全球潮汐計算を利用した日本沿岸の広域潮汐計算について

Tidal Simulation around Japanese Coastal Region with a Global Ocean Tide Model

白木喜章¹・柴木秀之²

Yoshiaki SHIRAKI and Hidenori SHIBAKI

This study examines the sensitivity of tidal simulation to the model-domain size, and validates the accuracy of tidal simulation with broad model domain as the storm surge simulation. The tidal simulation models which adopt the driving force given by the global ocean tide model are developed. The models cover the Seto Inland Sea and coastal region of Kyushu-Shikoku with three different model-domain sizes. The size of the broadest domain is just as the storm surge simulation. Validation with the tide-gauge data shows that the accuracy is high in the narrower domain cases, however, in the broadest domain case the calculational error of tide becomes large in Bungo Channel and eastern coastal region of Kyushu.

1. はじめに

高潮が沿岸域に及ぼす被害の規模は、その時の潮位によって変化することから、高潮の再現シミュレーションを行う際には、潮位の取り扱いが重要となる。近年では、計算機能力の向上に伴い、高潮と潮汐の計算を同時に行うことで両者の相互作用を考慮した潮汐・高潮結合モデルの開発が盛んに行われている。例えば、金ら（2008）や森ら（2009）によって四国南岸域に來襲した高潮について、潮汐、高潮および波浪を結合したモデルを用いた再現計算の報告がなされている。

外洋域における台風等の海面擾乱によって沿岸域に來襲する高潮計算では、開境界の位置を沿岸域よりも遠方にとる必要があり、瀬戸内海や四国南岸域の高潮を対象とする場合、その計算範囲は太平洋を含む広域となる。ただし、潮汐・高潮結合モデルで考慮される起潮力は、開境界での強制水位変動のみとされるのが現状であり、上記のような広域な範囲において潮汐計算の精度がどの程度の範囲まで確保されているのかは明確ではない。

本研究では、瀬戸内海および日本南方海域を含む広域において、開境界の潮汐変動のみを起潮力とする潮汐計算を行う。その際、計算領域の範囲を変えた複数の計算を行うことで、領域の広さに対する潮汐の計算精度の応答を調べる。そして、高潮計算で必要となる広範囲では、一部の沿岸域において潮汐計算の精度が低下する傾向にあり、高潮計算に反映する際に留意する必要があることを述べる。

2. 広域潮汐計算

(1) 潮汐モデル

本研究の潮汐計算では、開境界における起潮力として、Matsumotoら（2000）の全球潮汐モデル（NAO. 99Jb model）の結果による潮汐調和定数を用いる。NAO.99Jb modelは、日本周辺海域を $1/12^\circ$ (約9km) の高解像度の格子で分割し、さらにTOPEX/POSEIDONによる海面高度計データや日本沿岸域の験潮所データをデータ同化することで、高精度な潮汐計算を行っている。この結果を用いることにより、潮汐の情報が乏しい外洋域の開境界において潮汐変動を高精度に設定することが可能となる。なお、瀬戸内海や四国南岸域では7分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , P_1) が比較的主要であるため、それらの推算潮位を合成した水位変動を開境界に与える。

本研究の数値モデルは、柴木ら（2001）や原ら（2010）で広域の高潮計算に用いられたものを基本としており、潮汐のみを外力として計算したものである。プリミティブ方程式を支配方程式とする直交座標系、単層2次元のネスティングモデルで、非線形項は風上差分、空間差分はスタッガード格子、時間差分にはリーブ・フロッグ法としている。また、水平渦動粘性係数はスマゴリンスキー型を用いる。

計算範囲は瀬戸内海および日本南方海域を含む領域とし、範囲を変えた3ケースの計算を行う。図-1に3ケースの計算範囲および格子サイズを示す。図中の黒丸はそれぞれのケースにおける開境界の潮汐条件設定地点であり、地点間は両端の水位変動を線形補間した。Case3が最も広い範囲の計算で、瀬戸内海の格子サイズを450mとし、ネスティングによって沖方向に1,350m, 2,700m, 5,400mの格子サイズとした4領域計算である。Case1が最も狭く、450mと1,350m格子の2領域計算、Case2は450m,

1 博(理) (株) エコー環境・計画部主任
2 正会員 博(工) (株) エコー防災・水工部部長

図-1 Case1～Case3の計算範囲 (●：潮汐条件設定位置, △：験潮所)

1,350m, 2,700m 格子の3領域計算である。

上記3ケースについて潮汐計算を行い、潮汐の精度がどの範囲の計算まで維持されるかを調べるとともに高潮計算に反映できるかどうかを確認する。なお、コリオリパラメータは、計算範囲全域で一様としているが、緯度によって変化する惑星 β 効果についても検討する。

(2) 計算結果の比較と解析

計算はいずれのケースにおいても、計算開始からおよそ2日で定常状態に達することが確認された。図-2は、大潮期の四国南岸域が満潮時（計算開始から91時間後）のCase3の潮位分布結果である。外洋域の潮汐波はケルビン波として日本南岸域を南西方向に伝播する。また、瀬戸内海の潮汐は東西の入口である、豊後水道、紀伊水道から入射する潮汐波によって支配される。

図-2 Case3の潮位等値線分布

3. 計算結果の検証

(1) 潮位時系列

図-3は、図-1中に示した4地点の験潮所（高知、宇和

図-3 験潮所における推算潮位とCase1～Case3の1時間毎の潮位時系列比較（高知、宇和島、細島、松山）

島, 細島, 松山) において, 7分潮の潮汐調和定数 (海上保安庁) から推算した潮位と3ケースの計算潮位の1時間毎の時系列比較である. 結果は大潮期の1日間のものであり, 横軸は計算開始からの時間を示す.

Case1はいずれの地点においても推算潮位とほぼ一致しており再現精度は高い. また, Case2についても, 高知や細島で推算潮位と若干の差異がみられるものの, 潮汐計算の精度は, 四国南岸域や九州西岸域, 瀬戸内海において十分に保たれている. 一方, Case3は, 高知と松山で推算潮位やCase1, Case2とほぼ一致しているものの, 宇和島と細島において潮位変動の差異が比較的大きくなる傾向がある. とくに, 細島では潮汐波の振幅, 位相とともに精度が低下している.

表-1は, 図-3中に矢印で示した, 満潮時とその前後1時間の平均誤差を比較したものである. ここでの誤差は, 推算潮位 ($\eta_{pred.}$) と計算潮位 ($\eta_{calc.}$) を用いた式 (1) で定義される百分率とした.

Case1およびCase2はいずれの地点においても誤差は10%未満であり, 十分な計算精度が得られている. しかしながら, Case3は高知, 松山で精度が高いものの, 宇和島と細島で明確に誤差が大きくなっており, 宇和島で17%, 細島で27%を超える値となっている.

$$\left| \frac{\eta_{calc.} - \eta_{pred.}}{\eta_{pred.}} \times 100 \right| \dots\dots\dots (1)$$

(2) 潮位分布

Case2とCase3の結果を用いて, 外洋域から沿岸域にかけての潮位分布の比較を行う. 図-4に, 高知が満潮時におけるCase2およびCase3の潮位分布を示す. 沖側の潮位分布をみると両者の間で大きな違いはみられず同様の分布となっている. しかしながら, 沿岸域に近づくにつれて差異が大きくなっていることがわかる. とくに, 図中の印をつけた等値線は沿岸域において差異が大きくなっている.

次に, Case3において差異が比較的大きくなる傾向のあった領域について潮位分布の比較を行う. 図-5に豊後水道周辺域におけるCase1~Case3の同時刻の潮位分布を示す. 潮位時系列の比較において, 大きな差異がみられなかったCase1とCase2は, 潮位の値に多少の違いがあるものの, 潮位分布の傾向はほぼ一致している. 一方, Case3は九州東岸や豊後水道において, 他のケースと明確な差異が生じていることがわかる. ただし, 豊予海峡

図-4 開境界位置の違いによる潮位等値線分布の比較 (高知が満潮時, 上段: Case2, 下段: Case3)

以北の瀬戸内海の内側では, Case3の潮位は他のケースと同様の分布傾向になっている.

(3) 惑星 β 効果

ここでは, コリオリパラメータが緯度によって変化する惑星 β 効果についての検討を行う. 図-6は, 験潮所における7分潮の推算潮位, Case3の計算潮位ならびにCase3において β 面近似を施した計算 (Case3 β) の潮位時系列の比較である. これによると, 沿岸域におけるCase3 β の潮位変動は f 面近似としたCase3とほぼ一致している. よって, 今回の潮汐計算において用いた計算範囲では, 惑星 β 効果の沿岸域の潮汐変動に対する影響は小さいものと考えられる. ただし, より広い範囲の計算を行う場合, 惑星 β 効果を考慮することが必要となること

表-1 Case1~Case3の満潮時とその前後1時間の平均誤差 (%)

	Kochi	Uwajima	Hososhima	Matsuyama
Case1	4.0	5.1	6.3	7.6
Case2	4.3	3.9	7.8	8.4
Case3	4.6	17.2	27.3	6.2

図-5 開境界位置の違いによる豊後水道周辺域の潮位等値線分布の比較 (左から Case1, Case2, Case3)

 図-6 験潮所における推算潮位と Case3 および Case3 β の 1 時間毎の潮位時系列比較 (高知, 宇和島, 細島, 松山)

が推測される。

4. 考察

潮位時系列の比較によると、計算領域が最も狭い Case1 は、瀬戸内海や四国南岸域、九州東岸域のいずれの領域においても、験潮所の推算潮位とほぼ一致しており、高い精度の計算結果が得られた。また、計算領域を Case1 よりも広くした Case2 においても、潮汐計算の精度は十分であった。

高潮計算に適用可能な範囲までさらに領域を広げた Case3 の潮汐計算は、潮位時系列の比較において、四国南岸や瀬戸内海ではある程度の精度が得られるものの、豊後水道や九州東岸で明確な精度低下がみられた。潮位分布の比較においても他のケースとの差異が認められたことから、同海域の潮汐・高潮結合モデルにおいて、潮汐の起潮力を開境界のみに与える場合、豊後水道や九州

東岸域の潮汐の精度に留意する必要があることが明らかとなった。

図-7 は、2,700m 格子領域の南端 (A~G)、東端 (H~L) において、NAO.99Jb model より設定した Case2 の開境界の潮汐調和定数と、同地点における Case3 の計算結果を調和分解して得られた潮汐調和定数の比較を M_2 , S_2 分潮について示したものである。遅角については両者はほぼ一致していたため、ここでは振幅のみを示す。

計算範囲を広げることで、全体的に潮汐振幅がやや小さくなっている。この理由として、開境界が遠方になることや計算領域内で励起する潮汐が計算に考慮されていないことが挙げられる。また、領域の南西部にあたる A~F では Case2 と Case3 の差異が比較的大きくなっている。これは、外洋域の潮汐波は東側から入射し南西方向に伝播するため、南西部の誤差が大きくなる傾向があると考えられる。さらに、豊後水道や九州東岸域は東側開

図-7 2,700m格子領域の南端 (A~G) と東端 (H~L) における, Case2の開境界潮汐条件とCase3の計算によるM₂, S₂分潮の振幅の比較

境界と南側開境界のどちらからも遠方に位置するため、外洋域の潮汐の誤差による影響が顕著になるものと推測される。ただし、豊予海峡以北の瀬戸内海の内側で精度が回復するのは、豊予海峡が狭いため、豊後水道の精度が内側に大きく影響しないからであると考えられる。

5. まとめ

本研究では、開境界の潮位変動のみを起潮力とする潮汐計算がどの程度の範囲の計算まで精度を維持するのかを調べた。そして、高潮計算に反映可能かどうかを確認

した。以下に本論文の内容をまとめる。

- ①開境界における潮汐条件として全球潮汐モデルの結果を用いて、高潮計算に適用する程度の計算範囲を有する広域の計算 (Case2, Case3) と四国沿岸域に近い領域を範囲とする計算 (Case1) の潮汐計算を行った。
- ②Case1, Case2は、四国南岸域や九州西岸域、瀬戸内海において潮位時系列の再現性は高い。
- ③最も広域としたCase3は、豊後水道や九州東岸域において明確な精度低下がみられた。理由として、起潮力を与えた開境界が遠方であること、計算領域内で励起する潮汐が考慮されていないことが挙げられる。
- ④本研究で対象とした海域において潮汐・高潮結合モデルを用いる際、豊後水道や九州東岸域の潮汐計算の精度に留意する必要がある。
- ⑤本研究の計算範囲では、惑星β効果の沿岸域の潮汐変動に対する影響は小さい。

最後に、今後の課題として、潮汐計算の精度低下が認められた豊後水道や九州東岸域の精度向上を試みるとともに、潮汐・高潮・波浪結合モデルを構築し、過去の高潮の再現を図ることを挙げる。また、今回の計算精度の評価は、4地点の潮位時系列と潮位分布を用いた概略的なものであるが、今後、空間的に密で詳細な評価が必要となる。

謝辞：本研究は、瀬戸内海の高精度潮汐モデルの構築に付随して行ったものであり、その際、九州大学柳哲雄博士、愛媛大学郭新宇博士に貴重なご意見を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 金 洙列・安田誠宏・間瀬 肇 (2008)：潮汐・高潮・波浪結合モデルによる土佐湾異常高潮の追算, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 321-325.
- 柴木秀之・加藤史訓・山田浩次 (2001)：密度成層とWave Setupを考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 286-290.
- 原 信彦・山田 正・柴木秀之 (2010)：一般座標系による河川氾濫を考慮した台風7010号の高潮推算, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 435-440.
- 森 信人・高田理絵・安田誠宏・間瀬 肇・金 洙列 (2009)：強風時の表層鉛直混合が高潮および物理環境へおよぼす影響, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 241-245.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, Vol. 56, pp. 567-581.