

## 大橋川における高塩分水塊の遡上現象\*

森脇晋平<sup>1</sup>・藤井智康<sup>2</sup>・福井克也<sup>3</sup>

### Intrusion of high salinity water mass into Ohashi River, San'in District of Japan

Shimpei Moriwaki<sup>1</sup>, Tomoyasu Fujii<sup>2</sup> and Katsuya Fukui<sup>3</sup>

**Abstract:** Appearance of a high-salinity water mass that frequently intrudes into the Ohashi-River from the Lake Nakaumi and causes oxygen-deficient water mass in Lake Shinji in San'in District, western Japan, has been studied with special reference to the variations in water levels as well as wind patterns in Lake Nakaumi. Although no seasonal fluctuations in the high-salinity water mass index (HSI) were found, correlations seemed to exist between the monthly HSI and the water level differences as well as discharge of the Hii River. In a shorter time-scale, it was probable that the level of HSI increased when water level differences were large. The average velocity of the high-salinity water mass was estimated to be 0.44 m/s. Large HSI occurred more frequently during westerly winds than easterly ones, suggesting thereby that some of the HSI were associated with the rise of wind-induced halocline. Extensive HSI was likely to occur when the difference of water level was large and westerly winds prevailed.

**Key words:** high salinity water mass, Ohashi River, water level, wind

### はじめに

大橋川は宍道湖と中海を結んでいる全長約 8 km の河川である。中海から大橋川を通じてしばしば海水が宍道湖へ侵入しているが、この海水は低溶存酸素水状態の場合があることが報告されている(津田, 1995)。一方、浸入した海水は密度成層をつくりやすく、宍道湖の貧酸素水塊形成に関与していることが指摘されている(山室, 2001)。貧・低溶存酸素水塊は、海水として直接侵入してくるにしろ宍道湖内部で形成されるにしろ周辺水域の水産資源生物に短期的にも長期的にも悪影響を与えることが予想され

る。こういった観点から、大橋川を通じて海水が宍道湖へ侵入する条件や遡上機構の調査研究は重要な課題である。

橋谷ほか(1991)は宍道湖への海水の流入要因を低気圧による日本海側の海水位上昇であると指摘したが、その後 Ishitobi et al.(1999)や徳岡ほか(2001 a)の調査を除いてはほとんどなされていない。しかもそれらは調査期間が短かく、現象の地域的特徴を理解するためにはさらに水域全体を通して長期的に事例を検討する必要があるだろう。

一方、この海水の遡上現象の出現機構に関して中海の内部波の振動と関連する可能性が指摘されてい

<sup>1</sup> 島根県内水面水産試験場 Shimane Prefectural Inland Fisheries Experimental Station, Hirata, 691-0076, Japan

現所属：島根県水産試験場 Present address: Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Hamada, 697-0051, Japan

<sup>2</sup> 日本ミクニヤ(株) Mikuniya Corporation, Hiroshima, 734-0015, Japan

<sup>3</sup> 島根県内水面水産試験場 Shimane Prefectural Inland Fisheries Experimental Station, Hirata, 691-0076, Japan

現所属：島根県栽培漁業センター Present address: Shimane Prefectural Sea Farming Center, Nishinoshima, 684-0211, Japan

\* 2000 年度水産海洋学会で一部口頭発表

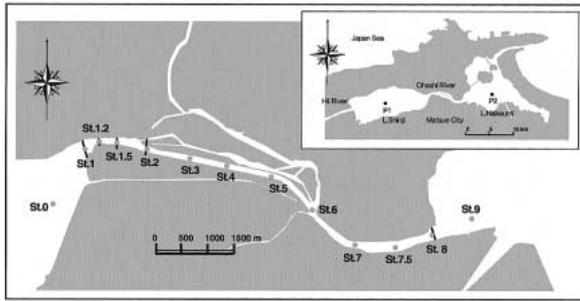


図1. 調査地点の概要. 連続観測は St.1.2 の水深 4 m で得られた. 水位変動は宍道湖と中海の中央部で, 風は中海の中央部でそれぞれ得られた資料である. また斐伊川の流量はその河口部で観測されたのもである.

**Fig. 1.** Location of survey points in the Ohashi River. Continuous data was obtained through the "Water Quality Observation System" (St.1.2) at 4 m depth in the central parts of Lake Shinji (P 1) and Lake Nakaumi (P 2). The flux of Hii River was observed at its mouth.

る (Fujii, 1998). 中海の内部波の変動は海上風と密接に相関していることが報告されているが (Fujii, 1997), 中海の海上風と海水の遡上現象との関連を取り扱った報告は皆無の状態である. 本報告ではこのような背景から, 大橋川での現地観測を実施し, あわせて大橋川の宍道湖入り口付近で得た長期間の連続観測資料を用いて, この現象の出現状況をとくに水位と風との関与に注目して調べた結果を報告する.

### 資料と解析の方法

今回取り扱った資料は大きく2つに分類できる. ひとつは島根県内水面水産試験場が調査船(8.5 総トン)を使用して1999年9月9日~10日に実施した観測である. 図1に示した観測点において, ハイドロラボ社製多項目水質計(H-20)とアレック電子社製電磁流速計(ACM-210 D)を用いて実施した反復観測によって延べ9シリーズの観測資料が得られたが, 今回は高塩分水塊の挙動に注目するため塩分と流れの資料を用いた. さらに高塩分水塊の遡上現象を捕捉するため上述の調査船による観測期間をはさむように図1の St.6 と St.8 に自記記録水質計(ハイドロラボ社製データゾンデー3型)を設置し, それらから得られた塩分値も用いた.

他のひとつは島根県内水面水産試験場が松江大橋の橋脚(図1: St.1.2)に設置している水質監視システム(島根県内水面水産試験場, 1999)から得られた塩

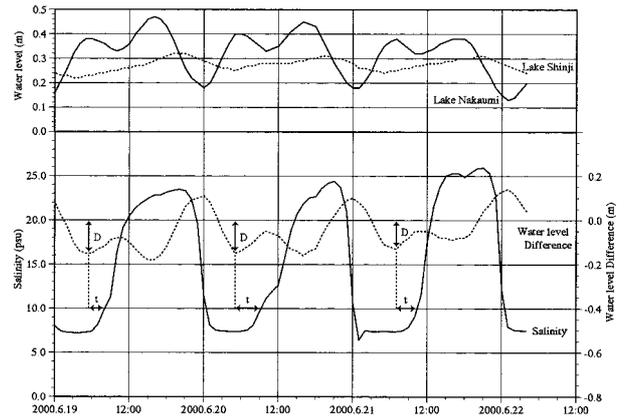


図2. 水質監視システム(図1, St.1.2の水深4 m 深)から得られた塩分の観測記録と水位(上段)および水位差(宍道湖-中海;下段)の一例.

**Fig. 2.** An example of data on salinity (lower) at St.1.2 and water level (upper) in the central parts of L.Shinji (P 1) and L.Nakaumi (P 2).

分観測値である. このうち1998年4月から2000年3月までの約4 m 深における観測記録を使用した.

水質監視システムから得られた塩分値の観測例を図2に示した. 得られたデータを見ると塩分値は短期間に上昇・下降をくりかえし, 高塩分水塊が進入・後退していることを示している. 宍道湖中央部の周年を通じての平均塩分値は2~7 psu である(伊達ほか, 1989)ので, 10 psu 以上の海水は宍道湖内部で生成されることはないと考えられ, 10 psu 以上の海水は大橋川を通じて外海から宍道湖に入ったものとみなすことができる. これをこの報告では「高塩分水塊」とよぶことにする. 高塩分水塊の出現規模を定量的に検討するため, 監視システムの水深約4 m 深において, 高塩分水塊が出現した時間(継続時間)とその塩分値とから積算塩分値を求め(図3), 高塩分水塊出現指数(以下 HSI とよぶ)を求めた(式1).

$$\text{高塩分水塊出現指数: HSI} = \sum \text{Sh} \cdot \Delta t \quad (\text{式1})$$

ただし, Sh: 10 psu 以上の塩分値,  $\Delta t$ : 単位時間(10分間). また HSI を月毎に積算(式2)して高塩分水塊の季節的な変動を検討した.

$$\text{月間の高塩分指数} = \sum_{d=1}^T \text{HSI} \quad (\text{式2})$$

ただし, d: 日(1, 2, 3..., T(月末))

図2には宍道湖と中海の中央部(図1: P1, P2)における水位変動も図示したが, 高塩分水塊が遡上する直前にはしばしば中海水位が宍道湖のそれを上回る水位の逆転現象がみられる. 今回この水位差(図2: "D") およびその時刻から高塩分水塊出現までの時間(図2: "T")とを計測した. さらに高塩分水塊出

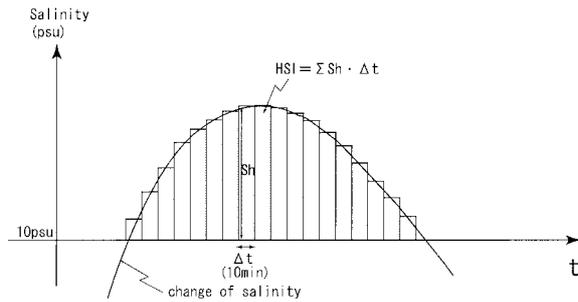


図 3. 高塩分指数 (HSI) の定義と計算の考え方.

Fig. 3. Scheme of the calculation of the High Salinity water mass Index (HSI).

現に及ぼす風の影響を検討するため出現開始時から6時間ごとに24時間前まで遡った風の状況を検討した。中海周辺の風の特徴としては年間を通じて東西軸方向に吹く風が卓越している(福岡ほか, 1999)ので, 中海中央部(図1:P2)における1時間ごとの風の東西成分を6時間ごとに平均算出したものを用いた。ただし, 風向については吹いていく方向を「風向」として東向きを「プラス」とした。

宍道湖中央部の水位, 中海中央部の水位と海上風および斐伊川河口部における河川流量値については建設省(現・国土交通省)出雲河川事務所が収集している資料を用いた。

## 結 果

### 1. 大橋川における高塩分水塊の分布と流動特性

#### 1) 航走調査から得られた塩分・流速縦断面

9月9日の第1回目~3回目の調査(図4)は中海の水位が宍道湖のそれより低下する時間帯に対応する。高塩分水は後退し鉛直的にも塩水楔は薄くなり, 底層部に高塩分水がへばりつくように分布している。流れも宍道湖から中海に向う成分が卓越し, 底部では高塩分水の分布に対応してごく弱い逆流がみられた。

9日の第4回目~5回目(図5)の調査は中海の水位が宍道湖のそれより高い時間帯に実施した。第3回目の調査(図4-(下))で下流部の底層部に薄く分布していた高塩分水は宍道湖方面へ遡上していった。流れは中海から宍道湖への成分が卓越していた。

10日の第6回目~7回目の調査時(図6)の水位状況は, 中海の水位は低下するが宍道湖のそれ以下には低下することなく, 水位が逆転した第1~2回目の状況(図4-(上), (中))とは異なる。高塩分水は遡上した状態を維持している。流れは停滞した状況

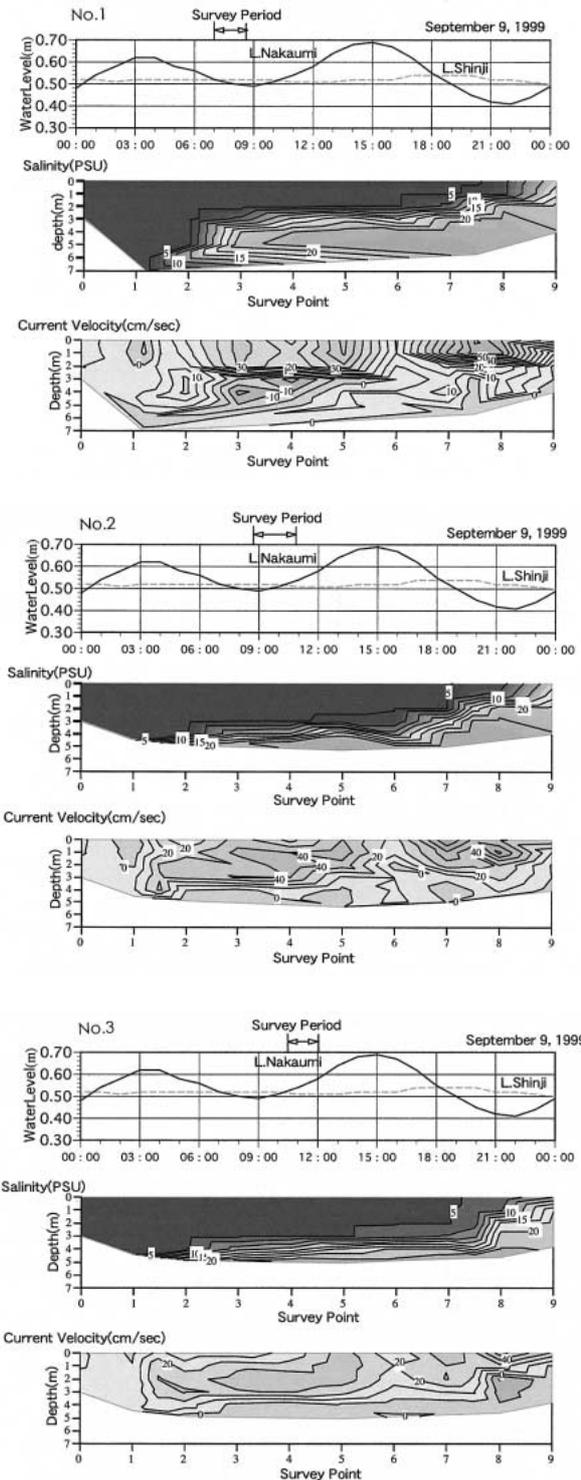


図 4. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段)一第1回~3回一。

Fig. 4. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) -No.1~3-.

であり, 流速の絶対値は調査期間を通じて相対的に小さい。

8回目~9回目の調査(図7)は中海の水位がふた

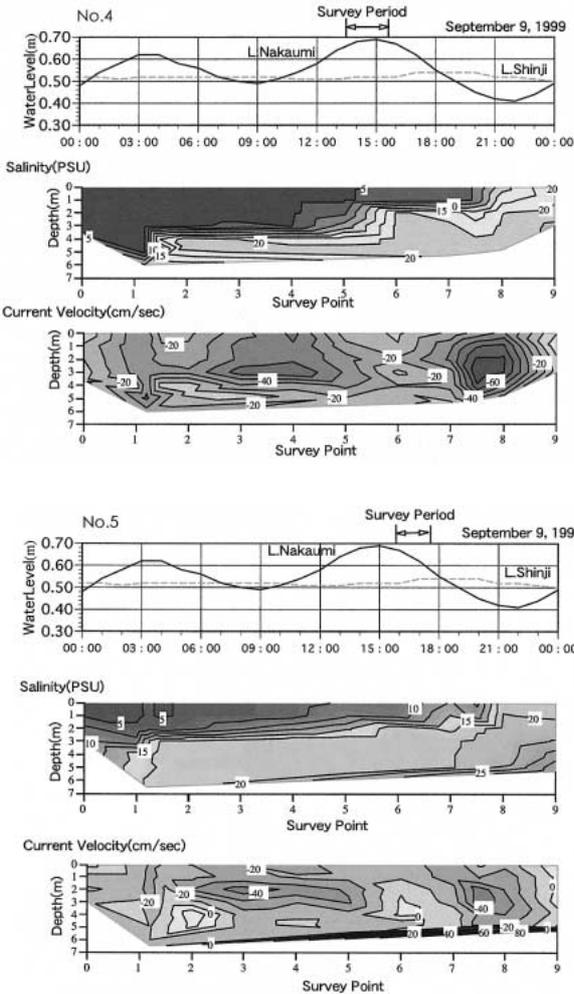


図 5. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段) — 第 4 回~5 回 —.

Fig. 5. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) —No.4~5—.

び上昇に転じた時間帯で、4 回目~5 回目調査時(図 5-(上), (下))と水位変動は同じ状況であった。この時期は、第 6 回~7 回目の調査(図 6-(上), (下))でみたように停滞していた高塩分水が再び遡上していったため、高塩分水は調査断面のほとんどすべてを占め、最終的には宍道湖へ達している。

以上のように中海と宍道湖の水位差に伴う高塩分水の進入・後退と流れの実態の一部が明らかになった。

2) 遡上速度の推定

同時期に底層部に設置した自記記録水質計の連続観測記録と松江大橋に設置の水質監視システムの記録とに基づき高塩分水の遡上速度を推定した。

今回の調査のうちで高塩分水が遡上していく過程を航走調査と自動連続観測の記録とを対比してとら

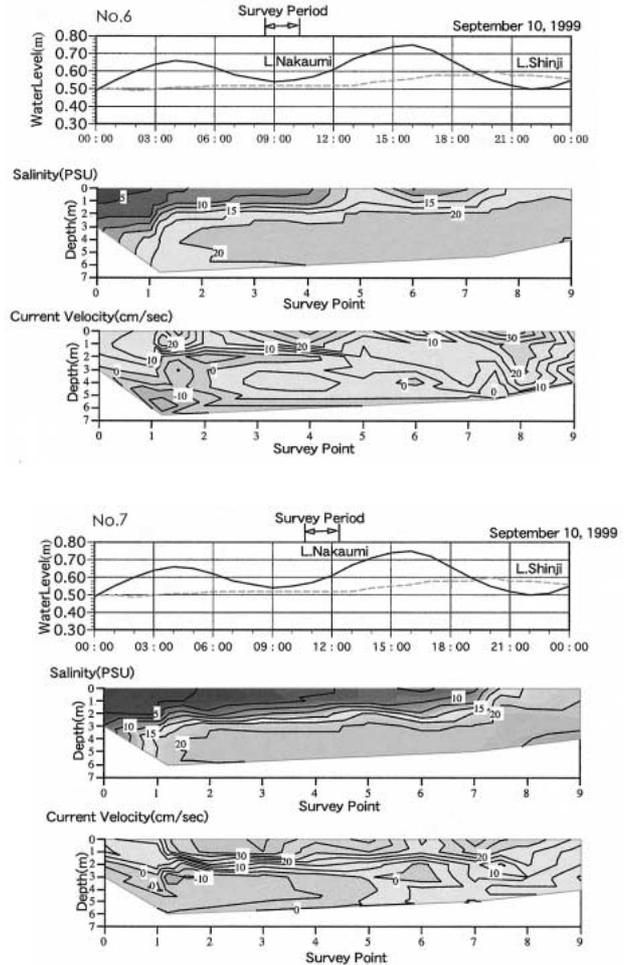


図 6. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段) — 第 6 回~7 回 —.

Fig. 6. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) —No.6~7—.

えることができたのは 9 日の第 3 回目(図 4-(下))から 5 回目(図 5-(下))の調査である。中海大橋付近(図 1: St.8)まで後退していた高塩分水が徐々に遡上して宍道湖入り口にまで達する様子がみられた。この期間の連続観測記録をみると、St.6 では 10 時 40 分から塩分値は上昇をはじめ、一方 St.1.2 の下層部では 15 時 10 分から塩分値は上昇を開始した。

これらの塩分値の変動は航走調査の結果とよく対応している。すなわち、塩分の上昇時刻とその測点より上流の測点での塩分上昇時刻とから高塩分水の遡上時間が計測できる。今回の調査ではこのような事例が 15 回認められた(図 8)。

それぞれの測点間の距離を計測して高塩分水の遡上速度  $V$  を推定したところ、

$$V=0.44 \text{ m/s (0.31~0.56 m/s)}$$

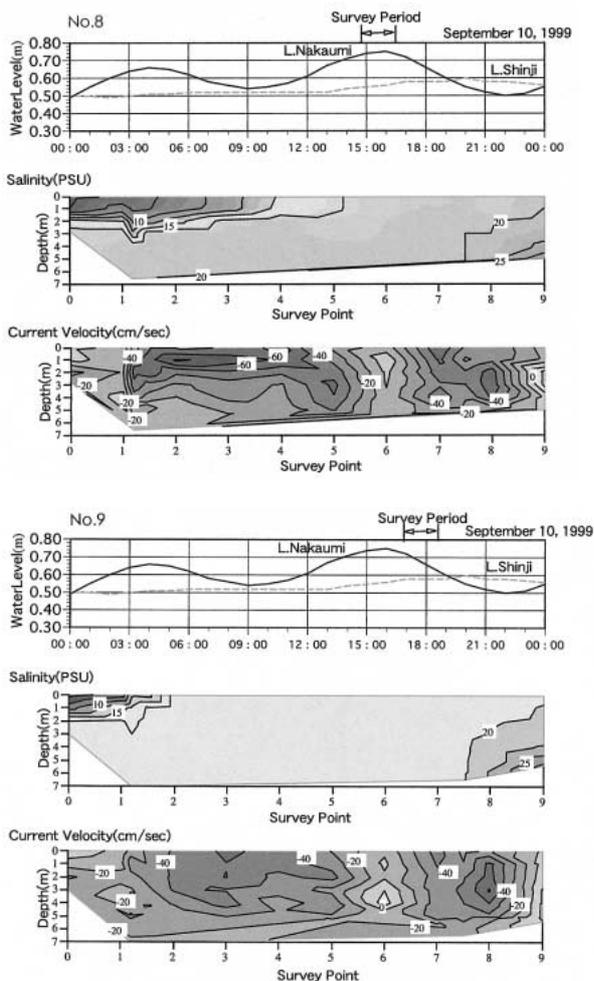


図7. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段) —第8回~9回—.

Fig. 7. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) —No.8~9—.

を得た。( )内は95%信頼区間である。

## 2 高塩分水塊の出現状況

### 1) 季節変動

水質監視システム下層部(図1:St.1.2の4m深)における高塩分水出現指数の季節的変動をみるため3年間の月別の出現指数変化(図9)をみたところ, 少なくとも得られた結果からは一定の共通した季節的変動パターンは認められない。

これまで宍道湖に進入する高塩分水の季節的な変動に関する知見はほとんどない。今回連続して長期的な観測が可能となり, 周年を通じての定量的な把握が可能となった。その結果, 大橋川の宍道湖入り口付近における季節的な高塩分水の出現は年によって著しく異なることが明らかになった。

橋谷ほか(1991)は宍道湖への高塩分水の流入要因として両水域の水位条件を指摘した。そこで高塩分指数の変動に影響をおよぼすと想定される環境要因として, 中海・宍道湖の水位, その差(宍道湖-中海), 河川流量(斐伊川)をとりあげ, それぞれの月平均値との関連を検討した。この結果(表1)による

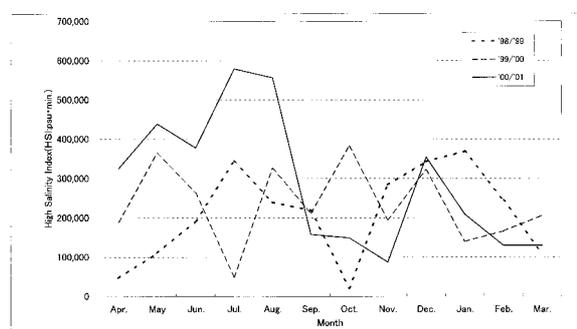


図9. 各年における月別高塩分指数の季節変化。  
Fig. 9. Seasonal changes of HSI during the year.

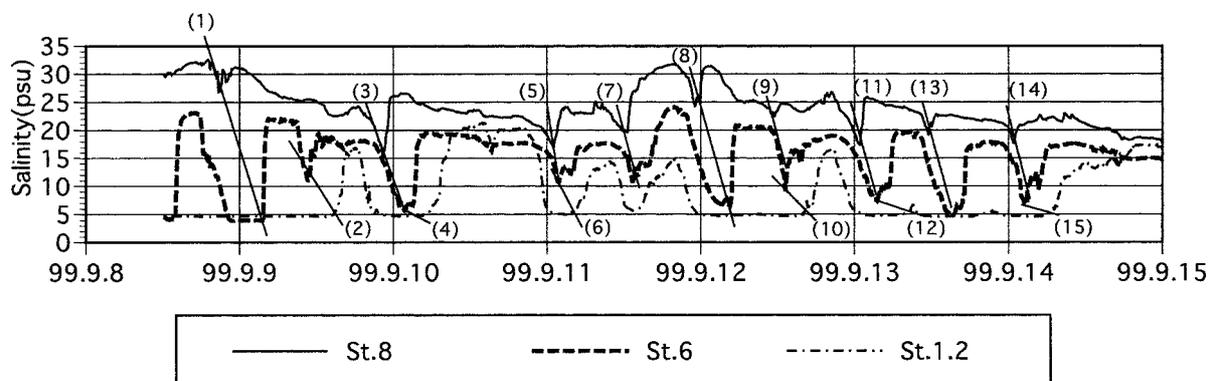


図8. 底層塩分の連続観測.1から15の斜線は高塩分水塊の進入を示している。

Fig. 8. Temporal variations in the bottom salinity at St.8,St.6 and St.1.2. Lines joining the two series indicate the high salinity water mass intrusion events.

表 1. 高塩分指数と環境要因(水位, 水位差, 河川流量)との相関係数. 下線の数字は 1% 有意水準で相関関係がある.

**Table 1.** Correlation coefficients between High Salinity Index and other environmental factors (water level, difference of water level, river discharge). Underlined are significant at 1% level or more.

|                     | H.S.I.       | W.L.in Shinjiko | W.L.in Nakaumi | W.L.Difference | Mon. Discharge |
|---------------------|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| High Salinity Index | 1.00         |                 |                |                |                |
| W.Level in Shinjiko | -0.02        | 1.00            |                |                |                |
| W.Level in Nakaumi  | 0.23         | <u>0.97</u>     | 1.00           |                |                |
| W.Level Difference  | <u>-0.75</u> | 0.27            | 0.03           | 1.00           |                |
| Monthly Discharge   | <u>-0.80</u> | 0.19            | -0.09          | <u>0.85</u>    | 1.00           |

表 2. 高塩分水の出現規模と継続時間との関係.

**Table 2.** Relation between level of the high salinity appearance and the hours of duration.

| hours of duration/scale | Level I | (%)  | Level II | (%)  | Level III | (%)  | Level IV | (%) | Level V | (%) | Total | (%)   |
|-------------------------|---------|------|----------|------|-----------|------|----------|-----|---------|-----|-------|-------|
| ~6                      | 189     | 31.3 | 1        | 0.2  | 0         | 0.0  | 0        | 0.0 | 0       | 0.0 | 190   | 30.6  |
| 6~12                    | 110     | 18.2 | 46       | 7.6  | 0         | 0.0  | 0        | 0.0 | 0       | 0.0 | 156   | 25.2  |
| 12~18                   | 2       | 0.3  | 137      | 22.7 | 28        | 4.6  | 0        | 0.0 | 0       | 0.0 | 167   | 26.9  |
| 18~24                   | 0       | 0.0  | 13       | 2.2  | 23        | 3.8  | 3        | 0.5 | 0       | 0.0 | 39    | 6.3   |
| 24~30                   | 0       | 0.0  | 0        | 0.0  | 9         | 1.5  | 6        | 1.0 | 0       | 0.0 | 15    | 2.4   |
| 30~                     | 0       | 0.0  | 0        | 0.0  | 8         | 1.3  | 14       | 2.3 | 31      | 5.1 | 53    | 8.5   |
| Total(%)                | 301     | 49.8 | 197      | 32.6 | 68        | 11.3 | 23       | 3.8 | 31      | 5.1 | 620   | 100.0 |

Level I:0~10,000psu・min. Level II:10,000~20,000psu・min. Level III:20,000~30,000psu・min. LevelIV:30,000~40,000psu・min. LevelV:40,000psu・min. ~

と, 高塩分水出現指数は水位差と河川流量との間に高い負相関がみられた. このことは, 河川の流量増加に伴う宍道湖水位の上昇が中海への流量を増大させることによって高塩分水の進入が阻害されることを示している.

松江大橋下 (St.1.2) に出現した海水のすべてが宍道湖の流入出に関与しているとは限らないであろうが, 月ごとの高塩分水出現指数(式 2)は大橋川を通じての宍道湖における海水の季節的な交換を示すひとつの指標になりえるであろう.

## 2) 短い時間スケールの変動

### ①規模と継続時間

今回観測された 620 回の高塩分水の出現をさらに短い時間スケールで検討するため, 出現規模と継続時間との関係を表 2 のように整理した. なお出現規模を次の 5 階級に分類して検討をすすめた. すなわち, 10,000 psu・min. 未満をレベル I, これ以上 20,000 psu・min. 未満をレベル II, これ以上 30,000 psu・min. 未満をレベル III, これ以上 40,000 psu・min. 未満をレベル IV, これ以上をレベル V とした.

出現規模としてはレベル I の頻度が約 50% で最も多く, 継続時間では 6 時間未満のものが約 30% を占めていた. 出現規模と継続時間との組み合わせで見るとレベル I で 6 時間未満のものが最も多く, 次いでレベル II で 12~18 時間が 22.7%, レベル I で 6~12 時間が 18.2% であった. レベル II, III では 12~18 時間, 18~24 時間の継続時間の出現頻度が高かった. レベル IV 以上の出現指数では 30 時間以上継

続する例がほとんどであった. このような長時間の継続は, いったん遡上した高塩分水塊が停滞したのちに再び遡上していくという過程によって発生したものである. こういった現象は実際に前節で述べた観測事例でみられている (図 6, 7).

### ②水位差と出現時間差

規模別に水位差の変化(図 2: "D")に対する出現頻度を図 10 に整理した. 出現の分布パターンをみると規模が大きくなるにつれて水位差の大きい方に出現分布が偏っていくという傾向がみられる. 実際, 水位差によって高塩分水出現規模における出現割合に差が認められた ( $p < 0.01$ ). したがって, 水位差の大きいときには規模の大きな高塩分水塊の出現が生じ

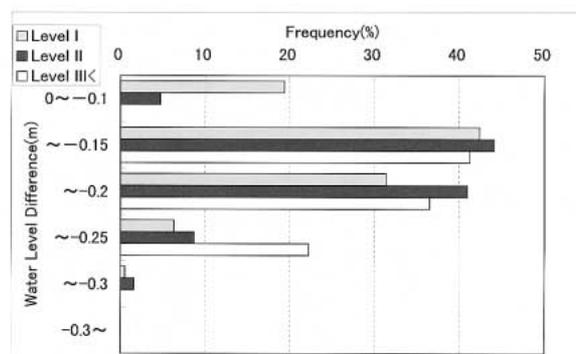


図 10. 水位差(図 2 の "D")に対する各レベル毎の HSI 頻度分布の比較.

**Fig. 10.** Comparison of the frequencies of HSI at each level of the water level difference ("D" in Fig.2).

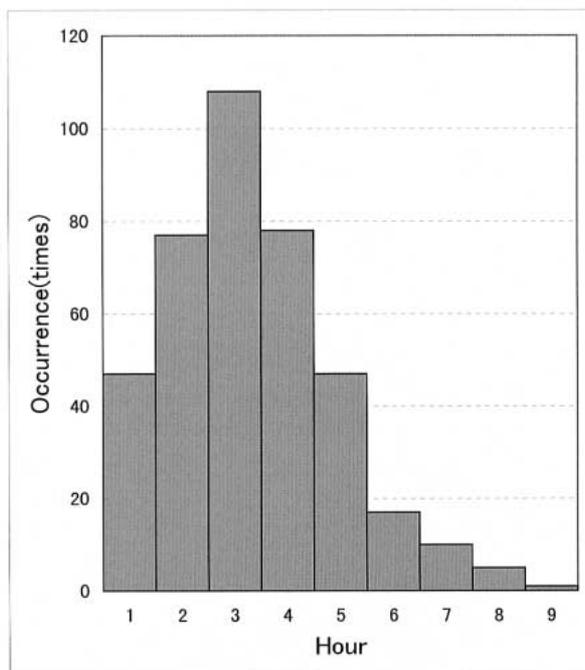


図 11. 水位差が最低になったときから塩分が 10 psu 以上に上昇するまでの時間(図 2 の"t")の頻度分布。

**Fig. 11.** Frequency distribution of time-lag "t" in Fig.2. A "t" is the period from the time when the water level difference reaches the minimum up to the time when the salinity rises up to 10 psu or more.

やすいといえる。

水位差の最大時刻と高塩分水塊の遡上開始時刻との差(図 2: "T")の頻度分布を図 11 に示した。620 例のうち 390 例を測定できたが、時間差のモードは 3 時間、平均値は 3.31 時間であった。

### ③風との関係

高塩分水の遡上と風との関係についてはひとつには長期間の観測資料が得られなかったため推測の域を出ていない。この点を今回詳しく検討した。なお、レベルⅣ以上については 30 時間以上継続するケースが多く、既に指摘したように停滞していた高塩分水塊が再び遡上したケースを多く含むと考えられ、別途検討したい。

まず、高塩分水の遡上が起こった時刻から 6 時間前までの中海中心部における海上風の東西成分の平均値(東方向をプラス成分とする)と高塩分水規模との関係を図 12 に示した。

該当する時間全体の組成(図 12: 下)は 0 から 5 m/s クラス(西風成分)の頻度が約 55% ともっとも高く、ついで 0 から -5 m/s クラス(東風成分)の頻度が 26% で前者のほぼ半数となっている。この全体の

頻度組成は高塩分水遡上時から 6 時間前までの風を統計したものであるが、3 年間の全季節を通じて得られたものであるので年間を通じた中海の海上風を代表していると判断してよいであろう。この全体の頻度とレベルⅠとレベルⅡともそれぞれの頻度には多少の差はみられるが顕著な分布パターンの差異はみられない。このことはこのレベルの高塩分水の遡上と風との間には密接な関係が乏しいことを示している。

ところが、レベルⅢの規模ではこれ以下の規模の風に対する出現頻度パターンとは異なっている。すなわち、5~10 m/s クラスの風(西風)に対する出現頻度は 24% で、その出現規模以下のクラスの 10% 前後に比較して 2 倍以上も大きくなっており、逆に東風の頻度は減少傾向にあり、出現頻度には統計的にも有意な差がある( $p < 0.05$ )。このことは、レベルⅢの高塩分水出現の規模が発生するときには、6 時間前までに 5~10 m/s のやや強い西風が吹いている場合が東風の吹いている場合に比べて多い、と言える。

つぎにどの程度の時間まで風が高塩分水遡上規模に影響を与えているかを検討した。レベルⅢについて遡上時刻から 6 時間前までの平均値のほかに、6-12 時間前、12-18 時間前、18-24 時間前のそれぞれの平均値に対する出現頻度を図 13 に示した。これによるとやや強い西風時に高塩分水遡上が見られる割合が高いのは 12-18 時間前までの風であることがわかる。すなわち 18 時間前までの風の影響が高塩分水の遡上に寄与していると言える。

## 考 察

大橋川における海水の流入・流出状況を検討するため調査船による反復観測を実施した結果、高塩分水塊の進入・後退は水位と密接に連動していることが分かった。その侵入速度は、徳岡ほか(2001 a)の結果の範囲内にあり同程度であった。ただ、今回の調査では観測事例が多く得られ、より信頼性が高いと言える。

松江大橋の橋脚に設置した水質監視システムから得られた塩分の連続データをもとに高塩分水塊出現単位を定義して、高塩分水塊出現の季節変動に及ぼす影響を検討した結果(表 1)からも水位差と高塩分水塊の遡上とは明瞭な相関関係がみられた。すなわち中海の水位が宍道湖のそれより高い場合には中海の水塊の遡上にとまって高塩分水が侵入してくる

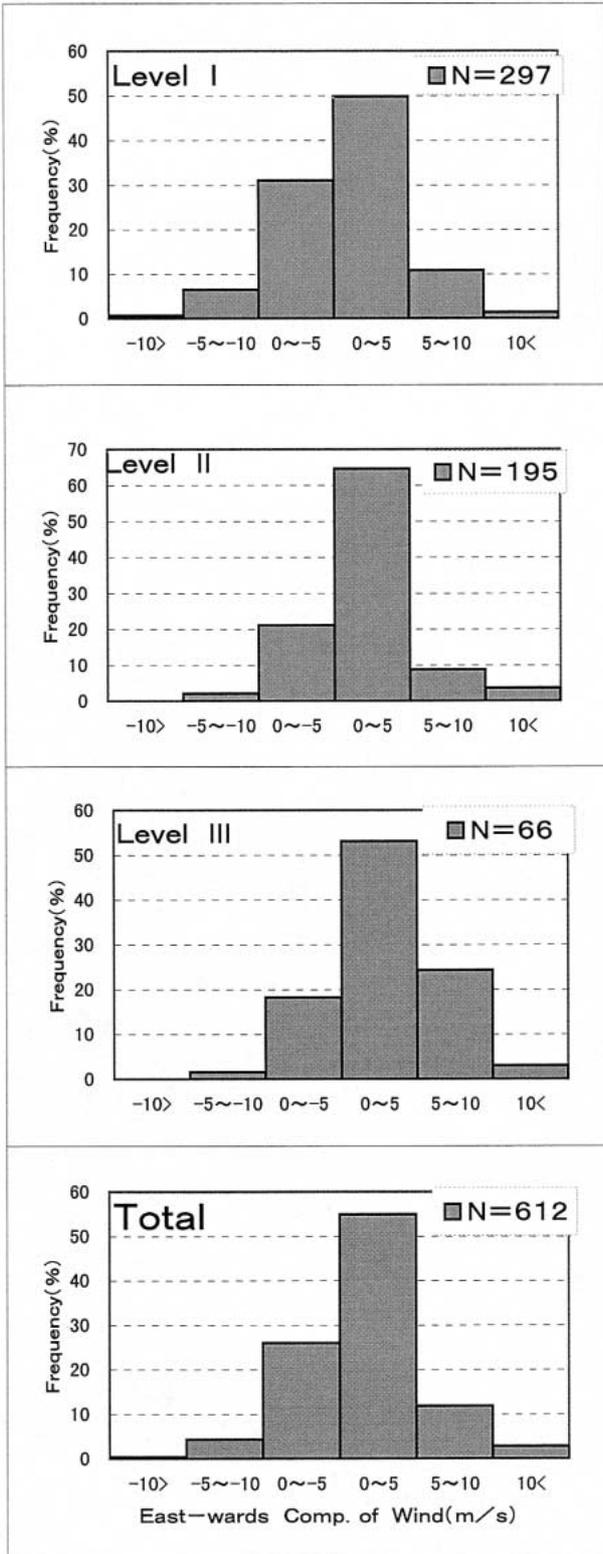


図12. 規模別のHSIの風(東西成分)に対する出現頻度分布. レベルⅢではそれ以下のレベルに比較してやや強い東向きの風(西風:5-10 m/s)のときの頻度が高い.

**Fig. 12.** Frequency distribution of the ratio of occurrence of HSI with east-ward comp. of wind for each level. In level Ⅲ, a frequency of slightly strong easterly wind is high as compared with that of the level I or II.

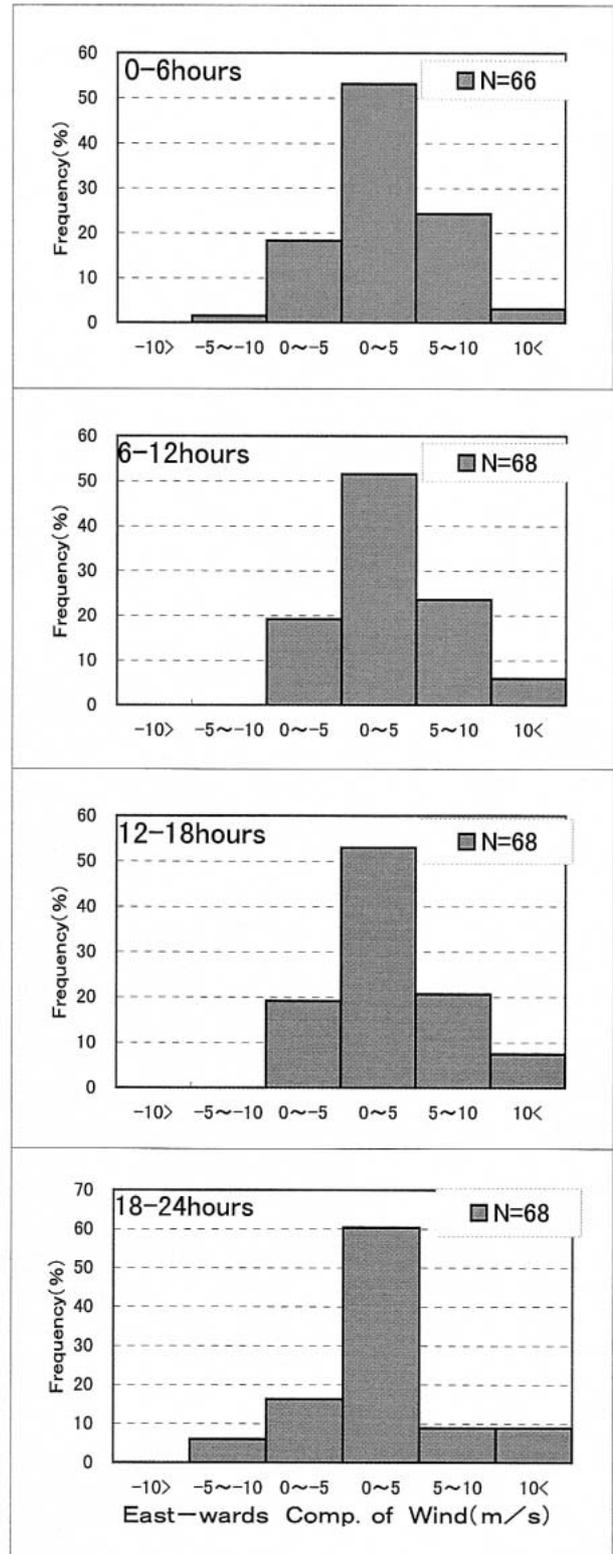


図13. レベルⅢの出現した6時間前ごとの風(東西成分)に対する出現頻度分布. 18-24時間前の分布はそれ以前とは明らかに異なっている.

**Fig. 13.** Frequency distribution of the ratio of occurrence of level Ⅲ HSI with east-ward comp. of the wind during a 24-hour period prior to the occurrence of the level Ⅲ HSI. Apparently, the distribution during 18-24 hour period is different from that of the other three time periods.

ことを示している。

短い時間スケールでみた場合においても、高塩分水塊の遡上と水位差との関係では水位差が大きくなると高塩分水塊の出現規模も大きくなるという傾向は認められる(図10)。ただ、どのクラスの出現規模も水位差が0.1~0.15 mのクラスのとときにモードがあり、いずれのレベルもほぼ同じ40%の出現割合を占めている。水位差によって明瞭な出現分布差の差異が生じない理由のひとつとして中海における塩分躍層の形成状況は気象・海況要因によって大きく変動する点にあると推測する。つまり、実際に個々の遡上高塩分水塊が水位差との関係でどのような発達程度の中海の塩分躍層時に遡上するのかは偶然性に依存するであろう。例えばある水位差の条件のもとで中海から大橋川への遡上が発生するとして、中海に高塩分水塊がまったく分布していなかったと考えても、一定量の水塊は遡上していったであろう。個々の高塩分水塊の遡上(高塩分出現単位)と水位差との関係を対応させた場合、明瞭な関係がみいだされるところは限らないという点に注意する必要がある。

発生要因に関するもう一つの結果は、規模の大きな高塩分水塊の出現がみられるほぼ半日前までにやや強い西風が吹いている場合が有意に多いことであって、この現象が風による塩分躍層の内部振動と関連があることが推測されることである。中海には風に伴う塩分躍層の振動が存在することはよく知られているが(例えば Fujii et al., 1996; 黒川ほか, 2000; Godo et al., 2001; 徳岡ほか, 2001 b), 大橋川への高塩分水塊の進入に関して Fujii (1998) は中海下層部の高塩分水が西岸にはい上がってきているときにこの現象が生じる可能性を指摘している。強い西風の連吹は中海塩分躍層の西側を上昇させるので、高塩分水の遡上のなかには西風の連吹の寄与によるもの確かに存在すると思われる。ただ規模の小さい場合(レベル I, II)では明瞭な関係はみいだせなかった。これは風による高塩分水塊の進入が起きないことを意味しない。レベル I, II の中にもやや強い西風の場合に進入がかなりの回数で生じているが、この中には風に伴うものも当然含まれているであろう。

ところで、西風の吹き出しから塩分躍層の上昇にまで要する時間は約3時間であり(Fujii, 1997)、一方大橋川河口部(St.9)から宍道湖入り口(St.1.2)にまで到達する高塩分水塊の時間は今回の調査で得られた遡上速度  $V=0.44$  m/s から推定して約5時間である。風の吹き出し開始から宍道湖入り口に高塩分水

塊が到達する時間を単純にこれらの合計とみなすと約8時間となる。これはほぼ半日前までに西風が吹いている場合が多いこと(図13)とを比較するとその範囲内に含まれる。

このことから西風の吹き出しによる塩分躍層の上昇、沿岸域への這い上がり、大橋川への遡上という一連の過程の存在が想定される。ただし、実際の高塩分水塊の出現機構はこのように単純ではなく、さまざまなケースが存在するであろう。その原因として、(1)水深が浅く地形の影響を受けやすい、(2)密度成層状態が一定ではなく気象・海象の変動の影響を受けやすい(日比野ほか, 1997; 黒川ほか, 2000)、(3)密度成層が内部振動として岸沿いに伝播する(Fujii, 1997)、などの中海の地理的特性が挙げられ、これらが現象を複雑にしていると考えられる。

これまで水位差と風の作用とを別々に考えてきたが、両者が合わさった場合を検討してみる。出現規模別に風と水位差とを比較して両者の組み合わせを整理すると表3のようになる。レベル III 出現時ではそれ以下に比較してより強い西風が吹いて水位差が大きい組み合わせのときの出現頻度が高い傾向にある。出現分布の重心位置を求めるとレベル III 出現時の風と水位差はそれぞれ 4.1 m/s, -0.18 m であるが、レベル II では 2.3 m/s, -0.15 m であり、レベル I

表3. 高塩分水の出現規模別に整理した水位差と風との組み合わせ。

Table 3. Combination of the water level difference with that of the east-ward comp. of wind. The numerals indicate the frequency of occurrence.

| Water Level Difference (m) | Level I |      |     |      |        |         |
|----------------------------|---------|------|-----|------|--------|---------|
|                            | 10~     | 10~5 | 5~0 | 0~-5 | -10~-5 | -15~-10 |
| 0~-0.1                     | 0       | 2    | 20  | 10   | 3      | 1       |
| ~-0.15                     | 0       | 8    | 42  | 23   | 8      | 0       |
| ~-0.2                      | 1       | 7    | 32  | 19   | 2      | 0       |
| ~-0.25                     | 1       | 2    | 7   | 2    | 0      | 0       |
| ~-0.3                      | 0       | 0    | 1   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.4                      | 0       | 0    | 0   | 0    | 0      | 0       |

| Water Level Difference (m) | Level II |      |     |      |        |         |
|----------------------------|----------|------|-----|------|--------|---------|
|                            | 10~      | 10~5 | 5~0 | 0~-5 | -10~-5 | -15~-10 |
| 0~-0.1                     | 0        | 0    | 4   | 2    | 0      | 0       |
| ~-0.15                     | 0        | 4    | 30  | 18   | 3      | 0       |
| ~-0.2                      | 1        | 4    | 38  | 9    | 0      | 0       |
| ~-0.25                     | 2        | 2    | 6   | 1    | 0      | 0       |
| ~-0.3                      | 0        | 1    | 1   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.4                      | 0        | 0    | 0   | 0    | 0      | 0       |

| Water Level Difference (m) | Level III |      |     |      |        |         |
|----------------------------|-----------|------|-----|------|--------|---------|
|                            | 10~       | 10~5 | 5~0 | 0~-5 | -10~-5 | -15~-10 |
| 0~-0.1                     | 0         | 0    | 0   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.15                     | 0         | 2    | 9   | 4    | 0      | 0       |
| ~-0.2                      | 0         | 4    | 7   | 3    | 0      | 0       |
| ~-0.25                     | 1         | 3    | 3   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.3                      | 1         | 3    | 0   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.4                      | 0         | 1    | 0   | 0    | 0      | 0       |

| Water Level Difference (m) | Level IV |      |     |      |        |         |
|----------------------------|----------|------|-----|------|--------|---------|
|                            | 10~      | 10~5 | 5~0 | 0~-5 | -10~-5 | -15~-10 |
| 0~-0.1                     | 0        | 1    | 0   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.15                     | 0        | 0    | 7   | 7    | 1      | 0       |
| ~-0.2                      | 0        | 1    | 9   | 1    | 0      | 0       |
| ~-0.25                     | 1        | 0    | 1   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.3                      | 0        | 0    | 0   | 0    | 0      | 0       |
| ~-0.4                      | 0        | 0    | 0   | 0    | 0      | 0       |

では  $1.6 \text{ m/s}$ 、 $-0.14 \text{ m}$  となり、レベルが下がるにつれて風は弱く、水位差は小さくなった。すなわち出現規模が大きくなるほど西風が強かつ水位差が大きいつきに出現する傾向があるといえそうである。ただ両者の寄与の程度は明らかではなく、両要因が遡上に対して独立な要因かどうかとも問題となろう。一般に日本海に低気圧が発達して東進した場合、東風が時計回りに変化して強い西風になり、同時に気圧低下に伴う海面の上昇が生じるというパターンが想定できる。このように西風と水位差とはある程度連動した気象現象であると考えられ、こうした過程が表3の結果に反映された可能性がある。

中海から大橋川を通じて宍道湖の入り口付近にまで進入する高塩分水塊の出現状況をとりとまとめたが、今回の報告は現象の大まかな特徴の把握にとどまり、詳細な出現機構の解明はさらに今後の検討が必要である。

## おわりに

現地観測と3年間の長期間の資料を簡単な統計処理をした今回の調査から得られた結果を要約すると以下のようなになる。

1. 宍道湖入り口付近に出現する高塩分水塊の季節変動は年により大きく異なり、宍道湖と中海との水位差及び斐伊川の流量と相関していた。
2. 短い時間スケールの変動においても出現指数と水位差との間に対応関係が認められた。また水位差の最大値出現時刻から平均して約3時間後に宍道湖入り口付近に高塩分水塊の出現がみられた。
3. 高塩分水塊の進入速度として  $V=0.44 \text{ m/s}$  ( $0.31\sim 0.56 \text{ m/s}$ )を得た。( )内は95%信頼区間である。
4. 約半日前までにやや強い西風が連吹する場合は東寄りの風の場合よりも規模の大きい高塩分水塊遡上が出現しやすい。これは風による塩分躍層上昇が関与していることを示している。
5. 水位差と風とを組み合わせた場合、西風で同時に水位差の大きいときに規模の大きい高塩分水塊の遡上が発生しやすい傾向が認められた。

## 謝辞

島根県内水面水産試験場主任施設管理技師森山勝氏、同職員大北晋也氏、常磐保氏にはこの調査を遂行するに当たり、甚大なご協力をいただいた。また

国土交通省出雲工事事務所には資料の提供をいただいた。ここに記して感謝します。

## 参考文献

- 伊達善夫・橋谷 博・清家 泰・近藤邦雄・奥村 稔・藤永 薫 (1989) 12年間の定期調査からみた中海・宍道湖の水質-季節変化, 経年変化, 平均値-。山陰地域研究, 5: 89-102.
- Fujii, T., Ueda, T., Okuda, S., and Yokoyama, K. (1996) Observation of Internal Oscillation Brackish Lakes with a Neutral Buoy. *Jpn.J.Limnol.*, 57: 4, 293-304.
- Fujii, T. (1997) Relationship of Internal Waves with Tide and Wind Drift Effects and Propagation of Internal Kelvin Wave in Brackish Lake Nakaumi. *Jpn.J. Limnol.*, 58: 241-260.
- Fujii, T. (1998) Relationship between Internal Oscillation and Movement of Anoxic Water in a Connected Brackish Water Region-Lake Nakaumi and the Ohashi River. *Jpn.J.Limnol.*, 59: 1-12.
- 福岡捷二・黒川岳司・日々野忠史・鈴木 篤・中村 剛・上原 浩 (1999) 中海における気象変化に伴う流れと貧酸素水塊の挙動。土木学会論文集, 636: 61-79.
- Godo, T., Kato, K., Kamiya, H., and Ishitobi, Y. (2001) Observation of wind-induced two-layer dynamics in Lake Nakaumi, a coastal lagoon in Japan. *Limnology*, 2: 137-143.
- 橋谷 博・奥村 稔・藤永 薫・近藤邦男・清家 泰 (1991) 宍道湖への高塩分水の流入。山陰地域研究, 7: 83-92.
- 日比野忠史・福岡捷二・池内幸司 (1997) 季節および日々の気圧配置の変化に伴う閉鎖性汽水湖内部での流れ場の特性。土木学会論文集, 579: 93-103.
- Ishitobi, Y., Kamiya, H., Yokoyama, K., Kumagai, M., and Okuda, S. (1999) Physical Conditions of Saline Water Intrusion into a Coastal Lagoon, Lake Shinji, Japan. *Jpn.J.Limnol.*, 60: 439-452.
- 黒川岳司・福岡捷二・日々野忠史・上原 浩・鈴木 篤 (2000) 中海における界面振動とそれに伴う流動。水工学論文集, 44: 999-1004.
- 島根県内水面水産試験場 (1999) 事業報告, No.1, pp.29-36 (宍道湖流入・流出調査)。
- 徳岡隆夫・三瓶良和・上野博芳・西村清和・須崎 聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教 (2001 a) 大橋川における高塩分水塊の動態観測 (1999年秋)。

LAGUNA (汽水域研究), 8: 79-90.

徳岡隆夫・三瓶良和・板坂尚教・亀井健史 (2001 b)  
中海における塩分躍層の動態についての新知見  
—1996 年度の湖底設置型音波探査装置による観  
測データから—。LAGUNA (汽水域研究), 8: 57-  
66.

津田良平 (1995) 宍道湖内における環境諸要素の分布  
とその変動。宍道湖湖底貧酸素化調査業務成果報  
告書, pp.9-13.

山室真澄 (2001) 沿岸域の環境保全と漁業。科学, 71:  
921-928.