

論 文 内 容 要 旨

緒 論

近年、非結氷期の河川に関する研究は、長足の進歩を遂げたのに較べ、結氷河川に関する研究は少なく、その研究の立遅れは大きい。結氷河川に関する問題は、大きく分けて次の3つに分類されるであろう。

1. 河川の結氷過程，河氷の力学，解氷過程など河氷に関するもの
2. 結氷下の流量および浮遊流砂量，結氷現象に伴う河床への影響など水理に関するもの
3. 河氷の附着，流氷などに伴う河川構造物の被害に関するもの

これらの中には、地球物理学的考察を必要とするものも少なくない。もちろん、上記の分類は、あくまでも便宜的なものであって、結氷河川に関する問題は、たがいに相関連することはいうまでもないことである。

著者は橋上からの写真観測，河氷断面の時間的变化，河氷の上下変位，結氷下の流速分布，結氷下の浮遊砂濃度などの観測を行ない，その結果にもとづき，結氷河川に関する問題のいくつかを明らかにした。

第I章 河川の結氷過程

石狩川の河口より上流24.6kmに石狩大橋がある。本章では石狩大橋上より撮影した観測写真にもとづき，河川の結氷過程を考察した。橋上より観測される結氷初期の河の流氷には，外観上次の3つの型がみられる。

1. 不透明な蓮葉状流氷

直径50cm～2m程度の蓮葉状の流氷で，そのふちには氷の切屑が堆積している。

2. 透明な板状流氷

比較的大型のものが多く，大きいものでは最大長が10m以上もある。また，その形は不規則で，角が多いのが特徴である。

3. 不透明な非盤状流氷

白濁色で形も不定な非盤状の氷塊である。

流水の一部は岸氷が風波、水位の変化などによって岸からちぎれることによって発生する。逆に風や流れの状態によって、流水の一部が、再び岸氷に附着し、岸氷の中央部への成長を助ける。一般的にみて、岸氷の中央部への大幅な成長は流水の附着よりも、気温の低下によるところが大きいと考えられる。

本章には河川の結氷過程の外に、結氷最盛期における石狩川の縦断方向での結氷状態を18枚の写真を用いて示した。

第Ⅱ章 全面結氷河川に関する観測方法

観測の場所は、石狩川の江別市内、通称「重兵衛渡し」と呼ばれている渡し場である。「重兵衛渡し」において、200mの河幅を $\frac{1}{n+1}$ 等分するn点を定め、これらの観測点を上流に向かって右よりNo.1 $\left(\frac{1}{n+1}\right)$ 、No.2 $\left(\frac{1}{n+1}\right)$ 、…… No.i $\left(\frac{1}{n+1}\right)$ 、…… No.n $\left(\frac{1}{n+1}\right)$ と呼ぶことにした。各観測年、観測点、観測項目を表にすると次のようになる。

観測年	観測点	観測項目
1960	No.i $\left(\frac{1}{6}\right)$	河水断面の時間的変化、積雪高、積雪密度
1961	No.i $\left(\frac{1}{6}\right)$	河水断面の時間的変化、積雪高、河床変動
	No.i $\left(\frac{1}{2}\right)$	河水の上下変位、垂直流速分布
1962	No.i $\left(\frac{1}{6}\right)$	河水断面の時間的変化、垂直流速分布、浮遊砂濃度、河水の上下変位
1963	No.i $\left(\frac{1}{17}\right)$	河床レベル、流水断面の流速分布、河水底面のレベル、水位、河水の上下変位、浮遊砂濃度

その外、気象要素として、気温、湿度、風速、などを観測した。本章では、これらの観測項目ごとに詳しくその観測方法を述べた。

注) 河水に孔をあけ、その中に湧き出した水面の高さを水位とする。

第Ⅲ章 全面結氷河川に関する観測結果

横断方向 5 点における河氷断面、積雪高の時間的变化 (1960, 1961, 1962); 積雪密度 (1960); 河床断面 (1963); 横断方向 3 点における河氷の上下変位 (1962, 1963); 流速分布 (1963); 浮遊砂濃度 (1962, 1963); 河氷底面のレベル (1963); 気温; 風速など第Ⅳ章, 第Ⅴ章における考察に必要と思われる観測値について, 一括して示した。これら観測値についての特徴は次のとおりである。

1. 多雪地帯の河氷断面は、真氷ともろみ^{注)}の層が交互に重り合っている。
2. 河氷断面は観測年および河の横断方向での観測点によってかなりの異差がみられる。また、河氷底面からの融解がみられる。
3. 平均の積雪密度は 0.31 g/cm^3 である。
4. 横断方向における河氷の上下変位は一様ではない。
5. 全面結氷下の流速は河氷底面および河床の近くにおいて略々対数分布を示す。
6. 全面結氷下の浮遊砂濃度は全流水々深にわたって、略々対数分布を示す。
7. 全面結氷河川が流心部において水面を現わす時期は 1 日の最高気温が正になるころと一致する。

第Ⅳ章 全面結氷河氷に関する理論的考察

河氷の上下変位はこれまで近似的に浮力のみによって説明されてきた。しかし河岸における応力関係を明らかにするには浮力の外に河氷の弾性的要素も考慮すべきである。著者は河氷を一枚の弾性板と考え理想的な場合における河氷の変位量, 垂直断面内の最大曲げ応力, 最大剪断応力を次のように導いた。

$$\eta = \left\{ 3.07 (d_1 - w) - s - \frac{d_1}{2} \right\} \left\{ A_0 \cos \frac{nx}{\sqrt{2}} \cosh \frac{nx}{\sqrt{2}} + D_0 \sin \frac{nx}{\sqrt{2}} \sinh \frac{nx}{\sqrt{2}} - 1 \right\} \quad 4-1$$

$$\left| \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right| = \left| \left\{ 3.07 (d_1 - w) - s - \frac{d_1}{2} \right\} \left\{ \cos \frac{nx}{\sqrt{2}} \cosh \frac{nx}{\sqrt{2}} - \frac{A_0}{D_0} \sin \frac{nx}{\sqrt{2}} \sinh \frac{nx}{\sqrt{2}} \right\} \right| \quad 4-2$$

注) もろみ: 雪と水の混合物をいう。

$$\left| \frac{\tau_{\max}}{\tau_0} \right| = \left| \left\{ 3.07(d_1 - w) - s - \frac{d_1}{2} \right\} \left\{ \cos \frac{nx}{\sqrt{2}} \sinh \frac{nx}{\sqrt{2}} - \frac{D_0 + A_0}{D_0 - A_0} \sin \frac{nx}{\sqrt{2}} \cosh \frac{nx}{\sqrt{2}} \right\} \right| \quad 4-3$$

η : 中正面の変位量 (下方を正とする)

E : ヤング率

d_1 : 氷厚

I : 断面の二次モーメント

s : 水位 (η と同じ座標を用いる)

σ_{\max} : 最大曲げ応力

w : 積雪を含めた単位面の自重

$$\sigma_0 = \frac{Ed_1 n^2 D_0}{1.5}$$

A_0, D_0 : 両端の条件より定まる定数

τ_{\max} : 最大剪断応力

x : 横断方向の座標 (河の中央を原点とする)

$$\tau_0 = \frac{Ed_1^3 n^3 (D_0 - A_0)}{8.49}$$

$$n = \left(\frac{0.245}{EI} \right)^{\frac{1}{4}} (> 0)$$

河岸近くにおける河水の材料力学的な崩壊条件は4-1, 4-2, 4-3より推定される。また現地における河水の上下変位の観測値は4-1を考慮することによって、定性的によく説明することができる。

多雪地帯における河水は常に積雪下における氷の成長と考えられる。著者は積雪下の氷の成長について次の式を導いた。

$$\epsilon_0 = -\left(\frac{k_1}{\alpha_1} + H \right) \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \left\{ \left(\frac{k_1}{\alpha_1} + H \right)^2 \frac{K_2}{K_1} - \frac{2k_2}{L\rho_2} \int_0^t V dt + 2 \left(\frac{k_1}{\alpha_1} + H \right) \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \epsilon_0^* + \epsilon_0^{*2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad 4-4$$

Suffix 1 : 雪に関する常数

K : 温度拡散係数

” 2 : 氷に関する常数

L : 氷の融解熱

ϵ_0 : 氷厚

V : 気温

k : 熱伝導係数

ρ : 密度

α : 表面からの熱輸送係数

ϵ_0^* : 氷厚の初期値

H : 積雪高

4-4は積雪のない場合における氷の成長において

1. 全面結氷の初期においては、河氷は一枚の真氷であって、その厚さも比較的小さく、横断方向での大部分は単に水面に浮いている状態と考えてよい。したがって、降雪のないときは河氷の成長も単純で、横断方向の各点においてほぼ一様に成長する。
2. 真氷の部分の厚さが小さいうちに降雪があったときは、水面が河氷上面より上になり、河氷上にある積雪の上下両面の中間に位置する。すなわち、 $\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}\dot{\dot{m}}\dot{\dot{a}}\dot{\dot{z}}\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}$ となる。そして積算寒度とともに $\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}\dot{\dot{m}}\dot{\dot{a}}\dot{\dot{z}}\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}$ の上部より凍結がはじまり、元の真氷との間にも $\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}\dot{\dot{m}}\dot{\dot{a}}\dot{\dot{z}}\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}$ を残すことになる。
3. 河氷における真氷の部分の総和がある程度大きくなると、河氷を一枚の弾性板として取扱うのが妥当である。すなわち、河氷の上下変位は横断方向に対し一様ではなくなる。このことは河氷の成長が横断方向に対して一様でないことを示すものと理解される。
4. 多雪地帯の河氷は真氷と真氷の間にも $\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}\dot{\dot{m}}\dot{\dot{a}}\dot{\dot{z}}\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}$ をはさんでいる。このため外気の積算寒度は流水にまで達せず、河氷の底面では融解が進行する。
5. 多雪地帯における河氷は $\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}\dot{\dot{m}}\dot{\dot{a}}\dot{\dot{z}}\dot{\dot{u}}\dot{\dot{w}}$ と積算寒度によって上方に成長し、下方から消滅していく。

全面結氷河川において、最初に水面が現われるのは流心部である。このことは、気温の上昇と河氷底面での融解を考慮して説明することが出来る。流心部の解氷についてはその外に材料力学的な要素についても考慮すべきであるが、これについての詳しいことは不明である。

流心部が水面を現わす直前(3~5日)には河氷上の雪面に黒いシミが現われる。これは河氷下の流水が河氷上に湧き出したものである。流心部において水面が現われた後は流心部の両側における解氷の速度は非常に遅い。

本章の最後においては全面結氷河氷の解氷過程および解氷期における流水を写真を用いて示した。

第V章 全面結氷下の河川の水理学的考察

全面結氷下においても壁面(河床,河氷底面)近くにおいて、その流速は対数分布をする。河床近くにおける流速分布より河床の相当砂粒粗度高を求めると2.1cm~4.2cm(重兵衛渡し)となる。著者は河床および河氷底面における相当砂粒粗度高を与えたときの最大流速点の位置について理論的な考

察を行なった。全面結氷下における最大流速点の位置は、流量を定めたときの河床での摩擦速度を求める上に不可欠の要素である。

「重兵衛渡し」における河床および河氷底面から最大流速点までの距離の比は 1.14 : 1 となる。

全面結氷における河氷は次の条件のもとで平衡状態にあると考えられる。

$$\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad 5-1$$

$$I_1 = I_2 \quad 5-2$$

H : 流水々深

x : 流れの方向の座標

I₁ : 動水勾配

I₂ : 河床勾配

すなわち、5—1、5—2の条件において、河氷底面に働く浮力は流れの方向に一様となり、かつ、流れの状態も全面結氷部の入口、出口を除いた外はまったく流れの方向に一様になり、河氷は平衡状態にある。このことは、全面結氷下においても、その流速は対数分布を仮定してよいことを示すものである。

このことから、全面結氷下における流量は水位との間に一義的関係がないことを示し、全面結氷下の流量は河氷底面での平均レベルを用いて表わすべきことを示した。

また、全面結氷下の浮遊砂濃度は垂直方向の全流水々深にわたって略々対数分布をしており、実際の立場から考察するなら、全面結氷下の総浮遊流砂量は、流量と同様に河氷底面の平均レベルを用いるとよい一義性が得られることを示した。

全面結氷河川における水位の物理的意味は次のように考えられる。まず上流からの流量にしたがって河氷底面の位置が定められる。水位は河氷底面が定められた位置になるように河氷に浮力を与えるまで河氷底面より高くなることになる。このことは、一定の流量においても、降雪などによってその重さが変わるとき、水位は流量に関係なく増加することを意味する。

論文審査結果の要旨

この研究は河川の結氷とこれに伴う水理に関するものであり、観測は石狩川の江別市内、通称「重兵衛渡し」と呼ばれている渡し場で行なわれた。河幅を6等分して定められた5つの観測点で、河水断面、積雪高の時間的変化、積雪密度、河床断面が、又横断方向3点において、河水の上下変位、流速分布、浮遊砂濃度、河水底面のレベル、気温、風速などが測定され、その結果が第1, 2, 3章に示されている。

このような観測から得られた結論は、河水についての流体力学と河水についての弾性体力学を巧みに組合せて導いた理論によって説明されている。多雪地帯の河水断面は真氷ともろみの層が交互に重り合っていることが観測されたが、これは全面結氷の初期に、氷の厚さがあまり大きくない時、その上の積雪に河水がまじりその上面が凍結した時に中間にもろみの層を形成されるものとして説明された。河水断面は河の横断方向にかなりの差異が認められたが、これを著者は、河水を弾性板と考えることによって説明した。即ち氷が薄い時は氷は水の浮力のみで支えられるため横断方向への力学的条件が均一であり従って氷は一樣に成長するが氷の厚さが十分に大きくなると氷は弾性板としての変位を示すようになるため岸の附近と中央部とで氷面の高さに差異が生じ、それが以後の氷の成長に影響すると考え、その機構を数式によって示した。次に氷の下面で融解が認められることは外気の影響がもろみの層でさえぎられるためと考え、観測された融解速度を説明するには河床の温度を 0.01°C 程度と推定する必要があると云う数値を得た。その他全面結氷下の流れは河水底面と河床の近くで夫々ほぼ対数分布を示すことが観測され、乱流混合の考慮によって説明が与えられた。

この研究の主な収穫は以上のようなものであるが、全面結氷河川という特異な対象についての水理を明かにした点は高く評価される。物理的な説明も、特に流体力学と弾性体力学を総合して氷に及ぼされる力を導き、一通りの理論を作り上げたことは、著者の力量と、これまでの熱心な研究を裏づけるものである。この研究がこの方面の学問を一步前進させるものであると考えられる。

よって、鎌田新悦提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。