

回転系潮流乱流場の組織的渦構造と湾や灘の質量輸送

西村 司* ・小林智尚** ・古田 剛一***
田 附 正文**** ・加藤直幸***** ・山口吉宗*****

1. 回転系水理模型実験

本論文は、湾や灘の潮流乱流場に卓越する組織的渦構造に着目した Froude/Rossby 相似水理模型実験に立脚し、未だ現象論にとどまるいくつかの質量輸送のプロセスについての回転系乱流論的議論を展開するものである。

著者らは前報（西村ら，1992）において、大阪湾の潮流場の衛星からの可視化によって回転系乱流場特有の組織的渦構造を検出し、Froude/Rossby 相似 3 次元縮尺地形水理模型実験によって原型の渦構造のパターンが流体力学的に無理なく再現できることを示した。

もしも回転系組織的渦構造がこの潮流場の支配要因であるならば、大阪湾内のいくつかの流れのプロセスがそれによって初めて説明できるようになるはずである。事実著者らの模型実験は、大阪湾の恒流の現象を全体平均乱流場として再現し、その流れ学的実体を組織的渦構造のプロセスに帰着させることができた。本論文では、地球自転効果に焦点を絞った 4 種類の実験的検討を行ない、湾や灘のいくつかの質量輸送プロセスにおける回転系潮流乱流場の組織的渦構造の役割を示す。

2. 恒流と地球自転および月齢

まず第 1 の実験においては、前報と同一の大阪湾縮尺地形模型を使って、恒流に及ぼす地球自転効果と月齢に伴う履歴を調べる。

(1) 地球自転の効果

大阪湾の恒流は湾内の質量輸送の 1 つの支配要因と考えられ、地形性渦流、密度流および吹送流に関連したプロセスが議論されてきた（藤原，1989；石川ら，1979；柳ら，1979）。しかしながら、質量輸送には乱流の寄与が本質的であるにもかかわらず、乱流論的観点からの恒流のプロセスの検討はなされていなかった。

一方、80 年代の組織的渦構造の基礎研究の進展は、乱流場が回転系にある場合に、とくにその決定論的側面が強調されることを示すに到っている（Nihoul ら，1989）。そこで著者らは前報において、水平縮尺 5 万分の 1 歪み率 50 の 3 次元縮尺地形模型を直径 2 m のターンテーブルに乗せ、大阪湾の潮流場の回転系 Froude/Rossby 相似水理模型実験を行ない、その瞬間乱流場計測をもとに全体平均乱流場を計算して恒流を再現した。

図-1(a)は、模型に再現された 1987 年 12 月 23 日の大潮における恒流であり、2 時間おきに得られた 12 個の瞬間乱流場の算術平均によって得られたものである。この実験は地球自転を無視してきた従来の実験よりも長さスケールが 1 桁小さく、密度流や吹送流の効果は考慮されず、不自然な粗度調整も施されていない。にもかかわらず、模型の恒流は、藤原（1989）のいう原型の恒流成分のすべてを、その流れパターン大きさとともに好く再現している。

おなじく図-1(b)に、同一の模型を使って得られた、地球自転を考慮しない Froude 相似模型実験結果を示す。原型とは異なった湾全体におよぶ恒流が出現し、この種の現象は地球自転の支配下にあることがわかる。この点、上嶋ら（1989）や中辻ら（1991）による海底地形改変による流況制御技術の提案は、実用化にあたって少なくとも原型におよぼす地球自転効果の考慮が必要であろう。

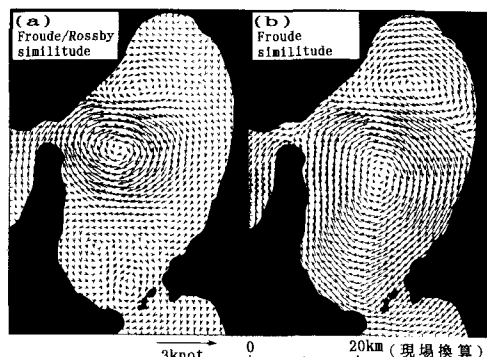


図-1 3次元縮尺地形模型実験による大阪湾の恒流

* 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 工修 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

**** (株)日鐵建材工業

***** (株)東洋建設

***** (株)五洋建設

(2) 月齢に伴う履歴の効果

潮流乱流場の特徴は、その非定常性である。図-1(a)の恒流図算定のもととなった模型における2時間ごとの瞬間乱流場をみると、潮汐の干満のいずれの位相においても日平均乱流場に類似の流速分布が得られている。すなわち、少なくとも大潮時においては、乱流場を代表する渦の時間スケールは1日より大きい。ここに、かのReynoldsの実験を参考にすれば、渦の代表時間スケールより大きい非定常性、したがってこの場合は数日スケールの月齢による非定常性が、内部の組織的渦構造に履歴の効果をもたらすものと予測される。

図-2に、大阪湾の恒流に対する月齢効果の模型実験結果を示す。図中2つの時系列は、潮汐表(1987)をもとに描かれた明石海峡と友ヶ島水道の1987年12月後半における変化、おなじく6つの流速場は、月齢を異にするそれぞれの日の24時間平均乱流場である。顕著な恒流が大潮の22日以降に観察されるものの、小潮の15日から次の中潮の18日にかけてはその出現をみない。

興味深いのは、中潮の状況である。小潮から大潮に向かう18日の中潮においては、恒流は未発達状況にとどまる。ところが逆に、大潮から小潮に向かう26日の中潮をみると、大潮時に形成された恒流が湾内にまだ居残っている。これは、恒流の時間スケールが数日であること、その発達は月齢による履歴の支配下にあることを示す。

閉鎖海域における回転系乱流場の1つの特徴は、組織

的渦構造が固有の地形形状によって空間的にlockされることである(Nishimuraら, 1992)。恒流の顕著な22日以降の恒流場をみると、いずれも湾全体が中央の沖ノ瀬上の右転の渦と他のよりスケールの小さい複数の渦によって埋め尽くされていることがわかる。さらに、これらの渦相互の回転をみると、右転と左旋が無理なく噛み合っており、あたかも1つのギヤボックス内の歯車群のような組織的渦構造をなしている。

周囲の海岸線にlockされた渦構造の発達は回転系特有のものであり、その決定論的性質の度合いは乱流エネルギー注入の最大である大潮よりも、むしろ後の24日以降において著しい。このような渦構造は湾全体の地形によって空間的に固定されるから、この段階では個々の瞬間乱流場が平均乱流場により近づいてくる。この理由によって、恒流への月齢による履歴の効果が説明できる。

3. 乱流拡散と水塊輸送

第2の実験においては、模型実験による瞬間乱流場データをPC内に取り込んで大阪湾の乱流拡散シミュレータを実現し、それを使ってこの研究の出発点となったところの衛星による可視化に流れ学的根拠を与える。

(1) 乱流拡散シミュレータ

回転系水理模型実験が大阪湾の流れをよく再現することが示された現在、この模型を使って湾内の水塊輸送を評価するためのLagrange追跡実験の見通しがたってくる。だが、水塊輸送は非定常な潮流場の種々のスケールの乱流成分からの寄与が総合された結果として生じてくるものだから、水理実験を直接その評価に応用するには、膨大な人日が要求される。たとえば染料パッチの輸送や混合を評価しようとすれば、染料パッチ投入の位置や空間時間パラメータの組み合わせを変えた数多くの実験が必要となろう。この点、純粋な数値シミュレーションは魅力的であるが、たとえば原型の恒流をよく表現できる数値モデルはみあたらないのが現状である。そこで、回転系水理模型実験による瞬間乱流場をPC内に取り込み、それをもとに数値的にLagrange追跡を行なうためのハイブリッドな乱流拡散シミュレータを実現した。

(2) 渦のプロセスの可視化

図-3に、シミュレータの応用例を示す。図(a)は1987年12月23日10時28分のMOS-1/MESSR画像であり、それによる流れの可視化が本研究の出発点となったものである。だが、衛星画像に判読される渦構造のパターンがたしかに1つの流れ学的プロセスの結果であることを示すには、時系列的な測定が必要となる。そこで、乱流拡散シミュレータによってこの可視化の再現を行なう。

図(b)に、明石海峡近傍の計算結果を示す。まず瞬間乱

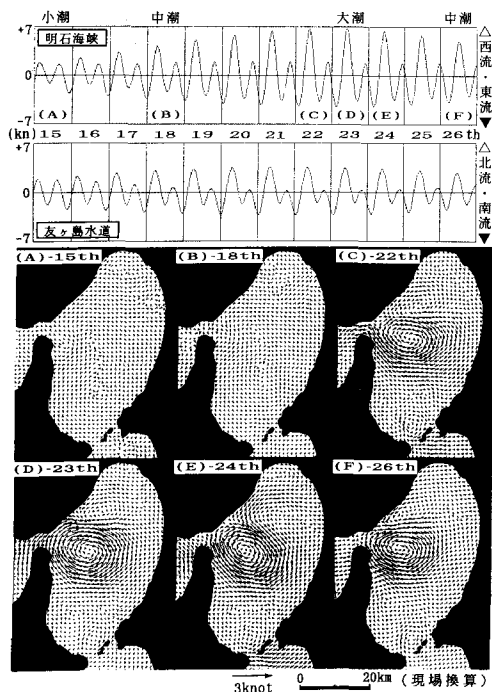


図-2 大阪湾の恒流の月齢変化(1987年12月後半:模型)

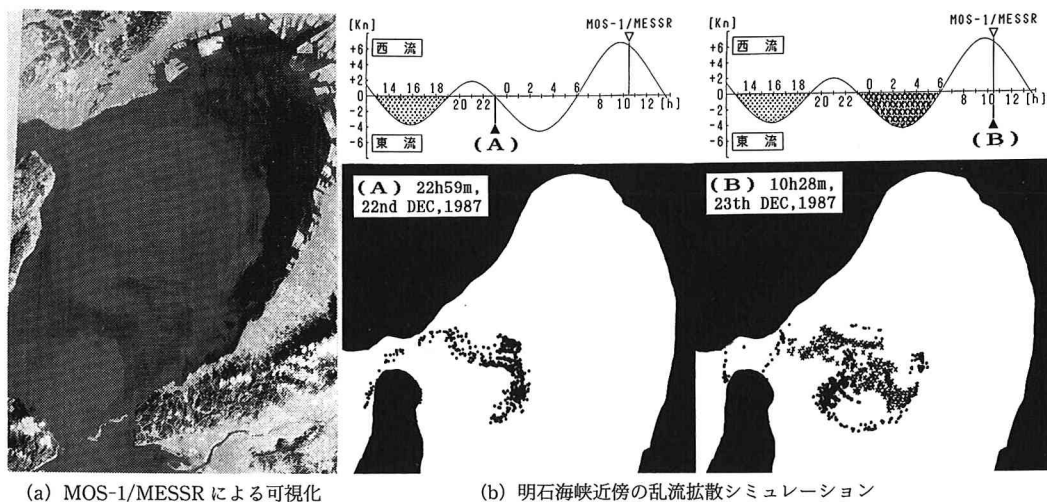


図-3 Froude/Rossby 相似 3 次元縮尺地形模型水理実験にもとづく乱流拡散実験

流場計測データファイルが MOS-1 データ収集時刻より 24 時間さかのぼって PC 内に読み込まれ、大阪湾の海面流速ベクトル場が空間的に 1.13 km 時間的に 2 時間間隔の格子点データによって表現された。MOS-1 に可視化された最も顕著な渦、すなわち沖ノ瀬上の渦は明石海峡経由の東流によって形成されたものと判断し、まず衛星データ収集時刻から 2 潮汐前の 12 月 22 日 12 時 45 分～同 19 時 05 分の東流時に明石海峡から粒子群 (●) を、続いて 22 日 22 時 59 分～翌 06 時 04 分の東流時に粒子群 (×) を投入し、それらの Lagrange 追跡を行なった。個々の粒子の移動速度は、格子点データの補間によって算定された。

図(A)の水塊分布図は、22 日 22 時 59 分の状況を示している。先の東流によって大阪湾に運び込まれた水塊が湾内に渦パターンを示し始めている。一方、図(B)は、翌 23 日 10 時 28 分の衛星データ収集時における状況である。明石海峡から先に流入した水塊 (●) は沖ノ瀬上の渦の外縁を形成し、後に流入した水塊 (×) が渦の内部に質量を補給している。ここに、図(a)の衛星画像の渦パターンを回転系乱流場特有の組織的渦構造のプロセスの結果であるとする当初の仮説が裏付けられた。

4. 乱流の逆カスケード過程

第 3 の実験は、回転系のさまざまな乱流成分の組織的渦構造への逆カスケード過程に及ぼす地球自転と乱流の 3 次元性の効果を評価するための基礎実験である。

(1) 実験のデザイン

湾や灘の質量輸送を受け持つ回転系潮流乱流場の基本プロセスの 1 つは逆カスケード過程、すなわち小スケールの渦から大スケールのそれへの乱流エネルギーの移行

である。そこでまず、明石海峡から供給される乱流成分の沖ノ瀬上の逆カスケード過程に焦点を絞り、友ヶ島水道の効果を考慮から外して単純化した地形模型とする。

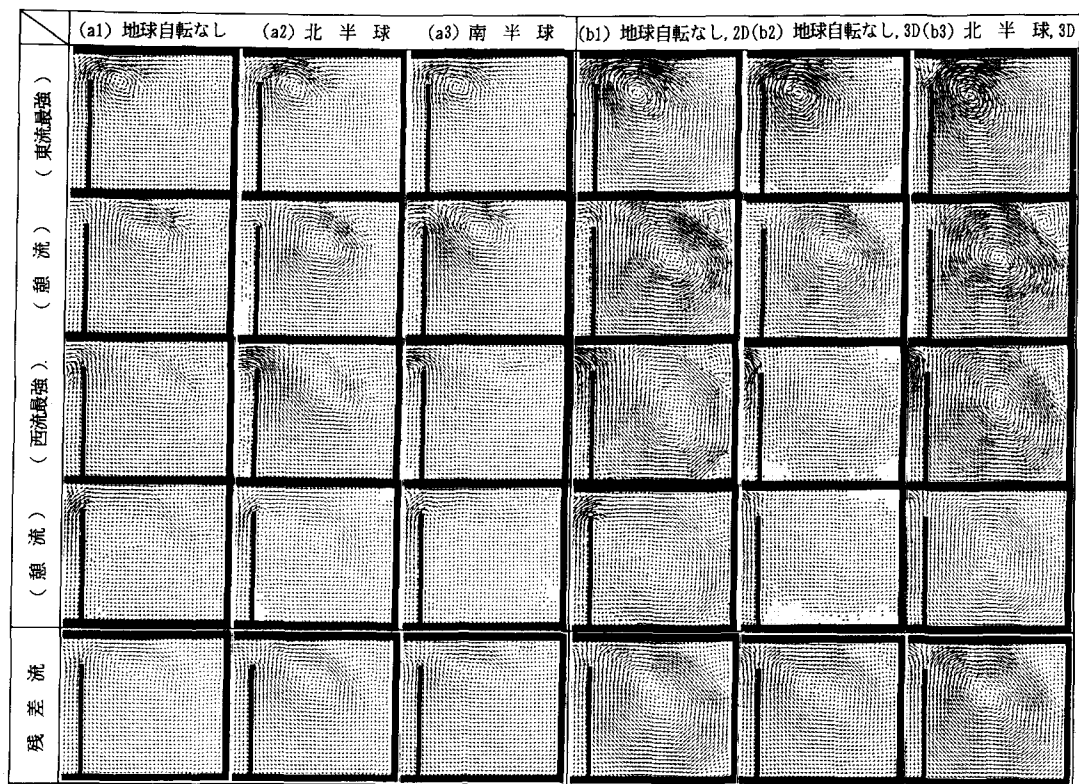
採用した回転系乱流論的アプローチの特色をより鮮明にするため、従来の代表的な潮流場の基礎実験との間にデータの互換性を保証することが望ましい。そこで、潮汐残差流の基礎実験を行なった Yanagi (1976) の「片寄った開口部を持つ正方形の湾」の模型をベースとして採用し、径 2 m のターンテーブルに乗せるためにその 5 分の 1 の歪みなし模型とした。さらに、組織的渦構造の履歴に作用する月齢あるいは日潮不等を再現する目的で、PC 制御パルスモータ駆動のプランジャ型起潮機を自作した。

図-4 に示すような 2 つのシリーズの実験が行なわれた。実験(a)は地球自転の効果を示すものであり、実験(b)は海峡から湾や灘に供給される乱流の 3 次元性を評価するためのものである。

(2) 地球自転の効果

図(a1)は、地球自転の効果を考慮しない Yanagi (1976) の実験の Froude 相似模型実験である。上段より東流最強、憩流、西流最強、憩流のそれぞれにおける瞬間乱流場およびその算術平均としての残差流場が、大阪湾の地形形状を考慮して原型の実験の鏡像として示されている。原型の実験との相似は、よいものと判断される。

図(a2)は、北半球の実験結果である。いずれの瞬間乱流場においても類似の組織的渦構造が存在し、それに応じて残差流も強化される。沖ノ瀬上の渦に相当する湾内の右転渦は、スピンドウンが緩やかとなりコンパクトにまとまる。一方、図(a3)は、南半球の実験結果である。北半球に比べて右転渦のスピンドウンが速やかに進行



(a) 地球自転の評価

(b) 乱流場の3次元性の評価

図4 回転系乱流場の逆カスケード過程に関する基礎実験 (Yanagi (1976) との比較実験)

し、結果として残差流は弱くなる。

(3) 3次元乱流の効果

乱流論によれば、沖ノ瀬上の右転渦は、明石海峡淡路側の境界層剝離点から供給された小スケールの右転渦の逆カスケード過程によって形成維持されている。さらに、回転系にあるとき3次元乱流は2次元のそれへと移行し易く、2次元乱流においては逆カスケード過程がより効率よく進行し、結果として渦構造の組織性が増す。

図(b1)は、明石海峡のFroude数を大阪湾に合わせた実験結果である。模型自身が2次元であるために、淡路の先端から供給される小スケールの渦は発生の時点ですでに2次元的であり、逆カスケード過程の効率がよい。

図(b2)は、原型の大阪湾の3次元性と高レイノルズ数を考慮し、明石海峡に設置した乱流格子によって強制的な3次元乱流とした実験結果である。エネルギーの総和は高くなったものの、小スケールの3次元乱流成分の作用によって、右転渦への逆カスケード過程よりもむしろカスケード過程による減衰のプロセスが強化される。

図(b3)は、さらに北半球の自転効果を加えて、大阪湾のFroude/Rossbyを意図した実験結果である。逆カスケード過程が効率よく進行してコンパクトかつ長寿命の

右転渦が再現され、強い残差流が出現する。しかしながら、図-3(a)の衛星画像あるいは図-2の3次元縮尺模型実験にみるような、湾全体におよぶ複数の渦からなる組織的渦構造の形成には至らない。その理由は、この実験が地形性 β 効果を考慮から外していること、および正方形の湾の形状が渦構造の形成に適さないことによる。

5. 底質輸送と海底マウンド

最後の第4の実験は、湾や灘の底質輸送を再現するためのFroude/Rossby相似移動床模型実験である。

(1) 鳴門の渦潮による底質輸送

回転系乱流場の組織的渦構造とりわけ海峡近傍のそれは、湾や灘の底質輸送の支配要因となる。図-5(a)に、本実験の動機を与えた組織的渦構造のLandsat/MSS映像を示す。1972年10月24日10時06分の大潮時の北流終了時の鳴門海峡であり、最大流速約10ノットの北流によって播磨灘に供給された乱流成分の左旋/右転の渦対への逆カスケード過程を記録している。

一方、図(b)は、国土地理院沿岸海域地形図からの抜粋であり、Landsatに映像化された径5kmほどの右転/左旋渦が直下の海底地形の双丘マウンドに対応しているこ

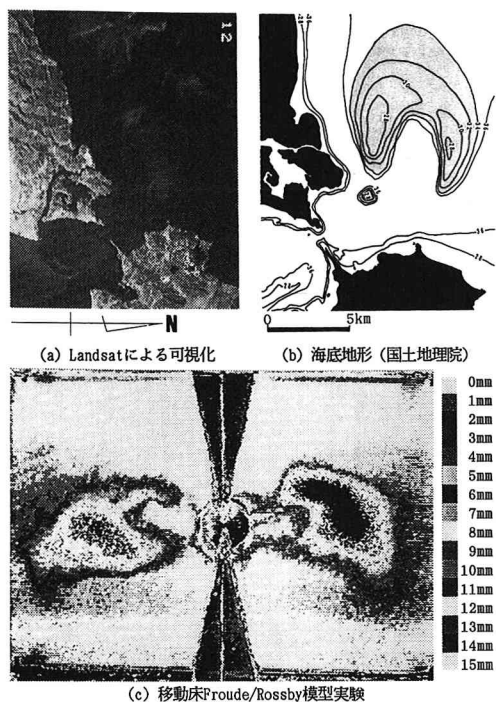


図-5 鳴門海峡の底質輸送

とがわかる。西村 (1986) は、回転系水理模型実験によってこの渦対を再現し、北半球における逆カスケード過程の左右のアンバランスが左旋の渦をより強化し、結果としてこの海底地形マウンドの位置や形状の左右非対称性を招くものと考えた。ここでは、その模型を移動床とし、底質輸送の Froude/Rossby 相似模型実験を行なった。

(2) 実験による再現

図-5(c)に、上空から映像化した実験結果を示す。鳴門海峡中央部の左右対称な地形形状は、水槽中央部に左右から突き出した1対の三角形の岬に単純化されている。双丘マウンドの底質が鳴門海峡中央部の海釜から供給されたものと考え、カンテンを材料に作成した半透明の微粒子を海峡中央部のピットから連続的に供給した。

現象の進行は、直上のTVカメラによって時系列的に映像化されてPC内に取り込まれ、いくつかの実験常数

を含む光経路モデルによって海底地形等深図に変換された。図(c)は、マウンドの生成が終了した状態を示し、原型とのよい対応をみせている。この種の底質輸送は、藤原 (1990) による大阪湾沖ノ瀬にもみられ、海洋/固体地球相互作用の1例として興味深い研究対象を提供している。

謝辞：本研究は、田中総太郎、杉村俊郎、畠山祐二の3氏による衛星データ解析の支援を受けて進行中のものであり、その1部は文部省科学研究費 [No. 04452234：日本列島周辺海洋乱流場における組織的渦構造の研究] を受けている。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・早川曲生 (1979)：密度成層をとり入れた大阪湾恒流の水理模型実験，海洋学会秋季大会講演要旨集，pp. 41-42。
- 上島英機・湯浅一郎・宝田盛康・橋本英資・山崎宗広・田辺弘道 (1989)：大阪湾停滞水域の流況改善技術に関する実験的研究，海岸工学論文集，第36巻，pp. 839-843。
- 海上保安庁水路部：潮汐表，第一巻，日本及び付近。
- 国土地理院 (1982)：沿岸海域地形図，鳴門海峡。
- 中辻啓二・栗田秀明・狩野晋一・村岡浩爾 (1991)：大阪湾ベリエリア開発構想に係わる水環境の変化予測，海岸工学論文集，第37巻，pp. 484-488。
- 西村 司 (1986)：鳴門の渦潮，山文社。
- 西村 司・小林智尚・田附正文・田中総太郎・杉村俊郎・畠山祐二 (1992)：回転系乱流場特有の組織的渦構造と大阪湾の恒流，海岸工学論文集，第39巻，pp. 911-915。
- 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，海洋学会秋季大会講演要旨集，pp. 16-17。
- Nihoul C. J., M. Jamart (1989)：Mesoscale/Synoptic Coherent Structures in Geophysical Turbulence, Elsevier Oceanography Series 50。
- Nishimura T., S. Tanaka, T. Sigimura, Y. Hatakeyama, I. Hisano and M. Tazuke (1992)：The coherent structure in the oceanic turbulence around Japan Islands Chain forced by an air, sea and solid earth interaction, Proc. PORSEC '92, pp. 267-272。
- Yanagi T. (1976)：Fundamental study on the tidal residual circulation- I, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 32, pp. 199-208。