

# 鳴門海峡の渦潮はなぜ起こるのか？

神戸大学 大学院  
工学研究科市民工学専攻  
教授

内山 雄介



## ● 著者略歴 ●

1998年東京工業大学・博士（工学）。  
運輸省港湾技術研究所（現国立研究開発法人 海上・港湾・航空  
技術研究所）、米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校地球惑  
星物理学研究所を経て2011年より神戸大学、2015年から現職。  
専門は海岸工学・海洋物理学・海洋モデル、趣味は旅行とサウナ。

## 1. 海の中の「まわる」と渦潮

海の中にも「まわる」ものはたくさんあります。一番規模の大きなものは海洋循環流でしょうか。例えば北太平洋を例にすると、赤道のやや北を西進する北赤道海流がフィリピンにぶつかって北上して黒潮となり、台湾、沖縄を通過して房総半島沖で東に進み、アメリカ西海岸にぶつかって南下するカリフォルニア海流となり、それが赤道の北側で西に転じて北赤道海流になります。この北太平洋の南半分を時計回りにぐるりとまわる一連の大きな流れは「北太平洋亜熱帯循環流」と呼ばれます。それ以外にも、海洋には直径数100kmの「中規模渦」と呼ばれる渦巻き構造がたくさんあります。大気中の渦である台風とよく似た海洋の中規模渦ですが、残念ながら人間の目で直接観察することは不可能で、人工衛星で海面の水温の分布を調

べることで表面温度のコントラストとしてはじめて可視化できます。そんな中で、我々日本人に馴染み深い、海の「まわる」ものの一つに鳴門の渦潮が挙げられるかもしれません。淡路島と徳島を結ぶ鳴門海峡で見られる渦潮は世界でも有数の大きさと強さを誇る珍しい海洋現象で、船や橋の上から目視観察できるほどはつきりとした渦構造であるため、古来から人気の観光スポットにもなっています（図-1）。本稿では、鳴門海峡で発生する渦潮がどうして世界最大級になるのか、その発生メカニズムについて紹介したいと思います。

## 2. 鳴門海峡の地質的条件と渦潮の価値

淡路島と四国徳島を隔てる鳴門海峡は、瀬戸内海の東側にある播磨灘と紀伊水道とを接続する最小幅約1.3kmのとても狭い海峡です（図-2）。2つの突き出た岬に挟まれた海峡中央付近は全体的にはV字型海底渓谷となっていますが、海峡最狭部はその南北に広がる海域と比べて水深は約80mと非常に浅くなっています。これに対して最狭部の北側には水深151mおよび216mの2ヶ所と、南側には水深164mの1ヶ所の計3ヶ所に窪地（深み）があります。淡路島側にはリアス式海岸線を構成する浅瀬および岬と浅瀬が顕著に見られるのですが、これらは和泉層群の砂岩優勢層と呼ばれる比較的固い地質に対応します。一方で、徳島側の比較的直線的な海岸や窪地は、浸食に対して脆い泥岩優勢層に対応しています。これらの地質条件によって鳴門海峡付近の海岸・海底地形は極めて複雑になっています。このような特殊な地形条件から生まれる強くて複雑な海の流れに伴って、有名な「鳴門の渦潮」が恒常的に生成されています。

渦潮の景観は歌川広重の「六十余州名所図会阿波鳴



図-1：鳴門の渦潮。  
左：歌川広重による「六十余州名所図会阿波鳴門の風波」（1853-1856）、右：鳴門の渦潮の空中写真（Mantokun, 2009）。いずれも Wikimedia Commons 提供。

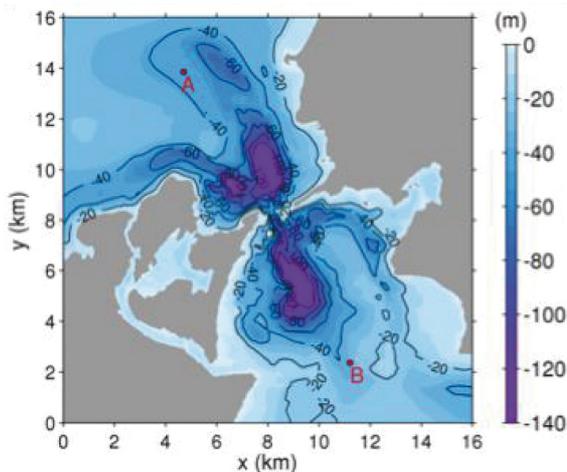


図-2：鳴門海峡周辺の水深分布。

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ます。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活動が精力的に行われています（例えば、兵庫・徳島「鳴門の渦潮」世界遺産登録推進協議会など）。このような活動の中で、世界遺産登録に向けて推進すべき活動の一つに渦潮の価値を定量化するための科学的データの蓄積が挙げられ、私たちの研究チームでも鳴門の渦潮に関する海洋科学的な研究を進めてきました。

### 3. 渦潮のコンピュータシミュレーション

ここでは私たちが行なったスーパーコンピュータを用いた海洋流動に関する数値シミュレーションによって明らかになった、鳴門の渦潮の発生メカニズムについて詳しく説明します。シミュレーションの詳細はかなり専門的になりますのでここでは触れませんが、興味のある方は2020年に発表された私たちの研究論文 (doi:10.2208/kaigan.76.2\_I\_97) をご参照下さい。

渦潮の発生にとって最も重要となる現象は「潮汐」です。潮汐とは主に月と太陽の引力によって起きる海面の昇降現象で、1日に1～2回のゆっくりした海面の昇降として海岸などでみられます。「潮の満ち引き（干満）」のサイクルでは、海水面が上昇しきった満潮や、下降しきった干潮などが発生しますが、干満が発生するタイミングは場所によって変化します。このとき、潮汐によって海面が上がった場所から下がった場所へと海水が流れ、地形が狭い場所に寄せ集められるために、海流が生まれます。これを潮汐流（あるいは潮流）と呼び、鳴門海峡ではこの潮汐流がとても強くなるのがよく知られています。

### 4. メカニズム1：潮汐波の2つの経路

計算された水位の時空間分布を「調和解析」という手法を使って様々な潮汐成分に分解して分析したところ、淡路島周辺海域において最も振幅が大きいのはM2分潮（月の引力によって起こる潮汐成分で、12.42時間の周期で干満を起し、日本の太平洋沿岸では一般に振幅が最も大きい）であり、M2による水位変動はまず外洋で発生したあと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淡路島を周回する経路Aと、紀伊水道から直接鳴門海峡へ至る経路Bを取る2つの波に分解されて伝播し、鳴門海峡で邂逅することがわかりました（図-3、4）。

二つの経路を通ったM2分潮の鳴門海峡における到達時間の差は2.5時間で、経路Aの方が経路Bよりも2.5時間遅れて鳴門海峡へ到着すると見積もられました。紀伊水道を出て紀淡海峡から淡路島東岸、明石海峡、淡路島西岸を経て鳴門海峡へと至る反時計回りの経路長は約130kmです。経路A上の平均水深約20mを用いると理論的に求められるM2潮汐波の

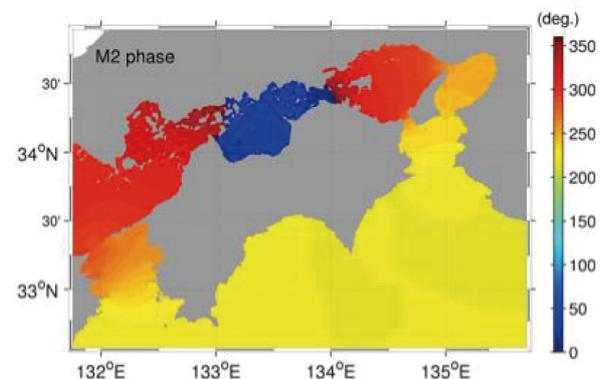


図-3：瀬戸内海におけるM2分潮成分の位相（角度）分布。鳴門海峡の北側は赤系色、南側は黄系色で、位相差（角度差）は71度。これを時間に換算すると約2時間半となる。備讃瀬戸や来島海峡でも位相差が大きく、鳴門海峡と同じような状況が生まれやすいことが分かる



図-4：外洋から入射する潮汐波の二つの経路。経路Aは淡路島を周回するぶん経路Bよりも鳴門海峡への到着が2.5時間遅れる。Google Earth から作成。

スピード（波速）は毎分約0.84kmになります。すると経路Aの所要時間は $130 \div 0.84 =$  約155分と見積もられ、約2時間半が妥当な数字であることが簡単に証明できます。

## 5. メカニズム 2： 海峡南北の水位差と潮流の強化

潮汐伝播の時間差 2.5 時間によって、鳴門海峡の南北（図-2の点A、B）では、南側の点Bで水位が低下しているのに北側の点Aでは水位が高い状態にあるなど、大きな水位差が発生します。点A-B間の水位差は-1.0mから+0.7m程度の範囲で変動し、干満差が最大となる大潮期ほど水位差が大きくなります。図-5は縦横比が誇張されて描かれていますが、この時の南北間の水位差は約1.3mにもなることが分かります。水は高いところから低いところへ流れ、しかも高低差が大きいほど流れが速くなりますので、この南北の水位差によって鳴門海峡の流れが強くなることは直感的に理解できるのではないのでしょうか。

もう少し専門的な説明をすると、物理学の法則によ

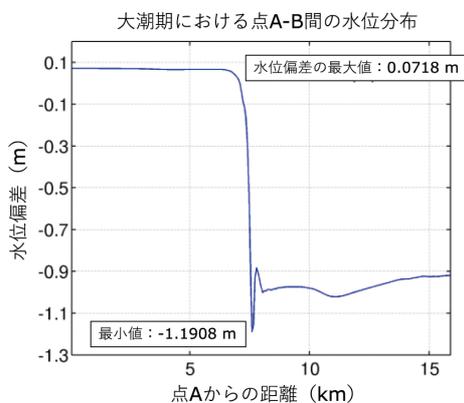


図-5：大潮期（干満差が最大になる時期）における点A-B（図-2参照）間の水位偏差分布。

れば、流れの加速度（速度の時間変化率）は、水位の空間勾配に比例します。つまり大きな水位差が短い区間で起こると流れは強く加速されるという理屈になっているのです。北から南方向への水位低下は実際には鳴門海峡のすぐ近く、水平距離でいうと高々500mくらいの区間で顕著になっています（図-5）。海峡のすぐ近くに水位変化が集中しているのは鳴門海峡の地形条件が強く関与していて、深くて広い水瓶のような窪みがとても狭くて浅い海峡の南北にあるため（図-2）、海峡部に流れが過度に集中してしまうことが原因です。

図-6は鳴門海峡周辺における表層流の状況を可視化したものです。(a)はM2分潮の潮流楕円（時々刻々変化する潮流の強さと方向をベクトル[矢印]で表示し、基点をそろえたときにその先端が描く曲線）、(b)は時間平均された表層流速（残差流と呼びます）で、海峡を通過するときに流れ（潮流）が強化されること、その空間分布は南北に非対称となることが分かります。播磨灘方向への流れは左斜め上約45度方向に発達する集中したジェットのような構造が目立ちますが、紀伊水道方向へ流れは互いに反対回りの水平循環流の双子構造が現れています。潮流楕円は平均流分布に対応しており、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ことが確認できます。これらの流れの構造は2.で説明した複雑な海底地形分布の影響を強く受けて形成されたものであることが分かりました。

## 6. メカニズム 3： シア不安定機構による渦の発生

複雑な海底地形分布の影響を受けながら、鳴門海峡の中央部付近で発達する潮流によって、強い正負の渦度が発達することが図-6(c)に示されています。

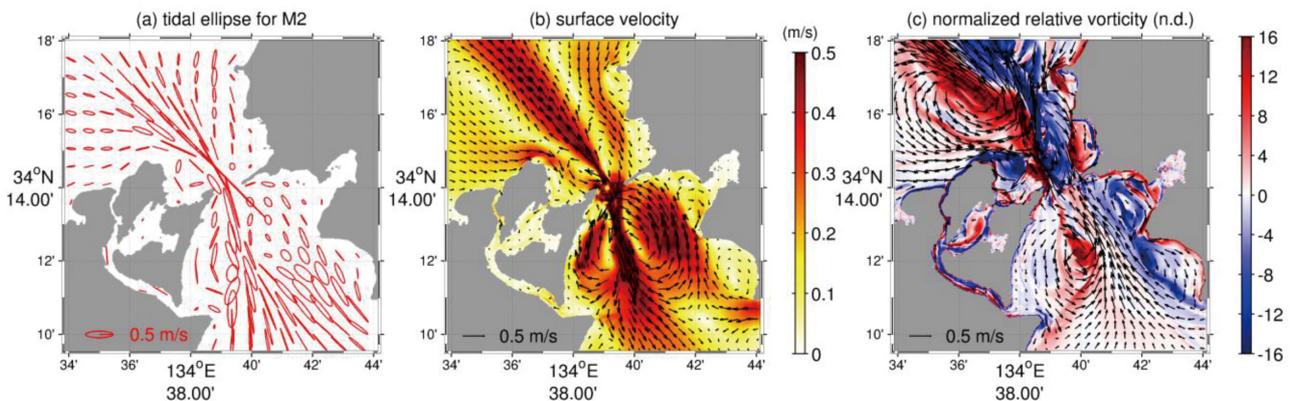


図-6：鳴門海峡における海洋表層の流れの状況。左 (a)：M2分潮の潮流楕円、中央 (b)：時間平均された流速（絶対値）の空間分布、右 (c)：渦の強さと回転方向を表す「(無次元相対)渦度」という物理量の空間分布の一例。赤は反時計回り、青は時計回りの渦度であり、矢印は表層流速をベクトル表示したものの。

普通の人には馴染みが薄いですが、「渦度」とは渦を直接的に評価する量で、数学的には流れのベクトルの回転 (rotation, curl) を求めると得られ、物理的には水がその場で回転する強さ (正確には角速度×2) を回転方向とともに与える量です。鳴門海峡では上げ潮・下げ潮に伴って約6時間ごとに流れの向きが北西方向から南東方向へと交互に発達しますが、時間変化する流れの下流側に渦が交互に発生します。

図-6 (c) は表層における無次元相対渦度分布の瞬間値の一例で、上げ潮時 (北西方向の流れ) に対応しています。海峡の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ことがわかります。無次元相対渦度の絶対値が1を超える渦は海洋では強い渦と言われますが、鳴門の渦潮を構成する渦の渦度は10を軽く超えており、尋常ではない強さを持っています。潮流の主流部、その周辺の減速域、あるいは海岸周辺を中心に数10mから数100mのサイズ (直径) を持つ渦が多数発生しています。シミュレーションモデルの水平解像度は20mですので、これより小さなサイズの渦は直接表現できませんが、これらの強い渦の集合体として鳴門の渦潮が構成されていることが示されました。

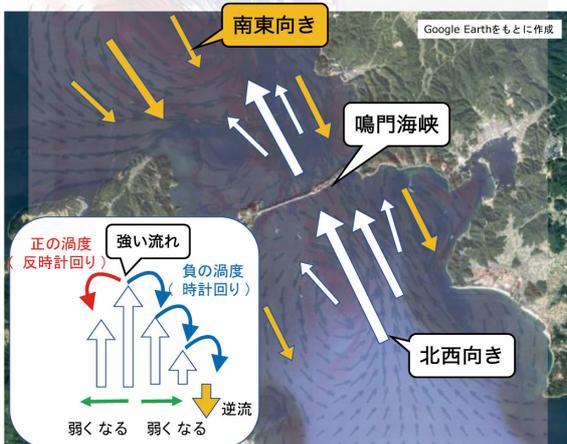


図-7: 上: 鳴門海峡周辺の表層流れの分布と渦の発生機構の説明 (図-6b と Google Earth から作成)。  
下: 雲によって可視化された大気中のシア不安定渦列 (Wikimedia Commons・GRAHAMUK 提供)。

渦潮の発生メカニズムを特定するために、「渦運動エネルギー収支解析」という方法で調べたところ、これらの強い渦は水平流速によるシア不安定という機構で形成されていることが判明しました。シア不安定とは、流れの強さの空間的な差異によって、強い流れから弱い流れの方向に回転運動が生じて、それが徐々に渦に発達していく機構 (図-7上参照) で、自然界では比較的良好に見られる流体現象です (図-7下)。鳴門の渦潮の場合は、淡路島の存在によって海峡南北での潮位差がとても大きくなること、複雑な地形条件によって海峡のすぐ近くで非常に強い潮流が発達すること、この潮流が複雑に空間分布することでシア不安定機構によって渦が発達しやすい条件下にあること、などの好条件がいくつも重なった結果、ユニークで類まれなる自然現象・自然景観となったと結論づけられます。

## 7. おわりに

鳴門の渦潮は自然景観としての美しさもさることながら、海の世界にとっても特別な役割を果たしています。私たちのシミュレーションによれば、鳴門海峡に発達する渦潮の直下では、海峡の中央部で沈み込み、両岸の海岸付近で上昇流になるような鉛直循環流が発達していて、そこでは極めて効率的な鉛直混合が生じていることがわかりました。このような鉛直混合は、表層の酸素を底層に送りこんだり、反対に栄養が豊富な深層水を表層に供給したりするため、水産業や海洋生態系に対して大きな恩恵をもたらします。また、渦潮や潮流が有する南北に非対称な構造によって、鳴門海峡では平均的には南向きの海水流出が卓越していることもわかりました。つまり、鳴門海峡は海水や水質・生物に関連する物質について、播磨灘から紀伊水道 (ひいては外洋) への流出を促進させる排水ポンプのような機能があるということになります。ちなみに播磨灘の出入り口を構成する3つの海峡のうちの残りの2つである備讃瀬戸と明石海峡は、いずれも播磨灘の外側の海域 (濠洲と大阪湾) から播磨灘へと海水を流入させていることも同時に明らかになりました。

冒頭で紹介した海洋循環流は北太平洋スケールでの海水交換を、中規模渦は数100kmスケールでの海水混合を、渦潮は数10kmの湾灘スケールでの環境調整役を担っており、海の中の「まわる」は海洋環境、ひいては地球システムに対して重要な役割を果たしているのです。