実用的熱負荷シミュレーションのための NewHASP と換気回路網プログラムを用いたダブルスキン多数室モデルの構築 キャビティ通過風量およびブラインド循環風量への換気回路網によるアプローチとブラインド制御性能評価

MODELING OF DOUBLE-SKIN FAÇADE SYSTEM USING NEWHASP AND VENTILATION NETWORK PROGRAM FOR PRACTICAL THERMAL LOAD SIMULATION

A ventilation network approach to double-skin cavities, blind circulation airflow and blind operation performance

相 賀 洋^{*1}

Hiroshi OHGA

Recently, double-skin façade systems combining various solar shading and glazing panes has been devised as the facade of ZEB. Therefore, there is a need for a practical thermal load simulation model that can evaluate various double-skin facades systems and can be used in mechanical design work. In this paper, using NewHASP and a ventilation network program, a multi-space model of the entire double-skin facade system consisting of a double-skin cavity, an air layer between the blind and the inner glazing pane, and the room, is proposed. And clarify the effect of blind slat angle control on thermal performance of double-skin.

Keywords : NewHASP, Ventilation Network, Double-skin facade, Multi zone simulation, Blind circulation airflow, Slat angle control

NewHASP, 換気回路網, ダブルスキン, 多数室, ブラインド循環風量, スラット角制御

1. はじめに

最近 ZEB のファサードとして、様々な日射遮蔽物やガラスを組み合わせたダブルスキンが考案されている。そのため多様なダブルスキンを評価でき、かつ設備設計の実務で利用できる実用的な熱負荷シミュレーションモデルが求められている。特にダブルスキンは室内外への透明性が求められる建築に採用される場合が多く、室内熱環境だけでなく室内光環境的な視野からも性能評価および設計がなされるべきである。さらに最近改めて注目されているのは、自然光を積極的に取り入れて、働く人々の健康・快適性を向上させ、かつ省エネルギーを実現させようとする昼光利用システムである。大木・吉澤・相賀¹⁾らは、光環境シミュレーションプログラム Radiance²⁾と動的熱負荷計算プログラム NewHASP/ACLD³⁾を用いて一般ガラスと外部・内部日射遮蔽物の組み合わせた昼光利用システムのエネルギー性能・グレア・眺望性評価および多目的最適化を行った。

今後、透明性を保ちつつ自然光の導入により快適性向上と省エネルギー効果が得られるダブルスキンと日射遮蔽物を組み合わせた昼光利用システムの開発が期待される。ダブルスキンの場合、煙突効果による駆動力を高めるために、ブラインドなどの日射遮蔽物はダブルスキンの外側ガラスと内側ガラスの間の通風する空間（以降、キャビティという）に設置されることが多い。そのため日射遮蔽物

の制御、たとえばブラインドのスラット角制御は、ブラインド循環風量やキャビティ通過風量、さらに居室側への熱流へと連鎖的に影響を及ぼし、ダブルスキン全体の性能に影響すると考えられる。しかしながら、キャビティ内部に設置したブラインドのスラット角制御が、ダブルスキンの換気および熱性能に及ぼす影響について解析するには、換気・伝熱・光学モデルの連携が必要となるため解析事例は少ない。

そこで、本論文では NewHASP と換気回路網プログラム（以降、CVNEC と略す）を用いて、ダブルスキンのキャビティ（以降 DS と略す）、ブラインドとダブルスキン内側ガラスとの間の空気層（以降 BS と略す）およびダブルスキンに接する居室（以降 RM と略す）で構成されるダブルスキンファサードシステム全体の多数室モデルを構築し、ブラインドのスラット角制御が、ダブルスキンの熱性能に及ぼす影響について明らかにする。

はじめに CVNEC でダブルスキンキャビティ通過風量およびブラインド循環風量を求める換気モデルを構築した。つぎにメタシミュレーション⁴⁾⁵⁾技術を用いて、これらの風量を NewHASP プログラム内部でスペース間移動風量として取り込み、NewHASP に組み込まれている多数室計算機能により、DS と BS の空気温度および RM 熱負荷を求める。この DS、BS、RM それぞれの日射熱取得率を求めるための伝熱モデルとして、多数室計算用の日射熱取得率を新たに

^{*1} (株)大林組 博士(工学)

Obayashi Corporation, Dr.Eng.

考案した。またこの日射熱取得率を求めるために必要なブラインド単体の透過率等は、Radiance により作成したスラット角とプロファイル角を与えて透過率等を求めるモデル¹⁾を光学モデルとして用い、各種ブラインド制御方法を考案しブラインド制御モデルを作成した。DS、BS、RM の温度はキャビティ通過風量およびブラインド循環風量により変化し、キャビティ通過風量およびブラインド循環風量は DS、BS、RM の温度により変化する。そのため温度と風量の反復計算により、DS、BS の温度および RM の熱負荷を求めるプラットフォームを構築し解析を試みた。

今回は冷房最大日における DS、BS 温度特性と RM 熱負荷特性、キャビティ・ブラインド循環風量特性、年間冷房時各種ブラインド制御シミュレーション結果について報告する。今後は、Radiance と NewHASP を使用してダブルスキンと日射遮蔽物を組み合わせた昼光利用システムの性能評価を行う予定である。

2. 既往研究

実用熱負荷計算プログラムに組み込み可能なダブルスキンの実用的熱負荷計算法に関して、岩崎、酒井⁹⁾は日周期定常計算法によるダブルスキンの多数室モデルを構築し、設計用動的熱負荷計プログラム DYLOAD に組み込んだ。郡・石野⁷⁾は、ダブルスキン用の熱流重み係数を用いた熱計算式とダブルスキンの熱性能値を整備し、その利用法を示した。さらにその熱計算式をエネルギーシミュレーションツール BEST[®]へ組み込んだ。柳井⁸⁾らは、熱換気回路網プログラム NETS[®]を用いてダブルスキンを含めた建物全体のモデル化・各種検討を行った。尹、奥宮⁹⁾らは、シミュレーションによりダブルスキンの SC 値、U 値を示した。張本・武田¹⁰⁾らは、熱負荷計算プログラム LESCO[®]をベースとして、ユニット化された単層ダブルスキンの熱的性能の検討を行った。浅川・加治屋¹¹⁾は、ブラインドも含めたダブルスキンキャビティ内の温度・気流分布を実測および CFD 解析で再現した。ブラインドの熱移動に関して、稲沼・石野¹²⁾らは断熱箱実験により遮蔽係数を求める日射熱移動モデルを構築した。五味・永田¹³⁾らは窓ガラスと室内ブラインドの中空層の自然対流による空気の流れと熱流量を実験および CFD 解析で明らかにした。鈴木¹⁴⁾らは、ブラインド面を介した中空層と室内間の換気について、数値風洞実験により圧力差と風速の相関関係を求めた。

しかしながら、キャビティ内部に設置したブラインド制御が、ダブルスキンの換気および熱性能に及ぼす影響について解析し、実務設計用として空調機器容量算定が可能な実用的熱負荷シミュレーション体系に展開できるモデルとして構築された事例は少ない。本論文では、NewHASP を中心としたメタシミュレーション技術により、換気回路網による換気モデル、多数室計算用の日射熱取得率による伝熱モデル、Radiance により求めたブラインドの光学モデルを用いて、キャビティ内部に設置したブラインドのスラット角制御が、ダブルスキンの熱性能に及ぼす影響について明らかにする。

3. ダブルスキン多数室モデルの構築

3.1 ダブルスキン多数室換気モデル

Fig.1 に換気モデルの換気回路網を示す。Fig.1 の破線 (---) 枠内の換気回路網は、上下方向に各階 DS、水平方向に BS で構成されているダブルスキン多数室換気回路網本体を示す。

Fig.1 Double-skin façade ventilation Network models

Fig.1 の点線 (····) 枠内の換気回路網は、上下方向に各階 DS の室温補正用換気回路網(3.1.2 参照)を示す。この 2 種類の換気回路網は、NewHASP 既往の入力データ¹⁵⁾のスペースデータ (以降 SP と略す)、侵入外気データ (以降 INFL と略す)、スペース間空気移動データ (以降 CFLW と略す)を用いて、CVNEC の換気回路網の節点、開口、流路情報を新規追加情報として与える。

3.1.1 ダブルスキン多数室換気回路網本体

DS 上部開口、下部開口条件として換気開口の流量係数×開口面積、DS 間の開口条件としてグレーチングの流量係数×開口面積、BS⇔DS 間の開口条件としてブラインドの流量係数×窓面積を与える。ブラインドの流量係数は、Fig.2 に示すブラインドのスラット角 (絶対値) と流量係数の関係¹⁴⁾により求めた。

Fig.2 Coefficient of flow rate vs. blind slat angle¹⁴⁾

(Note: The coefficient of flow rate was obtained from the approximate equation coefficient shown in the literature.)

3.1.2 各階 DS 室温補正用換気回路網

NewHASP の多数室計算では、同一条件の室(例えば Fig.1 の DS2 ~DS4) を連結させて、一方向にダブルスキンキャビティ通過風量 CFLW を与えると、同一条件の室 (DS2~DS4) はすべて同一室温になる。そのため、外気流入側となる最上階もしくは最下階の換気口から外気が初めて流入した DS (以降、第 1 DS と略す) の室温と残りの階の DS の流入前同一室温 (まだ第 1 DS からの通過風量が流入しない状態の室温) から、残りの各階 DS の流入後室温 (第 1 DS からの通過風量が順次流入した状態の室温) を新たに求める。この流入後室温となるための室温補正用相当侵入外気量を各階について算出し、NewHASP 内部で相当侵入外気量を侵入外気量として与えて置換し、各階室温を補正する。この補正のため、中間階に室温補正ダミー外気侵入データ INFL を作成し、室温補正用相当侵入外気量と置換する。補正後の n 階 DS 室温は式(1)、 n 階 DS 室温補正用相当侵入外気量は式(2)で求める。なお、DS と RM 間に自然換気ガラリなどによる空気移動がある場合、本補正式は適用できない。

$$\theta_n = \frac{WF_0\theta_0 + C_p\rho V_0\theta_{n-1}}{WF_0 + C_p\rho V_0} \quad (1)$$

$$V_n = \frac{WF_0(\theta_0 - \theta_n)}{\theta_0 - \theta_1} V_0 \quad (2)$$

ここに

V_n : n 階 DS 室温補正用相当侵入外気量	[lit/s]
V_0 : ダブルスキンキャビティ通過風量	[lit/s]
θ_n : 補正後の n 階 DS 室温	[°C]
θ_0 : 流入前同一 DS 室温	[°C]
θ_1 : 外気流入第 1 DS 室温	[°C]
WF_0 : DS の室温変動に対する除去熱量重係数初項 (NewHASP の HASP/ACSS 用ファイルより取得)	[W/°C]
C_p : 空気比熱	[J/g°C]
ρ : 空気密度	[g/lit]

3.2 ダブルスキン多数室伝熱モデル

3.2.1 ダブルスキン多数室の境界面の設定

Fig.3 にダブルスキン伝熱モデルの多数室構成における日射熱取得のダイアグラムを示す。多数室構成として Fig.3 の破線 (---) 枠で示すように、ダブルスキンを水平方向へ外気側から DS、BS、RM の 3 室に分けて多数室伝熱計算を行う。DS と BS の境界面すなわちブラインドは、DS 側、BS 側共熱抵抗だけの半密閉中空層のみの内壁として与える。BS と RM の境界、すなわち DS のインナーガラスは、BS 側ではガラスの熱伝導率を与えた内壁として与える。RM 側ではガラスの熱伝導率を与えた内壁および透過日射のみの窓 (熱貫流率=0) として与える。この場合、室の室温変動の重み係数初項を求めるときに、ガラスの熱貫流率が、内壁とガラスで 2 重に計上されるため RM 側のガラスで補正を行う。

3.2.2 ダブルスキン多数室用日射熱取得率

従来 NewHASP の多数室計算では、アウターガラスの透過日射は DS の熱取得となり、他室すなわち BS、RM への影響は全く考慮されない。そこで Fig.3 に示す日射熱取得ダイアグラムに基づき、未知数を温度 $t_1 \sim t_5$ とする熱平衡式を立て、DS、BS、RM 3 室の日射熱取得率をダブルスキン多数室用日射熱取得率として導出した^{注 1)}。

Fig.3 Solar heat gain diagram of double-skin façade

対流・放射成分の分離は NewHASP の計算法^{注 2)}に従った。ダブルスキンキャビティ通過風量 V_2 とブラインド循環風量 V_B はダブルスキン多数室換気モデルにより求める。

3.3 ダブルスキンブラインドモデル

3.3.1 ブラインド光学モデル¹⁾

Radiance によりプロファイル角 φ を 15° づつ変化させた直達日射を入射させ、スラット角 θ を 15° づつ変化させた場合の各放射束算出面の放射束を求め、ブラインド単体の透過率 $\tau(\varphi, \theta)$ および反射率 $\rho(\varphi, \theta)$ の関数近似式を作成した。

3.3.2 ブラインド制御モデル

ブラインド制御モデルとして①スラット角一定制御、②昼間保護角+夜間垂直 (スラット角 90°) 制御 (以降、②保護/垂直制御)、③昼間保護角+夜間水平制御 (以降、③保護/水平制御)、④昼間 (保護角+水平制御) +夜間水平制御 (以降、④水平保護/水平制御)、⑤昼間 (保護角+透過率一定) +夜間水平制御 (以降、⑤透過率一定保護/水平制御) を考えた。夜間は水平面天空日射が 0 となる時間帯とした。②~⑤は保護角制御のバリエーションである。

3.3.3 保護角制御のバリエーション

保護角制御とは、直射光が室内側に入射しないスラット角度を維持しながら制御する方法である。保護角制御の保護角 θ_p は、スラット幅 w 、スラット間隔 h 、プロファイル角 φ として式(3)より求める。

$$\theta_p = \sin^{-1} \frac{h}{w} \cos \varphi \quad (3)$$

スラット角を保護角 θ_p 以上にすれば直射光は室内側に入射しないので、スラット角を保護角以上のどの角度にするかは、基本的に自由である。そのため室内光環境的に有利な制御方法と室内熱環境に有利な制御方法に分けて保護角制御のバリエーションを整理する必要がある。

(1) 夜間制御

夜間のスラット角であるが、在室時で照明が点灯している場合、光環境的にはブラインドで照明の光を反射できるので垂直にするのが有利となる。一方熱環境的には冷房時で DS の温度が室温より低い場合には、スラット角を水平にしてブラインド循環風量を増やして換気するほうが夜間放熱できるため有利となる。本論文では②保護/垂直制御と③保護/水平制御を比較対象とする。

(2) 昼間制御

昼間のスラット角制御として、光環境的には式(3)の保護角 θ_p がある値以下になったら、スラット角を一定にする制御（以降、保護角スラット一定併用制御）、熱環境的には透過率を一定に制御する方法（以降、保護角透過率一定併用制御）が考えられる。Fig.4に保護角スラット一定併用制御、Fig.5に保護角透過率一定併用制御のブラインド操作曲線図を示す。ブラインド操作曲線図は、プロファイル角に応じてスラット角を操作するブラインド操作曲線と透過率の関係を示した図である。Fig.4は保護角 θ_p が負になる場合にスラット角を一定とする制御とし、一定にするスラット角 θ_{set} をパラメータとした。Fig.5は一定にする透過率 τ_{set} をパラメータとした。目標透過率になるスラット角を、数値計算で関数近似式 $\tau(\varphi, \theta)$ の逆関数として求めた。本論文では保護角スラット一定併用制御として、式(3)で求めた昼間の保護角が負になった場合、スラット角を水平とする制御を④水平保護/水平制御を比較対象とし、保護角透過率一定併用制御としては $\tau_{set}=0.3$ とした⑤透過率一定保護/水平制御を比較対象とする。

4. ダブルスキン多数室シミュレーション方法

4.1 連続メタシミュレーションプラットフォーム⁴⁾⁵⁾

ダブルスキン多数室換気モデル、伝熱モデル、ブラインド制御モデルを順次実行し、複数のメタシミュレーションを連続で行うためのプラットフォームをFig.6に示す。メタシミュレーションとは、複数のシミュレーション結果を熱取得レベルでNewHASPの内部データと直接置換し、年間時刻別熱負荷計算を行うためのメタ（上位の）シミュレーションである。それぞれのプログラムの変更を最小限にするため、データのやり取りは、双方のシミュレーション結果を書き出す時系列転写ファイル（Transcription files、以降転写ファイル）のみを介したバッチ処理（複数プログラムの同時実行は行わない）とし、各プログラムの独立性を保っている。

連続メタシミュレーションプラットフォームは、反復ループ、各シミュレーションプログラムの実行を受け持つドライバ、転写ファイル制御コマンドで構成される。各ドライバは転写ファイルを読み出し、当該プログラムの入力データを自動作成して実行後、当該プログラムの出力データを読み出して転写ファイルに書き出すことができる。NewHASP本体の窓熱取得、すきま風・移動風量熱取得計算部分に、転写ファイル入出力用のインターフェースを組み込む。NewHASP本体用の入力データは常時同一状態とし、反復計算時に毎回同じ計算ルートを通ることにより、転写ファイルと内部置換データの同期をとる。

4.2 連続メタシミュレーションのフローとダブルスキン状態変化

Fig.7に連続メタシミュレーションのフローを示す。以下に示す7段階のメタシミュレーションを自動的に行う。

- ①基準窓：DS外側ガラスを基準ガラス（普通透明ガラス 3mm）とし、透過日射がDSのみに入射するとした段階
- ②DS自然換気無：DSの日射熱取得をDS、BSとRMに分けてシミュレーションした段階。DS・BSの自然換気無のため温室状態となり自然室温が計算上は80℃となった。
- ③1階DSのみ自然換気有：1階のDSのみに外気を導入した段階。1階DSのみ自然換気有

Fig.4 Blind operation diagram of avoid direct sunlight and constant slat angle control

Fig.5 Blind operation diagram of avoid direct sunlight and constant transmittance control

Fig.6 Meta_simulation platform

Fig.7 Continuous Meta_simulation flow

Fig.8 Vertical temperature distribution fluctuation for each simulation

Fig.9 Double-skin cavity temperature and air flow rate fluctuation for each simulation

④各階 DS 自然換気有：1 階 DS に導入した外気を最上階まで通気した段階。1 階～最上階自然換気有とする。本論文 3.1.2 に示した各階 DS 室温補正用換気回路網モデルを利用する。

⑤～⑦ダブルスキン通過風量と室温の反復計算（3 回固定）段階

Fig.8 に、各段階でシミュレーションを停止して作成した各段階での DS 上下温度分布の変化を示す。また Fig.9 に連続メタシミュレーションと DS 性能変化を示す。各階 DS 室温・ダブルスキン通過風量変化をみると、NewHASP と CVNEC が室温とダブルスキン通過風量をやり取りしながら収束していく過程が読み取れる。各階 DS 室温、自然換気風量ともに 7 回目のメタシミュレーションでほぼ収束したことがわかる。計算法としては、年周期定常計算により、同時刻の温度と風量をやりとりしていることになる。

5. ダブルスキン多数室シミュレーション事例

5.1 シミュレーション条件

Fig.10 に示した事務所ビルの 1 スパン 7.2m 分のフルハイトのダブルスキンおよび居室について、ダブルスキン多数室シミュレーションを行った。シミュレーションの条件を Table1 に示す。ダブルスキンは 5 層（5 室）とし 5 階建ての事務所ビルの階数と一致させた。ダブルスキンの外部開口は最下階の 1 階と最上階の 5 階に設置し、開口の方位は南方位と西方位とした。ブラインドもフルハイトとし高さ 4m、中性帯位置は 2m として開口条件を与えた。

5.2 冷房最大日シミュレーション結果

RM の室冷房顕熱負荷が最大となる 9 月 11 日（月）のシミュレーション結果の南方位を Fig.11、西方位を Fig.12 に示す。ブラインドは、スラット角 45° 固定とした。Fig.11(a)に南方位ブラインド循環風量の推移を示す。夜間は 40~50 m³ / (h・m²)、昼間は 50~60 m³ / (h・m²)、DS と BS の温度がほぼ同じになる空調停止時に最小風量となった。Fig.11(b)に南方位 DS キャビティ通過風量の推移を示す。昼間の風量は上昇気流で最大 2800 m³/h となったが夜間は 500 m³/h 以下の上昇・下降流が混在している。Fig.11(c)に南方位日射気象データの推移、Fig.11(d)に南方位 DS、BS、RM の室温の推移を示す。DS の室温は 12 時が最大となり、DS5F で約 43°C、DS1F で 35°C となり上下温度差は約 8°C となった。BS の室温は日中で DS の室温よりどの階でも約 2°C 高い。

Fig.10 The model of double-skin facade and room

Table1 Simulation conditions	
Double-skin facade	Inner pane: single clear 8mm Outer pane: single clear 8mm Venetian blinds: Light, located in the cavity of the double-skin no air exchange between offices and the cavity of double-skin façade 7.2m wide of south side, 5 stacked zones Ventilation effective opening area per double-skin façade width: 0.06 m²/m including flow coefficient, located top and bottom zone
Room	Room usage: office, Orientation: Facing south Floor eight: 3.6m, Ceiling Height: 4.0m Room depth: 7.2m, Room width: 7.2m
Number of Air Conditioning Zone	1 (No distinction between perimeter and interior)
Meteorological	Tokyo Reference year of Expanded AMeDAS Weather Data
Air conditioning	Operating time: 8:00-18:00 Set temperature and humidity Summer: 26 °C, 50% Winter: 22 °C, 40% Intermediate period: 24 °C, 50%
Internal heat and others	Personnel density: 0.2 persons/m² Lighting density: 15 W/m² Equipment density: 30W/m² Indoor heat capacity Sensible : 40 kJ/(m²·K) Latent : 40 kJ/(m²·(g/kg(DA)))

Fig.3 に示したように、本論文のブラインドは、DS キャビティ通過気流がブラインドの両側を流れるタイプではない。室内側に梁の幅分凹んだ空間にブラインドが設置されているとしている。そのため BS が熱だまりとなり、ブラインド循環流があるにもかかわらず BS の室温が DS よりも上昇したと考えられる。この配置のブラインドのあるダブルスキンの実測および CFD 解析例¹¹⁾でも、同様なブラインドによる周囲の空気温度の上昇例が報告されている。Fig.11(e) に南方位 RM の室顕熱負荷の推移を示す。12 時に最大となり 75~115W/m² で推移した。月曜日なので休日明けの蓄熱負荷の影響で、午前中の熱負荷が大きい。Fig.11(f) に南方位 DS キャビティ通過風量とブラインド循環風量の関係を示す。DS キャビティ通過風量が増加するとブラインド循環風量も増加する傾向にある。

Fig.12(a) に西方位ブラインド循環風量の推移を示す。夜間は 40~45 m³/ (h・m²)、昼間は 30~60 m³/ (h・m²)、DS と BS の温度がほぼ同じになる空調停止時に最小風量となった。Fig.12(b) に西方位 DS キャビティ通過風量の推移を示す。昼間の風量は日射が当たる時間帯は上昇気流で最大 2800 m³/h となったが日射の当たらない昼間と夜間は 900 m³/h 以下の上昇・下降流が混在している。Fig.12(c) に西方位日射気象データの推移、Fig.12(d) に西方位 DS、BS、RM の室温の推移を示す。DS の室温は 15 時が最大となり、DS5F で約 43℃、DS1F で 35℃となり上下温度差は約 8℃となった。BS の室温は日中で DS の室温よりどの階でも約 2℃高い。Fig.11(e) に西方位 RM の室顕熱負荷の推移を示す。15 時に最大となり 74~111W/m² で推移した。Fig.12(f) に西方位 DS キャビティ通過風量とブラインド循環風量の関係を示す。DS キャビティ通過風量が増加するとブラインド循環風量も増加する傾向にある。

5.3 冷房年間シミュレーション結果

Fig.13 に南方位 RM5F の年間時刻別冷房シミュレーションにより求めた各種ブラインド制御方式の設計用室冷房顕熱最大熱負荷比較を示す。最大熱負荷の超過危険率は 2.5% (上位 20 番目) とした。ケース①-1~①-6 に①スラット角一定制御のスラット角を 0°、15°、30°、45°、60°、75° と順次上げた場合の最大熱負荷を示す。スラット角 0° から 45° まではスラット角を上げるにつれて日射遮蔽性能が上がるため最大熱負荷は減少していく。しかしながらスラット角 60° および 75° では逆に最大負荷は増加していく。これは、スラット角を上げることにより日射遮蔽性能は上がるものの、スラット間の隙間が狭くなるために DS/BS 間の換気性能が下がり結果的には最大熱負荷が増加したと考えられる。すなわち日射遮蔽性能および換気性能の観点においては、スラット角は 45° が最適となると考えられる。ケース②~⑤に、保護角制御のバリエーションにおける最大熱負荷比較を示す。夜間のスラット角を②保護/垂直制御にした場合と③保護/水平制御にした場合の比較では、③保護/水平制御の最大熱負荷が小さくなる。これは夜間スラットを水平にすることにより DS/BS 間の換気性能が上がり、RM 側から BS、DS 側への夜間冷却効果が促進されたためと考えられる。さらに夜間にスラット角を水平に保ちつつ、昼間に保護角が負になった場合、スラットを水平にする④水平保護/水平制御と昼間に透過率 (0.3 とした) を保つ制御⑤透過率一定保護/水平制御を比べると、⑤透過率一定保護/水平制御の最大熱負荷とほぼ等しくなった。ケース③~⑤の最大熱負荷は、ケース①-1 のスラット水平の値とほぼ同じである。

Fig.11 South side cooling peak day (Sep. 11th) simulation results

Fig.12 South side cooling peak day(Sep.11th) simulation results

Fig.13 South side Maximum sensible room heat extraction selected by excess probability 2.5%

Fig.14 South side Annual simulation results

Fig.14 に南方位 RM5F の年間時刻別冷房シミュレーションにより求めた各種ブラインド制御方式の室冷房顕熱年間熱負荷比較を示す。ケース①-6 スラット角 75° 一定を除き、年間熱負荷特性は、最大熱負荷特性と同様な傾向を示した。スラット角 75° の最大熱負荷と年間熱負荷と比較した場合、最大熱負荷ではスラット 0° の 1.85 倍になるが、年間熱負荷では 1.15 倍となる。これは、南方位の最大負荷発生時の日射入射角がスラット角の 75° に近く、ブラインドの透過率が高くなり、最大熱負荷が大きくなるためである。

Fig.15 West side Maximum sensible room heat extraction selected by excess probability 2.5%

Fig.16 West side Annual simulation results

Fig.15 に西方位 RM5F の各種ブラインド制御方式の設計用室冷房顕熱最大熱負荷比較、Fig.16 に室冷房顕熱年間熱負荷比較を示す。南方位の最大熱負荷特性および年間熱負荷特性とほぼ同じ傾向であるが、Fig.15 ケース①-6 に示すスラット角 75° の最大熱負荷が西方位のためブラインドの透過率が低く南方位に比べ小さくなった。

Fig.17 West side transmittance / slat angle vs. maximum / annual sensible heat extraction

Fig.17aに西方位 RM5Fの保護角が負になる場合に透過率を一定とする制御（制御曲線を Fig.5 に示した）の透過率をパラメータとし、透過率と最大室顕熱負荷および年間室顕熱負荷の関係を示す。透過率 0.4 値を除き、透過率が増加すると最大室顕熱負荷および年間室顕熱負荷はわずかに減少した。透過率が増加すると窓熱取得は増加するが、スラット角が水平に近づくことにより BS/DS 間の換気性能が良くなり室熱負荷が減少したと考えられる。

Fig.17bに西方位 RM5Fの保護角が負になる場合にスラット角を一定とする制御（制御曲線を Fig.4 に示した）のスラット角をパラメータとし、スラット角と最大および年間室顕熱負荷の関係を示す。スラット角を変えても最大および年間室顕熱負荷に大きな変化は見られなかった。保護角が負になる場合にスラット角や透過率を変化させても熱負荷特性には大きな変化はなかったが、昼光利用の効果には影響すると思われる。今後の昼光利用の性能評価で明らかにしたい。

6. まとめ

設備設計の実務に用いられている実用的熱負荷シミュレーションプログラム NewHASP と換気回路網プログラムを用いたダブルスキン多数室モデルを構築し、新たに提案したブラインド制御方式を含めた各種ブラインド制御の熱的性能評価を行った。本論文の結論を以下に示す。

- 1) NewHASP の多数室計算におけるゾーン間移動風量、外気侵入風量を換気回路網プログラムの風量と NewHASP プログラム内部で直接置換する手法により、ダブルスキンキャビティ風量、ブラインドスラット間循環風量を求め、熱負荷シミュレーションを行う多数室換気回路モデルを構築した。
- 2) NewHASP の多数室計算におけるダブルスキンキャビティ（以下 DS）、ブラインドとダブルスキン内側ガラスの空気層（以下 BS）、居室（以下 RM）の 3 室に関するダブルスキン用日射熱取得率の

式を導出し、ダブルスキン多数室伝熱モデルを構築した。

- 3) ダブルスキンキャビティ内部に設置したブラインドの制御方式として、保護角制御のバリエーションである保護角が負になるときに透過率を一定に保つ制御とスラット角一定に保つ制御を提案し、ブラインドの操作曲線図を作成し、従来の制御方式と熱的性能を比較した。
- 4) 夏ピーク日のブラインド循環風量は、30~60 m³/h・m² となり BS の空気温度は DS の空気温度より最大 2℃ 高くなった。
- 5) スラット角を年間常時一定としてスラット角を 0° ~75° と 15° 単位で順次上げた場合、スラット角 0° ~45° まではスラット角を上げるにつれて日射遮蔽性能が上がり最大および年間冷房熱負荷は減少した。しかしスラット角 60° および 75° では、スラット間の隙間が狭くなるために DS/BS 間の換気性能が低下し熱負荷が増加した。
- 6) 従来のブラインド保護角制御において、夜間スラットを垂直にした場合と水平にした場合を比較した。水平にすると垂直にするのに比べ最大・年間冷房熱負荷ともに小さくなった。水平にすると DS/BS 間の換気性能が促進されるためと考えられる。
- 7) ブラインド保護角制御のバリエーションとしての保護角が負になるときに透過率を一定にする制御、スラット角を一定にする制御は、透過率やスラット角を変化させても、最大・年間冷房熱負荷に対する影響は少ない。しかし昼光利用システムの効果に影響すると予想される。
- 8) ダブルスキンの構造、日射遮蔽物、ガラスなどの組み合わせが変わった場合、本論文のダブルスキン多数室モデルにおいては、ダブルスキン日射熱取得ダイアグラム、日射熱取得式、日射遮蔽物、ガラスの入射角特性近似式、ブラインド特性の変更を行うだけでよい。これらの変更は Excel ファイルの変更だけで対応可能であり、極めて自由度と応用性が高いモデルである。
- 9) 本論文のダブルスキン多数室モデルは、NewHASP の既往の入力支援システム、熱負荷集計表作成等の出力支援システムがほぼ変更なしに使用でき、設備設計の実務に適用可能である。
- 10) 今後は、本論文のダブルスキン多数室モデルと光環境シミュレーションプログラム Radiance を使用して、ダブルスキンと日射遮蔽物を組み合わせた昼光利用システムの性能評価を行う予定である。

謝辞

本論文のブラインドの基本光学特性は、東京理科大学理工学部建築学科吉澤研究室との共同研究で得られたデータを使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Ohki, C., Okamoto, T., Tadaki, J., Yamamoto, T., Ohga, H., and Yoshizawa, N.: Optimization of outside and inside sun shading devices using Radiance and NewHASP Pareto optimal solution by energy usage, glare and view, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.84, No.766, pp. 1067-1076, 2019. 12(in Japanese)
大木知佳子, 岡本俊英, 只木寿理恵, 山本竜也, 相賀洋, 吉澤望: RadianceとNewHASPを用いた外部・内部日射遮蔽物の最適化 エネルギー性能・グレア・眺望性によるパレート解, 日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第766号, pp. 1067-1076, 2019. 12

- 2) Radiance : <https://www.radiance-online.org/about/main.html>, accessed 2020.3.4
- 3) Nagai, T. et al., H.: Features and User's Guide of New HASP/ACLD-8, Proceedings of SHASE Symposium 'The Present and the Future of Software for Thermal Load and HVAC, SHASE, 2004(in Japanese)
長井達夫,他: NewHASP/ACLD-8の特徴と利用法, 空気調和・衛生工学会シンポジウム 熱負荷・空調ソフトウェアの現状と将来, 2004
- 4) Ohga, H.: NewHASP-Based Meta-Simulation Part1 Basic Design of NewHASP-Based Meta-Simulation, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 31-32,2016. 7(in Japanese)
相賀洋: NewHASPを核としたメタシミュレーション技術に関する研究 第1報 メタシミュレーションモデルの基本設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 31-32, 2016. 7
- 5) Ohga, H., Harashima, H.: NewHASP-Based Meta-Simulation (Part 2) Meta-Simulation of Ventilation System, Technical Papers of Annual Meeting, the SHASE of Japan, pp. 105-108, 2016. 9(in Japanese)
相賀洋: NewHASPを核としたメタシミュレーション技術に関する研究 (第2報) 換気メタシミュレーションモデル, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集, pp. 105-108, 2016. 9
- 6) Sakai, K., Iwasaki, H.: Thermal Characteristics of a Double Skin Façade (Part 1) Thermal Load Calculation, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, pp. 555-556, 1981. 7
酒井寛二, 岩崎博志: ダブルスキンの熱特性(第1報) 熱負荷計算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 555-556, 1981. 7
- 7) Kohri, K., Ishino, H.: A proposal of thermal performance equations for double skin facades and airflow windows, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.682, pp. 997-1002, 2012. 12(in Japanese)
郡公子, 石野久彌: ダブルスキン, エアフローウィンドウの熱性能式の提案, 熱負荷計算のための窓性能値に関する研究, 第3報, 日本建築学会環境系論文集, 第77巻, 第682号, pp. 997-1002, 2012.12
- 8) Yanai, T. et al., The simulation study of the thermal performance on the building with double-skin-facade, Technical Papers of Annual Meeting, the SHASE of Japan, pp. 1135-1138, 2004. 9(in Japanese)
柳井崇, 他, ダブルスキンを有する建物における熱性能シミュレーションの検討事例, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 1135-1138, 2004. 9
- 9) Yoon, G., Kato, Okumiya, M.: Study on the thermal performance of double-skin facade (Part 1) Proposal of prediction technique for thermal performance on cooling season, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.674, pp. 251-257, 2012. 4(in Japanese)
尹奎英, 加藤弘樹, 奥宮正哉: ダブルスキンの熱的性能予測に関する研究 (第1報)夏期におけるダブルスキン熱的性能予測手法の提案, 日本建築学会環境系論文集, 第77巻, 第674号, pp. 251-257, 2012. 4
- 10) Harimoto, K., Tanaka, T., Takeda, H.: Thermal Performance Evaluation of Combinations of Double-Skin Facade Components: An Airflow Calculation for Comparison of Annual Heat Load of Solar Shading Methods, Transaction of SHASE of Japan, No.185, pp. 19-25, 2012. 8(in Japanese)
張本和芳, 田中拓也, 武田 仁: ダブルスキンシステムの構成部材の組み合わせによる熱的性能について: 換気シミュレーションによる日射遮蔽手法の比較, 空気調和・衛生工学会 論文集 No.185, pp. 19-25, 2012. 8
- 11) Asakawa, T., Kajiya, R.: Study on the method of Thermal Efficiency Evaluate of the Double-Skin Window -Comparison of Measuring Experiment with CFD Analysis by Two Dimensions Model, pp. 185-188, 2013. 9(in Japanese)
浅川拓也, 加治屋亮一, ダブルスキンの熱的性能評価手法に関する研究ー測定実験と2次元モデルによるCFD解析との比較ー, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 185-188, 2013. 9
- 12) Inanuma, M., Ishino, H., Shibahara, T.: Experimental study on mathematical model for shading coefficient of sunlit windows with venetian blinds, Journal of Architecture, Planning Environmental and Engineering (Transactions of AIJ), No.527, pp. 45-52, 2000. 1(in Japanese)

- 稲沼實, 石野久彌, 芝原崇慶: 横型ブラインドのある窓の日射遮蔽係数算定のための日射熱移動に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No.527, pp. 45-52, 2000. 1
- 13) Gomi, I. NAGATA, A., et al.: A study on airflow properties and natural convective heat transfer of window with internal blinds, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.84, No.763, pp. 835-843, 2019. 9(in Japanese)
五味勇, 永田明寛, 他: 窓ガラスと室内ブラインド周りの気流性状・自然対流熱伝達に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第763号, pp. 835-843, 2019. 9
- 14) Suzuki, H., Takeda, H., Isozaki K.: A Study of Heat Load on Various controls of Angulate of Slats of Venetian Blind, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 145-146, 2015. 7(in Japanese)
鈴木宏和, 武田仁, 磯崎恭一郎: ブラインド制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 145-146, 2015. 7
- 15) JABMEE of Japan: NewHASP/ACLD Operation Manual, <http://www.jabmee.or.jp/hasp/>, accessed 2020.3.9

注

注 1) ダブルスキン多数室用日射熱取得率の式を以下に示す。

$$\eta_{DSC} = \frac{\alpha_{1C}}{\alpha_0 + \alpha_1} a_1 + \frac{\alpha_{2C}}{\alpha_2 + \alpha_3} \tau_1 a_3 \quad \dots\dots(A1)$$

$$\eta_{DSR} = \frac{\alpha_{1R}}{\alpha_0 + \alpha_1} a_1 + \frac{\alpha_{2R}}{\alpha_2 + \alpha_3} \tau_1 a_3 \quad \dots\dots(A2)$$

$$\eta_{BSC} = \frac{\alpha_3}{\alpha_2 + \alpha_3} \tau_1 a_3 + \frac{\alpha_4}{\alpha_4 + \alpha_6} \tau_1 \tau_3 a_5 \quad \dots\dots(A3)$$

$$\eta_{BSR} = \frac{\alpha_3}{\alpha_2 + \alpha_3} \tau_1 a_3 + \frac{\alpha_4}{\alpha_4 + \alpha_6} \tau_1 \tau_3 a_5 \quad \dots\dots(A4)$$

$$\eta_{RMC} = \frac{\alpha_{6C}}{\alpha_4 + \alpha_6} \tau_1 \tau_3 a_5 \quad \dots\dots(A5)$$

$$\eta_{RMR} = \tau_1 \tau_3 a_5 + \frac{\alpha_{6R}}{\alpha_4 + \alpha_6} \tau_1 \tau_3 a_5 \quad \dots\dots(A6)$$

ここに

α_i	: 部位 <i>i</i> の日射吸収率 (相互反射考慮)	[-]
α_i	: 部位 <i>i</i> の総合熱伝達率	[W/m ² K]
τ_i	: 部位 <i>i</i> の透過率	[-]
η	: 日射熱取得率	[-]

添え字 : DS: ダブルスキンキャビティ, BS: ブラインドとインナーガラス間空気層, RM: 居室, C: 対流成分, R: 放射成分、

注 2) NewHASP における熱取得の放射成分と対流成分の分離について以下に説明する。NewHASP では、プログラム内部で放射熱伝達率 α_r と対流熱伝達率 α_c を固定値として与えている。熱取得のうち $\alpha_r / (\alpha_r + \alpha_c)$ を放射成分、 $\alpha_c / (\alpha_r + \alpha_c)$ を対流成分とし、対流成分は即時、放射成分は多重放射による時間遅れを伴って室内空気に伝わるとしている。厳密にいうと DS の多重放射成分のうち、一部は DS のアウターガラスから室外へ、一部はインナーガラスから室内へ再放射される。今回の再放射分は無視した。そのためダブルスキンの温度が高めに出る傾向にある。DS の再放射については今後の検討課題としたい。

MODELING OF DOUBLE-SKIN FAÇADE SYSTEM USING NEWHASP AND VENTILATION NETWORK PROGRAM FOR PRACTICAL THERMAL LOAD SIMULATION

A ventilation network approach to double-skin cavities, blind circulation airflow and blind operation performance

Hiroshi OHGA^{*1}

^{*1} Obayashi Corporation, Dr.Eng.

A multi-space model of a double-skin façade system is proposed using the practical thermal load simulation program NewHASP and the ventilation network program employed in mechanical design practice. Using this model, thermal performance evaluation of various venetian blind controls including the newly proposed blind control system is performed. The conclusions of this paper are shown below.

- 1) A method called Meta_simulation was developed to directly replace the airflow rate between zones and infiltration airflow rate in the NewHASP program with the results of the ventilation network program. Using this method, the airflow of the double-skin cavity and the airflow between the blind slats are obtained, and a thermal load simulation is performed.
- 2) Derived the formula of double-skin solar heat gain coefficient for double-skin cavity (hereafter DS), blind and double-skin inner glass air layer (hereafter BS), and office room (hereafter RM). Three-space model using NewHASP multi-space calculation is developed.
- 3) As a slat control method of the blind installed inside the double-skin cavity, the author proposed two variation of the avoid direct sunlight control. First is to keep the transmittance constant when the avoid direct sunlight angle becomes negative and second is to keep the slat angle constant. The operation curve of the blind control was proposed, and the thermal performance was compared with the conventional control method.
- 4) Blind circulation airflow rate on summer peak day was 30 ~ 60m³ / h.m² and BS air temperature was up to 2K higher than DS air temperature.
- 5) When the slat angle is fixed through the year and the slat angle is sequentially increased in increments of 0 ° to 75 ° in increments of 15 °, the solar shading performance increases as the slat angle is increased from 0 ° to 45 °, and maximum and annual cooling load decreased. However, at slat angles of 60 ° and 75 °, the gap between the slats became narrow, and the ventilation performance between DS / BS was reduced and the cooling load increased.
- 6) In the conventional blind avoid direct sunlight angle control, the case where at the night slats were vertical and the case where they were horizontal were compared. Both horizontal and vertical cooling heat loads were reduced when compared to vertical. It is thought that the ventilation performance between DS / BS is promoted when it is horizontal.
- 7) As a variation of the blind avoid direct sunlight angle control, the control to keep the transmittance constant when the avoid direct sunlight angle becomes negative and the control to keep the slat angle constant were compared by changing the transmittance and the slat angle. The effect on the maximum / annual cooling load is small. However, it is expected to affect the effectiveness of daylight harvesting systems.
- 8) By using the double-skin multi-space model in this paper, if the combination of double-skin structure, solar shading, glass, etc. is changed, it is only necessary to change the double-skin solar heat gain diagram, solar heat gain formula, solar shading, the incident angle characteristic approximation formula of glazing and the blind characteristics. This change can be dealt with only by changing the Excel files, and so it is a model with extremely high flexibility and applicability.

(2020 年 3 月 10 日原稿受理, 2020 年 6 月 8 日採用決定)