

沿岸流動中の coherent 渦に対する海底地形勾配の鏡像効果

西村 司*・畠山 祐二**・北島 陽一***

1. 問題の背景

我が国沿岸に見られる慣性力の卓越する流れを2つあげるとすれば、おそらく太平洋岸を洗う黒潮と、瀬戸内の各海峡水域の潮流ということになる。今、これらの流れを水平面的な2次元流れとみるならば、沖合いの慣性力の卓越する流れをポテンシャル流、陸岸を固体壁面とみることができ、この場合の流れの区分は模式的に図一1のようになる。即ち、沖合い数十m~数十kmのところにポテンシャル流が存在し、陸岸との間に乱流境界層を形成している。この乱流境界層は、陸岸が滑らかな平面地形形状をなしていれば壁面乱流境界層となり、流れは大小種々のスケールの渦によって満たされる。一方、陸岸が半島、岬あるいは浅瀬などの形態を採ってポテンシャル流内部に突出していれば、陸岸沿いの壁面乱流境界層はこれらの突出地形の先端部より剝離して自由乱流境界層となり、その内部には規則性を持つ coherent 渦列が形成され易い。この種の自然界の Reynolds 数が非常に大きい流れの場中にみられる coherent 渦としては、例えば、鳴門の渦（参考文献 1）、あるいは黒潮によって駿河湾口に形成される渦（参考文献 3）などの観測例が報告されている。

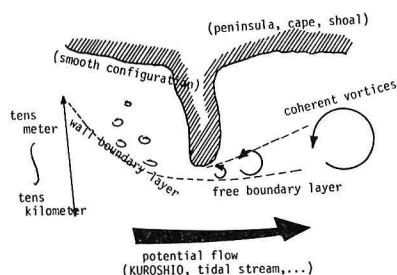
さて、通常の coherent 渦の研究においては、個々の渦を無限に長いローラーの様な回転体として把握し、その運動学的な挙動あるいはそれに伴う周囲流体の境界層内部への取り込みを渦の回転軸に垂直な面内の運動とし

て議論することがよくなされている。一方、ここで取り扱う沿岸流動中の coherent 渦は、渦の縦横比、即ち、渦の長さ（と直径との比）が極めて小さいという特徴を持つ。例えば、前述の駿河湾口の渦においては、長さ 1,000 m、直径数 km であって、縦横比は 0.1 のオーダーを採る。この様に小さい縦横比の渦に対してはもはや通常の coherent 渦に対する様な無限に続く渦管としての取り扱いには限界が生じ、海底面粗度の影響あるいは海底地形勾配の影響を新たに考慮に入れてゆく必要が生じてくる。“鏡像効果”、即ち海底地形勾配が渦の移動に対し鏡面として作用するということは、既に文献 1)、2)、3) に、その可能性が示されている。本論文は、この鏡像効果の定量化に対するモデルを提案し、水理模型実験によってその妥当性を検証するものである。

2. リモートセンシングによる観測例

2.1 駿河湾口の渦に対する鏡像効果

沿岸流動中のスケールの大きい、即ち数十m~数十km スケールの渦の運動は、リモートセンシングによってその定量的把握が可能となる。写真一1は、1979年10月21日19時44分撮像の NOAA 画像であって、駿河湾口における左旋の渦の形成の様子を示している。畠山ら³⁾は、10月20日18時26分より10月23日07時44分にわたるほぼ12時間毎の NOAA 画像を解析した結果、



図一1 coherent 渦形成の模式図



写真一1 駿河湾口における渦の生成
(10月21日19時44分の NOAA 画像)

* 正会員 工博 東京理科大学講師 理工学部土木工学科

** 正会員 理修 アジア航測(株)立地環境部環境計画課

*** 学生会員 東京理科大学大学院土木工学科

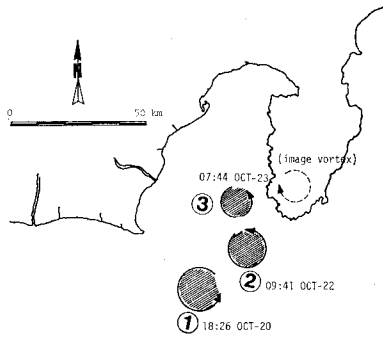


図-2 渦の移動の経時変化

図-2 に示される渦の形成および運動の経時変化を見出し、それが伊豆半島による鏡像効果によるものであることを示唆した。即ち、

〔① 10月20日 18時26分〕: 御前崎の沖合い約 30 km に位置する金州の瀬背部に、黒潮と瀬との間のシアによって左旋の渦が形成されつつある。渦内部への周囲水の巻き込みが観測される。なお、当時、黒潮は陸岸へと極めて接近した状況にあった。

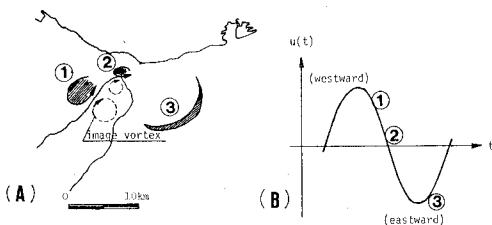
〔② 10月22日 09時41分〕: 渦が駿河湾口を横断し、石廊崎先に達する。その進行スピードは黒潮の流速の約半分である。

〔③ 10月23日 07時44分〕: 渦が伊豆半島西海岸およびその延長によって東向き移動を妨げられ、海岸沿いに北上して駿河湾内に侵入する。

この伊豆半島沿岸に沿う北上運動の水理学的機構が次の様に考えられた。即ち、左旋の実際の渦は伊豆半島西海岸越しに図-2中破線で示すところの右旋の鏡像を形成する。その結果、渦は自分自身と鏡像との間に渦対を形成し、その相互作用のもとに北上運動を行なう。これを、渦に及ぼす海底地形勾配の鏡像効果と称している。この様な黒潮によって形成されるスケールの大きい渦の形成およびそれに対する海底地形勾配の鏡像効果の可能性は、足摺岬、室戸岬、潮岬、石廊崎、野島崎、八幡岬においても又、期待される。

2.2 明石海峡の渦に対する鏡像効果

海峡を通過する潮流によってスケールの大きい渦が形成され、それに対して海底地形が鏡像効果を及ぼす例と

図-3 明石海峡における渦の移動(藤原⁴⁾による)

して明石海峡における観測例がある。図-3は、藤原⁴⁾によって得られた明石海峡播磨灘水域に形成された左旋の渦の振る舞いの経時変化を示すものである。図中、(A)は、(B)の各潮流位相の各々において期待される渦の位置を示している。即ち、西流によって淡路島西岸に形成された左旋の渦 ① は次の東流への転流に伴って海峡を東向きに横断し、大阪湾内に帯状に分布する。この場合の渦の挙動は、淡路島西岸越しの右旋の鏡像を想定すれば、実際の左旋の渦とその鏡像との間の東向きの自己誘導速度にその水理学的原因を求めることができる。潮汐表⁵⁾の巻末に記述されている明石海峡の潮流固有の特徴の概略によれば、明石海峡の淡路寄り 1/3 の部分については、潮流の挙動が、通常考えられがちな水面勾配に起因する往復流とは大いにその性質を異にする。その一つの原因として、淡路島側におけるこの様な渦の振る舞いが寄与している可能性が極めて濃いものと考えられる。

3. 渦輪モデルの提案

3.1 渦対モデルの適用とその限界

まず、通常の鏡像の考え方を適用する。海底を水平面、陸岸を鉛直壁と仮定し、円筒状の左旋の渦が陸岸より l の距離にあるものと

する。この場合、図-4に示すごとく、まず陸岸を鏡面と考えて右旋の鏡像を得た後、更に、海面および海底について順次、上方および下方へと際限なく鏡像を考えてゆくことによって、結果として $2l$ の間隔を有する円筒状の左旋・右旋の渦

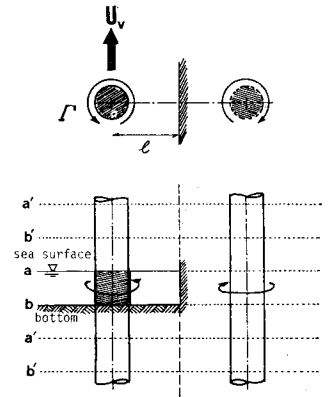


図-4 渦対モデル

からなる逆回転の渦対を得る。この渦対の自己誘導速度は周知のごとく、

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

として求められる。ここに、 Γ は渦まわりの循環、 l は渦と陸岸との間の距離である。結局、渦は図示の様に式(1)の速度をもって陸岸沿いに移動する。無論、右旋の渦に対しては移動方向は逆向きとなる。この種のモデルは、例えば Barker ら⁶⁾(1977) によって、航空機の離陸に伴う滑走路上の居残り渦の解析に使われている。

このモデルを前述の駿河湾口の渦に対して適用すれば以下のようになる⁹⁾。即ち、NOAA 画像より伊豆半島からの距離 $l=15$ km を得る。渦の形成に要する時間と単位

時間あたりに金洲の瀬より放出される渦度との積から循環 $\Gamma = 3 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{sec}$ を得る。従って式(1)よりその移動速度は $U_0 = 0.17 \text{ m/sec}$ と見積ることができる。一方、連続した NOAA 画像より、渦の北向の移動速度を求めると 0.28 m/sec であり、両者はほぼ一致している。しかしながら、渦対モデルの水平な海底・鉛直な陸岸の仮定は、本論の対象としている現実にはそぐわない。

3.2 渦輪モデルの提案

より現実に即した“渦輪モデル”を提案する。図-5に示す一様傾斜の海底面があるものとする。一般に、渦の回転は渦軸に対し垂直でなければならない。又、境界面においては、渦の回転面はその境界面と一致しなければならない。従って、渦の回転軸は境界面に垂直でなければならない。この条件を満足する曲線としては、円弧あるいはらせん等が考えられるが、

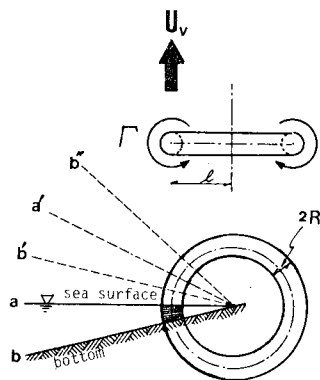


図-5 渦輪モデル

渦の縦横比が小さいということから円弧とみなす事が妥当であろう。この場合、海面および海底面越しに順次鏡像をつくってゆく事によって、結果として図示の様にドーナツ状の渦輪を得る。この時、周知の様に、渦輪は速度

$$U_0 = \frac{\Gamma}{4\pi l} \ln\left(\frac{6l}{R}\right) \quad \dots\dots(2)$$

をもって図示のごとく移動する。このモデルを前述の駿河湾口の渦に対して適用すれば次のようになる。即ち、NOAA 画像より半径 $R = 7 \times 10^3 \text{ m}$ を得、式(2)によって、 $U_0 = 0.43 \text{ m/sec}$ の値を得る。これは実測値を充分に説明し得る値である。

4. 模型実験による検証

鏡像効果の妥当性を検証することを目的として水理模型実験を行なった。図-6に実験装置と方法を模式的に示す。1.8m×2.3m、深さ 0.3m の平面水槽内部に勾配が 0, 1/50 および 1/15 の3種類の海底地形模型を設置した。図中、 x 軸は水際線、 y 軸は x 軸に垂直な鉛直壁である。この鉛直壁は実験上の制約あるいは必要から設けたものである。渦の発生は、水槽の y 軸壁面に密着した1枚の長方形板を底面に垂直に保ちつつ原点

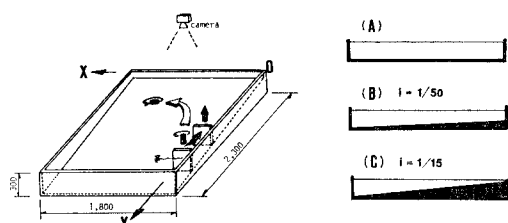


図-6 実験装置および方法

に向けて急に移動させた後、鉛直上方へと引き抜くという手順によってなされた。こうして発生した左旋の渦は、軸鉛直壁による鏡像効果および x 軸鉛直壁あるいは海底勾配による鏡像効果の両者の作用の下に図示の様な運動を呈する。渦の運動の経時変化は、水路上方 2.6m の位置のモータードライブカメラによって2秒ごとに記録される。シャッター速度を $1/4 \text{ sec}$ にすることによって、写真からの流速ベクトルの読み取りを可能としている。渦の外周は最大の流速ベクトルの囲む円として算定され、渦まわりの循環 Γ はその流速と円周との積である。

図-7に、海底勾配が (A) 0, (B) 1/50, (C) 1/15 の各場合における渦の位置変化を、各々3つの実験ケースを例にとって中心の (x, y) 座標の時間変化にして示す。実験条件の詳細は省略するが、渦まわりの循環はおおむね $500 \sim 2,000 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、渦の半径は $5 \sim 50 \text{ cm}$ 、渦

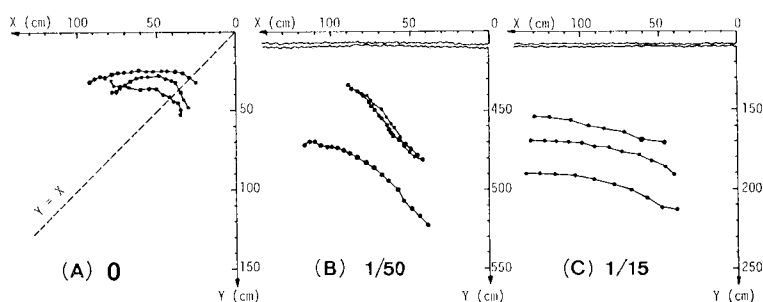


図-7 渦の軌跡(2秒毎の位置変化)

の長さは $5 \sim 20 \text{ cm}$ の範囲にある。図より以下の事が言える。

- (A) 勾配 0: 渦の運動は直線 $y=x$ に関して対称の軌跡を描く。これは、鉛直水際線 x 軸および y 軸鉛直壁の双方から全く同等の渦対モデルに相当する鏡像効果を受けるためである。
- (B) 勾配 1/50: 水際線より沖合いにある渦に対しても海底地形勾配にもついても x 軸方向の渦輪モデルに相当する鏡像効果があることが示される。 y 軸鉛直壁の効果と海底勾配の効果とがほぼ同等に効く。
- (C) 勾配 1/15: 勾配 1/50 の場合に比較して海底

傾斜面からの鏡像効果が良く効いているために、渦は x 軸に平行な移動を行なう。

これらのことから、当然の事ながら急傾斜の海底ほど鏡像効果の効き具合が著しいという事が判断される。

図-8 は、上述の (A), (B), (C) の各場合について、渦まわりの循環がほぼ $2,000 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度の渦を選び出し、循環 Γ および理論値 U_0 によって無次元化した渦の進行速度 U^* の経時変化を示したものである。ここに、 U_0 あるいは U_0^* は全て、 x 軸方向の鏡像効果を念頭に置き、理論式としては (A) に対して渦対モデル、(B) に対して渦輪モデルを適用した。循環 Γ の時間変化は、概ね単調に減少してゆく Γ が、ある時点において突発的に減少する場合があることを示している。これは、渦の減衰が逐時的なものでは無く、何段階かの突発的な減衰過程を経るものであることを示している。無次元化した渦の進行速度 U^* は殆んどの場合に $0.5 \sim 4.0$ の範囲におさまっており、理論の妥当性が示される。ちなみに、海底勾配が $1/50$ および $1/15$ の場合に対しても又、渦対モデルを適用すると、 $U_0^* = 20 \sim 30$ となり、渦対モデルが渦の移動速度に対して過小評価を与えることを示している。なお、実験に際しての縦横比はほぼ $0.2 \sim 0.5$ の範囲にあり、渦の移動速度を速度の尺度に採った場合のフルード数は $0.005 \sim 0.05$ である。一方、前述の駿河湾口の渦に対しては、これらの値は各々 0.07

および 0.005 であり、海底地形勾配は約 $1/20$ である。模型と現実との間には大略の相似が成り立っている。

5. むすび——展望

海底勾配の鏡像効果に起因するものと考えられるスケールの大きい渦の水平移動の検出がリモートセンシングによって可能となった。その水理学的モデルとして渦輪モデルが提案され、水理模型実験によってその妥当性が検証された。フロート追跡と連携したリモートセンシングの展開、コリオリ力を加味した実験的検討、渦の段階的減衰機構の検討などが今後の課題として残される。鏡像効果は、渦といういわば1つの運動形態の移動というだけでなく、それを構成する水塊の実質の運動を誘起するものであり、その定量的評価は沿岸流動研究の1つのテーマとなり得る。渦という形態を探るの水塊の移動は、いわゆるダランベールのパラドックスを回避するのである。

謝辞： 水理実験は昭和 56 年度卒業研究の一環として、生津知之（現・飛島建設）、山ノ内久（現・新潟市役所）および和田勉（現・西武建設）の3氏によって実施された。深甚の謝意を表する次第である。なお、本研究は文部省科学研究費一般研究（C）を受けて実施されつつある。

参考文献

- 1) Maruyasu, T., S. Onishi and T. Nishimura: Study of tidal vortices at the Naruto Strait through remote sensing, Bull. of the Remote Sensing Laboratory, No. 1, Science Univ. of Tokyo, 1981.
- 2) 西村 司・大西外明・田中総太郎: 自然界の流れへの coherent 構造モデルの適用と可視化手法としてのリモートセンシング, 第 24 回水理講演会論文集, pp. 221~228, 1981.
- 3) 畠山祐二・田中総太郎・西村 司: マルチテンポラルなリモートセンシングによる駿河湾の海水交換現象の観測, 海洋学会秋季大会要旨集, pp. 199~200, 1981.
- 4) 藤原建紀: 海水交換 (I) 大阪湾にトラップされた播磨灘系水, 海洋学会秋季大会, pp. 12~13, 1979.
- 5) 海上保安庁: 潮汐表第 1 巻日本及び付近.
- 6) Barker, S. J. and S. C. Crow: The motion of two-dimensional vortex pairs in a ground effect, J. Fluid Mech., Vol. 82, part 4, pp. 659~671, 1977.

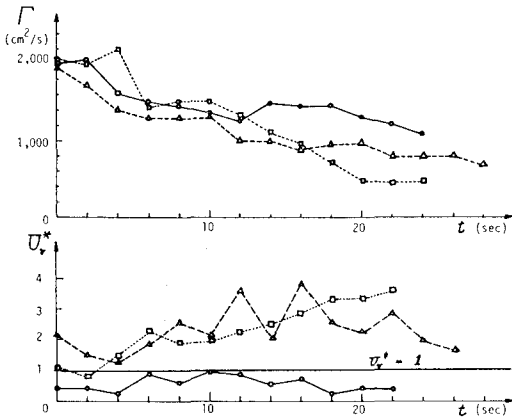


図-8 循環および渦の移動速度の時間変化