

〈特別研究課題〉 建築的手法による建物室内温熱環境の制御に関する研究  
助成研究者 名古屋大学 奥宮 正哉



## 建築的手法による建物室内温熱環境の制御に関する研究

奥宮 正哉  
(名古屋大学)

### Control of thermal environment in building by architectural method

Masaya Okumiya  
(Nagoya University)

In this paper, the control of thermal environment and energy consumption for air conditioning by architectural method were studied. Concretely, the green roof for reducing thermal load through roof and the double skin facade for reducing heat load through window were examined. Firstly we presented the study method and then show the effectiveness of both methods. Also design procedures of these methods were discussed.

キーワード：ダブルスキン，屋上緑化，建築的手法，建築室内温熱環境，省エネルギー

#### 1. はじめに

本研究は現在増加しつつある日本の最終エネルギー消費量の25%を占め、将来は30%にも達すると言われている民生用エネルギー消費の抑制に貢献することを目指したものである。そして、この民生用エネルギーのうち住宅用、業務用の建物を運用するエネルギーが多くを占めており、さらにこの建物の運用エネルギーのうち30～50%を空調用エネルギー（住宅の場合には冷暖房・換気用エネルギー）が占める。そしてこのエネルギー消費を削減するためには高効率機器を採用すること、居住者の意識改革、すなわちライフスタイルの変革などがあるが、それよりも増してエネルギー消

費量が少なくかつ快適な建物そのものを計画することが重要であり有効である。

そこで、本研究では省エネルギーな建物を作るための手法、つまり建築的な省エネルギー手法のうち、窓よりの熱負荷を減らす手法としてのダブルスキン、屋根からの熱負荷を減らす方法としての屋上緑化、について、その室内環境改善効果と省エネルギー効果を実測・シミュレーションによって検討する。

## 2. ダブルスキンの熱的性能の評価

ダブルスキンは、建物外壁の外側をさらにガラスで覆う手法であり、透明性・省エネルギー性を実現し、快適な室内環境も提供するという面から、近年オフィスビルなどで採用される事例が増えている。

ダブルスキンの熱的性能は、日射遮蔽係数(以下SC 値と称する)と熱貫流係数を用いて評価できる。また、図1に示す図表<sup>1)</sup>を用いると、最大冷房負荷時のSC 値とダブルスキン内の空気温度を読み取ることができ、最大冷房負荷時に限り熱的性能の予測が可能である。これに対して、近年のライフサイクルアセスメントを重視する設計では、ダブルスキンの年間あるいは期間性能の予測が必要といえる。しかしながら、ダブルスキンの年間あるいは期間性能に対する設計資料は殆どなく、設計者は最大負荷時のダブルスキン性能をもって年間あるいは期間性能を評価し設計を行っているのが現状である。

そこで本章では、ダブルスキンの熱的性能を実測データと数値解析により検討し、ダブルスキンの年間あるいは期間性能を考慮に入れた設計資料の提供を目的としている。

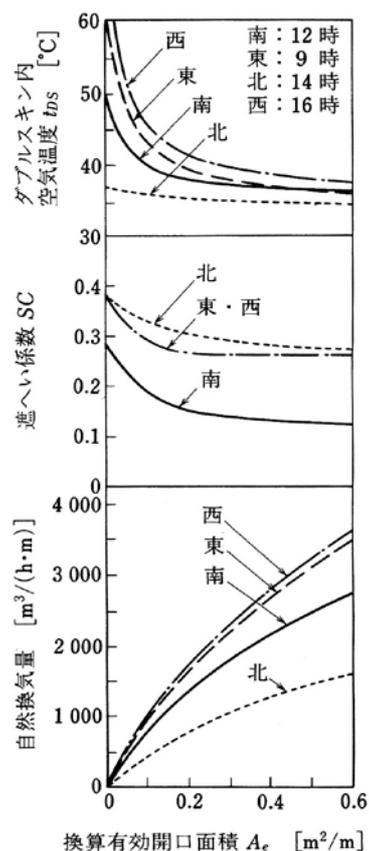


図1 ダブルスキン負荷計算用資料

### 2.1 夏期実測対象ダブルスキンと計測の概要

実測建物は東京都に建つ7階建ての建物であり、外ガラスは10mm、内ガラスは6mmの単板透明ガラスである。ダブルスキン厚さは800mmであり、内ガラスから100mmの位置に白色のブラインドが設置されている。夏期実測として、2005年8月23日0時から31日0時までの8日間、南面のダブルスキンについて計測が行われた。外気条件として外気温度、湿度、水平面全天日射量、南垂直面全日射量、外部風速が5分間隔で計測された。ダブルスキン内では空気温度が1~7Fについて計104点、外ガラス・内ガラスの表面温度計9点、ブラインド内・外・室内の日射量が5分間隔で計測された。そしてこの実測結果をもとに、ダブルスキンの熱的性能を把握し、数値計算モデルの妥当性を検討した。

## 2.2 数値計算モデルの概要と妥当性の検討

### 2.2.1 数値計算モデルの概要

数値計算モデルでは、ダブルスキンを構成する内外ガラス、日射遮蔽物、空気層を、高さ方向に8のセグメントに分割した。日射遮蔽物が有る場合は内外ガラス・日射遮蔽物間、無い場合は外ガラス・内ガラス間の相互放射による熱伝達が行われる。気流は空気層内を鉛直上向きに流れ、内外ガラス・日射遮蔽物から対流熱伝達により熱を得る。換気量の収束計算により各セグメントの温度を求め、ダブルスキンに面した室の熱取得(熱損失)を算出する。計算の流れの概略を図2に示す。

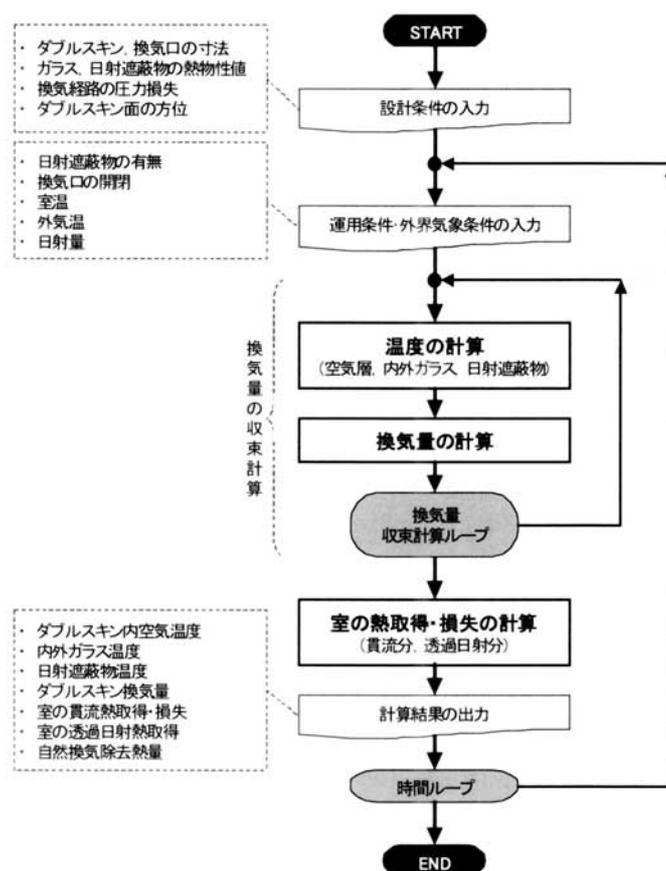


図2 ダブルスキン計算フロー

### 2.2.2 数値計算モデルの妥当性の検討

ダブルスキンの熱性状・室の熱取得について、夏期実測結果との比較により数値計算モデルの妥当性を検討した。ダブルスキンの形状を単純化し、外気温、日射量、室温、ダブルスキン入口温の実測値を与条件とした。またダブルスキンの設計条件を表1に示す。換気量・ダブルスキン内空気温度・内側ガラス温度を算出し、実測値と比較した。それぞれの結果を図3～図5に示す。また、室の熱取得とし、透過日射・内側ガラスからの伝達熱を算出し、実測値と比較した。

換気量については、実測値が計算値より大きい時間帯が目立つが、その時間帯は外部風速が大きい傾向にあり、その影響が考えられる。その他の時間は概ね一致した。

ダブルスキン内空気温度については、日射の多い時間に計算値が実測値より低くなった。実建物では、グレーチングを備えており、また内ガラス部には垂壁がある。モデルはそれらの日射吸収率の高い部材を考慮していないためにこの差が現れたと考えられる。

内側ガラス温度については、23日は雨の影響で実測値が低くなっているが、他は概ね一致した。室内透過日射はブラインドの使用状況や反射光の影響による変動が大きいいため、日によってばらつきがあるが、期間で見ると妥当な範囲内のばらつきといえる。

内側ガラスからの放射・対流による熱取得は計算値の方がやや高い傾向を示したが、それほど大きな差はなかった。

以上から、各項目でわずかながら誤差を生じたが、大きな差は見られなかったため、本数値計算モデルは妥当と考える。

表1 ダブルスキンの設計条件

物理量 [単位]	数値
ダブルスキン方位角 [°]	-33.0
ダブルスキン傾斜角 [°]	90.0
ダブルスキン高さ [m]	36.5
外ガラス厚さ [mm]	10.0
内ガラス厚さ [mm]	6.0
ブラインドスラット角 [°]	45.0
ブラインド外空気層厚さ [m]	0.7
ブラインド内空気層厚さ [m]	0.1
ブラインド日射透過率 [-]	0.1
ブラインド日射吸収率 [-]	0.6
ブラインド放射率 [-]	0.95
透明ガラス放射率 [-]	0.837
下部換気口流量係数 [-]	0.23
下部換気口面積 [m <sup>2</sup> /m]	0.34
上部換気口流量係数 [-]	0.30
上部換気口面積 [m <sup>2</sup> /m]	0.69
地表面反射率 [-]	0.14

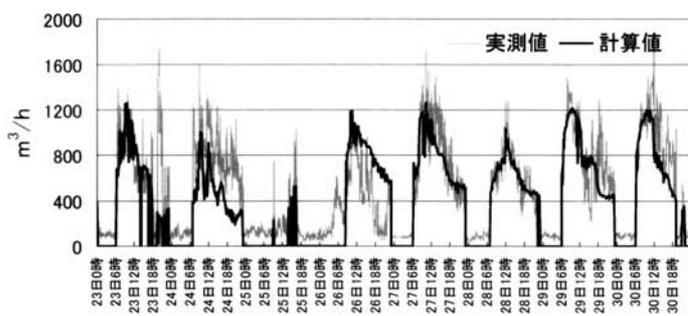


図3 実測値と計算値の比較  
(換気量)

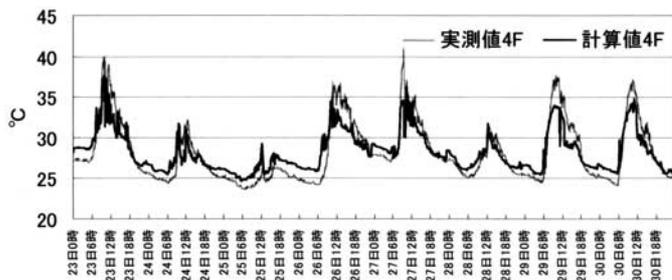


図4 実測値と計算値の比較  
(ダブルスキン内空気温度)

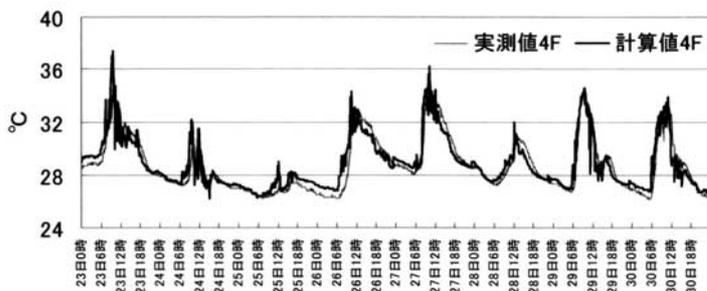


図5 実測値と計算値の比較  
(内側ガラス温度)

## 2.3 ダブルスキンのSC 値・熱貫流率

### 2.3.1 2種類の計算方法について

[年間負荷計算ソフトでSC 値・熱貫流率を固定に用いる場合]

図1から求められる冷房ピーク負荷算定用の、一定のSC 値を用いて日射熱負荷を算出した。また、ダブルスキンをガラスの間にブラインドと非密閉空気層として求めた一定の熱貫流率を用いて貫流熱負荷を算出した。

結果としては図6に示される $I_T + I_R + I_C$ が日射熱負荷として、 $KR + K_C$ が貫流熱負荷として求まる。

[数値計算によりSC 値・熱貫流率の期間変動を考慮した場合]

前述の数値計算モデルにより、まず図6に示される $I_T$ が透過日射量として、 $I_R + I_C + K_R + K_C$ が内側ガラスからの熱取得として求まる。そして次に、内外温度差を0として日射分 $I_R + I_C$ を求め、貫流分 $K_R + K_C$ と分離した。

どちらの計算も与条件として標準気象データを用い、室温 $26^{\circ}\text{C}$ 、空調期間は6月1日～9月30日の8～18時とした。

### 2.3.2 SC 値・熱貫流率の変動<sup>注1)</sup>

ピーク期間とオフピーク期間のSC 値・熱貫流率の変動を図7～図10に示す。ピーク期間の12時には一定としたSC 値と一致したが、他の時間帯やオフピーク時は高くなっている。オフピーク時はダブルスキンの換気量が少なく排熱量が少ない。また、熱貫流率も小さくなる。よってSC 値が大きくなっている。

全期間での時間ごとの日射熱負荷、貫流熱負荷をそれぞれ図11、図12に示す。日射熱負荷はピーク時間帯のみ合う傾向にあるが、他の時間帯はSC 値一定で計算した場合より大きくなる。月ごとでは、差が最も大きくなったのは6月で18%、差が最も小さくなったのは8月で13%、6～9月の冷房期間全体では16% SC 値一定で計算した場合より大きくなった。貫流熱負荷も大きくなる傾向にあるが、ほぼ線形に分布しているので適切な熱貫流率の設定により改善できるといえる。

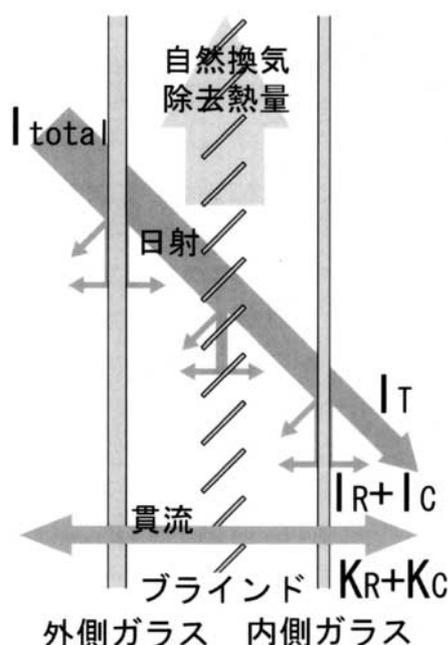


図6 窓面の熱取得

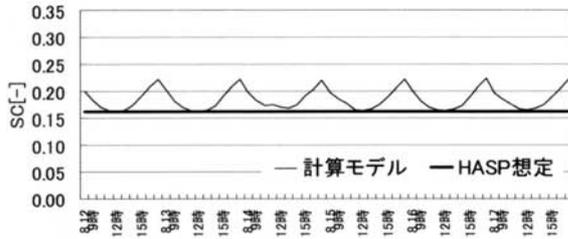


図7 ピーク期のSC値

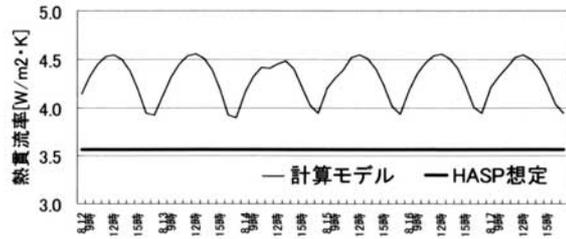


図8 ピーク期の熱貫流率

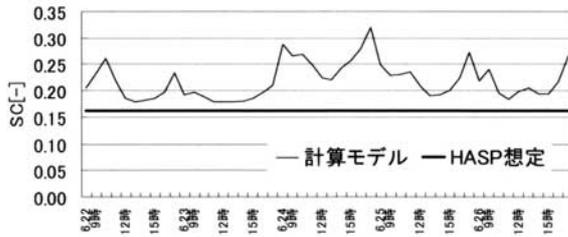


図9 オフピーク期のSC値

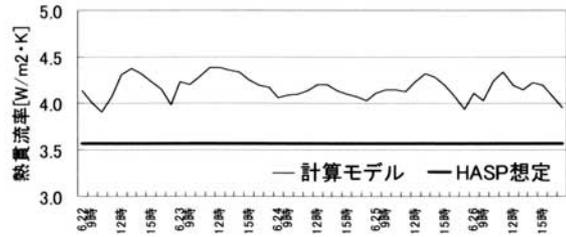


図10 オフピーク期の熱貫流率

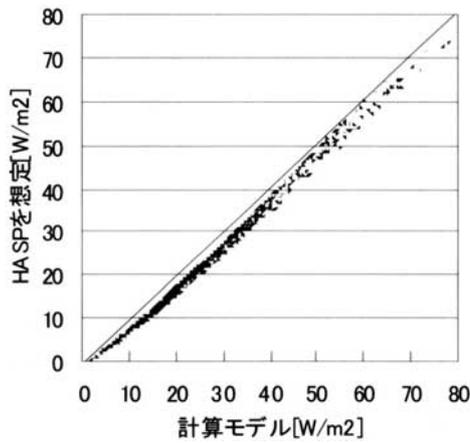


図11 日射熱取得の比較

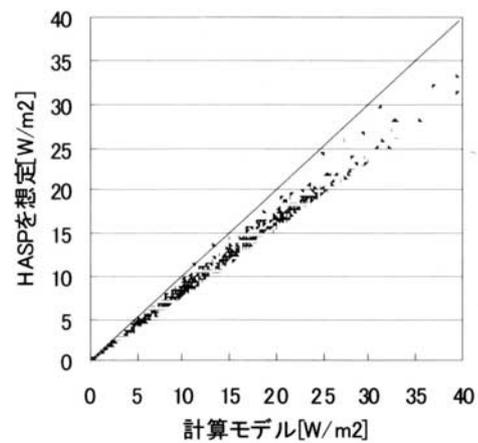


図12 貫流熱取得の比較

### 3. 屋上緑化による屋根通過熱量の低減効果

近年、地球温暖化などの環境問題の対策として、パッシブな室内温熱環境改善方法が注目されている。その1つとして屋上緑化がある。また屋上緑化はこれまで工場への施工例は少なかったが、工場敷地内に一定面積の緑地の設置を求める工場立地法の2004年3月の一部改正によって、緑地帯の一部を屋根面へ施工できるようになり、敷地の有効利用の観点から工場建物の屋上緑化の機運が高まっている。また、工場屋根緑化の利点は土地の有効利用のみではなく、屋根面の温度上昇を抑制することによる室内居住域での暑熱感の緩和作用もあると期待される。

そこで本章では、特に折板屋根のように熱的性能が弱く室内熱環境が予想される屋根を対象に、夏期において屋上緑化がどの程度屋根通過熱量低減できるか、また室内環境をどの程度改善できるかを検討する。

### 3.1 緑化屋根通過熱量評価プログラムの概要

汎用的な室温・熱負荷計算ソフトにより簡易に植物の蒸発散効果を表現する目的から、従来は蒸発散冷却量を日射量の線形関数としてモデル化する手法が採られてきた（以下既往モデル）。しかし、蒸発散量は緑化システムが保有する水分量に強く影響を受けると考えられるため、本研究では蒸発散量 $E[\text{kg}/\text{m}^2]$ を体積含水率 $\phi$  [-]と日射量 $I$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]による重回帰式によってモデル化を行い（以下提案モデル）、さらに一次元熱収支計算による緑化屋根通過熱量評価プログラムを構築した。

$$\text{既往モデル： } E = aI \quad (a \text{ は定数}) \quad (1)$$

$$\text{提案モデル： } E = bI + c\phi + d \quad (b \sim d \text{ は定数}) \quad (2)$$

#### 3.1.1 緑化表面の一次元熱収支モデル

緑化屋根の熱収支モデルを図13に示す。また、式(3)は緑化屋根表面の一次元の熱収支式であるが、 $\alpha c(t_o - t_1)$ は、外気から緑化表面への対流熱伝達量を、 $\epsilon \sigma t_1^4$ は緑化表面から大気への長波長放射量を、 $\epsilon R$ は大気から緑化表面への長波長放射量を、 $I \cdot a$ は日射吸収量を、 $LE$ は蒸発散による緑化表面からの潜熱放熱量を表している。さらに、 $\Delta t_1 c \rho_1$ は計算上の緑化表面第一層の蓄熱量を、 $q_2$ は土壌下方向への伝導熱量を、それぞれ表している。

$$q_1 = q_2 + \Delta t_1 c \rho_1 \quad (3)$$

ただし、 $q_1 = \alpha c(t_o - t_1) + I \cdot a + \epsilon R - \epsilon \sigma t_1^4 - LE$ である。

以下同様に各層境界にて熱の入出力に関する一次元熱収支式を立て、それらを連立方程式として解いて各層境界温度を求めた。

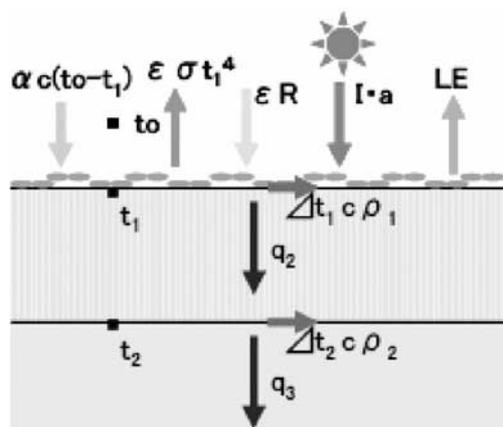


図13 緑化屋根の熱収支モデル

#### 3.1.2 作成プログラムの妥当性についての検討

計算の妥当性を検証するため、土壌表面温度 $t_1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]と蒸発潜熱 $LE$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]に対して実測データ、既往モデル計算結果、提案モデル計算結果の三者を比較する。ここで実測データには、清水ら<sup>2)</sup>により2004年8月8日～8月14日の7日間に名古屋大学工学部4号館屋上にて、メキシコマンネングサを人工土壌に植生させた試験体で測定したデータを用いる。既往モデルの係数には同実測結果から清水らが同定した日射吸収率の補正值を用いた。このモデルでは含水率の影響

響は考慮されていない。提案モデル計算結果とは、式(2)で述べた蒸発散量 $E[\text{kg}/\text{m}^2]$ についての重回帰式を用いたモデルによる計算結果である。その具体的な式を式(4)、式(5)に示す。

$$0 < I \text{ の場合 : } E = 0.323 \times I + 1.273 \times \phi - 0.077 \text{ [kg/m}^2 \text{]} \quad (4)$$

$$I \leq 0 \text{ の場合 : } E = 0 \text{ [kg/m}^2 \text{]} \quad (5)$$

検討には2004年8月8日～8月14日の7日間の実測データを与条件として与えた。これは8月7日に降雨があり、その後に土壌が絶乾状態に近づいていく過程を採り上げている。図14、図15に計算結果を示す。含水率が低下すると蒸発散挙動の再現ができなくなる既往モデルに対し、提案モデルは含水状態に関わらず良い精度で蒸発散挙動を再現できている。

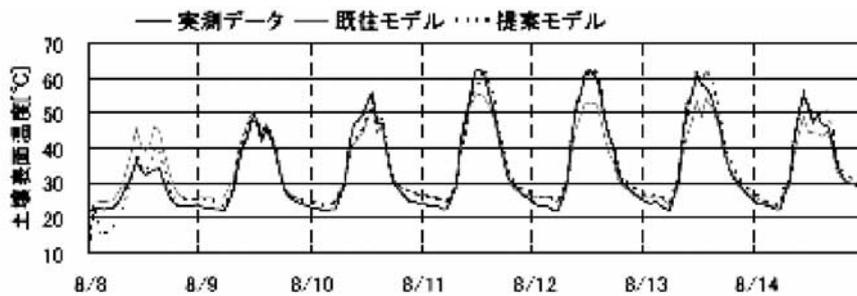


図14 土壌表面温度推移

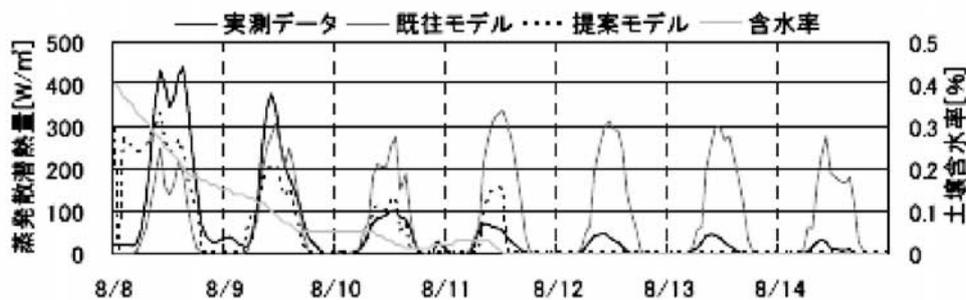


図15 蒸発散潜熱量の推移

### 3.2 折板屋根緑化の性能の検討

緑化折板屋根は図16のようにモデル化した。但しプログラムは一次元計算であるため、折板の凹凸部を個別計算し、面積加重平均により折板屋根全体の平均値を得た。

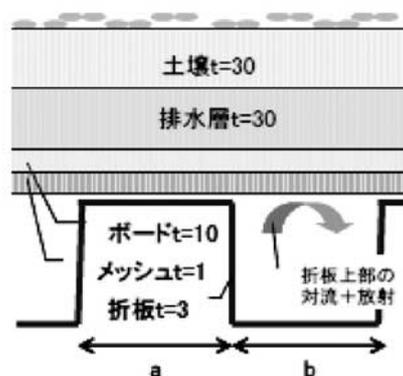


図16 折板屋根+緑化ユニット

### 3.2.1 緑化屋根の初期含水率の比較

図17に初期含水率を30%、20%、10%、5%とした場合（Case30G～Case5G）の室内側屋根表面温度を示す。含水率差の大きい第一日目はケースにより2℃以内で差が出たが、その後はほぼ同様の挙動を示した。緑化有の4ケースと緑化無のcaseNとは昼間は約13℃差があるが、夜間はほぼ同温度で推移している。

### 3.2.2 折板の凹凸形状による比較

図16に示すa（凸部の長さ）とb（凹部の長さ）の比率の違いによる比較を行った結果を図18に示す。a:b=1:1、1:2、1:4、1:7の4ケース（Case1G～Case7G）で検討した結果、期間を通してa:b=1:1の方がa:b=1:7よりも昼間に最大約2℃高い温度を示した。

### 3.2.3 折板上部の空気層の総合熱伝達率による比較

折板上部空気層は通気や表面仕上げ等の状態により対流・放射熱伝達率の変動が予想される。総合熱伝達率を $3.5\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 、 $7\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 、 $14\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 、 $21\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ と変化させた検討結果を図19に示す（Case3.5G～Case21G）。その結果、折板屋根上部の総合熱伝達率が小さいほど室内側屋根表面温度の最大値が低く抑えられることがわかった。

以下の検討では、同条件で緑化の有無による検討を行った。計算結果は室内側屋根表面温度差で評価している。

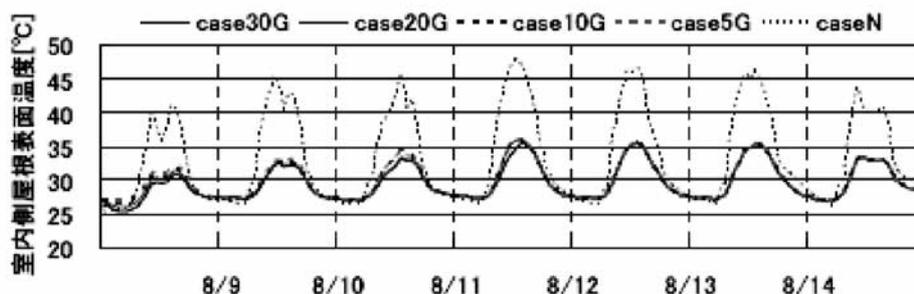


図17 初期含水率ごとの室内側屋根表面温度推移

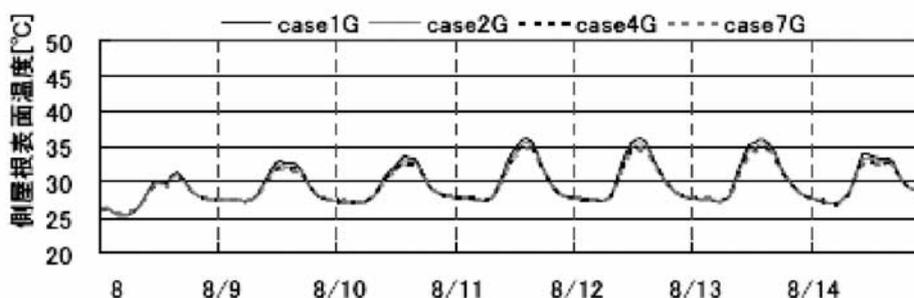


図18 折板凹凸の割合ごとの室内側屋根表面温度推移

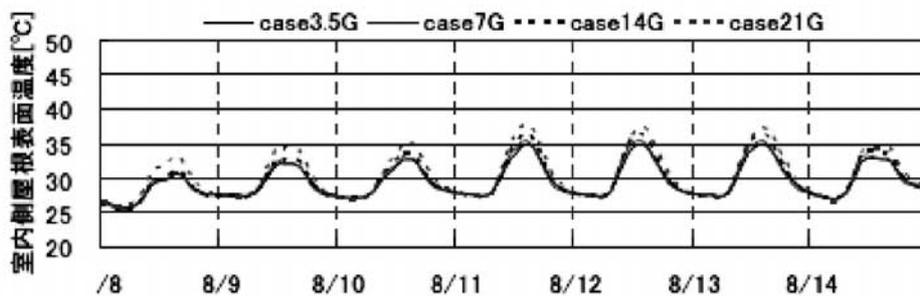


図19 空気層の総合熱伝達率ごとの室内側屋根表面温度推移

### 3.2.4 断熱材の厚さによる比較

図20に対象とした断熱方法を示す。図21に断熱材厚さを100mm、50mm、25mm、0mmとした場合の緑化の有無による室内側屋根表面温度差を示す (Case100N,100G ~ Case0N,0G)。昼間の最大温度差は100mmから順に1.2°C、2.1°C、3.8°C、13.5°Cであり、断熱材が薄くなるほど昼間の緑化による遮熱効果が顕著に現れている。

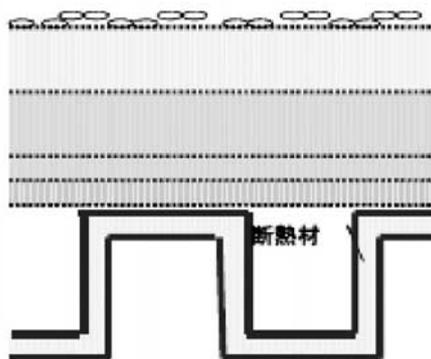


図20 折板屋根+断熱

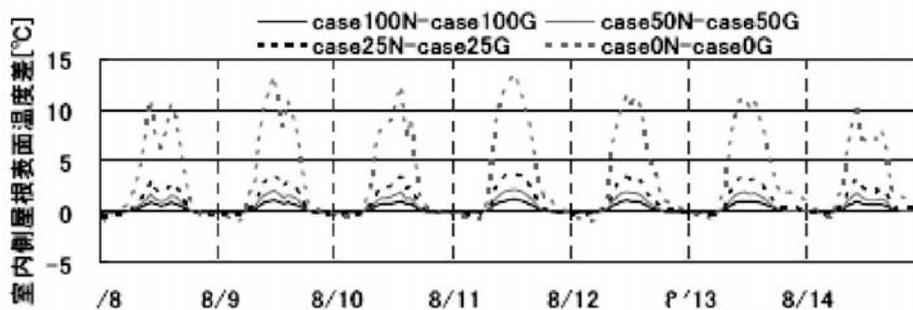


図21 断熱材厚さごとの室内側屋根表面温度推移

### 3.2.5 RC屋根・木造屋根との比較

折板屋根と同様にRC屋根と木造屋根の例で屋根通過熱の検討を行った。3.4の検討で最も緑化の効果が大きく現れた断熱材0mmの場合に注目し、折板屋根、RC屋根、木造屋根の緑化の有無による室内側屋根表面温度差を比較した結果を図22に示す。期間を通して、折板屋根、木造屋根、RC屋根の順で緑化による表面温度の低下が顕著であった。このことから、緑化の効果が最も大きいのは自身の断熱性が低い折板屋根であると言える。

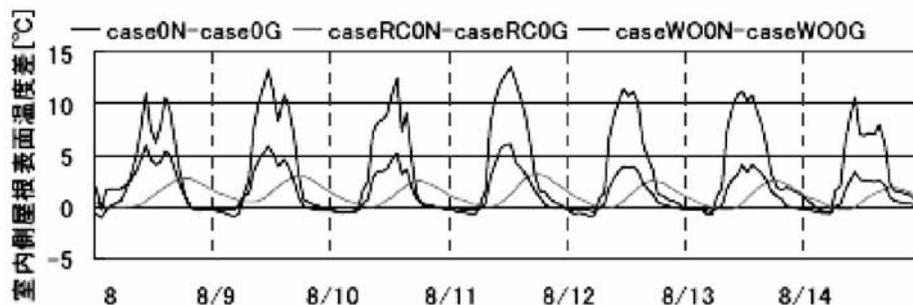


図22 断熱材厚さ0mm時の室内側屋根表面温度推移

## 4. まとめ

本研究では、ダブルスキンと屋上緑化の室内環境制御性能についての検討を行った。ダブルスキンについては数値計算モデルを用いてSC値と熱貫流率の変動を確かめた。今後は年間負荷算定用のSC値・熱貫流率を提案していきたい。また屋上緑化については、主に折板屋根において薄層型屋上緑化を設置した場合の屋根通過熱量低減効果を検討するために、一次元非定常熱計算を行い室内側屋根表面温度を算出した。土壌初期含水率による影響はあまりみられなかったが、折板凹凸部の比率差が大きく、折板上部空気層の総合熱伝達率の小さい折板屋根は屋根通過熱量の低減効果が大きいことが分かった。そして、断熱材が薄い屋根ほど昼間に緑化の有無による室内側屋根表面温度の差が大きく、緑化の効果が現れやすいことも分かった。

また、RC屋根と木造屋根に対しても折板屋根と同様の計算を行い比較したところ、屋上緑化を適用したことによる屋根通過熱の低減効果が最も大きく現れるのは折板屋根であることが示された。

## 参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会編集：空気調和・衛生工学便覧 3空気調和設備設計篇 第13版
- 2) 清水孝：薄層緑化の熱的性能のモデル化による空調負荷低減効果に関する研究、2005年度空気調和・衛生工学会中部支部学術論文集 p5-8

注1) 数値計算結果からのSC値と熱貫流率Uの算出

$$SC = (IT + IR + IC) / (gD ID + gS IS)$$

gD: 標準ガラス(透明3mm)に対する直達日射の熱取得率

gS: 標準ガラス(透明3mm)に対する天空日射の熱取得率

ID: 面に入射する日射の直達成分

IS: 面に入射する日射の天空成分

$$U = (KR + KC) / (\theta_o - \theta_i)$$

$\theta_o$ : 外気温

$\theta_i$ : 室温