

建築物模型各部位における外表面熱伝達率の測定法

小林 定教・黒谷 靖雄
総合理工学部材料プロセス工学科

Measurement Method of Heat Transfer Coefficient at Each Part of Building Model

Sadanori KOBAYASHI and Yasuo KUROTANI
Department of Natural Resources Process Engineering

Abstract

This paper focuses on the measurement of distribution of the heat transfer coefficient of the entire wall surface rather than the measurement accuracy at measurement of the heat transfer coefficient of each panel of the building, and experiments were made to smooth surfaces of a small building model (1.1 m × 1.1 m × 1.1 m) consisting of an SAT meter installed outdoors, to develop the measurement method of the transmission heat flow density and convective heat transfer coefficient of each part of the building based on the measurement results of the SAT meter, infrared radiant energy thermometer, and net pyrradiometer. The thermal image of the wall panel taken by the infrared radiant energy thermometer was divided into 10 cm × 10 cm grids, and the heat transfer coefficient was obtained from the heat balance amount of each panel. This method indicates possibility of measurement of the heat transfer coefficient distribution of the entire wall panel if two or more SAT meters can be installed on the wall of the building where surface roughness is very little and the emissivity is large, though the measurement accuracy of the heat transfer coefficient is rather low.

1. はじめに

建築物外壁面を対象とした対流熱伝達率（以下熱伝達率という）の実験的研究としては、小型の熱流板¹⁾、SAT計²⁾などを建築物壁面の一部に設置して熱伝達率を測定した報告はあるが、建築物各面全体の熱伝達率分布を対象とした研究は見られない。これは壁面における対流熱流量密度の測定が困難なためである。

本研究では、建築壁面の熱伝達率の測定において、測定精度より各壁面全体の熱伝達率分布を求めることに重点をおき、屋外に設置した小型建築物模型の平滑な各面を対象に実験を行い、SAT計、赤外放射温度計（以下放射温度計という）、放射収支計などの測定結果より伝達熱流量密度を求める方法について検討した。さらに模型壁面を10 cm平方の部位に区画し、その壁面各部位の熱伝達率の測定法について開発を試みた。

建築壁面における気流には、建築物による特有の周辺気流と、その周辺気流が壁面の凹凸

により複雑に変化して形成する壁面近傍風があるが、本研究では基準となる周辺気流を対象とする。

本報では建築物模型壁面各部位（以下壁面各部位という）における熱伝達率の測定法に関して行った基礎的な実験について報告する。

2. 実験装置、実験方法および壁面各部位の熱伝達率の求め方

2.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。装置は、5面のSAT計^{注1)}よりなる立方体（1.1 m×1.1 m×1.1 m、厚さ0.1 m）の建築物模型と、放射温度計（TH3102MR, 8~13 μm）、放射収支計（CN-40）、超音波風向風速計（SA-200型, TJ-51型プローブ）、通風型熱電対温度計により構成されている。

2.2 実験方法と実験条件

実験は、RC造3階建ての鉄柵（高さ1.15 m）のある屋上面中央部に建築物模型を設置して行った。測定対象面は日射の当たる建築物模型の二壁面（南面、西面）である。

放射収支量（ q_n ）の測定に当たっては、放射収支計を壁面から0.15 m離れた位置に設置し、屋上面（地表面）からの照り返しを小さくするため二重の黒色ネットを敷いている。また、測定は秋期の晴天で比較的風の強い日に行い、屋上面付近の温度境界層の影響が小さくなるよう留意している。

各温度は赤外放射温度計（12.8秒の平均値：0.8秒×16スキャン）および熱電対（タイプT：0.32 mmφ）により1分間隔でデータロガー（EF）に収録し、屋上風速は超音波風向・

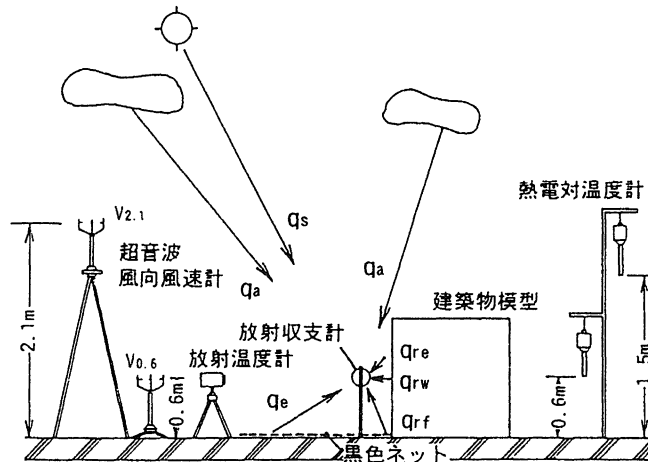


図1 実験装置

風速計により屋上面からの高さ 0.6 m, 2.1 m の各位置で 1 分間平均風速を 1 分毎に測定した。

2.3 壁面各部位の熱伝達率の求め方

図 2 の壁面 (SAT 計表面) においては(1)式の熱平衡式がなりたつ。

$$q_s + q_a + q_e = q_c + q_r + q_\lambda \quad (1)$$

ここに, q_s : 壁面で吸収される日射量 (w/m^2)

q_a : 壁面で吸収される大気放射熱量密度 (w/m^2)

q_e : 壁面で吸収される周辺物体からの放射熱量密度 (w/m^2)

q_c : 壁面から外気への対流熱伝達熱量密度 (w/m^2)

q_r : 壁面から放射される放射熱量密度 (w/m^2)

q_λ : 壁面から内部へ向かう伝導熱量密度 (w/m^2)

(1)式より対流熱伝達率は(3)式となる。

$$q_c = h_c(\theta_s - \theta_a) = q_s + q_a + q_e - q_r - q_\lambda \quad (2)$$

$$h_c = (q_s + q_a + q_e - q_r - q_\lambda) / (\theta_{sx} - \theta_a) \quad (3)$$

ここに, h_c : 対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)

θ_s, θ_{sx} : 壁面平均, 各部位の表面温度 ($^{\circ}C$)

θ_a : 空気温度 ($^{\circ}C$)

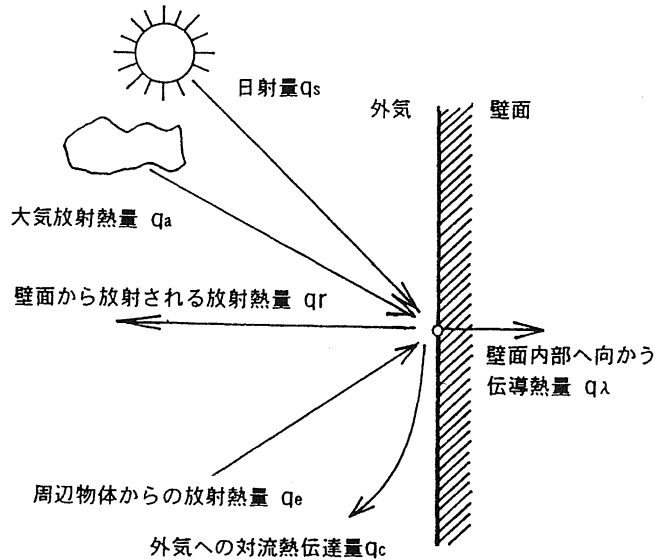


図 2 外壁面における熱の流れ

本研究では壁面前方に放射収支計受感部を設置しているため、受感部には、大気側からの q_s , q_a , q_e , および壁面側からの壁面の q_{rw} , 壁面両端部周辺・地表面からの q_{re} ・ q_{rf} , 受感部上方（大気）からの q_{ae} が入射する。従って放射収支量 (q_n) はその両者の差となる。

$$q_n = q_s + q_a + q_e - (q_{rw} + q_{re} + q_{rf} + q_{ae}) \quad (4)$$

熱伝達率を(3)式より算出する際に用いる壁面への入射熱量 ($q_s + q_a + q_e$) は、放射収支量 q_n に ($q_{rw} + q_{re} + q_{rf} + q_{ae}$) を加えて求める。

ここに、

$$\begin{aligned} q_{rw} &= \phi_1 \varepsilon_1 \sigma_b T_{sw}^4 && : \text{壁面からの放射熱量密度 (w/m}^2\text{)} \\ q_{re} &= \phi_2 \varepsilon_2 \sigma_b T_{se}^4 && : \text{壁面両端部周辺からの放射熱量密度 (w/m}^2\text{)} \\ q_{rf} &= \phi_3 \varepsilon_3 \sigma_b T_{sf}^4 && : \text{地表面からの放射熱量密度 (w/m}^2\text{)} \\ q_{ae} &= \phi_4 \varepsilon_4 \sigma_b T_a^4 (a + b \sqrt{f}) && : \text{大気放射熱量密度 (Brunt の式) }^{注2), 注3)} \text{ (w/m}^2\text{)} \\ \varepsilon &&& : \text{長波長放射率} \\ \phi_1 &&& : \text{放射収支計受感部の壁面に対する形態係数} \\ \phi_2 &&& : \text{受感部の壁面両端部周辺に対する形態係数} \\ \phi_3 &&& : \text{受感部の壁面周辺地表面に対する形態係数} \\ \phi_4 &&& : \text{受感部の壁面上方天空に対する形態係数} \end{aligned}$$

$q_{rw} = \phi_1 \varepsilon_1 \sigma_b T_{sw}^4$ の T_{sw} は、熱画像における放射収支計の平行投影面部分の壁面温度 θ_{swp} を周囲表面温度から推定、補正した壁面平均温度 (θ_{sw}) である。

壁面各部位の熱伝達率を求めるに当たり、1.1 m × 1.1 m の壁面を 10 cm 平方の 121 (11 × 11) の部位に区画した。壁面各部位の伝達熱流量密度 q_{cx} , 熱伝達率 h_{cx} の算出に当たっては、壁面への放射量 ($q_s + q_a + q_e$) は壁面各部位に一樣に入射するものとし、放射収支計の日影部分の表面温度 θ_{sws} を補正し、121部位の各平均表面温度 θ_{swx} , 各放射熱量密度 ($q_{rwx} = \varepsilon_1 \sigma_b T_{swx}^4$) を求め、次式より h_{cx} を算出する。

$$h_{cx} = (q_s + q_a + q_e - q_{rwx} - q_{\lambda x}) / (\theta_{swx} - \theta_a) \quad (5)$$

なお、伝達熱流量密度 $\{q_{\lambda} = \lambda(\theta_1 - \theta_{10})/d\}$ は壁面中央の値を用い、各部位とも同一とする。

建築物壁面 (SAT 計) 模型は、押出法ポリスチレンフォーム (厚さ: $d = 0.1$ m, 熱伝達率: $\lambda = 0.037$ W/m·K) 製、その外表面は艶消し黒色塗装仕上げ ($\varepsilon_1 = 0.97$) とし、各面中央部には内部温度測定用熱電対を埋設している。また、壁面両端部周辺の ε_2 は 0.9, 黒色ネット (地表面) の ε_3 は 0.95 とする。

3. 実験結果とその検討

本報では、データの中から風向・風速が比較的安定し、図3のように、①主風向流が測定対象壁面に対し正の小さい角度で当たる正圧面の場合 (実験 No. 1), ②主風向流が測定

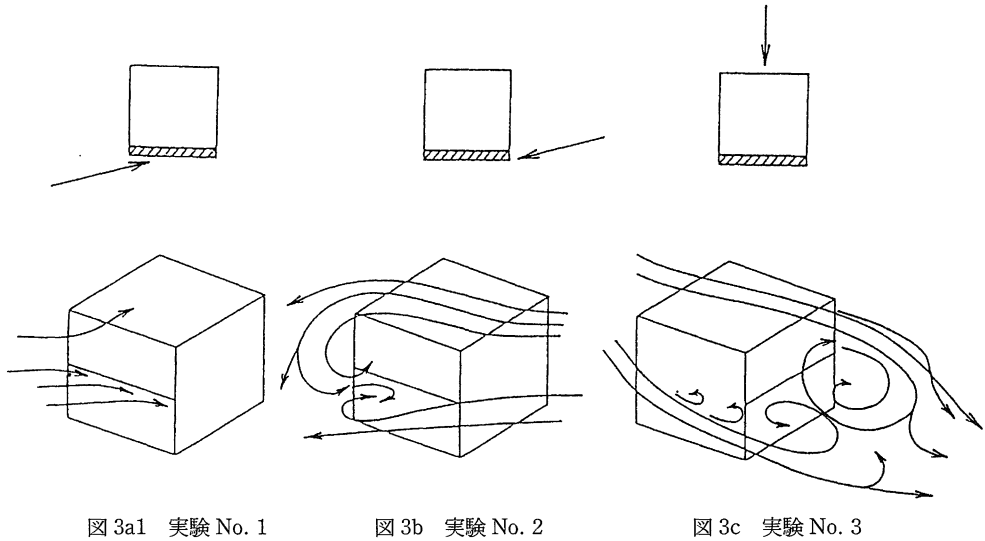


図 3a1 実験 No. 1

図 3b 実験 No. 2

図 3c 実験 No. 3

図 3 対象建築物壁面と主風向，ならびに周辺空気の流れ

面に対し負の小さい角度で側面に当たる負圧面の場合（実験 No. 2），③対象壁面が主風向流の後流面となる場合（実験 No. 3）を選び考察する．同図に上記 3 壁面に対する空気の流れを示す．

表 1 に実験 No. 1, No. 2, No. 3 の実験時の概要と測定結果の一部を，図 4 に同実験時前後 30 分間の風速，気温，SAT 計内部温度，放射収支量特性を示す．

各実験における風速 $V_{2.1}$ ，および $V_{0.6}$ は，実験 No. 1 では 1～2.5 m/s，1～2 m/s，No. 2 では両者とも 0.6～2 m/s，No. 3 では 0.6～2.8 m/s，0.9～2.3 m/s である．気温は， $H=0.6$ m と $H=1.6$ m における差はほとんど見られず，実験 No. 1：18.1℃，実験 No. 2：19.2℃，実験 No. 3：18.8℃である．SAT 計中央内部に埋設した熱電対の内，表面から 1 mm，10 mm の内部温度 (θ_1, θ_{10}) は，図 4 に示すように，10 mm では比較的安定しているが，1 mm における変化は大きい．そのため，表面からの距離 1, 10, 20 mm における内部温度変化の近似曲線を描き，($\theta_{10}-\theta_{20}$) の変化を参考に ($\theta_1-\theta_{10}$) を求め伝導熱流量密度を算出する．快晴時に観測を行ったが，薄雲の影響を受け放射収支量に多少変化が見られる．

写真 1 は測定対象壁面の熱画像で，その熱画像には放射収支計とその影の両者が写っている．放射収支計の平行投影面における壁面温度 T_{swp} は放射収支計に遮蔽され測定されていない．従って(5)式の $q_{rwx} = \phi_1 \varepsilon_1 \sigma_b T_{swx}^4$ の算出に当っては， T_{swx} は，2.3 で述べた方法により放射収支計の投影面周囲の壁面温度分布を基に補正した値を採用し，また，壁面の熱伝達率の算出に当たっては，放射収支計の影部分の壁面温度も補正し，壁面温度，熱伝達率分布を求めている．

表1 各実験時の概要と平均熱伝達率

実験 No.		実験 No. 1	実験 No. 2	実験 No. 3
測定日時		11月13日 14時56分	11月14日 12時50分	11月13日 11時51分
測定対象壁面		西壁面	南壁面	南壁面
風向		北北西	北北東	北
風速 (m/s)	H=2.1 m	2.0	1.1	1.7
	H=0.6 m	1.5	1.2	1.4
気温 (°C)	H=1.5 m	18.3	19.0	18.6
	H=0.6 m	18.1	19.2	18.8
壁面平均表面温度(°C)		53.6	66.5	70.9
放射収支量(W/m ²)		474.7	512.5	571.4
平均伝導熱流量密度(W/m ²)		474.7	512.5	571.4
平均伝導熱流量密度(W/m ²)		444.3	474.6	528.3
平均熱伝達率(W/m ²)		12.5	10.0	10.1

3.1 建築物模型壁面の温度分布

写真1, 図5に実験 No. 1, No. 2, No. 3の測定対象壁面の温度分布を示す. 図5は壁面を10 cm 平方に区画した壁面各部位の平均温度を基に等温線を描いたものである.

3.1a 実験 No. 1 (図5a, 写真1a)

写真, 図は, 左斜め前方から風が当たる場合の壁面温度分布である. 左上方から下方にかけて低温部があり, 紺, 青, 緑の縞模様で温度差のある部分が確認できる. それより風下では順次温度が上昇している. これは, 風上側先端より温度境界層が発達して風上で最低温度をとり, 風下に行くに従い温度境界層が厚くなり順次高温になることを示している. 壁面中央部と風上側では約10°Cの温度差がみられる.

3.1b 実験 No. 2 (図5b, 写真1b)

一般風速は実験 No. 1 に比べ小さいが, 測定面が負圧となるため, 風上側の壁面, 屋根面で剥離した気流が風下に回り込んで壁面に当たる部分を低温にする. その傾向は下方ほど強く表れている. 表面温度は実験 No. 1 より高いが, 風下の端部は中央部より約10°C低い.

3.1c 実験 No. 3 (図5c, 写真1c)

後流の負圧面となる実験 No. 3の気流は, 図3cのように建築物風上側両壁面, 屋根面の負圧域のため剥離し, 両側面からの横渦流, 屋根面上方からの縦渦流が大きくふくらみ測定対象面に向かって流れる. 縦渦流は対象壁面下部に衝突した後上方に流れ下部温度を低下させ, 両端に生じた横渦流は互いの干渉と縦渦流の影響を受け壁面両端部下方に衝突する. その結果対象壁面上方に赤色の高温部が生じ, 両端において下方ほど低温になる傾向がみられ

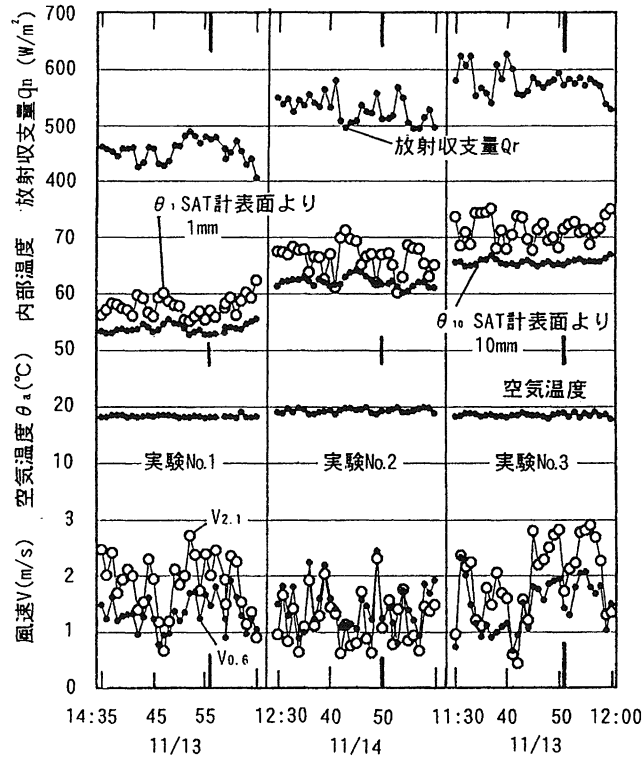


図4 空気温度，SAT 内部温度，風速，放射収支量特性

る。この場合も中央部と両端部では約10°Cの温度差が生じている。

3.2 壁面各部位の伝達熱流量密度特性

図6は実験 No. 1, No. 2, No. 3 の測定対象面における伝達熱流量密度分布を示したものである。伝達熱流量密度は、実験 No. 1, No. 2, No. 3 とともに表面温度と同様な分布を示す。これは壁面に入射する放射量が同一で、かつ伝導熱流量密度(表1)が小さいためと考える。

3.3 壁面各部位の熱伝達率

図7に各面の熱伝達率分布特性を示す。壁面の熱伝達率は、実験 No. 1, No. 2, No. 3 とともに表面温度と同様な分布となる。

3.3a 実験 No. 1 (図7a)

実験 No. 1 の壁面は気流が斜めに当たる正圧となり、熱伝達率は、図のように風上側の上部で最大値 21 W/m²·K を示す。これは風上側の気流が上方にも流れるためと考えられる。熱伝達率は、風下に行くに従い急激に減少するが、中央部では 11~12 W/m²·K、風下側で

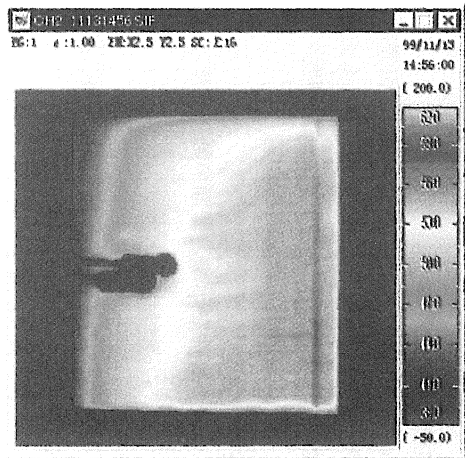
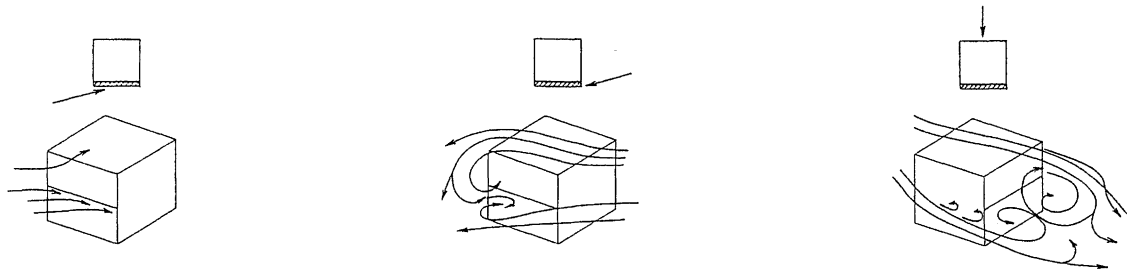


写真 1a 実験 No. 1

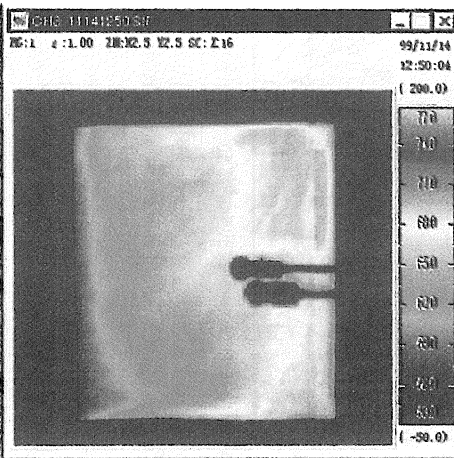


写真 1b 実験 No. 2

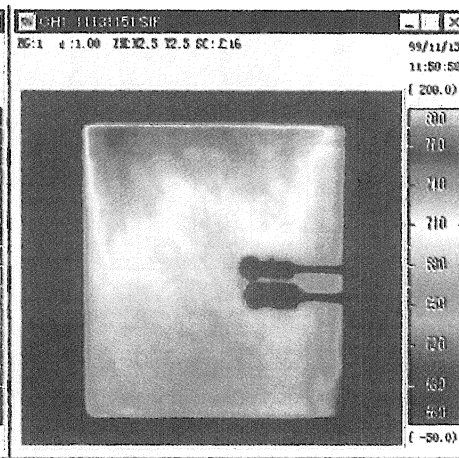


写真 1c 実験 No. 3

写真 1 建築物模型壁面の熱画像

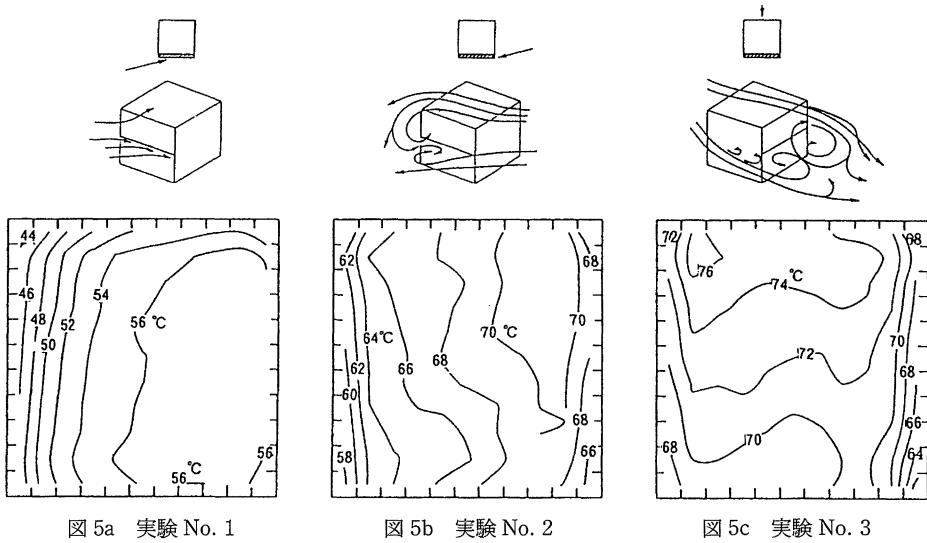


図5 建築物模型壁面の表面温度特性

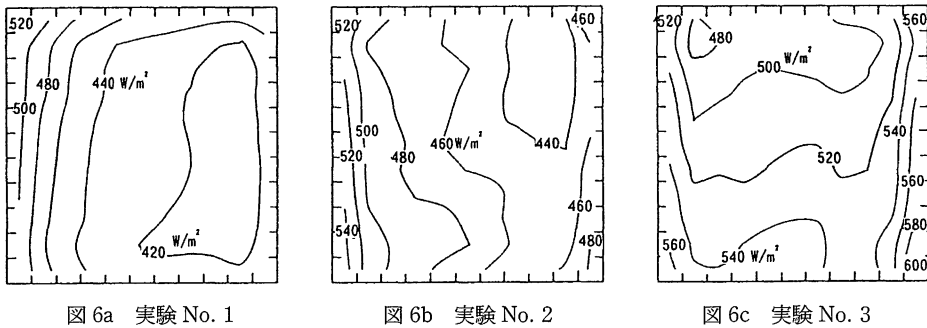


図6 建築物模型壁面の対流熱流量密度分布特性

はこれより約 $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 小さくなる。この現象は平板の平行気流の場合にもみられる。

3.3b 実験 No. 2 (図 7b)

実験 No. 2 は、実験 No. 1 の主風向流の角度が負の場合で、熱伝達率は、3.1b の温度分布と同様、気流が風下側に回り込み壁面に衝突すると考えられる下方部分で最大となり、負圧域の風上側に行くに従い減少する傾向を示す。中央部の熱伝達率は $9 \sim 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ で、主風流が直接当たる実験 No. 1 の場合に比べ約 $2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 小さい。

3.3c 実験 No. 3 (図 7c)

熱伝達率は壁面の両端で最大値をとる。これは、3.1b, 3.1c と同様に負圧域の壁面により

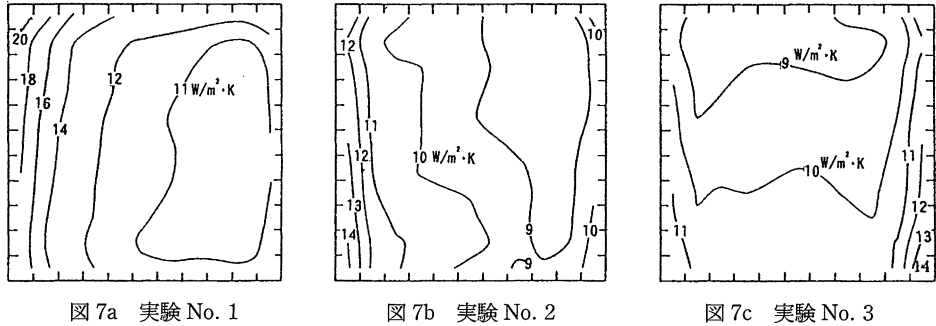


図 7a 実験 No. 1

図 7b 実験 No. 2

図 7c 実験 No. 3

図 7 建築物模型壁面の対流熱伝達率分布特性

壁面の左右と上部から大きな渦流が流れ込むためと考えられる。中央部の熱伝達率は、上方に行くほど小さく、実験 No. 2 と同じ $9\sim 10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ となる。

以上の結果より、この測定法により建築物各面の正圧面、負圧面の熱伝達率が求められることを示した。立方体である建築物の周囲気流は、風洞実験のような平行気流の場合は少なく、同一壁面においても風向により熱伝達率分布が変化する。

実験 No. 1 は、対象壁面に対して気流が正の小さい角度で壁面に沿って流れる場合で、熱伝達率が風上側先端で最大値を採り風下に行くに従い減少する。これは前述したように風洞実験における平行流によく似た現象といえる。今回の実験における実験 No. 2, No. 3 では、一般風は実験 No. 1 よりやや小さいが、対象壁面中央部の熱伝達率は、実験 No. 1 では $11\sim 12\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 、実験 No. 2, No. 3 では $9\sim 10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ であり、その差は小さい。実験 No. 1 の測定対象面近傍気流は、建築物自体の影響は比較的小さく、一般風の影響が大きい気流と考えられ、熱伝達率は一般風速の一次式として表示されることが多い。一方、実験 No. 2, No. 3 では、負圧域の気流が熱伝達率の増減に影響するため、一般風速に対する熱伝達率の増加割合は実験 No. 1 より小さくなると考えられる。

4. 建築物壁面の熱伝達率測定への適用

この測定法は、複数の SAT 計（板のみ）と基準 SAT 計の表面温度を放射温度計により同一熱画像に収録し、同時に放射量、SAT 計内部の温度、気温、風速などを測定して建築物壁面各部位の熱伝達率を求める方法である。その際下記の条件を満たす必要がある。

- 1) 測定は快晴時に行い、壁面への放射量は測定対象面各部位とも同一であると仮定する。
- 2) 反射の影響を極力小さくするため、測定対象面は出来る限り放射率の高い表面仕上げとする。

3) 放射温度計の焦点を確実に合わせ、放射温度計の視野角内に測定対象面を確保するため、測定対象面の形状は正方形とする。正方形以外の場合には、建築物周辺が背景雑音にならないように測定対象建築物の立地環境の影響を小さくするよう配慮する。

4) 基準 SAT 計は対象建築壁面中央部の代表点に設置する。

5) SAT 計の伝導熱流量密度を求めるため、基準 SAT 計、またはそれに代わる SAT 計内部に熱電対を埋設し、壁面近傍の内部温度勾配を求める。

6) 各 SAT 計の伝導熱流量密度は放射量に比べ小さいので、各壁面近傍の内部温度勾配は、基準 SAT 計の内部温度勾配と同一であると仮定する。

7) 独立した小型建築物（1～2 階建）の壁面における実験でこの測定法の妥当性を確認した後、放射率が比較的大きい壁面において SAT 計を設置した場合の背景雑音、反射光の影響について検討する。適切な壁面を見つめることが出来れば、ガラス面に SAT 計を設置し壁面各部位の熱伝達率を測定することが可能になる。

この測定法は、測定対象壁面に設置した多くの SAT 計（板のみ）と基準 SAT 計の表面温度を放射温度計により同時測定し熱伝達率を求める方法であり、測定対象建築物の形状などの選択が重要である。

今回は測定機器の都合上放射収支計を用いたが、同時に有効放射計の測定値が得られれば、測定精度を上げることが出来ると考える。

5. お わ り に

本報では、自然風下における独立した建築物壁面各部位の熱伝達率を求めるため、SAT 計化した小型の建築物模型を作製し、放射収支計、放射温度計などを用い、SAT 計の放射量、伝導熱流量密度、放射収支計の放射収支量などの熱収支より熱伝達率を求める方法について実験・考察し下記のことを明らかにした。

1) この測定法は、壁面各部位における熱伝達率の測定精度はやや落ちるが、壁面全体の熱伝達率分布を求められると考える。

2) 建築物に対する風向と各面熱伝達率をパターン化できる。

3) 壁面各部位の熱伝達率の同時測定が可能である。

4) 測定対象面に気流が斜めに当たる正圧の場合の熱伝達率は、気流が風上側で上方にも流れるため、風上側上方で最大値を採り、風下になるに従い急激に減少する傾向を示す。

5) 主風流向の角度が 4) とは逆に負の場合の熱伝達率は、気流が風下側に回り込み壁面に衝突すると考えられる下部で最大値を採り、負圧域の風上側になるに従い減少する傾向を示す。建築物各面は、主風向により正圧面、負圧面と変化するため、それに伴い熱伝達率は大きく変動する。

6) 測定対象壁面が後流の負圧面の場合には、両端、上部からの大きな渦流が対象壁面温度に影響を及ぼすため、熱伝達率は壁面の下部と両端で最大値を採り、中央部では上方ほど小さくなる傾向を示す。

7) 本研究では屋外実験のため風向が限られたが、今後の建築物壁面における測定に役

立つ基礎的な資料が得られたと考える。

8) 今後はこの研究成果を踏まえ、風洞内の建築物模型、屋外における建築物模型実験、小型建築物実験を通して大型建築物壁面に適用できる熱伝達率を提案する方向に研究を進める必要がある。風向と建築物壁面熱伝達率との関係を明らかにできれば、建築壁面に小型の熱流計を設置して得られた諸家の熱伝達率が整理できると考える。

謝辞

実験に当たり、超音波風向・風速計の使用等について古江嘉弘福山大学教授にご配慮いただいた。この研究の一部は平成10, 11年度文部省科学研究費補助金〔基盤研究C(2)〕によった。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤 鑑, 後藤 滋, 関根 孝, 関根 毅, 岡 樹生, 吉沢 晋, 前川甲陽, 木村建一, 伊藤直明, 小原俊平, 片山忠久: 環境工学における市街地風の変動とその影響に関する研究, その7, 8 (自然風による建築物外表面の対流熱伝達率に関する研究・その1, その2) 日本建築学会論文報告集, 第191号, pp. 27~36, 37~44, 1972.3
- 2) 斎藤平蔵, 松尾 陽, 樋口誠六, 池沢宏和: 外壁面での輻射授受と表面熱伝達率について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 241~242 1968.10
- 3) 浦野良美, 渡辺俊行: 水平屋根スラブの外表面顕熱収支測定と伝熱応答解析, 日本建築学会論文報告集, 第325号, pp. 93~103. 1983.3
- 4) 小林定教, 黒谷靖雄: 夏期の外表面対流熱伝達率に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第465 pp. 11~17, 1994.11
- 5) 渡辺俊行: 室温変動係の理論構成と動的挙動に関する研究, 昭和57年6月
- 6) 市街地風研究会編: 市街地風の研究, オーム社
- 7) 渡辺要: 建築計画原論II, 丸善

注1) SAT計は1960年斎藤平蔵博士の考案したもので、通常は艶消し黒色塗装をした銅板製で、裏面を十分保温したものである。

空気温度に放射相当温度を加えたものをSAT (Sol-air temperature) という。

$$\text{SAT} = \theta_a + (aJ + \varepsilon J_n) / h_o \text{ (}^\circ\text{C)}$$

ここに θ_a : 空気温度 ($^\circ\text{C}$)

h_o : 壁面の総合熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

J : 壁面に入射する日射量 (W/m^2)

J_n : 壁面の夜間(実効)放射量 (W/m^2)

a : 壁面の日射放射率

ε : 壁面の長波長放射率

注2) Bruntは、地表面のある1点が天空から受ける放射量は大気中の水蒸気含有量に大きく関係することを見だし、下記の関係式を提案した。

$$\text{大気放射熱量密度} = \sigma_0 T_a^4 (0.526 + 0.076 \sqrt{f}) \text{ (w}/\text{m}^2)$$

f : 水蒸気圧 (mmHg)

注3) f については、松江地方気象台の気温、相対湿度、気圧を採用した。