

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

(8) 地域冷暖房とコー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
日本工業大学 工学部

森俊介
石田武志

[要旨] 民生部門の CO₂ 排出削減のために、コージェネレーションの導入やヒートポンプに期待が寄せられているが、その CO₂ 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大きい。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。本課題では、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 CO₂ 排出削減評価を行なってきた。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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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）、CO₂ ヒートポンプ給湯機（以下 CO₂HP）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

(1) 民生用需要データの推計

1) 建物用途別床面積データ

GIS(Geographic Information System)とは、コンピュータ上に地図情報や様々な付加情報をもたせ、作成・保存・利用・管理し、地理情報を参照できるように表示機能をもったシステムである。本研究ではこの GIS のデータを用いて建物用途別床面積の推計を行う。対象地域は札幌市、宇都宮市、那覇市から、各々複数地域を設定する。札幌市および宇都宮市における対象地域は図 1、図 2 のように設定する。図 3 に GIS から抽出しまとめた対象地域の延床面積データを示す。

2) 建物用途別負荷データ

各建物のエネルギー負荷について、まず用途別需要 4 種 (冷房・暖房・給湯・電力) について、各々 7 期 (冬季・夏季・中間期の各々平日・休日と夏季ピーク) 24 時間帯で推計を行う。季節設定は地域ごとに異なるため表 1 のように設定する。家庭用の負荷は先行研究^[5]に従い推計した。

表 1 季節と日数の設定

	夏期ピーク	夏期平日	中間期平日	冬期平日	夏期休日	中間期休日	冬期休日
札幌	3	66	68	133	23	24	48
宇都宮	3	84	85	85	35	37	36
那覇	3	163	83	0	78	38	0

業務負荷に関しては、事務所、商業、ホテルを対象とし、日建設計伊香賀氏によるビル用途別エネルギー需要原単位データ^[6]を用いる。図 4、図 5 に札幌市を例に、家庭用と事務所要の電力需要原単位推計値を示す。

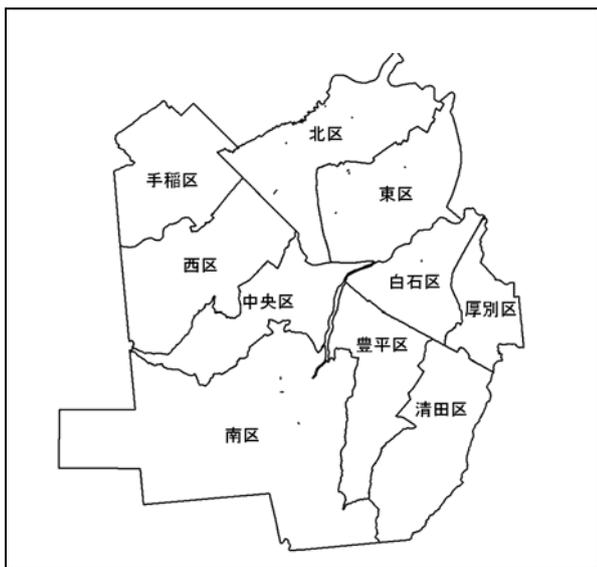


図 1 札幌市対象地域

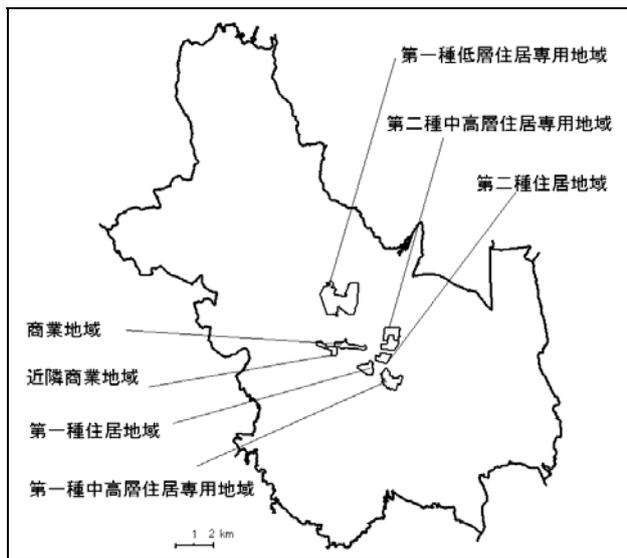


図 2 宇都宮市対象地域

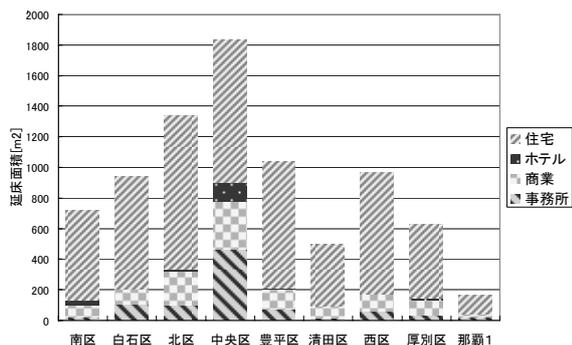


図 3 延床面積データ

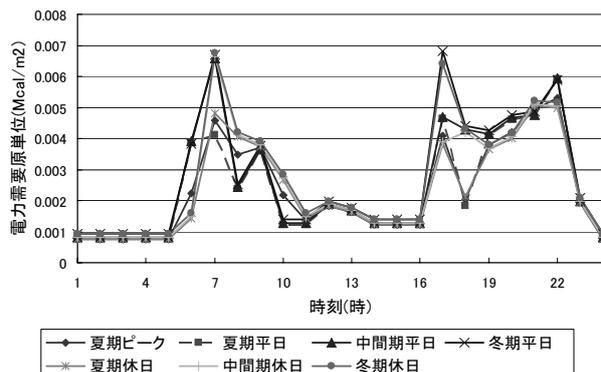


図 4 札幌市電力需要原単位(家庭用)

3) 地域別エネルギー需要データ

図 6 のフローに従い建物用途別床面積データと建物用途別負荷データを各々掛け合わせることで、地域別エネルギー需要を求める。図 7 に例として豊平区の夏平日における時刻別電力需要を示す。図 8 は同じ豊平区の使用別需要を推計したものである。

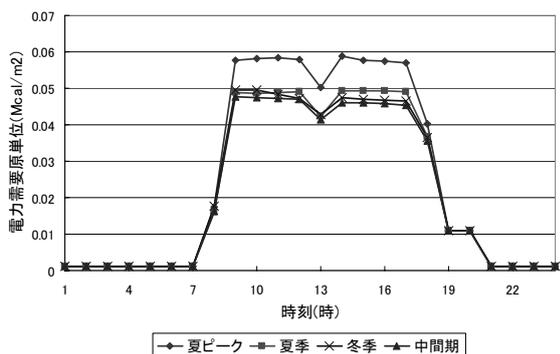


図 5 札幌市電力需要原単位(事務所)

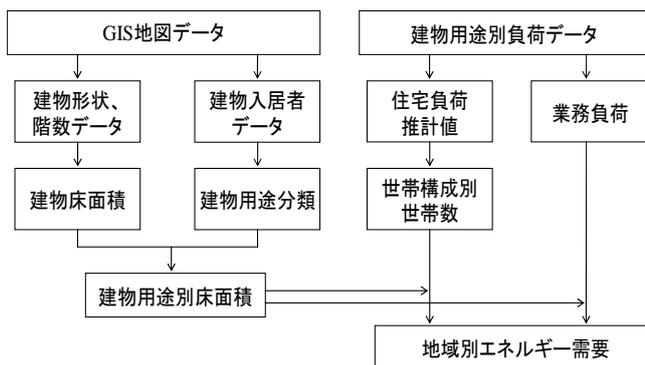


図 6 モデルの評価フロー

中央区の延床面積は豊平区の約 2 倍であるが、建物構成の相違から中央区の電力需要は豊平区の約 3 倍となる。那覇の場合の年間用途別需要を図 9 に示す。地域の違いにより用途別需要に大きな違いがある。

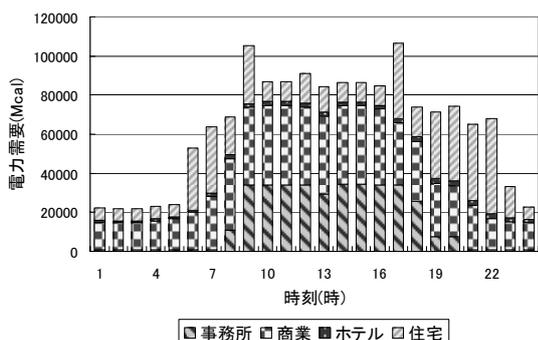


図 7 時刻別電力需要(豊平区・夏平日)

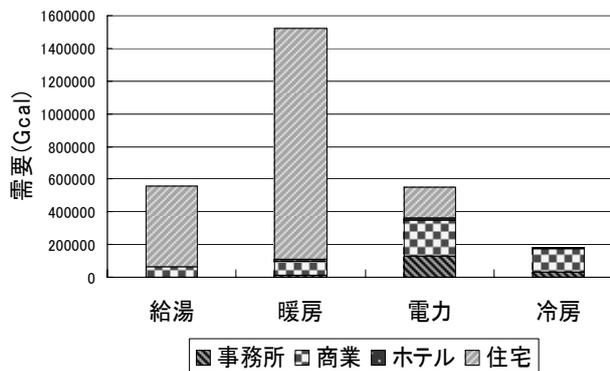


図 8 年間用途別需要(豊平区)

(2) モデルの概要

1) シナリオ

推計した需要に対し CGS (個別、DHC)、CO₂HP、貯湯槽の 4 機器を対象に、地域別に最適導入評価を行う。表 2 に解析シナリオを示す。なお case-HP は、オール電化のケースとし、ガスの購入はないものとする。

2) エネルギーフロー

解析には図 10 のエネルギーフローを用いる。このように、全体的な削減効果だけでなく各機器への導入量制約を課すことで機器の導入効果評価の比較も可能となる。

CGS は負荷率が 100%未滿運転では発電効率が落ちる部分負荷特性を持つ。この特性を、本モデルでは稼働率 r_0 以上又は 0 の制約「0-1 型整数計画問題」により考慮する。また HP の外気温特性を考慮する。

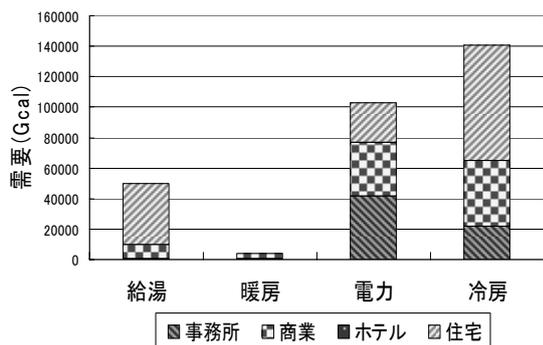


表 2 解析シナリオ

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

図 9 年間用途別需要 (那覇 1)

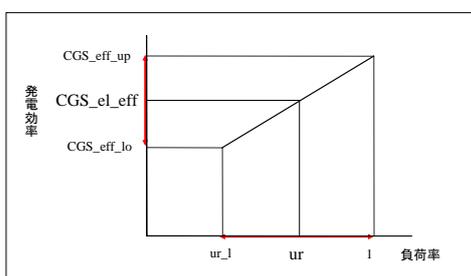
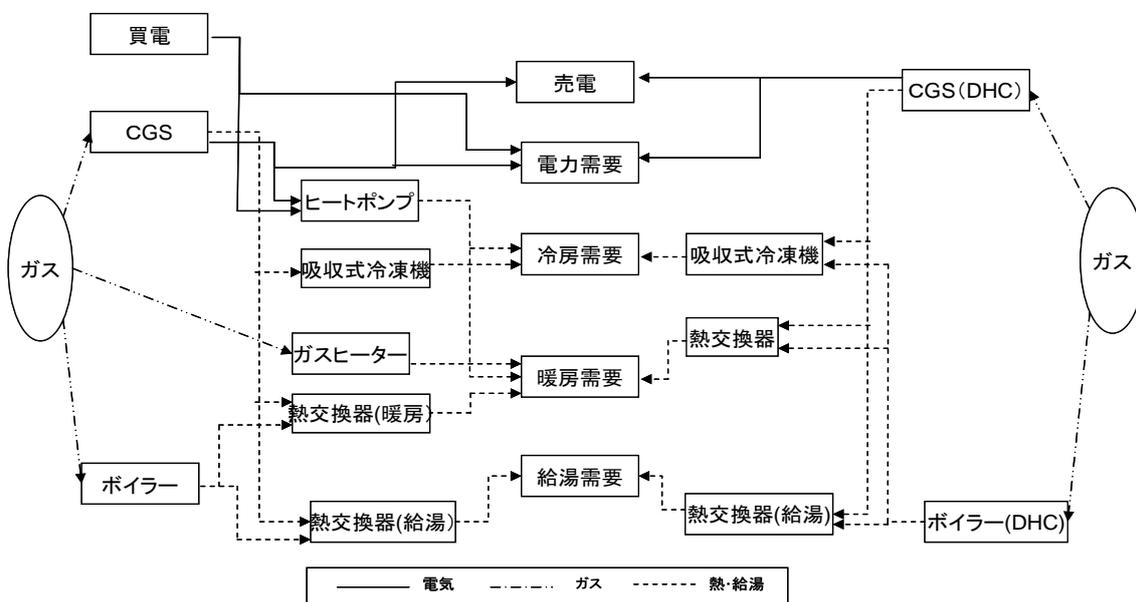


図 11 CGS 部分負荷特性

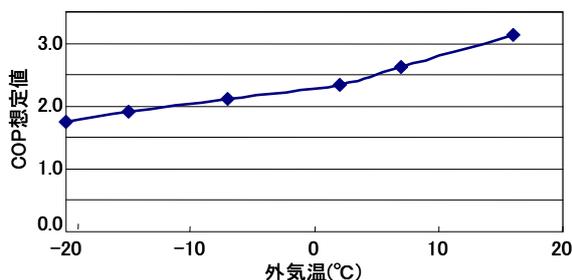


図 12 外気温と HP の COP の関係

目的関数は CO₂ 排出最小化またはコスト最小化とする。

4. 結果・考察

(1) 札幌、那覇、宇都宮の解析結果

図 13 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 13 よりすべての機器を導入する case-FULL が非常に大きな CO₂ 削減効果があることが分かる。これは需要家間の電熱の連携を考慮に入れたことや、CGS と貯湯槽を組合せることで CGS の負荷率を高く保ち、部分負荷特性による効率低下を回避できた効果によるものと考えられる。

図 14 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を示す。図 14 より 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 を削減したためだと考えられる。

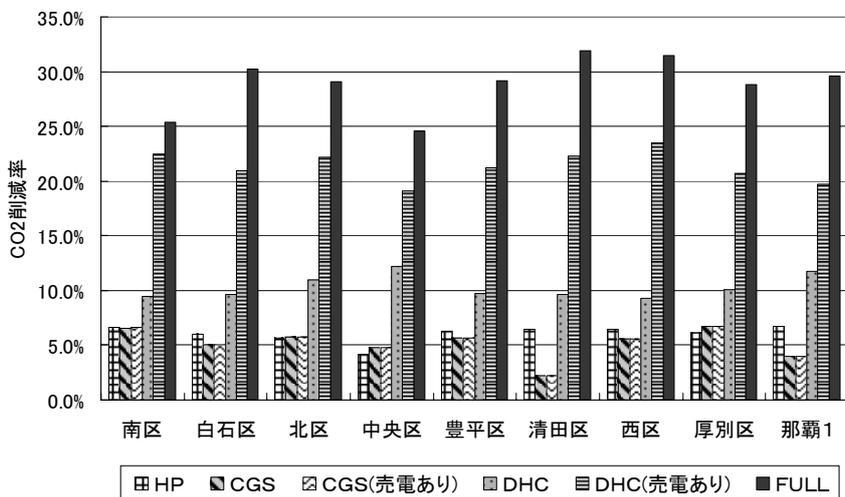


図 13 ケース別 CO₂ 削減率(札幌および那覇 1)

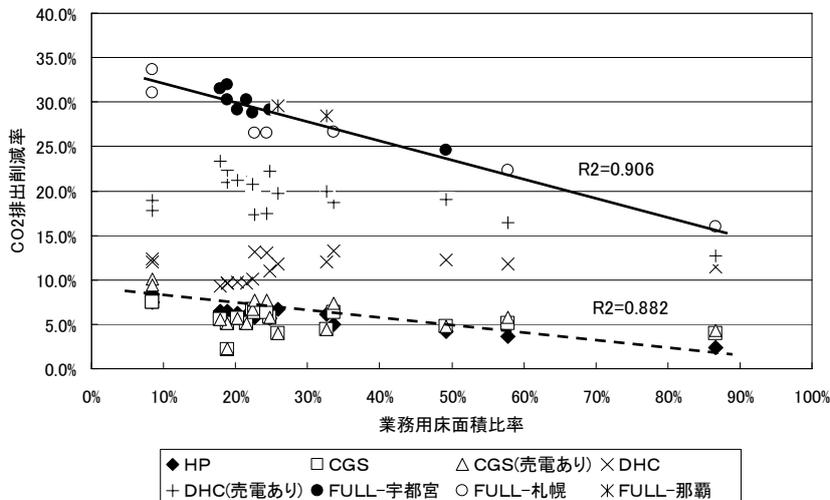


図 14 業務建物の割合と CO₂ 削減率の関係

次いで、図 14 の case-FULL での CO₂ 排出削減ポテンシャルの線形近似を日本全体へ拡張する。

(2) 日本全体への評価の拡張

図 14 から、CO₂ 排出削減ポテンシャルに直結する指標として、業務用建物面積の比率が重要であることが示された。そこで、この分布をモデル化する。まず、図 15、16 に実際の宇都宮市の市街地中心からの距離と、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。

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

(140.8) (32.2) $R^2 = 0.988$ (53.9) (-15.8) $R^2 = 0.950$

$Drs(x)$: 住宅建物面積密度 $Dbs(x)$: 業務建物面積密度

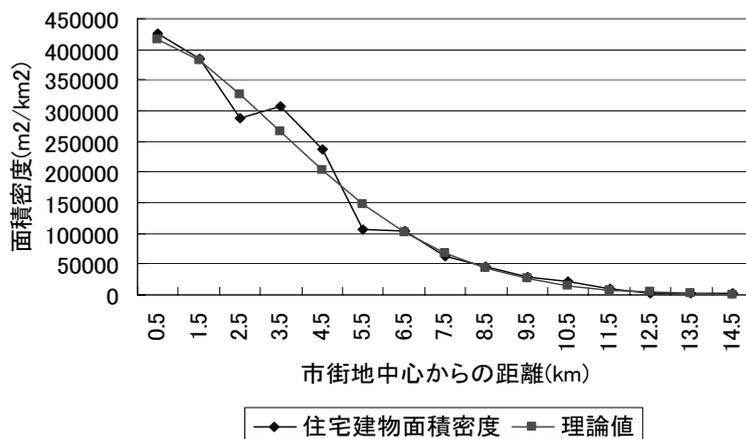


図 15 住宅建物面積密度の市街地中心部からの距離の変化

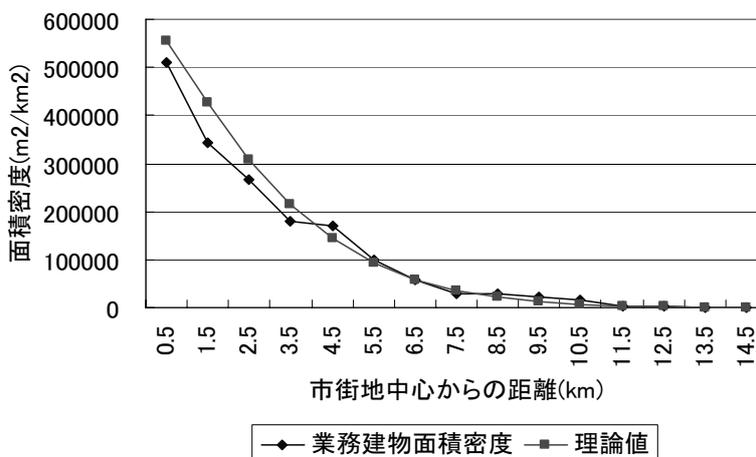


図 16 業務建物面積密度の市街地中心部からの距離の変化

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 3 に結果を示す。表 3 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。

表 3 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 ² /km ²)	区間面積(km ²)	業務建物面積(m ²)	住宅建物面積(m ²)	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

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、業務用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により、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 4 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		

(3) 結論

GIS を用い札幌・宇都宮・那覇の地域需要を推計し、分散型電源の導入評価を行った。またその結果の、建物構成と CO₂ 削減率の関係をパターン化し、気候特性、面積等が異なっても、CGS、HP、DHC など空調機器の最適な導入時の CO₂ 排出削減ポテンシャルは、業容床面積比率に対して共通性のある関係にあることを見出した。さらに、業務用および家庭用建物床面積密度と中心からの距離の関係式を利用することにより、地域別評価を広域に拡大する評価手法を示した。さらに、日本全体の 950 市町村区別 CO₂ 削減ポテンシャルの推計を行った。

この結果、市町村ごとの削減ポテンシャルの分布と日本の各県では 15.9%(秋田県)から 30.4%(東京都)まで削減ポテンシャルが広がる推計を得た。また、日本全体では 18.6%のポテンシャルがあると推計された。

本研究では、データの制約から詳細な分析対象地域が限定されたため、上記の値はなお試算の域を出ない。しかし今後分析対象地域の拡大が果たされた場合にも本研究手順は同様に適用可能であり、それによりさらに精度の高い評価が可能となるものと考えられる。

5. 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。

(1) 科学的意義

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マイ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。

(2) 地球環境政策への貢献

地球環境対策として、民生部門特に住居・業務用建物部門への対策はこれまで基礎となるデータの不足から個別的な対策技術の提案にとどまっており、たとえば CGS や HP などの分散型エネルギーシステムが日本全体にどのように貢献するかについての評価例はきわめてマクロレベルでしかなされていなかった。このため、機器の運転特性や需要の分布・機構依存性などを考慮した評価はなされていない。本研究により、政策の効果はより具体性をもって示されたものと考えられる。

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 CO₂ 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。

6. 引用文献

- 1) 経済産業省：「エネルギー基本計画」，2003
- 2) 菅原大誉， 秋澤淳， 柏木孝夫：「GIS による地域エネルギー計画指標」，第 21 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，199—202，2005
- 3) 辻毅一郎：「環境低負荷型ユーティリティシステムノ創生」，研究成果報告書，2005
- 4) 伊藤純一， 森本慎一郎， 森俊介：「GIS による地域エネルギー需要推計及び CGS, HP, PV 導入評価」，第 22 回エネルギーシステム・経済・環境カンファレンス，387—390，2006
- 5) 小池祥元：「家庭用エネルギー需要に対する CGS の導入と全電化の影響評価」，2004 年度東京理科大学卒業論文，2004
- 6) 伊香賀俊治、近本智行、永瀬修：「集合住宅を対象とした温暖化防止対策とその削減効果（その 1）研究目的と東京各地の冷暖房負荷解析」，エネルギー・資源学会大会学術講演論文集，2001
- 7) 石田武志、森俊介：「都市街区におけるマイクログリッド等の分散エネルギーネットワーク評価モデルの構築」，第 22 回エネルギーシステム・経済・環境カンファレンス，187—190，2006
- 8) 東洋経済新報社：「地域経済総覧」，2006

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)>

なし

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表>

- 1) S. Mori, J. Ito, T. Ishida, and S. Morimoto, "A GIS-based Model for the Assessment of Energy and Environmental Contributions of Distributed Energy Systems", Managing Environmental Knowledge (Klaus Tochtermann and Arno Scharl (eds.)), Proc. of the 20-th International Conference on Informatics for Environmental Protection, Shaker Verlag, Aachen, 107-114, 2006

(2) 口頭発表(学会)

- 1) T. Ishida and S. Mori, "Research of the Decision Model on Capacity and Operation Condition of Energy Systems of the Commercial Building and Urban District Considering Weather Condition of the City", IEW-2005, Kyoto, Japan, 2005
- 2) 石田武志, 森俊介:「都市街区内におけるマイクログリッド等の分散エネルギーネットワーク評価モデルの構築」, 第22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, 187-190、虎ノ門パストラル、2006
- 3) 大嶋 勲, 森本慎一郎, 森俊介:「異業種建物の連携に伴う地域エネルギーシステムの構築とその環境性・経済性評価」, 第22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, 191-194, 虎ノ門パストラル、2006
- 4) 伊藤純一, 森本慎一郎, 森俊介:「GISによる地域エネルギー需要推計及びCGS、HP、PV導入評価」, 第22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, 387-390, 虎ノ門パストラル、2006
- 5) 小池祥元, 石田武志, 森俊介:「GISを用いた日本の地域別エネルギー需要の推計及びCGS・DHC導入効果」, 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, 13-16, 虎ノ門パストラル、2007
- 6) S. Mori, J. Ito, T. Ishida, and S. Morimoto, "A GIS-based Model for the Assessment of Energy and Environmental Contributions of Distributed Energy Systems", Managing Environmental Knowledge (Klaus Tochtermann and Arno Scharl (eds.)), the 20-th International Conference on Informatics for Environmental Protection, Shaker Verlag, Aachen, 107-114, 2006

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし