

結氷時の塩水遡上に関する現地観測

FIELD OBSERVATIONS ON SALINITY INTRUSION AT ICE-COVERED RIVERS

吉川 泰弘¹・渡邊 康玄²
Yasuhiro YOSHIKAWA and Yasuharu WATANABE

¹ 正会員 工修 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

² 正会員 工博 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

The purpose of this study is to clarify hydraulic phenomena in the estuarine basins of ice-covered rivers. Field observations were therefore conducted. As a result, it was found that reducing the time for each measurement was important when conducting flow observations in estuarine basins. Similarities and differences of phenomena in rivers when they were covered or not covered with ice were also clarified. Similar phenomena indicate a correlation between the water-level fluctuation velocity and the total discharge, and the two different relationships between the tidal and water levels that result from increases and decreases in the former. Different phenomena indicate a great variety in flow direction depending on the tides when the rivers were covered with ice, and the reduction of the freshwater flow velocity due to the friction resistance of ice sheets during salinity intrusion.

Key Words : Ice-Covered River, Tidal Zone, Field Observation, Hokkaido, Tokoro, Tesio

1. はじめに

河川の流量は、流域全体の水資源計画を策定する場合において重要な基礎資料である。流量の観測手法について、非結氷時かつ非感潮域では既往の研究、実績により水理現象に合う手法が確立されてきている。

しかし、結氷時、感潮域という特殊な状況では、次の理由により流量の観測手法が確立されているとは言えない。結氷時は観測する人間にとって厳しい気象条件であるとともに、河川表面が氷で覆われていることから観測自体も困難さを伴うため、氷板下の流況は不明確な部分が多い。感潮域は塩水遡上現象により複雑な流況(非定常)となる。感潮域については、新しい機材(例えば ADCP)の導入¹⁾が示されているが、流れ場の条件による特性や精度が十分に解明されているとは言えない現状である。結氷時、感潮域の流量観測は、問題点は指摘されてはいるものの具体的な手法が提案されていないため、従来の観測手法で原則行われている。

これを改善するために、結氷時かつ非感潮域における流量観測手法については、ADCP を用いて現在の観測精度を低下させることなくより短時間で経済的な観測方法についての研究が鈴木ら²⁾によりなされている。また、非結氷時かつ感潮域の流量観測手法については、ADCP を河床に設置し単位幅流量と水位変化量から流量を連続的に推算する研究が佐藤・中津川³⁾により行われている。

表-1 観測場所と観測時の条件

	直線部	蛇行部
非結氷時	—	常呂川
結氷時	天塩川	常呂川

る。一方、結氷時かつ感潮域においては、氷板による摩擦抵抗の発生、流体水温の変化、流体密度の変化の特徴を持ち複雑な水理現象が生じていると考えられるが、現在、観測事例が少ないため未だにその現象が解明されているとは言い難い状況にある。

本研究は、流量観測手法の開発を念頭に置き、結氷時かつ感潮域における現地観測を行い水理現象の解明を目指している。

2. 現地観測

現地観測は、北海道東部の常呂川において結氷時と非結氷時の2期間、北海道北部の天塩川において結氷時の1期間行った。常呂川では結氷時と非結氷時の比較のために、天塩川では蛇行している常呂川との比較のために観測を行った。今回の観測場所と観測時の条件を表-1に示す。なお、常呂川の観測の詳細については既往論文⁴⁾を参考されたい。

(1) 観測期間

a) 常呂川

結氷時、非結氷時においてそれぞれ満月の大潮を挟む3周期の観測を行った。1周期は上げ潮時3回、下げ

表-2 観測場所の概要

観測場所	河道	KP(km)	河床形状	川幅 ^{※1} (m)	水深 ^{※1} (m)	最深河床高(m)	河床勾配 ^{※2}
常呂川河口観測所 ⁴⁾	蛇行部	1.1	左岸掘れ	65	3.3	-2.7	1/700
天塩川河口観測所	直線部	5.0	平坦	270	6.4	-6.1	1/2500

※1 結氷時の満潮時における観測値を記載

※2 河口 (KP0.0) と観測場所の最深河床高を結ぶ河床勾配

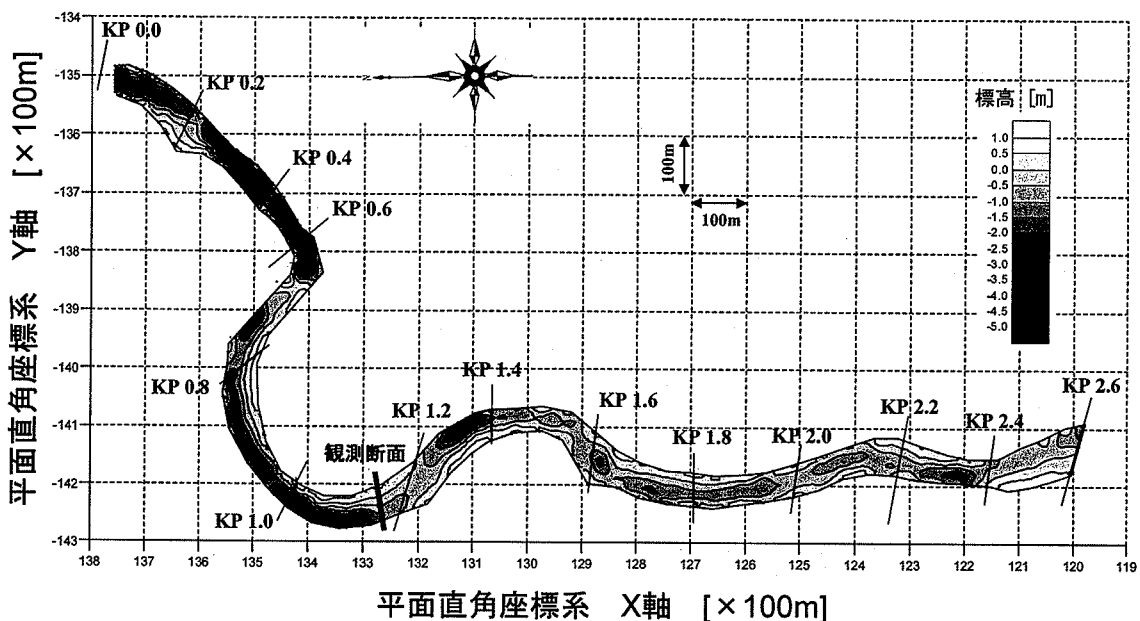


図-1 常呂川下流域における河床高のコンター図 (2005 年 12 月測量)

潮時 3 回の観測で、計 18 回の観測を実施した。結氷時の観測は 2005 年 2 月 22 日 09:00～25 日 11:50 で大潮時の潮位差 1.00m、非結氷時は 2005 年 8 月 18 日 04:40～8 月 21 日 07:30 で大潮時の潮位差 1.33m である。

b) 天塩川

結氷時の中潮の期間に満潮時、下げ潮時、干潮時、上げ潮時の計 4 回の観測を行った。期間は 2006 年 2 月 15 日 05:25～16:10 であり、満潮と干潮の潮位差は 0.24m である。

(2) 観測場所

一般に行われる塩水遡上の観測は、塩水遡上距離や内部抵抗係数の逆算値⁵⁾を知るために縦断観測の事例が多い。しかし、今回は通常の流量観測を念頭に置いている事および感潮域での詳細な横断観測の事例が少ない事から、横断方向の観測としている。

観測場所は水文資料のある観測所とし、観測場所の概要を表-2 に示す。常呂川について、河道平面形状及び河床高を図-1 に示す。蛇行部区間は河口から 0.6km の地点から上流 1.4km の区間であり、上流から河口に向って左岸へと湾曲している。観測地点は、蛇行部の中間と蛇行部の入り口のほぼ中間に位置する。天塩川について、河口から上流 1km の地点から 7km までの区間が直線部である。観測地点は、その直線部のほぼ中間に位置する。両観測場所を川幅水深比で比較すると、常呂川で 20、天塩川で 42 であり天塩川の方が大きい。

なお、天塩川の観測地点について、直上流には天塩河口大橋があり幅 2.6m の橋脚が河川横断距離にして 38m、98m、188m、278m の位置に存在している。

感潮区間は、既往調査⁶⁾より河口から上流までの距離において、常呂川で 6.9km、天塩川で 19.5km であり河床勾配の緩い天塩川の方が長いと分かる。

(3) 観測項目

常呂川における観測の概念図を図-2 に、天塩川における観測の概念図を図-3 に示す。横断方向に常呂川では 9 測線、天塩川では 7 測線設定して流速、塩分濃度を測定した。1 回の観測は左岸から観測を開始し右岸で観測が終了する事とした。

流速測定は ADCP(WorkHorse Sentinel 1200kHz Zed-Hed, RD Instruments, ハイレゾリューションモード)を用いた。層厚は常呂川で 10cm、天塩川で 25cm とし、1 データは常呂川で 10 ピング、天塩川で 20 ピングのアンサンブル平均値とした。1 データの取得時間は水深にもよるが常呂川で約 3 秒間、天塩川で約 10 秒間であり、各測線の測定時間は 180 秒間行った。

塩分濃度はアレックメモリー STD(ATU100-PK, アレック電子(株))を用い、水位は精密自記水位計(MC-1100WA, 光進電気工業(株))を用いた。なお、常呂川における塩分濃度は濡筋のみとしている。結氷時の水位は、氷に穴を開けて測定しているため自由水面の高さである。

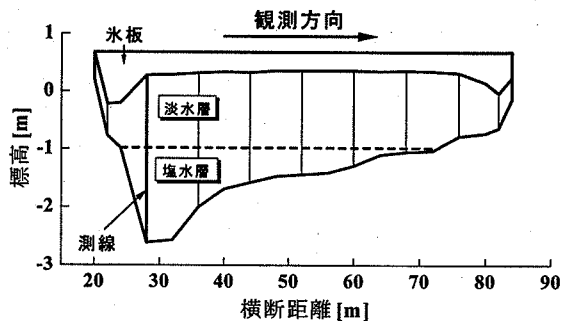


図-2 常呂川観測の概念図

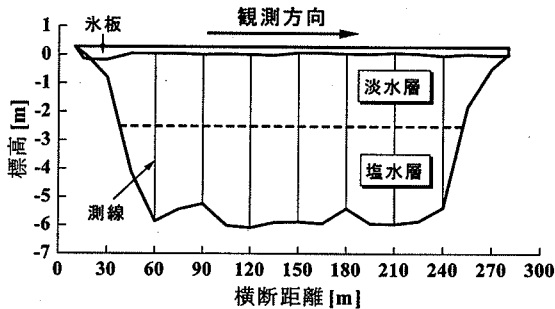


図-3 天塩川観測の概念図

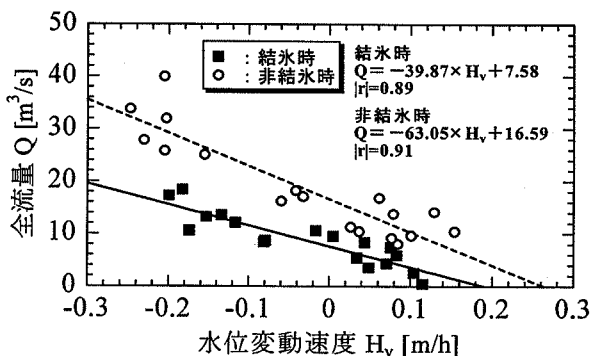


図-4 水位変動速度と全流量の相関図 (常呂川)

3. 水理現象と流量観測

ここでは、流量観測上重要である水位、流速、流況および測定時間についての検討を行う。

(1) 水位

感潮域の流量を連続的に推定する式として、水位の変動速度を用いる流量推定式³⁾がある。この式は、水位と流量の位相差を考慮し鉛直方向の水位変動速度 m/h から流量を推定する式であり、非結氷時の現象より導かれたものである。ここでは、この式が結氷時において成立するかの検討を行う。用いるデータは、観測回数の多い常呂川のものを用いる事とした。

水位変動速度と流量の位相差を相関係数により求める。水位変動速度は、鉛直上向方向を正として1時間毎の観測水位データから算出する事とした。ある時刻の流量と1時間前、2時間前、3時間前の水位変動速度との相関係数を算出した。この結果、結氷時、非結氷

表-3 潮位と水位の相関係数 (常呂川)

相関係数	結氷時	非結氷時
全データ	0.95	0.96
上げ潮時	0.98	0.99
下げ潮時	0.98	0.99

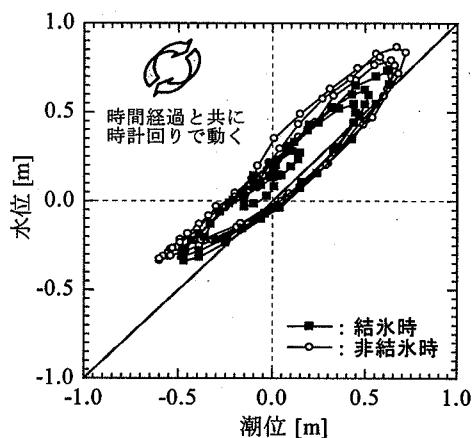


図-5 潮位と水位の相関図 (常呂川)

時ともに1時間前の水位変動速度を用いた場合に相関係数が一番高くなった。このため水位変動速度と流量の位相差は1時間であると分かった。

位相差を考慮した水位変動速度と全流量の相関図を図-4に示す。なお、ここで言う全流量とは順流逆流を勘案した流量であり、河口へ向かう流量から逆流している流量を差し引いた値としている。相関係数の絶対値 $|r|$ について、結氷時は0.89、非結氷時は0.91でありともに高い相関がある。特に結氷時においても高い相関がある事から、更なる観測が必要ではあるが、少なくとも今回の常呂川での観測結果では、結氷時においても流量推定式が成立する可能性があると言える。また、流量推定式は通年で一本とされていたが、今回の観測により流量推定式は結氷時と非結氷時で異なる事が明確となった。

次に、潮位と水位の相関関係を明らかにする。網走観測所の潮位と常呂川の観測断面水位の相関図を図-5に示す。データ間を時系列で線で結んでいる。相関関係は、結氷時と非結氷時で若干の違いがあるが、以下の二価性の関係が読み取れる。

上げ潮時 (干潮→満潮) ... 水位が高くなる

下げ潮時 (満潮→干潮) ... $Y = X$ の直線に乗る

この二価性の関係を見るために、全データ、上げ潮時のデータ、下げ潮時のデータに区分した相関係数を表-3に示す。結氷時と非結氷時ともに高い相関係数を示し、特に上げ潮および、下げ潮での相関係数が高い事が分かる。今回の観測結果より、結氷時と非結氷時ともに潮位と水位は相関の良い二価性の関係がある事が分かった。この事は、少なくとも流量変化が無視できる場合、潮位により水位の推定が可能であることを示唆するものである。

(2) 3次元流速

通常の流量観測の実施および、結氷時の感潮域の水理現象の解明のためには、流況を捉える必要がある。ADCP 測定値の水平面内のベクトル流速と鉛直方向のベクトル流速を3次元流速に成分分解し、流況について検討を行う。

a) 直線部の観測断面の流況

直線部に位置する天塩川観測断面において、満潮・下げ潮・干潮・上げ潮に分けた流速を図-6に示す。観測断面に直交する方位180°(河口方向)を主流方向として、主流方向の流速をコンターで図示し、横断・鉛直方向流速を各測線を基準としてベクトルで図示している。図には、各測線の観測開始時間を記載している。1測線の観測時間は移動を含め約10分間であり、1回の観測時間は7測線あるため約70分間となる。図-6より、横断・鉛直方向流速は主流方向流速に対して小さく、主流方向流速が支配的であると分かる。また、横断距離98m, 188m付近のベクトル流速の方向が向き合っている理由は、橋脚の影響を受けたものと推測される。

次に流心の位置に着目する。その位置は満潮から下げ潮では右岸側にあり、干潮から上げ潮では左岸にある。この流心位置の移動の原因を探るために、各測線毎の流速分布を塩分濃度15psuを境界として、淡水と塩水に区分した平均流速を算出した。河口に向かう流れを正とした平均流速を縦軸に、時間を横軸に取り図-8に示す。左岸から右岸への観測方向を念頭に置くと、図-8から平均流速について以下の事が言える。

- 1) 満潮から下げ潮の間の時間帯では、水位が下降するにつれて横断面平均流速が速くなるため、横断面内では測定時刻が相対的に遅い右岸へ行くにつれて平均流速が速くなる。
- 2) 干潮から上げ潮の間の時間帯では、水位が上昇するにつれて横断面平均流速が遅くなるため、横断面内では測定時刻が相対的に遅い右岸へ行くにつれて平均流速が遅くなる。

上述により、流心位置の移動は測定時間の違いによる見かけ上の移動であると言える。また、感潮域において、ある瞬間の流量に近づけるためには、1測線の測定時間を精度を落とす事なく短くすれば良い事が分かる。

b) 蛇行部の観測断面の流況

結氷時において、蛇行部に位置する常呂川観測断面の流速(主流方向348°)を図-7に示し、淡水と塩水の平均流速を図-9に示す。図-7の塩淡水境界面は、塩分濃度15psuに対するADCPの反射強度を求めて各測線でその反射強度に対する標高を結んだものである。蛇行部である常呂川の流心位置の移動について、直線部である天塩川の結果を踏まえて検討を行う。図-7,9より流心位置について以下の事が言える。

表-4 潮汐による主流方向の変化 (単位: 方位°)

観測	流れ	満潮時	下げ潮	干潮	上げ潮
天塩川 (結氷時)	順流 逆流	177 20	180 -	181 24	185 22
常呂川 (結氷時)	順流 逆流	14 176	3 -	326 -	13 193
常呂川 (非結氷時)	順流 逆流	350 173	348 -	350 -	347 -

- 1) 満潮の流心位置は右岸側である。流れは鉛直方向に二分されている。上層は矩形断面内の流れ(自由渦型)となり、下層の逆流の流速は左岸側の境界付近で速くなる。
- 2) 下げ潮の流心位置は、右岸から左岸へと遷移する。断面内の流速は、満潮に比べて速くなる。
- 3) 干潮の流心位置は、滞筋の左岸側である。(強制渦型)
- 4) 上げ潮の流心位置は、左岸から右岸へと遷移する。断面内の流速は、干潮に比べて遅くなる。

上述により、上げ潮と下げ潮において、蛇行部の流心位置の移動が、天塩川における直線部の流心位置の移動と逆となっている事が分かる。特に上げ潮で顕著に現れている。このことから、蛇行部の流心位置の移動は、測定時間の遅れに起因しているとは言えない。蛇行部の流心位置の移動の原因は、測定時間の遅れによる影響よりも、蛇行形状による影響の方が強いと推定できる。

c) 主流方向

ここでいう主流方向とは断面全体の平均的な流れの方向であり、横断面内で水平面ベクトル流速から算出する平均ベクトル流速の方向とした。平均ベクトル流速の算出方法は、各測線、各層毎の水平面ベクトル流速をXY軸に成分分解し、XY軸で各々平均した値から算出している。主流方向の挙動を把握するために、順流と逆流に区分して、満潮、下げ潮、干潮、上げ潮において平均ベクトル流速を算出した。潮汐による主流方向の変化について表-4に示す。表-4より、常呂川において非結氷時よりも結氷時の方が主流方向が大きく変化し、結氷時において天塩川(直線部)より常呂川(蛇行部)の方が主流方向が大きく変化している事が分かる。原因については現在明らかに出来ないが、主流方向は水理現象を解明する上でも重要であるため、氷板の影響などを念頭に引き続き調査を行う予定である。

(3) ADCP の測定時間

各測定時間による平均流速の差異に着目して検討を行う。検討には有効水深の2割, 5割, 8割の位置の測定値を用いた。180秒間の測定値から、10秒, 20秒, 40秒, 60秒, 120秒間の移動平均流速(U)を算出した。各々の移動平均流速の分散(s^2)を180秒間の平均流速の2乗(u^2)で割った値を縦軸に、各々の移動平均流速(U)と測定時間(T)および有効水深(H)を用いて無次元化した値を横軸それぞれ取り、図示したものが図-10, 11である。縦軸の値が0に近づくほど180秒間の移動平均流速に近づく。

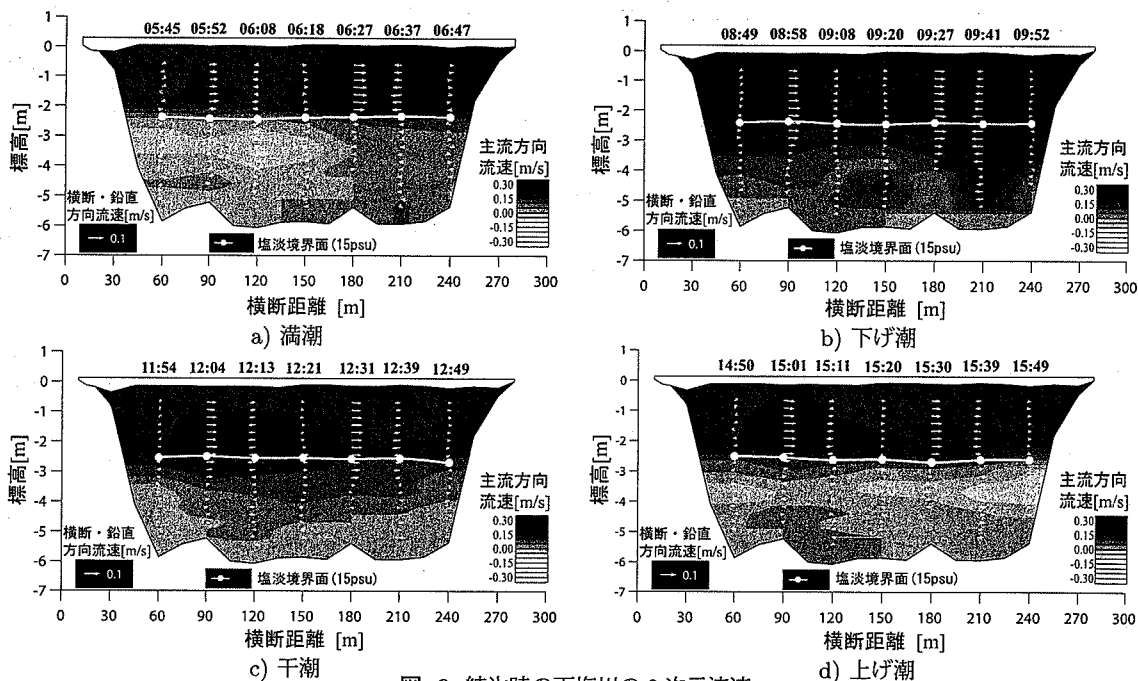


図-6 結氷時の天塩川の3次元流速

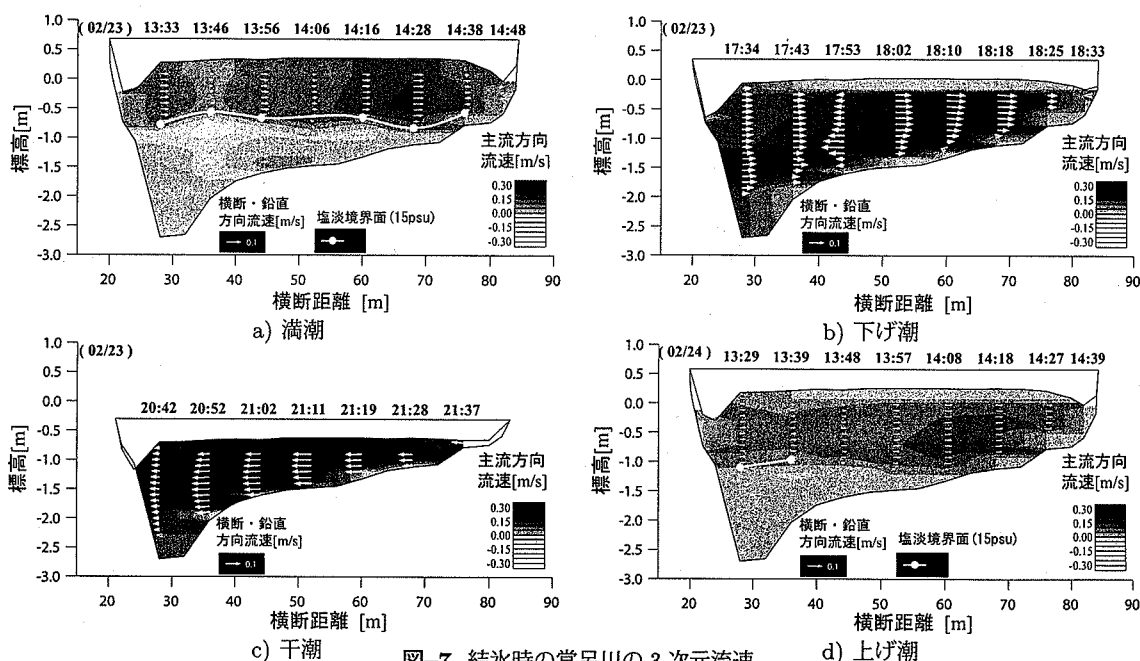


図-7 結氷時の常呂川の3次元流速

s^2/u^2 の値のばらつきを見ると、直線部の天塩川に比べて蛇行部の常呂川で大きい。常呂川において結氷時と非結氷時ともにばらつきが大きいことから、直線部に比べて蛇行部では、測定時間を長くとっても180秒の移動平均流速に近づくとは言えない。一方、直線部の天塩川では、検討結果から測定時間の差異による平均流速の大きな差異は見られなかった。このことから蛇行部および直線部ともに、感潮域におけるADCPの測定時間は、ある程度短くしても精度上問題ないと判断できる。

(4) 淡水と塩水が受ける抵抗

淡水と塩水の平均流速を算出する以下の式⁶⁾を用いて、流体が受ける抵抗について検討を行う。

$$V_1 = K_1 \sqrt{\epsilon g H_0} \quad (1)$$

$$V_2 = K_2 \sqrt{\epsilon g H_0} \quad (2)$$

V : 流速 [m/s], K : 係数, g : 9.8 [m/s²], H_0 : 水深 [m], ϵ : $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, ρ : 密度 [t/m³], 添え字1は淡水, 2は塩水である。 K_1 , K_2 を逆算し求めたものを表-5に示す。流速は最大流速を与えた。

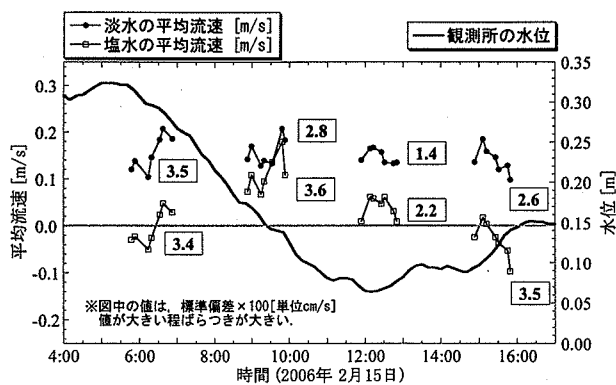


図-8 各測線毎の淡水と塩水の平均流速 (天塩川)

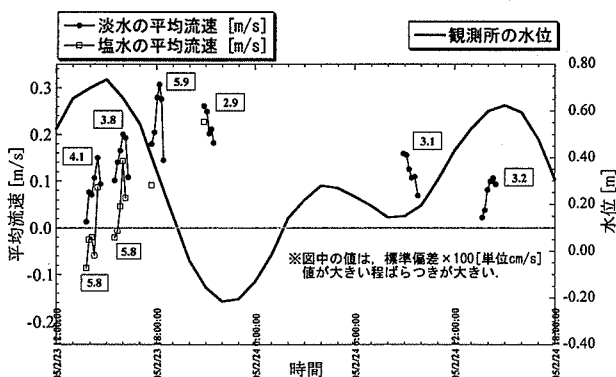


図-9 各測線毎の淡水と塩水の平均流速 (常呂川)

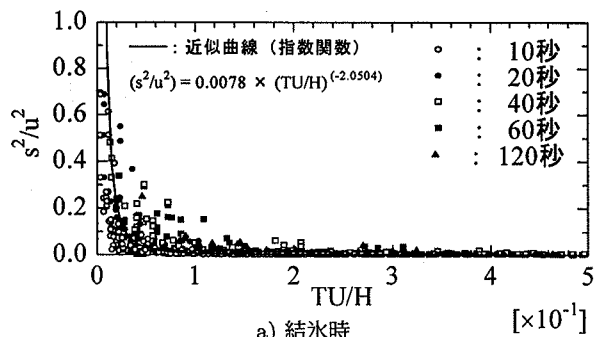
表-5 淡水と塩水の平均流速 (常呂川)

満潮時	V_1	V_2	H_0	ϵ	K_1	K_2
結氷時 1	0.17	-0.14	2.9	0.022	0.22	-0.18
結氷時 2	0.12	-0.06	2.7	0.021	0.16	-0.08
非結氷時 1	0.26	-0.11	3.3	0.022	0.31	-0.13
非結氷時 2	0.25	-0.11	3.1	0.023	0.30	-0.14

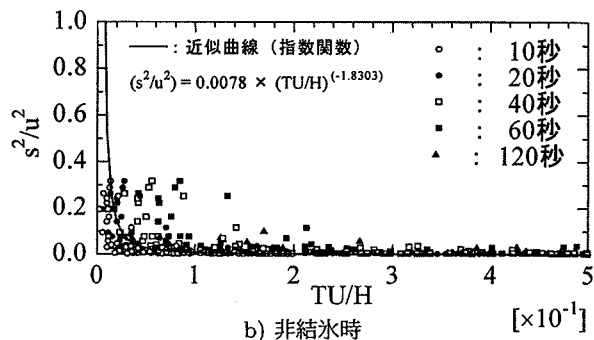
K が小さくなる程、流体が受ける抵抗が大きくなる。淡水について、 K_1 の平均値は結氷時：0.19、非結氷時：0.30 で結氷時の方が小さく、結氷時の方が流体が受ける抵抗が大きい。この原因として氷板による摩擦抵抗が考えられ、氷板により淡水の流速が遅くなったと推測出来る。塩水については、 K_2 の平均値は結氷時：-0.13、非結氷時：-0.13 で同値であり、塩水が受ける抵抗は氷板の有無に関わらず結氷時と非結氷時での相違はない事が確認された。

4. おわりに

今回の検討から、感潮域の流量観測では 1 測線の測定時間を短くする事が重要である事が明確となった。また、現地観測及び解析により結氷時と非結氷時の現象の同異を明らかにした。同じ現象である事が確認された事項は、水位変動速度と全流量が相関関係にある事、潮位と水位が二価性の関係にある事である。異なる現象としては、結氷時の主流方向が潮汐によって大きく変化する現象、塩水遡上時の淡水流速が氷板の摩擦抵



a) 結氷時



b) 非結氷時

図-10 各測定時間と平均流速の関係図 (常呂川)

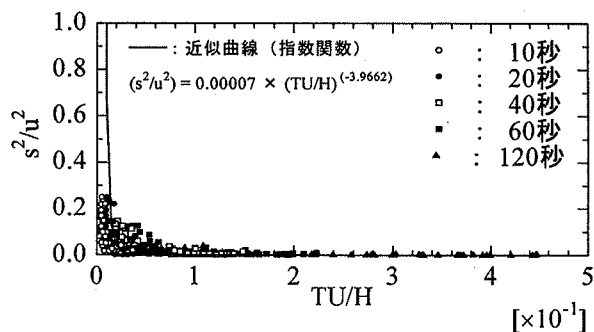


図-11 各測定時間と平均流速の関係図 (天塩川・結氷時)

抗によって減速する事である。特に結氷時の主流方向が変化する事は、流量観測精度上重要であり今後さらに調査が必要である事が判明した。

謝辞 北海道開発局網走開発建設部、留萌開発建設部より資料の提供等の御尽力、(株) 福田水文センターより観測等の御協力を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局 (独) 土木研究所：平成 14 年度版水文観測、(社) 全日本建設技術協会、pp204-208、2002。
- 2) 鈴木優一、石田享平、渡邊康玄、桑村貴志：結氷河川での河川流量観測手法の検討、北海道開発土木研究所月報、No.609、2 月、2004。
- 3) 佐藤嘉昭、中津川誠：超音波式流速計による感潮域の流出量の推定、北海道開発局技術研究、第 48 回、2005。
- 4) 吉川泰弘、渡邊康玄：結氷時の常呂川河口域における流量観測、北海道開発局技術研究、第 49 回、2006。
- 5) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの水利に関する基礎的研究、土木研究所資料第 1537 号、pp.37-45、1979。
- 6) 山本晃一、高橋晃、深谷渉：感潮河川の塩水遡上実態と混合特性、土木研究所資料第 3171 号、pp.8,27-29,52、1993。

(2006. 4. 6 受付)