

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

研究代表：花木 啓祐（東京大学大学院工学系研究科）

中間報告書

平成 19 年 3 月

# 目次

(1)	都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価	1
	東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻	花木 啓祐
	同上	石井 暁
(2)	都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果	13
	東京大学 大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻	藤井 康正
(3)	都市建築物由来のエネルギー消費と変革による削減効果	25
	慶應義塾大学	伊香賀 俊治
(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	35
	信州大学 繊維学部	高橋 伸英
(5)	都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果	49
	東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻	原田 昇
	同上	高見 淳史
	日本学術振興会海外特別研究員 (The University of Texas at Austin)	円山 琢也
(6)	都市系バイオマスと未利用エネルギーの活用によるエネルギー削減効果	63
	東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻	荒巻 俊也
	同上	石井 暁
	東京大学 先端科学技術研究センター	栗栖 (長谷川) 聖
(7)	都市における需要変化に伴う誘発二酸化炭素排出量変化	83
	東京大学 新領域創成科学研究科環境システム学専攻	吉田 好邦
(8)	地域冷暖房とコジェネの導入による削減効果	93
	東京理科大学 理工学部経営工学科	森 俊介
(9)	さまざまな主体の知識共有のための統合ツール開発	107
	東京大学 総括プロジェクト機構	ステーヴェン クレイネス
	日本工業大学 システム工学科	石田 武志

## (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

東京大学大学院工学系研究科 都市工学専攻

石井 暁

### [要旨]

都市の将来像を描くのは、新しい環境技術動向を予測推定する必要があり、多くの不確実性を伴うものの、将来の都市における二酸化炭素排出削減量を総合評価するためには重要である。本研究では、まず都市の中長期的政策オプション検討の始めに、個々の技術の積み重ねと統合評価枠組みとして、日本全国の気候区分や都市規模を考慮しながら5都市を選定し、それらについて詳細に個別分析することにより、日本の都市全体の推定へと拡張してゆく方針を決定した。

この比較的詳細な分析を行う5都市には、気候条件・都市規模を代表する都市として札幌、宇都宮、東京、広島、那覇を取り上げた。次に、都市チームの各研究者による将来可能性のある導入技術の洗い出しと、将来の都市シナリオの取りまとめをおこなった。その結果として、都市の規模により都市形態や社会構造の傾向が異なる可能性が大きいこと、各部門の導入可能技術オプションはそれらの要素に大きく左右されることなどが確認された。

これらを受けて、各部門の二酸化炭素削減量を統合評価する手法として都市における空間分析を適用することを検討した。具体的には、民生・業務部門やエネルギー部門での削減効果を統合評価する際に有益である都市内部の用途別床面積を、既存のデータベースの組み合わせにより効率的かつより正確に推定する手法を検討した。これらの検討は都市チームの各要素である太陽電池、地域冷暖房、バイオマス利用などの個々の技術導入検討に直接かかわる事が予想されると共に、都市内部の建物分布に関するデータにおいてチーム内の整合性の向上を図ることにより、DOMEモデルによるインタラクティブな解析が困難な要素についても考慮するという意図がある。

また、この手法を用いて、選定した都市の中から札幌、宇都宮、那覇において、空間分析を用いた民生建物部門からの二酸化炭素の排出量の推定を試みた。具体的には、2004年における各都市内建物の内部用途を、最新情報である電子市街地地図をベースに、自治体が自主的に実施することが義務付けられている都市計画基礎調査建物現況調査、電話帳データベースで補完しながら推定し、別途求めた用途別・規模別に設定された二酸化炭素排出原単位から、都市内民生建物におけるエネルギー需要と二酸化炭素排出量を推定した。それぞれの地域差を反映させる要素としては、全国を寒冷地域、関東・中部地域、近畿以西地域の3分類に分割した空調設備の導入割合、各電力供給会社における単位電力あたりの排出量原単位を用いた。

検討の結果、宇都宮市是那覇市より年間電力消費量およびガス消費量において上回っているにもかかわらず、地域電源構成の違いにより、那覇市で総合的に二酸化炭素排出量が大きいこと、各都市における電力およびガス消費量由来の二酸化炭素排出量割合に地域差が見られることなどが明らかとなった。また、これらの結果は太陽電池導入(4)や地域冷暖房(8)、未利用エネルギーとしての湿系廃棄物系バイオマス利用技術(6)においても個々の解析に用いられている。

## 1. はじめに

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木目の細かな検討が必要となる。

特に後者に関しては、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。しかし、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（1km×1km）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<sup>1),2)</sup>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。

そこで本研究では、日本全国の気候区分や都市規模を考慮しながら5都市を選定し、それらについて詳細に個別分析することにより、日本の都市全体の推定へと拡張してゆく方針を決定した。また、将来の都市におけるエネルギーおよび二酸化炭素削減技術導入オプションの洗い出しを学識者ヒアリングにより取りまとめた。また、選定された5都市については、比較的データの整備が進んでいる札幌市、宇都宮市、那覇市を先駆的に取り上げ、建物民生部門からのエネルギー需要に伴う二酸化炭素排出量を推定した。

## 2. 都市シナリオ設定との推定方法の考案

### 2.1 日本全国諸都市の推定方法

最終的に日本全体の二酸化炭素排出量の削減可能量を推定するに当たって二つの方法をまず検討した。第一の方法は代表都市を取り上げて解析を行い、それを元にして全国値を求める方法である。第二の方法は、当初より日本全体を解析の対象とする方法で、90都市圏程度を同時に解析していく方法である。後者の場合、常に日本全体の数値を示しつつ研究を進めることができる利点がある一方で、都市の内部における建物密度などの構造までは踏み込んだ解析を行うことは不可能であり、たとえば地域冷暖房の導入効果の評価などは困難である。このようなことから、第一の方法を採用することにした。

次に、代表的な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、広島市、那覇市を対象にすることとした（表1）。この中で、宇都宮市や那覇市のような中規模あるいは小規模の都市は従来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しており、地球温暖化防止の地域計画も立てられていない。これらの都市の中で、本年度は宇都宮市を対象にして検討を進めた。

表1 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 ーデー 度・日	冷房デグリー 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

## 2.2 都市シナリオ設定と導入技術オプション

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、とりまとめをおこなった。その結果を表2に示す。

表2 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	備考
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> </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> </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>・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>・革新的技術導入の幅が大きい</li> </ul>

### 3. 都市内部における空間分析

#### 3.1 はじめに

日本全国の都市からの二酸化炭素削減量の将来予測において、札幌、宇都宮、東京、広島、那覇の5都市が日本全国の都市における様々な特徴（気候、都市規模など）を網羅的に表現できていることを正確に評価できる必要がある。つまり、各都市における特徴を明らかにするためにも、都市全体の集計値のみを用いるのではなく、都市内部建物の空間的分布を考慮した検討が重要となる。

したがって、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う。一方で、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。

#### 3.2 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について推定した。表3に各データベースにおける長所と短所を示す。

表3 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がより正確</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。

#### (1) Step 1：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4）。

表4 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。

#### (2) 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。

宇都宮市の全建物

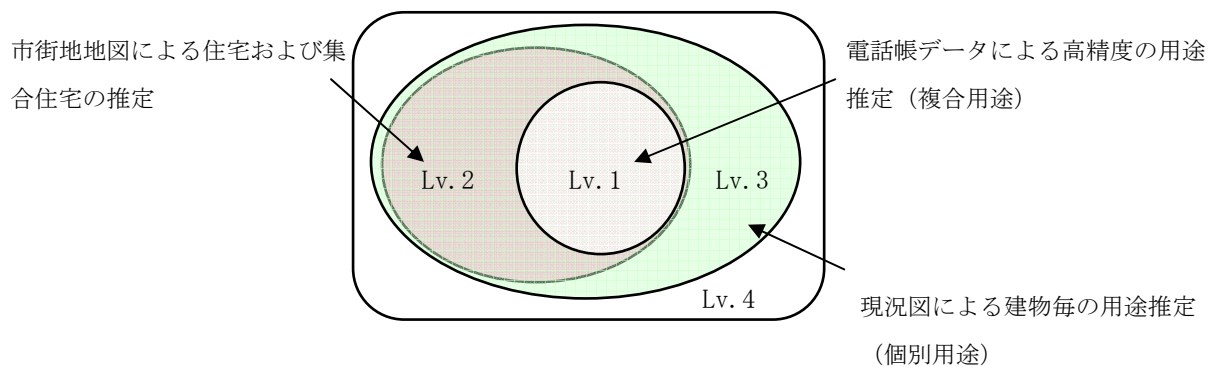


図1 建物用途推定精度の概念図

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。

### 3.3 都市内部建物用途推定結果

宇都宮市の各用途地域における推定結果を表5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5 各用途地域における建物用途推定精度別土地面積（㎡）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 (91.0%)	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

### 3.4 都市内部分析への適用

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6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。

#### (1) 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>3)</sup>のデータベースを用いて算出した。このツールには、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6 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

## (2) 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。それぞれの平均年間原単位を表4に示す。ガスについては、原単位を2.37t-CO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>とした。

## (3) 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>4), 5)</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>5)</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7に示す。

表7 業務施設建物の規模別空調設備採用割合

		～1000m <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%

### 3.5 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8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札幌の例を図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、一人当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。

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。

### 3.6 都市内部建物用途分析のまとめ

本検討では、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おこなった。その結果、依然として現実には及ばない点が残るが、既存のデータベースを元に推定精度をどれ程高められるかの目安を知ることが出来た。宇都宮の結果より、市街地地図および電話帳データベースを用いた方法で（Lv. 1およびLv. 2），ほとんどの地域で80%以上、いくつかの地域では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、都市計画基礎調査の建物現況調査（Lv. 3）の利用により、これらの比率は推定地域すべてにおいて91.6%～97.0%に向上することが明らかとなり、用途地域によっては高い精度で都市内の建物用途別の床面積が、個々の建物内の複合用途レベルまで推定できることが明らかとなった。地域差をより正確に反映させるためにパラメータをより深く検討し、精度の向上を図る必要性はあるものの、今後の都市における二酸化炭素排出削減策導入効果において検討のベースとなることが期待される。

表8 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CO2排出量 （ $\text{tCO}_2/\text{year}$ ）	4.55	3.20	8.09



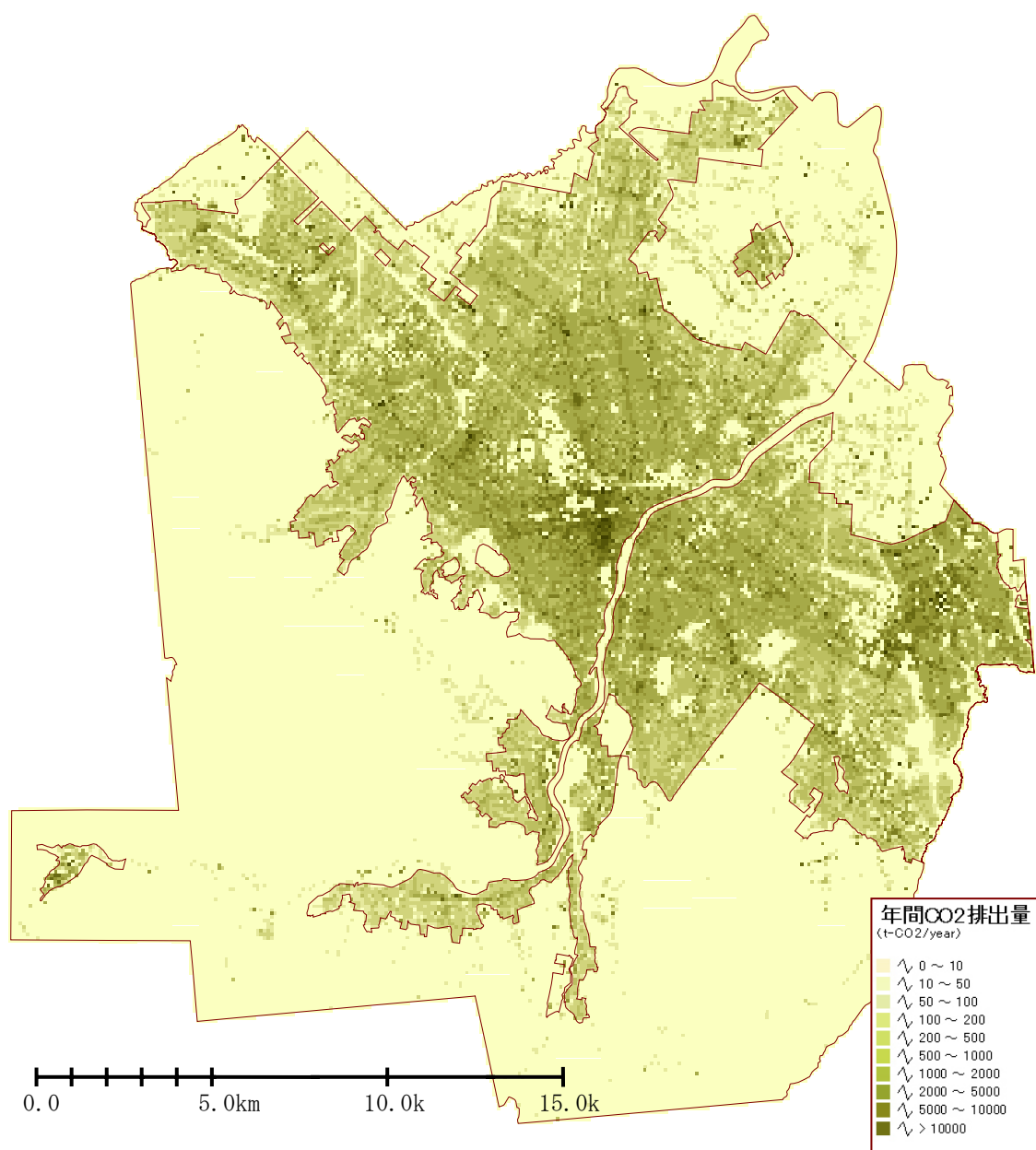


図2 札幌市における年間二酸化炭素排出量（100mメッシュ）  
（※図中枠内は市街化区域を表す）

## 参考文献

- 1) 田畑智博, 後藤尚弘, 藤江幸一, 井村秀文, 薄井智貴: 発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究, *土木学会環境システム研究論文集*, Vol. 30, pp. 315-322, 2002
- 2) 丹治三則, 盛岡 通, 藤田 壮: 流域圏でのシナリオ誘導型施策立案と評価を支援する地理情報システムに関する研究, *土木学会環境システム研究論文集*, Vol. 31, pp. 367-377, 2003
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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

## （２）都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 藤井 康正

【要旨】 本研究では、民生業務・家庭部門における最終需要端での省エネルギー施策の導入や分散電源の大規模導入が、日本の電力系統の電源構成や運用方法に影響を与え、その結果として現れる日本のエネルギー需給と CO<sub>2</sub> 排出量に与える影響を詳細に検討することを目的としている。

平成 16 年度は、日本全国を 9 地域に分割した最適電源構成モデルを構築した。本モデルの時間解像度は、7 季節、24 時間帯であり、電源の種類としては原子力、石炭、IGCC、LNG、LNG 複合、石油、揚水、一般水力、地熱（外生値）を考慮し、9 地域別の電力需給構造の差異や地域間での電力の経済融通も考慮した。この最適電源構成モデルは、大規模な線形計画問題として定式化され、CO<sub>2</sub> 排出削減技術として CO<sub>2</sub> 回収貯留設備も考慮した。

平成 17 年度は、個々の家庭における不確実な電力・熱の負荷曲線を生成するボトムアップシミュレーションモデルを構築し、求めた負荷曲線に基づいて、確率動的計画法により個々の家庭でのコージェネレーションシステム、給湯用ヒートポンプの最適運転方法を決定するモデルを構築した。このモデルを用いて、全国 47 都道府県別のコージェネレーションシステムと給湯用ヒートポンプの運用シミュレーションを行い、これらの機器が大規模導入された場合の日本の各地域の系統電力の日負荷曲線の形状に与える影響を推定した。

平成 18 年度は、最適電源計画モデルを今後の大規模化に備えて、より拡張性の高いソフトウェアを用いて再構築するとともに、従来のガスエンジンを用いたコージェネレーションシステムのモデルに加えて、燃料電池を利用した家庭用コージェネレーションシステムのモデルも新たに作成した。燃料電池コージェネレーションシステムは、ガスエンジンのそれに比べて発電効率は高く、部分負荷運転も可能であるという特徴を有している。ただし、機器の特性には非線形性があり、部分負荷運転時の機器の発電効率ならびに廃熱利用率は、定格運転時のそれらよりも低下すると考えられている。東京地区の 4 人世帯を想定した数値シミュレーションによるシステム解析結果からは、系統電源による電力の CO<sub>2</sub> 排出原単位に大きく依存するが、燃料電池コージェネレーションシステムの導入による CO<sub>2</sub> 排出削減効果は、必ずしも自明ではないことなどが示唆された。

【キーワード】 最適電源構成モデル、CO<sub>2</sub> 回収貯留、コージェネレーションシステム、給湯用ヒートポンプ、燃料電池コージェネレーション、数値シミュレーション

### 1. はじめに

京都議定書が発効し、日本でも 1990 年比 6% の温室効果ガスの削減が要求されることとなった。これにより、産業、民生、運輸などの各最終需要部門におけるエネルギー利用の高効率化、低環境負荷を実現するとともに、エネルギー転換部門としての発電部門においても、京都議定書に対応するための電源構成やその運用などが求められている。

日本の最終エネルギー消費の 14.2%（2003 年度）を占める家庭部門に対して、省エネルギー対策を行うことは重要性を増してきている。政府もコージェネレーションシステム（以降 CGS と略記）ならびに給湯用ヒートポンプ（以降 HP と略記）に関して導入目標を掲げ、市場においても高効率給湯器や

CGSの投入・開発強化が実施されている。こうした機器の大規模導入は、家庭における給湯用エネルギー源の変化や系統電力購入量の変化をもたらし、将来的な電源計画にも大きく影響を及ぼしうる。

本研究では、個々の家庭の不確実な電力需要・熱需要に対して、CGSとHPの最適な運用を決定し、その一軒一軒の系統電力購入量を考えることで、従来の研究では考えられてこなかった各家庭での運用差にも目を向けている。また、供給側に目を向けると、昨今特に注目を集めている技術としてCO<sub>2</sub>回収貯留があるが、本研究では最適電源構成モデルを活用して、発電部門にCO<sub>2</sub>排出量制約が課せられた場合、最適電源構成ならびにCO<sub>2</sub>回収貯留設備の導入がどのように推移するかを試算している。これらを組みあわせて、一戸建て住宅にガスエンジンCGSやHPが大規模に導入された場合に、発電部門側の電源構成・運用の変化も考慮して、CO<sub>2</sub>排出量がどのように影響を受けるかも評価している。そして、新技術として将来の導入普及が期待されている燃料電池CGSに関しても、ガスエンジンCGSと同様に確率動的計画法に基づく数学モデルを試作し、特定の世帯を想定したシミュレーションを通して、その有効性について準備的な検討を進めた。

## 2. 研究目的

本研究は、次のように3つの部分に分けられる。

### (1) 家庭での電力・熱の日負荷曲線のボトムアップシミュレーション

家庭での人間の挙動を、乱数を用いた確率的なシミュレーションとしてモデル化し、電力・熱の日負荷曲線を生成する。

### (2) 確率動的計画法を用いたCGSやHPの最適運用戦略の導出

ボトムアップシミュレーションにより作成した家庭での電力・熱の日負荷曲線を用い、一軒一軒の家庭にCGSやHPを導入し、確率動的計画法を用いて最適な運用方策を決定するとともに系統電力購入量の変化を算出する。

### (3) 最適電源構成モデルによる電源構成・運用とCO<sub>2</sub>回収貯留の推移の計算

全国47都道府県の4,700軒分の家庭を想定した系統電力購入量の変化を推定値を集計し、CGSやHPの導入が系統電力の日負荷曲線の形状に与えるマクロな影響を評価する。そして、2050年までのCGSやHPの普及シナリオを与え、これらの機器の大量導入が、電源構成・運用ならびにCO<sub>2</sub>回収貯留の推移にどのように影響を及ぼすかを、最適電源構成モデルを利用して評価する。

## 3. 研究の方法

### (1) 家庭での電力・熱の日負荷曲線のボトムアップシミュレーション

本研究で作成したボトムアップシミュレーションは家庭の中にある電気・ガス機器個々の時刻別に発生する需要を乱数（モンテカルロ・シミュレーション）により生成し、それらの和として1軒1軒の電力・熱の日負荷曲線を算出するものである。まず、統計調査データを参考に各家庭の世帯構成員とその行動を決め、それぞれの10分毎の各時点での行動や気温などの情報から、各電気・ガス機器の起動確率を求める。そして、求めた起動確率に従って、これらの機器の起動・停止をモンテカルロ・シミュレーションにより決定し、それに機器毎の単位消費エネルギーを掛けることによってその機器の使用エネルギーを求める。そして、それを積分することによって日負荷曲線を生成する。

図1には、東京在住の5人家族世帯、冬期平日の電力と熱（給湯）の日負荷曲線の生成サンプルを載せる。急峻なピーク負荷が表れ、不確実な需要となる様子が模擬できていることが見て取れる。

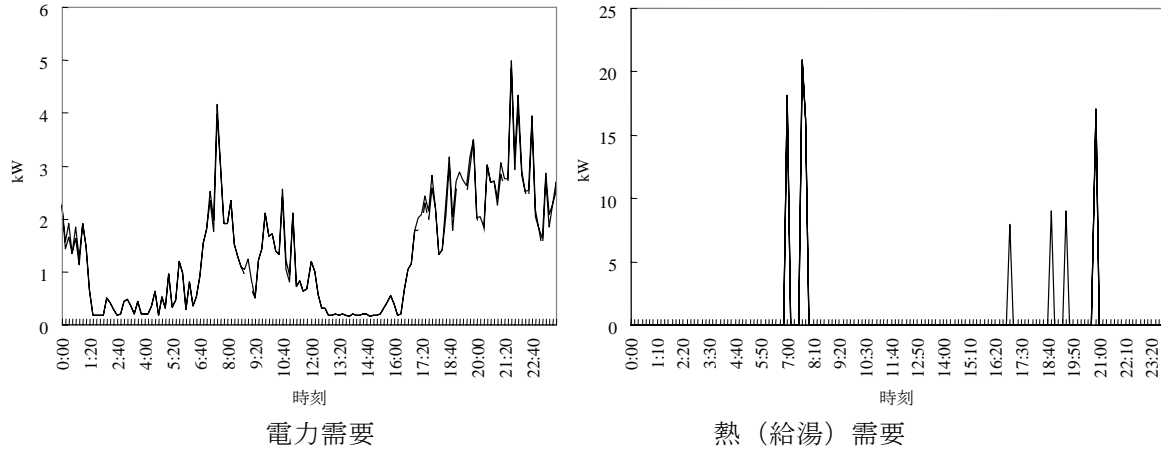


図1. 東京在住の5人家族世帯（冬期平日）の電力と熱（給湯）の日負荷曲線の生成サンプル

都道府県による気温・家族構成比率・行動パターン・機器普及率の違いを考慮して、全国47都道府県・20世帯類型・6季節・10分単位の電力・熱の日負荷曲線を生成する。将来的なライフスタイルの変化や家庭用エネルギー利用機器の技術革新なども考慮した負荷曲線の生成も可能である。

## （2）確率動的計画法を用いたCGSやHPの最適運用戦略の導出

家庭における電力・熱の日負荷曲線の形状は、毎日毎日異なっており確実に負荷の大きさを予測することは難しい。また、負荷変動が大きく、負荷の集中する時間帯も日々変化するものと考えられる。このような状況下で、CGSやHPのメリットを活かすような効率的な運用を行なうためには、家庭での電気・ガス機器の使用傾向、CGSやHPの性能等を考慮した合理的な運用戦略を決める必要がある。

そこで本研究では、家庭における電力・熱の需要の時間的な推移を、一種の確率過程によりモデル化できると仮定し、確率動的計画法を用いて、光熱費（電気代とガス代の和）の期待値が最小となるような最適運用戦略を導出することを考えた。

以下に第 $t$ 時点における光熱費の期待値 $Q_t$ を求める関数方程式を示す。

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}) = \min_{a_t} \left( C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, a_t) + \sum_{m=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}; Dh_{t+1,m}) Q_{t+1}(S_{t+1,i'}, Dh_{t+1,m}) \right) \quad (1)$$

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}) = \min_{a_t} \left( C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}, a_t) + \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}, De_{t,k}; Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) Q_{t+1}(S_{t+1,i'}, Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) \right) \quad (2)$$

ただし、 $C_t$ ：第 $t$ 時点における総コスト、 $S_{t,i}$ ：第 $t$ 時点に貯湯タンク内残湯量（ $i$ ：8段階に離散化）、 $Dh_{t,j}$ ：第 $t$ 時点に熱負荷（ $j$ ：8段階に離散化）、 $De_{t,k}$ ：第 $t$ 時点に電力負荷（ $k$ ：8段階に離散化）、 $a_t$ ：貯湯タンク内残湯変化量あるいはCGSの制御出力、 $P_{t,t+1}$ ：第 $t$ 時点と第 $t+1$ 時点との間における需要の遷移確率

式（1）と（2）の $P_{t,t+1}$ は、モンテカルロ・シミュレーションを通して、同一世帯に関して繰り返し需要（例えば10日分）を発生させて、その発生頻度から確率を推計する。モンテカルロ・シミュレーションにおいて、たまたま一度も発生しなかった事象の確率については、周辺の事象の確率を利用して正規分布補間を行なうことによって値を想定する。

次に対象としたCGSおよびHPシステム及びモデル仕様を示す。図2、図3に概略図を載せる。

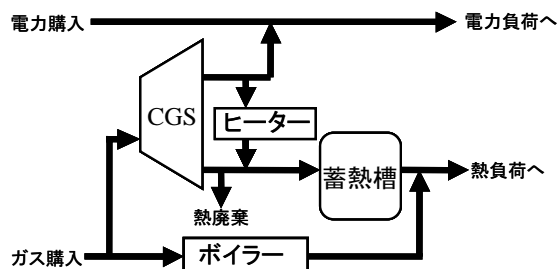


図2. CGSのシステム構成図

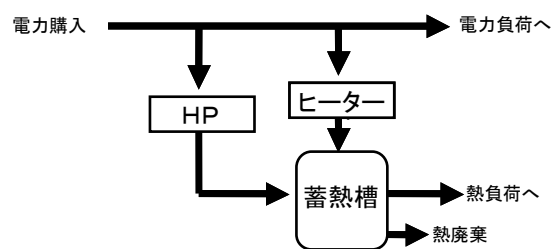


図3. HPのシステム構成図

表1 CGSの想定仕様（ガスエンジンCGSを想定した場合）

項目	仕様	備考
発電出力	1000[W]	
廃熱出力	3250[W]	
効率(発電)	20[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m <sup>3</sup> ])基準
効率(廃熱)	65[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m <sup>3</sup> ])基準
総合熱効率	85[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m <sup>3</sup> ])基準
暖機運転時廃熱出力減少率	50[%]	エンジンが停止状態から運転状態に変化した時の熱出力減少率(暖機運転時間は10分間)
最大ガス消費量	0.4343[m <sup>3</sup> /h]	1時間連続動作時のガス消費量
貯湯タンク容量	20000[Wh]	タンク容量を300[L]とし、元水温を一律60[°C]上昇させるものとする。
補助ボイラ熱効率	80[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m <sup>3</sup> ])基準
ヒーター熱効率	98[%]	余剰電力を熱変換する際のヒーター熱効率
タンク保温効率	99.9[%/5min]	電気温水器の保温効率を参考に決定・5分ごとにタンク内熱量が0.1[%]づつ減少

表2 HPの想定仕様

項目	仕様	備考
出力	4500[W]	
COP	4(定格)	外気温に依存して変化
暖機運転時廃熱出力減少率	50[%]	エンジンが停止状態から運転状態に変化した時の熱出力減少率(暖機運転時間は10分間)
貯湯タンク容量	25800[Wh]	タンク容量を370[L]とし、元水温を一律60[°C]上昇させるものとする。
ヒーター熱効率	98[%]	不足した熱需要をまかなうためのヒーター熱効率
タンク保温効率	99.9[%/5min]	電気温水器の保温効率を参考に決定・5分ごとにタンク内熱量が0.1[%]づつ減少

図4、図5に一軒一軒の不確実な需要に対し確率動的計画法により運用を決定し、その後100軒分平均した各種負荷とガスエンジンCGS出力ならびにHP用電力などを示す。

CGSでは、確率動的計画ケースでは小刻みに需要に対応した運転をすることはなく、電力需要がある程度期待される朝と夕刻に運転をする結果となっている。ガスエンジンCGSの場合では、系統電力の消費量を2割以上削減はできるものの、都市ガスの消費量が大幅に増加する。床暖房などの新規の温熱需要がない場合は、排熱を有効に利用でき場合もある。

HPの場合では、不確実な給湯需要に備えるため、貯湯タンク残湯量のある程度多く保とうとする運転パターンをとり、当初予想された夜間電力を利用した運転とはならなかった。この結果は、現時点での定式化方法では、確率動的計画の24時における終端条件の考慮の仕方にまだ検討の余地がある可

能性を示唆している。HPの導入は、電力消費量自体は15%程度増加するものの、深夜の安価な電力利用することや、給湯用の都市ガス利用をなくすることができるため、結果として1割程度の光熱費の削減に寄与する結果となっている。ここで計算された購入電力量の変化、購入ガス量の変化を次章の最適電源構成モデルへの入力データに反映させる。

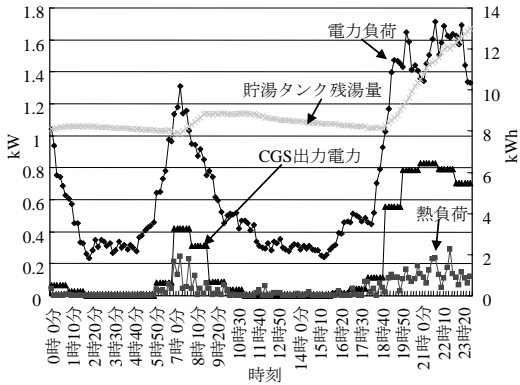


図4. CGS確率動的計画ケース

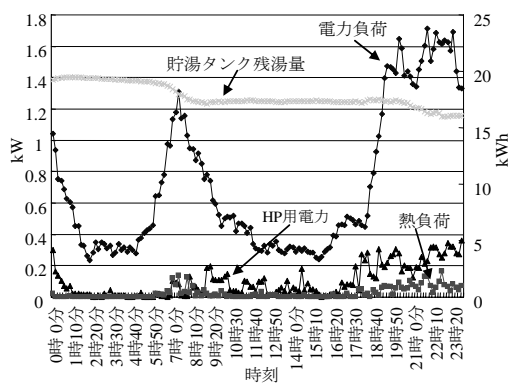


図5. HP確率動的計画ケース

次に燃料電池を発電装置として利用したCGSのシステム解析について述べる。基本的な構成は図2に示したガスエンジンCGSと同じである。ガスエンジンCGSの運用としては、「運転」と「停止」の2値制御がなされているが、燃料電池の場合は、1kW程度の小容量であっても、部分負荷運転が可能となる点が大きく異なる。確率動的計画法に基づいて数学モデルを作成する際には、燃料電池CGSでは、（2）式における $a_i$ の探索領域が広がる。そのため、必要な計算時間も数倍に増加する。

表3には、本研究で試作した燃料電池CGSで想定した部分負荷特性を示す。停止状態も含めて5段階の出力レベルを考慮している。

表3 燃料電池CGSの部分負荷特性の想定

制御段階	1	2	3	4
出力	300W	500W	750W	1000W
発電効率	27%	30%	31%	31.50%
廃熱効率	24%	33%	38%	41%

燃料電池を利用するCGSの場合、部分負荷時でも、発電効率はガスエンジンCGSよりも高い。一方、廃熱利用の方は、発電効率が高い分だけ効率が落ちるものと考えられている。特に負荷率が低い場合は、廃熱の利用効率は特に低いものとなっている。このことは逆に、廃熱の有効利用のために、床暖房などの新規給湯需要を想定しなくても良いことを示唆している。

次の図6から図8には、夏期、中間期、冬期（それぞれ平日と休日）における東京地区を想定した4人家族世帯の一日における系統電力の購入量の推移（100軒平均）を示す。電力需要、熱需要は前述のボトムアップシミュレーションで作成したものである。

ここでは、「電力負荷」はCGSがない場合、「GE」はガスエンジンCGSを設置した場合、「FC」は燃料電池CGSを設置した場合、「FC(連続)」は燃料電池CGSを昼夜連続運転する場合のそれぞれの系統電力の購入量の推移を表している。燃料電池は、頻繁な起動停止は耐久性を損ねる可能性があるため、

耐久性の確保を目指した連続運転もその運用方法の一つとして検討されている。本研究では、この連続運転による運用方法は、最低出力（300W）以下には出力を下げられないものとしてモデル化している。

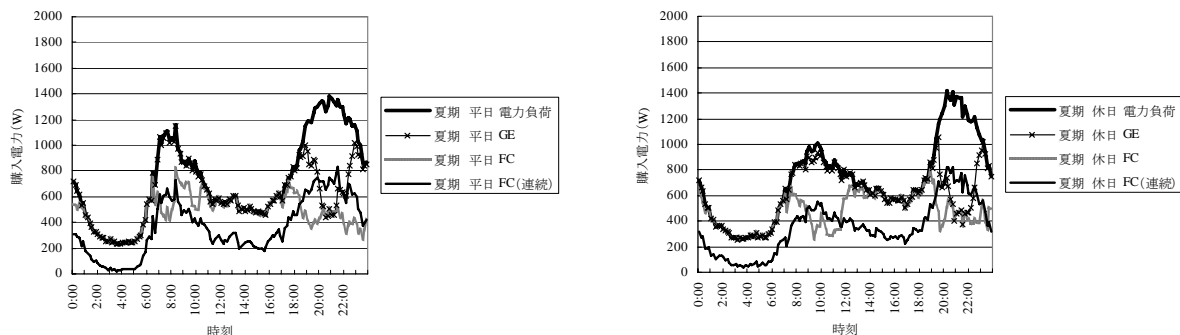


図 6 夏期における系統電力購入量（左：平日、右：休日、東京地区、4人世帯の 100 軒平均）

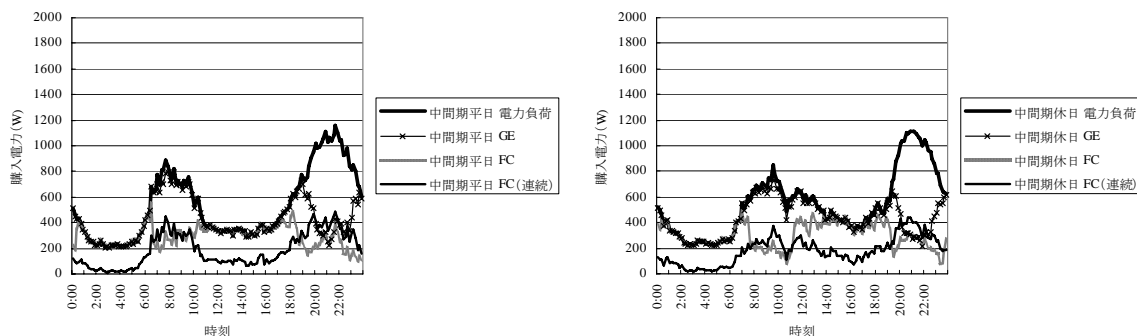


図 7 中間期における系統電力購入量（左：平日、右：休日、東京地区、4人世帯の 100 軒平均）

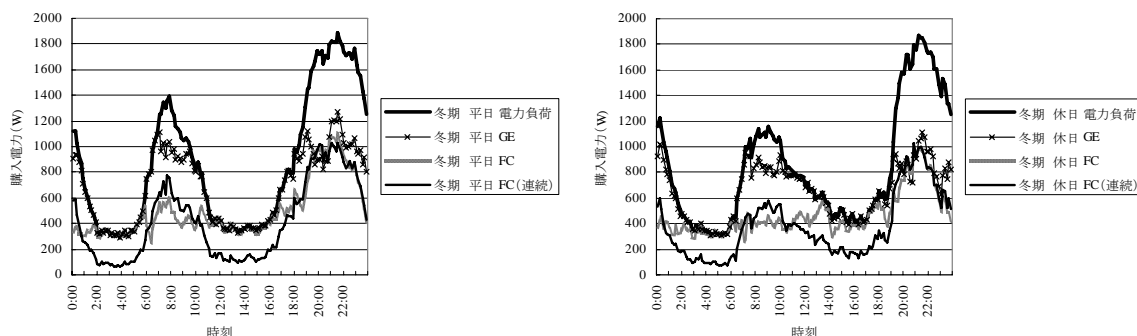


図 8 冬期における系統電力購入量（左：平日、右：休日、東京地区、4人世帯の 100 軒平均）

ガスエンジン CGS の場合では、朝方のピーク時には起動されることの割合は少なく、主に夕方からのピーク需要に使用されているのがわかる。一方、燃料電池 CGS の場合は、部分負荷での柔軟な運用が可能となるため、朝方の小さなピークでも運用されるケースが増えている。燃料電池を連続運転する場合では、深夜の系統電力購入量も大幅に減少する。



次の図 9 には 1 日当たりの光熱費を示す。CGS を導入する場合は、そうでない場合に比べて、一般には光熱費（電気代とガス代の合計）は減少する。ただし、この光熱費には CGS の設備費は含まれていないことには注意が必要である。CGS 導入の光熱費に関する経済的な差額は 1 日当たり 50～100 円であり、1 年間に換算しても 2～3 万円程度と考えられる。この差額で、設備を購入できるかどうか、CGS を実際に普及させる場合には問題となる。CGS 間での比較では、燃料電池を連続運転させない場合が最も経済的であることがわかる。ただし、前述したように、頻繁起動停止は設備の寿命を短くする可能性があるため、設備費も考慮した経済性評価が必要である。

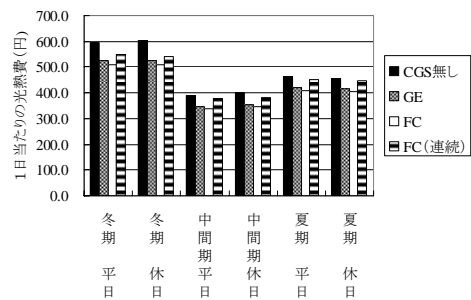


図 9 1 日当たりの光熱費

図 10 には 1 日当たりの電力購入量、図 11 には 1 日当たりのガス購入量を示す。燃料電池 CGS を連続運転する場合、電力購入量は大幅に減少し、その代りにガスの購入量が数倍程度に顕著に増大することがわかる。

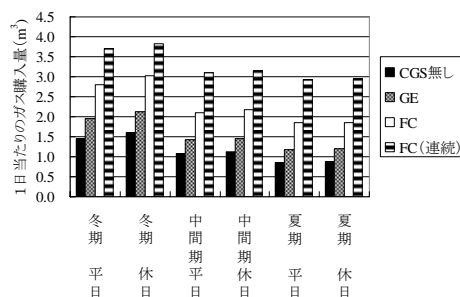
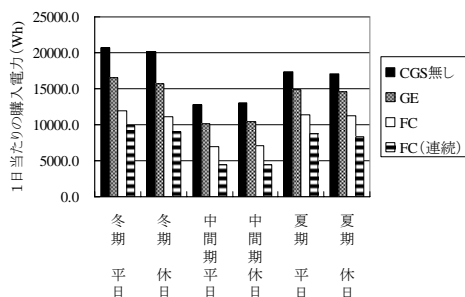


図 10 1 日当たりの電力購入量

図 11 1 日当たりのガス購入量

図 12 と図 13 には、1 日当たりの CO<sub>2</sub> 排出量の推定量を示す。（系統電力の CO<sub>2</sub> 排出係数として、0.368kg-CO<sub>2</sub>/kWh を想定したものを左に、0.660kg-CO<sub>2</sub>/kWh を想定したものを右に示す。）

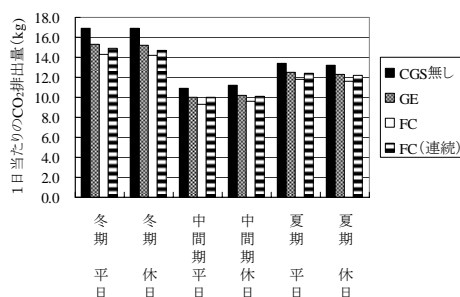
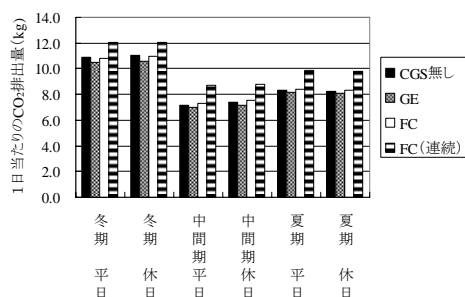


図 12 1 日当たりの CO<sub>2</sub> 排出量

図 13 1 日当たりの CO<sub>2</sub> 排出量

(系統電力 0.368kg-CO<sub>2</sub>/kWh を想定)

(系統電力 0.660kgCO<sub>2</sub>/kWh を想定)

図12や図13に見るように、系統電力のCO<sub>2</sub>排出係数が小さい場合、燃料電池を利用した場合であっても、今回想定した発電効率や廃熱利用効率を前提とする限り、CGSの導入はCO<sub>2</sub>の排出量を増加させてしまうこともあり得ることがわかる。

### （３）最適電源構成モデルによる電源構成・運用とCO<sub>2</sub>回収貯留の推移の計算

前述したように、本最適電源構成モデル自体は、平成16年度の研究で構築したものであり、平成17年度は、対象期間を1990～2035年だったものを、2005年～2050年へと更新した。さらに、平成18年度には、最新の最適化計算ソフトが利用できるように、プログラムを全面的に書きなおし、モデルの再構築を行った。

本モデルは需要に対して、日本全体の発電事業総費用を最小にするような電源構成、運用方法を線形計画法により求めるものであり、電源種別の運用特性や経済特性、そしてCO<sub>2</sub>排出量削減対策なども明示的に考慮した解析が可能である。本モデルの主要設定条件を以下に載せる。

- ・ 目的関数：発電事業総費用（期間中の割引率は5%で現在価値換算）の最小化
- ・ 制約条件：電力需給制約、供給予備力制約、設備容量制約、発電出力上限・下限制約、揚水式水力関連制約、電力融通制約、負荷追従制約、LNG消費量制約、CO<sub>2</sub>排出量制約、CO<sub>2</sub>回収設備制約、CO<sub>2</sub>貯留制約
- ・ 対象期間：2005年から2050年（5年間隔で10期間）
- ・ 対象地域：日本を9地域（北海道・東北・東京・北陸・中部・関西・中国・四国・九州）に分割
- ・ 供給力：原子力、石炭火力発電、IGCC、LNG火力発電、LNG複合発電、石油火力発電、揚水発電、一般水力・地熱発電（外生値）、他社受電（日本全体の最適化を行う）
- ・ 需要：各地域・年度につき24 時間帯日負荷曲線（年間7 パターン）
- ・ 参照ケース、2050年までにCGSの戸建住宅100%普及ケース、2050 年HPの戸建住宅100%普及ケースの需要を使用（現時点から2050年までは線形に普及率が高まると想定）
- ・ CO<sub>2</sub>回収設備：石炭火力発電、IGCC、LNG火力発電、LNG複合発電にのみ導入可能と想定
- ・ CO<sub>2</sub>貯留：帯水層、油・ガス田、海洋帯水層、海洋への貯留を考慮する。輸送パイプライン、注入法等についても考慮

## 4. 結果と考察

ここでは、これまでに開発したモデルを組み合わせ、日本全体としてのCO<sub>2</sub>排出量の変化を試算した結果を示す。なお、ここではCGSとしては、一戸建住宅を対象にしたガスエンジンCGSのみを考慮していることには注意が必要である。燃料電池CGSや集合住宅へのCGS導入を考慮したシナリオでの下での検討は、今後進めていく予定である。

図14と図15には、CO<sub>2</sub>排出制約が無いケースにおいて、ガスエンジンCGSやHPが普及することで参照ケース（ガスエンジンCGSやHPが普及しないケース）からの発電電力量の変化分をそれぞれ図示する。モデルによる計算結果によると、2050年頃になると、CGSやHPの大規模普及による電力需要の変化に対しては、主にベース電源となる原子力、LNG複合発電の発電量を変化させることで対応している。

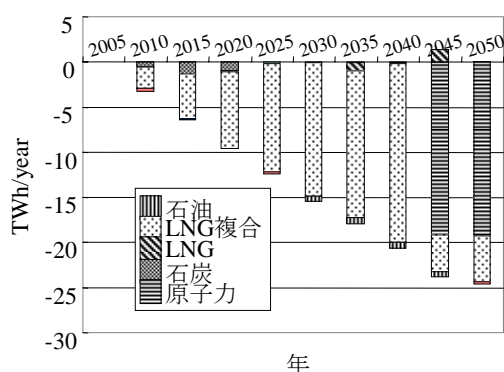


図14. CGSの普及により変化する発電電力量

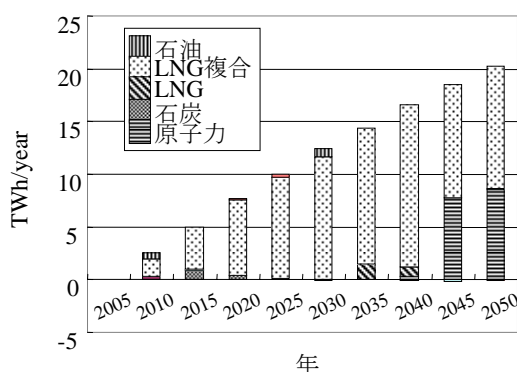


図15. HPの普及により変化する発電電力量

次に図16には参照ケース（ガスエンジンCGSやHPが普及しないケース）において、CO<sub>2</sub>排出量の1990年比8割削減を想定した場合のCO<sub>2</sub>バランスを示す。また、このときのCO<sub>2</sub>排出制約条件式のシャドープライスと同額の炭素税を導入した状況下で、ガスエンジンCGSとHPが大規模普及した場合のCO<sub>2</sub>バランスを図11、図12にそれぞれ示す。いずれの場合も主にLNG複合発電から排出されるCO<sub>2</sub>を油・ガス田、帯水層、海底下帯水層、海洋（深海）の順に使用していき、CO<sub>2</sub>回収貯留を大規模に実施される結果となった。また、HPの導入により家庭で排出されなくなるCO<sub>2</sub>排出量は大きく、同額の炭素税を導入した場合、CO<sub>2</sub>排出量の8%程度の追加削減につながる結果となった。なお、CO<sub>2</sub>貯留サイトに関しては、地中貯留については現時点ではまだ調査段階であり、また海洋（深海）貯留に関しては国際的な合意は得られていない。

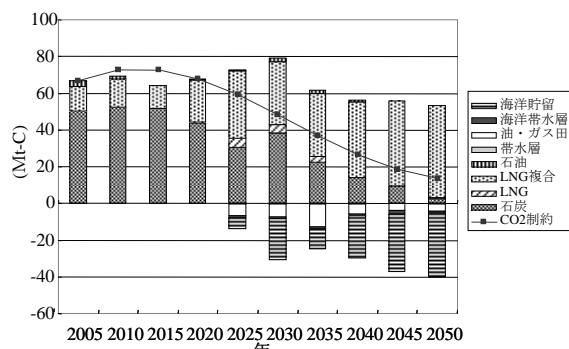


図16. 参照ケースのCO<sub>2</sub>バランス  
(1990年比8割削減)

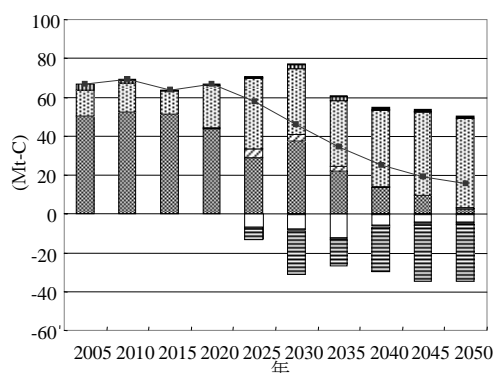


図17. CGSの普及時のCO<sub>2</sub>バランス

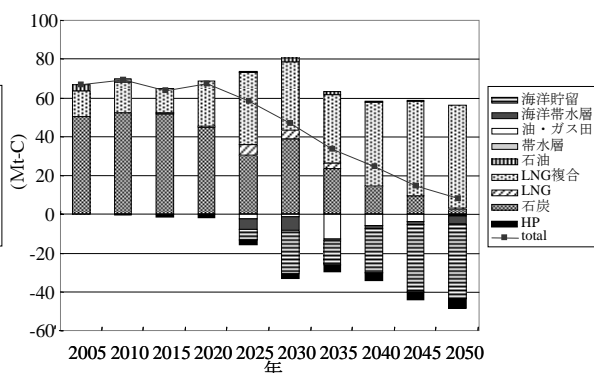


図18. HPの普及時のCO<sub>2</sub>バランス

(1990年比8割削減相当の炭素税導入ケース)

最後にガスエンジンCGSやHPの普及によりCO<sub>2</sub>排出原単位がどう変化するか考察する。CO<sub>2</sub>排出原単位の計算方法は、参照ケースとCGSケース・HPケースの電源からのCO<sub>2</sub>排出量の差を分子に、総電

力需要量の差を分母に用いることで、系統側の運用はブラックボックスとして、あくまで需要端でのCO<sub>2</sub>排出原単位を、将来の設備容量の変化まで含めたCO<sub>2</sub>排出原単位を算出することになる。

こうして算出した2050年までの全期間内排出原単位を図19に示す。現在の需要端でのCO<sub>2</sub>排出原単位は全電源平均で0.101[kg-C/kWh]、火力平均で0.18[kg-C/kWh]である。今回の計算結果では、CO<sub>2</sub>排出量制約が無い場合には、CGSケース・HPケースのどちらも全電源平均より小さい結果となった。これは、CO<sub>2</sub>排出量制約が無い場合には、原子力の発電電力量を変化させて、CGSやHPの普及による電力需要の変化に対応しているためで、現在の全電源平均や火力平均とはいずれも異なる結果となった。そして、CO<sub>2</sub>排出量制約（1990年比5～6割削減）が課せられると、現在の全電源平均のCO<sub>2</sub>原単位に比べ、CO<sub>2</sub>原単位は増加する結果となった。これは、CO<sub>2</sub>排出量制約が課せられた場合、原子力発電は上限制約一杯まで導入されるため、CGSやHPの普及による電力需要の変化には、LNG複合発電による調整で対応することになると推定されるためである。ただし、さらに厳しいCO<sub>2</sub>制約（1990年比7～8割削減）が課せられると、CO<sub>2</sub>原単位は低下に転ずる結果となっているが、これは火力発電所にCO<sub>2</sub>回収装置のついた設備の普及するためである。

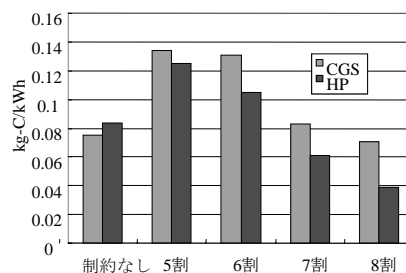


図19. 2050年までの全期間内CO<sub>2</sub>排出原単位  
(横軸は1990年比の2050年時点のCO<sub>2</sub>排出削減率)

## 5. 本研究により得られた成果

本試算を通じて以下のことがわかった。

- 不確実な需要下における確率動的計画法を利用したCGSの運用決定は、基本的には電力需要に追従して運転を行うため、床暖房などの新規の給湯需要を想定しない場合では、排熱を有効に利用することが出来ずに運転コストが割高になる地域も場合によってはあり得ることが予想される。一方、HPを導入した場合、地域によって程度差はあるが、従来のガスボイラよりも運転コストは削減されることが多いこと予想される。
- ガスエンジンCGSや燃料電池CGSを導入した場合の系統電力の購入量の変化や、光熱費の変化、CO<sub>2</sub>排出量の変化を試算した。系統電力のCO<sub>2</sub>排出係数が小さい場合、燃料電池を利用した場合であっても、今回想定した発電効率や廃熱利用効率を前提とする限り、CGSの導入はCO<sub>2</sub>の排出量を増加させてしまう可能性があることが示唆された。前提条件の精査を行い、より精度の高い評価が必要である。
- CGSやHPの大規模普及の有無に起因する電源構成・運用の変化から求められるCO<sub>2</sub>排出原単位は、全電源平均や火力平均とは異なる結果が得られた。CO<sub>2</sub>排出量制約がないときには、CGSやHPの普及による電力需要の変化への対応は、主に原子力発電により行うため全電源平均よりも低い値となる。1990年比5～6割削減程度のCO<sub>2</sub>排出量制約が課せられると、原子力発電は上限一

杯まで導入されるため、CGS や HP の普及による電力需要の変化へは専ら LNG 複合発電により対応することになるため、CO<sub>2</sub> 排出原単位は増加する。さらに、1990 年比 7～8 割削減程度の厳しい制約が課せられると、CO<sub>2</sub> 回収貯留の導入が進み CO<sub>2</sub> 排出原単位は低下に転ずる。その結果、今回想定した前提条件では、厳しい CO<sub>2</sub> 削減を想定した場合、HP は CGS よりも高い CO<sub>2</sub> 排出削減効果を期待できる。

これまでの評価では、想定した前提条件に依存しているものと考えられるが、HP と比較して CGS には不利な結果となっている。今後は、一戸建住宅でのガスエンジン CGS に加えて、燃料電池 CGS や集合住宅での CGS の集合運用なども想定した評価を行い、計算精度を高めることが必要と考えられる。また、CO<sub>2</sub> 回収貯留技術の有効性も示されたが、CO<sub>2</sub> 地中貯留に関しては、現在、日本国内の CO<sub>2</sub> 貯留可能量の見直し作業が進められている。新しい CO<sub>2</sub> 貯留可能量を反映した評価を行なう必要があると考えられる。また、CO<sub>2</sub> 海洋貯留が実施できないケースも想定した評価も重要であると考えられる。

## 6. 引用文献

- 1) EDMC 「エネルギー・経済統計要覧」(財) 省エネルギーセンター (2002)
- 2) 西尾健一郎 他、「ヒートポンプ給湯器や燃料電池 CGS など家庭用エネルギー機器の技術選択分析」、第 24 回エネルギー資源学会研究発表会
- 3) 末包哲也、「CO<sub>2</sub> 貯留技術の動向 1」地中(帯水層)貯留技術」、エネルギー資源学会学会誌 第 26 巻第六号(通巻 154 号)
- 4) 辻穀一郎 他、「関西文化学術都市における住宅用エネルギー消費の計測調査報告書(第Ⅱ部)」日本学術振興会 (2001)
- 5) NHK 放送文化研究所「国民生活時間調査」日本放送出版協会 (2001)
- 6) 総務省統計局統計センター「国勢調査」(2002)
- 7) 総務省統計局資料 「平成 16 年全国消費実態調査」
- 8) 電気事業連合会統計委員会編 「電気事業便覧平成 13 年版」 日本電気協会(2002)
- 9) 鍋島一郎「動的計画法」森北出版(1968)
- 10) IBEC 住宅建築省エネルギーハンドブック 2002
- 11) 国立社会保障・人口問題研究所、「日本の世帯数の将来推計(都道府県別推計)」(2005 年 8 月推計)
- 12) 総合資源エネルギー調査会需給部会 「2030 年のエネルギー需給展望」
- 13) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部会編 「平成 14 年度電力需給の概要 52」
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部会編 「平成 16 年度電源開発の概要 49」
- 15) エンジニアリング振興協会、石油開発環境安全センター、「CO<sub>2</sub> 地中貯留技術調査 平成 5 年度報告書」(1994)
- 16) 大阪ガス(平成 15 年 6 月 19 日発表)の 2005 年度商品化目標仕様(燃料電池 CGS: 1kW 機)  
<http://www.osakagas.co.jp/Press/pr03/030619.htm>



### （３）都市建築物由来のエネルギー消費と変革による削減効果

慶應義塾大学 理工学部

伊香賀俊治

〔要旨〕 本研究では、住宅や業務建築の運用に伴うエネルギー消費と、それらの建設に伴う誘発環境負荷の両者を対象とする。前者の対策には、断熱性能の向上、省エネ型設備の導入などがあり、後者の対策には、長寿命化やエコマテリアルの採用などがある。さらにライフスタイルの変更も検討対象とする。建築物は、ライフサイクルが長いために、都市内のすべての建築が更新されるまでに数十年以上かかること、都市計画的には建物規模の誘導が可能であること、家族構成・住宅面積・就業人口比率・勤務時間などのストーリーラインによって影響を受ける社会的な要因が大きいことなどの特徴を有する。

まず、これらの複雑な要素を考えずに複数の都市に導入した場合のエネルギー消費量削減のポテンシャルを求める。次に中期解析に用いる建築物の更新サイクルの検討を対象都市に対して行うと共に、省エネ型の技術の普及を予測し、これらを建築物のエネルギー消費モデルに組み込む。さらに社会の変化に伴う住宅、業務用建築の変化シナリオを作成し、エネルギー消費量を求める。

本研究では、住宅や業務建築の運用に伴うエネルギー消費と、それらの建設に伴う誘発環境負荷の両者を対象とする。H16～17年度は、サブテーマ(1)で選定された4都市（宇都宮市、札幌市、広島市、那覇市）に対して、家族類型別世帯数の将来推計を2050年まで延長する検討を行った。また、ライフスタイルの変化、社会の変化のシナリオを住宅部門に反映させ、住宅の断熱、高効率家電製品の買い替え促進、省エネ型ライフスタイルへの変革による二酸化炭素の削減ポテンシャルを算出した。H18年度は、事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量を2050年まで都道府県別に予測し、事務所ビルにおける温暖化防止対策の効果を評価し、温室効果ガス削減目標の達成に向けた対策について検討した。

〔キーワード〕 戸建住宅、集合住宅、業務用建築、断熱強化、省エネ家電、ライフスタイル

#### 1. はじめに

本研究では、住宅や業務建築の運用に伴うエネルギー消費と、それらの建設に伴う誘発環境負荷の両者を対象とする。前者の対策には、断熱性能の向上、省エネ型設備の導入などがあり、後者の対策には、長寿命化やエコマテリアルの採用などがある。さらにライフスタイルの変更も検討対象とする。建築物は、ライフサイクルが長いために、都市内のすべての建築が更新されるまでに数十年以上かかること、都市計画的には建物規模の誘導が可能であること、家族構成・住宅面積・就業人口比率・勤務時間などのストーリーラインによって影響を受ける社会的な要因が大きいことなどの特徴を有する。まず、これらの複雑な要素を考えずに複数の都市に導入した場合のエネルギー消費量削減のポテンシャルを求める。次に中期解析に用いる建築物の更新サイクルの検討を対象都市に対して行うと共に、省エネ型の技術の普及を予測し、これらを建築物のエネルギー消費モデルに組み込む。さらに社会の変化に伴う住宅、業務用建築の変化シナリオを作成し、エネルギー消費量を求める。

## 2. 研究目的

サブテーマ(1)で選定された4都市（宇都宮市、札幌市、広島市、那覇市）に対して、家族類型別世帯数の将来推計を2050年まで延長する検討を行い、ライフスタイルの変化、社会の変化のシナリオを住宅部門に反映させ、住宅の断熱、高効率家電製品の買い替え促進、省エネ型ライフスタイルへの変革による二酸化炭素の削減ポテンシャルを算出することを今年度の研究目的とした。

## 3. 住宅からのCO<sub>2</sub>排出量の2050年までの予測

### 3.1 推計方法

住宅のエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の計算フローを図1に示す。都道府県／都市別、7家族類型別（①高齢単独世帯、②その他単独世帯、③高齢夫婦のみの世帯、④その他夫婦のみの世帯、⑤夫婦と子から成る世帯⑥ひとり親と子から成る世帯、⑦その他の世帯）に、(1)暖冷房、(2)給湯、(3)その他（厨房、娯楽情報、家事衛生、照明）別に計算する。

#### 3.1.1 暖冷房用エネルギー消費量の計算

気象条件、設定室温等を考慮した数十パターンの建物条件による熱負荷計算結果を元に重回帰式を作成し、その式を推計ツールに組み込んだ。推計ツールには、家族類型や地域特性を考慮した延床面積、断熱性能等の変数を用意し、家族類型や検討地域に合わせて熱負荷原単位を変えて利用する仕組みとした。家族類型別の負荷原単位と世帯数から地域全体の負荷を求め、燃料別分担と燃料別平均COPから暖冷房用のエネルギー消費量を算出した。なお、空調換気扇の電力消費量もここに算入した。マクロモデルでの都道府県／都市別暖冷房負荷推計に利用するため、重回帰分析を行い、暖冷房負荷重回帰式を作成した。

重回帰分析の基データとなる各条件の熱負荷は、戸建住宅および集合住宅の標準モデルについて、住宅用熱負荷計算ソフトSMASHで計算した値を利用した。説明変数のシミュレーション条件は、熱損失係数4水準、それ以外の3つの説明変数（デグリーデー、設定室温、延べ運転時間）は3ケースずつ設定した。重回帰分析の観測数は各説明変数の計算条件の組み合わせで33×4=108通りとした。

#### 3.1.2 給湯用エネルギー消費量の計算

給湯用エネルギー消費量の計算フ

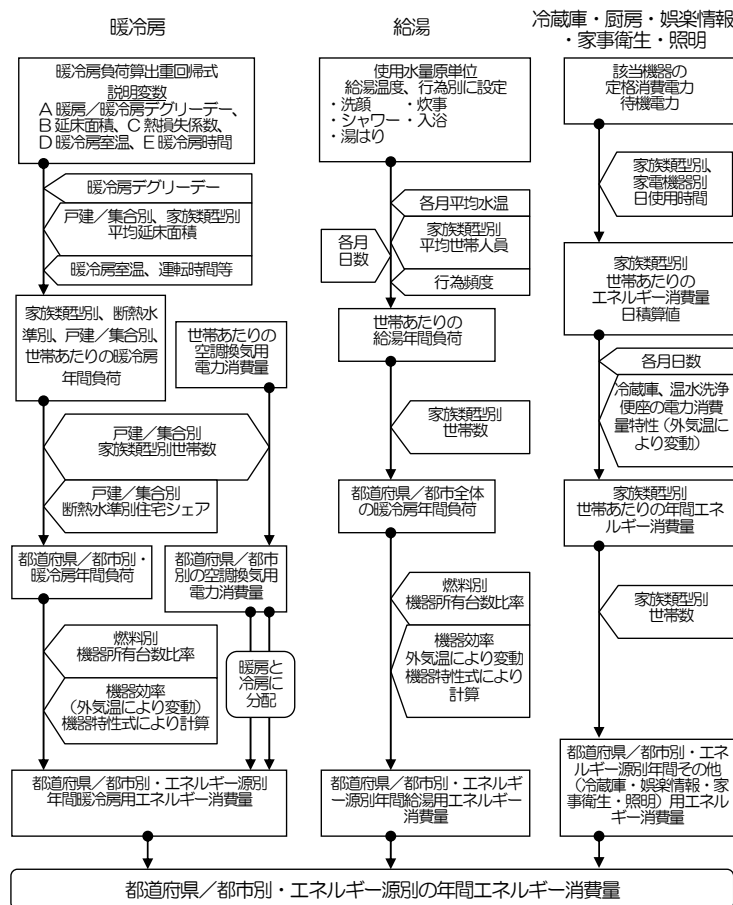


図1 住宅エネルギー消費推計マクロモデルの計算フロー



ローを図1に示す。使用量原単位および利用温度には、空気調和・衛生工学会（以下、空衛学会）の研究成果を利用した。給湯使用行為頻度テーブル、世帯数、各月平均水道水温から給湯負荷を求め、燃料別分担と燃料別平均COPから給湯用エネルギー消費量を算出した。

### 3.1.3 厨房・娯楽情報・家事衛生・照明用エネルギー消費量の計算

厨房・娯楽情報・家事衛生・照明用エネルギー消費量の計算フローを図1に示す。空衛学会の研究成果を利用し、家族類型別に各家電機器の電力消費量日積算値を設定した。日積算値を作成する際の家族構成モデルは、家族類型別に1種のモデルを仮定して当てはめた。日積算値に日数および世帯数を乗じて厨房他4用途のエネルギー消費量を算出した。

### 3.1.4 太陽熱利用量の計算

県庁所在都市毎に、南傾斜20度、南垂直面、最適角度別の単位集熱器面積あたりの年間太陽熱集熱量をデータベースに組み込んだ。戸建住宅、集合住宅別に、集熱器設置角度と普及率を入力して算出する。

### 3.1.5 太陽光発電量の計算

太陽光発電量も太陽熱利用と同様に、県庁所在都市毎に、南傾斜20度、南垂直面、最適角度別の単位発電容量あたりの年間発電量をデータベースに組み込んだ。戸建住宅、集合住宅別に、太陽光発電パネルの設置角度と普及率を入力して算出する。

### 3.1.6 将来推計の条件

札幌市、宇都宮市、広島市、那覇市の4都市について2050年まで表1に示す条件で将来推計を行った。

### 3.1.7 世帯数将来推計の2050年までの延長

表1 将来推計で仮定した省エネルギー対策の概要

	省エネルギー対策の内容
暖 冷 房	新築住宅の断熱強化（2020年までにすべての新築住宅が次世代省エネ基準を満たすものとした）
	既存住宅の断熱強化（2005年以降、毎年全住宅の1.0%が次世代省エネ基準を満たすように断熱改修されるものとした）
	省エネエアコンへの買替促進（2020年時点で全世帯平均の暖房COPが3.0から6.0へ、冷房COPが4.0から6.0へ、2050年時点で全世帯平均の暖房COPが4.0から8.0へ、冷房COPが6.0から8.0へ向上するものとした）
	灯油式から電気式の暖房機器への買換促進（2005年を基準として、電化率が2020年に1.5倍、2050年3倍になるものとした）
	暖房室温を2℃下げ、冷房室温を1℃上げる省エネ行動（2020年までに全世帯の30%で実行され、移行横ばいとした）
	暖房及び冷房の延べ運転時間を25%短縮する省エネ行動（2020年までに全世帯の30%で実行され、移行横ばいとした）
給 湯	電気温水器からヒートポンプ給湯機への買替促進（2020年時点までに完了、また、2050年までにCOP6.0に向上するものとした）。
	潜熱回収型給湯機への買替促進（2020年時点までに完了、熱効率率は1.2倍に向上するものとした）
	灯油式から電気式の給湯機器への買換促進（2005年を基準として、電化率が2020年に1.5倍、2050年3倍になるものとした）
	省エネ行動の普及（①給湯温度を1℃下げる、②入浴回数を減らす。風呂給湯量を減らす。節水シャワーヘッドを使用する、③洗顔と炊事で湯を使うのを減らす。夏の洗顔・炊事には水を使うなどの省エネ行動が2020年には全世帯の50%で実行され、以降横ばいとした）
家 電 製 品	省エネ型冷蔵庫への買替促進（2005年を基準として、2020年には60%、2050年には70%、冷蔵庫の電力消費量が削減されるとした）
	省エネ型テレビへの買替促進（2005年を基準として、2020年には50%、2050年には75%、テレビの電力消費量が削減されるとした）
	省エネ行動の普及（①不使用時に家電のコンセントを抜く、②風呂の残り湯を洗濯に使う、③洗濯をまとめて洗う。スピードコースで洗濯する、④廊下・浴室・洗面所の白熱灯から電球型蛍光灯に交換する、⑤温水洗浄便座のふたを閉める。温度設定を季節に合わせて調整するなどの省エネ行動が2020年には全世帯の50%で実行され、以降横ばいとした）
	太陽熱給湯の普及（戸建住宅で4m <sup>2</sup> /戸、集合住宅で2m <sup>2</sup> /戸の太陽熱給湯器が2020年までに戸建で20%、集合住宅で2%、2050年までに戸建で40%、集合住宅で4%まで普及するものとした）
熱・太陽	太陽光発電（戸建住宅で4kW/戸、集合住宅で0.5kW/戸の太陽光発電が2020年までに戸建で10%、集合住宅で1%、2050年までに戸建で20%、集合住宅で2%まで普及するものとした）

注：その他、電力会社の努力分として、2010年の電力CO<sub>2</sub>原単位は、電気事業連合会の自主目標0.34kg-CO<sub>2</sub>/kWh（1990年比20%削減）とした。なお2010年以降の公表値がないため、2050年までに1990年比60%削減まで対策が推進されるものとした。

1990年から2020年まで推計できるマクロモデルの推計年次を2050年まで延長した。各都道府県の世帯数推移推計データには、2025年までは(独)国立社会保障・人口問題研究所の将来推計値を引用し、それ以降(2025～2050年)は公開データが存在しないため、暫定措置として、将来人口推計などを基に外挿した。なお、今年度の推計では、4都市が属する北海道、栃木県、広島県、沖縄県の世帯数将来推計値は、シナリオチームのAシナリオとBシナリオの中間的な値となっており、4都市についても道県庁所在都市への世帯集中を想定しなかった。

### 3.2 結果・考察

#### 3.2.1 札幌市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の将来推計

(独)国立社会保障・人口問題研究所の予測と、札幌市の家族類型別世帯数の統計データを基に、札幌市の世帯数の将来推計を行った結果、図2に示すように、2005年に1990年比15%増となるのをピークに減少に転じ、2050年には1990年比23%減まで減少し続ける。

この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける札幌市内の住宅の用途別CO<sub>2</sub>排出量を2050年まで予測した結果を図3に示す。CO<sub>2</sub>排出量は、2010年には1990比18%増という高いレベルに留まるものの2050年には46%減まで減少する。これに対して、表1に示すような対策を強化したケースでは、2010年には1990年比3%増に抑えられ、2050年には66%減にまで削減できるという結果が得られた。

#### 3.2.2 宇都宮市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の将来推計

宇都宮市の世帯数の将来推計結果を図4に示す。2020年に1990年比35%増になるまで増大を続け、2050年においても1990年比23%増に留まっている。

この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける宇都宮市内の住宅の用途別CO<sub>2</sub>排出量を2050年まで予測した結果を図5に示す。CO<sub>2</sub>排出量は、2010年には1990比31%増という高いレベルに留まり、2050年においても21%減に留まっている。これに対して、表1に示すような対策を強化したケースでは、2010年には1990年比15%増に抑えられ、2050年には51%減にまで削減できるという結果が得られた。

#### 3.2.3 広島市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の将来推計

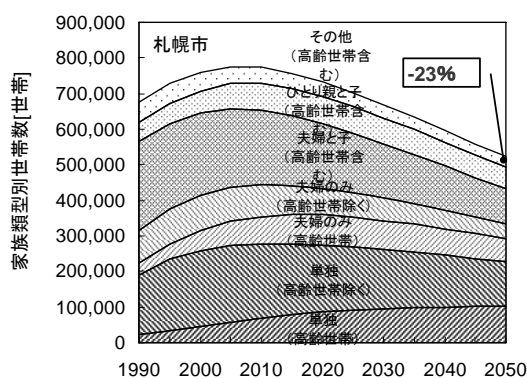


図2 札幌市の家族類型別世帯数の将来推計

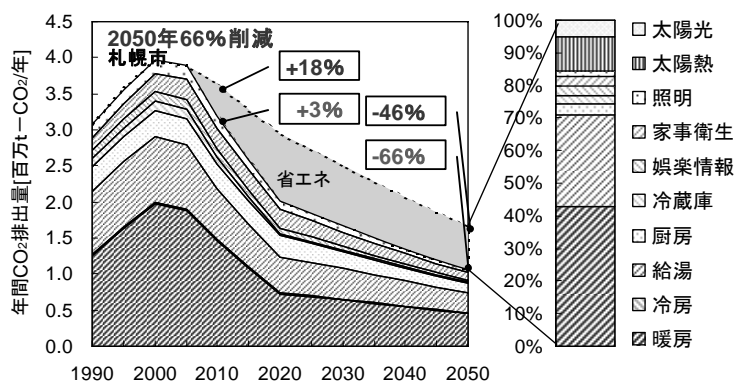


図3 札幌市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の推移(対策強化ケース)

広島市の世帯数の将来推計結果を図6に示す。2010年に1990年比17%増となるのをピークに減少に転じ、2050年には1990年比12%減まで減少し続ける。

この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける広島市内の住宅の用途別CO<sub>2</sub>排出量を2050年まで予測した結果を図7に示す。CO<sub>2</sub>排出量は、2010年には1990比18%増という高いレベルに留まるものの2050年には47%減まで減少する。これに対して、表1に示すような対策を強化したケースでは、2010年には1990年比4%減に抑えられ、2050年には68%減まで削減できるという結果が得られた。

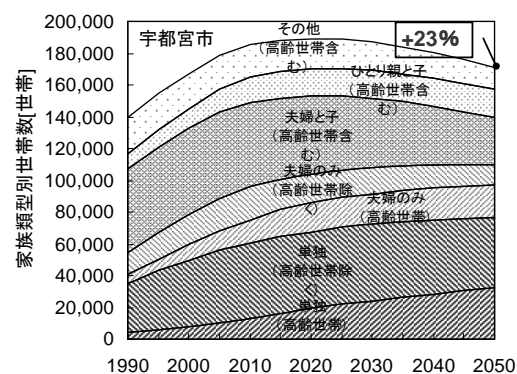


図4 宇都宮の家族類型別世帯数の将来推計

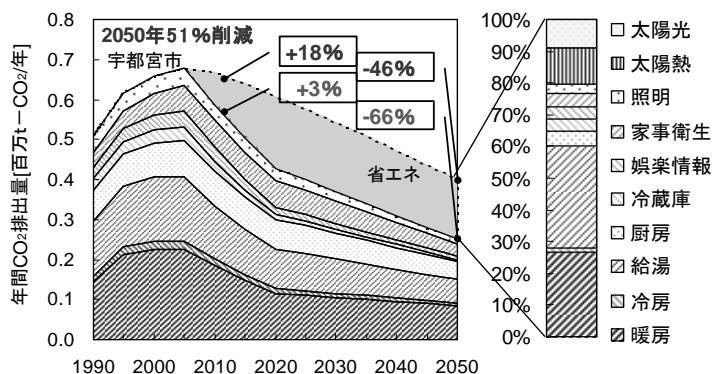


図5 宇都宮市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の推移（対策強化ケース）

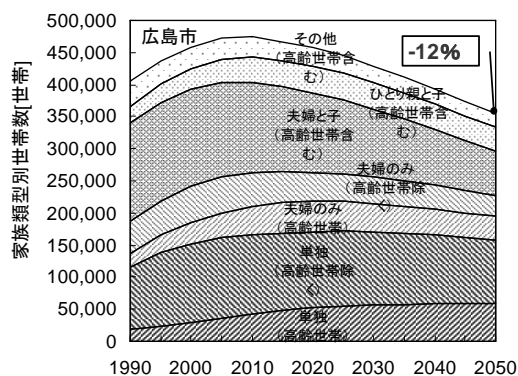


図6 広島市の家族類型別世帯数の将来推計

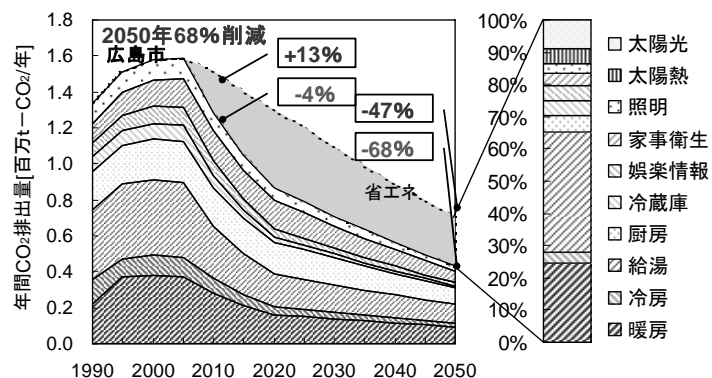


図7 広島市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の推移（対策強化ケース）

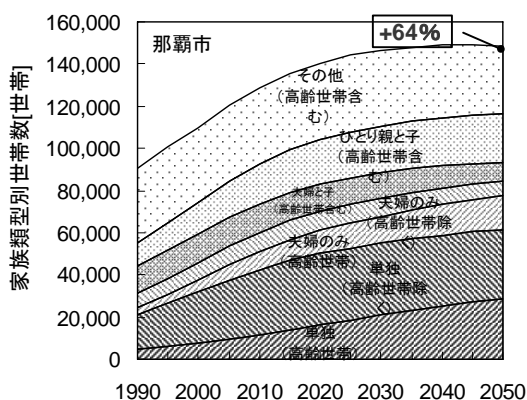


図8 那覇市の家族類型別世帯数の将来推計

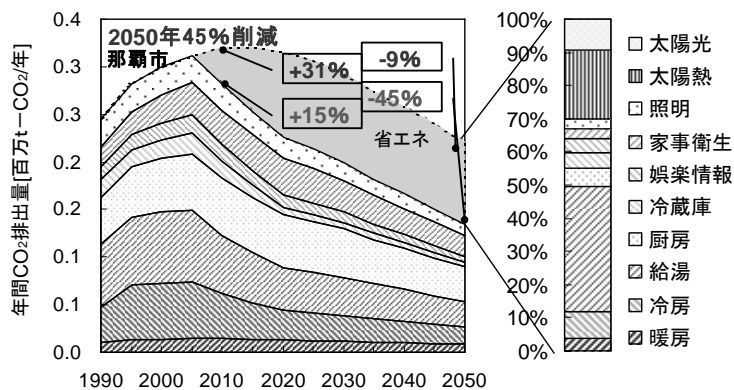


図9 那覇市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の推移（対策強化ケース）

### 3.2.4 那覇市の住宅CO<sub>2</sub>排出量の将来推計

那覇市の世帯数の将来推計結果を図8に示す。2010年に1990年比42%増となり、2045年まで増大し続け、2050年でもようやく減少に転ずるが1990年比64%増となる。

この世帯数データ等に基づき、自然体ケースにおける那覇市内の住宅の用途別CO<sub>2</sub>排出量を2050年まで予測した結果を図9に示す。CO<sub>2</sub>排出量は、2010年には1990比31%増という大幅な増大となり、2050年でも9%減に留まっている。これに対して、表1に示すような対策を強化したケースにおいても、2010年には1990年比16%増に留まるものの、2050年には46%減まで削減できるという結果が得られた。

## 4. 事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量の2050年までの都道府県別予測

### 4.1 予測方法

予測モデルの概要を図10に示す。予測モデルは以下の3つのサブモデルから構成されている。

- ① 床面積に関する予測モデル：ストック/新築/改修床面積を都道府県別に2050年まで予測する。
- ② CO<sub>2</sub>原単位(床面積当りのCO<sub>2</sub>排出量)評価モデル：低炭素技術の導入による床面積当りのCO<sub>2</sub>排出量の削減効果を評価する。
- ③ 低炭素技術の導入評価モデル：各低炭素技術について、経済合理的な導入率を評価する。

事務所ビルのストック床面積の公的な予測データは存在しない。そこで、将来推計人口データに基づき、事務所ビルのストック床面積を算出する。事務所ビルのストック床面積の予測フローを図11に示す。各パラメータを、2050年の社会像別(都市集中型社会:シナリオA、地方分散型社会:シナリオB)にそれぞれ適宜推計した(表2)。試算した結果を図12に示す。

2005年度までの新築床面積を建築着工統計に基づき推計した。それ以降は、毎年の新築床面積が事務所ビルの残存率関数に従い減少する一方で、ストック床面積を満たすように毎年の

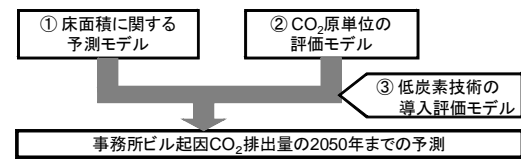


図10 予測モデルの概要

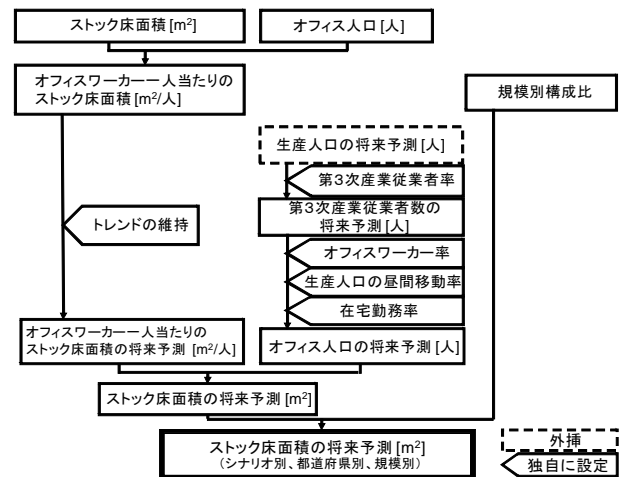


図11 事務所ビルのストック床面積の予測フロー

表2 オフィス人口に関する各パラメータの根拠

生産人口 (15～64歳の人口)	環境省「脱温暖化2050プロジェクト」における将来推計人口データ(シナリオA・B共通)
第3次産業従業者率 (生産人口のうち、第3次産業従業者の占める割合)	GDP成長率と同じ比率で増加していくと仮定(シナリオA:2%/年、シナリオB:1%/年)
オフィスワーカー率 (第3次産業従業者数のうち、オフィス人口の占める割合)	2005年時点での値を固定(シナリオA・B共通)
生産人口の昼間移動率 (人口を昼間人口に変換する係数)	2005年時点での値を固定(シナリオA・B共通)
在宅勤務率 (オフィス人口のうち、在宅勤務者の占める割合)	シナリオA:2020年に約10%で安定 シナリオB:2050年に約30%に達成すると仮定
オフィスワーカー一人当たりのストック床面積	現状の微増傾向が2020年まで続き、24.9m <sup>2</sup> /人で安定すると仮定
規模別構成比 (床面積ベース)	小規模クラス(～1999m <sup>2</sup> ):51.1% 中規模クラス(2000～9999m <sup>2</sup> ):26.4% 大規模クラス(10000m <sup>2</sup> ～):22.5%

事務所ビルのストック床面積 [億m<sup>2</sup>]

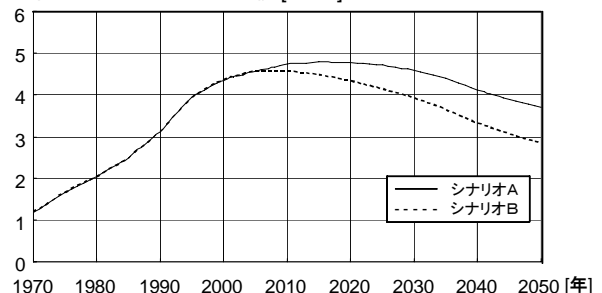


図12 事務所ビルのストック床面積(全国)

新築床面積を予測した。また、改修床面積を新築後20年周期で改修工事が行われると仮定し、毎年の改修床面積を予測した。事務所ビルのCO<sub>2</sub>原単位は、事務所ビルの規模や所在地の気候、ライフステージによって異なる。そこで、規模別の事務所ビルの標準モデルを設定し、各モデルビルに様々な低炭素技術を採用した場合のCO<sub>2</sub>原単位を、規模別、気候区分別、ライフステージ別に算出し、データベースを作成した。事務所ビルモデルは規模別に3種類設定し、それぞれ2000m<sup>2</sup>未満、2000～9999m<sup>2</sup>、10000m<sup>2</sup>以上のビルの代表的規模とした。「官庁施設の環境保全性に関する基準」<sup>2)</sup>に基づき、CO<sub>2</sub>削減効果が大きい低炭素技術を選定した(表3)。新築・改修時のCO<sub>2</sub>排出量の評価には、建物のLCAツールを用いた。運用時のCO<sub>2</sub>排出量の評価には、空調に関してビル空調熱源経済性評価プログラムFACESを、空調以外に関してCEC計算基準を用いた。

規模別、気候区分別、ライフステージ別、低炭素技術別に、CO<sub>2</sub>原単位を算出した。各低炭素技術の導入率は経済性に強く影響され、導入率と投資回収年数の関係は選好関数で表されることが知られている。また、投資回収年数に影響を与える初期単位コストは、累積生産量が増加するほど低下し、その関係は学習曲線として表される。選好関数と学習曲線に基づき、各低炭素技術の導入率を規模別、新築・改修時別に予測した。

#### 4.2 予測条件

ストック床面積は、前報で算出した将来の社会像別(A:都市集中型、B:地方分散型)シナリオ、及び両者の中間シナリオ、以上3ケースを想定する。電力CO<sub>2</sub>原単位に関しては、2005年以前は実績値を用いる。2005年以降は、2005年度の実績値(0.425kg-CO<sub>2</sub>/kWh)を固定したシナリオと、超長期エネルギー技術ロードマップにおける予測値(2030年:0.27kg-CO<sub>2</sub>/kWh、2050年:0.12kg-CO<sub>2</sub>/kWh)を採用したシナリオの2ケースを想定する。

#### 4.3 予測結果

低炭素技術が導入されないケース(自然ケース)および2008年から各低炭素技術が導入率に基づき導入されるケース(対策ケース)について試算した。

##### 4.3.1 事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量(全国)

図16、17に事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量の予測結果を示す。ストック床面積は両者とも中間シナリオを採用し、電力CO<sub>2</sub>原単位に関しては、図16が2005年度実績値を固定、図17がロードマップの予測値を採用している。図16に示すように、対策ケースにおける

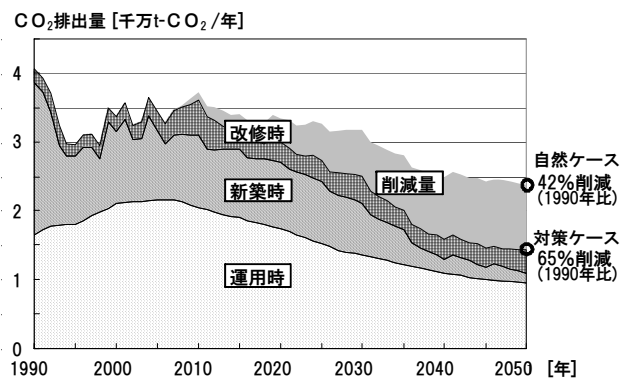


図16 事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量の予測結果  
(ストック床面積: 中間シナリオ、  
電力CO<sub>2</sub>原単位: 2005年度実績値(固定))

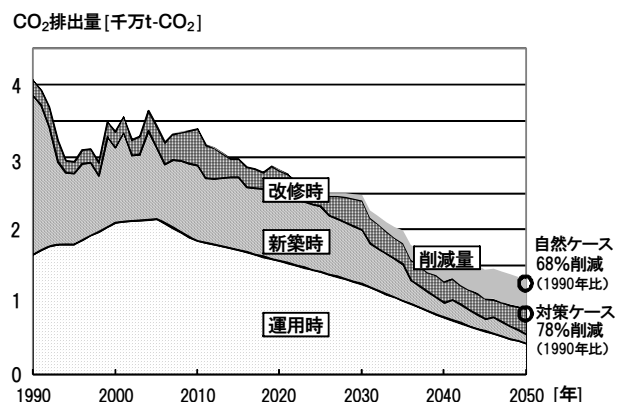


図17 事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量の予測結果  
(ストック床面積: 中間シナリオ、  
電力CO<sub>2</sub>原単位: ロードマップの予測値)

2050年のCO<sub>2</sub>排出量は1990年比で65%の削減が可能である。一方、自然ケースにおいても42%削減されている。これは1990年の新築床面積が非常に大きく、自然ケースにおいても新築床面積が減少するためである。図17に示すように、電力CO<sub>2</sub>原単位が大幅に改善された場合、対策ケースでは78%の削減が可能である。また、ストック床面積、電力CO<sub>2</sub>原単位の各ケースを組み合わせた場合における予測結果を表1に示す。

各低炭素技術によるCO<sub>2</sub>削減量の内訳を図18に示す。削減効果が大きい対策は、長寿命化（2050年時の総削減量の40%）、照明方式（同28%）、熱源方式（同17%）である。特に長寿命化による削減効果が大きい。対策開始から効果が表れるまでに約20年を要するため、削減目標達成に向けて早急に取り組む必要がある。社会環境変化および低炭素技術のCO<sub>2</sub>削減への貢献度を図19に示す。在宅勤務者の増加やサービス産業化の影響が比較的大きいため、これら社会環境変化の不確実性を踏まえ、精度良く予測することが重要である。

#### 4. 3. 2 事務所ビルの運用CO<sub>2</sub>排出量（都道府県別）

2050年の事務所ビル運用時のCO<sub>2</sub>排出量を、都道府県別・社会像別に予測した結果を図20に示す（電力CO<sub>2</sub>原単位：ロードマップの予測値、対策ケース）。全国的にAシナリオよりもBシナリオの方がCO<sub>2</sub>排出量は小さく、その傾向は東京都を代表とする都市部で顕著に表れている。都市部における事務所ビル運用時CO<sub>2</sub>排出量は、社会像の違いの影響を強く受けることが示唆された。

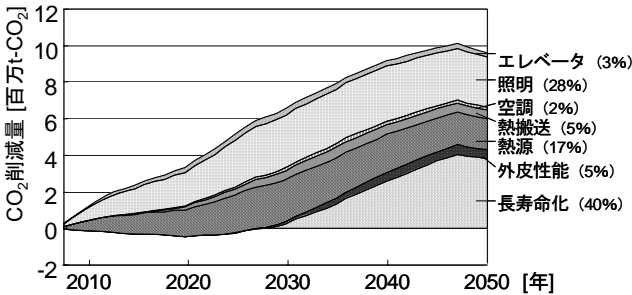


図18 各低炭素技術によるCO<sub>2</sub>削減量の推移

#### 5. 本研究により得られた成果

H16～17年度は、サブテーマ(1)で選定された4都市（宇都宮市、札幌市、広島市、那覇市）に対して、家族類型別世帯数の将来推計を2050年まで延長する検討を行った。また、ライフスタイルの変化、社会の変化のシナリオを住宅部門に反映させ、住宅の断熱、高効率家電製品の買い替え促進、省エネ型ライフスタイルへの変革による下記に示すように都市毎のCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルを示した。

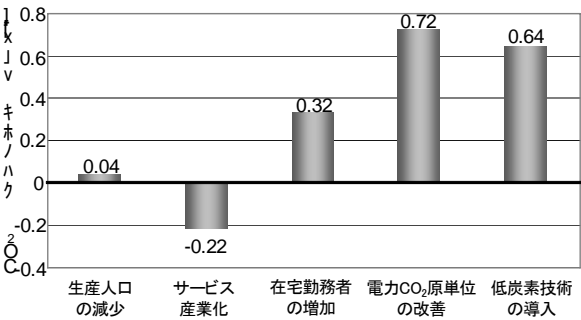


図19 各パラメータ変動のCO<sub>2</sub>削減量への貢献度

H18年度は、事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量の超長

表4 各予測条件における2020年および2050年時の事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量（1990年=1.0とする）

ストック床面積	電力CO <sub>2</sub> 原単位	自然ケース		対策ケース	
		2020年	2050年	2020年	2050年
Aシナリオ	2005年度実績値（固定）	0.88	0.66	0.88	0.54
	ロードマップの予測値	0.74	0.37	0.74	0.36
中間シナリオ	2005年度実績値（固定）	0.82	0.58	0.82	0.48
	ロードマップの予測値	0.69	0.32	0.69	0.22
Bシナリオ	2005年度実績値（固定）	0.77	0.50	0.77	0.41
	ロードマップの予測値	0.64	0.28	0.65	0.19

期予測モデルを用い、事務所ビル起因CO<sub>2</sub>排出量を2050年まで予測した。各低炭素技術のCO<sub>2</sub>削減効果を示し、削減目標の達成に向けて取り組むべき対策の方向性を明確化した。

## 6. 引用文献

- 1) SMASH for Windows Ver.2 ―住宅用熱負荷計算プログラム―、建築環境・省エネルギー機構、2000
- 2) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：グリーン庁舎基準及び同解説、2006.1
- 3) 東京電力・中部電力・関西電力・日建設計：ビル空調熱源経済性評価プログラム（FACES）, 2003

## 7. 海外との協力

本項目には、特記事項はない。

## 8. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

- 1) 伊香賀俊治・三浦秀一・外岡豊・下田吉之・小池万理・深澤大樹：住宅のエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の都道府県別マクロシミュレーション手法の開発、日本建築学会技術報告集第22号、pp. 263-268、2005.12

＜その他誌上発表（査読なし）＞

なし

### （2）口頭発表（学会）

- 1) 小池、伊香賀ほか：住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究（その5）、住宅内のエネルギー消費推計マクロモデルの改良、日本建築学会大会講演梗概集、2005.09
- 2) 伊香賀、三浦ほか：住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究（その6）、住宅の省エネルギー対策によるCO<sub>2</sub>削減量の2020年までの予測、日本建築学会大会講演梗概集、2005.09
- 3) 小池、伊香賀ほか：住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究（その7）、世帯あたりエネルギー消費量の推計値と実測値の比較、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、2005.08
- 4) 伊香賀、三浦ほか：住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究（その8）、断熱・家電製品・ライフスタイルの変更によるCO<sub>2</sub>削減量、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、2005.08
- 5) 伊香賀、三浦ほか：民生家庭部門CO<sub>2</sub>排出量と温暖化対策効果の都道府県別将来推計、第14回日本エネルギー学会大会発表論文集、2005.08
- 6) 伊香賀、三浦ほか：住宅のエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の都道府県別マクロシミュレーション手法の開発、第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2005.12
- 7) 小池、伊香賀ほか：住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究（その9）、インターネットを利用したCO<sub>2</sub>排出量の2050年までの将来推計サービス、日本建築学会大会講

演梗概集、2006.09

- 8) 伊香賀、吉野ほか：住宅内のエネルギー消費量の都道府県別将来推計に関する研究（その10）、エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の2050年までの推計結果、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、2006.09
- 9) 伊香賀、小池ほか：日本の家庭からのCO<sub>2</sub>排出量の2050年までの都道府県別逆予測、第2回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2007.3
- 10) 新谷、村上、伊香賀ほか：事務所ビル起因のCO<sub>2</sub>排出量の長期予測モデルの開発、第2回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2007.3

（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

９．成果の政策的な寄与・貢献について

本研究の成果は、グループ全体として京都議定書発効以降のわが国のCO<sub>2</sub>排出削減目標策に寄与するとともに、一部は政府間気候変動パネルの評価に反映されるよう努める。



#### (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

信州大学 繊維学部

高橋伸英

##### [要旨]

低炭素社会の実現に向けて、民生部門のエネルギー消費由来のCO<sub>2</sub>排出を削減することが急務となっている。その一つの手段は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、太陽電池はその有力な候補である。本研究では、都市への太陽光発電の導入可能性を明らかにし、中長期的な導入シナリオを描き、太陽光発電導入によるCO<sub>2</sub>削減効果を予測することを目的としている。

中規模都市の代表として宇都宮市と札幌市を選択し、住宅用系統連携太陽光発電システムを導入した場合の発電ポテンシャルを都市の建物構成を考慮して評価した。その結果、消費電力に対する発電ポテンシャルの割合、およびCO<sub>2</sub>排出削減割合は、都市の建物構成に大きく依存し、戸建住宅など建築面積当りの電力消費量が小さい建築用途が多い地域では、太陽光発電により電力消費全てを賄うことも可能であり、太陽光発電の導入は有力なCO<sub>2</sub>排出削減手段となりうる。

NEDOの導入目標に基づき、日本全国での太陽光発電の導入量を2050年まで予測した。その結果、2050年の太陽光発電による発電シェアは40%まで増加し、住宅の屋根のみに設置した場合、日本全国の屋根面積の約60%が太陽電池で覆われると予測された。また、その規模まで大量に太陽光発電が導入されると電源構成の大幅な変更を余儀なくされることが示唆された。

太陽光発電の大規模導入を可能にする手段として蓄電池の併用に着目し、蓄電池を併設した、「完全独立型」と「系統連系逆潮流なし」の二つのシステムについて発電コスト、CO<sub>2</sub>排出原単位を評価した。「完全独立型」は、蓄電池製造コストが現状の約10分の1まで低下したとしても、発電コストは現在の系統電力の数倍程度にしか低減できない。一方、「系統連系逆潮流なし」では、太陽電池容量と蓄電池容量の間に最適な組み合わせがあり、蓄電池コストが現状の10分の1程度まで低下すれば、系統電力に匹敵する発電コストになり、太陽光発電量も有効に利用され、太陽光発電の大規模導入を可能にする有望なシステムであることが示された。

##### [キーワード]

太陽光発電ポテンシャル、建築面積、CO<sub>2</sub>排出削減、大規模導入、蓄電池、LCA

##### 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。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>。

NEDOのロードマップ<sup>2)</sup>では、2030年までに累積導入量100GW、発電量として家庭用電力の50%、全電力の10%程度を太陽光発電により賄うことを想定している。そのように太陽光発電の大規模導入を進めるためには、まず太陽電池モジュールを設置できる面積を確保することが必要である。現在導入が進んでいる太陽光発電システムは主に住宅の屋根に設置するものであるが、太陽電池を設置できる場所およびその面積は都市の建物構成によって大きく変わり、太陽光発電による供給可能電力量（発電ポテンシャル）は都市によって大きく異なる。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>3)</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、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>4)</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>5)</sup>。太陽光発電システムの大量導入にあたり、設置のための十分な面積が存在するか、また設置によりどの程度の電力を賄うことができるかについて、都市レベル、都道府県レベル、電力会社管轄地域レベルで検討を行い、より具体的な導入形態について知見を深める必要がある。

また、太陽光発電システムの導入を推し進めるためにはコストの低減は必須である。現在の発電コストは45円/kWhと言われており<sup>2)</sup>、系統電力の発電コストの数倍となっている。NEDOのロードマップでは、2010年に従量電力料金並み（23円/kWh）、2020年に業務用電力料金並み（14円/kWh）、2030年に汎用電力料金並み（7円/kWh）まで発電コストを低減することを目標としている。そのためには高コストな高純度シリコンの使用を低減すること、システム構成材料の高強度化、長寿命化、および設置工事の低コスト化などが必要である。さらに、仮にコストが低減し導入が進んだとすると、次は太陽光発電システムの大量集中導入に伴う問題が生じる。現在導入が進んでいる太陽光発電システムは概ね系統と連系し、昼間の余剰電力を系統へ逆潮流させ売電し、夜間または雨天時に電力が不足する場合には系統から電力を購入するシステムである。現状のように導入量が少なければ系統に与える影響は無視できるほど小さいが、限られた地域で集中的に大量の太陽光発電システムが系統と接続され逆潮流を行う場合には、電圧変動や高調波ノイズなどの問題が生じると懸念される。電気事業法では低圧需要家引き込み口に換算した電圧変動を $101 \pm 6V$

（5%）の範囲に抑えなければならないと定められているが、この制約を満たすための導入量の限界は、配電線のインピーダンスに大きく左右され、農村地区では10%、住宅地区では30%程度と言われている<sup>6)</sup>。また高調波ノイズによる導入量限界は農村地区では55%、住宅地区では60%程度と推定されている。商工業地区では比較的配電線のインピーダンスが小さいために、これらの問題による導入量限界はないと言われている。また、これらの局所的な問題とは別に、気候により大きく変動する太陽光発電を大規模に導入することによる電力品質の問題、また出力調整の問題が生じる。いずれにせよ、電力貯蔵設備を併設するなどの太陽光発電の不安定さを補償するような手段が講じられない限り、例えばコストが低下しても大量導入への道を開くのは困難である。また、生じうる問題を回避する手段を講じるにはエネルギーとコストが掛かり、CO<sub>2</sub>が余計に排出

される。そのようなコスト、CO<sub>2</sub>排出への跳ね返りを考慮し、システム全体でコスト、CO<sub>2</sub>排出削減効果を評価し、対策の有効性を検討する必要がある。

## 2. 研究目的

本研究では、都市への太陽光発電の導入可能性を明らかにし、長期的な導入シナリオを描くとともに、それにより代替可能な発電量、CO<sub>2</sub>削減量を予測することを最終目的とする。また、太陽光発電が大規模に導入された場合に懸念される問題に対して解決手段を提案し、そのコスト、CO<sub>2</sub>排出量の増加を評価することにより、大量導入時のより現実的なシステムのあり方とコスト、CO<sub>2</sub>排出量評価を行う。具体的にはこれまでに以下の3項目について研究を行ってきた。

(1)代表都市における太陽光発電導入ポテンシャルの評価

(2)日本全国における太陽光発電導入の中長期予測

(3)大規模導入のための蓄電池併設システムの提案とコスト、CO<sub>2</sub>排出量評価

(1)では、太陽光発電を都市にどの程度導入することができ、その発電ポテンシャル、CO<sub>2</sub>削減ポテンシャルが都市によりどう異なるかについて、代表的な都市を選択し検討を行った。

(2)では、NEDOの太陽光発電導入シナリオに基づき、住宅の屋根面積の変化、太陽電池モジュールの技術改善も考慮し、2000年から2050年までの太陽光発電量を各都道府県別、電力会社別に予測を行った。

(3)では、大規模導入に伴う問題を解決する一つ的手段として、蓄電池を併設するシステムを想定し、コスト、CO<sub>2</sub>排出量を評価を行った。

## 3. 研究方法

(1)代表都市におけるPV導入ポテンシャルの推定

導入する太陽光発電システムは屋根置き型であり、系統連系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想定しない。また、想定した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%）を仮定した<sup>6)</sup>。

具体的な代表都市として、人口中規模の宇都宮市と札幌市を選択した。太陽電池モジュール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し、各建物用途別に導入率、導入形態を設定した。今回の計算では、宇都宮市と札幌市に対して同じ設定を用いた。住宅には導入率（戸数基準）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、変換効率を17%とすると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82.4 m<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<sup>7)</sup>。

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>8)</sup>よりダウンロードした太陽光発電システム用標準気象データ（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。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、系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位は114 g-C/kWhと推定されており<sup>6)</sup>、これらの値を用いてCO<sub>2</sub>排出削減量を計算した。

## (2)日本全国におけるPV発電量予測

NEDOが想定した導入シナリオに基づき太陽光発電システムが日本全国に導入された場合の発電量の時間変化を予測する。予測には人口変化に伴う建物の屋根面積変化を考慮する。また、時間が経過すると共に太陽電池モジュールの技術水準も向上することが予想されるため、その変化も計算に取り入れる。計算は都道府県別に行い、365日24時間別の発電量を計算する。また計算された結果から電力会社管轄地域別に集計し、電力会社ごとの発電シェアの変化についても検討を行う。計算は以下の手順により行う。

- 1) 太陽電池モジュールを設置する住宅の屋根面積を決定するために、各都道府県別の戸建および集合住宅の家族類型別の延床面積データ（2000年～2050年）を用いた。戸建住宅および集合住宅の平均階数を家族累計、地域および年度によらず、それぞれ1.8階、4.1階と仮定し、屋根面積に変換した<sup>9)</sup>。
- 2) 日射データは太陽光発電システム用標準気象データ（METPV-2）を用いて計算し、各都道府県の県庁所在地における時間別斜面日射量の平年値を計算した。このときのパネルの水平面に対する角度は年間の受光量が最大となる最適傾斜角を用いた。最適傾斜角とは年間の斜面日射量が最大となる角度であり、「太陽光発電導入ガイドブック<資料編>」<sup>10)</sup>から各県庁所在都市における値を使用した。
- 3) 太陽電池モジュールは温度により効率が変化するため、温度による補正を行う必要がある。その補正には各県庁所在地の月別平均気温のデータを用いた。
- 4) 太陽電池の導入量は、2002年までの導入量実績<sup>2)</sup>とNEDOの2030年の目標値である100GWから回帰式を求め、2050年までを予測した。
- 5) モジュール効率は、現状およびNEDOの2010、2020、2030年の目標値<sup>2)</sup>に基づき回帰式を求め、2050年までを予測した。
- 6) 太陽電池1kW当りのモジュール面積はモジュール効率が高くなると減少する。そこで、5)のモジュール効率の推移予測結果を用い1kW当りのモジュール面積の推移を予測した。また、パネルの傾斜角を各都道府県の最適傾斜角の平均値とし、パネルを置くために必要な屋根面積に換算した。これにより、累積導入量が決定すると、それに必要な屋根面積を求めることができる。
- 7) 4)～6)より、累積導入量予測からそれに必要な屋根面積が予測でき、さらに1)の屋根面積の予測結果を用いることにより、屋根面積基準の太陽電池モジュールの導入率（占有率）を計算することができる。

## (3)大規模導入のための蓄電池併設システム評価

太陽電池の導入が進み大規模に導入されるようになると系統連系に伴う種々の問題が生じる。その問題を解決する一つの方法は蓄電池の併用である。本研究では、蓄電池のシステムへの導入

形態として二つの場合を考えた。一つは、長期的な曇天および雨天時においても全ての消費電力を太陽光発電により賄うことを目的とし、複数日分の消費電力量を蓄電できる大容量の蓄電池を導入する場合であり、系統非連系な完全独立型のシステムである。しかし、これでは大容量の蓄電池が必要になり、コストが非常に高くなることが予想される。そこで、より低コストで蓄電池を導入し、かつ系統連系に伴う問題を回避できる手段として、昼間の太陽光発電の余剰電力を蓄電池に蓄電し、系統と連系するが逆潮流は行わず、太陽光発電量および蓄電量が不足し消費電力を賄えない場合にのみ系統から電力を購入する、系統連系逆潮流なしのシステムを提案する。完全独立型よりも小容量の蓄電池で済むため、蓄電池に掛かるコストが抑えられる。しかし、このシステムにおいても、蓄電池容量が大きいと太陽光発電量の有効利用が可能となるが、やはり蓄電池コストが高くなり、全体システムコストが増加する。逆に、蓄電池容量が小さすぎると蓄電池のコストは低く抑えられるが、発電量のうち蓄電できず廃棄される割合が増加するとともに購入電力量も増加し、コストが増加する。従って、コストの面から最適な蓄電池容量が存在することが予想される。本研究では住宅設置型を対象とし、年間を通じた電力需要パターンと太陽光発電パターンを考慮し、コストミニマムとなる最適蓄電池容量を求めることとする。

次の三ケースについてコスト、CO<sub>2</sub>排出原単位の計算を行い、比較する。

- ① 住宅用屋根置き系統連系逆潮流あり太陽光発電システム
- ② 住宅用屋根置き蓄電池併設独立型太陽光発電システム
- ③ 住宅用屋根置き蓄電池併設系統連系逆潮流なし太陽光発電システム

太陽電池モジュールの技術水準、生産規模については、将来を想定し、モジュール効率17%、耐用年数20年、生産規模100GW<sub>y</sub>とする。①、②については、PVの発電容量は3.5kWとし、出力電圧200Vとする。

①のケースではパワーコンディショナーの容量は3.5kWとした。②のケースでは、必要な蓄電池容量は年間の太陽光発電パターンと電力消費パターンから決定される。③のケースでは、太陽電池モジュールの技術水準、生産規模は前出と同じであるが、発電容量は2.0～5.0 kWの間で最適となる容量を探索する。蓄電池については、容量を1.0～10kWhとし、放電深度(DOD) 70%で運転するとし、回復充電は行わないこととした。また、耐用年数は20年を想定した。コストを最低にするように、太陽電池の発電容量と蓄電池容量は最適な組み合わせが決定される。

いずれのケースも設置対象都市は宇都宮市とし、南向きでアレイ角30度に設定した。気象データはNEDOの太陽光発電システム用標準気象データ(METPV-2)<sup>8)</sup>により平年値を使用した。100km<sup>2</sup>の延床面積を有する戸建住宅を対象とし、消費電力パターンは3季節(夏期、冬期、中間期)24時間別のデータを使用した<sup>11)</sup>。

太陽電池モジュールの投入エネルギー、CO<sub>2</sub>排出量、投入コストはそれぞれ7.8 GJ/kW、128.8 kg-C/kW、110.7 千円/kWとした<sup>6)</sup>。蓄電池の製造エネルギー、CO<sub>2</sub>排出原単位はそれぞれ398 MJ/kWh<sup>12)</sup>、20.2 kg-C/kWhと仮定した<sup>13)</sup>。また、蓄電池の製造コストは現状の販売コスト<sup>14)</sup>を参考に、10kWh以上の容量では100円/Wh、それ以下の容量では140円/Whと仮定した。また将来の蓄電池コストとして、NEDOの将来目標値12円/Wh<sup>15)</sup>を用いた。

## 4. 結果・考察

### 4-1 代表都市におけるPV導入ポテンシャルの評価

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。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。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。

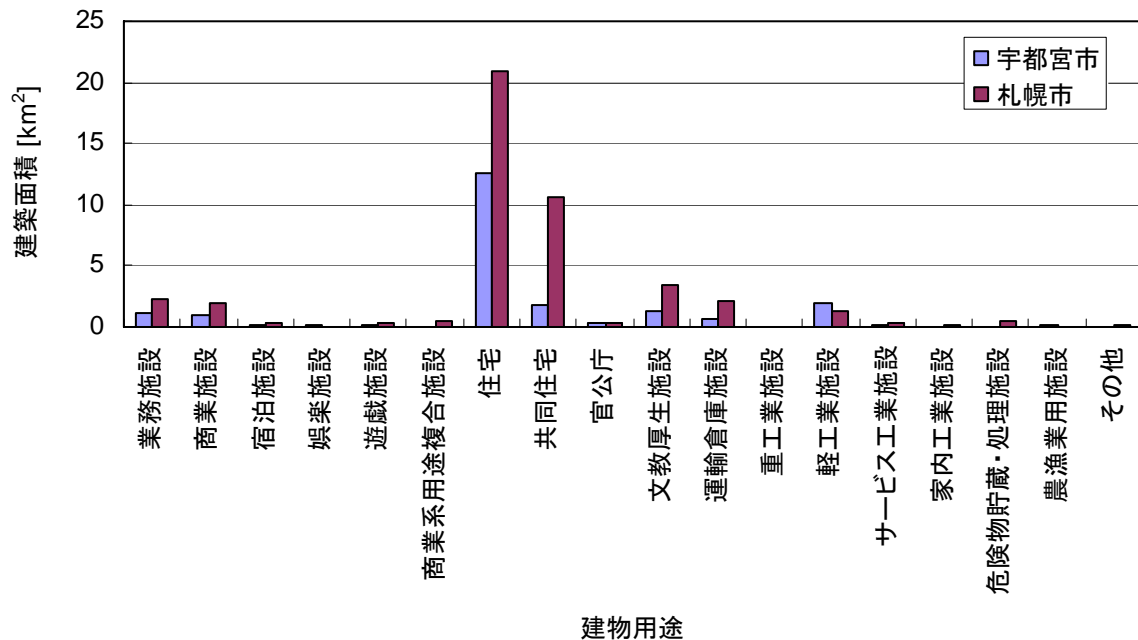


図1 宇都宮市と札幌市の用途別建築面積

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。

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2003年度の電灯・電力の総電力使用量は2,429,181 MWh/y<sup>16)</sup>であるので、今回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<sup>16)</sup>。また

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

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多い。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。そのため、太陽電池モジュー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。そこで、宅地面積と電力消費量の比は、太陽光発電を導入した時の供給割合を定性的に予想するための一つの指標となると考え、他の都市についても電力消費量と宅地面積の比を調査した。47都道府県の県庁所在都市についての結果を図2に示す。一部データが揃わず値がない都市もあるが、名古屋市、大阪市、東京（23区）、福岡市、京都市と大都市で大きいことが分かる。東京（23区）の値は、142 kWh/(m<sup>2</sup> y)となったが、東京では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推定されている<sup>4)</sup>ことから、都市化が進むことにより太陽光発電による電力供給割合は低下し、CO<sub>2</sub>削減割合も小さくなると予想される。

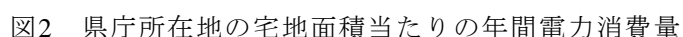

$$(\text{累积导入量 [万kW]}) = 0.2543t^3 - 4.6101t^2 + 28.814t - 53.145 \quad (R^2 = 1)$$

表2 PV累積導入実績とNEDO目標値

年度	PV累積導入量 [万kW]
1993 (実績)	2.4
1994 (実績)	3.1
1995 (実績)	4.3
1996 (実績)	6
1997 (実績)	9.1
1998 (実績)	13.3
1999 (実績)	20.9
2000 (実績)	33
2001 (実績)	45.3
2002 (実績)	63.7
2030 (NEDO目標)	10,000

\*実績値は経済産業省の試算による

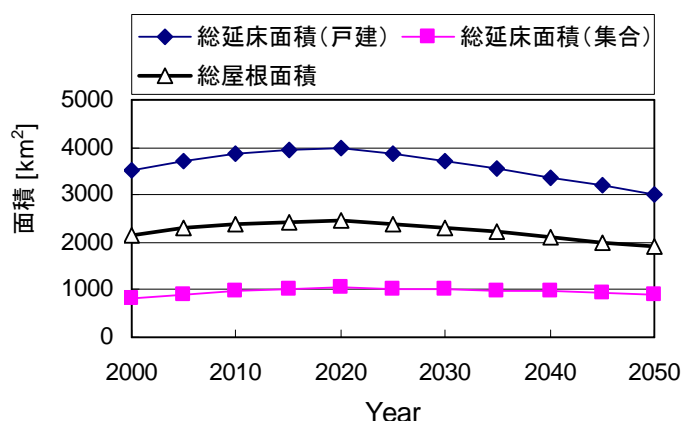


図3 戸建・集合住宅の延床面積と総屋根面積の推移

ここで $t$ は1990年度からの年数とした。この近似式から2050年の累積導入量を予測すると、40,000万kWとなった。これは単純に計算すると現在の電力消費の約40%を供給できる規模である。

NEDOのロードマップ<sup>2)</sup>では多結晶シリコンのモジュール効率の目標値を2010年、2020年、2030年でそれぞれ16、19、22%と想定している。これらの値と現状のモジュール効率（2000年で14%、2005年で15%と仮定）からモジュール効率の時間変化は次の式により近似された。

$$\text{モジュール効率}[\%] = 0.13(t-10)^{1.21} + 14.0 \quad (R^2=0.9992)$$

$t$ は1990年度からの年数であり、ここでは $t \geq 10$ である。この式により外挿すると、2050年の多結晶太陽電池モジュールの変換効率は29%となる。

全国の住宅の延床面積は戸建と集合住宅のそれぞれについて、図3に示すように推移すると予測された。いずれも2020年以降減少に転ずる。これらから推定された日本全国の総屋根面積は2,000～2,500km<sup>2</sup>となり、やはり2020年以降減少すると予想された。

これらのデータを用い、屋根面積ベースの導入率が地域によらず一定であるとして計算した太陽光発電量の予測結果を図4に示す。これ

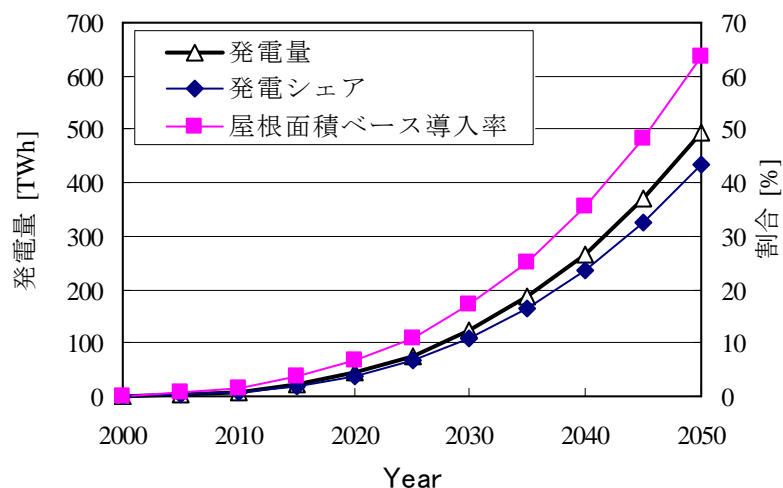


図4 PV発電量、発電シェアおよび設置面積割合の推移予測

は全国合計値の時間変化であるが、2030年には123 TWh/y 2050年には494 TWh/yの発電量となり、2004年の系統電力の総発電量（1,137 TWh/y）を基準とする発電シェアは2030、2050年でそれぞれ10.8%、43.4%となった。また住宅の屋根面積に占める割合は17.1%、63.8%となった。今回は住宅の屋根のみを設置に利用すると想定したが、2050年度の計算結果から、発電シェア40%程度とするには全国の住宅の屋根の6割に太陽電池モジュールが設置されなければならない。住宅以外の場所も設置に利用できるとすれば、NEDOの想定を満たす十分な面積が存在すると思われる。しかし、



今回の計算では多結晶シリコン太陽電池を想定し、2050年のモジュール変換効率を約29%と仮定しているが、モジュール効率がこの値まで向上できなければその分設置面積が増大する。例えば、大幅にコストを低減できると期待される色素増感太陽電池は現状の変換効率は4～5%であり、仮に2050年度の時点で実用化され、その効率が15%まで増加したとしても、同条件で計算すれば約2倍の設置面積が必要であり、住宅の屋根だけでは設置面積が不足する。住宅以外の建物の屋根および壁面、あるいは空き地の利用など、あらゆる設置可能な場所の利用により設置面積の確保が必要となる。

各都道府県の電力消費（2004年度データ<sup>19)</sup>）に占める2050年時の太陽光発電量の割合を図5に示す。図4の系統電力の総発電量よりも図5の電力消費量の総計の方が2割ほど小さいため、割合は図4の時よりも大きくなっている。地域によって供給割合が大きく異なることが明らかとなった。割合が最も小さいのは大阪府の33.0%、最も大きいのは鹿児島県の82.1%であった。今回の計算では、太陽電池モジュールの導入率を地域によらず屋根面積ベースで一定の値に設定しているため、この割合が小さいということは、その地域における屋根面積あたりの電力消費量が多いことを意味する。しかし、必ずしも都市化が進んでいる地域でのみ小さい値を取るわけではなく、福井、富山、岡山、山口でも東京と同程度の値となった。これは産業構造やその地域の建物構成が大きく影響していると考えられる。

電力会社管轄地域別で集計した電力消費量（2004年度）に対する太陽光発電量（2050年度）の割合を図6に示すが、電力会社によって47.6%（北陸）から66.3%（東北）まで変化する。大都市圏

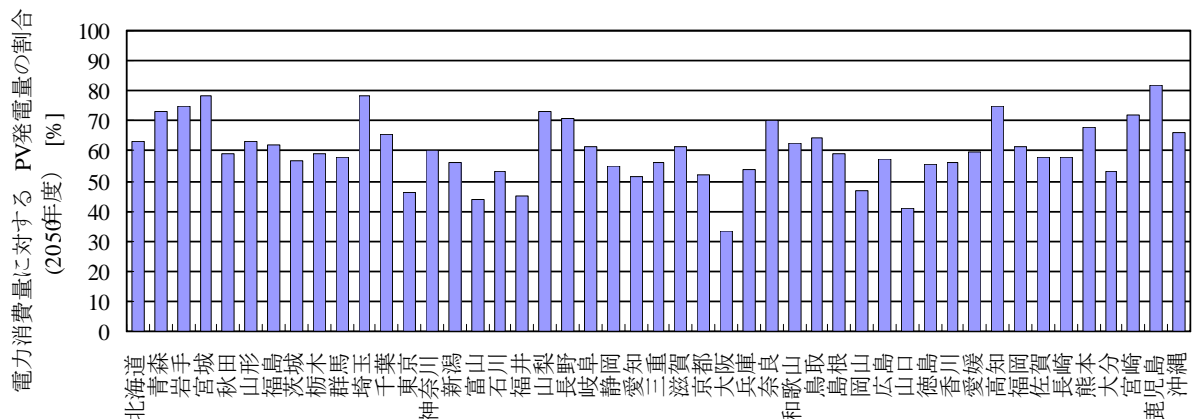


図5 都道府県別の電力消費量（2004年度）に対するPV発電量（2050年度予測値）の割合

を含む東京電力、関西電力で低い値を取ると予想したが、必ずしも予想通りではなかった。確かに都道府県別では東京都の割合は小さかったが、埼玉県、千葉県、山梨県では大きく、東京の低い割合を補填している。つまり東京など大都市では面積あたりの電力需要が大きく、その都市で限れば太陽光発電による供給割合は低いが、同じ電力会社管轄地域内で発電量を融通することにより供給割合を高めることができる。しかし、北陸電力地

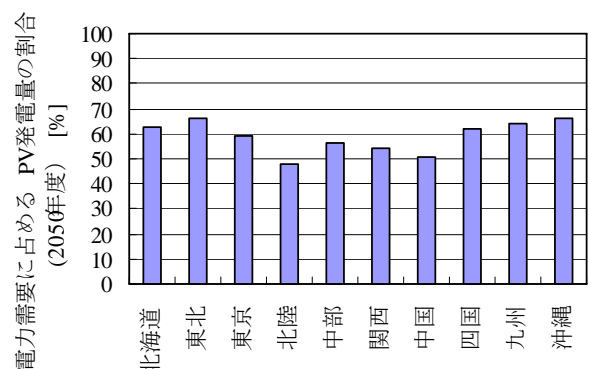


図6 電力会社別の電力消費量（2004年度）に対するPV発電量（2050年度予測値）の割合

域では太陽光発電による供給割合がどの県も低いため、融通することができず低い値に留まった。

太陽光発電は主に昼間に行われるため、太陽光発電による供給割合は昼間だけでみれば今回示した値よりも数倍大きいことが予想される。現在の電源構成は水力、原子力、などのベース供給力とピーク供給に対応した石油火力、およびその中間のミドル供給を担う石炭火力、天然ガス火力などから成っている。太陽光発電による供給割合が増加すれば、他の電源の割合を低下させなければならない。ベース供給力である原子力は30%の発電シェアを占め、今後さらに増加するとの見通しもあるが、太陽光発電の大規模導入がNEDOの想定通りに進めば、ベース供給力である原子力を減らすことも可能性として考えられる。いずれにしても、太陽光発電の大規模導入の達成には現在の電源構成の大幅な変更が不可欠となるが、比較的低コストで低CO<sub>2</sub>排出原単位な原子力を減らしてまで太陽光発電を導入することが、本当にCO<sub>2</sub>排出の削減に結びつくかは、電源構成の変更を想定し包括的な検討により明らかにしなければならない。

#### 4-3 大規模導入のための蓄電池併設システム評価

まず、①住宅用屋根置き系統連系逆潮流ありの場合の太陽光発電システムのコスト、エネルギーCO<sub>2</sub>排出原単位などの評価結果を表3に示す。3節で述べたように、多結晶シリコン太陽電池を想定し、モジュール効率17%（セル効率20%）、生産規模1GW/yの時の評価結果である<sup>6)</sup>。この評価により、多結晶太陽電池の発電コストは将来的には従量電力料金よりも低くできる可能性が示された。

大規模導入の一つの形態として想定した、②独立型・蓄電池併設システムについての計算結果を表3に示した。宇都宮市の気象データを用い、100m<sup>2</sup>の延床面積を有する戸建住宅において、購入電力量がゼロとなる蓄電池容量は26kWhと計算された。この規模の戸建住宅の消費電力量は年間2,100kWhと計算され、この蓄電池容量は4.5日分の消費電力に相当する。蓄電池の製造コストを100円/Whと仮定して計算した結果、発電コストは131円/kWhまで著しく増加した。コスト・ペイバック・タイムは85年と長く、コスト的には導入困難なレベルとなった。仮に製造コストがNEDOの蓄電池部会の目標値である12円/Whに低減できるとした場合、発電コストは47円/kWhまで低減できるが、それでも現在の従量電力料金の数倍高い。またCO<sub>2</sub>排出原単位への跳ね返りが大きく、

表3 各太陽光発電システムの投入エネルギー、発電コスト、CO<sub>2</sub>排出原単位

	①系統連系逆潮流あり (PV発電容量：3.5kW)	②独立型・蓄電池併設 (PV発電容量：3.5kW)		③系統連系逆潮流なし・蓄電池併設 (PV発電容量：2.0kW)	
		蓄電池現状コスト (100円/Wh)	蓄電池将来コスト (12円/Wh)	蓄電池現状コスト (140円/Wh)	蓄電池将来コスト (12円/Wh)
System cost [yen/W]	277	1020	366	343	344
Energy payback time [y]	0.89	2.3	2.3	2.5	1.5
CO <sub>2</sub> payback time [y]	1.5	5.5	5.5	4.3	3.1
Cost payback time [y]	11	85	31	37	19
発電コスト [yen/kWh]	18	131	47	57	29
CO <sub>2</sub> 排出原単位 [g-C/kWh]	7.5	28	28	21	15

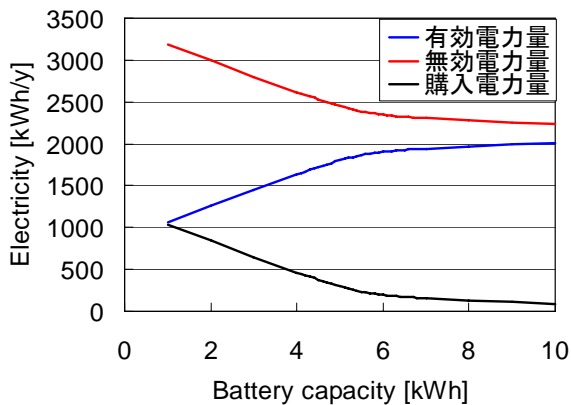


図7 系統連系逆潮流なし蓄電池併設型太陽光発電システムにおける蓄電池容量と有効電力量、購入電力量の関係

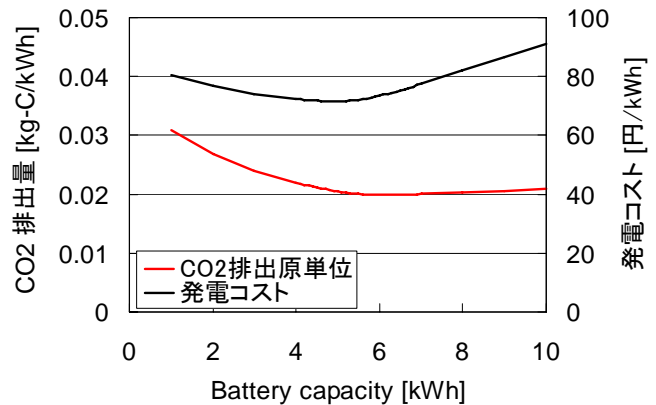


図8 系統連系逆潮流なし蓄電池併設型太陽光発電システムにおける蓄電池容量と発電コストとCO<sub>2</sub>排出原単位の関係

蓄電池を併設することにより、CO<sub>2</sub>排出原単位は約4倍に増加した。しかし、CO<sub>2</sub>排出については、系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位が114 g-C/kWhであり、それと比較すれば4分の1程度であるので、完全独立型にすることによるCO<sub>2</sub>削減効果への影響は小さく、やはりコストの方が問題である。

コストを下げ、かつ太陽光発電の導入率を高めるために、本研究では③系統連系逆潮流なし蓄電池併設型システムを提案する。図7に電力消費として有効に利用される太陽光発電量、および購入する電力量を示す。太陽電池の発電容量は3.5kWとした。それぞれの量は併設する蓄電池の容量により大きく変化し、蓄電池容量の増加に伴い、有効利用される発電量は増加し、購入電力量は減少する。

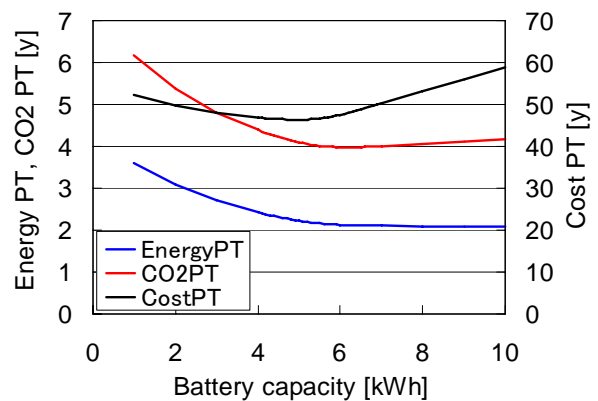


図9 系統連系逆潮流なし蓄電池併設型太陽光発電システムにおける蓄電池容量とEPT、CPT、CO<sub>2</sub>PTの関係

図8には蓄電池容量が変化した場合の発電コスト、CO<sub>2</sub>排出原単位の変化、そして図9には3種類のペイバックタイムの変化を示した。図から分かるように、コスト、エネルギー、CO<sub>2</sub>排出量が極小となる蓄電池容量が存在し、その容量は必ずしも一致しない。発電コストでは蓄電池容量が5.0kWhのときに極小値71.5円/kWhとなった。また、投入エネルギー、CO<sub>2</sub>排出量が極小となる蓄電池容量は、それぞれ9.4、6.2 kWhであった。このことは、コストとCO<sub>2</sub>排出量のどちらを重視するかにより選択する蓄電池の容量が変わることを意味する。

また、太陽電池の発電容量によっても最適となる蓄電池容量は変化する。図10にPV発電容量が変化した場合の、最低コストを与える蓄電池容量とその時の発電コストを示す。最適な蓄電池容量は太陽光発電容量の増加に伴い3kWまでは急激に増加するが、それ以上の範囲では約5kWhでほぼ一定となった。一方この時の発電コストはPV発電容量の増加に伴い単調に増加した。いずれにしても太陽電池容量が小さいほど必要となる蓄電池の容量も発電コストも低下する。しかし、図11に示すように、太陽電池容量が小さいと、電力消費に占める割合が低下する。コストが最小となる2kWの太陽電池と0.7kWhの蓄電池の組み合わせでは、電力消費の44%しか賄うことができない。

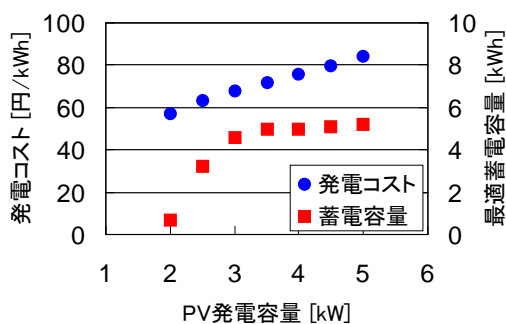


図10 PV発電容量と最適蓄電池容量  
および発電コストの関係

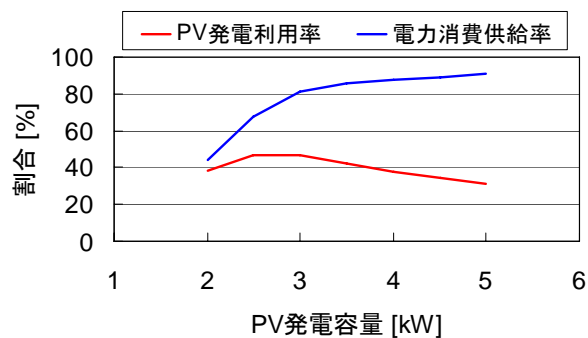


図11 PV発電容量と発電電力利用率および  
消費電力供給率の関係

い。つまりCO<sub>2</sub>の削減効果も同程度に留まる。この時の発電コスト、CO<sub>2</sub>排出原単位についても表3に示してあるが、現状の蓄電池製造コスト140円/kWhを用いて計算した場合、発電コストは57円、コストペイバックタイムは37年となった。完全独立型に比べれば発電コストは小さいが、それでも現状の重量電力料金よりは数倍高い。一方、コストが最小となる蓄電池容量は蓄電池の製造コストにより大きく変わり、仮に蓄電池製造コストが12円/kWhに低減したとすると、最適な蓄電池容量は8.3kWhと計算された。蓄電池容量は現状コストの時に比べ10倍以上大きくなったが、その時の発電コスト、CPTはそれぞれ29円、19年と著しく低下した。発電コストは依然として系統電力の従量電量料金よりも高いが、化石燃料コストの高騰を考えれば、競合できるレベルに低減できる可能性がしめされた。また、製造コストが低下すれば蓄電池容量を大きくすることができると、太陽光発電量の有効利用も可能になり、利用率は74%、電力消費に対する供給割合は86%となった。蓄電池製造コストがシステム構成およびその効率に大きく影響を及ぼすことが明らかになり、太陽光発電システムの大規模導入には太陽電池そのものとともに、蓄電池の低コスト化が必要不可欠である。

以上、蓄電池を併設した太陽光発電システムについてコスト、CO<sub>2</sub>排出量の評価を行った結果、完全独立型とするための大容量の蓄電池を用いた場合、蓄電池の製造コストを現在よりも10分の1程度小さいと仮定しても、発電コストは従量電力料金の数倍程度にしか削減できず、コスト的には不利であることが示された。一方、完全独立型とせず、太陽光発電量を有効に利用するために蓄電池を導入し、消費電力の供給が不足する時のみ系統から電力を購入するとした、系統連系逆潮流なしのシステムでは、蓄電池の製造コストによって、発電コストを最低にする蓄電池容量が変わるが、将来の蓄電池コストを仮定した場合、発電コストは従量電力料金と匹敵する程に低減できる可能性があり、また、太陽光発電量も有効に利用できる可能性がある。

## 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ポテンシャルを都市の建物構成を考慮して評価した。その結果、消費電力に対する太陽光発電ポテンシャルの割合、およびCO<sub>2</sub>排出削減割合は、都市の建物構成に大きく依存し、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り。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ということが明らかとなった。

NEDOの導入目標に基づき、日本全国への太陽光発電システムの導入量変化を2050年まで予測した。その結果、2050年では太陽光発電による発電シェアは40%程度まで増加すると予測された。住宅の屋根にのみ設置をすると仮定した場合、40%の発電シェアを達成するために日本全国の60%の屋根面積が太陽電池モジュールで覆われると予測された。また、都道府県別に見ると電力需要に対する割合は大きく異なり、地域によって太陽光発電によるCO<sub>2</sub>削減効果が異なることが明らかになった。

太陽光発電の大規模導入を可能にするための有力な手段として蓄電池を併用したシステムを提案し、コスト、CO<sub>2</sub>排出量の評価を行った。その結果、大容量の蓄電池を備えた完全独立型のシステムではコストが高くなりすぎ、導入が困難であることが示された。一方、系統と連系し電力が不足する場合には系統から購入するが、太陽光発電量は逆潮流せず蓄電池に貯留し使用するシステムでは、蓄電池コストが現状の10分の1まで低下すれば、系統電力料金と競合できるレベルまで発電コストが低減でき、太陽光発電量も有効に利用され、太陽光発電の大規模導入にとって現実的かつ有効なシステムであることが示された。

## 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) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) (2004)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) K. Kurokawa, PV systems in urban environment, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **67**, 469-479 (2001)
- 6) 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, 東京 (2002)
- 7) 太陽光発電技術研究組合, 平成7年度NEDO委託業務成果報告書「太陽光発電評価の調査研究」, 平成8年3月 (1996)
- 8) NEDO, 技術情報データベース, <http://www.nedo.go.jp/database/>
- 9) 総務省統計局, 平成10年 住宅・土地統計調査 確報集計結果(全国編) 統計表 付表第11表「建て方(4区分), 階数(4区分) 別住宅数 一全国, 都道府県, 13大都市(平成10年)」(2000)
- 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 太陽光発電導入ガイドブック<資料編> (2000年改訂版) (2000)
- 11) 空気調和・衛生工学会, 都市ガスによるコージェネレーションシステム 計画・設計と評価, 丸善, 東京 (1994)
- 12) 化学工学会第I種研究会「CO<sub>2</sub>と地球環境問題研究会」, 太陽光発電技術の評価II (1995)
- 13) 株式会社BRSホームページ, <http://www.battery-reuse.co.jp/>
- 14) エヌ・イー・ティー株式会社ホームページ, 価格リスト <http://www.solar-battery.net/price.html>

- 15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成11年度ニューサンシャイン計画 太陽光発電システム実用化技術開発 (2000)
- 16) 宇都宮市データバンク, <http://www2.city.utsunomiya.tochigi.jp/DataBank/index.htm>
- 17) さっぽろ統計情報, <http://www.city.sapporo.jp/toukei/>
- 18) 新エネルギー財団ホームページ, <http://www.nef.or.jp/photovolataicpower/joukyou01.html>
- 19) 電気事業連合会, 電力統計情報, <http://www.fepc.or.jp/>

## 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。また中長期的な太陽光発電の導入の予測を行うことにより、大規模導入に伴う問題の発生を予見することができる。また都道府県別、電力会社別の発電量の予測はより現実的な導入シナリオの立案に寄与する。さらに、大規模導入に対する問題を明らかにし、それに対して有効なシステムの提案は、太陽光発電の大規模導入の実現に寄与する。

## （５）都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果

東京大学

大学院工学系研究科都市工学専攻

原田 昇

大学院工学系研究科都市工学専攻

高見 淳史\*

日本学術振興会

海外特別研究員 (The University of Texas at Austin)

円山 琢也\*\*

(\* 平成18年4月より      \*\* 平成18年3月まで東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻)

### 〔要旨〕

本研究は、2050年までを見越した日本における中長期温暖化対策シナリオとそれに至る環境政策の方向性を提示することを目的とした全体プロジェクトのうち、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を目的とした都市チームに所属し、都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果を分析する手法の構築及びその手法による評価を行うことを目的とするものである。その結果、平成16～18年度の3年間で以下の成果を得た。

①ロードプライシング政策に関して、従来厳密な検討があまり行われてこなかったエリア課金の評価を行える、トリップチェーンベースの非加算経路コストを考慮したネットワーク均衡モデルを提案した。これを沖縄本島に適用することにより、エリア課金とコードン課金の下での消費者余剰、最適課金額、CO<sub>2</sub>排出量の相違を明らかにした。

②個人の居住地と勤務地を適切に入れ替えることのみによって通勤時間と通勤目的の自動車交通に起因するCO<sub>2</sub>排出量の削減をねらう職住最適再配置政策について、ネットワーク配分手法を適用し、混雑現象を考慮して分析できるモデルを提案した。これを東京都市圏、宇都宮都市圏、沖縄県に適用し、いずれの都市圏においても通勤目的の自動車からのCO<sub>2</sub>排出量が34～39%削減しうることを示した。

③道路交通センサスのオーナーインタビューOD調査データを用いて、他の交通手段への転換が可能と考えられる比較的短距離の自動車トリップがどの程度存在しているかを、土地利用類型別・目的別に集計した。その結果、仮に手段転換が完全に行われれば、全国・全目的で約5%のCO<sub>2</sub>排出量が削減されることを示した。

④全体プロジェクトで設定されている2つのシナリオに即し、職住最適再配置と短距離自動車トリップの削減を積み重ねた場合のCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルを試算した。

〔キーワード〕 二酸化炭素、都市交通、ロードプライシング、職住最適再配置、交通手段転換



## 1. はじめに

環境省の統計<sup>1)</sup>によると、二酸化炭素の総排出量のうち運輸部門（自動車・船舶等）からの排出は約2割を占める。1990年代末以降、運輸部門排出量の増加傾向は頭打ちとなっているが、京都議定書の基準年（1990年）から2004年度までの増加率は20.4%に達する。内訳を見ると、貨物交通に起因する排出量は3.2%減少しているものの、旅客交通に起因する排出量は42.5%、特に自家用乗用車からの排出量は52.6%増加している。以上のことは、旅客交通、とりわけ乗用車からのCO<sub>2</sub>排出量を削減する努力が極めて重要であることを示している。

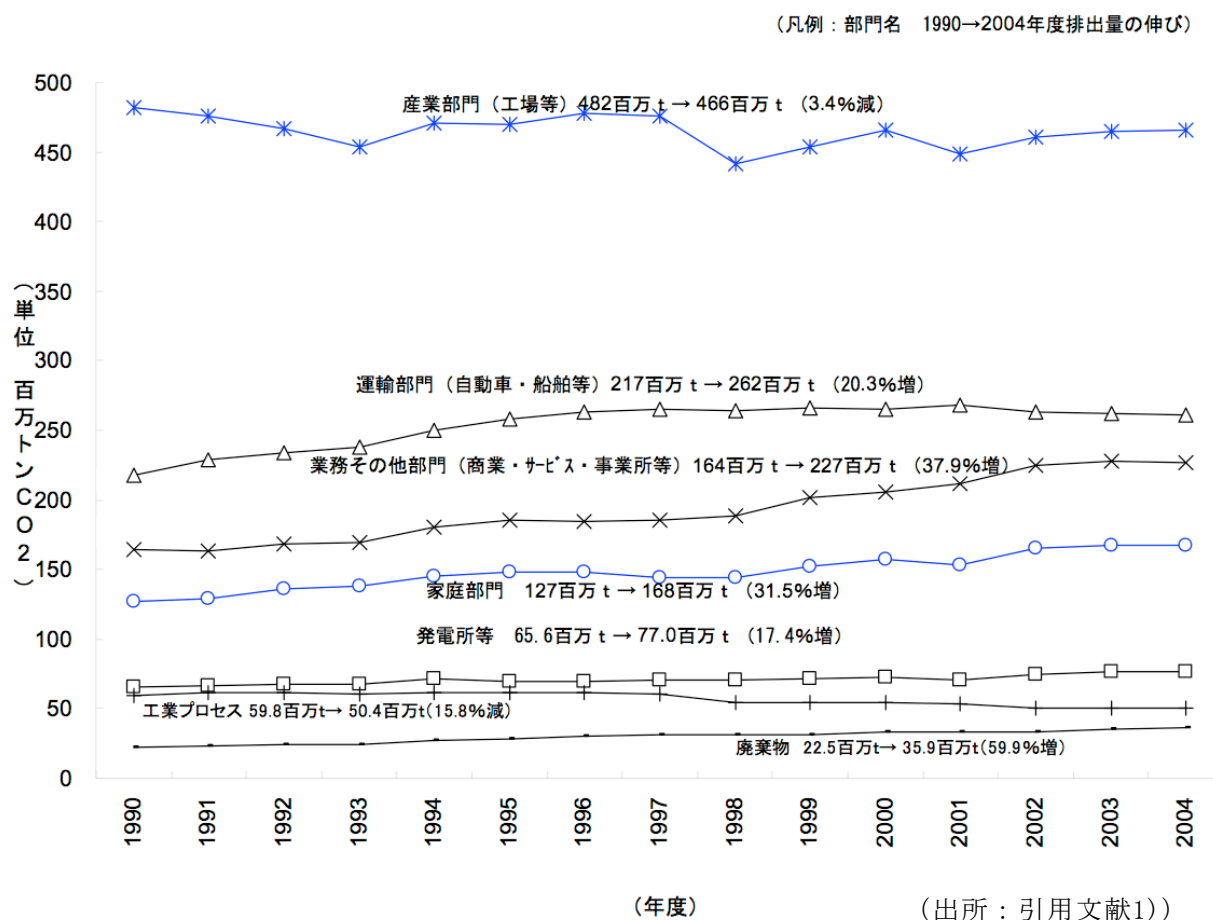


図1 二酸化炭素の部門別排出量（電気・熱配分後）の推移

## 2. 研究目的

本研究は、2050年までを見越した日本における中長期温暖化対策シナリオとそれに至る環境政策の方向性を提示することを目的とした全体プロジェクトのうち、都市に対する中長期的なCO<sub>2</sub>排出削減策導入効果の評価を目的とした都市チームに所属し、都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果を分析する手法の構築及びその手法による評価を行うことを目的としている。



### 3. 研究方法

#### 3-1. 研究方針・分析対象都市の決定

本研究では、都市交通に由来する日本全体のCO<sub>2</sub>排出削減量の推計を行うことをねらいとして、

- ・ 可能な部分に関しては、全国レベルの推計を最初から行う
- ・ その他の部分に関しては、いくつかの特徴的な都市を選定し、それら個別都市の検討を行ったのち、結果を全国へ拡大する

という方針で進めた。

#### 3-2. データの収集・整理

都市交通関連の基礎データとして、「パーソントリップ調査」と、「道路交通センサス」のオーナーインタビューOD調査のデータを利用することとし、それらの収集・整理を行った。

パーソントリップ調査は、人を単位とする1日の行動に着目した調査で、人の移動を複数の交通手段にわたり捉えることができるのが特色であり、全国の都市圏ごとに概ね10年程度の間隔で実施されている。宇都宮都市圏におけるパーソントリップ調査のデータは、1992年のものが最新であるが、そのデータを入手し整理した。加えて、平成16年度には宇都宮都市圏の自動車とバスのネットワークデータの作成と更新を行い、平成17年度には沖縄の自動車ネットワークデータの作成を行った。

道路交通センサスのオーナーインタビューOD調査は、自動車の1日（平日・休日とも）の動きを自動車の所有者にアンケート形式で尋ねる調査であり、概ね5年ごとに全国で実施されている。パーソントリップ調査と異なり他の交通手段の利用状況は把握されていないが、特に自動車分担率の高い都市においては有用なデータとなる。本研究では、平成11年に実施されたオーナーインタビューOD調査（平日・休日）のデータを整備した。

#### 3-3. 具体的な検討テーマの選定

具体的に検討するテーマとして以下の3つを選び、これらを進めた場合のCO<sub>2</sub>排出量の削減効果あるいは削減ポテンシャルについて検討することとした。

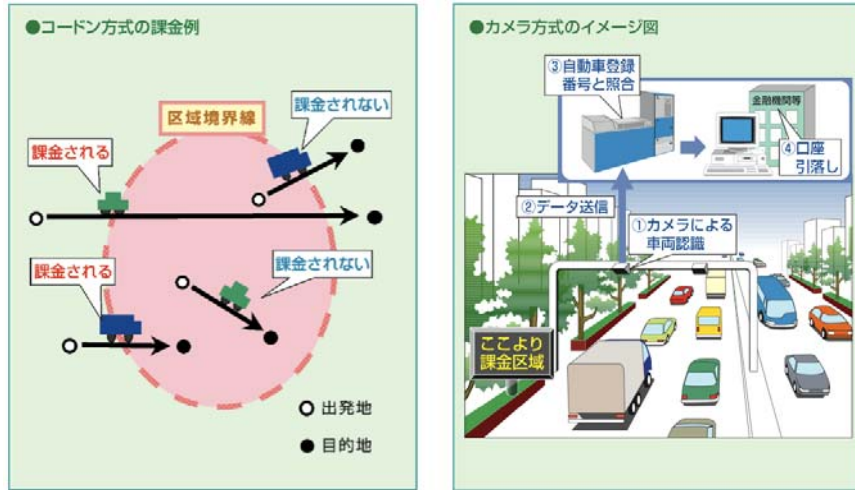
- ・ ロードプライシングの実施 —コードン課金とエリア課金の比較—
- ・ 職住最適再配置の実施
- ・ 短距離移動における自動車から他手段への転換促進

### 4. 結果・考察

#### 4-1. ロードプライシングの実施 —コードン課金とエリア課金の比較—

ロードプライシングとは、大都市都心部などの一定の区域における自動車の走行や進入に対し課金を行う政策である。自動車利用者の交通行動に対し、走行経路の変更、自動車から他の交通手段の転換、目的地の変更、時間帯の変更、トリップの取り止めといった影響を及ぼしうる。結果として、対象区域における自動車利用が減少することと、それによって混雑が緩和し走行速度が向上することによって、CO<sub>2</sub>排出量を削減する効果が見込まれる。経済学の視点からも、消費者余剰を最大にする最適課金が設定可能という点で論理性の高い手法である。

課金の方法には、対象区域への進入に対してその都度あるいは1日1回課金されるコードン課金（例：東京都で検討されたケース＝図2）や、対象区域内での走行に対して1日1回課金されるエリア課金などがある。一般に、対象区域界での車両の出入りを観測すればよいコードン課金に比べ、対象区域内各所で車両の動きをモニターする必要があるエリア課金は実施が難しいとされる。しかし、東京と同じく世界的な大都市であるロンドンでは、既にエリア課金によるロードプライシングが導入されて効果を上げている。すなわち、エリア課金によるロードプライシングは技術的には現実に適用可能なレベルにまで到達していると言える。



（出所：「東京都ロードプライシング検討委員会報告書の概要」，東京都環境局）

図2 東京都で検討されたカメラ方式によるコードン課金

交通モデルの世界でも、コードン課金は、流入の都度課金されることを、対象区域界の流入リンクに料金を賦課して表現すればよいのに比べ、エリア課金については、1日のトリップチェーン全体を考慮しなければならず、厳密な研究はあまり行われてこなかった。

本研究では、エリア課金の厳密な評価を行うために、トリップチェーンベースの非加算経路コストを考慮したネットワーク均衡モデルを提案し、等価な最適化問題（次式）およびその解法を示した<sup>2)</sup>。

$$\min Z(\mathbf{g}, \mathbf{h}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{n,p} \sum_{m \in M_p} \tau_p g_n^m - \sum_n \int_0^{h_n} D_n^{-1}(\omega) d\omega$$

subject to

$$h_n = \sum_m g_n^m, \quad \forall n$$

$$x_a = \sum_{m,n} \delta_{a,n}^m g_n^m, \quad \forall a$$

$$x_a \geq 0, \quad h_n \geq 0, \quad g_n^m \geq 0$$

where

$x_a$  : リンク  $a$  の交通量

$t_a(x_a)$  : リンク  $a$  のリンクコスト関数

- $D_{rs}^{-1}(\cdot)$  : ODペア  $rs$  間の逆需要関数  
 $\delta_{a,n}^m$  : リンク  $a$  がトリップチェーン経路  $m$  に含まれるとき 1、それ以外るとき 0 をとる変数  
 $h_n$  : トリップチェーン  $n$  の交通量  
 $g_n^m$  : トリップチェーン  $n$  におけるトリップチェーン経路  $m$  の交通量  
 $\tau_p$  : 課金パターン  $p$  の所要時間単位に変換された課金レベル  
 $M_p$  : 課金パターン  $p$  のトリップチェーン経路の集合

本モデルは、Beckmannモデルを基本モデルとする需要変動型利用者均衡モデルであり、交通需要が最小交通費用の関数（直接需要関数）の形で表現される。本モデルでは、利用者が課金を避けようとする場合には、トリップチェーンベースの交通費用に基づいて、トリップチェーンを取りやめるか、代替経路を通るかを選択する。前者には、他手段への転換、トリップチェーン経由目的地の変更、移動そのものの取りやめが含まれると解釈される。

本モデルを沖縄県に適用した結果を示す。具体的には、平成11年道路交通センサスデータからトリップチェーンデータを作成し、トリップチェーン単位の需要関数を設定して、本モデルを適用した。那覇市都心部（図3）を仮想的な課金区域とし、日単位で計算した。

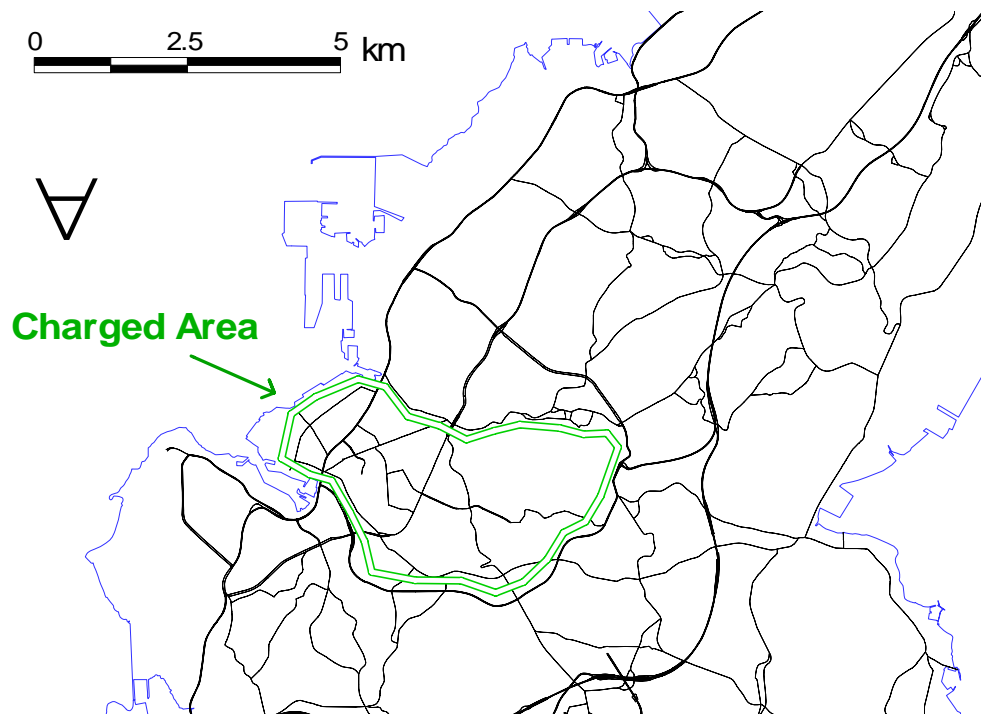


図3 分析における仮想的課金区域（那覇市都心部）

まず、課金額と社会的余剰の関係をコードン課金とエリア課金で比較したものを図4に示す<sup>2)</sup>。最適エリア課金額は約500円で、最適コードン課金額の約250円よりも大きく、コードン課金と比べると、社会的余剰はほぼ同じで、より大きな収入が確保できることが示された。

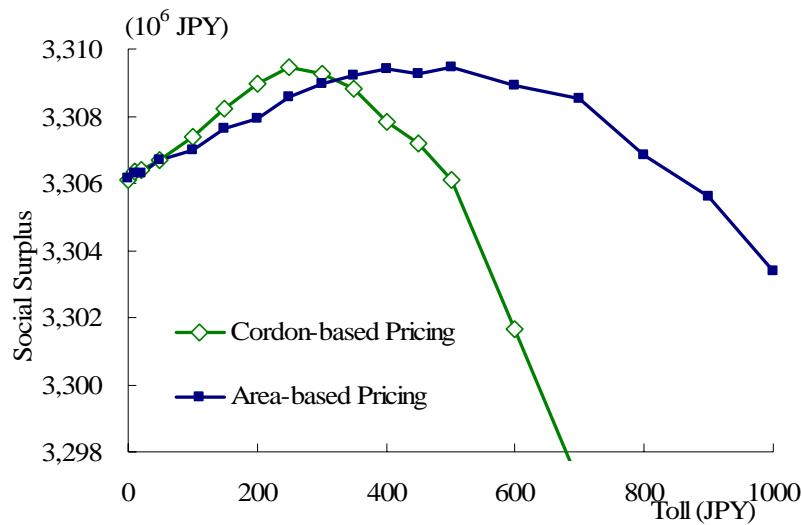


図4 コードン課金とエリア課金の比較：課金額と社会的余剰

次に、課金額と都市圏全体でのCO<sub>2</sub>排出量の関係を両課金方式で比較したものを図5に示す<sup>3)</sup>。いずれの課金方式においても、消費者余剰が最大となる最適課金の状況下におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減率は約1%という結果になっている。コードン課金の場合は、課金額の増加につれて削減効果が頭打ちとなっている。これは、コードン課金下では課金対象とならない地域内内トリップが増加するため、削減効果が打ち消されるためである。また、CO<sub>2</sub>排出量を最小化するという観点から最適なコードン課金額を設定するとすれば、その額は約600円であることも読み取れる。

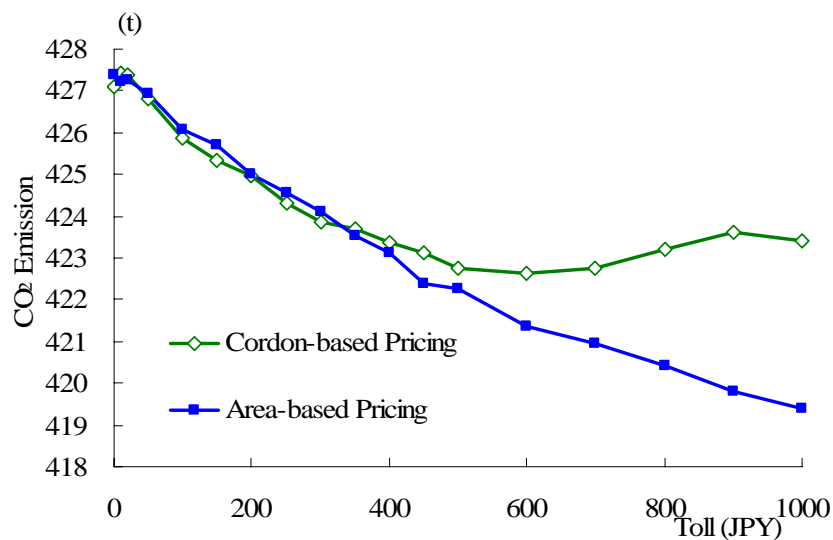


図5 コードン課金とエリア課金の比較：課金額と都市圏全体のCO<sub>2</sub>排出量

#### 4-2. 職住最適再配置の実施

職住最適再配置とは、現状の住宅と雇用の分布（すなわち、通勤目的の発生・集中交通量）を変化させずに、個人の居住地と勤務地（すなわち、通勤ODパターン＝どこからどこへ通勤するか）の組み合わせを適切に入れ替えることによって、通勤時間を減少させ、併せて交通環境負荷を削減することを目指す施策である。

その概念を図6に示す。ある個人は居住地aから勤務地Aへ、別の個人は居住地bから勤務地Bへと通勤するが、図の上の通勤パターン（Cross Commutingとよばれる）は無駄とも言える移動を含んでいる。これを下のように入れ替えることができれば、通勤時間・移動距離が減少し、CO<sub>2</sub>排出量の削減に貢献する。

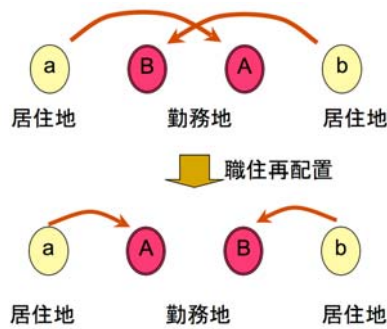


図6 職住最適再配置の概念

職住最適配置問題は、数学的には「最適割当UE」とよばれる最適化問題として次のように定式化され、ネットワーク配分手法を適用して解を求めることができる<sup>4)</sup>。

$$\min Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$$

subject to

$$\sum_s q_{rs} = O_r, \quad \forall r$$

$$\sum_r q_{rs} = D_s, \quad \forall s$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r, s$$

$$x_a = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad \forall a$$

$$x_a \geq 0, f_k^{rs} \geq 0, q_{rs} \geq 0$$

where

- $q_{rs}$  : ODペア  $rs$  間の通勤目的OD交通量
- $O_r$  : ゾーン  $r$  からの通勤目的自動車発生交通量（所与）
- $D_s$  : ゾーン  $s$  への通勤目的自動車集中交通量（所与）
- $f_k^{rs}$  : ODペア  $rs$  間の経路  $k$  の経路交通量

$x_a$  : リンク  $a$  の交通量  
 $t_a(x_a)$  : リンク  $a$  のリンクコスト関数（混雑考慮）  
 $\delta_{a,k}^{rs}$  : リンク経路接続行列（ODペア  $rs$  間経路  $k$  がリンク  $a$  を通過するとき 1、  
 しないとき 0 をとる変数）

なお、上記の定式化から明らかなように、本分析では交通手段の転換は考慮していない。また、ネットワーク上の混雑現象を考慮した最適状態を求められる点が本モデルの特長であるが、ここで言う「最適」の状態とは、CO<sub>2</sub>排出量が最小となる状態でなく、“利用者が各人にとって交通費用最小となる経路を選択する”という条件下で総交通費用が最小となるようにODパターンを入れ替えた状態を意味していることに注意が必要である。

東京都市圏・宇都宮都市圏・沖縄県を対象に、職住最適配置下における自動車による平均通勤時間ならびに通勤目的自動車からのCO<sub>2</sub>排出量を計算し、現状のそれと比較した結果を表 1 に示す。3つの対象地域は条件が異なるが、そのいずれにおいても平均通勤時間にして2～3割、CO<sub>2</sub>排出量にして3～4割の減少が見込まれることが分かる。

沖縄における現状および最適配置下における通勤トリップ長の分布を図 7 に示す。5 kmに満たない短距離帯のトリップが大幅に増加している。これらの他の交通手段への転換が図られれば、CO<sub>2</sub>排出削減量はより多くなると言える。

表 1 職住最適配置による通勤目的自動車CO<sub>2</sub>排出量の削減効果

都市圏	シナリオ	平均通勤時間	CO <sub>2</sub> 排出量
東京	現状	41.24分	1,804 t
	最適	31.65分 (-23%)	1,192 t (-34%)
宇都宮	現状	30.43分	149.5 t
	最適	21.69分 (-29%)	94.0 t (-37%)
沖縄	現状	24.66分	146.0 t
	最適	17.70分 (-28%)	88.8 t (-39%)

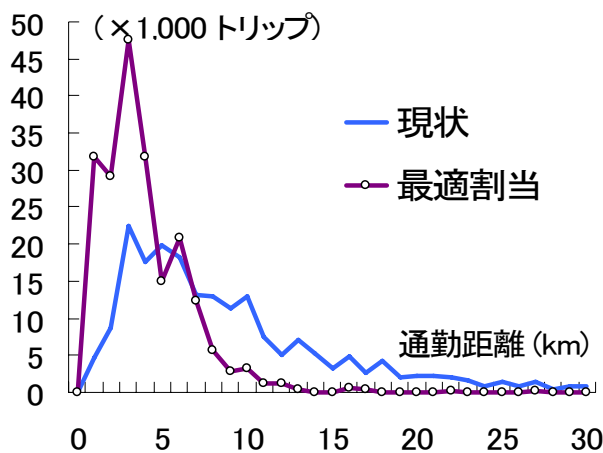


図 7 通勤トリップ長分布の変化  
(沖縄の場合)

こうした再配置は、雇用者が負担する通勤手当や住宅手当の制度を変更することなどによって、部分的に実現する可能性がある。また、混雑緩和による便益は再配置の対象とならない者にも及ぶ（東京都市圏を対象とした検討によると、職住再配置をどの程度大掛かりに実施するかにもよるが、最大で総走行台時削減量の3割程度が再配置の対象外の者に帰着する<sup>4)</sup>）ため、再配置を奨励するような助成政策が社会的に正当化される場合もあり得る。しかし、最適再配置は、その実現性を求めるより、理想的な状況下におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減ポテンシャルを示すものと理解すべきである。都市構造に起因する交通環境負荷に対する中長期的な政策を考える上で、1つの基礎的な情報を与えるものとして意義は大きい。

#### 4-3. 短距離移動における自動車から他手段への転換促進

交通手段の選択はトリップ長との関連が深いことが知られている。平成11年全国都市パーソントリップ調査のデータによると、2 km以内のトリップの半数以上は徒歩で行われており、自転車もかなりの距離まで利用されている（図8）。一方、0.5〜2 kmの距離帯で1〜2割、2〜4 kmの距離帯では4割程度のトリップが自動車で行われている。このような比較的短距離の移動について、自動車から徒歩や自転車への転換を図ることは、CO<sub>2</sub>排出量の削減につながる。

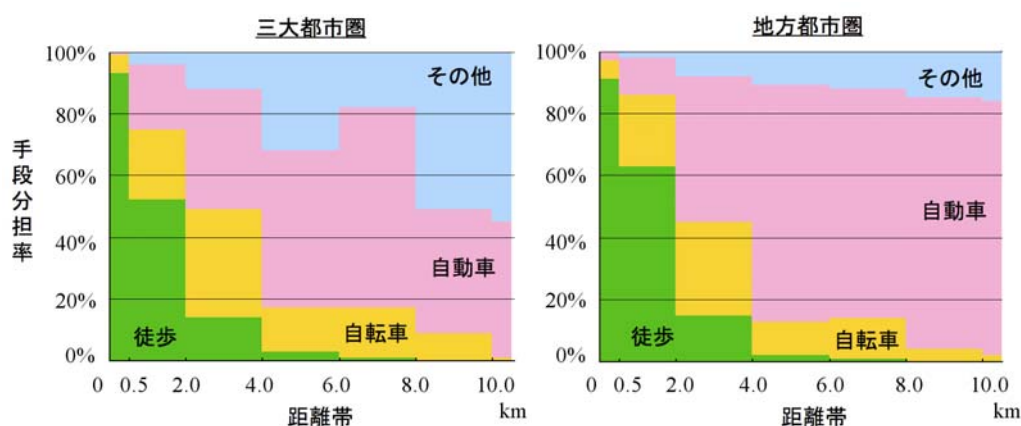


図8 トリップの距離帯と手段分担率（平成11年全国都市パーソントリップ調査より）

本研究では、平成11年道路交通センサスのデータに基づき、個人所有の自家用乗用車を対象として、短距離の自動車移動を徒歩や自転車に転換することによる、自動車のトリップ数、走行台キロ、CO<sub>2</sub>排出量の削減ポテンシャルを算出した。具体的には、自宅（住宅）を出てから自宅（住宅）へ帰宅するまでのトリップチェーンをひとまとまりとして、

- ① トリップチェーンにおけるすべてのトリップの区間距離が5 km以下である
- ② トリップチェーンにおける合計移動距離が10km以下である
- ③ トリップチェーンにおけるすべてのトリップの乗車人員が1人である
- ④ トリップチェーンにおけるどのトリップも、運行目的が「送迎」「貨物・荷物の運搬を伴う業務」または「不明」に該当しない

の4つの条件をすべて満たす自動車によるトリップチェーンを、他手段への転換により削減可能なものと見なして抽出した。

4条件のうち、①と②は肉体的な労力に基づく仮定である。図8にあるとおり、5km以内のトリップの2割程度が徒歩または自転車で行われているという現状を踏まえれば、①は非現実的な仮定ではないと考えられる。③については、同乗者がいるトリップは、場合にもよるが手段転換の可能性が低いと判断した。④のうち運行目的「不明」を除く2つの目的に関しては、同乗者や荷物を伴うため、やはり手段転換の可能性は低いと判断した。

計算は平日・休日別および車種別（乗用車・軽乗用車の別）に行い、それぞれ平日・休日の日数比と車種別CO<sub>2</sub>排出量原単位を加味して集計する。すべてのトリップはその自動車の「使用の本拠」にある市町村に帰着するものとして、シナリオチームが設定している10の土地利用類型別および運行目的別に削減ポテンシャルを算出した。

結果を表2に示す。土地利用類型により削減ポテンシャルには若干の差があり、都市地域でポテンシャルが高い傾向が見受けられる。全目的では概ね3～6%程度のCO<sub>2</sub>排出量が削減可能と見なされる。削減量全体への寄与を目的別に見ると、帰宅、通勤、家事・買物の順で大きい。これは削減率が高いことと、そもそも走行台キロや排出量が多いことの両方に因る。社交・娯楽目的や観光・レジャー目的の移動については、もともとの排出量はそれなりに多いが、上記の4条件を満たすトリップが少ないことから、寄与度は相対的に低くなっている。

表2 短距離自動車トリップの削減によるCO<sub>2</sub>排出量の削減ポテンシャル（削減率）

		通勤	通学	家事・買物	社交・娯楽	観光・レジャー	無荷物業務	帰社	帰宅	全目的
三大都市圏	都市地域	-6.5%	-2.3%	-8.1%	-4.8%	-0.9%	-1.4%	-0.3%	-6.0%	-4.9%
	平野農業地域	-5.1%	-3.3%	-5.4%	-3.8%	-1.4%	-2.1%	-0.4%	-5.1%	-4.3%
	中山間地域	-4.8%	-1.3%	-3.9%	-3.0%	-1.0%	-1.4%	-0.4%	-4.1%	-3.5%
地方中枢都市圏	都市地域	-6.7%	-3.4%	-7.4%	-4.4%	-0.8%	-1.0%	-0.3%	-5.7%	-4.5%
	平野農業地域	-4.7%	-1.7%	-5.4%	-3.7%	-1.2%	-1.7%	-0.8%	-4.8%	-3.9%
	中山間地域	-6.3%	-2.2%	-6.8%	-3.6%	-0.9%	-2.1%	-0.6%	-5.4%	-4.7%
地方中核都市	都市地域	-8.6%	-4.1%	-8.0%	-5.2%	-1.0%	-1.5%	-0.4%	-7.1%	-5.6%
その他地域	都市地域	-9.1%	-2.8%	-7.9%	-5.4%	-1.1%	-1.9%	-0.7%	-7.5%	-6.1%
	平野農業地域	-6.3%	-1.9%	-5.6%	-4.2%	-1.0%	-1.7%	-0.6%	-5.7%	-4.6%
	中山間地域	-6.4%	-1.6%	-4.4%	-3.3%	-1.0%	-1.6%	-0.7%	-5.0%	-4.2%
全国平均		-7.1%	-2.5%	-6.9%	-4.6%	-1.0%	-1.5%	-0.5%	-6.0%	-4.9%
排出量の目的別構成比	削減前	19.7%	0.6%	8.9%	6.7%	11.4%	4.6%	1.5%	39.5%	100.0%
	削減後	19.3%	0.6%	8.7%	6.7%	11.9%	4.8%	1.6%	39.1%	100.0%
削減量全体への寄与		28.6%	0.3%	12.6%	6.2%	2.3%	1.4%	0.2%	48.4%	100.0%



なお、本研究では手段転換を促進するための具体策とその効果については検討していない。近年注目を集めている方策としては、環境や健康などの側面からの説得的コミュニケーションによって交通行動の変更を促す「モビリティ・マネジメント」がある。その一方で、安全で快適な歩行環境・自転車利用環境の整備や、短距離の移動で日常の用を済ませることができるような都市づくりも、行動変更を促進するための基盤として依然重要と考えられる。

#### 4-4. シナリオに即したCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルの試算

4-2と4-3での検討結果に基づき、シナリオチームが設定した地域内旅客交通に関する将来シナリオ（表3）に即する形で、両シナリオ下における自家用乗用車（軽乗用車を含む）による地域内交通からのCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルを試算した。

表3 シナリオチームによる人口と交通に関連するシナリオ設定（概要）

	シナリオA	シナリオB
人口構成 人口分布	<p>2050年時点の性年齢階層別・都道府県別・土地利用類型別の人口が設定される</p> <p>□都道府県別人口：2010年以降、大都市圏・地方中枢都市圏を有する県に集中</p> <p>□都道府県内人口：コンパクトシティの形成により、都道府県内における都市地域の人口比率は1995～2000年における増加傾向のまま推移</p> <p>□世帯：核家族化傾向に歯止めかからず</p>	<p>■都道府県別人口：2015年以降、三大都市圏と地方中枢都市圏で純移動率がマイナスに、他県ではプラスに</p> <p>■都道府県内人口：2020年代中頃から農村地域・中山間地域の人口比率が増加し、2050年には2000年水準に戻る</p> <p>■世帯：核家族化傾向に歯止め</p>
発生 原単位	<p>①高齢者の通勤・業務トリップが10%増（高齢者就業率増）</p> <p>②15歳以上の通学トリップが10%増（生涯学習の普及）</p> <p>③女性の通勤・業務トリップが1999年の男性と同等にまで増（女性就業率増）</p> <p>④女性の家事・買物トリップが1999年の男性と同等にまで減（女性就業率増）</p> <p>⑤観光・レジャートリップが10%減</p> <p>⑥全トリップ数（帰宅を除く）の変化に伴って帰宅トリップが変化</p>	<p>①男性の通勤・業務トリップが1999年の女性と同等にまで減（ワークシェア）</p> <p>②男性の家事・買物トリップが1999年の女性と同等にまで増（ワークシェア）</p> <p>③観光・レジャートリップが10%増加</p> <p>④全トリップ数（帰宅を除く）の変化に伴って帰宅トリップが変化</p>
手段 分担率	<p>⑦4 km以上の自動車トリップの3分の1が鉄道にシフトするよう、距離帯別の分担率が変化</p>	<p>⑤6 km以下の自動車トリップの半分が徒歩・二輪にシフトするよう、距離帯別の分担率が変化</p>
平均 トリップ 長	<p>⑧全平均で2000年比10%減となるよう、10km以遠帯のトリップの平均トリップ長が減（コンパクトシティ）</p> <p>⑨⑦により見かけ上自動車のトリップ長が減、鉄道のトリップ長が増</p>	<p>⑥全平均で2000年比10%減となるよう、10km以遠帯のトリップの平均トリップ長が減（コンパクトシティ）</p> <p>⑦⑤により自動車の平均トリップ長が増</p>

具体的には、シナリオチームによる平成11年全国都市パーソントリップ調査ベースの設定に従い、A・B両シナリオ下での発生原単位、自動車分担率、平均トリップ長の変化率を計算し、それを平成11年道路交通センサスからの発生原単位や走行台キロの集計値に当てはめた。加えて、4-2で算出した職住最適再配置によるCO<sub>2</sub>排出量の削減ポテンシャルと、4-3で算出した短距離自動車トリップの削減によるCO<sub>2</sub>排出量の削減ポテンシャルをそれぞれ積み上げた。試算したケースの概略を表4に示す。

表4 試算を行ったケースの概略

	概 要	人口 構成 *1	人口 分布 *2	発生 原単位	自動車 分担率	平均 トリップ 長	備 考
0	現況	現	現	現	現	現	——
1	性年齢別人口の変化のみ考慮。 各属性の交通特性は全く変わらないとする	シ	現	現	現	現	——
2	性年齢別人口の変化に加えて、 就業率の変化などによるトリ ップ発生段階の変化も考慮	シ	現	シ	現	現	——
3	2に加え、土地利用類型別の人口 分布の変化も考慮するが、各 類型での自動車の使い方(分担 率、平均トリップ長)は不変	シ	シ	シ	現	現	——
4	2に加え、土地利用類型別の人口 分布も変化し、それに伴って 自動車の使い方(分担率、平均 トリップ長)も変わる	シ	シ	シ	シ	シ	——
5	4に加え、職住最適再配置による 削減ポテンシャルを考慮	シ	シ	シ	シ	シ	4-2より、通勤からの CO <sub>2</sub> 排出量の35%の2 倍(往復を考慮)を 削減
6	4に加え、短距離移動における 自動車からの転換による削減 ポテンシャルを考慮	シ	シ	シ	シ*3	シ	4-3の運行目的別削 減率を適用

[注] 「現」の項は現況(1999年実績)に、「シ」の項はシナリオチームの設定(AまたはB)に従った値を適用する。

\*1 性年齢別の人口(人口総数の減少もここに含まれる)。

\*2 土地利用類型別の人口比率。

\*3 短距離自動車トリップ削減と内容が重複することから、表3の⑤⑦の影響を除去するよう設定し直した。

試算の結果を図9と表5に示す。人口の減少・高齢化のみを考えた場合の削減率は3割程度(ケース1A・1B)であり、対策を講じたケース4以降ではさらに相当量の削減が見込まれている。特にシナリオA系列の削減率がB系列を大きく上回っているが、これはシナリオAにおいて公共交通への転換を織り込んでいる設定(シナリオチームによる)に起因する。また、職住最適再配置は直接的には通勤と帰宅についてのみ自動車による移動とCO<sub>2</sub>排出量を減少させるが、通勤からの排出

量は全体の15～20%であることから、全目的の排出量に対する削減ポテンシャルは10～15%程度と見積もられる。

なお、ケース4Bでは条件を満たす自動車トリップの半数が、ケース6Bでは条件を満たす自動車トリップのすべてが徒歩や自転車に転換すると設定しているにも関わらず、両者のCO<sub>2</sub>排出量がほぼ同等なのは、両者の条件に以下のような違いがあるためである。すなわち、ケース4Bの設定では、運行目的や乗車人員などに関係なく、6 km未満のすべての自動車トリップ（の半数）が転換対象になっている。これに対し、ケース6Bで転換対象に含まれるには4-3で述べた4条件のすべてをトリップチェーン単位で満たすことが必要であり、結果として転換するトリップは限定されている。

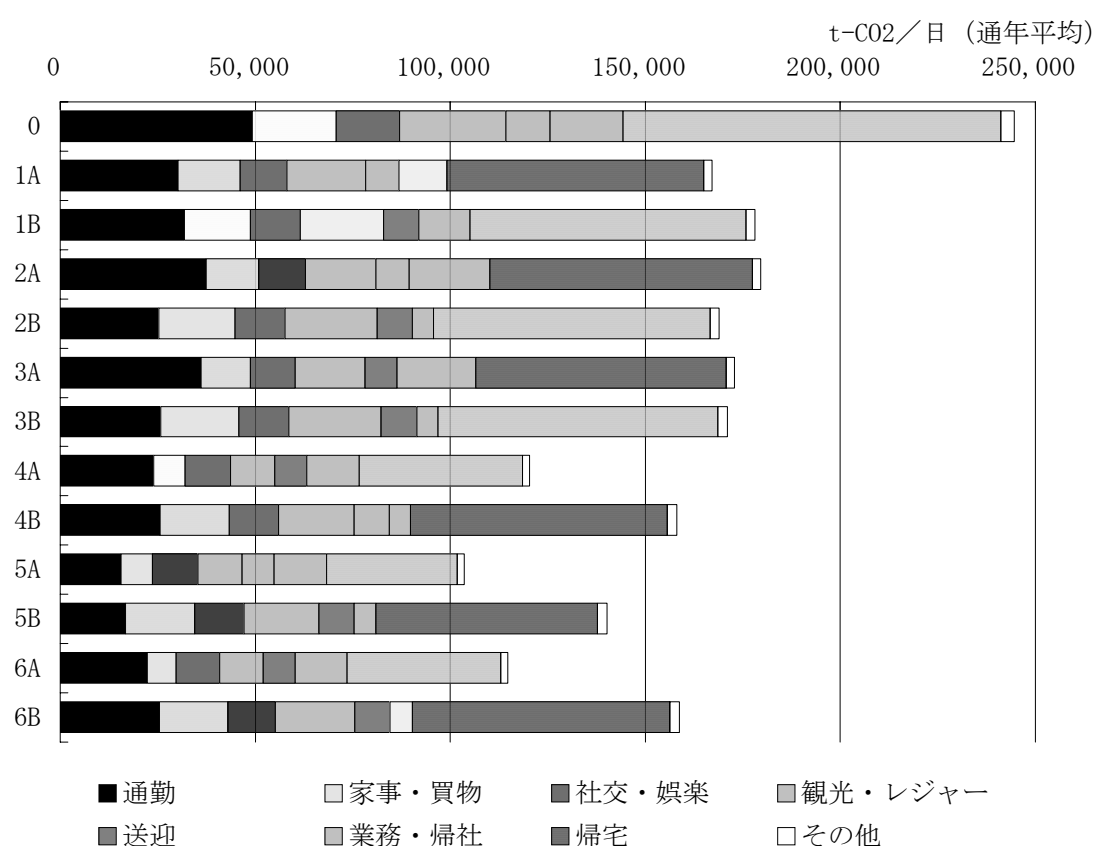


図9 各ケースのCO<sub>2</sub>排出量試算結果

表5 各ケースのCO<sub>2</sub>排出量削減率

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6
シナリオ A	-31.7%	-26.6%	-29.3%	-50.8%	-57.6%	-53.1%
シナリオ B	-27.2%	-30.9%	-30.1%	-35.4%	-42.7%	-35.1%

## 5. 本研究より得られた成果

平成16～18年度の3年間で得られた成果は以下のようにまとめられる。

- ・ ロードプライシング政策に関して、従来厳密な検討があまり行われてこなかったエリア課金の評価を行える、トリップチェーンベースの非加算経路コストを考慮したネットワーク均衡モデルを提案した。これを沖縄本島に適用することにより、エリア課金とコードン課金の下での消費者余剰、最適課金額、CO<sub>2</sub>排出量の相違を明らかにした。
- ・ 個人の居住地と勤務地を適切に入れ替えることのみによって通勤時間と通勤目的の自動車交通に起因するCO<sub>2</sub>排出量の削減をねらう職住最適再配置政策について、ネットワーク配分手法を適用し、混雑現象を考慮して分析できるモデルを提案した。これを東京都市圏、宇都宮都市圏、沖縄県に適用し、いずれの都市圏においても通勤目的の自動車からのCO<sub>2</sub>排出量が34～39%削減しうることを示した。
- ・ 道路交通センサスのオーナーインタビューOD調査データを用いて、他の交通手段への転換が可能と考えられる比較的短距離の自動車トリップがどの程度存在しているかを、土地利用類型別・目的別に集計した。その結果、仮に手段転換が完全に行われれば、全国・全目的で約5%のCO<sub>2</sub>排出量が削減されることを示した。
- ・ 本プロジェクト全体で設定されている2つのシナリオに即し、職住最適再配置と短距離自動車トリップの削減を積み重ねた場合のCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルを試算した。

## 6. 引用文献

- 1) 環境省：2004年度（平成16年度）の温室効果ガス排出量について，2006.
- 2) Maruyama, T. and Harata, N.: Difference between area-based and cordon-based congestion pricing: Investigation by trip-chain-based network equilibrium model with non-additive path costs, Transportation Research Record, No.1964, pp.1-8, 2006.
- 3) 円山琢也：ロードプライシング政策の比較分析 ―エリア課金 vs コードン課金―，都市のORウィンターセミナー2006 in つくば，2006.
- 4) 円山琢也，原田昇：ネットワーク上での混雑を考慮した最適職住配置手法の構築とその実証研究，都市計画論文集，No. 38-3, pp. 517-522, 2003.

## （６）都市系バイオマスと未利用エネルギーの活用によるエネルギー削減効果

東京大学

大学院工学系研究科 都市工学専攻

先端科学技術研究センター

荒巻俊也・石井暁

栗栖（長谷川）聖

### 〔要旨〕

厨芥や下水汚泥などの都市廃棄物系バイオマスからのバイオガス製造ポテンシャル、建設発生木材やエネルギー作物や早成樹によるバイオエタノール製造ポテンシャル、下水熱利用の地域冷暖房システムによるCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルの推定を行った。

厨芥や下水汚泥などの都市廃棄物系バイオマスによるバイオガス製造ポテンシャルと下水熱利用の地域冷暖房システムのポテンシャルについては、横浜や東京都といった都市レベルでの解析を行った。これらはいずれも詳細な建物情報を元にした、ポテンシャルの厳密な推定を目指している点でユニークなモノである。

さらに都市系廃棄物によるバイオガス製造ポテンシャルと、建設発生木材や栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャルについては全国レベルでの推計を行い、特に都市廃棄物と建設発生木材については超長期シナリオにもとづく2050年までのポテンシャルの推定を行った。CO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルとしては栽培系バイオマスによるバイオエタノール生産のポテンシャルは大きく、建設発生木材によるバイオエタノール生産、都市廃棄物のメタン発酵という順となっている。ただし、解析の仮定などにより結果が大きく変わることが予想される。

〔キーワード〕 バイオマス、厨芥、下水汚泥、建設廃材、早成樹、エネルギー作物、下水熱、地域冷暖房、バイオエタノール、メタン発酵

### 1. はじめに

将来の脱温暖化社会におけるエネルギー源として、バイオマス資源や未利用熱の利用が期待されている。

バイオマス資源については、厨芥や下水汚泥などの都市廃棄物系バイオマス、建設廃棄物や製材所廃棄物に含まれる木質バイオマス、エネルギー作物や早成樹などの栽培系バイオマスなどに分けられ、嫌気性発酵によるバイオガス生産、発酵などによる液体燃料化、焼却などによる発電・熱回収などの技術オプションが考えられる。本グループでは、

- ・ 横浜市を対象とした都市の湿系バイオマス（厨芥、下水汚泥）からのバイオガス製造による温室効果ガス削減公開の解析
  - ・ 全国レベルでの都市湿系バイオマスからのバイオガス製造ポテンシャルの将来推定
  - ・ 全国レベルでの建設発生木材によるバイオエタノール製造ポテンシャルの将来推定
  - ・ 全国レベルでの栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャルの推定
- を行った。

都市域における未利用熱の利用については、清掃工場排熱や変電所排熱、下水熱や河川水熱な

どさまざまな熱源が考えられるが、その中から都市内に広く存在している下水熱を用いた地域冷暖房システムの導入効果の解析を東京都区部を対象として行った。

2. 横浜市を対象とした都市の湿系バイオマス（厨芥、下水汚泥）からのバイオガス製造による温室効果ガス削減公開の解析

2.1 分析の概要

都市におけるメタン発酵施設導入の検討として、横浜市を対象に、下水処理場にバイオガス施設を併設し、都市における生ごみ（厨芥類）および下水汚泥を利用してのメタン回収・利用のエネルギーおよび CO<sub>2</sub> 削減ポテンシャルを推定した。対象である横浜市の人口は 360.1 万人、総世帯数は 158.1 万世帯、都市計画基礎調査による平成 15 年度現在の総建物数は 82.9 万棟である。

横浜市に 11 ある下水処理場に都市生ごみの受け入れを想定した場合の処理フローを示す（図 1）。ここでは、湿式メタン発酵技術の導入を想定したため、有機成分を多く含む排水処理施設と併設することが望ましいと考えた。とは重要である。横浜市における一般家庭厨芥および事業系厨芥（飲食店、食料品小売店、病院、学校、ホテル）からの、生ごみの発生量を空間的に示したのが図 2 である。ここでは、表 1 に示すとおり、9 通りの収集ケースを設定した。ケース 1～3 は、食品リサイクル法の対象となっている業種を段階的に加えてゆくケースとし、これら事業系の収集は 100% とした。また、家庭系厨芥類は収集困難であることを考慮して 5%～100%まで、段階的に変化させる収集ケースとした。

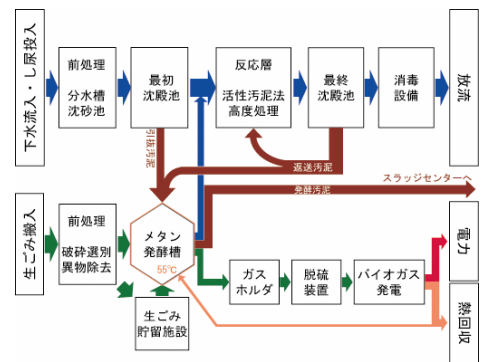


図1 水再生センターにおける厨芥類受け入れ処理フロー

※下水汚泥のバイオガス発生率<sup>1), 2)</sup>をそれぞれ0.65Nm<sup>3</sup>/kg-VS（20.7%TS VS/TS比0.95）、0.33Nm<sup>3</sup>/kg-VSとした。

2.2 計算方法

生ごみは各町丁目の中心点からその最寄の下水処理場と搬入すると仮定し、道路地図データを用いて輸送量を計算した（図 3）。最も一般的な中型ゴミ運搬車（容量 2.2t）を用い、各エリアの面積と必要台数から、収集車一台が受け持つ管轄面積を計算した。管轄面積内の道路延長は道路密度（総道路延長 km/面積 km<sup>2</sup>）の平均値を求め、管轄内領域の全道路を走行すると仮定した。運搬車の燃費は中型ゴミ車の平均値である 2.67km/L<sup>3)</sup>を用いた。

表1 厨芥類収集ケース

シナリオ	内訳
1	食品小売業
2	食品小売業+飲食店
3	食品小売業+飲食店+病院+学校+ホテル
4	Scenario3+5% 家庭厨芥
5	Scenario3+10% 家庭厨芥
6	Scenario3+20% 家庭厨芥
7	Scenario3+50% 家庭厨芥
8	Scenario3+75% 家庭厨芥
9	Scenario3+100% 家庭厨芥

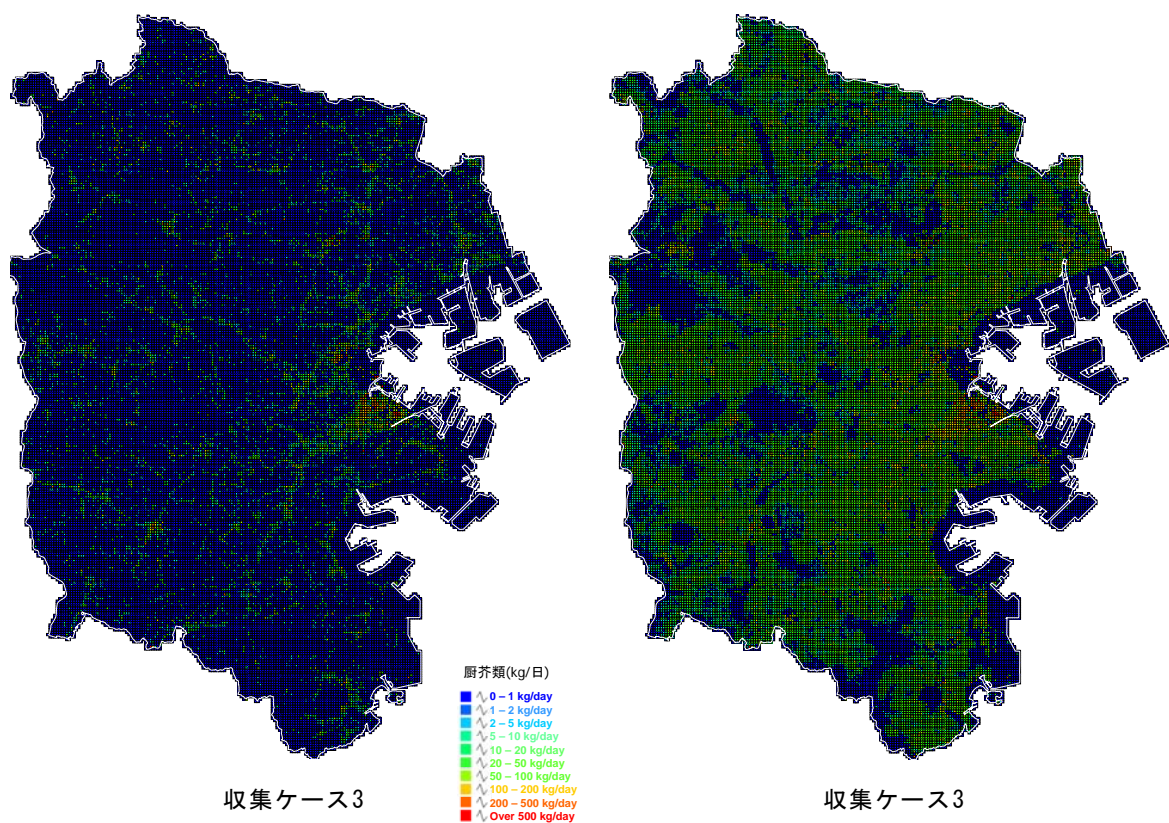


図2 横浜市における一日あたりの生ごみ排出量の空間分布（収集ケース別）

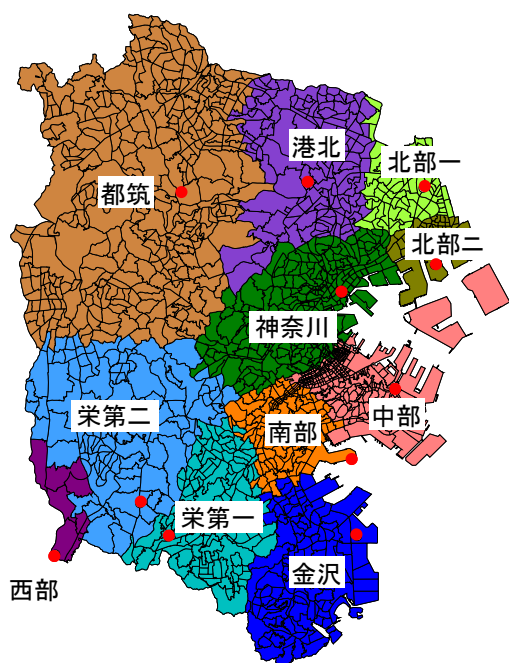


図3 町丁目別処理施設への厨芥類搬入エリア

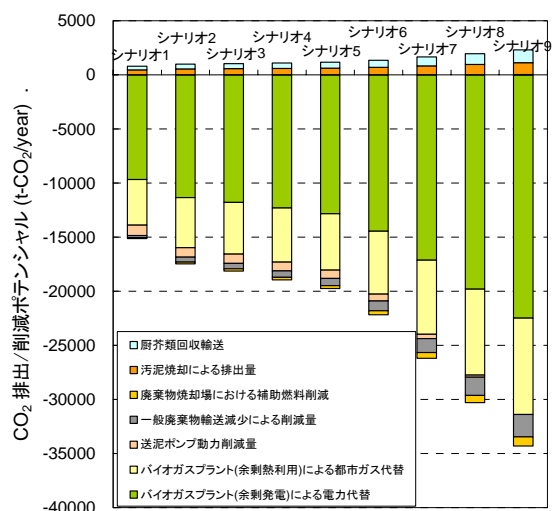


図4 熱供給需要制約下における二酸化炭素排出/削減量の内訳

一方、技術パラメータとして、および評価方法として、バイオガス中のメタン含有率を 60%とし<sup>4)</sup>、マイクロガスタービンによる発電量および回収熱量で評価した。CO<sub>2</sub>削減量を求めるために、系統電力の CO<sub>2</sub>排出原単位に 0.32kg-CO<sub>2</sub>/kWh を用いた。余剰熱は利用率を 53%とし、主に給湯および暖房用として利用するため、都市ガスの原単位 2.28 kg-CO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>を用いた。ライフサイクル的に計算するため、新たに発生する生ごみの輸送分、一般廃棄物中の生ごみ減少による輸送減少分、汚泥再生センターへ送泥ポンプ動力減少分、補助燃料削減分を計上した<sup>5)</sup>。

### 2.3 結果および考察

現時点における市の廃棄物行政に照らして、横浜市において家庭から排出される生ごみと下水道汚泥を利用したバイオガス発電により9つの収集ケースを検討した結果、最大で年間約 71.0GWh の余剰電力発電と年間約 181.0TJ の余剰熱回収が可能であり、二酸化炭素換算で約 16000 - 32000t-CO<sub>2</sub> の削減効果があることが明らかとなった。しかし、2001 年現在におけるバイオガス施設（下水処理場）周辺の民生建物熱・エネルギー需要を考慮した結果、南部下水処理場において、メタンの燃焼による発電から回収する余剰熱供給量が半径 1km 以内の周辺民生建物における需要量を上回り、回収エネルギーを全て使いきれないという事態を招く恐れがあることも示された。これにより、最大年間約 14000GJ、二酸化炭素換算で年間約 1000t-CO<sub>2</sub> を無駄にしてしまうことが明らかとなった。

## 3. 全国レベルでの都市湿系バイオマスからのバイオガス製造ポテンシャルの将来推定

### 3.1 湿系廃棄物系バイオマス利用におけるシナリオ設定

2. で述べた横浜市と同じ推計方法およびパラメータを用いて、二つのビジョンの描く日本全国の 2050 年までのバイオガス施設導入効果のトレンドについて分析を行った。その際、各超長期シナリオにおいてメタン発酵技術導入の効果を推定するにあたり、次のような仮定をおいた。

表2. シナリオ別の仮定

シナリオA	シナリオB
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 厨芥・汚泥等のバイオマスも「エネルギー資源」としてみなされ、中山間地域に至るまで、集中的な収集・処理が行われる。ごく一部の堆肥化や飼料化は、質として比較的均一な事業系厨芥が用いられる。</li> <li>・ 昼間人口（絶対数）が 2000 年レベルで固定される。これにより、全体の人口が減少するため見た目上の昼間人口移動は活発化し、東京、大阪など大都市への集中が進む。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中山間地域に人が移り住み、家庭菜園など堆肥または有機飼料が重宝され需要が増えるため、中山間地域のみならず都市部の厨芥であっても堆肥・飼料としての用途と競合する。</li> <li>・ 昼間人口と夜間人口の比率が 2050 年にかけて 1 に収束する（在宅勤務・職住近接が進む）。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 事業系厨芥類の回収量は都市部・平野農村地域において、2000 年時点で 0%、年間 1%のスピードで上昇し 2020 年で 20%、その後は年間 2%の上昇で 2050 年で 80%となる。</li> <li>・ 家庭厨芥類の回収量は中山間地域において、2000 年で 0%、年 1%上昇で 2020 年で 20%、シナリオ A はそのまま 2050 年で 50%、シナリオ B は回収のインセンティブが働かず 2020 年以降は 20%固定。</li> </ul>	

### 3.2 シナリオ下におけるバイオマス賦存量の推定

2020 年、2050 年における都道府県別の人口分布を考慮し、表 2 の仮定に照らしてバイオガス施設でのメタン回収に使用できる厨芥量を試算した。事業系は厨芥類を多く排出する業種：一般お



よびその他飲食店、飲食料品およびその他小売店、遊興興行施設、病院、学校、老人福祉施設を対象とし、各年・各都道府県における活動量を夜間人口、昼間人口、高齢人口（65歳以上）などの相関の最も高い人口関連の要素から推定した。事業所由来の厨芥排出量の推定は羽原ら<sup>6)</sup>の方法による。家庭からの厨芥発生量は、平成16または17年度の家庭ごみの組成調査として報告されている秋田市、仙台市、金沢市、相模原市、京都市、福岡市の平均値  $224.8(\pm 22.1)\text{g/日/人}$  を用いた（図5）。その結果、総人口はシナリオAがシナリオBを上回っているものの、堆肥化との競合はシナリオBが高くメタン回収技術への割り当てが少なくなる。昼間人口動態においてシナリオAは集中型であるのに対して、シナリオBは地方分散型であるため、シナリオBにおける事業系厨芥量は三大都市圏に属する周辺都道府県（埼玉県など）において増えるなどの影響が反映されている様子が見える。

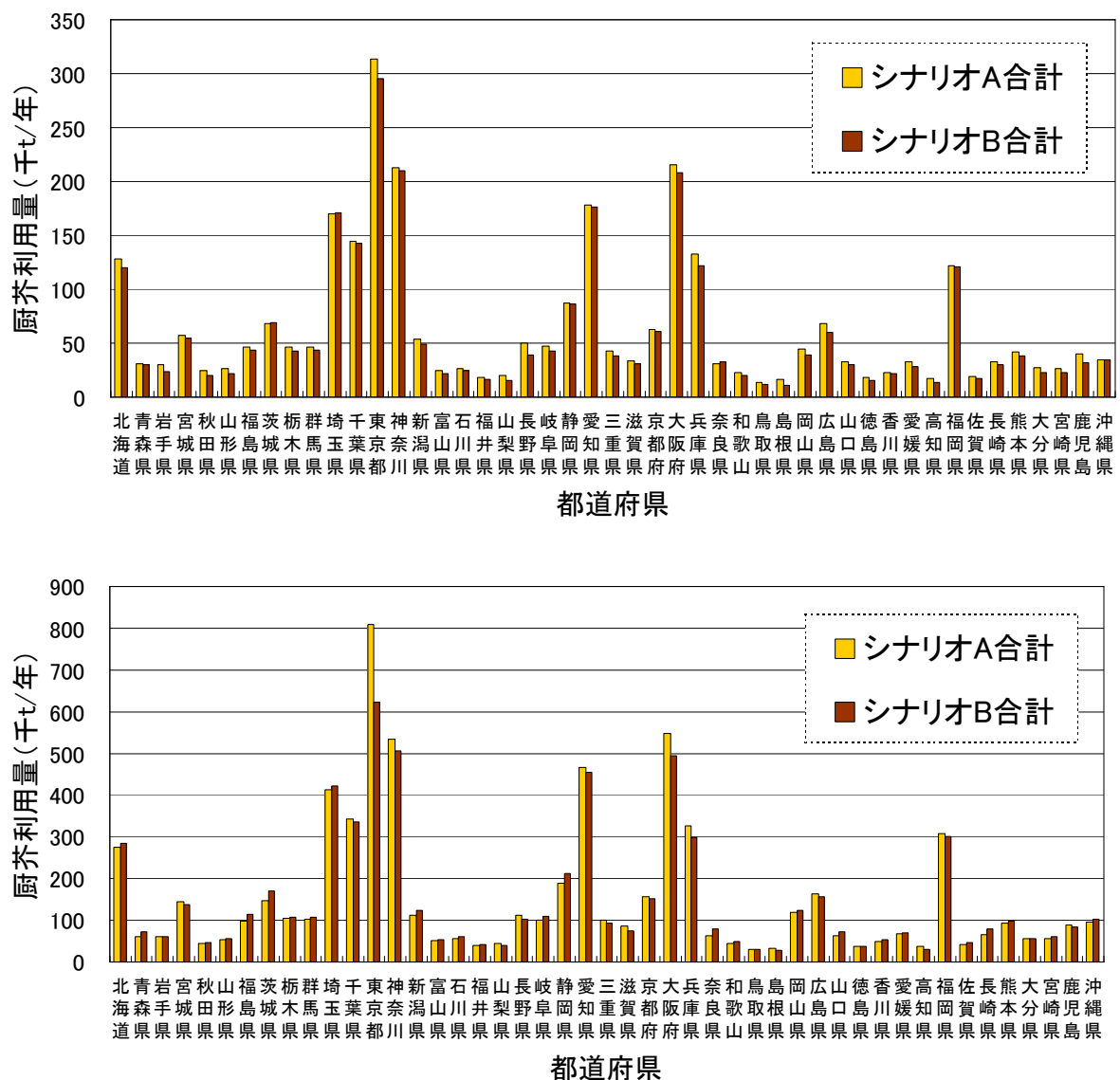


図5 2020年（上）および2050年（下）におけるバイオガス施設における厨芥利用可能量

汚水処理から排出される汚泥量は、平成15年度の下水道統計<sup>7)</sup>より一人当たりの汚泥量と有機成分を求め、将来的な汚水処理人口の推移を、2000-2005年における実績データおよび各都道府県下水道構想における目標値から回帰直線を求めて推定した。

### 3.3 結果および考察

各都道府県における厨芥利用可能量および汚水処理由来の汚泥排出量を求め、メタン生成ポテンシャルの推計を行い、バイオガス発酵施設においてガスタービン発電、熱回収した場合のポテンシャルを推定した。マイクロガスタービンの効率の技術革新が2050年にかけて25%から最大40%まで向上すると仮定して、全国におけるシナリオ別の年間発電量を推定したところ2050年において、シナリオA、B共通で約3400GWhであった（図6）。これらのエネルギー回収量は各シナリオにおいて地域差が存在するものの、2005年時点における電力およびガス供給を代替すると仮定した場合、二酸化炭素換算で年間約184万トン-CO<sub>2</sub>を削減できることがわかった。ただし、将来的には系統電力およびガスの単位あたりの二酸化炭素排出原単位が低下する事が考えられるため、二酸化炭素換算の議論は注意が必要である。シナリオ間の比較では、シナリオBにおいて堆肥化との競合により、家庭系および事業系厨芥回収量は少ないが、人口が多い分だけ汚泥系の発生および回収が進む結果、同様の発電ポテンシャルが期待できることを示している。また2010年、2015年におけるマイクロガスタービンにおける効率の向上がエネルギー回収に大きく影響している。

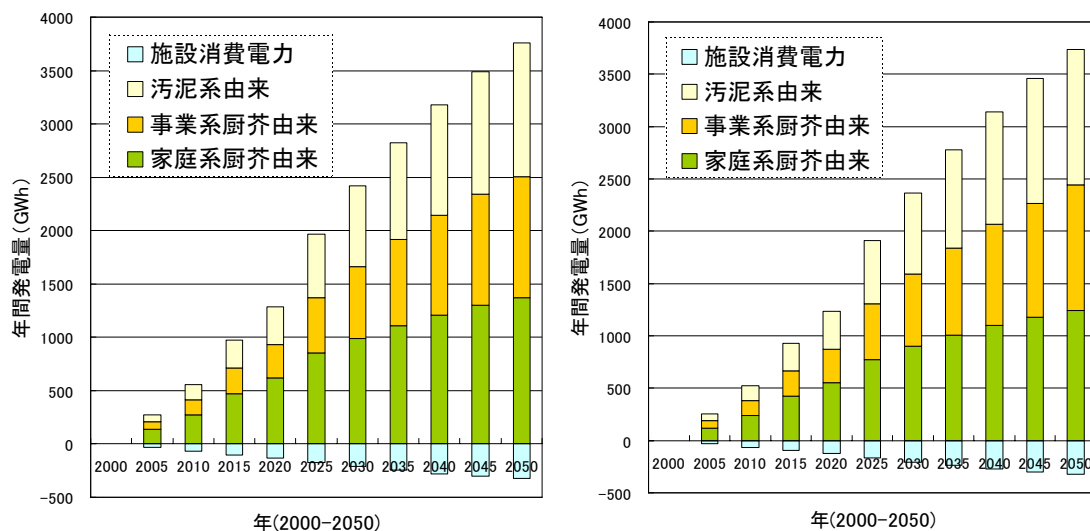


図6 シナリオA（左）およびシナリオB（右）年における全国推定年間発電量（GWh）

### 3.4 まとめ

本検討では、2050年のシナリオA・B下における湿系廃棄物系バイオマス利用促進による、エネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルを推定した。都市街区レベルの検討においては、湿系廃棄物バイオマス利用によるエネルギー回収ポテンシャルに加えて、バイオガス利用技術オプションによっては施設の環境戦略的な立地を考慮することが重要であることが示された。また、それらの技術を考慮する際、技術導入、維持管理等に関するコストに充分留意する必要がある。

一方、全国の将来超長期シナリオ下における検討では、同じく多くの検討の余地は残されているが、将来の日本のビジョンに沿って湿系廃棄物系バイオマス利用によるエネルギー回収ポテンシャルが示された。これらのポテンシャルは、将来の脱温暖化社会における、回収率や利用率の設定、技術オプションの適切な選択を考慮することにより、さらに向上する可能性があることが示された。

#### 4. 全国レベルでの建設発生木材によるバイオエタノール製造ポテンシャルの将来推定

##### 4.1 研究概要と方法

建設発生木材からのバイオエタノール製造ポテンシャルの現状での評価および将来予想を各都道府県について行った。将来予想に用いる住宅ストックについては本プロジェクトで用いられている A、B の二つのシナリオに基づいた。両シナリオにおける住宅ストック床面積の将来予測から、毎年の新築床面積と解体床面積を木造、非木造住宅ごとに推定し、建設発生木材量を推定した。バイオエタノール製造にかかるエネルギー収支と LCCO<sub>2</sub> の計算については NEDO の報告書<sup>8)</sup>に従った。なお LCCO<sub>2</sub> の計算は廃木材の収集からエタノール製造までのプロセスを対象としている。

##### 4.2 住宅ストックの変化と建設発生木材量

戸建て、集合住宅の住宅ストック床面積の全国集計値の将来変化をシナリオごとに図 7 に示す。また、ストック床面積から推定された新築・解体床面積も併せて示す。シナリオ A ではより人口が減少するため、シナリオ B より住宅ストック、とりわけ戸建ての住宅ストックが数%のオーダーで少なくなることが予想される。新築・解体床面積についても同様に数%程度の差となる。なお、これらの床面積から計算される建設発生木材量は、2004 年に 11.9 百万 t であるのに対し、2050 年ではシナリオ A で 10.2 百万 t、シナリオ B で 10.9 百万 t となる。

##### 4.3 エタノール製造ポテンシャルと CO<sub>2</sub> 排出削減量

2008 年からエタノール製造プロセスの導入が開始され、導入率は一定の速度で上昇し、2017 年までに 100%の建設発生木材がエタノール製造プロセスに導入されるようになると仮定した場合、エタノール製造量は図 8 に示した値となる。2050 年の時点でシナリオ A で 3.0 百万 kL、シナリオ B で 3.2 百万 kL であり、2002 年時点のガソリン消費量 58.4 百万 kL の約 5%に相当する。つまり 2050 年にガソリンのすべてが E5 に代替可能であり、半分のガソリンが E10 と代替可能であるという結果となる。

バイオエタノールによるガソリン代替に伴う CO<sub>2</sub> 削減量を試算すると図 9 のようになる。2050 年ではシナリオ A で 6.8 百万 t (シナリオ A)、シナリオ B で 7.2 百万 t となっており、2000 年の全国排出量 1,190 百万 t の約 0.5%に相当する。

##### 4.4 まとめ

建設発生木材を利用したバイオエタノール生産のポテンシャルを 2050 年までの 2 つの超長期シナリオに基づいて評価した。都市への集積は進むが人口がより減少するシナリオ A において若干エタノール生産ポテンシャルが低くなった。

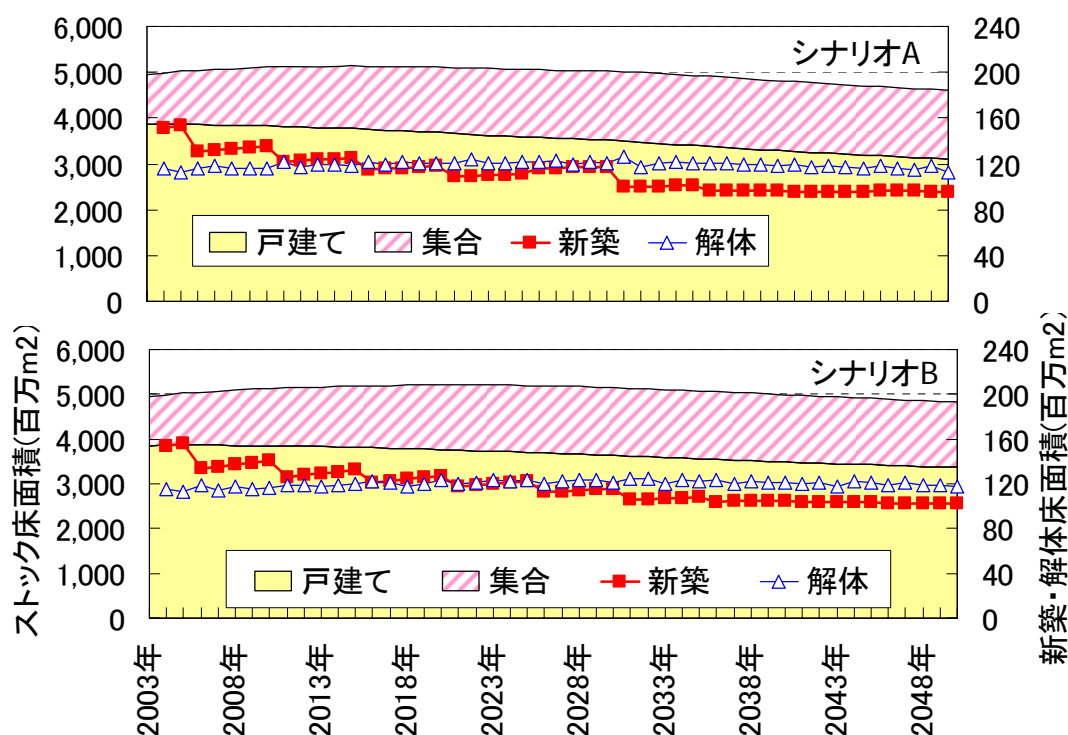


図7 住宅ストック床面積の変動と新築・解体床面積

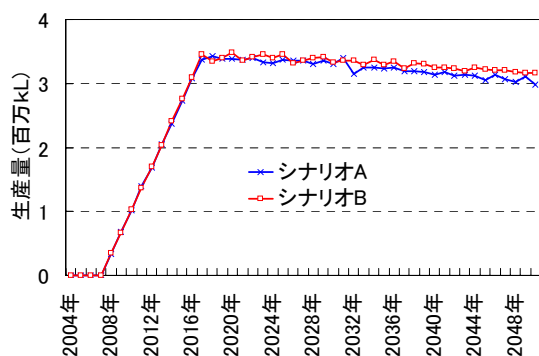


図8 バイオエタノールの生産ポテンシャル

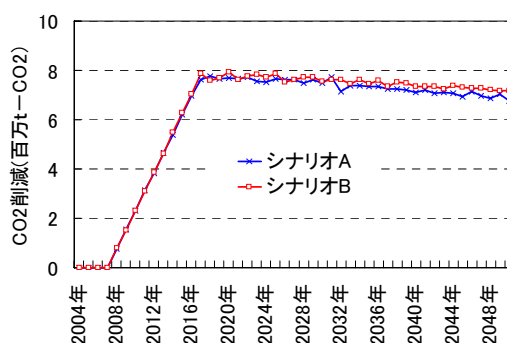


図9 バイオエタノールによるCO<sub>2</sub>削減ポテンシャル

## 5. 全国レベルでの栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャルの推定

### 5.1 栽培対象地と対象バイオマス

日本の土地利用は、大きく森林(自然林地、二次林地、植林地)、草原(自然草原、二次草原、人工草原)、農耕地、住宅市街地に分類される。本研究におけるバイオマス栽培対象地は、かつて人為的管理が行われていたが現在はほとんど放置されている二次林地および植林地、また、かつて農耕地として利用されていたが現在は農作物が栽培されていない耕作放棄地を含む二次草原および牧草地等の人工草原とした。これらの土地面積の合計は、国土面積の55%(二次林地25%、植林地25%、二次草原2%、人工草原3%)を占めている。

二次林地および植林地におけるバイオマス栽培対象樹種の選定において、かつて建築用材とし

て育林されたスギ、ヒノキ、マツ等の従来樹種からエネルギー活用を主目的とした初期成長の早い早生樹への樹種転換の可能性を検討した。対象とした早生樹種は、亜寒帯・温帯気候が生育適地であるヤナギ、亜熱帯・熱帯気候が生育適地であるアカシアを選定した。また、かつて薪炭材として利用されていたやや早生な従来樹種として、亜寒帯・温帯気候に適したカンバ、暖温帯・亜熱帯気候に適したコジイ、さらに、日本全体に生育地域が広がるササを対象樹種として選定した。また、二次草原および人工草原におけるバイオマス栽培対象作物種は、デンプン系バイオマスとしてコメおよびコムギ、糖系バイオマスとしてサトウキビ、セルロース系バイオマスとして青刈コーンおよび青刈ソルゴーといった牧草を選定した。

## 5.2 栽培系バイオマス都道府県別生産ポテンシャル推定手法と使用したデータベース

図 10 は栽培系バイオマス生産ポテンシャル推定手法である。全国都道府県別の土地利用状況を把握可能な 3 次メッシュ (約 1km<sup>2</sup>) データとして「自然環境保全基礎調査植生調査 3 次メッシュ<sup>9)</sup>」を用いた。森林においては都道府県別に二次林地および植林地メッシュエリアを抽出し、後述する樹種別傾斜条件・気候条件によって早生樹種の生育可能地メッシュを解析し、都道府県別樹種別のバイオマス栽培地メッシュを抽出した。これらメッシュエリアの面積を算定し、この栽培地面積 (ha) に後述する樹種別年間生長量 (t-dry/ha/year) を乗じることにより、都道府県別樹種別の栽培系バイオマス年間生産ポテンシャル (t-dry/year を高位発熱量換算 MJ/year) を推定した。草原においても同様で、都道府県別に二次草原および人工草原メッシュエリアを抽出後、後述する作物種別 LCCO<sub>2</sub> 評価、気候条件から都道府県別作物種別のバイオマス栽培地メッシュを抽出した。抽出メッシュエリアの面積に後述する作物種別の年間生長量を乗じて、都道府県別作物種別の栽培系バイオマス年間生産ポテンシャルを推計した。

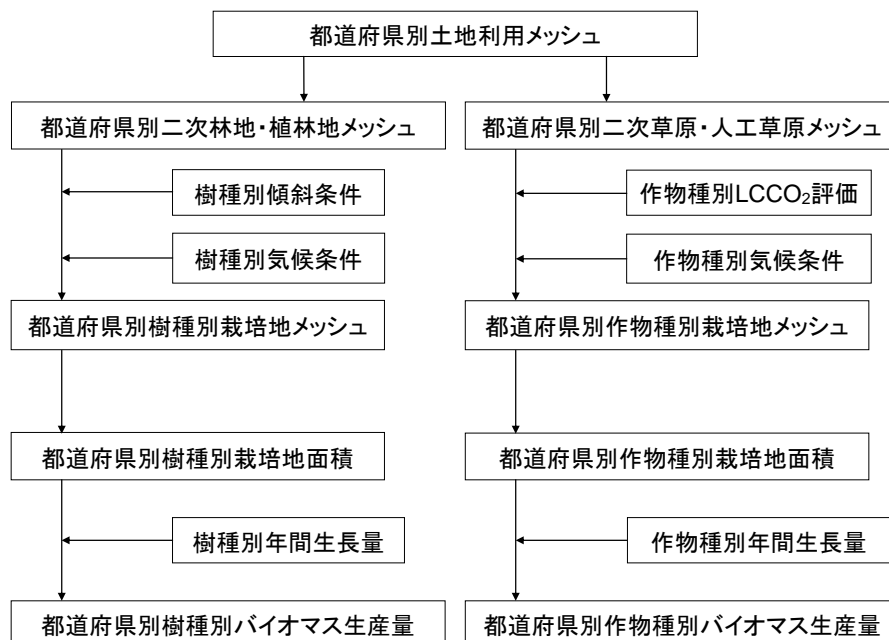


図 10 栽培系バイオマス生産ポテンシャル推定フロー

急傾斜地の多い日本の森林において、早生樹の短周期栽培収穫を想定する際、対象地の傾斜度に応じて樹種ごとの栽培収穫システムを検討した。二次林地および植林地 3 次メッシュデータに対応した傾斜度 3 次メッシュデータ（「国土数値情報：最大傾斜度メッシュ<sup>10)</sup>」）を利用して、二次林地および植林地を緩傾斜地（農業的利用に適した 0～15° の傾斜地<sup>11)</sup>）、中傾斜地（農業的利用には不適であるが林業的利用に適した 15～30° の傾斜地<sup>11)</sup>）、急傾斜地（林業的利用にも適さない 30° 以上の傾斜地<sup>11)</sup>）に 3 区分した。

対象樹種の中で、早生樹であるヤナギ（亜寒帯・温帯）およびアカシア（亜熱帯・熱帯）は、緩傾斜地における短周期（4 年周期<sup>12)</sup>）での農業的栽培収穫システムを想定し、やや早生な従来樹種であるカンバ（亜寒帯・温帯）およびコジイ（暖温帯・亜熱帯）は、中傾斜地における中周期（10 年周期<sup>12)</sup>）での林業的栽培収穫システムを想定した（表 3）。また、上記 4 樹種が生育不可能な地域においても生育可能なササは、緩傾斜地における短周期収穫システムおよび中傾斜地における中周期収穫システムのどちらも想定することとした（表 3）。なお、15～30° 程度の中傾斜地において、数年間隔の短周期ではなく 10 年間隔程度の中周期で樹木の育林を行うことは、山地における土砂災害防止機能を維持する上でも重要である。また、林業的利用にも不適と判断される 30° 以上の急傾斜地については、バイオマス栽培対象地から除外することとした。

表 3 各種栽培系バイオマスの傾斜条件・気候条件・年間生長量

	日最高最低気温		年降水量		傾斜度	栽培収穫周期	年間生長量
	Min(°C)	Max(°C)	Min(mm)	Max(mm)	(°)	(year)	(t-dry/ha/year)
ヤナギ	-16	31	700	2,860	0～15	4	20
アカシア	-1		300	3,000	0～15	4	18
カンバ	-20	29	670	2,870	15～30	10	14
コジイ	-5	32	1,120	3,580	15～30	10	13
ササ	-24	33	750	4,330	0～30	4, 10	8

	作物栽培地	年間生長量
	(都道府県)	(t-dry/ha/year)
サトウキビ	鹿児島県・沖縄県	50
青刈コーン	北海道	19
青刈ソルゴー	上記以外の都府県	18

対象樹種が生育可能な気候条件については、「自然環境保全基礎調査植生調査 3 次メッシュ」のメッシュデータ上に確認される樹種（ヤナギ、カンバ、コジイ、ササ）と、このメッシュデータに対応する気候値メッシュデータ（「メッシュ気候値 2000 年：日最高気温・日最低気温・年間降水量<sup>13)</sup>」）を解析し、各樹種が生育可能な気候値（日最高気温・日最低気温・年間降水量）範囲を決定した（表 3）。なお、対象樹種のうちアカシアは、日本における生育地域が非常に少なく、メッシュデータ上には確認されなかったため、国際連合食糧農業機関（FAO）の樹種データベース（Ecocrop1&2<sup>14)</sup>）の報告値から気候値範囲を決定した（表 3）。

後述する栽培系バイオマス LCCO<sub>2</sub> 評価の結果を用いて、コメ、コムギ、青刈コーン、青刈ソルゴー、サトウキビのエネルギー利用における LCCO<sub>2</sub> 排出量が小さい順に、①サトウキビ、②青刈

ソルゴー、③青刈コーンの3種を二次草原および人工草原における栽培系バイオマスの対象作物種とした。

農林水産省の統計資料<sup>15)</sup>によると、サトウキビは亜熱帯気候の鹿児島県および沖縄県のみ生産されており、青刈ソルゴーは北海道以外の全都府県で生産され、青刈コーンは亜寒帯気候の北海道を含む全都道府県で生産されている。そこで、二次草原および人工草原での作物栽培において、鹿児島県および沖縄県はサトウキビ栽培、北海道は青刈コーン栽培、その他の都府県は青刈ソルゴー栽培を想定することとした(表3)。

ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイおよびササの年間生長量は、農林水産省「バイオマス変換計画<sup>12)</sup>」において報告された国内の林業試験場における実測値を引用した。また、サトウキビは沖縄県における実測値<sup>16)</sup>を、青刈コーンおよび青刈ソルゴーは、国内の農業試験場における実測値<sup>17)</sup>を用いた(表3)。

### 5.3 栽培系バイオマス都道府県別生産ポテンシャル推定結果

図11は、都道府県別の二次林地、植林地、二次草原、人工草原の合計面積と、これらの中で実際にバイオマス栽培対象地となる土地面積の推定結果を示している。これは、30°以上の急傾斜地あるいは対象バイオマスの生育不適地と判断される気候地域を除外した土地面積を示している。北海道、宮城県、茨城県、千葉県、佐賀県、沖縄県は二次林地、植林地、二次草原、人工草原合計面積の90%以上がバイオマス栽培対象地となるのに対し、福井県、山梨県、奈良県、和歌山県、徳島県、高知県は二次林地・植林地・二次草原・人工草原合計面積の30%~50%程度を利用することになる。日本全体では、二次林地、植林地、二次草原、人工草原合計面積の72%の土地面積においてバイオマス栽培が可能と推定された。

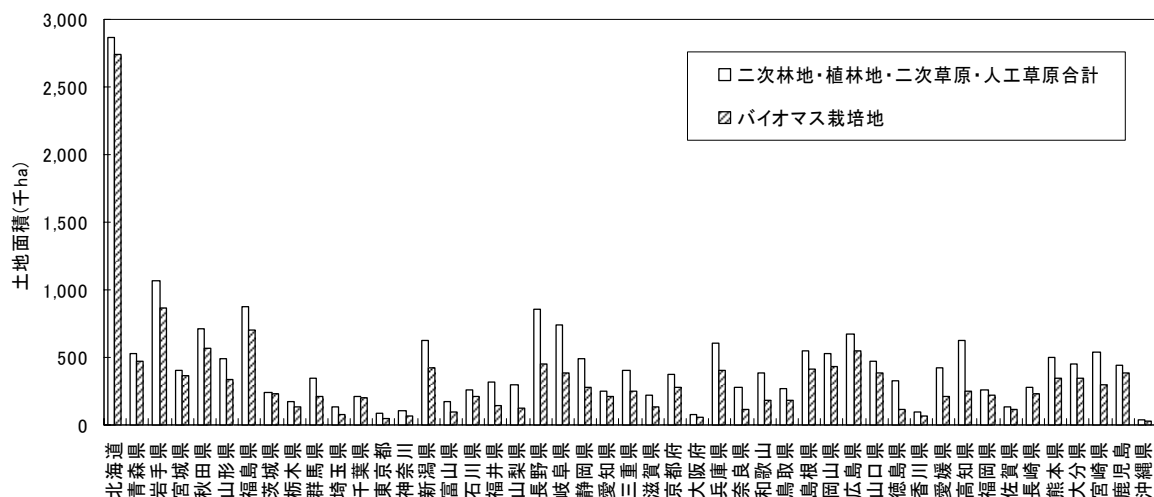


図11 都道府県別バイオマス栽培対象地面積

図12は、これら都道府県別バイオマス栽培対象地の中で、二次林地および植林地における樹種別栽培地面積を示している。北海道、東北、関東および中部地方は、亜寒帯・温帯気候に適した樹種であるヤナギおよびカンバの生育適地面積が大きく、近畿、中国、四国および九州地方には、暖温帯気候に適した樹種であるコジイの生育適地面積が大きい結果となった。また、亜熱帯・熱

帯気候に適した樹種であるアカシアの生育適地は非常に少なく、北海道、東北および関東地方は生育不適地であり、中部、近畿、中国地方の一部と四国、九州地方が生育可能地となった。

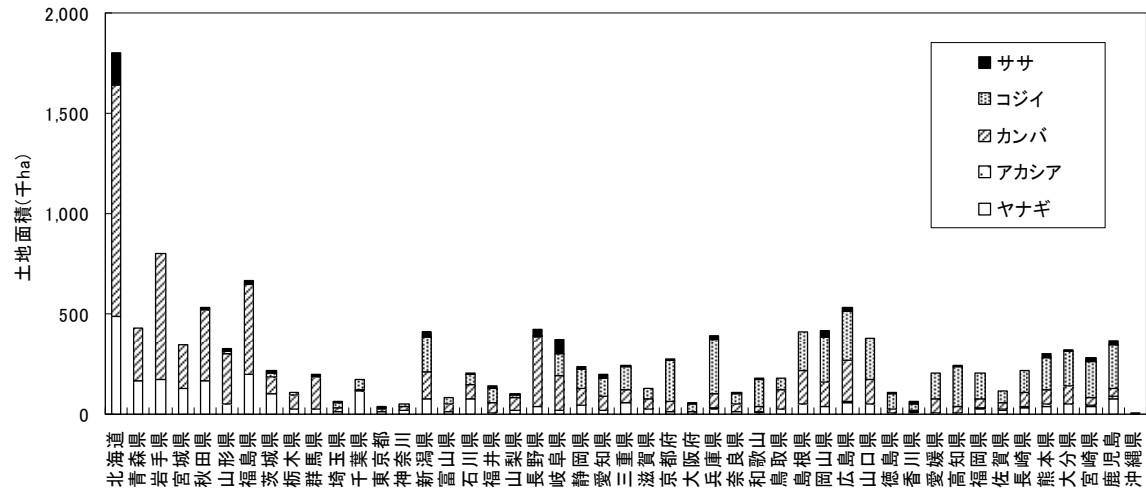


図 12 都道府県別樹種別栽培対象地面積

また図 13 は、樹種別および作物種別バイオマス栽培対象地面積(ha)に各樹種および作物の年間生長量(t-dry/ha/year)を乗じることにより、栽培系バイオマスの都道府県別年間生産ポテンシャル(t-dry/year を高位発熱量換算 MJ/year<sup>18)</sup>)を推定した結果を示している。日本全体での栽培系バイオマス生産ポテンシャルは年間約 4300PJ (森林 87%、草原 13%) と推定され、日本の年間一次エネルギー総供給量<sup>19)</sup>の 19%に相当している。この中で、北海道の生産ポテンシャルは日本全体の約 20%を占めていた。生産ポテンシャルの小さい都府県は、東京都、神奈川県、大阪府、香川県であり、各都府県のポテンシャルは日本全体の 1%に満たない結果となった。

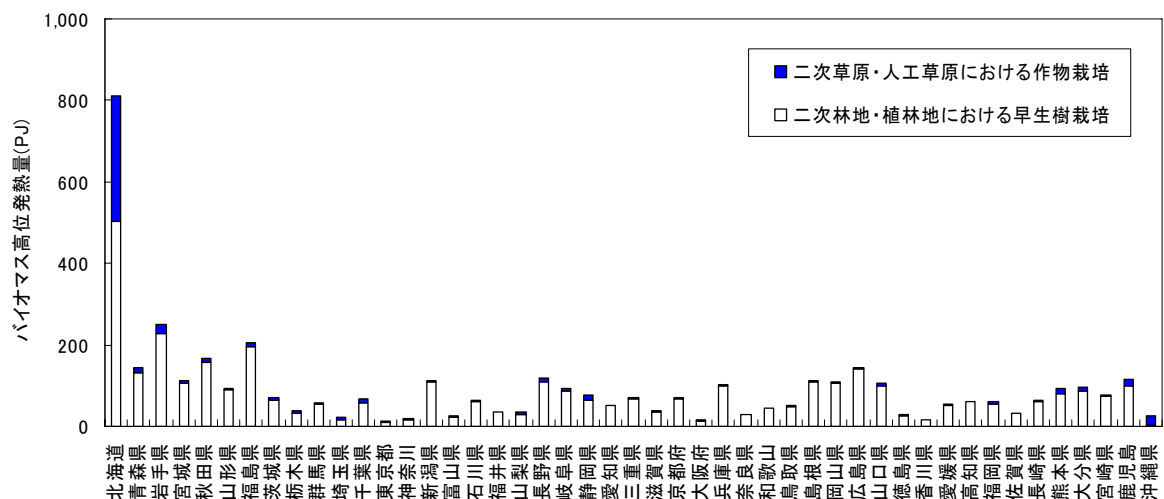


図 13 栽培系バイオマス都道府県別年間生産ポテンシャル推定結果



#### 5.4 バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価

主な組成成分の違いから、糖系のサトウキビ、デンプン系のコメおよびコムギ、セルロース系の樹木(ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイ、ササ)および牧草(青刈コーン、青刈ソルゴー)を対象バイオマスとして解析を行った。

表 4 はバイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価のシステム境界および評価対象としたエネルギー消費を示している。評価対象としたライフサイクル過程は、バイオマス栽培収穫過程、バイオマス輸送過程、バイオエタノール製造過程の 3 過程である。表に示すように、バイオマス栽培収穫過程は、農業機械および林業機械を使用する際の燃料エネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出、そして、これら機械および燃料を生産する際のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出、また、バイオマス栽培時に必要となる種苗、苗木、肥料、農薬を生産する際のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出を評価対象とした。バイオマス輸送過程は、バイオマス栽培地からバイオエタノール需要地までの往復距離におけるトラック輸送時の燃料エネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出、これら燃料を生産する際のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出を対象とした。また、バイオエタノール製造過程は、各エタノール製造工程(前処理・糖化・発酵・蒸留・脱水)における電力および熱エネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出、エタノール製造に必要な薬品を生産する際のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出を評価対象とした。

表 4 バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価のシステム境界・評価対象

システム境界	評価対象
バイオマス栽培収穫過程	農業機械・林業機械使用時の燃料エネルギー消費
	種苗・苗木・肥料・農薬・機械・燃料生産時のエネルギー消費
バイオマス輸送過程	トラック輸送時の燃料エネルギー消費 (↑バイオマス栽培地からバイオエタノール需要地まで)
	輸送用燃料生産時のエネルギー消費
バイオエタノール製造過程	前処理・糖化・発酵・蒸留・脱水時の電力・熱エネルギー消費 (↑発酵残渣による熱エネルギー回収を考慮)
	薬品生産時のエネルギー消費

農林水産省の統計資料に報告されている樹木および作物栽培収穫時の機械使用による燃料(ガソリン、軽油、灯油、潤滑油)消費量(L/ha/year)に、燃料種別の発熱量原単位(MJ/L)<sup>19)</sup>および CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/MJ)<sup>19)</sup>を乗じて、機械使用時の燃料エネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/ha/year)を算定した。なお、統計資料は、ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイ、ササの栽培時には「育林費結果報告<sup>20)</sup>」を、収穫時には「素材生産費等調査報告<sup>21)</sup>」を引用した。また、コメおよびコムギの栽培収穫時には「米及び麦類の生産費<sup>22)</sup>」、青刈コーンおよび青刈ソルゴーの栽培収穫時には「畜産物生産費<sup>23)</sup>」、サトウキビの栽培収穫時には「工芸農作物の生産費<sup>24)</sup>」を用いた。また、これと同様の統計資料に報告されている農業機械(作物)および林業機械(樹木)の減価償却費、燃料費、種苗費(作物)、苗木費(樹木)、肥料費、農薬費(円/ha/year)に、これら各々の製品に該当する産業連関表(I-A)-1 型 CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/円)<sup>25)</sup>を乗じることにより、各種製品生産時のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/ha/year)を算出した。

バイオマス栽培地からバイオエタノールの主な需要地となる住宅市街地および農耕地までの最

大輸送距離を片道 10km と仮定し、往復 20km をトラック輸送すると想定した。各種バイオマスの年間生産量(年間生長量) ( $t\text{-dry/ha/year}$ ) に、貨物自動車エネルギー消費量原単位 ( $\text{MJ/t/km}$ )<sup>26)</sup>、軽油の  $\text{CO}_2$  排出原単位 ( $t\text{-CO}_2/\text{MJ}$ )<sup>19)</sup>、往復輸送距離 20km を乗じることにより、トラック輸送時の燃料エネルギー消費に伴う  $\text{CO}_2$  排出量 ( $t\text{-CO}_2/\text{ha/year}$ ) を算出した。また、各種バイオマス往復 20km 輸送時の軽油消費量 ( $\text{MJ/ha/year}$ ) に、産業連関表 (I-A)-1 型  $\text{CO}_2$  排出量原単位 (石油製品部門) ( $t\text{-CO}_2/\text{MJ}$  に換算)<sup>25)</sup> を乗じて、燃料生産時のエネルギー消費に伴う  $\text{CO}_2$  排出量 ( $t\text{-CO}_2/\text{ha/year}$ ) を算出した。

バイオマスは主な組成成分の違いによってエタノール製造プロセスが異なる。このため、対象バイオマスを糖系のサトウキビ、デンプン系のコメおよびコムギ、セルロース系の樹木(ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイ、ササ)および牧草(青刈コーン、青刈ソルゴー)に 3 分類し、これら 3 種類のバイオエタノール製造プロセスを想定した。NEDO の報告書<sup>8)</sup>を参考に、3 種類の製造プロセスにおけるバイオエタノール製造時の電力・熱エネルギー消費および薬品生産時のエネルギー消費に伴う  $\text{CO}_2$  排出量を算定した。セルロース系バイオエタノール製造時の電力・熱エネルギー消費および薬品生産時のエネルギー消費に伴う  $\text{CO}_2$  排出量は、Maruyama<sup>27)</sup> の報告値を引用し、デンプン系および糖系バイオエタノールは、該当する製造プロセスのみの電力・熱エネルギー消費および薬品生産時のエネルギー消費に伴う  $\text{CO}_2$  排出量を対象とした。また、バイオエタノール製造プロセスにおいて、セルロース系の樹木および牧草からはリグニンが、糖系のサトウキビからはバガスが醗酵残渣として発生する。これらの醗酵残渣は、バイオエタノール製造時の熱エネルギー源として有効利用することができるため、リグニンおよびバガスによる熱エネルギー回収も想定することとした。なお、デンプン系のコメおよびコムギにおいては、リグニンやバガスに相当する醗酵残渣が発生しないため、エネルギー回収は想定しない。

図 14 は、醗酵残渣による熱エネルギー回収を考慮した場合の各種バイオマスにおけるバイオエタノール生産量 1GJ 当たりの  $\text{LCCO}_2$  排出量評価結果を示している。また、バイオエタノールの代替対象となるガソリンについても、文献値<sup>28)</sup>を引用したガソリン生産量 1GJ 当たりの  $\text{LCCO}_2$  排出量を示した(図 15)。バイオマスの主な組成成分によって  $\text{LCCO}_2$  排出量を比較すると、糖系のサトウキビの  $\text{CO}_2$  排出量 ( $11\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$ ) が最も小さく、次いでセルロース系の青刈ソルゴー ( $18\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$ )、青刈コーン ( $18\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$ ) および樹木となり、デンプン系のコメ ( $33\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$ ) およびコムギ ( $32\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$ ) は、 $\text{CO}_2$  排出量が大きくなる結果となった。これは、バイオエタノール製造過程において、サトウキビはバガスを、牧草や樹木は醗酵残渣であるリグニンを熱エネルギーとしてエネルギー回収することが可能であり、エタノール製造時のエネルギー消費量を大幅に削減することができるためである。また、図 15 において、ガソリンの  $\text{LCCO}_2$  排出量 ( $78\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$ ) は、ガソリンの燃焼時における  $\text{CO}_2$  排出量が  $\text{LCCO}_2$  全体の 86%を占めていた。カーボンニュートラルという概念から、バイオエタノールの燃焼は  $\text{CO}_2$  排出と見なされないのに対し、化石燃料由来のガソリンの燃焼は  $\text{CO}_2$  排出源となる。このため、全てのバイオマス種において、ガソリンと比較した場合の  $\text{LC CO}_2$  排出量は小さく、ガソリンをバイオエタノールで代替することは、代替量 1MJ 当たりサトウキビの最大  $67\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$  ( $=78-11$ ) からコメの最小  $45\text{kg-CO}_2/\text{GJ}$  ( $=78-33$ ) までの  $\text{CO}_2$  排出削減効果があることが分かった。

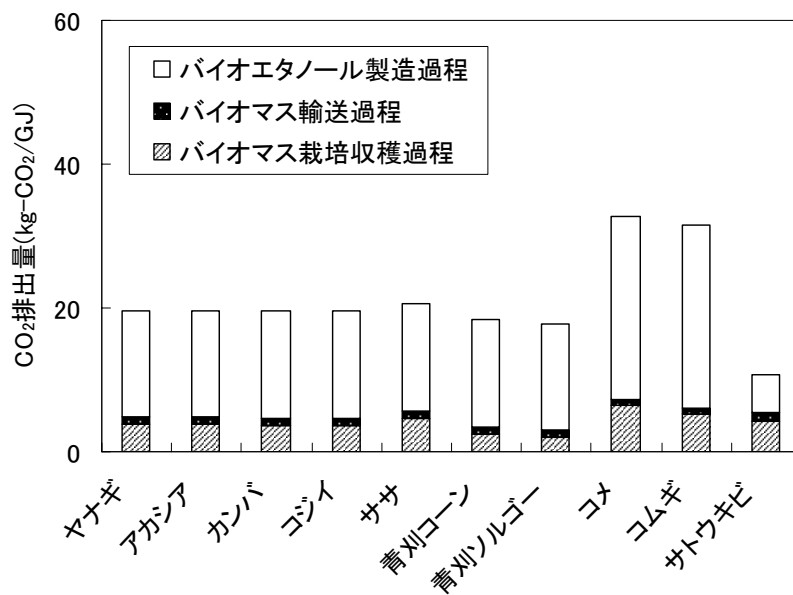


図 14 バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価結果

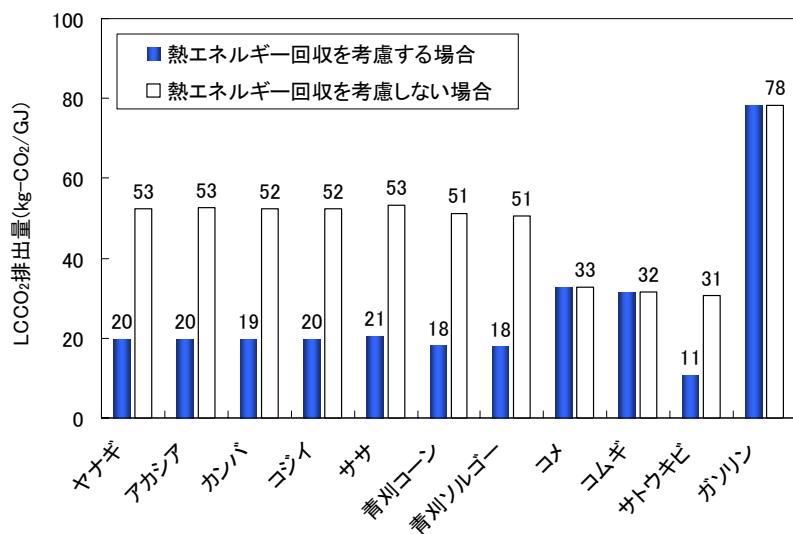


図 15 バイオエタノールとガソリンの LCCO<sub>2</sub> 比較

#### 5.5 栽培系バイオマスのバイオエタノール活用による CO<sub>2</sub> 排出削減ポテンシャル評価

図 16 は、日本全体を 8 地域に分割して地域ごとのバイオエタノールおよびガソリンの需給バランスを評価した結果を示している。北海道および東北地方におけるバイオエタノール余剰供給量によって関東地方におけるガソリン需要量の約 80%を代替可能である。また、中国、四国および九州地方においては、これらの地域内で需給バランスがとれる結果となった。日本全体では、現状のガソリン需要量の 78%を栽培系バイオマスからのバイオエタノールによって代替可能であることが分かった。

バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価結果を用いて、栽培系バイオマスからのバイオエタノール供給

可能量全量をガソリンと代替した場合の  $LCCO_2$  排出削減ポテンシャルを算定した結果、約  $138\text{Mt-CO}_2$  の排出削減効果があることが分かった。これは、日本全体の年間  $\text{CO}_2$  排出量  $1,188\text{Mt-CO}_2^{29)}$  の約 12% に相当している。

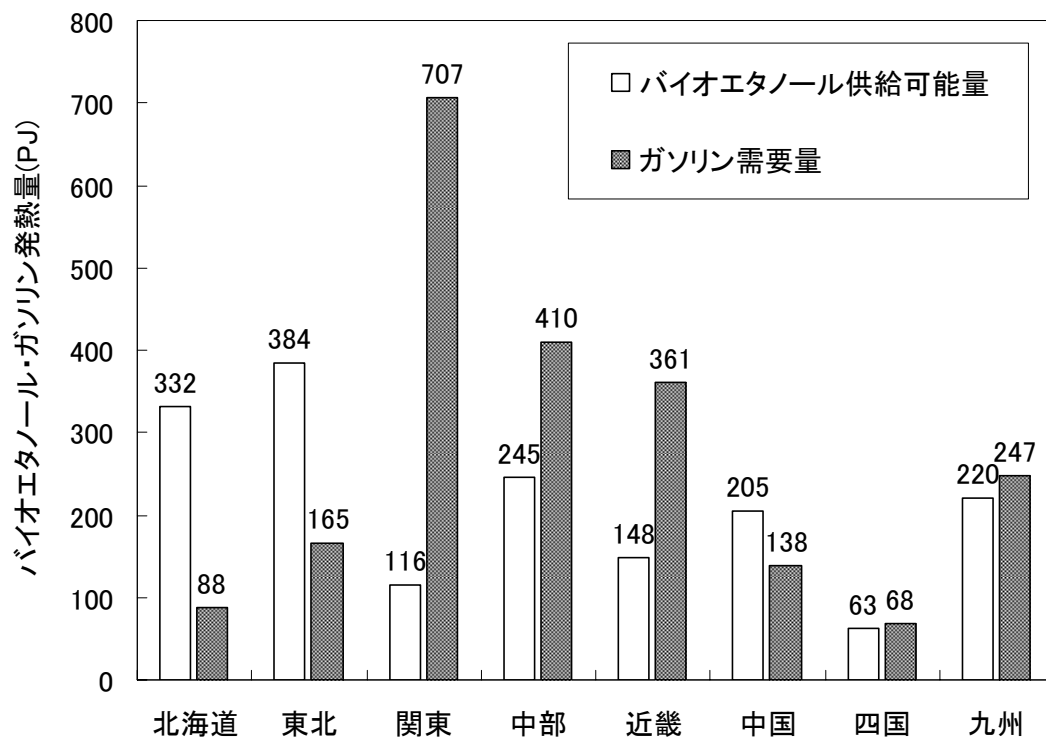


図 16 バイオエタノールとガソリンの 8 地方別需給バランス

## 6. 下水熱を用いた地域冷暖房システムの導入効果の解析

### 6.1 研究の概要と方法

下水熱は地域冷暖房（DHC）の熱源として活用することで利用可能になるが、質の低い熱である反面、都心部に張り巡らされている下水のネットワークから熱を取り出せるという優位性を有している。しかしながら、現実の都市における下水熱の利用による温室効果削減可能量については、定量的な評価がなされておらず、そのポテンシャルすら明らかになっていない。そこで、DHCプラントシミュレーションモデルと、下水流量と温度を計算する下水幹線シミュレーションモデルの2つのモデルを開発し、東京都区部の建物情報を利用して同地域に適用し、東京都区部において下水熱を最も効率よく利用した場合にどの程度  $\text{CO}_2$  が削減されるかについて推定した。

図17は下水幹線シミュレーションモデルの概要を示している。東京都の建物利用の地理情報システムと下水温度の実測値を元に任意の地点の下水流量と水温を推定する手法を新たに開発した。この方法では、建物の用途別の床面積あたり下水排出原単位に、各建物用途ごとの床面積を乗じ、また下水の流下時間をも考慮した。下水の集水域を各幹線の流域図を基に独自に決定した点や、下水の流下に伴うタイムラグを考慮した点、上流側のDHCで下水熱を利用した場合に下流側の下水温度を変化させた点にオリジナリティがある。

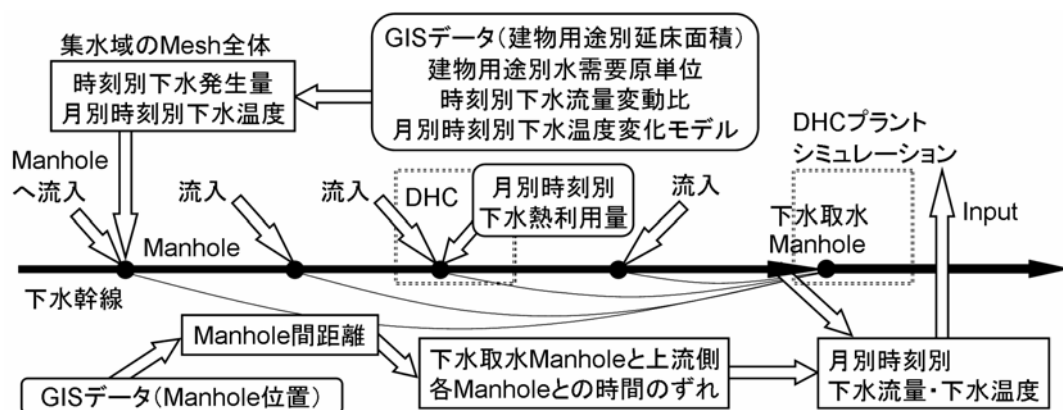


図 17 下水幹線シミュレーションモデルの概要

図18はDHCプラントのシミュレーションモデルの概要を示している。このモデルでは、1年間を通じて、1ヶ月ごとおよび1時間ごとのシミュレーションが可能になっており、また現実の状態に合わせて蓄熱槽の設置も考慮している。二酸化炭素排出量を計算する場合には時刻によって電力の炭素原単位が異なるため、このような詳細な検討が必要になり、その意味でこのような緻密なモデル設定は重要である。

これら二つのモデルを用いて、対象メッシュにDHCを導入した場合の確保できる熱量、LCCO<sub>2</sub>や経済性を推定した。2つのモデルや評価方法の詳細は池上<sup>30)</sup>を参照されたい。

## 6.2 東京都区部におけるCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャル

表5は各処理区において下水熱を最も有効に利用した場合のCO<sub>2</sub>排出削減量と削減率を示している。もっとも熱需要が大きい芝浦処理区では59の地区に下水熱DHCを導入することによりこれらの地区に通常のDHCを導入した場合より年間49,913トンのCO<sub>2</sub>排出を削減できる。これは当該地区の民生部門CO<sub>2</sub>排出量推定値の約0.70%に相当し、この時のCO<sub>2</sub>排出削減コストは平均すると約9.5 [千円/tonCO<sub>2</sub>]であると試算された。都区部全体では320の地区に下水熱DHCを導入することにより約137 [千tonCO<sub>2</sub>/yr]のCO<sub>2</sub>を削減できるポテンシャルがあることが分かった。これは、東京都区部の民生部門のCO<sub>2</sub>排出量の推定値の0.54%であった。

図19の印はこの時の下水熱DHCが導入される位置を示している。

## 6.3 気候の変化に伴うDHC

熱需要の多い芝浦処理区を対象として、気候条件を変化させて導入効果がどのように変化するかを検討した。具体的には、気温や下水温度について札幌の情報をを用いてシミュレーションを行った。その結果、下水熱DHCの導入は寒冷地の方がCO<sub>2</sub>削減コストやCO<sub>2</sub>削減率といった面で効果が大きくなるが、熱利用による冬季の下水温度の低下が問題となり多数のDHCの導入には困難があることが示された。

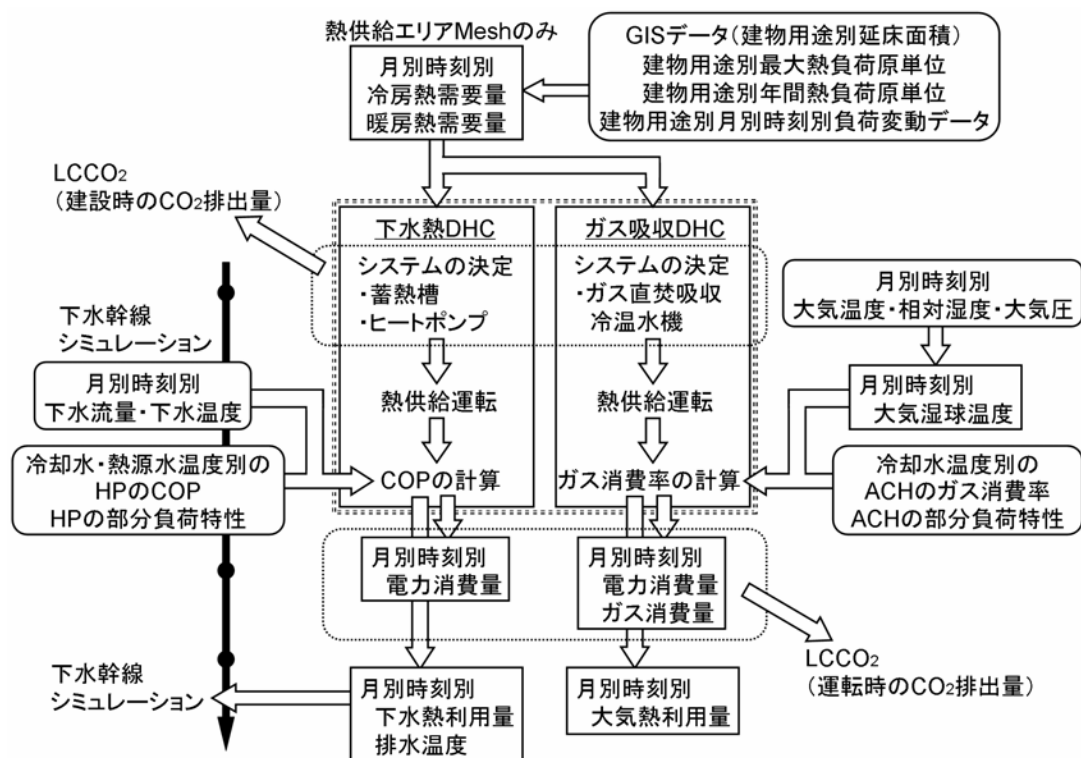


図 18 DHC プラントシミュレーションモデルの概要

表5 各処理区のCO<sub>2</sub>排出削減量・削減率

	導入 DHC 数	LCCO <sub>2</sub> 排出削減量 [tonCO <sub>2</sub> /yr]	民生部門のCO <sub>2</sub> 排出量に対する 削減率	
			処理区全体	熱供給エリア比
A 芝浦	59	49913	0.70%	10.83%
B 三河島	46	19964	0.69%	10.36%
C 砂町	37	9772	0.49%	8.87%
D 小台	10	3111	0.42%	9.87%
E 落合	24	10853	0.56%	11.69%
F 森ヶ崎	79	27568	0.58%	10.30%
G 小菅	2	306	0.06%	8.82%
H 葛西	27	7502	0.53%	9.89%
I 新河岸	31	7261	0.24%	9.58%
J 中川	5	1140	0.12%	11.63%
合計	320	137389	0.54%	10.41%

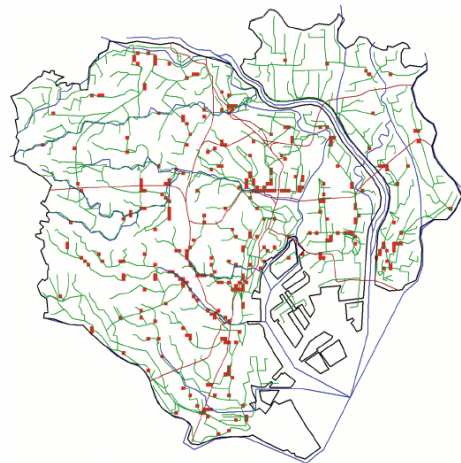


図 19 東京都区部の DHC 導入最適 Mesh 位置

## 7. まとめ

厨芥や下水汚泥などの都市廃棄物系バイオマスによるバイオガス製造ポテンシャルと下水熱利用の地域冷暖房システムのポテンシャルについては、横浜や東京都といった都市レベルでの解析を行った。これらはいずれも詳細な建物情報を元にした、ポテンシャルの厳密な推定を目指している点でユニークなモノである。さらに都市系廃棄物によるバイオガス製造ポテンシャルと、建設

発生木材や栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャルについては全国レベルでの推計を行い、特に都市廃棄物と建設発生木材については超長期シナリオにもとづく2050年までのポテンシャルの推定を行った。CO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルとしては栽培系バイオマスによるバイオエタノール生産のポテンシャルは大きく、建設発生木材によるバイオエタノール生産、都市廃棄物のメタン発酵という順となっている。ただし、解析の仮定などにより結果が大きく変わることが予想される。

## 参考文献

- 1) 竹野勝彦 (2001) メビウスシステム～生ごみとし尿汚泥の高速メタン発酵処理技術～, 都市清掃, 54 (244), 529-533
- 2) 菊池理, 毛塚博明, 久芳良則 (2001) REMシステム, 都市清掃, 54 (244), 534-537
- 3) 川崎市環境局 (2004) 生活環境事業年報 平成15年度版, 川崎市
- 4) 日本エネルギー資源学会 (2002) バイオマスハンドブック, オーム社出版
- 5) 石井暁, 花木啓祐 (2006) 川崎市下水処理場における有機性食品廃棄物を利用したエネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルの推定, 土木学会環境システム論文集, 34, 443-453
- 6) 羽原浩史, 松籐敏彦, 田中信壽 (2002) 事業系ごみ量と組成の事業所種類別発生・循環流れ推計法に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 13(5), 315-324
- 7) 日本下水道協会 (2005) 平成15年度版下水道統計行政編, 日本下水道協会
- 8) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: 開発項目「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/セルロース系バイオマスを原料とする新規なエタノール発酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発」平成13年度～平成17年度成果報告書、平成18年3月
- 9) 環境省生物多様性センター: 自然環境保全基礎調査第5回植生調査3次メッシュ植生データ, 2001.
- 10) 国土交通省国土計画局: 国土数値情報標高・傾斜度メッシュ, 1981.
- 11) 国土調査研究会: 土地・水情報の基礎と応用, 1992.
- 12) 農林水産省農林水産技術会議事務局: バイオマス変換計画, 1991.
- 13) 気象業務支援センター: メッシュ気候値 2000.
- 14) FAO: Ecocrop1: The crop environmental requirements database & Ecocrop2: The crop environmental response database, 2004.
- 15) 農林水産省統計部: 作物統計 (普通作物・飼料作物・工芸農作物).
- 16) 日本エネルギー学会: バイオマスハンドブック, 2005.
- 17) 日本草地畜産種子協会: 飼料作物品種・種子情報
- 18) N. El Bassam: ENERGY PLANT SPECIES, 1998.
- 19) 資源エネルギー庁: 総合エネルギー統計 平成15年度版, 2006.
- 20) 農林水産省統計部: 平成13年度 育林費結果報告, 2004.
- 21) 農林水産省統計部: 平成13年度 素材生産費等調査報告書, 2004.
- 22) 農林水産省統計部: 平成13年度 米及び麦類の生産費, 2004.
- 23) 農林水産省統計部: 平成13年度 畜産物生産費, 2004.
- 24) 農林水産省統計部: 平成13年度 工芸農作物の生産費, 2004.
- 25) 南斉規介, 森口祐一: 2000年産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), 国立環境研究所地球環境研究センター, 2006.
- 26) 国土交通省総合政策局情報管理部: 交通関係エネルギー要覧 平成18年版, 2006
- 27) Maruyama, S., : Development of Pretreatment, Saccharification and Ethanol Fermentation Technique, New Ethanol Fermentation Technique and the Like from Cellulose Biomass, 2003.
- 28) 石油産業活性化センター: 石油産業活性化センター (PEC) H13 年度報告書, 2002.
- 29) 環境省: 環境統計集, 2003 年国内各温室効果ガスの排出量.
- 30) 池上貴志: 東京都区部における下水熱利用地域冷暖房システムの戦略的導入による二酸化炭素排出削減効果および経済性の解析、平成18年度東京大学博士論文、2006.





## （７） 都市における需要変化に伴う誘発二酸化炭素排出量変化

東京大学

新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 吉田好邦

### 〔要旨〕

物流の波及に注目した地域間の物流量の新しい計算手法を提案し、脱温暖化社会におけるCO<sub>2</sub>排出量の推計に適用するとともに、モーダルシフト等のCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルの分析に応用した。全国貨物純流動調査（物流センサス）を用いて、2種類の物流を検討する。ひとつは生産から消費に向かって、すなわち上流から下流に物の流れをみることによる派生物流で、もうひとつは下流から上流に向かって、消費に由来して誘発される物の流れをみることによる誘導物流である。誘導物流では、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに、地域間に発生する物流をさす。都道府県間物流の手段（陸上、鉄道、船舶などの種別）については物流センサスにデータが存在するため、県間の物流削減量が得られることによる、モーダルシフトによる効果の分析も比較的容易に可能となる。

具体的には特定の都道府県で最終需要が発生したとき、どの地域からどのような品類を出荷しているか、また最終需要が入荷する際に、他にどのような品類がどの程度入荷するかを東京都と北海道を例にとって示し、最終消費地域によって発生する物流が異なることを示した。

またモーダルシフトと人口変動の観点からみたCO<sub>2</sub>の削減ポテンシャルを推計した。人口シナリオによって与えられる人口変動を最終需要の変動として捉え、誘導物流の変化を求め、それによって変化するCO<sub>2</sub>排出量を計算した。さらにモーダルシフトを実施した場合のCO<sub>2</sub>削減量を算出し、脱温暖化社会における物流分野でのCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルを評価することができた。

〔キーワード〕 派生物流、誘導物流、産業連関分析、モーダルシフト、CO<sub>2</sub>排出量

### 1. はじめに

CO<sub>2</sub>排出の中から物流由来のものに焦点を当て、排出量を削減する方策を探る。物流は部門別の排出においては運輸部門にあたり、運輸部門は全体排出量の21%、およそ2億6000万トンのCO<sub>2</sub>を排出している。運輸部門の中で自動車の割合は90%を占めている。自家用車の普及とともに、物流においてトラックが多用されるようになった。自動車は、近年では短距離輸送のみならず600km以上の距離での陸上輸送でも約30%を占めている。このように、自動車は他の輸送機関に比べて多くのCO<sub>2</sub>を排出する輸送機関となっている。このような背景から、物流に焦点をあてたCO<sub>2</sub>削減対策の具体的な評価が極めて重要といえる。

### 2. 研究目的

本研究では物流の波及に注目した地域間の物流量の新しい計算手法を提案し、モーダルシフト等のCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルの分析に適用する。使用するデータは、物流に関する公表データのうち最も代表的なデータベースである全国貨物純流動調査（物流センサス）<sup>1)</sup>である。本手法で評価する物流は2つある。ひとつは生産から消費に向かって、すなわち上流から下流に物の流れをみ

ることによる派生物流である。派生物流はある製品が生産されたときにそれが最終消費者に搬送されるまでに発生する地域間の物流をさす。もうひとつは下流から上流に向かって、消費に由来して誘発される物の流れをみることによる誘導物流である。誘導物流では、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに、地域間に発生する物流をさす。本手法は各種産業の生産や家計の消費行動と物流との関係を接続する、いわば物流産業連関分析といえる。都道府県間物流の手段（陸上、鉄道、船舶などの種別）については物流センサスにデータが存在するため、県間の物流削減量が得られることによる、モーダルシフトによる効果の分析も比較的容易に可能となる。

### 3. 研究方法

#### 3.1 物流センサス

物流センサスは、国土交通省が昭和45年度以来5年ごとに実施している統計調査である。物流が発生する個々の事業所から出荷されるすべての貨物について、貨物の品目、重量、届先地、荷受人業種、輸送機関、輸送経路、物流時間などを全国規模で調査しているので、全国各地の物流施設、交通施策計画の基礎資料、その他物流に関する調査研究に広く用いられている。

物流センサスにおける品類区分は、以下に示す8種である。

- ① 農水産品
- ② 林産品
- ③ 鉱産品
- ④ 金属機械工業品
- ⑤ 化学工業品
- ⑥ 軽工業品
- ⑦ 雑工業品
- ⑧ 特殊品

物流センサスの産業区分は、大きく分けると鉱業、製造業、卸売業、倉庫業の4産業であるが、今回の計算では、さらに細かく区分をされた46産業を用いて計算している。

物流センサスにおける輸送機関の区分は以下の5種である。

- ①鉄道
- ②自家用トラック
- ③営業用トラック
- ④海運
- ⑤航空

純流動物流調査には、年間調査と3日間調査がある。3日間調査には79品目で調査した細かい流動データがあるのだが、調査期間3日という少ない情報から算出された結果であるので、今回は年間調査の結果のみを用いることにした。よって、2000年に調査された第7回全国貨物純流動調査の結果から、以下のデータを選択した。これらのデータは全て、年間に動いた重量がトン単位で表示されている。

#### ●「都道府県間流動量（品類別）」（物流センサスⅠ-3-1）

各都道府県間を移動した物流量を示している。従って47都道府県×47都道府県の行列が、品

類別に 8 個存在する。行列の  $ij$  成分は、 $i$  県から  $j$  県への出荷重量を表している。

- 「産業業種・品類別年間出荷量」 (物流センサスⅡ-1-1)

$ij$  成分は、産業  $i$  が出荷した品類  $j$  の重量を示している。

- 「産業業種・品類別年間入荷量」 (物流センサスⅡ-1-2)

$ij$  成分は、品類  $j$  として入荷した後に産業  $i$  に投入された重量を示している。

- 「産業業種別年間輸出入量」 (物流センサスⅠ-1-2)

各産業に対して、年間の輸出量と輸入量を表示したものである。

- 「都道府県・代表輸送機関別年間出荷量 (品類別)」 (物流センサスⅢ-1-10)

$ij$  成分は、県  $i$  から輸送機関  $j$  によって輸送される物流量を示している。よって、47 都道府県  $\times$  5 輸送機関の行列を 8 個使用する。

### 3.2 誘導物流の計算方法

#### 2.1 誘導物流

誘導物流は、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに、製造過程で地域間に発生する物流をさす。産業連関分析では最終需要に由来する生産を求めるが、同様に最終需要に由来して発生する地域間の物流をとらえたい場合に、以下に示す導出手法による誘導物流を用いる。まず必要となるデータ・用語についてまとめる。

- ・ 誘導物流行列  $X_c^{(k)}$

$ij$  成分が県  $i$  から県  $j$  への年間出荷量を表す品目  $c$  別の行列。物流は需要に対して誘発する生産を求める度に発生するが、添え字  $k$  は波及する生産の回数を表し、最終需要の生産による誘導物流における  $k$  の値が 1 である。すべての  $k$  について  $X_c^{(k)}$  の和をとることにより (収束計算により)、品目  $c$  別に全誘導物流が求められる。

- ・ 波及需要量行列  $F_c^{(k)}$

品目  $c$  別にある対角行列。その  $ii$  成分は、 $k$  回目の生産の波及によって県  $i$  において発生する品目  $c$  の需要量である。

- ・ 入荷係数行列  $B$

$ij$  成分は、産業  $j$  の 1 単位の入荷量のうち、品目  $i$  の占める量を表す。したがって、各列の和は 1 となる。この行列は物流センサスの「産業業種・品類別年間入荷量」の表から計算される。

- ・ 出荷係数行列  $D$

$ij$  成分は、品目  $j$  の 1 単位の出荷量のうち、産業  $i$  から出荷される量を表す。したがって各列の和は 1 となる。この行列は物流センサスの「産業業種・品類別年間出荷量」の表から計算される。

- ・ 歩留まり行列  $E$

入荷量に対する出荷量の重量比を対角成分に並べた行列。 $ii$  成分が産業  $i$  の歩留まり率を表す。

- ・ 投入係数行列  $A$

$ij$  成分は、品目  $j$  の 1 単位の出荷量に対して入荷される品目  $i$  の量を表す。この行列は入荷構造を表す  $B$  と出荷構造を表す  $D$ 、歩留まり行列  $E$  の積  $BED$  によって得られる。

- ・ 入荷行列  $N^{(k)}$

ij成分はk回目の生産の波及の結果必要となる、品目iの県jへの入荷量を表す。

- ・ 出荷行列  $S^{(k)}$

ij成分はk回目の生産の波及の結果必要となる、品目jの県iからの出荷量を表す。

- ・ 県間移入行列  $R_c$

品目c別にある。ij成分は品目cが県jに1単位輸送されたときの県iからの輸送量を表す。したがって、各列の和は1である。この行列は「都道府県間流動量（品類別）」の表から計算される。

以上の行列を用いた誘導物流の計算方法は以下になる。まずk回目の生産の波及において、品目cの需要  $D_c^{(k)}$  が発生しているとする。k回目の誘導物流行列  $X_c^{(k)}$  は県間移入行列  $R_c$  に乗じて、

$X_c^{(k)} = R_c F_c^{(k)}$  によって得られる。得られた誘導物流行列  $X_c^{(k)}$  の行和を求めることにより各県で都

合必要となる品目cの出荷量を求める。つまり  $\mathbf{e}$  を全成分が1の縦ベクトル  $(1 \ \cdots \ 1)^t$  とし、

$\mathbf{s}_c^{(k)} = X_c^{(k)} \mathbf{e}$  とすると、出荷行列  $S^{(k)}$  は、 $S^{(k)} = (\mathbf{s}_1^{(k)} \ \cdots \ \mathbf{s}_c^{(k)})$  となる。ただしCは品目の総数で

ある。次に投入係数行列を  $A$  とすると、入荷行列  $N^{(k)}$  は、 $N^{(k)} = A(S^{(k)})^t$  となる。 $N^{(k)}$  を品目別

に  $N^{(k)} = (\mathbf{n}_1^{(k)} \ \cdots \ \mathbf{n}_c^{(k)})^t$  と表し、 $\mathbf{n}_c^{(k)}$  の成分を対角に並べた対角行列を、k+1回目の生産の波及

需要量  $F_c^{(k+1)}$  とする。以上の手続きを繰り返すことにより、誘導物流行列が順次求められる。最初

の波及需要量  $F_c^{(0)}$  を、最終需要によって与えることにより、最終需要により誘発される物流を求めることができる。

この計算プロセスでは生産の波及を順次遡るごとに付随する物流を捉えて積算する。通常の産業連関分析では収束計算によってLeontief逆行列と同じ結果が得られるが、本手法ではLeontief逆行列に相当する簡略な演算はできないが、それに相当する収束計算によって波及による間接的な物流を捉えることができる。既往の研究には村越ら<sup>2)</sup>があり、各都道府県の産業構造の違いを取り込むことを前提としているが、金額ベースの係数を物量ベースに変換することが困難であるため、基礎的な検討に留まっていた。本研究では各都道府県が産業構造において同一と簡略化し、都道府県ごとの差異は物流の地域特性において考慮することで、地域間の物流連関構造を定量的に導いている。

## 4. 結果・考察

### 4.1 特定地域における消費による誘導物流の計算

以上の計算手法により求めた結果の一例として、東京都における農水産品の最終需要が1トン発生した場合の誘導物流量を表示する。

表1は品類別に表した誘導物流量であり、東京に1トンの農水産物を最終需要として届けるまでに、全国全品類で4.257トンの物流が必要になることがわかる。農水産品そのものがやはり多いが、その他には農水産物を加工した食品が含まれる軽工業類の物流量や、鉱産品の物流量が多いことが見て取れる。

表 1 品類別誘導物流量（東京都で農水産物の最終需要が単位トン発生した場合）

品類	誘導物流量(t)
農水産品	1.708
林産品	0.116
鉱産品	0.862
金属機械工業品	0.337
化学工業品	0.397
軽工業品	0.556
雑工業品	0.123
特殊品	0.158
合計	4.257

図1は、誘導物流を出荷した具体的な県を品類別に図示したものであり、図2は同様に誘導物流を入荷した県を表示した図である。この二つの図を見比べると、出荷物流の方が比較的全国に散らばっているのに対し、入荷物流は極端に東京都に偏っており、全国の物流が徐々に東京都に集まっていく過程が予想できる。

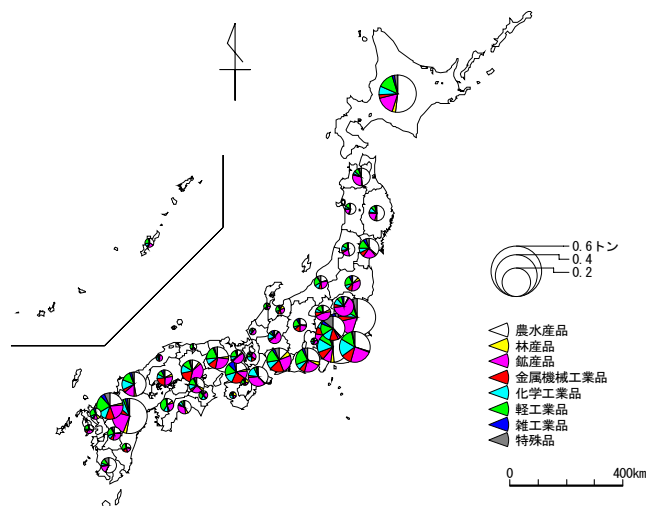


図 1 東京都で農水産物の最終需要が1トン発生した場合の誘導物流各品類の出荷量の都道府県別内訳

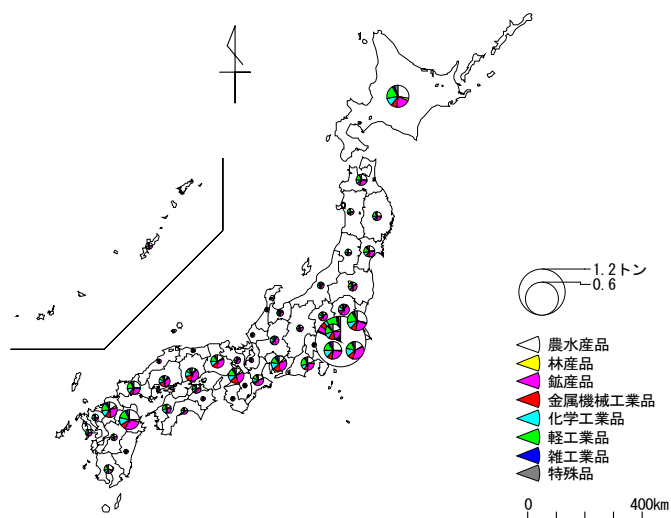


図 2 東京都で農水産品の最終需要が1トン発生した場合の誘導物流各品類の入荷量の都道府県別内訳

1トンの農水産品の最終需要が北海道で発生した場合の結果を取り上げてみると、都道府県品別別の出荷量と入荷量は、それぞれ図3と図4のようになる。この2つの図を見ると、東京都で需要が発生した場合に比べて、入荷、出荷ともに、物流が北海道内に集中している。東京都とは逆に、北海道は割合と農水産業が盛んであるので、需要が発生したとしても道内で補えてしまうためだろう。

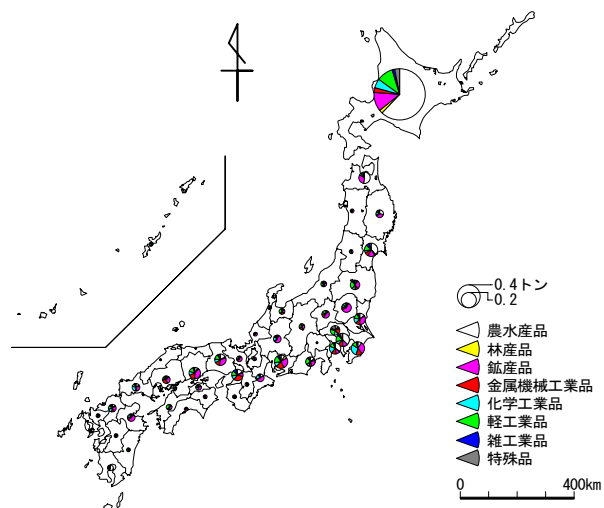


図 3 北海道で農水産品の最終需要が1トン発生した場合の誘導物流各品類の出荷量の都道府県別内訳

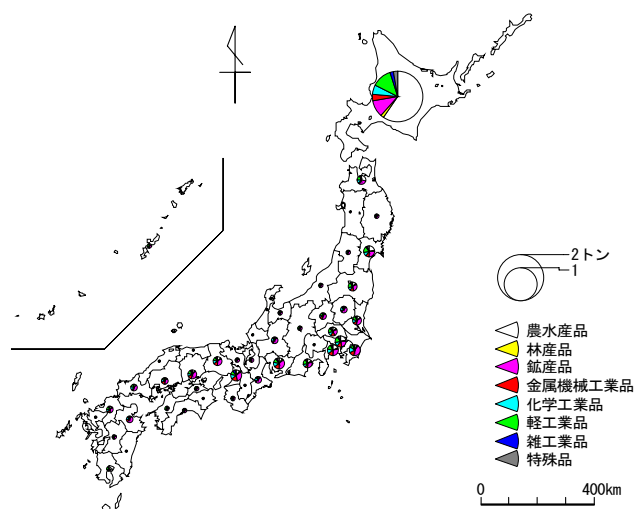


図4 北海道で農水産品の最終需要が1トン発生した場合の誘導物流各品類の入荷量の都道府県別内訳

#### 4.2 2050年におけるCO2排出量

2050年でのCO2排出量を計算するにあたっては、人口シナリオA,Bを考慮した評価をおこなう。人口の変化を最終需要の変化と捉えて検討した。結果を図5に示す。この結果からは、排出量が多く算出されているのはシナリオBの方であるが、それは2050年時点での予想されている人口が多いため、合計での一人当たりのCO2排出量は表2のようになり、シナリオBの方が一人当たりの排出量は低い。よって、この結果だけをもって排出削減ポテンシャルはシナリオAの方が高いとは一概にいえない。

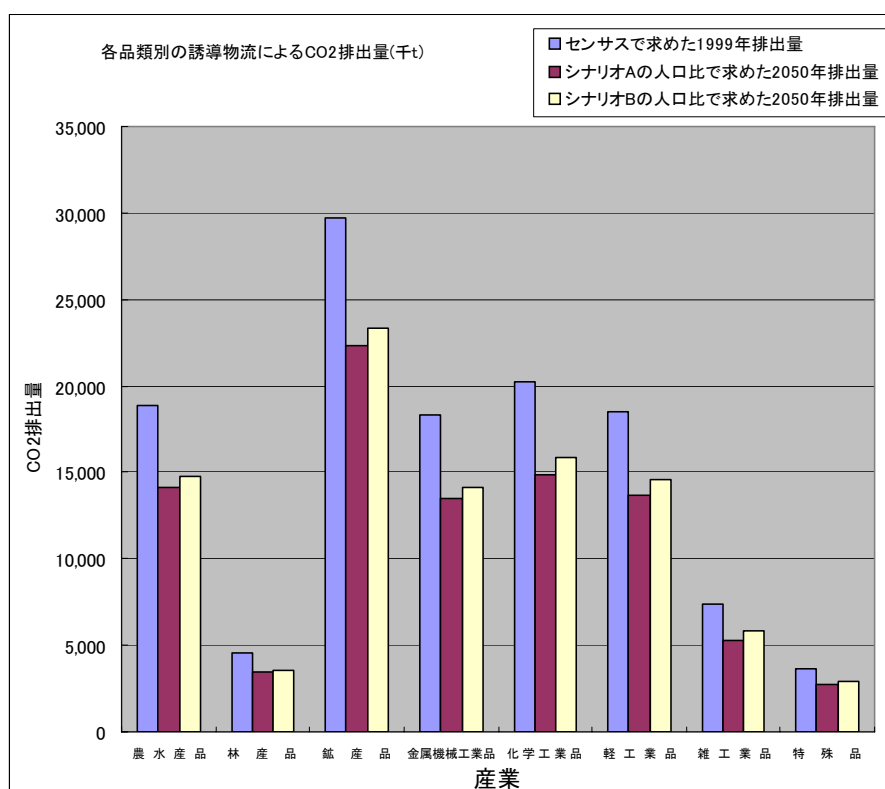


図5 人口シナリオ別の品類別CO2排出量(単位: 千t・CO2)

表 2 人口シナリオ別の一人当たり CO2 排出量(単位:kg・CO2/人)

シナリオA	シナリオB	現在の排出量
9. 51	9. 46	9. 56

次に、対策としてモーダルシフトを実施すると仮定した場合のCO2削減量を推定する。政府が2001年に策定した「新総合物流施策大綱」では、環境負荷を低減させる物流体系の構築と循環型社会への貢献を目標に、2010年までにモーダルシフト化率（500キロ以上での鉄道、海運の利用率）を50%まで向上させるとしている。ただ輸送手段の選択権は貨物の運搬側が握っているわけではなく、少量他頻度配送などの荷主側の要求に応えることを優先する傾向にあるので、貨物業界の一存でモーダルシフトを実施することには限界がある。したがって、本節では荷主に着目してモーダルシフトを検討するために、誘導物流を求める計算を用いて、需要品類別にその品類が運搬される過程の流通におけるモーダルシフト効果を求める。モーダルシフトは自動車輸送を鉄道と海運にシフトするとした。また農水産品の輸送は鮮度等の理由を考慮しモーダルシフトの対象外とする。

人口シナリオ別に結果を示す。表3は、シナリオAで求めた2050年のCO2排出量からモーダルシフトを行った場合のCO<sub>2</sub>削減量である。金属機械工業品、化学工業品、軽工業品は他の品類と比べて、モーダルシフトにより多くCO2排出量を削減できる。農水産品以外の品類でモーダルシフトを50%達成すると、現在の排出量の30%以上削減を見込むことができる。



表 3 シナリオ A 最終需要品類・モーダルシフト率別 CO2 削減量(千 t・CO2)

モーダル シフト率 需要品類	10%	20%	30%	40%	50%
農水産品	59	173	307	473	650
林産品	0	0	0	0	0
鉱産品	0	0	0	0	0
金属機械工業品	144	453	834	1,329	1,861
化学工業品	151	426	797	1,346	1,982
軽工業品	151	460	823	1,286	1,777
雑工業品	94	243	409	607	815
特殊品	0	0	0	0	0
合計	599	1,755	3,171	5,041	7,086
現在からの削減量	37,037	38,194	39,609	41,479	43,524
削減ポテンシャル	26.4%	27.2%	28.2%	29.6%	31.0%

シナリオBでモーダルシフトを行った場合には、表4のようである。農水産品以外の品類で40%のモーダルシフトを行うと、現在の排出量の25%以上削減を見込むことができる。

表 4 シナリオ B 最終需要品類・モーダルシフト率別 CO2 削減量(千 t・CO2)

モーダル シフト率 需要品類	10%	20%	30%	40%	50%
農水産品	66	196	347	532	730
林産品	0	0	0	0	0
鉱産品	0	0	0	0	0
金属機械工業品	163	505	925	1,462	2,041
化学工業品	179	503	934	1,554	2,268
軽工業品	170	520	930	1,450	2,001
雑工業品	108	278	466	688	921
特殊品	0	0	0	0	0
合計	688	2,001	3,601	5,685	7,960
現在からの削減量	31,270	32,585	34,185	36,269	38,544
削減ポテンシャル	22.3%	23.2%	24.4%	25.8%	27.5%

## 5. 本研究により得られた成果

本研究では、最終需要により発生する誘導物流の全国への波及に注目した計算手法を構築し、算出した誘導物流により生じるCO2排出量を計算した。またその計算結果を利用し、人口シナリオを考慮した2050年におけるCO2排出量削減ポテンシャルを求めた。

特定の都道府県で最終需要が発生したとき、どの地域からどのような品類を出荷しているか、

また最終需要が入荷する際に、他にどのような品類がどの程度入荷するかを東京都と北海道を例にとって示し、最終消費地域によって発生する物流が異なることを示した。

またモーダルシフトと人口変動の観点からみたCO<sub>2</sub>の削減ポテンシャルを推計した。人口シナリオによって与えられる人口変動を最終需要の変動として捉え、誘導物流の変化を求め、それによって変化するCO<sub>2</sub>排出量を計算した。さらにモーダルシフトを実施した場合のCO<sub>2</sub>削減量を算出し、脱温暖化社会における物流分野でのCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルを評価することができた。

## 6. 引用文献

- 1) 国土交通省,「第7回全国貨物物流調査(物流センサス)」

## (8) 地域冷暖房とコジェネの導入による削減効果

東京理科大学 理工学部経営工学科 森 俊介

〔要旨〕 民生部門のCO<sub>2</sub>排出削減のために、コジェネレーション(CGS)の導入やヒートポンプに期待が寄せられているが、そのCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルは需要パターン、機器特性、温度特性に依存するところが多い。このため、地域により最適なシステムのあり方に差が生じると考えられる。本仮題では、これまでその地域性と機器特性に着目した研究を行い、特に日本の中小規模都市の典型例と考えられる宇都宮市を例として、個別建物・機器の特性を地域の詳細なエネルギー需要の推計と合わせ機器導入によるCO<sub>2</sub>排出削減評価を行ってきた。ここではエネルギー機器の部分負荷特性や空調機器の外気温依存性等を非線形混合整数計画法によりモデル化し、需要家の構成をGISに基づき抽出した点に特徴があった。

平成18年度は、この方法を札幌市および那覇市に適用し、気候特性の異なる日本の3都市17区に対して適用を行った。その結果、空調・給湯機器を全電化するケースHPと全オプションの導入を認めるケースFULLの場合、これら17地域を通じCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルと業務用ビル床面積の比率との間に統計的に有意な関係を見出すことができた。そこで、この関係を全国950市区に適用することで日本全体の都市部におけるCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルの推計を行なった。

結果として、日本の各市町村のCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルは人口密度、経済活動に基づく業務用ビルの全建物床面積に対する比率のばらつきから大きく変化するものの、日本全体ではおよそ18.6%の排出削減ポテンシャルのあることが分かった。

〔キーワード〕 二酸化炭素、CGS、地域特性、機器特性、非線形混合整数計画モデル

### 1. はじめに

近年における我が国のエネルギー消費は増加傾向にあり、特に家庭部門における消費は全体の約14%を占め省エネルギー対策が不可欠なものとなっている。地球温暖化対策としてCO<sub>2</sub>排出削減のために熱電併給発電(コージェネレーション)システム(以下CGS)や太陽光発電システム(以下PVシステム)、CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯機(以下CO<sub>2</sub>HP)などの省エネルギー技術の導入効果が期待されている。またCGSを地域冷暖房(以下DHC)として導入するなど、電力や熱のエネルギーネットワークの導入効果が期待されている。これらの機器はそれぞれが異なる特性を持ち、効果は導入対象のエネルギー需要に依存する。例えばCGSは、発電の際の廃熱を有効利用することで省エネルギーを実現するシステムであるが、廃熱を有効利用できない時間帯は、CGSによる発電は電気事業者による発電に比べ非効率なシステムとなる。これをさらに拡大し、複数の需要家の存在する地域エネルギーシステムでの需要家の連携と再生可能エネルギーを組み合わせ、効率性と環境負荷の低減を両立させるネットワーク化の試みが各所で検討・実施され、一部で実証試験等も始められている。しかし現状では、地域の電熱需要の状況や、導入可能な分散電源の状況などをふまえて、分散エネルギー源ネットワークの最適な設計手法の検討は未だ十分に進んでいない状況であると考えられる。さらに、従来の研究は建物あるいは地域単位での評価にとどまり、日本全体でのポテンシャル評価を具体的な機器構成モデルの積み上げにより行った例はない。

## 2. 研究目的

そこで、本研究では、まず分散エネルギーネットワークの最適導入手法の検討の第一段階として、各需要家に設置された分散電源を隣接需要家間で連動運転することによる省エネルギー可能性及び、最適用途構成の条件を、最適化手法により導出するモデルの開発を行う。従来の研究においては、運転特性の違う各種機器を連動して制御するための運転制御等のシミュレーション検討は行われているが、分散電源の最適容量の導出等を数理計画手法により検討した事例は少ない。

具体的な検討対象としては、気候及び建物構成における地方都市の代表としてまず栃木県宇都宮市を対象に、都市街区における業務建物群と住宅群を考え、これら需要家群に業務用ガスエンジンコージェネレーションシステム(CGS)、家庭用太陽光発電システム(PV)を導入した場合を対象とする。これらの民生部門エネルギーシステム導入による地域としてのCO2排出削減効果を定量的かつ具体的に評価する。さらに、本研究では、日本全体のCO2排出削減ポテンシャル導入効果評価に向け、ついで札幌、那覇など気候や人口など特性の異なる複数の地域を対象に、同様の分析方法を適用する。異なる地域を対象にすることにより、建物構成の違いや、気候の違いによる分散型電源の有効性の比較が可能となる。また得られた結果を外挿することで日本全体の評価の推計を行うことを本研究の目的とする。

## 3. 研究方法

### 3.1 民生部門建物・住宅におけるエネルギー負荷の推計

本研究では、まず宇都宮市を取り上げ、エネルギー需要の推計と空調機器導入効果の分析を行う。推計フローを図1に示す。地域における導入効果を評価するためには、地域の需要家タイプとエネルギー需要、床面積等を積み上げる必要がある。具体的には、GISデータによる実在建物の形状データより床面積を推計し、各建物の用途分類により各地域の用途別建物構成を推計した。そして推計した用途別床面積データと、各建物のエネルギー負荷を積算することで地域別のエネルギー需要の推計を行った。

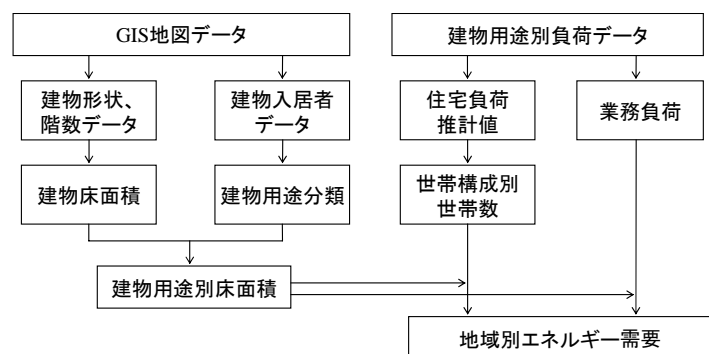


図1 地域エネルギー負荷推計フロー

#### (1) 業務用建物におけるエネルギー負荷推計

分担者が開発した業務用建物のエネルギー需要を推計するための簡易推計モデル<sup>(1)</sup>を用いて、街区内の建物ごとにエネルギー負荷を推計し、それらを積算することにより、街区全体のエネルギー負荷を推計した。本モデルを用いることにより、建物要件やまると同時に、地域内の複数の建物のエネルギー負荷需要を積み上げ計算して求めるだけのデータがデータより推計している<sup>(2)</sup>。

#### (2) 住宅におけるエネルギー負荷推計

住宅のエネルギー負荷推計においても業務建物とすることが望ましい。家計調査<sup>(3)</sup>による二人以

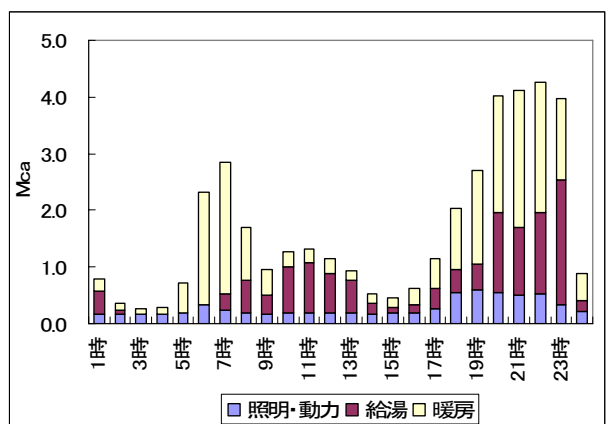


図3 家庭用エネルギー需要世帯構成別推計結果例 (1月 男勤め/女勤め)

エネルギー支出データ、及びエネルギー価格データを用い、文献(4)の推計手法に基づき宇都宮市の平均的な住宅の月別用途別エネルギー消費量の推計を行った。この推計フローを図2に示す。世帯構成別時刻別需要の推計を行った。世帯構成は、国民生活時間調査(5)の世代別・職業別データを組み合わせ代表的な世帯を構成した。図3に推計結果の例を示す。

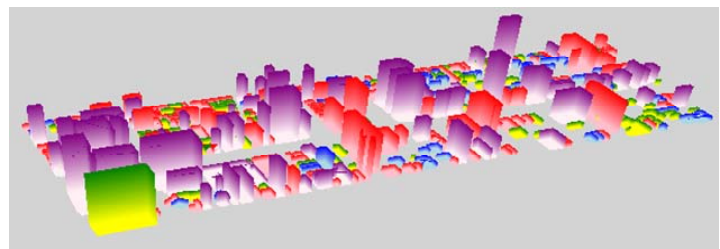
### 3.2 実地域におけるエネルギー負荷の推計

#### (1) 街区の場合

都市の実在する街区(ここでいう街区は数百m四方程度の範囲を想定している)空間について、エネルギー負荷の推計を行った。具体的には、GISデータに基づく街区内に存在する実在建物の形状データより、床面積を推計し、3.1に述べた各建物のエネルギー負荷を推計し集計することで街区全体のエネルギー負荷を推計するものである。本研究では、一例として、代表的な地方都市の中心市街地であり、住宅と業務ビルが混在する地区を取り上げた。このような住宅と業務建物が混在する地区は、日本の都市部においてよく見受けられるものであると考えられ、このような街区において分散電源ネットワークの有効性を評価することは全国的な普及を考えるうえで重要であると考えられる。GISからの建物データ抽出例を図4に示す。

#### (2) 住宅・業務混在地域の場合

住宅・業務建物が混在する場合、この混在のパターンにより需要とCGS導入効果特性が異なるものと考えられる。そこで、ここでは都市中心部だけでなく、近郊の住宅・業務建物混在地域を取り上げ、評価を行う。宇都宮市において取り上げた7地域を図5に示す。各地域の用途別床面積の推計結果、及び建物平均階数、熱電比の結果を示す。また建物用途別の需要について、図6に年間エネルギー需要を、図7に時刻別電力需要の例を示す。ただし、ここで熱電比は年間の給湯需要と暖房需要の和を電力需要で除算した値を用いた。



・ 地区面積 125,700m<sup>2</sup> ・ 建物の平均階高 2.7 階

図4 検討対象街区(栃木県宇都宮市の中心市街地)



図5 宇都宮市対象7地域の選定

表 1 宇都宮市近郊7地域の床面積, 平均階数, 熱電比(地域別)

	地域延べ 床面積(m2)	建物構成比					平均 階数	熱電比
		戸建	集合	事務所	商業	ホテル		
第一種中高層住居専用地域	316719	54%	37%	5%	2%	1%	2.10	1.7
第二種中高層住居専用地域	184087	58%	20%	14%	7%	2%	2.14	1.1
第一種住居地域	200312	54%	21%	17%	6%	1%	2.14	1.1
第二種住居地域	324047	29%	13%	30%	26%	2%	2.44	0.6
近隣商業地域	193691	57%	9%	15%	15%	4%	2.16	0.9
商業地域	570427	12%	1%	48%	33%	5%	3.09	0.4
第一種低層住居専用地域	804299	86%	6%	5%	3%	0%	2.00	1.5

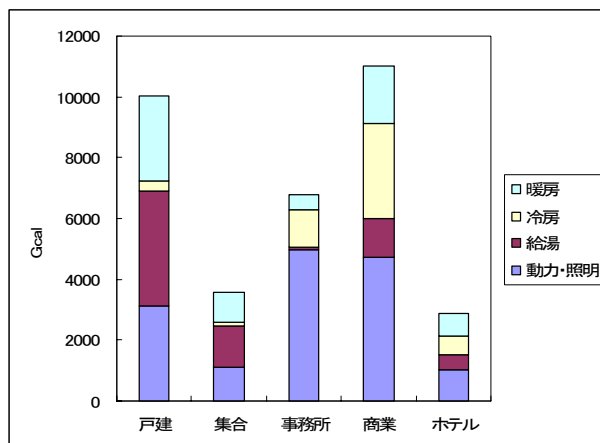


図 6 年間用途別需要 (近隣商業地域)

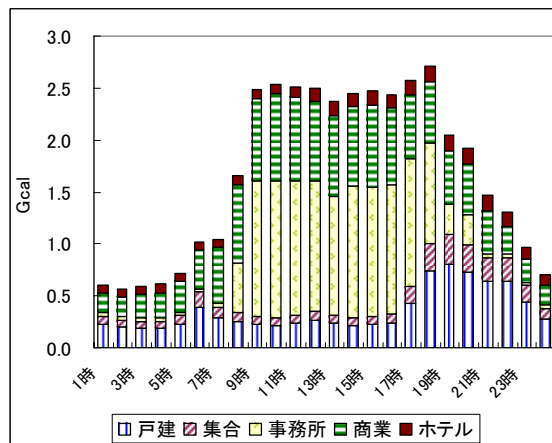


図 7 時刻別電力需要 (近隣商業地域)

### 3.3 評価対象のモデリング

本研究では, CGS(個別, DHC), PV, CO2HP, 貯湯槽の5機器を対象に, 地域別にさまざまな組み合わせの8ケースの最適導入評価を行った. 表2には機器データを示す. 図8は, 各需要家のエネルギーフローである. 最適化により, 機器の導入規模と運用パターンが決定される. 主な制約式は, 熱・電力需要の制約式, 各構成機器の電力, 熱のバランスである. CGSの部分負荷は, 混合整数非線形計画法によって表現される. また頻繁な稼動停止を起こすことを抑制するために稼動・停止の制御式を導入している. これらの詳細は, 昨年度の報告と同様であるので, ここでは省略する.

本年度は, CGSの他, 近年の性能向上により環境保全性が向上したヒートポンプ(HP)を評価に加えた. HPのCOPは上昇しつつあるものの, 実際には外気温により変化する. そのため寒冷な気候の元では, 必ずしも期待通りの性能を発揮しない可能性がある. ここでは, HPのカタログ等から図9の関係を導入した.

表2 機器特性の設定データ

機器	効率	費用(円/kW)	年経費率
ガスエンジン(個別用)	発電 0.31	200,000	0.142
	排熱 0.44		
ガスエンジン(DHC用)	発電 0.39	27,500	0.142
	排熱 0.32		
ヒートポンプ	冷房 3.0	80,000	0.142
	暖房 4.0		
吸収式冷凍機	個別用 1.0	27,500	0.142
	DHC用 1.2		
熱交換器	0.9	10,000	0.142
ボイラー	0.8	15,000	0.142
ガス温水器	0.8	10,000	0.142
ガスヒーター	0.8	7,740	0.142
PVモジュール	0.1	206,667	0.084
インバータ他	0.9	163,333	0.142

## 4. 結果・考察

### 4.1 街区における省エネルギー性の評価

宇都宮市を例とした場合の中心部街区の評価をまず行った。ここでは、各業務ビル・住宅グループ間でエネルギー融通がある場合と無い場合について、最適CGS容量の導出とそのときの街区全体の一次エネルギーの評価を行った。最適化計算結果を表3に示す。これより、対象地域においては電力融通により1.7%程度の省エネルギーが可能であることがわかった。このときの

グループ間のエネルギー融通の時間変化の状況の事例として、図10に業務建物グループ1とその他のグループ間とのエネルギーの融通の状況を示す。さらにエネルギー電力融通する住宅グループ内の住宅数をそれぞれ変化させた場合の1次エネルギー量の計算を行った(表4)。これより今回検討した業務建物群に対して、住宅数を増加するほど省エネルギー性が高くなることわかる。これは業務建物に対するエネルギー需要規模に対して当初検討した住宅数の規模が小さいことによると考えられる。

表3 業務建物と住宅のエネルギー融通による街区全体のエネルギー消費量

ケース		最適CGS容量(kW)		街区全体の一次エネルギー (Gcal/年)	街区全体のCO2排出量 (t-CO2/年)
		建物グループ1	建物グループ2		
ケースa	エネルギー融通なし	1台目	238	107,471	18,709
		2台目	896		
		合計	1,134		
ケースb	エネルギー融通あり	1台目	930	105,652	18,603
		2台目	500		
		合計	1,431		
ケースc	地域暖房(集中熱源)	1台目	1,351	105,186	19,064
		2台目	4,321		
		合計	5,672		

( )内の数字は「エネルギー融通なし」と比較した場合の増減率を示す。

表4 エネルギー融通を行う住宅数を変化させた場合の省エネルギー効果

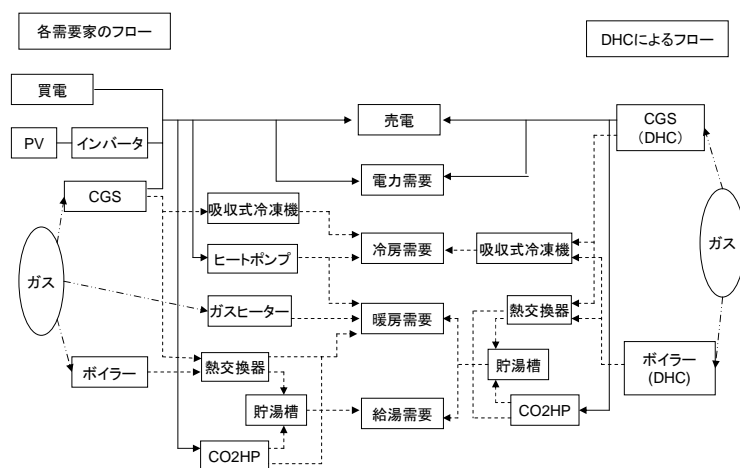


図8 各需要家ごとのエネルギー機器とフロー

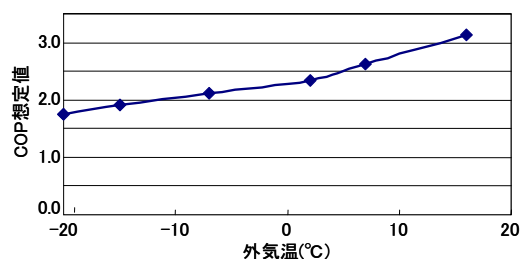
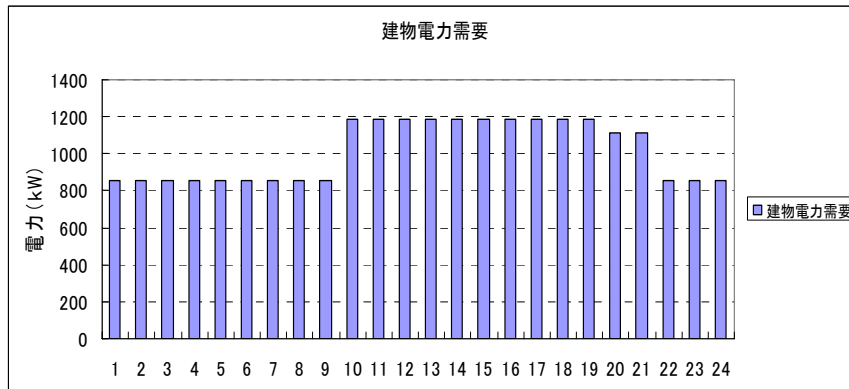
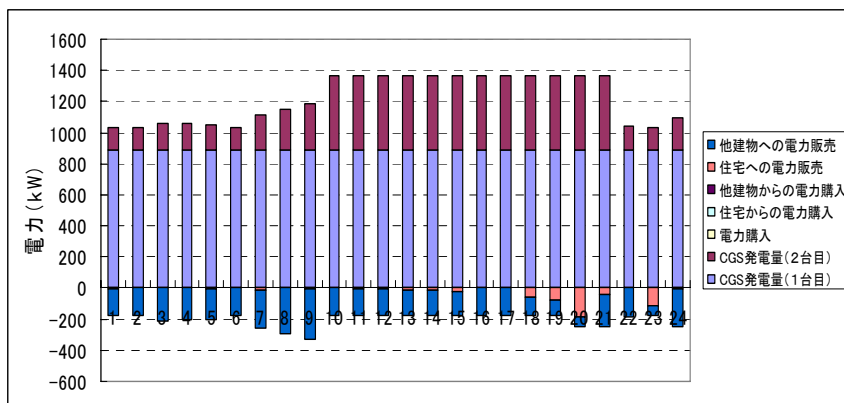


図9 HPの外気温依存特性の設定

ケース		住宅グループ	住宅数 (戸)	(合計)	街区全体の 一次エネルギー (Gcal/年)	街区全体の CO2排出量 (t-CO2/年)	融通した場合の 削減率 (%)
(標準設定)	エネルギー 融通なし	1	87	109	107,471	18,709	一次エネルギー 1.7%
		2	22				
	エネルギー 融通あり	1	87	109	105,652	18,603	CO2 0.6%
		2	22				
住宅数を 1000戸に増加	エネルギー 融通なし	1	800	1000	112,521	19,616	一次エネルギー 3.3%
		2	200				
	エネルギー 融通あり	1	800	1000	108,834	19,357	CO2 1.3%
		2	200				
住宅数を 10000戸に増加	エネルギー 融通なし	1	8000	10000	161,681	28,366	一次エネルギー 10.9%
		2	2000				
	エネルギー 融通あり	1	8000	10000	144,053	27,209	CO2 4.1%
		2	2000				



(a)業務建物グループ1の電力需要（8月）



(b)業務建物グループ1と他グループの電力収支（8月）

図10 業務建物グループ1と他グループ間でのエネルギー融通収支の計算結果

#### 4.2 近郊7地域のシミュレーション

住宅地の割合の大きな近郊7地域においては、表5の8ケースの最適導入評価を行った。ここでは、CO2排出の最小化の結果を示す。

図11に各地域、各ケースにおけるCO2削減率を示す。なおCO2削減率は各ケースのCO2排出量をcase-baseで除算した値である。この図より、すべての機器を導入するcase-fullでは大きなCO2削減ポテ

表5 解析のケース分類

ケース	導入対象					
	PV	CO2HP	貯湯槽	CGS	DHC	売電
case-base	-	-	-	-	-	-
case-PV	○	-	-	-	-	○
case-HP	-	○	○	-	-	-
case-CGS	-	-	-	○	-	-
case-CGS(売電あり)	-	-	-	○	-	○
case-DHC	-	-	-	-	○	-
case-DHC(売電あり)	-	-	-	-	○	○
case-full	○	○	○	○	○	○



ンシャルがあることが分かる。

図12は熱電比とCO2削減率の相関を示す。

傾向はケースにより異なる。

case-HP, case-CGS, case-CGS(売電あり)では, CO2HPが給湯及び暖房に対して熱を供給する機器であるため, 熱電比に比例してCO2削減率が増加するものと考えられる。他方, case-DHC, case-DHC(売電なし)では, 熱電比が約1.0付近の住宅と業務建物が一方に偏らず

バランスよく構成されている地域ほど, 一日を通じて電熱需要が安定し, CGS導入によって高いCO2削減効果があるものと考えられる。

図13は業務用床面積比率とCO2排出削減率の関係である。このように, 両者の間には比較的明確な関係が見て取れる。

#### 4.3 宇都宮市全域評価

4.2の対象7地域の解析結果を用い, 宇都宮市全域において行政区画別にCO2の削減効果を推計した。前項で示したようにCO2削減率はcase-PVでは平均階数, その他のケースでは熱電比つまり建物構成と高い相関がある。そこで行政区画別の平均階数データ, 業務建物の割合のデータを用い, 解析結果をもとに宇都宮市全域のCO2削減効果を推計した。

図14に行政区画別の業務建物の割合を示す。またCASE-HPの場合について図15に行政区格別CO2削減率推計結果を示す。

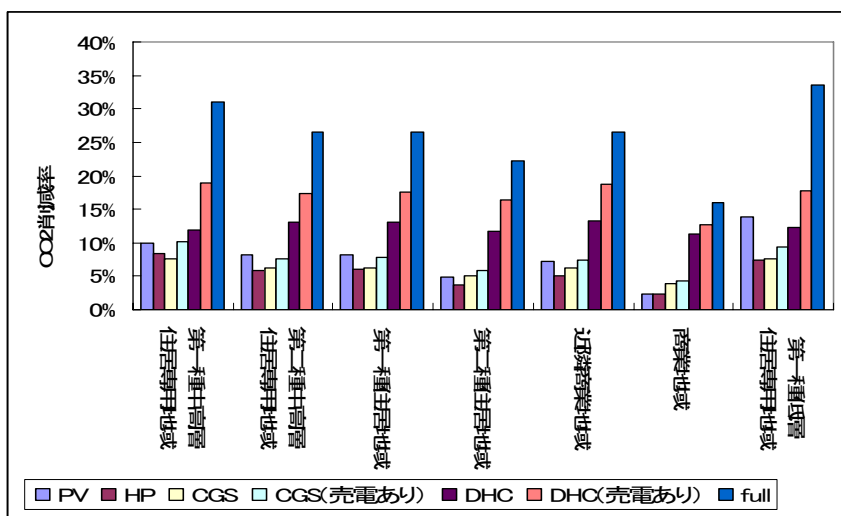


図11 ケース別CO2削減率

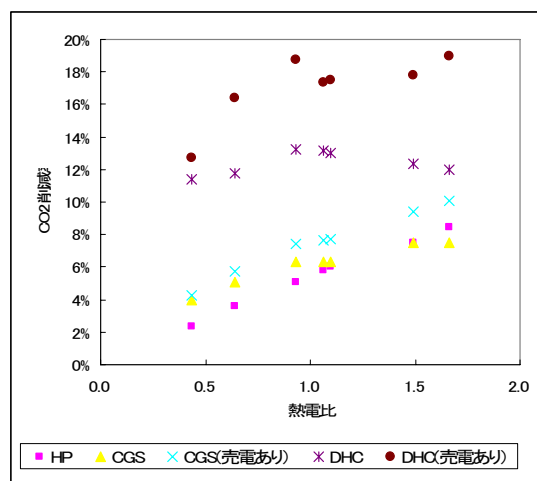


図12 熱電比とCO2削減率の関係

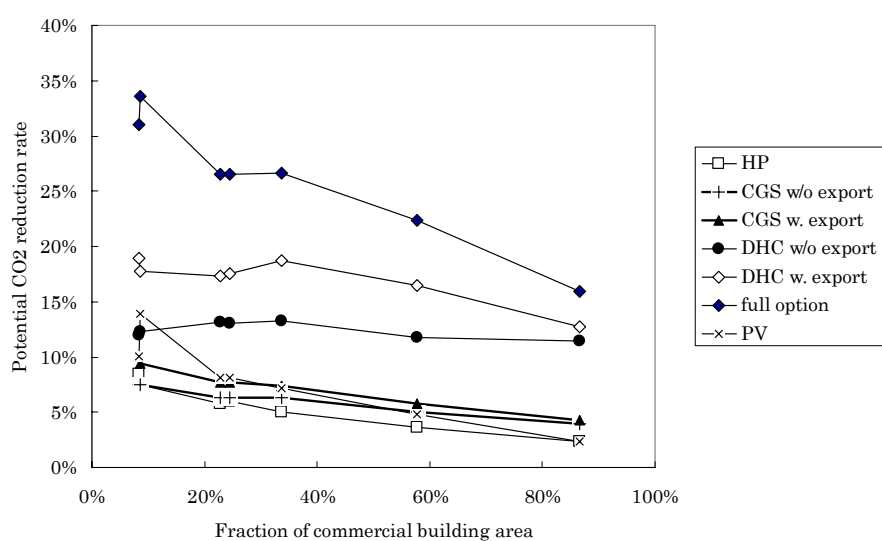


図13 業務建物面積率とCO2削減率の関係

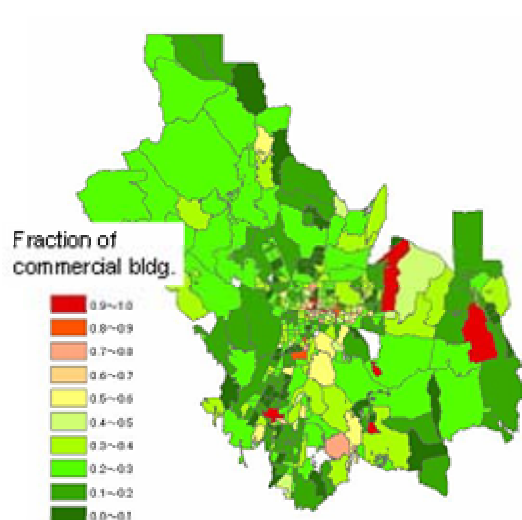


図14 行政区画別業務建物の割合

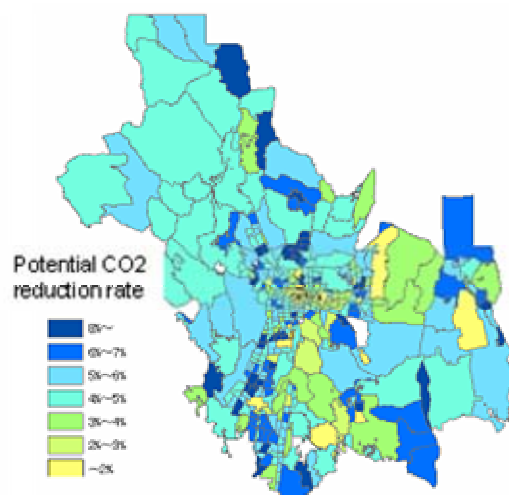


図15 行政区画別CO2削減率 (HP)

これらの図では、各機器導入時のCO2排出削減効果を見るため、Case-BASEにおけるCO2排出最小化時の宇都宮市全域CO2排出推計値炭素換算 548ktを基準としている。

図15から、CASE-HPの場合の潜在的削減率の地域分布と、約6%の削減率が全体で期待できることが分かった。また図13から、需要家間でのエネルギー融通により熱電比が調整できるDHCの場合、地域によらず約12%の削減率が得られることが示された。

表6には、全地域CO2削減率を、CO2排出最小化とコスト最小化の場合について、ケースごとに比較を行った。なお、表6では削減率の計算において、現状での排出量を揃えるため、現状に近いと考えられるCO2最小化、コスト最小化のいずれにおいてもCase-Baseにおける費用最小化を排出量の基準とした場合(上段)、およびCO2最小化においてはCase-BaseにおいてCO2排出最小化を基準とした場合(下段)、の2通りを示した。図12-15の削減率とは、下段の数値が対応する。

表6 宇都宮市全域における平均CO2削減率

CO2 削減率	PV	HP	CGS	CGS (売電あり)	DHC	DHC (売電あり)	フルオプシ ョン
CO2 最小化-a	13.73%	10.46%	11.00%	12.32%	16.99%	21.49%	31.69%
CO2 最小化-b	9.24%	5.80%	6.37%	7.76%	12.67%	17.40%	28.14%
cost 最小化	8.80%	8.72%	3.95%	5.99%	0.23%	11.36%	13.95%

a: Case-Baseにおけるコスト最小化時のCO2排出量を基準とした場合

b: Case-BaseにおけるCO2排出最小化時のCO2排出量を基準とした場合

このように、また、PVの導入可能量まで最大限考慮するフルオプシオンケースでは、現状最大約31.7%の削減率が示された。DHC導入の効果は大きいものの、熱輸送の費用に不確実性が高く、また建物の更新が制約される問題が残る。

## 5. 日本全国への拡張とCO2排出削減ポテンシャル評価

### 5.1 札幌・那覇における評価結果

前章まで、宇都宮を例として具体的な街区へのCGSあるいはDHC、HPの導入効果を具体的に評価した。しかし温暖化対策として重要な評価は、日本全体における削減効果である。これまで、CGSあるいはHPの環境負荷削減効果は個別建物や特定地域、あるいはマクロな評価としても東京など主要都市など限定的なものでしかなかった。そこで、ここでは日本の南北端に位置する札幌、那覇にも前章までの方法を適用し、CO2削減効果について推計を行なう。

基本的なデータと推計手順は前章に従う。図16に分析対象とする札幌の8区を示す。言うまでもないが、札幌では暖房需要が大きく、那覇とは特性が大きく異なる。これにより、ヒートポンプの効率も変化する。

図17にCO2最小化の際の札幌市の各地域と那覇1での各ケースにおけるCO2削減率を示す。なおCO2削減率は各ケースのCO2排出量をcase-baseで除算した値である。図17より、すべての機器を導入するcase-FULLのCO2削減効果が大きいことが示されるが、これは宇都宮と同様である。

図18に、札幌8地区、宇都宮7地区、那覇2地区の各ケースにおける業務建物の割合とCO2削減率の関係を一括したもの示す。図18ではcase-FULLにおいて、業務建物の割合とCO2削減率には相関があることが分かり、業務建物の割合が大きくなるほどCO2削減率は下がる。これは熱需要に比べ電力需要の割合が大きい業務建物では、発電に伴う廃熱を有効利用できなかったものと考えられる。またCase-HPにおいても相関があることが分かる。これは熱需要の割合が大きい家庭でHPがより多くのCO2を削減したためと考えられる。図18のcase-FULLでは線形近似は  $y = -0.205x + 0.340$  となる。



図16 札幌の場合の対象地域

このように、札幌、宇都宮、那覇という気候特性の異なる3地域に対して共通した傾向が見出せるので、日本のこのほかの地域におけるCO2排出削減ポテンシャルも基本的にはこれで近似的できると考えられる。そこで、これを日本全体へ拡張する。

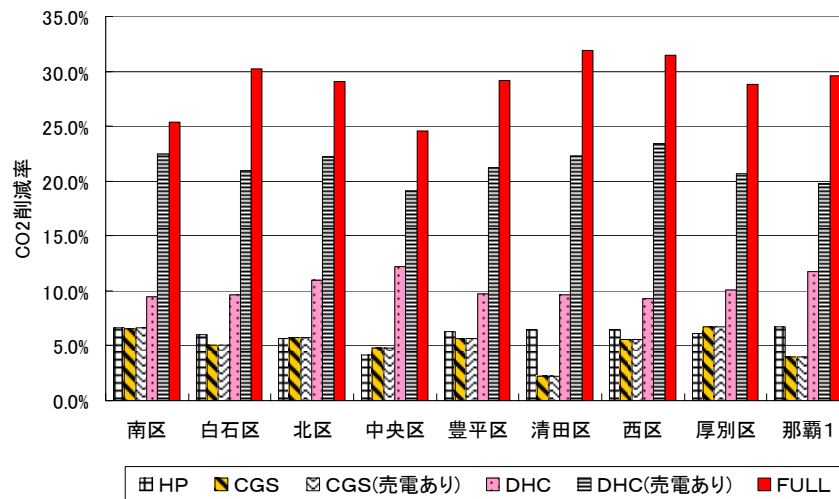
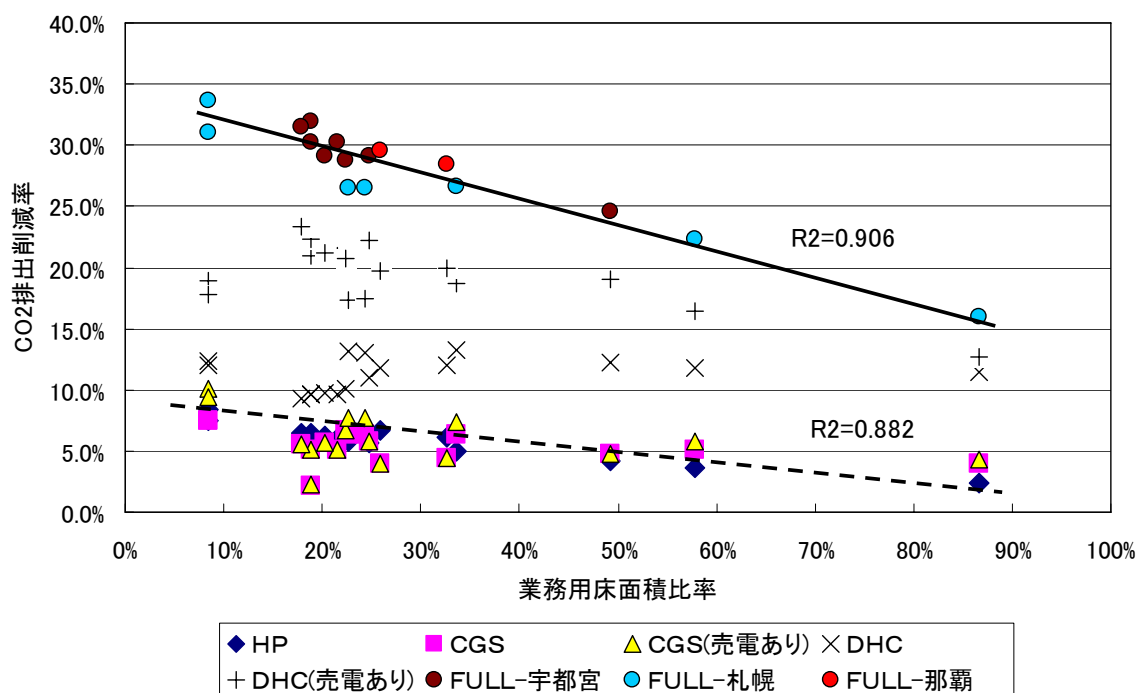


図 1 7 ケース別CO2削減率(札幌および那覇1)



の距離と、建物面積密度の関係を示す。次に、この面積密度を中心部からの距離の関数として当てはめる。具体的には、以下の式で表す。なお( )内はt-値である。

$$\ln(Drs(x)) = 12.952 - 3.053x^{1.8} \quad R^2 = 0.988 \quad \ln(Dbs(x)) = 13.310 - 4.46x^{1.3} \quad R^2 = 0.950$$

(140.8) (32.2)      (53.9) (-15.8)

$Drs(x)$  : 住宅建物面積密度       $Dbs(x)$  : 業務建物面積密度

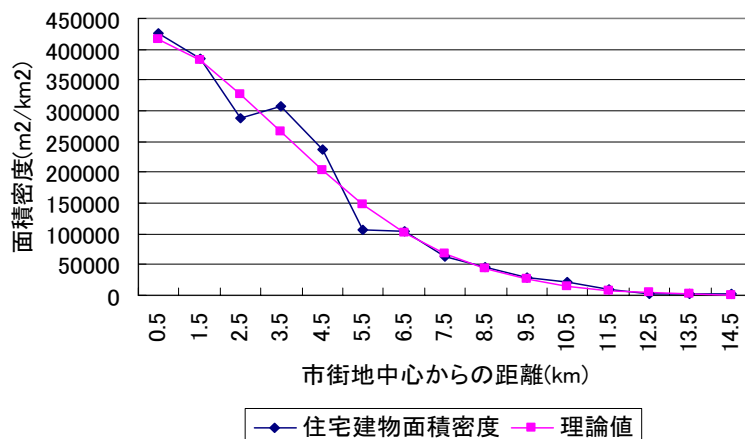


図 19 住宅建物面積密度

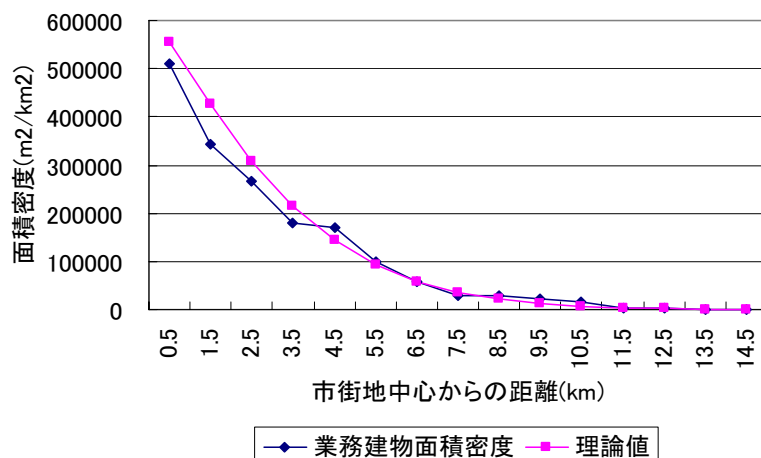


図 20 業務建物面積密度

市街地中心からの距離を0.5kmごとの区間に区切り、円環面積と上記の式より、区間ごとの住宅建物面積・業務建物面積・業務面積比率を求める。表7に結果を示す。表7より中心からの距離が8.5km～9.5kmにおいて業務面積比率が最小となり、その後増加に向かうことがわかる。

これを日本のその他の地域に適用する。まず表3の市の面積の平均半径で正規化し、正規化距離と面積密度の割合の関係が一定と仮定する。さらに市の人口密度が高ければ、住宅建物面積密度も比例的に高いと考える。また、経済活動指標が高ければ、業務建物面積密度も高いものとする。本研究での経済活動指標は、市区の人口1人当たりの小売商品販売額とする。これにより、業

業務建物面積と住宅面積の比率が変わる。

本研究では、日本全国の950市町村に対し、人口密度、経済活動指標をもとにして、CO2排出削減率の推計を行った。例えば、千葉県ではCO2削減率は鴨川市の16.9%から花見川区の31.5%まで様々な値となっていることがわかる。またこれらを各市町村の面積で加重平均を取ることで、県あるいは全国の削減ポテンシャルの推計を行った。さらに、CO2削減率を市区の面積で加重平均することにより、各都道府県のCO2削減率を求めた。表8より秋田県の15.9%から東京都の30.4%まで様々な値となり、日本全体のCO2削減率の推計値を求めることができた。また、日本全体で集計した場合、CO2排出削減ポテンシャルは18.6%となった。

表7 区間ごとの業務面積比率

中心からの距離(km)	業務建物面積密度(理論値)(m <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	区間面積(km <sup>2</sup> )	業務建物面積(m <sup>2</sup> )	住宅建物面積(m <sup>2</sup> )	業務面積比率
0.5	555197.4	0.79	436051	326583	0.57
1.5	427133.8	6.28	2683759	2395187	0.53
2.5	308569.6	12.57	3877597	4114412	0.49
3.5	213638.2	18.85	4026981	4999647	0.45
4.5	143066.2	25.13	3595642	5113434	0.41
5.5	93175.4	31.42	2927190	4655094	0.39
6.5	59234.5	37.70	2233086	3870617	0.37
7.5	36857.3	43.98	1621066	2981790	0.35
8.5	22492.7	50.27	1130604	2147294	0.34
9.5	13484.6	56.55	762535	1454263	0.34
10.5	7952.3	62.83	499660	930278	0.35
11.5	4618.4	69.11	319204	563919	0.36
12.5	2643.9	75.40	199349	324756	0.38
13.5	1493.2	81.68	121967	178042	0.41
14.5	832.5	87.96	73234	93077	0.44
15.5	458.5	94.25	43217	46465	0.48
16.5	249.6	100.53	25096	22177	0.53
17.5	134.4	106.81	14355	10130	0.59
18.5	71.6	113.10	8095	4433	0.65
19.5	37.7	119.38	4505	1860	0.71

表8 都道府県別CO2削減率推計結果

	CO2削減率(%)		CO2削減率(%)		CO2削減率(%)
北海道	16.6	石川県	18.1	岡山県	18.1
青森県	17.5	福井県	17.5	広島県	18.6
岩手県	16.0	山梨県	17.9	山口県	18.0
宮城県	18.7	長野県	17.9	徳島県	18.0
秋田県	15.9	岐阜県	16.5	香川県	21.7
山形県	17.1	静岡県	21.0	愛媛県	18.8
福島県	18.2	愛知県	23.7	高知県	16.7
茨城県	20.9	三重県	19.3	福岡県	24.3
栃木県	18.1	滋賀県	19.7	佐賀県	19.6
群馬県	20.7	京都府	19.0	長崎県	19.1
埼玉県	25.3	大阪府	30.0	熊本県	18.5
千葉県	21.6	兵庫県	19.8	大分県	17.0
東京都	30.4	奈良県	22.2	宮崎県	17.5
神奈川県	29.5	和歌山県	18.6	鹿児島県	17.9
新潟県	17.5	鳥取県	18.7	沖縄県	21.9
富山県	18.4	島根県	16.3		

## 6. 本研究により得られた成果

平成16年度は、単独の需要家を対象とする場合のCGS導入によるCO2排出削減効果を、機器特性の部分負荷特性に着目して混合整数非線形計画法で表現するモデル開発を行った。さらに日本の主要7地域における効果の差を評価した。さらに、意思決定プロセスに利用するために分散計算機環境でのシミュレーションツールの開発を行った。これを受け、平成17年度はさらに前者の空調機器特性の具体的な表現を持つモデルを拡張し、特に地域における需要家の分布を考慮した上で、CGSあるいはHP導入による省エネルギーやCO2排出削減評価を行うシステムの構築を行った。これにより、需要家の分布が東京などの大都市に比べると比較的狭い範囲で変化する宇都宮市において、GISデータをもとに中央都市街区および周辺の住居・業務混合地域における導入効果を評価した。さらに、この結果を地域全体に拡張し評価する手順を構築した。

平成18年度は、さらにこの方法を札幌、那覇という日本の南北端の都市に適用し、さらに宇都宮の結果とあわせると、CO2排出削減ポテンシャルと業務用床面積比率の間に地域を貫く一つの関係のあることを見出した。これをさらに日本の950市町村に適用することで、建物部門の潜在的なCO2排出削減ポテンシャルの推計を行なった。

本研究の結果、宇都宮市全域でのCO2排出削減ポテンシャルは、HPおよびCGS単独導入の場合で約6%、

熱電融通を取り入れるDHCでは約12%, さらに売電まで可能とすると約17%に達するという評価が得られた。また, 日本全体では18.6%の削減が推計された。この結果は, 現在の発電構成と機器特性に基づくものであるため, 発電構成や機器の技術進歩がさらなるCO2排出削減を生むと期待できるが, それらが相乗効果となるかあるいはむしろ相殺的になるかは今後の課題である。ただし, HPの場合は, 発電部門のCO2排出原単位の低下がそのまま評価につながるものと言える。

本研究の成果を拡張することで, これらの具体的な機器構成のミクロレベルの評価を全国規模に展開できる展望が開けたものと言える。

#### 引用文献

- (1) 石田武志・森俊介・堂脇清志, 「経済性制約と機器の部分負荷特性を考慮した業務建物の最適CGS導入決定支援システムの構築」, 電学会論B vol. 125 No. 4 pp373-380, 2005
- (2) (社)空気調和・衛生工学会, 「都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価」, 1994
- (3) 総務省統計局, 家計調査報告
- (4) 日本放送出版協会: 「国民生活時間調査 全国編」, NHK放送文化研究会編
- (5) 清本浩介: 「世帯構成・ライフスタイル変化を考慮した域別家庭用エネルギー需要の推計とCGSの長期最適導入・運用計画評価」. 第20回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 2003





## (9) さまざまな主体の知識共有のための統合ツール開発

東京大学 総括プロジェクト機構  
領域創成・学術統合化プロジェクト研究部門  
ステーヴェン クレイネス  
日本工業大学システム工学科  
石田 武志

### [要旨]

日本全国の様々な気候や他の特性をもつ都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減を満たすための技術や政策の導入効果を網羅的に評価することは、極めて複雑な問題である。これらの評価のためには、地域特性を反映する都市生活や産業活動を整理するとともに、技術や政策などの施策も整理する必要がある。温暖化対策を評価するためには、極めて幅広い分野の専門家が参加していることが特徴である。しかし、この幅広い専門性を協調的に機能させることは極めて難しい問題である。そこで、本研究では、それぞれの研究者間に遍在する知識を、インターネットの利用により、知識協調を行い、プロジェクトの目標達成を支援する「ウェブ・ベース協調基盤」の設計と構築を行ったものである。

この「ウェブ・ベース協調基盤」構築に関して、平成16年度は、「CO<sub>2</sub>テックテーブル」と呼ばれる研究者間の知識共有情報基盤の構築を行った。さらに平成17年度は、内外の研究者により構築されている数値モデルをウェブ・ベース基盤において外部から操作できるインターフェース作成を中心に実施した。具体的にはDOME (distributed object-based modeling environment)のモデル統合基盤を用いて、MS ExcelやMathworks Matlabなどのソフトウェアを用いて構築されたモデルを、ウェブ・ベース基盤を通じてアクセスできる環境を構築した。これに加え、DOMEのさらなる開発をマサチューセッツ工科大学のCAD研究室と継続した。これに加え17年度は、当該プロジェクト内において開発された複数のモデルを連動させるための統合モデルを中心に、電源構成モデルと、電力需要を削減するための住宅・建物省エネルギー対策モデルの統合を行った。これに続き平成18年度は、17年度に作成した統合モデルを用いて、国内の電力会社別の計算を行い、国内CO<sub>2</sub>排出量を計算することができることを示した。

平成16－18年度において、「都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減技術や政策の評価知識（共有のための統合ツール開発）」についての主な成果は：

1. Web空間にCO<sub>2</sub>排出量推計、削減対策評価に必要な知識・データを共有する情報基盤、「CO<sub>2</sub>テックテーブル」の構築
2. インターネットを介してモデル操作を支援するウェブ・ベース基盤の構築
3. 時系列シナリオ評価を含めた統合モデルを実現するためのDOMEツールの構築
4. 東京都の電源計画・供給モデルの適用によるDOME統合機能の評価
5. DOME統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合解析
6. 電源計画・供給モデルの拡張（9電力会社の計算）及び全国CO<sub>2</sub>排出量評価

[キーワード] 二酸化炭素、技術評価、モデル統合化、電源計画モデル、ウェブ技術

## 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub>排出の増加に伴う地球温暖化が顕著になり、CO<sub>2</sub>排出の効果的な制御方法が広く研究されてきている。この国際的な動きの中で、CO<sub>2</sub>排出と大きな関係がある電源構成や、様々な都市生活の消費活動を最適化することができれば、都市におけるCO<sub>2</sub>排出抑制の一手段となりうる。しかし温暖化対策を評価するためには、極めて幅広い分野の専門家が参加しており、この幅広い専門性を協調的に機能させ、最適な施策を導出することは極めて難しい問題である。

一方で、近年のインターネットの普及やIT技術の発展により、様々な情報・知識を簡易に共有して技術基盤を作ることが可能となりつつある。温暖化研究に参加する広い分野の専門家の計算モデルやデータベースなどの知識リソースを共有する技術基盤を構築することができれば、中長期の最適な温暖化施策を精度よく導出できると考えられる。例えば、内外の研究者により構築されている数値計算モデルをインターネットを介してウェブにより外部から操作できるようにすれば、都市をはじめに、日本国内の活動に伴うCO<sub>2</sub>排出の削減対策の総合的な効果を素早く評価したり、最適の解を検討したりするための有効な手段になると考えられる。

## 2. 研究目的

本研究では、それぞれの研究者間に遍在する知識を、インターネットの利用により、知識協調を行い、プロジェクトの目標達成を支援する「ウェブ・ベース協調基盤」の設計と構築を行ったものである。さらに、当該プロジェクト内において開発された複数のモデルを連動させるための統合モデルをDOME (distributed object-based modeling environment)のモデル統合基盤を用いて構築し、電源構成モデルと、電力需要を削減するための住宅・建物省エネルギー対策モデルの統合を行った。この統合モデルにより、首都圏や国内のCO<sub>2</sub>排出量を評価できることを示すことが目的である。

## 3. 研究方法

本年度の研究目的を達成するための研究方法は、以下のとおりである。

(1) インターネットのWeb技術、データベース技術により、情報共有基盤を構築し、以下の事項を実現した。

a) Web空間にCO<sub>2</sub>排出量推計、削減対策評価に必要な知識・データを共有する情報基盤、「CO<sub>2</sub>デックテーブル」の構築

b) インターネットを介してモデル操作を支援するウェブ・ベース基盤の構築

(2) DOME (distributed object-based modeling environment) ソフトウェアを用いて様々なモデルを統合し、モデルを連動させて評価を行う機能を実現した。具体的に実施した事項は以下のとおりである。

a) 時系列シナリオ評価を含めた統合モデルを実現するためのDOMEツールの構築

b) 東京都の電源計画・供給モデルの適用によるDOME統合機能の評価

c) DOME統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合解析

d) 電源計画・供給モデルの拡張（9電力会社の計算）及び全国CO<sub>2</sub>排出量評価

DOMEは、マサチューセッツ工科大学のCAD研究室において開発されているモデル統合基盤であり、MS ExcelやMathworks Matlabなどの各種ソフトウェアを用いて構築されたモデ

ルや、J a v a による記述されたモデルに対して、各モデル間のパラメータをリンクさせ、モデルを連動させることができるツールである。

本研究では、Matlabにより構築された電源構成モデルや、電力需要を削減するための建物省エネルギー対策モデル、住宅省エネルギー対策評価モデルの統合を行った。各モデルは、異なる研究者によりそれぞれ構築されたもので、統合することを考慮して作成されたものではないが、D O M E を用いることにより、個別モデルでは得られない部門間相互作用の評価もできることを示した。

#### 4. 結果・考察

##### (1) W e b 空間にC O<sub>2</sub>排出量推計、削減対策評価に必要な知識・データを共有する情報基盤、「C O<sub>2</sub>テックテーブル」の構築

本研究プロジェクトの各研究者が持つ知識・データを明確かつ共用しやすい形式に変換するW e b ベースの協調基盤の開発を行った。この協調基盤は公開領域とログイン領域に分かれている。公開領域には、一般者向きのプロジェクト情報を載せて、掲示板など「フィードバック」を取得する機能などが整備されている。ログイン領域には、プロジェクトメンバー全員のアカウントが作成され、様々のプロジェクトの内部情報や関連するナレッジを登録したりアクセスしたりするための協調基盤が作成されている。具体的に作成した機能は以下のとおりである。

- ①公開サイトとプロジェクト内サイトを分け、プロジェクトのメンバーのページへのパスワード制限アクセスの機能
- ②ログイン済みのメンバーは、個人情報や発表論文リストを自ら修正でき、電子ファイルの形にある資料をアップロードできる機能
- ③メンバー毎に以下の機能をもつ「C O<sub>2</sub>テックテーブル」
  - (ア)メンバー毎の「C O<sub>2</sub>排出を起こす都市活動」の分類テーブル
  - (イ)メンバー毎の「C O<sub>2</sub>排出を削減する技術や政策」の分類テーブル
  - (ウ)各々の対策効果を評価するために「必要なモデルやデータ」の分類テーブル

図1に「C O<sub>2</sub>テックテーブル」の基本画面を示す。この画面において、都市関係統計、技術データや政策関係データや計算ツールについて登録情報が示されている。「C O<sub>2</sub>テックテーブル」のデータベースはプロジェクトのメンバー毎に用意しており、各メンバーが自分の「C O<sub>2</sub> Tech Table」のデータ入力や変更を自由にでき、他のメンバーのデータを参照したり、コピーしたりすることができる。

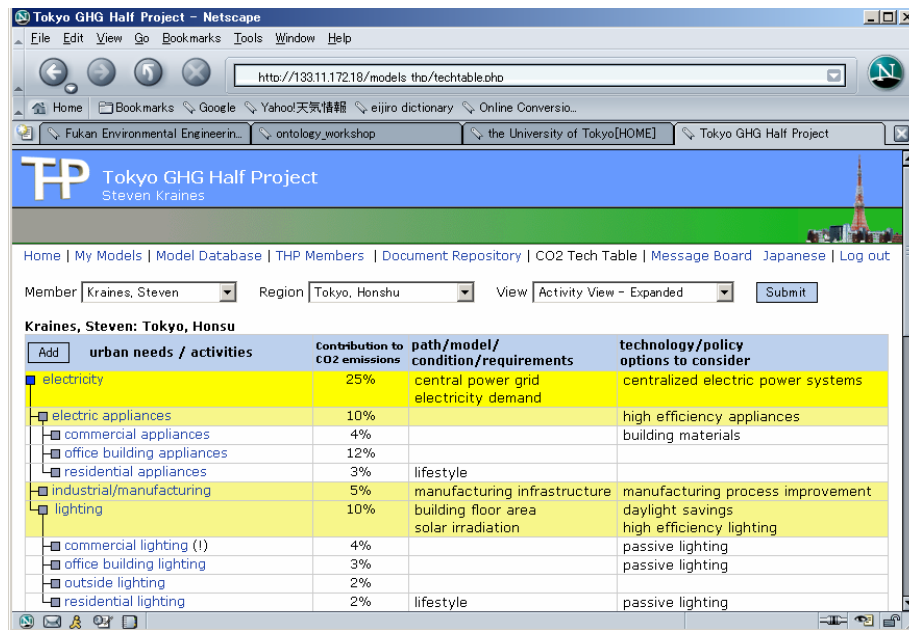


図1 「CO<sub>2</sub>デックテーブル」の基本画面

## (2) インターネットを介してモデル操作を支援するウェブ・ベース基盤の構築

(1) によるデータ共有基盤の構築に加え、インターネットを介して、温暖化対策評価モデルを操作するための基盤を構築した。具体的には、DOME (distributed object-based modeling environment) ソフトウェアを用いたWebを介して遠隔地からでもモデル操作を可能とするインターフェースの構築を行った。

具体的にはウェブ・ベース基盤に登録された各種モデル・データベースにおいて、図3に示すように、モデルのパラメータを表示し、ユーザーが操作できる入力フィールドを追加した。(ただし、図2に示すウェブ・ベース基盤に登録されたモデルリストは、現段階でモデルがDOMEを通じて直接操作できるようにはなっているのは一部である。) このような入力インターフェースを用いることにより、各ユーザーは各自の特定のシナリオを反映したモデル計算条件を入力することが可能となる。図4にソフトウェアのスキーム図を示す。ウェブを通してモデルパラメータの変更を受け付け、DOMEソフトウェア基盤を通じて実計算を要求するためのJavaサーバを構築した。これにより、計算結果がDOMEからJavaサーバに戻され、さらにユーザーインターフェースに結果が渡される。

## (3) 時系列シナリオ評価を含めた統合モデルを実現するためのDOMEツールの構築

DOME (distributed object-based modeling environment) モデルによるソフトウェア統合環境の開発を、マサチューセッツ工科大学のCAD研究室と共同研究を継続し、「モデル統合プロジェクト」と呼ばれるDOME内において複数モデルを時系列に繰り返し計算を可能とする一連のツールが利用可能となった。この繰り返し計算機能には、ユーザーが定義した任意の単位と開始時間、終了時間の定義に基づいたタイムカウンター機能が提供されている。この機能によりDOMEにおいてタイムステップごとに複数のモデルを連動させながら計算を実行していくことが可能となった。

Models		
ID	Model Name	Modeler
1	GIS database aggregator interface	Steven Kraines
2	IO analysis CO <sub>2</sub> calculator interface	Steven Kraines
13	Electricity Generation Best-Mix Model	
14	SOFC dynamic model	
16	EnergyPlus	
17	Absorption Chiller	
18	Building LCA Model	Toshiharu Ikaga
27	Demonstration Model	
56	Dynamic traffic flow model	Yoshikuni Yoshida
64	Statistical OD Traffic Assignment Model	
67	Statistical Heat Island Model	
68	IO tables in Tokyo	Yoshikuni Yoshida
76	Roof-top PV electricity generation model	Steven Kraines
79	Power Generation Best-Mix Model	
83	Simple counterflow tubular heat exchanger	Steven Kraines
981	Automobile LCA Model rebuilt 20050222	
982	PlasticBlastFurnace20040416	
983	PlasticThermalProcessing 20040416	
984	Total Building Energy Model 20050222	
991	PV Power Generation Model 20040317	
992	Convert PV power to grid 20050221 rebuilt	
993	Product Manufacture Coefficient Model 20040608	
997	new irradiation model 20050124	
998	PV Cell Tech Model with enumeration 20050222 rebuilt	
999	Building LCA Model 20050222 rebuilt	Toshiharu Ikaga
1000	Ikaga Building Energy Model 20060323	Toshiharu Ikaga
1001	power dispatch model v9 20060409	Yasumasa Fujii
1002	Electricity power planning integrated project 20060327	Steven Kraines

図2 ウェブ・ベース基盤に登録されたモデルのリストを提示するウェブページ

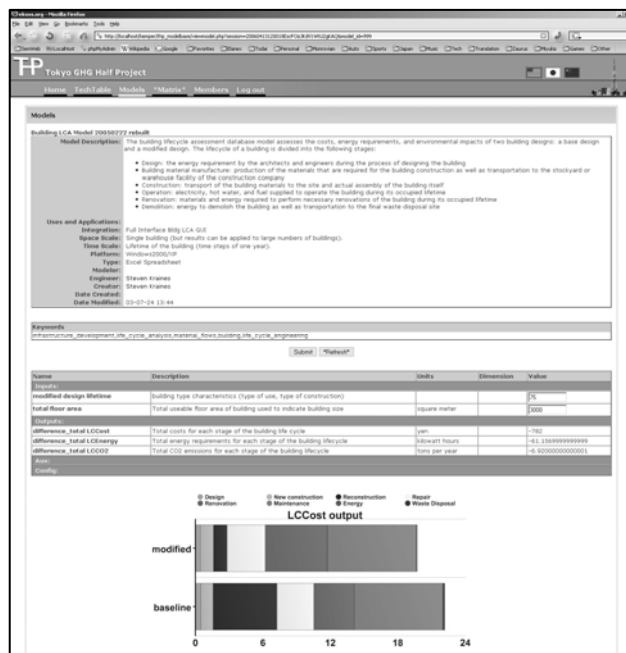


図3 ウェブ・ベース基盤上に構築された DOMEモデルの基本画面

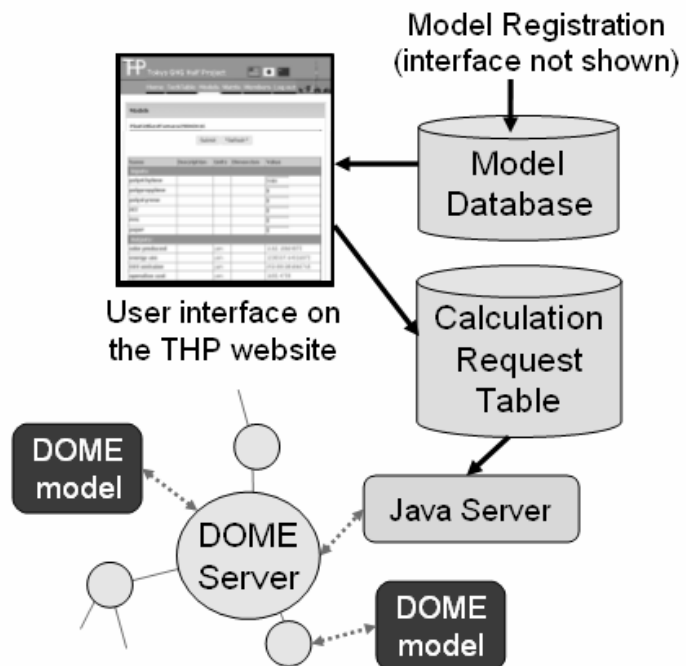


図4 DOME統合基盤とウェブ・ベース基盤を接続するためのソフトウェアのスキーム図

#### （４）DOMEの統合機能を用いた東京における電源計画・供給モデルの評価

（３）のDOMEによる時系列統合機能により、Mathworks Matlab上の電源計画・供給モデルを用いてDOME統合モデルを構築した。ここで用いる電源計画と供給モデルは、特定の地域の需要曲線として、7季節（夏季平日、夏季休日、冬季平日、冬季休日、中間期平日、中間期休日、ピーク需要）のデータと、その地域で利用可能な電源種別を与えることにより、年間の代表7季節日別の時間別供給量と電源種別の最適な発電容量を計算することができる。このモデルで扱うことができる電源種別は、水力、原子力、LNG火力、石炭火力、石油火力、ガスコンバインドサイクル、SOFC-ガスタービンコンバインドサイクル、揚水発電である。図5に電源計画・供給モデルのDOMEによる基本インターフェース画面を示す。図6は、グラフィックユーザーインターフェースをカスタマイズして作成した画面を示す。

図7に示すようなフィードバックループをDOMEモデル統合プロジェクトにより構築した。図に示すように、電源計画・供給モデルは、それぞれの電源種別において最小の発電容量と設備コストを考慮して最適な計算を行うとともに、さらにCO<sub>2</sub>税を外生的に与えて計算を行い、最適化された電源種類ごとの発電容量のコスト、発電総量、CO排出量を出力として計算される。

name	value
sofc parameters	
sofc use flag	1.00000000 no unit
sofc subsidy (max 377)	0.0 yen per watt
sofc efficiency (def 0.67)	0.670000000 no unit
other input parameters	
co2 tax	0.0 yen per tonne
n_days	7.00000000 no unit
number of days represented	1 x 7 day
generation tech parameters	
installation cost	1 x 11 yen per watt
running cost	1 x 11 yen per watt-hour
upper limit	1 x 11 kilowatt
lower limit	1 x 11 kilowatt
increasing ramp constraint	1 x 11 no unit
decreasing ramp constraint	1 x 11 no unit
offline time	1 x 11 no unit
total annualized cost	3.39949753E12 yen per year
total co2 emissions	5.91842937E7 tonne per year
total annualized cost with co2 tax	3.39949753E12 yen per year
power dispatch data	168 x 11 kilowatt-hour
capacities	
generation amounts	
total power generation	2.18013337E11 kilowatt-hour
power demand data	24 x 7 kilowatt-hour

図5 電源計画・供給モデルのDOMEによる標準インターフェース

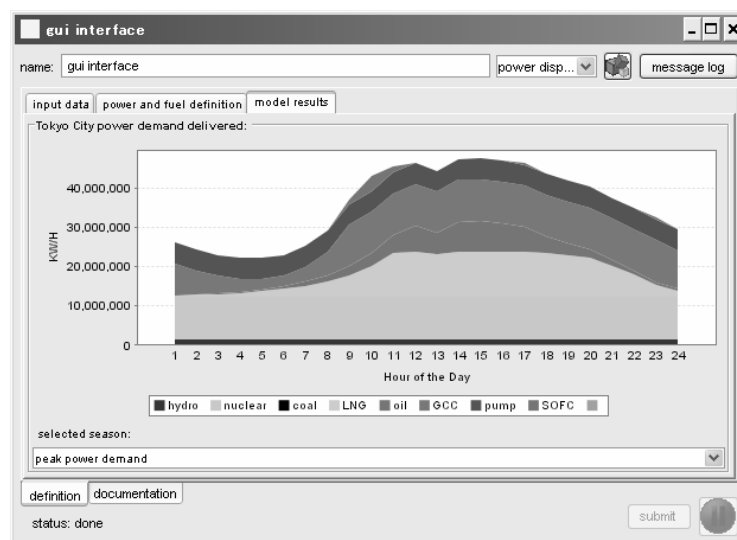


図6 カスタマイズされた電源計画・供給モデルのグラフィックインターフェース画面

計算においてSOFC/GTシステムの設備コストは、基準コストである37,7000円/kWから、SOFCの導入補助により削減されるような修正を外生的に与えるようにした。さらにCO<sub>2</sub>税を用いて、電源種別の運転コストが変化するように設定した。電源計画・供給モデルによる最適化計算の後、その年のCO<sub>2</sub>排出量と年間総コストの計算結果が記録され、さらに発電所の廃止率を提供する簡単なモデルにより、発電容量が修正される。計算で用いるこのモデルは、それぞれの電源種別の最小容量を更新するために、毎年10%の容量が廃止されると簡単に設定をしている。これは、電源種類別に廃止率に差をつけるなど、さらに詳細な電源廃止モデルにも簡単に代替することが可能である。こ

のように修正された各電源の容量や、SOFC／GT補助金、CO<sub>2</sub>税率などの値が、電源計画・供給モデルの入力データとして与えられ、繰り返しループ計算がなされる。モデルの初期条件として与えられている1995年から、2045年まで、49回の繰り返しタイムステップを実行している。

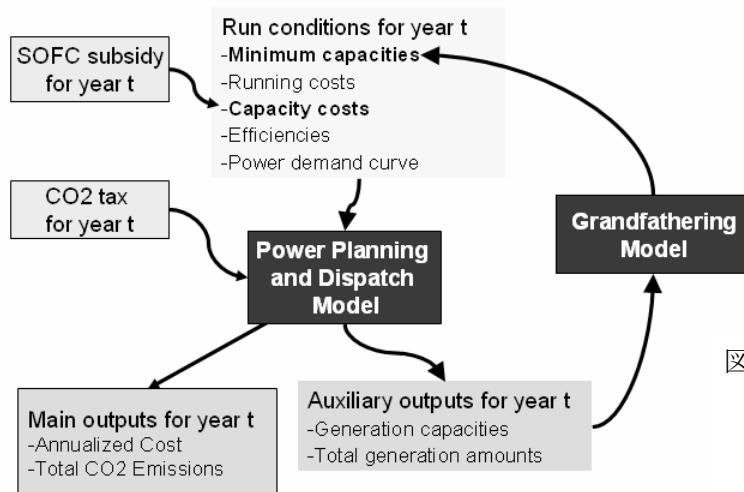


図7 DOMEによる電源計画・供給モデルもフィードバック・ループ

最初の実行ケースとしては、最初の10年間のSOFC補助率が0円／kWと設定し、次の10年間では100,000円／kW、その後10年で120,000円／kW、さらにその後10年間で90,000円／kW、最後の10年間で0円／kWに戻るといった設定を行った。この条件は、SOFC／GTシステムの導入補助が段階的に行われていき（設備生産のスケールメリットにより設備単価が減少し）、数十年後に補助を0にすることができるという設定である。さらに、最初のSOFC／GTに補助金を導入するシナリオに加えて、1トン当たり10,000円のCO<sub>2</sub>税を2005年から導入された場合の統合モデルの計算を実施した。

図8に年間総コストとCO<sub>2</sub>排出量の計算結果を示す。図9に各時間ステップの電源種別の容量構成の推移を示す。このシナリオにおいては、CO<sub>2</sub>税により原子力発電容量が計算期間全体にわたって最大の1995年レベルで推移していることがわかる。SOFC／GTシステムは導入量が増加する一方で、SOFC／GTシステムは、GCCやLNG火力などの炭素強度のより高い電源のみを代替していることがわかる。

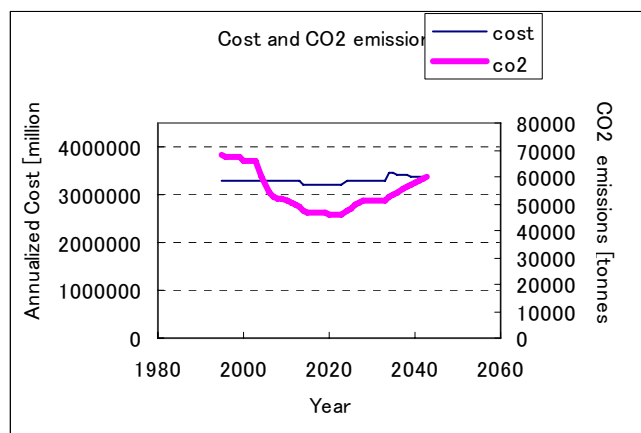


図8 SOFC／GTシステムへの補助金及びCO<sub>2</sub>税を考慮したシナリオにおける年間総コストとCO<sub>2</sub>排出量

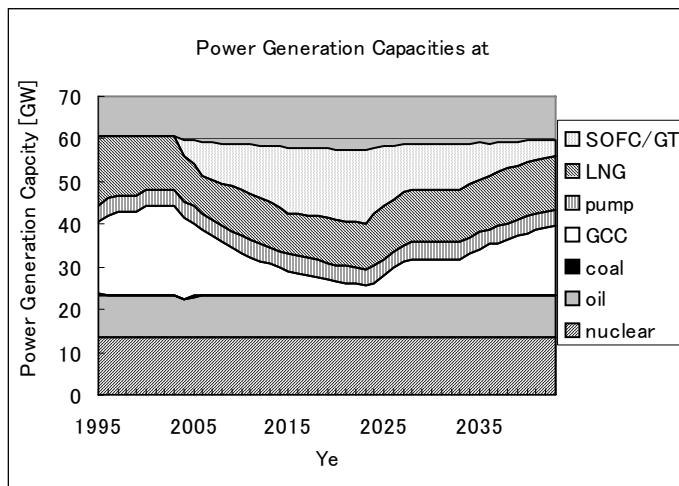


図 9 SOFC／GTシステムへの補助金及びCO<sub>2</sub>税を考慮したシナリオにおけるシミュレーション期間の各電源種別の最適化容量

#### (5) DOME 統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合

##### ①統合モデルの概要

地球温暖化対策には需要対策と供給面の対策があり、とりわけ電力の場合には需要側対策と供給側の対策が相互に関連を持つため、その両面を同時に検討していかなければ真に対策の有効性を評価することができない。実際の都市に複数の対策が導入されたときの効果を評価するためには、それらの対策の効果を個別に推定して加算するだけでなく、これらの対策効果を同時に評価できるような解析方法の確立が必要になる。本研究では、関連する複数の対策の相互関係を評価する方法を構築するために、前節（4）において構築された電源計画モデルに、民生部門のモデルを統合し、対策導入効果を様々な条件で評価するための解析ツールの構築を行った。

構築したシステムは、図10に示すように電源計画モデルと、家庭部門のエネルギーモデル、業務建物部門のモデルをDOMEにより結合した。

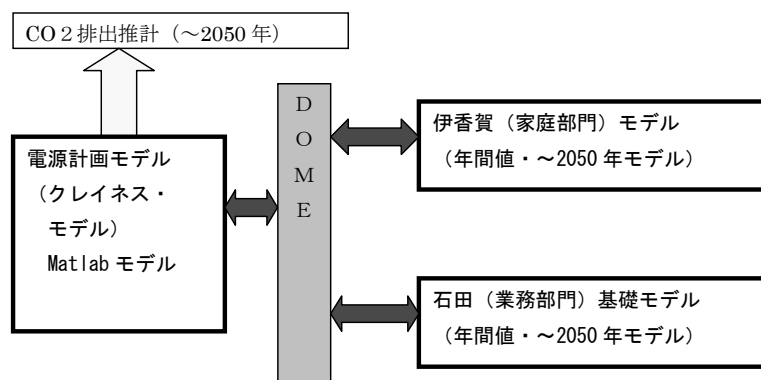


図 10 電源計画モデルと需要部門（民生部門）の統合の概要

##### ②住宅エネルギー・CO<sub>2</sub>のマクロ評価モデル

伊香賀による住宅エネルギー・CO<sub>2</sub>のマクロ評価モデルは、図15に示すように都道府県、対策の種類等を入力データとして与えると、2050年までの家庭部門のエネルギー消費構成が出力されるモデルである。このモデルはExcel VBAにより構築されており、内部の計算値は、



年間値のみで、時刻別データは扱っていない。また5年ステップでの計算である。住宅エネルギー原単位データベースの構築には、SMA S Hを用いて、エネルギー需要を求めている。対策コストに関してはモデル内では考慮していない。

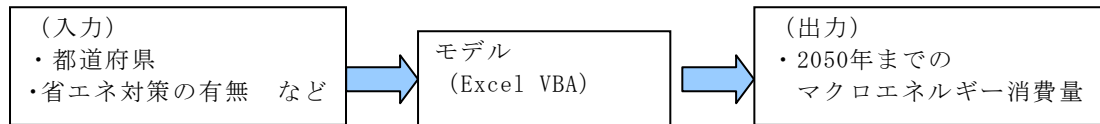


図15: 住宅エネルギー・CO<sub>2</sub>のマクロ評価モデル

### ③業務エネルギー・CO<sub>2</sub>のマクロ評価モデル

従来、業務用建物における空調熱源システムを検討する場合、建物設計時におけるエネルギー負荷予測や、エネルギー負荷計測事例から作成した用途別エネルギー負荷原単位により推計することが一般的である。しかし、実際の建物におけるエネルギー消費は、建物内の用途構成比やそれぞれのテナントにおける稼働形態、稼働時間などで様々に変動する。従来の方ではこのような外部条件による負荷変動を詳細に考慮することが困難であった。また空調負荷を推計する既存システム（例えばMICRO-PEAKなど）を負荷推計システムとして最適化モデルに含めることは困難であった。

今後、C G SやH Pなどの空調システムの導入可能性を、精度良く検討するためには、建物のエネルギー負荷を各種省エネルギー対策も含めて、エネルギーシステムの評価と一体化して推計することが必要である。本研究では、建物の電力・エネルギー負荷を細分化して定式化し、建物概要、建物用途、気象データに基づく建物内部からの発熱、壁面での熱貫流や外気交換による熱損失などの算出方法を明確にし、様々な条件下でのエネルギー負荷を簡易推計する計算ブロックをモデル内に明示的に導入することを可能とした。このモデルを地球温暖化対策等の施策評価においても、従来は原単位などを用いたマクロ的な評価が中心であったが、各種条件が詳細に設定できることから、各対策間の効果を相対的に評価するなど、施策決定支援の側面でも利用できるモデルである。モデルは、E x c e l V B Aにより構築されており、内部の計算値は、年間12ヶ月の代表日の時刻別データを推計している。

### ④電源計画－需要部門の統合モデルの計算事例

住宅及び業務エネルギー・CO<sub>2</sub>のマクロ評価モデルを、DOMEに接続し、電源計画・供給モデルと統合し、時間ステップごとの計算を行うことができる統合モデルを構築した。家庭部門では、太陽光発電の導入量が年々増加するような設定とし、さらに電力会社の電力単価に導入量が左右されるようにした。需要部門での分散電源導入により、需要サイドの電力デマンドは減少し、電力会社側の発電構成に影響を与

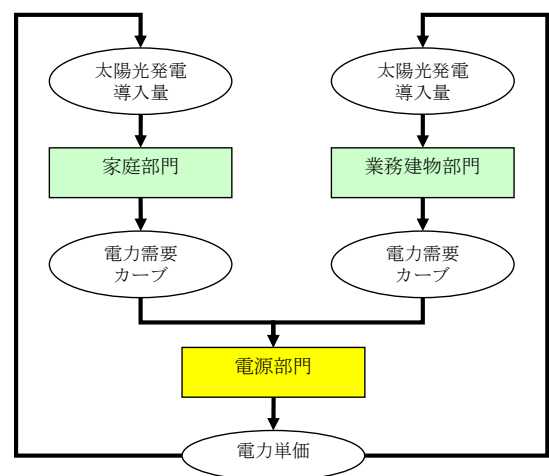


図11 需要部門モデルと電源計画モデルのフィードバックループ

え、発電単価が増減し、それが需要部門の太陽光発電の導入判断に影響を与えるようなフィードバックループが構成される（図 1 1）。

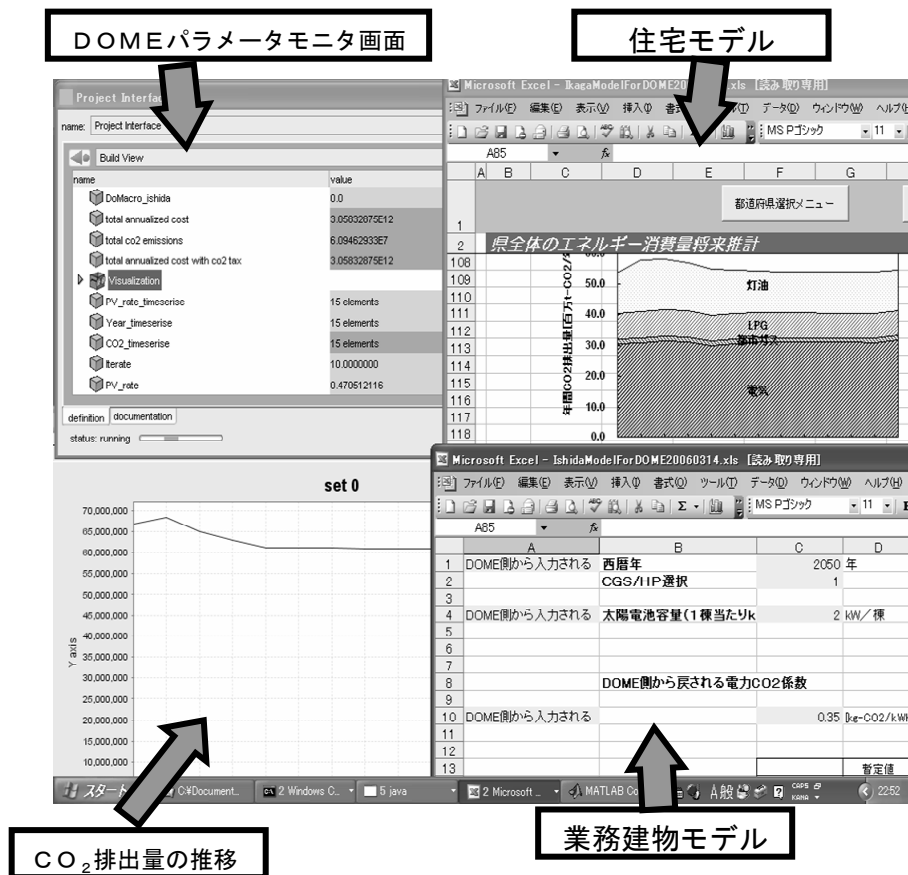


図 1 2 DOME 統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合の様子

図 1 2 に、計算を実施している画面の様子を示す。需要部門における太陽光発電の導入量が大幅になってくると、電源構成に影響を与え、特に火力発電等の稼働率の低下等により電力単価が変動し、それにより需要側の分散電源の導入量が左右されるというフィードバックループが稼働している。

### ⑤ 計算ケースの設定

各モデルにおいては、様々な対策の導入設定が可能であるが、本研究では各モデルにおける以下の対策パラメータを変化させて、モデル間の連動効果を評価した。

電源計画モデル： SOFC 補助金、CO<sub>2</sub> 税

業務建物モデル： 太陽光発電

住宅モデル： 太陽光発電

想定した計算ケースは以下の 7 通りである。

ケース 1：基本シナリオ:各対策の標準導入時

ケース 2：SOFC/GTシナリオ:基本シナリオ+SOFC/GTコンバインド発電が導入された場合

- ケース 3 : SOFC/GT+C02税シナリオ:SOFC/GTシナリオ+2005年以降にC02税の導入した場合
- ケース 4 : 太陽光発電一定シナリオ:基本シナリオ+需要サイドでの住宅太陽光発電の導入 (2010年～)
- ケース 5 : 太陽光発電フィードバックシナリオ:基本シナリオ需要サイドでの住宅太陽光発電の導入 (2010年～)。太陽光発電導入量が電源計画による電源構成に基づく電力単価 に左右される場合
- ケース 6 : 太陽光一定+SOFC/GT+C02税シナリオ: SOFC/GT +C02税シナリオ及び住宅太陽光発電導入 (フィードバックなし)
- ケース 7 : 太陽光 (フィードバック+SOFC/GT+C02税シナリオ: SOFC/GT +C02税シナリオ及び住宅太陽光発電導入 (フィードバックあり)

## ⑥計算結果

各ケースの設定に基づいて2050年までの計算を行った結果を図 1 3 に示す。太陽光発電のフィードバックを行った場合としない場合では、削減量に相違がでてくることがわかる (ケース 4 と 5、ケース 6 と 7 の比較)。今回の計算は住宅用の太陽光発電の導入のみのフィードバックであるため、排出量全体の変化は小さいものの、他の対策によるフィードバックや対策相互効果を考慮した場合は、大きな差になる可能性も考えられる。

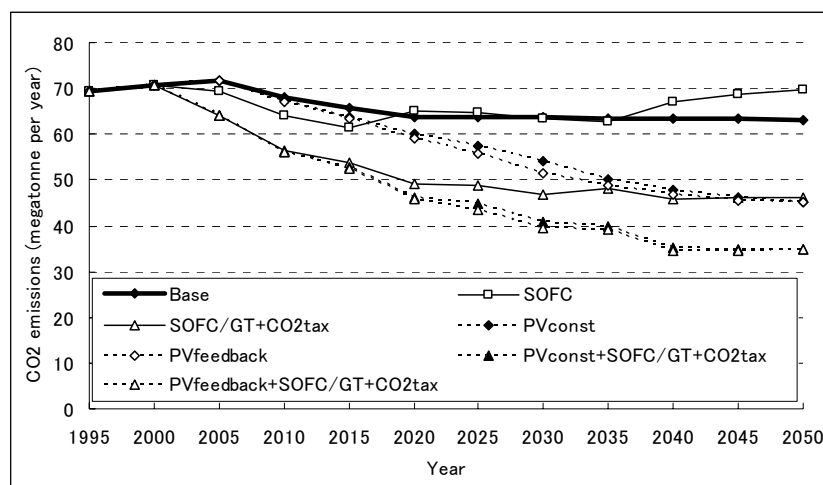


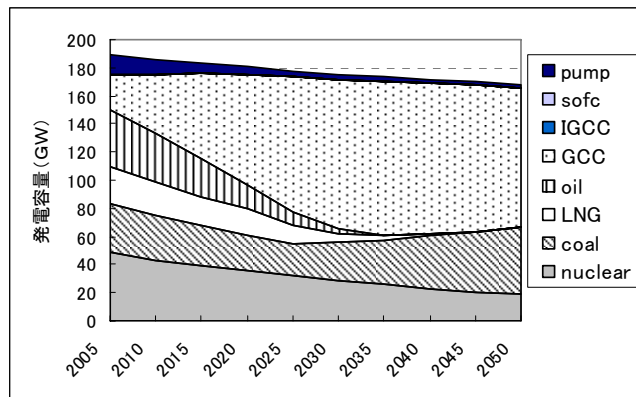
図 1 3 各ケースのCO<sub>2</sub>排出量計算結果

## (6) 電源計画・供給モデルの拡張 (9 電力会社の計算) 及び全国CO<sub>2</sub>排出量評価

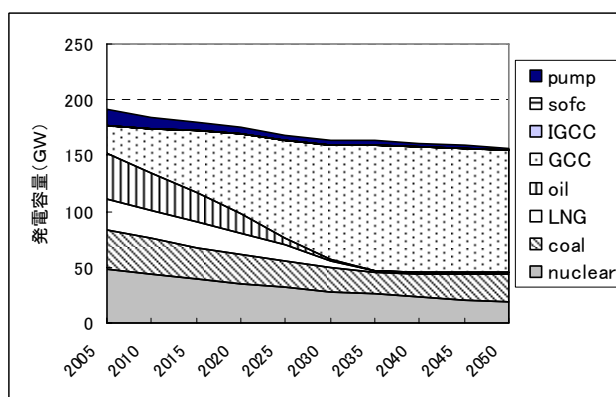
(4) で構築した電源計画モデルは東京電力管内のみであったが、それを拡張し 9 電力会社 (北海道電力、東北電力、東京電力、北陸電力、中部電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力) 別の推計ができるように改良した。各電力会社の現状の電源種構成比を設定し、電力会社別に需要カーブ、電源種類ごとの発電容量の上限・下限の設定などを選択できるようにしている。また、需要部門の対策による電力需要の削減や、太陽光発電の導入による電力需要の増減についてのデータも外生的に与えることができるようにしている。

この拡張モデルを用いて、9つの電力会社ごとに計算を行い、それぞれの計算結果を積算することにより、国内全体の発電構成や発電量、CO<sub>2</sub>排出量を導出した。図 1 4 - 図 1 6 に発

電容量の最適化結果の事例を示す。それぞれP V導入により電力需要が変動する場合としない場合について、さらに炭素税の導入有無による相違を示している。同様に図17－19にCO<sub>2</sub>排出量の推計結果を示す。

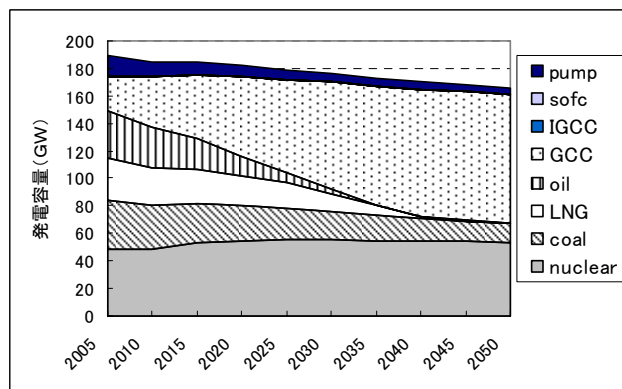


(a) P Vによる需要変動なし

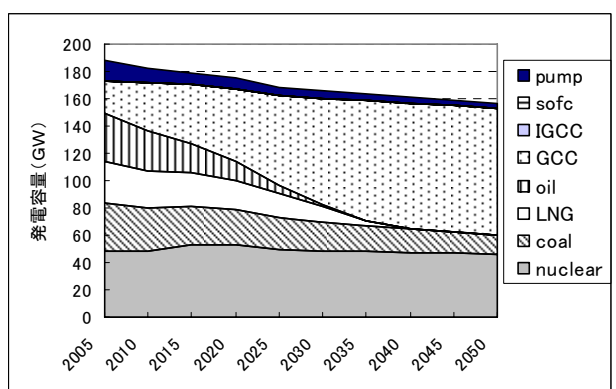


(b) P Vによる需要変動あり

図14 全国の発電容量の最適化結果（炭素税なしの場合）

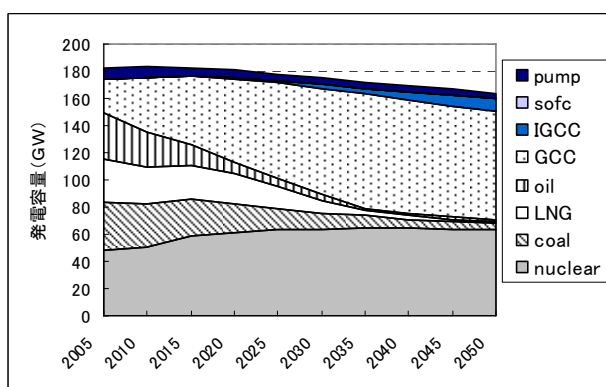


(a) P Vによる需要変動なし

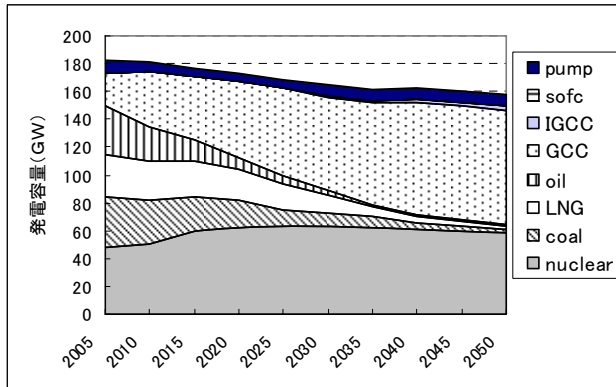


(b) P Vによる需要変動あり

図15 全国の発電容量の最適化結果（炭素税10万円/t-CO<sub>2</sub>の場合）

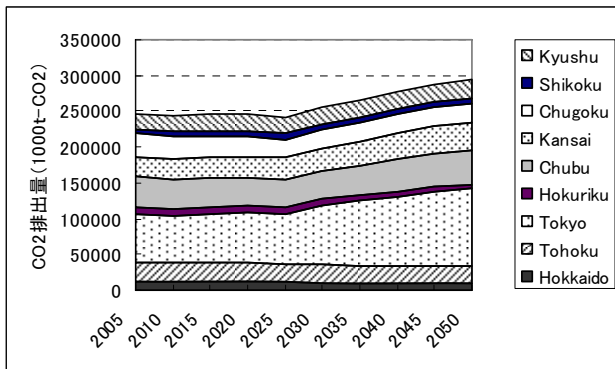


(a) P Vによる需要変動なし

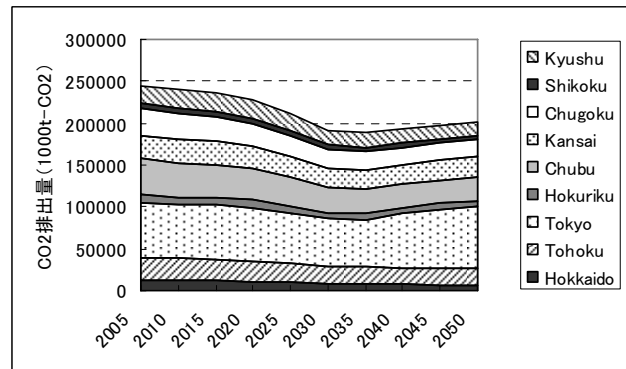


(b) P Vによる需要変動あり

図16 全国の発電容量の最適化結果（炭素税50万円/t-CO<sub>2</sub>の場合）

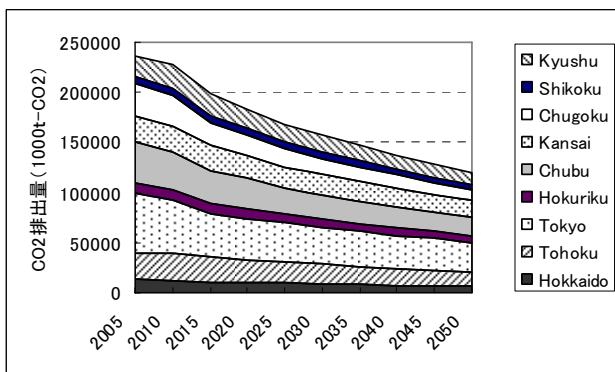


(a) P Vによる需要変動なし

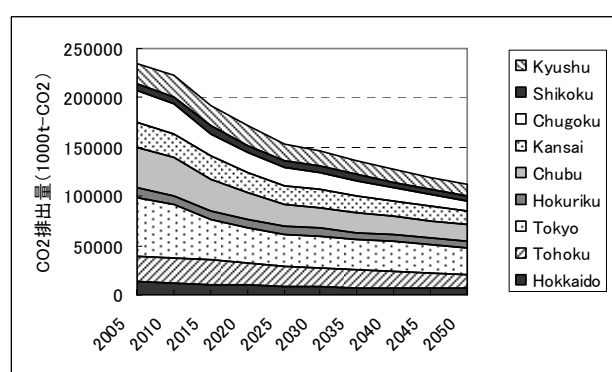


(b) P Vによる需要変動あり

図 1 7 全国の電源起源C O<sub>2</sub>排出量推計結果（炭素税なしの場合）

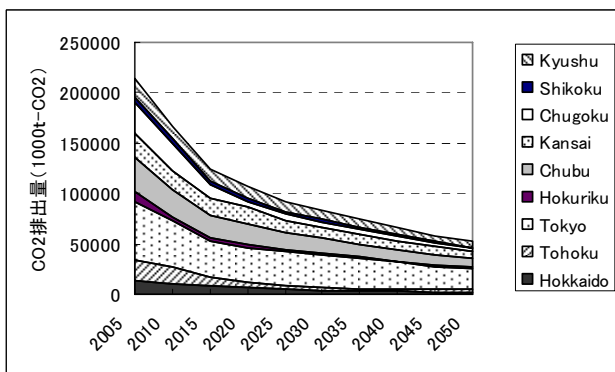


(a) P Vによる需要変動なし

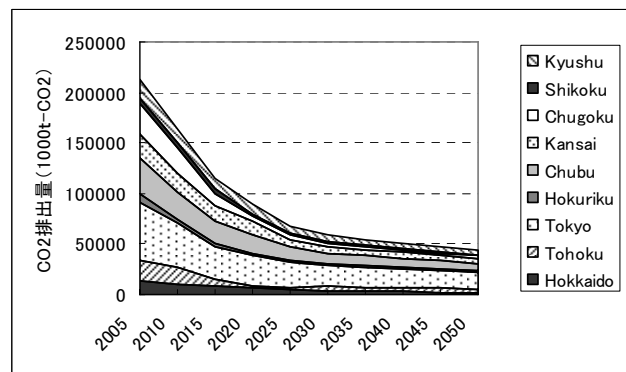


(b) P Vによる需要変動あり

図 1 8 全国の電源起源C O<sub>2</sub>排出量推計結果（炭素税 1 0 万円 / t -CO<sub>2</sub>）の場合）



(a) P Vによる需要変動なし



(b) P Vによる需要変動あり

図 1 9 全国の電源起源C O<sub>2</sub>排出量推計結果（炭素税 5 0 万円 / t -CO<sub>2</sub>）の場合）

以上のようにDOMEを基礎として、様々なモデルの統合や時系列計算が可能となった。(5)に示した電源計画モデルと需要部門モデルの統合解析についても、9電力会社区別に推計できるように改良中である。

## 5. 本研究により得られた成果

本研究では、各部門で作成された詳細モデルを統合することにより、部門間相互作用をDOME (distributed object-based modeling environment)と呼ばれるモデル統合基盤を用いて統合し評価する手法を開発したものである。

具体的には、Matlabにより構築された電源構成モデルと、電力需要を削減するための建物省エネルギー対策モデル、住宅省エネルギー対策評価モデルの統合を行った。各モデルは、異なる研究者によりそれぞれ構築されたもので、統合することを考慮して作成されたものではないが、DOMEを用いることにより、個別モデルでは得られない部門間相互作用や時系列の評価もできることを示すことができた。

## 6. 引用文献

特になし。

## 7. 国際共同研究等の状況

マサチューセッツ工科大学のCAD研究室との共同研究を継続し、分散型モデル統合化のためのソフトウェア開発を行った。

## 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)

- ① Steven Kraines, David Wallace, Daniel Favrat, AGS 2005 Annual Meeting (MIT), Alliance for Global Sustainability (2005)  
“Tokyo GHG Half Project Distributed Object-based Modeling Environment Progress from the AGS 2000 demo to now” (ソフトウェアのデモンストレーション)
- ② Steven Kraines, Brian Kemper, AGS 2005 Annual Meeting (MIT), Alliance for Global Sustainability (2005)  
“EKOSS: Environmental/Engineering Knowledge Ontology-based Semantic Search” (ソフトウェアのデモンストレーション)
- ③ Steven Kraines, Toshiharu Ikaga, Tomoyuki Chikamoto, David Wallace, ISIE 2006 Annual Meeting (Stockholm, Sweden), International Society for Industrial Ecology (2006)  
“Model-Integration Based Evaluation of Technologies to Promote Sustainability in the Building, Electricity, and Transportation Sectors of Tokyo, Japan” (口頭発表)
- ④ Steven Kraines, Brian Kemper, Rafael Batres, ISIE 2006 Annual Meeting (Stockholm, Sweden), International Society for Industrial Ecology (2006)

“EKOSS Ontology: A Prototype for a Domain Ontology for Industrial Ecology” (ポスター発表)

- ⑤ Yasuo Inoue, Yukio Yanagisawa, Steven Kraines, ISIE 2006 Annual Meeting (Stockholm, Sweden), International Society for Industrial Ecology (2006)  
“Estimation of Collection Costs for Municipal Garbage Using Grid-based City Models”  
(ポスター発表)
- ⑥ 石田 武志, Steven Kraines, モデル統合基盤により複数モデルを連動させた首都圏CO<sub>2</sub>削減シミュレーション, エネルギー・資源学会 第23回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, p159-162, (2007. 1)

(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

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

研究成果を基に、更に有用な協調基盤となるウェブサイトを構築するとともに、プロジェクト内のモデル開発メンバーの協力を得た上で、この電源計画モデルと需要モデルの統合モデルなどの協調基盤を、温暖化対策の政策立案に利用できるものとしていく予定である。