

小川原湖への塩分侵入現象の確率統計的考察

A Stochastic Analysis of Salt Intrusion into Lake Ogawara

長尾正之*・西部隆宏**・石川忠晴***・山浦勝明****

By Masayuki NAGAO, Takahiro NISHIBE,

Tadaharu ISHIKAWA and Katsuaki YAMAURA

Sea water intrusion into a brackish water lake is a stochastic phenomenon because the water levels of the ocean and the lake are incidentally fluctuated by weather condition. In this paper, a stochastic model is developed to simulate the time series of the water levels by using AR formulation in order to estimate the frequency and the intensity of the sea water intrusion into Lake Ogawara in a long term.

The result of the stochastic simulation for thirty years, together with the conservation law of salinity, successfully estimated the averaged salinity concentration in the lake.

Keywords: Stochastic Analysis, Salt Intrusion, AR model

1. はじめに

汽水湖は、多種の生物が入り交じり豊かな生態系を有するとともに、古来より漁労の場として利用されてきた。ひところは、地域振興のために、干拓や淡水化が進められたこともあったが、近年は、汽水湖の貴重な自然環境を保全しようとする動きが強まっており、そのために、そこでの自然環境の成り立ちを理解するための調査が行われつつある。

汽水湖の環境は、海水侵入とそれに伴う塩分循環の微妙なバランスの上に成り立っている。したがって、汽水湖の自然環境を理解するためには、塩分の侵入・循環・排出システムを解析することが大切である。筆者らは、青森県の小川原湖をフィールドとして、汽水湖の塩分循環の事例解析を試みている。¹⁾

ところで、塩分侵入現象は力学的現象であるから、従来は、水理学・流体力学の分野の研究課題としてアプローチされてきた。しかし、塩分侵入現象を支配する潮位と湖水位は、ともに気象・海象条件の影響を強く受け確率的に変動する。したがって、塩分侵入現象は確率的な視点からもとらえる必要がある。そこで本研究では、潮位と湖水位の変動特性を解析し、小川原湖への塩分侵入現象の確率統計的性質を検討した。

* 正会員 工修 東京工業大学助手 大学院総合理工学研究科 (〒226 横浜市緑区長津田町4259)

** 学生会員 東京工業大学大学院修士課程 (〒226 横浜市緑区長津田町4259)

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 (〒226 横浜市緑区長津田町4259)

**** 正会員 上田市役所 (〒386 長野県上田市大手1-11-16)

2. 小川原湖の概要

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 ）ではわが国で第11位の湖である。水面標高は約40cm（TP）、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）は湖の北東端にある。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。放水路のゲートは、洪水時に湖水位が70cm（TP）を越える時以外は閉塞されている。したがって、常時は高瀬川を経由して自然的な流出入が生じている。

潮位が湖水位を上回ると、高瀬川を塩水が遡上するが、河道延長が6.6kmあるために、塩水が小川原湖に到達するには時間を要する。すなわち、潮位の高さだけでなく、継続時間が重要で、このため小川原湖への大規模な塩水侵入は比較的稀な現象である。実際には「高低潮位」が比較的高く、ふたつの満潮があまり分離しない場合に、大規模な塩水侵入が見られる。そこで、大規模な塩水侵入発生の季節性を知るための簡便な指標として、朔望日における2つの満潮位とそれに挟まれる高低潮位の平均（以下、朔望日高潮位と呼ぶ）を用いる。図-2に、朔望日高潮位（1984～1989年：6年分）と湖水位（1981～1990年：10年分）の季節変動を示す。これから、大規模な塩水侵入は5月末から7月上旬及び11月から1月にかけて生じやすいと推測される。²⁾

小川原湖に達した遡上塩水は、湖内に少し入った地点で湖水の下にもぐり込み³⁾、湖内斜面を斜面ブルームとして流れ下り、湖心部に達し塩分成層を形成する。湖内に蓄積された塩分は、風や放射冷却による乱流混合によって少しずつ表層に運ばれ、引き潮時に高瀬川を経由して排出される。

3. 塩水侵入の確率性

小川原湖への塩水侵入が確率的現象であることを、水位の関係から説明する。（図-3）

小川原湖の平均水位は40cm（TP）であり、また小川原湖付近の大潮時満潮位（天文潮位）は40cm～70cm（TP）である。したがって塩水侵入を誘起する水位差は数10cmのオーダーである。

さて、塩水侵入の外力である潮位は、基本的には月と太陽の運行によって定まる天文潮位に従って変動するが、その上に天候の影響による変動が加わる。一般に気圧が10hPa低下すると潮位は約10cm上昇する。また海底勾配が緩い海岸付近は波浪によるセットアップが生じる。波浪による水位上昇は波浪特性に依存するが、数10cmに達することもある。また、強風時には吹き寄せによる水位上昇も生じる。海岸付近の潮位は、これらが重なった結果であり、全体として数10cmのオーダーで天文潮位からずれることがある。大規模な海水侵入は、このズレがプラスに作用した時に発生すると考えられる。

湖水位も同様に、天候によって確率的に変動する。すなわち降雨があれば上昇し、その後緩やかに低下する。過去の経験によれば、1降雨による湖面上昇量は流域平均降雨量の約3倍であり、100mmの降雨で数10cmとなる。

以上のように、潮位も湖水位も、天候の影響によって数10cmのオーダーで変動する。これは大潮時満潮位と湖水位の差の平均量と同オーダーである。したがって、小川原湖への塩水侵入現象は、平均的には図-2に示した季節性があるといっても、実際には天候の影響による確率性が重要な要素となっているのである。

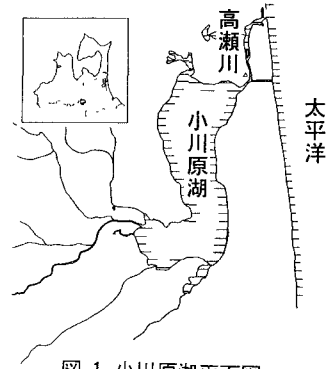


図-1 小川原湖平面図

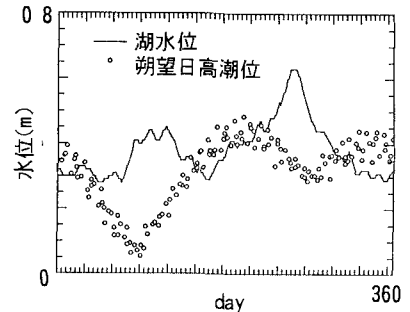


図-2 湖水位と朔望日高潮位の変化

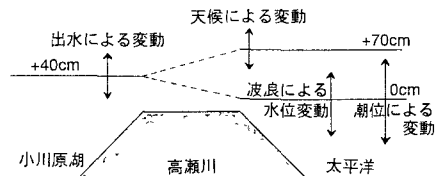


図-3 水位関係説明図

4. 河口潮位及び湖水位の確率統計的解析

4-1 河口潮位の推定

高瀬川河口の内側の河道部では建設省が水位測定を行っているが、河川流量の影響を受け、また欠測が多いので、本研究では他の資料から河口外部の水位を推定した。

高瀬川河口から南に40km離れた八戸港では、天文潮位年表が作成され、また港内で実潮位が計測されている。両者の差を取ることににより、気圧変動及び吹き寄せによる潮位偏差を求められる。このようにして得られた潮位偏差と気圧の相関を図-4に示す。このように、気圧変動と潮位上昇量の間には、先に述べた比例関係が明確に現れている。

一方、波浪によるセットアップ量は、以下の手順で求めた。まず、波浪データは、高瀬川河口から北に10km離れたむつ小川原港の外部で計測されている $H_{1/3}$ (1/3有義波高) と $T_{1/3}$ (有義波周期) のデータを用いた。これらを水理公式集⁴⁾に述べられている計算式に代入した結果、図-5に示すように、 $H_{1/3}$ のみとの直線関係で近似できることがわかった。さて、この方法は波浪が斜面に打ち上がった場合のセットアップ量を対象としているが、しかし河口部は開口しているから実際の水位上昇量は上記の方法で求めた値より何割か小さくなるものと考えられる。そこで、河口内部の河道で計測されている水位を参考に、以下のような補正を加えた。先に述べたように、河口内部の水位は欠測が多いが、その時々観測値と $H_{1/3}$ の関係をプロットすると、図-6に縦線で示すような範囲にある。この結果と図-5に示した直線関係を勘案し、波浪による河口部水位上昇量と $H_{1/3}$ の関係を次式で表すこととした。

$$\Delta H = 0.05 H_{1/3} \tag{1}$$

以上の手順により、八戸港の潮位データとむつ小川原港の波浪データから高瀬川河口潮位を推定した。かなり込み入った手順を踏んでいるが、現況の現地データの制約のもとでかなり苦心した結果である。一般に、環境の解析には、常にデータ入手の制約があり、その制約の中で推測を重ねなければならない。

4-2. 潮位偏差時系列の解析

前節の手順により、潮位偏差時系列（河口潮位と天文潮位の差）を2年分作成した。その結果を図-7に示す。もっと長期の時系列が作成できれば、それらを直接的に統計解析できるのだが、今回は入手可能なデータの制約で2年分の時系列しか作成できなかった。そこで、このデータの確率特性の時系列解析をまず行い、その結果に基づき、同じ確率特性を持つモデル時系列をシミュレーションにより発生させた後、長期間に発生する現象の確率

評価を行うこととした。

図-7の潮位偏差時系列は3つの変動成分から構成されている。ひとつ

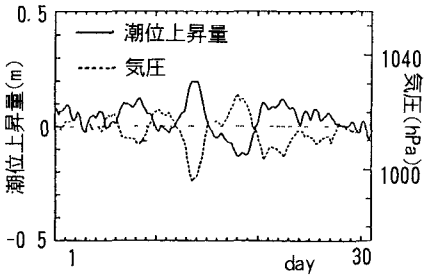


図-4 気圧と潮位上昇量

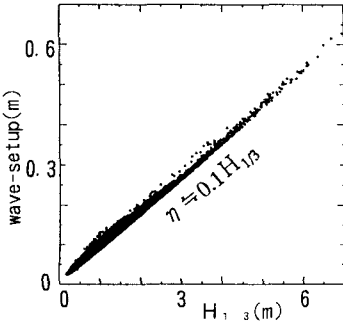


図-5 wave-setupと波高の関係

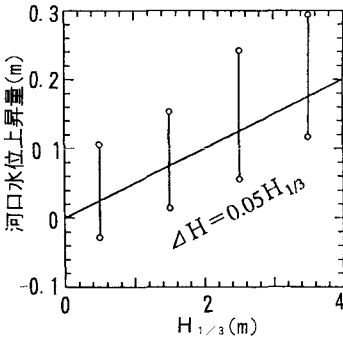


図-6 河口水位と波高の関係

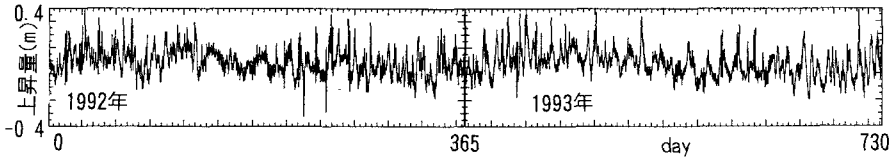


図-7 潮位偏差の時系列

は季節的な変動（図-8）、2番目は天候の変化による数日から十数日の変動、3番目は1日以下の微変動である。この中で特にパワーの大きな2番目の変動が、塩水侵入の確率性に強い影響を与えていると考えられる。そこで、図-7の時系列から図-8の季節変動時系列を差し引き、さらに移動平均によって1日以下の微変動を消去して1日ごとの数値列とすると、図-9が得られる。この時系列をARモデルで解析する。

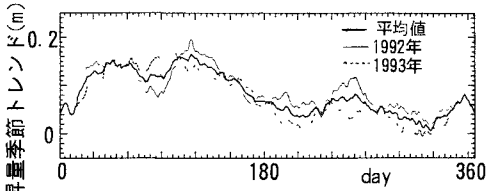


図-8 潮位偏差の季節変動

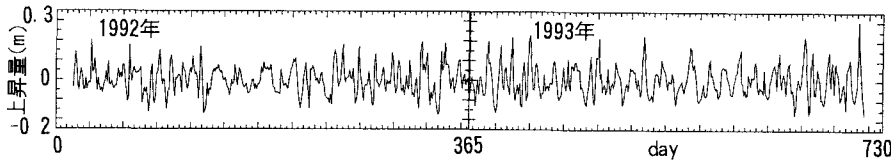


図-9 長期変動及び日内微変動を除いた時系列

$$y_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} + \dots + a_m y_{i-m} + \varepsilon_i \quad (2)$$

ここに、 y_i は時刻*i*での潮位偏差、 a_i はAR係数、 ε_i は時刻*i*におけるランダム外力である。 ε_i の物理的意味は明確でないが、潮位に影響を及ぼす「天候因子」である。

AR係数はMEM法で求めた。また項数 m は赤池の指標⁵⁾を参考に15とした。この結果を(2)式に代入して

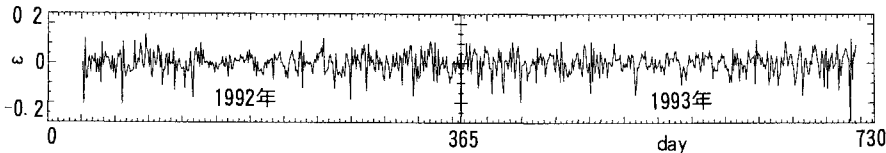


図-10 εの時間変動

ランダム変数時系列 ε を求め（図-10）、その自乗の30日移動平均をプロットすると 図-11のようになる。また ε の自己相関関数を図-12に示す。これから、 ε は、その強度が図-10のような季節変動を持つホワイトノイズであるとみなせる。そこで、 ε の頻度分布図を描き、それに従った確率で乱数を発生させ、さらに図-11の季節変動強度を乗じて、 ε の長期間時系列を作成した。これを(2)式に代入して、天候による潮位偏差の30年分のモデル時系列を作成した。結果の一部を図-13に示す。

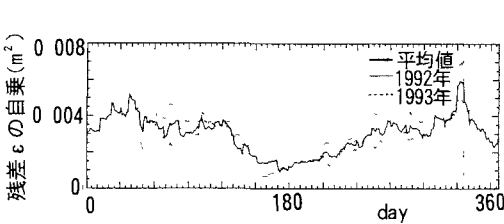


図-11 εの自乗平均

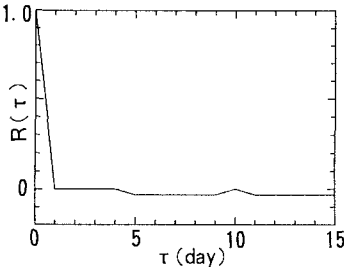


図-12 εの自己相関関数

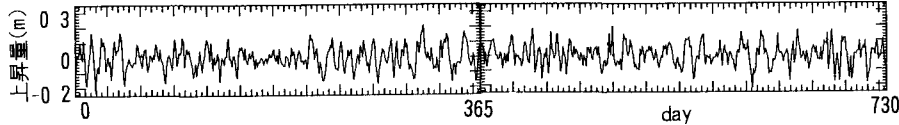


図-13 シミュレーション結果

4-3. 湖水位時系列の解析

湖水位については、比較的長期にわたって実測されている。しかし短期的な欠測が多くあるために時系列は寸断されている。そこで、潮位偏差と同様にARモデルを作成した。作成手順は前節とほぼ同様であるので、記載を省略する。図-14は、実測データのうち比較的長期間欠測が無かった部分のスペクトルと、ARモデルによる湖水位シミュレーション結果のスペクトルを比較したもので、両者はよく一致している。

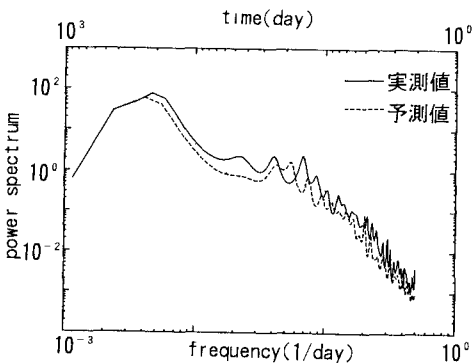


図-14 元データとシミュレーション結果のパワースペクトル

5. 塩水流入量の長期間シミュレーション

5-1. 計算方法について

以上述べたように確率的に変動する外力のもとで、湖への塩分侵入がどのような確率的特性を持つかをシミュレーションによって検討する。上記のモデルにより河口潮位と湖水位のモデル時系列データを30年間分作成し、これらを入力として高瀬川の塩水遡上計算を行った。高瀬川の塩水遡上現象については、石川ら¹⁾、佐々木ら²⁾がモデル化している。ここでは石川らの方法によって小川原湖に到達する塩分量を算定した。このモデルの詳細は紙面の制約で省略するが、基本的な考え方は以下のとおりである。

河川の流量は、断面形が与えられている場合には、水深と水面勾配から定まる。しかし高瀬川の場合は、両端が湖水位と河口水位によって抑えられているため、水位変化は水深に比べてかなり小さく、河道断面積の時間変化は少ない。また河道距離は不変だから水面勾配を両端の水位差で表現できる。したがって、高瀬川流量を、湖と河口の水位差を唯一の変数として近似的に記述することができる。（他のファクターは定数となる。）一方、高瀬川の塩水遡上形態は概ね強混合であるため、現象を一次元的に記述することができる。¹⁾ 前述したように、小川原湖に達した塩水は、ある地点（プランジングポイント）で湖水の下に入るから、この地点に到達した塩分が小川原湖に流入したものと考えてよい。なお、プランジングポイントの位置とその近傍の流れについては長島ら³⁾がまとめている。

5-2. シミュレーション結果

図-15に1日ごとの塩水侵入量のシミュレーション結果を5年分示す。塩分侵入が生じやすい季節は、図-2で述べたように、初夏と冬であるが、各年ごとに流入量や流入時期が変化している。図-16は、30年間分のシミュレーション結果を月別に整理し、月ごとの平均流入量と最大値及び最小値をプロットしたものである。

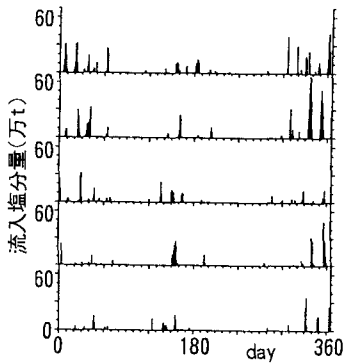


図-15 日単位の流入塩分量
(シミュレーション)

平均的には初夏と冬季の流入量が多いが、しかし変動の幅がきわめて大きいことがわかる。図-17には、年間の侵入塩分量の時系列を示しているが、年によって4倍程度の開きがみられる。

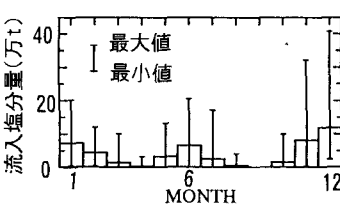


図-16 流入塩分量の季節性
(シミュレーション)

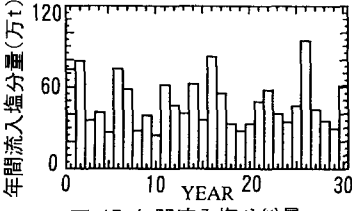


図-17 年間流入塩分総量
(シミュレーション)

5-3. 結果の妥当性のチェック

プランジングポイントが湖内にあるために、塩分侵入量を直接計測することは困難であり、上記の結果を

直接的に検証することはできない。そこで筆者の一人は、以前に、湖内に貯留されている塩分量の測定値の差し引きから特定期間の流入塩分量を推定しようとしたことがあるが¹⁾十分な精度で算定することはできなかった。この原因は、小川原湖内の塩分分布が場所的に様でなく、また内部セイシュによって時間的に変動するために、ふたつの時点の差を算定するには必ずしも十分な精度で観測できないためと考えられる。そこで本論文では、以下のような間接的な方法で、先のシミュレーション結果の妥当性をチェックする。

長期的に見れば、流入塩分量の累積値と流出塩分量の累積値はほぼ等しいはずである。流出塩分量は、小川原湖から下流に流出する水量と塩分濃度を乗じたものに等しい。高瀬橋観測点における塩分濃度の記録によれば、流出水の塩分濃度は湖表層の塩分濃度にほとんど等しい。(つまり表層の混合層の湖水が流出している。これは小川原湖の地形特性に原因している)この事実から、次のような塩分収支式が得られる。

$$\sum S = \sum (Q_{in} - Q_{ev}) C_{su} - \sum Q_{in} C_{in} \tag{3}$$

ここに $\sum$: 長期間累積、 S : 遡上塩分量、 Q_{in} : 上流からの流入量、 Q_{ev} : 湖面蒸発量、 C_{su} : 湖表層塩分濃度、 C_{in} : 流入河川水の塩分濃度。ここで、 C_{su} と C_{in} を近似的に一定値として変形すると、表層塩分濃度について次式を得る。

$$\bar{C}_{su} = \frac{\bar{S} + V_{in} \bar{C}_{in}}{V_{in} - V_{ev}} \tag{4}$$

ここに、 $\bar{S}$: 年間遡上塩分量の長期間平均値、 V_{in} : 年間河川流入量の長期間平均値、 V_{ev} : 年間湖面蒸発量の長期間平均値、 $\bar{C}_{su}$: 表層湖水塩分濃度の平均値、 $\bar{C}_{in}$: 河川流入水塩分濃度の長期間平均値である。 $\bar{S}$ は図-17の平均値で、48.2万 t / 年である。 V_{in} は建設省データにもとづき $6.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ とする。 V_{ev} は、日平均湖面蒸発量を1.5mm/日とすると、 $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年}$ となる。 $\bar{C}_{in}$ は、主要流入河川である七戸川での西田らの実測結果に基づき80ppmとする。以上から求められた $\bar{C}_{su}$ と、実測されている表層塩分濃度を比較した結果を図-18に示す。

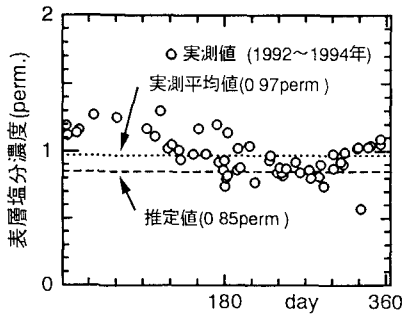


図-18 検証結果

6. おわりに

八戸港潮位データ、むつ小川原港波浪データ及び小川原湖水位データをもとに、AR式で河口潮位と湖水位の変動を表し、小川原湖への塩分侵入現象をシミュレートするモデルを作成した。このモデルを用いて長期間の塩分侵入量を推定したところ、以下の点が明らかになった。

- ① 海水侵入は平均的には初夏と冬季に集中する。これは天文潮位と湖水位の季節変動によると考えられる。
- ② しかし、平均的な季節性に比較して、月間侵入量の年ごとの偏差は3倍程度ある。また年間侵入量は、年ごとに4倍程の開きがある。従って、小川原湖の海水侵入現象はかなり確率的な現象であると言える。
- ③ シミュレーションから得られた平均年間塩分侵入量を用いて、現地観測から得られている湖表層の塩分濃度をほぼ説明できることから、本モデルは概ね妥当なものであると推測される。

【参考文献】

1) 石川忠晴 ほか: 小川原湖に侵入する塩分の計算モデルの検討, 水工学論文集, 第35巻, 1991, pp. 191-196.
 2) 板井雅之: 小川原湖の水理学的風景に関する基礎的研究, 東北大学工学研究科 修士論文, 1992.
 3) 長島伸介, 松本潤也, 石川忠晴, 西田修三: 小川原湖の塩水侵入挙動, 土木学会第48回年次学術講演会, 1993.
 4) 土木学会水理委員会: 水理公式集, 1993, pp. 511-512.
 5) 日野幹雄: スペクトル解析 朝倉書店, pp. 221
 6) 佐々木幹夫 ほか: 感潮狭水道における物質移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, 1991, pp. 201-205.