

瀬戸内海における湾・灘での水質の季節変動特性

日比野忠史*・浅井 正**・細川 恭史***

1. はじめに

内湾域の水域環境に対する海洋運動の影響,さらには,気候の変動や温暖化など地球規模の現象による変化の程度をどう考えていくか.沿岸環境保全のために,どれだけ自然力を利用することが可能であるか.これらの問題は内湾域での現象のみで明らかにすることは不可能であり,外洋と内湾域での海水の流入出を考えることが必要である.外洋から内湾域にいつ,どのような性質の海水が流入し,これらが内湾域での生態系にどのような影響を与えているかを知ることが重要となる.本論文では第三港湾建設局瀬戸内海総合水質測定調査データ,気象庁海洋観測資料・海況解析データおよび河川流量年表を用いて瀬戸内海での季節的な水質の変動について検討を行っている.

瀬戸内海は豊後水道,紀伊水道および関門海峡を通じる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ると言われている.両水道の入口における M_2 分潮の振幅と位相の違いは小さく,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する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.

Takeoka (1984), 柳 (1997) は,瀬戸内海における河川水の平均滞留時間は 7.7 ヶ月程度であり,瀬戸内海に流入した河川水が太平洋に輸送される機構として潮流による混合が最も大きな役割を果たしていることを示唆している.また,上嶋ら (1985) は,瀬戸内海全域の水質汚濁機構を物理的側面から考察した結果,潮流と残差流の相乗効果が湾・灘間の海水交換に寄与していること,季節的な密度成層を考慮した実験から夏季の交換能力が

冬季の 2 倍以上にもなる可能性を示している.いずれにおいても瀬戸内海の流動構造や海水交換について理解するためには,季節的な湾・灘スケールの水質特性を把握することの必要性が示されている.

2. 瀬戸内海総合水質測定調査の概要

第三港湾建設局は,瀬戸内海における海岸汚染の防除業務を効率的,積極的に実施するため,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.調査測点は図-1 に示すように管内全域の 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おいた合計 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 等の栄養塩である.

取得データは全調査項目に対して上層(海面-2.0 m),下層(海底面+2.0 m, 50 m 超では水深 50 m)の観測値として整理されている.データの取得に際しては,各海域を担務する管内各工事事務所所有の調査船・清掃船・清掃兼油回収船を使用し,各期において数日間~数週間かけて実施されているため,これらのデータから広域での数日間の変化を見出すことは不可能であるが,広域での

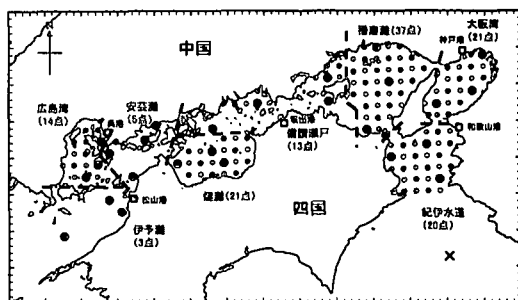


図-1 瀬戸内海総合水質測定調査(第三港湾建設局)の概要
(×は本論文で用いた徳島県水産試験場による観測地点)

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部 主任研究官(現 広島大学助教授 工学部第四類地域環境工学講座)
** 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局 海域環境課 課長
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部 部長

季節の変動特性を含むデータとして活用が可能である。

3. 瀬戸内海での水質変動と流れ

瀬戸内海の湾・灘規模での流れの構造、特に季節的な水質変化の特性を明らかにするため瀬戸内海（第三港湾建設局管内）を7つの海域（紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸、燧灘、広島湾・安芸灘、伊予灘）に分けて検討している。

3.1 総合水質測定調査データの特性

図-2には潮岬、足摺岬、那覇での月平均水位、潮岬（海面；△，100 m水深；▲），紀伊水道（観測点中の南東端地点，33.85°N，135°E，海面；●，40 m水深；○）での水温，紀伊水道、大阪湾、播磨灘に流入する月平均河川流量が示されている。潮岬の水温，水位データは気象庁，紀伊水道での●，○は総合水質調査されたものである。

紀伊水道の上下層水温は潮岬での月平均された水温と良く対応しており，33.85°N，135°E付近の水塊が外海水塊の特性を表していると考えられる。ただし，1992と93年の海面水温は潮岬の海面水温と3～4℃差が生じている。これは，観測月に河川流出が多く，紀伊水道に流入した河川流出の影響がでていることが原因と考えられる。ちなみに，河川からの流入量は紀伊水道（吉野川）で大きい。平均的には大阪湾と備讃瀬戸への河川流入が大きいことがわかる。播磨灘，伊予灘への河川流入量は大阪湾への流入量の約1/4である。

潮岬・足摺岬と那覇との水位を比較すると1990と94年では水位の逆転が生じており，水位は90年前半には那覇で高く，潮岬・足摺岬で低い。これに対して，94年は那覇で低く，潮岬・足摺岬で高くなっている。水温は90年前半は潮岬沖の100 m水深で低く，94年は潮岬の海面で高くなっている（紀伊水道40 m水深の水温は潮岬沖100 m水深の水温と同様に94年8月は90年8月と比べて約4.5℃高くなっている）。すなわち，那覇で水位が高い（低い）ときには四国沿岸で水位が低く（高く）なる傾向にある。瀬戸内海総合水質測定調査で得られた紀伊水道南端のデータは，この傾向を現しており，月の平均的な水塊の特性を有していると言える。

3.2 湾・灘内の水塊特性（10年平均値）

図-3には(a)燧灘，(b)播磨灘，(c)大阪湾，(d)伊予灘(●)，広島湾・安芸灘，(e)備讃瀬戸，(f)紀伊水道における1988～97年の10年間で平均された水温と塩分の関係，図-4には瀬戸内海の近年10年間(1988～1997年)の(a)2月期，(b)8月期の平均塩分分布(海面～2 m，海底+2 m)が示されている。図-3中の□，■は2月期，△，▲は5月期，▽，▼は8月期，○，●は10月期の観測値を表しており，白抜きが上層(海面～2 m)，塗りつぶしが下層(海底+2 m)の値を示している。

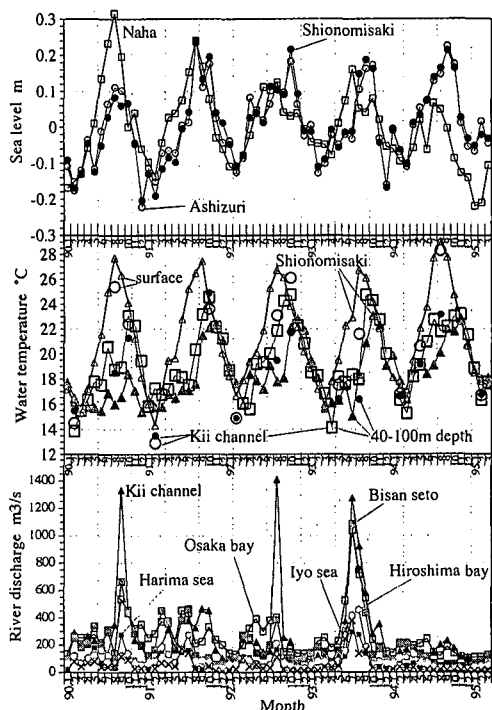


図-2 潮岬，足摺岬，那覇での月平均水位・紀伊水道における水温および瀬戸内海の各海域への流入河川水量の経時変化

図-3と4から，①-1 播磨灘と備讃瀬戸での水質が類似しており，両海域で塩分が低いこと，①-2 伊予灘，燧灘では海域内の水温・塩分分布の幅が小さいが河川流入量の大きい大阪湾，紀伊水道，広島湾では分布幅が大きくなっていること，①-3 大阪湾湾奥では年を通して表層水塊の塩分が小さいが，広島湾表層では5月期と8月期に塩分が小さくなっていること，①-4 2月期の水温・塩分は外洋に近づくに連れて高くなっており，備讃瀬戸，播磨灘で低く，紀伊水道と大阪湾，播磨灘では水温の水平勾配が大きいこと，①-5 2月期と5月期の紀伊水道と大阪湾では水温，塩分の差(水温～塩分関係は右上がり)が海域内で大きくになっているが，8月期と10月期には水温，塩分の差が小さく(一様化)になっていること，①-6 伊予灘，広島湾，大阪湾，紀伊水道での8月期と10月期の低層の水温～塩分関係は類似しているのに対し，播磨灘，備讃瀬戸，燧灘では水温差が大きい(8月期に高く，10月期に低い)こと，①-7 播磨灘の水塊で□で囲んだ水塊は大阪湾の水塊に類似し(○で囲んだ水塊は播磨灘固有)，備讃瀬戸の○で囲んだ水塊は燧灘の水塊に類似していること，①-8 紀伊水道と大阪湾での最高塩分は年を通して変化しないのに対して備讃瀬戸，燧灘では8月期と10月期に顕著な低塩分状態(播磨灘と同レベル)に

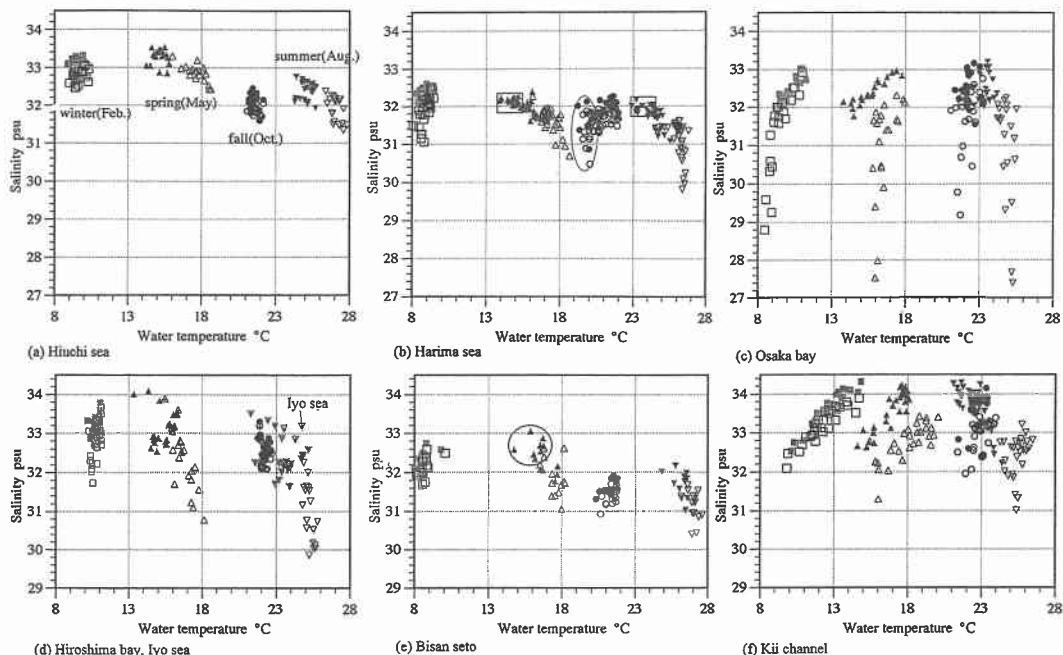


図-3 瀬戸内海の灘・湾における水温と塩分の関係 (1988～1997 年の平均値)

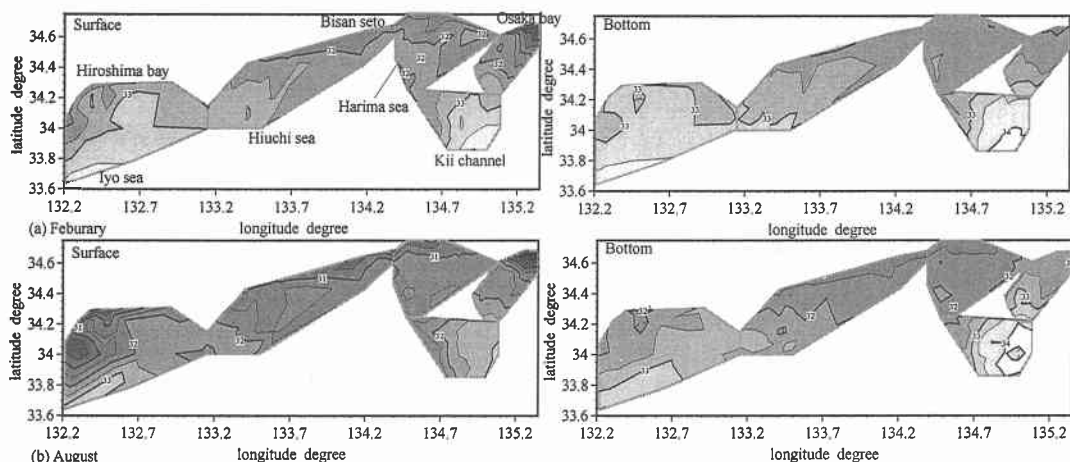
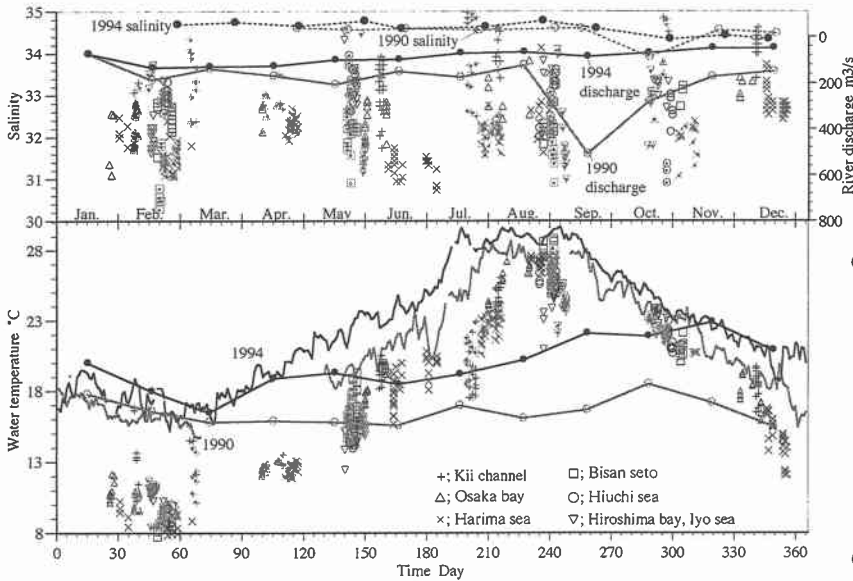


図-4 瀬戸内海における塩分分布の季節 (冬～夏季) 変化 (1988～1997 年の平均値)

ある (広島湾では8月期に低下) こと, ①-9 伊予灘, 燧灘の塩分は5月期に最大になり, 燧灘の5月期の塩分は広島湾より高いこと, ①-10 紀伊水道の紀伊半島側における8月期の下層では10月期の下層よりも高塩分低水温であることがわかる。

以上のことから瀬戸内海における各湾・灘の相互間での流れに関して以下のことが考えられる。②-1 瀬戸内海に流入した河川水は備讃瀬戸, 播磨灘に滞留する (①-1, 4), ②-2 大阪湾, 紀伊水道は外洋の影響が大きい海域と河川水の影響が大きい海域に大別できるが, 8～10月期

には一様化する傾向がある (①-2, 4, 5, 8), ②-3 大阪湾湾奥には年間を通して河川水の影響を受けた水塊が存在しているが, 広島湾へは10～2月期に高塩分水塊が流入してくる (①-3), ②-4 5～8月期の播磨灘下層へは大阪湾方向からの流入が主であるが, 10～2月期には大阪湾からの高塩分水塊の流入が小さくなる (①-6, 7), ②-5 5～8月期には備讃瀬戸へは伊予灘～燧灘方向から水塊が流入している (①-7, 9), ②-6 備讃瀬戸, 燧灘で8～10月期に塩分が低くなることからこの期間は大阪湾・紀伊水道で補給された陸水は播磨灘・備讃瀬戸方向へ流



(a) July, 1990
(A型蛇行流路, 四国沖に冷水塊の存在)

(b) July, 1994
(非蛇行接岸型, 四国沿岸水温の上昇, 図-5)

(c) March, 1991
(C型蛇行流路, 四国沖の冷水塊の消滅)

図-6 日本沿岸での水温 (水深 100 m) 分布, 黒潮流路

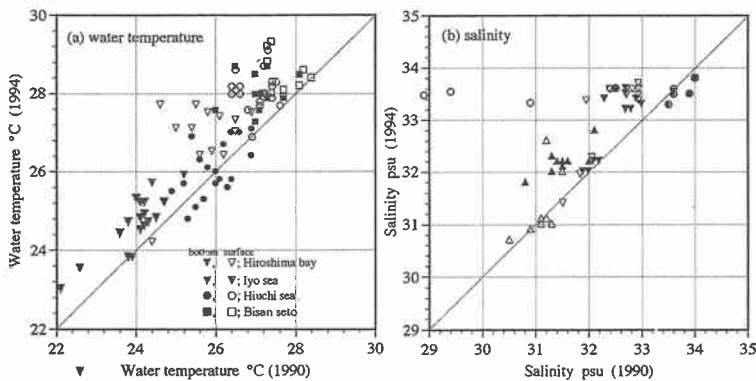


図-7 広島湾・伊予灘, 燧灘, 備讃瀬戸の夏季における 1990 年と 94 年の水温・塩分比較

入し, 備讃瀬戸・燧灘に停滞している (①-8), ②-7 四国沿岸の冷水塊が 8 月期頃に紀伊水道に流入する (①-10)。

3.3 瀬戸内海での塩分分布の季節変動

内海北部には年間を通じて塩分が低くなっており, この傾向は河川流出が大きい 8~10 月期に顕著である。河川流出は大阪湾と紀伊水道で多く, 河川水の影響は備讃瀬戸~燧灘付近まで及んでいる。高塩分の分布は紀伊水道から大阪湾に続いており, 紀伊水道から流入した外海水による海水交換は紀淡海峡で卓越していると考えられる。さらに, 紀伊水道では 8 月期に塩分が高く, 夏季に外海水 (四国沿岸の冷水塊) の流入が大きい, 外海水は大阪湾方向に流入し, 播磨灘へは大阪湾で希釈 (混合) された水塊が流入すると考えられる。鳴門海峡における

海水交換は吉野川からの流出水の挙動を検討することが必要であるが, この点については日々の水温・流速データを用いて今後検討する。

4. 瀬戸内海水塊への外海水の影響

4.1 黒潮流路とその影響

図-5 には燧灘 (○), 播磨灘 (×), 大阪湾 (△), 広島湾・伊予灘 (▽), 備讃瀬戸 (□), 紀伊水道 (+) における 1990 年と 94 年の海底での水温 (下段図)・塩分 (上段図) と観測日, 瀬戸内海に流入する 21 級河川からの流出量 (上段図の実線), および潮岬における海面 (実線) と 100 m 水深 (実線) の水温の季節変化, 図-6 には 90 年と 94 年 7 月の水温 (水深 100 m) 分布, 図-7 には

90年と94年8月下旬～9月上旬に広島湾・伊予灘(▼; 海底, ▽; 海面), 燧灘(●; 海底, ○; 海面), 備讃瀬戸(■; 海底, □; 海面)で観測された水温・塩分の90年と94年の比較が示されている。図-5中の薄いシンボル(・を付記)は90年, 黒シンボルは94年の観測値, 上段図の波線は徳島県水産試験場による塩分値(観測点は図-1中の×地点水深100m), 図-6中の実線は水温の等値線(7月は20°C, 3月は17°C)を示しており, 図-6中の等値線が黒潮との境界(黒潮と四国南岸の冷水塊との水温差は3～5°C, 90年に差が大きい)になっている。

黒潮が非蛇行接岸型の流路(図-6(b))をとった94年にはA型の蛇行流路(図-6(a))をとった90年に比較して潮岬での水温が高く, 海面では2～3°C, 100m水深では夏季～冬季に5°C程度の差が生じている(図-5, 3.1節では那覇と四国沿岸水位に関係から述べた)。以下では, 高水温水塊が潮岬に流入した94年および低水温水塊が流入した90年における瀬戸内海水塊(水温・塩分)の相違を明らかにすることで瀬戸内海への外海水の流入の影響を検討する。

94年には瀬戸内海全体で塩分が高い傾向にあり(播磨灘の5月期を除く), 5月期の広島湾・安芸灘, 8月期(9月上旬の観測, 図-7)の備讃瀬戸, 広島湾・安芸灘および10月期(11月上旬の観測)の燧灘で高塩分になっている。

90年は各海域での塩分の分布幅が大きくなっている。特に, 備讃瀬戸の塩分低下が顕著である。91年3月に黒潮がC型の蛇行流路(図-6(c))をとり, 四国沖の冷水塊は消滅する91年2月期の観測(図には90年8月期まで, 10月期は欠測)まで低い状態が続いている。

内海の水質は外海からの流入水塊と河川流出水との相互作用によって決定されると考えられる。90年春季の河川流入量は94年春季と同程度(図-5)であることから, 両年の塩分分布の差に対して河川水の流入による影響が少ないことが予想できる。90年に塩分の分布幅が大きいのは, 黒潮系水塊の流入量が少なかった(四国沿岸で水位が低く, 図-3, 紀伊水道沖で塩分が低い, 図-5)ことや陸水と外海水の混合が小さいことが考えられる。これらのことは内海水は流入水塊の微妙なバランスによって混合や滞留の時間・空間スケールが変化することを示しており, 黒潮接岸の影響が瀬戸内海の水質に及んでいることが示唆される。

4.2 瀬戸内海での水塊の滞留・移動特性

図-5から紀伊水道を除く海域での水温は潮岬海面水温よりも低くなっていることがわかる。特に, 2月期の観測では潮岬の水温よりも5°C以上低くなっている。さらに, 34を越える塩分は紀伊水道南端でのみで観測されていることがわかる。これらのことは瀬戸内海奥では外海水による海水交換が小さい(外海水の直接的な流入が

少ない)ことを示しており, 瀬戸内海北部(播磨灘, 備讃瀬戸, 広島湾)には陸起源の水塊が長期に滞留していることが予想される。

瀬戸内海各海域間の海水交換は複雑に行われている。例えば, 図-5において1994年5月期に観測された播磨灘での塩分は海底においても31.5以下(他の湾・灘, 他観測期に比較して低塩分)であるが, 8月期の観測では34を越える海域(備讃瀬戸側で高い)もある。5月期の観測は備讃瀬戸(5/24, 26), 紀伊水道(6/6-8), 大阪湾(5/30, 31, 6/9), 播磨灘(6/10, 13, 14, 16, 29, 30.7/4)の順に行われている。大阪湾上層を除く他の海域での塩分は31を超えていることから播磨灘での塩分低下は大阪湾上層水が流入したと考えるのが妥当である。また, 8月期の塩分は5月期より1以上高く(この期間に日本周辺海域では並年より3割程度の水温上昇がある, 宮野ら(2000)), 隣接する海域との海水交換(外海水の直接的な流入がある)が2ヶ月以内の時間で起こっている。瀬戸内海での海水交換は季節の変化に伴った流れのほか, 気象・海象変動等の影響を強く受け, 時空間スケールの異なる複雑な流れが組合わさって行われていると考えられる。

5. おわりに

(1) 瀬戸内海においては外海水による海水交換は大きくなく, 内海北部では年間を通じて塩分が低い。この傾向は河川流出が大きい8～10月期に顕著である。高塩分の分布は紀伊水道から大阪湾に続いており, 紀伊水道から流入した外海水による海水交換は紀淡海峡で卓越していると考えられる。

(2) 瀬戸内海水は流入水塊の微妙なバランスによって混合や滞留の時間・空間スケールが変化しており, 河川流出および黒潮接岸の影響が瀬戸内海の水質に及んでいる。

謝辞: 紀伊水道沖合の塩分は徳島県水産試験場より提供されている。また, 本データの整理に関して宮野仁氏(株)エコー, 港湾技術研究所受託研修生)に御支援を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 上島英樹, 橋本英資, 山崎宗広, 宝田盛康 (1985): 瀬戸内海水と外洋水の海水交換—瀬戸内海水理模型による海水交換実験—, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 742-746.
- 宮野 仁, 日比野忠史, 中山恵介, 岡田知也, 細川恭史, 浅井 正 (2000): 内湾域の水環境に影響を及ぼす物理的要因に関する考察, 港湾技術研究所報告, Vol. 39, No. 2.
- 柳 哲雄 (1997): 瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支, 海の研究 Vol. 6, No. 3, pp. 157-161.
- Takeoka, H. (1984): Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea. Continental Shelf Research, 3, pp. 327-341.