

# 温度成層風洞を用いた都市域の対流熱伝達率に関する基礎的研究

大場 正昭<sup>\*1</sup> 名和 健太郎<sup>\*2</sup> 藤本 健作<sup>\*3</sup>

## Study on Convective Heat Transfer Coefficients in Urban Areas Using Thermally Stratified Wind Tunnel

Masaaki Ohba<sup>\*1</sup> Kentarho Nawa<sup>\*2</sup> Kensaku Fujimoto<sup>\*3</sup>

Complex heat transfer fluxes occur between external surfaces of building walls and the urban canopy layer on typical summer days. The convective heat transfer coefficient on urban surfaces is an essential index that indicates roughly the characteristics of sensible heat fluxes inside the canopy layer. An experiment was conducted to obtain a formula for predicting convective heat transfer coefficients. An unstable layer was produced by heating panels of a thermally stratified wind tunnel. The measurement accuracy of the vertical temperature profiles and conductive heat fluxes from the heating panels was improved after the wall was insulated to reduce heat loss from the wind tunnel walls. The radiative heat transfer was calculated by Gebhart's absorption factor method. The heat transfer coefficients over a rough floor in the velocity range from 0.5 m/s to 2.0 m/s were 25% larger than those over a smooth floor. An experimental formula for the heat transfer coefficients with a function of reference velocity and bulk Richardson number was derived by a nonlinear regression model, but the estimation accuracy was insufficient due to a lack of sampling data. An experiment must be carried out to accumulate data and obtain high quality prediction formulas.

### 1. 序

建物の外表面における対流熱伝達率は、室内熱負荷の算定やヒートアイランド負荷の評価に重要なパラメータである[1]。都市表面から上層の都市キャノピー層への複雑な放熱特性を工学的にバルク表現として極力簡素化し、パラメータの存在範囲を知ることは極めて重要である。このために、対流熱伝達率を何らかの簡易式で整備しておくことは有用である[2,3]。対流熱伝達率は温度や気流の乱れの性状に左右されるので、影響要因を系統的に調整できる温度成層風洞を用いることにした。

本研究は、暑熱環境の都市空間を風洞内に再現し、都市域の対流熱伝達率に関して、バルクリチャードソン数を関数とした実験式を算出することを目的とする。

### 2. 実験概要

#### 2.1 風洞

室内回流式エッフェル型風洞で、測定部は長さ 9370mm、幅 1200mm、高さ 1000mm である。図 1 に風洞仕様を示す。消費電力量と熱源保守費の軽減対策から、熱源は業務用の空冷式チラーユニットを採用し、60 の温水と 5 の冷水を同時製造した。気流の加熱能力は 78.9 kW、冷却能力は 51 kW である。温水の温度変動を制御するために加熱能力 15kW の電気式再加熱装置を 1 次温水ポンプの配管系に設置した。温水のドリフトは  $\pm 0.2$  である。風洞床面は 6 枚の加熱冷却パネルで構成される。床面温度は 1.5kW/パネルの面状電気ヒーターで 80 まで加熱できる。風速範囲は 0.5m/s ~ 2.0m/s で、風速 1m/s のときに 35 /m の温度勾配を作成する。風洞内の熱的定常性を得るために厚さ 25mm の断熱材を外側

<sup>\*1</sup> 本学建築学科，教授

<sup>\*2</sup> 株式会社 朝日工業社 工修

<sup>\*3</sup> 本学大学院建築学専攻

2003 年 9 月 16 日 受理

壁面に張り付けて、風洞壁面からの熱損失を少なくした。流れの可視化と熱画像撮影のために、風洞内部は黒色表面仕上げで放射率1.0に近い状況を作りだした。

## 2.2 実験条件

表1に実験条件を示す。気流を気流冷却装置で8.0に冷却した後、加熱パネルを60に加熱して、不安定成層流を作成した。風速は0.5m/s～2.0m/sの4ケース、都市空間は平滑面と粗度面の2ケースとした。粗度は高さ10mmのL型アングルを250mm間隔に並べて形成した。

## 2.3 測定方法

### (1) 温度測定

壁面温度と気流温度は銅-コンスタンタン型熱電対を用いた[4]。線径は0.076mmと0.1mmの2タイプである。床面近傍の鉛直温度分布の測定には0.076mmを用いて放射熱伝達の影響を抑えた。熱源のON-OFF制御に伴う冷水の温度ドリフトが生じたので、測定時間は5分間に設定した。図2に温度較正を示す。HART Scientific社の熱電対較正装置9105型を用いた。熱電対は何れも良い温度精度を示した。

### (2) 風速測定

風速分布はダンテック社の2次元レーザードップラー流速計で測定した。シーディング粒子は平均粒径 $1.0\mu\text{m}$ で、送風機室から発煙装置で粒子を送入した。取得データ数が10,000個または測定時間が1分の条件でサンプリングした。床面近傍を除いて6,000個以上のトレーサ粒子を取得した。

### (3) 床面の伝導熱量測定

放熱量はREBS社のPHF-01熱流計を使用し、データローガーに収録した。感温部は貼り方による測定誤差が生じないようにアルミ箔で貼り付けた。測定時間は1時間。図3に床面の伝導熱量の時間変化を示す。平均伝導熱量は $520\text{W/m}^2$ である。図4に流れ方向の床面温度分布を示す。X軸の原点は温度成層装置の測定胴入口である。温度制御の白金測温抵抗体がアルミ板と面状ヒータの間に挿入されているので、パネルごとにピークが生じた。平均温度は55.3で標準偏差は6.7を示した。

### (4) 熱画像測定

日本電気の赤外放射温度計TH3102MRで風洞内の熱画像を撮影し、温度境界層の形成状況を視覚的に把握した。測定波長は $8\sim 13\mu\text{m}$ 、最小検知温度差0.08である。

## 2.4 測定点

### (1) 温度測定

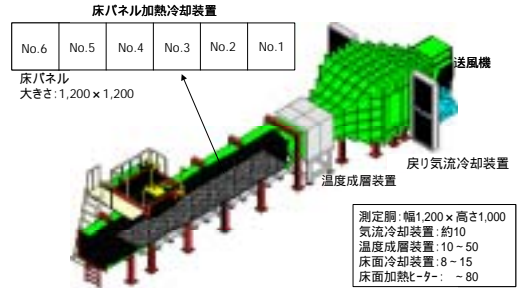
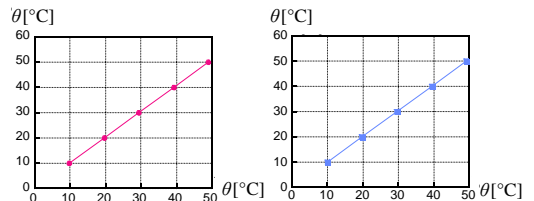


図1 温度成層風洞

表1 実験条件

ケース	床面温度[℃]	粗度	風速[m/s]
1	60.0	なし	0.5
2		あり	0.5
3		なし	1.0
4		あり	1.0
5		なし	1.5
6		あり	1.5
7		なし	2.0
8		あり	2.0



(1) 線径0.076mm

(2) 線径0.32mm

図2 熱電対の温度較正

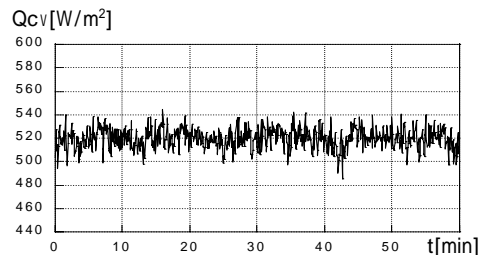


図3 床面伝導熱量の時間変化

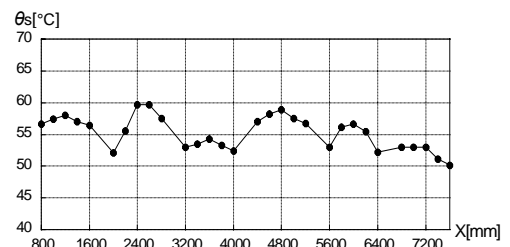


図4 風洞床パネルの表面温度

図5に風洞床面パネル上の測定点を示す。X=6100mmとX=6300mmのY方向に200mm間隔に5点ずつ計10点を設けた。測定高さはZ=0.5mm~4mmは0.5mm間隔、Z=4mm~15mmは1mm間隔、16mm~40mmは4mm間隔、それ以上は50mm間隔に300mmまでの36点を選定した。

## (2) 風速測定

測定部入り口のX=600mmで流入気流の鉛直風速分布を測定した。また温度境界層が十分に発達した加熱パネルNo.5上のNo.3とNo.5の測定点で鉛直風速分布を測定した。測定高さはZ=1mm~10mmは1mm間隔、Z=10mm~20mmは2mm間隔、20mm~50mmは5mm間隔、それ以上は50mm間隔に250mmまで、合計26点を選定した。

## 2.5 放射熱伝達量と対流熱伝達量の算出方法

風洞内で対流熱伝達を検討する上で、長波長放射による影響を除去する必要があるので、放射熱伝達の検討を行った。

図6に形態係数算出のための風洞ゾーン分割図を示す。熱画像の温度分布から側壁面の高さを3分割し、天井面と床面はパネルごとに分割した。割数は53である。小領域の面間平均形態係数はWalton(1986)の改良型MS法に基づいて算出した[5]。

Gebhartの放射吸収係数 $a_{ij}$ は、面の放射率を $\varepsilon_j$ 、形態係数をFとすれば、

$$a_{ij} = \bar{\varepsilon}_j F_{ij} + \sum_{k=1}^N F_{ik} (1 - \bar{\varepsilon}_k) a_{kj} \quad (1)$$

から求めた。式(1)の右辺第1項は面iを自ら出た長波長放射が直接面jに吸収される割合、第2項は面iを自ら出た長波長放射が面kで反射の後に面jに吸収される割合を表す。

面iから長波長放射によって出ていく正味の熱量を $Q_{Ri}$  [W/m<sup>2</sup>]すると、次式が成り立つ。

$$A_i Q_{Ri} = A_i (\bar{\varepsilon}_i T_i^4) - \sum_{j=1}^N a_{ji} A_j (\bar{\varepsilon}_j T_j^4) \quad (2)$$

従って、放射熱伝達量 $Q_{Ri}$ はGebhartの吸収係数法により

$$Q_{Ri} = \bar{\varepsilon}_i (T_i^4 - \sum_{j=1}^N a_{ij} T_j^4) \quad (3)$$

から求めた[6]。ゾーン面の放射率 $\varepsilon_i$ は、黒色塗装した面を黒体に近い0.95とし、ステンレスメッシュが付いた風洞流入面を0.20、及び風洞流出面を

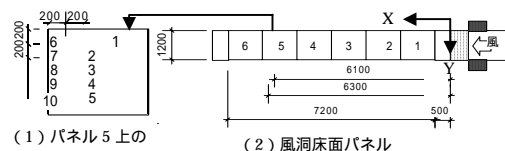


図5 風洞床面パネル番号及びパネル5上の測定点番号

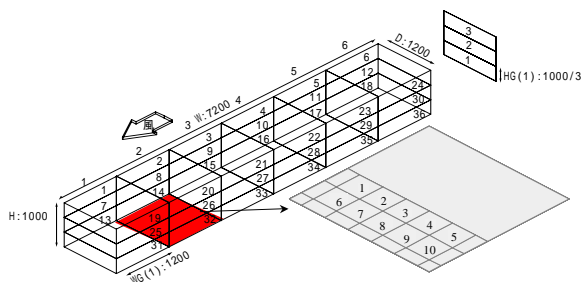


図6 形態係数算出のための風洞ゾーン分割

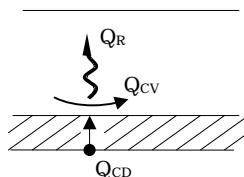


図7 加熱面の熱平衡

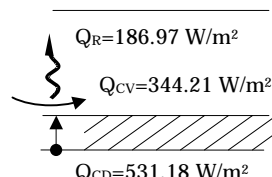
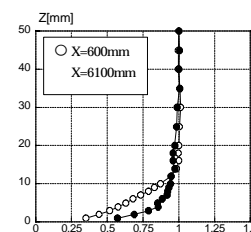
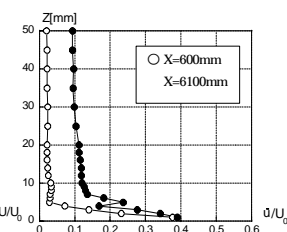


図8 ケース3の熱収支

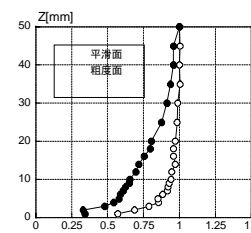


(1) 風速分布

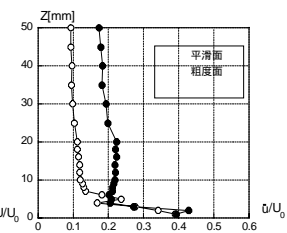


(2) 乱れの強さ

図9 平滑面の鉛直風速分布と乱れの強さの分布



(1) 風速分布



(2) 乱れの強さ

図10 平滑面と粗度面の鉛直風速分布と乱れの強さの分布

1.0 とした。

図 7 に加熱面の熱平衡を示す。加熱面の放射熱伝達量  $Q_R$ 、対流熱伝達量  $Q_{CV}$ 、及び伝導熱量  $Q_{CD}$  との間には熱量保存則から

$$Q_R + Q_{CV} = Q_{CD} \quad (4)$$

の関係が成り立つ。従って、熱流計の伝導熱量から放射熱伝達量を差し引いて、対流熱伝達量を

$$Q_{CV} = Q_{CD} - Q_R \quad (5)$$

から算出した。

対流熱伝達率は次式により計算した。

$$h = Q_{CV} / (T_s - T_{ref}) \quad (6)$$

図 8 に熱収支例を示す。高さ 9mm の上空温度  $T_{ref}$  と床面温度  $T_s$  の温度差から対流熱伝達率を算出した。上空温度の参照高さは風速 0.5m/s の鉛直温度分布から選定した。対流熱伝達率は  $10.2 \text{ W/m}^2$  である。

### 3.5 実験結果及び考察

#### (1) 平滑面と粗度面上の気流特性

図 9 に平滑面の  $X=600\text{mm}$  と  $6100\text{mm}$  の風速分布を示す。風速は  $0.5\text{m/s}$  である。 $X=600\text{mm}$  では高さ 15mm 以上で一様な風速分布を示した。 $X=6100\text{mm}$  では平板境界層が発達し、境界層厚さは約 30mm に達した。乱れの強さは床面近傍では摩擦の影響により大きくなった。図 10 に  $X=6100\text{mm}$  の平滑面と粗度面の比較を示す。粗度面の境界層厚さは約 50mm まで形成された。

#### (2) 平滑面と粗度面上の温度特性

図 11 に  $X=6100\text{mm}$  の平滑面の鉛直温度分布を示す。測定点 No.1 ~ No.5 の温度分布を平均化した。  $T$  は  $Z=250\text{mm}$  の上空温度との温度差を示す。平均風速が速くなると、対流により熱伝達が促進されるために温度境界層厚さが増加した。図 12 に平滑面と粗度面の鉛直温度分布を示す。風速は  $0.5\text{m/s}$  である。粗度面では温度分布が緩やかに発達し、平滑面より温度境界層厚さが厚くなった。図 13 に平滑面近傍の鉛直温度分布を示す。床面近傍の流れは層流状態にあるが、塗装面の僅かな凹凸が原因で高さ 1mm までの範囲で温度が一様な分布を示した。56 の床面温度に対して、僅か 0.01mm 上空の点で温度が 43 まで低下した。空気の高い断熱性能が改めて確認できた。

図 14 に温度境界層厚さと風速の関係を示す。温度境界層厚さは上空温度に達するまでの高さとして定義し、測定点 10 点の温度境界層厚さを平均化した。粗度面の温度境界層高さは平滑面に比べて約 25% 大きかった。

#### (3) 平滑面と粗度面の対流熱伝達率の特性

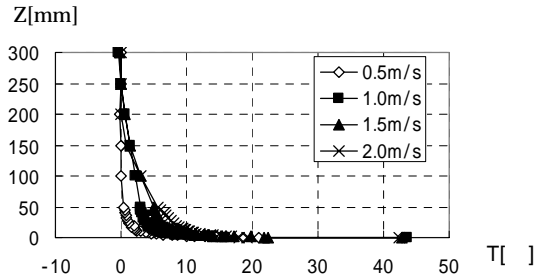


図 11 平滑面の鉛直温度分布と基準風速の関係

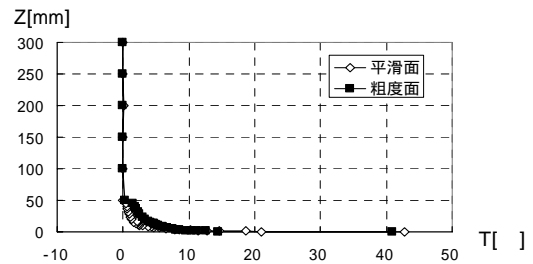


図 12 平滑面と粗度面の鉛直温度分布

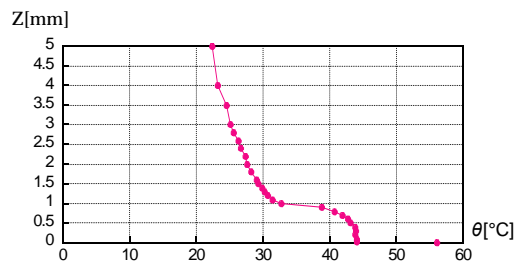


図 13 平滑面近傍の鉛直温度分布

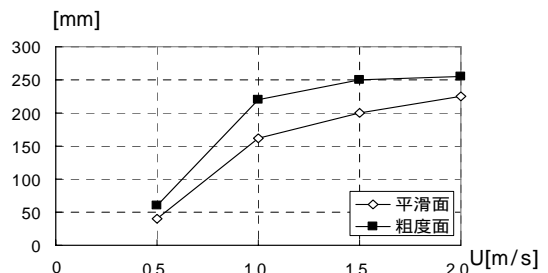


図 14 温度境界層厚さと風速の関係

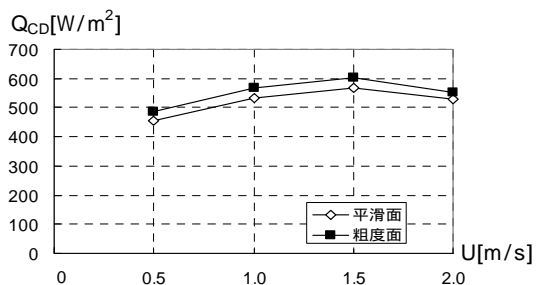


図 15 床面伝導熱量と風速の関係

図 15 に伝導熱量と風速の関係を示す。僅かに粗度面の伝導熱量が平滑面に比べて大きい。風速 2.0m/s では 1.5m/s よりも伝導熱量が低下した。

図 16 に床面の対流熱伝達率分布を、図 17 に平均鉛直温度分布を示す。X=6100mm と X=6300mm の間に温度分布の差は殆どないので、10 点の対流熱伝達率を平均化した。図 18 に対流熱伝達率と風速の関係を示す。既往の研究結果[8]と同様に、対流熱伝達率は風速にほぼ比例する傾向を示した。粗度面の風速 2m/s で対流熱伝達率が減少したのは床面の伝導熱量が低下したことが原因である。粗度面の対流熱伝達率が平滑面に比べて平均で 25%高い数値となった。図 19 にバルクリチャードソン数と風速の関係を示す。バルクリチャードソン数は次式で定義した。

$$R_{ib} = \frac{gZ}{U} \quad (7)$$

高さ 9mm の上空温度と風速を用いて、バルクリチャードソン数を求めた。図中の  $R_{ib}$  値は測定点 No.3 と No.8 の平均値である。実験では風速とバルクリチャードソン数が同時に変化したので、バルクリチャードソン数だけの影響を抽出することができない。従って、不安定が強くなると対流熱伝達率が小さくなる傾向を示した。

#### (4) 対流熱伝達率のルイス実験式

大気境界層内の乱流輸送量が高さ方向に一定な範囲において、顕熱流束  $H$  は

$$H = -C_p u_* \theta_w \quad (8)$$

で記述できる。 $u_*$  は摩擦速度、 $\theta_w$  は摩擦温度である。巨視的に地表面から対流により大気に放出される対流熱伝達率が顕熱流束に熱交換されると考えれば

$$H = -C_p u_* \theta_w \quad (9)$$

となるので、対流熱伝達率として

$$h = C_p u_* \theta_w / (T_s - T_a) \quad (10)$$

を得る。

ルイスはモーニンオブコフ長との関係から

$$u_* = A_0 U F(Z/Z_0, R_{ib}) \quad (11)$$

を導き出した[7]。 $A_0$  は係数で、 $Z_0$  は粗度長である。

$R_{ib} < 0$  となる不安定流れでは、安定度関数  $F$  を実験から次式で定義した。

$$F(R_{ib}) = 1 - \frac{BR_{ib}}{1 + C |R_{ib}|^{1/2}} \quad (12)$$

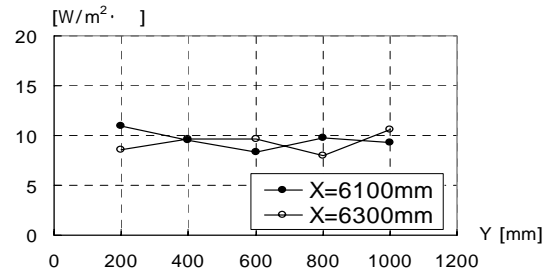
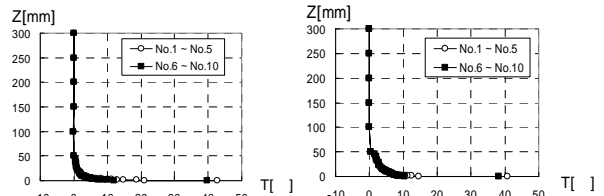


図 16 平滑面の対流熱伝達率分布



(1) 平滑面 (2) 粗度面

図 17 X=6100mm と X=6300mm の平均鉛直温度分布の比較

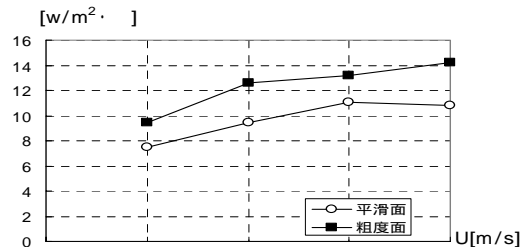


図 18 対流熱伝達率と風速の関係

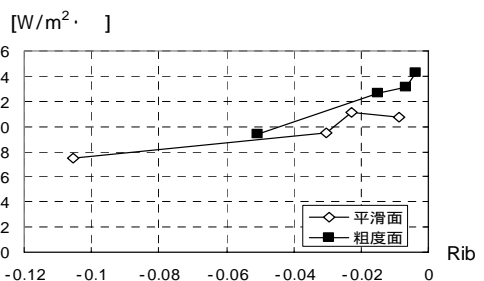


図 19 対流熱伝達率とバルクリチャードソン数の関係

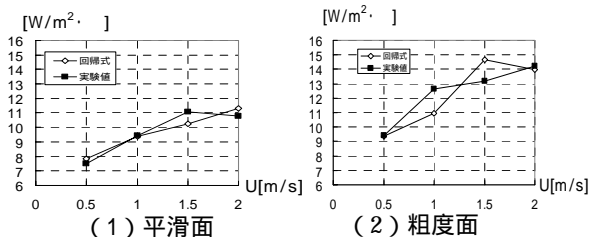


図 20 対流熱伝達率と風速に関する実験式の回帰精度

BとCは実験定数である。従って、式(9)と式(11)から対流熱伝達率は次式で表現できる。

$$= A \cdot F(R_{ib}) \cdot U \quad (13)$$

Aは実験定数。

#### (5) 対流熱伝達率の実験回帰式

今回の少ない実験データから非線形回帰分析により実験定数を同定した。図20に対流熱伝達率と風速の関係を、図21に対流熱伝達率とバルクリチャードソン数の関係を示す。実験定数は

平滑面  $A=1.83$ 、 $B=-2189868.51$ 、 $C=-65036.08$

粗度面  $A=0.07$ 、 $B=-27671.60$ 、 $C=-36.78$

である。取得データ数が少ないので、実験定数の有意性は低い。

#### (6) 回帰式による対流熱伝達率特性

図22に対流熱伝達率に及ぼすバルクリチャードソン数の影響を示す。風速が一定の場合、不安定になるほど対流熱伝達率は増加する。粗度面は平滑面に比べて中立時の  $R_{ib}=0$  で対流熱伝達率が零に近い。原因は同定した係数Aが0.07と小さいためである。

図23に風速の影響を示す。バルクリチャードソン数を一定で風速を変えると対流熱伝達率は風速に比例することが判る。しかし、風速が零になると対流熱伝達率は零になる。風速が零でも自然対流により熱伝達は生じるので、回帰式の改善が必要である。

ユルゲスの式は乱れの小さい流れを対象とした小試料面における値であるから[8]、都市表面の値として適用するには問題がある。従って、都市の大気安定度を関数にしたバルク型対流熱伝達率の実験式は有用と考えられる。

### 5. 結語

今回の実験から次の結果を得た。

(1) 温度成層風洞を用いて対流熱伝達率を計測するシステムを構築した。本システムは次から構成される。

- ・レーザードップラー流速計の気流計測
- ・極細熱電対の気流温度計測
- ・サーモカメラと熱電対の表面温度計測
- ・Gebhartの吸収係数法を用いた放射熱伝達量の算定
- ・熱平衡式による対流熱伝達量と対流熱伝達率の算定

(2) 平滑面の対流熱伝達率は風速  $0.5\text{m/s} \sim 2.0\text{m/s}$  のときに  $8.54 \sim 12.09 \text{ W/m}^2$  を示した。粗度面の対流熱伝達率は平滑面に比べ約25%大きかった。

(3) 対流熱伝達率をバルクリチャードソン数と風速の関数で表現する実験式を算出し、対流熱伝達率

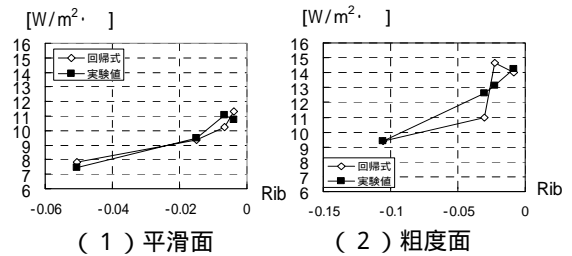


図21 バルクリチャードソン数と対流熱伝達率に関する実験式の回帰精度

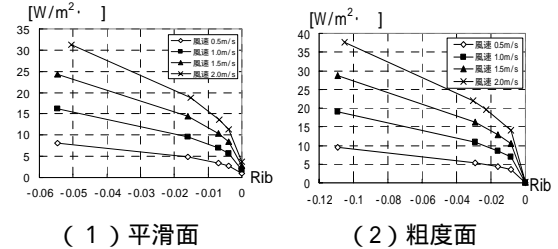


図22 実験回帰式による対流熱伝達率とバルクリチャードソン数の関係

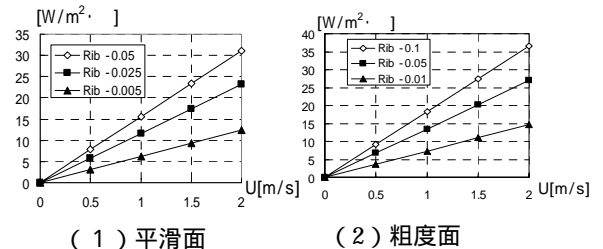


図23 実験回帰式による対流熱伝達率と風速の関係

の特性を調べた。

対流熱伝達率は上空参照温度に影響を受けるので、大気安定度と鉛直温度分布の関係から上空参照温度を定義する必要がある。また、対流熱伝達率に関して、高精度の実験回帰式を得るために、実験データを蓄積する必要がある。今後、安定な流れにおける対流熱伝達率の実験を行い、都市熱空間の熱特性を示す基礎データを整備していく予定である。

### 謝辞

ゲッパートの吸収係数算出プログラムは横浜国立大学院生飯野氏の協力を得た。実験は大成建設技術センターの浦野、森川氏の助言を得て、本学卒研生が担当した。ここに深謝の意を表す。

## 記号の説明

$a_{ij}$	: 放射吸収係数	[-]
$C_p$	: 定圧比熱	[J/kgK]
$F_{ij}$	: 面々形態係数	[-]
$F$	: 安定度関数	[-]
$g$	: 重力加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
$R_{ib}$	: パルクリチャードソン数	[-]
$Q_{CD}$	: 床面伝導熱量	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{CV}$	: 対流熱伝達量	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_R$	: 放射熱伝達量	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_i$	: $i$ 面の絶対温度	[K]
$U$	: 風速	[m/s]
$Z_o$	: 粗度長さ	[m]
	: 放射率	[-]
	: 空気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
	: 温度差。 $= T_s - T_{ref}$	[ ]
$T_{ref}$	: 上空参照温度	[ ]
$T_s$	: 床面温度	[ ]
$T$	: 温度差。 $T = T_i - (Z=250mm)$	[ ]
$T_i$	: 温度	[ ]
	( $Z=250mm$ ): $Z=250mm$ の温度	[ ]
	: シュテファンボルツマン定数	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
	: 対流熱伝達率	[W/m <sup>2</sup> ]
$\bar{\theta}$	: 対象域の平均絶対温度	[K]
	: 温度境界層厚さ	[m]

- 6) 村上、高橋、加藤、雀、近藤、対流場、放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析 第1報 連成シミュレーションの解法と室内モデルへの適用、空気調和・衛生工学会論文集, 57, 105-116, 1995
- 7) Louis, A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Boundary Layer Meteorology, 17, 187-202, 1979
- 8) 渡辺、建築計画原論、丸善、63-65、1965

## 既発表文献

- 1) 大場、栗田、名和、室内回流式エッフェル型温度成層風洞の紹介、日本風工学会誌、88、73-80, 2001
- 2) 大場、栗田、名和、室内回流式エッフェル型温度成層風洞の基本性能及び夏季晴天時の公園緑地の熱環境シミュレーション、東京工芸大学工学部紀要、24, 1, 1-9, 2001
- 3) 藤本、名和、大場、温度成層風洞を用いた都市温熱環境計画に関する基礎的研究 その2 平滑面と粗度面の対流熱伝達率特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、627-628, 2003

## 参考文献

- 1) 吉田、原山、村上、大岡、持田、屋外温熱環境形成寄与率 CRO に関する研究 その1 CRO の提案と CRO3 を用いた都市の熱交換効率の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、931-932, 2001
- 2) 大塚、中村、風洞実験による建物群模型の対流熱伝達率の特性把握、日本建築学会計画系論文集、520、83-90、1999
- 3) 足永、建物屋上面の対流熱伝達率に関する実験式の作成、日本建築学会関東支部研究報告集、517-520, 2000
- 4) 宮野、小林、熱電対による表面温度測定について、日本建築学会計画系論文集、253、81-89、1977
- 5) Walton, Algorithms for calculating radiation view factors between plane convex polygons with obstructions, NBSIR 86-3463, NTIS PB89-114045/AS