

潮流強化に伴う鳴門の渦潮の発生機構に関する研究

内山 雄介¹・Xu ZHANG²・柳瀬 翔太³

¹正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

³丸紅株式会社 情報不動産本部 (〒103-6060 東京都中央区日本橋2-7-1 東京日本橋タワー)

世界遺産登録を目指す卓抜した自然現象・自然景観である「鳴門の渦潮」の発生メカニズムと、周辺海域環境への影響に着目し、4段ネスト高解像度海洋流動モデリング技術を用いた精緻な数値解析を行った。鳴門海峡に出現する渦潮は、紀淡海峡で分派して淡路島東岸から明石海峡を経て伝播する潮汐波と、紀伊水道北部での潮汐の位相差に伴う圧力勾配によって惹起され、2つの岬に挟まれた狭隘な海峡という独特の地形的な拘束によって強化される潮流の水平シア不安定によって発生することを明らかにした。また、渦潮域直下では海峡中央部の強流帯で沈み込むようなdipole型の鉛直循環流が発生し、極めて効率的な鉛直混合が生じていること、播磨灘から紀伊水道方向への平均海水輸送を促進していることが示された。

Key Words : tidal strait, tidally induced eddies, whirlpool, shear instability, nesting, ROMS

1. はじめに

淡路島と四国徳島を隔てる鳴門海峡は、播磨灘と紀伊水道とを接続する最小幅約13 kmの狭隘な海峡である(図-1)。2つの突き出た岬に挟まれた海峡中央付近の主流部は全体的にはV字型海底渓谷となっているが、海峡最狭部はその南北海域と比べて非常に浅く、水深約80 mの浅瀬(海関)を形成している。これに対して最狭部の北側には水深151 mおよび216 mの2ヶ所、南側には水深164 mの1ヶ所の計3ヶ所の窪地(海釜)がある。淡路島側に顕著に見られるリアス式海岸線を構成する浅瀬および岬と海関は和泉層群の砂岩優勢層に、徳島側の比較的直線的な海岸や海釜は、浸食に対して脆弱な泥岩優勢層に対応しており、これらの地質条件によって海峡付近の海岸・海底地形は極めて複雑になっている。このような特殊な地形条件から生まれる強い潮流に伴い、有名な「鳴門の渦潮」が恒常的に生成される。渦潮の景観は歌川広重の「六十余州名所図会阿波鳴門之風波」を始め、多くの浮世絵・絵画等のモチーフになるなど、高い文化的・経済的価値があるとされている。この類まれなる渦潮の景観を世界遺産登録し、保護・保全するための官民による精力的な活動の中で、渦潮の価値を定量化するための科学的データの蓄積が強く求められている¹⁾。

一方、東向きの瀬戸内海通過流(例えば、内山ら²⁾)によって備讃瀬戸から播磨灘へ流入する海水は、主に鳴門海峡を通じて南方へ流出すると言われており、播磨灘や紀伊水道の海水収支構造と、それに伴う海域環境や海

洋生態系の形成に強く関与していると考えられる。しかしながら、鳴門の渦潮の実態や、周辺の海域環境への影響は、散発的な現地観測やごく限定された条件下での室内実験などを除くと実際にはほとんど調べられておらず、未解明な点が非常に多い。そこで本研究では、鳴門の渦潮の科学的知見を蓄積するために、渦潮発生機構の解明と、周辺海域環境への影響把握を主たる目的として、多段ネスティングによるダウンスケーリング3次元海洋モデルを用いた高解像度数値解析を行った。

2. 高解像度海洋流動モデリング

(1) 4段ネストJCOPE2-ROMSモデル

領域海洋循環モデルROMSを用いた4段ネスティングによる高解像度ダウンスケーリング3次元流動モデリングを行った。まず、JCOPE2再解析値(日平均値)を境界・初期条件とした³⁾1-way offlineによる2段ネスト構成(水平解像度はL1:2km, L2:600m)のJCOPE2-ROMS瀬戸内海3次元流動モデル^{3,4)}をベースに、さらに2段階、計4段階のネスティングを行い、鳴門海峡を中心としたL3モデル(水平解像度100m)とL4モデル(同20m)を新たに開発した(図-1, 表-1)。各モデルでは外洋影響、気象庁GPV-MSMによる海上風、MSM出力をオンラインで用いたCOAMPS型バルク法による海面熱収支(ただし短波放射量のみ気象庁観測値を使用)、河川流量データベースによる一級河川流入(月平均気候値)などの外力条件を可能な限り正確に考慮した。

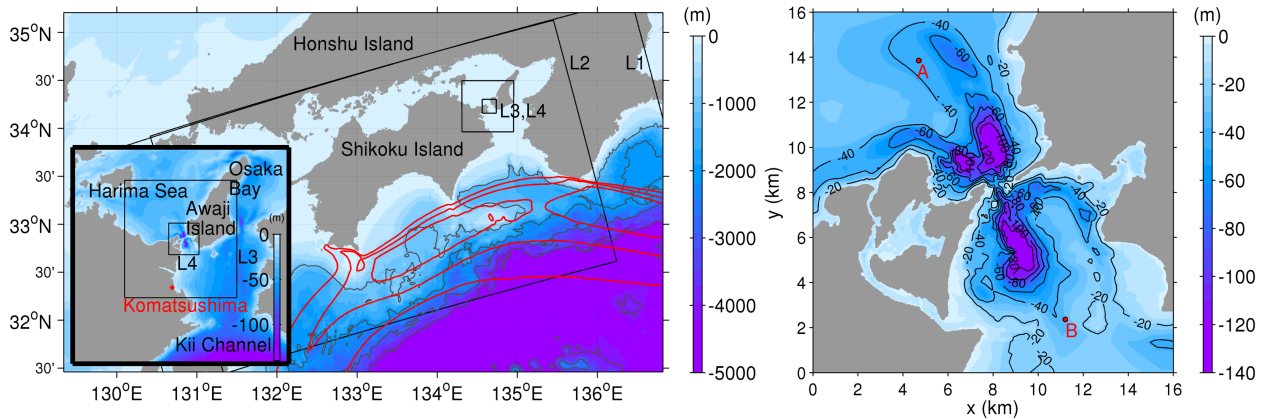


図-1 左：計算モデル領域。細線黒枠は ROMS-L1～L4 モデルの境界。左図中の太線黒枠のインセットは鳴門海峡周辺の拡大図であり、赤点は気象庁小松島観潮所の位置を示している。右：L4モデル全領域の拡大図であり、赤点A・Bは本文中で用いる検査点。いずれも黒線は等深線、青系カラーは水深、グレーは陸地部分。左図中の四国沖の赤線は0.5m/s刻みの期間平均表層流速絶対値の等値線であり、平均的な黒潮流路位置を表す。

表-1 4段ネスティング3次元海洋流動モデルの計算条件一覧。

Models	L1	L2	L3	L4
Duration	3/1/2006–11/31/2015	9/1/2006–11/9/2015	9/1/20015–11/9/2015	9/15/2015–10/26/2015
Grids (lon. × lat. × z)	320 × 320 × 32	800 × 480 × 32	592 × 592 × 32	800 × 800 × 32
Lateral grid resolution	2 km	600 m	100 m	20 m
Baroclinic time step	120 s	30 s	4 s	0.5 s
Sea surface fluxes	JMA GPV MSM (hourly) + JMA Solar Radiation Data (hourly) + COAMPS bulk formula			
Initial/boundary conditions	JCOPE2 (daily)	L1 (daily)	L2 (hourly)	L3 (hourly)
T-S nudging or tides	JCOPE2 (10-day ave.)	TPXO 7.0	–	–
Bathymetry data source	SRTM_PLUS30 + JEGG500		Central Disaster Management Council (50 m)	

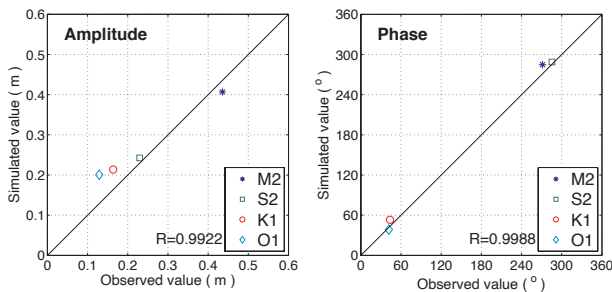


図-2 徳島県小松島観潮所（図-1左インセットの赤点）における潮位の調和解析結果。L3モデル（縦軸）と気象庁観測値（横軸）の散布図。主要4分潮の振幅（左）および遅角（右）。図中のRは相関係数。

本海域における主要な外力である潮汐に関しては、TPXO7.0全球調和定数を用いて主要10分潮の順圧潮汐をL2モデルの外洋境界条件から導入し、L3、L4へは1時間毎にそれぞれの親グリッド境界条件を更新することで、順圧・傾圧潮汐を考慮した⁵⁶⁾。主たる解析対象であるL4モデルの助走期間を除いた解析期間は、2015年9月～10月の3朔望期間の約6週間である。

(2) モデルの再現性

解析に先立ち、モデル出力を観測値と比較し、良好な再現性を有することを確認した。ここでは潮位（水位偏

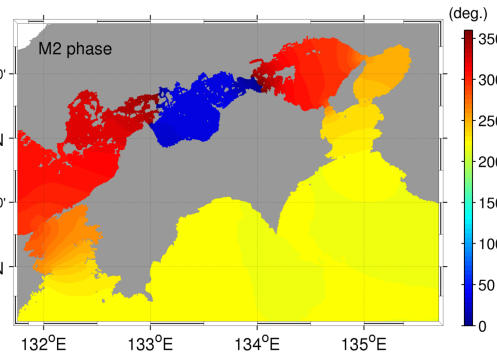


図-3 瀬戸内海全域におけるM2分潮の位相分布。L2モデル水位1時間値の調和解析結果（単位は度）。

差）について観測値と計算値を比較した結果を紹介する。観測潮位として気象庁による徳島県小松島観潮所（図-1左インセット内の赤点）での公表値を用い、L4モデル領域内には観測値が存在しないため、計算値としてはL3モデルの小松島での値を用いた。それぞれの毎時潮位に対して調和解析を行い、各分潮成分のうち主要4分潮（M2、S2、O1、K1）の振幅および遅角を散布図として表示した（図-2）。両者の調和定数は良好に一致しており、相関係数はそれぞれ0.9922と0.9988であり、L3モデルの高い再現性が確認される。一方、L4モデルの再現性はL3計算潮位との二乗平均平方根誤差RMSEを用

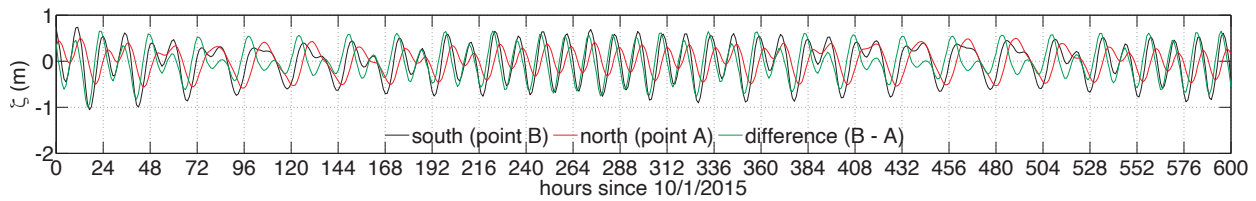


図-4 L4モデルによる鳴門海峡北部（図-1右の点A，赤線），南部（同じく点B，黒線）における水位および両者の差（緑線）の時間変動。2015年10月1日から25日間（600時間）分を表示。

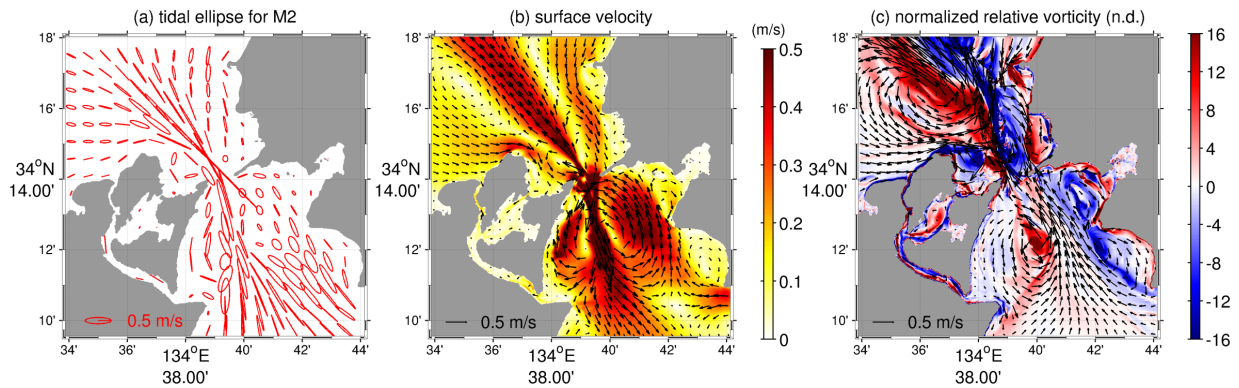


図-5 鳴門海峡における海洋表層の流況（L4モデルの結果，以下同様）．左：M2分潮の潮流楕円，中央：計算期間最後の1朔望周期（約14日間）の平均流速分布．カラーは流速絶対値（m/s）．右：渦度をコリオリ係数で除した表層無次元相対渦度（カラー）の瞬間値の一例．赤は正（反時計回り），青は負（時計回り）の渦度，矢印は表層流速ベクトル．

いて間接的に評価した．L4領域中の鳴門海峡北部（図-1右の点A）および南部（点B）でのRMSEはそれぞれ0.0189 m, 0.0213 mと見積もられた．どちらも誤差1%程度であることから，L3による潮汐の再現性は良好であり，L4との境界接合も問題ないことが確認された．

3. 結果と考察

(1) 鳴門海峡周辺海域における潮汐伝播特性

L2モデルによる計算水位を調和解析したところ，本海域において最も振幅の大きいM2分潮は，紀淡海峡から大阪湾へ侵入し，明石海峡を通過して反時計回りに周回する成分と，紀伊水道から直接鳴門海峡へ至る2つの卓越波に分解されて伝播し，鳴門海峡で邂逅することが明らかとなった（図-3）．鳴門海峡における両者の位相差は約71度，M2分潮の周期は12.42時間であるので，鳴門海峡北部の潮位変動は南部よりも約2.5時間遅れて変動することをこの結果は示している．このとき，鳴門海峡から淡路島東岸，明石海峡，淡路島西岸を経て鳴門へ至る反時計回りの経路長は約130 kmであり，その平均水深を20 mとすれば（例えば，図-1参照），長波としてのM2潮汐波の波速は約14 m/sである．したがって，潮汐波が鳴門海峡周辺から淡路島を半時計回りに伝播するための所要時間は約155分と見積もられ，モデルの結果から見積もられる約2.5時間の位相差が妥当な値であることが確認できる．なお，海峡部における南北間のM2分潮

の位相差はL2, L3, L4モデルともにほぼ同じ値であり，モデル水平解像度による差異は見られなかった．

(2) 鳴門海峡での潮流の発生と強化

鳴門海峡の南北（図-1右の点A, B）における潮位変動の時系列を見ると（図-4），南部と比べると北部海域の潮位は全体的に振幅が小さく，日潮不等が不明瞭で，朔望周期での振幅差も小さく，相対的に単調に変動している．一方で北部の水位ピークは南部よりも2-3時間遅れており，調和解析によるM2分潮の位相遅れ（図-3）と整合していることが確認される．A-B間の水位差は-1.0 mから+0.7 m程度の範囲で変動しており，大潮期ほど水位差が大きい．水位差変動の位相特性は，概ね南部海域の水位変動と調和的であり，その傾向は大潮時に顕著である．つまり，海峡を挟んだ南北の水位差は主として南部の紀伊水道側の水位変動によって励起されていることが分かる．なお，海峡周辺域における計算期間中の南北間水位差の絶対値の最大値は，特定の2点間の差を計量した図-3の結果よりは若干大きく，約1.3 mであった．

以上の解析結果から，淡路島の影響を受けて形成される約2.5時間の潮位の位相遅れによって，鳴門海峡では1 mを優に超える潮位差，すなわち大きな圧力勾配が形成され，その結果強い潮流が発生するものと理解される．

図-5左は鳴門海峡周辺における表層流の潮流楕円（M2成分）の空間分布，図-5中央は計算期間最後の1朔望周期（約14日間）の平均表層流速（すなわち残差流）分布

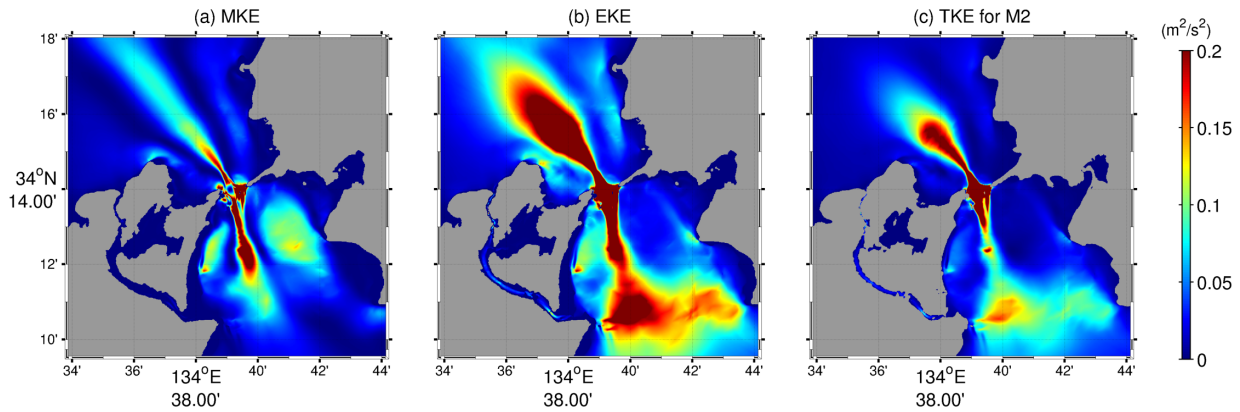


図-6 解析期間で平均した表層運動エネルギーの空間分布. 左：平均運動エネルギーMKE，中央：渦（変動成分）運動エネルギーEKE，右：M2分潮の調和定数より推定されるM2分潮運動エネルギーTKE.

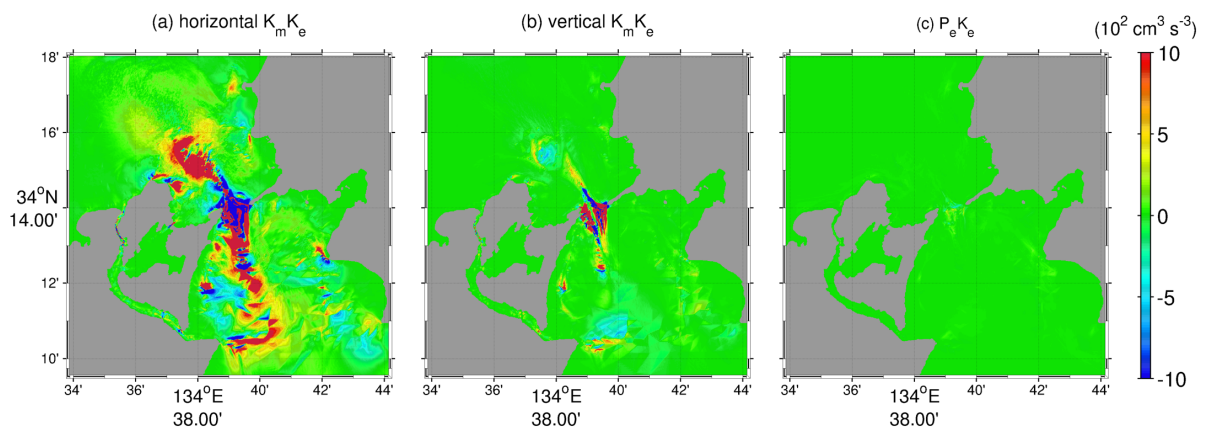


図-7 渦運動エネルギー保存式中の(a)順圧転換項 $K_m K_e$ の水平シア成分，(b) $K_m K_e$ 鉛直シア成分，(c)傾圧転換項 $P_e K_e$ の空間分布. それぞれ水深20mまでの表層積分値を示している. 暖色系は正值，寒色系は負値を表す.

を示している. 潮流は海峡狭窄部を通過することにより著しく強化されるが，地形条件に対応してその空間分布は南北に非対称となり，播磨灘方向への北流は左斜め上約45度方向に発達する単一の流軸に集中したジェット構造が顕著であるが，紀伊水道方向への南流は多岐構造となる. 潮流楕円分布は平均流分布とよく対応しており，北側のジェット領域では直線的，南側では円に近い形状となっている. 北側海域のジェットは2つの海釜の間に発達しており，その左右の海岸寄りの領域には逆向きの残差流が発生し，弱い水平循環流を生じている. 海峡南側では海釜上に強い南流が発達し，海釜の南縁付近で東西両方向に巻き込まれ，互いに反対向きに回転する2つの強い水平循環流のペアが形成されている.

(3) サブメソスケール渦～鳴門の渦潮～の発生

海釜地形の影響を受けつつ海峡中央部付近で発達する潮流によって強い正負の渦度が上げ潮・下げ潮に伴って交互に発生する. 図-5右は表層における無次元相対渦度分布の瞬間値の一例である. この図は上げ潮時に対応しており，海峡狭窄部から北向きにジェットが発達し，そ

の外縁部や地形周辺を中心に多数の渦が発生している. Rossby数と等価な無次元相対渦度の絶対値は1を大きく超え，潮流主流部外縁の減速域や地形境界周辺を中心にサイズ $O(10^2 \sim 10^3 \text{ m})$ の非地衡性の強いサブメソスケール渦が多数発生している. モデル解像度(20 m)の制約上，これらより小さなサイズの渦は本モデルでは直接表現できないが，これらの強いサブメソスケール渦の集合体として鳴門の渦潮が構成されているといえる.

(4) 運動エネルギー収支

鳴門海峡におけるエネルギー収支を検討するために，カットオフ周期14日の時間フィルタによって長周期(平均)流速と短周期(変動)流速に分離し，それぞれの成分に対して運動エネルギーを求めた. 図-6は解析期間全体で平均された平均流運動エネルギー(Mean Kinetic Energy, MKE)，変動流速による渦運動エネルギー(Eddy KE, EKE)，さらにM2分潮の調和定数から再合成される水平潮流速から推算される潮汐運動エネルギー(Tidal KE, TKE)の空間分布を示している. なお，EKEは実際には周波数帯的に渦と潮汐の両成分を含むが，両者の空

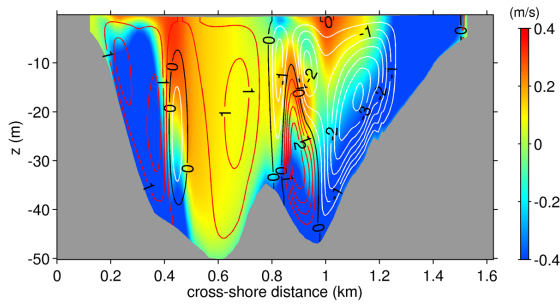


図-8 鳴門海峡最狭部（海関）断面における時間平均流速分布．カラー：断面に直交する北向き流速，コンター：断面内の overturning 流線関数（赤：時計回り，白：反時計回り）．時間平均操作は解析期間最後の 1 朔望周期に対して行った．横軸は鳴門海峡西側の徳島県鳴門市側からの距離．

間スケールが非常に近く，空間フィルタでの分離が困難であったため，簡易的に上記の方法を用いてM2の寄与をTKEとして推定した．M2以外の分潮成分によるTKEはM2の8～28%とかなり小さく，しかも狭窄部近傍の狭い領域にエネルギーが集中していたことを確認しており（図は割愛），エネルギー的な寄与は限定的である．

渦潮が顕著となる表層でのMKEは潮流分布（図-5）とよく対応した空間分布を示しており，全運動エネルギーの15%を占めていた．一方，渦運動エネルギーEKEは85%の寄与があり，主流部だけではなく外縁減速域等にも広範に分布し，海域の力学を強く支配していることが分かる．M2によるTKEはEKEの65%程度（主要4分潮の線形和はEKEの約81%）であり，MKEとEKEの中間的な空間寄与・分布構造を有している．以上のことから，鳴門海峡での流体運動に対しては潮流が最も強く寄与しており，吹送流や瀬戸内海通過流などのsubtidal成分の寄与はその1/5程度と小さく，強い潮流の影響範囲およびその周辺領域において広範に渦潮が発達する，という構造になっていると理解される．

(5) 渦潮の発生メカニズム

渦潮の発生メカニズムを特定するために，EKE保存式中の外力項である順圧転換項 $K_m K_e$ （水平および鉛直成分）と，傾圧転換項 $P_e K_e$ の海表面から水深20 mまでの鉛直平均値の空間分布を求めた（図-7）． $K_m K_e$ ， $P_e K_e$ が正值を取る場所において，それぞれシア不安定，傾圧不安定によりEKEが増大することを表している．例えば，図-7左の $K_m K_e$ が正值（暖色系）の場所，すなわち主に海峡周辺や南北の主流部において，シア不安定によって渦が生成されることが分かる． $K_m K_e$ は $P_e K_e$ よりも1桁大きく，特に水平Reynolds応力成分が卓越していることから，鳴門海峡の渦潮は地形的な拘束によって強化された潮流の水平シア不安定によって発生することが明示された．

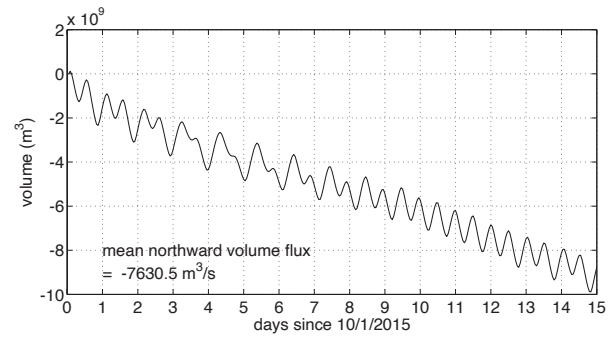


図-9 鳴門海峡最狭部（海関）断面（図-8と同じ断面）における北向き断面通過流量の2015年10月1日0時から15日の時間積分値（ 10^9 m^3 ）．

4. 海域環境への影響

(1) 渦潮直下の平均鉛直構造

渦潮直下の3次元流動構造を調べるために，鳴門海峡の最狭部海域断面における時間平均流速分布および鉛直断面内のoverturning流線関数を求めた（図-8）．潮汐の位相に応じて正負の強い渦度が発生する海峡中央部では，全体的には北向き残差流の領域が大きく，水面にピークを有し，下方へ向かって減速しながらも海底面まで達している．しかし，海峡両サイドの浅海域では逆に南向き流れが発達し，海峡中央部のシル部分の水面付近でも弱い南流が見られる．これらの傾向は当然ながら表面残差流分布（図-5中央）に対応している．

断面内流線関数分布を見ると，全体的には海峡西部で時計回り，東部で反時計回り，海峡中央部で沈み込んで両サイドで湧昇するようなdipole型の鉛直循環流が発生している．海峡中央部のシル東側斜面上の下層部においても時計回りの循環が見られる．これらの鉛直循環流は強い鉛直流を伴うことから，渦潮直下では極めて効率的な鉛直混合が生じていることを示している．

(2) 渦潮に伴う鳴門海峡通過流の形成

図-8と同じ鳴門海峡最狭部断面内における流量の時間積分値を図-9に示す．海峡通過流量は潮汐変動と連動して南北方向にその方向を転じるが，残差流としては明らかに負（南向き）であり，期間平均の流量は南向きに約 $7,631 \text{ m}^3/\text{s}$ である．つまり，鳴門海峡は播磨灘から紀伊水道方向への海水輸送を促進していることが分かる．瀬戸内海では四国沖を東進する黒潮の流路変動の影響を受けつつも，平均的に時計回り（豊後水道から紀伊水道方向）の通過流が卓越することが知られている²⁾．播磨灘からのLagrange的な物質輸送に対しては，淡路島北部の明石海峡から大阪湾方向への流出よりも，鳴門海峡から紀伊水道方向への流出の方が顕著である⁷⁾．本研究の結果は

これらの既往の知見とよく合致している。このような海峡南側の紀伊水道方向への長期的な流出傾向は、鳴門海峡周辺の複雑な地形や、それに伴って発達する渦潮などによる非線形効果の影響を受けて形成される上げ潮・下げ潮方向の非対称な流速分布 (図-5) によるものであり、湾灘間の物質交換に対する鳴門海峡の役割を理解する上で極めて重要な物理要素であるといえる。

5. おわりに

本研究では、類まれなる自然現象である「鳴門の渦潮」に着目し、世界遺産登録の動きに伴って重要性が急増している渦潮の科学的知見の蓄積に資するべく、多段ネスト高解像度3次元海洋流動モデリング技術を応用した精緻な数値解析を実施した。その結果、まず、紀淡海峡で分派して淡路島に沿って伝播する2経路の潮汐波が約2時間半の位相遅れを伴って邂逅することにより形成される強い圧力勾配と、狭窄部の海関（浅瀬）・南北に複数存在する海釜（窪地）・泥岩と砂岩が交錯して形成されるリアス海岸地形といった複雑な地形的拘束によって、鳴門海峡において潮流が著しく強化されることを示した。

鳴門の渦潮は、subtidal長周期流動や潮流の強流帯およびその周辺に広範に発達する極めて強いサブメソスケール渦の集合体であり、これらの渦は主に潮流に伴う水平シア不安定によって発生することを明らかにした。また、海峡狭窄部の渦潮直下における平均的な3次元流動構造は、海峡中央部で沈み込むようなdipole型の鉛直循環流で特徴づけられ、そこでは極めて効率的な鉛直混合が生じていることを示した。さらに、渦潮や潮流の非線形効果によって長期的には南向きの流量フラックスが発達し、鳴門海峡は播磨灘から紀伊水道方向への海水および物質

輸送を促進している可能性を示した。

謝辞：本研究の遂行にあたり、科学研究費（18H03798, 19H00782）の援助を受けた。

参考文献

- 1) 兵庫・徳島「鳴門の渦潮」世界遺産登録推進協議会：「鳴門の渦潮」自然編～潮汐作用と特殊な地形が織りなす類まれな自然現象～（案），55 pp., 2020.
- 2) 内山雄介，栗山貴生，宮澤泰正：外洋影響を考慮した瀬戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果について，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68, No. 2, p. I_441-I_445, 2012.
- 3) Uchiyama, Y., Kanki, R., Takano, A., Yamazaki, H. and Miyazawa, Y.: Mesoscale reproducibility in regional ocean modeling with a 3-D stratification estimate based on Aviso-Argo data, *Atmosphere-Ocean*, Vol. 56, No. 4, pp. 212-229, 2018.
- 4) Kurosawa, K., Uchiyama, Y., and Kosako, T.: Development of a numerical marine weather routing system for coastal and marginal seas using regional oceanic and atmospheric simulations, *Ocean Engineering*, Vol. 195, 106706, 2020.
- 5) Uchiyama, Y., Zhang, X., Suzue, Y., Kosako, T., Miyazawa, Y. and Nakayama, A.: Residual effects of treated effluent diversion on a seaweed farm in a tidal strait using a multi-nested high-resolution 3-D circulation-dispersal model, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 130, pp.40-54, 2018.
- 6) Zhang, X., Uchiyama, Y. and Nakayama, A.: On relaxation of the influences of treated sewage effluent on an adjacent seaweed farm in a tidal strait, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 144, pp. 265-274, 2019.
- 7) 小裕大地，内山雄介，御手洗哲司：長期高解像度再解析に基づく瀬戸内海内部流動と幼稚仔分散過程の形成メカニズムに関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 72, No. 2, pp. I_1273-I_1278, 2016.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

GENERATION MECHANISM OF TIDALLY-DRIVEN WHIRLPOOLS AT NARUTO STRAIT, JAPAN

Yusuke UCHIYAMA, Xu ZHANG and Shota YANASE

This study investigates the generation mechanism and influences on surrounding marine environment of “Whirlpools at Naruto Strait”, which provide us an extraordinary seascape aimed at being registered as a world natural heritage site, by using a state-of-the-art high-resolution numerical ocean circulation modeling technique in a quadruple nested configuration. We found that the pronounced pressure gradient force associated with the meridional surface elevation difference is induced by a phase difference of bifurcating two major tidal waves originated from Kitan Strait that eventually results in intensified tidal currents at Naruto Strait. One branch of the tidal waves propagates counterclockwise along Awaji Island through Akashi Strait, whereas the other comes directly from Kii Channel. Consequently, the whirlpool emerges as a large number of submesoscale eddies primarily due to horizontal shear instability of tidal currents energized at the narrow gap topography between two headlands sticking out to the strait. A dipole of overturning vertical circulations appears underneath the whirlpools with convergent downward transport at the strongest tidal current near the center of the strait, leading to highly efficient vertical mixing. Such a three-dimensional nonlinear mixing promotes a time-averaged southeastward mass transport that extracts the water and materials from Harima-nada Sea to Kii Channel.