

# 高性能ファサードの標準解法による性能評価

相 賀 洋

## Performance Evaluation of High-Performance Façades using the Standard Solution Method

Hiroshi Ohga

### Abstract

From a global warming perspective, building façades with good energy-saving performances are required. Therefore, a thermal load simulation model for practical use is required to evaluate various façades in the mechanical design works. In this study, we proposed a standard solution method for the thermal performance of various façades consisting of glazing, shading devices, and airflow cavities using thermal load simulation program NewHASP, a ventilation network program, and Radiance. We clarified the thermal load performances of the double-skin façades, airflow window, airflow screen, and push-pull windows.

### 概 要

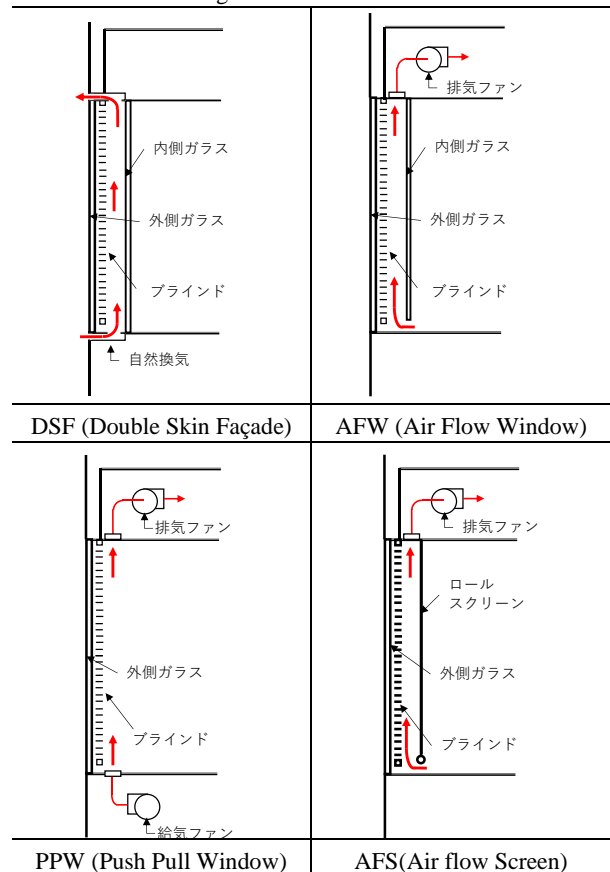
地球温暖化の観点から、建築物のファサードの省エネルギー性能が求められている。そのため、設備設計実務において様々なファサードを評価するための実用的な熱負荷シミュレーションモデルが必要とされている。本論文では、建物の熱負荷計算プログラムNewHASP、換気回路網プログラム、光環境シミュレーションプログラムRadianceを用いた、ガラス、日射遮蔽装置、換気中空層から構成される様々なファサードの熱性能の標準解法を提案した。また、この解法を用いてダブルスキン、エアフローウィンドウ、エアフロースクリーン、プッシュプルウィンドウの熱負荷性能を明らかにした。

### 1. はじめに

地球温暖化は拡大し、加速し、深刻化しつつある。この地球温暖化を早急に抑えるため、CO<sub>2</sub>削減が建築分野でも強く求められている。建築物のファサードについても、建物全体の省エネルギーに寄与する性能が求められている。ファサードの構成要素（以降、デバイス）として、ガラス、ブラインド、スクリーン、およびこれら中間層を流れる気流があり、このデバイスの組み合わせにより、Table 1に示す単一階ダブルスキン（以降、DSF）、エアフローウィンドウ（以降、AFW）、プッシュプルウィンドウ（以降、PPW）、エアフロースクリーン（以降、AFS）などの多様な高性能ファサードが検討される事例が多い。

従来これらについて実用的熱負荷シミュレーションを行う場合には、ファサードの熱性能値として、日射熱取得率（-）と熱貫流率（W/m<sup>2</sup>.K）を時間変化の伴わない定数で与えるのが一般的であったり。しかしながら、たとえば自然換気を伴うDSFは外気温度および日射により通風量が時間的に変化するため、これら熱性能値は時間変化量となる。またブラインドと組み合わせたファサードの場合、ブラインドのスラット間隙の気流は自然対流であり、スラット受熱日射や外気温度の影響を受けるため、厳密に言えば時間変化量となる。すなわち最も単純なブラインドありの一般窓（以降、CNV）でさえも、厳密には時間変化量として熱性能値を扱うべきである。またこ

Table 1 高性能ファサード  
High-Performance Façades



これらファサードの熱性能は、ガラスの種類、ブラインドの種類やスラット角により多様に変化する。特にガラスを2枚使用するDSF、AFSについていえば内ガラスと外ガラスの組み合わせは無数に考えられ、今後新たなガラスやブラインドのような日射遮蔽装置（デバイス）が開発された場合の対応を考慮すると、熱貫流率と日射熱取得率もしくはその補正式<sup>2)</sup>をファサードの熱性能値として定数で与える方法は、もはや限界に達しているといえよう。

そこで本論文では、日々進化を続ける多様な高性能ファサードの各部温度および熱流を計算する窓熱節点モデル（窓の各層、各部材に節点を設け、節点ごとの熱平衡式より節点温度・熱流を求めるモデル）をマクロとしてExcelファイル（以降、窓熱節点Excelファイル）に搭載した。このExcelマクロの計算結果として得られた窓熱取得を、中間ファイル（以降、転写ファイル）を経由し、当社にて設備設計実務で使用されている熱負荷計算プログラムNewHASP<sup>8)</sup>に引き渡し（以降、内部置換）、NewHASPによる熱負荷シミュレーションを行う手法（以降、標準解法）を開発した。この窓熱節点Excelファイルでは、ブラインド循環風量、ロールスクリーン通気量、ダブルスキン通風量などの自然換気を伴う通気量は、換気回路網モデルを用いて求める。さらに自由境界面を導入してロールスクリーン等日射遮蔽物の昇降制御も記述できる。この標準解法を用いてDFS、AFW、AFS、PPWの熱負荷性能を明らかにした。

## 2. 高性能ファサード標準モデル

### 2.1 標準解法のシミュレーション体系

標準解法と窓熱節点ExcelファイルによるNewHASPを用いた標準解法シミュレーション体系をFig.1に示す。NewHASPは同じNewHASP入力データで2回実行する。1回目は窓転写ファイルに窓熱節点モデル入力情報を1年分書き出し、2回目は窓転写ファイルから窓熱節点Excelファイル出力結果である窓取得と室温変動に対する除去熱量重み係数の初項（以降、WF0）を1年分読み込み内部置換する。

### 2.2 標準解法

標準解法を高性能ファサードに用いたモデルの構成をFig.2に示す。ファサードはガラス、日射遮蔽物、中空層を複数組み合わせ合わせた複合体である。標準解法では、層数、ガラスの種類、日射遮蔽物の種類、中空層の換気の有無は自由に設定できる。n層のガラス・日射遮蔽物・中空層で構成されるファサードは、熱伝達率、ガラスの熱伝導率、日射吸収率、中空層の風量を与えるとn個の熱平衡式が得られ、連立方程式を解きn個のデバイス温度、中空層温度を求めると窓熱取得が求まる。標準解法の手順を以下に示す。

① シミュレーション対象ファサードを構成する層ごと

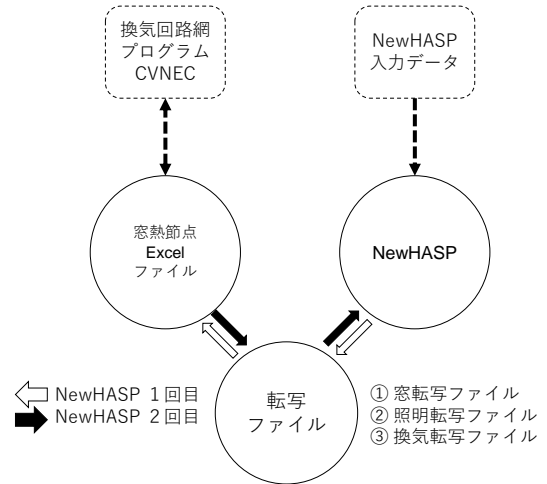


Fig. 1 標準解法シミュレーション体系 Standard Solution Platform

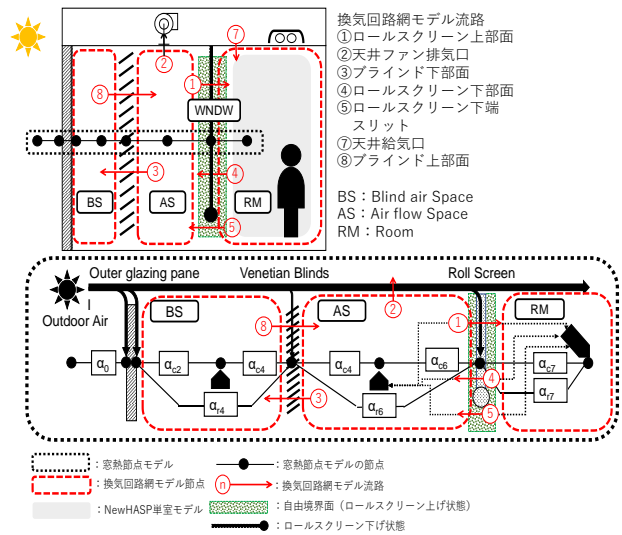


Fig. 2 高性能ファサード標準モデルの構成 High-Performance Facade Standard Model Configuration

に熱節点を定義する。熱節点は外気、ガラス内外表面、中空層、日射遮蔽物、室内空気、自由境界面のいずれかである。自由境界面とは熱抵抗を0、流量係数を1、透過率を1、吸収率を0とした境界面である。

- ② 物体のガラスと日射遮蔽物の節点には日射吸収率、通気がある中空層の節点には通気量を与え、各節点ごとに熱平衡式から熱平衡行列を作成し、各節点温度を未知数とした連立方程式を解き各節点温度を求める。
- ③ 通気がある中空層の節点の風量は、デバイス開口の面積、流量係数やべき指数など開口特性値とそれに対応した開口条件式を与えて換気回路網プログラム（以降、CVNEC）で求める。
- ④ CVNECの入力データは、窓熱節点Excelファイルのシート上にExcelマクロで自動作成する。
- ⑤ 日射遮蔽物の制御、開口の開閉制御、排気ファン発停制御はExcelマクロで記述する。なお日射遮蔽制御結

果を1年分外部ファイル経由でRadianceに入力し、別途示す照明転写ファイル経由でNewHASP（2回目計算時）に与えて昼光利用時熱負荷を求めることもできる。

- ⑥ 通気量は熱節点温度により変化するため窓熱節点計算と通気量換気回路網計算の反復計算を行う。
- ⑦ 日射吸収率は、相互反射を考慮した総合日射吸収率を各デバイス単体（ガラス、ブラインド、ロールスクリーン等）の透過率、反射率を与えて求めた値を別途時系列ファイルで与える。
- ⑧ 自由境界面は日射遮蔽物の昇降制御に用いる。各種制御アルゴリズムを与えて、節点を日射遮蔽デバイスか自由境界面に選択して設定することにより昇降制御をシミュレートする。
- ⑨ 室内空気に接するデバイスの表面温度、透過率、室内流入通風量から、ファサードの対流熱取得、放射熱取得を求める。熱取得なので室内空気温度は常時NewHASPの基準温度とする。
- ⑩ 室内空気温度を基準温度、基準温度+1℃とした場合の熱取得差を求め、WF0を求める。この操作はExcelのマクロで行う。
- ⑪ Fig. 1に示した窓転写ファイルにファサードの対流熱取得、放射熱取得、WF0を格納する。

上述した処理に必要なデータおよび熱平衡行列は、窓熱節点Excelファイルに内蔵もしくは、外部ファイルで窓熱節点Excelファイルに与える。これにより、ファサードに関する情報を窓熱節点Excelファイルに集中させることができ、NewHASPおよびCVNECのコード変更は必要なく、新たなファサード、デバイス特性値に対しても窓熱節点Excelファイルを更新するだけで対応できる。

### 2.3 高性能ファサード標準モデルの構成

標準解法で作成される標準モデルは、層数および節点数、デバイス種別は自由である。本論文ではDSF, AFW, AFS, PPW, CNVを定式化するための標準モデルとして、AFS<sup>3)</sup>を原型とするFig. 2に示した高性能ファサード標準モデル（層数5、節点数8）を作成した。

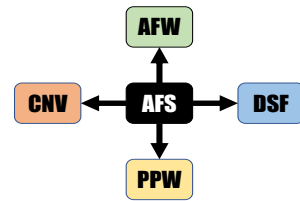
外側ガラス、外側中空層BS、ブラインド、内側中空層AS、内側デバイスもしくは自由境界面の5層で構成される。内側デバイスは、AFSの場合はロールスクリーン、DSFとAFWの場合は内側ガラス、PPW, CNVおよびロールスクリーン上げ状態の場合は自由境界面が設定される。高性能ファサード標準モデルは、NewHASPモデルの入力データにおいて窓（WNDWデータ）として定義される。WNDWデータの窓種コードをTRAN（WNDW TRANデータ）とするだけで、Fig. 1に示す窓転写ファイルへの入出力、窓熱取得内部置換がなされる。標準モデルでは窓熱節点Excelファイル側で多数室換気回路網計算（反復計算後）結果を取り込んだ窓熱取得結果を窓転写ファイル経由でNewHASP側に渡しているため、NewHASP側では

AFSについての多数室計算を必要とせず、Fig. 2網掛け部分に示す単室計算モデルとしてよい。なおAFSと共に隣室との多数室計算したい場合には多数室の指定も可能である。

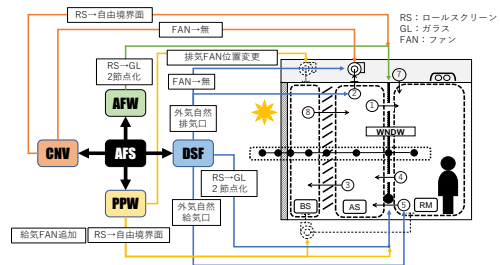
NewHASP1回目の計算でWNDW TRANデータで定義された内部置換窓（窓配置スペース数および窓数自由）の時刻別情報を、すべてFig. 1に示す窓転写ファイルに1年分出力する。ここにはFig. 2黒点線枠部分に示す窓熱節点で必要な時刻別情報が1年分出力されている。窓熱節点Excelファイルは窓転写ファイルを毎時刻読み込み、窓熱節点温度を求める。窓熱節点温度のうち中空層温度、外気温度、室温を与えてFig. 2赤破線部分に回路網節点、赤字①～⑧に流路を示す換気回路網プログラムを毎時実行する。毎時刻ごとに窓熱節点Excelファイルと換気回路網プログラムとの反復計算を行う。反復計算後の節点温度と透過率、対流および放射熱伝達率から窓対流熱取得および窓放射熱取得を求めて窓転写ファイルに1年分出力し、2回目のNewHASP計算で内部置換して熱負荷を求める。なおブラインドスラットの対流熱伝達率は換気回路網で求めた風量から風速を求めユルゲスの式で与えた。また室内に面するFig. 2の流路①④⑤の室内側流入風の熱取得については、窓対流熱取得に計上した。

### 2.4 高性能ファサード標準モデルによるモデル生成

AFS（ロールスクリーン下げ状態、自由境界面なし）を原型とする高性能ファサード標準モデルから、Fig. 3aに示すようにDSF, AFW, PPW, CNVの各モデルが生成



a) 生成概念



b) 生成フロー

Fig. 3 高性能ファサード標準モデルによるモデル生成

Model Generation with High-Performance Facade Standard Model

できる。Fig. 3bに生成フローを示す。

各モデルの生成手順を以下に述べる。AFWモデルは、Fig. 3bのロールスクリーンを内側ガラスとする。内側ガラスの断熱性を考慮するため内側ガラスの内表面、外表面に熱節点を設ける。DSFモデルは、AFWモデルから、Fig. 3bの流路⑤の経路を外気→内側中空層ASとし外気給気口の開口条件を与える。流路②の経路を内側中空層AS→外気とし外気排気口の開口条件を与える。PPWモデルは、Fig. 3bのロールスクリーンを自由境界面とする。排気ファンを外側中空層BSからの排気とする。流路⑤を給気ファン（プッシュファン）とし室内から外側中空層BSに給気する。CNVモデルは、Fig. 3bのロールスクリーンを自由境界面とする。排気ファンはなしとする。これらの操作は窓熱節點Excelファイルの変更だけでよい。

### 2.5 高性能ファサード標準モデルの窓熱取得

高性能ファサード標準モデルの窓熱取得をFig. 4に示す。室境界の気密状態によりLoose, Medium, Tightの3タイプに分類される。Looseは自由境界面を有する場合である。自由境界面の外側の内側中空層ASは室内に属すると考え、ブラインド面を窓熱取得算定面とした。ブラインド

面の対流熱取得および放射熱取得、スラット間室内側流入風量熱取得、透過日射熱取得を窓熱取得とした。Mediumは室内側デバイスがロールスクリーンもしくは内ガラスの場合である。デバイス面の対流熱取得および放射熱取得、ロールスクリーン通風室内側流入風量熱取得、デバイス下部スリット室内側流入風量熱取得、透過日射熱取得を窓熱取得とした。Tightは室内側デバイスがTightな内ガラスの場合、すなわちDSFである。内ガラスの対流熱取得および放射熱取得、透過日射熱取得を窓熱取得とした。

### 2.6 高性能ファサード昼光利用Radiance<sup>4)</sup>モデル

高性能ファサード昼光利用RadianceモデルをFig. 5に示す。昼光および照度センサ周囲の人工照明の影響を考慮し、照度センサで感知している照度より照明点灯率を求める<sup>5)</sup>。窓熱節點Excelファイルで記述されたブラインドスラット角制御、ロールスクリーン制御情報を毎時刻1年分与え、Radianceで単独計算して、毎時刻の照明点灯率を求め、Fig. 1に示した照明転写ファイル経由でNewHASP内部置換を行う。

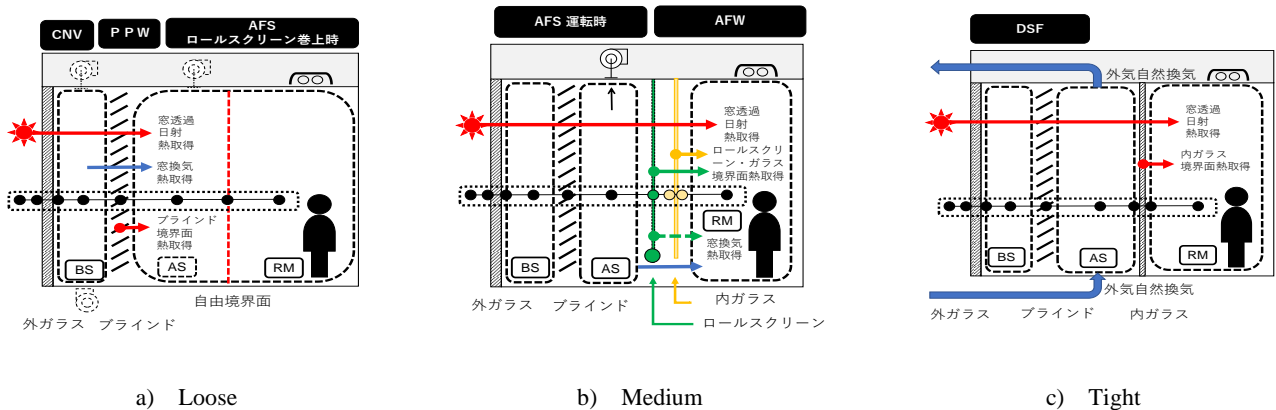


Fig. 4 高性能ファサード標準モデルの窓熱取得  
Heat Gain from Windows for Standard Model of High-Performance Façade

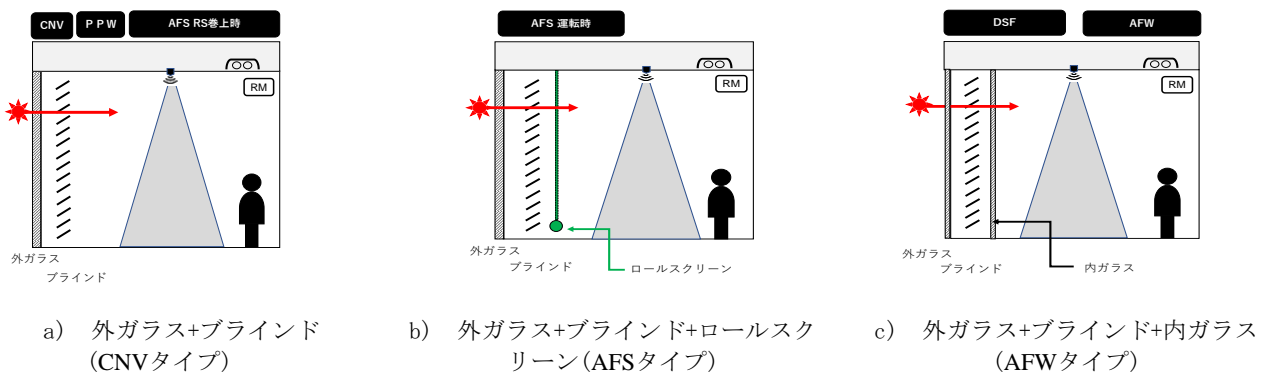


Fig. 5 高性能ファサード昼光利用Radianceモデル  
Daylight Harvesting Radiance Model for High-Performance Façade



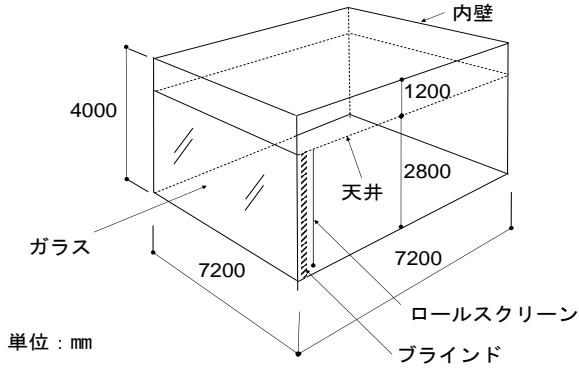


Fig. 6 建築モデル  
Building Model

Table 2 ファサード仕様  
Facade Specifications

記号	仕様
DSF	外ガラス：普通透明8mm, 内ガラス：Low-e 6+6 冬期自然換気口閉鎖
AFW	外ガラス：普通透明8mm, 内ガラス：Low-e 6+6 通風量：650m <sup>3</sup> /h (=90m <sup>3</sup> /h・m)
AFS	外ガラス：Low-e 6+6 ロールスクリーン：幕材気密性Medium <sup>6)</sup> 空調運転時：直達日射(有：下げ, 無：上げ) 空調停止時：上げ 通風量：650m <sup>3</sup> /h (=90m <sup>3</sup> /h・m)
PPW	外ガラス：Low-e 6+6 通風量：650m <sup>3</sup> /h (=90m <sup>3</sup> /h・m)
CNV	外ガラス：Low-e 6+6
共通	ブラインド常時下, スラット角45° 固定 Low-e 6+6: 熱貫流率: 1.9 W/m <sup>2</sup> ・K

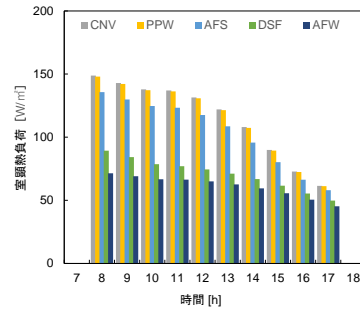
### 3. シミュレーション結果

高性能ファサード標準モデルによるシミュレーション対象とした建築モデル (AFS設定時) をFig. 6に示す。7.2m角の事務室のフルハイトファサードとし、主方位は南とした。DSF, AFW, AFS, PPW, CNVについて比較する。比較ファサードの仕様をTable 2に示す。通風量は一般的と思われる窓幅1m当たり外気導入量(室奥行15m×人員密度0.2人/m<sup>2</sup>×1人当たり外気導入量30m<sup>3</sup>/h・人=90m<sup>3</sup>/h・m)に窓幅を乗じて(窓幅7.2m×90m<sup>3</sup>/h・m=648m<sup>3</sup>/h)をまるめ650m<sup>3</sup>/hとした。

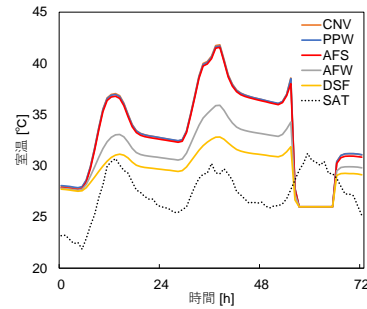
#### 3.1 ピーク期間シミュレーション結果 (昼光利用無)

高性能ファサード標準モデルを用いて、年間熱負荷シミュレーションを行った。室顕熱負荷最大値発生日(月曜)をピーク日とし、ピーク日の直前2日間(土日)を含めた3日間をピーク期間とする。

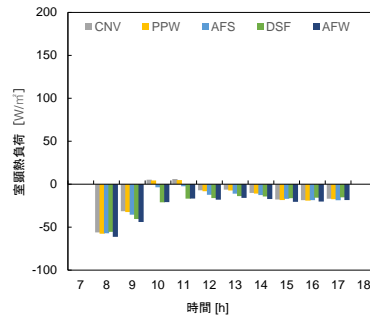
##### 3.1.1 室顕熱負荷・室温比較 夏冬ピーク日の室顕



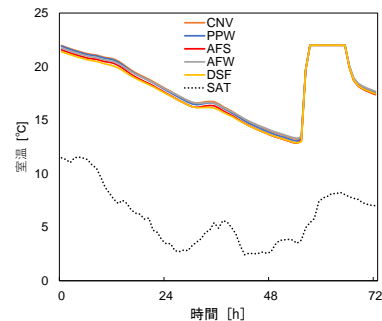
a) 夏ピーク日 (9/11月曜日) 室顕熱負荷比較



b) 夏ピーク期間 (9/9~9/11) 室温比較



c) 冬ピーク日 (12/4月曜日) 室顕熱負荷比較



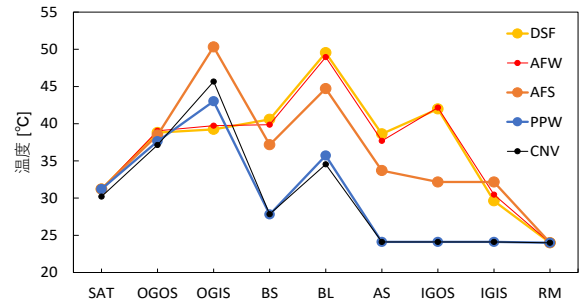
d) 冬ピーク期間 (12/2~12/4) 室温比較  
SAT: 夜間放射量のみ考慮した相当外気温度

Fig. 7 夏冬ピーク日シミュレーション結果  
Summer/Winter Peak Day Simulation Results

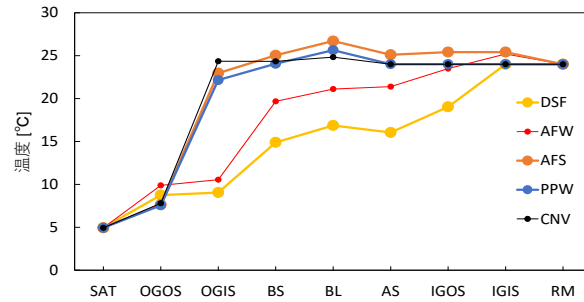
熱負荷比較および夏冬ピーク期間の室温比較をFig. 7に示す。夏ピーク日（9/11月曜）室顕熱負荷比較をFig. 7aに示す。室顕熱負荷最大値は立ち上がり時である8時に発生した。CNVとPPWは、ほぼ同じで約150W/m<sup>2</sup>、AFSは約135 W/m<sup>2</sup>、DSFは約90W/m<sup>2</sup>、AFWは約70W/m<sup>2</sup>となった。立ち上がり負荷なのでFig. 7bに示す休日室温変動の影響を受けている。CNV、PPW、AFSの休日の室温はほぼ同じ値で推移している。休日のためPPWおよびAFSの排気ファンは停止してかつAFSのロールスクリーンは巻き上げており、CNVと同じ状態になっているためである。冬ピーク日（12/4月曜日）室顕熱負荷比較をFig. 7c(正值は冷房、負値は暖房)に示す。室顕熱負荷最大値は立ち上がり時である8時に発生した。CNV、PPW、AFS、AFW、DSFはほぼ同じで約55~60W/m<sup>2</sup>となった。立ち上がり負荷なのでFig. 7dに示す休日の室温変動の影響を受けている。CNV、PPW、AFS、AFW、DSFの休日の室温はほぼ同じ値で推移している。CNV、PPW、AFSの状態は休日の夏ピークと同じであり、DSFの通風は停止しているため休日の室温変動はほぼ同じとなった。CNV、PPWの熱負荷は10時~11時は冷房側となった。スラット受熱日射量による放熱のためと考えられる。

**3.1.2 窓周り水平温度分布比較** 夏および冬ピーク時の窓周り水平温度分布比較をFig. 8に示す。夏ピーク時（9/11月曜日12:00）の水平温度分布比較をFig. 8aに示す。CNVとPPWの水平温度分布は他のファサードに比べ低い。これはブラインド内側の中空層温度が室温と同等のため、それより外側の水平温度分布が低くなるためである。CNVとPPWの窓室熱取得算定面であるブラインド表面温度が約35℃であるのに対し、AFSの窓室熱取得算定面であるロールスクリーン表面温度は32℃、AFW、DSFの窓室熱取得算定面である内ガラス内表面温度は、30℃、29℃となった。また、AFS、AFW、DSFの透過日射はCNV、PPWより小さくなる。そのためFig. 7aに示したAFS、AFW、DSFの熱負荷はCNV、PPWより小さい。DSFとAFWはほぼ同じ水平温度分布となった。DSFの通気入口温度は約30℃の外気温であるのに対してAFWの通気入口温度は約24℃の室温（基準温度）である。一方通風量は、Fig. 9に示すようにAFSの650m<sup>3</sup>/hに対しDSFの自然換気による通風量が約1350m<sup>3</sup>/hである。そのため水平温度分布が同等となると考えられる。AFSの外側ガラスの内表面温度はDSF、AFWに比べて高いが、それより内側の水平温度分布（BS~IGOS）はDSF、AFWに比べて低くなった。これはAFSのロールスクリーンの通気性により室温の空気がロールスクリーンの外側に流入したためである。

冬ピーク（12/4月曜日9:00）における水平温度分布比較をFig. 8bに示す。CNV、PPW、AFSの水平温度分布はほぼ同等で、外ガラス内表面より室内側の水平温度分布は他のファサードに比べ高い。これはブラインド内側の中空層温度が室温と同等のため、それより外側の水平温度分布が高くなったためである。AFSではロールスク



a) 夏ピーク（9/11月曜日12:00）



b) 冬ピーク（12/4月曜日9:00）

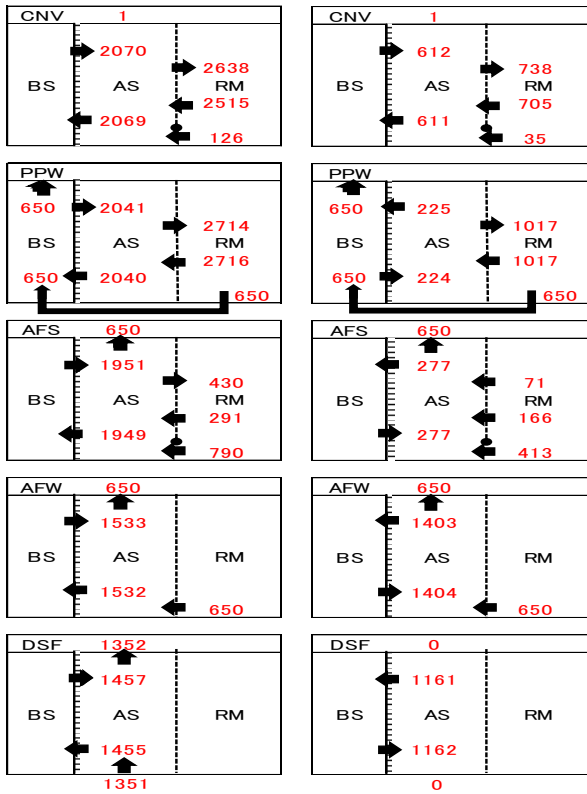
SAT : 相当外気温度	BS : 外側中空層	IGOS : 内ガラス外表面
OGOS : 外ガラス外表面	BL : ブラインド表面	IGIS : 内ガラス内表面
OGIS : 外ガラス内表面	AS : 内側中空層	RM : 室温=基準温度

Fig. 8 夏冬ピーク時窓周り水平温度分布比較  
Comparison of Horizontal Temperature Distribution in Summer/Winter Peak Time

リーンの通気による室内空気の内側空気層へ流入とロールスクリーン日射吸収反射によりCNV、PPWより若干高めな水平温度分布となった。冬のDSFの通気は停止している。DSF、AFW共に外ガラスを透明8mm、内ガラスをLow-eとしているため、外側ガラス外表面から内側ガラス内表面までの水平温度分布は、CNV、PPW、AFSより低くなった。

**3.1.3 窓周り風量分布比較** 夏冬ピーク時の窓周りにおける風量分布比較をFig. 9に示す。図中のBS、RMなどの記号はFig. 2と同じ。夏ピーク（9/11月曜日12:00）の風量分布比較をFig. 9aに示す。CNVとPPWのブラインド循環流風量および自由境界面の通気量に大きな違いは見られない。AFSのロールスクリーン通気量は、PPWの自由境界面の通気量に比べ小さい。AFWの排気量はファン排気量の650m<sup>3</sup>/hであるが、DSFの自然換気量は、約1350m<sup>3</sup>/hと大きい。

冬ピーク（12/4月曜日9:00）の風量分布比較をFig. 9bに示す。PPWの自由境界面の通気量は、CNVよりも大きい。AFSのロールスクリーン通気量はCNV、PPWより小さく上部、下部ともに室内側から中空層側に流入している。AFWのブラインド循環風量は約1400m<sup>3</sup>/hに対し、外気通気口を閉じたDSFのブラインド循環風量は約1200m<sup>3</sup>/hに減少した。



a) 夏ピーク (9/11月曜日12:00)      b) 冬ピーク (12/4月曜日9:00)

Fig. 9 夏冬ピーク窓周り風量分布比較  
Comparison of Airflow Distribution in Summer/Winter Peak Day

Table 3 相当熱性能値  
Equivalent Thermal Performance Value

	夏ピーク時 9/11月曜日12:00		冬ピーク時 12/4月曜日9:00		従来法 <sup>7)</sup>	
	相当K値	相当η値	相当K値	相当η値	K値	η値
AFS	0.9	0.02	0.6	0.03	—	—
AFW	0.6	0.05	0.6	0.07	0.83	0.07
CNV	1.4	0.15	1.2	0.17	1.47	0.23
PPW	1.4	0.15	1.1	0.17	0.81	0.26
DSF	1.5	0.05	1.3	0.07	1.13	0.08

3.1.4 ピーク時相当熱性能値 従来年間を通じて一定と仮定してきた熱性能値との比較のため、夏冬ピーク時の熱貫流率と日射熱取得率の参考値としてピーク時外気条件、日射条件、中空層気流条件を与え、シミュレーション結果から、以下の方法で求めたピーク時の相当熱貫流率（以降、相当K値）と相当日射熱取得率（以降、相当η値）をTable 3に示す。相当K値は、ピーク時室温の室内側熱取得とピーク時室温を1℃上げた場合の室内側熱取得熱平衡式を解いて求め、その差を面積で除した値とする。相当η値は、ピーク時室内透過日射成分と、室内空気と接するデバイスの吸収日射がそのデバイスの両側に均等に熱伝達すると仮定した吸収日射熱伝達成分を合計した値を、ピーク時窓面入射日射量で除した値とする。

夏ピーク時の相当K値は、 $DSF1.5 > CNV1.4$ となった。この理由は、CNVではブラインドスラット間気流により、室温と仮定した空気がガラスとブラインド間の中空層に入るため中空層が冷却され、一方DSFではダブルスキン中空層に夏ピーク時の高温空気が入り中空層が加熱されるためである。冬ピーク時の相当K値は、 $DSF1.3 > CNV1.1$ となった。この理由はCNVではブラインドスラット間気流により、室温と仮定した空気がガラスとブラインド間の中空層に入るため中空層が加温される。一方DSFではダブルスキン中空層は冬期に通風しないため2重ガラス状態になるが、冬外側ガラスが普通ガラスのため低温になる。日射も南面のため立ち上がり時は少なく、ダブルスキン中空層温度は上昇しない。そのため、 $DSF$ 相当K値  $>$   $CNV$ 相当K値となったと考えられた。従来法との比較ではPPWのK値に相違がみられた。Fig. 9より明らかなようにPPWのブラインドの上部スラット間から室内側上部への流入空気量が大きいと考えられる。

### 3.2 年間シミュレーション結果（昼光利用有・無）

昼光利用有および無の場合の、高性能ファサード標準モデルを用いた年間熱負荷シミュレーションを行った。Fig. 5に示した3タイプの昼光利用時年間照明点灯率比較をFig. 10に示す。Fig. 10はFig. 5に示したデバイス位置を保持したまま1日24時間年間8760時間点灯としてRadianceで求めた年間照明点灯率である。経過時間は通年の経過時間数であり、経過時間1時間につき一つの点灯率が示される。点灯率最大値は夜間点灯時を示す。夜間点灯時はAFSの点灯率が夜間室内照明のロールスクリーン面での反射により最も低く、ブラインド面の反射を受けるCNV、ガラス面透過・反射を受けるAFWの順に大きくなる。南面のため夏至を中心として対称に点灯率が上昇する領域がみられる。CNV、AFW、AFSの順で透過率が低くなると、この領域の面積は順に増加する。

照明点灯の有無、ロールスクリーン昇降状態を考慮してFig. 5に示した3タイプの照明点灯率から新たに制御を考慮した照明点灯率を求め、Fig. 1に示した照明転写ファイル経由でNewHASP内部置換を行った。Fig. 11に昼光利用有および無の場合の、高性能ファサード標準モデルを用いた年間室顕熱負荷比較を示す。昼光利用無の年間冷暖房顕熱負荷合計は、CNVとPPWは約120kWh/m<sup>2</sup>年となり、AFSは約105 kWh/m<sup>2</sup>年、DSFは90 kWh/m<sup>2</sup>年となった。CNV、PPW、AFSの年間顕熱暖房負荷は11~13 kWh/m<sup>2</sup>年と小さいが、AFWは25kWh/m<sup>2</sup>年、DSFは44 kWh/m<sup>2</sup>年と大きくなった。これは南面フルハイトのファサードのためである。冬期は太陽高度が低くなり南面のガラス透過日射量が大きく、日射によりペリメータ暖房負荷が大きく低減される。またブラインドに吸収された日射は、対流成分が大きく即時に空気に伝わる。いわば冬期のブラインドに日射が当たれば発熱体となる。CNVではその発熱体を室内に設置し直接室内空気を加温できる。ところがAFWやDSFではガラスの外側に発熱体を設置した状

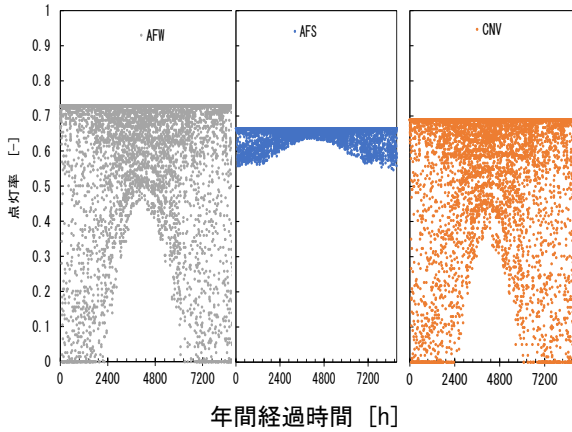


Fig. 10 昼光利用時照明点灯率比較  
Comparison of Lighting Rates for Daylight Harvesting

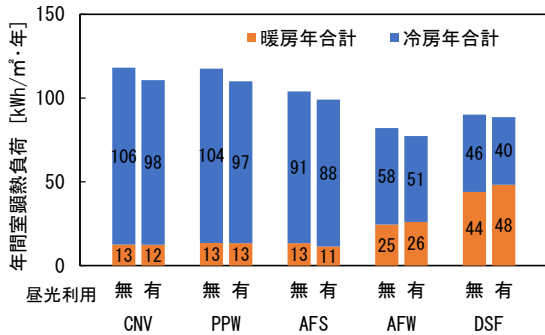


Fig. 11 年間室顕熱負荷比較  
Annual Room Sensible Thermal Load Comparison

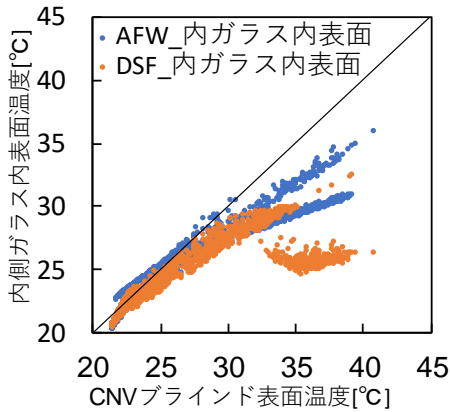


Fig. 12 暖房期CNV・AFW・DSF表面温度比較  
Comparison of CNV, AFW and DSF Surface Temperatures during the Heating Season

態となり、せっかく発熱体で加温した空気を排気もしくは外気側に熱伝達してしまうことになるため暖房負荷が増大する。

Fig. 12に暖房期CNV・AFW・DSF表面温度比較を示す。Fig. 12より、室内側境界面であるAFW、DSFの内ガラス内表面温度がCNVのブラインド表面温度よりも低いこ

とがわかる。またAFWの内ガラス内表面温度がDSFより高くなっている理由を以下に示す。DSFの外ガラスは普通透明ガラスのため外気温が低く日射が当たらない時間帯は、DSF(換気無)中空層温度は外気温に近くなる。一方その時間帯のAFS中空層温度は、室内設定温度の空気が流入するため室温に近くなる。そのためAFWの内ガラス内表面温度がDSFより高くなったと考えられる。

昼光利用有の場合、照明点灯率が小さくなるため昼光利用無の年間冷房顕熱負荷が減少する傾向にある。昼光利用の有無による年間暖房顕熱負荷への影響は小さい。年間冷暖房顕熱負荷合計の昼光利用による削減率は、DSF2%、DSF以外は5~6%となった。

#### 4. まとめ

高性能ファサードは、新しいガラスや日射遮蔽デバイスの開発により日々進化している。これらの最新の特性を記述できる実用的な熱負荷シミュレーションが必要とされている。そこでファサードの層数、ガラスと日射遮蔽物の配置と種類、中空層の換気の有無について自由に組み合わせた高性能ファサードの窓熱取得を求めることが可能な標準解法を考案した。また標準解法による5層8節点の高性能ファサードモデルを作成し、単一階ダブルスキンDSF、エアフローウィンドウAFW、プッシュプルPPW、エアフロースクリーンAFS、一般窓CNVを定式化し、同一モデルで年間熱負荷比較を行った。本論文の結論を以下に示す。

- 1) n層のガラス・日射遮蔽物・中空層で自由に構成されるファサードは、各層の熱伝達率、ガラスの熱伝導率、日射吸収率、中空層の風量を与えるとn個の熱平衡式が得られ、連立方程式を解きn個のデバイス温度、中空層温度を求めると窓熱取得が求まる。
- 2) 中空層の風量は換気回路網プログラムで求める。
- 3) 熱抵抗を0、流量係数を1、透過率を1、吸収率を0とした自由境界面を与えることにより日射遮蔽物の昇降制御が記述できる。
- 4) 標準解法を実装したマクロ付きEXCELファイルを開発した。NewHASP、換気回路網プログラムと連携させ高性能ファサードの熱負荷を求めた。新たなファサードを考案した場合、EXCELファイルの更新だけで対応可能である。
- 5) 標準解法で求めた日射遮蔽制御結果を外部ファイル経由でRadianceに入力し、別途年間昼光利用計算を行い、照明点灯率を求めNewHASP本体で内部置換することにより昼光利用の有無の熱負荷が求まる。
- 6) 主方位南の7.2m角事務室の年間冷暖房合計熱負荷は、CNV、PPWはほぼ同じで、AFS、DSF、AFWの順に小さくなった。昼光利用による削減率は、DSF2%、DSF以外5~6%となった。



## 参考文献

- 1) 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  
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.77.997>)
- 2) 郡公子, 石野久彌, 長井達夫, 村上周三: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その 116) BEST への高性能窓システム新計算法の導入, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2013.9  
(DOI: [https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2013.5.0\\_17](https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2013.5.0_17))
- 3) 相賀洋: 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エアフロースクリーンモデルの構築, 日本建築学会環境系論文集, 第 87 巻, 第 802 号, pp. 828-835, 2022.12  
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.87.828>)
- 4) Radiance:  
<https://www.radiance-online.org/about/main.html>,  
accessed (2023-10-19)
- 5) 吉澤 望, 三木 保弘, 山口 秀樹, 田村 仁人: 昼光利用によるオフィスの照明エネルギー削減効果の系統的検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 83 No.747, pp. 425-434, 2018  
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.83.425>)
- 6) 佐久間英二, 二宮秀典, 永田明寛, 萩原伸治: 窓に付属する日射遮蔽物の断熱性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 731 号, pp. 31-41, 2017.17  
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.82.31>)
- 7) 板硝子協会: ビルと複層ガラス, 2014
- 8) 長井達夫, 相賀洋: NewHASP/ACLD- $\beta$  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, pp. 45-52, 2004.3