

運輸省港湾技術研究所

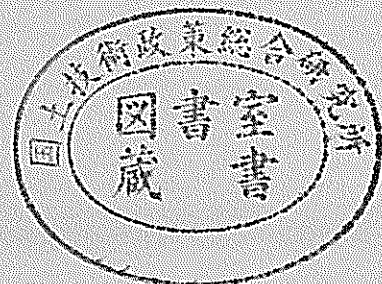
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.39 NO.2 June 2000

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第39巻 第2号 (Vol. 39, No. 2), 2000年6月 (June 2000)

目 次 (CONTENTS)

1. Numerical Study on the Flow Characteristics of Tide-Induced Jet
..... Jong-Chun PARK, Tomonari OKADA, Keita FURUKAWA,
Keisuke NAKAYAMA and Yasushi HOSOKAWA 3
(潮汐噴流の流れ特性に関する数値的研究
..... 朴 鍾千・岡田知也・古川恵太・中山恵介・細川恭史)
2. Compressive Behavior of Sensitive Ariake Clays
..... Zhenshun HONG and Takashi TSUCHIDA 27
(鋭敏な有明粘土の圧縮特性に関する一考察
..... 洪 振舜・土田 孝)
3. 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
— 瀬戸内海総合水質測定調査データによる解析 —
..... 宮野 仁 ・日比野忠史・中山恵介・岡田知也・細川恭史・浅井 正 47
(Estimates of Physical Factors Influencing on Enclosed Shallow Water Environments
— Water Exchange Analysis Based on the Data Sets of Comprehensive Investigations in Seto Inland Sea,
Japan —
..... Masashi MIYANO, Tadashi HIBINO, Keisuke NAKAYAMA, Tomonari OKADA,
Yasushi HOSOKAWA and Tadashi ASAI)
4. 大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内水環境に及ぼす影響の定量的評価
..... 岡田知也・中山恵介・日比野忠史・細川恭史 73
(A Quantitative Evaluation of the Influence of External Waters on the Water Environment of Ohfunato Bay,
Japan
..... Tomonari OKADA, Keisuke NAKAYAMA, Tadashi HIBINO and Yasushi HOSOKAWA)
5. ケーソン式岸壁の地震時変形に及ぼす上下動の影響について
..... 野津 厚・上部達生・風間基樹・三籐正明 99
(Effect of Vertical Ground Motions on Deformation of Caisson Quay Wall During Earthquake
..... Atsushi NOZU, Tatsuo UWABE, Motoki KAZAMA and Masaaki MITOU)
6. 海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する研究
..... 早川健司・山路 徹・濱田秀則153
(A Study on Durability of Recycled Concrete under Marine Environment
..... Kenji HAYAKAWA, Toru YAMAJI and Hidenori HAMADA)

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 — 瀬戸内海総合水質測定調査データによる解析 —

宮野 仁 *・日比野 忠史 **・中山 恵介 ***・岡田 知也 ***
・細川 恭史 ****・浅井 正 *****

要 旨

瀬戸内海は豊後水道、紀伊水道および関門海峡の3つの海峡を通して外海に面し、かつ、21の1級河川が流入している。外海や河川からの流入水塊の水質・量は季節的に変化するため、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と考えられる。本論文では、季節に1回観測される広域の水質データ(第三港湾建設局・瀬戸内海総合水質測定調査データ)を基に、気象庁海洋観測資料・海況解析データおよび河川流量データを用いて、瀬戸内海における平年の水質状態を把握し、これと比較することによって年や季節の変化を起こす物理的要因について検討を行った。

黒潮流路に伴った瀬戸内海周辺海域の水温変動について解析した結果、黒潮流路と潮岬(紀伊水道)および足摺岬(豊後水道)の海面水位・水温との対応が良いことがわかった。黒潮が非蛇行流路をとる時には紀伊水道から黒潮系暖水塊が流入し、蛇行流路をとる時には豊後水道から流入すると考えられ、外洋と接する境界付近での水塊特性やその挙動を把握することが重要であると示唆された。

さらに、保存系物質である塩分の季節平均分布と瀬戸内海へ流入する河川水の挙動を考慮した数値モデル解析により、海峡毎に異なる海水交換量を逆推定できた。東部海域の湾・灘を隔てる海峡付近での海水交換に寄与する乱れ(拡散)エネルギーを詳細に検討した結果、紀淡～鳴門～明石海峡の順に大きく、10月期、2月期に比べて5月期、8月期の方が大きくなることが認められた。このことは、湾・灘の海水交換量を精度良く見積もるためには、海域に実在する水塊の性質を適正な時間・空間スケールで評価する必要があることを示唆している。

キーワード：水温、塩分、黒潮流路、河川水流入、海水交換、拡散係数

* 海洋環境部環境評価研究室研修生(株式会社エコー)

** 海洋環境部主任研究官

*** 海洋環境部環境評価研究室

**** 海洋環境部環境評価研究室長

***** 第三港湾建設局海域環境課長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：0468-44-5018 Fax：0468-44-6243 e-mail:miyano@cc.phri.go.jp

Estimates of Physical Factors Influencing on Enclosed Shallow Water Environments – Water Exchange Analysis Based on the Data Sets of Comprehensive Investigations in Seto Inland Sea, Japan –

Masashi MIYANO*
Tadashi HIBINO**
Keisuke NAKAYAMA***
Tomonari OKADA***
Yasushi HOSOKAWA****
Tadashi ASAI*****

Synopsis

We examined the physical factors affecting annual and seasonal changes in water quality of the Seto Inland Sea, Japan by using the data measured by several institutions, mainly the Third District Port Construction Bureau and Meteorological Agency. The observed sea level and water temperature at Cape Shiono and Cape Ashizuri were influenced by the course of Kuroshio stream in the Pacific Ocean. This result suggests that open boundary condition is sensitive to the annual/seasonal fluctuation of water quality in inland seas.

Numerical analyses, with considering the seasonal distribution of salinity and the discharge from rivers, revealed that water exchange rate varied among different straits. The value of exchanging rate shows good agreement with those by previous studies. The more detail modeling for water exchange mechanism shows turbulent diffusion in the vicinity of three straits (Kitan strait, Naruto strait and Akashi strait) changed locally and seasonally. The highest energy of turbulent diffusion was found at the Kitan strait. The energy of turbulent diffusion in summer was found higher than those in winter at each strait. It means the water mass characteristics need to be determined with data sets of the suitable temporal and spatial scales.

Key Words: water temperature, salinity, the course of Kuroshio stream, river discharge, water exchange, diffusion coefficient

* Trainee of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environmental Division, ECOH Corp.
** Senior Research Engineer of Marine Environmental Division
*** Research Engineer of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environmental Division
**** Chief of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environmental Division
***** Director of Environment Division, The Third District Port Construction Bureau
3-1-1, Nagase Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5018 Fax : +81-468-44-6243 e-mail:miyano@cc.phri.go.jp

目 次

要 旨	47
1. はじめに	51
2. 黒潮・対馬暖流接岸域沿岸での水位・水温変動	53
2.1 西日本沿岸域での水温・水位の変化特性	53
2.2 海流と沿岸域の水質	54
2.3 本章のまとめ	56
3. 瀬戸内海周辺での水質変動と流れ	57
3.1 総合水質測定調査の概要	57
3.2 瀬戸内海水塊の水質変動特性	57
3.3 本章のまとめ	64
4. 数値モデルによる海水交換に関する考察	64
4.1 湾・灘間での海水交換量の推定	64
4.2 海峡部での海水交換機構に関する定性的な評価	65
4.3 本章のまとめ	66
5. おわりに	67
謝辞	67
参考文献	67
付録	68

1. はじめに

内湾域の水環境に影響を及ぼす物理的要因は、河川から水塊流入、湾内循環等の内湾域での現象のみに支配されているわけではなく、海流に代表される海洋の運動の影響、気候の変動や温暖化といった湾外の現象にも強く支配されていると考えられる。沿岸環境保全のためには、河川からの淡水供給だけでなく、外洋と内湾域との海水の流入も含めて、内湾域にいつ、どのような性質の海水が流入し、これらによって内湾域の生態系がどのような影響を受けているのかを知ることが重要となる。

本論文では、瀬戸内海をモデルケースとして、様々な気象・海況データの整理、解析を行うことにより、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を行った。まず、瀬戸内海を取り囲む外洋での現象として、黒潮・対馬暖流が接岸する沿岸での水位・水温変動特性を整理した。続いて、瀬戸内海での季節的な水質変動特性を検討し、瀬戸内海の湾・灘間での海水交換機構（流れの方向、交換量、交換時間）のモデル化および考察を行った。

検討のためには、年4回瀬戸内海全域で実施されている第三港湾建設局・瀬戸内海総合水質測定調査データをはじめ、気象庁海洋観測資料・海況解析データ、河川流量年表を用いることにより、時間・空間的に広がりを持った水質状況について解析を行った。

日本列島は西にアジア大陸、東に太平洋が広がるため、四季（気候）に応じた気圧配置が形成される。日本周辺沿岸域では、こうした気候・気象（気圧場の変動）に応じた様々な変化が起こっている。これらは、三陸沿岸や東京湾の水質に現れており（日比野ら, 1999, 2000）、瀬戸内海においてもその影響は少なくないと予想される。代表的な外洋での現象として以下のような整理が行える。

- ①日本周辺では、暖候期には太平洋に小笠原気団（太平洋高気圧）が発達するために、気圧は太平洋で高く、日本海で低くなり、東西方向に気圧勾配が形成される。寒候期になるとアジア大陸でシベリア気団（高気圧）が卓越し、暖候期とは逆の気圧配置となる。
- ②黒潮流路は蛇行（A～D型）、非蛇行（N型）に大別でき、蛇行流路では八丈島に対してどちら側で蛇行しているかによってパターンを分けることができる。すなわち、遠州灘沖の流路（A型、B型）、八丈島の南側流路（C型）、房総沖の流路（D型）の蛇行パターンがある。なお、A型は30°N付近まで大きく南方へ蛇行する流路である。
- ③黒潮域（29°N, 135°E）水深100mでの水温は19～22℃（5月頃～11月頃まで成層）の範囲で変化する。黒潮内

での水温は2月に低く、8月に高いのに対し、対馬暖流域（37°55'N, 134°33'E）では水温のピークの特定は難しく（数週間～数ヶ月の変動（約5℃）が大きい）、短周期の変動を除くと8～13℃変化がある。本州南岸の沿岸域に現れる黒潮系水塊の塩分は34.5psu程度で、黒潮の内側での塩分は34.7psu以上ある。

- ④日本沿岸域では冬季に向かって水位が低下（西日本で低下量大）する。日本海では9月頃からの水位低下に伴って対馬海峡から高塩分の海水が流入する。
- ⑤夏季、東シナ海、日本海へは黄海方向（黄河、長江起源）から低温・低塩分の水塊が流入してくるために、対馬付近では表面塩分は32psu程度となっている。

一方、瀬戸内海での気候・気象現象に目を向けると、以下のような整理ができる（小坂, 1985）。

- ①瀬戸内海の気候は「瀬戸内海性気候」と呼ばれ、一般的に年間を通じて温暖で雨量が少ない。
- ②年平均気温は15℃程度、年平均降水量は1000～1500mmで、瀬戸内海中央部で最も少ない。
- ③季節的には、冬から春にかけて内陸性気候（日本海側と同様に低温）、春から夏にかけて海洋性気候（太平洋側と同様に高温）の様相を示す。
- ④瀬戸内海は東西に長く広がり、複雑な海岸線と多くの島などの地勢的影響を受け、気象は局地的に変化しやすい。

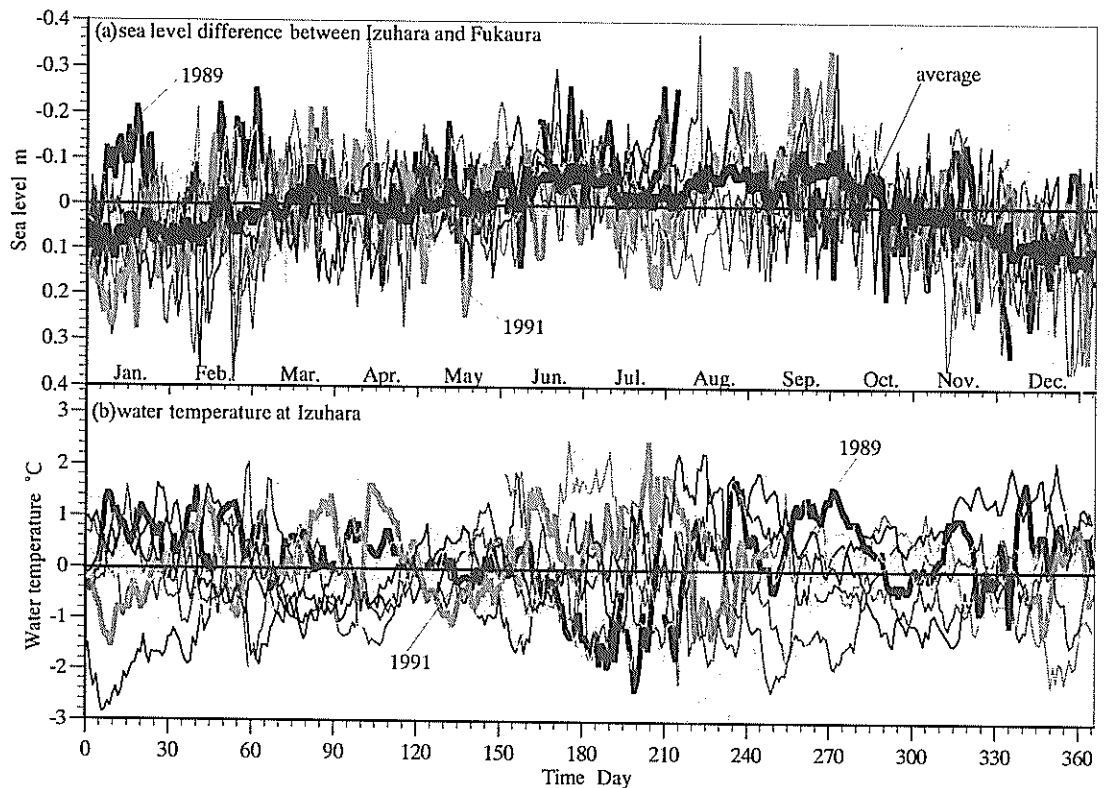
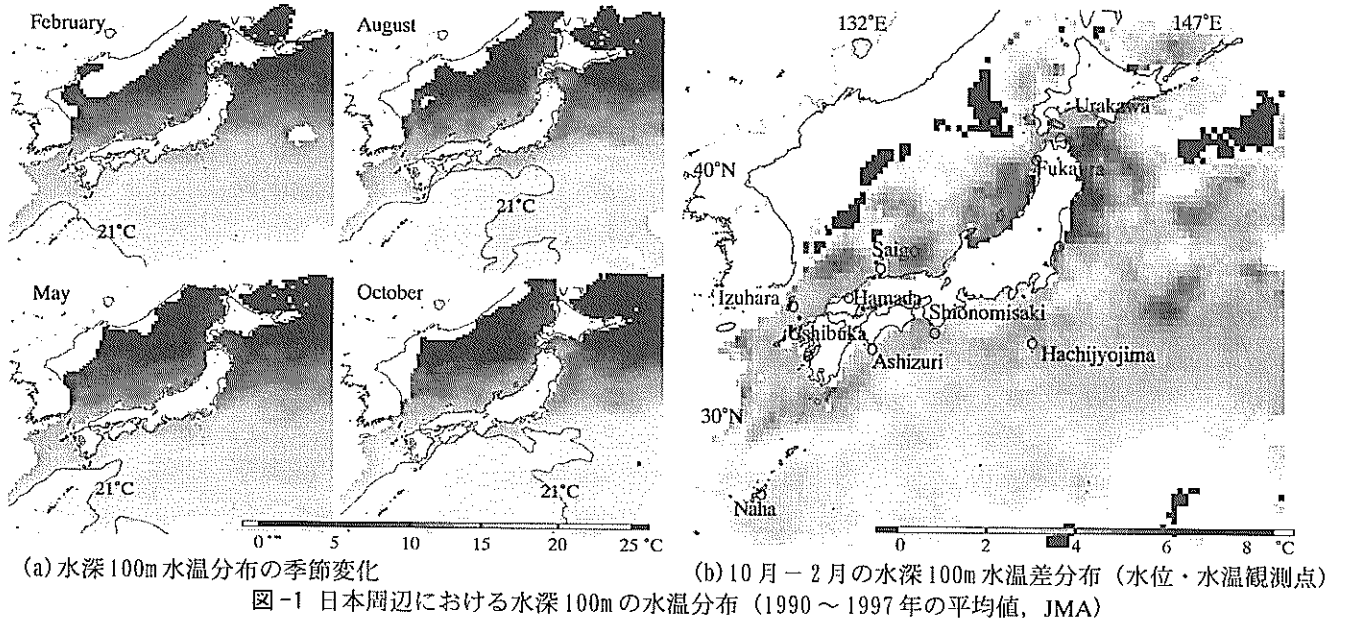
瀬戸内海は豊後水道、紀伊水道および関門海峡を通じる外海水の流入や主要21河川（1級河川）からの淡水流入があるため、季節的に変化する水塊の流入や内海水の滞留によって複雑な流れが生じていると考えられる。瀬戸内海の潮汐は関門海峡の入口が極めて狭いため、その殆どが豊後水道と紀伊水道から進入する潮汐に支配されている。両水道の入口におけるM₂分潮の振幅と位相の違いは小さく、近似的には同じ水位変動をしているとみなされる。ただし、瀬戸内海は基本振動周期が半日より長い水路であり、豊後・紀伊の両水道から進入するにつれて潮時が遅れ、中央部の燧灘・備讃瀬戸で最も遅れる。特に半日周潮は入口と中央部では180°の位相差を生じ、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）。

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 (1984, 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。したがって、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が有効な手掛かりとなる。

大阪湾については、中辻ら(1995)により、現地観測結果および数値実験結果から、淀川河川水に影響された成層

海域である大阪湾東部において上層で湾口に、下層で湾奥に向かうエスチャリー循環が卓越していること、この鉛直的な循環機構が上層の水平発散を起こし、地球自転効果の影響を受け時計回りの水平循環（高気圧性渦：西宮沖還流）を作り出すことが明らかされている。一方、藤原ら(1997)は、流速ならびに栄養塩の実測結果から、栄養分豊かな外洋水が大阪湾の下層に流入していること、潮汐の変化を差し引いた残差流により陸起源の流入量に



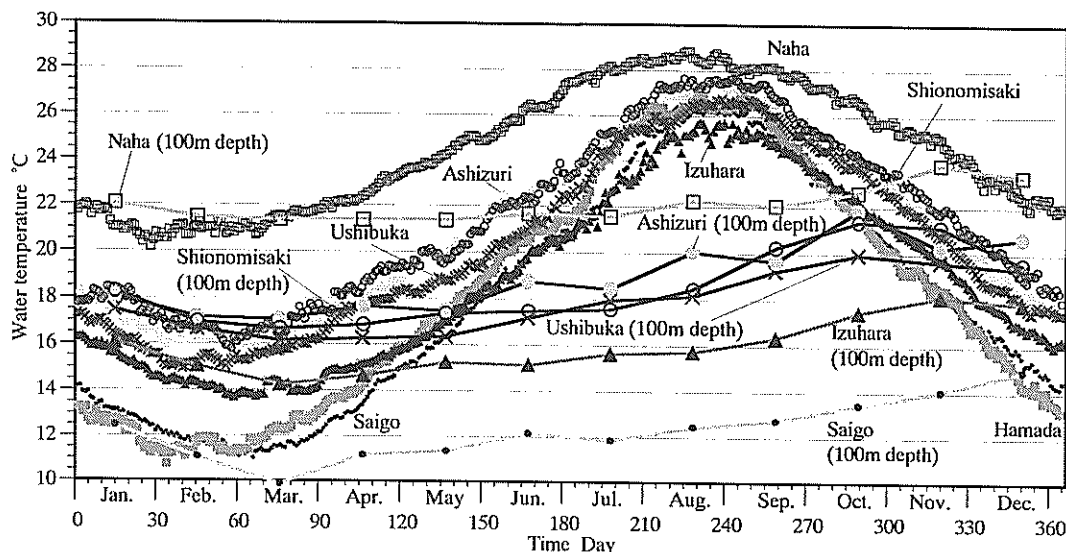


図-3 那覇、足摺岬、潮岬、牛深、厳原、浜田、西郷における日平均水温の季節変化 (1987～1995年の平均値)

相当する窒素(外洋から200t/day, 河川等から200t/day) やリン(外洋から34t/day, 河川等から20t/day) が紀伊水道を通じて外洋から大阪湾へ流入していることを明らかにしている。また、窒素やリンの総量規制を行ったとしても外洋から流入している限り、大阪湾の水質はなかなか改善されない可能性を指摘している。

2. 黒潮・対馬暖流接岸域沿岸での水位・水温変動

2.1 西日本沿岸域の水温・水位の変化特性

(1) 日本周辺の水温分布の変動特性

図-1(a)には1990～1997年の月毎に平均された2月, 5月, 8月, 10月の水深100mでの水温(図中の実線は21℃の等値線), (b)には日本周辺で水温が高い10月と水温が低い2月の水温差および本解析で用いた水位・水温の観測地点が示されている(白抜け範囲はデータなし)。

図-1(a)から2, 5月は西日本南岸の水温変化は小さいが, 8, 10月には黒潮本流が豊後水道および紀伊水道に流入し, 水温が上昇していることがわかる(黒潮と西日本南岸冷水塊の境界には水温差が2～3℃ある)。九州西岸～日本海側においても10月に水温が高くなっており, 対馬暖流が暖水を日本海へ運んでいることが予想できる。さらに, 21℃以上の水塊は2, 5月には沖縄付近, 8, 10月は相模湾沖まで達していることがわかる。このように, 日本沿岸域では接岸する海流の水温変動が大きく, 内湾域に与える影響は小さくないと考えられる。瀬戸内海では豊後水道, 紀伊水道, 関門海峡で内海水の流出入があるために, 季節的な水温較差が2～5℃であると読み取れる。

(2) 日本列島南北の水位差と水温変化

図-2には1987～1996年までの(a)日本海水塊の出入り口にある厳原(対馬)と深浦(青森県)の日平均水位差と(b)厳原における10年平均水温との日水温偏差が示されている。図-2(a)の太実線は10年間の平均水位差を表している。厳原と深浦の水位の逆転は4～5月と10月に起こっている。これらの期間には厳原での水温の年変動幅は小さくなっていることがわかる。日本周辺では4～5月は水位上昇, 10月は水位低下が起こっており, 水位の変位は南側ほど大きいため厳原と深浦間の水位の逆転が起こる。この時期に毎年の水温変動幅が小さいのは, 毎年繰り返される(年変動の小さい)厳原周辺での流れ(日本海への流出入)が生じていることが考えられる。

(3) 太平洋沿岸域(日本)の水温変動と海流

図-3には那覇, 牛深, 厳原, 浜田, 西郷(隠岐), 足摺岬, 潮岬の表層における1987～1995年の9年間の同日の平均水温および図-1に示した100m水深の水温分布から抽出した牛深, 厳原, 浜田, 西郷, 足摺岬, 潮岬での水温(気象庁提供)の季節変化が示されている。

図-3から以下のこと(海面水温に関しては①, 水深100mでの水温については②)がわかる。

①-1 太平洋側の足摺岬, 潮岬, 九州西岸(東シナ海)の牛深では, 水温変化は類似しており(牛深で約1℃低い), 那覇での水温変化と比較すると年後半に水温差が小さくなっている(最低, 最高水温の出現には那覇より約1ヶ月の遅れがある)。

①-2 厳原では牛深の水温変化と類似(年間を通じて約1℃低い)しているが, 最低水温が現れるのが約

1.5ヶ月遅れている。

- ①-3 日本海側にある浜田と西郷での水温は冬季に水温が低く、水温較差が大きい(約16.5℃)。
- ①-4 浜田、西郷の水温は3月頃から急激に上昇し、夏季(5~9月)には巖原の水温よりも高くなるが、9月頃から急激な水温低下がある。
- ①-5 巖原、浜田、西郷の水温上昇は同時期(3月頃)に起こっているが、上昇量は浜田、西郷で大きい。
- ②-1 足摺岬、潮岬、牛深では10月に水温が最高になっているのに対し、日本海にある巖原、西郷では水温の最大の出現が1~2ヶ月遅れている(日本海の北東側ほど水温が低く、最高水温の出現が遅れる)。
- ②-2 那覇の水温と足摺岬、潮岬、牛深との水温差は3月頃から減少し始め10月頃最小となる(8~9ヶ月で約4℃上昇し、3~4ヶ月で約4℃低下する)。
- ②-3 足摺岬、潮岬、巖原では11~4月に表面と100m水深での水温が一致しているのに対し、西郷では12~2月に海面と100m水深での水温が一致している。
- ②-4 12~3月には牛深では100m水深の水温が海面水温より高く(2月に2℃)なっている。
- ②-5 巖原の100m水深へ到達する対馬暖流の水温は牛深の水深100mに到達する水温よりも年間を通じて約2℃低い。

これらの現象から黒潮水塊が移流する時期と流れ方向を考えることができる。

- ③-1 5月頃から10月頃まで(図-2において深浦で相対的に水位が高い期間、8月頃までは日本周辺では水位は上昇する)黒潮系の高水温塊は四国南岸、九州西岸に徐々に近づき、この期間は瀬戸内海へ豊後水道および紀伊水道から黒潮系暖水塊が流入しやすい状況にある(①-1, ②-2)。
- ③-2 九州西岸(牛深)へは年間を通じて四国沿岸へ向かう黒潮系水塊と類似の水温塊が流入している(①-1, ②-1)。
- ③-3 日本海表層へは3~9月頃まで太平洋側から水塊が流入し、9月下旬頃からは北方向からの流れが生じている(①-3, 4)。
- ③-4 日本海にある低水温塊は巖原にまで達していない(①-5)。
- ③-5 巖原へは黄海の影響が海面上に現れる(①-4, 5)。
- ③-6 冬季、牛深沿岸の海水面へは北方向(黄海または日本海)から冷水塊が流入する(②-4)。

(4) 海面水位と水温変動

図-4には1985~1995年3月までの那覇、足摺岬、潮

岬、牛深、巖原、浜田、西郷および浦河(北海道)の月平均水位と月平均水温、図-5には月平均水位の10年間の平均値(水位・水温、1985~1994年)との比の経月変化が示されている。

図-4, 5から以下のこと(④)がわかる。

- ④-1 1985~94年では水位・水温とも上昇傾向にある。
- ④-2 八丈島では2~3年周期で水位が低下している。
- ④-3 日本海側沿岸域と八丈島の水位変化の関係は太平洋沿岸域と八丈島の水位変化の関係と同程度の相関がある。
- ④-4 八丈島での水位低下時に沿岸域での水温が低下する傾向にある。
- ④-5 日本海側にある浜田、西郷での水温変動幅が他の沿岸域に比較して大きい。
- ④-6 1990年前半は牛深、浜田、西郷で水温が高く、足摺岬、潮岬で低くなっている(八丈島での水位が90/3月~91/3月まで低下)。

八丈島の水位が西日本沿岸域の水位変化と対応が良く(④-1, ④-3)、かつ、沿岸水温変化との対応も良い(④-4)ことから、黒潮流路が日本沿岸の水位に影響を与え、黒潮が日本沿岸へ輸送する熱量が大きいことが示唆される。

なお、近年の水位・水温上昇(④-1)は黒潮流路との関連があると考えられる。また、④-6は黒潮流路の変化によって沿岸域に流入する水塊の性質を変化させると考えられる(詳細は付録Aを参照)。

2.2 海流と沿岸域の水質

(1) 豊後水道、紀伊水道からの流入水塊

図-6に(a)足摺岬と潮岬の水位差と水温差、那覇と八丈島の水位因子(月平均水位/10年間の月平均水位)差(那覇における水位因子-八丈島での水位因子/4.6、図-5参照)、(b)浦河(北海道)と那覇(沖縄)の水位差、牛深(長崎)と西郷(隠岐)の水温差の関係が示されている。図6-(a)で八丈島の水位因子を4.6で除しているのは那覇での水位変動幅を八丈島の水位変動幅と同等に(正規化)するためである。また、図6-(a)で那覇と八丈島の水位因子差を比較するのは那覇と八丈島の水位が黒潮流路との間に強い関連があると考えられる(日比野ら, 2000)ためであり、図6-(b)で北海道と沖縄での水位差と牛深と西郷の水温差を比較するのは、三陸沿岸に流入する水塊の変化が北海道と沖縄の水位差と強い関連があることによる(日比野ら, 1999)。

図-6(a)から足摺岬と潮岬の水位差と水温差および那覇と八丈島の水位関係が良い対応にあることがわかる。

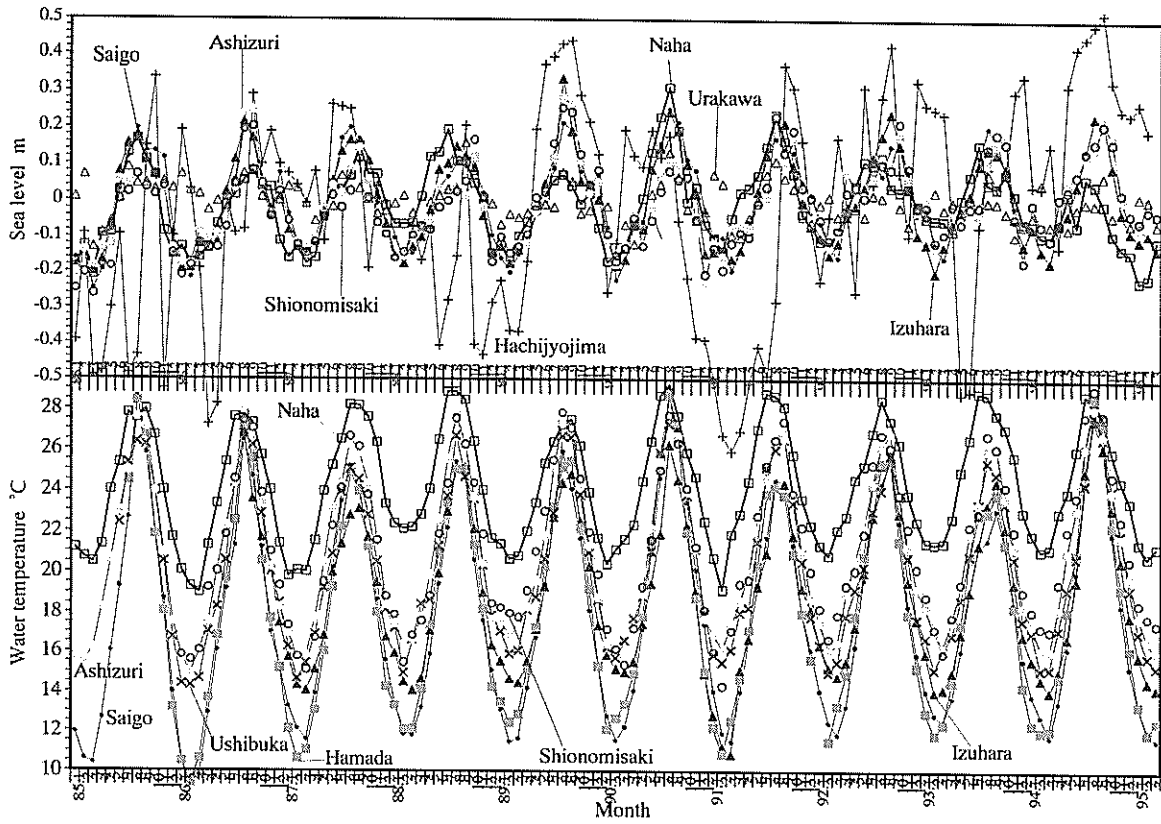


図-4 那覇, 足摺岬, 潮岬, 牛深, 巖原, 浜田, 西郷, 八丈島および浦河における月平均水位および水温の経時変化

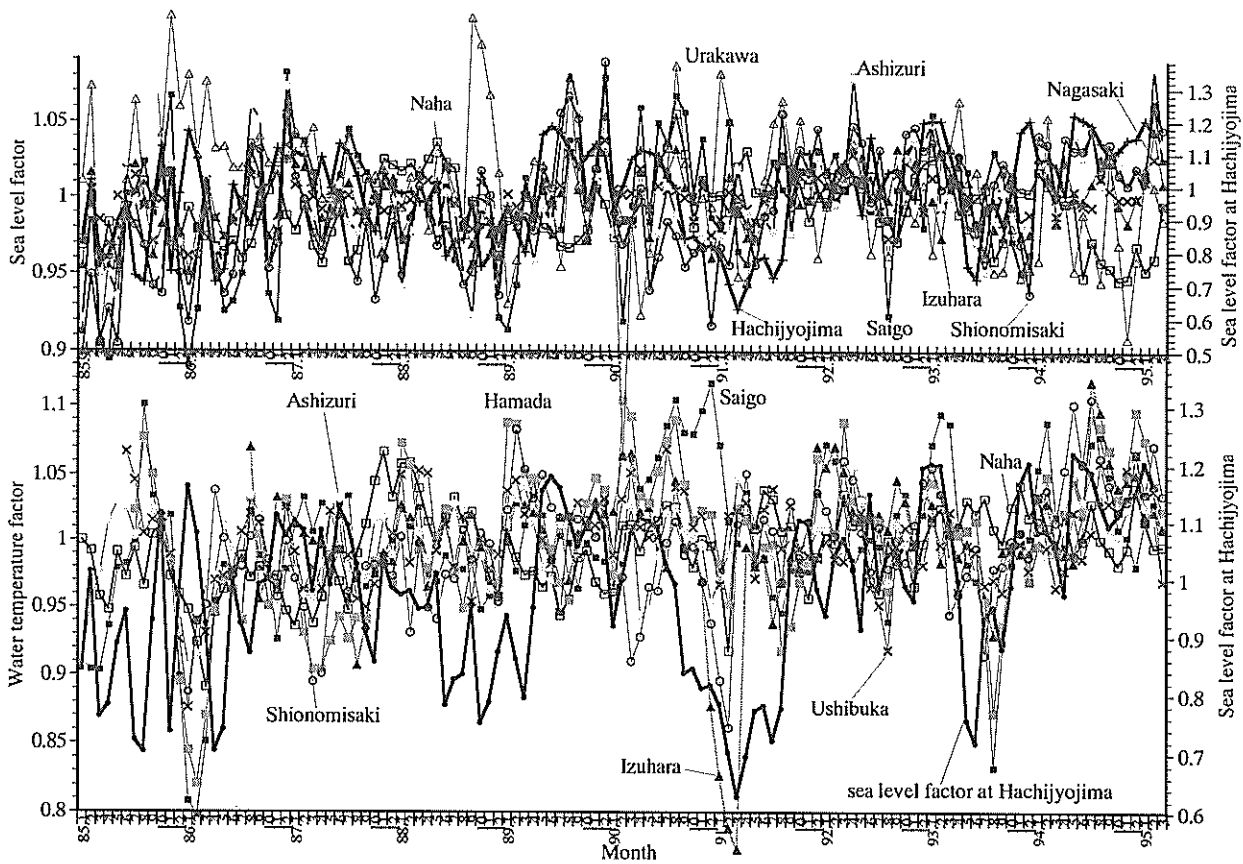


図-5 那覇, 足摺岬, 潮岬, 牛深(長崎), 巖原, 浜田, 西郷, 八丈島における水位および水温の月平均値の並年値との比

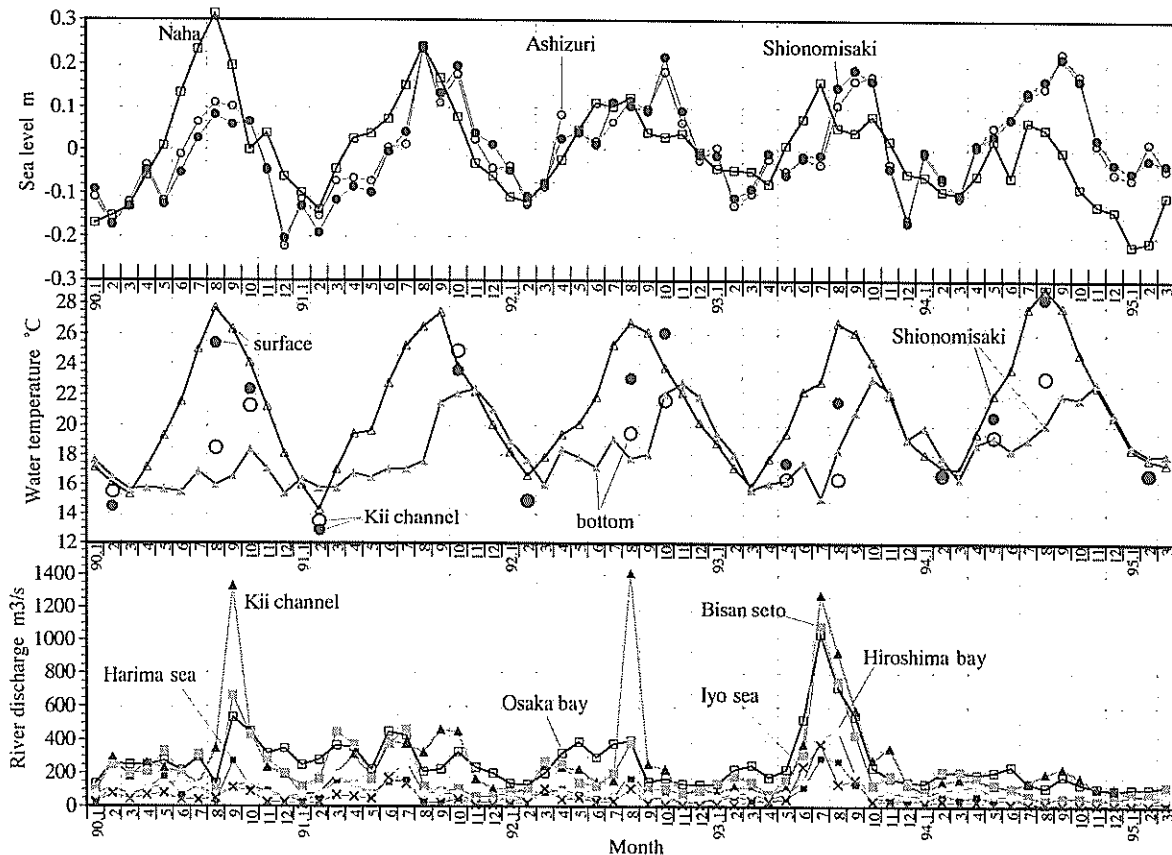


図-7 潮岬，足摺岬，那覇の月平均水位，紀伊水道の月平均水温および瀬戸内海の各海域への流入河川水量の経時変化

すると考えられる。逆に、那覇で水位上昇、八丈島で水位低下が起こると、黒潮が東シナ海に深く浸入し、蛇行する（熊野灘～遠州灘沖に反時計廻りの冷水塊渦の生成）。この結果、豊後水道側に相対的に暖かい水塊が流入すると考えられる。

瀬戸内海の水質変動は外洋との境界部での水塊変動によってもたらされ、外洋での海流（黒潮）の流路や性状の変化が境界部付近における水質変動の要因の一つとして寄与していると考えられる。

3. 瀬戸内海周辺での水質変動と流れ

3.1 総合水質測定調査の概要

本章では、瀬戸内海での流れの構造、特に湾・灘規模での季節的な流れの特性を明らかにすることを目的として、第三港湾建設局によって測定された瀬戸内海総合水質測定調査データを用いて検討を行う。ここでは、瀬戸内海（同建設局管内の海域）を図-B.1に示す8つの海域（紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸、燧灘、安芸灘、広島湾、伊予灘）に分けて検討している。

調査測点は管内全域の8×8km間隔で配置され、現行では湾・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（付録B参照）。調査項目は、年4回（5、8、10、2月期）の全測点における水温、塩分、D₀、pH、濁度など、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などの栄養塩である。

取得されたデータは、全調査項目に対して上層（海面-2.0m）、下層（海底面+2.0m、50m超では水深50m）の観測値として整理されている。そのため、鉛直的に連続した分布特性は評価できない。特に、下層のデータについては測点により水深が異なるため、測定水深を考慮した解析が必要である。また、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、広域での季節間より長い時間スケールの変動特性を含むデータとして活用が可能である。すなわち、取得データは湾・灘の空間スケールでの季節的な水質変動特性を表すものである。

3.2 瀬戸内海水塊の水質変動特性

瀬戸内海での海水交換は主に紀伊水道と豊後水道を通

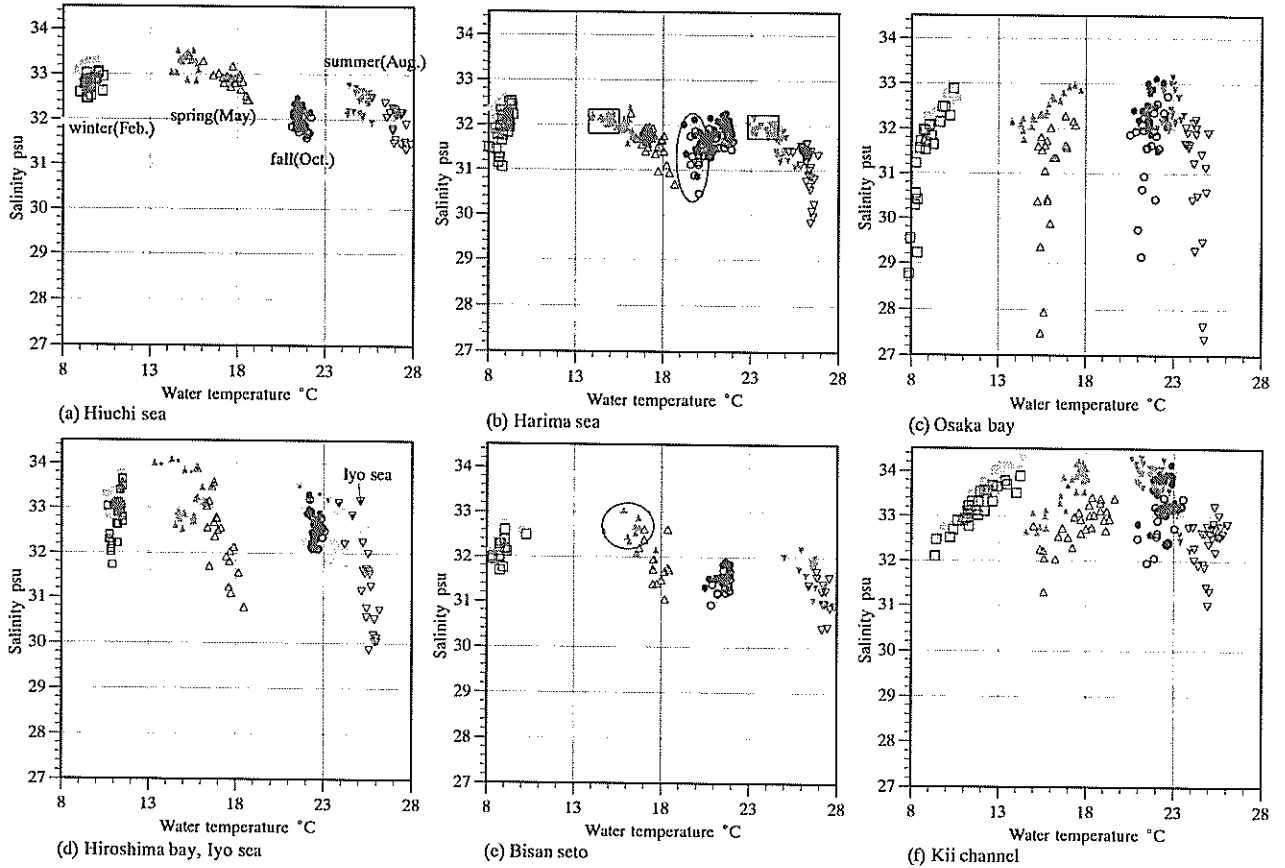


図-8 瀬戸内海の湾・灘における水温と塩分の関係 (1988～1997年の平均値)

して行われていると考えられる。外洋と内湾をつなぐ水道では外洋の影響とともに内湾の影響を強く受けていると考えられる。本節では瀬戸内海総合水質測定調査データの特性について検討を行うことによって、そこに現れている外洋の影響、個別の湾・灘における水塊特性、湾・灘間の海水交換特性について明らかにする。

(1) 紀伊水道での水塊特性

図-7には潮岬、足摺岬、那覇での月平均水位、潮岬(海面; △, 100m水深; ▲), 紀伊水道(観測点中の南東端地点, 33.85°N, 135°E, 海面; ●, 40m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。水温・水位データは気象庁, 紀伊水道での水温データは総合水質測定調査により測定されたものである。

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, この期間に紀伊水道に流入した河川水の影響が出ていることが一つの原因と考えられる。ちなみに, 河川からの流入量は紀伊水道(吉野川)で短期的に増大

する特性があるが, 平均的には大阪湾と備讃瀬戸への河川流入量が多いことがわかる。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。

また, 月平均された足摺岬と潮岬の水位差は最大で数cmである。前章で述べたように, 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。94年は那覇で低く, 潮岬, 足摺岬で高くなっている。これに伴って, 水温は90年前半は潮岬の100m水深で低く94年は潮岬の海面で高くなっている。紀伊水道海底の水温が潮岬沖100m水深の水温と同様に8月では1994年に約4.5℃高くなっている(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, 図-5)。

以上のことから, 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には外洋での水塊変動の影響が含まれていると言える。

(2) 湾・灘内の水塊特性 (10年平均値)

図-8には(a) 燧灘, (b) 播磨灘, (c) 大阪湾, (d) 伊予灘(・), 広島湾, (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が示されている(同データの海面-2mおよび下層-25mでの塩分分布

の季節変化を図-12に後述)。図-8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-2.0m), 塗りつぶしが下層(海底面+2m, 50m超の水深では50m)の値を示している。

図から以下のこと(①)がわかる。

- ①-1 播磨灘と備讃瀬戸での水塊が類似しており, 両海域で塩分が低い。
- ①-2 伊予灘, 燧灘では海域内での水温・塩分分布の幅が小さいが, 大阪湾, 紀伊水道, 広島湾では分布幅が大きくなっている。
- 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。
- ①-4 2月期の水温は備讃瀬戸, 播磨灘で低く, 外海に近づくに連れて暖かくなっており, 紀伊水道と大阪湾では水温の水平勾配が大きい。
- ①-5 8月期の水温～塩分関係は紀伊水道と大阪湾では上層と下層とも右上がり海底塩分が高い2本の線で表されているのに対し, 他の海域では1本の線で表すことができる。
- ①-6 伊予灘, 広島湾, 大阪湾, 紀伊水道での8月期と10月期の低層水塊が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)。
- 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(○の水塊は特有), 備讃瀬戸の○で囲んだ水塊は燧灘の水塊に類似している。
- 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(播磨灘と同等)にある。
- 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。
- 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温である。

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(②)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(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(①-3, 後述の図-12)。
- ②-4 5月期の播磨灘下層は大阪湾方向からの流入が主で

あるが, 8月期～10月期には隣接海域からの流入が小さくなる(①-6, 7)。

- ②-5 5月期に備讃瀬戸へは伊予灘～燧灘方向から水塊が流入する(①-7, 9)。
- ②-6 備讃瀬戸, 燧灘で8月期, 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, 備讃瀬戸方向へ流れ, 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, 後述の図-12)。

(3) 瀬戸内海水塊への外海水の影響

図-9には(a)燧灘, (b)播磨灘, (c)大阪湾, (d)伊予灘(・), 広島湾, (e)備讃瀬戸, (f)紀伊水道における1990年の水温と塩分の関係, 同様に図-10には1994年の関係を示している。図-11には同データの海底での水温・塩分と観測日および潮岬における海面(実線)と100m水深(実線+●)の水温の季節変化が示されている。図-9, 10中の等値線図は偏差の大きい季節のものを示しており, 図-11中の薄いシンボルは1990年, 黒いシンボルは1994年の観測値(○; 燧灘, ×; 播磨灘, △; 大阪湾, ▽; 広島湾, 伊予灘, □; 備讃瀬戸, +; 紀伊水道)を示している。

図-11に示すように潮岬での水温は1994年に水温が高く, 海面では2～3℃, 100m水深では夏季～冬季に5℃程度の差が生じている。以下では, 水温が高い傾向にある1994年(非蛇行接岸型の黒潮流路)および水温が低い傾向にある1990年(A型蛇行流路)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により瀬戸内海への外海水の流入の影響を検討する。

1994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, 伊予灘, 8月期(9月上旬の観測)の備讃瀬戸, 広島湾, 伊予灘および10月期(11月上旬の観測)の燧灘が高塩分になっている。一方, 1990年は塩分の分布幅が大きくなっている。特に, 5月期の備讃瀬戸の塩分低下が顕著である。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ことから, 90年の塩分の分布幅が大きいのは陸水と外海水の混合が94年と比べて小さいことによると考えられる。90年春季の河川流入量は94年春季と同程度であることから, 外海水の変動が90年と94年における塩分分布の変化の原因であると考えられる。このような相違は, 黒潮流路変動(接岸・蛇行)のような外海水の変動の影響が瀬戸内海の水質に及んでいる可能性が大きいことを示唆している。

(4) 湾・灘間での水塊の滞留・移動特性

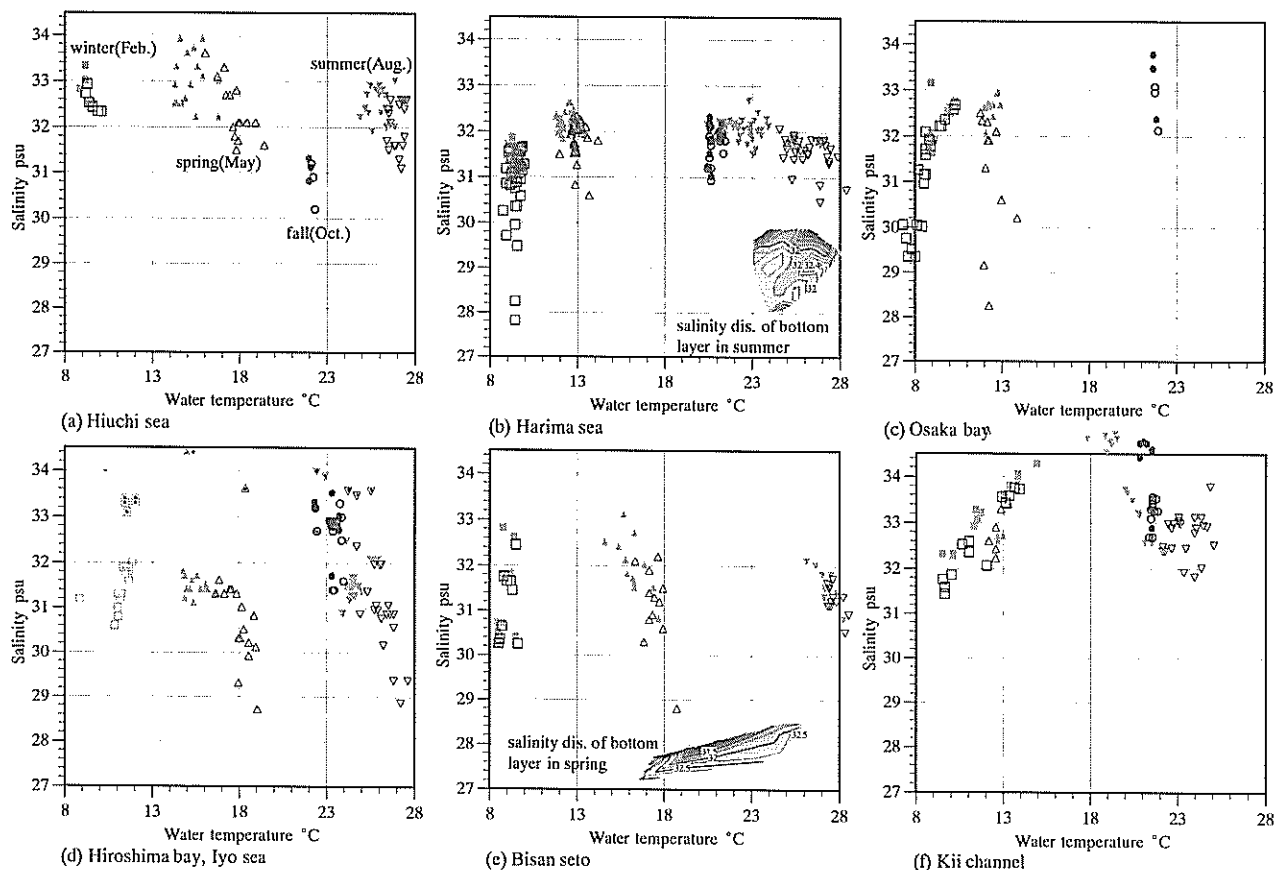


図-9 瀬戸内海の湾・灘における水温と塩分の関係 (1990年の観測値)

図-11から紀伊水道を除く瀬戸内海の各海域での水温は潮岬の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(紀伊水道の一部を除いて)では潮岬の水温よりも5℃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観測されている。これらのことは瀬戸内海の奥部への直接的な外海水の流入が少ないことを示しており、瀬戸内海の奥部にあたる播磨灘、備讃瀬戸、広島湾には陸起源の水塊の滞留時間が長いことが予想される。

1994年5月期に観測された播磨灘での塩分(観測は6月)は海底においても31.5以下(他の海域、他の観測期と比較して低塩分)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。このような塩分の変化は海域相互の複雑な海水交換によるものと考えられる。

同年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によるものと考えするのが妥当である。また、8月期の塩分上昇は2ヶ月間に1psu以上あり、

隣接する海域との海水交換が2ヶ月以内の時間で生じていることがわかる。

(5) 瀬戸内海東部海域での平均塩分の変化

図-12には瀬戸内海の近年10年間(1988~1997年)における季節的な平均塩分分布を示している。(a)に5月期の上層(海面-2m)、下層(-25m)、同様に、(b)に8月期、(c)に10月期、(d)に2月期の分布を示している。下層の平面分布は、各測点で測定水深が異なる(下層データは海底面+2mで測定されている)ため、上層と海底面+2mの塩分値を線形補間することにより求めた水深-25m層の塩分分布を表わしている。

播磨灘においては年間を通して灘北部で塩分が低く、2月期、5月期には灘内の南北で1psu程度の塩分差が生じている。8月期、10月期は灘の全域で31程度となり、平面的にはほぼ一様な分布である。大阪湾においては年間を通して湾奥部で低塩分水、湾南部で高塩分水が分布している。湾奥部では河川(主に淀川)からの流入水塊により希釈され、湾南部では紀淡海峡から高塩分水が流入するため、湾内の南北で1.5程度の塩分差が生じている。紀伊水道西部も河川(主に吉野川)からの流入水量が多く、その影響が西低東高の塩分分布に現れていることがわか

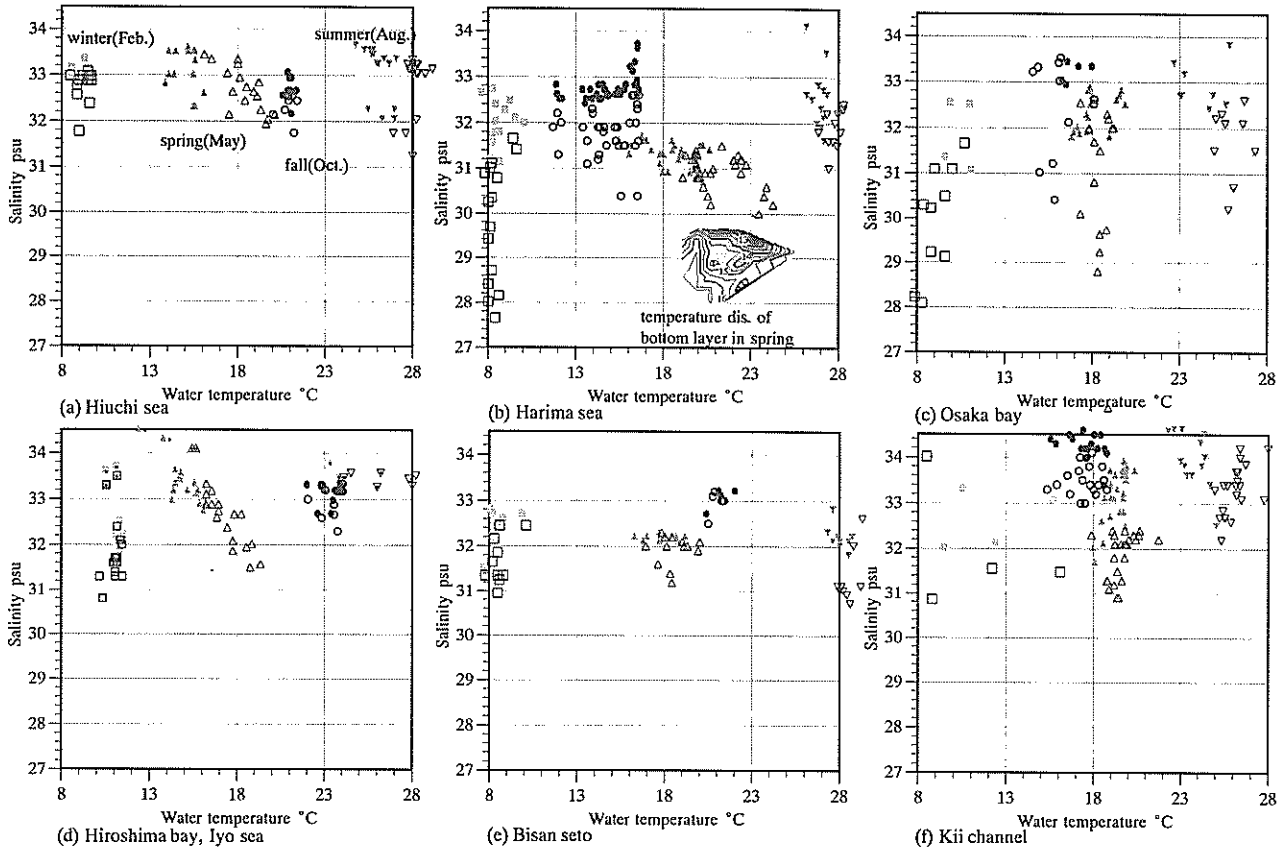


図-10 瀬戸内海の湾・灘における水温と塩分の関係 (1994年の観測値)

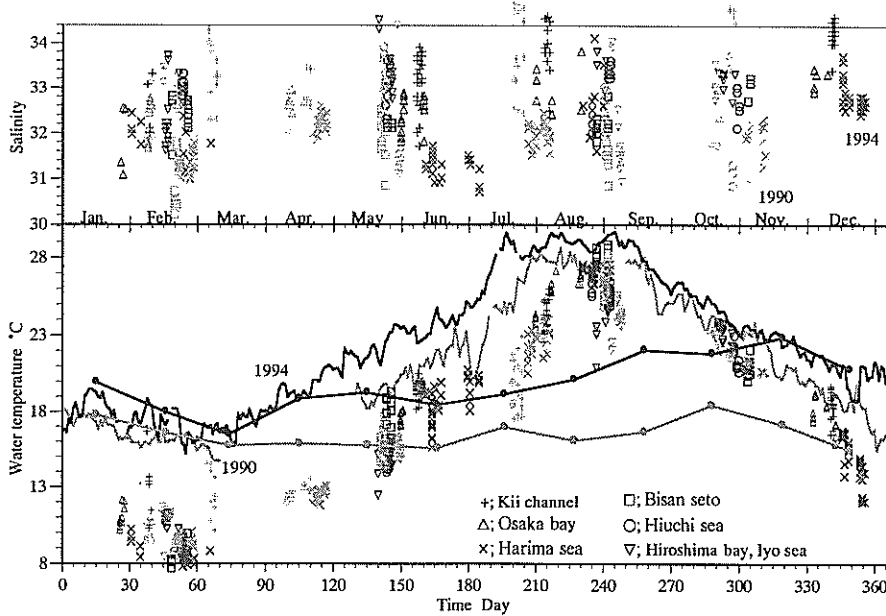


図-11 瀬戸内海の各海域での海底水温・塩分および潮岬での海面・水深100mの水温の日変動 (1990, 1994年の観測値)

る。紀伊水道の平均塩分は各季節で播磨灘および大阪湾より高いことから、播磨灘および大阪湾への塩分供給は、主に紀伊水道と接する鳴門海峡と紀淡海峡における外海水との海水交換によって行われていると考えられる。

図-13は、図-12に示した季節毎の塩分分布の変化が

± 0.3psu以上の海域を示したものである。黒い部分は0.3以上の塩分低下、白い部分は0.3以上の塩分上昇が生じた海域を表わしている。播磨灘、大阪湾、紀伊水道では、2月期～8月期にかけて塩分が低くなり、8月期～2月期にかけて塩分が高くなる傾向にある。ただし、大阪

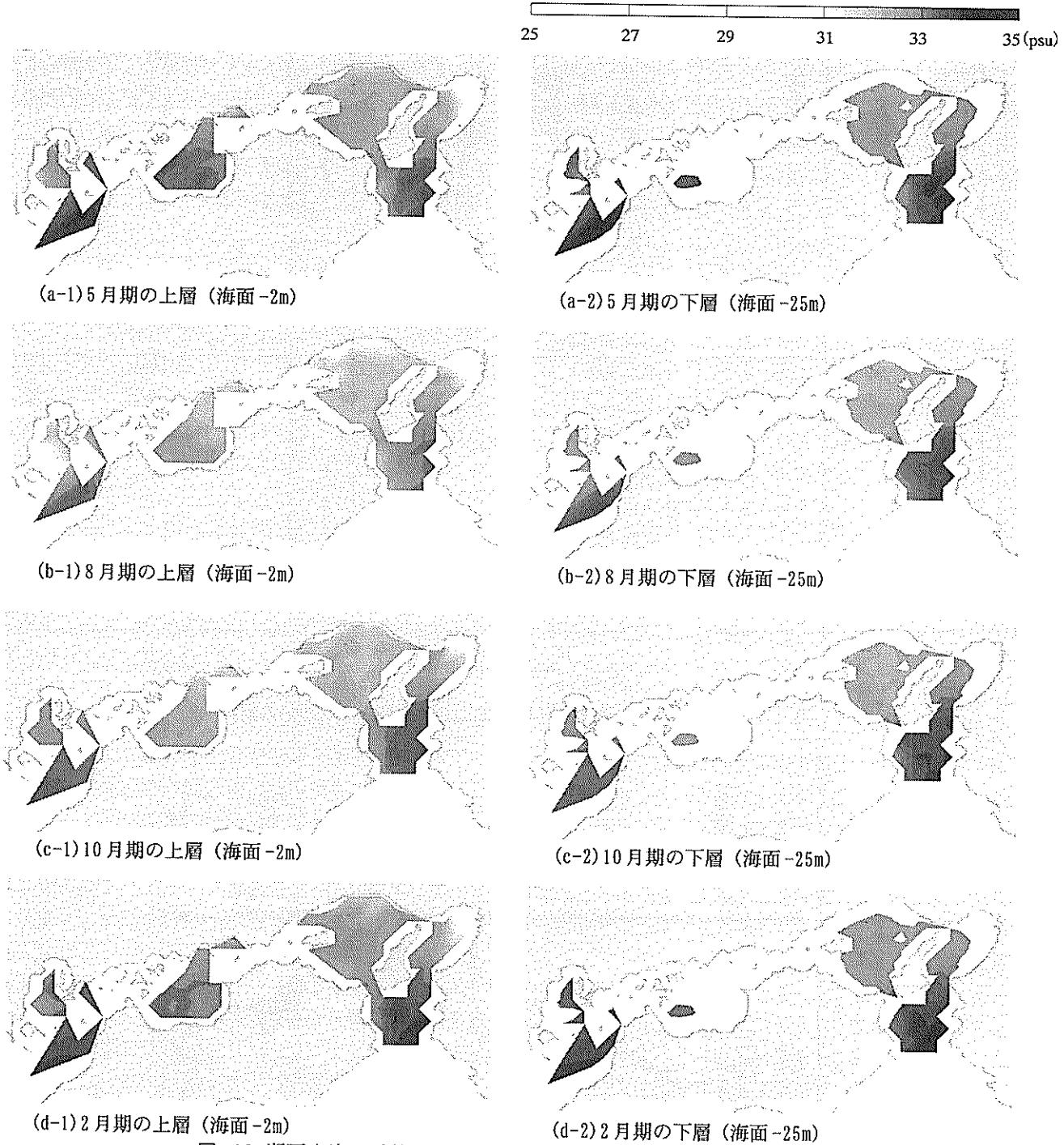


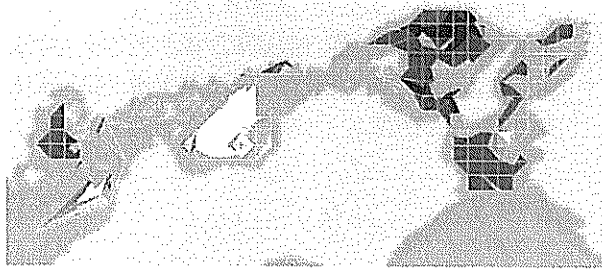
図-12 瀬戸内海の季節的な平均塩分分布 (1988～1997年の平均値)

湾の湾奥部と紀淡海峡付近においては、5月期～8月期に塩分上昇、10月期～2月期に塩分低下しており、湾内でも場所的に変化傾向が異なることがわかる。

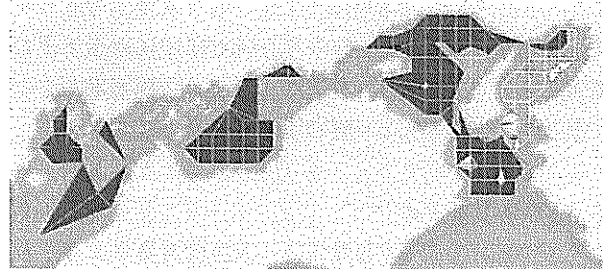
図-14には紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸での各観測期における10年間の平均塩分が示されている。下層の測定水深が測点毎に異なるというデータの特性を考慮し、平均塩分は10年間(1988～1997年)の観測期毎の測定データを各測点において鉛直的に測定水深で荷重

平均した後、海域毎の平均値を求めたものである。紀伊水道の塩分は年間を通して他の湾・灘の値より高く、約33前後である。播磨灘、備讃瀬戸での平均塩分は8月期、10月期に低く、2月期、5月期に高い傾向を示すのに対し、大阪湾では8月期、10月期に高く、2月期、5月期に低い傾向を示している。大阪湾では夏季に淀川から多量の河川水流入がある(付録C参照)にもかかわらず、平均塩分が低下しない理由は、湾内に流入した陸起源水塊が次

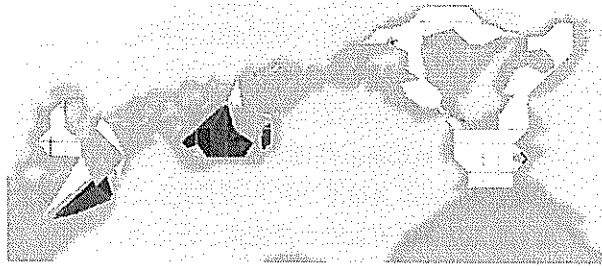
黒：-0.3psu 以下（低下），白：+0.3psu 以上（上昇）



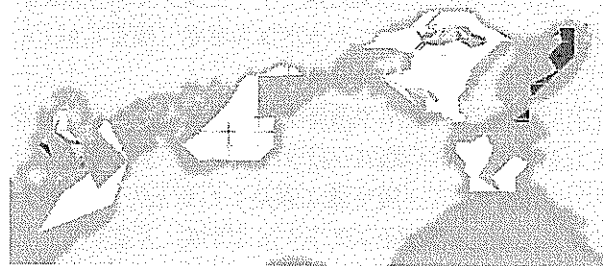
(a) 2月期～5月期の変化



(b) 5月期～8月期の変化



(c) 8月期～10月期の変化



(d) 10月期～2月期の変化

図-13 瀬戸内海の平均的な季節間塩分変化（1988～1997年の平均値）

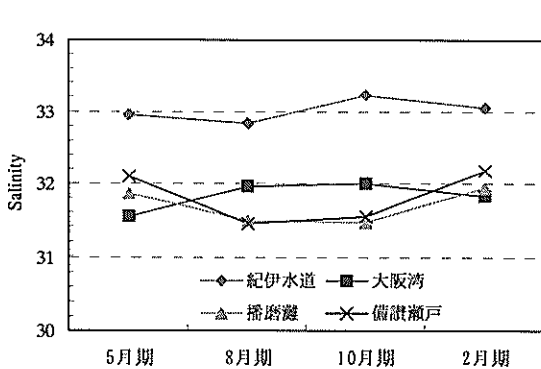


図-14 紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸における平均塩分の季節変化（1988～1997の平均値）

の観測期までに他の湾・灘に流出するため、あるいは河川水流入による塩分低下量を上回る量の塩分供給があるためと考えられる。

図-15は、紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸での1997年度の各観測期（1997年5月期、8月期、10月期、1998年2月期）における塩分の鉛直分布を示したものである。ここでは、各観測期における下層（海底面+2m）の塩分データを用いて、海域別に各測点での測定水深を10m間隔の水深帯（10～20m、20～30m、30～40m、および40m以深）に分け、それぞれの水深帯毎に平均塩分を求め、鉛直分布図を作成した。

紀伊水道と大阪湾では各観測期で鉛直的に塩分差が大きく、特に、8月期の上層と下層では2psu程度の塩分差（上層塩分<下層塩分）があることがわかる。また、各観

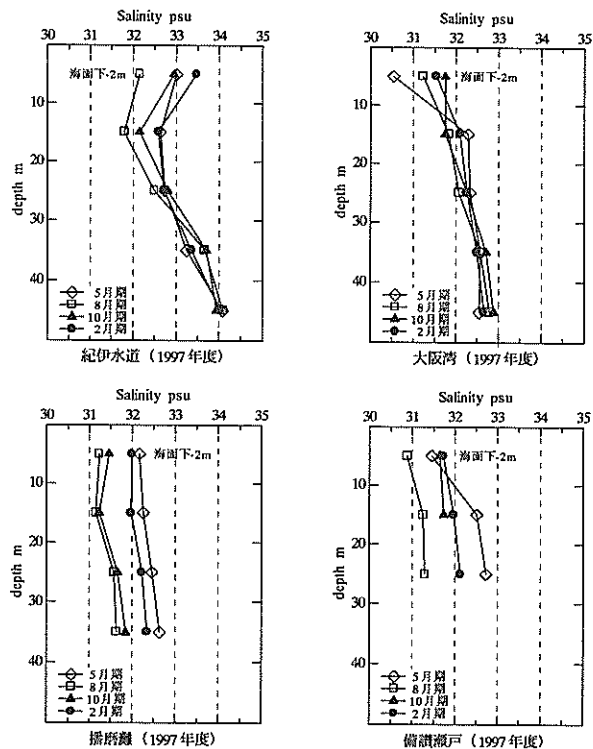


図-15 紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸における平均塩分の鉛直分布（1997年度）

測期での上層の塩分変化に比べて下層の変化が相対的に小さいことが認められる。紀伊水道および大阪湾では上層で河川水流入の影響を受けやすく（低塩分水が存在）、下層では季節を問わず高塩分水が存在することから、塩分成層が形成されやすい海域であると考えられる。一方、

播磨灘と備讃瀬戸(5月期を除く)では鉛直的な塩分差は1psu未満と小さく、鉛直的にほぼ様な水塊が分布していることが伺われる。これらの海域では紀伊水道および大阪湾と比べて季節的な変化が大きく、各観測期での上層の塩分変化と同等に下層の塩分も変化している。

3.3 本章のまとめ

以上の結果から、播磨灘北部、大阪湾湾奥および広島湾は陸起源の水塊が滞留しやすい海域であり、播磨灘南部、大阪湾南部および備讃瀬戸は、外海水の流入や隣接する海域との海水交換による水塊の移動(混合)が生じやすい海域であることが示唆される。

この水塊移動が盛んである海域では、主に塩分(外海水)が紀伊水道の下層から紀淡海峡および鳴門海峡を経由して大阪湾および播磨灘に供給されると予想される。また、各季節の湾・灘の塩分分布は陸域、外海からの流入水塊の微妙なバランスと海域相互の海水交換によって形成されるものと考えられる。

4. 数値モデルによる海水交換に関する考察

4.1 湾・灘間での海水交換量の推定

(1) モデル化の概念

瀬戸内海の流入した水塊は、その海域内で複雑に循環されて、一部は湾・灘内に滞留し、また一部は海域間の海水交換により湾外へと流出していくと考えられる。したがって、瀬戸内海の海水交換ネットワークでのボトルネックやその主経路を見出すことは、湾・灘の水質改善手法や対策範囲を模索する手掛かりとして重要である。

ここでは、瀬戸内海東部海域での湾・灘間の海水交換について、保存系物質である塩分を指標として、柳ら(1985)に倣い、ボックスモデルによる解析を試みる。湾・灘を一つのボックスと考えることにより、湾・灘全体の流動構造に関わる海水交換を考察することが可能となる。

(2) ボックスモデルの定式化

湾・灘をそれぞれ独立したボックスと考えると、ボックス相互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。

$$\phi = \alpha \times \Delta S \times q = \Delta S \times Q \quad (1)$$

ここで、 α は海水交換率、 ΔS は隣接するボックス相互の塩分差、 q は隣接するボックス間(海峡部)における海水流量で任意期間の平均量を表わし、 Q は海水交換率 α と海水流量 q の積である。

各ボックス内の時間的な塩分変化量に対して、播磨灘では紀伊水道、大阪湾、備讃瀬戸との海水交換(式(2))、大阪湾では紀伊水道、播磨灘との海水交換(式(3))を考え、それぞれ以下のように定式化する。図-16にモデルの模式図を示す。

$$V_H \frac{dS_H}{dt} - R_H \cdot S_H = (S_K - S_H) \cdot Q_{KH} - (S_H - S_O) \cdot Q_{HO} + (S_B - S_H) \cdot Q_{BH} \quad (2)$$

$$V_O \frac{dS_O}{dt} - R_O \cdot S_O = (S_K - S_O) \cdot Q_{KO} + (S_H - S_O) \cdot Q_{HO} \quad (3)$$

式中の V はボックスの体積(図-16参照、図中の A は海域面積、 D は海域平均水深を示している)、 S はボックス内の平均塩分、 R は平均河川流量を表わす。また、添字の H, O, K, B はそれぞれ播磨灘、大阪湾、紀伊水道、備讃瀬戸を、 KO, KH, HO, BH はそれぞれ紀淡海峡、鳴門海峡、明石海峡、備讃瀬戸を表わす。

各湾・灘の平均塩分変動は、海水交換による塩分変動と河川水流入による塩分変動の和によって決定すると考えられる。したがって、播磨灘および大阪湾での海水交換による塩分変動は、それぞれの平均塩分変動から河川水流入による塩分変動(低下)を差し引いて得られる。

今、式(2)、(3)において、各海峡に対応する海水交換量 Q が年間で一定であると仮定すると、4つの未知数 Q が存在することになる。これに対して各湾・灘の季節平均塩分(総合水質測定調査データ)を用いると8つの方程式が得られる。ここでは、流入する河川水により湾内の海水が押し出される(河川水と湾内水が入れ替わる)と仮定し、河川水流入による塩分変動(低下)は、各湾・灘

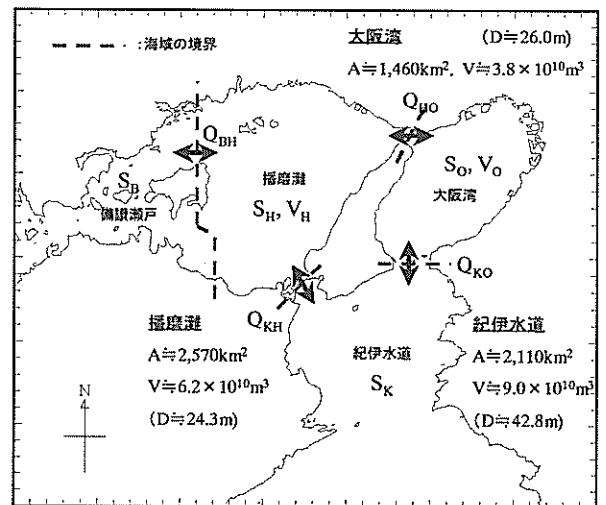


図-16 瀬戸内海東部海域を対象としたモデルの模式図

の季節間での河川水の平均積算流入量と各季節の平均塩分との積（塩分フラックス）として、それぞれの平均塩分変動（式(2), (3)の左辺）から差し引く。

(3) 海水交換量に関する考察

瀬戸内海東部海域（播磨灘，大阪湾）を対象に，前述した海域別の10年平均塩分（図-14参照）を用いて播磨灘および大阪湾と他海域との年間平均の海水交換量を見積もってみる。播磨灘，大阪湾に対するそれぞれ4期分の塩分収支式から，最小自乗法により連立方程式の最適解を求めた。各湾・灘に流入する平均積算流入量は1988～1997年の10年間の月平均流量（図-C.1参照，流量年表）から求めた季節間の平均積算量を用いた。

その結果，月平均量に換算した紀淡海峡と鳴門海峡における海水交換量（ $Q_{KO}=1.65 \times 10^{10}$, $Q_{KH}=1.26 \times 10^{10}$, $m^3/month$ ）の比率（ Q_{KO}/Q_{KH} ）は約1.3となり，紀淡海峡での海水交換量が鳴門海峡に比べて多く，大阪湾の水塊が播磨灘の水塊より外海の影響を強く受けやすい可能性があることを示している。また，この試算結果は，柳ら（1985）により見積もられた値（ $Q_{KO}=2.34 \times 10^{10}$, $Q_{KH}=0.77 \times 10^{10}$, $m^3/month$ ）とオーダー的に同程度であるが，紀淡海峡と鳴門海峡の比率（ Q_{KO}/Q_{KH} ）は約3.0）としては小さく見積もられている。これらの相違に関しては，試算に用いた平均塩分のデータ特性に関わる次のような要因が考えられる。

- ① 季節の代表値として用いた平均塩分データは，実際には測定に数日～数週間を要しており（図-11），各海域および各測点で時間的なずれがある。
- ② 同じボックス（湾・灘）内においても水平的な塩分差が大きい（図-12）。

4.2 海峡部での海水交換機構に関する定性的な評価

本節では海峡付近の水塊に焦点を絞り，湾・灘間の海峡部において海水交換を生じさせる外的要因をモデル化した拡散係数を指標として評価することを試みる。海峡部での海水交換機構を海峡付近の各季節の平均塩分差と平均流速値を用いてモデル化し，瀬戸内海東部海域での各海峡における場所的，季節的な比較検討を行う。

(1) 海峡部での海水交換機構のモデル化

海峡付近での塩分変化は，長期的に考えた場合，非定常性が無視できる程度にしか現れないため，時間的な塩分変化と移流・拡散による塩分変化の釣り合いを次式で表わすことができる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(S \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(S \cdot U_i \cdot h) = 0 \quad (4)$$

ここで， S は塩分， U_i は流速， h は水深を表わす。それぞれの値は平均量と分散量に分離して，次のように置き換えることが可能である。

$$\begin{cases} S = S_0 + S' \\ U_i = U_{0i} + U_i' \\ h = h_0 + h' = h \end{cases} \quad (5)$$

filter function : $G * \{S\} = S_0$

S_0 は塩分の平均量， S' は分散量を表わし， U_i および h についても同様である。また，添字 i は平面内での流速の方向成分を意味する。水深 h については海峡付近で同様であると仮定する。

式(4)を式(5)の関係をj用いて書き換えると，

$$\frac{\partial}{\partial t}(S_0 \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(S_0 \cdot U_{0i} \cdot h) = - \frac{\partial}{\partial x_i}(G * \{S' \cdot U_i' \cdot h\}) \quad (6)$$

と表わせる。また，長期間におけるトレンドが無視できるものとして左辺の第1項は消去し，右辺の分散項を拡散係数 K_m でモデル化すると，

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(S_0 \cdot U_{0i} \cdot h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_m \cdot \frac{\partial}{\partial x_i}(S_0 \cdot h) \right) \quad (7)$$

となり，海峡部のコントロールボリュームに対してガウスの発散定理を用いて表現し直すと，式(7)は次のように書ける。

$$\int_l (S_0 \cdot U_{0n}) dl = K_m \cdot \int_l \left(\frac{\partial S_0}{\partial n} \right) dl \quad (8)$$

式(8)より，海峡付近での拡散係数 K_m は平均塩分 S_0 と平均流速 U_0 より次式で求まる。ここで，式(9)の分子を移流因子，分母を拡散因子と定義する。

$$K_m = \frac{\int_l (S_0 \cdot U_{0n}) dl}{\int_l \left(\frac{\partial S_0}{\partial n} \right) dl} \quad (9)$$

(2) 拡散係数の見積もりと考察

瀬戸内海東部海域（明石海峡，鳴門海峡，紀淡海峡）を対象に，前述の測点毎の10年平均塩分（図-8参照）を用いて拡散係数を見積もってみる。海峡付近の平均塩分は，海峡を挟む最短距離に位置する測点の平均値を用いて，その間に存在する水塊を海峡部のコントロールボリュームと定義する。

海峡部の平均流速 U_0 については，急縮形状をなす海峡部で季節的な定常場を仮定したため，潮汐および残差

流は無視できるものと考えられる。ここでは、瀬戸内海全域を3.6km正方格子、単層で地形近似し、浅水流近似された連続式と運動方程式を解く方法により、季節毎の河川水流入による流れ場を計算した。河川からは季節毎の平均流量を河口部における水位変動として与え、瀬戸内海に流入する1級河川(全21河川)を対象とした(図-C.1)。紀伊水道、豊後水道での開境界では潮岬と足摺岬における水位の10年平均変動(季節、図-4)を境界条件として与えた。

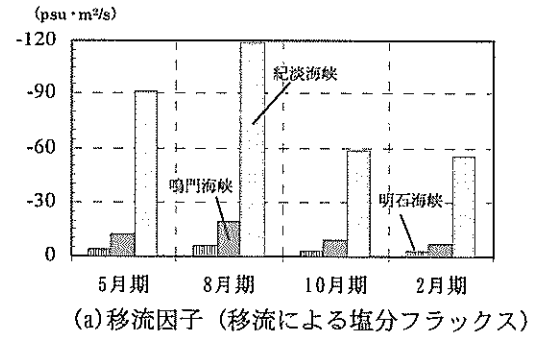
図-17は明石、鳴門、紀淡の3つの海峡部を対象に算定した移流因子(移流による塩分フラックス)と拡散因子(拡散に寄与する海峡部の塩分差)を表わしている。図中の値は式(9)中の分子と分母に相当するものであり、移流因子のマイナス値は海峡部のコントロールボリューム内へ向かう量、拡散因子のマイナス値はコントロールボリューム外へ向かう量を意味している。両者の値は各海峡ともに海峡部の塩分が移流フラックスにより供給され、拡散により発散していることを示している。各海峡における移流因子は紀淡、鳴門、明石海峡の順に大きく、紀淡海峡では他海峡より1オーダー大きい。また、その割合は季節的に同程度である。一方、拡散因子は紀淡、明石、鳴門海峡の順に(2月期は明石海峡が最小となる)大きいことがわかる。

表-1に同海峡部を対象に算定した拡散係数を示す。算定した拡散係数の値は一般的に数値計算などで用いられている拡散係数 $10^{-1} \sim 10^3$ (m^2/sec)の範囲内であり、概ね妥当な値であると判断できる。ただし、ここで定義した拡散係数は季節的な塩分の定常場を仮定して求めた値である。

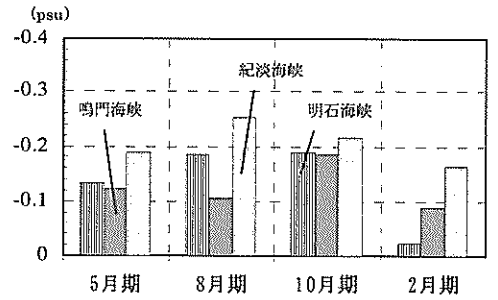
表-2には明石海峡を基準に他海峡の拡散係数の割合を、表-3には10月期を基準に他期の割合を比較した結果を示している。表-2によれば、鳴門海峡の拡散係数は明石海峡の3~6倍程度、紀淡海峡では15~20倍程度となり、海水交換に寄与する拡散エネルギーの場所的な割合として定性的に評価できる。また、10月期を基準にした場合(表-3)、5月期、8月期の値は各海峡とも2~3倍程度であり、10月期に比べて拡散エネルギーの割合が大きいことがわかる。2月期の明石海峡については傾向が異なり、他期と比べて極端に拡散係数が大きい。このような傾向は、明石海峡での塩分差が他期と比べて小さい(播磨灘と大阪湾の塩分差が小さい)ことに起因していると考えられるが、詳細については不明である。

4.3 本章のまとめ

ここでモデル化したボックスモデルでは、洪水時に流



(a) 移流因子 (移流による塩分フラックス)



(b) 拡散因子 (拡散に寄与する塩分差)

図-17 紀淡海峡、鳴門海峡、明石海峡での移流因子と拡散因子の季節変化

表-1 拡散係数の算定結果

	明石海峡	鳴門海峡	紀淡海峡
5月期	31.9	100.4	490.0
8月期	31.0	178.9	473.2
10月期	14.1	52.2	273.7
2月期	112.8	79.7	334.4
	(m^2/sec)		

表-2 拡散係数の比較 (基準: 明石海峡)

	明石海峡	鳴門海峡	紀淡海峡
5月期	1.0	3.1	15.4
8月期	1.0	5.8	15.3
10月期	1.0	3.7	19.4
2月期	1.0	0.7	3.0

表-3 拡散係数の比較 (基準: 10月期)

	明石海峡	鳴門海峡	紀淡海峡
5月期	2.3	1.9	1.8
8月期	2.2	3.4	1.7
10月期	1.0	1.0	1.0
2月期	8.0	1.5	1.2

入した河川水が短時間のうちに湾・灘の表層を這って流出してしまうような現象は取り扱えない。すなわち、湾・灘の代表値を精度良く見積もるためには時間的なずれを適正に補正する必要があり、ボックスのスケール設定に対しては実際に海域に存在する水塊の空間スケールを充分配慮して取り扱う必要があると考えられる。その空間スケールが瀬戸内海の水環境を考える上での単位となる

大きさである。

また、拡散係数の見積もり結果から、海峡付近での海水交換に寄与するエネルギーの割合は時間・空間的に一様ではないことが示唆された。海峡部での拡散係数は紀淡海峡～鳴門海峡～明石海峡の順に大きく、冬季より夏季の方が大きい値となることが認められた。拡散係数の場所的な相違は移流による塩分フラックスの大きさに依存し、季節的な相違は拡散に寄与する塩分差の大きさに依存すると考えられる。

5. おわりに

内湾域の季節的な水質変動に影響を及ぼす物理的要因について、瀬戸内海および周辺海域を対象に既往の調査結果を用いて解析を行った。また、海域の平均塩分データを用いて数値モデルによる海水交換に関する考察を行った。得られた主要な結果を以下に示す。

(1) 黒潮・対馬暖流接岸域沿岸での水位・水温変動

①太平洋沿岸域の水温変動から、高水温塊が西日本太平洋沿岸に到達する時期は、北日本で西日本より相対的に水位が低くなる時期と一致しており、5月頃から10月頃まで黒潮系の高水温塊は四国南岸、九州西岸に徐々に近づく。この期間は瀬戸内海へ豊後水道および紀伊水道から黒潮系暖水塊が流入しやすい状況にある。

②八丈島の水位が西日本沿岸域の水位変化と対応が良く、さらに、沿岸水温変化との対応も良いことから、黒潮流路が日本沿岸の水位・水温に影響を与えており、黒潮が日本沿岸へ輸送する熱量が大きいことが示唆される。

③黒潮が直進（非蛇行）流路をとり、西日本太平洋沿岸に接近するときには、足摺岬（豊後水道）に流入する水塊に比較して暖かい水塊が潮岬（紀伊水道）に流入している。さらに、黒潮が東シナ海に深く浸入し、蛇行する（熊野灘～遠州灘沖に反時計廻りの冷水塊渦の生成）ときには、豊後水道側に相対的に暖かい水塊が流入している。

(2) 瀬戸内海周辺での水質変動と流れ

①瀬戸内海に流入した河川水は広島湾、備讃瀬戸、播磨灘、大阪湾に滞留する傾向にあり、陸起源の水塊の滞留時間が長いことが予想される。

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。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。

③瀬戸内海総合水質測定調査で得られた紀伊水道南端の水温値と潮岬水温とは良く一致しており、紀伊水道南端のデータには外洋での水塊変動の影響が含まれていると考えられる。

④瀬戸内海各海域（備讃瀬戸の8月期の海面水温の一部を除いて）での水温は潮岬海面水温よりも低く、特に、2月期の観測では潮岬の水温よりも5℃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観測されている。

⑤黒潮が紀伊水道、豊後水道に接近した1994年には瀬戸内海での塩分が高い傾向にあるのに対し、黒潮が離岸していた90年には海域内での塩分分布の分散が大きくなっていることから、黒潮流路変動の影響が瀬戸内海の水質に及んでいる可能性が大きいことが示唆される。

⑥瀬戸内海の水質は陸域、外海からの流入水塊の微妙なバランスと海域相互の海水交換によって形成される。

(3) 数値モデルによる海水交換量に関する考察

①ボックスモデルにより、塩分分布データを用いて海峡毎に異なる海水交換量を逆推定することができた。ただし、湾・灘の海水交換量を精度良く見積もるためには、ボックスのスケール設定に対して、実際に海域に存在する水塊の性質を適正な時間・空間スケールで評価する必要があることが示唆された。

②東部海域の湾・灘を隔てる海峡付近での海水交換に寄与する乱れ（拡散）エネルギーを詳細に検討した結果、紀淡海峡～鳴門海峡～明石海峡の順に大きく、10月期、2月期（冬季）より5月期、8月期（夏季）の方が大きい値となることが認められた。

(2000年3月31日受付)

謝辞

本論文で用いた水位・水温データは気象庁より提供されたものである。また、研究を進めるにあたり、貴重な助言を頂いた海水浄化研究室中村由行室長ならびに古川恵太主任研究官にはここに深く感謝致します。

参考文献

上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・宝田盛康(1984): 瀬戸内海水の海水交換機構, 海岸工学講演会論文集 第

31 卷, pp. 665-669.

上嶋英機・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-, 海岸工学講演会論文集 第32巻, pp. 742-746.

宇野木早苗(1993): 沿岸の海洋物理学, pp. 109-112

気象庁監修(1995): 1995年版気象年鑑.

建設省河川局編(1988-1997): 流量年表, 日本河川協会.

小坂淳夫編(1985): 瀬戸内海の環境, 恒星社厚生閣, pp. 18.

中辻啓二・藤原建紀(1995): 大阪湾におけるエスチャリ一循環機構, 海岸工学講演会論文集 第42巻, pp. 396-400.

日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一(1999): 海面水位の変動が内湾域の水環境に及ぼす影響-大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構-, 港研報告 Vol. 38, No. 3, pp. 3-36.

日比野忠史・野村宗弘・岡田知也・古川恵太(2000): 東京湾における密度構造の変化と流れ場-黒潮の流れと東京湾-, 港研報告, Vol. 39, No. 1, pp. 25-55.

藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘(1997): 外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量, 海岸工学講演会論文集 第44巻, pp. 1061-1065.

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.

柳 哲雄・柴木秀之・武岡英隆(1985): 播磨灘・大阪湾の塩分, 窒素, リン収支, 沿岸研究ノート 第22巻, 第2号, pp. 159-164.

Takeoka, H. (1984): Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea. *Continental Shelf Research*, 3, pp. 327-341.

付録A 黒潮流路と外海の水塊特性

本文中の2.2節に関連して, 黒潮流路や外海水塊の沿岸域への波及について整理した結果を以下に記す.

(1) 黒潮流路と沿岸域の水溫変動

図-6(b)において, 1987~88年, 91年と93年の夏季に水位差と水溫差の相関が悪く(沖縄での年前半の水位が高く, 西郷で水溫が上昇しない, 図-4)なっている. これらの期間は図-6(a)で示した沖縄と八丈島の水位差が大きい期間(八丈島での水位低下と那覇での水溫上昇が顕著, 図-5)であり, 西郷で平年並みの水溫上昇は観測されていない. 黒潮がC型の蛇行流路をとる場合(八丈島で水位が低下)には, 日本海に流入する黒潮系暖水塊

量は並年に比較して小さいと考えられる. このため, 西郷での水溫が上昇せず, 水位差と水溫差の相関が悪くなると考えられる.

ちなみに, 1991と93年夏季の黒潮流路はC型(図-A.1参照)をとっているが, C型への移行形態は両年で異なっている(91年はA型→C型, 93年はN型→C型, 図-4参照, 八丈島の水位低下). なお, 90年のA型蛇行時には日本海への黒潮暖水塊の流入量は大きくなっている(詳細は次節で述べる).

図-A.1に図-6(b)で水位差と水溫差の相関が悪くなった(a)1990と91年, (b)1993年の日本周辺100m水深の水溫分布, 図-A.2には蛇行流路が大きく変化した1990と91年の(a)対馬暖流沿い(牛深, 巖原, 西郷)と(b)黒潮沿い(那覇, 足摺岬, 潮岬)における海面と水深100mの水溫偏差(海面水溫は1985-94年, 100m水深水溫は1990-97年の平均値との差)を示した. 図-A.2中の白抜きのシンボルは海面水溫, 塗りつぶしは100m水深水溫を表している.

1990年は八丈島の南側で黒潮が蛇行し, 蛇行位置(蛇行によって形成される冷水塊)が北東方向に移動・拡大し, 1990年11月には黒潮蛇行による冷水塊が八丈島を含むようになっていた. 1991年11月には黒潮流路は直進(非蛇行)し始めている(図-A.1(a)).

図-A.2から①黒潮蛇行の位置が八丈島に近づいた1990年6月頃から西郷(海面, 100m水深とも)で水溫上昇, 牛深, 巖原, 潮岬, 足摺岬で水溫低下の傾向があること, ②1991年には, 対馬暖流沿いで水溫低下, 黒潮沿いで水溫上昇の傾向があることがわかる. さらに, ③西郷の水溫変化は1990年では日本海の北端(深浦)が南端(巖原)より水位が高い期間(図-2)に上昇し, 91年ではその逆の傾向にあることがわかる.

③から黒潮がA型の流路をとるときには, 夏に向かって暖水塊の日本海への流入を助長することが考えられ, 逆にC型の流路をとるときには日本海の流入を抑制することが考えられる. また, ②からC型の流路をとるとき, 冷水塊が四国沿岸から離れ, 足摺岬, 潮岬で水溫は上昇すると考えられる.

黒潮蛇行位置の移動(A型→C型)によって黒潮域沿岸の水溫が上昇し, 対馬暖流域沿岸の水溫が低下するためには, 黒潮流路が沖縄本島近くを通り, 四国沿岸に接近することが必要と考えられる.

図-A.3には黒潮沿い(足摺岬, ●; 10~4月, ○; 5~9月, 潮岬, ■; 10~4月, □; 5~9月), 対馬暖流沿い(牛深, ●; 10~4月, ○; 5~9月, 西郷, ■; 10~4月, □; 4~10月)での海面水溫と100m水深水溫の関

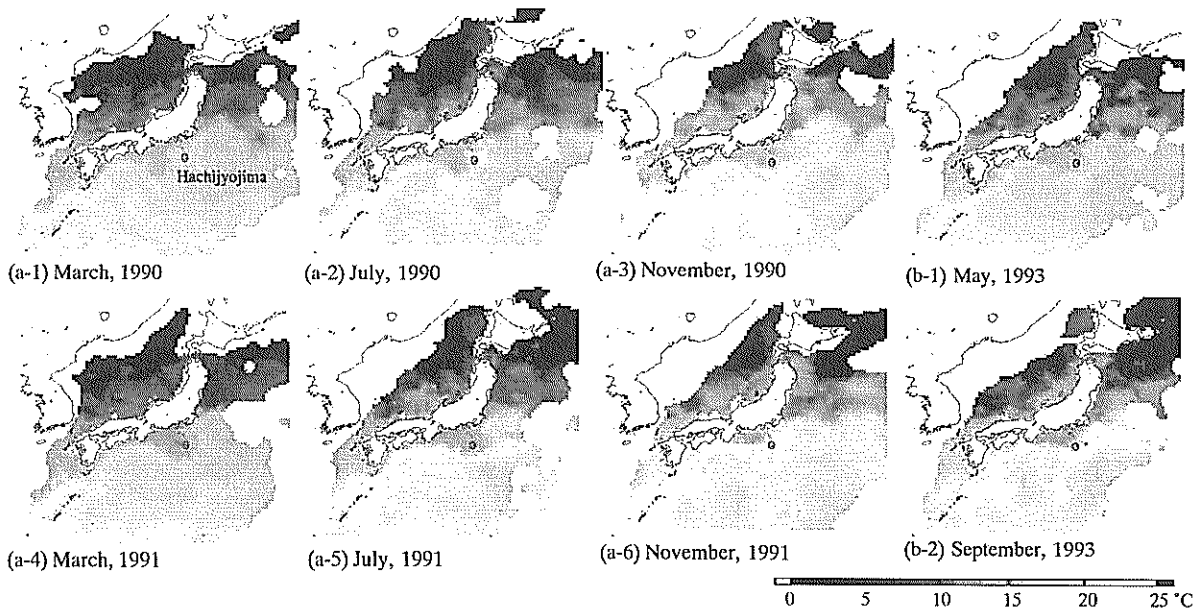
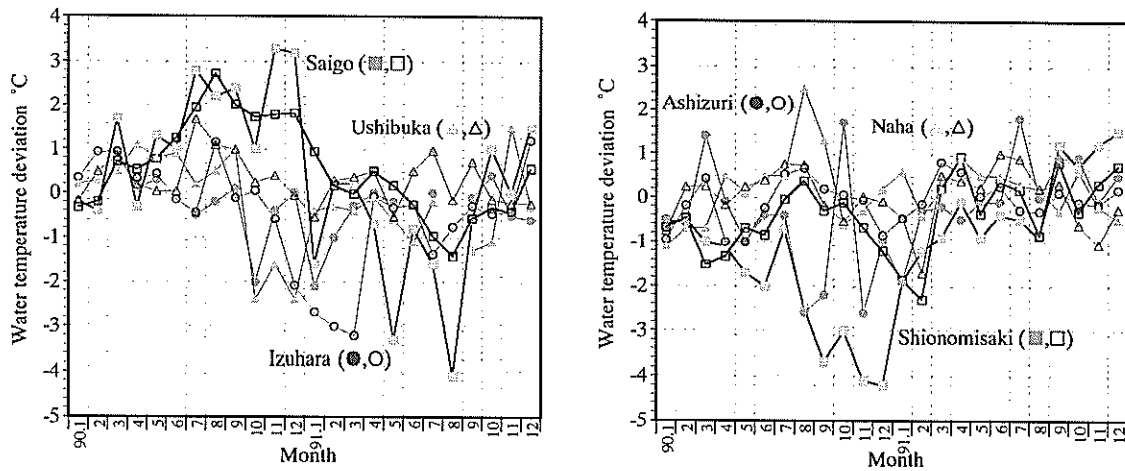


図-A.1 日本周辺における水深100mの水温分布



(a) 牛深, 巖原, 西郷 (対馬暖流沿い)

(b) 那覇, 足摺岬, 潮岬 (黒潮流い)

図-A.2 水溫の月平均偏差の比較 (白抜きは海面, 塗りつぶしは水深100mの水溫)

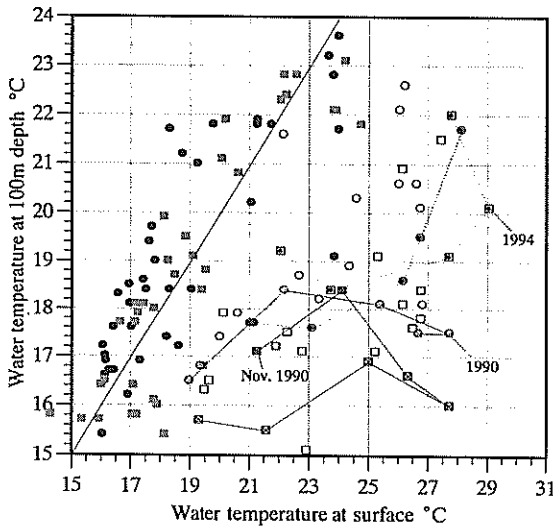
係, 図-A.4には2地点間の海面での水溫差と100m水深での水溫差の關係(○; 1990~91年, ●; 1992~95年)が示されている. 図-A.3中で"×"は1990年夏季, "・"は1994年夏季の値を示している. ちなみに, 1990年の黒潮流路は八丈島西側で蛇行(A型, 図-A.1(a)), 1994年は5月以降沿岸近くを流れる非蛇行接岸型となっている(気象年鑑, 1995年版).

図-A.3から①足摺岬, 潮岬では10~4月頃は海面水溫と100m水深水溫の相関が高く, 5~9月頃の間水溫差(水溫勾配)が生じること, ②牛深での海面水溫と100m水深水溫の關係は足摺岬, 潮岬と類似の關係(同溫度帯)にあるが, 西郷では牛深よりも2ヶ月程度長く水深方向に水溫勾配が生じていることがわかる. さらに, 1990年と94年の春から秋は海面で水溫が高くなっているが,

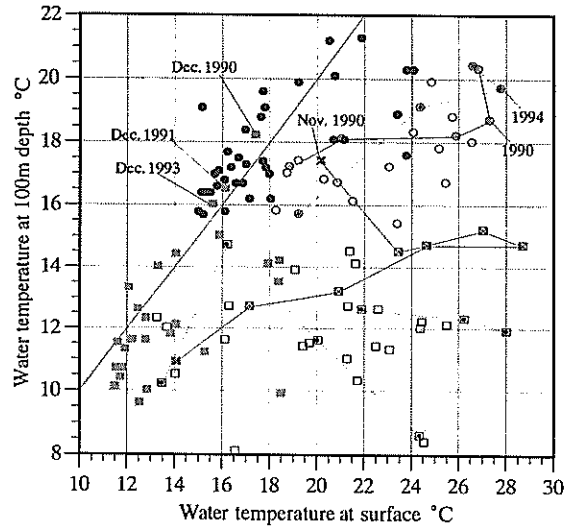
各々の沿岸で上昇の傾向が異なっていることがわかる.

③1990年と94年の100m水深の水溫を比較すると, 足摺岬, 潮岬では1994年に水溫が高く, 牛深では同程度, 西郷では1990年に水溫が高くなっている. また, ④西郷において1990年11, 12月, 1991年12月, 1993年12月に100m水深での水溫が16°Cを越えていることがわかる.

足摺岬, 潮岬の黒潮流域沿岸, 牛深沿岸では同様な水溫變動(図-3)傾向を有しており, 黒潮系の水塊が九州西岸に達していると考えられる. ①, ②から豊後水道, 紀伊水道, 九州西岸の沿岸域においては10~4月頃には100m以浅へ水溫勾配の小さい黒潮系の水塊が接岸してくると考えられる. また, 西郷においては水溫勾配が大きい期間が九州西岸(牛深)に比較して約2ヶ月長いこと(②)から日本海への対馬暖流系(黒潮系)水塊は上層で

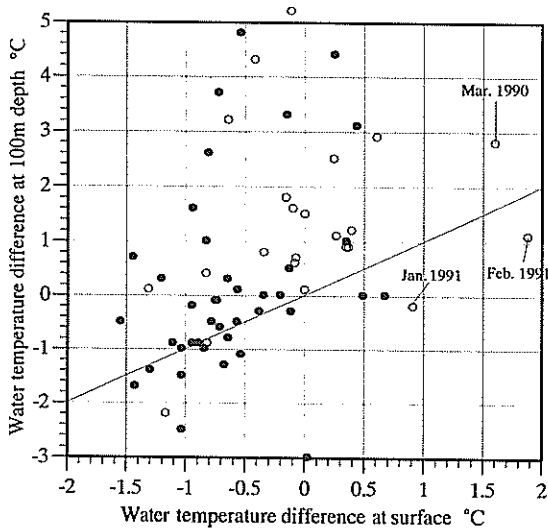


(a) 足摺岬 (●; 10~4月, ○; 5~9月),
潮岬 (■; 10~4月, □; 5~9月)

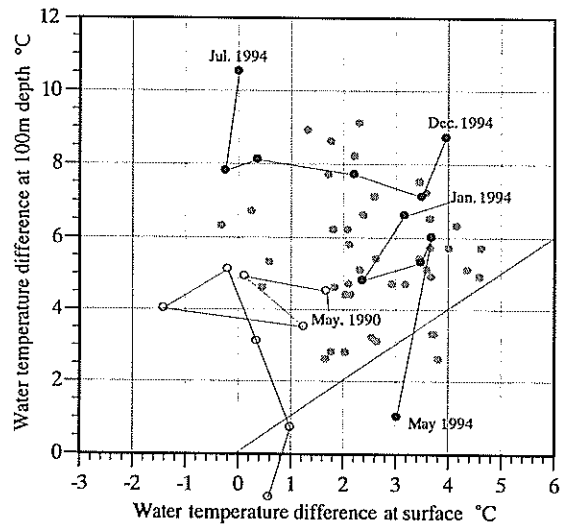


(b) 牛深 (●; 10~4月, ○; 5~9月),
西郷 (■; 10~4月, □; 5~9月)

図-A.3 黒潮, 対馬暖流沿いでの海面水温と水深100m水温との関係 (1990~1995年の月平均値)



(a) 足摺岬-潮岬 (○; 1990-91, ●; 1992-95)



(b) 牛深-西郷 (○; May-Dec. 1990, ●; 1994)

図-A.4 黒潮, 対馬暖流沿いの2地点間での海面と水深100mにおける水温差の関係 (1990~1995年の月平均値)

早い (4月頃から) 流入があると考えられる。

③から黒潮流路が沿岸域に接岸する水塊水温に与える影響が大きいことが予想できる。黒潮の接岸 (1994年の非蛇行接岸型の流路) によって沿岸域での水温が上昇することは一般的に言われているが, 1990年の八丈島西側での蛇行 (A型, 図-A.1(a)) によっても西日本沿岸の水温が上昇している。ただし, ③で示したように100m水深での水温上昇の形態が蛇行, 非蛇行の場合で異なっている。1990年の蛇行期には那覇, 巖原, 西郷, 浦河で水位が上昇しているのに対し, 1994年の非蛇行接岸型では那覇, 巖原, 浦河 (西郷は欠測) で水位が低くなっている (図-5)。図-A.3では水位の上昇した沿岸での100m水深

の水温が上昇していることから, 八丈島西側で蛇行 (A型) が起こるときには黒潮が東シナ海奥まで暖水塊を運び, 非蛇行接岸型のときには東シナ海への暖水塊の流入が小さくなると考えられる (黒潮の影響によって水位は上昇する, 西岸境界流)。

(2) 豊後水道, 紀伊水道への黒潮の影響

図-A.4(a)から足摺岬と潮岬での水温差は潮岬での水温が高いときには, 水深100m水温差と海面水温差との間に正の相関があること, 潮岬での水温が低くなると, 足摺岬の100m水深の水温が潮岬よりも相対的に高くなることからわかる。

足摺岬と潮岬での水温差は黒潮の影響が豊後水道と紀

伊水道のどちらに強く現れているかの指標となると考えられる(図-6では水位差との対応が良く、水位は黒潮流路との関係が強いことを日比野ら(2000)は示している)。この考え方に基づけば、黒潮が九州側に接近した場合に足摺岬で水温が高く(図-A.4(a)では正)、紀伊半島側に接近した場合には潮岬で水温が高くなる。

1990~95年では潮岬で海面水温が高い傾向、水深100mでは足摺岬で水温が高い傾向にある。八丈島西側に冷水塊が存在するとき(1990~91年初旬)には足摺岬で海面水温が高くなる頻度が多くなり、冷水塊の存在位置が紀伊水道に流入する水塊に影響を与えることがわかる。非蛇行接岸型の流路をとった1994年は九州南岸~紀伊半島沿岸に冷水塊が存在しないために潮岬での水温が上昇すると考えられる。

これらのことから紀伊水道から瀬戸内海に流入する水塊の特性を把握するためには冷水塊の位置を考慮する必要性が高いことが示唆される。

(3) 対馬海峡付近への黒潮系暖水塊の影響

図-A.4(b)から牛深と西郷の水温差は水深100mと海面での相関が小さい(負の傾向がある)ことがわかる。黒潮流路が非蛇行接岸型であった1994年は1990年以外の年の傾向と類似しており、100m水深の水温差が大きい(牛深で高水温)ときに、海面水温差が小さい(牛深で低水温)傾向がある。この傾向は100m水深と海面での流れが異なることを示しているが、詳細についてはここでは述べない。

A型の黒潮蛇行があった1990年は西郷の海面と100m水深に暖水塊が流入していることがわかる(次項参照)。1990と94年は日本沿岸に暖水塊を流入させているが、両年は黒潮流路が異なっており、各々の年で異なった水塊

の流入特性がある。

(4) 日本海への熱輸送

西郷沿岸100m水深での水温は12月頃に最大(豊後水道、紀伊水道、九州西岸の沿岸域では10月頃に最大)となる(図-3)。この原因として、上層熱量の下層への輸送や黒潮系水塊の流入が考えられる(日本海では春頃から表層に高塩分水塊が現れ、夏に向かって50~100m付近に高塩分水塊域が現れる)が、現段階での特定は困難である。

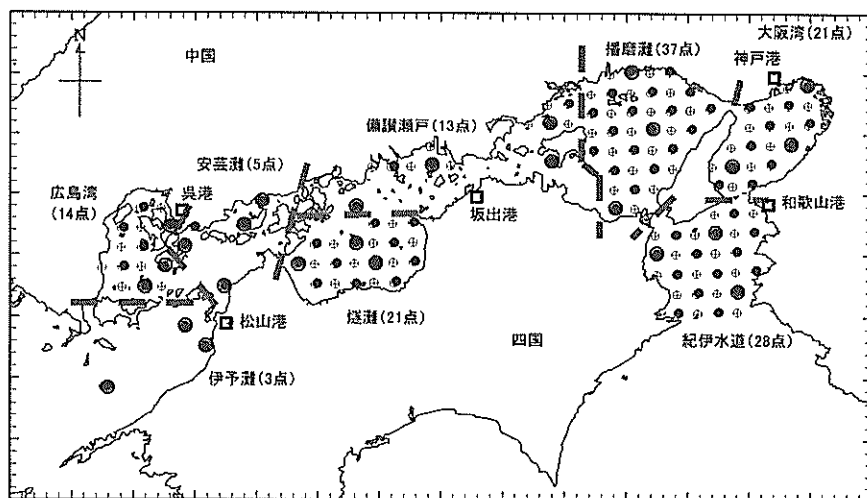
1990年の④の現象は黒潮系暖水塊が日本海に流入したことによるものと考えられ、海面水温が100m水深水温に近づく過程で100m水深水温が約3.5℃/月上昇している。対馬付近の水塊は関門海峡を通して瀬戸内海へ流入しており、瀬戸内海の水質に影響を及ぼすと考えられる。

付録B 瀬戸内海総合水質測定調査の測点と項目

第三港湾建設局は、瀬戸内海における海洋環境整備事業を効率的、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(管内)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。図-B.1に調査測点および調査項目を示す。

付録C 瀬戸内海に流入する河川流量

瀬戸内海の湾・灘に流入する主要な河川(1級河川)の月平均流量の経時変化を図-C.1に示す。図中の値は、図-B.1に示された8つの海域にそれぞれ流入する河川の月平均値(1988~1997年の10年平均値)を累計したものである。



水質調査(第三港湾建設局)

1. 調査範囲及び測点
 S56~大阪湾
 S57~管内全域(8×8km間隔)
 H01~現在(合計142点)
 (水質・底質の悪化海域に重点)
2. 調査時期及び項目
 年4回(5, 8, 10, 2月期)
 水温、塩分、Do、pH、濁度など
 対象:全測点
 年2回(8, 2月期)
 GOD、SS: 測点(●)
 T-N、T-P、栄養塩: 測点(⊗)
 上層: -2.0m
 下層: B+2.0m(50m)

図-B.1 瀬戸内海総合水質測定調査(第三港湾建設局)の測点と項目

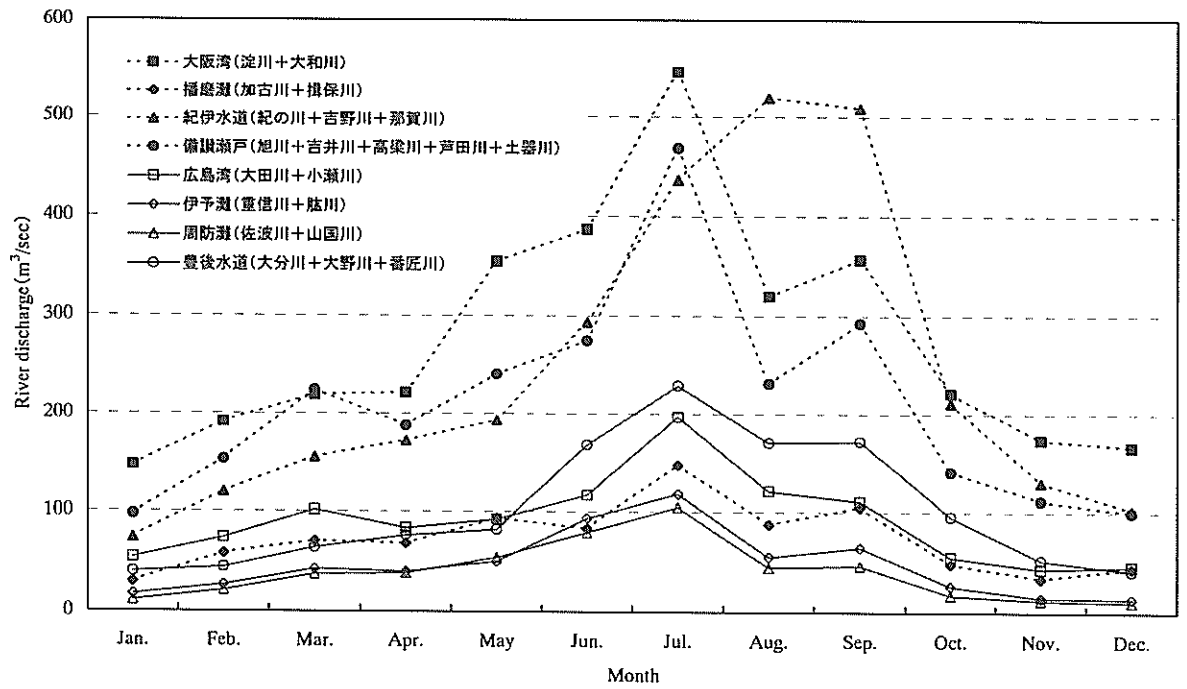


図-C.1 瀬戸内海の湾・灘に流入する月平均河川流量 (1988～1997年の平均値, 流量年表)