

河川結氷時の流量推定ソフトの開発と現場への適用

(株) 北開水工コンサルタント

○井上 和哉

(国) 北見工業大学 社会環境工学科

吉川 泰弘

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム

阿部 孝章

河川結氷時は、水位と流量の関係式（HQ式）が成り立たず、年間を通じた流量の把握やダム下流のリアルタイム流量を正確に把握できないなどの課題がある。寒地土木研究所では、河川結氷時を対象とした結氷HQ式を開発し、河川結氷時の流量を既往の観測データのみで推定する手法を開発した。本稿では、本手法を実際の現場で運用することを目的として、操作が簡便であるエクセルシートを開発し、現場への適用を試みた。本技術は、河川結氷時の流量推定精度の向上のため、結氷河川において普及活動を行っていく予定である。

キーワード：河川結氷，HQ式，汎用ソフト，流量観測

1. はじめに

寒冷地に位置する河川の特徴の一つとして、冬期間の低温や降雪による河川水面の結氷（以後、河川結氷）があげられる。河川結氷状況については、約40年前より山辺¹⁾や山口²⁾，山下³⁾ら多くの研究者によって調査研究が行われており、寒冷地河川特有の様々な問題を指摘している。これらの中で河川管理を行う上で重要な問題として、開水時で得られている水位と流量の関係式（HQ式）は、河川結氷時において流量が過大に評価され、成立しないことがあげられる。

北海道の河川は、12月下旬から4月上旬までの期間に結氷し、この期間内に年間の渇水流量を記録することが多い。このため、河川結氷時の流量は、水資源計画における正常流量を決定するための基礎資料作成において重要である。また、今後、気候変動により冬期間の流量が増減することも考えられるため、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河川管理者から望まれている。

現在、河川結氷時の流量推定方法は、経験等を基にして作成された北海道開発局方式（Eye-Method法）が標準の結氷補正手法として用いられている。また、ダム放流などの人為的な流量変化の影響が発生している地点ではこの方法では流量を求められないため、河川の特性に応じて開発建設部毎に補正が行われている^{4) 5)}が、これらの方法は、いずれもリアルタイムの流量を精度よく推定することは困難であった。また、河川結氷時の流量観測は河氷厚にばらつきがある河氷の上での作業であるため、きわめて危険であり、作業員の安全性の確保が問題視されている。さらに、追加観測などが発生する場合が多い

ため、労力軽減も求められている（写真-1）。

寒地土木研究所寒地河川チームでは、現行の観測結果のみで流量を推定することが可能であり、かつ従来の推定手法に比べて精度が高い「河川結氷時の流量推定手法」を開発し、2012年3月にマニュアル化した⁶⁾。本手法は、平成24年6月版「河川砂防技術基準調査編」の第2章第4節-31において、参考資料として提示されている。

本稿では、まず上記の「河川結氷時の流量推定手法」について簡単に説明する。次いで、コストやリスク低減を達成しつつ、流量推定式を実際に現場で運用することを目指し、汎用ソフト（Microsoft Office Excel）を用いて作成した「河川結氷時の流量計算プログラム」について紹介する。最後に、「河川結氷時の流量計算プログラム」の実際の現場での運用状況について報告するものである。



写真-1 河川結氷時の流量観測

(2011. 1. 26 常呂川忠志観測所 氷厚 60cm)

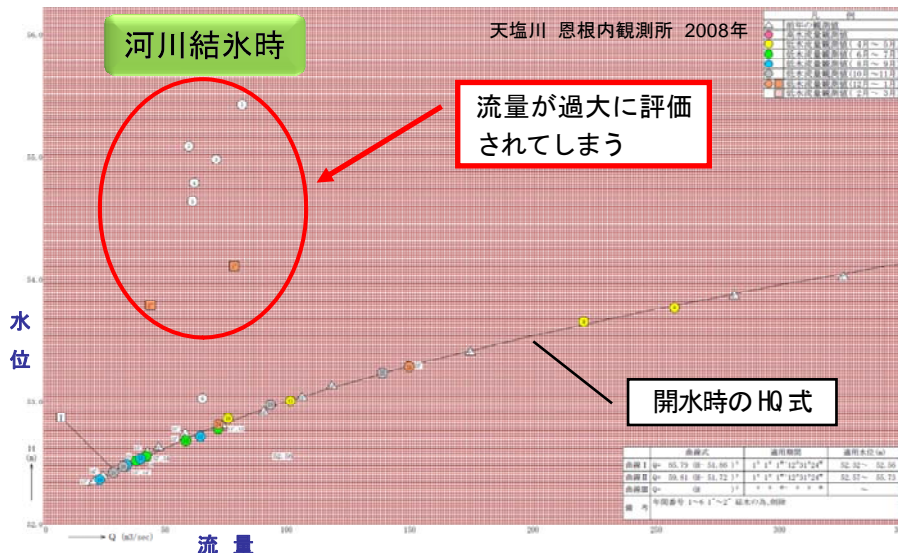


図-1 寒冷地河川における水位と流量の関係

2. 河川結氷時の流量推定手法

北海道の河川は、冬期間の気温の低下や降雪によって、12月下旬から4月上旬の約100日結氷し、その期間内に年間の湧水流量を記録することが多いため、その間の流量は、水資源計画における正常流量を決定するための重要な基礎資料となり、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⁷⁾。しかし、河川結氷時は、図-1に示すように河水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）は成立しない。

更に、河水が流水へ与える影響については十分には解明されておらず、従来の河川結氷時の流量を推定する手法は、この影響を考慮できていないため、推定精度が低いという問題があった。

そこで、寒地土木研究所寒地河川チームでは、図-2に示すように、河川結氷時の流量を連続的に推定する手法の統一的な運用に向け、流量推定式を開発した⁸⁾。

河川結氷時の流量推定式は、流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 、河氷底面粗度を表す $C(\text{m}^{3/4}/\text{s})$ 、川幅 $B_w(\text{m})$ 、流下断面積 $A_o(\text{m}^2)$ とする以下の(1)式である。

$$Q = CB_w^{-\frac{1}{4}} A_o^{\frac{5}{4}} \quad (1)$$

そして、式を用いた流量推定方法は、

- 1) 開水時のHA式（水位 H と流積 A の関係式）を流量観測データまたは横断測量データから導出する。
- 2) 結氷時の流量観測データから、喫水 $d(\text{m})$ 、 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。

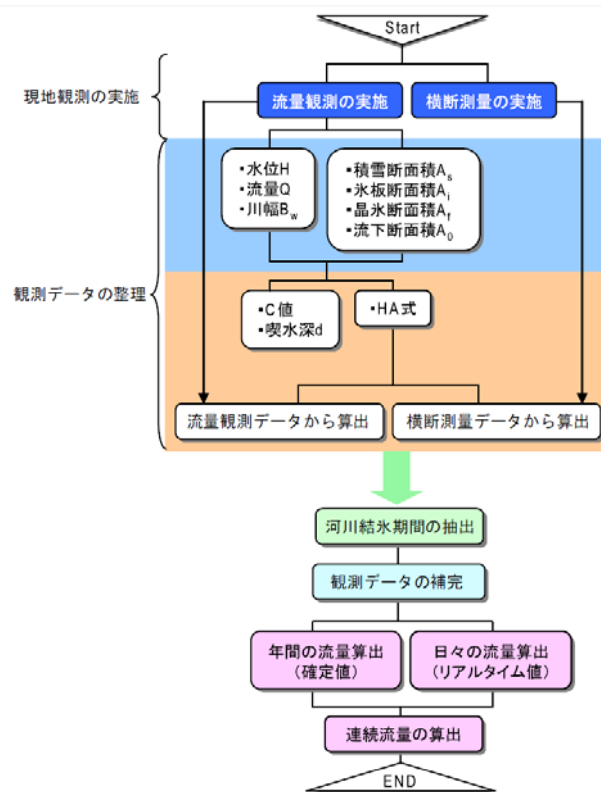


図-2 流量推定手法のフロー

- 3) 測定される結氷時の連続水位 H から、喫水 d を差し引いた値 H' を、HA式に代入し A_o を求め、式(1)に C 、 B_w 、 A_o を代入し流量 Q を求める。という3つのステージを踏む。

本手法は従来行われてきた推定手法よりも精度が高いことが実証されている⁹⁾。

本稿では概略を述べるにとどめたが、詳細については「河川結氷時の流量推定手法マニュアル(案)」及び論文⁷⁾を参照されたい。

3. システム化計画とプログラム開発

河川結氷時の流量推定手法を実際の現場担当者に活用して頂き、結氷河川の管理技術向上や観測作業員の労力の低減を計るために、操作が簡便なプログラムを作成した。このプログラムを「河川結氷時の流量計算プログラム」とする。本プログラムでは、実作業で要望が多いリアルタイムでの流量推定、流量観測から得られる実測値の入力およびリアルタイム水位データの取得、入力をサポートすることとした。

しかし、本プログラムの作成にあたり、新たな専用ソフトを開発するとなると、開発労力が掛かり、利用者においても使用方法を習得しなければならず、ハードルの高いものとなってしまい技術普及が遅れるという懸念があった。

このため、ソフトの利便性や簡便性を念頭に置き、多くの方が操作に習熟している汎用ソフト(Microsoft Office Excel)を用いたプログラムを作成することとし、作成されたデータは再利用しやすく、初めて見ても内容が理解可能であり、簡素なものとした。また、マニュアルもユーザーが検索しやすいように1ファイルにまとめた。本プログラムファイルは、寒地土木研究所河川チームが所有しており、関心をお持ちの各署へ配布する体制がある。

図-3に本プログラムの使用フローを示し、簡単な使用方法を示す。



図-3 流量推定プログラム使用フロー

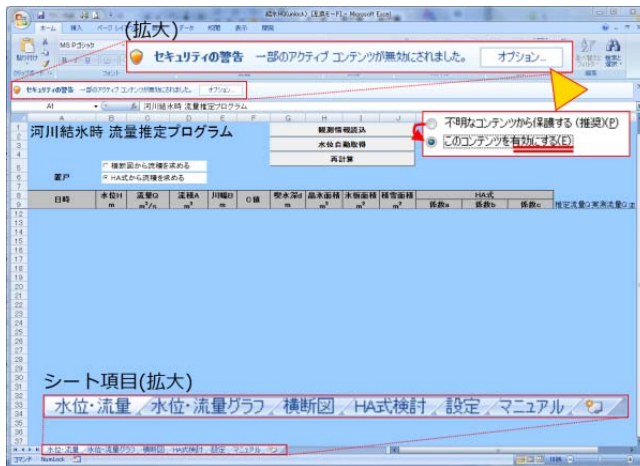


図-4 立ち上げ画面

(1) プログラム概要

本プログラムファイルは、1つの観測所で1つのファイルとする。

このプログラムはExcelのマクロを使用しており、ユーザーのセキュリティレベルによっては図-4のように警告バーが表示される場合があるが、問題なく動作するので、“このコンテンツを有効”にする。

(2) 基本情報を設定する

「流量推定プログラム」の入っているファイルを開き、図-5に示す「設定」シートに、これから検討する水系、河川、観測所名を選択する。

ここで選択できる内容は、北海道内の直轄河川の流量観測所全てが網羅されており、本プログラムを入手した後すぐに設定できるようになっている。

水密度、晶氷密度、氷板密度、積雪密度については、現在標準的な値が入力されており、密度が既知の場合を除きそのまま続ける。

(3) 観測情報の読み込み

基本情報を設定後「水位・流量」シートに戻り、別途図-6に示す様式に整理した観測情報ファイルを選択し、データを取り込む。結果を図-7に示した。

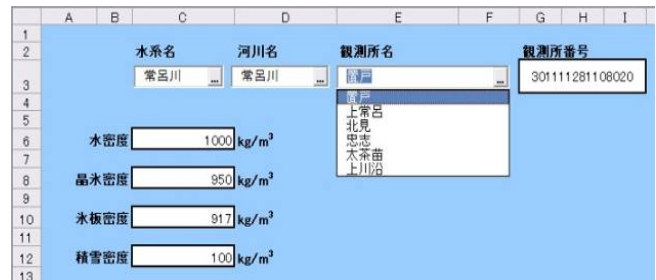


図-5 設定画面

日時	水位H m	流量Q m ³ /s	流積A m ³ /s	川幅B m	晶氷面積 m ²	氷板面積 m ²	積雪面積 m ²
2012/1/10 11:40	210.59	4.88	6.23	20.00	0.00	1.45	1.56
2012/2/7 14:53	210.62	4.37	5.85	20.00	0.00	6.18	0.71
2012/3/14 9:42	210.63	5.76	7.77	20.00	0.00	0.18	0.49
2012/3/19 8:43	210.64	6.11	7.25	20.00	0.00	0.18	0.55
2012/4/10 13:26	210.64	5.88	7.56	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/5/15 11:29	210.85	13.93	12.32	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/5/22 10:43	210.79	11.90	11.31	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/5/30 8:43	210.79	11.47	11.01	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/6/5 14:05	210.76	10.62	10.69	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/6/11 9:30	210.77	10.07	10.32	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/6/14 9:29	210.76	9.80	10.34	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/6/21 8:32	210.80	12.28	11.30	20.00	0.00	0.00	0.00
2012/7/3 10:10	210.66	6.64	8.16	20.00	0.00	0.00	0.00

図-6 観測情報ファイル(例)

図-7 観測情報の読み込み

(4) HA式の導出

HA式を導出するには“a) 横断情報から求める” “b) 流量観測データから求める”の2つ方法があり、本システムで簡単に求められるように設計されている。

下記に示すa), b) は随時切り替えることが可能である。

a) 横断情報から求める

横断情報からHA式を求めるには、「横断図」シートを選択し、「距離」「標高」にそれぞれ値を入力する(図-8)。入力すると随時、画面右側のグラフに横断形状が描かれるので、使用者はこれを確認しながら作業を行うことができる。また、このプログラムには水位観測所横断データはあらかじめ入れられてはいないため、自ら入手した最新の横断情報を入力し、使用することが推奨される。

b) 流量観測データから求める

流量観測データからHA式を求めるには、「HA式検討」シートを選択する。ここでは(3)で読み込んだ観測結果をボタン1つで値をコピーすることができるほか、別途手入力することも可能になっている(図-9)。

求められた係数a~cの結果を確認できるよう右側のグラフに表示される。結果に問題がないようであれば水位流量シートにHA式係数へ値を転送する。

以上の作業により基本設定作業は終了となる。

(5) 推定流量の算出と作図

次に、通常時に流量を推定する際に行う作業を、順を追って解説を行う。

「水位・流量」シートで現在から過去2週間分の水位情報をインターネット上の「水文水質データベース」¹⁰⁾から取得し、シートの行へ追加する。その後「再計算」ボタンを押すことで観測情報から得られた値が計算され、結氷時の河川流量が得られる。ここで得られたデータは蓄積していくことができる。

計算結果についてはエクセルのデータで表されており、流量推定結果を河氷厚推定計算等の別な用途に活用することが期待できるほか、計算された推定値と実測値は図-10のように「水位・流量グラフ」シートに表示されるので、視覚的にとらえることができる。

グラフの初期設定では、横軸と縦軸の目盛りについて自動で調整されるが、ユーザーが任意に表示したいサイズや目盛りを設定することができる。

(6) その他

実測流量と推定流量に差が見られる場合はHA式に問題があることが考えられるので、(3)、(4)節で入力された内容を再確認する必要があるほか、場合によっては観測条件の見直し等の検討が必要になる。

本システムの利用については、別途、検討が必要な部分いくつかある。本報では説明部分を一部割愛しているため、不十分な内容になっていることをご容赦いただきたい。詳しい内容については「流量推定プログラム」ファイル内において、詳細なマニュアルを用意しており、こちらを参照いただきたい。

以上、ここまでの結氷河川の流量推定プログラムの簡単な説明である。



図-8 横断図シート画面イメージ

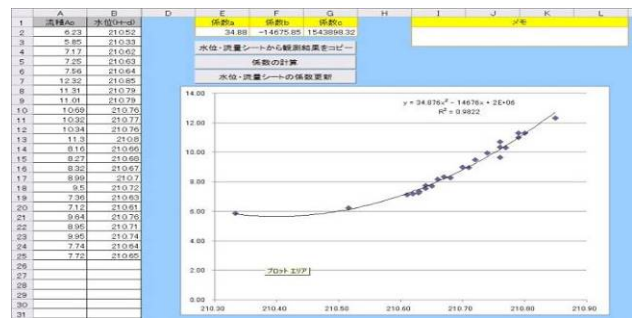


図-9 HA式検討シート画面イメージ



図-10 水位・流量グラフイメージ

4. 運用状況

本システムは現在、網走開発建設部北見河川事務所鹿ノ子ダム管理支所において2012年12月より常呂川水系観測所を対象に先行運用を行っている。

鹿ノ子ダムは、オホーツク海へ注ぐ一級河川・常呂川（図-11）の上流、常呂郡置戸町字常元に建設された総貯水容量39,800千 m^3 の多目的(洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい用水の供給、水道用水の供給)の重力式コンクリートダムである。



図-11 常呂川流域

当該ダムにおいては、流水の正常な機能の維持及びかんがい用水の供給のため冬期間もダム放流を行っている。昭和62年12月14日「鹿ノ子ダム操作規則」によると、流水の正常な機能の維持に必要な流量は、冬期（12/21～3/31）北見観測所地点（図-11）において4.39 m^3/s とされている。昨年までの過去10ヶ年ではこの流量を下回っていない。また、平成21年2月に策定された「常呂川水系河川整備計画」によると、流水の正常な機能の維持に関する目標は、同観測所において年間を通じて概ね8.0 m^3/s と掲げられている。この目標値については策定以降は下回っていないが、過去10ヶ年では下回る流量が観測されている。

これまでの流水の正常な機能の維持のための冬季放流量管理は、前年度のHQ式（結氷補正なし）を用いた観測所の流量と、月3回の流量観測データにより行ってきた。このため、リアルタイムでの流量を推定する手段がなかったことから、正常流量を下回っていた場合は事後にしか知ることができないという問題を抱えていた。

この問題は北海道内の国土交通省直轄ダムを対象に行ったアンケートにより複数のダムで同様の問題を抱えていることが判っており、この複数のダムの中から鹿ノ子ダムを任意で抽出し、本システムの先行運用を行うこととした。

鹿ノ子ダム管理支所において本システムを先行運用していただき、本システムを運用されている中、以下のようなご意見を頂いた。

- 水位自動取得機能により、直近2週間分のデータをボタン操作1つで取得可能であり、手入力作業が発生しないため、特段の追加作業無しでリアルタイム流量を把握できる。
- エクセルファイル内に操作マニュアルが組み込まれており使いやすい。またマニュアルの内容についても操作手順が簡潔にまとめられており、それを読むだけで容易に操作ができる。
- 水位・流量グラフが自動で作成され、実測値との比較も容易である。
- 使い勝手が良く、通常業務にほとんど影響を与えずリアルタイム流量を把握できる。

このような意見から、ダムからの放流量管理のうち、冬季の正常流量維持に関して抱えていた問題は、本プログラムの利用によって解決される可能性が示されたと言えよう。

一方、観測情報やHA式に誤りがあるままに計算をすすめてしまう可能性があることが指摘されている。データ修正を行えるような仕様としてあるが、ダムによる利水補給のためのリアルタイムデータとしては致命的となる。利用者が観測情報や係数等を理解した上で使用するという見識を持つことはもちろんだが、プログラムの機能として、データ更新ミスをチェックする機能を持たせることや、ミスの原因となる手動操作のオートメーション化等の工夫が求められている。

5. プログラムのサポート

本プログラムはMicrosoft Office Excel 2003/2007/2010での動作検証が行われており、意見、要望、バグ報告等についてサポートしている。

導入検討等、興味関心をお持ちであれば、寒地土木研究所河川チームへ問い合わせいただければ幸いです。

6. まとめ

本稿では、多くの方が操作に習熟している汎用ソフト（Microsoft Office Excel）のプログラムにより、すべての結氷河川において、これまでの観測データを用い、簡単に従来よりも精度の高い結氷期の流量の推定ができることを述べた。

今後の展望と課題として、現在、結氷初期と解氷期についてリアルタイムでの判断ができず、本プログラムに用いた流量推定式の適用期間について検討が必要がある。また、結氷補正に利用されている氷板厚は、現地観測の

結果より与えられた値を利用して推定されている。先にも述べているが、現地観測は氷割れの危険性があることから、危険性の問題は解決されていない。解決策として、将来的に吉川ら⁷⁾によって発表されている氷板厚の計算式を組み込むことにより、気温から氷板厚を予測させることにより改善されるのではないかと考えている。

操作性という部分では、初期の設定や係数発生的手段など現状で操作がやや煩雑となっている部分について、今後、普及活動の中で意見を聴取し、改良していきたいと考えている。

将来的には、開発された結氷補正HQ式が水文水質データベース¹⁰⁾へ組み込まれ、自動で補正されることが最終目標ではあるが、まず、着実な1歩として、本年3月までに運用上の課題抽出と修正を行い、その後全道で本システムが運用されることを期待している。

本プログラムで採用している河川結氷時の流量推定手法は、平成24年6月版「河川砂防技術基準調査編」の第2章第4節-31において、参考資料として提示されている。

謝辞：本報の作成にあたり、先行運用していただいている北海道開発局網走開発建設部北見河川事務所鹿ノ子ダム管理支所の菅野裕也係長をはじめ、プログラム開発等を担当した株式会社北開水工コンサルタントの菊地正彦、松川優一の両氏、その他関係各位からは有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)山辺功二:北海道の結氷河川, 水温の研究, 第 12 巻第 1 号, 1968.
- 2)山口甲, 西村豊:河川の水温と結氷に関する研究, 土木研究所月報, No.238, 1973.
- 3)山下彰司:結氷下の河川の水利特性について, 開発土木研究所月報第 465 号, 1992.
- 4)橋場雅弘, 吉川泰弘:結氷河川における流量推定式と音響測定機器を用いた現地観測, 河川流量観測の新時代, 第 3 巻, pp.31-40, 2012.
- 5)通年施工推進協議会(国土交通省大臣官房技術調査課):河川結氷対策指針, 2000.
- 6)(独)土木研究所寒地土木研究所寒地河川チーム:河川結氷時の流量推定手法マニュアル(案), 2012.
- 7)吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸:結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.1, pp.21-34, 2012.
- 8)吉川泰弘, 鳥谷部寿人:雪国における積雪量と結氷河川の流量に関する研究, 河川 66 (12), 10-15, 2010.
- 9)YOSHIKAWA Yasuhiro, WATANABE Yasuharu, HAYAKAWA Hiroshi, HIRAI Yasuyuki:Development of a Discharge Estimation Method for Frozen Rivers, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 29, 1, 81-105,2011.
- 10)国土交通省:水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>