

コジェネレーションシステムの地域運用による 省エネルギー可能性の評価

佐賀井 重雄, 外岡 豊, 藤井 美文

1. はじめに

都市の省エネルギーは地球環境対策としても強く求められており地域全体のエネルギー需給のあり方を根本的に再検討して、地域的な省エネルギーを実現させるための基礎研究としてコジェネレーションシステムの地域的運用による省エネルギーの可能性を検討した。

電力と熱エネルギーを同時に発生するコジェネレーションシステムは、省エネルギー技術として期待され、最近急速に普及しつつある。このシステムは広域供給ネットワークシステムをとっている電気事業者の系統電力に対し、電力と熱の需要に近いところで発電するので、オンサイト方式の一種であり、また、発電規模が小規模分散するので分散型（電源）システムの一種でもある。コジェネレーションシステムには工業用も含めて様々なものがあるが、ここでは事務所ビル、ホテル、病院等の業務用ビルと住宅の暖冷房給湯用の民生用エネルギー需要に対するコジェネレーションシステムをとりあげる。

電力料金が高価格のわが国において、一方では石油価格が相対的に安くなっており、個別の建物でみた場合のコジェネレーションシステム導入の1つの動機は経済性の追及であるが、筆者らの関心はコジェネレーションシステムを地域全体の省エネルギーに活かすことにある。地球環境問題への関心の高まりの中で都市の省エネルギーの必要性が叫ばれコジェネレーションシステムや未利用エネルギーの活用が最近話題になってきているが、その現状における普及率は地域全体の省エネルギーに寄与する水準には達していない。また発生した電力を系統電力側に供給する「逆潮流」は法的に規制されており、技術として省エネルギーに寄与できる可能性が期待されているものの省エネルギー性

が十分に引き出されていない場合も多く、適用するシステムと運用次第でその効果は大幅に異なってくる。

そこで本稿では、コジェネレーションシステムがその適地に十分普及導入された場合について、システム方式、運用方式の両面から省エネルギー可能性を検討する。そのため、メッシュ別のエネルギー需給データを用いてコジェネレーションを例とした民生用エネルギー需要に対する地域的なエネルギー供給システムの省エネルギー可能性を評価するための基礎的な解析を行なった。コジェネレーションシステムにおいては、年間を通じての毎時の電力と熱需要の負荷変動がその省エネルギー性や設備機器の投資費用を含む総合コストに与える影響が大きく、シミュレーションに際して負荷変動の想定次第で評価が変わってしまうことが問題となる。最近では確率論をとり込んだ評価の試みもなされているが、ここでは最も具体的な導入実現の場と想定される東京都都部の現況におけるエネルギー需要データを用いて実現性の高い建物用途と密度から推定される地域的なエネルギー需要のもとで省エネルギー可能性の評価を行なうこととした。詳細な建物用途、熱需要用途区分にもとづき、忠実に再現されたエネルギー需要データを用いることにより、現実的な省エネルギー可能性を評価することが可能である。

以上の評価を実際に行なうため、地域メッシュデータをもとにそれぞれの地域電力/熱需要特性に対応した、最適な供給システムと、その運用とを求める簡単なモデルを開発した。このモデルでは、地域メッシュごとのエネルギー需要に対して、コジェネによるエネルギー供給をどのように行なうかを省エネルギー可能性最大化問題としてとらえ、熱源システムとその運用をいくつかのパターンの中から選択して決定することも可能である。

2. 地域メッシュエネルギー需要データベース

2.1 地域メッシュエネルギーデータベースの概要

本稿で用いた地域メッシュエネルギー需要データ

さがい しげお (財)電力中央研究所 情報研究所
〒201 狛江市岩戸北2-11-1
とのおか ゆたか (財)計量計画研究所
ふじい よしふみ 文教大学 国際学部

ベースの概要を説明する。

「地域メッシュ」とは、地域に関する種々の情報を表示する単位として用いるため、単位とする地域内をほぼ方形で面積の等しい小地域に細分して設けられた地域単位のことである。また、この区画した地域メッシュごとに各種の統計データを表示したものが「地域メッシュ統計」である[1]。

ここで用いた地域メッシュ区画は経緯度に従って約1 km四方のほぼ同じ面積に区分した標準地域メッシュと呼ばれるものである。本稿で分析の対象とした領域は東京23区部であり、その中に含まれている基準地域メッシュの総数は約600である。

分析に用いたメッシュ別の業務用エネルギーは、次のような手順で推計した[2, 3]。

- 1) メッシュ別建物用途別延べ床面積を求める。
- 2) これに建物用途別・熱用途別・エネルギー種類別・エネルギー需要原単位を与え、エネルギー需要量を推計する。さらに23区部の用途別電力、ガス需要統計で合計調整して、実態に近い水準にする。
- 3) 次にその月別変動パターン（年間計に対する月別%）および時刻別変動パターン（日計に対する時刻別%）により、年間値を配分して平日の月別・時刻別エネルギー消費量を求める。

上述のようにして、年間12ヵ月の典型的な平日を代

表する1日24時間のエネルギー需要量を求めた。またボイラ効率とCOP（成績係数、1 kWの電力の熱量（860 [kcal/h]）でどれだけの能力の熱量 [kcal/h] が得られるかを示す数値、無次元数）の想定から逆算した暖冷房負荷を求めた。

ここでの想定は、コジェネレーションシステムは個々の建物にそれぞれ導入されるのではなく、1 km四方のメッシュ内の建物用途の混在をひとつの複合拠点開発されたビル群のように見なし、ひとつのメッシュにひとつの熱源システムを用意するということである。わが国で実現されている地域冷暖房事業の供給地域として1平方kmはやや大き目であるが、データの制約上止むを得ない。本論の目的は具体的な導入を計画するものではなく、メッシュデータは地域の熱需要の特性を表現できればよいので、分析上の障害はさしたるものではないと考えられる。

2.2 東京都区部のエネルギー需要の特徴

図1(a)は上述の方法で推計した、1988年度のエネルギー需要密度（単位時間当たりの平均エネルギー消費量）分布である。この分布パターンを見ると、東京都区部のほぼ山手線に囲まれた領域にエネルギー需要密度の高い地域メッシュが分布しており、周辺部に行くにしたがって、需要密度が小さくなる構造があるこ

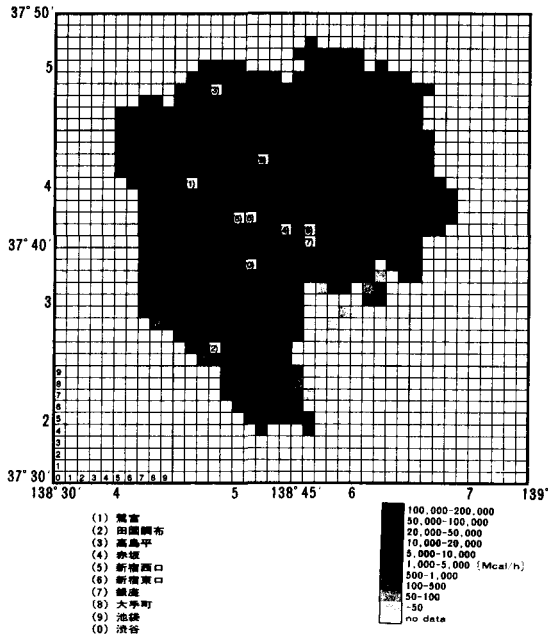


図1(a) 東京都区部のエネルギー需要密度

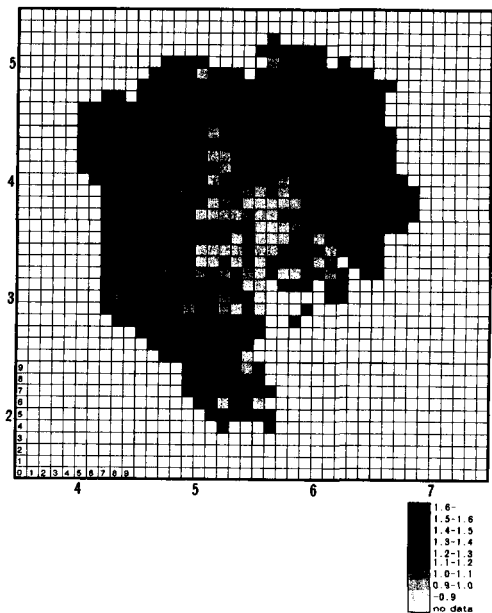


図1(b) 東京都区部の平均熱電比

とが分る。また、特にエネルギー需要密度が高い地域メッシュを地図と比較してみると、そこが新宿や渋谷、池袋、日比谷や丸の内といった繁華街やオフィスの中心地とほぼ一致している。また、以下で考察するコジェネレーションシステム導入検討の重要な指標となる、電力に対する熱需要の比率を示すいわゆる「熱電比」をこれらの対象地域メッシュごとに計測した結果を図1(b)に示す。この図によると、図1(a)でのエネルギー需要密度の高い東京都中心部においては比較的熱電比が低いことがわかる。これは電力需要の大きい事務所ビルの集積を反映しているものと考えられる。

3. 地域エネルギー供給システムモデル

本稿では、地域的なエネルギー供給を行なうことにより、省エネルギーとなる可能性を定量的に評価する問題について考える。

コジェネレーションシステムでは、熱と電力を同時に発生するため、その熱と電力とをできる限り同時に利用できるようにすることが、全体のエネルギー効率を高めるポイントとなる。もちろん、蓄熱設備などを設置する場合にはこの限りではないが、ここでは蓄熱設備の設置は考えないこととする。エネルギー効率的なコジェネレーションシステムを各地域メッシュに導入するためには、次に示すような、2つの問題を考える必要がある。

- 1) 地域メッシュ内のエネルギー需要特性に見あったコジェネレーションシステムの熱源機器の選択と運用とをどのように決定するか。
- 2) ひとつのエネルギー供給設備に関して、エネルギーの利用効率が向上するような供給地域をどのようにして決定するか。

以下、上述の2つの問題に関してモデルを開発して分析を行なった結果について報告を行なう。

3.1 エネルギー供給システムのモデル化

ひとつの地域メッシュ内部のエネルギーの需要と供給との関係を単純化して表現し、その地域メッシュ内の電力と熱エネルギーとを供給するために必要な1次エネルギーの全量を換算するモデルを開発した。このモデルでは、前述の1)の問題を解くため、専用熱源と系統電力とによる従来型のエネルギー供給を行なう場合と、地域内にコジェネレーション設備を導入して、電力と熱とを併給する場合とのそれぞれの所要1次エネルギー量を比較し、省エネルギー率を評価すること

が可能である。

従来型の熱供給は、熱は専用熱源により、電力は系統電力を購入することによってまかなわれる。これらの熱負荷、電力負荷を、それぞれのエネルギー供給機器の変換係数から、1次エネルギー換算することが可能である。また、地域にコジェネレーション設備を導入した場合には、以下に示す運用パターンでコジェネレーションシステムにより電力、熱を供給し、電力が不足する時間帯には、系統より電力を、そして、熱が不足する時間帯には専用熱源により熱を供給するものとした。これらも機器のパラメータを用いて、電力・熱供給のための1次エネルギー換算を求めることが可能である。あるメッシュにおける省エネルギー率は次の式によって定義することができる。

$$\begin{aligned} (\text{省エネルギー率}) = & \\ \{ & (\text{従来型の熱供給の1次エネルギー}) \\ & - (\text{コジェネによる熱供給の1次エネルギー}) \} \\ & / (\text{従来型の熱供給の1次エネルギー}) \end{aligned}$$

また、2)の問題に対応するため、複数の地域メッシュのエネルギー需要パターンを合成して、「地域の連結」より広いエネルギー供給区域を設定する状況を模式的に表現することができる機能も付加した。このモデルの概要を図2に示す。

このモデルでは、コジェネレーションシステムの特性を発電効率などのいくつかのパラメータにより表現し、モデル化している。発電機の特性は、投入するエネルギーに比例して発電を行なう線形の近似とした。現実の発電機では、部分負荷運転時には発電効率が低下するなど、必ずしも特性を線形で近似することはできないが、今回は単純化して近似するものとした。このようなコジェネの特性のパラメータの主なものには、発電機の発電効率や総合効率（熱の発生効率を含んだ全体のエネルギー変換効率）などがある。モデルでは地域のエネルギー需要特性に適したコジェネレーションシステムを選択するために4種類のシステムを機器のタイプとして設定した。これらは、

- (1) ガスタービンシステム
- (2) ガスエンジンシステム
- (3) ディーゼルエンジンシステム
- (4) 燃料電池システム

である。

コジェネのシステム特性の問題と同様に重要になるのが、コジェネの運転をどう設定するかである。今回は計算時間の短縮のために、3つの運用パターンを用

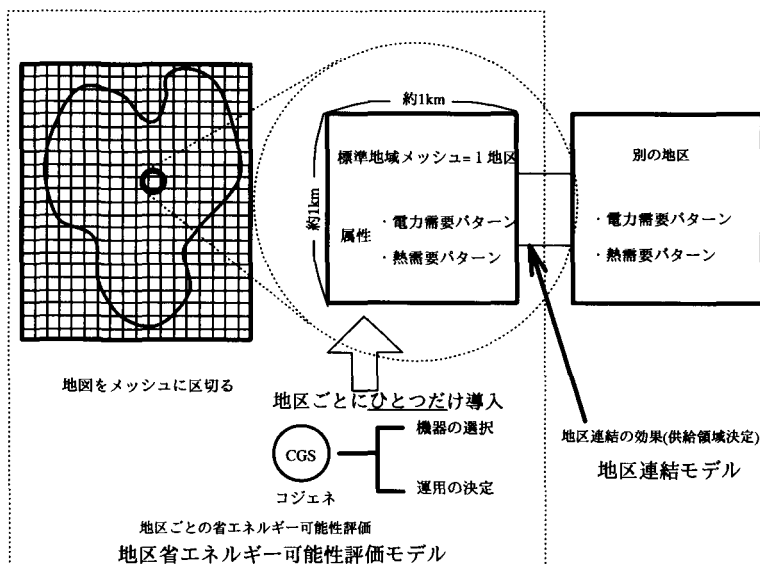


図2 エネルギー供給システムモデルの概要

複数の地域メッシュをひとつの領域として取り扱くと、その連結によって生じた“地域”の合成負荷パターンが改善される（特に熱の利用率が向上するなど）可能性がある。この場合、連結されて生じた地域にひとつのエネルギー供給設備をおいた場合のエネルギー利用効率、個々の地域メッシュに適したエネルギー供給設備を設置する場合よりも向上する可能性がある。この可能性を定量的に評価する。このモデルは前節のコジェネの導入による省エネルギー可能性の評価を行なったうえで、さらにいくつかの地域メッシュの連結を行なうことにより省エネルギー率が向上する地域メッシュの組合せを求める問題であるということが出来る。具体的に、ここでは次の問題を解くことにする。

いた。それらは、次の3つである。

(1) 方形近似モデル

ある起動時刻と停止時刻の間は一定出力で発電を行う運用を行なう。このモデルは1日のピーク電力の買電を減少させる、もっとも単純な運用のモデルである。

(2) ベース運転+方形近似モデル

方形近似モデルの運用に加えて、24時間連続で一定出力で発電を行なう運用を加える。このモデルは、発電機が2台の場合のもっとも単純な運用をモデル化したものである。

(3) 電力負荷追従運転モデル

地域メッシュ内の電力付加の変化に追従して発電を行なう運用をする。このモデルは、コジェネにより必要な電力をすべて供給し、熱が多少あまっても買電をしないという状態をモデル化したものである。

結局、機器の選択と運用の選択の組合せ、計12通りの地域エネルギー供給パターンのシミュレーションを行なった。なお、これらの各運用パターンのモデルにおいては、それぞれの形状の中で最もコジェネからの電力の供給が高くなるようなものを選択するような簡単な最適化を行なっており、コジェネの発電による電力が不足する時間帯においては、買電により電力需要を補うことにしている。このような単純なモデル化においても地域の電力の供給のうちおよそ60%程度はカバーすることが可能であることが確認されている。

3.2 地域供給のモデル化

＜問題＞

今、考察の対象とする地域メッシュをひとつのノードと考える。このメッシュ状に配置されている隣接するノードを接続していくつかのツリーを構成する（つまりフォリストとなる）ものとする。このようにして構成されるフォリストのうち、対象地域全体の省エネルギー率を最も改善するものを選択せよ。

この問題はノードひとつを「連結するか(1)、あるいは連結しないか(0)」を表現する0-1変数として、整数計画問題として考えることも可能であるが、ここでは、簡単化のため、グリーディーライクな発見的な算法を構成して省エネルギー率を向上させるようなフォリストを決定することとした。方針としては、個々の省エネルギー率の高い地域メッシュを基点とし、その地域メッシュの周囲を探索し、連結により省エネルギー率が向上するツリーを作成していく方法を使った。この場合、すでに存在しているツリーに新たにひとつ地域を付加した場合、省エネルギー率が向上しない時にはその地域をツリーに含めることは止め、新たなツリーを構成する、といった方法にした。

4. モデルによる分析

4.1 最適なコジェネレーションシステムと達成可能な省エネルギー率の分析

前の章で述べたモデルを利用して、各地域メッシュのエネルギー負荷特性に最も適したコジェネレーションシステムの決定、およびその時に達成される省エネルギー率の評価を行なった。手順は次のとおりである。

- (1) 各地域メッシュに対し、上述のモデルを用いて、コジェネシステムの設定、と運用のすべての組合せ(計12通り)に対して省エネルギー率の評価を行なう。
- (2) その結果の省エネルギー率の比較を行ない、省エネルギー率が最大になる組合せを各地域メッシュにおいて決定する。

図3に、このようにして求めた地区メッシュごとの最大省エネルギー率を示す。この図によると、省エネルギー率の高い地域は、東京都区部の中心に存在するエネルギー需要密度の高い領域から少し外側にあるドーナツ状の領域であることがわかる。この領域はエネルギー負荷パターンのクラスター分類から見ると、業務地域と、住宅地域の間の特徴を持つ、負荷の混在領域に当たっており、両方の特性がうまく交じりあうことによって、熱と電力の同時利用率が高くなり、結局のところ、本文でいうところの省エネルギー率が高くなっているものと推定される。実際の地域的熱供給

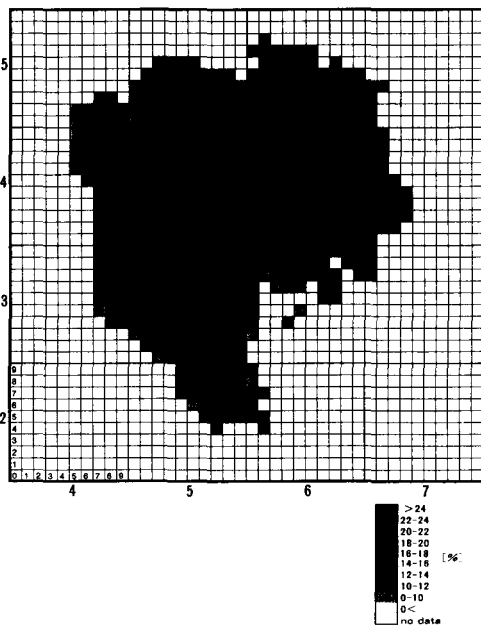


図3 コジェネレーションシステムを導入した場合の省エネルギー率
各メッシュの省エネルギー率は従来型のシステムとコジェネシステムとでそのメッシュ内部のエネルギーを供給するための1次エネルギーを比較て求めた。

給を行なう領域としては、1 km四方という大きさはかなり大規模なものであり、この大きさの領域では、すでに負荷パターンの合成による省エネルギーの改善効果も含まれている可能性がある。

4.2 メッシュの連結による省エネルギー率の改善

地域メッシュを連結し、多少広い地域に対して電力および熱の供給を行なった場合の省エネルギー率の評価を前述のモデル、および算法を利用して行なった。このモデルで利用した地域連結のための算法の概要は、次のとおりである。

- (1) まず、個別の地域メッシュに対して、省エネルギー率の評価をあらかじめ行なっておく。
- (2) さらに、地域連結を評価するためのプログラムを起動し、連結により省エネルギー率が向上する地域の連結を行なう。省エネルギー率が向上する限り、できるだけ広い地域メッシュを連結するように行なうものとする。

なお、この分析では、エネルギーの需要と供給の観点からのマッチングのみを行なった分析であり、その他の配管熱損失およびその費用等については考慮に入れていないものであることには注意を要する。

また、上述の地域メッシュ連結の作業を行なう際に、地域ごとのエネルギー特性に適した、別の種類のコジェネレーションシステムを導入し、関係運転することにより、さらなる省エネルギー率の向上を期待するといったことは現在のモデルにはまだとり込まれてはいない。今後の課題としたい。

ガスエンジンシステムを各地区に導入し、電力負荷追従で動かすような運用を行なった場合に、このような地域連結の分布を構成した例を図4に示す。この図によると、省エネルギー率が改善されるようなメッシュ間接続は、前述の東京都中心部よりちょっと外側をとりまく地域に生じやすいことがわかる。この結果からは、比較的エネルギー負荷特性の異なる領域が接している部分においては負荷の合成による省エネルギー可能性が高いことが予測される。また、この図からみると、連結可能な領域の直径は標準地域メッシュの大きさで数個程度、すなわち2~3 km程度であり、大規模な供給地域は生じないことがわかる。また、上述の個別地域においてコジェネレーションシステムを導入したうえで、さらに地域連結を行ない、その場合の省エネルギー率の向上を東京23区で平均したものが表1である。この表によると、地域連結が省エネルギー

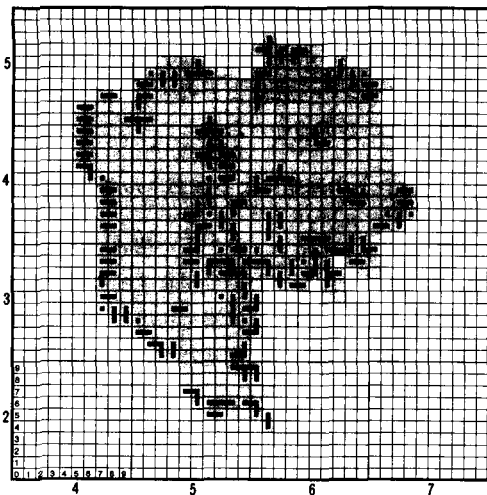


図4 地域連結の例（ガスエンジン，電力負荷追従運転の場合）

黒線でつながっているメッシュどうしが連結されたメッシュである。黒点のあるメッシュは連結により省エネルギー性が向上する可能性があるが、結局、連結できなかったメッシュである。

表1 地域連結による省エネルギー率の改善

		平均省エネルギー率 [%]			
		ガスタービン	ガスエンジン	ディーゼルエンジン	燃料電池
運転	方形近似	0.04	0.63	0.40	0.48
	ベース+方形	0.02	0.59	0.40	0.47
	電力負荷追従	0.01	0.57	0.35	0.43

省エネルギー率は、個々の地域メッシュへのコジェネレーションシステムを導入した状態のもとで、さらに地域連結を行なった場合、全体の省エネルギー率に占める地域連結の効果の割合

に寄与する割合は、地域全体では、期待するほど大きな量にはならないことがわかる。地域連結が効果を大きな量を持つ領域にしぼって導入する方が効果的であることを端的に示している結果であるといえる。

5. まとめ

ある地域において、そこに導入される地域エネルギー供給システムの効率性を評価するひとつの手法の提案を行なった。また、その手法を用いて、東京都23区部を約1 kmメートル四方の標準地域メッシュで区切った個別領域の熱および電力の民生用需要推計データを用い、それぞれにコジェネレーションシステムを導入した場合、最大どの程度省エネルギー率が達成できるかについて、定量的な評価を試みた。このような解析手法の開発によって、土地利用（の変化による地域的なエネルギー需要負荷）、熱源配置、エネルギー供

給システム等を変化させた場合の省エネルギー効果を定量的に評価することができる。

なお、本稿はあくまでも電力と熱との、エネルギー的な観点から、需要負荷パターンの形状の地区ごとの特徴に着目し、単純なモデルによって分析を行なったものである。現在設備のコストを分析にとり入れ、より評価を現実的なものにするための試みを行なっているところである。さらに、ゴミ・下水・排熱などの未利用エネルギー源を活用するシステムなども今後検討する必要がある。

謝辞

本稿におけるモデル開発の際には、(財)電力中央研究所の椎名孝之氏に協力していただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 総務庁統計局監修：地域メッシュ統計ガイドー利用のための手引ー，1988。
- [2] 外岡豊：事業所，住宅，自動車，船舶，航空機の熱消費および排出実態推計について，ドラフト，1990。
- [3] 外岡豊：大気汚染排出構造に関する研究（その9）事業所，住宅の熱消費量とNO_x，SO_x排出量，日本建築学会大会学術講演梗概集，1986。
- [4] 市川徹，尾島俊雄：民生用コジェネレーションの省エネルギー性に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，第433号，pp.21-29，1992。
- [5] 佐賀井重雄，椎名孝之：コジェネレーションシステムの導入による地域省エネルギー可能性の評価，電力中央研究所研究報告，Y92004，1993。
- [6] 佐土原聡：東京都区部における地域冷暖房導入地区の選定に関する研究，早稲田大学博士論文，1988。
- [7] 椎名孝之，佐賀井重雄：パラメトリック最適化によるコジェネレーションシステム最適バランス運転問題ー東京都区部における分析ー，日本オペレーションズリサーチ学会1992年度秋季研究発表会アブストラクト集，pp.224-225，1992。
- [8] 椎名孝之，佐賀井重雄：コジェネの地域導入による省エネルギー可能性の評価モデルの開発，情報処理研究，No.19，pp.1-12，1993。
- [9] 佐賀井重雄，椎名孝之：コジェネレーションの導入による地域省エネルギーに関する評価（その2），エネルギー・資源学会第12回研究発表会講演論文集，1993。