

汽水環境解析のための十三湖水戸口流量の推定方法に関する検討

Estimation Method of Discharge through the Mouth of Lake Jusan for Assessment of the Brackish Environment

Atas Pracoyo¹・梅田 信²・田中 仁³・佐々木幹夫⁴

Atas PRACOYO, Makoto UMEDA, Hitoshi TANAKA and Mikio SASAKI

Mixing ratio of saline water and freshwater is crucial in estuaries. The salinity flux into a brackish lake particularly has high influences on the environment and ecosystem in the lake. In this paper, we propose a method of estimation of discharge through the tidal inlet of Lake Jusan, considering not only the water balance but also kinematic conditions in the lake. Our method gives more accurate estimation on discharge fluctuation caused by tidal changes, and is also capable of simulating salinity flux into the lake properly. Both of them are very important on assessing water quality and ecological factors in estuaries. The results from this method are not affected by topographical change around the tidal inlet, which is one of the advantages of the proposed method.

1. 序論

汽水域は、海水と淡水が混ざり合う陸と海との境界域であるという点から、特殊な環境と言われることが多い(たとえば楠田・山本, 2008)。その中でも汽水湖は、閉鎖性水域としての性格を有することから、よりいっそうに特殊であると言えよう。特に湖内の塩分環境を形成する海水および河川水の流入は、潮汐や波浪などの海側の条件に加えて、出水など河川側の条件および湖の条件である湖水位とも関連する(鶴田ら, 2001; 丸谷ら, 2010)。また、湖沼(閉鎖性水域)としての特性から、汚濁負荷の蓄積による水質の悪化が懸念されることが多い(久保田ら, 2006)。

岩木川の最下流部に位置する十三湖は、ヤマトシジミの産地として知られている。十三湖は、非常に浅いという地形的な特徴などから、海水の交換頻度が非常に高いことが分かっている(梅田ら, 2008)。またヤマトシジミの生息に対して、塩分がストレスとなり成長に負の効果があると考えられること(原ら, 2008)や、過度の高塩分が斃死を招く可能性があること(梅田ら, 2010)が指摘されている。

したがって、汽水湖における海水流入量、または湖水交換量を正確に把握することが、水質や生物などの水環境を把握する上で必要である。本研究では、十三湖内の汽水特性を把握する上で重要な水戸口からの湖水交換量(特に海水流入量)について、湖水位や潮位などの経年的にかつ連続的に測定されており、比較的入手しやすい

データを活用して、より精度良く求めるための方法について検討した。

2. 現地の概要および観測方法

十三湖は、青森県の西部で岩木川の最下流にある汽水湖である。全集水面積は2,544km²で、岩木川がそのうちの8割弱を占める。そのほかに、十三湖の平均水深は約1mで、湖心の最深部でも2mほどの水深しかない非常に浅い湖である。湖の平面形状は、図-1に示すように、湖の北西部分にある「水戸口」により日本海に通じている。水戸口は、水路幅180mで両側には、1946年に竣工した突堤がある。北側突堤の延長は389m、南側は337mである。この突堤により、河口閉塞が防がれている。

本研究で行った現地観測は、この水戸口付近における流れの状況を把握するためのものである。つぎのような大きく分けて二通りの観測を実施した。

一つ目に、電磁流速計(アレック電子株式会社, 現JFEアドバンテック株式会社, COMPACT-EM)を地点Aの2水深に設置して、連続的な測定を行った。設置深度は、湖底上0.5mと1.5mである。なお当該地点の全水深は、潮汐により変動するが、概ね2mから3m程度である。また同一位置で水温・塩分計(アレック電子株式会社, COMPACT-CT)を設置し、塩分と水温の測定も同時に行っている。いずれも測定期間は2009年7月10日から10月25日、測定間隔は10分である。

二つ目は、ADCP(RD-Instruments社製)を用いた流速空間分布の観測を行った。観測日は、2009年7月10日午後、8月10日午後、9月26日午後、27日午前の計4日間である。この観測の目的は、水戸口近傍の流速分布を把握することである。特に、図-1に示した測線における通過流量を算出し、後述する流量推定結果の検証に活用した。

1 学生会員 M Eng 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正会員 博(工) 東北大学准教授
3 フェロー 工博 東北大学教授
4 正会員 工博 八戸工業大学教授

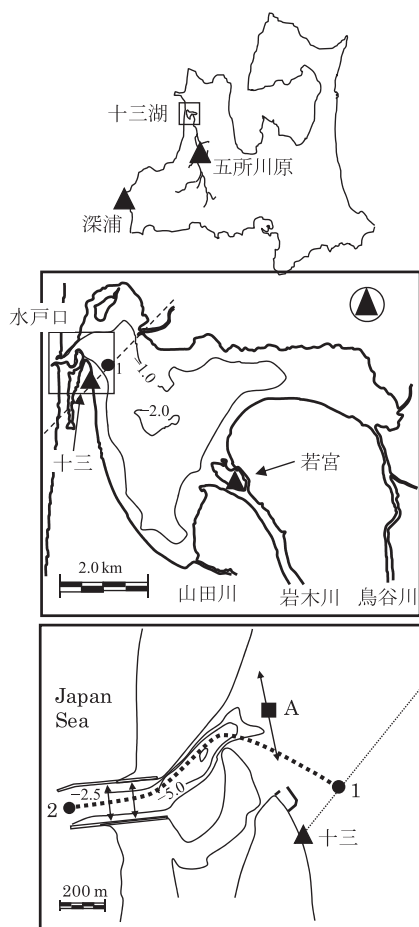


図-1 (a) 十三湖および周辺の測定地点, (b) 十三湖の概形および湖水位の測定地点, (c) 水戸口周囲の測定地点

図-2に本観測期間(2009年の7月10日から10月15日)の現地状況(河川流量, 湖水位)を示す。河川流量は, 五所川原地点で計測された値に対して, 十三湖の集水面積(2,544km²)と五所川原地点の集水面積(1740km²)の比を乗じて, 十三湖への流入量に換算したものである。観測開始後の7月中旬から8月はじめまで, 出水が連続的に生じていた。その後, 8月下旬から10月上旬までは比較的落ち着いた流量が継続していた。十三湖の水位は, 集水域で出水が生じたときには, これにあわせて上下していることが分かる。また出水ではない平常時には, 概ね潮位の変動に追随している。ただし, 十三地点における湖水位の振幅は, 潮汐に比べて若干小さい傾向がある。

また参考にADCP流動観測時の概況について述べておく。7月10日はちょうど出水があったときに重なってしまい, 河川流量, 湖水位ともに大きかった。そのため,

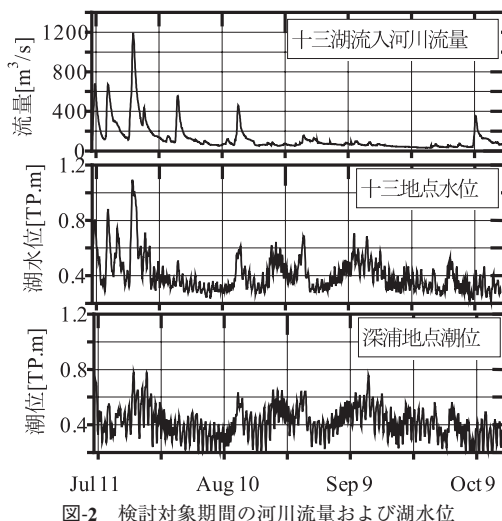


図-2 検討対象期間の河川流量および湖水位

水戸口における流動も, 全般的に湖内から日本海への流出する流れだった。8月観測時は, 晴天でかつほぼ無風の非常に穏やかな状況だった。9月観測時は, 二日とも晴天であったが, 26日は風が比較的強く, 27日は弱風の状況だった。

本研究では, ここまで述べたような, 筆者らの現地観測によるデータ以外に次のものを用いた。河川流量は十三湖から約30km上流の五所川原地点で, 湖水位は若宮地点(湖上流部)と十三地点(湖下流部)の2地点で国土交通省により計測されている。また本研究で用いた潮位は, 気象庁による深浦地点における観測値である。各測定地点は, 図-1に示してある。

3. 水戸口通過流量の算出方法

(1) 力学的条件を考慮した流量の推定方法

本論文では, 3通りの方法で水戸口の通過流量を推定し, それぞれで比較検討した。一つ目の方法は, 湖水位と潮位の差から, マニング則を適用して推定するものである(これを以下手法Aと呼ぶ)。マニング則は, v :流速, n :粗度係数, R :径深, I :エネルギー勾配とすれば,

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

であるが, 水戸口は広幅水路であるので, 径深は水深 h と見なすことができる。したがって, 水戸口の通過流量 Q_M は, B :水路幅として,

$$Q_M = (Bh) \cdot \frac{1}{n} h^{2/3} I^{1/2} = \frac{B}{n} h^{5/3} I^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

と表すことができる。

エネルギー勾配 I は, 潮位(深浦地点)と湖水位(十三地点)の差を各時刻で求め, これを図-1に示した地点1(湖水位観測点近傍)と地点2(水戸口出口)の間を結

ぶ経路（点線）の距離 L で除して算出した。この経路は、十三地点から水戸口外側までの滞筋に概ね沿って流動が生じていると考え、対象領域の深浅測量結果を参考に設定した。その結果、水戸口通過流量 Q_M は、 H_L ：湖水位、 H_T ：潮位、 H_B ：水路床高さとして、

$$Q_M = \frac{B}{n\sqrt{L}} (H_L - H_B)^{5/3} |H_L - H_T|^{1/2} \operatorname{sgn}(H_L - H_T) \cdots (3)$$

と表される。ここで、 Q_M は湖からの流出を正、海から湖への流入を負としているために符号関数を用いた。

この式で現れるいくつかの定数は、つぎのように定めた。水路幅 B は、水戸口の突堤間隔である180mを用いた。粗度係数 n は、本研究と同じく水戸口における水理条件の検討を行ったWatanabe et al. (1995)を参考に0.035とした。また水路長 L については、湖水位が観測されている十三地点から水戸口の海側出口までの滞筋を湖水流動の中心として想定し、図-1下段中の点1から点2までをつなぐ点線を仮想的な水路長と考え、 $L=1,310$ mを設定した。

水路床高さ H_B は、湖内の深浅測量の結果を用いて設定することができる。しかし、十三湖からの流出土砂や沿岸漂砂の堆積あるいはこれらの洗掘といった河床変動により変化する可能性がある。また、式(3)のみから流量を求めると、湖内の水収支が合わなくなる可能性がある。そこで、 H_B を未定とし、湖水の連続条件を考慮して決定するようにした。湖水容量を V 、河川からの流入量を Q_R とすれば、

$$Q_M = Q_R - \frac{dV}{dt} \cdots \cdots (4)$$

である。河川流量 Q_R は、岩木川の五所川原地点における流量に、十三湖および五所川原地点の集水面積比を乗じて求めることができる。一方、湖水量の変化 dV/dt も梅田ら(2007)が行っているように、湖面積×水位変動として求めることができる。しかし、本研究では湖水量変化の項を消去できるよう、式(4)を時間積分し、積分時間間隔の開始と終了で水位が等しくなるよう設定した。すなわち、

$$\int_{t_0}^{t_1} Q_M = \int_{t_0}^{t_1} Q_R \cdots \cdots (5)$$

とし、ここに t_0 、 t_1 は $h(t_0)=h(t_1)$ となる時刻である。

以上から、式(3)と式(5)を連立して、 H_B を設定の上、 Q_M を求めることができる。なお、 t_0 と t_1 の設定すなわち一定の湖水位となる時刻は、十三湖の特性として、潮汐に応じて1日のうちでも数回も生じうる。しかし、水位や河川流量の測定時間間隔が1時間であるので、あまり積分間隔が短いと誤差が大きくなってしまう。そのため、本研究では約10日間ごとの積分時間を設定した。

(2) 流速の測定結果を用いた推定方法

二つ目の流量算出方法は、連続測定で得られた2水深

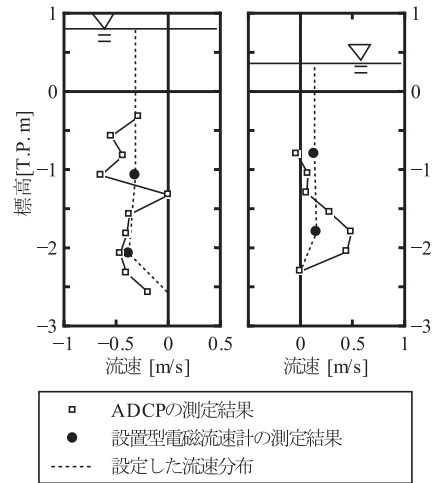


図-3 測定した流速分布の比較および設置した2点の流速計に対する流速分布の設定事例

の流速を用いて流量を推定するものである（以下、手法B）。その際、流速分布を仮定する必要があるが、測定は2点のみである。そこで本論文ではごく単純な設定をした。底面ではノンスリップ条件より流速をゼロとし、水面では上側の測点と等しい流速とした。これらと測定点の流速はそれぞれ直線で結んで補間し、流速分布を作成した。その上で、この分布から水深平均流速を求めて流量推定に用いた。

通過断面は、矩形を仮定した。水深は、流速計を設置した地点における湖底高さと各時刻の水位から算出した。断面幅は、湖水の収支を考慮して設定した。すなわち、断面平均流速： v_M 、水路幅： B_M 、水深 h_M とすれば、

$$B_M = \frac{\int_{t_0}^{t_1} Q_R dt}{\int_{t_0}^{t_1} v_M h_M dt} \cdots \cdots (6)$$

のように、前掲の式(5)における計算と同様に、水戸口通過流量がある期間の河川からの流入量と等しいとして、 B_M を決めることができる。

また、ADCPで測定した横断面内の流速分布からも、スナップショットとしての流量を求めることができる。後述するように、この結果を手法Bの検証に用いた。

(3) 湖水収支に基づく流量の推定方法

第3の方法は、連続条件のみに基づく方法で、梅田ら(2008)において用いられた方法である。十三地点における湖水位変動と湖面積および河川流量の関係から、流量を推定するものである。

$$Q_M = Q_R - A_L \frac{dH_L}{dt} \cdots \cdots (7)$$

ここで A_L ：十三湖の面積を示す。この方法を以後手法Cと呼ぶ。

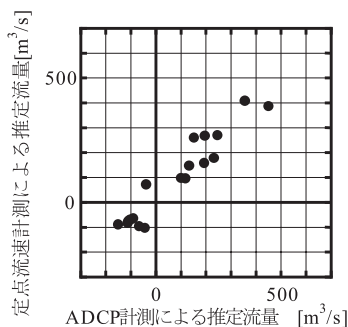


図-4 固定点で測定した流速に基づく方法 (手法B) における水戸口通過流量の推定精度の確認

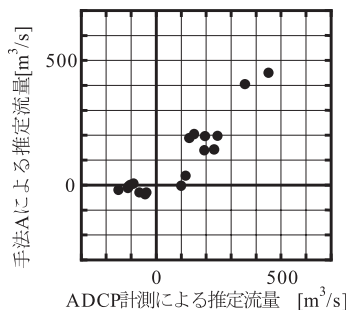


図-6 力学的な条件を考慮した方法 (手法A) に関する水戸口通過流量の推定精度の確認

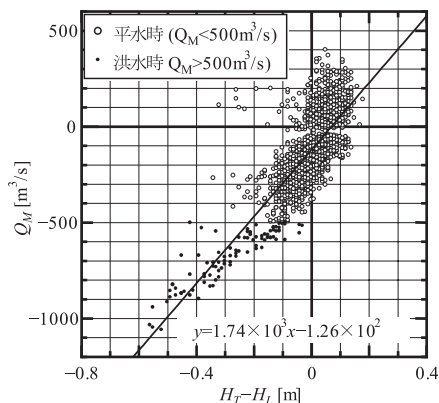


図-5 潮位と湖水位の差に対する流速測定結果から求めた水戸口流量の関係

4. 観測および解析の結果

(1) 流速に基づく流量推定の妥当性確認

固定点において電磁流速計で連続測定した流速から、流量を算出する妥当性について、いくつかの段階を踏んで確認した。まず図-3は、ADCPで計測地点近傍を計測したときの流速の鉛直分布を、同時刻に対して比較したものである。なお、電磁流速計の流速データから設定した鉛直分布を破線であわせて示している。船の揺動などに伴うADCPの測定でのバラツキが比較的大きいことや、固定点の測定が2点しかないことなどから、評価はやや難しいが、概ね平均的には2水深の測定から評価できそうである。なお、ここに示していないADCPのデータを確認すると、水戸口の水深が浅いことなどの影響で、水深方向および横断方向の流速の変化は大きいものではなかった。

式 (6) に基づいて流速を用いた流量推定のための水路幅 B を求めたところ、 $B_M = 394.7\text{m}$ が得られた。これに対して、ADCPの計測時に、測点1の脇を通過した測線のボトムトラックデータを使って、この値の妥当性を確認した。平均水位に対する断面積で考慮すると、推定断面では 838m^2 であるのに対し、ADCPから得られた断面積は $854 \sim 972\text{m}^2$ であった。したがって、式 (7) で得られた

横断幅は、やや過小評価だが概ね妥当だと考えられる。

図-4は、手法Bの流量推定値とADCPの断面計測結果から求めた流量の比較をしたものである。手法Bの値は、ADCPで流速分布を計測した時刻と対応したものを抽出している。ADCPの測定が限られた回数ではあるものの、相関係数が0.95という高い相関が両者に得られた。したがって、手法Bによる流量推定は、十分な精度を持っていると評価できる。

(2) 潮位データの取り扱い

本論文では、最終的に式 (3) により、潮位と湖水位のバランスから流量を算出することが目的である。ただし、潮位が計測されている深浦は、十三湖から50km程度離れているため、十三湖の近傍とは多少の差があることが予想される。これを厳密に評価するのは難しいと考えられるため、本研究では以下に述べるようなかなり単純な評価をした上で、補正をして用いた。

図-5は、横軸に深浦の潮位と十三地点の湖水位の差を取り、縦軸に手法Bから得られた流量をプロットしたものである。式 (3) を考えると、潮位と湖水位が等しければ、水戸口流量はゼロとなるはずである。しかし図中に示した回帰式からも分かるように、原点をやや外れた関係となっている。前節の検討結果から、流速から推定した流量は妥当性が高いと考えられる。そこで、潮位の補正を考慮することとした。図中に示した回帰線は、概ね非出水時を考慮するため、流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ 以下に対して直線で近似したものである。これによると、潮位を 7.2cm 差し引く補正を行うと、原点を通る関係が得られることになる。そのため潮位を用いる解析では、この補正を行って用いることとした。

(3) 力学的条件を考慮した流量と塩分流入量の推定

前節のように補正した潮位と3 (1) 節で述べた方法から、水戸口流量を推定した結果を示す。まず図-6は、図-4と同様に、ADCPによる観測結果から算出した断面流速と、同時刻における手法Aによる推定結果で相関をとったものである。手法Bと比較すると、やや精度が落ちる

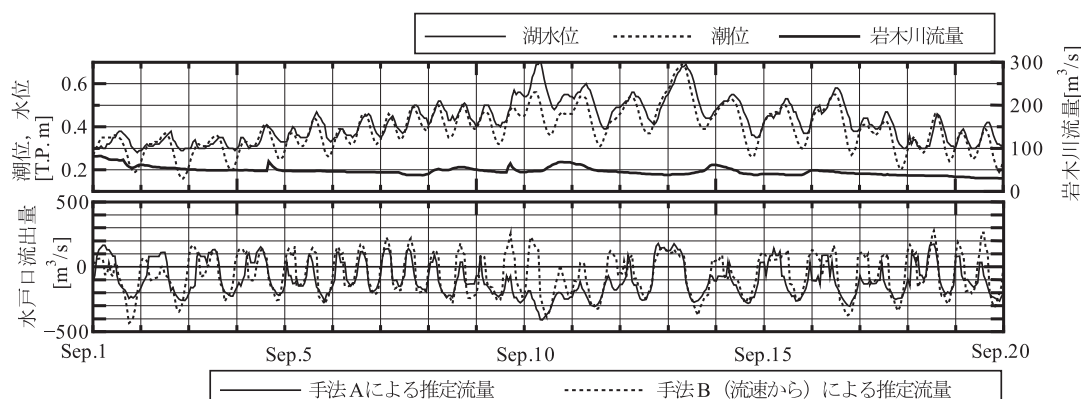


図-7 水戸口通過流量の推定結果についての比較検証のための時系列 (2009年9月1日～20日)

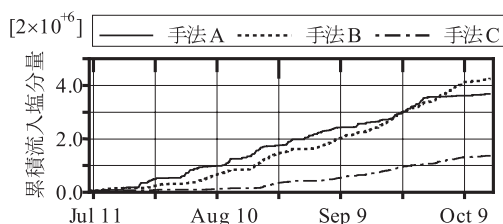


図-8 湖内への塩分流入量の累積値の時系列

ものの、概ねよく一致していると言える。

流量の推定結果の時系列 (一部) を図-7に示す。本研究で提案した手法Aに基づく推定結果は、流速から推定した流量 (手法B) と概ね同様の変動を示している。ただし、9月9～10日で多少の乖離が見られる。このとき、出水は生じていないが湖水位が上昇している。別途のデータとして、近傍の風向風速を確認したところ、やや強い西よりの風が吹いていたため、吹送流により水戸口から海水が流入していたと推測される。したがって、本研究の手法Aをより精度向上させるためには、風の条件も考慮に入れる必要があると考えられる。

図-8は、本研究で用いた各手法で、日本海から水戸口を通じて十三湖へ流入した塩分量を累積して比較したものである。ここで、海水の塩分は、梅田ら (2008) などの観測結果に基づいて33psuの一定値を仮定した。塩分の流出量に関しては、湖内での混合過程も考慮する必要があるため、本論文では流入フラックスのみを対象とした。この結果によると、本研究で提案した手法Aは、流速の測定時系列を用いた手法Bと良い対応をしていることが分かる。それに対して、湖水位と河川流量から連続条件で設定をする手法Cは、かなり過小評価をする結果となった。

5. 結論

汽水湖の環境を大きく左右する海からの塩分流入量を評価するために、本論文では、湖水の水収支に加え、潮

位と湖水位の差に応じた力学的条件を考慮して、十三湖と日本海の流入量を求める方法の検討した。その結果、水戸口の通過流量および流入塩分量について、妥当な結果を得ることができた。ただし、強風時に生じる吹き寄せの影響を別途考慮する必要性が示唆された。

謝辞：本研究は岩木川における河川生態学術研究会の総合的な調査研究の一環として実施された。また本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 (B) (21360230, 代表：田中仁) により実施された。現地観測の際には、十三漁業組合にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 梅田 信・田中 仁・小西絵里子・佐々木幹夫 (2008)：十三湖における塩分と溶存酸素の変動に関する観測と解析，海岸工学論文集，第55巻，pp1051-1055。
- 楠田哲也・山本晃一監修・河川環境管理財団編 (2008)：河川感潮域，技報堂出版，353p。
- 久保田光彦・藤原広和・長崎勝康・吉田由孝・細井 崇 (2006)：小川原湖における水質・底質環境およびヤマトシジミの生息状況について，海岸工学論文集，第53巻，pp.1091-1095。
- 鶴田泰士・石川忠晴・西田修三・藤原広和・村井禎美 (2001)：小川原湖への海水進入現象に関わる水理データの整備と復元，水文・水資源学会誌，第14巻1号，pp.13-26。
- 原 拓也・山崎 瞳・小山裕起・出村国光・細川泰史・笠井亮秀・長崎勝康・和田 実・東 信行 (2008)：青森県十三湖におけるヤマトシジミ (*Corbicula japonica*) の個体群維持機構，日本生態学会東北地区会第53回大会。
- 丸谷靖幸・中山恵介・堀松大志・鰐目淑範・米元光明 (2010)：網走湖における密度界面に対する風応力と河川流入の影響評価，水工学論文集，Vol.54，pp.1393-1398。
- Watanabe, K., Tanaka, H., Sasaki, M. (2005)：Estimation of water depth at river mouth using water level variations - Application to Lake Jusan, *Environmental Hydrodynamic and Sustainable Water management*, Taylor & Francis Group, London, pp.1141-1146。