

II-27 河川結氷と積算寒度の関係について

北見工業大学 正員 佐渡 公明
○ 北見工業大学 正員 中尾 隆志

1. まえがき

河川の結氷は流れを伴うため貯水池、湖沼よりは複雑な結氷状況を呈する。すなわち、第一に流下時間内の気温低下に伴う Frazil ice (氷晶) から Black ice (氷塊) の生成、第二に主として上流で降った雪が起因すると思われる snow slush run (雪泥)、ice slush run (氷泥) (これらは「もろみ」²⁾、「せろ」³⁾とも呼ぶようである) の付着、固結といった二つの要因が複雑に絡み合っ。て河川の結氷が進行する。第一の要因である気温の低下について著者は先に常呂川・若松大橋(北見市)の結氷率(H%)を北見市の気温を用いた積算寒度(θt : $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)から

$$H = a + b \cdot \log(\theta t) \quad \text{-----} \quad (1) \quad \text{但し、} a, b: \text{定数}$$

なる片対数紙上の直線回帰式でほぼ近似できることを示した¹⁾。しかしながら結氷を促す水温の低下は河川の流れのため、観測地点の気温と同様上流地点の気温も強く影響されるものと考えられる。一方、snow slush run, ice slush run の原因も主に観測地点より上流で降った降雪が原因と考えられる。

本論文は、常呂川・若松大橋(北見市)で行った結氷観測をもとに河川の結氷が気温の変化および降水量に対し強い相関があることを示し、また結氷するかしなりの限界を積算寒度と単位幅当りの流量より説明する。なおここでいう結氷率とは若松大橋下流に設けられた流量観測

用ワイヤー下の河川幅(60.60m)に対する横断方向の結氷長さを百分率で表わしたものである。

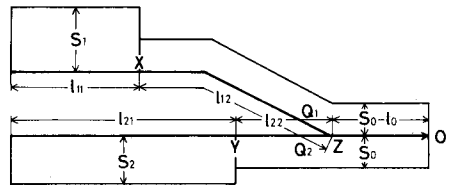


図-1 模式図

2. 基礎式

河川の結氷率(H)と積算寒度(θt)の間には先に述べたように式(1)なる回帰式で表わされる。今、河川上流の水面上に降った雪が snow slush run, ice slush run になり、観測地点まで流下して、観測地点の河岸、水面上の突起物に付着・固結するならば次式がまず考えられる。

$$H = c \cdot P \quad \text{-----} \quad (2) \quad \text{但し、} P: \text{降水量、} c: \text{定数}$$

従って、結氷率の要因として積算寒度と降水量の両方を考えるならば、式(1)、(2)より

$$H = a + b \cdot \log(\theta t) + cP \quad \text{-----} \quad (3) \quad \text{ここに } a, b, c: \text{定数}$$

なる重回帰式で表わされる。

先に述べたように説明変量 θt , P は観測地点の積算寒度、降水量のみでなく、上流地点での積算寒度、降水量も影響すると思われる。このため観測地点より上流の平均積算寒度、平均降水量が必要になる。図-1は、流量 Q_1 , Q_2 をもつ2つの河川が地点Zで合流し、地点Oで結氷観測を行なう場合、水源から地点Oまでの平均の説明変量 $\bar{S}$ (積算寒度; 降水量) を求める方法を示す模式図である。今、地点X, Y, Oで気温、降水量のデータが得られるものとし、X, Y地点より上流ではX, Y地点のデータを、X—O, Y—O区間ではO地点のデータを適用して、 $\bar{S}$ は次式で表わされる

$$\bar{S} = \left\{ \frac{l_{11} S_1 + (l_{12} + l_0) S_0}{l_{11} + l_{12} + l_0} \right\} \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} + \left\{ \frac{l_{21} S_2 + (l_{22} + l_0) S_0}{l_{21} + l_{22} + l_0} \right\} \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad \text{-----} \quad (4)$$

但し, l_{ij} (i :河道数, j :区間分割数), l_0 は流下距離

1つの河道の場合は

$$\bar{S} = \frac{l_n S_1 + (l_{12} + l_0) S_0}{l_{11} + l_{12} + l_0} \quad \text{-----} \quad (5)$$

3. 観測方法・観測結果

3-1 観測方法

結氷観測は昭和55年12月16日から昭和56年4月5日までの111日間、常呂川中流の若松大橋の下流83mの地点にある流量観測用ワイヤーを利用し、ワイヤーの横断方向の氷の長さおよび氷の先端の厚さを実測し、さらに氷の状態を真氷と雪氷に区別して観測した。また、ワイヤーよりも上下流の水板が成長に伴い観測線上の結氷の割合に影響を与えるので、観測断面より約20m上下流の結氷状況をスケッチした。このほか上流より流れてくる snow slush run, ice slush run, ice block run (氷片) や川霧についても観測した。観測時刻は毎日午前9:00~10:00であった。欠測は1月2日, 1月4日である。一方、気温、降水量の気象データは後述するように常呂川流域に設置してある網走地方気象台管轄の北見大和、境野、北見の3ヶ所のAmedasデータの1時間毎の値を用いたが、北見の気温データのみ観測地点右岸に設置してある百葉箱内の測温抵抗体による自記アナログデータを使用した。また、観測期間中の流量および観測断面の流速分布を調べるため、4月4日に水深測線および流速測線間隔をそれぞれ0.5, 1mとして流量測定を行った。

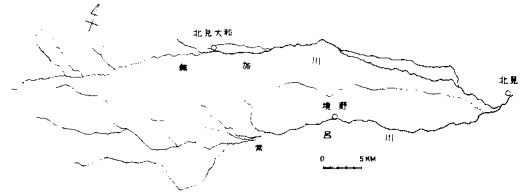


図-2 常呂川流域

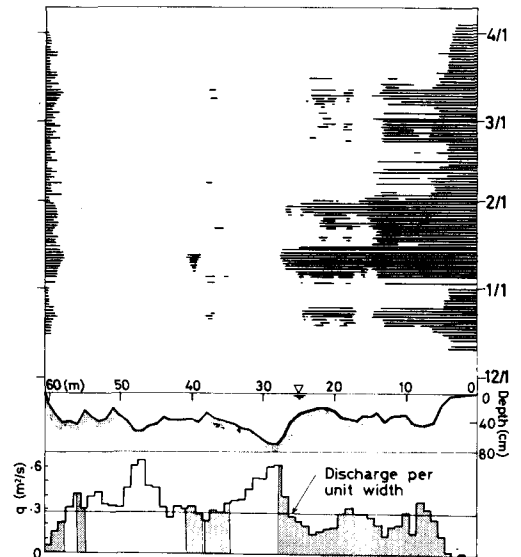


図-3 55年度一冬の結氷状況

3-2 観測結果

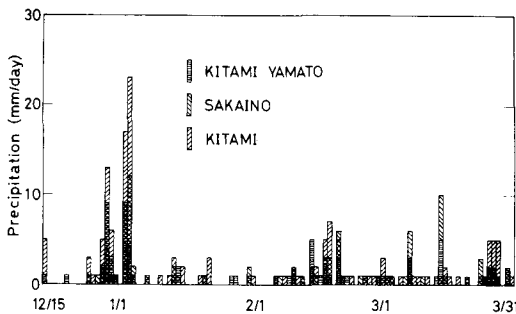


図-4 北見大和・境野・北見の日降水量

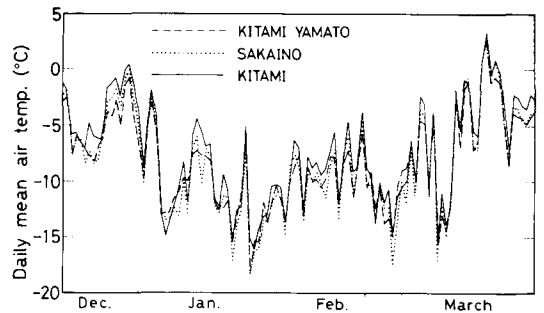


図-5 北見大和・境野・北見の日平均気温

図一2に本報告で用いた気象データの所在地を示す。水源より北見大和、境野までの流下距離はそれぞれ30.9 km, 43.8 km、北見大和と境野から合流点までは41.8 km, 24.6 km また合流点より観測地点までの距離は1.2 kmであった。本観測期間中の水位の変動は、55m75 ~ 56m18であった。4月4日に実施した流量測定の結果、全流量は17.85 m³/s (水位56m18)であった。図一3は本観測による結氷状況の変化と幅1 m毎の流量を示したものである。観測期間中の結氷・解氷の繰返しは巨視的にみて5回であった。図からわかるように左岸は期間中ほとんど結氷の増加はみられなかったが右岸側は結氷の増減が激しく結氷幅は最大27 m 近くに達した。単位幅当りの流量のグラフで斜線の部分は結氷したことを示している。また単位幅当りの流量が大きい所では結氷しないことがわかる。

図一4は北見大和、境野、北見における日界を午前9時とした場合の日降水量の変化を示したものである。降水量の傾向は3地点ともほぼ同様であるが適は3地点でかなり差がみられる。図一5は図一4と同様に日界を、午前9時とし、1時間毎の気温の平均から求めた3地点の日平均気温を示したものである。日降水量と同様に気温変化の傾向は3地点ともほぼ同様であるが相対的に北見の気温は他の2地点よりもやや高めであることがわかる。一方、境野の気温は他の2地点の平均気温に比べて気温の変化が激しく、3地点の積算寒度はかなりの違いがあることがわかる。

図一3、図一4、図一5より降水量の増加や日平均気温の低下に伴い結氷の割合が増加している。

4. 重回帰式の適用

上記で述べたように降水量、日平均気温は3地点でかなりの差異があるため式(4)を用い流下距離内の平均降水量、平均積算寒度を求めて式(3)の適合度を検討することにした。この際、結氷観測は毎日午前9時頃となっていたため、北見の日降水量・日平均気温の日界を前日9時から当日午前9時と決め、北見大和、境野の気象データの日界は次のように決めた。北海道開発局・網走開発建設部で昭和55年12月～昭和56年3月まで常呂川水系7ヶ所で行った計52回の流量調査結果の流速を使って水漲から北見大和、境野および北見までの流下時間を求め、2地点の日界をそれぞれ北見大和：前々日午前9時から前日9時、境野：前々日午後6時から前日午後6時と決定した。一方、無加川と常呂川の合流直前の流量は実測により、それぞれQ₁ = 4.64 m³/s, Q₂ = 6.42 m³/sであった。重回帰分析には、12月16日から3月31日までの104日分(欠測2日)のデータを用い、この期間を表

表 1 相 関 係 数 と 回 帰 係 数

積算寒度	北見大和・境野・北見			北 見			期 間
	北見大和・境野	北 見	考慮せず	北見大和・境野	北 見	考慮せず	
1	R	0.962	0.956	0.924	0.970	0.961	1980,12,16-1980,12,25
	a	-18.7	-16.3	-4.5	-26.1	-22.8	
	b	34.1	32.6	24.8	39.1	37.2	
	c	7.71	3.04		11.10	4.47	
2	R	0.928	0.927	0.918	0.938	0.937	1980,12,26-1981, 1,16
	a	-162.7	-162.7	-151.3	-150.5	-150.7	
	b	95.7	95.9	91.0	91.5	91.6	
	c	0.70	0.45		0.87	0.56	
3	R	0.821	0.816	0.807	0.828	0.824	1981, 1,17-1981, 2, 1
	a	-130.8	-125.0	-128.9	-126.7	-120.9	
	b	67.7	65.2	66.7	66.8	64.3	
	c	-2.26	-1.12		-2.35	-1.18	
4	R		0.267	0.082	0.252	0.273	1981, 2, 2-1981, 3, 6
	a		-17.5	-7.4	-17.4	-21.0	
	b		13.8	9.5	13.9	15.2	
	c		-1.32		-1.69	-1.32	
5	R	0.838	0.834	0.831	0.803	0.799	1981, 3, 7-1981, 3,31
	a	1469.7	1474.9	1456.9	1486.7	1486.9	
	b	-501.8	-503.5	-497.1	-512.3	-512.2	
	c	0.66	0.35		0.63	0.21	

1の5つの期間に分けて行った。積算寒度を北見・大和・境野・北見の3地点を考慮した場合、北見だけの場合；降水量を3地点を考慮した場合、北見だけの場合、全く考慮しなかった場合について計6通りの組み合わせで計算を行ない、各ケース毎に式(3)の相関係数 R と各回帰係数 a , b , c を求めた。表1に計算結果を示す。表中

ケース1から3がいずれも結氷期でありケース5は解氷期
ケース4は結氷期から解氷期に移る過渡期である。ケース4を除き各場合とも相関係数は0.797から0.962と、かなり相関が良いことがわかる。特に結氷期のケース1から3までは、降水量として3地点を考慮した場合、いずれも積算寒度として北見だけの方が3地点の平均を用いたものより、相関係数が高くなっている。この理由として、結氷期では河川の水温がほぼ0に近くなっており、観測地点付近の氷板は北見の気温の低下ではじめて形成され、結氷率が増すものと考えられる。また積算寒度を3地点の平均、北見だけを用いたいずれの場合でも降水量を考慮した方が相関がよく、特に降水量として3地点の平均を用いた方が相関が良い。このことは、河川の結氷において上流付近で降った雪が snow slush run, ice slush run となって流下し、付着、固結して結氷率を増加させる大きな要因になると考えられる。

一方、解氷期であるケース5の場合積算寒度として、3地点の平均を用いた方が北見の積算寒度のみを用いた方よりも相関が良い。このことは上流での気温の上昇が水温を上げ、氷板をゆるめ、ice block run になり、流量が融雪と共に増し下流の解氷状況に影響をもたらしうものと考えられる。またいずれの積算寒度を使った場合でも降水量として3地点の平均を用いた方が相関が良くなっている。この時期の降水は流量を増加させるため解氷が促進されるからである。

図-6は、観測断面の各1 m幅において初めて氷板が出現した日の北見の12月16日からの積算寒度と単位幅当りの流量 q との関係を示すグラフである。図の直線より右下側の範囲が結氷する領域で、左上側の範囲が結氷しない領域である。この結氷限を示す直線式は、 $q = 0.03 + 0.32 \log(\theta t)$ となる。 q が小さい場合は、積算寒度が小さくても結氷可能となることがわかる。

今後の課題として観測地点を増やし、図-6のような流量と積算寒度から結氷するかしんかの関係を明らかにし、文献3), 4)で述べられているフルード数と結氷の関係について調べることである。

参考文献

- 1) 坂渡, 中尾; 河川の結氷率について—常呂川・若松橋の場合—, 第36回土木学会年講(1981)
- 2) 平山, 佐々木, 大村; 河川結氷時の流量の推定について, 第35回土木学会年講(1980)
- 3) 岸力, 中尾欣四郎; 北海道における河川の結氷と冬期渇水量について, 第16回土木学会年講(1961)
- 4) P. Larsen; Thermal Regime of Ice Covered Waters, IAHR Symposium on Ice Problems, Sweden, 1978.

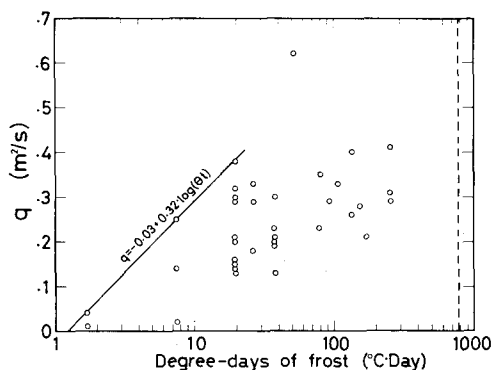


図-6 積算寒度と流量