

# 領域モデルの境界条件設定を目的とした瀬戸内海潮汐計算とそのデータベース化

## TIDAL SIMULATION FOR THE DEVELOPMENT OF DATABASE TO OPTIMIZE TIDE-BOUNDARY CONDITIONS WITH REGIONAL MODEL IN THE SETO INLAND SEA

白木喜章<sup>1</sup>・高尾敏幸<sup>2</sup>・柴木秀之<sup>3</sup>

Yoshiaki SHIRAKI, Toshiyuki TAKAO and Hidenori SHIBAKI

<sup>1</sup>理博 株式会社エコー 環境・計画部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

<sup>2</sup>正会員 工修 株式会社エコー 環境・計画部 (同上)

<sup>3</sup>正会員 工博 株式会社エコー 防災・水工部 (同上)

Tidal simulation model with high-resolution spatial grid is developed. The model covers the whole area of the Seto Inland Sea, Japan and the time series of tide data are stocked all grid points in the area. The stocked data easily provide highly accurate tide boundary conditions to the regional model in the Seto Inland Sea. This study applies the data to two regional models, the Mizushima Port and Wakaura Bay. It is more useful for tide and tidal-current simulations than past studies that the tide-boundary conditions are determined by reference to data from adjacent tide gauge. In the Mizushima port model, tidal variations agree with that of tide gauge data. And, the Wakaura bay model can reproduce a progressive tidal wave without any difficulty.

**Key Words :** *Tidal simulation, tide-boundary condition, regional model, Seto Inland Sea*

### 1. はじめに

潮汐・潮流の数値計算は、沿岸域の研究や環境アセスメント等の調査で高い頻度で実施される代表的な数値計算の一つである。一般に、沿岸域の潮汐・潮流計算は、計算範囲を数km～数10kmとする領域モデルが用いられ、その開境界に潮汐変動を与える。

潮汐境界の主な設定法として、以下の二つが挙げられる。一つは、開境界の近隣に位置する験潮所の潮汐調和定数を参考に推算した潮位時系列を与える方法である。この設定法では、例えば東京湾のように比較的開境界が狭く、境界両端の潮汐振幅差や遅角差が小さい領域において有用となる。一方、開境界が広い場合、岸沿いの潮汐の情報だけでは潮汐変動の設定が困難となり、試行計算を繰り返して条件を絞り込む非効率な作業が必要となる。

二つ目の設定法として、Matsumoto et al.<sup>1)</sup>による全球潮汐モデル(NAO.99Jb model)の結果を用いる方法がある。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と日本沿岸域の験潮所データと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、領域モデルの開境界の任意地点において

潮汐変動を設定できる。すなわち、開境界が広い領域モデルにおいても、容易かつ高精度な潮汐の開境界条件の設定が可能となる。ただし、幅の狭い海峡や灘で構成される瀬戸内海のような複雑な地形を有する海域で領域モデルを構築する場合、NAO.99Jb modelの格子幅は地形精度が不十分となる可能性が生じる。

そこで、四国南方沖の開境界で、NAO.99Jb modelの結果を用いた潮汐変動を設定し、瀬戸内海全域を含む計算範囲において潮汐計算を行う。そして、この計算により、瀬戸内海の任意点における潮汐時系列のデータベースを構築する。本論文は、瀬戸内海全域の潮汐モデルの概要とその再現性、また、そのデータを瀬戸内海の領域モデルに適用した際の有効性について示す。

### 2. 瀬戸内海全域の潮汐計算

#### (1) 潮汐モデル

瀬戸内海全域の潮汐計算には、プリミティブ方程式を支配方程式とする直行座標系、単層2次元のネスティングモデルを使用し、水平渦動粘性係数はスマゴリンスキー型を用いる。計算範囲を図-1に示す。

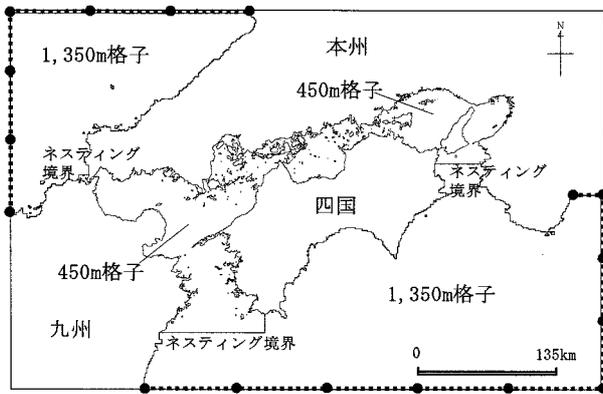


図-1 瀬戸内海潮汐計算の計算範囲（破線：開境界）

瀬戸内海および沿岸域の水深データは海図（海上保安庁）を、外洋域については海上保安庁日本海洋データセンター（JODC）の500mメッシュ水深を使用する。格子幅は外洋域を1,350m、瀬戸内海を450mとし、図中の破線を開境界とする。開境界上の黒丸の地点において、NAO.99Jb modelの結果より得られた主要な7分潮（ $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $P_1$ ）の調和定数から推算した潮汐変動を与え、地点間は線形補間して連続的な水位変動とする。

図-2に潮汐計算により得た、大潮期の四国沖南方沖が満潮時、満潮3h後、干潮時の潮位分布を示す。開境界に設定した潮汐波は、瀬戸内海の東西入口より入射する。

計算は3ヶ月以上連続して行い、計算範囲の全格子における潮汐時系列データをデータベースとして保存した。これを調和分解することで任意地点の7分潮の調和定数を得ることができる。

## (2) 潮汐計算の再現性

潮汐計算の再現性の検証は、図-3に示す主要験潮所における潮汐調和定数および予報潮位の比較により行う。

### a) 潮汐調和定数の比較

図-4は、主要験潮所における潮汐調和定数の実測値と計算値の比較を $M_2$ 分潮（半日周潮成分）、 $K_1$ 分潮（日周潮成分）について示す。

$M_2$ 分潮の振幅をみると、瀬戸内海西部において、振幅が大きく、東部で小さいといった傾向が計算でも表現されている。ただし、計算値の方が実測値よりも振幅の値が過大になっている。瀬戸内海西部ではとくにその傾向が強い。

振幅が実測値とずれる理由として、海峡などの狭く潮流が強い海域の地形再現精度や海底摩擦の過小評価が挙げられる。とくに、瀬戸内海西部は、元来、振幅が大きい上に、来島海峡やその周辺に島が多数存在するため、東部に比べて実測値との差異が相対的に大きくなる傾向があると考えられる。また、日周潮は海峡部を一日におよそ一往復するのに対し、半日周潮は二往復する。そのため、日周潮よりも半日周潮の方が精度低下の原因となる海峡部の影響をより大きく受ける。それにより、半日周潮の方が実

測値との差異が大きくなるものと考えられる。

今後、地形再現精度や海底摩擦係数の調整によって、より潮汐計算の精度を向上させる必要があるものの、実測値との差異は大きいところでも約10%未満である。また、 $M_2$ 分潮の遅角は実測値と計算値がほぼ一致しており、 $K_1$ 分潮については振幅、遅角ともに再現性が高い。このことから、現時点の計算結果は本研究の目標とする一定の再現性は得られているものと考えられる。

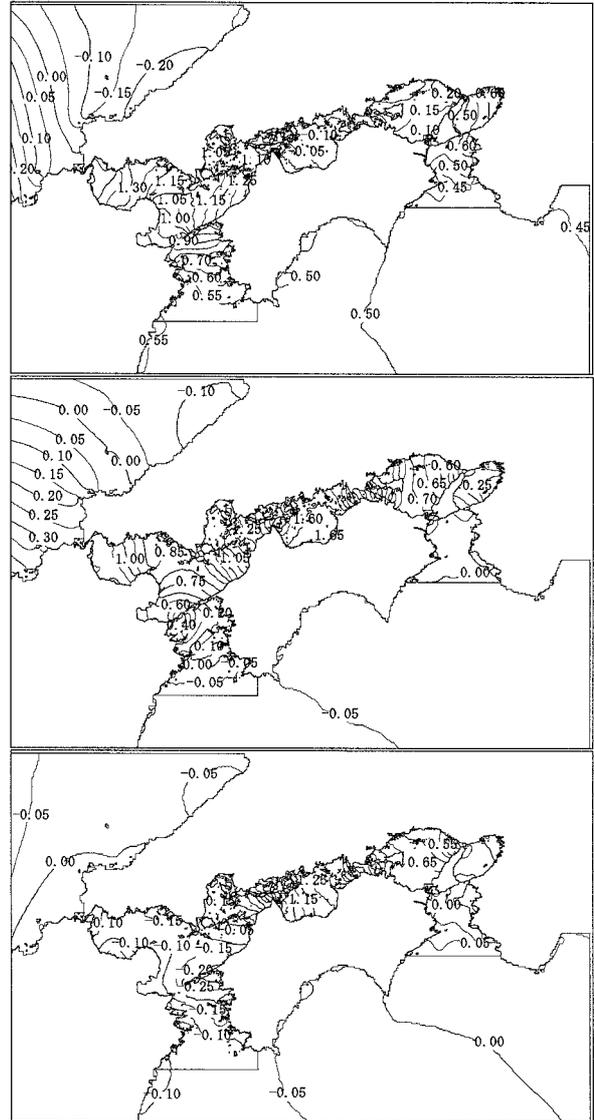


図-2 四国沖南方沖が満潮時（上）、満潮3h後（中）、干潮時（下）の潮位計算結果（大潮期、単位：m）

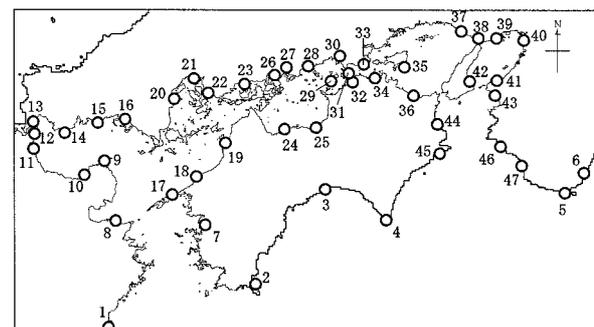


図-3 主要験潮所の位置（1～6：太平洋，7～47：瀬戸内海）

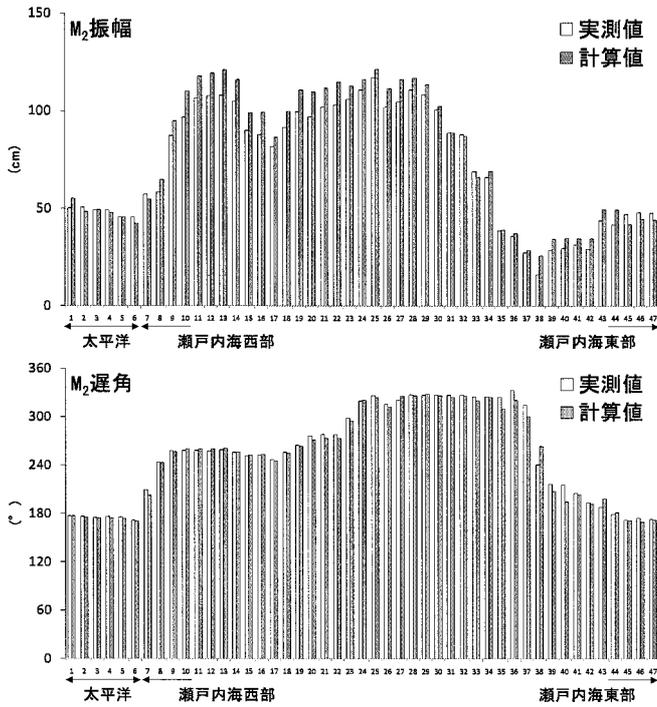


図-4(1) 各験潮所における潮汐調和定数の実測値と計算値の比較 ( $M_2$ 分潮, 上: 振幅, 下: 遅角)

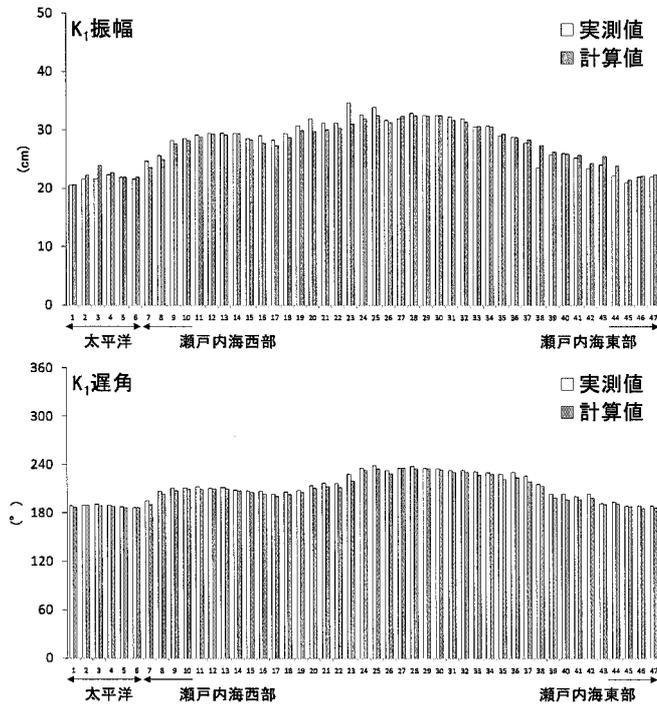


図-4(2) 各験潮所における潮汐調和定数の実測値と計算値の比較 ( $K_1$ 分潮, 上: 振幅, 下: 遅角)

### b) 潮位時系列の比較

図-5に験潮所が位置するStn. 19(松山), 29(水島), 34(高松), 42(洲本)の7分潮予報潮位と計算潮位の時系列の比較を示す。

Stn. 19, 29, 34において, 計算値は, 小潮時の干満差がやや過大になっている。しかし, 両者の位相は全地点において良く一致している。

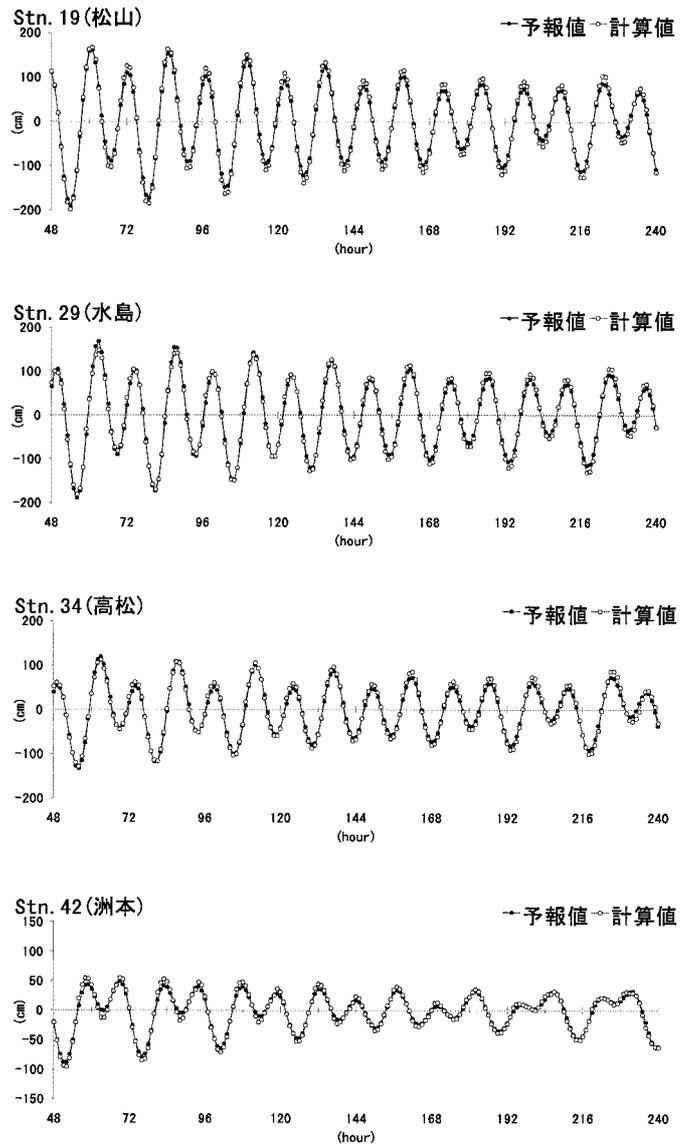


図-5 7分潮予報潮位と計算潮位の時系列比較 (上から Stn. 19, 29, 34, 42)

## 3. 領域モデルへの適用

瀬戸内海の潮汐計算により得られた任意地点の潮汐データを, 領域モデルの潮汐境界条件に適用する。本論文では, 岡山県水島港周辺海域と和歌山県和歌浦湾の領域モデルを例に挙げる。

### (1) 岡山県水島港周辺海域

水島港領域モデルの計算範囲を図-6に示す。広域の格子幅を500m, 狭域の格子幅を100mとしたネスティングモデルを使用する。図中の破線を開境界とし, 地点A~Fにおいて瀬戸内海潮汐計算によって得た7分潮の調和定数による潮汐変動を与えた。地点間は線形補間して連続的な水位変動とする。なお, ここでは比較のために, 同じ計算範囲において, 近接する験潮所の7分潮の調和定数を参考に潮汐開境界

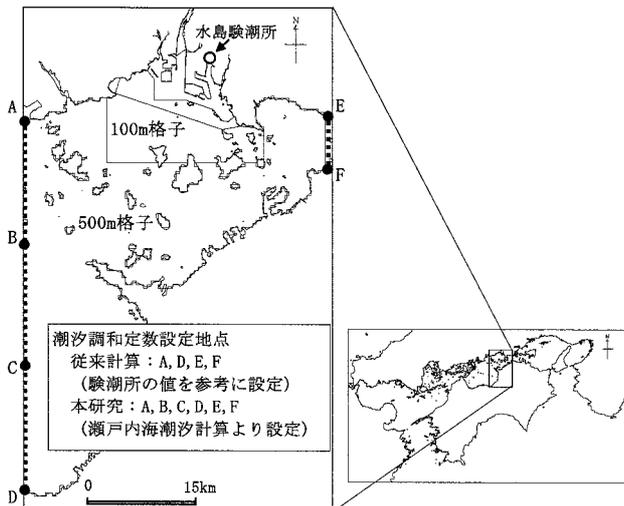


図-6 水島港領域モデルの計算範囲 (破線：開境界)

条件を設定した計算 (白木他<sup>2)</sup>, 以降「従来計算」と定義) についても示す. 従来計算での潮汐調和定数の設定位置は地点A, D, E, Fである.

図-7は, 本研究および従来計算で潮汐開境界条件として設定した, 地点A~Fにおける $M_2$ 分潮,  $K_1$ 分潮の潮汐調和定数を示す. 両者を比較すると, 西側境界の $M_2$ 分潮の振幅は15cm~20cmの差がみられる. また, 東側境界の遅角については, 従来計算が線形の分布であるのに対し, 本研究が $M_2$ 分潮,  $K_1$ 分潮ともに地点Cにおいて位相が最も遅くなる分布になっている. さらに, $M_2$ 分潮の東西境界の位相差は, 従来計算が約 $5^\circ$ , 本研究は約 $15^\circ$  となり, 多くの点で違いがみられる.

図-8に水島験潮所 (図-6参照) における, 7分潮の予報潮位, 従来計算の潮位, 本研究の計算潮位を時系列として比較する.

近接する験潮所の潮汐調和定数を参考に, 潮汐開境界条件を設定した従来計算値は, 予報値よりも干満差が小さくなっている. とくに, 大潮期においてその傾向が顕著になっている. それに対し, 瀬戸内海全域の潮汐計算結果を用いて開境界条件を設定した本研究の計算値は潮汐の再現精度は高く, 期間を通して予報値と一致している.

このように, 瀬戸内海全域の潮汐計算の結果を用いることで, 領域モデルの潮汐の計算精度を向上させることができる. とくに, 水島港領域モデルは, 西側の開境界が広く, さらに境界数が複数ある. そのような場合, 岸沿いの験潮所の情報だけで, 図-7のような潮汐振幅や遅角の分布を推定するのは困難である. 本研究の手法を用いることで, 試行計算を繰り返すことなく, 効率良く潮汐開境界条件の設定が可能となる.

## (2) 和歌山県和歌浦湾

図-9に瀬戸内海に入射した $M_2$ 潮汐波の振幅と潮汐と潮流の位相<sup>3)</sup>を示す. 瀬戸内海の東側入口である

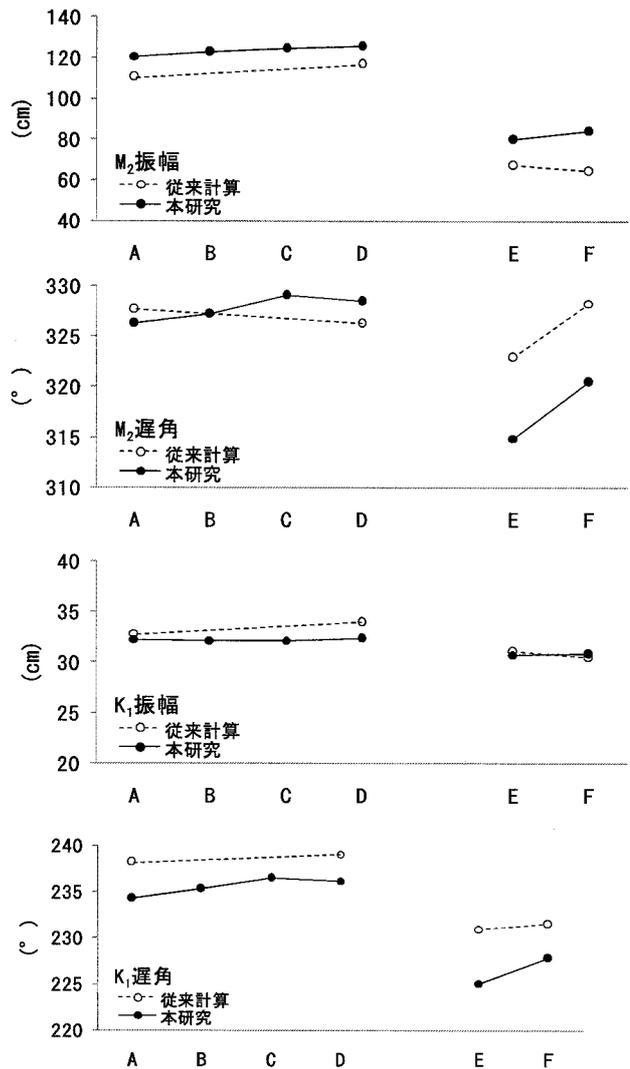


図-7 水島港領域モデルの従来計算と本研究の開境界に設定した潮汐調和定数 ( $M_2$ 分潮,  $K_1$ 分潮)

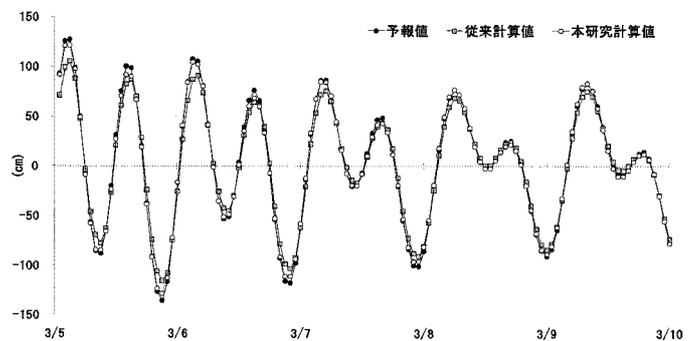


図-8 水島験潮所における, 7分潮の予報潮位, 従来計算潮位, 本研究の計算潮位の時系列比較

紀伊水道の潮流は, 図-9(1)に示すように, 紀伊水道沖の太平洋から侵入してくる潮汐波に支配されている. また, 西側入口である豊後水道から瀬戸内海を通過して紀伊水道に到達する潮汐波はほぼゼロまで減衰する. そのため, 図-9(2)に示すように, 紀伊水

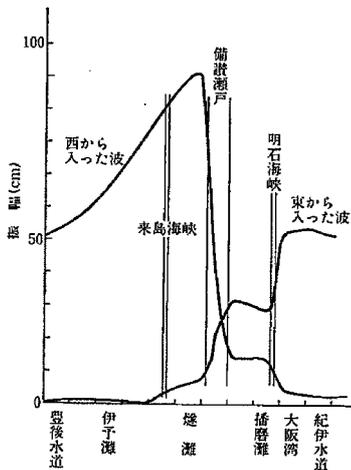


図-9(1) 瀬戸内海の東西から入射した潮汐波の振幅<sup>3)</sup>

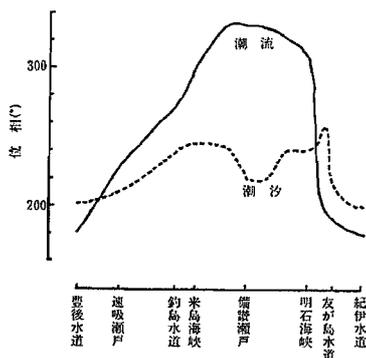


図-9(2) 瀬戸内海の各海域におけるM<sub>2</sub>潮汐波の潮汐と潮流の位相<sup>3)</sup>

道では、潮汐と潮流がほぼ同位相となり、満潮時に北向きの潮流が最強に、干潮時に南向きの潮流が最強になるといった進行性の潮汐の挙動を示す。

和歌浦湾は紀伊水道の東部に位置し、湾口も比較的広いため、潮汐の伝播特性は進行波的な挙動となる。このような海域で、領域モデルによって進行性の潮汐を表現することは難易度が高く、開境界に潮汐変動を設定する際、とくにその位相について留意する必要がある。

ここでは上記のような進行性の潮汐に着目する。例として和歌浦湾領域モデルを挙げ、本研究の手法が進行性の潮汐の表現にも有用であることを示す。

和歌浦湾領域モデルの計算範囲を図-10に示す。格子幅は250mとする。図中の破線を開境界とし、地点A~Gにおいて、瀬戸内海潮汐計算によって得た7分潮の調和定数による潮汐変動を与える。

比較のために、同じ計算範囲において、従来型の潮流計算の条件を示す。ここで、「従来計算」の潮汐開境界条件は験潮所の潮汐調和定数を参考にしており、設定位置は地点A, B, F, Gである。

図-11に、本研究および従来計算の潮汐開境界条件として設定した地点A~Gにおける潮汐調和定数をM<sub>2</sub>分潮について示す。両者を比較すると、振幅は従来計算の値が大きく、地点BからFにかけて線形に減少

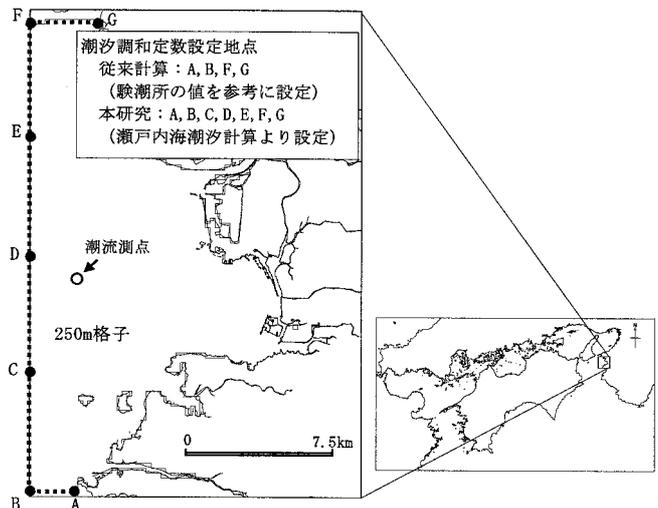


図-10 和歌浦湾領域モデルの計算範囲 (破線：開境界)

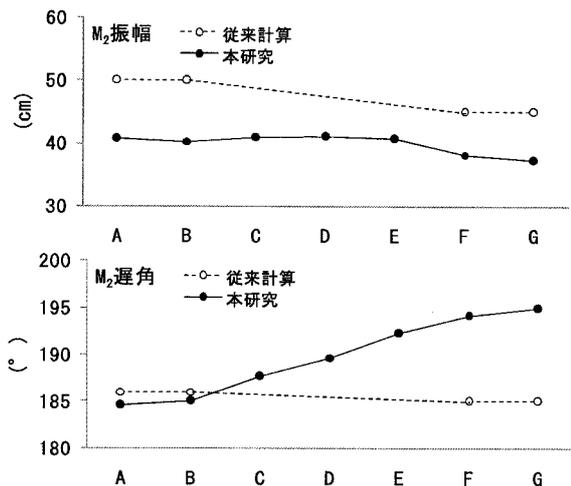


図-11 和歌浦湾領域モデルの従来計算と本研究の開境界に設定した潮汐調和定数 (M<sub>2</sub>分潮)

するのに対し、本研究では、地点C, D, Eにおいてやや大きくなる分布傾向がある。遅角については、従来計算が開境界上でほぼ一様であるのに対し、本研究の手法では地点BからFにかけて値が大きくなるという分布となっている。

図-12は、図-10中に示した潮流観測点実測値と従来計算によるM<sub>2</sub>分潮の潮流楕円を比較したものである。楕円上の数値は、潮流の位相(時間)を意味する。これをみると、潮流楕円の大きさは両者ではほぼ一致しているものの、北向き潮流が最強となる時刻が3時間程度早いことがわかる(図中矢印)。実測値の北向き潮流が強くなるのは満潮時であることから、従来計算は満潮3時間前に北向き潮流が強くなっていることになる。同様に、南向き潮流が強くなる時刻についても計算値と実測値の間で3時間程度のずれがみられる。すなわち、従来計算の領域モデルで計算された潮汐は、定在性の潮汐波となっていることを示唆している。

図-13は、実測値と本研究によるM<sub>2</sub>分潮の潮流楕円の比較図を示す。潮流が強くなる時刻に注目すると、本研究の計算値は実測値とほぼ一致している。これ

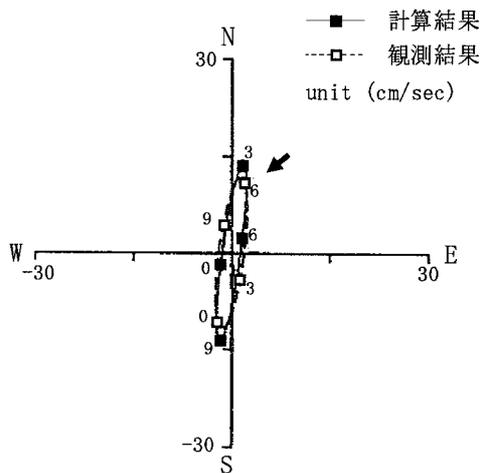


図-12 実測値と従来計算の潮流楕円の比較 ( $M_2$ 分潮)

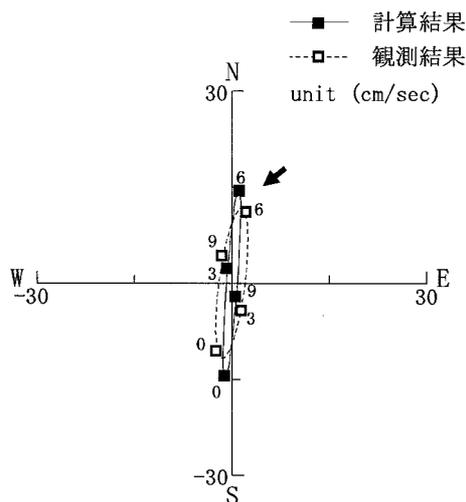


図-13 実測値と本研究の潮流楕円の比較 ( $M_2$ 分潮)

は、本研究の手法により進行性の潮汐が十分に表現できていることを意味する。

以上により、瀬戸内海全域の潮汐計算の結果を潮汐開境界に用いることで、進行性の潮汐の表現にも有用であることがわかる。従来計算において、進行性の潮汐が表現できていないのは、岸沿いの験潮所の情報によって開境界の潮汐を設定していることにより、図-11にみられるように、開境界の潮汐の位相をほぼ一様に設定せざるを得ないためであると考えられる。それに対し、本研究の手法を用いれば、広い開境界における潮汐の位相の分布を適切に設定でき、潮流楕円の大きさだけでなく、その位相についても再現性を向上させることが容易になる。

#### 4. まとめ

本研究では、複数の海峡や灘、湾によって構成される瀬戸内海において、各海域の領域モデルの潮汐開

境界条件の設定を容易にかつ高精度にするための潮汐開境界データベースの作成を目的とし、瀬戸内海全域の潮汐計算を実施した。

以下に本論文の内容をまとめる。

- ① 瀬戸内海の潮汐計算において、開境界の潮汐変動を全球潮汐モデル(NAO.99Jb model)の結果により設定した。潮汐は主要7分潮とした。
- ② 瀬戸内海の潮汐計算による潮汐調和定数と験潮所の潮汐調和定数を比較したところ、半日周潮の振幅が瀬戸内海西部で計算値の方が過大になる傾向があった。この傾向は、海峡などの狭い海域の地形再現精度や海底摩擦の強弱に起因するものと考えられる。振幅の再現性は全域で高く、日周潮については、振幅、遅角ともに実測値と計算値が一致した。
- ③ 瀬戸内海の潮汐計算の結果を岡山県水島港の領域モデルに用いた。この領域は西側開境界が広い上に、開境界が東西に複数ある。そのため、験潮所の潮汐調和定数だけでは、潮汐の設定が難しい。本研究の手法によると、設定が容易になり、潮汐変動の再現性も向上することが確認できた。
- ④ 和歌山県和歌浦湾は、瀬戸内海の入口に位置し、湾口も広いため、潮汐は進行性の挙動となる。このような海域では、開境界における潮汐の位相の設定が重要となる。瀬戸内海潮汐計算の結果を用いることで、位相の分布を適切に与えることができ、進行性の潮汐・潮流の特性を表現することができた。

以上により、瀬戸内海の各海域において、潮汐および潮流の計算を行うにあたり、潮汐開境界条件の設定をより容易かつ精度良く実施するための方法を提案した。

今後の課題として、瀬戸内海潮汐モデルのさらなる高精度化が挙げられる。また、構築したデータベースの公開方法についても検討を行う必要がある。

謝辞：九州大学柳哲雄博士より、本研究の必要性の示唆を受けました。また、瀬戸内海全域の潮汐モデルを構築するにあたり、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

- 1) Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe : Ocean tide modes 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, 2000.
- 2) 白木喜章, 高尾敏幸, 柴木秀之, 山下義昭, 田中文裕 : 岡山県水島港周辺海域における流況・SS 分布予測モデルの開発, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.1069-1074, 2008 年 7 月.
- 3) 柳哲雄 : 沿岸海洋学 一海の中でのものはどう動くか一, 恒星社厚生閣, 1994.