

ダブルスキンとソーラーチムニーを用いた自然換気システムに関する研究

(その 1) 自然換気システム概要および縮小模型実験と CFD 解析による効果検証

STUDY ON NATURAL VENTILATION SYSTEM BY DOUBLE SKIN AND SOLAR CHIMNEY

Part1 Outline of Natural Ventilation System and Validation of the Effects

by Measurement of scale-down model and CFD analysis

伊藤 優*¹, 三浦 寿幸*², 村江 行忠*³, 栗木 茂*⁴

Yu ITO, Toshiyuki MIURA, Yukitada MURAE and Shigeru KURIKI

This study was conducted for the natural ventilation system of office building used by double skin and solar chimney. In this paper, firstly, the outlines of the natural ventilation system and an experimental scale-down model built for the effect were described. Secondary, measurements and CFD analyses were conducted on the condition of hybrid ventilation that the setting temperatures of office room were 24 °C and 28 °C at outdoor air temperature 20 °C changing amount of solar radiation conditions 0W/m² to 800W/m². The CFD analyses were performed by changing the thermal boundary conditions of the wall under the same condition as heat value from planate heater with the measurement. And the temperature distribution and ventilation volume were compared. The following results were obtained.

1. In the space of double skin and solar chimney, solar radiation increased, the air temperature and temperature difference between up-to-down also increased.
2. It was confirmed that as solar radiation increased, the ventilation volume also increased.
3. The analyses results of ventilation volume and temperature in the model were evaluated more than the results of the measurements. However, in the case considering thermal transmission, the result was improved.

Keywords : Natural Ventilation, Double Skin, Solar Chimney, Scale-down Experiments

自然換気, ダブルスキン, ソーラーチムニー, 縮小模型実験

1. はじめに

地球温暖化対策は喫緊の課題であり, 建築分野においては CO₂ 排出量を削減すべく, ZEB(Zero Energy Building)化の取組みが進められている. 自然換気は冷房エネルギーの削減に寄与する他, 室内空気質を維持・向上する効果があることから, 有用な環境配慮技術と考えられている. 近年のオフィスビルにおいては, ファサードと合わせた自然換気システムの事例が増加している.

本研究ではオフィスビルのダブルスキンとソーラーチムニーを用いた自然換気システムを対象とし, 設計の基礎データを得ることを目的に, 縮小模型を製作して換気性状の検討を行った. ただし, 縮小模型を用いた測定は, 風速の測定精度の問題, 実験室の温度制御, 建物壁面の熱境界条件の違い等, 実験上の制約があるため, 想定したい条件をすべて賅えないという課題が挙げられる. 一方で CFD 解析はこれらの制約にとらわれず, 全体の流れ・熱の移動の他, 室内細部の分布予測に有効である. そこで, 本研究は模型実験を行えない条件は CFD 解析によって検討を進めることとする.

本報では, まず自然換気システムと製作した縮小実験模型の概要について述べる. 続いて, 模型実験と再現性の確認のための CFD 解析によって温度分布および日射量と換気量の関係を検討した結果について述べる.

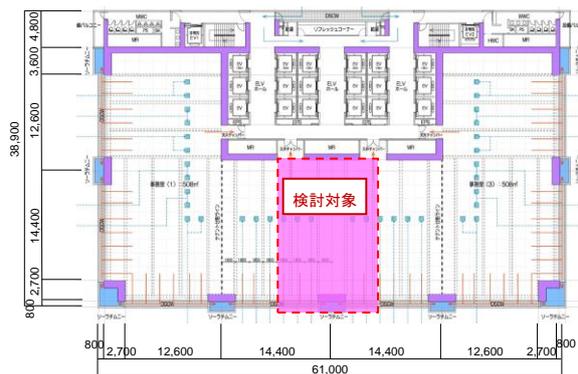


図 - 1 オフィスビル基準階平面図

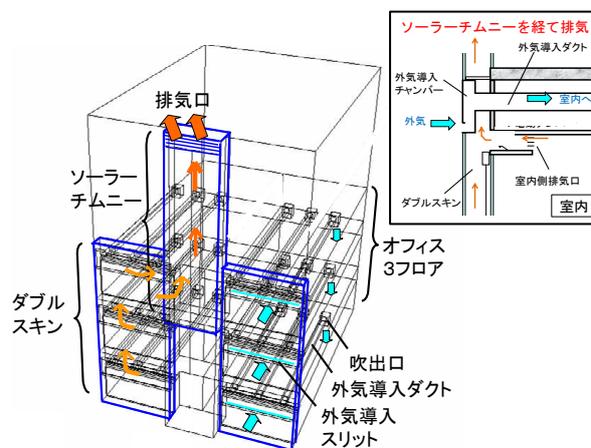


図 - 2 自然換気システム概要

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

*2 筑波技術大学 産業技術学部 教授・博士 (工学)

*3 戸田建設株式会社技術開発センター 工学修士

*4 戸田建設株式会社技術開発センター

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M. Eng.

Prof., Tsukuba University of Technology, Dr. Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M. Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION

2. 自然換気システムの概要

図-1 に検討対象とした自然換気システムの採用を想定したオフィスビルの基準階平面図、図-2 にその基準階の一部(検討領域)についての自然換気システムの換気経路をそれぞれ示す。

検討領域は幅 14.4m(1 スパン)×奥行 18.9m×天井高さ 2.9m で階高 4.2m を想定している。

オフィスビルの外皮はダブルスキン(奥行 800mm 想定)とソーラーチムニー(奥行 1,100mm 想定)で構成され、それらを自然換気システムの排気経路として利用する。ダブルスキン内のブラインドおよびソーラーチムニー受熱面に日射が当たり、そこで暖められた空気の浮力が自然換気の駆動力として期待できる。ダブルスキンの外側に設けた外気導入チャンバーとオフィス室内とをダブルスキンを貫通して天井に配管した外気導入ダクトで接続することにより、室内への外気の流入経路を形成している。排気は室内側排気口→ダブルスキン→ソーラーチムニー→チムニー上部排気口の順の経路である。ダブルスキンは3層吹抜けで、その最上層とソーラーチムニーが開口を介して接続されたユニットを形成している。ソーラーチムニーも3層分の高さがあり、ダブルスキンよりも2層分高い位置に配置して上下のユニットと立面上でかみ合う構成である。

冷房時は外気導入チャンバーから室内側排気口までの換気経路を閉じ、ダブルスキン下部に設けるスリット開口を開放することで、ダブルスキンとソーラーチムニー内部の換気がなされる。

3. 縮小模型の概要

上記自然換気システムの換気性状の検討を行うことを目的に縮小模型を製作した。製作対象は、図-1 および図-2 に示したオフィス3フロア1ユニットにおける、検討領域の1/2 スパンである。外観を写真-1、平面図と断面図および測定点を図-3 に示す。実験室内での作業性を考慮し、模型の縮率は1/10とし、模型の大きさは幅 720mm×奥行 2,000mm×高さ 2,100mm である。

模型の材料は厚さ 10mm(ただし外気導入チャンバーは 5mm, 外気導入ダクトは 3mm)の亚克力板を使用し、実験の際は模型周囲のほぼ全体^{注1)}を厚さ 25mm の断熱材で覆った。換気経路中の開口面積は表-1 に示す通りである。

既往の研究におけるソーラーチムニーによる自然換気を対象とした模型を用いた実験では、チムニー受熱面などの発熱面の表面温度を設定条件に制御する方法で行われる例が多い¹⁾。本研究では日射を受ける部分と内部負荷の発熱が想定される箇所に各実験ケースの条件にそれぞれ対応した発熱量を与える方法とした。発熱体の概要を表-2 に示す。発熱が想定される箇所は、ダブルスキン内のブラインド表面(3層分)、ソーラーチムニー受熱面、オフィス室内(3層分)の3項目である。それぞれにシリコンプレートと一体の面状アルミ箔ヒーターを設置して電力メー

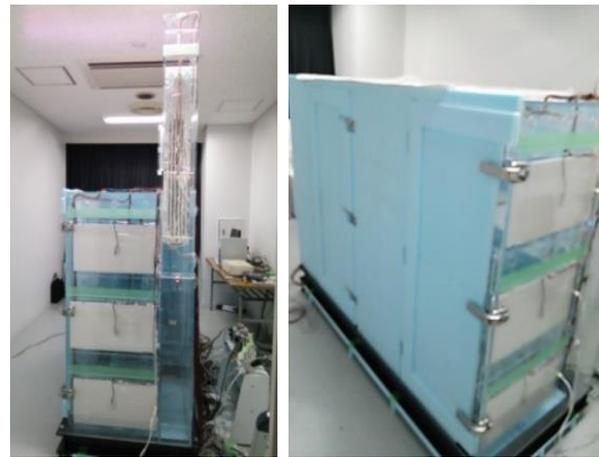
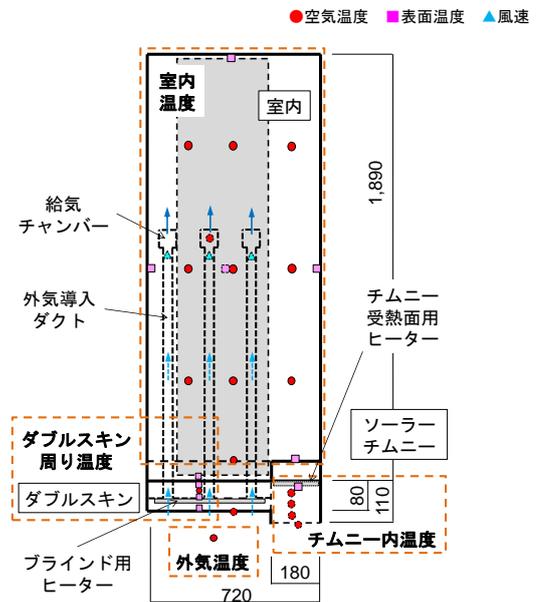
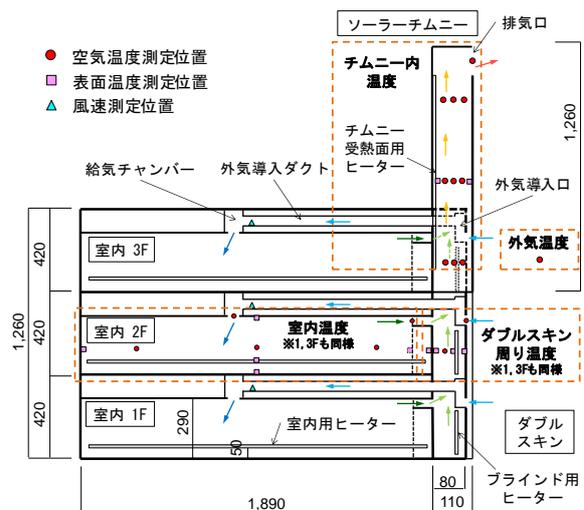


写真-1 実験用縮小模型



(1) 平面図



(2) 断面図

図-3 縮小模型の図面および測定点

ターと変圧器を接続し、電力を計測しながら発熱量を調整するものとした。

実験模型は、戸田建設(株)技術開発センター 室内環境研究施設小実験室(5.3m(L)×3.1m(W)×2.5m(H))に設置した。実験室の室温は天井埋込カセット型エアコンで制御し、外気温を模擬した。また、空調吹出口と模型の間に板を設置し、空調の気流が模型の外気導入口や排気口へ直接影響しないように配慮した。

4. 本模型実験の相似則

相似則については既往の研究²⁾を参考に、「室内気流の大半は乱流域であり、それも壁面近くの乱流域境界層はごく薄く、大部分が十分に発達した乱流域である」と仮定することで、(1)式の実用的相似則の式に従うものとした。

$$n_L n_\theta = n_U^2 \quad (1)$$

また今回の模型実験において、発熱体からの熱移動は対流により行われると仮定し、熱的相似則条件は対流輸送と内部発熱の関係から(2)式となる。

$$n_H = n_U n_\theta n_L^2 \quad (2)$$

上記を用いて、本実験は $n_L=1/10$ であるので、 $n_\theta=1$ とすると、 $n_H=0.00316$ 、 $n_U=0.316$ となる。

また、熱貫流率の縮率 n_k は(3)式で与えられる。

$$n_K = n_U \quad (3)$$

ダブルスキンやチムニーのガラス部分の熱貫流率の縮率をあわせるためにはアクリル板を 17mm の断熱材で覆う必要がある。

- n_L : 模型の縮率[-]
- n_θ : 温度の縮率[-]
- n_U : 流速の縮率[-]
- n_H : 発熱量の縮率[-]
- n_k : 熱貫流率の縮率[-]

5. 模型実験と CFD 解析の概要

5.1 検討ケース

縮小模型を用いた実験と CFD 解析による検討は、表 - 3 に示すように、実大スケールにおける室温と鉛直面日射量をパラメータとした 10 ケースを対象に実施した。ダブルスキンのブラインドとチムニー受熱面として設置したヒーターの発熱は、それぞれの日射吸収量を仮定し、相似条件に従って 1/10 スケールに換算した熱量を与えた。いずれも外気温度は 20℃であり、室温は自然換気時に補助冷房を併用した場合を想定して各フロアの平均室温が設定温度に近似するように調整を行った。

5.2 縮小模型実験概要

表 - 4 に測定項目と使用機器を示す。測定点は図 - 3 に示す通りである。空気温度と壁表面温度は、T 型熱電対を用いて合計 84 点測定した。外気導入ダクト(計 9 本)にそれぞれ貼付型風速プローブを設置し、ダクト断面の面風速測定値から通風量を算出した。発

表 - 1 縮小模型の開口面積

開口部	寸法 [mm]	面積 [10 ² mm ²]	個数	合計面積 [10 ² mm ²]
チムニー排気口	180×160	288	1	288
室内側排気口	540×40	216	3	648
室内への吹出口	60×40	24	3	72
外気導入ダクト	内径 34	9.1	9	82
外気導入スリット	540×20	108	3	324

表 - 2 発熱体

項目	個数	ヒーター寸法 [mm]	設置位置	発熱方向
ダブルスキン(ブラインド)	3	245×500	外気導入チャンバー下方	ダブルスキン内(室内側)
ローラーチムニー受熱面	1	180×900	室内側の壁面	チムニー内(屋外側)
ワイス室内内部負荷	3	400×1,800	FL+50mm(断熱材で嵩上げ)	上

表 - 3 検討ケース

Case 名	実験条件 (実大スケール)			模型実験・解析設定値 (1/10 スケール)	
	外気温度 [°C]	室温 [°C]	鉛直面日射量 [W/m ²]	チムニー受熱面 [W]	ブラインド表面 [W]
20-24	20	24	0	0	0
			200	12	19
			400	24	38
			600	36	57
			800	48	76
20-28	20	28	0	0	0
			200	12	19
			400	24	38
			600	36	57
			800	48	76

表 - 4 測定項目と使用機器

項目	点数	使用機器・センサー
空気温度 表面温度	84	T 型熱電対
		GL820 データロガー (グラフテック)
風速	9	多点式風速計 GeZ-200DA (トーニック)
		貼付型風速プローブ QB-10 (トーニック)

熱体を発熱させた後、概ね定常と判断できる状態から 1 分間隔で計測し、30 分平均値をとった。

5.3 CFD 解析概要

模型実験で捉えきれない細部や実験条件についてを CFD 解析によって検討を進める上で、模型実験の再現性の確認が必要と考えられる。ここでは模型実験と同じ温度条件で壁面の熱境界条件の違いによ

て温度分布や換気量にどの程度の差が生じるか把握し、予測の際の課題を検討することを目的に、CFD解析を実施した。

(1) 解析条件

図-4に解析モデル、表-5に解析条件をそれぞれ示す。解析モデルは1/10スケール模型実験を再現した。模型外部の気流の影響がないようにするため、解析領域は外部水平方向に4mずつ、高さ方向に8mの自由空間を設けた。外部については、無風時の自然換気を想定し、鉛直4面の境界は全圧0Pa条件、上面は自由流出条件を与えた。設定外気温度20℃は、初期条件として解析領域に一律に与えた。

模型内部については、ダブルスキン内のブラインド表面、チムニー受熱面およびオフィス内部負荷分の発熱を模擬して模型に設置した面状ヒーターを再現し、面発熱条件を与えるものとした。ブラインドとチムニーの発熱量は表-3に示す通りの値とし、オフィス内部発熱については、実験時の調整状況から24℃の場合は10W/階、28℃の場合は15W/階とした。また、模型の外気導入ダクトを除くオフィスの天井裏およびソーラーチムニーの室内側に接した壁柱の内部は解析対象外とした。

メッシュ分割について、模型内部および周囲0.1mと高さ方向0.4mの外側までの領域は、マルチブロックを用いて外部に比べてさらに細分割した。

(2) 解析ケース

表-3に示した各温度・発熱条件ケースに対してそれぞれ、模型壁面の熱境界条件を表-6に示す通り、4パターンを解析した。

解析 a は模型内部の発生熱の移動が全て対流で行われると仮定し、模型の壁面と流体間で熱の移動が無いように断熱とした場合である。

しかし、実施した模型実験では10mmの亚克力板と25mmの断熱材で施した壁における熱伝導があるので、それを再現した解析 b を設定した。亚克力板と断熱材の熱伝導率をそれぞれ0.21W/mK、0.033W/mKとした。

Case20-28のうち鉛直面日射量400W/m²の条件のみ、解析 c と解析 d の2パターンを加えた。解析 c は、発熱ヒーターも含めて模型実験で得た各壁面における表面温度測定値を与え、熱伝達係数(9.0W/m²)³⁾を指定して面発熱させたものである。解析 d は4章で述べたように、ダブルスキンとチムニーのガラスを実際のもので熱貫流率の縮率を合わせるために亚克力板を17mmの断熱材で覆った場合であり、解析 b との違いの把握を試みた。なおオフィス室内については、室内温度を模型実験になるべく近づけるため、解析 c と同様とした。

6. 実験と解析の結果の比較

6.1 温度分布

(1) 内部の温度分布の実験結果

図-5にCase20-24(オフィス設定室温24℃)とCase20-28(オフィス設定室温28℃)について、鉛直面

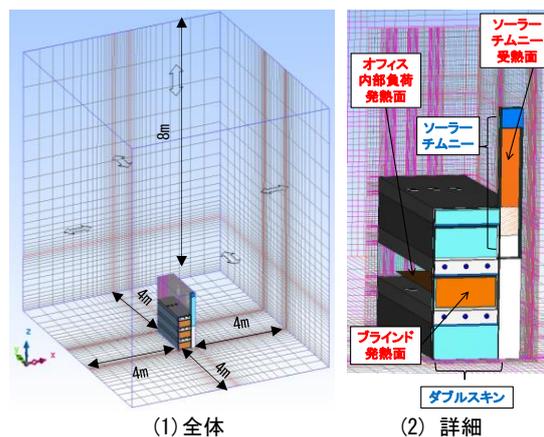


図-4 解析モデル

表-5 解析条件

解析ソフト	熱流体解析ソフト Stream Ver.11 (ソフトウェアクレイドル)
乱流モデル	標準k-εモデル
解析領域	・全体: 8.72(x)×10(y)×10(z) [m] ・ブロック: 0.92(x)×2.2(y)×2.5(z) [m]
メッシュ分割	・全体: 49(x)×60(y)×62(z) = 182,280 ・ブロック: 102(x)×115(y)×184(z) = 2,158,320 ・合計: 2,314,380
解析領域 流出境界条件	・鉛直4面(X/Y min/max): 全圧0Pa ・上面(Zmax): 自然流出
壁境界条件	一般対数則
発熱条件	ヒーター表面に発熱量[W]を面発熱として与えた ・ブラインド・チムニー受熱面: 表-3の通り ・オフィス内部負荷(1フロアあたり): 室温24℃設定: 10W 室温28℃設定: 15W
壁熱境界条件	・模型内部: 表-6の通り ・解析領域外: 断熱

表-6 解析ケース

	壁面熱境界条件	備考
解析 a	断熱	—
解析 b	熱貫流考慮	—
解析 c	実験の表面温度	Case20-28の鉛直面日射量400W/m ² の条件のみ
解析 d	ガラス面熱貫流の縮率考慮	

日射量が0W/m²から800W/m²まで変化したときのダブルスキンとチムニー内の空気温度上下分布を示す。鉛直面日射量が0W/m²の条件でのダブルスキンおよびチムニー内の空気温度はオフィスの室温よりも低い状態にあるが、それらは日射量が大きくなるにつれて上昇し、200 W/m²でオフィスの室温と同等かそれ以上となった。さらに日射量が大きくなるとダブルスキンおよびチムニー内の空気温度の上昇と共に上下の温度差が増大する傾向になった。

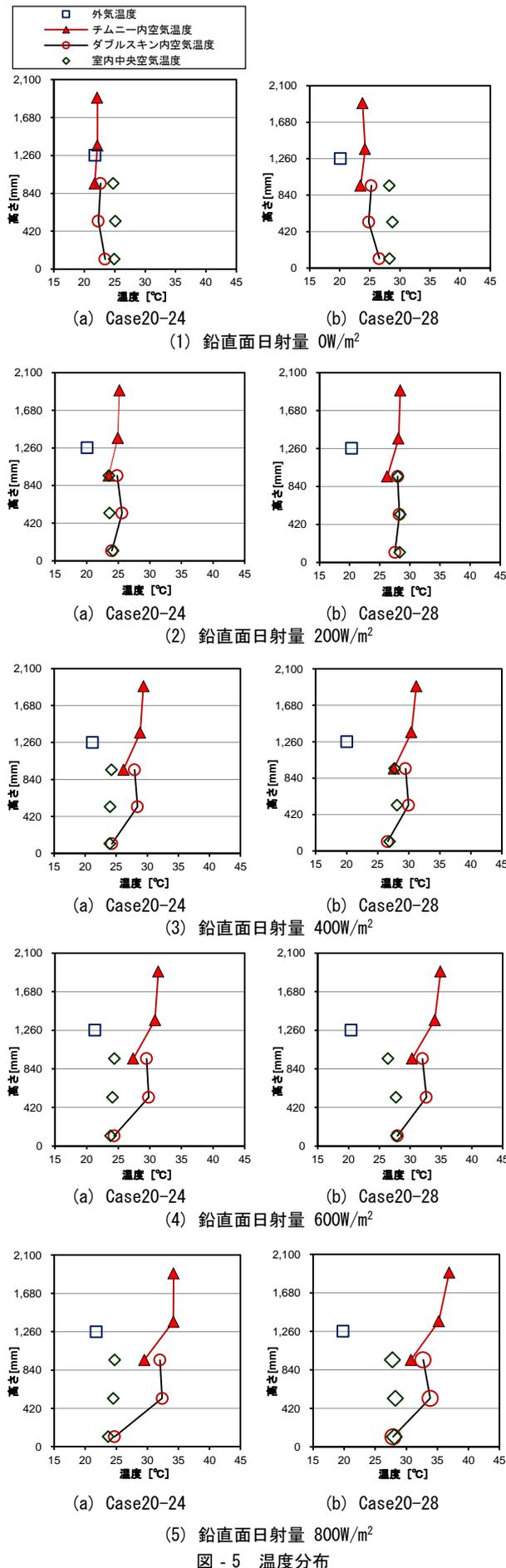


図 - 5 温度分布

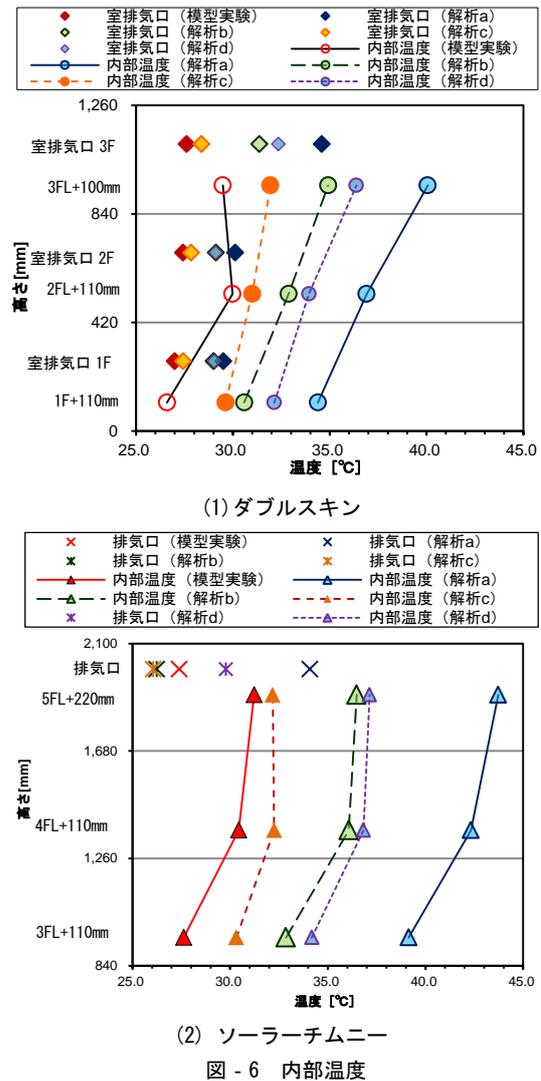


図 - 6 内部温度

(Case20-28(室温 28°C設定)、鉛直面日射量 400W/m²)

(2) ダブルスキンおよびチムニー内部温度の比較

図 - 6 に Case20-28 のうち鉛直面日射量が 400W/m² 条件における内部の詳細な温度分布を示す。

①ダブルスキン周り (図 - 6(1))

各階における室排気口の温度を比較すると、解析 a,b,d は、1・2 階において模型実験より 2~3°C 高い。これは室内の発熱量のうち対流でダブルスキン内へ排出された成分が多いと考えられる。また、3 階において模型実験との温度差が大きくなったのは、ダブルスキン内を上昇した気流が若干室内側に入り込んだためである。解析 c については、模型実験と平均室温が一致していたため、排気口においてもほぼ近似した温度となった。

内部の上下温度分布を見ると、解析 a は模型実験より 7~11°C と温度差が大きく評価され、ブラインド表面の日射による加熱の影響がそのまま空気温度の昇温に寄与した。解析 b は模型実験との温度差が、3~4°C 程度となり解析 a より小さくなった。解析 d はダブルスキン前面に被覆がない解析 b に比べ、熱貫流による損失が少ないので 1.5°C 高い結果であった。

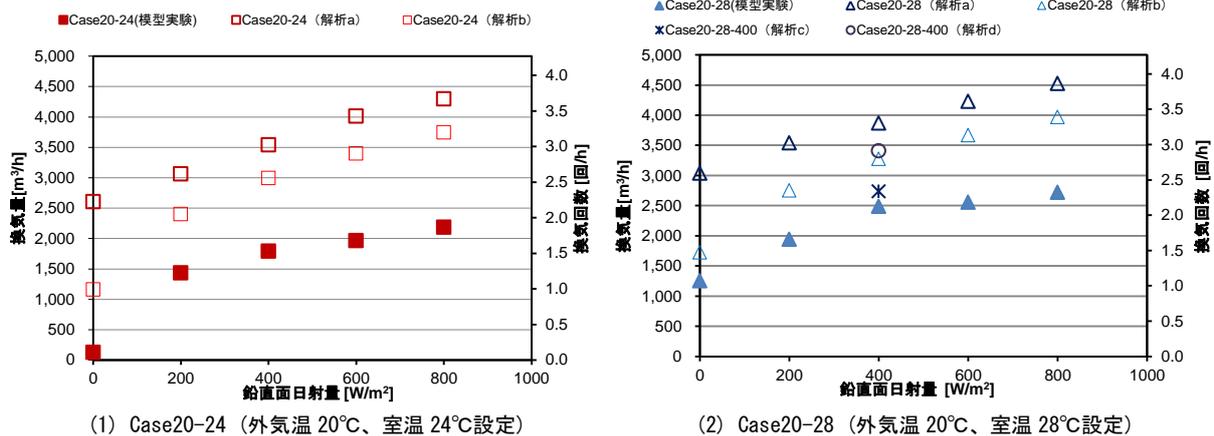


図 - 7 鉛直面日射量と換気量の関係

本検討では実際のシステムより温度を低く見積もっていると考えられる。

②ソーラーチムニー内部の上下温度分布(図 - 6(2))

3階における内部温度は、解析 a を除いてダブルスキン内部 3 階の温度(図 - 6(1))より低くなった。3 階ではダブルスキンとソーラーチムニーが開口を介して水平方向に接続されるが、ダブルスキンからの暖まった気流は開口の上部を通過することと、チムニーの底面において躯体への熱移動があることが原因と考えられる。

内部の上下温度分布をみると、解析 d と解析 b の温度差は 1.0°C 前後になり、ダブルスキン内より温度差が小さくなった。

チムニー排気口の温度については、いずれもチムニー内部空気の最上部より低くなった。これは排気口の面の中心で比較した値だが、排気口は上部では排気されるものの下部では外気の逆流が生じたためと考えられる。

6.2 日射量と換気量の関係

図 - 7 に、Case20-24 と Case20-28 それぞれの鉛直面日射量と実大スケール換算した換気量・換気回数の関係の比較を示す。換気量は外気導入ダクトの面風速より算出した通風量の合計値である。模型実験、解析ともに、日射量が大きいか換気量が増える傾向と、室温が高く室内外温度差が大きいか換気量が多い様子が確認できた。

日射がある場合における模型実験での換気回数は、Case20-24 で 1.0~2.0 回/h 程度、Case20-28 で 2.3~3.5 回/h 程度であった。これらに対し、解析 a では平均して模型実験の 1.6~2.0 倍程度であり、模型壁面の熱貫流を考慮した解析 b ではより実験結果に近づくものの 1.2~1.4 倍程度となった。断熱条件で予測した場合、室内で発生した熱がそのままダブルスキンやチムニー内部の昇温に寄与するため、換気が促進されたと考えられる。

7. おわりに

ダブルスキンとソーラーチムニーを用いたオフィスの自然換気システムと、その換気性能を検証するために製作した縮率 1/10 の模型の概要を説明した。そして、縮小模型を用いた実験とその再現性検討のための CFD 解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) ダブルスキンおよびチムニー内では、日射量が大きくなるにつれて内部の空気温度が上昇すると共に上下の温度差が増大する傾向になった。
- 2) 模型実験・解析ともに、日射量が大きいか、また室温が高く室内外温度差が大きいか換気量が多くなる傾向が確認できた。日射がある場合における模型実験での換気回数は、Case20-24 で 1.0~2.0 回/h 程度、Case20-28 で 2.3~3.5 回/h 程度であった。
- 3) 1/10 スケールの模型実験を対象とした CFD 解析を行うと、内部の空気温度が高く、換気量が大きめの傾向となった。また、模型実験で得た各壁面の表面温度測定結果を初期値としたケースの CFD 解析は、実験に近い結果を示せた。予測精度の改善には壁面熱境界条件の検討が課題として残された。
- 4) 実際の自然換気システムのガラス面における熱貫流の縮率を合わせた解析との比較より、本検討では実際のシステムより温度予測が低く見積もっていると考えられた。

今後は、模型の壁面の相互輻射を考慮して壁面温度が実験結果に近似するか確認することや、9.0W/m² とした熱伝達係数といったパラメータの妥当性を検証し、予測精度の改善を図る。

注釈

注 1) 実際は、外気導入スリットのあるダブルスキンの外側表面のみ断熱材の被覆が無く、他の外側表面はすべて厚さ 25mm の断熱材で覆った状態であった。

謝辞

縮小模型を製作するにあたって早稲田大学 長谷見雄二教授に貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、趙晟佑、木村建一: ソーラーチムニーによる自然換気システムの性能予測に関する実験研究、空気調和・衛生 工学会論文集、No.81、2001 年 4 月、pp11-19
- 2) 勝田高司、土屋喬雄: 室内空気分布の模型実験法に関する研究 第 1 報—室内空気分布の実用的相似則、空気調和・衛生 工学会論文集、No.17、1981.10
- 3) 井上宇市. 空気調和ハンドブック. 改訂 5 版, 丸善株式会社, 2008, p.57