

風と塩水遡上の関連性に関する統計解析

Statistical analysis of relationship between wind and salt wedge intrusion

北見工業大学	○学生員	加藤 淳子 (Junko Kato)
北見工業大学	正 員	中山 恵介 (Keisuke Nakayama)
北海道開発局	正 員	崇田 徳彦 (Naruhiko Muneta)
北見工業大学	正 員	早川 博 (Hiroshi Hayakawa)

1. はじめに

北海道東部のオホーツク沿岸域に位置する網走湖およびオホーツク海に注ぐ網走川は、ヤマトシジミ、ワカサギ、シラウオなどの多くの水産資源に恵まれており産業の基盤を担っている。網走湖は約 7km の網走川によりオホーツク海と接続されており、潮汐によってオホーツク海の塩水が流入しているため、上部が淡水層、下部が塩水層の二層構造をした典型的な汽水湖である(図-1)。網走湖では富栄養化が進行しており、アオコの発生が確認されている。そのため、底層にヘドロ状の底泥が堆積し、二成層化による明確な密度界面の存在により、下層に貧酸素水塊が発生している。その結果、風による湧昇が与えられると、下層の貧酸素水塊が水表面に達する青潮現象を誘発し、数多くの水産資源が失われてしまう危険性がある。

青潮とは、湖面にある程度の風速が与えられると、水表面が風下側で上昇し、傾圧効果により密度界面が逆勾配となり風上側で上昇し、風上側での湧昇の効果が加わり、無酸素化した下層の水が水表面に達する現象である。そのため、湧昇による青潮現象の発生を抑制するためには、水表面から密度界面までの距離を十分に確保しておく必要がある。つまり、このような現象を改善していくには、塩水の流入を制御することが考えられ、網走湖における塩水遡上機構を解明する必要がある。

網走川の塩水遡上に関してこれまで多くの研究があり、潮汐や風の影響等による塩水侵入長に関する検討が行われている^{1),2)3),4),5)}。その中で、網走湖の塩水流入の主な原因は、網走湖とオホーツク海との潮位差であると考えられてきた。しかし、河口域の流れに対して影響を与えている外力を抽出すると、潮汐や風だけでなく、波によるエネルギーも重要な外力であると考えられ⁶⁾、風波が発生したときに radiation stress が生じ、塩水の侵入長が大きくなることが推測される。この風波のエネルギーを考慮した塩水遡上への影響効果に関する検討はほとんど存在しないが、最近、中山ら⁷⁾は radiation stress の発生を外力として 3 次元数値計算モデルを利用した塩水遡上への影響評価に取り組み、radiation stress を考慮したケースの方が塩水侵入長を増大させることを示している。

そこで本研究では、風波を発生させる風が塩水侵入に

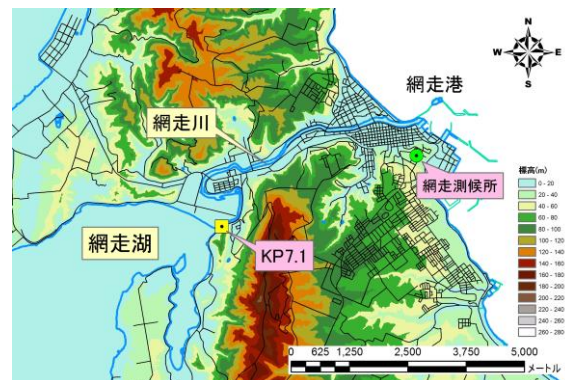


図-1：網走川(網走港から網走湖の区間)

どの程度影響を与えているかについて、網走湖への塩水流入量、湖水一潮位の水位差、風等の観測データを統計解析することによって風波の影響を抽出し、定性的に塩水侵入長への影響評価を行うことを目的とする。

2. 既存の浸入量推定式

これまでの研究から網走湖への塩水侵入量、いわゆる逆流流量 $Q(\text{m}^3/\text{day})$ と網走川 KP7.1 の湖口水位と潮位の水位差 $\Delta H(\text{m})$ との関係は図-2 の散布図に示すような線形関係にあることが報告されている⁵⁾。ここで解析に使用したデータは、網走開発建設部が 2005 年 9 月 1 日から 2008 年 3 月 31 日までに湖口 KP7.1 で実施した水位、流速等の流況観測モニタリングの観測値である。逆流流量 Q は流況観測モニタリング結果から、1 日の中での逆流流量を積算した 1 日当たりの積算流量である。また、湖口 KP7.1 の水位と網走港の潮位⁸⁾との水位差 ΔH は 1 日の中で最大となる水位差を与えた。水位差と逆流流量の塩水侵入量の推定式は図-2 から以下の直線回帰式で表される⁵⁾。

$$Q = 2.960 \times 10^6 * \Delta H \quad (1)$$

ここで、回帰式の相関係数は $R=0.729$ であり、水位差が大きくなるのに従い逆流流量のばらつきがやや大きくなる傾向を示している。このばらつきの原因は水位差の影響だけではなく、それ以外の要因の一つとして前述した風波の影響が考えられる。

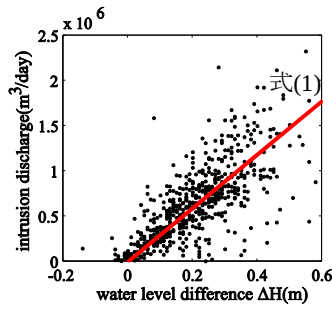
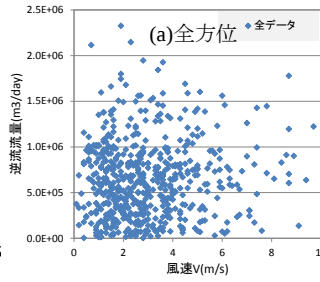
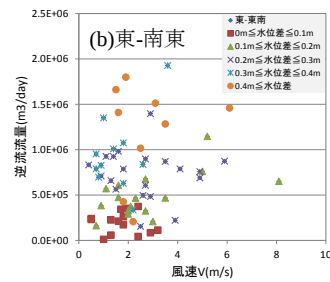


図-2：逆流流量 Q と水位差 ΔH の関係



(a)全方位



(b)東-南東

図-3：風速 V と逆流流量 Q の関係

3. 風による影響抽出

中山ら⁷⁾は3次元数値解析モデルにより網走川の風波による波の遡上が塩水遡上に影響することを指摘している。ここでは風と逆流流量との関係について観測データの統計解析により検討を行った。解析に用いた風のデータは、図-1に示す網走測候所において前述の水位差が最大となる時刻の観測値である。

逆流流量 Q (m³/day) と風速 V (m/s) の相関図を示すと、図-3(a)の全データによる相関係数は $R=0.110$ となり、ほとんど相関が見られなかった。図-1に示した網走港の防波堤は南東向きに開口部が開いているため、図-3(b)は東、東南東、南東の3方位のデータだけを抽出したが、同様に明確な相関は見られなかった。

式(1)の塩水侵入量推定式が、逆流流量と水位差の標準的な関係を表していると仮定すると、逆流流量の実測値 Q_{obs} と式(1)から得られる推定値 Q_{cal} との差である逆流流量の残差 ΔQ は、水位差以外に風波による波エネルギー等の影響を含んでいると考えられる。そこで、風速 V (m/s) と逆流流量の残差 ΔQ との相関を検討したが、図-4(a)の全データについては風速との相関は見られなかった。しかし、逆流流量 Q と同様に風向別に抽出してみると、図-4(b)の東南東の風向の場合、図に示すような二価性の傾向が現れた。

東南東の風向にこのような傾向が現れたのは、前述したように網走港の防波堤の開口部の向きが関係していると推測されるため、逆流流量 Q の場合と同様に、風向別4グループの相関図を作成した。その結果、図-4(c)において風速が4(m/s)以上の強い風の場合(A、B)と、風は弱い逆流流量の残差 ΔQ が大きい場合(C)の3種類の傾向が現れた。

A、B、C各々の範囲で水位差 ΔH と逆流流量の残差 ΔQ 、逆流流量の推定値 Q_{cal} と実測値 Q_{obs} についてその平均値を表-1にまとめた。その結果、水位差が小さく逆流流量の残差 ΔQ が大きいAは、風の影響を強く受けていることがわかる。また、BとCは水位差が同程度であるものの、Bは風の影響が逆流流量にそれほど関係していなかった。一方、Cは風が弱いにも関わらず残差が大きくなる傾向が見られた。

4. 主成分分析の適用

前章において、水位差 ΔH と逆流流量 Q との関係はあ

表-1：図-4(b)における範囲 A、B、C の水位差と逆流流量の実測値と推定値の関係

	水位差 ΔH (m)	残差 ΔQ (m³/day)	実測値 Q_{obs} (m³/day)	推定値 Q_{cal} (m³/day)
A	0.172	242,841	752,046	509,205
B	0.305	65,826	968,777	902,951
C	0.297	311,584	1,191,274	879,690

る程度把握することができたが、各データ個体を見たときに水位差や風の影響をどの程度受けているのかまだ明確にできていない。そこで本章では、水位差や風に影響される個体を区分するために、主成分分析^{9),10)}を適用した。主成分分析は、 p 個の変数(項目) $x_1, x_2, \dots, x_p$ のもつ情報を、次の二つの性質を満足する m 個の合成変数 y_1 (第1主成分), y_2 (第2主成分), $\dots, y_m$ (第 m 主成分) に要約する手法である。

- (1) y_i と y_j ($i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, m$) の相関係数は0である。
- (2) y_1 の分散は $(x_1, x_2, \dots, x_p)$ のあらゆる1次式の中で最大である。以下同様にして、 y_m の分散は $y_1, y_2, \dots, y_{m-1}$ のすべてと無相関な1次式の中で最大である。

ここで、 N 個のデータに基づいて計算した主成分を以下の式で表す。

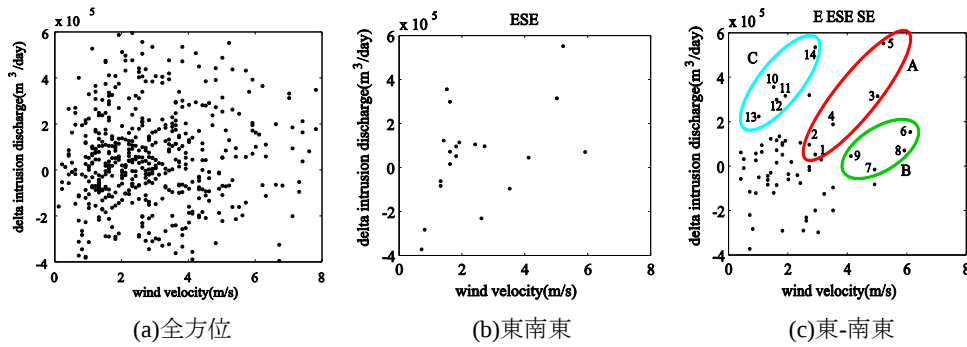
$$\left. \begin{aligned} y_1 &= h_{11}x_1 + h_{21}x_2 + \dots + h_{p1}x_p \\ y_2 &= h_{12}x_1 + h_{22}x_2 + \dots + h_{p2}x_p \\ &\dots\dots\dots \\ y_j &= h_{1j}x_1 + h_{2j}x_2 + \dots + h_{pj}x_p \\ &\dots\dots\dots \\ y_m &= h_{1m}x_1 + h_{2m}x_2 + \dots + h_{pm}x_p \quad (m \leq p) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

それぞれの主成分の平方和は

$$h_{1j}^2 + h_{2j}^2 + \dots + h_{pj}^2 = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

である。

第 j 主成分の分散を λ_j で表したとき、この λ_j を主成分分析では固有値と呼ぶ。また、主成分 y_j の係数列 $(h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{pj})$ は固有ベクトルと呼ぶ。固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ を全て加えたものは、変数 x_1 の分散、 x_2 の分散、 $\dots, x_p$ の分散の合計に等しい。これを総分散と呼び、主成分 y_j の分散 λ_j の総分散に対する割合を寄与率という。主成分 y_j の寄与率は次式で表される。

図-4：風速 V と逆流流量の残差 ΔQ の関係

$$y_j \text{の寄与率} = \frac{\lambda_j}{\text{総分散}} \quad (4)$$

第 m 主成分までの累積寄与率 C_m は式(4)から、

$$C_m = \sum_{j=1}^m y_j \text{の寄与率} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m}{\text{総分散}} \quad (5)$$

となる。

図-4(c)のA, B, Cの範囲のデータに対して主成分分析を適用した。今回使用した説明変数は、逆流流量の実測値 Q_{obs} 、風速 V 、水位差 ΔH の3変数で、観測データ数はA: 5点、B: 4点、C: 5点の計14点である。説明変数が3個のため固有値は3個となり、そのうち最も大きい固有値に対応する固有ベクトルと2番目に大きい固有値に対応する固有ベクトルの関係が図-5(a)である。また、各データ個体の第1主成分における座標(第1主成分得点)と第2主成分における座標(第2主成分得点)の関係図が図-5(b)である。分析結果の精度として累積寄与率 C_m が用いられるが、本分析では第2主成分までに $C_2 \approx 90\%$ を得ており、精度は良いと考える。

図-5(a)から、第1主成分の固有ベクトルの中で各個体に対して影響力が大きいのは逆流流量と水位差であり、この両者によって個体の相関関係が支配されていることが示されており、式(1)の高い相関関係が裏付けられている。また、第2主成分は第1主成分に直交する成分であり、式(1)が第1主成分を表すものと考え、第2主成分は式(1)のまわりでのデータのばらつき成分に相当し、第2主成分の固有ベクトルは風速の係数が大きく、ばらつきの要因として風速が支配的であるとわかる。

各データ個体の主成分得点を横軸に第1主成分、縦軸に第2主成分としてプロットした図-5(b)に示す番号は、A: 1～5、B: 6～9、C: 10～14であり、図-4(c)の図中の番号に対応している。図-5(a)と対比させると、図-5(b)においてAとBの番号が第1、第2主成分得点が負値の範囲に集まっている。これは図-5(a)では風速がその位置にあり、これらの番号の個体は風速の影響を強く受けていることを意味する。実際に、図-4(c)を見るとNo.3, 5, 6, 7, 8は風速が大きいデータで、それを証明する結果となった。また、No.2, 4, 9は第1、第2主成分得点が0付近にあり水位差、風速の影響をあまり受けない個体、No.1については除外した方がよいデータであると考えられる。

次に、図-4(c)のA, B, Cのデータを含む東、東南東、南東

のデータについて同様の主成分分析を行った。図-6(a)が主成分係数、図-6(b)が主成分得点の第1、第2主成分の対応図である。A, B, Cだけの場合と同じく、第1主成分は逆流流量と水位差、第2主成分は風速が支配的であり、両図を対比させて、水位差、風速が支配的なデータに分類できそうである。

以上のことから、主成分分析を行うことにより観測データの中で逆流流量に関係が強い水位差の個体、風速の影響が大きい個体、というように分類わけを行うことができた。これは図-4(c)で得られた結果を理論的に裏付けている。

5. 重回帰分析による塩水浸入長の推定

前章では主成分分析によってデータ個体の分類わけが可能であることを示したが、ここではその分類わけされたデータを用いて重回帰分析を行い、逆流流量に水位差、風の有無がどの程度影響するかを検討した。重回帰分析とは複数の説明変数からある目的変数の予測を行う手法^{(10),(11)}で、本研究では逆流流量 Q を目的変数、水位差 ΔH と風速 V を説明変数として分析を行った。

まず、図-4(c)のA, B, Cの全データ14個は、図-7のように逆流流量 Q と水位差 ΔH の関係を示す推定式、式(1)の上側にプロットされ、水位差、風の影響で逆流流量 Q が大きいデータである。これらのデータに対して、説明変数に風速 V を含めた場合の重回帰式は

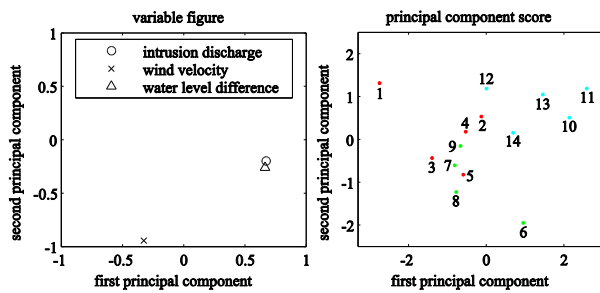
$$Q = 3.573 \times 10^6 \Delta H + 1.159 \times 10^4 V \quad (6)$$

となり、決定係数 R^2 が $R^2 = 0.828$ と良好な推定結果を得ている。次に、A, Bのデータは前述のとおり風速の影響を強く受けている個体なので、A, Bのデータを対象に重回帰分析を行った。その結果、説明変数に風速 V を含めた場合の重回帰式は

$$Q = 3.302 \times 10^6 \Delta H + 2.056 \times 10^4 V \quad (7)$$

となり、決定係数 R^2 が $R^2 = 0.660$ と小さくなった。風の影響を強く受けるA, Bのデータの場合、重回帰式の第2項、風の係数は式(7)の方が大きくなるものの、決定係数 R^2 は逆に悪くなることがわかる。ただし、式(1)の決定係数は $R^2 = 0.531$ であるので、データ選択によって回帰式の適合度が改善されることがわかる。

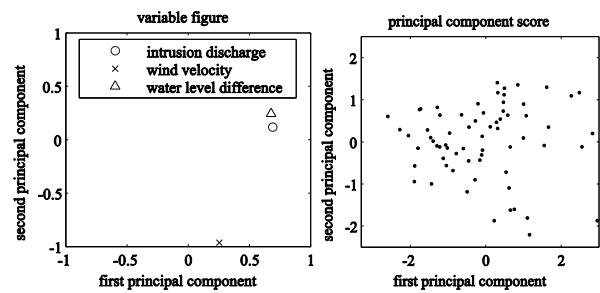
最後に、データの選別を行わずに全ての観測データを対象に式(6)の重回帰式を適用すると、決定係数が $R^2 = 0.359$ と悪くなり、主成分分析等によるデータ選択の必要性を示



(a)主成分係数

(b)主成分得点

図-5：主成分分析結果（A,B,C のデータ）



(a)主成分係数

(b)主成分得点

図-6：主成分分析結果（東-南東の場合）

唆している。主成分分析は複数の変数を合成して元の変数を減らし、少数の総合指数に集約するために利用される。前章の結果から、第1主成分が逆流流量と水位差に集約されており、式(7)のように風速の影響を受けているデータだけを選択しても、重回帰式の決定係数はあまり良くない。したがって、今後、風以外に波浪データを取り入れて検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

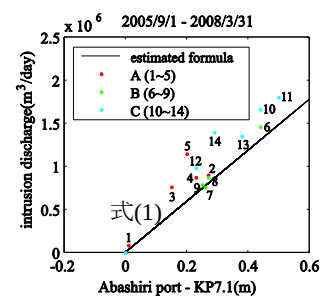
本研究では、風波による塩水遡上に関する研究を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 風の影響抽出を行った結果、水位差 ΔH が小さく逆流流量の残差 ΔQ が大きい観測データは、風の影響が卓越する傾向にあることがわかった。特に風の影響が卓越するためには3~4(m/s)以上の強い風が必要である。また、風が弱い場合に水位差 ΔH が比較的大きく逆流流量の残差 ΔQ も大きくなるがあった。その要因として、今回検討していない沖波の波向きが考えられる。
- 2) 主成分分析を適用した結果、観測データ個体毎の持つ性質を把握し、風速 V 、逆流流量 Q 、水位差 ΔH の影響に分類分けをすることができた。
- 3) 主成分分析により水位差、風の影響を強く受けるデータを抽出して重回帰分析を行った結果、データ選択をしない場合より重回帰式の適合度を向上させることができた。

網走港は潮位のみで波浪観測が実施されていないため、今後は近隣の紋別南の波浪観測データから網走港での波向きを推定し、同様に解析を進める必要がある。

参考文献

- 1) 栗島知哉，高橋克人，宮島滋近，平野道夫，山田正：塩淡水二成層を形成している網走湖の塩水の流出入に関する研究，水工学論文集，第37巻，pp.305-312，1993。
- 2) 池永均，大東淳一，三沢大輔，内島邦秀，檜山和男，山田正：網走川における塩水遡上特性と塩水楔の形態

図-7：逆流流量 Q と水位差 ΔH の関係（A,B,C）

変化に関する研究，水工学論文集，第42巻，pp.775-780，1998。

- 3) 池永均，向山公人，大島伸介，山田正：塩淡水二成層を形成する汽水湖沼の長期的な界面変動予測手法の開発，土木学会論文集，No.628/II-48，pp.77-96，1999。
- 4) 吉川泰弘，安田浩保，渡邊康玄：網走川における透過性構造物の塩水遡上への影響，土木学会河川技術論文集，Vol.13，pp.7-12，2007。
- 5) 網走湖水環境改善施策検討委員会：網走湖水環境改善施策検討最終報告書，2010。
- 6) K. Nakayama, T. Shintani, T. Kakinuma, Y. Maruya, Y. Yonome, Y. Yonemoto and I. Nakauchi: Influence of Stokes Drift on Salt Wedge Intrusion Evaluated using Full-Nonlinear and Strongly-Dispersive Wave Equations, Proc. of 32nd Conference on Coastal Eng., current.34, ICCE, 2010。
- 7) 中山恵介，丸谷靖幸，新谷哲也，柿沼太郎，中内勲，米元光明：塩水遡上へ与えるストークスドリフトの影響評価，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.326-330，2010。
- 8) 気象庁 HP：気象統計情報・潮位表，<http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/suisan/index.php>(2011/09/30)。
- 9) 杉山高一：多変量データ解析入門，朝倉書店，1996。
- 10) 柳井晴夫：多変量データ解析法，朝倉書店，1998。
- 11) 朝野熙彦：入門多変量解析の実例，講談社サイエンスフィク，2000。