

# ダブルスキンファ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

## A Study on Influence of Smoke Diffusion on Evacuation Safety through Double-skin Façade in Fire

建築学専攻 原田研究室 南 雄太

### 1. 研究の背景と目的

ダブルスキン（以下、DS）は、建物外壁・窓の外側をガラス面で覆い中空層を形成する構法であり、平常時は建物外皮の断熱性能、日射遮蔽性能を向上や、煙突効果による室内の自然換気機能をもつ。しかし中空層が複層にわたり堅穴空間を形成する DS で火災が発生した際中空層内に煙が流入して煙拡散経路となり、上層階居室の避難安全性に支障をきたす恐れがある。

DS の中空層内煙流動性状に関する先行研究<sup>[1][2][3]</sup>はあるが、いずれも基礎的な実験的研究にとどまっており、温度分布や圧力分布を予測し、中性帯高さを制御する方法に関する知見は十分ではない。

本研究では DS の仕様や流入する煙の状態から中空層内温度分布を簡易に予測できるモデルを構築し、温度分布に基づいた中性帯高さを制御方法の提案を目的としている。そのために模型実験で中空層内分布を測定して煙流動性状を明らかにし、DS の仕様を考慮した温度分布予測手法を提案する。さらに、換気回路網計算に予測手法を組み込んだ際の中性帯高さに着目し、避難安全性への支障を抑制する DS の仕様を提案する。

### 2. ダブルスキン内煙流動性状に関する相似則

中空層内を上昇する熱気流に関して、模型実験から実大スケールの煙流動性状を予測するため、以下の 4 つの仮定を適用することで式(1)が得られる。式(1)を無次元化して式(2)の $\pi$ ナンバー、式(3)の縮率 $n$ を算出した。

仮定 1 物質拡散現象の無視

仮定 2 非圧縮性、Boussinesq 近似

仮定 3 レイノルズ応力、熱輸送を渦動粘性係数、渦温度拡散係数を用いてモデル化

仮定 4 エネルギー散逸の無視

・質量保存

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

・運動量保存

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g\beta(T - T_a) + \nu_t \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (1)$$

・エネルギー保存

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \alpha_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q$$

・エネルギー保存（境界条件）

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \alpha_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + K \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\pi_1 = \frac{L_0}{t_0 v_0} \quad \pi_2 = \frac{p_0}{\rho v_0^2} \quad \pi_3 = g\beta \frac{\Delta T_0 L_0}{v_0^2} \quad (2)$$

$$\pi_4 = \frac{Q_0}{\rho c_p v_0 \Delta T_0 L_0^2} \quad \pi_5 = \frac{K_0}{\rho c_p v_0}$$

$$n(t) = n(Q)^{-1/3} n(L)^{4/3}$$

$$n(v) = n(Q)^{1/3} n(L)^{-1/3}$$

$$n(p) = n(Q)^{2/3} n(L)^{-2/3} \quad (3)$$

$$n(\Delta T) = n(Q)^{2/3} n(L)^{-5/3}$$

$$n(K) = n(v) = n(Q)^{1/3} n(L)^{-1/3}$$

### 3. 縮小模型実験によるダブルスキン内煙流動性状測定

#### 3.1 実験装置概要

図 1 に縮小模型の断面図、中空層水平断面図を示す。模型は 1/10 スケールで 5 層の複層 DS の 1 層目で火災が発生した場合を想定した。

居室は幅 370mm、奥行き 370mm、高さ 360mm であり、側面 1 面は目視のために 2mm 厚の透明硬質塩ビ板とし、インナースキンを除く 2 面及び天井、床面は 20mm 厚のポリスチレンフォームを使用した。インナースキンは火災室を除く居室では 25mm 厚、火災室では 50mm 厚のセラミックファイバーボードとし、アウトースキンは 2mm 厚の透明硬質塩ビ板とした。インナースキン、アウトースキン及び袖壁の壁面①、②で囲まれた領域をダブルスキン中空層とし、幅は 300mm、厚さは可変とした。火災室には高さ可変、幅 300mm の中空層と接続するスリット、屋外と接続するスリットをそれぞれ設けた。火災室には幅 250mm、奥行き 300mm のシリコンラバーヒーターを設置し、発生する熱気流を煙に見立てた。また、火災室天井面からの熱貫流を抑制するため、2 層目床面に 12.5mm 厚のセラミックファイバーブランケットを敷いた。図中の各部材熱伝導率は非定常熱線法で別途測定した結果を使用した<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 測定項目

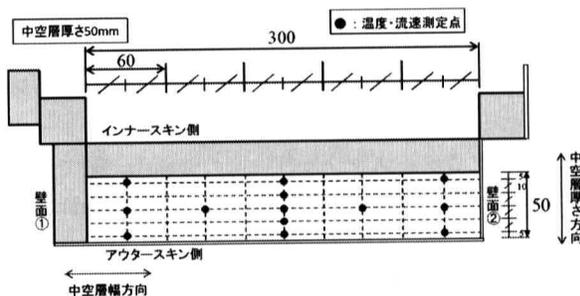
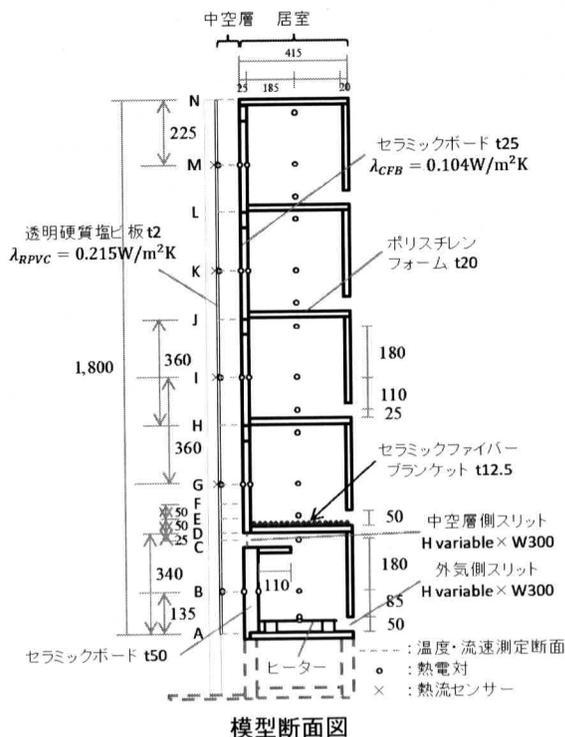
定常状態を確認後、着色した煙をシート状レーザー光を用いて目視確認を行った。レーザー光は中空層幅方向で 2 か所、厚さ方向で 3 か所に照射した。

目視確認後、図 1 に示す 14 箇所の中空層内水平断面 A～N の各測定点で T 型熱電対 ( $\phi 0.1\text{mm}$ )、熱線風速計 (KANOMAX CLIMOMASTER Model6501) により温度・流速を測定した。また、熱流センサー (江藤電機 Heat Flow Sensor Type S11A) をアウトースキン外側に貼付し、壁面を貫流する熱流束を測定した。

#### 3.3 実験条件

表 1 に実験条件を示す。建築的条件として、中空層厚さ $d$ [mm]、中空層-火災室スリット開口高さ $H_{sd}$ [mm]、外気側スリット開口高さ $H_{so}$ [mm]、火災条件として火災室の上昇温度 $\Delta T_f$ [K]を条件とした。

実験名の「d○○」は中空層厚さ○○mm、「 $H_{sd}\Delta\Delta$ 」



中空層水平断面図

図1 ダブルスキン縮小模型

は火災室-中空層間スリット高さが△△mm、「CL▽□」の▽は火災室階層、□は同一の「d○○」、「H<sub>sd</sub>△△」の条件で火災室上昇温度ΔT<sub>f</sub>の異なる条件を示す。

表1 実験条件

実験名	上昇温度 ΔT <sub>f</sub> [K]	中空層 厚さ d[mm]	開口高さ H <sub>sd</sub> [mm]	開口高さ H <sub>so</sub> [mm]
d50 - H <sub>sd</sub> 50 - CL1.1	13.0	50	50	50
d50 - H <sub>sd</sub> 50 - CL1.2	21.6	50	50	50
d70 - H <sub>sd</sub> 50 - CL1.1	12.3	70	50	50
d70 - H <sub>sd</sub> 50 - CL1.2	20.9	70	50	50
d100 - H <sub>sd</sub> 50 - CL1.1	12.7	100	50	50
d100 - H <sub>sd</sub> 50 - CL1.2	22.1	100	50	50
d100 - H <sub>sd</sub> 50 - CL1.3	28.3	100	50	25
d50 - H <sub>sd</sub> 25 - CL1.1	13.1	50	25	50
d50 - H <sub>sd</sub> 25 - CL1.2	17.1	50	25	50
d100 - H <sub>sd</sub> 25 - CL1.1	12.8	100	25	50
d100 - H <sub>sd</sub> 25 - CL1.2	17.4	100	25	50

### 3.4 実験結果

図2にd100 - H<sub>sd</sub>50 - CL1.2の目視結果を示す。中空層内に流入した開口噴流は、空気を巻き込みながらインナースキン側を沿うように上昇し、2層目上部でアウトースキンと衝突していた。衝突後は空気と十分に混合した状態で上昇し、中空層頂部から流出していた。

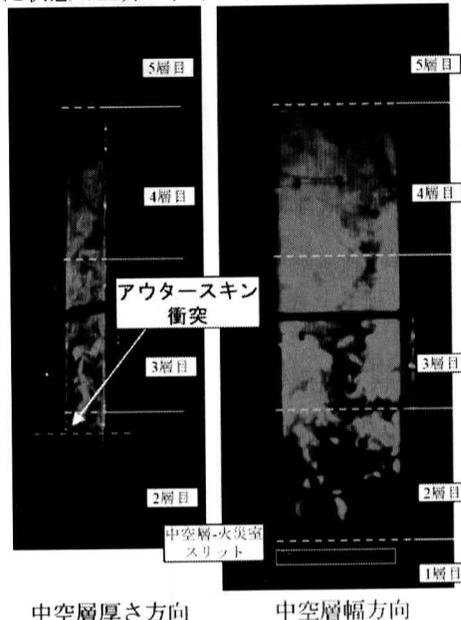


図2 目視結果

図3に中空層内鉛直分布を示す。噴流流入直後は煙と空気が十分に混合していないため厚さ方向で温度差が大きいが、アウトースキンと衝突後の混合域では厚さ方向の温度差はほとんどなく、流速は摩擦の影響により壁面近傍で小さくなっていた。

また噴流の吹き出し直後の性状について、縦軸に各測定点の上昇温度を同一断面内最大上昇温度で無次元化した無次元温度、横軸にインナースキンからの距離を温度分布の半値幅で無次元化した無次元距離をとった断面無次元温度分布、図5に高さごとの温度分布半値幅を示す。図4より、吹き出し直後の開口噴流の温度は正規分布に近い分布形であった。また、半値幅は高さに比例して増加しており、増加率は式(4)に示すフルード数Fr<sub>d</sub>[-]に比例していた(図6)。

$$Fr_d = \frac{v_f}{\sqrt{\frac{\Delta\rho_f}{\rho_f}gd}} \quad (4)$$

### 4. 中空層内温度分布のモデル化

3節の実験結果より、噴流の流入後からアウトースキン衝突までを領域①、衝突後から中空層頂部までを領域②とし、各領域で温度分布のモデル化を行った。

#### 4.1 領域① 温度分布

図4より、領域①の噴流断面温度は正規分布に近い分布形であったことから、図7に示すような仮想線熱源火災プルームに置き換えてモデル化した。

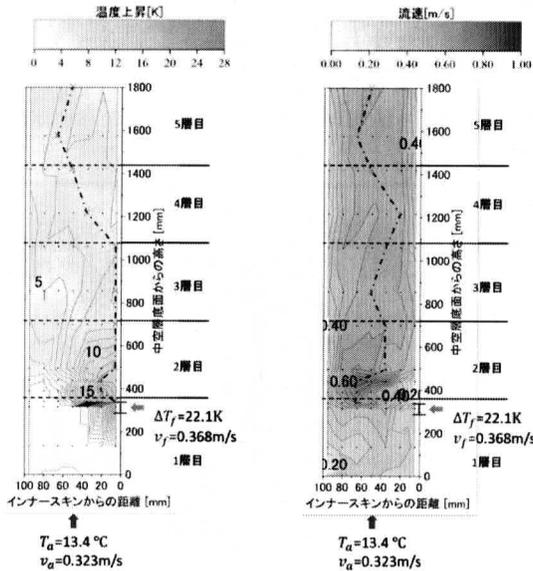


図3 中空層内鉛直温度・流速分布

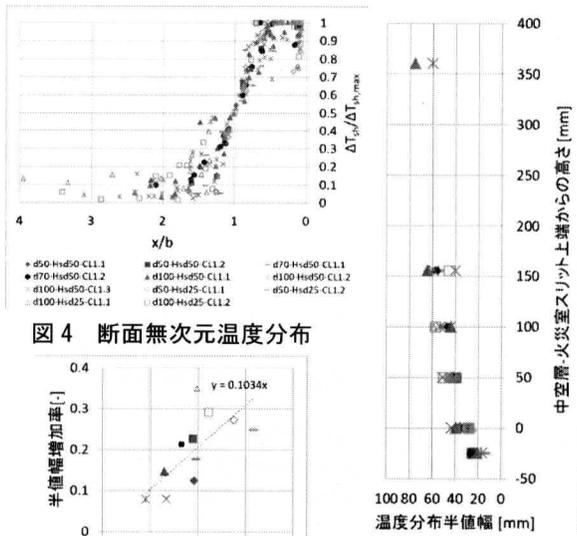


図4 断面無次元温度分布

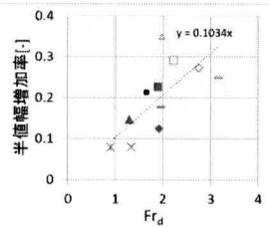


図5 温度分布

図6 半値幅増加率

領域①のプルーム運搬熱流量 $Q_f$ [kW/m]は

$$Q_f \propto \rho_{sh} c_p \Delta T_{sh}(z) d_p(z) v \quad (5)$$

である。式(5)にプルーム中気体の浮力と運動エネルギーの関係式(6)、実験から決定したプルーム幅 $d_p(z)$ [m]に関する式(7)、流入熱流量に関する式(8)を代入し、高さ $z$ [m]を $Z + Z_0$ [m]に置き換えると式(9)が得られる。なお、式(9)の比例係数は領域①に属する実験値を良好に再現するように決定した(図8点線)。

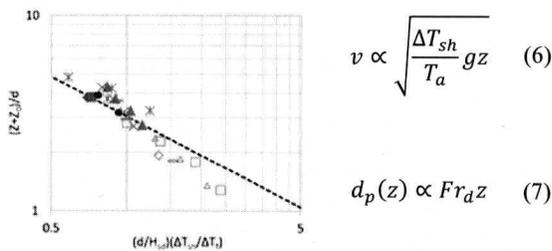


図8 領域① 温度分布  $Q_f = \rho_f H_{sd} v_f c_p \Delta T_f$  (8)

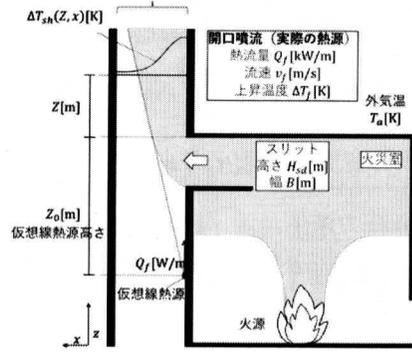


図7 仮想線熱源 概念図

$$\frac{Z + Z_0}{d} = 3.05 \left( \frac{d}{H_{sd}} \frac{\Delta T_{sh}(z)}{\Delta T_f} \right)^{-2/3} \quad (9)$$

#### 4.2 領域② 温度分布

領域②では微小高さ $dz$ [m]のコントロールボリュームの熱収支からモデル化した。

$$\frac{dQ_{sh}(z)}{dz} = -(Q_{wall,i} + Q_{wall,o}) \quad (10)$$

式(10)に各熱流量の項である式(11)を代入し、高さ $z$ [m]を $Z + Z_0$ [m]に置き換えると式(12)が得られる。Cは積分定数であり、各領域の境界条件で決定する。

$$Q_{sh}(z) = \rho_{sh} v_{sh} d c_p \Delta T_{sh}(z) \quad (11)$$

$$Q_{wall} = K \Delta T_{sh}(z) dz$$

$$\frac{Z + Z_0}{d} = -\frac{\rho_{sh} c_p v_{sh}}{K_i + K_o} \ln(\Delta T_{sh}(Z)) + C \quad (12)$$

#### 4.3 境界高さ

開口噴流プルーム幅と中空層厚さが等しくなる高さを領域①と②の境界高さとする。境界高さでのプルーム熱流量は $Q_f$ [kW/m]、質量流量は流入空気と噴流の流量の和 $m_a + m_f$ [kg/sm]より、プルーム温度 $\Delta T_{sh}(Z_{co})$ [K]が求まり、式(9)に代入することで境界高さ $Z_{co}$ [m]が式(13)で求められる。

$$Z_{co} = 3.05 \left( \frac{d}{H_{sd}} \frac{\Delta T_{sh}(Z_{co})}{\Delta T_f} \right)^{-2/3} d - Z_0 \quad (13)$$

#### 4.4 実験値と比較

図10に $d100-H_{sd}50-CL1.2$ の実験値と温度分布モデルの予測値を示す。図10より予測値は実験値を良好に再現できていた。そのほかの実験についても予測値が実験値を良好に再現できていた。

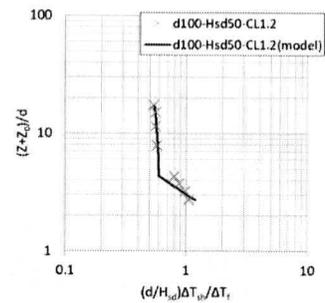


図10 無次元温度分布

#### 5. 実規模建物における中空層内煙流動性状の予測

実大スケールの煙性状予測は宮本<sup>[5]</sup>を参考にした。図11のような火災室以外の居室と中空層の空気のやり取りを無視したDS換気回路網計算に4節の中空層内温度分布を適用し、式(14)を連立して予測した。

・ Loop(a) 圧力保存

$$\frac{1}{2}\rho_a v_{af}^2 + \rho_f g h + \frac{1}{2}\rho_f v_f^2 + \int_0^{H_2} \rho_{sh}(Z) g dZ + \frac{1}{2}\rho_{sh} v_t^2 - \rho_a g(H_2 + h) = -\frac{1}{2}\rho_{sh} v_t^2 \lambda \frac{H_2}{D_e}$$

・ Loop(b) 圧力保存

$$\frac{1}{2}\rho_a v_a^2 + \rho_a g H_1 + \int_0^{H_2} \rho_{sh}(Z) g dZ + \frac{1}{2}\rho_{sh} v_t^2 - \rho_a g H = -\frac{1}{2}\rho_a v_a^2 \lambda \frac{H_1}{D_e} - \frac{1}{2}\rho_{sh} v_t^2 \lambda \frac{H_2}{D_e} \quad (14)$$

・ 火災室質量流量保存

$$m_{af} = m_f$$

・ 中空層内質量流量保存

$$m_a + m_f = m_t$$

避難安全性に対して有効な DS の仕様を提案するため、 $d50 - H_{sd}50 - CL1.2$ の実験条件を式(3)より実大換算した条件 (Full\_Base) と、火災条件は同じで DS の仕様を変更した条件 (Full\_1) における実大スケールの中空層内煙流動性状をそれぞれ予測する。表 2 に 2 つの入力条件を示す。

表 2 ダブルスキン計算モデル 入力条件

凡例	上昇温度 $\Delta T_f$ [K]	中空層 厚さ $d$ [m]	中空層底部 開口面積 $A_a$ [m <sup>2</sup> ]	開口高さ $H_{sa}$ [m]	開口高さ $H_{so}$ [m]
Full_Base	10.78	0.5	1.5	0.5	0.5
Full_1	10.78	1.0	0.6	0.25	0.25

図 12 に中空層内温度分布 $\Delta T_{sh}$ [K]と外気との圧力差分布 $\Delta P_{sh}$ [Pa]の予測結果を示す。図より、Full\_Base と比較して Full\_1 は、温度はあまり変わらないが中性帯は高くなり、上層階の避難安全性への支障を抑制できていることが分かった。

## 6. まとめ

DS の仕様や流入する煙の状態から中空層内温度分布を簡易に予測できるモデルを構築し、温度分布に基づいた中性帯高さの制御方法の提案するため、縮小模型実験を実施し、中空層内煙流動性状を明らかにした。また、実験結果から中空層内を 2 つの領域に分割して温度分布の予測式を提案した。さらに、DS 換気回路網計算に温度分布を組み込んで実大スケールの煙流動性状を予測し、上層階居室の避難安全性への支障を抑制するためには、中空層底部の開口面積を小さくすることで中性帯を高くし、中空層厚さを大きく、中空層-火災室スリット及び火災室外気側スリットの高さは小さくすることで中空層内噴流温度を下げるのが有効であることを明らかにした。

### 【謝辞】

本研究の一部は大井財団研究助成「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。ここに謝意を記す。

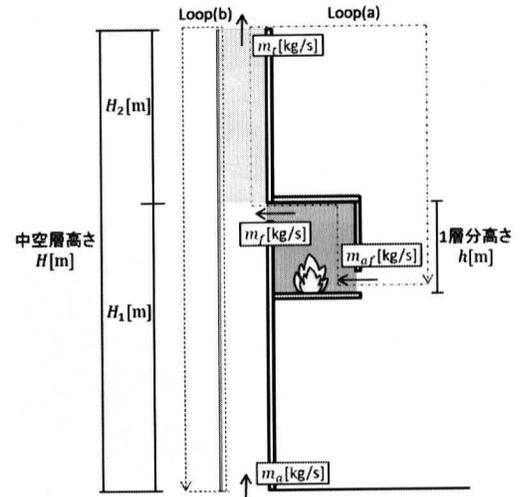


図 11 ダブルスキン計算モデル

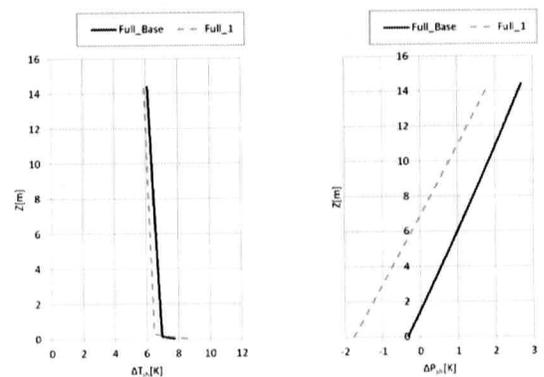


図 12 実大スケール予測結果

### 【記号】

$A_a$ : 中空層底部開口面積[m<sup>2</sup>],  $b$ : 温度分布半値幅[m],  $C$ : 積分定数[-],  $c_p$ : 空気比熱 [kJ/kgK],  $d$ : 中空層厚さ [m],  $D_e$ : 中空層断面水力直径 [m],  $d_p(z)$ : プルーム幅 [m],  $F_{Ra}$ : フルード数[-],  $g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>],  $h$ : 居室 1 層分高さ [m],  $H_1$ : 中空層底部から中空層-火災室スリット上端までの高さ [m],  $H_2$ : 中空層-火災室スリット上端から中空層頂部までの高さ [m],  $H_{sa}$ : 中空層-火災室スリット開口高さ [m],  $H_{so}$ : 外気側スリット高さ [mm],  $K$ : 熱貫流率 [kW/m<sup>2</sup>K],  $L$ : 長さ [m],  $m$ : 質量流量 [kg/s],  $p$ : 圧力 [Pa],  $\Delta P$ : 圧力差 [Pa],  $Q$ : 熱流量 [kW],  $q$ : 単位体積当たりの熱量 [kW/m<sup>3</sup>],  $T$ : 温度 [°C],  $\Delta T$ : 温度差 [K],  $t$ : 時間 [s],  $v$ : 流速 [m/s],  $x$ : インナースキンからの水平距離 [m],  $z$ : 高さ [m],  $Z$ : 中空層-火災室スリット上端からの高さ [m],  $Z_{co}$ : 境界高さ [m],  $Z_0$ : 仮想線熱源高さ [m],  $\alpha_t$ : 満温度拡散係数 [m<sup>2</sup>/s],  $\beta$ : 体膨張係数 [1/K],  $\lambda$ : 中空層内摩擦抵抗係数 [-],  $\nu$ : 渦動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s],  $\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $\Delta\rho$ : 密度差 [kg/m<sup>3</sup>]

(添え字) 0: 代表値, a: 外気及び中空層底面, af: 外気側スリット, f: 火災室及び中空層-火災室スリット, sh: 中空層内, sh, max: 中空層内最大値, t: 中空層頂部, wall, i: インナースキン, wall, o: アウタースキン

### 【参考文献】

- [1] 仁井他 (2015), ダブルスキンの火災安全上の課題に関する実験的検討 (その 3) 煙流動に関する基礎的検討, 日本建築学会学術講演梗概集 2015 (防火), pp367-368
- [2] 丁他 (2004), ダブルスキン建築による自然換気・排煙統合システムの可能性に関する研究 (第 1 報) ダブルスキン建築による自然換気・排煙統合システムの基本概念, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 No.2, pp1267-1270
- [3] 林他 (2018), 自然換気中のダブルスキンファサード内の火災時煙流動性状に関する研究, 京都大学大学院工学研究科建築学専攻修士論文
- [4] 竹越他 (1982), 非定常熱線法による直交異方性物質の熱伝導率測定法, 日本機械学会論文集(B 編)48 巻 433 号, pp1743-1750
- [5] 宮本他 (2020), ダブルスキン内の中空層厚さが煙流動性状に及ぼす影響に関する研究, 京都大学工学部建築学科卒業論文
- [6] AGC グラスプロダクツ株式会社 (2020), AGC 板ガラス建材総合カタログ 技術資料編 第 12 版, pp3-1-2, 3-2-1-3-2-4