

海峡水域の大スケール渦生成・挙動に及ぼす 海底地形の影響について

——リモートセンシングの海洋水理への応用に関する研究 (2)——

大 西 外 明*・ 田中総太郎**・ 西 村 司***

1. はじめに

海峡水域の水理現象の研究は、内海水理研究の境界条件として極めて大きい意義を有している。海峡においては、両側より陸岸が挟まり、1日に2往復する潮流が卓越するという特徴のために、一般に模式図(図-1)に示す様な、大小2つのスケールの渦が形成される。図中、小スケールの coherent 渦とは、海峡部の陸岸突出点で剝離した渦度で、後流中の境界層内で集積して生じる渦をさすものである。一方、大スケールの渦は潮流が日に2回往復することによって生じるもので、小スケールの coherent 渦が更に半潮流サイクル6時間にわたって集積して形成される。

この様にして生じる大スケールの渦は、海峡をとおしての tidal-exchange 過程、あるいは周辺の灘水域における海水交換・混合過程に極めて大きい役割を演じている。したがって、大スケール渦の形成過程・運動の水理学的機構を明らかにしてゆくことは内海水理研究において重要な意味を持つが、船舶からの海上観測を主な手段とする現地調査手法によっては、この様な時間・空間スケールの大きい水理現象の把握は困難である。この点、自然界のスケールの大きい水理現象の1つの可視化法として、人工衛星あるいは航空機からのリモートセンシングを導入することは極めて有力な手法である。

この様な観点から、筆者らは、海峡水域の潮流のリモートセンシングを進めており、小スケールの coherent 渦とその更に集積した大スケールの渦の形成過程、および

これらの渦の、海峡水域における海水交換・混合に果たしている役割を見出しつつある^{1),2),3)}。本論文においては、この大スケール渦の生成あるいは運動に対して、海峡近傍の起伏に富んだ海底地形の影響を明らかにしてゆくことを試みる。

2. 海峡水域における海底地形の特徴

海峡は、急に挟まり、また急に拡がるという平面的な地形特性を有するために、潮流の往復に伴ない背部の灘水域に coherent 渦あるいは大スケール渦を生成する。一方、この様な平面的特徴に加えて、海峡は一般に近傍の水域に深い海底凹部や浅瀬を有し、海底起伏が激しいという特徴をも有している。図-2 は、瀬戸内海に位置する鳴門海峡の海底地形図である。播磨灘側には、最深部、160 m および 200 m の A, B 2つの海底凹部が存在し、また 30 m の等深線で囲まれる浅瀬 E が海峡に向かって突き出している。一方、紀伊水道側には最深部

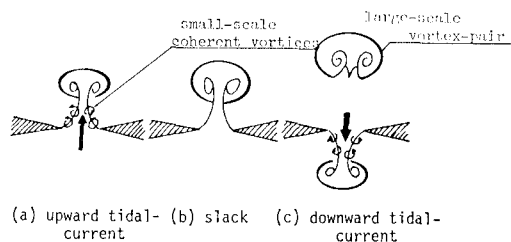


図-1 海峡水域における渦の生成

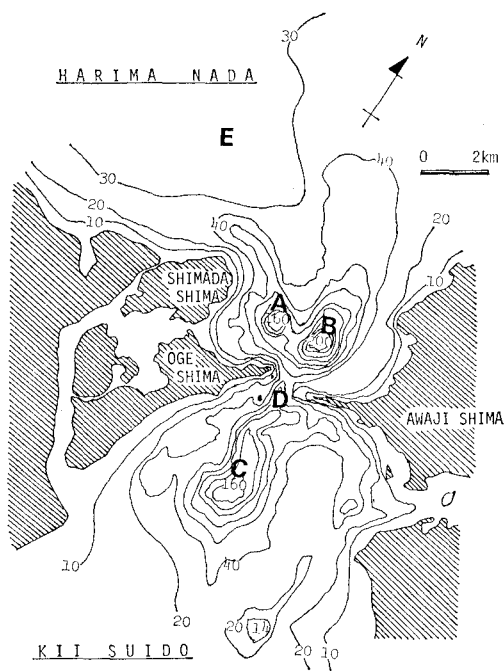


図-2 鳴門海峡の海底地形図

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 リモートセンシング技術センター
 *** 正会員 工修 東京理科大学講師 理工学部土木工学科

160 m の海底凹部 C、および深さ 80 m の海谷が存在する。瀬戸内海における他の海峡、すなわち明石海峡、友ヶ島水道、速吸瀬戸においても、海峡近傍水域の海底は起伏が著しい。

瀬戸内海が、その大部分が水深 30 m 前後の極めて平坦な海底面を伴う穏やかな内海であることを考慮すれば、海峡水域の急激な海底地形変化はその平面地形形状の急変と相まって、潮流に伴う大スケール渦生成過程への影響をととして内海水理環境に大きい影響を有するものと考えられる。

3. 大スケール渦生成への海底地形の影響要因

潮流によって形成される大スケール渦は、海峡近傍水域の後流中の乱流境界層（特に自由乱流境界層）内の coherent 渦が集積（amalgamation）した結果として生じる。したがって、大スケール渦への海底地形の影響を調べるためには、まず coherent 渦への影響を知る必要がある。coherent 渦は、渦軸の一端を海面、他の一端を海底面に接する一本の line-vortex であるから、ここでは、まず簡単な渦の運動論によってこの種の line-vortex に及ぼす海底地形の効果を調べ、その効果の集積として大スケール渦への効果を論ずることとする。

3.1 line-vortex に及ぼす海底地形の効果

(1) “鏡像効果”による加速・減速作用

今、図-3 の様に、海底地形急変部の近傍に、海面と海底とを渦軸で直接結ぶ line-vortex A があるものとする。渦 A は海底面越しの自分自身の鏡像 B との間に誘起される誘導速度

$$U_v = \frac{\Gamma}{4\pi l} \dots\dots\dots (1)$$

の効果によって、斜面に平行な運動を行なう。ここに Γ

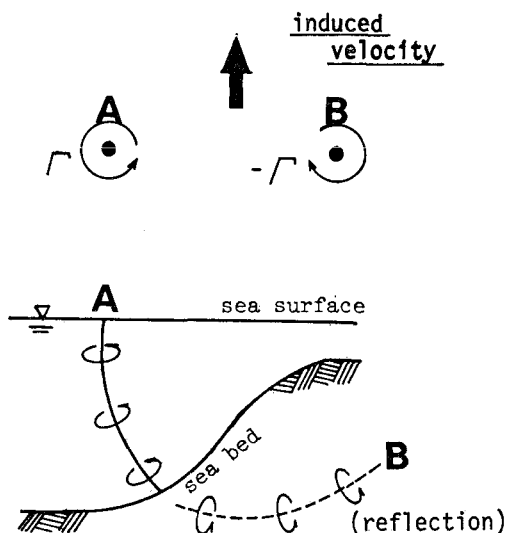


図-3 鏡像効果

は渦まわりの循環で定義される渦の強さ、 l は渦と海底面との間の平均的な距離である。したがって、海峡部に生じた coherent 渦が海底凹部あるいは浅瀬の側面、即ち、海底傾斜面にさしかかる場合を想定すれば、個々の coherent 渦は、海底傾斜面によって加速あるいは減速される。(1) 式より、渦の強さが強く海底起伏の度合いが強い程、すなわち、 Γ が大きく l が小さい程、この加速・減速の効果は著しい。

(2) 湧昇流発生による減衰作用

海底と海面とを渦軸によって直接結ぶ line-vortex に沿って、海底近傍の水が海面に向かって上昇する（湧昇流の発生）機構は、大気中の類似の line-vortex、即ち、一端を地表面に接する tornado（大竜巻）と同様の機構によって説明される²⁾。すなわち、渦の回転に伴い海底面沿に発達する境界層内の海水が渦軸沿いに上昇して湧昇流となる。また、海底地形の急変が、この海底面沿いの境界層厚さの増大をもたらす、地形性の湧昇流を発生する現象の水理学的機構も説明されつつある³⁾。この様に海面と海底とを結ぶ line-vortex は、種々の形態の湧昇流を生じることによって減衰してゆく。この効果は、海底面の粗度が大きく、地形変化が急激である程、すなわち、海底面沿い境界層の厚さが増す程著しい。

(3) line-vortex の回転の向きによる影響の相異

以上の2つの影響要因においては、海底傾斜面と line-vortex との位置関係、および、渦の回転の向きが重要な因子となる。実験的に示せば以下のとおりである。実験方法を図-4 に示す。幅 0.6 m、深さ 0.8 m の水平水路内の左岸側に海底傾斜面の模型を設置し、水深 0.4 m、流速 0.2 m/sec、フルード数約 0.1 の一様流を流した。海底と海面とを結ぶ line-vortex は、幅 0.3 m の平板を水面に急にさし入れ、また、急に引き抜くことにより生ずる発達渦を用いた。この操作を左岸にて行なえば上方から見て反時計まわりの渦を生じ、右岸にて行なえば時計まわりの渦を生じる。発達渦生成後、染料を渦中心部に投入し、流下に伴う状況を上方に設けたカメラにより連続撮影した。なお、水理量は、鳴門海峡において出現する coherent 渦を念頭において設定している。

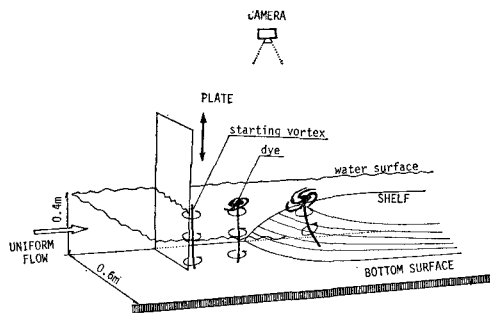
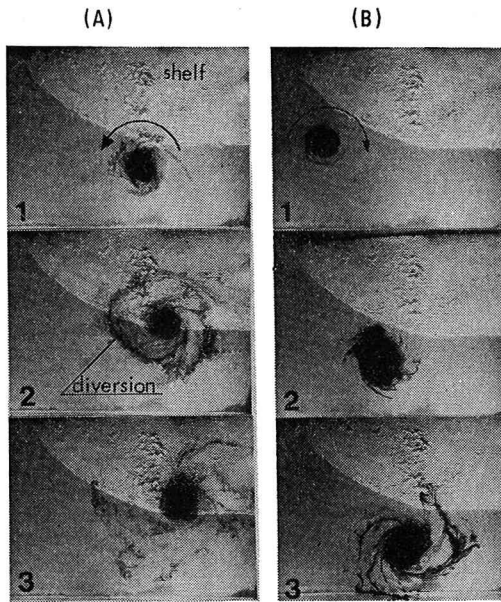


図-4 実験方法

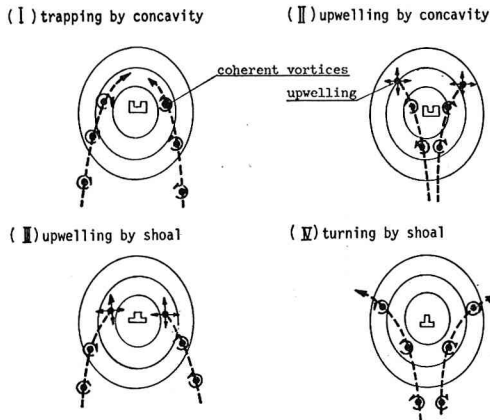


写真—1 line-vortex と海底地形

実験結果の一例を写真—1に示す。(A)は、渦が反時計まわりの回転を行なう場合であって、渦は流下に際し海底傾斜面により鏡像効果に基づく減速作用を受け、渦軸下端が傾斜面を登ってゆくと同時に地形性の湧昇流を生じつつ減衰している。一方、(B)は時計まわりの回転の場合であって、渦は流下に際して海底傾斜面より鏡像効果に基づく加速作用を受け、地形性湧昇流は生じない。なお、(B)-3 にみられる湧昇流は右岸側の水路側壁との間の相互作用によって生じた地形性湧昇流であり、実験的制約にもとづくものである。

3.2 大スケール渦に及ぼす海底凹凸部の影響

海峡水域の大スケール渦と同等のスケールを有する海底凹凸部に、海峡最狭部で剝離した渦度の集積した coherent 渦、すなわち、海面と海底とを渦軸で結ぶ line-vortex の列が進入してくる場合を想定する。3.1 の議論



図—5 大スケール渦に及ぼす海底凹凸部の効果

から、渦の回転の向き、進入方向、海底傾斜面の向き、および大スケール渦へと至る coherent 渦同士の amalgamation 過程を考慮することによって、図—5 に示す (I)~(IV) の 4 種類の現象が生じものと考えられる。すなわち、海底凹部に対しては、

(I) coherent 渦が凹部に trap され、大スケール渦が形成される。

(II) coherent 渦が傾斜面をはい上がり湧昇流を伴いつつ減衰する。

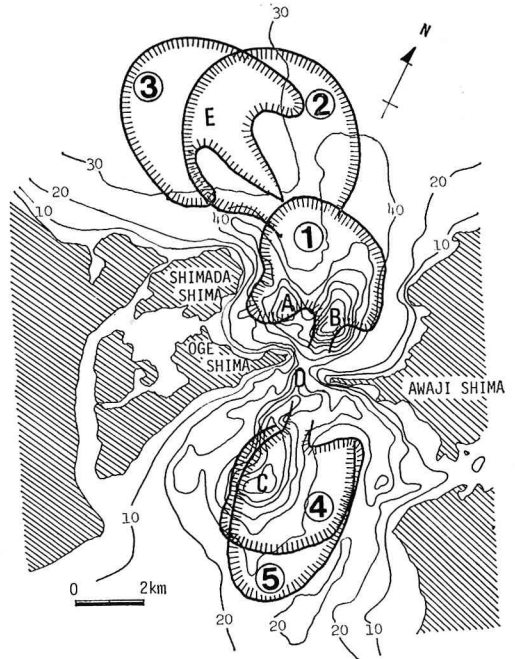
海底凸部に対しては

(III) coherent 渦が湧昇流と減衰を伴いつつ海底傾斜面をはい上がる。

(IV) coherent 渦は浅瀬を避けて側方を通過する。大スケール渦の形成は浅瀬の側方において進行する。

4. リモートセンシングによる観測

鳴門海峡における大スケール渦対の生成および挙動の実態が、Landsat MSS 画像、および航空機からの熱映像によって観測された。図—6 は得られた画像の主なもの seabed topography map 上に重ねて描いたものである。表—1 は各々の画像の諸元を示す。得られた画像の各々は、海



図—6 鳴門海峡における大スケール渦

表—1 リモートセンシングデータ諸元

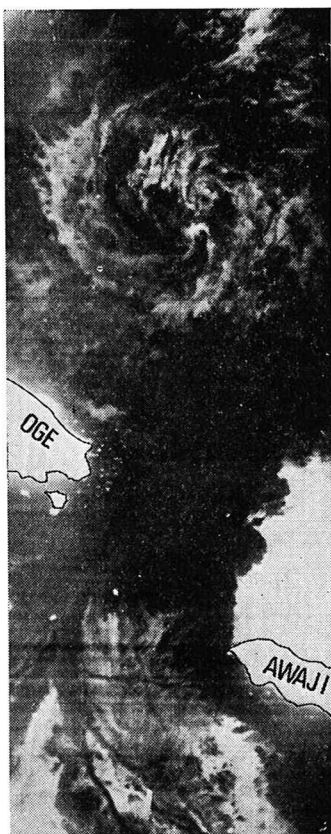
Imagery	Spectral-Band	Altitude	Data Acquisition Time	Phase of the Tidal Current at Data Acquisition Time
①	Landsat MSS 5	950 km	9:48 A.M. Aug. 1st, 1976	① northward flow
②	Landsat MSS 5	950 km	10:06 A.M. Oct. 24th, 1972	② northward flow
③	Landsat MSS 5	950 km	9:57 A.M. Dec. 30th, 1975	③ southward flow
④	thermal	4 km	11:00 A.M. Aug. 23th, 1979	④ southward flow
⑤	thermal	4 km	12:00 A.M. Aug. 23th, 1979	⑤ southward flow

峽を背にして左半分が反時計まわり、右半分が時計まわりの大スケール渦からなる渦対である⁵⁾。大スケール渦対の位置と、各々の画像の得られた時点での潮流の位相とを比較することにより、この大スケール渦対が鳴門海峡をととしての tidal-exchange に大きい役割を有していることが理解できよう。

この様な大スケール渦は海峡部の急激な海底地形変化によって大きい影響を受けている。まず、播磨灘側水域における大スケール渦対 ①, ②, ③ をみることににより、渦対の自己誘導速度に基づく播磨灘への進入が海底地形の屋根線に沿って浅瀬 E に向かっていることが判読される。これは、3.2 に示した、海底凸部による (IV) の効果によるものと説明できる。また、渦 ①の形状をみると、海底凹部 A によって、(I) coherent 渦の trapping による大スケール渦生成が行なわれているものと推測される。

この様な trapping の過程を Landsat 画像によって把握することは困難であるが、航空機からの熱映像を用いればきめ細かく調べることができる。写真-2 (a) は、鳴門海峡上空 900 m から、1972 年 7 月 22 日

10 時 25 分に撮像された熱映像である。撮像時の海峡中央部の潮流は、北流へ転流後約 3 時間の北流最強状態 6.5 ノットである。海峡北側水域に反時計まわりの大スケール渦が形成されている様子が判読される。図-7 は、潮流板調査結果⁵⁾であって、南流から北流への転流時に海峡中央部に投入した潮流板の流跡線を 6 時間にわたって追跡したものである。なお当日の潮流は北流最強時 7.4 ノットである。海底地形、熱映像、潮流板の軌跡



(a) 高度 900 m より



(b) 高度 4 000 m より

写真-2 熱映像

の 3 者を比較することによって、海底凹部 A の作用によって coherent 渦の trapping と大スケール渦の形成が進行していることが明らかにされる。

熱映像を用いれば、特に水温躍層を有する水域においては、鉛直混合の情報を得ることができる。写真-2 (b) は、高度 4 000 m の航空機から得られた 1979 年 8 月 23 日 11 時、南流へ転流後 2 時間経た時点での熱映像である。転流以前の北流によって形成されそのまま播磨灘側水域に居残っている大スケール渦対の右半分が低温であることを示し、この部分、即ち海底凹部 B において (II) 湧昇流と減衰の作用が進行していることを示唆している。一方、紀伊水道側水域に現在形成されつつある大スケール渦対は、その全域が低温の水塊として出現しており、海底凹部 C あるいは D において (II) の作用が進行していることを示している。

この様に、鳴門海峡においては、海峡を挟んで播磨灘側水域と紀伊水道側水域とは海底地形が異なるために大スケール渦形成においても差異が生じる。リモートセンシング、潮流板調査⁵⁾、縮尺模型水理実験結果⁸⁾を総合すると、播磨灘側水域においては効率良く大スケール渦対が形成されるが、南流時における大スケール渦対形

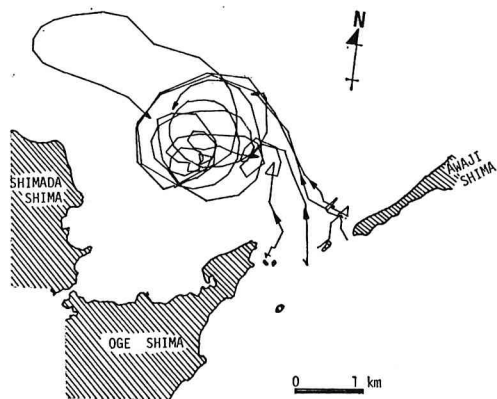


図-7 潮流板の流跡線 (参考文献 5) による)

成効率はそれ程良くなくむしろジェット流の形態をとることが知られている。この様な相異は、鳴門海峡をとおしての tidal-exchange の非対称性の一因となるものと考えられる。

5. む す び

海峡水域において、1 日に 2 回形成される大スケール渦に着目し、海峡特有の起伏の激しい海底地形の与える影響を論じた。要点をまとめると次の様になる。

- (1) 海峡水域に形成される大スケール渦を coherent 渦の集合とみなし、更に、coherent 渦の各々を海面と海底とを結ぶ line-vortex として把握した。
- (2) line-vortex に及ぼす海底地形の効果を、渦の運動論および水理実験を用いて解析し、3つの影響要因を明らかにした。
- (3) 大スケール渦を coherent 渦の集合、即ち line-vortex の集合として考えることにより、海底凹凸部の大スケール渦に及ぼす影響として4種の形態を見出した。
- (4) こうして得られた海底地形の影響要因を用いて、Landsat・航空機からの鳴門海峡のリモートセンシングデータを解析し、海峡水域における大スケール渦に及ぼす海底地形の影響の実態を良く説明することができた。

以上の結果は、現段階では未だ定性的な部分が多い。

より以上の定量的議論は今後の課題として残されている。

謝辞：本研究を含む一連の海洋水理リモートセンシング研究は丸安隆と博士の示唆によって始められた。熱映像による大スケール渦の把握という特殊な作業の実際面はアジア航測株式会社によって実現された。水理実験は、55年度卒業研究生であった大北隆之（現・東光コンサルタンツ）、橋本彰文（現・熊谷組）の両氏によって実施された。記して厚く御礼申し上げる次第である。なお、本研究は昭和54・55年度文部省科研費（代表者・丸安隆和）を受けた。

参 考 文 献

- 1) 大西外明・田中総太郎・西村 司：Landsat リモートセンシングを導入した海峡部海水交換の研究，土木学会論文報告集 第298号，pp. 201~213, 1980.
- 2) 大西外明・西村 司：渦水域における上昇流の観測とその発生機構に関する考察，第23回水講演集，pp. 123~130, 1979.
- 3) 大西外明・西村 司：決定論的立場からの海峡部 tidal-exchange の観測とその制御策の検討，第24回水講演集，pp. 221~228, 1980.
- 4) 大西外明・西村 司：海峡背部の coherent 渦による地形性湧昇流，第35回水講演集，1980.
- 5) 本四公団：本州四国連絡架橋漁業影響調査報告，第16号，1977.