

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

Analysis of the Characteristics of Tidal Current at Kurushima Strait-Field Observations and Numerical Simulation of 3D-Flow

岡林昭夫¹・高橋吉弘²・柴木秀之³・高尾敏幸⁴

Akio OKABAYASHI, Yoshihiro TAKAHASHI, Hidenori SHIBAKI and Toshiyuki TAKAO

This study presents the results of analysis of the field observations and the numerical simulation of tidal currents in the Kurushima Strait. The field data measured tidal currents at the two points near the Strait for fifteen days and measured vertical distributions of tidal currents in the west channel of the Strait for 10 hours in one day. The numerical simulation is performed by a multi-level model of tide and tidal currents as horizontal eddy viscosity terms, described with the Smagorinsky's formulas, are incorporated. The specific peculiarities of the complex coastal line and bottom topography of the Strait are taken into account in the model. The tidal current fields are reproduced by the model. Several components of tidal currents and the location of streaks, generated in the Strait, can be predicted by the numerical simulation.

1. はじめに

来島海峡は瀬戸内海中央で燧灘と安芸灘を結び、海峡内には複数の島が存在する。これら島の存在により、海峡は狭い歪曲した4つの水道（来島瀬戸・西水道・中水道・東水道）からなっている。各水道は日本有数の強流と複雑な流動構造を有し、瀬戸内海の中でも最大の難所の1つとなっている。そのため、1974年に開発保全航路に指定され、船舶の安全な航行のための取組みを行っている。本報告は、来島海峡航路の潮流の現状把握を目的に、ADCPによる現地観測と時空間的に密な情報を得るために構築した3次元流動シミュレーションによる解析を行い、海峡部の流況特性を述べるものである。

2. 現地観測による流況特性の解析

(1) 対象海域及び現地観測

図-1は、来島海峡を中心とする流動シミュレーションの計算範囲と海峡周辺の海底地形を表す。現地観測は、2007年8月9日～24日までの15日間、図中のA・B点で海底設置方式のADCPによる15昼夜連続観測を行い、また、8月9日に海峡内の西水道の3測線（Ⅰ～Ⅲ）でADCPを調査船に固定し、海面下方向に横断面観測を行った。横断面観測は、上げ潮・下げ潮最強時、高・低潮転流時を含む約10時間について、毎正時から約20分かけて調査船を測線Ⅰ～Ⅲに沿って移動しながら行った。ただし、

強流海域における移動観測時の限界船速が5knots以下であるため、調査船による移動観測が可能な中潮時に行った。さらに、既往報告（第三港湾建設局、1981；（財）日本水路協会、1982）から、C・D点で実施された海峡内の15昼夜連続観測の解析結果を抽出した。

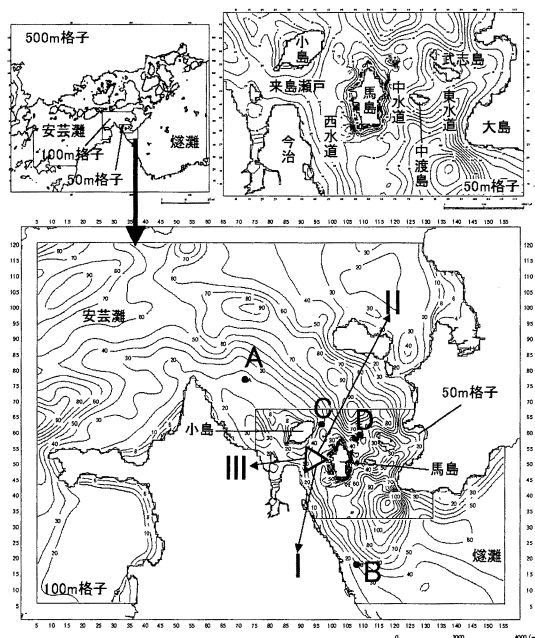


図-1 流動シミュレーションの計算範囲と来島海峡周辺海域の海底地形及び現地観測の位置図

(2) 現地観測結果から見た流況特性

図-2は、A点の半日周潮流の潮流楕円を表す。来島海峡ではM₂分潮流が卓越し、S₂分潮流は4割程度で、他の

- | | |
|---------|--------------------------------|
| 1 | 国土交通省四国地方整備局
港湾空港部 |
| 2 | 国土交通省四国地方整備局
高松港湾・空港技術調査事務所 |
| 3 正 会 員 | 博(工) 株式会社エコー 防災・水工部 |
| 4 | 修(工) 株式会社エコー 環境・計画部 |

分潮流は小さい。図によれば、下層の最大流速は上層より1割程度小さいものの、主流向に差は見られない。また、上げ潮時の卓越流向はSE（南流）で、下げ潮時はNE（北流）であり、海岸線にはば平行となる。

図-3は、横断面観測による4潮時の3側線沿いの表層流速ベクトルを表す。小島・馬島・今治側の海岸による地形的な制約を受けるため、上げ潮時の西水道の潮流は、小島の東西側から流入し、水道内で合流した後南側から流出する。一方、下げ潮時の潮流は、南側から流入し、小島の東西側へ分流する。3横断面の表層の流速分布を見ると、下げ潮時は断面中央で相対的に流れが速く、海岸付近で遅い。一方、上げ潮時は今治と馬島の海岸付近の流れが速く、断面中央は相対的に遅い。上げ潮時には、小島の背後に憩流域が生じ、その範囲が南側まで伸びていることに起因すると考えられる。

図-4は、3横断面の中央位置（Ⅰ～Ⅲ）における潮流の水平流速ベクトルの鉛直分布を表す。図中の流速ベクトルの表示は、北流を上向き、南流を下向きとする。また、毎正時に行った横断面観測の時間経過に準じた時間変化図として表す。流速値は上層から下層にかけて減少し、地点Ⅲを除く流向は、上層から下層にかけて時計回りに変化する。一般に、潮流の鉛直分布は、底面摩擦と地球自転の影響を受けて、下層ほど流速は減少し、時計回りに変化する。しかし、3点の流速と流向は、鉛直方向に同じような変化をしない。海峡内の西水道や来島瀬戸の中央の水深は相対的に深く、滞筋状の海底地形が形成されている。潮流の鉛直方向の変化は、主にこの海底地形に制約された流れの特徴を表していると考えられる。

3. 3次元流動シミュレーション

(1) 流動計算の基本式

3次元流動シミュレーションは、多層レベルモデルを採用する。レベルモデルは、連続式とNavier-Stokesの運動方程式を多層に分割し、各層で鉛直方向に積分した平均量に関する方程式を基本とする。モデルの詳細な説明と基本式の差分化は、柴木・渡辺（2002）を参照されたい。

(2) 流動計算モデルの概要と計算条件

図-1に表した計算範囲は、第1領域から海峡部を囲む第3領域に分割する。3つの領域は各々500m、100m、50m格子により地形近似し、3領域同時計算を行う。鉛直方向には、平均海面～5m、-5m～-15m、-15m～-35m、-35m～海底の4層で分割する。水平渦動粘性項には、係数 $C=1.0$ のスマグリンスキー式を、鉛直渦動粘性係数は $0.01\text{m}^2/\text{s}$ の一定値を採用する。底面摩擦項には、海域格子点の最下層厚に対してマンギンの粗度係数 0.025 を設定する。また、安芸灘と燧灘側の開境界では、近隣の検潮所の主要4分潮（ $M_2 \cdot S_2 \cdot K_1 \cdot O_1$ ）の潮汐調和定数をもとに、試行計算により決定した強制潮汐変動を与え、計算期間は、現地観測と同じ15昼夜の連続計算とする。

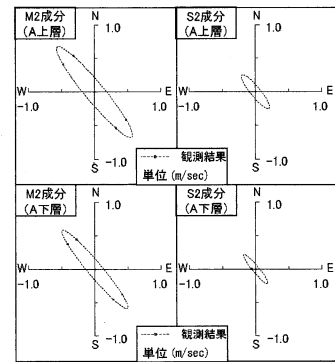


図-2 A点の15昼夜連続観測による半日周潮流の潮流楕円

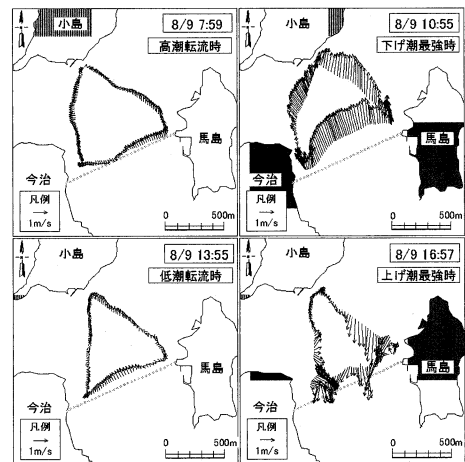


図-3 横断面観測により解析された来島海峡西水道内の潮流の流速ベクトルの空間分布

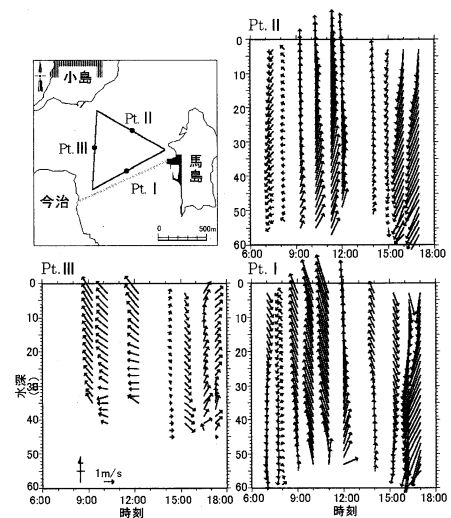


図-4 来島海峡西水道内の横断面における潮流の水平流速ベクトルの鉛直分布とその時間変化

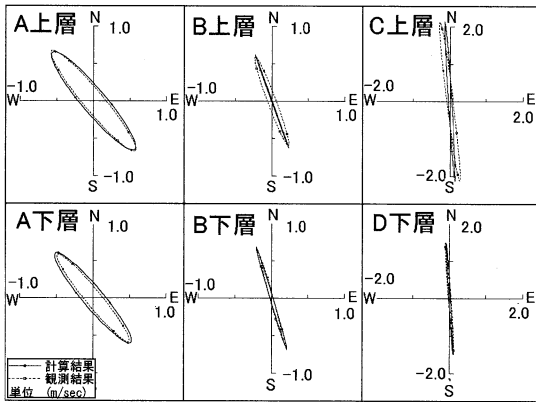


図-5 15昼夜連続観測点における M_2 分潮流の潮流楕円の観測結果と流動モデルによる計算との比較

計算範囲の第3領域となる海峡周辺の海底地形は、海図とともに馬島周囲の深浅測量成果を使用し、これを50m格子によりデータ化した。上野(1967)で適用された数値モデルは、単層かつ500m格子程度により地形近似を行っている。また、陸田ら(2002)は、100m格子による3次元高解像度計算を行ったものの、来島海峡内の観測データとの詳細な検証や15昼夜連続計算は行っていない。本研究で採用する3次元流動モデルと、観測データによる検証から、流動モデルによる計算結果を利用して海峡部の複雑な流動構造の解析が期待できる。

(3) 流動計算モデルの来島海峡への適用性

図-5は、A～D点において卓越する M_2 分潮流の潮流楕円の観測と計算の比較を表す。A・Bの2点は、上層(海面下5m)と下層(海底上5m)について比較し、C点は上層(海面下5m)、D点は下層(海底上5m)の比較である。全点の M_2 分潮流は、最大流速(長軸流速)、卓越流向(長軸方向)及び潮流の変動(長軸・短軸成分の比率)など良好に再現されている。

図-6は、海峡西水道の3横断面における上げ潮・下げ潮最強時の表層流速の空間分布の観測と計算の比較を表す。前述した横断面内の表層流速の分布傾向は良好に再現されている。ただし、詳細に見ると、図中のA付近の流速は計算が過大となる等、水道内の海岸近傍の流速の再現には課題が残る。海岸線等の局所的な地形の近似が、50m格子では不十分なためと考えられる。また、上げ潮時に断面A-Bの中央で見られる相対的な流速の減少も、その絶対値までは再現できていない。

4. 来島海峡の潮流の解析

(1) 島周りで発生する潮流成分の特性

3次元流動シミュレーションをもとに、来島海峡内で生じる潮流の特性を解析する。来島海峡では、 M_2 分潮流が卓越し、最大流速は2.0m/sを超過する。この基本潮流場に島が存在すると、地形性の流れが生じる。山田・矢野(1971)は、強い往復流下に島が存在すると、上げ潮時と

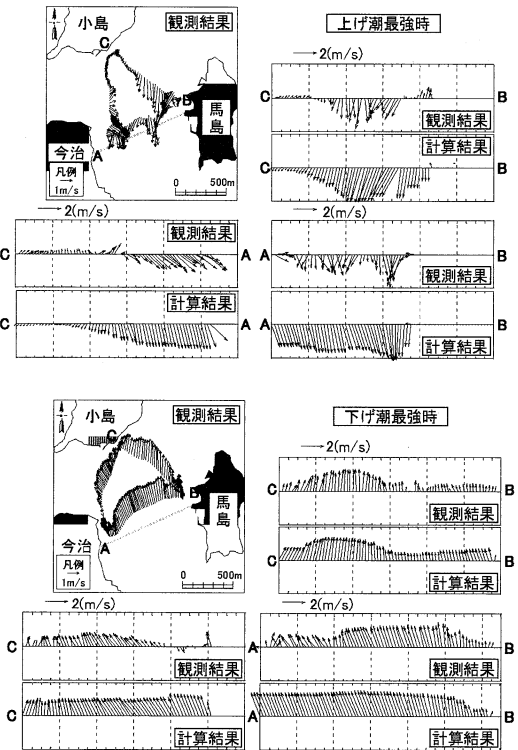


図-6 来島海峡西水道の横断面で観測された表層流速ベクトルの空間分布と流動モデルによる計算との比較

下げ潮時に島回りで生じる偏流により M_4 分潮流が発生することを明らかにした。図-7の左図は、山田・矢野の報告から引用した M_4 分潮流の発生要因を説明した模式図である。また、右図に表す特徴的な平均流(片潮)が島周りで発生することも明らかにした。これら島周りで生じる成分流れの空間分布は、計算結果でも再現できる。

(2) 来島海峡で発生する地形性潮流成分の分布特性

図-8の左図は、来島海峡内の馬島と小島周辺の M_2 分潮流の潮流楕円の空間分布を、中央の図は、 M_4 分潮流の分布を表す。小島と馬島周辺の M_2 分潮流は、上げ潮時がSE方向に、下げ潮時がNW方向に流れ、長軸成分の比率が大ききほぼ往復流となる。これにより、小島の北東側と南西側の海域で M_4 分潮流が発生する。一方、馬島周辺の M_4 分潮流の発生箇所は島の西側へ突き出た凸型地形の周辺海域である。

(3) 来島海峡で発生する平均流の特性

図-8の右図は、来島海峡内の馬島と小島周辺の大潮期の平均流ベクトルの空間分布を表す。小島周辺の平均流ベクトルは、図-7の右図に表した模式図の特徴と良く似た分布傾向となる。一方、馬島周辺の平均流ベクトルは、主流向(M_2 分潮流とほぼ同じ流向)に直角に突き出た馬島西側の凸型地形の周辺で顕著な片潮が発生するものの、図-7の右図のような島周りの分布は見られない。2つの島周りの平均流の分布や、先に述べた M_4 分潮流の発生状況

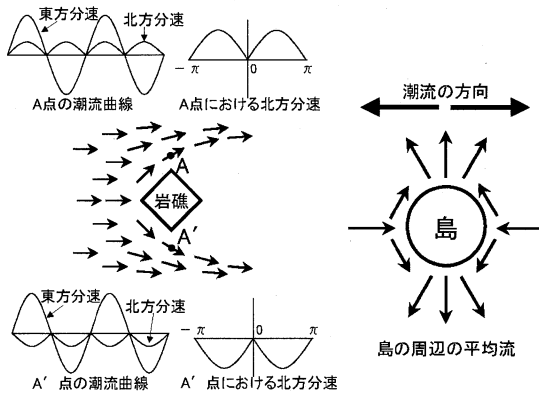


図-7 強い往復潮流内に存在する島周りで生じる M_4 分潮流の発生要因と平均流分布の模式図

は明らかに異なる。これは、島の形状の違いに起因すると考えられる。小島の長軸は、潮流の主流向に対してほぼ直角であり、ほぼ対称的な地形を有するに対し、馬島の長軸は主流向にほぼ平行で、かつ東側の海岸が流線形状を有する非対称的な地形である。そのため、成分流の分布に差が生じると考えられる。

5. 来島海峡の流況特性

3次元流動モデルは、水平渦動粘性項にスマゴリンスキー式を採用しており、局所的な流速の水平シア（水平勾配）と格子間隔に依存する乱れの水平成分の時空間分布を求めることができる。この結果を利用して、来島海峡における

乱れの空間分布特性を明らかにする。図-9は、大潮期の上げ潮最大流速発生時の表層と下層の流速ベクトルと、各層の流速の絶対値及び水平渦動粘性係数の空間分布を表す。表層の流速ベクトルの分布を見ると、馬島が潮流に対する障害物となり、島の背後海域で流速が弱く、馬島の東西側の水道中央で強いことが確認できる。表層流速の水平シアが大きい箇所は、水平渦動粘性係数の値も相対的に大きく、潮流の主流向に平行な筋状の潮目（筋目：Streak）や小規模な渦が複数発生していると考えられる。これら潮目の位置は、本流動モデルで採用した50m格子では近似できない小規模な渦流の外縁を表し、海面収束域が形成されると推定される。計算結果によれば、潮目の岸側は憩流域となる。既往報告（第三港湾建設局，1981）によれば、航空写真から概略の潮目の位置が確認されている。潮目は、海峡内に点在する複数の島の海岸近傍から流下方向に複数存在しており、この複雑な分布を模式的に表した図が示されている。これを、図-9に表す第1層の水平渦動粘性係数の分布に、潮目の位置として太い実線で併記した。水平渦動粘性係数が相対的に大きい水域の外縁と潮目の位置がほぼ一致している。そして、流動シミュレーションによれば、水平渦動粘性係数の分布は、1潮汐間で生じる潮流変化とともに、時空間的な変化を繰り返すことが予測された。また、図-9に表す表層と第3層（海面下25m）の水平渦動粘性係数の分布に見られるように、鉛直方向にも変化する。これは、海峡内の海底地形の影響によるものと考えられる。数値シミュレーションによる潮流の鉛直方向の分解能が十分でないため、潮目位置で生じる流れの収束や鉛直下方の流れの構造までは表現できない。しかし、本流動モデルに

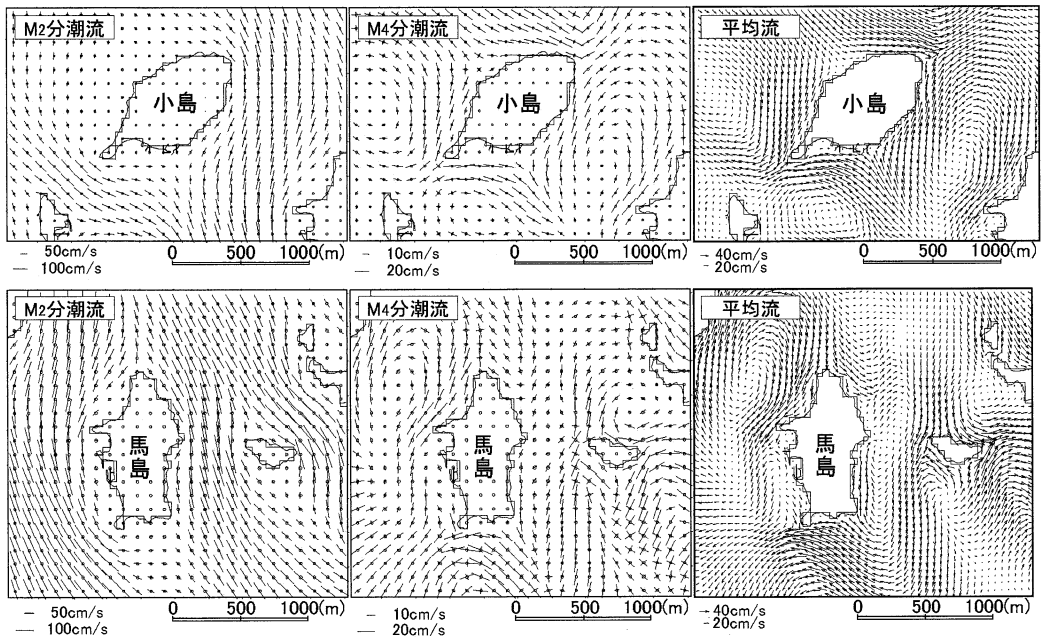


図-8 来島海峡の小島と馬島周辺の M_2 分潮流と M_4 分潮流の潮流楕円及び大潮期平均流ベクトルの空間分布

より計算される表層の水平渦動粘性係数の分布を利用すると、来島海峡の流況特性の1つに挙げられる潮目や渦流の発生位置を、概略、推定することができる。

6. おわりに

日本有数の強流海域として知られる来島海峡の潮流を、現地調査と3次元流動シミュレーションにより解析した。現地調査より、次の流況特性がまとめられた。

- (1) 海峡の潮流は M_2 分潮流が卓越し、その最大流速は上層から下層にかけて減少する傾向にある。
- (2) 西水道の潮流の空間分布は、海峡内の島の存在により、上げ潮時と下げ潮時で異なる。水道内の横断面において、下層の流速は上層よりも小さく、下層の流向は上層に比べて時計回りに変化する傾向にある。流向の変化は、主に水道内の海底地形の影響を受けたと考えられる。
- シミュレーションからも、次の流況特性が示された。
- (3) 海峡内の島の周辺海域では、上げ潮時と下げ潮時の偏流による M_4 分潮流の発生と、片潮による特徴的な平均流が発生する。これら成分流の島周りの分布は、卓越する潮流の流向とそれに対する島の形状により異なる。
- (4) 海峡内で発生する潮目（筋目：Streak）や渦流の位置は、表層の渦動粘性係数の分布から概略推定できる。推定

される潮目や渦流の分布は、海底地形により鉛直方向に変化し、潮汐周期の時空間的な変動を繰り返す。

本研究で使用した流況シミュレーションモデルは、特に海岸近傍の地形近似度や、渦流及び鉛直流の分解能に課題が残る。今後、高精度化を目指した改良を試みたい。

本研究を実施するにあたり、(独)港湾空港技術研究所 栗山善昭博士には、研究方針の決定及び成果のとりまとめについて有益なご助言を賜った。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 上野武夫 (1967)：数値実験による来島海峡の潮流の研究，神戸海洋気象台彙報，第179号，116p.
 (財)日本水路協会 (1982)：来島海峡潮流変化調査報告書，52p.
 柴木秀之・渡辺 晃 (2002)：密度成層と Wave Setup を考慮した多層高潮推算に関する研究，土木学会論文集，No.719，II-61，pp.47-66.
 第三港湾建設局 (1981)：来島海峡潮流調査報告書，pp.41-46.
 陸田秀実・土井康明・市位嘉崇 (2002)：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，海岸工学論文集，第49巻，pp.376-380.
 山田紀男・矢野雄幸 (1971)：地形の影響による恒流と1/4日周潮流の発生について，水路部研究報告，No.6，pp.63-77.

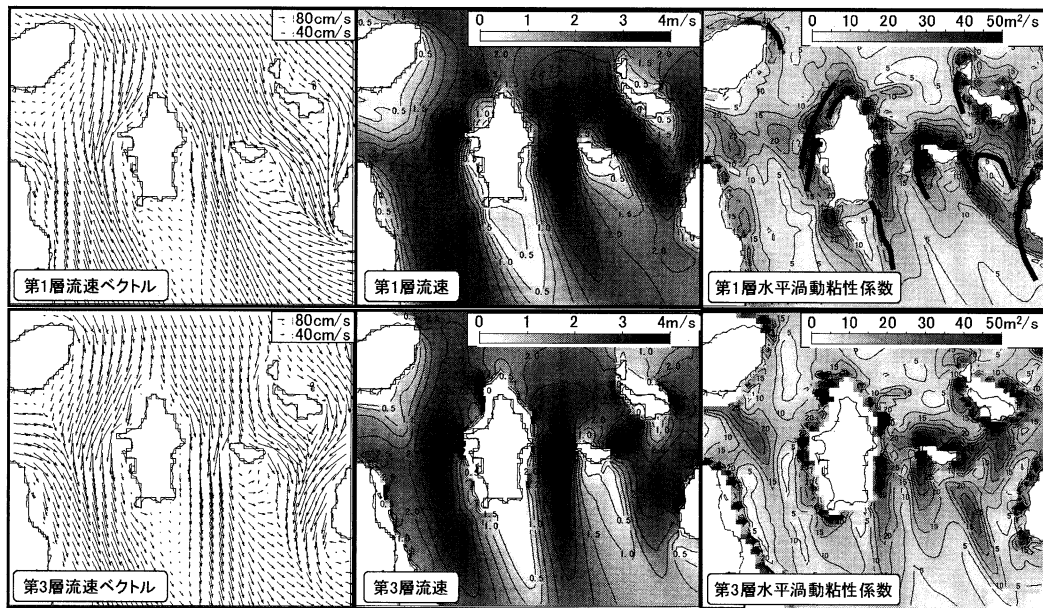


図-9 来島海峡における大潮期の上げ潮最強時の表層と下層の流速ベクトル・各層の流速絶対値及び水平渦動粘性係数の空間分布