

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・競合関係の総合的な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]

地球環境問題においては、国家、企業、家計など様々な主体が環境汚染者であり、同時に影響を受ける被害者でもある。その関わり方は一様ではなく、また世代間の競合も存在する。すなわち、効果的な対策を論じるためには、複数主体の存在を前提とした上での行動評価と対策評価をおく必要がある。本研究は、都市を対象としたエネルギー需給システムにおいて、多主体が存在するCGSおよび地域空調システム（DHC）の導入により、地域二酸化炭素排出削減ポテンシャルを評価するシステム構築を行うことを目指す。平成16年度は、大きく分けて以下の2点に関する研究を行った。

その1は、各主体の行動を評価するためのモデル開発である。都市の商業用ビルおよび住宅を対象として、用途別エネルギー需要の推計を行い、現実のエネルギー機器の特性を考慮した上での最適な行動が導出できるモデル開発を行った。これには、非線形混合整数計画法を用いた最適化モデルを必要とした。

その2は、多主体間の行動評価の統合ツールの開発である。都市エネルギーシステムには建築、都市計画、交通、電力など複数分野の主体が参加する。そのため、複数のモデルの統合的な解析が必要となる局面が存在する。そこで、本研究では特に分散最適化を目指すツール開発を行った。

これらの研究は、すでに日本のいくつかの地域での試算に用いられた。日本の各都市の具体的な評価に適用するのは、来年度以降の課題である。

[キーワード] 二酸化炭素、機器特性、分散最適化、非線形混合整数計画モデル、多主体

1．はじめに

都市の炭素排出削減技術評価を行うには、技術的削減ポテンシャル、経済性を含む導入ポテンシャル、の2側面からの検討が必要である。本研究では、都市エネルギーシステムにおける炭素排出削減策を、この、の2つの角度から検討を行う。さらに、近年のコジェネレーションなど分散型電源が導入される場合、余剰電力や余剰熱の託送利用というネットワークを考慮する場合には、主体間の協調と競合を念頭に置かねばならない。すなわちA.個別の参加主体に関する削減ポテンシャル、B.多主体が相互依存しつつ行動する場合の削減ポテンシャル、という[個]と[集合]で異なるアプローチが必要である。後者は、特に都市部業務用建物において大きなポテンシャルを持つと予想されている。例えば、店舗、オフィス、ホテル、病院が余剰エネルギーを相互利用することの効果は大きいとされている。しかしながら、その評価の基本となる熱需要の推計や機器の特性は、従来の評価ツールでは十分に反映されてきたとは言えない。さらに、複数主体の

相互依存行動の表現に関しては、従来マルチエージェント型のモデルが報告例が多いが、これらは個々の主体のエネルギーモデルが単純化された記述にとどまっており、現実の行動を十分に反映したものとは言えない。特に、従来のマルチエージェントツールでは、地域全体としてのCO2排出量制約や資源制約が加わった場合の均衡点などは扱うことができない問題があった。

本研究では、前者、業務用ビル評価のより実際を反映した評価ツール開発と、多主体の存在する状況を全体最適と併せて評価するためのマルチエージェントと分散最適を統合したシステム開発を行う。

2．研究目的

まず、都市のエネルギー需給主体の主役である業務用ビルに関し、エネルギー負荷に関して、気候特性や建物概況をふまえて推計する簡易モデルを構築するとともに、この簡易負荷モデルを、システムの部分負荷や経済性の制約を考慮したC G S及びH Pの最適導入容量・稼動条件を決定するモデルと一体化した形で数理計画法により構築を行うことを目的とする。

これにより国内各都市の気候データに基づいたエネルギー負荷推計と、外気温特性を踏まえた空調システムの最適容量・稼動条件の導出が一体化したモデルで可能となる。さらに業務用途構成比等を変数にすることにより、ある空調システム容量に対する最適な業務用途構成比の導出等も可能となる。本研究では、現実的な機器特性を反映するため、非線形混合整数計画法(MINNLN)によりモデル化を行った。

次いで、多主体が協調・競合しつつ行動する場合の表現ツールの開発を行う。従来は、完全情報をもとに最適化を行う集中最適化モデル評価またはマルチエージェントツールが用いられてきた。しかし、前者にはデータの集中管理や改訂の難しさ、個々の主体の行動が明示されないなどの問題点がある。後者には、基本的にはエージェントは開発者が設定したルールに基づいて行動する。そのため、例えばエージェントの全体に対して30%のCO2排出制限を加えた場合、どの主体がどのように負担することになるかといったシミュレーションは行えないといった問題がある。そこで両者の中間的な分散最適化システムの開発を行うことを目的とする。

3．研究方法

3.1 都市部民生用建物の最適エネルギー機器導入・運用評価ツールの開発

検討対象として図2に示すようなH PとC G S等の空調熱源システムの容量・稼動条件を決定するモデルを考え、C G Sの補助システムとしては、ガス冷温水器+ボイラーを想定した。

(1) 空調システムモデルの定式化 モデル化された空調システムの各構成要素について、エネルギーの制約、収支を以下のように定式化した。なお、式の詳細は、文献(1)、(2)に示す。また、空調機器のフローを図1のように設定した。

(定式化の構成)

- ・ 熱・電力需要の制約
- ・ 各構成機器の電力、熱のバランス式

- ・部分負荷効率の定式化
- ・CGS運転の稼働・停止の制御式
- ・経済性制約式
- ・回収年 = CGS初期設備費増分 / (従来システム運転コスト - CGS運転コスト)
- ・単純回収年 X 年
- ・目的関数 : 1次エネルギー最小化

このように、業務用ビルの各行動主体は、経済性を考慮した上でエネルギー投入を最小化しようとするという行動を行うものとしている。

次に、エネルギー機器の定式化を述べる。現在民生部門の熱需要は、主に空調需要、給湯需要、厨房需要からなるが、特に前2者がほとんどである。現在、空調・給湯用機器としては、ガスを燃料として排熱を有効利用するコジェネレーション(CGS)と、近年性能向上が著しいヒートポンプ(HP)が代表的である。しかし、その動作原理から前者は稼働率に依存して、後者は外気温と稼働率の双方に依存して効率が変化する。負荷率がある程度以下になると、機械を停止させることが通常である。これは、HPの場合図2のような効率変化(HPでは成績係数COP)が発生することを示す。このような家計が含まれる場合、通常の数理計画法では適用できず、[0,1]2値変数が必要となる。

具体的には、 r を負荷率、 c を効率として

$$\delta = 0 \text{ or } 1 \text{ (binary)}$$

$$r \leq \delta \quad \text{and} \quad r \geq r_0 \delta \quad (1)$$

$$c = c_{\min} + \frac{c_{\max} - c_{\min}}{1 - r_0} (r - r_0)$$

となる。機器出力は設備容量に負荷率を乗じたものとなるので、設備容量、機器出漁をとともに変数とする場合は、評価には非線形混合整数計画法が必要となる。

(2) 業務建物の熱負荷簡易推計

建築学会、空調学会等では、建物の実測データをもとに空調熱需要原単位を与えており、既存の評価ではそのようなデータを基礎として評価することが多い。しかし、日本の気候は地域差が大きいため、本研究プロジェクトのように日本各地の削減ポテンシャル評価のためには、建物の熱負荷原単位の簡易推計システムが必要となる。本研究では、図3のフローに基づき、気候条件と建物および建物利用条件を与えることで熱負荷が簡易推計できるツールを構築した。

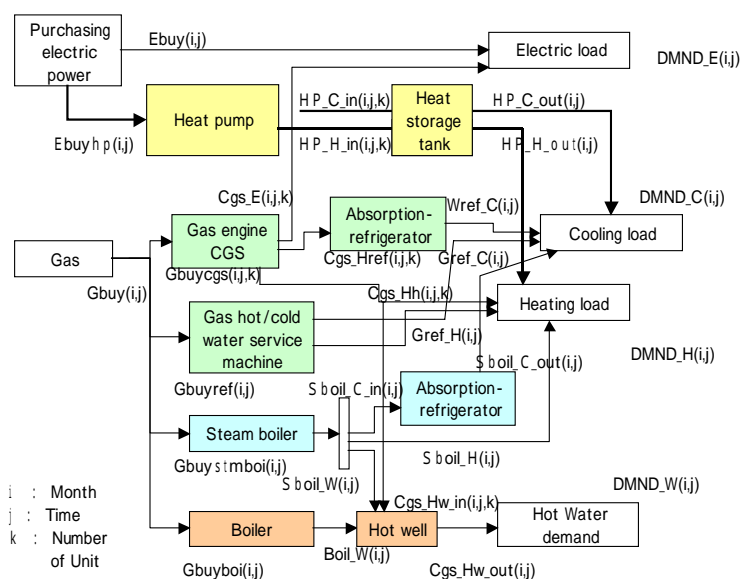


図1 業務用建物の空調機器エネルギーフローの設定

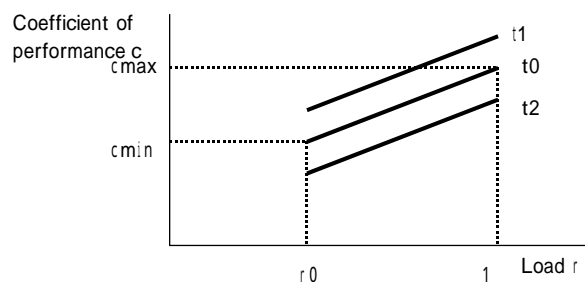


図2.ヒートポンプの部分負荷特性及び外気温特性

この簡易推計ツールは、業務用建物に関する既存の調査データベースELPAC⁽³⁾の分布のほぼ中央値を再現することが確認されている。

異常の熱負荷推計ツールおよび機器特性定式化にアメダス月別代表日24時間気候データを用いることで、特定用途の業務用ビルの最適空調機器設備導入及び運用計画を地域別に求めることが可能となる。

(3) 家庭用エネルギーシステム評価

家庭用エネルギー需給評価に関しては、建築学会が提示した標準戸建住宅に関する熱負荷パラメータを用い、これに居住者の行動とSMASHなどエネルギー負荷計算システムを適用

することで熱需要及び電力需要の推計が可能となる。ただし、居住者の行動や保有する家電機器に関しては利用者が設定する必要がある。本研究では、NHK生活時間調査、家計調査、建物平均延べ床面積、入浴時間や月平均入浴回数、水温等から主要エネルギー利用機器と平均稼働時間を求め、地域別の家庭用エネルギー

用途別需要が推計することとした。表1には、一例として季節別使用水温・使用水量のデータを示す。また、図4には、冬季・関東・借家・4人世帯・専業主婦家庭における家庭用エネルギー需要の推計結果を示す。このようにして積み上げたエネルギー需要データに最適なエネルギー危機導入・運用モデルを適用する手順は、基本的に業務用ビルの場合と同様である。

ただし、戸建住宅の場合、小型吸収式冷凍機が市販されていない事情を勘案し、CGS排熱は暖房と給湯のみに使えるものとした。

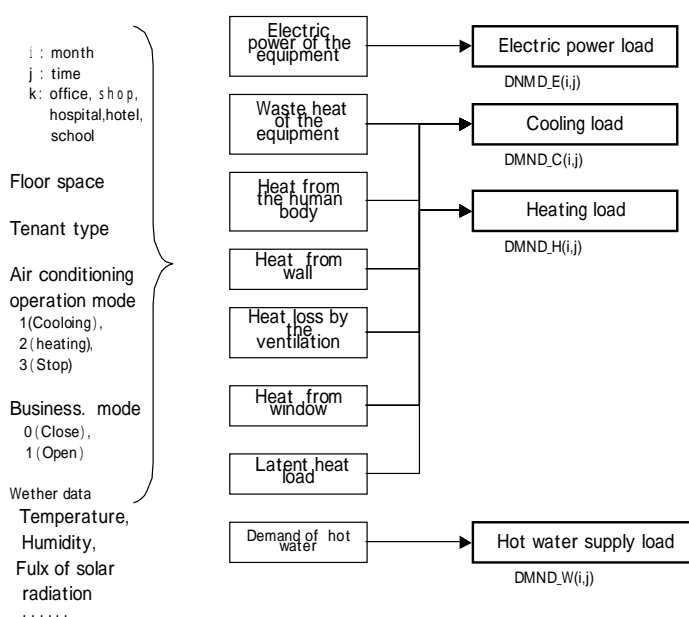


図3 建物エネルギー負荷の推計の構成

表1 季節別使用水温・使用水

	冬期		ベース期		夏期	
	使用温度 (℃)	使用量 (l/回)	使用温度 (℃)	使用量 (l/回)	使用温度 (℃)	使用量 (l/回)
洗顔	38.0	13.9	-	12.9	-	10.5
入浴	39.0	15.2	38.0	16.5	38.0	18.6
シャワー	39.0	21.2	38.0	25.6	38.0	36.0
炊事	39.0	14.6	38.0	12.7	40.0	12.0
湯はり	44.0	200.0	40.0	200.0	41.5	200.0

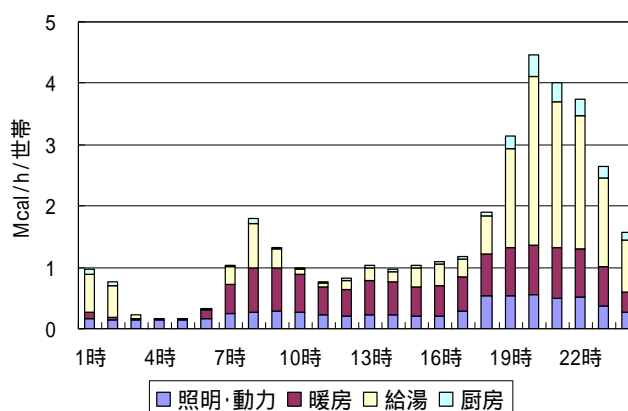


図4 4人世帯における日負荷曲線
(男勤め・家庭婦人・子供：冬期：借家：関東)

3.2 多主体間自律分散協調最適化システムの開発

地域におけるエネルギーシステムは、従来は一般需要家、電気事業者およびガス業者の2供給主体、これに灯油等の燃料販売を考慮すれば十分であり、またエネルギー種と使用目的はほぼ自明な関係があった。これに対し、近年ではCGSやごみ発電、さらに独立電気事業者(IPP)などの電気供給者が電力供給グリッド内に存在しうる。さらに、地域開発では余剰熱の配送も現存する。このような多様な主体が強調・競合して市場に参加する場合、どのような挙動があり、またどのような価格での供給形態となるかは、エネルギー機器の現実的な導入ポテンシャル評価の上できわめて重要である。従来、多主体の相互依存光堂の解析には、インターネットの発達に伴ってマルチエージェントモデルの適用がしばしばなされてきたが(4)(5)、地域全体のCO2排出制約の影響等、全体的な制約を満たす場合を扱うことはできなかった。また、完全情報・完全競争に基づく全体最適化モデルは現実の取引が部分情報しか公開されない状況や、さらにモデルそのものの改訂が困難となるという問題を抱えている。そこで、ここでは計算機ネットワークの進歩を利用し、1CPUが主体を表し、各主体が限定された情報のみを公開しつつ、さらに全体としての限定公開情報を管理するサーバが都市のCO2排出制約や化石燃料供給制約等を満たすよう価格調整あるいは供給量調整を行うと言う、自律分散型最適化システムの構築を行うことで、この問題を広く扱う計算機システムを開発することとした。

具体的には、通信にTCPプロトコル、ポート8000を用い、図5にあるようCPU間で公開情報、例えば多主体地域エネルギーシステムでは市場価格と各主体の取引量などをサーバを通じ交換することとする。

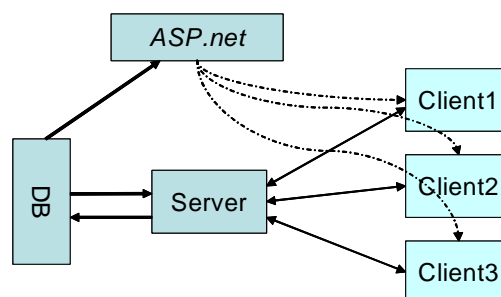


図5 GARUDA システム

通信を開発言語には".NET framework"のVisual Basic.NETを用いた。本システムは、GARUDA(GAMs Remote Unification and Distribute Analysis)と名づけられている。GARUDAシステムでは制約された情報を効率的に管理し、解析推移を保存するためにデータベースを導入する。そのため3層クライアント/サーバシステムを参考とする構造とした。

、では解析結果や状態情報の送受信を行い、、ではそれらの情報をデータベースに書込み・読み込みを行う。これらのデータベースの情報を抽出し、でwebページに公開することで、各クライアントはで閲覧することができ、それぞれの意思決定の判断材料として利用することができる。図6にはサーバのフローチャートを示す。このシステムの各CPUに、前述の業務用ビル、家庭、電気事業者、ガス事業者等の各モデルを搭載し、サーバにCO2排出制約をかければ、協調と競合のプロセスのシミュレーションが可能となる。

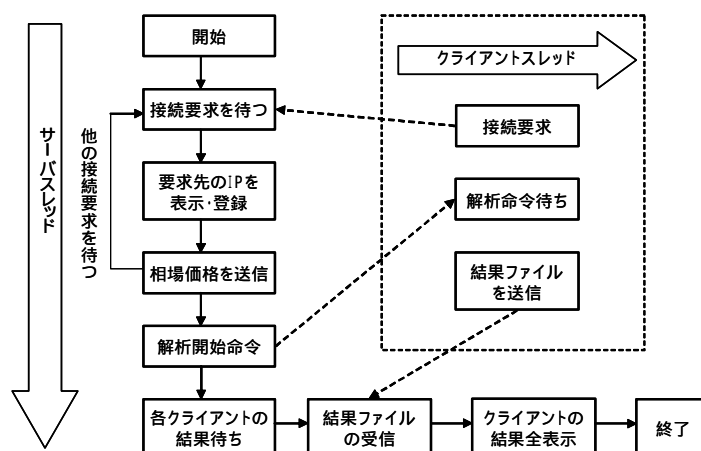


図6 サーバの動作フローチャート

4. 結果・考察

(1) 業務用ビルの評価システム結果と考察

3に述べたエネルギー需要推計システム、エネルギー機器運用定式化を用いることで、評価システムが構築できる。主な結果を以下に示す。まず空調機器の条件を同じにし、各都市における気候特性に基づく都市別のエネルギー負荷データを推計し、C G S及びH Pを導入した場合のそれぞれの最適容量を求めた場合の結果を表2に、都市別のエネルギー消費量(1次エネルギー)を図7に示す。この結果より、東京と鹿児島ではC G Sに比べH Pのほうが1次エネルギーは小さくなっており、その他の都市ではC G Sのほうが1次エネルギーが小さくなった。特に札幌や青森などの札幌など寒冷地では、H PとC G Sによるエネルギー消費量の差が大きくなることがわかる。これはH Pの外気温特性により、H Pは寒冷地ほど実稼動時のC O Pが低くなることによる。実際、図8に都市別のH Pの年間平均C O Pを指数にしたものを示すが、寒冷地の都市ほど平均実C O Pが低いことがわかる。また気候特性がほぼ同じ東京、大阪、広島、廣島の3都市においてH PとC G Sの優位性が変化するのは、東京に比べ大阪、広島の評価時の効率がH Pについては若干悪くなり、C G S効率が若干高くなることによるものであり、気候データの相違によるエネルギー負荷データの相違に起因するものと考えられる。

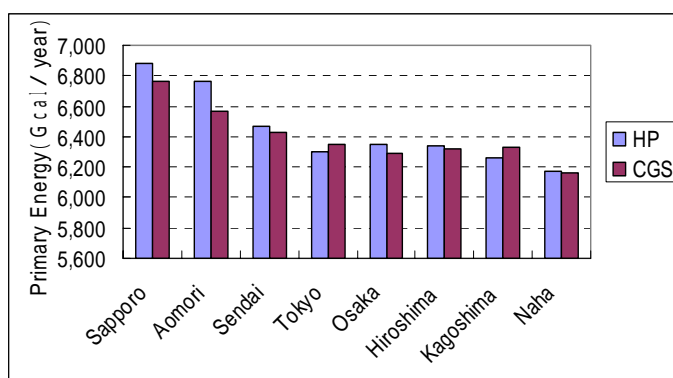


図7 空調エネルギー消費量の都市別評価結果

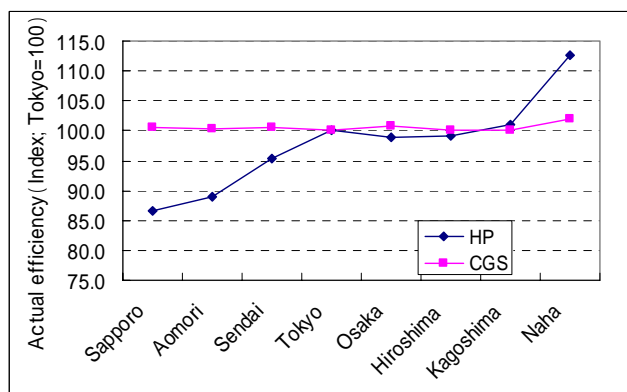


図8 H P及びC G Sの年間実効率(指標)

また、東京の気象データに基づいたエネルギー負荷推計データを使用した場合のC G SとH Pの最適容量を求めた。H PについてはC O Pを変化させていった場合の最適容量を計算した。結果を表2に示す。C O Pが低い場合はC G Sのほうが一次エネルギー投入は少ないが、C O Pが冷房 5.0 - 4.5, 暖房 5.0 - 4.5 になるとH Pのほうが一次エネルギーが小さくなる。これより東京における気象条件下ではH Pの C O P が

冷房暖房共に 5.0 程度より大きくなるとH Pのほうが有利になっていくことがわかる。

表2. H PのC O Pを変化させた場合の最適空調容量 HP(Tokyo)

Heat system	COP of Heat pump	Capacity of system (kW) (Mcal/h)		Primary energy (Gcal/Year)	CO2 emission (t/year)	Investment-return years
C G S	-	No.1	342	6,348	1,174 (1,433)	8.08
		No.2	0			
H P	C: 5.0 - 4.5	No.1	65	6,300	1,025 (1,855)	3.89
	H: 5.0 - 4.5	No.2	42			
H P	C: 4.5 - 4.0	No.1	82	6,475	1,070 (1,854)	5.13
	H: 4.5 - 4.0	No.2	39			
H P	C: 4.0 - 3.5	No.1	126	6,555	1,083 (1,879)	7.75
	H: 4.0 - 3.5	No.2	81			

Numerical value in the parenthesis used emission factor of the average of thermal power plant

(2) 家庭用エネルギー需要システムの評価

図9に家庭用エネルギー需要の推計結果の一例を示す。このように家族構成、ライフスタイルによる差が得られている。図10は東京、家庭婦人世帯においてCGSが導入された場合の、負荷率の季節・時間大別変化である。このように、混合整数計画法を利用した効果が明らかとなっている。図11には、部分負荷特性および会議音特性による機器効率の変化を考慮することによる総コストの上昇率を地域別に示す。この図から、定格効率に基づいた評価と機器の特性を考慮した評価の差はもまた、地域によって大きく変化することが分かる。

本システムにより、民生用エネルギー需給システムを地域・ライフスタイル別に評価することが可能となったと言える。

(3) 多主体間自律分散協調最適化システムの開発

本システムは、ここでは4台のPC上で作動実験を行った。写真1には、一例として、各PC上で数理計画ソフトGAMSがサーバからの信号により自動起動している状況が示されている。本システムを用い、モデル全体にCO₂排出制約を加える場合、電力市場では需要家

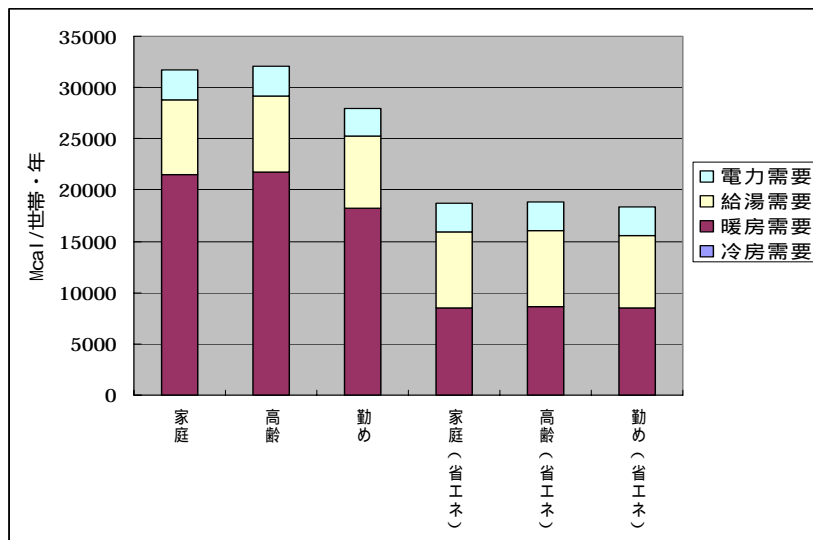


図9 用途別消費エネルギー(札幌)

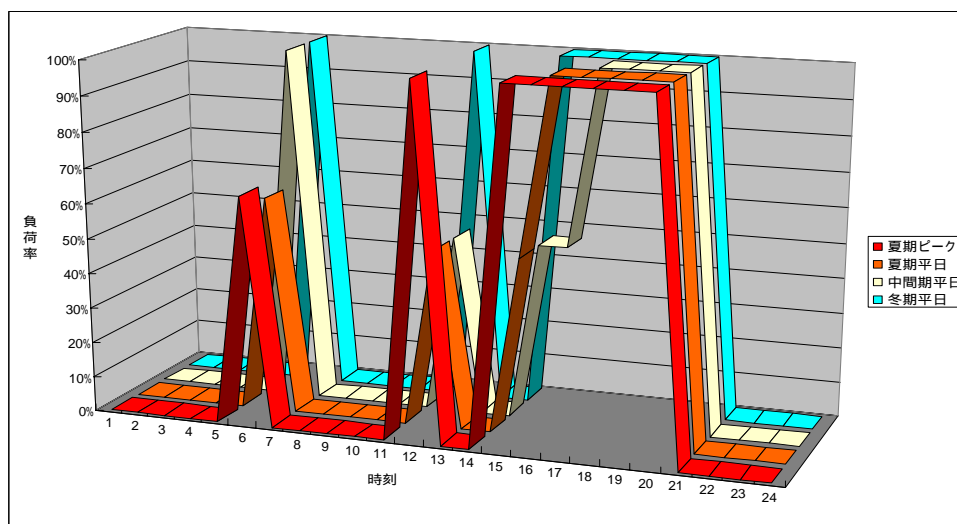


図10 家庭用CGS(ガスエンジンの場合)の負荷率の季節時間帯別変化例

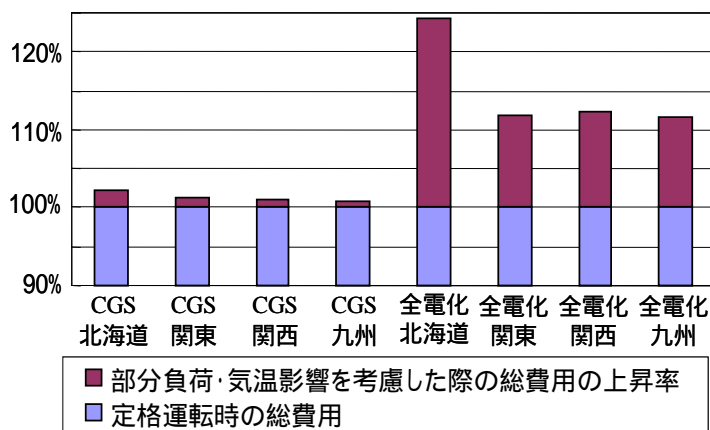


図11 機器特性による総費用増加率の地域比較

の消費電力に対する CO₂ 排出量は電気事業者の送電量に対する CO₂ 排出量と同じと考えていいので、電気事業者 (=サーバ) に対して CO₂ 排出制約を加えればよい。ここでは、図 11 に示すよう、4 種類の需要家(戸建て木造住宅、集合住宅、オフィスビル、ホテル)と、電気およびガス事業者がそれぞれ取引を行いつつ、費用最小化を目指すシミュレーションを行った。図 12 では、サーバがこの事業者を兼ねている。

その後、電気事業者に約 3~40% (=400 万 t) の CO₂ 排出制約を加え、同時に電力料金を 18~23 円/kWh の間で変化させた。その結果を図 13 に示す。これは、

- ・CO₂ 排出制限に対して電気事業者が炭素税を付加した場合の電力料金上昇を想定したことになる

- ・それに対して需要家は各々の意思で電力購入するため電気事業者の意思のみでの価格上昇は避けられることになる

という事を示す。このような方法で山登り探索を行う事で、モデル全体の均衡解を探し出せることがわかる。

電力量が減少しているのは、暖房用にガス利用へ移行しているからであるが、データベースへ登録すると同時に各クライアントで適宜解析が行われたことがわかる。

以上のように、本研究課題では、より現実的な機器特性を反映した各主体の行動のモデル開発、複数主体の強調と競合の自律分散最適化システム開発、の 2 点を達成した。

5. 本研究により得られた成果

本研究の目的は、都市エネルギーシステムにおける複数主体の協調と競合を解析するシステムの開発を、現実のエネルギー機器や主体の行動の特性に即して表現することで、炭素削減策の具体的な政策評価に結びつけることにあった。今回、業務用ビルおよび家庭用の熱負荷推計とエネルギー機器の最適導入・運用評価を、機器の部分負荷特性や温度依存特性に合わせて非線形混合整数計画法を用いてモデル化し、従来の方法よりも詳細な評価

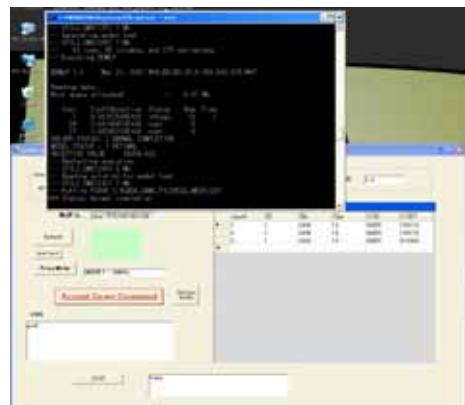


写真 1 GAMS が自動起動している様子

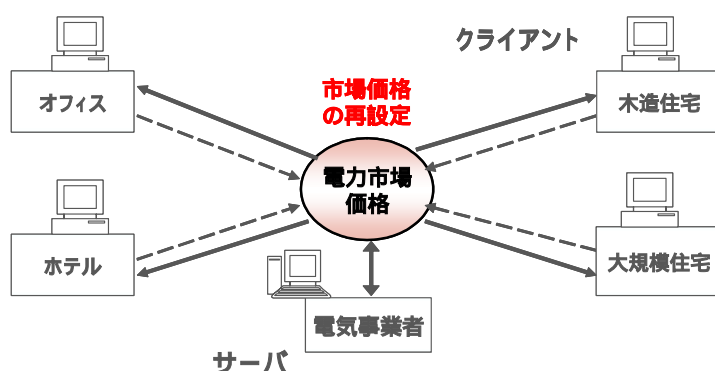


図 12 GARUDA システムの解析の流れ

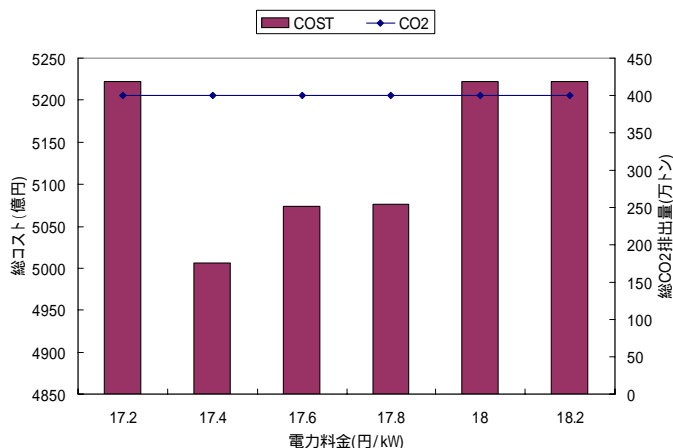


図 13 CO₂ 排出制約を加えた時の電気料金の変化に対するモデル全体の総コスト・CO₂ 排出量の推移

を行えることを確認できた。また、複数主体の協調と競合を評価するため、限定された公開情報を交換しつつ分散最適を行うシステム開発を行った。成果として、マルチエージェントと集中最適化の中間的な性質を持つシステム開発が行えた。このシステムは、次年度以降の地域開発計画とCO2削減ポテンシャル評価に利用できるものと考えられる。

6．引用文献

- (1) 石田，森他：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、電気学会B部門論文誌、2005
- (2) 大嶋，森他：業務用ビルへの部分負荷運転を考慮したCGS運転時の環境性・経済性の評価，資源・エネルギー学会第23回研究発表会講演論文集，105-108(2004)
- (3) (社)建築設備技術者協会；ELPAC 2000，(2000)．
- (4) 下村貴裕、最所祐一、藤井康正、山地憲治：「マルチエージェントモデルを用いた電力市場における価格形成過程の分析」電気学会論文誌B Vol.124，No.2，2004
- (5) 永田武、山崎勇司、歌谷昌弘、佐々木博司、藤田秀紀：「マルチエージェントを用いた電力自由化市場における地域間電力」電気学会論文誌C Vol.124，No.11，2004

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)>

Kiyoshi Dowaki and Shunsuke Mori, " Biomass energy used in a sawmill ", Applied Energy, Vol.80, PP.327-339, 2005

石田 武志、堂脇 清志、森 俊介、「経済性制約下における業務建物の最適CGS導入決定支援システムの構築」、電気学会論文誌B、Vol.125，No.4，PP.373/380、2005年4月

<その他誌上発表(査読なし)>

堂脇清志、浅井貴康、森 俊介、「地域におけるバイオマスガス化CGSの技術と導入評価」、電気学会メタボリズム社会・環境システム研究会資料、MES-04-6、2004年3月15日

森 俊介、「総論：再資源化ネットワーク技術の動向 - 調査を終えて - 」、電気学会研究会資料、電気学会メタボリズム社会・環境システム研究会、MES-04-7、PP.1-4、早稲田大学現代政治研究所、2004年6月11日

伊藤陽介、森 俊介、堂脇清志、「関東地方における家電リサイクルのモデル化」、電気学会研究会資料、電気学会メタボリズム社会・環境システム研究会、MES-04-10、PP.15-20、早稲田大学現代政治研究所、2004年6月11日

(2) 口頭発表(学会)

大嶋 勲、堂脇清志、森 俊介、「業務用ビルへの部分負荷運転を考慮したCGS運転時の環境

性・経済性評価」、第23回エネルギー・資源学会研究発表会、PP.105-108、大阪国際会議場、2004年6月11日

石田武志、堂脇清志、森 俊介、「経済制約下における業務建物の最適省エネルギー対策導入手法の検討」、第23回エネルギー・資源学会研究発表会、PP.317-320、大阪国際会議場、2004年6月11日

石田武志、堂脇清志、森 俊介、「分散エネルギーの高度制御による省エネルギー実現の条件の検討」、電気学会C部門大会、宇都宮大学、2004年9月2日

森谷宣夫、森 俊介、森本慎一郎、「ライフスタイルを考慮した地域別エネルギー需要の推計およびCGS導入効果」、第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、虎ノ門パストラル、2005年1月26日

小長井晋介、森 俊介、森本慎一郎、「解体木材を利用したバイオマスガス化システムのプロセス評価と導入可能性」、第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、虎ノ門パストラル、2005年1月27日

石田武志、森 俊介「経済制約下における業務用建物の最適空調機器容量決定手法の検討」、第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、虎ノ門パストラル、2005年1月27日

新川哲也、森 俊介、森本慎一郎、「リモーティング技術を応用したGAMS統合システムの開発と情報制約環境下における自律分散協調システムの提案」、第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、虎ノ門パストラル、2005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。