

河川結氷時における新たな流量推定手法の開発

吉川 泰弘¹・平井 康幸¹

¹土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

河川結氷時の流量は、渇水流量（年間を通じて355日はこれを下回らない流量）を記録することが多く、年間の水資源計画を策定する際には重要な資料となる。本研究の課題は、河川結氷時の流量を推定する新たな手法を開発し、本手法を現場へ適用することである。本研究では、詳細な現地観測を実施し、これらの観測データを用いて検討を行い、河川結氷時の流量推定手法を開発した。本手法は現行の観測資料のみで流量を推定することが可能であり、推定した流量の精度は従来手法と比べて高いことを示した。

キーワード 結氷河川、流量推定手法、北海道

1. はじめに

寒冷地の河川は、冬期間の気温の低下によって結氷する。この結氷期間は、北海道では12月下旬から4月上旬の約100日である。河川結氷時の流量は、年間を通じた水資源計画における正常流量（流水の正常な機能を維持するために必要な流量）を決定するための重要な基礎資料となる。また、今後、気候変動により冬期間の流量が増減する場合には、今よりも増して河川結氷時の流量を精度よく推定することが望まれている。

しかし、河川結氷時は図-1に示すように河氷の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係（ HQ 式）は成り立たず、一方で、河氷が流水へ与える影響については十分には解明されていない。このため、河川結氷時の流量を連続的に推定する手法は、河氷が流水へ与える影響を考慮していない従来手法はあるものの推定精度が低く、現在、現場への適用には至っていない。

本研究は、河川結氷時における流量推定手法の開発を目的として、河川結氷時において詳細な現地観測を実施し、これらの観測データを検討資料として、コスト低減の観点から、追加観測なしに現行の観測資料のみを用いる流量推定手法を開発した。さらに、本手法の現場への適用を念頭に置き、本手法と従来手法の推定流量の精度比較を行い、本手法の利点と欠点を明確にした。

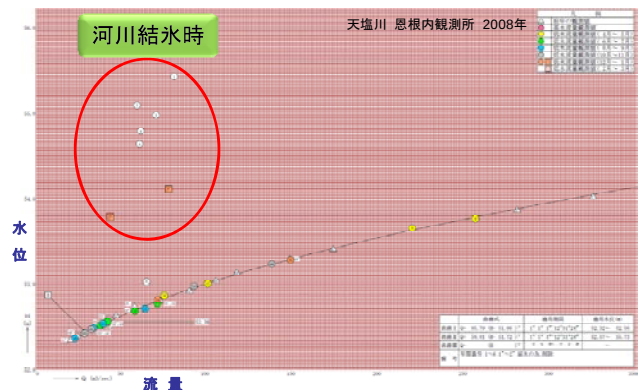
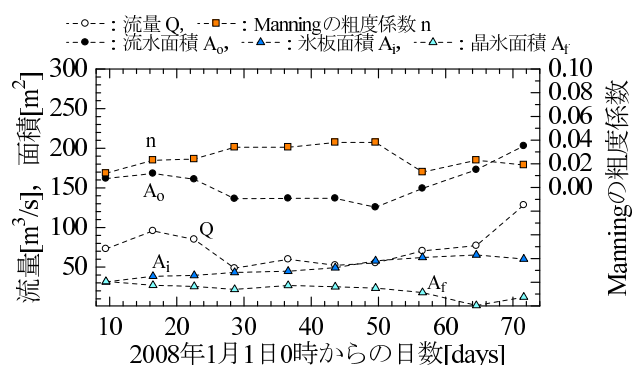


図-1 寒冷地河川における水位と流量の関係
(提供：北海道開発局)

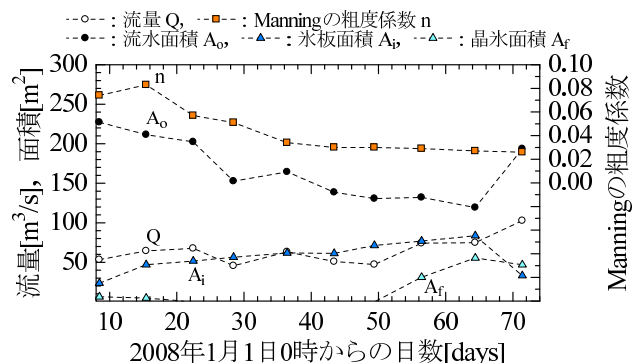
2. 現地観測

北海道北部に位置する天塩川（流路延長256km、流域面積5,590km²）を対象に、観測期間を2008年1月から3月として、円山（まるやま）観測所 KP30.00、天塩川の基準地点である誉平（ぼんびら）観測所 KP58.93、恩根内（おんねない）観測所 KP111.70の3地点で水位と流量の現地観測を実施した。観測期間中の3地点の結氷状況は、河川水面が全て河氷で覆われる完全結氷であった。なお、恩根内は、円山および誉平に比べて晶氷が多く滞留する地点である。本研究では、結氷河川における河氷を、硬い氷板（Ice Sheet）と水面および氷板下に存在する軟らかい晶氷（Frazil, Frazil Slush）に大別して検討しており、KPとはキロポストの略で河口からの距離 km である。なお、晶氷とはシャーベット状の氷であり、現場においてモロミと呼称されている。

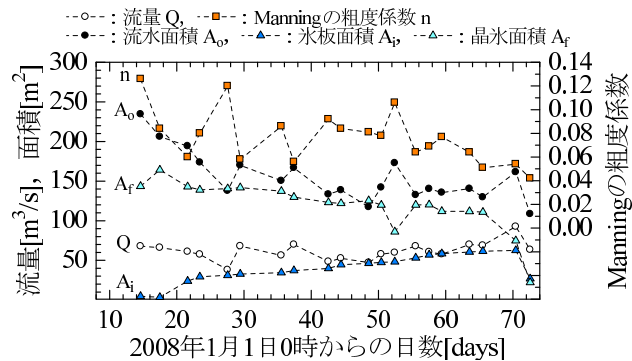
現地観測から得られた観測流量 Q [m^3/s], 流水面積 A_o [m^2], 氷板面積 A_i [m^2], 晶氷面積 A_f [m^2]およびManningの粗度係数 n [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]を図-2に示す. 図-2より, 氷板面積 A_i は各地点で時間経過に伴い増加しているが, 晶氷面積 A_f は地点により時間的な変動が異なる. Manningの粗度係数について, 円山では0.012から0.038の範囲で推移しているのに対して, 菅平では0.026から0.083の範囲で時間経過に伴い小さくなっている. 恩根内では0.126から0.042の範囲であり, その変動は菅平同様に時間経過に伴い小さくなっているが, 菅平に比べて上下に値が変動している. 今回の詳細な現地観測結果から, 地点によって結氷状況および水理現象が異なることが分かる.



1) 円山 KP30.00



2) 菅平 KP58.93



3) 恩根内 KP111.70

図-2 流量, 流水面積, 氷板面積, 晶氷面積, Manningの粗度係数の経時変化

3. 河川結氷時の流量推定式の開発

現地観測結果より, 河川結氷時の流量は複合的な影響を受けて一義的に決まらないことを受けて, これらの影響を過不足なく考慮した河川結氷時の流量推定式を開発した. この式を式(1)に示す. この式の導出過程については既往研究¹⁾を参照して頂き, 本論文では本推定式の具体的な意味について述べる.

$$Q = C B_w^{-1/4} A_o^{3/4} \quad (1)$$

ここで, 流量 Q [m^3/s], C [$\text{m}^{3/4}/\text{s}$], 川幅 B_w [m], 流水面積 A_o [m^2]である. 本推定式の C 値の変化に対する流量 Q と流積 A_o の応答を図-3に示す. 図-3より, 本推定式は河水量が増加すると流積 A_o が小さくなり, 河氷底面が粗いと C 値は小さくなり, 流量 Q は減少する式である. 河川結氷時の横断概念図を図-4に示す. 図中において, 積雪面積 A_s [m^2], 水位 H [m], 喫水 d [m]である.

(1) C 値

C 値の物理的意味は, 河氷底面が流水により融解されて, 滑らかになることによる粗度の減少の程度を表している. なお, 本推定式は, 河床の変動は無視し河床の粗度は一定と考えて, その影響は C 値に織り込まれていると仮定している. C 値は, 小さいほど河氷の影響によって流れずらく流量は小さくなる.

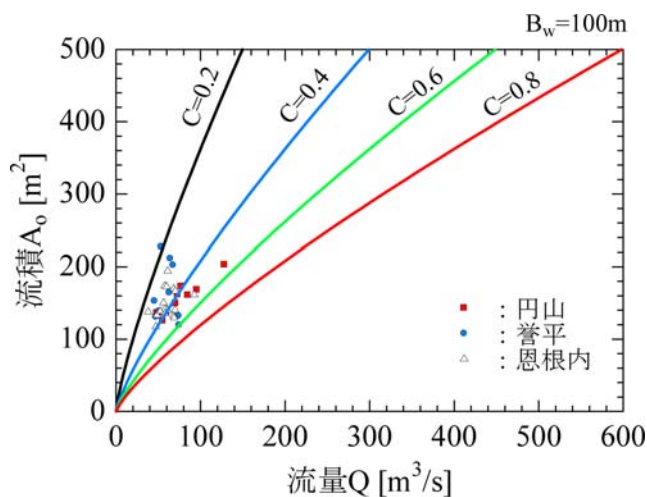


図-3 流量推定式の C 値の変化に対する流量 Q と流積 A_o

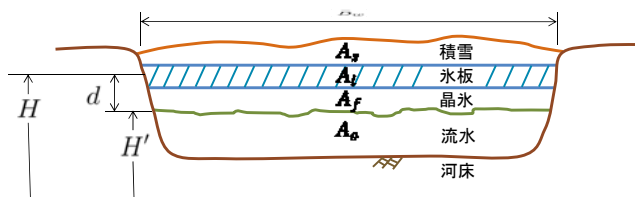


図-4 河川結氷時の横断概念図

(2) 川幅 B_w

本推定式の川幅 B_w は、定期流量観測で得られる流量測定図における区間距離の合計であり、横断面内において河川水が存在する左岸側の測線から右岸側の測線までの距離である。

(3) 流水面積 A_o

本推定式の流水面積 A_o は、流量測定図における区分断面積の合計であり、河川水が流れる面積である。なお、晶氷面積 A_f [m^2] は、流量測定図のモロミ面積の合計であり、氷板面積 A_i [m^2] は、流量測定図の水面上氷面積と水面下氷面積の合計であり、積雪面積 A_s [m^2] は、流量測定図の雪面積の合計である。

4. 河川結氷時の流量推定手法の精度比較

河川結氷時の流量推定手法の現場への適用を念頭に、従来手法の ΔH を用いる手法、従来手法の K 値を用いる手法²⁾、本手法の C 値を用いる手法の3つの手法において、現行の観測資料のみのデータを用いて流量を推定し、真値を本研究で得られた観測流量として、各手法における推定流量と観測流量の精度比較を行った。

流量推定に必要な入力データは、月3回の間隔で定期的実施されている流量観測から得られる流量、積雪面積、氷板面積、晶氷面積、川幅、水位とし、連続的な水位データは、国土交通省の水文水質データベースから得られる1時間毎のデータとした。

(1) 流量推定手法の手順

各手法における流量推定手法の実際の手順を記述する。

a) ΔH を用いる手法

- 1) 開水時の HQ 式を導出する。
- 2) 結氷時の観測流量 Q を開水時の HQ 式に代入して相当水位 H' を求める。
- 3) 結氷時の観測水位 H と相当水位 H' との差 $\Delta H (=H-H')$ を求め、観測を実施していない日の ΔH は、その日を挟む観測日の値を用いて線形補完により求める。
- 4) 結氷時の連続水位 H から ΔH を差し引いた値 H' を HQ 式に代入して、結氷時の流量 Q を推定する。

b) K 値を用いる手法

平山²⁾による K 値を用いる手法について解説する。結氷時（添字 w ）と開水時（添字 s ）において、Manning式を適用すると、式(2)および式(3)が与えられる。

$$Q_w = \frac{A_w}{n_0} R_w^{2/3} I_w^{1/2} \quad (2)$$

$$Q_s = \frac{A_s}{n_1} R_s^{2/3} I_s^{1/2} \quad (3)$$

n_0 , n_1 , I_w , I_s は一定値、 $Q_w = Q_s$ と両者の流量が等しいと仮定すると、式(4)が導かれる。

$$A_s R_s^{2/3} = \frac{1}{K} A_w R_w^{2/3} \quad (4)$$

式(4)の右辺の値が連続的に与えられれば、得られる左辺の値から相当水位 H' を算出し、この相当水位 H' を開水時の HQ 式に代入して流量を推定することができる。

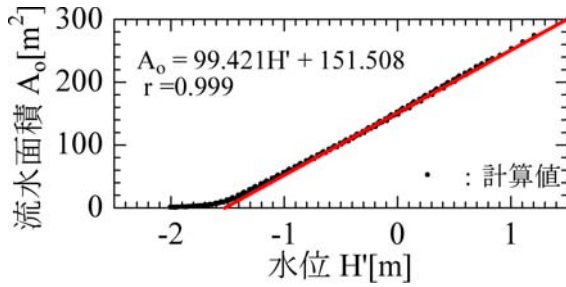
- 1) 開水時の HQ 式、開水時の HA 式、開水時の $H-A_s R_s^{2/3}$ 式を導出する。
- 2) 結氷時の定期観測データから $A_w R_w^{2/3}$ を得る。
- 3) 結氷時の観測流量 Q を HQ 式に代入して相当水位 H' を求め、 $H-A_s R_s^{2/3}$ 式に相当水位 H' を代入して $A_s R_s^{2/3}$ を求める。
- 4) 式(4)から K 値を得て、喫水 d と川幅 B_w は観測データから得る。観測を実施していない日の K , d , B_w は、その日を挟む観測日の値を用いて線形補完により求める。
- 5) 結氷時の連続水位 H から喫水 d を差し引いた値 H' を HA 式に代入して A_w を求め、径深は A_w , B_w から求める。これらの値から $A_w R_w^{2/3}$ を求める。
- 6) 式(4)に $A_w R_w^{2/3}$ と K 値を代入して $A_s R_s^{2/3}$ を求める。
- 7) $H-A_s R_s^{2/3}$ 式に $A_s R_s^{2/3}$ を代入して相当水位 H' を求め、 HQ 式に相当水位 H' を代入して、結氷時の流量 Q を推定する。

c) C 値を用いる手法（本手法）

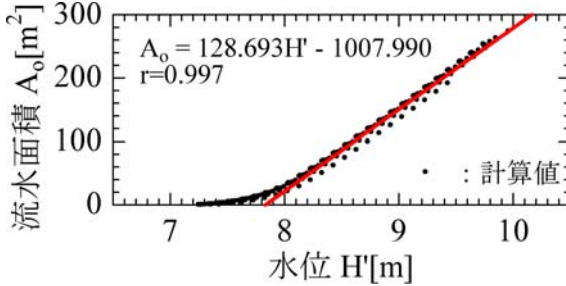
- 1) 開水時の HA 式（水位 H と流積 A の関係式）を横断測量データから導出する。
- 2) 結氷時の定期観測データから、喫水 d , C 値、川幅 B_w を得る。観測を実施していない日の d , C , B_w は、その日を挟む観測日の値を用いて線形補完により求める。
- 3) 結氷時の連続水位 H から喫水 d を差し引いた値 H' を HA 式に代入して A_o を求めて、式(1)に C , B_w , A_o を代入して結氷時の流量 Q を推定する。

・ HA 式と喫水 d の導出について

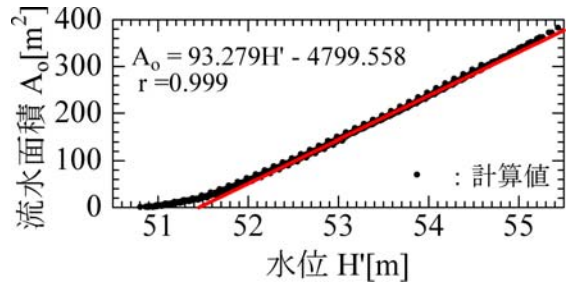
HA 式の導出は、開水時の横断測量データを用いて、図-5に示す水位 H' と流水面積 A_o の関係式(5)を導く。河川結氷時の水位 H を式(6)に代入して、相当水位 H' を求め、この H' を HA 式に代入し A_o を算出する。なお、河川結氷時の水位 H' は河床底面の横断面平均標高となり、喫水 d は式(7)より算出³⁾した。



1) 円山 KP30.00



2) 誉平 KP58.93



3) 恩根内 KP111.70

図-5 開水時における水位 H' と流水面積 A_o

$$A_o = f(H') \quad (5)$$

$$H' = H - d \quad (6)$$

$$d = \frac{\rho_s A_s + \rho_i A_i + \rho_f A_f}{\rho_w B_w} \quad (7)$$

ここで、 ρ [kg/m³] は密度であり、水の密度 $\rho_w = 1000.00$ 、雪の密度 $\rho_s = 100.00$ 、氷の密度 $\rho_i = 917.40$ 、晶氷の密度 $\rho_f = 950.38$ とした³⁾。

・ C 値の算出について

定期観測データの流量 Q 、川幅 B_w 、流水面積 A_o を式 (8) に代入して C 値を算出する。

$$C = \frac{Q}{B_w^{\frac{1}{2}} A_o^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

(2) 推定流量と観測流量

各地点において、各手法の推定流量、推定に用いた各値、観測流量を図-6, 7, 8 に示す。推定に用いた観測データの観測日は、図中の四角黒塗りで示した。図-6, 7, 8 より、観測期間中の B_w の経時変化は小さく、 d , ΔH , C , K の経時変化は各地点毎に異なる。また、3 手法の推定流量は、観測流量の経時変化を定性的に良く再現していることが分かる。なお、流量の日変動は上流の岩尾内ダムの放流量の影響であり、図-8 に岩尾内ダムの放流量の経時変化を示す。

ΔH を用いる手法の推定流量は、水位と ΔH から算出されるため、水位変動が直接的に流量変動となるため、他の手法と比べて、推定流量の変動が大きいと考えられる。また、図-6 の K 値を用いる手法の推定流量は、 K 値が 1 よりも小さく変化が小さいため、式 (4) より結氷時の流水面積変動が直接的に流量変動となり、 C 値を用いる手法と比べて、推定流量の変動が大きいと考えられる。

(3) 誤差ヒストグラム

推定流量の観測流量に対する誤差ヒストグラムを図-10 に示す。誤差評価に用いた観測データは、本研究で得られた観測流量の全 40 データの内、定期的な流量観測で河川が結氷している期間内として 36 データとした。

図-10 の $\pm 5\%$ の誤差内でみると、 ΔH を用いる手法 (ΔH 法) は全 36 データの内 33% の 12 データが入り、 K 値を用いる手法 (K 値法) は全 36 データの内 36% の 13 データが入り、 C 値を用いる手法 (C 値法) は全 36 データの内 36% の 13 データが入り、どの手法も同程度の精度で流量を推定している。

図-10 の $\pm 10\%$ の誤差内でみると、 ΔH 法は全 36 データの内 58% の 21 データが入り、 K 値法は全 36 データの内 50% の 18 データが入り、 C 値法は全 36 データの内 58% の 21 データが入る。 ΔH 法と C 値法は、 K 値法と比べて推定精度が高い。

図-10 $\pm 20\%$ の誤差内でみると、 ΔH 法は全 36 データの内 81% の 29 データが入り、 K 値法は全 36 データの内 81% の 29 データが入り、 C 値法は全 36 データの内 92% の 33 データが入る。 C 値法は他の手法と比べて推定精度が高い。

本研究の新たな流量推定手法 (C 値法) は、上記の精度で観測流量を推定することが可能であり、今回の検討においては、本手法であるは従来手法よりも推定精度が高い。本研究の流量推定式の精度は、測定した連続水位データ、式 (7) の喫水 d の推定式、 HA 式の精度に影響を受ける。また、 d , C , B_w の値を線形補完して与える期間において、河水量の変化、河水の構成材料の変化、晶氷の滞留および掃流、水温変化が起こる場合には、推定流量はその影響を受ける。

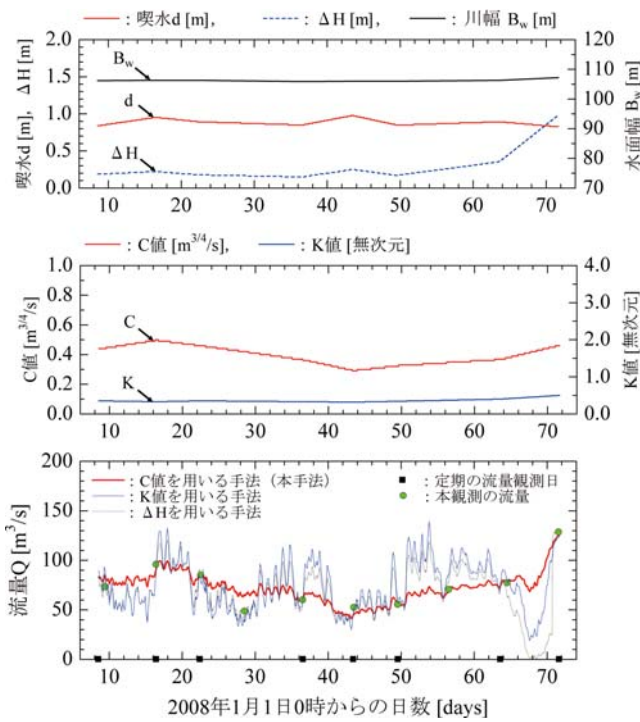


図-6 円山 (KP30.00) における
本手法と従来手法の推定流量と観測流量

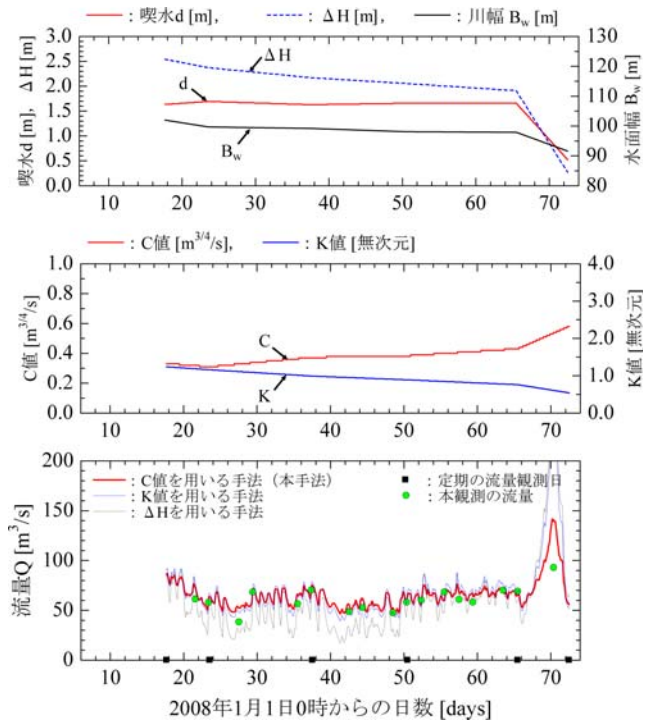


図-8 恩根内 (KP111.70) における
本手法と従来手法の推定流量と観測流量

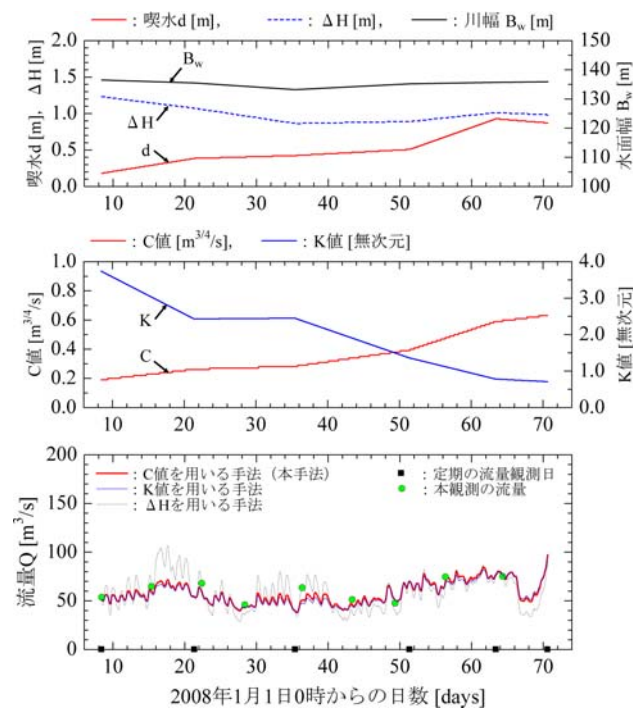


図-7 誉平 (KP58.93) における
本手法と従来手法の推定流量と観測流量

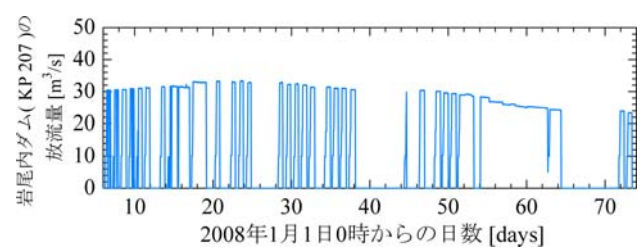


図-9 岩尾内ダムの放流量の経時変化

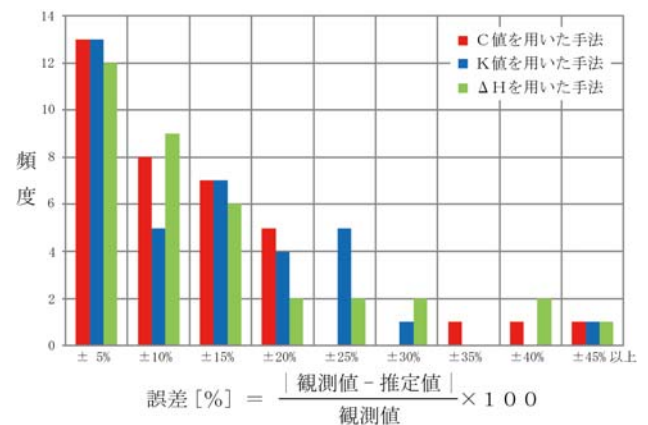


図-10 推定流量の誤差ヒストグラム(全36データ)

(4) 本手法の利点と欠点

本手法の利点として、例えば、 K 値は開水時の粗度係数、エネルギー勾配の関数であり、結氷以外の影響を受けるため、その変動要因を特定するのが困難であるが、本手法は結氷時のみの観測データを用いており、流量の推定手法が明確となっているため、推定流量と観測流量

が一致しない場合においては、その原因についての考察が可能であることである。

本手法の欠点としては、河床変動を考慮していないため、その影響を見積れないこと、喫水 d を式(7)を用いて算出する際の積雪密度、氷板密度、晶氷密度は、本研究では定数として与えているが、地点および時間によ

て、その値が異なることが予見されるため、各値の与え方については検討が必要であることである。

本研究は、河川結氷時を対象としているため、開水時から結氷時の初期結氷期間 (Freeze-up period)、結氷時から解氷時の解氷期間 (Break-up period)の流量を推定するためには、さらに検討を要する。この課題の解決のためには、新たな現地観測および観測データの解析を行う必要がある。また、本検討は、1河川、1シーズンを対象としているため、本手法の汎用性、有効性、適用条件を明らかにするためには、本手法を広く他の現場へ適用し検討を重ねる必要がある。

5. まとめ

本研究の成果として、河川結氷時の流量を流水面積 A_o 、水面幅 B_w 、 C 値から連続的に推定する新たな手法を開発した。この手法は、開水時の HQ 式に依らず晶氷（モロミ）が滞留している地点においても適用可能であり、現行の観測資料のみで流量を推定することが可能で

ある。今回の検討において、本手法は従来従来手法に比べて推定精度が高く、 $\pm 20\%$ 誤差内に全36データの内、92%が入ることを示した。

本研究は河川結氷時のみを対象としているものの、渇水等による被害のない持続的発展が可能な水活用社会の実現に向けた社会的ニーズに応えた技術であり、コスト低減を考慮して現行の観測資料のみで流慮を推定することが可能であり、かつ従来手法と比べて推定精度が高いため、今後の汎用性が期待される。

参考文献

- 1) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 早川 博, 平井 康幸 : 河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法, 土木学会, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1075–1080, 2010.
- 2) 平山 健一 : 結氷した河川の流れと流量測定 (その 2), 北海道広域利水調査会, 利水評論, 第 27 号, pp.27-55, 1983.
- 3) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 早川 博, 清治 真人 : 氷板下における晶氷厚の連続測定, 土木学会, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1027–1032, 2009.