

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) 都市への対策導入における各主体間の協力・競合関係の総合的評価とシミュレーション

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CO₂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が、これまでその地域性と機器特性に着目した研究はなされてこなかった。そこで、ここではエネルギー機器の具体的な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、CO₂削減の繊細可能量を推計するモデルを開発した。さらに、業務ビルの割合の多い街区から住宅の割合の多い街区の建物の用途、需要家の構成をGISに基づき抽出し、用途・季節・時間大別のエネルギー需要を推計するシステムを構築した。このシステムを用い、業務ビルを含む街区において、コジェネレーションシステムと電気ヒートポンプシステムのCO₂削減ポテンシャルの評価を行った。これにより、業務ビルを含む街区において、コジェネレーションシステムと電気ヒートポンプシステムのCO₂削減ポテンシャルの評価を行った。

成果として、

空調容量・基数、稼働パターン決定モデルを、非線形混合整数計画法により開発し地域分散エネルギーネットワークの最適構成評価ツールの基礎が開発された。このモデルを用い国内の主要8都市における最適空調機器の構成を求め、地域によってCGSとHPの優位性が変化することを示した。

宇都宮市行政区画別業務建物の割合のGISに基づく推計に適用し、CO₂排出削減ポテンシャル推計を行った。この結果、CGS導入時に宇都宮市民生部門のみで焼く年間4万炭素トンの削減ポテンシャルのあることが示された。

[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

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まっている。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。

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)を導入した場合を考えた。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ことが本研究の目的である。

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

本研究における推計フローを図1

に示す。地域における導入効果进行评估するためには、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。

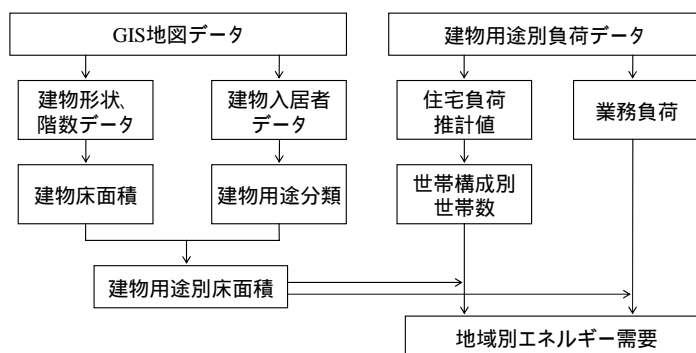


図1 地域エネルギー負荷推計フロー

(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¹⁾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、建物要件や気候特性を考慮したエネルギー負荷推計を行うことができると同時に、地域内の複数の建物のエネルギー負荷も同時に推計することが可能となる。また、給湯負荷は需要を積み上げ計算して求めるだけのデータが整備されてい

ないため、空気調和・衛生工学会の原単位データより推計している²⁾。

(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同様に、人員構成、生活パターンに応じた負荷推計ができることが望ましい。家計調査³⁾による二人以上世帯と単身世帯の5年間(H12～H16)の都市別・月別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。

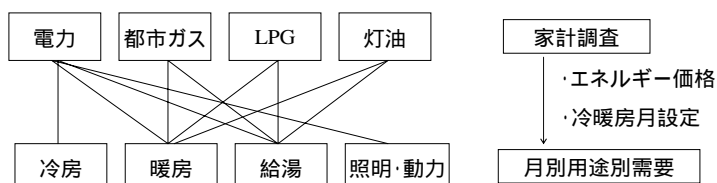


図2 家庭用エネルギー需要の推計フロー

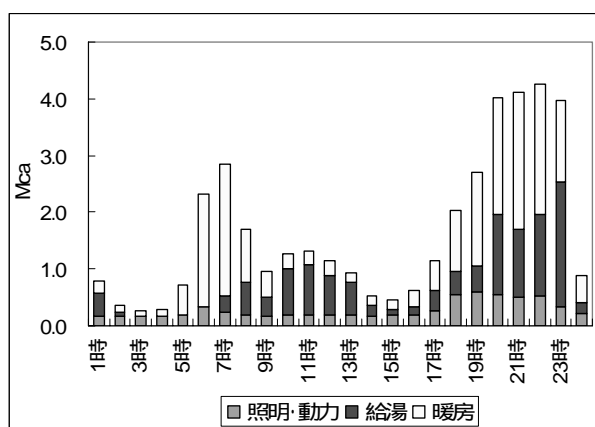


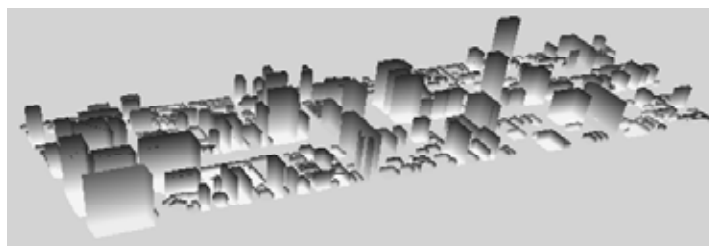
図3 家庭用エネルギー需要世帯構成別推計結果例
(1月 男勤め/女勤め)

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四方位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。



・地区面積 125,700m² ・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)

(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。

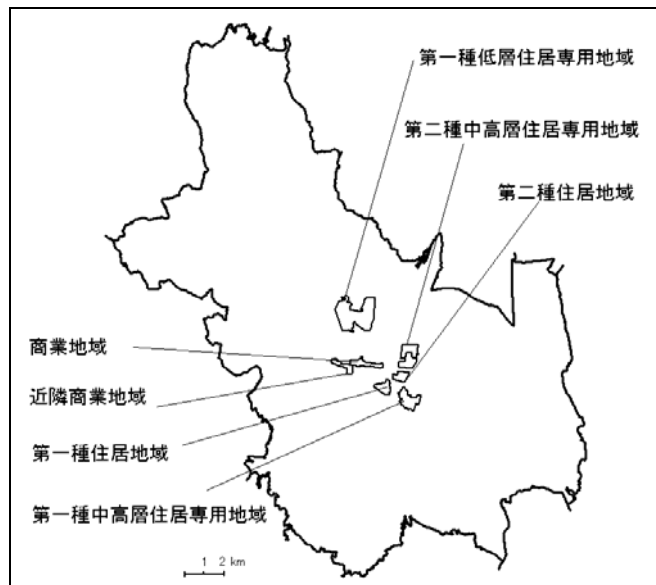


図5 宇都宮市対象7地域の選定

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(m ²)	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

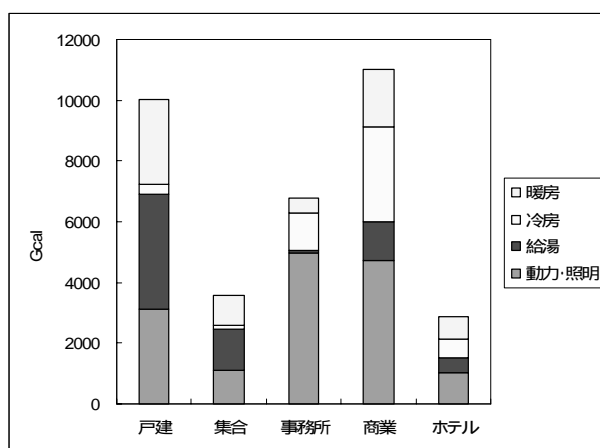


図6 年間用途別需要(近隣商業地域)

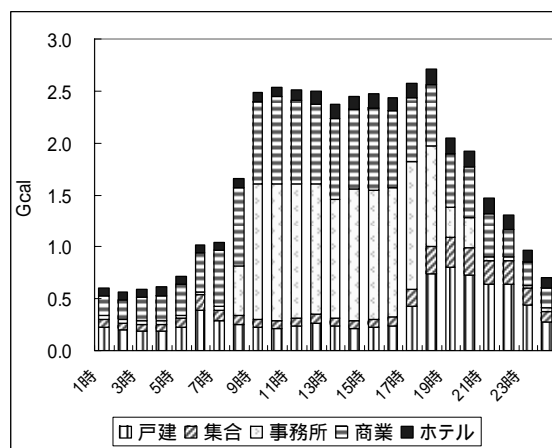


図7 時刻別電力需要(近隣商業地域)

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1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

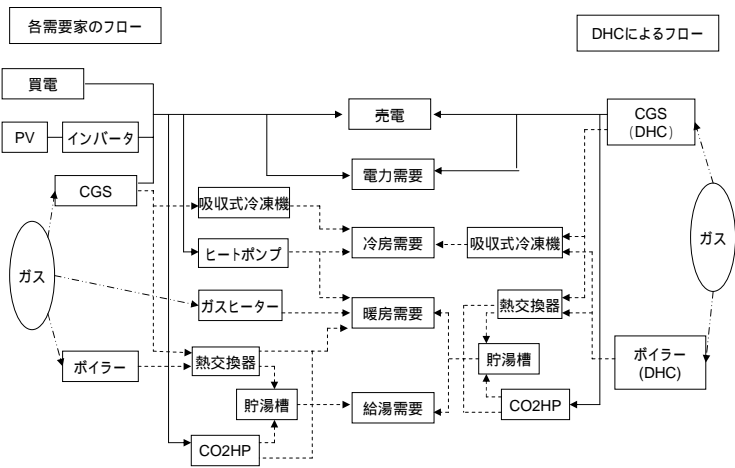


図8 各需要家ごとのエネルギー機器とフロー

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2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8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3)。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	80,000	0.142
	排熱 0.32		
ヒートポンプ	冷房 3.0	27,500	0.142
	暖房 4.0		
吸収式冷凍機	個別用 1.0	10,000	0.142
	DHC用 1.2		
熱交換器	0.9	15,000	0.142
ボイラー	0.8	10,000	0.142
ガス温水器	0.8	7,740	0.142
ガスヒーター	0.1	206,667	0.084
PVモジュール	0.9	163,333	0.142
インバータ他			

9の関係を導入した。

4. 結果・考察

4.1 街区における省エネルギー性の評価

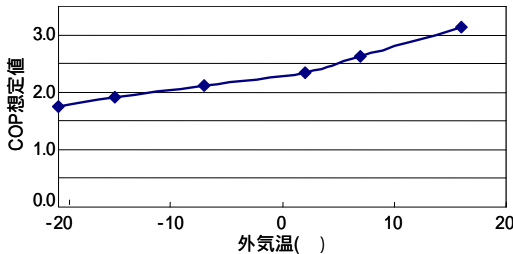


図9 HPの外気温依存特性の設定

宇都宮市を例とした場合の中心部

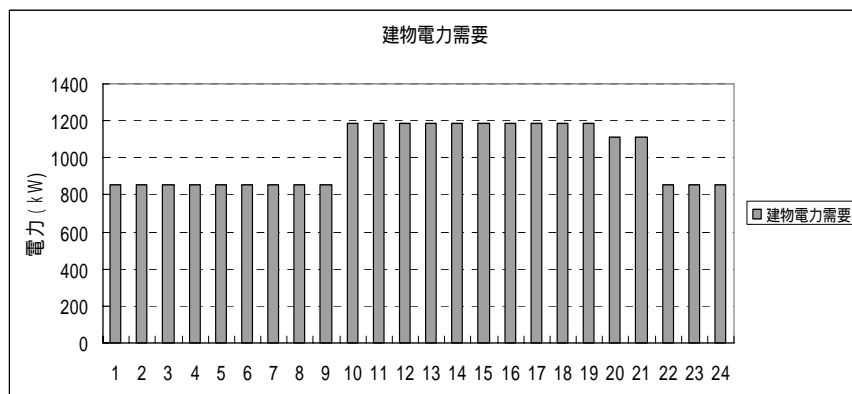
表2 業務建物と住宅のエネルギー融通による街区全体のエネルギー消費量

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		

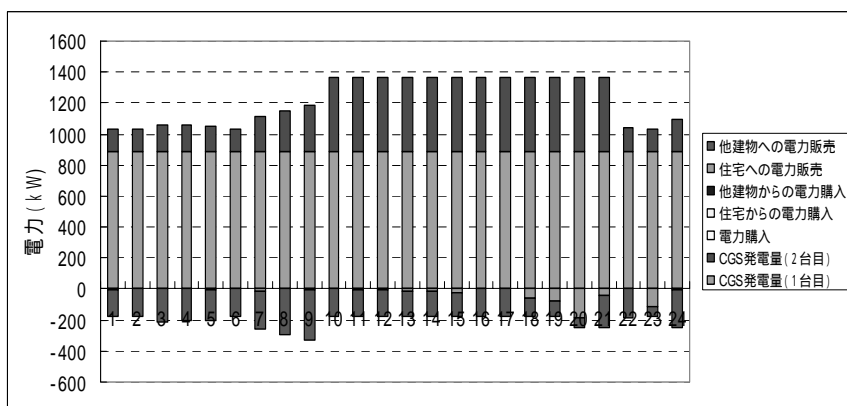
()内の数字は「エネルギー融通なし」と比較した場合の増減率を示す。

表3 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

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8 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4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。

表4 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	-	-	-	-	-	-

図9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削減ポテンシャルがあることが分かる。

図10はcase-PVにおける建物の平均階数とCO₂削減率を示したものである。結果より平均階数の増加とともにCO₂削減率は減少する。これは、平均階数の増加は床面積に対するPV導入可能量の減少による結果と考えられる。

図11はcase-PV、case-CGS、case-CGS(売電あり)、case-DHC、case-DHC(売電あり)における熱電比とCO₂削減率の関係を示したものである。

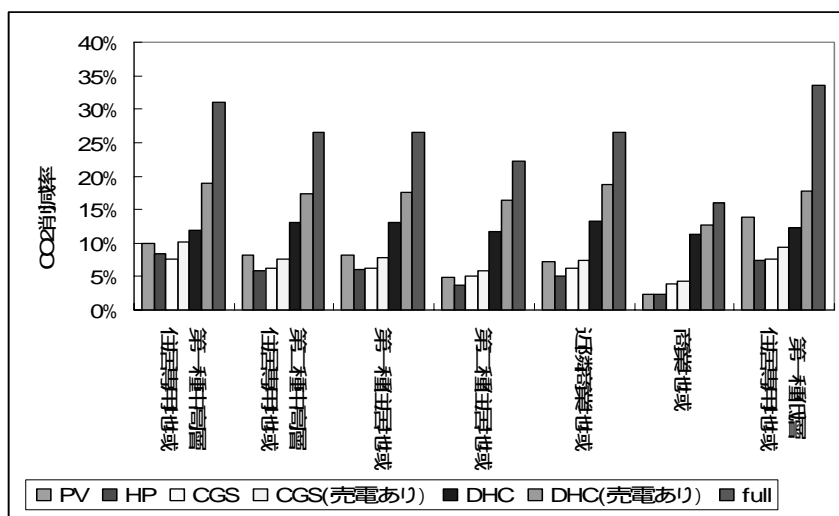


図9 ケース別CO₂削減率

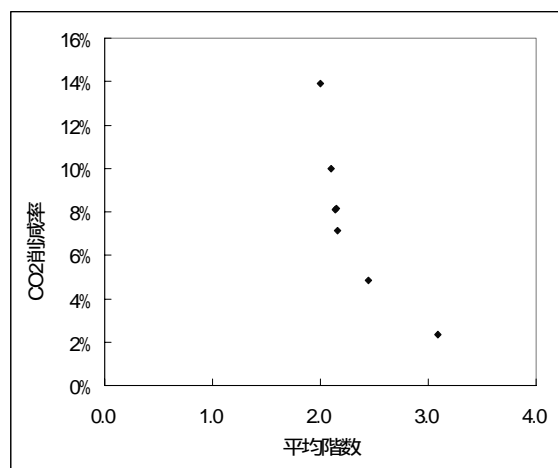


図10 平均階数とCO₂削減率の関係(case-PV)

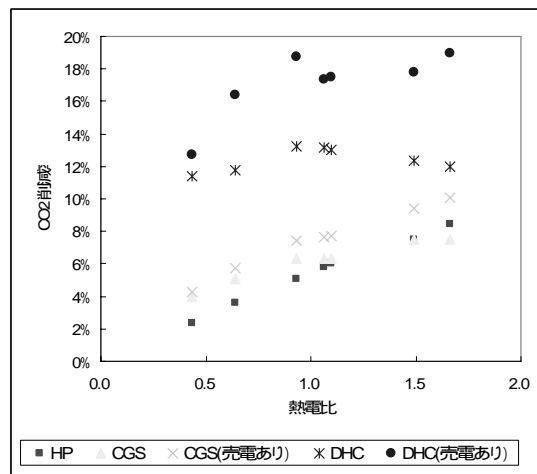


図11 熱電比とCO₂削減率の関係

図11は熱電比とCO₂削減率の相関を示すが、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。

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12に、折れ線近似により導出した業務建物の割合とCO₂削減率の関係を、図13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14に行政区格別CO₂削減率推計結果を示す。

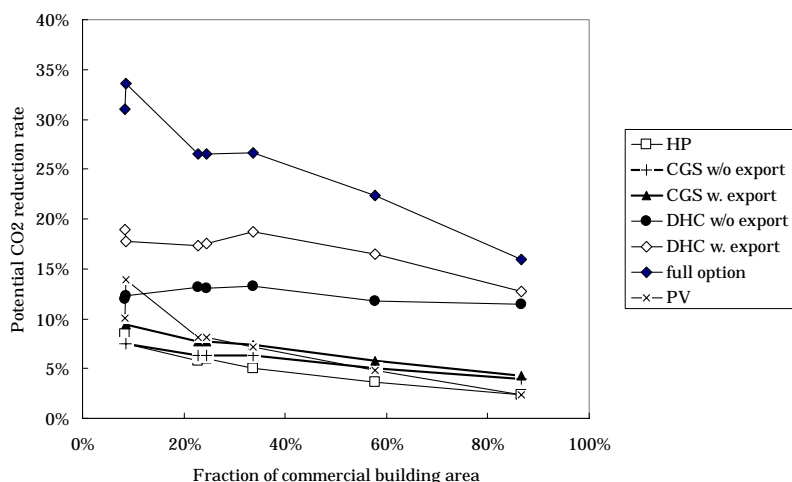


図12 業務建物面積率とCO₂削減率の関係

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 548 k tを基準としている。

図14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5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5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5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。

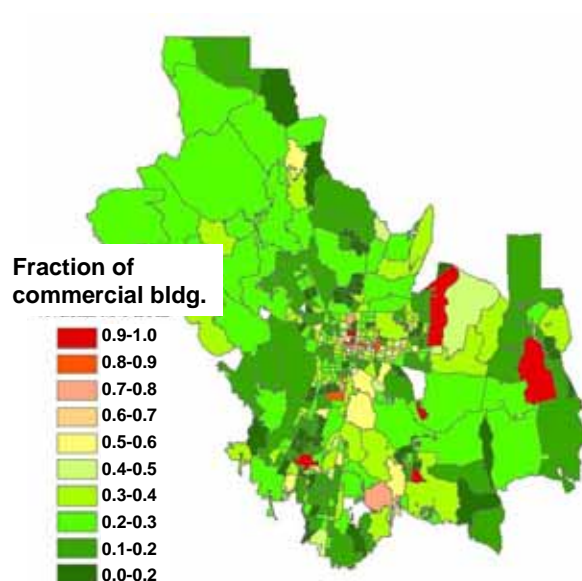


図13 行政区画別業務建物の割合

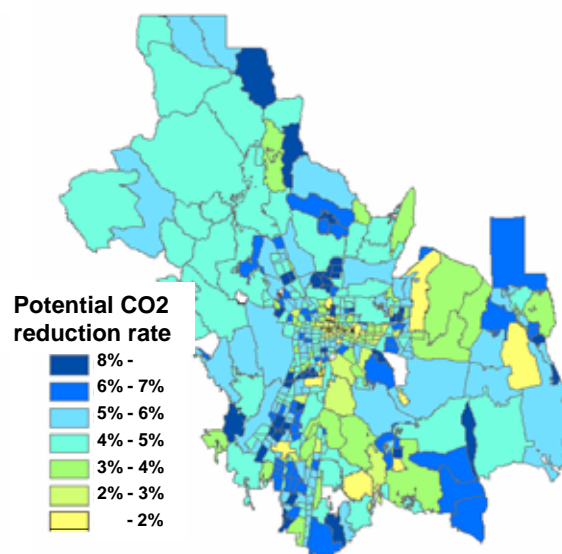


図14 行政区画別CO₂削減率(HP)

表5 宇都宮市全域における平均CO₂削減率

CO ₂ 削減率	PV	HP	CGS	CGS (売電あり)	DHC	DHC (売電あり)	フルオプション
CO ₂ 最小化-a	13.73%	10.46%	11.00%	12.32%	16.99%	21.49%	31.69%
CO ₂ 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ョンケースでは、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. 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。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、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。

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。

本研究の成果は、単に宇都宮市に限定されるものではなく、GISを用いれば他の都市にも直ちに適用可能であり、これを用いることで日本全体に広がるより広域の評価が可能となることを示唆するものである。

6．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

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) 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) 石田武志・森俊介:「地域の気候特性を考慮した業務建物における空調機器の容量・稼働条件決定モデルに関する研究」, 電学会論B vol.125 No.10 pp1522-1529、2005

(2) 口頭発表(学会)

Takeshi Ishida and Shunsuke 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, July 6, 2005, Palulu Plaza, Kyoto, Japan

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、PP.187/190、虎ノ門パストラル、2006年1月26日

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、PP.191/194、虎ノ門パストラル、2006年1月26日

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、PP.387/390、虎ノ門パストラル、2006年1月27日

(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。