

結氷時の感潮域における ADCP を用いた流量観測手法

Discharge Measurement Using an ADCP in the Tidal Zone of an Ice-covered River

吉川 泰弘* 渡邊 康玄**

Yasuhiro YOSHIKAWA and Yasuharu WATANABE

河川の流量は、流域全体の水資源計画を策定する上で重要な基礎資料である。流量の観測手法を確立するためには、その場所における水理現象を解明する必要がある。結氷時の感潮域においては、結氷時の観測の困難さ、感潮域の複雑な流況のために、水理現象が十分に解明されているとは言い難い状況にある。このため結氷時の感潮域における流量の観測手法は、水理現象を解明した上での手法となっていない。本研究は流量観測手法の開発を念頭に置き、結氷時の感潮域における現地観測を行い、水理現象の解明および流量観測に関する知見を得ることを目指している。得られた知見は以下の2点である。1) 今回の常呂川における観測結果から、感潮域の非結氷時で成立する流量推定式(佐藤、中津川)は、感潮域の結氷時においても成立する可能性があることが分かった。また流量推定式の係数が、結氷時と非結氷時で異なる事が明らかとなった。2) 結氷時の感潮域において ADCP の測定時間を長くしても、その観測期間の横断面流量の精度は向上しない。また ADCP の測定時間の違いによる平均流速の違いは、小さいという事が分かった。今回の天塩川における検討結果から、非定常流れである結氷時の感潮域において ADCP の測定時間を1測定当たり10秒とすれば、ある瞬間の横断面内の平均流速に近づき、その観測期間の横断面流量の精度が向上する事が分かった。

〈キーワード: 結氷河川; 感潮域; 流量観測; 北海道; 天塩川; 常呂川〉

Data on river discharge is essential for basin-wide water resource planning. Hydraulic phenomena in the freezing waters of a river's tidal zone have not been sufficiently clarified, because it is difficult to observe river conditions under ice sheets and the flow regime in such zones with unsteady flow is complex. Discharge in the tidal zone of ice-covered rivers has been measured using the conventional discharge measurement method for ice-free rivers, even though the accuracy of such measurements is questionable. Toward achieving an improved discharge measurement method for ice-covered rivers, it is necessary to clarify the hydraulic phenomena in the ice-covered tidal zone. Our field observation in the tidal zones of two ice-covered rivers revealed two main findings: 1) Observations at the Tokoro River revealed that it might be possible to apply a discharge estimation equation for the tidal zone of an ice-free river (Sato, Nakatsugawa) to an ice-covered river. The discharge estimation equation for the tidal zone of an ice-covered river employed a different value for the coefficient. 2) In using an ADCP to measure the average discharge within a cross-section of a river channel with unsteady flow, prolonging the measurement duration did not improve measurement accuracy. The measured values showed little difference according to the measurement duration. We concluded from field survey at the Teshio River that 10-second measurement is sufficient for measuring discharge in the ice-covered tidal zone.

〈 Keywords : Ice-Covered River, Tidal Zone, Discharge observations, Hokkaido, Teshio River, Tokoro River 〉

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。流量の観測手法においては、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)となるため、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のが現状である。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。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および流量観測に関する知見を得ることを目指している。

2. 現地観測

現地観測は、北海道東部の常呂川(流路延長120km、流域面積1,930km²)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(流路延長256km、流域面積5,590km²)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観測を行い、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。

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

(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⁴⁾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⁵⁾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事が分かる。

(3) 観測項目

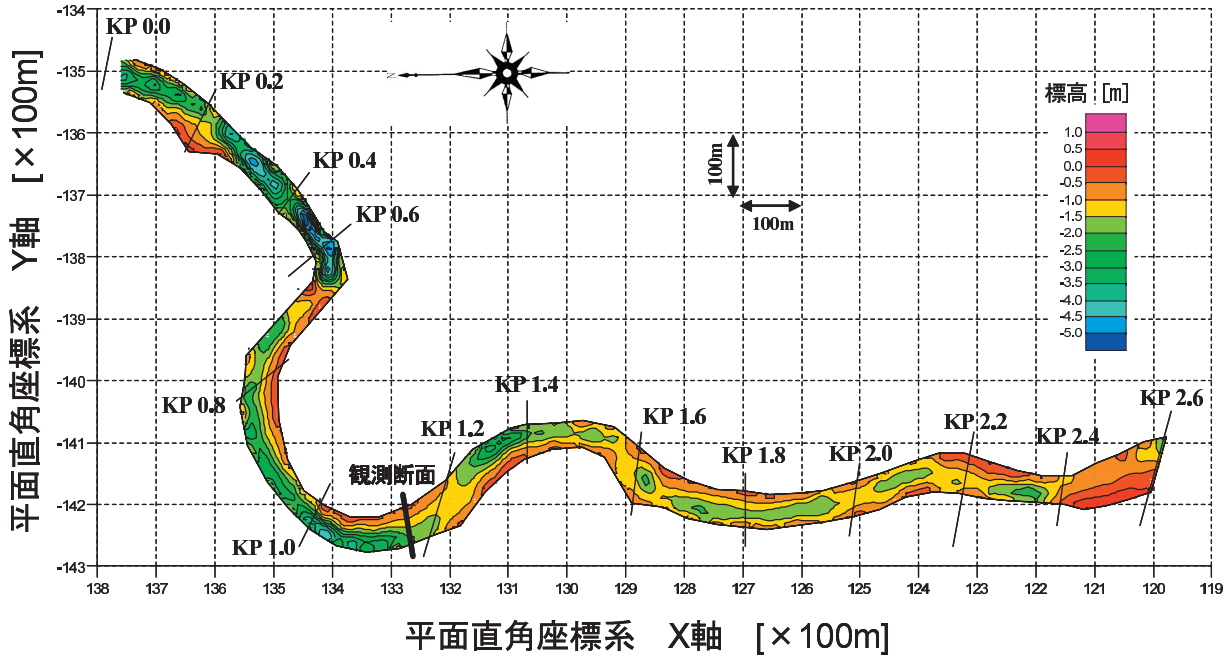
常呂川における観測の概念図を図-2に、天塩川にお

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	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)

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。結氷時の測定は測線の氷に穴を開けて行った。今回の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。

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滲筋のみとしている。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。

a) ADCP について

結氷時の ADCP の測定は、測線に氷の穴を開けて

ADCP を材料で固定し鉛直下方に向けて測定を行った。固定に用いる材料は、ADCP には方位測定のため磁石が内臓されており、磁気の影響を磁石が受けないために、ゴム、ステンレス、木などの材料を用いた。また、ADCP は流体の温度により音波速度の補正を行っており、その温度範囲は-5～45℃である。今回の観測はその範囲内であった。

ADCP の測定値は、水平面での流速 (V_H)、 V_H の方位 (β°)、鉛直方向の流速である。 β は北が 0° とし右回りの方位である。水平面での流速 (V_H) を簡便のため主流方向および横断方向の流速に分離する方法について記述する。主流方向とは河川上流から河口への方向であり、横断方向とは主流方向と直角をなす方向である。その関係を図－4に示す。主流方向の方位： a° を基準方向とした場合の β の方向を γ° とすると、 γ 、 θ (ラジアン表示) は次式で求めた。

- i) $a < \beta$ …… $\gamma = \beta - a$
 - ii) $a > \beta$ …… $\gamma = 360^\circ + (\beta - a)$
 - iii) $a = \beta$ …… $\gamma = 0^\circ$
- $$\theta = \gamma \pi / 180^\circ$$

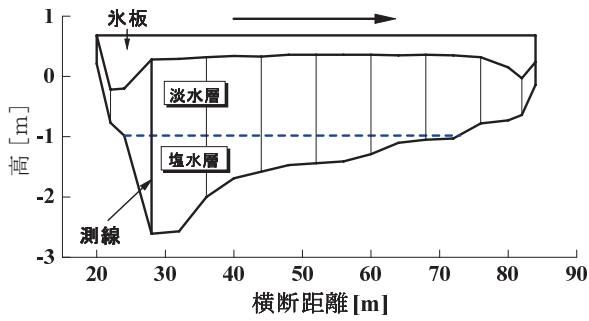


図-2 常呂川観測の概念図

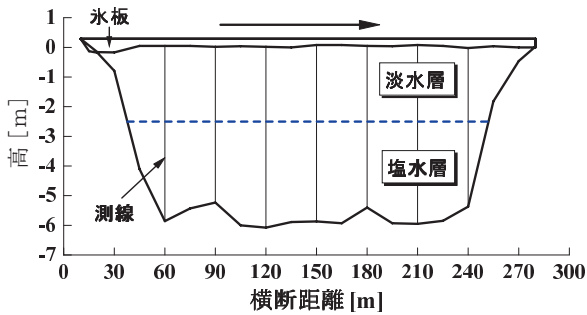


図-3 天塩川観測の概念図

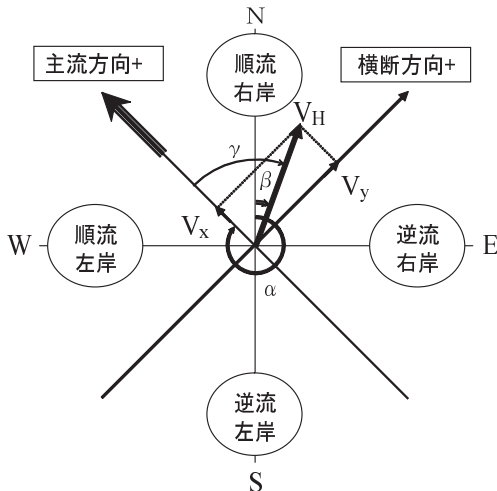


図-4 流速ベクトルと方位の関係

主流方向を正とする流速： V_x と横断方向の右を正とする流速： V_y は、 V_H 、 θ を用いて次式で分離し求めた。

$$\begin{aligned} \text{a) } 0 \leq \theta < \pi & \quad V_x = V_H \cos(\theta) \\ & \quad V_y = V_H \sin(\theta) \\ \text{b) } \pi \leq \theta < 2\pi & \quad V_x = -V_H \cos(\theta - \pi) \\ & \quad V_y = -V_H \sin(\theta - \pi) \end{aligned}$$

観測場所により主流方向の方位が変化する事を考慮して、ここではあえて固定していない。主流方向の方位の決め方は、観測断面に直交する方位とする方法と、横断面内において各測線、各層毎の水平面ベクトル流速を各々XY軸に成分分解し、X軸、Y軸で平均して算出される平均ベクトルの方位を主流方向の方位とする方法が考えられる。

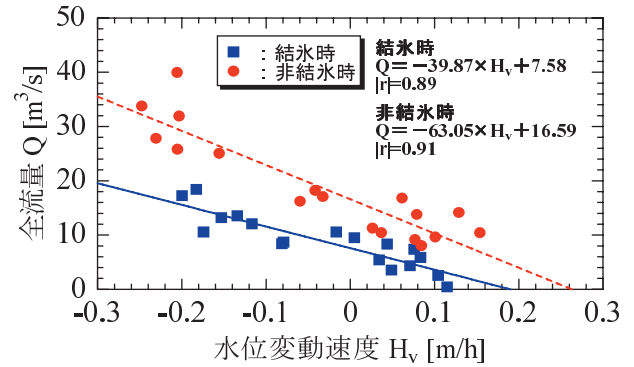


図-5 水位変動速度と全流量の相関図(常呂川)

3. 水理現象と流量観測

ここでは、流量観測を行う上で重要である水位、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。ここでいう水位変動速度m/hとは、1時間の間に水位が上昇または下降した場合の鉛直方向の移動距離である。この水位変動速度の算出は「ある時刻の水位」から「1時間前の水位」を引く事により求められる。この場合の水位変動速度の時刻は「ある時刻の30分前」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-5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

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

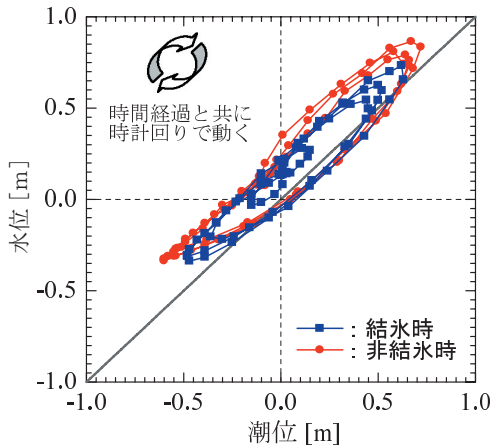


図-6 潮位と水位の相関図（常呂川）

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の係数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-6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事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-7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-7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。

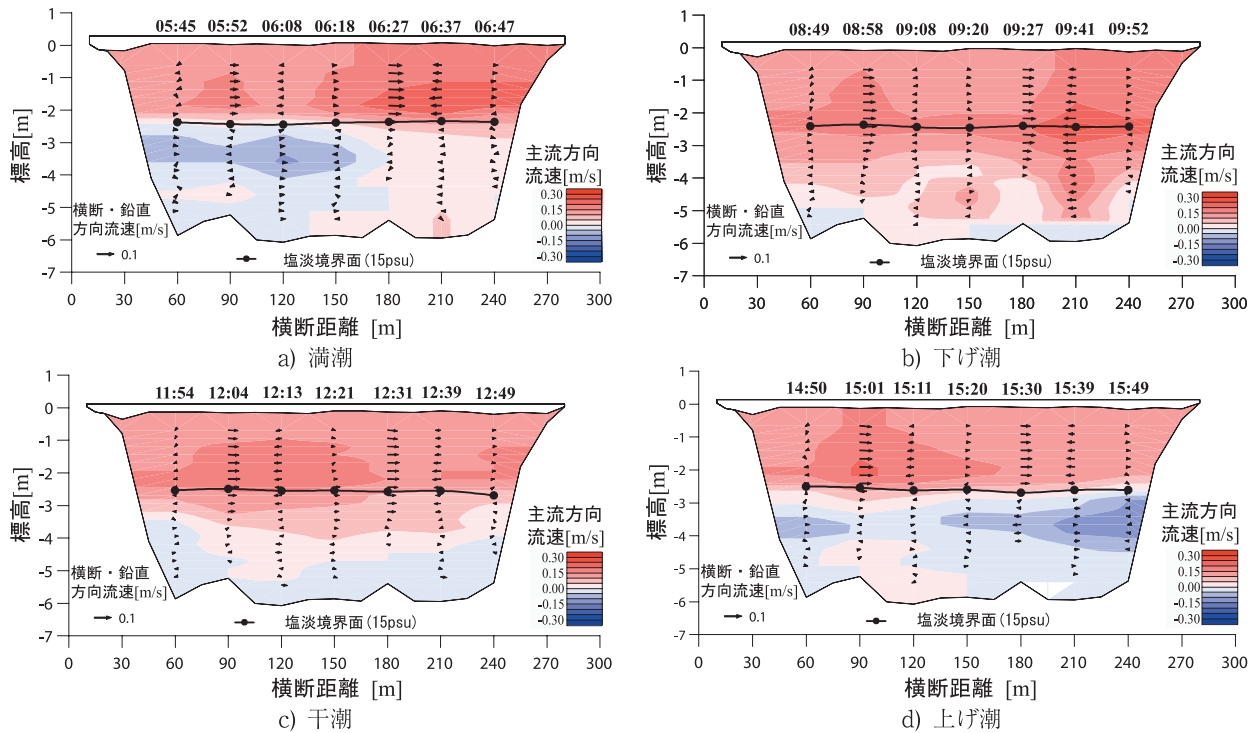
次に流心の位置に着目する。その位置は満潮から下げ潮では右岸側にあり、干潮から上げ潮では左岸にある。この流心位置の移動の原因を探るために、各測線毎の流速分布を塩分濃度15psuを境界として、淡水と塩水に区分した平均流速を算出した。河口に向かう流れを正とした平均流速を縦軸に、時間を横軸に取り図-9に示す。左岸から右岸への観測方向を念頭に置くと、図-9から平均流速について以下の事が言える。

- 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。

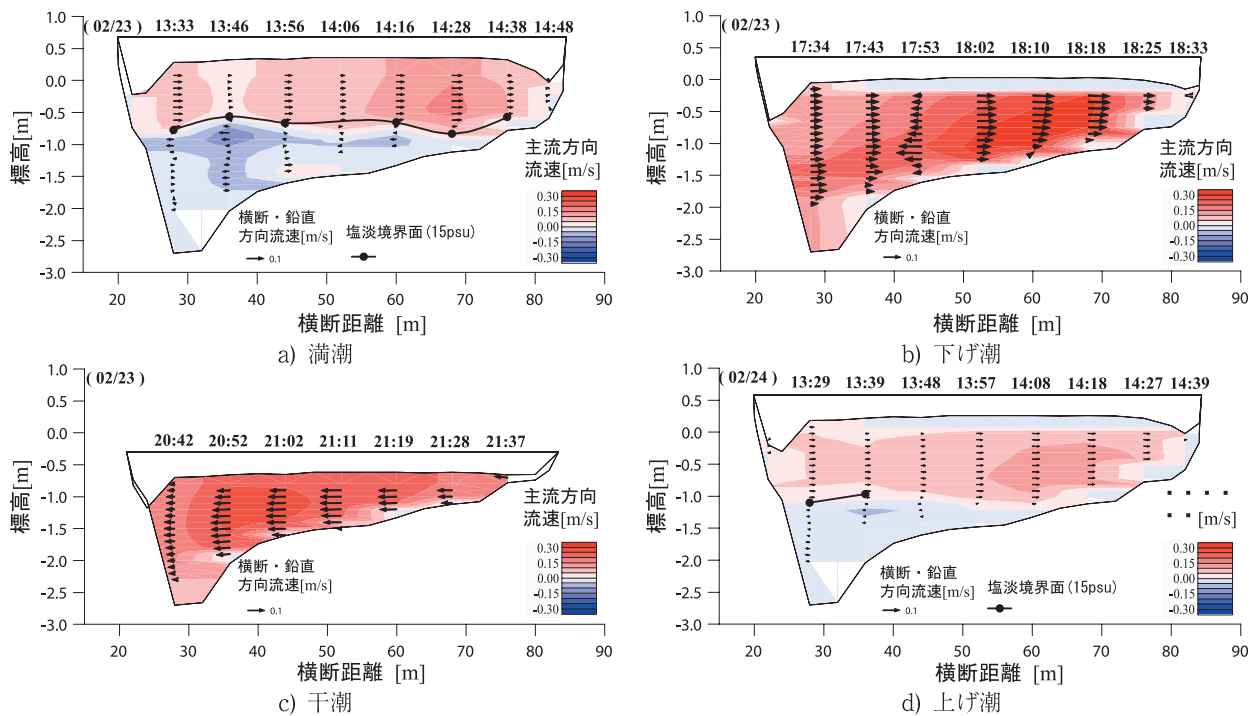
上述により、流心位置の移動は測定時間の違いによる見かけ上の移動であると言える。また、感潮域において、ある瞬間の流量に近づけるためには、1測線の測定時間を精度を落とす事なく短くすれば良い事が分かる。

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-8に示し、淡水と塩水の平均流速を図-10に示す。図-8の塩淡境界面は、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-8、10より流心位置について以下の事が言える。



図－7 結氷時の天塩川の3次元流速



図－8 結氷時の常呂川の3次元流速

- 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、滯筋の左岸側である。（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

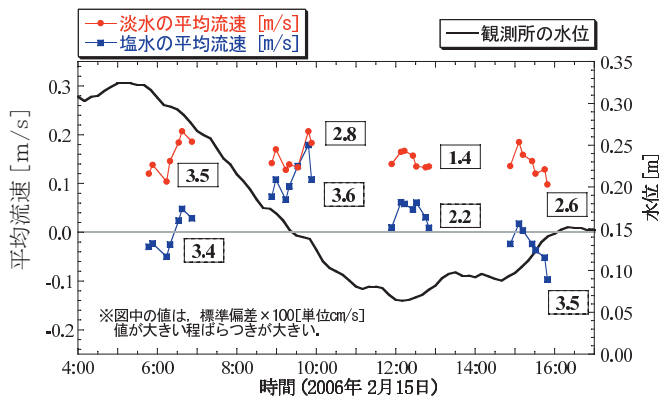


図-9 各測線毎の淡水と塩水の平均流速（天塩川）

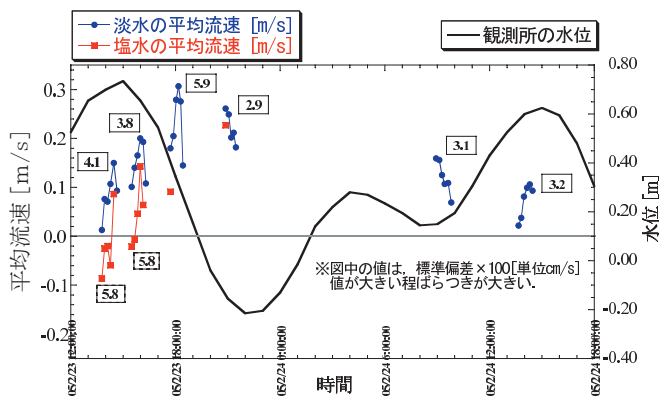


図-10 各測線毎の淡水と塩水の平均流速（常呂川）

に現れている。この事から、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。

(3) 流速の測定時間

定常流れにおける流速の測定時間について述べ、次に非定常流れについての検討を行う。非定常流れの検討は蛇行部の影響を無視するために、直線部である天塩川の観測結果を用いている。

a) 定常流れ

現行の流速測定時間は、1点につき20秒以上と明記¹⁾されている。既往研究^{6), 7)}では、先の測定時間に理論的説明を加えている。その理論は、流速の時間的な変動特性により測定精度が規定されるというものである。真の平均流速 (U) と観測された平均流速 (U_T) の差が誤差であるが、この誤差を標準偏差 (U_T) で表し相対誤差 $e (=U_T'/U)$ で検討している。なお、 e は式 (1) で表されている。

$$e = \sqrt{2 \frac{T_E}{T}} \cdot \frac{u'}{U} \quad (1)$$

ここで、 T_E : 流水中の平均的な大きさの渦がある点

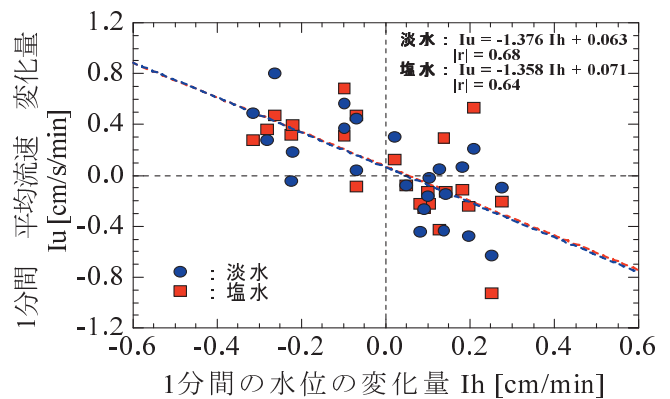


図-11 水位と平均流速の変化量の相関図（天塩川・結氷時）

を通過する時間、 T : 測定時間、 u' : 乱れの強さ、 U : 真の平均流速である。

式 (1) より、測定時間が長いほど真の平均流速に近づく事が分かる。しかし、あまりに測定時間を長く取ることは実際上困難であるため、測定精度を決めて測定時間が決定される事となる。これは測定時間を長く取れば真の平均流速に近づく事を前提とした定常流れが仮定できる場合のものである。

b) 非定常流れ

非定常性が強い流れである感潮域では、定常流れの場合のように測定時間を長く取る事により真の平均流速に近づくとは言えない。結氷時の感潮域における流速の測定時間の検討は、直線部の天塩川において平均流速の挙動、測定時間の差異の2点に着目して行う。**平均流速の挙動** 図-9より各観測毎の標準偏差は、水位変動が大きい下げ潮時と上げ潮時で値が大きく、この時間帯で平均流速のばらつきが大きい事が分かる。

図-11は1分間の水位の変化量と1分間の平均流速の変化量の相関図である。図-11より負の相関がある事が分かる。回帰直線式から水位の変化量の絶対値が小さいほど、平均流速の変化量の絶対値は小さくなる事が分かる。平均流速の変化量の絶対値が小さければ、測線間の平均流速の差が小さくなり、ある瞬間の横断面内の平均流速に近づくと言える。この平均流速に近づくためには、1測線の測定時間を短くすれば良い事となる。また、水位変動が大きい時間帯である下げ潮時と上げ潮時には、特に短く取る必要があると言える。**測定時間による差異** 前項の結果より、測定時間を短くすれば良い事が分かった。次に、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事とする。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

表-4 各測線における平均流速の標準偏差（天塩川・結氷時）

横断距離 [m]	60	90	120	150	180	210	240
標準偏差 [cm/s]	0.51	0.84	0.44	0.45	0.62	0.53	0.62

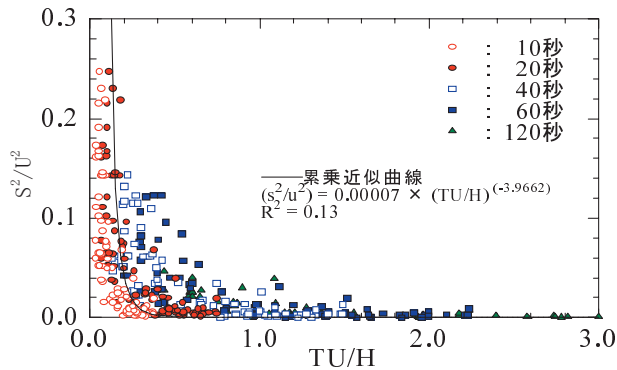


図-12 各測定時間と平均流速の関係図（天塩川・結氷時）

(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-12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。図中の指数関数の近似曲線は、全ての値を対象としている。近似曲線の R^2 は、近似曲線の値が測定値にどれだけ近いかを表す数値である。 R^2 が0に近づくほど、近似曲線の値は測定値から離れる。今回、 R^2 は0.13と小さく測定値のばらつきが大きい事を示している。測定時間が長いほど180秒の移動平均流速に近づくとは言えない。

次に、測定時間の差異による平均流速の違いを見る事とする。各測線において各測定時間の平均流速の標準偏差を算出したものを表-4に示す。どの測線においても、標準偏差の値は小さい事が分かる。測定時間の差異による平均流速の違いは小さく、10秒間の測定値と120秒間の測定値は大きな差異がないと言える。

4. おわりに

結氷時かつ感潮域における流量観測手法の開発を念頭に置いた現地観測および解析により、以下の事が明らかとなった。

- 1) 今回の常呂川における観測結果から、感潮域の非結氷時で成立する流量推定式³⁾は、感潮域の結氷時においても成立する可能性があることが分かった。また流量推定式の係数が、結氷時と非結氷時で異なる事が明らかとなった。
- 2) 平均流速の挙動および測定時間による差異の検討から、結氷時の感潮域において ADCP の測定時間を

長くしても、その観測期間の横断面流量の精度は向上しない。また ADCP の測定時間の違いによる平均流速の違いは、小さいという事が分かった。今回の天塩川における検討結果から、非定常流れである結氷時の感潮域において ADCP の測定時間を1測定当り10秒とすれば、ある瞬間の横断面内の平均流速に近づき、その観測期間の横断面流量の精度が向上する事が分かった。

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を頂きました。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、pp122、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月号、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) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究、土木研究所資料第1537号、pp.37-45、1979.
- 5) 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.
- 6) 浅野富夫：流量観測における観測時間と精度との関係、土木技術資料第22巻11号、pp15-20、1980.
- 7) 浅野富夫：流量観測における観測時間と精度との関係（その2）、土木技術資料第23巻9号、pp21-26、1981.



吉川 泰弘*

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
研究員



渡邊 康玄**

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
上席研究員
博士（工学）