

沿岸海洋モデルによる来島海峡の潮位分布と 潮流の 3 次元構造の解明

陸田 秀実*・土井 康明**・市位 嘉崇***

本研究は、瀬戸内海に適合した高精度かつ高解像な沿岸海洋モデルを新たに開発し、瀬戸内海全域の海峡や灘における潮汐・潮流の変動特性を明らかにしたものである。また、瀬戸内海の狭い海峡の代表例として、来島海峡を対象に水平方向 100 m の高解像度潮汐・潮流シミュレーションを行った結果、海峡部における潮位の水平勾配や 5 m/s を超える潮流速の存在、島間を通過する物質の輸送特性、さらには局所的な水平渦や鉛直循環流の存在を明らかにした。このような狭い海峡部の 3 次元流動構造が栄養塩の混合を促進し、瀬戸内海の一次生産を高めていることを示唆した。

1. はじめに

近年、沿岸海洋モデルは、海洋構造物の海域に及ぼす流れの影響、海域の各種汚染物質や水質の流動予測、沿岸生態系の把握と保全などにおいて、その成果を挙げつつある。特に、瀬戸内海は港湾整備や産業立地、ウォーターフロント開発等による埋め立て、産業排水や生活排水の流入による海水の富栄養化が著しいため、高精度かつ高解像な沿岸海洋モデルの開発が強く望まれている。

また、瀬戸内海は灘と海峡が交互に連結された複雑構造をしており、狭い海峡における鉛直循環流によって有機物の分解が促進され、これによって混合された栄養塩は灘部における一次生産を高めていると考えられている。このような狭い海峡部の 3 次元流動構造を明らかにすることは、海洋物理学のみならず海洋生物および水産学分野においても極めて重要である。

そこで本研究では、瀬戸内海に適合した高精度かつ高解像な沿岸海洋モデルを開発し、海峡や灘における潮汐・潮流の変動特性を明らかにする。次いで、瀬戸内海の狭い海峡の代表例として来島海峡を対象に狭領域計算を行い、潮汐の急変や潮流の 3 次元構造、さらにはこの海域の物質輸送特性を明らかにし、瀬戸内海特有の狭い海峡が物質循環に果たす役割について検討する。

2. 沿岸海洋モデルの概略

(1) 支配方程式と計算手法

支配方程式は、Navier-Stokes 方程式、連続式であり、Boussinesq 近似を仮定した準 3 次元 Barotropic モデルである。本研究では、複雑地形によって潮流・潮汐が急変する瀬戸内海を対象としているため、海洋モデル POM (G. L. Mellor, 1998a) をベースに、CIP 法 (Yabe et al., 1991) による非線形項の高精度化、海底地形の 3 次 spline 補間、圧力勾配の安定化 (G. L. Mellor, 1998b)

など種々の改良を行い、沿岸海洋モデルの高度化を行った。

(2) 計算領域と計算条件

瀬戸内海の高解像度な潮汐・潮流シミュレーションを行う場合、複雑な海岸地形や点在する多くの島々を無視することは出来ない。そこで、格子解像度は瀬戸内海全体の広領域において水平方向 1 km メッシュ、格子数 574×277、鉛直方向 6 層とした。また、時間刻みは外部モード 5 s、内部モード 60 s とした。太平洋からの外洋潮位は M_2 分潮のみとし、潮位振幅 0.5 m で 7 日間の計算を行った。さらに、瀬戸内海でも比較的潮流の速い来島海峡を対象とした狭領域において、水平方向 100 m メッシュ、格子数 127×149、鉛直方向 16 層とし、瀬戸内海全体の広領域計算結果から潮位と潮流を境界で接続した。なお、時間刻みは外部モード 1 s、内部モード 3 s とした。

3. 計算結果

(1) 瀬戸内海全域の潮位分布

まず始めに、水平解像度 1 km メッシュで行われた瀬戸内海全域の計算結果について、その妥当性を検証する。

図-1 は、燧灘の干潮時および満潮時における瀬戸内海全域の潮位分布を示したものである。瀬戸内海特有の複雑地形によって、潮汐振幅は燧灘において一番大きく、かつ位相差が最も遅れる傾向にあり、従来と同様の結果が得られている。

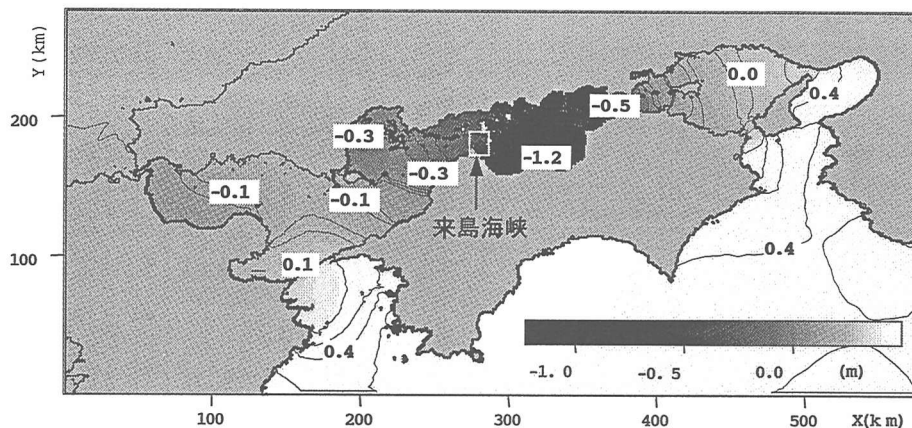
図-2 は、本モデルと POM モデルおよび Delft3D モデル (Delft Hydraulics, 1999) による潮位の時系列変化を比較したものである。ここで示す測点において、本モデルと POM モデルの移流項の差分精度が潮位変動に及ぼす影響は少ないと言える。一方、広島湾や大阪湾奥部において Delft3D による潮位変化が他の海洋モデルと異なる傾向を示している。

図-3 は、本モデルと現地観測 (肥後ら, 1980) により得られた各測点の潮流楕円の比較を示したものである。この他 8 測点についても同様の比較を行ったが、流速・流向ともに概ね良好な一致が得られており、本モデル結果の妥当性が検証できた。しかしながら、来島海峡付近

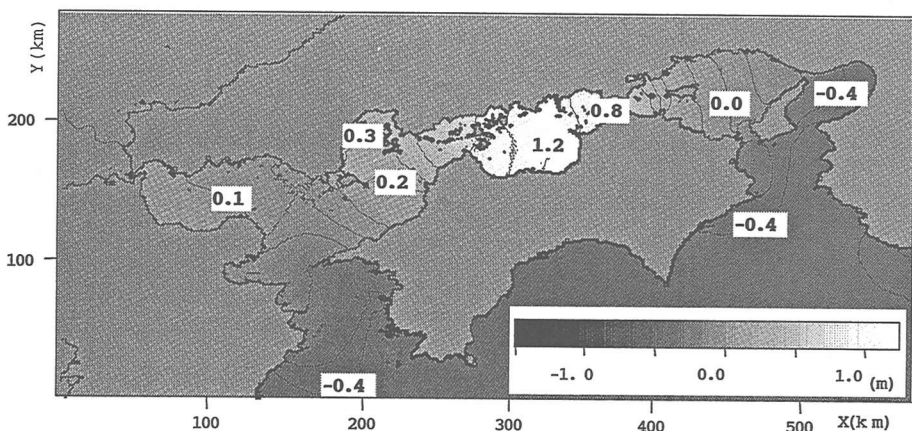
* 正会員 博(工) 広島大学助手、大学院工学研究科社会環境システム専攻

** 正会員 工 博 広島大学教授、大学院工学研究科社会環境システム専攻

*** 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

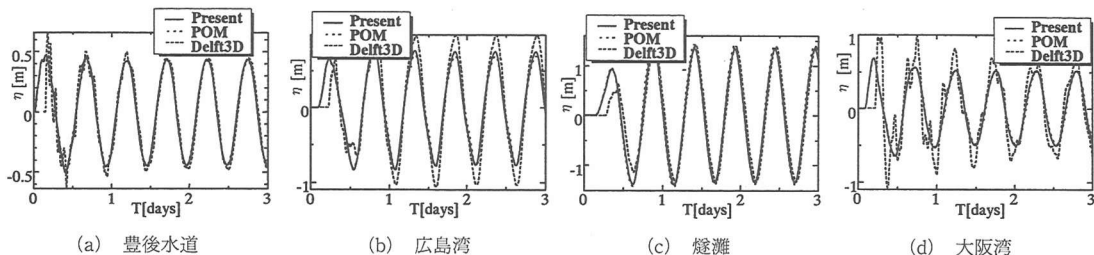


(a) 乾灘干潮時



(b) 満潮満潮時

図一 瀬戸内海全域の潮位分布



図二 各種海洋モデルによる各測点の潮位変動の比較

においては最大流速で 50 cm 程度の差が見られることから、格子解像度をさらに上げる必要があると考えられる。そこで次節以降では、図一4 に示す来島海峡付近においてネスティング処理を行い、水平解像度 100 m の高解像度潮流・潮汐シミュレーションを行った。

(2) 来島海峡付近の潮位変動と潮流の3次元構造

来島海峡では、図一4 に示すように北西から南東に延びる水深 100 m を超える海釜が形成され、その北側は 30 m 以浅となっている。ここでは、このような複雑な海底地形による潮位変動と潮流の3次元構造、さらにはこの海域の物質輸送特性を解明する。

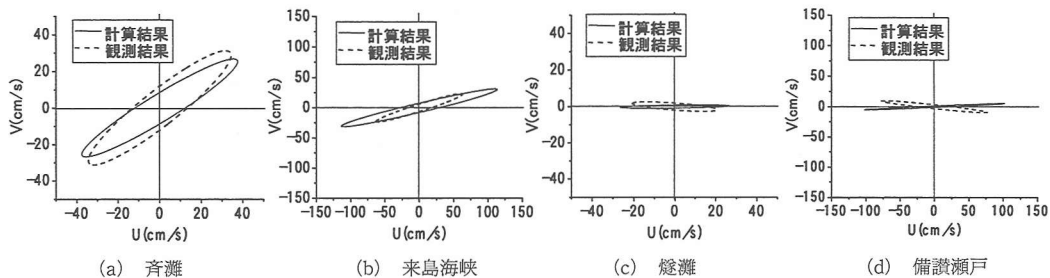


図-3 各測点の潮流楕円による比較

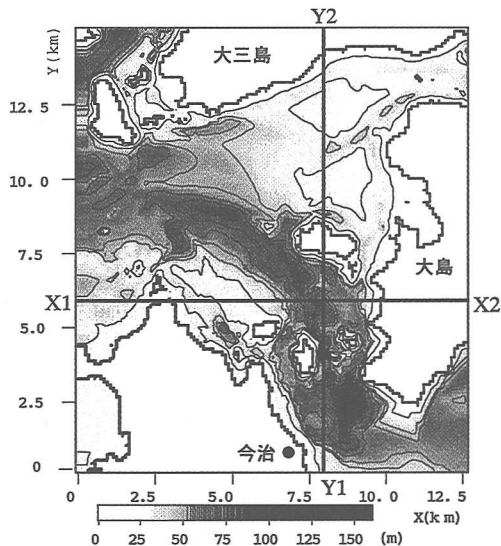


図-4 来島海峡付近の海底地形

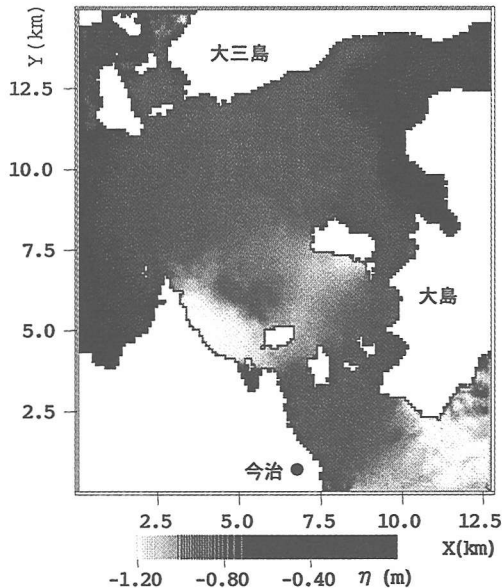


図-5 来島海峡付近の潮位分布

図-5 は、下げ潮最大時の来島海峡付近の潮位分布を示したものである。この海峡では、東西 10 km 程度に潮位差約 0.5 m 程度の水面勾配が形成されており、かなりの潮流速が発生しているものと予想される。

図-6 および 7 は来島海峡北部および南部領域にトレーサ群を投入し、無風状態における潮汐 1 周期間の物質輸送特性を調べたものである。南部領域のトレーサ群は北西から南東に延びた海釜に沿って輸送され、北部領域のトレーサ群は来島海峡ではなく大島と大三島の間を通り抜けて輸送されることが分かる。

図-8 は同海峡における上げ潮および下げ潮時の潮流分布を示したものである。流路の狭い来島海峡では島間を通り抜ける非常に速い潮流が発生し、その最大流速は 5 m/s を超える場合がある。また、局所的な水平渦が多数形成されており、水塊の水平混合とともに鉛直循環も活発となっていることが予想される。

そこで X1-X2 および Y1-Y2 断面 (図-4 参照) における鉛直流速のコンター図を図-9 に示す。図から 10 cm/s 程度の鉛直上昇流 (正), 下降流 (負) が多数出現し、この狭い海峡において海水の鉛直混合が活発に行われていることが分かる。このような狭い海峡における潮流の 3 次元構造は、局所的に出現する水平渦によって励起され、栄養塩などの鉛直循環を促し、瀬戸内海全体の豊穡さを保つ一要因となっているものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、瀬戸内海に適合した水平解像度 1 km の沿岸海洋モデルを新たに開発し、現地観測結果と概ね良好な対応が得られた。また、水平解像度 100 m で来島海峡付近の高解像度潮流・潮汐シミュレーションを行った結果、詳細な潮位変動や潮流の 3 次元構造、さらには物質輸送特性が明らかとなった。さらに、この海峡では局

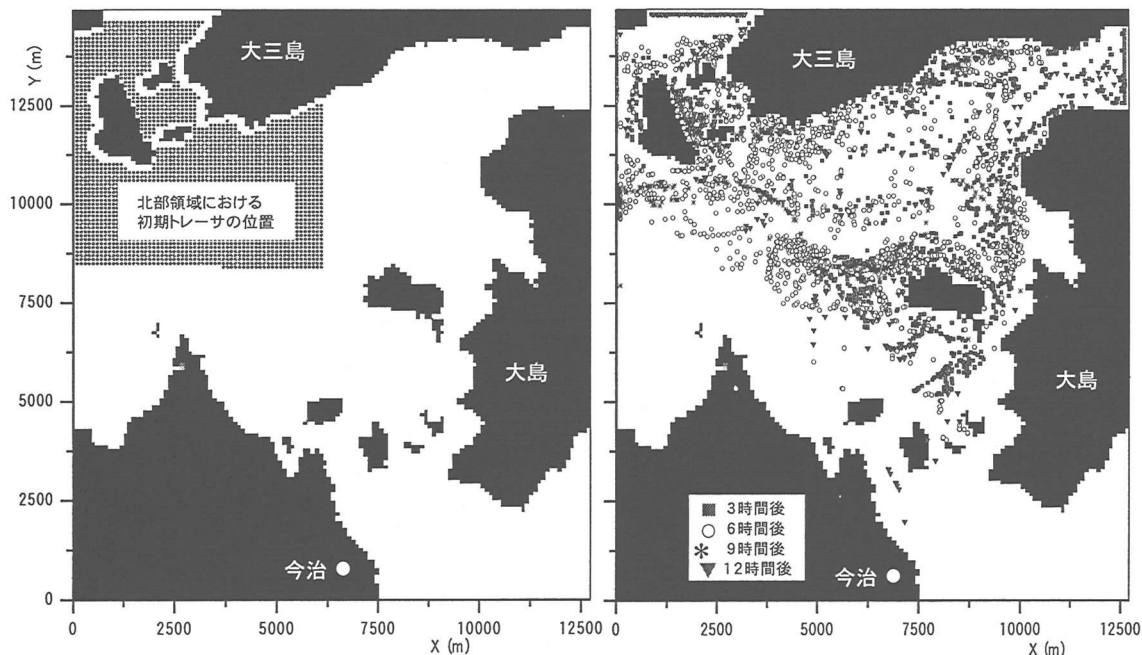


図-6 来島海峡北部領域の物質輸送

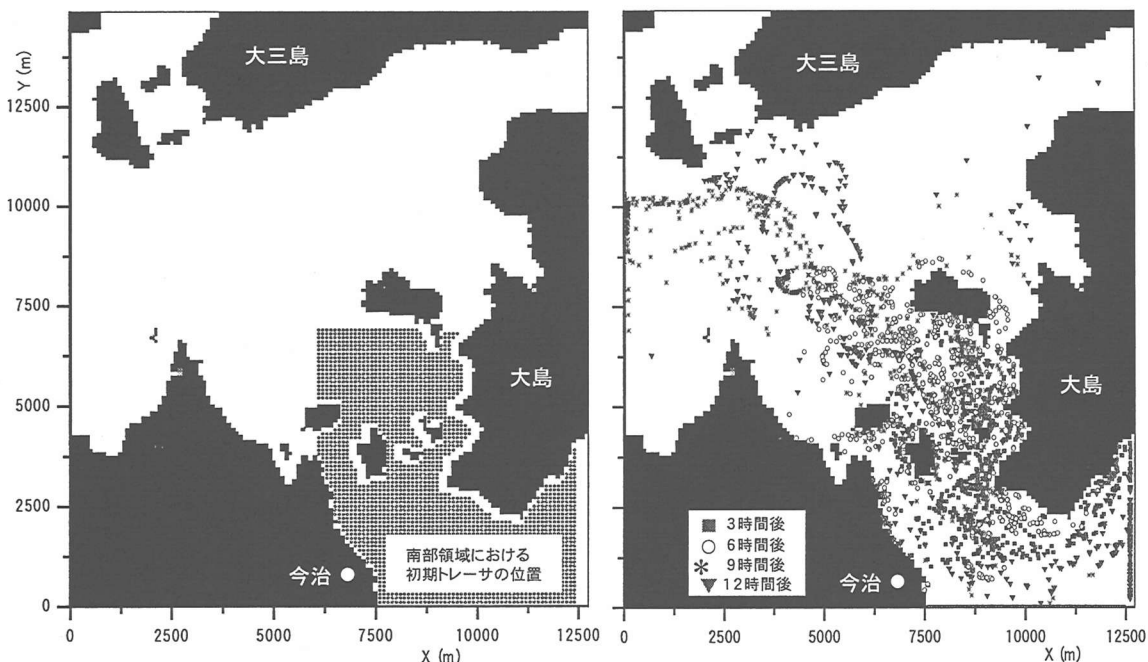
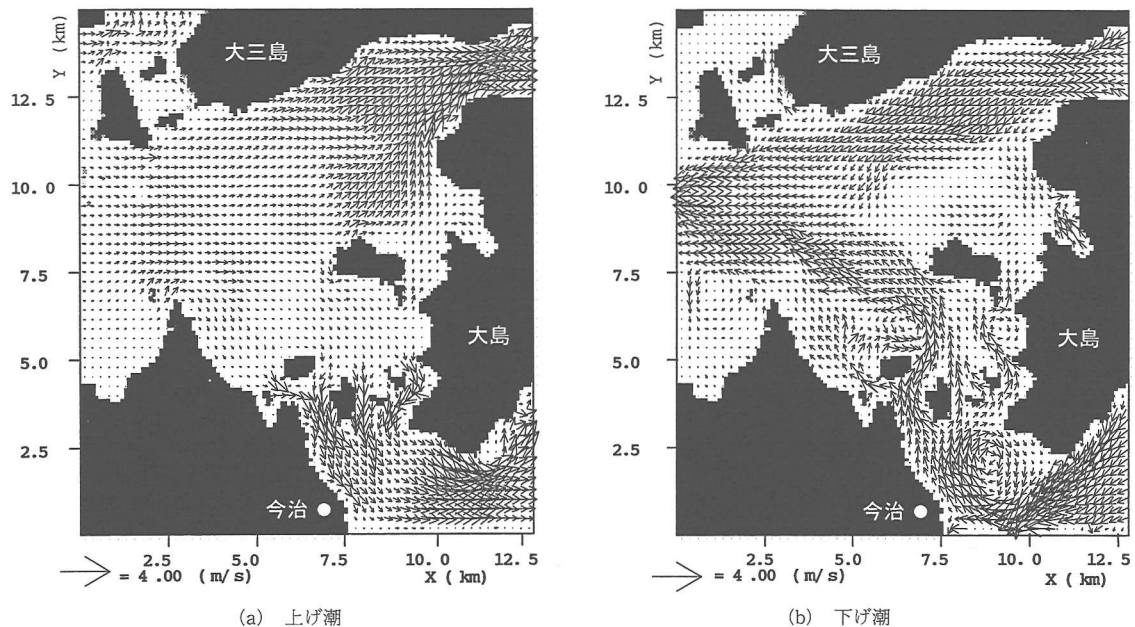


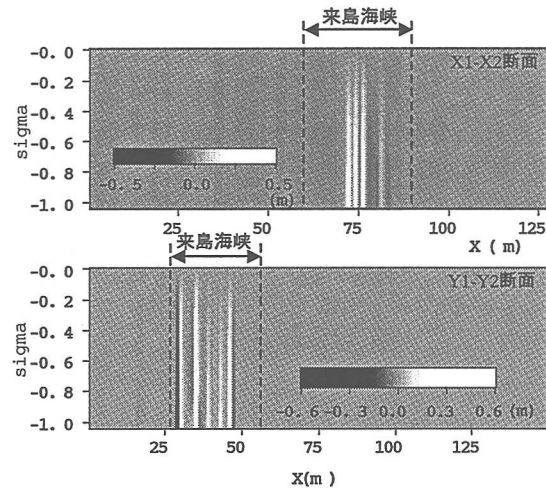
図-7 来島海峡南部領域の物質輸送

所的な水平渦とそれに伴う鉛直循環流が卓越しており、このような狭い海峡が瀬戸内海の物質循環に果たす役割を示唆した。

謝辞：本論文は、文部科学省ミレニアムプロジェクト「沿海・内海の環境変動の革新的計測と変動予測プロジェクト」(代表者：金子 新)の研究成果の一部であり、



図一8 来島海峡付近の表層の潮流分布



図一9 来島海峡付近の鉛直循環流

ここに記して謝意を表す。また、来島海峡の海底地形データはアジア航測（株）高野 忠氏の御協力を得たものである。

参 考 文 献

肥後竹彦・高杉由夫・田辺弘道 (1980): 瀬戸内海全域の潮流について, 中国工業技術試験所報告, 12, pp. 81-120.

Delft Hydraulics (1999): Delft 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions, release 3.05.

G. L. Mellor (1998a): Users Guide for a three dimensional primitive equation, numerical ocean model, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton NJ.

G. L. Mellor, L.-Y. Oey and T. Ezer (1998b): Sigma Coordinate Pressure Gradient Errors and the Seamount Problem, J. of Atmospheric and Oceanic Tech., Vol. 15, pp. 1122-1131.

Yabe T. and P. Y. Wang (1991): Unified numerical procedure for compressible and incompressible fluid, Journal of The Physical Society of Japan, Vol. 60, No. 7, pp. 2105-2108.