

回転系乱流場特有の組織的渦構造と大阪湾の恒流

西村 司* ・ 小林智尚** ・ 田附正文***

田中総太郎****, 杉村俊郎*****, 畠山祐二*****

1. 潮流乱流場と恒流

本論文は、大阪湾の潮流乱流場に卓越する組織的渦構造を衛星によって検出し、回転系乱流場特有のその決定論的振舞いをもとに、従来は現象論的に取り扱われてきた恒流の物理的実体を明らかにするものである。

(1) 衛星による可視化

一般に、乱流場の構造を議論するには、流れの可視化から出発することが多い。本論文は、その手段として極軌道地球観測衛星を採用する。図-1 は、1987年12月23日10時28分に収集された MOS-1/MESSR のハイゲイン可視データに、大阪湾の潮流乱流場の組織的渦構造に焦点を絞った画像強調処理を施したものである。大阪湾は、明石海峡および友ヶ島水道から流入した潮流に起因する大小の潮流渦の組織的渦構造によって支配されていることがわかる。瀬戸内海の潮流渦の現地調査研究は、衛星データ利用の本格化した1970年代半ば以降急速な進展を見せてきた(西村, 1986; 藤原, 1990)。いずれも、湾や灘における潮流渦の重要性と、その供給源としての海峡の役割を鮮明にしている。

(2) 大阪湾の恒流とその現象論

一方、従来から、海上観測をもとに、この大阪湾には恒流の存在が指摘されている。たとえば藤原(1989)は、収集期間半月以上の流速資料をもとに、図-2 のような恒流図を描き、その主成因は地形性渦流であるとした。さらに、この恒流に対する河川水の密度流効果(石川ら, 1979; 上嶋, 1990)や風の吹送流効果(柳ら, 1979; 高橋ら, 1987・1988)なども論じられてきている。

しかし、この大阪湾の恒流なるものは、現段階では観測結果にもとづいた現象論的な概念に過ぎず、従来の瀬戸内海地形模型実験の報告をみても、図のような恒流が再現された例は見当たらない。本論文では、大阪湾の恒流の物理的実体が衛星によって可視化された、回転系潮

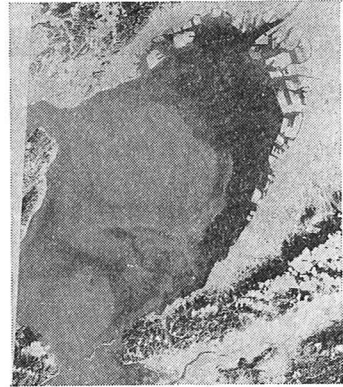


図-1 大阪湾の潮流乱流場内部の組織的渦構造 (1987年12月23日10時28分の MOS-1/MESSR 画像)



図-2 大阪湾の恒流図 (藤原 (1989) による)

流乱流場特有の決定論的な渦構造であることを示す。

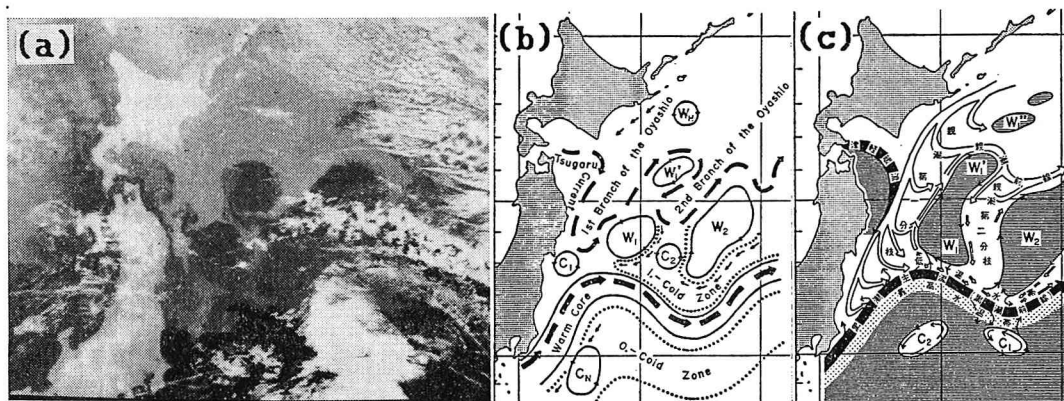
(3) 回転系乱流場としての取り扱い

本論文の出発点は、衛星によって得られた潮流渦構造の可視化画像と海上観測から得られた恒流図との、双方の流れの形態の類似にある。だが、形態の類似が物理的実体の同一に直結するわけではなく、双方の関係を示すには、まず実体の明らかな潮流渦構造の定量的測定が必要となる。しかしながら、この数時間スケールの現象を十数日回帰の極軌道衛星によって把握するのは難しく、また、静止軌道衛星は空間分解能の限界を持つ。ここに、回転系乱流場の本質としての決定論的性格に着目した本論文の意義が生じてくる。

2. 回転系乱流場の決定論的本質

従来、潮流乱流場の研究においては、地球自転の効果

* 正会員 工博 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科
 ** 正会員 東京理科大学助手 理工学部土木工学科
 *** 東京理科大学大学院 土木工学科
 **** 正会員 工博 (財)リサーチセンシング技術センター 主任研究員
 ***** 正会員 (財)リモートセンシング技術センター 研究員
 ***** 正会員 アジア航測(株) コンサルタント事業部 技術部長



図—3 地球自転によって強化された組織的渦構造の決定論的側面と恒常的な流れとの相互関係 ((a) 瞬間的乱流場 (b) Kawai (1955) による全体平均 (c) Masuzawa (1957) による恒流の認識)

はさほど考慮に入ってこなかった。だが、乱流場の1つの本質は、それが回転系にある場合、きわめて決定論的側面が強化されることである (Nihoul ら, 1989)。

(1) 決定論的渦構造と恒常の流れ

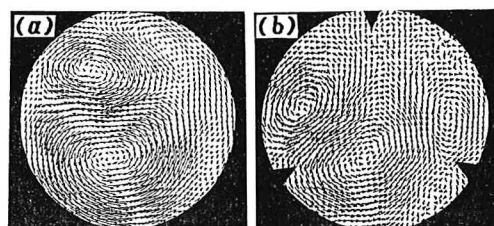
より一般に、回転系乱流場とその上の恒常的な流れとの1つの相互関係が、筆者らによって提案されようとしている (Nishimura ら, 1992)。図—3 は、親潮海域における海洋乱流場に対して、それぞれ異なる観点から得られた3枚の絵から構成されている。1つは、NOAA/AVHRR データに、海洋乱流場の組織的渦構造に焦点を絞った強調処理を施したものである。一方、他の2枚の絵はそれぞれ、海上観測を総合した Kawai (1955) の流動模式図、および Masuzawa (1957) によるその修正図である。

着目すべきは、約40年前の Kawai (1955) の絵が、NOAA 画像に極めて類似した形態の流動図を描いていることである。これは、第1の絵のような渦構造が、この海域に決定論的に卓越していることを意味し、それは筆者らの毎日の NOAA 直接受信解析によっても確認されている (西村, 1986)。そこで、日時の異なった多くの海上観測のいわば全体平均を採ったとしよう。このとき、第2の絵のような、NOAA 画像に類似の模式図が描かれるであろう。

さて、ここに、海洋におけるいわゆる河川のような「海流」の実在を信じる人が、同一の流れを概念的に解釈したとしよう。このとき、2年後の Masuzawa (1957) にみるような修正が行なわれる。すなわち、いわゆる「恒常的に存在する親潮」なるものは、現象論的概念であり、その物理的実体は海洋乱流場の組織的渦構造に全体平均操作を施して得られる全体平均乱流場に他ならない。

(2) 海洋乱流場の回転系模型実験

海洋乱流場を可視化できる衛星にも、流れの時系列的測定には不向きな点がある。可視赤外センサによっては



図—4 回転系乱流場の組織的渦構造に關した模型実験。いずれも計6つの実験結果の全体平均乱流場。

大気妨害が避けられず、極軌道衛星によっては時間分解能が現象の迅速さに対応できない。ここに、地球自転を考慮した、回転系模型実験の必要性がでてくる。

図—4 に、1つの抽象化された基礎実験例を示す。親潮海域や大阪湾を直径 60 cm の円形水槽に単純化し、ターンテーブルに乗せて地球自転効果を与え、水槽底面を傾けて β 効果を再現する。乱流エネルギーの注入には不明の点が多いので、初期条件として代表渦スケールが水槽直径より2オーダー小さい格子乱流場を与える。

ある時間経過の後、当初与えた格子乱流場から、2次元な組織的渦構造が立ち上がる。実験 (a) においては、 β 効果を惑星のそれと解釈すれば西岸強化流の出現を示し、地形性のそれと解釈すれば海岸線に対する渦構造の圧迫を意味する。実験 (b) においては、海岸線から突き出した岬が海域内部にまで1つのギャボックスのような組織的渦構造を決定する。同時に、それぞれ海流や沿岸流として、現象論的な恒流を現出している。

3. Rossby/Froude 相似模型実験

まず、衛星に可視化された回転系乱流場の組織的渦構造こそ、大阪湾の恒流の物理的実体であるとの仮説をたてる。次に、3次元5万分の1縮尺 Rossby/Froude 相似模型実験を行なって原型に相似の潮流渦構造を実験室内に再現し、地球自転の効果を示す。さらに、瞬間乱流

表-1 本実験と既往の実験との諸元の比較

実験	諸元	水平縮尺	鉛直縮尺	時間縮尺	考慮した要因							
					潮流	密度成層	渦構造	恒流	F_r 相似	R_o 相似	地球自転	衛星
石川ら(1979)		1/2,000	1/159	1/159	○	○	×	○	○	×	×	×
今本ら(1988)		1/5,000	1/500	1/224	○	×	×	○	○	×	×	×
上嶋ら(1990)		1/2,000	1/159	1/159	○	○	×	○	○	×	×	×
本論文(1992)		1/50,000	1/1,000	1/1,581	○	×	○	○	○	○	○	○

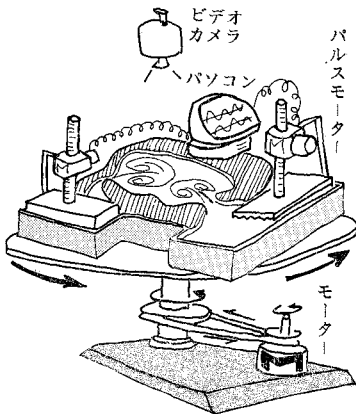


図-5 回転系模型実験の概要

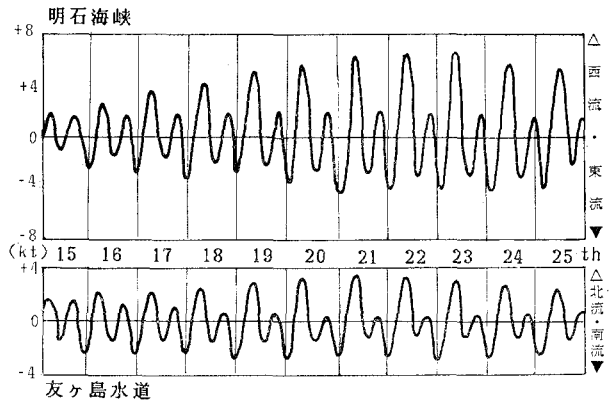


図-6 明石海峡／友ヶ島水道の潮流 (1987年12月)

場のベクトル測定結果の全体平均をとって恒流の流れ場を求め、原型との比較によって当初の仮説を検証する。

(1) 実験のデザイン

表-1に、本実験と既往の大阪湾縮尺模型実験との比較を示す。衛星によって可視化された組織的渦構造の再現に焦点を絞ったこと、Froude 相似と Rossby 相似との両立を図ったことに特徴を持つ。図-5に、実験装置の概要を示す。ターンテーブルの直径が2mであることから水平縮尺を1/50,000と決定した。表面張力の影響を考えて歪み率を50とし、鉛直縮尺を1/1,000とした。Froude 相似則より時間縮尺が1/1581と計算され、模型の1日が56秒となる。また、Rossby 相似則よりターンテーブルには周期98秒の回転をあたえれば良い。縮尺をみると、この回転系模型実験が他と比べてきわめてコンパクト、かつ本質的に異なるものであることがわかる。

(2) 装置と方法

大阪湾に卓越する流れは、明石海峡と友ヶ島水道を日に2往復する潮流である。図-1のMOS-1画像の状況を模型上に再現するために、その時点より8日間さかのぼり、1987年12月15日～25日の潮流を模型上に忠実に再現した。図-6に、水路部「潮汐表」から読みとった、原型のそれぞれの海峡の潮流流速を時系列として示す。

潮流は、それぞれ明石海峡近傍の播磨灘および友ヶ島水道近傍の紀伊水道に設置された2機のパソコン数値制御／パルスモータ駆動のプランジ型起潮機によって再

現された。まず、図-6の時系列がパソコンに入力され、その積分によってそれぞれの海峡の起潮機のプランジの駆動量が時系列として計算される。次に、この時系列から作製されたパルスが駆動用パルスモータにリアルタイムに供給され、起潮機の運転と制御が行なわれる。

実験は、まずターンテーブルを約30分間回転させて湾内に剛体回転を実現したのち起潮機によって潮流を再現し、染料による流れの可視化実験によって組織的渦構造の再現性を検証し、水面に散布したアルミ粉粒子の追跡による瞬間流速ベクトル場の測定を行なう。データは、画像データとして頭上のTVカメラに記録され、パソコンによって画像処理されて乱流場が測定される。

(3) 組織的渦構造の再現性

図-7に、流れの可視化実験の1例を示す。画像収集時刻を図-1のMOS-1画像と同じくとり、それぞれ、ターンテーブルを反時計廻り、回転なし、時計廻りに回転して、北半球、地球自転なし、南半球の状況が現出する。画像には、1日前からの播磨灘系水および紀伊水道系水の挙動が染料によって可視化されている。

北半球においては、明石海峡および友ヶ島水道の潮流が湾内に右転／左旋の渦対を形成し、MOS-1画像と相似の組織的渦構造が現出する。自転なしの場合、海峡からはむしろジェット状の流れが観察され、すでに相互の混合が生じている。一方、南半球においては、渦構造は

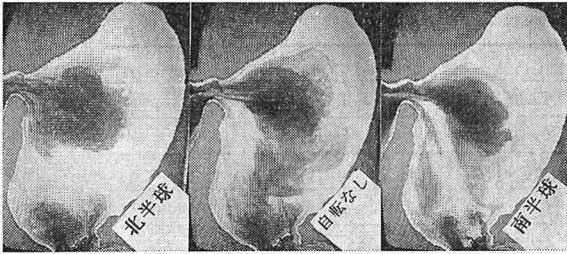


図-7 渦構造の再現性検証のための可視化実験

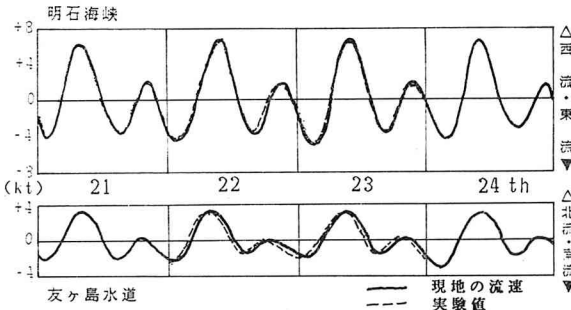


図-8 明石海峡/友ヶ島水道における潮流の再現性 (友ヶ島水道の位相のズレは実験的制約による)

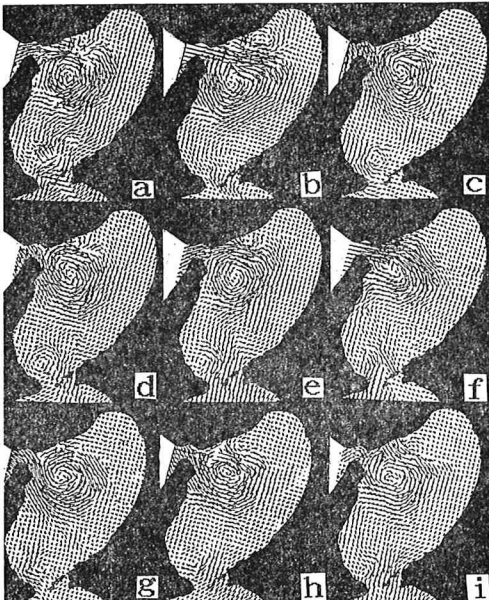
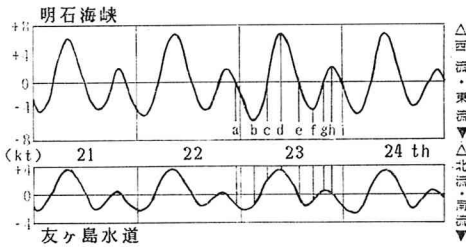


図-10 乱流計測によって得られた瞬間乱流場 (上: 計測時刻, 下: 瞬間乱流場)

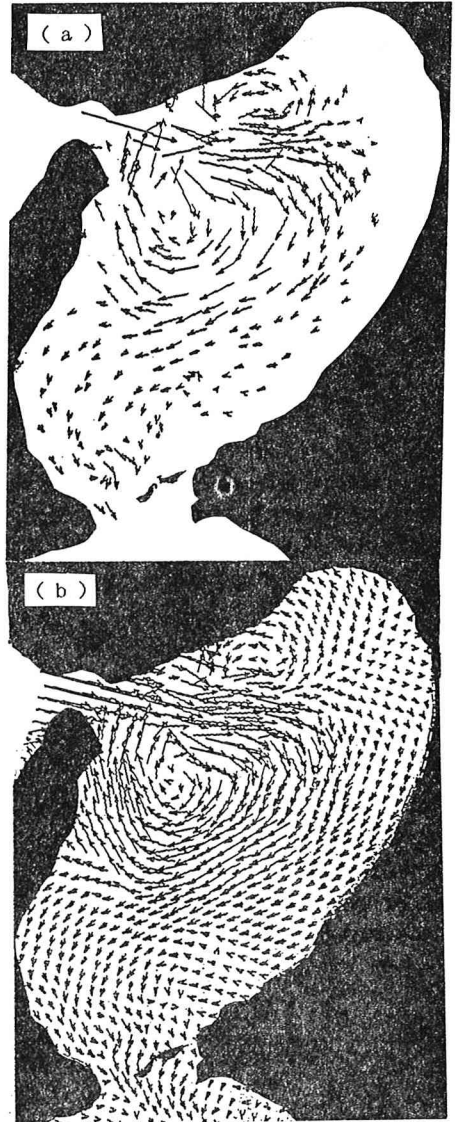


図-9 瞬間乱流場の計測 ((a) サンプル, (b) 格子点化)

実現するものの MOS-1 画像と形態を異にし、しかも 1 日後のこの時点ですでに紀伊水道系水の播磨灘への流入がみられる。ここに、大阪湾の組織的渦構造の決定論的側面が地球自転効果によって強化されたことがわかる。

次に、北半球において、境界条件として与えた明石海峡と友ヶ島水道の潮流流速の再現性を調べる。それぞれの潮流流速予測地点で、アルミ粉をトレーサとした水粒子追跡によって流速測定を行ない、図-8 に原型と比較する。絶対値および位相とも、良い一致が得られている。

(4) 瞬間乱流場の計測

北半球の模型上において、瞬間乱流場の計測を行なった。まず、水面に散布したアルミ粉粒子の動きを真上の

TV カメラから撮影する。これは、1987年12月15日～25日の約240時間におよび大阪湾内の流れの時系列的な衛星データが手に入ったことに相当する。

次に、田中ら(1982)のシーマーク法を用いて流速ベクトル図を作成する。2秒間隔1組のTV画像をパソコン内蔵の2枚のフレームメモリに取り入れ、眼前に瞬時に切り替わる双方間の同一粒子の位置変化から流速ベクトルを求めていく。図-9(a)のように、通常1組の画像データから約200個の流速ベクトルデータが収集される。次に、図-9(b)のように、補間によって格子点化を施す。これによって、大阪湾内の瞬間的な乱流場が計測され、以後の流れ学的演算の準備が整う。

図-10に、計測結果を示す。図(a)は、さきのMOS-1画像の得られた1987年12月23日における潮流時系列と、3時間間隔計9回の計測時刻とを示す。一方、図(b)は、それぞれの時刻に計測された瞬間乱流場を示す。衛星の可視化した渦パターンの物理的実体は、たしかにそれが組織的渦構造であることが定量的に確認される。

4. 恒流の物理的実体

図-11は、9つの瞬間乱流場の算術平均によって得られた全体平均乱流場である。図-2の恒流図と同一の流れパターンが出現している。すなわち、明石海峡近傍には右転の沖ノ瀬還流、その北側には小規模な左旋の須磨沖反流および右転の西宮沖還流、東岸沿いには東岸恒流帯、そして南部海域には友ヶ島反流が再現されている。

かくして、衛星による可視化と回転系乱流場としての

流れ学的取り扱いとに立脚した本論文によって、大阪湾の恒流の物理的実体は、湾内の回転系潮流乱流場に卓越する組織的渦構造の全体平均であることが示された。

謝辞：藤原建紀氏との日頃の議論が有益である。回転系における格子乱流の実験は久野一郎氏によって、潮流実験は田中誠氏および中川敬氏によって遂行された。画像処理および流速ベクトル計測は、桐澤英明氏開発によるBOZUによってなされた。深甚の謝意を表したい。

参 考 文 献

- 石川雅紀・熊谷幹郎・西村 肇・藤原建紀・早川典生(1979): 密度成層をとり入れた大阪湾恒流の水理模型実験, 海洋学会秋期大会講演要旨集, pp. 41-42.
- 今本博健・大年邦雄(1988): 大阪湾の潮流に関する模型実験, 土木学会第43回年次学術講演会, pp. 778-779.
- 海上保安庁水路部(1987): 潮汐表第1巻日本及び付近.
- 上嶋英機(1990): 大阪湾の流動特性を利用した環境改善への提言, 海洋学会秋期大会講演要旨集, pp. 339-340.
- 高橋 暁・柳 哲雄(1987): 大阪湾の緩衝容量(V), 海洋学会秋期大会講演要旨集, pp. 55-56.
- 高橋 暁・柳 哲雄(1988): 大阪湾の残差流変動, 海洋学会秋期大会講演要旨集, pp. 64-65.
- 田中総太郎・杉村俊郎・西村 司・二宮 泰・畠山祐二(1982): NOAA-6/AVHRR データによる黒潮流動ベクトル図の作製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.
- 西村 司(1986): 鳴門の渦潮, 山文社.
- 西村 司(1986): NOAA/APT 直接受信による黒潮のモニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 10, No. 1, pp. 57-62.
- 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫(1989): 大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 209-213.
- 藤原建紀・中田英昭(1990): 大阪湾の流動特性と水質・底質との関連: 海の気象, Vol. 35, No. 5・6, pp. 58-70.
- 柳 哲雄・樋口明生(1979): 大阪湾の吹送流 I, 海洋学会秋期大会講演要旨集, pp. 16-17.
- Kawai, H. (1955): On the polar frontal zone and its fluctuation in the waters to the northeast of Japan (I), Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab., Vol. 4, pp. 1-46.
- Masuzawa, J. (1957): On the fluctuation of the kuroshio east of Honshu and its forecast, Proc. Symp. on the oceanic forecast near Japan, pp. 25-38.
- Nihoul C. J., M. Jamart (1989): Mesoscale/Synoptic coherent structures in geophysical turbulence, ELSEVIER OCEANOGRAPHY SERIES 50.
- Nishimura T., S. Tanaka, T. Sugimura, Y. Hatakeyama, I. Hisano, M. Tazuke (1992): The coherent structure in the oceanic turbulence around Japan Islands Chain forced by an air, sea and solid earth interaction, Proc. POREC '92, pp. 267-272.

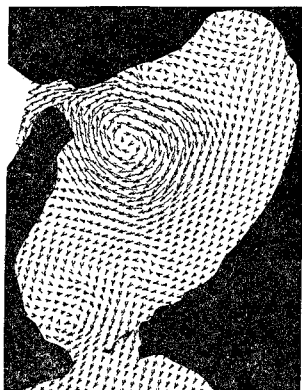


図-11 瞬間乱流場の算術平均によって得られた全体平均乱流場(1987年12月23日を想定)