

## B-56 環境低負荷型オフィスビルにおける地球・地域環境負荷低減効果の検証

### (3) 屋内外熱負荷低減効果の数値シミュレーションモデルによる検証

独立行政法人産業技術総合研究所

ライフサイクルアセスメント研究センター 地域環境研究チーム 玄地 裕

<研究協力者>独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター 平野勇二郎\*

\* 平成14年12月より日本学術振興会特別研究員、平成16年4月より国立大学法人埼玉大学

平成13～15年度合計予算額 14,692千円

(うち、平成15年度予算額 3,848千円)

[要旨] 太陽電池(PV)パネル、屋上緑化などの環境保全手法が大規模に都市部に導入された場合、ヒートアイランド現象緩和など、二次的な効果も期待される。建物外部熱環境をシミュレートする都市気象数値モデルと外部熱環境から建物熱負荷、冷暖房エネルギー消費をシミュレートするビルエネルギーモデルを連成させたモデルを利用して、特にPVパネルの都市熱環境への影響を考慮してエネルギー消費削減効果についての検討を行った。平成13年度は、研究棟屋上に150m<sup>2</sup>の規模で設置されたPVパネルに関し、大気への顕熱輸送量、建物への伝導熱輸送量の変化の実測を行い、屋内エネルギー消費と屋外熱環境との関係を記述する数値モデルに導入するためのPVパネル熱収支モデルを作成した。熱収支観測結果を再現する数値シミュレーションを行った結果、実測値と計算値との時刻別顕熱フラックスは10%程度、日積算値では1%程度の誤差で再現可能であることを確認した。平成14年度には、PVパネル熱収支モデルの連成モデルへの導入を行い、東京23区を対象に、PVパネルが大規模に導入された際の夏季冷房負荷削減効果について検討した。

その結果、PV大規模導入の気温への影響は0.1℃以下と影響は無視でき、また計算領域に関しては10%程度の冷房消費量削減効果があると推定された。平成15年度には、太陽電池パネル大規模設置による年間屋内外熱負荷低減効果、エネルギー消費量の検討可能なモデル改良を行った。平成14年度までの評価結果とあわせ、一年あたりの太陽電池パネルの空調エネルギー消費への影響について定量的評価を行った。また、同じ屋上を行う熱負荷低減手法として屋上緑化を取り上げ、空調エネルギー消費、気温変化について比較を行った。その結果、日平均気温変化は両対策とも0.1℃以下であり、非常に小さかった。発電を除いた空調エネルギー消費の比較を行ったところ、太陽電池パネルの省エネルギー効果が屋上緑化よりも大きいことが示唆された。

[キーワード] 太陽電池パネル、屋上面熱収支、ヒートアイランド、エネルギー消費、シミュレーション

#### 1. はじめに

地球温暖化抑止に向けた二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出削減策の一つとして太陽電池が注目されている。太陽電池設置の副次的効果としてオフィスビルなどの場合、太陽電池は屋上壁(場合によっては側壁)から離されて設置されるため、日射遮蔽効果によって建物内部への伝導熱が減り、場合に

よっては冷房負荷が半減できる<sup>1)</sup>ことが示唆されている。都市部に大規模に太陽電池を導入した場合にはパネルの設置により冷房負荷削減に伴う排熱削減が起こる可能性があり、さらなる省エネルギー効果も期待される。これは、大規模に建物が密集して、エネルギー消費の巨大な一部の都市では、夏季において建物からの排熱が周囲の気温上昇の一因となり、さらにその気温上昇によって建物の熱負荷増大が起こり、冷房室外機からの排熱が増してさらなる気温上昇が起こるといふ、気温上昇とエネルギー消費増の間に正のフィードバックがかかっているためである。排熱削減は、フィードバックが逆に働くために省エネルギーに寄与するのである。しかし、逆にパネル設置による表面熱収支の変化により顕熱輸送が増加した場合には、都市気温が上昇して、冷房エネルギー消費が増えることも考えられる。都心部においては夏季最高気温が1℃上昇した場合、電気、都市ガスなどの二次エネルギーベースで約6%のエネルギー消費増がおきているため<sup>2)</sup>である。このように太陽電池導入効果は、代替エネルギー技術としての省エネルギー効果だけでなく、都市気象とエネルギー需要との相互作用によるエネルギー消費変化を考慮して、都市システムの観点から総合的に評価を行う必要がある。

## 2. 研究目的

サブテーマ（3）では、地球温暖化対策研究棟で採用された建物環境負荷低減技術が都市のような建物群に大規模に採用された際に、どの程度屋外への熱環境負荷を軽減してエネルギー消費を削減するか定量的に明らかにすることを目的とした。具体的には、建物外部熱環境をシミュレートする都市気候数値モデルと外部熱環境から建物熱負荷、冷暖房エネルギー消費をシミュレートするビルエネルギーモデルを連成させたモデルを利用して、特に太陽電池パネルの都市熱環境への影響を考慮してエネルギー消費削減効果についての検討を行った。

## 3. 研究方法

太陽電池パネルと都市熱環境の相互関係を考慮するためには、太陽電池パネルと大気との熱の授受を記述した熱収支を明らかにする必要がある。太陽電池熱収支モデルにはパネル表面温度評価を目的として、壁に太陽電池を設置して発電効率の上昇のために空気層であるダクトをつくり、ダクトの長さや幅の最適値を算出しているモデルはあるが<sup>1)</sup>、熱収支中の大気との顕熱フラックスの変化に着目した研究はなかった。そこで本研究では太陽電池パネルを実際に建物の屋上に設置して大気への顕熱、建物への伝導熱といった熱収支の実測を行い、開発した都市キャノピー、ビルエネルギーモデルに適用可能な太陽電池設置時の屋上面熱収支モデルを作成した。

総合評価のためには都市気象やビルエネルギー消費を評価するモデルに太陽電池設置時の熱収支をモデル化して導入する必要がある。産総研では、都市気温上昇とエネルギー消費量増加の關係に着目し、都市街区内気温とエネルギー需要の關係を記述した都市キャノピーモデルとビルエネルギーモデルの連成モデル開発を行ってきた<sup>3) 4)</sup>。外部熱環境をシミュレートする都市気候数値モデルは、コンピュータのメモリー、処理速度といった問題から検討対象とする都市、建物の密集した街区の広さに応じて、モデルの取り扱いを変える必要がある。本研究では、はじめに排熱と街区全体の気温上昇のフィードバック効果を取り扱うために、建物がある程度密集した街区（500m四方程度）を検討スケールとした。

作成した太陽電池パネル設置時の屋上面熱収支モデルを都市キャノピー・ビルエネルギー連成

モデルに組み込み、太陽電池パネルが大規模に設置された場合の都市熱環境への影響と冷暖房エネルギー消費に対する影響について、東京23区をモデル地区として検討した。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 太陽電池パネル熱収支モデル

太陽電池パネルを国立環境研究所地球温暖化研究棟の屋上に設置して大気への顕熱、建物への伝導熱の変化の実測を行い、エネルギーと気象の関係を記述するモデルへの適用を考慮した太陽電池設置時の熱収支モデルを作成した。

##### ① 実測と熱収支式

実測は、つくばにある国立環境研究所地球温暖化研究棟屋上に約9kW級太陽電池パネルを設置して行った。パネルは建物屋上南面に、架台によって屋上面からは約60cm上方に設置されている。図1に観測場所と観測項目を示す。測定項目は短波長波放射量（パネル上の上向き下向き）、気温（パネル上、空気層入口、出口）、風向風速（パネル上、空気層内）、パネル温度（表面、裏面）、屋上面温度、屋上壁内温度分布、発電量である。長波短波放射量は、放射収支計CNR-1（キップ&ゾーネン社）をパネルに対して垂直に取り付けることで太陽電池パネルに実質的に入射する短長波フラックスを測定した。風向風速は三杯式風向風速計（牧野応用測器研究所）、気温などの温度は、アスマン通風温度計で補正した自作の熱電対、発電量は100Ωの一定負荷を与えた時の電力を電力計にて測定した。

図2に観測場所にほど近いアメダス（つくば）の気温と観測値の比較を示す。アメダスが瞬時値を測定しているのに対して観測値は5分平均値であるため観測値がなだらかな変化をしていると考えられた。図2の期間のアメダス平均値が12.6℃に対し観測値平均は12.4℃であり、観測は妥当だと考えた。図3に太陽電池パネル表面、裏面温度の日変化例を示す。1ヶ月間（2002年3月）の表面と裏面の日平均温度差と標準偏差を求めた結果、それぞれ0.52℃、0.77であった。この観測結果より太陽電池パネルの熱伝導は十分早く、瞬時にパネル全体が均一温度に達すると仮定できるとして、パネル温度日変化を考えた。

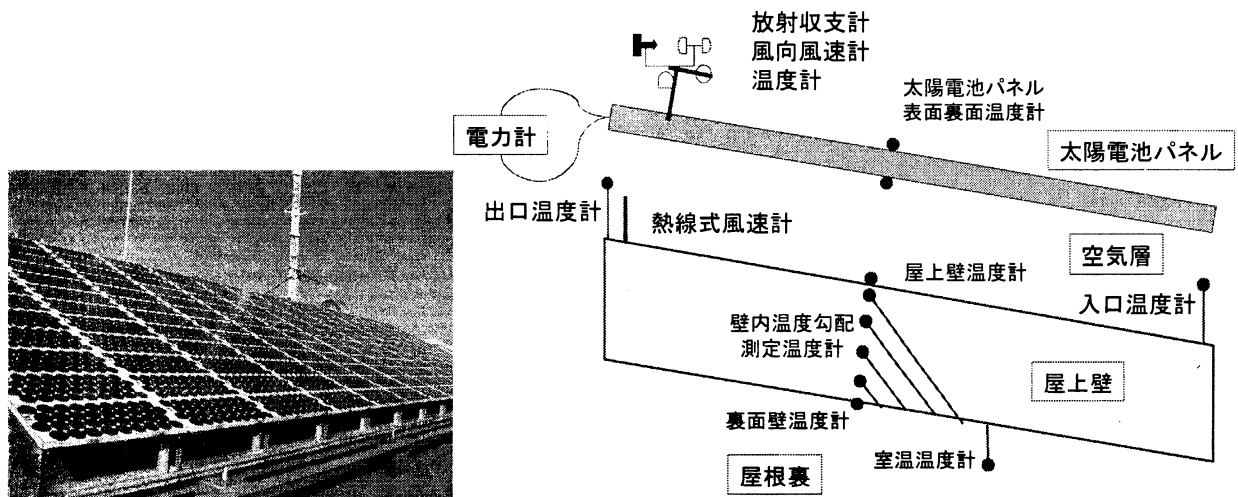


図1 観測場所(国立環境研究所)の外観と観測項目

太陽電池パネル設置時の熱収支概念図を図4に示す。日中の太陽電池パネル熱収支は次のように考えた。短波の太陽光はパネル表面でアルベドAの割合で反射され、残りは吸収される。また、長波の太陽光はすべて吸収される。裏面には屋上面からの輻射熱が入力される。吸収されたエネルギーは、発電、パネル表面、裏面から空気への顕熱フラックス、表面、裏面からの輻射とパネル温度上昇に分配される。潜熱輸送は、表面材質がガラスであることから無視した。以上の熱収支を式(1)に示す。式(1)を用いて求めた代表的な冬季晴天日(2002年3月20日)の太陽電池パネル熱収支観測結果を図5に示す。

パネルへの入力を正とし、放熱、発電量、パネルへの蓄熱量は負として、測定間隔である5分ごとの熱収支を計算した。パネルへの蓄熱量は5分ごとのパネル平均温度から算出した。太陽電池パネルからの顕熱フラックスは、式(1)に観測値を代入し、残差として計算した。日中、蓄熱量の変化が激しい理由は、5分ごとの瞬時値を測定しているために風速の違いによってパネル表面温度が細かく変化するためであると考えられた。パネルからの顕熱フラックスは最大約400W/m<sup>2</sup>に達した。これは、都市キャノピーからの顕熱輸送量<sup>5) 6)</sup>と推定される200W/m<sup>2</sup>~300W/m<sup>2</sup>(夏季)の約1.5~2倍であった。

太陽電池パネル熱収支基礎式

太陽電池パネル熱収支式 :  $(1-A)I + J - 2\varepsilon_p \sigma T_p^4 + \varepsilon_w \sigma T_w^4 - H_p - C_p \rho_p d_p \frac{dT_p}{dt} - P = 0 \dots (1)$

太陽電池パネル顕熱輸送 :  $H_p = h_s(T_p - T_a) + h_b(T_p - T_i) \dots (2)$

空気層熱収支式 :  $h_b(T_p - T_i) + h_w(T_w - T_i) + \frac{V_i C_a \rho_a d_i}{L}(T_a - T_i) - C_a \rho_a d_i \frac{dT_i}{dt} = 0 \dots (3)$

屋上壁表面熱収支式 :  $\varepsilon_p \sigma T_p^4 - \varepsilon_w \sigma T_w^4 + h_w(T_i - T_w) - \lambda_w \left. \frac{\partial T_w}{\partial z} \right|_{z=z_0} = 0 \dots (4)$

壁内部熱伝導式 :  $\frac{\partial T_w}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \dots (5)$

屋根裏壁面熱収支式 :  $h_w(T_r - T_{wr}) + \lambda_w \left. \frac{\partial T_w}{\partial z} \right|_{z=z_r} = 0 \dots (6)$

総括熱伝達係数 :  $h = aV + b \dots (7)$

A[-]: アルベド、d[m]: 厚さ、Cp[Jm<sup>-3</sup>K<sup>-1</sup>]: 体積熱容量、H[Wm<sup>-2</sup>]: 顕熱フラックス、h[Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>]: 総括熱伝達係数、I[Wm<sup>-2</sup>]: 短波日射量、J[Wm<sup>-2</sup>]: 長波日射量、L[m]: パネル長さ、P[Wm<sup>-2</sup>]: 単位面積あたりの発電量、T[K]: 温度、t[s]: 時間、V[ms<sup>-1</sup>]: 風速、z[m]: パネルに鉛直な座標、α[m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>]: 壁内熱拡散係数、ε[-]: 射出率、λ[Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]: 熱伝導率、σ[Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>]: ステファンボルツマン定数である。ここで、添え字はp: 太陽電池パネル、s: パネル表面、b: パネル裏面、a: パネル上空気、i: 空気層、w: 屋上壁、r: 屋根裏、z<sub>0</sub>: 屋上壁表面、z<sub>r</sub>: 壁屋根裏面を表す。

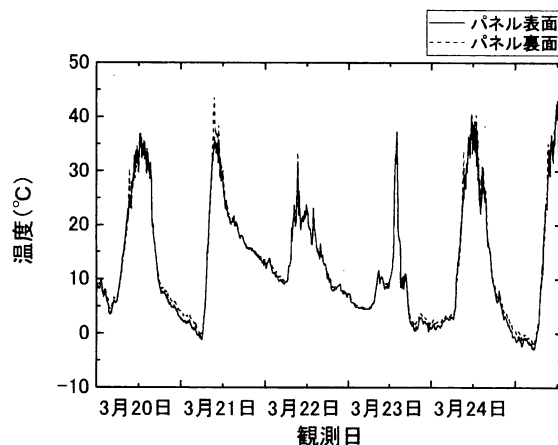
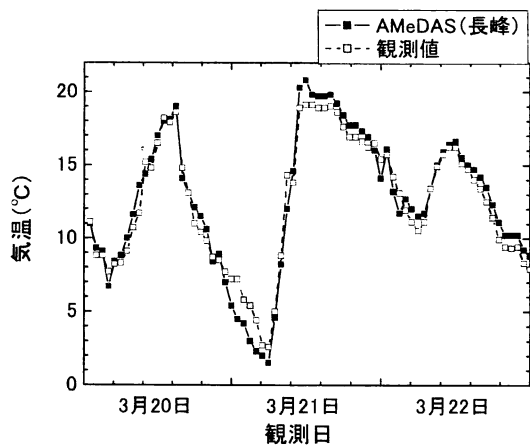


図2 AMeDAS(つくば)と観測気温の比較 図3 太陽電池パネル表面温度と裏面温度の日変化例

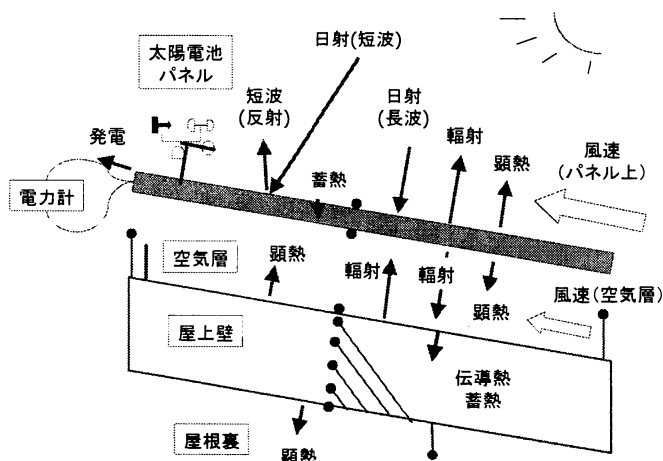


図4 太陽電池パネル熱収支の概念図

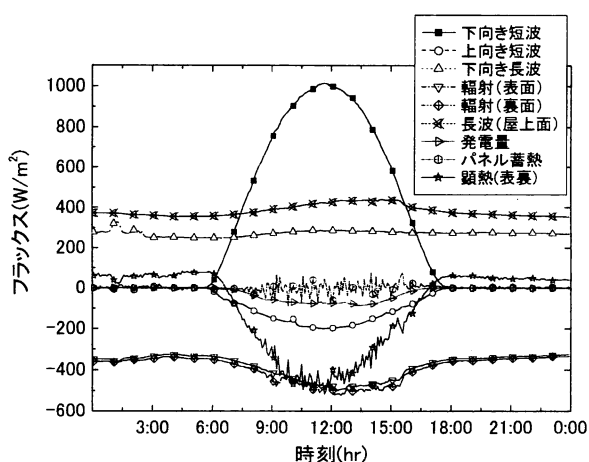


図5 冬季晴天日(2002年3月20日)太陽電池パネル熱収支観測結果

## ②太陽電池パネルの熱伝達係数

太陽電池設置時の熱収支モデルを都市キャノピーモデルに適用可能にするためには、都市キャノピーモデルにあわせた入出力を作成することが大切である。都市キャノピーモデルの表面熱収支と太陽電池パネル熱収支が異なるところは、太陽電池と屋上面の空気層が存在することと、それによる空気層内風速の推定が必要な点である。そこで、空気層内の風速と、パネルの熱伝達係数の風速依存性について実測から検討を行った。

### ア. 空気層内風速

都市キャノピーモデルではパネル直上の風速（シミュレーション上の屋上面第一層）が計算される。パネル直上の風速からパネルと屋上壁間の空気層内の風速を簡易的に推定できれば、都市キャノピーモデルへの組み込みも可能となる。そこで、実際のパネル上1.5mの風速と空気層内の風速の関係を実測から求めた。図6に両者の風速の関係を示す。東西南北の風向による差は小さく、空気層内の風速 $V_i$ とパネル直上1.5mの風速 $V_s$ の関係を一次関数で近似した結果、式（8）となった。このときの相関係数は0.6972、係数の $t$ -値はパネル直上風速係数部分が133.8、定数部分が56.3であった。これらの結果から近似結果は有意であると考えられた。

$$V_i = 0.404V_s + 0.395 \quad \dots \quad (8)$$

### イ. 太陽電池パネルの熱伝達係数

地物表面からの気層への顕熱輸送方程式は一般的に熱伝達係数と気層と地物表面の温度差で与えられる。ここで、熱伝達係数は、近似的に式（7）のように風速の関数であることが知られており、表面材質によっても依存性は変化する<sup>7)</sup>。また、平板上からの乱流境界層における平均熱伝達率は、熱伝達速度と伝導伝熱速度の比を表す無次元数ヌッセルト(Nu)数、動粘性係数と熱拡散係数の比を表す無次元数であるプラントル(Pr)数と流れの状態を表すレイノルズ(Re)数と代表長さの関数として表されることも知られている<sup>8)</sup>。

$$Nu = 0.037 Pr^{1/3} Re^{0.8} \quad \dots \quad (9)$$

太陽電池パネルからの顕熱フラックス $H_p$ は前節で述べたように式（1）の熱収支式において右辺に各測定値を代入することによって求めた。パネル表面からの顕熱フラックスとパネル裏面からの顕熱フラックスの和が $H_p$ であるので、パネル上風速 $V_s$ と空気層内風速 $V_i$ を用いて顕熱フラックス $H_p$ は式（2）のように表される。その際の総括熱伝達係数 $h$ は、表面、裏面によらず風速依存性は一定で風速の一次関数であると仮定し、式（2）'の形で表した。また、気温と空気層内温度の差は最大2℃程度であり、日中のパネルと気温の温度差に比べて小さかったため、太陽電池パネルと気温、空気層内温度との差は、気温と空気層内入口出口温度の平均温度との差で近似を行うと、 $H_p$ は式（10）のように表される。

$$H_p = h_s(T_p - T_a) + h_b(T_p - T_i), \quad h_s = aV_s + b, \quad h_b = aV_i + b \quad \dots \quad (2)'$$

$$H_p \cong h(T_p - \bar{T}_i) \quad \dots \quad (10)$$

$$= \{a(V_s + V_i) + 2b\}(T_p - \bar{T}_i) \quad (\because h_s \approx h_b, T_a \approx T_i)$$

熱伝達係数 $h$ は表面風速 $V_s$ と空気層内風速 $V_i$ の和に比例し、比例定数が $a$ 、定数部分が $2b$ に相当することから、実測された熱伝達係数 $h$ を $V_s + V_i$ に対してプロットした（図7）。前節の検討からパネル上風速と空気層内風速が比例関係にあることと、風向による係数の違いに有意な差は見られ

なかったことから、これらのプロットに最小二乗法による一次近似を施して式(10)のa、bを求め、 $a=4.3$ 、 $b=1.6$ を得た。このときの相関係数は0.9225、係数のt-値はa、bそれぞれ64.74、9.99であった。これらの結果から、フィッティング結果は有意であると考えられた。フィッティング式と都市キャノピーモデル<sup>4)</sup>に使用されているユルゲスの式 $a=4.1$ 、 $b=5.8$ では、切片の値に差が生じたが、これは表面の粗度の違いであると考えられた。また、平板上の伝熱過程としてNu数、Re数、Pr数から顕熱フラックスを計算した場合は誤差が大きかった。

以上から、パネル表面、裏面の総括熱伝達係数 $h_s$ と $h_b$ は、風速依存性が同一であり、共に式(7)で $a=4.3$ 、 $b=1.6$ として表せることが示唆された。

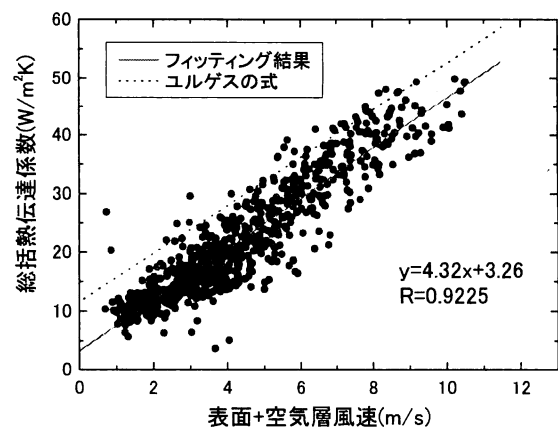
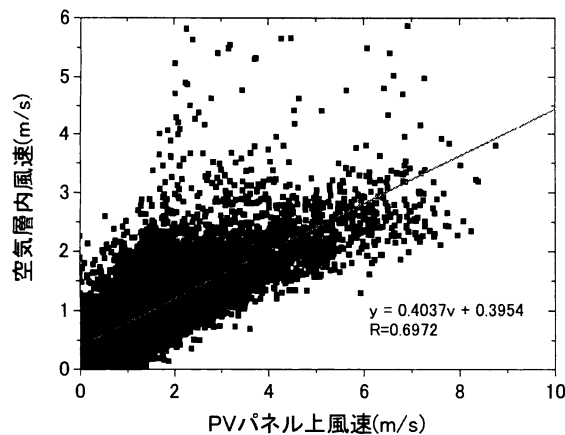


図6 太陽電池パネル上風速と空気層内の風速の関係

図7 総括熱伝達係数の風速依存性

### ③シミュレーション結果と実測の比較

以上の検討結果を用いて鉛直一次元熱伝導モデルを作成した。基礎式は、式(1)から式(7)である。作成したモデルを用いて冬季熱収支の実測値とシミュレーション結果の比較を行った。入力は、外気条件である短波日射量、長波日射量、気温、太陽電池パネル直上風速、発電量と建物内室温である。主な出力は太陽電池温度、太陽電池パネル表面、裏面からの顕熱フラックス、空気層内温度、壁温度である。空気層内風速は式(8)より計算される。表1に使用したパラメータを示す。アルベドは、観測から得られたパラメータを用いた。太陽電池の熱容量は構造を考慮してガラスの文献値<sup>10)</sup>を用いた。初期条件はパネル、壁温度、室温、気温、空気層温度をすべて同一温度とした。境界条件は、上端ではパネル上1.5mの観測気温、下端は観測室温とした。外気温上昇による熱負荷計算のためには、本来ならば室温は出力として計算されるべきであるが、ここでは、太陽電池パネル熱収支モデルの確認のために観測室温を既知として与えた。計算は助走計算として1日分の計算を行い、その結果を初期値として晴天日の計算を行った。冬季晴天日(2002年3月20日)のパネル表面温度変化の実測値と計算値の比較を図8に示す。また、太陽電池パネル表面と裏面からの合計顕熱フラックスの実測値と計算値の比較を図9に示す。パネル表面温度計算値の位相は温度変化の位相と一致し、さらに $0.8^{\circ}\text{C}$ 程度の誤差で計算値は実測値を再現した。太陽電池パネル表面裏面からの顕熱フラックス計算値は、パネル温度変化同様に変化の位相が一致した。冷房負荷を議論する際に重要な日中の実測値と顕熱フラックスの誤差は24%程度であった。これは、顕熱輸送量としては $70\text{W}/\text{m}^2$ 程度であり、今回の実測により太陽電池パネル設置した際

に増加した顕熱輸送量が約100~200W/m<sup>2</sup>程度であることを考慮すると定性的な議論が可能な値であると考えられる。今後、顕熱輸送量の直接実測などとの比較による妥当性の検討は必要であると考えられるが、日中のエネルギー消費を議論する際に、本熱収支モデルを利用することは可能であると考えられた。

表1 計算に用いたパラメータ

	太陽電池		断熱材	コンクリート
	実測値	文献値 <sup>9)10)</sup>	文献値 <sup>11)</sup>	文献値 <sup>11)</sup>
アルベド(-)	0.18	0.1	-	0.2
熱容量(J/m <sup>3</sup> K)	-	2.0×10 <sup>6</sup>	4.7×10 <sup>4</sup>	1.9×10 <sup>6</sup>
熱伝導率(W/mK)	-	-	0.028	1.5
射出率(-)	0.94	0.94	0.94	0.94
発電効率(%)	10	15	-	-

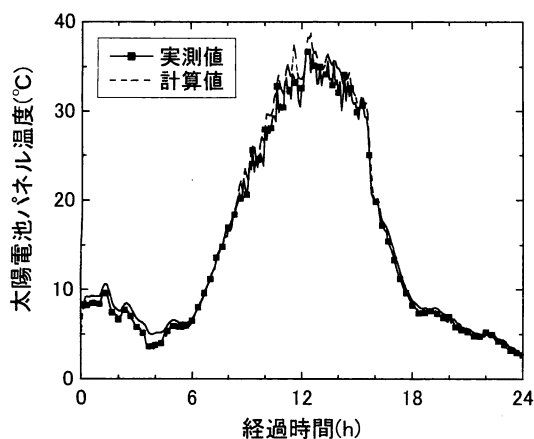


図8 太陽電池パネル温度日変化の実測とシミュレーションの比較  
(2002年3月20日)

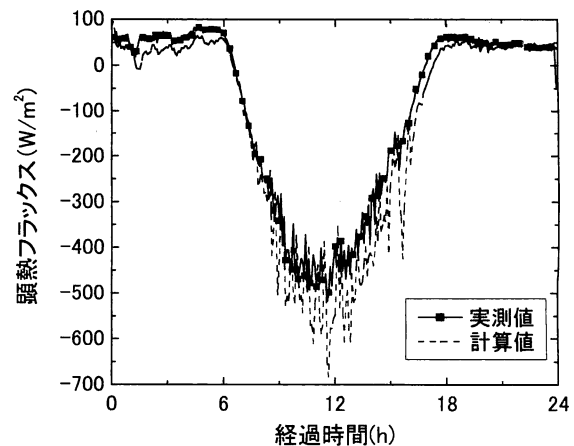


図9 太陽電池パネル顕熱フラックス日変化の実測とシミュレーションの比較  
(2002年3月20日)

## (2) 都市気象・ビルエネルギー連成モデルによる夏季解析

### ① 計算対象街区

都市の気温は、建物用途、建物断熱構造、天空率（ある地点で上空を見上げた際に、空の占める割合）などに依存する。建物用途と断熱構造を考慮すると、東京23区は主に事務所街区、集合住宅街区、木造住宅街区の3タイプの街区に分類できる<sup>6)</sup>。これらのタイプの比較を行うために、天空率がほぼ等しい街区を抽出して、さらにその中から、エネルギー消費の最も大きい街区を選び、検討街区とした。本稿では、排熱の影響が大きい0.2~0.4程度の天空率の街区を選択して解析を行った。計算対象街区のパラメータを表2に示す。これらの街区について、太陽電池パネル設置の冷房消費電力が問題となる夏季晴天日の気温への影響とエネルギー消費への影響についてシミュレーションを行った。



表2 選定した3街区のパラメータ

街区タイプ	事務所	集合住宅	木造住宅
選定地域	中央区	足立区	杉並区
平均建物高度	26.8m	6.0m	6.1m
平均建物幅	15.5m	9.8m	9.9m
平均道路幅	8.6m	3.8m	3.0m
建物最高高度	45m	15m	15m
天空率	0.26	0.39	0.29

②計算条件

計算条件を設定する際には、太陽電池パネルが設置された際の最も影響が大きい場合の評価を目的にした。気象条件は、夏季晴天日の条件として1998年8月2～5日の4日間のデータを用いた。但し、日射量は晴天日の理論値を用いた。太陽電池パネルの設置面積は、文献<sup>7)</sup>にある東京都の利用可能最大屋上面積割合を参考にして各建物屋上の50%とした。各街区の違いは、建物の外壁の物性値、断熱構造、空調システムの違いとその運転時間、排熱形態などにより表現した。設定パラメータを表3に示す。集合住宅街区、木造街区の断熱条件を次世代の1/2に設定した理由は、計算対象とした建物が第一次省エネルギー基準が制定された昭和55年よりも古いものも多く、かつ、新しい次世代基準の建物も多いと予想されるため、ここでは平均値を用いた。また、事務所の空調タイプ及び排熱場所は資料<sup>8)</sup>を参考にして現状値を推定した。また、太陽電池パネルの発電効率は、我々の実測値をもとに太陽電池直上の日射量基準8%として計算した。太陽電池パネルのアルベドも我々の観測結果から0.2とした。

表3 設定パラメータ

街区タイプ	事務所	集合住宅	木造住宅
空調タイプ	直焚吸収 33% 電動空冷 67%	電動空冷 100%	電動空冷 100%
排熱場所	屋上排熱	各階から排熱	各階から排熱
屋上の断熱	内断熱	次世代基準の1/2断熱	次世代基準の1/2断熱

③シミュレーション結果と考察

ア. 街区タイプによる気温上昇の違い

太陽電池パネル設置状態と設置しない状態の3街区における気温日変化の比較を図9に示す。最も気温の高い8月2日条件の15時と最も気温の低い8月5日条件5時の地上3m気温のシミュレーション結果を比較した。太陽電池パネルの設置によって、事務所街区、集合住宅街区、木造住宅街区のいずれも気温変化は0.1℃以内でまったく変化は無かった。これは、建物最高高度までの気柱平均気温についても同様であった。

屋上面に太陽電池パネルを設置したことによる熱収支変化から考えると気温上昇が起きると予想されたため、気温変化のシミュレーション結果に関して、妥当な変化であるかについて検討した。

屋上面積の50%の面積分太陽電池パネルが設置されるとしたので、パネル設置による屋上からの

顕熱輸送量は、パネル設置の影響を受けたものと通常の屋上面からの顕熱輸送を面積按分している。計算期間第一日目の12時で比較するとパネルを設置した場合には高度にもよるが、顕熱輸送量は屋上単位面積あたり約60W/m<sup>2</sup>増加していた。これが、設置面積、街区道路幅、ビル幅、建物存在割合を考慮して按分されるため、建物が存在する高度全てを考慮して気柱からの顕熱輸送総量(W)を単位メッシュ面積(m<sup>2</sup>)で除した単位メッシュ面積あたりの顕熱輸送量の変化は、20～40W/m<sup>2</sup>であった。各街区における顕熱輸送量の気柱熱収支を図10に示す。事務所街区と集合住宅、木造住宅街区では、平均建物高度と平均道路幅が大きく異なるために、建物最高高度まで考慮した気柱の熱収支は大きく異なった。日中の支配的な顕熱輸送の起源が事務所街区では人工排熱(400W/m<sup>2</sup>程度)、木造住宅街区では、屋上、壁面から400W/m<sup>2</sup>程度とまったく異なった。これは、木造住宅街区では、平均高度が8m以下とほぼ2階建ての住宅街であると考えられ、通常の日表面熱収支と同様に屋上、日表面からの顕熱輸送が支配的であるために顕熱輸送量が400W/m<sup>2</sup>を越えたと考えられた。それに対して、事務所街区では、屋上面積よりも側壁面が面積的に支配的であるため、平面と比較して日射による入力は小さくなる。また、事務所のエネルギー消費が大きいことから冷房排熱が支配的な顕熱輸送であったと考えられ、これらの気柱熱収支の結果は妥当であると考えられた。

屋上面からの顕熱輸送が支配的である木造住宅においても太陽電池パネルの影響がほとんど無い理由について、太陽電池パネル設置の有無による気柱熱収支の差をとり、解析した。各街区の気柱熱収支の差を図11に示す。

特徴的なことは、木造住宅街区では、一日中、太陽電池パネル設置によって屋上からの顕熱輸送が増大しているのに対して、事務所街区では、日中午後3時頃までは顕熱輸送量が増大しているが、それ以降は翌日の日の出まで屋上からの顕熱輸送量が減少していることである。午後3時は、午前から昼の間にコンクリートに蓄熱された熱が出てくる時間であり、太陽電池パネル設置によって事務所街区の屋上への蓄熱量が減り、午後の屋上からの熱輸送が減少することを表していた。この効果は、冷房負荷削減効果につながり、午後の人工排熱量減少効果を大きくしていた。一方、木造住宅街区では、最も支配的な屋上からの顕熱輸送量が増加することから気温上昇がおこることが予想された。しかし、パネルの影による冷房負荷減少効果によって冷房排熱が顕熱増大量と同程度(約20W/m<sup>2</sup>)減少したため、気温上昇には結びつかなかった。また、木造住宅街区では、事務所街区とは異なり、屋上からの顕熱輸送が減少することはなかった。これは、木造の熱容量がコンクリートほど大きくないためであった。

以上から、太陽電池パネル設置の夏季ヒートアイランド現象に関する効果は以下のようにまとめられた。

- ・太陽電池パネル設置による気温上昇は無視できる。
- ・パネル設置による単位メッシュ面積あたりの顕熱輸送量増加は、最大40W/m<sup>2</sup>程度であった。
- ・外壁の熱容量がパネルよりも大きい場合には、午後の顕熱輸送量は減少する。

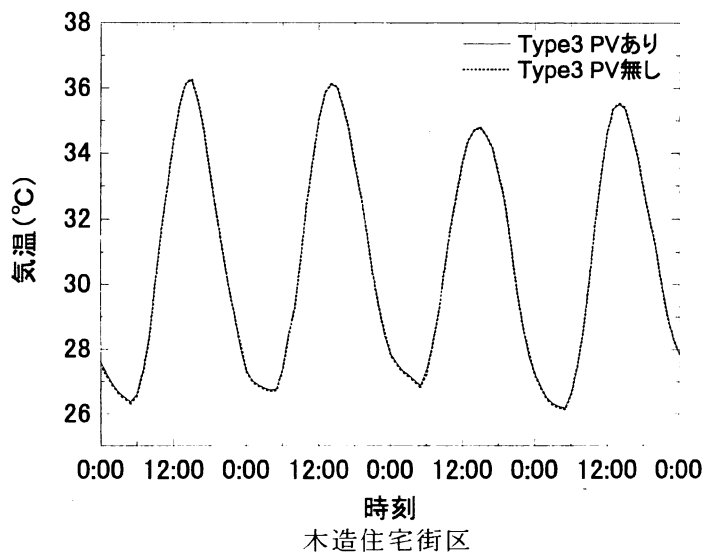
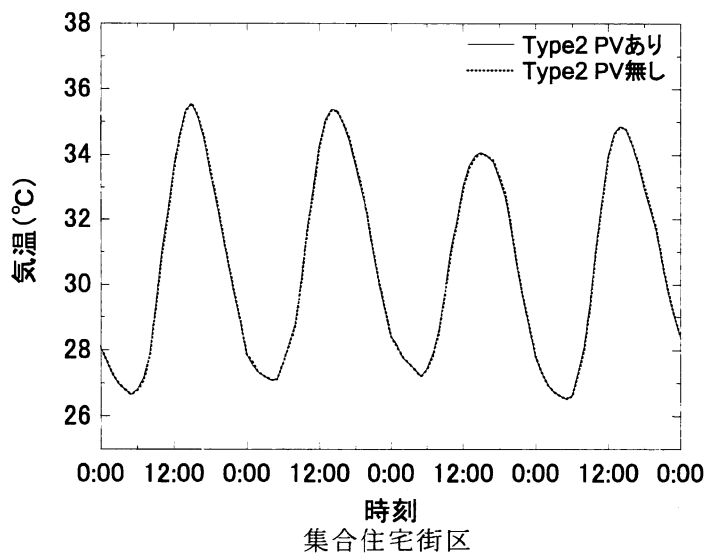
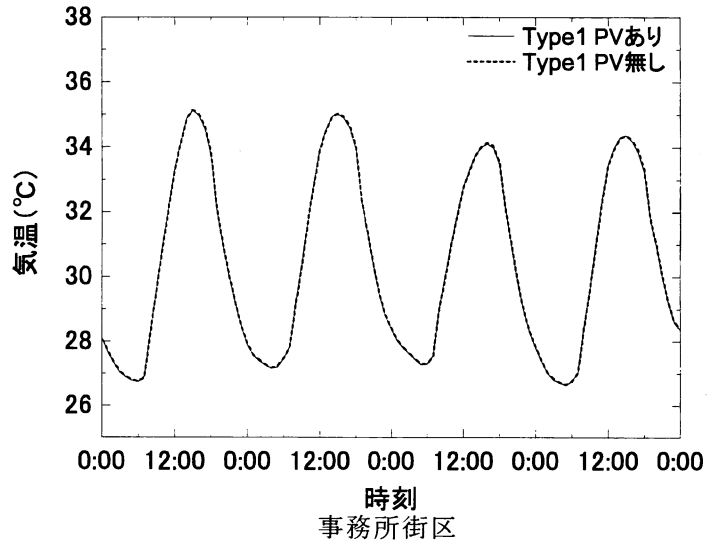


図9 各街区における太陽電池パネル設置時の気温日変化のシミュレーション結果

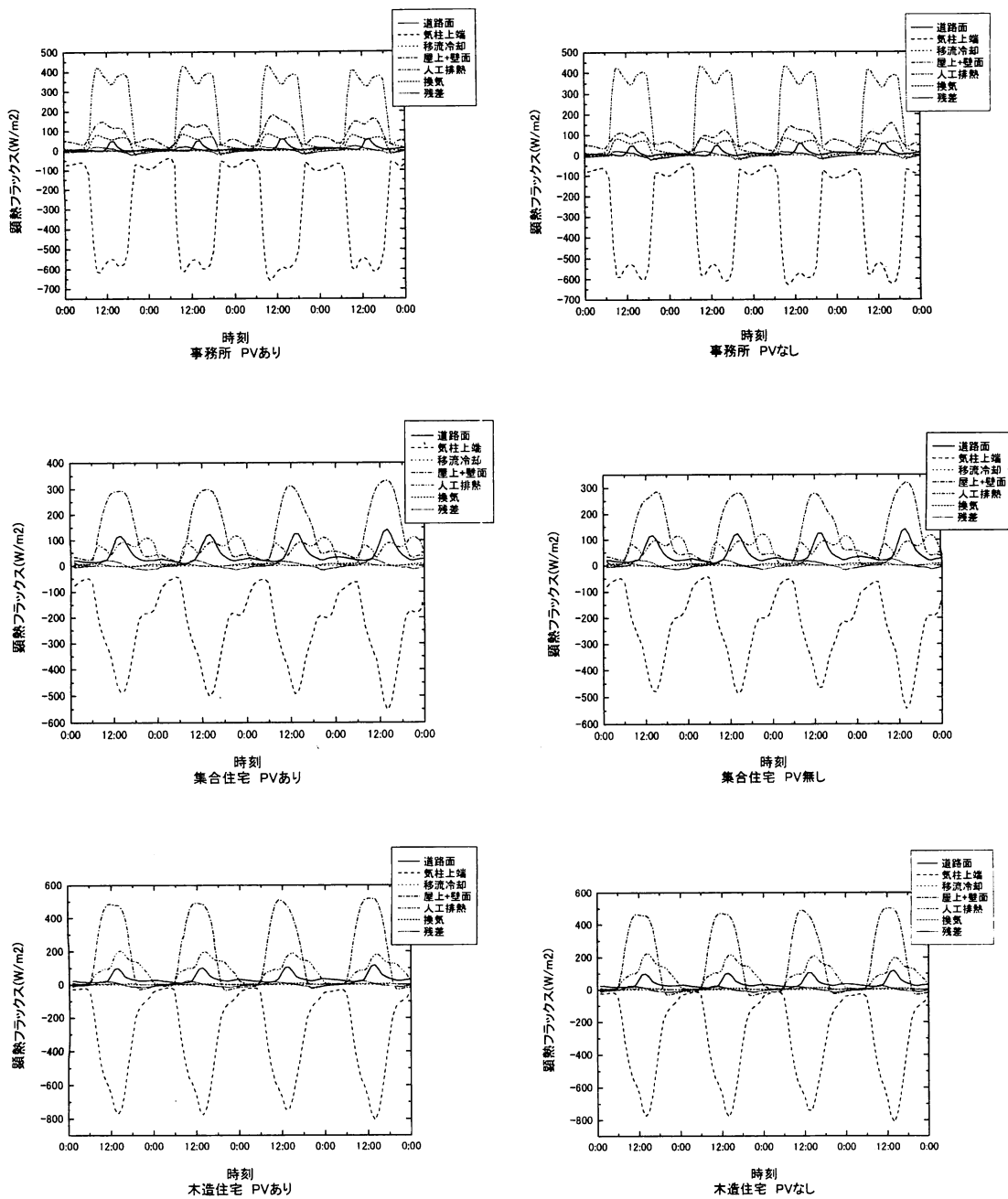


図10 各街区の気柱熱収支

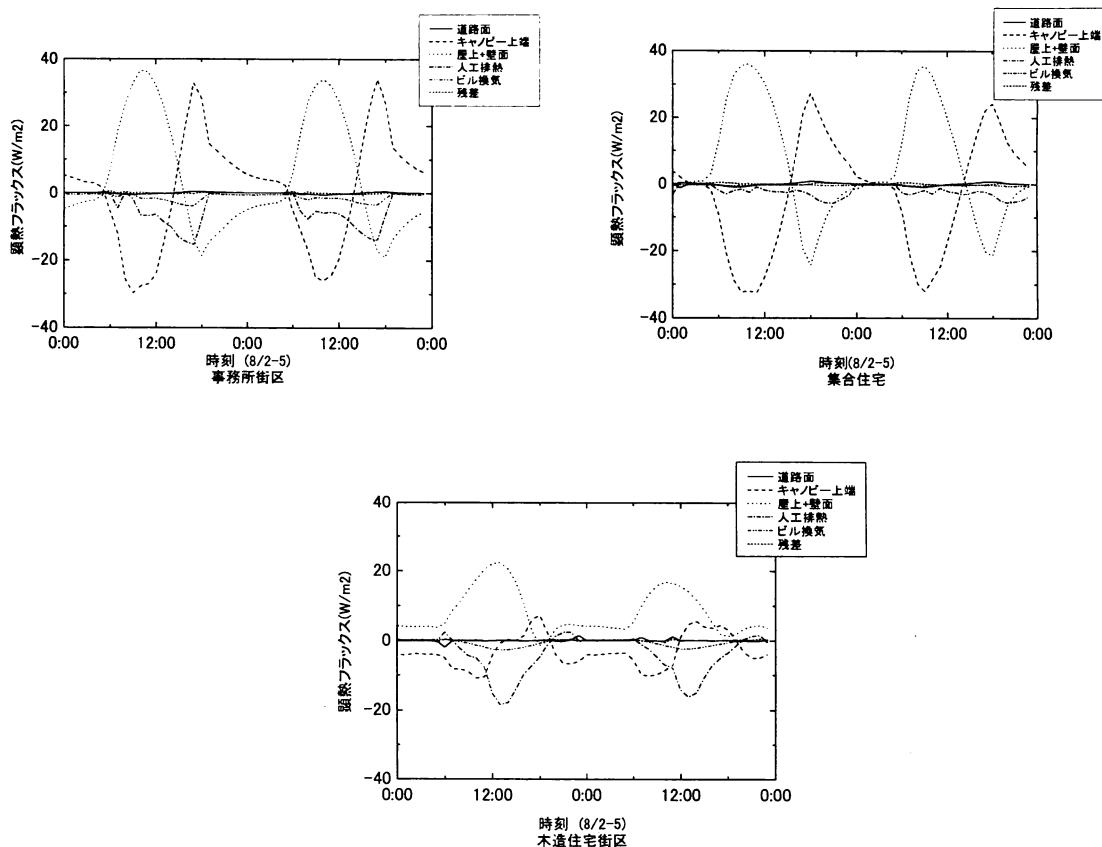


図11 気柱熱収支のPV設置有無による差

#### イ. 気温と冷房用エネルギー消費量の変化

計算期間4日間の単位建物床面積あたり冷房用エネルギー消費量の比較を行った。その結果、太陽電池パネル設置によって、全ての街区で冷房用のエネルギー消費は削減された。削減量は事務所街区、集合住宅街区、木造住宅街区それぞれ、2.7%、5.2%、10.0%であった。これは、太陽電池パネルによる屋上部分の影による負荷低減効果が大きいためであると推定された。

#### ④東京23区における太陽電池パネル設置による副次的省エネルギー効果

街区の冷房省エネ率は、気温影響の観点からは重要と考えられたPVシステム特性についての与条件（パネル面アルbedo、発電効率）には大きく依存せず、むしろ街区条件（形状と構成建築種）により左右されるが示唆された。そこで、対象街区領域を30街区領域に拡張し数値実験を行った。その結果、東京23区を構成する事務所街区、集合住宅街区、木造住宅街区のいずれの街区群においても、冷房エネルギー削減率と街区天空率との間には正の相関性が認められた（図12）。以上の相関関係を、東京23区の全街区域に外挿し、街区毎の天空率に基づき冷房省エネ率を推定する方法で、23区域における省エネ率マップを作成した（図1.3-5）。その結果、建築屋根面の50%をカバーするPVシステムの導入は、夏季の東京23区に対し、事務所街では～3%、住宅街では3～7%程度の冷房省エネ面での副次効果をもたらす事が予測された。

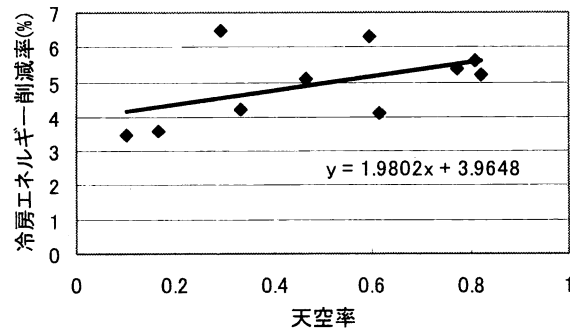
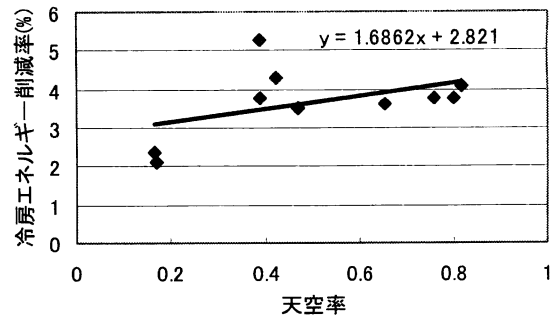
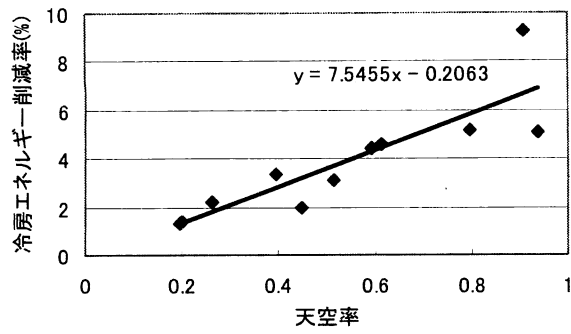


図12 各街区群の冷房エネルギー削減率と天空率の関係

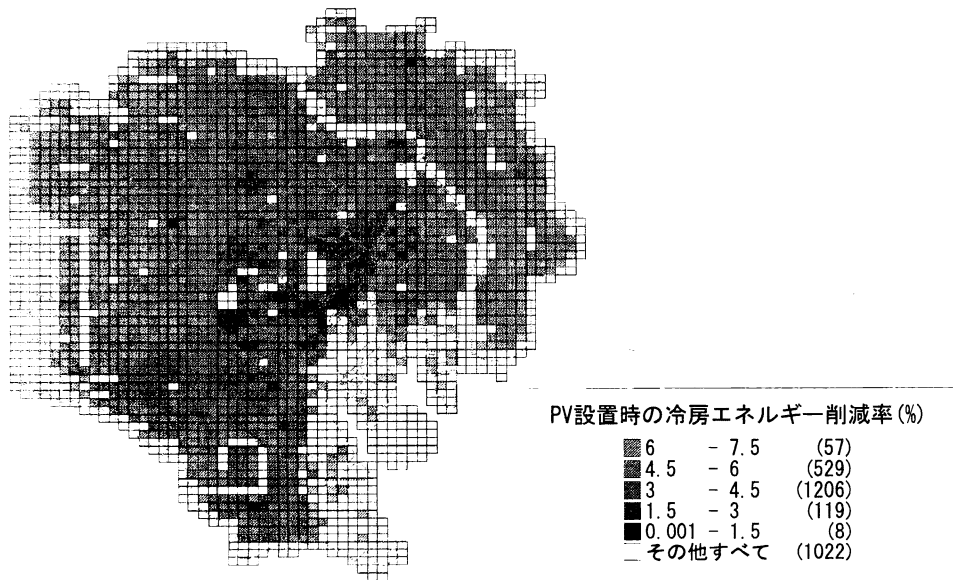


図13 東京23区のPVパネル設置による夏季冷房エネルギー削減率の分布

(3) 年間計算による太陽電池パネル設置の影響検討

① 太陽電池パネル設置時の年間気温変化

平成14年度に、太陽電池パネル熱収支モデルを導入した産業技術総合研究所が開発を行っている都市気象・エネルギー連成モデル（CM-BEM）は、夏季だけではなく年間を通して温熱環境と建物空調エネルギー消費のシミュレーションが可能なように改良が行われている。平成15年度は、改良されたCM-BEMを用いて太陽電池パネルが大規模に業務街区に設置された際の温熱環境と建物空調エネルギー消費への影響について評価を行った。

エネルギー消費が都市ヒートアイランドの面からも問題となる密集業務街区として東京都中央区日本橋周辺を選び、CM-BEMを利用して年間シミュレーションを行い、PVパネル大規模導入による年間での気温変化、年間空調エネルギー消費の増減について検討を行った。建物空調やヒートアイランド対策の計算条件を表3に示す。

表3 年間計算条件の概要

設定項目	日本橋街区
計算対象期間	2002年6月1日0時～2003年6月1日0時
空調熱源構成 (冷房)	吸収式冷温水器（冷却塔使用）33% 空冷ヒートポンプ（集中式）25% 空冷ヒートポンプ（個別式）42%
(暖房)	空冷ヒートポンプ（個別式）50% 吸収式冷温水器50%
冷房期間	冷房：5月1日～10月31日 暖房：1月1日～2月28日、12月1日～12月31日
設定温度	冷房：26℃、相対湿度50% 暖房：22℃、湿度制御せず
排熱位置	空冷室外機、冷却塔ともに屋上
被覆構成	側壁：窓30%、地表面：緑被率0% 地表面は全面コンクリートと仮定
表面特性	アルベド：コンクリート0.2、窓面0.4
PVパネル特性	アルベド：0.2、発電効率：8%、屋上面の50%に設置

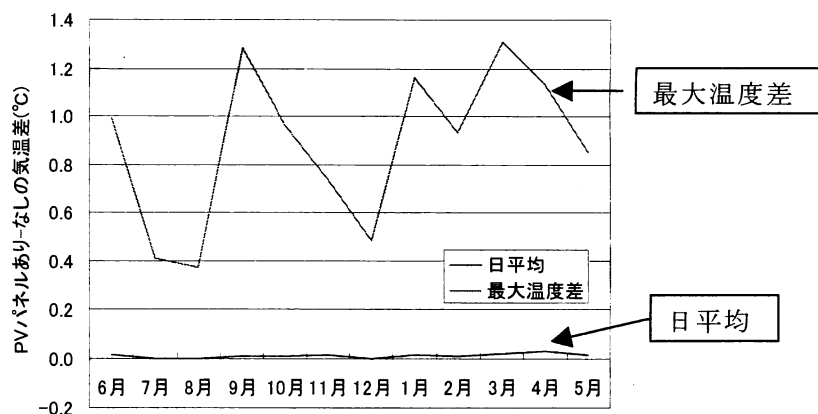


図14 各月の日平均気温のPVパネル有無による温度差

現況ケースに対して、PVパネル導入ケースとして平成14年度同様に対象街区の屋上面積の50%に太陽電池パネルを導入すると仮定した。PVパネル導入による各月の日平均気温のPVパネル有無による温度差を図14に示す。各月の日平均温度差は最大0.03℃であり平均気温変化は非常に小さいと推定された。また、そのときのPVパネル導入ケースと現況ケースの各月の最大温度差は、夏季の7月8月に0.4℃程度と小さく、暖房期間の1月2月は、1℃程度と大きな温度差であった。ただし、同じ冷房期間でも9月は1.2℃を超える最大気温差があり、また、暖房期間の12月でも0.5℃程度の最大温度差であったことから、気象条件がこれらの温度差に影響を与えていると考えられた。

### ②年間空調エネルギー消費量変化

年間計算から得られたPVパネル導入ケースと現況ケースとの各月の空調エネルギー消費量の差を図15に示す。冷房期間の5月から10月にかけてはPVパネルを導入した場合の方が、空調エネルギー消費が増加した。逆に、暖房期間の12月から2月にかけては空調エネルギー消費が減少した。この結果は、PVパネル導入が冷房空調負荷の減少に寄与した平成14年度の検討結果と逆であった。この理由は、平成14年度は快晴晴天日について検討を行ったために、屋上からの空調負荷への影響が大きかったためであると考えられた。実際に冷房負荷が大きい7月、8月に関してはほぼ負荷の変化は無いという結果であった。6月の空調エネルギーが増加した理由は、気温がまだ低く、かつ太陽高度が高いためにPVパネル導入時には午前の気温立ち上がりが高く、冷房負荷が増大したためであると考えられた。また、10月は気温が低いために8月よりもPVパネルからの顕熱輸送増大による気温上昇の影響が冷房空調に現れたためであった。

冬季の暖房空調エネルギーの減少は、PVパネルからの顕熱輸送の増大による気温上昇が夏季に比べて冬季に関しては大きく出る場合があるために、気温上昇による暖房負荷減少が起きた結果であると考えられた。暖房月の空調エネルギー消費の減少率は、それぞれ-5%、-4%、-4%と大きく、年間を積算すると暖房エネルギー削減が冷房エネルギー増加を上回り、年間では-1%の省エネルギーに寄与する結果となった。

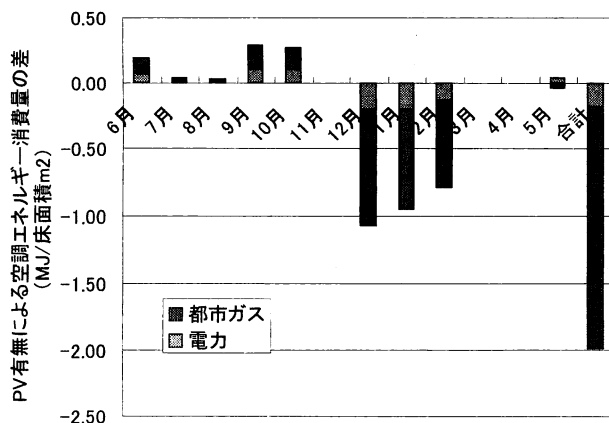


図15 太陽電池パネル導入による各月の空調エネルギー消費量の差

### ③屋上緑化と太陽電池パネル導入した場合の年間空調エネルギー消費量削減効果の比較

屋上緑化対策をPVパネルと同様に、日本橋街区の屋上面積の50%に導入した場合の年間気温変化



と年間空調エネルギー変化について検討した。各月の屋上緑化対策の有無による日平均気温差の変化を図16に示す。また、そのときの空調エネルギー消費量の変化を図17に示す。屋上緑化の場合、PVパネルと異なり、年間にわたって気温低下に寄与するが、その量は日平均値で最大0.05℃程度と小さくPVパネル同様に気温への影響は小さいと考えられた。そのときの空調エネルギー消費は、気温変化に対応して冷房期間には省エネルギー、暖房期間にはエネルギー消費増につながった。業務街区の日本橋の場合、冷房負荷が暖房負荷よりも大きいため年間を通じては省エネルギーに寄与した。ただしその量は床面積当たり1MJであり、PVパネル導入時と比較して省エネルギーへの寄与は約半分にとどまった。

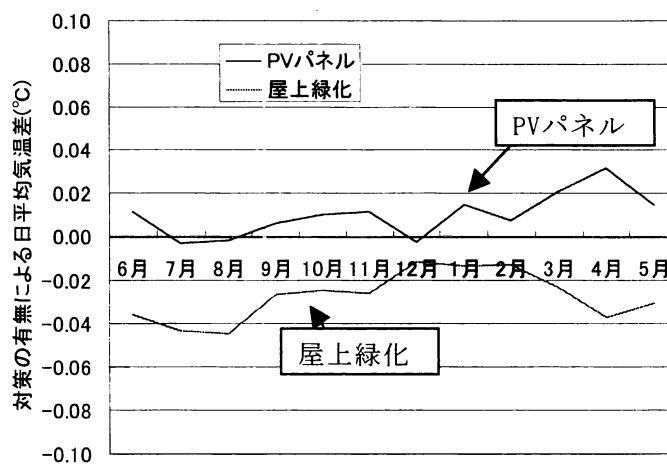


図16 対策有無による日平均気温の変化(屋上緑化と太陽電池パネルの比較)

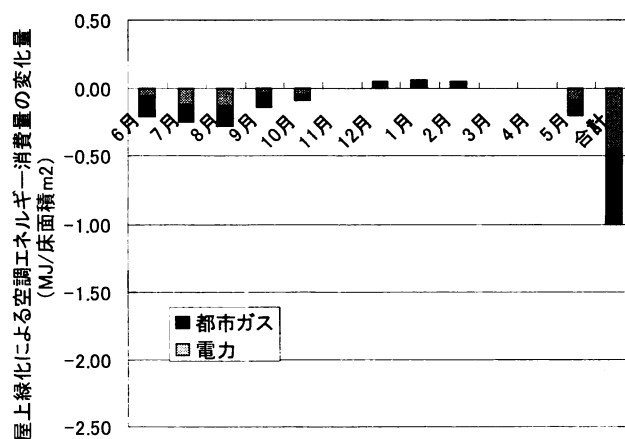


図17 屋上緑化による各月の空調エネルギー消費量の差

## 5. 本研究により得られた成果

太陽電池パネルを国立環境研究所地球温暖化研究棟屋上に設置して太陽電池パネル熱収支を実測した。実測からパネル表面総括熱伝達係数はパネル表裏共に風速の関数として $h=4.3V+1.6$ で表現できた。この関係を用いて太陽電池熱収支モデルを構築し、モデルによりパネル温度が $0.8^{\circ}\text{C}$ 程度、日中顕熱輸送量が $70\text{W}/\text{m}^2$ 程度の誤差で再現されることを確認した。

開発した太陽電池熱収支モデルを都市気象・ビルエネルギー連成モデルに導入して太陽電池パネルが夏季冷房エネルギー消費に与える影響について、事務所街区、集合住宅街区、木造住宅街区を対象に検討した。その結果、全ての街区で冷房用のエネルギー消費は削減され、削減量は事務所街区、集合住宅街区、木造住宅街区それぞれ、 $2.7\%$ 、 $5.2\%$ 、 $10.0\%$ であった。これは、太陽電池パネルによる屋上部分の影による負荷低減効果が大きいためであると推定された。このとき、夏季気温変化は $0.1^{\circ}\text{C}$ 以下であり、太陽電池パネル設置による夏季ヒートアイランドへの影響は無視できた。

さらに太陽電池パネル導入の年間の気温と空調エネルギー消費への影響について業務街区の東京都日本橋地区をモデル地域として定量的評価を行った。その結果、年間でも気温変化は最大、日平均で $0.03^{\circ}\text{C}$ 程度にとどまり熱環境への影響は小さいと予測された。また、空調エネルギー消費は、冷房負荷の大きい7月8月に関してはほぼ変化が無く、暖房エネルギーは $4\sim 5\%$ 程度の省エネルギーにつながる事が予測された。これは、夏季のみの検討とはことになったが、これは晴天日だけではなく曇天も対象にしたためであると考えられた。

同じ屋上に行う熱負荷低減手法として屋上緑化を取り上げ、同様に年間の空調エネルギー消費、気温変化について比較を行った。その結果、日平均気温変化は屋上緑化でも $0.1^{\circ}\text{C}$ 以下であり、非常に小さかった。発電を除いた空調エネルギー消費の比較を行ったところ、PVパネルの省エネルギー効果が屋上緑化よりも大きかった。この結果、地球温暖化対策としてのPVパネル導入は業務地区に関しては都市熱環境の現状を保持する程度の影響であり、発電を考慮すると十分に温暖化対策となりうると推定された。

住宅街区、東京23区全体などの広域に対する影響については今後の課題である。

## 6. 引用文献

- 1) Hongxing Yang, John Burnett, Jie Ji: Energy and Building 31, pp285-290, 2000  
" Simple approach to cooling load component calculation through PV"
- 2) 亀卦川幸浩、玄地裕、吉門洋、近藤裕昭：エネルギー・資源、22, 3, 235-240 (2001)  
「建築空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発」
- 3) 亀卦川幸浩、玄地裕、近藤裕昭、花木啓祐：エネルギー・資源、第23巻第3号、200-206 (2002)  
「街区構造に応じた高温下対策の導入が都市空調エネルギー需要に及ぼす影響」
- 4) 近藤裕昭、劉発華：大気環境学会誌、33, 3, 179-192 (1998)  
「1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究」
- 5) 浅枝隆、藤野毅：水文・水資源学会誌、5, 4, 3-7 (1992)  
「舗装面の熱収支と蓄熱特性について」
- 6) 近藤裕昭：朝倉書店、2001  
「人間空間の気象学」

- 7) R. J. Cole , et N. S. Sturrock. Building and Environment, 12, 207 (1977)  
 “The convective heat exchange at the external surface of buildings”
- 8) 槌田昭、山崎慎一郎、秋山光庸：学献社（1965）  
 「伝熱工学演習」
- 9) 日本建築学会編：丸善（2001）  
 「建築設計資料集成」
- 10) 国立天文台編：丸善（2001）  
 「理科年表」
- 11) 建設省住宅局建築指導課長監修：住宅・建築省エネルギー機構，68  
 「建築物の省エネルギー基準と計算の手引」

## 7. 国際共同研究等の状況

現在、海外から本研究に関する問い合わせがあり、共同研究については、協議検討中である。相手先は、太陽電池パネルの大規模設置による都市気象への影響について実測をアリゾナで行いたいと考えているグループである。世界的に見て、太陽電池パネルの都市気象への影響について研究を行っているグループは我々だけであることから、IAUCの発表を知り、問い合わせがあった。

Jay S. Golden, SCPM  
 Co-Director  
 Sustainable Technologies Program  
 Arizona State University, USA.  
<http://sustainable.asu.edu>

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

- ① M. CHIKADA, T. INOUE, T. SAWACHI, Y. GENCHI, T. ICHINOSE : PLEA 2001 - The 18th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianópolis - BRAZIL, (2001)  
 “EVALUATION OF ENERGY SAVING METHODS IN A RESEARCH INSTITUTE BUILDING, CCRH”
- ② 玄地 裕、菅原有希、大友順一郎、温慶茹、高橋宏、稲葉敦，環境システム研究論文集，vol. 30, 271-276(2002)  
 「太陽電池パネル設置時の屋上面熱収支の実測とモデルの構築」

<学術誌（査読なし）>

- ① 玄地 裕：太陽エネルギー，29, 3, 3-9 (2003)  
 「都市ヒートアイランドとエネルギーシステム」

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

### (2) 口頭発表

- ① Y. Sugawara, J. Ohtomo, K. Wen, H. Takahashi, Y. Genchi : AGS Annual Conference 2002, San José Costa Rica (2002)  
 “Impacts on the heat island effect when a large number of photovoltaic cells is installed in Tokyo”
  - ② 玄地 裕、菅原有希、大友順一郎、温慶茹、高橋宏、稲葉敦：第30回環境システム研究論文発表会（2002）  
 「太陽電池パネル設置時の屋上面熱収支の実測とモデルの構築」
  - ③ 玄地裕、大橋唯太、稲葉敦、石崎雅子、亀卦川幸浩、高橋宏：第22回エネルギー・資源学会研究発表会（2003）  
 「太陽電池パネル大規模設置の夏季気温と冷房負荷への影響」
  - ④ Y.Genchi, M.Ishisaki, Y.Ohashi, Y.Kikegawa, H.Takahashi and A.Inaba:5th International Conference on Urban Climate(IAUC), Lodz. Poland, 2003  
 “Impacts of large-scale photovoltaic panel installation on the heat island effect in Tokyo”
- (3) 出願特許  
なし
  - (4) 受賞等  
なし
  - (5) 一般への公表・報道等  
特に記載すべき事項はない。

#### 9. 成果の政策的な寄与・貢献について

太陽光発電技術研究組合の付加価値研究会における大綱電池パネルの発電以外の付加価値の検討において、本研究成果である太陽電池パネルの大規模普及によるヒートアイランドへの影響と日陰効果による冷房負荷削減効果を示して太陽電池パネルの付加価値の定量的検討に貢献した。

また、財団法人省エネルギーセンターのヒートアイランド現象緩和に対する省エネ等の効果に関する調査委員会（経済産業省委託）の調査に対して、本研究成果である太陽電池パネル導入のヒートアイランドへの影響を考慮したエネルギー消費に対する定量的検討モデルが、ヒートアイランド対策の具体案検討の一部として使用される予定。