

網走川における塩水遡上特性と 塩水楔の形態変化に関する研究

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF SALINITY INTRUSION
AND CHANGE OF SALT WEDGE IN ABASHIRI RIVER

池永 均¹・大東淳一²・三沢大輔³・内島邦秀⁴・檜山和男⁵・山田 正⁶

Hitoshi IKENAGA, Junichi OHTSUKA, Daisuke MISAWA,
Kunihide UCHIJIMA, Kazuo KASHIYAMA, Tadashi YAMADA

¹正会員 工修 中央大学技術員 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

²学生員 中央大学大学院 理工学研究所土木工学専攻 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

³学生員 中央大学大学院 理工学研究所土木工学専攻 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

⁴正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090 北海道北見市公園町165)

⁵正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

⁶正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

This paper deals with the characteristics of the salinity intrusion in Abashiri River, which located in the northeast of Hokkaido Island. we found that the chief factors influencing mechanical properties of salinity intrusion is tidal current and the river profile in Abashiri River.

The present authors had already proposed the changing condition of mixing pattern of salt wedge under the influence of tidal current. By using these concept, it is possible to evaluate the change of the mixing pattern with salinity intrusion under the influences of the disturbance due to wind on the surface of the water and the river profile could be negligible in Abashiri River. However, we found that the salt wedge was completely broken down without the influence of tidal current at the 4km point(Kagamibasi-bridge) away from mouth of river, where a large projection exists on the bed. Hence it is necessary to apply the modified changing condition.

Key Words : salt wedge, tidal current, stratified flow, tidal river, Abashiri River

1. はじめに

河道内に侵入する塩水層の破壊は、せん断不安定による界面波の破碎や界面上に発生する組織渦に起因する塩水と淡水の混合の末に生ずることが知られている。このような解釈に立脚した成層破壊に関する理論・実験的研究は数多く^{1)~3)}、そのメカニズムや破壊時の挙動が詳細に検証されつつある。しかしながら、著者らが長年携わってきた網走川では、塩水遡上時に楔から強混合へと遷移する際に、これとは別の機構が支配的であることが、最近の現地調査によりわかってきた。網走川感潮域は、河口からおよそ7kmの河道区間であり、大潮時には潮汐波による流れが卓越する水域である。このような河川では、河道内に侵入する潮汐流の影響が卓越し、次に述べるような塩水楔の形態変化が起り得るものと考えられる。河道に侵入する海水の流動は、①密度差に基づき下層を楔状に遡上する成分(lock exchange

flow)と、②潮位変動に起因する流れ(潮汐流)成分に大別できる。密度差の影響が卓越する場合(例えば、下げ潮から上げ潮への移行期)には、海水は塩水楔の形態で遡上(即ち、下層から侵入する)するが、潮汐流の影響が増大する場合(例えば、大潮時)には、これにより外海から塩水が輸送され、結果的に弱混合から強混合へと遷移する。ところで、このタイプの形態変化は、他の感潮河川、沿岸、汽水湖沼などでも起り得る現象であるが、そのメカニズムの存在が認識されなかった理由として、次のような事項が考えられる。潮汐流により塩水楔の形態変化が生じるには、①塩水の供給源(外海)と、②そこから塩水を水平方向に輸送するだけのエネルギーを有する潮汐流の存在が前提条件となる。このような条件を満たす水域は河口付近の一部に限られる場合がほとんどであるため、一般に塩水の遡上距離が問題となりやすい河川工学の分野では、副次的な意味しか持たなかったものと考えられる。

著者らは、既にこのような考えに基づく塩水楔の形態変化条件⁴⁾を提案しており、実測結果との比較検証を行っている。また、外海～河道～湖沼から成る一連の連結性水域を対象に行った、準3次元の数値実験においてもこれと同様な形態変化が起こり得ることを示している。従って、大枠では、この理論の妥当性について確認している。しかしながら、その後研究を進めるうちにこの条件のみでは説明できない塩水楔の形態変化が生起することがわかってきた。特に、河床形状の急変部では、その影響により局所的に塩水楔から強混合へと遷移する場合があります。理論の修正を余儀なくされている。このような現状に鑑み、本研究は、網走川の感潮域で行った現地観測結果に基づき、大潮時における同河川の塩水遡上特性を明らかにするとともに、塩水楔の形態変化の機構について基礎的に考察するものである。

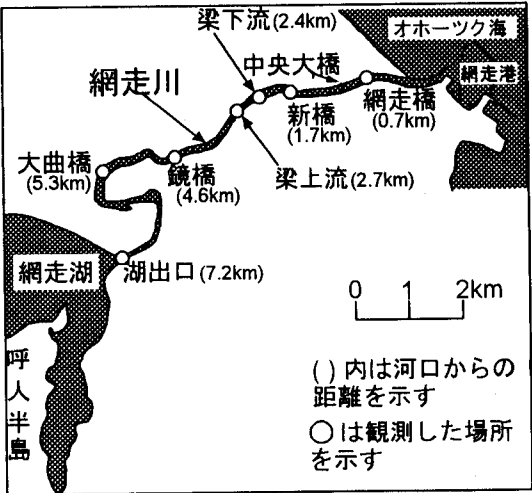


図-1 網走川の概要

2. 網走川の概要

網走川は、阿寒山系に源を発し、幹線流路延長が約115kmの一級河川である。河口から約7km上流には、湖面積約31.4km²、平均水深6.1m（最大水深16.1m）を有する天然の汽水湖沼（網走湖）が存在する。網走湖は、海水の逆流によりかなり塩水化の進行した湖であり、そのことがアオコや青潮の発生など水質環境に著しい悪化をもたらす要因ともなっている。従って、湖水の浄化を考えるうえで、網走川の塩水遡上や湖内への塩水流入特性を明らかにすることは重要である。網走川は、度重なる河道改修により、河道全域の通水能力が向上した。なかでも1928～1931年に周辺住民の手により自発的に行われた河口付近の大規模な改修工事は、皮肉にも湖への海水流入を促進する要因の1つとなった。これまでの研究により、網走川における塩水の遡上特性は、潮汐、河川流量、河床形状などの条件の違いによって複雑に変化し、その形態についても強・緩・弱混合と変わり得ることが明らかにされている⁵⁾。

3. 現地観測の概要

著者らは、網走川に架かる主要な4つの橋梁部（網走橋、新橋、鏡橋、大曲橋）、梁（新橋と鏡橋の間地点）の上・下流部、および網走湖出口の計7ヶ所（何れの地点も河道の最深部）において定点連続観測と小型の船外機船を用いた船上移動観測を行い、大潮時の海水の遡上特性について明らかにした（図-1参照）。定点観測では、塩分濃度、溶存酸素量、水温、流速の各鉛直分布の時系列（10分～1時間間隔で48時間の連続観測）を、また船上からの移動観測では、これらの項目に加え魚群探知機（超音波）を用いて

表-1 網走川における現地観測概要

観測年月日 (大潮)	網走湖	網走川(河口からの距離: km)						測定項目	測定機器
		網走橋 1.0	新橋 1.7	梁下流 2.4	梁上流 2.7	鏡橋 3.8	大曲橋 5.3		
1992年 8月 11日	●	●	●				●	水温 (°C)	水温計(セントラル科学)
1992年 10月 18日	●	●	●				●	溶存酸素量 (mg/l)	溶存酸素量計 (セントラル科学)
1993年 3月 16日	●	●					●	塩分濃度 (%)	導電率計 (セントラル科学)
1993年 5月 11日	●							水位 (m)	NP 型水位計 (測機舎)
1993年 11月 16日	●		●				●	流速 (m/s)	プライス式流速計 (玉屋商店)
1994年 4月 28～30日	●						●		電磁流速計 (アレック電子、日本ハイコン)
1994年 8月 6～8日	●	●	●	●	●	●	●		A.D.C.P. 1200、2400kHz (RD社)
1995年 2月 28日	●		●				●		魚群探知機 [超音波] (本多電子)
1995年 5月 1～3日	●		●				●		
1995年 8月 24～26日	●		●				●		
1995年 11月 28～30日	●		●				●		
1996年 3月 8日	●								
1996年 4月 18～20日	●		●				●		
1996年 8月 27～29日	●		●				●		
1997年 2月 7～9日	●		●				●		
1997年 4月 21～28日	●		●				●		

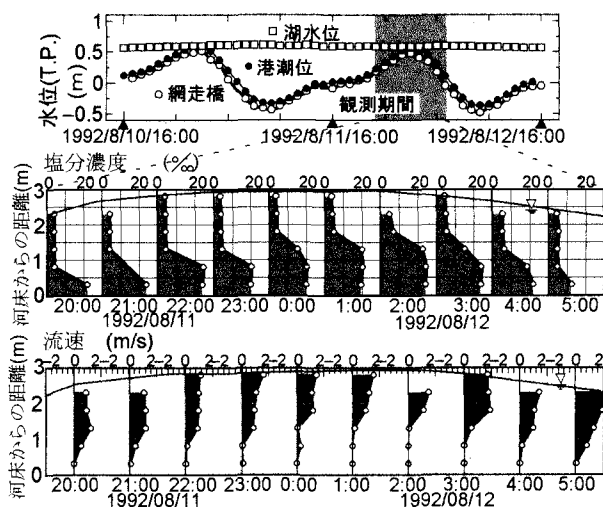


図-2(a) 塩水遡上時の網走橋（河口から1.0km）における塩分濃度、流速の鉛直分布
1992/8/11 20:00～12 5:00

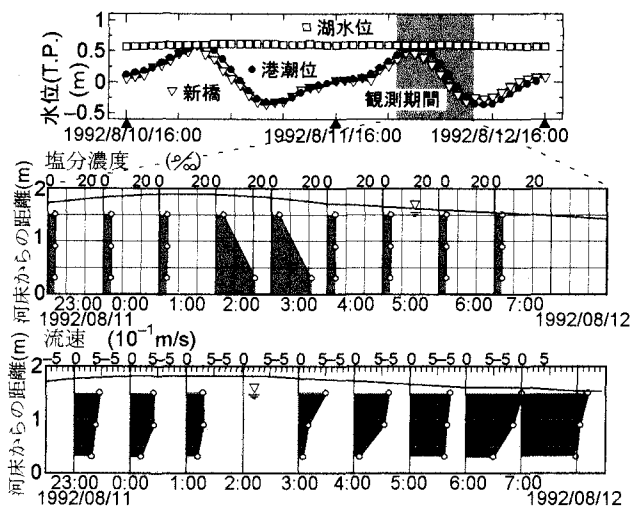


図-2(b) 塩水遡上時の新橋（河口から1.7km）における塩分濃度、流速の鉛直分布
1992/8/11 23:00～12 7:00

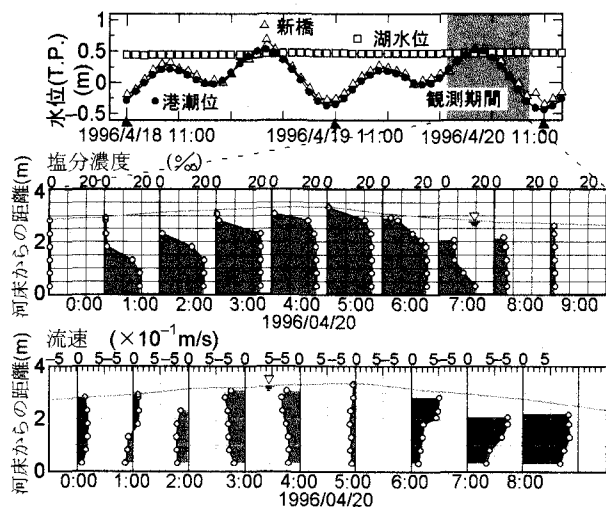


図-2(c) 塩水遡上時の新橋（河口から1.7km）における塩分濃度、流速の鉛直分布
1996/4/20 0:00～8:00

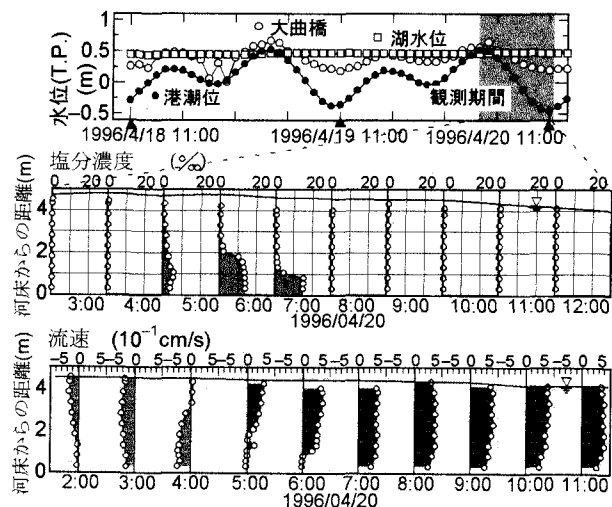


図-2(d) 塩水遡上時の大曲橋（河口から5.3km）における塩分濃度、流速の鉛直分布
1996/4/20 2:00～11:00

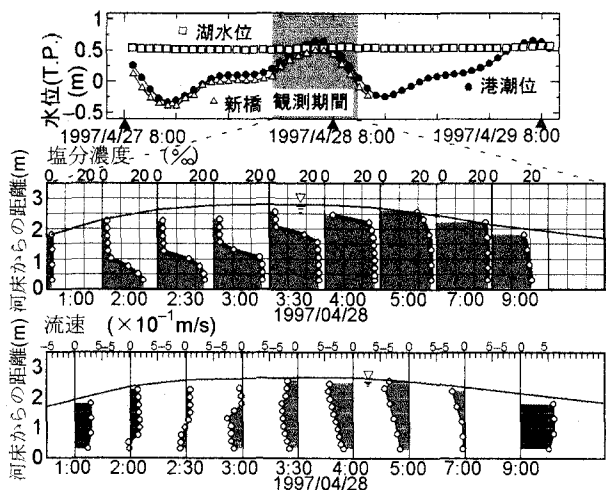


図-2(e) 塩水遡上時の新橋（河口から1.7km）における塩分濃度、流速の鉛直分布
1997/4/28 1:00～9:00

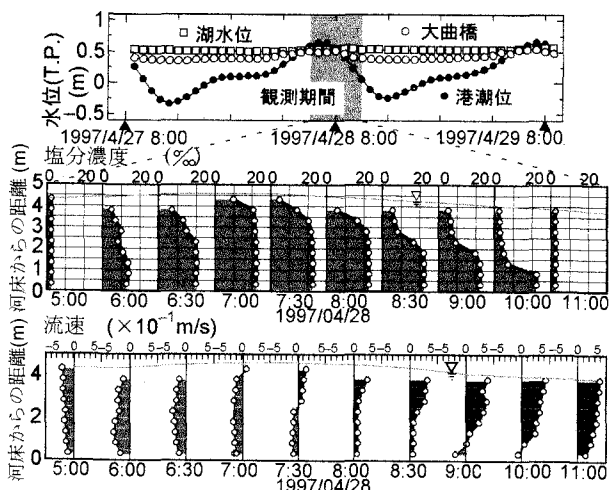


図-2(f) 塩水遡上時の大曲橋（河口から5.3km）における塩分濃度、流速の鉛直分布
1997/4/28 5:00～11:00

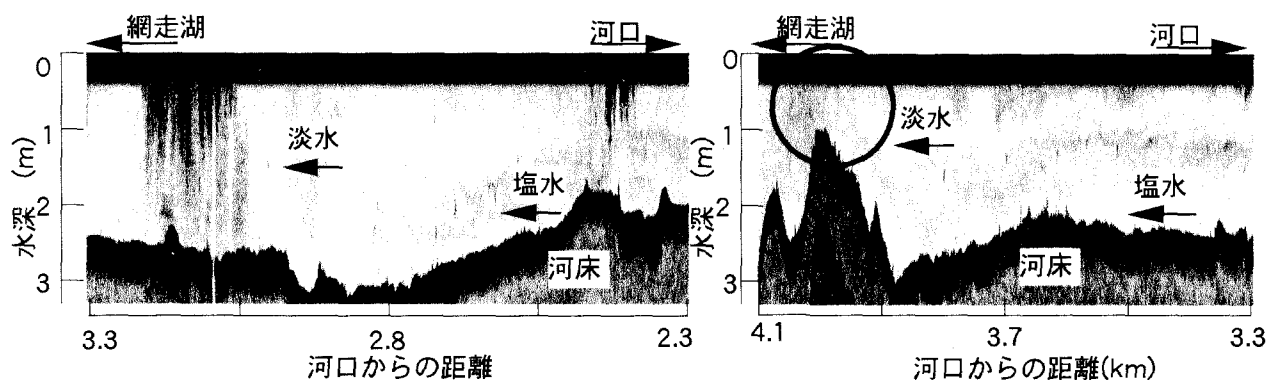


図-3(a) 網走川（河口から2.3km～3.3km）における 超音波による観測結果（移動観測）
1997/4/27 3:31～3:47

図-3(b) 網走川（河口から3.3～4.1km）における 超音波による観測結果（移動観測）
1997/4/27 4:26～4:35

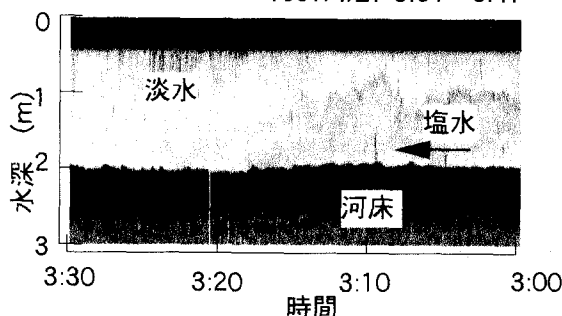


図-3(c) 網走川（河口から2.3km）における 超音波による観測結果（定点観測）
1997/4/27 3:00～3:30

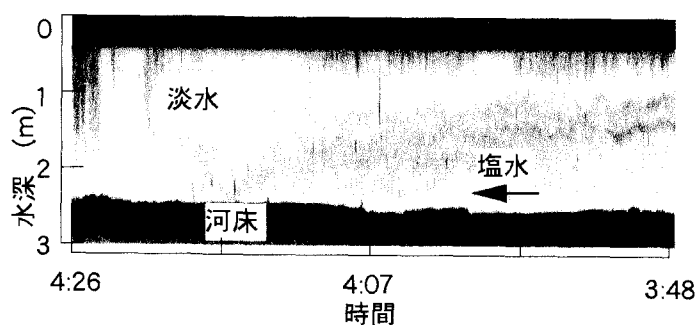


図-3(d) 網走川（河口から3.3km）における 超音波による観測結果（移動観測）
1997/4/27 3:48～4:26

密度界面の挙動について計測を行った。表-1は観測概要を示したものである。

4. 観測結果と考察

(1) 塩水遡上特性

図-2はそれぞれ1992年（(a), (b)）、1996年（(c), (d)）、および1997年（(e), (f)）の3回の観測から得られた各観測地点における水位、塩分濃度、および流速分布の時系列変化を示したものである。何れの観測も大潮時に行われたものであるが、外海の潮位と網走湖の水位との差（以下水位差（ ΔH ）と呼称する）がそれぞれ異なっている。水位差は、1992年では小さく（2～3cm）、1997年では大きい（20cm）。また1996年ではその中間の値（10～16cm）を示している。これより、塩水の遡上形態や遡上距離が水位差（ ΔH ）の違いによって次に述べるような変化を示すことがわかった。（a）、（b）は、塩水遡上時に水位差（ ΔH ）が小さく、潮汐流に比べ河川流の影響が大きい場合である。このとき網走橋、新橋ともに弱混合の形態で遡上する様子が確認できる（なお、このときは、塩水が大曲橋まで到達しなかった）。これに対し、潮汐流の影響が大きい場合（(e)、(f)）は、遡上時間の経過に伴い河口に近い新橋地点において楔から強混合へと移行している。しかしながら、河口から離れ、潮汐流の影響が小さくなる地点（大曲橋）では、当初から強混合の形態で遡上している。なお、同じ強混合の形態でも、新橋地点では塩分濃

度が25～28%（網走港の塩分濃度に相当する）であるのに対し、大曲橋地点では13～20%と全体的に低い値を示している。従って、潮汐の影響の卓越する新橋地点（河口から1.7km）と、そうでない大曲橋地点（河口から5.3km）では、塩水楔から強混合へと遷移する際に、明らかに淡水層への塩分の輸送形態に違いが現れている。即ち、前者では、潮汐流による外海からの大規模な塩分輸送により塩水楔の形態変化が生じるのに対し、後者では、微視的な界面破壊（せん断不安定による界面波の破碎や組織渦）、あるいは風、地形形状による乱れの影響によって下層から上層へと塩分輸送が行われる。因みに、（c）、（d）は、水位差（ ΔH ）が（a）、（b）と（e）、（f）の中間の値を示すときの挙動であり、新橋地点では弱混合から強混合へと遷移する直前で上げ潮から下げ潮に移行している。なお、海水の遡上距離は、水位差（ ΔH ）が大きい程長くなり、それが16cm以上のときに河口から7km上流に位置する湖に海水が到達することや、強混合で遡上するよりも塩水楔の方が遡上速度が速いことがわかっている。楔で遡上する際の流速分布を見ると界面を境に上層（上流から下流方向）と下層（下流から上流方向）で流向が異なっているが、緩、強混合へと遷移する場合は、全水深にわたり下流から上流への流れに移行している。図-3は、新橋、鏡橋地点を楔の形態で遡上する塩水の動態を魚群探知機（超音波）により可視化したものである。（a）、（b）は下流から上流方向（楔の侵入方向と同じ方向）に船を移動しながら観測した塩水楔の先端部の映像であり、（c）、（d）は河口から2.3km、3.3kmの地点に

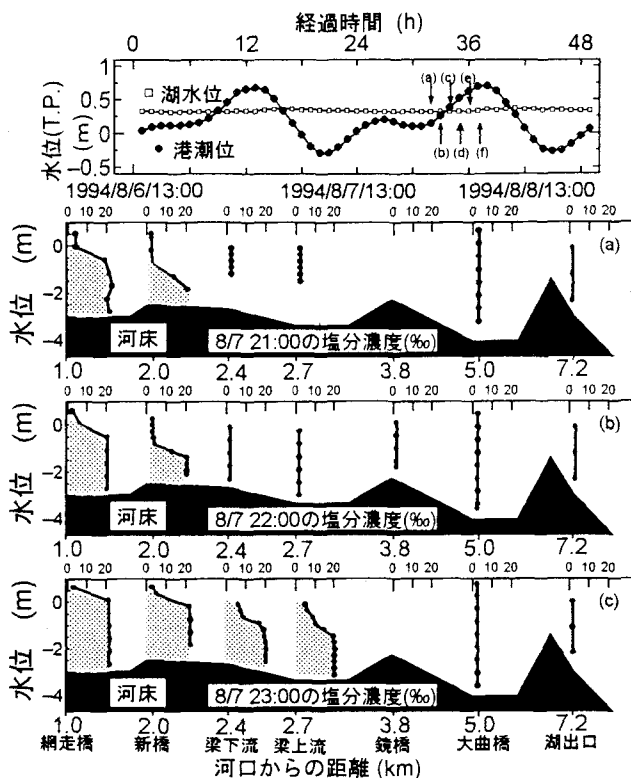


図-4は時間の経過とともに楔長が短くなっている（塩水楔から強混合に遷移する）ことを示している。

図3、4は107kHzの超音波を使用して界面の挙動を可視化したものである。新橋を通過した塩水楔が鏡橋に到達した時点で強混合の形態に変化している。

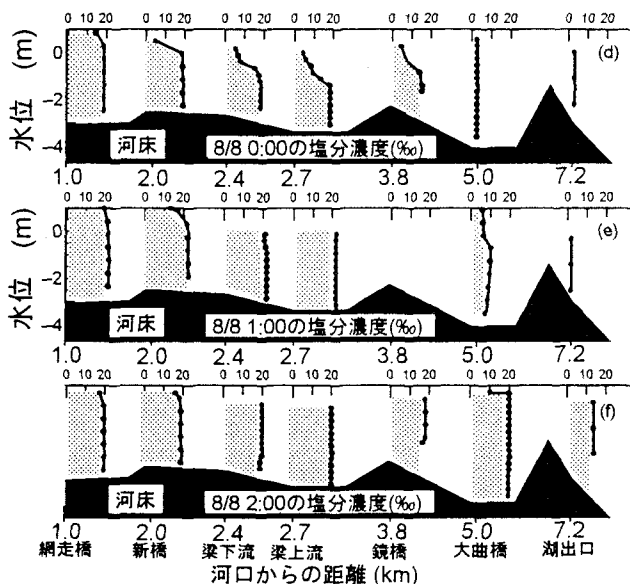


図 - 4 塩水遡上時の各地点における塩分濃度分布の時間変化 1994/8/7 21:00～8 2:00

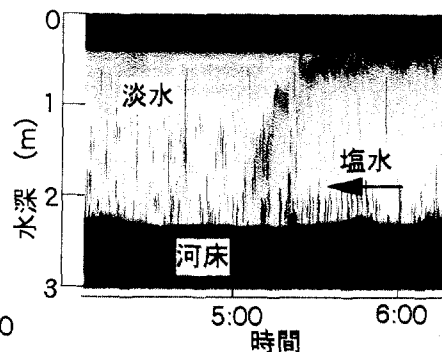
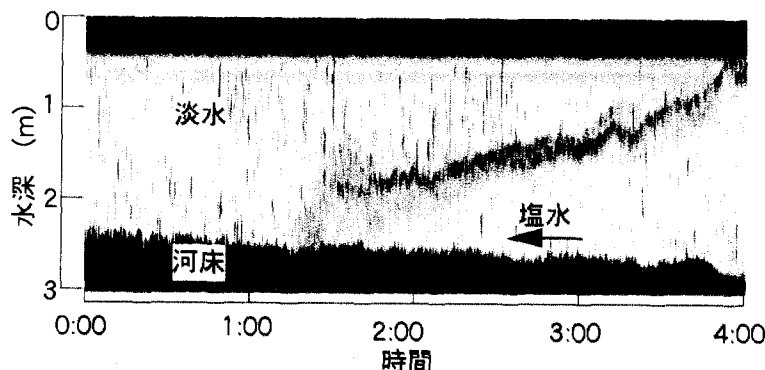


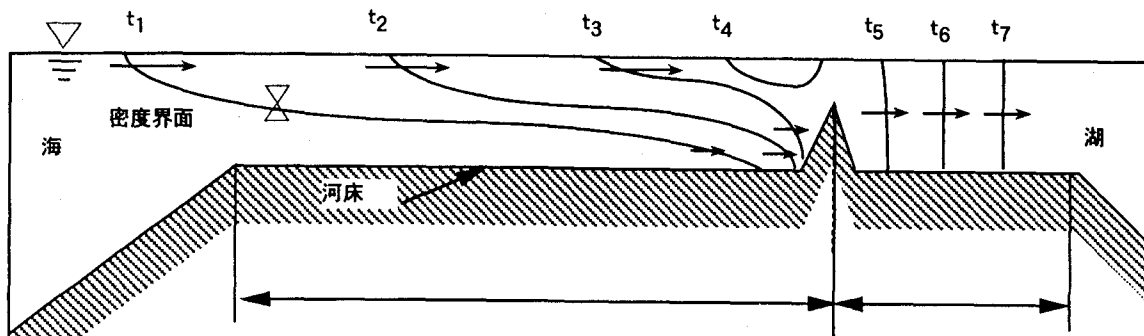
図-5(a) 新橋（河口から1.7km）における界面の挙動 図-5(b) 鏡橋（河口から3.8km）における界面の挙動 1997/4/28 0:00～4:00 1997/4/28 4:10～6:15

において船を停止させた状態で観測し界面の挙動を示したものである。何れの映像においても楔の先端部の輪郭が多少ぼやけていることから、この部分では、局所的にせん断不安定による混合が生じているものと予想される。また河口から3.8kmの鏡橋上流の凸部直上では、成層が明瞭に判別できないことから（図-3(b)○印部分）、この辺では河床形状の急変による乱れの影響により塩水と淡水が完全に混合しているものと推察される。

(2) 塩水楔の形態変化の機構について

潮汐流が卓越する（入潮量が多い）場合に、当初、楔の形態で遡上する塩水は、その侵入長に伴い緩混合～強混合の形態へと移行することがわかった。また、河口から離れ、河川流や河床形状の影響が相

対的に大きくなる地点（河口から約3.8kmに位置する鏡橋以遠）では、楔先端部において局所的な混合現象が生じ、強混合へと遷移することが示された。塩水侵入時の成層破壊が、ほとんどの場合、せん断不安定や風、地形形状の影響による局所的な混合によるものであることは、既に多くの理論的、実験的研究により裏付けられている。網走川においても鏡橋（河床形状が急変する地点）よりも上流側では攪乱による塩淡混合が卓越することは前述のとおりである。本節では、潮汐流が卓越する河道区間における塩水楔の形態変化について、これとは異なるタイプの機構が存在することを実測データに基づき明らかにする。そこで、塩水侵入時に楔から強混合へと遷移する様子を明確にするため、各観測点における塩水遡上時の塩分濃度分布の時間変化と、新橋と鏡橋



潮汐流が卓越する場合に塩水楔が強混合へと変化する時のメカニズム

河床変化による乱れによって塩水楔が破壊し強混合へと変化する時のメカニズム

図-7 網走川における塩水楔の形態変換の概念図

(凸部の下流)における塩水遡上時の界面挙動を図-4および図-5(a), (b)にそれぞれ示す。これらの図から、海水の遡上距離が増すにつれ、鉛直方向の密度勾配が小さく(即ち、河口付近から逐次成層破壊が生じ、楔長が短く)なっている様子が確認できる。この現象は、恰も、上層から遡上する塩水が、楔の形態で下層から遡上する塩水を追い掛けるようなふるまいを見せることから、著者らが既に提示した⁴⁾、⁵⁾潮汐流の影響による塩水楔の形態変化の可能性を裏付けるものである。また、この結果は、図-2(c), (e)に示した水位差(ΔH)が大きいときの大曲橋地点での観測結果とも合致している。仮に上層からの塩水の遡上速度が楔の侵入速度よりも相対的に速い場合は、塩水の侵入長に占める楔長の割合が、時間経過に伴い相対的に小さくなる。従って、上層の塩水が下層部に形成される密度フロントに追いついた場合には、塩水楔は消滅し、塩水は強混合の形態で遡上することになる(但し、図-4, 5は、塩水楔が完全に消滅するまでの過程を示しているわけではない。潮汐流の影響のみで、塩水楔が完全に破壊されたケースについては、網走川においても未だ確認されていない)。その際、上方からの塩水遡上は潮汐流に、下方を楔状に侵入する流れは密度流(Lock Exchange Flow)に起因するものと見なすことは自然である。他方、潮汐流の影響が小さい鏡橋以遠では、前節でも述べたように強混合に遷移したときに塩分濃度が低い値(10~15%)を示すことから、鏡橋上流の河床形状の急変(凸部)による乱れの影響で塩水楔が破壊されたものと推察できる。以上より、網走川で確認される塩水楔の形態変化は、潮汐流が原因となって生じるものと河床形状の変化による乱れに起因するタイプがあり、鏡橋上流の凸部を境に下流側は前者の機構に、上流側は後者に支配されることがわかった(図-6参照)。

5. まとめ

網走川下流河道において海水遡上時の挙動を現地観測により明らかにした。その結果、潮汐の影響が

卓越する河道区間とそれ以外の区間では、塩水楔の形態変化の機構が異なることがわかった。前者では、潮汐流の影響が密度流(Lock Exchange Flow)よりも相対的に大きくなることによって塩水楔の形態が変化するのに対し、後者では、河床形状の急変による乱れに起因して成層が破壊する。

謝辞：本研究に引用した現地データは、極めて厳しい気象条件の中、北見工業大学利水研究室、中央大学水理研究室の多くの学生の多大な努力により取得されたものである。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 小松利光・上杉達夫・孫双科・安達貴浩・松岡弘文・大和則夫・朝位孝二：川内川河口部における塩水遡上について，水工学論文集第40巻，pp. 493-498, 1996.
- 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) 大東淳一・池永均・山田正・内島邦秀・向山公人：潮汐を考慮した塩水楔の破壊に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会概要集2，pp. 798-799, 1997.
- 6) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，1993.
- 7) 清水康之・藤田睦博・平野道夫・山田正：網走湖および網走川における塩分密度流の計算，水文・水資源学会誌，第10巻，第1号，1月，pp. 44-55, 1997.
- 8) 井上和也・田中正博・坂口拓史・西澤賢太郎：河口感潮域における塩水侵入の解析，京都大学防災研究所年報，第36号，B-2，pp. 411-423, 1993.

(1997.9.30受付)