

### S - 3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案 手法の確立に関する総合研究プロジェクト

#### 3．都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価

#### (4) 都市への燃料電池と太陽電池導入によるエネルギー削減効果

成蹊大学 工学部

山田興一

< 研究協力者 >

成蹊大学工学部

岩崎 博

信州大学繊維学部

高橋伸英

#### [ 要旨 ]

都市への太陽光発電システムの導入によるCO<sub>2</sub>排出削減効果を評価するために、中規模都市の代表として選定された宇都宮市および札幌市を対象として、住宅用系統連携太陽光発電システムの導入量を予測し、その時に得られる発電量およびCO<sub>2</sub>排出削減量を評価した。地域特性を表す条件として日射量、および建築特性として建物用途別の建築面積を考慮して太陽光発電量を計算した。両市ともに、太陽電池パネルの設置は南向き、アレイ角30°とし、戸建住宅には導入率100%で3.5kWのシステムを、共同住宅には導入率100%で14kWのシステムを、その他の建物用途には導入率70%、建築面積の50%に太陽電池パネルを設置すると仮定した。また、想定した太陽電池は多結晶シリコン型であり、モジュール効率17%（セル効率20%）、システム効率を81%と仮定した。将来技術を仮定した多結晶シリコン太陽電池製造プロセスのLCA評価により、CO<sub>2</sub>排出原単位は8.4 g-C/kwhと推定され、CO<sub>2</sub>排出削減効果の評価にはその値を使用した。

宇都宮市の場合、年間の太陽光発電量は電力消費量の約50%に達し、CO<sub>2</sub>排出削減量は電力消費由来のCO<sub>2</sub>排出の46%であり、宇都宮市の年間総CO<sub>2</sub>排出量を17%削減できる。また、建築面積全てに太陽電池を敷き詰めた場合は電力消費量の1.8倍を供給することが可能であると推定された。一方、札幌市の場合は、太陽光発電量は電力消費の約40%であり、CO<sub>2</sub>排出削減量は総排出量の11%であった。また、全ての建築面積に太陽電池を敷き詰めた場合、電力消費量の1.1倍が供給可能であったが、宇都宮市に比べて低い値となった。これは両市の建築特性の違いが大きく関わっており、札幌市の方が、共同住宅が多く、単位宅地面積当たりの電力消費量が多いためであると推測された。都市への太陽光発電システムの導入には都市の建築特性を考慮する必要がある、戸建住宅が多く、単位宅地面積当たりの電力消費量が少ない方が、太陽光発電システム導入によるCO<sub>2</sub>排出削減効果が大きいことが明らかになった。

#### [ キーワード ]

住宅用系統連携太陽光発電システム、宇都宮市、札幌市、建物用途別建築面積、CO<sub>2</sub>排出削減

#### 1．はじめに

我が国の温室効果ガスの排出量の約9割はエネルギー起源のCO<sub>2</sub>である。エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出を部門別で見ると、産業部門が最も多く、運輸部門、業務その他部門、そして家庭部門の順

となるが、2001年度の排出量を1990年度比で見た場合、産業部門が - 5.1%と削減されているのに対し、運輸部門が + 22.8%、業務その他部門が + 30.9%、家庭部門が + 19.4%の増加となっている<sup>1)</sup>。これら3部門の増加は、オフィスビルや商業施設等の床面積の増大や、家庭における家電製品の使用の増加、社用車・自家用車等の保有台数の増加等により引き起こされていると考えられ、早急に何らかの対策を施す必要がある。オフィス、商業施設あるいは家庭におけるエネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量を削減するための一つの方策は、CO<sub>2</sub>排出原単位の小さいエネルギー源への代替であり、太陽電池、燃料電池はその有力な候補となりうる。

太陽電池の導入は主に既存の発電施設の無い遠隔地から始まったが<sup>2)</sup>、太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換できる簡便性、住居の屋根や壁面への設置の容易さ、既存の発電設備とも連携できることから、都市部での導入も進んだ<sup>3)</sup>。特に日本は資源に乏しいため、太陽光発電にける期待は大きく、また最も重要な地球温暖化対策の一つと目され、30年前から研究開発が進められてきた。政府主導の助成制度の後押しを受けて、一般家庭への導入も急速に進み、現在では生産量、累積導入量でも世界第一位となっている<sup>1)</sup>。

太陽電池の都市への導入によるCO<sub>2</sub>削減効果については、Kraines, *et al.*<sup>4)</sup>が東京を対象として系統連携住宅用太陽光発電システムの導入を検討しており、利用可能な建物の屋根または屋上の全てを利用した場合、電力需要の12%が太陽光発電により賄われ、同じ割合のCO<sub>2</sub>を削減できるとしている。また、太陽電池モジュールを設置できる面積は土地利用形態、建物の種類によって大きく異なり、一戸建住宅の割合が高く、住宅規模が大きい地域では太陽光発電によるエネルギー供給量が大きく導入ポテンシャルが高い<sup>5)</sup>。さらに、住宅地域では太陽光発電システムを設置可能な面積に敷き詰めることにより、概ねその地域での電力需要を満たすことができるが、工業地区では40-70%程度に留まるという試算もある<sup>3)</sup>。太陽光発電システム導入によるCO<sub>2</sub>排出削減量を推定するためには、日射量などの気象条件のみならず建築特性を考慮した都市間差を考慮する必要がある。

## 2．研究目的

本研究では、分散電源としての屋根置き型の太陽光発電システムを都市部に導入することによるCO<sub>2</sub>排出削減効果を定量化することを目的とする。最終的には日本全土を対象とし、太陽光発電システム導入によるCO<sub>2</sub>排出削減量の推定を目的とするが、全ての都市を網羅し、解析対象とすることは現実的ではない。そこで、気象条件、人口規模、都市形態などを考慮して代表的な都市を選定し、まずは代表都市での解析を行い、日本全土へと展開する。今年度は、中規模都市の代表として選定された宇都宮市および札幌市を対象とし、太陽光発電システムの導入による発電ポテンシャル、およびCO<sub>2</sub>排出削減量の推定を行う。

## 3．研究方法

導入する太陽光発電システムは屋根置き型であり、系統に接続して余剰発電量は逆潮流により売電することを想定する。太陽光発電システムの設置可能面積としては建物の屋根、または屋上部分とし、壁面や空地などへの導入はここでは想定しない。設置可能面積を推定するために、宇都宮市および札幌市の建物用途別の建築面積を利用する。各用途別に太陽光発電システムの導入方法を仮定する。今回の計算では、宇都宮市と札幌市に対して同じ仮定を用いた。住宅には導入

率を100%とし、戸建住宅には発電容量3.5kWのシステムを、共同住宅には発電容量14kWのシステムを導入する。3.5kWの太陽電池モジュール面積は20.6m<sup>2</sup>であり、戸建住宅の建築面積の約20%を占める程度である。また、14kWのモジュール面積は82.4 m<sup>2</sup>であり、集合住宅の平均建築面積の約50%程度の規模である。住宅以外の用途建物には、導入率を一律70%とし、建築面積の50%に太陽電池を設置すると仮定した。

太陽電池パネルを南向き、傾斜角30°で設置すると想定し、NEDOのホームページ<sup>6)</sup>よりダウンロードした日射量データベースMETPV-2を用いて、宇都宮市および札幌市における年間斜面日射量を計算した。その結果、宇都宮市での年間斜面日射量は1,468 kWh/m<sup>2</sup>/y、札幌市では1,382 kWh/m<sup>2</sup>/yとなった。太陽電池の種類は多結晶シリコンを想定し、モジュール効率としては将来技術革新を見込んだ17%（セル効率20%）を仮定した。またインバータ効率を含めた全体のシステム効率は都市によらず81%と仮定した。また想定した将来技術における住宅用多結晶シリコン太陽光発電システムのCO<sub>2</sub>排出原単位はLCAにより8.4 g-C/kWh、電気事業連合の系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位は114g-C/kWhと推定されており<sup>7)</sup>、これらの値を用いてCO<sub>2</sub>排出削減量を計算した。

#### 4．結果・考察

宇都宮市と札幌市について推定された建物用途別の建築面積を図1に示す。また、その割合を図2に示す。総建築面積は宇都宮市が21km<sup>2</sup>、札幌市が45km<sup>2</sup>程度と推定され、札幌市の方が約2倍大きい。割合で見ると、住宅の割合は宇都宮市で67%、札幌市で69%と両市とも建築面積の中で最も大きい部分を占めるが、札幌市の方が共同住宅の割合が大きいことが分かる。宇都宮市では戸建ての住宅が最も割合が高いが、その次は軽工業施設となっている。

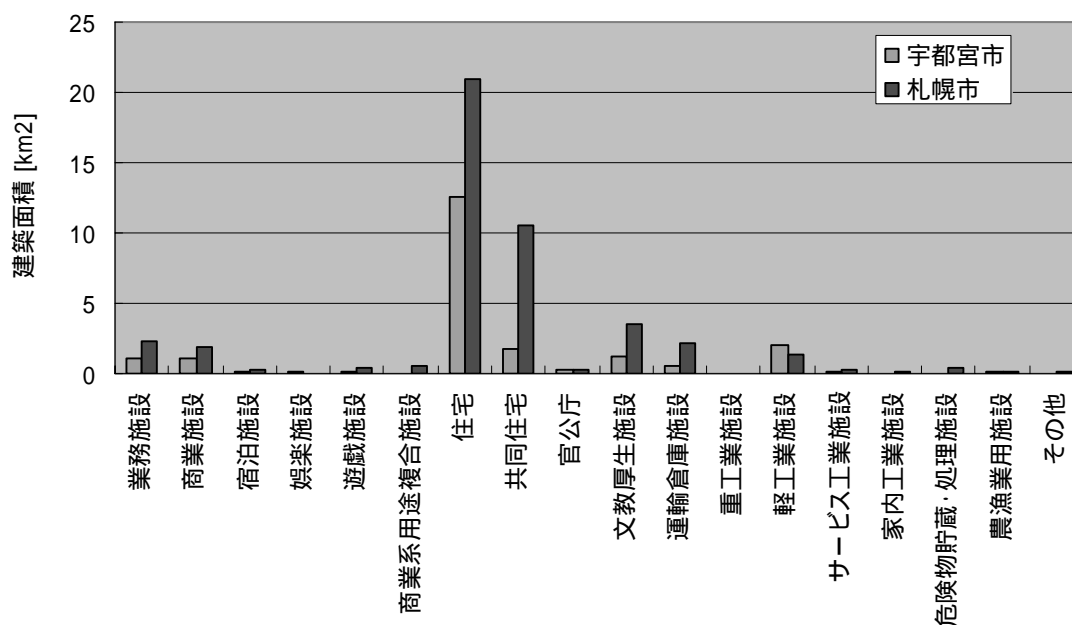


図1 宇都宮市と札幌市の用途別建築面積

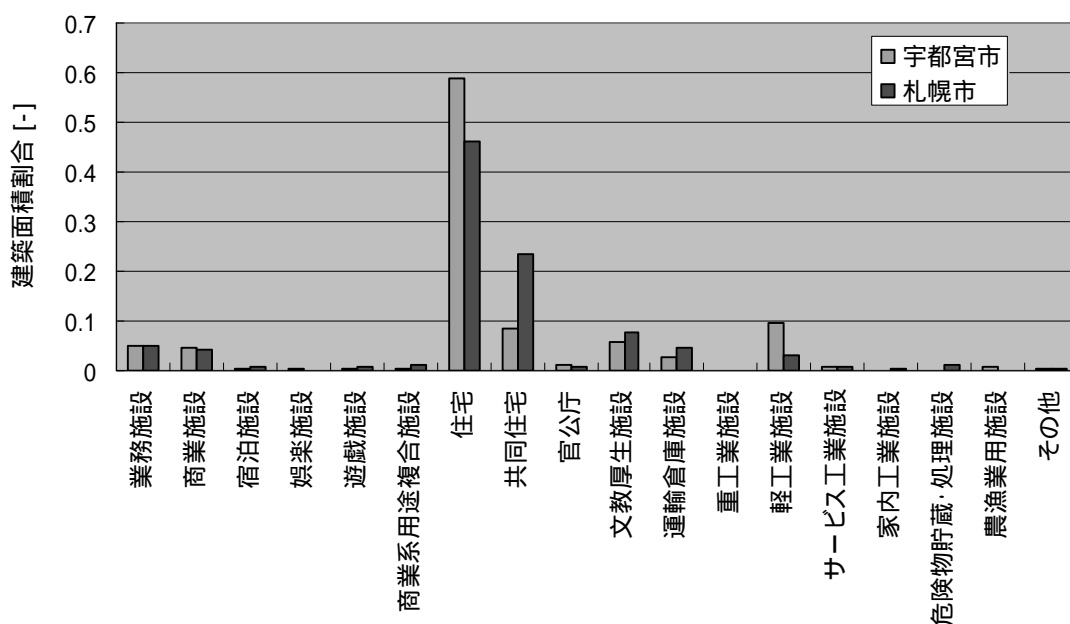


図2 宇都宮市と札幌市の用途別建築面積割合

前述の仮定を用いて推定した結果、各都市における建物用途別の太陽光発電量ポテンシャルは表1のようになった。両市とも発電量が最も多いと予想されるのは戸建住宅で、次いで共同住宅である。住宅をまとめると、宇都宮市では全体の59%、札幌市では全体の69%をしめる。住宅の建築面積割合は二つの都市の間で顕著な差はなかったが、発電量では10%の差を生じた。これは札幌市の方が全体にしめる共同住宅の建築面積の割合が大きく、本計算では、より容量が大きく、面積も広い太陽電池システムを共同住宅に設置すると想定しているためである。住宅について発電量が大きいの、宇都宮市では軽工業施設であり、札幌市では文教厚生施設であった。

全体の発電量の合計は、宇都宮市で120万MWh/y、札幌市で300万MWh/yとなった。宇都宮市の平成15年度の電灯・電力の総電力使用量は2,429,181 MWh/yであるので、今回の計算した建物への太陽光発電システムの導入により、電力消費の約50%を供給できることがわかる。また、太陽光発電導入により、約13万tの炭素排出が削減でき、これは宇都宮市の電力消費によるCO<sub>2</sub>排出の46%、宇都宮市全体の年間排出CO<sub>2</sub>の17%に相当する。また今回の計算では、住宅以外の建物への導入率を70%と

表1 建物用途別の太陽光発電ポテンシャル

	総発電量[MWh/year]	
	宇都宮	札幌
戸建住宅	537,275	1,171,593
共同住宅	180,551	930,270
文教厚生施設	89,046	231,007
業務施設	78,467	154,065
運輸倉庫施設	40,975	143,358
商業施設	72,372	128,044
軽工業施設	142,673	89,152
商業系用途複合施設	3,513	33,999
危険物貯蔵・処理施設	2,771	30,419
遊戯施設	8,488	25,707
宿泊施設	5,800	20,529
官公庁	19,303	20,238
サービス工業施設	11,629	17,597
その他	5,172	11,285
家内工業施設	1,862	9,726
農漁業用施設	9,891	4,664
娯楽施設	6,785	3,536
重工業施設	330	507
合計	1,216,902	3,025,696

し、建築面積の約50%に太陽電池を設置すると仮定しているが、最大ポテンシャルとして、導入率を100%、住宅も含め全ての建築面積を太陽電池で覆うと仮定すれば、合計で電力消費の約1.8倍の発電が可能であると計算され、系統接続の安定性の制限がなければ、全ての電力消費を太陽電池で賄うことも可能である。一方、札幌市の平成15年度の総電力使用量は7,597,602 MWh/yであり、今回計算された太陽光発電ポテンシャルは電力使用量の約40%であった。宇都宮市の時と同様、全ての建築面積に太陽電池を敷き詰めたと仮定すると、その発電量は電力消費の1.1倍となった。札幌市の場合は、最初の仮定でのCO<sub>2</sub>排出削減量は、札幌市の二酸化炭素排出量290万t-Cの約11%と推定された。

宇都宮市と札幌市では、それぞれの市の統計資料により公表されている宅地面積に対して、今回設置面積の推定に用いた建築面積の割合は両者とも約35%と等しい。しかし、宅地面積当たりの電力消費量は宇都宮市、札幌市でそれぞれ39、58 kWh/(m<sup>2</sup> y)と札幌市の方が約1.5倍大きい。つまり単位面積当たりの電力消費量が大きい。そのため、太陽電池パネルを同じ条件で設置しても、札幌市の方が電力消費に対する供給量の割合が小さくなった。これは札幌市の方が共同住宅の割合が大きいことから予想される。他の都市の例として、東京都、広島市、那覇市における、宅地面積当たりの年間電力消費量はそれぞれ142<sup>10)</sup>、80<sup>11)</sup>、101 kWh/(m<sup>2</sup> y)<sup>12)</sup>となり、どれも宇都宮市および札幌市の値よりも大きい。特に東京都は面積当たりの電力消費量が最も高く、全ての建物の屋根および屋上を太陽光発電に利用しても電力需要の約12%しか供給できないという報告<sup>4)</sup>を裏づけている。広島市や那覇市の詳細については不明であるが、単位面積当たりの電力消費量の値から、宇都宮市、札幌市よりも太陽光発電による供給割合およびCO<sub>2</sub>削減割合は小さくなると予想される。今回宇都宮市と札幌市の二つの都市において、建築特性を考慮して太陽光発電ポテンシャルを比較した結果、共同住宅・集合住宅が多いほど、電力消費に対する供給割合は小さくなる傾向があることが示唆された。このことより、戸建住宅の多い地域では太陽光発電はCO<sub>2</sub>排出を大きく削減するための代替エネルギー源として有効であるが、共同住宅・集合住宅の多い、より都市化した地域では太陽光発電の導入によるCO<sub>2</sub>排出削減効果は小さい。従って後者のような地域では電力消費に伴うCO<sub>2</sub>排出を削減するための異なる対策を取る必要がある。

また、今回の計算では建築面積を屋根面積とみなし、建物の屋根、屋上などへの太陽電池パネルの設置を想定したが、壁面なども使えばさらに発電量を増加させることはできる。さらに、建物に限らず、休耕地、空き地、駐車場など、その他の土地にも導入することができれば太陽光発電量を増加させることは可能である。それらの土地への設置に際しては、CO<sub>2</sub>排出原単位を悪化させるような追加的な周辺装置や材料が掛からないよう留意する必要がある。しかし、地上に設置する場合を想定しても、架台の下にコンクリート製の基礎を置くことにより0.88 g-C/kWh、建設工事については2.6 g-C/kWhのCO<sub>2</sub>排出原単位への跳ね返りがあると推定されており<sup>7)</sup>、それらを合わせると地上置きの場合の系統連携太陽光発電システムのCO<sub>2</sub>排出原単位は12 g-C/kWhと屋根置きに比べ約1.5倍大きくなるが、系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位114 g-C/kWhからの削減幅が4%程度小さくなるに過ぎず、太陽光発電システム導入によるCO<sub>2</sub>排出削減効果は地上置きの場合でも屋根置きの場合とほぼ等しいと言える。

今回の計算では発電システムのシステム効率を81%と仮定した。Ohtani, *et al.* は日本全国に導入された100基の住宅用系統連携太陽光発電システムについて長期間の測定を行い、年間通してのシステム効率が平均で72%であったと報告している<sup>13)</sup>。システム効率は、モジュールの温度上昇や

汚れなどによる効率低下、日射の不完全な利用、およびインバータ損失などを考慮したシステム効率であり、地域によって異なることが予想される。今回は地域特性としては、日射量および建築特性を考慮したが、今後はその他システム効率に影響を及ぼす気温などの気象条件を考慮してシステム効率を計算し、対象とする都市の地域特性をさらに考慮した太陽光発電ポテンシャルの推定を行う。

## 5．本研究により得られた成果

住宅用系統連携太陽光発電システムを宇都宮市と札幌市に導入した場合の発電量およびCO<sub>2</sub>排出削減効果が明らかになった。電力消費に対する太陽光発電による供給割合、およびCO<sub>2</sub>排出削減割合は、都市の建築特性に大きく影響を受ける。戸建住宅のように建築面積当たりの電力消費量が小さい建築用途が多くを占める地域では、太陽光発電システム導入による電力供給量が大きく、電力消費を100%賄うことも可能である。またCO<sub>2</sub>排出削減効果も大きく、そのような地域では太陽光発電システムの導入は有力なCO<sub>2</sub>排出削減手段となりうる。

## 6．引用文献

- 1) 経済産業省, エネルギー白書2004年版, <http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/index.html> (2004)
- 2) M. A. Green, Photovoltaic technology overview, *Energy Policy*, **28**, 989-998 (2000)
- 3) K. Kurokawa, PV systems in urban environment, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **67**, 469-479 (2001)
- 4) S. B. Kraines, D. R. Wallace, Y. Iwafune, Y. Yoshida, T. Aramaki, K. Kato, K. Hanaki, H. Ishitani, T. Matsuo, H. Takahashi, K. Yamada, K. Yamaji, Y. Yanagisawa and H. Komiyama, An integrated Computational Infrastructure for a Virtual Tokyo, *Journal of Industrial Ecology*, **5**, 35-54 (2001)
- 5) 佐賀武義, 三浦修一, 住宅における太陽エネルギー導入のための地域別可能性評価に関する研究: 太陽 / 風力エネルギー講演論文集, 125-128 (2002)
- 6) NEDOホームページ, <http://www.nedo.go.jp/database/>
- 7) 山田興一, 小宮山宏著, 太陽光発電工学-太陽電池の基礎からシステム評価まで-, 日経BP社, (2002)
- 8) 宇都宮市データバンク, <http://www2.city.utsunomiya.tochigi.jp/DataBank/index.htm>
- 9) さっぽろ統計情報, <http://www.city.sapporo.jp/toukei/>
- 10) 東京都の統計, <http://www.toukei.metro.tokyo.jp/index.htm>
- 11) 広島市の統計, <http://www.city.hiroshima.jp/kikaku/joho/toukei/index.htm>
- 12) 那覇市統計情報, <http://www.city.naha.okinawa.jp/kouho/toukei/toukei.htm>
- 13) K. Otani, K. Kato, T. Takashima, T. Yamaguchi and K. Sakuta, Field Experience with Large-scale Implementation of Domestic PV Systems and with Large PV Systems on Buildings in Japan, *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, **12**, 449-459 (2004)

## 7．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 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 ) >

なし

<学術誌 ( 査読なし ) >

なし

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

### ( 2 ) 口頭発表

なし

### ( 3 ) 出願特許

なし

### ( 4 ) 受賞等

なし

### ( 5 ) 一般への公表・報道等

なし

## 9．成果の政策的な寄与・貢献について

地域特性、都市の建築特性を考慮して太陽光発電ポテンシャルを評価することにより、太陽光発電システムを導入する際に有利な条件を有する地域、都市が明らかになり、太陽光発電システム導入の政策計画立案に貢献する。