

潮汐を考慮した塩水層の破壊に関する研究

中央大学大学院 学生員 大東淳一 中央大学理工学部 正 員 池永均, 山田正
北見工業大学 正 員 内島邦秀 東京都水道局 正 員 向山公人

1. はじめに 塩水遡上時の界面破壊に関する研究はこれまでに数多くなされている¹⁾。しかしそのほとんどはせん断流（例えば、須賀他²⁾(1982)）や吹送流（例えば、吉田他³⁾(1993)）を対象とした実験的研究が主であり、実河川を対象とし潮汐の影響をも考慮した界面破壊に関する研究はほとんどなされていない。著者らはこれまでに潮汐を考慮した塩水遡上の解析を行い、計算条件によって塩水遡上時に全断面逆流となり、かつ水面付近の流速が河床付近の流速より大きくなることから、密度分布が鉛直方向に逆勾配となる不安定現象が形成される場合があることを見出している⁴⁾。このことは潮汐の影響が、時として塩水遡上時の界面の不安定現象の本質的要因となりうる可能性を示唆している。そこで本研究は潮汐の影響による界面破壊のメカニズムを解明することを目的として、塩水層が潮汐により水面付近の流速が河床付近の流速より大きくなることから上層の密度の鉛直分布が不安定な逆勾配となるために破壊され、緩混合型あるいは強混合型へと変わる破壊条件を提案し、著者らが北海道東部に位置する網走湖、網走川で行った観測の結果⁵⁾と比較検討をした。

2. 潮汐による塩水層の破壊条件式の導出 著者らはこれまでに、網走湖、網走川における15回の大規模観測と3次元数値解析により塩水遡上形態に関する研究を進めている。図-1は海域・河道域・湖を計算領域とした3次元数値解析の結果で河道内の密度の鉛直分布である。図-1(a)は初期条件であり、塩水楔を河口付近に与えている。図-1(b)より $t=4$ 分の時には、塩水は乱れを受けて緩混合型となる。図-1(c)より $t=12$ 分の時塩水層は潮汐により不安定な密度勾配をとっている。以上のように塩水の遡上形態は塩水が遡上する際の乱れあるいは混合の強弱によって決まるが、その要因としては潮汐、河川の順流方向流量、河床形状、風の影響など様々考えられる。本研究ではそのうち潮汐のみに着目し解析した。図-2は本解析の模式図である。図-2(a)に示す全水深 h が一般的な河道域において、底面摩擦がゼロならば流れは鉛直方向に一樣となり、断面平均流速 u_m は長波の波速 c を用いて表-1(1)式のように表せる。 η は水面の変位量である。しかし実際の流れは河床で底面摩擦の影響を受け、流速の鉛直分布は対数分布則をとることが多い。本解析においては計算の容易性のため、流速の鉛



t=0分 密度の初期条件は塩水楔

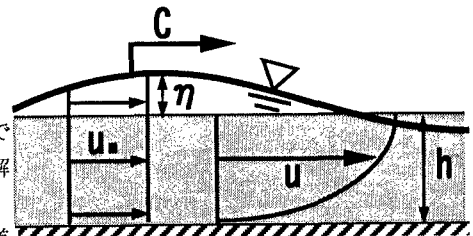


t=4分 上層の塩水が乱れを受けている



t=12分 密度分布が不安定な逆勾配

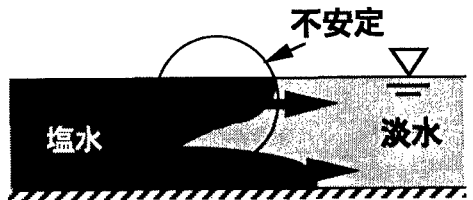
図-1 3次元数値解析結果（密度コンター図）
潮汐の周期1時間、振幅45cm



(a) 河道内縦断方向の流速分布図



(b) 塩水層の侵入速度図



(c) 塩水層の不安定層形成概念図

図-2 塩水層の破壊に関する模式図

キーワード：塩水楔、塩水侵入、界面破壊、数値解析

連絡先：〒112 東京都文京区春日1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 Tel. 03(3817)1805

直分布を図-2(a)の u に示すような放物線と与えると、表-1(3)式のような河道域における流速の鉛直分布を得る。また図-2(b)のような全水深 h 、上層の淡水層厚 h_1 、下層の塩水層厚 h_2 の河道域において、下層の塩水層の流速が表-1(4)式に示す内部波の波速 C_i に等しいとする。ここで、潮汐の影響により上層の流速が下層の流速よりも速い場合が考えられるが、このとき図-2(c)に見られるような、上層の密度分布は不安定な逆勾配となるために塩水層が破壊すると考えると表-1(3)、(4)、(5)式より(6)式が得られる。よって表-1(7)式が潮汐による塩水層の破壊条件式である。

3. 解析結果 図-3における曲線は表-1(7)式の解析結果、各点は上げ潮時に網走川を遡上した塩水楔の観測値 h_1 、 h_2 、 η を(7)式の塩水層の破壊条件式に当てはめた結果である。塩水層の破壊条件式の解析結果は、曲線の上側が $u > C_i$ となる不安定領域であり、塩水層が潮汐によって破壊される条件を表している。また曲線の下側が $u < C_i$ となる安定領域であり、塩水層は破壊されることがなくそのままの形態で進行することができる条件を表している。すなわち塩水楔の観測値が曲線の下側にくれば塩水層の破壊条件式を満たすことになる。さらに曲線は、全水深に対して塩水層厚の割合が大きいほど塩水層は破壊しやすく不安定状態であることを意味している。実際の観測の際も全水深に対して塩水層厚の割合が大きいとき緩混合型で塩水が遡上することが多かった。また下層の流速がほとんどなく水深に対して塩水層厚の割合が小さいとき、塩水楔が数時間同じ場所に破壊されずにとどまる場合もあった。観測値を破壊条件式に当てはめた結果は各観測地点ごとに注目するといずれも右上がりに点が分布しているのがわかる。これは上げ潮時には時間の経過と共に η 、 h_2 が増加するためである。解析の結果と比較すると、表-1(7)式の塩水層の破壊条件式をよく満たした。

4. まとめ 本研究において著者らは、潮汐による塩水層の破壊の条件を提案し、解析を行い以下の結果を得た。1)河道域の全水深に対して下層の塩水層厚の割合が大きいほど塩水層は破壊されやすい状態である結果が得られた。2)網走川における観測において、塩水は遡上の際、塩水層厚が大きいとき水面変位量が大きく、不安定な遡上形態であることが多かった。

その観測値を塩水層の破壊条件式に当てはめてみると、両者はよく一致する結果が得られた。

＜参考文献＞ 1) The 4th International Symposium on STRATIFIED FLOWS(Grenoble, 1994) 2)須賀堯三・高橋晃：塩水楔の先端渦による混合，第26回水理講演会論文集，pp. 495-500，1982。 3)吉田静男・大谷守正・田代徹雄・西田修三・八木史郎：河口二層流の表層塩分に与える風の効果，水工学論文集，第37巻，pp. 299-304，1993。 4)池永均・山田正・内島邦秀・笠井雅広・向山公人・大東淳一：塩水遡上の3次元数値解析と潮汐を考慮した塩水楔の破壊に関する研究，水工学論文集，第41巻，pp. 509-514，1997。 5)桑島知哉・平野道夫・宮島滋近・山田正：北海道網走湖への海水流入に関する現地観測，水文・水資源学会1993年研究発表会要旨集，pp. 128-129，1993。 5)宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，1993。

表-1 塩水層の破壊条件式

$$\begin{aligned}
 u &= \pm \frac{c}{h} \eta \quad (1) \\
 f\left(\frac{z}{h}\right) &= \left(\frac{z}{h}\right)\left(2 - \frac{z}{h}\right) \quad (2) \\
 u &= u_m \left(\frac{z}{h}\right)\left(2 - \frac{z}{h}\right) \quad (3) \\
 u_m &= c \frac{\eta}{h}, \quad c = \sqrt{gh} \\
 C_i &= \sqrt{eg \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}} \quad (4) \\
 u &> C_i \quad (5) \\
 \frac{\eta}{h} \sqrt{gh} \left(\frac{h_2}{h}\right)\left(2 - \frac{h_2}{h}\right) &> \sqrt{eg \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}} \quad (6) \\
 \frac{\eta}{h} &> \frac{\sqrt{eg \left(\frac{h-h_2}{h}\right)\left(\frac{h_2}{h}\right)}}{\left(\frac{h_2}{h}\right)\left(2 - \frac{h_2}{h}\right)} \quad (7)
 \end{aligned}$$

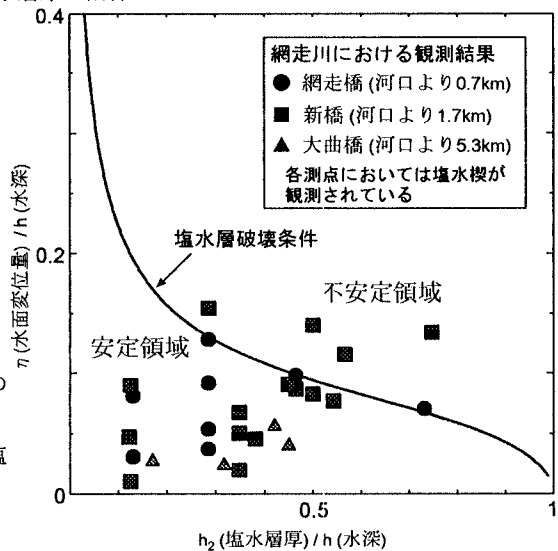


図-3 潮汐による塩水層の破壊条件の解析結果と網走川における観測結果