

シャボン玉による流れの可視化と 昭和基地周辺の雪の吹きだまり

佐藤稔雄*・半貫敏夫*

Flow-Visualization by Means of Soap Bubbles on Snowdrift around the Huts at Syowa Station

Toshio SATO* and Toshio HANNUKI*

Abstract: The wind tunnel tests were conducted in order to predict profiles of the snowdrift formed around the buildings with the pilotis built at Syowa Station in Antarctica on the following assumptions.

That is, assuming that the snow flakes in the wind velocity fields exceeding the certain mean wind velocity flow along with the wind and the other snow flakes in those fields not exceeding it tend to accumulate on the ground surface, the profiles of the snowdrift around the buildings can be predicted under the blizzard.

The results of the wind tunnel tests (the flow-visualization by means of soap bubbles and the measurement of wind velocity distributions) using two-dimensional models are as follows;

- 1) The profile of the snowdrift changes according to the surface friction velocity of the surface boundary layer U_* and the altitude of the pilotis h .
- 2) The profile of the snowdrift can be predicted in the division of the wind velocity field at the altitude Z satisfying in $U/U_{50} \doteq 0.5$.
- 3) The variation of the snowdrift profile can also be expressed by the index K (eq. 9) of the fluid energy of the mean wind flowing the pilotis. Since the index K is a function of U and h , it is useful for the planning information of buildings.

要旨: 昭和基地に建つ高床式建物周辺に形成される雪の吹きだまりの形態を予測するため、次のような仮説を設定して風洞実験を試みた。すなわち、雪嵐の時、建物周辺で、ある特定風速を超える速度場の雪粒子は風と共に流れ、それ以下の速度場では、そこに含まれる雪粒子が地表に堆積する確率が高いと考え、建物周辺の風向、風速分布を知ることにより、吹きだまりの形態を推定しようとするものである。2次元模型による風洞実験（シャボン玉による流れの可視化および模型周辺の風速分布測定）より次の結果を得た。

- 1) 雪の吹きだまり形態は境界層の地表面摩擦速度 U_* 、ピロティ高さ h により変化する。

* 日本大学理工学部建築学教室。Department of Architecture, College of Science and Technology, Nihon University, 1-8, Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101.

2) $U/U_{50} \div 0.5$ となる高さ Z による速度場区分で吹きだまり形態をほぼ推定出来る。

3) ピロティを流れる流体エネルギーの指標 K (式 9) によっても、吹きだまり形態の変動を表現出来る。そしてこれは、 U, h の関数であるから、南極基地建物計画の資料として利用出来る。

1. は じ め に

南極観測用建物の設計に関する問題点は、輸送、建設、断熱、不燃化等多方面にわたるが、特に建物の配置計画、単体の形態および構造方式の決定に際しての重要な設計変数となるものに、風荷重と雪の吹きだまりの形成があげられる。風荷重に関しては、昭和基地周辺の気象観測データが、すでに 1957 年(第 1 次南極地域観測隊)より蓄積されており、これに基づいて行われる静的な構造設計に対する信頼性は極めて高い。今後は輸送能力の増加や観測事業の発展に伴い、軽量塔状建物(テレメトリー情報処理棟等)、空気膜構造(航空機格納庫等)の出現に備えて、風荷重に関する動的な設計資料を整備することが必要不可欠となろう。

一方、雪の吹きだまりの形成は、元来雪に覆われている南極大陸では避けられないことであって、建物周辺の局所的な雪の吹きだまりを避けるには、床下を吹抜けとした高床形式を採用することが最も簡単な解決法であり、各国とも、岩盤上の基地建物にはこの方式を採用している。しかし、この方式は大開口部をもつ建物には向かないので、格納庫等では、形態、機能の工夫等によってこれを避ける他はないが、まだ適切な解決策は得られていない。また、高床形式にしても吹きだまり発生メカニズムに対する風速、地形、地表面粗度長、建物形態およびピロティ高さの影響度など、基地建物の設計資料としての建物周辺気流に関する諸問題については、黒田・木下(1940)、木村・吉阪(1942 a-d)、STYLES(1968)、真木(1975)等の報告があるが、その定性的な検討は不十分なままに残されている。そこで我々は、次に述べるような雪の吹きだまりに関する仮説を設定し、風洞実験によってその過渡的な形態を推定出来ると考えた。ただし、これは大胆な仮定から出発した多分に直感的な仮説であり、現時点では現象論的に吹きだまり形態との相似を確認しただけで、これを理論としてまとめるのは次の課題とする。

2. 建物周辺に発生する雪の吹きだまり

この吹きだまり形態の予測は、次の仮定のもとに考えられている。すなわち、大気中に含まれる雪粒子は一様に分布しており、その混相流体の性質は、密度の増加を除けばほぼ空気と等しく、雪嵐の状態は空気の流れてシミュレート出来ると仮定した。これは本論における

基本的な仮定であるが、一般に雪嵐の状態を想定する時、大気安定度中立の風速の場合、空気中に含まれる雪粒子の濃度分布は、高度 Z が増すに従って減少する Z の指数関数の形で表現されると言われている。ただし、本論で対象とする空間は、 $0 \leq Z \leq 5 \text{ m}$ 程度の範囲であり、かつ $U \geq 20 \text{ m/s}$ の状態を考えているので、この範囲での飛雪を含む強風の性質はほぼ一様であると仮定した。一方、比較的に低風速の雪嵐では、この雪粒子の空間濃度分布の影響が無視出来なくなるから、想定する風速レベルによっては、この効果を何等かの形で考慮しなければならないと思われるが、これは将来の課題として残す。

この前提に基づいて、建物周辺に発生する吹きだまりの形態を次のように推定出来ると考えた。すなわち、雪嵐時の建物周辺では、雪粒子を輸送してきた風速が、建物によって急激に乱され、そこには境界層と建物形態に固有な比較的に乱れの大きい速度場が構成される。この速度場において平均風速がある特定値を越える範囲では、そこに含まれる雪粒子は平均風速とはほぼ等しい速度で空中を浮遊し、それ以下の速度場の雪粒子は、地上に堆積する確率が高いと考えられる。これより建物周辺の平均風速分布を実験的に調べることによって、その速度場の状態から吹きだまり形態を推定する資料を得ることが出来ると考えた。ただし、これは地表面、建物形状などの固定境界が変化しない範囲での仮説であるから、初め吹きだまりのない状態から、ある限られた時間の雪嵐を経験した後に生ずると予測される雪の吹きだまり形態に関してのみ役立ち得るものである。

一方、WHILLANS (1975) は吹きだまり発生メカニズムを次のように説明している。風による飛雪輸送量 Q は基準風速の関数で表わされるが、この風速が地形的要因（たとえば傾斜角）等で減ぜられると、輸送しきれない雪粒子が風向方向の区間 Δx に、 $\Delta Q = (dQ/dx) \cdot \Delta x$ だけ堆積するというものである。ただし、 Q は風向に直角な単位幅半無限断面を単位時間に通加する雪の量であり、長さの単位としては km のオーダーの量を扱う理論として展開している。この仮説において、飛雪輸送量を風速および乱れの強さの関数と考え、風速変化の要因を地形に関する変数のみでなく、乱流構造の関数と考えれば、本論の仮説と矛盾しないと考えられる。さらに本論の特徴は、この吹きだまりの依存性を xz 平面で等しく扱い、風向に無関係な速度場区分の形で吹きだまり形態まで推定出来ると仮定した点である。

3. 風 洞 実 験

単純化のために2次元空間を設定し、風洞内に接地境界層モデルを作成して、建物周辺気流の性状を調べた。2次元模型は、表面粗度の影響を除くために、透明硬質塩化ビニール板

を用いて製作した矩形断面を持つ角柱であり、昭和基地建物に対する長さの縮尺は $1/20$ である。実験手順としては、まず流れの可視化手法を用いて模型周辺の **flow pattern** を知り、これより吹きだまりの資料となるべき風速分布の精密測定領域を決め、次に図 1 に示す 3 種の 2 次元境界層の中で風速分布を測定した。ここでは吹きだまりに関係すると思われる 2 要素、すなわち平均風速鉛直分布およびピロティ高さ h をとりあげて実験を計画した。なお、主要な測定データは乱流中の平均量である。

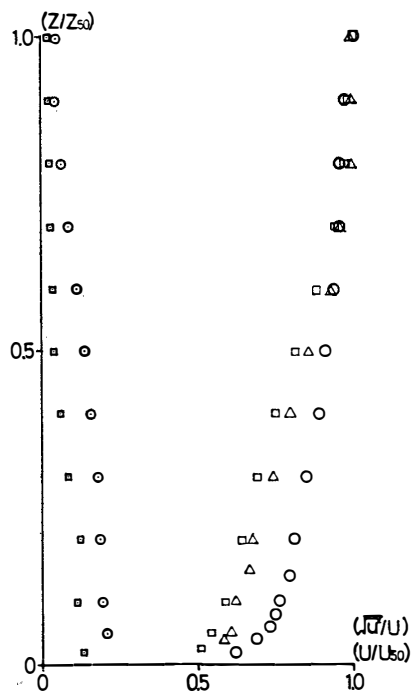


図 1 境界層モデルの平均風速および乱れの強さの鉛直分布

U_{50} ; 高度 50 cm の平均風速

□; 模型設置点 ($X=2500$ mm) での平均風速 (境界層モデル I)

△; 模型設置点 ($X=2500$ mm) での平均風速 (境界層モデル II)

○; 模型設置点 ($X=2500$ mm) での平均風速 (境界層モデル III)

▣; 模型設置点 ($X=2500$ mm) での乱れの強さ (境界層モデル II)

◎; 模型設置点 ($X=2500$ mm) での乱れの強さ (境界層モデル III)

Fig. 1. The mean wind profile for the surface boundary layer in the wind tunnel test-II.

U_{50} ; Longitudinal component of mean wind velocity at 50 cm altitude in the wind tunnel.

□; Mean wind velocity at $X=2500$ mm (model-I)

△; Mean wind velocity at $X=2500$ mm (model-II)

○; Mean wind velocity at $X=2500$ mm (model-III)

▣; The turbulence intensity of U at $X=2500$ mm (model-II)

◎; The turbulence intensity of U at $X=2500$ mm (model-III)

3.1. 相 似 則

3.1.1. 風洞内の地表風モデルに関する相似条件

風洞内に南極の自然風を再現するため、根本（1963）の提案する相似則より、次の2項目の相似条件を設定した。

1) 乱流境界層中の平均風速および乱れの強さの鉛直分布が、自然風中の実測値と相似であること。

2) 風速変動に関するパワースペクトルの形が自然風のそれと相似であること。

これらの条件を満たすことを目標にして、境界層ブロックの組合わせにより地表風モデルを作成した。

大気安定度が中立の場合、接地境界層中の平均風速鉛直分布は式(1)で表わされる。LUERS

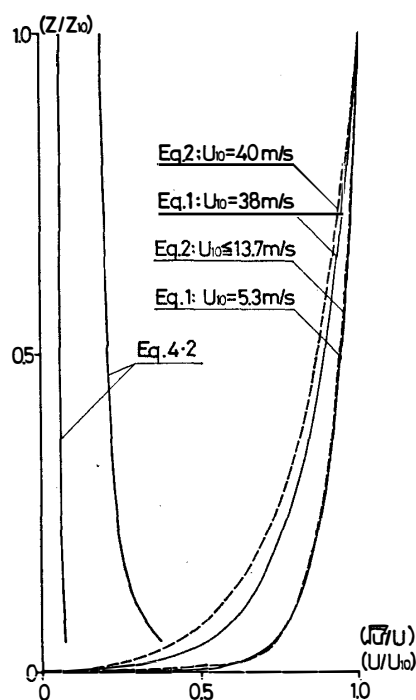


図 2 平均風速および乱れの強さの鉛直分布（地表風モデル）

Z ; 高度, $Z_{10}=10$ m

U ; 平均風速

U_{10} ; 高度 10 m の平均風速

$\sqrt{\overline{u^2}}$; 変動風速 u の R.M.S.

Fig. 2. The mean wind profiles for the surface boundary layer model.

Z ; Altitude from the surface. $Z_{10}=10$ m.

U ; Longitudinal component of mean wind velocity.

U_{10} ; Longitudinal component of mean wind velocity at 10 m altitude.

$\sqrt{\overline{u^2}}$; Root mean square of turbulence.

(1973) も式(2) のモデルを提案しているが、図 2 に示すごとく式(3) のデータを加えて規準化すると、低風速域での傾向に両者の差はほとんどない。ここでは真木 (1974) による昭和基地での観測データ (式 3) に基づき、式(1)をシミュレーションの目標とした。

$$U_z = \frac{U_*}{k} \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (1)$$

$$U_z = \frac{U_*}{k} \ln \left(\frac{Z+Z_0}{Z_0} \right). \quad (2)$$

ただし、 U_z : 高度 Z での平均風速水平成分(m/s).

U_* : 地表面摩擦速度 (m/s)

k : カルマン定数 ($k \doteq 0.4$)

Z : 地表よりの高さ (m)

Z_0 : 地表面粗度長 (m).

$$\left. \begin{aligned} U_* &= 0.0349 U_{10} \\ Z_0 &= 10^{-4} \text{ m} \end{aligned} \right\}. \quad (3.1)$$

ただし、 $0 < U_{10} \leq 13.7 \text{ m/s}$.

$$\left. \begin{aligned} U_* &= U_{10} / (36.58 - 0.575 U_{10}) \\ \log_{10} Z_0 &= (0.096 U_{10} - 5.3) \end{aligned} \right\}. \quad (3.2)$$

ただし、 $U_{10} > 13.7 \text{ m/s}$.

ここで U_{10} : 高度 10 m の平均風速水平成分である。

図 1 に本実験で使用した境界層モデル I, II, III の平均風速および乱れの強さの鉛直分布を示す。境界層モデル I と II は、式 (1) および式 (3) を用いて、 $U_{10} \doteq 40 \text{ m/s}$ の強風状態を再現しようとしたモデルである。概略の形はほぼ相似と考えられるが、回流型風洞を使用しているために、境界層ブロック位置と測定空間との距離が十分にとれないことと、ブロックの配置が十分でなかったため、速度勾配の一部にやや不安定な傾向が残っている。また地表に近い $0 < Z \leq 4 \text{ m}$ (風洞内では $0 < Z \leq 20 \text{ cm}$) の速度勾配は、むしろ $U_{10} \doteq 15 \text{ m/s}$ とした低風速モデルに近い性状を示し、この範囲ではモデル I, II, III の順に U_* が大きくなり、実験目標とは逆の結果となった ($Z_0 = 10^{-4} \text{ m}$ をほぼ一定として U_* を計算すると、モデル I で $U_* = 0.47 \text{ m/s}$, モデル II で 0.5 m/s , モデル III では 0.56 m/s である)。境界層モデル III は、乱れがモデル I, II に比べて大きく、図 2 と比較すると、 $U_{10} \doteq 20 \text{ m/s}$ の昭和基地の強風状態を最もよく再現していると考えられる。

平均風速水平成分 U に関する乱れの強さ I_u は式 (4.1) で定義されるが、これは U_* の関数で表わされることが自然風の実測により確認されており、式 (1) より I_u は式 (4.2) で表わされる (岡内他, 1977).

$$I_u = \sqrt{\overline{u_z^2}} / U_z \quad (4.1)$$

$$I_u = A_1 \cdot k / \ln(Z/Z_0). \quad (4.2)$$

ただし、 $\sqrt{\overline{u_z^2}}$: 高度 Z での風速変動の二乗平均

A_1 : 自然風の実測より決まる定数; $1.7 \leq A_1 \leq 3.0$ (塩谷による実測値).

式 (4.2) に式 (3) を代入した結果を図 2 に示す. 風洞実験による地表付近での I_u は、図 1 よりおよそ 0.15~0.2 であり、これは式 (4.2) の範囲にある.

安達 (1973) によると、南極における風速変動のパワースペクトルにおいても、一般的な風の性質として、よくいわれる高周波数域での $-5/3$ 乗則が成立し、かつ風速の鉛直成分については、周波数 10^{-1} 付近でピークが顕著であることが示されている. 風洞実験の結果を、境界層モデル III について図 3 に示す. これよりスペクトルの形もほぼ満足すべき結果を示すと考えられる. 以上の相似条件の検討により、本実験においては自然風を再現出来たと考

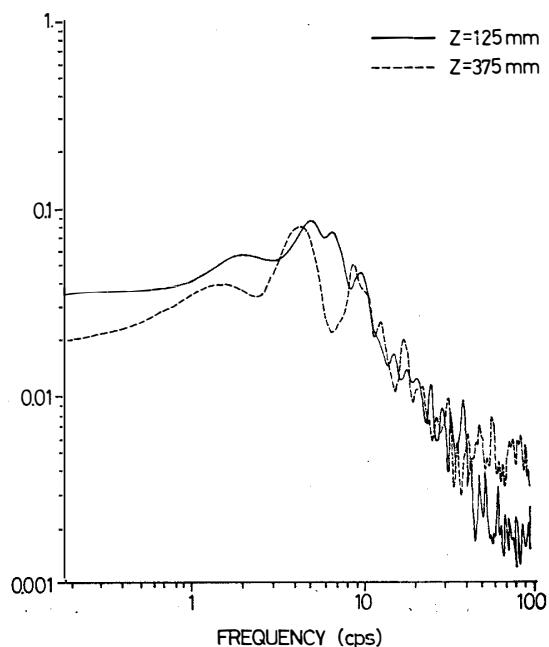


図 3 境界層モデル III の風速変動パワースペクトル (標準化);

分散値 6.169 (m/s)^2 , $Z=125 \text{ mm}$, 分散値 18.877 (m/s)^2 , $Z=375 \text{ mm}$

Fig. 3. The power spectra of wind velocity fluctuation for longitudinal components. (Standardized); variance; 6.169 (m/s)^2 , $Z=125 \text{ mm}$, variance; 18.877 (m/s)^2 , $Z=375 \text{ mm}$

えてよいであろう。

3.1.2. モデルのスケールおよび基準風速の決定（構造モデルの相似則）

乱流境界層内での模型実験に関する相似則として、根本（1963）によって提案された重力の影響を考慮しない場合の相似則（式 5）を採用した。

$$\frac{U_m}{U_P} = \left(\frac{L_m}{L_P} \right)^{1/3} = \left(\frac{1}{\lambda_L} \right)^{1/3} \quad (5)$$

ここで添字 m , P はそれぞれ模型実験における量と自然風中の実物に関する量を表わす。

L : 流れを特徴づける代表長さ

λ_L : 長さの縮尺率 ($\lambda_L = L_P/L_m$).

この他、模型の動的応答を調べる場合は次式を満たさねばならない（加藤他, 1971）。

$$\left. \begin{aligned} U_m T_m / D_m &= U_P T_P / D_P \\ h_m &= h_P \\ \rho_m / W_m &= \rho_P / W_P \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 T : 構造物の固有周期 (s)

D : 構造物の代表長さ (m)

h : 構造物の減衰定数

ρ : 流体（空気）密度 (kg/m^3)

W : 構造物の密度 (kg/m^3).

式 (5) と 式(6) より長さと時間の縮尺率の関係が導ける。

$$\lambda_t^3 = \lambda_L^2.$$

ここで λ_t : 時間の縮尺率 ($\lambda_t = T_P/T_m$).

3.2. 実験計画

3.2.1. 実験 I（流れの可視化実験）

目的および実験の概要： この実験は構造模型の周辺を流れる流体の **flow pattern** を知るために企画したもので、流れの観察法（トレーサー法）でよく用いられる流糸と、ここで新しくシャボン玉を媒体に用いて流れの可視化を試みた。本実験はその第 1 ステップとして、流れの基礎的性質にのみ着目したので、特別な乱流格子は使わずに、風洞内の気流そのままのいわゆる層流に近い状態で実験を行った。したがって **flow pattern** に影響を与える量としては、基準風速とピロティ高さを想定して表 1 に示すような 8 種の状態を作成し、その各々についての特性を観察した。

表 1 風洞実験 I に関する基準風速とピロティ高さの組合わせ
 Table 1. The combinations of basic wind velocity and altitude of
 pilotis ; h for the wind tunnel test-I.

h (cm)	h/H	U_{50} (m/s)
0.0	0.0	3.0
		6.0
5.0	1/3	3.0
		6.0
10.0	2/3	3.0
		6.0
15.0	1.0	3.0
		6.0

実験装置および測定機器： 使用した風洞は、水平単帰回流型風洞（日大理工学部建築学科施設）である。吹出口は 900×1200 mm の矩形断面で、測定部は大気に開放されており、その長さは 1750 mm である。ここでは流れの可視化の媒体の性質から、基準風速を 3.1 m/s から 6.4 m/s の範囲で設定した。基準風速の測定はマノメータと熱電式風速計（日本科学工業，モデル 24-3111）を用いて行った。また、可視化実験のチェックデータとして、模型周辺の風速分布を定温度型熱線流速計（日本科学工業，モデル 21 ser.）を用いて測定した。測定位置は、風向方向（ x ）および風向に直角方向（ z ）それぞれについて、100 mm グリッドの交点を標準とした。流速計受感部は指向性を持っているので、これを各測定位置で同一条件となるようにコントロールした。

流糸を用いた流れの可視化実験では、流糸として長さ 30 mm のよりのない刺しゅう糸を用いて、これを千鳥配置した 0.1 mm ϕ のダクロン製釣糸に 100 mm 間隔（標準）で結びつけた。

シャボン玉を用いた流れの可視化実験装置を図 4 に示す。これは、風洞吹出口付近でストローにより、ほぼ一定の径をもつシャボン玉を発生させて、空中に浮遊するシャボン玉の軌跡をストロボ装置を用いて写真撮影するシステムである。ストロボ装置は中村理科，モデル II（ストロボライト；Lux, FT-25, Xenon discharge tube）を用いた。

と風速分布から吹きだまりの形態を推定しようとするものである．ここでは吹出口基準風速をほぼ一定に保ち，平均風速の鉛直分布およびピロティ高さ h を変数として実験を行った．これらの組合わせを表 2 に示す．

実験装置： 実験に使用した風洞は日大理工学部理工学研究所の水平単帰回流型風洞で，測定部として固定カート（断面： 2000×2000 mm，長さ： 5300 mm）を用いた．概要を図 5 に示す．吹出口基準風速は 3.1. に述べた相似則から，自然風の最大値 45 m/s を想定して（昭和基地の月別瞬間最大風速の記録によると，この最大風速はおよそ $30 \sim 50$ m/s である．これより $U_P = 45$ m/s とする）， $16 \sim 17$ m/s の範囲で設定した．風速測定器はピトー管と定温度型熱線流速計である．流速計測定部のサポートおよび測定空間内での測定位置決定には，計測用 3 次元微動装置を用いた．熱線の向きは実験を通して一定であるが，2 次元乱流中での指向性の影響を最小にするように考慮している．測定記録は自動平衡型記録計に記録した後に整理した．

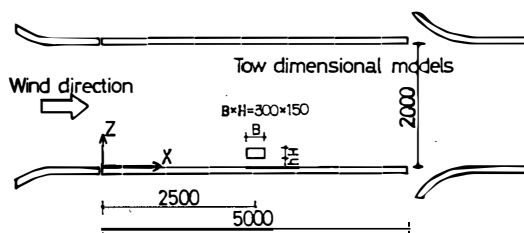


図 5 風洞測定部略図（風洞実験 II）

Fig. 5. The section of experimental space in the wind tunnel (wind tunnel test-II).

実験模型： 2 次元模型は，透明硬質塩化ビニール板（板厚 3 mm）を用いて製作した幅 300 mm，高さ 150 mm，長さ約 1900 mm の角柱である．これを風洞測定部の両壁に実験 I と同様な支持金具を用いて流れに直角に固定した．

4. 実験結果と考察

4.1. 実験 I（流れの可視化）について

本実験における境界層は，測定空間全域にわたってほぼ一定であり，層流流れの場合と見なしうるものである．図 6 に流糸による流れの可視化の 1 例を示す．この観察法により，測定空間の主速度方向および風向の変動範囲などの概略を知ることが出来るが，一方では，地表や模型付近および後流渦領域などの比較的的平均風速の小さい場では，流糸が流れに完全に追従していない．ただし本実験の目的は，後述の建物周辺風速測定における主風向判定の基

礎資料を得ることであり、予備実験としては十分に満足すべき結果が得られたと考える。実験 II においても同様な手法で風向を判定した。

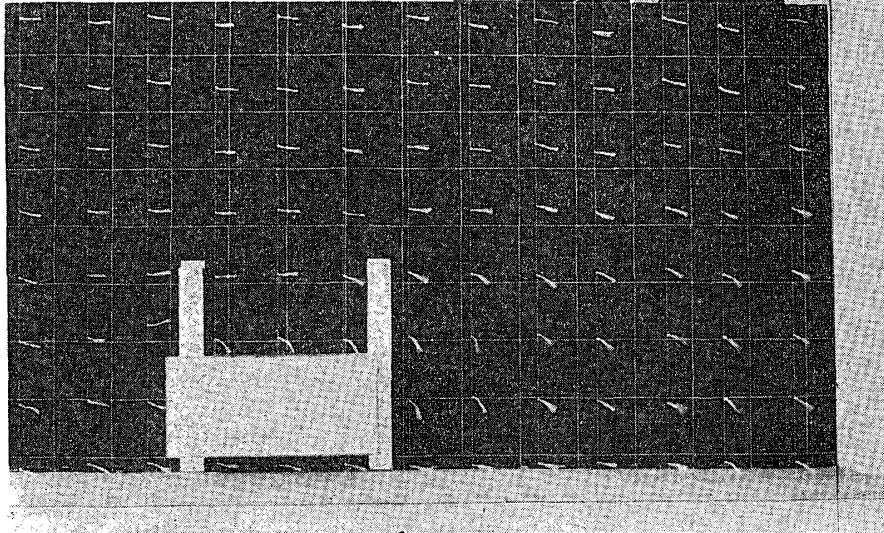


図 6 流系による流れの可視化実験 ($U_{50}=5.9$ m/s, $h=5$ cm)

Fig. 6. Flow visualization by means of years ($U_{50}=5.9$ m/s, $h=5$ cm).

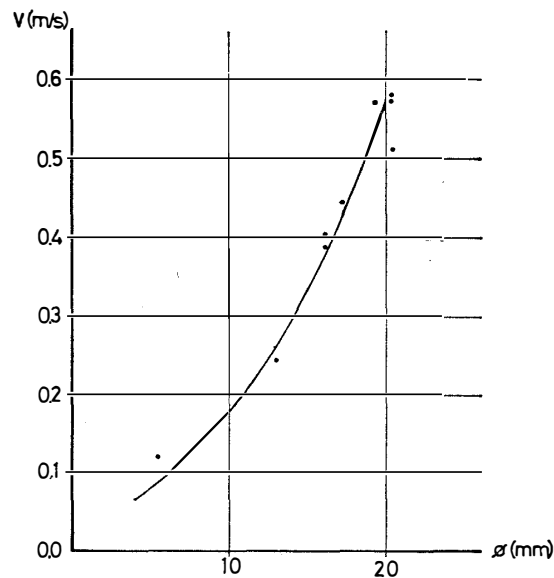


図 7 シャボン玉の直径と無風状態の沈降速度の関係

●; ストロボ写真による実測値

—; $V=2.4 \times 10^{-5}\phi^3 + 5.2 \times 10^{-4}\phi^2 + 7.3 \times 10^{-3}\phi + 2.5 \times 10^{-2}$

(実験式)

Fig. 7. The relation between the diameter of soap bubbles and the rate of sedimentation in still air.

●; Measurements from photographic survey by means of strobo light.

—; $V=2.4 \times 10^{-5}\phi^3 + 5.2 \times 10^{-4}\phi^2 + 7.3 \times 10^{-3}\phi + 2.5 \times 10^{-2}$

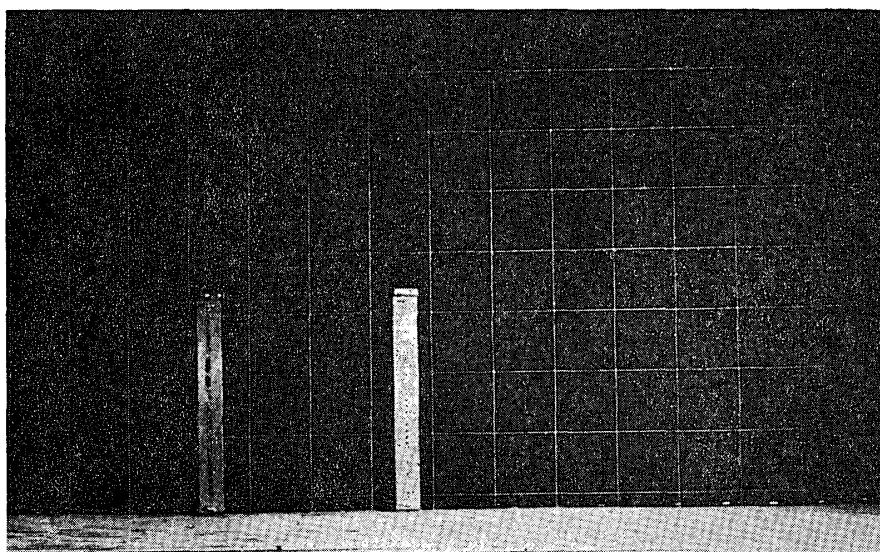


図 8 模型セット前の境界層におけるシャボン玉の軌跡 ($U_{s0}=2.9$ m/s, ストロボ発光; 100 cps)
 Fig. 8. Loci of soap bubbles in the surface boundary layer model before the model setting
 ($U_{s0}=2.9$ m/s, strobo light; 100 cps).

次にシャボン玉による流れの可視化について述べる．無風状態のシャボン玉直径 (ϕ mm) とその沈降速度 (V m/s) の関係を図 7 に示す．乱されない測定空間でのシャボン玉の軌跡を図 8 に、模型を置いた場合の流れの様子を、 h をパラメータにして図 9 に示す．本実験ではストロボ装置の光量、フィルム感度の制約から、シャボン玉直径を 15~20 mm としたが、この大きさでは、シャボン玉をトレーサーとして利用する目的に対しては、低風速域で重力の影響が大きすぎて、データの信頼性は落ちることになる．一方、気象ポケットブック (1969) より雪粒子の落下速度を調べると、厳密には粒子、結晶構造によって異なるが、およそ 0.5 m/s 程度が多いと考えられ、これは本実験のシャボン玉落下速度にほぼ一致している．これより、雪嵐の状態のシミュレーションとしては適切なモデルと言えよう．

この手法の特徴は、流れの場をほとんど乱さずに、ほぼ流線と見なし得るシャボン玉軌跡が手軽に追えることおよび 3 次元模型に対しても適用出来ることである．また、ストロボ発光数と写真から風速分布を近似的に把握することも出来る．この方法で求めた速度分布を、熱線流速計による結果と比較したものを図 10 に示す．これより、乱れの少ない領域での測定値の両者の誤差は最大で 18% 程度である．風向判定についても、シャボン玉によれば、流糸以上の細かな観察が可能となる．

以上のごとく流れの可視化法の利用により、建物周辺の流れの概略を把握することが出来る．また、単に主風向やその変動を知るだけでなく、これより吹きだまり形成の条件となる

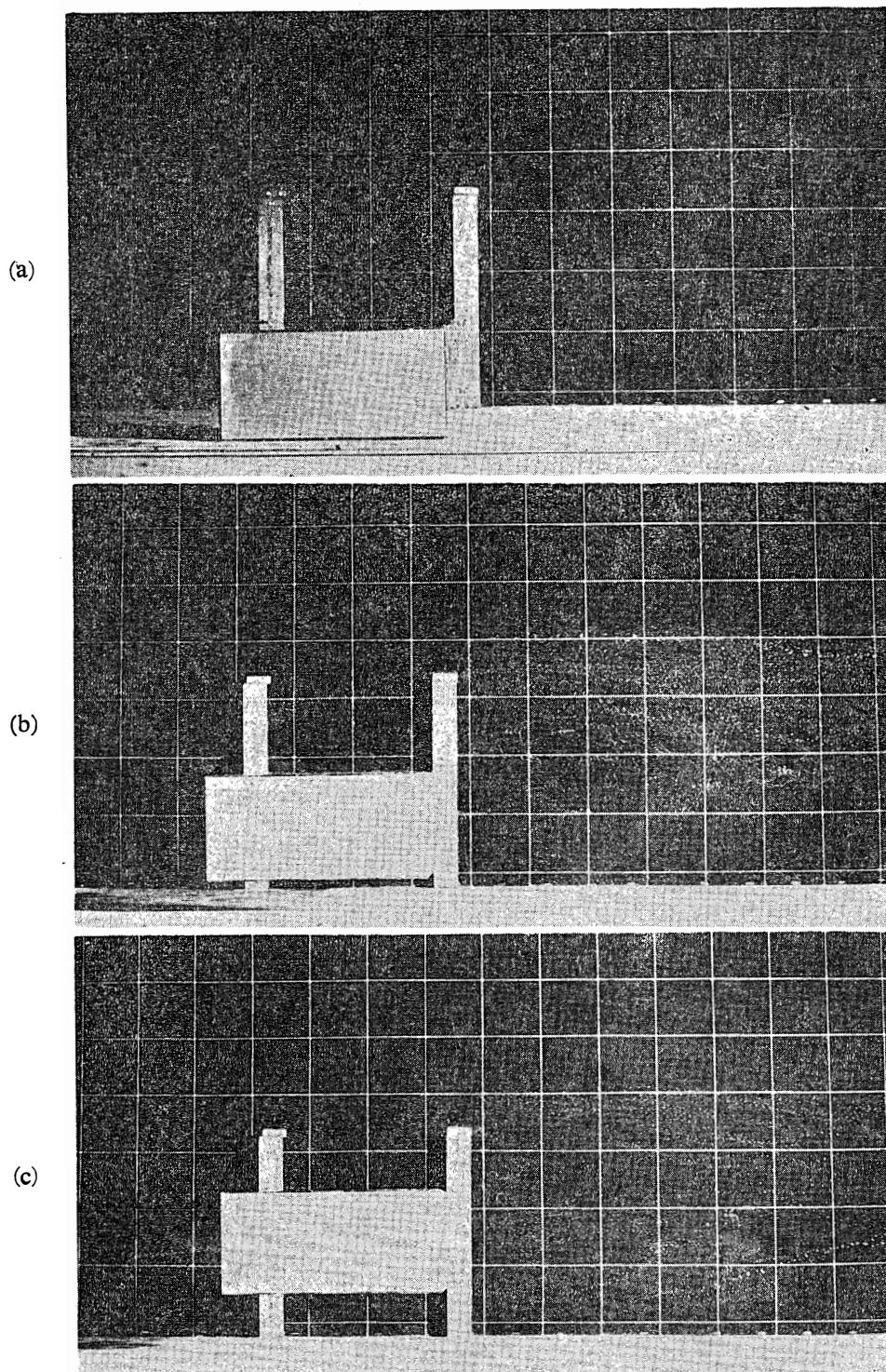


図 9 シャボン玉による流れの可視化

Fig. 9. Flow visualization by means of soap bubbles.

(a) $U_{50}=2.9\text{ m/s}$, $h=0$, strobo light; 100 cps

(b) $U_{50}=3.2\text{ m/s}$, $h=5\text{ cm}$, strobo light; 100 cps

(c) $U_{50}=3.2\text{ m/s}$, $h=10\text{ cm}$, strobo light; 100 cps

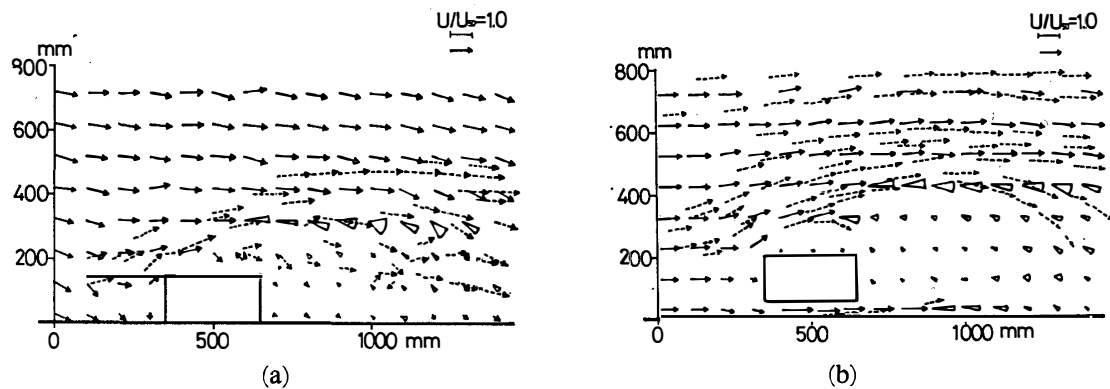


図 10 ストロボ写真から判定したシャボン玉の運動 (---) と熱線流速計による風速測定値 (→) の比較

Fig. 10. Velocity ratio of soap bubbles from photographic survey by means of strobo light and normalized wind velocity distributions measured by hot wire anemometer.

(a) $U_{s0} = 2.7 \text{ m/s}$, $h = 0$.

(b) $U_{s0} = 2.7 \text{ m/s}$, $h = 50 \text{ mm}$.

→: Normalized velocity of mean wind (U/U_{s0})

-->: Velocity ratio of soap bubbles (U_s/U_{s0})

速度場区分を精密測定するための計測位置を効率よく決定出来る。さらにシャボン玉による流れの可視化法は、空気と雪粒子の混相流体をよくシミュレートしているの、このデータは吹きだまり形態を予測する資料として有益であろう。なお、この手法は 3 次元的な流れの可視化法としても実験の精度を、その条件と目的に応じて変えられる点で利用範囲が広く、有効な流れの観察法になり得ると考えられる。

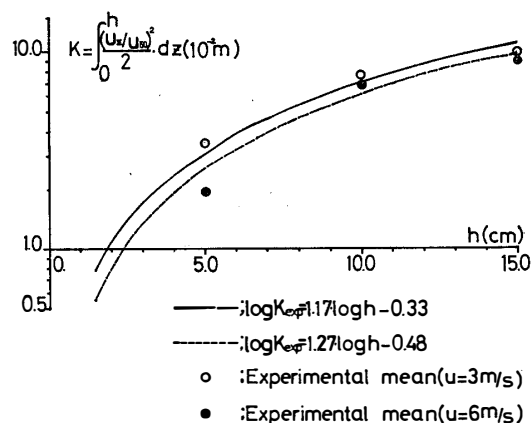


図 11 ピロティ内の流れに関する K - h 関係 (風洞実験 I)

Fig. 11. Experimental K - h relationships for the air flow in pilotis (wind tunnel test-I). K ; An index of mean flow energy in pilotis (eq. 9).

熱線流速計による風速測定データは等速度線で整理し、これより 4.2. で述べる流体エネルギーの指標 K を比較のために計算した (図 11). ここでピロティ内風速の鉛直分布は、測点間を式 (1) で補間して K_{exp} を求めている. 図中の実験式は、式(8) の指数形を仮定し、流入端、流出端の K_{exp} の平均を用いて指数 α, β を決定したものである.

$$\log_{10} K_{\text{exp}} = \alpha \log_{10} h - \beta. \quad (8)$$

ここで、 K_{exp} : K (式 9) の実験値.

4.2. 実験 II (2 次元模型周辺の風速分布測定結果)

境界層モデル I の実験結果を等速度線で整理したものを図 12 に示す. 模型隅角部近傍のように速度勾配の大きい所では、この測点間隔 Δl ($15 \text{ mm} \leq \Delta l \leq 50 \text{ mm}$) では不十分であるが、高さ h の増加と共にピロティ空間の高速度領域が拡がって、模型周辺の速度場を変化させる様子が観察出来る. 風上側の速度場では、 $h=40 \text{ mm}$ を境にしてその性質を変えており、後流域では、ピロティ高さ h の増加と共に、そこを吹抜ける流量が増大して、その流れが後流渦と干渉しあい、後流渦領域をせばめる結果となっている.

次に、これらの測定結果を用いて、建物周辺に発生すると考えられる雪の吹きだまり形態の推定に関する仮説を確認するための速度場区分を試みる. ここで問題となるのは、風によって運ばれている雪粒子が、そのまま浮遊するか、堆積するかの限界を表わす風速の決め方である. この場合、真木 (1971)、小林・牧野 (1975) による昭和基地での飛雪観測データが 1 つの参考になろう. しかし、実際にはこの風速が、かなりの変動幅を持った値であろうと考えられるので、ここでは境界層モデルの平均風速鉛直分布の形から、地表に接した薄い層を想定し、ここを雪粒子の移動の少ない堆積する確率の高い層として、 $U/U_{50} \div 0.5$ と言う無次元風速で区分することにした. すなわち $U/U_{50} \div 0.5$ 以上の速度場では雪粒子が風に乗って流れ、それ以下の速度場では堆積の確率が高いとし、これを建物周辺の速度場に適用しようとするものである. ただし、この $U/U_{50} \div 0.5$ と言う値は、境界層の性質や基準風速のとり方で決まるものであるから、一般には $U/U_{50} \div C$ (C は境界層の性質や基準風速の関数) とした方がよい. 本実験の境界層の場合、 $U/U_{50} \div 0.5$ の接地層厚は、実際のスケールに換算して平均 20 cm となっている. 図 13 は、この $U/U_{50} \div 0.5$ で速度場区分を行った結果であり、図中の地表と点線および実線のカーブで囲まれた区間が、 $U/U_{50} \leq 0.5$ の速度場であり、左端の一点鎖線は境界層の平均風速鉛直分布である. この線は、昭和基地建物周辺に見られる吹きだまりの形態 (現在実測中) とよく似ており、また、この形はピロティ高さ h によ

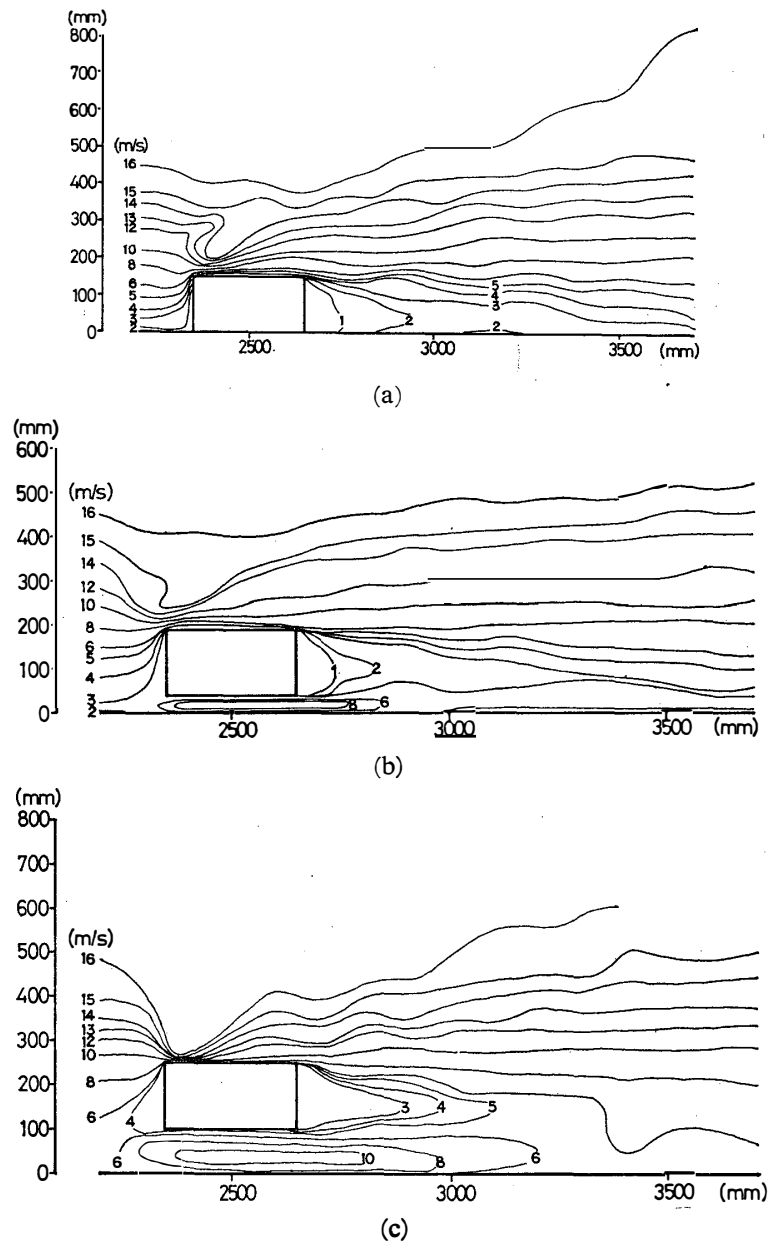


図 12 境界層モデル I における模型周辺の等速度線 (風洞実験 II)

Fig. 12. Uniform wind velocity lines around 2-dimensional model in surface boundary layer model-I (wind tunnel test-II).

(a) $U_{50} = 16.7 \text{ m/s}$, $h = 0$

(b) $U_{50} = 16.2 \text{ m/s}$, $h = 40 \text{ mm}$

(c) $U_{50} = 16.8 \text{ m/s}$, $h = 100 \text{ mm}$

て変化している。その変化が特に著しいのは、 $40 \text{ mm} < h < 100 \text{ mm}$ の間である (図 13 (b))。

この吹きだまりの形態の性質を表現するもう一つの指標として、ピロティ内の平均風速エネルギーに関する量 K を次式で定義する。

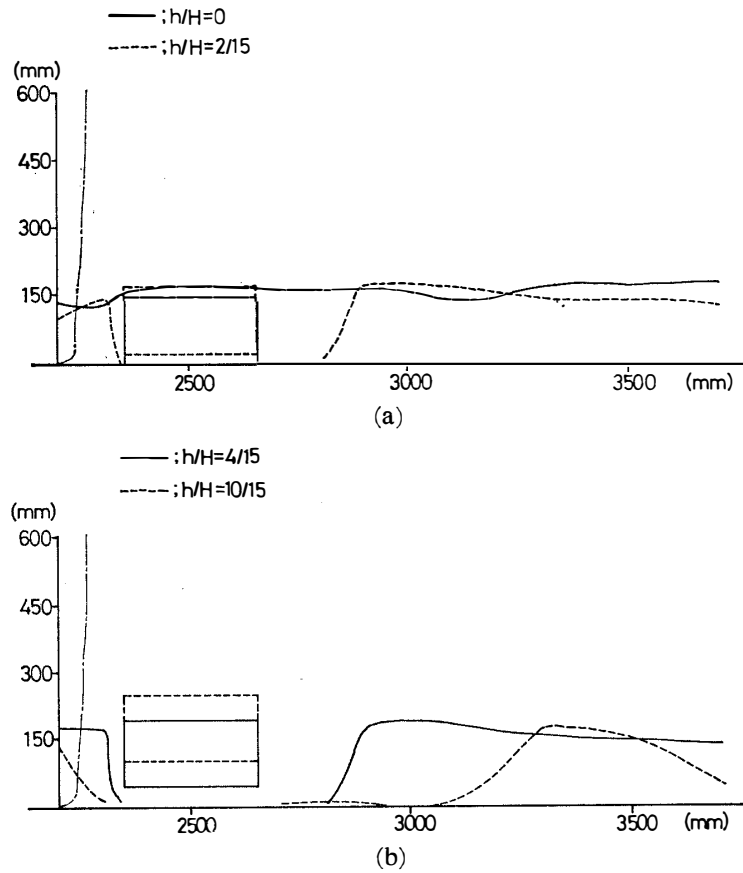


図 13 境界層モデル I における模型周辺の $U/U_{50}=0.5$ による速度場区分

Fig. 13. Division of the wind velocity field at the altitude Z satisfying in $U/U_{50}=0.5$ in the surface boundary layer model-I (wind tunnel test-II).

(a) $U_{50}=16.6 \text{ m/s}$, $h=0$, $h=20 \text{ mm}$

(b) $U_{50}=16.5 \text{ m/s}$, $h=40 \text{ mm}$, $h=100 \text{ mm}$

$$K = \int_0^h \frac{1}{2} \left(\frac{U_z}{U_{50}} \right)^2 dz. \quad (9)$$

ここで, h ; ピロティ高さ (10^{-2}m).

実験データから式 (9) を計算するために次の仮定を用いた. ピロティ内の風の流れは, 流入端近傍よりも流出端近傍が風向が安定しているので, ここでは図 14 に示すピロティ空間 C の風速データを用いて式 (9) を計算した. なお各データ間の風速分布は式 (1) で補間している. この K の計算結果とピロティ高さ h の関係を図 14 に示す. ここでも図 13 と同様の性質が説明出来る. すなわち $K_{\text{exp}} \div 1 \text{ cm}$ となるピロティ高さ ($h \div 0.44 H$, 実際のピロティ高さ 1.32 m に相当する) が, その吹きだまり形態を大きく変化させる点として理解されよう.

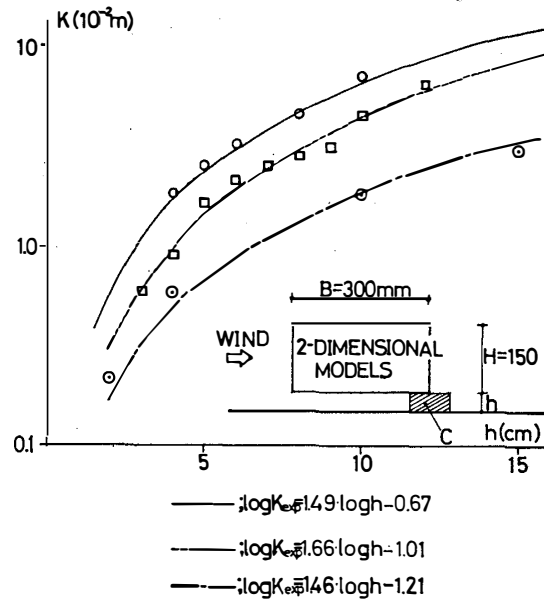


図 14 境界層モデル I, II, III におけるピロティ内の流れに関する $K-h$ 関係 (風洞実験 II)

- ◎; 境界層モデル I の実験値
- ; 境界層モデル II の実験値
- ; 境界層モデル III の実験値

Fig. 14. Experimental $K-h$ relationships for the air flow in pilotis in the surface boundary layer models I, II and III (wind tunnel test-II).

- ◎; Experimental means in the surface boundary layer model-I
- ; Experimental means in the surface boundary layer model-II
- ; Experimental means in the surface boundary layer model-III

これまでの検討から、吹きだまり形態に関する指標として $U/U_{s0} \div 0.5$ の速度場区分および式 (9) で表現される K がほぼ妥当だと考えられるので、これらの指標が乱流境界層の性質によってどのように変るかを調査した結果が図 14, 図 15 に示してある。図 15(a) は、境界層モデル II の速度場区分が、ピロティ高さ h によって変化する様子を示す。これは、境界層モデル I とほぼ同じ傾向であるが、図 15(b) に示す境界層モデル III では、 h に対する吹きだまり形態の変化が急である。この境界層の変化に関しては、これらの境界層を式 (1) で表わせるとして、地表面粗度長 $Z_0 = 0.001 \text{ cm}$ を一定と仮定した場合の地表面摩擦速度 U_* をパラメータにして表現することも出来る。 U_* の値が大きい程、 $K_{\text{exp}} = 1 \text{ cm}$ となるためのピロティ高さ h は小さくなる傾向を示すが、 $K_{\text{exp}}-h$ 関係曲線の形は、実験式 (8) で示される範囲であり (図 14), あまり変らないと考えられる。

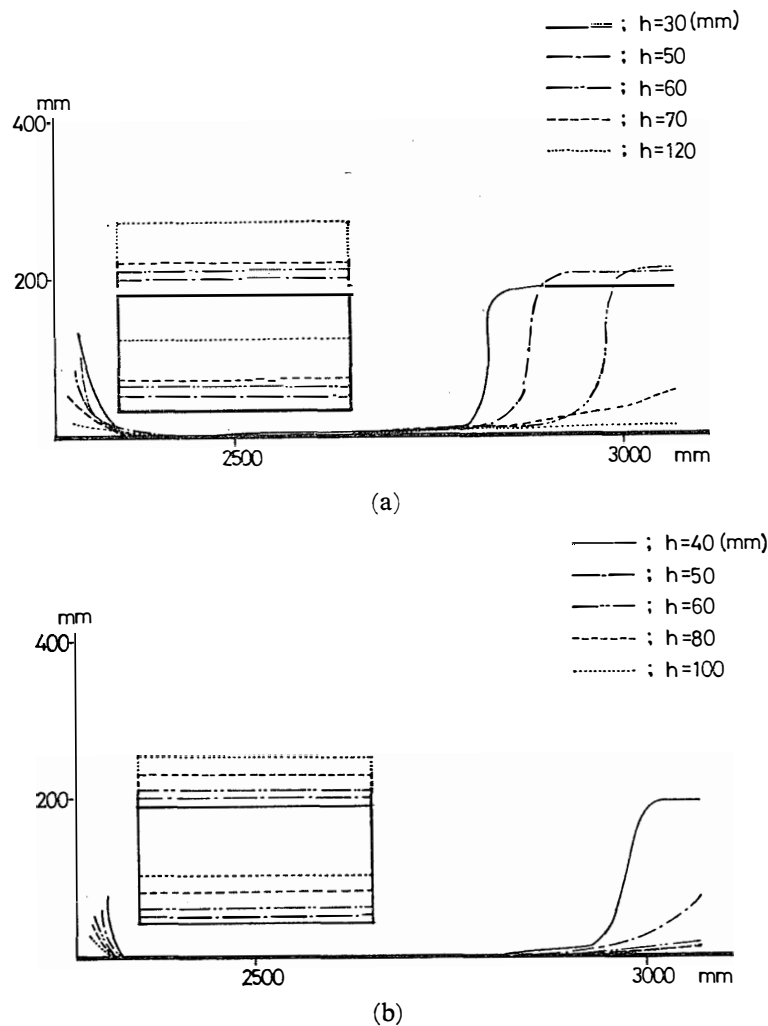


図 15 ピロティ高さ h による $U/U_{50} \div 0.5$ -line の変化 (風洞実験 II)

Fig. 15. Profiles for the altitude Z satisfying in $U/U_{50} \div 0.5$ corresponding to the variation of the altitude of pilotis; h .

(a) In the surface boundary layer model-II.

(b) In the surface boundary layer model-III.

5. ま と め

吹きだまりのシミュレーションを目的として、これまでに述べたような2種類の風洞実験、すなわち、a) トレーサー法による建物模型周辺の流れの可視化、b) 3種類の乱流境界層における、矩形断面をもつ2次元模型周辺の平均風速分布の測定を試みたが、これらの結果は次のように要約出来る。

1) 初めの吹きだまりのない状態から限られた時間の雪嵐を経験した後に、2次元模型周

辺に発生すると予測される吹きだまりを特徴づけるパラメータとして、地表面摩擦速度 U_* 、ピロティ高さ h 、 $U/U_{s0} \div 0.5$ の速度場区分およびピロティ部分を近似的に流管と考えた場合の平均風速に関する流体エネルギーの指標を考えた。4. の考察に述べたごとく、これらは適切なパラメータであると考えられる。

2) ここで、 $K_{exp}=1\text{ cm}$ となるピロティ高さ h は、吹きだまりの状態変化が急な点であり、建物に密接した吹きだまりを避ける目的で計画される高床式構造の設計に関する 1 つの指標となろう。

3) 吹きだまりのように、建物周辺を流れる気流の特性が関係する問題に対しては、流れの可視化の手法は、流れの様子をあらかじめ観察出来る点で有効な実験手段の 1 つである。

4) 我々がここで利用した新しい試み（ストロボ装置を用いたシャボン玉による流れの可視化法）は、雪嵐をよくシミュレートしており、比較的簡単な装置で実験出来、かつ、流れの 3 次元的性質も容易に把握出来る点で適用範囲が広く、将来有効な実験手法の 1 つになり得ると考えらる。

以上は平坦な地表に建設されると仮定した矩形断面をもつ 2 次元模型に関する結論であり、地形、構造物の形状に関する 3 次元的な評価の指標を知ることが、このシミュレーションで残された課題である。また、雪粒子間の粘着力の効果も、吹きだまり形態に大きく影響すると思われる重要な要素であるから、実測の結果によっては、これを何等かの形で考慮する必要が起こるかも知れない。

文 献

- 安達隆史 (1973): 南極昭和基地における乱流観測 (I). 南極資料, 47, 62-76.
加藤 勉・秋山 宏・川端三郎・神田 順 (1971): 超高層建物の耐風性に関する風洞実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 939-940.
木村幸一郎・吉阪隆正 (1942a): 建物周囲の吹溜り積雪状況に関する模型実験 (第 1 報). 雪氷, 4 (3), 16-19.
木村幸一郎・吉阪隆正 (1942b): 建物周囲の吹溜り積雪状況に関する模型実験 (第 2 報). 雪氷, 4 (5), 1-8.
木村幸一郎・吉阪隆正 (1942c): 建物周囲の吹溜り積雪状況に関する模型実験 (第 3 報). 雪氷, 4 (6), 2-7.
木村幸一郎・吉阪隆正 (1942d): 建物周囲の吹溜り積雪状況に関する模型実験 (第 4 報). 雪氷, 4 (7), 13-18.
小林俊一・牧野勤倫 (1975): 昭和基地における飛雪観測 (予報). 南極資料, 53, 45-52.

- 黒田正夫・木下是雄 (1940): 風洞による人工吹雪の実験報告. 日本雪氷協会論文集, **1**, 144-158.
- LUERS, J. K. (1973): A model of wind shear and turbulence in the surface boundary layer. NASA, Contractor Report, **2288**, 42.
- 真木太一 (1971): 昭和基地における地吹雪発生中の視程と風速の関係. 南極資料, **42**, 35-42.
- 真木太一 (1974): 南極昭和基地での超音波風速温度計による大気乱流観測. 南極資料, **48**, 37-42.
- 真木太一 (1975): 簡単な物体によってできる雪の吹きだまりに関する研究. 南極資料, **53**, 33-44.
- 根本 茂 (1963): 自然風を対象とした風洞模型実験の相似側. 航空学会誌, **11** (116), 8-14.
- 岡内 功・伊藤 学・宮田利雄 (1977): 耐風構造. 東京, 丸善, 418 p.
- 正野重方 (1969): 気象ポケットブック. 東京, 共立出版, 230 p.
- STYLES, D. F. and MELBOURNE, W. H. (1968): Outline design of an Antarctic station to minimize drift accumulation. Records of the Antarctic Treaty Meeting of Experts on Logistics. Tokyo, Ministry of Education, Part II, 90-112.
- WHILLANS, I. M. (1975): Effect of inversion winds on topographic detail and mass balance on inland ice sheets. J. Glaciol., **14** (70), 85-90.

(1978 年 4 月 3 日受理, 6 月 15 日改訂稿受理)