

火災時のダブルスキンファサードを通じた上層階への煙流動性状に関する研究

A Study on smoke flow to upper floors through double-skin façade in case of fire

建築学専攻 原田研究室 宮本康平

1. 研究の背景・目的

ダブルスキンは建物外壁面の外側をガラス面で覆い中空層を形成することで、中空層内の煙突効果や空気層としての優れた断熱性により建物の熱負荷低減や自然換気を実現できるとして、環境問題に対する意識が高まっている今日注目されている構法である。

このようなダブルスキン建築において火災が発生した際には、火災発生室から中空層を経路として上層階へ急激に煙が拡散する恐れがあり、上層階での避難安全性に悪影響を及ぼすことが考えられる。

南^[1]は中空層に噴出した煙の流動性状について模型実験により測定を行い、噴流の温度分布予測を提案した。しかし、火災発生室のみが中空層と接続した条件下での検討であり、上層階居室への煙拡散を直接測定検討できていない。

鍵屋らは実地調査のほか中空層に噴出した熱流について相似性を確かめ、模型実験により上部開口の仕様の違いに伴う上層階居室への煙拡散の傾向の違いを明らかにしている^[2]。長谷見らは縮小模型を用いた模型実験及び予測モデルでの計算を通じて中空層内の圧力分布に基づき、平常時の換気性能及び煙拡散の危険性の評価を行っている^[3]。

しかし、これらは吹き抜け空間や中空層を中心とした分析にとどまっており、居室への煙拡散性状や上層階居室への煙の流入量について圧力差に基づいた詳細な検討はなされていない。

本研究では模型実験を行い、中空層を通じた上層階居室への煙拡散性状を測定した。また、予測モデルを構築し模型実験の結果と比較して妥当性を確かめたのち、実大規模での計算を行うことで、上層階居室への煙拡散性状を予測し避難安全性の評価を行った。

2. 上層階居室への煙拡散性状に関する模型実験

2.1. 実験模型概要

実験模型概要を図 2-1、2-2 に示す。5 層のダブルスキン建築を 1/10 スケールで模しており、1 層目を火災発生室としてヒーターによる加熱で火災発生を再現する。ヒーターにより加熱された気流(以下煙)は中空層へ噴出し、中空層下端から流入する空気と混合し上昇する。実験条件に応じ、2~5 層目居室の中空層側スリットを開放し、また中空層上端には雨仕舞を想定した上部抵抗を設ける。

2.2. 測定項目

図 2-2 に無指向性の風速計及び熱電対を用いて流速、温度の測定を行った測定断面を示す。測定断面内には水平鉛直方向に 3 箇所あるいは 5 箇所の測定点を設け測定を行った。また各居室中空層側スリット付近について、スリットを通過して中空層に流入する煙/空気及び、居室へ拡散する煙の流動性状を可視化し目視確認を行ったほか、映像を撮影した。



図 2-1
実験模型外観

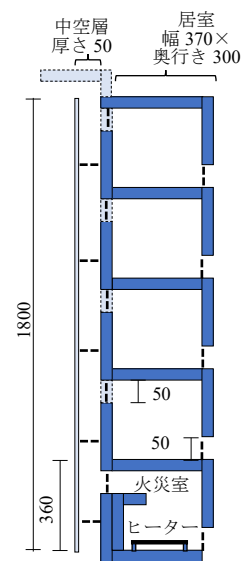


図 2-2
実験模型概要及び
測定断面(数値は[mm])

2.3. 実験値の整理方法

測定断面を通過する質量流量 m [kg/s] 及び熱流量 Q [W] は、測定断面内 k 個の測定点に測定断面積 A [m²] を均等に割り当てたうえで、得られた流速 v [m/s]、温度 T [K] より求める。

圧力分布は中空層内を図 2-5 に示すように各層スリット間及びスリット高さごとに CV を設け、測定断面から得られた温度、流速を割り当てることで求める。図 2-6、7 に概要を示す。

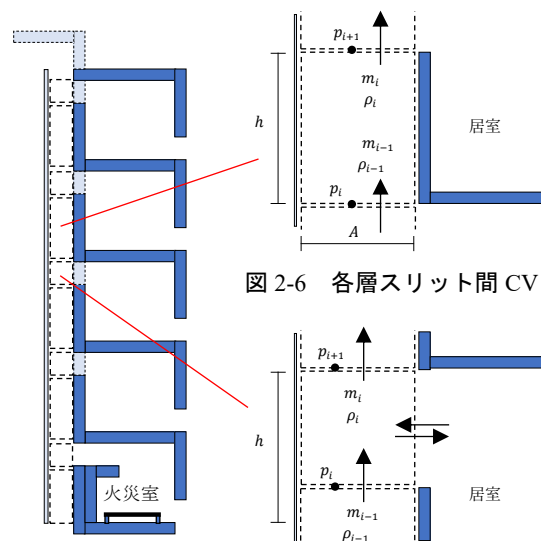


図 2-5 CV 割当

図 2-7 各層スリット高さ CV

ある各層スリット間、各層スリット高さ CV_i の下端と上端での静圧の関係はベルヌーイの定理よりそれぞれ式(2-3)、(2-4)から得られる。

$$p_i + \frac{m_{i-1}^2}{2\rho_{i-1}A^2} = p_{i+1} + \frac{m_i^2}{2\rho_iA^2} + \rho_i gh + \frac{m_{i-1}^2 fh}{2\rho_{i-1}A^2 d_H} \quad (2-3)$$

$$p_i + \frac{m_{i-1}^2}{2\rho_{i-1}A^2} = p_{i+1} + \frac{m_i^2}{2\rho_iA^2} + \rho_i gh + \frac{m_{i-1}^2 fh}{2\rho_{i-1}A^2 d_H} + \xi_c \frac{m_{i-1}^2}{2\rho_{i-1}A^2} \quad (2-4)$$

式(2-4)右辺末項は、居室から空気/煙が流入している場合に考慮する合流に伴う圧力損失であり、合流損失係数 $\xi_c[-]$ は参考文献^[4]をもとに決定する。

2.4. 実験条件

表 2-1 に実験条件を示す。

実験名	ΔT_f	v_f	H_f	居室との接続
d50-CL2	21.8	0.46	-	なし
d50-Ht50-CL2	24.4	0.45	50	
d50-Ht25-CL2	24.2	0.43	25	
d50-Ht50-CL2-C	25.7	0.36	50	あり
d50-Ht25-CL2-C	26.7	0.42	25	
d50-Ht0-CL2-C	26.7	0.39	0	

2.5. 実験結果

d50-Ht25-CL2-C での、スリットを通過する煙や空気の流動性状を図 2-8 に示す。2、3 層目では空気が居室から中空層へ流入しており、空気はスリット上半分を通過し下半分では渦が生じていた。4、5 層目では中空層から居室へ煙が拡散しており、煙はスリット範囲内で圧力差により居室側へ拡がりつつ上昇し、天井面に衝突したのち浮力により天井面に沿い拡散していた。

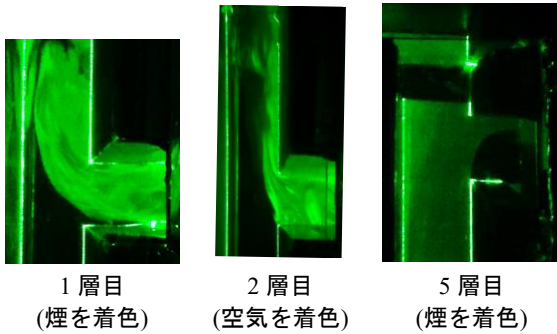


図 2-8 流動性状

図 2-9、10 に中空層内温度分布、圧力分布を示す。温度分布についてはいずれの実験でも大きな変化はみられないものの、圧力分布については上部開口を閉鎖することで顕著に圧力が増加していることがわかる。

各居室を中空層と接続した 3 実験での質量流量を図 2-11 に示す。上部抵抗が増大するにつれ、上層階居室への煙の拡散量が増加しており、また上部を閉鎖した場合、3 層目から煙の拡散が始まることわかる。

3. 予測モデルの構築

3.1. 概要

熱換気回路計算をもとにして、各居室の温度及び部材物性値、寸法を入力条件とした、中空層内温度分布、質量流量の算出を行う予測モデルを構築した。

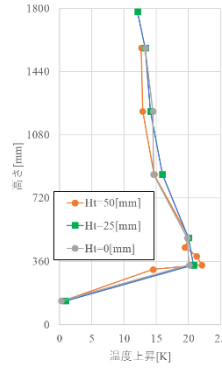


図 2-9 温度分布

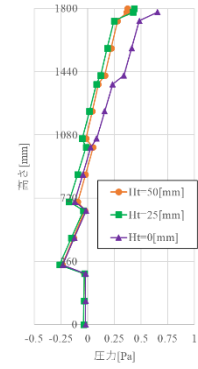


図 2-10 圧力分布

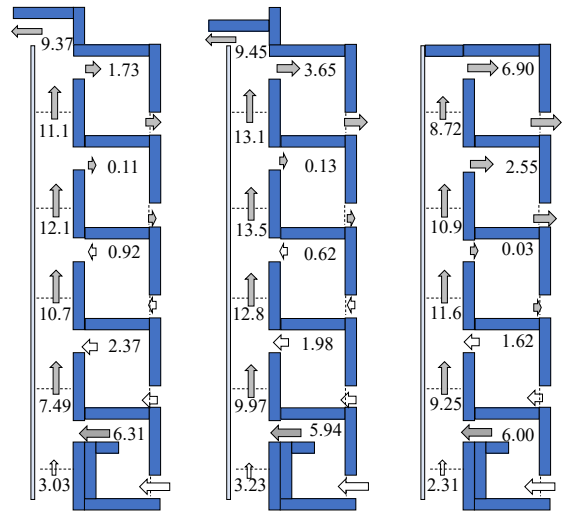


図 2-11 質量流量 $[\times 10^{-3} \text{kg/s}]$

実験値の整理方法と同様に各層スリット間及び各層スリット高さに CV を設け、換気回路計算の手続きで用いる室内圧は各居室床面高さ及び中空層下端高さに設定した。各居室内については均一な温度とする 1 層ゾーンモデルとした。

室内圧を仮定することで各開口を通過する気流流量及び中空層内温度が算出できる。そして得られた流量をもとに室内圧を補正する反復計算を行う。

3.2. CV 熱収支

図 3-1 に概要を示す。CV 内温度及び接する 2 壁体の 2 表面の計 5 ヶ所について温度を未知数としたうえで、放射、対流、伝導、熱流量を考慮し 5 ヶ所で熱収支式を立式することで温度を算出する。

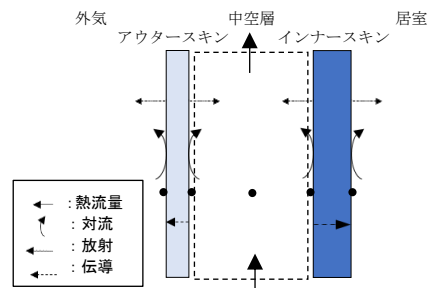


図 3-1 CV 熱収支

3.3. 分岐損失

先述の煙流動性状の目視結果を踏まえると、上層階居室へ拡散する煙の流量を決定する際には、静圧差のみならず中空層内を上昇する煙の動圧が無視できない。そこで、中空層及び居室中空層側スリットをダクトと見立てて、分岐時の圧力損失を考える。

図 3-2 に概要を示す。CV 下端と居室の CV 下端高さでベルヌーイの式を立てて、

$$p_{sh} + \frac{m_{sh}^2}{2\rho_{sh}A_{sh}^2} = p_{room} + \frac{m^2}{2\rho_{sh}\alpha^2A^2} + \xi_d \frac{m_{sh}^2}{2\rho_{sh}A_{sh}^2}$$

$$\Leftrightarrow p_{sh} - p_{room} = \frac{m^2}{2\rho_{sh}\alpha^2A^2} + (\xi_d - 1) \frac{m_{sh}^2}{2\rho_{sh}A_{sh}^2} \quad (3-1)$$

ただし、 ξ_d : 分岐損失係数[-]であり、参考文献[5]をもとに値を決定する。

式(3-1)から、居室へ拡散する煙の流量を算出する。

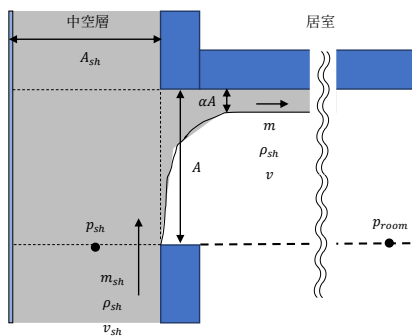


図 3-2 分岐損失

3.4. 予測結果

一例として図 3-3~5 に d50-Ht25-CL2-C での予測結果を示す。温度分布、圧力分布ともによく一致しており、中性帯高さについてもよく再現ができています。

質量流量についても 4 層目で大きな値が得られているものの、中空層内やその他居室についてよく再現ができています。

4. 実大規模での検討

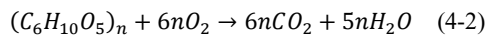
火災室温ではなく火源発熱量を入力条件として、予測モデルを用いてダブルスキン構造が採用されたオフィスビルを想定した実大規模での検討を行う。

4.1. 二酸化炭素発生量の概算

火源を書類と想定し、セルロースが発熱量 Q [kW] で燃焼しているとするとセルロースの燃焼熱 L_v [kJ/g]^[6] を用いて火源燃焼速度 m_{cel} [g/s] は式(4-1)から得られる。

$$Q = m_{cel} L_v \quad (4-1)$$

本研究では定常状態を取り扱っているため、火源が完全燃焼しているとするとセルロースの反応式(4-2)から二酸化炭素発生量 $m_{CO_2,f}$ [kg/s] は式(4-3)より得られる。



$$m_{CO_2,f} = m_f \frac{264}{162 \times 1000} \quad (4-3)$$

火源から発生した二酸化炭素はすべて中空層へ流入するとして、質量収支をもとに上層階居室への二酸化

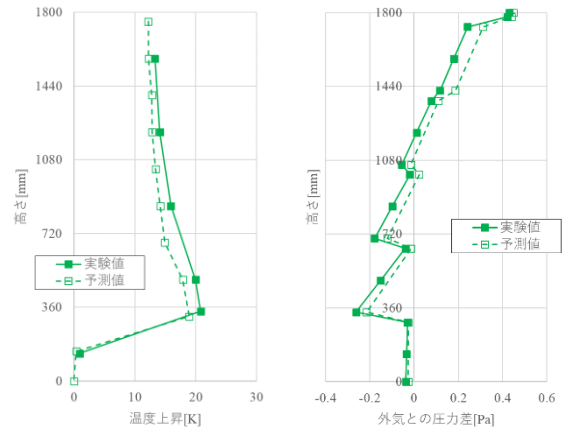


図 3-3 温度分布

図 3-4 圧力分布

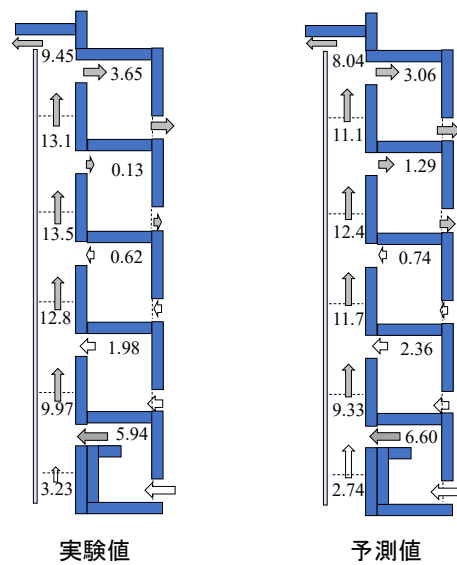


図 3-5 質量流量 [x 10⁻³ kg/s]



図 4-1 計算条件

炭素流入量を算出する。

4.2. 計算条件

実験模型と同形状の実大建物を想定する。図 4-1 に計算条件を示す。寸法、物性値等は実大建物を想定し、上部開口の高さ寸法及び火災室火源発熱量を実験条件とした。

4.3. 予測結果

4.3.1. 上部開口による比較

発熱量を 800[kW]とした 3 つの上部開口条件で予測結果を図 4-2,3 に示す。

上部開口が小さくなるにつれ、中空層内、居室の温度上昇が顕著になり、圧力も増大している。

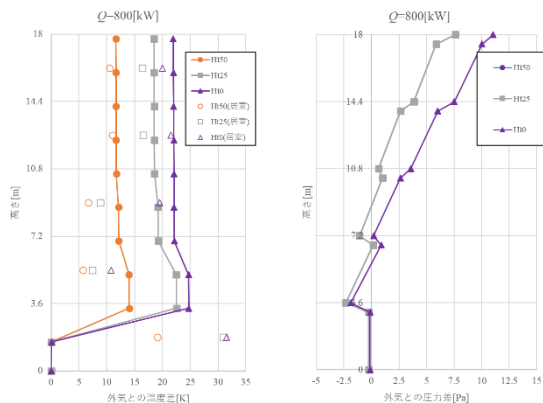
上部開口が小さくなるにつれ上部抵抗が増大し、上層階居室への煙流量が増加している。また、上部開口を閉鎖した場合 3 層目から煙の流入が始まっている。

二酸化炭素流入量については、($H_t = 25[\text{cm}]$ の場合、4 層目時点で $H_t = 50[\text{cm}]$ の 5 層目とほぼ同等の二酸化炭素が流入している。)また、 $H_t = 0[\text{cm}]$ では 4 層目、5 層目で $H_t = 50[\text{cm}]$ の場合を大きく上回る流入量となっている。

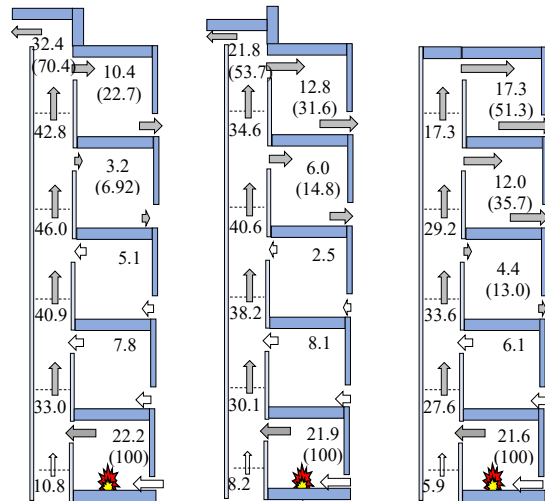
これらから、上部開口面積を小さくすることで煙流入が始まる層が低下し、二酸化炭素流入量から読み取れる煙の正味の流入量も大幅に増加し、避難安全性に悪影響を及ぼすと言える。

4.3.2. 発熱量による比較

図 4-3 に 2 つの発熱量での計算結果を上部開口面積ごとに示す。上部抵抗が増加することで中空層内圧力が増加していることが、前述の煙拡散量につながっている。また、計算を行った条件の範囲では、発熱量や中空層内温度が変化しても中性帯高さはほとんど変化していないことから、上部開口の仕様が火災発生時にある層で煙の拡散を受けるかを決定する要因として大きな影響を与えていることがわかる。

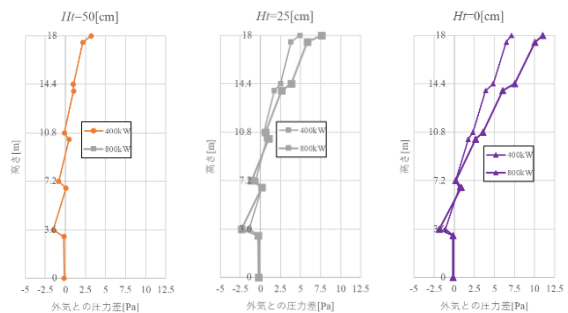


温度分布 圧力分布
図 4-2 予測結果



$H_t = 50[\text{cm}]$ $H_t = 25[\text{cm}]$ $H_t = 0[\text{cm}]$

図 4-3 質量流量[kg/s]
(括弧内は二酸化炭素流量百分率[-])



$H_t = 50[\text{cm}]$ $H_t = 25[\text{cm}]$ $H_t = 0[\text{cm}]$

図 4-4 圧力分布

5. 結論

- ・ 中空層上部抵抗が増大することで中空層内圧力が上昇し、上層階居室への煙拡散量の増加につながる。特に煙の正味の流入量については大幅に増加する。
- ・ 上部開口面積が中空層内中性帯高さを決定する支配的な要因のひとつであり、面積が大きくなるにつれ中性帯高さが低下したことから、煙拡散が始まる層を高くするには上部抵抗を低減することが非常に有効であることがわかった。

凡例

m : 質量流量[m/s], T : 温度[K], v : 流速[m/s], ρ : 密度[kg/m³], p : 静圧[Pa], F : 摩擦損失[Pa], H : 上部開口鉛直寸法[m]

添え字

sh : 中空層, $room$: 居室, f : 火災室あるいは火災室噴流

参考文献

- [1] 南, ダブルスキンがサードによる火災時の煙拡散が避難安全性に及ぼす影響に関する研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 2021
- [2] 鍵屋他, ダブルスキンの火災安全上の課題に関する実験的研究 (その 1~4), 日本建築学会学術講演梗概集, 2015
- [3] 長谷見他, 自然エネルギー利用・火災安全性から見た煙突効果の利用と制御(その 1~4), 日本建築学会関東支部研究報告書, 2002
- [4, 5] 空調調和衛生工学会, 空調調和衛生工学便覧 第 13 版, p211, 2001
- [6] 日本火災学会, 火災便覧 第 4 版, p70, 2018

本研究の一部は大林財団助成「日射熱取得時のダブルスキンファサードを通じた煙流動性状に関する研究」(2018 年度採択)を受けたものである。ここに謝意を示す。