

# 空気膜構造物の屋根融雪に関する実験的研究

宮川 保之

## Experimental Study of Snow Melting at Roof of Air-supported Structure

Yasuyuki Miyakawa

### Abstract

It is necessary for snow on roofs of air-supported structures to be melted. Although there are various methods of melting snow, from the standpoint of appearance and safety it is considered most practical to blow hot air on the inside surface of the roof fabric. This paper reports on the general characteristics of a hot air blowing system for single fabric structures. Firstly, the modes of snow melting according to amounts of heat supplied were examined experimentally under various weather conditions using a model box installed in Niigata Prefecture. Based on the data obtained, the accuracy of the calculation equation for the amount of heat for melting snow was examined. Next, scale model experiments were performed to study the thermal characteristics of a hot air blowing system using large nozzle outlets.

### 概 要

空気膜構造物においては降雪時の屋根融雪をすみやかに行なう必要がある。融雪のためには各種の方法が考えられるが美観、安全性の観点からは膜面の内側に温風を吹き出す方式が最も実用的であると思われる。本報告は通常の一重膜における温風吹出しシステムに関して検討したものである。まず実際の膜材を張った模型箱を多雪地域である新潟県に運び込み、種々の気象条件に対して膜面への供給熱量と融雪状態を実験的に調査した。このデータを基に融雪に必要な熱量の算定式の妥当性を検討した。次に大型ノズルを用いた膜面への温風吹出しシステムの熱的特性を把握するため別に縮尺模型を製作し一連の模型実験を行なった。

### 1. はじめに

空気膜構造物においては薄い膜材を室内空気圧でふくらませているため積雪等の過大な荷重がかかることは非常に危険である。このため降雪時においては室内圧を上げて荷重に対応することになるが、ある程度以上の積雪が見込まれている場合には屋根面の融雪をすみやかに行なう必要がある。融雪方法には屋根散水、電気膜ヒーター、大型ファンにより雪を吹きとばす方法、室内側から膜面に向かって温風を吹きつける方法等が考えられる。しかし美観、安全性、コスト等を考えるならば室内側から温風を吹き出す方法が最も実用的であると思われる。米国では空気膜構造の融雪方法として空気膜を二重とした上で、この二重空間内に温風を吹き出す方式が多用され

ている。しかしながら二重膜はコストが高く、また光線透過率も低下するためわが国においては一重膜が増加するものと予想される。一膜重では膜面に向かって吹出された温風が室内に拡散するため融雪に有効に利用できる熱量の比率は減少する。一方、融雪に必要な熱量は降雪量、外気温等の気象条件から一応は計算が可能である。

本報告においては、まず融雪に必要な熱量の計算式の妥当性を検討する目的で実際の膜材を張った融雪実験用模型箱を多雪地域である新潟県に運び込み、種々の気象条件に対する膜面への供給熱量と融雪状態とを実験的に調査した。次に吹出し口として大型ノズルを用いた場合の膜面への温風吹出しシステムの熱的特性を把握するため別に縮尺模型を製作し実験を行なった。

## 2. 融雪実験

### 2.1. 融雪に必要な熱量の計算式

融雪に必要な熱量  $q_0$  は ASHRAE による提案式<sup>1)</sup> を参考にすれば次式のように表わせる。

$$q_0 = q_s + q_m + A_r(q_e + q_h) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $q_0$ ; 融雪に必要な熱量 (kcal/h)

$q_s$ ; 氷点下の降雪温を  $0^\circ\text{C}$  にするための熱量 (kcal/h)

$q_m$ ;  $0^\circ\text{C}$  の雪を  $0^\circ\text{C}$  の水にするために必要な融解熱 (kcal/h)

$q_e$ ; 無発熱 (kcal/h)

$q_h$ ; 膜外表面から外気への対流およびふく射伝達熱量 (kcal/h)

$A_r$ ; 積雪状態を表わすパラメータ ( $0 \leq A_r \leq 1$ )

$A_r = 1$ ; 雪が融けている状態

$A_r = 0$ ; 雪が積もり膜表面がすべてかなりの雪で覆われている状態

今回の融雪計画では雪は降りはじめからすべて融かす前提であるので便宜的に  $A_r = 1$  とした。

$$q_s = C_p \times (-\theta_f) \times Q_H \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$q_m = 80 \times Q_H \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$q_e = 597 \times W \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$W = \lambda' \cdot A_w (f_s - f_i) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\lambda' = 0.012v + 0.013 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$q_h = \alpha \times A_w (\theta_s - \theta_0) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$\theta_f$ ; 降雪温 ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_s$ ; 膜外表面温 ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_0$ ; 外気温 ( $^\circ\text{C}$ )

$Q_H$ ; 降雪量 (kg/h)

$W$ ; 蒸発水分量 (kg/h)

$\lambda'$ ; 湿気伝達率 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ )

$A_w$ ; 膜面積 ( $\text{m}^2$ )

$f_i$ ; 外気の水蒸気圧 (mmHg)

$f_s$ ; 融雪が行なわれている濡れ面での飽和水蒸気圧 (mmHg)

$v$ ; 外部風速 (m/s)

$C_p$ ; 比熱 (kcal/kg $\cdot^\circ\text{C}$ )

$\alpha$ ; 外気側総合熱伝達率 (kcal/ $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ )

降雪量は通常、長さの単位 (cm) で表わされているため体積基準の降雪量を重量単位で表わすためには降雪時の雪の密度がぜひとも必要である。前田の実測<sup>2)</sup> によると降雪時 (新雪) の雪の密度は  $0.1 \text{ g}/\text{cm}^3$  程度である。

### 2.2. 融雪実験のための模型箱

模型箱の外観を写真-1 に、断面を図-1 に示す。膜

面への熱供給は小型の温風ヒーターにより行ないヒーターの発熱量を変えることにより供給熱量をコントロールした。膜面に供給された熱量の測定は膜内表面に貼られた熱流板によった。

### 2.3. 融雪実験結果

融雪実験を新潟県塩沢町において昭和58年2月上旬に行なった。実験は降雪時を選び降雪量に応じて膜面への供給熱量を変化させながら行なった。降雪量は箱型の容器に積もる雪の重量を20分間毎に測定することにより算定した。図-2 に実験結果を示す。図中で横軸は所与の気象条件に対して(1)式から計算した融雪に必要な熱量を表わし、縦軸は模型において実際に膜面に供給した熱量を表わす。図中の破線より上の領域では計算上は雪は融けるはずであり、また下の領域では融けずに積もるはずである。実験値は良く一致しており計算式の妥当性がうかがえる。また図-3 に実験を行なった2月10日の降雪量 (重量単位) を示す。写真-2 は必要熱量よりも供給熱量が少なかった場合の実験状況を示す。時間の経過とともに膜面に雪が積もっていく状態が確認できた。

## 3. 大型ノズルによる温風吹出しシステムの模型実験

### 3.1. 実験模型

模型外観を写真-3 に、模型断面を図-4 に示す。今回は最も単純なモデルを考え吹出し口は片面にのみ設置し対向面はすべて吸込み口としている。横型の吹出し口

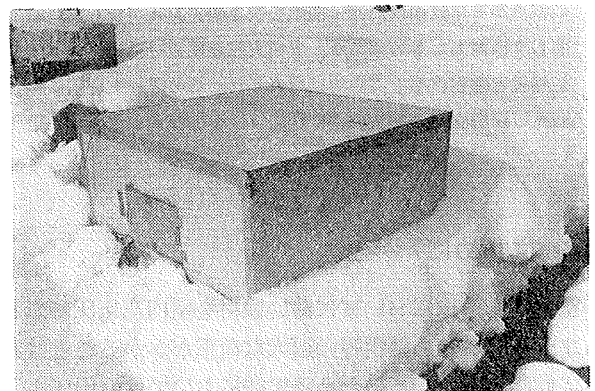


写真-1 融雪実験のための模型箱の外観

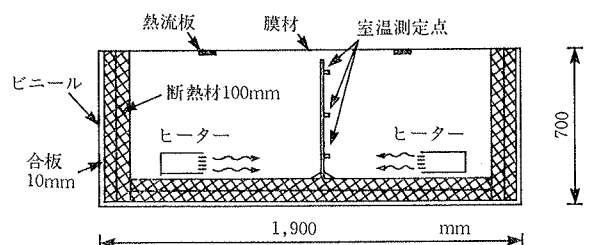


図-1 融雪実験のための模型箱断面

としては円形ノズル（内径 12 mmφ、吹出し角度は上向き 30°）32個である。模型の天井面としては実際の膜材を用い、この膜面を通して外部に流出する熱量測定のため熱流板10枚を設置した。

3.2. 模型実験結果

3.2.1. 流出熱量分布, 上下室温分布 吹出しノズルより室内に供給された熱量は天井膜面を加熱するとともに周壁, 床等から外部に流出する。図-5 は吹出し速度, 吹出し温度, 周壁の断熱状態を変化させた場合の室内に供給された全熱量  $q_r$  に対する天井膜面での対流による流出熱量  $q_c$  の実験結果である。吹出し速度による変化はほとんど見られないが周壁の断熱状態が良くなると  $q_c$  の比率が多少, 増大している。次に全供給熱量に対する

上下室温差を図-6 ~ 図-8 に示す。計画時においては降雪量, 外気温等のデータを基にして融雪に必要な熱量を算定すれば図-5 より室内に供給すべき全熱量が予測できる。ただし図-5 の  $q_c$  は対流による供給熱量であるため周壁等から膜面に伝達されるふく射熱量を別に算定し供給熱量に加える必要がある。しかし室内全体が均一に暖房されている場合を除けば周壁温度は一般的に低いいためこのふく射熱量は小さい。

3.2.2. ノズルより吹出された温風の温度降下 膜面に供給すべき熱量  $q_c$  は前述の方法で予測することができるもののその時の吹出し温度は別途にもとめなければならぬ。このためにはある条件下で吹出された温風の温度降下（吸込み口付近での温度）の計算が必要とな

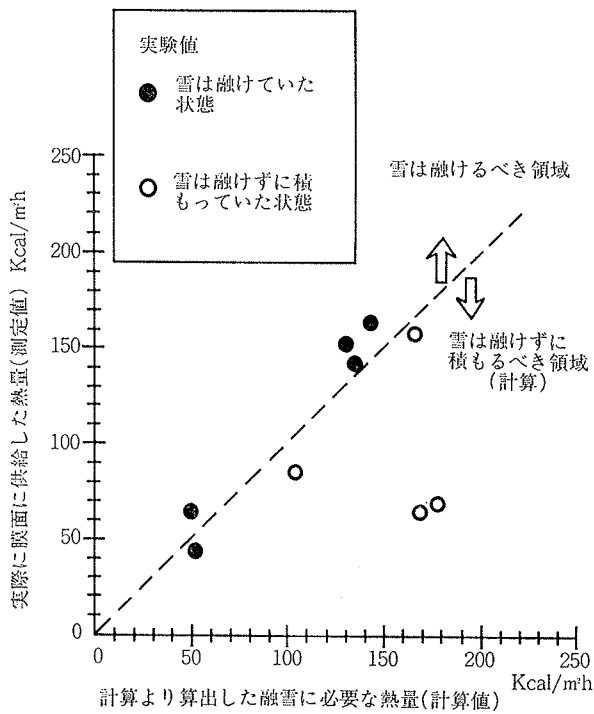


図-2 模型箱による融雪実験結果 (昭和58年2月10日午前中)

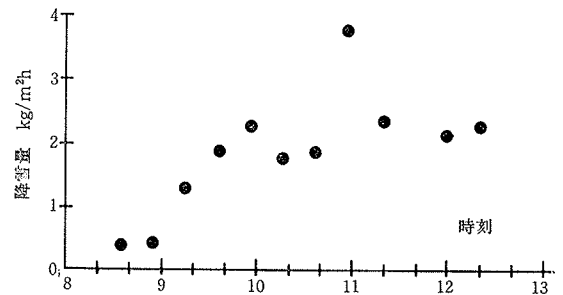


図-3 降雪量の測定結果 (昭和58年2月10日, 新潟県塩沢町)

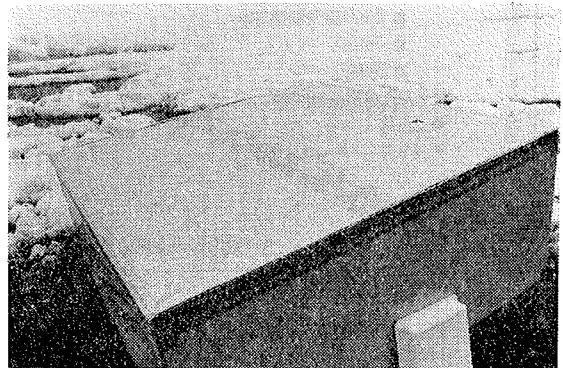


写真-2 融雪実験状況 (供給熱量が少なく膜面に雪が積もっている。)

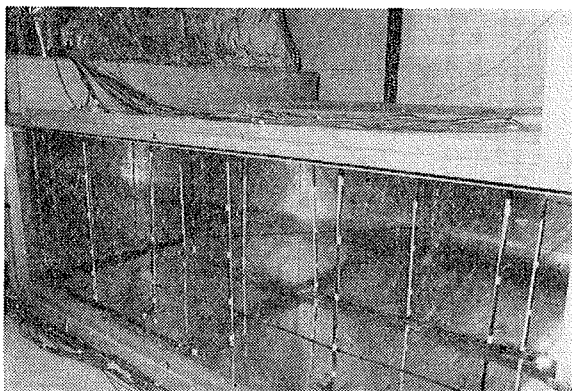


写真-3 温風吹出しシステム実験模型外観

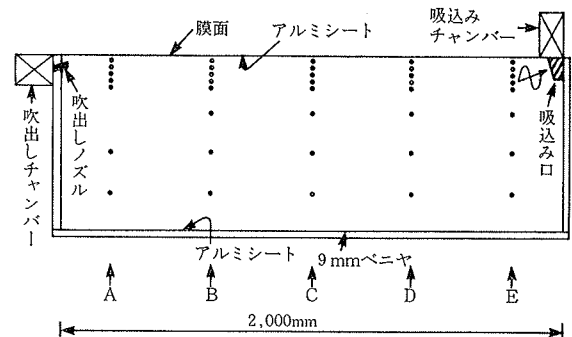


図-4 温風吹出しシステム実験模型断面 (黒丸印は室温測定点)

る。膜面に向かって吹出された温風は膜面に到達するまでに周囲空気をエントレーンメント（連行）するために温度が急激に低下する。その後膜面に沿って移動する過程でさらに冷却される。膜面に到達した温風は膜面に沿う平面噴流となりエントレーンメントされる流量は通常の自由噴流の場合に比較して極端に減少する。それ故、温風が膜面に沿って移動冷却される過程は次のような熱平衡式で近似的に表わすことができる<sup>3)</sup>。

$$C_p \cdot \gamma \cdot V_0 \frac{d\theta}{dx} \cdot \Delta x + K(x) \cdot (\theta - \theta_a) \cdot W \cdot \Delta x = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$K(x)$  は吹出し口より  $x$  だけ離れた位置での天井膜面の熱貫流率であり空気速度が変化するため  $x$  の函数となる。いま  $K(x)$  を区間毎の定数値  $K_U$  で近似的に置きかえた上で  $\theta = \theta_0$  とすると、

$$\theta_x = \theta_a + \exp(-K_U \cdot W \cdot x / C_p \cdot \gamma \cdot V_0) \cdot (\theta_0 - \theta_a) \quad \dots\dots\dots(9)$$

次に吹出された温風が膜面に到達するまでの温度降下の一形式は KOESTEL<sup>4)</sup> により、

$$\left. \begin{aligned} u/u_c &= \exp(-ay^2) \\ \Delta t/\Delta t_c &= \exp(-by^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

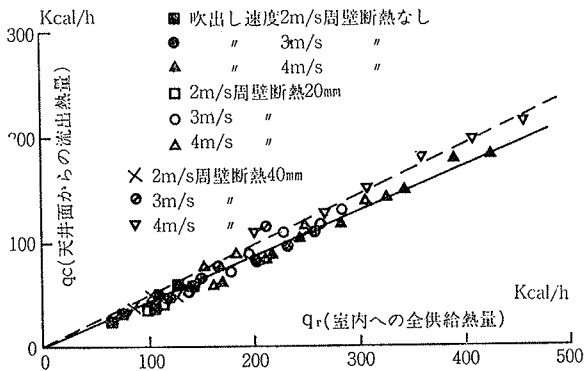


図-5 室内への全供給熱量  $q_r$  に対する天井膜面での流出熱量  $q_c$  との相関

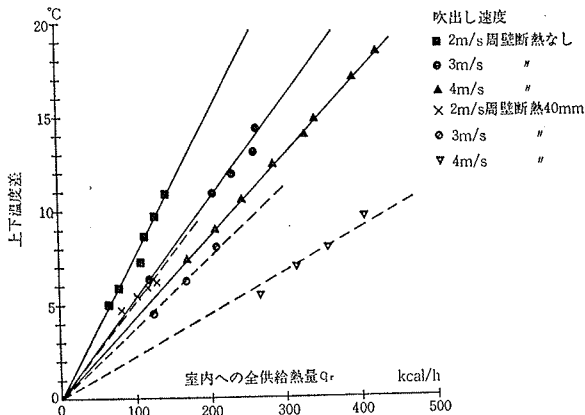


図-6 室内への全供給熱量  $q_r$  に対する上下温度差 (A位置)

任意の位置での熱量  $Q_x$  は、

$$\begin{aligned} Q_x &= C_p \cdot \gamma \cdot 2\pi \int_{y=0}^{y=\infty} \Delta t \cdot u \cdot y \cdot dy \\ &= C_p \cdot \gamma \cdot 2\pi \int_{y=0}^{y=\infty} \Delta t_c \cdot u_c \cdot \exp\{-y^2(a+b)\} y \cdot dy \\ &= C_p \cdot \gamma \cdot \pi \cdot \Delta t_c \cdot u_c / (a+b) \quad \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

一方、吹出し口における送熱量  $Q_0$  は、

$$Q_0 = (\pi D_0^2 / 4) \cdot u_0 \cdot \Delta t_0 \cdot \gamma \cdot C_p \quad \dots\dots\dots(12)$$

$Q_x = Q_0$  であるから、

$$\Delta t_c / \Delta t_0 = D_0^2 \cdot u_0 (a+b) / 4u_c \quad \dots\dots\dots(13)$$

一方、文献5)より、

$$v/v_c = \exp[-2K^2(y^2/x^2)] \quad \dots\dots\dots(14)$$

$K$  は吹出し口のスロー一定数である。(10)式、(14)式より、

$$a = 2K^2/x^2 \quad \dots\dots\dots(15)$$

また、KOESTEL により、

$$b/a = \{4/[1+(1/P_r)]\} - 1 \quad \dots\dots\dots(16)$$

故に、 $(a+b) = 3 \cdot 3K^2/x^2$  .....(17)

また等温時においては、次式が成り立つ。

$$u_c/u_0 = D_0 \cdot K/x \quad \dots\dots\dots(18)$$

吹出し口近傍では(18)式が近似的に成り立つとし、(17)式、(18)式を(13)式に代入すれば、

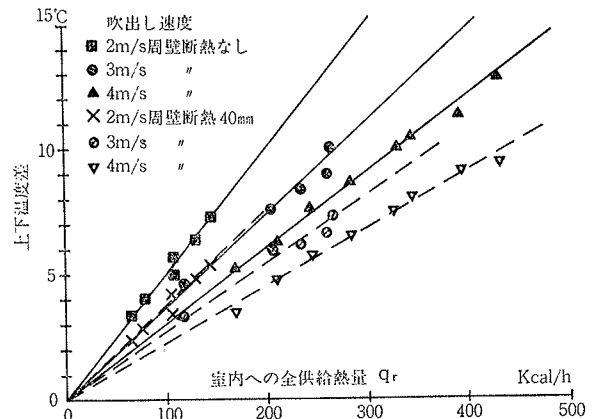


図-7 室内への全供給熱量  $q_r$  に対する上下温度差 (C位置)

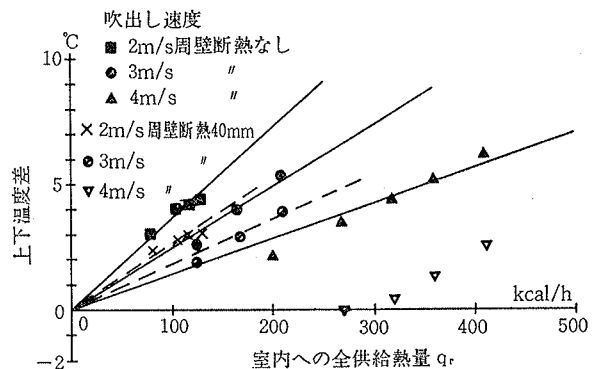


図-8 室内への全供給熱量  $q_r$  に対する上下温度差 (E位置)

$$\Delta t_0 / \Delta t_c = 0.825 D_0 \cdot K / x \quad \dots\dots\dots(19)$$

別の近似的な方法として膜面に到達するまでの区間においてはエントレーンメント等により周囲空気へ流出する熱量を考え(8)式の左辺に  $K_L(\theta - \theta_r) \cdot W \cdot \Delta x$  なる項を付け加える。 $\theta_x$  は、

$$\theta_x = \frac{K_U \cdot \theta_a + K_L \cdot \theta_r}{K_U + K_L} + \exp \left\{ - \frac{(K_U + K_L) \cdot W \cdot x}{C_p \cdot \gamma \cdot V_0} \right\} \times \left\{ \theta_0 - \frac{K_U \cdot \theta_a + K_L \cdot \theta_r}{K_U + K_L} \right\} \quad \dots\dots\dots(20)$$

以上述べた方法を基にして吹出し口より吸込み口に至るまでの温風の温度降下の計算式として次の三つの方法を考える。

(ケース I) 吹出された温風が膜面に到達するまでの温度降下は(19)式を用い、それ以降は(9)式を用いる。

(ケース II) 膜面に到達するまでは(20)式、それ以降は(9)式を用いる。

(ケース III) 温風の流れを壁に沿う Plane Jet と考えこの過程でエントレーンメントされる流量 ( $V_x - V_0$ ) は次の(21)式を用いる。

$$V_x / V_0 = 1.2 \sqrt{ax / D_0 + 0.41} \quad (a \approx 0.1) \quad \dots\dots\dots(21)$$

各区間毎にエントレーンメントされる流量の増分が主噴流域に熱的に混入するものとし(8)式の左辺に組み込む。

三つの方法による温風の温度降下の計算値と実験値との比較を図-9, 図-10に示すがケース(II)による方法が最も良く実際の状態を再現しているものと思われる。なお  $K_L$  値は模型のA位置における温風温度の実験値と計算値とが一致するように逆算したものである。この  $K_L$  値は吹出し速度に応じてほぼ同じ程度のオーダーとなるため一般的な適用が可能となる。

参考文献

1) ASHRAE GUIDE AND DATA BOOK SYSTEMS (1970), pp. 573~588

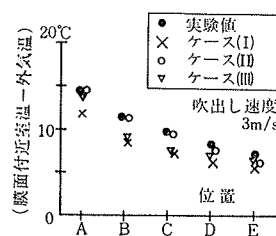


図-9 温風の温度降下に関する計算値と実験値との比較

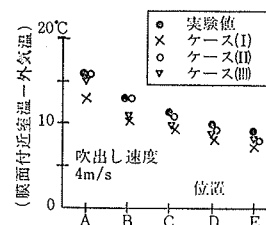


図-10 温風の温度降下に関する計算値と実験値との比較

$\theta_x$ ; 吹出し口より xm 離れた位置での膜面付近室温 (°C)	$K_L$ ; 噴流より周囲空気への熱移動係数 (kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C)
$\theta_a$ ; 外気温 (°C)	$D_0$ ; 吹出し口径(m)
$\theta_0$ ; 吹出し温 (°C)	$\Delta t_c$ ; ( $\theta_x - \theta_r$ )
$\theta_r$ ; 噴流外室温 (°C)	$\Delta t_0$ ; ( $\theta_0 - \theta_r$ )
$V_0$ ; 吹出し風量 (m <sup>3</sup> /h)	$U_0$ ; 吹出し速度(m/s)
$V_x$ ; 吹出し口より xm 離れた位置における全流量 (m <sup>3</sup> /h)	$K$ ; スロー定数
$W$ ; 建物幅 (m)	$U_c, U$ ; 位置 x における軸上速度, 中心軸より y 離れた位置での速度
$C_p \cdot \gamma$ ; 空気の比熱、比重量	$Pr$ ; プラントル数
$K_U$ ; 膜面の熱貫流率 (Kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C)	a, b; 速度分布、温度分布形態係数
	$\bar{a}$ ; 吹出し口の特徴係数

記号表

2) 前田博司: 雪荷重の評価に関する基礎的研究(その1), 日本建築学会論文報告集, 第319号, (昭57.9), pp. 32~37

3) 土屋喬雄: 建物断熱と室内垂直温度分布の関係について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭52.10), pp. 433~434

4) KOESTEL: Computing Temperature and Velocities in Vertical Jets of Hot or Cold Air, Transactions of ASHVE, No. 1512, pp. 213~232

5) 石原正雄: 建築換気設計, 朝倉書店