

小川原湖に侵入する塩分の計算モデルの検討

A Model for the Estimation of Salt Intrusion
into Lake Ogawara

石川忠晴*・板井雅之**・小沢康彦***

By Tadaharu ISHIKAWA, Masayuki ITAI and Yasuhiko OZAWA

An empirical model is developed and calibrated for the estimation of salt intrusion into Lake Ogawara. The model is based on one-dimensional kinematics of the salt water front in a divergent channel of the lake to the ocean. An assumption is made that the longitudinal profile of salinity concentration around the front is kept constant, and the profile is empirically evaluated.

The model successfully reproduces the time series of flow rate and salinity concentration at a measurement station in the channel. The time-integration of estimated salinity flux agree fairly well with the increment of total salinity in the lake.

Keywords: saline lake, salt intrusion, empirical model,
numerical simulation

1. はじめに

汽水湖の水理環境は塩分の微妙な流動と混合の上に形成されているので、その環境評価を行うためには、下流河道から侵入する塩分量のオーダと変動特性を把握することが重要である。そのための手法としては、下流河道の二層流計算や移流拡散・分散計算などの水理学的計算が一般的であろう。しかしこれらの手法で長期的な侵入塩分量の計算を行うにはかなりの労力を要し、また現状では、必ずしも十分な計算精度が保証されているわけではない。下流河道の水理・水質データがある程度得られている場合には、それを用いて、侵入塩分量を求めるための半経験的モデルを構築することが考えられる。すなわち、タンクモデルや貯留関数法などの水文モデルのように、運動の基本的機構をまず概念的にモデル化し、そこに表れるパラメータを現地データを用いて調節する。本研究では、青森県小川原湖に侵入する塩分について、このような半経験的なモデルを検討した。

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

(〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 学生会員 東北大学大学院 修士課程

(同 上)

*** 東北大学工学部学生

(同 上)

2. 小川原湖の概要及び検討に用いた資料

小川原湖は青森県東部（北緯 $40^{\circ}45'$ 、東経 $141^{\circ}20'$ ）に位置し、湖面積（ 63.2km^2 ）ではわが国で11位の湖である。水面標高は約 T.P.0.4m（非洪水時）、平均水深は約11m、最大水深は約25m であり、海岸平野に位置する湖としてはかなり深い。主な流入河川はいずれも湖の南西部に入り、流出部（高瀬川）は湖の東北端にある。高瀬川の河道延長は約 6.6km で、河口より 5.7km の地点から放水路が開削されている。（図-1 参照）放水路のゲートは、湖水位が T.P.0.7m を越える時（年に数回発生する）以外は閉塞されている。したがって、常時は高瀬川本川を経由して自然的な流出入が生じている。湖水位の低い非洪水期中の大潮の前後では、満潮位が湖水位を越えることが多く、塩分が高瀬川を遡上し、湖に流入する。年間で塩分侵入が特に活発な時期は、冬季及び5月中旬から8月上旬にかけてである。

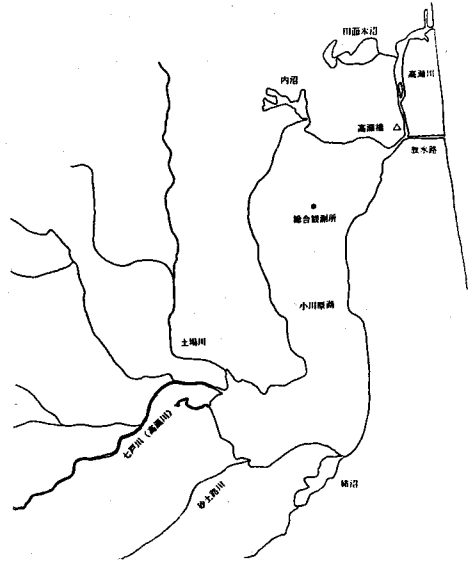


図-1 小川原湖の平面形状

本研究で用いるデータは、建設省高瀬川総合開発工事事務所から貸与された平成元年の計測値で、以下の項目が含まれている。

- ①高瀬橋地点（図-1 の△印）における流量：超音波流速計（1 測線）の計測値に断面積を乗じて求められている。欠測及び異常値が含まれているが、前後の値から内挿できる場合は内挿して用いた。
- ②高瀬橋地点における塩素イオン濃度：上下2点の値が得られている。本研究ではこの平均値を用いる。
- ③湖水位及び河口水位：河口水位には欠測が多いが、八戸港潮位データを用いて補完できる。
- ④湖内における塩素イオン濃度の鉛直分布：各月に1度、水深20mまでの塩分濃度が定期的に計測されている。その他に、総合観測所における水深15.6mまでの自動記録データがある。

なお、湖内定期観測以外のデータは1時間毎の時系列値となっている。モデルの構築にあたっては、欠測の比較的小さい期間（4月下旬から8月上旬）のデータを用いた。

3. 計算モデルの検討

3・1 大潮時前後の塩分侵入状況

図-2 に大潮時前後の湖水位と河口水位、高瀬橋地点の流量及び塩素イオン濃度の変化の一例を示す。流量変動は湖水位と河口水位の差に概ね比例しており、位相差はほとんど認められない。すなわち、河道内に貯留されている水の慣性効果はさほど大きくないと推察される。また塩素イオン濃度は逆流の開始から少し遅れて増加し始め、逆流から順流に転ずる時刻にピークを示し、その後減少する。過去の調査¹⁾によれば、高瀬川に多量に塩分が遡上する時は、強混合の形態（すなわち押し出し流れ）をとることが多い。そのことと図-2 の変化を考え合わせると、塩分濃度の時間的変化は流量の時間的変化に密接に関係付けられるものと推察できる。

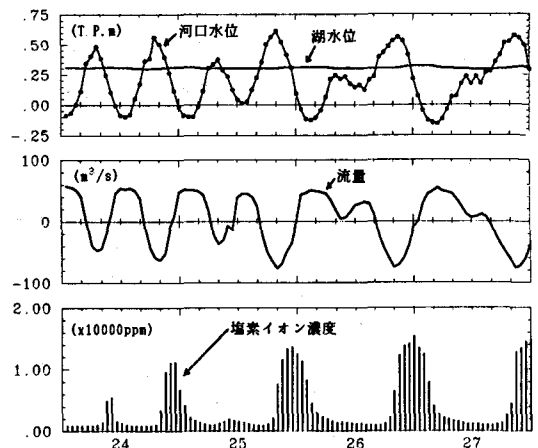


図-2 平成元年6月大潮時前後の状況

3・2 高瀬川流量の計算法

流量と（湖水位－河口水位）の位相差がほとんど認められないので、次の関係を仮定する。

$$Q = f(\Delta H) \quad (1)$$

ここに、 ΔH は湖水位と河口水位の差、 Q は流量（海向きを正とする）である。この関係は図-3に示すようになっている。データの中心が座標原点から少しはずれているが、その原因は不明である。（例えば、水位観測の座標原点の誤差や、流量測定値の定誤差が考えられる。）しかし、いずれにせよ、測定値間の関係は次式で近似される。

$$\text{順流: } Q = \{(\Delta H - 0.05) / 1.2 \times 10^{-4}\}^{1/2}$$

$$\text{逆流: } Q = (\Delta H - 0.05) / 4.0 \times 10^{-3} \quad (2)$$

3・3 高瀬橋地点塩分濃度の計算モデル

3・1に述べた塩分濃度特性をもとに、以下のようなモデルを考える。高瀬橋地点を座標原点として、河道に沿って海向きに距離座標 x を取る。河道内に海水が侵入する時の濃度分布は模式的に図-4のようになるであろう。海水と湖水の丁度中間の濃度の地点を海水フロントの位置と定義する。フロント位置は次式で表される。

$$dx = Q / A(x) \cdot dt \quad (3)$$

ここに、 $A(x)$ は河道断面積である。高瀬川は両端を湖と海の水位で抑えられているので、河道断面積は時間的にあまり変化しない。そこで、これを時間的に不変とみなし、 $dz = dx \cdot A(x) / \Delta t$ をみたすように新たな変数 z を導入する。ここに Δt はデータ時間間隔である。 z と流量は次の式で関係付けられる。

$$dz = Q \quad \text{または} \quad z = \sum Q + \text{const.} \quad (4)$$

すなわち、 z は河道に侵入した湖水の体積（符号を変えれば海水の体積）である。上に仮定したように、河道断面積が時間的に不変とみなせれば、 z は x の単調増加関数である。また、河道断面積が x によらず一定であるなら、 z は x に比例する。そこで、 z を「擬似的な距離」と呼ぶことにする。“フロントのボヤケ”が河口部で形成され、河道部では単純な押しだし流れが生じているとすると、フロント位置を基準として、濃度分布形状は擬似的距離 z のみの関数となるであろう。^(脚注)

z に関するフロント前後の濃度分布は次のようにして求められる。順流が長時間継続した後に逆流が生じると、塩分フロントが海側の河口から侵入を始める。そこで逆流が始まった時刻を始点として（4）式の右辺を計算し、得られる z と塩分濃度の関係をプロットすると図-5-1のようになる。多少のバラツキは

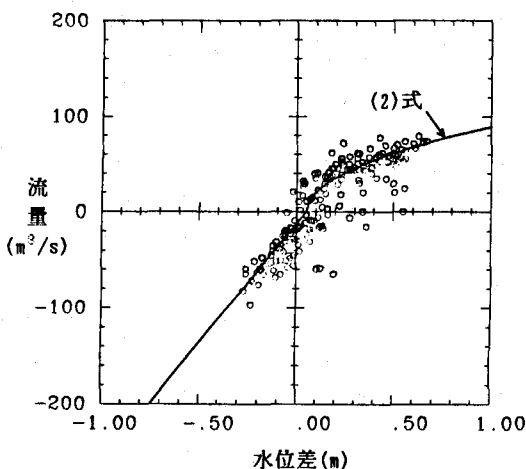


図-3 高瀬川流量と上下流端水位差の相関

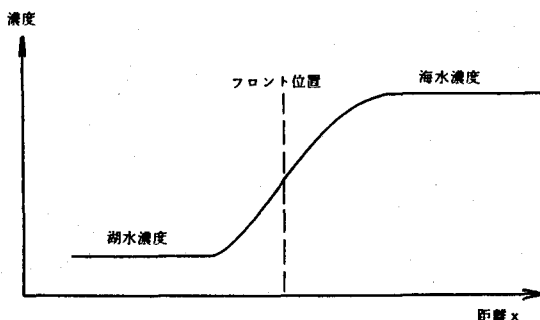


図-4 フロントの概念図

（脚注）厳密に言うと、“観測地点で測定される濃度の時間変化を擬似的距離上の変化に置き換えた分布形”が不変であれば（4）式以降のモデルは成立する。この場合は、フロントが侵入するとともに濃度分布形が変化してもよいことになる。しかし、観測地点が1ヶ所に固定されているために観測される濃度変化が“見かけ上不変”だということである。いずれの説明が適当かは、複数地点で観測を行えば明らかになるであろう。現状では判別できない。

あるが、概ね一定の関係にある。これがフロント前後の濃度分布を表している。また同図における塩分フロント（中間濃度）の z 座標が、観測地点と河口部の擬似的距離を表している。同様に、逆流が十分長く継続した後に順流が生じた場合について、湖水が流下する時のフロント前後の濃度分布を求めることができる。この結果を図-5-2に示す。図-5-2と図-5-1の図形は、横軸を若干ずらすと、ほぼ上下が逆の形をしている。すなわち、逆流で生じる海水フロントと順流で生じる湖水フロントの濃度変化パターンは、到達時間が異なるだけで、（海水濃度と湖水濃度を入れ換えれば）ほぼ同じパターンを取るとみなすことができる。なお、図-5-2におけるフロントの z 座標が、観測地点と湖側の河口部の擬似的な距離を表している。

図-5-3はフロント位置を基準とした混合率（順流の場合は湖水に対する海水の混合率、逆流の場合は海水に対する湖水の混合率）の近似曲線（5）式の適合度を示している。図中の○印は海水フロントの測定値を、●印は湖水フロントの測定値を示している。

$$y = \exp \{ -0.527 (\xi / 100 + 1.2)^{1.5} \} \quad (5)$$

ここに、 y は混合率、 ξ はフロントを基準とした擬似的距離で、順流の時に $\xi = z$ 、逆流の時に $\xi = -z$ 。

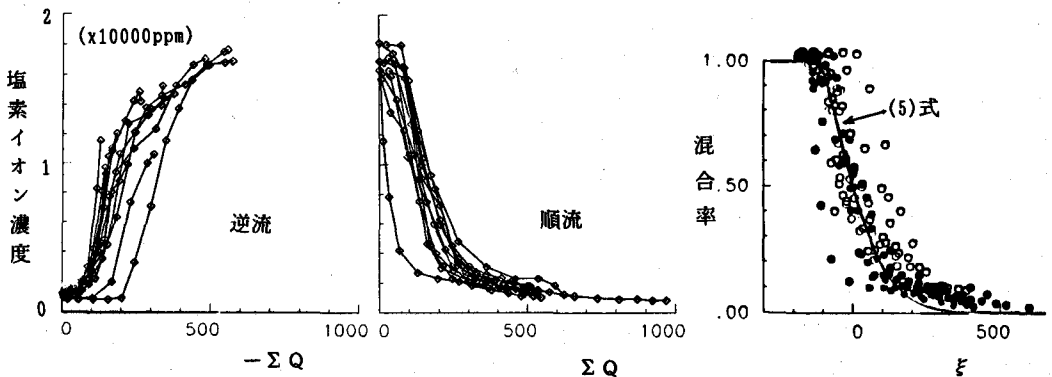


図-5-1 海水フロントの濃度変化

図-5-2 湖水フロントの濃度変化

図-5-3 フロントの混合率

3・4 計算方法

まず、湖水位と河口水位の時系列データから、（2）式を用いて流量の時系列データを作成する。この時、フロントが順流に乗って海側の河口から外に出た後に逆流が生じる場合には、フロント位置を海側の河口にリセットする。同様に、フロントが逆流に乗って湖側の河口から外に出た後に順流が生じる場合には、フロント位置を湖側の河口にリセットする。（図-6参照）

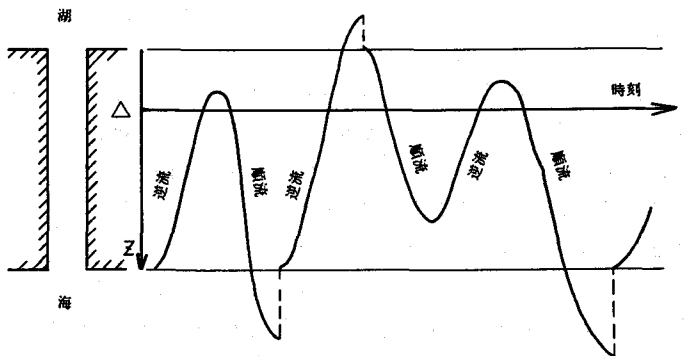


図-6 フロントの移動の概念図

得られた z から（5）式を用いて混合率を求め、塩素イオン濃度を計算する。最後に、流量と塩素イオン濃度を乗じて時間的に積分し、湖に流出入する塩分量を求める。

4. 計算結果

平成元年4月20日から8月9日及び10月4日から12月7日の2期間について計算を行った。両期間とも塩

分侵入の活発な時期である。また、各々の計算開始日と終了日は湖内の定期観測日に当たっており、湖内に蓄積している総塩分量が概略算定されている。なお、第1期間のデータは計算モデルのトレーニングデータとして前節で使用している。

4・1 平成元年4月20日から8月9日の計算結果

紙面の制約から、6月についての結果のみを示す。図-7-1に流量についての結果を、図-7-2に塩素イオン濃度についての結果を示す。本モデルは極めて簡単な構造のモデルではあるが、測定値とよく一致した結果を与えることがわかる。図-7-3の実線は、湖内に蓄積された塩分量の計算値を計算開始時点を基準にプロットしたものである。図中の○印は、定期観測から得られた20m以浅の塩分量の変動を示している。また△印は、総合観測所の自動観測記録から得られた15.6m以浅の塩分量の変動を表している。最深部までの塩分量は得られていないが、しかし水深15.6mまでで湖全体積の89%、水深20mまでで98%を占めているので、全体的な傾向を見るには十分であると思われる。両測定値が一致しないのは、測定深度の違いよりも、測定誤差のためである。すなわち、湖体積の大部分の塩分濃度は数百ppmのオーダーであり、1カ月あたりの変動量は数十ppmのオーダーである。したがって塩素イオン濃度の現地計測の誤差のオーダーに近い。これに各深度の体積を乗じて塩分量の変化を求めるので、濃度の測定誤差及び湖内の不均一さの影響が結果に大きく表れる。したがって、これらの測定値からは総塩分量の変化の傾向とそのオーダーしかわからないと考えたほうが良いと思われる。以上のことを踏まえて計算結果と測定値を比較すると、まずまず良好な一致をみていると言える。

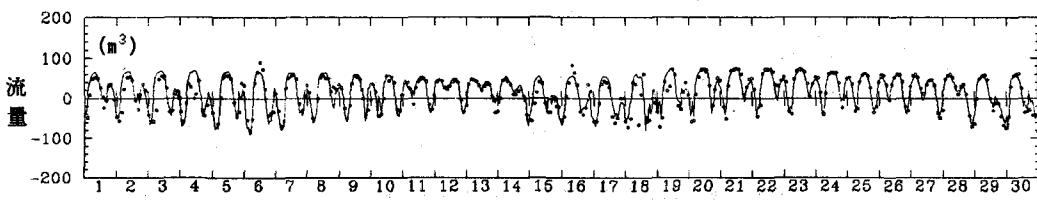


図-7-1 高瀬橋地点流量（平成元年6月）

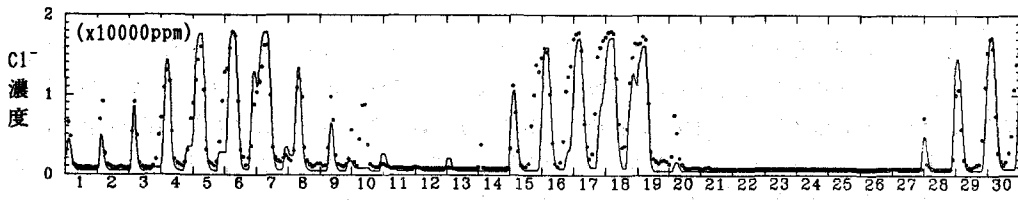


図-7-2 高瀬橋地点塩素イオン濃度（平成元年6月）

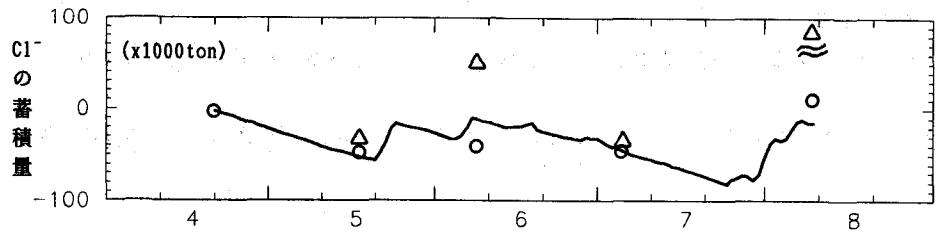


図-7-3 小川原湖に侵入した塩分量の累積値（平成元年4月下旬～8月上旬）

4・2 平成元年10月4日から12月7日の計算結果

紙面の制約から11月についての結果のみを示す。図-8-1に流量の結果を、図-8-2に塩素イオン濃度の結果を示す。流量の測定値（○印）が頻繁にホールドされているが、これは流速計が正常に作動していなかったためである。その部分を除くと、測定値と観測値はほぼ一致している。また塩素イオン濃度について

ては、6月の計算結果と同程度の結果を与えている。図-8-3は湖内に蓄積された塩分量を示している。先に述べたように測定値の精度はかなり悪いのだが、変化の傾向は計算結果と概ね一致している。

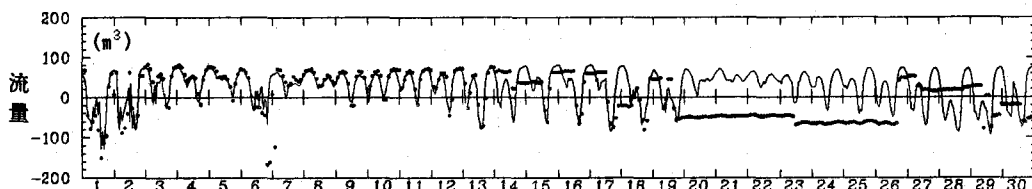


図-8-1 高瀬橋地点流量（平成元年11月）

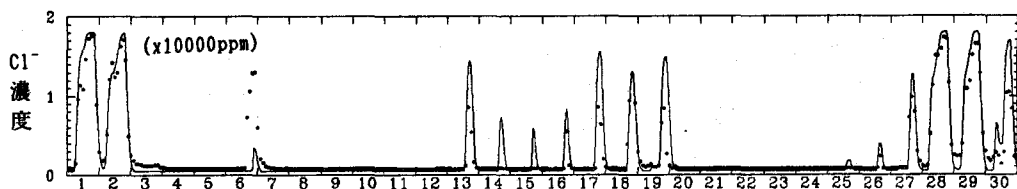


図-8-2 高瀬橋地点塩素イオン濃度（平成元年11月）

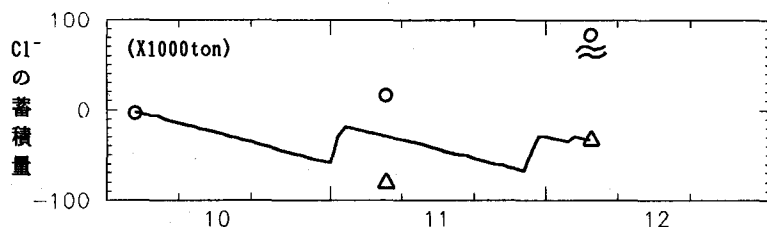


図-8-3 小川原湖に侵入した塩分量の累積値（平成元年10月上旬～12月上旬）

5. おわりに

本研究では、流量を積分して海水フロント（または湖水フロント）の擬似的位置を求めるモデルをもとに、小川原湖に侵入する塩分量を推算する計算モデルを作成した。現状では湖内に蓄積されている塩分量の測定精度が低いために、侵入塩分累加量の計算精度の直接的検証はできないが、おおよその傾向と変化のオーダは一致していた。本モデルが、高瀬橋で観測された流量と塩素イオン濃度を良く再現することから、ある程度の精度で侵入塩分量を推定できているものと思われる。

現状では、水理・水質観測の欠測が多く、また湖内の総塩分量の測定精度が低いので、本モデルの有用性は高いと考えられる。

なお、本モデルは強混合の河川を対象に検討されたもので、二層流的挙動を示す河川には適用できない。

解析データの利用に便宜を計って下さった建設省東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所に謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所：小川原湖塩分変化予測検討業務報告書、1987