

黒潮流路の瀬戸内海周辺での水理現象に及ぼす影響

CONSEQUENCES OF THE KUROSHIO PATH FOR HYDRAULIC PHENOMENA AROUND SETO INLAND SEA

日比野忠史¹・浜走幸育²・松岡純作³

Tadashi HIBINO, Kousuke HAMABASHIRI and Jyunsaku MATSUOKA

¹正会員 博士(工学) 広島大学工学研究科助教授 社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²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(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³国土交通省中国地方整備局港湾空港部海域環境・海岸課長(〒730-0004 広島市中区東白島町 14-15)

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. The observed sea level height (SLH) and sea surface temperature (SST) at Cape Shiono and Cape Ashizuri were influenced by the Kuroshio path. This result suggests that an open boundary condition is sensitive to the annual/seasonal fluctuation of water quality in inland seas.

The water quality in Seto Inland Sea is greatly related with the Kuroshio path. In the recent twenty years, the Kuroshio path changed periodically. The Kuroshio current often takes a meanderings path over 1980's and it tends to come alongside Kii peninsula over 1990's. Also, the salinity distribution in the inland sea changed periodically with the shifts of the Kuroshio path.

Key Words : Warm-water intrusion, Water exchange, SLH at Naha, Salinity distribution

1. はじめに

瀬戸内海は豊後水道、紀伊水道および関門海峡を通じての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、季節的に異な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、そのほとんどが豊後水道と紀伊水道から進入する外海水に支配されると言われている。

Takeoka¹⁾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²⁾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、外洋を含む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。

本論文では、様々な気象・海況データの整理、解析を行うことにより、瀬戸内海の水環境に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・水温変動特性と黒潮流路との関連について検討した。続いて、瀬戸内海での水質変動から年スケール黒潮流路(瀬戸内海周辺沿岸域での水位関係)と内海流動に関する考察を行った。

2. 黒潮・対馬暖流域沿岸の水位・水温変動

2.1 西日本沿岸域での水位・水温の季節変化

(1) 日本周辺での水温分布の季節変化

Fig. 1 には 1990～97 年の月毎に平均された 2 月, 5 月, 8 月, 10 月の表層水温(気象庁により客観解析された水深 100m での水温分布³⁾) が示されている(白抜け範囲は欠測)。Fig. 1 より 2 月から 10 月に向かって 21℃以上の水塊が西日本南岸域に接近しており、10 月には黒潮本流による紀伊水道または豊後水道から瀬戸内海への黒潮系暖水塊の影響があることが予想される(黒潮と西日本南

岸水塊の境界には水温差が2〜3℃ある). 日本海側においても8月に15℃の水温をもつ水塊が本州に沿って流入しており, 対馬暖流が暖水を日本海へ運んでいることが推測できる.

瀬戸内海では豊後水道, 紀伊水道, 関門海峡で内海水・外海水の流出入があるが, 関門海峡から接近する水塊の温度は豊後水道, 紀伊水道に達する水塊に比較して5℃程度低いことがわかる (Fig. 1).

(2) 西日本沿岸域での水温変動

Fig. 2 には那覇, 牛深(熊本), 厳原(対馬), 浜田, 西郷(隠岐), 足摺岬, 潮岬における表層の1987〜95年の9年間の同日の平均水温(気象庁海洋観測資料)および Fig. 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, 潮岬での水温の季節変化が示されている. Fig. 2 から以下のこと(①, ②)がわかる.

海面水温に関して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最低, 最高気温の出現には那覇より約1ヶ月の遅れがある. ①-2; 厳原での水温は年間を通じて牛深の水温よりも約1℃低いが, 最低水温が現れるのが約1.5ヶ月遅れている. ①-3; 浜田, 西郷の水温は3月頃から急激に上昇し, 夏季(5〜9月)には厳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. ①-4; 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℃). ①-5; 厳原, 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.

水深100mでの水温に関して, 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, 日本海にある厳原, 西郷では, 水温が低く, 水温の最大値の出現が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, 厳原では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月に表面と100m水深での水温が一致している. ②-4; 厳原の100m水深へ到達する対馬暖流の水温は牛深の水深100mに到達するその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次のように考えることができる.

③-1; 5月頃から10月頃まで黒潮系の高温水塊は九州西岸〜四国南岸に徐々に近づき, これに伴って瀬戸内海へは豊後水道および紀伊水道から黒潮系暖水塊の影響が強くなる(①-1, ②-2). ③-2; 九州西岸(牛深)へは四国沿岸へ向かう黒潮系水塊と類似の水温塊が年間を通じて見られる(①-1, ②-1). ③-3; 日本海表層へは3〜

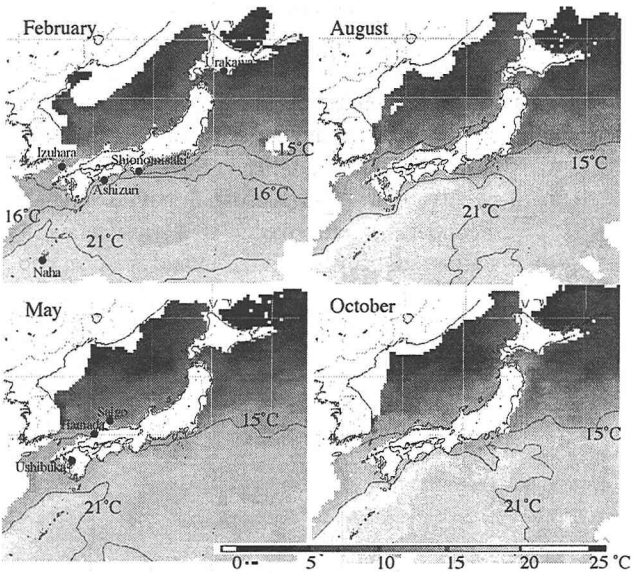


Fig.1 Seasonal variation of subsurface temperature distribution around Japan (average from 1990 to 1997, JMA)

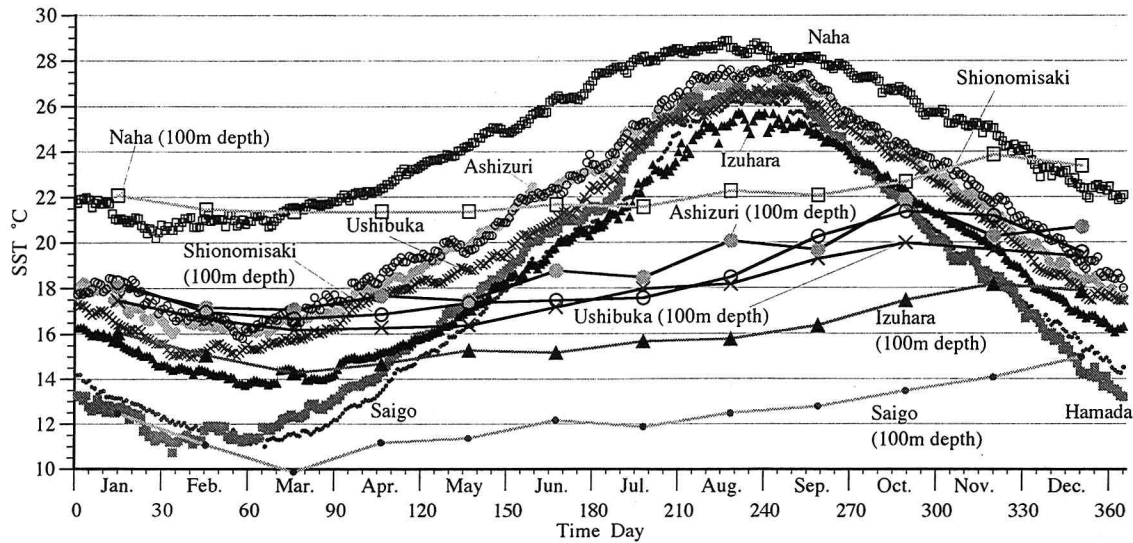


Fig.2 Seasonal variation of SST at Naha, Ashizurimisaki, Shionomisaki, Ushibuka, Izuhara Hamada and Saigo (average from 1987 to 1995, JMA)

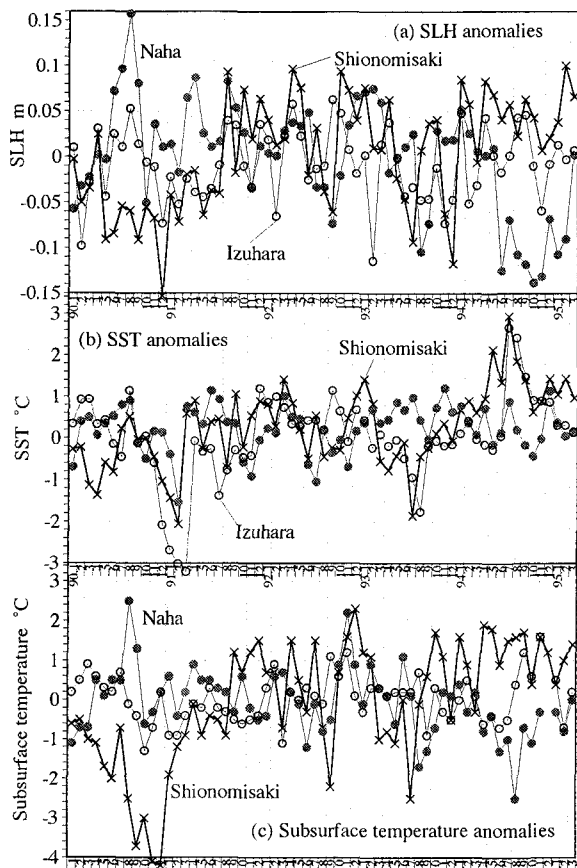


Fig.3 Time series of sea level height (SLH), sea surface temperature (SST) and subsurface temperature anomalies (normal is average from 1985 to 1995, JMA)

9月頃太平洋側からの影響が強くなり、9月下旬頃からは暖水塊の影響はなくなっている(①-3, 4)。

2.2 那覇の水位と瀬戸内海周辺の水温

Fig. 3 には 1990-95 年の潮岬、厳原および那覇での (a)水位、(b)海面水温および(c)水深 100m 水温の月平均偏差(1985-95 年の平均値との差)の経月変化が示されている。

図から潮岬、厳原および那覇での水位の関係が各々の地点間での水温の関連と深いことがわかる。那覇での水位が潮岬での水位よりも高い期間(90-91 年)は、潮岬での水温が低くなっている。逆に低い期間(93-95 年)は、潮岬での水温が高く観測されている。厳原での海面水温も潮岬での水温と類似の傾向を示している(90/91 年冬と 94 年夏に顕著)が、海面水温と 100m 水深水温の変化は逆の傾向が観測されている(厳原では海面と 100m 水深で流れのパターンが異なる)。

Fig. 4 には潮岬と厳原における那覇との水位差と水温差の関係が示されている。いずれの沿岸とも那覇との水位差の増大に伴って水温差の上昇が観測されており、潮岬、厳原での水温が那覇の水位・水温の変動に強い影響を受けていることがわかる。水位の上昇が黒潮水塊の接

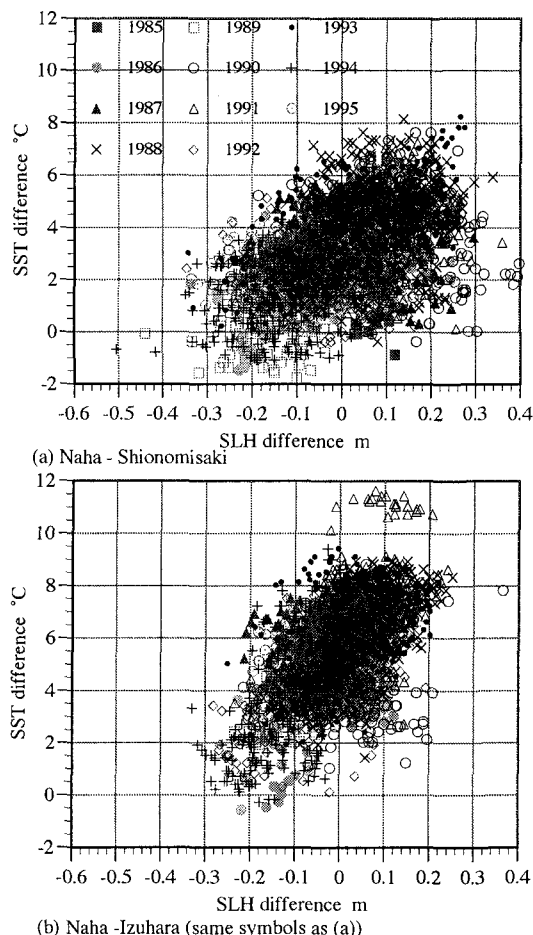


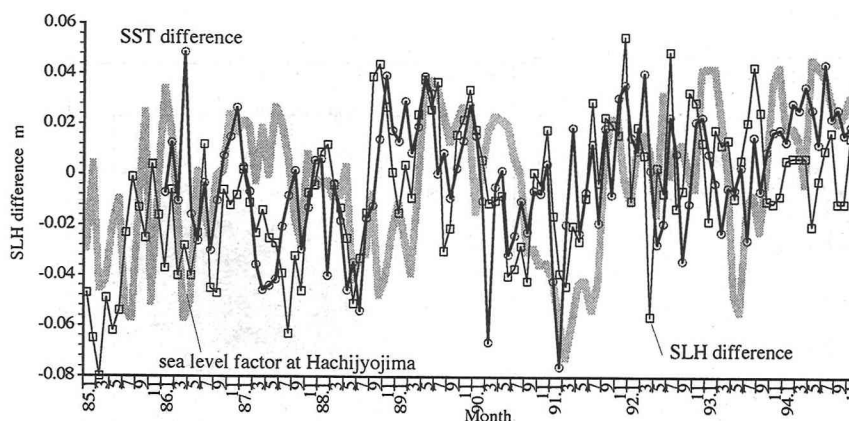
Fig.4 Correlation between SLH and SST differences (1985-1995, JMA)

岸によるものと考えれば、那覇での水位上昇と潮岬の水位低下は黒潮流路が蛇行していることを示しており、那覇との水位関係を検討することで瀬戸内海周辺での水塊水質に対する黒潮系暖水塊の影響を推定できることが示唆される。厳原においても那覇での水位上昇時に水温が低下するということは、黒潮蛇行時には日本海表層へ黒潮系水塊の影響は小さいことを示している。ここで、那覇および瀬戸内海周辺の水位関係を黒潮流路との関係で論じているのは、全太平洋での水位データの取得が可能であり、かつ、豊富なデータがあること、また、本研究の目的が単に黒潮系水塊が瀬戸内海水質に及ぼす影響のみを検討しているものではないことによる。太平洋全域での水位変化と日本周辺の水位変化を比較することができ、これによりグローバルな海洋現象と瀬戸内海の水利現象との関連を明確にすることで、長期的な瀬戸内海での水質変動特性を把握できるものと考えている。

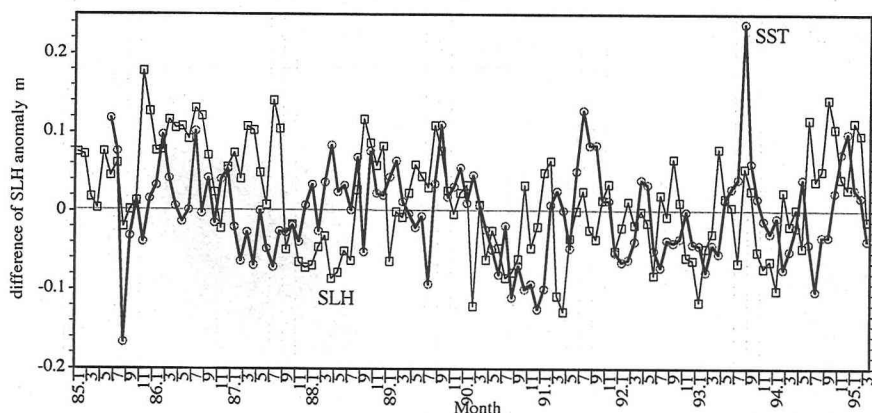
2.3 黒潮系暖水塊と沿岸域の水質

(1) 豊後水道、紀伊水道からの流入水塊

Fig. 5に(a)足摺岬と潮岬の水位差と水温差、八丈島での水位因子(月平均水位/10年間の平均月平均)の関係、(b)浦河(北海道)と那覇(沖縄)での平年水位差の差、牛



(a) Shionomisaki - Ashizurimisaki (SLH and SST differences) and SLH factor at Hachijojima



(b) Urakawa - Naha (SLH anomaly) and Ushibuka - Saigo (SST anomaly)

Fig.5 Time series of SLH and SST difference along Kuroshio and Tsushima warm current, JMA

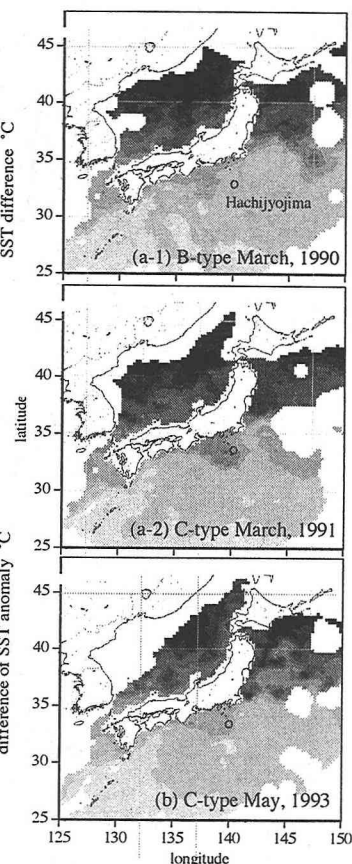


Fig.6 Distribution of subsurface temperature around Japan, JMA

深(熊本)と西郷(隠岐)での平年水温差の差の関係が示されている。図(a)で八丈島の水位因子と比較するのは八丈島の水位が黒潮流路との間に強い関連がある(八丈島の水位が低いときにはC型蛇行(Fig. 6(a-2)), 水位が高いときにはN型(非蛇行)かB型蛇行(Fig. 6(a-1))⁴⁾ためであり、図(b)で浦河(北海道)と那覇での水位差と牛深と西郷の水温差を比較したのは、日本沿岸での海流の動きが北-西太平洋で起こる水位振動(NWPO)によって表されるためである⁵⁾。日本周辺(西太平洋)での水位は、冬期アリューシャン低気圧の発達に伴った北太平洋での水位上昇が起因となる年周期の水位振動が起こっている。この北太平洋と西太平洋での水位振動の節が北海道付近にあり、沖縄の水位較差はNWPOの振幅を表している。

図(a)から足摺岬と潮岬の水位差と水温差が良い対応関係にあることがわかる。このことは足摺岬または潮岬の水位が上昇すると、水温の高い水塊が水位上昇の起こった沿岸に接近することを示している。さらに、八丈島での水位変動とも対応がよいことから黒潮流路が豊後水道、紀伊水道での水理現象に影響を及ぼしていることがわかる。すなわち、黒潮がN型(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、潮岬で水位が高くなり、(黒潮の影響は)豊後水道よりも紀伊水道から流入する水塊に対して強くなる(A型をとった90年は潮岬で水位は低い、

Fig. 6(a-1))。黒潮がC型蛇行するとき(Fig. 6(a-2), (b))には足摺岬で水位が上昇し、豊後水道から流入する水塊に対して黒潮の影響が強くなると考えられる。

(2) 日本海への暖水塊流入(関門海峡周辺の水塊特性)

Fig. 5(b)は沖縄での水位が平年に比べて高く(北太平洋で水位低下)なるときに、日本海にある西郷での水温が東シナ海にある牛深での水温よりも高くなることを示している。すなわち、沖縄で水位が上昇することによって、暖水塊(対馬暖流)が日本海北東側に運ばれ、西郷沿岸(日本海)で水温を上昇させている。

Fig. 5(b)において1988年、91年と93年の夏季はFig. 5(a)で示した八丈島での水位が低い期間であり、西郷で平年並みの水温上昇は観測されていない。すなわち、黒潮の蛇行は大きく(八丈島で水位低下)なると、日本海に流入する暖水塊量は平年に比較して少なくなると考えられる。Fig. 4(b)に示したように厳原の水温は那覇の水位と相関が強く、日本海への暖水塊流入と直接的な関連があると言える。このことは、関門海峡からの瀬戸内海への流入水塊の特性を把握するための情報として那覇水位を用いることの可能性を示している。

ちなみに、1991年と93年春-夏季の黒潮流路はC型をとっている(Fig. 6)が、C型(八丈島の南に黒潮)への移行形態は両年で異なっている(91年はB型→C型、93

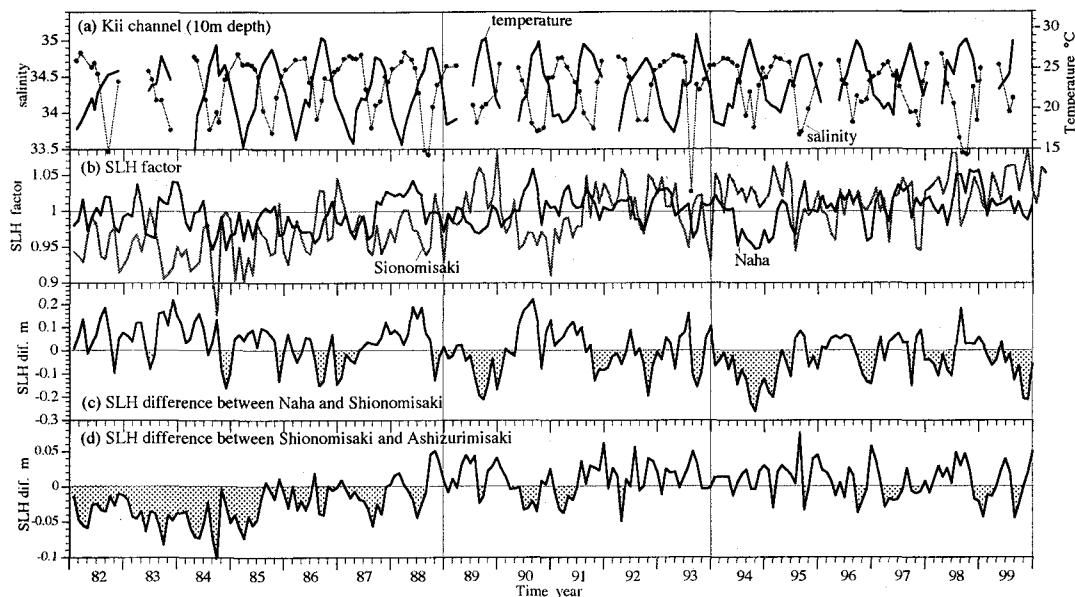


Fig.7 Relationship of SLH among at Naha, at Shionomisaki and at Ashizurimisaki, and SST, salinity at Kii channel (33.31N, 135.16E)

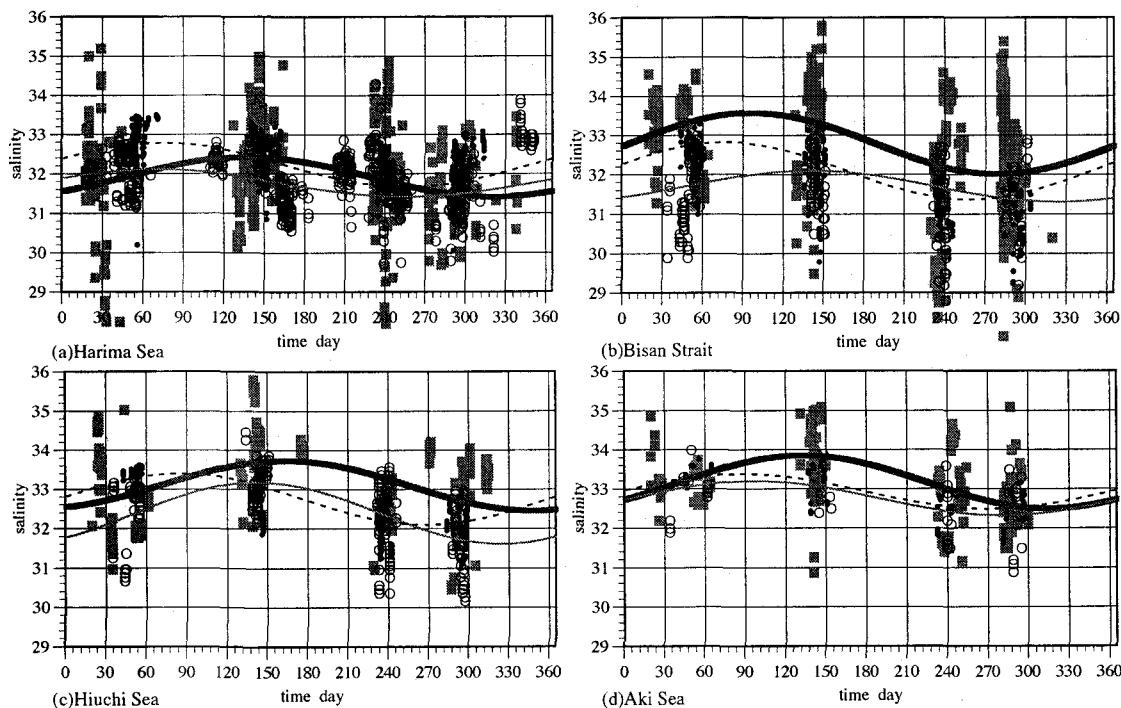


Fig.8 Variation of salinity distributions during 1982-88, 1989-93 and 1994-99 (■, — 82-88; ○, — 89-93; ●, --- 94-99)

年はN型→C型). 黒潮がB型(八丈島の西側で蛇行)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への流入を抑制することが考えられる.

3. 瀬戸内海と内海塩分の変動特性

Fig. 7には(a)紀伊水道(33.31°N, 135.16°E, 水深10m)での水温と塩分, (b)潮岬と那覇での水位因子(観測月の水位を対象月の平年値で割ったもの), (c)那覇と潮岬で

の水位差および(d)潮岬と足摺岬での水位差の経年変化が示されている. 図から, 那覇, 潮岬, 足摺岬間の水位差には, 水位の上昇とは別に20年程度の変動周期があり, 1982~88年, 1989~93年, 1994~99年で水温・水位の変化が明らかに異なっていることがわかる. 紀伊水道での水温変化を見ると82~88年の水温の最低値は約15°Cであるが, 89~93年では約17°C, 94~99年には約19°Cと最近5年間では最低水温が4°Cも高くなっている.

那覇と潮岬での水位差は90年代に大きく(潮岬で水位が高い)なっている. 潮岬と足摺岬での水位差は80年代に足摺岬での水位が潮岬での水位より高くなっている. 黒

潮流路との関連で考えると90年代には、黒潮は四国～紀伊水道に接岸することが多くなり、紀伊水道での水温を上昇させている(特に、那覇での水位低下が顕著な94年、99年は黒潮の接岸による影響が様々な海域で現れている⁷⁾)。黒潮がこの流路を通る時には豊後水道側への接岸は弱く(足摺岬で水位が低い)になっていることが説明できる。瀬戸内海の海水に及ぼす黒潮系水塊の影響は82～88年には豊後水道で大きく、89年以降は紀伊水道で大きいと考えられる。

Fig. 8には瀬戸内海中央に位置する(a)播磨灘、(b)備讃瀬戸、(c)燧灘、(d)安芸灘における底層(海底面+2.0m)での塩分が示されている。図には、国土交通省中国地方整備局・瀬戸内海総合水質調査結果⁸⁾(年4回(5, 8, 10, 2月期)の測定)とこれから求められた塩分の季節変動の近似曲線が示されている。図中の近似曲線は1982～88年、1989～93年、1994～99年に区分して示されており、それぞれの期間の測定値を時間的・量的に平均した値から求められている⁸⁾。

82～88年(足摺岬で水位の高い期間、Fig. 7(d))には、備讃瀬戸、燧灘、安芸灘での塩分が高くなっていることから、この期間には豊後水道方面からの黒潮系水塊が備讃瀬戸まで影響を及ぼしていると考えられる。播磨灘での高塩分状態は94年以降に多く起こっており(潮岬で水位が高い)、紀伊水道からの黒潮系水塊の影響が強いと考えられる。しかし、紀伊水道への影響が強い場合には黒潮系水塊の瀬戸内海中央への影響は少なく、播磨灘においても顕著な塩分上昇は観測されていない。

以上のことから、瀬戸内海周辺沿岸域での水位および、内海の水質は黒潮の流路との関連が強く、瀬戸内海では豊後水道側に黒潮系水塊の接近(足摺岬での水位が潮岬での水位より高い)があるときに海水流動が促進されることが推測できる。

4. おわりに

本論文では黒潮系暖水塊の瀬戸内海の水質に及ぼす瀬戸内海周辺水位の影響について検討を行った。

- (1)瀬戸内海では豊後水道、紀伊水道、関門海峡で海水の流入があるが、関門海峡から接近する水塊の温度は豊後水道、紀伊水道に達する水塊に比較して5℃程度低い。
- (2)黒潮水塊が移流する時期と流れ方について次の①～③のことが考えられる。①5月頃から10月頃まで黒潮系の高温水塊は九州西岸～四国南岸に徐々に近づき、これに伴って瀬戸内海へは豊後水道および紀伊水道への黒潮系暖水塊の影響が強くなっている。②九州西岸(牛深)へは四国沿岸へ向かう黒潮系水塊と類似の水塊が年間を通じて見られる。③日本海表層へは3～9月頃太平洋側から水塊が流入し、9月下旬頃からは暖

水塊の流入はなくなっている。

- (3)黒潮がN型(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、潮岬で水位が高く(那覇で水位は低い)なり、豊後水道と比較して紀伊水道への影響が強くなる。黒潮がC型蛇行するときには、足摺岬で水位が上昇(那覇で水位は高く、潮岬では水位は低い)し、豊後水道から黒潮系水塊の影響が強くなる。
- (4)那覇、潮岬、足摺岬間の水位差には、水位の上昇とは別に20年程度の周期変動があり、紀伊水道での水温変化を見ると82～88年の水温の最低値は約15℃であるが、89～93年では約17℃、94～99年には約19℃と最近5年間では最低水温が4℃も高くなっている
- (5)1980年代には黒潮は蛇行流路をとることが多く、豊後水道からの黒潮系水塊の影響が強くなっていた。この結果、黒潮系水塊は内海中央(備讃瀬戸)まで影響を及ぼし、湾内流動を活発にしていた。90年代になると、黒潮が紀伊半島に接岸し、紀伊水道への黒潮系水塊の影響が強くなったが、この場合には瀬戸内海全体の海水流動を促進していないことが推測される。

謝辞：紀伊水道の水温・塩分データは徳島水産試験場より提供されたものである。また、外洋および沿岸水温データは気象庁海洋観測資料 No86-89、水位データは日本海洋データセンターホームページから入手している。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Takeoka, H. : Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea. *Continental Shelf Research*, 3, pp.327-341, 1984.
- 2) 上島英樹, 橋本英資, 山崎宗広, 宝田盛康: 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, 1985.
- 3) 海洋気象部海洋課: 表層水温の客観解析, 測候時報, 第57巻6号, pp.271-282, 1990.
- 4) HIBINO, T, FURUKAWA, K. : Preliminary Use of Global Meteorological Information as an Indicator for Long Term Water Exchange in an Estuary - Development of Aleutian Low and Ocean Current -, ICCE2000, pp.3669-3682, 2001.
- 5) 宇野木早苗, 久保田雅久: 海洋の波と流れの科学, 東京大学出版会, pp.215-218, 1996.
- 6) 宮野仁, 日比野忠史, 中山恵介, 岡田知也, 細川恭史, 浅井正: 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, 第39巻第2号, pp.1-26, 2000.
- 7) (財)日本気象協会: 1998 気象年鑑, 大蔵省印刷局, pp.194-198, 1998.
- 8) 日比野忠史, 駒井克昭, 浅井正: 瀬戸内海平均海面の推定, 水工学論文集, 第45巻, pp.1069-1074, 2001.

(2001. 10. 1受付)