

## 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

#### (1) 都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価

東京大学

大学院工学系研究科都市工学専攻 花木啓祐

〈研究協力者〉 東京大学

大学院工学系研究科都市工学専攻 石井 暁

平成16～20年度合計予算額 39,499千円

(うち、平成20年度予算額 5,760千円)

上記の合計予算額には、間接経費 9,116千円を含む

[要旨] 都市に対するさまざまな二酸化炭素排出削減策の導入の効果は、気候条件、都市規模、人口密度、都市内の活動度の分布など、それぞれの都市の持つ特性によって異なる。従って、その効果を評価し、将来の予測を行うに当たっては都市側の条件をその評価に反映させていく必要がある。本研究では、まず評価対象とする対策によって、面的な情報、都市全体の統計情報など、効果の解析に必要な情報が異なることを明らかにした。

次いで、詳細な面的情報をこれらの対策評価に用いるために、利用可能な地理情報システムを詳細に検討した。広く用いられる従来の国土数値情報では、地域冷暖房の解析など面的な高い空間解像度を必要とする解析には十分な情報を得ることができない。そこで、都市計画基礎調査建物現況調査、電話帳データベース、電子市街地地図データなど、利用可能な情報を有効に組み合わせることによって都市内の活動度の面的な分布を把握する手法を新たに確立し、札幌市、宇都宮市、那覇市に対して適用し、都市内の二酸化炭素排出量の分布を100メートルメッシュ単位で評価した。このようにして確立した方法は本S-3-3の他の研究において活用した。

宇都宮市に対して、都市をコンパクト化したときの建物由来の二酸化炭素排出削減の効果をもとに2050年の人口シナリオを想定して推定した。その結果、都市のコンパクト化が二酸化炭素排出の削減に有効であることを定量的に示した。

また、人口減少によって生じる余剰地を有効に活用して、風力発電、太陽光発電、バイオマスの三者の再生可能エネルギーを生産するポテンシャルを6つの中規模の都市に対して推定した。最後に、異なる規模の都市に対する二酸化炭素排出削減策導入の戦略をまとめた。

[キーワード] 二酸化炭素、地理情報システム、コンパクト都市、都市構造、将来予測

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub>をはじめとした温室効果ガスの排出が小さい「低炭素社会」を形成することが求められている。そのような低炭素社会を実現させる場が低炭素都市である。低炭素都市を形成していくためには、コンパクトシティの形成のような都市の計画面、再生可能エネルギーの都市への導入、省エネルギーを通じた排出削減対策を有機的に組み合わせていく必要があるが、実際の都市においてはまた制約条件もある。

都市に対する低炭素化対策の導入の特徴を考えるといくつかの点がある。第一は、都市の建物および基盤施設の建設、さらに人間の居住地の変更は50年以上を要するゆっくりした変化であるという点である。都市構造の変更の対策を現在から取り始めても、2050年時点ではまだその変化の途上である。第二は、都市内の面的な建物の分布が対策を立案し、実現する際に重要であるという点であり、これは特に地域冷暖房の導入などで顕著である。第三は、規制と誘導の両者が必要であるという点である。そして最後に、都市の活力と魅力を生かしつつ低炭素化の対策を導入することが必須であり、活力をそぐ形での低炭素化は持続可能ではない、という点が挙げられる。

このような条件の中で日本全国の諸都市における中長期的な二酸化炭素排出削減策の評価には、導入可能性のある将来技術の洗い出しをおこない、正確な現状把握に基づく将来のそれぞれの都市の形態を注意深く検討する必要がある。都市における二酸化炭素の排出削減策としての技術および政策の導入は、都市の規模や属する気候区分などにより異なるため、幅広いオプションの可能性を考慮する必要があると同時に、空間分布を考慮したきめの細かい検討が必要となる場合もある。しかしながらそのようなきめの細かい分析をすべての都市、すべての対策に対して行うことは、解析上の必要性、データの入手可能性を考えると必ずしも必要ではない。検討対象とする対策に応じて解析方法を変化させ、その上でそれを全国の都市に対して適用していくという方法の確立が必要となる。

これらの解析を行うためには都市の活動の解析と、気候条件などの外的要因を考慮した解析方法を開発し、それらを用いて二酸化炭素排出の見通しと対策導入による削減効果を明らかにする必要がある。

## 2. 研究目的

本研究は、「S-3-3. 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」の研究全体に対して解析の方針を与え、また本研究で得られた都市内部の活動度分布などの情報を他の分担者に提供すると共に、他の分担者によってなされた研究の成果を用いた解析を行うことを目的とする。

具体的には、都市の詳細な活動を解析する緻密性と日本全体を解析するという網羅性の両者のバランスのとれた解析を行うため、対象とする対策や部門毎に異なる解析方法の基本方針を明らかにする。その際、日本全国の気候区分や都市規模を考慮しながら詳細に検討する対象として5都市を選定し、とりわけ札幌市、宇都宮市、那覇市を具体的に取り上げ、さまざまな種類の地理情報システムを組み合わせることによって、解析の方法を提示し、またこれらの都市に対する解析を行うと共に、詳細な情報を他の分担者に提供することを目標とした。

次いで、実際の都市が将来コンパクト化したときの効果について、建物部門の二酸化炭素排出

削減、コンパクト化で生み出される余剰地を活用した再生可能エネルギーの生産の効果を実際の都市の情報に基づいて評価し、都市構造が低炭素化にもたらす効果を解析する。また、都市の規模毎の低炭素化のための対策導入の戦略を提示する。

### 3. 研究方法

詳細の研究方法は「4. 結果・考察」で述べることとし、ここでは研究方法の概略のみを記述する。

#### (1) 解析方法の基本方針の確立

本研究において対象とするべき対策をスクリーニングし、それぞれの対策の効果の解析に必要な都市のデータについて、面的情報が必要か否か、どのような統計情報が可能かを検討することによって解析の基本方針を確立した。それと合わせて、詳細な検討を行う対象都市を抽出し、それらの都市についての利用可能な情報を個別に得ることによって解析の手法を決定した。

#### (2) 都市内部における活動度分布解析

詳細な検討が必要な解析対象を想定し、モデル都市に対して都市内の活動度分布に関するさまざまな情報を有機的に組み合わせることによって解析する手法を提案し、実際にデータを用いて解析を行った。それによって、対象とした3つの都市に対して二酸化炭素排出の分布を求めた。

#### (3) 都市構造変化がもたらす低炭素効果の解析

モデル都市である宇都宮市においてコンパクトな居住がなされたときの二酸化炭素の排出量の変化を、S-3のシナリオチームによって提示された将来の人口シナリオに基づいて解析した。また、6つの中規模都市に対して、都市の人口減少に伴う空地の活用形態を想定して再生可能エネルギー生産量を推定した。

### 4. 結果・考察

#### (1) 解析方法の基本方針の確立

##### 1) 対象対策とその特徴の把握

都市を構成する主要要素である民生業務（建築物）、交通（交通、自動車単体技術）、エネルギー（燃料電池、太陽電池）の各部門において、専門家に2050年における状況予測と導入可能性のある革新的技術についてヒアリングをおこない、都市との関係を考察しながらとりまとめをおこなった。その結果を表1に示す。

都市からの二酸化炭素の主要排出源である民生建物系への対策として、地域冷暖房や太陽光発電等の技術は、技術的およびコストの両面における進展が早く、将来的に重要なオプションのひとつとなることが期待されている。しかし、これらの導入可能性やその効果を都市レベルでより正確に推定するためには、都市内部の現在および将来のエネルギー需要の空間分布を詳しく把握することが重要である。既存研究で多く用いられている検討方法では、一般的に入手が容易である3次メッシュ（1kmx1km）等を利用したものが多く、流域圏や都道府県レベルの推定には適しているものの、都市のレベルでの適正技術導入評価には適切ではない面があり、解析手法について本研究で詳細な検討を行った。

表1 都市の各部門における将来の傾向、検討革新的技術および政策

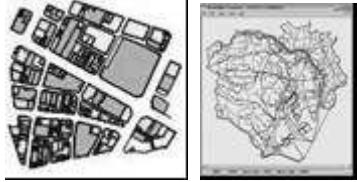
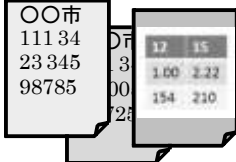
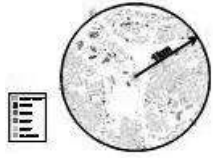

対象部門	将来の傾向および検討革新的技術・政策	都市との関係
都市全体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在より都市規模による人口分布や発展傾向等に明確な差</li> <li>・モノ循環の地産地消化</li> <li>・情報流通のグローバル化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・都市規模により導入される技術が大きく異なる</li> <li>・都市の経済活動にも依存</li> </ul>
民生業務部門	<ul style="list-style-type: none"> <li>・病院の増加や学校の減少</li> <li>・断熱・空調・照明・給湯の技術革新</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人口減少と社会構造の変化により建物用途別の床面積が大幅に変化する</li> <li>・地域冷暖房導入は都市内の活動度分布に依存</li> </ul>
交通・自動車単体部門	<ul style="list-style-type: none"> <li>・通勤移動の減少や余暇移動の増加</li> <li>・最適燃料自動車の導入（燃料電池車、軽油代替DMEなど）</li> <li>・車に対する人の嗜好性の変化</li> <li>・IT化（ホームオフィス化）</li> <li>・居住地事務所等誘導政策</li> <li>・カーボンニュートラル燃料製造技術革新</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・都市のコンパクト化が生じれば移動手段が変化</li> <li>・移動目的のシフト</li> </ul>
エネルギー部門	<ul style="list-style-type: none"> <li>・家庭用コージェネレーションシステム導入</li> <li>・燃料電池の系統電力化</li> <li>・太陽電池の普及</li> <li>・SOFC・薄膜多結晶シリコン太陽電池導入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分散型エネルギーの導入は都市の構造に依存</li> <li>・革新的技術導入の幅が大きい</li> </ul>

対象とする地域と対策に対応して解析のスケールも異なる。とりわけ、一つ一つの建物や土地利用の情報である地理情報システム(GIS)を用いた解析は、都市の内部でのそれらの建物や土地利用の分布が支配的な因子となる場合に有効である。たとえば、熱需要が異なる建物群を対象にして行われる地域冷暖房は、建物間の距離と熱需要の量によってCO<sub>2</sub>削減効果が異なる。また都市内で廃棄物を収集しバイオマスとして利用するプロセスの場合も収集距離が重要になるために都市内の住宅やオフィスの分布が必要となる。

一方、個別の建物への対策のように、それぞれの効果を都市全体、あるいは県全体として合算するような場合、分布を伴うような情報は不要であり、またかえって解析を難しくする。行政単位毎の統計情報の方がむしろ有効である。太陽電池の導入の場合には一つ一つの建物の形状に合わせた解析も可能であるが、都市全体での導入効果を評価する場合には分布に関する情報は必ずしも必要ではない。表2に、緻密な面的な情報が必要な場合と、網羅的な数値統計情報が有用な場合の典型例を示す。都市活動を解析・評価し低炭素化策を提案する場合に、都市内の建物などの分布をも含むいわばマイクロな解析と、都市全体としての建物総床面積などのいわばマクロな解析を使い分ける必要がある。

前者のように地理情報システムによる解析を行う場合には、日本全国を網羅する場合に工夫が必要となる。第一の方法は地理情報システムの中でもやや粗い国土数値情報によって全国を同時に解析する方法である。第二の方法は個別の建物情報のように細かい解析を数個の都市に対して行い、その結果を基に全国の状況を推定する方法である。

表2. 面的情報と数値統計情報の使い分け

	面的情報（建物・土地利用の分布）	数値統計情報（建物・土地利用の量）
基礎情報	地理情報システム(GIS)に基づく解析 	建物用途と建物数・床面積の数値情報 
解析の規模	街区単位	市町村単位・県単位
解析例	ごみ焼却熱利用地域冷暖房の効果  都市内廃棄物のバイオマス利用	建物のエネルギー性能改善、太陽電池 

## 2) モデル都市の設定

上記で述べた詳細な分析を行う場合、国内のすべての都市に対して解析を行うことが困難な場合が多い。そこで、地理的な条件、規模などが異なるモデル都市を選定することとした。

モデル都市の選択に当たっては各部門の二酸化炭素に都市側の条件として与える影響を考え、最も重要な要件として人口規模と、冷暖房に支配的影響を与える気候条件を考えた。その結果、札幌市、宇都宮市、東京都区部、広島市、那覇市を対象にすることとした（表3）。この中で、宇都宮市や那覇市のような中規模・小規模の都市は既往のこのような解析で取り上げられることは少なかった。しかし、日本全体の動向を考えるに当たっては、多数存在するこのような規模の都市に着目することが不可欠だと考え、選択した。これらの都市では入手できるデータが限定されるという問題があるが、その中で札幌、宇都宮、那覇を中心に更に踏み込んで具体的な研究を行った。

表3 解析対象とする5都市の規模と気候条件

都市名	面積 km <sup>2</sup>	人口 万人	日照時間 年間計	暖房デグ リーデー 度・日	冷房デグ リーデー 度・日
札幌市	1121	182.3	1774.8	2574	
宇都宮市	312	44.3	1938	1416	47
東京都区部	617	802.6	1847.2	855	148
広島市	742	111.4	2004.9	1033	150
那覇市	49	12.6	1820.9		444

## (2) 都市内部における活動度分布解析

ここでは、都市内部の建物および建物内部の床面積の用途別比率について、できるかぎり詳細な把握を行った。都市には大小様々な規模の建物が存在し、それらすべてについて使用用途およ

び床面積等の属性情報を与えつつ空間分析をおこなうのは、小中規模の都市ならともかく、東京や札幌などの大都市については非常に困難であると考えられる。したがって、将来の都市形態や都市発展を推測する手がかりとなることも期待して、都市計画用途地域の分類に着目し、検討する方法を考案した。具体的には、用途地域毎に建物内の複合用途を考慮した床面積比率を計算し、それを他の同じ用途地域にも適用するという方法である。以下に建物用途の推定手順と用途地域を用いた分析について得られた知見をまとめる。

#### 1) 宇都宮市の空間データベースの検討および推定法

都市計画基礎調査建物現況調査（以下、建物現況調査とする）、電話帳データおよび市街地地図を用い、建物内の用途別床面積を宇都宮市について推定した。表4に各データベースにおける長所と短所を示す。

表4 各データベースの長所および短所

データ	長所	短所
建物現況調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最も多くの建物内用途情報が得られる</li> <li>・延床面積が与えられている場合が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・用途分類など調査内容が統一されていない（自治体により異なる）</li> <li>・用途分類が分析に不適</li> <li>・アップデートが不規則（基本的に5年に一度）</li> <li>・全建物が網羅されていないことが多い（例：市街化地域のみ）</li> </ul>
電話帳データ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・個別名義が与えられている</li> <li>・最も細かな用途分類</li> <li>・単一建物内の複合用途を推定可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電話番号と座標による住所のマッチングが不完全であり、正確な住所を特定できない場合が多い</li> </ul>
市街地地図データ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最新データが手に入る</li> <li>・所有者の名義がいくらか入っている</li> <li>・民間データであるため建物情報により正確</li> <li>・市街化調整区域もカバーしている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・用途分類が不十分（3分類のみ）</li> <li>・建物階数データはほとんどない</li> <li>・延床面積はなし（建築面積のみ）</li> </ul>

各データベースは整備状況や仕様が年度や地域により大きく異なり、それらをうまく組み合わせる必要がある。以下に詳細な推定手順を示す。本推定では、空間分析にGIS地理情報ソフトウェア（SIS MapModeller、インフォマティックス社）を用いた。

##### Step1：電話帳データベースによる推定

電話帳データベースは登録されている電話番号のほかに、掲載名称、掲載名称補足情報、住所、緯度経度、業種コード等が収録されている。今回、産業中分類に分けられた業種コードを「業務施設」、「商業施設」、「宿泊施設」、「飲食店」、「病院・医院」、「公共施設・学校」、「屋外施設」、「工場」、「住宅」、「その他（倉庫・駐車場など）」の10用途に整理した。この分類は今回の分析のため仮に設定したもので、必要に応じて容易に変更が可能である。電話帳データベースにおける用途分類上の問題点として、業種コードの割り振られていない情報が多数存在するということが挙げられる（表5）。

表5 宇都宮市電話帳データの属性情報の有無

	掲載名称あり				
	業種コードあり		業種コードなし		
	各業種コード	コード：その他	掲載名補足情報あり	掲載名補足情報なし	
			(株) (有) を含む	名称のみ	
情報数	31703	816	4106	267	82063
割合 (%)	26.7%	0.6%	3.5%	0.2%	69.0%

自動的に用途に分類できたのは全体118,955件の26.7%であった。これは、電話帳データの業種コードに個人（住宅）が含まれないためだと考えられる。残りの73.3%の用途は基本的に手作業で推定する必要があるが、業種コード「その他」に分類されていたデータ、掲載名補足情報があるもの、掲載名に「(株)」や「(有)」があるデータを別途抽出して（全体の4.3%）、これらについてのみ手作業で業種を与えた。作業後に残った82,063件（全体の69.0%）のデータは、ほぼすべてが個人名（家主の氏名）であるため、全て個人住宅と考えて差し支えないと思われた。これにより電話帳に記載された情報についてはほぼ100%用途が割り振られた。

#### Step 2：地図情報との重ね合わせおよび現況図等を用いた補完作業

Step 1で作成した電話帳データを市街地地図に重ね合わせて、宇都宮の建物内に用途を割り付けた。ここでは複数の用途が同じ建物上に重ね合わさることにより、建物内の複合用途を推定できるとした。ただし、電話帳には登録していない個人等が存在すること、何らかの理由でデータが欠損していることが考えられるため。次の方法によって建物用途推定の精度の向上を試みた。

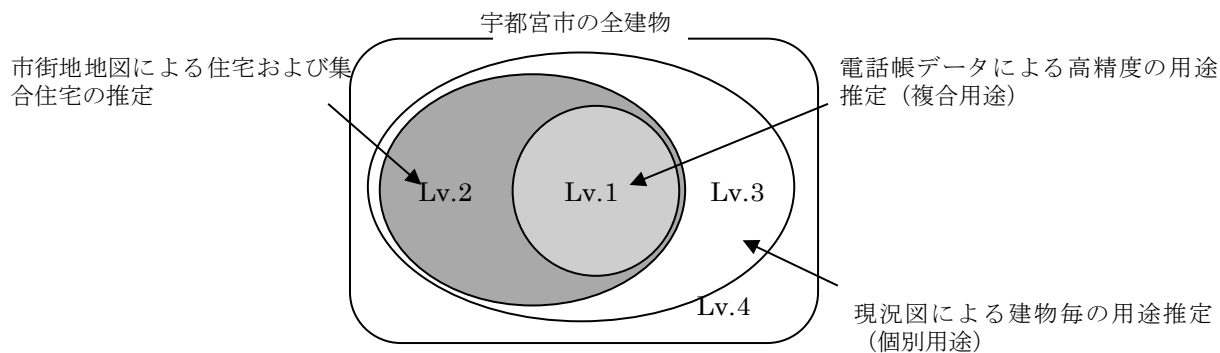


図1 建物用途推定精度の概念図

用途地域別における建物の用途を推定する際の推定精度を以下の4段階とすると、

- Lv.1 建物内の複合用途が電話帳記載情報により推定されるもの。
- Lv.2 電話帳記載情報に記載されない、個人家屋および集合住宅を市街地地図の属性情報により補完したもの。
- Lv.3 都市計画基礎調査建物用途現況図の情報を用いて、Lv.1およびLv.2で用途推定ができなかった建物についてその用途を補完したもの。Lv.1およびLv.2で可能な建物内の複合用途は

推定できないが、建物全体としてひとつの用途が割り当てられる。

Lv. 4 残り。電話帳に記載がなく、市街地図情報および都市計画基礎調査建物用途現況図においても、用途情報が割り当てられていないものが考えられる。図1に建物用途推定精度の概念図を示す。

## 2) 宇都宮市の推定結果

宇都宮市の各用途地域における推定結果を表6に示す。本来ならば、各建物の階数データから建物延床面積を計算し比較するのが理想であるが、すべての建物について正確な階数データが存在しないため（特にLv. 4の建物）、オリジナルである土地面積で表現している。表5より、Lv. 1およびLv. 2の推定では、第二種中高層住居専用地域B地区（74.5%）を除いて、9地域で80%以上、4地域で90%以上の土地面積ベースで建物内部複合用途を推定できていることがわかる。また、Lv. 3の精度での推定が可能であれば、この比率は今回検討した14地域すべてにおいて91.6%～97.0%に向上することがわかる。実際、今回対象としている宇都宮市では、現況図が電子データで整備されているためLv. 3の精度で建物用途を推定することが可能である。

表6 各用途地域における建物用途推定精度別土地面積（m<sup>2</sup>）およびその割合（%）<sup>1,2</sup>

用途地域	総土地面積	用途推定土地面積 Lv. 1&Lv. 2	用途推定可能 土地面積 <sup>3</sup> Lv. 3	用途推定不可能 土地面積 Lv. 4
商業用地	153596.1	134895.0 (87.8%)	9935.3 (6.5%)	5609.3 (3.7%)
近隣商業地	91667.8	81144.9 (89.0%)	7870.6 (9.0%)	2652.2 (3.0%)
第一種住居専用地域A	97187.0	85237.3 (87.7%)	8541.5 (8.8%)	3408.2 (3.5%)
第一種住居専用地域B	268386.7	222992.9 (83.1%)	34903.6 (13.0%)	10490.1 (3.9%)
第一種低層住居専用地域A	438070.8	402650.1 (91.9%)	14681.1 (3.4%)	20739.7 (4.7%)
第一種低層住居専用地域B	111643.6	99680.1 (89.3%)	4154.9 (3.7%)	7807.5 (7.0%)
第一種中高層住居専用地域A	152059.7	139764.9 (91.9%)	7085.1 (4.7%)	5209.7 (3.4%)
第一種中高層住居専用地域B	454120.9	409045.1 (90.1%)	27067.9 (6.0%)	18007.9 (4.0%)
第二種住居専用地域A	231302.1	193026.6 (83.5%)	25560.0 (11.1%)	12715.5 (5.5%)
第二種住居専用地域B	153325.2	125709.1 (82.0%)	18914.4 (12.3%)	8701.7 (5.7%)
第二種中高層住居専用地域A	83915.6	78379.3 (93.4%)	2801.1 (3.3%)	2735.2 (3.3%)
第二種中高層住居専用地域B	399441.8	297625.0 (74.5%)	78253.0 (19.6%)	23563.9 (5.9%)
工業地域	105008.2	93957.6 (89.5%)	3788 (3.6%)	7262.6 (6.9%)
準工業地域	153089.1	128923.8 (84.2%)	11336.8 (7.4%)	12828.5 (8.4%)

Note:

- 1: 各列は推定精度レベル（Lv. 1&Lv. 2, Lv. 3, Lv. 4）ごとに区分されている。
- 2: 建物延床面積（土地面積×建物階数データ）で推定するのが理想であるが、階数データが無い建物があり、今回は元データをより反映させるため土地面積を用いた。
- 3: 用途推定が都市計画基礎調査建物用途現況図より可能な割合

## 3) 対象3都市の活動分布分析への適用

上の方法を用いて、札幌市、宇都宮市、那覇市における建物民生由来のエネルギー需要およびその二酸化炭素排出量の空間分布を計算した。札幌市、宇都宮市、那覇市における基本情報、および研究に使用したデータベースの更新状況を表7に示す。総人口および総世帯数は平成17年度国勢



調査の速報値または、平成17年度10月現在の値を示した

特に建物現況調査の用途分類は各自治体で独自の分類がなされているが、後述するエネルギー需要および二酸化炭素排出量原単位を計算する際に用いる用途に再集計した。

#### 規模別用途別床面積におけるエネルギー需要原単位

規模別用途別のエネルギー需要は近本ら<sup>1)</sup>のデータベースを用いて算出した。このツールにより、各種の空調設備を導入した場合の建物用途および規模別における床面積当たりの年間エネルギー需要を求めることができる。

表7 各都市における基本情報および使用されたデータベースの更新年月日

	札幌市	宇都宮市	那覇市
<b>基本情報</b>			
総人口（2005年国勢調査より）	1,880,875	453,210	312,308
総世帯数（2005年国勢調査より）	837,371	182,020	122,464
建物総棟数（市街地地図より）	520,442	208,127	62,741
面積（km <sup>2</sup> ）	1121.12	312.16	38.99
気候区分 <sup>*1</sup>	I. 北海道	III 南東北 宮城、福島、長野	VI. 沖縄
<b>空間情報データベース</b>			
建物用途データ （都市計画基礎調査建物用途現況図）	2003年度 （平成15）	2001年度 （平成13）	2001年度 （平成13）
市街地地図データベース （ゼンリン社：ZmapTownII）	2004年10月 <sup>*2</sup>	2004年6月	2004年11月
電話帳データベース （ゼンリン社：TelPoint 全件版）	2003年10月	2003年9月	2004年6月

\*1: 一般的に北海道（I類）、北東北（II類）、南東北（III類）、関東、東海、近畿、中国、四国、九州（IV類）、南九州（V類）、沖縄（VI類）の6区分に分類される。

\*2: 一部の区=2005年1月

#### 単位消費電力および消費ガスあたりの原単位

都市における単位消費電力あたりの二酸化炭素排出量は、供給電力会社の電源構成の違いにより大きく異なる。札幌市、宇都宮市、那覇市は、それぞれ北海道電力（0.52 t-CO<sub>2</sub>/kWh）、東京電力（0.32 t-CO<sub>2</sub>/kWh）、沖縄電力（0.94 t-CO<sub>2</sub>/kWh）の値を用いた。ガスについては、原単位を2.37t-CO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>とした。

#### 空調設備導入割合の推定

事務所建物および商業建物の用途別規模別の空調システム採用割合は、建築設備情報年鑑・竣工設備データ（ELPAC）およびその集計データを用いた論文<sup>2),3)</sup>を参考に、地域別・建物規模別空調設備導入割合を用いて求めた。データベースは、建物の調査結果を、規模別として5000m<sup>2</sup>以下、5001-10000m<sup>2</sup>以下、10000-30000m<sup>2</sup>、30000m<sup>2</sup>以上の4分類、地域別として、寒冷地、関東・中部、

近畿以西の3分類に分けて集計してある。したがって、札幌市、宇都宮市、那覇市はそれぞれの地域に属するとして、各地域における実際の調査建物数から規模別の設備導入割合を加重平均によって求めた。戸建住宅は全て個別熱源（熱交換器なし）と仮定した。延床面積5000m<sup>2</sup>以下の建物については、文献値<sup>3)</sup>を参考に全国共通とした。3都市における規模別、業務施設の空調施設採用割合を例として表8に示す。

表8 業務施設建物の規模別空調設備採用割合

		~1000 m <sup>2</sup>	1001~ 2000m <sup>2</sup>	2001~ 5000m <sup>2</sup>	5001~ 10000m <sup>2</sup>	10001~ 30000m <sup>2</sup>	30000m <sup>2</sup> ~
札幌市	中央熱源 電動空冷チラー	0.3%	3.9%	16.6%	31.0%	32.9%	41.5%
	中央熱源 ガス吸収式	0.3%	4.0%	5.8%	20.8%	48.8%	58.5%
	個別熱源 電気式パッケージ	99.4%	92.2%	77.6%	48.2%	18.3%	0.0%
宇都宮市	中央熱源 電動空冷チラー	0.3%	3.9%	17.4%	34.4%	36.5%	42.1%
	中央熱源 ガス吸収式	0.3%	4.0%	6.3%	19.6%	46.1%	54.1%
	個別熱源 電気式パッケージ	99.4%	92.2%	76.3%	46.0%	17.4%	3.8%
那覇市	中央熱源 電動空冷チラー	0.3%	3.9%	16.4%	33.2%	35.6%	42.5%
	中央熱源 ガス吸収式	0.3%	4.0%	5.7%	19.6%	45.1%	51.7%
	個別熱源 電気式パッケージ	99.4%	92.2%	77.8%	47.3%	19.3%	5.8%

### 3都市における電力・ガス年間需要および二酸化炭素排出推定量

表9に各都市における年間電力需要量、年間ガス需要量および年間二酸化炭素排出量とその内訳を示す。また、各都市においてこれらを空間的に可視化し、100mメッシュで集計した3都市の結果を図2に示す。全体の結果より、都市由来の二酸化炭素排出量における地域差が明らかとなっている。まず、札幌市、宇都宮市、那覇市の人口はそれぞれ、札幌市（188万人）>宇都宮市（45.3万人）>那覇市（31.2万人）であり、電力需要、ガス需要共に同様の傾向が見られるものの、二酸化炭素の排出量は那覇市が宇都宮市を上回る結果となった。

一人あたりの電力・ガス需要および二酸化炭素排出量では、電力需要に大きな差はみられないが、ガス需要および二酸化炭素排出量で比較的大きな地域差が現れている。例えば、ガス需要は那覇市がその他の都市と比較して小さいが、一人あたりの二酸化炭素排出量は最も大きい。那覇市においてガス需要、ガス吸収式などの空調設備導入割合が小さいこと、単位面積当たりのガス需要が最も大きい戸建住宅や集合住宅が少ないことが原因であると考えられる。また、二酸化炭素排出量は、沖縄電力における、単位消費電力あたりの二酸化炭素排出量原単位が他の2地域と比較して、大きいことが原因であると考えられる。

表9 各都市における電力需要、ガス需要および年間二酸化炭素排出量

	札幌市	宇都宮市	那覇市	
総人口（2005年国勢調査より）	1,880,875	453,210	312,308	
総世帯数（2005年国勢調査より）	837,371	182,020	122,464	
建物総棟数（市街地地図より）	520,442	208,127	62,741	
電力需要（GWh/year）	14360.2	3583.7	2699.4	
一人当たりの電力需要（MWh/year）	7.63	7.91	8.64	
ガス需要（ $\times 10^6 \text{Nm}^3/\text{year}$ ）	466.0	133.7	53.2	
一人当たりのガス需要（ $\text{Nm}^3/\text{year}$ ）	247.77	295.08	170.45	
二酸化炭素排出量 （ $\times 10^3 \text{t-CO}_2/\text{year}$ ）	電力由来	7467.31 (87.2%)	1136.04 (78.3%)	2402.44 (95.0%)
	ガス由来	1099.81 (12.8%)	315.61 (21.7%)	125.63 (5.0%)
	合計	8567.12	1451.65	2528.07
一人あたりの $\text{CO}_2$ 排出量（ $\text{tCO}_2/\text{year}$ ）	4.55	3.20	8.09	

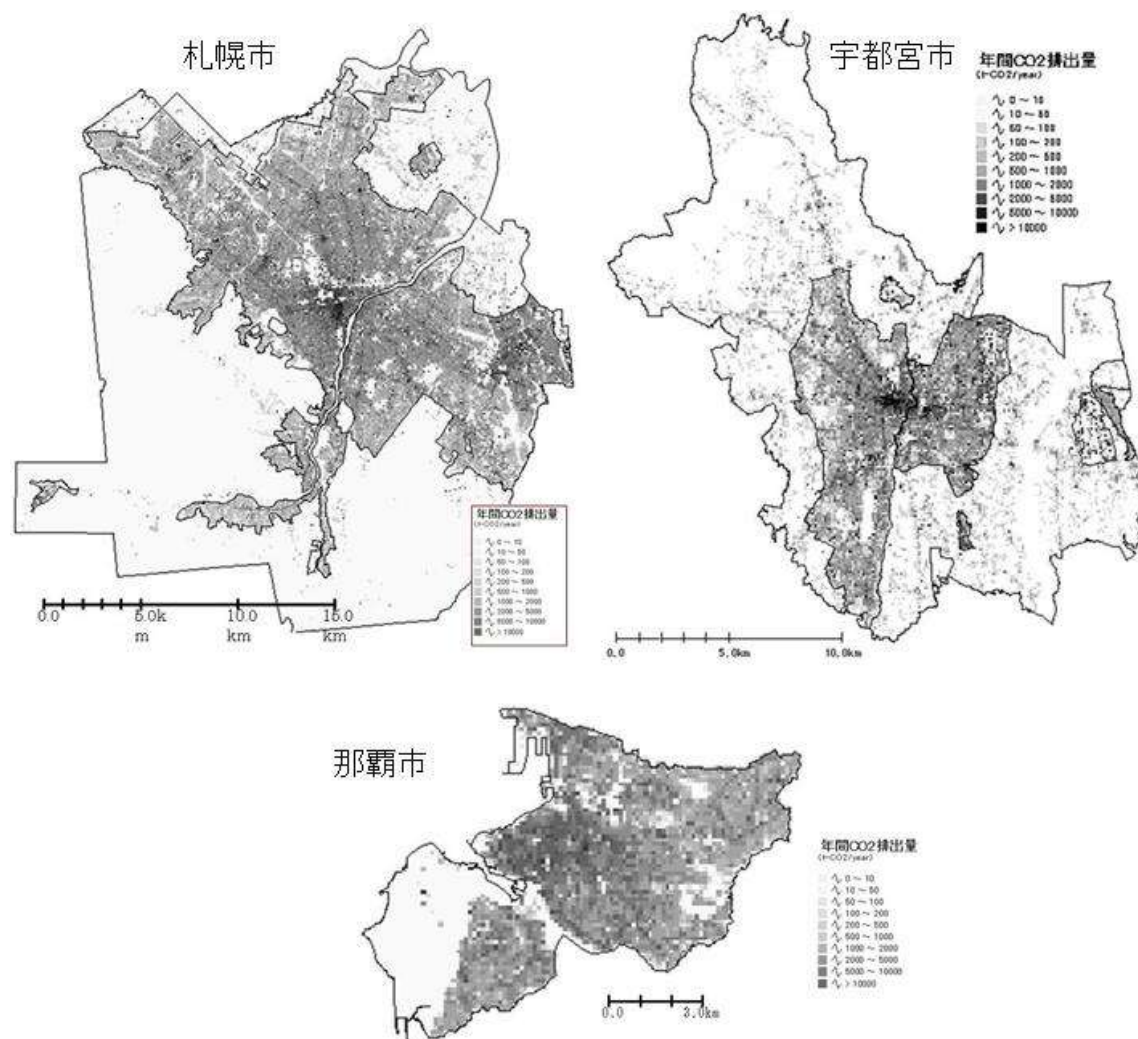


図2 札幌市、宇都宮市、那覇市における建物部門からの年間二酸化炭素排出量分布（100mメッシュで表示し、図中枠内は市街化区域を表す）

二酸化炭素排出量の空間分布は、宇都宮市や札幌市において、幹線道路に沿って比較的排出量の多い建物が分布している傾向が示されているが、那覇市ではそれらの空間的な偏りは少なく、南西部を除く市内ほぼ全域においてエネルギー需要が高い。これは、那覇市のように、比較的小さくてエネルギー需要が高い都市については地域冷暖房など様々な技術導入の可能性が考えられるが、札幌市や宇都宮市では検討に注意が必要であることを示している。

### (3) 都市構造変化がもたらす低炭素効果の解析

#### 1) 都市のコンパクト化の解析 (宇都宮市)

本脱温暖化プロジェクトシナリオチームが将来社会シナリオA、Bとして描いた二つの社会像を考慮して、宇都宮市における都市形態を中央集中型（密集型）および分散型（平坦型）と仮定することにより、都市形態の違いに依存する適用技術の違い、およびその際の二酸化炭素の削減可能量を定量的に解析した。なお、本研究では交通部門は解析の対象外とし、建築部門由来のCO<sub>2</sub>排出を対象とした。

表10に示す宇都宮市の将来人口予測は、2050年の栃木県の人口予測値に、2005年の栃木県に対する宇都宮市の人口比をかけて求めた。本研究では、シナリオA、シナリオB、およびAとBの中間の状態を想定した中間シナリオの3つの将来社会シナリオについて検討した。

表10 将来社会シナリオにおける2050年の宇都宮市の人口・世帯数予測

	シナリオA	シナリオB	中間シナリオ
人口予測値 (2050年栃木県の人口予測値 <sup>4)</sup> ) × (2005年宇都宮市人口) / (2005年栃木県人口)	319, 599	359, 665	339, 632
世帯数予測値 2050年脱温暖化社会プロジェクトの予測値 <sup>4)</sup>	150, 631	130, 293	140, 462
2050年栃木県の人口予測値 <sup>4)</sup>	1, 408, 239	1, 584, 783	1, 496, 511

#### コンパクト都市シナリオの作成

宇都宮市の中心を宇都宮駅とし、GISを用いて中心からの距離ごとに町丁目を抜き出し、中心から「1km以内」、「1～2km」、「2～3km」、「3～4km」、「4km以上」の5つのエリアについて町丁目データを分類した。表11に2005年の宇都宮市の、中心からの距離で分類した各町丁目の人口密度の平均を示す。

表11 町丁目の人口密度の平均値、最大値、最小値<sup>5)</sup>

中心からの距離	人口密度平均(人/km <sup>2</sup> )	最大値(人/km <sup>2</sup> )	最小(人/km <sup>2</sup> )
1km以内	6725	18669	51
1～2km	5504	11931	222
2～3km	5879	10567	19
3～4km	4620	12891	277
4kmより外	3874	13410	0

以下のように2050年の宇都宮市の将来構造について3つのシナリオを描き、それらを比較した。

i) 中央密集シナリオ

中央密集シナリオとは、宇都宮駅周辺を中心に業務施設・商業施設・集合住宅を密集させ、人口密度を高くすることにより、中心における職住近接を目指すコンパクトシティを目指した都市シナリオである。これにより、地域冷暖房などの温室効果ガス排出量削減対策の有効活用が期待できる。

各町丁目の人口減少率は、中心に近い町丁目では人口が増加し、郊外では減少するとし、計算のパラメータは表12のように仮定した。人口の移動に伴い、業務施設、商業施設、戸建住宅、集合住宅の4つの床面積も変化すると仮定した。図3に2050年における宇都宮市の人口密度計算結果および想定される都市形態を示す。

表12 各町丁目の人口の減少率の仮定

エリア番号	中心からの距離	シナリオA	シナリオB	中間シナリオ
エリア1	1km以内	-10%	-10%	-10%
エリア2	1～2km	0%	0%	0%
エリア3	2～3km	10%	10%	10%
エリア4	3～4km	20%	15%	13%
エリア5	4kmより外	60%	42%	54%

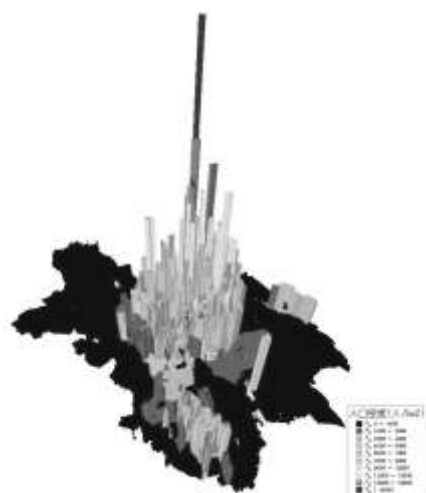


図3 2050年における宇都宮市の人口密度（中央密集シナリオ）



図4 2050年における宇都宮市の人口密度（平坦シナリオ）

ii) 平坦シナリオ

平坦シナリオとは、将来社会シナリオのうちシナリオBに近い状況である。宇都宮市の各町丁目の人口密度が同じになると仮定し、宇都宮市全体に人口や様々な施設が分散した都市シナリオで

ある。現状と比べ、集合住宅に比べ戸建住宅が増加し、各用途施設の建築面積が増大する。これにより太陽光発電などの温室効果ガス排出量削減対策の導入が促進されることが期待できる。

宇都宮市全体の2050年予測人口と、宇都宮市の全面積より、将来の宇都宮市の人口密度を求めたところ、シナリオAは1022人/km<sup>2</sup>、シナリオBは1150人/km<sup>2</sup>、中間シナリオ1086人/km<sup>2</sup>であった。2050年の人口分布を図4に示す。

### iii) 均等減少シナリオ

均等減少シナリオとは、現在の都市の構造が2050年まで維持される都市シナリオである。将来宇都宮の人口が減少するにあたり人口、世帯数、用途別床面積等が全て均等比率（2050の値/2005の値）で減少するとした。均等減少シナリオでは、戸建ておよび集合住宅の建物階数は、2005年の各町丁目における総建築面積と総延床面積の比率から求めた。2050年の人口分布の予測は図5のようである。

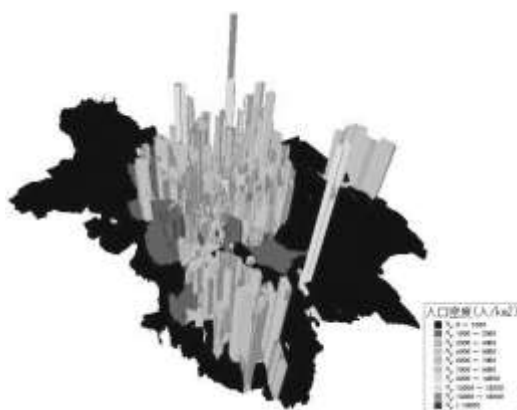


図5 2050年における宇都宮市の人口密度  
(均等減少シナリオ)

## 導入技術オプション

### ①太陽光発電

太陽電池導入にあたり、本S-3-3研究グループで太陽電池を担当している高橋の方法を参考にした。太陽光発電システムは屋根置き型で建物の屋根、または屋上部分とし、壁面や空地などへの導入は想定しないとした。系統連携して余剰発電量は逆流により売電するとし、太陽電池の種類は多結晶シリコンであり、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%）と仮定した。太陽光発電システムの設置率と設置面積について、住宅は導入率（戸数基準）を100%とし、住宅以外を70%とした。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とした。3.5kWの太陽電池モジュールは、変換効率17%の場合20.6m<sup>2</sup>となり、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82.4m<sup>2</sup>となり、集合住宅の平均建築面積の約50%程度の規模である。住宅以外のモジュール面積は82.4m<sup>2</sup>となり、集合住宅の平均建築面積の約50%に太陽電池を設置すると仮定している。各都市シナリオにおいて、年間発電量原単位として70.76 kWh/年/m<sup>2</sup>を用い、代替電力として東京電力の炭素強度（0.368 kg-CO<sub>2</sub>/kWh）を用いて温室効果ガス年間削減ポテンシャルを求めた。

## ②地域冷暖房

地域冷暖房技術の導入にあたり、本S-3-3研究グループで地域冷暖房を担当している森の結果を参考にした。

## 太陽光発電技術および地域熱供給技術導入評価

各都市シナリオの、宇都宮市全体の太陽光発電技術導入による温室効果ガス年間削減量を表12に示す。総建築面積（総屋根面積）が最も大きい平坦シナリオにおける太陽光発電による温室効果ガス年間削減量は、中央密集シナリオの削減量の2倍以上、均等減少シナリオの約1.6倍と、他の都市シナリオの削減量に比較して非常に大きいことがわかる。また、平坦シナリオの中でも特に集合住宅と業務施設に設置した太陽光発電システムによる削減量が大きくなっている。これは、中央密集シナリオや均等減少シナリオは高層建物として存在するこれらの用途別床面積が、平坦シナリオでは1階建てとして、宇都宮市全域に分散しているためと考えられる。

また、地域熱供給システム導入による温室効果ガス削減ポテンシャルについて検討した結果を表14に示す。平坦シナリオでは、全町丁目で熱負荷密度が0.95GJ/年/m<sup>2</sup>以下であるので、地域冷暖房などの地域熱供給システムが導入できない。また、中央密集シナリオでは、将来社会シナリオ間の削減量の値が同じであった。これは、中央密集シナリオにおいて、熱負荷密度0.95GJ/年/m<sup>2</sup>以上という導入条件を満たすのは、中心から3km以内の全町丁目であり、それ以外は同様に導入条件を満たしていないためである。これは、中央密集シナリオの作成過程において、中心から3kmより内側の町丁目まではどの将来社会シナリオにおいても人口の減少率が変わらないため、中心から3kmより内側の町丁目の人口・世帯数・各用途延床面積・建築面積など算出した値は将来社会シナリオ間で変化しないことによる。

表13 各都市シナリオにおける太陽光発電技術導入による温室効果ガス年間削減量ポテンシャル  
(千t-CO<sub>2</sub>/year)

	シナリオA			シナリオB			中間シナリオ		
	中央密集	平坦	均等減少	中央密集	平坦	均等減少	中央密集	平坦	均等減少
業務施設	19	44	34	24	50	38	21	47	36
商業施設	5	10	7	6	12	8	5	11	7
戸建住宅	19	32	30	23	36	34	20	34	32
集合住宅	22	57	25	28	64	28	25	60	27
合計	65	143	96	81	161	108	71	152	102

表14 地域熱供給システムを導入した場合の年間CO<sub>2</sub>削減量(千t-CO<sub>2</sub>/year)

	中央密集シナリオ	平坦シナリオ	均等減少シナリオ
シナリオA	111	0	23
シナリオB	111	0	26
中間シナリオ	111	0	25

## 2) 都市シナリオ間の比較（導入技術の複合評価）

都市シナリオ3つ、将来社会シナリオ3つの計9つのケースについて検討を行ったが、ここでは本プロジェクトの将来社会シナリオにより即した都市形態と思われる2つのシナリオ、「中央密集シナリオ×シナリオA」および「平坦シナリオ×シナリオB」、加えてそれらの中間シナリオである「均等減少シナリオ×中間シナリオ」の3ケースについて比較考察を行った。

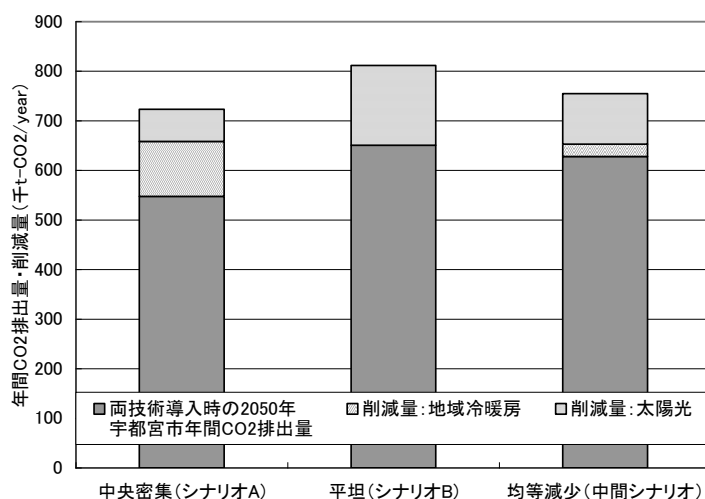


図6 都市シナリオ別民生建物エネルギー由来の温室効果ガス削減ポテンシャル

表15 温室効果ガス削減技術導入による温室効果ガス排出量削減率(%)

都市シナリオ	将来社会シナリオ	太陽光	地域熱供給	両技術合計
中央密集シナリオ	シナリオA	9	15	24
平坦シナリオ	シナリオB	20	0	20
均等減少シナリオ	中間シナリオ	14	3	17

選択された3つのケースについて、太陽光発電システムと地域冷暖房など地域熱供給システム導入による年間温室効果ガス削減量と、両技術導入時の2050年宇都宮市の年間温室効果ガス排出量を図6に示す。また、両技術による温室効果ガス削減率を表15に示す。中央密集シナリオの場合、両技術導入を考慮しない現状シナリオにおいて、民生建物からの温室効果ガス排出723,000t-CO<sub>2</sub>/年のうち、176,000t-CO<sub>2</sub>/年の削減が見込まれることとなった（削減率24%）（図6、表15）。これに対して、両技術を導入しない場合の平坦シナリオにおける総温室効果ガス排出量は約20%多く812,000t-CO<sub>2</sub>/年であったが、地域熱供給システムの導入条件を満たす地域が存在せず、総排出量のうち、太陽光発電技術のみにより161,000t-CO<sub>2</sub>/年の削減ポテンシャルに留まった（削減率20%）（図6、表11）。また、均等減少シナリオの2050年の宇都宮市年間温室効果ガス排出量の値は、中央密集シナリオの排出量の値よりも約15%大きく、両技術導入による削減率は最も少なく17%程度であった。

想定されたとおり、平坦シナリオでは、中央密集シナリオと比較して太陽光発電システムの導



入による温室効果ガス削減効果が大きく、削減量、削減率共に中央密集シナリオの約2倍である。しかし、平坦シナリオでは、地域冷暖房など地域熱供給システムを導入することができないため、地域熱供給システムの導入による削減効果の大きい中央密集シナリオよりも2050年の宇都宮市年間温室効果ガス排出量の値が小さくなっている。3つのケースでは、将来社会シナリオにおける宇都宮市の2050年における人口が異なるため、考察には注意が必要であるが、一人当たりの温室効果ガス年間排出量においても、同様に中央密集シナリオ>平坦シナリオ>均等減少シナリオとなった。

### 3) 余剰地利用による再生可能エネルギーの生産

日本においては、人口が今後減少していくことは確実であり、とりわけ中小都市では人口の減少が大きく生じることが考えられている。この人口減少を積極的に低炭素都市の形成の機会ととらえ、人口の減少に伴って生じる余剰地を再生可能エネルギーの生産として用いることは、地域の活性化の面からも有望である。

今回対象としたのは、旭川市、いわき市、上越市、富士市、下関市、高知市の6つの中規模都市である。都市縮小に伴う余剰地を推定する面的なデータとして国土数値情報(GIS)を、余剰地ができる割合を推定するのに人口データを使用した。

本研究では都市の縮小割合を推定するために、各都市の1995年人口と2030年推計人口の比を考えた。必要となる各データを総務省統計局による国勢調査の市町村別人口データ及び国立社会保障・人口問題研究所による市町村別将来推計人口から引用した。

今回、人口減少に伴う建物用地の減少率は、人口減少率に等しいと仮定した。

本研究では都市縮小の要因を2つに分けて考える。

- ①都市人口の減少によるもの
- ②都市中心部への積極的な集密化によるもの

今回は縮小された都市の設定年度を2030年とし、以下の4つのシナリオで余剰地を推定した。各シナリオの特徴を表16に示す。

表16 想定する都市縮小シナリオ

シナリオ	シナリオ説明	再生可能エネルギー導入の可否		
		風力	太陽光	バイオマス
人口減シナリオ A	人口減少 均等	×	○	草本系
人口減シナリオ B	人口減少 郊外から	○	○	木質系 草本系
10%集密化シナリオ	人口減少+10%集密化	○	○	木質系 草本系
30%集密化シナリオ	人口減少+30%集密化	○	○	木質系 草本系

人口減シナリオAは、特に人口分布の誘導の政策をとらずに人口がいわば「虫食い」的に減少する場合であり、まとまった余剰地は生じない。人口減シナリオB郊外の人口をまとめて減少させるシナリオで、人口が都心部で減少すると、そこに郊外から人口を流入させ、郊外の余剰地を有効に使うシナリオである。集密化シナリオはこのような都市のコンパクト化を人口の減少に加えて更に積極的に進めるシナリオである。

## 再生可能エネルギー導入技術の設定

### ①風力発電

今回の研究では、現在技術における一般的な容量である1,000 kW、1,500 kW、2,000 kWの3つ及び、2030年の目標技術である5,000 kWの、合わせて4種類のシステムを考えた。各都市の風況のデータを用いて、発電量を求めた。各都市の発電量の計算に当たってはNEDOの風況マップを用いた。

風力発電の導入にはまとまった空地が必要なため、次の3つの条件を満たすメッシュにおいて風力発電が導入可能になると想定した。

- ・メッシュ内の建物用地が全て余剰地になったメッシュ
- ・幹線交通用地が0でないメッシュ
- ・メッシュ内余剰地の面積が $D^2$ ( $D$ :ロータ直径)以上であるメッシュ

### ②太陽電池

本研究で導入を想定する太陽電池の種類とそのシステム効率を表17にまとめた。太陽光パネルの設置角度は全都市において真南、傾斜角30度に統一する。

表17 太陽電池の種類とそのシステム効率

太陽電池種類	システム効率 [kW/m <sup>2</sup> ]
多結晶Si	13.9%
単結晶Si	14.3%
a-Si/単結晶Siヘテロ接合	16.6%
薄膜Siハイブリッド	8.6%
CIS系	10.1%
2030年技術(多結晶Si) <sup>8)</sup>	22.0%

### ③植物バイオマス

今回導入を想定するのは木質系バイオマスとしてヤナギと竹、草本系バイオマスとしてササとススキの、合わせて4種である。各作物の年間成長量と高位発熱量、糖分含有量、バイオエタノール製造時の原単位を表したのが表18である。

表18 導入を想定するエネルギー作物種とバイオエタノール製造原単位

エネルギー作物種	年間成長量 [t-dry/ha/year]	高位発熱量 [GJ/t-dry]	糖分含有量 [t/t-dry]	バイオエタノール製造原単位	
				[L/t-dry]	[MJ/t-dry]
ヤナギ	20	20.9	78.0%	330	6,990
竹	22	19.3	80.6%	341	7,223
ササ	8	16	69.0%	292	6,183
ススキ	18.8	18.2	78.0%	330	6,990

人口減シナリオAでは、草本系作物のササ、ススキを、それ以外のシナリオでは全ての作物を導入対象とした。人口減シナリオAで木質系バイオマスを導入しない理由は、全メッシュで均等に空き地ができるということでもまとまった土地が確保できないため、ある程度の耕作規模が必要である木質系バイオマスの育成は難しいと考えたためである。

## 6 都市の推定結果

表19に対象とした6都市の比較を示す。

表19 都市縮小を考える6つの都市

都市名		旭川市	いわき市	上越市	富士市	下関市	高知市
面積	[km <sup>2</sup> ]	748	1231	973	245	716	309
メッシュ数	[個]	807	1193	946	208	654	246
建物用地	[km <sup>2</sup> ]	67	80	72	38	36	35
人口密度	[人/km <sup>2</sup> ]	475	288	214	1,034	406	1,129
人口[千人]	1995年	361	361	212	247	311	340
	2030年	287	290	168	224	218	306
人口減少率	%	20%	20%	21%	10%	30%	10%
余剰地面積 [km <sup>2</sup> ]	人口減A・B	14	16	15	4	11	4
	10%集密化	19	22	21	7	13	7
	30%集密化	30	35	32	14	18	13
平均風速	[m/s]	5.1	5.3	4.7	2.9	5.1	3.0
斜面日射量	[kWh/m <sup>2</sup> ・day]	3.5	4.2	3.4	3.7	3.9	4.3

表からわかるように、人口に関する将来の動向が異なる一方で、平均風速、日射量もまた異なっている。

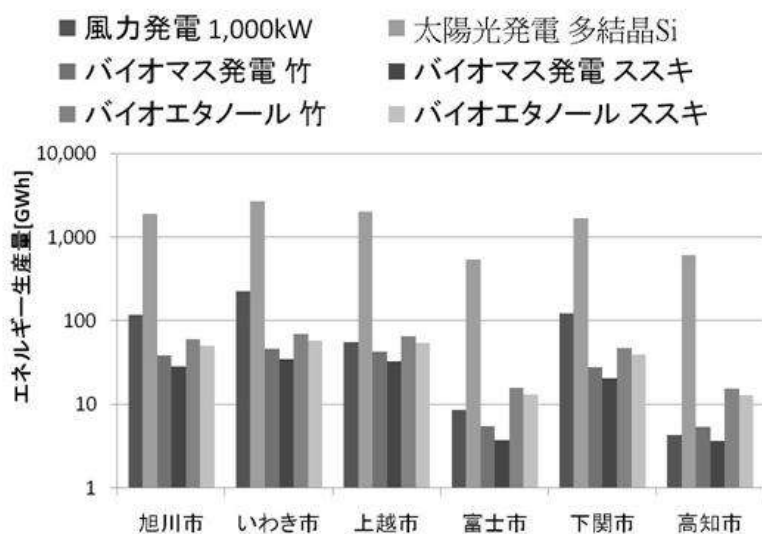


図7 余剰地を生かした再生可能エネルギー生産ポテンシャル (人口減少シナリオB)

まずエネルギー生産の地域による差を分析するために、人口縮小シナリオを人口減シナリオBに固定して考える。図7は、各都市における再生可能エネルギーの年間総生産量である。

発電システムごとに見てみると、高知市において竹を原料としたバイオマス発電が風力による発電量を上回っている他は発電量の多い順に、太陽光>風力>エタノール>バイオマス発電、となっている。太陽光発電のポテンシャルは他エネルギーに比べて10倍~20倍程度も大きく、大きなポテンシャルが存在している。ただし、この試算の場合には余剰地に隙間なく太陽電池を敷設

する場合を想定しており、まさに最大限のポテンシャルの試算となっている。

次に、いわき市を例にしてついて、シナリオ間の比較を行う。人口減少シナリオAではまとまった空地ができないという理由で風力による発電と、バイオマスにおいて竹の利用を考えていないため、これらの生産量は0となっている。各システムの生産量を人口減シナリオと30%集密化シナリオで比べてみると、太陽光とバイオエタノールは2.2倍、風力発電は1.4倍、バイオマス発電では2.7倍となっている。

(4) 都市規模別の戦略

都市の規模・密度によって、二酸化炭素排出削減のための対策の効果は異なり、低炭素都市に向けた戦略も異なる。都市の規模別にその戦略の相違を示すと図8のようになる。

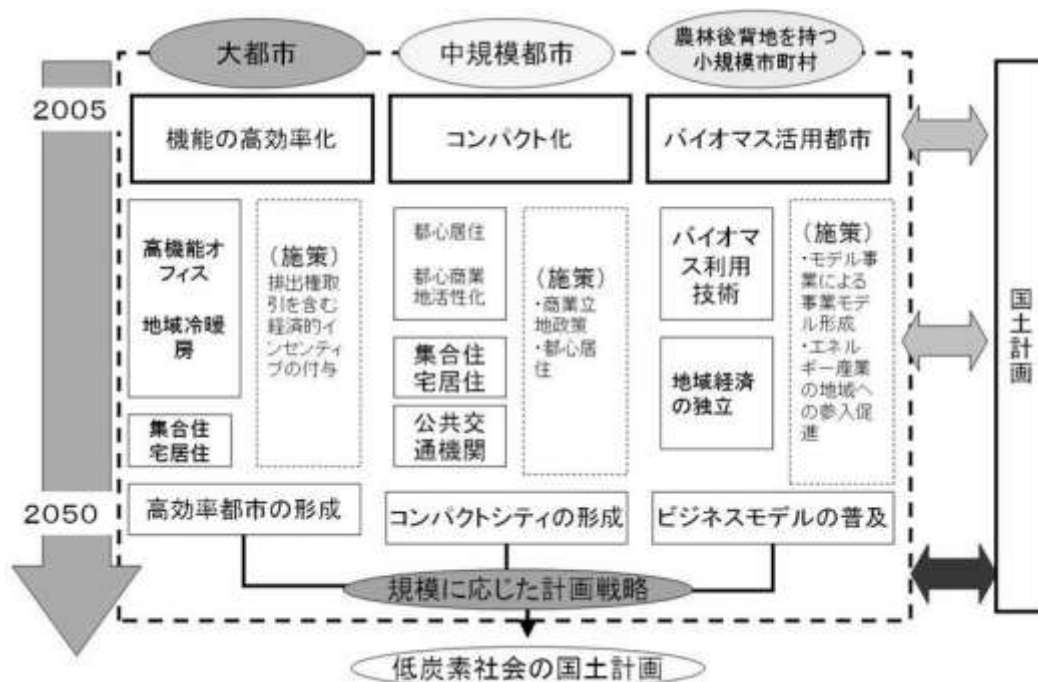


図8 異なる規模の都市の低炭素化戦略

中枢都市以上の規模の都市では、一定程度の密度を保持することにより鉄道輸送が可能になり、CO<sub>2</sub>排出が削減できる。また中核都市から小都市では軽軌道系（LRT）の整備が都市のコンパクトによって可能になる。コンパクトな都市の形成は温暖化対策だけではなく、道路、水道、下水道などのインフラストラクチャのサービス水準の維持のためにも重要である。密度が低く拡散した住形態はインフラストラクチャの維持の費用負担が大きく、それゆえにサービス水準の低下が生じ、人々の生活の質の低下につながる。

このコンパクトさは住環境に対してもあてはまる。わが国の一人あたりの家庭部門のエネルギー消費の増大の背景には社会的な傾向とライフスタイルの変化がある。すなわち、世帯あたりの人数が一貫して減少している一方で、住宅の床面積は増大している。その結果として一人あたりの床面積は増加している。さらに、かつての暖房機器のようにその周辺だけ暖めるのではなく、空間全体を暖める暖房が主力になり、また冷房も空間に対して行われる。集合住宅と戸建て住宅の

比率、そして社会として、単身の居住が今後も増加するのか、多人数居住への回帰が起きるのかは大きなポイントである。グローバル化の一環として競争にあらゆる場がさらされている現在、人々は単身赴任をし、家族が別々に暮らす傾向にある。この傾向が今後も続くならば一人あたりの住宅のエネルギー消費は増加の傾向を続ける基盤となるので、その効果を相殺して更にエネルギー需要の削減を実現していくことが求められる。

東京、名古屋、京阪神の三大都市圏に代表されるように、規模が大きく密度も高い大都市においては、エネルギー効率の高い集合住宅の導入、CO<sub>2</sub>削減効果が現れる場所を選んだコジェネレーションと地域冷暖房の導入、そして郊外部からの通勤に対するモーダルシフトなどが有効である。

札幌や仙台のように人口が100万人を越えるような中枢都市では集合住宅と戸建て住宅の両者への対策、鉄道の整備とモーダルシフトが考えられる。もっとも、鉄道整備の効果はその都市の地形、物理的な都市域の広がり形状にも依存する。

中規模程度の地方都市の場合、大規模な鉄道を建設することは費用の面で困難である。これらの都市には性能の高い路面電車であるLRTやモノレールなどが現実的である。

これに対し、小規模な都市や中山間地域では公共交通を導入することは実際問題として困難である。自家用車のような個人的な移動手段の環境負荷をいかに低下させるかが重要な点となる。一方でこれらの地域は森林系あるいは農業系のバイオマスを活用する可能性も有しており、それらの事業性は検討に値する。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究では、さまざまな対策が都市に導入された際の効果は都市側の条件によって異なる、という定性的な推論を定量的なデータによって裏付けることを可能にしたものである。とりわけ、緻密な都市内のデータと網羅的で都市全体の活動を表現する情報を組み合わせることを提案している点は、実際の情報の入手可能性と低炭素都市の研究の基礎として重要である。

都市内の活動度分布の解析については、従来組み合わせられていなかった既存のデータベースを組み合わせ、都市内部の建物における用途別床面積を最大限推定する試算をおこなった。その結果、依然として現実には及ばない点は残るが、既存のデータベースを元にして都市における二酸化炭素排出削減策導入効果解析の基礎データになることを示した。

都市構造の変化に対する解析においては、交通面での優位性が指摘されるコンパクト都市において期待できる建物由来の二酸化炭素排出削減、再生可能エネルギー生産について成果を得た点は今後の研究につながる重要な知見である。

### (2) 地球環境政策への貢献

本研究で開発した手法は、国あるいは地方自治体が都市の単位で二酸化炭素削減の方策を立案する際に有効な手法となりうる。とりわけ、二酸化炭素の将来の削減の解析を可能にするための情報、またコンパクトシティを実現した際の効果についての研究成果は短期および長期の施策に有用である。現時点で本研究の成果が直接的に環境政策に用いられてはいないが、本研究は常に政策面での貢献を意図して行われており、今後成果が活用されることが期待される。

## 6. 引用文献

- 1) 近本智行, 伊香賀俊治, 永瀬修: 建物で消費されるエネルギーの定量データベース, 第20回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス論文講演集, pp. 271-274, 2004
- 2) 足永晴信, 田中稔, 山本享, 田口明美: 冷熱源機器の導入割合を考慮した空調システムおよび関連機器の地域排熱量に関する研究, 空気調和・衛生工学論文集, No. 86, pp. 77-85, 2002
- 3) 国土交通省・環境省: 平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書: 2004
- 4) 藤野純一, 日比野剛, 榎原友樹, 松岡譲, 増井利彦, 甲斐沼美紀子: 低炭素社会のシナリオとその実現の可能性, 地球環境 Vol. 12 No. 2, pp. 153-160, 2007
- 5) 平成17年国勢調査

## 7. 国際共同研究等の状況

特になし。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

なし

### (2) 口頭発表(学会)

S. Ishii and K. Hanaki: "Potential energy recovery and CO<sub>2</sub> reduction by utilizing organic food waste in sludge recycle centres in Yokohama", Proc. of the 7th International Conference on Ecobalance, Tsukuba, 125-128, 2006

### (3) 出願特許

なし

### (4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

### (5) マスコミ等への公表・報道等

なし

### (6) その他

なし