

カーテンが窓面の結露に及ぼす影響に関する研究  
【CFDによる自然対流場気流の検討】

試験研究センター 環境部 環境試験室 小早川 香

## 1. はじめに

本研究では、カーテンの断熱性及び吸放湿性が、カーテンと窓ガラスの間の空間（以後、窓部と呼びます）の温湿度や風速に与える影響を明らかにし、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を目的にしています。

窓ガラス面に生じる結露水量は、窓部の熱収支、窓部の水分収支、結露による凝縮潜熱を考慮した窓ガラス面の熱収支から、式(1)～(3)で考えます。

$$-S_w \alpha_c (T_w - T_g) + S_c \frac{(T_i - T_w)}{R_c} + Q C_a (T_i - T_w) = 0 \quad \cdots (1)$$

$$-S_w \alpha' (X_c - X_g) + S_c \frac{(X_i - X_w)}{R'_w} + Q C_a (X_i - X_w) = 0 \quad \cdots (2)$$

$$\alpha_c (T_w - T_g) + L \alpha' (X_w - X_g) + \frac{\sigma}{\frac{1}{e_c} + \frac{1}{e_g} - 1} (T_w^4 - T_g^4) = \frac{\lambda_g \cdot (T_g - T_{go})}{d} \quad \cdots (3)$$

ここに、 $S_w$ ：窓ガラスの面積 ( $\text{m}^2$ )、 $S_c$ ：カーテンの面積 ( $\text{m}^2$ )、 $\alpha_c$ ：窓部の対流熱伝達率 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )、 $\alpha_r$ ：窓部の放射熱伝達率 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )、 $\alpha'$ ：窓部の湿気伝達率 ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg}/\text{kg}')$ )、 $T_i$ ：室内側空気温度 ( $\text{K}$ )、 $T_w$ ：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 ( $\text{K}$ )、 $X_i$ ：室内側空気絶対湿度 ( $\text{kg}/\text{kg}'$ )、 $X_w$ ：窓部空気絶対湿度 ( $\text{kg}/\text{kg}'$ )、 $X_g$ ：窓ガラス面の絶対湿度 ( $\text{kg}/\text{kg}'$ )、 $Q$ ：窓部の換気量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )、 $L$ ：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  $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 、 $e_c$ ：カーテンの放射率、 $e_g$ ：ガラスの放射率、 $\lambda_g$ ：窓ガラスの熱伝導率 ( $\text{W}/\text{mK}$ )、 $d$ ：窓ガラスの厚さ ( $\text{m}$ )

これらのうち、実験などで直接測定できないファクターが、窓部の対流熱伝達率  $\alpha_c$ 、窓部の湿気伝達率  $\alpha'$ 、窓部の換気量  $Q$  です。対流熱伝達率は、ガラスを通過する熱伝達式を用いて、式(4)より同定します。湿気伝達率は式(5)によるルイスの関係から計算します。湿気伝達率特定に必要なルイス数については既報<sup>1)</sup>で検討を行い、結露実験時のルイス数を特定することができました。

$$q = \alpha_c (T_w - T_g) \quad \cdots (4)$$

$$Le = \frac{\alpha}{\alpha' \cdot C_p} \quad \cdots (5)$$

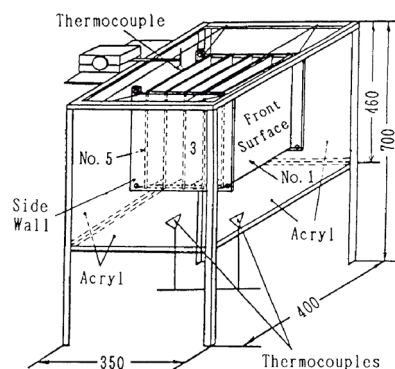
ここに、 $q$ ：窓ガラスを通過する熱量、 $Le$ ：ルイス数 (-)、 $C_p$ ：空気の定圧比熱 ( $= 1.006 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )

換気量については既報<sup>2), 3)</sup>で窓部風速を実測しましたが、風速測定位置が限定的であることから、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を利用して検討します。

窓部に生じる気流は、窓ガラスからの冷放射による自然対流ですが、CFD解析で自然対流場を扱った例は少なく、カーテンと窓ガラスの間の空間についての前例はありません。そこでカーテンと窓ガラスを平行平板と捉え、鉛直平行平板の自然対流に関する藤井らの研究<sup>4)</sup>をCFDで再現して、自然対流をCFDで検討することの有効性を確認することにしました。本報ではその結果について報告します。

2. 藤井らの実験概要<sup>4)</sup>

藤井らは、5枚の平板で構成される鉛直平板群から空気への自然対流に関する実験を行っています。図-1に実験装置を示します。それぞれの平板には面ヒータが内蔵されており、平板群は上下が解放されたアクリル板で囲まれた空間に設置されています。ヒータの発熱量と平板間隔を表-1に示す条件として、平板表面温度、平板間の風速などを測定しています。

図-1 藤井らの実験装置 (出典：参考文献<sup>4)</sup>)表-1 藤井らの実験条件<sup>4)</sup>

平行平板の間隔 (mm)	9.7	14.7	19.7	34.7
発熱量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	41.5	71.1	85.9	96.2

## 3. CFD解析概要

解析には、3次元流体解析ソフトFlowDesigner (株式会社アドバンスドナレッジ研究所) を使い、定常解析を実施しました。平行平板の厚さ (2mm) を考慮し、平板間の

最小格子は1~5mmとしました。図-2にモデルを示します。

乱流モデルは高い精度の解が期待できる空間平均モデルであるLESもありますが、計算容量を考慮してRANSモデルを使用することとしました。藤井らの実験から得られるレイノルズ数は、代表長さを平板高さ(285mm)とすると約4000です。一般にレイノルズ数が4000以上で乱流と言われていますが、本実験では遷移領域であった可能性もあります。そこで乱流モデルとして、最も適用例が多い標準k- $\epsilon$ モデルと、壁面近傍での減衰を考慮した低レイノルズ数モデルであるLaunder-Sharmaモデル(低Re)を選択することとしました。

#### 4. 解析結果

5枚の平板のうち中央に位置する平板表面の温度分布の解析結果を図-3に示します。k- $\epsilon$ モデルでは下部から上部へ段階的に温度が上昇しており、藤井らの実験と概ね一致した結果が得られました。一方、低Reモデルでは中央部付近の温度が最も高く、上部および下部で低温度になる結果となり、実験結果との整合が得られませんでした。

2枚目と3枚目の平板の間の空間風速について、平板間距離ごとにプロットし、藤井らの実験と比較したものを図-4に示します。平板間距離(平行平板の間隔)が9.7mmおよび34.7mmでは概ね実験と解析で良い一致がみられましたが、19.7mmでは両者の結果に乖離があります。全体の傾向として平板間距離の風速分布は、平板近傍で風速が小さく、中央部で大きくなる傾向で、実験と解析は一致していました。また、k- $\epsilon$ モデルよりも低Reモデルのほうが平板近傍の風速解析値が小さくなる傾向があり、これは壁面近傍の減衰が考慮された結果であることがわかります。

#### 5. おわりに

自然対流をCFDで検討することの有効性を確認するために、過去文献の実験例をk- $\epsilon$ モデルと低Reモデルを用いてCFD解析で再現しました。その結果、実験結果と解析結果は、温度および風速で一部の不一致がみられましたが、風速分布など全体的な傾向が一致しており、CFD解析の有効性が確認できました。

今後は、メッシュ数の再検討や、LESモデルを用いた解析も視野に入れ、検討を進めていく予定です。

#### 【参考文献】

- 1) 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レイス数, 日本建築学会環境系論文集, Vol.819, pp.234-240, 2024年5月
- 2) 小早川香, 小椋大輔, 小南和也: カーテンが窓面の結露に

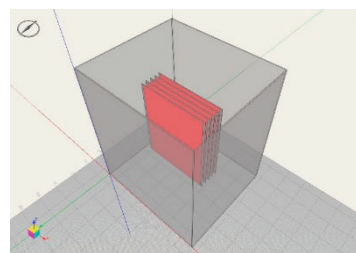
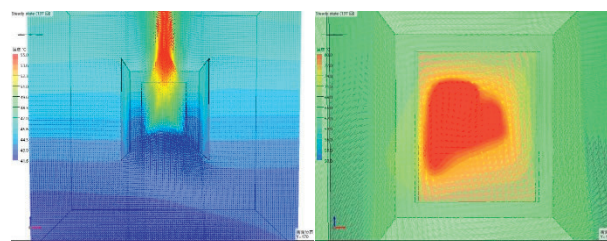


図-2 解析モデル



(1) k- $\epsilon$  (2) 低Re

図-3 温度コンター図

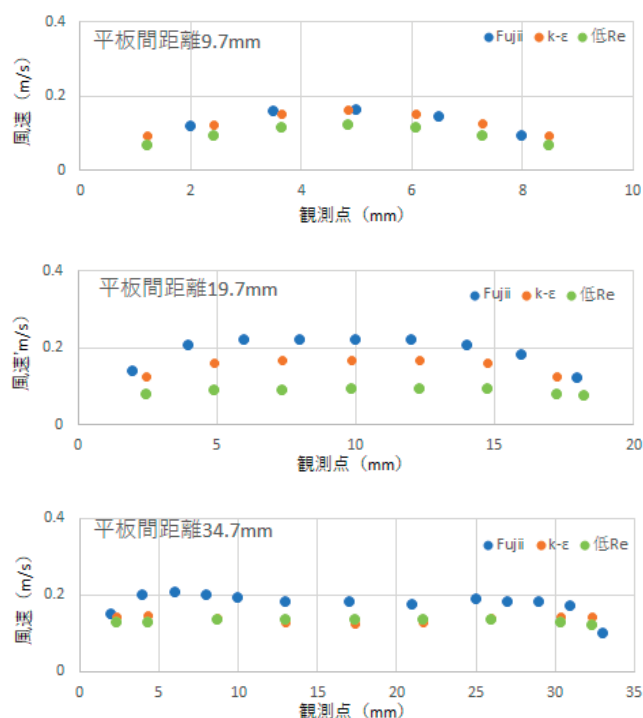


図-4 藤井らの実験結果との風速比較

及ぼす影響に関する研究 その1: カーテンと窓面の間の温度と風速の検討: 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.931-932, 2020年9月

- 3) 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2: PIVによるカーテンと窓面の間の気流の可視化: 日本建築学会学術講演梗概集(東海), pp.585-586, 2021年9月
- 4) 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年10月