

流雪溝屈曲部における流れの水理特性

Hydraulic Characteristics on Flow of Elbow Parts of
Snow-Removing Ditches

野口 隆夫*・高橋 迪夫**・木村 喜代治***

By Takao NOGUCHI, Michio TAKAHASHI and Kiyoji KIMURA

A problem related to the capacity of snow removing by flowing water in ditch is treated. In this experiment, crushed ice was used instead of snow. The scale of the region of separation has been measured for the various plane forms of the elbow parts of ditch. The rise in ditch stage has been analyzed theoretically, and compared with the experimental values. The both results agreed approximately. The energy losses of the flow on the elbow parts of ditch is estimated. The limiting conditions of crushed ice transportation by flowing water through the elbow parts of ditch has been studied experimentally.

Keywords : snow-removing ditch, snow-water mixture flow, energy loss, coefficient of elbow loss

1. ま え が き

我が国の日本海側の豪雪地帯では、降雪期間において郊外幹線道路の雪対策は、80~90%の完成度に達していると考えられる。しかしながら、都市内の一般道路では、まだ整ってはならず、このための街づくりが各地で進められている。そこで近年、これら都市内の除・排雪手段として、経済的かつ効率の良い除雪が可能である流雪溝が見直され、流雪溝の整備がかなり進められるようになってきた。一般的に、流雪溝においては、直線部よりも屈曲部、断面変化部、あるいは分・合流部において流雪能力が劣るために、流雪溝の機能はこういった部分の流雪能力が、大きく影響していることになる。

一部の都市、区域を除いて、現在設置されている流雪溝施設の多くは直線水路でしかも水路勾配の大きなものが多いが、これは、流雪溝が整備し易い部分から優先的に施工されているということと同時に、流雪能力の十分な理解、とくに流雪溝屈曲部あるいは断面変化部における流雪機構がまだ十分に解明されていないことにも起因していると考えられる。また、流雪溝直線部の流れの流動特性および流雪能力に対して、佐藤・首藤¹⁾、渡辺²⁾、大熊³⁾、佐々木⁴⁾等の研究があり、管水路内の雪水二相流については、川越⁵⁾、白樫⁶⁾、梅村⁷⁾、および川島⁸⁾、等の研究がある。一方、流雪溝屈曲部に対しては、田中⁹⁾によって屈曲

* 学生会員 日本大学大学院 工学研究科土木工学専攻

(〒963 郡山市田村町徳定字中河原1)

** 正会員 日本大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科

部を閉塞する雪塊を水潤雪の曲げ強度等の力学的関係から明らかにしようとする試みがなされている。しかしながら、屈曲部の流れの機構あるいは流雪能力に関しての水工学的研究はほとんど見受けられず、解明しなければならない点が多々存在しており、この部分における流れの特性に関する十分な検討が必要となると考えられる。

本研究は流雪溝屈曲部における流れに注目して、雪、削水、あるいは砕水を用いた室内模型実験を通じて、屈曲部の構造、特に平面形状の違いによる剥離域の大きさ、また屈曲部においての水位上昇による越水の問題、および流れの損失の評価、および屈曲部における削水の閉塞限界に関して水工学的検討を加え、さらにこれを基に、望ましい屈曲部の構造について言及しようとするものである。なお屈曲部における流れの基本的な特性を十分理解するために、問題を単純化し流体として雪を含まない清水を用いた実験を行い、これを基に次の段階である疑似雪として削水を流水中に投入する実験を行った。

2. 実験装置および方法

実験で使用した水路は、全長約4.0m、幅10.0cm（45度拡幅 15.0cm）、深さ12.0cmのアクリライト製可変勾配の循環式開水路で、その水路の中央部に、図-1の様な屈曲角度が90度、45度、30度、および45度拡幅の4種類の屈曲部が取り付けられるようになっている。剥離域の計測および流況の可視化には、木屑をトレーサーとした表面浮遊法と、流速の大きい場合にはフルオレセインナトリウム溶液を用いた。

削水による閉塞実験は、90度屈曲部を取り付けた水路を、室内温度+1℃に設定した恒温恒湿室に設置して行った。削水は、毎秒65gの削水を作ることができる自動水かき機を水路の上流端に2機設置し、連続的に流水中に投入できるようにした。水理諸量の測定は削水を投入する前に行なった。なお、削水を投入中の水理諸量については屈曲部において閉塞しなかった場合にのみ測定を行った。

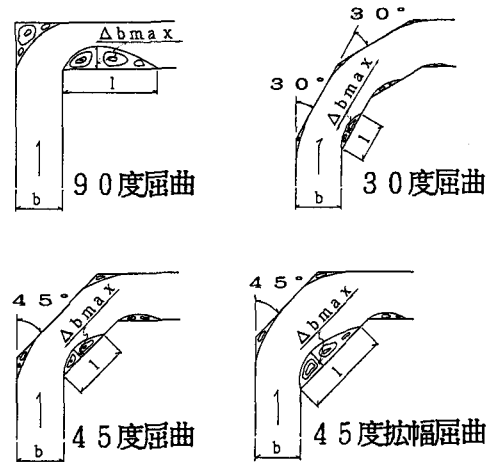


図-1 屈曲部構造模式図

3. 実験結果および考察

3.1 剥離域の大きさ

次元解析により、最大剥離幅 Δb_{max} は次の関数形で表すことができる。

$$\frac{\Delta b_{max}}{b} = \phi \left(\frac{R}{b}, R_0, F_R, \theta \right) \quad \text{--- (1)}$$

ただし、 b : 水路幅、 R : 径深、 θ : 屈曲角度、 $R_0 = vR/\nu$ 、 $F_R = v/\sqrt{gR}$ 。

図-2は、各種の屈曲形状における最大剥離幅 Δb_{max} と屈曲部上流側のフルード数 F_{R1} との関係を示したものである。この図より、多少のばらつきはあるが、いずれの屈曲形状においても Δb_{max} は F_{R1} が大きくなるとともに減少し、射流ではかなり小さくなっていることが認められる。また、屈曲角度が小さくなるほど剥離域の大きさが減少し、有効な流水断面が増加してい

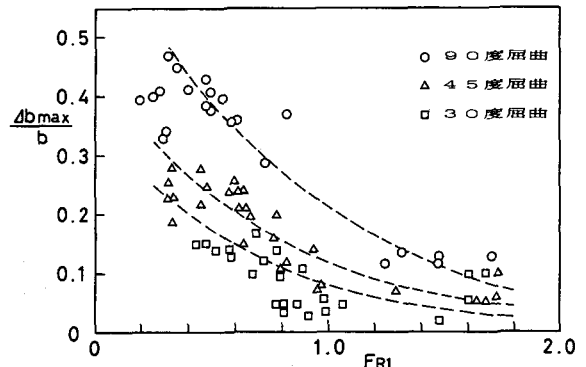


図-2 フルード数に対する最大剥離幅の変化

ることがわかる。一方、レイノルズ数に対しては、系統的な計測が十分でないこともあり明瞭な傾向は認められない。

3・2 剥離域の形状

図-3は、剥離域の形状がどのように変化するかを把握するために Δb_{max} と剥離長 l との関係を検討したものである。

Δb_{max} と l との比は、巨視的には $l/\Delta b_{max} \div 6$ となり、剥離域の形状はほぼ相似形を保ちながら変化していることがうかがえる。ここで、3・1,3・2において検討している剥離域であるが、屈曲角度が45度および30度の流れに対しては、図-1に示してある様に、最も大きな剥離域が形成される最初の屈曲背後における値を採用している。さらに、剥離域の形状は水深方向に変化すると考えられるが、流雪溝の流れに関しては雪は上層部を流れることから、本研究では水面における剥離域の特性について検討している。

3・3 屈曲部における水位変化

写真-1は、フルード数が約1.5の状態における水位変化を撮ったものである。この写真の様にフルード数が大きくなるに伴い屈曲部における水位が上昇し流雪溝からの越水の問題、あるいは、流れの損失の評価の面からこの部分における水位変化の検討が必要になる。

図-5は、 h_0 を最初の屈曲における最も水位が上昇した場所の水深とし、水位変化の割合 h_0/h_1 と屈曲部上流側におけるフルード数 F_1 との関係を示したものである。この図から、フルード数が大きくなるに伴い h_0/h_1 も増加していく傾向がみられる。また屈曲角度が大きくなるほど水位変化も大きく、90度屈曲ではフルード数が2前後で屈曲部における水深が上流側の水深の約3倍にもなっており、かなり危険な状態になるものと考えられる。また、図中の実線は以下に述べる方法により求めた理論式である。

図-4の1-2を検査面として屈曲部に運動量方程式を適用すると次式となる。

$$\frac{1}{2} \rho g b h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g b h_2^2 \cos \theta - F \sin \theta$$

$$= \beta_2 \rho Q v_2 \cos \theta - \beta_1 \rho Q v_1 \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 β は運動量補正係数、 θ は屈曲角度、また F は屈

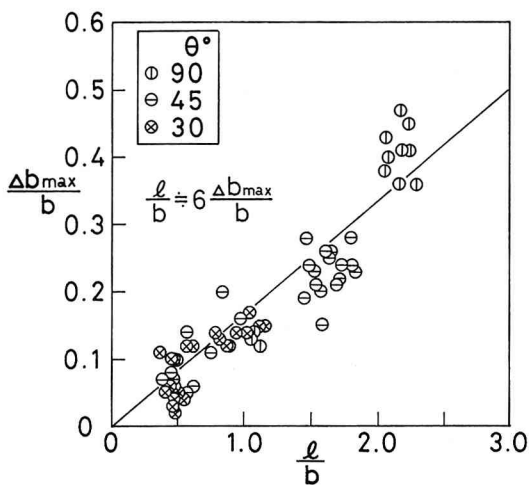


図-3 最大剥離幅と剥離長

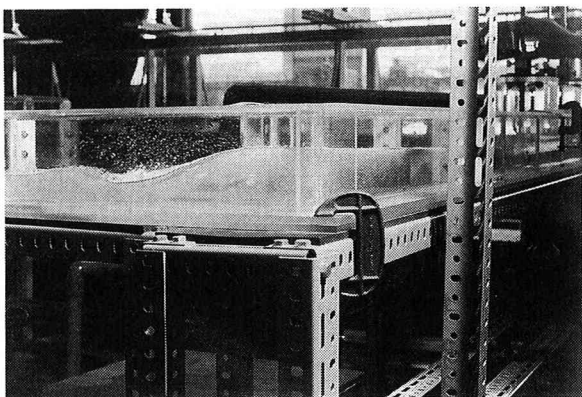


写真-1 屈曲部における水位変化の流況

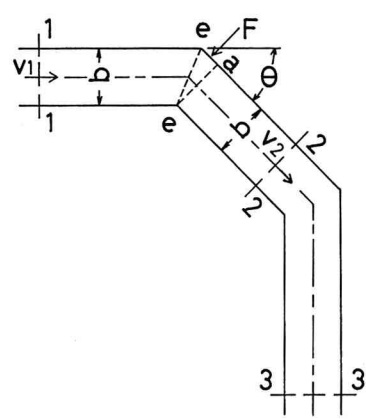


図-4 屈曲部の模式図

曲部壁面 ae に作用する圧力で次式によって表されると仮定する。

$$F = \frac{1}{2} \rho g b \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h_e^2 \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $h_2 = h_e$ を許し $\beta_{1,2} = 1.0$ とすると式(2), (3) から、屈曲部における水位変化の割合 h_e/h_1 を求める式は次の様になる。

$$\left(\frac{h_e}{h_1}\right)^3 - (2F_1^2 + 1)\left(\frac{h_e}{h_1}\right) + 2F_1^2 \cos\theta = 0 \quad \text{----- (4)}$$

ただし、 $F_1 = v_1/\sqrt{g h_1}$ 。

この方法より求めた理論式(4)と実験値を比較してみると、屈曲角45度および30度の測定値においてフルード数が1.5以上の所で若干差が認められるが、全体的に見ると式(4)は実験結果をほぼ表現しているものと考えられる。

次に図中の●は、削水を流水中に投入した時の計測結果である。これから、測定数は少ないが、削水が流水中に入っている場合も、削水の入っていない状態とほぼ同様な傾向となる事が認められた。

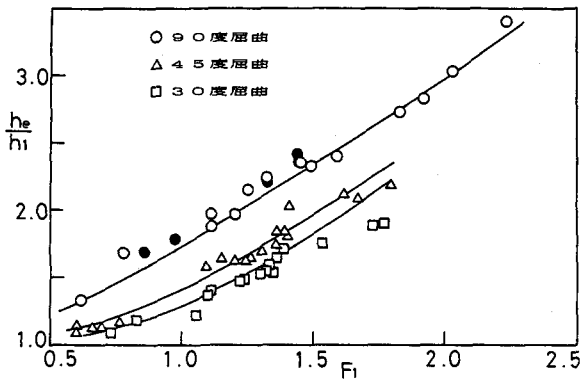


図-5 屈曲部における水位変化

3・4 屈曲損失

図-4の1-3区間の流れの全損失水頭 h_L が、屈曲部における剥離渦等起因する局所的な損失水頭 $h_{e,L}$ と、その区間の摩擦による損失水頭 h_f の和として表されるとすると、Bernoulliの定理より、

$$h_L = h_f + h_{e,L} = \left[z + h + \frac{\alpha v^2}{2g} \right]_1 - \left[z + h + \frac{\alpha v^2}{2g} \right]_2 \quad \text{----- (5)}$$

となる。ここで、 h_f , $h_{e,L}$ は各々次式で表されるものとする。

$$h_f = \frac{\lambda_1}{4R_1} \left(\frac{L_1}{2} \right) \frac{v_1^2}{2g} + \frac{\lambda_2}{4R_2} \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \frac{v_2^2}{2g} + \frac{\lambda_3}{4R_3} \left(\frac{L_2}{2} \right) \frac{v_3^2}{2g} \quad \text{---- (6)}$$

$$h_{e,L} = f_{e,L} \frac{v_1^2}{2g} \quad \text{----- (7)}$$

ここに、 $f_{e,L}$ は屈曲損失係数、 L_1, L_2 は各々水路中心に沿った1-e, e-3区間の長さである。 $f_{e,L}$ は次元解析および芦田の急拡部流れの損失に関する研究を参考にすると、 Δb_{max} と同様に次の関数形で表されることが期待できる。

$$\begin{aligned} f_{e,L} &= \psi_1\left(\frac{\Delta b_{max}}{b}, F_R\right) \\ &= \psi_2\left(\frac{R}{b}, R_*, F_R, \theta\right) \quad \text{---- (8)} \end{aligned}$$

次に、流れを滑面流れと仮定して λ の値を次の滑面対数式より見積る。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log(1.59 \cdot R_{*R} \cdot \sqrt{\lambda}) \quad \text{---- (9)}$$

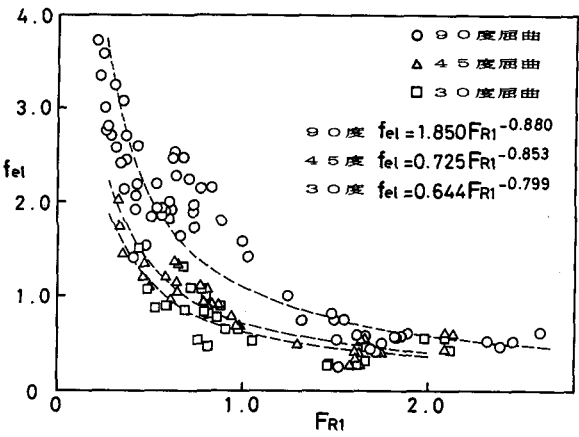


図-6 フルード数に対する屈曲損失係数の変化

ここに、 $R_{or} = \nu R / \nu$ である。この λ の値を用いて式(5)～(7)から算出された $f_{0.2}$ と F_{R1} との関係を示したものが図-6である。

この図より、 $f_{0.2}$ は F_{R1} が大きくなるに伴って減少し、射流ではほぼ一定の値に漸近することが認められ、また、屈曲角度が小さくなるほど $f_{0.2}$ が小さくなることが分かる。これは前述の Δb_{max} と F_{R1} との関係にかなり類似な関係を示している。

また、90度屈曲ではフルード数が0.2～0.3の常流域で $f_{0.2}$ が3～4とかなり大きな値を示している。これから、屈曲角度が大きく流れがゆるやかになると、屈曲による損失が急激に増大し流雪能力が大幅に低下してくるものと考えられる。

3・5 削氷による閉塞限界

90度屈曲を水路中央部に取り付け、流水中に削氷を連続的に投入して行った屈曲部における閉塞実験および観測の結果を以下に示す。

図-7は、削氷の流量に対する容積濃度 C_v と上流側のフルード数 F_{R1} との関係における閉塞の有無の観測結果を示したものである。図中の○は閉塞しない場合、●は閉塞する場合を示している。

この図から、フルード数が0.6程度までの常流域における閉塞限界がかなり明確に推定できるものと考えられる。

ここで、投入する削氷の量が決っており多少量が少ないために、フルード数を大きくすると水深を小さくとらなければならない、その状態に削氷を投入すると水路の底に接触するためそこで閉塞する場合もあったが、その場合、この実験からは除外した。

次に、閉塞実験における閉塞した場合としない場合の流況を写真-2,3に示す。

写真-2は、屈曲部において削氷が詰まって閉塞した状態を撮ったものである。削氷が投入された所から屈曲部に到達するまでに流水中の削氷が一体化し、そして先端の部分が屈曲部の壁面に衝突しその部分がくずれない場合に詰まって閉塞する。しかしながら、閉塞してもある程度時間が経過して上流側の水位が上昇し下流側よりも高くなった時、その力によって詰まっていた削氷が押し流される場合もあった。この場合は、5秒以下であれば閉塞しないと、それ以上であれば閉塞するものと判断した。

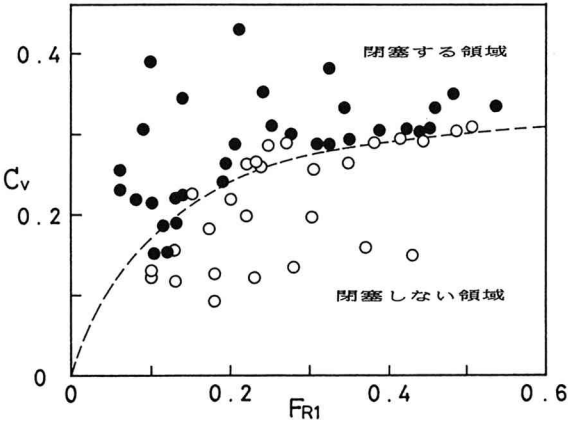


図-7 C_v とフルード数との関係における閉塞限界

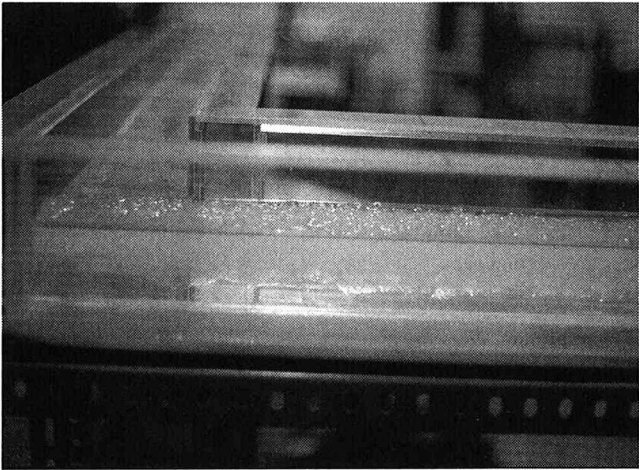


写真-2 閉塞状態

写真-3は、前とは逆の閉塞しない状態を撮ったものである。一体化した削氷が屈曲部の壁面に衝突する前または直後に流れによって屈曲部内にある部分が次々とくずれて流下する様子が認められた。

また、3・3の水位変化を検討する場合では、削氷に対して流量が多いために、連続的ではなく断続的に屈曲部に削氷が到達する状態となった。これは実際の流雪溝では、投入された雪は連続的というよりも塊が断続的に流れているので、この実験の状態に近いものと考えられる。

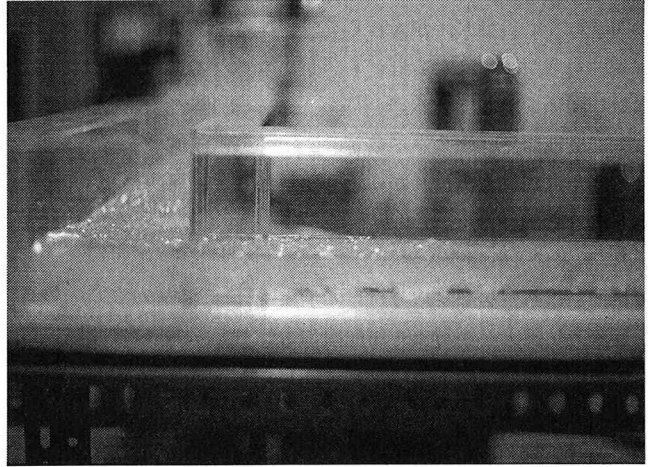


写真-3 非閉塞状態

4. まとめ

流雪溝屈曲部における流れについて、剥離域の大きさ、水位変化、損失および閉塞限界などの点から実験的検討を行った。得られた主要な結果は以下の通りである。

- (1) Δb_{max} はフルード数が大きくなるにつれて減少し、屈曲角度が小さいほど Δb_{max} も小さくなり有効な流水断面が得られる。
- (2) h_e/h_1 を求める理論式(4)は、実験結果をほぼ表現したのと考えられる。また、削氷を流水中に投入すると h_e/h_1 は多少増加する傾向がみられる。
- (3) $f_{e,2}$ も Δb_{max} 同様、フルード数が大きく屈曲角度が小さいほど $f_{e,2}$ は小さくなり流雪能力が増大するものと考えられる。
- (4) フルード数が0.6程度までの常流域における閉塞限界が、かなり明確に推定できるものと考えられる。

< 参 考 文 献 >

- 1) 佐藤敏之・首藤伸夫：雪混り流水の抵抗法則，第27回水理講演会論文集，pp.801～806，1983.
- 2) 渡邊善八：流雪溝の配置と排雪に要する水量，第48巻雪氷第3号，pp.141～148，1986.
- 3) 大熊孝・米内弘明・星野和利・小林雄二：流雪溝の流雪能力と塗装によるその改善，土木学会論文集，第35号，IV-3，pp.99～106，1985.
- 4) 佐々木幹夫・西田修三：流雪溝の設計流量について，第29回水理講演会論文集，pp.191～196，1985.
- 5) 川越信清ほか：パイプ輸送による除雪の試み，第9回自然災害科学総合シンポジウム論文集，pp.103～106，1972.
- 6) 白樫正高・古塩淳・徳永靖・橋本斉・脇屋正一：雪の水力輸送に関する研究，第48巻雪氷第7号，pp.41～48・pp.75～82，1986.
- 7) 梅村晃由・中山実喜男・内山明・徳永靖・白樫正高：雪の水力輸送に関する研究，第48巻雪氷第4号，pp.207～214，1986.
- 8) 佐々木幹夫(研究代表)：流末にスラリー輸送を用いた流雪溝に関する研究，文部省化学研究費報告書，1989.
- 9) 田中康之・高橋修平・小林俊一：流雪溝の流雪能力について，国立防災科学技術センター研究報告第3号，pp.55～68，1969.