TOPEX と POSEIDON 両高度計データ間に みられる相対バイアスの評価*

横田秀和・久保田雅久†

Evaluation of a Relative Bias between TOPEX and POSEIDON Altimeter Data

Hidekazu Yokota and Masahisa Kubota‡

Abstract

TOPEX and POSEIDON altimeters are on board the same satellite and measure the sea surface topography, alternatively. Here the relative bias between the two altimeters is estimated. Data for five orbits over the North Pacific are analyzed. The relative bias is found to be about 22cm and considerably stable, not depending on the orbit and the observation time. The value is consistent with that indicated by the calibration by *in situ* data. The effectiveness of adding the constant relative bias to the POSEIDON altimeter data is demonstrated by the comparison with *in situ* sea level data. Corrected POSEIDON altimeter data are also obtained by linearly interpolating the TOPEX altimeter data closed in time instead of adding the constant value. In comparison of both results with *in situ* sea level data, the correlation is higher for the latter corrected data.

1. はじめに

人工衛星 TOPEX/POSEIDON は、アメリカの NASA (National Aeronautics and Space Administration) とフランスの CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) との共同によって 1992 年 8 月に打ち上げられた海洋観測衛星であり、海洋大循環を調査するために海面高度の精密な測定を行うことを目的としている。衛星の高度は 1336km, 約 112 分で地球を 1 周し、1 サイクル (約 10 日間) の間に 127 周して同じ地点に戻る軌道をとっている。搭載されているセンサーは、アメリカの NASA によって開発された TOPEX 高度計とフランスの CNES によって開発された POSEIDON 高度計の 2 つのマイク

ロ波高度計である。これら 2 つの高度計は 1 つのアンテナを共有しているため、同時に観測を行うことはできない。TOPEX 高度計がオペレーショナルなセンサーであるのに対し、POSEIDON 高度計は実験的なセンサーであることから、主として TOPEX 高度計が観測を行い、POSEIDON 高度計は 10 サイクルに 1 サイクル程度の観測を行っている。このように、観測は 2 つの高度計によって交互に行われているため、すべての期間にわたってデータを連続的に得るためには、両高度計によって観測されたそれぞれのデータを複合して扱うことが必要となる。しかしながら、それぞれの高度計の測定精度の違いなどのため、両高度計のデータは単純に複合して使うことはできないことが予想される。また、Benada (1993) によってすでに報告されているように、TOPEX 高度計は POSEIDON 高度計よりも海面を約 20cm 短く測定していることが認められている。

そこで、本研究では、それぞれの高度計で観測された

* 1995 年 4 月 18 日受領; 1995 年 7 月 10 日受理

† 東海大学海洋学部; 〒424 静岡県清水市折戸 3-20-1

‡ School of Marine Science and Technology, Tokai University, Shimizu, Shizuoka, 424 Japan

Fig. 1. Locations of sea level stations and ground tracks used in this study. Pass numbers are indicated.

データを複合して扱うための準備として、両高度計データ間のバイアス、すなわち相対バイアスを定量的に求め、これを一定値と仮定して取り除くことの有効性について、実際に観測された潮位データを用いて評価することを試みた。

2. 使用データ

2.1. TOPEX/POSEIDON 海面高度データ

本研究では、NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory) の PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) から配布されている TOPEX/POSEIDON Merged GDR (Geophysical Data Record) のサイクル1からサイクル62までのデータを使用している。相対バイアスの計算には、ジオイドからの残差である Residual Sea Surface Height (以後 RSSH とする) の値を用いている。RSSH を求める際に施した補正は Benada (1993) に基づき、湿潤対流圏と乾燥対流圏および電離層におけるマイクロ波伝播速度の遅れの補正 (wet troposphere correction, dry troposphere correction, ionosphere correction) と、マイクロ波の反射特性により海面高度が実際の海面高度よりも低く見積もられてしまうことに対する補正 (electromagnetic bias) である。ただし、電離層に起因する補正に関しては、TOPEX 高度計の観測値には2つの周波数を用いて測定を行った結果から求められた補正量を用いているのに対し、POSEIDON 高

度計の観測値には DORIS (Determination of Orbit Radiopositioning Integrated by Satellite) データから求められた補正量を用いているという点が、両高度計の間で異なっている。海洋の潮汐の補正には、Cartwright and Ray model (Cartwright and Ray, 1991) および Schwiderski model (Schwiderski, 1980) の改良版のどちらかを選択できるが、本研究ではそれぞれの補正量を用いて RSSH を求め、結果の比較を行った。以後、前者による値を用いて補正を行った RSSH を RSSH_{CR}、後者による値を用いて補正を行った RSSH を RSSH_{SCH} と書く。また、相対バイアスの計算に用いる観測値の品質管理として、測定が正常に行われていない時の観測値は、使用に不適当と考え取り除いている。また、今後の研究計画として、北太平洋における解析を考えているため、相対バイアスの計算に用いるのはそれぞれの軌道データのうち赤道から 60°N までのデータとしている。

2.2. 潮位データ

本研究では、相対バイアスの補正を行った POSEIDON 高度計データの評価として、潮位データとの比較を行っている。比較に用いた潮位データは、University of Hawaii Sea Level Center よりインターネットを通して得られた WOCE (World Ocean Circulation Experiment) “fast” Sea Level Data であり、1日平均の潮位データである。各観潮所の位置を Fig. 1 に示す。

3. 相対バイアスの計算方法

本研究で用いた相対バイアスの計算方法の模式図を Fig. 2 に示す. 図に示されているように, POSEIDON 高度計によって観測が行われたサイクルの観測値と, その前後のサイクルの TOPEX 高度計による観測値から線形補間により求めた推定値 (以後, この値を TOPEX 高度計による基準値と書く) との差を求め, それらの全ての差の平均値を両高度計データ間の相対バイアスとみなすことにする. そして, この値を用いて POSEIDON 高度計によって観測された値を補正することにより, 両高度計データ間のバイアスが近似的に除去できると考える.

サイクル 1 からサイクル 62 までの間で POSEIDON 高度計による海面高度の観測が行われたサイクルは, サイクル 20, 31, 41, 55 である. そこで, 実際の相対バイアスの計算には, サイクル 19, 20, 21, サイクル 30, 31, 32, サイクル 40, 41, 42, サイクル 54, 55, 56 の観測データを用い, 比較的長い距離にわたって連続的に観測が行われている Fig. 1 に示す 5 本の軌道について解析を行った. この 5 本の軌道のうち, 軌道 49, 125, 201, 227 は北上軌道, 軌道 34 は南下軌道である. 相対バイアスの計算に用いる軌道が 5 本だけというのは少ないようにも思えるが, 相対バイアスが生じている原因は, 主にそれぞれの高度計の (海面高度算出のアルゴリズムを含んだ) 観測システムの違いによるものであり, 軌道や期間の違いによって相対バイアスが大きく異なることは考えにくいことから, 5 本の軌道をサンプルとして十分に相対バイアスを見積もることができると考えられる. なお, 観測が行われた地点が各サイクル毎に微妙に異なっているため, サイクル 2 で観測が行われた地点を標準観測点とし, 他のサイクルの観測値をこの地点に内挿をした後に, 相対バイアスの計算を行っている.

4. 相対バイアスに関する解析結果

まず始めに, 本研究で求められる相対バイアスの推定精度を見積もるために, TOPEX 高度計によって 3 サイクル続けて観測が行われている場合について, 前述の計算方法を適用してみた. この際, 計算に用いたのは, サイクル 24, 25, 26, サイクル 35, 36, 37, サイクル 47, 48, 49 に関する Fig. 1 に示す 5 本の軌道の観測値である. その結

Fig. 2. Schematic diagram for calculating the relative bias. ○ and ■ indicate the data obtained by the TOPEX and the POSEIDON altimeters, respectively. □ indicates the data interpolated linearly by the neighboring TOPEX altimeter data.

果, RSSH.CR についての (Fig. 2 に示されている) 全ての差の平均値が 0.0cm で標準偏差が 7.3cm, RSSH.SCH についての全ての差の平均値が 0.9cm で標準偏差が 7.9cm と求められた. この計算に用いたのは全て TOPEX 高度計の観測値であるから, 差の平均値がほぼ零であることは, 差が生じている原因が基本的にランダムであることを意味している. また, 差の標準誤差は 7~8cm となっており, これは 10 日前と 10 日後の観測値から線形に補間しても推定しきれない実際の海面変動成分を表しているものである. ここで, RSSH.CR と RSSH.SCH の差の平均値や標準誤差に違いが出ていることが認められるが, この原因は, RSSH の算出の際の潮汐補正の違いによるものである. 本研究の相対バイアスの計算方法には, 観測時間に依存した種々の影響を取り除いた観測値を用いているため, 潮汐補正の違いによって求められる相対バイアス値に違いが出てくることが十分に予想できることである. また, 現在の潮汐モデルの誤差が数 cm から 10cm 程度あるといわれていること (Jacobs *et al.*, 1992; Schlax and Chelton, 1994) を考え合わせると, 潮汐補正の違いによる影響が 1cm 以内であるということは, かなり小さいものであるといえることができるだろう.

さて, 相対バイアスの計算結果の一例として, Fig. 3 に, サイクル 19, 20, 21 の軌道 34 における RSSH.CR につい

Fig. 3. Spatial variation of (a) values of TOPEX altimeter data averaged for cycles 19 and 21, (b) values of POSEIDON altimeter data obtained for cycle 20 and (c) the difference between them.

ての結果を示す。この図から、POSEIDON 高度計の観測値と TOPEX 高度計による基準値との差は、空間的にかなり一様な分布をしている様に見える。Fig. 3 の例では、差の標準偏差は 6.4cm であり、TOPEX 高度計による観測データのみを用いたときの推定精度 (7~8cm) に比較して決して大きくない。これらのことから、相対バイアスは空間的にほぼ一様に分布していると推測される。そこで、相対バイアスを一定値と仮定して、POSEIDON 高度計の観測値を補正することにより、バイアスを近似的に除去できることが期待できる。

RSSH.CR と RSSH.SCH のそれぞれについて各サイクルと各軌道毎に求めた差の平均値と標準偏差を Fig. 4

に示す。この図から、差の平均値は、観測期間や軌道によって若干の違いがあるものの、値はそれほど大きく異なっていないことが分かる。これら全ての差の平均値より、RSSH.CR に対する相対バイアスは 22.3cm で標準偏差は 9.5cm、RSSH.SCH に対する相対バイアスは 21.4cm で標準偏差は 9.7cm と求められた。よって、相対バイアスの値としては、約 22cm の値が得られ、Benada (1993) で報告されていることと矛盾しない結果が得られたことになる。また、相対バイアスの値はそれぞれの潮汐補正により異なっているが、この程度の違いは潮汐モデルの誤差の範囲内である。

さて、標準偏差が 9~10cm と、推定精度よりも 2cm 大

Fig. 4. Biases (plots) and standard deviations (vertical bars) for each pass {(a) pass34, (b) pass49, (c) pass125, (d) pass201, (e) pass227}. Tide correction is made by Cartwright and Ray model(●) and Enhanced modified Schwiderski model(○).

きくなっていることについて考えてみる。この原因が、2つの高度計の測定精度の違いによるものであるということは明らかである。Fu *et al.* (1994)によると、高度計自体の測定精度は、TOPEX 高度計が 1.7cm, POSEIDON 高度計が 2.0cm と評価されている。また、それぞれの高度計データに施した補正の違いは、電離層におけるマイクロ波伝播速度の遅れの補正のみであり、Fu *et al.* (1994)によって見積もられているこの補正量の精度は、TOPEX 高度計で 0.5cm, POSEIDON 高度計で 1.7cm と評価されている。これらの値は、差の標準偏差が推定精度より 2cm 大きいということを十分に説明できると思われる。

したがって、これらのことから、POSEIDON 高度計の観測値を一定の相対バイアス値を用いて補正することにより、両高度計データを複合して扱うことの可能性が示された。

ここで得られた相対バイアスの値は、TOPEX/POSEIDON データのキャリブレーションの結果からも検討されている。例えば、Morris and Gill (1994) では、アメリカの五大湖での観測結果をもとに相対バイアスについて議論している。彼らが用いている軌道の数、特に POSEIDON 高度計が観測を行った軌道数は少なく、また、データ数も限られているが、バイアスとして 15cm 前

Fig. 5. Time series of sea level data (solid line) and the TOPEX/POSEIDON altimeter data at Johnston Island. ○ indicates the data observed by TOPEX altimeter. ■ and □ indicate the original and corrected data observed by POSEIDON altimeter, respectively.

後の値を得ている。一方, Christensen *et al.* (1994), あるいは Ménard *et al.* (1994) は, 地中海に設置された固定観測点 Lampedusa とカリフォルニア沖に設置された固定観測点 Harvest で得られた現場観測値を利用して相対バイアスについて述べている。相対バイアスに関する彼らの結果は, Sea State Bias の計算方法に依存をしているが, 15cm から 23cm の範囲であった。本研究で求められた相対バイアスの値は 22cm 前後であり, 彼らの結果と同様な結果が得られたといえるだろう。

5. 海面高度データと潮位データとの比較

この節では, それぞれの高度計の観測値と実際に観測された潮位データとの比較を行い, 相対バイアスを一定値と仮定して取り除き, 両高度計観測データを複合して扱うことの有効性について検証する。海面高度データと潮位データとの比較には, それぞれのデータについて平均値からの偏差を用い, 時間変動成分のみを比較している。それぞれのデータに施した処理は次の通りである。潮位データについては, 日平均値を用いて, TOPEX/POSEIDON のデータと同じ期間 (1992 年 9 月 23 日～1994 年 5 月 30 日) の平均値からの偏差を求めている。海面高度データについては, 観測所からの距離が 150km 以内の観測値

に対して距離に依存した重みをかけて求めた平均値を各サイクル毎に求め、この各サイクル毎の平均値から成る時系列データをもとに、全ての期間(サイクル1～サイクル62)の平均値からの偏差を求めている。ここで、海面高度データは10日毎に存在し、潮位データは1日毎に存在しているが、比較の際には、高度計が観測を行った日の潮位データを用いている。

ここでは、RSSH_CR と潮位データとを比較した結果について述べることにする。まずはじめに、一例として、Johnston Island における潮位データと TOPEX/POSEIDON の軌道 249 との比較結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) より、TOPEX 高度計の観測値については、潮位の変動と非常によく一致した変動を示していることが分かる。しかし、POSEIDON 高度計の観測値について、観測値をそのまま TOPEX 高度計の観測値と複合したのでは、2つの高度計の観測値の間に約 20cm のバイアスがあることが明らかに分かる。POSEIDON 高度計の観測値については相対バイアスの補正を行ってから比較を行った結果である Fig. 5(b) を見ると、観測された海面高度は、潮位の変動とよく一致した変動を示しており、2つの高度計の観測値を複合して扱うことの有効性を認めることができる。ただし、ここで注意しなければならないことは、TOPEX 高度計による観測値の数に比べて圧倒的に多いため、観測値の平均値は TOPEX 高度計の観測値に大きく依存したものになっていることである。そのため、Fig. 5(a) からは POSEIDON 高度計の観測値が潮位データと大きく異なっているように見えている。しかし実際には、Ménard *et al.* (1994) で報告されているように現場観測値とのバイアスは TOPEX 高度計が -18.5cm、POSEIDON 高度計が 1cm と、POSEIDON 高度計の方が現場観測値に近いという結果が得られている。

ところで、「すべての期間にわたってデータを連続的に得る」ということに着目すると、POSEIDON 高度計の観測値の相対バイアスを取り除いて用いるという方法の他に、POSEIDON 高度計が観測を行ったサイクルの前後の TOPEX 高度計が観測を行ったサイクルの値から補間をして求めるという方法も考えられる。これについて議論するために、サイクル毎に各観測所から 150km 以内の観測値を平均した値について、(1) POSEIDON 高度計の観測値、(2) 相対バイアスの補正を行った POSEIDON

Table 1. Comparison between the sea level anomaly and the anomaly for various guessed values of data for the cycle observed by POSEIDON altimeter.

	Correlation coefficient	RMS error (cm)
(1) The POSEIDON altimeter data	0.456	11.3
(2) The POSEIDON altimeter data corrected by the relative bias	0.478	11.0
(3) The data linearly interpolated using the neighboring TOPEX altimeter data	0.568	7.0
(4) The data interpolated by a spline method using the neighboring TOPEX altimeter data	0.418	8.7

高度計の観測値、(3) 前後のサイクルの TOPEX 高度計データから線形補間により推定した値、(4) (3) と同様であるが補間の方法に 3 次のスプライン補間を用いた場合の 4 種類のデータと潮位データとの相関係数および RMS 誤差を求め、比較を行った。その結果を Table. 1 に示す。この表から、潮位データとの誤差が最も小さく相関が最も高いのは、(3) であることが分かる。(1) と (2) でほとんど RMS 誤差が同じなのは、相対バイアスを除去しても POSEIDON 高度計自体の測定精度は変わらないためである。また、スプライン補間を用いて推定した値の相関が他の場合と比べて低くなっているのは、スプライン関数を用いて補間をすると必要以上に変動が強調される場合があるためだと予想される。

これらの結果から、TOPEX/POSEIDON 観測データについて、全ての期間にわたるデータを利用する際には、POSEIDON 高度計の観測値は使わずに、前後のサイクルの TOPEX 高度計データから線形補間によって推定した値を用いたほうが良いということが示唆される。しかし、観測が行われた瞬間の値を解析に用いるような場合には、POSEIDON 高度計の観測値を使わざるを得ない。特に、その時間変動が TOPEX/POSEIDON の回帰周期である 10 日より短いような現象は、前後のサイクル

の(10日前と10日後の)観測値からの補間では、現象を捕らえることができないことが考えられる。その際には、当然 TOPEX 高度計による観測よりも精度は低いが、POSEIDON 高度計の観測値をバイアス補正したものを、近似的に使うことができるだろう。

6. おわりに

本研究では、POSEIDON 高度計によって観測が行われたサイクルにおける観測値を、その前後の TOPEX 高度計によって観測が行われたサイクルの観測値から線形補間によって推定し、この値と POSEIDON 高度計の観測値との差を求めることによって、両高度計データ間の相対バイアスを見積もっている。

相対バイアスの計算は、サイクル 19, 20, 21, サイクル 30, 31, 32, サイクル 40, 41, 42, サイクル 54, 55, 56 で観測された 4 本の北上軌道と 1 本の南下軌道の計 5 本の軌道のデータを用いて行った。その結果、相対バイアスには観測時間の違いや軌道による違いはほとんど見られなかった。そして、潮汐の補正を Cartwright and Ray model で行った場合のバイアスの平均値は 22.3cm, Schwiderski model の改良版で行った場合のバイアスの平均値は 21.4cm であった。すでに行われている両高度計のキャリブレーションの結果から両高度計間のバイアスは 15cm から 23cm と見積もられており、本研究でもほぼ同じ結果が得られたといえる。

また、TOPEX/POSEIDON 高度計データと潮位データとの比較を行った結果、バイアスの補正を行うことによって、海面高度変動と潮位変動とが良く一致した変動を示すようになることが示された。これにより、POSEIDON 高度計によって観測が行われたサイクルのデータを有効に利用することができると思われる。

しかしながら、POSEIDON 高度計が観測を行ったサイクルについて、バイアス補正をした POSEIDON 高度計の観測値よりも、前後のサイクルの TOPEX 高度計による観測値から線形補間によって推定した値のほうが、潮位データとの相関が高く、また誤差も小さいということも示された。したがって、特別に POSEIDON 高度計によって観測される瞬間値を必要とする場合を除けば、TOPEX 高度計による観測値のみを扱い、POSEIDON 高度計によって観測が行われたサイクルのデータは補間し

て求めるという方法が最も良いと考えられる。

謝 辞

本研究で用いた TOPEX/POSEIDON Merged GDR は、NASA JPL の PO.DAAC から提供していただきました。ここに謝意を表します。本研究で利用した WOCE Sea Level Data は、University of Hawaii Sea Level Center の ftp サーバー (kia.soest.hawaii.edu) から得られたものです。サーバーの管理者ならびに関係者の方々に心より感謝いたします。また、本研究を行うにあたり、TOPEX/POSEIDON Merged GDR の使用に関して大いなる助言をして下さった NASA JPL の Robert Benada 博士に深く感謝いたします。

References

- Benada, R. (1993): PO.DAAC MERGED GDR (TOPEX /Poseidon) USERS HANDBOOK, Rep. JPL D-8944, Jet Propul. Lab., Pasadena, Calif., 122pp.
- Cartwright, D.E. and R.D. Ray (1991): Energetics of global ocean tides from Geosat altimetry. *J. Geophys. Res.*, **96**, 16897-16912.
- Christensen, E.J., B.J. Haines, S.J. Keihm, C.S. Morris, R.A. Norman, G.H. Purcell, B.G. Williams, B.D. Wilson, G.H. Born, M.E. Parke, S.K. Gill, C.K. Shum, B.D. Tapley, R. Kolenkiewicz and R.S. Nerem (1994): Calibration of TOPEX/POSEIDON at Platform Harvest. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24465-24485.
- Fu, L.-L., E.J. Christensen, C.A. Yamarone Jr., M. Lefebvre, Y. Ménard, M. Dorrer and P. Escudier (1994): TOPEX/POSEIDON mission overview. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24369-24381.
- Jacobs, G.A., G.H. Born, M.E. Parke and P.C. Allen (1992): The global structure of the annual and semiannual sea surface height variability from Geosat altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **97**, 17813-17828.
- Ménard, Y., E. Jeansou and P. Vincent (1994): Calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters over Lampedusa: Additional results at Harvest. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24487-24504.
- Morris, C.S. and S.K. Gill (1994): Evaluation of the TOPEX/POSEIDON altimeter system over the Great Lakes. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24527-24539.
- Schlax, M.G. and D.B. Chelton (1994): Aliased tidal errors in TOPEX/POSEIDON sea surface height data. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24761-24775.
- Schwiderski, E.W. (1980): On charting global tides. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **18**, 243-268.