

## 十三湖における遡上塩水の鉛直構造

八戸工業大学 市沢 明裕・佐々木 幹夫、東北大学 田中仁・梅田信・西村亜紀

### 1. はじめに

十三湖は岩木川の河口に位置し、十三湖河口から岩木川からの淡水が日本海に注がれている。十三湖の河口を現地では水戸口と呼んでおり、水戸口への導流堤建設が始まったのが大正 15 年であり、完成は昭和 22 年である。この導流堤建設により、この湖には定期的に塩水が遡上するようになり、湖の汽水湖環境は以前の河口閉塞時に比べると安定するようになってきている。この湖に生息するシジミも自然産卵、自然繁殖するようになり、シジミは安定して獲れるようになってきている。しかし、漁獲量は年変動を繰り返しており、汽水環境のどの変化がシジミ漁に影響を与えているのかについては未だに未解明といえる。そこで本研究では、この湖における汽水環境特性を明らかにすることを最終的な研究目的とし、今年度は遡上塩水の現地観測を行い、遡上塩水の鉛直構造を検討してみる。



図1 塩分観測位置

### 2. 観測方法

観測は自記式の塩分計、流向流速計を用いて、7月から8月上旬にかけて行った。図1に観測地点を示す。観測地点は湖の中央部に設置し、流行流速計を下層に、塩分計をおよそ20cm間隔に4個使用し、観測を行ってみた。写真1に流向流速計の固定状況を示す。流向流速計は底面から57cmの位置に設置した。写真2は塩分計の設置状況を示す。設置は観測地点に船で行き船上よりロープに固定した塩分計を鉄パイプに縛り付けて固定した。塩分計の位置は湖の底より30cm(東北大塩分計)、70cm(八工大塩分計)、90cm(東北大塩分計)、120cm(東北大塩分計)の位置に設置した。写真3は計測器設置完了後の様子を示す。左に塩分計4個、右に流向流速計を設置した。



写真1 現地観測の状況

\* Perpendicular structure of salt water moved into Lake Jusan by Akihiro Ichizawa, Mikio Sasaki, Hitoshi Tanaka, Makoto Umeda and Aki Nishimura



写真2 計測器の設置状況

写真3 機械設置完了後の様子  
右側：流向流速計、左側：塩分計4個

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 塩水遡上状況

図3に塩分の観測結果を示す。観測は7月12日から8月5日に行った。縦軸は塩分濃度を示し、単位はpsuである。横軸は時間で単位は日である。塩水は14日の朝から上昇したのち、すぐに減少したが昼から夜にかけてまた上昇した。15日は朝に塩水が上昇しすぐに減少したが、昼から16日にかけて塩分濃度が高い時間が続いていた。16日になってからすぐに塩水が減少したがすぐに上昇し、17日にかけて塩分濃度が高い時間が続いた。

図4に水戸口の順流と逆流を示す。縦軸は流量を示し、単位は $m^3/s$ である。横軸は時間で単位は日である。流量がプラスのときは順流、マイナスのときは逆流を示す。14日には午前と午後2回逆流が生じている。午前および午後の逆流は図3の塩分濃度が高くなっている観測に対応している。15日も14日と同様午前と午後2回逆流が生じている。この逆流は図3の塩分濃度に示すように、湖央での塩分濃度上昇に対応している。水戸口の逆流は湖の中央まで塩水を遡上させており、塩水の遡上は水戸口の流れて概略判断できる。しかし、15日の午後の逆流は規模が小さいが図3の塩分濃度の変化は塩水の遡上が大規模であったことを示している。この高濃度現象は水戸口の流れに対応していない。湖内における塩水塊の独特の動きによるものと考えられる。

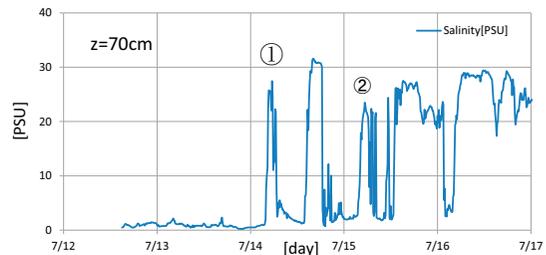


図3 塩分観測結果

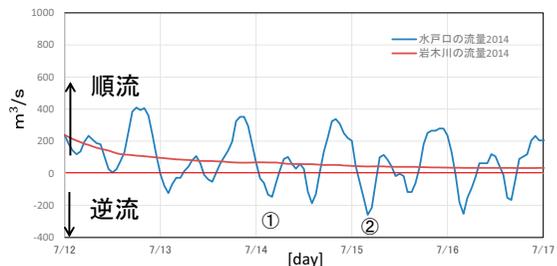


図4 水戸口の順流と逆流

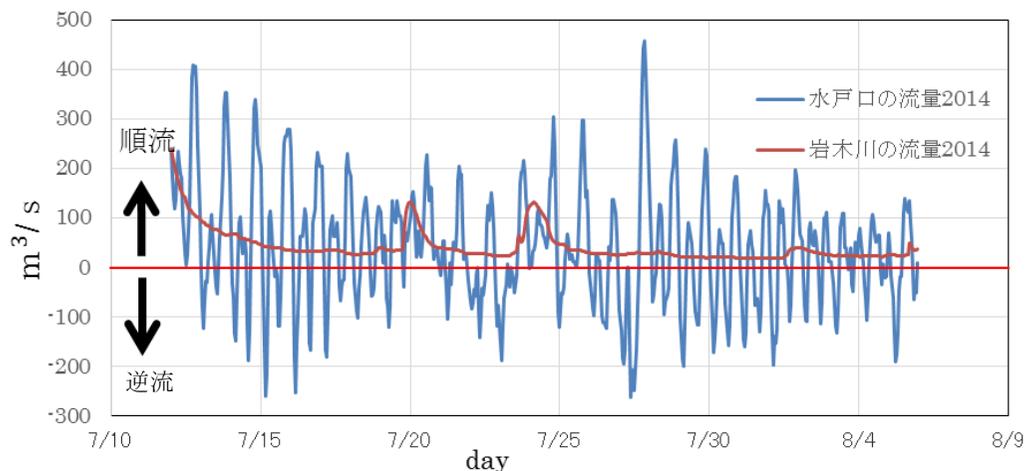


図2 水戸口の流量と岩木川の流量

図2に水戸口の流量と岩木川の流量を示す。縦軸は流量を示し、単位は $\text{m}^3/\text{s}$ である。横軸は時間で単位は日である。観測を始めた日から流量は上昇と減少を繰り返していることがわかる。7月19日の午後から20日にかけて岩木川の流量が上昇している。この時間と同じときの水戸口では逆流が無くなっていた。同じく7月23日の午後から岩木川の流量が上昇しているが、19日のときのように水戸口の逆流が無くなっていることがわかる。8月1日にも午後から少しだが流量が上昇しているが、このときは水戸口の流量に影響はしていないことがわかった。7月27日の12時ごろに大きく逆流し、19時ごろにかけて観測期間中もっとも水戸口の流量が増えていることがわかる。これは、図5の(1)や(2)の期間日16日ごろに観測値の塩分濃度が上昇しすぐに減少していくのと対応している。

### 3.2 塩分濃度の予測

塩水の動きは塩分濃度の変化で推定される。塩分濃度はSasaki, Tanaka & Umeda(2012)によれば以下のように与えられる。

逆流時には鉛直方向に分割した各層の塩分濃度 $c$ は $k$ 番目の層内において次式で与えられる。

$$c_k = (C_{\max k} - C_{\min k}) \{1 - \exp(-\alpha_{1k} \xi_k)\} + C_{\min k} \quad (1) \quad c_k = C_{\min k} \quad \text{at} \quad \xi_k = 0 \quad (2)$$

$$c_k = C_{\max k} \quad \text{at} \quad \xi_k = \infty \quad (3) \quad \xi_k = \beta_{1k} \int |u_k| dt / l_0 + \beta_{2k} x_k / l_0 + l_{01k} / l_0 \quad (4)$$

式(4)において、 $t$ 、および $x$ は時間、および流路に沿う陸から海へ向かって取られた座標、 $u_k$ は流速、 $l_0$ は場の代表的な長さであり、ここでは $l_0 = 3600 \text{ m}$ としており、 $\beta_1$ および $\beta_2$ は任意の定数であり、逆流時に $\beta_1 = 1$ 、 $\beta_2 = 3$ 、順流時に $\beta_1 = 1$ 、 $\beta_2 = -3$ 、 $L_{01}$ は逆流開始時の塩水フロントの位置に相当する距離である。

順流時には塩分濃度は次式により与えられる。

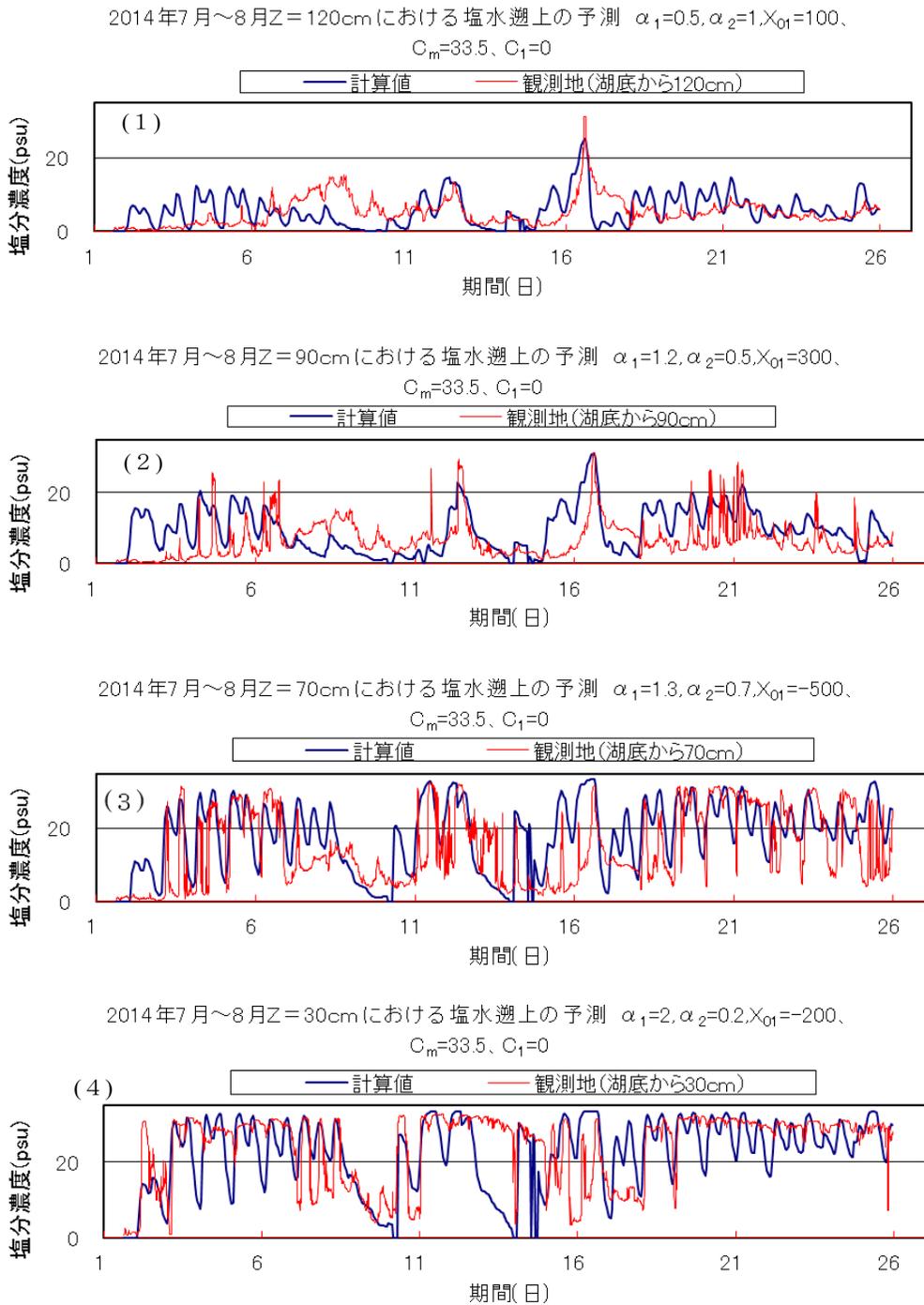


図5 塩分濃度理論値と観測値の比較 2014年7月12日～8月5日

$$c_k = (C_{pk} - C_{\min k}) \exp\{-\alpha_{2k}(\xi_k - \xi_{ok})\} + C_{\min k} \quad (5) \quad c_k = C_{pk} \quad \text{at} \quad \xi_k = \xi_{ok} = \xi_k \Big|_{t=0} \quad (6)$$

$$c_k = C_{\min k} \quad \text{as} \quad \xi_k = \infty \quad (7)$$

ここに、時間  $t$  は順流開始時に 0 となる。また、式 (5) において、 $C_{pk}$  は順流開始時の塩分濃度である。式 (1) および (5) より、逆流および順流時の塩分が計算される。

図 5 に式 (1) および式 (5) を用いて塩分の予測を行った湖底から 30cm、70cm、90cm、および 120cm における計算結果を示した。図 5 の(1)は湖底から高い位置にあるため塩分濃度は全体的に低いことがわかる。16日ごろの観測結果に計算値を合わせてみた。1日から11日までの計算値と観測値はあまりうまく予測することが出来なかったが、11日から18日は観測値に計算値を近づけることが出来た。しかしそのあとの18日から21日までは、あまり観測値に合わせられなかった。次に(2)は湖底から90cmの位置にあり、(1)よりはやはり全体的に塩分濃度は高くなっていることがわかる。(2)は(1)と同様に16日の塩分濃度が高くなっているところに計算値をあわせた。1日から11日までは計算値はあまり合わせられなかった。12日から26日までは全く同じではないが、だいたい合わせることが出来た。次に(3)は、湖底から70cmの位置にあり塩分濃度も高くなってきていることがわかる。(3)では10日から20日を見ながら計算値を合わせた。1日から3日までは計算値は合っていないがその後の3日から26日はうまく予測することが出来ている。最後に(4)は湖底から30cmの位置にあり、今回の調査でもっとも低い位置にあるため、4つのグラフの中で一番塩分濃度が高い時間がながいことがわかる。計算値は塩分変動の変化をよく表していると考えられる。

### 3. 3 塩淡水の混合

下層から上層まで塩分変化がみられるのは、7月27日の1日だけであり、この時の鉛直方向の塩水と淡水の混合を拡散係数で評価してみる。塩水遡上時の境界面を通しての混合は次式(8)で与えられるものとすることができる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (8) \quad D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = D_z \frac{\frac{\partial c_{t,z+1}}{\partial z} - \frac{\partial c_{t,z-1}}{\partial z}}{2\Delta z} \approx D_z \frac{c_{t,z+1} - 2c_{t,z} + c_{t,z-1}}{2\Delta z^2} \quad (9)$$

ここに、 $D_z$  は拡散係数である。いま、式 (8) 右辺は式(9)のように差分表示できるものとする。ここに、式 (9) は最初の微分が中央差分、2 回目の差分は前進差分および後退差分で示されている。時間に関しては中央差分をとると、式 (8) は次式で与えられる。

$$\frac{c_{t+1,z} - c_{t-1,z}}{2\Delta t} = D_z \frac{c_{t,z+1} - 2c_{t,z} + c_{t,z-1}}{2\Delta z^2} \quad (10)$$

よって、式 (10) を用いることにより、観測は鉛直方向に 4 点取られているので観測値より拡散係数  $D_z$  が求まる。ただし、 $Z = 70 \text{ cm}$  の観測値は  $z = 60 \text{ cm}$  の地点とほぼ同一の値であるとしている。

7月27日の塩水遡上時の拡散係数を示したのが図6および7であり、図6は水深が150cm程度なので中層の下部、図7が中層の上部を示している。図より、中層下部では拡散係数 $D_z$ が $5 \sim 20 \text{ cm}^2/\text{s}$ にあり、中層上部では $1 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ にある。これらの平均値は、次のようになっている。

中層下部	遡上時	$D_z = 3.24 \text{ cm}^2/\text{s}$	後退時	$D_z = 6.67 \text{ cm}^2/\text{s}$
中層上部	遡上時	$D_z = 2.31 \text{ cm}^2/\text{s}$	後退時	$D_z = 1.31 \text{ cm}^2/\text{s}$

中層上部で $1 \sim 3 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、中層下部で $3 \sim 7 \text{ cm}^2/\text{s}$ の塩淡水の鉛直混合が生じているようである。

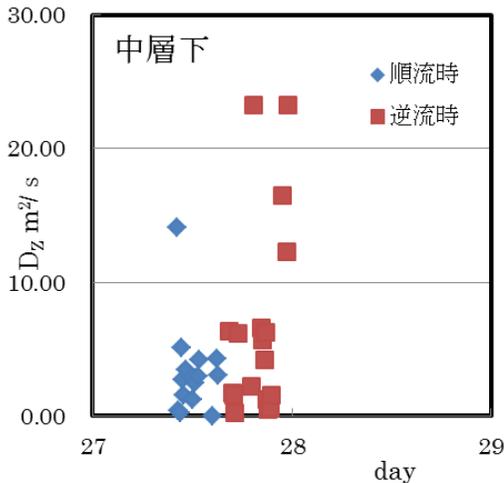


図6 8月27日における塩水遡上時の塩淡水の混合 底面から60cm地点

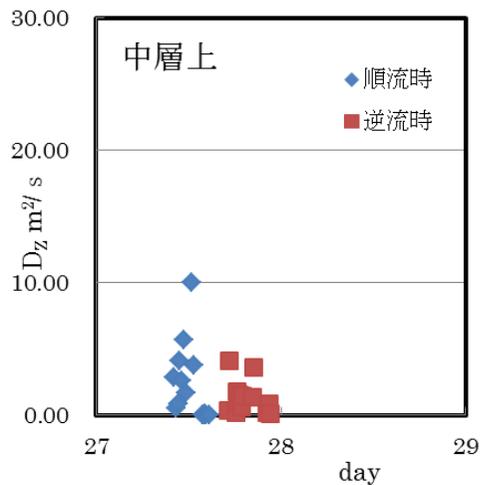


図7 8月27日における塩水遡上時の塩淡水の混合 底面から90cm地点

#### 4. 結論

湖の中央部に自記式の塩分計を設置し、塩分の現地観測を実施し、遡上塩水の鉛直構造を調べてみた。本研究により以下のことが明らかとなった。

- (1) 湖中央での塩分濃度の予測が式(1)および(5)を用いることにより可能になった。
- (2) 遡上時の塩淡水の混合は中層部で $10 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーで生じており、おおよそ、下部で $1 \sim 20 \text{ cm}^2/\text{s}$ で平均 $3 \sim 7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、上部で $1 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ で平均 $1 \sim 3 \text{ cm}^2/\text{s}$ で混合が生じていた。

#### 参考文献

1. 佐々木幹夫・梅田 信・田中 仁(2013.3): 岩木川河口における塩淡水交換特性、東北地域災害科学研究、第49巻、pp.139-144.
2. Mikio Sasaki, Hitoshi Tanaka and Makoto Umeda(2012): THEORY ON SALT-WATER MOVEMENT IN IWAKI RIVER MOUTH, ICHN, November 4-7, 2012 in Orland, Florida.