

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560709

研究課題名(和文)高性能ガラスファサードの環境性能の解明と効果推定

研究課題名(英文) Investigation and Estimation of Energy Saving Effects of High-Performance Glazing Facades

研究代表者

郡 公子 (Kohri, Kimiko)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20153504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：高性能ガラスファサードを実現する手法であるダブルスキン、エアフローウィンドウ(AFW)のように窓内に空気を通す窓システムに共通して利用できる実用的な理論式を導出した。この式を利用すると、窓システムの熱貫流率、日射熱取得率、窓内空気温度の上下分布が得られる。また、計算に必要となる窓システムの熱特性値を整備し公開した。本計算法の妥当性を実測値との照合で確認した上で、熱環境・エネルギーシミュレーションプログラムに組み込んだ。数値解析を行い、高性能ガラスファサードを採用することによる空調最大熱負荷や空調年間熱負荷の低減効果を定量評価した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the theoretical equations expressing thermal performance of window systems such as airflow windows and double skin facades were derived. These equations are sufficiently practical and can be used for obtaining the vertical distribution of U-factor, solar heat gain factor and cavity air temperature of window systems. The database of thermal properties which are necessary for calculation with the proposed equations were also provided and open to the public. The numerical simulation analysis were performed and the energy saving effects of various window systems were evaluated.

研究分野：建築環境設備

キーワード：ダブルスキンファサード エアフローウィンドウ 熱貫流率 日射熱取得率 空調熱負荷

1. 研究開始当初の背景

ガラス建築は、自然光利用の点でもともと有利であるので、弱点となりがちなファサードの熱性能を高性能化すれば、環境建築として成立する可能性がある。ガラスファサードの高性能化手法としては、室空気を窓内に通すエアフローウィンドウ (AFW)、外気をファサード内に通すダブルスキンがあり、着実に普及しつつあるものの、その熱性能の汎用的で実用的な推定法はなかった。高性能窓システムを採用するガラスファサードの的確な熱設計のために、実用的な熱性能の推定法あるいは熱性能値の整備が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は、高性能ガラスファサードとして、エアフローウィンドウ (AFW)、ダブルスキンを対象とし、その熱貫流率、日射熱取得率、窓内温度などの熱性能を推定する実用式を提案し、その計算に必要な熱特性値を、種々のガラス・ブラインドの組み合わせなどについて整備し、データベースとして公開することを第一の目的とする。さらに、実用式を組み込む熱環境・エネルギーシミュレーションプログラムを開発し、それを利用する数値解析を通して、主要な設計要因による AFW、ダブルスキンファサードの空調熱負荷低減効果を、最大熱負荷と年間積算熱負荷の点から評価しようとするものである。

3. 研究の方法

(1)文献調査

高性能窓システムの設計法の実態や動向を把握するために、建築専門誌の調査を行い建築事例を収集し解析する。

(2)理論研究

高性能窓システムの熱性能を表す汎用的で実用的な熱性能式の導出を試みる。

(3)プログラム開発

提案した熱性能式を組み込むプログラムを開発し、高性能窓システムをガラスファサードとして採用する建築の熱性能評価を可能とする。

(4)計算法検証

高性能窓システムの熱性能式を用いた計算法の妥当性を確認するために実測値との照合を行う。

(5)数値解析

主要な設計要因による高性能ガラスファサードの熱性能の感度を定量評価するための数値解析を行う。

4. 研究成果

(1)高性能窓システムの動向

高性能窓システムとしてダブルスキン、AFW、エアバリア窓の3つを取り上げ、表1に示す建築専門誌や学会誌、学会大会論文集を調査し、設計事例収集を行い解析した(文献)。図1に、高性能窓システムを採用する建築事例の竣工年別件数を示す。ダブルス

キン、AFWは1980年代、エアバリア窓は1990年代から利用されていることが分かる。また、1990年代後半から高性能窓システムの利用が増加しており、定着してきていると考えられる。そのほか、ダブルスキンは内側 Low-E 複層ガラスを使用するのが一般的になっていて、多層吹き抜けタイプの場合には6層程度の吹き抜けが多い、AFWは、外に Low-E 複層ガラスを使用するタイプが出現し始めたなどの傾向が文献調査より分かった。

表1 調査対象文献

調査雑誌	調査範囲
新建築	1976年1月号 - 2011年12月号
ディテール	61号 - 190号(1979年秋号 - 2011年冬号)
日経アーキテクチャ	No.345 - No.966(1989年 - 2011年12月25日号)
建築設備士	2000年1月号 - 2011年12月号
東京都環境計画書	東京都環境局に提出された設計データ(東京都のみ)
日本建築学会	1976年 - 2011年までの学術講演梗概集
空調和衛生工学会	2001年 - 2011年までの学術講演梗概集
空調和衛生工学誌	1997年1月号 - 2010年11月号

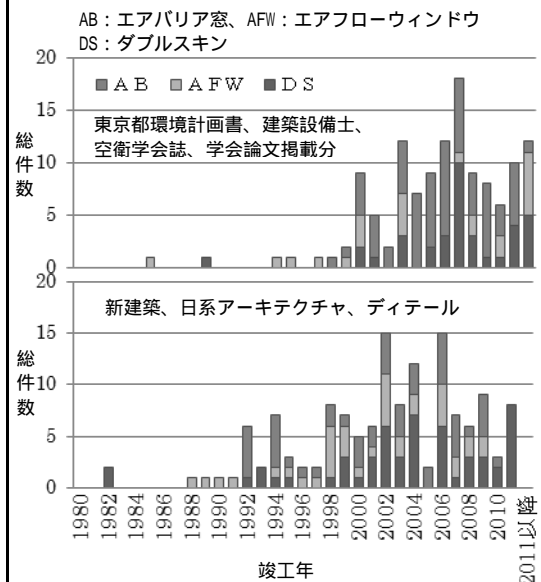


図1 高性能窓システムをもつ建築件数の推移

(2)高性能窓システムの熱性能式の提案

ダブルスキン、AFWの熱平衡式を外気温、室温、窓内空気温度、窓面日射量に対する重み係数を用いて表し、その式を変形・整理することにより、ダブルスキン、AFWに共通して利用可能な熱性能理論式を導いた(文献)。表2にその式を示す。窓内を通す室空気あるいは外気の風量を与えると、熱貫流率、日射熱取得率、窓内空気温度が得られる。多層吹き抜けタイプのダブルスキンに対して、自然換気により生じるダブルスキン空気温度の上下分布とそれによる各層の熱性能の違いも評価できる。同様に、窓高さの高いAFWに対しても、窓内温度分布の影響を考慮する計算が可能である。上下温度分布の影響を考慮せず平均的な熱性能を求めたいときは、吹き抜け全層を、式の上では1層と扱う(n=1)。熱貫流率、日射熱取得率の式はともに、非通気時の性能に対して通気による性能変化量を補正するという考えにもとづいている。U、は無限風量通気時の熱貫流率、日

射熱取得率の変化量であり、これに換気効果率 r を乗じると換気量に応じた性能変化量が得られる。 r は、窓換気量と非換気時の窓内対流熱取得係数 K_C により決まる。 K_C は、窓内空気温度が 0、室内外相当温度が 1 のときの窓内空間の対流熱取得を表し、断熱性の高いガラスを使用すると小さな値となる。

表中には、熱貫流率、日射熱取得率のほか、窓内空気温度の算定式も示している。表 2 の式(3)中の{}内は流入空気温度を基準とした場合の非換気時の室外相当温度、室内相当温度、窓面日射量による窓内空気温度変化量を示す項であり、 $(1 - r^n)$ は、換気による温度変化の抑制率を表す。

ダブルスキンの場合、表 2 の式(3)~(5)を熱の式とし、別に圧力差による自然換気の式を適宜たてて連立させて解くことにより、自然換気量を求められる。

表 2 高性能窓システムの熱性能式

窓内空間を等間隔に多層に分割して考えると、外気あるいは室空気の流入層から n 番目の層の窓熱貫流率 $U_{V,n}$ [W/m² K]、日射熱取得率 $\eta_{V,n}$ [-]、窓内空気温度 $t_{V,n}$ [] は、次式で表される。

$$U_{V,n} = U + \Delta U \cdot r^n \quad \dots(1)$$

$$\eta_{V,n} = \eta + \Delta \eta \cdot r^n \quad \dots(2)$$

$$t_{V,n} = t_{IN} + \{T_O(t_{Oe} - t_{IN}) + T_R(t_{Re} - t_{IN}) + T_{SR}I\}(1 - r^n) \quad \dots(3)$$

$$\text{ただし、} r = c_p \rho V / (K_C + c_p \rho V) \quad \dots(4)$$

$$T_O + T_R = 1 \quad \dots(5)$$

V は層単位の外ガラス面積基準の窓換気量[lit/sec m²]であり、窓幅 1m 当たりの換気量 Q [lit/sec · m] と 1 層の高さ H_G [m] から求める。窓全体の平均的熱性能を簡単に求めるには、層分割数を 1 とする。このとき窓内空気温度は均一と仮定される。

$$V = Q / H_G \quad \dots(6)$$

【記号】 U 、 η ：非換気時の熱貫流率[W/m² K]、日射熱取得率[-]、 ΔU 、 $\Delta \eta$ ：熱貫流率極限変化量[W/m² K]、日射熱取得率極限変化量[-]、 r ：換気効果率[-]、 t_{IN} 、 t_{Oe} 、 t_{Re} ：流入空気温度、室外相当温度、室内相当温度 [] (相当温度とは、夜間放射量や室内側放射量の影響を加味した外気温や室温のこと)、 I ：窓面日射量 [W/m²]、 T_O 、 T_R ：室外相当温度、室内相当温度に対する非換気時の窓内空気温度重み係数[-]、 T_{SR} ：窓面日射量に対する非換気時の窓内空気温度重み係数 [K m²/W]、 K_C ：非換気時の窓内対流熱取得係数[W/m² K]、 c_p 、 ρ ：空気比熱[J/gK]、密度[g/lit]

図 2 は、窓換気量と換気効果率 r の関係を示したものである。換気の効果は、換気効果率だけでもある程度評価できる。

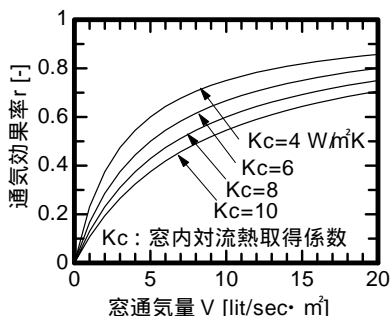
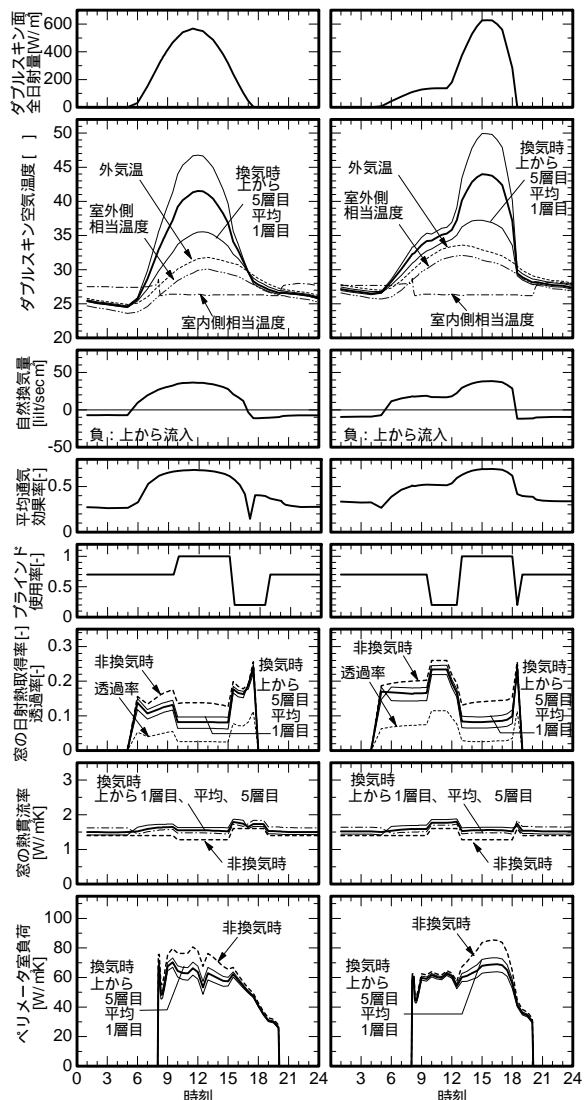


図 2 窓換気量と換気効果率

ダブルスキンの熱性能式を利用した数値計算法の妥当性は、ダブルスキン内空気温度の計算値と実測値との照合により確認した(文献)。また、熱性能式を利用する上で必要となる熱特性値を整備し(文献)、公開した(<http://www.ibec.or.jp/best/program/db/>)。

(3) ガラスファサード建築の空調熱負荷解析
提案した高性能窓システムの熱性能を組み込む熱環境・エネルギーシミュレーションプログラムを開発し、それを利用する数値解析を行った。

まず、設計用気象条件下のダブルスキンの特性を解析した(文献)。図 3 は、東京に建つ 5 層吹抜けダブルスキン建築の南、西ゾーンのオフィスのダブルスキン状態値とペリメータ冷房負荷の計算結果を示したものである。ダブルスキンの性能は全層平均を想定している。

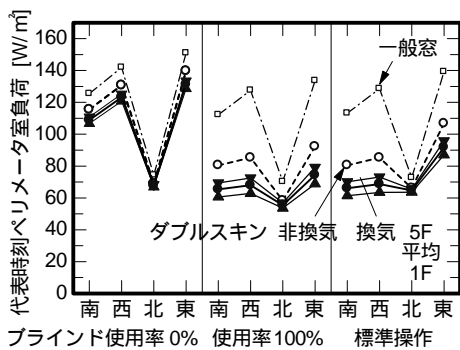


(a) 南方位 (Js-t 基準気象) (b) 西方位 (Jc-t 基準気象)

図 3 ダブルスキン状態とペリメータ負荷変動 (東京設計気象)

図3より、ダブルスキン面日射のピーク時刻のダブルスキン空気温度の上下差は10K以上になり、日中の平均通気効果率は0.5~0.7になることがわかる。日射熱取得率はブラインド使用率、太陽位置、自然換気量の変化に応じて、熱貫流率はブラインド使用率、自然換気量の変化に応じて変動する。自然換気により、日射熱取得率は減少、熱貫流率は増大する。特にブラインド使用時の日射熱取得率の減少は大きい。また、自然換気によるペリメータ負荷の減少は直達日射入射量の強い時間帯に顕著である。

図4は、さらに、方位別代表時刻のペリメータ室負荷へのダブルスキン自然換気の効果と比較したものである。参考に内側ブラインド付きのLow-E複層ガラスの一般窓の結果も示した。ブラインドを使用しないと自然換気を行ってもダブルスキンと一般窓の負荷の差はそれほど大きくない。ブラインドを使用し自然換気をすることでペリメータ室負荷の方位差がかなり小さくなる。北方位はブラインドを使用しても自然換気による負荷低減は小さい。



* 「標準操作」のブラインド使用率は、9:00-18:00の時間帯に直達日射ガラス透過量が10W/m²以下のとき20%、それを超えるとき100%、それ以外の時間では70%

図4 ダブルスキン方位・ブラインド使用法とペリメータ室負荷 (東京設計気象)

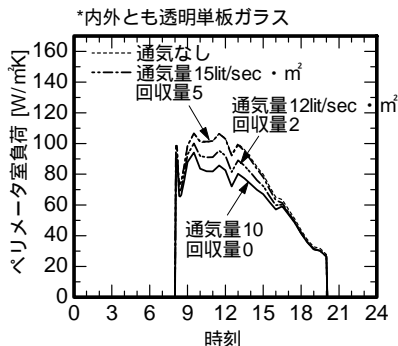


図5 AFWの風量とペリメータ室負荷 (南ゾーン・東京設計気象)

AFW に対しては、提案した熱性能式を利用すると、窓の排気を空調機に回収する影響も推定できる。図5は、南面AFWの窓通気効果

を比較したものである。10lit/sec m²の窓通気を行うと、非換気に対して代表時刻(11:30)のペリメータ負荷は2割近く減少する。これに対して、通気量を2lit/sec m²増やしその分を空調機に回収すると、通気による負荷低減量は約半分になり、通気量を5lit/sec m²増やしてそれを回収すると負荷低減は期待できない。ただし、室内環境の向上効果を別途評価する必要がある。

次に、5層吹抜けダブルスキン冷房期間性能を、東京標準年気象を想定する年間計算を行い、評価した(文献)。ダブルスキンのガラスは、外側が透明単板ガラス、内側がLow-E複層ガラスであり、ブラインドは明色である。上下に0.06 m²/mの換気口をもつ。ダブルスキンの自然換気によるオフィスペリメータゾーンの冷房負荷低減効果を、図6に示す。非換気時に対する換気時の冷房負荷の低減率は、ブラインドを使用しない場合1割程度であるのに対して、ブラインドを使用すると、最大2割程度となった。日射遮蔽性を高めるためにはブラインドを使用することが重要といえる。

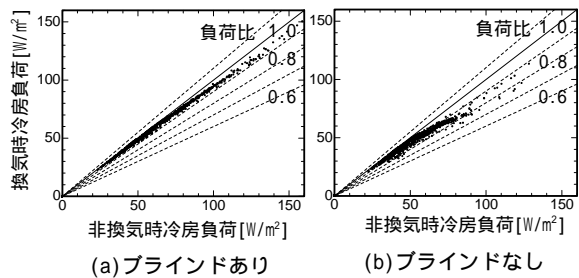


図6 ダブルスキンの換気による冷房負荷低減効果(南ゾーン・東京標準年気象)

図7は、Low-E複層ガラスの一般窓(内側ブラインド)に対するダブルスキンの冷房負荷低減効果を示したものである。ブラインドを使用しないと、Low-E複層ガラス一般窓とダブルスキンの冷房負荷の差はあまりなく、ダブルスキンを採用する価値がない。それに対して、ブラインドを使用すると、最大4割程度の冷房負荷を低減できることがわかる。

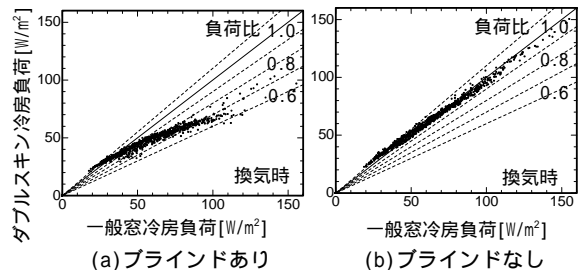


図7 一般窓に対するダブルスキンの冷房負荷低減効果(南ゾーン・東京標準年気象)

そのほか、AFW、ダブルスキンを採用するオフィスの空調最大熱負荷、年間空調熱負荷の解析も行い、ブラインドを併用することに

より、空調最大熱負荷、空調年間負荷の方位差を小さくできることなどが判明した(文献、ほか)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 29 件)

郡公子、石野久彌、長井達夫、村上周三、建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 47 報 ダブルスキン自然換気の調整法とその効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、1253-1254、2014、査読無

郡公子、石野久彌、青山翔夏：AFW を採用するガラス建築の熱負荷解析、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、265-268、2014、査読無

郡公子、石野久彌、鈴木大輝：ダブルスキンファサードの熱負荷への効果解析 第 1 報 自然換気効果の基本特性、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、273-276、2014、査読無

郡公子、石野久彌、長井達夫、村上周三：建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発、第 40 報 ダブルスキン建築の数値計算機能の追加、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、1241-1242、2013、査読無

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・衛生工学会学術講演論文集、17-20、2013、査読無

守雅俊、郡公子、石野久彌：高性能窓システムの熱性能評価のための実用計算ツールの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、1231-1234、2013、査読無

郡公子、石野久彌、青山翔夏：ダブルスキンの熱性能値に関する研究 第 6 報 熱性能の実用算定式とデータベース、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、121-124、2013、査読無

郡公子、石野久彌、熱負荷計算のための窓性能値に関する研究 第 3 報 ダブルスキン、エアフローウィンドウの熱性能式の提案、日本建築学会環境系論文集、No.682、997-1002、2012、査読有

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 96) ダブルスキン、エアフローウィンドウの熱性能式の提案、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.1335-1338、2012、査読無

郡公子、石野久彌、大島瑞己：文献調査と数値解析による高性能窓システムの傾

向解析 第 2 報 窓システムの分類定義とダブルスキンの熱性能、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、1009-1012、2012、査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

郡 公子 (KOHRI KIMIKO)

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：20153504

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし