

屋上濡れ面の熱伝達率に関する実験的研究

小林 定教*, 萩原 文雄**

Experimental Study on Heat Transfer Coefficient of Wet Rooftop Surface

Sadanori KOBAYASHI

Natural Resources Process Engineering

Fumio HAGIWARA

Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuyama Univ.

(Received December 31, 1996)

Abstract

Heat transfer coefficient on the building external surface is an important constant indispensable for numerical calculations of building heat load, room temperature changes, condensation, etc. There is a problem in adopting the value of heat transfer coefficient in wind tunnel experiments or in field experiments in which a small heat flow panel is attached to the building wall surface as the surface heat transfer coefficient for the entire building.

Consequently, it is necessary to newly develop and expand the measurement method for the architectural heat transfer coefficient.

For this purpose, the authors developed a method of measuring the convective heat flux density in the field, using a SAT meter and pyrriadiometer.

With this research, the convective heat transfer flux density on the rooftop surface in which radiation cooling at nighttime caused surface condensation was found from the conduction heat flow density of the SAT meter, radiation balance amount and condensation weight variations.

In this report, careful consideration was given to the convective heat transfer coefficient on the wet surface and heat transfer coefficient on the wet surface, including the latent heat amount, based on the results thus found.

1. はじめに

建築外表面の熱伝達率は、建築物の熱負荷、室温変化、結露などの数値計算において欠くことの出来ない定数である。外表面熱伝達率は、凹凸面を有する建築壁面の熱流量密度、表面温度、ならびに周辺気流速度の測定が困難なため、風洞実験^{1,2)}において平滑な小試料板を対象として測定した値、および現場測定^{3,4)}において建築壁面に小型の熱流板を設置して

* 材料プロセス工学科

** 福山大学工学部建築学科

求めた値を基に提案されたものである。この値を、建築物全体の表面熱伝達率として採用することには問題がある。また、断面形状が円、正方形などの管外表面の熱伝達率は、伝熱工学分野において十分なデータが蓄積されているが⁵⁾、その場合の気流特性は建物周辺の気流特性とは異なるため、建築外表面にその値をそのまま用いることは出来ない。従って、新たに建築学的な熱伝達率の測定方法を開発・発展していく必要がある。筆者らは凹凸の少ない屋上面を対象に熱伝達率の現場測定法を開発し、夏期の日射を受けた面の熱伝達率を測定し、上記の設計用熱伝達率より小さい値を提案した⁶⁾。

本研究では、夜間の放射冷却により表面結露を生じた屋上面における対流伝達熱流量密度を SAT 計の伝導熱流量密度、放射収支量ならびに結露重量変化量より求めた。本報ではその結果に基づき、対流熱伝達率、ならびに潜熱量を含んだ濡れ面熱伝達率について考察する。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概要を図1、写真1に示す。

1) 対流熱伝達率 (h_c)

夜間において SAT^{注1)} 計表面に結露が生じた場合の熱収支式は(1)となる。

$$\varepsilon\sigma_b T_s^4 = \varepsilon R_o + h_c (\theta_a - \theta_s) + AH + (\lambda/d) (\theta_{si} - \theta_s) \quad (1)$$

上式の AH (潜熱量) を $AH = DW \cdot L$ とすると、対流熱伝達率 h_c は下式となる

$$h_c = \{\varepsilon R_o - \varepsilon\sigma_b T_s^4 + (\lambda/d) (\theta_{si} - \theta_s) + DW \cdot L\} / (\theta_s - \theta_a) \quad (2)$$

2) 濡れ面熱伝達率 (h_{cL})

(1)式において、SAT 計放射収支量 ($\varepsilon R_o - \varepsilon\sigma_b T_s^4$) と伝導熱流量密度の和は、対流による移動熱量と水分移動に伴う移動熱量の和に等しい。

ここで $(\varepsilon R_o - \varepsilon\sigma_b T_s^4) + (\lambda/d) (\theta_{si} - \theta_s)$ を $h_{cL} (\theta_s - \theta_a)$ で表すことが出来る 것으로、 h_{cL} (濡れ面熱伝達率とする) は(3)式となる。

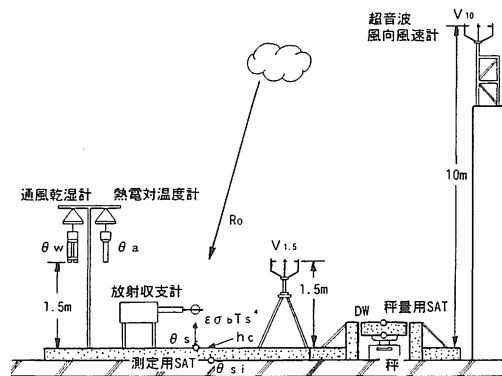


図1 実験装置

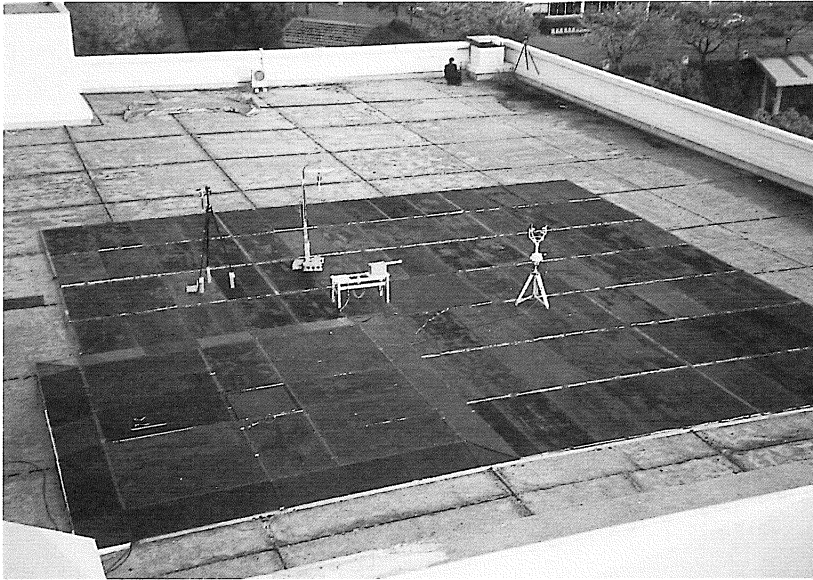


写真1 実験装置

$$h_{cL} = \{ \varepsilon R_o - \varepsilon \sigma_b T_s^4 + (\lambda/d) (\theta_{si} - \theta_s) \} / (\theta_s - \theta_a) \quad (3)$$

記号

- ε : 長波長放射率
- R_o : 大気放射量と周囲物体からの長波長放射量 (W/m^2)
- $\varepsilon \sigma_b T_s^4$: SAT 計からの放射量 (W/m^2)
- AH : 潜熱量 (W/m^2)
- θ_a : 空気温度 ($^{\circ}C$)
- θ_w : 湿球温度 ($^{\circ}C$)
- θ_s : SAT 計の表面温度 ($^{\circ}C$)
- θ_{si} : SAT 計の裏面温度 ($^{\circ}C$)
- λ : SAT 計の熱伝導率 ($W/m \cdot K$)
- d : SAT 計の厚さ (m)
- h_c : 対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- h_{cL} : 濡れ面熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- L : 潜熱 (J/kg)
- DW : 結露重量 ($kg/m^2 \cdot h$)

実験装置は、図1のように、SAT 計、放射収支計、結露重量測定用天秤、超音波風向風速計、アスマン通風乾湿計、通風型熱電対温度計より構成されている。

実験は RC 造3階建のパラペット(高さ 1.2 m) のある屋上面 (45 m×24 m, 北東, 北

西隅に階段室) 中央部に、熱伝達率測定部 (1.8 m×1.8 m, 厚さ 5 cm) を有する SAT 計 (12.9 m×13.1 m, 以下測定用 SAT 計とする), 結露重量測定部 (0.9 m×0.9 m, 厚さ 5 cm) を有する SAT 計 (寸法 4.55 m×4.55 m, 以下秤量用 SAT 計とする) の 2 種類の SAT 計を設置して行った。

秤量用 SAT 計の表面は、秤を設置することにより測定用 SAT 計より 10 cm 高くなるため、周囲にはスロープを付け気流の流れに配慮した。

夜間における放射収支量 Q ($=\varepsilon R_o - \varepsilon \sigma_b T_s^4$) は放射収支計 (CN-40 英弘精機) で、各温度は熱電対 (タイプ T: 0.32 mmφ) で、それぞれハイブリットレコーダにより 1 分毎に測定した。湿球温度 θ_w は、アスマン通風乾湿計により 10 分毎に、結露重量は電子天秤 (FX-3000, 最小目盛り 0.01 g) により 1 分毎に測定した。放射収支計の受感部は、SAT 計表面から 70 cm の高さに設置した。測定用 SAT 計は、厚さ 5 cm の発砲ポリスチレン板 (1.8 m×1.8 m) 製で、その中央部に埋設された 5 本の熱電対により内部温度分布を求めた。測定用・秤量用 SAT 計の表面は、ともに艶消しの黒色塗装仕上げとした。風速は、屋上面 1.5 m の屋上面近傍風速 ($V_{1.5}$) と、屋上面上 10 m の風速 {以下一般風速 (V_{10}) とする} を、それぞれ超音波風速計 (SA-200型, TJ-51型プローブ: 海上電機) で 1 分間の平均値を 1 分毎に測定した。

測定日 (17:00~5:00) の天候は、17時~21時は晴れ、それ以降は曇りであった。測定は、SAT 計表面温度が露天温度以下になり、内部温度分布がほぼ直線になったことを確認後開始した。

3. 実験結果とその検討

3.1 屋上面の風速について

図 2 は、夜間 (17:00~5:00) における熱伝達率測定時の一般風速 (V_{10}) と屋上面近傍風速 ($V_{1.5}$) の関係を示したものである。今回の実験中の風速は $V_{10}=2.3$ m/s 以下, $V_{1.5}=2.0$ m/s 以下の範囲に集中し、一般風速 V_{10} が 1.5 m/s 以下の範囲ではパラベットなどの影響を受け屋上面近傍風 $V_{1.5}$ の方がやや小さくなっている。

3.2 SAT 計表裏面温度、気温、湿球温度の時間的变化

図 3 は、風速の時間的变化が大きい 19:00~21:00 の放射収支量 Q , 測定用 SAT 計表 (裏) 面温度 θ_s (θ_{si}), 気温 θ_a , 湿球温度 θ_w の時間的变化を示したものである。20 時までは $\theta_{si} < \theta_a$ となるが、それ以降は $\theta_{si} > \theta_a > \theta_w > \theta_s$ となり、SAT 計表面の放射冷却により θ_s が最も低い温度となる。気温 θ_a と SAT 計裏面温度 θ_{si} はほぼ一定の値を示すが、表面温度 θ_s は $\theta_a > \theta_s$ のため気流があると対流熱伝達により熱が供給されて表面温度が上昇し、結果的に放射収支量に影響を及ぼす。湿球温度は 9.5~10.5°C であった。なお、秤量用 SAT 計の表裏面温度は、秤自身が発熱源となり、測定用 SAT 計に比べ表面温度で 0.5~1.3°C, 裏面温度では 5.0~7.8°C 高い値を示した。本報では秤量用 SAT 計の高温範囲が局所的なものと考え、以下測定用 SAT 計による測定結果について検討する。

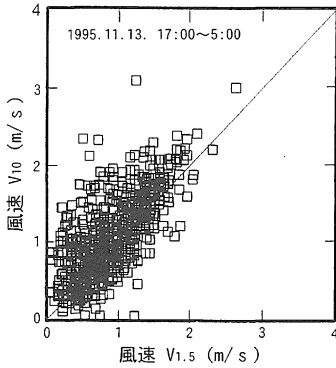


図2 屋上面近傍風速 $V_{1.5}$ と一般風速 V_{10}

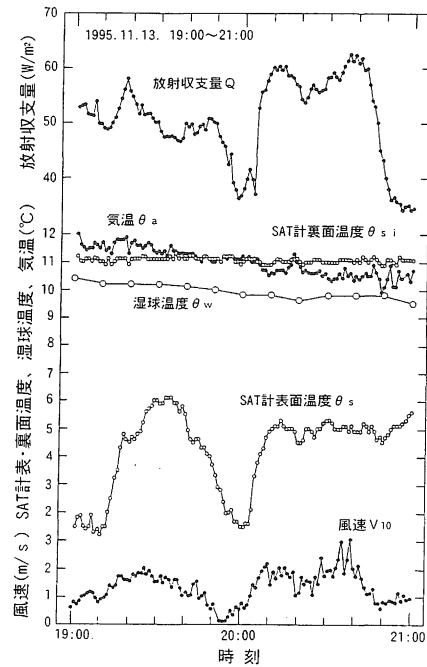


図3 夜間における SAT 計表面温度、気温、湿球温度、放射収支量の時間的変化特性

3.3 放射収支量、伝達・伝導熱流量密度の時間的変化

図4は結露重量1分毎の変化を示す。SAT計の作製に際しては、結露の秤量が風の影響を受けまいよう留意した。1分毎の結露重量は、測定期間全体の変動傾向を緩やかな曲線で描き、それより各時刻における結露重量変化量を求めた。

図5は、19:00~21:00における放射収支量 Q 、SAT計裏面から表面への伝導熱流量密度 Q_λ 、下向き対流伝達熱流量密度 Q_h 、濡れ面伝達熱流量密度 Q_{hL} の10分間平均の時間的変化を示す。伝導熱流量密度 $(Q_\lambda)_{10}$ は、風速の変化に伴い変動するものの、SAT計の熱伝導率 ($\lambda=0.038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) が小さいため、 $4\sim 5 \text{ W/m}^2$ で安定している。従って濡れ面伝達熱流量密度 $(Q_{hL})_{10} = |(Q)_{10} - (Q_\lambda)_{10}|$ は、風速の変化とともに放射収支量 Q と同様な時間的変化をとる。前述したように、風速が速くなると、対流伝達熱流量密度 $(Q_h)_{10}$ が大きくなり表面温度があがるため、放射収支量 $(Q)_{10}$ も同様な時間的変化をとる。

3.4 熱伝達率の時間的変化

図6は、図5の結果から求めた熱伝達率 $(h_c)_{10}$ 、 $(h_{cL})_{10}$ の時間的変化を風速($V_{1.5}$ 、 V_{10})とともに示したものである。対流熱伝達率 h_c は10分間平均値で示した。風速の範囲は $0\sim 3 \text{ m/s}$ で夜間としては比較的变化が大きい。

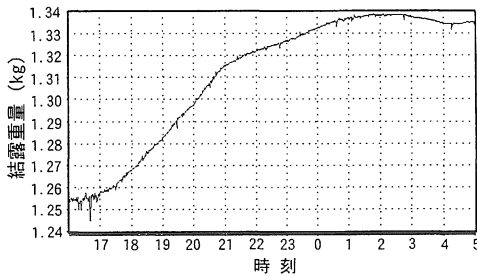


図4 SAT 計表結露重量の時間的変化

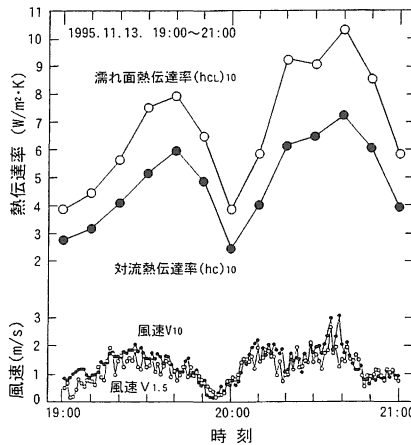
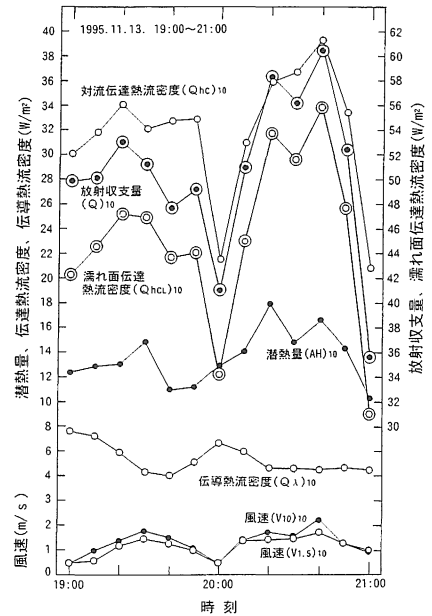
図6 風速 ($V_{1.5}$, V_{10}) と対流熱伝達率濡れ面熱伝達率の時間的変化

図5 夜間における放射収支量, 対流伝達熱流密度, 濡れ面熱伝達率, 伝達熱流密度特性

対流熱伝達率 (h_c)₁₀, 濡れ面熱伝達率 (h_{cL})₁₀ は放射収支量 Q , 風速 V_{10} の変化と同様な形をとりながら変化する。 $(h_c)_{10}$ は約 $2.5 \sim 7 \text{ W/m}^2\text{K}$, $(h_{cL})_{10}$ は約 $4 \sim 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ である。

3.5 熱伝達率と風速の関係

1) 対流熱伝達率 (h_c)

図 7a, 図 7b は, 17:00~5:00における10分間平均の対流熱伝達率 (h_c)₁₀ と一般風速 (V_{10})₁₀, 屋上面近傍風速 ($V_{1.5}$)₁₀ の関係を示したものである。両者とも風速の増大に伴い漸増する傾向がみられる。同図に風速と熱伝達率の実験式を記す。

昼間と異なり夜間の場合は, 放射冷却により気温と表面温度との差 ($\theta_a - \theta_s$) が $1.5 \sim 12.3^\circ\text{C}$ で下向き伝達熱流となる。 $V_{10} = 0 \sim 2 \text{ m/s}$ の熱伝達率 (h_c)₁₀ は $2 \sim 7 \text{ W/m}^2\text{K}$ と小さい。今回の測定では, 気流が自然対流と強制対流の共存の状態にあることが多く, 小さな h_c 値となったと考えられる。

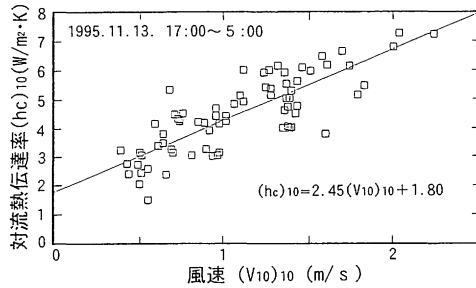


図 7a 風速 $(V_{10})_{10}$ と対流熱伝達率 $(hc)_{10}$ の関係

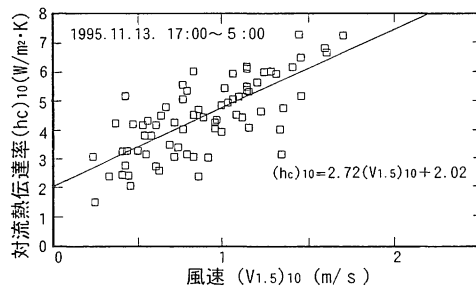


図 7b 風速 $(V_{1.5})_{10}$ と対流熱伝達率 $(hc)_{10}$ の関係

2) 濡れ面熱伝達率 (h_{cL})

図 8a (図 8b) は、1 分毎に測定した濡れ面熱伝達率 h_{cL} と一般風速 V_{10} , $(V_{1.5})$ の関係を示したものである。熱伝達率 h_{cL} は、2 m/s までは h_c に比べ増加割合は大きい。前述したように、2 m/s 以上のデータが少ないため、風速が大きい場合については更に検討が必要である。同図に10分間平均の濡れ面熱伝達率 $(h_{cL})_{10}$ と一般風速 $(V_{10})_{10}$, ならびに $(V_{1.5})_{10}$ に関する実験式を併記した。夜間における h_{cL} は、雲量により測定面の放射収支量が変化するため、その表示方法については更に検討を要する。

3.6 既往の研究結果との比較

既往の熱伝達率に関する風洞・屋外実験の研究結果と比較するために、図 9 に jürges, 岡・佐藤・木村⁷⁾, 西藤²⁾, 宮野・小林⁸⁾ の風洞実験結果, 浦野・渡辺⁴⁾, 小林・黒谷⁶⁾ の屋外実験結果を併記した。なお、試料板・寸法ならびに熱伝達率は下記の通りである。

- ①岡 樹生 (30 cm×30 cm) 銅板⁷⁾ 面平均 h_c

$$h_c = 6.8 + 4.4 V \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

- ②jürges (50 cm×50 cm) 銅板¹⁾ 面平均 h_c

$$h_c = 5.6 + 3.9 V \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

- ③西藤一郎 (100 cm×100 cm) ガラス板²⁾ 面平均 h_c

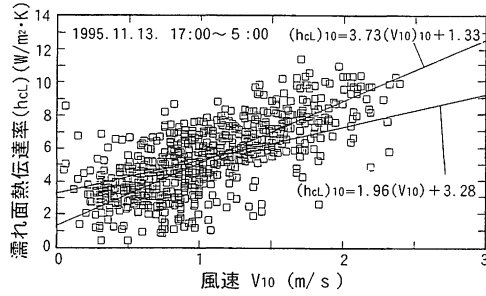


図 8a 風速 (V_{10}) と濡れ面熱伝達率 (h_{CL}) の関係

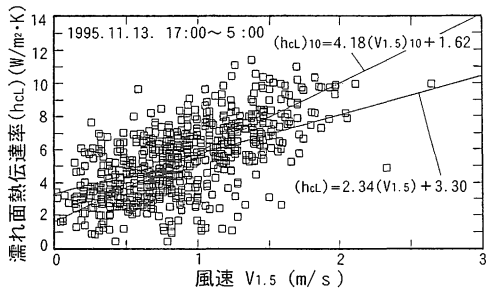


図 8b 風速 ($V_{1.5}$) と濡れ面熱伝達率 (h_{CL})₁₀ の関係

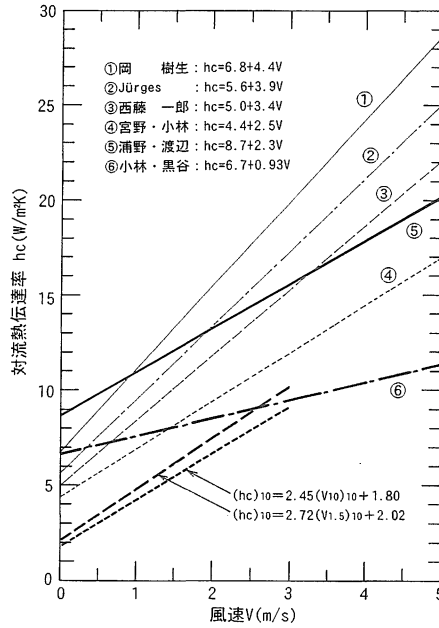


図 9 熱伝達率に関する既往の実験結果との比較

$$h_c = 5.0 + 3.4 V \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

④宮野・小林 (50cm×180cm) ネオプレン⁸⁾ 局所 h_c

$$h_c = 4.4 + 2.5 V \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

(試料板先端から 1.7 m の位置における局所熱伝達率)

⑤浦野・渡辺 (4.6 m×10.9 m) モルタル面⁴⁾

$$h_c = 8.7 + 2.3 V \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

⑥小林・黒谷 (12.9m×13.1m) 発砲ポリスチレン面⁶⁾

$$h_c = 6.7 + 0.93 V_{10} \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

⑤, ⑥は水平屋根スラブ面における現場測定

従来の風洞実験より求められた実験式においては, 試料板寸法が大きくなるほど風速に対する熱伝達率の増加率は小さくなっている。これは, 実験をする際試料板を加熱するため, 熱伝達率が試料板風上側先端において最大値をとり, 先端から 20 cm までの範囲で急激に減少し, それ以遠では減少傾向が緩慢となるため⁸⁾, 試料板寸法が小さいほどその影響を大きく受け, 風速に対する熱伝達率の増加割合が大きくなったものと考えられる。現場測定においても測定面(熱流計)を加熱する実験では, 上記の影響があると考えられる。⑤においては熱流計を用いているがその面を加熱せず測定しているため, 測定面の温度に対する影響は少なく, 風速に対する熱伝達率の増加割合も小さい。

本研究で求めた実験式の風速に対する対流熱伝達率 h_c の増加割合は, ⑥の日射を受けた同寸法の h_c 値⁶⁾ よりも大きい。これは両実験とも低風速時での測定のため, 前者の結露面では下向き熱流・自然対流時に, 後者の日射を受けた面では上向き熱流・自然対流時に近い状態になるため熱伝達率値は前者より大きくなっている。従って風速が大きくなるに従い両者の値は近付くものと推定される。

4. ま と め

建築物の外壁面は, 夜間には放射冷却の影響を受け屋外気温より低くなり結露を生じることがある。この場合の対流熱伝達率を明らかにするため, SAT 計と放射収支計による測定法とその熱伝達率, および潜熱量を含んだ濡れ面熱伝達率について考察した。その結果以下に示すことが明らかとなった。

(1) SAT計と放射収支計による対流熱伝達率の測定方法は, 結露が無い場合は無論, ある場合も結露重量変化量を測定すれば使用できる。

また, 表面温度測定に放射温度計を用いるなど, 測定方法を一部改良すれば, この方法は建築壁面の測定にも応用できると考える。

(2) 夜間の低風時 (0~2 m/s) における屋上面下向き熱流時の対流熱伝達率 h_c は 2~7 W/m²K で, 日射を受けた上向き熱流時の 6.7~8.3 W/m²K より小さい値となる。

(3) 結露面の潜熱量を含んだ濡れ面熱伝達率 h_{cL} は低風時 (0~2 m/s) において 2~10 W/m²K である。その潜熱量は雲量の変化に伴い変化する。

注1：SAT計は、斎藤平蔵博士が考案（1960年）したもので、通常は艶消し黒色塗装した金属板で、裏面を十分保温したものである。金属板の温度を測定すれば、下式の $a, \epsilon=1$ の場合の SAT を測ったことになる。

$$\text{SAT} = \theta_a + aJ/h_o + \epsilon R_o/h_o$$

SAT：相当外気温度，放射空気温度（Sol-Air Temperature）

a：短波長放射率

J：太陽放射量と地物からの反射などの短波長放射量（ W/m^2 ）

h_o ：総合熱伝達率（ $h_c + h_r$ ）（ $\text{W/m}^2\text{K}$ ）

h_r ：放射熱伝達率（ $\text{W/m}^2\text{K}$ ）

参 考 文 献

- 1) Jürges. W: Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand, Beihefte zum Gesundheitsingenieur, Beiheft 19. pp. 51, Nov. 1924
- 2) 西藤一郎：境界層及び空気層に於ける伝熱，住居の防熱について（第7報），日本建築学会論文報告集，第36号，pp. 74-81, 1947.12
- 3) 佐藤 鑑，後藤 滋，関根 孝，関根 毅，岡 樹生，吉沢 晋，前川甲陽，木村健一，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，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. 27-44, 1972.1
- 4) 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
- 5) 日本機械学会：伝熱工学資料
- 6) 小林定教，黒谷靖雄：夏期の屋上面の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号，pp. 11-17, 1994.11
- 7) 岡 樹生，佐藤 鑑，伊藤直明，木村健一：外表面熱伝達率の測定装置とその特性について，（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4），日本建築学会論文報告集，号外，pp. 521, 1967.10
- 8) 宮野秋彦，小林定教：熱伝達特性と試料板寸法，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 691-692, 1981.9
- 9) 浦野良美，渡辺俊行，林 徹夫，龍 有二：濡れ面の熱伝達率とその表現に関する考察，日本建築学会中国・九州支部研究報告，第7号，pp. 197-200, 1987.3
- 10) 小林定教，森川和祥：濡れ面の対流熱伝達率に関する実験的究，その3，日本建築学会中国・九州支部研究報告，第10号，pp. 333-336, 1996.3
- 11) 小林定教，宮野秋彦：熱伝達率の研究（突起物を有する外壁面の熱伝達率に関する風洞実験），日本建築学会論文報告集，第258号，pp. 53-62, 1977.8