

高瀬川中下流部の浅瀬が塩水遡上に 及ぼす影響について

INFLUENCE OF A SHALLOW WATER AREA UPON THE SALT WATER BEHAVIOR IN TAKASE RIVER

成田舞¹・石川忠晴²・藤原広和³・和光一紀⁴

Mai NARITA, Tadaharu ISHIKAWA, Hirokazu FUJIWARA and Kazuki WAKO

¹学生会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

³正会員 工博 八戸工業高専助教授 建設環境工学科 (〒039-1192 青森県八戸市田面木上野平16-1)

⁴東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

The Takase River, a mild slope river from a brackish water lake named Lake Ogawara, has a wide shallow area in the middle reach of the channel. Saline water intrusion to the lake is probably influenced by the existence of the shallow area. In this study, an extensive field measurement was carried out using 18 salinity meters, 68 thermometers and 3 current meters in order to investigate the flow characteristics in the shallow area and its influence upon the vertical flow structure in the low-water channel. The measurement results showed that the flow retardation in the shallow area intensifies the density stratification in the low-water channel in rising tides. This finding is consistent with the salinity record obtained at a monitoring station near the lake.

Key Words : saline water intrusion, field measurement, a shallow water area, tidal river, salinity stratification

1. はじめに

青森県東部に位置する高瀬川は、汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ河道延長6.6kmの感潮河川である(図-1)。高瀬川の塩水遡上現象とそれに伴う小川原湖内での塩分循環は、同湖の水質や生物に大きな特色を与えている。特に、同湖の特産であるヤマトシジミの繁殖環境は塩水遡上によってもたらされる塩分に依存している^{1),2)}。一方で、小川原湖の治水安全度は低く、高瀬川の改修などによる疎通能力向上が現実的対策として考えられている。しかし、低水路の掘削や河道の拡幅などによる地形改変は、常時の塩水遡上を変化させる恐れがある。それゆえ、小川原湖の汽水環境を適正に管理していくためには、塩水遡上時の流動と高瀬川河道地形との関係をあらかじめ把握しておく必要がある。

高瀬川の中下流部は河道幅が広がっているが、河道内の大部分は高水敷であり、滞筋は狭小となっている。高水敷は通常は冠水しているものの水深は極めて浅く、大潮時にはその一部が干出することもある。このような特異地形は、塩水遡上に大きな影響を及ぼすことが考えら

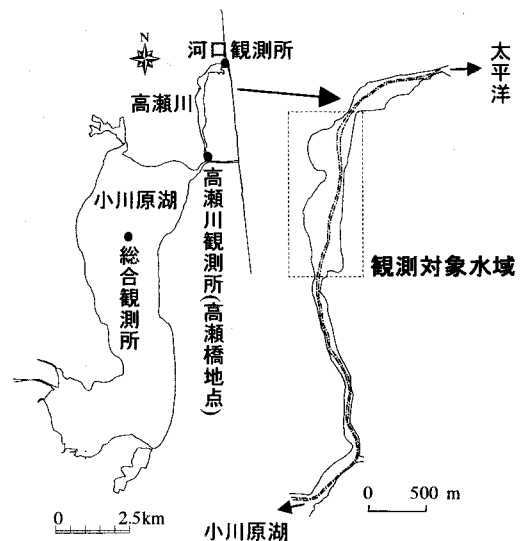


図-1 高瀬川の位置と形状

れる。藤原ら^{3),4)}は、この複断面区間において塩水遡上形態が変化している可能性を基礎的水理実験により示唆している。

また、藤原ら⁵⁾は同区間において、6本の塩分水温計と

多数の水温計を設置し、水温と塩分の相関関係を用いて高水敷部の塩水流動の把握を試みている。しかし、相関関係が時空間的に一定していないことから、流況を必ずしも十分に捉えることができなかった。そこで本研究では、塩分水温計の数を大幅に増やし、高水敷への塩水の流入から流出に至る過程を詳細に調べた。その結果にもとづき、高瀬川塩水遡上に対する中下流部浅瀬の影響について考察する。

2. 観測フィールドの概要

高瀬川の上流端である小川原湖平均水位はT.P.+40cm、下流端の河口平均潮位はT.P.+10cmであることから、平均水位勾配は約 4.5×10^{-5} と極めて緩やかである。河口における満潮位はT.P.+40~70cmであることから、潮汐ごとに全区間で逆流の生じる場合が多い。

河口から5.5kmにある高瀬橋地点では、塩分のモニタリングが長期間行われており、その結果をもとに高瀬川の塩水遡上特性が考察されている^{(6),(7),(8)}。塩水侵入の規模が中程度の場合は緩混合、規模が大きい場合はほぼ強混合で塩水が到達し、強混合状態は日潮不等の高高潮時に起こることが多い。このような混合状態の変化には、途中の河道地形が影響している可能性が高い。しかし、高瀬川河道の大部分は米軍演習地に隣接しているため立ち入りが規制されており、塩水遡上の縦断的観測例は極めて少なく⁽⁹⁾、また計測点も限られているため、その実態は十分明らかにされていない。

前述した藤原ら^{(3),(4)}の研究から、筆者らは中下流部の広大な高水敷での平面的塩水流動が、縦断的塩水遡上形態に影響を及ぼしていると考え、集中的な現地観測を企画した。この水域の地形を図-2に示す。平面図内の記号は後述する観測機器の配置を示している。この部分の河道幅は300~400mに渡るが、大部分はT.P.-10cm程度の標高の浅瀬であり、その中を幅約60m、深さ2~3mの滞筋が走っている。側線Dより上流(図の下方)は米軍演習機の進入路にあたり、通常は立ち入り禁止水域であるが、事前に申請することにより土日のみ立ち入ることができる。

3. 観測の概要

(1) 観測方法

図-2に示す水域において、2002年8月3日(土)から10日(土)にかけて現地観測を実施した。□印で示す12地点(C1~C12)の河床から10cmの位置に、メモリー式小型塩分水温計(アレック電子社製 MDS-CTまたはCOMPACT-CT)を設置した。また、河床から20cmと30cmの位置に水温計(Onset社製 Hobo Water Temp ProまたはStowAway Tid-bit)を設置した。ただしC4,C7地点には、水温計の代わ

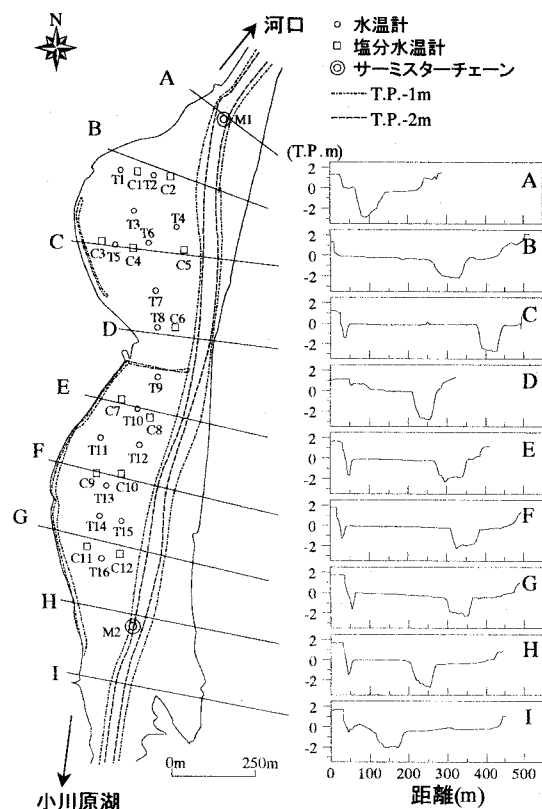


図-2 高瀬川中流部の形状と観測地点

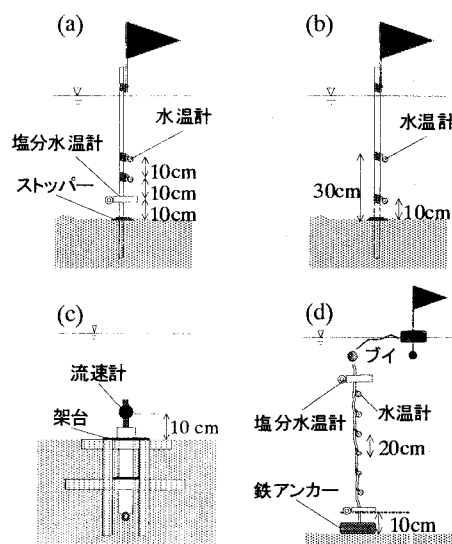


図-3 観測機器設置の様子

りに塩分水温計を河床から30cmの位置に取り付けた。設置の様子を図-3(a)に示す。塩分水温計を設置した地点の間に埋めるように、○印で示す16地点(T1~T16)の河床から10cm, 30cmの位置に、水温計を設置した(図-3(b))。また、塩分水温計を設置したC5,C8,C10地点には、メモリー式小型流速計(アレック電子社製 COMPACT-EM)を、河床から10cmの位置に設置した(図-3(c))。さらに、◎印で示す浅瀬上下流の滞筋2地点(M1,M2)に、サーミスターチェーンを設置した。M1地点は河口から約1.5km上

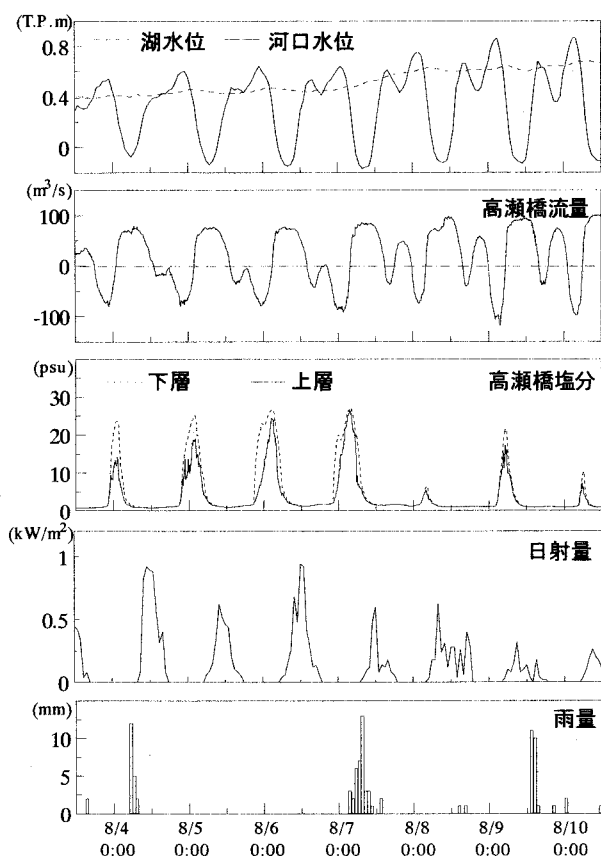


図-4 観測期間の諸データ

流にあたる。サーミスターチェーンの形状を図-3(d)に示す。アンカーとブイでロープを緊張させ、M1地点は河床から10cmと190cm、M2地点では10cmと150cmの位置に塩分水温計を、その間に20cm間隔で水温計を取り付けてある。

各機器の計測時間間隔は1分とした。ただし、流速計は1秒間隔で10秒間の計測を1分毎に行い、その平均値を採用した。なお、C3,C8地点の塩分水温計は、流下物がセンサー部を遮るなどの影響でデータが得られなかった。

(2) 観測期間の諸条件

図-4は観測期間における湖水位、河口水位、高瀬橋地点の流量・塩分、小川原湖総合観測所の日射および雨量の時系列である。各観測所の位置は図-1に示されている。潮汐は、8月3日が長潮、4日が若潮、5,6日が中潮、7～10日が大潮であった。

河口水位が湖水位を上回ると逆流が発生し、塩水が遡上する。全観測日において高瀬橋地点まで塩水が到達していた。以下、観測期間中の7回の塩水遡上を、それぞれevent1～7と呼ぶことにする。event3,4では中程度の規模の塩水侵入が発生した。しかし、8月7日の朝方の雨の影響で湖水位が通常時より10cm以上も上昇し、event5以降では大潮にもかかわらず遡上の規模は小さくなっている。また、浅瀬の河床から10cmに設置した機器はいずれも空気中に出ることはなく、浅瀬は干出しなかった。

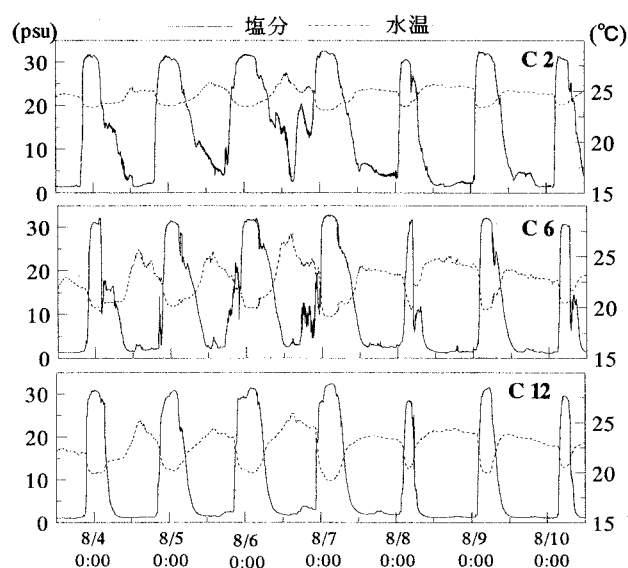


図-5 塩分水温計データ(8/3 12:00～8/10 12:00)

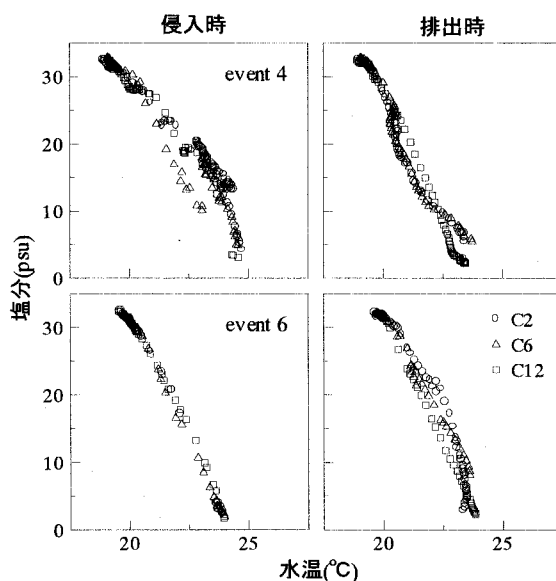


図-6 水温と塩分の相関

(3) 塩分と水温の相関

図-5はC2,C6,C12地点における塩分水温計の時系列である。全観測日において塩水が到達し、ほぼ全域において30psuに達した。また、塩分上昇に伴い水温の低下が見られる。event4,6における同3地点の水温と塩分の相関を、侵入時と排出時に分けて図-6に示す。eventが異なると曲線の形状が異なり、また同じeventにおいても地点ごとに形状が異なっている。これは、各地点の水深が異なることや、侵入海水の水温が河道を遡上していく過程で変化すること、河川水温や日射条件等が日ごとに異なることなどが影響していると考えられる。

そこで、塩分水温計の水温-塩分関係を表す近似式を地点ごと・時間帯ごとに求め、近似式の係数を時空間的に内外挿することを考えた。まず、水温-塩分関係を一

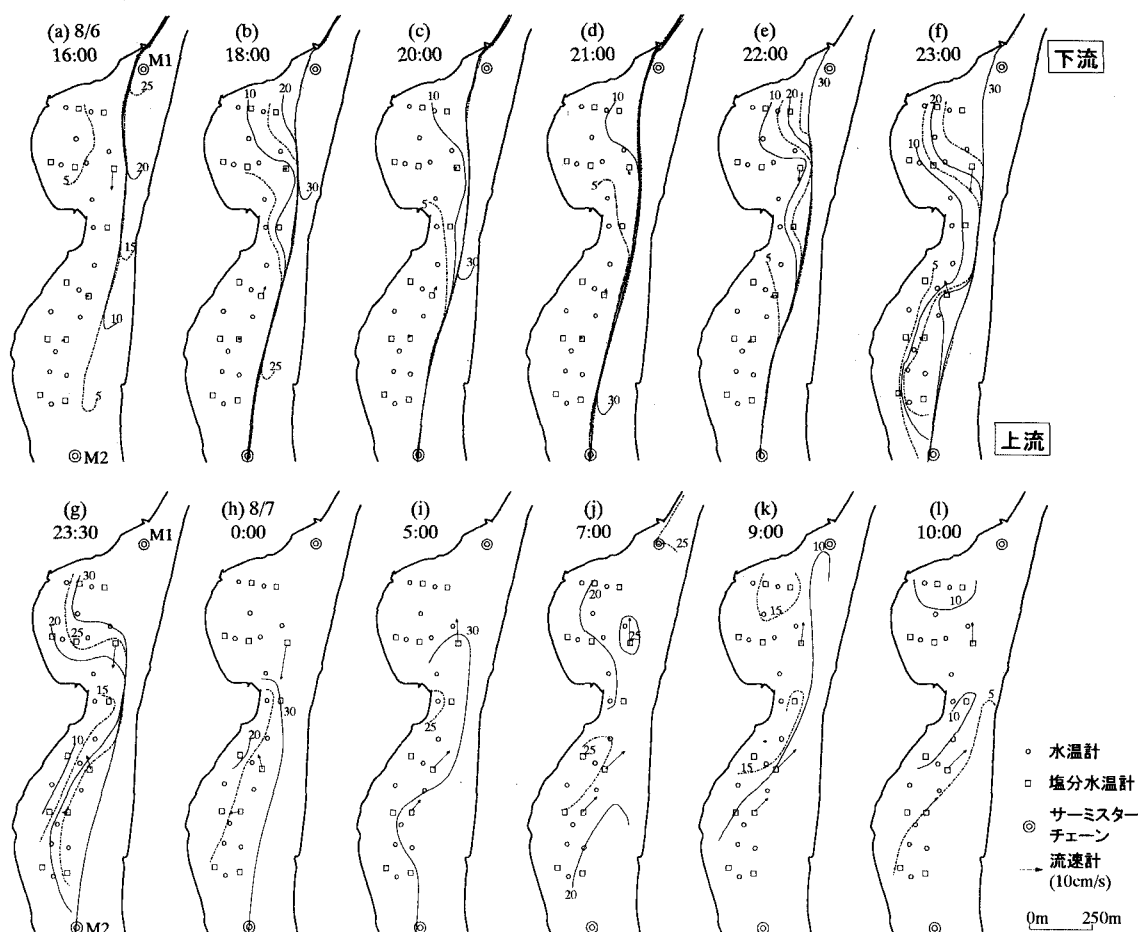


図-7 event4の等塩分線(8/6 16:00~8/7 10:00)

定の時間刻みで区切ると、ほぼ直線で近似することができる。そこで、それぞれの時間帯において、地点ごとに最小二乗法によって回帰式を求めた。次に、水温計設置地点とほぼ直線上に並ぶ2つの塩分水温計(C_m, C_n)を選び、3点の距離の比

$$[\text{水温計} - C_m] : [C_n - \text{水温計}] = a : b \quad (1)$$

を求めた。塩分水温計の回帰式の1次項の係数を α_m, α_n 、定数項を β_m, β_n とすれば、水温計設置地点における回帰式は、

$$S = \frac{b\alpha_m + a\alpha_n}{a+b}T + \frac{b\beta_m + a\beta_n}{a+b} \quad (2)$$

となる。以上のようにして求めた回帰式に水温を代入し、塩分を推定した。なお、同様の整理をM1およびM2地点に設置した水温計に対しても行い、塩分鉛直分布の時系列を得た。

4. 観測結果及び考察

(1) 浅瀬における塩水流動

図-7(a)~(l)に、観測期間中最も侵入規模の大きかったevent4における、底から10cmの塩分分布を、5psuごと

の等濃度線で示す。流速計を設置した3地点については、流速ベクトルを記入してある。

14時頃に逆流が発生し、約1時間後にM1地点に塩水が到達した。図-7(a)では滞筋を塩水が遡上しているが、浅瀬には侵入していない。ただし、下流側の浅瀬奥には前回のeventで侵入した塩分が若干残留している。図-7(b)では遡上がさらに進み、下流側浅瀬に塩水が侵入している。また、滞筋ではM2地点に塩水が到達している。19時頃に高低潮を迎え、高瀬川の逆流は一時終了する。このため浅瀬に侵入した塩水はいったん退いてゆく。しかし、滞筋ではこの間もわずかながら遡上が進んでいる(図-7(c),(d))。

高高潮に向けて逆流量が増加すると、再度下流側浅瀬に塩水が侵入する(図-7(e))。30分ほど遅れて上流側の浅瀬にも塩水が侵入し、左岸に向かって広がってゆく(図-7(f),(g))。この時、鉛直方向にも若干の塩分・水温差が発生し、密度流的挙動が見られたが、紙面の都合によりここでは記述を割愛する。図-7(h)では、下流側浅瀬は30psu以上の高塩分水で満たされる。7日の1時頃には浅瀬全域が高塩分状態となる。

4時頃に流れが順流に転じると、上流側浅瀬の左岸寄りから塩分濃度が低下する(図-7(i))。次に滞筋において塩水が退き始め、浅瀬底層よりも先に塩水が排出され

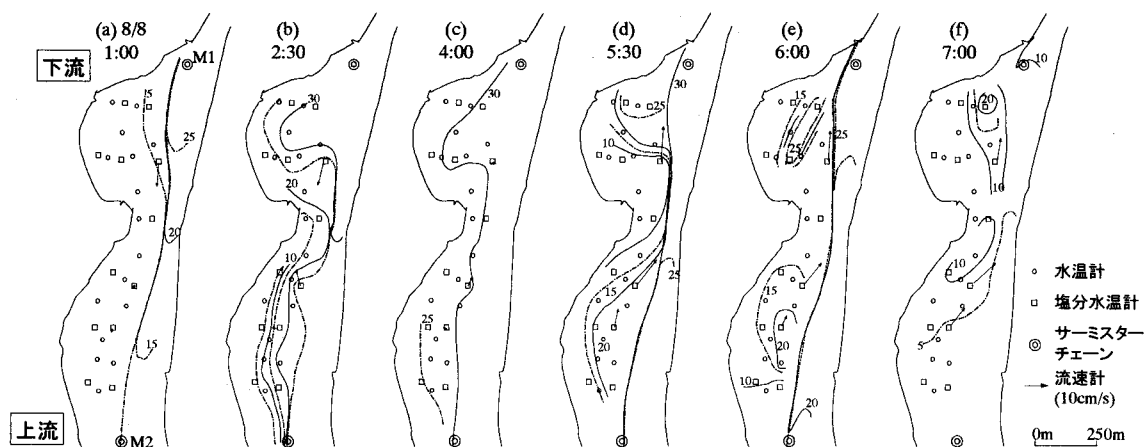


図-8 event5の等塩分線(8/8 1:00~7:00)

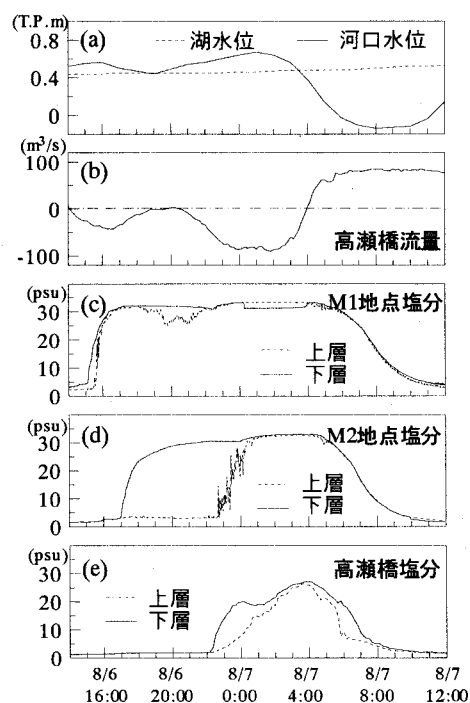


図-9 event4の水利データ

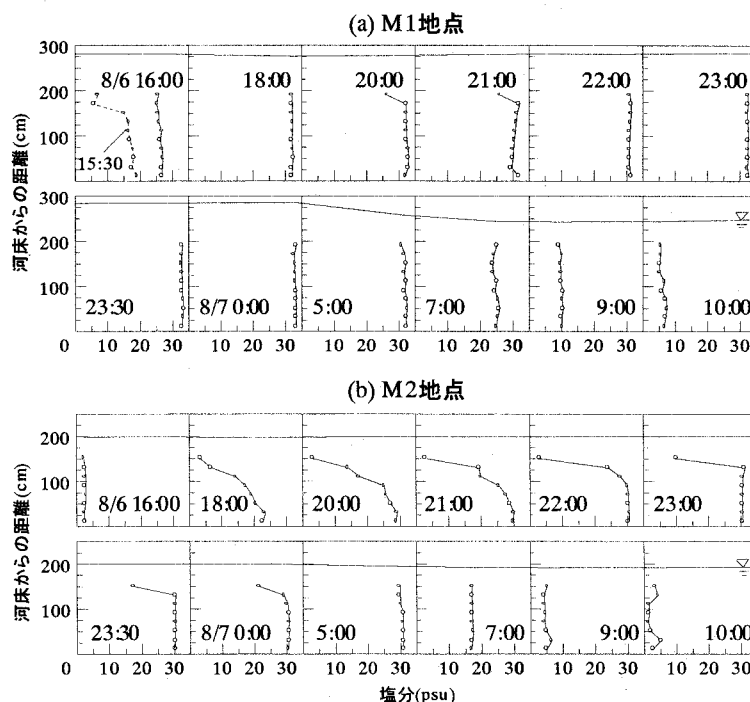


図-10 塩分鉛直プロファイル

る(図-7(j)). 図-7(k),(l)では、浅瀬中部に残留した塩水塊が、ゆっくりと下流側に移動しながら拡散してゆく。一方下流側浅瀬では、周囲より比較的高い塩分が残留している。

図-8(a)~(f)にevent5の塩分分布を示す。このeventは、降雨により小川原湖水位が上昇した後であり、塩水侵入規模は小さかった。このため低高潮では浅瀬に塩水が到達しなかったため、高高潮による塩水侵入のみを示す。図-7(a),(b)と同様に、まず滞筋を塩水が遡上してゆく(図-8(a))。次に、図-7(e)~(h)と同様に浅瀬にも塩水が広がってゆく(図-8(b),(c))。侵入のピーク時には、浅瀬のほぼ全域が25psu以上の高塩分水で満たされる。流れが順流に転じた後、図-7(i)と同様に、上流側浅瀬左岸寄りの塩分が低下する(図-8(d))。図-7(j)と同様に、滞筋を先に塩水が退いてゆく(図-8(e))。図-7(k),(l)と同様に、下流側浅瀬には塩分が残留する(図-8(f))。こ

のように、塩水侵入規模の小さい場合でも、浅瀬上での塩水流動特性は概ね同じであると言える。

(2) 浅瀬の流れが滞筋の成層状態に及ぼす影響

本節では、M1地点、M2地点及び高瀬橋地点の塩分データから滞筋での成層状態の特性を述べた後、前節の結果をもとに、中下流部の浅瀬が塩水遡上に及ぼす影響を考察する。

図-9にevent4における湖水位と河口水位、高瀬橋流量、M1地点、M2地点及び高瀬橋地点の上・下層塩分の時系列を示す。また、M1地点、M2地点の上下層塩分データから推定したサーミスターチェーンの塩分鉛直分布を、図-10に水面位置と合わせて示す。M1地点、M2地点ともに表層付近ではデータが得られておらず、特に高潮時のM1地点ではデータのない深さが1m近くに及ぶ。これは干潮時にもブイが常に水中にあるようにサーミスターチェーン

の長さを調節したこと、観測期間中の降雨により湖水位が上昇したことによるものである。よって、図-10(a)に関しては成層状態の変化の議論を行わない。

図-9(a),(b)に示すように、第一満潮(低高潮)により14:00に逆流が始まったが、高低潮により20:00頃に流れは一旦停止した。その後再度逆流が生じ、約8時間継続した後4:00頃に順流に転じている。これに応じM1地点(図-9(c))では15:00~16:00に塩分が急上昇した。その後、高低潮時に上層で塩分が低下したが、他の時間では観測した区間において塩分はほぼ一様であった。M2地点(図-9(d),図-10(b))では、第一満潮にやや遅れて17:00~18:00に下層塩分が急激に上昇し、高低潮時にも徐々に上昇を続けている。一方、上層塩分は22:30頃まで低レベルに留まり、この間の塩分鉛直分布は緩混合的形状を呈している。高高潮時に上層塩分は約2時間半で下層塩分と同程度まで増大したが、その間に大きな変動が生じている。その後は上下層で同様の挙動を示している。高瀬橋地点(図-9(e))では、高高潮時に緩混合で塩水が到達する。2:00頃に上下層の塩分が一致するが、順流に転じると上層塩分が先に低下する。

以上のような滞筋での塩分分布の形成機構を、浅瀬での観測結果と合わせて考察する。まず、M1地点の上層で高低潮時に生じた塩分低下は、同時時間帯に浅瀬での等塩分線が一時的に後退していることから(図-7(b)~(d))、浅瀬の低塩分水が滞筋表層に回帰したためと考えられる。一方、M2地点上層で低塩分が長時間継続しているのは(17:00~22:00)、同時時間帯には塩水が上流浅瀬に到達していないことから(図-7(b)~(e))、侵入塩水により浅瀬上流側に押しやられた河川水が滞筋表層に流れ出し、低塩分層を形成したためと考えられる。また、M2地点上層で塩分上昇時に生じる乱れ(23:00~0:00)については、M1地点上層では塩分上昇時にほとんど乱れが見られなかったこと、浅瀬の塩水フロント(図-7(f),(g)の等塩分線の密な部分)が同時時間帯にM2地点を通過していることから、主に塩水フロント付近での河川水と塩水の水平shearに起因すると推察される。高瀬橋地点における上下層の一樣化は(2:00)、M2地点で上下層一樣になった塩水塊が到達したためと考えられる。2地点間の距離は2.5kmであり、到達時間差が約1時間であることから、流速は約70cm/sであった計算になるが、これは高瀬橋地点で同時時間帯に計測された流速とほぼ一致している。

2で述べたように、高瀬橋で従来より観測されている塩分鉛直分布は、中規模の塩水遡上では緩混合的であり、日潮不等の大きな大潮に生じる大規模な塩水遡上では強混合的になっている。この現象の発生機構は、上記の観測結果から次のように推測される。すなわち、中規模の塩水遡上では、中下流部浅瀬に貯留されている河川水が滞筋表層に遅れて流出するために成層状態が顕著になる。一方、日潮不等の大きな場合には、第一満潮により浅瀬部分の河川水が塩水に置換されるため、大規模な塩水遡

上の生じる第二満潮時には全層混合状態になりやすいものと思われる。今回の観測では、後者については確認できていないが、今後観測結果を検証データとして現象を再現し得る数値シミュレーションモデルを作成し、流動特性の把握を総合的に行いたいと考えている。

5. おわりに

高瀬川中下流部浅瀬における流動が塩水遡上形態に及ぼす影響を、現地観測をもとに検討した。その結果、浅瀬に貯留された河川水が塩水に置き換わる過程で生じる平面的流動が、滞筋での塩分鉛直構造に大きな影響を与えているものと推察された。塩水遡上の形態分類は、これまでは主に潮位変動の大きさを指標に整理されてきているが、ここで検討したように横断形状の特性も遡上形態に影響を及ぼしている。高瀬川の河道形状は比較的特異ではあるが、同様の現象は他の河川でも多かれ少なかれ存在する可能性があるのではないかと考えられる。

謝辞：現地観測を実施するにあたり、国土交通省東北地方整備局高瀬川総合開発工事事務所と六ヶ所村漁業共同組合にご協力いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鶴田泰士, 石川忠晴, 西田修三, 成田舞, 藤原広和: 小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.175-187, 2002.
- 2) 西田修三, 佐野俊幸, 中辻啓二: 汽水湖における流動構造と物質循環過程, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1116-1120, 2001.
- 3) 藤原広和, 沢本正樹, 神山尚人: 複断面水路における河口密度流の混合特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.416-420, 1995.
- 4) 藤原広和, 沢本正樹, 田中博通: 複断面及び単断面水路における密度流の混合特性の相違について, 水工学論文集, 第41巻, pp.515-520, 1997.
- 5) 藤原広和, 石川忠晴, 西田修三, 鶴田泰士, 沢本正樹: 高瀬川の複断面河道部における塩水遡上特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.1005-1010, 2000.
- 6) 石川忠晴, 板井雅之, 小沢泰彦: 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, pp.191-196, 1991.
- 7) 藤原広和, 田中博通: 高瀬川感潮域の現地観測による水理特性について, 水工学論文集, 第37巻, pp.171-176, 1993.
- 8) 西田修三, 中辻啓二: 緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定, 水工学論文集, 第43巻, pp.869-874, 1999.
- 9) 建設省東北地方建設局高瀬川工事事務所: 小川原湖塩分変化予測検討業務報告書, 1987.

(2002. 9. 30受付)