

瀬戸内海における湾・灘水塊の移流・交換量の季節変動特性

浜 走 幸 育*・日比野忠史**・駒 井 克 昭***・松 岡 純 作****

1. はじめに

瀬戸内海は 12 の湾・灘に分けられ、それぞれの海域において固有の水塊特性を有している。また豊後水道、紀伊水道および関門海峡を通じて外海水の流入や主要 21 河川（1 級河川）からの淡水流入があるため、季節的に変化する水塊の流入や内海水の滞留によって複雑な流れが生じていると考えられる。瀬戸内海の潮汐は関門海峡の入口が極めて狭いため、その殆どが豊後水道と紀伊水道から進入する潮汐に支配されている。

両水道の入口における M_2 分潮の振幅差と位相差は小さく、近似的には同じ水位変動をしているとみなされる。ただし、瀬戸内海は基本振動周期が半日より長い水路であり、豊後・紀伊の両水道から進入につれて潮時が遅れ、中央部の燧灘・備讃瀬戸で最も遅れる。特に半日周期は入口と中央部では 180° の位相差を生じ、満干が逆になる。また、複雑な地形を反映して流況も複雑であり、狭い海峡では局所的な強い潮流が見られ、潮汐残差流が発達する場所が多い（宇野木, 1993）。

国土交通省中国整備局は、瀬戸内海における海岸汚染の防除業務を効率的、積極的に行うため、また将来の利用・保全計画を策定するための基礎データ収集の一環として、瀬戸内海全海域において昭和 56 年度から定期的に総合的な水質調査を実施している（日比野ら, 2000）。本調査は瀬戸内海を 8 つの海域（伊予灘～紀伊水道）に区分して年 4 回の水質調査を行っている。湾・灘スケールの海水の移流量および海水交換量を求めることによって栄養塩等の物質循環を明らかにする可能性が高まり、この水質調査結果を有効に活用していくことが期待される。本論文では観測年の異常値を把握するための基準となる平年の瀬戸内海の各湾・灘間での移流・海水交換の季節変動量を推定することを目的としている。このため、国土交通省中国整備局・瀬戸内海総合水質測定調査結果

の他に日本海洋データセンター・潮位資料、河川流量年表を用いた。また外海の塩分として、大分県海洋水産研究センターのデータを豊後水道側の塩分、徳島県水産試験場のデータを紀伊水道沖側の塩分とした。

調査測点は館内全域に 8×8 km 間隔で配置され、現行（平成 1～11 年度）では湾・灘スケールの水質および底質の現況把握に重点を置いた合計 142 点となっている。調査項目は、年 4 回（5, 8, 10, 2 月期）の水温、塩分、DO, pH, 濁度等、また年 2 回（8, 2 月期）の海域代表点における採水による COD, SS および T-N, T-P, NO_2 -N, NO_3 -N, NH_4 -N, PO_4 -P 等の栄養塩である。瀬戸内海総合水質調査データは全調査項目に対して表層（海面 - 2.0 m）、底層（海底面 + 2.0 m, 50 m 超では水深 50 m）の観測値として整備されている。

2. 瀬戸内海における移流量の推定

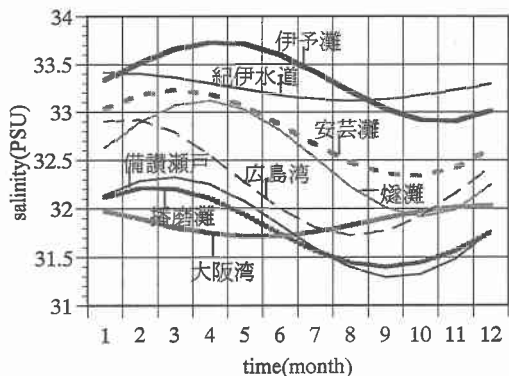
2.1 瀬戸内海での塩分と海面水位の季節変動特性

（1）塩分

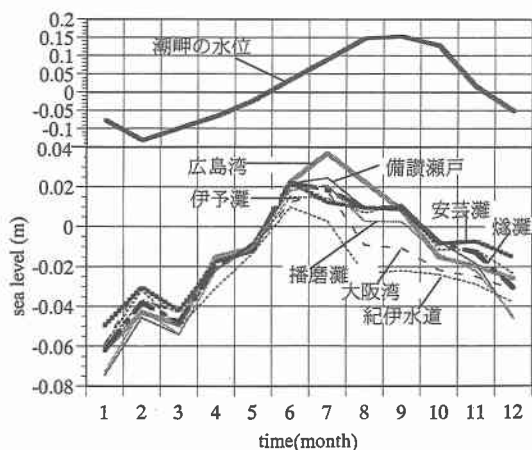
図-1 には塩分の観測データの平均値から求めた瀬戸内海各海域での塩分の近似曲線を示している。近似曲線は時間と物理量から最小 2 乗法によって求められている。

伊予灘、紀伊水道では、外海に近いので塩分は高いが紀伊水道で冬期から夏期に塩分が低くなっている。伊予灘では 4～5 月頃塩分のピークがあり、淡水の流入が多くなるにつれて徐々に塩分が低下する傾向である。これに対し紀伊水道では塩分の変動は小さく、河川流量が多い 9 月以降に塩分の上昇が現れている。この時期に紀伊水道に黒潮が接岸しており、外海の影響を大きく受けていると考えられる。安芸灘、燧灘は瀬戸内海中央に位置し、外海の影響を直接受けにくい、塩分は高い。これは、これらの海域に流入する河川流量が少ないこと、豊後水道からの流入の影響が強いことが考えられる。広島湾、備讃瀬戸、播磨灘は 2～3 月に最大があり、河川流量が多くなる 8～9 月に最小が現れる傾向にある。大阪湾は他の海域とは異なり、塩分は 32 (PSU) を下回る月がほとんどであることより、年間を通して河川流量の影響を強く受けていると考えられる。さらに、8～10 月に塩分

* 学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
** 正 会 員 工 博 広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻
*** 正 会 員 工 修 広島大学助手 大学院工学研究科社会環境システム専攻
**** 国土交通省中国整備局港湾空港部海域環境・海岸課長



図一 各海域の塩分の月変動

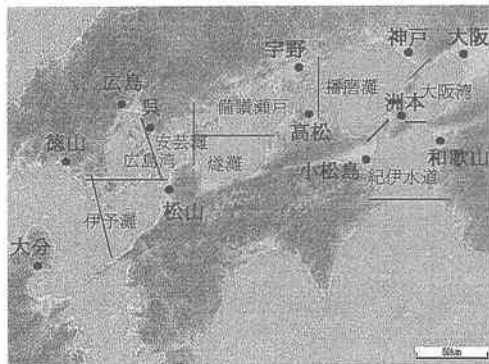


図二 潮岬との水位差の月変動 (上図は潮岬の水位)

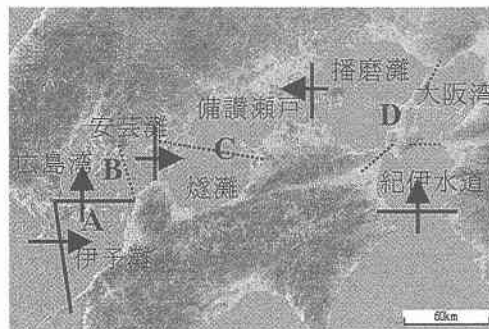
の上昇が起こっていることから紀伊水道とともにこの時期に外海からの影響を受けていると考えられる。

(2) 海面水位

海水交換量を推定するためには、湾・灘間での移流量を明確にしなければならない。移流量を推定するためには基準海面を知ることが必要であるが、沿岸域で観測されている水位の相対関係を知ることは非常に困難である。瀬戸内海平均海面の分布にはさまざまな結果が報告されているが、統一された水位の基準面がないのが現状である。一方で、海面水位は水温や気圧配置の関係が深いことが報告されており、これらの関係から平均海面が推定されている。日比野ら (2001) はグローバルな気圧勾配～水位勾配の季節変動から、水位勾配が気圧勾配のみに依存している時期 (気圧勾配と水位勾配の変化率が 1 cm/hPa) に瀬戸内海周辺の水位勾配が 0 になる基準海面を仮定し、瀬戸内海周辺における 5～6 月の平均の海面を基準海面としている。この結果を用いて各海域での平年水位 (1989～1998 年の平均値) を求めた。図一は各



図三 水位の観測点



図四 ボックスモデルの模式図

海域における潮岬との水位差を示している。水位は日本海洋データセンター潮位資料 (1976～1998 年の月別平均値) を用いた。水位の観測点を図一に示す。観測点はそれぞれの海域を代表するものではないため、伊予灘は徳山・大分・松山の平均、広島湾は広島、安芸灘は呉・松山の平均、燧灘は呉・松山・高松・宇野の平均、備讃瀬戸は高松・宇野の平均、播磨灘は高松・宇野・神戸の平均、大阪湾は神戸・大阪・洲本の平均、紀伊水道は小松島・和歌山の平均を用い、各海域の代表水位とした。外海の水位として、豊後水道側は油津・足摺岬の平均、紀伊水道沖側は潮岬・室戸岬の平均を用いた。

西部海域では 6 月頃から水位の上昇が顕著である。特に瀬戸内海では 6～9 月に潮岬の水位より高くなっている。これは黒潮の沿岸、暖候期の密度の増大、河川水流出量の増加が考えられる。この時期 (8, 9 月) に大阪湾と紀伊水道では水位が低くなっているが上記の理由を考慮すると、この海域ではバロクリニックな流れが卓越すると考えられる。

2.2 ボックスモデルを用いた移流量の推定

瀬戸内海総合水質調査結果を有効に活用するために図一のように、瀬戸内海を A～D の 4 海域と東部の 3 海域に分けた。A 海域は伊予灘、B 海域は広島湾と安芸

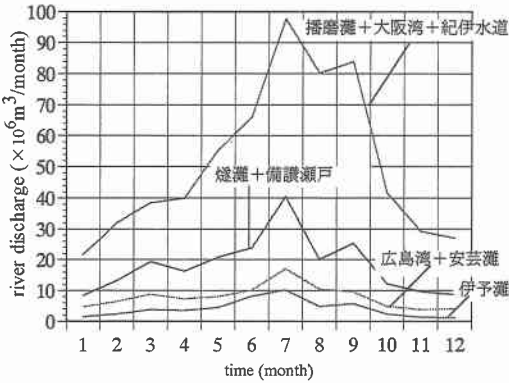


図-5 各海域に流れ込む河川流量

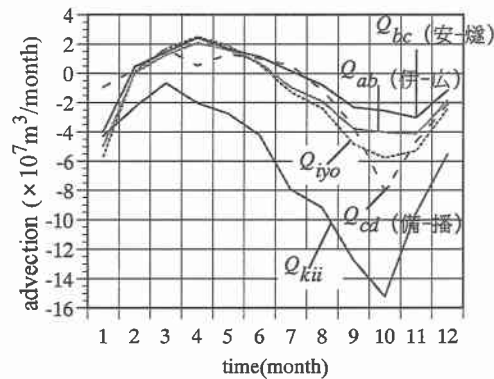


図-6 移流量の月変動

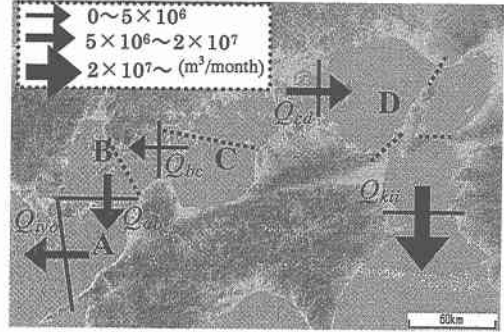


図-7 移流量の年平均と向き

灘, C 海域は燧灘と備讃瀬戸, D 海域は播磨灘と大阪湾と紀伊水道である。海域間の移流量は、海域内の体積の時間変化は海域間の移流量と、河川水の流入量に等しいとした質量保存則から求められる。ここで移流量は図-4の矢印の向きを正と定義する。

$$\frac{dV_i}{dt} = Q_{i-1,i} + Q_{i,i+1} + R_i \quad (i = A \sim D) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 dV_i/dt : 海域の体積の時間変化 (m^3/month)、 $Q_{i-1,i}$: 海域 $i-1$ と海域 i 間の移流量 (m^3/month)、 $Q_{i,i+1}$: 海域 i と海域 $i+1$ 間の移流量 (m^3/month)、 R_i : 海域 i に流入する全河川流量 (m^3/month) である。河川流量は河川流量年表の 1 級河川流量データ (1988~1998 年の月別平均値) を用いた。図-5 はそれぞれの海域に流れ込む河川流量を示す。東部海域で全体の 6 割程度の流出量があること、6~9 月の流出量が年間の 3 割程度あることが分かる。

まず C 海域を出発点とし、算出された移流量を代入していくことで、それぞれの海域間の移流量を求めることができる。C 海域を出発点とすると、広島湾、安芸灘 (B 海域) と燧灘、備讃瀬戸 (C 海域) 間の移流量 Q_{bc} と燧灘、

備讃瀬戸と播磨灘、大阪湾、紀伊水道 (D 海域) 間の移流量 Q_{cd} は、和の形 $Q_{bc} + Q_{cd}$ で算出されるので、両者の割合は B~C 間の水位差と B~C 海峡断面積より Q_{bc} を、C~D 間の水位差と C~D 海峡断面積より Q_{cd} を算出した。算出された全海域の移流量を図-6 に示す。図-6 の移流量の正負は移流の向きを表しており、図-4 で示した矢印の向きを正としている。正は外海から内海へ、負は内海から外海へ流れを表している。 Q_{ryo} は豊後水道と伊予灘 (A 海域) 間、 Q_{ab} は伊予灘と広島湾、安芸灘間、 Q_{kii} は播磨灘、大阪湾、紀伊水道と外海 (紀伊水道沖) 間の移流量を示す。図-6 から全体的に 7 月~10 月に移流量が多い。河川流入量が多い時期から 2~3 ヶ月遅れて移流量が多くなるが、大阪湾、紀伊水道の水位 (図-2) を見ると水位上昇が生じず、潮岬の水位が高くなることより、この時期に紀伊水道では、淡水流出や黒潮の接近によってエスチャリー循環が卓越すると考えられる。2~6 月には瀬戸内海西部、中央部では外から内へ向う流れが、瀬戸内海東部では内から外へ向う流れが生じている。8~1 月には瀬戸内海全体で内から外へ向う流れが生じている。図-7 に年平均の移流量と移流の向きを示す。年平均で見ると、瀬戸内海の水は外海へ流出する傾向にあり、特に瀬戸内海東部では年間通して外に向う移れが生じている。これは、東部海域に流入する河川流量 (特に淀川・吉野川) が外海水の流入量に比べて大きいことから瀬戸内海東部の海水は外海へ流出する傾向にあるためと考えられる。

2.3 瀬戸内海東部の移流量の推定

移流量 $Q_{cd} \cdot Q_{kii}$ が算出されると、瀬戸内海東部 (播磨灘・大阪湾・紀伊水道) 間の移流量を計算できる。図-8 に瀬戸内海東部のボックスモデルの模式図を示す。矢印の向きを正とする。D 海域は播磨灘、E 海域は大阪湾、F 海域は紀伊水道である。計算は E 海域から始めるものとする。播磨灘~大阪湾間の移流量 Q_{de} と紀伊水道~大阪湾間の移流量 Q_{fe} は和の形で算出されるため、2.2 と同じく両者の割合は D~F 間の水位差と D~F 海

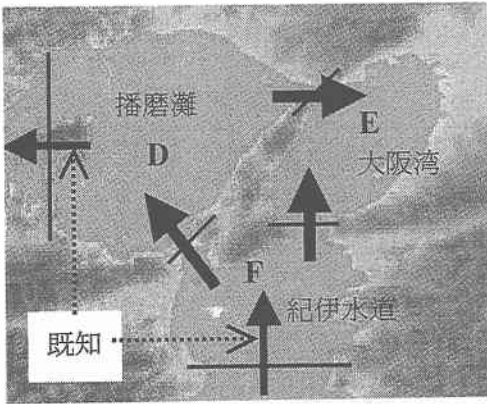


図-8 ボックスモデルの模式図(東部海域)

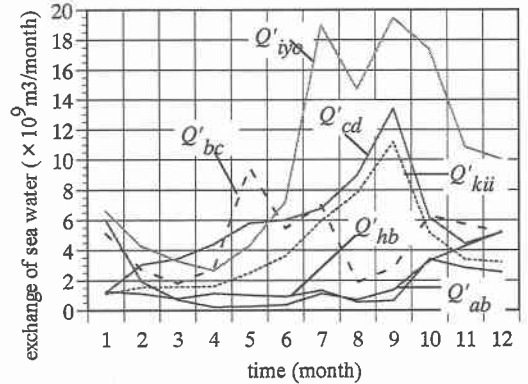


図-10 海水交換量の月変動

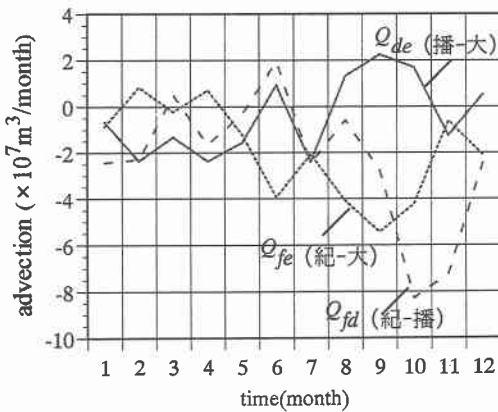


図-9 移流量の月変動(東部海域)

峡断面積より Q_{de} を E~F の水位差と E~F 海峡断面積より Q_{fe} を算出した。算出された瀬戸内海東部の移流量を図-9 に示す。 Q_{fd} は播磨灘~紀伊水道間の移流量である。

7月頃から大阪湾から紀伊水道への流れが生じ、これに伴って播磨灘から大阪湾に向かう流れが生じている。9月頃から播磨灘から紀伊水道に向かう流れが卓越するにしたがい、播磨灘から大阪湾に向かう流れは小さくなっている。

3. 瀬戸内海における海水交換量の推定

3.1 ボックスモデルを用いた海水交換量の推定

図-4 で分けた海域間の海水交換量について、保存系物質である塩分を指標として、宮野ら(2000)に倣いボックスモデルによる解析を試みる。海域間の海水交換による塩分フラックス ϕ は次式によって表わすことができる。

$$\phi = \Delta S \times Q' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ΔS : 隣接する海域間の塩分差, Q' : 海水交換量 (m^3/month)

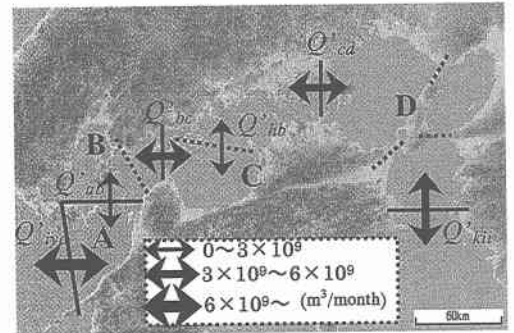


図-11 海水交換量の年平均

month) である。

各海域内の時間的な塩分変化量は、海域間の海水交換による塩分の移動と、移流による塩分の移動と、河川水による塩分の連行によって起こるとして次式より求めた。

$$\begin{aligned} \frac{dS_i V_i}{dt} = & (S_{i-1} - S_i) Q'_{i-1,i} + (S_{i+1} - S_i) Q'_{i,i+1} \\ & + S_{i-1} Q_{i-1,i} + S_{i+1} Q_{i,i+1} - S_i R_i \\ & (i = A \sim D) \dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 V_i : 海域 i の体積 (m^3), S_i : 海域 i の塩分, $Q'_{i-1,i}$: 海域 $i-1$ と海域 i 間の海水交換量 (m^3/month), $Q'_{i,i+1}$: 海域 i と海域 $i+1$ 間の海水交換量 (m^3/month), R_i : 海域 i に流れ込む河川流量 (m^3/month) である。

海水交換量を計算するため①~③を仮定した。

- ① 海水交換・移流による塩分移動は上下層の鉛直平均塩分、河川水は上層の塩分を連行するものとした。
- ② 塩分の供給は外海からであるので、まず、外海~瀬戸内海間での海水交換量 (Q'_{kii} と Q'_{iy}) を求め、次に各海域間の海水交換量を求めた。この時、豊後水道と紀伊水道沖の平均塩分を外海塩分とし、瀬戸内海の塩分

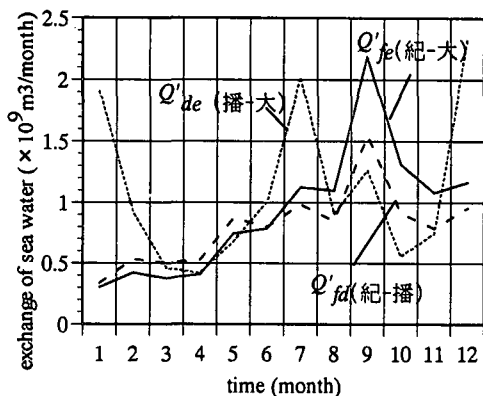


図-12 海水交換量の月変動 (東部海域)

は A～D 海域の平均塩分を用いた。

- ③ C 海域では燧灘と備讃瀬戸の塩分の変動が異なるため両者の平均を代表塩分とするには問題が生じる。そのため燧灘と備讃瀬戸は別にしその海峡の海水交換量 Q'_{hb} を定義することとした。

図-10 は海水交換量の月変動, 図-11 は海水交換量の年平均を示す。それぞれの海水交換量の計算は連立方程式を解いて算出した。

紀伊水道～外海間の海水交換量 Q'_{ki} と豊後水道～伊予灘間の海水交換量 Q'_{yo} , 備讃瀬戸～播磨灘間の海水交換量 Q'_{ca} が他海域間の数倍ある。 Q'_{ki} は河川流出量との対応がよいことから, 紀伊水道からは多量の内海水が外海へ流出するため, 紀伊水道ではこの流出に伴ったエスチャリー循環による外海水の流入 (ここでは海水交換として考えている) が考えられる。備讃瀬戸～播磨灘間においては海水交換量が 7～9 月に他の海域に比べて 10 倍近い値をとるが, この海峡では潮流が卓越し, さらに C 海域と D 海域での塩分差が大きいため海水交換量 Q'_{ca} が多くなると考えられる。移流量と海水交換量の比は約 1:50～100 であり, 塩分変動は移流量を無視できる。しかし, 西部海域の伊予灘～広島湾間では 4～5 月頃に移流量と海水交換量の比が 1:10 にまで縮まるため, 移流量は無視できない可能性がある。

3.2 瀬戸内海東部の海水交換量の推定

海水交換量 Q'_{ki} を用いて瀬戸内海東部の海水交換量を推定した。播磨灘～紀伊水道間の海水交換量 Q'_{ar} と大阪～紀伊水道間の海水交換量 Q'_{er} は未知量であるため, 両者の割合は播磨灘～紀伊水道の塩分差と大阪湾～紀伊水道の塩分差に比例すると仮定して求めた。図-12 に算出された瀬戸内海東部の海水交換量を示す。 Q'_{de} は播磨灘～大阪湾の海水交換量である。ここで, 3.1 の①の仮定で移流・海水交換は鉛直平均塩分を用いるとしていたが, 播磨灘と大阪湾とは塩分の挙動が異なり 6 月頃に

は播磨灘と大阪湾の塩分濃度が逆転する (図-1)。大阪湾では上層と下層で密度差が大きく明石海峡・紀淡海峡でシルがあることから, 大阪湾では上層と下層で密度差が大きくなる 3～8 月は上層塩分が輸送されると仮定して算出した海水交換量が図-12 である。東部海域においても海水交換は夏期に卓越している。播磨～大阪湾間の海水交換は, 両湾の塩分濃度逆転に対応してピークが出ている (図-1)。また, 東部海域の海水交換量は図-10 と比較して西部海域の伊予灘～広島湾間と同じ程度の交換量であり, 播磨灘～大阪湾間の 4 月と播磨灘～紀伊水道間の 1, 10, 11 月は移流量と海水交換量の比が 1:10 程度なので, 移流量の効果を無視できない可能性がある。

4. おわりに

瀬戸内海では春～夏期に外海から内海奥に向かう流れ, 夏～冬期に外海へ向かう流れが生じているが, 年平均では外海へ向かう流れが卓越する。特に東部海域においては年間を通して流出傾向にある。これは東部海域に流入する河川流量 (特に淀川・吉野川) が外海水の流入量に比べて大きいためである。紀伊水道ではこの流出に伴ってエスチャリー循環による外海水の流入 (海水交換量) が考えられる。なお伊予灘～播磨灘の塩分の季節変動は図-6 の移流方向と同傾向にあり, この移流量の妥当性が示唆される。また, 瀬戸内海の塩分変動は海水交換量が移流と比較して 100 倍程度あることが分かった。移流量の効果が海水交換量と同程度の影響を及ぼす時期は瀬戸内海西部 (伊予灘～広島湾) の 4～5 月頃であり, 特に豊後水道からの移流量の効果が大きくなること, 夏～冬期には海水交換量が卓越し塩分変動は海域間の移流量を無視できることが明らかにされた。

謝辞: 日本沿岸の潮位データは日本海洋データセンターのホームページ, 豊後水道の塩分データは大分県海洋水産研究センターのホームページ, 紀伊水道沖の塩分データは徳島県水産試験場からご提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp. 109-102.
 日比野忠史・駒井克昭・浅井 正 (2001): 瀬戸内海平均海面の推定, 水工学論文集, 45 巻, pp. 1069-1074.
 日本海洋データセンター, 海洋データオンライン提供サービス (JDOSS), http://www.jodc.jhd.go.jp/online_hydro_j.html
 宮野 仁・日比野忠史・中山恵介・岡田知也・細川恭史・浅井 正 (2000): 内湾域の水環境に及ぼす物理的要因に関する考察—瀬戸内海総合水質観測データによる解析—, 港湾技術研究所報告, 第 39 巻, 第 2 号, pp. 1-26.