

リモートセンシングに立脚した沿岸海域自走渦の運動論的研究

KINEMATIC STUDY OF SELF-PROPELLED MARINE VORTICES
BASED ON REMOTELY SENSED DATA

西村 司*・島山 祐二**・田中総太郎***・丸安隆和****

By Tsukasa NISHIMURA, Yuji HATAKEYAMA, Sotaro TANAKA and Takakazu MARUYASU

Based on remotely sensed data from space and air, some isolated marine vortices have been found to be propelling themselves along the coastline at the Suruga Bay and at the Akashi Strait, which are generated respectively by the shear of the Kuroshio or the tidal current. A kinematic discussion has been developed about the characteristics of these self-propelled marine vortices, and following results are obtained. These self-propelled vortices accompanied by a substantial mass transport and by a coastal current have an important role in the coastal current system. The earth rotation effects support the action of the counterclockwise marine vortices which are generated at the Pacific Coast of Japan by the shear of the Kuroshio.

1. はじめに

わが国を取り巻く沿岸海域は、2種類の高速の流れをもつ。太平洋岸を洗う黒潮と瀬戸内海の各海峡を往復する潮流である。最近著しく進歩を遂げたリモートセンシング技術が、これらの高速の流れと陸岸との間のシアーによって生ずる孤立した渦の存在とその決定論的な運動との記録を可能とした。今まで誰もが目で確認することのできなかつた現象である。

1976年、著者らの研究グループは大鳴門橋の建設に関連して、鳴門の渦潮の研究を実施する機会に恵まれた。鳴門海峡の潮流は周知のように10ノット以上に達する激しい流れであり、海峡最狭部の両側から突出する陸岸との間のシアーによって生ずる雄大な渦は多くの人々の興味を誘ってきた。われわれはこの渦の生成、発達およびその沿岸海域流動に果たしている役割のメカニズム研究に初めてリモートセンシング技術を導入し、それに

よって多くの成果を挙げる事ができた¹⁾。その際、孤立した渦の運動論は解析の道具として大きい役割を果たした。

これ以来、われわれは沿岸海域の多くの衛星データを常に注意深く観察しており、それによって海峡水域と同様に黒潮と海岸線との間の海域にもシアーに基づく多くの孤立した渦が存在するを見出した。特に興味をひいたのは、これらの渦が海岸線に沿ってかなりの速度で自走するという事であった。本研究はこれらの渦を自走渦と名付け、リモートセンシングデータに立脚してその運動のメカニズムおよび沿岸海域環境における役割を評価することを試みるものである。

海洋におけるスケールの大きい孤立した渦の研究は、1970年代に入り、メキシコ湾流に伴う「リング」の研究を契機として主として外洋の中規模渦を対象として進められている(たとえばRobinson²⁾)。これに対し本研究は沖合を流れる主流と海岸線との間のシアーに基づく沿岸海域の渦を対象とする。この種の渦の運動とその沿岸海域流動における役割とを対象とするメカニズム研究は、出入りの激しい海岸地形と高速の流れとの双方をあわせもつわが国においては沿岸海域の流動環境を把握するうえできわめて実質的な意義をもつものと思われる。

* 正会員 工博 東京理科大学助教授 理工学部
(〒278 野田市山崎2641)

** 正会員 理修 アジア航測(株)立地環境部
(〒243 神奈川県厚木市船子568)

*** 正会員 工博 リモートセンシング技術センター
(〒106 港区六本木7-15-17)

**** 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部
(〒278 野田市山崎2641)

2. 研究の進め方

本研究は、従来主として陸上の静止した事物を対象として発達してきたリモートセンシング技術を海域に実在する非定常な運動状態の解明に適用しようとする。したがって、研究手法もまたおのずと従来とは異なったものとなり、本研究においては以下のような手順を踏んでいる。まず、リモートセンシングデータをもとに渦の現象の発生からこれに続く運動およびこれに誘発される沿岸海域への影響のメカニズムについて理論的意味付けを行う。次に、その考察の正当性を確かめるために沿岸海域においてすでに知られている現象と照合し、その普遍性の検証のために実験室におけるモデル実験を加える。以上の手順は、おのこのリモートセンシングを陸上に適用する際の判読およびグランドトゥルスに相当するものであり、特に、その場所に近づいて実測することの困難な海洋流動のリモートセンシングに特有の方法であると考えられる。

理論的意味付けにあたっては Lamb³⁾にみられる古典的な「孤立した渦の運動論」を沿岸海域固有の条件に合わせて使用し、力学的議論には立ち入らないこととした。これは、1つには最近発達しつつあるコヒーレント構造の研究手法を適用してゆくことを念頭に置いたためであり、あと1つには現時点における現地観測技術が渦の力学的議論を十分にサポートするまでには発達していないことを考慮したことによる。

最も簡単な渦の自走のメカニズムは渦の運動論によって以下のように表現されている。すなわち、Fig.1 (a)のように互いに逆回転する同じ強さの2つの渦が渦対をなしているものとなれば、この渦対は一樣速度

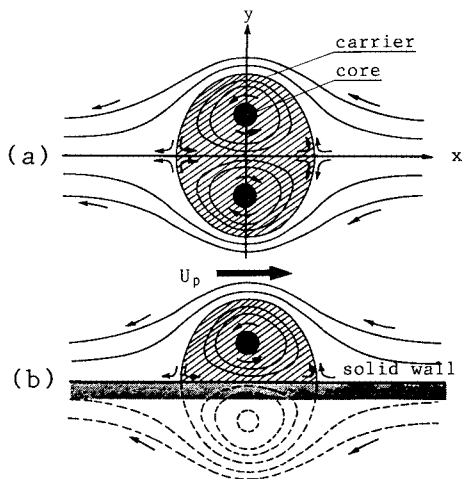


Fig.1 Self-propelled motion of vortices.;
((a) vortex-pair, (b) image effect)

$$U_p = \frac{\Gamma}{4\pi a} \dots\dots\dots (1)$$

をもって図の向きに自走する。ここに Γ は渦の強さ、 $2a$ は渦軸間の距離である。図はまたこの渦対と行動を共にする座標系からみた定常流線網を示す。一方、図 (b)のように単独の渦が剛体壁近傍に位置したとすればこの渦もまた式 (1) の速度をもって自走する。ここに a は渦軸と壁面との間の距離である。以下、剛体壁の渦に及ぼすこのような運動論的な影響を「イメージ効果」と称するが、これは、渦があたかも剛体壁背部にイメージとしての逆回転の渦があるかのような運動を呈していることによる。ここに注目すべきはこれらの自走渦が図中斜線部のキャリヤ内部の実質流体の輸送を伴うということである。

自然界におけるスケールの大きい渦の自走の運動論的研究例は、Barker ら⁴⁾の航空機翼端渦の研究にみることができる。航空機が離陸もしくは着陸するとき、滑走路上空には翼の両端から左旋・右旋の一对の渦が延びる。このとき、渦はまず渦対の自走機構によって地上に舞い降りた後、地表面からイメージ効果を受けて左右へと分離する。Barker らは地表面の近傍の渦に及ぼすこの影響を「ground effect」と名付け、これらの渦を無限に延びる平行な直線状の渦とみなしてその運動を渦運動論によって解析し、有界な水槽を用いた室内モデル実験によって検証している。

以上の渦に対し、本研究で取り扱う自走渦は2つの特色をもつ。1つは、渦の長さが極端に限られており、そのアスペクト比(渦の長さ/直径)が1あるいは0.1のオーダーと非常に小さいことである。あと1つは、流れの場が自由水面、海底面あるいは海岸線によって限られた有界なものであるということである。したがって、理論的意味付けにあたっては主に無限の流れの場として記述されている渦の運動論をこの特殊な渦の運動へと適用するために種々の仮定を設けている。このアプローチの適用性は室内モデル実験によって検証される。また、地球自転の影響は実験的に考慮に入れられる。

3. リモートセンシングデータからの自走渦の検出

(1) 黒潮によって形成される自走渦

わが国沿岸海域における代表的な高速の流れとしては、「黒潮」を挙げることができる。黒潮と太平洋岸との間のシアによって形成される自走渦の存在は、畠山ら⁵⁾の1979年10月20日から23日にかけての Landsat データおよび一連の NOAA データを用いた観測によって、駿河湾において見出された。Fig.2に代表的な2葉の NOAA 画像を示す。画像 (a) は10月20日18時26

分の状況であり、駿河湾口における左旋の渦の形成と周囲水の渦内部への巻込みの状況が示されている。一方、画像 (b) は10月23日7時44分の状況であり、渦が伊豆半島西岸沿いに北上している状況を確認することができる。Fig. 3はこれらの画像解析によって得られた渦の振舞いを時系列としてまとめたものであり、おのおの、(A) 湾口部における左旋の渦の形成と周囲水の巻込み、(B) その形成終了、(C) 伊豆半島への接近および (D) 伊豆半島西岸沿いの北上の様子を示している。

本海域の海底地形の特徴はFig. 4に示すように、両側に2つの顕著な浅瀬を有する深い湾であることにある。すなわち、御前崎沖30kmにわたって延びる浅瀬の先端には水深50mの「金洲の瀬」が突出し、伊豆半島沖合いには水深200m程度の浅瀬が延びている。

このような海底地形条件および観測当時の黒潮主流が駿河湾口にきわめて接近していたという流動条件を考慮すると、Fig. 3の左旋の渦の振舞いは以下のように説明で

きる。すなわち、(A) は接近した黒潮が金洲の瀬よりシアアを受けて左旋の渦を形成している状態、(B)、(C)、(D) はこの左旋の渦が伊豆半島およびその延長の浅瀬からのイメージ効果を受けて北上し、湾内へと呑み込まれる運動を示している。この渦の自走速度は約1ノット、その容量は 10^{11} m³のオーダーに及ぶ可能性がある。

中村ら⁶⁾は本海域における毎日の水温分布測定をとおして各種水塊の移動を把握する研究を進めており、駿河湾内に3~4日スケールの大規模な短期変動が存在することを示している。Fig. 5は、中村らによって得られた1979年10月23日の水温分布図である。23°Cの等水温線が湾口より伊豆半島西岸へと帯状に延びるとともに湾内に閉曲線をなすが、前日および翌日の観測はこのよう

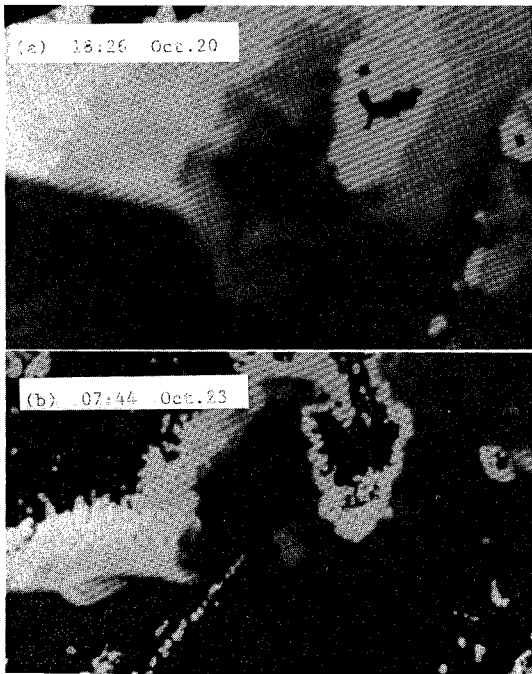


Fig. 2 NOAA imageries ; by Hatakeyama⁵⁾.

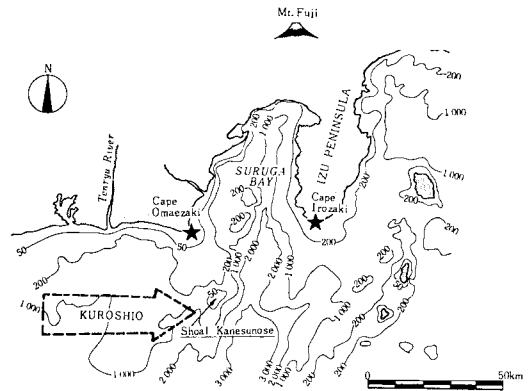


Fig. 4 Depth chart of the Suruga Bay.

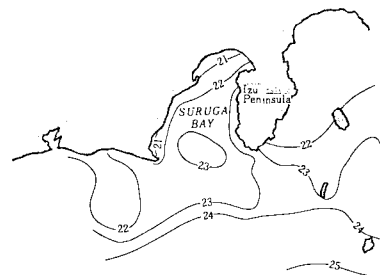


Fig. 5 Temperature chart ; by Nakamura⁶⁾.

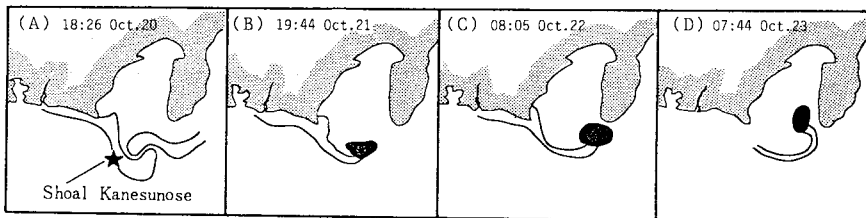


Fig. 3 Time series of the self-propelled motion of the isolated vortex. ; by Hatakeyama⁵⁾.

な分布を示していない。これらは、先の NOAA 画像によって得られた自走渦の挙動によく対応している。

もし、このような渦の自走機構が確かに存在するものとすれば、駿河湾内の海水の多くの部分が、金洲の瀬背部における左旋の渦の発生後数日の内に黒潮系統の外洋水に置き換わることとなる。すなわち、自走渦の実質水塊輸送能力は中村らのいう 3~4 日スケールの短期変動および湾内水の更新プロセスに寄与する可能性がある。

いま、黒潮流路とわが国の太平洋岸海底地形との双方を概観すると、同様の左旋の渦が豊後水道、土佐湾、紀伊水道、熊野灘そして鹿島灘において期待できる。これらの渦のみなもととなるシアアの生成点、すなわちこれらの海域の上流に位置する海岸地形突出点はおのおの、種子島、足摺岬、室戸岬、潮岬そして野島崎となる。事実、NOAA データの蓄積は、これらの海域における左旋の渦の存在とその種々の様相とを明らかにしつつある。一例として、Fig. 6 に杉村ら⁷⁾によって解析された NOAA データを示す。1983 年 4 月 25 日 03 時 14 分に得られたデータであり、足摺岬、室戸岬および潮岬に左旋の渦の形成の様子をみることができる。田中ら⁸⁾は黒潮周辺の孤立した渦の運動の追跡に十分な精度をもつ NOAA データの幾何補正の手法を開発した。これによって、黒潮の流動変動に対する渦運動論的研究が可能となっている(杉村ら⁹⁾)。

(2) 海峡水域の潮流によって形成される自走渦

わが国沿岸海域におけるあと 1 つの高速の流れとして瀬戸内海の多くの海峡を通過する潮流を挙げることができる。鳴門海峡におけるリモートセンシングの展開¹¹⁾は、通常の数 m スケールの鳴門の渦の外にそれらが集積してできる数 km スケールの渦対が形成されること、および、その渦対の Fig. 1 (a) の機構に基づく自走運動が海峡を通しての実質水塊輸送を伴い、内外水域の海水交換に大きい役割を果たしていることを示した。

一方、イメージ効果を受けて海峡水域の海岸線に沿って自走する渦の存在を明石海峡においてみる事ができる。Fig. 7 は、1972 年 10 月 24 日 10 時 06 分に得られた当海域の Landsat 画像である。潮汐表¹⁰⁾によれば当日の海峡中央部流速は

- 5:23 —— 東流より西流へ転流
- 8:42 —— 西流最強時 6.4 ノット
- 12:09 —— 西流より東流へ転流

であった。すなわち、この画像は西流へ転流後 4 時間 40 分経過後の状況を示していることとなる。画像上には西流によって淡路島東岸に沿って発達した境界層が淡路島北端より剥離して左旋の渦を形成している様子が観察される。この渦は西向きの潮流によって流されることなく淡路島北端背部水域にとどまったまま成長し、この



Fig. 6 NOAA imagery at 03:14 Apr. 25 1983.; by Sugimura⁷⁾.



Fig. 7 Landsat imagery at 10:06 Oct. 24 1972.

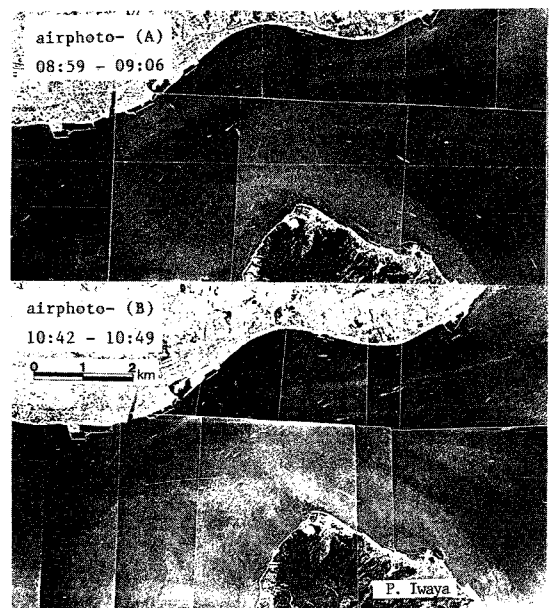


Fig. 8 Airphotos on Oct. 26 1976.; from the reference¹⁰⁾

画像の得られた時点ではその直径はすでに海峡幅のスケールに達している。

この左旋の渦の成長過程の時系列的情報は 1976 年 10

月26日日本四公団によって撮影された一連の航空写真¹¹⁾によって得られる。Fig. 8はその一例を示すものであり、おのおの左旋の渦が海面に散布したトレーサによって可視化されている。航空写真(A)は8時59分、(B)はその2時間後10時42分に撮影されたものである。

Fig. 9はこれらの航空写真より判読した流れの様子と潮汐表によって得た当日の海峡中央部の潮流流速とを比較したものである。流れの場は、海峡中央部の主流、明石海岸線に沿った壁面境界層および淡路島沿岸の境界層の3つの領域に分けることができる。淡路島沿岸の境界層は岩屋港付近より剥離して自由境界層および左旋の渦を形成する。航空写真(A)はこの左旋の渦の形成過程の初期の段階にあり、(B)はその中盤の状況を示している。(B)の時点においては渦の直径はすでに海峡幅のスケールに達している。

この左旋の渦が西流によって流されることなく淡路島北端西部水域にとどまったまま生長することは、淡路島海岸線の左旋の渦に及ぼす海峡中央部に向けてのイメージ効果を考慮することによって説明できる。この考察の正当性を裏付けるために、以下に2種類の既存の観測資料を検討する。

まず、藤原¹²⁾は、Landsat画像および航空写真の解析によって、この左旋の渦がFig. 10に示すような挙動を示すことを見出し、その運動を以下のように記述している。

すなわち、「(a) 西流時に淡路島北端に形成された反流渦は、(b) 転流時には東向きの流れの先頭を切って大阪湾へと流入し、(c) 東流時には播磨灘より大阪湾へと流入した涙滴状の水塊の外縁に沿って帯状に分布する。」と。このような左旋の渦の興味深い振舞いのメカニズムは、それに及ぼす淡路島西岸のイメージ効果を考慮することによって説明することができる。すなわち、渦は海峡最狭部に向かって自走するために、西流時には淡路島西岸水域にとどまったまま発達しつつ転流を待ち、転流時には東流に先んじて海峡を通過するのである。

一方、潮汐表¹⁰⁾には明石海峡の潮流状況に関して以下

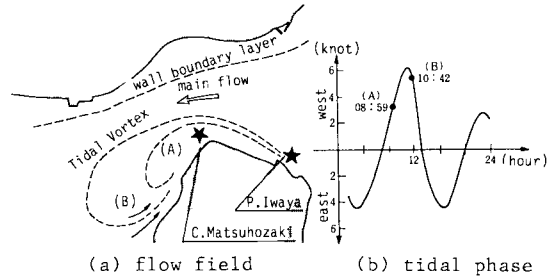


Fig. 9 Growth of the tidal vortex.

の記述がみられる。すなわち、「主流は海峡の中心線上で海峡の幅の約3分の1の幅の区域である。この線の北側は北に向かうに従って次第に流速を減じ、中央主流と潮時の差は少ないが、主流の南側は激潮を生ずる所があり、松帆崎付近は比較的流速が大きく、潮時は中央主流より20~50分早い。」と。これらの記述はFig. 9に示す海峡北側水域における壁面境界層の存在、淡路島側水域における境界層の剥離と左旋の渦の形成、それによる主流幅の減少および転流に先だつての左旋の渦の海峡通過というようなりモートセンシングによって初めて得られる情報をもとに統一的に説明できるのである。

4. 自走機構の運動学的解析

リモートセンシングによって把握された自走渦は瀬戸内海海峡水域あるいは太平洋岸のいくつかの岬の近傍の海況に大きい影響をもつことが予測された。しかしながら、リモートセンシングデータのみによってはこれらの渦によってもたらされる諸現象を解明することは困難である。そこで、fluid mechanics的な解析を加えることによってリモートセンシングデータのもつ意味とそのもたらす効果とに普遍性を与える必要がある。ここでは、特にイメージ効果によって自走する渦を対象として古典的な渦運動論に立脚した解析を行う。

(1) 渦運動論の適用

潮流や黒潮などの高速の流れに直面する海岸線においては、海底は一般に沖合へと急に落ち込む地形を有して

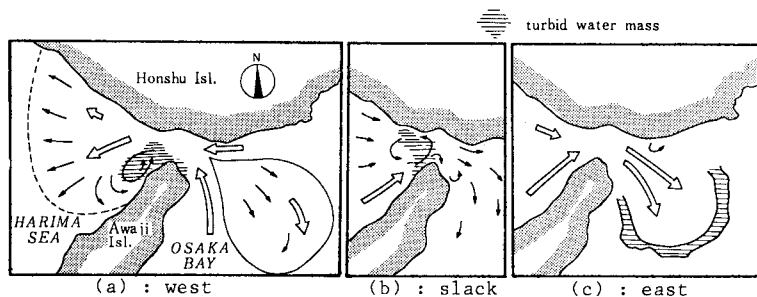


Fig. 10 Motion of the counterclockwise tidal vortex; from Fujiwara¹²⁾.

いる。そこで、第一次の近似モデルとして Fig. 11 (b) のように水平な海底面および鉛直な海岸線を想定する。この仮定のもとで渦の自走機構を表現する「渦対モデル」が以下のようにして得られる。

一般に渦による水粒子の回転面は渦軸に垂直であるから、この地形条件のもとで海岸線近傍の渦を海面と海底とに直交する鉛直回転軸と仮定する。境界を剛体壁とみなし境界層の発達を無視すれば、プラントル¹³⁾によって、この流れは図 (a) に示す無限に続く完全流体中の渦対の場を、それを横切る流体運動のないような3つの平面 α, β, γ によって切り出したものと同等になることが示される。したがって、無限空間の渦対についてのポテンシャル理論の記述は、そのまま直接に沿岸海域の有界な自走渦のメカニズムの説明に適用できることになる。

こうして得られる自走渦のまわりの定常流線網を Fig. 12 に示す。これは自走渦とともに移動する座標系から見たものであり、このとき、以下のことが結論される。すなわち、

- (ア) 海岸線近傍に位置する孤立した渦は、海岸線からイメージ効果を受けて海岸線に沿って自走する。
- (イ) 海岸線に立って観測するとき、右旋の渦は左方へ、左旋の渦は右方へと自走する。
- (ウ) 渦の自走速度は、2. の式 (1) によって計算される。ここに a は渦軸の海岸線からの距離である。
- (エ) 渦の自走にはただ単なる渦運動という運動形態の位相のみならず、実質水塊の輸送が伴う。
- (オ) 実質水塊輸送のキャリヤは渦コアおよび周囲水塊によって構成され、海岸線に沿って $3.5a$ 、沖合いに向かって、 $2a$ の範囲に及ぶ。
- (カ) 渦コアの輸送は Helmholtz の渦定理によって説明できるが、周囲の水塊の輸送はイメージ効果そのものに起因する。

(キ) 海岸線に沿って沿岸流が発生する。その最大流速は自走速度の約4倍である。

以上のように、渦対モデルは最も簡略化されたものであるにもかかわらず、イメージ効果に起因する自走渦の特性本質をよく表現している。

われわれの対象としている海岸線近傍の渦をさらによく表現する「渦輪モデル」を Fig. 13 に示す。いま、図 (b) のように海底が水際線より沖合に向かって一様に傾斜しているものと想定する。渦軸は海面と海底とに直交するからその最も簡単な場合として、渦軸を水際線を中心とする円弧とみなすものとする。このとき、この有界な渦のまわりの流れは図 (b) に示す無限の完全流体中の渦輪の場をそれを横切る運動のないような2つの平面 α, β によって切り出したものと同等になることが先の渦対

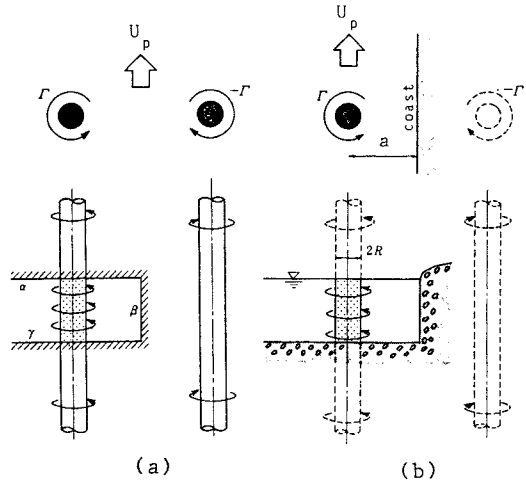


Fig. 11 Vortex-pair model; ((a) vortex-pair, (b) image effect of the coast)

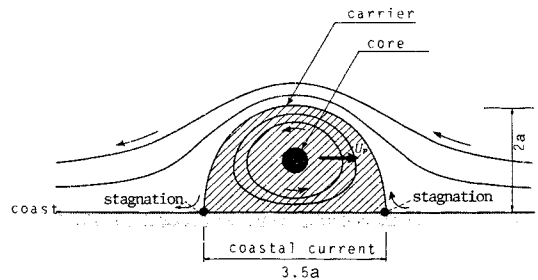


Fig. 12 Streamlines of a self-propelled marine vortex; based on the vortex-pair model.

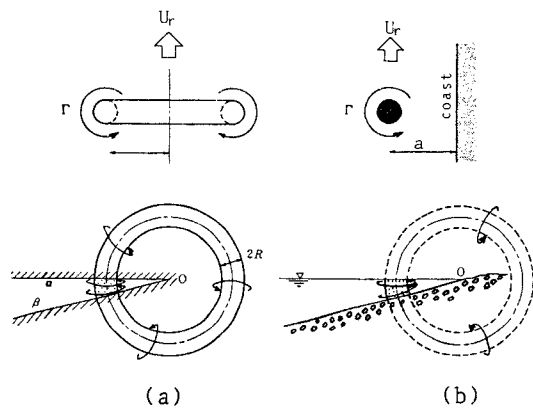


Fig. 13 Vortex-ring model; ((a) vortex-ring, (b) image effect of the coast)

モデルの場合の延長として期待できる。渦輪の運動もまた、渦運動論に詳しい記述があり、それをそのまま沿岸海域の自走渦に適用することができる。

渦輪モデルによって得られる自走渦の性質は渦対モデルによって得られるものと基本的には同じであるが、自

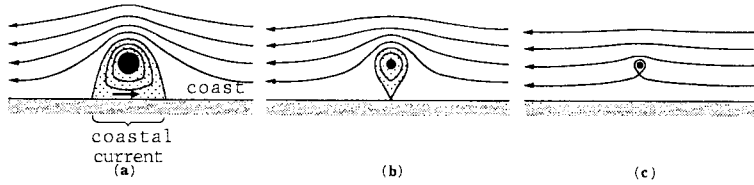


Fig. 14 Streamlines of a self-propelled marine vortex ; based on the vortex-ring model.

走速度および実質水塊輸送の形態が異なる．すなわち、自走速度は、

$$U_r = \frac{\Gamma}{4\pi a} \log \frac{6a}{R} \dots\dots\dots (2)$$

と表わされ自走速度がコアの半径 R の関数である．

Fig. 14 に渦と行動を共にする移動座標系からみた定常流線網を示す．図中、(a) においてはコア径が大きく自走速度は小さいもの水塊輸送のキャリヤは海岸線に達し、沿岸流をみる事ができる．一方、(c) においてはコア径が小さく自走速度は大きいもののキャリヤは渦コア近傍に限られ、沿岸流は生じない．両者の中間に位置する (b) に対応する R/a は約 1/100 である．

(2) 渦輪モデルの実験的検証

以上の運動論的モデルにおいては、有界な渦周りの運動に無限に続く渦の運動論を適用しようとするためにいくつかの仮定を設けている．そこで、これらの仮定の妥当性を裏付ける目的でやさスケールの大きい水理模型実験を行う．実験装置および方法の概要を Fig. 15 に示す．20 m×30 m の平面水槽内に一様勾配 1/20 の海底地形模型を設置した．自走渦の発生は鉛直側壁に接して置かれた幅 1.8 m の渦発生板によって行われた．この渦発生板はまず β 氏によって所要の強さとコア径をもつ渦が形成されるまで海岸線に向かって引き寄せられたうえで α 氏によって水面上に引き上げられる．この操作によって生じる左旋の渦の直径は 1~3 m、海岸線からの距離は約 6 m、背丈は約 30 cm、アスペクト比は約 1/10、 R/a は 1 のオーダーである．これらの幾何学的諸元は沿

岸海域の原型の自走渦とほぼ相似である．一方、運動学的相似は無次元時間をも原型と等しくとることを要求する．この場合、時間の代表スケールが前もって決まらないために運動学的相似もまた同時に成り立つ．

流れおよび実質水塊輸送状況の目視観測を目的として渦コアと周囲流体とが微小の浮子によって可視化され、水面上方のカメラによる連続写真撮影が行われた．自走速度 U_0 および渦軸の海岸線からの距離 a は実測された．

測定の精度向上のために 2 種類のセンサーによる水量の直接測定がなされた．渦内部の流速分布測定を目的として渦軸の自走路上にプロペラ流速計を固定した．自走路上の流速は海岸線に平行な自走成分とそれに垂直な渦の回転成分との和である．ここでは流速計出力が回転成分のみを表わすようにプロペラ回転軸を海岸線に垂直に固定した．渦内部の静水圧分布が同じく渦軸の自走路上に固定した水位計によって測定された．渦内部の鉛直流速成分を微小と仮定すると水位計からの出力は渦内部の静水圧分布を表わすこととなる．これら 2 つのセンサーからの時系列出力はペンレコーダによって 1 枚の記録紙上に記録された．

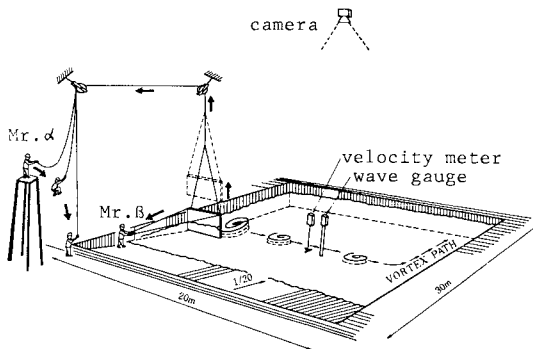


Fig. 15 Apparatus and methods.

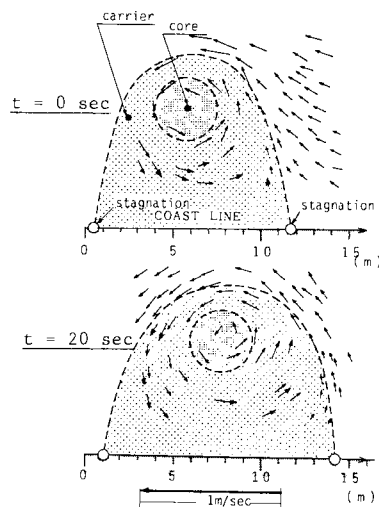


Fig. 16 Photo data of velocity distribution and of substantial mass transport.

実験は計17ケース行われた。連続写真上に同一パターンのトレーサの移動を追跡していくことによって Fig. 16 に示すような一連のベクトル図が描かれた。图中、コアの位置変化は絶対座標によって示してあり、流速ベクトルは自走速度の実測値 U_0 をもって移動する座標系からみたものである。また、図上には写真判読によって剛体回転と認められる渦コアを示している。これらのベクトル図および写真判読をもとにコア径およびコア外縁の流速の第1の実験値である R_1, u_1 が求められた。

流速計および水位計からの時系列出力の一例を Fig. 17 に示す。图中 (a) は回転流速の分布を示し、零流速の点はこの時点において渦軸が流速計設置点を通じたことを意味する。渦コアの外縁は最大流速の点 α, β として表わされ、両者間の直線状の流速分布はこの部分が剛体回転をなすことを意味する。この流速分布からコア径およびコア外縁流速の第2の実験値 R_2, u_2 が次のように求められる。すなわち、

$$R_2 = \frac{1}{2} U_0 \cdot \Delta t, \quad u_2 = \frac{1}{2} (u_\alpha - u_\beta) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 U_0 は自走速度の実測値、 Δt は2点 α, β 間の時間差、 u_α, u_β は α, β 点における流速である。一方、图中 (b) の水位計出力においては、最大凹み Δh の点

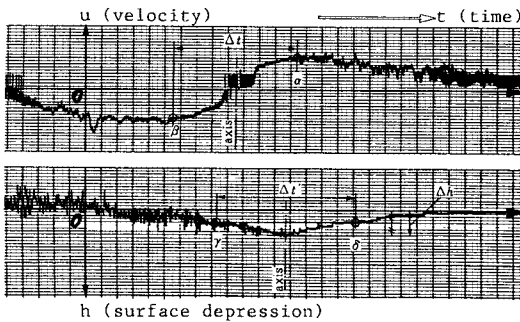


Fig. 17 Outputs from velocity meter and from wave gauge.

がこの時点における渦軸の水位計通過を意味する。いま、2点 γ, δ を凹み $\Delta h/2$ の点とすれば、ランキン渦近似を適用することによってコア径およびコア外縁流速の第3の実測値が次のように求められる。すなわち、

$$R_3 = \frac{1}{2} U_0 \cdot \Delta t', \quad u_3 = \sqrt{g \cdot \Delta h} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\Delta t'$ は2点 γ, δ 間の時間差である。

以上のコア径およびコア外縁流速の3種類の実測値から、自走速度の3種類の計算値が渦輪モデルによって計算された。すなわち、

$$U_i = \frac{\Gamma_i}{4\pi a} \log \frac{6a}{R_i} = \frac{R_i u_i}{2a} \log \frac{6a}{R_i} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 a は渦軸の海岸線からの距離の実測値である。これらのおおのこの計算値と実測値との比較を Fig. 18 に示す。横軸は実測値、縦軸は計算値である。图中の破線にプロットが乗るとき、そのデータは渦輪モデルをよく裏付けているといえる。ベクトル図からの計算値 U_1 は実測値 U_0 とおおむね対応しているが、流速分布からの計算値 U_2 および静水圧分布からの計算値 U_3 は実測値よりもやや低い評価を与える。この傾向はセンサーを正確に渦軸の自走路上に設定することが困難であったという実験上の制約に起因する。

トレーサの移動の目視観測によれば、これらの自走渦においてはキャリヤ外縁からの流線の剝離が生じることなく、渦の自走および実質水塊輸送がきわめて効率よく遂行された。Fig. 16 中のコアは、連続写真上に剛体回転として観察される部分であり、キャリヤの外縁は海岸線に目視観測された2個のよどみ点を結ぶ1本の流線である。本実験における R/a は少なくとも $1/10$ であり、ほとんどがこの長円形のキャリヤを示した。以上の実験的事実は、水塊が自走渦という運動形態をとることによってグランベールの背理を回避していることを示すものである。

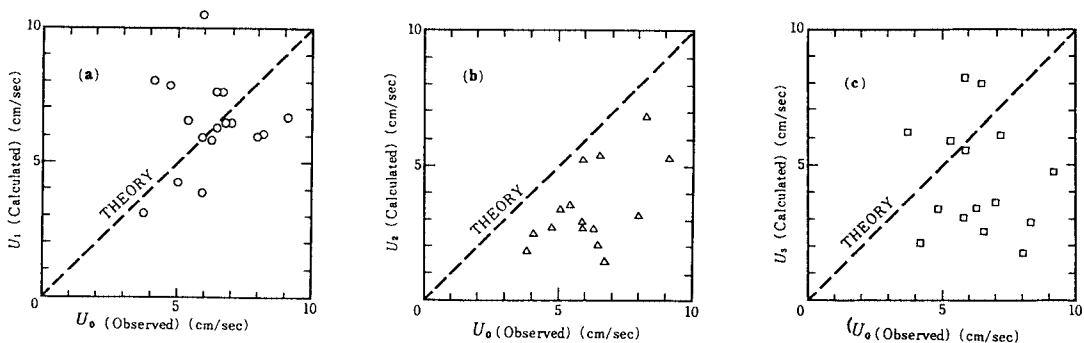


Fig. 18 Comparison of the calculated self-propelled speed with the observation ; ((a) : calculated from photo data, (b) : from velocity data, (c) : from pressure data)

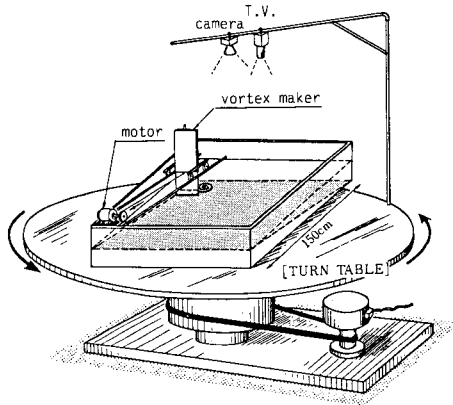


Fig. 19 Apparatus and methods.

(3) 地球自転の影響の実験的評価

対象とする海洋流動の時間スケールが数日のオーダーに及ぶようになると、地球自転の影響を考慮する必要がある。地球自転は本来は運動論的な要素であるにもかかわらず従来の海洋流動研究においてはコリオリ力という仮想の力として考慮されるのが通常である。しかしながら、ここで解析の道具として用いている渦運動論においては地球の自転は考慮されていないので第2の実験を行ってその影響を評価した。

Fig. 19に実験装置および方法を示す。直径2 mのターンテーブル上の1.5 m平方の水槽内において水平海底面および1/20 勾配海底面について実験を行った。渦の発生方法は前実験と同様であるが渦発生板の駆動はモーターを用いる。実際海域の自走渦との間の幾何学的相似はアスペクト比および R/a によって評価された。これらの値はおのおの0.1 および1である。一方、運動

学的相似は無次元時間 T^* によって評価された。すなわち、

$$T^* = \frac{T_v}{T_e} \dots\dots\dots (6)$$

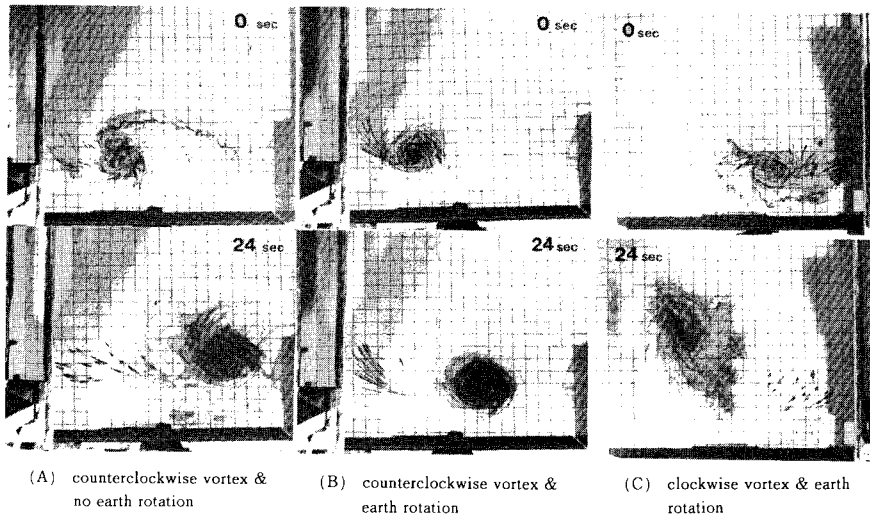
ここに、 T_v は渦の自転周期、 T_e は地球の自転周期である。本実験においては黒潮によって生ずる自走渦を想定して T^* を0.1に設定した。なお、実験の際の地球自転は北半球を想定し、回転周期を90秒としている。実験は水平および1/20 勾配の海底地形のおのおのに対し、(A) 地球自転なしの条件下における左旋の渦、(B) 地球自転下の左旋の渦、および(C) 地球自転下の右旋の渦の3ケースを想定した。渦の形成時に染料によってコアを可視化し、ターンテーブルに固定したカメラによって連続撮影した。水平海底面に対する実験結果の一例をFig. 20に示す。各実験ケースにおける渦の挙動の概略は以下のとおりとなる。

(A)：地球自転なしの左旋の渦は形成終了後、海岸線に沿って自走する。自走速度の実測値は連続写真から求めた渦の強さと海岸線からの距離とをもとに渦対モデルによって評価された計算値によく一致した。

(B)：地球自転下の左旋の渦は同様に式(1)の自走速度で海岸線に沿って右方へと移動すると同時に海岸線へと接近する運動を呈する。特に着目すべきは(A)と比較して渦運動がより長い時間安定して続くということである。

(C)：地球自転下の右旋の渦は海岸線に沿って左方へと自走すると同時に沖合へと押し出され、渦の自走、渦自体の安定性の双方が損なわれる。

以上のように地球自転は左旋の渦の自走機構およびその存在の持続性を強化するが、一方、右旋の渦のそれら



(A) counterclockwise vortex & no earth rotation (B) counterclockwise vortex & earth rotation (C) clockwise vortex & earth rotation

Fig. 20 Experimental results.

を弱化する作用をもつということが出来る。

一様勾配海底地形条件下における実験結果もまた、基本的には上と同様である。ただし、自走速度としては渦輪モデルに基づく式(2)が適用される。一様勾配の効果は、左旋の渦の安定化と海岸線への接近および右旋の渦の不安定化と沖合への離脱の傾向を助長するように働く。これは、地球自転と水深変化との複合による相対渦度の生成に起因するものと思われる。これらの結果はわが国太平洋岸に黒潮との間のシアーによって形成される左旋の渦の安定性に地球自転が大きい役割を果たしていることを示すものである。

5. むすび

本論文は、黒潮あるいは潮流と海岸線との間のシアーによって形成される自走渦に対してリモートセンシングデータに立脚した運動論的解析を施したものである。まず、沿岸海域の渦の自走というマクロスケールの水塊移動がリモートセンシング技術の導入によって有効に観測されることを、駿河湾および明石海峡における観測例によって示した。次に、海岸線に沿う自走渦について渦運動論的解析を施し、渦の自走、渦に伴う実質水塊輸送、沿岸流などの発生メカニズムを明らかにした。これらの解析結果は水理実験によって検証され、また、黒潮に伴ってわが国太平洋岸に発生する左旋の渦の自走機構が地球自転によって促進されることは実験的に示された。

水理実験に際して、木ノ瀬紘一博士(農業土木試験場)には多大なご協力を賜った。Fig. 6のNOAA画像は、杉村俊郎氏(リモートセンシング技術センター)の提供による。明石海峡の流況については、藤原建紀氏(中国工業技術試験所)のご教示を得た。深甚の謝意を表す。

本研究は文部省科学研究費(No. 56550356)を受けて実施された。

参 考 文 献

- 1) Maruyasu, T., Onishi, S. and Nishimura, T. : Study of tidal vortices at the Naruto Strait through remote sensing, Bull. of the Remote Sensing Labo., Remote Sensing Series No.1, Science University of Tokyo, 1981.
- 2) Robinson, Allan R. : Eddies in Marine Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1983.
- 3) Lamb, H. : Hydrodynamics, 6th ed., Cambridge University Press, pp. 202~249, 1975.
- 4) Barker, S.J. and Crow, S.C. : The motion of two dimensional vortex pairs in a ground effect, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 82, part 4, pp. 659~671, 1977.
- 5) Hatakeyama, Y., Tanaka, S. and Nishimura, T. : A formation process of an oceanic vortex analyzed by multi-temporal remote sensing, Proceedings of the 15th ERIM, pp. 1173~1185, 1981.
- 6) 中村保昭・千葉 仁 : 伊豆諸島北部周辺海域における海況の短期変動, 静岡水産試験場報告第15号, pp. 1~7, 1981.
- 7) 杉村俊郎・田中総太郎・畠山祐二 : 1983年春の日本周辺海域の流動, 1983年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 25~26, 1983.
- 8) 田中総太郎・杉村俊郎・西村 司・二宮 泰・畠山祐二 : NOAA-6/AVHRR データによる黒潮流動ベクトル図の作成と海洋渦および短周期蛇行に関する考察, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 2, No. 3, pp. 11~30, 1982.
- 9) 杉村俊郎・田中総太郎・畠山祐二・西村 司 : 1983年秋の日本周辺海域の流動, 1984年度日本海洋学会春期大会講演要旨集, pp. 282~283, 1984.
- 10) 海上保安庁 : 潮汐表第一巻日本及び付近.
- 11) 中国工業技術協会 : 現地資料から見た明石海峡付近の海水流動, 明石海峡における流跡の研究報告書別冊, p. 85, 1977.
- 12) 藤原建紀 : 海水交換(1), 大阪湾にトラップされた播磨灘系水, 1979年度日本海洋学会秋期大会講演要旨集, pp. 12~13, 1979.
- 13) L. プラントル(白倉昌明・橋藤雄監訳) : 流れ学(上), コロナ社, p. 84, 1972.

(1983. 5. 31・受付)