環境システム研究論文集Vol.30,2002年10月

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

玄地　裕[1]、菅原有希[2]、大友順一郎[3]、温慶茹[4]、高橋宏[5]、稲葉敦[6]

[1]博(工) 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（〒305-8569　つくば市小野川16-1）
[2]東大大学院生　東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻（〒113-0031　文京区弥生2-11-16）
[3]博(工) 東大大学院助手 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻（同上）
[4]博(工) 東大大学院講師 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻（同上）
[5]工博 東大大学院教授 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻（同上）
[6]工博 ライフサイクルアセスメント研究センター長 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（〒305-856 つくば市小野川16-1）

太陽電池パネル設置による屋上面熱収支変化の実測とモデルの構築をおこなった。その結果、設置した太陽電池パネル表面の総括熱伝達係数 h はパネル表裏共に風速 V に対して h=4.3V+1.6 と表され、顕熱フラックスを風速と気温と太陽電池パネル表面温度から求めることができた。

Input を風速、気温、日射量、室温とする太陽電池熱収支モデルを作成し、太陽電池設置による顕熱フラックス、伝導熱フラックス変化を定量的に計算できた。

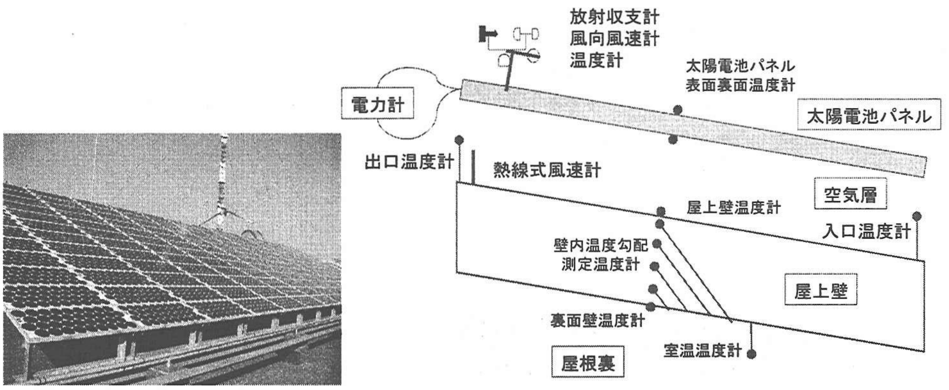
***Key Words:** Photovoltaic cell, heat balance, heat island, heat conductivity, sensible heat flux*

1.研究背景と目的

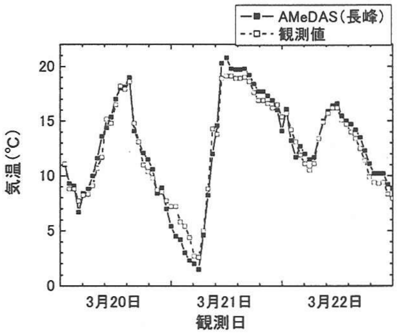
地球温暖化抑止に向けた二酸化炭素（CO_2）排出削減策の一つとして太陽電池が注目されている。太陽電池設置の副次的効果としてオフィスビルなどの場合、太陽電池は屋上壁（場合によっては側壁）から離されて設置されるため、日射遮蔽効果によって建物内部への伝導熱が減り、場合によっては冷房負荷が半減できる[1]ことが示唆されている。都市部に大規模に太陽電池を導入した場合にはパネルの設置により冷房負荷削減に伴う廃熱削減が起こる可能性があり、さらなる省エネルギー効果も期待される。しかし、逆にパネル設置による表面熱収支の変化により顕熱輸送が増加した場合には、都市気温が上昇して、冷房エネルギー消費が増えることも考えられる。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[2]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。総合評価のためには都市気象やビル消費エネルギー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。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[1]、熱収支中の顕熱フラックスの変化に着目した研究はなかった。著者らは、都市気温上昇とエネルギー消費量増加の関係に着目し、都市街区内気温とエネルギー需要の関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開発を行ってきた[3,4]。そこで本研究では太陽電池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、我々の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することを目的とした。

2.実測結果と熱収支式

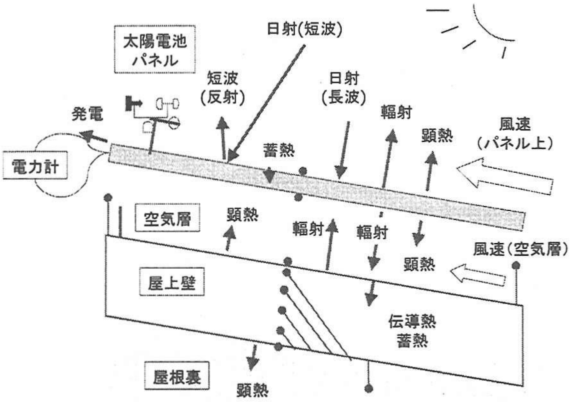
実測は、つくばにある国立環境研究所地球温暖化対策国際研究棟屋上に約 9kW 級太陽電池パネルを設置して行った。パネルは建物屋上南面に、架台によって屋上面からは約 60cm 上方に設置されている。図－1 に観測場所と観測項目を示す。測定項目は短波長波放射量（パネル上の上向き下向き)、気温(パネル上、空気層入口、出口)、風向風速（パネル上、空気層内)、パネル温度（表面、裏



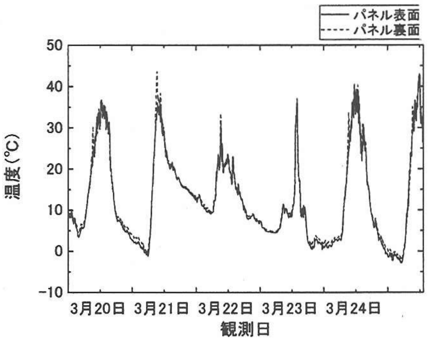
図－1　観測場所と観測項目



図－2　AMeDAS(長峰)と観測気温の比較



図－4　太陽電池熱収支の概念図



図－3 太陽電池パネル表面温度と
裏面温度の日変化例

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（長峰）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。

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

太陽電池パネル熱収支基礎式

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

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

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

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

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

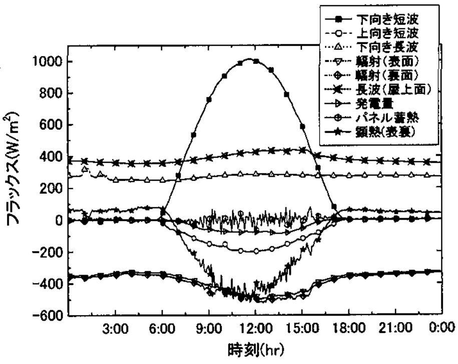
屋根裏壁面熱収支式：
$$h_w(T_r - T_{wr}) + \lambda_w \left.\frac{\partial T_w}{\partial z}\right|_{z=z_r} = 0 \quad \cdots\cdots(6)$$

総括熱伝達係数：
$$h = aV + b \quad \cdots\cdots(7)$$

A[-]：アルベド、d[m]：厚さ、$C\rho$[$Jm^{-3}K^{-1}$]：体積熱容量、H[Wm^{-2}]：顕熱フラックス、h[$Wm^{-2}K^{-1}$]：総括熱伝達係数、I[Wm^{-2}]：短波日射量、J[Wm^{-2}]：長波日射量、L[m]：パネル長さ、P[Wm^{-2}]：単位面積あたりの発電量、T[K]：温度、t[s]：時間、V[ms^{-1}]：風速、z[m]：パネルに鉛直な座標、α[m^2s^{-1}]：壁内熱拡散係数、ε[-]：射出率、λ[$Wm^{-1}K^{-1}$]：熱伝導率、σ[$Wm^{-2}K^{-4}$]：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_0：屋上壁表面、z_r：壁屋根裏面を表す。

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/m²に達した。これは、都市キャノピーからの顕熱輸送量[5)6)]と推定される200W/m²～300W/m²（夏季）の約1.5～2倍であった。



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

3. 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。

（1）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。

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

（2）太陽電池パネルの熱伝達係数

地物表面からの気相への顕熱輸送方程式は一般的に熱伝達係数と気相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[7]。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[8]。

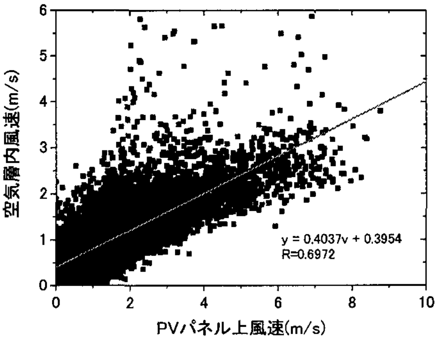
$$\mathrm{Nu} = 0.037\,\mathrm{Pr}^{1/3}\,\mathrm{Re}^{0.8} \quad \cdots (9)$$

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 $\overline{T_i}$ との差で近似を行うと、H_p は式（10）のように表される。

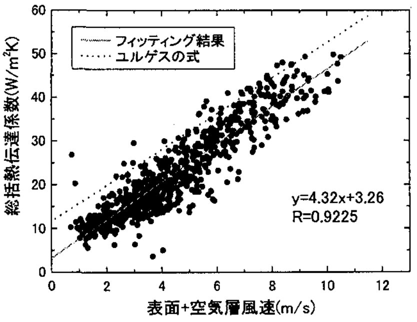
$$H_p = h_s(T_p - T_a) + h_b(T_p - T_i), \quad h_s = av_s + b, \quad h_b = av_i + b \quad \cdots\cdots (2)'$$

$$\begin{aligned} H_p &\cong h(T_p - \overline{T_i}) \\ &= \{a(V_s + V_i) + 2b\}(T_p - \overline{T_i}) \quad (\because h_s \approx h_b, T_a \approx T_i) \end{aligned} \quad \cdots\cdots (10)$$

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



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

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[4]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。

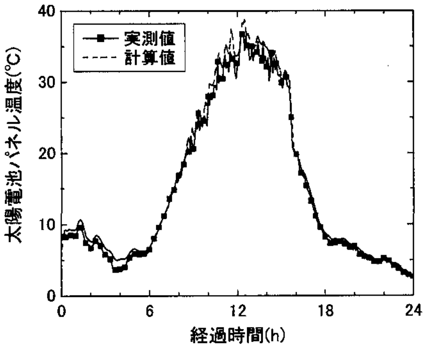
4. シミュレーション結果と実測の比較

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

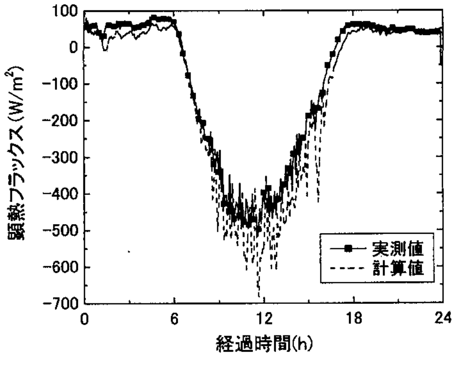
表−1 計算に用いたパラメータ

	太陽電池		断熱材	コンクリート
	実測値	文献値[9)10)]	文献値[11)]	文献値[11)]
アルベド(-)	0.18	0.1	-	0.2
熱容量(J/m³K)	-	2.0×10^6	4.7×10^4	1.9×10^6
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	-	-

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



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)

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[10)]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℃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70W/m²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/m²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。

5. 結論

太陽電池パネルを国立環境研究所地球温暖化対策国際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℃程度、日中顕熱輸送量が70W/m²程度の誤差で再現されることを確認した。

本熱収支モデルを用いた夏季熱収支の解析と都市気象

とビルエネルギー消費モデルに太陽電池熱収支モデルを導入し、気温変化とエネルギー消費量評価を行うことは今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、環境省地球環境研究総合推進費（「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」課題番号 B-56、研究代表者：国立環境研究所一ノ瀬俊明）、文部科学省ﾐﾚﾆｱﾑﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ（「都市への二酸化炭素排出削減技術群適用効果の統合的解析と最適化」研究代表者：東京大学花木啓祐教授）、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（代表者：東京大学定方正毅教授）により実施された。ここに感謝の意を記す。

参考文献

1)Hongxing Yang, John Burnett, Jie Ji : "Simple approach to cooling load component calculation through PV" Energy and Building 31, pp285-290, 2000

2)亀卦川幸浩、玄地裕、吉門洋、近藤裕昭：「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」エネルギー・資源 第22巻第3号, 235-240 、2001

3)亀卦川幸浩、玄地裕、近藤裕昭、花木啓祐：「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」エネルギー・資源、第23巻第3号、pp200-206, 2002

4)近藤裕昭、劉発華：「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」大気環境学会誌、vol.33, No.3, 179-192、1998

5)浅枝隆、藤野毅：「舗装面の熱収支と蓄熱特性について」、水文・水資源学会誌、Vol.5, No.4, pp3-7、1992

6)近藤裕昭：人間空間の気象学、朝倉書店、2001

7) R.J. Cole , et N.S. Sturrock . "The convective heat exchange at the external surface of buildings" Building and Environment 12, pp207 、1977

8) 槌田昭、山崎慎一郎、秋山光庸、伝熱工学演習、学献社、1965

9)日本建築学会編、建築設計資料集成、丸善、2001

10)国立天文台編、理科年表、丸善、2001

11)建設省住宅局建築指導課長監修、建築物の省エネルギー基準と計算の手引、住宅・建築省エネルギー機構, p68

Development of a heat balance model of photovoltaic cells to assess PV installation impacts on the urban heat island effect

Y. Genchi(AIST), Y. Sugawara(UT), J.Ohtomo(UT), C. Wen(UT), H. Takahashi(UT), A. Inaba(AIST)

Photovoltaic (PV) cells are considered as one of countermeasures for saving electricity generated by fossil fuels. When PV cells are largely introduced in Tokyo, the surface heat valance will be changed. We developed a new PV cell surface heat balance model so as to assess all the impacts of introduction of photovoltaic cells, like a change of energy consumption resulting from a change of air temperature and a change of cooling loads in buildings resulting from the shielding effect of photovoltaic cells.

We set PV cells on the top of the roof of a research institute building in Tsukuba, Japan, and measured PV cell surface heat valance and meteorological data. From these measured data, we determined our model's parameters.