

塩濃度の変化から推定した本庄水域の表層水の交換率

小池文人¹・相崎守弘²・清家 泰³・秋葉道宏²・奥村 稔³・藤永 薫³

Surface water exchange rate of the Honjo area in Lake Nakaumi estimated from salinity change

Fumito Koike¹, Morihiko Aizaki², Yasushi Seike³, Michihiro Akiba², Minoru Okumura³
and
Kaoru Fujinaga³

Abstract: Water turnover in Honjo area of Lake Nakaumi was estimated from salinity change rate. Reduced major axis method and principal component analysis were used instead of least squares method, to avoid artifact in parameter estimation. 2.26% of surface water in Honjo area were exchanged every day with the surface water of central area of Lake Nakaumi before new channel construction. 0.0403 ‰ day⁻¹ of background salinity increase was also detected. This may be caused by mixture with saline bottom water. After new channel construction between north area of Lake Nakaumi, water inflow through the new channel was although not detected. From the analysis assuming the absence of inflow through the new channel, daily inflow from central part of Lake Nakaumi was 3.42% of surface water in Honjyo area. Background salinity increase was 0.0461 ‰ day⁻¹. Long term experiment is necessary to avoid the effect of seasonal change and episodic weathers. Comparison between the result of other method may be also helpful.

Key words: brackish water lake, reduced major axis, principal component analysis, rate of mixture with bottom water.

はじめに

湖沼や湾などの閉鎖的な水域での水の交換速度の推定は、水域の生態系のなりたちを考える上で重要であり、生態系を制御することによる水質浄化方法の策定や、漁業における適正な養殖方法や規模の決

定のためなどにも不可欠である(中村, 1991)。

陸水では水の流れが一方向であるため、湖沼における水の交換率は湖沼の水の容積と流出河川の水量との比で表現する。また広い湾口を持った海の湾では海流が重要な役割をはたす。いっぽう汽水湖では潮汐などの水位変動による水の出入りと、底層での

1 横浜国立大学環境科学研究センター, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

Institute of Environmental Science and Technology, Yokohama National University, 79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, JAPAN

2 島根大学生物資源科学部, 松江市西川津町 1060

Faculty of Life and Environmental Sciences, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

3 島根大学総合理工学部, 松江市西川津町 1060

Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

海水の流入と表層での淡水の流出による密度流がともに水の交換に大きな役割を果たす。また汽水湖では水の交換率が塩分躍層をはさんで表層と底層とでは異なっており、要因が複雑であることもあって値の推定はあまりなされていない。

本庄水域は日本海のラグーンである中海の内部を人工的にいくつかの堤防で区切った閉鎖水域である(徳岡ほか, 1991)。これらの堤防により中海は、境水道に直接接続する中海北部、中海北部からさらに中浦水門をこえて上流側にある中海本体、中海北部と中海本体のあいだにあり、それぞれとの間を堤防で区切られた本庄水域、の3つの水域に分割されている。本庄水域は幅約180m、長さ約2.2 Km、水深約4mの西部承水路を通じて中海本体と接続しているが、1998年4月28日より、中海北部と本庄水域を隔てる北部承水路堤にも直径2.5m、長さ26mの2本の通水管が水面を含む深さ(低部の水深がEL-1.9 m)で埋設され、西部承水路と含めて2ヶ所からの水の交換が可能となった。

いずれの水路も水深が浅いため、中海本体や中海北部との間では、通常は塩濃度の比較的うすい表層水のみが出入りしていると考えられる。このため、本庄水域においては密度流による交換を考えず、近似的に潮汐のみを考慮することができる。また本庄水域内部では塩分躍層の発達が悪く、水深の大きな部分の湖底をのぞいては、湖底近くまで表層とほぼ同じ塩濃度の水が分布している(相崎・秋葉, 1998; 清家ほか, 1999a, b)。

水域での水の交換率を推定するためには、水位や水流を実測や計算機シミュレーションなどによって把握し、水域から出入りする水量から交換率を求め

る方法と(中村, 1991)、調査中に消失・生成されない何らかの物質をトレーサーとして用いて、物質の濃度変化から水の交換率を推定する方法が考えられる。前者の方法では交換率のみでなく流速などの生物にとって重要な特性値を得ることができるが、詳細な流速の継続測定やシミュレーションのためのパラメータ測定などに多大な労力と資金が必要である。特に水域をつなぐ水路の流量だけでなく、水路の出入り口での小さなスケールの水の混合や、水域全体での広域な混合についての情報も必要である。

本庄水域が接続する中海では、上流の降雨の多寡などにより表層水の塩濃度が大きく変化する。そこで、この研究では塩濃度をトレーサーとして用いて本庄水域の表層水の交換率を推定した。

方 法

中海の塩濃度の観測値は、島根大学生物資源科学部の相崎・秋葉ほかによるもの(調査地点は相崎・秋葉, 1998)と、同大学総合理工学部の清家ほかによるデータ(島根大学環境化学研究室, 1999)を使用した(表1)。表層水の塩濃度としては、水深0mから1mまでの観測値の平均を用いた。通常この範囲内での水深による塩濃度の差はほとんどない。

中海本体では上流からの淡水の流入によって塩濃度は乱高下するが、本庄水域は中海本体の塩濃度の推移に追従するかたちで変化している(図1)。本庄水域と中海本体の水の交換量が多ければ、両水域間の塩濃度差はほとんどなくなり、本庄水域は中海本体の塩濃度変化に敏感に反応する。逆に交換量が少なければ本庄水域は中海本体にゆるやかに追従する。

表1. 計算に利用した塩濃度データ。

Table 1. Data used in the analysis.

調査水域 Area	調査地点数 sampling points	計算に利用した期間 Measurement period	測定水深 Depth	調査者による地点番号 Station number in data source	調査者 Data source
本庄水域 Honjo area	6	1997年6月 ~1998年4月 June 1997 - April 1998	0m, 0.5m, 1m	Station1 ~Station6	相崎, 秋葉 Aizaki and Akiba
本庄水域 Honjo area	4	1997年6月 ~1998年11月 June 1997 - Nov. 1998	0m, 1m	St. 24, St. 25, St. 28, St. 29	島根大学環境分析化学 研究室 Environmental Analytical Chemistry Lab., Shimane Univ.
中海本体 Central area of Nakaumi	1	1997年6月 ~1998年4月 June 1997 - April 1998	0m, 0.5m, 1m	Station8	相崎, 秋葉 Aizaki and Akiba
中海本体 Central area of Nakaumi	1	1997年6月 ~1998年11月 June 1997 - Nov. 1998	0m, 1m	St. 4	島根大学環境分析化学 研究室 Environmental Analytical Chemistry Lab., Shimane Univ.
中海北部 North area of Nakaumi	1	1997年6月 ~1998年11月 June 1997 - Nov. 1998	0m, 1m	St. 27	島根大学環境分析化学 研究室 Environmental Analytical Chemistry Lab., Shimane Univ.

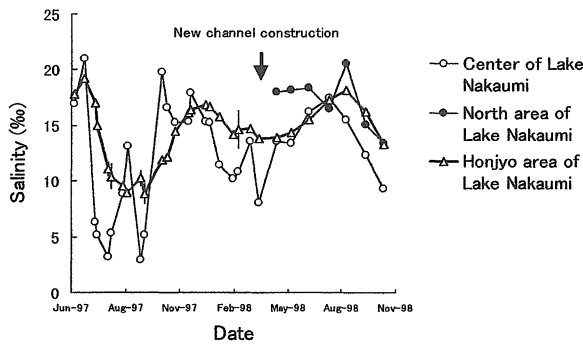


図1. 塩濃度の経時変化. 本庄水域については平均値と標準偏差(縦棒)を示す.

Fig. 1. Salinity change from June 1997 to November 1998. Vertical bars of Honjo area represent standard deviation.

この追跡のしかたを調べることによって水の交換率を逆算することが可能である(柳, 1994).

今回の計算では本庄水域を中海本体や中海北部とのみつながる閉鎖水域と考え、本庄水域に直接流れ込む河川は無視し、本庄水域への降水や水面からの蒸発も無視した。ただし塩濃度が急激に下降する期間には本庄水域内への多量の降水があった可能性があるため、この影響を取り除くために1日あたりの本庄水域内の塩濃度変化が $-0.1\% \text{日}^{-1}$ より急激に減少している期間は計算から除外した。また、モデルの作成時には本庄水域内の一部の湖底にある高塩濃度の低層水と表層水との混合は起きないと仮定した。本庄水域内では表層水は水平方向に良く混合すると仮定したが、本庄水域内部の塩濃度の標準偏差は、解析に使用したデータの平均で $0.288 \pm 0.404\%$ であり、本庄水域と中海本体との差 ($2.16 \pm 1.79\%$, 平均 \pm SD) や本庄水域と中海北部との差 ($1.70 \pm 1.53\%$, 平均 \pm SD) などの水域間の差に比べて小さかった。

モデル作成にあたって、中海北部との間の導水パイプ設置前については、西部承水路を通じた本庄水域と中海本体との交流のみを考慮した。ある日 t の塩濃度が本庄水域で H_t 、中海本体では N_t とする。翌日は本庄水域の水のうち α だけの割合が入れ替わるとすると翌日の本庄水域の塩濃度は、

$$H_{t+1} = (1 - \alpha) H_t + \alpha N_t$$

この間の1日の塩濃度変化は

$$\begin{aligned} H_{t+1} - H_t &= (1 - \alpha) H_t + \alpha N_t - H_t \\ &= \alpha (N_t - H_t) \end{aligned}$$

そこで、本庄水域と中海本体の塩濃度の差、 $N_t - H_t$,

と本庄水域の1日あたりの塩濃度の変化速度、 $N_t - H_t$ の散布図を描けば、両者の関係を示す近似直線の傾きが水の入れ替わり率、 α に相当する。

中海北部との間の導水パイプ設置後には、西部承水路を通じた中海本体との交流と、北部承水路堤のパイプを通じた中海北部との交流の両方を同時に考える必要がある。ある日 t の塩濃度を本庄水域で H_t 、中海本体では N_t 、中海北部は P_t とする。西部承水路からは、本庄水域の表層水の α だけの割合が1日で入れ替わり、通水パイプを通して本庄水域の表層水の β だけの割合が1日で入れ替わるとする。翌日 $t+1$ には本庄水域の水のうち $\alpha + \beta$ だけが入れ替わるので、

$$H_{t+1} = (1 - \alpha - \beta) H_t + \alpha N_t + \beta P_t$$

本庄水域での、この間の1日の塩濃度変化は

$$\begin{aligned} H_{t+1} - H_t &= (1 - \alpha - \beta) H_t + \alpha N_t + \beta P_t - H_t \\ &= \alpha (N_t - H_t) + \beta (P_t - H_t) \end{aligned}$$

そこで、本庄水域と中海本体の塩濃度の差、 $N_t - H_t$ 、と本庄水域と北部の貯木場の塩濃度差、 $P_t - H_t$ 、と本庄水域の1日あたりの塩濃度の変化速度、 $H_{t+1} - H_t$ 、によって張られる3次元空間での近似平面を求めれば、そのパラメータがそれぞれの水路を通っての入れ替わり率になる。

ここで、中海本体と中海北部の塩濃度差が独立に変動すれば α と β を独立に推定できる。しかし、両者の塩濃度が等しい場合にはパイプ設置以前と同じ解析を行うことになり、この場合は通水パイプ設置による交換率全体の変化はわかるが、どちらの水路がどれだけ貢献しているのかを分離して評価することはできない。また中海本体と中海北部の塩濃度が比例関係にある場合には、濃度差の大きな水が少量入ったのか、あるいは濃度差の小さな水が大量に入ったのかを区別できないこともおきる。

近似直線や近似平面を求める場合には、通常は最小二乗法による2変数の回帰分析や重回帰分析が使われる。しかしその原理から、最小二乗法による近似直線は縦軸と横軸を入れ替えて計算するとそれぞれ別の数式が得られ、相関係数の絶対値が小さな場合には近似直線の傾きが水平に近くなる、などの不都合が知られている(Sokal and Rohlf, 1995)。この研究では直線の傾きのパラメータそのものが重要であるため、最小二乗法は適さない。そこでこのような欠点知られていない簡便なreduced major axis法(Sokal and

Rohlf, 1995)と主成分分析によって近似直線と近似平面を求めた。なお2変数の主成分分析によって求めた近似直線は reduced major axis 法の結果と同じものになるが(圓川, 1988), 計算は reduced major axis 法のほうがはるかに簡便である。

通水パイプ設置前のデータについては reduced major axis 法を用いた。この方法は、横軸の変数を x , 縦軸の変数を y とすると、

$$\begin{aligned} x' &= (x - x \text{の平均}) / x \text{の標準偏差} \\ y' &= (y - y \text{の平均}) / y \text{の標準偏差} \end{aligned}$$

として x と y を正規化し、この x' と y' とでグラフを描いたときの近似直線は必ず原点をとおり、傾きが1か-1のどちらかであることを利用する。相関係数が正の場合は直線の傾きが1に、負の場合は-1となる。相関係数が有意でない場合には近似直線を引く必要がない。相関係数が正の場合の近似直線の式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} y' &= x' \\ (y - y \text{の平均}) / y \text{の標準偏差} &= (x - x \text{の平均}) / x \text{の標準偏差} \\ y &= (y \text{標準偏差} / x \text{標準偏差}) x + y \text{平均} \\ &\quad - x \text{平均} \times y \text{標準偏差} / x \text{標準偏差} \end{aligned}$$

また相関係数が負の場合の近似直線の式は以下である。

$$\begin{aligned} y' &= -x' \\ (y - y \text{の平均}) / y \text{の標準偏差} &= - (x - x \text{の平均}) / x \text{の標準偏差} \\ y &= - (y \text{標準偏差} / x \text{標準偏差}) x + y \text{平均} \\ &\quad + x \text{平均} \times y \text{標準偏差} / x \text{標準偏差} \end{aligned}$$

通水パイプ設置後は3変数に増えるため、主成分分析を用いて近似平面を計算した。主成分分析は座標軸の移動や回転を行う手法である。データに x , y , z の3変数があったとき、通常使われる相関行列を用いた主成分分析ではまず、

$$\begin{aligned} x' &= (x - x \text{の平均}) / x \text{の標準偏差} \\ y' &= (y - y \text{の平均}) / y \text{の標準偏差} \\ z' &= (z - z \text{の平均}) / z \text{の標準偏差} \end{aligned}$$

として正規化した後に、 x' , y' , z' の3つの座

標軸によって張られた空間を考える。データ点は原点のまわりに散らばっていて、この散布図の中で最もデータのばらつきが大きな方向に第1主成分軸を、それと直行する方向の中で最もデータのばらつきが大きな方向に第2主成分軸を、さらにこれら二つの軸と同時に直行する方向に第3主成分軸を決定する。主成分軸による新しい座標系の原点も正規化後の x' , y' , z' によって張られた空間の原点と同じである。各主成分と x' , y' , z' との関係は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{第1主成分} &= a_{11} x' + a_{12} y' + a_{13} z' \\ \text{第2主成分} &= a_{21} x' + a_{22} y' + a_{23} z' \\ \text{第3主成分} &= a_{31} x' + a_{32} y' + a_{33} z' \end{aligned}$$

ただし、 a_{ij} は主成分分析によって求められた因子負荷量行列の要素である。

ここで、求めるべき近似平面は第1主成分軸と第2主成分軸によって張られた平面であり、今回のような3変数の主成分分析では、この平面の式は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \text{第3主成分} &= a_{31} x' + a_{32} y' + a_{33} z' \\ &= a_{31} (x - x \text{平均値}) / x \text{標準偏差} \\ &\quad + a_{32} (y - y \text{平均値}) / y \text{標準偏差} \\ &\quad + a_{33} (z - z \text{平均値}) / z \text{標準偏差} \\ &= 0 \end{aligned}$$

この研究では、求めたパラメータの信頼性を調べるためブート・ストラップ法を用いた (Efron and Tibshirani, 1993)。この方法ではもとのデータの中から、そのデータのサンプル数と同じ数のデータを、重複することも許してランダムに再サンプルし、パラメータを計算することを多数回繰り返して、パラメータ値の頻度分布を求める。計算に用いるデータの頻度分布が、このデータの母集団での頻度分布を反映していれば、データ数が少ない影響をも織り込みずみの、パラメータの頻度分布を得ることができる。

この研究では、パイプ設置前のデータについては reduced major axis 法とそのブート・ストラップ計算を自作のプログラムで行い、パイプ設置後のデータについては自作プログラムによってブート・ストラップ計算のための再サンプリング・データを作成後、SPSS 8.0E (SPSS Japan Inc., 東京)を用いて主成分分析を行った。

なお、調査を行ったグループによって使用した調査器具や地点が異なるため、期間ごとの塩濃度変化の差分を計算する場合には、各グループ内のデータ間でのみ計算を行った。水域間の塩濃度差には期間の平均値を用いた。

結果と考察

パイプによる通水前において、本庄水域の塩濃度変化速度と、中海本体と本庄水域の間の塩濃度差には正の相関が見られた(図2, $r=0.72$)。このデータにおける reduced major axis 法による近似直線のパラメータを表2に示す。近似直線の傾きの値から、1日あたり本庄水域の表層水の2.26%が中海本体の表層水と入れ替わっていることがわかる。95%信頼区間は1.71%から3.07%までの間であった。この交換率では1ヶ月で50%の水が入れ替わり、202日で99%の水が交換されることになる(図3)。本庄水域の面積が16.23 km²、平均水深を5.1mとすると容積は8248×10⁴ m³となり、そのほとんどすべてを表層水と仮定すると1日の交換水量は186万t日⁻¹である。

ただし今回のパラメータ推定では、はじめのモデルではゼロになるべき切片も有意に正の値を取っていた。これは中海本体の表層水と本庄水域の表層水に塩濃度差がない状態であっても、本庄水域の表層水の塩濃度が0.0403 %日⁻¹ずつ上昇していることを意味する。

本庄水域の集水域からの淡水の流入や湖面への降雨はこのパラメータを引き下げる要因であり、水面からの蒸発と本庄水域内での高塩濃度の底層水との混合は、値を大きくする要因である。今回の解析では急激な塩濃度低下時のデータを削除しているが、通常は蒸発量は降水量と淡水流入量の合計より少ないと思われる。この定常状態での塩濃度上昇には、高塩濃度の底層水との混合が大きく寄与している可能性がある。

パイプによる通水後の、本庄水域と中海本体および中海北部との間の塩濃度差には正の相関が見られた(図. 4, それぞれ $r=0.97$ と $r=0.61$)。このデータにおける主成分分析の結果を表3に示す。各パラメータのうち中海北部と本庄水域の交換については係数の値がゼロに近かった。この結果からは、中海北部の水塊は本庄水域にほとんど流入していない可能性がある。中海本体との交換率は3.36 %日⁻¹で、また定常的な塩濃度上昇を示す定数項は0.0542 %日⁻¹であった。これらは片側検定では有意であったが、両側検定

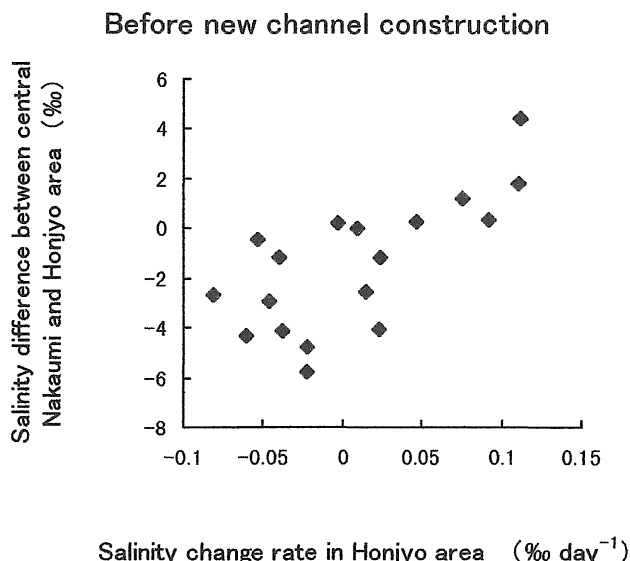


図2. 通水パイプ設置以前における、中海本庄水域の塩濃度変化速度と、中海本体との間の塩濃度差との関係。

Fig. 2. Salinity change rate in Honjo area and salinity difference between central Nakaumi before new channel construction.

表2. 通水前の本庄水域の塩濃度変化に与える中海本体との塩濃度差のモデルに対する、reduced major axis法による近似直線のパラメータ。傾きの値が、通水実験前の本庄水域の1日あたりの交換率にあたる。95%信頼区間はブート・ストラップ法による1000回の繰り返し計算によって求めた。いずれのパラメータ値も正である確率は99.9%以上であった。
Table 2. Estimated parameters in the model of salinity change in Honjo area, and salinity difference between central Nakaumi before new channel construction. Parameters were determined reduced major axis method, and its confidence limit was determined by bootstrap of 1000 iterations. Slope is the daily exchange rate of surface water in Honjo area.

代表値 Representative value	傾き (α) Slope (α)	切片 (残差) Intercept (residual)
中央値 Median	0.0226	0.0403
95%下限 95% lower limit	0.0171	0.0202
95%上限 95% upper limit	0.0307	0.0598

の95%水準では有意ではなかった。

有意水準が低い主な原因は、利用できたデータが6期間と少なかったことによる。また、中海北部の塩濃度は中海本体よりおおむね高いが(図1)、両者のあだ

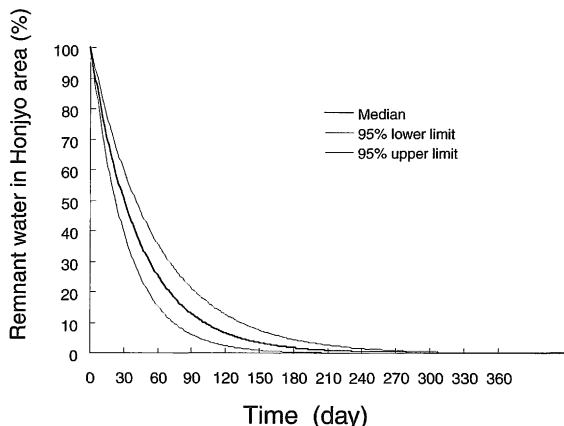


図3. 導水パイプ設置以前の推定値から計算された、本庄水域に残留する水の減少率をあらわす残余関数。
Fig. 3. Remnant function of Honjo area calculated from the estimated water exchange rate.

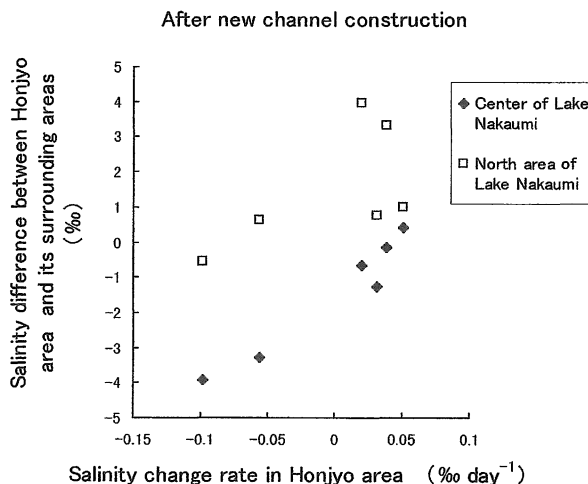


図4. 導水パイプ設置後の、中海本庄水域の塩濃度変化速度と、中海本体との間の塩濃度差との関係。
Fig. 4. Salinity change rate in Honjo area and salinity difference between surrounding central and north areas of Nakaumi after new channel construction.

の相関は高く ($r=0.65$)、この相関の高さが近似平面を使用したパラメータ推定を難しくしている。ただし、北部承水路堤のパイプによる水路の断面積は西部承水路の断面積に比べて非常に小さく、水の交換には有効に機能していない可能性も大きい。

水路が二つあるため、中海北部と本庄水域の間では流入量と流出量が一致しない場合もありうる。このようなときには、今回推定した交換率は外部からその水路を通して本庄水域に流入した量を示している。流出については、どちらからどれだけ流出してもかまわない。中海北部からの流入が十分少なかったとすれば、パイプ設置以前と同様に中海本体との間だけでの近似直線を解析すればよい。

そこで中海本体からのみ流入する仮定で計算を

表3. 北部承水路堤のパイプによる通水後の本庄水域の塩濃度変化に与える、中海本体や中海北部の塩濃度差のモデルに対する、主成分分析による近似平面のパラメータ。係数の値が、通水実験後のそれぞれの水域からの1日あたりの交換率にあたる。95%信頼区間はブート・ストラップ法による200回の繰り返し計算によって求めた。

Table 3. Estimated parameters in the model of salinity change in Honjo area, and salinity difference between both central and north areas of Nakaumi by after new channel construction. Parameters were determined by principal component analysis, and its confidence limit was determined by bootstrap of 200 iterations.

代表値 Representative value	中海本体の係数 Parameter for central Nakaumi (α)	中海北部の係数 Parameter for north Nakaumi (β)	切片 (残差) Intercept (residual)
中央値 Median	0.0336	-0.00325	0.0542
95%下限 95% lower limit	-0.00112	-0.0188	-0.0822
95%上限 95% upper limit	0.0548	0.0451	0.111
パラメータ>0の確率 Probability of parameter > 0	96.5%	35.2%	96.5%

行った(表4)。その結果、1日あたりで本庄水域の水量の3.42%が中海本体から流入することになり、表層水の流入によらない0.0461%日⁻¹の定常的な塩濃度上昇が検出された。

パイプによる通水前後の、中海本体から本庄水域への流入量の比較をブート・ストラップ法によって検定した結果、通水後の中海本体からの流入が通水前の流入より大きな値をとる確率は92.7%であった。同様に表層水の流入によらない定常的な塩濃度上昇について、通水後の値が通水前より高い確率は97.3%であった。5%の有意水準には達しないが、パイプ通水後に中海本体からの流入が増えている可能性がある。中央値で比較すると、流入量はパイプ設置以前にくらべて51%の増加にあたる。なお、定常的な塩濃度上昇速度はパイプ通水後に中央値で14%増加していた。

中海の水位は季節による差があり、夏には水位が高く冬に低い。今回の比較では、通水前のデータはほぼ1年間あるのに対して、通水後のデータは夏のデータのみであり、これが中海本体からの流入量の増加に影響している可能性もある。表層水の流入以外の

表4. 北部承水路堤のパイプによる通水後の本庄水域の塩濃度変化に与える、中海本体や中海北部の塩濃度差のモデル、中海本体からのみの表層水の流入を考慮した試算と、中海北部からのみの表層水の流入を考慮した試算を示す。Reduced major axis法により近似直線を計算し、1000回のブート・ストラップ計算により95%信頼区間を求めた。

Table 4. Estimated parameters in the model of salinity change in Honjo area, and salinity difference between each of central area and north area in Nakaumi after new canal construction. Parameters were determined by reduced major axis method, and its confidence limit was determined by bootstrap of 1000 iterations.

代表値 Representative value	中海本体からのみの 流入を仮定		中海北部からのみの 流入を仮定	
	傾き (α) Slope (α)	切片 (残差) Intercept (residual)	傾き (α) Slope (α)	切片 (残差) Intercept (residual)
中央値 Median	0.0342	0.0461	0.03318	-0.0557
95%下限 95% lower limit	0.0168	0.0386	0.00703	-0.0816
95%上限 95% upper limit	0.0417	0.0705	0.113	0.0198
パラメータ>0 の確率 Probability of parameter > 0	> 99.9%	> 99.9%	> 99.9%	7.2%

定常的な塩濃度上昇は、強風などによって底層水との攪拌が行われる場合に大きな値になると考えられる。パイプによる通水実験の影響を正確に見きわめるには、季節によるトレンドを除去し、強風などの気象条件の影響が問題なくなる程度の長期間における研究が必要である。降水や蒸発、集水域からの淡水の流入などの見積もりを正確に行えば、低層水との混合速度をより正確に見積もることができる可能性がある。また水域をつなぐ流量の測定など、他の方法による推定値との比較も望ましい。

ま と め

1. 中海の本庄水域への周辺の水域からの表層水の流入を、塩濃度の変化パターンから推定した。
2. パラメータ推定にあたっては、通常使われる最小二乗法では交換率が過小評価となるため、reduced major axis法と主成分分析を用いて推定を行い、信頼性をブート・ストラップ法で検討した。
3. 中海北部との間に設置されたパイプによる通水前

は、1日あたり本庄水域の表層水の2.26%が中海本体の水と入れ替わっていた。また、0.0403%日⁻¹の定常的な塩濃度上昇がみられ、これは塩濃度の高い底層水との混合によるものである可能性がある。

4. パイプによる通水実験開始以降において、パイプを通した中海北部からの水の流入は検出できなかった。パイプからの流入量は無視できると仮定したモデルでは、中海本体からの流入は1日あたり本庄工区の表層水量の3.42%であり、定常的な塩濃度上昇は0.0461%日⁻¹であった。

5. より正確な比較には、季節や気象条件の影響を除去できるだけの長期間の研究が必要で、流速の実測などの他の調査方法による結果との比較も望ましい。

謝辞：データ解析についてアドバイスを与えていただいた北陸先端科学技術大学院大学の上野博芳氏と原稿を読み貴重な情報をいただいた岡山理科大学の奥田節夫氏に感謝します。

引 用 文 献

相崎守弘・秋葉道宏(1998) 中海本庄工区の水質特性。LAGUNA (汽水域研究), 5: 175-182.

Efron B. and Tibshirani R. J. (1993) An introduction to the bootstrap. Chapman & Hall, New York.

圓川隆夫(1988) 多変量のデータ解析。朝倉書店。

中村充(1991) 水産土壌学。工業時事通信社。

鳥根大学環境分析化学研究室(1999) 宍道湖・中海水質月報(1994.1-1998.12)印刷中。

清家泰・奥村稔・藤永薫・千賀有希子(1999a) 中海本庄工区の生物と自然, 2. 本庄工区の水質特性。たたら書房, 鳥取。

清家泰・奥村稔・藤永薫・大谷修司・千賀有希子・岡宏樹(1999b) 中海本庄工区の水質特性。LAGUNA 6: 1-9.

Sokal, R. R. and Rohlf, F. J. (1995) Biometry, 3rd ED. W. H. Freeman and Company, New York.

高安克己(1998) 中海本庄水域周辺承水路の水塊動態。LAGUNA (汽水域研究), 5: 161-173.

徳岡隆夫・大西郁夫・高安克己・米元正一・安間恵・後藤慎二・園田巖・鹿島薫(1991) 中海北西部(本庄工区)の湖底地形と堆積層。山陰地域研究, 7: 23-38.

柳哲雄(1994) 沿岸海洋学—海の中でのものはどう動くか(改訂版), 恒星社厚生閣, 東京。