アンカーアイス厚の簡易的な計算式の検討

Examination of a simple anchor ice thickness formula

北見工業大学	学生員	奥野翔也	(Shoya Okuno)
北見工業大学	正員	吉川泰弘	(Yasuhiro Yoshikawa)
寒地土木研究所	正員	横山洋	(Hiroshi Yokoyama)
福田水文センター	正員	橋場雅弘	(Masahiro Hashiba)

1. はじめに

寒冷地の河川では、約100日間気温の低下により河川 内が結氷する.河川水面が結氷しない急勾配の箇所にお いては、河床に氷が付着・集積する現象がみられ、この 氷はアンカーアイスと呼ばれている. 治水面では、剥離 したアンカーアイスに加えて氷盤が河道内の狭窄部で詰 まるアイスジャム現象が起き、水位の上昇、氾濫、流下 する氷による事故等につながる.利水面では、アンカー アイスおよび河川水面や流水中に形成された晶氷が取水 口に流入し詰まることで取水障害の発生につながる.環 境面では、アンカーアイスによって無脊椎動物や魚類の 冬期の生息環境を変化させる. さらに, 橋場らり, 鈴木 ら²)³)の既往研究では、アンカーアイスが河床から剥離 する際に藻類を取り込みながら流下し結氷河川特有の物 質輸送が存在することを現地観測から推察している. ア ンカーアイスの形成について、平山らの既往研究%では 流速と水深の条件が重要なパラメーターであり,水深は 0.3m から 0.4m が発生の限界, 流速は 0.6m/sec から 0.8m/sec が限界の流速であることを明らかにしている. アンカーアイスの現象の解明のためには、現地観測によ る現象の把握,現象の定式化が望まれる.定式化につい ては大村ら
のが水温を気温から計算することで、アンカ ーアイス形成式の作成を試みているが、十分に現象を再 現できていない.

本研究では、熱収支に基づく簡易式を構築して現象の 再現を試みた.計算結果の妥当性を確認するために、北 海道紋別市の湧別川と北海道名寄市の名寄川において 2015 年度から 2017 年度に観測された過去3年間の現地 観測データを用いた.この現地観測データを用いて、構 築した計算モデルの計算結果の妥当性の確認を試みた.

2. アンカーアイス厚の計算式の導出

本研究では熱収支に基づいて計算式の構築を試みた. 熱収支の概要図を図-1 に示す.図-1 において,温度 $T[^{\circ}C]$,アンカーアイス厚 h_b [m],流度 U_w [m/s],熱フラ ックス Φ [kg/m²]として, λ [無次元]:晶氷の空隙率 0.4, ρ_i [kg/m³]:アンカーアイス層の密度, Φ_w :流水間の熱フ ラックス, Φ_{bu} :アンカーアイスと流水の境界面の熱フ ラックス, Φ_{bd} :アンカーアイスと河床の境界面の熱フ ラックス,添え字は各層の値であることを示している. アンカーアイス厚の増減は、アンカーアイスと流水の



境界面および河床との熱収支,アンカーアイスの空隙率 を考慮して式(1)で表した. L_i [J/kg]: 氷の潜熱である.

$$(1-\lambda)\rho_i L_i \frac{dh_b}{d_t} = \phi_{bu} - \phi_{bd} \tag{1}$$

各層の熱フラックスは、熱交換係数、熱伝導率、層厚、 温度差を用いて式(2)、式(3)、式(4)で表される. ある時 間において各層の境界面における変動は平衡状態と仮定 すると、 $\phi_a = \phi_w = \phi_b$ となり、 ϕ_w は式(5)で表される. なお、 ϕ_w は、既往研究⁹⁷⁾を参考にして水深と流速の関 数となる式を用いた.

$$\phi_a = h_{sa}(T_w - T_a) \tag{2}$$

$$\phi_w = C_{wi} \frac{U_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} (T_{bu} - T_w)$$
(3)

$$\phi_b = \frac{k_i}{h_i} (T_{bd} - T_{bu}) \tag{4}$$

$$\phi_w = \frac{T_{bd} - T_a}{\frac{h_w^{0.2}}{C_{wi} U_w^{0.8} + \frac{h_b}{k_i} + \frac{1}{h_{sa}}}}$$
(5)

C_{wi}[ws^{0.8}/℃m^{2.6}]:1622, *T_{bu}*[℃]:アンカーアイスと流水の 境界面の温度, *h_w*[m]:河床から水面までの水深である.

一方で、式(1)の ϕ_{bu} は、平衡状態と仮定しているため、 $\phi_{bu} = \phi_w$ とした. ϕ_{bd} は観測データがないため、試行錯 誤を行い 120W/m²とした.これらの値を式(1)に代入す ると式(6)になる.さらに1次のテイラー展開で表すと式 (7)となる.

$$\frac{dh_b}{d_t} = \left\{ \left(\frac{T_{bd} - T_a}{\frac{h_w^{0.2}}{C_{wi} U_w^{0.8}} + \frac{1}{h_{Sa}} + \frac{h_b'}{ki}} \right) - \phi_{bd} \right\} \frac{1}{\rho_i L_i (1 - \lambda)}$$
(6)

$$h_{b} = \left[\left\{ \left(\frac{T_{bd} - T_{a}}{\frac{h_{w}^{0.2}}{C_{wi} U_{w}^{0.8} + \frac{1}{h_{sa}} + \frac{h_{b'}}{ki}}} \right) - \phi_{bd} \right\} \frac{1}{\rho_{i} L_{i}(1-\lambda)} \right] \Delta t + hb' \quad (7)$$

h_b [m]:アンカーアイスの厚さ, *T_{bd}* [℃]:地温(河床温度), *T_a*[℃]:気温, *h_w*[m]:河川の水深, *C_{wi}* [ws^{0.8/}°Cm^{2.}
⁶]:1622, *U_w*[m/s]:流速, *h_{sa}*[w/m²°C]:熱交換係数であり25.
0 を与えた. *ρ_i*[kg/m3]:氷の密度917.4, *L_i*[J/kg]:氷の潜熱3.336×10⁵, *λ*[無次元]:アンカーアイスの空隙率0.4, *Δ t*[s]:10 分毎のデータを用いているため600 を与えた. *h_b*'
[m]:10 分前のアンカーアイス厚さであり,この値がマイナスの場合はアンカーアイス消失と考えて0を与えた.

3. アンカーアイスの現地観測結果と計算値との比較

3.1 アンカーアイスの現地観測の概要

(1) 湧別川(H27年度)

2015 年 12 月から 2016 年 2 月を観測期間とし, 図-2 の北海道紋別市湧別川の河口から 26.7km(岩見橋下流) の地点で行った.機器設置の概要を図-4 に示す.図-4 よりアンカーアイスの形成,剥離タイミングの把握のた めに,陸上と水中のカメラ撮影,水位,水温,地温,水 中照度,流速の観測を実施した.

地温(河床温度)の測定は,長径 340mm,短径 190mmの粗石を採取し,この粗石の中心部に円径 40mm, 深さ130mmの穴を空けた.この穴に精密温度計(JFEア ドバンテック MDS-MkV/T,分解能 0.015℃,精度± 0.05℃)のセンサー部が粗石の内部となるように設置し, 設置後の穴はゴム栓にて密閉した.また,各観測機器は 10分インターバルに設定した.陸上カメラは,河川状 況の変化を画像で把握するために左岸高水敷に設置し, 10分インターバルに設定した.水中カメラは,アンカ ーアイスの形成と剥離現象を画像で把握するために,10 分インターバルに設定した.

(2) 湧別川(H28 年度)

2017年1月から2017年2月を観測期間とし、図-2と同じ地点で、図-4と同じ機器を設置した.ただし、流速については、H28年度の計11回の流量観測の流速と水位の値を用いて、回帰直線式を求めて、この回帰直線式に連続水位データを入力して連続流速データを求めた.

(3) 名寄川(H29 年度)

2017 年 12 月 8 月から 2018 年 3 月 9 日を観測期間と し,図-3 の北海道名寄市名寄川の河口から 17.6km(矢文 橋,以下 KP17.6)の地点で現地観測を行った.水位は既 存の上名寄水位観測所の観測データを用いた.流速は, マニング式を用いて求めた. KP17.6 地点に精密水温計, 気温計,水中照度計,地温計を設置し 10 分インターバ



図-2 湧別川の現地観測地点と機器設置地点



図-3 名寄川の現地観測地点と機器設置地点



図-4 機器設置の概要

表-1 本計算で用いた各定数

	h _{sa}	ρί	Li	ki
	熱交換係数	密度	潜熱	熱伝導率
単位	w/(m ² °C)	kg/m ³	J/kg	w/(m°C)
値	25.0	917.4	3.336×	2.31
			10 ⁵	

ルに設定した.地温の観測方法は、H27年度湧別川の観 測と同じである.水中カメラは、タイムラプスカメラを 矢文橋上流に設置し、1分インターバルに設定した.

3.2 現地観測による形成・剥離時期と計算値

湧別川(H27 年度), 湧別川(H28 年度), 名寄川(H29 年 度)のアンカーアイス現地観測結果による形成と剥離の 時期, アンカーアイス厚の計算値を一部抜粋して図-5, 図-6, 図-7 に示す. 図の下段の「アンカーアイス形成」 は, 水中カメラ映像からアンカーアイスが形成されてい る期間を表しており, 「水中カメラ視界不良」は, 水中 カメラ自体が氷で覆われて画像が判読できていない期間 を表している. 図-5,6,7 の観測結果からアンカーアイス が形成される条件は, 地温, 水温, 水中照度が低下する 夜間であることが分かる. アンカーアイスが剥離する条 件は, 地温, 水温, 水中照度が上昇する日中であること が分かる.







図-6 アンカーアイスの現地観測結果とアンカーアイス厚の計算値(H28年度湧別川,一部抜粋)



図-7 アンカーアイスの現地観測結果とアンカーアイス厚の計算値(H29年度名寄川,一部抜粋)

アンカーアイス厚の計算に用いた入力値 T_a , T_{bd} , h_w , U_w , は, 観測データの数値を用いた. 定数は表-1 の数値を用いた.

(1) アンカーアイス形成における比較

湧別川(H27 年度)の図-5, 湧別川(H28 年度)の図-6, 名寄川(H29 年度)の図-7 の現地観測結果より, アンカーアイスは,水中照度が小さくなり水温と地温が低下する夜間に形成されている.アンカーアイス厚 hbの計算値は,現地観測でアンカーアイスが形成されているタイミングで厚くなり現象を再現している.

(2) アンカーアイス剥離における比較

湧別川(H27年度)の図-5と湧別川(H28年度)の図-6の現地観測結果より、アンカーアイスは、水中照度が大きくなり水温と地温が上昇する日中に剥離されている.
図-5と図-6から、アンカーアイスが剥離する場合の地温、水温、水中照度の上昇のタイミングは異なることが分かる.これらの現象の解明には、さらなる検討が必要である.アンカーアイス厚 hb の計算値は、現地観測でアンカーアイスが剥離されているタイミングで消失し現象を再現している.

名寄川(H29年度)の図-7の現地観測結果より,アン カーアイスは水中照度が大きくなり水温と地温が上昇す る日中に剥離されている.アンカーアイス厚 hb の計算 値は,現地観測でアンカーアイスが剥離されているタイ ミングで消失しており現象を再現している.

(3) 考察

3 年間の現地観測から、夜間の日射の影響が無くなる 時間帯に水温と地温が低下するためアンカーアイスが形 成され、日中の日射の影響を受ける時間帯に水温と地温 が上昇しアンカーアイスが剥離することが推察された. 本研究で提案したアンカーアイス厚 hb の計算値は、現 地観測でアンカーアイス形成・剥離のタイミングで、増 加・現象しており、定性的に現象を再現できた.一方で、 アンカーアイス厚の現地観測データを取得出来ていない ため、アンカーアイス厚の計算値の妥当性の確認はでき ていない.

4. まとめ

本研究で得られた成果は以下となる.

- ・現地観測結果から、アンカーアイスは、水中照度が小 さくなり水温、地温が小さくなる夜間に形成され、水 中照度が大きくなり水温、地温が大きくなる日中に剥 離すること。
- ・熱収支に基づいてアンカーアイス厚の計算式を構築した.現地観測結果と計算値の比較から、アンカーアイスの形成と剥離現象を定性的に再現できることを確認した.一方で、実河川のアンカーアイス厚の観測データがないため、定量的な計算値の妥当性の確認はできなかった.

・本検討において、 Φ_{bd} の値は観測値が無いため、アン カーアイス厚の変動と一致するように任意の値を入力 した. 今後、実際の値との検証が必要である.

謝辞:本研究は,北海道河川財団の研究助成, JSPS 科 研費 JP18K04361, JP17H01870 の助成を受けたものであ る.記して謝意を表します.

参考文献

- 橋場雅弘,吉川泰弘,伊藤丹,黒田保孝:アンカー アイスの平面分布と含有物質に関する現地観測,水 工学論文集,第58巻,pp.1279-1284,2014.
- 2) 鈴木広卓,橋場雅弘,吉川泰弘,黒田保孝:アンカ ーアイスが結氷河川の物質循環に与える影響,河川 技術論文集,第21巻,pp.49-54,2015.
- Suzuki,H.,Hashiba,M.,Yoshikawa,Y.,Yokoyama,H. : Field study of anchor ice occurrence and disappearance and material circulation in cold regions river, 24th IAHR International Symposium on Ice, 2018.
- 4) 平山健一,佐藤志貴,寺田浩一郎,笹本誠,堺茂樹, 滝口大樹:アンカーアイスの発生に関する現地観測, 第12回寒地技術シンポジウム,pp.499-504, 1996.
- 5) 大村新也,吉川泰弘,横山洋:アンカーアイスの形 成と剥離に関する現地観測,土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集,第75号,2019.
- ・・ 結氷河川の水理,土木学会水理委員会, 第 22 回水工学に関する夏季研修会講義集,A-1, 1986.
- Ashton,G.D.,Ed.:River Lake Ice Engineering,Water Resources Publications, pp.233-236, pp289, 1986.