3次元非静水圧モデルによる来島海峡の渦流の数値解析

Numerical Analysis of Vortex Flow in the Kurushima Straits by 3-D Non Hydrostatic Model

東平 伸¹・近藤 徹¹・伊藤陽二¹・清家 清¹・柴木秀之²・鈴山勝之³

Shin HIGASHIHIRA, Touru KONDO, Youji ITOH
Kiyoshi SEIKE, Hidenori SHIBAKI and Katsuyuki SUZUYAMA

The numerical simulation of tidal current in the Kurushima Straits is performed by three-dimensional non-hydrostatic model based on the Navier-Stokes equations. The program cord is CADMAS-SURF/3D. Several islands exist in the straits, and straits have the complicated topography consisted by three water ways. The characteristics of tidal current in the straits are reproduced by the simulations, and the simulation results are analyzed. Weak current area is formed behind the islands in the strong current, and the streaks are formed along the lines of shear flow near the boundaries of islands. The large energy of turbulent flow and the downward flow is generated along the streaks. The Karman Vortex, which period is 20 minutes, is generated in the area behind the island.

1. はじめに

強潮流域の島や岬等が存在すると、その先端から流下方向にストリークと呼ばれる流速が早い領域と遅い領域が隣接するシアが生じる。ストリークは一般に潮目と呼ばれており、この近傍では渦流や鉛直流が発生する複雑に乱れた状態となる。このような海域は、水質の鉛直混合が活発に行われ、生物の生息にも影響を与える。そのため、潮目の位置や島の背後に形成される憩流域の範囲を精度良く推定することは、海域環境を把握する上で重要な要素となる。本研究は、来島海峡を対象に、3次元非静水圧流動モデルとしてCADMAS-SURF/3D（沿岸開発技術研究センター，2010）を採用した潮流シミュレーションを行い、複雑な流れが存在する海域の表現能力を明らかにすることで、現地適用性を述べるものである。

2. 数値解析モデルの概要

(1) 計算範囲の設定

来島海峡の渦流を対象とする潮流シミュレーションは、来島海峡を中心に、西側海域の安芸灘から東側海域の燧灘までを対象とする広域の計算（以降、広域計算と定義）と来島海峡周辺の海域のみを対象とする狭域の計算（以降、詳細計算と定義）の2種類に分類する。図-1(1)は広域計算の範囲を表し、上図が計算範囲全体を、下図が来島海峡の周辺海域の領域である。

広域計算は、8層のレベルモデルによる潮流シミュレーションを行い、馬島を中心とする来島海峡周辺領域の計算結果を出力し、詳細計算の境界条件を求める。

詳細計算は、CADMAS-SURF/3Dによる3次元非静水圧モデルによる潮流シミュレーションとし、図-1(2)の破線で示す馬島を中心とする3水道（西・中・東）を含む範囲とする。上図の範囲は上げ潮（南流）を、下図は下げ潮（北流）を対象とし、境界法線は潮流の流向に直交するように設定する。境界上の矢印で示す流れの上流端境界より、広域計算で求めた断面流速分布を与える。

図-1(1) 潮流シミュレーションの計算範囲（広域計算）

1 国土交通省 四国地方整備局 松山港湾・空港整備事務所
2 正会員 博(工) 株式会社エコー 技術本部
3 博(工) 株式会社エコー 技術本部 防災解析部

図-1 (2) 潮流シミュレーションの計算範囲 (詳細計算)

(2) 計算範囲の地形近似

広域計算は、図-1 (1) の上図の範囲を500m格子で、来島海峡周辺領域を50m格子で地形近似し、3領域 (500m, 100m, 50m) の3段階格子) を2-way ネスティングにより計算する。鉛直方向は8層で近似し、水深20m以浅は層厚5mで分解する。西側と東側の境界は、白木ら (2010) の瀬戸内海潮汐計算による主要7分潮の潮汐調和定数をもとに、15昼夜の連続計算を行う。この結果より、小潮期から大潮期までの連続的な潮流流速場を推定する。詳細計算は、図-1 (2) の範囲を20m正方格子により地形近似を行い、鉛直方向に層厚5mで全水深を分解する。図-2は、馬島周辺の3水道の等深線分布を表す。海峡内は水深が深く、中水道は100m以深の滞筋が存在する。

図-2 詳細計算で使用する馬島周辺海域の水深分布

(3) 境界条件

詳細計算はone-way ネスティング法とし、上げ潮時及び下げ潮時において、図-1 (2) の境界 (矢印を付けた破線上) で与える。この断面流速は、先行する広域計算の結果をもとに設定する。図-2のように、大潮期の表面では1.5m/s、小潮期は0.6m/sの流速を与え、鉛直分布は広域計算による鉛直分布を、鉛直方向の各層に内挿値として反映する。なお、側方境界はスリップ条件を設定し、一部境界から流入する流量は考慮しないこととする。下流側の流出境界は、Sommerfeldの放射境界を設定した。

(4) 乱流モデル

8層レベルモデルによる広域計算の渦動粘性項は、スマゴリンスキー型の水平渦動粘性項を、鉛直渦動粘性項はリチャードソン数依存型を採用する。また、潮流以外に密度流 (水温・塩分の3次元分布を、拡散方程式により同時計算することで追跡) と吹送流を考慮する。この結果、来島海峡周辺海域は鉛直混合により一様な密度となることを確認した。そこで詳細計算では、密度一様で計算を行った。詳細計算で採用する乱流モデルは高Re型k-ε2方程式とする (数値流体力学編集委員会編, 1995)。

3. 来島海峡の流況の再現

(1) 潮流の現地観測

来島海峡内の流況は、強潮流帯であり15昼夜連続の観測を行うための係留を行うことが困難である。そこで、大潮期を対象に、図-3に示すように来島海峡においてL1とL2の2つのラインを設定し、調査船にADCP (RD社製600kHz) を艀装し、曳航観測 (鉛直方向に1m間隔に測定) を実施した (岡林ら, 2008)。曳航調査を行うラインは、上げ潮時に島背後となる馬島南側の測線L1と、西水道に流れ込む流速分布を把握するための3測線L2を設定し、馬島周辺で発生する流速分布の検証データを作成する。

図-3 来島海峡の上げ潮時の潮流表面流速分布の比較
(左図：馬島南側ライン, 右図：馬島西側ライン)

(2) 流況分布の再現

図-3左図は、来島海峡の馬島南側海域において、ADCP曳行調査により測定した大潮期の上げ潮最大時の表面流速を表し、それに対応する詳細計算による表面流速の分布を表す。

ラインL1の比較を見ると、上げ潮時に馬島南側の海域で形成される島背後の憩流域が表現されており、島の東西側で、海峡を通過する強流域との境界で生じている。計算は、島背後域の流向・流速や憩流域の規模を良く表現している。一方、馬島西側のラインL2は、強い流速が発生する位置が十分に表現されていない。これは、詳細計算において、西側開境界からの流量を考慮していないことに起因し、東水道で形成される東側と西側からの流入に伴う収束流を表現できていない。これは、後述する潮目の発生位置や鉛直流速の強さの再現性に影響することが考えられる。側方境界等、複数境界からも流入を可能にすることは、今後の改良点である。

(3) 島周辺の流速の平面分布

図-4は、大潮期及び小潮期の上げ潮最大時の流速ベクトル図であり、図中に、潮目の位置を太線により併記した。海峡中央の強い流速域と島の周辺で形成される弱い流速域の境で、潮目が形成されることがわかる。潮目の開始点は、海峡に突出した島の岬先端となり、これらの点から下流側に筋状にラインが形成される。この潮目は、小潮期に小規模なものとなり、海峡内の流速分布は一様な傾向となる。

図-4 上げ潮時の島周辺の流速ベクトルの平面分布
(上図：大潮期最強時, 下図：小潮期最強時)

4. 来島海峡の流況の分析

(1) 海峡部の断面流速の分布

図-5は、大潮期及び小潮期の下げ潮最大時の流速ベクトル図と、大潮期における断面流速の分布を表す。図中に、鉛直断面の視点を矢印で示し、特徴的な鉛直分布が見られる位置を平面図と対応できるように数字で明記する。大潮期のラインA-Bの断面流速の分布より、潮目が形成される①の位置では、表面において潮目に流速が収束し、下層で発散する鉛直下降流が発生する。また、ラインC-Dの断面流速の分布より、島背後の憩流域及び強流速帯では、潮目の近傍で鉛直上昇流が発生する傾向にあり、ライン断面において、鉛直的な循環渦流が形成される箇所が見れる。

一方、小潮期では、海峡内の流速分布は一様な傾向となる。断面流速分布の傾向は大潮期とほぼ同様になるが、現象は小規模なものになる。

図-5 下げ潮時の馬島周辺の断面流速の分布

(2) 海峡部の乱流エネルギーの分布

図-6は大潮期と小潮期の乱流エネルギーの分布を表す。乱れが強くなる箇所は、潮目が形成される陸境界を開始点とし、潮目と一致する筋状の範囲となる。上図に示す大潮期の場合、筋状の範囲が明確となり、水平方向の顕著な流速シアが形成されるため、大きな乱流エネルギーが生成される。一方、下図に示す小潮期の場合は、海峡部を通過する流量は減少し、水平方向の流速シアの形成が抑えられるため、乱流エネルギーも減少する。

(3) 島背後の流速の時系列変化

図-7は馬島近傍における代表点の流速ベクトルの時系列を表す。渦流の発生により、流速ベクトルが反時計・時計回りに回転し、流速ベクトルの変化は通常の潮汐成分の時間変動(12時間)よりも短くなる。渦流の変化から判断すると、馬島の西南端と東南端において約20分程度の周期を有する流動成分が形成される。

図-6 上げ潮時の馬島周辺における乱流エネルギーの分布 (上図:大潮期, 下図:小潮期)

図-7 上げ潮時の馬島周辺における流速時系列の変化 (上図:馬島西南端, 下図:馬島東南端)

図-8 馬島周辺で発生するカルマン渦列の時間変化

(4) 渦流の生成

図-8は上げ潮時の馬島周辺における流速ベクトルの空間分布について、計算開始後540s（9分）から1,100s（18分）までの時間変化を表す。馬島の西南端近傍で発生した反時計回りの渦は、次第に発達しながら南に流下する。約10分後に、馬島の東南端近傍で、新たな時計回りの渦が発生する。この現象の現地スケールによるレイノルズ数を概算すると次式となる。

$$Re = Ud / \varepsilon = (1.5 * 500) / 10 = 75 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 U は大潮期の最大流速、 d は流れに対する馬島のスケール、 ε は渦動粘性係数を表し、約 $10\text{m}^2/\text{s}$ のオーダーとなることから、レイノルズ数は $10 \sim 10^2$ のオーダーとなる。この範囲はカルマン渦列が形成される値と一致する。また、交互に発生する時間間隔は、約10分程度となることから、渦列の周期は約20分と推定される。来島海峡の3次元シミュレーションにより、島の後流域において渦列が交互に発生し、この渦が発達しながら流下する状況が表現されている。

5. おわりに

3次元非静水圧モデル（CADMAS-SURF/3D）により、来島海峡の潮流シミュレーションを実行し、現地への適用性を確認した。このシミュレーション結果をもとに、複雑な地形を有する海峡部の流れの特徴を解析した。

主な成果をまとめる。

- ① 海峡内の島の背後で生じる流れの分布を概ね再現した。

ただし、複数の開境界からの流入を表現できないため、流れが合流する場合の流速分布の精度は、依然として向上の余地が残った。計算モデルの改良点である。

- ② 大潮期には、岬等の突出した地形から生じる潮目の存在や潮目位置で乱れのエネルギーが大きくなる状況を表現した。一方、小潮期の潮目は小規模になる。
- ③ 島の境界から渦列（カルマン渦）が発生し、流下方向に移動することを表現した。渦の発生周期は約20分程度となり、レイノルズ数は $10 \sim 10^2$ のオーダーとなる。

謝辞：本報告は、「来島海峡航路環境調査」の一項目として実施されたものである。調査の実施にあたり、港湾空港技術研究所の中村研究主幹に、計算条件及び計算結果に関するご助言をいただき、とりまとめにあたって参考にした。ここに記して、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 岡林昭夫・高橋吉弘・柴木秀之・高尾敏幸（2008）：現地観測と3次元流動シミュレーションによる来島海峡の流況特性の解析，海岸工学論文集，第55巻，p.416-420。
- 白木喜章・高尾敏幸・柴木秀之（2010）：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，海洋開発論文集，第26巻，pp.423-428。
- （財）沿岸開発技術研究センター（2010）：数値波動水槽の研究・開発，沿岸技術ライブラリー，No.39,p.235。
- 数値流体力学編集委員会編（1995）：数値流体力学シリーズ3乱流解析，東京大学出版会