

都市への太陽光発電システム導入に関する研究
FEASIBILITY STUDY OF INTRODUCING PHOTOVOLTAIC
POWER GENERATION SYSTEMS IN CITIES

森 圭太郎* 井村 秀文**

Keitaro MORI* and Hidefumi IMURA**

ABSTRACT; Solar energy is clean and inexhaustible. Its use would reduce the environmental loads such as the emission of air pollutants from fossil fuels. However, commercialization of solar energy is still at its infant stage due to various technological and economical reasons. For promoting the effective utilization of solar energy systems, studies are necessary on the costs covering their installation, operation and maintenance as well as on their environmental impacts. By using a logistic model, this study presents an estimation of the solar energy generation cost when photovoltaic systems are introduced. Environmental impacts of the systems are also discussed by assuming some model cities. The results showed that the solar power generation cost using photovoltaic systems is four times as high as that of the commercial electricity. Purchasing of PV systems by public housing authorities, however, would promote their dissemination and lower their prices. If PV systems are effectively used in combination with various non-used refuse heat and natural energy sources, they could supply 35% of the total energy demand in model cities. Surface temperature of the areas would drop by 1°C if the PV panels are set up on two thirds of the built-up area.

KEYWORDS; solar energy, photovoltaic power generation system, eco-city, ecopolis, urban environment

1. はじめに

我が国のエネルギー消費は、化石燃料を主とした供給によって支えられているが、近年、地球温暖化等の環境問題が人類にとっての重大な問題となるにつれ、エネルギー多消費に対する具体的な対策がますます強く求められている。太陽エネルギーはクリーンで量が膨大であることから、代替エネルギー源として大いに期待されている。しかし、エネルギー密度が低く、天候に左右される等の理由により、その利用はいまだ十分に進んでいない。太陽エネルギーの積極的な利用によって環境負荷の低減を実現するには、その導入に対する障害を把握し、克服手段を明らかにする必要がある。その第一ステップとして、導入のコストと効果を定量的に把握することが重要である。

本研究では、太陽光発電システムを都市に導入しようとする場合の方法とその問題点及びその導入が都市の環境改善にどのような効果をもたらすかを検討する。

2. 太陽光発電システムの発電コスト

太陽光発電は近年の研究開発により技術的には実用可能な状況となっている。しかし、その発電コストは現在の電気料金に比べると高く、このことが都市への太陽光発電システム導入に対する最大の障害であると言われている。そこで、逆流（自家発電で作った電気を配電線を通して電力会社側へ流すこと）有り、売電（逆流した電力を電力会社が買い取ること）有りの太陽光発電システムによる発電コストについて評価する。

* J R 東日本 JR East Japan

** 九州大学工学部環境システム工学研究センター Inst. of Environmental Systems, Faculty of Eng., Kyusyu University

太陽光発電による発電コストGは以下の式で求めた。

$$G = TC / TP$$

$$TC = C_p + C_b + C_m$$

$$TP = t I \eta \{1 - 0.005 (T - 298)\}$$

G: 発電コスト

TC: 発電に必要な総経費

TP: 寿命までの総発電量

C_p: 太陽電池パネル費

C_b: 周辺機器費

C_m: 維持費

t: 寿命年数

I: 日射量

η: 発電効率

T: パネル温度

太陽光発電システムの発電コストGは、発電に必要な総経費TCを太陽電池が寿命までに発電する総発電量TPで割った値とする。発電に必要な総経費TCは、太陽電池パネル費C_pと周辺機器（インバータ、保護装置、架台等）費C_b及び維持費C_mの総和とする。総発電量TPは太陽電池の寿命年数に日射量と太陽光発電システムの発電効率及び太陽パネル温度による発電能力低下率を掛けたものとする。太陽パネル温度による発電能力の低下は、パネル温度が25℃を超えると、1℃につき0.5%発電能力が低下するものとする。

太陽電池パネル製造コストの過去のトレンドに関する習熟曲線（図1）によれば、太陽電池累積生産量が2

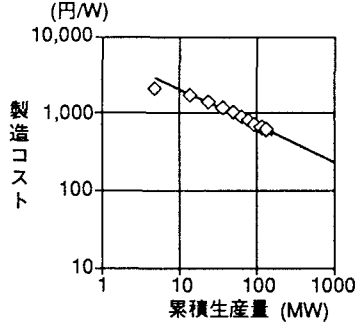


図1 太陽電池パネルの習熟曲線

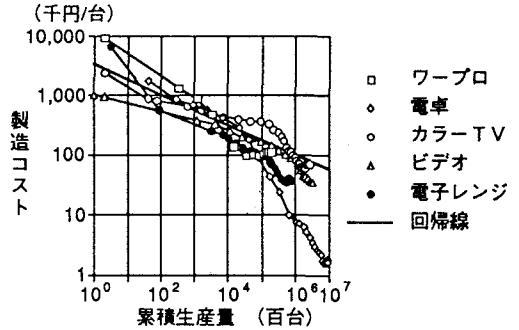


図2 家電製品の習熟曲線

倍になると、製造コストは28%低下する。そこで、太陽電池パネル費は今後の累積生産量を仮定し、習熟曲線によって決定した。周辺機器の製造コストは家電製品の生産量と価格に関する習熟曲線（図2）より決定した。すなわち、累積生産量が2倍になると、製造コストは16%低下するものとした（図3）。維持費は周辺機器の買い替え費と考え、10年後の周辺機器費とした。太陽電池パネルの寿命年数は20年、発電効率は10%とした。

太陽電池が年間20MW、周辺機器が年間100台で生産された場合と太陽電池が年間100MW、周辺機器が年間3,000台で生産された場合の発電コストの計算結果を図4に示す。その結果、イ）現在の発電コストは既存の電気料金（25円/kWh）に比べて四倍以上高く、ロ）通産省が目標とする、太陽電池が年間100MW、周辺機器が年間3,000台で生産された場合、2005年頃になって初めて既存の電気料金と競合可能になることがわかる。

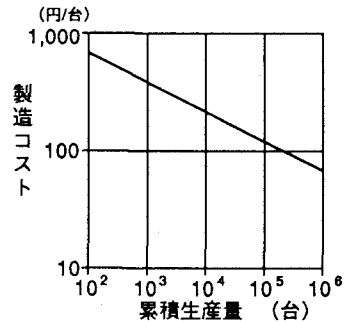


図3 周辺機器の習熟曲線

3. 太陽光発電システムの早期普及のための対策及びその効果

太陽光発電システムの発電コストは、現在の電気料金に比べて割高であるため、特別の用途を除くと、太陽光発電の普及は進んでいない。太陽光発電システムを普及させるには、その発電コストを下げる必要があるが、そのためには太陽光発電システムの需要を喚起し、生産量を増やすような何らかの施策を行う必要がある。本章では、太陽光発電システムの普及を早めるための施策をいくつか仮定し、施策後の発電コストの推移を求めた。さらに、各施策後の太陽光発電システムの普及過程をロジスティックモデルを用いて求めた。

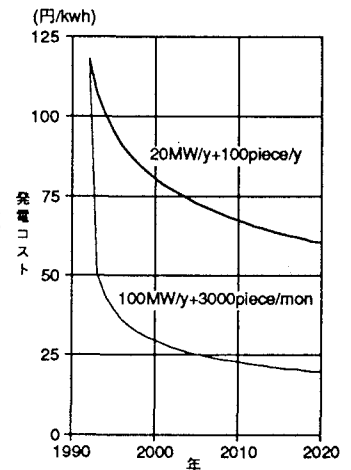


図4 発電コストの推移

3. 1 施策の設定

普及促進のための施策として以下の7つを想定した。

施策1 発電に必要な総経費の2/3を補助金で負担する。

施策2-a 毎年公共新築住宅の10%に太陽光発電システムを設置する。

施策2-b 毎年公共新築住宅の50%に太陽光発電システムを設置する。

施策2-c 毎年公共新築住宅の100%に太陽光発電システムを設置する。

施策3-a 年間20MWの太陽電池を輸出する。

施策3-b 年間40MWの太陽電池を輸出する。

施策A 施策1と施策2を行う。

公共新築住宅の年間戸数は現在約7万戸であるが、ここではそのうちの戸建て3万戸を対象とする。太陽電池は戸建て住宅一軒につき3kWpシステムを設置するものとする。周辺機器は戸建て住宅一軒につき1台必要であるとする。また、現状で毎年生産されている太陽電池量(20MW)は、施策に関係なく生産されているものとする。

3. 2 施策後の発電コスト推移

発電コストの評価手法は前章に準じて行った。各施策の発電コストを図5に示す。その結果、イ) いずれの施策も発電コストは低下しているがロ) 新築住宅への設置はその効果が大きい。すなわち、施策2-aで40%、施策2-bで56%、施策2-cで64%発電コストを低下させる。ハ) 太陽電池の輸出による効果は小さい。これは、太陽電池パネルの輸出は周辺機器の需要を喚起しないためである。周辺機器累積生産量の増加による周辺機器製造コストの低下が、発電コスト低下に大きな影響を与えている。ニ) 補助金での負担も発電コスト低下には有効な手段である。

3. 3 ロジスティックモデル

新しい製品や技術が市場に浸透してゆく様子はロジスティック曲線により説明されることが多い。ロジスティック曲線は、市場占有率を $f(t)$ とすると

$$f(t) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha t - \beta}} \quad t: \text{時間}, \alpha, \beta: \text{定数}$$

であるが、ここで

t_1 : 市場占有率が0.1%に達する年, t_2 : 市場占有率が50%に達する年, $T = t_2 - t_1$: 市場占有率が0.1%から50%になるまでの時間。

これをテイクオーバータイムと呼ぶ。

とするとロジスティック曲線 $f(t)$ は

$$f(t) = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\frac{6.90675}{T}(t - t_1 - T)\right\}}$$

で表せる。太陽光発電の普及過程はこのロジスティック曲線 $f(t)$ を用いて計算した。計算方法は、太陽光発電が最大限導入され得る量、テーク

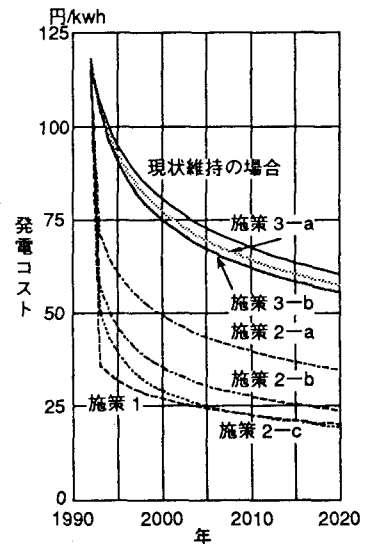


図5 施策別発電コストの推移

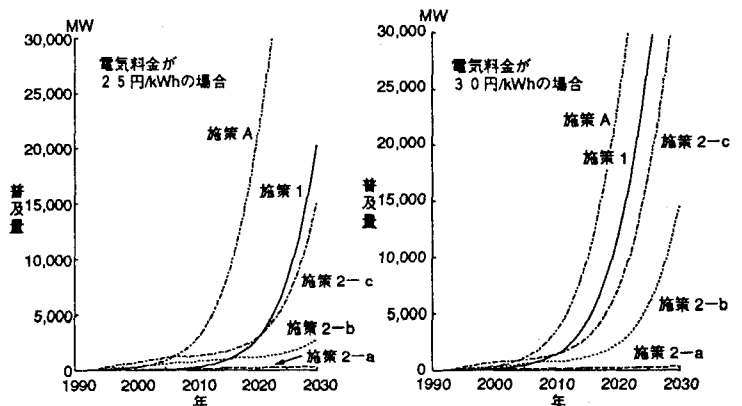


図6 太陽光発電システムの普及予測

オーバータイムを設定し、各年ごと $f(t)$ の繰り返し計算を行う。この時、太陽光発電システムの普及開始時期を設定し、普及開始時期として市場占有率0.1%を与える。算出された市場占有率と最大導入可能量の積で、その年 t における太陽光発電の導入量を求める。以下 t に関する繰り返し計算を行う。

3. 4 施策後の普及過程推移

太陽光発電システムの普及開始時期は、（太陽光発電システムによる発電コスト≦電気料金）が成り立つ時とし、このときの太陽光発電システムの市場占有率を0.1%とした。テイクオーバータイムは30年、太陽光発電システムの最大導入可能量は、71,000MWとした。

電気料金が25円/kWhと30円/kWhの場合の普及過程を施策3－a, bを除く各施策について計算した（図6）。施策1から施策2－cまでは、5円の電気料金上昇により普及開始時期が5～7年早まっている。電気料金の上昇が太陽光発電システムの早期普及に大きな影響を与えることがわかる。

表1 都市規模

	住宅都市	業務都市
位置	東京周辺	東京周辺
人口(万人)	1.5	6.4(昼) 0.11(夜)
ゴミ量(t/日)	20	150
下水量(m³/日)	3,750	16,000
世帯数		
一戸住宅	2,700	0
集合住宅	1,900	340
敷地面積(ha)		
一戸住宅地	115	0
集合住宅地	20	4
オフィス街	0	85.5
公園	16	16
その他	9	54.5
計	160	160
床面積(m²)		
オフィス	0	1,282,500
学校	16,000	4,000
飲食業	3,000	138,000
小売業	9,000	12,000
病院	9,000	20,000
その他	15,000	20,000

4. モデル都市への太陽光発電システム導入の効果

太陽光発電システムを都市へ導入しようとする場合、その導入効果を定量的に把握することは重要である。そこで、仮想的なモデル都市を想定し、そこに太陽光発電システムを導入した場合の効果について評価した。モデル都市は住宅都市と業務都市を仮定し、各都市内のエネルギー需要及び電力需要を既存のエネルギー原単位を基に求めた。また都市内に存在する未利用エネルギー（太陽熱、ゴミ焼却熱、下水廃熱）についてもその供給可能量を推定した。加えて、太陽電池を設置したビルの地表面温度を一次元熱収支モデルで求め、オフィスビル街の地表面温度を考察した。

4. 1 設定条件

モデル都市として住宅都市と業務都市を仮定した。住宅都市は人口15,000人のベッドタウンを、業務都市は人口1,100人で5階建てオフィスビルが建ち並ぶオフィス街を仮定した。都市規模を表1に示す。モデル都市の年間エネルギー需要量は既存の原単位^{1) 2)}を用いて求めた。さらに、冷・暖房用エネルギーは月別にデグリデーに応じて配分した。給湯用エネルギーは、夏季需要量の2倍を冬季需要量とした。照明動力、その他用エネルギーは毎月一定であるとした。都市内の未利用エネルギーは、太陽熱・ゴミ焼却熱・下水廃熱を考えた。

1) 太陽熱エネルギーは太陽熱温水器を利用して全て給湯用途で利用する。利用可能エネルギー量は、次式で算定した。

$$E_h = I \times 365 \times \eta_h \times S$$

E_h : 利用可能太陽熱エネルギー, I : 全天日射量,
 η_h : 熱効率, S : 太陽熱温水器設置面積

2) ゴミ焼却熱エネルギーは熱供給システムとして冷房用（夏季）、暖房用（冬季）、給湯用（それ以外）に利用する。利用可能エネルギー量は、以下の式で算定した。

$$E_w = V_w \times 365 \times 10^3 \times H \times \alpha \times \beta$$

$$E_{wh} = V_w \times \eta_l \times \eta_m \times T$$

E_w : 利用可能ゴミエネルギー, V_w : ゴミ量,
 H : 発熱量, α : 所内利用率, β : ボイラー効率,
 E_{wh} : 利用可能ゴミ熱エネルギー量,
 η_l : 輸送ロス, η_m : 機器効率, T : 利用期間

3) 下水廃熱エネルギーはヒートポンプを利

表2 設置面積

	太陽電池	太陽熱温水器
一戸住宅	30 m²/世帯	2 m²/世帯
集合住宅	200 m²/棟	100 m²/棟
学校	2,000 m²/校	100 m²/校
オフィスビル	屋根面積の2/3	屋根面積の1/4
住宅都市(ha)	太陽電池	太陽熱温水器
一戸住宅	8.1	0.54
集合住宅	0.6 (30棟)	0.3 (30棟)
学校	0.8 (4校)	0.04 (4校)
オフィスビル	0	0
業務都市(ha)	太陽電池	太陽熱温水器
一戸住宅	0	0
集合住宅	0.12 (6棟)	0.06 (6棟)
学校	0.2 (1校)	0.01 (1校)
オフィスビル	34.2	12.8

表3 設定値

記号	値	単位
V_w	20(住宅都市) 150(業務都市)	t/日
V_s	3,750(住宅都市) 16,000(業務都市)	m³/日
T	7~9月(冷房) 11~4月(暖房)	年
H	2000	kcal/kg
α	15	%
β	80	%
η_l	0.9	
η_m	1	
η_e	15	%
η_c	860	kcal/kwh
E_w		kcal/年
E_{wh}		kcal/年
E_{we}		kcal/年
Δt	5	℃
C_p	0.998	kcal/kg/℃
γ	996	kg/m³
COP	4(暖房) 4.5(冷房)	
E_s		kcal/日
E_{sh}		kcal/年
I		kcal/m²/日
η_h	30	%
S		m²
E_h		kcal/年

用して冷房（夏季）及び暖房用（冬季）に利用する。利用可能エネルギー量，は以下の式で算定した。

$$E_s = V_s \times \Delta T \times C_p \times \gamma$$
$$E_{sh} = E_s \times \frac{COP}{COP + 1} \times T \quad (\text{冷房時})$$
$$E_{sh} = E_s \times \frac{COP}{COP - 1} \times T \quad (\text{暖房時})$$

E_s ：利用可能下水廃熱エネルギー， V_s ：下水流量，
 Δt ：利用可能温度差， C_p ：比熱， γ ：比重，
 E_{sh} ：利用可能冷暖房用熱エネルギー，
 COP ：成績係数， T ：利用期間

さらに，モデル都市内の建築物は断熱構造とし，その断熱効果は従来の建築物に比べて冷・暖房に必要なエネルギーの3割が削減できるとした。太陽電池と太陽熱温水器の設置面積及び導入量を表2に，設定値を表3に示す。

4. 2 モデル都市のエネルギー需要に関する結果

モデル都市のエネルギー需要に関する結果を図7，8に示す。まず，住宅都市について次のことがいえる。1) 冬季に消費される暖房用エネルギーが大きい。2) 太陽光発電，未利用エネルギーの利用，建築物の断熱構造が都市内で全て実行された場合，エネルギー需要は夏季で約40%，冬季で約30%の削減効果がある。一方，業務都市では，1) 冷房・暖房用に消費されるエネルギー量がともに大きい。2) 太陽光発電，未利用エネルギーの利用，建築物の断熱構造が都市内で全て実行された場合，夏季で約40%，冬季で約35%の削減効果がある。

4. 3 モデル都市の供給エネルギーに関する結果

図7によると，下水廃熱以外の未利用エネルギー供給量は毎月ほぼ安定している。また，太陽光発電からのエネルギー供給量も月による変動は小さい。

4. 4 モデル都市の電力需要に関する結果

図9に示すように両都市とも夏季の冷房用電力需要が大きい。図10には未利用エネルギー供給後の電力需要について示すが，住宅都市では，未利用エネルギーの利用と太陽光発電が行われた場合，低温熱源に利用される電力需要はなくなる。業務都市では，未利用エネルギーの利用と太陽光発電が行われた場合，低温

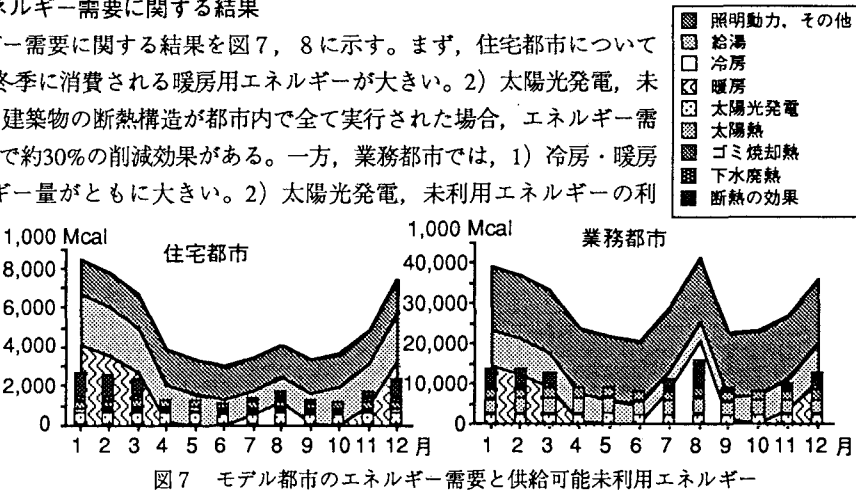


図7 モデル都市のエネルギー需要と供給可能未利用エネルギー

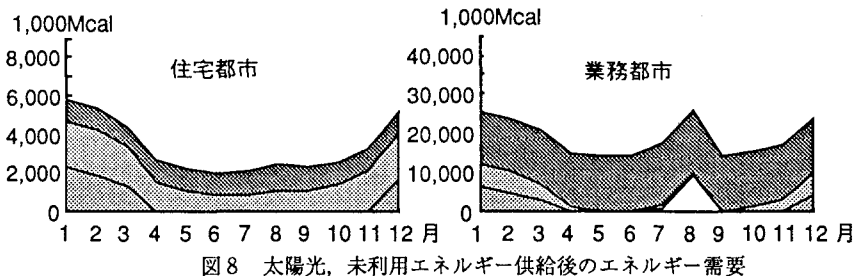


図8 太陽光，未利用エネルギー供給後のエネルギー需要

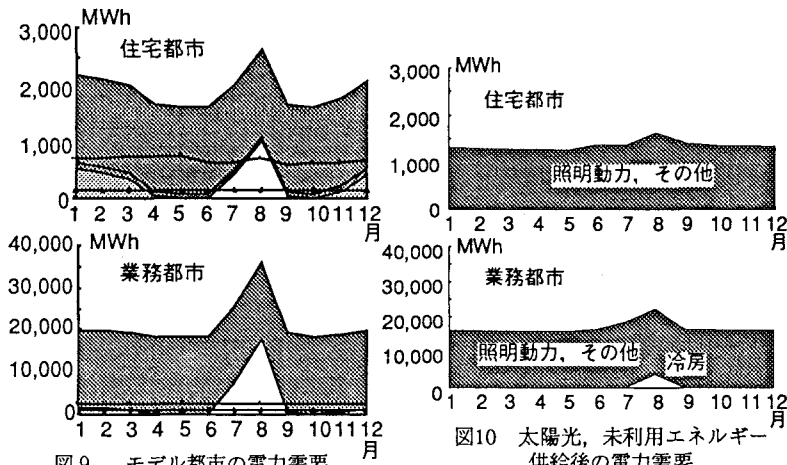


図9 モデル都市の電力需要

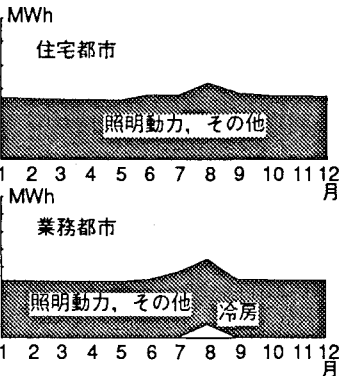


図10 太陽光，未利用エネルギー供給後の電力需要

熱源用の電力需要は冷房用がわずかにあるのみである。また、いずれの都市においても電力の季節間格差が是正される。

4. 5 太陽電池が地表面温度に与える影響

太陽電池は日射エネルギーの一部を電力エネルギーに変換するため、太陽電池を設置した構造物が吸収する日射量は減りその地表面温度は低くなる。業務都市内のオフィスビルの屋根の2/3に太陽電池を設置した場合としない場合について、ビルの地表面温度を一次元熱収支式³⁾で求めた。この時、太陽電池によって電力に変換されたエネルギーは地表面で反射したものとして考え、アルベド値を変化させた。季節は8月、太陽電池の発電効率³⁾は10%とし、表4に示す設置面積及び表5のビルについてのパラメータを用いた。太陽電池を設置した場合のアルベドは0.4とした。一次元熱収支式による計算結果を図11に示す。この図より、ビルの地表面温度は太陽電池を設置すると昼間で約2℃低くなる。また、オフィス街の太陽電池設置面積はオフィス街のビル敷地面積に対して4割(表1～3)を占めることから、業務都市のオフィスビルの屋根の2/3に太陽電池を設置した場合、オフィスビル街の地表面温度の最高温度は1℃程度低下すると予測される。

表4 敷地面積と設置面積

業務都市	太陽電池設置面積	敷地面積
オフィス街	34.2 ha	85.5 ha

表5 ビルのパラメータ値

アルベド	0.3
粗度長	300 cm
蒸発能	0
熱容量	0.67 cal/K/cm ³
熱拡散率	0.58 cm ² /min

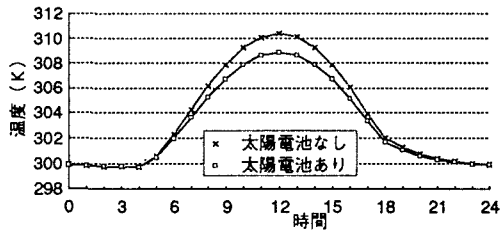


図11 ビルの地表面温度

5. まとめ

本研究では、最初に、都市への太陽光発電システム導入に際して、現在最も大きな障害となっている発電コストに焦点をしぼり、太陽光発電システムによる発電コストの評価を行った。次に、太陽光発電システムの早期普及のための対策を検討し数種の施策を想定した後、その施策が実施された場合の発電コストの推移と普及過程をロジスティックモデルを用いて評価した。続いて、モデル都市として住宅都市と業務都市を仮定し、各都市内のエネルギー需要及び電力需要を既存のエネルギー原単位を基に求めた。また、モデル都市に太陽光発電システムを導入した場合の発電可能電力量を求め、都市内に存在する未利用エネルギー(太陽熱、ゴミ焼却熱、下水廃熱)についてもその供給可能量を推定した。そして最後に、太陽電池を設置したビルの地表面温度を一次元熱収支モデルで求め、モデル都市内のオフィスビル街の地表面温度を考察した。得られた結果を要約すると以下のとおりになる。

- (1) 太陽光発電システムの発電コストは既存の電気料金より4倍以上高い。太陽電池が年間100MW、周辺機器が月間3,000台で生産された場合は、2005年頃には既存の電気料金と競合できるようになる。
- (2) 太陽光発電システムの新築住宅への設置や補助金の交付は発電コストを大きく下げる。新築住宅の10%に設置した場合では40%、50%に設置した場合で56%、100%に設置した場合で64%発電コストを低下させる。また、電気料金を5円上昇した場合、普及開始時期は5～7年早まる。
- (3) モデル都市内の太陽光発電、未利用エネルギーの利用、建築物の断熱構造化が全て実行された場合、既存システムからのエネルギー需要量は平均35%削減できる。特に低温熱源用の電力需要が減りエネルギーの有効利用が可能である。
- (4) 業務都市のオフィスビルの屋根の2/3に太陽電池を設置した場合、オフィスビル街の地表面温度は1℃程度低下する。

参考文献

1) 住環境計画研究所：昭和63年版家庭用エネルギー統計年報，1989
2) 日本エネルギー経済研究所：昭和63年度業務用エネルギー消費実態調査
3) 上野賢仁他：環境システム，Vol.20，pp 262～269，1992