

## 精密軌道決定による海洋荷重モデルの評価解析

### Quality check of ocean loading models through precise orbit determination

大坪 俊通 <sup>\*1</sup>, 松本 晃治 <sup>\*2</sup>, 久保岡 俊宏 <sup>\*1</sup>, 後藤 忠広 <sup>\*1</sup>

Toshimichi Otsubo <sup>\*1</sup>, Koji Matsumoto <sup>\*2</sup>, Toshihiro Kubo-oka <sup>\*1</sup>, Tadahiro Gotoh <sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 情報通信研究機構, National Institute of Information and Communications Technology

<sup>\*2</sup> 国立天文台, National Astronomical Observatory

Email: otsubo@nict.go.jp <sup>\*1</sup>

#### Abstract:

Several ocean loading models are tested with precise observation data of satellite laser ranging to LAGEOS satellites. High-precision orbit determination analysis using our software ‘concerto v4’ reveals that recent models based on the TOPEX/POSEIDON altimeter data generally excel the formerly used Schwiderski model. Among the altimeter-based models, the NAO.99b model shows the best performance. By increasing the standard 11 waves to 54 waves in the NAO.99b model, the performance gets slightly better.

#### 1. はじめに

現在, VLBI・SLR・GPS・DORIS などの高精度宇宙測地技術をもった測地観測局の位置決定は, 全球規模で 1 cm 程度, リージョナルには 1 mm 程度の精度を達成している<sup>[1]</sup>. 精密測地解析においてこのような高い精度に対応するには, 地球基準座標系の中で局位置がどのように変動するか, すなわち固体地球潮汐や海洋・大気・陸水・雪など様々な荷重効果による補正を, 局位置決定精度と同等あるいはそれ以上の精度で行うことが必要となる.

そのうち, 海洋の荷重変化による局位置の変動幅は, 局の地理的特徴に依存するが, 大きいところで数 cm 程度で, モデル間の差を見ても数 mm 程度である. 1990 年代より TOPEX/POSEIDON 等のアルチメータ衛星の恩恵によって, 全球の海洋潮汐モデルが著しく改善されつつある. それに伴い, 海洋荷重計算に用いる数値テーブルも更新されている. 例えば IERS Conventions 1996<sup>[2]</sup> の発行時点では Schwiderski モデルなどが推奨されていたのに対し, 最近新しく編纂された IERS Conventions 2003<sup>[3]</sup> では CSR4.0, TPX0.5, FES99, GOT00.2, NAO.99b といったアルチメータデータの解析により作られたモデルが推奨されている. また, 11個の分潮について3次元の変位を計算することが長い間標準的に行われてきたが, 最近では, 国立天文台によりそれを54分潮にまで拡張する試みも始まっている<sup>[4]</sup>.

本研究では, 衛星レーザ測距 (Satellite Laser Ranging; SLR) データを, 情報通信研究機構で開発中の精密軌道解析ソフトウェア concerto<sup>[5]</sup> によって解析し, どのモデルが観測値に合致するか調べることで, 海洋潮汐モデルの評価を行うことを試みる.

## 2. 解析条件

精密軌道解析ソフトウェア concerto v4 は、前バージョン v3 よりも、さらに精度の高い物理モデルを取り込んでおり、本稿で述べる 54 分潮海洋荷重モデルもその一つである。海洋荷重モデルを入れ替えて、軌道などのパラメータ推定後の残差 RMS を調べ、それが小さいほど良いモデルである、という方針である。

使用したデータは、2003 年 7 月から 2004 年 6 月までの 12 ヶ月の LAGEOS-1 および LAGEOS-2 に対する SLR ノーマルポイントデータである。軌道は、3 日おきに、6 要素および along-track constant 加速度および along-track once-per-rev 加速度を推定した。軌道アークを短めに設定したのは、ここで見た信号が 1 mm 程度と小さく、できるだけ観測値の残差のばらつきを小さくしておきたいためである。観測局位置は ITRF2000 に固定したが、レンジバイアスを局別に推定している。地球回転パラメータは IERS の EOPC04 値に固定した。そのほかのモデルについては、IERS Conventions 2003 にほぼ準拠したモデルを採用して解析した。

広く使われている海洋荷重 11 分潮は、

$$M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, Ssa$$

である。なお、(研究集会後に知ったことであるが、) IERS Conventions 内に直接の記載はないものの、上の分潮に対して与えられた振幅・位相情報から、

$$M2', K1', K1'', O1', K2', Q1', Mf'$$

の 7 分潮を比較的容易に追加でき<sup>[6]</sup>、そうすべきであることがわかった。

これに対し、国立天文台が拡張した 54 分潮は、

$$\begin{aligned} &M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, Ssa, M1, J1, OO1, 2N2, \mu 2, \nu 2, L2, \\ &T2, Mtm, Sa, 2Q1, \sigma 1, Q1', \rho 1, O1', \tau 1, M1', \chi 1, \pi 1, P1', K1'', K1', \phi 1, \phi 1, \\ &\theta 1, J1', OO1', \varepsilon 2, \mu 2', N2', \nu 2', \gamma 2, \alpha 2, M2', \beta 2, \delta 2, \lambda 2, S2', R2, K2', \\ &\zeta 2, \eta 2, \eta 2' \end{aligned}$$

に及ぶ。なお、2 行目 T2 以下については、アドミッタンスの内挿<sup>[7]</sup>によって潮位や荷重係数を計算している。図 1・図 2 に、11+7 分潮・54 分潮それぞれについて、3 次元(radial, west, south)の振幅と位相の数値テーブルを、鹿島局を例に示す。

われわれは、以下のモデルを交替させながら concerto の海洋荷重モデルとして取り込んだ。

```
$$
MONUMENT PEAK      7110
$$ GOT00.2_PP ID: Nov 12, 2004 17:32
$$ Computed by OLMPP by H G Scherneck, Onsala Space Observatory, 2004
$$ MONUMENT PEAK      7110,      RAD TANG lon/lat: 243.5773 32.8917
.00355 .00237 .00128 .00083 .01203 .00766 .00394 .00136 .00014 .00007 .00008
.00163 .00049 .00044 .00016 .00366 .00228 .00120 .00042 .00007 .00002 .00002
.00394 .00165 .00085 .00049 .00190 .00123 .00062 .00024 .00005 .00003 .00004
-47.9 -87.0 -69.0 -89.1 37.4 22.7 36.4 13.0 -148.3 -158.2 -174.6
151.2 115.6 118.4 116.5 -134.2 -149.6 -135.2 -157.4 117.8 131.2 18.1
88.6 110.4 72.5 104.3 177.0 164.8 176.2 158.4 41.7 21.3 4.0
```

図 1: 11 分潮海洋荷重の数値テーブル。GOT00.2 の例。

```

$$
7110
$$ Processed by the program GOTIC2_seq
$$ Computed by K. Matsumoto, NAO, Nov., 2001
$$ 7110 lon/lat 243.5773000000 32.8917000000
.003714 .002442 .012082 .007768 .001192 .003840 .000774 .001408 .000604 .000632 .000337 .000301 .000335 .000205 ...
.000093 .000133 .000162 .000200 .000265 .000270 .001464 .000109 .000121 .000114 .000220 .000043 .000239 .001638 ...
.000094 .000170 .000121 .000125 .000214 .000141 .000012 .000045 .000008 .000012 .000013 .000139 .000011 .000004 ...
.000024 .000005 .000022 .000231 .000041 .000269 .000118 .000031 .000176 .000090 .000082 .000012
.001643 .000494 .003583 .002266 .000401 .001137 .000150 .000411 .000179 .000190 .000103 .000090 .000101 .000072 ...
.000037 .000028 .000049 .000060 .000078 .000079 .000428 .000031 .000036 .000034 .000065 .000013 .000071 .000486 ...
.000028 .000050 .000036 .000038 .000066 .000041 .000004 .000015 .000003 .000005 .000006 .000061 .000005 .000002 ...
.000010 .000001 .000004 .000045 .000007 .000046 .000020 .000021 .000097 .000036 .000014 .000002
.003801 .001653 .001889 .001231 .000812 .000592 .000463 .000244 .000091 .000107 .000064 .000128 .000151 .000152 ...
.000105 .000097 .000033 .000039 .000046 .000046 .000232 .000019 .000018 .000017 .000034 .000007 .000037 .000256 ...
.000015 .000027 .000020 .000021 .000041 .000045 .000006 .000030 .000006 .000011 .000013 .000142 .000011 .000004 ...
.000027 .000004 .000014 .000138 .000021 .000138 .000061 .000004 .000036 .000028 .000031 .000005
314.199 280.264 37.103 22.345 286.166 36.074 269.874 17.184 29.012 44.401 50.625 267.769 269.952 289.447 ...
305.286 281.937 12.485 13.132 17.185 17.844 22.299 19.454 29.003 30.100 35.481 36.018 37.039 37.096 ...
37.643 38.207 43.383 44.319 50.289 253.870 269.589 286.081 289.245 311.355 312.725 314.196 315.090 315.773 ...
309.211 280.472 276.061 269.517 211.561 208.749 208.673 279.505 254.322 223.667 187.571 184.865
155.087 123.105 223.938 209.116 120.344 222.775 106.372 204.283 215.212 231.438 238.090 89.863 93.051 125.543 ...
160.751 129.668 199.928 200.509 204.267 204.891 209.102 207.471 215.238 216.359 222.154 222.726 223.910 223.976 ...
224.510 225.088 230.455 231.455 238.083 74.108 92.922 120.229 125.364 151.732 153.285 155.032 156.675 158.086 ...
162.200 123.646 115.184 105.881 55.419 53.373 53.334 152.326 135.712 105.745 29.865 16.122
89.616 112.304 178.182 166.573 72.287 177.319 105.985 164.876 168.890 184.925 190.593 57.338 59.220 74.396 ...
101.990 111.972 163.714 163.845 164.862 165.058 166.529 170.816 168.931 170.451 176.744 177.144 178.102 178.173 ...
178.612 179.148 183.929 184.821 190.416 45.961 59.083 72.236 74.324 87.431 88.394 89.552 90.561 91.482 ...
100.394 112.438 110.291 105.735 48.620 46.079 46.019 54.393 55.998 35.360 6.613 4.129

```

図 2: 54 分潮海洋荷重の数値テーブル(行末の…は改行なしで続くという意).  
NAO.99b の例.

- |                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| [a] 海洋荷重無視      | [b] Schwiderski モデル  |
| [c] CSR 4.0 モデル | [d] FES99 モデル        |
| [e] GOT00.2 モデル | [f] TPXO.6.2 モデル     |
| [g] NAO.99b モデル | [h] NAO.99b 54 分潮モデル |

なお, [b]～[g] の 11 分潮数値テーブルは, スウェーデン Onsala Space Observatory の H. G. Scherneck 氏による数値テーブル自動計算システム

<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>

によって得たものである.

### 3. 解析結果

ここでは, 軌道その他のパラメータを推定した後の, 観測値残差の RMS を比べてみる.

まずは, 全局平均の重みつき RMS をグラフとして図3に, 12ヶ月平均値を以下に示す.

- |              |              |
|--------------|--------------|
| [a] 1.211 cm | [b] 1.102 cm |
| [c] 1.092 cm | [d] 1.094 cm |
| [e] 1.093 cm | [f] 1.093 cm |
| [g] 1.090 cm | [h] 1.089 cm |

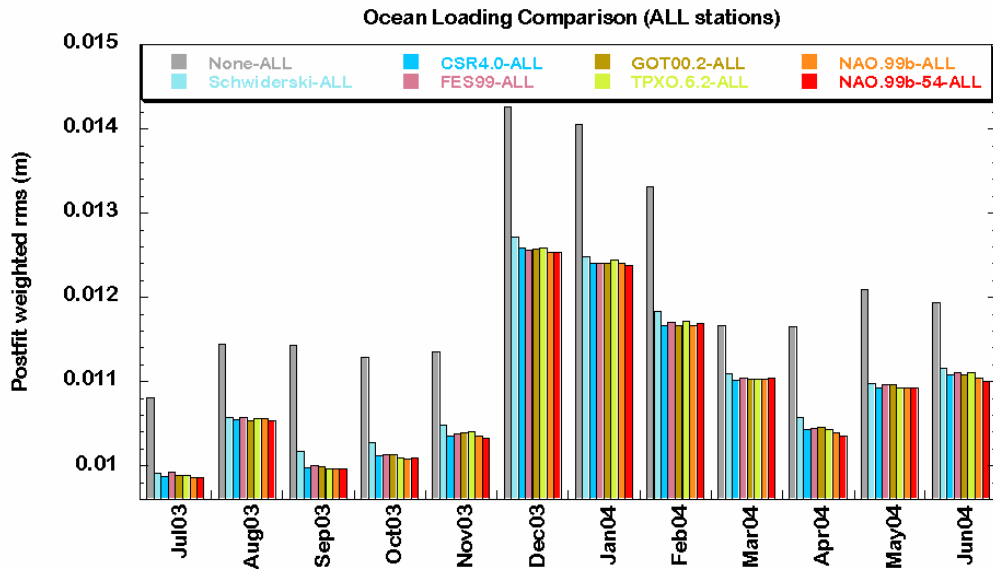


図3:海洋荷重モデル毎のパラメータ推定後残差重みつき RMS. 全局の重みつき平均.

全般的に, 1.0~1.4 cm RMS の結果が得られている. 8つのモデルの比較では, やはり海洋荷重を全く無視すると ([a]) 際立って RMS が大きい. すなわち, concerto v4 において, 海洋荷重モデルが有効に働いていることが確認された. 残りの7つのなかでは, TOPEX/POSEIDON 登場前に標準的に使われていた Schwiderski モデルを使うと, RMS が大きいことがわかる. さらに, 残りの6つ [c]~[h] は, ほとんど変わらない数値であるが, わずかながら [h] NAO.99b 54 分潮モデルが最も小さく, 次いで [g] NAO.99b 11+7 分潮モデルという結果になった.

#### 4. まとめと今後の展望

情報通信研究機構で開発中の精密軌道解析ソフトウェア concerto によって, およそ 1 cm のノイズに埋もれた, 平均して 1 mm 以下の海洋荷重モデル「差」を評価した. 海洋荷重変形モデルの適用による効果は顕著に現れており, さらに TOPEX/POSEIDON 以降のアルチメータデータによるモデルがそれ以前に比べて改善されていることもわかった. また, わずかの差ながら, NAO.99b モデル, 特に 54 分潮まで拡張した場合に, 最も観測値と一致した.

本稿ではまだ1年分の解析しか行っていないが, 今後は扱う期間や観測局を拡張して, 海洋荷重モデル差をより明らかにしていきたい.

#### 参考文献

- [1] Z. Altamimi, P. Sillard, C. Boucher, “ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications,” J. Geophys. Res., 107, B10, 10.1029/2001JB000561, 2002.
- [2] D. D. McCarthy (ed.), “IERS Conventions (1996),” IERS Technical Note 21, 1996.
- [3] D. D. McCarthy and G. Petit (eds.), “IERS Conventions (1996),” IERS Technical Note 32, 2003.
- [4] K. Matsumoto, “Loading contribution from minor ocean tidal constituents,” Proceedings of International

Workshop on GPS Meteorology, Tsukuba, Japan, 2003.

- [5] 大坪 俊通, 「衛星レーザー測距データの高精度解析 —cm から mm へ—」, 測地学会誌, 投稿中, 2005.
- [6] H.-G. Scherneck, “Explanatory supplement: ocean loading tides,” PDF document available at <http://www.oso.chalmers.se/~hgs/Articles/hgs4wg6.pdf>.
- [7] 松本 晃治, 「海洋荷重モデル NAO.99b の構築と普及」, 測地学会誌, 50, 3, 187-200, 2004.