

紀淡海峡における海水交換と物質輸送過程の解明

石塚正秀*・中辻啓二**

1. はじめに

閉鎖性内湾における水質構造を考える上で、陸域からの汚濁負荷が影響を及ぼすことは言うまでもないが、海峡を通じた海水交換や物質輸送も見逃せない。とくに、成層化の発達した内湾と鉛直混合した外洋を結ぶ海峡部では、流動や密度構造が往路と復路で異なる挙動を呈することから、海峡部における輸送過程の解明は重要である。大阪湾と紀伊水道を結ぶ紀淡海峡はその典型例である。流速が速いうえに開口部を3ヶ所も持つ複雑な断面形状を呈している(図-1参照)。ADCPやSTD等の開発により現地観測の精度が増したものの、栄養塩の分布を調べるには採水する必要があり、その信頼度は落ちる。

そこで、本研究では3次元パロクリニック流れの数値実験を行い、海峡部での海水交換や物質輸送過程を明らかにする。と同時に、現地観測を計画するに際して有用な情報を提供するためのデータ解析を実施する。

2. 紀淡海峡の地形

紀淡海峡には、図-1に示すように沖ノ島、地ノ島(二つ合わせて友ヶ島)があり、三つの瀬戸が存在する。淡路島側から、由良瀬戸、中ノ瀬戸、加太瀬戸である。狭い意味で由良瀬戸を紀淡海峡とよぶ場合もあるが、本論文では、すべての瀬戸を含む海域を紀淡海峡とする。

三つの瀬戸の中では由良瀬戸が最も大きく、幅約3.7 km、最大水深約150 mであり、断面積は紀淡海峡全体の約80%を占める。二番目は加太瀬戸であり、幅約800 m、最大水深約70 m、断面積比は15%である。中ノ瀬戸は最も小さく、幅約500 m、最大水深約40 m、断面積比は約5%である。

3. 数値実験の概要

本研究では紀淡海峡における複雑な地形を考慮し、各瀬戸からの海水交換を詳細に議論する必要があるため、二つの段階に分けて数値シミュレーションを実施した。

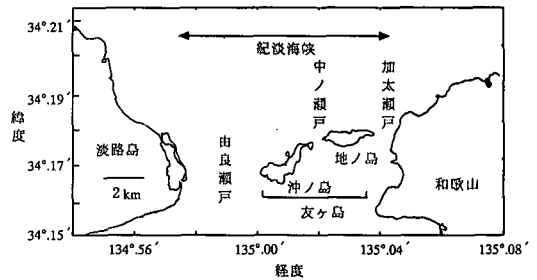


図-1 紀淡海峡の地形図

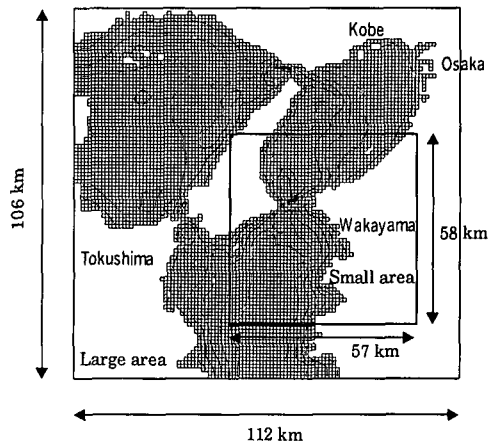


図-2 計算対象領域

(1) 大領域計算

はじめに、図-2に示す大阪湾、紀伊水道、播磨灘を含む計算領域(大領域)において流動再現シミュレーション(hindcasting)を行った。領域の大きさは大阪市を原点として西方向に112 km、南方向に106 kmであり、計算格子幅は1 km×1 kmとする。鉛直方向の格子間隔は表層から2 m×5層、4 m、6 m、10 m、15 m×2層の計10層位の不等間隔とした。計算対象期間は1997年8月5～25日である。計算開始日の8月5日は大阪府・兵庫県・徳島県水産試験場による浅海定線調査が各海域で行われており、この値を空間補間し、水温・塩分の初期条件とした。また、実データを用いたhindcastingシミュ

* 学生会員 修(工) 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

表-1 計算条件

	大領域	小領域
計算領域	112×106 km	57×58 km
計算格子幅	1 km×1 km	0.25 km×0.25 km
計算時間間隔	30 秒	10 秒
開境界外力	潮位振動 (6分潮)	潮位振動 (半日周期) 流速振動 (半日周期)
開境界密度	浅海定線調査+T&H	大領域計算の結果
初期密度場	浅海定線調査	大領域計算の結果

レーションでは、開境界から流入する水温・塩分を正確に与える必要があるが、希望する実データはなかなか得られない。そこで、本計算では毎月一回実施される浅海定線データを時間補間し、さらに、流入値による急激な数値変化を押さえるため Thatcher・Harleman (1972) の関係式を与えた。また、潮位変動は開境界に位置する小豆島の北側 (大多府島, 大部) と南側 (坂手), 紀伊水道の南側 (橋, 比井) において、潮汐調和定数 (6分潮, $K_1, O_1, P_1, M_2, S_2, K_2$) を与えた。さらに、淀川の河川流量, 関西国際空港 MT 局の風向・風速, 日射等の気象条件を時間変化させて与えた。

(2) 小領域計算

つぎに、紀淡海峡を中心とした計算領域 (小領域, 図-2 参照) で数値シミュレーションを実施した。計算領域の北側境界は大阪湾中央部, 南側境界は紀伊水道の南部海域に位置し、それぞれ開境界とした。なお、紀伊水道の西側境界は閉境界とする。水平方向の格子幅は大領域の4分の1 (250 m×250 m) である。また、鉛直方向の格子間隔は大領域計算と同じとした。

開境界における外力条件は大領域計算により得られた8月23日6:00~18:00の結果を調和解析して、半日周潮成分, 1/4日周潮成分, 残差流成分を求めた。紀伊水道側では水位変動を、大阪湾側では沖ノ瀬環流の影響を考慮する必要があるために流速変動を与えた。また、流速変動を与える場合、開境界のすべての格子点で条件を与えるとデータ量が多くなるため、ここでは、補間の影響が大きくなる程度に水平方向には代表点を選び各点を線形補間した。鉛直方向にはすべての層でこれを与える。それぞれの式を以下に示す。

紀伊水道側の境界条件

$$\xi = \xi_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \theta_1\right) + \xi_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t - \theta_2\right) \dots (1)$$

大阪湾側の境界条件

$$U = U_0 + U_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \phi_{u1}\right) + U_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t - \phi_{u2}\right) \dots (2)$$

$$V = V_0 + V_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \phi_{v1}\right) + V_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t - \phi_{v2}\right) \dots (3)$$

ここで、添え字“1”は半日周潮成分, 添え字“2”は

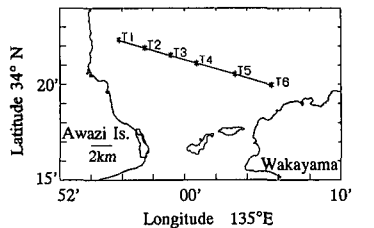
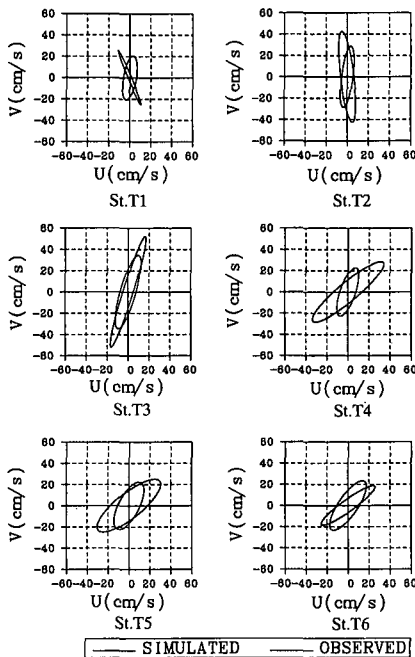


図-3 潮流楕円の比較と観測地点

1/4日周潮成分, 添え字“0”は残差流成分を表す。Tは潮汐周期, ξ は潮位振幅, θ は潮位振幅の遅れ角, Uはx方向流速, ϕ_u はx方向流速の遅れ角を示す。y方向流速についても同様である。

計算開始時の初期水温・塩分は大領域計算により得られた6:00の値を空間補間した。表-1に計算条件をまとめる。さらに、小領域計算で得られた流速・渦拡散係数の30分毎の結果を用いて中立粒子の追跡計算を行った。流動モデルは準三次元パロクリニックモデル ODEM を使用した (中辻, 1996)。

4. 計算結果の妥当性の検討

図-3は紀淡海峡を中心とした小領域計算および現地観測から得られた潮流楕円 (M_2 成分) を示す。現地観測は運輸省第三港湾建設局により1978年4月23日~5月8日 (15日間) に行われた。観測地点は兵庫県洲本市と大阪府泉南郡を結ぶ直線上6地点であり、それらの位置を図-3の下段に示す。数値実験では8月23日6:00~18:00の12時間のデータを用いて調和解析を行っ

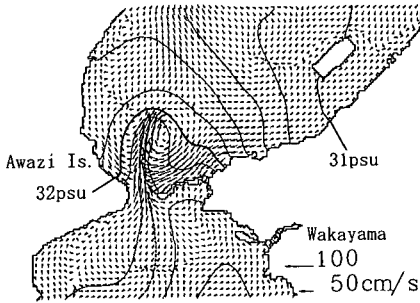


図-4 紀淡海峡北流終了時の流動ベクトルと塩分分布

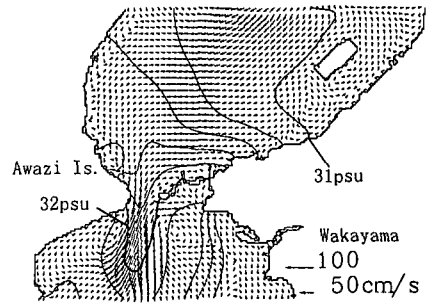


図-5 紀淡海峡南流終了時の流動ベクトルと塩分分布

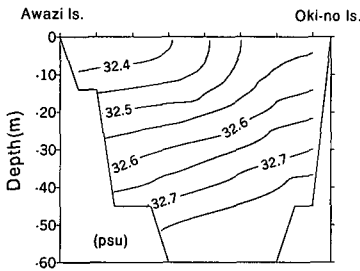


図-6 北流終了時の由良瀬戸における塩分の鉛直分布

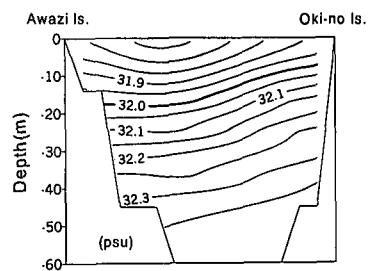


図-7 南流終了時の由良瀬戸における塩分の鉛直分布

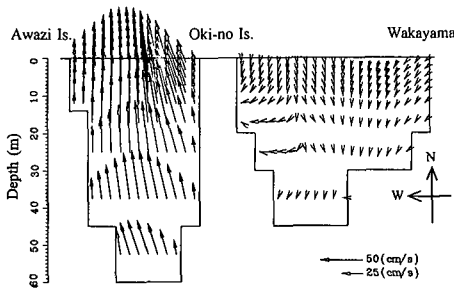


図-8 北流終了時の紀淡海峡における流動ベクトルの鉛直分布

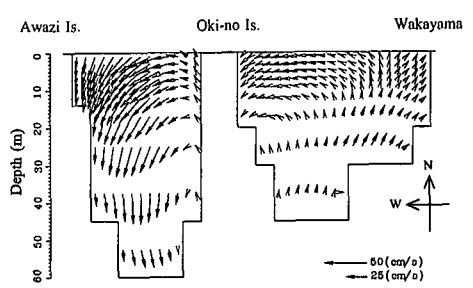


図-9 南流終了時の紀淡海峡における流動ベクトルの鉛直分布

たため、長軸長は観測値と異なるが長軸の向きはほぼ一致している。ただし、岸に近い観測点 T1 では観測値と計算結果が異なっている。また、洲本、淡輪、和歌山、友ヶ島における潮汐の調和定数の比較もよい一致を示した。以上より、今回実施した紀淡海峡北部海域における数値モデルの計算条件の設定は妥当であるといえる。

5. 数値シミュレーションの結果と考察

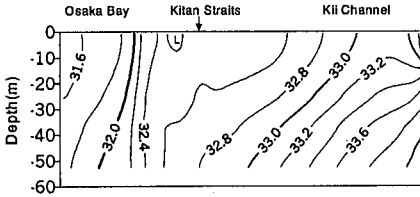
(1) 流動特性と密度分布

a) 水平分布

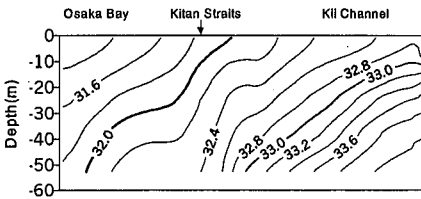
図-4は紀淡海峡の北流終了時の水深1mにおける流動ベクトルと塩分の水平分布を示す。ここでは友ヶ島反流の挙動に関連した考察を行うため、紀伊水道の南部は図から削除している。北流から南流への転流時に沖ノ島

の北側に時計回りの友ヶ島反流が形成されているのが認められる。北流がはじると沖ノ島西端部において流れのシアが発生し、規模の小さい時計回りの流れが発生する。その後、この流れは北流の加速とともに北側へと移動し、転流時に図-4のように最も発達する。この時、友ヶ島の北側と淡路島側では南向きの流れがみられる。

塩分分布をみると、塩分 32 psu の高塩分水塊は紀淡海峡北側で全体に広く分布している。由良瀬戸を中心とした分布形状から、断面積の最も大きい由良瀬戸からの流入の影響が大きいことが分かる。また、大領域計算の流速ベクトルをみると、北流時に紀伊水道を北上する流れは和歌山県側の地形に沿ってまっすぐ紀淡海峡へと向かう傾向にあり、由良瀬戸だけでなく、加太瀬戸や中ノ瀬戸を通じて大阪湾へと水塊が流入する。その結果、図-4



図—10 北流終了時の紀伊水道—大阪湾における塩分の縦断面分布



図—11 南流終了時の紀伊水道—大阪湾における塩分の縦断面分布

にみられるように友ヶ島の北側海域にも外洋性の高塩分水塊が大阪湾内へ輸送される。

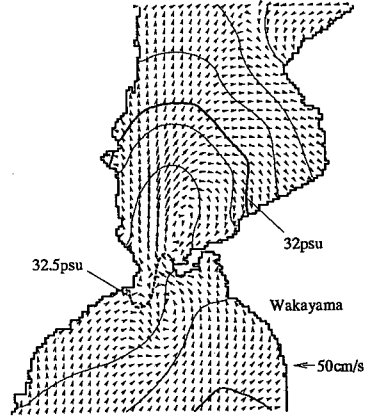
一方、図—5 は南流終了時の結果を示す。北流終了時と違って由良瀬戸の南側海域に塩分 32 psu 以下の水塊が分布しているが、友ヶ島の南側ではみられない。南流開始時には大阪湾の東岸恒流帯が友ヶ島の北側で南西方向に流れるため、湾内水は由良瀬戸から紀伊水道へと流出する。また、友ヶ島反流は南流開始後にも存在するため、淡路島側では友ヶ島反流の外縁を回り込むように淡路島の西岸に沿って湾内低塩水が南下し、由良瀬戸の西側を通り紀伊水道へと流出する。

このように紀淡海峡では、北流時には各瀬戸を通じて水塊が流入し、南流時には由良瀬戸へと流れが向かう流動特性があることが明らかとなった。1989年に紀ノ川河口で異常発生した「ホテイアオイ」が河口から流出後わずか数日で吉野川河口に現れたという現象は、上述の流動特性により生じたものと理解できる。

b) 鉛直分布

図—6, 7 は紀淡海峡の北流終了時と南流終了時の由良瀬戸における塩分の鉛直分布を示す。断面は紀淡海峡中央部(北緯 34°17')である。北流終了時には高塩分水塊が存在しており、北流によって大阪湾内に流入していることが分かる。一方、南流終了時には大阪湾内の低塩分水塊が由良瀬戸へと流れ込むために、表層部では 32 psu 以下の水塊が分布する。また、水深 15 m 以下では 32 psu 以上の水塊が分布しており、南流終了後も大阪湾内に高塩分水塊が存在していることが分かる。

図—8, 9 は同じ時間・緯度での紀淡海峡における流動の鉛直分布を示す。北流終了時は由良瀬戸ではほぼ鉛直



図—12 水深 38 m における残差流ベクトルと残差塩分

に様な流動となっている。また、中ノ瀬戸・加太瀬戸は由良瀬戸よりも流動変化の位相が早いことが知られており、平面図(図—4)と合わせて考えるとよく理解できる。一方、南流終了時は流動が鉛直方向に変化している。この断面での時計回りの流れは図—5からも分かるように沖ノ島の南側に発生する地形性流れである。

図—10, 11 は北流・南流終了時における紀伊水道—大阪湾における塩分の縦断面分布を示す。北流終了時に塩分 32 psu を越える高塩分水塊が大阪湾内に流入していることが分かる。また、紀伊水道は成層しているのに対して大阪湾内では等塩分線が垂直に立っており、これは紀淡海峡における強い混合作用の影響と考えられる。一方、南流終了時には表層から湾内の低塩水が紀伊水道に向かって流出するために紀淡海峡は成層する。また、底層には北流終了時にみられた高塩分水塊が残留している。

この結果を 1997年8月23日6:00~18:00に由良瀬戸断面で行った現地観測の結果と比較すると、観測で得られた流動・塩分分布は数値シミュレーションの結果よりも複雑な構造を呈している。完全な一致はみられないが、本モデルの計算条件を考えると妥当な結果といえる。

c) 残差流

図—12に一潮汐平均した残差流と残差塩分の底層における水平分布を示す。先にも述べたように、底層では高塩分水が大阪湾内へ分布しており、底層を通じて高塩分水塊が大阪湾に流入する結果が得られた。

(2) 紀淡海峡の断面通過流量と塩分フラックス

表—2は数値実験により得られた8月23日6:00~18:00(12時間)における由良・加太・中ノ瀬戸の断面通過流量と塩分フラックスを示す。正值は大阪湾への流入を表す。8月23日は日潮不等の小さい中潮期である。各瀬戸ともに大阪湾方向に流入している結果が得ら

表-2 紀淡海峡の断面通過流量と塩分フラックス

	由良瀬戸	中ノ瀬戸	加太瀬戸
断面通過流量 ($m^3/12h$)	783×10^6	27×10^6	31×10^6
塩分フラックス ($psu \cdot m^3/12hr$)	25885×10^6	904×10^6	1066×10^6

れた。断面積の最も大きい由良瀬戸からの流量は紀淡海峡全体の93%, 中ノ瀬戸は3%, 加太瀬戸は4%である。この結果から、紀淡海峡を通じた水塊の流入は由良瀬戸が支配的であるといえる。つぎに、各瀬戸における塩分フラックスを算定した。断面通過流量と同様に各瀬戸から大阪湾内へ塩分が流入する結果が得られた。

以上のように、今回の計算では大阪湾への流入が卓越することが示された。また、紀淡海峡と大阪湾との塩分輸送を考える場合には由良瀬戸だけでなく中ノ瀬戸や加太瀬戸における流動も無視できない。さらに、地形性の逆流の影響や紀ノ川からの淡水の供給も塩分フラックスを算定する際に重要といえる。

(3) 紀淡海峡における物質輸送過程

物質輸送過程を可視化するために北流最強時に由良瀬戸に中立粒子を投入する追跡シミュレーションを行った。粒子は由良瀬戸の水深10mに500個ずつ250m間隔で横一列に配置した。図-13, 14はそれぞれ投入後3時間, 15時間の結果を示す。いずれも北流から南流への転流時である。3時間後には沖ノ島寄りに配置された粒子群は友ヶ島逆流に取り込まれながら、沖ノ島の北側約10km付近まで拡がる。その後、南流によって南側に拡がり、15時間後には大阪湾内に残留した粒子群に新たな北流水塊が流入しているのがわかる。また、大阪湾内での粒子の残留率は約90%であり、時間の経過とともに、より広範囲に粒子が拡散している結果が得られた。また、図-14で由良瀬戸の南側に粒子群がみられるが、これは淡路島西岸を南下する水塊が由良瀬戸の西側を通じて紀伊水道へ流出し、淡路島南側の時計回りの流れに取り込まれ、残留した結果である。また、北流最強時に加太・中ノ瀬戸に粒子を配置した場合は、友ヶ島北側の南西流により、由良瀬戸へと運ばれる結果が得られた。

6. おわりに

紀淡海峡を中心とした詳細な地形を考慮した数値実験を行い、紀淡海峡における海水交換と物質輸送過程を検討した。紀淡海峡は大阪湾と紀伊水道・太平洋をつなぐ中間に位置し、大阪湾内の水質構造を考える上で重要な海域である。しかし、三つの瀬戸を有した複雑な地形特性から、現地観測による詳細な物質輸送の議論は困難である。その点で、3次元流動の数値シミュレーションは有効な解析ツールといえる。

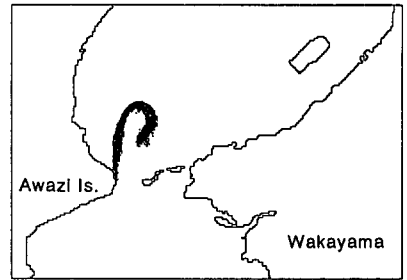


図-13 北流最大時に投入した粒子の分布, 投入後3時間

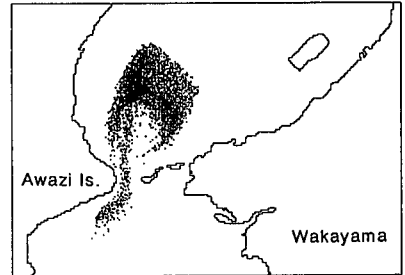


図-14 北流開始時に投入した粒子の分布, 投入後15時間

本研究では、紀淡海峡における鉛直混合や底層を通じた高塩分水塊の流入が示された。また、紀淡海峡の流動は北流時と南流時で非対称であり、地形性流れの発生、流れの位相差が大きいなど複雑な構造を呈している。これらの結果は今後の現地観測計画をたてるに際して、海水交換や塩分輸送を考える上での重要な知見といえる。

謝辞：本研究の実施に際しては、文部省科学研究費補助金（基盤(B) 09555198, 基盤(C) 09650565)（研究代表者 中辻啓二）の交付を受けたことを付記する。また、淀川河川流量は建設省近畿建設局淀川工事事務所から、大阪湾・播磨灘・紀伊水道の水温・塩分データは、大阪府・兵庫県・和歌山県・徳島県水産試験場から提供していただいた。ここに、記して謝意を述べる。

参考文献

- 運輸省第三港湾建設局関西国際空港調査室 (1979): 大阪湾南部海岸性状調査報告書, pp. 495-522.
- 大阪府・兵庫県・和歌山県・徳島県水産試験場 (1997): 浅海定線調査報告.
- 中辻啓二 (1996): 海洋: 閉鎖性海域, 数値流体力学, 第4巻, 第4号, pp. 306-332.
- Thatcher, M. L. and R. F. Harleman (1972): A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries, Massachusetts Institute of Technology, Report no 144, February 1972.