal level data between adjacent tide gauges in Western of Japan.

図2 (c). 西日本における隣接する常設験潮所の潮位の差の標準偏差の分布.

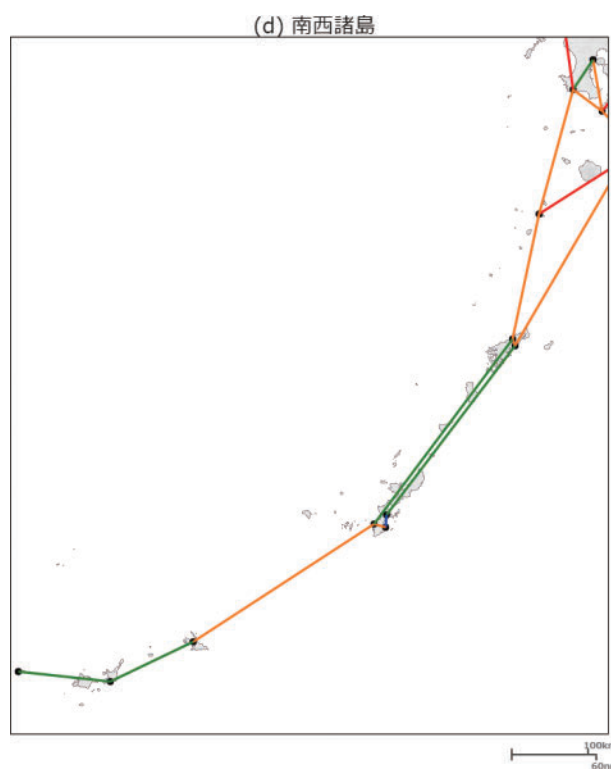


Fig. 2 (d). The distribution of the standard deviation of the tidal level data between adjacent tide gauges in the Nansei Islands.

図2 (d). 南西諸島における隣接する常設験潮所の潮位の差の標準偏差の分布.

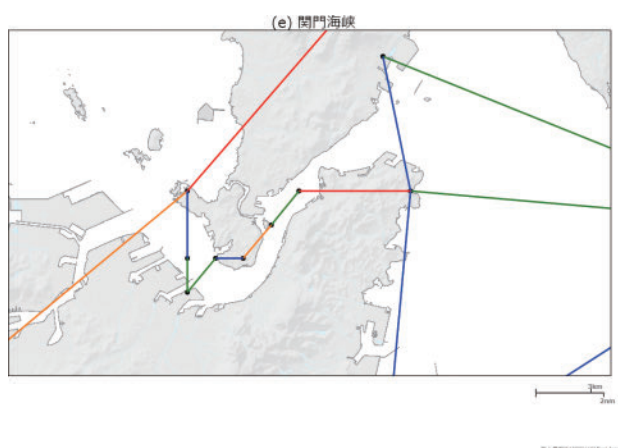


Fig. 2 (e). The distribution of the standard deviation of the tidal level data between adjacent tide gauges in the Kanmon Strait.

図2 (e). 関門海峡における隣接する常設験潮所の潮位の差の標準偏差の分布.

回っている。南方諸島以外の多くの地点で、天文潮位の差の標準偏差が、観測潮位の差の標準偏差のほとんどを占めるように見える。

図では、黒色に見えている長さが天文潮位の差以外の成分の大きさに比例しているかのような印象を受けるが、実際にはそうではない。標準偏差の二乗量である分散については、天文潮位、海流がぶつかる効果による潮位の水平傾斜、風の吹き寄せ効果等のそれぞれの成分の寄与の和が、観測潮位の差の分散に一致する。日本海側などの、潮位の差が小さいところでは、黒色の長さが長く、天文潮位の差以外の成分が大きいように見えるが、例えば、境 (J15) と田後 (J16) の潮位差の標準偏差は 3.72 cm、天文潮位の差の標準偏差は

0.66 cm であるから、天文潮位の差以外の成分の標準偏差は  $\sqrt{3.72^2 - 0.66^2} = 3.66$  cm である。もともと潮位差の大きい区間、たとえば、舞阪 (P24) と赤羽根 (P25) では、天文潮位の差以外の成分の標準偏差は  $\sqrt{13.40^2 - 12.03^2} = 5.09$  cm であり、境・田後間の場合とほとんど変わらない。つまり、もともと天文潮位の差の寄与が小さい日本海側を含めて、殆ど全ての地点で、天文潮位の差以外の成分の標準偏差は小さいように見える。

もともと、潮汐の性質が似ていれば観測潮位の差が小さいだろうという予想は、第 1 章でも述べたとおりで、不思議なことではない。ただ、今回の手法で、隣接する常設験潮所の潮位の差の、天文潮位以外の成分を定量化しておくことは、無駄なことではないように思われる。そこで、隣接験潮所間の潮位差を計算する際の手順を次のように修正することにする。ある験潮所 R の観測潮位  $h_R(t)$  に、隣接する験潮所 S の天文潮位  $\tilde{h}_S(t)$  から R の天文潮位  $\tilde{h}_R(t)$  を引いた値を足して、補正潮位  $h_{R=S}(t)$  を毎時求める。

$$h_{R=S}(t) = h_R(t) + (\tilde{h}_S(t) - \tilde{h}_R(t)) \quad \text{式 (1)}$$

この補正潮位  $h_{R=S}(t)$  と験潮所 S の観測潮位  $h_S(t)$  の差を求め、標準偏差を求める。ここで天文潮位は、気象庁のウェブサイトに掲載された主要四分潮成分のみ使用して求める。なお、現在の水路測量業務法及びその施行細則等からなる水路測量の規則では、潮高改正に用いる水位記録を天文潮位で補正する方法は記載されていないことに注意する必要がある。

Fig. 3 は、このようにして天文潮位で補正して求めた潮位の差の標準偏差を、補正前の観測潮位の差の標準偏差に対して散布図として示した。補正前後の標準偏差の中央値はそれぞれ 5.81 cm と 4.03 cm であった。もともと観測潮位の差の標準偏差が小さかった留萌港 (H6) 石狩港 (H7) 間、苫小牧西港 (H18) 苫小牧東港 (H19) 間、秋田 (J31) 男鹿 (J32) 間、男鹿・深浦 (J33) 間、中城湾港 (W6) 沖縄 (W7) 間では、補正後の標準偏差の方が大きくなったが、その違いはわずかで

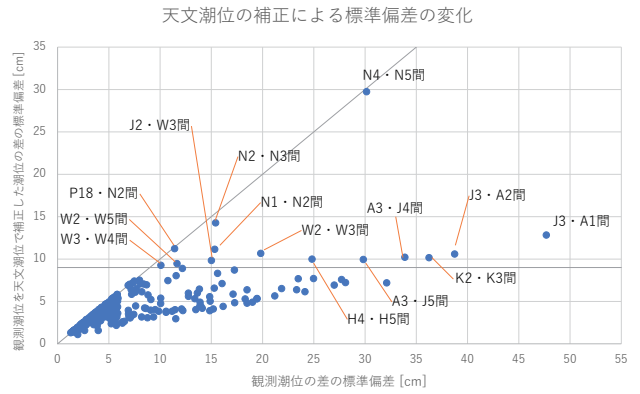


Fig. 3. The Scatter plot, with the standard deviations of the observed tidal level data between adjacent tide gauges as the horizontal axis and its correction by astronomical tide as the vertical axis. The grey line shows the parts that has the corrected standard deviation of 9 cm as well as the part where standard deviations are equal before and after the correction. The names of the adjacent tide gauge pairs that had the corrected standard deviations of more than 9 cm are shown according to the abbreviation shown in Table 1.

図 3. 横軸に観測潮位の差の標準偏差を、縦軸には天文潮位で補正した潮位の差の標準偏差をとった散布図。灰色線で、補正後の標準偏差 9 cm 及び補正前後の標準偏差が等しい部分を示した。補正後の標準偏差が 9 cm 以上の区間については、Table 1 に示した略称により験潮所名を示した。

あり、0.06 cm より小さかった。南方諸島の潮位差は、補正によりほとんど標準偏差が変わらなかったが、黒潮流路により隣接験潮所間で平均水面が大きく異なることが原因として考えられる。

関門海峡と九州西岸では、補正後の標準偏差が 9 cm を上回る区間がいくつかある。これらの海域でも、観測潮位の差の標準偏差の大部分が天文潮位の差によるものであった。ただし、もともと潮汐の振幅が大きく、主要四分潮以外の成分も大きいと考えられ、そのため、補正後の標準偏差が他の区間よりも比較的大きいと考えられる。

Fig. 4 (b) は、天文潮位で補正後の潮位の差の標準偏差を、日本全国を 1 枚に描いたものである。補正前の標準偏差の分布は、Figs. 2 (a) - (e) と同じであるが、Fig. 4 (b) と同縮尺で Fig.

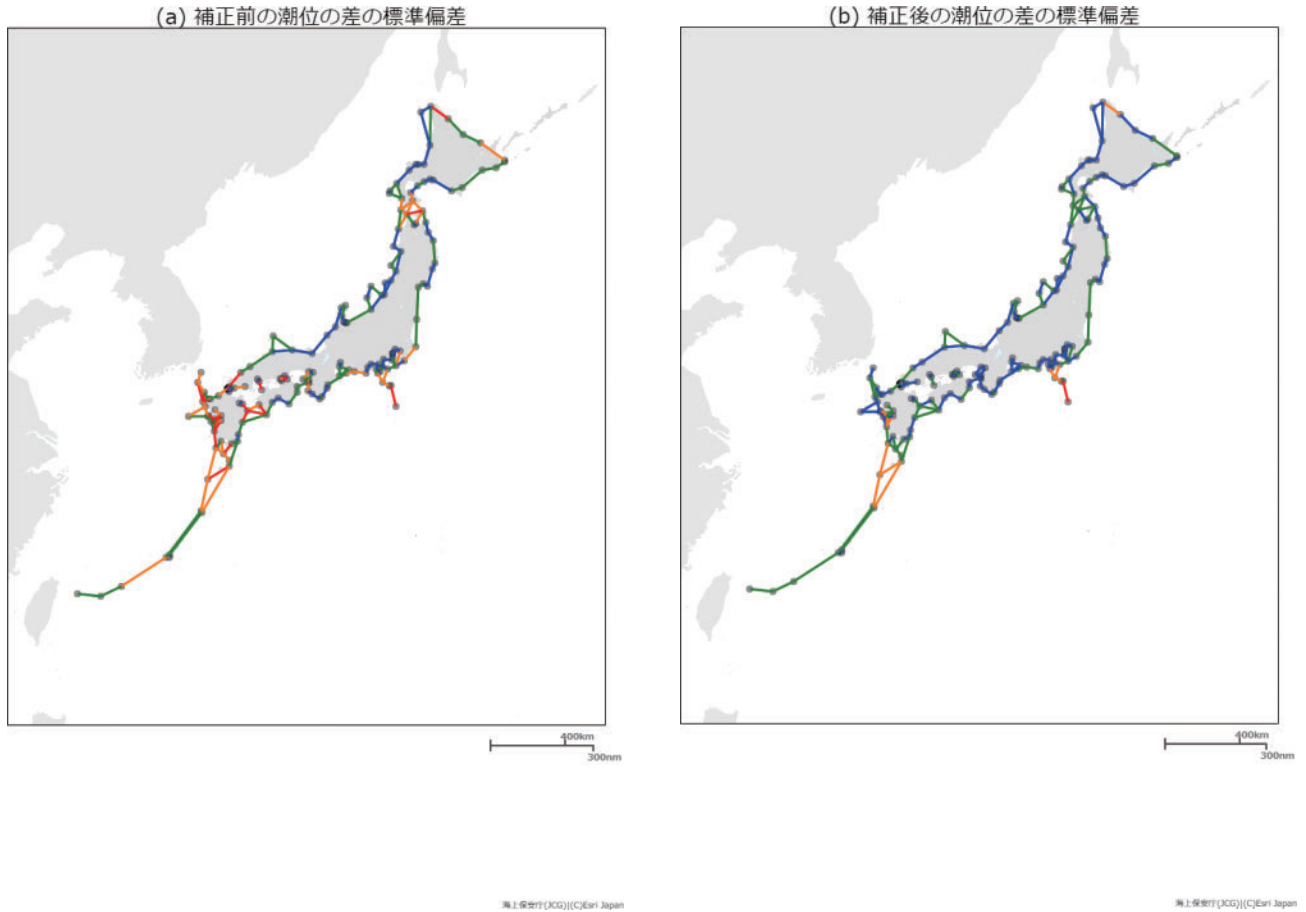


Fig. 4. The distribution of the standard deviations of the tidal level data between adjacent tide gauges before (a) and after (b) correction by the astronomical tide. The blue, green, orange, and red lines show the standard deviations less than 4.5 cm, 9 cm, 18 cm, and more than 18 cm, respectively.

図 4. (a) 天文潮位で補正する前及び (b) 後の潮位の差の標準偏差の分布. 標準偏差が 4.5 cm 未満, 4.5 cm 以上 9 cm 未満, 9 cm 以上 18 cm 未満, 18 cm 以上の区間をそれぞれ青線, 緑線, 橙線, 赤線で示した.

4 (a) に示してあり, 補正前後の標準偏差を比較できる. 天文潮位で補正を行えば, 黒潮流路に近い港の間を除き, 潮位の差の標準偏差はほぼ 9 cm 以内に収まる. 水路測量の潮高改正に近隣の常設験潮所があり, 天文潮位による補正を行うことが規則で許容されれば, 特級で要求される水深誤差の範囲を満たす潮高改正が可能といえるだろう.

なお, 単一の地点ごとの潮位時系列の統計について, 日本沿岸の常設験潮所の観測潮位のうち, 天文潮位以外の成分の標準偏差は, 平均して 10.2 cm であることがわかっている (近澤・他, 2012). 隣接する常設験潮所の潮位の差の, 天文潮位以外の成分の標準偏差は, それよりも小さ

い. これは, 風の吹き寄せ効果や, 黒潮の接近の効果が, 隣接する常設験潮所に同時に働き, 同符号の潮位偏差となる時間があることが原因のひとつとして考えられる.

この観点で式 (1) について補足する. もとこのこの補正の趣旨は, 潮高改正に用いる常設験潮所 R の潮位記録  $h_R(t)$  の天文潮位  $\tilde{h}_R(t)$  を, 測量地 S の天文潮位  $\tilde{h}_S(t)$  に置き換えることであり,  $\tilde{h}_S(t) - \tilde{h}_R(t)$  で補正する. 式 (1) には補正により加える値  $\tilde{h}_S(t) - \tilde{h}_R(t)$  を括弧書きで示してある. 一方, 式 (1) の四則演算を式 (1') のように入れ換えれば, もともと天文潮位  $\tilde{h}_S(t)$  のみによる潮高改正があって, それを, 測量地に近接した常設験潮所 R の天文潮位以外の成分  $h_R(t) - \tilde{h}_R(t)$  で

補正したとみることもできる。

$$h_{R=S}(t) = \tilde{h}_S(t) + (h_R(t) - \tilde{h}_R(t)) \quad \text{式 (1')}$$

上述したように、実際の潮位記録は、天文潮位以外の成分もその標準偏差はおおよそ 10 cm 程度あり、そのままでは特級精度を満たす潮高改正は難しいように思われる。しかし、今回の補正の試行が表しているのは、多少離れていても、常設験潮所の観測記録により天文潮位以外の成分を加えることで、標準偏差は天文潮位による誤差よりずっと小さくなるということである。

## 6 まとめ

水路測量における潮高改正のため、測量海域に簡易験潮器を設置することがあるが、これには時間的にも、人員の面も、費用についても大きな負担である。大きなコストをかけてまで簡易験潮器を設置していたのは、これまで、常設験潮所の潮位を潮高改正に使用できる地理的な範囲とその基準が明確でなかったからと思われる。

本稿では、潮高改正にかかる誤差を基準面の誤差と観測潮位の誤差にわけ、このうち、観測潮位の誤差の目安を、特級海域での測深値に要求される誤差の分散のうち水深に依存しない項の半分である 9 cm とした。観測潮位の誤差は、隣接する常設験潮所の潮位データを用いて、次のように求めた。まず、観測潮位として 2013 年から 2017 年までの 5 年間の毎時潮位を用い、二地点の平均水面を揃えてその差の時系列とした。次に、この潮位の差の標準偏差を求めた。

この標準偏差が 9 cm 以内であることが、本稿で提案する常設験潮所の潮位を潮高改正に使用できる基準である。そして、Figs. 2(a)–2(e)に青線及び緑線で示した海域が、この基準を満たし、常設験潮所の潮位を潮高改正に使用できる範囲である。

これらの図に示した海域では、簡易験潮器を設置することなく、常設験潮所のデータを潮高改正に利用することが可能である。また、本稿では示すことができなかった常設験潮所についても、水

路測量を計画する際には、測量海域付近で同様の統計解析を行い、潮高改正に常設験潮所を利用可能かどうか確認のうえ利用することを推奨する。

## 謝 辞

住吉昌直海洋情報技術官には、誤差の考え方や図の解釈等有用な議論を頂いた。毎時潮位データは JODC の資料を使用した。調和定数は気象庁の資料を使用した。常設験潮所間の直線距離は国土地理院のウェブサービスを利用した。ここに記して感謝の意を表す。

## 文 献

- 近澤昌寿・橋口祥治・大久保沙貴 (2012) 日本沿岸における潮位偏差の地域性及び季節性について、測候時報, 79, 特別号, S1-S24.
- Sato, S. (2018) CATZOC Allocation in Japan, IHO DQWG13 Workshop.
- 佐藤 敏 (2020) 水路測量に係る平均水面の求め方の問題点, 海洋情報部研究報告, 58, 100–108.
- 佐藤 敏 (2021) 本多式験潮器, 水路, 投稿中.
- 住吉昌直・栗田洋和・安原 徹・橋本崇史・小川 遥・長澤亮佑・長野勝行・吉澤 信・眞保智彦・秋山裕平 (2020) マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について: 海外水路機関における最適化の事例紹介, 海洋情報部研究報告, 58, 66–79.
- 寄高博行・花輪公雄 (2020) 東京湾平均海面基準の日本沿岸平均水位分布とその季節・経年変動, 海の研究, 29, [4], 107–128, doi: 10.5928/kaiyou.29.4\_107.

## 要 旨

水深の許容誤差の観点で、潮高改正に使用する潮位の変動が「同じ」とみなせる基準として、測量海域の潮位と観測潮位の差の標準偏差が 9 cm 未満という指標を提案した。この指標を満たす範囲を調べるため、日本海洋データセンター登録の常設験潮所の潮位差の標準偏差を計算した。津軽

海峡を除く須佐から稚内までの日本海沿岸と、黒潮接岸地点付近や潮汐の振幅変化の大きな一部区間を除く志布志から花咲までの太平洋沿岸の大部分で、隣接する常設験潮所の中の潮位の差の標準偏差は9 cm 未満であることがわかった。これは、特級の水路測量で要求される水深誤差の許容範囲内であると解釈できる。これらの海域では、潮高改正のためだけに測量海域の岸壁前面に簡易験潮器を設置するのではなく、最も近い信頼できる常設験潮所の潮位を用いるべきである。