模型雪を用いた風洞実験による吹きだまりの可視化*

苫米地 司**

Wind-tunnel Experiments of Snowdrift

Tsukasa TOMABECHI

1. はじめに

これまで、道路や建物を対象とした吹きだまりに関する研究は、屋外での実測調査を中心に実施されてきた。しかし、屋外の実測調査は、雪の降る場所の冬期間に限定されることや膨大な人力と経費が必要となるため、調査事例が限られてくる。このため、現状では道路や建物を対象とした吹きだまりの定性的あるいは定量的な性状を系統的にまとめるに至っていない。

このような背景から、近年、模型雪を用いた風洞実験で吹きだまりを可視化して道路や建物を対象とした吹きだまりの定性的あるいは定量的な検討が実施されている^{1), 2)}。本稿では、これらの実験手法の概要を報告する。

2. 模型雪を用いた風洞実験の歴史とその特徴

表1に、模型雪の変遷に注目した風洞実験の歴史的な流れの概要を示す。同表のように、1934年に E. A. Finney によってノコクズや雲母の粉末を模型雪とした本格的な実験が実施されている³⁾。その後、模型雪は炭酸マグネシウム^{4), 5)}、酸化アルミナ⁶⁾、ガラスビーズ⁷⁾、活性白土等^{1), 2)}と研究者あるいは研究目的によって使い分けられている。

模型雪を用いた風洞実験は、ある条件下の流れにおいて形成される吹きだまり性状を検討する実験手法である。すなわち、流れの剝離、渦の発生

表1 模型雪を用いた風洞実験の歴史的な流れ

年 代	研 究 者	模 型 雪
1934年	●E. A. Finney ³⁾	ノコクズ・雲母の粉 炭酸マグネシウム
1939年	●木下 是雄 ⁴⁾	
1955年	●谷藤 正三・小川 哲夫 ⁵⁾	炭酸マグネシウム
1975年	●室田 達郎・佐藤 卓 ⁶⁾	酸化アルミナ ガラスビーズ 活性白土 活性白土
1980年	●Iversen ⁷⁾	
	●安濃 豊 ¹⁾ 遠藤 明久・苫米地 司 ²⁾	

等の流れ状態を可視化するのではなく、ある流れ状態の中で形成される2次的な現象(吹きだまり性状)を可視化する実験手法である。したがって、一般的に実施されている流れの可視化とはやや異なる。ここで、模型雪を用いた実験手法の特徴を整理すると、次のようになる。

- 1) 一般に実施されている流れの可視化手法で、吹きだまりの形成状況の概要を把握することは可能である。しかし、道路や建物を対象とした吹きだまりの研究で重要な要因となる「吹きだまりの時間的な変化(吹雪継続時間と吹きだまり状況との関係)」、「吹きだまり量」、「吹きだまり高」等の検討が十分にできない。模型雪を用いた実験では、これらの情報を同時に得ることができ、吹きだまり現象の全貌を把握することが可能である。
- 2) 吹きだまり状況から、流れ場の風速の強弱の分布、剝離、渦の形成などの流れの全貌を把握することが可能である。

*原稿受付 昭和63年10月5日

**正会員 北海道工業大学建築工学科

3) 模型雪を用いた風洞実験は、混相流になるため、気流を対象とした風洞実験よりも相似性の確立がむずかしい。これまでの実験例^{4)~7)}では、気流の相似性、幾何学的相似性および落下運動の相似性を検討している。近年では、これらの検討に加え、模型雪の粘着性を検討し、前述の気流等の相似よりも粘着性の相似が最も重要と考えられている^{1), 2)}。

4) 模型雪を用いた風洞実験は、風洞内に多量の粉体を挿入するため、専用の風洞装置が必要となる。このため、日本国内での装置の設置例が極めて少ない現状にある。

3. 模型雪を用いた風洞実験の概要

3.1 粉体専用風洞装置

粉体専用風洞装置の一例として、筆者の使用している回流型の風洞装置の概要を写真1および図1に示す。図に示すように、送風機で発生した風

写真1 北海道工業大学の粉体専用風洞装置

図1 北海道工業大学の粉体専用装置の概要

は、2つの曲がり部を経てノズルの位置に到達する。他方、模型雪は、オートフィーダーからコンプレッサーの圧縮空気で吹き出され、測定部上流のノズルから風洞内に噴出され、吹雪現象が発生する。実験風速はインバータで設定し、整流板の枚数や間隔を変えることで風速分布や乱れを設定する。後述の4.1, 4.2の実験例では、風速分布を大気境界層の風速分布に相似するように設定し、雪面上の乱れ強さに近似するように模型の設置範囲で風洞内の乱れ強さを15%程度になるように設定している⁹⁾。また、模型雪として用いる活性白土の供給量は、1cc/sから5cc/sの範囲で調整できる。さらに、風洞内へは、コンプレッサーの圧縮空気が流入するため、測定部後方に排気用の小型送風機を取り付けてある。なお、本装置は、送風機の部分を粉体が通過するため、送風機部分の維持管理に多くの問題がある。今後、同様の装置を設置する場合には、送風機の位置や風洞内の粉体の回収方法などを検討する必要がある。

3.2 模型雪

自然界での雪粒子は落下後、斜面において無制限に積もり得るものではなく、雪粒子間の粘着性に相応した形をとる。また、落下後、風により移動する場合は雪の粘着性に相応した移動の始まる限界摩擦速度以上の速度が必要となる。すなわち、推積形状や限界摩擦速度の相似性を得るためには、模型雪として用いる材料の粘着性が雪と同程度でなければならない。この条件が模型雪を選定する場合に最も重要となる。

これまで模型雪として使用されている粉体と雪の粘着性を安息角で比較すると、表2となる。安息角は、粉体を推積したときの凝着力や安定性に関する目安となる物理量である。写真2に、活性白土の安息角の実測例を示す。表2に示すように、活性白土が雪に最も近似した安息角の値を示す。これらの結果から筆者は気温条件がマイナスの範囲を対象とした場合に活性白土を模型雪に用いている。なお、活性白土は、酸性白土を硫酸で加熱処理し、酸性白土中の塩基成分を溶出させたものである。

表2 模型雪材料の粘着性と安息角

模型雪の材料名	安息角 (θ)	雪の安息角 (θ) ^{a)}
炭酸マグネシウム	40°~70°	約 50°
酸化アルミナ	35°~45°	(気温が-3.5° の場合)
ガラスビーズ	35°~37°	約 45°
活性白土	48°~53°	(気温が -35° の場合)

注) 安息角の範囲が広い粉体は付着・凝集性が大きく、実験中に粉体の性状が変化しやすい。

写真2 活性白土の安息角(θ)の実測例

筆者の使用している日本活性白土㈱の活性白土 K製品の物理特性を表3に、電子顕微鏡写真を写真3に示す。この活性白土は、表面に微細な孔を有した粒径 10μ 程度の粉体である。さらに、前述のように粘着性が雪と近似しているため、図2に示すように限界摩擦速度も雪と近似した傾向を示す。

3.3 モアレカメラ装置

吹きだまりの可視化は、医療用高低差測定用モアレカメラ FM3013型 (FUJI PHOTO) を用いている。モアレカメラ装置の概要を写真4に、構造の概要を図3に示す。この装置は、カメラのシャッターを押すと同時に、図中のハロゲンランプ (500W) が点灯し、図中の格子 (0.5mm 間隔) が移動してモアレ縞が得られる。このモアレ縞 (黒縞と白縞の高低差 1mm, 写真6図7参照) によって、吹きだまりの等深線図が得られる。等深線図から、吹きだまりの深さ・範囲および量を数的に把握することができる。すなわち、モアレカメラにより吹きだまりを3次的にとらえることができる。

4. 模型雪に活性白土を用いた風洞実験による吹きだまりの可視化の例

模型雪に活性白土を用いた風洞実験で吹きだま

表3 実験に用いた活性白土の物理特性

含水比	8.5 %			
比 重	2.51			
粒 度	最 大	粒 径	2.0 mm	
	60 %	粒 径	0.014 mm	
	30 %	粒 径	0.0049 mm	
	10 %	粒 径	0.00125mm	
	均 等	係 数	11.2	
	曲 率	係 数	1.4	
	4.76mm以上	の 粒 子	—	%
	4.76~2mm	の 粒 子	—	%
	2~0.42mm	の 粒 子	0.04	%
	0.42~0.074mm	の 粒 子	3.96	%
	0.074~0.005mm	の シルト分	65.50	%
	0.005mm 以下	の 粘 土 分	30.50	%
	0.001mm 以下	の コロイド分	8.0	%
	2000 μ フルイ	通過重量百分率	100	%
	420 μ フルイ	通過重量百分率	99.9	%
	74 μ フルイ	通過重量百分率	96.0	%
安息角	48°~51°

写真3 活性白土の電子顕微鏡写真(×3000)

図2 活性白土の摩擦速度と風速の関係

りを可視化した2つの実験例を以下に示す。実験の相似性は、前述2に示したように、気流の相似性、模型の幾何学的相似性、雪の落下運動の相似性および粘着性の相似性について検討してい

写真4 モアレカメラ装置
(FM 3013)

図3 モアレカメラ装置の概要

白土の供給量 2 cc/s ・活性白土の供給時間2時間30分とした。実験結果の一例を写真5に示す。写真のように、高床式建物の風下側に顕著な吹きだまりが形成されている。この吹きだまりのモアレ写真を写真6に示す。写真のように、モアレ縞で吹きだまりの範囲や吹きだまり高を明瞭に把握することができる。なお、写真の黒縞と白縞の高低差は1mmである。

本実験の対象とした南極昭和基地の高床式建物後方の吹きだまり性状は、現地で詳細な調査が実施

されている⁹⁾。これらの調査結果と実験結果とを対比すると、図5となる。図のように、写真6のモアレ写真から求めた推積断面と現地の1978年9月22日の積雪断面は近似し、吹きだまりの高さ的要因のシミュレートは十分に可能である。模型雪を用いた風洞実験は、吹きだまりの高さの他に吹きだまり量や吹雪の継続時間等についてもシミュレートできることを前述の2に示した。ここで、吹きだまり量と吹雪の継続時間について、実験結果と実測調査結果とを対比してみる。

る^{2), 9)}。

4.1 南極昭和基地の高床式建物後方の吹きだまり性状の再現実験

図4に示す昭和基地の高床式建物の1/100模型を用いて模型雪に活性白土を用いた風洞実験を実施した。実験条件は、風洞内風速 7.0 m/s ・活性

図4 昭和基地高床式建物の模型概要

写真5 南極昭和基地高床式建物後方の吹きだまりの可視化状況

写真6 写真5に示した吹きだまりのモアレ写真

図5 南極昭和基地における吹きだまり形状と風洞模型実験による吹きだまり形状の対比

図5に示した積雪断面の時点における現地の吹きだまり量は、建物後方4×24mの範囲で60.72 m³である。一方、模型実験の吹きだまり量は、前述の範囲に該当する4×24cmの範囲で54cm³となる。すなわち、1/100模型を用いた実験で約1/100の吹きだまり量を形成していることになり、吹きだまりの量的要因のシミュレートも十分に可能である。

同様に、模型実験の吹雪状態から下記に示す安濃式¹⁰⁾で吹雪継続時間を検討すると、次のようになる。

$$T_p \cdot Q_p \cdot \eta_p / \rho_0 \cdot Fw^{p2} = T_m \cdot Q_m \cdot \eta_m / \rho_m \cdot Fw_m^2$$

ここで、 T ：吹雪継続時間、 Q ：吹雪量 (g/m・min)、 Fw ：建物の幅 (m)、 η ：雪の捕捉率(%), ρ ：雪のかさ比重 (g/cm³)、 p ：原型、 m ：模型を示す。

現地では、 $Q=8288.3\text{g/m}\cdot\text{min}$ 、 $n=0.5\%$ 、 $\rho=0.3\text{g/cm}^3$ 、 $Fw=6\text{m}$ である。一方、模型実験では、 $Q=27.4\text{g/m}\cdot\text{min}$ 、 $n=18.4\%$ 、 $\rho=0.65\text{g/cm}^3$ 、 $Fw=6\text{cm}$ となる。これらの値から、 $T_p/T_m=561.3$ となる。 $T_m=2.5$ 時間であるから、 $T_p=1403.33$ 時間となる。現地での吹雪継続時間は1681.23時間であるから、模型実験から得られる吹雪継続時間は現地と近似した値を示している。

このように、模型雪を用いた風洞実験は、流れ場の風速の強弱の分布、剥離、渦などで形成される吹きだまり状況を可視化し、さらに、吹雪継続時間・吹きだまり量・吹きだまり高等の情報を同時に得ることができ、吹きだまり現象の全貌を把握するための有効な実験手法である。

4.2 住宅団地における建物周辺の吹きだまり性状

図6に、実験に用いた札幌市を想定した住宅団地の1/500模型の概要を示す。実験条件は、札幌市内の平均的な吹雪継続、吹雪量等を考慮して、風洞内風速6.0m/s、供給時間1時間、活性白土の供給量2cc/sとした。図7に、風向45°の場合の吹きだまり性状とモアレ写真およびモアレ写真から得られた等深線図との対比を示す。図のように、住宅団地内の吹きだまり状況の全貌が把握できる。写真7、8に、風向15°、30°の吹きだまり性状とモアレ写真とのそれぞれの対比を示す。

図6 札幌市を想定した住宅団地模型の概要

(風向45°、風速6m/sの場合)

図7 住宅団地の吹きだまり状況そのモアレ写真・等深線図の一例

このように、模型雪を用いた風洞実験で吹きだまり性状を可視化することによって、同一の住宅団

(風向15°, 風速6m/s, 上写真: 吹きだまり性状, 下写真: モアレ写真)

写真7 吹きだまり性状とモアレ写真の対比

(風向30°, 風速6m/s, 上写真: 吹きだまり性状, 下写真: モアレ写真)

写真8 吹きだまり性状とモアレ写真の対比

地内においても風向の差異で吹きだまりの形成位置, 吹きだまり高等に大きな差があることが明らかとなる。

住宅団地内の吹きだまり性状は, 風向の他に風速や建物の隣棟間隔の差異によっても大きく異なってくる。これらの点について, 同様の実験で検討することにより, 住宅団地内の詳細な吹きだまり性状を把握することができる。これらの結果をもとに, 雪国における住宅地の有効な防雪対策を可能にすると考える。

5. まとめ

模型雪を用いた風洞実験による吹きだまりの可視化実験は, 道路や建物を対象とした防雪対策を検討する場合の重要な要因となる吹きだまり量・吹きだまり高・吹雪の継続時間等に関する情報を同時に得ることができる。今後, 大型の粉体専用風洞装置の導入により, 地形模型を用いて山岳地帯の積雪状況や都市全体の積雪状況の検討も可能に

なってくる。「雪につよい街づくり」を目指す今日, 模型雪を用いた風洞実験の活用が望まれる。

参考文献

- 1) Anno, Y. and Konishi, T.: Modeling the effects of asnowdrift-preventing forest and a snow fence by means of activated clay particles, Cold Reg. Sci. Technol., 5 (1981), 43-58.
- 2) 吉米地・遠藤: 建物周辺の吹きだまり対策に関する基礎的研究, 日本雪工学会誌第1号(昭和61年), 1-8.
- 3) Finney, E. A.: Snow control on the highways, Michigan Engineering Experiment Station Bulletin No. 57 (1934), 1-62.
- 4) 木下是男: 風洞による人工吹雪の実験法, 応用物理, 8 (昭和14年), 12-17.
- 5) 谷藤・小川: 道路の吹きだまり防除防止工法に関する実験的研究 (その3), 土木研究所報告 (昭和30年), 1-30.
- 6) 室田・佐藤: 木造の耐雪化に関する研究 (その2), 科学技術庁調整局 (昭和50年), 170-184.
- 7) Iversen, J. D.: Drifting snow similitude transport rate and roughness modeling, J. Glaciology, 26 (1980), 398-403.
- 8) 黒岩大介: 雪, 粉体工学研究会誌 Vol. 13, No. 10 (1976), 556-569.
- 9) Kobayashi, S.: Studies on Interaction between Wind and Dry Snow Surfaces, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Ser. A NO. 29 (1979), 1-64.
- 10) Tomabechi, T. and Endo, A.: Wind-tunnel Experiments of Snowdrift Formation behind an Elevated Building at Syowa Station, Antarctica, Antarct. Rec. 84 (1985), 114-119.
- 11) Mitsuhashi, H.: Measurements of snowdrifts and wind profiles around the huts at Syowa Station in Antarctica, Antarct. Rec. 75 (1982), 37-56.
- 12) Anno, Y.: Requirements modeling of a snowdrift Cold Reg. Sci Technol., 8 (1984), 241-252.