

雪の空気輸送実験(その1)－水平直管部の圧力損失

—

著者	小林 俊市, 熊谷 元伸
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	44
ページ	105-121
発行年	1989-01
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000997

雪の空気輸送実験(その1) ——水平直管部の圧力損失——

小林俊市*・熊谷元伸*

国立防災科学技術センター長岡雪氷防災実験研究所

Experiments of Snow Removal Based on the Use of a Blower (1) ——Pressureloss in a Horizontal Straight Pipe——

By

Toshiichi Kobayashi and Motonobu Kumagai

*Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, National Research Center
for Disaster Prevention, Suyoshi, Nagaoka, Niigata-ken 940, Japan*

Abstract

In order to obtain the data concerning snow removal based on the use of a blower, experiments were carried out outside by using a test equipment with a horizontal straight pipe (length: about 7 m).

The results of the tests are as follows:

- (1) The pressureloss in the straight pipe when new snow was fed was approximately equal to that of the single-phase flow of air. The pressurelosses at the wind velocity in pipe 30 m/s are as follows: 3.5 mmAq/m for new snow, 5 ~ 5.3 mmAq/m for fine-grained snow and 6.5 mmAq/m for granular snow.
- (2) The critical wind velocities under which no snow was conveyed inside of the pipe depended on the snow types i.e., 10 m/s for new snow, 15 m/s for fine-grained snow and 25 m/s for granular snow.
- (3) The mixing ratios of snow to air ranged from 0.18 to 1.6, and the volumetric concentrations were less than 0.01.
- (4) Snow masses transported by this equipment were calculated as follows: 2 t/h for new snow, 5 ~ 7 t/h for fine-grained snow and 9 ~ 11 t/h for granular snow.
- (5) The temperature of the flow in the pipe when snow was fed rose by 1 ~ 3.5 °C compared with the air temperature. The reason of this temperature rise was concluded as the state change of air by "poly tropic change" and the effect of the baffle plate.

Key words: Pneumatic Conveying of Snow, Snow Removal, Pipe for Snow

*第3研究室

Transport.

キーワード：空気輸送（雪）、除雪、輸送管（雪の）。

1. ま え が き

国道など幹線道路の除雪については、除雪機械の整備が進み、大雪に際しても充分対応できる体制が整えられつつある。

これに対して、除雪機械が入れないような都市の狭い街路の除雪、あるいは家屋の周辺に堆積した雪の処理方法としては、これまで散水消雪（消雪パイプ）、流雪溝、雪の水力輸送など水を用いる方法が多く実施されてきた。

そのうち、散水消雪は、地下水の持つ熱で雪を融かす方法であり、降雪の多い時には大量の地下水をくみ上げることとなり、地下水の枯渇を来す。さらに、地盤の悪い地域では、地盤沈下を引き起こすなどの弊害が現われており、最近では増設を規制する方向にある。

一方、流雪溝は、水流により雪を輸送するため、地下水のような高い温度の水を必要としない。ただ、その設置に際しては1/50～1/500程度の勾配が必要とされ（建設省北陸地方建設局、1983）、長岡市街地のような平坦地には不向きとされてきた。

しかし、最近では材料の進歩により、例えばフッ素樹脂のような滑雪性の材料を溝の壁面にはり付けたり、滑雪性の塗料を塗布したりして、雪の溝壁面への付着を防止することにより、1/1000程度の緩勾配でも設置可能とする説もある（大熊ほか、1985）。

さらに、ネットコンベヤとポンプとを組み合わせたブーストステーションを流雪溝に付設することにより、多少逆勾配の地域でも設置可能な方法が開発されている（建設省、1988）。

また、当所において昭和53～58年度に実験を行い技術開発した雪の水力輸送方式は、勾配に関係なく雪を輸送できるため、現在JR福井駅構内、及び富山県魚津市内の県道において、いずれも流雪溝との組み合わせで実用化されている（小林・栗山、1987）。

このように、水を用いて雪を輸送する方法は、狭い地域の雪処理に有効な手段であると考えられる。

しかしながら、問題は水源をいかに確保するかということである。その手段の一つとして、山間地に降る雪をダムでせき止め、融解水を克雪用水として利用する「雪対策ダム事業」が、一部の地域において着手されている。

以上のようなことを背景にして、当所では水を用いなくて雪を輸送する方法を検討した結果、円管内で空気力により雪を圧送する方法に着目し、昭和60年度から研究を開始した。

「空気輸送技術」そのものは新しい技術ではなく、粉粒体の輸送方法として各分野で応用

されている。身近な例としては、長岡ニュータウンのゴミ処理システムに空気輸送技術が採用され、昭和63年度から実際に稼動を始めている。

しかし、この技術を雪に応用することは、本来不適とされている付着、凝集の著しい粉粒体を取り扱うことになるため、管内で閉塞の恐れがある。すなわち、管内の圧力損失という本質的な問題のほかに、解決しなければならない問題がいくつか存在する。

一般に、空気輸送装置は空気源(air source)、粒子供給部(feeder)、管路(pipeline)、粒子回収部(receiver)からなり、粉粒体の空気輸送を実施する場合には、次の3つの問題が存在する(辻, 1984)。

(1)供給 (2)回収 (3)輸送管

雪の空気輸送の場合、当面(2)については実用化の段階で検討することになる。また(1)については、次章で述べるように、今回は管内に「じゃま板」をさし出す方法を採用した。しかし、後述するような問題点もあるので、次年度以降に他の供給法を検討したいと考えている。

以上のことから、今回は(3)の輸送管の問題、すなわち管路内における固体(雪)と気体(空気)の流動について実験を行った結果を述べる。

2. 実験方法

実験装置は、図1及び写真1に示すように、コンクリート舗装の試験道路上に、送風機

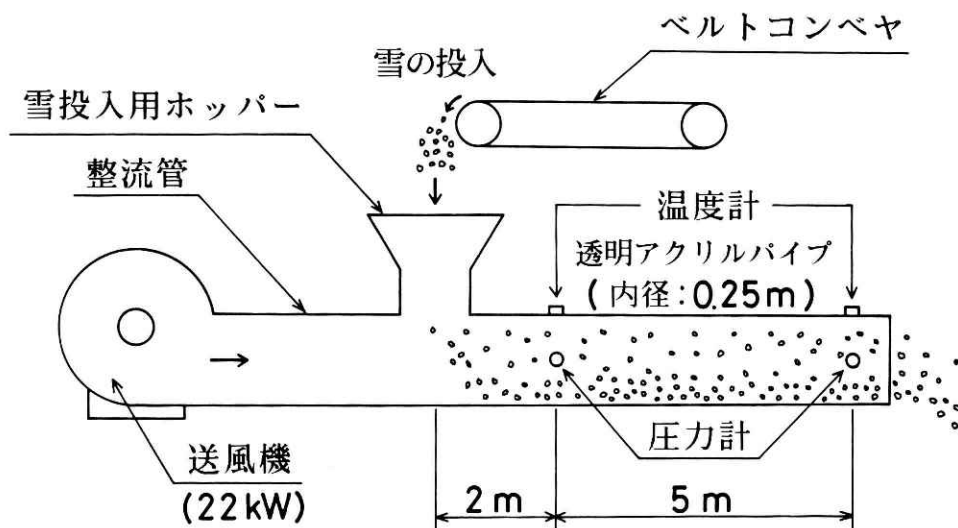


図1 実験装置の略図

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment.



写真1 実験装置全景

Photo.1 The whole view of the experimental equipment.

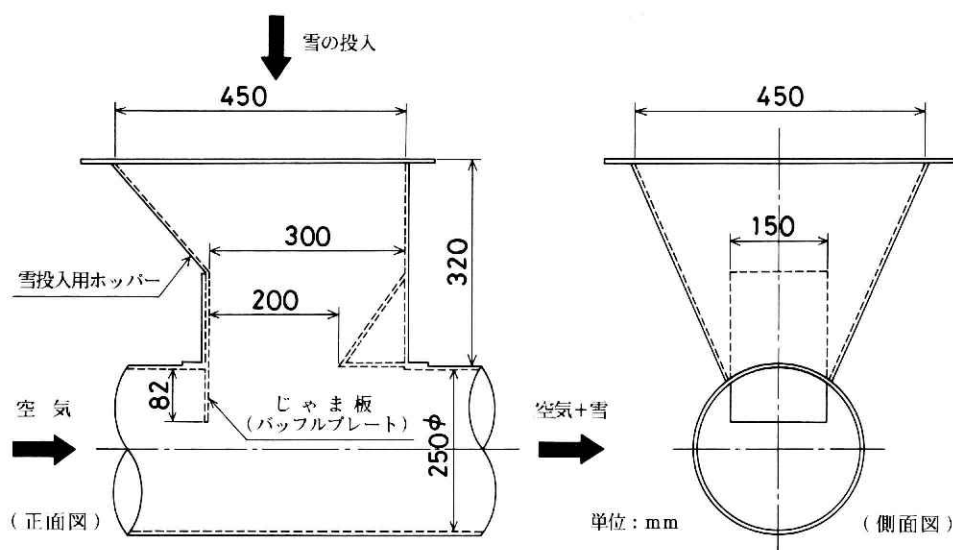


図2 雪の投入部詳細

Fig.2 The part drawing of the feeder of snow.

(ターボファン, 22kW), 整流管(内径0.25m, 長さ2 m, 鋼管), 雪投入用ホッパー及び輸送管(内径0.25m, 全長約7 m, 透明アクリル製)を直列かつ水平に連結したものである。

このうち, 雪投入部は, 図2に示すように, 輸送管内にじゃま板(バッフルプレート, 深さ82mm, 幅150mm, 厚さ4.5mm)をさし出し, その下流側に負圧を発生させる。そして, 上から雪を投入した時に, 雪が吹き上がるのを防止する構造とした。雪の投入は, いずれも雪の

体積でほぼ $0.1 \sim 0.13 \text{ m}^3$ になるようベルトコンベヤ上に雪を積み上げて行った。投入量は、ベルトコンベヤの送り速度を変えることによって、任意に設定できる。

実験における計測項目及び使用計測器を表1に示す。このうち、管内圧力及び管内温度については、図1に示したように、雪投入口から2 m及び7 mの位置にそれぞれセンサーを設置し、増幅器又は変換器を介して記録計に接続した。また、管内風速は雪投入時の測定が困難なため、投入前に空気のみを流送させた時点で、雪投入口から2 m及び7 mの位置に熱線風速計を設置して測定を行った。

なお、実験時の気温は $-3.4 \sim -0.6^\circ\text{C}$ 、投入雪の含水率は新雪、こしまり雪、しまり雪については0%，ざらめ雪はいくらか水分を含む状態であった。

表1 計測項目及び使用計測器
Table 1 Items measured and the instruments.

計測項目	使用計測器
管内風速	熱線風速計(0～40m/s)
管内圧力	圧力変換器(0.1kgf/cm ²)
管内温度	サーミスタ温度計($-10 \sim 10^\circ\text{C}$)
雪 温	// ($-43.2 \sim 120.7^\circ\text{C}$)
雪 密 度	100ccサンブラ, 電子天秤

3. 実験結果

3.1 輸送管内の圧力損失

輸送管内の圧力損失と管内風速(雪投入口から2 m及び7 mの位置で測定した値の平均値)との関係を図3に示す。但し、ここでの圧力損失は次式(1)により求めた。

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{p_1 - p_2}{L} \quad (1)$$

ここに、 $\frac{\Delta p}{L}$ ：単位長さ当りの圧力損失(mmAq/m)，

Δp ：圧力損失(mmAq)，

p_1 ：雪投入口から2 mの位置での管内圧力(mmAq)，

p_2 ：雪投入口から7 mの位置での管内圧力(mmAq)，

L ： p_1 と p_2 の間の距離(m)。

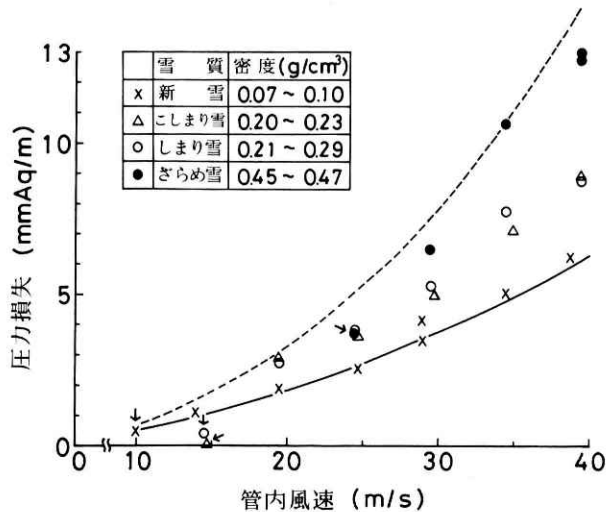


図3 圧力損失と管内風速の関係

Fig. 3 Relation between the pressure loss and the wind velocity in pipe.

図中の各記号は、雪質のちがいを表わし、密度の値は、ベルトコンベヤ上に雪を積んだ時のかさ密度を示す。また、投入雪の体積がほぼ一定のため、混合比 m (後述する) の値は管内風速によって変動する。

図3から明らかなように、圧力損失は管内風速が速くなるほど大きく、また雪密度が高くなるほど増大する傾向が見られる。図中実線で示したのは、空気だけを流送させた場合、すなわち単相流としての圧力損失曲線である。

雪を投入した場合の圧力損失の大きさは、新雪では空気だけの単相流の場合とほとんど変わらず、管内風速30m/sの時約3.5mmAq/mとなっている。これは、後述する管内体積濃度が0.01以下と小さく、かつ新雪の場合密度が0.07~0.1g/cm³ と他の雪質に比べて1/2~1/5と低いことに起因すると考えられる。目視観察結果によると、新雪を投入した時に輸送管の出口から排出される雪は、管内に[・]_・[・]_・まりを生じた管内風速10m/sの場合を除いては、すべて細かい粒子となっていた。

これに対して、こしまり雪、しまり雪での圧力損失は、共にほぼ同じような値を示しており、管内風速30m/sの時5~5.3mmAq/mで、新雪に比べて約1.5倍であった。目視観察結果によると、30m/s以上の管内風速では、新雪同様細かい粒子となって排出されるが、20m/sに低下すると、直径2~3cmの雪塊となって出てくるという状態であった。

一方、ざらめ雪の場合は他の雪質に比べて最も大きな圧力損失を示しており、管内風速30m/sの時6.5mmAq/mと、新雪の場合の約2倍となっている。目視観察結果でも、いずれの管内風速においても直径3~5cmの雪塊の状態で輸送管出口から排出されている。

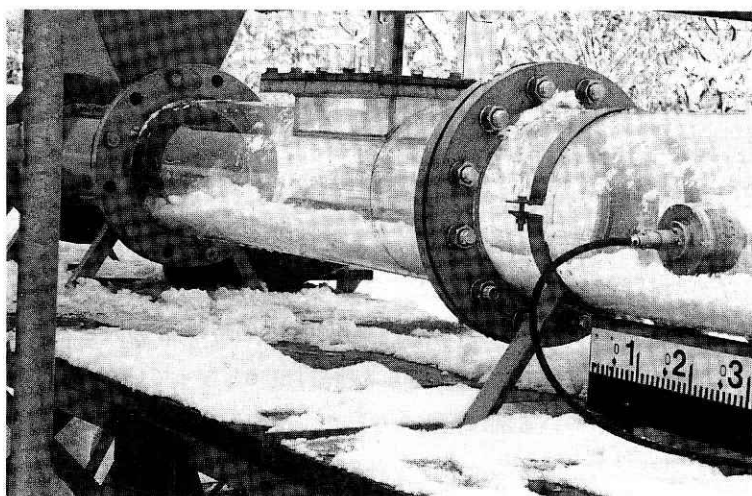


写真2 輸送管内の雪の堆積状況

Photo. 2 The condition of heap of snow in pipe.

次に、図3の中で矢印を添えた4つの記号は、輸送管内につまりを生じた時の圧力損失の値で、この時の管内風速が本実験装置における限界風速と考えられる。但し、ここでのつまりというのは、写真2に示したように、輸送管内全体に雪が充満して閉塞した状態とは異なる。すなわち、図2に示したように、本装置における雪の供給方法は、重力により落下させるのみで、強制的に加速させているわけではない。したがって、管内風速が小さい場合には、空気力によるせん断応力が雪と管壁との付着力に抗し切れなくなって、管底に雪が堆積し始める。いったん堆雪が始まると、管の有効断面積が小さくなり、一定量の雪を供給し続けるための雪投入部からの供給量が輸送可能量を上回ってしまう。そのしわ寄せは、まず雪投入部の出口付近の閉塞という形であらわれ、次いでホッパー内に雪が充満して供給不能となってしまう。それ故、限界風速というよりも、むしろ富田(1982)の指摘するように、浮遊限界状態を示すサルテーション速度に、より近いのかもしれない。しかしながら、前述のように今回は管内の雪の動きを直接観測していないので、ここではあえて“限界風速”と呼ぶことにする。

図3から明らかなように、本実験における限界風速の大きさは雪質によって異なり、新雪で10m/s、こしまり雪、しまり雪では15m/s、またざらめ雪では25m/s程度であることがわかった。したがって、管内につまりを生じさせず、かつ効率よく雪を輸送できる風速としては、30m/s程度が望ましいものと思われる。

3.2 混合比

円管内の粒体量を定量的に表わす手段として混合比があり、次のように求められる。

$$m = \frac{G_s}{G_a} \quad (2)$$

ここに、 m ：混合比、

G_s ：固体粒子(雪)の質量流量(kg/s)、

G_a ：気体(空気)の質量流量(kg/s)。

空気輸送においては、後述する体積濃度よりも混合比の方が一般的に用いられている。

式(2)により求めた混合比 m と管内風速との関係を図4に示す。図4から明らかなように、混合比 m は雪質によって異なる。例えば、管内風速30m/sの時の m の大きさは、新雪で0.26、こしまり雪では0.83、しまり雪では0.9、ざらめ雪では1.6となっている。雪に似たような物性の輸送材料を空気輸送している例は見当たらないが、やや近いと思われる例を上滝(1979)の報告から引用したのが付表1である。条件が異なるので、同一線上で比較するのは無理であろうが、オーダー的にはほぼ近い値が出ているといえそうである。

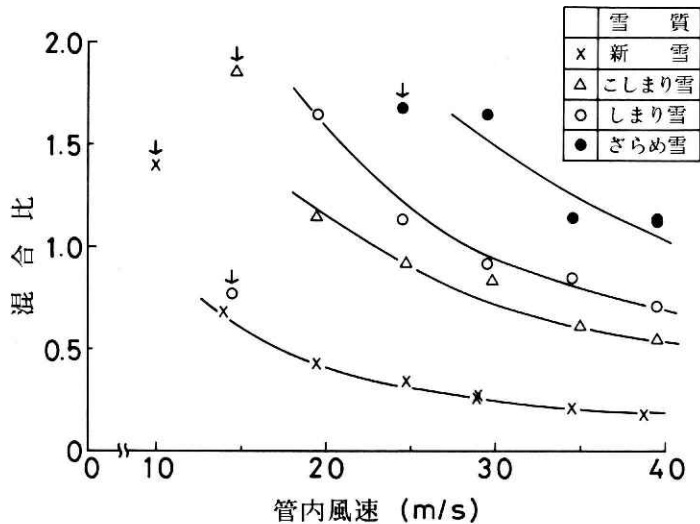


図4 混合比と管内風速との関係

Fig. 4 Relation between the mixing ratio and the wind velocity in pipe.

3.3 体 積 濃 度

体積濃度は、固体-気体混合物の全体積に対する固体体積の比率として、次のようにあらわされる。

$$C = \frac{V_s}{V_a + V_s} \quad (3)$$

ここに、 C ：体積濃度、

V_s : 固体粒子(雪)の体積流量(m^3/s),

V_a : 気体(空気)の体積流量(m^3/s).

式(3)により求めた体積濃度 C と管内風速との関係を図5に示す. 前述したように, 投入した雪の体積がほぼ一定であったため, 体積濃度は雪質には依存していない. また, 管内風速が低下すると粒子速度も減少するため, 体積濃度は増加する. 但し, 前述のように, 投入雪質によって輸送管の出口から排出される雪の形状が異なるため, 実際の粒子速度は雪質によって異なるものとみられる. しかし, 今回は粒子速度の測定を行っていないので, 管内風速を基準に考えた.

図5から明らかなように, C の大きさは, 矢印を添えた4つの記号(輸送管内につまりを生じた時の値, 以後の図中の矢印も同様のことを表わす)を除く順調に雪を輸送できた実験の範囲では, 最大でほぼ0.01である.

ステパノフ(1979)は, 固体-空気混合物の体積濃度は一般に1%に満たないとしている. また, 上滝(1979)も, 管内で粉粒体が占める体積は, 多くの場合数%以下であると述べている. したがって, 今回の実験から得られた体積濃度は, ほぼ妥当な数値であるように思われる. しかし, 前述のように雪投入部に改善の余地があるとみられるので, それによつては体積濃度もさらに高め得るものと考えられる. これは今後の大きな課題であるといえる.

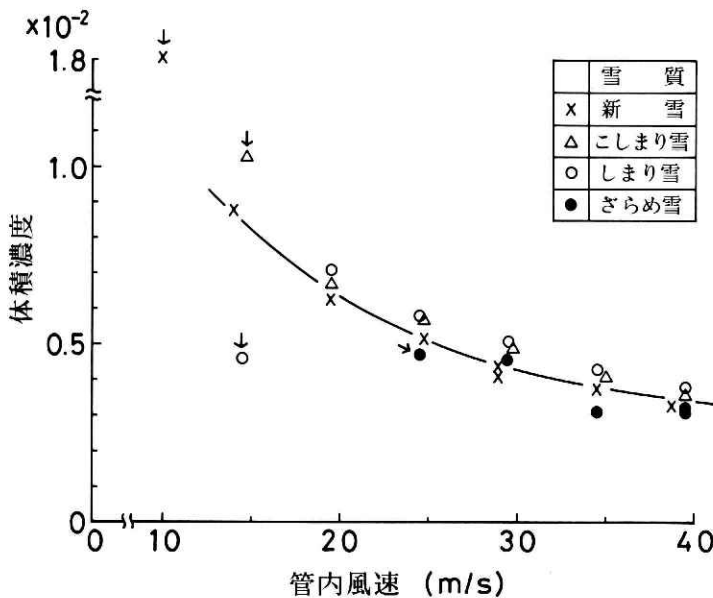


図5 体積濃度の変化

Fig. 5 Variation of the volumetric concentration against the wind velocity in pipe.

3.4 雪輸送量

図6は、空気輸送した雪の質量流量 G_s と管内風速との関係を示したものである。前述のように、実験ではすべて $0.1 \sim 0.13 \text{m}^3$ とほぼ一定体積の雪を投入しているので、図6における各雪質間の質量流量の差は、雪密度のちがいによると見なすことができる。

ところで、図6のたて軸の質量流量というのは、投入雪量(kg)を輸送時間(sec)で除した値であるが、実際の輸送に要した時間は、せいぜい $15 \sim 20 \text{sec}$ 程度である。そこで、図6の流量で1時間連続して雪を輸送し続けた場合の輸送量を表2に示した。表2から明らかなように、本実験装置による雪輸送量は、新雪で 2t/h 前後、こしまり雪では 5t/h 程度、しまり雪で $6 \sim 7 \text{t/h}$ 、またざらめ雪では $9 \sim 11 \text{t/h}$ であることがわかった。

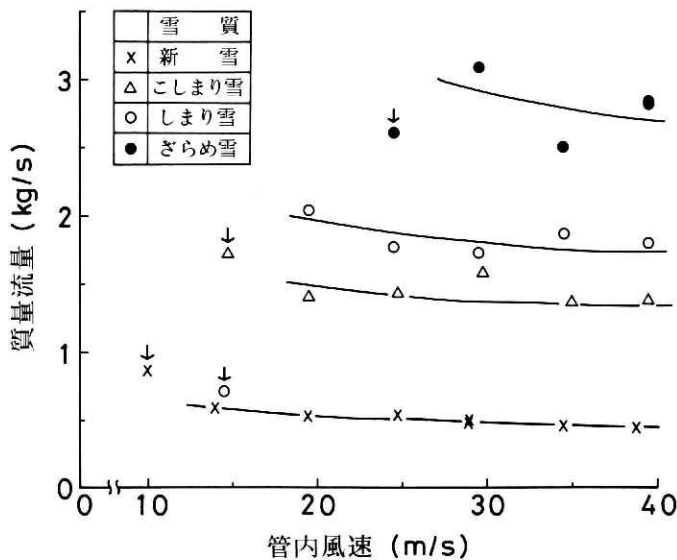


図6 雪の質量流量と管内風速との関係

Fig. 6 Relation between the mass flow of snow and the wind velocity in pipe.

表2 雪輸送量

Table 2 Calculated snow masses transported by this equipment in an hour.

雪質	雪輸送量(t/h)
新雪	1.6～2.2
こしまり雪	4.9～5.7
しまり雪	6.2～7.3
ざらめ雪	9.0～11.1

3.5 輸送管内の温度上昇

雪の空気輸送方式において、その輸送能力を左右する大きな要素の一つとして、輸送管内の温度上昇が挙げられる。

図7, 8は、それぞれ雪投入口から2 m, 7 mの位置で測定した管内温度と気温との関係を

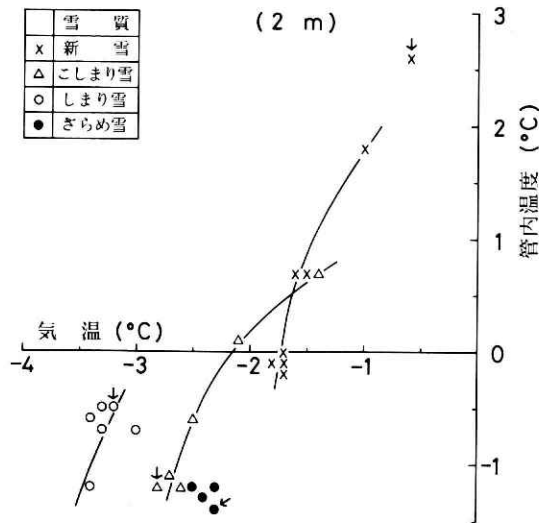


図7 管内温度(2 m地点)と気温

Fig. 7 Relation between the temperature in pipe (at 2 m point) and the air temperature.

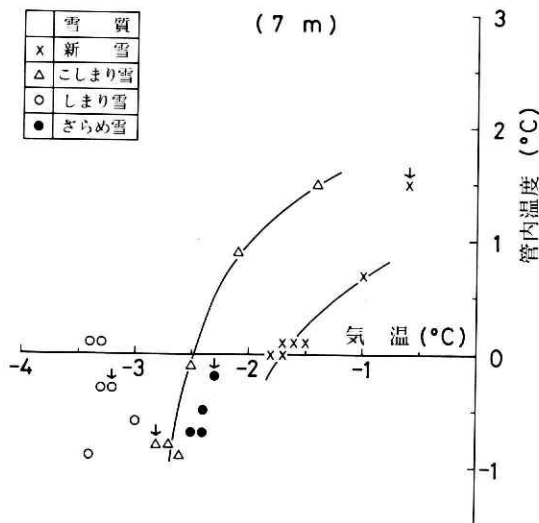


図8 管内温度(7 m地点)と気温

Fig. 8 Relation between the temperature in pipe (at 7 m point) and the air temperature.

示したものである。第2章で述べたように、実験時の気温は $-3.4\sim-0.6^{\circ}\text{C}$ と、いずれも氷点下であった。しかし、管内温度はすべて気温よりも高く、 0°C 以上のケースもかなりみられる。

次に、管内温度と気温との温度差を求め、管内風速との関係を示したのが図9、10である。2つの図から、温度上昇と管内風速や雪質、密度との関係ははっきりしないが、いずれの場合も管内温度の方が気温を $1\sim3.5^{\circ}\text{C}$ も上回っていることがわかる。

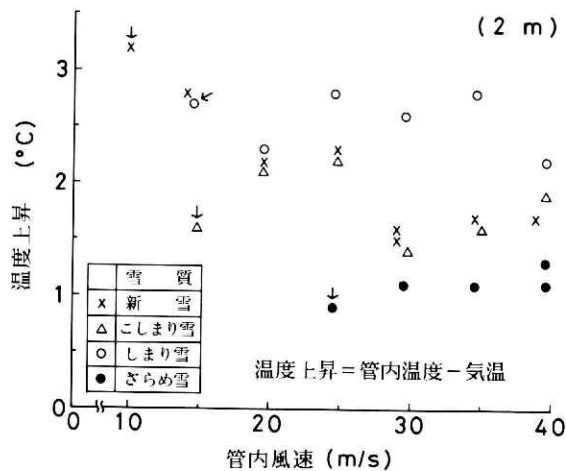


図9 管内の温度上昇(2 m地点)

Fig. 9 Temperature rise in pipe (at 2 m point) against the wind velocity in pipe with different snow type.

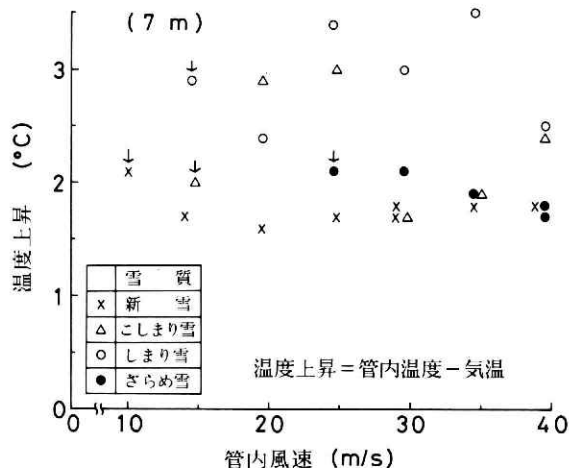


図10 管内の温度上昇(7 m地点)

Fig. 10 Temperature rise in pipe (at 7 m point) against the wind velocity in pipe with different snow type.

4. 考 察

4.1 輸送管内の雪の流れ

今回は、粒子速度の測定や高速度カメラによる管内の雪の動きの観測を行っていないので、確定的なことはいえないが、小林ほか(1987)の結果と併せて考えると、管内の雪の流れは以下のように推定される。

新雪を投入した場合、15m/s以上の管内風速では、ほとんどの粒子が浮遊運動をしていたものとみられる。

また、こしまり雪、しまり雪の場合、30m/s以上の管内風速では新雪と同様に浮遊運動が顕著であるが、20m/s以下になると、跳躍粒子又は転動粒子が卓越してくると考えられる。

これに対して、ざらめ雪では浮遊する粒子は少なく、ほとんどの粒子は雪塊の形で跳躍ないしは転動していたものと推定される。

次に、輸送管出口から排出される雪の状態が投入雪質によって異なる原因は、次のように考えられる。

まず新雪の場合、降雪直後でもまだ雪粒同士の結合が出来ていないか、又は出来ていても弱いために、15m/s位の弱い風でも充分粒子をバラバラにほぐし得るものとみられる。

これに対して、こしまり雪、しまり雪では、すでに雪粒同士の結合が緊密に出来ており、20m/s以下の風速では結合状態を解消するのに不十分であるとみられる。

一方、ざらめ雪の場合は、第2章でもふれたように、すでにいくらか水分を含んだ状態にあるため、本来雪粒同士の結合が弱いにもかかわらず、管内を移動する過程で逆に雪粒同士が付着し、雪塊に変わっていったものと考えられる。

4.2 輸送管内の圧力損失の特性

一般に定速区間における圧力損失と気流速度との関係は、付図1のように表わされる。付図1から明らかなように、各パラメータによる曲線はいずれも最小値があり、その位置は固体粒子の質量流量 G_s (kg/s) が大きくなるほど、図の破線のように気流速度(m/s)の大きい方へ移動する(森川, 1979)。

これに対して、本実験結果の図3では最小値を確認することができない。本来、“管内に粒子が堆積すれば、流れの断面積が小さくなり、しかも堆積粒子によるあらさの増加のために、圧力損失は急激に増加する”(森川, 1979)はずである。しかし、今実験では、前述のように管底にいったん雪の堆積が発生すると、すぐに雪投入部出口付近につまりを生じて供給不能となってしまう、最小値及び左上がりの増加曲線を得ることができなかったと考えられる。

その一方で、管の内径が20cm、40cmのように大きい時には、圧力損失に最小値はあらわれていないとの報告もある(森川, 1979)。

いずれにせよ、今後雪投入部をさらに検討を加えて改造する必要がある。

4.3 管内温度の上昇

図9, 10に示したように, 管内温度が気温を1~3.5°Cも上回る原因として, 次の2つを挙げることができる.

(1) 送風機による空気の状態変化

輸送用の空気は送風機で圧縮され, 輸送管内で状態が変化し, 圧力のみならず温度も変化する. 一般にその変化は次の式で表わされる.

$$pv^n = \text{一定} \quad (4)$$

ここに, p : 圧力,

v : 比容積,

n : 指数.

n の値によって, 次の5つの状態変化に大別される. ①等温変化 ②等圧変化 ③等容変化 ④断熱変化 ⑤ポリトロップ変化

本実験の場合, 装置の構造上①, ②, ③は当てはまらない. また, 多少の熱の出入りを伴うことから, 厳密には断熱変化でもなく, 結局ポリトロップ変化以外には考えられない. ポリトロップ変化により生ずる空気の温度変化は, 次のように表わすことができる(生井, 1972).

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (5)$$

ここに, T_2 : 終わりの絶対温度(°K),

T_1 : 初めの絶対温度(°K),

p_2 : 変化終点での圧力(mmAq),

p_1 : 初めの圧力(mmAq),

n : ポリトロップ指数.

n の値は, 一般に断熱変化における同形の式の断熱指数 $k=1.4$ (空気の場合)よりも大きいとされている. ここでは, 一応 $n=1.4$ として, 式(5)を用いて $\Delta T = T_2 - T_1$ を試算してみた. その結果, $\Delta T = 0.1 \sim 1.3^\circ\text{C}$ といずれも小さく, これだけでは本実験における温度上昇分すべてを説明できないことがわかった.

(2) じゃま板(バッフルプレート)による影響

本実験終了後に, 整流管の雪投入口に近い部分に, 圧力センサーと温度センサーを取付け, じゃま板の設置による管内温度への影響を調べた. 調査結果を表3に示す. 表3から明らかに, 整流管の管内温度は, 気温に比べて2.3~3.9°Cも上昇することがわかった.

すなわち, 雪投入口からの雪の吹き上がりを防止するために設けたじゃま板により空気流が一部で阻止され, その結果として温度上昇を生じていることがわかった.

結局管内の温度上昇は, (1)及び(2)の相乗作用により発生すると見なすことができる.

表3 じゃま板の影響調査結果

Table 3 Measured temperature rises due to a baffle plate.

1. 設定風速: 40m/s

測定位置 \ 要素	風速(m/s)	管内温度(°C)	気温(°C)
整流管	34	8.7	4.8
雪投入口から2m地点	40	7.3	
雪投入口から7m地点	39	7.5	

2. 設定風速: 30m/s

測定位置 \ 要素	風速(m/s)	管内温度(°C)	気温(°C)
整流管	25.5	8.4	6.1
雪投入口から2m地点	30	6.9	
雪投入口から7m地点	30	7.3	

5. ま と め

長さ約7mの水平直管を有する雪の空気輸送実験装置を用いて、雪の輸送実験を行った結果をまとめると、次の通りである。

1) 雪を投入した時の直管部の圧力損失は、新雪では空気だけを流送させた時の圧力損失にほぼ等しく、管内風速30m/sで約3.5mmAq/m、こしまり雪、しまり雪では新雪に比べ約1.5倍、ざらめ雪では約2倍であった。

2) 輸送管内につまりを生じた時の限界風速の値は雪質によって異なり、新雪では10m/s、こしまり雪、しまり雪では15m/s、ざらめ雪では25m/s程度であることがわかった。したがって、管内につまりを生じさせないためには、30m/s以上の風速が必要である。

3) 管内を流動する雪と空気との比率を表わす混合比と体積濃度を求めると、まず混合比は雪質によって異なるが0.18~1.6の範囲、また体積濃度は最大で0.01程度であった。

4) 実験結果から推定した雪輸送量は、新雪で2t/h前後、こしまり雪では5t/h程度、しまり雪で6~7t/h、またざらめ雪では9~11t/hであることがわかった。

5) 管内温度は、いずれも気温に比べて1~3.5°Cも高くなっており、その原因はポリトロップ変化による空気の状態変化とじゃま板の設置による影響に起因するとみられる。

謝 辞

本報告書をまとめるに当り、長岡雪氷防災実験研究所の方々、特に長岡雪氷防災実験研究所長中村勉博士から有益な御助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

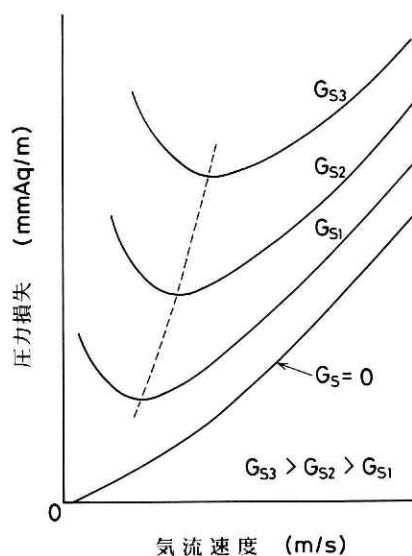
- 1) 生井武文(1972): 遠心軸流送風機と圧縮機. 第14版, 朝倉書店, 28-40.
- 2) 上滝具貞(1979): 粉粒体の空気輸送(新版). 第3版, 日刊工業新聞社, 304pp.
- 3) 建設省(1988): 雪の連続輸送技術の開発. 雪に強い都市づくりに関する総合技術の開発報告書, 14-27.
- 4) 建設省北陸地方建設局監修(1983): 流雪溝設計運営要領. 社団法人北陸建設弘済会, 60.
- 5) 小林俊市・栗山弘(1987): 雪の水力輸送の技術開発. 雪と道路, No. 10, 95-99.
- 6) 小林俊市・熊谷元伸・栗山弘・野原以左武(1987): 雪の空気輸送実験(序報). 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 347.
- 7) 森川敬信(1979): 流体-固体二相流——空気輸送と水力輸送——. 初版, 日刊工業新聞社, 55-57.
- 8) 大熊孝・米内弘明・星野和利・小林雄二(1985): 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359号/IV-3, 99-106.
- 9) A. J. ステパノフ著, 今市憲作・崎展・辻本良信共訳(1979): ポンプとブロワ——二相流を中心に——. 初版, 産業図書, 186-187.
- 10) 富田侑嗣(1982): 固気二相流における流動の固有の性質. 混相流の基礎理論と応用技術, 混相流シンポジウム実行委員会, 109-128.
- 11) 辻裕(1984): 空気輸送の基礎. 第1版, 養賢堂, 1-4.

(1989年6月12日原稿受理)

付表1 空気輸送装置の使用例

Attached Table Specifications of some cases using pneumatic conveyors.

被 輸 送 物				空 気 輸 送 装 置								
名 称	真比重 t/m ³	形 状	平均径	輸送量(t/h)		管 径 mm	距 離(m)		混 入 機	輸送形式	混 合 比	
				常 用	最 大		水 平	垂 直			常 用	最 大
ココアビーンズ	1.2	楕円状	12mm	0.5	0.6	67.9	7	4	ホップ電磁フィーダー	圧 送 式	1.4	1.7
木材チップ(細片)	0.4~0.45	片 状	10~20mm	45	60	395	500	254	ロータリーフィーダー	〃	1.9	2.6
塩化ビニル粉	1.4	球 状	—	2	4	100	40	15	〃	圧送循環方式	1.1	2.2
合 成 樹 脂	0.95	球 状 円柱状	3mm	1.2	1.2	65	20	16	吸 込 ノ ズ ル	吸 引 式	2.3	2.3
農 薬 粒 剤	0.9~1.0	円 柱	1.5φ	0.5	0.9	100	40	10	エ ゼ ク タ	圧 送 式	0.7	1.2



付図1 圧力損失と気流速度との特性線図の例

Attached Fig. 1 Relation between the pressure loss and the wind velocity.