

# カーテンが窓面の結露に及ぼす影響に関する研究

## 実験室実験による結露時のルイス数の検討

STUDY ON THE EFFECT OF CURTAINS ON DEW CONDENSATION ON WINDOWS  
The Lewis number during dew condensation in laboratory experiment

小早川 香\*1、小椋 大輔\*2、小南 和也\*3

### 1. はじめに

カーテンは開口部に取り付けられる補助部材として、住宅をはじめ、事務所、学校、ホテル、病院などの建物で多用されている。カーテンは、室内外からの視線の遮蔽機能（プライバシー効果）、色やデザインで部屋の印象を変えられる装飾機能、病院の診察室や複数床病室などでみられる空間の間仕切り機能、室外からの光に対する調光・遮光効果、断熱性の向上による省エネルギー効果、室内外で発生する騒音の防音・吸音効果など、さまざまな役割を担っている。

一方で、建物における深刻な問題のひとつに窓ガラス（開口部）の結露がある。建物の熱的弱点となり得る開口部の断熱性や防露性については、多くの研究例があるが、開口部の室内側付加物として取り付けられているカーテンも含めて考慮した研究例は少ない<sup>1)~4)</sup>。またカーテンを取り付けた場合の窓ガラス面の結露水量についての検討例はない。

窓ガラス表面の結露水量は、窓ガラス面積、絶対湿度差、湿気伝達率を乗じて求められる。物体表面と周辺空気との湿気伝達率は、対流熱伝達率とルイスの関係から求めた値が一般的に採用されるが、ルイスの関係の適用範囲に関しては、低風速時には成り立たないという報告<sup>5),6)</sup>や、熱伝達率の導出に疑義が残るものの結露凝縮時・蒸発時ともに成り立たないという報告<sup>7)</sup>がある。カーテンを取り付けた窓ガラスが結露していた場合、カーテンと窓ガラスの間の空間（以後、窓部と呼ぶ）の風速が1m/sに満たないとすれば、窓ガラスの結露水量を計算するためにはルイス数の特定が不可欠となる。しかし、鉛直平

行平板の自然対流に関する報告<sup>8)</sup>や、濡れ表面での対流熱伝達特性とルイスの関係についての報告<sup>5)</sup>はあるが、建築環境工学分野におけるルイスの関係について検討された例は少なく、カーテンを取り付けた窓ガラスに結露が生じた際のルイス数について検討された例はない。

そこで、本研究ではカーテンを取り付けた窓ガラスにおいて、窓部の風速および窓ガラス面に生じる結露の実態を把握するために、結露水量測定実験を行った。また、実験結果から実験時の湿気伝達率と熱伝達率を算出し、ルイス数の検討を行ったので、その結果を報告する。

### 2. ルイスの関係について

ルイス数は、熱と物質の移動速度の比を表す無次元数である。湿気移動は物質伝達の一種であることから、対流による熱と湿気の伝達に相似関係が成立する。熱移動と物質移動のアナロジーが成り立つ場合、対流熱伝達率 $\alpha$ 、対流物質伝達率 $h_M$ 、空気密度 $\rho$ 、空気の定圧比熱 $c_p$ 、熱拡散率 $a$ 、拡散係数 $D$ から、式(1)が成り立つ<sup>9)</sup>。

$$\frac{\alpha}{h_M \cdot \rho \cdot c_p} = P \left( \frac{a}{D} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (1)$$

ASHRAE<sup>9)</sup>では、 $a/D$ をルイス数( $Le$ )と定義している。ルイス数は温度変化にはほとんど影響されず、空気と水蒸気の混合体の場合は0.845となり、熱と物質移動のアナロジーが成り立つ場合は $P=1$ になるとしている。また、対流熱伝達率 $\alpha$ と対流湿気伝達率 $h_M$ の比は、一定圧力の単位体積当たりの比熱に等しいとし、式(2)で表した関係式をルイスの関係と呼んでいる。

\*1 KOBAYAKAWA Kaori : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 環境部 環境試験室

\*2 OGURA Daisuke : 京都大学大学院工学研究科 教授 博士(工学)

\*3 KOMINAMI Kazuya : (一財)日本建築総合試験所 理事 博士(工学)

$$\frac{\alpha}{h_M \cdot \rho \cdot C_P} \approx 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

またシュミット数  $Sc$  とプラントル数  $Pr$  から、ルイス数は式(3)で表される<sup>10)</sup>。

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad \dots\dots\dots (3)$$

浅野は、対流熱伝達率と湿気伝達率の比 ( $\alpha/\alpha'$ ) のいくつかの実験値<sup>11), 12)</sup> とルイス数の関係を比較しており、ルイス数は0.8~4を示している。

一方、J.L.Threlkeldによる文献<sup>13)</sup>では、同様の関係が式(4)のように導出されており、左辺をルイス数と呼んでいる。対流物質伝達率と空気密度の積を絶対湿度による湿気伝達率  $\alpha'$  とすれば、式(1)と式(4)は同様である。

$$\frac{\alpha}{\alpha' \cdot C_P} = \left( \frac{a}{D} \right)^{2/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、松本<sup>14)</sup>や銚井ら<sup>15)</sup>も、式(4)の左辺をルイス数と定義している。ルイス数は1以下で通常はルイス数=1と近似できるとし、ルイス数=1の場合をルイスの関係と呼んでいる。

以上のように、ルイス数 ( $Le$ ) の定義は分野によって異なるようだが、本論文では建築環境工学分野で用いられることの多い定義<sup>14), 15), 16)</sup>である式(5)を用いて、結露発生時の窓ガラス面のルイス数を明らかにすることとする。

$$Le = \frac{\alpha}{\alpha' \cdot C_P} \quad \dots\dots\dots (5)$$

### 3. 結露水量測定実験

#### 3.1 実験概要

実験は、個々に温湿度制御が可能な図-1に示す2室タイプの実験室(両室とも内法寸法：W2600mm、L2600mm、H3200mm)で実施した。室内-室外間の界壁に窓ガラスを想定した板ガラス(有効面積：幅720mm×高さ900mm×厚さ3mm)を設置し、界壁から100mm離れた位置にカーテンを取り付けた。

カーテンなしの条件と、ひだのないカーテン(以下、ひだなしカーテン)、ひだのあるカーテン(以下、ひだありカーテン)の2種類のカーテンとした。なお、ひだなしカーテンとひだありカーテンは表-1に示すポリエステル繊維製の同素材である。実験状況を写真-1に示す。ひだなしカーテンは幅900mm×高さ1200mmで、ひだありカーテンは幅1800mmの布地にひだを作り、幅900mmに仕上げた2倍ひだである。上部カーテンレール部分はフラットで、下部に行くほどひだが広がり、6つの山を形成している。ひだの最もカーテンに近

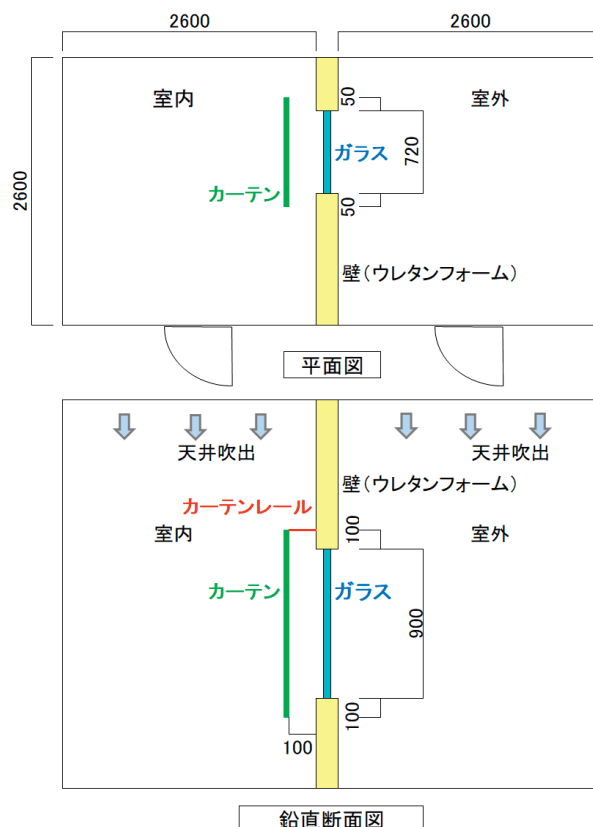


図-1 実験装置の概要(寸法単位：mm)

表-1 カーテンの材質

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| 材質    | ポリエステル繊維                                        |
| 厚さ    | 0.5mm                                           |
| 熱抵抗*1 | 0.009 m <sup>2</sup> K/W                        |
| 透湿率*2 | 1.78 × 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> ・s・Pa/ng |

\*1：JIS A 1412-2により測定した20℃時の値

\*2：JIS A 1324により測定した



(1) ひだなしカーテン



(2) ひだありカーテン

写真-1 実験状況

い位置が界壁から100mmとなるように設置した。ひだの最も遠い位置は界壁から約150mmであった。

3.2 実験条件

実験条件は、室内空気温度が20℃、室外空気温度が0℃の一定条件とした。室内側相対湿度は60％および結露が生じやすい90％の2条件とした。

3.3 測定項目と測定位置

測定項目は、室内側窓ガラス表面温度、室内外・窓部の空気温度および相対湿度、室内側窓ガラス面に生じた結露水量である。

温湿度測定位置を図-2に示す。窓部空気温湿度の測定位置は、上部、中部、下部の3箇所とした。温度はT熱電対を、相対湿度は高分子温湿度センサ（株式会社ティアンドディ製、TR-72U）を用いて、それぞれ1分間隔で測定した。

窓ガラスに生じた結露水量は、ガラス全面に表面結露が生じた状態で、定期的に紙ウエスですべての結露水を拭き取り、電子天秤（株式会社エー・アンド・デイ製、GF-6002A）で質量を測定し、拭き取り前後の紙ウエスの質量変化量を結露水量とした。拭き取り間隔は、結露水が流下しない間隔とし、室内側相対湿度60％の条件で1時間毎、90％の条件で15分毎とした。

3.4 測定結果と考察

室内側相対湿度が60％の場合の温度測定結果および絶対湿度測定結果を図-3に示す。また、1時間当たりの結露水量測定結果を表-2に示す。

図-3(1)より窓部空気温度およびガラス室内側表面温度は、カーテンなし、ひだなしカーテン、ひだありカーテンの順に高いことがわかる。カーテンを取り付けることによって空気層による断熱性が増すことから、カーテンなしよりもカーテンありの方が、温度が低くなる。また、ひだありカーテンはひだなしカーテンに比べてひだ部分に空気層を持つため熱抵抗が大きくなり、温度はカーテンの空気層も含めた断熱性能に依存していると考えられる。図-3(2)より絶対湿度はいずれのカーテン仕様でも窓部上部では室内とほぼ同様であったが、下部へ行くほど小さくなり、ひだありカーテンで最も上部と下部の差が大きくなっている。

表-2より結露水量は、カーテンの有無および仕様にかかわらず、室内側相対湿度が60％の場合よりも、90％の方が多い。また両条件とも、カーテンなしで結露水量が最も多く、ひだありカーテン、ひだなしカーテンの順で結露水量が少ない。既報<sup>17)</sup>で、窓部の風速はカーテンなしが最も小さく、ひだありカーテン、ひだなしカーテンの順で大きい結果であることから、カーテンありの結露水量は窓ガラス面近傍の通気量に依存しており、低通気量ほど多くなっていると思われる。

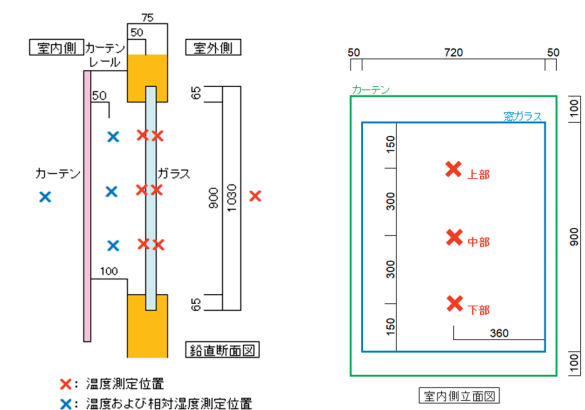
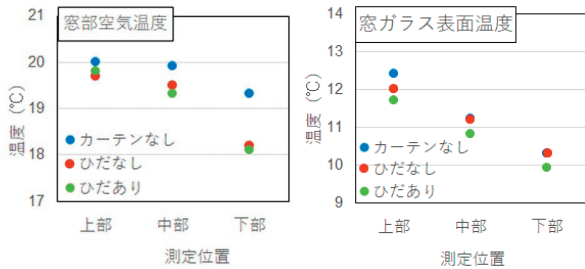
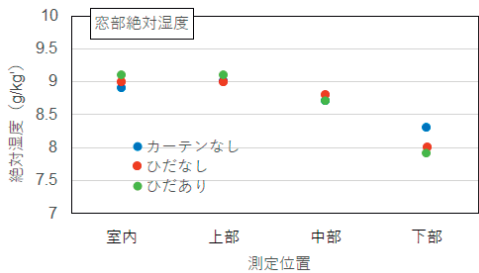


図-2 測定位置図（寸法単位：mm）



(1) 温度測定結果



(2) 絶対湿度測定結果

図-3 温湿度測定結果（室内側相対湿度：60％）

表-2 結露水量測定結果

| 室内相対湿度(%) | 60  | 90   |
|-----------|-----|------|
| カーテンなし    | 2.6 | 15.0 |
| ひだなしカーテン  | 2.0 | 12.9 |
| ひだありカーテン  | 2.2 | 13.3 |

\*：単位（×10<sup>-6</sup> kg/(m<sup>2</sup>s)）

4. ルイス数の検討

2章で述べたとおり、湿気伝達率と対流熱伝達率の相似関係は、式(5)で表される。以下では、結露水量測定実験で得られた結果を用いて、湿気伝達率と対流熱伝達率を推定し、窓ガラス面に結露水量が発生した際のルイス数を検討する。

#### 4.1 湿気伝達率の推定

窓ガラスに生じる結露水量  $W$  は、窓ガラスの面積  $S_g$ 、窓部とガラス表面の絶対湿度差から、式(6)式で表される。

$$W = S_g \alpha' (X_w - X_g) \dots\dots\dots (6)$$

湿気伝達率がガラス全体で同一の値であると仮定すると、実験で得られた温湿度および結露水量の測定結果より式(6)から、窓ガラス全面の平均的な湿気伝達率が計算できる。なお、室内側窓ガラス面の絶対湿度  $X_g$  (kg/kg') は、室内側窓ガラス表面温度から求めた飽和絶対湿度である。計算した湿気伝達率を表-3に示す。湿気伝達率はカーテンありよりカーテンなしの方が大きい値となり、カーテンありではひだの有無や室内側相対湿度によって大きく異なる結果である。

表-3 カーテン仕様による湿気伝達率

| 室内側相対湿度 (%) | 60  | 90  |
|-------------|-----|-----|
| カーテンなし      | 3.8 | 3.6 |
| ひだなしカーテン    | 2.4 | 2.7 |
| ひだありカーテン    | 2.2 | 2.7 |

\*：単位：(×10<sup>-3</sup> kg/(m<sup>2</sup>s (kg/kg' )))

#### 4.2 熱伝達率の推定

結露が生じた際の窓ガラス面の定常状態における熱収支式は式(7)で表される。

$$\alpha(T_w - T_g) + L\alpha'(X_w - X_g) + \frac{\sigma}{\frac{1}{e_c} + \frac{1}{e_g} - 1} \cdot (T_c^4 - T_g^4) = \frac{\lambda_g(T_g - T_{go})}{d} \dots\dots\dots (7)$$

左辺第一項はガラス表面の対流熱伝達、第二項は結露発生による凝縮熱、第三項はガラスの放射熱伝達、右辺はガラスを通過する熱流束を示す。このうち、対流熱伝達率  $\alpha$  を除く各値は、3章における実験結果から得られるので、(7)式から対流熱伝達率を算出した結果を図-4に示す。カーテンやひだの有無にかかわらず、熱伝達率は同程度であった。

#### 4.3 ルイス数の算出

実験結果から求めた湿気伝達率および熱伝達率を用いて、式(5)から算出した結露実験時のルイス数を図-5に示す。カーテンなしではルイス数は1.2程度であるが、カーテンありでは、ルイス数は1.7~2.1である。

#### 4.4 ルイス数の検証

2章で述べたように建築環境分野ではルイス数は概ね1で近似できるとされているが、大きく1から離れた実験結果も報告されている<sup>5), 6), 7), 10)</sup>。濡れ面に強制対流

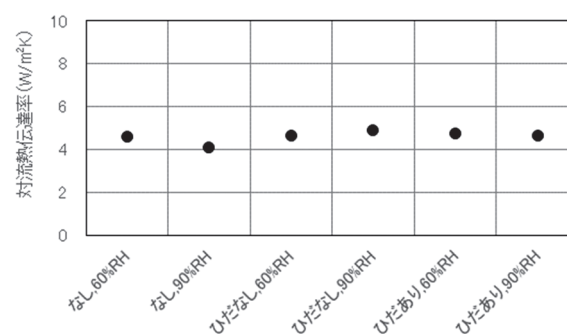


図-4 対流熱伝達率算出結果

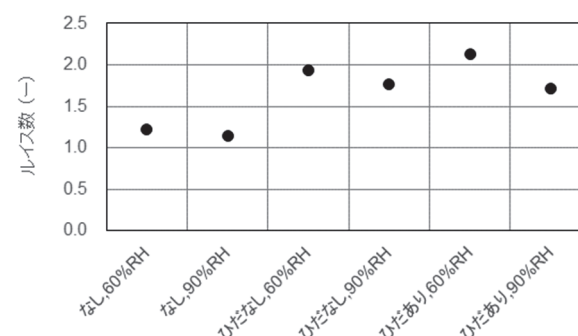


図-5 結露実験時のルイス数算出結果

を与え、対流熱伝達率と湿気伝達率を測定した水谷らの実験結果<sup>5)</sup>から算出したルイス数を図-6に示す。風速が速い時(約1m/s以上)は、 $Le \approx 1$ が成立するが、低風速時(1m/s未満)は1より大きい値になる。既報<sup>17)</sup>の風速測定実験において、カーテンなしの場合の風速はカーテンありの場合と同位置の測定結果を示しているが、実験室中央部の空気温湿度測定位置で別途測定した風速は約0.2~0.3m/sである。窓部のカーテンから50mm離れた位置で測定したカーテンありの場合の風速は0.1m/s程度であったので、風速が小さいほどルイス数が大きくなる傾向は水谷らの結果と同様となった。常温域での湿り空気の定圧比熱を1 (kJ/(kg·K))とすれば、ルイス数は対流熱伝達率と湿気伝達率の比であるが、熱拡散率と濃度拡散率すなわち湿気拡散の比である。ルイス数が1より大きいときは熱拡散が湿気拡散よりも大きいことを示しており、結露が生じにくい状態であることを意味すると言える。

以下で、4.3節で算出したルイス数を用いて、窓ガラス全面で一様として得られたルイス数の妥当性を検証する。既報<sup>17)</sup>により上下で風速分布があることから対流熱伝達率は一様ではないと予測されるが、実験で得られた温度を用いてルイス数を一様とみなした場合の結露水量を算出し、結露水量の実験結果と比較する。



窓ガラスを図-7のように3分割した場合、ガラス全面に様に結露が生じた際の各部位の結露水量は、全面の結露水量の1/3になると仮定して、各部位の結露量を求める。各部位のガラス室内側表面温度および窓部空気温湿度を、3章で測定した上部、中部、下部の測定値として、下記の手順で結露水量を算出した。

①上、中、下の各部位ごとに、式(7)を用いて対流熱伝達率を算出する。その際、結露による凝縮潜熱はガラスを通過する熱流および輻射による熱流の $1 \times 10^{-4}$ 以下と非常に小さいので、左辺第二項は無視する。

②ガラス全面でルイス数が同一と仮定して、4.3節で得られたルイス数と①で算出した対流熱伝達率から、各部位ごとの湿気伝達率を算出する。

③各部位ごとの結露水量を式(6)から算出する。

④上、中、下の各部位ごとの結露水量を合計し、実験結果で得られた結露水量と比較する。

上記の手順で算出した結露水量計算値と、結露水量実測値の比較を図-8に示す。いずれの条件でも、計算値は実測値と概ね良く一致しており、ルイス数をガラス全面で同一の値とし得ることがわかる。

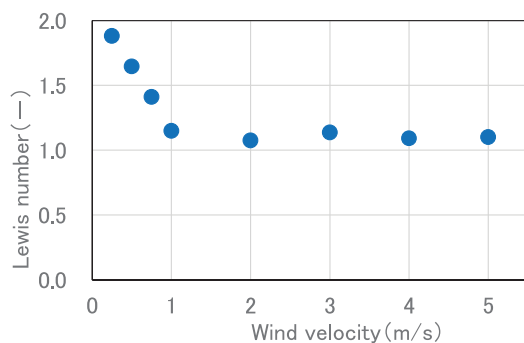


図-6 水谷らの実験結果<sup>5)</sup>から算出したルイス数

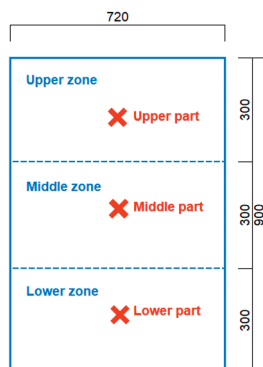


図-7 窓ガラス立面図 (寸法単位: mm)

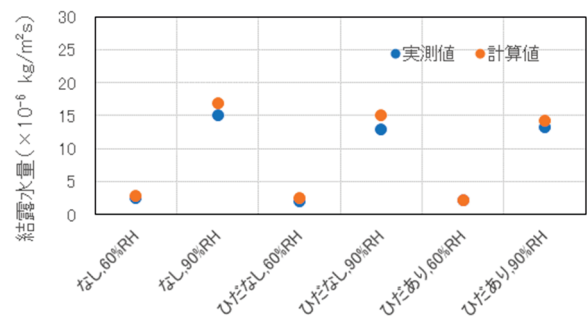


図-8 結露水量の比較

## 5. おわりに

カーテンを取り付けた窓ガラスにおいて、窓ガラス面に生じる結露の実態を把握するために、結露水量測定実験を行った。また、実験結果から実験時の湿気伝達率と熱伝達率を算出し、ルイス数の検討を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 結露水量測定実験より、室内側相対湿度が60%よりも90%の方が単位時間あたりの結露発生量が多くなる。またカーテンなしよりもカーテンあり(ひだありカーテン、ひだなしカーテン)の方が、単位時間あたりの結露発生量が少なくなる。
- 2) 結露水量実験結果から求めた湿気伝達率は、カーテンありよりカーテンなしの方が大きい。カーテンありでは $2.2 \sim 2.7 (\times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s} (\text{kg}/\text{kg})))$ となり、カーテンのひだの有無や室内側相対湿度によって大きく異ならない。
- 3) 実験結果を用いて算出したルイス数は、カーテンなしで1程度、カーテンありで1.7~2.1であった。窓ガラス近傍に生じる自然対流では、ルイス数が1より大きくなる場合がある。
- 4) ルイス数を窓ガラス全面で一様とみなし、上下の風速分布を考慮して結露水量の分布を計算した結果、実測結果と計算結果が概ね一致した。このことからルイス数の一様性が確認され、値の妥当性も示された。

今回の実験およびルイス数の検討により、窓ガラスに結露が発生する場合のルイス数を得ることができた。しかし、結露水量を計算する際には、室内で水蒸気が発生する場合や室外との気密性、カーテンの素材やひだなどの形状の違いによる吸放湿性など、検討すべき課題がある。今後は、今回検討したルイス数を用いた結露予測計算モデルにより冬季における窓ガラス面の結露水量がどのように変化するかを予測することによって、ひだあり

カーテンの断熱性や吸放湿性が、窓部の温湿度や風速に与える影響を明らかにしていく。

### 【記号】

|             |                                                                            |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$    | : 対流熱伝達率 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )                                 |
| $h_M$       | : 対流物質伝達率 ( $\text{m}/\text{s}$ )                                          |
| $\alpha'$   | : 湿気伝達率 ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}(\text{kg}/\text{kg}')$ )           |
| $\rho$      | : 空気の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )                                         |
| $C_p$       | : 空気の定圧比熱 ( $=1.006\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )                   |
| $a$         | : 熱拡散率 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )                                           |
| $D$         | : 拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )                                           |
| $Le$        | : ルイス数 (—)                                                                 |
| $Sc$        | : シュミット数 (—)                                                               |
| $Pr$        | : プラントル数 (—)                                                               |
| $W$         | : 窓ガラス全面の結露水量 ( $\text{kg}/\text{s}$ )                                     |
| $S_g$       | : 窓ガラスの面積 ( $\text{m}^2$ )                                                 |
| $X_W$       | : 窓部の絶対湿度 ( $\text{kg}/\text{kg}'$ )                                       |
| $X_g$       | : 窓ガラス面の絶対湿度 ( $\text{kg}/\text{kg}'$ )                                    |
| $T_c$       | : カーテン表面温度 ( $\text{K}$ )                                                  |
| $T_W$       | : 窓部空気温度 ( $\text{K}$ )                                                    |
| $T_g$       | : 窓ガラス室内側表面温度 ( $\text{K}$ )                                               |
| $T_{go}$    | : 窓ガラス室外側表面温度 ( $\text{K}$ )                                               |
| $L$         | : 水蒸気の凝縮潜熱 ( $=2500.3\text{ kJ}/\text{kg}$ )                               |
| $\sigma$    | : ステファンボルツマン定数 $=5.67 \times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ |
| $e_g$       | : ガラスの放射率 (—)                                                              |
| $e_c$       | : カーテンの放射率 (—)                                                             |
| $\lambda_g$ | : 窓ガラスの熱伝導率 ( $\text{W}/\text{mK}$ )                                       |
| $d$         | : 窓ガラスの厚さ ( $\text{m}$ )                                                   |

### 【付記】

本稿は、日本建築学会環境系論文集に掲載された既報<sup>17)</sup>を再構成したものです。

### 【参考文献】

- 1) 吉岡丹, 篠原道正: 建築構成部位材料が室内熱環境に及ぼす影響 (その3) -カーテンの表面温度-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.559-560, 1979.
- 2) 長能里佳, 西川竜二, 武田仁: カーテンの取り付け方の工夫が窓の断熱性と住宅の暖房負荷に与える効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.43-44, 1999.
- 3) 須貝高, 石田卓: 窓ガラス・外装材の仕様の違いによる室内熱環境への影響 その2床暖房・厚手カーテンの有無の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.41-42, 2002.
- 4) 戒能慧邦, 高田暁, 松下敬幸: カーテンが窓の熱貫流抵抗に及ぼす影響 重力換気を考慮した伝熱解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.5-6, 2008.
- 5) 水谷章夫, 大滝泰, 土川忠浩, 大澤徹夫, 宮野明彦: 濡れ表面での湿気および対流熱伝達特性とルイスの関係, 日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会第31回熱シンポジウム, 1988.
- 6) 難波拓也, 大澤徹夫, 角舎輝典: 垂直な濡れ表面の湿気伝達特性に関する実験的研究—非加熱時の実験結果—, 日本

建築学会東海支部研究報告集, 第44号, pp493-496, 2006.

- 7) 本間義規: 開口部サマールスクリーンの開発に向けたガラス面滴状凝縮・蒸発性能の把握—開口部の断熱強化に関する研究 その2, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.321-322, 2007.
- 8) 藤井丕夫, 儀間悟, 富村寿夫, 張興: 鉛直平行平板群からの自然対流に関する実験的研究, 日本機械学会論文集, 59巻566号, 1993.
- 9) ASHRAE Handbook, Chapter6, pp.19/32, 2023.
- 10) 例えば, 浅野康一: 物質移動の基礎と応用, 丸善, pp.189, 2004.
- 11) Mizushima T., Nakajima M.: Simulations heat and mass transfer: The relation between heat transfer and mass transfer coefficients, Memoirs of the faculty of engineering, Kyoto university, 1951.
- 12) E.M.Sparrow, et al.: Forced convection condensation in the presence of noncondensables and interfacial resistance, International journal of heat mass transfer, Vol.10, pp.1829-1845, 1967.
- 13) J.L. Threlkeld: Thermal Environmental Engineering, pp.198, 1970.
- 14) 松本衛, 新建築学体系10環境物理, 3湿気, 彰国社, 1984.
- 15) 鈴井修一, 池田哲朗, 新田勝通: エース 建築環境工学II 熱・湿気・換気, 朝倉書店, 2002.
- 16) 防露設計研究会: 住宅の結露防止, 学芸出版社, 2004.
- 17) 小早川香, 小椋大輔, 小南和也: カーテンが窓面の結露に及ぼす影響に関する研究 実験室実験による結露時のルイス数, 日本建築学会環境系論文集, Vol.819, pp.234-240, 2024.
- 18) 小早川香, 小椋大輔, 小南和也: カーテンが窓面の結露に及ぼす影響に関する研究 その1~4, 日本建築学会学術講演梗概集, 2020~2023

### 【執筆者】



\*1 小早川 香  
(KOBAYAKAWA Kaori)



\*2 小椋 大輔  
(OGURA Daisuke)



\*3 小南 和也  
(KOMINAMI Kazuya)