

博士論文

213

都市の省エネルギー方策に関する  
基礎的研究

1994年12月

指導教官 茅 陽一 教授

工学系研究科電気工学専門課程

秋澤 淳

わが妻，久美にこの論文を捧げる

## はじめに

二酸化炭素による地球温暖化問題は、注目を受けてから短期間のうちに世界的な大問題になった。先進国の一部は2000年の二酸化炭素放出量を1990年レベルに抑制することを目標に掲げる一方、日本も一人あたり放出量を1990年レベルに抑えることを目標とした。しかしながら、最近、目標実現は危ういとの報道がなされている。いままでエネルギーを使ってきた習慣を突然大きく転換することは困難であることが表われている。10年のレンジですでできることをやらねばならないが、さらに長期的に省エネルギー方策を導入することが必要である。他方、世界的に都市に人口が集中する傾向が進んでおり、経済活動の集積がますますエネルギー消費の強度を高めていくと予想される。したがって、都市自身が省エネルギー的になることが強く求められる。その観点から、本研究は都市を対象に省エネルギー方策を考えることを目的とした。

本研究は株式会社三菱総合研究所からの国内留学の過程で行った。留学の機会を与えて下さった佐藤公久社会・公共本部長（現常務取締役）、吉田哲生社会システム第一部長（現社会システム部長）、宮尾三郎建設システム室長（現国土基盤部長）には大変感謝いたします。また、建設システム室の同僚諸兄には留学にあたり大きなご支援をいただいたことに厚く御礼申し上げます。

1994年12月

秋澤 淳

## 目 次

はじめに

第1章	序論	.....	1
1.1	研究背景	.....	1
1.2	研究目的	.....	11
1.3	研究内容および構成	.....	13

## 第1部 電力託送がコジェネレーション導入拡大に与える効果

第2章	電力託送を含めたコジェネレーション自家発の最適挙動	.....	17
2.1	本章の目的	.....	17
2.2	最適挙動モデルの基本的考え方	.....	18
2.3	1時間帯モデルによる分析	.....	25
2.4	2時間帯モデルへの拡張	.....	47
2.5	本章のまとめ	.....	64

第3章	電力託送によるコジェネ保有者の最適ネットワーク化	.....	67
3.1	本章の目的	.....	67
3.2	コジェネ・ネットワーク化の基本的考え方	.....	69
3.3	ネットワーク化による需要熱電比の挙動	.....	72
3.4	需要家の最適ネットワーク化	.....	84
3.5	本章のまとめ	.....	131

第4章	コジェネ分散型電源の効率が導入規模に与える影響	.....	133
4.1	本章の目的	.....	133
4.2	分散型電源と集中型電源の相互干渉過程	.....	134
4.3	均一料金モデルによる分析	.....	135



4.4	時間帯別料金制の影響	....	145
4.5	本章のまとめ	....	152

## 第2部 運輸エネルギー消費を最小化する最適都市構造

第5章	混雑度一定の都市モデルによる土地利用構造の分析	....	155
5.1	本章の目的	....	155
5.2	混雑度一定の都市モデルの基本的考え方	....	158
5.3	業務地モデルによる道路比率分布	....	160
5.4	総トリップ長最小化型土地利用	....	163
5.5	職住近接型土地利用	....	170
5.6	2次元都市モデルへの拡張	....	176
5.7	2次元総トリップ長最小化型土地利用	....	183
5.8	本章のまとめ	....	190
第6章	運輸エネルギー消費を最小化する土地利用構造	....	193
6.1	本章の目的	....	193
6.2	自動車交通のメカニズム	....	195
6.3	2次元都市モデルの定式化	....	199
6.4	燃料消費を最小化する最適土地利用	....	206
6.5	本章のまとめ	....	214
第7章	エネルギー消費を抑制する最適都市圏構造の評価	....	217
7.1	本章の目的	....	217
7.2	都市間通勤を考慮した最適都市圏構造モデル	....	219
7.3	入力データ	....	226
7.4	最適都市圏構造	....	230
7.5	本章のまとめ	....	236

### 第3部 民生部門および運輸部門に関する省エネルギー型都市像

第8章	地域熱供給プラントの立地を考慮した省エネルギー型都市構造	239
8.1	本章の目的	239
8.2	地域熱供給を含めた都市モデルの基本的考え方	241
8.3	地域熱供給を含めた都市モデルの定式化	245
8.4	入力データ	251
8.5	地域熱供給プラント立地を考慮した最適土地利用構造	255
8.6	本章のまとめ	271
第9章	結論	273
9.1	主要な結果	273
9.2	省エネルギー型都市システムの方向性	276
9.3	今後の課題	279
謝辞		
参考文献		284
発表論文等		291
付録	民生部門におけるコジェネレーション導入効果の国際比較	295
0.1	研究目的	295
0.2	発電排熱状況の国別実態調査	296
0.3	発電排熱利用による省エネルギー効果の概算	301
0.4	エネルギー需要性向がエネルギー効率に与える影響	302
0.5	結果のまとめ	307
謝辞		
参考文献		

# 第1章

## 序 論

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 地球温暖化問題と省エネルギー

本研究の基本的な背景は地球温暖化問題にある。周知のように地球温暖化は大気中の二酸化炭素の温室効果が主たる原因である。しかも、現代においてはその二酸化炭素は化石燃料消費に起因する。そのため、温暖化を抑制するためには化石燃料消費を削減しなければならない。エネルギー消費は経済活動と密接につながっているため、この要請は経済的な停滞をもたらす可能性が高い。しかしながら、二酸化炭素の発生削減は国際的に合意され、わが国においても2000年において1990年レベルの国民一人あたり発生量に抑えることが目標に定められた。具体的な削減方策は様々考えられているが、概ね3種類に分類できる。すなわち、

- i) 燃料の転換 .... 天然ガス，原子力，再生可能エネルギーの利用促進
- ii) エネルギー効率の向上 .... 機器効率や利用効率改善などによる省エネルギー
- iii) CO<sub>2</sub>の回収・除去 .... CO<sub>2</sub>の海底貯留，植林など生物利用による固定

いずれも現状の経済活動レベルを低下させることなく、二酸化炭素の放出削減を目指している。

本研究ではこの中でも省エネルギーを取り上げる。特に“都市”に注目した省エネルギー方策を検討する。従来、省エネルギーはボイラや冷蔵庫などの機器レベルで技術的改善がなされてきた。あるいは、ヒートポンプ式のエアコンなど新技術も導入されている。しかしながら、個別の技術的省エネルギーだけでは温暖化抑制に求められる抜本的なエネルギー消費削減は困難である。従来のエネルギー節約的発想とは異なる構造的なエネルギー利用の転換が必要になると考えられる。ここでは消費の末端を個別技術的に捉えるのではなく、エネルギーが消費される“場”そのものを省エネルギーの基盤となるように転換するアプローチをとる。いわば、アレルギー性鼻炎に鼻水止めの薬を投与するような対症療法的な対策ではなく、漢方薬により鼻炎が生じる原因を直すような体質改善的な対策を考えようとするものである。

## 1.1.2 エネルギー消費の動向と都市の位置づけ

ここでは、過去および最近のエネルギー消費の動向を踏まえ、都市とエネルギー消費との強い関連性を整理する。

(1) エネルギー消費のトレンドとCO<sub>2</sub>排出量

まず、基本的なデータとして部門別のエネルギー消費<sup>[1]</sup>をみる。図1-1および図1-2にエネルギー消費量および消費指数（1955年度を1とする）それぞれの過去の推移を示す。これより次のことが指摘できる。

- ー 産業部門のエネルギー消費が石油ショック後停滞傾向にあるのに対し、民生部門、運輸部門は石油ショックにもかかわらず、上昇傾向を維持している。
- ー 民生部門と運輸部門のエネルギー消費量はほぼ同程度であるが、過去からの消費の伸びをみると、運輸部門が最も伸びている（1955→1990年度で約10倍）。民生部門の伸びは運輸部門に次いで約8倍を示す。

産業部門のエネルギー消費が停滞したのは、燃料コストの上昇を背景として省エネルギー技術の導入が盛んになったことを反映している。それに対して、同様にガソリンなどの燃料コストが上昇したにもかかわらず運輸エネルギー消費はわずかに停滞傾向を示したに過ぎない。最近のエネルギー消費の一方的増加傾向をみても、産業部門で行われたような構造的転換が民生部門・運輸部門には起こっていない。このことから、今後の省エネルギーを考えていく上で民生・運輸の両部門が大きな対象領域になるといえる。

また、二酸化炭素の放出量の観点から各部門の影響をみる。図1-3には1990年における需要部門別のCO<sub>2</sub>放出量の構成<sup>[2]</sup>を示した。産業部門がほぼ半分、民生部門が26%、運輸部門が19%を占める。民生部門と運輸部門の和はほぼ全体の半分以上を占めるので、産業部門に対するのと同様な放出抑制対策が適用されてよい。しかも、自動車はほとんど化石燃料に依存しており、二酸化炭素の大きな排出源となっている。しかしながら、両部門での消費形態は個別・分散的であり、産業部門のように一ヶ所に集中していて管理可能な状況にはない。そのため、短期的には実施しやすい産業部門や発電部門などから削減対象が選択されやすいと考えられるが、長期的には分散的な消費についても捕捉可能にするような対策を講じる必要がある。

民生部門・運輸部門のどちらもが現実集積・活動している場所は“都市”である。都市活動に伴って両部門でエネルギーが消費されている。その意味で空間的な都市を省エネルギーの対象と位置づけることが重要と考えられる。

図1-1 日本の部門別エネルギー消費の推移

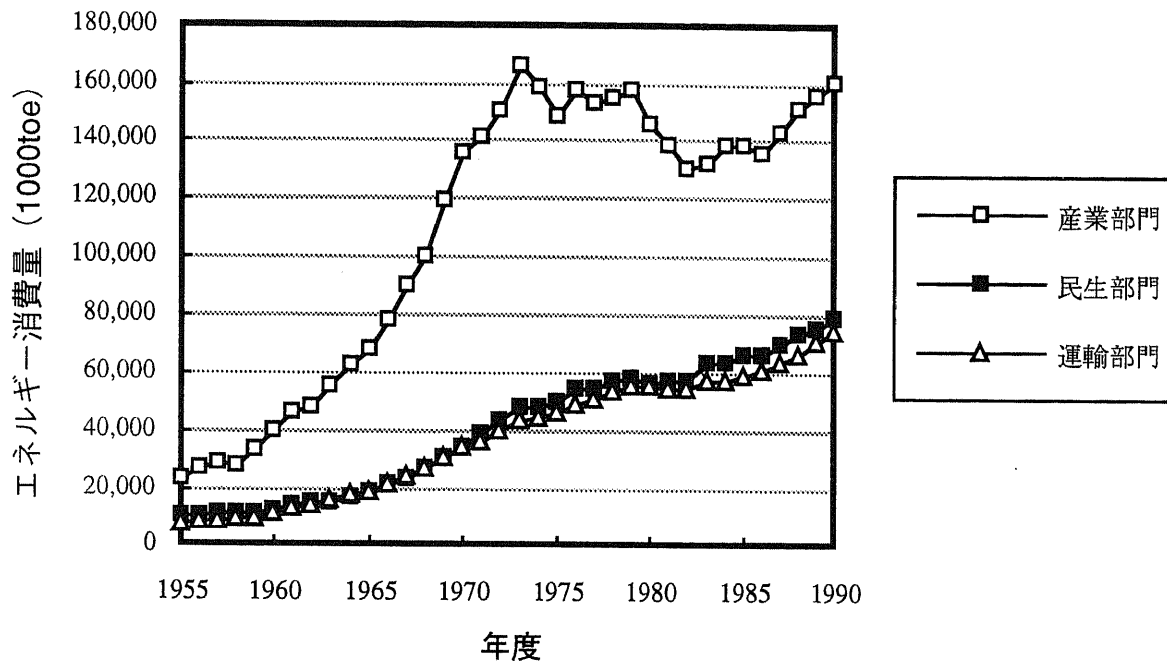


図1-2 日本の部門別エネルギー消費の伸び (1955年度基準)

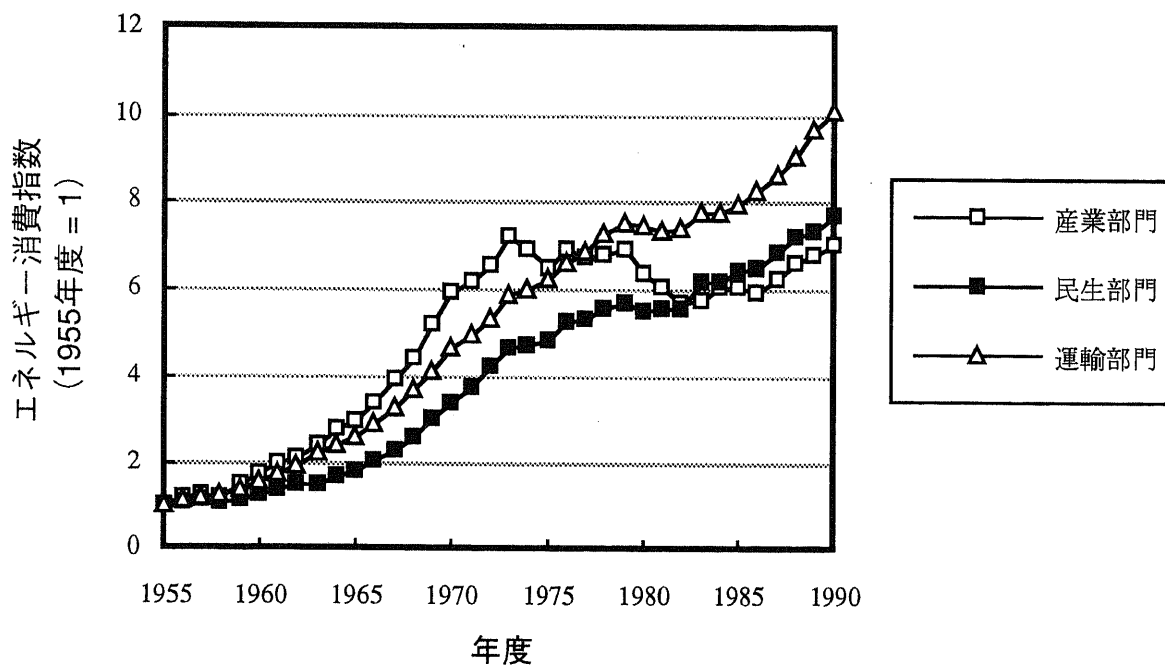
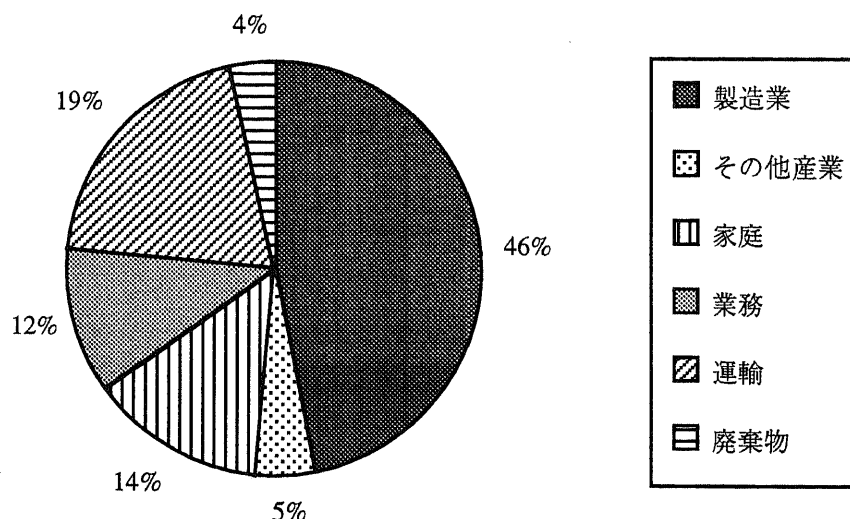


図1-3 二酸化炭素放出の部門別構成



## (2) 民生部門の都市への集積と膨張

都市が注目されるべき理由の一つは、都市への経済活動の集中、人口の集中が進むと予想されることである。東京一極集中問題に表われているように、極端な集中は交通混雑や遠距離通勤を生み出すとともにヒートアイランド現象など都市内気象の変動を引き起こし、エネルギー消費を増幅する要因とみなしうる。わが国における都市人口比率<sup>[3]</sup>の増加傾向から将来予測を行った結果を図1-4に示す。ただし、都市人口としては人口集中地区の人口をとった。人口集中地区とは次の地区を指す。

人口集中地区：人口密度4,000人/km<sup>2</sup>以上の調査区が市町村の境域内で互いに隣接し、それら隣接した地域の人口が5,000人以上となる地区。

都市人口比率について1960年～1990年のデータから推定された予測式は次の通り。

$$\ln\left(\frac{f}{1-f}\right) = 0.0261t - 51.3 \quad (R^2R = 0.954) \quad \dots (1.1)$$

(10.2)    (-10.2)

ただし、

$f$  : 都市人口比率

この推定によれば2020年あたりには全人口の80%が都市に居住し、2050年には90%に達すると予想される。この都市に人口が集中する傾向は日本だけに限らず、全世界的な傾向である<sup>[4]</sup> (図1-5)。特に発展途上国では農村部から都市への人口流入が著しいといわれている。この結果、民生部門のエネルギー消費のほとんどは都市において行われることになるといってよい。言い替えれば、都市における民生部門向けの省エネルギー方策を準備しなければならないことを意味している。

図1-4 日本の都市人口比率の将来予測

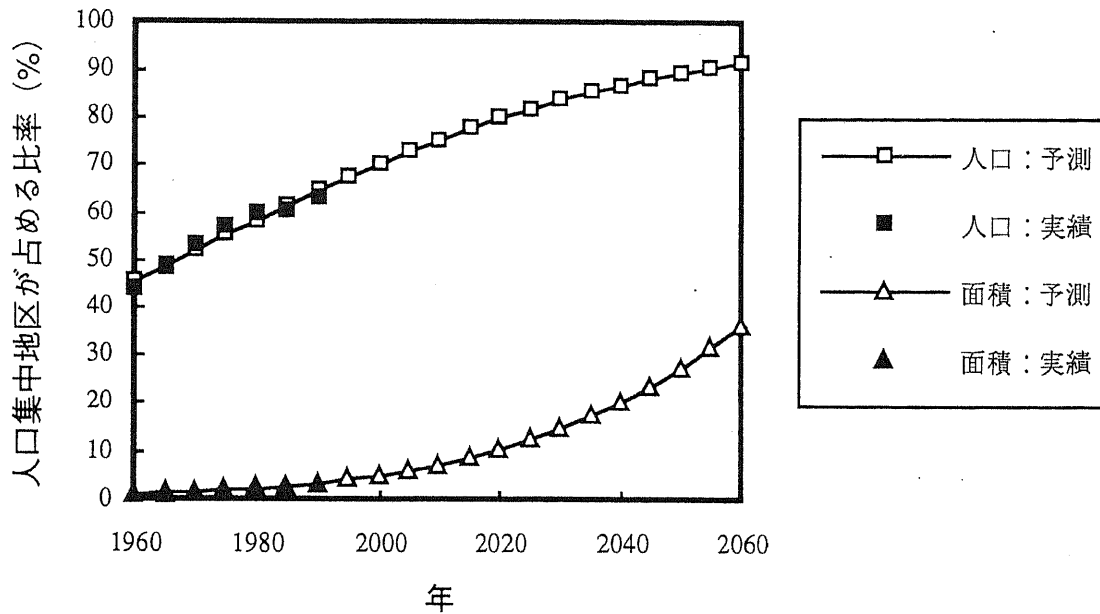
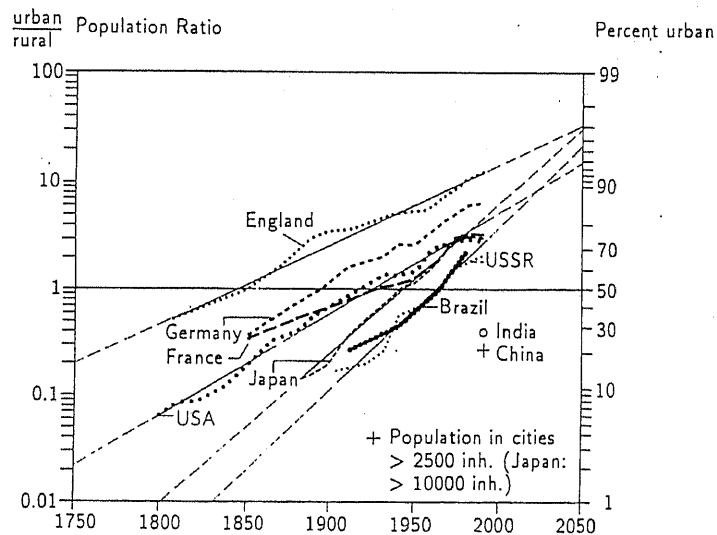


図1-5 世界的な都市人口の増加傾向

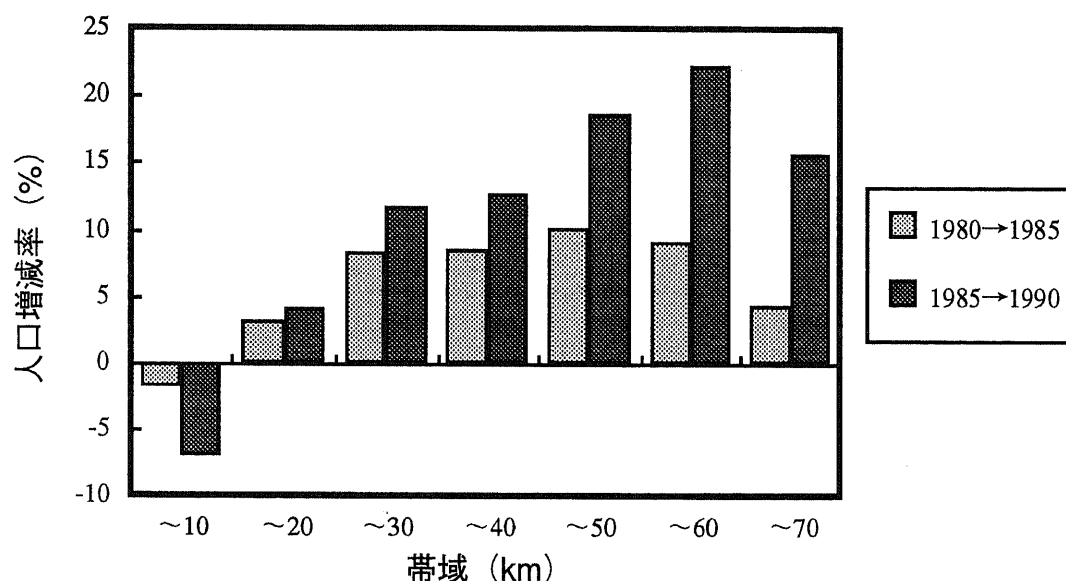


具体的な都市への人口集中の例として東京周辺の人口変化を取り上げる。図1-6に東京70キロ圏の距離帯別人口増減を示す<sup>[3][5]</sup>。10kmまでの都心部では人口減少が続いているが、それ以外では人口が増加傾向にある。50km帯から70km帯にかけての範囲で増加率が15～20%に達し、とりわけ増加が顕著である。東京周辺には人口の蓄積が進みつつあり、一極集中のまま肥大する傾向が続いている。一極集中の問題点や対策はいくつも指摘されている。国土庁では東京の都市圏構造を一極集中型から多極分散型にすることを目的として、複数の“業務核都市”を首都圏内に整備し、ある程度自立的な都



市として育成することを構想している。これは激しく混雑する現状の通勤事情を緩和することを目的とした職住近接型の業務地配置の枠組みにも関連することである。都市にも物理的な許容限度があることを考慮すれば、長期的な観点から上記構想のような多極化を進めることは支持される。ただし、当面既にある比較的大きな都市を核にするにしても、都市圏全体としてどのような構成が望ましいのかについては議論が必要である。東京の優位性は変わらないと予想されるので、遠隔地に住宅開発、ニュータウンの整備などを進めるのでは通勤輸送量が増大し、エネルギー的な観点からは望ましくないことは明らかである。すなわち、都市圏構造もエネルギー消費や二酸化炭素放出量と深く関連し、都市と並んで長期的な課題の一つにあげられる。

図1-6 東京70キロ圏の人口増減率



### (3) 運輸部門の燃費改善の硬直化

運輸部門においては都市内の自動車交通にとりわけ問題がある。都市に人口が集中するとともに自動車普及台数は増加の一途をたどっているため、都市における交通量の増大は渋滞の原因となっている。実際に交通渋滞は慢性化の傾向にある。渋滞は燃費を悪化させ、エネルギー消費の増加につながる。図1-7に大都市と全国の旅行速度の比較を示す<sup>[6]</sup>。大都市における速度は全国よりもかなり低く、その状況に改善は見られない。図1-4に示すように都市面積が増大すれば、全国値自体が低下することになると予想される。

また、自動車単体の燃費も低下傾向にある。図1-8に新車10モード燃費の推移<sup>[7]</sup>を示した。第二次石油ショック直後の1982年をピークとして燃費は低下しつつある。これはオートマチック車の増加、

エアコンやパワステなど装備の増加が主要な要因と考えられている。現在は燃費の比較的よい年代の車種も利用されておりストック平均の燃費レベルが維持されていたとしても、やがて燃費の低い車種の比率が高まればストック平均値は低減していく。販売車種は消費者の好みに依存するため、燃費のよい車種のみ限定させることは社会的に無理である。したがって、自動車単体の燃費改善は不可欠であるが、それ以外の省エネルギー方策を強化しなければならない。

図1-7 大都市と全国の旅行速度の比較

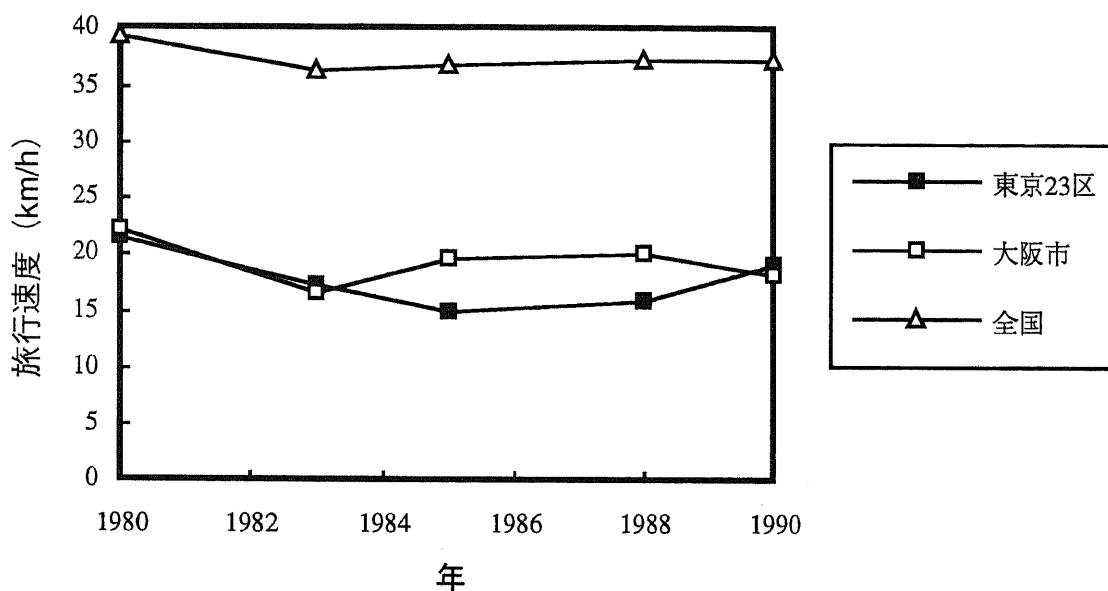
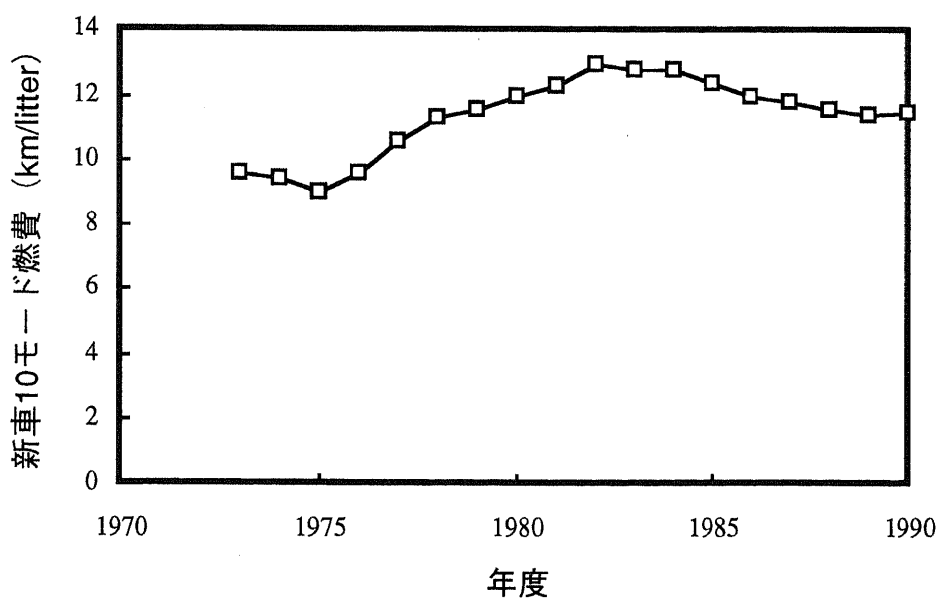


図1-8 新車の10モード燃費の動向



### 1.1.3 熱の多段階利用技術の動向

#### (1) 多段階利用の必要性

エネルギー消費を削減する一つの有力な方法は、高い温度レベルから熱を使用し、低い温度レベルまで多段階に利用することである<sup>[8][9]</sup>。多数の熱需要が一度の一次エネルギー投入によって賄うことができる。単純化された条件の下ではあるが、完全に多段階利用を実現すれば日本において現状の60%ものエネルギー消費を削減できるとの研究報告も出されている<sup>[10]</sup>。従来は熱が必要なところでは個別に燃料を燃焼させていた。家庭用の暖房・給湯などは30℃～50℃程度の低温で十分であるにもかかわらず、現在の方式では1500℃を超える温度の熱を消費しており無駄である。高級な熱エネルギーを適材適所に利用することが重要な課題と位置づけられる。エネルギー消費の方式を抜本的に変えるという点で、熱の多段階利用は今後の省エネルギー促進にとって大きな役割を有する。

#### (2) コージェネレーション

近年注目されている多段階利用技術の一つがコージェネレーションである。これは発電の際に排出される熱を暖房・給湯などに利用するものである。一般の発電所では排熱は冷却水に廃棄される。また、都市などの熱需要地から遠距離に立地することが多いため、現実的に利用が困難である。一方、コージェネレーション・プラントは元々熱電併給を目的としているため、小型で需要地に近接して都市内に配置される。廃熱による損失に加えて送電損失も削減され、コージェネレーションは総合効率として80%程度が見込まれている。従来の発電所のエネルギー効率が35%程度であることと比較すれば、2倍以上の効率改善が可能となる。

コージェネレーション・プラントは既に実際に導入が進んでいる。図1-9に日本におけるコージェネレーション導入の推移を示した<sup>[11]</sup>。石油ショック以降導入が始まってはいるが、ここ数年の間に大きく伸び始めている。この傾向は経済的な観点からもコージェネレーションが支持されていることを意味している。

#### (2) 未利用エネルギーの活用

未利用エネルギーとは廃熱として捨てられている熱を回収利用しようというものである。現在の熱利用の末端にさらに一段階を加えることに相当する。東京23区内における廃熱賦存量として図1-10に示す熱源構成が示されている<sup>[9]</sup>。ごみ処理場、火力発電所、産業廃棄物など比較的高温の排熱を有するものが約6割を占めている。低温排熱でも下水処理場は構成比率が高く、また集中的な排熱源であるため捕捉しやすい点で有用と考えられる。これらの排熱を利用して地域熱供給を行うことができれば

ば、新たな一次エネルギーを投入することなしに熱需要を賄うことが可能となる。都市活動とごみ処理や下水処理は不可分の関係にあり、一般的に都市には両方の施設が付属する。ごみ処理場<sup>[12][13]</sup>や下水処理場<sup>[14]</sup>の排熱を利用した地域熱供給は既に一部で事業化されており、都市自身が持つエネルギー源として位置づけ利用を図ることが重要と考えられる。

図1-9 コジェネレーション導入量の推移

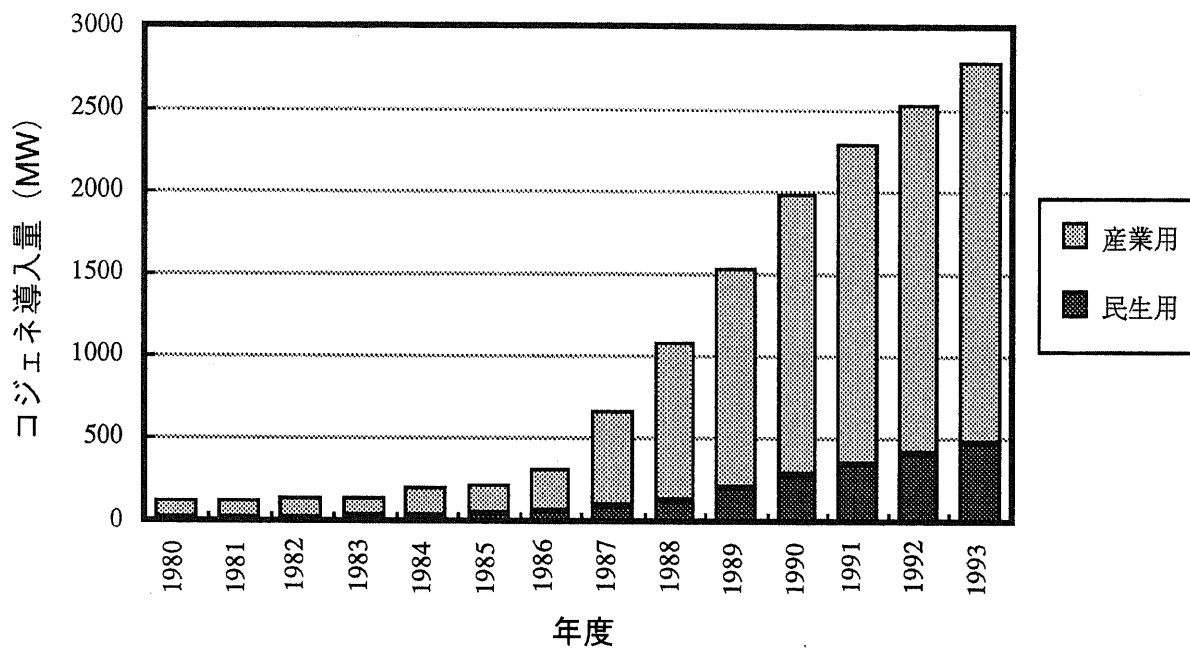
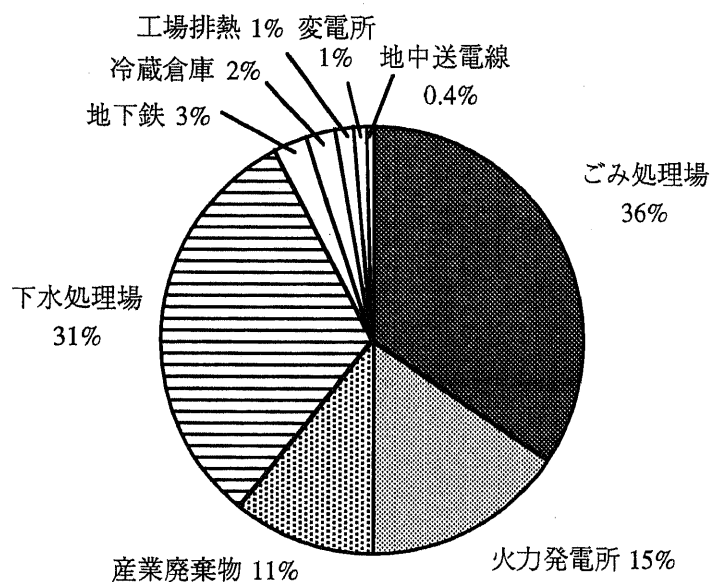


図1-10 東京23区における都市排熱賦存量推計

(エネルギー総量：27,713Tcal/年)



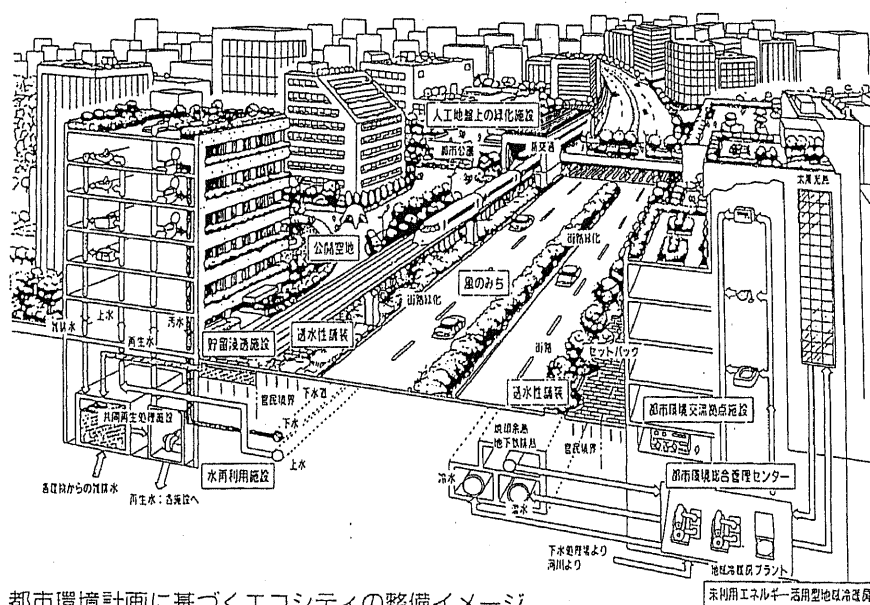
## 1.1.4 環境調和型都市

都市が省エネルギーの対象として認識され始めたことは、最近“環境調和型都市”の考え方が広まりつつあることにも表われている。エコ・ポリス、エコ・シティなど様々な事業名で環境庁、国土庁、建設省、通産省などから構想が出され、具体的な予算措置がとられている[15]。その一つにおける都市整備イメージを図1-11に示した。構想の中には概ね次のような項目が含まれている。

- 地域熱供給および熱配管の整備
- 工場排熱など未利用エネルギーの活用
- 太陽光発電など再生可能エネルギーの利用
- ごみのリサイクル促進
- 透水性舗装などによる地下水の涵養
- 緑地帯の設置
- 街区の通風性向上による都市気象の改善

いずれも付加的に有効な設備を導入する方策が主であり、現在の都市そのものには大きく手を加えていない。例えば都市交通の渋滞緩和などは必須の課題であるにもかかわらず、環境調和型都市の中には位置づけられていない。歴史的には経済原則に従って都市が拡大してきたのであるから、省エネルギーが強く求められている現在において現状の都市形態が容認されるものとはいえない。都市の構造を新たに再編する抜本の方策により、エネルギー消費削減の目標に適した都市形態に導くことが必要である。

図1-11 環境調和型都市のイメージ例



都市環境計画に基づくエコシティの整備イメージ

## 1.2 研究目的

地球温暖化問題を基本的な背景として、民生部門および運輸部門の省エネルギーを考えることは不可避の課題である。本研究では、将来の都市への人口や活動の集中化を考慮し、特に都市における上記2部門に対する省エネルギー方策を検討する。基本的には次の観点からアプローチする。

民生部門： コージェネレーションの導入促進

運輸部門： 運輸エネルギー消費を削減する都市構造への転換

都市全体： 地域熱供給の配置を考慮した都市構造の最適化

### (1) コージェネレーションの導入促進

コージェネレーションは有力な省エネルギー対策であるが、生産した電力と熱が同時に消費されなければ効果が出ない。それぞれの需要パターンは一般にずれているので、一つの需要家だけでコージェネの有利性を引き出すのは条件が厳しい。現在導入が進んでいる需要家は比較的条件が整っている場合と考えられるので、さらにコージェネレーションを導入させるには条件が悪い需要家を対象にせざるを得ない。このとき、複数の需要家を組み合わせれば自由度が高まるため、条件の改善を図ることが可能となる。そこで、本研究では電力託送（電力会社の送電線を利用して自家発電等の電力を輸送すること）を利用した需要家のネットワーク化の基本的な挙動メカニズム、省エネルギー効果を明らかにすることを目的とする。

また、コージェネレーションは分散型電源と位置づけられる。省エネルギー型の都市にはコージェネレーション・プラントが多数配置されることが考えられるが、普及するにつれて一般の系統発電所との競合関係が発生すると予想される。そもそもエネルギー効率が高いことがコージェネレーション導入の基礎であるが、運用上の効率は需要家に依存する。そこで、本研究では分散型電源と集中型電源の競合関係に着目し、コージェネレーションの効率と導入規模の関係を明らかにすることを目的とする。

### (2) 運輸エネルギー消費を削減する都市構造への転換

現在の都市構造は省エネルギーの観点からみて十分なものではない。省エネルギー機能を構造的に都市の中に埋め込むことを考え、本研究では都市内の土地利用に注目する。すなわち、運輸エネルギー消費を最小化する土地利用構造を導くことを目的とする。その際、交通渋滞の緩和も社会的に求められている点であるので、渋滞のない都市構造を考慮する。さらに、従来通りの渋滞を許す場合の土地利用も導き比較することによって、望ましい都市の形態を明らかにする。

また、現実の都市間通勤を考慮し、都市圏構造についても省エネルギーの観点から分析を行う。一極集中型から多極分散型への移行については、従来通勤距離の観点から研究がなされてきた。本研究では、より直接的にエネルギー消費を最小化する分散型都市圏構造を見出すことを目的とする。

### (3) 地域熱供給の配置を考慮した都市構造の最適化

熱の多段階利用により最終的に排出される低温熱は民生部門の熱需要に供給されることが適当と考えられる。熱輸送には配管敷設費がかかるため、長距離輸送は経済的に成り立たない。したがって、排熱源と居住地を近接させることが重要な要件となる。一般に排熱源は都市外郭に位置するため、居住地が都市の外郭に移動すれば都心への通勤距離が伸び、運輸エネルギー消費を悪化させる。そこで、本研究では地域熱供給プラントが都市境界または都市内部に立地することを想定し、民生部門のエネルギー消費と運輸部門のエネルギー消費の合計を最小化する土地利用構造を導くことを目的とする。

従来、大型発電所や工場は都市から遠距離の地点に移転し、居住地から離れることによって公害問題を回避してきた。そのことが逆に、排熱利用の面では実現を妨げる壁になっている。省エネルギーをまず基本目標とするならば、排熱を有効活用できるように排熱源と需要地の両方を適切に配置することが重要となる。本研究では都市全体の省エネルギーの観点から地域熱供給を捉え、民生・運輸の両部門からみて最適な立地点を評価することを目指す。

## 1.3 研究内容および構成

研究目的に対応して、本論文は次の3部から構成される。各部における研究内容を以下に述べる。

第1部 電力託送がコジェネレーション導入拡大に与える効果

第2部 運輸エネルギー消費を最小化する最適都市構造

第3部 民生部門および運輸部門に関する省エネルギー型都市像

### 1.3.1 電力託送がコジェネレーション導入拡大に与える効果

本研究では電力託送を扱う。託送は現在のところは制度的に認められていないが、近い将来に認められる計画である。コジェネレーションの導入促進に及ぼす効果の観点から電力託送の役割を示すねらいがある。

#### (1) 電力託送を含めたコジェネレーション自家発の最適挙動

第2章では、コジェネレーションと電力託送とを組み合わせたときに、電力託送が行われる条件およびコジェネレーションの挙動を分析する。コジェネレーション保有者と託送受け手の効用最大化を評価基準とする厚生経済学的なモデル化を行い、解析的な最適解（最適行動）を導出してその特性を調べる。モデル化は1時間帯および2時間帯について行った。また、電力託送の有無によるエネルギー効率を比較することによって、電力託送の省エネルギーに対する効果を導く。

#### (2) 電力託送によるコジェネ保有者の最適ネットワーク化

第3章では、コジェネレーション・プラントを有する需要家を複数組み合わせたネットワーク化の効果について分析する。まず、コジェネレーションの効率と需要の熱電比（熱負荷／電力負荷の比）が密接な関係にあることに注目し、電力および熱の負荷分布から熱電比の分布を理論的に導出する。これに基づき、2種類の需要家を組み合わせることが熱電比の分布に与える影響を示す。ついで、多数の需要家ネットワークを非線形計画法を用いてモデル化し、コスト最小化の観点から具体的に最適な需要家の組み合わせを導く。また、設備規模、電力託送量、エネルギー効率などの季節別時間帯別コジェネ挙動を算出し、ネットワーク化の効果を示す。

#### (3) コジェネ分散型電源の効率が導入規模に与える影響

第4章では、分散型電源と集中型電源の相互干渉過程に注目し、両者の均衡点として分散型電源の



導入量を求める。均衡点は分散型電源の発電効率に依存するため、コージェネレーションとして運用されることを想定して効率と導入量との関係を分析する。また、将来的な時間帯別料金制の導入を考慮し、料金設定が分散型電源の導入に与える影響を導く。

### 1.3.2 運輸エネルギー消費を最小化する最適都市構造

#### (1) 混雑度一定の都市モデルによる総トリップ長を最小化する土地利用構造

第5章では、都市構造の導出にあたって交通混雑の解消を同時に考慮して土地利用をモデル化し、最適土地利用分布を導く。ここでは総トリップ長最小化を評価基準に設定し、業務地人口に引き寄せられて通勤分布が定まる場合と、分布が通勤距離に依存する場合について分析する。また、得られた最適解と実際の東京23区の土地利用分布とを比較し、省エネルギー型都市に求められる点を考察する。

#### (2) 運輸エネルギー消費を最小化する土地利用構造

第6章では、第5章と異なり混雑を許容する都市モデルを用いて、運輸エネルギー消費を最小化する土地利用分布を分析する。評価基準は総運輸燃料消費量とし、交通混雑は内生化する。燃料消費が抑制される範囲で混雑は最適化の結果として算出される。第5章のモデルよりも自由度が高いため、都市総人口や都市半径に関する感度分析を行い、望ましい都市規模について分析する。

#### (3) エネルギー消費を抑制する最適都市圏構造の評価

第7章では、運輸に関するエネルギー消費最小化の観点から最適な都市圏構造を分析する。都市圏構造は現実を反映し、中心都市とその周囲に立地する衛星都市群としてモデル化する。都市構造の分析では含めていない都市間通勤がある場合に、都市間距離に応じた中心都市と衛星都市の間での最適な人口配分を導く。ここでは衛星都市の数に注目することから、走行時のエネルギー消費だけでなく道路・鉄道の設備建設時のエネルギー消費を含めた総エネルギー消費を評価基準と設定する。

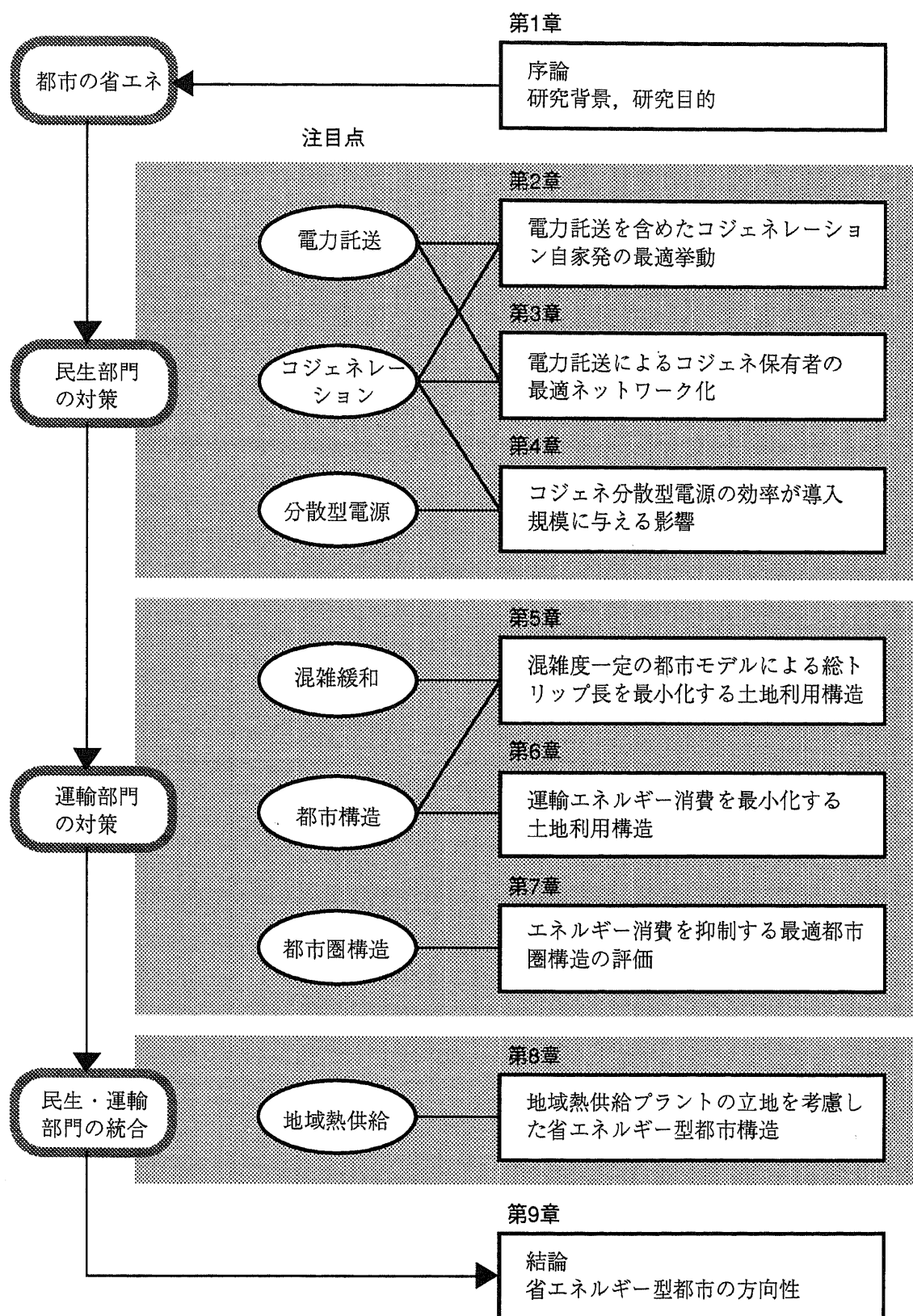
### 1.3.3 民生部門および運輸部門に関する省エネルギー型都市像

第8章では、第6章の運輸エネルギー消費モデルに民生部門の電力および熱需要に対する地域熱供給モデルをつけ加え、運輸部門と民生部門を統合した都市モデルを作成する。両部門のエネルギー消費の最小化を評価基準とし、地域熱供給プラントの立地が最適土地利用分布に与える影響を分析する。ここでは地域熱供給としてコージェネレーション利用型と工場排熱利用型の2方式を考える。前者は都市内に自由に立地できることから、総エネルギー消費を最小化する最適なプラント立地点を導出する。

また、両者が競合関係にあることに注目し、それらの代替性を示すとともに、両者が併存する場合に最適プラント立地点への影響をみる。以上により、省エネルギーを目指す都市においては土地利用や人口の適正な配置が必要であることを明らかにする。

本論文の構成を図1-12に示す。

図1-12 本論文の構成



---

# 第1部 電力託送がコジェネレーション 導入拡大に与える影響

---

## 第2章

### 電力託送を含めた コジェネレーション自家発の最適挙動

## 第2章 電力託送を含めたコージェネレーション自家発の最適挙動

### 2.1 本章の目的

コージェネレーション（以下コジェネ）は発電排熱を熱供給の熱源として有効利用するため、総合的にみてエネルギー効率が低い。そのため、CO<sub>2</sub>による地球温暖化の対策の一つとして有望視されている。しかしながら、一般には電力需要と熱需要の時間変化が整合的ではないため、必ずしも十分な効果が発揮できてない。両者の時間変化が一致すればコジェネは安定して高い効率で運転できるが、負荷パターンがずれることにより余剰となる排熱が発生し、エネルギー効率の低下をきたす。現在は法的に建物外部に自家発電電力を供給することはできないので、余剰熱を地域熱供給に利用したり、蓄熱層を設けて需要の整合性を改善する方法がとられてきた。反対に、余剰の電力を外部に供給できれば、それによっても熱の需給バランスを整合させることが可能となる。これが認められれば、コジェネの省エネ性を改善すると同時に、燃料コストの削減、稼働率の向上に伴い経済性が高まることにより、コジェネの導入が一層促進されると期待できる。

そこで、本章では電力託送が有する上記の効果に着目し、電力託送がコジェネ自家発に与える基本的な影響・効果を、数理的モデルから導かれる最適挙動に基づいて分析することを目的とする。また、実際のデータに基づいてパラメータを設定し、数値例によってコジェネ自家発の挙動、電力託送の影響を示す。

一方、現在、負荷率改善を目的として電力市場に時間帯別料金制が導入されつつある。コジェネの運用は買電コストと競合関係にあるため、明らかに料金設定の影響を受ける。したがって、電力託送の挙動やコジェネに対する効果も、必然的に時間帯別料金によって変化すると予想される。コジェネではない通常型自家発の挙動については前田<sup>[16]</sup>・重次<sup>[17]</sup>が分析しているが、熱併給の効果や託送については考慮されていない。既存の電力会社とコジェネの競合関係を議論するためには時間帯別料金制を踏まえたモデルが必要である。そこで、1時間帯モデルをさらに2時間帯モデルに拡張し、コジェネー時間帯別料金ー電力託送の3者の関係を分析し、電力託送の役割を考察する。

## 2.2 最適挙動モデルの基本的考え方

### 2.2.1 電力託送の概要

本研究では電力託送に注目する。そこでまず、電力託送の動向を整理するとともに、託送に期待される効果について述べる。

#### (1) 電力託送の動向<sup>[18]</sup>

電力託送とは、電力会社またはそれ以外の事業者（例えば自家発電）が発電した電力を、当該事業者以外の電力系統を経由して需要家に送電することをいう。現在日本では、電力会社間において、供給力不足の補完や設備の効率的運用による経費の節減等を目的として電力融通・託送が既に行われている。ただし、これは卸売レベルの託送であり、自家発を保有する需要家が電力会社の送配電網を利用して他の需要家に託送する小売レベルの託送は認められていない。

米国では、1978年に立法された連邦公益事業規制政策法（PURPA法）による電気事業の規制緩和に伴い、コジェネレーションや小規模電源などの非電気事業者の参入が始まった。PURPA法では高効率の発電施設を適格認定設備（QF）として認定し、電力会社にQFとの系統連系と余剰電力の購入を義務づけたことによって、発電部門での競争が導入され、エネルギー利用の効率化が進んだ。一方、託送については現行の法制度の下では限られているが、電力会社は自発的にQF電力の託送サービスを行っている。現在のところ、公営電力から要求があった場合に、自社の供給区域外の電力会社またはQFから電力を受取り、自社の送電線を通じて要請のあった公営電力に託送する義務を負うにとどまる。非電気事業者による電力供給を促進するためには、電力会社の送電系統に自由にアクセスでき、託送が行えることが必要であり、連邦エネルギー規制委員会（FERC）は競争入札に参加した非電気事業者の送電線アクセスを考慮して、電力会社に託送義務を課すことを提案している。今後は送配電部門の規制緩和が課題とされている。

電力市場の自由化は米国、欧州で進みつつあり、日本においても近年本格的に議論が始まった。すでに電力会社に対する自家発の余剰電力の売電が法的にも認可され、分散電源と電気事業者の電力系統との連系（逆潮流）が開始された。これは産業用自家発やごみ発電、太陽光発電に活用されている。さらに、通産省・エネルギー庁は電気事業法を改正し、卸売り事業の自由化と自家発の電力小売りを認める方針を打ち出し、1996年度中の実現が目指されている。今回の規制緩和では自家発側で送電できる範囲内での販売が許可される。また、電気事業審議会は電気事業参入規制の緩和と同時に、電力託送も認めるように答申しており<sup>[19]</sup>、近い将来に託送が実現する可能性は高まりつつある。

## (2) 電力託送の種類

電力託送は、送り手と受け手の違いにより次の通り3種類に分けられる。それぞれの託送イメージを図2-1に示す。

### 1) 電気事業者間の卸電力融通

電気事業者が、他の電気事業者から電力融通を受ける場合に、その中間に存在する電気事業者の送電線を利用する。

### 2) 卸電力託送

非電気事業者（QF、独立系電気事業者など）が売電価格の高い電力会社に卸供給する場合に、自社発電設備の位置する電力会社から中間にある電力会社の送電線を利用する。この託送により、買い手側の独占状態が解消され、買い手同志の競争が導入されるため、送り手側が有利になるように運用できる。

### 3) 小売電力託送

小売電力託送には次の2つの場合がある。

- － 自家発を保有する産業用需要家が他の自社事業所に電力会社の送電線を利用して電力供給を行う場合。
- － 需要家が供給区域外の電力会社または非電気事業者から買電する場合。

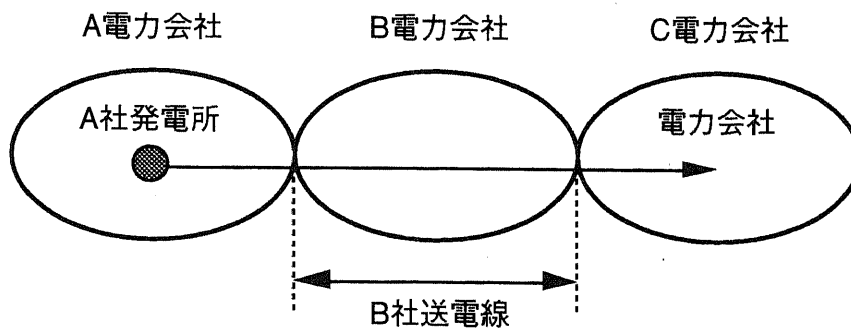
## (3) 電力託送の効果

従来のコジェネの運用においては、発電した電力はその場で消費する必要があるため、コジェネ運転の最大出力が電力需要で制約されてきた。一方、電力需要に合わせた発電では熱供給と熱需要とのギャップにより熱の余剰が発生するが、その場合、単独のコジェネプラントでは熱は廃棄されざるをえない。コジェネが地域熱供給と結合されている場合には、余剰となった熱を熱源として利用することが可能である。コジェネ・システムのエネルギー効率を上げるためにはこの余剰熱の廃棄を削減する必要がある。したがって、電力を融通できない現状では、熱配管を整備し地域熱供給システムと合体する方策をとらなければならない。しかしながら、熱配管等のインフラ整備は多額の投資を必要とするとともに、熱の損失やポンプ動力を考慮すれば遠方までの熱輸送は困難である。

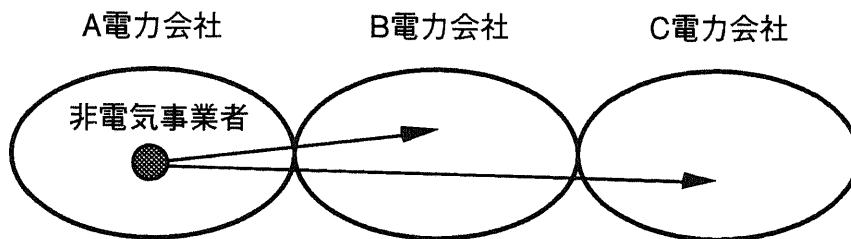
他方、電力託送が認められれば余剰電力を他の需要家に送ることによって有効利用できるため、熱需要に合わせた運用を行い熱の廃棄をなくすることが可能となる。地域熱供給を行う場合と電力託送を利用する場合でのコジェネ運用の基本的な違いを図2-3に示した。前者では縦軸（熱）方向の調整を

図2-1 電力託送の種類

(a) 電気事業者間の卸電力託送

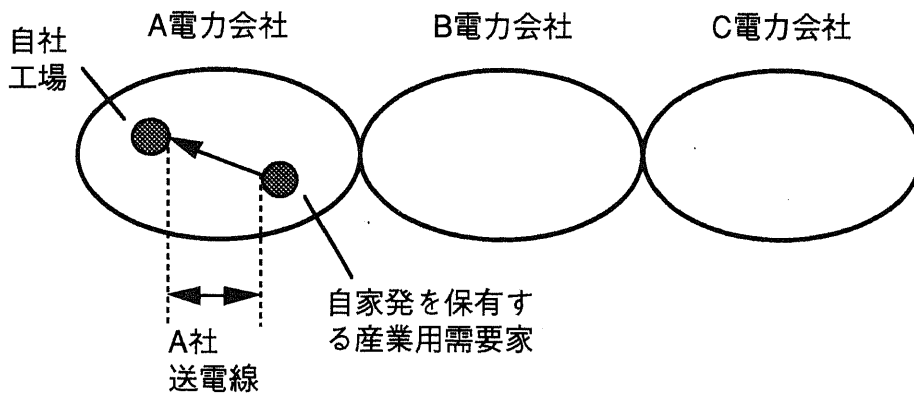


(b) 卸電力託送

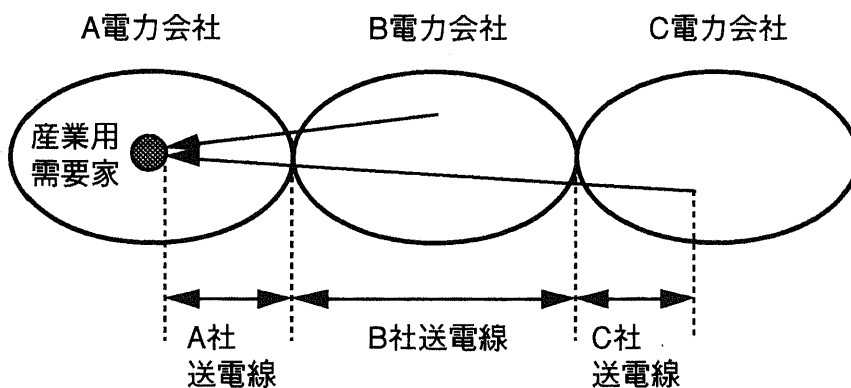


(c) 小売電力託送

自家発からの電力供給：



他電力会社等からの買電：





行うが、後者では横軸（電力）方向の調整により熱の廃棄を抑制する。

また、図2-2に電力託送が発生する状況をイメージとして示した。図中のコジェネ熱電比はコジェネの熱出力／電力出力を意味する。図では熱需要が相当する電力需要を上回る状況（例えば、住宅における夕方から夜にかけて）とその逆の状況（例えば、オフィスにおける昼間）を表している。この図の場合ハッチした部分において電力託送が起こると予想される。また、昼間の超過した電力需要については、コジェネの設備コストによっては電力系統から買電することが考えられる。

この時、託送の効果としては次が挙げられる。

- i) コジェネ稼働率の向上
- ii) 稼働率向上に伴う経済性の改善
- iii) 余剰熱の発生抑制によるエネルギー効率の向上
- iv) 託送受手側の電力購入コストの削減
- v) 系統電力に対する負荷削減に伴う系統発電所における廃熱の減少

（系統発電所の排熱は一般的に有効利用されないで廃棄される。）

コジェネ本体の経済性の向上は、個々の事業体にとって導入意欲を高めることにつながる。また、系統発電所における廃熱の削減は社会的にみたエネルギー効率の改善をもたらす。すなわち、コジェネがミクロ的と同時にマクロ的にも便益を産む状況を作り出すため、コジェネ導入が促進されることが期待できる。

図2-2 電力託送を含めたコジェネ運用のイメージ

（熱需要に合わせて発電し、余剰電力を託送する）

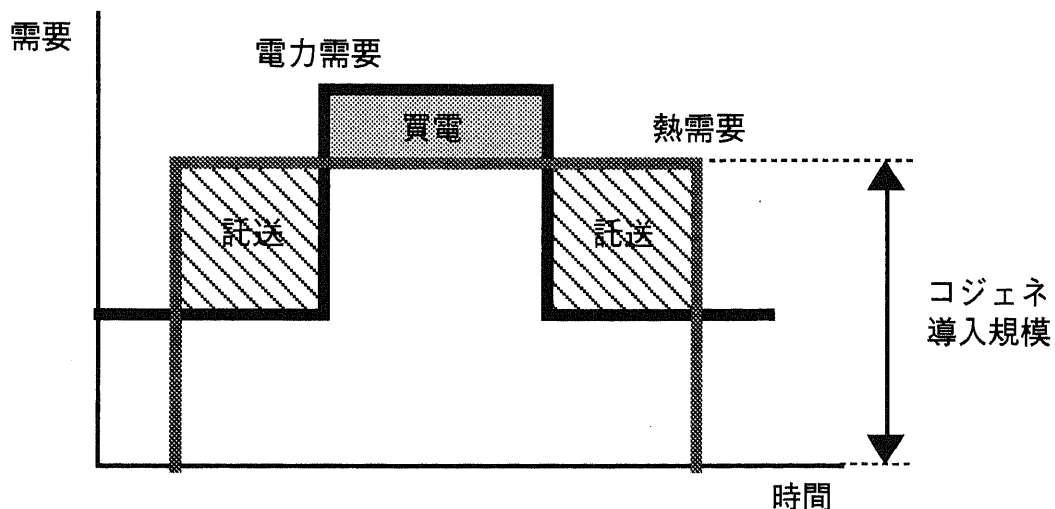
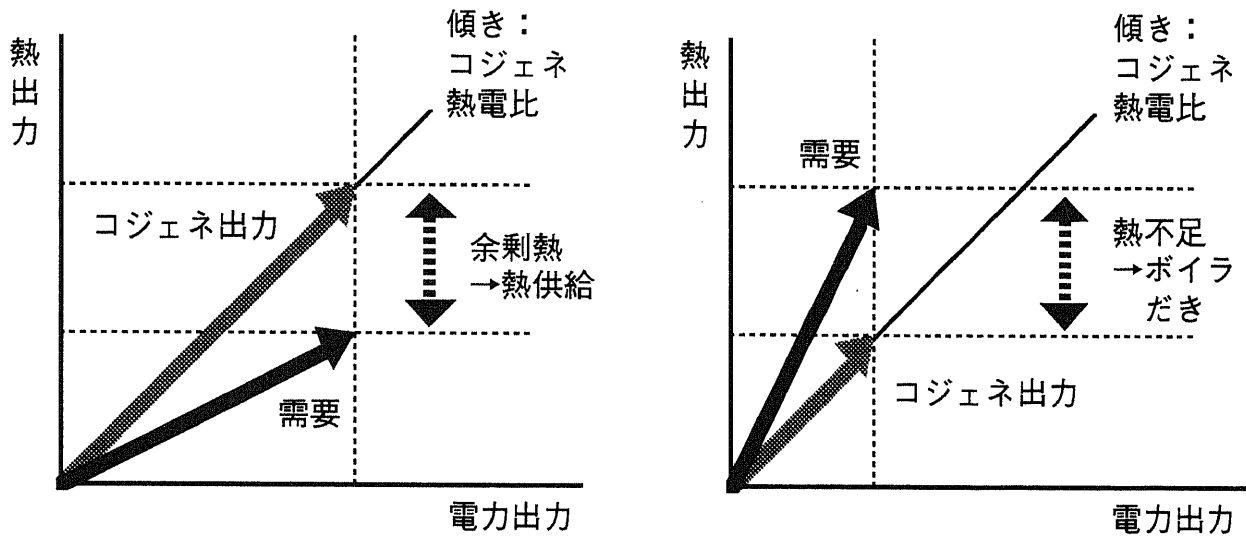
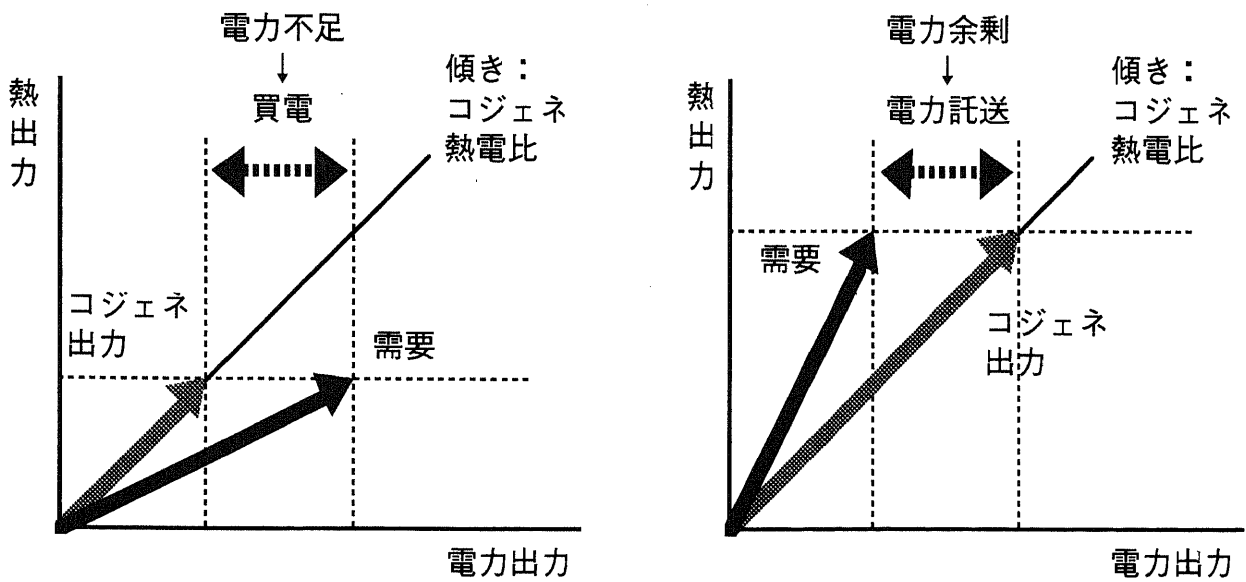


図2-3 熱調整と電力調整によるコジェネ運用方法の違い

(a) 熱供給またはボイラ追いだきによる調整



(b) 電力託送または買電による調整



注: コジェネ熱電比 ..... コジェネの熱出力/電力出力

## 2.2.2 自家発便益の最大化モデル

本章では、コジェネ自家発保有者の行動を合理的な評価に基づく結果と考え、その挙動を最適化型モデルとして定式化する。挙動はその最適解として得ることができる。

## (1) モデル化の考え方

コジェネ自家発保有者は電力料金が与えられた状況の下で、コスト的に有利であれば自家発を運転すると考えられる。すなわち、ある経済的評価を最大化するような合理的な行動をとるとみなすことができる。そこで、ここでは厚生経済学<sup>[20]</sup>の考え方に基づいて、自家発保有者の便益の最大化に従ってコジェネの挙動を導く。この基準は基本的に次式で表される。

$$J = \int_0^X P_e(x) dx + \int_0^Y P_h(y) dy - C(X, Y) \rightarrow \text{Max.} \quad \dots (2.1)$$

ただし、

$P_e(x)$ ：コジェネ保有者の電力の限界効用関数 (willingness to pay)

$P_h(y)$ ：同熱の限界効用関数

$C(x, y)$ ：コスト関数 (設備費、燃料費、買電費等を含む)

すなわち、電力、熱を消費することによって得られる効用からそれに要するコストを差し引いた便益を最大にするよう行動すると考える。

## (2) モデル化の前提

ここでは、まず、簡略化されたモデルから出発し、より複雑な想定を加えていく。以下の手順でモデルの作成および最適挙動の導出を行う。

- |          |      |            |
|----------|------|------------|
| 1時間帯モデル： | i)   | 託送を含まないモデル |
|          | ii)  | 託送を含めたモデル  |
| 2時間帯モデル： | iii) | 託送を含まないモデル |
|          | iv)  | 託送を含めたモデル  |

なお、1時間帯モデルでは電力、熱とも1時間帯とするが、2時間帯モデルでは電力を2時間帯に、熱を1時間帯とみなす。これは発電に伴う熱供給と熱需要とのギャップを持たせるためであり、今回の最適挙動の一般性を失うものではない。電力、熱ともに多時間帯に拡張した場合も、この結果から推定できる。

また、設備コストは線形を仮定する。電力託送のコストは託送電力量に比例すると想定する。

### 2.2.3 変数等の定義

以下では2時間帯モデルの記述のため時間帯の添え字をつけているが、一時間帯モデルでは添え字のない変数を用いるとともに時間は1年を単位として表現する。

〈時間帯〉

$i$  : 時間帯区分 ( $i=1$ : オフピーク,  $i=2$ : ピーク)

$T_i$  :  $i$ 時間帯の時間数 (時間)

〈設備容量〉

$K$  : コージェネ設備容量 (kcal/h)

〈コージェネ運用〉

$X_{Ni}$  :  $i$ 時間帯のコージェネ発電量 (kcal/h)

$X_{Ui}$  :  $i$ 時間帯のコージェネ買電量 (kcal/h)

$X_{Ri}$  :  $i$ 時間帯の託送受け手側の買電量 (kcal/h)

$X_{Wi}$  :  $i$ 時間帯の託送電力量 (kcal/h)

$Y$  : 熱供給量 (kcal/h)

〈コストパラメータ〉

$\gamma$  : コージェネ固定費 (円/(kcal/h))

$\eta$  : コージェネ燃料費 (円/kcal)

$\delta$  : 熱供給固定費 (円/(kcal/h))

$\varepsilon$  : ボイラ追いだき用燃料費 (円/kcal)

$P_{Ui}$  :  $i$ 時間帯の電力料金 (円/kcal)

$P_W$  : 託送料金 (円/kcal)

〈コージェネ特性パラメータ〉

$\rho$  : コージェネ熱電比 (熱出力/電力出力) (—)

〈限界効用関数〉

$P_{eNi}$  :  $i$ 時間帯のコージェネ保有者の電力の限界効用関数 (円/kcal)

$P_{eRi}$  :  $i$ 時間帯の託送受け手側の電力の限界効用関数 (円/kcal)

$P_h$  : コージェネ保有者の熱の限界効用関数 (円/kcal)

## 2.3 1時間帯モデルによる分析

### 2.3.1 電力託送を含まない場合

#### (1) コジェネ自家発保有者の評価関数

まず、託送を含まない、単独のコジェネ自家発の挙動を導く。コジェネの熱出力が十分な場合と熱が不足しボイラ追いだきで補う場合では、ボイラ燃料費が加わるためコスト関数が異なることから、2つのケースに分けて定式化する。各々について(2.1)式の評価基準は次のように表現される。(2.2)(2.5)式の第1項目が電力の効用、第2項目が熱の効用、第3項目がコジェネの供給コスト、第4項目が買電コストを意味する。

ケース1：追いだきしない場合

$$J = \int_0^{x_U+x_N} P_{eN}(x)dx + \int_0^Y P_h(y)dy - (\gamma K + \eta X_N + \delta Y) - P_U X_U \rightarrow \text{Max.} \quad \dots (2.2)$$

s.t.

$$X_N \leq K \quad \dots (2.3)$$

$$Y \leq \rho X_N \quad \dots (2.4)$$

ケース2：追いだきする場合

$$J = \int_0^{x_U+x_N} P_{eN}(x)dx + \int_0^Y P_h(y)dy - [\gamma K + \eta X_N + \delta Y + \varepsilon(Y - \rho X_N)] - P_U X_U \rightarrow \text{Max.} \quad \dots (2.5)$$

s.t.

$$X_N \leq K \quad \dots (2.6)$$

$$Y > \rho X_N \quad \dots (2.7)$$

#### (2) 最適解の導出

##### 1) ケース1の最適解

まず、ケース1についてラグランジアンを次式のように構成し、クーン・タッカー条件から最適解を求める。

$$H = \int_0^{x_U+x_N} P_{eN}(x)dx + \int_0^Y P_h(y)dy - (\gamma K + \eta X_N + \delta Y) - P_U X_U + \lambda(K - X_N) + \mu(\rho X_N - Y) \quad \dots (2.8)$$

最適条件は次の通り導かれる。

$$\frac{\partial H}{\partial X_U} = P_{eN} - P_U \leq 0 \quad \dots (2.9)$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_N} = P_{eN} - \eta - \lambda + \mu \rho \leq 0 \quad \dots (2.10)$$

$$\frac{\partial H}{\partial Y} = P_h - \delta - \mu \leq 0 \quad \dots (2.11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial K} = -\gamma + \lambda \leq 0 \quad \dots (2.12)$$

$$\lambda (K - X_N) = 0 \quad \dots (2.13)$$

$$\mu (\rho X_N - Y) = 0 \quad \dots (2.14)$$

上記の不等号は次を意味する。

“=” …… 内点解（ゼロでない解）

“<” …… 端点解（ゼロ）

以下では買電が起これず（ $P_U > P_{eN}$ ）， $X_N$ ， $Y$ ， $K$ が正となる条件の下で最適解を求める。ケース1の解はさらに2つのケースに分かれる。すなわち，排熱が余るケースと熱需給が過不足ないケースになる。

(a) 排熱が余るケース（ $Y < \rho X_N$  のとき）

(2.14)式で排熱が余る条件から $\mu$ はゼロとなる。 $K > 0$ より，(2.12)式の等号条件から

$$\lambda = \gamma > 0 \quad \dots (2.15)$$

したがって，(2.13)式より次が成り立つ。

$$K = X_N \quad \dots (2.16)$$

さらに，(2.10)(2.11)式より次の最適条件を得る。

$$P_{eN} = \eta + \gamma \quad \dots (2.17)$$

$$P_h = \delta \quad \dots (2.18)$$

これより，本ケースの最適解を $(X_1, Y_1)$ とすれば，次式で与えられる1点となる。

$$X_1 = P_{eN}^{-1}(\eta + \gamma) \quad \dots (2.19)$$

$$Y_1 = P_h^{-1}(\delta) \quad \dots (2.20)$$

また，この最適解が成立するための $\rho$ の範囲は $Y < \rho X_N$ より次となる。

$$\rho > \rho_1 = \frac{Y_1}{X_1} \quad \dots (2.21)$$

(b) 排熱が過不足ないケース ( $Y=\rho X_N$  のとき)

排熱が余らないため(2.14)式から次を得る.

$$\mu > 0 \quad \dots (2.22)$$

(2.15)(2.16)式は同様に成り立つ. (2.10)(2.11)式より次を得る.

$$P_{eN} = \eta + \gamma - \mu\rho \quad \dots (2.23)$$

$$P_h = \delta + \mu \quad \dots (2.24)$$

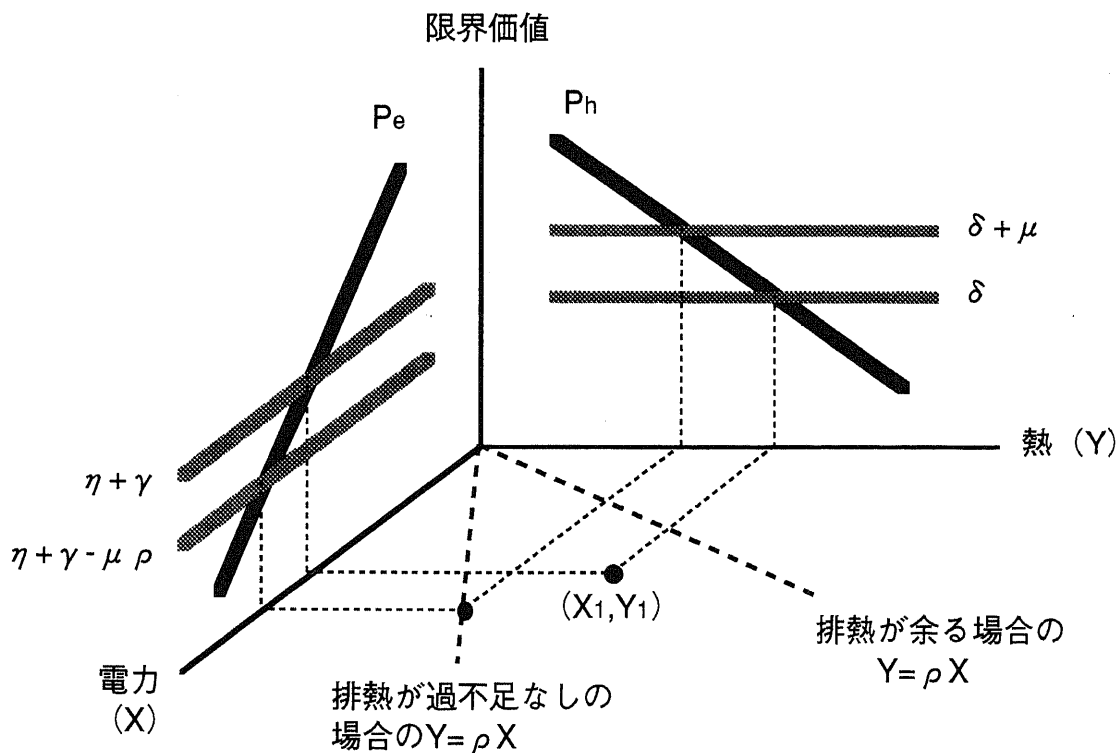
したがって, 最適挙動は次となる. これは $\mu$ に依存して変化する.

$$X_N = P_{eN}^{-1}(\eta + \gamma - \mu\rho) \quad \dots (2.25)$$

$$Y = P_h^{-1}(\delta + \mu) \quad \dots (2.26)$$

需要の熱電比をコジェネの熱電比に一致させるため $\mu$ が活性化し, 電力の限界価値を下げ, 熱の限界価値を上げて需要が調整される. 以上の最適解のイメージを図2-4に示す.

図2-4 コジェネの排熱が十分である場合 (ケース1) の最適解

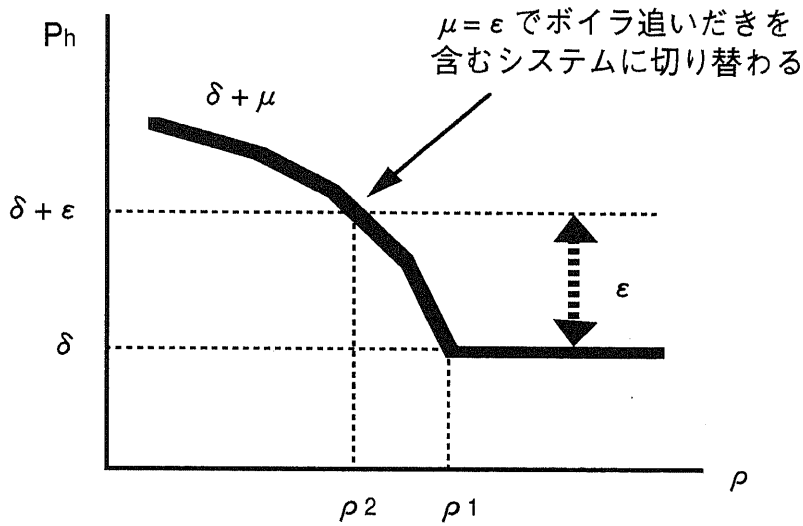


(23)式では,  $\rho$ が小さくなるに従って $\mu$ は増大し, 熱の限界価値は上昇していく. この時, ボイラ追いだきで熱を賄えば必要な燃料費は $\epsilon$ であるため, 熱の限界価値は $\delta + \epsilon$ となる. これは $\rho$ によらず固定的であるため, やがてコジェネのみのシステムにおける熱の限界価値はボイラ追いだきを含めた場合

の限界価値を上回る結果となる（図2-5）。自家発保有者にとってみればコジェネのみシステムでは高い負担を強いられることになるので、 $\mu=\varepsilon$ となった時点でボイラありのシステムに切り替わると解釈できる。この点を  $(X_N, Y)=(X_2, Y_2)$ ， $\rho=\rho_2$ とすれば、本ケースの $\rho$ の条件は $Y \leq \rho_1 X_N$ を考慮して次となる。

$$\rho_2 \leq \rho \leq \rho_1 \quad \dots (2.27)$$

図2-5 コジェネのみからボイラ追いだきへの転換



## 2) ケース2の最適解 ( $Y > \rho X_N$ のとき)

ケース2の(2.5)(2.6)式から次式のようにラグランジアンを構成し、ケース1と同様に最適条件を導く。この場合のラグランジアンは次式の通り。 $Y > \rho X_N$ の前提から $\mu$ を含む項は省いている。

$$H = \int_0^{X_U+X_N} P_{eN}(x)dx + \int_0^Y P_h(y)dy - \left( \gamma K + \eta X_N + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_N) \right) - P_U X_U + \lambda (K - X_N) \quad \dots (2.28)$$

最適条件は次のように求められる。

$$\frac{\partial H}{\partial X_N} = P_{eN} - \eta - \lambda + \varepsilon \rho \leq 0 \quad \dots (2.29)$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_U} = P_{eN} - P_U \leq 0 \quad \dots (2.30)$$

$$\frac{\partial H}{\partial Y} = P_h - \delta - \varepsilon \leq 0 \quad \dots (2.31)$$



$$\frac{\partial H}{\partial K} = -\gamma + \lambda \leq 0 \quad \dots (2.32)$$

$$\lambda (K - X_N) = 0 \quad \dots (2.33)$$

先と同じく買電しない場合について最適解は以下のように得られる。(2.32)式から $\lambda = \gamma > 0$ より,

$$K = X_N \quad \dots (2.34)$$

(2.29)(2.31)式より,

$$P_{eN} = \eta + \gamma - \varepsilon \rho \quad \dots (2.35)$$

$$P_h = \delta + \varepsilon \quad \dots (2.36)$$

したがって、最適挙動は次で与えられる.

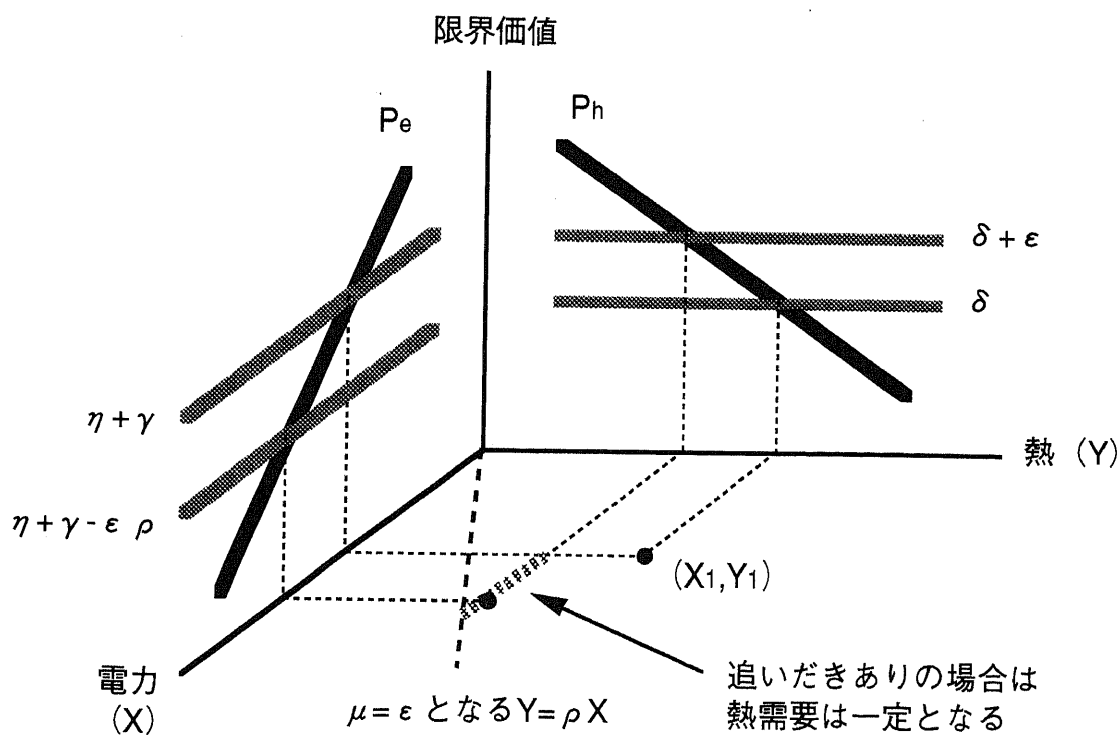
$$X_N = P_{eN}^{-1}(\eta + \gamma - \varepsilon \rho) \quad \dots (2.37)$$

$$Y = P_h^{-1}(\delta + \varepsilon) \quad \dots (2.38)$$

これは電力需要のみ $\rho$ に依存して変化するが、熱需要は一定となる。これが最適解となる $\rho$ の範囲は次となる.

$$0 \leq \rho < \rho_2 \quad \dots (2.39)$$

図2-6 ボイラ追いだきありの場合（ケース2）の最適解



(2.35)式は、電力の限界価値として、コジェネの固定費+燃料費から排熱がボイラの燃料費を節約している分を割り引いた値を意味している。一方、熱の限界価値は(2.36)式から熱供給の固定費とボイラ燃料費の和となる。この場合の解の様子を図2-6に示す。

以上で得られた最適解を表2-1に整理して示す。

表2-1 コジェネ自家発（託送なし）の最適解

ケース	排熱余剰	排熱過不足なし	追いだきあり
電力の 限界価値	$P_{eN} = \eta + \gamma$	$P_{eN} = \eta + \gamma - \mu\rho$	$P_{eN} = \eta + \gamma - \varepsilon\rho$
熱の 限界価値	$P_h = \delta$	$P_h = \delta + \mu$	$P_h = \delta + \varepsilon$
熱電比 $\rho$ の範囲	$\rho > \rho_1 = Y_1/X_1$ (上記の限界価値を与え る $X_N, Y$ の比)	$\rho_1 \geq \rho > \rho_2$ ( $\rho_2 : \mu = \varepsilon$ となる $\rho$ )	$\rho_2 \geq \rho \geq 0$

### (3) 線形な限界効用関数の場合の最適需要

#### 1) 電力、熱需要の限界効用関数

以上の最適解から、コジェネ自家発の挙動は熱電比 $\rho$ に大きく依存することが明かとなった。ここでは、電力および熱の限界効用関数を次のような1次関数と仮定し、具体的な需要規模を導く。

限界効用関数：

$$P_{eN}(X_N) = a - b X_N \quad \dots (2.40)$$

$$P_h(Y) = \alpha - \beta Y \quad \dots (2.41)$$

#### 2) 排熱が余る場合

$$X_1 = \frac{a - \eta - \gamma}{b} \quad \dots (2.42)$$

$$Y_1 = \frac{\alpha - \delta}{\beta} \quad \dots (2.43)$$

#### 3) 排熱が過不足なしの場合

電力、熱の限界価値の式から $\mu$ を消去し、次を得る.

$$a - b X_N + \rho (\alpha - \beta Y) = \gamma + \eta + \delta \rho \quad \dots (2.44)$$

先の $X_1, Y_1$ を代入し、次の2式を解く.

$$b(X_N - X_1) + \beta \rho (Y - Y_1) = 0 \quad \dots (2.45)$$

$$Y = \rho X_N \quad \dots (2.46)$$

これより、 $(X_N, Y)$  は次式で表される楕円となる.

$$b\left(X_N - \frac{X_1}{2}\right)^2 + \beta\left(Y - \frac{Y_1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}(b X_1^2 + \beta Y_1^2) \quad \dots (2.47)$$

3) 追いだきをする場合

$$X_N = \frac{a - \eta - \gamma - \varepsilon \rho}{b} \quad \dots (2.48)$$

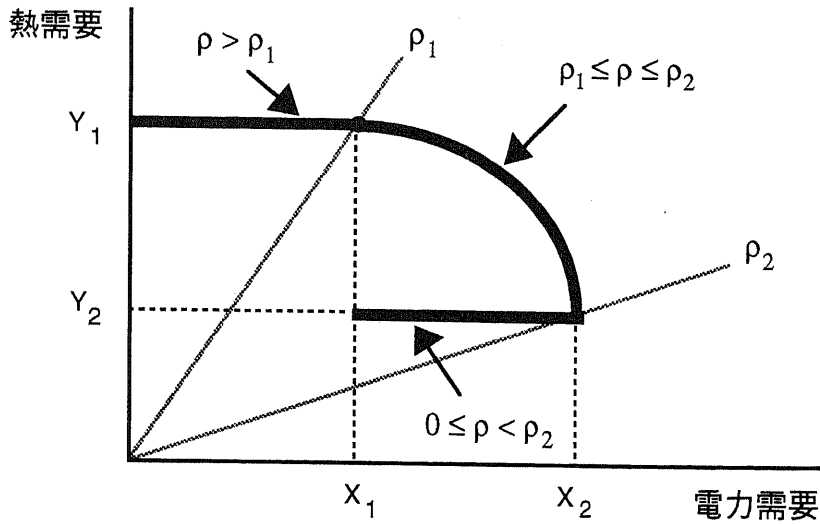
$$Y_2 = \frac{\alpha - \delta - \varepsilon}{\beta} \quad \dots (2.49)$$

ここで、電力供給の燃料コスト $\eta$ は発電効率の関数であることに注意が必要である. コジェネの発電効率はある熱電比までは一定であるが、それ以上においては熱電比に依存し、熱電比が大きくなるほど発電効率が小さくなる. これはコジェネの総合効率が上限を持つことによる. すなわち、ある熱電比以上では総合効率が上限にはりついて飽和するため、投入エネルギーに対して熱供給の割合が拡大すれば電力供給の割合が低下せざるを得ない.  $\eta$ が熱電比に依存し始める点 $\rho_0$ を越えた熱電比では $\eta$ が増大するので、電力の限界価値は増加し電力需要は $\eta$ 一定とみなした値よりも低減する. なお、以下では $\rho_0$ が排熱余剰の状態に含まれると仮定して議論を進める.

以上に基づいた、 $\rho$ に対する自家発の最適挙動（電力、熱需要）を図2-7に示す. 挙動は排熱の利用状況に対応して次のように変化する.

- i) 排熱余剰の場合       $\dots$        $\rho_0$ 以下では $(X_1, Y_1)$ の一点に位置する.  
 $\rho_0$ より大になると $Y_1$  = 一定の直線上に位置する.
- ii) 過不足なしの場合       $\dots$        $\rho$ に従って曲線上に位置する.
- iii) 追いだきする場合       $\dots$        $Y_2$  = 一定の直線上に位置する.

図2-7 託送を含まない場合のコジェネ最適挙動



#### (4) 電力と熱の限界価値の挙動

最適需要を与える電力，熱の限界価値を図2-8に示す．切り替え点となる $\rho_1$ および $\rho_2$ を境界として限界価値の動きが変化する．電力の場合は，まず $\rho$ が増加するに従って排熱の利用量が拡大するため限界価値は低下する．次いでボイラ追いだきを取り除いてコジェネ排熱と熱需要を均衡させるために限界価値は増加を始め，排熱が余剰となる状態に至って当初（ $\rho=0$ ）の時と同じ限界価値になる．これは，発電のみであれば熱需要とは無関係である一方，排熱が余剰であれば同じく熱需要とは無関係になることを反映している．

熱の場合は，追いだきありの範囲では限界価値が高く，コジェネの排熱のみを用いる状態に入ると限界価値が低下する．電力と同様に排熱余剰となる状態で限界価値は一定値に落ち着く．これは，追いだき用の燃料を必要とする $\rho < \rho_2$ の範囲では設備費と燃料費を負担するが，排熱余剰の $\rho > \rho_1$ の範囲では燃料がいらないため設備費のみを負担することによる．

コジェネの代わりに買電が起きる条件は次のように求められる．(2.9)式より $X_U > 0$ となる時，

$$P_{eN} = P_U \quad \dots (2.50)$$

(2.10)(2.12)式より， $X_N = K = 0$ となることから，

$$P_{eN} < \eta + \gamma + \mu \rho \quad \dots (2.51)$$

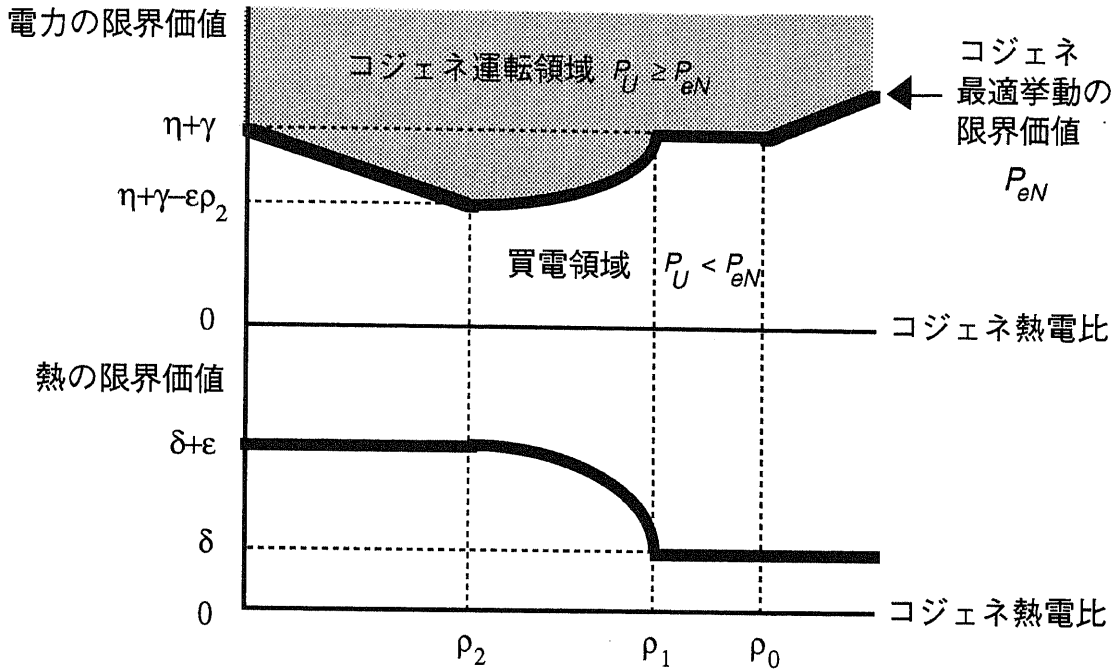
したがって，次が買電の条件となる．

$$P_U < \eta + \gamma + \mu \rho \quad \dots (2.52)$$

結局，電力料金が図2-8の実線（最適解の限界価値 $P_{eN}$ ）より小さい領域では買電が行われ，大きい

領域でコジェネが運転されることになる。なお、コジェネでない通常の自家発の場合には領域の境界が $\eta+\gamma$ となるので、コジェネであることにより $0 \sim p_1$ において運転領域が拡大することがわかる。

図2-8 電力、熱の限界価値の挙動

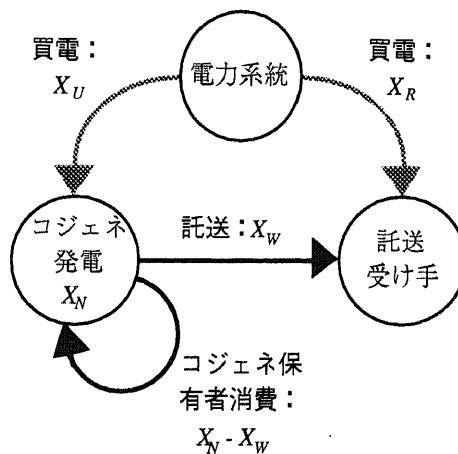


### 2.3.2 電力託送を含む場合

#### (1) 託送受け手を含むコジェネシステムの構成

コジェネ自家発から直接電力を受ける需要家と、託送を経由して電力を受ける需要家の2者を考える。電力系統からの買電を考慮した電力託送を含めた場合のスキームは図2-9に示す形を想定する。ここでは、コジェネの発電分 $X_N$ から $X_W$ が受手側に託送されるとする。

図2-9  
託送受け手を含む  
コジェネスキーム



(2) 評価関数

託送を含める場合には、評価関数に託送受け手の電力の効用を加える。また、託送なしの場合と同様にボイラ追いだきを行う時にコスト関数の切り替えが発生するため、二つのケースに分けて定式化する。次の定式化において、第1項目がコジェネ保有者の電力の効用、2項目が託送受け手の電力の項用、3項目がコジェネ保有者の熱の効用、4項目がコジェネのコスト、5項目が買電コスト、6項目が託送コストを表わしている。

ケース1：追いだきしない場合

$$J = \int_0^{X_U+X_N-X_W} P_{eN}(x)dx + \int_0^{X_R+X_W} P_{eR}(x)dx + \int_0^Y P_h(y)dy - (\gamma K + \eta X_N + \delta Y) \\ - P_U(X_U+X_R) - P_W X_W \rightarrow \text{Max.} \quad \dots (2.53)$$

s.t.

$$X_N \leq K \quad \dots (2.54)$$

$$X_W \leq X_N \quad \dots (2.55)$$

$$Y \leq \rho X_N \quad \dots (2.56)$$

ケース2：追いだきする場合

$$J = \int_0^{X_U+X_N-X_W} P_{eN}(x)dx + \int_0^{X_R+X_W} P_{eR}(x)dx + \int_0^Y P_h(y)dy - [\gamma K + \eta X_N + \delta Y + \epsilon(Y - \rho X_N)] \\ - P_U(X_U+X_R) - P_W X_W \rightarrow \text{Max.} \quad \dots (2.57)$$

s.t.

$$X_N \leq K \quad \dots (2.58)$$

$$X_W \leq X_N \quad \dots (2.59)$$

$$Y > \rho X_N \quad \dots (2.60)$$

(3) 最適解の導出

1) 電力託送の挙動

まず、最適解として託送の発生するときの挙動を求める。先と同様にラグランジアンを次式の通り構成する。ただし、 $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\theta$ はラグランジエ乗数。ケース2では $\mu=0$ とみなす。

$$H = J + \lambda (K - X_N) + \mu (\rho X_N - Y) + \theta (X_N - X_W) \quad \dots (2.61)$$

託送に関する最適条件は次のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial X_W} = -P_{eN} + P_{eR} - P_W - \theta \leq 0 \quad \dots (2.62)$$

$$\therefore P_{eR} \leq P_{eN} + P_W + \theta \quad \dots (2.63)$$

ここで、託送が生起するとき等号が成り立つ。今、コージェネ保有者と託送受け手が同一の限界効用関数を持っているとする。限界効用関数は単調減少関数と考えてよいので、(2.63)式の条件からコージェネ発電と託送電力の大小関係は次のようになる。

託送が発生している時、 $P_W > 0$ 、 $\theta \geq 0$ より $P_{eR} > P_{eN}$ となるので次式が成り立つ。

$$X_N - X_W > X_W + X_R \geq X_W \quad \dots (2.64)$$

$$\therefore X_N > X_W \quad \dots (2.65)$$

$$\therefore \theta = 0 \quad \dots (2.66)$$

すなわち、コージェネで発電した電力をすべて託送に回すことはない。結局、託送の最適挙動は次で与えられる。すなわち、託送受け手の限界価値が送り手（コージェネ保有者）の限界価値に託送コストを上乗せした額に等しくなるように託送が起きる。

$$P_{eR} = P_{eN} + P_W \quad \dots (2.67)$$

## 2) ケース1の最適解

ケース1の最適条件は次のように導かれる。

$$\frac{\partial H}{\partial X_U} = P_{eN} - P_U \leq 0 \quad \dots (2.68)$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_R} = P_{eR} - P_U \leq 0 \quad \dots (2.69)$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_N} = P_{eN} - \eta - \lambda + \mu \rho + \theta \leq 0 \quad \dots (2.70)$$

$$\frac{\partial H}{\partial Y} = P_h - \delta - \mu \leq 0 \quad \dots (2.71)$$

$$\frac{\partial H}{\partial K} = -\gamma + \lambda \leq 0 \quad \dots (2.72)$$

$$\lambda (K - X_N) = 0 \quad \dots (2.73)$$

$$\mu (\rho X_N - Y) = 0 \quad \dots (2.74)$$

等号が成立するときにゼロでない解を持つ。ここでも買電が起きない状況についてコージェネの最適

挙動を求める。解は排熱が余るケースと排熱が過不足ないケースに分かれる。なお、託送を含まない場合の(2.15)(2.16)式はここでも成り立つ。

(a) 排熱が余るケース

(2.63)(2.70)(2.71)式より次の条件を得る。

$$P_{eN} = \eta + \gamma \quad \dots (2.75)$$

$$P_{eR} = \eta + \gamma + P_w \quad \dots (2.76)$$

$$P_h = \delta \quad \dots (2.77)$$

これが最適解となる熱電比の範囲は次で与えられる。

$$\rho > \rho_1^* = \frac{Y_1}{X_1^*} \quad \dots (2.78)$$

ただし、

$$X_1^* = P_{eN}^{-1}(\eta + \gamma) + P_{eR}^{-1}(\eta + \gamma + P_w) \quad \dots (2.79)$$

(b) 排熱が過不足ないケース

(2.63)(2.70)(2.71)式より次の条件を得る。

$$P_{eN} = \eta + \gamma - \mu \rho \quad \dots (2.80)$$

$$P_{eR} = \eta + \gamma - \mu \rho + P_w \quad \dots (2.81)$$

$$P_h = \delta + \mu \quad \dots (2.82)$$

託送を含む場合についても、含まない場合と同じく $\mu=\varepsilon$ となる熱電比においてボイラ追いだきに切り替えられる。その点を $\rho_2^*$ とすれば、このケースが最適解となる範囲は次となる。

$$\rho_2^* \leq \rho \leq \rho_1^* \quad \dots (2.83)$$

3) ケース2の最適解

(2.57)式のラグランジアンより最適条件は次のように求められる。

$$\frac{\partial H}{\partial X_U} = P_{eN} - P_U \leq 0 \quad \dots (2.84)$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_R} = P_{eR} - P_U \leq 0 \quad \dots (2.85)$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_N} = P_{eN} - \eta - \lambda + \varepsilon \rho + \theta \leq 0 \quad \dots (2.86)$$

$$\frac{\partial H}{\partial Y} = P_h - \delta - \varepsilon \leq 0 \quad \dots (2.87)$$



$$\frac{\partial H}{\partial K} = -\gamma + \lambda \leq 0 \quad \dots (2.88)$$

$$\lambda (K - X_N) = 0 \quad \dots (2.89)$$

買電しない状況について、最適解は次となる。なお、(2.15)(2.16)式も成り立つ。

$$P_{eN} = \eta + \gamma - \varepsilon \rho \quad \dots (2.90)$$

$$P_{eR} = \eta + \gamma - \varepsilon \rho + P_W \quad \dots (2.91)$$

$$P_h = \delta + \varepsilon \quad \dots (2.92)$$

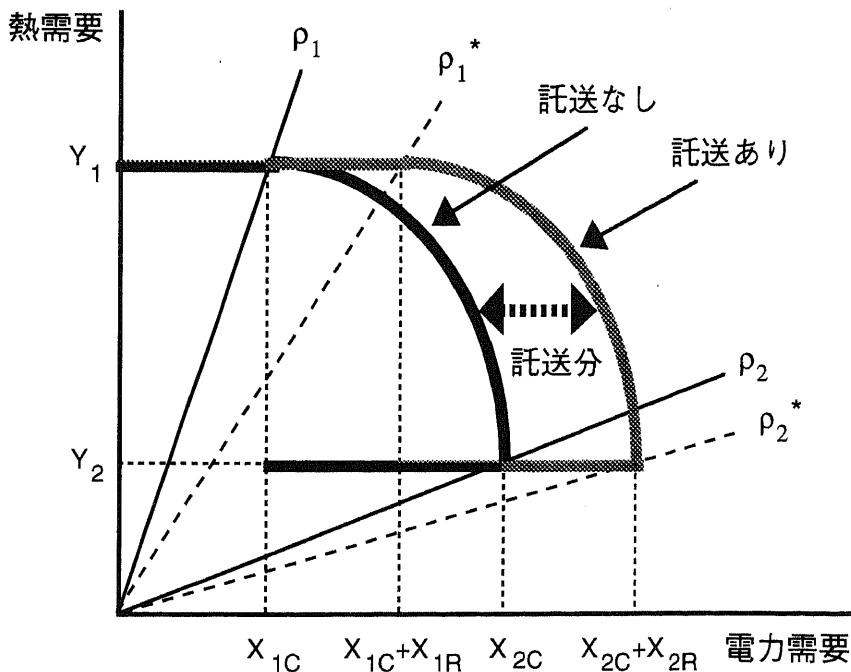
これが最適解となる熱電比の範囲は次の通り。

$$0 \leq \rho < \rho_2^* \quad \dots (2.93)$$

#### (4) 最適需要

以上の最適解は、コジェネ保有者については託送を含まない場合と一致する。すなわち、保有者の需要は変化せず、託送分だけコジェネ発電量が拡大することになる。託送を含まない場合と比較して、含む場合の最適需要の挙動を図2-10に示す。

図2-10 託送の有無別の最適需要の比較

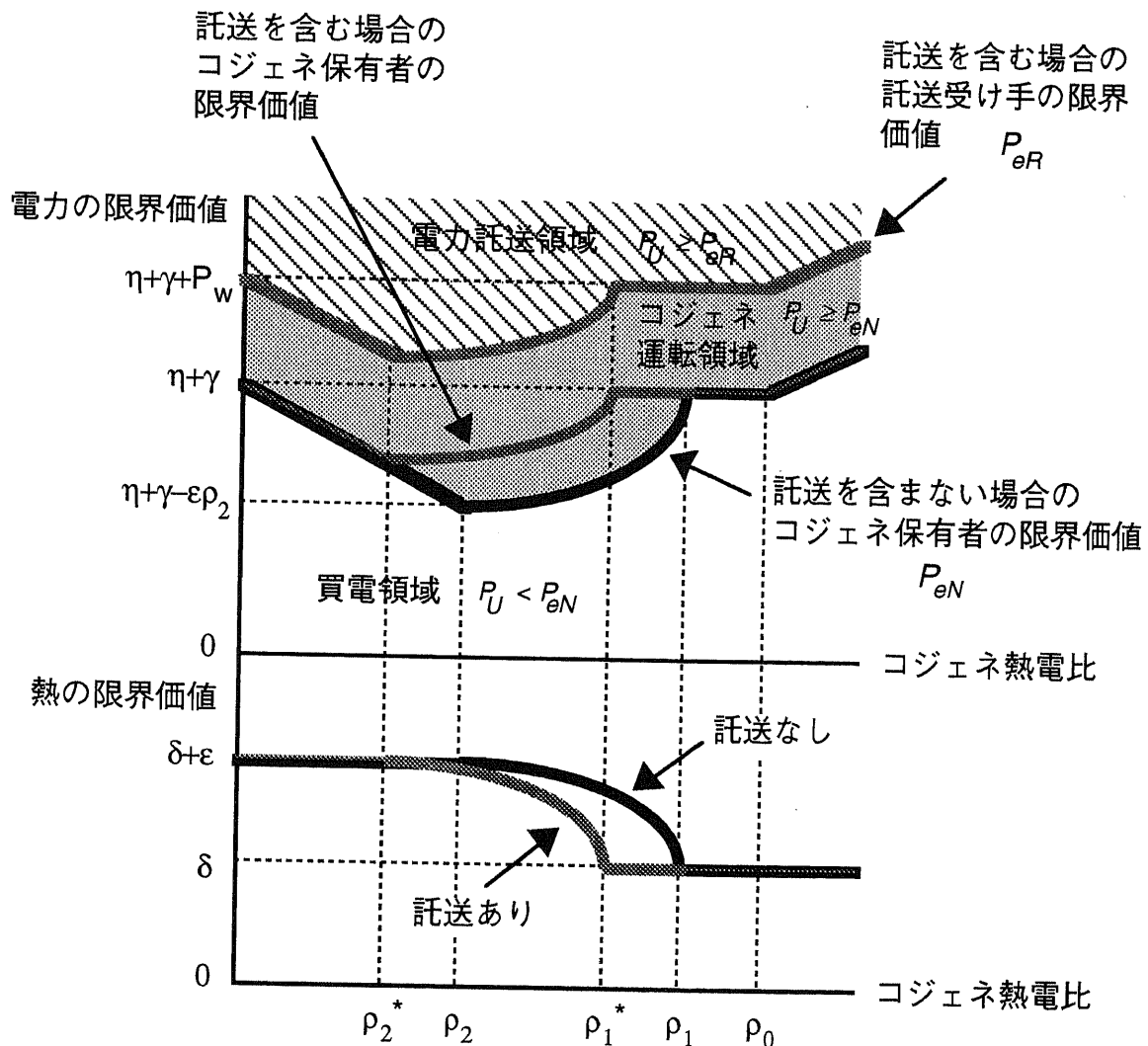


図より、 $\rho_2^* \sim \rho_2$ の範囲では、託送なしの場合にはボイラ追いだきが必要であったが、託送によってコジェネ自家発の電力と熱のバランスが改善されていることがわかる。一方、 $\rho_1^* \sim \rho_1$ の範囲では託送を含めることによって排熱余剰になる。さらに熱電比がかなり大きくなると発電効率の低下を伴うため、排熱余剰と相まってエネルギー効率の低下につながる。したがって、電力託送の影響はコジェネプラントの特性（熱電比）に大きく依存する。

#### (5) 電力と熱の限界価値の挙動

託送を含む場合の最適需要を与える電力、熱の限界価値を、含まない場合と合わせて図2-11に示す。切り替え点が託送を含むことによって低下する。

図2-11 託送の有無別の電力、熱の限界価値の比較



電力料金に対する反応は次のように求められる。託送受け手が買電する条件 ( $X_R > 0$ ,  $X_W = 0$ ) は (2.63)(2.69)(2.70)式より,

$$P_{eR} = P_U \quad \dots (2.94)$$

$$P_{eR} < \eta + \gamma + \mu \rho + P_W \quad \dots (2.95)$$

$$\therefore P_U < \eta + \gamma + \mu \rho + P_W \quad \dots (2.96)$$

すなわち、託送の最適挙動を与える限界価値より電力料金が下回れば、託送を受けずに託送受け手は買電する。逆に上回れば託送が生起する。コジェネ運転および託送の電力料金に対する反応を図2-11に合わせて示した。

### 2.3.3 最適挙動数値例

ここでは、実際の需要に基づいて限界効用関数を求め、コジェネおよび電力託送の具体的な挙動を数値例によって示す。

#### (1) 限界効用関数の推定

事務所ビルの需要を対象に、電力および熱の効用関数を推計する。限界効用関数は1次関数を仮定する[17]。このとき、関数形は価格弾性値を用いて次式のように表わせる。

$$P(x) = \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right) P_0 - \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{P_0}{X_0}\right) x \quad \dots (2.97)$$

ただし,

$\varepsilon$  : 価格弾性値 (次式で定義される料金の変化率に対する需要の変化率の比)

$$\varepsilon = - \frac{P}{x} \frac{\partial x}{\partial P} \quad \dots (2.98)$$

$P_0$  : 現在の電力料金

$X_0$  : 現在の需要

事務所ビルの需要事例[21]から現在の需要量を求め、1日を1時間帯とみなして電力および熱の限界効用関数を推計したところ以下を得た。ただし、パラメータは次のように設定した。

電力料金: 20 (円/kWh)

都市ガス料金: 0.005 (円/kcal)

価格弾性: 0.3 (電力、熱ともに同じ) [16][22]

なお、限界効用関数の単位は (円/kcal) ,  $x$ および $y$ の単位は (kcal/h/m<sup>2</sup>) である。

$$P_{eN}(x) = 0.101 - 0.00567 x \quad \dots (2.99)$$

$$P_h(y) = 0.0217 - 0.00122 y \quad \dots (2.100)$$

(2) 入力パラメータの設定

1) コジェネ本体のコスト

コジェネの設備コストとしては概ね15-30（万円/kW）の値が報告されている[23][24][25]。これより、コジェネ本体の設備コストとして25（万円/kW）を想定する。

2) ボイラのコスト

ボイラの機器コストおよび熱効率として表2-2に示す値が報告されている[26]。これに基づいて算出したボイラと熱交換機を総合した時のコストおよび熱効率を併せて示した。

表2-2 ボイラの機器コストおよび熱効率

機 器	機器コスト		熱効率
	(万円/出力kW)	(円/kcal/h)	
ボイラ	0.7	8.14	0.9
熱交換器	0.004	0.0465	0.95
ボイラ+熱交換器		8.61	0.86

ボイラの年間コストは次式で算出される。

$$C_B = \frac{C_f}{\eta_B} + \frac{r C_e}{8760 w} \quad \dots (2.101)$$

ただし、

- $C_B$  : ボイラの年間コスト（円/kcal）
- $C_e$  : ボイラの設備コスト（円/(kcal/h)）
- $C_f$  : 燃料コスト（都市ガス0.005円/kcal）
- $\eta_B$  : ボイラの熱効率
- $r$  : 年経費率（17%）
- $w$  : 年間稼働率

これより、燃料費と固定費がほぼ同レベルになる年間稼働率を求めると  $w = 3$  (%) となる。したがって、3%以上稼働する場合には固定費は燃料費より小さくなり、實際上燃料費がほとんど考えられる。そのため、ここでは燃料費のみを考慮する。

### 3) 熱供給コスト（配管建設コスト）

熱供給用の配管建設コストとしては次のデータが報告されている。箱崎の配管建設費は配管と専用溝の中間的な値となっており、代表値としてこの値を用いることとする。

箱崎地域熱供給事業 .... 356.4 (万円/m)

資料[24] 配管 .... 50 (万円/m)

専用溝 .... 500 (万円/m)

箱崎の事例における供給熱量あたりの配管建設コストは表2-3に示す通りである。

表2-3 箱崎の事例における配管建設工事費

		計画／実績値	備 考
主要機器	冷却能力	8,000 (RT)	1 (RT) = 3,320 (kcal/h)
	加熱能力	17,000 (Mcal/h)	
供給熱量		43,560 (Mcal/h)	
総工事費		2,637,000 (千円)	建設単価：356.4 (万円/m)
供給熱量あたり建設費		60.5 (円/kcal/h)	

以上に基づいて、コジェネの供給コストは表2-4に示すように与えた。ここで、電力供給の燃料費は発電効率0.35を仮定した。

また、電力託送に関する料金の実績はないので、託送単価はkWhあたり1円と仮定した。

表2-4 コジェネの供給コスト・パラメータ

	電力供給	熱供給
燃料費 (円/kcal)	0.0143	0.005
固定費 (円/(kcal/h))	49.4	10.3

4) プラント効率

コジェネプラントのエネルギー効率の上限およびボイラの効率は次のように設定した。

コジェネ：	発電効率上限	....	0.35
	総合効率上限	....	0.8
ボイラ：	効率	....	0.9

(3) 事務所的需要における最適挙動

事務所ビルの需要家の限界効用関数から導いた最適解の電力需要-熱需要平面上的挙動を図2-12に示す（ただし、 $\rho=0\sim2$ ）。また、熱電比に対する託送量の変化を図2-13に示す。今回の例では、熱電比の変化に対してコジェネの発電量および託送量の変化は小さい。託送を含めた場合では排熱が過不足ない熱電比の範囲（ $\rho_1^*\sim\rho_2^*$ ）は託送を含まない場合に比べて狭い。

図2-12 電力需要および熱需要の挙動

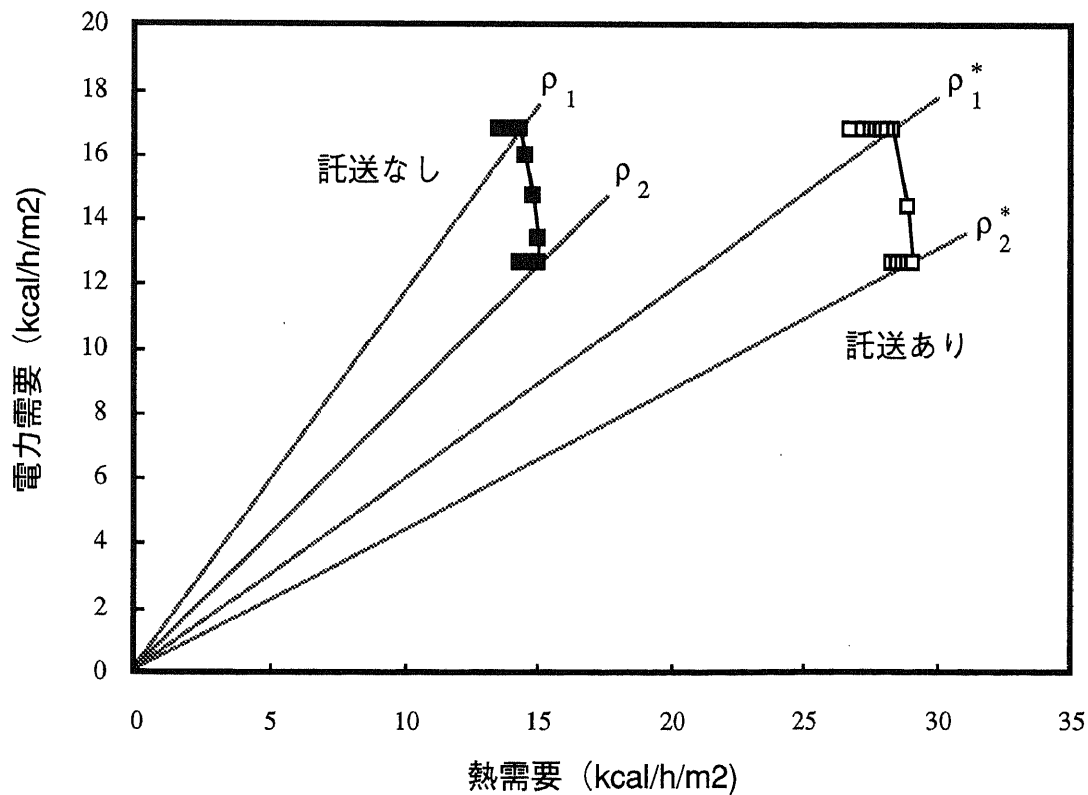
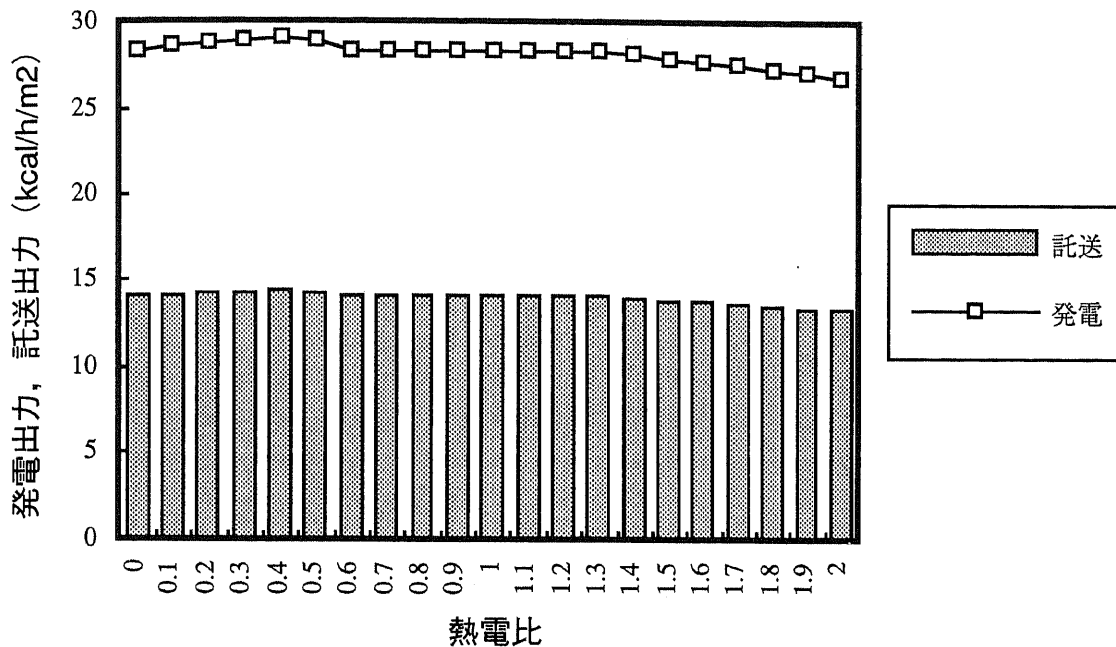


図2-13 コジェネ発電および電力託送の変化



#### (4) 電力および熱の限界価値

最適挙動における電力、熱の限界価値の変化をそれぞれ図2-14、図2-15に示した。なお、図2-14にはコジェネ保有者の限界価値と託送受け手の限界価値を合わせて示した。電力の限界価値は熱電比0.8付近で最も小さくなるので、電力料金が上昇していけばこの程度の熱電比を持つコジェネプラントから運用が始まると考えられる。一方、電力託送は熱電比0.4程度のプラントから導入されると予想される。

また、熱電比約1.3以上において発電効率が低減していくため、限界価値が上昇していく。このとき、電力料金が低い場合（例えば図2-14で20円/Mcal以上）では、熱電比が低い範囲では電力託送が行われても、より高い熱電比を持つコジェネプラントでは自家発電のみになり、さらに高い範囲では買電が行われる。コジェネ保有者が電力を主とした需要家（低位の熱電比）か、熱を主とした需要家（高位の熱電比）かによって、大幅に挙動が異なることがわかる。

熱の限界価値は低位の熱電比では固定費と変動費を負担しているが、熱電比が増加すると排熱が過不足ない状態において限界価値が低下し、固定費のみ負担する状態で一定化する。なお、託送を含む場合には排熱が過不足ない状態が非常に狭く、変化が急激である。

図2-14 電力の限界価値の変化

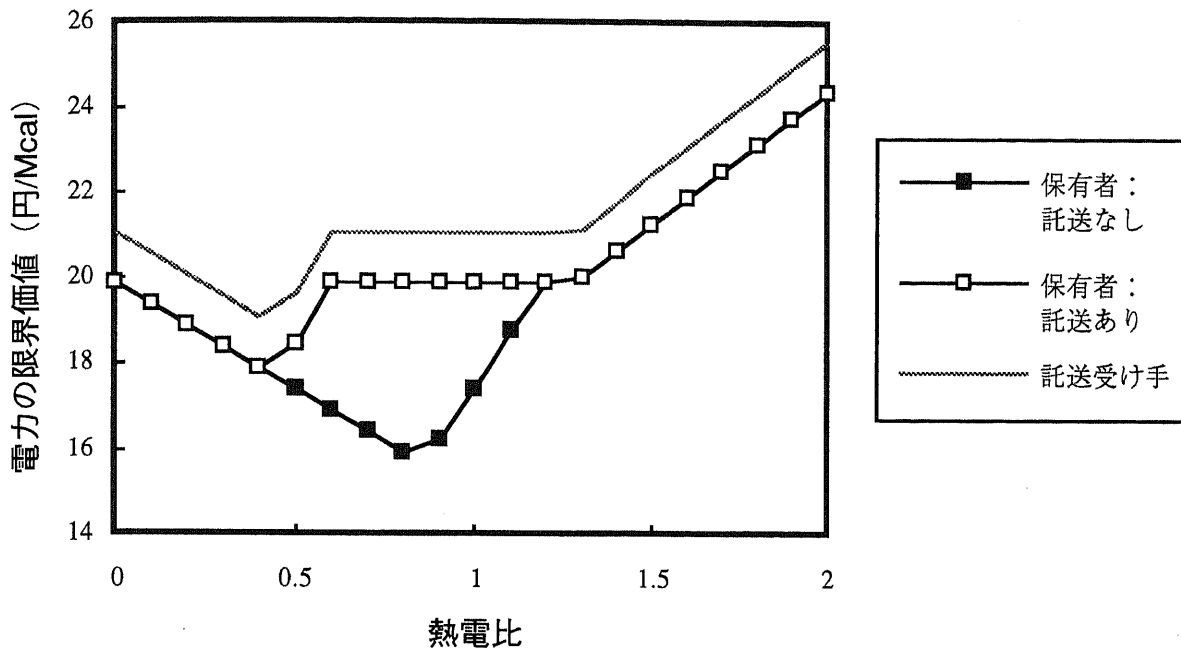
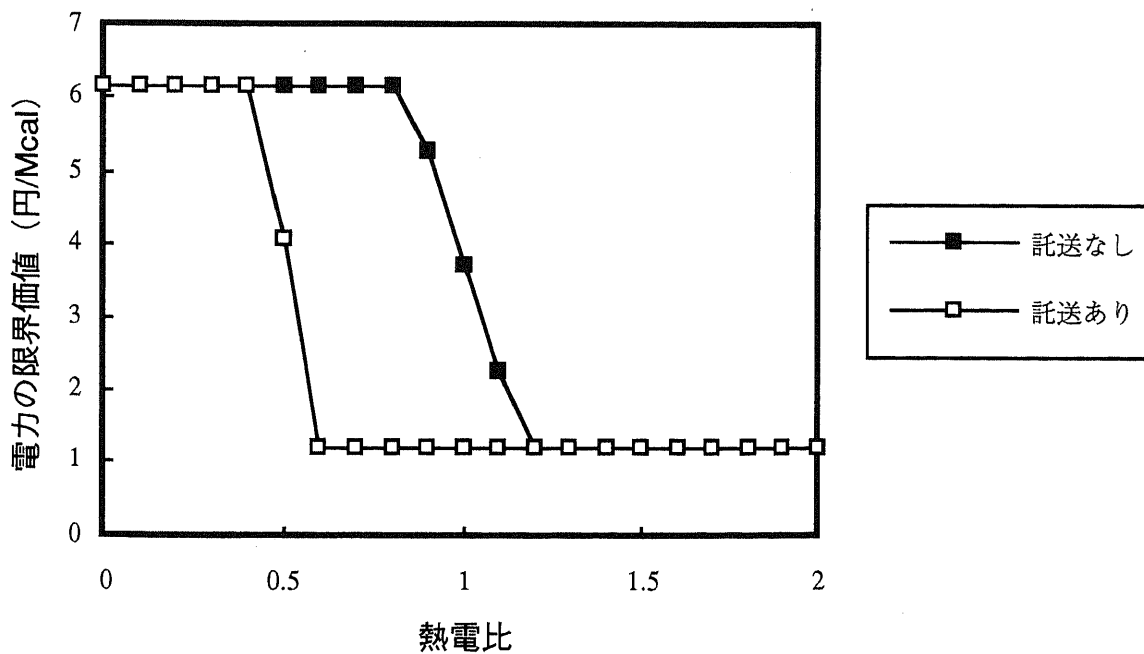


図2-15 熱の限界価値の変化



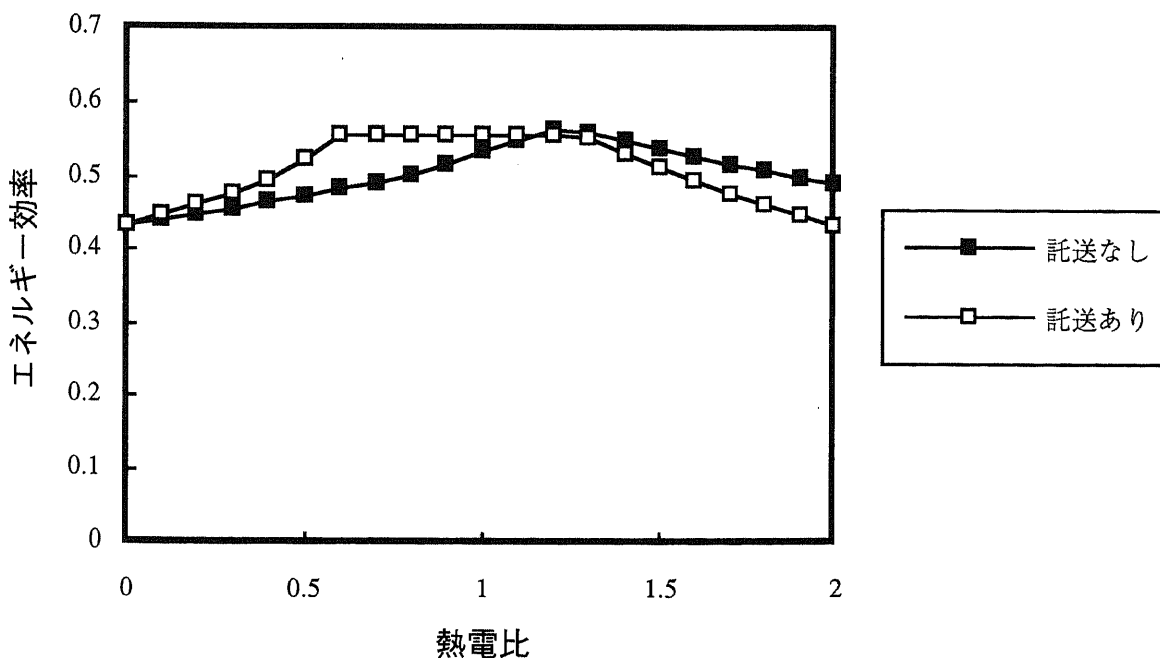


## 2.3.4 電力託送のエネルギー効率改善効果

託送を含めることによってコジェネの運用がよりエネルギー効率的になる条件を得ることが本検討の興味ある点である。そこで、託送のない場合と託送を含めた場合のエネルギー効率の差異を最適挙動に基づいて求めた。図2-16に託送有無別のエネルギー効率の比較を示す。なお、託送が行われない場合、受手側は系統発電所から買電するとしてその発電効率を考慮した。その時の電力料金は、熱電比0～2の範囲で託送が発生するように25円/Mcalと設定した。

図2-16よりコジェネ熱電比が0～1.3程度までの範囲において、託送を含めることによりエネルギー効率が改善されることがわかる。託送を含まない場合には熱電比1.2で最大値をとり、その前後で低下するが、託送を含めた場合には熱電比0.6～1.2の範囲で同じ最大値を維持する。言い替えれば、電力託送はある範囲のコジェネプラントについて最高効率での運転を可能とする。また、この例では熱電比0.6において最大のエネルギー効率の改善がみられる。託送なしの時の効率約0.45に対して託送を含めることによって0.55程度に高まり、約0.1ポイントのエネルギー効率向上が見込まれる。一方、熱電比1.3以上の領域では託送なしの方が効率がよい。これは託送分の発電増加に伴い排熱が過剰に発生することとともに、発電効率が低下することに起因する。当然ながら、未利用の排熱増加は効率低下につながる。

図2-16 電力託送の有無別のエネルギー効率



以上により、コジェネの熱電比によっては、電力託送がコジェネのエネルギー効率の改善に役立つことが導かれた。従来のようにコジェネが単独で運用されるのに比べ、電力託送が認められることはコジェネ運用の自由度を高めるといってよい。その結果、設備稼働率の向上とともに、エネルギー効率の改善による燃料消費の減少、買電の削減などコスト低下につながるので、コジェネの経済性が大きく高まると期待される。また、それは今後のコジェネ導入を促進することを意味する。

今回は事務所的需要に基づいてエネルギー効率改善効果を分析したが、さらに一般化すれば、例えば事務所とホテル間の託送など、電力需要、熱需要の時間パターンにずれがあり相互に補完的な需要家を連携することによって、より一層の省エネルギーを実現することも可能となる。また、事務所と工場間の託送を行えば民生部門と産業部門との協調運用の可能性も開ける。すなわち、コジェネの持つポテンシャルを引き出す上で、電力託送の寄与は少なくないと考えられる。

## 2.4 2時間帯モデルへの拡張

ここでは、これまでの1時間帯モデルを2時間帯に拡張する。2時間帯における電力託送を含まない場合および託送を含む場合について最適挙動を導出し、1時間帯モデルでは得られない時間帯別料金に対するコジェネ自家発の反応を分析する。また、1時間帯モデルと同じ数値例を用いて具体的な最適挙動を示す。

なお、電力需要はピーク、オフピークの2時間帯を、熱需要は1時間帯を仮定する。

### 2.4.1 電力託送を含まない場合

#### (1) コジェネ自家発保有者の評価関数

1時間帯モデルと同じ評価関数の考え方、すなわち、自家発保有者の便益最大化に基づいて定式化する。今回は、2つの時間帯でコジェネのみで賄うかボイラ追いだきを含むかにより、3つのケースに分かれる。

ケース1：追いだきしない場合

$$J_1 = \sum_{i=1}^2 T_i \int_0^{X_{Ui} + X_{Ni}} P_{eNi}(x) dx + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y \right\} - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} X_{Ui} T_i \quad \dots (2.102)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.103)$$

$$Y \leq \rho X_{N1} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.104)$$

ケース2：オフピークに追いだきする場合

$$J_2 = \sum_{i=1}^2 T_i \int_0^{X_{Ui} + X_{Ni}} P_{eNi}(x) dx + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 \right\} - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} X_{Ui} T_i \quad \dots (2.105)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.106)$$

$$Y > \rho X_{N1} \quad \dots (2.107)$$

$$Y \leq \rho X_{N2} \quad \dots (2.108)$$

ケース3：ピークおよびオフピークに追いつきする場合

$$\begin{aligned}
 J_3 = & \sum_{i=1}^2 T_i \int_0^{X_{Ui} + X_{Ni}} P_{eNi}(x) dx + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy \\
 & - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 + \varepsilon (Y - \rho X_{N2}) T_2 \right\} \\
 & - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} X_{Ui} T_i
 \end{aligned} \quad \dots (2.109)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.110)$$

$$Y > \rho X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.111)$$

## (2) 最適解の導出

### 1) ラグランジアン

上記の各評価関数に対応しラグランジアンを構成し、クーン・タッカー条件から最適解を導く。ラグランジアンは次の通り。

$$\begin{aligned}
 H_j = & J_j + \lambda_1 (K - X_{N1}) + \lambda_2 (K - X_{N2}) + \mu_1 (\rho X_{N1} - Y) + \mu_2 (\rho X_{N2} - Y) \\
 & (j = 1, 2, 3)
 \end{aligned} \quad \dots (2.112)$$

ただし、 $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$  : ラグランジエ乗数

### 2) 最適解

ここでは買電は行われず、コジェネが電力および熱供給を行う解を求める。買電しない電力料金の条件については後述する。この結果、1時間帯の場合は最適解は3つのモードに分かれたが、2時間帯の場合には解が多様化し、コジェネの最適挙動は5つのモードに分かれて得られた。

#### (a) モード1：ピーク、オフピークとも排熱余剰

$H_1$ を用いて最適条件は次のように求められる。

$$\frac{\partial H_1}{\partial X_{N1}} = (P_{eN1} - \eta) T_1 - \lambda_1 + \mu_1 \rho = 0 \quad \dots (2.113)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial X_{N2}} = (P_{eN2} - \eta) T_2 - \lambda_2 + \mu_2 \rho = 0 \quad \dots (2.114)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial Y} = P_h (T_1 + T_2) - \delta - \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad \dots (2.115)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial K} = -\gamma + \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \quad \dots (2.116)$$

これより次を得る.

$$P_{eN1} = \eta + \frac{\lambda_1 - \mu_1 \rho}{T_1} \quad \dots (2.117)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\lambda_2 - \mu_2 \rho}{T_2} \quad \dots (2.118)$$

$$P_h = \frac{\delta + \mu_1 + \mu_2}{T_1 + T_2} \quad \dots (2.119)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \gamma \quad \dots (2.120)$$

この時、両時間帯ともコジェネ排熱が余ることから、

$$\mu_1 = \mu_2 = 0 \quad \dots (2.121)$$

また、オフピークは設備余裕があるため  $X_{N1} < K$ . ゆえに、

$$\lambda_1 = 0 \quad \dots (2.122)$$

したがって、(2.120)式より  $\lambda_2 = \gamma$  となるため、

$$K = X_{N2} \quad \dots (2.123)$$

以上から、本モードの最適条件は次のようにまとめられる.

$$P_{eN1} = \eta \quad \dots (2.124)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (2.125)$$

$$P_h = \frac{\delta}{T_1 + T_2} \quad \dots (2.126)$$

これより、最適挙動は次で与えられる.

$$X_{N1} = P_{eN1}^{-1}(\eta) \quad \dots (2.127)$$

$$X_{N2} = P_{eN2}^{-1}\left(\eta + \frac{\gamma}{T_2}\right) \quad \dots (2.128)$$

$$Y_1 = P_h^{-1}\left(\frac{\delta}{T_1 + T_2}\right) \quad \dots (2.129)$$

本モードが最適解となる  $\rho$  の範囲は、オフピーク時に熱が余っていることから次式となる.

$$\rho > \frac{Y_1}{X_{N1}} = \rho_1 \quad \dots (2.130)$$

(b) モード2: ピーク排熱余剰, オフピークは過不足なし

(2.117)~(2.120)式において、オフピーク時に排熱が過不足ない状態であるのでラグランジェ乗数が活性化する. 一方、ピーク時は不活性状態である. すなわち、

$$\mu_1 > 0, \mu_2 = 0 \quad \dots (2.131)$$

また, (2.122)(2.123)式も成立する. したがって, 本モードの最適条件として次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \frac{\mu_1 \rho}{T_1} \quad \dots (2.132)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (2.133)$$

$$P_h = \frac{\delta + \mu_1}{T_1 + T_2} \quad \dots (2.134)$$

ここで,  $\rho$ が小さくなるにつれて $\mu_1$ は増加するが, ボイラの燃料費相当額を越えればボイラ追いだきを行った方が便益が大きい. したがって,  $\mu_1 = \varepsilon T_1$ の時にオフピーク時において追いだきが導入される. この時の熱電比を $\rho_2$ とすれば, 本モードが最適解となる熱電比の範囲は次となる.

$$\rho_1 \geq \rho \geq \rho_2 \quad \dots (2.135)$$

(c) モード3: ピーク排熱余剰, オフピーク排熱不足

オフピーク時にはボイラ追いだきが導入されるためコスト関数が変わる. ラグランジアン $H_2$ を用いて先と同じく一階微分 $=0$ を求め, 最適条件として次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\lambda_1}{T_1} \quad \dots (2.136)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\lambda_2 - \mu_2 \rho}{T_2} \quad \dots (2.137)$$

$$P_h = \frac{\delta + \varepsilon T_1 + \mu_2}{T_1 + T_2} \quad \dots (2.138)$$

ここで, 各時間帯で排熱が余剰もしくは不足のため,

$$\mu_1 = \mu_2 = 0 \quad \dots (2.139)$$

また, (2.120)(2.122)(2.123)式も成立する. したがって,

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho \quad \dots (2.140)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (2.141)$$

$$P_h = \frac{\delta + \varepsilon T_1}{T_1 + T_2} \quad \dots (2.142)$$

本モードが最適解となる熱電比の範囲は, ピーク時に排熱が余っていることから次となる. なお, オフピークの条件を考慮した.

$$\rho_2 > \rho > \rho_3 = \frac{Y}{X_{N2}} \quad \dots (2.143)$$

ただし,

$$X_{N2} = P_{eN1}^{-1} \left( \eta + \frac{\gamma}{T_2} \right) \quad \dots (2.144)$$

$$Y = P_h^{-1} \left( \frac{\delta + \varepsilon T_1}{T_1 + T_2} \right) \quad \dots (2.145)$$

(d) モード4: ピーク排熱過不足なし, オフピーク熱不足

(2.136)~(2.138)式において, ピーク時のみラグランジェ乗数が活性化する. すなわち,

$$\mu_1=0, \mu_2>0 \quad \dots (2.146)$$

また, (2.120)(2.122)(2.123)式も成立する. したがって, 本モードの最適条件として次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho \quad \dots (2.147)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma - \mu_2 \rho}{T_2} \quad \dots (2.148)$$

$$P_h = \frac{\delta + \varepsilon T_1 + \mu_2}{T_1 + T_2} \quad \dots (2.149)$$

このとき, モード2と同様に $\mu_2$ とボイラ追いだき燃料費 ( $\varepsilon T_2$ ) が一致した熱電比においてピーク時に追いだきが導入される. この時の熱電比を $\rho_4$ とすれば, 本モードが最適解となる熱電比の範囲は次となる.

$$\rho_3 \geq \rho \geq \rho_4 \quad \dots (2.150)$$

(e) モード5: ピーク, オフピークともに排熱不足

本モードではすべての時間帯でボイラ追いだきを行う. したがって, 評価関数 $J_3$ をに基づくラグランジアン $H_3$ を用いて最適条件を導く. 一階の微分条件から次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\lambda_1}{T_1} \quad \dots (2.151)$$

$$P_{eN2} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\lambda_1}{T_2} \quad \dots (2.152)$$

$$P_h = \frac{\delta}{T_1 + T_2} + \varepsilon \quad \dots (2.153)$$

両時間ともに排熱のラグランジェ乗数は不活性のため,

$$\mu_1 = \mu_2 = 0 \quad \dots (2.154)$$

また, (2.120)(2.122)(2.123)式も成立する. したがって,

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho \quad \dots (2.155)$$

$$P_{eN2} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (2.156)$$

$$P_h = \frac{\delta}{T_1 + T_2} + \varepsilon \quad \dots (2.157)$$

本モードが最適解となる熱電比の範囲は次で与えられる.

$$0 \leq \rho < \rho_4 \quad \dots (2.158)$$

### (3) 買電しない条件

電力会社から買電せずコジェネを運転する電力料金の条件は, 各ラグランジアン $H_j$ について以下となる.

$$\frac{\partial H_j}{\partial X_{U1}} = (P_{eN1} - P_{U1}) T_1 < 0 \quad \dots (2.159)$$

$$\frac{\partial H_j}{\partial X_{U2}} = (P_{eN2} - P_{U2}) T_2 < 0 \quad \dots (2.160)$$

したがって, 次の条件を得る.

$$P_{U1} > P_{eN1} \quad \dots (2.161)$$

$$P_{U2} > P_{eN2} \quad \dots (2.162)$$

すなわち, 最適条件として得られた各モードの限界価値よりも電力料金が高くなった場合にコジェネが運転される.

## 2.4.2 電力託送を含む場合

### (1) 評価関数

託送を含めた場合では, コジェネの発電量 $X_{Ni}$ から $X_{Wi}$ が託送受け手に送られると想定する. また, コジェネ保有者, 託送受け手ともに系統から買電可能とする. この時の評価関数は以下の通り, ボイラ追いだきの有無に対応して3通りに定式化される. なお, 各評価関数の中に受け手側の電力の効用が新たに導入されている.

ケース1: 追いだきしない場合

$$J_1 = \sum_{i=1}^2 T_i \left\{ \int_0^{X_{Ui} + X_{Ni} - X_{Wi}} P_{eNi}(x) dx + \int_0^{X_{Ri} + X_{Wi}} P_{eRi}(x) dx \right\} + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy \\ - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y \right\} - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} (X_{Ui} + X_{Ri}) T_i - P_W \sum_{i=1}^2 X_{Wi} T_i \quad \dots (2.163)$$



s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.164)$$

$$Y \leq \rho X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.165)$$

$$X_{Wi} \leq X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.166)$$

ケース2：オフピーク時のみ追いだきする場合

$$\begin{aligned} J_2 = & \sum_{i=1}^2 T_i \left\{ \int_0^{X_{Ui} + X_{Ni} - X_{Wi}} P_{eNi}(x) dx + \int_0^{X_{Ri} + X_{Wi}} P_{eRi}(x) dx \right\} + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy \\ & - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 \right\} \\ & - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} (X_{Ui} + X_{Ri}) T_i - P_W \sum_{i=1}^2 X_{Wi} T_i \quad \dots (2.167) \end{aligned}$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.168)$$

$$Y > \rho X_{N1} \quad \dots (2.169)$$

$$Y \leq \rho X_{N2} \quad \dots (2.170)$$

$$X_{Wi} \leq X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.171)$$

ケース3：ピーク，オフピーク時に追いだきする場合

$$\begin{aligned} J_3 = & \sum_{i=1}^2 T_i \left\{ \int_0^{X_{Ui} + X_{Ni} - X_{Wi}} P_{eNi}(x) dx + \int_0^{X_{Ri} + X_{Wi}} P_{eRi}(x) dx \right\} + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy \\ & - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 + \varepsilon (Y - \rho X_{N2}) T_2 \right\} \\ & - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} (X_{Ui} + X_{Ri}) T_i - P_W \sum_{i=1}^2 X_{Wi} T_i \quad \dots (2.172) \end{aligned}$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.173)$$

$$Y > \rho X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.174)$$

$$X_{Wi} \leq X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (2.175)$$

(2) 電力託送が発生する条件

託送を含まないモデルと同様に、ラグランジアンを次のように構成し最適条件を導く。ただし、 $\lambda_j$ ,  $\mu_j$ ,  $\theta_j$ はラグランジェ乗数。

$$\begin{aligned} H_j = & J_j + \lambda_1(K - X_{N1}) + \lambda_2(K - X_{N2}) \\ & + \mu_1(\rho X_{N1} - Y) + \mu_2(\rho X_{N2} - Y) + \theta_1(X_{N1} - X_{W1}) + \theta_2(X_{N1} - X_{W2}) \\ & (j = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad \dots (2.176)$$

電力託送が生起する場合の挙動は、次式で表わされる $X_{Wi}$ に関する条件に従う。なお、ラグランジアンの3ケースとも同じ最適条件を与える。

$$\frac{\partial H_j}{\partial X_{Wi}} = (P_{eRi} - P_{eNi} - P_{Wi})T_i - \theta_i = 0 \quad \dots (2.177)$$

$$P_{eRi} = P_{eNi} + P_{Wi} + \frac{\theta_i}{T_i} \quad \dots (2.178)$$

ここで、限界効用関数 $P_{eNi}$ ,  $P_{eRi}$ は単調減少関数と考えられるので、1時間帯モデルと同様にラグランジェ乗数 $\theta_i$ はゼロとなることが証明できる。先と同様に、コジェネで発生した電力をすべて託送に回すことはない。したがって、託送が発生するときの最適条件は次で表わされる。すなわち、託送受け手の限界価値がコジェネ保有者の限界価値に託送料金を加えた値になる。

$$P_{eRi} = P_{eNi} + P_{Wi} \quad \dots (2.179)$$

一方、託送受け手側が買電せず託送を受ける電力料金の条件は次となる。

$$\frac{\partial H_j}{\partial X_{Ri}} = (P_{eRi} - P_{Ui})T_i < 0 \quad \dots (2.180)$$

$$\therefore P_{eRi} < P_{Ui} \quad \dots (2.181)$$

したがって、各時間帯の電力料金が(2.179)式を超えたならば託送が生起する。逆にそれ以下の電力料金では買電となる。

(3) コジェネ挙動の最適解

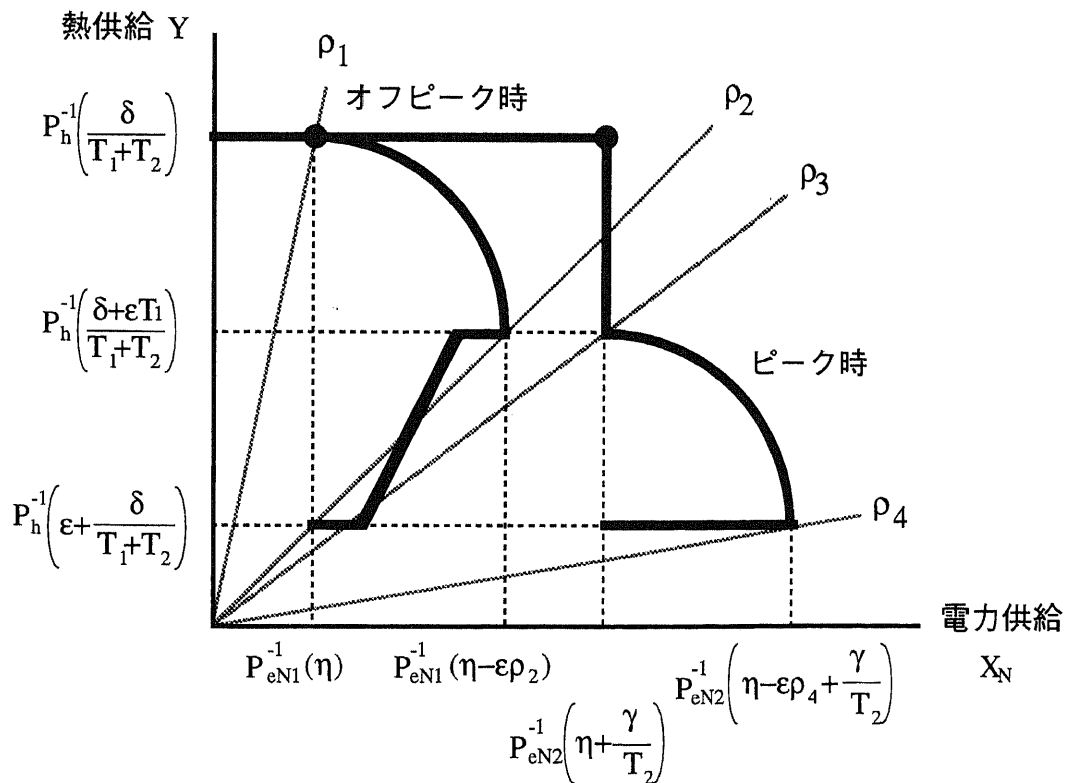
コジェネ保有者および託送受け手が買電せずコジェネが電力を供給する解は、託送を含まない場合と同じく5つのモードに分かれて得られる。コジェネ保有者の最適挙動は基本的に託送を含まないモデルで得られた解と同じ形式である。ただし、コジェネ発電量が託送分を含むによって排熱が増加するため、モードの切り替え点となる熱電比が託送を含まない場合よりも小さくなる。

## (4) 2時間帯モデルによるコジェネ挙動

電力託送を含まない場合のコジェネ最適挙動を各時間帯について電力需要—熱需要平面に表わしたものを図2-17に示す。曲線で描かれている部分がピークおよびオフピークにおいてそれぞれのラグランジェ乗数が活性化する部分である。熱電比が小さくなるにしたがって、まず一点で表わされる熱余剰の状態（モード1）からオフピーク時においてコジェネ排熱と需要がバランスする状態（モード2）になり、やがてモード3を経てピーク時においてバランスする状態（モード4）に切り替わる。さらに低位の状態（モード5）では両時間帯ともボイラ追いだきが行われ、熱需要一定の直線上に位置する。

ただし、1時間帯モデルと同じく、熱電比がある程度以上になると発電効率が低下するため、発電の燃料費が増大することに注意が必要である。その結果、限界価値が上昇し電力需要が低減する。ここではこの熱電比 $\rho_0$ がモード1の範囲内（ $\rho_0 > \rho_1$ ）にあると想定した。図2-17において $Y=Y_l$ 上に位置する部分がその状態を表現している。

図2-17 2時間帯モデルによるコジェネ自家発の最適挙動



託送が発生した場合にはコジェネの電力供給が増加するため、託送分 $X_w$ だけ最適挙動の曲線が $X_N$ 軸上を右にシフトする結果となる。

### 2.4.3 通常型自家発とコジェネ自家発との料金反応の比較

#### (1) コジェネ自家発の料金反応

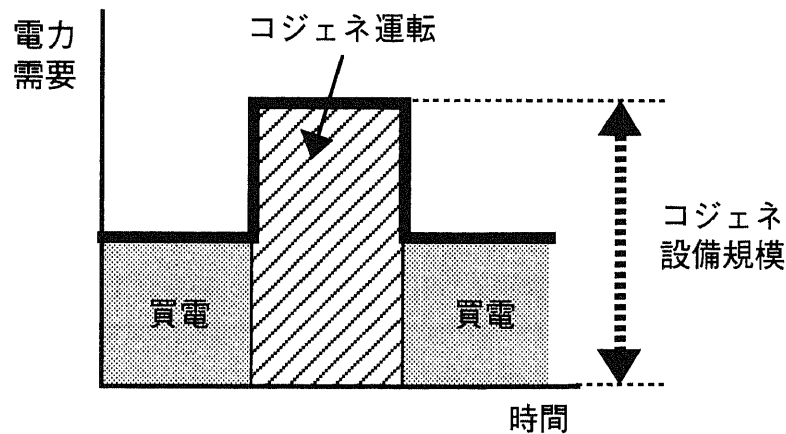
ここでは、電力のみを供給する通常型自家発とコジェネ自家発の場合の電力料金に対する反応の違いを比較する。自家発の反応は次の4通りに分かれる。

- i) 両時間帯とも自家発を運転する。
- ii) ピーク時のみ自家発を運転する。
- iii) 自家発をベース運転（一定出力運転）する。
- iv) 両時間帯とも買電する。

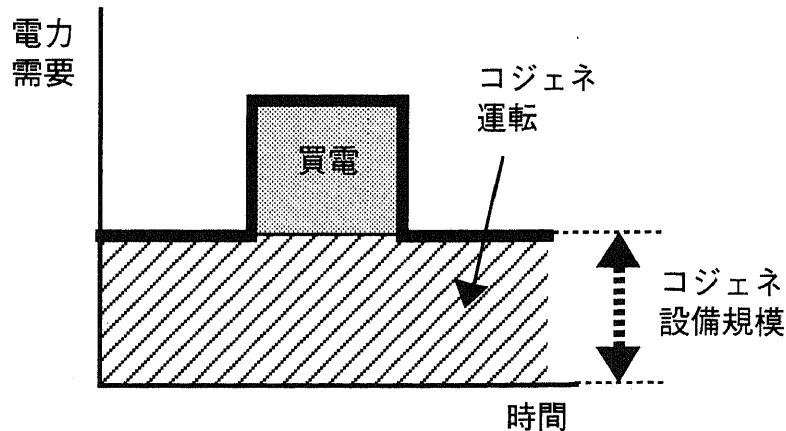
コジェネ自家発の時間帯別電力料金に対する挙動は、基本的にそれぞれの時間帯において前述した最適条件を与える限界価値よりも電力料金が下回った場合に買電が行われる。両時間帯とも自家発を運転する（買電しない）条件は既述の通りである。ここではピーク時運転およびベース運転が発生するモード（図2-18）について述べる。

図2-18 コジェネのピーク時運転およびベース運転のイメージ

ピーク時運転：



ベース運転：



1) ピーク時運転モード

オフピーク料金だけが下回ればコジェネはピーク時のみに運転され、オフピーク時は買電で賄われる。この場合の電力料金の範囲は次で与えられる。

$$P_{eN1} = P_{U1} < \eta - \frac{\mu_1 \rho}{T_1} \quad (0 \leq \mu_1 \leq \varepsilon T_1) \quad \dots (2.182)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma - \mu_2 \rho}{T_2} < P_{U2} \quad (0 \leq \mu_2 \leq \varepsilon T_2) \quad \dots (2.183)$$

2) ベース運転モード

自家発のベース運転では両時間帯ともコジェネが運転されるが、コジェネ容量を越えるピーク時の需要は買電により補われる。このため、ピーク時の限界価値は電力料金に一致する点に注意が必要である。この場合が起きる条件は次の通りとなる。

$$P_{eN1} = \eta + \frac{\lambda_1 - \mu_1 \rho}{T_1} < P_{U1} \quad (0 \leq \mu_1 \leq \varepsilon T_1) \quad \dots (2.184)$$

$$P_{U2} = P_{eN2} = \eta + \frac{\lambda_2 - \mu_2 \rho}{T_2} \quad (0 \leq \mu_2 \leq \varepsilon T_2) \quad \dots (2.185)$$

ここで、(2.120)式においてベース運転のためピーク、オフピークともに設備容量制約が活性化し $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ が正となり、次式が成り立つ。

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \gamma \quad \dots (2.186)$$

本式と(2.184)(2.185)式から $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ を消去し、次の条件を得る。

$$\gamma + \eta (T_1 + T_2) - (\mu_1 + \mu_2) \rho < P_{U1} T_1 + P_{U2} T_2 \quad \dots (2.187)$$

以上の料金(2.183)(2.187)式を下回れば、両時間帯ともすべて買電で賄われる。

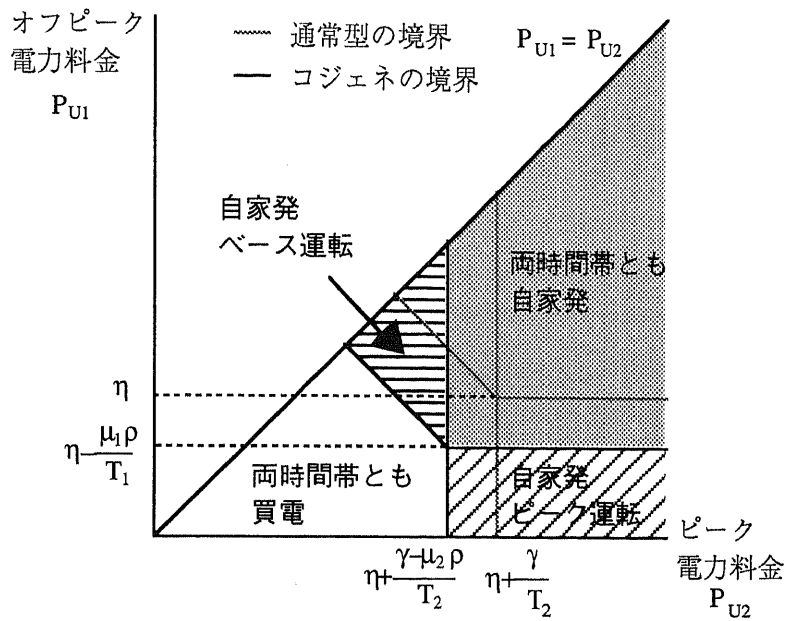
(2) 通常型自家発の料金反応

通常型自家発の時間帯別料金に対する挙動は、熱供給をしないのでコジェネの場合の熱電比 $\rho$ をゼロとみなせばよい。

(3) 通常型とコジェネの比較

以上から得られたコジェネの場合および通常型の場合それぞれの挙動を図2-19に示した。ピーク時、オフピーク時ともコジェネの方が運転される料金の下限が引き下げられている。言い替えれば、自家発の運用範囲が拡大されており、排熱利用を行うことによる有用性が表われている。

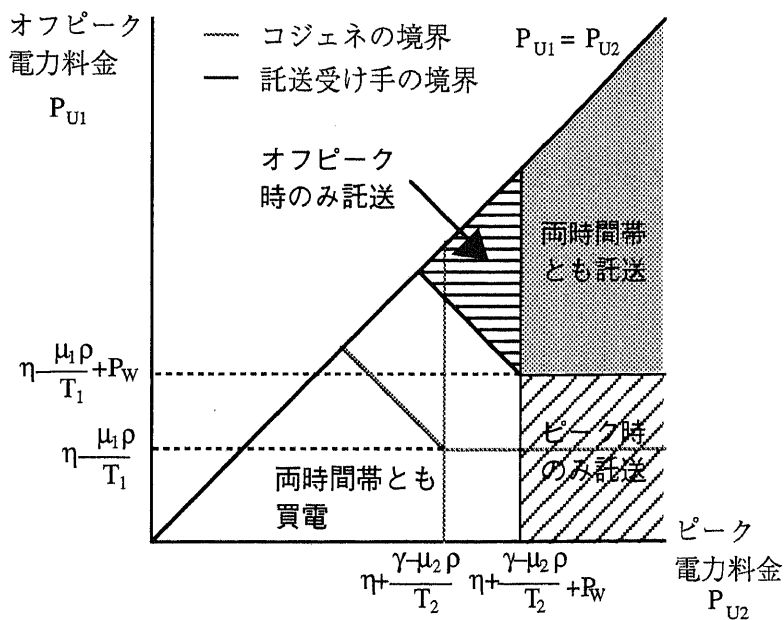
図2-19 コジェネ保有者および通常型自家発保有者の時間帯別料金に対する反応



(4) 託送受け手の料金反応

電力託送の挙動は前述した託送の生起条件から求められる。自家発ピーク運転時にはピーク時のみ託送が発生する。自家発ベース運転時には、ピーク時ではコジェネ側限界価値が電力料金に等しいため託送は発生せず、オフピーク時のみに託送が生起する。託送の挙動を図2-20に示す。

図2-20 託送受け手の時間帯別料金に対する反応



## 2.4.4 最適挙動数値例

## (1) 限界効用関数の推定

1時間帯モデルで用いた事務所ビルの需要事例に基づき、ピーク、オフピークにおける電力の限界効用関数を推定した。それぞれの時間帯の長さは1日あたり12時間ずつとした。その結果、次を得た。

$$P_{eN1}(x_{N1}) = 0.101 - 0.0143 x_{N1} \quad \dots (2.188)$$

$$P_{eN2}(x_{N2}) = 0.101 - 0.00332 x_{N2} \quad \dots (2.189)$$

熱需要については(2.100)式を用いる。

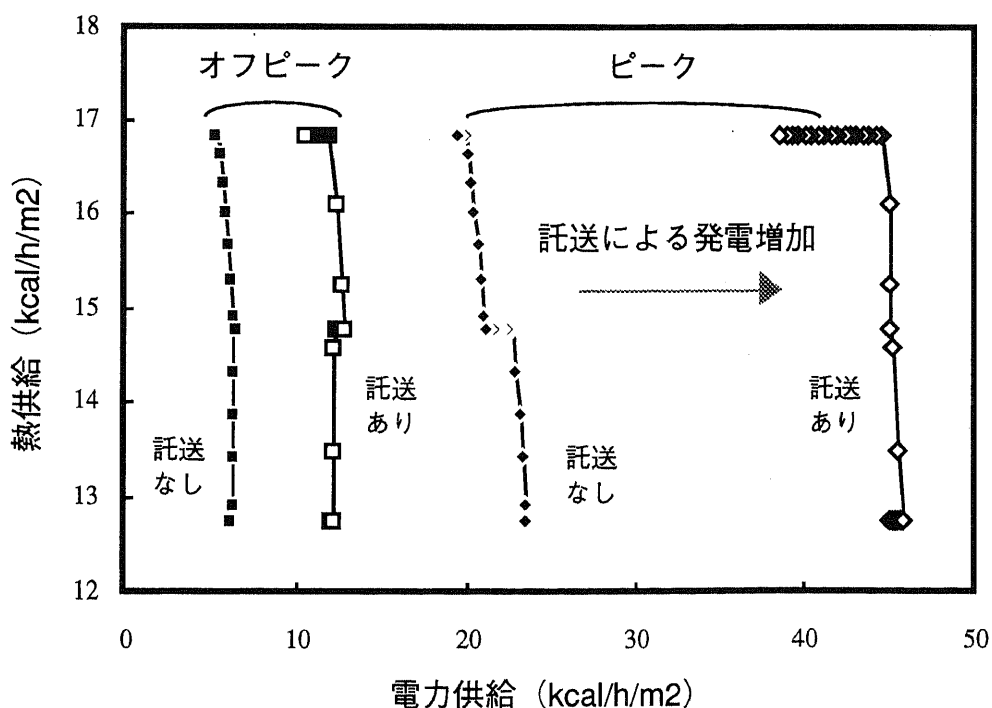
## (2) コスト等のパラメータ

コジェネ供給コストは表2-4の通り設定する。また、託送料金はkWhあたり1円とした。コジェネプラントの特性については1時間帯モデルと同様とする。

## (3) 2時間帯モデルによる最適挙動

事務所ビルの需要家の保有するコジェネの電力供給－熱供給平面上における最適挙動を図2-21に示す。ただし、熱電比0～3についてプロットしたものである。

図2-21 電力託送の有無別の熱電比に対するコジェネ最適挙動



熱電比の変化に対する電力供給の変化は、高い熱電比の範囲を除いてそれほど大きくない。発電効率が低下しない上限の熱電比 $p_0$ はモード1の範囲に位置すると想定していたが、今回の数値例ではモード3に含まれている。そのため、熱電比が比較的高い範囲のモード1および2の挙動は発電燃料コストの増加に伴い、電力需要低減の方向にずれを生じている。

#### (4) 電力および熱の限界価値

最適挙動を与える電力、熱の限界価値の変化をそれぞれ図2-22、図2-23に示した。前者には託送受け手の限界価値も示している。ピーク時の電力の限界価値は熱電比ゼロにおいてコジェネの燃料費と固定費を負担するが、熱電比が増加するにしたがって排熱利用により割引かれる。やがてピーク時間帯における排熱が過不足なく需要とバランスする状態を経て限界価値が上昇し、再び熱電比ゼロの場合と同じ値に戻る。さらに高い熱電比においてはコジェネ発電効率の低下を受けて限界価値は一方的に増加傾向を示す。他方、オフピーク時の限界価値は熱電比ゼロのときに燃料費のみを負担する。比較的低位の熱電比の範囲ではピーク時の限界価値と同様の变化を示すが、限界価値が低下する途中で熱電比 $p_0$ を超えるため、限界価値は上昇に転ずる。

今回の数値例から、熱電比 $p_0$ の位置により、それを超える範囲において限界価値は増加傾向の方向に大きくゆがむことがわかった。ゆがみが含まれる場合には熱電比の差異による料金反応の違いがより複雑になる。言い替えれば、電力料金のレベルによっては、同じ料金に対してコジェネの多様な反応を誘起することが予想される。

熱の限界価値については、熱電比がゼロから増加するにしたがって低減する傾向を持つ。この点は1時間帯モデルに一致するが、オフピークとピークのそれぞれにおいて排熱需給がバランスする状態が発生するため、2段階の階段状に限界価値が低下する。上段が設備費に加え両時間帯ともに燃料費を負担し、中段では設備費とオフピーク分のみの燃料費を負担する。下段では排熱余剰の状態であるので、設備費のみを負担する。

各時間帯における電力の限界価値の挙動は1時間帯モデルと基本的に一致する。さらに多時間帯に拡張した場合には、同様の挙動を並列させたものになると予想される。一方、熱需要については今回1時間帯としたため2段階の変化を生じた。熱についても電力と同じ時間帯区分を行った場合には、それぞれの時間帯において電力および熱の限界価値は1時間帯モデルの結果と同様の挙動を示すと考えられる。したがって、時間帯間が独立であれば、全体の最適挙動は並列的な組み合わせによって記述される。



図2-22 2時間帯モデルによる電力の限界価値の変化

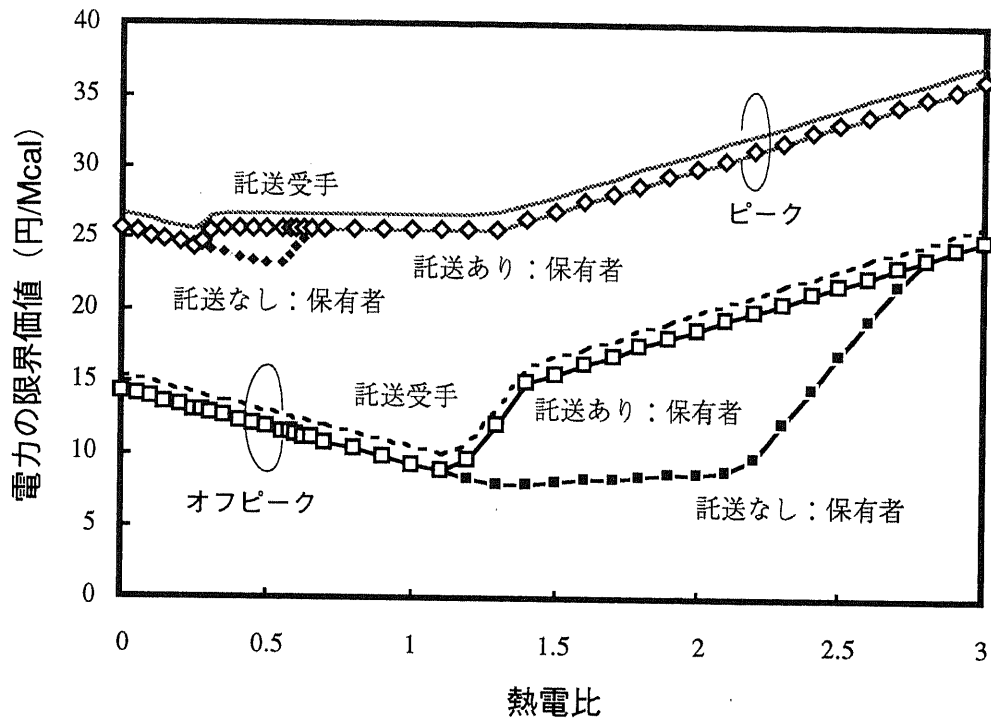
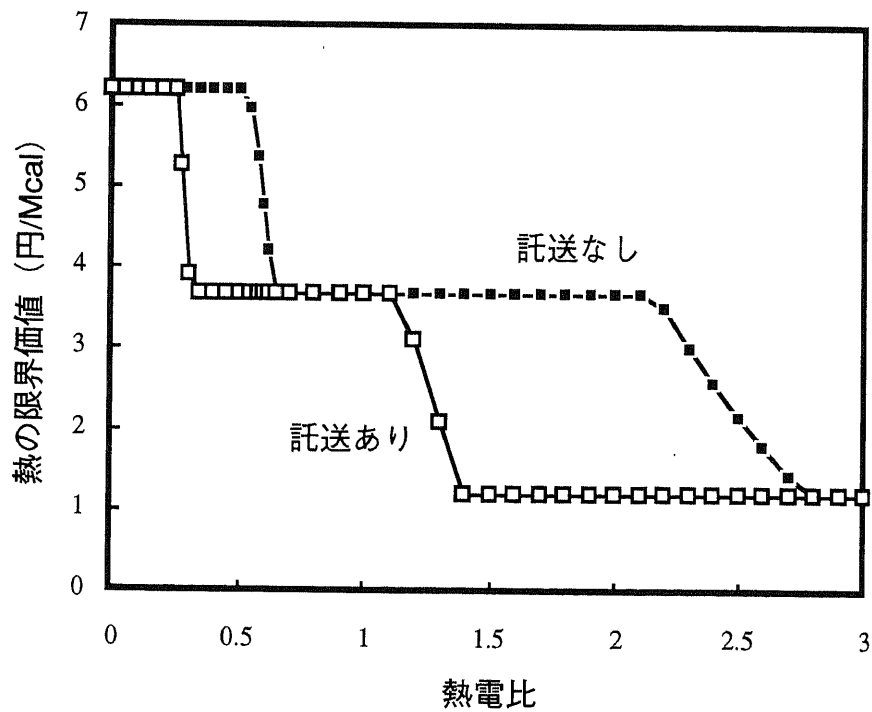


図2-23 2時間帯モデルによる熱の限界価値の変化



## 2.4.5 電力託送のエネルギー効率改善効果

2時間帯の場合に電力託送の導入によって得られるエネルギー効率の改善効果を調べる。図2-24に託送の有無別のコジェネ保有者および託送受け手を合わせたエネルギー利用効率を示す。託送を含まない場合には託送受け手は系統電力を買電するとした。その時の条件は次である。電力料金は熱電比0～2の範囲で電力託送が発生するように設定している。

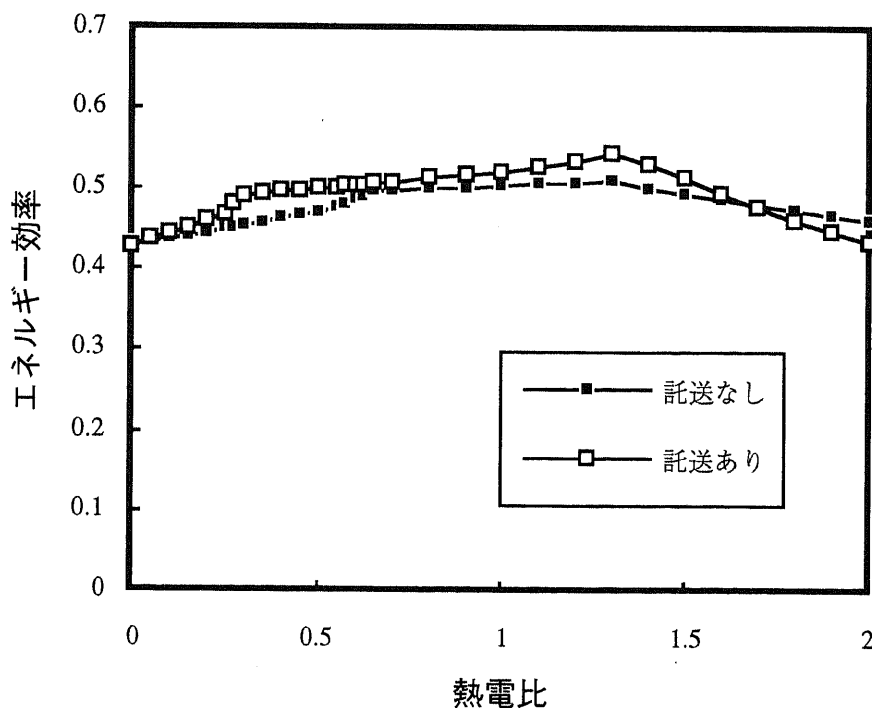
系統発電効率： 0.35

電力料金： オフピーク ... 20 (円/kcal)

ピーク ... 30 (円/kcal)

図より、熱電比0.2～1.6の広い範囲において託送を含めることによってエネルギー効率の改善が認められる。熱電比0.3付近および1.3付近において効率が比較的大きく改善されており、熱電比0.3で最大の改善幅約0.04をとる。熱電比1.7以上において託送を含めた方が効率が悪化するのは、発電効率の低下とともに排熱が余剰になることに起因する。また、1時間帯モデルの結果と比較すると、改善幅の最大は半分程度に縮小しているが、改善される熱電比の範囲は拡大しており、託送は多様なコジェネプラントに対して効果を持つと解釈できる。

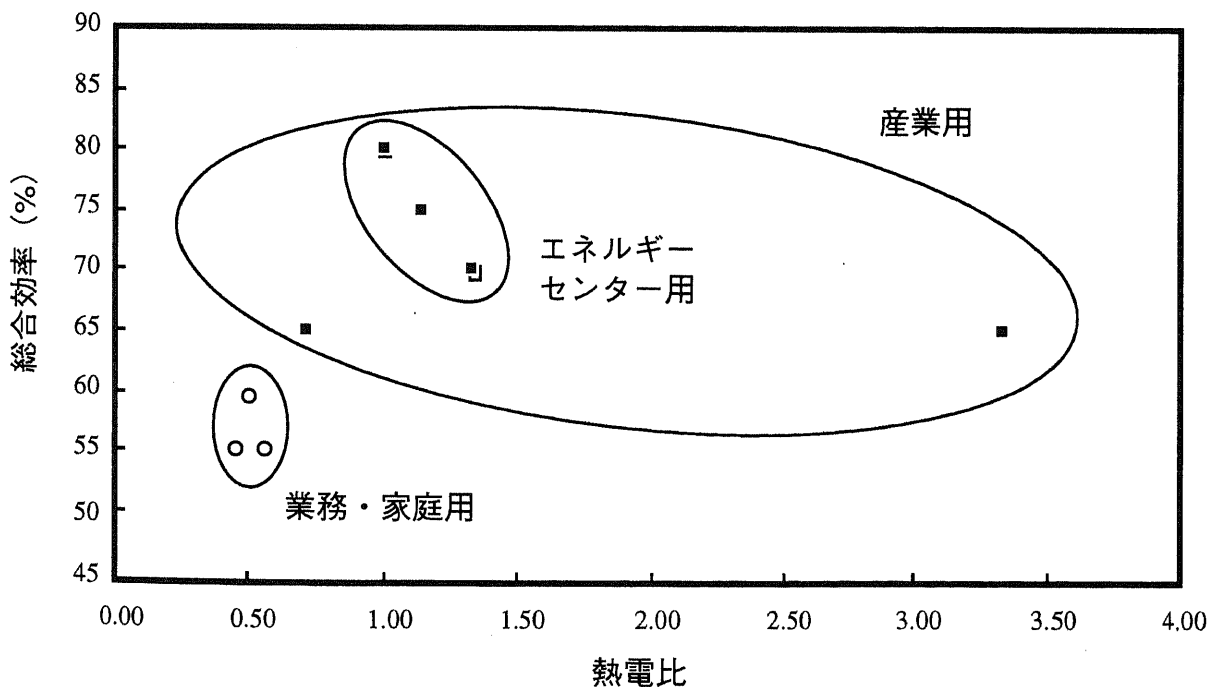
図2-24 2時間帯モデルによる電力託送の有無別のエネルギー効率



コジェネ単体のエネルギー効率としては、低位の熱電比では熱供給効率が小さいため総合効率は低い。したがって、電力託送は低い効率のコジェネプラントに対して運用面で効率改善をもたらす。一方、熱電比1.3付近ではコジェネは元々高い総合効率で運転されており、電力託送はさらなる効率向上につながっている。このことから、電力託送は低い効率のコジェネに対しても、高い効率のコジェネに対しても、一層効率を高めることに役立つといえる。低位の熱電比において最大の効率改善を与える意味で低い効率のコジェネプラントがより強い影響を受ける点については、1時間帯モデルの結果を保持している。

現実との比較のため、コジェネの用途別プラント特性<sup>[25]</sup>として熱電比－総合効率の分布を図2-25に図示した。産業用はかなり幅広い分布を示すが、業務・家庭用は熱電比0.5付近に、エネルギーセンター用は1.0付近に位置する。数値例において電力託送が効果的である範囲に実際のコジェネプラントも分布しており、託送のエネルギー効率改善効果が現実的に意味を持つことを示唆している。

図2-25 各種コジェネプラントの熱電比－総合効率特性



## 2.5 本章のまとめ

### 2.5.1 結果のまとめ

本章ではコジェネの最適挙動をベースとし、将来的に導入が予想される電力託送とコジェネの組み合わせが省エネルギーに及ぼす影響を分析した。モデル分析により次の結果を得た。

- (1) コジェネ保有者の便益最大化を評価基準に設定することにより合理的な挙動を解析的に導いた。その結果、最適挙動はコジェネプラントの特性である熱電比（熱出力／電力出力）に大きく依存して変化する。
- (2) 最適な電力需要を与える電力の限界価値は、低位の熱電比の範囲では熱電比が大きいほど低下するが、排熱需給が過不足なく一致する過程で上昇に転ずる。熱電比がより高い排熱余剰の状態では一定値をとるが、さらに高い範囲になると発電効率の低下を反映して限界価値は増加傾向をとる。一方、熱の限界価値は低位の熱電比の範囲では固定費と燃料費を負担するが、熱電比増大とともに限界価値は低減し、高位の範囲では排熱余剰のため固定費のみ負担となる。
- (3) 電力託送は、電力料金がコジェネ保有者の限界価値に託送料金を上乗せした額以上になった場合に発生する。また、託送は託送受け手の限界価値が保有者の限界価値+託送料金に一致するように行われる。
- (4) 2時間帯モデルによって多様な挙動が導出された。コジェネが常時運転される形態だけでなく、ピーク時のみ運転する場合や、ベース的に運転される場合も生じる。通常型自家発の挙動と比較した結果、コジェネは時間帯別電力料金に対して運転される領域が拡大する。これは熱併給の効果を反映している。
- (5) 時間帯別料金に対して、コジェネ保有者の限界価値はオフピークでは燃料費に相当し、ピークでは燃料費と固定費の合計に相当する条件が最適挙動を与える。託送受け手の挙動は1時間帯と同様に保有者の限界価値+託送料金となる。
- (6) 電力託送を含めることにより、含まない場合に比べエネルギー効率が改善される。改善効果は幅広い熱電比の範囲で認められ、後者の場合の効率より1割程度改善される。また、託送は高い効率を持つコジェネに対して効率をさらに向上させる一方、効率の低い低位の熱電比を持つコジェネにおいても大きな改善効果を与える。
- (7) 電力託送が改善効果を持つ範囲に実際のコジェネプラントも位置しており、効果が現実的に

意味を持つことを示唆している。

コジェネ保有者の電力需要と熱需要のギャップを低減する上で電力託送が役立つとの予想が本章の分析結果から裏付けられた。特に、託送の導入によってエネルギー効率が改善されることが明らかにできたことは、託送の評価を高めることにつながる。現実社会では基本的に経済性が確保できなければ具体的な設備導入や省エネ努力に結びついていかない。言い替えれば、現在コジェネ導入が進みつつある状況は経済性の条件が整った需要家から導入が図られているとみなせる。条件のよいところはやがて導入され尽くすので、さらにコジェネ導入を促進するためには経済性の劣る需要家に対して何らかの政策が必要とされる。電力託送はエネルギー効率改善や稼働率向上などを通じて投資効率の改善をもたらし、コジェネ導入拡大につながる政策の一つと解釈できる。

### 2.5.2 今後の課題

コジェネ保有者の便益最大化は電力料金を外生的なパラメータとみなしてモデル化しているが、電力会社をモデルの中に導入し電力料金を内生変数とすれば、社会的厚生（消費者側の便益と電力会社側の便益の総和）を最大化するモデルとなる。これによって、社会全体の視点から最適なコジェネ挙動と料金設定を導くことが可能となる。通常型の電力供給のみの自家発については重次[27]、前田[16]が最適挙動を導いている。コジェネの場合は熱供給が熱電比のパラメータを介して電力の限界価値に影響するが、基本的な構図は同じと考えてよい。同様の考え方に基づいて社会的に最適な挙動が導けると予想される。その流れをさらに拡張するならば、熱併給がコジェネの本質的特徴であるので、電力会社のみならず地域熱供給会社を含めた最適挙動を分析することがあげられる。地域熱供給も近年導入が盛んになりつつあり、ごみ焼却排熱や河川水の熱の利用など未利用エネルギー技術の一つとしても進められている。熱が廉価に供給されればコジェネの供給と競合することになるため、いかなる料金設定が社会的に望ましい結果をもたらすかについて明らかにすることは意味深い。

## 第3章

# 電力託送によるコジェネ保有者の 最適ネットワーク化

## 第3章 電力託送によるコジェネ保有者の最適ネットワーク化

### 3.1 本章の目的

コジェネ・プラントを保有する需要家は様々な電力負荷および熱負荷の時間パターンを持っている。熱負荷が高い一方で電力負荷が小さければ、コジェネで熱供給した場合には電力が余剰となってしまう。他方、熱負荷よりも電力負荷が大きいようなコジェネ保有者では電力が不足する。通常であれば、後者の需要家は系統電力を買電することによって補充する。この時、電力託送が認められていれば、前者の需要家から後者の需要家に余剰電力を供給することが可能となる。電力託送を利用することによって、前者の需要家はエネルギーを廃棄することを回避でき、需要家全体として高いエネルギー効率を実現できるとともに、設備稼働率をも高く維持できる。さらに、余剰電力が買電よりも安価であれば後者の需要家はコスト削減を実現できる。以上のように多様な需要パターンを適切にネットワークできれば、社会的には省エネルギーを促進し、個別需要家としてはコスト低減に役立ちうる。

従来は電力託送が認められていないので、地域熱供給によって熱を融通するしかない。しかしながら、熱供給配管は設備コストが高く、長距離をカバーすることは経済的に困難である。電力託送は既存の送配電網を利用できるとともに熱輸送に比較して長距離輸送は技術的、経済的に容易である。したがって、広範囲に立地する多様な需要家をネットワークでき、より組み合わせに適切な需要家を選択できると考えられる。

コジェネのネットワークに関しては次の研究が報告されている。佐賀井ら[28]は東京23区をメッシュに区切り、単独のメッシュの場合と近接したメッシュを結合した場合についてコジェネ設置の省エネ効果を推計している。ただし、メッシュ間の結合の探索は発見的方法によっており、最適化型の方法ではない。また、メッシュの需要パターンは用途別需要の積み上げによって与えられており、いかなる需要家の結合が望ましいかは直接にはわからない。上野ら[29]は電力も熱も融通するコジェネ・ネットワークを想定し最適化型モデルを用いて分析しているが、事務所とホテルの結合のみを扱うにとどまる。伊東ら[30]も2つのエリアに設置したコジェネの最適設備規模および最適運用を求めているが、2ヶ所ともホテルが立地するケースである。どちらも複数の需要家の結合形態を議論するには不

足である。むしろ、時間帯別の細かな挙動を導くことに重点がおかれている。伊東らが託送料金に対するシステム挙動を感度分析している点は興味深い。

また、コジェネ運用時のエネルギー効率には熱電比が主要な指標となる。電力負荷、熱負荷が変動するため、熱電比も時間帯によって変動する。したがって、熱電比の統計的分布を知ることがエネルギー効率の推計に必要となる。藤井ら<sup>[31]</sup>は実際の熱電比のデータにガンマ分布を当てはめ、コジェネ導入の省エネルギー率を求めている。ただし、ガンマ分布を選んだ理由は経験的なものと思われる。そもそも熱電比の分布がどのようなになるかを示す研究は見受けられない。

そこで本研究では、まず、需要家間をネットワーク化した場合に得られる総合化された需要および熱電比の統計的性質を分析する。容易にわかるように需要の熱電比とコジェネの熱電比が常に一致していれば、コジェネは最大のエネルギー効率を安定して発揮できる。その観点から、ネットワーク化による需要パターンの組み合わせを適当に調整することにより、総合化された需要の熱電比とコジェネの熱電比を整合させることの可能性を調べる。次に、具体的な需要家間の結合を見い出すため、事務所ビル、ホテル、店舗、病院、住宅の代表的な5種類の建物用途をとりあげ、それぞれが保有するコジェネ・プラントの最適結合をモデル化し、最小コストとなる組み合わせを導く。また、その時の電力託送の価格を変動させることによって託送の役割を分析する。

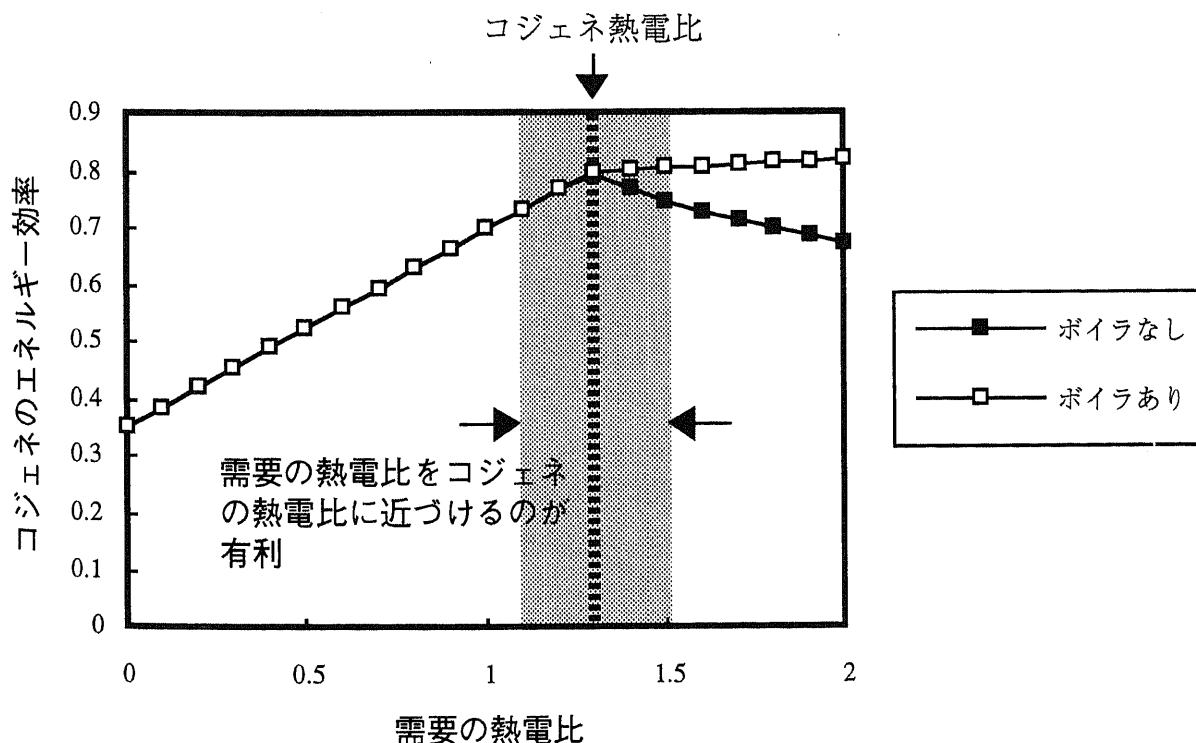


## 3.2 コジェネ・ネットワーク化の基本的考え方

### 3.2.1 熱電比とコジェネのエネルギー効率

コジェネのエネルギー効率と熱電比は密接な関係がある。ここで、熱電比にはコジェネ側の電力出力に対する熱出力の比率と、需要側の同時に発生する電力需要と熱需要との比率の2つの意味がある。需要の熱電比とエネルギー効率の関係の例を図3-1に示した。コジェネ単独で賄うとすればコジェネの熱電比と需要の熱電比が一致するところで最大の効率を得られる。これは、後者が前者よりも小さい場合には必要な電力供給に対してコジェネの排熱が余剰となり、後者が前者よりも大きい場合には逆に電力が余剰となることに起因する。後者が大きくなる場合にボイラを導入すればこの範囲で電力余剰を抑制できるため、エネルギー効率を高位で安定化することができる。他方、後者が小さくなる場合に系統から買電することはエネルギー効率の観点からは意味がない。系統発電所は一般に発電排熱を廃棄しているため、買電によってコジェネにおいて削減された余剰排熱は、単に系統発電所における廃熱に置き換えられただけである。買電する方が有利かどうかはそれぞれの発電効率に依存する。以上から、設備コストを抑えるとともにコジェネを高いエネルギー効率で運用するためには、できるだけ需要の熱電比をコジェネの熱電比周辺に近づけることが重要である。

図3-1 コジェネのエネルギー効率の熱電比に対する依存性



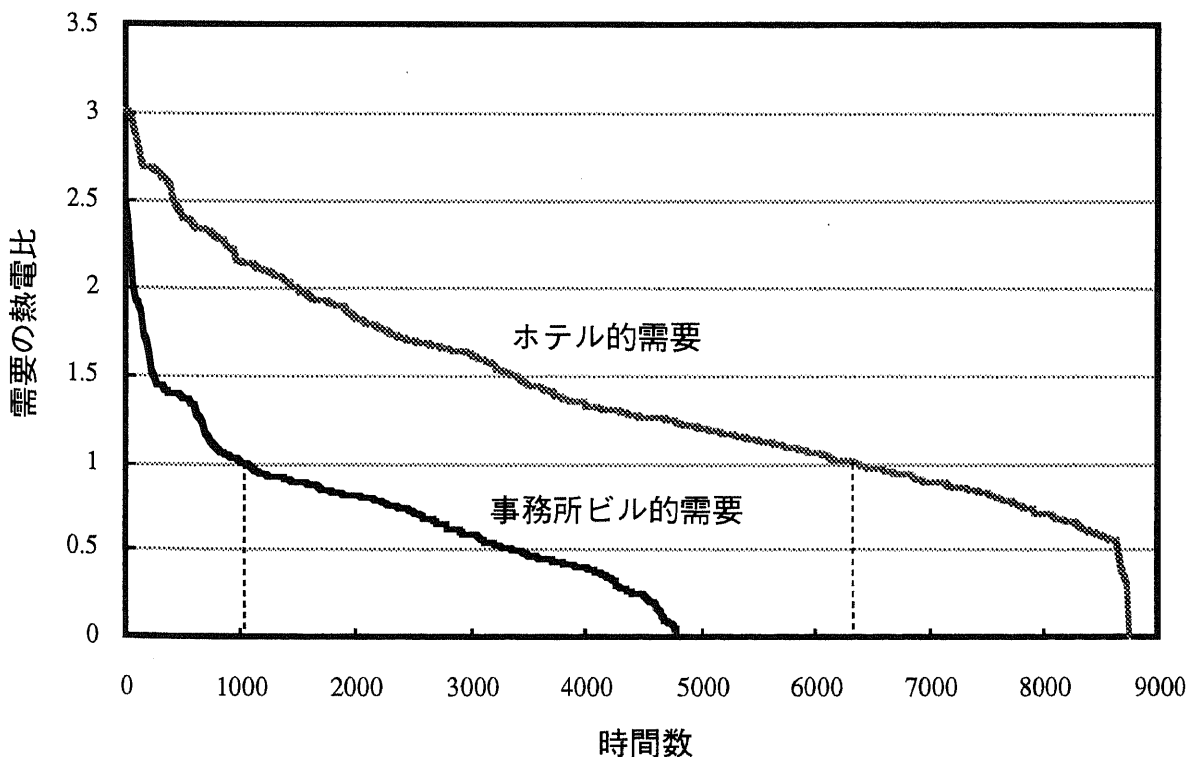
## 3.2.2 建物用途別の熱電比の比較

先の結果から、需要の熱電比がコジェネの熱電比以上である期間が長いほど、コジェネは高いエネルギー効率で有効に運転される。逆に、需要の熱電比がコジェネの熱電比以下となる期間が長ければ、コジェネ単体の総合効率の上限が0.8だとしても、実際にはもっと低い効率しか実現しない。その結果、後者のような需要家においては経済性が乏しくなるためコジェネの導入はされにくいと予想される。

図3-2に比較的熱需要の高いホテルと電力需要が主となる事務所ビルについて、事例データ<sup>[21]</sup>を基に熱電比の年間持続曲線を比較した。ここで、コジェネ熱電比を1.0と仮定すれば、ホテル的需要ではコジェネが高効率で稼働する時間数は6,000時間を超えるが、事務所ビルの需要ではわずか1,000時間と1/6になる。しかも年間の約半分は夜間のため熱電比はゼロである。

この状態のまま個別の需要家とコジェネを考えたら事務所ビルではコジェネは利用されない。しかしながら、ホテル的需要の約6,000時間はボイラで補充している状態であるので、この領域でコジェネ出力を拡大し余剰電力を事務所ビルの需要における低熱電比領域の部分に供給できれば、お互いに相補的な関係を成立させることができる。図ではそれぞれ需要間での熱電比発生時間の対応が直接わからないが、負荷の時間パターンによっては相補性の実現する可能性がある。言い替えれば、電力託送による需要家のネットワーク化が意味を持つことを示唆している。

図3-2 ホテル的需要と事務所ビルの需要の熱電比持続曲線の比較



## 3.2.3 コジェネ保有者のネットワーク化

複数のコジェネ保有者を想定し、それぞれがコジェネ・プラントと熱供給補足用のボイラを運転していると考え、これらの保有者で一つのシステムを構成し、これら以外の需要家や電力会社は外部の要素と位置づける。このとき、次の2つの運用方法が考えられる。

- i) システム内で電力を融通しあい、外部からの買電、外部への売電はしない。
- ii) システム内で余った電力は外部へ売電する。

前者では、最終的に電力が余剰になるのであれば発電を抑制してボイラで補うことになり、電力が不足すればコジェネで発電する。このとき廃熱が発生するためエネルギー効率が引き下げられる。後者では常に熱需要を賄うように発電し、余剰電力が発生したならば外部の需要家または電力会社に売電する。電力が不足する場合は前者と同じく発電を増やす。

設備はそれぞれの需要家が保有し、電力のみが融通される状況を想定するが、このとき以下に示すように、各需要家の負荷を総和した負荷に関する議論によって総体としての電力融通を表現できる。言い換えれば、各需要家があたかも一つのビルに集約され、一つのコジェネ・システムから供給を受けるとみなしてよい。需要家 $i$ の負荷および余剰電力、コジェネ熱電比を次のように表わす。

- $x_i$  : 電力負荷
- $y_i$  : 熱負荷
- $\Delta w_i$  : 余剰電力（正のとき）または不足電力（負のとき）
- $\rho$  : コジェネ熱電比

このとき、

$$\Delta w_i = \frac{y_i}{\rho} - x_i \quad \dots (3.1)$$

$$\Delta w = \sum_i \Delta w_i = \sum_i \left( \frac{y_i}{\rho} - x_i \right) = \frac{1}{\rho} \sum_i y_i - \sum_i x_i \quad \dots (3.2)$$

(3.2)式は融通の最終的な結果における電力余剰／不足の状態は、電力負荷、熱負荷をそれぞれ総和した需要における電力余剰／不足の状態に一致することを示す。したがって、需給挙動をみる上では需要家が空間的に離れていることは捨象できる。この点は需要の総和の際に重みづけがなされても保持される。しかしながら、個別の需要家間で発生する託送やボイラ追いだきは明示的に取り扱えない。これらについては平均値として挙動を得ることができる。

以上を踏まえ、個々の需要を総合して得られる需要の挙動に関して議論を進める。また、電力託送を利用したネットワーク化により需要を総合する場合に、適当な結合形態（組合せ比率）を具体的に見い出すことに注目する。

### 3.3 ネットワーク化による需要熱電比の挙動

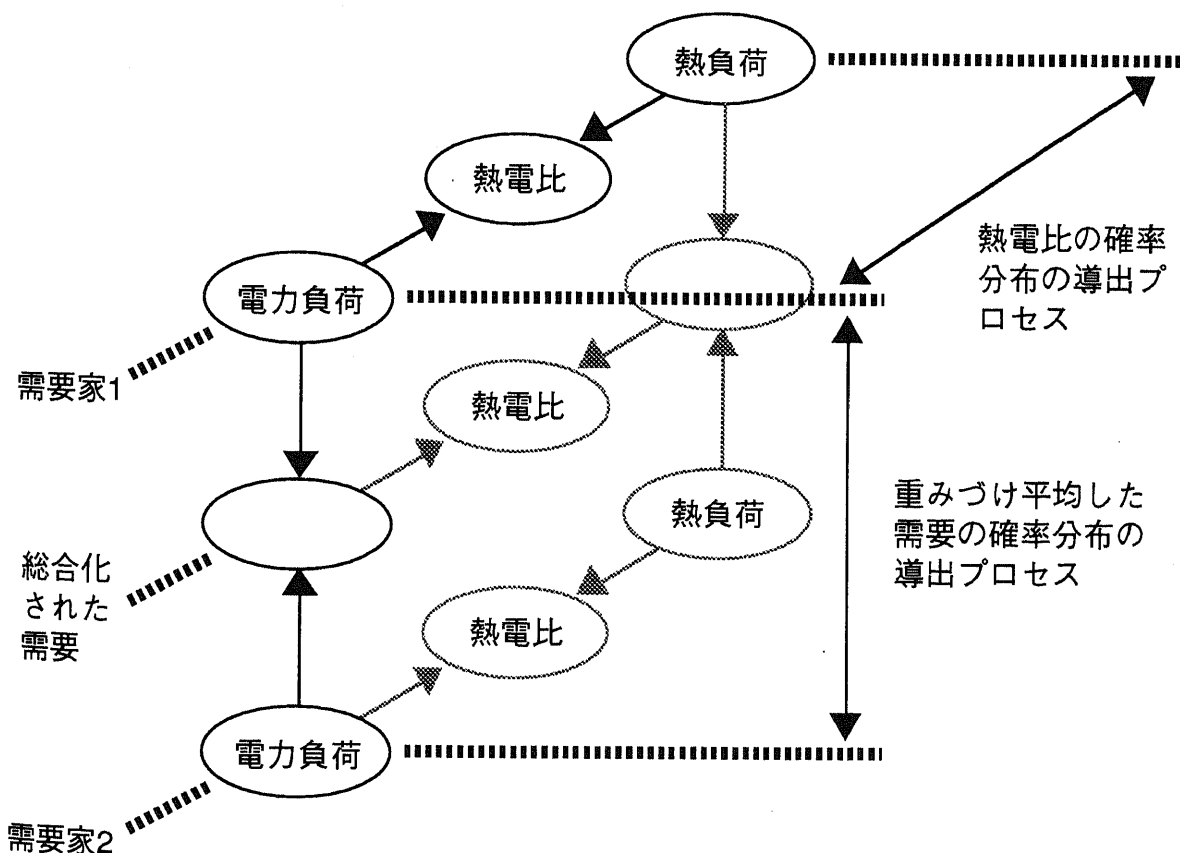
#### 3.3.1 熱電比挙動分析の基本的考え方

##### (1) 結合された需要の熱電比挙動

前述したように需要の熱電比をコジェネ熱電比に近づけることがエネルギー効率の観点から重要である。これは前者の平均が後者に近く、分散が小さい状態が望ましいと言い替えられる。そこで、ここでは異なる2種類の需要家を想定し、これらの需要を重みづけ平均した需要（以下では“総合化された需要”と呼ぶ）の平均および標準偏差の挙動を調べる。

図3-3に熱電比挙動を導くための2つのプロセスについて示した。まず、電力需要と熱需要の確率分布を与え、熱電比の確率分布を導く。次いで、電力需要、熱需要のそれぞれを2つの需要家間で結合した時に得られる総合化された需要の確率分布を導く。先の熱電比分布の算出手順を総合化された需要に対して適用することによって、結合比率によって総合化された需要の熱電比の平均、標準偏差を求める。この挙動と個別の需要家の熱電比挙動とを比較する。

図3-3 総合化された需要の熱電比挙動算出のためのプロセス



(2) 変数等の定義

ここで用いる変数, パラメータ等の記号を以下のとおり定義する.

〈添え字〉

$i$  : 需要家の番号

〈変数〉

$x$  : 電力負荷 (kcal/h)

$y$  : 熱負荷 (kcal/h)

$z$  : 熱電比 (—)

$\xi$  : 結合比率 ( $0 \leq \xi \leq 1$ ) (—)

〈確率分布〉

$\phi(x, y)$  : 電力負荷と熱負荷の同時確率密度関数 (—)

$f(x)$  : 電力負荷の確率密度関数 (—)

$g(y)$  : 熱負荷の確率密度関数 (—)

$q(z)$  : 熱電比の確率密度関数 (—)

〈パラメータ〉

$\mu_x$  : 電力負荷の平均 (kcal/h)

$\sigma_x$  : 電力負荷の標準偏差 (kcal/h)

$\mu_y$  : 熱負荷の平均 (kcal/h)

$\sigma_y$  : 熱負荷の標準偏差 (kcal/h)

$\mu_z$  : 熱電比の平均 (—)

$\sigma_z$  : 熱電比の標準偏差 (—)

$r$  : 電力負荷と熱負荷の相関係数 (—)

$R_x$  : 電力負荷に関する需要家間の相関係数 (—)

$R_y$  : 熱負荷に関する需要家間の相関係数 (—)

$\alpha_x$  : 電力負荷に関するガンマ分布のパラメータ (—)

$\beta_x$  : " (—)

$\alpha_y$  : 熱負荷に関するガンマ分布のパラメータ (—)

$\beta_y$  : " (—)

## 3.3.2 熱電比の確率分布

負荷変動は一般に正規分布で記述される場合が多い。また、負荷の確率分布が正規分布ならば加重平均した需要の分布も正規分布となるため、熱電比分布の導出プロセスがどちらも同じとなり手続き上都合がよい。ここではまず、電力負荷、熱負荷の分布が相関を持つ正規分布で与えられる場合を考える。しかしながら、正規分布では現実にはありえない負値が生じてしまう。そこで、電力負荷と熱負荷がそれぞれ独立であると仮定し、ガンマ分布の場合について熱電比の分布を導き、正規分布の場合と比較する。

## (1) 負荷分布が正規分布の場合

相関を持つ2次元の同時正規確率密度関数は次式で表わされる。

$$\phi(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2(1-r^2)} \left\{ \left( \frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2r \left( \frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right) \left( \frac{y-\mu_y}{\sigma_y} \right) + \left( \frac{y-\mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \quad \dots (3.3)$$

一方、熱電比 $z$ は次で与えられる。

$$z = \frac{y}{x} \quad \dots (3.4)$$

このとき、熱電比の確率密度分布は次の式を展開して求めることができる。

$$\begin{aligned}
 q(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\phi(x,zx)}{\left| \frac{\partial z}{\partial y} \right|} dx = \int_{-\infty}^{\infty} |x| \phi(x,zx) dx \quad \dots (3.5) \\
 \therefore q(z) &= \frac{1}{\pi\sqrt{1-r^2}} \exp \left[ -\frac{(\mu_x z - \mu_y)^2}{2S^2} \right] \times \\
 &\quad \left\{ \frac{\sigma_x \sigma_y (1-r^2)}{S^2} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{A}{\sigma_x \sigma_y \sqrt{1-r^2} S} \right)^2 \right] + \frac{A}{S^3} \sqrt{\frac{\pi(1-r^2)}{2}} \operatorname{Erf} \left( \frac{A}{\sigma_x \sigma_y S \sqrt{2(1-r^2)}} \right) \right\} \quad \dots (3.6)
 \end{aligned}$$

ただし、

$$S = \sqrt{\sigma_y^2 - 2r\sigma_x\sigma_y z + \sigma_x^2 z^2} \quad \dots (3.7)$$

$$A = \sigma_y(\mu_x\sigma_y - r\mu_y\sigma_x) + \sigma_x(\mu_y\sigma_x - r\mu_x\sigma_y) z \quad \dots (3.8)$$

$$Erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad \dots (3.9)$$

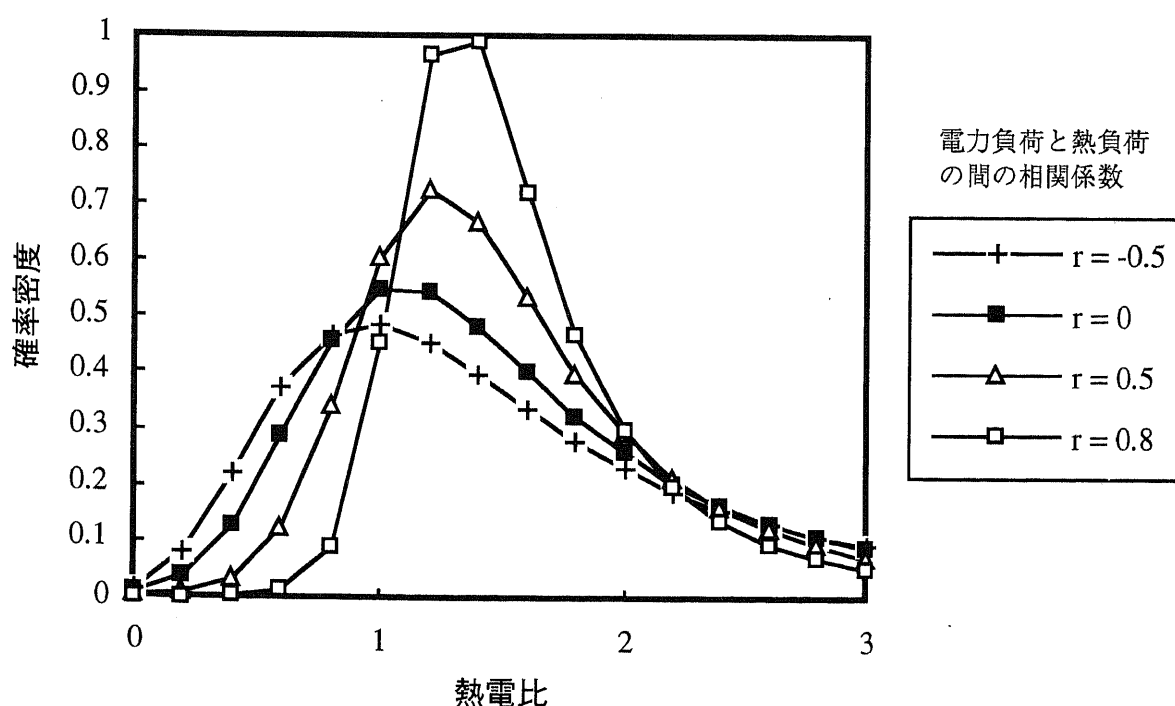
この $q(z)$ の概形を図3-4に図示する．分布のパラメータは次のように設定した．

電力負荷： 平均 .... 2 , 分散 .... 1

熱負荷： 平均 .... 3 , 分散 .... 1

熱電比の分布は，ゼロから急激に立ち上がり $\mu_y/\mu_x$ よりやや低めにピークを持ち，熱電比の高位側に長く裾を引く分布形状となっている．相関係数が高くなるにしたがって，ピークが $\mu_y/\mu_x$ に近づきながら大きくなる様子が見て取れる．相関が強くなれば熱電比は一定値に収束する傾向を持つことは予想通りである．特に低位の熱電比の範囲で発生確率が急速に低下するが，高位側の裾は相関係数の変化に対してそれほど大きな変化はない．排熱余剰となる低い熱電比の発生が抑制される点はコジェネが熱供給する上で好ましい．その意味で，電力負荷と熱負荷の相関係数は需要とコジェネとの適性をマクロ的に示す指標と位置づけられる．また，相関係数がゼロの場合には分布の中にコーシー分布が含まれることから，この分布では分散が発散すると考えられる．

図3-4 負荷が正規分布する場合の熱電比分布



## (2) 負荷分布がガンマ分布の場合

正規分布の場合ではパラメータによっては熱電比のマイナス側にも分布するが、これは現実的ではない。この点を改善するため、もともと正の範囲でのみ定義されるガンマ分布を適用する。ただし、相関を持つ場合は表現できないので、電力負荷、熱負荷が相互に独立であることを仮定する。ガンマ分布の場合、それぞれの負荷分布は次で与えられる。

$$f(x) = \frac{x^{\alpha_x-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta_x}\right)}{\beta_x^{\alpha_x} \Gamma(\alpha_x)} \quad \dots (3.10)$$

$$g(y) = \frac{y^{\alpha_y-1} \exp\left(-\frac{y}{\beta_y}\right)}{\beta_y^{\alpha_y} \Gamma(\alpha_y)} \quad \dots (3.11)$$

ただし、

$$\alpha_x = \frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2}, \quad \beta_x = \frac{\sigma_x^2}{\mu_x} \quad \dots (3.12)$$

$$\alpha_y = \frac{\mu_y^2}{\sigma_y^2}, \quad \beta_y = \frac{\sigma_y^2}{\mu_y} \quad \dots (3.13)$$

(3.5)式と同様に、 $q(z)$ は以下のように求められる。

$$q(z) = \int_0^\infty x f(x) g(zx) dx = \frac{\Gamma(\alpha_x + \alpha_y)}{\Gamma(\alpha_x) \Gamma(\alpha_y)} \frac{\beta_x^{\alpha_y} \beta_y^{\alpha_x} z^{\alpha_y-1}}{(\beta_x^{\alpha_x} z + \beta_y^{\alpha_y})^{\alpha_x + \alpha_y}} \quad \dots (3.14)$$

すなわち、負荷がガンマ分布の場合には熱電比はベータ分布に従うことが示された。また、このとき平均および分散を次の通り解析的に求めることができる。

平均：

$$\mu_z = \frac{\alpha_y}{\alpha_x - 1} \frac{\beta_y}{\beta_x} \quad (\alpha_x > 1) \quad \dots (3.15)$$

分散：

$$\sigma_z^2 = \frac{\alpha_y (\alpha_x + \alpha_y - 1)}{(\alpha_x - 1)^2 (\alpha_x - 2)} \left( \frac{\beta_y}{\beta_x} \right)^2 \quad (\alpha_x > 2) \quad \dots (3.16)$$

さらに、これらのパラメータを負荷分布のパラメータで置き換えれば、熱電比分布の平均、標準偏差と負荷分布の平均、標準偏差との直接的な関連が次のように得られる。

$$\mu_z = \frac{\mu_x \mu_y}{\mu_x^2 - \sigma_x^2} \quad (\mu_x^2 > \sigma_x^2) \quad \dots (3.17)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{\mu_x^2 (\sigma_y^2 \mu_x^2 + \sigma_x^2 \mu_y^2 - \sigma_x^2 \sigma_y^2)}{(\mu_x^2 - \sigma_x^2)^2 (\mu_x^2 - 2\sigma_x^2)} \quad (\mu_x^2 > 2\sigma_x^2) \quad \dots (3.18)$$



(3) 正規分布の場合とガンマ分布の場合の比較

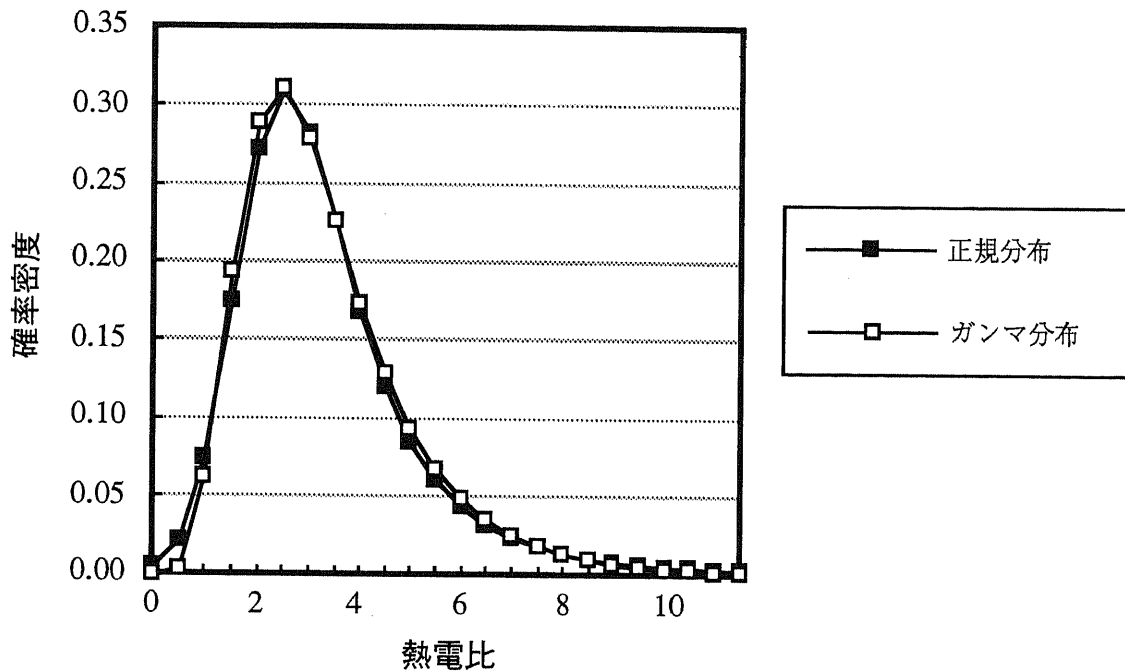
負荷分布が正規分布の場合とガンマ分布の場合の熱電比分布の比較を行う。パラメータは次のように設定した。電力と熱は独立の仮定から相関係数はゼロとした。両者の比較を図3-5に示す。

ケース1:  $\mu_x = 10, \sigma_x = 3.3, \mu_y = 30, \sigma_y = 10$

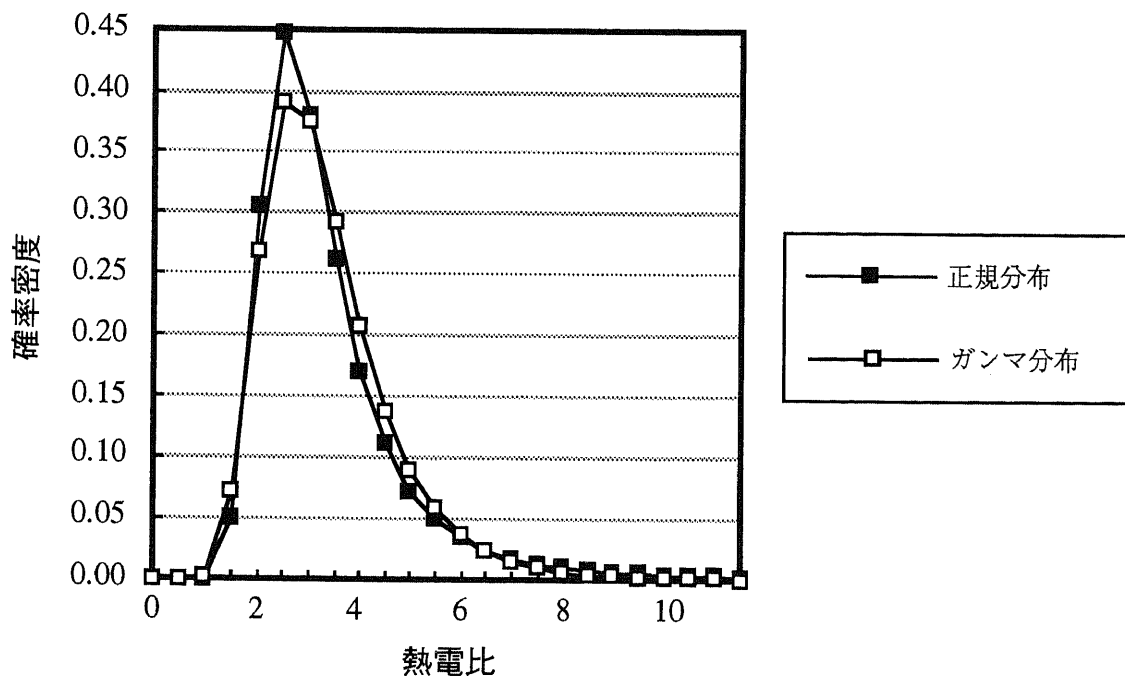
ケース2:  $\mu_x = 10, \sigma_x = 3.3, \mu_y = 30, \sigma_y = 3.3$

図3-5 正規分布の場合とガンマ分布の場合の熱電比分布

〈ケース1〉



〈ケース2〉



両者の比較を図3-5に示す。正規分布に基づく場合もガンマ分布に基づく場合も基本的には同様の分布傾向を示す。同じ熱電比にピークを持ち、高位側に裾を引いている。ケース1では両者が全般によく一致しており、ケース2ではピークの高さがやや異なることを除いて両方とも概ね一致している。このことから、厳密には異なるものの、近似的には正規分布の場合の代わりにガンマ分布の場合を用いることが可能と考えられる。

#### (4) 電力負荷と熱負荷の相関

電力負荷と熱負荷の相関をみるために、具体的な需要の例について調べる。事務所ビルの需要とホテル的需要について図3-6に示す。これらは各月の代表日の負荷パターン12ヶ月分<sup>[21]</sup>をプロットしたものである。この例の場合、相関係数は次の通り。

事務所ビルの需要： 0.86

ホテル的需要： 0.42

事務所ビルの需要ではある程度相関がみられるが、ホテル的需要では相関は比較的小さい。したがって、需要によっては電力負荷と熱負荷を独立とみなし、ガンマ分布に基づいて熱電比を導くことも有効と考えられる。

#### 3.3.3 総合化した需要の確率分布

ここでは、重みづけ平均した需要の確率分布を求める。重みを $\xi$ とし、2種の需要家の電力負荷を結合した場合を考える（熱負荷についても同様である）。すなわち、

$$x = \xi x_1 + (1 - \xi) x_2 \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad \dots (3.19)$$

このとき、総合化された需要の平均、分散は次で与えられる。

平均：

$$\mu_x = E[\xi x_1 + (1 - \xi) x_2] = \xi \mu_{x_1} + (1 - \xi) \mu_{x_2} \quad \dots (3.20)$$

分散：

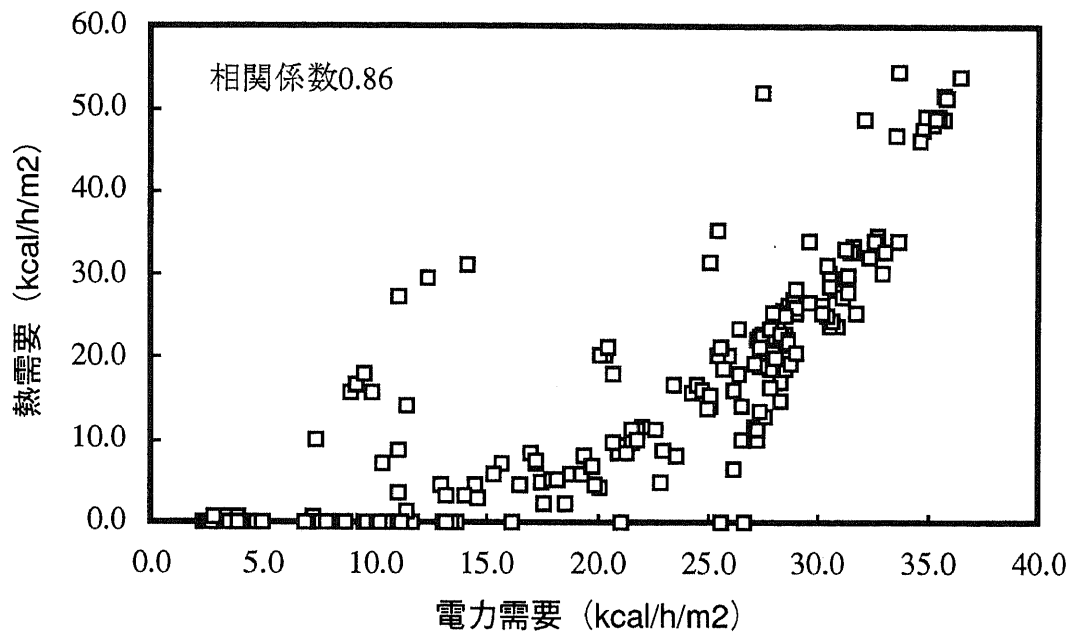
$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= E[(x - \mu_x)^2] \\ &= \xi^2 \sigma_{x_1}^2 + (1 - \xi)^2 \sigma_{x_2}^2 + 2\xi(1 - \xi) \text{Cov}(x_1, x_2) \\ &= \xi^2 \sigma_{x_1}^2 + (1 - \xi)^2 \sigma_{x_2}^2 + 2\xi(1 - \xi) R_x \sigma_{x_1} \sigma_{x_2} \end{aligned} \quad \dots (3.21)$$

ただし、 $\text{Cov}(x_1, x_2)$  :  $x_1$  と  $x_2$  の共分散

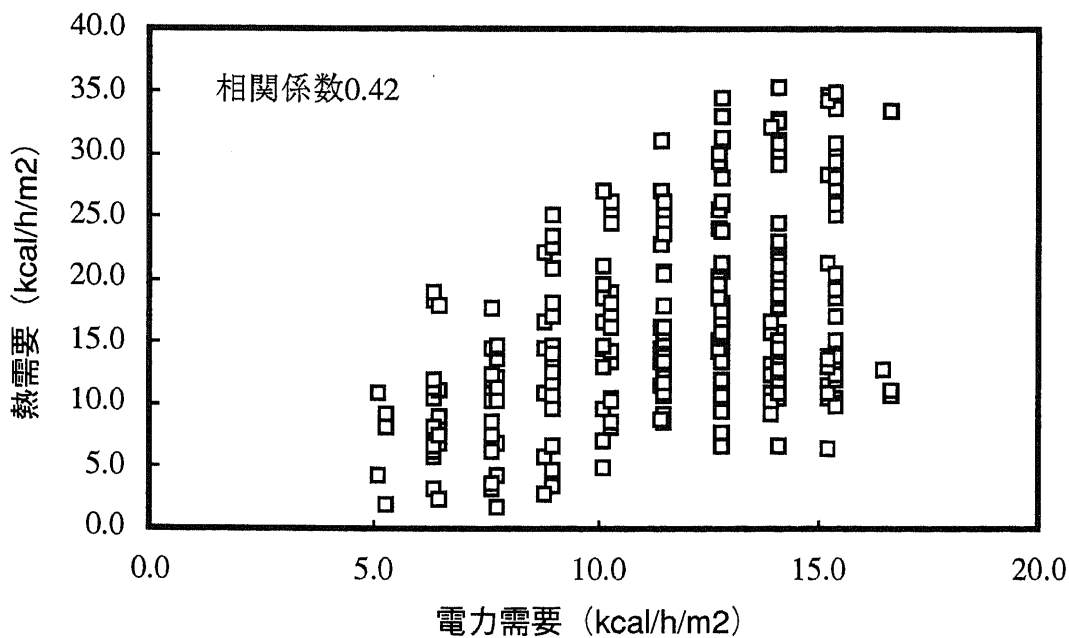
結合比率を変化させたときの総合化された需要の平均、標準偏差の挙動を図3-7に示す。個別需要家を端点とし、結合比率にしたがって相関係数 $R_x$ に応じて3通りの奇跡を描く。すなわち、

図3-6 年間の電力負荷と熱負荷の例

〈事務所ビルの需要〉



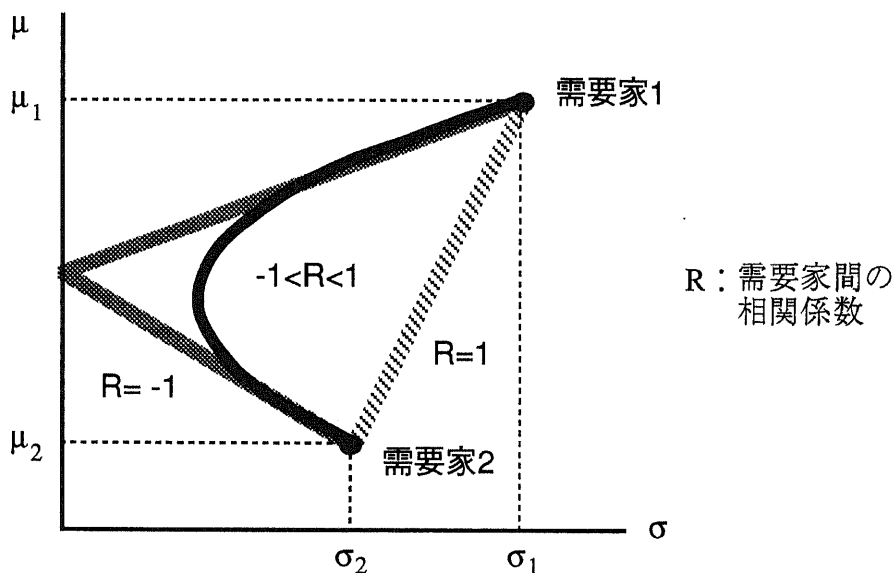
〈ホテルの需要〉



- i)  $R_x = 1$  のとき : 端点を結ぶ直線
- ii)  $-1 < R_x < 1$  のとき : 端点を結ぶ双曲線
- iii)  $R_x = -1$  のとき : 途中、標準偏差ゼロで折り返す直線

これより、2つの需要を総合した場合、もともとの需要の分散よりも小さくなる傾向を持つ。相関係数によっては両方の需要家の分散を大きく下回ることありうる。

図3-7 総合化された需要の平均—標準偏差の挙動



もともとの需要が正規分布であれば、加重平均した変量も正規分布となる。一方、需要がガンマ分布の場合には、一般的には加重平均した変量はガンマ分布に再生されない。その点で負荷分布にガンマ分布を当てはめることは熱電比の分布を導く上で困難がある。ただし、上記の議論では分布を特定していないので、需要の分布形状によらず成り立つ性質である。

### 3.3.3 ネットワーク化による熱電比の平均—標準偏差挙動

総合化された電力負荷分布と熱負荷分布の平均、標準偏差が求められれば、先の手順によって総合化された需要の熱電比分布を得ることができる。ただし、ここでは電力負荷と熱負荷は独立とみなし、近似的に熱電比の平均、分散として(3.17)(3.18)式を用いることとする。表3-1に示す分布のパラメータを与え、需要家間の相関が平均—標準偏差挙動に与える影響を次の3通りについて調べた。

- i) 電力負荷の相関のみを変化させた場合（熱負荷の相関はゼロ）
- ii) 熱負荷の相関のみを変化させた場合（電力負荷の相関はゼロ）

## iii) 電力負荷と熱負荷のどちらも同じ相関係数を持つとした場合

それらの結果を図3-8に示す。

表3-1 需要家の負荷分布の設定

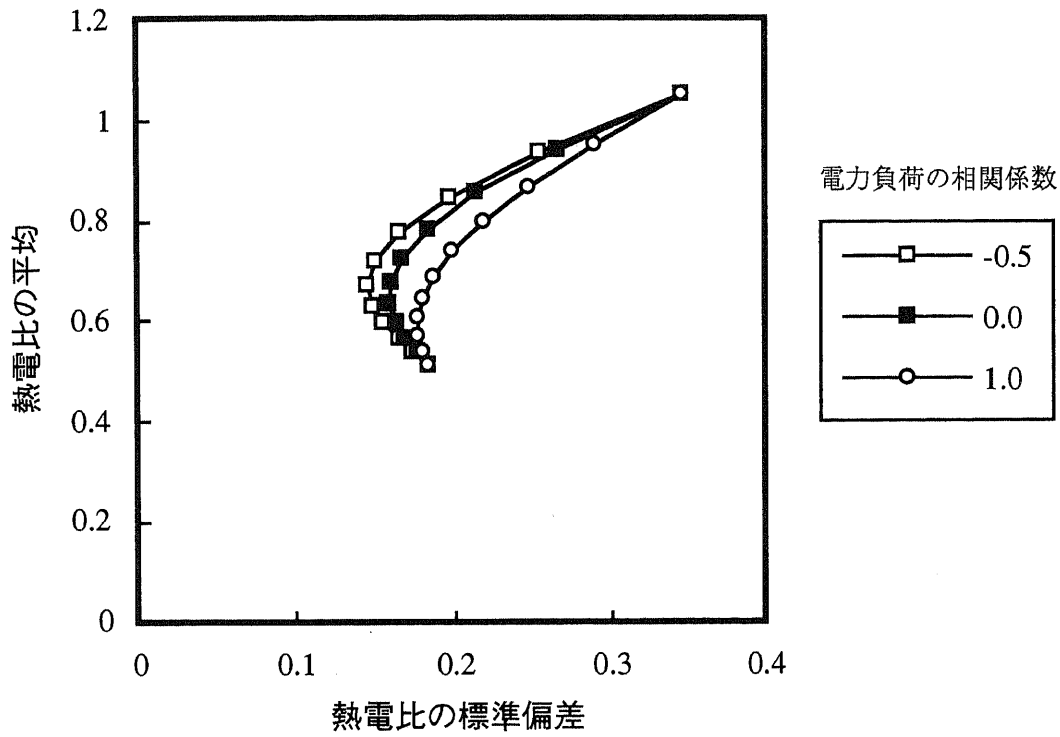
需要家	負荷	平均	分散
需要家1	電力負荷	20	10
	熱負荷	10	10
需要家2	電力負荷	10	5
	熱負荷	10	5

結合された時の熱電比も図3-7と同様に、標準偏差がもともとよりも小さくなるような弧を描く挙動を示す。また、この効果は需要家間の相関に大きな影響を受ける。熱負荷の相関が変化する場合の方が電力負荷の相関が変化する場合よりも振れ幅が大きいので、影響が大きい。熱負荷が逆相関を持つ需要家の組み合わせがより熱電比の変動を抑えることに役立つといえる。

このことから、コジェネの熱電比よりも熱電比が高い需要家と低い需要家をネットワーク化すれば、適当な結合比率によって需要熱電比の平均値をコジェネ熱電比に近づけることができるとともに、熱電比の標準偏差をもととの需要家よりも小さくすることができる。すなわち、コジェネ熱供給の余剰や不足を小さくし、高いエネルギー効率で運用することを可能にする。従来ならばコジェネが自己完結的にエネルギー供給を行うために無駄が発生していたが、電力託送による需要家のネットワーク化は熱電比挙動に自由度を与え、コジェネに適したように需要の熱電比を調整するのに有効であることが示された。

図3-8 総合化された需要の熱電比挙動

電力負荷の相関が変化する場合：（熱負荷の相関はゼロ）



熱負荷の相関が変化する場合：（電力負荷の相関はゼロ）

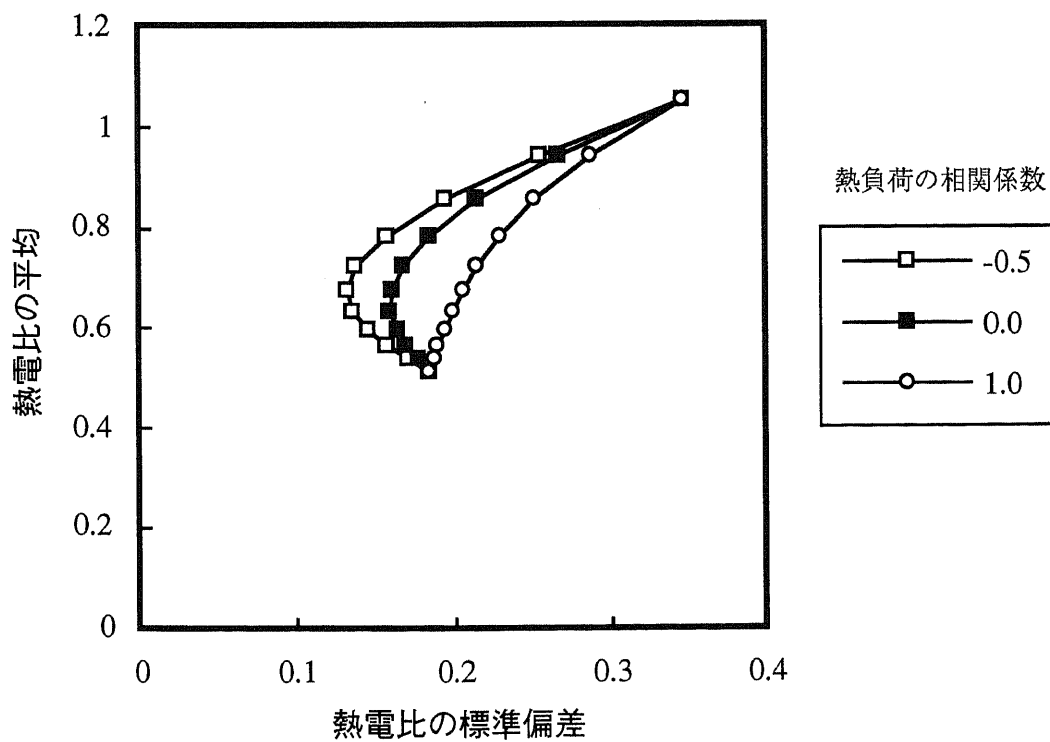
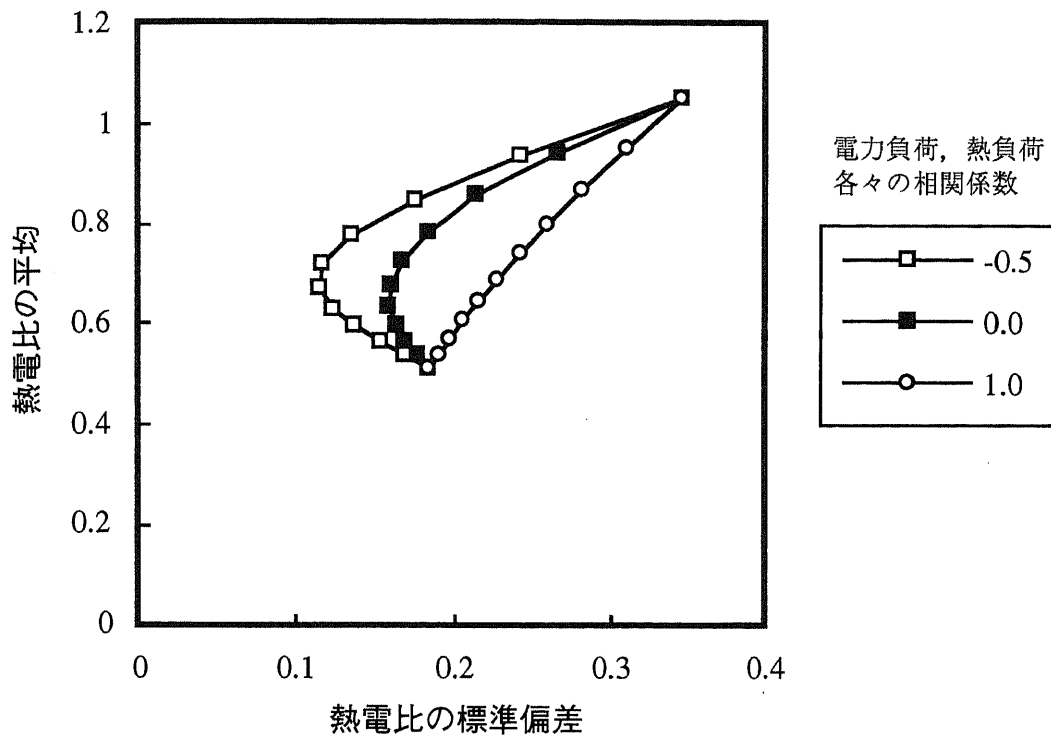


図3-8 総合化された需要の熱電比挙動（つづき）

電力，熱負荷の相関が同じ場合：



### 3.4 需要家の最適ネットワーク化

ここでは、具体的な複数の需要家を想定し、コジェネを保有する需要家を電力託送でネットワーク化して運用する状態をモデル化する。これに基づき、経済性の意味で最適な需要家間の結合を導くとともに、設備導入規模、エネルギー供給挙動、託送の挙動を明らかにする。

#### 3.4.1 需要家ネットワーク化モデルの基本的考え方

##### (1) n種の需要家を総合化した需要

先の2種の需要家の重みづけ結合をn種に拡張する。総合化された需要を次で与える。

$$x = \sum_{i=1}^n \xi_i x_i \quad \dots (3.22)$$

$$y = \sum_{i=1}^n \xi_i y_i \quad \dots (3.23)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 1 \quad (\xi_i \geq 0) \quad \dots (3.24)$$

このときの平均、分散は次のように表わされる。

平均：

$$\mu_x = \sum_{i=1}^n \xi_i \mu_{xi} \quad \dots (3.25)$$

$$\mu_y = \sum_{i=1}^n \xi_i \mu_{yi} \quad \dots (3.26)$$

分散：

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= E \left[ \left\{ \sum_{i=1}^n \xi_i (x_i - \mu_{xi}) \right\}^2 \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j E[(x_i - \mu_{xi})(x_j - \mu_{xj})] \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j \text{Cov}(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j R_{xij} \sigma_{xi} \sigma_{xj} \quad \dots (3.27) \end{aligned}$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j R_{yij} \sigma_{yi} \sigma_{yj} \quad \dots (3.28)$$

電力負荷と熱負荷の相関係数は次のように求められる。

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \dots (3.29)$$

ここで、



$$\begin{aligned}
 Cov(x,y) &= E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j E[(x_i - \mu_{xi})(y_j - \mu_{yj})] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j r_{xij} \sigma_{xi} \sigma_{yj} \dots (3.30)
 \end{aligned}$$

$$\therefore r_{xy} = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j r_{xij} \sigma_{xi} \sigma_{yj} \dots (3.31)$$

ただし、

$r_{xy}$  : 総合化された需要の電力負荷と熱負荷の相関係数  
 $r_{xij}$  : 需要家iの電力負荷と需要家jの熱負荷の間の相関係数

## (2) モデル化の前提

### 1) 対象とする需要

今回は具体的な需要家として代表的な次の5種類を対象とする。

対象需要家： 事務所ビル、ホテル、店舗、病院、住宅

それぞれの電力負荷、熱負荷は次のように季時別に分けて日間および年間の負荷変動を考慮した。また、各時間帯で負荷は正規分布すると仮定した。

季節： 3季に区分。

夏季	....	7月、8月、9月
冬季	....	12月、1月、2月
中間季	....	上記以外の月

時間帯：5時間帯に区分。

第1時間帯	....	6時～10時
第2時間帯	....	10時～14時
第3時間帯	....	14時～18時
第4時間帯	....	18時～22時
第5時間帯	....	22時～6時

### 2) 需要家の単位

モデルでは前述の総合化された需要に対してコジェネ、ボイラの設備を当てはめる。このとき、コスト最小化を評価基準とすると、基本的には設備規模が小さくなるような解が導かれる。したがって、

床面積あたりの需要をそのまま用いると、単に最も需要規模が小さい需要家のみが選択されることが予想される。この解を回避するため、それぞれの需要家の年間電力消費量がどれも同じになるような床面積を各需要家の1単位とする。

### 3) コジェネ挙動のモデル化

ここでは需要家のネットワーク化におけるコジェネ運用について次の2通りのモデル化を行う。

- i) 電力負荷追従運転モデル
- ii) 熱負荷追従運転モデル

前者では電力負荷に合わせて発電し、不足する熱をボイラで補う。ただし、ネットワーク系内で余剰電力が発生しないようにコジェネおよびボイラを運用する。一方、後者ではボイラを持たず、コジェネがすべての熱供給を分担する。このため、常に熱需要に合わせてコジェネを運用し電力を融通し合い、系全体として余剰となる電力は系外に売電する。この場合、売電先は電力会社を想定した。また、後者においても系全体として電力が不足する場合にはいずれかのコジェネが焚き増しして補うものとし、そのための買電は行わないとした。

### 4) 評価基準

上記のどちらのモデルにおいても経済性、すなわち供給コストを評価基準とする。年間電力消費量を一定とする制約の下で、コストを最小にする最適な需要家間の結合比率を求める問題として定式化する。

## (3) 変数等の定義

ここでのモデル化に用いる記号を次の通り定義する。

〈添え字〉

- $i$  : 時間帯番号 ( $i=1\sim5$ )
- $k$  : 季節番号 ( $k=1$ :夏季,  $2$ :冬季,  $3$ :中間季)

〈負荷〉

- $x$  : 電力負荷 (kcal/h)
- $y$  : 熱負荷 (kcal/h)
- $z$  : ボイラ追いだき負荷 (kcal/h)
- $w$  : 余剰電力 (kcal/h)

〈負荷分布〉

- $\phi(x,y)$  : 電力負荷と熱負荷の同時確率密度関数 (—)

$f(x)$	: 電力負荷の確率密度関数	(—)
$g(y)$	: 熱負荷の確率密度関数	(—)
$h(z)$	: 追いだき負荷の確率密度関数	(—)
$\mu$	: 平均 ( $\cdot$ は $x, y, z, w$ を意味する)	(kcal/h)
$\sigma$	: 標準偏差	(kcal/h)

〈設備および運用〉

$K_c$	: コジェネ設備規模	(kcal/h)
$K_b$	: ボイラ設備規模	(kcal/h)
$S$	: 年間コジェネ発電量の平均値	(kcal)
$E$	: 年間買電量の平均値	(kcal)
$H$	: 年間ボイラ追いだき量の平均値	(kcal)
$Q$	: 年間売電量の平均値	(kcal)
$W$	: 年間電力託送量の平均値	(kcal)

〈コスト〉

$\gamma$	: 固定費 ( $\cdot$ は $c$ : コジェネ, $b$ : ボイラを意味する)	(円/(kcal/h))
$\lambda$	: 燃料費	(円/kcal)
$P_e$	: 買電価格	(円/kcal)
$P_s$	: 売電価格	(円/kcal)
$P_w$	: 託送料金	(円/kcal)

〈パラメータ〉

$\rho$	: コジェネ熱電比	(—)
$\eta_c$	: コジェネ発電効率	(—)
$\eta_b$	: ボイラ熱効率	(—)
$LOLP_x$	: 電力に関する負荷損失確率	(—)
$LOLP_y$	: 熱に関する負荷損失確率	(—)
$t_i$	: 時間帯の長さ	(h)
$T_k$	: 季節別の日数	(日)

### 3.4.2 電力負荷追従運転モデル

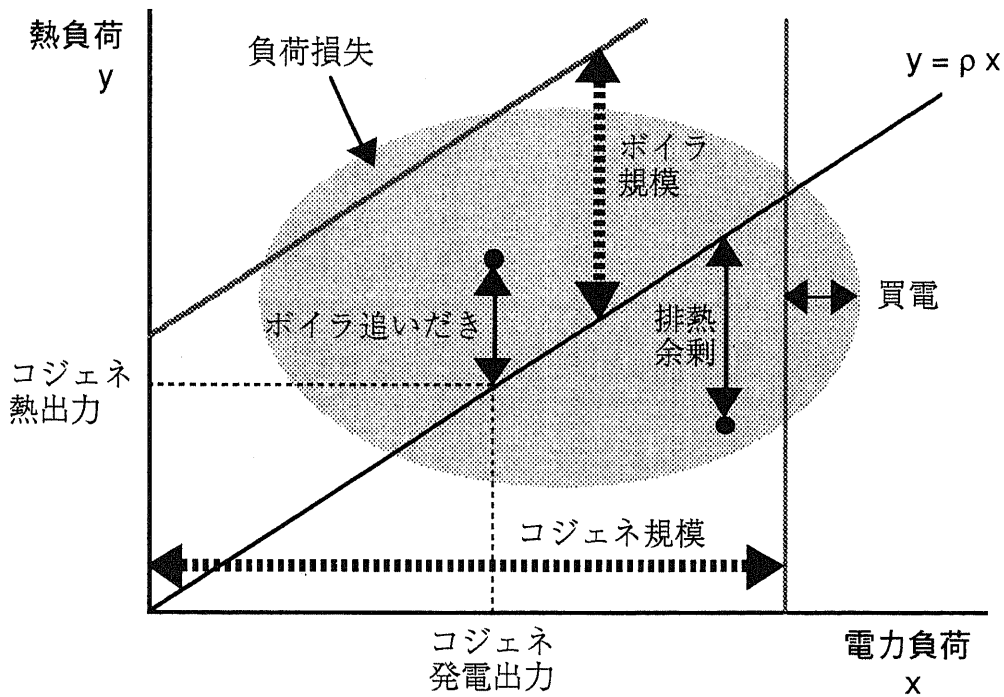
#### (1) モデル定式化の考え方

ここではネットワーク化された需要家が保有するコジェネ・プラントおよびボイラによって系内の電力および熱の需要を賄う場合をモデル化する。本モデルの特徴は次の通り。

- i) 系外への電力売電は行わない。
- ii) コジェネからの余剰電力の発生を抑え、不足する熱をボイラ追いだきで補う。
- iii) コジェネ、ボイラの規模はそれぞれ負荷損失確率の条件を満たすように決定する。
- iv) コジェネ設備規模を超える電力需要分は電力会社から買電する。

総合化された需要に対する規模設定などの挙動を図3-9に示す。

図3-9 電力負荷追従運転モデルにおける挙動



注： ハッチ : 電力負荷と熱負荷分布の分布  
黒丸 : 電力負荷と熱負荷の発生例

## (2) 問題設定

供給コスト最小化は、本モデルの場合次のように定式化される。

$$J = \gamma_c K_c + \gamma_b K_b + \frac{\lambda_c}{\eta_c} S + \frac{\lambda_b}{\eta_b} H + P_e E + P_w W \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (3.32)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 1 \quad (\xi_i \geq 0) \quad \dots (3.33)$$

$\xi_i$ は需要家間の結合比率を意味する。設備規模や運用に関する各変数を以下に定式化する。

## (3) コジェネの規模および運用

## 1) コジェネ規模

コジェネの規模は電力負荷について、負荷損失確率の条件に基づいて決める。すなわち、次式を満たす $K_c$ とする。

$$\frac{1}{8760} \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i \int_{K_c}^{\infty} f_{ki}(x_{ki}) dx_{ki} \right) = LOLP_x \quad \dots (3.34)$$

## 2) コジェネ発電量

コジェネの発電量の平均は次式で求められる。なお、負荷が設備容量を超えた場合は最大出力で運転するとした。

$$S = \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i \left\{ \int_{-\infty}^{K_c} x_{ki} f_{ki}(x) dx_{ki} + K_c \int_{K_c}^{\infty} f_{ki}(x_{ki}) dx_{ki} \right\} \right) \quad \dots (3.35)$$

{ } 内部は次のように展開できる。

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{K_c} x_{ki} f_{ki}(x) dx_{ki} + K_c \int_{K_c}^{\infty} f_{ki}(x_{ki}) dx_{ki} \\ &= \frac{K_c + \mu_{xki}}{2} - \frac{K_c - \mu_{xki}}{2} \operatorname{Erf} \left[ \frac{K_c - \mu_{xki}}{\sqrt{2} \sigma_{xki}} \right] - \frac{\sigma_{xki}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(K_c - \mu_{xki})^2}{2\sigma_{xki}^2} \right] \end{aligned} \quad \dots (3.36)$$

## 3) 買電量

負荷が設備容量を超えた分を積分することによって、買電量の平均が求められる。

$$E = \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i \left\{ \int_{K_c}^{\infty} (x_{ki} - K_c) f_{ki}(x_{ki}) dx_{ki} \right\} \right) \quad \dots (3.37)$$

{ } 内部は次のように展開できる。

$$\begin{aligned} & \int_{K_c}^{\infty} (x_{ki} - K_c) f_{ki}(x_{ki}) dx_{ki} \\ &= \frac{\sigma_{xki}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(K_c - \mu_{xki})^2}{2\sigma_{xki}^2} \right] - \frac{K_c - \mu_{xki}}{2} \left( 1 - \operatorname{Erf} \left[ \frac{K_c - \mu_{xki}}{\sqrt{2} \sigma_{xki}} \right] \right) \end{aligned} \quad \dots (3.38)$$

## (4) ボイラの規模および運用

## 1) ボイラ規模

図3-9において、熱負荷がコジェネ熱電比×電力負荷の直線を上回る場合にボイラ追いだきが発生する。下回る場合は熱負荷はコジェネ排熱で十分賄われる。したがって、ボイラ追いだきの負荷は次のように表わされる。

$$z_{ki} = \begin{cases} 0 & (y_{ki} \leq \rho x_{ki}) \\ y_{ki} - \rho x_{ki} & (y_{ki} > \rho x_{ki}) \end{cases} \quad \dots (3.39)$$

したがって、追いだきの負荷分布は次式で求めることができる。

$$h_{ki}(z_{ki}) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{ki}(x_{ki}, z_{ki} + \rho x_{ki}) dx_{ki} \quad \dots (3.40)$$

ただし、厳密には $x_{ki}$ が $K_c$ を超える範囲ではボイラ追いだき量は(3.39)式と異なるが、その範囲では分布が希薄であるため上記の積分で十分近似できるとした。この式を展開することによって次を得る。

$$h_{ki}(z_{ki}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\rho^2\sigma_{xki}^2 - 2\rho r_{ki}\sigma_{xki}\sigma_{yki} + \sigma_{yki}^2)}} \exp\left[-\frac{\{z_{ki} - (\mu_{yki} - \rho\mu_{xki})\}^2}{2(\rho^2\sigma_{xki}^2 - 2\rho r_{ki}\sigma_{xki}\sigma_{yki} + \sigma_{yki}^2)}\right] \quad \dots (3.41)$$

すなわち、追いだきの分布は正規分布で表わされる。負荷損失確率の条件によりボイラ規模は次式で定められる。

$$\frac{1}{8760} \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i \int_{K_b}^{\infty} h_{ki}(z_{ki}) dz_{ki} \right) = LOLP_y \quad \dots (3.42)$$

## 2) ボイラ追いだき量

追いだきの負荷分布から追いだき量の平均は次で求められる。

$$H = \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i \left\{ \int_0^{K_b} z_{ki} h_{ki}(z_{ki}) dz_{ki} + K_b \int_{K_b}^{\infty} h_{ki}(z_{ki}) dz_{ki} \right\} \right) \quad \dots (3.43)$$

{ } の中はそれぞれ次のように展開できる。

$$\begin{aligned} & \int_0^{K_b} z_{ki} h_{ki}(z_{ki}) dz_{ki} \\ &= \frac{\Sigma_{zki}}{\sqrt{2\pi}} \left( \exp\left[-\frac{(\mu_{yki} - \rho\mu_{xki})^2}{2\Sigma_{zki}^2}\right] - \exp\left[-\frac{\{K_b - (\mu_{yki} - \rho\mu_{xki})\}^2}{2\Sigma_{zki}^2}\right] \right) \quad \dots (3.44) \end{aligned}$$

$$K_b \int_{K_b}^{\infty} h_{ki}(z_{ki}) dz_{ki} = \frac{K_b}{2} \left( 1 - \operatorname{Erf} \left[ \frac{K_b - (\mu_{yki} - \rho \mu_{xki})}{\sqrt{2} \Sigma_{zki}} \right] \right) \quad \dots (3.45)$$

ただし,

$$\Sigma_{zki} = \sqrt{\rho^2 \sigma_{xki}^2 - 2\rho r_{ki} \sigma_{xki} \sigma_{yki} + \sigma_{yki}^2} \quad \dots (3.46)$$

### (5) 託送電力量

電力託送はネットワーク内の個々の需要家の間でやりとりされる。今回のモデル化では個別の託送は明示できないが、託送合計の平均値は次の考え方によって得られる。今、熱負荷に合わせて発電したと想定すると、個々で余剰となる電力をすべて託送した結果、全体として電力が不足の場合と余剰の場合がありうる。このとき、電力負荷追従運転では託送電力は次のように消費される。

- i) 不足の場合： すべての託送電力がいずれかの需要家によって消費される。
- ii) 余剰の場合： 個々の需要家が不足している分のみ託送の受け手で消費される。

余剰となる分はボイラ追いだきによって発生を抑制される。

したがって、熱負荷追従運転で発生する個々の需要家における余剰電力の合計から、総合化された需要においてボイラ追いだきによって抑制された発電分を差し引いたものに託送電力量は等しい。これより、年間託送電力量の平均は次式で与えられる。

$$W = \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i \left\{ E \left[ \sum_{y_j > \rho x_j} \left( \frac{y_{kij}}{\rho} - x_{kij} \right) \right] - E \left[ \frac{z_{ki}}{\rho} \right] \right\} \right) \quad \dots (3.47)$$

ただし、添え字  $j$  は需要家種別を示す。

### 3.4.3 熱負荷追従運転モデル

#### (1) モデル定式化の考え方

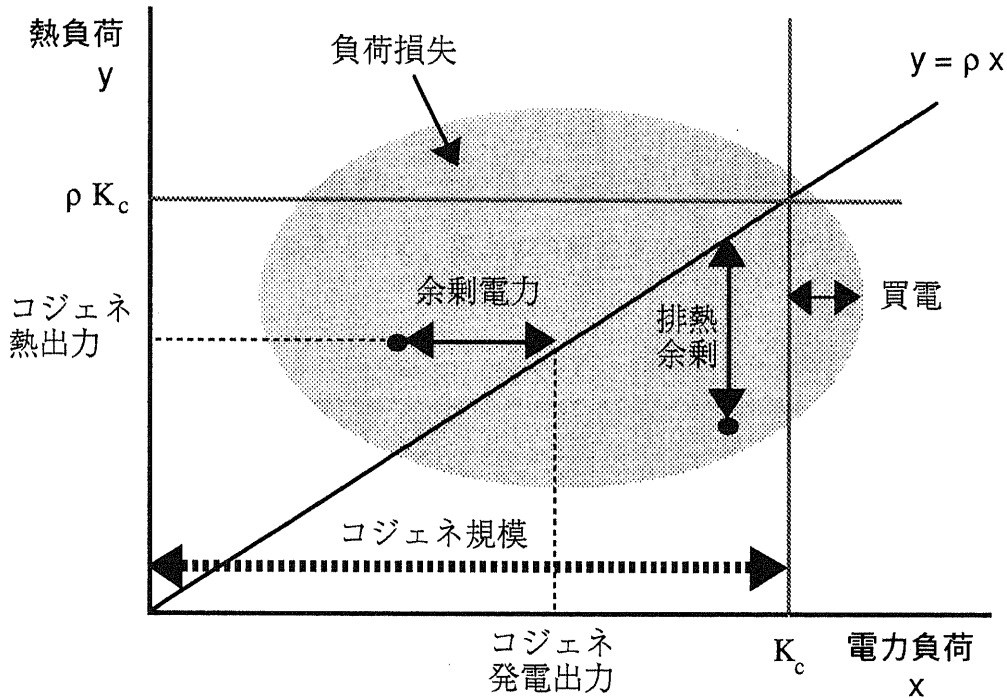
ここではネットワーク化された需要家が保有するコジェネ・プラントのみによって系内の熱需要を賄う場合をモデル化する。本モデルの特徴は次の通り。

- i) 系外へ余剰電力を売電する。
- ii) コジェネのみで熱負荷を賄い、ボイラは持たない。
- iii) コジェネの規模は熱供給に関する負荷損失確率の条件を満たすように決定する。
- iv) コジェネ設備規模を超える電力需要分は電力会社から買電する。

v) 不足する電力はコジェネの焼き増しによって補う。

総合化された需要に対する規模設定などの挙動を図3-10に示す。図3-9と比較してコジェネの規模決定の方法が熱負荷に依存し、電力負荷に依らない点異なる。

図3-10 熱負荷追従運転モデルにおける挙動



## (2) 問題設定

供給コスト最小化は、本モデルの場合次のように定式化される。総コストから売電収入を差し引いたものを評価基準とする。

$$J = \gamma_c K_c + \frac{\lambda_c}{\eta_c} S + P_e E + P_w W - P_s Q \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (3.48)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 1 \quad (\xi_i \geq 0) \quad \dots (3.49)$$

設備規模および運用に関する各変数を以下に定式化する。

## (3) コジェネの規模および運用

### 1) コジェネ規模

本モデルではコジェネは熱供給設備として位置づけられるので、先のボイラと同じ考え方によって



設備規模が定められる。すなわち、コジェネ規模は次式で決定される。

$$\frac{1}{8760} \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i \int_{\rho K_c}^{\infty} g_{ki}(y_{ki}) dy_{ki} \right) = LOLP_y \quad \dots (3.50)$$

## 2) コジェネ発電量

今回のモデルでは、系内の電力負荷および系外に売電する分の合計がコジェネの総発電量である。系内の電力負荷合計は先のモデルにおける(3.35)式と同様に定式化される。売電分についての定式化は後述する。

## 3) 買電量

コジェネの設備規模を超える電力負荷は、その差分を系統からの買電によって補う。今回の場合コジェネの規模が熱負荷によって決まるため、電力の負荷損失確率は $LOLP_x$ とはならない。定式化は(3.37)式と同様である。

## (4) 売電量

総合化された需要における余剰電力は次で表わされる。

$$w_{ki} = \begin{cases} 0 & (y_{ki} \leq \rho x_{ki}) \\ \frac{y_{ki}}{\rho} - x_{ki} & (y_{ki} > \rho x_{ki}) \end{cases} = \frac{z_{ki}}{\rho} \quad \dots (3.51)$$

先のボイラ追いだきをコジェネ熱電比で除した形になっていることから、売電の平均値として次を得る。

$$Q = \frac{H}{\rho} \quad \dots (3.52)$$

## (5) 託送電力量

本モデルにおける託送電力量は、先と同様に、個々の需要家における余剰電力の総和から売電分を差し引いたものに等しい。すなわち、

$$W = \sum_{k=1}^3 T_k \left( \sum_{i=1}^5 t_i E \left[ \sum_{y_j > \rho x_j} \left( \frac{y_{kij}}{\rho} - x_{kij} \right) \right] \right) - Q \quad \dots (3.53)$$

(3.51)式を考慮すれば、本モデルの託送電力量は電力負荷追従運転モデルと一致する。

## 3.4.4 建物用途別負荷データ

## (1) 建物用途別の負荷変動パターンのサンプル

建物用途としては、事務所ビル、ホテル、店舗、病院、住宅を対象とした。過去の文献[21][32][33][34][35]等からそれぞれの電力および熱（温熱＋冷熱）の負荷データを収集した。収集事例数を表3-2に示す。

表3-2 建物用途別の負荷変動データの事例数

資料名	建物用途				
	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
A	2	2		1	
B			1		
C	1	1	1	1	1
D	1	1	1	1	1
E	1	1	1		1
F	1	1	1	1	
G	1	1	1	1	
合計	7	7	6	5	3

各用途について、季節別の電力負荷および熱負荷のサンプルデータを図3-11～20に示した。バラツキがあるものの、基本的な時間変動の傾向は一致していると考えられる。

## (2) 負荷パラメータの推定

収集されたデータに基づいて季節別・時間帯別の負荷分布パラメータを推定した。推定のベースとなるサンプル数は次のようになる。

平均、標準偏差： 各時間帯の時間数×事例数

需要家別の電力と熱の相関： 同上

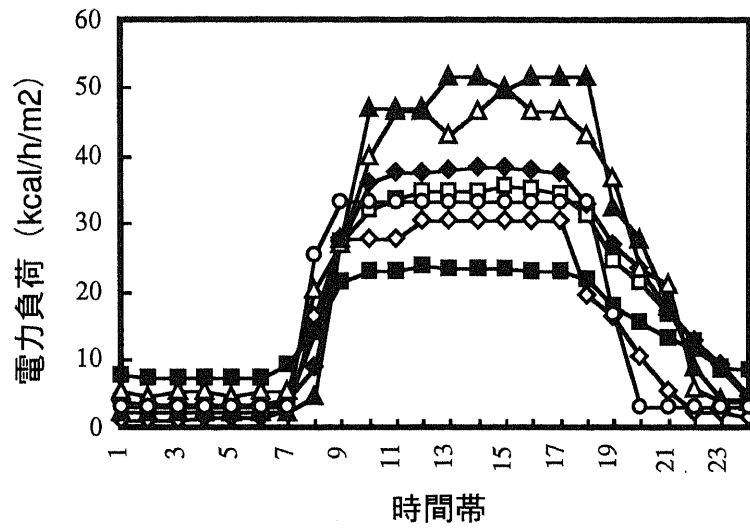
需要家間の相関： 各時間帯の時間数×事例数<sup>2</sup>

例えば事務所ビルについては、平均、標準偏差用のサンプル数は28または56であり、需要家間の相関用のサンプル数は196または392となる。推定されたパラメータを以下の表に示す。

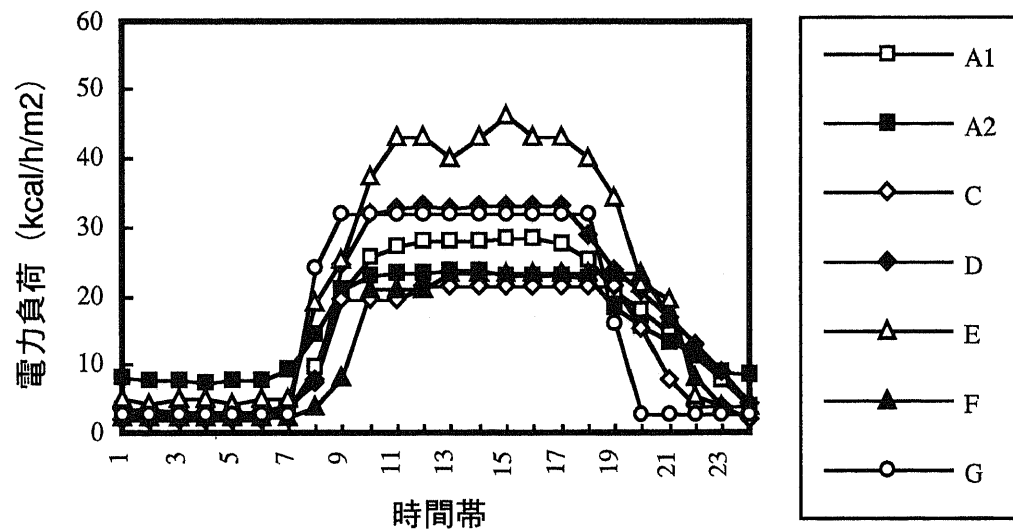
電力負荷の平均および標準偏差	....	表3-3
熱負荷の平均および標準偏差	....	表3-4
季節別・時間帯別の需要家間の相関	....	表3-5～19

図3-11 事務所ビルの負荷事例（電力）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

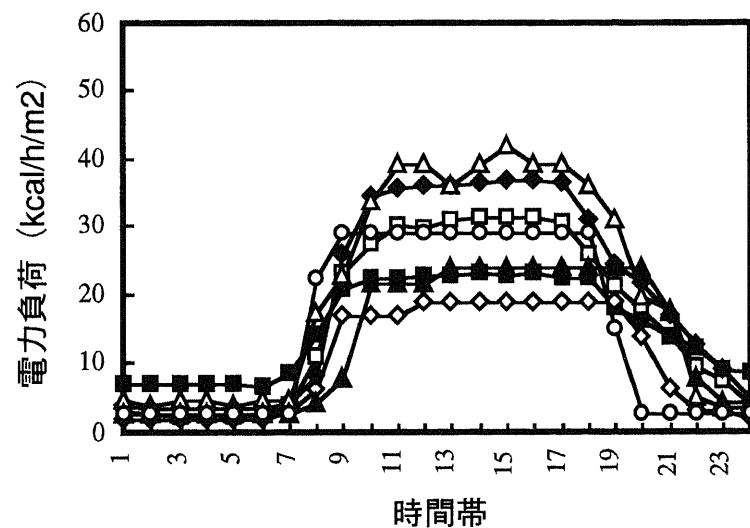
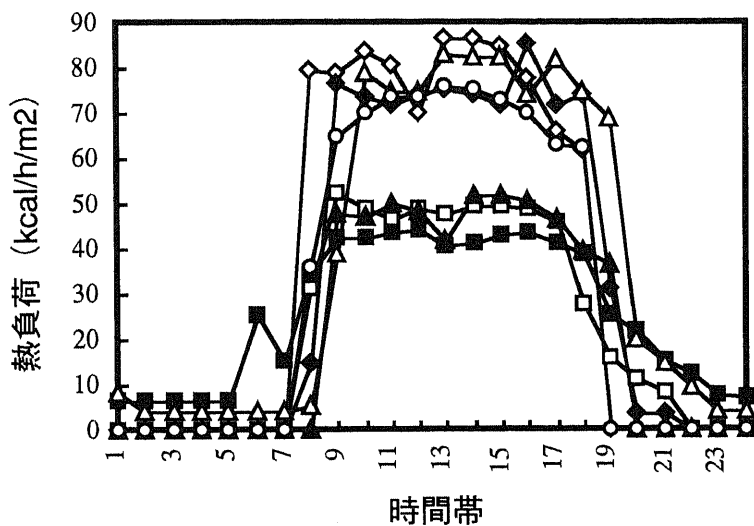
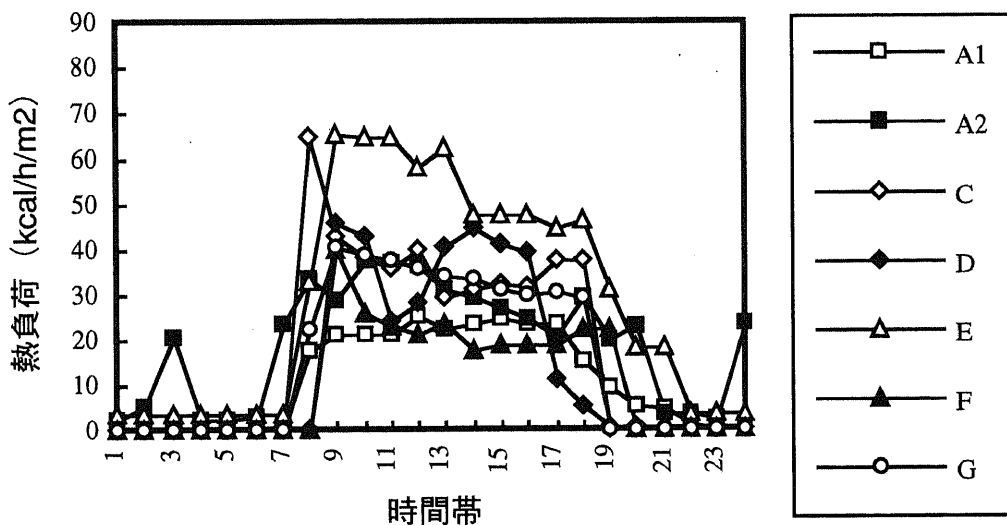


図3-12 事務所ビルの負荷事例（熱）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

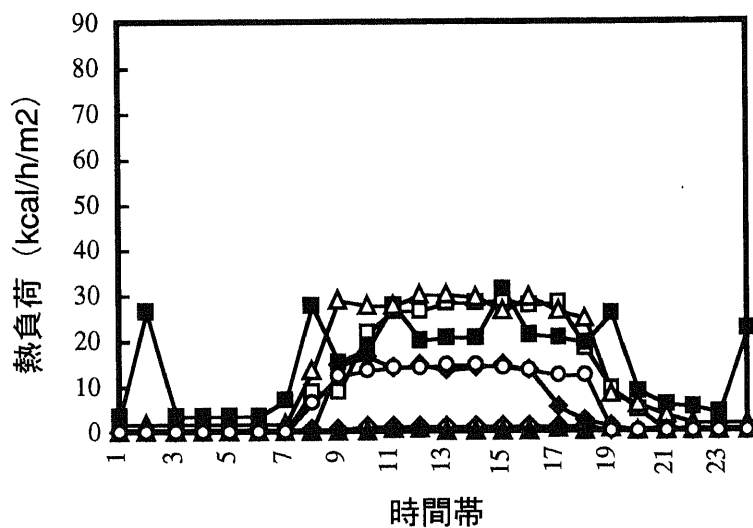
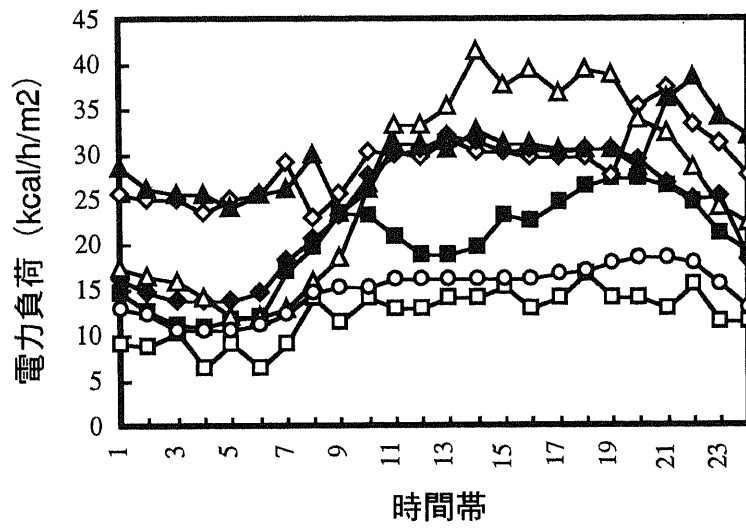
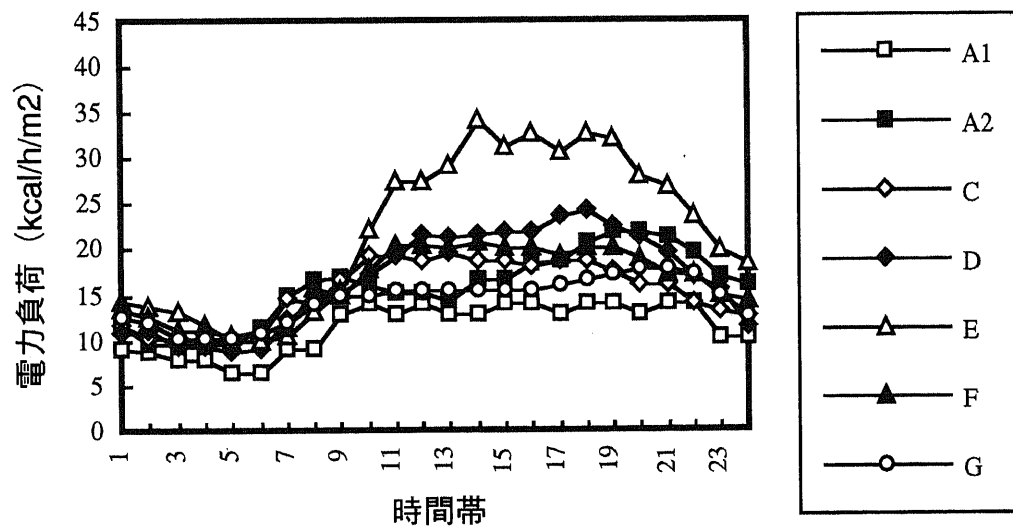


図3-13 ホテルの負荷事例（電力）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

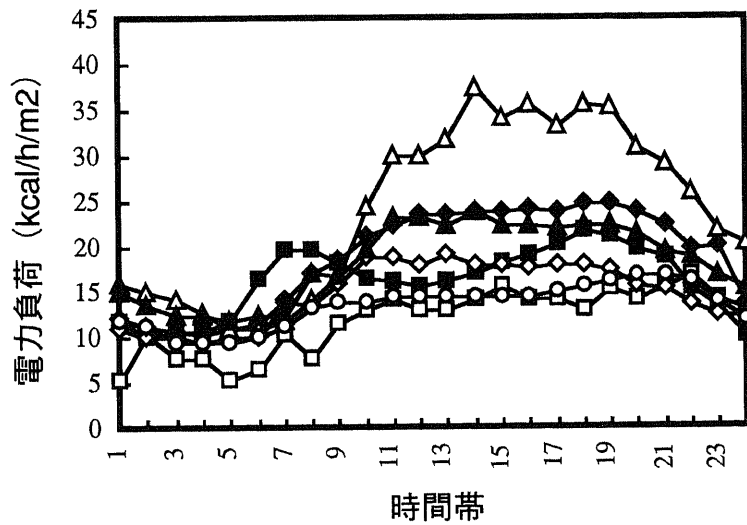
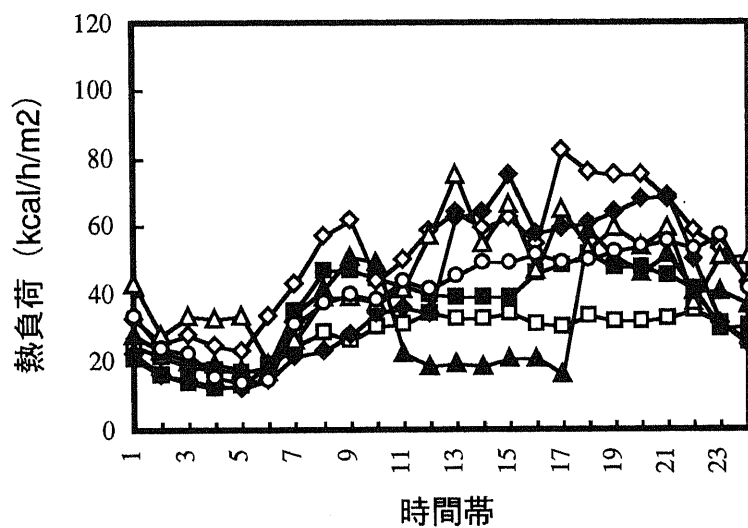
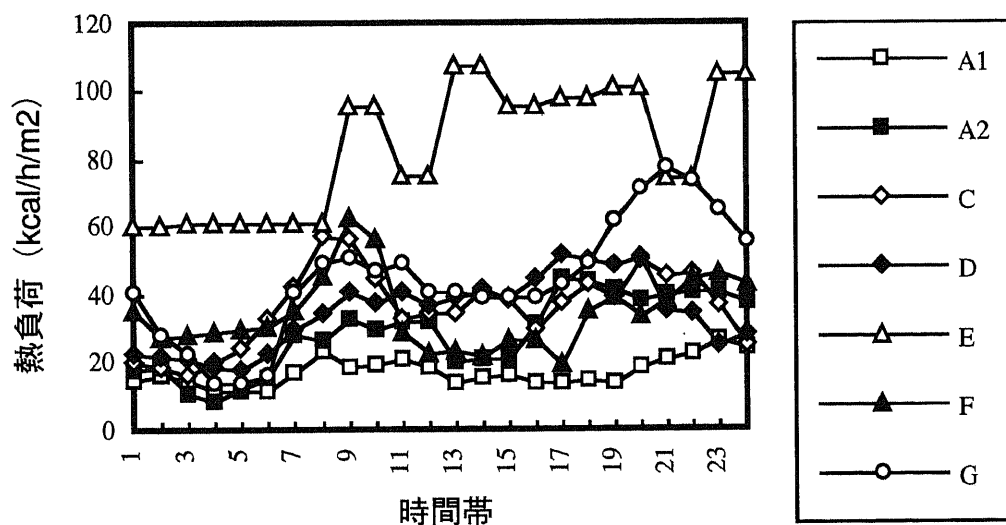


図3-14 ホテルの負荷事例（熱）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

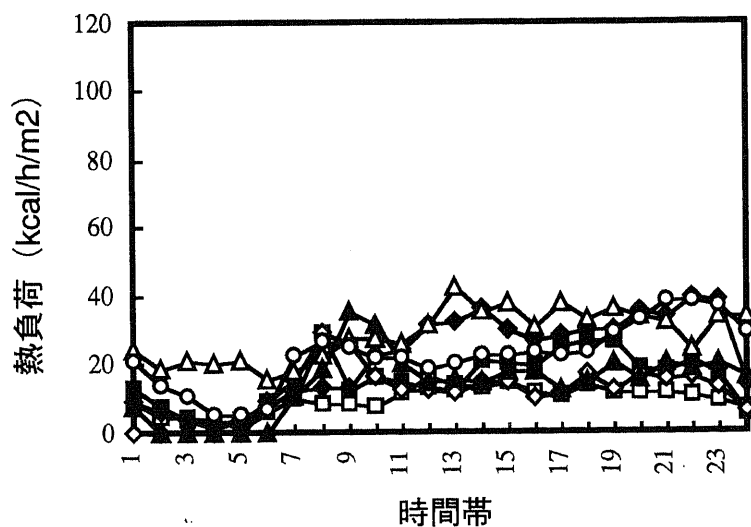
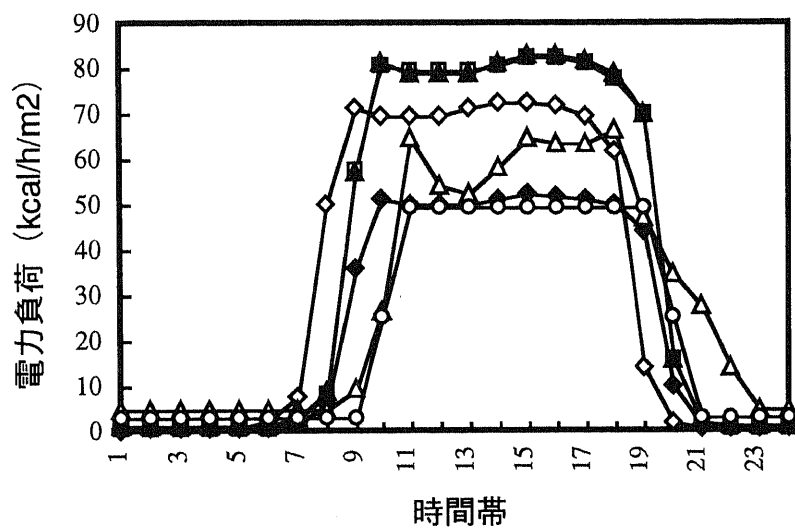
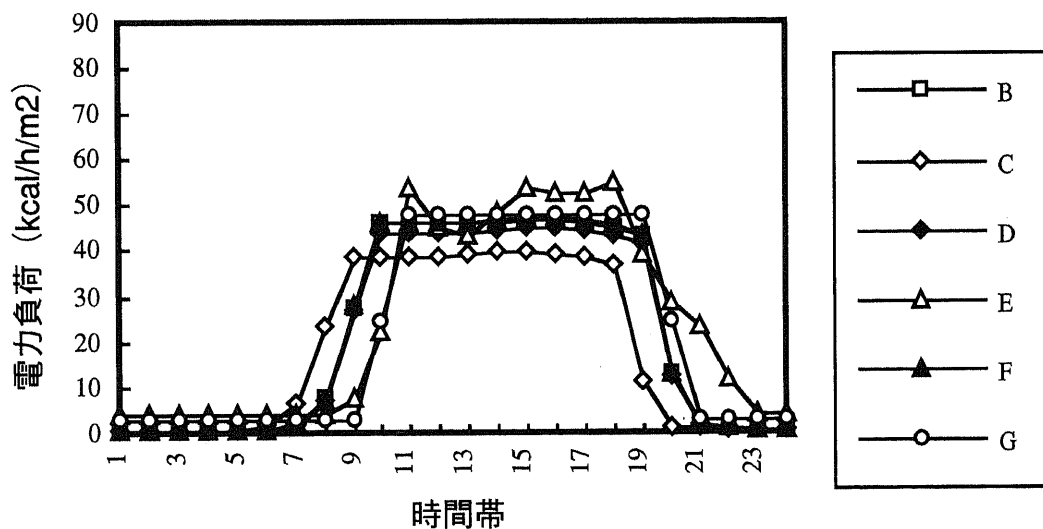


図3-15 店舗の負荷事例（電力）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

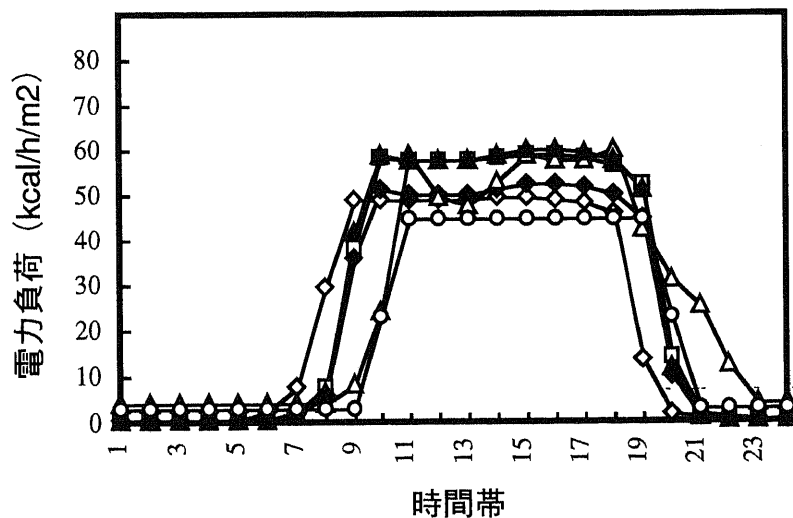
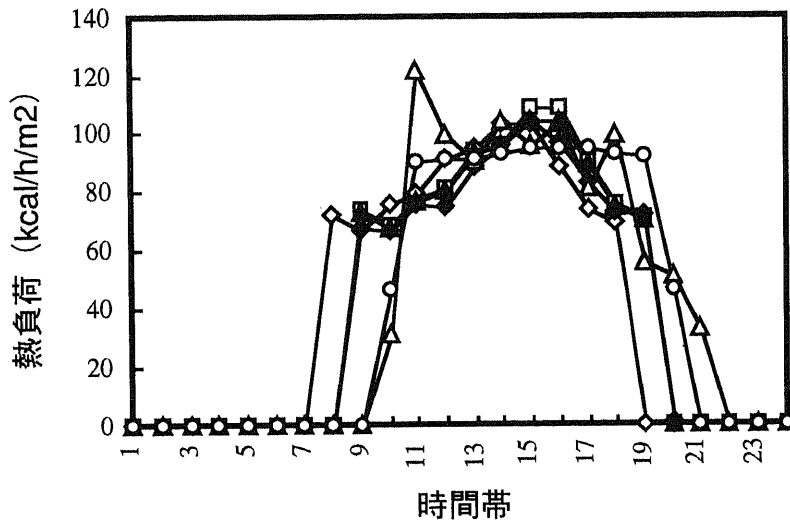


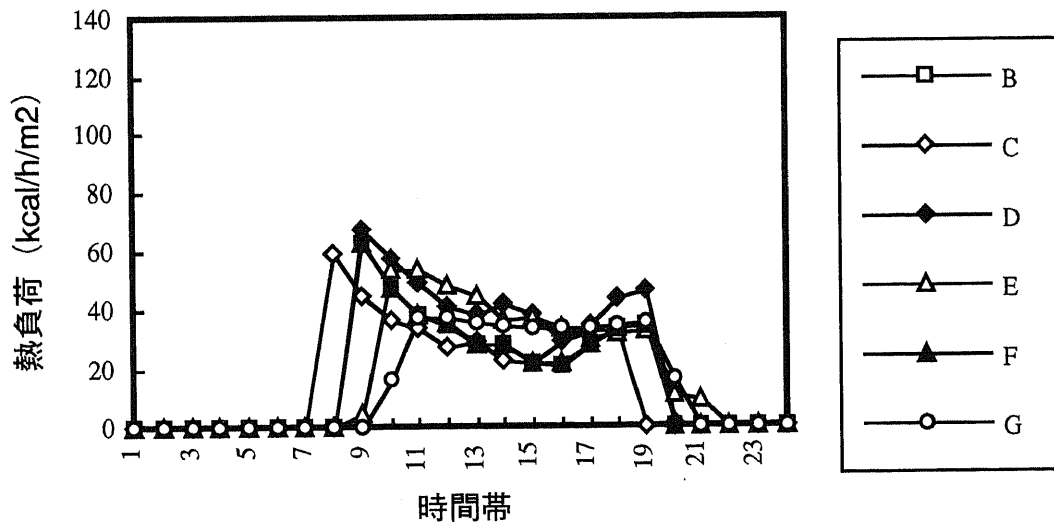


図3-16 店舗の負荷事例（熱）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

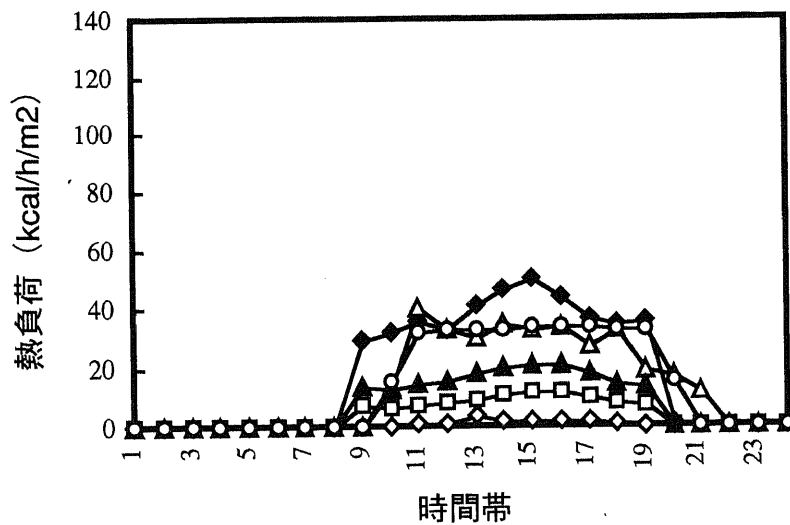
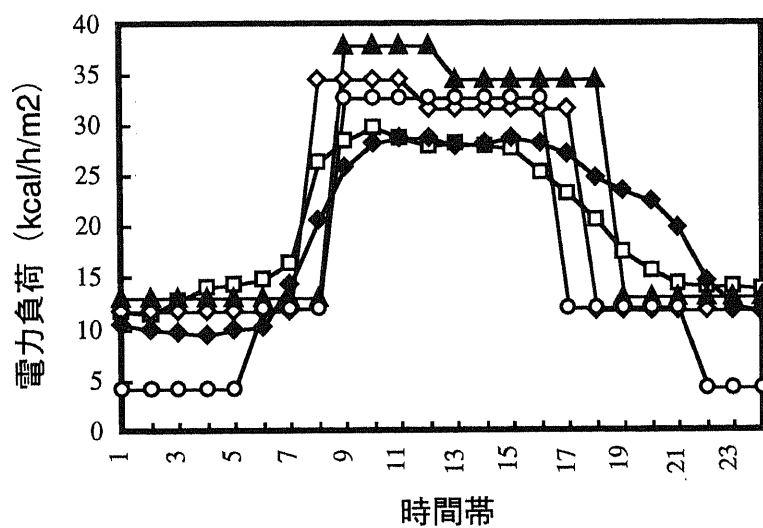
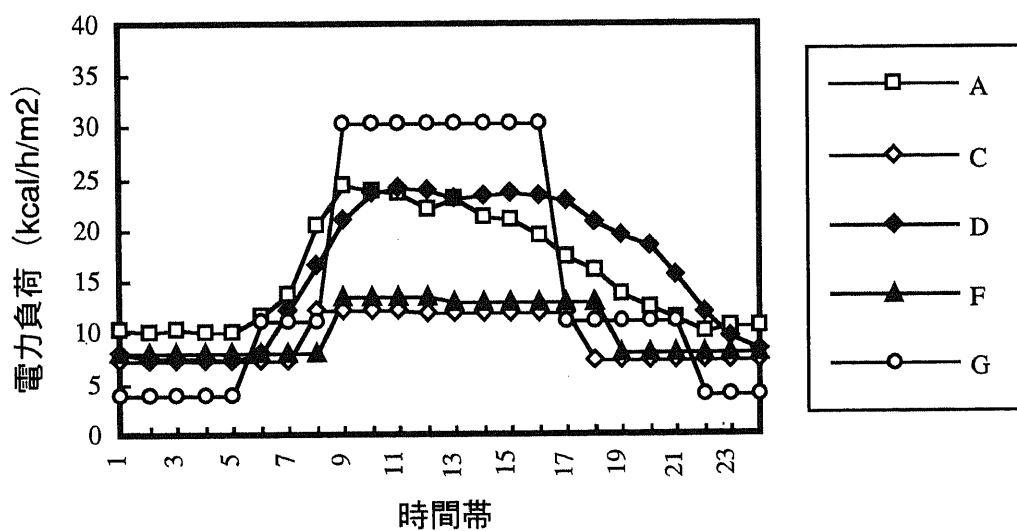


図3-17 病院の負荷事例（電力）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

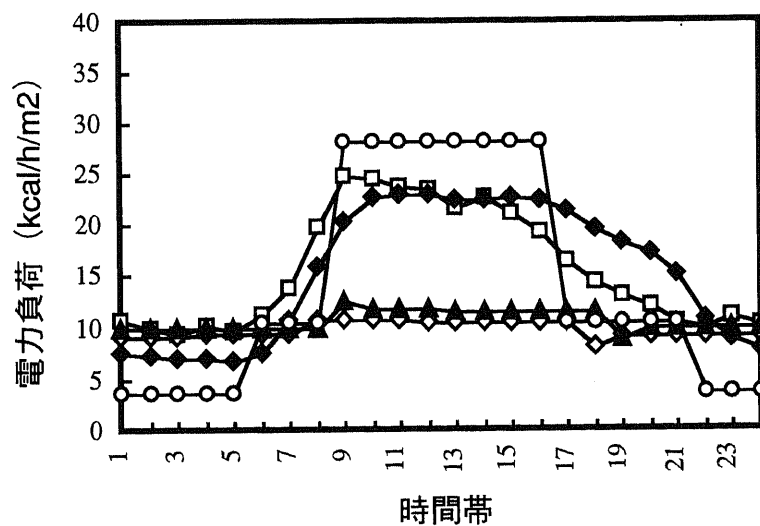
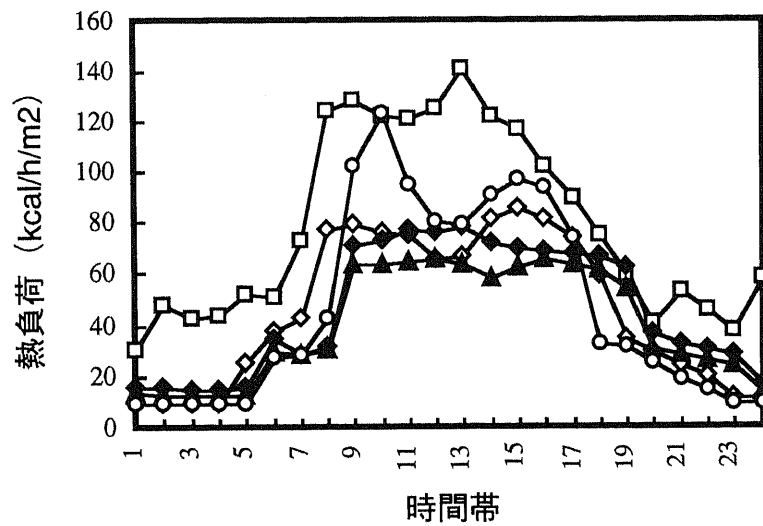
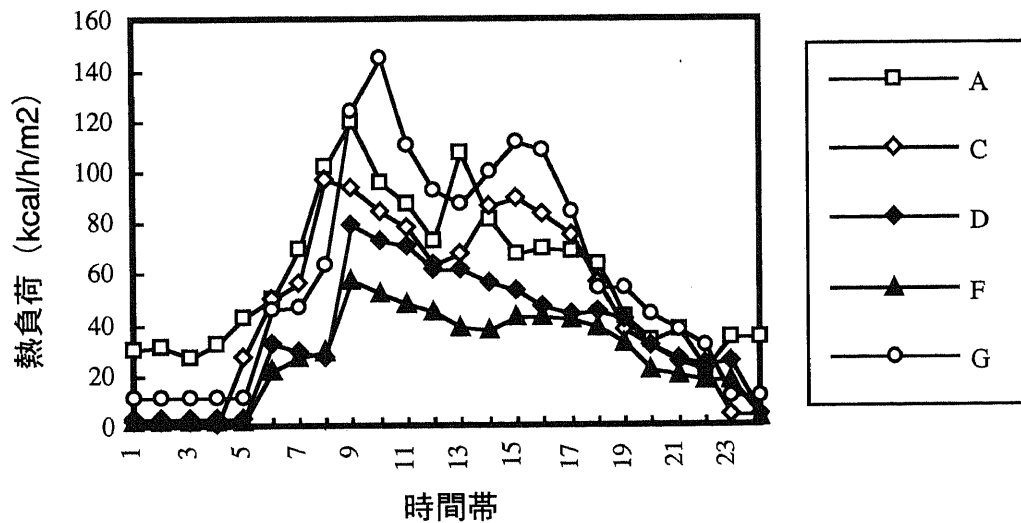


図3-18 病院の負荷事例（熱）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

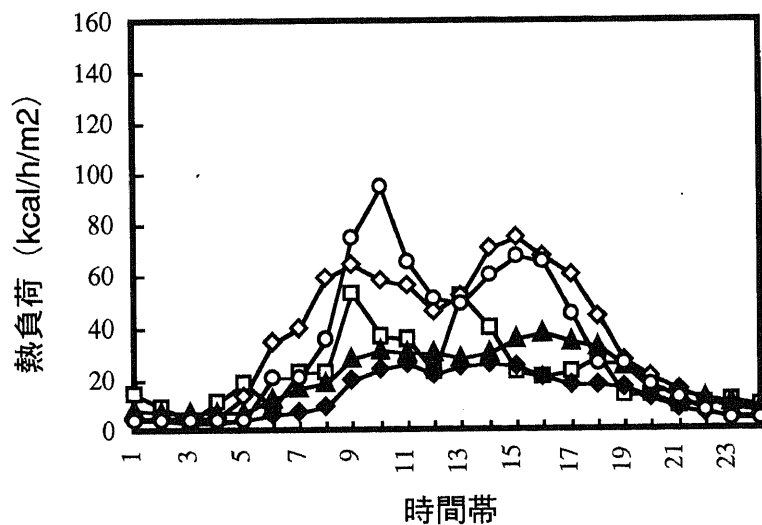
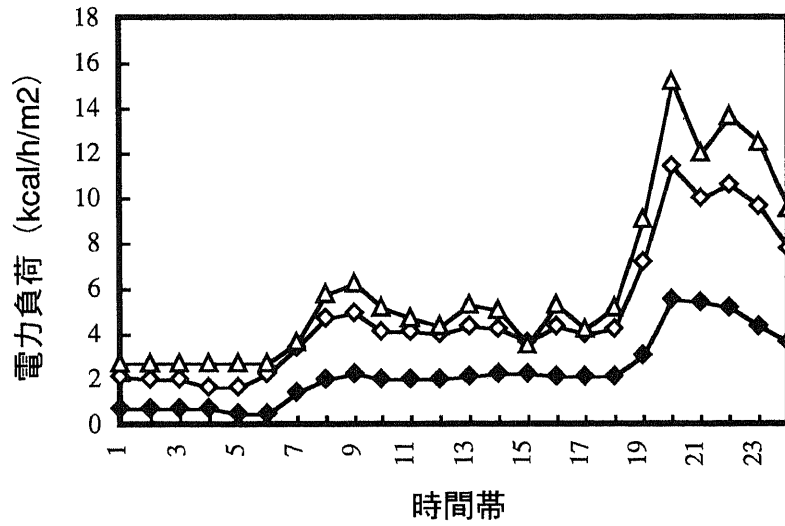
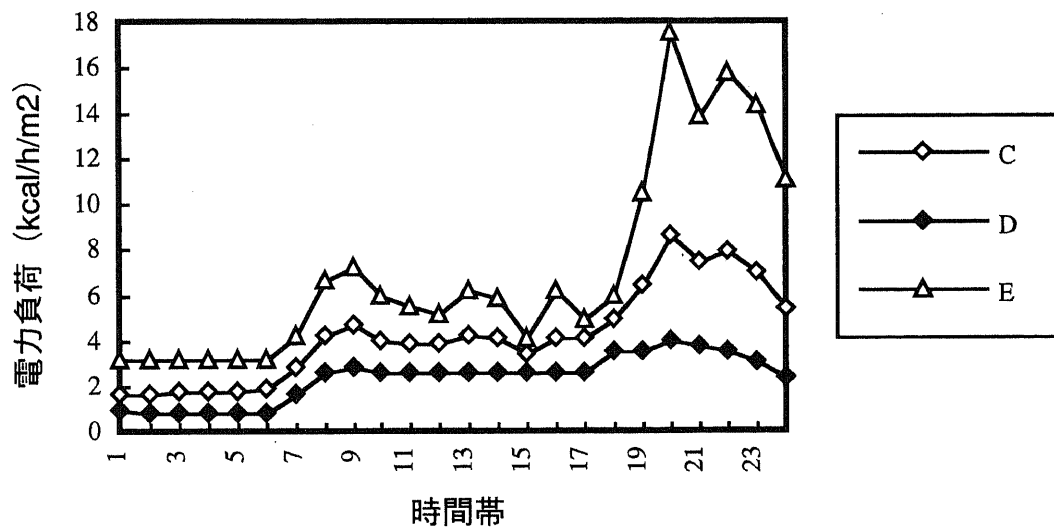


図3-19 住宅の負荷事例（電力）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

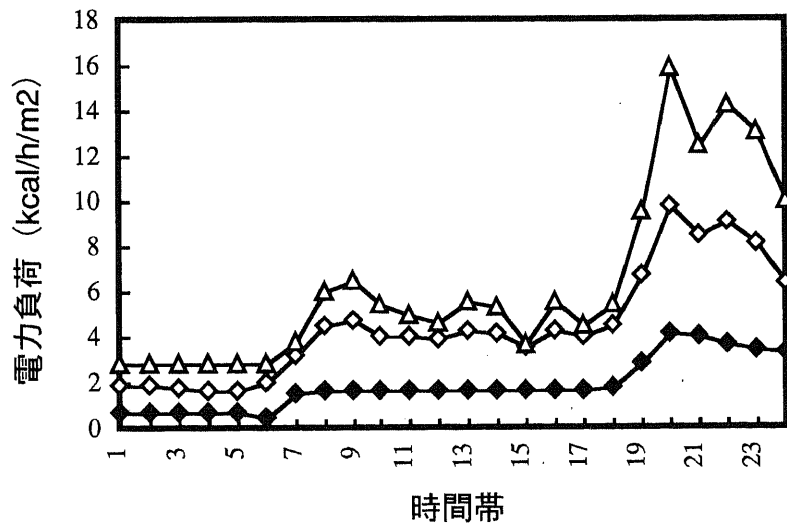
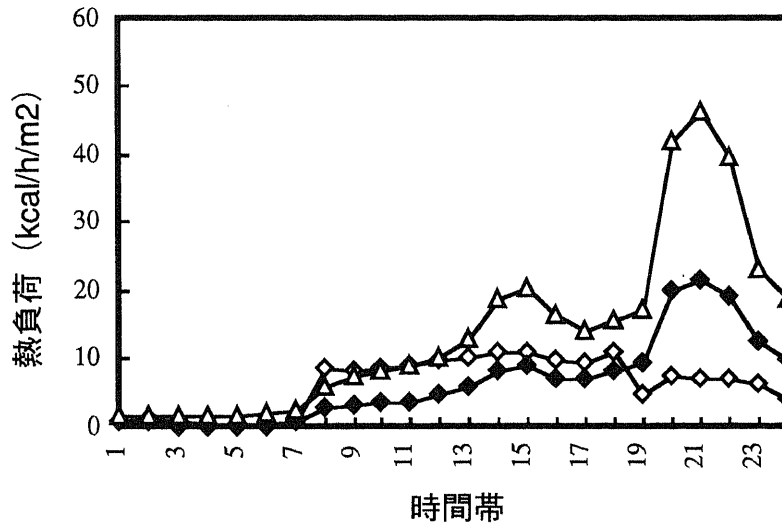
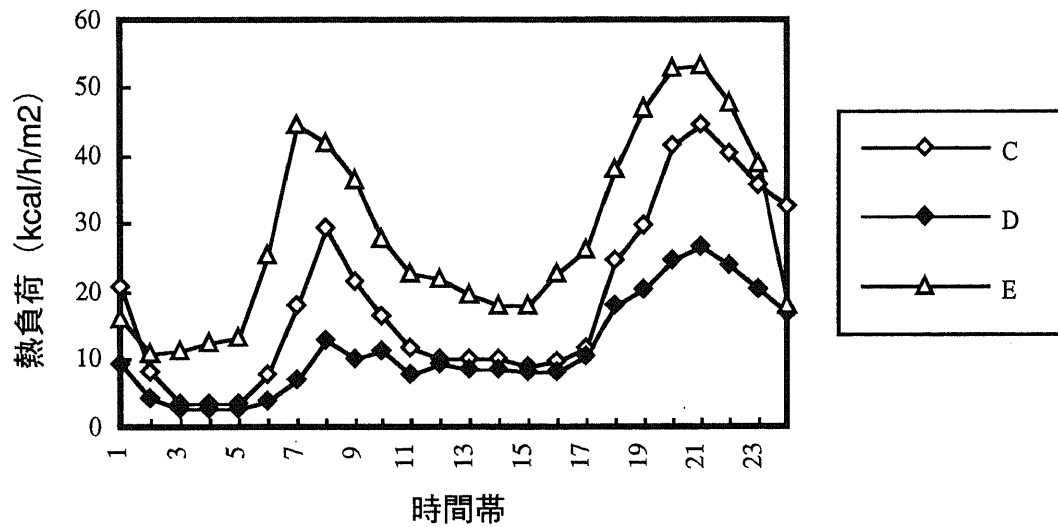


図3-20 住宅の負荷事例（熱）

〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉

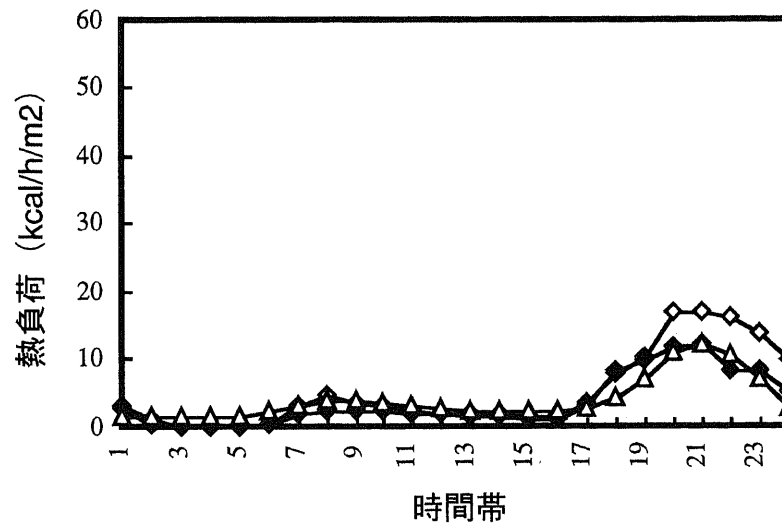


表3-3 用途別・時間帯別の床面積あたり負荷の平均および標準偏差（電力）

(a) 夏季

(単位：kcal/h/m<sup>2</sup>)

時間帯 No.	平均					標準偏差				
	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	20.3	20.2	27.8	24.8	3.8	12.8	6.2	28.6	9.6	1.6
2	36.3	25.3	64.3	31.6	3.7	8.5	8.4	13.3	3.2	1.3
3	36.1	26.4	65.9	27.0	3.6	9.7	8.0	13.2	7.6	1.2
4	16.1	26.7	18.9	14.0	9.0	9.2	7.8	22.3	4.2	3.8
5	4.1	17.4	1.8	10.7	3.3	2.2	7.2	1.5	3.3	3.2

(b) 冬季

(単位：kcal/h/m<sup>2</sup>)

時間帯 No.	平均					標準偏差				
	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	16.3	14.6	17.6	16.3	4.1	10.6	2.9	16.0	7.1	1.8
2	28.8	19.1	45.1	20.3	4.0	7.2	5.3	3.5	7.1	1.3
3	28.8	20.2	46.1	17.1	4.0	7.3	5.6	4.6	6.6	1.2
4	15.1	19.2	15.3	10.6	8.6	7.6	4.5	16.6	3.9	4.9
5	4.0	11.4	0.0	7.7	3.2	2.1	2.7	0.0	2.2	3.3

(c) 中間季

(単位：kcal/h/m<sup>2</sup>)

時間帯 No.	平均					標準偏差				
	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	15.8	15.5	21.4	15.8	3.7	10.2	3.7	20.7	6.7	1.8
2	28.2	20.2	51.9	19.2	3.6	7.1	6.3	5.1	7.1	1.5
3	28.3	21.1	53.3	16.0	3.5	7.0	6.6	5.8	6.3	1.5
4	14.6	19.9	16.3	10.8	8.4	7.5	5.4	18.3	3.2	4.3
5	3.9	11.9	0.0	8.3	3.1	1.9	3.2	0.0	2.4	3.1

表3-4 用途別・時間帯別の床面積あたり負荷の平均および標準偏差（熱）

(a) 夏季

(単位：kcal/h/m<sup>2</sup>)

時間帯 No.	平均					標準偏差				
	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	38.0	37.9	29.5	70.4	5.0	29.8	10.0	33.9	34.9	3.1
2	63.6	43.2	90.8	84.9	9.4	16.2	15.0	10.7	23.7	4.0
3	60.6	49.8	91.9	75.5	11.6	16.5	16.7	12.0	18.6	4.2
4	10.6	52.0	20.5	34.9	20.0	15.5	12.4	31.2	13.8	14.8
5	2.0	26.2	0.0	21.4	3.7	4.1	11.1	0.0	14.6	6.2

(b) 冬季

(単位：kcal/h/m<sup>2</sup>)

時間帯 No.	平均					標準偏差				
	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	26.8	44.3	23.4	73.7	23.0	20.9	19.8	27.4	34.3	12.7
2	34.2	39.6	36.3	72.8	13.2	12.3	24.1	7.7	21.9	5.6
3	28.9	42.8	30.9	64.3	17.1	11.0	25.0	5.8	22.1	9.3
4	5.9	49.1	9.2	31.6	37.7	9.2	22.5	15.2	9.6	12.0
5	1.6	31.6	0.0	15.7	13.5	4.2	21.2	0.0	15.5	10.8

(c) 中間季

(単位：kcal/h/m<sup>2</sup>)

時間帯 No.	平均					標準偏差				
	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	8.7	19.2	5.4	36.9	3.1	9.6	7.8	9.4	23.4	0.8
2	15.5	20.6	22.3	40.9	2.1	11.0	8.6	14.5	15.4	0.6
3	14.1	21.6	22.8	38.3	3.3	11.1	7.9	14.5	18.9	2.4
4	2.9	23.9	6.4	14.8	11.8	5.4	9.4	10.7	6.1	3.2
5	1.5	10.5	0.0	8.1	2.7	4.6	10.1	0.0	5.9	3.6

表3-5 需要家間の相関係数（夏季）－電力負荷vs.電力負荷の相関－

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	1.000	0.279	0.655	0.754	0.223
	ホテル	0.279	1.000	0.227	0.235	0.050
	店舗	0.655	0.227	1.000	0.584	0.137
	病院	0.754	0.235	0.584	1.000	0.238
	住宅	0.223	0.050	0.137	0.238	1.000
2	事務所	1.000	0.004	0.000	-0.012	0.005
	ホテル	0.004	1.000	0.003	-0.013	0.010
	店舗	0.000	0.003	1.000	0.004	0.000
	病院	-0.012	-0.013	0.004	1.000	-0.024
	住宅	0.005	0.010	0.000	-0.024	1.000
3	事務所	1.000	-0.010	0.016	0.086	-0.024
	ホテル	-0.010	1.000	-0.005	-0.028	0.005
	店舗	0.016	-0.005	1.000	0.054	-0.013
	病院	0.086	-0.028	0.054	1.000	-0.057
	住宅	-0.024	0.005	-0.013	-0.057	1.000
4	事務所	1.000	0.010	0.524	0.231	-0.196
	ホテル	0.010	1.000	0.003	0.011	-0.004
	店舗	0.524	0.003	1.000	0.228	-0.299
	病院	0.231	0.011	0.228	1.000	-0.072
	住宅	-0.196	-0.004	-0.299	-0.072	1.000
5	事務所	1.000	0.112	-0.002	0.013	0.243
	ホテル	0.112	1.000	-0.007	0.004	0.317
	店舗	-0.002	-0.007	1.000	0.012	-0.005
	病院	0.013	0.004	0.012	1.000	0.035
	住宅	0.243	0.317	-0.005	0.035	1.000



表3-6 需要家間の相関係数（夏季）－熱負荷vs.熱負荷の相関－

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	1.000	0.304	0.586	0.517	0.554
	ホテル	0.304	1.000	0.232	0.232	0.293
	店舗	0.586	0.232	1.000	0.447	0.436
	病院	0.517	0.232	0.447	1.000	0.416
	住宅	0.554	0.293	0.436	0.416	1.000
2	事務所	1.000	0.016	0.038	0.003	0.042
	ホテル	0.016	1.000	0.085	0.002	0.099
	店舗	0.038	0.085	1.000	0.006	0.233
	病院	0.003	0.002	0.006	1.000	-0.001
	住宅	0.042	0.099	0.233	-0.001	1.000
3	事務所	1.000	-0.051	0.198	0.156	0.028
	ホテル	-0.051	1.000	-0.132	-0.104	0.010
	店舗	0.198	-0.132	1.000	0.413	0.119
	病院	0.156	-0.104	0.413	1.000	0.059
	住宅	0.028	0.010	0.119	0.059	1.000
4	事務所	1.000	0.099	0.440	0.341	-0.216
	ホテル	0.099	1.000	0.133	0.112	-0.031
	店舗	0.440	0.133	1.000	0.460	-0.292
	病院	0.341	0.112	0.460	1.000	-0.222
	住宅	-0.216	-0.031	-0.292	-0.222	1.000
5	事務所	1.000	-0.032	0.000	0.075	-0.035
	ホテル	-0.032	1.000	0.000	-0.048	0.580
	店舗	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
	病院	0.075	-0.048	0.000	1.000	0.005
	住宅	-0.035	0.580	0.000	0.005	1.000

表3-7 需要家間の相関係数（夏季）－電力負荷vs.熱負荷の相関－

注：表側が電力負荷，表頭が熱負荷を表わす。

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	0.808	0.315	0.657	0.564	0.594
	ホテル	0.239	0.527	0.217	0.177	0.195
	店舗	0.577	0.219	0.938	0.438	0.428
	病院	0.691	0.310	0.598	0.637	0.555
	住宅	0.230	0.156	0.155	0.177	0.764
2	事務所	0.113	0.012	0.024	-0.001	0.032
	ホテル	0.008	0.300	0.039	0.002	0.045
	店舗	0.003	-0.007	-0.044	0.002	0.009
	病院	-0.012	-0.051	-0.071	-0.598	-0.091
	住宅	0.012	0.037	0.054	0.005	0.810
3	事務所	0.194	-0.030	0.100	0.092	0.004
	ホテル	-0.013	0.361	-0.030	-0.029	0.004
	店舗	0.026	-0.018	0.166	0.057	0.007
	病院	0.151	-0.107	0.408	0.285	0.057
	住宅	-0.029	-0.010	-0.066	-0.077	0.627
4	事務所	0.695	0.165	0.484	0.373	-0.206
	ホテル	0.004	0.531	0.004	0.006	0.003
	店舗	0.471	0.141	0.921	0.491	-0.313
	病院	0.153	0.115	0.211	0.623	-0.069
	住宅	-0.221	-0.049	-0.288	-0.233	0.537
5	事務所	0.607	0.206	0.000	0.000	0.238
	ホテル	-0.018	0.467	0.000	-0.019	0.312
	店舗	0.011	-0.016	0.000	0.026	-0.006
	病院	0.039	0.005	0.000	0.526	0.032
	住宅	-0.034	0.588	0.000	0.008	0.837

表3-8 需要家間の相関係数（冬季）－電力負荷vs.電力負荷の相関－

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	1.000	0.562	0.673	0.509	0.250
	ホテル	0.562	1.000	0.558	0.395	0.176
	店舗	0.673	0.558	1.000	0.477	0.174
	病院	0.509	0.395	0.477	1.000	0.200
	住宅	0.250	0.176	0.174	0.200	1.000
2	事務所	1.000	0.004	-0.002	-0.002	0.001
	ホテル	0.004	1.000	0.000	-0.004	0.005
	店舗	-0.002	0.000	1.000	0.003	-0.007
	病院	-0.002	-0.004	0.003	1.000	-0.002
	住宅	0.001	0.005	-0.007	-0.002	1.000
3	事務所	1.000	-0.010	0.009	0.038	-0.044
	ホテル	-0.010	1.000	-0.007	-0.029	0.037
	店舗	0.009	-0.007	1.000	0.036	-0.033
	病院	0.038	-0.029	0.036	1.000	-0.119
	住宅	-0.044	0.037	-0.033	-0.119	1.000
4	事務所	1.000	0.185	0.560	0.243	-0.096
	ホテル	0.185	1.000	0.202	0.094	-0.036
	店舗	0.560	0.202	1.000	0.235	-0.139
	病院	0.243	0.094	0.235	1.000	-0.031
	住宅	-0.096	-0.036	-0.139	-0.031	1.000
5	事務所	1.000	0.212	-0.003	0.009	0.219
	ホテル	0.212	1.000	-0.011	-0.002	0.473
	店舗	-0.003	-0.011	1.000	0.014	-0.008
	病院	0.009	-0.002	0.014	1.000	0.016
	住宅	0.219	0.473	-0.008	0.016	1.000

表3-9 需要家間の相関係数（冬季）－熱負荷vs.熱負荷の相関－

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	1.000	0.197	0.469	0.418	-0.077
	ホテル	0.197	1.000	0.185	0.167	-0.029
	店舗	0.469	0.185	1.000	0.411	-0.130
	病院	0.418	0.167	0.411	1.000	-0.086
	住宅	-0.077	-0.029	-0.130	-0.086	1.000
2	事務所	1.000	-0.003	0.027	-0.001	0.009
	ホテル	-0.003	1.000	-0.010	0.008	-0.005
	店舗	0.027	-0.010	1.000	0.045	0.068
	病院	-0.001	0.008	0.045	1.000	0.005
	住宅	0.009	-0.005	0.068	0.005	1.000
3	事務所	1.000	-0.027	-0.087	0.075	-0.114
	ホテル	-0.027	1.000	0.063	-0.052	0.086
	店舗	-0.087	0.063	1.000	-0.176	0.299
	病院	0.075	-0.052	-0.176	1.000	-0.248
	住宅	-0.114	0.086	0.299	-0.248	1.000
4	事務所	1.000	0.016	0.349	0.314	-0.093
	ホテル	0.016	1.000	0.013	0.021	-0.002
	店舗	0.349	0.013	1.000	0.549	-0.221
	病院	0.314	0.021	0.549	1.000	-0.140
	住宅	-0.093	-0.002	-0.221	-0.140	1.000
5	事務所	1.000	0.032	0.000	-0.064	0.014
	ホテル	0.032	1.000	0.000	-0.001	0.356
	店舗	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
	病院	-0.064	-0.001	0.000	1.000	0.070
	住宅	0.014	0.356	0.000	0.070	1.000

表3-10 需要家間の相関係数（冬季）－電力負荷vs.熱負荷の相関－

注：表側が電力負荷，表頭が熱負荷を表わす。

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	0.703	0.209	0.570	0.475	-0.148
	ホテル	0.430	0.460	0.444	0.361	-0.128
	店舗	0.494	0.178	0.838	0.430	-0.182
	病院	0.428	0.168	0.435	0.764	-0.106
	住宅	0.276	0.109	0.208	0.211	0.799
2	事務所	0.711	0.000	-0.018	-0.005	-0.005
	ホテル	-0.009	0.844	-0.045	-0.007	-0.013
	店舗	-0.006	0.006	0.417	0.030	0.007
	病院	0.003	-0.001	0.020	0.638	0.005
	住宅	-0.004	0.005	-0.043	0.005	0.881
3	事務所	0.568	-0.014	-0.047	0.040	-0.071
	ホテル	-0.013	0.912	0.037	-0.032	0.058
	店舗	0.018	-0.012	0.075	0.034	-0.056
	病院	0.091	-0.056	-0.187	0.351	-0.245
	住宅	-0.057	0.045	0.137	-0.136	0.839
4	事務所	0.574	0.027	0.520	0.492	-0.124
	ホテル	0.115	0.721	0.187	0.183	-0.040
	店舗	0.370	0.026	0.935	0.574	-0.208
	病院	0.145	0.015	0.202	0.345	-0.026
	住宅	-0.066	0.009	-0.166	-0.114	0.909
5	事務所	0.544	0.131	0.000	0.009	0.251
	ホテル	0.038	0.752	0.000	-0.072	0.556
	店舗	-0.003	-0.004	0.000	0.031	-0.002
	病院	-0.016	0.014	0.000	0.521	0.056
	住宅	0.044	0.315	0.000	0.001	0.749

表3-11 需要家間の相関係数（中間季）－電力負荷vs.電力負荷の相関－

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	1.000	0.407	0.655	0.477	0.170
	ホテル	0.407	1.000	0.386	0.262	0.075
	店舗	0.655	0.386	1.000	0.438	0.116
	病院	0.477	0.262	0.438	1.000	0.126
	住宅	0.170	0.075	0.116	0.126	1.000
2	事務所	1.000	0.004	0.000	-0.001	0.002
	ホテル	0.004	1.000	0.006	-0.002	0.005
	店舗	0.000	0.006	1.000	0.003	-0.002
	病院	-0.001	-0.002	0.003	1.000	-0.004
	住宅	0.002	0.005	-0.002	-0.004	1.000
3	事務所	1.000	-0.005	0.016	0.051	-0.027
	ホテル	-0.005	1.000	-0.004	-0.011	0.008
	店舗	0.016	-0.004	1.000	0.044	-0.020
	病院	0.051	-0.011	0.044	1.000	-0.052
	住宅	-0.027	0.008	-0.020	-0.052	1.000
4	事務所	1.000	0.179	0.554	0.269	-0.130
	ホテル	0.179	1.000	0.198	0.100	-0.048
	店舗	0.554	0.198	1.000	0.246	-0.204
	病院	0.269	0.100	0.246	1.000	-0.043
	住宅	-0.130	-0.048	-0.204	-0.043	1.000
5	事務所	1.000	0.194	-0.004	0.013	0.257
	ホテル	0.194	1.000	-0.006	0.024	0.444
	店舗	-0.004	-0.006	1.000	0.014	-0.011
	病院	0.013	0.024	0.014	1.000	0.017
	住宅	0.257	0.444	-0.011	0.017	1.000

表3-12 需要家間の相関係数（中間季）－熱負荷vs.熱負荷の相関－

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	1.000	0.160	0.272	0.250	0.084
	ホテル	0.160	1.000	0.107	0.134	0.136
	店舗	0.272	0.107	1.000	0.306	-0.054
	病院	0.250	0.134	0.306	1.000	0.024
	住宅	0.084	0.136	-0.054	0.024	1.000
2	事務所	1.000	-0.002	0.000	0.003	0.006
	ホテル	-0.002	1.000	0.014	0.019	-0.076
	店舗	0.000	0.014	1.000	0.025	-0.032
	病院	0.003	0.019	0.025	1.000	-0.040
	住宅	0.006	-0.076	-0.032	-0.040	1.000
3	事務所	1.000	-0.006	0.024	0.060	-0.158
	ホテル	-0.006	1.000	-0.003	-0.013	0.064
	店舗	0.024	-0.003	1.000	0.042	-0.100
	病院	0.060	-0.013	0.042	1.000	-0.281
	住宅	-0.158	0.064	-0.100	-0.281	1.000
4	事務所	1.000	-0.008	0.266	0.301	-0.186
	ホテル	-0.008	1.000	-0.013	-0.019	0.007
	店舗	0.266	-0.013	1.000	0.507	-0.314
	病院	0.301	-0.019	0.507	1.000	-0.293
	住宅	-0.186	0.007	-0.314	-0.293	1.000
5	事務所	1.000	0.018	0.000	-0.046	0.030
	ホテル	0.018	1.000	0.000	-0.028	0.552
	店舗	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
	病院	-0.046	-0.028	0.000	1.000	-0.058
	住宅	0.030	0.552	0.000	-0.058	1.000

表3-13 需要家間の相関係数（中間季）－電力負荷vs.熱負荷の相関－

注：表側が電力負荷，表頭が熱負荷を表わす。

時間帯No.	用途	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
1	事務所	0.706	0.226	0.497	0.430	0.058
	ホテル	0.237	0.377	0.294	0.237	0.010
	店舗	0.371	0.166	0.571	0.397	-0.022
	病院	0.278	0.151	0.337	0.429	0.031
	住宅	0.123	0.115	0.073	0.111	0.826
2	事務所	0.655	0.008	0.004	0.006	-0.019
	ホテル	0.000	0.712	0.009	0.020	-0.028
	店舗	0.002	-0.006	-0.296	0.028	0.029
	病院	0.000	-0.005	-0.002	0.023	0.017
	住宅	0.000	0.012	0.008	0.019	0.681
3	事務所	0.515	-0.008	0.015	0.044	-0.130
	ホテル	-0.006	0.752	-0.003	-0.010	0.033
	店舗	0.020	-0.005	-0.089	0.036	-0.098
	病院	0.076	-0.018	0.058	-0.113	-0.337
	住宅	-0.034	-0.013	-0.018	-0.054	0.066
4	事務所	0.302	-0.016	0.439	0.545	-0.220
	ホテル	0.093	0.506	0.158	0.196	-0.075
	店舗	0.337	-0.017	0.808	0.645	-0.403
	病院	0.116	-0.008	0.198	-0.072	-0.034
	住宅	-0.095	-0.001	-0.165	-0.149	0.146
5	事務所	0.540	0.207	0.000	-0.020	0.302
	ホテル	0.038	0.658	0.000	-0.037	0.517
	店舗	-0.004	-0.007	0.000	0.036	-0.012
	病院	-0.014	0.027	0.000	0.486	0.027
	住宅	0.047	0.462	0.000	-0.059	0.669



## 3.4.5 最適需要家構成

## (1) 入力データ

コジェネおよびボイラに関するコスト、発電効率等のパラメータは表3-14の通り設定した[23][36].  
また、電力料金については表3-15の通り[37].

表3-14 パラメータ設定

項 目	コジェネ	ボイラ
設備費 (円/(kcal/h))	174 *1	8.6
燃料費 (円/kcal)	0.005	0.005
年経費率 (%)	17	17
効率 (-)	0.35 *2	0.9
熱電比 (-)	1.3	
LOLP (%)	1	1

注) \*1: コジェネ設備費 15 (万円/kW)

\*2: 発電効率

表3-15 パラメータ設定

項 目		価格 (円/kWh)
買電料金		20
託送料金		1
売電料金	昼間 *3	12.5
	それ以外	4.2

注) \*3: ここでは第2および第3時間帯が該当するとした。

なお、以下では電力負荷追従運転をケース1、熱負荷追従運転をケース2とする。

## (2) 最適結合比率

前述の負荷分布および入力パラメータの下で最適結合を求めた結果、表3-16に示す結合比率が得られた。ケース1では事務所およびホテルの比重が0.3~0.4と高く、次いで店舗と住宅がほぼ同じ0.1程度の重みを持つ。ケース2では店舗が最大の比率0.6を占め、ホテルが0.3、事務所が0.1と続く。住宅の比率はほとんどゼロとなる。病院はケース1、2ともにゼロであり、ネットワークに含まれてこない。これは病院の昼間の熱負荷が他の需要家よりもかなり大きいことに起因し、コジェネおよびボイラの

設備コスト抑制のために排除されたと考えられる。

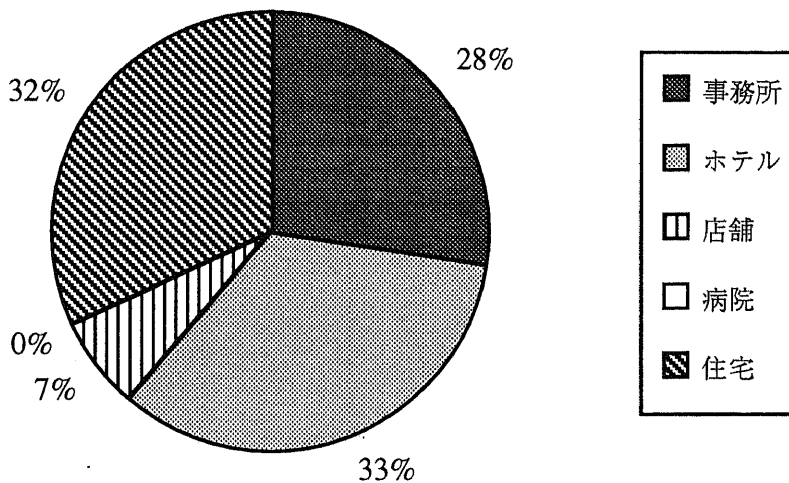
表3-16 需要家の最適結合比率

	事務所	ホテル	店舗	病院	住宅
ケース1	0.336	0.442	0.121	0	0.101
ケース2	0.133	0.305	0.558	0	0.004

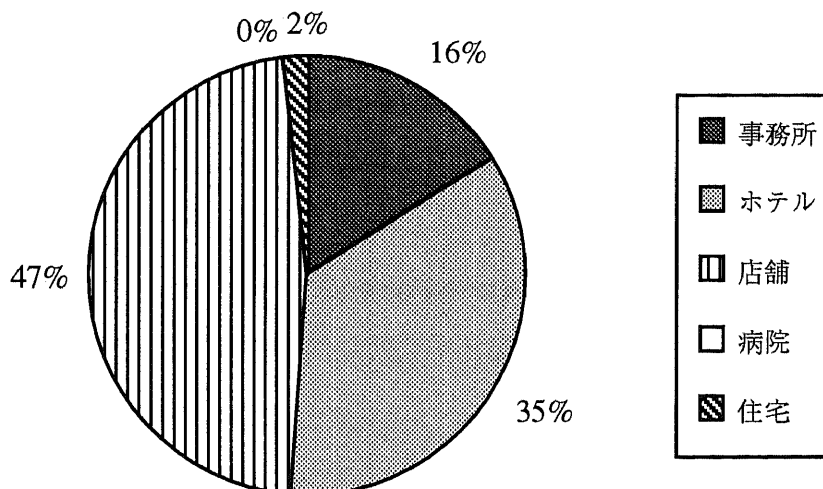
この結合比率を、さらに床面積比率に直した結果を図3-21に示す。ケース1では事務所、ホテル、住宅がそれぞれ約30%，残りの10%弱を店舗が占める。一方、ケース2では店舗が約半分を占め、ホテルが約1/3，残りがほぼ事務所となり、店舗の比重が極端に大きい点が特徴的である。

図3-21 需要家の最適床面積構成

〈ケース1〉



〈ケース2〉



(3) 各ケースにおける挙動

1) ケース1

ケース1における季節別・時間帯別の挙動を図3-13に示す。

(a) 電力託送

電力託送の発生は夏季の第4時間帯、冬季の第2～第4時間帯が主である。コジェネ発電規模に比較して1/4～1/5程度の電力が託送に利用されている。しかしながら、それ以外の時間帯はやや小さく、特に中間季にはほとんど託送は発生しない。託送の規模は電力余剰となる需要家と不足になる需要家のバランスを示す。したがって、冬季の方が夏季よりも相補的になる状況が起こることを意味している。これは次の事情に起因すると考えられる。

第2, 第3時間帯： ホテルにおける熱需要が大きく余剰電力が発生する一方、事務所、店舗では電力不足の傾向にある。

第4時間帯： 夕方18時～22時に当たり、事務所、店舗では熱需要が減少するのに対し、住宅では熱需要が大きく伸び、余剰電力が発生する。

夏季の昼間は冷房負荷が大きいため電力余剰の傾向が強く、不足になる需要家が相対的に少ないことが電力託送を抑制する結果につながっていると考えられる。夏季の第4時間帯の挙動は冬季と同じく、住宅の熱負荷が多いことによる。

(b) ボイラ追いだき

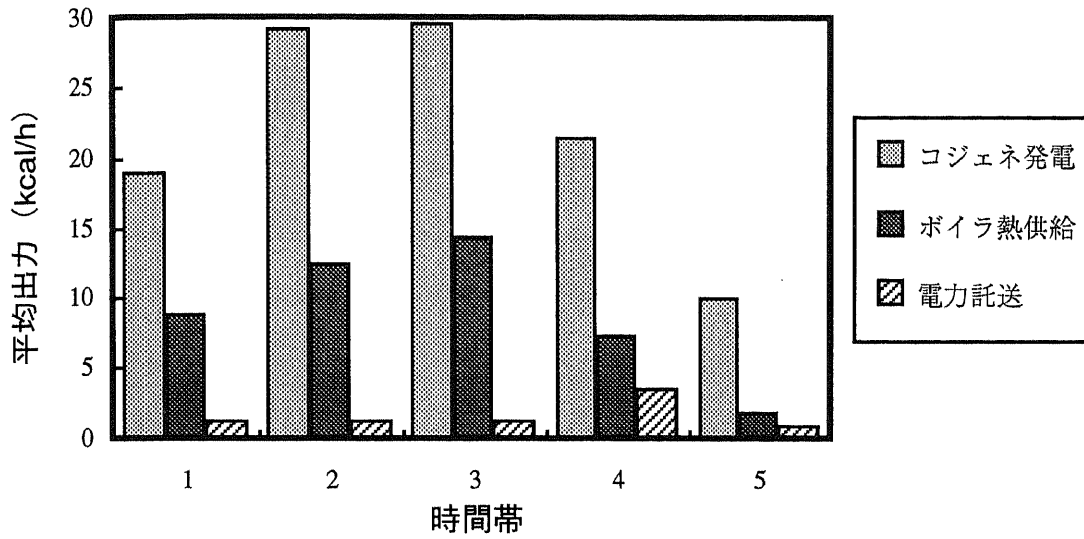
夏季の昼間から夕方にかけてボイラ追いだきが多く発生している。夏季は冷房需要が大きくなるため、熱負荷をボイラに負担させないとコジェネの出力バランスが保てないことを示す。冬季では昼間の追いだきは小さく、朝と夕方の追いだきが目立つ。これも朝と夕方は暖房負荷が高まる時間帯であるためである。

以上から、ケース1における需要家構成の要因は次のように解釈される。

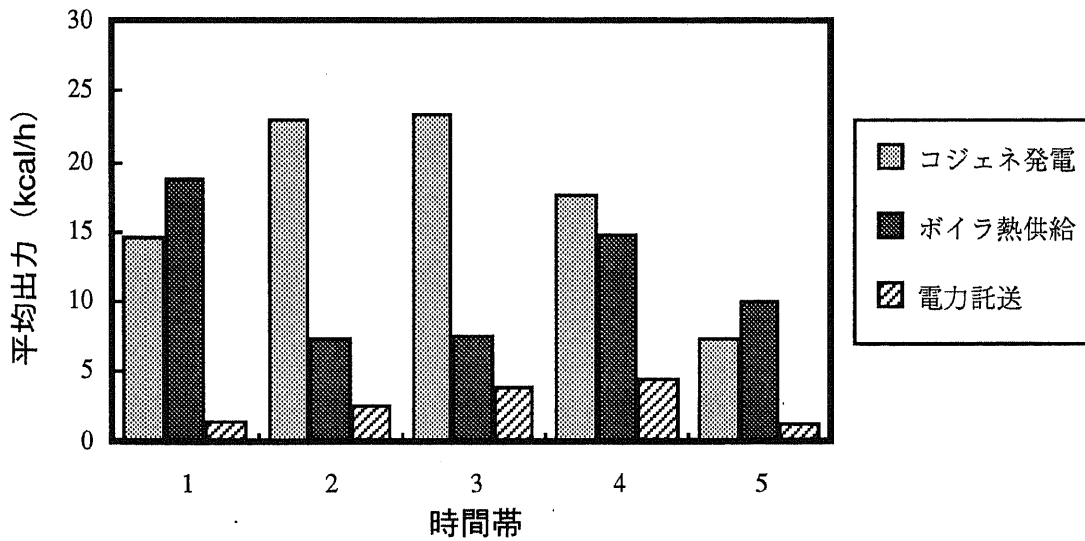
ホテル	....	安定した電力需要、熱需要を持ち、冬季の昼間に余剰電力を発生させ、託送の送り手となる。
事務所	....	余剰電力の受け手となる。
店舗	....	事務所と同じく託送受け手となるが、昼間の電力負荷が他に比べて大きいために構成比率は抑えられている。
住宅	....	夕方の余剰電力送り手となる。ただし、夕方の電力負荷が他より大きいために構成比率は高くない。

図3-13 ケース1における季節別・時間帯別の挙動

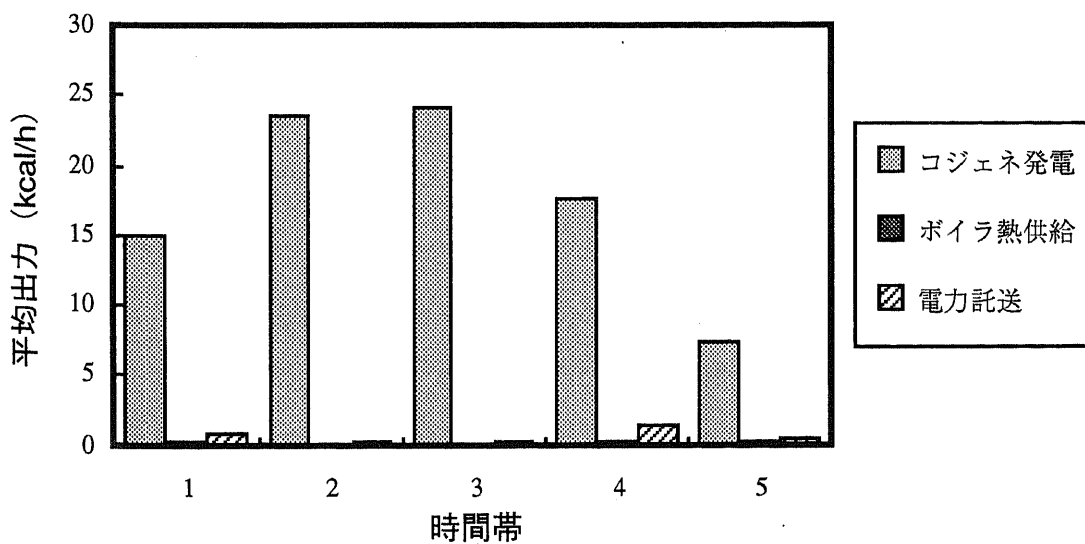
〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉



## 2) ケース2

ケース2における季節別・時間帯別の挙動を図3-14に示す。

## (a) 電力託送

電力託送の発生規模の傾向はケース1とよく似ている。夏季よりも冬季がやや多く、中間季はそれに比べてほとんどない。また、夏季の第4時間帯と冬季の第2～第4時間帯が比較的大きいことも同様の傾向である。ケース2では住宅があまり含まれてこないで、余剰電力の供給はホテルが受け持っており、託送の受け手は事務所および店舗であると考えられる。

## (b) 外部売電

ケース2では余剰電力を売電することによって処理している。売電は夏季の昼間と冬季の朝、夕に主として発生している。中間季にはほとんど発生していない。また、コジェネ発電規模と比較して売電の規模は小さい。今回のピーク時売電価格は比較的高めの設定であるがそれでもコジェネ発電の燃料コストをほんの少し上回る程度である。一方、オフピーク時売電価格は燃料コストを下回る。そのため全体として売電は赤字を生む状況になっている。したがって、積極的に余剰電力を発生させる要因が働かず、売電が少なくなる組み合わせが選択されたと解釈できる。

## (c) コジェネ規模

ケース2では熱供給をすべてコジェネが賄うとしているため、結果的にケース1よりもコジェネの規模は大きくなった。

コジェネ規模： ケース1 .... 約35 (kcal/h)

ケース2 .... 約50 (kcal/h)

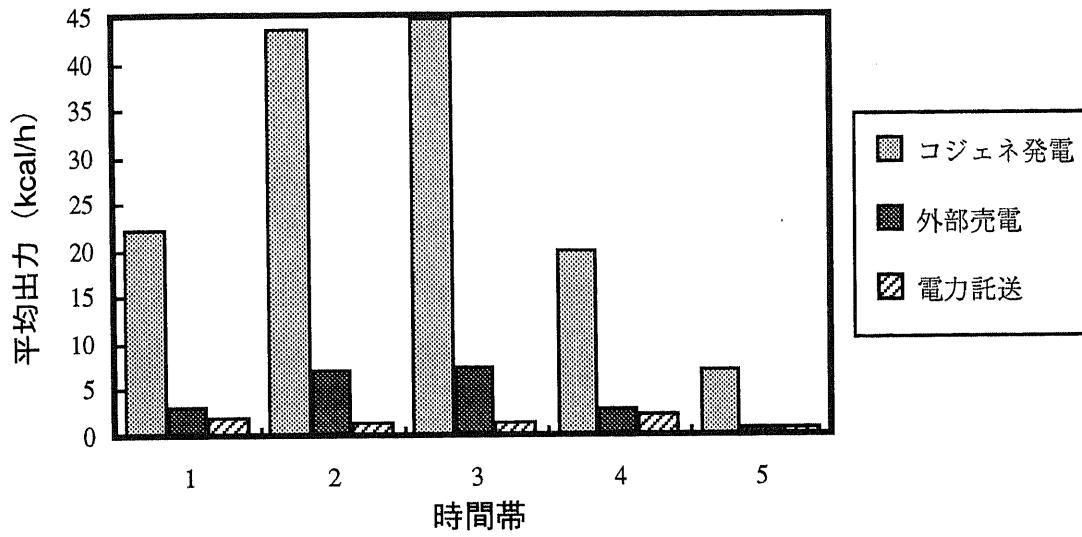
ここで電力負荷がケース1程度では相対的にコジェネ設備は過剰となってしまう。そこでケース2ではコジェネ設備に見合うだけ電力負荷が大きくなるような組み合わせが選択されたと考えられる。電力負荷の高位側に比重が高くなるため、組み合わせた分布は電力負荷－熱負荷平面上でコジェネ熱電比を表わす直線 ( $y = \rho x$ ) を下回る範囲に広がる分布となる。それは同時に余剰電力の発生を抑え、売電の低減につながっている。

以上から、ケース2における需要家構成の要因は次のように解釈される。

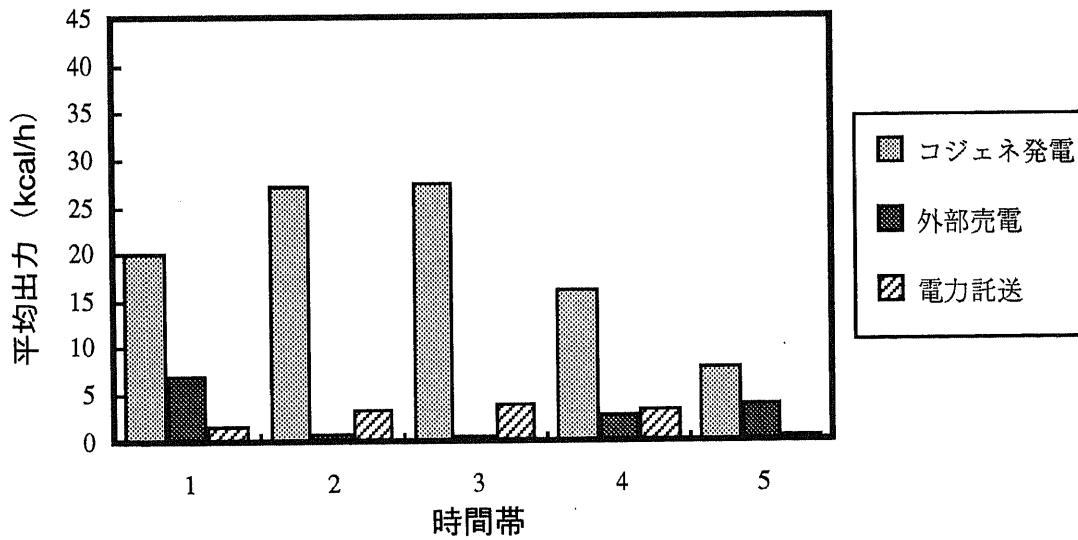
店舗	....	余剰電力の発生が少ないため、より重点的に比重が高まった。
事務所	....	余剰電力の発生を抑える。
ホテル	....	補完的な余剰電力を託送に回す。
住宅	....	夕方の熱負荷が突出しているために構成から排除された。

図3-14 ケース2における季節別・時間帯別の挙動

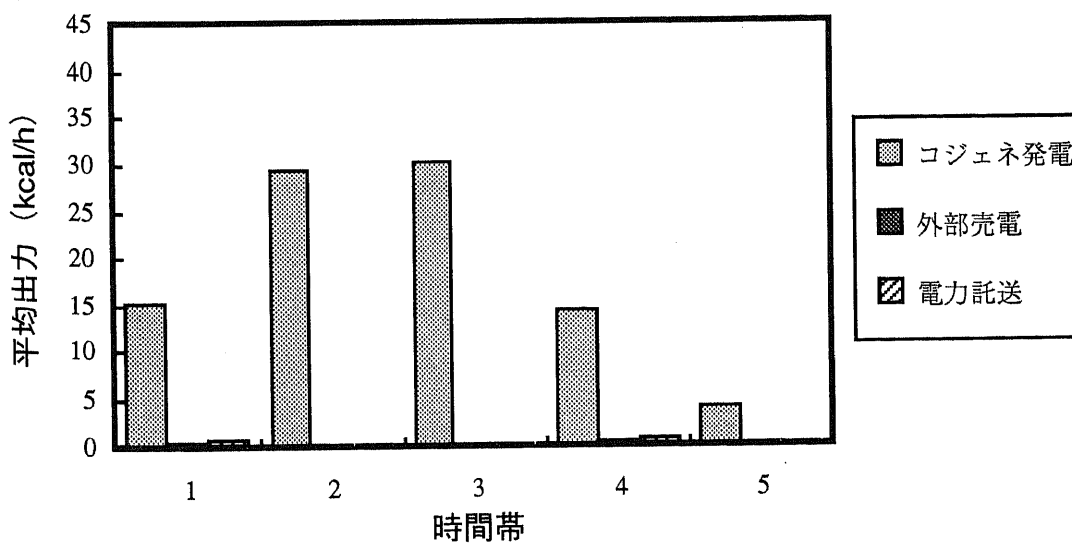
〈夏季〉



〈冬季〉



〈中間季〉



## (4) 個別需要家におけるコジェネ単独導入との比較

コジェネのネットワーク化の効果をみるために、コジェネをそれぞれの需要家が単独に導入した場合を想定し、今回の最適組み合わせの場合と結果を比較した。ケース1およびケース2についての比較を図3-15に示す。

## 1) ケース1

最適組み合わせに比べて、個別の単独導入ではコジェネの規模が1～1.5倍程度、ボイラの規模が0.7～4倍程度となっており、多大な設備がコストの増大をまねいている。それに対し、最適組み合わせは設備を節約することを通じてコストの最小化を実現したといえる。ケース1で構成比率が高いホテルと事務所は単独でも比較的成本が小さい。構成比率はもともと経済性を有する点を反映したと考えられる。一方、住宅は5種類の用途の中で最もコスト高である。コジェネおよびボイラともに規模が大きいかかわらず最適組み合わせに含まれていることは、電力託送の授受において他との整合性が高い（補完的）ことを示している。店舗はそれほどコストが高くはないのに構成比率が住宅と同じ程度に抑えざるものは、コジェネ規模が大きくなることが一因と考えられる。

エネルギー効率の観点からは、事務所、ホテルの効率は最適組み合わせよりも下回るが、それ以外は最適組み合わせを超えている。組み合わせはホテル、住宅の相対的に高い効率を利用し、これらの効率をやや低下させることによって事務所、店舗の低い効率を大幅に引き上げている。ここにネットワーク化の効果が表われている。

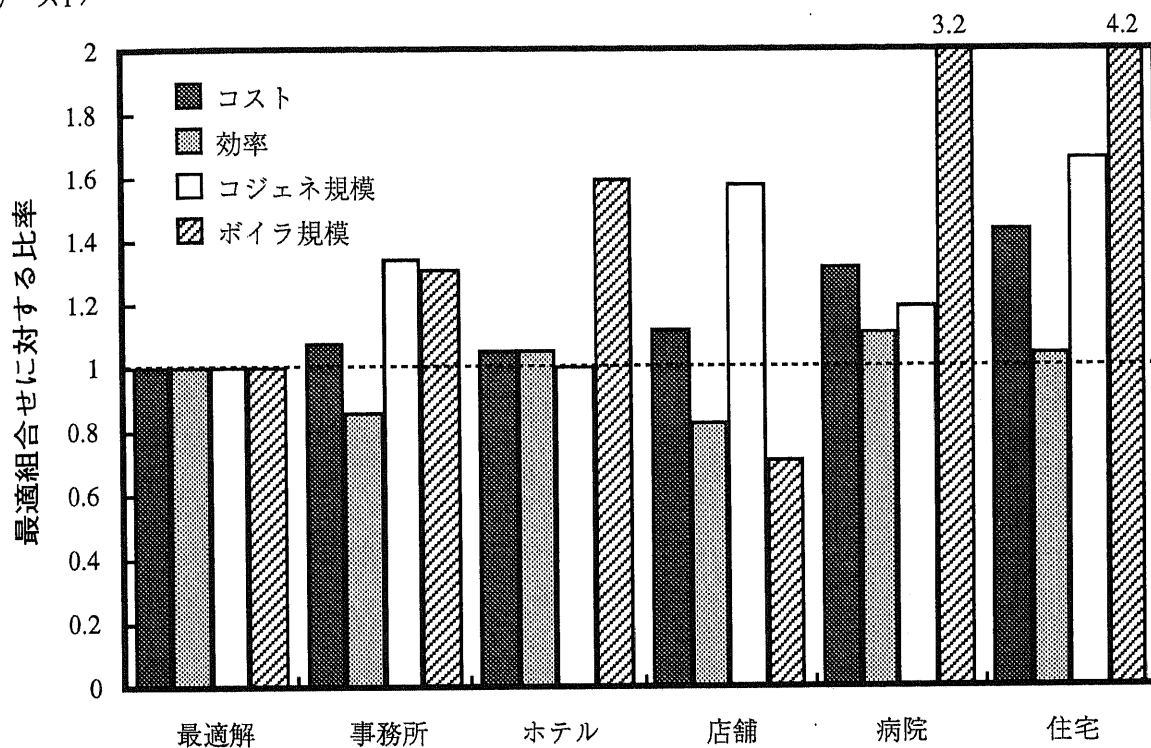
## 2) ケース2

ケース2では、最も経済性が高い単独導入は店舗であり、最適組み合わせとほぼ同じコストを与える。事務所、ホテルは比較的经济性がよいが、病院、住宅はコジェネ規模が最適組み合わせの2～3倍、売電が8～9倍と突出している。これらは熱負荷が大きいことに起因する。設備規模を反映して、これらのコストは最適組み合わせの1.5～2倍とかなり大きい。ケース1と同様に、最適組み合わせにおける店舗の比率が大きいことは、単独導入の経済的優位性を反映していると考えられる。

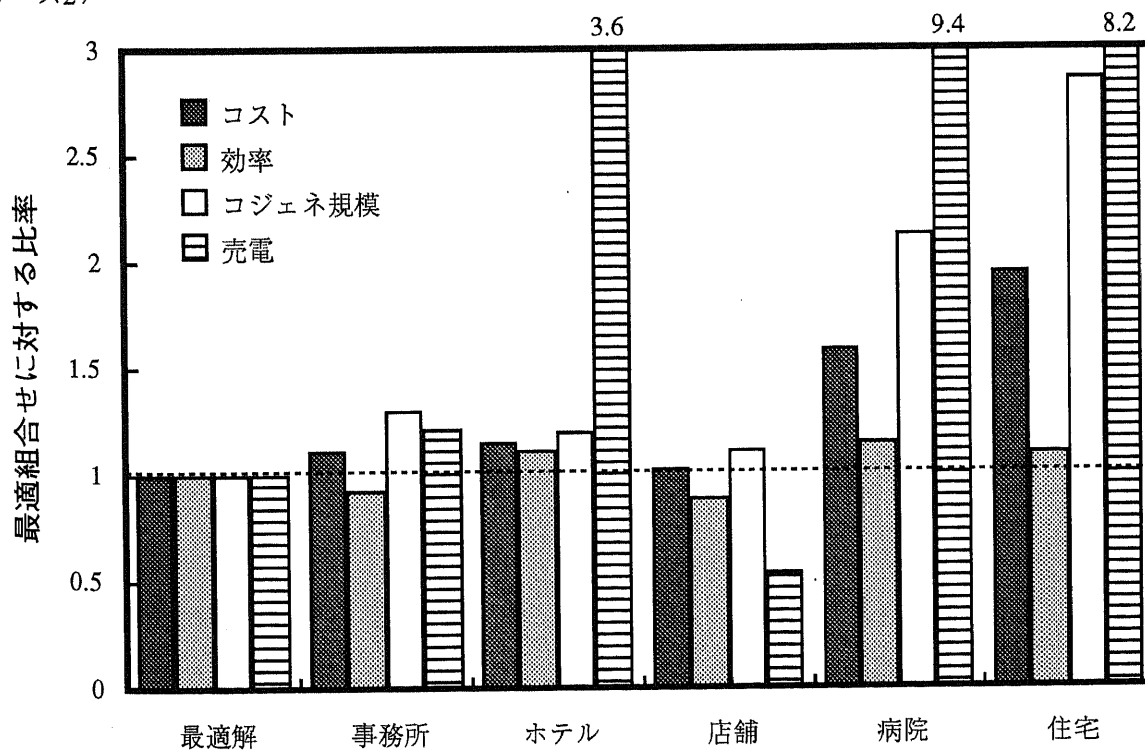
エネルギー効率の面では、ホテル、病院、住宅が最適組み合わせより上回り、事務所、店舗が下回る。前三者は売電が多いことからみてコジェネの電力供給が不足になる状態が少なく、コジェネの焚き増しの必要が少ないことが有利に働いている。後の二者は負荷パターンから考えても熱需要が相対的に小さく、コジェネ焚き増しの頻度が高いことからエネルギー効率が小さくなっている。ケース1と同様に、店舗、ホテル、事務所間で補完性が働き、店舗と事務所の低い効率が引き上げられており、ネットワーク化の効果が認められる。

図3-15 最適組み合わせと単独導入の比較

〈ケース1〉



〈ケース2〉

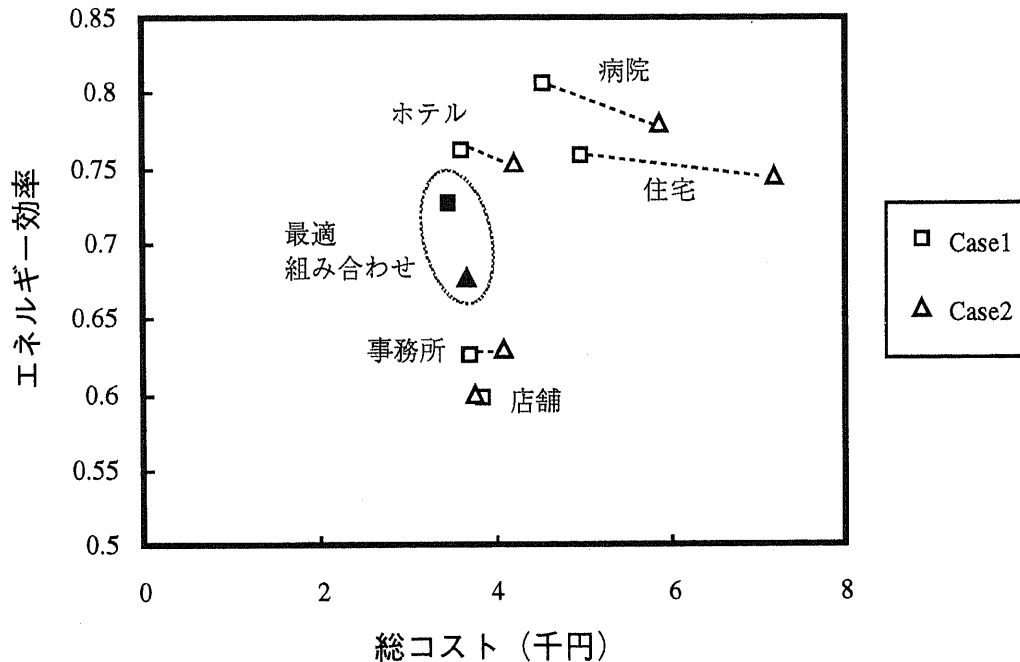




## (5) 電力託送によるネットワーク化の効果と課題

ここでは総コストとエネルギー効率に注目し、ネットワーク化の効果を整理する。総コストとエネルギー効率の2次元平面に最適組み合わせと単独導入の結果をプロットしたものを図3-16に示した。

図3-16 最適組み合わせと単独導入の総コストおよびエネルギー効率



## 1) 総コストに対する効果

ケース1では設備規模の抑制が経済性を高めている。需要家の間に不等時性が存在するため、補完的な需要を適度に結合することで、全体としての負荷を平準化できたことがコジェネ設備の削減に寄与した。ケース2においてホテルの突出した売電がホテルとの最適結合によって縮小されている点にも不等時性に基づく平準化が表われている。すなわち、電力託送によるネットワーク化は不等時性による補完的な関係を経済的に顕在化させる効果を持つ。また、補完性のために最適組み合わせのコストは単なる線形結合よりも低下する点が需要家ネットワークの有利性を示している。

## 2) エネルギー効率に対する効果

エネルギー効率では病院が最も高く、ホテル、住宅がそれに次ぐ。事務所と店舗の効率は比較的低い。マクロ的にみれば、最適組み合わせを行うことは高い効率と低い効率のものを結合し、中程度の効率を生み出すといえる。ミクロ的には、朝や夜における電力託送の増大は託送受け手側のコジェネ

焚き増しを削減しており、送り手側の効率をあまり低下させることなく受け手の効率の改善につながっている。定常的に託送が発生する需要家を組み合わせれば、ネットワーク化の効率改善効果は一層拡大すると予想される。

### 3) ネットワーク化における課題

コジェネ導入による省エネルギー促進の観点からは、託送によってエネルギー効率の向上を実現することが望まれる。今回与えた需要家の負荷分布では補完性に限界がある。現実の都市部では事務所の立地が多く、コジェネ焚き増しの割合が大きいと考えられるので、補完的な余剰電力が発生する割合が強い分布を組み込むことがエネルギー効率改善に寄与すると予想される。このためには次のことが有効と考えられる。

- i) 熱負荷の平均が大きく、分散が小さい需要を取り込む。
- ii) 売電価格を上げる。

熱負荷の分散が大きいと設備規模が拡大するため経済性が悪化する。高水準で安定的な負荷があればコジェネ・ネットワーク化には好都合である。ただし、売電価格が上昇すれば、ある程度分散があっても固定費の増大を売電収入で補える可能性も考えられる。その意味で、売電価格の上昇は結合される需要家の範囲を広げ選択の自由度を拡大し、エネルギー効率改善に役立つと予想される。

ケース2の結果にみられるように、売電が赤字要因になる場合には余剰電力が発生しないような組み合わせが選択され、エネルギー効率の低下につながる。言い替えれば、電力会社に売電するよりも、より高い価格で購入する需要家に直接販売できれば効率改善に寄与する。自家発電力の販売価格の方が電力会社の料金よりも低いと考えられるので、直接売買が可能であれば買い手は見つかる予想される。法制度的に電気事業の規制緩和が実施される方向にあるが、その意味で規制緩和はコジェネ・ネットワーク化による効率改善にとって効果的と考えられる。

#### 3.4.6 託送料金が最適構成に与える影響

ここでは託送料金をベースケースの1 (円/kWh) 以外に0, 2, 5, 10 (円/kWh) に変化させて、最適構成等に対する感度分析を行った。0 (円/kWh) はすべての需要家が単一ビルに收容される場合に相当する。

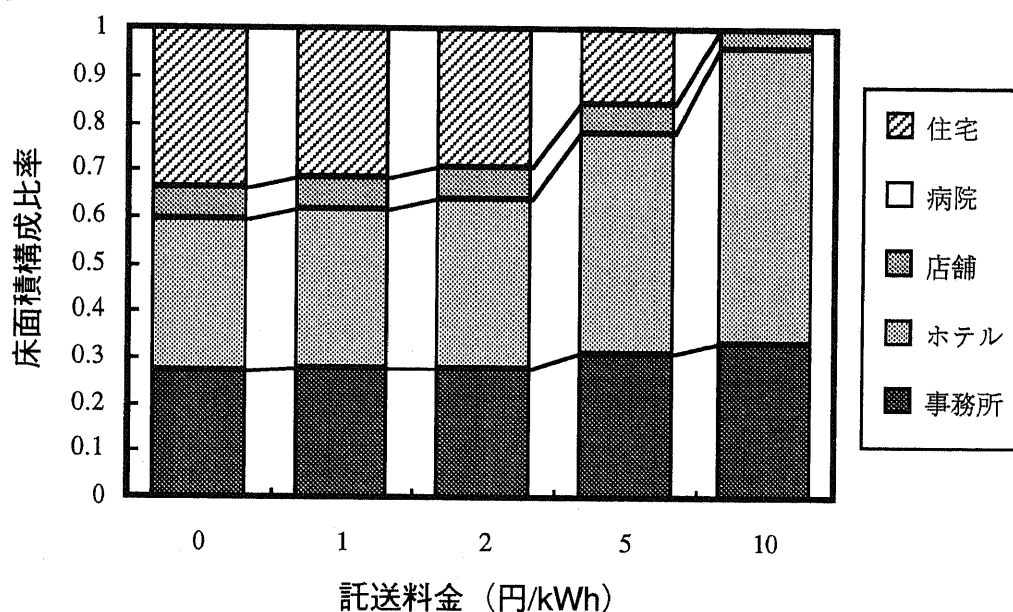
##### (1) 需要家構成比率への影響

託送料金の影響を各ケースについて調べた結果を図3-17に示す。託送料金が上がるにつれて、ケー

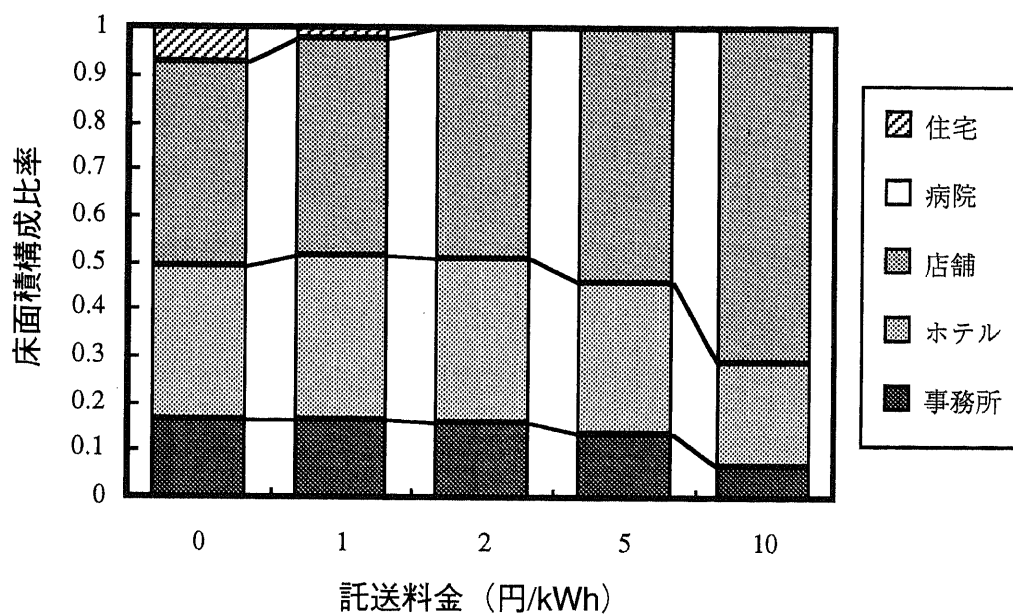
ス1では住宅の比率が急速に減少し、その代わりホテルの比率が拡大する。これは住宅の夕方の余剰電力の託送が削減されることを反映している。ホテルの増加に合わせて託送受け手となる事務所も増加傾向を示す。ケース2では、託送料金上昇に対して託送送り手となるホテルが縮小傾向を示し、逆に店舗が比率を増大させる。また、住宅の比率もゼロとなり、託送を抑制しようとする傾向が表われている。託送料金の上昇は託送を減らしそれぞれの需要家を分離させる。図中の動きは、分離の結果単独導入において最もコストが小さい需要家に収束する過程と理解できる。

図3-17 最適需要家構成に対する託送料金の感度分析

〈ケース1〉



〈ケース2〉

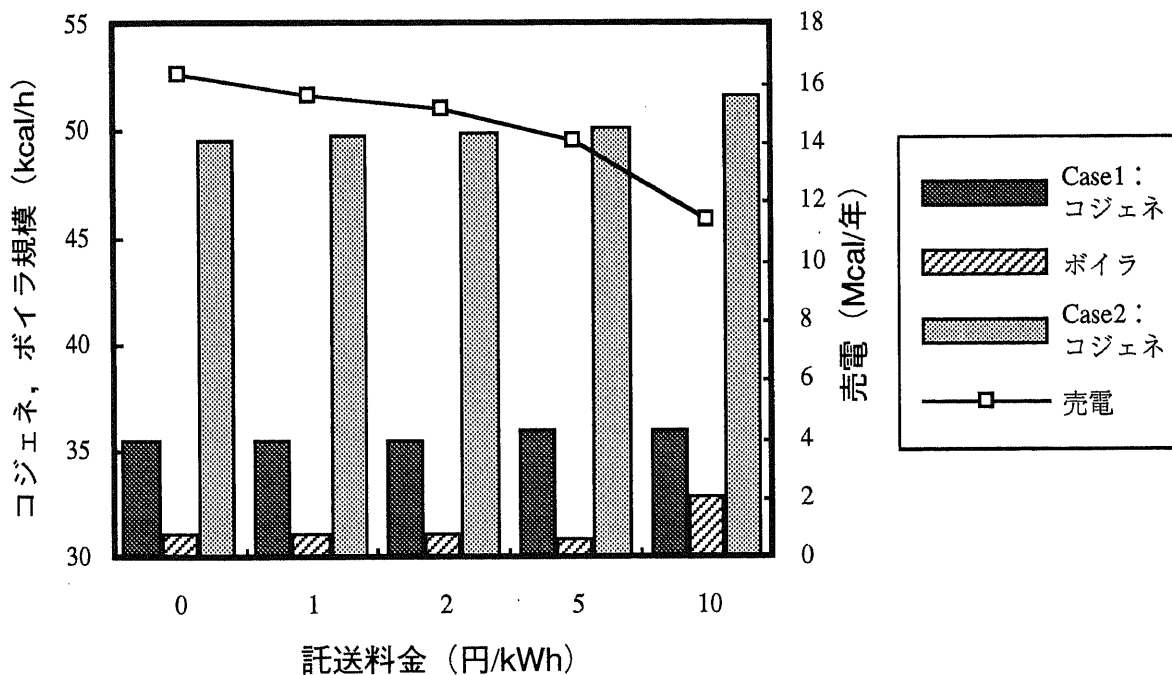


## (2) 設備規模への影響

図3-18に各ケースの設備規模と年間売電量と託送料金の関係を図示した（図左側の設備規模の軸がゼロからでないことに注意）。コジェネ、ボイラの規模は各ケースともに託送料金に対してそれほど変化しない。わずかに上昇傾向を示す程度である。託送が減るため需要家が分離される傾向が強まるので、コジェネ規模が拡大したと考えられる。

一方、ケース2の売電は託送料金に比較的敏感に反応して減少する。これは店舗の比率が高まるため余剰電力が発生しなくなることによる。

図3-18 設備規模に対する託送料金の感度分析

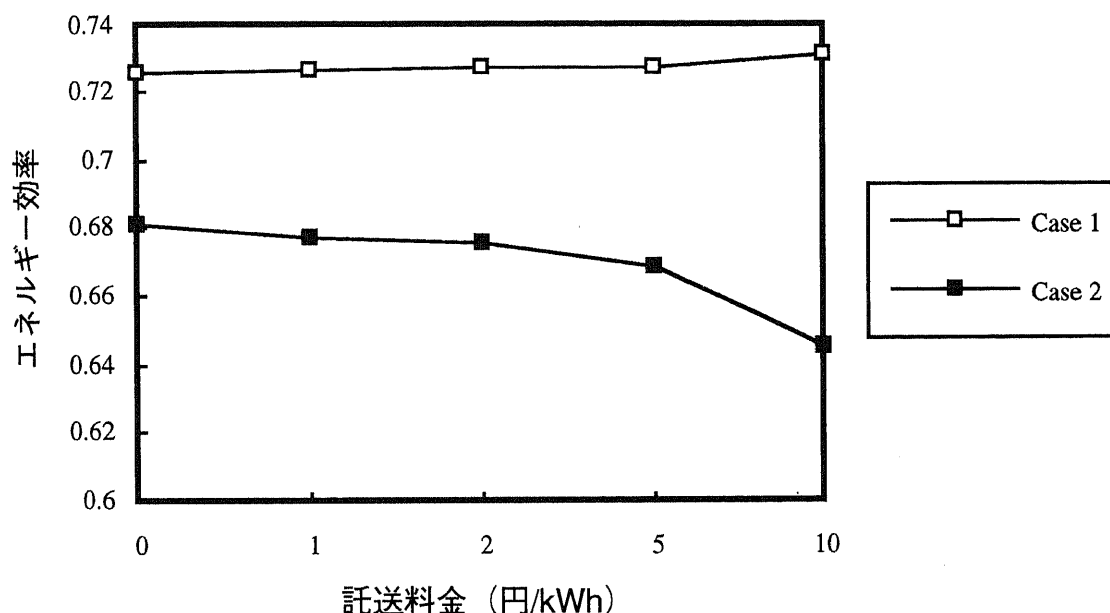


## (3) エネルギー効率への影響

託送料金とエネルギー効率との関係を各ケースについて図3-19に示した（縦軸がゼロからでないことに注意）。託送料金の影響は微小であるが、ケースによって逆に現われ、ケース1ではエネルギー効率がわずかに上昇するがケース2では効率が低下していく。託送料金が上昇するにつれて託送が減少し、単独導入において最もコストが小さい需要家に収束する。したがって、図3-16からわかるように、ケース1ではホテル（高効率）に、ケース2では店舗（低効率）に集中していく。上記の挙動はこのことに起因する。ただし、ケース1ではホテルと事務所間のバランスによりほぼ一定の効率となつて現われたと考えられる。

現状では電力会社に対する売電に魅力が乏しいので、売電によって余剰電力を処理するケース2においては効率低下の傾向を持つと考えられる。したがって、託送料金を抑えて電力託送を維持・促進することはエネルギー効率の高位安定に寄与すると期待される。特に売電ではなく外部の需要家に余剰電力を託送する（直接販売する）場合には、託送料金のエネルギー効率への影響はより強く現われると予想される。

図3-19 エネルギー効率に対する託送料金の感度分析



ケース2の挙動とエネルギー効率の関係から、システム構成としてコジェネだけですべての熱供給をカバーすることはやや極端だと思われる。ケース2においても追いだき用ボイラの導入を認めれば、コジェネの設備を節約できる。また、需要家の組み合わせについても余剰電力の発生が少ない需要家の比重を高める必要がなくなるため、組み合わせの選択が柔軟になる。その結果、ケース1と同程度の効率を有するシステムを組むことも可能になると考えられる。

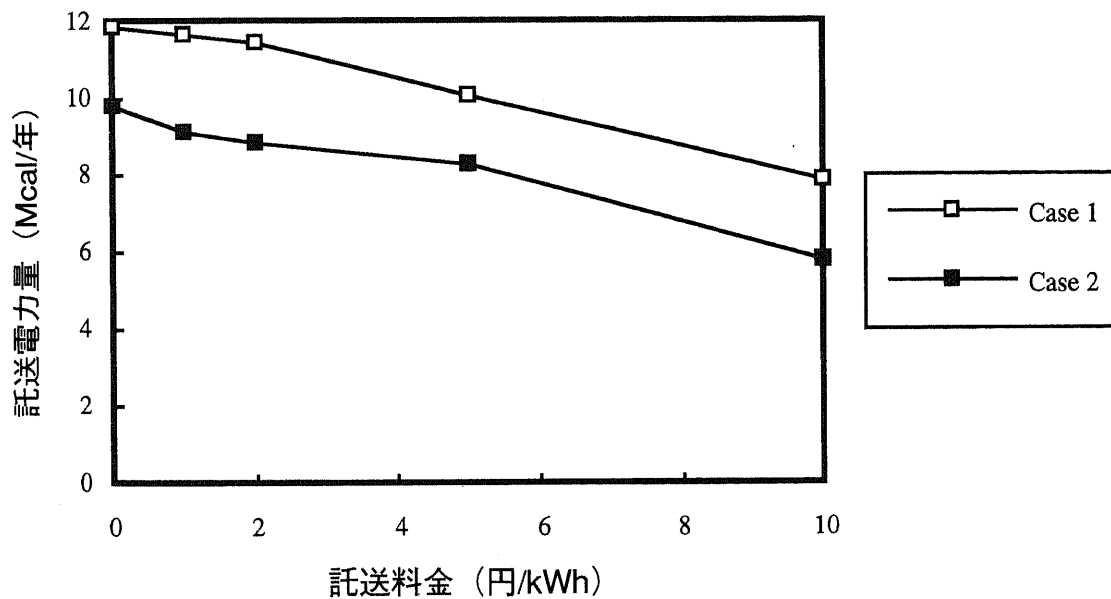
#### (4) 託送電力量に対する影響

託送料金と託送電力量との関係を図3-20に示した。ケース1では2 (円/kWh) を超えて、ケース2では5 (円/kWh) を超えたあたりから託送電力量は急速に低下を始める。床面積構成比率の変化を見ても5 (円/kWh) から急に構成が変化しているので、この付近に託送料金の影響の転換点があると考えられる。一方で託送料金が10 (円/kWh) に達してもかなり託送が行われている点は興味深い。託送に

より需要家間で電力融通することがコストの削減につながっていることを反映している。

ただし、本モデルでは各季節・各時間帯の挙動を変数にとっていないので、料金に対して必ずしも敏感に反応しないことを考慮する必要がある。個別の時間帯について経済性から託送するかどうかを決めるのではなく、需要家の負荷分布の関係として電力不足と過剰とがあれば必ず託送することが仮定されている。また、ここでは電力会社から買電するのは負荷がコジェネ設備容量を超えた場合に限っている。託送料金が上昇したとき、通常であれば電力会社から買電すると予想されるので、その点で託送電力量が過大に評価されていると考えられる。

図3-20 託送電力量に対する託送料金の感度分析



## 3.5 本章のまとめ

### 3.5.1 結果のまとめ

将来的に大量にコジェネが都市に導入された場合、相互に余剰電力を融通しあうことは保有者にとって経済的な利益をもたらすと同時に、省エネルギーにつながるため社会的にも評価されると期待できる。本章では電力託送を応用してコジェネプラントを保有する需要家をネットワーク化したときの効果について、需要側の熱電比の統計的挙動と、具体的な需要家の組み合わせの可能性および電力託送の発生量について分析した。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 電力負荷および熱負荷がそれぞれ正規分布する仮定の下で、需要側熱電比の確率分布を導いた。分布は電力負荷と熱負荷の相関係数に大きく依存し、相関が高いほど低位の熱電比の分布が低減するとともにピークが急峻になる。低位の熱電比はエネルギー効率が低い状態に相当するので、強い相関はコジェネのエネルギー効率を改善する。
- (2) 電力負荷と熱負荷が独立である仮定の下で、負荷がガンマ分布に従う場合に需要側熱電比の確率分布はベータ分布になる。この分布と正規分布に基づく分布はよく似た形状を示す。また、負荷分布のパラメータと熱電比の平均、分散との関係を導いた。
- (3) 需要家を結合したときの総合化された需要における熱電比の平均、標準偏差の挙動を導いた。需要家間の相関によっては結合した時の熱電比の標準偏差は、もともとの需要家の持つ標準偏差よりも小さくなりうる。したがって、適当な需要家間で結合すれば需要側熱電比をコジェネ熱電比に近づけることができ、運用上のエネルギー効率を高くできる。
- (4) 事務所、ホテル、店舗、病院、住宅の需要家を取り上げ季節別、時間帯別の負荷分布を与え、電力負荷追従運転と熱負荷追従運転の2ケースについて、年間コストを最小化する需要家組み合わせを導いた。主たる床面積構成としては、前者はホテル、事務所、住宅から、後者は店舗、ホテルから構成された。
- (5) 電力託送は冬季の昼間から夜にかけてと夏季の夜に比較的多く発生し、コジェネ発電量の1/4～1/5程度が託送を経由して利用される。これらの時間帯ではホテル、住宅で余剰電力が発生し、その他の需要家が電力不足になることに起因する。中間季にはほとんど託送されない。
- (6) 熱負荷追従運転の場合に、ネットワーク系全体としての余剰電力の売電は夏季の昼間、冬季の朝、夜に比較的多く発生する。これらの時間帯に熱負荷が高まることによる。
- (7) エネルギー効率の観点からは、熱負荷追従運転は電力負荷追従運転よりも効率が劣る。前者

では売電価格が低く売電が赤字になるため、余剰電力を抑える組み合わせが選択される。その結果、コジェネ排熱が余剰となる割合が増大することが効率低下をもたらす。

- (8) 託送料金が上昇すると、電力負荷追従運転ではホテルの比率が高まり、住宅が減少する。一方、熱負荷追従運転では店舗の比率が急拡大する。これには託送送り手となる需要家を切り離し、単独導入で最もコストの小さい需要家に収束する傾向が表われている。
- (9) 託送料金の上昇にたいして、電力負荷追従運転ではエネルギー効率はそれほど大きな変化をみせない。熱負荷追従運転では効率が低下する傾向を持つので、託送料金を抑えることはコジェネ効率の維持（悪化抑制）につながる。
- (10) 売電が経済的魅力に乏しい場合にはエネルギー効率は低下するので、売電価格の設定はコジェネ効率に大きな影響を与える。また、コジェネ電力を系外の需要家に赤字でない価格で直接売電できれば効率改善に役立つ。
- (11) 託送料金がかなり高い状態でも電力託送は発生する。外部から買電しない条件の下では需要家相互の融通が大きな役割を持つことを示している。

なお、今回の需要家組み合わせモデルは、3季5時間帯5需要家に対して変数6～7個、制約条件2～3本の非常にコンパクトなモデルとして表現されている点が特徴である。

### 3.5.2 今後の課題

電力託送の位置づけとして次の2通りが考えられる。

- i) 需要家間の負荷のアンバランスを補完する。
- ii) 自家発電力を電力会社以外の需要家に販売する。

今回、電力託送を前者の考え方に基づく電力融通として位置づけた。モデル分析によれば、夏季、冬季の夜の時間帯では発電量の1/4～1/5が託送に回されており、活発な融通が行われている。しかしながら、その他の時間帯では託送の規模はそれほど大きくない。より活発な託送のやりとりを含めるためには工場などの事業所を考慮することがあげられる。

一方、後者のように託送を非電力事業者の自家発から一般需要家に対する販売方策と捉える考え方もある。将来的な規制緩和を考えれば、コスト削減もしくは収益拡大のために積極的に託送を利用する形態は十分予想される。コジェネにとって電力負荷のみが増大すれば効率悪化につながるの、高いエネルギー効率を維持するための料金制など、コジェネと電力会社との連携を分析することが課題と考えられる。



## 第4章

# コジェネ分散型電源の効率が導入規模に 与える影響

## 第4章 コジェネ分散型電源の効率が導入規模に与える影響

### 4.1 本章の目的

国内・国外では電力市場の規制緩和が一つの流れとして認められる。日本においても既存の電力会社に対して電力を卸売りする発電事業の自由化や、自家発電力の一般家庭や事業所に対する小売を解禁にする方向性が通産省・資源エネルギー庁から打ち出されている。これらの電力事業への参入規制の緩和はますますコジェネの導入を促進することになると予想される。

将来コジェネが大量導入された場合、電力市場は従来の集中型電源とコジェネなどの分散型電源で構成されることになる。現在のようにコジェネの導入量が相対的に非常に小さいうちは、コジェネは集中型電源の規模や運用に対してほとんど影響を与えないと考えられるが、やがてコジェネの比率が高まるにしたがってコジェネの行動が集中型電源に影響を及ぼすと考えられる。そのため、相互に影響しあう結果として、分散型電源と集中型電源の構成が決まることになる。

従来、分散型電源と集中型電源との関係に関する研究は、将来需要の不確実性に対する柔軟性という観点から森ら[38]、松橋ら[39]によってなされている。また、両者の運用に関して浅野[40]はゲーム論的立場から分析している。本研究では分散型電源と集中型電源の需要分布形状を直接考慮している点が特徴である。森らは日負荷曲線を用いて電源構成を分析することによって負荷分布を考慮しているが、両者間での相互干渉を明示的には取り扱っていない。また、浅野は運用面のみを扱い電源規模は含まれていないが、本研究では相互干渉の結果から電源規模を算出している。なお、森ら、松橋らと異なり本研究は分散型電源の優位性を評価するのではなく、行動様式から導かれる電源構成の静的状態を記述することをねらいとしている。

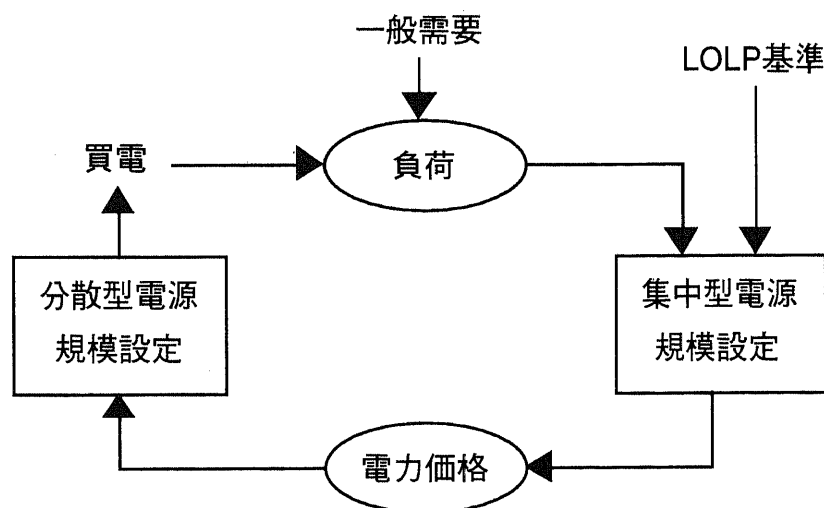
本研究では、コジェネ分散型電源と集中型電源の間に働く相互干渉過程をモデル化し、両者の電源構成を導くとともに、その均衡状態に及ぼす分散電源の効率の影響を分析することを目的とした。さらに、将来的には時間帯別料金制が普及するであろうことを視野に入れ、2時間帯モデルによって時間帯別料金の設定がコジェネ導入規模に与える影響を分析し、その競合関係を導く。

## 4.2 分散型電源と集中型電源の相互干渉過程

分散型電源は自己の評価基準（分散型電源保有者に対する電力供給コストの最小化）を満たすよう  
に行動すると想定できる。言い替えれば、供給コストが最小になるように電源規模および集中型電源  
からの買電量を決定する。この時、分散型電源の規模の設定によって集中型電源からの買電量が変化  
するため、分散型電源の行動は集中型電源に対する負荷分布に影響し、集中型電源の規模を変化させ  
る。逆に、集中型電源の規模は設備コストを通じて電力価格に反映されるため、分散型電源の買電に  
影響を与え、分散型電源の規模決定を変動させる。すなわち、分散型電源の買電によって電力価格が  
上昇するならば買電は抑制され、価格が下落するならば買電は促進される。この相互の干渉過程を図  
4-1に示す。本研究では、図のループを影響が循環することによって最終的に収束し、両者の行動が均  
衡する点において電源構成が定まると考える。ただし、この均衡は静学的なものであり、動学的要素  
である電源建設投資や需要の時間変化などは捨象されている。

なお、ここでは電力会社が従来通り供給義務を負い、集中型電源はLOLP（負荷損失確率）がある  
一定値になるように規模が決められると想定している。

図4-1 分散型電源と集中型電源の相互干渉



以下では、まず、分散型電源と集中型電源の間に働くこの相互干渉プロセスを均一料金の場合につ  
いて定式化し、その均衡解を分析する。次いで、2時間帯モデルに拡張し、均衡解に対する時間帯別  
料金の影響を調べる。

## 4.3 均一料金モデルによる分析

### 4.3.1 モデルの前提

#### (1) 前提条件

##### 1) 電力需要の想定

電力需要として分散型電源が主に賄う需要とそれ以外の一般の需要を想定する。また、それぞれは相関を持つ正規分布で表現されると仮定する。

##### 2) 電源の行動様式

分散型電源と集中型電源の行動様式がそれぞれ異なることが今回のモデルの特徴である。前述した通り次のように設定する。

分散型電源： 電力供給コストを最小化する

集中型電源： LOLP基準に基づいて電力需要を賄う

すなわち、分散型電源の行動を集中型電源がフォローする形とみなす。これは現実の自家発保有者および電力会社の行動様式を反映している。

#### (2) 変数等の定義

ここで用いる変数を以下のとおり定義する。

##### 〈需要〉

$x$  : 分散型電源の需要 (kW)

$y$  : 一般の需要 (kW)

$z$  : 集中型電源の負荷 (kW)

##### 〈需要の確率分布〉

$f(x,y)$  :  $x$ と $y$ の同時確率密度関数 (—)

$g(x)$  :  $x$ の確率密度関数 (—)

$q(z)$  :  $z$ の確率密度関数 (—)

$\mu$  : 平均,  $\sigma$  : 標準偏差 (・は $x$ または $y$ ) (kW)

$r$  :  $x$ と $y$ の相関係数 (—)

##### 〈電源規模〉

$K_c$  : 分散型電源の規模 (kW)

$K_u$  : 集中型電源の規模 (kW)

〈電源の運用〉

$F_c$  : 分散型電源の燃料消費量 (kWh)

$E_c$  : 分散型電源の買電量 (kWh)

$E_u$  : 集中型電源の発電量 (kWh)

$P$  : 電力価格 (円/kWh)

〈パラメータ〉

$\gamma$  : 設備費 (円/kW)

$\lambda$  : 燃料費 (円/kWh)

$\eta$  : 発電効率 (以上, はc: 分散型電源, u: 集中型電源) (—)

$T$  : 8760時間 (時間)

#### 4.3.1 分散型電源の挙動定式化

分散型電源は与えられた電力価格の下で供給コストを最小にするよう電源規模を決定する。すなわち, 評価基準は次式のように表される。

$$J = \gamma_c K_c + \lambda_c F_c + P E_c \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (4.1)$$

ただし,

$$F_c = \frac{T}{\eta_c} \left\{ \int_{-\infty}^{K_c} x g(x) dx + K_c \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx \right\} \quad \dots (4.2)$$

$$E_c = T \int_{K_c}^{\infty} (x - K_c) g(x) dx \quad \dots (4.3)$$

最適な分散型電源規模は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dK_c} &= \gamma_c + \lambda_c \frac{dF_c}{dK_c} + P \frac{dE_c}{dK_c} \\ &= \gamma_c + \left( \frac{\lambda_c}{\eta_c} - P \right) T \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx = 0 \end{aligned} \quad \dots (4.4)$$

$$\therefore \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx = \frac{\eta_c \gamma_c}{(P \eta_c - \lambda_c) T} \quad \dots (4.5)$$

(4.5)式の左辺は分散型電源の規模 $K_c$ を越える負荷の発生比率, すなわち負荷損失確率LOLPを意味する。言い替えれば, 分散型電源は自己のLOLPを右辺値に合わせるように電源規模 $K_c$ を設定する。

### 4.3.2 集中型電源の挙動定式化

集中型電源は一般の需要と分散型電源が賄い切れない負荷，すなわち $K_c$ を越える分の負荷に対して供給を行い，LOLP基準に基づいて設備規模を決定する．そこで，まず集中型電源の負荷分布を求め，電源規模および電力価格を導く．

#### (1) 集中型電源の負荷分布

集中型電源に対する負荷 $z$ は分散型電源の需要レベルに応じて次の2通りとなる．

$$z = \begin{cases} y & (x \leq K_c) \\ x + y - K_c & (x > K_c) \end{cases} \quad \dots (4.6)$$

この時， $z$ の確率密度分布は次式で求められる．

$$q(z) = \int_{-\infty}^{K_c} f(x, z) dx + \int_{K_c}^{\infty} f(x, z - x + K_c) dx \quad \dots (4.7)$$

ここで， $f(x, y)$ として次式で表わされる2次元正規確率分布を仮定する．すなわち，

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2(1-r^2)} \left\{ \left( \frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2r \left( \frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right) \left( \frac{y-\mu_y}{\sigma_y} \right) + \left( \frac{y-\mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \quad \dots (4.8)$$

これを(4.7)式に代入して展開し次式の集中型電源の負荷分布を得る．

$$\begin{aligned} q(z) = & \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp \left( -\frac{(z-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right) \left( 1 - \operatorname{Erf} \left[ \frac{r\sigma_x(z-\mu_y) + \sigma_y(\mu_x - K_c)}{\sigma_x\sigma_y\sqrt{2(1-r^2)}} \right] \right) \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2\pi}(\sigma_x^2 + 2r\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)} \exp \left( -\frac{(z + K_c - \mu_x - \mu_y)^2}{2(\sigma_x^2 + 2r\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)} \right) \times \\ & \left( 1 + \operatorname{Erf} \left[ \frac{\sigma_x(\sigma_x + r\sigma_y)(z - \mu_y) + \sigma_y(\sigma_y + r\sigma_x)(\mu_x - K_c)}{\sigma_x\sigma_y\sqrt{2(1-r^2)}(\sigma_x^2 + 2r\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)} \right] \right) \quad \dots (4.9) \end{aligned}$$

ただし，

$$\operatorname{Erf}[x] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du \quad \dots (4.10)$$

## (2) 集中型電源の規模

集中型電源の規模 $K_u$ は所与のLOLP基準に基づいて決定する。すなわち、

$$\int_{K_u}^{\infty} q(z) dz = LOLP \quad \dots (4.11)$$

この時、kWhあたり電力価格は次式で求められる。

$$P = \frac{\gamma_u K_u}{E_u} + \frac{\lambda_u}{\eta_u} \quad \dots (4.12)$$

ただし、

$$E_u = T \int_{-\infty}^{K_u} z q(z) dz \quad \dots (4.13)$$

### 4.3.3 電源構成の均衡解

#### (1) 入力データ

電力需要および電源設備コスト等のパラメータについては表4-1に示す数値を用いた[39]。

表4-1 分散型電源および集中型電源のパラメータ設定

パラメータ	分散型電源	集中型電源
設備建設費 (万円/kW)	40	30
燃料費 (円/Mcal)	3	1.3
年経費率 (%)	16	16
発電効率 (—)	*1	0.35
LOLP (%)	*2	1
需要平均 (MW)	100	300
需要標準偏差 (MW)	20	100
相関係数	0.8	

注：\*1) 感度分析する。分散型電源の発電効率は(4.14)式で定義されたもの。

\*2) 分散型電源のLOLPは計算の結果決まる。

#### (2) 発電効率の考え方

コジェネを含む分散型電源の物理的な発電効率は0.35程度であるが、分散型電源がコジェネとして

運用されている状況を模擬するため、ここではさらに発電効率が高くなる想定をする。すなわち、熱供給に必要な燃料をボイラで供給したと仮定して逆算し、コージェネの投入燃料から差し引き、その残りの燃料で発電したと考えると発電効率を算出する。発電効率は次式で計算される。

$$\eta = \frac{\eta_b}{\eta_b - \alpha \eta_y} \eta_c \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad \dots (4.14)$$

ただし、

$\eta_b$ ：ボイラ効率

$\eta_y$ ：コージェネ熱供給効率

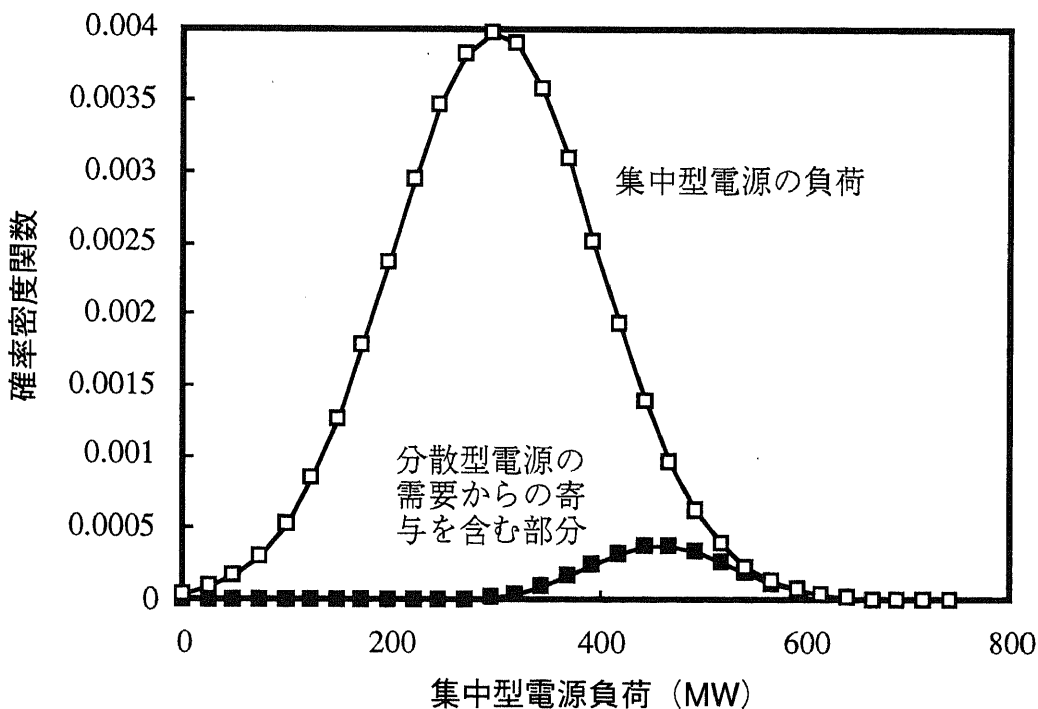
$\alpha$ ：コージェネ排熱の有効利用比率

例えば、 $\eta_b$ を0.9、 $\eta_y$ を0.45、 $\eta_c$ を0.35とすれば、 $\eta$ は最大で0.7となる。

### (3) 分散型電源の負荷分布

図4-2に分散型電源に対する負荷の分布形状の一例を示す。なお、負荷分布に併せて(4.9)式の第2項目の寄与分、すなわち、分散型電源において需要が電源規模を超えた時の集中型電源の負荷を示した。分散型からの寄与は高位に集中しており、集中型負荷の高位の裾部分を正規分布からややふくらませた形にしている。ただし、寄与分の効果は分散型電源の需要と一般の需要との相関に依存する。

図4-2 分散型電源と集中型電源の均衡



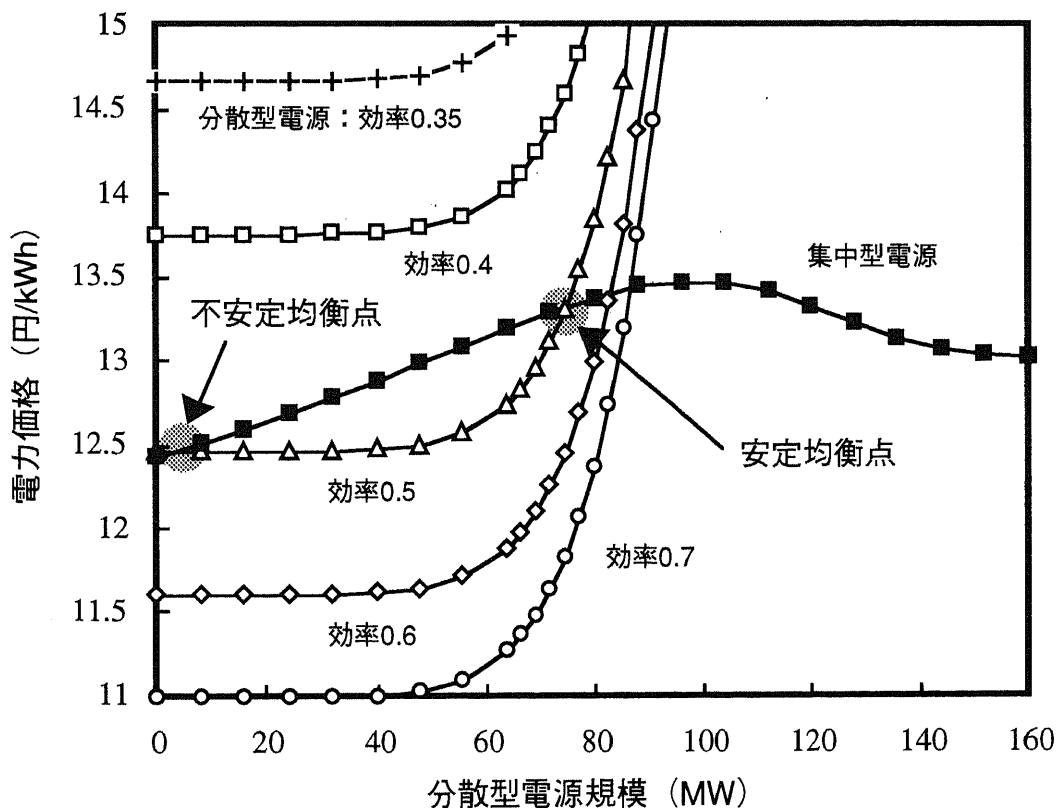


(4) 分散型電源規模と電力価格との関係

図4-3に分散型電源および集中型電源各々の $K_c$ と $P$ の関係を、分散型電源の発電効率をパラメータとして図示した。分散型電源は電力価格が高くなるほど導入規模が拡大する。一方、集中型電源は分散型電源の導入規模が比較的小さいうちは導入拡大にしたがって電力価格が上昇するが、ある程度以上導入が進むと逆に電力価格は低下に転じる。前半の価格上昇は、分散型電源導入規模が小さいうちはベース運転の状態に相当することから、集中型電源の規模低減よりも発電量の減少が卓越するために生じる。後半における価格下落は、ピーク時に集中する分散型電源の需要からの負荷が減るために集中型電源の規模が縮小することに起因する。

図より、分散型電源が発電のみの場合（効率0.35の場合）には両者の均衡解がないことがわかる。すなわち、分散型電源は立地せず、すべて集中型電源で賄われることを意味する。一方、分散型電源がコジェネとして運用され、ある臨界的な効率以上になった時に初めて分散型電源が立地可能となる。また、発電効率によっては2つの均衡点が存在する。すなわち、コジェネ分散型電源の効率は電源構成に対して本質的な影響を与える。

図4-3 分散型電源と集中型電源の均衡

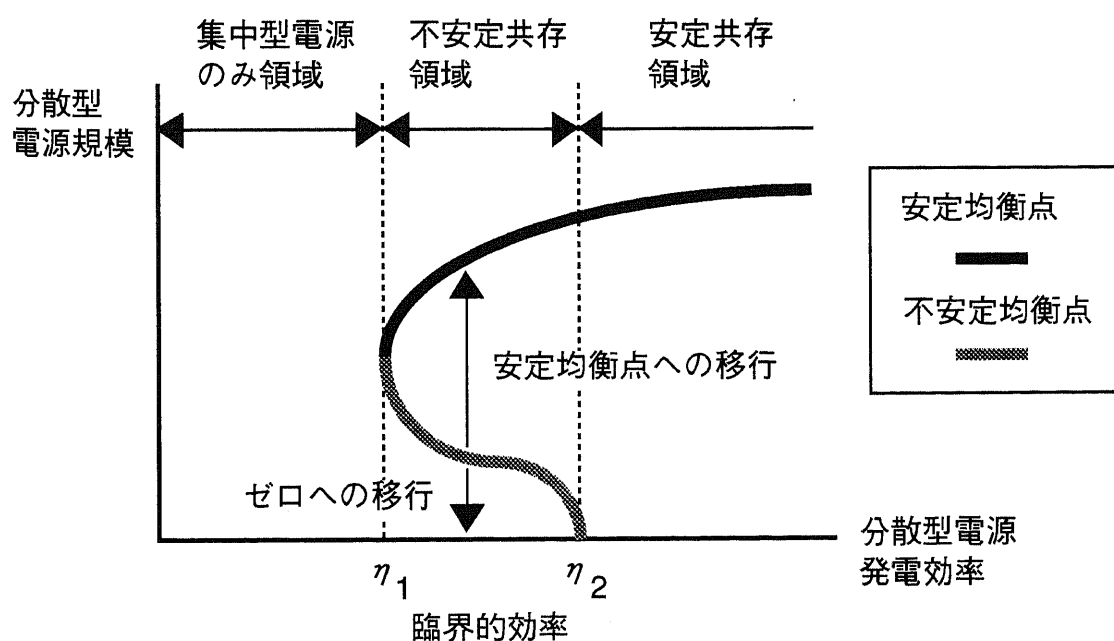


## (5) 均衡点の性質

図4-3によれば、均衡解の特性から分散型電源の効率には2つの転換点がある。低位の臨界的効率から高位の臨界的効率までの範囲では、安定な均衡点と不安定な均衡点がそれぞれ1個ずつ存在し、高位の効率以上の範囲では安定な均衡点1個のみになる。分散型電源の発電効率に対する均衡点の変化の様子を模式的に図4-4に示した。コジェネとして高効率で運用されれば安定な均衡点だけになることは、コジェネの社会的効用が大きいという解釈から納得がいく挙動である。電力需要と熱需要の整合がとれない状態のコジェネでは不安定均衡点も発生し、さらに熱供給の割合が低下すればコジェネは入らなくなる。現実には熱負荷をある程度持つホテルやショッピングセンターなどにコジェネが導入されているが、民生用の（コジェネでない）自家発の導入があまりみられないことは、この条件を反映していると考えられる。

不安定な均衡点は外部条件などの変化によって均衡点からずれ、安定点またはゼロへと移動すると予想される。言い替えれば、何らかの支援的な外部要因（例えば政府の助成）により安定均衡点へと移行する（分散型電源の導入量が拡大する）一方、阻害的な外部要因（例えば電力会社の競争的価格設定）により市場から追い出されると考えられる。このことから、分散電源の導入状況が安定的か不安定的かによって政策が異なってくると解釈できる。なお、後述する数値例でみる限り、不安定共存領域に相当する発電効率の幅は比較的狭い。

図4-4 分散型電源の発電効率に対する均衡解の挙動



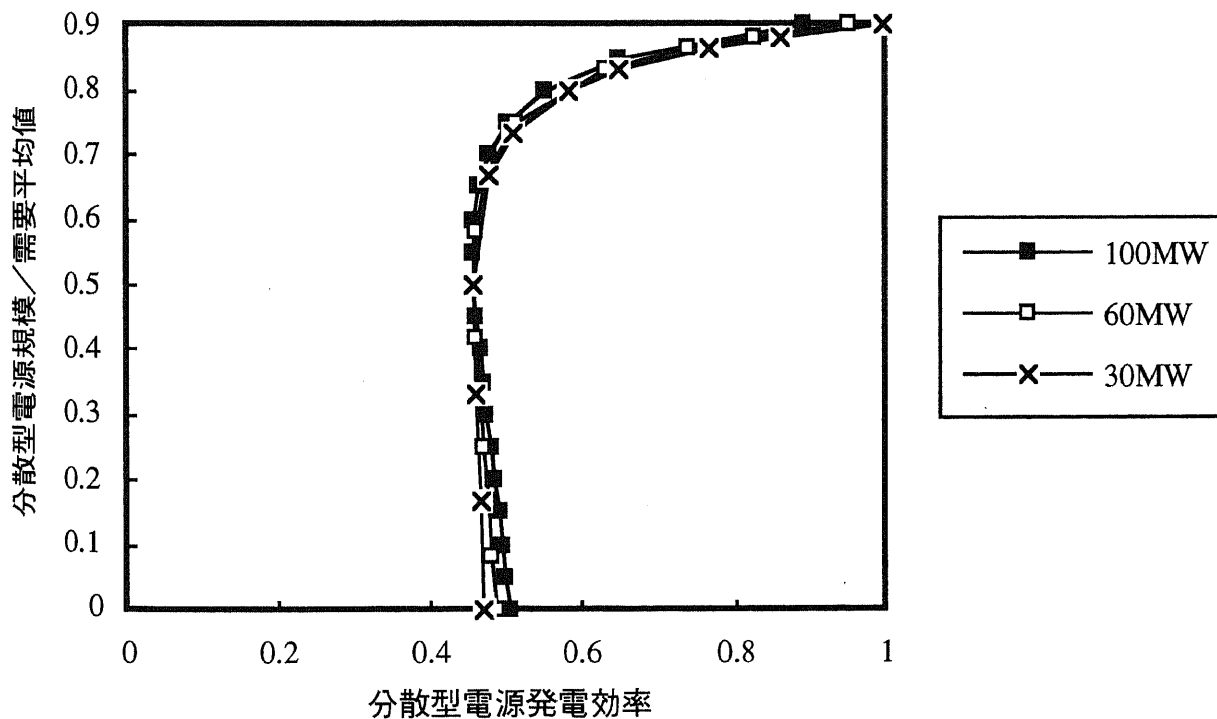
#### 4.3.4 感度分析

##### (1) 分散型電源の需要平均値の影響

表4-1の設定では分散型電源の需要平均値が一般の需要の平均値に比べて1/3と、比較的分散型電源が多く導入されている状態を想定した。この点是不確定な要素なので、平均値を30, 60, 100 (MW)として均衡解を求めた。なお、標準偏差は平均に対する比が一定となるように設定した。その結果を図4-5に示す。ただし、縦軸は分散型電源の規模を需要平均値で割った相対値を示す。平均値が異なる場合でも分散型電源の導入規模や臨界的効率はほとんど変化しない。したがって、分散型電源に依存する需要規模によらず導入の条件はほぼ一定とみなしうる。

この数値例における臨界的効率約0.45はコジェネの発電排熱の約40%を有効利用する状況を意味し、現状の技術で十分対応可能なレベルである。

図4-5 分散型電源の需要平均値に関する感度分析

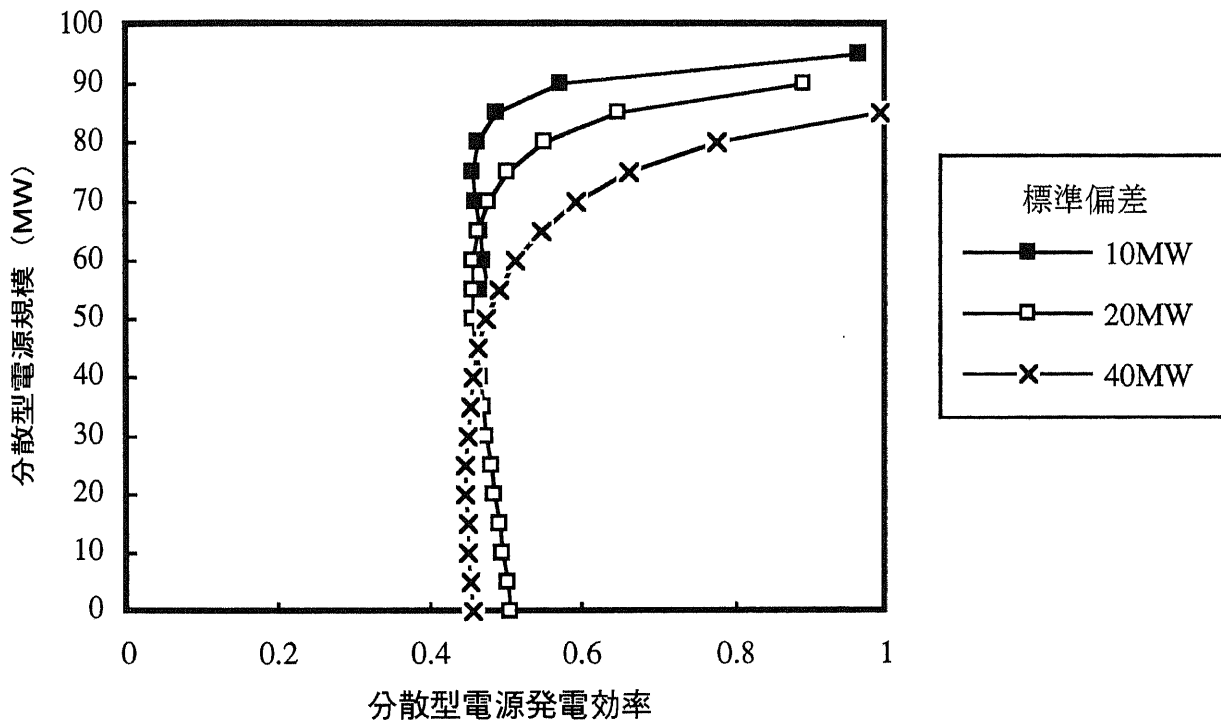


##### (2) 分散型電源の需要の分散の影響

電源構成に影響するパラメータとして、分散型電源に対する需要分布の分散を変動させる。需要の標準偏差を10, 20, 40 (MW)とした時の分散型電源効率に対する均衡解の挙動を図4-6に示す。図より臨界的効率はいずれもほぼ一定の位置にあり、需要の分散はあまり影響しないことがわかる。一

方、臨界的効率付近の湾曲度合や不安定均衡解に対応する分散型電源効率の範囲の広さに影響を与える。前者は分散が大きくなるほど緩くなり、後者については10MW、40MWでは小さいが、20MWでは相対的に大きくなっている。しかしながら、数値例をみる限り不安定均衡解が存在する範囲はそれほど広くない。したがって、多くのコジェネは安定解として実現されると予想される。不安定解の領域にコジェネ効率が入る可能性については電力需要と熱需要の相関の観点から検討の必要がある。

図4-6 分散型電源の需要の標準偏差に関する感度分析



### (3) 分散型電源の建設費の影響

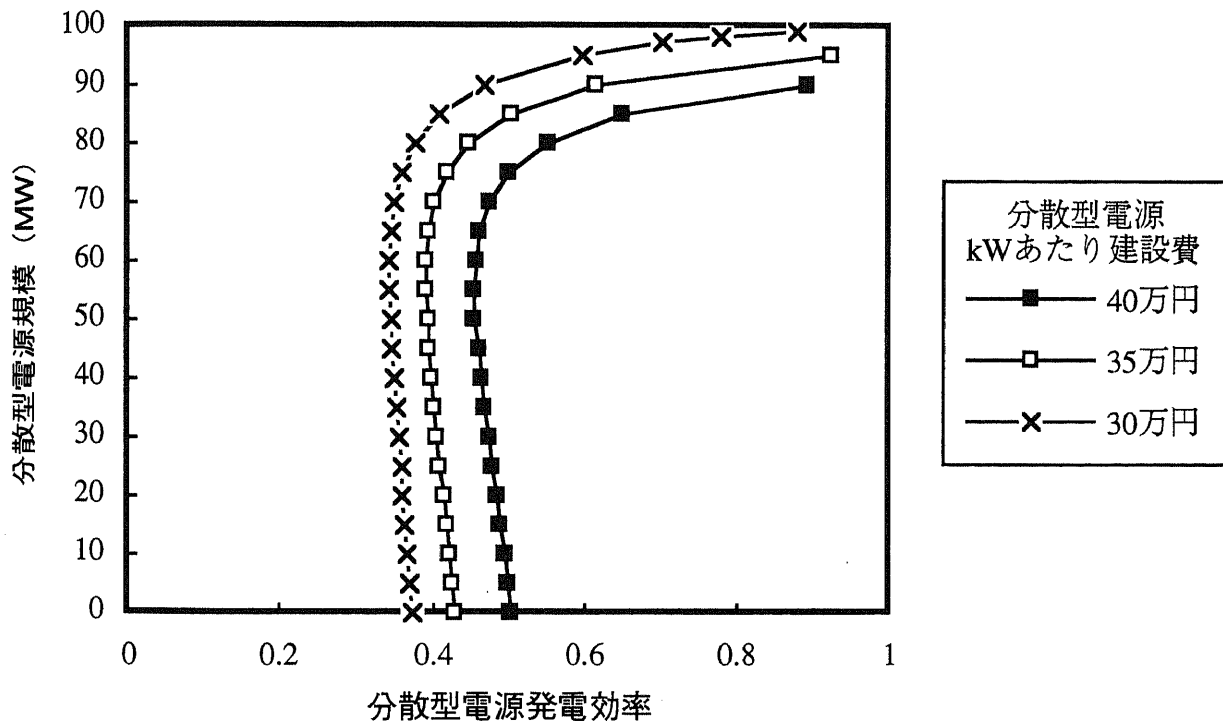
分散型電源の建設費を30, 35, 40 (万円/kW)とベースケースよりも安くした場合の均衡解の挙動を図4-7に示す。建設費は先の需要分布の分散よりも大きく影響し、建設費が安くなるほど臨界的効率が低下するとともに、安定均衡解部分の分散型電源規模が大きくなる。したがって、建設費が安いコジェネにとっては不安定領域が低位に移動するため、安定領域での運用が確保しやすいと考えられる。また、分散型電源の建設費が集中型と同程度の場合には、発電効率0.35において均衡解が存在する。言い換えれば、コジェネでなく電源として集中型電源と共存が可能となるという点で、建設費低減の効果は大きい。

数値例では、ベースケースでの分散型電源の規模は需要平均値より標準偏差程度下回るところに設

定され、かなりの電力を集中型電源から買電する形態をとる。分散電源でありながら規模が控え目に算出されるのは、主としてコストに起因すると考えられる。

以上から、従来から定性的に指摘されてきたことであるが、コストおよび効率は分散型電源（コジェネ）の導入に影響を与える主要な要因であることが定量的に確認できたとともに、その影響は不連続的な結果を与えることが明らかとなった。この不連続性はコジェネ導入者の費用－便益的な観点からの判断によるものではなく、電力会社との相互関係の中で静態的に定まっていることに注意が必要である。

図4-7 分散型電源の建設費に関する感度分析



## 4.4 時間帯別料金制の影響

ここでは先の均一料金制との比較として時間帯別料金制（ピーク，オフピークの2時間帯）を想定し，均衡解への影響を分析する。

### 4.4.1 2時間帯モデルへの拡張

#### (1) 時間帯の区分

時間帯別電力料金についてはピーク時間帯，オフピーク時間帯の長さを等分にとり，次のように需要を区分した。

ピーク需要：  $z \geq Y_0$  となる需要

オフピーク需要：  $z < Y_0$  となる需要

ただし，

$Y_0$ ： それ以下の生起確率が0.5となる集中型電源の負荷レベル

ここで，年間の負荷持続曲線に基づいて時間帯を分けているため，毎日の時間帯区分が一定ではないことに注意が必要である。

これまでに加え，次の記号を定義する。

$i$ ： 時間帯添字 ( $i=1$ ：オフピーク， $i=2$ ：ピーク)

$\rho$ ： 料金比 (ピーク料金／オフピーク料金の比)

#### (2) 分散型電源の運転モード

オフピーク料金が高いうちは常に分散型電源を運転する方が有利であるが，オフピーク料金が発電のkWhあたり燃料費を下回ればオフピーク時間帯に買電する方が低コストとなる。すなわち，分散型電源の運転モードは次の2種類に分かれる。

1) ピーク・オフピーク運転モード (モード1)

2) ピーク時のみ運転モード (モード2)

各モードの一般需要 ( $y$ ) - 分散型電源 ( $x$ ) の2次元平面上における運転，買電の挙動を図4-8に示す。 $Y_0$ は各モードで添え字をつけて区別した。モード1では $x$ が設備規模 $K_0$ よりも小さい範囲では常に稼働する。一方，モード2では買電した時に集中型電源の負荷が $Y_{02}$ より小さくなる場合はオフピーク時間帯に存在するため，それ以外の範囲でコジェネが運転される。また，モード2において $x > K_0$ の時

のピーク時の買電は次の2通りに分かれる。

i)  $x+y \geq K_c + Y_{02}$  のとき

分散型電源は $K_c$ を供給し、不足分を買電する。

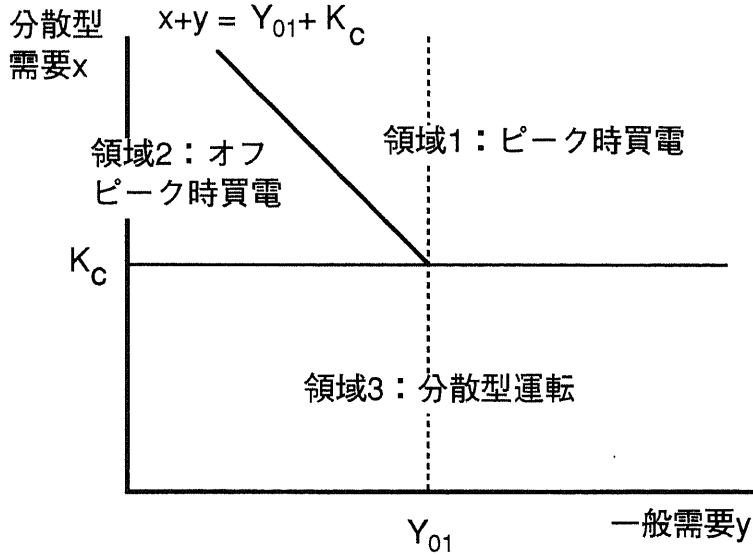
ii)  $Y_{02} \leq x+y < K_c + Y_{02}$  のとき

集中型電源の負荷が $Y_{02}$ になるように分散型電源が供給する。(分散型供給量 $=x+y-Y_{02}$ )

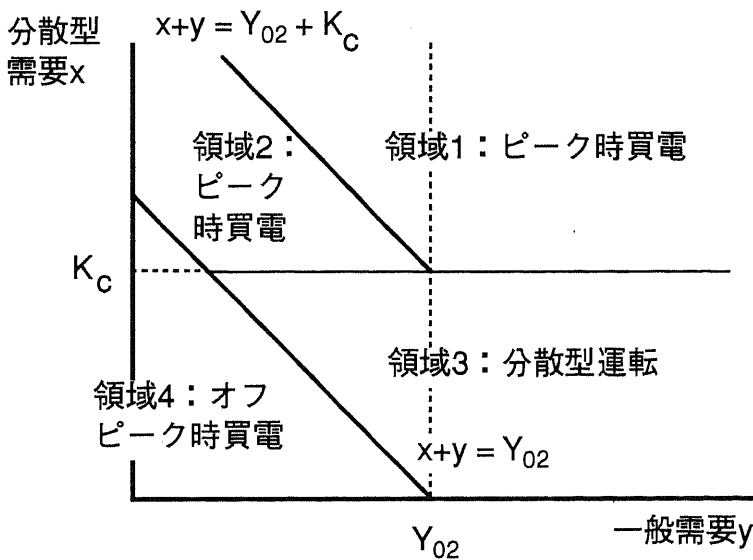
後者の場合には分散型の供給を増やすと負荷がピーク時からオフピーク時に移行するため、 $x+y-Y_{02}$ が供給量の上限となる。

図4-8 分散型電源の運転モードにおける挙動

モード1:



モード2:



#### 4.4.2 ピーク・オフピーク運転モードの定式化

##### (1) 分散型電源の挙動

本モードでは、常に分散型電源を運転し、分散型規模を超える負荷についてはその差分を買電で補う。基本的に均一料金モデルと同じ買電形式となる。モード1における分散型電源の評価基準は次式で表される。

$$J = \gamma_c K_c + \lambda_c F_c + \sum_{i=1}^2 P_i E_{ci} \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (4.15)$$

s.t.

$$F_c = \frac{T}{\eta_c} \left\{ \int_{-\infty}^{K_c} x g(x) dx + K_c \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx \right\} \quad \dots (4.16)$$

$$E_{x1} = T \int_{K_c}^{\infty} \int_{-\infty}^{K_c + Y_0 - x} (x - K_c) f(x, y) dx dy \quad \dots (4.17)$$

$$E_{x2} = T \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c + Y_0 - x}^{\infty} (x - K_c) f(x, y) dx dy \quad \dots (4.18)$$

これより分散型電源の最適規模は次式で与えられる。

$$\frac{dJ}{dK_c} = \gamma_c + \lambda_c \frac{dF_c}{dK_c} + \sum_{i=1}^2 P_i \frac{dE_{ci}}{dK_c} = 0 \quad \dots (4.19)$$

$$\begin{aligned} \therefore \gamma_c + \frac{\lambda_c}{\eta_c} T \int_{K_c}^{\infty} g(x) dx - T P_1 \left\{ (\rho - 1) \int_{K_c}^{\infty} (x - K_c) f(x, K_c + Y_0 - x) dx \right. \\ \left. + \int_{K_c}^{\infty} \int_{-\infty}^{K_c + Y_0 - x} f(x, y) dx dy + \rho \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c + Y_0 - x}^{\infty} f(x, y) dx dy \right\} = 0 \quad \dots (4.20) \end{aligned}$$

##### (2) 集中型電源の負荷

モード1における集中型電源の負荷の密度分布は均一料金モデルと同じである。すなわち、

$$q(z) = \int_{-\infty}^{K_c} f(x, z) dx + \int_{K_c}^{\infty} f(x, z - x + K_c) dx \quad \dots (4.21)$$

#### 4.4.3 ピーク時のみ運転モードの定式化

##### (1) 分散型電源の挙動

モード1と同様に評価基準を設定する。モード2における分散型電源の燃料消費および買電は次で求



められる。

$$F_c = \frac{T}{\eta_c} \left\{ \int_{-\infty}^{K_c} \int_{Y_0-x}^{\infty} x f(x,y) dx dy + K_c \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c+Y_0-x}^{\infty} f(x,y) dx dy \right. \\ \left. + \int_{K_c}^{\infty} \int_{Y_0-x}^{K_c+Y_0-x} (x+y-Y_0) f(x,y) dx dy \right\} \quad \dots (4.22)$$

$$E_{c1} = T \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{Y_0-x} x f(x,y) dx dy \quad \dots (4.23)$$

$$E_{c2} = T \left\{ \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c+Y_0-x}^{\infty} (x-K_c) f(x,y) dx dy + \int_{K_c}^{\infty} \int_{Y_0-x}^{K_c+Y_0-x} (Y_0-y) f(x,y) dx dy \right\} \quad \dots (4.24)$$

これらを(4.19)式に代入し整理すれば、分散型電源の最適規模は次式を満たす $K_c$ として与えられる。

$$\gamma_c + \left( \frac{\lambda_c}{\eta_c} - P_2 \right) T \left\{ \int_{K_c}^{\infty} \int_{K_c+Y_0-x}^{\infty} f(x,y) dx dy + \int_{Y_0-K_c}^{Y_0} (Y_0-y) f(K_c,y) dy \right\} = 0 \quad \dots (4.25)$$

モード2ではピーク時の買電とコジェネ設備導入がトレードオフの関係になるので、最適規模はピーク料金にのみ依存する。したがって、上記の最適条件にはオフピーク料金は含まれない。

## (2) 集中型電源の負荷

モード2における集中型電源の負荷の密度分布は次式で与えられる。 $Y_0$ を境としてオフピークとピーク時間帯に分かれて定式化される。また、図4-8の領域2におけるピーク時間帯の買電は、コジェネの出力を調整して集中型電源への負荷を $Y_0$ で一定にしているため、 $z$ の確率分布関数は $z=Y_0$ で不連続になる。

$z < Y_0$ の時：

$$q(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, z-x) dx + \int_{Y_0-z}^{K_c} f(x, z) dx \quad \dots (4.26)$$

$z \geq Y_0$ の時：

$$q(z) = \int_{K_c}^{\infty} f(x, z-x+K_c) dx + \int_{-\infty}^{K_c} f(x, z) dx \quad \dots (4.27)$$

#### 4.4.4 2時間帯モデルによる均衡解

##### (1) 料金比の影響

料金比をパラメータとして分散型電源の発電効率と導入規模との関係を図4-9に示す。ただし、分散型電源の建設費は30（万円/kW）としている。料金比2のモード1の結果をみる限り、分散型電源導入の臨界的効率は変化しない。しかしながら、料金比を上げるとオフピーク料金が低下するので、臨界的効率より高い効率においてモード1からモード2への転移が生じる。モード2の導入規模はモード1に比べてかなり少なく、大幅な下落となる。モード2で導入規模が小さいのは、ピーク時だけに分散型電源を運転するのではコスト的に不利であることを意味している。

なお、建設費40（万円/kW）ではモード2における導入規模がかなり高い料金比までゼロであり、低位の料金比の範囲でしか分散型電源は導入されない。

図4-9 分散型電源規模の料金比に関する感度分析

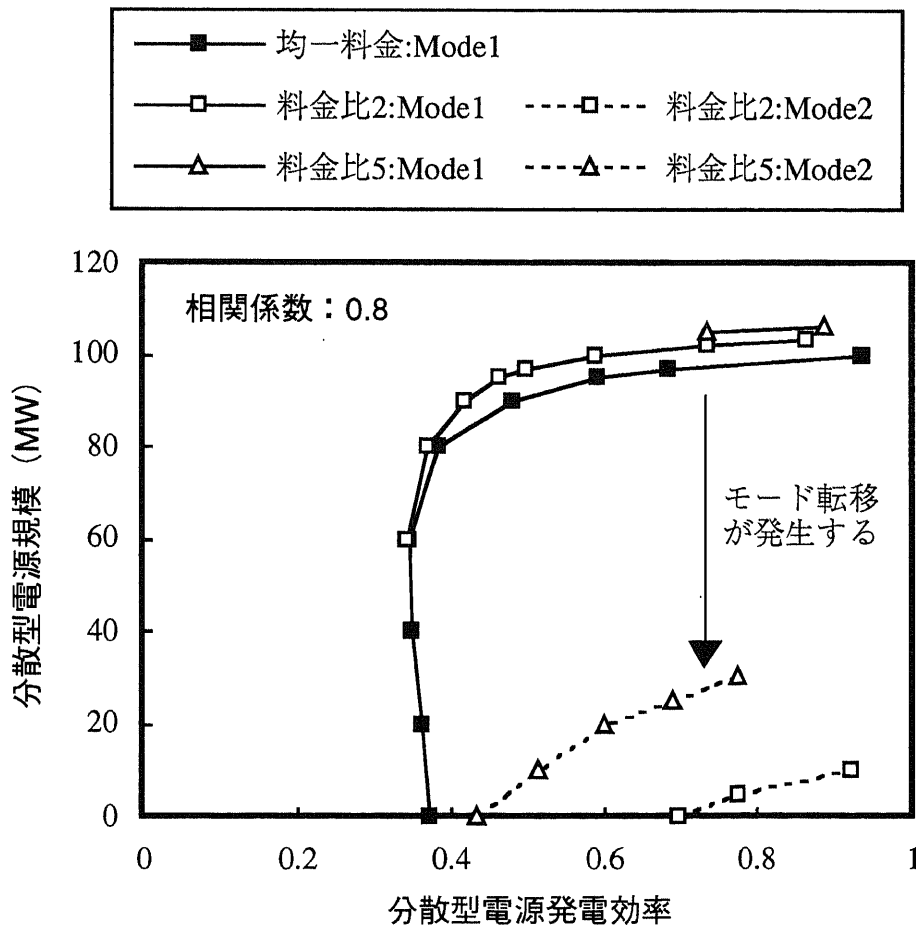
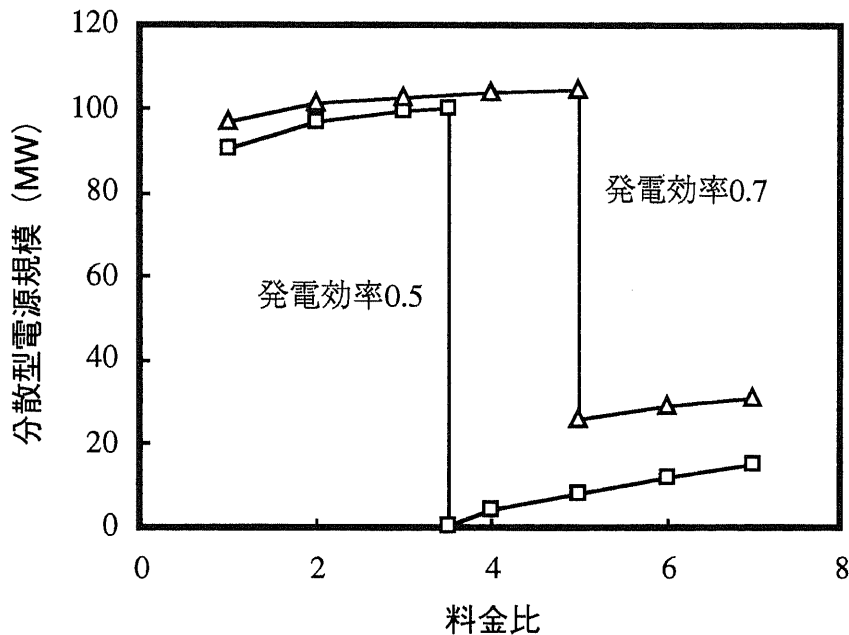


図4-9から発電効率0.5および0.7のプラントについて断面をとった結果（料金比対電源規模）を図4-10に示す。低位の料金比の範囲では分散型電源の規模が大きく、料金比が上昇するに従って導入規模が拡大する傾向を持つ。しかし、料金比の上昇に伴いオフピーク料金が低下し、相対的に買電が有利となりモード2に転換するため、前述したように電源規模はある料金比で突然ゼロもしくは小さい値にジャンプする。さらに料金比が高くなると再び増加し始める。図中でモード切り替えが発生する時のオフピーク料金額としては、料金比3.5において5.2円/kWh、料金比5において3.8円/kWhであった。このことから、時間帯別料金制において高い料金比（低いオフピーク料金）の設定は、分散型電源の規模を抑制する効果を持つといえる。また、この影響は分散型電源の効率が低いほど厳しい。

図4-10 料金比の分散型電源導入に対する影響



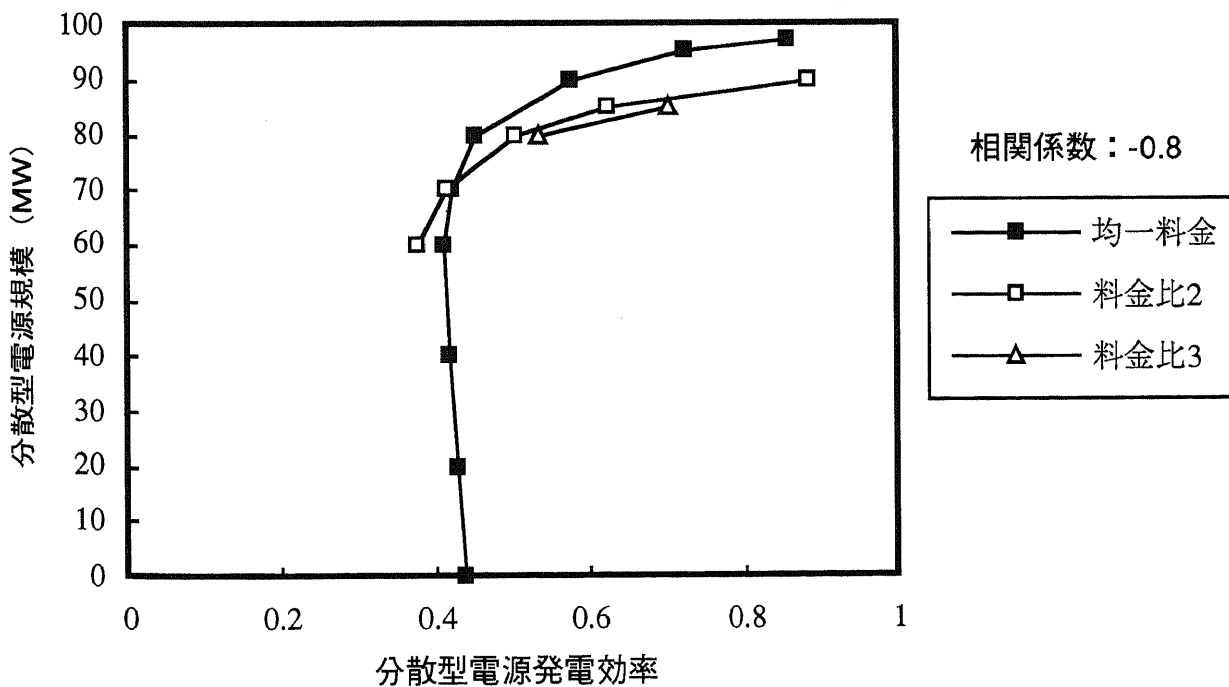
従来の時間帯別料金制に対する挙動に関する研究では、1日の内のピーク、オフピーク時間帯を固定して扱うのが一般的である。その場合にはオフピーク料金にかかわらず、ピーク料金が上昇すれば常に分散型電源の有利さが増し導入規模は増加する。一方、今回の検討では1日の時間帯区分を固定していない。そのため、ピーク時間帯とオフピーク時間帯の挙動が独立にはならない。すなわち、オフピーク料金の低下に伴うオフピーク時の買電行動が、モード転換を通じてピーク時の挙動に影響する。このことが、今回の結果が従来の結果と様相を異にする原因である。オフピーク時の買電が加わることで図4-8の $Y_{02}$ は $Y_{01}$ よりも大きくなるので、モード2ではピーク時に発生する買電が減少する。そのため分散型電源の設備導入が不利になるので、不連続的なジャンプが発生する。

(2) 需要相関の影響

分散型電源の需要と一般の需要の相関が-0.8の場合について料金比の影響をみた結果を図4-11に示す。ただし、モード1の挙動のみを示した。この場合には料金比が上昇するにつれて分散型電源の導入規模が低減する傾向を示している。相関0.8に対する図4-9の結果と比較して、料金比の与える効果は逆転している。ここでは相関がマイナスなので、一般の需要がオフピークの時に分散型電源の需要はピークをとる。したがって、料金比が上昇してオフピーク料金が低下するに伴い、分散型電源における買電の増加がピークカットになるため、分散型電源の規模は抑制される結果となる。

一般の需要とピークをとる時間帯がずれ比較的安定した需要の場合、均一料金制の下では買電するより自家発を導入する方が有利となるが、自家発を入れると社会全体としてはコスト高になる状況が考えられる。この時、時間帯別料金制を適用すると買電の方が有利となるとともに、社会全体のコストが最小になる例が指摘され、時間帯別料金制の正当性としてあげられている[41]。今回の結果もそれを裏付けるものと考えられる。

図4-11 需要間の相関が-0.8の時の分散型電源規模に対する料金比の影響



## 4.5 本章のまとめ

### 4.5.1 結果のまとめ

本章では分散型電源と集中型電源を相互に影響し合うシステムとして位置づけ、電源構成を均衡解として記述することにより、分散型電源の導入規模の効率に対する依存性を導いた。本研究の特徴は分散型電源と集中型電源の相互干渉を明示的に取り扱い、集中型電源の負荷分布が分散型電源の導入規模に依存して変化するものとしてモデル化したことである。今回の均一料金モデルおよび2時間帯モデルによる分散型電源導入に関する分析の結果、次のことが得られた。

- (1) 分散型電源が導入される上で臨界的な効率が存在する。なお、この臨界的効率は現在のコジェネ技術で十分達成可能と考えられる。
- (2) 分散型電源の建設費の低下が導入規模拡大および臨界的効率の低減に効果がある。
- (3) 時間帯別料金制において料金比を高めると、分散型電源導入規模が突然ゼロまたは小さくなる分岐的挙動を示す。

従来分散型電源の導入について、需要地に近接して立地すればコジェネとして運用可能となり、エネルギー有効利用に役立つとの定性的な議論がなされていた。しかしながら、電力需要と熱需要は時間パターンが整合しないため、エネルギー効率をかならずしも高くとれない状況が指摘されてきた。今回の結果から、コジェネとして立地する場合でも最低限確保しなければならない効率があることが示され、分散型というだけで立地可能とはいえないことが明らかとなった。また、条件によっては時間帯別料金制が分散電源の導入を抑制する影響を持つことが示された。

### 4.5.2 電力託送によるコジェネ導入促進効果

今回の結果を利用して、電力託送をコジェネと組み合わせることによる導入促進効果が評価できる。2章の結果によると電力託送はエネルギー効率を0.04～0.1ポイント程度向上させる効果を持つ。今回の発電効率に換算すると次のようになる。

エネルギー効率： 0.45 → 0.55 (改善幅：0.1)

換算発電効率： 0.394 → 0.45 (改善幅：0.056)

図4-7を参考にすると、分散型電源の建設費が35（万円/kW）の場合には発電効率が0.4付近に臨界的

効率が位置するので、エネルギー効率の改善が小さくても導入規模はゼロ→80 (MW) と大幅に拡大する。建設費が30 (万円/kW) の場合には80 (MW) →90 (MW) と約10%程度の拡大となる。2章の議論によれば、元々エネルギー効率が低いコジェネプラントに対して電力託送は効率改善効果を持つので、託送を導入することによって臨界的効率を乗り越えさせる効果が期待できることは重要である。この場合はコジェネの急拡大が予想される。一方、既にある程度高い効率で運転されているコジェネに対してはそれほど導入拡大効果は大きくない。

#### 4.5.3 今後の課題

今回のモデルは静学的であるとともに規範的ではない。言い替えれば、電力市場構成を表現したに留まり、分散型電源導入の適正規模の評価には至っていない。この評価を行うためには分散型電源特有の利点をモデル化し、社会的な便益に対する寄与を評価する必要がある。分散型電源の建設期間が短いことに注目した研究は既になされているが、そこでは電力のみの供給が中心である。コジェネの熱併給の特徴に基づいた分析が求められる。

また、今回はピーク時間帯での余剰電力売電は考慮していない。売電の有無は分散型電源の挙動や導入規模に大きく影響すると予想される。余剰電力の売電を許した場合のモデルの拡張が今後の課題である。

---

## 第2部 運輸エネルギー消費を最小化 する最適都市構造

---

### 第5章

混雑度一定の都市モデルによる  
総トリップ長を最小化する土地利用構造

## 第5章 混雑度一定の都市モデルによる総トリップ長を最小化する土地利用構造

### 5.1 本章の目的

運輸部門はその燃料のほとんどを化石燃料に依存している。地球温暖化問題により人為的なCO<sub>2</sub>の発生を可能な限り抑制することが求められている現在、運輸部門のエネルギー消費を削減することは不可避の課題である。また、近年の車両の大型化やエアコン等の装備が普及するにつれて燃費が低下しつつあるとともに、都市部における渋滞の恒常化など燃費の悪化要因も増してきている。前者は消費者の選好に基づくものであるし、後者は道路容量を超えた自動車の流入に基づくものであるので、従来のように自動車メーカーの努力だけに頼ったのでは抜本的な省エネルギーの実現は厳しいと考えられる。

運輸部門の省エネルギー対策の基本的視点として次の3点があげられる。

- i) 自動車単体の燃費を改善する。
- ii) トリップ数を減らす。
- iii) トリップ長を減らす。

2点目としては、例えば相乗りすることでトリップを削減することが可能である。トリップ自体を直接減少させることは経済活動を抑制することにつながるため、合意形成に困難が予想される。3点目の考え方はトリップの出発地と目的地の配置を適正化することによって移動距離を減らす。この場合トリップそのものは確保されており運輸サービスとしての低下はないため、対策として実行可能なものと考えられる。

従来の都市に関する研究では、古くはダンツィックの“コンパクト・シティ”<sup>[42]</sup>があげられる。これは半径1.3kmの円形で8層のビルに20万人が居住する人工的な都市をイメージしたものであり、都市全体を小容積に集中することによってトリップ長を低減させる。ただし、あまりに理想的な都市像であるので、現実の都市におけるトリップ長削減を考える上では具体的に適用が難しい。現実的な観点からは、大河原ら<sup>[43]</sup>が東京周辺の通勤トリップ実績に基づいて出発地と目的地の再配置による通勤時間短縮効果を評価している。しかしながら、居住地・業務地分布は固定され、望ましい土地利用



像は議論されていない。

一方、道路容量が都市開発の制約となることを明示的に取り扱った研究も報告されている。道路整備は公共部門が行い都市開発は民間主体で事業化するため、それぞれの間に整合性がとれないことが交通混雑を引き起こしているともみることができる。この点を考慮し、粕谷<sup>[44]</sup>は具体的な都市を例にとり、都市開発を道路容量を制約条件として地代収入を最大化する問題として定式化している。また、転馬<sup>[45]</sup>は宅地開発と道路整備を同時に最適化するアプローチを行っている。逆に、田口ら<sup>[46]</sup>は道路ネットワークの構造から各リンクの重要度を評価している。これは道路網のどの部分が混雑するかを幾何学的な観点から示しており、一つの指標として興味深い。さらに一般的に、都市中心部は中心であるゆえに混雑することを腰塚<sup>[47]</sup>は理論的に導いている。このことは都心業務地が潜在的に交通によって制約されていることを示す。

以上を踏まえ、本研究では直接的に総トリップ長を最小にする土地利用構造を求めることを目的とするとともに、その際に都市内の交通が渋滞しない状況を一つの理想像と考え、混雑度がいたるところ一定の都市をモデル化する<sup>[48]</sup>。道路容量を考慮せずに事務所ビルの立地が進められた結果、現在の都市では道路整備を上回って自動車交通が増え、都心部での渋滞が激しくなっている。したがって、混雑緩和を実現するために必要な土地利用分布を見出すことは、将来的な都市形成にとって意味深い。また、現実に道路整備も混雑緩和を目指して実施されているはずである。

さらに、職住近接を考慮した場合についても分析を行う。近年、増大する通勤混雑の緩和方策として“職住近接”がいられている。これは居住地近くの出先オフィスに勤務することによって、都心部への通勤を減らすことを目指している。この考え方は石油ショック後の1980年代初頭に省エネルギーの観点からも都市計画において議論された<sup>[49][50]</sup>。それらは業務地と居住地の機能をコンパクトにまとめた小規模の都市を作れば遠距離移動が削減できるであろうことをねらいとした。ただし、その場合に必要または望ましい都市構造については定量的に示されていない。また、最近の職住近接では通勤トリップのみに注目しているため、業務地が分散することにより発生する業務トリップに関しては研究例は少ない。腰塚<sup>[51]</sup>は円形都市において業務地が一極集中する場合と多極分散する場合を通勤距離の視点から分析しているが、通勤する業務地が居住地に最寄りのものである条件が成り立たなければ多極分散の効果は保証されないことを指摘している。また、鈴木<sup>[52][53]</sup>は通勤分布を正規分布型に仮定して通勤トリップ長と業務トリップ長の総和と業務地分散との関係を分析している。その結果、ある条件の下で一極集中または完全分散が最適解であることを導き、中途半端な業務地分散がかえって逆効果であることを述べている。

そこで本研究では、混雑度一定の都市の中に職住近接の考え方を導入した場合に得られる土地利用構造を導くとともに、近接の度合と通勤交通・業務交通を合わせた総トリップ長の関係を分析する。

## 5.2 混雑度一定の都市モデルの基本的考え方

本研究の特徴は混雑度一定の都市モデルを用いることである。ここでは、モデル化の主たる構成要素について述べる。

### 5.2.1 モデル化の前提条件

#### (1) 前提条件

現実の交通行動は複雑であるのでモデル化に際し簡単化を行った。また、まず1次元の都市を検討し、その後で2次元の都市をモデル化する。今回の都市モデルを作成する上での前提は次の通りである。

- i) 1次元の都市または2次元の円形都市を考える。
- ii) 都市は居住地、業務地、道路から成る。
- iii) 自動車交通のみを取り扱う。
- iv) 通勤交通および業務交通を考慮する。
- v) すべての人口が通勤する。
- vi) トリップ発生 の時間要因は考えない。
- vii) 1次元都市の場合、都市の幅は1kmとする。

#### (2) 変数等の定義

1次元都市のモデル化で用いる記号を次のように定義する。

##### 〈土地利用〉

$f(x)$	: 居住地面積比率	(—)
$g(x)$	: 業務地面積比率	(—)
$\rho$	: 居住地人口密度	(人/km <sup>2</sup> )
$\sigma$	: 業務地就業人口密度	(人/km <sup>2</sup> )

##### 〈交通〉

$t_1(x)$	: 業務交通	(台)
$t_2(x)$	: 通勤交通	(台)
$b_1$	: 業務トリップの時間あたり発生率	(1/h)

$b_2$	: 通勤トリップの時間あたり発生率	(1/h)
$c$	: 道路幅員あたりの時間あたり通過台数	(台/h/km)

〈パラメータ〉

$P$	: 総人口	(人)
$R$	: 都市の長さの半分	(km)
$r$	: 距離減衰係数	(-)

### 5.2.2 トリップ発生メカニズム

2地点間のトリップの発生メカニズムとして次の2種類を想定する。ただし、 $\phi$ ,  $\varphi$ は地点 $x_1$ で発生するトリップの内、 $x_2$ へ向かうトリップの割合を意味する。

業務地人口依存型：

$$\phi(x_1, x_2) = \frac{\sigma g(x_2)}{P} \quad \dots (5.1)$$

距離依存型：

$$\varphi(x_1, x_2) = \frac{r}{2} \exp\left(-r|x_1 - x_2|\right) \quad \dots (5.2)$$

(5.1)式は $x_1$ で発生するトリップが着地の業務人口に比例して配分されることを意味する。一方、(5.2)式はトリップが2地点間の距離に対して指数関数的に減少することを表わす。すなわち、長距離移動の割合は長距離になるほど少なくなる。これらの式はそれぞれ以下で述べる総トリップ長最小型都市モデルと職住近接型都市モデルにおける通勤トリップに対応する。業務トリップについては相手の多い地点により大勢移動すると仮定し、常に(5.1)式を用いるものとした。

### 5.2.3 混雑度一定の条件

今回の都市モデルの特徴である混雑度一定の条件は次式で与えられる。

$$1 - f(x) - g(x) = \frac{1}{c} \{b_1 t_1(x) + b_2 t_2(x)\} \quad \dots (5.3)$$

左辺は道路面積の供給を示し、右辺は業務交通および通勤交通をさばくために必要となる道路面積を表わす。すなわち、混雑度一定の条件は各地点における道路の需給が均衡する条件を与えている。混雑の程度はパラメータ $c$ に依存するが、混雑度一定として任意の地点で混雑が弱いあるいは渋滞のない状態を表現している。なお、今回のモデルでは通勤時間帯や業務時間帯を区別せず、両方のトリップが同時に発生している状況を仮定する。

## 5.3 業務地モデルによる土地利用分布

まず、混雑度一定条件を満たす都市における基本的な都市構造を調べるため、業務地と道路のみからなる都市を考える。より複雑な都市にモデルを拡張した場合においても、この構造が土地利用の大枠を定めると考えられる。

### 5.3.1 業務地モデルの定式化

#### (1) 業務交通

地点 $x$ を通過する交通は $x$ の片側から反対側に移動する人口の総和で与えられる。

$$\begin{aligned} t_1(x) &= 2 \int_{-R}^x \int_x^R \sigma g(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 \\ &= \frac{2\sigma^2}{P} \int_{-R}^x g(x_1) dx_1 \int_x^R g(x_2) dx_2 \end{aligned} \quad \dots (5.4)$$

#### (2) 混雑度一定条件

ここでは居住地を含まないので、混雑度一定条件は次で与えられる。

$$1 - g(x) = \frac{b_1}{c} t_1(x) \quad \dots (5.5)$$

#### (3) 業務地分布を定める微分方程式

(5.4)式を(5.5)式に代入し、微分することによって積分項を取り除く。その結果、次の微分方程式を得る。

$$g(x) g''(x) - g'(x)^2 - k g(x)^3 = 0 \quad \dots (5.6)$$

ただし、

$$k = \frac{4b_1\sigma^2}{cP} \quad \dots (5.7)$$

すなわち、業務地分布を求めることはこの微分方程式を解くことに帰着される。境界条件としては次が付属する。これは都市外への交通がないことから、都市の境界において道路比率がゼロになることを意味する。

$$g(R) = g(-R) = 1 \quad \dots (5.8)$$

また、容易にわかるように $g(x)$ は原点に対象となる。

### 5.3.2 業務地モデルによる土地利用分布

前出の微分方程式は、次のように解析的に厳密解が得られる。

$$g(x) = \frac{\cos^2\left(\frac{\sqrt{C}}{2} R\right)}{\cos^2\left(\frac{\sqrt{C}}{2} x\right)} \quad \dots (5.9)$$

ただし、 $C$ は次の関係式を満たす積分定数である。

$$\sqrt{C} \tan\left(\frac{\sqrt{C}}{2} R\right) = \frac{2b_1\sigma^2}{c} \quad \dots (5.10)$$

この式に基づく土地利用分布を図5-1に示す。また、トリップ発生率 $b_1$ を変化させたときの業務地分布の変化を図5-2に示す。なお、パラメータは次のように与えた。

$$\sigma = 100,000 \text{ (人/km}^2\text{)}, \quad b_1 = 0.2 \text{ (1/h)}, \quad c = 300 \text{ (台/h/m)}, \quad R = 10 \text{ (km)}$$

図5-1からわかるように、道路比率は都市辺縁部から中心部に向かって急速に拡大し、都市中心では半分近くの面積を道路にさかななければならない。これは交通が都市中心部で錯綜し、周辺よりも交通が集中することを反映している。また、図5-2からはトリップ発生率が増加するに従って中心部の混雑度が急激に悪化し、道路面積が急拡大する様子が見て取れる。 $b_1 = 2.0$ ではほとんどの面積を道路で占められてしまい、業務地の立地できる空間がわずかになってしまう。トリップ発生率の上昇は道路の混雑を急速に強め、土地利用に本質的な影響を与えるといえる。

図5-1 業務地モデルによる土地利用分布

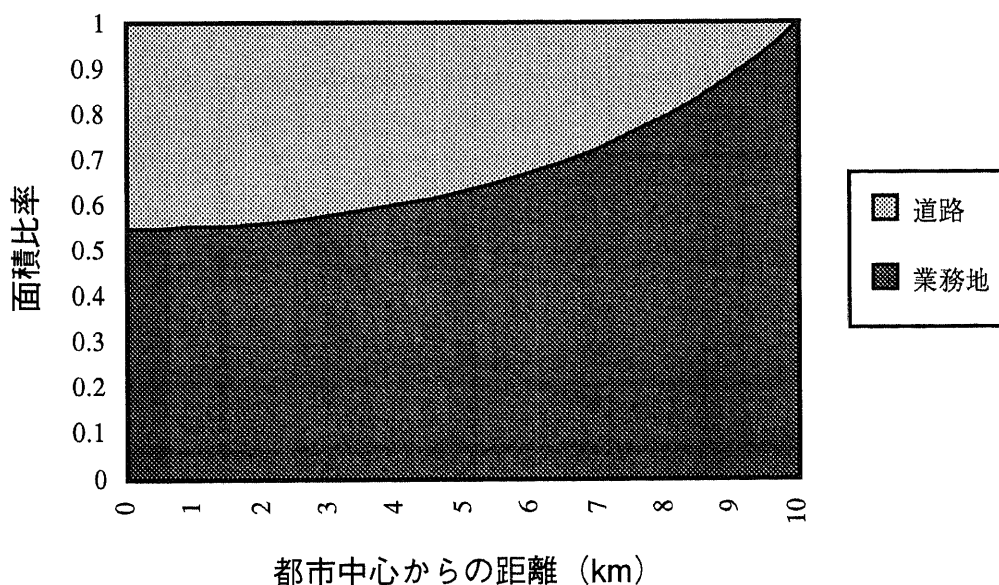
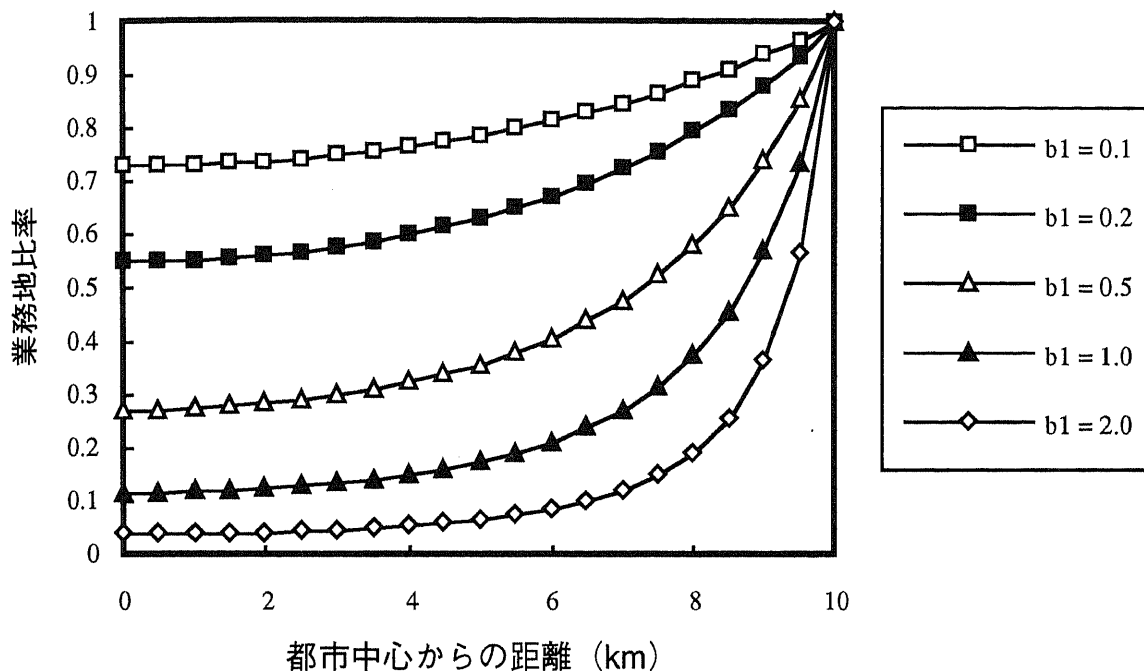
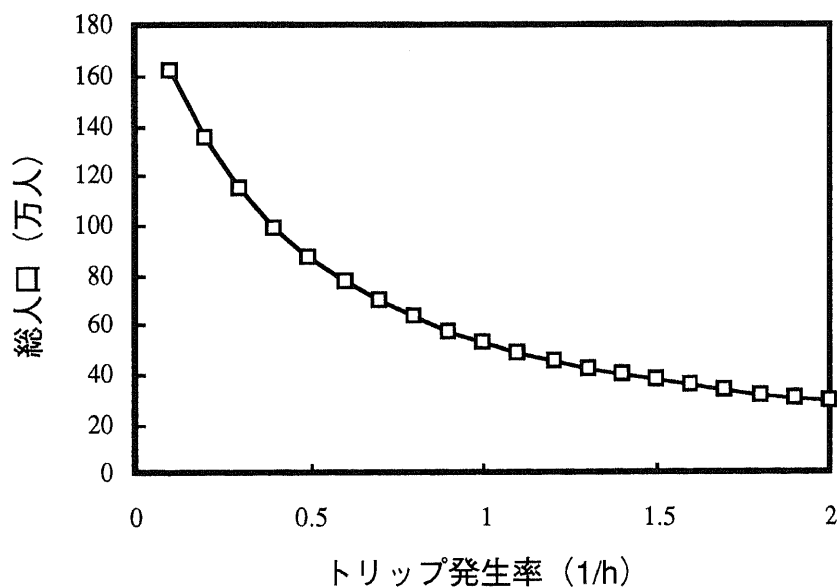


図5-2 トリップ発生率に関する業務地分布の感度分析



トリップ発生率によって大幅に土地利用が変化することからわかるように、混雑度一定の都市モデルでは都市の総人口はパラメータに大きく依存する。道路混雑が厳しくなれば業務地が少なくなるため、就業人口は急速に減少する。逆に大きな人口を収容しようとするれば、都市規模を拡大しなければならない。図5-3にトリップ発生率と総人口との関係を図示した。

図5-3 総人口に対するトリップ発生率の影響



## 5.4 総トリップ長最小化型土地利用

混雑度一定の条件の下では都市内のいたるところ走行状態が同じであるので、自動車燃費も同一となる。そのため、総運輸エネルギー消費量は総トリップ長に比例する。したがって、トリップ長を最小化する土地利用によってエネルギー消費最小化が達成できる。ここでは(5.1)式に基づき業務トリップおよび通勤トリップが発生するとした時に、(5.3)式を制約条件としながら総トリップ長を最小化する問題を考える。

### 5.4.1 総トリップ長最小化型モデルの定式化

#### (1) 業務交通および通勤交通

土地利用が原点对称になることは容易にわかる。(5.1)式から地点 $x$ を通過するトリップ数は次のように求められる。

$$\begin{aligned} t_1(x) &= 2 \int_{-R}^x \int_x^R \sigma g(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 \\ &= \frac{P}{2} - \frac{2\sigma^2}{P} \left( \int_0^x g(u) du \right)^2 \end{aligned} \quad \dots (5.11)$$

$$\begin{aligned} t_2(x) &= \int_{-R}^x \int_x^R \rho f(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 + \int_x^R \int_{-R}^x \rho f(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 \\ &= \frac{P}{2} - \frac{2\sigma\rho}{P} \int_0^x f(x_1) dx_1 \int_0^x g(x_2) dx_2 \end{aligned} \quad \dots (5.12)$$

#### (2) 混雑度一定条件

上記の業務交通および通勤交通を混雑度一定条件の(5.3)式に代入して整理し、次式を得る。

$$1 - y' - z' = \frac{P}{2c} (b_1 + b_2) - \frac{2\sigma}{cP} (b_1 \sigma z + b_2 \rho y) z \quad \dots (5.13)$$

ただし、 $y$ ,  $z$ は次の通り置き換えた。

$$y(x) = \int_0^x f(u) du \quad \dots (5.14)$$

$$z(x) = \int_0^x g(u) du \quad \dots (5.15)$$

#### (3) 総トリップ長



今回のモデルでは都市内の任意の2点間でトリップが発生する。  $b_1$ ,  $b_2$  の値によっては必ずしもすべての人口が自動車で移動するとは限らないが、ここではすべてのトリップ長の合計を最小化の対象とする。業務交通、通勤交通それぞれのトリップ長の総和  $L_1$ ,  $L_2$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} L_1 &= \int_{-R}^R \int_{-R}^R |x_1 - x_2| \sigma g(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 \\ &= \frac{2\sigma^2}{P} \int_0^R \int_0^R \left\{ |x_1 - x_2| + x_1 + x_2 \right\} g(x_1) g(x_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad \dots (5.16)$$

$$\begin{aligned} L_2 &= \int_{-R}^R \int_{-R}^R |x_1 - x_2| \rho f(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 \\ &= \frac{2\sigma\rho}{P} \int_0^R \int_0^R \left\{ |x_1 - x_2| + x_1 + x_2 \right\} f(x_1) g(x_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad \dots (5.17)$$

往復を考慮すれば、総トリップ長は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} J &= 2(L_1 + L_2) \\ &= \frac{4\sigma}{P} \int_0^R \int_0^R \left\{ |x_1 - x_2| + x_1 + x_2 \right\} \left\{ \rho y'(x_1) + \sigma z'(x_1) \right\} z'(x_2) dx_1 dx_2 \\ &= \frac{8\sigma}{P} \int_0^R \left( \rho y' + \sigma z' \right) \left( K + \int_0^{x_1} z(x_2) dx_2 \right) dx_1 \end{aligned} \quad \dots (5.18)$$

ただし、

$$K = R z(R) - \int_0^R z(x_2) dx_2 \quad \dots (5.19)$$

#### (4) 問題の定式化

以上から、総トリップ長最小化型の土地利用分布は、次の評価関数および制約条件によって記述される。

$$J = 2(L_1 + L_2) \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (5.20)$$

s.t.

$$y' + z' - \frac{2\sigma}{cP} (b_1 \sigma z + b_2 \rho y) z + \frac{P}{2c} (b_1 + b_2) - 1 = 0 \quad \dots (5.21)$$

$$y(0) = 0, \quad y(R) = \frac{P}{2\rho} \quad \dots (5.22)$$

$$z(0) = 0, \quad z(R) = \frac{P}{2\sigma} \quad \dots (5.23)$$

本モデルでは都市の内部のみに交通が発生するので、都市境界には道路は必要ない。  $y(R)$ ,  $z(R)$  に

ついで境界条件は次の条件，すなわち，都市の境界において道路面積はゼロになることを意味する．

$$f(R) + g(R) = 1 \quad \dots (5.24)$$

#### 5.4.2 最適解の導出

上記の問題は変分法を用いて解くことができる．そこで，パラメータを設定し，数値的に微分方程式を解いて最適解を求める．

この問題の積分汎関数は(5.21)式を束縛条件とした次式で表わされる．ただし， $\lambda$ ， $\mu$ はラグランジュ乗数である．

$$F = \frac{8\sigma}{P} (\rho y' + \sigma z') (K + v) + \lambda \left\{ y' + z' - \frac{2\sigma}{cP} (b_1 \sigma z + b_2 \rho y) z + \frac{P}{2c} (b_1 + b_2) - 1 \right\} + \mu (v' - z) \quad \dots (5.25)$$

ただし，

$$v(x) = \int_0^x z(t) dt \quad \dots (5.26)$$

変分法を適用し，オイラー方程式から以下を得る．

$$y = \left\{ 1 - \frac{2\sigma(4c + b_1 \lambda)}{\rho(4c + b_2 \lambda)} \right\} z \quad \dots (5.27)$$

$$\lambda' = -\frac{2\sigma\rho}{P} \left( 4 + \frac{b_2}{c} \lambda \right) z \quad \dots (5.28)$$

$$\mu = \frac{8\sigma}{P} (\rho y + \sigma z) \quad \dots (5.29)$$

さらに，(5.27)式を(5.21)式に代入して $z$ に関する微分方程式を得る．(5.22)(5.23)式の境界条件を満たすように $\lambda(0)$ および人口 $P$ を設定すれば，ルンゲクッタ法を用いてこの微分方程式系を解くことができる．

#### 5.4.3 総トリップ長を最小化する最適土地利用

##### (1) 入力データ

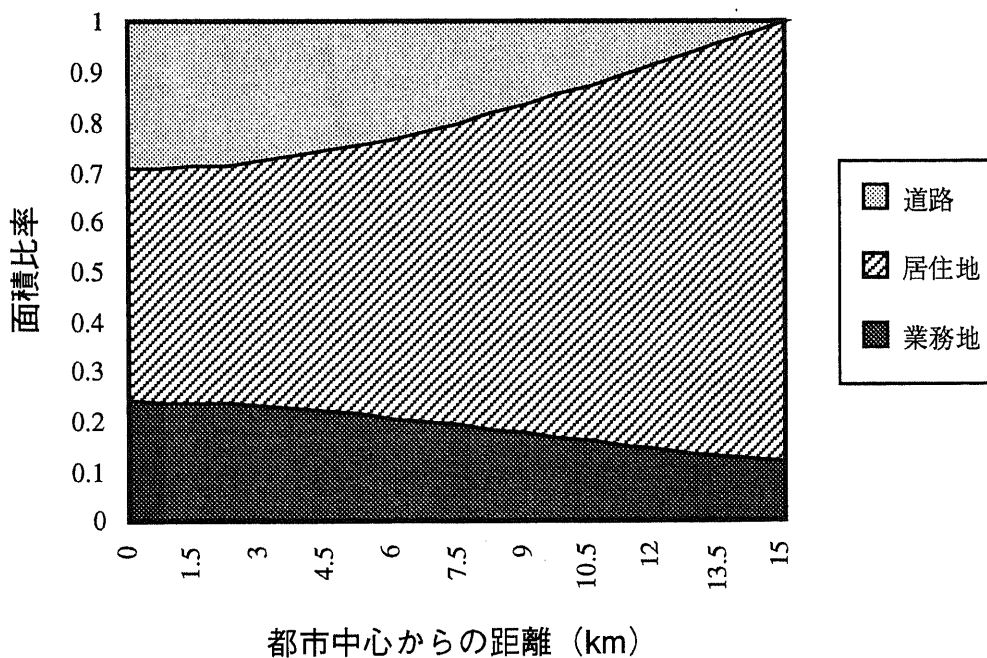
人口密度，交通に関するパラメータ値は，東京都に関するデータ[54][55][56][57]を参考に表5-1の通り設定した．

##### (2) 最適土地利用

表5-1 入力データ

パラメータ		単位	設定値
居住地人口密度		人/km <sup>2</sup>	30,000
業務地就業人口密度		人/km <sup>2</sup>	100,000
トリップ発生率	b <sub>1</sub>	1/h	0.23
	b <sub>2</sub>	1/h	0.08
道路幅員あたり交通量		台/h/m	300
都市の長さの半分		km	15

図5-4 総トリップ長を最小化する最適土地利用



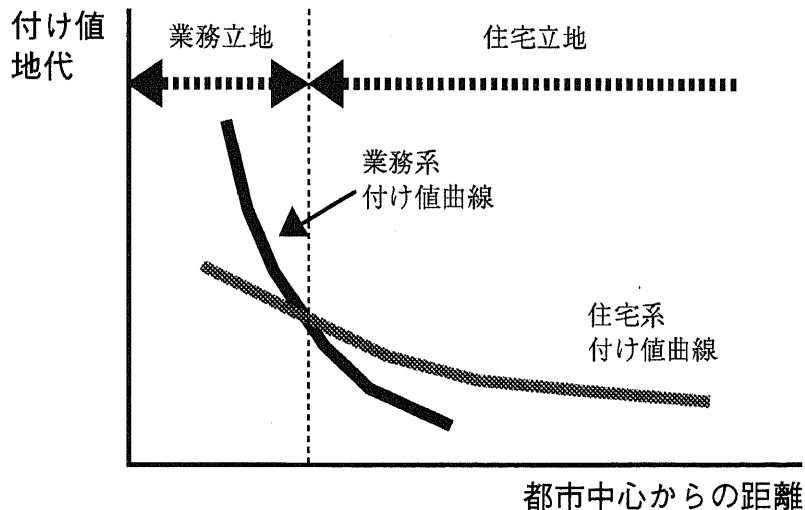
入力データに基づいて得られた最適土地利用分布を図5-4に示す。図より次の特徴が導かれる。

- 業務地は都市中心部に集まる傾向を持つ。
- 居住地は都市外縁部にいくほど比率が増加する。
- 道路は都市中心部に向かって急速に増大する。
- 都市中心部ではかなりの比率を道路にとられる。

都市中心部において道路比率が高い点は業務地のみのモデルで得られた傾向に一致し、混雑度一定

条件に起因するものである。都市の内部に業務地が集まりその周辺に居住地が広がる傾向は、基本的に現状の都市における傾向と同様である。従来の都市経済学の理論[58][59]では図5-5に示すような“付け値曲線（地価の支払い可能額、都心ほど高くなる特性を持つ）”を先見的に与え、より高額を負担できる業務系が都心部に立地し、相対的に低額しか支払えない住宅系がその外側に立地するとモデル化されている。それに対し、今回のモデルでは経済的な支払い能力は全く考慮せず、トリップ長の最小化という確定的な基準のみから土地利用を導いた。言い替えれば、今回の結果は、土地利用形成には地価など経済的要因だけでなく、トリップ長の短縮に伴う時間やエネルギーの削減などの物理的要因も基礎になっていることを示唆している。

図5-5 付け値曲線に基づく土地利用の考え方



#### 5.4.4 東京23区の土地利用との比較

現実との比較のため東京23区における土地利用を調査した。1986年の25mメッシュごとの土地利用データ[60][61]に基づき、皇居を中心とした距離別土地利用面積比率を求めた。その際、今回の都市モデルに対応するように細分されたデータを次の通り区分した。

- i) 業務地 .... 公共用地（供給処理施設を除く）、商業用地、住宅併用店舗の0.5倍
- ii) 居住地 .... 住宅用地、住宅併用店舗の0.5倍、住宅併用工場の0.5倍
- iii) 道路 .... 道路
- iv) その他 .... 工場用地、住宅併用工場の0.5倍、供給処理施設、鉄道、港湾、飛行場、農地、公園、緑地、空地

以上の用途別土地利用の距離別分布を図5-6に示す。また、“その他”および河川、海面などの水面を

除き、業務地、居住地、道路の3用途について距離別構成比率を求めたものを図5-7に示す。これは半径1km幅きざみごとの平均土地利用比率を示している。

図5-6 東京23区における距離別土地利用分布

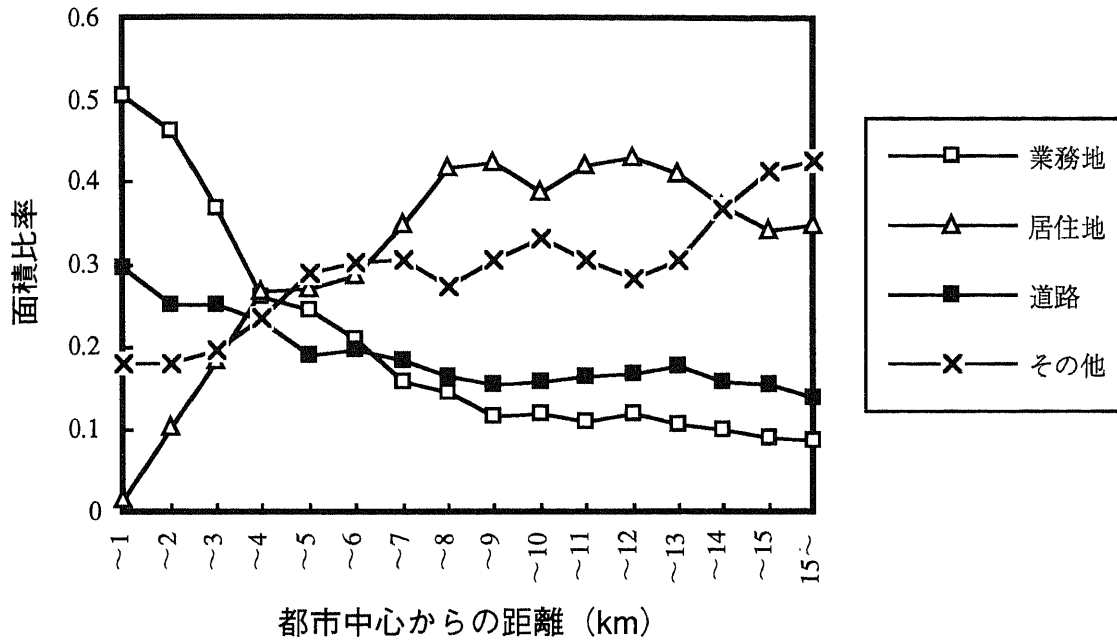
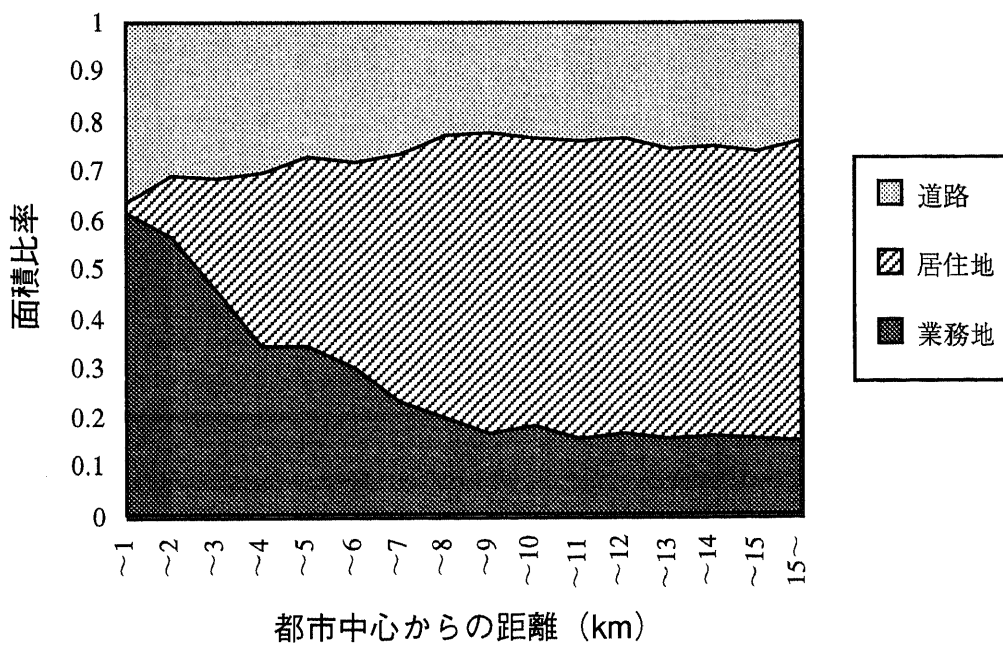


図5-7 東京23区における距離別土地利用構成



業務地、居住地分布の傾向としては、モデルの結果は現実の分布に似ていると評価できる。ただし、実際の業務地は都市中心部への集中度が激しい。道路については、モデルでは都市の境界から内側に入るにしたがって道路の比率が急速に拡大しているのに対して、実際は都心部の比率は周辺部より0.1程度高いにとどまる。混雑緩和という点から見れば、モデルの結果から都心部では周辺部より相当に道路を確保しなければならないことが定性的にいえるが、現実には交通の集中に対して道路が不足している状況がみてとれる。これらの点から、現状の土地利用は混雑度を犠牲にして、業務トリップ長の抑制に傾いていると解釈できる。混雑を緩和しながら総トリップ長を削減するためには、現状より業務地を周辺部に分散させるとともに、都市中心部の道路比率を高めることが必要となる。

## 5.5 職住近接型土地利用

### 5.5.1 職住近接型モデルの定式化

総トリップ長最小化型モデルとは異なり、職住近接型モデルの場合には規範的モデルではなく微分方程式系で表現される。

#### (1) 業務地分布

ある地点の業務地面積比率はその地点に通勤する人口によって定まる。本モデルでは通勤距離に依存して通勤交通が発生する(5.2)式を仮定するので、業務地比率は次式を満たす。

$$g(x_2) = \frac{1}{\sigma} \int_{-R}^R \rho f(x_1) \varphi(x_1, x_2) dx_1 \quad \dots (5.30)$$

居住地は都市の内部だけに立地すると仮定するが、本モデルでは通勤トリップが距離のみに依存するので、都市の境界を越えて通勤が発生する。したがって、業務地は都市の外部にも広がることになる点に注意が必要である。(5.2)および(5.30)式より、業務地人口分布は次式で求められる。

$$\sigma g(x_2) = \frac{\rho r}{2} \int_{-R}^R \exp(-r|x_1 - x_2|) f(x_1) dx_1 \quad \dots (5.31)$$

このとき、 $g(x_2)$ は $x_2$ の存在範囲によって次の3通りに分かれる。

i)  $x_2 < -R$  のとき

$$g(x_2) = \frac{\rho r}{2\sigma} e^{rx_2} \int_{-R}^R e^{-rx_1} f(x_1) dx_1 \quad \dots (5.32)$$

ii)  $-R \leq x_2 \leq R$  のとき

$$g(x_2) = \frac{\rho r}{2\sigma} \left\{ e^{-rx_2} \int_{-R}^{x_2} e^{rx_1} f(x_1) dx_1 + e^{rx_2} \int_{x_2}^R e^{-rx_1} f(x_1) dx_1 \right\} \quad \dots (5.33)$$

iii)  $R < x_2$  のとき

$$g(x_2) = \frac{\rho r}{2\sigma} e^{-rx_2} \int_{-R}^R e^{rx_1} f(x_1) dx_1 \quad \dots (5.34)$$

都市内部における(5.33)式より、 $f(x)$ と $g(x)$ の関係は次の微分方程式で記述される。

$$\frac{\sigma}{r^2} g'(x) + \rho \int_0^x f(u) du = \sigma \int_0^x g(u) du \quad \dots (5.35)$$

$$\therefore f(x) = -\frac{\sigma}{\rho} \left\{ \frac{1}{r^2} g''(x) + g(x) \right\} \quad \dots (5.36)$$

## (2) 業務交通と通勤交通

このモデルでも業務トリップは業務地人口に比例して発生するので、トリップ数は(5.11)式と同様の考え方で導かれる。一方、通勤トリップの発生は(5.2)式に従う。前述のように都市の内部とともに外部にも業務交通、通勤交通が存在するが、ここでは都市の内部 ( $-R \leq x \leq R$ ) における交通を定式化する。(5.32)~(5.34)式を用いて業務交通は次式で表現される。

$$t_1(x) = 2 \frac{\sigma^2}{P} \int_{-\infty}^x g(x_1) dx_1 \int_x^{\infty} g(x_2) dx_2 \quad \dots (5.37)$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^x g(x_1) dx_1 &= \frac{\rho}{2\sigma} \left\{ -e^{-rx} \int_{-R}^x e^{ru} f(u) du + e^{rx} \int_x^R e^{-ru} f(u) du + 2 \int_{-R}^x f(u) du \right\} \\ &= \frac{P}{2\sigma} + \frac{g'(x)}{r^2} + \frac{\rho}{\sigma} \int_0^x f(u) du \quad \dots (5.38) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_x^{\infty} g(x_1) dx_1 &= \frac{\rho}{2\sigma} \left\{ e^{-rx} \int_{-R}^x e^{ru} f(u) du - e^{rx} \int_x^R e^{-ru} f(u) du + 2 \int_x^R f(u) du \right\} \\ &= \frac{P}{2\sigma} - \frac{g'(x)}{r^2} - \frac{\rho}{\sigma} \int_0^x f(u) du \quad \dots (5.39) \end{aligned}$$

$$t_1(x) = \frac{P}{2} - \frac{2}{P} \left\{ \frac{\sigma}{r^2} g'(x) + \rho \int_0^x f(u) du \right\}^2 \quad \dots (5.40)$$

通勤交通は次式で求められる。

$$\begin{aligned} t_2(x) &= \int_x^R \int_{-R}^x \rho f(x_1) \varphi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 + \int_{-R}^x \int_x^R \rho f(x_1) \varphi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\ &= \frac{\rho}{2} \left\{ e^{rx} \int_x^R e^{-rx_1} f(x_1) dx_1 + e^{-rx} \int_{-R}^x e^{rx_1} f(x_1) dx_1 \right\} \\ &= \frac{\sigma}{r} g(x) \quad \dots (5.41) \end{aligned}$$

## (3) 混雑度一定条件

混雑度一定条件を表わす(5.3)式をこの場合に適用すれば次式が導かれる。

$$f(x) + \left( 1 + \frac{b_2 \sigma}{c r} \right) g(x) - 1 + \frac{b_1 P}{2c} - \frac{2b_1}{c P} \left\{ \frac{\sigma}{r^2} g'(x) + \rho \int_0^x f(u) du \right\}^2 = 0 \quad \dots (5.42)$$



ここで、 $\{ \}$  内および  $f(x)$  を (5.35)(5.36) 式で置き換え、 $g(x)$  に関する次の微分方程式を得る。

$$\frac{\sigma}{\rho r^2} g''(x) - \left( 1 + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{b_2 \sigma}{c r} \right) g(x) + 1 - \frac{b_1 P}{2c} + \frac{2b_1 \sigma^2}{c P} \left\{ \int_0^x g(u) du \right\}^2 = 0$$

.... (5.43)

#### (4) 問題の定式化

$g(x)$  をさらに置き換えれば、職住近接の土地利用は (5.36) 式と次式の微分方程式を解くことに帰着される。

$$w''' - k_1 w' + k_2 + k_3 w^2 = 0$$

.... (5.44)

ただし、

$$w(x) = \int_0^x g(u) du$$

.... (5.45)

$$k_1 = \left( 1 + \frac{\rho}{\sigma} \right) r^2 + \frac{b_2 \rho}{c} r$$

.... (5.46)

$$k_2 = \left( 1 - \frac{b_1 P}{2c} \right) \frac{\rho r^2}{\sigma}$$

.... (5.47)

$$k_3 = \frac{2b_1 \sigma \rho}{c P} r^2$$

.... (5.48)

このときの境界条件は次の通り。ここで、 $g(x)$  が偶関数で原点においてなめらかにつながることを考慮した。

$$w(0) = 0$$

.... (5.49)

$$w'(0) = g(0)$$

.... (5.50)

$$w''(0) = g'(0) = 0$$

.... (5.51)

さらに制約条件として次の総人口の制約および都市境界においてなめらかに業務地分布が接続する制約が付属する。これらを満足するように  $g(0)$  および  $P$  を決めれば解を得る。

$$\int_0^R f(x) dx = \frac{P}{2\rho}$$

.... (5.52)

$$g'(R) = -r g(R)$$

.... (5.53)

#### 5.5.2 距離選好に関する土地利用の感度分析

距離減衰係数  $r$  に関する感度解析を行った結果を図 5-8 に示す。ただし、都市内部のみを表示する。この外側にはさらに業務地が無制限まで広がる。また、距離に対するトリップ割合の減衰の様子を図

5.7に示した。(5.2)式のトリップ発生メカニズムによれば平均通勤距離は $1/r$ となるので、距離減衰係数は平均通勤距離の逆数という意味を持つ。計算結果から次のような特徴がまとめられる。

業務地： $r$ が小さい場合（通勤距離が長い場合）には業務地は都心部の比率が最も高く、周辺部にいくに従って緩やかに減少する。 $r$ が増加するにつれて都市外縁部の比率が増大する。分布は外縁部にピークを持ち、都市境界付近で急激に比率が減少する。また、 $r$ の増加により都市外部の業務地立地が減るため、内部の業務地面積が拡大する。

居住地：都心部から外縁部に向けて緩やかに比率が増加する。この増加傾向は $r$ が大きくなるに従って強まるとともに、都市境界の直前で比率が急増する。

道路：道路比率は都市中心部で高く、都市境界部分に近づくにつれて減少していく。 $r$ が小さいほど境界での道路比率が大きい点は、外部の業務立地が多くなるため内外間の業務交通、通勤交通が増加することに起因する。分布の概形は総トリップ長最小化型モデルと同様であり、都市中心部における交通の集中を反映している。

総トリップ長最小化型モデルの結果が現実的な都市の状況に似ていたのに対し、職住近接型モデルでは業務地が都市内にほぼ一様に広がっており、様相がかなり異なる。これは通勤形態が都市構造に大きな影響を及ぼすことを表わしている。現実には東京都心部に集中している業務機能を横浜、大宮、千葉などの周辺部に立地する都市に分担させるべく都市開発が進められているが、今回の結果には職住近接のためには都心部に集積する業務部門を広く都市外縁部に拡散させる必要があることが示唆されている。

図5-7 距離減衰係数に対する距離選好度合

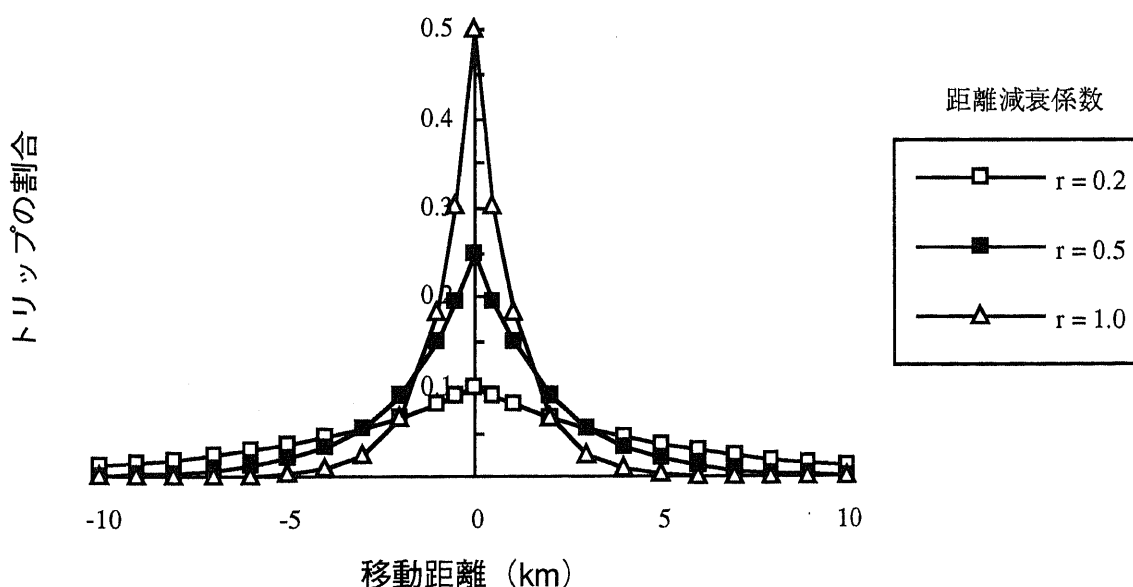
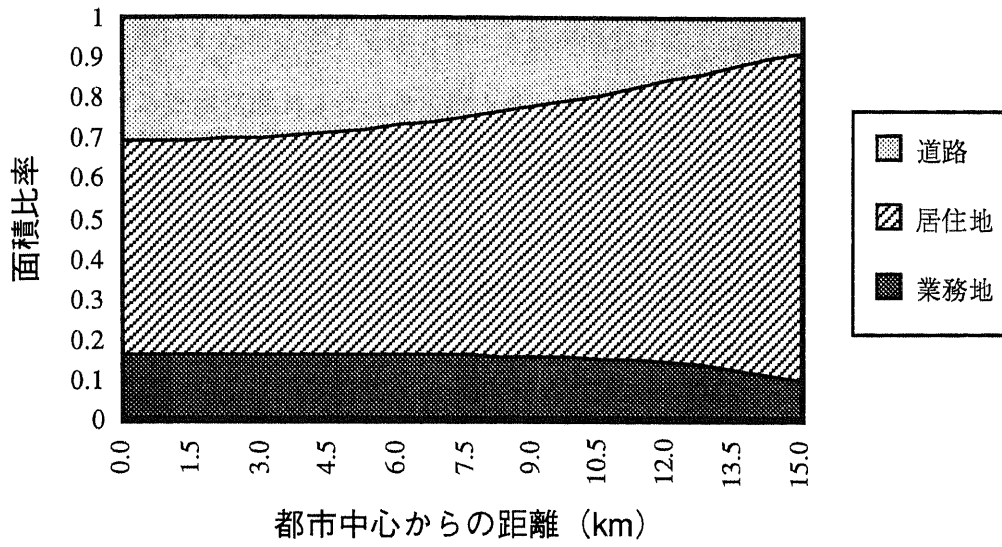
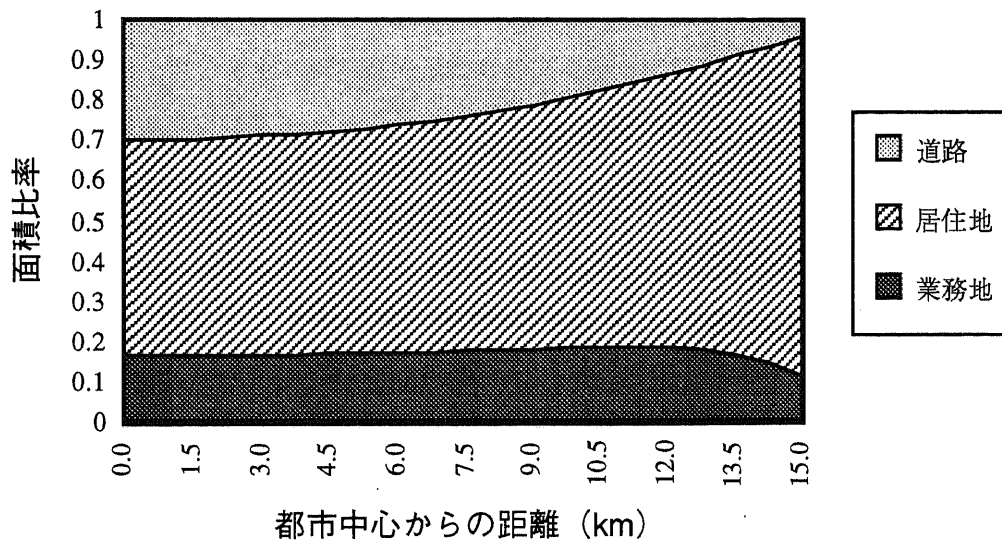


図5-8 職住近接型土地利用の距離減衰係数に関する感度分析

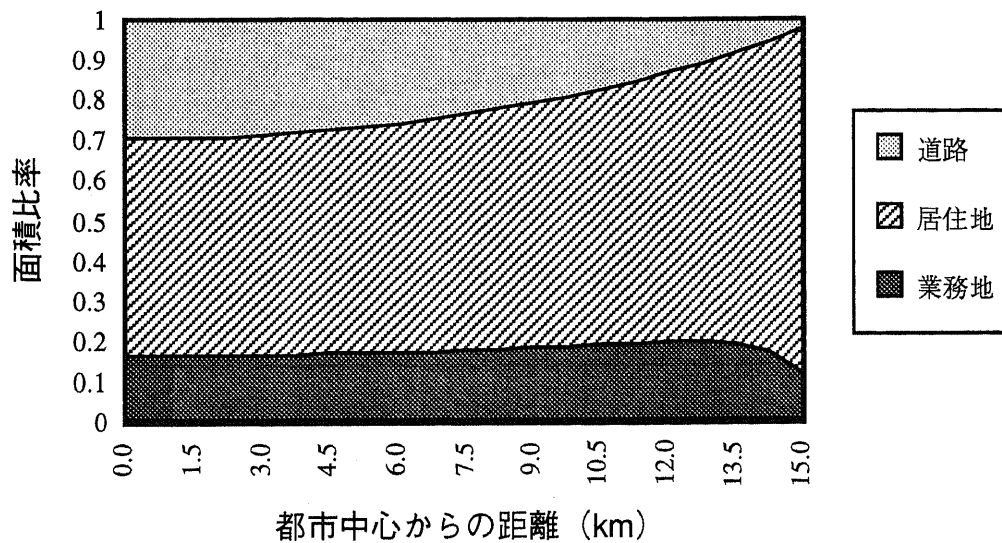
<  $r=0.2$  >



<  $r=0.5$  >



<  $r=1.0$  >

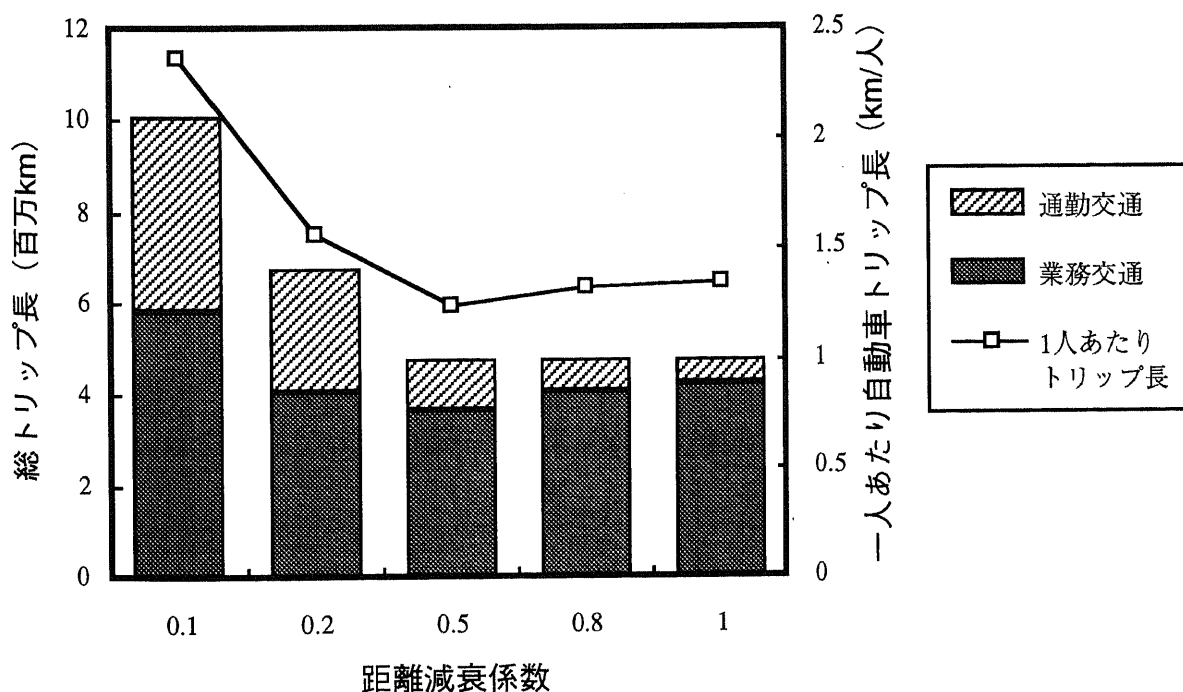


## 5.5.3 職住近接における総トリップ長の最小化

職住近接型の場合には距離減衰係数が大きくなるにつれて通勤距離は減少するが、一方で業務交通の移動距離も影響を受けるため必ずしも総トリップ長が減少するとは限らないと予想される。図5-9に距離減衰係数に対する業務交通および通勤の総トリップ長と、時間あたりの一人あたり自動車トリップ長を示す（距離減衰係数0.1と1.0では総人口が7%程度変化する）。なお、ここでの総トリップ長には自動車によらないものも含む。

図より、1人あたり自動車トリップ長は距離減衰係数が0.1から増加するにしたがって急激に減少するが、0.5で最小値をとりその後はやや増加する。総トリップ長についても同様の傾向が認められる。距離減衰係数の増大につれて業務トリップ長は通勤距離とともに減少するが、0.5で最小となった後に増加に転ずる。業務と通勤合わせて0.8以降はほぼ飽和傾向を示している。前半の減少は業務立地が都市の内側に移行してくることに起因し、後半の増加は外縁部における業務立地の比重が高まることによる。このことから、運輸エネルギー消費削減の観点からみればトリップ長を最小にする最適な距離減衰係数が存在する。言い替えれば、従来通勤者の立場から職住近接が言われてきたが、任意の業務地間で業務トリップが発生する条件の下ではやみくもに職住近接を図るよりも適当な通勤距離の選好状態をとることが望ましい。

図5-9 距離減衰係数に関する総トリップ長の感度分析



## 5.6 2次元都市モデルへの拡張

### 5.6.1 2次元円形都市におけるトリップ挙動

これまでは1次元の都市を考えてきたが、現実の都市は平面的広がりを持っているので、1次元では記述しきれない点があると思われる。特に交通の集中は、2次元の場合には四方八方からトリップが到達するため、より激しいものになると予想される。そこで、ここでは混雑度一定のモデルを2次元都市に拡張する。

ここでの都市に関して次の前提を置く。

- i) 半径 $R$ の円形をなす。
- ii) 道路として放射状道路と環状道路を考える。
- iii) 道路はいたるところに存在する。

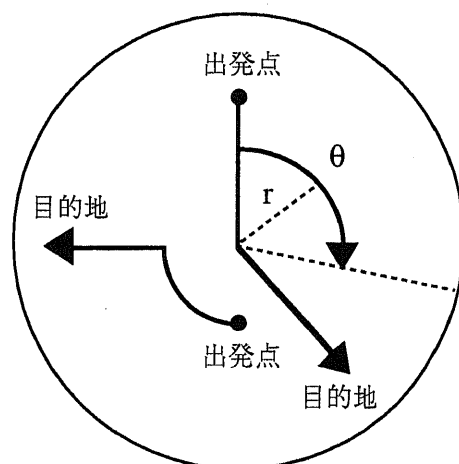
当然ながら1次元と異なり、2次元都市の場合には移動が2次的に発生する。このとき、放射状道路のみを使用し都市中心を通過する交通と放射状道路と環状道路を組み合わせた交通に分かれる。その様子を図5-10に示す。距離の短い経路が選択されると仮定すれば、環状道路が使用される条件は次で与えられる。

$$r\theta < 2r \quad \dots (5.54)$$

$$\therefore \theta < 2 \quad \dots (5.55)$$

すなわち、移動地点間が2ラジアン以内の場合には環状道路を用い、都市中心を通過しない。

図5-10 2次元円形都市におけるトリップ



### 5.6.2 2次元の混雑度一定条件

混雑度一定条件は2次元都市の場合次のように表わされる。なお、等方性から容易に予想できるように角度方向は一様な分布になるので、土地利用分布や交通トリップは半径方向のみの依存性を仮定した。

$$2\pi r \left\{ 1 - f(r) - g(r) \right\} = \frac{b}{c} \left\{ t_r(r) + 2\pi r t_c(r) \right\} \quad \dots (5.56)$$

ただし、

$r$  : 都市中心からの距離

$t_r(r)$  : 放射方向の交通トリップ

$t_c(r)$  : 円周方向の交通トリップ

### 5.6.3 2次元業務地モデルの定式化

業務地と道路のみからなる円形都市について土地利用分布を導き、1次元の場合と比較して2次元の場合の基本的特徴を調べる。

#### (1) 業務交通

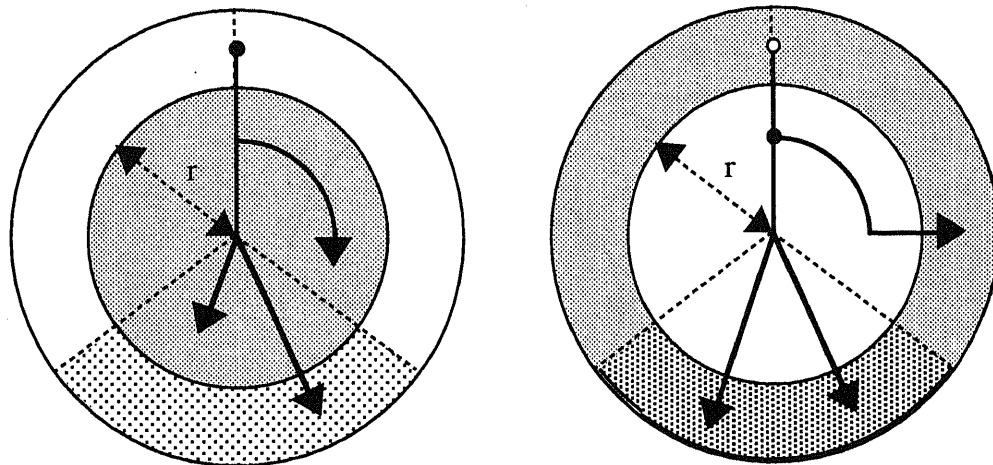
##### 1) 半径方向トリップ

都市中心から  $r$  の地点を半径方向に通過するトリップは図5-11に示す場合に発生する。

図5-11 円形都市における半径方向トリップ

<上り方向>

<下り方向>



上りの場合はハッチなしの領域からハッチした部分に移動するトリップが通過し、下りの場合はハッチなしから薄いハッチ部分への移動と薄いハッチ部分から濃いハッチの部分への移動の2通りが通過する。それぞれは次のように定式化される。

上り方向：

$$\begin{aligned}
 t_r^+(r) &= \frac{\sigma^2}{P} \int_r^R \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1+2}^{\theta_1+2\pi-2} r_1 r_2 g(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\
 &\quad + \frac{\sigma^2}{P} \int_r^R \int_0^r \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} r_1 r_2 g(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\
 &= \frac{4\pi\sigma^2}{P} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - 2 \int_r^R r_2 g(r_2) dr_2 \right\} \int_r^R r_1 g(r_1) dr_1 \\
 &\dots (5.57)
 \end{aligned}$$

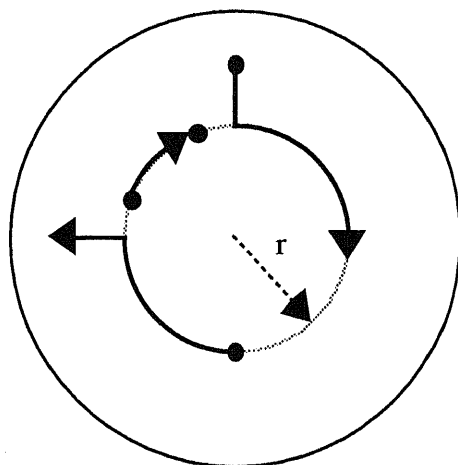
下り方向：

$$\begin{aligned}
 t_r^-(r) &= \frac{\sigma^2}{P} \int_0^r \int_r^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1+2}^{\theta_1+2\pi-2} r_1 r_2 g(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\
 &\quad + \frac{\sigma^2}{P} \int_0^r \int_r^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} r_1 r_2 g(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\
 &= \frac{4\pi\sigma^2}{P} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - 2 \int_r^R r_1 g(r_1) dr_1 \right\} \int_r^R r_2 g(r_2) dr_2 \\
 &= t_r^+(r) \\
 &\dots (5.58)
 \end{aligned}$$

## 2) 円周方向トリップ

半径 $r$ 上を移動するトリップは図5-12に示す場合である。すなわち、半径 $r$ 上に発着し外側の地点とを結ぶ移動と半径 $r$ 上の移動が該当する。

図5-12 円形都市における円周方向トリップ



ここで、角度 $\theta$ を通過する円周方向のトリップは、 $\theta$ をはさんで2ラジアン以下の移動によって生じる。したがって、 $(r, \theta)$ を通過するトリップは方向別に次式で表わされる。なお、円周上を移動するトリップについては1次元的に考える点に注意が必要である。

時計周り方向：

$$\begin{aligned} t_c^+(r) &= \frac{2\sigma^2}{P} \int_r^R \int_{\theta-2}^{\theta} \int_{\theta}^{\theta_1+2} r r_1 g(r) g(r_1) dr_1 d\theta_1 d\theta_2 + \frac{\sigma^2}{P} \int_{\theta-2}^{\theta} \int_{\theta}^{\theta_1+2} r^2 g(r)^2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &= \frac{2\sigma^2}{P} r g(r) \left\{ r g(r) + 2 \int_r^R r_1 g(r_1) dr_1 \right\} \end{aligned} \quad \dots (5.59)$$

反時計周り方向：

$$t_c^-(r) = \frac{2\sigma^2}{P} r g(r) \left\{ r g(r) + 2 \int_r^R r_1 g(r_1) dr_1 \right\} = t_c^+(r) \quad \dots (5.60)$$

等方性により、円周方向のトリップは角度 $\theta$ に依存しない。また、方向性にもよらない。

## (2) 混雑度一定条件

上記のトリップを混雑度一定条件に代入する。

$$2\pi r \{1 - g(r)\} = \frac{b_1}{c} \left\{ \left( t_r^+(r) + t_r^-(r) \right) + 2\pi r \left( t_c^+(r) + t_c^-(r) \right) \right\} \quad \dots (5.61)$$

これを整理して次を得る。

$$r z'(r)^2 - (k + 2r z(r)) z'(r) + \left( \frac{P}{2\sigma} - 2z(r) \right) z(r) - kr = 0 \quad \dots (5.62)$$

ただし、

$$z(r) = \int_r^R x g(x) dx \quad \dots (5.63)$$

$$k = \frac{cP}{4b_1\sigma^2} \quad \dots (5.64)$$

## (3) 業務地分布

(5.62)式から業務地分布は次の微分方程式を解くことによって求められる。

$$z'(r) = \frac{k}{2r} + z(r) - \frac{1}{r} \sqrt{r(r+2)z(r)^2 + r \left( k - \frac{P}{2\sigma} \right) z(r) + k \left( r^2 - \frac{k}{4} \right)} \quad \dots (5.65)$$

このとき、境界条件は次となる。

$$z(R) = 0 \quad \dots (5.66)$$



また、制約条件として総人口の制約が付属する。ただし、 $D$ は後述するロータリー半径。

$$z(D) = \int_D^R xg(x) dx = \frac{P}{2\pi\sigma} \quad \dots (5.67)$$

微分方程式を解いた上で、業務地比率は次で与えられる。

$$g(r) = -\frac{z'(r)}{r} \quad \dots (5.68)$$

#### (4) ロータリー

(5.68)式から明らかなように、都市中心では業務地比率は発散する。一方、都市中心を通過する交通はその1点のみを通るので、交通量が増えれば道路はパンクする。この状態を回避するために、都市の中心部には道路のみのロータリーを設置し、都市中心点を通る交通をロータリー全体にならして通過させるとする。

ロータリーの面積は最低必要な面積だけをとる。ロータリー内にはトリップの着地が存在しないので、すべて半径方向の交通となる。したがって、ロータリーに進入するトリップ数は前述の式を用いて次の通り求められる。

$$t_r(D) = \frac{(\pi-2)}{\pi}P \quad \dots (5.69)$$

ただし、

$D$  : ロータリー半径

それぞれのトリップがロータリーを横切ることを考慮して、最小限の面積は次で与えられる。

$$\pi D^2 = \frac{b_1}{c} t_r(D) \times 2D \quad \dots (5.70)$$

$$\therefore D = \frac{2b_1}{c\pi} t_r(D) = \frac{2b_1(\pi-2)}{c\pi^2}P \quad \dots (5.71)$$

### 5.6.4 業務地、放射状道路、環状道路の分布

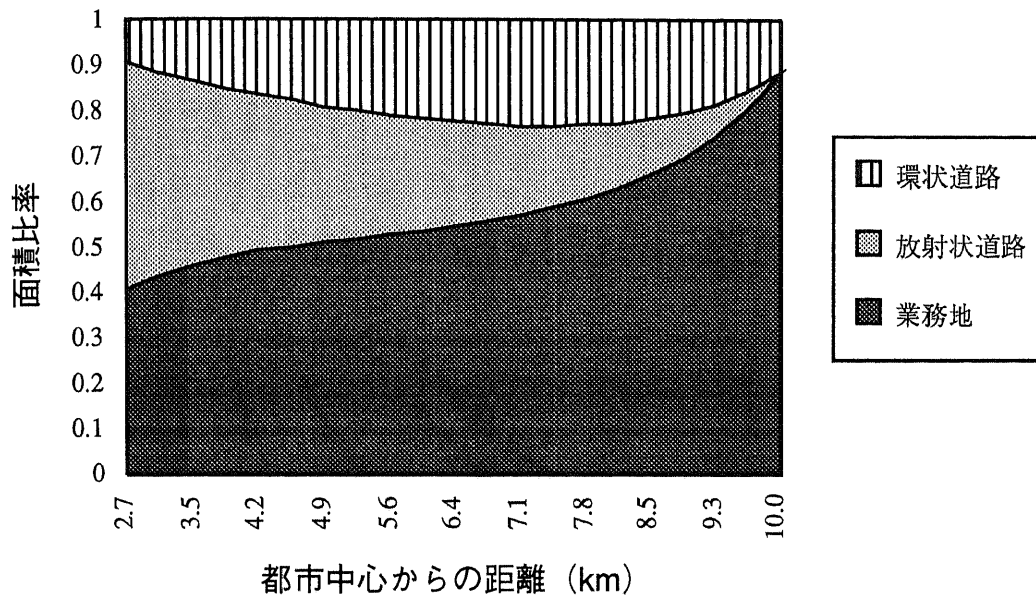
#### (1) 土地利用分布

先の微分方程式を数値的に解く。パラメータは次のように与えた。

$$\sigma = 100,000 \text{ (人/km}^2\text{)}, b_1 = 0.2 \text{ (1/h)}, c = 300 \text{ (台/h/m)}, R = 10 \text{ (km)}$$

その結果を図5-13に示す。都市辺縁部では道路の比率が小さく、都市の内部に向かって比率が増加傾向を示す。また、都市中心部では1次元モデルと異なり、放射状道路比率がさらに増加傾向を示す。都市部における交通の集中がよりの確に反映された結果と考えられる。

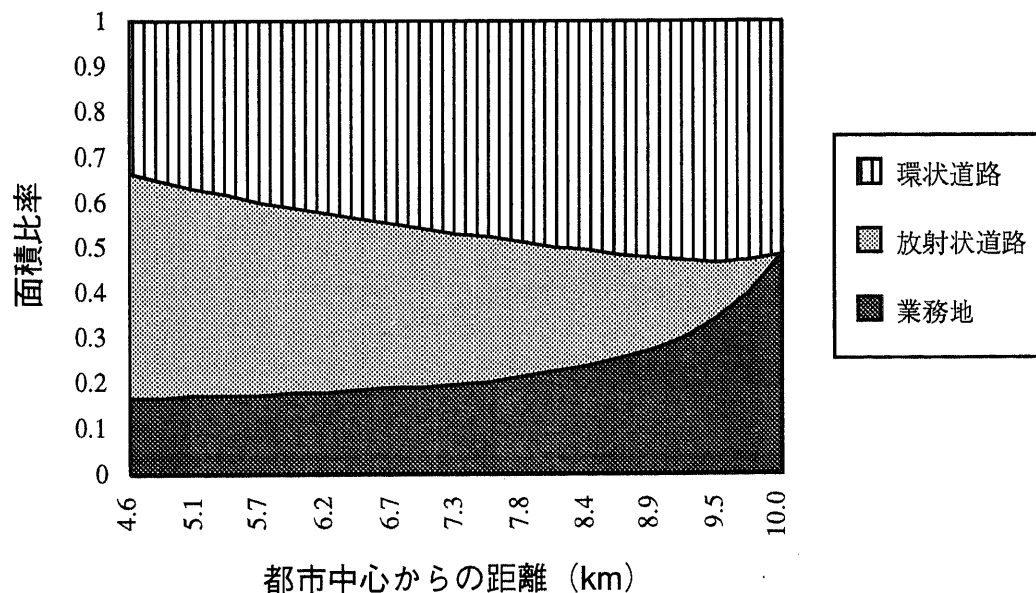
図5-13 業務地と道路からなる円形都市における土地利用分布



(2) トリップ発生率に関する感度分析

トリップ発生率 $b_1$ を0.1~1.0の間で変化させてみて、道路比率の変化を調べた。放射状、環状それぞれの道路について図5-15、図5-16に結果を示した。放射状道路が都心部で急増する傾向は $b_1$ が小さい場合の方が明確に表われる。環状道路については $b_1$ が増加するほど比率が拡大していくとともに、比率の最大値をとる地点が辺縁部に寄っていく。これは業務地が縁に追いやられることに起因する。

図5-14  $b_1=1.0$ に対する土地利用分布



$b_1=1.0$ について図5-14に土地利用分布を示したように、交通量が多くなる場合にはどの地点においてもかなりの割合を環状道路が占める。このことは、都市交通において環状道路が少なからぬ役割を持っていることを示している。実際の都市では環状道路の数が少ないので、その放射状道路にしわ寄せされ、都心部の混雑を悪化させていると考えられる。

図5-15 放射状道路比率に対するトリップ発生率の感度分析

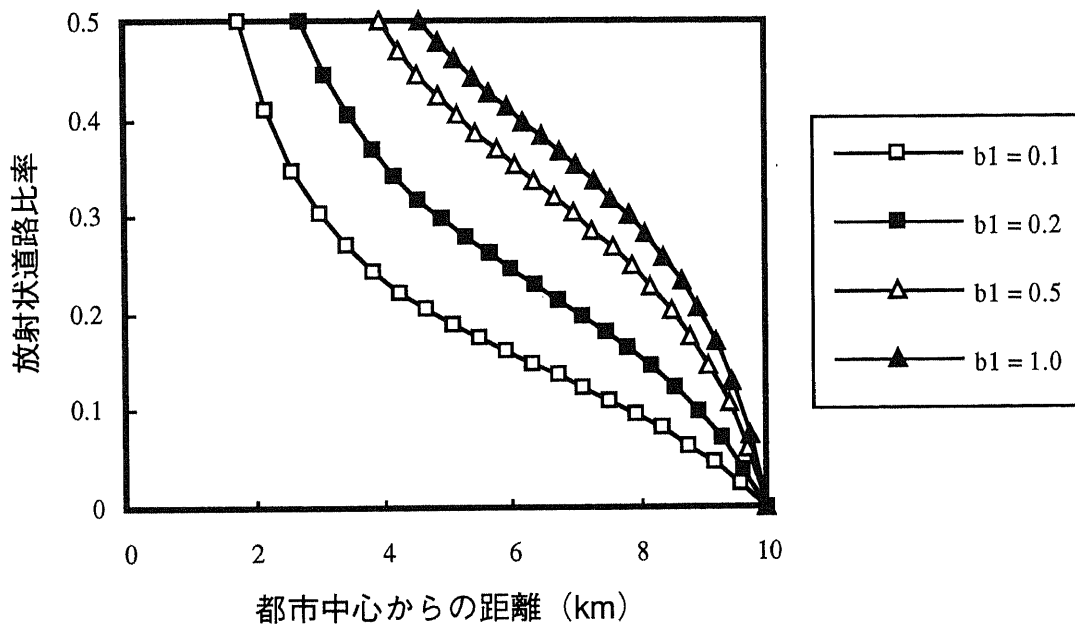
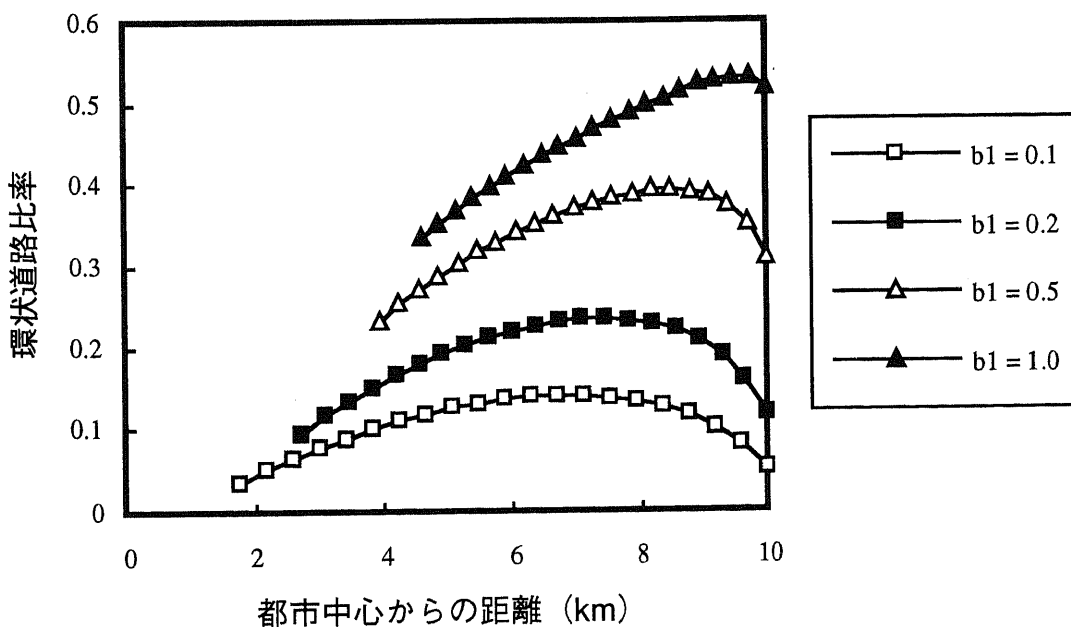


図5-16 環状道路比率に対するトリップ発生率の感度分析



## 5.7 2次元総トリップ長最小化型土地利用

### 5.7.1 2次元総トリップ長最小化型モデルの定式化

#### (1) 業務交通

業務交通に関する半径方向および円周方向のトリップは(5.57)(5.59)式で与えられる。

#### (2) 通勤交通

通勤交通も業務交通と同じ考え方に従って、次の通り定式化される。半径方向の通勤交通は業務交通とは異なり上りと下りでトリップ数が等しくならないが、円周方向は方向によらず等しい。

##### 1) 半径方向

上り方向：

$$\begin{aligned} s_r^+(r) &= \frac{\rho\sigma}{P} \int_r^R \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1+2}^{\theta_1+2\pi-2} r_1 r_2 f(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\rho\sigma}{P} \int_r^R \int_0^r \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} r_1 r_2 f(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &= \frac{4\pi\rho\sigma}{P} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - 2 \int_r^R r_2 g(r_2) dr_2 \right\} \int_r^R r_1 f(r_1) dr_1 \end{aligned} \quad \dots (5.72)$$

下り方向：

$$\begin{aligned} s_r^-(r) &= \frac{\rho\sigma}{P} \int_0^R \int_r^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1+2}^{\theta_1+2\pi-2} r_1 r_2 f(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\rho\sigma}{P} \int_0^r \int_r^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} r_1 r_2 f(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &= \frac{4\pi\rho\sigma}{P} \left\{ \frac{P}{2\rho} - 2 \int_r^R r_1 f(r_1) dr_1 \right\} \int_r^R r_2 g(r_2) dr_2 \end{aligned} \quad \dots (5.73)$$

##### 2) 円周方向

時計周り方向：

$$\begin{aligned} s_c^+(r) &= \frac{\rho\sigma}{P} \int_r^R \int_{\theta-2}^{\theta} \int_{\theta}^{\theta_1+2} r r_1 g(r) f(r_1) dr_1 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\rho\sigma}{P} \int_r^R \int_{\theta-2}^{\theta} \int_{\theta}^{\theta_1+2} r r_2 f(r) g(r_2) dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\rho\sigma}{P} \int_{\theta-2}^{\theta} \int_{\theta}^{\theta_1+2} r^2 f(r) g(r) d\theta_1 d\theta_2 \end{aligned}$$

$$= \frac{2\rho\sigma}{P} r \left\{ r f(r) g(r) + f(r) \int_r^R r_2 g(r_2) dr_2 + g(r) \int_r^R r_1 f(r_1) dr_1 \right\} \quad \dots (5.74)$$

反時計周り方向：

$$s_c^-(r) = s_c^+(r) \quad \dots (5.75)$$

### (3) 混雑度一定条件

今回の混雑度一定条件は次で表わされる。

$$2\pi r \left\{ 1 - f(r) - g(r) \right\} = \frac{1}{c} \left\{ b_1 \left( t_r(r) + 2\pi r t_c(r) \right) + b_2 \left( s_r(r) + 2\pi r s_c(r) \right) \right\} \quad \dots (5.76)$$

ただし、

$$t_r(r) = t_r^+(r) + t_r^-(r) \quad \dots (5.77)$$

$$t_c(r) = t_c^+(r) + t_c^-(r) \quad \dots (5.78)$$

$$s_r(r) = s_r^+(r) + s_r^-(r) \quad \dots (5.79)$$

$$s_c(r) = s_c^+(r) + s_c^-(r) \quad \dots (5.80)$$

ここで、次により変数の置き換えを行う。

$$y(r) = \int_r^R x f(x) dx \quad \dots (5.81)$$

$$z(r) = \int_r^R x g(x) dx \quad \dots (5.82)$$

これに基づき、各トリップは次のように書き直される。

$$t_r(r) = \frac{8\pi\sigma^2}{P} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - 2z(r) \right\} z(r) \quad \dots (5.83)$$

$$t_c(r) = -\frac{4\sigma^2}{P} \{ 2z(r) - z'(r) \} z'(r) \quad \dots (5.84)$$

$$s_r(r) = \frac{4\pi\rho\sigma}{P} \left[ \frac{P}{2} \left\{ \frac{y(r)}{\sigma} + \frac{z(r)}{P} \right\} - 4y(r) z(r) \right] \quad \dots (5.85)$$

$$s_c(r) = -\frac{4\rho\sigma}{P} \{ y(r)z'(r) + y'(r)z(r) - y'(r)z'(r) \} \quad \dots (5.86)$$

したがって、道路混雑度一定条件として次式を得る。

$$r + y' + z' = \frac{4b_1\sigma^2}{cP} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - 2z - 2rz' \right\} z + \frac{2b_2\rho\sigma}{cP} \left[ \frac{P}{2} \left\{ \frac{y}{\sigma} + \frac{z}{\rho} \right\} - 4yz - 2r\{yz' + y'z - y'z'\} \right]$$

.... (5.87)

(4) 総トリップ長

業務交通および通勤交通それぞれのトリップ長合計は次のように求められる。

業務交通：

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{\sigma^2}{P} \int_0^R \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1+2}^{\theta_1+2\pi-2} (r_1 + r_2) r_1 r_2 g(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\sigma^2}{P} \int_0^R \int_0^{r_1} \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} \left( r_1 - r_2 + r_2 |\theta_1 - \theta_2| \right) r_1 r_2 g(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\sigma^2}{P} \int_0^R \int_{r_1}^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} \left( r_1 - r_2 + r_2 |\theta_1 - \theta_2| \right) r_1 r_2 g(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &= -\frac{4\pi\sigma^2}{P} \int_0^R \left\{ (\pi-2) \int_0^R z(r_2) dr_2 + \frac{P}{2\sigma} r_1 + 2 \int_{r_1}^R z(r_2) dr_2 \right\} z'(r_1) dr_1 \end{aligned}$$

.... (5.88)

通勤交通：

$$\begin{aligned} L_2 &= \frac{\rho\sigma}{P} \int_0^R \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1+2}^{\theta_1+2\pi-2} (r_1 + r_2) r_1 r_2 f(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\rho\sigma}{P} \int_0^R \int_0^{r_1} \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} \left( r_1 - r_2 + r_2 |\theta_1 - \theta_2| \right) r_1 r_2 f(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &\quad + \frac{\rho\sigma}{P} \int_0^R \int_{r_1}^R \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1-2}^{\theta_1+2} \left( r_1 - r_2 + r_2 |\theta_1 - \theta_2| \right) r_1 r_2 f(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ &= -\frac{4\pi\rho\sigma}{P} \int_0^R \left\{ (\pi-2) \int_0^R z(r_2) dr_2 + \frac{P}{2\sigma} r_1 + 2 \int_{r_1}^R z(r_2) dr_2 \right\} y'(r_1) dr_1 \end{aligned}$$

.... (5.89)

以上から、往復を考慮して総トリップ長は次で表わされる。

$$\begin{aligned} L &= 2(L_1 + L_2) \\ &= -\frac{8\pi\sigma}{P} \int_0^R \left\{ (\pi-2) w(0) + \frac{P}{2\sigma} r_1 + 2w(r_1) \right\} \left\{ \rho y'(r_1) + \sigma z'(r_1) \right\} dr_1 \end{aligned}$$

.... (5.90)

ただし,

$$w(r) = \int_r^R z(x) dx \quad \dots (5.91)$$

### (5) 問題の定式化

2次元の円形都市における総トリップ長最小化型の土地利用は, 次の目的関数および制約条件で記述される. ただし,  $D$ はロータリー半径を示す.

$$L = 2(L_1 + L_2) \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (5.92)$$

s.t.

混雑度一定条件 (5.87)式

$$y(D) = \frac{P}{2\pi\rho}, \quad y(R) = 0 \quad \dots (5.93)$$

$$z(D) = \frac{P}{2\pi\sigma}, \quad z(R) = 0 \quad \dots (5.94)$$

$$y'(D) = 0 \quad \dots (5.95)$$

$$f'(D) = 0 \quad \dots (5.96)$$

(5.90)式より, 総トリップ長を小さくするためには $w(0)$  ( $=w(D)$ ) が小さくなる必要がある.  $z(r)$ が両端を固定された単調減少関数であることを考慮すれば,  $z(D)$ が最小値を取らなければならない. これは業務地比率 $g(D)$ が最大となることを意味するので, 居住地比率 $f(D)$ はゼロとなる. したがって, (5.95)式が成り立つ. また, その時に居住地比率がマイナス値を取らないように(5.96)式を制約条件とした. 最終的に土地利用比率は次で求められる.

$$f(r) = -\frac{y'(r)}{r} \quad \dots (5.97)$$

$$g(r) = -\frac{z'(r)}{r} \quad \dots (5.98)$$

### (6) ロータリー半径

今回の場合のロータリー半径は次式で与えられる.

$$D = \frac{2}{c\pi} \left( b_1 t_r(D) + b_2 s_r(D) \right) = \frac{2(b_1 + b_2)(\pi - 2)}{c\pi^2} P \quad \dots (5.99)$$

### 5.7.2 総トリップ長を最小化する最適土地利用

前出の問題について1次元の場合と同じく変分法によって最適解を求める。オイラー方程式から導かれる微分方程式系を数値的に解いた。なお、オイラー方程式は繁雑のため割愛する。

#### (1) 入力データ

入力データとしては表5-1の値を用いた。

#### (2) 最適土地利用

2次元に拡張した場合の総トリップ長を最小化する最適土地利用は図5-17の通り得られた。最適解の特徴は次のようにまとめられる。

- 業務地は都市中心部に集積し、外縁部に行くに従って低下する。
- 居住地は都心部での立地は少なく、外縁部で急拡大する。
- 道路は外縁部から中心部に向かって直線的に比率を拡大する。また、都市中心で半分以上を占める。
- 都心部では放射状道路の比率が急増する。環状道路は都心部のやや外側で最大比率をとる。

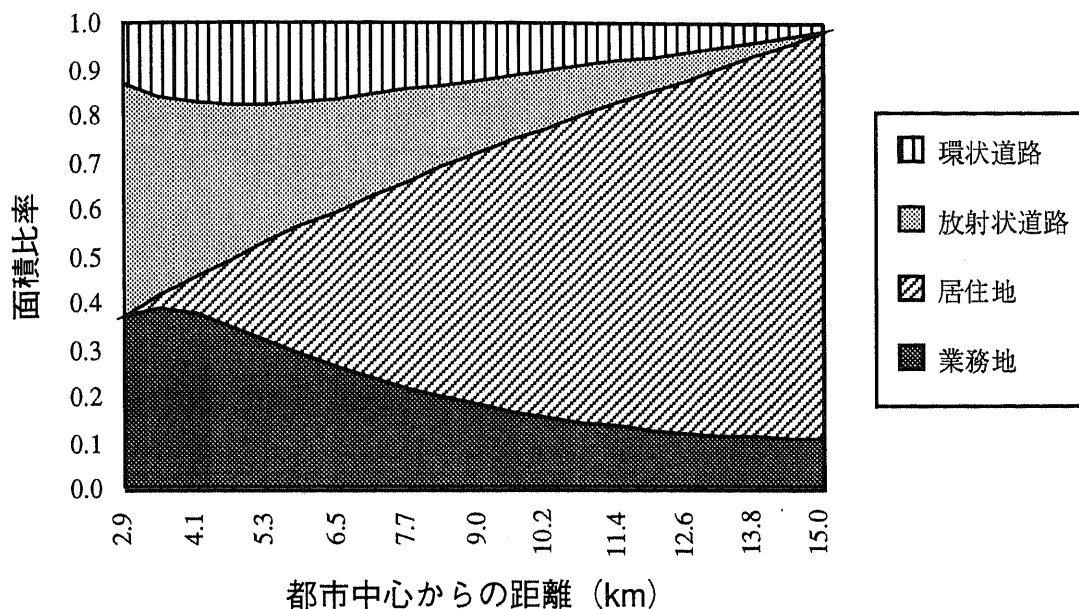
業務地の分布は都心部で高く外側に向かって裾を引く形状を示し、1次元モデルの結果よりも傾向が強く現われている。円形都市の場合は中心部の面積が相対的に小さくなるので、業務地の比率が拡大したことによると考えられる。

また、1次元の最適解に比較し、都市中心部における道路の比率が大きく高まっている。これは円形を仮定したことにより全方位から都心部に交通が流入するため、混雑のポテンシャルが強いことを反映している。この点から混雑発生に関して、2次元モデルは1次元モデルよりも的確に表現できていると考えられる。

さらに、2次元のモデルでは環状道路についての分布が得られる点が1次元よりも有用である。環状道路は都市の比較的外側ではほぼ放射状道路と同程度の比率を占める。都心部における環状道路の比率は1~2割を占めており、円周方向の交通量が頻繁に発生することを示唆している。今回のモデルでは最短経路を通過すると仮定しているので、環状道路は円滑に交通を運行させることと同時にトリップ長を抑制することに役立っていると考えられる。



図5-17 総トリップ長を最小化する最適土地利用（2次元）



### 5.7.3 東京23区の土地利用との比較

#### (1) 業務地、居住地分布

東京23区の土地利用を示した前出の図5-7と今回の結果を比較する。次に指摘するように基本的な傾向はよく一致している。

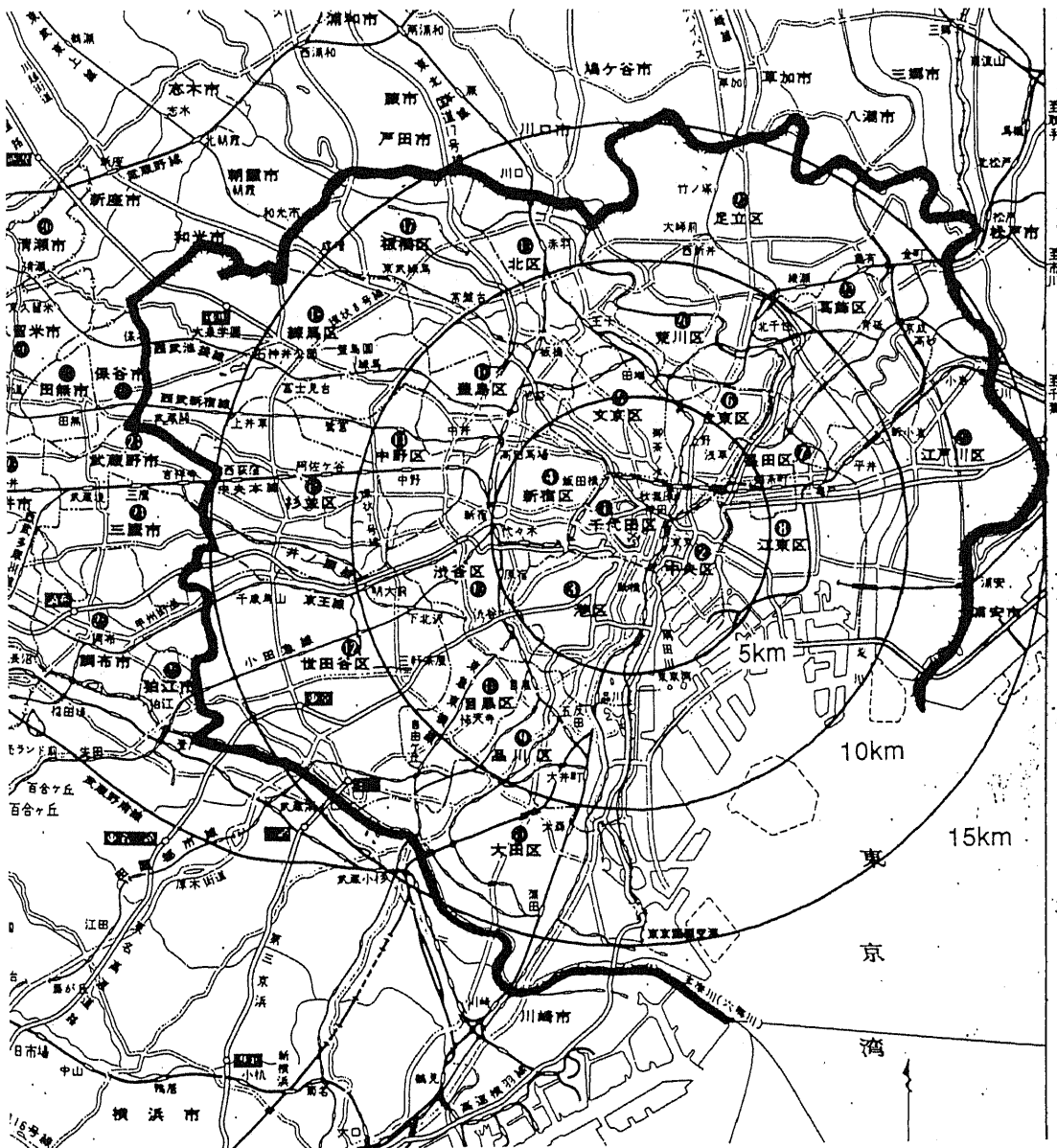
- 業務地は都心部で比率が高く、外側に向かうにつれて急速に低下する。外縁部ではほぼ一定値をとる。
- 居住地は都市中心には立地せず、都心部の外側で比率が急激に増大する。

このことから、現実の都市においても潜在的には総トリップ長を短くしようとするメカニズムが働いていると考えられる。しかしながら、経済活動的側面から業務地の都心部立地の誘因がそれ以上に強く影響しているため、モデルでは道路に当てられる面積が業務地に取られている。現実には都心部の業務系ビルの立地は道路整備にかかわらず進められており、そのことが交通混雑を誘起している。近年、道路容量を都市整備・土地利用に関する制約条件と考えた研究が報告されているように、混雑緩和問題は事象としての交通の面だけでなく、土地利用の面から整合のとれた都市整備を行う視点が不可欠になってきている。この点は本モデルの混雑度一定化と通じるものがある。交通混雑解消を制約条件ととらえれば、都心部の道路比率を高めることが、全体としての土地利用の整合を図りながら総トリップ長抑制的な都市構造を実現することに寄与すると考えられる。

## (2) 道路分布

東京23区を中心とした道路地図を図5-18に示す。外側の環状道路は都心を通過する交通を迂回させるため、内側は都心部の交通の円滑化のためと位置づけられる。しかしながら、都心部周辺には目立った環状道路が数本あるにとどまる。環状道路が少ない場合、最短経路を通過しようとするため環状道路に交通が集中すると予想されるが、現実にも混雑が発生している。モデルの土地利用分布の結果は、放射状道路のみならず適正な環状道路の整備が省エネルギー的、環境調和的な都市構造の形成のために必要なことを示唆している。

図5-18 東京23区周辺の道路地図



## 第6章

# 運輸エネルギー消費を最小化する 土地利用構造

## 第6章 運輸エネルギー消費を最小化する最適土地利用構造

### 6.1 本章の目的

第5章では土地利用の適正化により総トリップ長を最小化することを通じて運輸エネルギー消費の抑制にアプローチした。混雑度一定の制約条件を与えたことによって、総トリップ長と運輸エネルギー消費の間に比例的関係をもたせることができた点が第5章の基礎となっている。しかしながら、業務交通と通勤交通のトリップ発生が時間的に別々であることが表現できていない点が現実的ではない。また、都市内の任意の地点で混雑度が同一である条件はかなり厳しいと考えられる。一部で多少混雑が発生していても全体として燃料消費削減になっていれば、その状態は社会的に受け入れ可能な場合もありうる。

そこで、ここでは都心部における混雑を内生化し、直接的に総運輸エネルギー消費を最小化する土地利用構造を求める。それとともに、都市規模に関する最適性について、運輸エネルギー消費抑制の観点から分析を行う。

都心部における業務地区の開発が道路整備の速度を超えて進められていることが交通混雑の一因である。言い換えれば、道路の容量が業務地立地の制約条件になると解釈される。既に述べたように、道路網容量を制約とみなして地代収入を最大化するように土地利用配分を決めるモデル分析や、土地利用と道路整備の両方を同時に最適化するモデル分析がなされており、交通混雑と土地利用との関係が明確に意識され始めている。ただし、これらは既存の道路ネットワークを基礎とした部分改良的な分析であるのに対し、本研究では都市全体を最適化し全く新たな都市構造を導出する点で立場が異なる。

都市構造とエネルギー消費を扱った過去の研究の中で、林<sup>[62]</sup>は都市の人口密度と運輸エネルギー消費量の統計的關係から人口密度が低いほど運輸エネルギー消費が高いとの傾向を報告している。ただし、これは世界の様々な都市のデータに関する分析であり、一つの都市についての分析ではない。この点は条件をそろえた検討が必要である。本研究では運輸燃料消費を最小化するという意味で都市構造の性質を等しくし、人口密度を変化させた分析が可能である。

第5章のモデルは連続系であったが，ここでは離散系で定式化する．また，業務時間帯と通勤時間帯を分離し，それぞれの時間帯で業務交通，通勤交通が発生することとした．したがって，混雑状況は時間帯，都市内の位置によって異なる．第5章の分析よりも現実的な条件を与えるとともに，都市の形状が2次元円形の条件の下で，総燃料消費量を最小化する土地利用分布を導く点が本モデル分析の特徴である．

## 6.2 自動車交通のメカニズム

### 6.2.1 自動車の燃料消費特性

#### (1) 交通量と走行速度

交通工学の理論<sup>[63]</sup>によれば、交通流は以下のようにモデル化できる。まず、道路上の自動車密度と走行速度の間には、密度が高まるほど速度が低下する関係がある。この関係を線形近似すれば次式で表わされる。

$$v = v_0 \left( 1 - \frac{K}{k_j} \right) \quad \dots (6.1)$$

ただし、

$v$	： 走行速度	(km/h)
$v_0$	： 自由走行速度 (他に車がない時の速度)	(km/h)
$K$	： 自動車密度	(台/km)
$k_j$	： 渋滞密度 (速度がゼロとなる密度)	(台/km)

この時、交通量は次で与えられる。

$$Q = K v = v_0 K \left( 1 - \frac{K}{k_j} \right) \quad \dots (6.2)$$

ただし、

$Q$	： 交通量	(台/h)
-----	-------	-------

式から容易にわかるように、交通量は密度に対して放物線で描かれる。したがって、ある交通量を実現する密度には2つの解がある。1つは密度が低いが速度が高い軽負荷の場合であり、もう1つは混雑が発生し速度は低いが密度が高い重負荷の場合である。

また、道路容量 $Q_{\max}$ は最大交通量として次式で与えられる。

$$Q_{\max} = \frac{v_0 k_j}{4} \quad \dots (6.3)$$

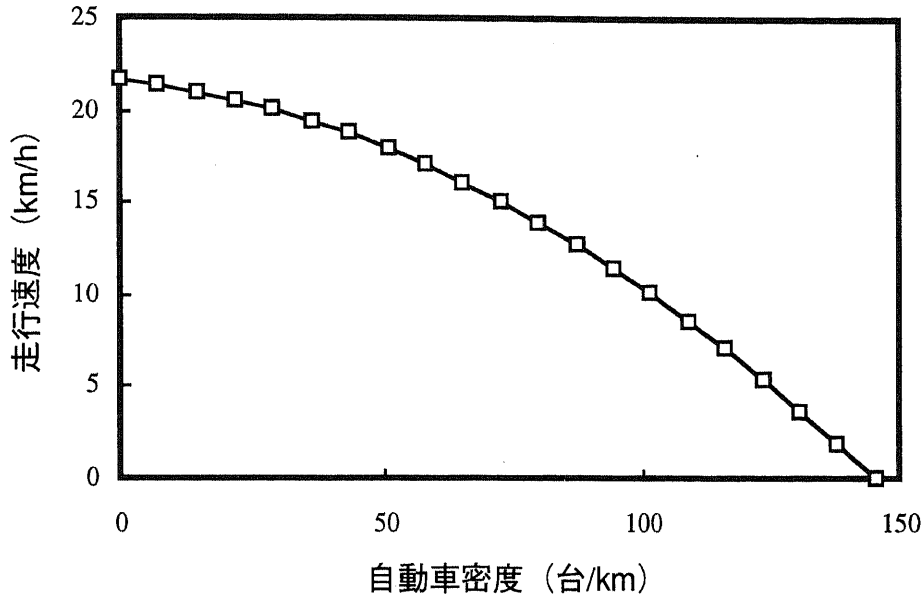
実際の交通では(6.1)式が必ずしも線形ではなく、石谷らは次の関係式を報告している<sup>[64]</sup>。

$$v(K) = -\frac{1}{1250} (K - 145.5) (K + 186) \quad \dots (6.4)$$

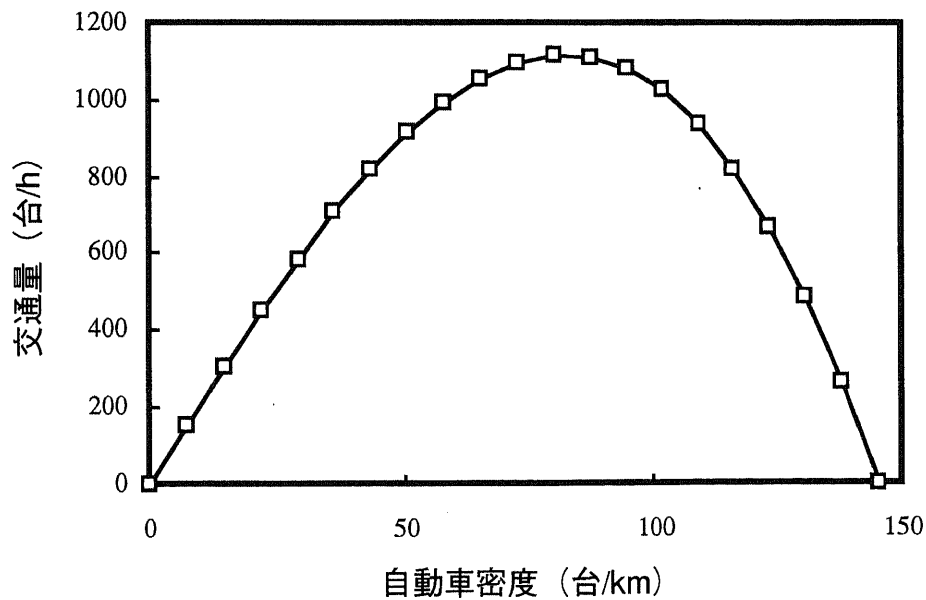
本式は2次式であるので、交通量は3次式で表現される。本式およびこれに基づいて得られた交通量の曲線を図6-1に示す。低密度時の走行速度が線形関係よりも抑制的になっている。

図6-1 自動車密度と走行速度および交通量との関係

〈走行速度vs.密度〉



〈交通量vs.密度〉



## (2) 自動車燃費

自動車の走行速度と燃費の関係はいくつか報告されているが<sup>[65][66]</sup>，ここでは次の関係式を用いる。

$$e(v) = 105.2 - 1.706 v + 0.0128 v^2 + \frac{356.9}{v} \quad \dots (6.5)$$

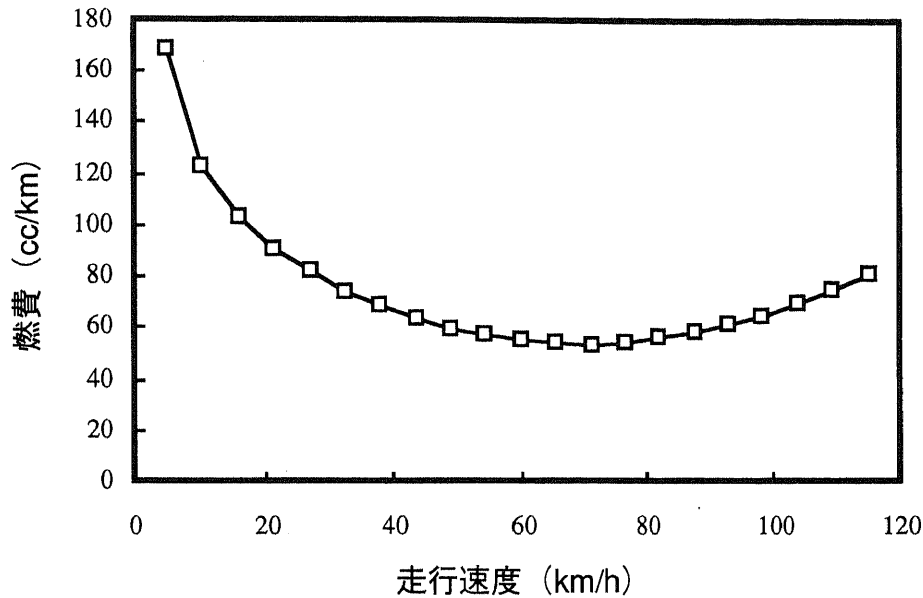
ただし，

$e$  : 乗用自動車（ガソリン車）の燃費 (cc/km)

この関係を図6-2に示す。低域では速度が上がるほど燃費が改善されていくが、70 (km/h) 付近で最

小値をとり、さらに速度が増すと逆に燃費は悪化傾向を示す。これは空気抵抗などに起因する。

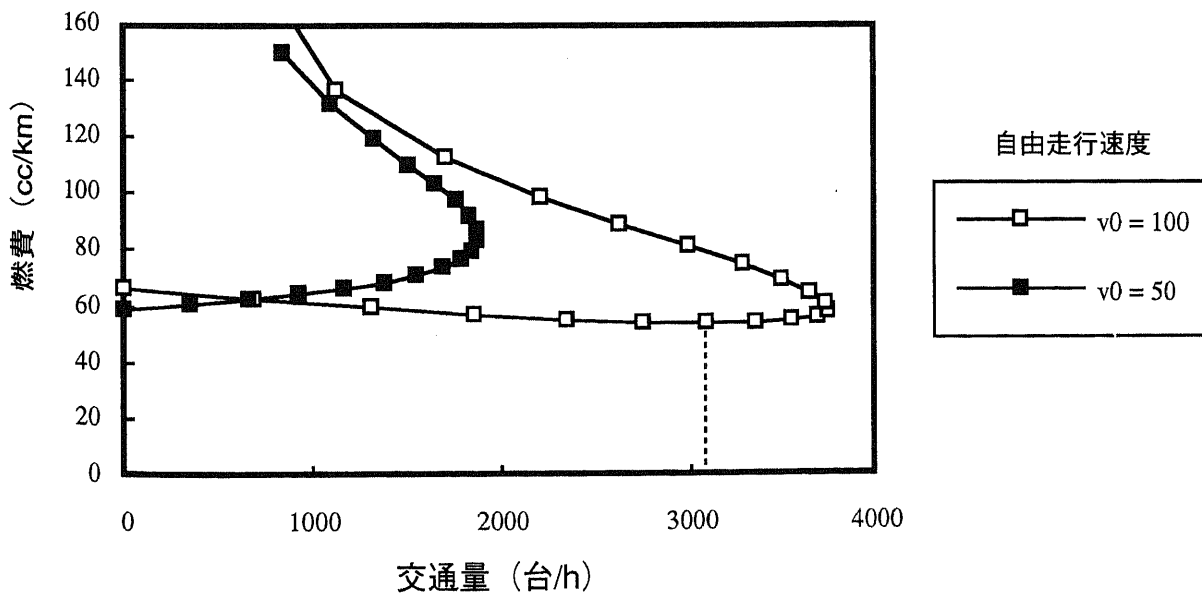
図6-2 自動車燃費と走行速度との関係



### (3) 最適交通量

走行速度と交通量の関係と走行速度と燃費の関係がわかれば、交通量と燃費の関係を導くことができる。(6.2)(6.5)式から求めたこの関係を自由走行速度をパラメータにして図6-3に示す。

図6-3 交通量と燃費との関係



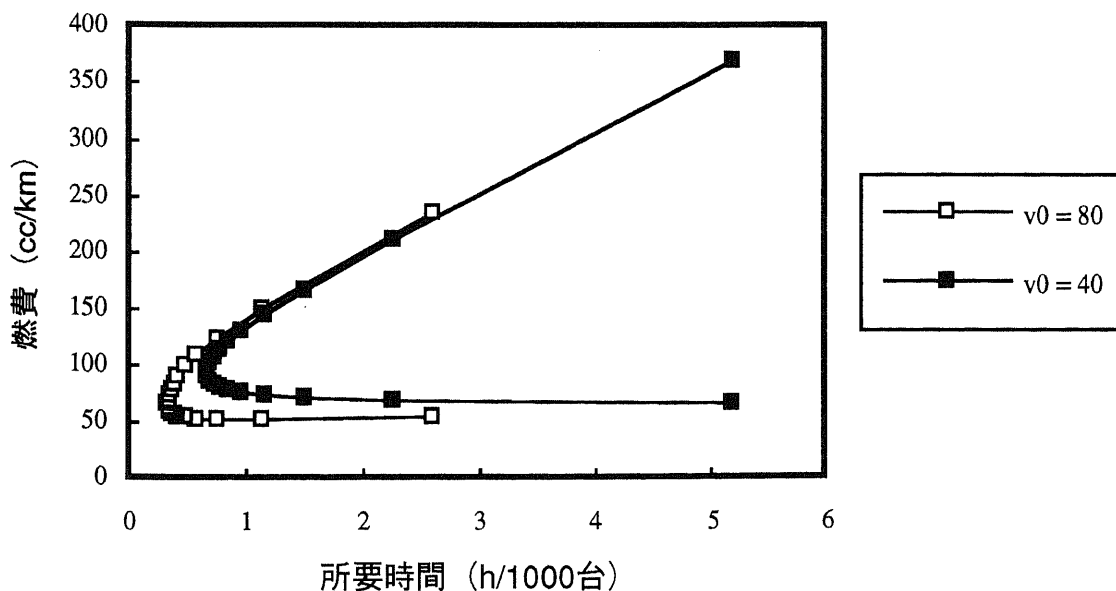


パラメータは  $v_0 = 50, 100$  (km/h),  $k_f = 150$  (台/km) と設定した。  $v_0$  が 100 (km/h) の場合には交通量 3000 (台/h) 付近に最小値を持つ。したがって、軽負荷と同時にこの程度の交通量になるように自動車密度を制御することが省エネルギーになると期待される。ただし、軽負荷時は全般に燃費がよく、最小値はそれほど厳しいものではない。一方、  $v_0$  が 50 (km/h) の場合には交通量ゼロが最小値である。これは燃費関数の最小ピークよりも低域のみが対応していることに起因する。このとき、できるだけ交通を抑制することがエネルギー削減になり、交通需要とエネルギー消費抑制が二律背反的であることを意味する。(6.4)式にみられるように都市部における自由走行速度は低く、後者の関係にある。したがって、運輸エネルギー消費抑制のためには交通状態の改善だけでは限界があり、都市構造的側面からのアプローチが必要であることが示唆される。

### 6.2.2 燃料消費と所要時間の関係

移動する立場からは直接的に燃費よりも移動時間に対する関心が強いと考えられる。エネルギー消費を抑えるために時間が大きくかかるようでは、一般に受け入れ難いことになる。先の燃費曲線を用いて所要時間と燃費との関係を示したものが図6-4である。図より、自由走行速度が比較的高い場合には燃費を最小にする所要時間が存在するが、低い場合には所要時間最大が燃費最小となる。しかし、後者の場合も燃費最小値付近はほぼフラットであるので、わずかに燃費を悪化させることで大幅な所要時間の短縮が得られる。したがって、どちらの場合でも所要時間最小と燃費最小はほぼ同時に実現することができる。

図6-4 所要時間と燃費との関係



## 6.3 2次元都市モデルの定式化

### 6.3.1 運輸エネルギー消費を最小化するモデルの考え方

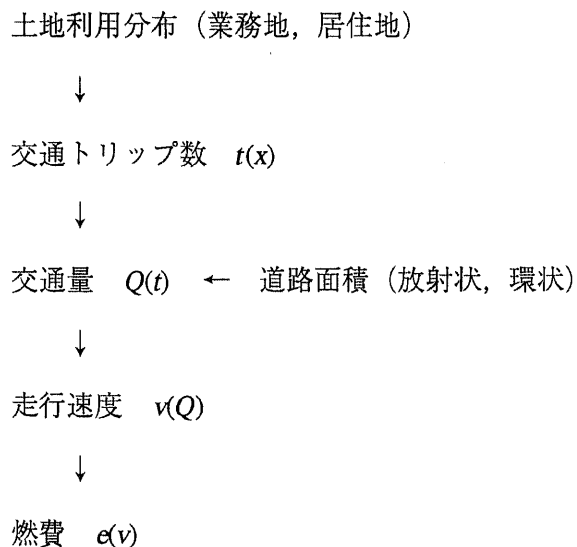
#### (1) 前提条件

本モデルでは以下の前提をおく。

- i) 2次元の円形都市を考える。
- ii) 都市は居住地，業務地，放射状道路，環状道路から成る。
- iii) 自動車交通のみを取り扱う。
- iv) 通勤交通および業務交通を考える。
- v) すべての人口が通勤する。
- vi) 通勤交通は通勤時間帯に，業務交通は業務時間帯に発生する。
- vii) いたるところに放射状道路，環状道路が存在する。
- viii) 交通は最短経路を通過する。
- ix) 交通は定常状態とする。

#### (2) 燃料消費量

本モデルでは運輸エネルギー消費量が直接評価基準となる。燃料消費は交通と燃費についての前出の関係式に基づいて次の手順によって求めることができる。



交通トリップ数については業務交通，通勤交通ともに，ある地点の発生トリップ数が着地の人口比率（業務地人口／総人口）に比例して配分される(5.1)式を仮定する。

## (3) 変数等の定義

以下で用いる記号を次のように定義する。なお、第5章における連続系の表現とは異なり、本モデルは離散系で表現する。

## 〈添え字〉

$i$	: 地点番号 (0~ $n$ )	
$n$	: 半径方向の分割数	(-)

## 〈土地利用〉

$r_i$	: 都市中心からの距離	(km)
$y_i$	: $x_i$ 地点の居住地面積比率	(-)
$z_i$	: $x_i$ 地点の業務地面積比率	(-)
$u_{ri}$	: $x_i$ 地点の放射状道路面積比率	(-)
$u_{ci}$	: $x_i$ 地点の環状道路面積比率	(-)
$\rho$	: 居住地人口密度	(人/km <sup>2</sup> )
$\sigma$	: 業務地就業人口密度	(人/km <sup>2</sup> )

## 〈交通〉

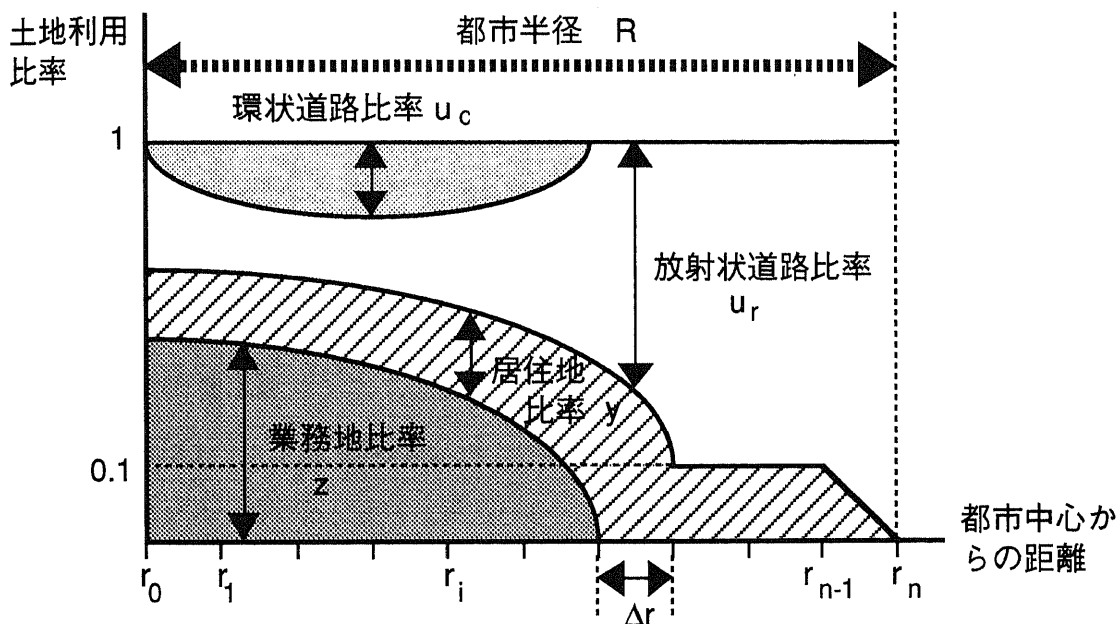
$t_{ri}$	: $x_i$ 地点の半径方向業務トリップ数	(台)
$t_{ci}$	: $x_i$ 地点の円周方向業務トリップ数	(台)
$s_{ri}^+$	: $x_i$ 地点の半径方向 (上り) 通勤トリップ数	(台)
$s_{ri}^-$	: $x_i$ 地点の半径方向 (下り) 通勤トリップ数	(台)
$s_{ci}$	: $x_i$ 地点の円周方向通勤トリップ数	(台)
$Q_{t.}$	: 業務トリップの各方向の交通量	( $\cdot$ は $r$ または $c$ ) (台/h)
$Q_{s.}$	: 通勤トリップの各方向の交通量	( $\cdot$ は $r$ または $c$ ) (台/h)
$v_{t.}$	: 業務トリップの各方向の走行速度	( $\cdot$ は $r$ または $c$ ) (km/h)
$v_{s.}$	: 通勤トリップの各方向の走行速度	( $\cdot$ は $r$ または $c$ ) (km/h)
$b_1$	: 業務トリップの時間あたり発生率	(1/h)
$b_2$	: 通勤トリップの時間あたり発生率	(1/h)
$T_1$	: 業務時間数	(h)
$T_2$	: 通勤時間数	(h)
$w$	: 道路幅員 (片側一車線)	(m)

〈パラメータ〉

$P$	: 総人口	(人)
$R$	: 都市半径	(km)
$\Delta r$	: 区間幅	(km)
$q$	: ガソリン発熱量 (8.4)	(kcal/cc)

今回のモデル化のイメージを図6-5に示す。

図6-5 円形都市モデルのイメージ



### 6.3.2 モデル定式化

#### (1) トリップ数

トリップ数は第5章の考え方と同様にして導かれる。離散化モデルとして以下の通り定式化される。ここでは一台に一人が乗車すると仮定した。等方性により業務交通の半径方向および円周方向，通勤交通の円周方向については交通の向きがどちらでもトリップ数は等しい。なお，半径方向の上りは都市中心に向かう方向，下りは都市辺縁に向かう方向としている。

##### 1) 業務交通

半径方向トリップ：

$$t_r = \frac{4\pi\sigma^2}{P} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - \Delta r \sum_{i=1}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) \right\} \frac{\Delta r}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) \quad \dots (6.6)$$

円周方向トリップ：

$$t_c = \frac{2\sigma^2}{P} r_i z_i \left\{ r_i z_i - \Delta r \sum_{i=1}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) \right\} \quad \dots (6.7)$$

2) 通勤交通

半径方向（上り）トリップ：

$$s_r^+ = \frac{4\pi\rho\sigma}{P} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - \Delta r \sum_{i=1}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) \right\} \frac{\Delta r}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (r_i y_i + r_{i+1} y_{i+1}) \quad \dots (6.8)$$

半径方向（下り）トリップ：

$$s_r^- = \frac{4\pi\rho\sigma}{P} \left\{ \frac{P}{2\sigma} - \Delta r \sum_{i=1}^{n-1} (r_i y_i + r_{i+1} y_{i+1}) \right\} \frac{\Delta r}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) \quad \dots (6.9)$$

円周方向（下り）トリップ：

$$s_c = \frac{2\rho\sigma}{P} r_i \left\{ r_i y_i z_i + y_i \frac{\Delta r}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) + z_i \frac{\Delta r}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (r_i y_i + r_{i+1} y_{i+1}) \right\} \quad \dots (6.10)$$

(2) 一車線あたり交通量

各地点の交通量はトリップ数を時間あたり一車線あたりに変換して求められる。時間あたりの変換はトリップ発生率を乗ずることによって得られる。また、車線数は道路の面積を一車線あたりの面積で除することによって得られる。

1) 業務交通

半径方向：

$$Q_{tri} = \frac{b_1 t_{ri}}{2\pi r_i u_{ri}} = \frac{b_1 w t_{ri}}{\pi r_i u_{ri}} \quad \dots (6.11)$$

円周方向：

$$Q_{tci} = \frac{b_1 t_{ci}}{2\pi r_i u_{ci}} = \frac{2b_1 w t_{ci}}{u_{ci}} \quad \dots (6.12)$$

2) 通勤交通

業務交通と全く同様にして、通勤交通についても以下のようなになる。

半径方向（上り）：

$$Q_{sri}^+ = \frac{b_2 w s_{ri}^+}{\pi r_i u_{ri}} \quad \dots (6.13)$$

半径方向（下り）：

$$Q_{sri}^- = \frac{b_2 w s_{ri}^-}{\pi r_i u_{ri}} \quad \dots (6.14)$$

円周方向：

$$Q_{sci} = \frac{2b_2 w s_{ci}}{u_{ci}} \quad \dots (6.15)$$

### (3) 走行速度

走行速度と交通量の関係は(6.1)(6.2)式から得られる。すなわち、

$$Q = K v = k_J v \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad \dots (6.16)$$

これより次式が導かれる。ただし、ここでは軽負荷交通を仮定した。

$$v = \frac{1}{2} \left( v_0 + \sqrt{v_0^2 - \frac{4v_0 Q}{k_J}} \right) \quad \dots (6.17)$$

本式を上記の各交通各方向の交通量に適用することによって、それぞれの走行速度を得る。

### (4) ロータリー

第5章のモデルと同じく、円形都市の場合は都市中心にロータリーが必要となる。ロータリーの規模は通過に必要な最低限の面積であると仮定するので、ロータリー内部では道路容量限度の交通量であるとした。第5章と同じ考え方に基づいてロータリー半径を業務交通、通勤交通それぞれについて求め、最大の方をとる。すなわち、

$$D = \text{Max}(b_1, b_2) \frac{2w}{Q_{\max}} \left( \frac{\pi-2}{\pi^2} \right) P = r_0 \quad \dots (6.18)$$

ただし、

$D$  : ロータリー半径 (km)

### 6.3.3 目的関数

今回のモデルでは一日あたり総自動車燃料消費量を目的関数とする。各地点における各交通各方向の1台あたり燃料消費量は、上記で得られた走行速度を(6.5)式の燃費関数に代入することによって求められる。これを各地点を通過する台数で和をとり、さらに都市全体で総和した総燃料消費量は次式で表わされる。なお、業務交通は2方向を考慮して2倍し、通勤交通は円周方向について2方向で2倍、

および通勤交通全体について朝夕を考慮して2倍している。また、ロータリー内部における燃料消費は無視した（総人口が一定ならば定数となる）。

$$\begin{aligned}
 E = & T_1 b_1 \Delta r \sum_{i=0}^{n-1} \left[ \{e(v_{lri}) t_{ri} + e(v_{lri+1}) t_{ri+1}\} + 2\pi \{r_i e(v_{lci}) t_{ci} + r_{i+1} e(v_{lri+1}) t_{ri+1}\} \right] \\
 & + T_2 b_2 \Delta r \sum_{i=0}^{n-1} \left[ \{e(v_{sri}^+) s_{ri}^+ + e(v_{sri+1}^+) s_{ri+1}^+\} + \{e(v_{sri}^-) s_{ri}^- + e(v_{sri+1}^-) s_{ri+1}^-\} \right. \\
 & \left. + 4\pi \{r_i e(v_{sci}) s_{ci} + r_{i+1} e(v_{sci+1}) s_{ci+1}\} \right] \quad \dots (6.19)
 \end{aligned}$$

これを熱量に換算したもの（ $q$ 倍した値）を今回の目的関数とする。すなわち、

$$J = qE \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (6.20)$$

### 6.3.4 制約条件

今回のモデルには以下の制約条件が付属する。

#### (1) 土地利用比率合計

各地点において土地利用比率の合計は1となる。したがって、

$$y_i + z_i + u_{ri} + u_{ci} = 1 \quad (i=1 \sim n) \quad \dots (6.21)$$

#### (2) 総人口

居住地および業務地のそれぞれについて、都市全体で人口を総和したものは総人口に一致しなければならない。

$$\pi \rho \Delta r \sum_{i=0}^{n-1} (r_i y_i + r_{i+1} y_{i+1}) = P \quad \dots (6.22)$$

$$\pi \sigma \Delta r \sum_{i=0}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) = P \quad \dots (6.23)$$

#### (3) 土地利用

境界を除いて都市内ではいずれの地点でも業務地または居住地としての利用がされているものとする。道路のみが立地するのは現実的に不自然であるので、それが発生するのを防ぐ。ここでは業務地比率と居住地比率の和の下限値を0.1と設定した。

$$y_i + z_i \geq 0.1 \quad \dots (6.24)$$

(4) 交通量

各地点での交通量は道路容量を下回らなければならない。したがって、

$$Q \leq \frac{v_0 k_J}{4} = Q_{\max} \quad \dots (6.25)$$

(5) 都市境界

都市の境界には業務地、居住地とも立地しないものとする。

$$y_n = z_n = 0 \quad \dots (6.26)$$



## 6.4 燃料消費を最小化する最適土地利用

### 6.4.1 最適土地利用分布

#### (1) 入力データ

モデルのパラメータは表6-1に示す通り設定した。人口密度およびトリップ発生率は第5章の数値と同様に設定し、自由走行速度および渋滞密度は前出の(6.4)式を参考にした。

表6-1 パラメータ設定（基準ケース）

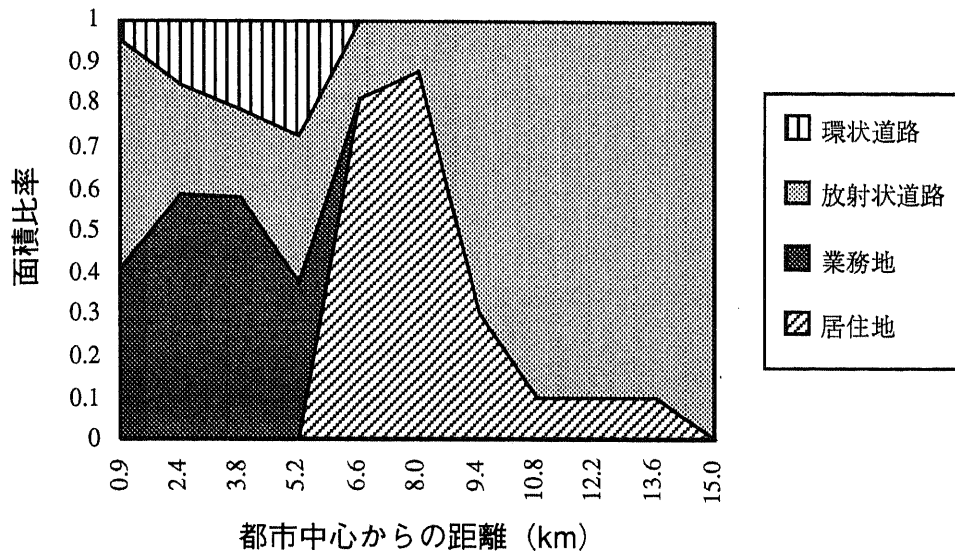
パラメータ		単位	設定値
総人口		人	5,000,000
人口密度	居住地	人/km <sup>2</sup>	30,000
	業務地	人/km <sup>2</sup>	100,000
トリップ発生率	b <sub>1</sub>	1/h	0.23
	b <sub>2</sub>	1/h	0.16
業務時間数		h	8
通勤時間数（朝夕各）		h	2
自由走行速度		km/h	30
道路幅員（一車線）		m	4
渋滞密度		台/km	150
都市半径		km	15

#### (2) 最適土地利用

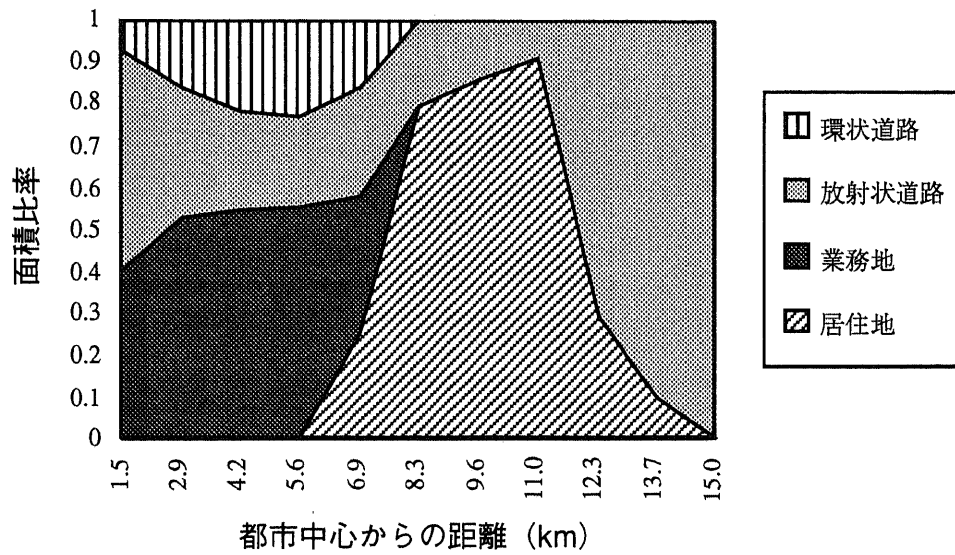
上記のパラメータに対し、総人口を変動させて最適土地利用を求めた結果を図6-6に示す。基本的な特徴として、業務地が都市中心に、居住地がその外側に立地する傾向がはっきりと表われている。この点は実際の都市構造と類似している。人口が増加するにつれて業務地が外側に広がり、そのため居住地はさらに都市辺縁部にシフトする。都市の境界で張り付くと、今度は居住地が都市の内側へ、業務地が外側へ立地し始める。これは通勤交通は都市中心部において道路に余裕があるため、その分を利用するためと解釈できる。1170万人では都市中心にも若干居住地が立地する一方、業務地は中域までかなり広がる。これ以上の人口では道路容量の制約が満たされず、解が求められない。

図6-6 運輸エネルギー消費を最小化する最適土地利用

〈人口500万人〉



〈人口800万人〉



〈人口1000万人〉

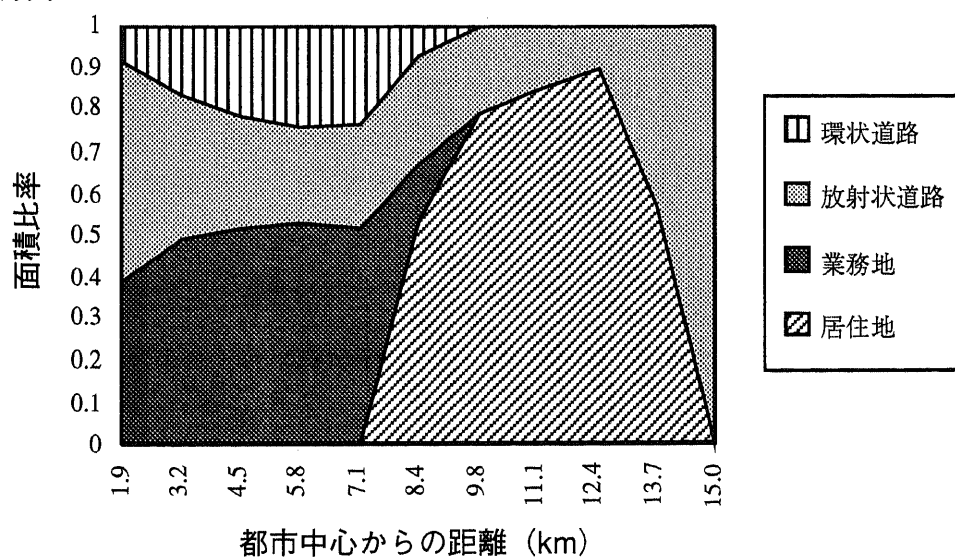
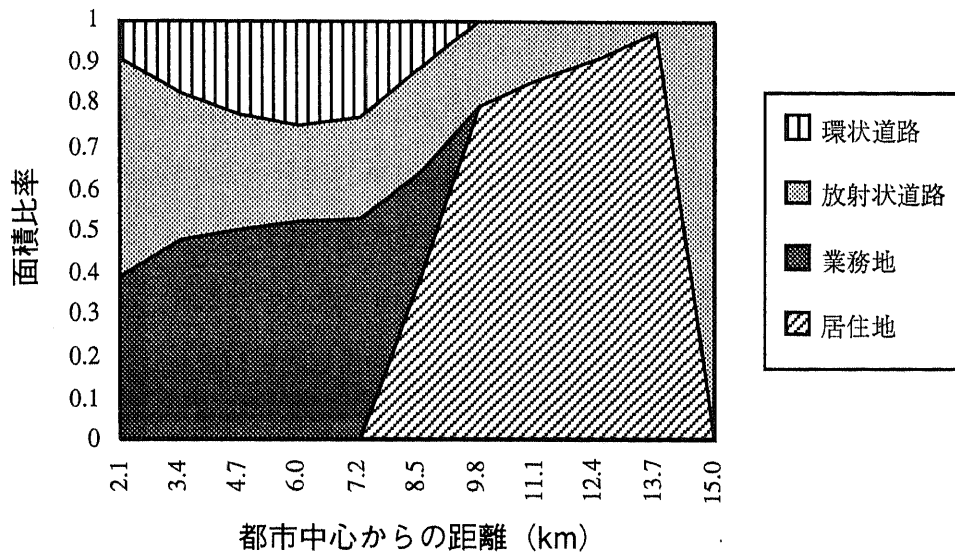
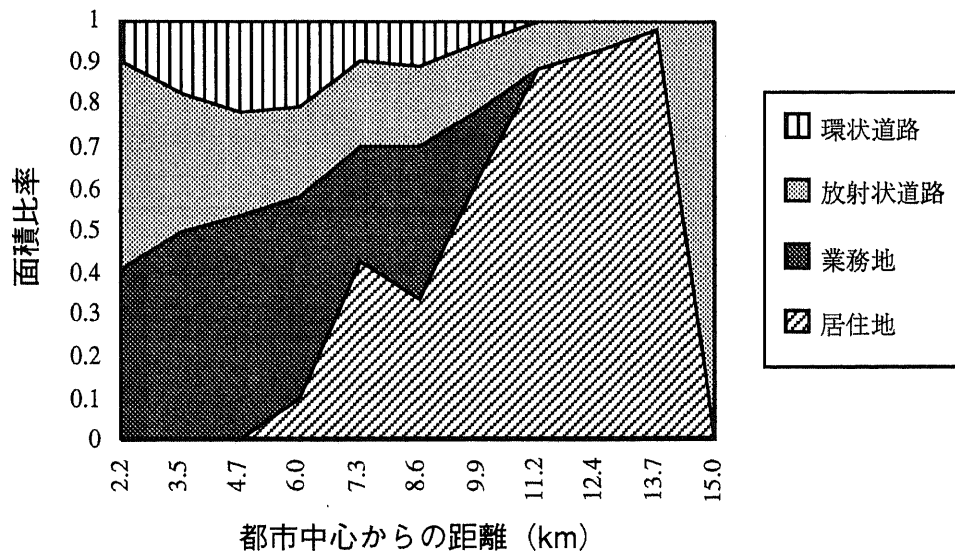


図6-6 運輸エネルギー消費を最小化する最適土地利用（つづき）

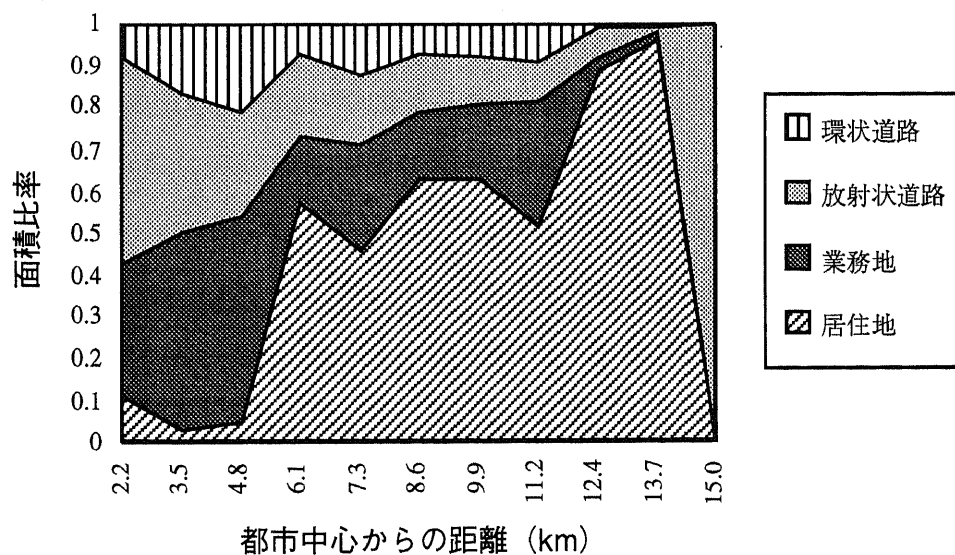
〈人口1100万人〉



〈人口1150百万人〉



〈人口1170百万人〉



道路分布については次の特徴が認められる。

- 道路比率（放射状＋環状）は都市の辺縁から中心に向けてほぼ直線的に増加する。
- 都市中心部で放射状道路の比率が急拡大する。
- 環状道路比率のピークは中心部のやや外側に位置する。
- 都市中心部は半分以上が道路に占められる。

以上の点は都市中心部にいくほど混雑が激しくなることを反映している。放射状道路や環状道路の分布やそれぞれを合計した道路比率の傾向は、第5章の混雑度一定の都市モデルによる結果と基本的に一致している。これは交通量は道路容量の上限で抑えられるので、混雑が激しくなると近似的に混雑度一定状態に近づくためと解釈できる。

業務地、居住地の分布から、道路容量に余裕がある場合にはそれぞれが明確に分離され、余裕がない場合（総人口が大きい場合）には混在することがわかる。前者は業務交通による燃料消費の比重が高く、業務交通のトリップ長の抑制を通じて燃料消費の削減を実現していることを示唆している。後者では業務地が外側に、居住地が内側に広がることによって、上りに比べてすいている通勤時の放射状道路の下り路線が活用されている。図6-7に総人口1000万人および1170万人における放射状道路の通勤交通の交通量を道路容量に対する比率として示した。1000万人の場合には上りは全般に交通量が多く下りは都心部のみが交通量が多い。1170万人では都市辺縁部において上り路線は道路容量一杯に交通量が張り付き、下り路線の交通量が増加していることが認められる。このとき、業務交通の都心部放射状道路と環状道路についても道路容量一杯になっている。また、混雑が限度に近い場合には近似的に混雑度一定状態になると考えれば、混雑度一定モデルの結果である“業務地が外側に向かって裾を引くような分布”になっているとみることもできる。

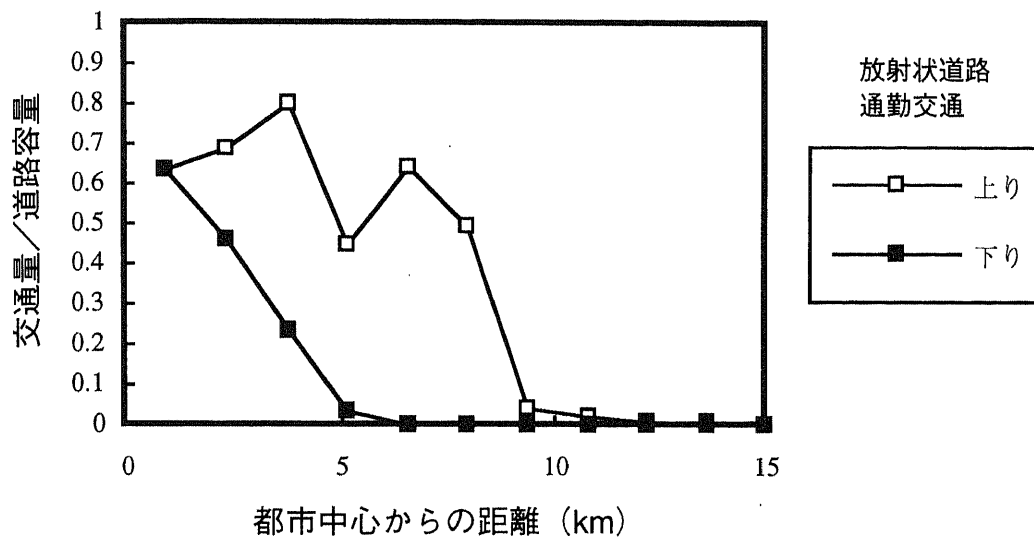
#### 6.4.2 最適都市規模

##### (1) 総人口に関する一人あたり燃料消費量の感度分析

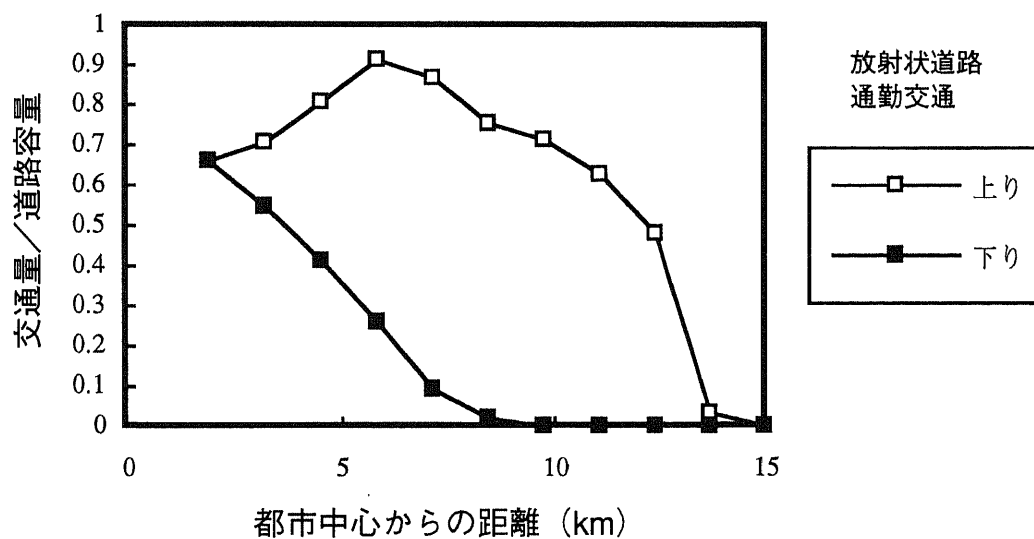
総人口に対する一人あたり燃料消費量のプロットを図6-8に示す。総人口300万人から1100万人までの間は直線的に燃料消費量が増大し、さらに人口が増えると燃料消費量は急激に増加する。都市の大きさ（半径）は変わらないので、人口増によって混雑が引き起こされる様子が表われている。特に限界的な人口では、前述のとおり業務交通、通勤交通のどちらにおいても放射状道路、環状道路ともにほとんど道路容量一杯であり、限界値直前での急上昇は突然混雑が都市全体に広がることを示している。

図6-7 放射状道路における方向別通勤交通量

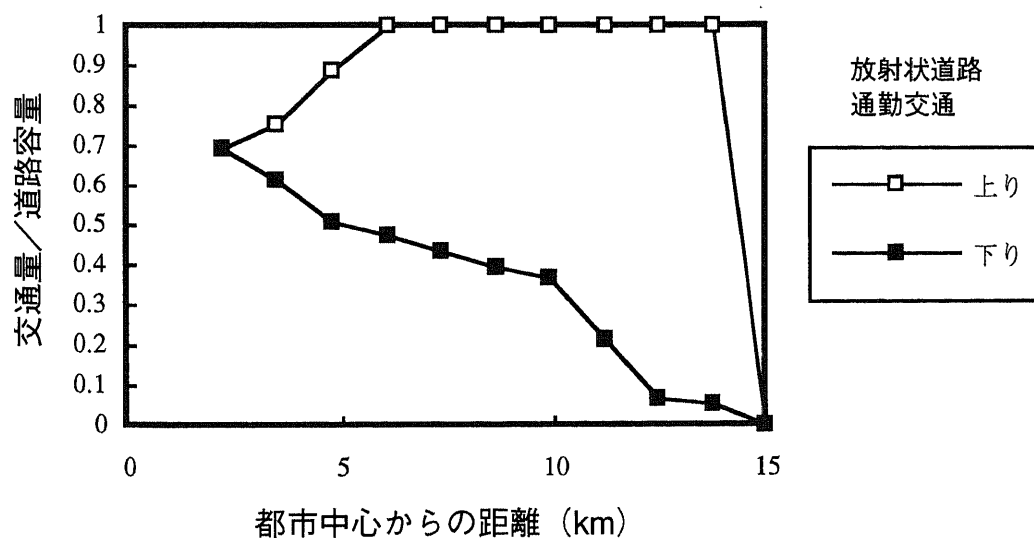
〈人口500万人〉



〈人口1000万人〉



〈人口1170万人〉



(2) 都市半径に関する一人あたり燃料消費量の感度分析

さらに、人口を一定とし、都市の半径を変化させて一人あたり燃料消費量の感度分析を行った。その結果を図6-9に示す。なお、横軸は平均人口密度（総人口／都市面積）をとった。これより、次のことが指摘できる。

- 人口密度には一人あたり燃料消費量を最小にする最適値がある。

図6-8 総人口と一人あたり運輸エネルギー消費の関係

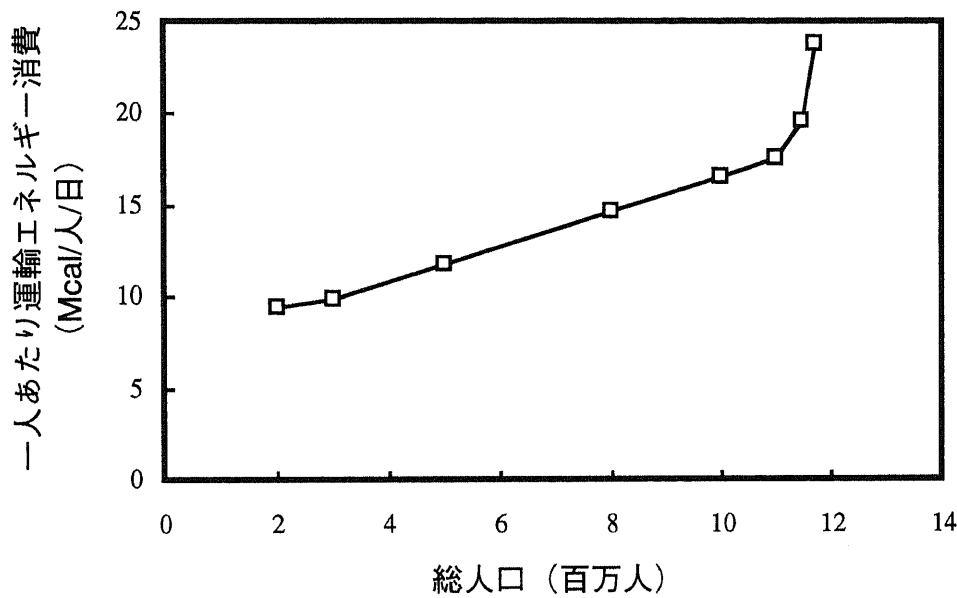
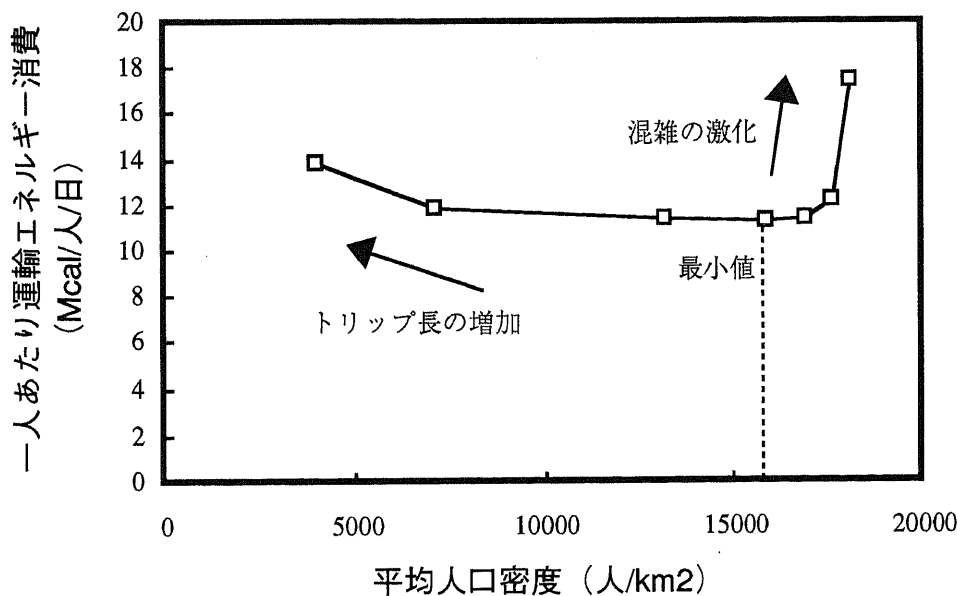


図6-9 人口密度と一人あたり運輸エネルギー消費の関係



- 人口密度が低くなるとトリップ長が増加するため燃料消費量は増える。
- 人口密度が高くなると混雑が激化して急激に燃料消費が増大する。

すなわち、人口が与えられたとき、運輸エネルギー消費の観点から最適な人口密度(または都市半径)が存在する。今回の結果からみる限り、最小値付近は平たい形状をしており、人口密度が小さい方向(都市半径が大きくなる方向)に多少はずれてもほぼ最適な特性を保持できると考えられる。

参考のため最大、最適、最小人口密度における土地利用分布を図6-10に示した。業務地と居住地がちょうど分離される程度の分布が望ましいといえる。

### 6.4.3 東京23区の土地利用との比較

東京23区の距離別土地利用分布は図5-7に示されている。実際の土地利用は次の特徴を有する。

- 業務地が中心に集積し、外側に向かって裾を引くように分布する。
- 居住地は都市中心部にはほとんど立地せず、外縁にいくほど比率が増加する。
- 道路はほぼ一様に分布するが、都市中心部の比率がやや大きい。

一方、今回のモデルの結果は業務地と居住地の立地が比較的明確に分かれることを示しており、現実比べてやや極端な傾向を持つ。しかしながら、現状の道路では混雑が慢性化しており常時混んでいることを考えれば、東京の現状は立地が分離される状態よりもより人口規模が大きい状態、すなわち、業務地分布が都市中心部の外側にも広がっている状態に近いとみなすこともできる。その場合にはモデルの結果は現状の傾向を含んでいると評価できる。

道路比率については、モデルの方が現実よりも大きな比率を示している。つまり、ある程度の混雑を許容する場合でも燃料消費抑制のためには都市中心部においてかなり大きな道路比率を確保せざるをえない。現状の道路比率はもっと小さい値であるので、より混雑は激しいことが示唆される。

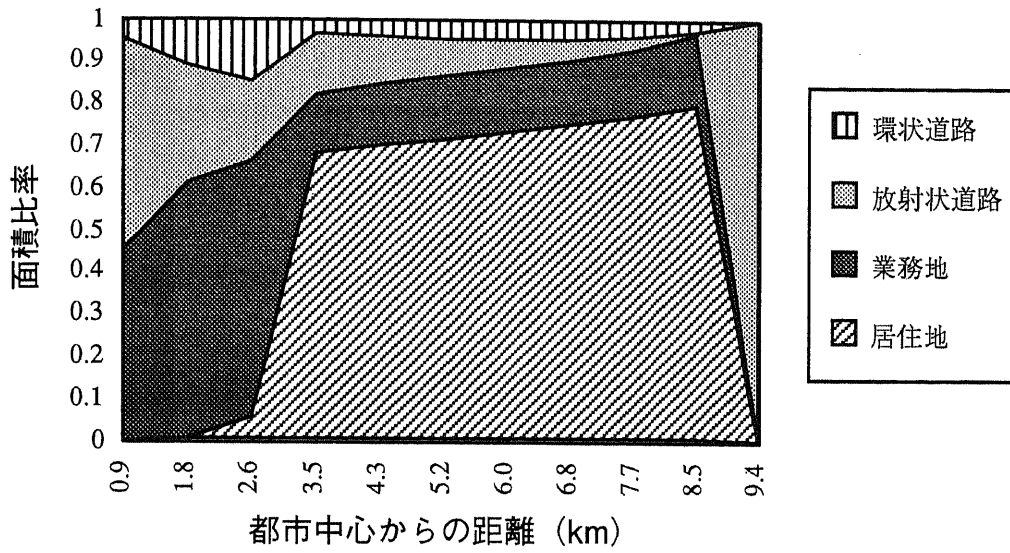
以上から、次の点で東京の現状は運輸エネルギー抑制型の都市構造にはなっていないと考えられる。

- 人口が適正規模より多いと思われる。
- 道路比率が少ない。

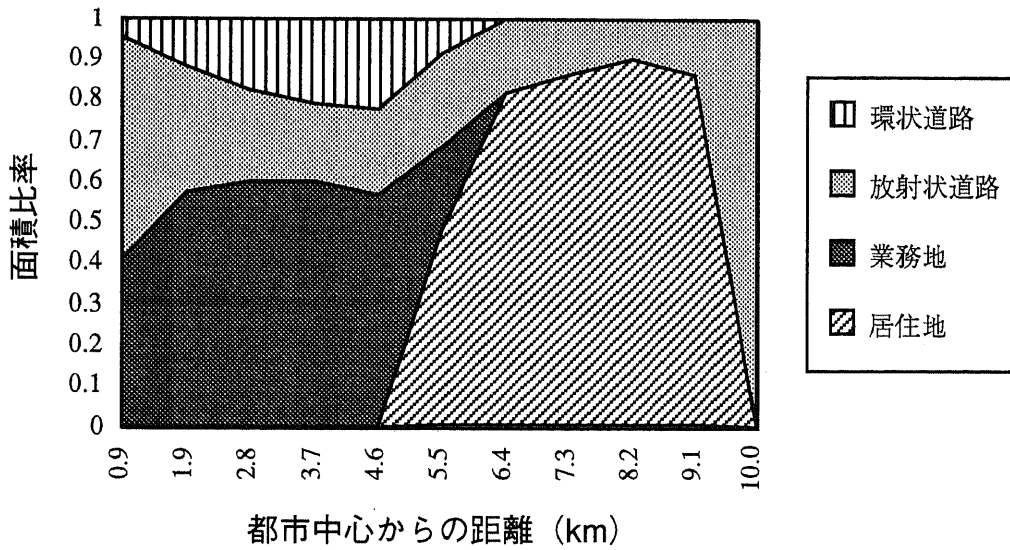
東京の現状をみると、人口が増加し人口密度が上昇するのを、東京都心部の領域を拡大することによって抑え、運輸燃料消費が急増するポイントを回避してきたと解釈できる(鉄道に負担を負わせたことも含まれる)。都市域の拡大は一人あたり燃料消費の点では悪化の方向性にある。したがって、巨大な一つの都市が肥大化するのではなく、ある程度の制御された規模の都市を複数並列させていくことの優位性が、運輸エネルギー消費抑制の観点からも支持される。また、運輸エネルギー抑制のためには、端的に都心部の道路を増やすことが将来の大きな課題と位置づけられる。

図6-10 人口密度に対する運輸エネルギー消費を最小化する最適土地利用

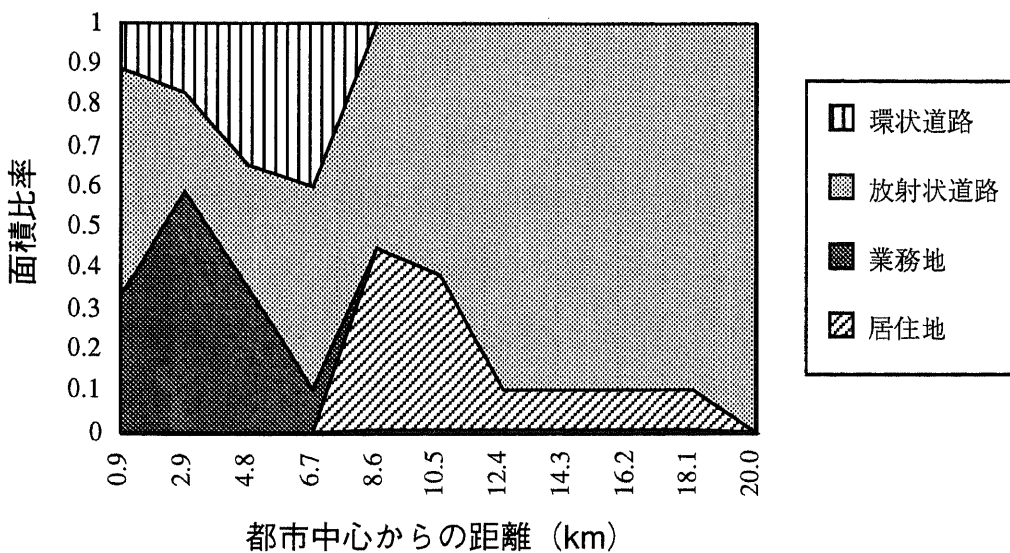
〈約18,000人/km<sup>2</sup>〉



〈約16,000人/km<sup>2</sup>〉



〈約4,000人/km<sup>2</sup>〉





## 6.5 本章のまとめ

### 6.5.1 結果のまとめ

本章では運輸エネルギー消費を最小にする土地利用構造を、混雑を内生化した円形都市モデルを用いて分析した。第5章では燃料消費量の代わりに総トリップ長を最小化するしたが、第6章では混雑の発生を許し、総運輸エネルギー消費量を直接的に最小化したことが特徴である。その結果は以下のようによまとめられる。

- (1) 運輸燃料消費を最小にする土地利用は、都市中心に業務地が立地し、その周囲に居住地が分布する傾向を持つ。これは業務交通を集中化させてトリップ長を低減させることに起因する。また、この傾向は実際の都市の傾向とよく似ている。
- (2) 都心部は混雑が激しくなることを反映し、都心部の道路面積比率はかなり大きい。特に放射状道路は都心において比率が急増する。
- (3) 都市人口を増加させていくと居住地の分布は外側に移動するが、やがて業務地が都市の外縁部にも分布するようになる。これは放射状道路の下り路線が上りに比べて空いているので、この道路容量を活用しようとすることに起因する。
- (4) 都市半径が一定の場合に人口を増加させると、一人あたり運輸エネルギー消費は上昇していくが、人口限度付近では急激に燃料消費が増加する。
- (5) 都市の総人口が一定の下で、運輸エネルギー消費を最小にする最適な人口密度が存在する。人口密度が過小になるとトリップ長の増加のために運輸エネルギー消費が高くなり、人口密度が過大だと混雑のためにエネルギー消費が急増する。

従来、最適な都市人口規模については都市経済学により、生産性を分析の基礎として議論されてきた<sup>[67]</sup>。そこでは主として都市とそれ以外の地域との間の人口配分を求めている。ただし、マクロ的に取り扱われる場合には都市内の土地利用は無視されている（住民の効用を最大化する規範型モデルによって定性的に都市内人口分布を導いている研究もある<sup>[68]</sup>）。それに対し、本研究では消費の立場から、最適人口密度の存在を明らかにすると同時に、省エネルギー型の土地利用分布を導くことができた点で、都市整備の上で示唆を与えるものと考えられる。

## 6.5.2 今後の課題

本研究のモデル化では交通挙動や土地利用を簡略化して表現している。その点から次が課題としてあげられる。

- － 交通量と走行速度の関係は常に軽負荷の場合を仮定している。しかしながら、実際の都市においては重負荷状態で渋滞が生じる点を反映させる必要がある。
- － 移動は常に最短距離を移動することを仮定しているが、都心部で混雑が生じている場合には、都心を通過するより環状道路を迂回する場合もありうる。
- － 第5章と同様に混雑を内生化した場合についても、職住近接の条件を与えた場合に土地利用構成がどのようなになるかは興味深い。特に、近接の度合と運輸エネルギー消費の最適性については、都市の一極集中と分散化の議論に関連して重要と考えられる。

また、都市の形状と運輸エネルギー消費量との関係についても興味深い課題である。過去の研究では直線的な都市はエネルギー消費が少なく、リング状の都市が最も多くなるとの結果を報告した例がある[69]。今回のモデルは円形都市を対象としたが、四角形、直線形などをモデル化することは難しい。幾何学的なアプローチによる円形・長方形の場合の交通流動については既に分析が行われている[46][70]。最適化型モデルによって最適土地利用を導くとともに、現実のデータに照らした実証的な分析が課題である。

## 第7章

# エネルギー消費を抑制する 最適都市圏構造の評価

## 第7章 エネルギー消費を抑制する最適都市圏構造の評価

### 7.1 本章の目的

第5章および第6章では単独の都市における土地利用の挙動に注目してきた。そこでは交通はすべて都市内で完結し、他都市間との移動はないものと仮定された。しかしながら、実際には、例えば東京の場合などでは他都市から通勤で出入りする人口は非常に多い。遠距離通勤が社会的に問題になっているように、大都市への業務機能の集中は周辺中小都市から大都市への通勤人口を増大させる傾向にある。この結果、通勤に伴うエネルギー消費の増加や都市中心部での混雑悪化によるエネルギー消費原単位の低下が発生している。

地理的に都市をよりマクロ的にみれば、複数の都市がつながりあって都市圏を構成している。現実的に東京の周辺に横浜、川崎、千葉、大宮などの中規模程度の業務系都市が分散立地している他、多摩ニュータウン、千葉ニュータウンのような居住機能に特化したベッドタウンも開発されている。したがって、運輸エネルギー消費の抑制を考える場合にも単独の都市構造だけでなく、都市圏に立地する複数の都市を都市間の移動を含めて検討する必要がある。そこで、ここでは都市圏構造についてモデル化を行い、運輸に関するエネルギー消費の観点から最適都市数や都市圏の人口分布を分析する。すなわち、中心となる大都市の周辺を衛星都市が取り巻くような形態がエネルギー的にどのような意味を持つのかを評価することを目的とする。

都市圏構造については、古くはクリスターラーによる中心地理論<sup>[59][71]</sup>が有名である。都市圏は大都市・中都市・小都市・・・と階層構造を成し、地理的には上位の都市を中心とした六角形の頂点の一つ下位の都市が位置する形態をとるとされる。この都市圏構造は1930年代の南ドイツ地方における都市立地によって実証されているが、大都市の周辺に中小の都市が立地する形態は現代でもみられる状況である。東京やパリなど大都市周辺では衛星都市的に新都市建設が行われている<sup>[72]</sup>。

地球温暖化が問題視されるに伴い、都市構造や都市配置についても省エネルギーの観点からの研究が報告されている。松岡ら<sup>[73]</sup>は国土全体における都市の空間点散らばりを表現する指標として“都市分散度”を定義し、都市分散度と運輸部門の二酸化炭素排出量との関係式を世界各国の統計データ

に基づいて推計している。これを用いて都市配置の違いによる二酸化炭素排出抑制効果を試算している。また、過去にも石油ショック後に都市整備とエネルギー消費に関する調査研究が報告されている[74]。そこでは事例として大分市と呉市が省エネルギー的であることが示され、その原因としてどちらも都市が二眼構造になっている点が指摘されている。すなわち、一極集中ではないことがトリップ長の短縮などを通じて省エネルギーにつながると説明づけている。これは都市（圏）構造がエネルギー消費に影響することを示唆している。

一方、職住近接を目指した業務地の分散化も都市圏構造と関連が深い。この場合は運輸エネルギー直接ではなく移動距離に注目した研究がなされている。田頭<sup>[75]</sup>は格子点状に業務地が配列され、各居住者は当該区画の業務地に通勤し、業務地間で距離に依存して業務交通が発生する場合に、ある条件の下で最適業務地数（一つや無限大ではない値）が存在することを示している。移動距離は運輸エネルギーと結び付くので、業務地を都市中心部と読み替えればエネルギー消費を最小化するような都市数があると予想される。

本章では現実に大きな比重を占める都市間通勤に注目し、中心都市と衛星都市からなる都市圏構造を規範型モデル的に定式化する。松岡らの分散化の効果試算では都市の配置をシナリオとして与えており、配置の最適性は議論されていない。また、田頭の検討では職住近接が前提とされているため都市間通勤は排除されており、実際の都市圏における通勤挙動は表現できていない。ここでは、より現実的な観点から実際の都市圏構造を捉えるとともに、省エネルギーの面から最適性にアプローチする。また、衛星都市の数の最適性に着目するため、走行に要するエネルギーのみならず道路・鉄道の建設に要したエネルギーを考慮する点が今回のモデルの特徴である。

## 7.2 都市間通勤を考慮した最適都市圏構造モデル

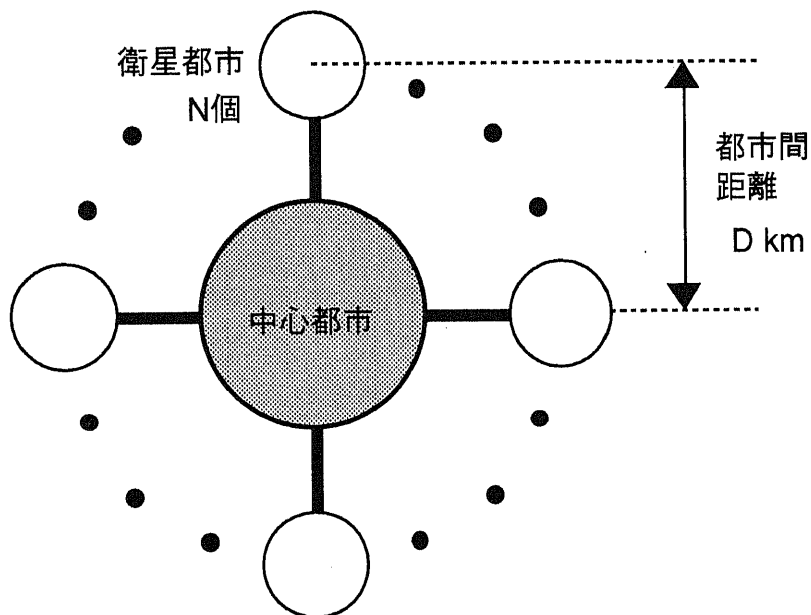
### 7.2.1 都市圏構造モデルの考え方

本モデルは、別の都市から中心都市への通勤を考慮し、都市間交通を含めた場合にエネルギー消費の観点から望ましい都市圏構造を分析することを目的とする。そのため、単独の都市内部の土地利用については簡易に表現した。

#### (1) 都市圏構造

東京など大都市の周囲には中小の都市が衛星状に立地している。その中には全くのベッドタウンとしてほとんどの居住者が大都市に通勤する都市もある一方、県庁所在地などのある程度都市機能（業務機能）を有する自立的な都市もある。ここでは、このような実際の都市圏の様子に基づき、都市圏構造を図7-1に示すように、中心都市の周囲にN個の衛星都市が立地する形態としてモデル化する。これらの衛星都市に居住する人口の一部が中心都市に通勤する。

図7-1 都市圏構造のモデル

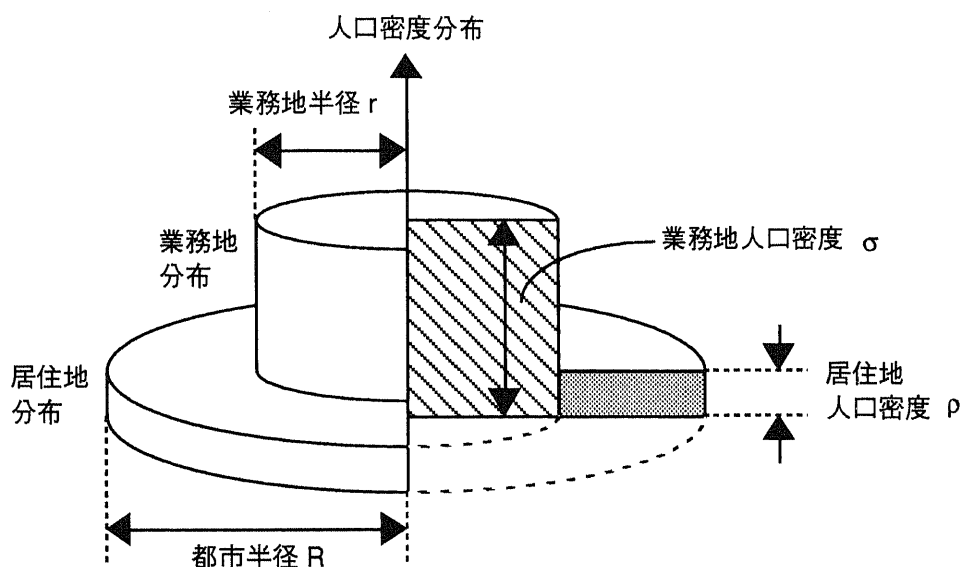


#### (2) 都市構造

中心都市および衛星都市は円形で、それぞれの個々の都市構造については、中心に業務地、その周囲に居住地が立地するとモデル化する。このとき、人口分布は業務地、居住地とも一様と仮定した。

すなわち、人口密度分布でみれば、業務地は円柱状であり、居住地については業務地の周囲をドーナツ状に取り巻いているとした。都市構造のモデルを図7-2に示す。

図7-2 単一の都市構造のモデル



### (3) 評価基準

都市間通勤は一般に鉄道による場合が大部分である。そこで、交通機関の分担として次の通り設定し、機関別に燃料消費を算出する。

業務交通 → 自動車  
通勤交通 → 鉄道（都市内、都市間とも）

また、本研究では都市圏構造として都市の数に注目する。エネルギーの観点から都市数を評価するため、ここでは運輸部門の燃料消費だけではなく、道路、鉄道の設備の保守管理および建設に関わるエネルギーも考慮に入れる。すなわち、エネルギーの評価は次の3点について行い、その合計を評価基準とする。

- i) 走行エネルギー .... 自動車燃料、鉄道の電力消費
- ii) 保守エネルギー .... 設備の保守、運用に関するエネルギー消費
- iii) 建設エネルギー .... 道路、軌道の建設に関するエネルギー消費

### (3) 前提条件

今回のモデル化の前提条件は以下の通りである。

- i) 各衛星都市は中心都市から等距離に位置する.
- ii) 各衛星都市の人口は等しい.
- iii) 各衛星都市人口の一定比率が中心都市に通勤し, 残りは当該都市に就業する.
- iv) 中心都市の人口はすべて中心都市に就業する.
- v) 通勤交通は衛星都市および中心都市の中心を経由する.
- vi) 業務交通は衛星都市および中心都市それぞれの内部で発着し, 都市間移動はないものとする.

(4) 変数等の定義

〈添え字〉

$i$  : 都市種別 (1....中心都市, 2....衛星都市)

〈都市構造〉

$N$  : 衛星都市の数 (—)  
 $R_i$  : 都市の半径 (km)  
 $r_i$  : 業務地の半径 (km)  
 $D$  : 中心都市と衛星都市間の距離 (km)  
 $\rho_i$  : 居住地人口密度 (人/km<sup>2</sup>)  
 $\sigma_i$  : 業務地人口密度 (人/km<sup>2</sup>)

〈人口〉

$P_0$  : 都市圏の総人口 (人)  
 $P_i$  : 各都市の居住人口 (人)  
 $Q_i$  : 各都市の就業人口 (人)  
 $s$  : 中心都市の人口シェア (—)  
 $\xi$  : 衛星都市人口の中で中心都市に通勤する人口の比率 (—)

〈交通〉

$b$  : 業務トリップの時間あたり発生率 (1/h)  
 $B_i$  : 各都市における業務交通の人キロ (人km)  
 $C_i^+$  : 各都市の中心に向かう通勤交通の人キロ (人km)  
 $C_i^-$  : 各都市の中心から外側に向かう通勤交通の人キロ (人km)  
 $L$  : 一つの衛星都市—中心都市間の通勤交通の人キロ (人km)



$\Lambda$  : 道路延長 (km)

$\Gamma$  : 鉄道延長 (km)

〈パラメータ〉

$\alpha$  : 道路密度の係数 (km/km<sup>2</sup>)

$\beta$  : 鉄道密度 (km/km<sup>2</sup>)

$\lambda_p, \mu_f$  : 自動車および鉄道の燃料エネルギー消費原単位 (Mcal/人km)

$\lambda_m, \mu_m$  : 道路および鉄道の保守エネルギー消費原単位 (Mcal/人km)

$\lambda_c, \mu_c$  : 道路および鉄道の建設エネルギー消費原単位 (Mcal/km)

$T$  : 業務時間数 (h)

## 6.5.2 モデル定式化

### (1) 人口分担

都市1および都市2の人口は、都市1の人口シェアを用いて次式で与えられる。

$$P_1 = s P_0 \quad \dots (7.1)$$

$$P_2 = \frac{(1-s) P_0}{N} \quad \dots (7.2)$$

また、各都市の就業人口は次式で表わされる。

$$Q_1 = P_1 + \xi N P_2 = \{s + \xi(1-s)\} P_0 \quad \dots (7.3)$$

$$Q_2 = (1-\xi) P_2 = \frac{(1-\xi)(1-s) P_0}{N} \quad \dots (7.4)$$

### (2) 都市規模

業務地の半径は上記の就業人口を収容できる広さとして次の通り決められる。

$$r_i = \sqrt{\frac{Q_i}{\pi \sigma_i}} \quad \dots (7.5)$$

都市の半径は、業務地の外側に一樣な人口密度で居住地が立地することから次式で与えられる。

$$\pi \rho_i (R_i^2 - r_i^2) = P_i \quad \dots (7.6)$$

$$\therefore R_i = \sqrt{r_i^2 + \frac{P_i}{\pi \rho_i}} \quad \dots (7.7)$$

### (3) 輸送人キロ

燃料エネルギーおよび保守エネルギーは輸送人キロにそれぞれの原単位を乗じて求める。輸送人キロは以下のように定式化する。

#### 1) 業務交通の人キロ

業務交通は業務地内の任意の2点間で発生すると仮定する。半径 $r$ の円内の2点間の平均距離は次で与えられる[51]。

$$\ell = \frac{128}{45\pi} r \quad \dots (7.8)$$

したがって、平均距離に就業人口および交通発生量を乗ずることによって業務交通の人キロを得る。

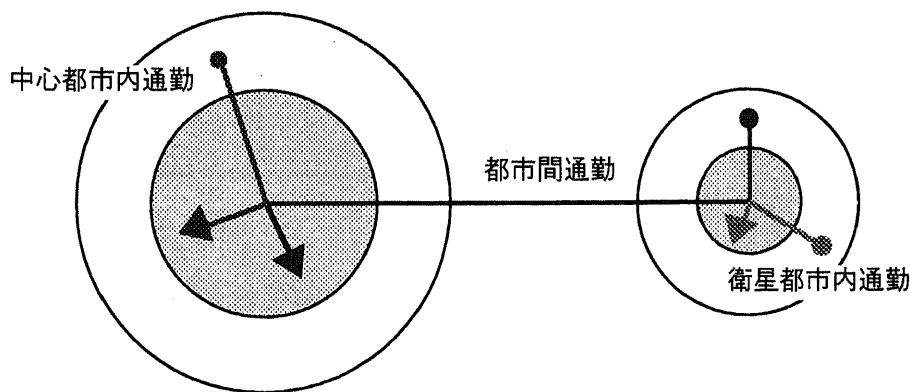
$$B_i = \frac{128}{45} T b \sigma_i r_i^3 \quad \dots (7.9)$$

#### 2) 通勤交通の人キロ

通勤交通は図7-3に示す3パターンからなるとモデル化する。したがって、移動経路は次の3部分に分かれる。

- i) 居住地から都市中心までの移動
- ii) 都市中心から業務地までの移動
- iii) 衛星都市の中心から中心都市の中心までの移動

図7-3 通勤交通の移動パターン



それぞれの輸送人キロは次式で与えられる。

居住地から都市中心まで：

$$C_i^+ = \int_{r_i}^{R_i} 2\pi \rho_i x^2 dx = \frac{2\pi \rho_i}{3} (R_i^3 - r_i^3) \quad \dots (7.10)$$

都市中心から業務地まで：

$$C_i^- = \int_0^{r_i} 2\pi\sigma_i x^2 dx = \frac{2\pi\sigma_i}{3} r_i^3 \quad \dots (7.11)$$

都市間：

$$L = \xi DP_2 \quad \dots (7.12)$$

#### (4) 道路および鉄道の延長

建設エネルギーは路線延長に基づいて評価される。路線延長は都市面積に密度を乗じて計算する。

道路と鉄道の密度と都市面積の関係は以下のとおりと設定した。

##### 1) 道路

道路延長 $\Lambda$ と領域面積 $S$ の間には理論的に次の関係が成立する[76]。

$$\Lambda \approx \sqrt{v\pi S} \quad \dots (7.13)$$

ただし、

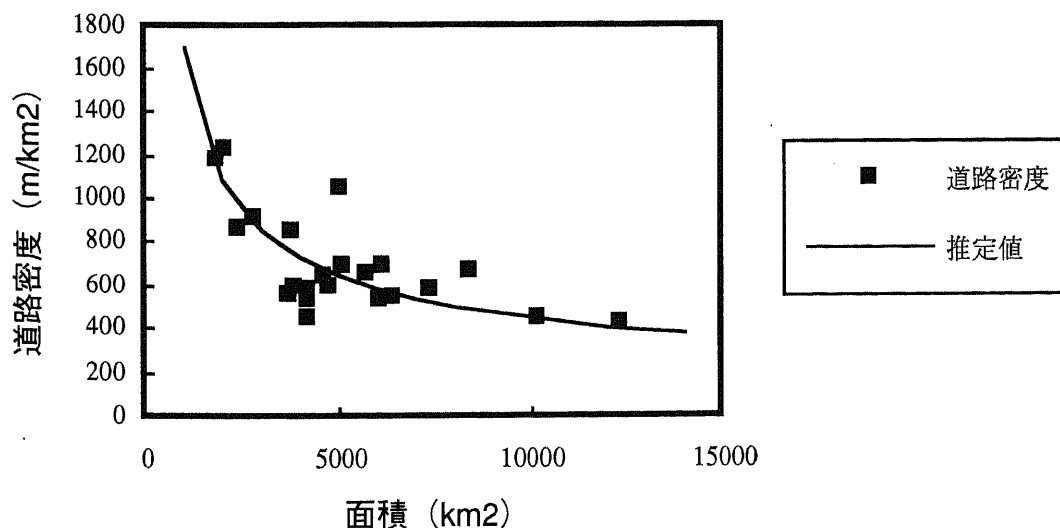
$v$  : 交差点数

したがって、道路密度は次式で表わされる。すなわち、面積の-0.5乗に比例する。

$$\frac{\Lambda}{S} \approx \sqrt{\frac{v\pi}{S}} \quad \dots (7.14)$$

一方、実際の道路密度を首都圏、近畿圏、中部圏の県別データ[77]から調べた。その結果を回帰曲線とともに図7-4に示す。

図7-4 道路密度と面積の関係



回帰曲線は次式の通り得られた。この結果も道路密度が面積の-0.5乗となることを支持している。

$$Y = 50001 (X - 278)^{-0.514} \quad \dots (7.15)$$

以上から、道路延長は次式で与えられるとする。

$$\Lambda = \alpha \sqrt{S} \quad \dots (7.16)$$

## 2) 鉄道

鉄道は道路ほど延長が長くはないので、鉄道密度は一定と仮定した。したがって、鉄道延長 $\Gamma$ は次式で表わされる。

$$\Gamma = \beta S \quad \dots (7.17)$$

## (5) 目的関数

以上に基づき、走行エネルギー $E_f$ 、保守エネルギー $E_m$ 、建設エネルギー $E_c$ は次のように定式化される。

走行エネルギー：

$$E_f = \lambda_f (B_1 + B_2) + 2\mu_f \{C_1^+ + C_1^- + N(C_2^+ + C_2^- + L)\} \quad \dots (7.18)$$

保守エネルギー：

$$E_m = \lambda_m (B_1 + B_2) + 2\mu_m \{C_1^+ + C_1^- + N(C_2^+ + C_2^- + L)\} \quad \dots (7.19)$$

建設エネルギー：

$$\begin{aligned} E_c &= \lambda_c (\Lambda_1 + N \Lambda_2) + \mu_c (\Gamma_1 + N \Gamma_2 + N D) \\ &= \lambda_c \alpha \sqrt{\pi} (R_1 + N R_2) + \mu_c \{\beta \pi R_1^2 + N(\beta \pi R_2^2 + D)\} \end{aligned} \quad \dots (7.20)$$

以上の総和を目的関数とする。すなわち、

$$J = E_f + E_m + E_c \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (7.21)$$

## 7.3 入力データ

### 7.3.1 エネルギー消費に関するパラメータ

#### (1) 走行エネルギー

1991年度の自動車および鉄道の人キロあたりエネルギー消費は統計<sup>[7]</sup>により次の値が示されている。

乗用車： 0.51 (Mcal/人キロ)

鉄道： 0.047 (Mcal/人キロ)

ただし、これらは平均値である。通勤時の鉄道ではかなりの混雑が発生しており、原単位はさらに小さいと考えられるので、ここでは次の値を用いる。

鉄道： 0.01 (Mcal/人キロ)

なお、この設定には不確定性が含まれるので、感度分析を行うことによって補う。

#### (2) 保守エネルギー

道路、鉄道の保守管理に消費されたエネルギーが産業連関表に基づいて推計されている<sup>[78]</sup>。これを輸送人キロで割ることによって原単位を得る。なお、産業連関表は昭和60年度のものが推計に用いられているので、輸送に関するデータも基本的には同年度の数値を使用した。

##### 1) 道路

文献に示されている道路の保守管理に要したエネルギーは下記の通り。これを旅客輸送と貨物輸送に走行台キロ<sup>[79]</sup>によって配分する。さらに旅客分を乗用車とバスの走行台キロで配分し、それぞれの輸送人キロ<sup>[79]</sup>で割る。データおよび得られた原単位を表7-1に示す。

道路の保守管理に消費するエネルギー： 6,371 (Tcal/年)

表7-1 道路の保守エネルギー原単位

項目	旅客			貨物
	乗用車	バス	合計	
走行台キロ (百万km)	275,557	6,352	281,909	146,533
輸送人キロ (百万人km)	384,362	104,898	489,260	
保守エネルギー (Tcal)	4,097	94	4192	
原単位 (Mcal/人km)	0.011	0.0009	0.009	

## 2) 鉄道

文献に示されている鉄道の保守管理に消費したエネルギーは下記の通り。これを在来線，新幹線，貨物の列車キロで配分し，さらに在来線，新幹線の輸送人キロ<sup>[80]</sup>で割った。データおよび得られた原単位を表7-2に示す。

鉄道の保守管理に消費するエネルギー： 12,838 (Tcal/年)

表7-2 鉄道の保守エネルギー原単位

項目	旅客			貨物
	在来線	新幹線	合計	
列車キロ (千km)	446,264	80,860	527,124	94,366
輸送人キロ (百万人km)	145,831 *	51,632 *	197,463	
保守エネルギー (Tcal)	9,218	1,670	10,888	
原単位 (Mcal/人km)	0.063	0.032	0.055	

注：\*) 昭和58年度の人キロ構成で昭和60年度の合計値を配分した。

## (3) 建設エネルギー

道路および軌道の1kmあたりの建設エネルギーについても前出の文献において推計されている。これを耐用年数で割ることによって，1日あたりの原単位を得る。なお，建設エネルギーには建設工事と維持改良工事の両方を含む。

## 1) 道路

一般道の建設エネルギーは下記の通り。これを旅客と貨物に走行台キロで配分した。また，道路の耐用年数は60年<sup>[78]</sup>とした。得られた原単位を表7-3に示す。

建設的工事に消費するエネルギー： 2,195 (Gcal/km)

維持的工事に消費するエネルギー： 31 (Gcal/km)

表7-3 道路の建設エネルギー原単位

項目	一般道
建設的工事 (Gcal/km)	955
維持的工事 (Gcal/km)	14
合計 (Gcal/km)	969
原単位 (Mcal/km/日)	44.2

## 2) 鉄道

軌道建設および維持改良に要するエネルギーは下記の通り。それぞれの旅客と貨物への配分は車両キロによって分ける。さらに、維持改良分については営業キロで割ることによって1kmあたりのエネルギーを求めた。軌道の耐用年数は60年とした。データおよび得られた原単位を表7-4に示す。

軌道建設に消費するエネルギー： 11,916 (Gcal/km)

維持改良に消費するエネルギー： 2,979 (Tcal/年)

表7-4 鉄道の建設エネルギー原単位

項目	旅客	貨物	合計
車両キロ (百万km)	19,751	6,531	26,282
営業キロ (km)	20,789	15,375	36164
建設的工事 (Gcal/km)	8,955		
維持的工事 (Gcal/km)	108		
合計 (Gcal/km)	9,063		
原単位 (Mcal/km/日)	413.8		

## 7.3.2 その他のパラメータ

次に関するパラメータを表7-5に示す。

- 居住地・業務地の人口密度
- 業務地内で発生する交通
- 道路密度係数，鉄道密度
- 衛星都市から中心都市に就業する人口比率

中心都市は都市機能が集積しており，業務地には高層ビルが，居住地にはマンションなど高層アパートが立地すると考えられる。一方，衛星都市では比較的低層のビルや一戸建住宅が立地すると考えられるので，人口密度は中心都市に比べて低くなる。ここでは，衛星都市の人口密度は中心都市の半分と想定した。

道路密度については大都市圏に関する回帰分析の結果から係数を定めた。また，鉄道密度は首都圏に関するデータ[81]を参考に設定した。

衛星都市から中心都市に就業する人口比率は0.5と設定した。この点についても不確実性を含むので、感度分析によってその影響を調べる。

表7-5 パラメータ設定値

パラメータ	単位	中心都市	衛星都市
居住地人口密度	人/km <sup>2</sup>	30,000	15,000
業務地人口密度	人/km <sup>2</sup>	100,000	50,000
業務トリップ発生率	1/h	0.2	
業務時間数	h	8	
道路密度の係数	—	50	
鉄道密度	km/km <sup>2</sup>	0.3	
中心都市への就業比率	—	0.5	



## 7.4 最適都市圏構造

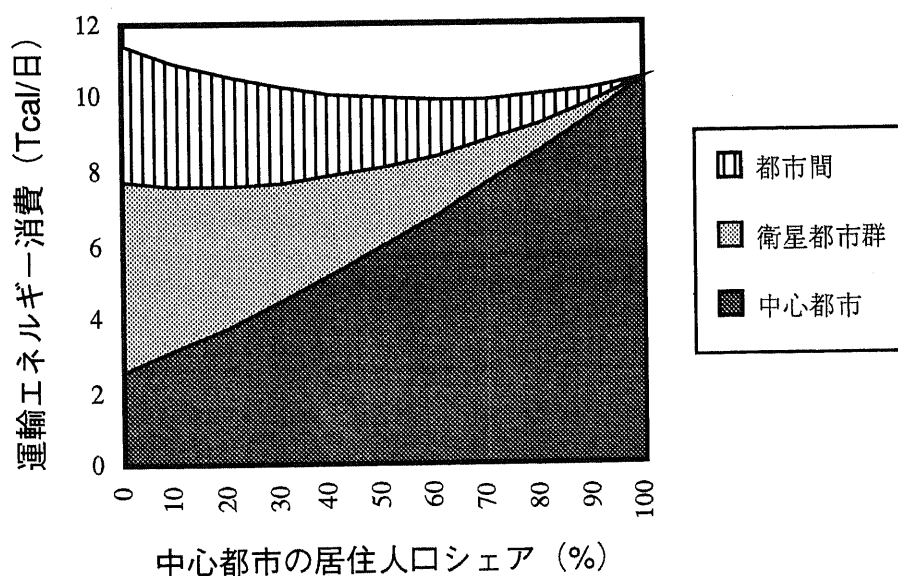
### 7.4.1 最適人口配分

中心都市に都市圏の全人口一極集中させれば、それを収容するために都市の半径が大きくなり、業務交通および通勤交通のエネルギー消費が増加する。中心都市の一部の人口を衛星都市に移転した場合、各衛星都市の人口増は中心都市の人口減の $1/N$ であるので、移転による衛星都市の拡大は中心都市の縮小に比べてエネルギー的な影響小さいと予想される。一方、すべての人口を衛星都市に居住させるならば、通勤に要するエネルギーが増大する。したがって、適当な人口分担によって都市圏全体のエネルギー消費が極小になると考えられる。そこで、中心都市の人口シェアに対するエネルギー消費量の変化を調べた。次のパラメータ設定に対する結果を図7-5に示す。

衛星都市数： 5 (個)

都市間距離： 20 (km)

図7-5 中心都市の最適人口分担



図より、中心都市が60%の人口シェアを持つ時に都市圏全体のエネルギー消費量が極小になる。都市間距離が長くなれば都市間通勤のエネルギー消費が増えるため、最適なシェアは上昇する。上記の条件において総エネルギー消費に占める建設に関するエネルギーの割合はほぼ1%程度であり、ほとんどは運用に関するエネルギー消費といつてよい。

## 7.4.2 中心都市の人口シェアを固定した場合の最適衛星都市数

本研究の関心の一つは、衛星都市の数についてエネルギー的に最適性があるかどうかである。言い替えば、都市に一極集中すべきか、分散型都市圏を整備することが望ましいのかがここでの注目点である。衛星都市の数を増やせばそれぞれの都市半径は小さくなり、そこでの業務、通勤交通のエネルギー消費は削減される。一方、衛星都市合計の道路延長、鉄道延長が増加することに加え、都市間の鉄道延長が $N$ 倍になる。前者の効果が後者よりも卓越するならば最適な都市数があると予想される。

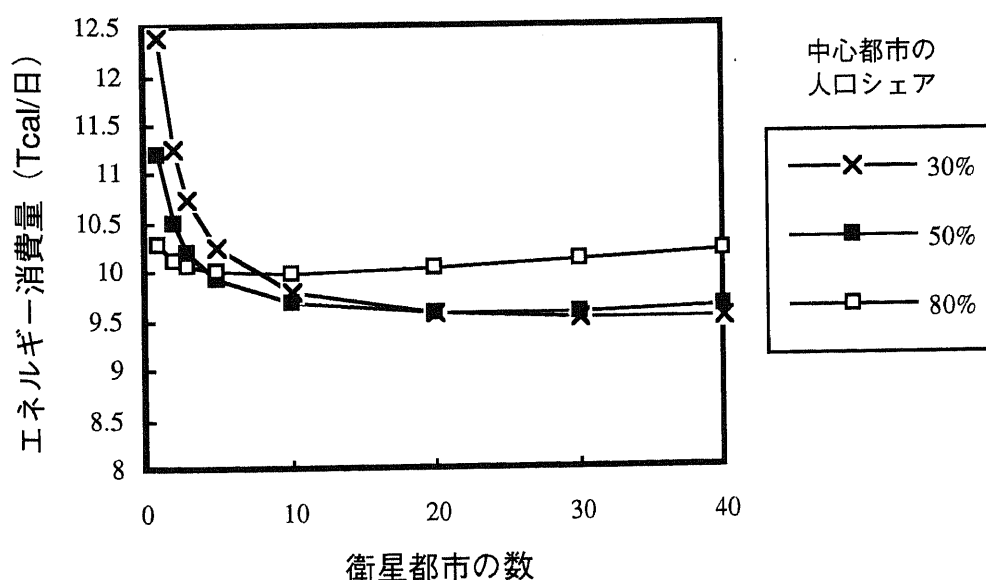
## (1) 中心都市の人口シェアと最適都市数の関係

そこで、まず、中心都市の人口シェアを固定し、衛星都市数を変化させることによって運輸エネルギー消費に対する影響をみた。都市間距離を20kmとし、人口シェアをパラメータとしたときの結果を図7-6に示す（縦軸がゼロからでないことに注意）。これよりつぎのことがわかる。

- 衛星都市の数を増加させていくと初めは急速にエネルギー消費量が低下するが、やがて鍋底のような状態になる。
- 本ケースでは30%のとき30個、50%のとき20個、80%のとき10個が最適都市数となる。
- 中心都市の人口シェアが大きいほど最適都市数は小さくなる。

それほど厳しくはないものの衛星都市数に最適値が存在することが示された。中心都市に人口が集中するほど最適衛星都市数が小さくなることから、一都市あたりの居住人口はそれほど大きく変化しない。衛星都市の規模として適度な大きさがあることが示唆される。

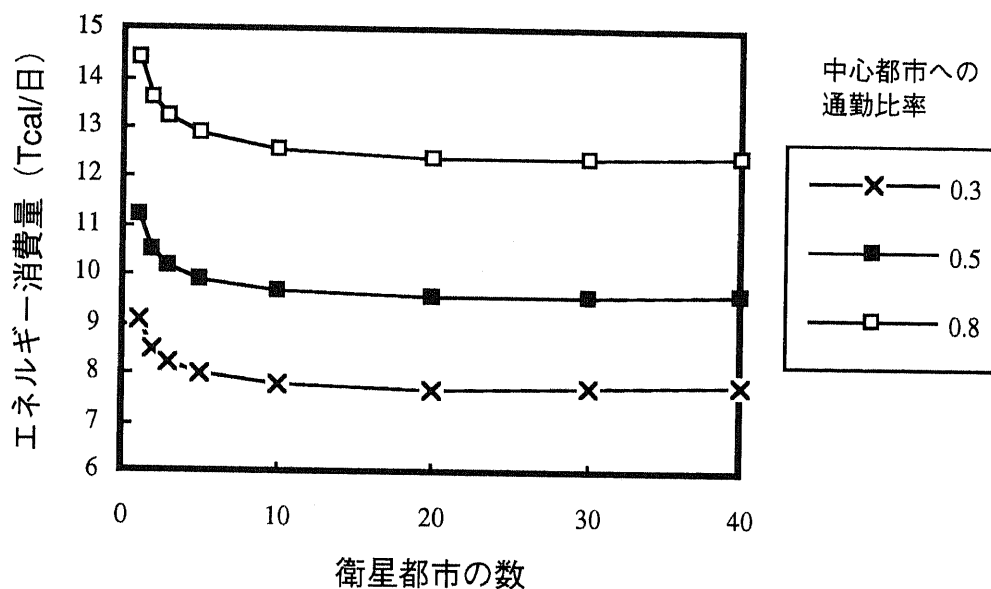
図7-6 中心都市の人口シェアを固定したときのエネルギー消費量（都市間距離20km）



## (2) 中心都市への通勤比率と最適都市数の関係

衛星都市から中心都市への通勤比率をパラメータとした時の衛星都市数の影響を図7-7に示す（縦軸がゼロからでないことに注意）。いずれの場合もほぼ同じ傾向を示し、20～30個付近に最適値がみとめられる。通勤比率の増加は最適都市数をやや拡大させる。これは通勤者が増えることから総トリップ長が延びるため、都市半径を短くする方向に変化したと解釈できる。

図7-7 中心都市への通勤比率別のエネルギー消費量（都市間距離20km）



## 7.4.3 人口配分を最適化した場合の最適衛星都市数

次に、それぞれの衛星都市数について前述の最適人口分担を行い、極小となるエネルギー消費量を当該都市数に対するエネルギー消費値とした。その結果を都市間距離をパラメータとして図7-8に示す（縦軸がゼロからでないことに注意）。また、衛星都市数に対する中心都市の最適人口シェアを図7-9に示した。

これらの結果から次のことがいえる。

- エネルギー消費抑制の観点から最適な衛星都市数が存在する。
- 都市間距離が長くなるほど最適都市数は少なくなる。
- 都市間距離が短いほど最適都市数によるエネルギー消費削減効果が大い。
- 最適値はそれほど厳しくない。
- 中心都市の人口シェアは都市数が増えるほど小さくなる。
- 都市間距離が長くなるほど中心都市の人口シェアが高まる。

図7-8 人口配分を最適化した場合のエネルギー消費量

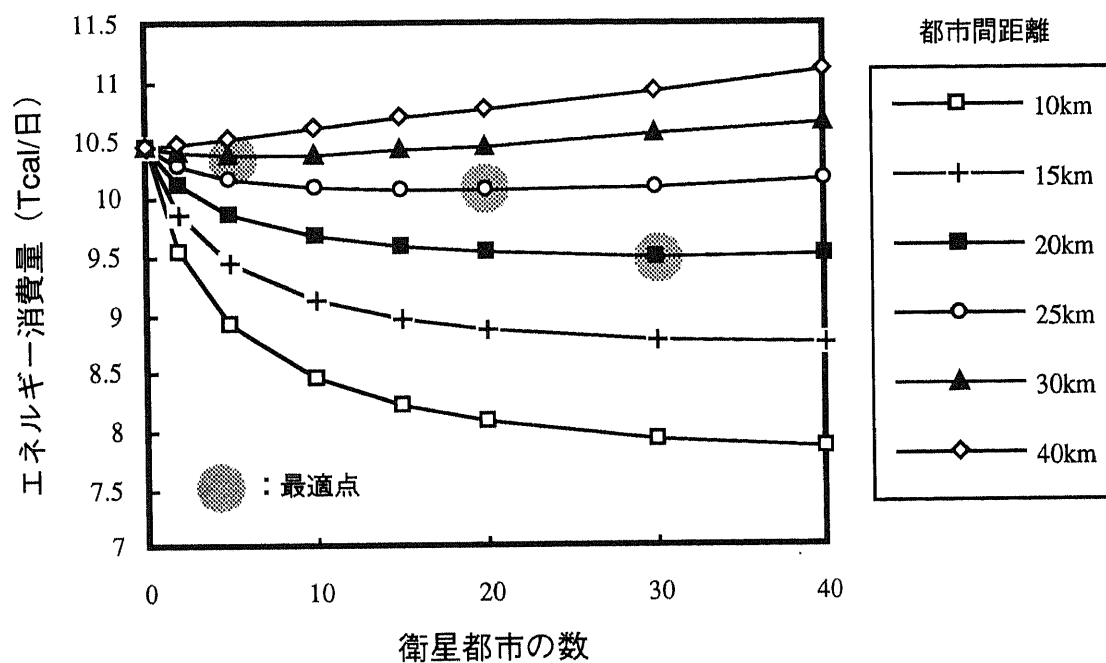
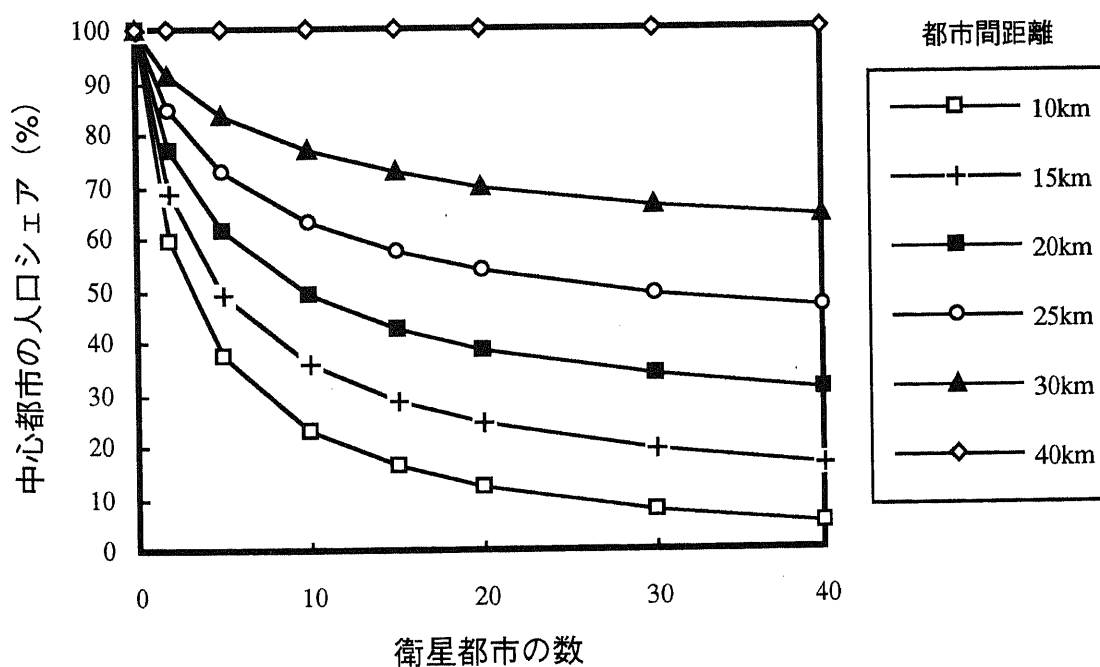


図7-9 人口配分を最適化した場合の中心都市の人口シェア



これより、人口を都市圏で分担する方が省エネルギーに寄与することが示された。また、衛星都市は中心都市の近傍に立地することが効果的である。都市間距離が短ければ衛星都市群に人口を移転し

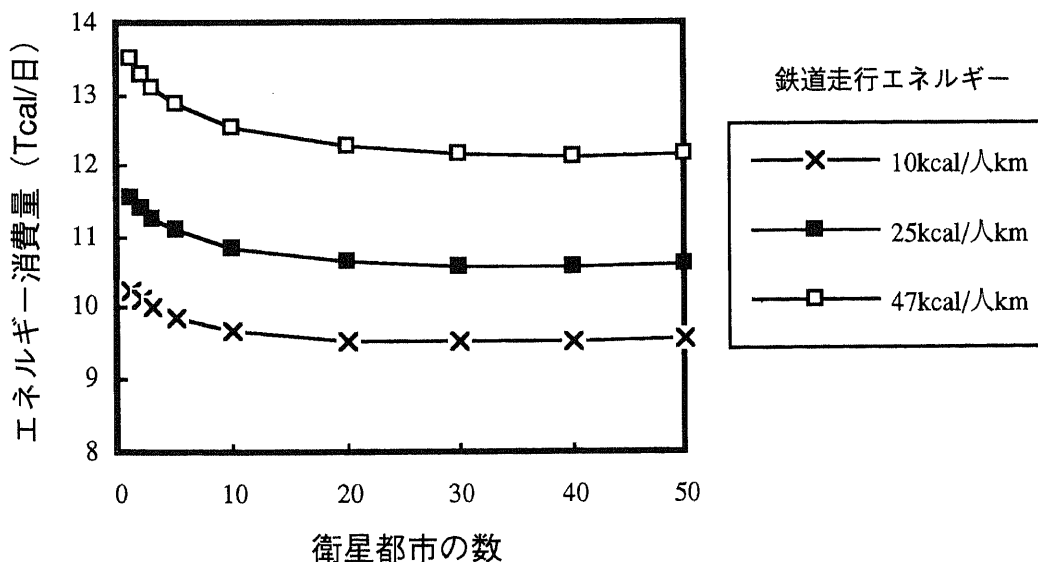
た方が有利になるが、衛星都市数が増えるため常に都市一つあたりの規模はおおよそ同程度になっていると考えられる。これは前述の人口シェアを固定した場合にみられた傾向に起因する。このときの中心都市の人口シェアは都市間距離によっては50%を下回り、中心都市は業務系の立地が集中する一方、周辺都市には住宅系の立地が進み、機能的な分化が認められる。東京は一極集中しており、本モデルの中心都市が肥大化した状態と考えられる。横浜・川崎・大宮・千葉・幕張などの東京周辺に業務核都市を整備する計画が進められているが、モデル分析の結果はその目指している方向性を支持するものと解釈できる。

都市間距離が40kmを超える長距離になると全人口は中心都市に取り込まれ、都市圏は中心都市のみとなる。言い替えれば、非常な広範囲にわたって都市圏を構成することはエネルギー的な悪化をもたらす。したがって、ある程度距離が離れた都市は自立性を保持できるような都市機能を整備する必要がある。この点は都市が階層的構造を持って平面空間上に分布するクリスタラーの中心地理論の特徴にも符合する。また、衛星都市の規模は常に小さく、中心都市と同程度の規模の都市が併存する状況は生まれない。このことは、同規模の都市が存在するならばそれぞれは独立的でなければならないことを意味する。

#### 7.4.4 鉄道走行エネルギーに関する感度分析

鉄道の走行エネルギーについては不確かさがあるので、感度分析によりその影響をみた。10 (kcal/人km) から現状平均値の47 (kcal/人km) まで変化させた結果を図7-10に示す(都市間20km)。

図7-10 鉄道走行エネルギーの最適都市数に対する影響



図には、鉄道走行エネルギーが大きくなるほど最適衛星都市数は増大する傾向が現われている。鉄道はもっぱら通勤に利用される仮定なので、鉄道走行エネルギーの増加は通勤のエネルギー消費増として表われる。そこで、都市の分割数を増やしてひとつひとつの規模を小さくし、通勤トリップ長を短縮しようという動機が働いたと考えられる。この結果から、通勤に鉄道以外に通勤にバスなどエネルギー消費が比較的大きい交通手段が使われる場合には、衛星都市、中心都市ともに都市は小型になると予想される。一方、東京に集まる鉄道路線は通勤の混雑が過密状態であり、人キロあたり走行エネルギーはかなり小さいと考えられる。したがって、上記の結果から、東京が一極集中し肥大化するのは通勤路線が張り巡らされていることともに、過密により低エネルギー消費が維持されていることも一因であると考えられる。

## 7.5 本章のまとめ

### 7.5.1 結果のまとめ

本章では運輸エネルギー消費の観点から、中心都市を衛星都市が取り巻く形態の都市圏構造について分析した。両方の都市内における業務交通、通勤交通および両都市間にまたがる通勤交通の3者のみを考慮した簡便なモデルを用いたが、最適な都市圏構造を導くことができた。運輸エネルギー消費として走行エネルギーだけでなく、道路・鉄道の建設に関するエネルギーを考慮したことが本モデルの特徴である。ここでの結果は次のようにまとめられる。

- (1) 衛星都市の数には運輸エネルギー消費を最小化する最適値が存在する。
- (2) 都市間距離が長くなるにつれて最適都市数は小さくなり、同時に中心都市の人口シェアは拡大する。
- (3) 衛星都市にはある適度な大きさがある。そのサイズになるように最低な都市数の分割が決まると考えられる。
- (4) 同規模の都市が併存する解はなく、その場合は都市が自立的にならざるをえないことを示唆する。
- (5) 通勤手段の走行エネルギー消費が増大すると最適都市数は増える。これは一つ一つの都市の規模（半径）を短縮し、通勤トリップ長を抑制しようとするすることによる。

東京が一極集中していることは従来から大きく問題視されている。とりわけ交通混雑や通勤混雑は分極構造への強い誘因となっており、職住近接の都市（圏）構造が議論されている。既存の研究[52][75]では、中心業務地が複数存在し居住者は近接する業務地に通勤すること、また業務地間で業務交通が発生することが想定されている。各業務地が同質であるとき、総移動距離を最小化する評価基準の下では、業務地を無限個にするか一極集中にするかの極解となることが報告されている。本研究は都市間の業務交通は仮定せず、都市間通勤に注目したモデル化を行うとともに、建設エネルギーを考慮する点で既存研究とはややアプローチが異なる。結果としては都市間距離に応じて極解を含む最適な都市数（内点解）が得られており、より現実的な答えであると考えられる。

今回の都市圏構造モデルの観点から考えれば、都心部への輸送能力を拡大し通勤を容易にしようとする努力が東京の一極集中の一因になっていると解釈できる。また、通勤のエネルギー消費が大きい

と衛星都市の規模が縮小する傾向から、東京周辺に立地させようとしている業務核都市の規模を確保するためには、自立性を保持することと併せて通勤移動に要するエネルギーを抑制する必要があることが指摘できる。今回のモデル分析では中心都市が常に大規模を維持している。これは中心都市－衛星都市の都市圏構造を保つ限り東京の一極集中は長期的に変わらないことを示唆している。したがって、多極化のためには東京と並ぶ程度の自立的な都市の形成を政策的に推し進めなければならない。業務交通を分離し、都市間通勤を低減できれば多極化は地域全体の省エネルギーに寄与すると予想される。

### 7.5.2 今後の課題

今回のモデルは業務交通と通勤交通しか考慮していない。しかしながら、交通においては貨物輸送も大きな役割を担っているので、貨物輸送を含めたモデル化がより現実的である。都市にはそれぞれ中心商業地が成立するので、貨物輸送は中心都市と各衛星都市間で発生すると考えられる。したがって、トリップ数は衛星都市数に比例すると仮定できる。貨物輸送を含めれば都市数が増えるほどエネルギー消費が拡大するため、衛星都市の数は今回の結果よりも抑制されると予想される。

また、本モデルは建設エネルギーを考慮しているが、静学的モデルである。したがって、最適値も衛星都市数を増やすことによるメリットとデメリットの静学的均衡を意味する。都市圏は人口増に伴って拡大・形成が進むと考えられるので、その点を表現するためには都市整備に関する動学的なモデル化が必要である。動学モデルによって一極集中構造と多極分散型構造に分かれる条件を分析することが今後の課題である。



---

## 第3部 民生部門および運輸部門に関する 省エネルギー型都市像

---

### 第8章

#### 地域熱供給プラントの立地を考慮した 省エネルギー型都市構造

## 第8章 地域熱供給プラントの立地を考慮した省エネルギー型都市構造

### 8.1 本章の目的

都市に生産・流通・消費などの一連の経済活動が集積し、エネルギー消費の一大拠点になると予想されることは既に述べた。東京一極集中が問題化しているように、ますます人口の集積が進めば交通の集中を招き、民生部門・運輸部門のエネルギー消費が増大する。実際にも日本全体における両部門のエネルギー消費は伸びる一方であり、留まる気配をみせていない。

これまで、第一部では主として業務・家庭におけるエネルギー消費削減をめざして、コージェネレーションの導入促進について分析した。また、第二部では都市内の運輸エネルギー消費の削減をもたらす土地利用構造を明らかにした。本章では、民生部門に対して地域熱供給プラント立地を考えるとともに、運輸部門に対して土地利用を調整することによって、都市内のエネルギー消費に関して最適な地域熱供給プラント立地と土地利用構造を同時に導出することをめざす。

近年、工場排熱、発電排熱、ごみ焼却排熱などの未利用エネルギーを活用して省エネルギーを図る研究が進められている<sup>[82]</sup>。また、実際に事業化された事例も見受けられる。従来、経済的な観点や公害問題に配慮し、工場や発電所は都市部から離れた地域に建設されてきた。そのため、排熱を利用しようにも需要地が近辺になく、未利用エネルギーが活用できない状況にある。地域熱供給事業として事業化された事例は都市内に工場が立地するケース<sup>[83][84]</sup>、団地に隣接するごみ処理場のケース<sup>[12][13]</sup>、都心地区にコージェネを導入したケースなど、いずれも輸送距離が短い場合に限定されている。逆に言えば、未利用エネルギーの利用を促進するためには供給源と需要地の双方を整合するように配置しなければならない。一方で、環境的観点から工場、ごみ処理場などの供給源は都市外に立地せざるをえない。したがって、需要地をそこに近づければ都心への移動距離が伸び、運輸エネルギー消費が増大することにつながる。最近“環境調和型都市<sup>[15]</sup>”の考え方が普及しつつあるが、それらの中では以上の点は全く検討されていないと言ってよい。

そこで、本研究では、工場排熱を利用した地域熱供給プラントとコージェネを利用した熱供給プラントの2種類について、民生部門エネルギー消費と運輸エネルギー消費の総和を最小化する土地利用構

造を分析する。それとともに、地域熱供給プラントの立地が都市内の土地利用分布に与える影響を調べ、民生部門と運輸部門の整合的な都市構造を明らかにすることを目的とする。また、都市部において将来的に工場排熱利用とコジェネ導入の両方が進められると考えられるが、排熱利用はコジェネが供給する熱負荷を奪うため、コジェネの効率低下、有利性の低減につながる。すなわち、両者は都市における省エネルギー技術として競合関係にある。そこで、この双方が導入される場合のプラントの最適立地点についても分析を行う。

## 8.2 地域熱供給を含めた都市モデルの基本的考え方

### 8.2.1 地域熱供給プラント

ここでは、地域熱供給プラントとして次の2種類を考える。

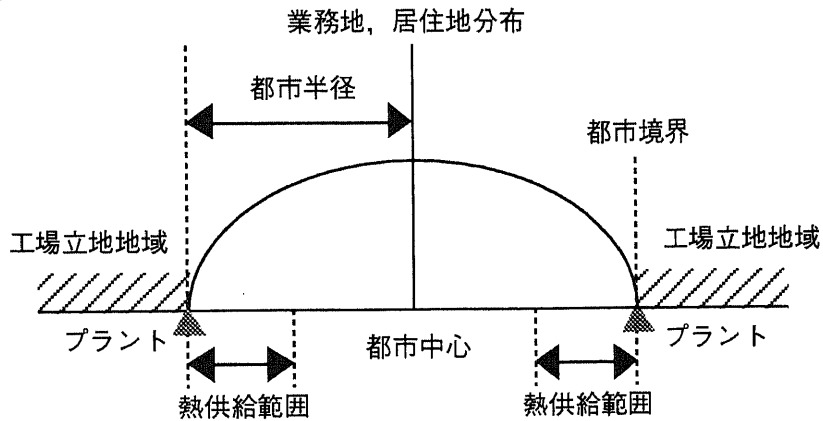
- i) 工場排熱利用型プラント
- ii) コージェネ利用型プラント

工場やごみ処理場、下水処理場などは一般に都市の外縁に位置している。また、都市内の大型工場は地方へ移転される傾向にある。そこで、前者のプラントは都市の境界に立地し、内側に向かって熱供給を行うものとする。一方、コージェネは都市の内部に立地することが实际的であるので、後者のプラントは都市内のどこでも立地できるものとする。立地の様子を図8-1に示す。

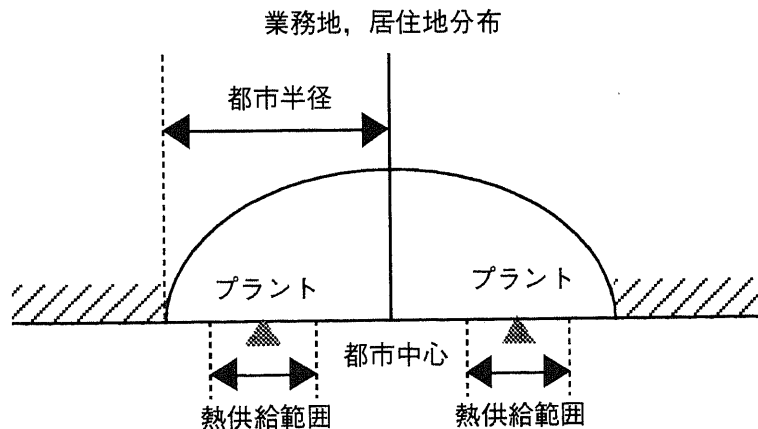
なお、都市は円形等方的であると仮定するので、地域熱供給プラントは都市中心から一定の距離に一樣に分布しているとする。

図8-1 地域熱供給プラントの立地形態

〈工場排熱利用型〉



〈コージェネ利用型〉



### 8.2.2 モデルの前提条件

本モデルでは次の前提条件をおく。

- i) 2次元の円形都市を考える。
- ii) 都市は居住地、業務地、放射状道路、環状道路から成る。
- iii) 運輸部門では自動車交通のみを取り扱う。
- iv) 通勤交通および業務交通を考える。
- v) すべての人口が通勤する。
- vi) 通勤交通は通勤時間帯に、業務交通は業務時間帯に発生する。
- vii) いたるところに放射状道路、環状道路が存在する。
- viii) 交通は最短経路を通過する。
- ix) 交通は定常状態とする。
- x) 必要な工場排熱は十分に供給される。
- xii) 電力需要、熱需要の時間変化は無視し、時間的に一様と仮定する。

### 8.2.3 エネルギー消費モデル

本研究では、都市内における運輸部門の燃料消費と民生部門の電力（一次換算）およびガス消費量の総和を目的関数とする。各部門のエネルギー消費モデルは以下のように設定する。

#### (1) 運輸部門

運輸部門のエネルギー消費モデルは第6章の混雑を内生化したモデルを用いる。

#### (2) 民生部門

民生部門については、業務地には事務所ビルが、居住地には住宅が立地すると仮定し、それぞれの電力需要および熱需要を考慮する。プラント方式別の運用方法は次の通り。

工場排熱利用型：

熱供給範囲の一定比率の需要家の熱需要をすべて賄う。

電力需要はすべて電力系統から買電する。

コジェネ利用型：

熱供給範囲の一定比率の需要家の電力需要をすべて賄う。

発電に伴って排出される熱を当該範囲のみに供給する。熱が余剰になれば廃棄する。

コジェネ供給以外の電力需要は電力系統からの買電によって賄う。

地域熱供給で賄われない熱需要に対しては、事務所ビルはボイラにより、住宅はガス暖房器によって供給すると仮定する。

また、工場排熱の使用／不使用は一次エネルギー消費には影響しないので、排熱の消費量は目的関数には含めない。

#### 8.2.4 変数等の定義

以下で用いる記号を次のように定義する。

〈添え字〉

$i$	: 地点番号 (0~ $n$ )	
$n$	: 半径方向の分割数	(一)

〈土地利用〉

$r_i$	: 都市中心からの距離	(km)
$y_i$	: $x_i$ 地点の居住地面積比率	(一)
$z_i$	: $x_i$ 地点の業務地面積比率	(一)
$u_{ri}$	: $x_i$ 地点の放射状道路面積比率	(一)
$u_{ci}$	: $x_i$ 地点の環状道路面積比率	(一)
$\rho$	: 居住地人口密度	(人/km <sup>2</sup> )
$\sigma$	: 業務地就業人口密度	(人/km <sup>2</sup> )

〈交通〉

交通および運輸燃料消費に関しては第6章のモデルと同じ。6.3を参照のこと。

$E_t$	: 運輸燃料消費量	(Mcal/日)
-------	-----------	----------

〈熱需給〉

$k$	: コジェネ立地点番号	(一)
$D_h$	: 工場排熱利用型プラントの供給範囲	(km)
$D_c$	: コジェネ利用型プラントの片側供給範囲	(km)
$j$	: $R-D_h$ に相当する地点番号	(一)
$m$	: $D_c$ の幅に相当する地点数	(一)
$\xi_h$	: 工場排熱利用型供給範囲に対する熱供給面積比率	(一)

$\xi_c$	: コージェネ利用型供給範囲に対する熱供給面積比率	(-)
$E_e$	: 電力消費量 (一次換算)	(Mcal/日)
$E_h$	: ガス消費量	(Mcal/日)
$E_p$	: ポンプ動力用電力消費量 (一次換算)	(Mcal/日)
$\eta_e$	: 電力系統の発電効率	(-)
$\eta_{ce}$	: コージェネ発電効率	(-)
$\eta_{ch}$	: コージェネ熱供給効率	(-)
$\eta_b$	: ボイラ効率	(-)
$\eta_s$	: ガスストーブ効率	(-)
$\gamma$	: 一人あたり電力需要 (・ : b ... 業務系, r ... 住宅系)	(Mcal/人)
$\delta$	: 一人あたり熱需要 (・ : b ... 業務系, r ... 住宅系)	(Mcal/人)

〈パラメータ〉

$P$	: 総人口	(人)
$R$	: 都市半径	(km)
$\Delta r$	: 区間幅	(km)
$\beta$	: 配管密度	(km/km <sup>2</sup> )
$q$	: ガソリン発熱量	(Mcal/cc)

## 8.3 地域熱供給を含めた都市モデルの定式化

### 8.3.1 運輸部門エネルギー消費

運輸部門のエネルギー消費は第6章の(6.19)式を熱量に換算したものを用いる。すなわち、

$$E_t = q F \quad \dots (8.1)$$

ただし、

$F$  : (6.19)式で求められた運輸燃料消費量 (cc/日)

### 8.3.2 民生部門エネルギー消費

ここで、地域熱供給の供給エリアについて次のように定義する。

供給範囲 .... 熱供給の幅に含まれる領域

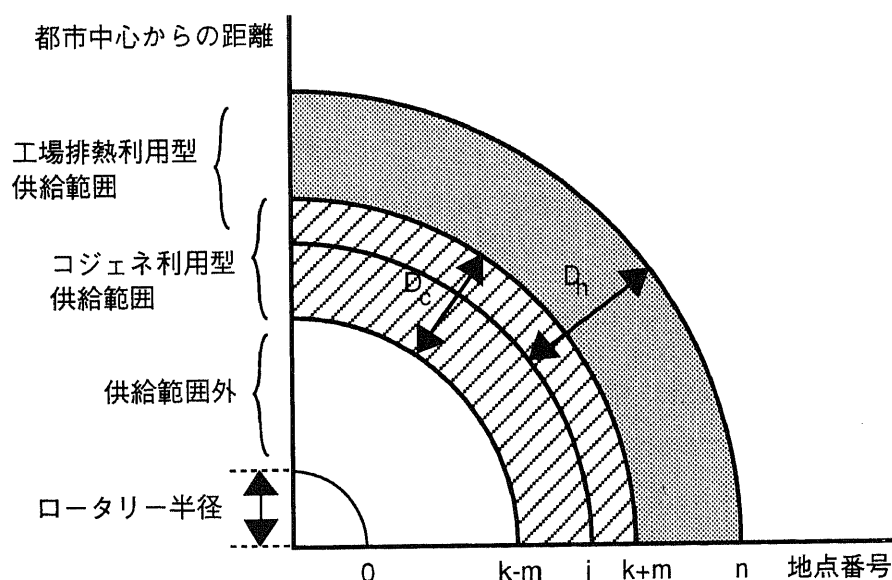
工場排熱利用型： 半径 $R-D_h \sim R$ までの領域

コージェネ利用型： 半径 $r_k-D_c \sim r_k+D_c$ までの領域

供給区域 .... 供給範囲の中で熱供給が行われる領域

また、この供給範囲に対する供給区域の比をそれぞれ $\xi_h$ ,  $\xi_c$ と定義する ( $0 \leq \xi \leq 1$ )。供給範囲の中でも地域熱供給区域に含まれない地点ではボイラまたはストーブにより個別に熱供給が行われる。都市内の供給範囲のイメージを図8-2に示す。

図8-2 地域熱供給の供給範囲の構成イメージ





図では工場排熱利用型とコジェネ利用型の供給範囲が重なる状態を想定している。工場排熱は民生部門の需要によらず発生するためできる限り消費すると考える。そこでこの場合、工場排熱が優先的に消費され、コジェネは残りの需要を賄うと仮定する。

### (1) 電力消費

各地点の電力需要に対して、コジェネ利用型の熱供給範囲のうち $\xi_c$ に対してコジェネが電力供給を行い、それ以外の地点では電力系統から買電する。したがって、地点別の電力需要による一次エネルギー消費は以下の通りで表わされる。

コジェネ供給範囲：

$$E_{ci} = 2\pi r_i (\gamma_r \rho y_i + \gamma_b \sigma z_i) \left( \frac{\xi_c}{\eta_{ce}} + \frac{1 - \xi_c}{\eta_e} \right) \quad \dots (8.2)$$

それ以外：

$$E_{oi} = \frac{2\pi r_i}{\eta_e} (\gamma_r \rho y_i + \gamma_b \sigma z_i) \quad \dots (8.3)$$

電力供給のための総一次エネルギー消費量は次式で与えられる。

$$E_e = \frac{\Delta r}{2} \left\{ \sum_{i=0}^{k-m-2} (E_{oi} + E_{oi+1}) + (E_{ok-m-1} + E_{ck-m}) + \sum_{i=k-m}^{k+m-1} (E_{ci} + E_{ci+1}) \right. \\ \left. + (E_{ck+m} + E_{ok+m+1}) + \sum_{i=k+m+1}^{n-1} (E_{oi} + E_{oi+1}) \right\} \quad \dots (8.4)$$

### (2) 熱消費

熱供給は次の3パターンに分かれる。

#### i) 工場排熱利用型供給区域

熱供給範囲のうち $\xi_b$ に対して工場排熱が供給される。

#### ii) コジェネ利用型供給区域

需要から工場排熱供給分を差し引いた負荷に対してコジェネが熱供給する。ただし、各地点について電力需要に伴う発電排熱量を上限とする。コジェネ熱供給が過剰であれば余剰分は廃棄される。

#### iii) 地域熱供給区域外

需要から工場排熱供給分およびコジェネ供給分を差し引いた負荷に対してボイラまたはストーブによって熱供給する。

これに基づき、供給範囲別に一次エネルギー消費は以下の通り定式化される。

工場排熱利用型供給範囲：

$$H_{hi} = 2\pi r_i (1 - \xi_h) \left( \frac{\delta_r}{\eta_s} \rho y_i + \frac{\delta_b}{\eta_b} \sigma z_i \right) \quad \dots (8.5)$$

コジェネ利用型供給範囲：

(コジェネ排熱が過剰でない場合)

$$H_{ci} = \frac{H_{ri}}{\eta_s} \left( 1 - \frac{S_{ci}}{H_{ri} + H_{bi}} \right) + \frac{H_{bi}}{\eta_b} \left( 1 - \frac{S_{ci}}{H_{ri} + H_{bi}} \right) \quad \dots (8.6)$$

ただし、

$S_{ci}$  : 地点  $i$  におけるコジェネの熱供給量

$$S_{ci} = 2\pi r_i \xi_c (\gamma_r \rho y_i + \gamma_b \sigma z_i) \frac{\eta_{ch}}{\eta_{ce}} \quad \dots (8.7)$$

$H_{ri}$ ,  $H_{bi}$  : 地点  $i$  における工場排熱供給分を差し引いた住宅系、業務系の熱負荷。

ただし、工場排熱供給範囲に重ならない部分は  $\xi_h$  をゼロとみなす。

$$H_{ri} = 2\pi r_i \delta_r \rho y_i (1 - \xi_h) \quad \dots (8.8)$$

$$H_{bi} = 2\pi r_i \delta_b \rho z_i (1 - \xi_h) \quad \dots (8.9)$$

(コジェネ排熱が過剰である場合)

$$H_{ci} = 0 \quad \dots (8.10)$$

地域熱供給範囲外：

$$H_{oi} = 2\pi r_i \left( \frac{\delta_r}{\eta_s} \rho y_i + \frac{\delta_b}{\eta_b} \sigma z_i \right) \quad \dots (8.11)$$

以上から、熱供給に伴う総一次エネルギー消費量は次式で与えられる。

$$E_h = \frac{\Delta r}{2} \left\{ \sum_{i=0}^{k-m-2} (H_{oi} + H_{oi+1}) + (H_{ok-m-1} + H_{ck-m}) + \sum_{i=k-m}^{k+m-1} (H_{ci} + H_{ci+1}) \right. \\ \left. + \sum_{i=k-m}^{k+m-1} (H_{ci} + H_{ci+1}) + (H_{ck+m} + H_{hk+m+1}) + \sum_{i=k+m+1}^{n-1} (H_{hi} + H_{hi+1}) \right\} \quad \dots (8.12)$$

なお、工場排熱利用型とコジェネ利用型の供給範囲が重ならない場合には、上式の2項目と3項目の間に地域熱供給範囲外に関する項が含まれてくるものとみなす。

### 8.3.3 ポンプ動力のエネルギー消費

#### (1) ポンプ動力

温水輸送に必要なポンプ動力は管摩擦に基づいて算出する。ここでは管摩擦係数の定式化にミーゼスの式<sup>[85]</sup>を用いた。また、ポンプ効率 $\eta_p$ は1とした。

管摩擦による損失：

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad \dots (8.13)$$

管摩擦係数：

$$\lambda = 0.0096 + 5.7 \sqrt{\frac{k}{100d}} + 1.7 \sqrt{\frac{1}{R_e}} \quad \dots (8.14)$$

ポンプ動力（一次換算）：

$$E_p = \frac{Mg Q \Delta h}{\eta_p} \quad \dots (8.15)$$

ここで、

$$R_e = \frac{Vd}{\nu} \quad \dots (8.16)$$

$$Q = \frac{S_h}{24 \times 3600 \Delta t} \quad \dots (8.17)$$

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad \dots (8.18)$$

ただし、

$S_h$  : 地域熱供給の負荷 (Mcal/日)

$R_e$  : レイノルズ数 (-)

$\nu$  : 動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s)

$k$  : 3.5e-5 (cm)

$Q$  : 流量 (m<sup>3</sup>/s)

$V$  : 流速 (m/s)

$L$  : 配管長 (m)

$d$  : 管の直径 (m)

$\Delta t$  : 温水利用の温度差 (°C)

$\eta_p$  : ポンプ効率 (-)

$M$  : 温水の単位重量 (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (9.8) (m/s<sup>2</sup>)

## (2) 配管長

配管長は熱供給区域面積に配管密度を乗じて算出する。

工場排熱利用型：

$$L_h = \beta \xi_h \pi \{R^2 - (R - D_h)^2\} \quad \dots (8.19)$$

コジェネ利用型：

$$L_c = \beta \xi_c \pi \{(r_k + D_c)^2 - (r_k - D_c)^2\} \quad \dots (8.20)$$

## 8.3.4 目的関数

以上に基づき、電力、熱およびポンプ動力に消費する一次エネルギーの総和を目的関数とする。

$$J = E_t + E_e + E_h + E_p \rightarrow \text{Min.} \quad \dots (8.21)$$

ただし、ポンプ動力は工場排熱利用型の分のみを意味する。コジェネ利用型に必要なポンプ動力はコジェネ自身で発電するものとし、上記の $E_e$ の中に含めるものとする。また、ポンプ動力用発電に起因する排熱も熱供給に利用する。

## 8.3.5 制約条件

今回のモデルには以下の制約条件が付属する。

## (1) 土地利用比率合計

各地点において土地利用比率の合計は1となる。したがって、

$$y_i + z_i + u_{ri} + u_{ci} = 1 \quad (i = 1 \sim n) \quad \dots (8.22)$$

## (2) 総人口

居住地および業務地のそれぞれについて、都市全体で人口を総和したものは総人口に一致する。

$$\pi \rho \Delta r \sum_{i=0}^{n-1} (r_i y_i + r_{i+1} y_{i+1}) = P \quad \dots (8.23)$$

$$\pi \sigma \Delta r \sum_{i=0}^{n-1} (r_i z_i + r_{i+1} z_{i+1}) = P \quad \dots (8.24)$$

## (3) 土地利用

境界を除いて都市内ではいずれの地点でも業務地または居住地としての利用がされているものとす

る。道路のみが立地するのは現実的に不自然であるので、それが発生するのを防ぐための制約である。ここでは業務地比率と居住地比率の和の下限値を0.1と設定した。

$$y_i + z_i \geq 0.1 \quad \dots (8.25)$$

#### (4) 交通量

各地点での交通量は道路容量を下回らなければならない。したがって、

$$Q \leq \frac{v_0 k_J}{4} = Q_{\max} \quad \dots (8.26)$$

#### (5) 都市境界

都市の境界には業務地、居住地とも立地しないものとする。

$$y_n = z_n = 0 \quad \dots (8.27)$$

## 8.4 入力データ

### 8.4.1 人口に関するパラメータ

人口および人口密度は表8-1の通り設定する。人口密度は東京のデータを参考に定めた。また、都市規模としては半径15 (km) とする。

表8-1 都市規模、人口および人口密度の設定

項目		単位	パラメータ
都市半径		km	15
総人口		人	8,000,000
人口密度	居住地	人/km <sup>2</sup>	100,000
	業務地	人/km <sup>2</sup>	30,000

### 8.4.2 交通に関するパラメータ

交通トリップの発生等に関するパラメータは、第6章と同じく表8-2の通り設定した。

表8-2 交通に関するパラメータ設定

項目		単位	パラメータ
トリップ発生率	$b_1$	1/h	0.23
	$b_2$	1/h	0.16
業務時間数		h	8
通勤時間数 (朝夕各)		h	2
自由走行速度		km/h	30
渋滞密度		台/km	150
道路幅員 (一車線)		m	4

### 8.4.3 エネルギー需要に関するデータ

#### (1) 住宅系エネルギー需要

文献資料[86][87]には家庭用のエネルギー需要について次のデータが報告されている。

年間総需要： 9,580 (Mcal/世帯/年)

熱需要比率： 70～80 (%)

今回のモデルでは通勤者を世帯主とみなし、世帯全体のエネルギー消費を居住者一人に割り当てた。これに基づき、住宅系エネルギー需要を表8-3の通り設定する。

表8-3 住宅系エネルギー需要

項目	単位	電力	熱	合計
年間需要	Mcal/m <sup>2</sup> /年	2900	6700	9600
一日あたり需要	Mcal/m <sup>2</sup> /日	18.4	7.9	26.3

## (2) 業務系エネルギー需要

## 1) 床面積あたり需要

事務所ビルおよび業務用用途平均に関し、床面積あたり燃料需要として次の値が報告されている<sup>[88]</sup>

(カッコ内は業務用平均)。

電力需要：	134.1	(125.7)	(Mcal/m <sup>2</sup> /年)
ガス・石油需要：	83.7	(122.0)	(Mcal/m <sup>2</sup> /年)
需要合計：	217.8	(247.7)	(Mcal/m <sup>2</sup> /年)

これに基づき、床面積あたり業務系エネルギー需要は表8-4の通り設定した。

表8-4 業務系エネルギー需要

項目	単位	電力	熱	合計
年間需要	Mcal/m <sup>2</sup> /年	130	100	230
一日あたり需要	Mcal/m <sup>2</sup> /日	0.356	0.274	0.630

## 2) 人員あたり需要

事務所ビルの人員あたり床面積は5～24 (m<sup>2</sup>/人) の値が報告されている<sup>[89][90][91][92][93][94]</sup>。20 (m<sup>2</sup>/人) レベルのデータは地方都市であることを考慮し、ここでは次の通り設定する。

人員あたり床面積：	10	(m <sup>2</sup> /人)
-----------	----	---------------------

表8-4の値に人員あたり床面積を乗ずることによって、業務地人員あたりエネルギー需要を得ることができる。

## 8.4.4 熱供給に関するデータ

## (1) 熱輸送

## 1) 配管径・利用温度差

熱輸送に関して次のように仮定する。利用温度は事例を参考に、温水80℃を50℃に低下させて熱交換すると仮定した。

配管直径： 0.5 (m)

利用温度差： 30 (℃)

## 2) 配管密度

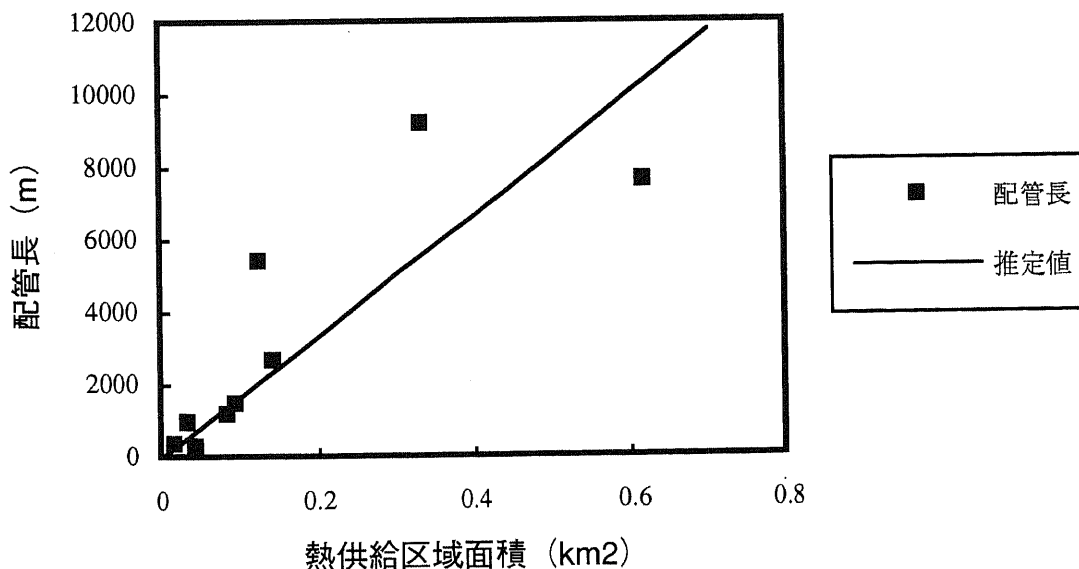
配管長は熱供給区域面積に配管密度を乗ずることによって求める。配管密度は実際の地域熱供給事業におけるデータ[95]から算出した。図8-3に東京ガスによって行われている9ヶ所の事業地区の配管長と区域面積の関係をプロットするとともに、併せて回帰直線を示した。切片をゼロにとった回帰直線は次の通り推計された。

$$Y = 16735 X \quad (R^2 = 0.64)$$

(6.21)

これより、配管密度はほぼ17 (km/km<sup>2</sup>) と推定される。配管延長は熱供給区域面積にこの配管密度を乗ずることによって算出する。

図8-3 地域熱供給事業における配管長と区域面積の関係



注：配管は4管方式。



## 3) 熱供給単位面積

熱供給範囲を一つのプラントから供給すると想定することは無理がある。図8-3の地域熱供給の実績値をみても一つの事業規模は0.05～0.6 (km<sup>2</sup>) となっている。コジェネ利用型は都心部に立地するため比較的小型であり、工場排熱利用型は都市外郭に立地し大規模になると想定し、ここでは方式別に単位プラントの事業規模を次のように設定する。

工場排熱利用型： 0.5 (km<sup>2</sup>)

コジェネ利用型： 0.2 (km<sup>2</sup>)

地域熱供給プラントあたりについてポンプ動力を求め、プラント数を乗ずることによってポンプ動力用の総一次エネルギー消費を計算する。

## (2) 熱供給範囲

方式別の地域熱供給範囲は次のように設定した。

工場排熱利用型： 感度分析において設定する。

コジェネ利用型： 立地点の一つ隣の地点（両側）まで熱供給する。

## (3) エネルギー効率

設備・機器のエネルギー効率は表8-5の通りとした。

表8-5 設備のエネルギー効率

項目		単位	パラメータ
発電	コジェネ	—	0.35
	電力系統	—	0.35
熱供給	コジェネ	—	0.45
	ボイラ	—	0.9
	ガスストーブ	—	1.0

## 8.5 地域熱供給プラント立地を考慮した最適土地利用構造

ここではまず、コジェネ利用型と工場排熱利用型のそれぞれが単独で導入されている状況を考え、地域熱供給プラントの立地が土地利用に与える影響を求める。また、併せて単独の場合のプラント立地の最適性を調べる。次いで、両方の方式が同時に立地する場合の相互影響を踏まえ、最適なプラント立地について分析する。

### 8.5.1 コジェネ利用型地域熱供給の立地ケース

#### (1) コジェネプラント立地の土地利用への影響

地域熱供給を含まない運輸エネルギー消費のみを最小化する土地利用を基準ケースとみなす。それに対してコジェネプラントを次の位置に配置した場合について、民生部門・運輸部門の両方のエネルギー消費合計を最小化する最適土地利用を求めた。基準ケースの最適土地利用を図8-4に、その結果を図8-5に示す。

コジェネ立地点：	距離	4.2	6.9	9.6	12.3	(km)
	地点番号	2	4	6	8	

なお、地点番号2に立地したときに供給区域がほぼ供給範囲面積に等しくなる規模を設定し、立地点によらず供給区域面積は固定した。この面積は都市の総面積の約10%に相当する。

図8-4 地域熱供給を含まない場合の最適土地利用（基準ケース）

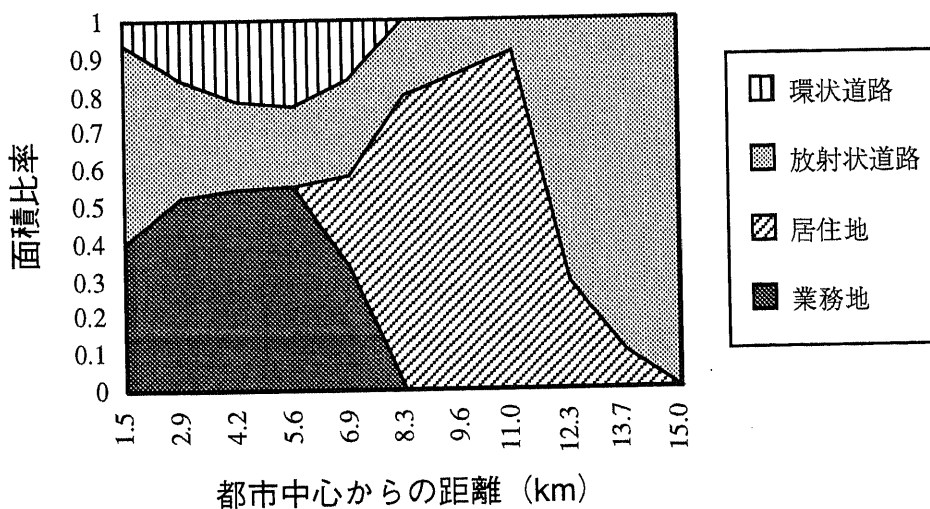
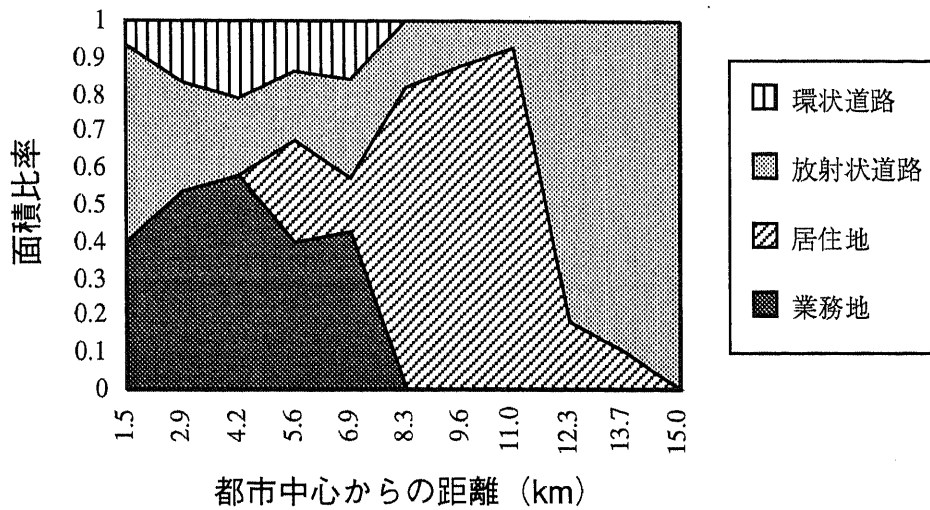
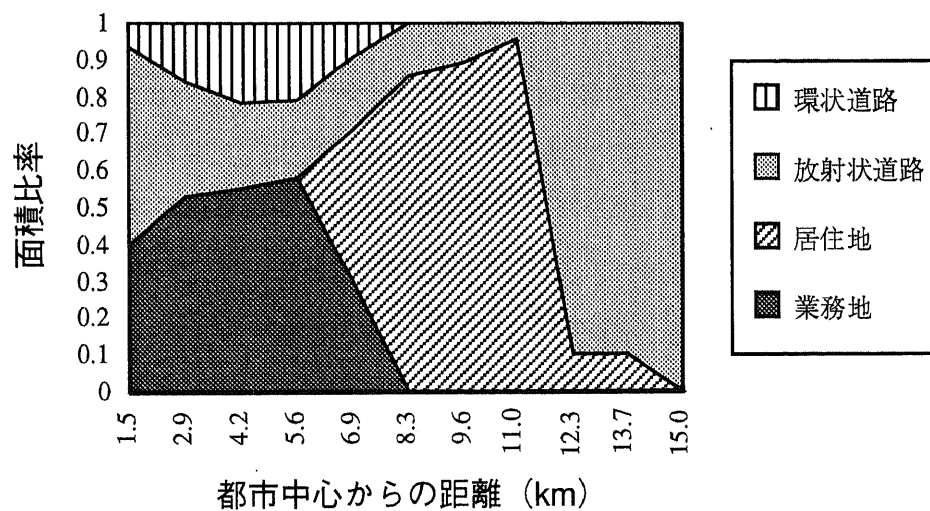


図8-5 コージェネ利用型地域熱供給プラント立地の土地利用への影響

<立地点：4.2km>



<立地点：6.9km>



<立地点：9.6km>

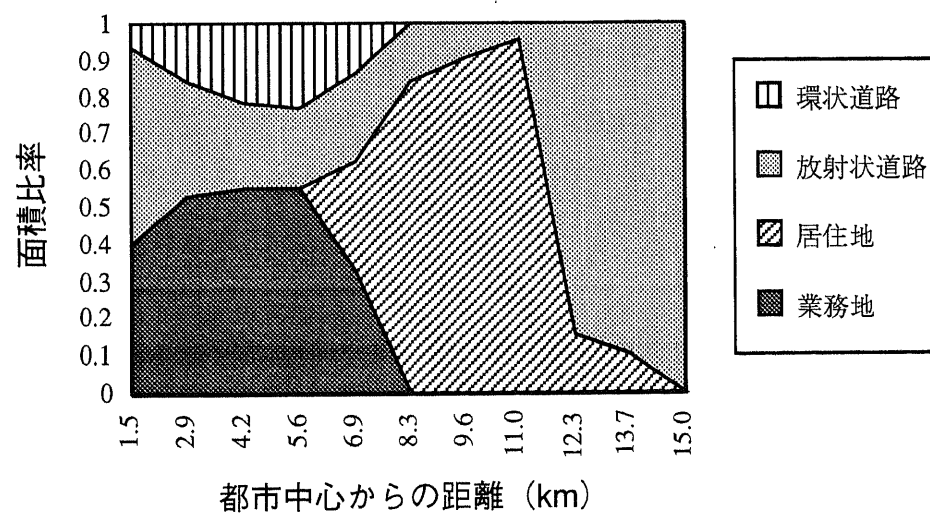
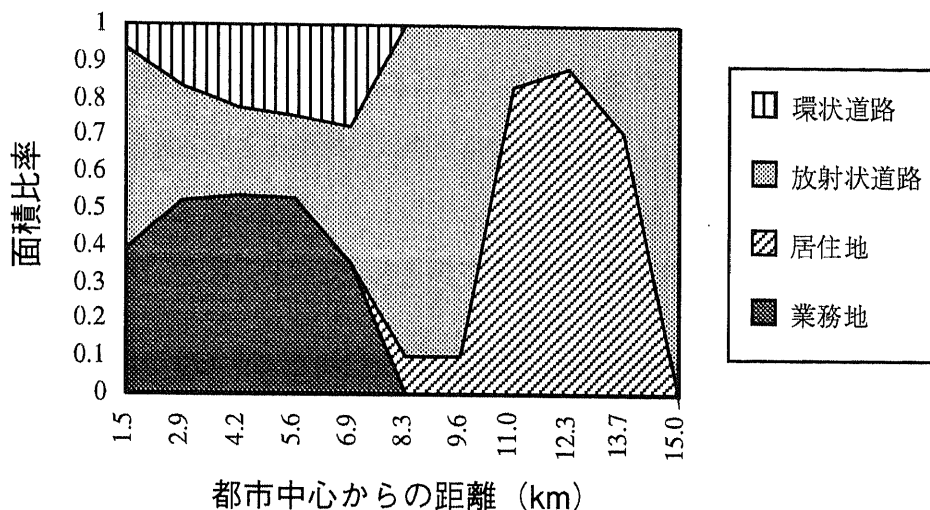


図8-5 コジェネ利用型地域熱供給プラント立地の土地利用への影響（つづき）

〈立地点：12.3km〉



この結果は、コジェネプラントの立地は最適土地利用に大きな影響を与えることを明らかに示している。コジェネ立地が都心に近い4.2km地点のときには居住地はコジェネに引き寄せられて基準ケースよりも都市内側に侵入し、その分業務地がやや外側に広がっている。立地が都市半径の中程の6.9～9.6km地点の場合は、熱供給範囲において居住地比率がやや高くなっているもののほぼ基準ケースと同様の土地利用分布を示す。コジェネが12.3km地点に立地した場合には、土地利用の様相は一変し、居住地はコジェネに引きずられて都市外側に移動する。業務地は影響を受けず都市中心部に位置しているため、業務地と居住地の間にすき間が生じている。

以上から、地域熱供給の立地は特に居住地分布に対して影響が大きい。これは世帯あたりのエネルギー需要を居住者一人に割り当てたことにより、需要密度が高い点に起因すると考えられる。一方、業務地分布があまり影響を受けないことは業務交通のエネルギー消費を抑制する動機が強く働いていることを示している。すなわち、地域熱供給を受けるために都心部から外側に広がることは業務トリップ長を増大させ、民生部門のエネルギー消費削減よりも運輸エネルギー消費の悪化の方が卓越することを意味する。

## (2) コジェネプラントの最適立地

コジェネの各立地点に対する基準ケースに比較したエネルギー消費の節約量および比率を図8-6に示す。4.2km地点および12.3km地点は運輸エネルギー消費を悪化させていることがわかる。結局、9.6km地点への立地の場合に節約量が最大となり、最適立地ポイントである。このとき一次エネルギー消費

全体として5%の節約が実現される。9.6km地点が最適になる理由として、民生部門のエネルギー需要規模が大きいこと、運輸エネルギー消費にほとんど影響を与えないことが指摘できる。

図8-7には立地点別のコジェネ挙動を示した。9.6km地点において電力、熱供給ともに供給シェア(コジェネ供給量/都市内総需要)が最大となる。また、4.2km地点では廃熱が発生している。ここで、廃熱率はコジェネ熱生産量に対する廃熱の比率を示す。

図8-6 コジェネ立地点別のエネルギー消費節約量および比率

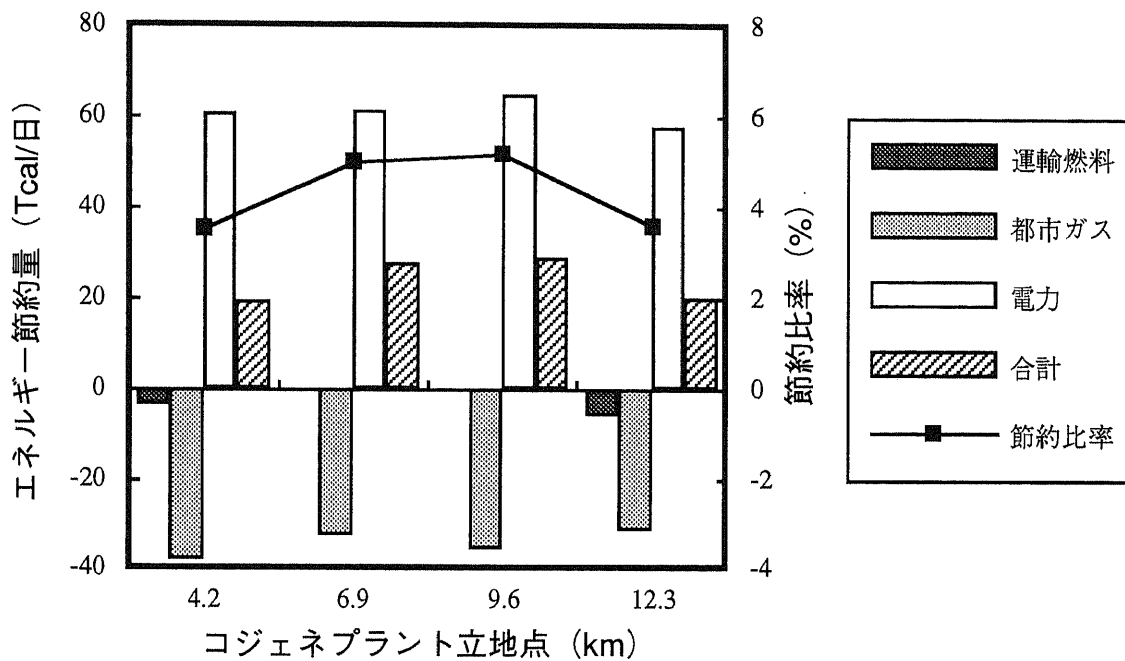
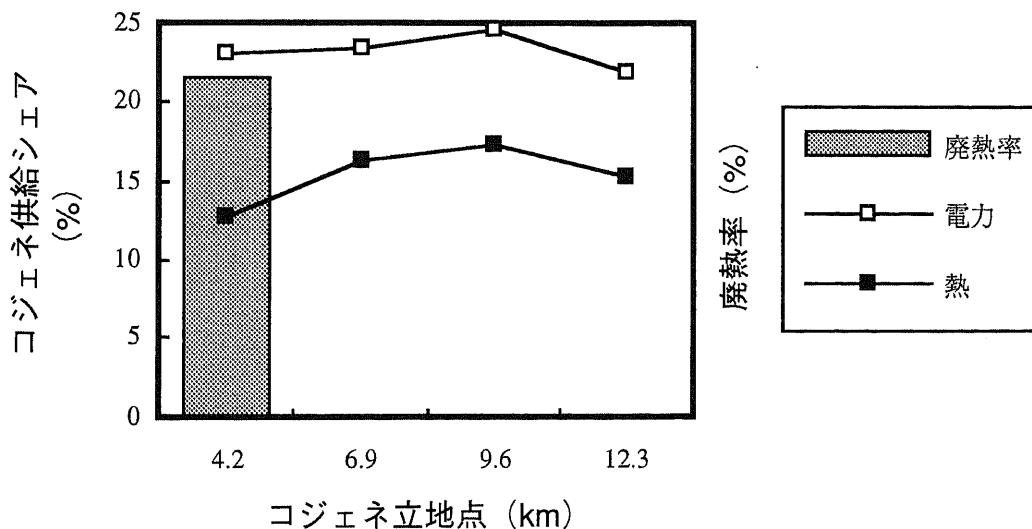


図8-7 立地点別のコジェネ挙動



廃熱発生は、業務地が供給範囲の大部分を占め熱需要が電力需要に比べて小さいことによる。この点もコジェネの業務地立地が最適にならない一因と考えられる。

### 8.5.2 工場排熱利用型地域熱供給の立地ケース

#### (1) 工場排熱利用型プラント立地の土地利用への影響

次に工場排熱利用型プラントが立地する場合の土地利用に対する影響をみる。工場排熱利用型プラントの立地点は都市境界に固定されている。ここでは都市内側への熱供給範囲の幅を変化させる。ただし、幅によらず供給区域の面積は一定とする。したがって、内側への距離が延びるほど各地点の負荷を地域熱供給がカバーする割合が低下することになる。供給区域面積は先のコジェネ利用型の場合と同じく都市の総面積の約10%と設定した。供給範囲の下限地点は次の通り変化させたときの結果を図8-8に示す。

工場排熱供給範囲：	下限地点	12.3	9.6	6.9	4.2	(km)
	地点番号	8	6	4	2	

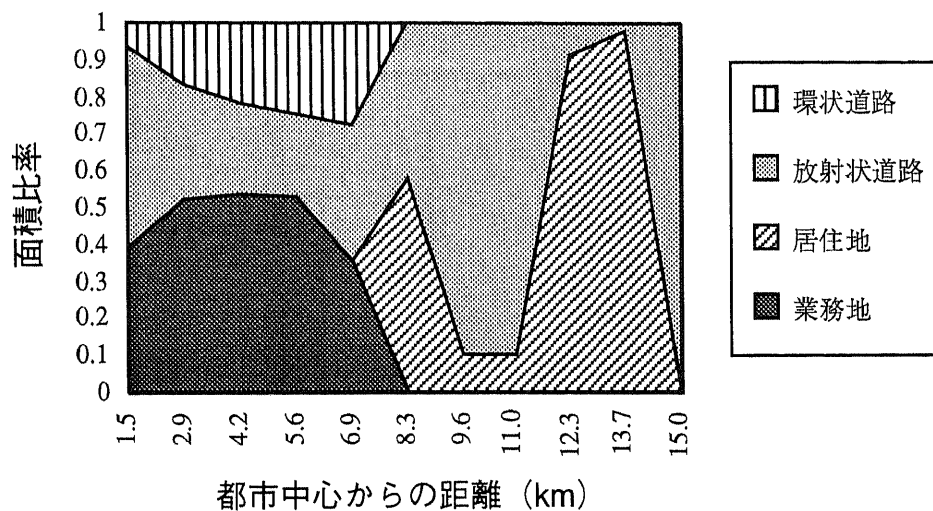
結果はコジェネ利用型の場合と同じく、工場排熱利用型地域熱供給の導入は土地利用に大幅な変化をもたらすことを示している。供給範囲が狭い場合（下限地点12.3km）には特に影響を強く受ける。居住地は熱供給範囲に強く引きずられ、業務地のすぐ外側の部分と熱供給範囲内の2ヶ所に分断される様子が見て取れる。下限地点9.6kmの場合には、ほとんどの居住地が熱供給範囲に立地し、業務地と居住地がちょうど分離した状態である。下限が6.9kmより都心側の場合には基準ケース（運輸燃料のみを最小化した結果）と同じ土地利用分布に戻る。供給区域面積は常に一定なので、供給範囲を広げれば人口が集中する領域に対する供給量が減ってしまう（供給区域の割合は距離によらず一定を仮定するため）。したがって、土地利用の変化がなくなることは、熱負荷に起因する一次エネルギー消費の節約よりも運輸エネルギー消費抑制の誘因が強く働くことによる。

#### (2) 熱供給範囲のエネルギー消費に対する影響

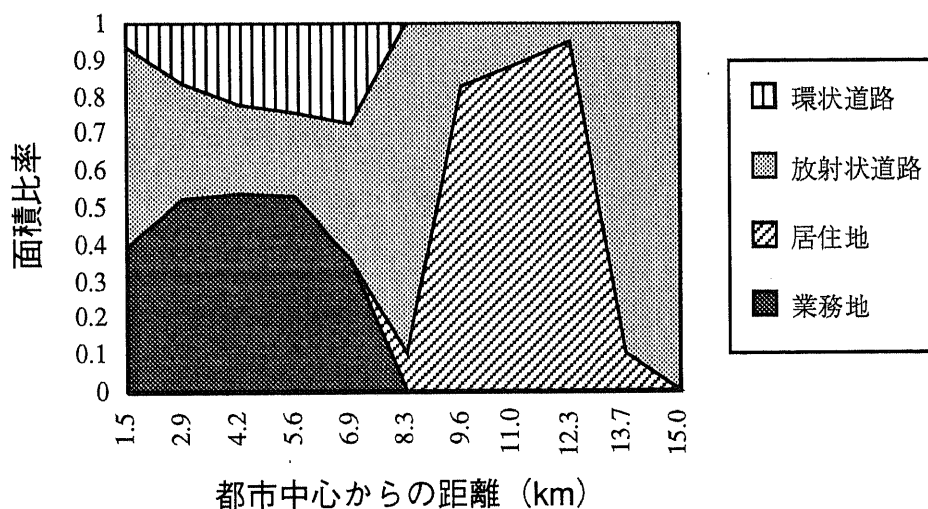
熱供給範囲を変化させたときの都市全体のエネルギー消費の変化は図8-9の通りである。ただし、基準ケースからの変化分のみを示した。供給範囲を広げるにつれて供給区域に含まれる負荷が減少することに伴い、都市ガスの節約量は低減する傾向を持つ。また、同時に節約率も低下する。この結果から、幅広くカバーするよりも集中的な熱供給が効率的であり、省エネルギーに寄与するといえる。言い換えれば、多少運輸エネルギー消費が増加したとしても、プラントの周囲に人口を集積させて地域熱供給事業を行うことが望ましいことを表わしている。

図8-8 工場排熱利用型地域熱供給プラント立地の土地利用への影響

〈供給下限：12.3km〉



〈供給下限：9.6km〉



〈供給下限：6.9km〉

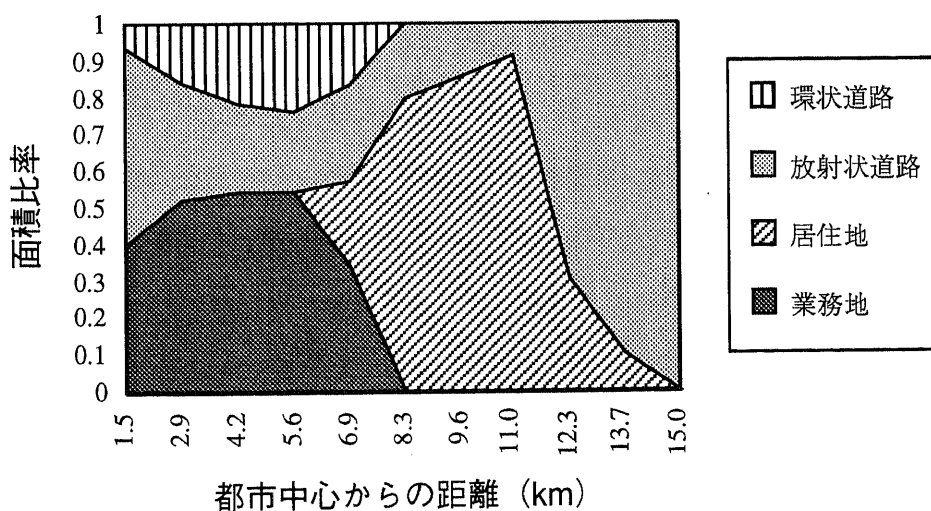
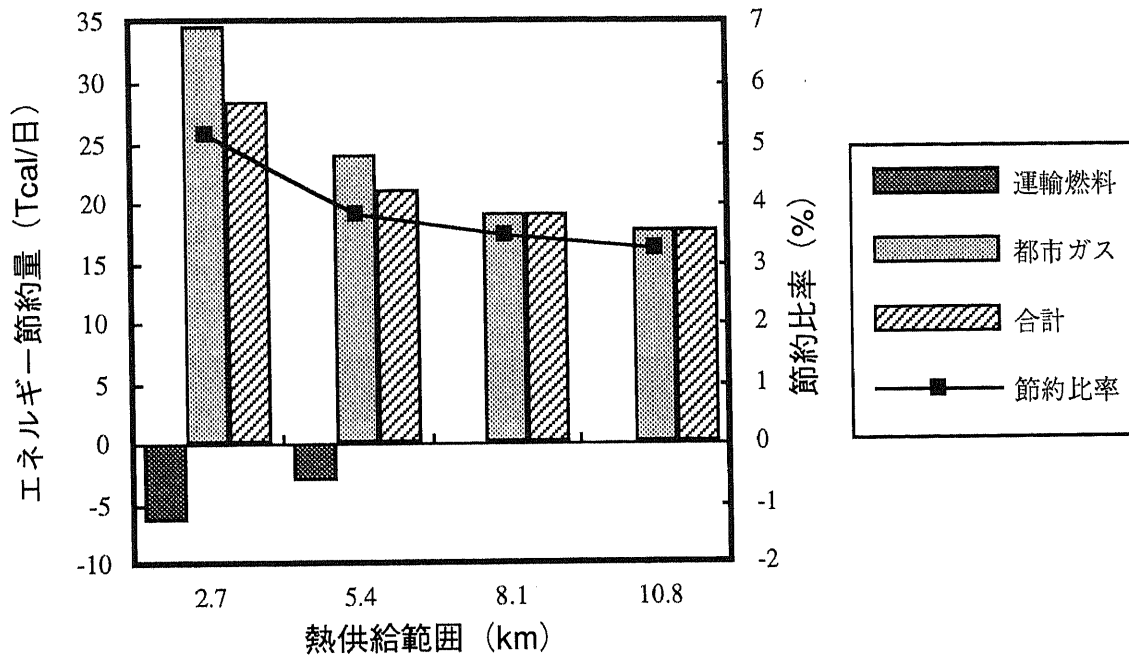


図8-9 工場排熱利用型の熱供給範囲のエネルギー消費に対する影響



### (3) 業務系熱需要に関する感度分析

前述の結果では、業務交通の影響が強いために業務地の立地はほぼ固定されていた。しかしながら、業務系ビルの熱需要がある程度以上大きければ、運輸エネルギー消費抑制を犠牲にしても、熱供給区域に立地する方が有利になると予想される。現実には冷房需要を中心として事務所ビルなどの熱需要の拡大が見込まれる。そこで、業務系の熱負荷を増加させて土地利用に対する影響を感度分析した。ただし、変化がはっきり現われるように、地域熱供給の区域面積はほぼ供給範囲の面積に等しくなるように設定した。パラメータは次の通り。

熱供給範囲の下限地点： 11.0 (km)

業務系熱負荷原単位： 100, 200, 300, 400, 500 (Mcal/m<sup>2</sup>/年)

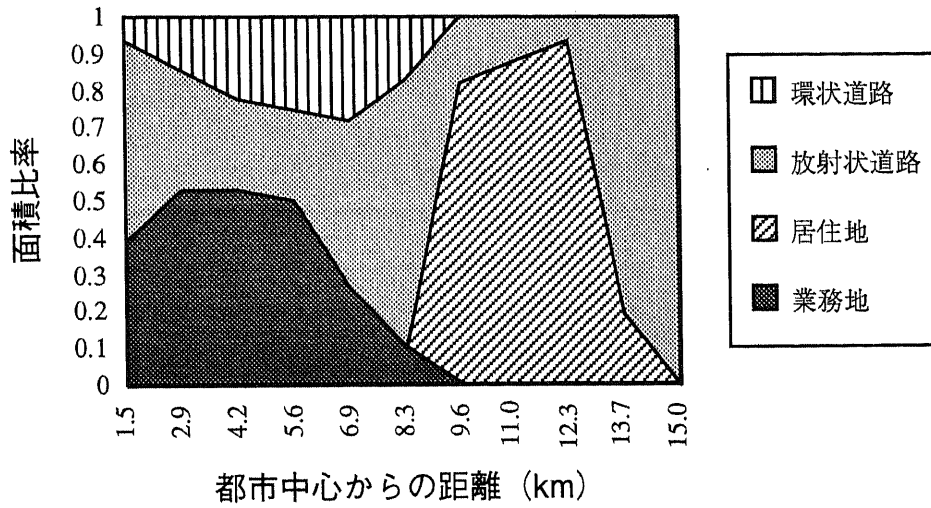
またここでは、熱負荷原単位100 (Mcal/m<sup>2</sup>/年)において総エネルギー消費量を最小にする土地利用を基準ケースとみなした。感度分析した結果の土地利用構造を図8-10に示す。なお、原単位が200 (Mcal/m<sup>2</sup>/年)のときは基準ケースと違いがなかったので省略した。

この結果は原単位が現状の3倍以上になると一部の業務地が地域熱供給範囲に移動し始めることを示している。そのため、居住地が基準ケースよりさらに都市外縁部に押しやられる傾向がみられる。また、業務地の拡散は道路面積比率に大きく影響し、環状道路の分布がはなはだしく変化する。業務地に合わせて環状道路を設置する必要性が生じる点に注意が必要である。

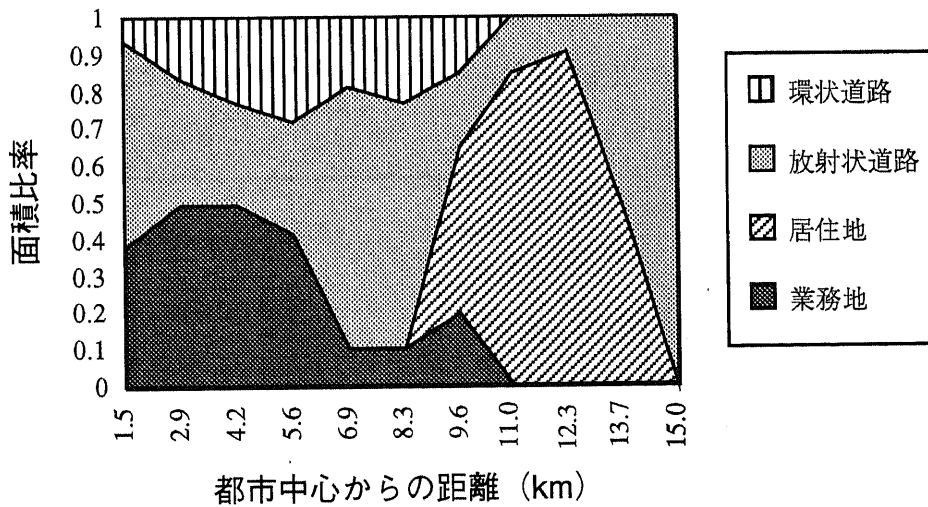


図8-10 業務系熱負荷原単位の土地利用への影響

〈熱負荷：100Mcal/m<sup>2</sup>/年〉



〈熱負荷：300Mcal/m<sup>2</sup>/年〉



〈熱負荷：400Mcal/m<sup>2</sup>/年〉

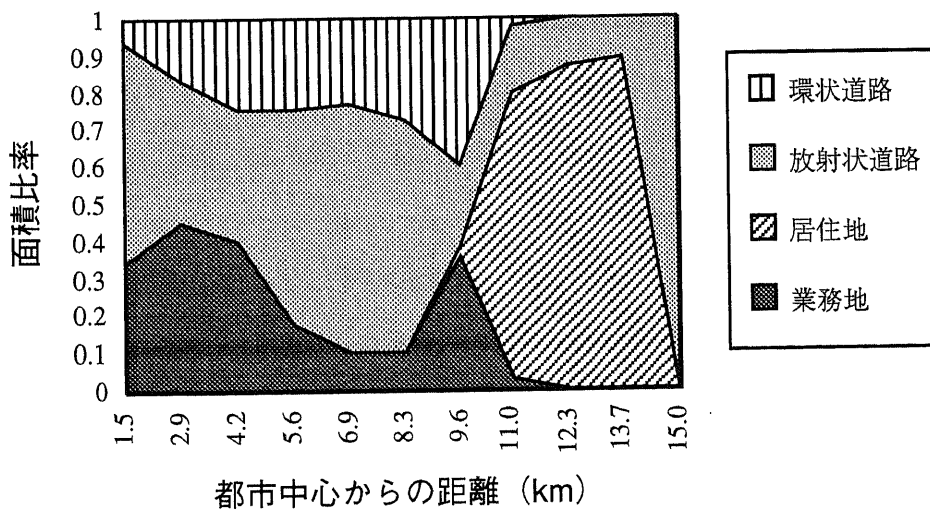


図8-10 業務系熱負荷原単位の土地利用への影響（つづき）

〈熱負荷：500Mcal/m<sup>2</sup>/年〉

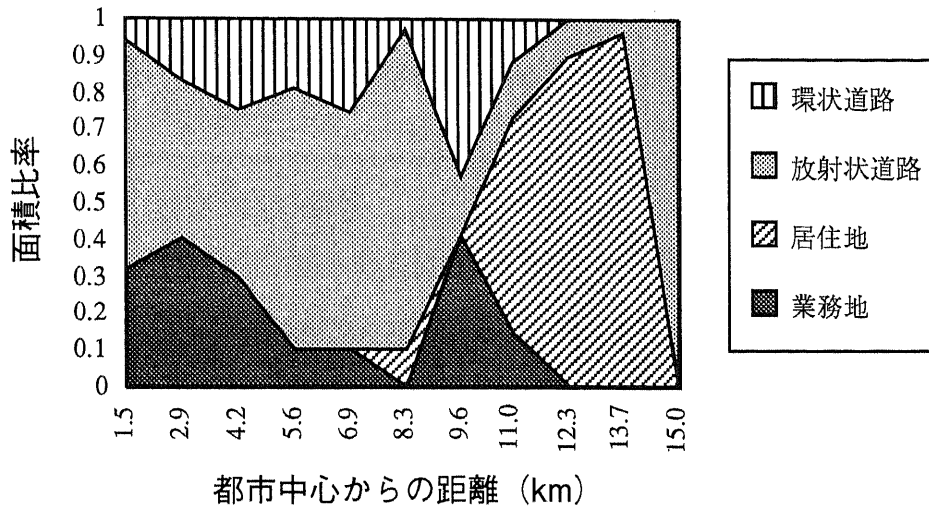
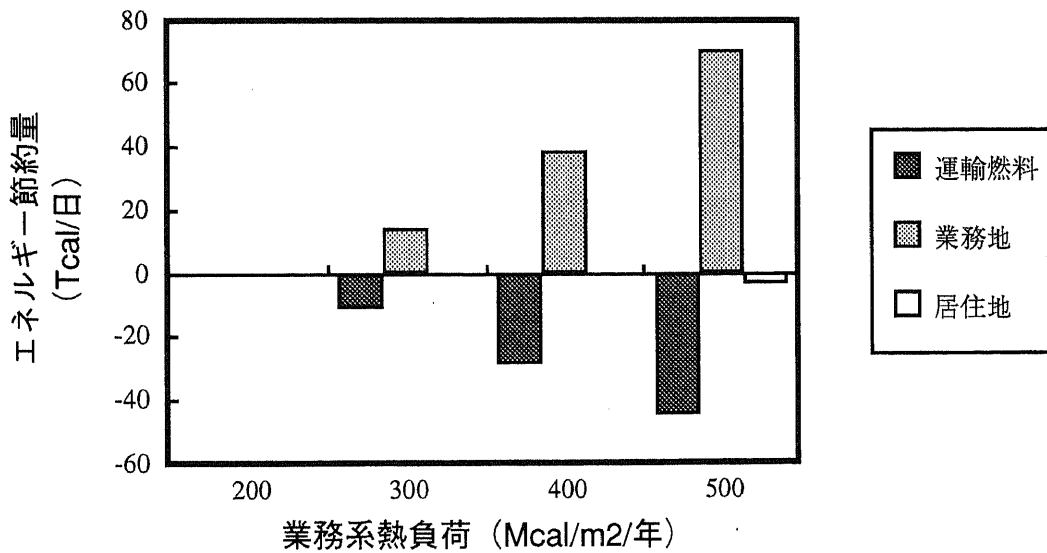


図8-11 運輸エネルギー消費と熱エネルギー消費の変化（基準ケース：100Mcal/m<sup>2</sup>/年）



注：基準ケースの業務系熱消費を負荷原単位の変化に合わせて補正した値との差をとった。

業務系熱負荷原単位を変化させたときの基準ケースに対するエネルギー節約量を図8-11に示した。

業務系熱消費の節約量は次のように求めている。

$$\text{基準ケース業務系熱消費} \times \text{熱負荷原単位} / \text{基準原単位} - \text{業務系熱消費}$$

業務地が都心の外側に移動するに従って運輸燃料消費が拡大するが、それを上回って業務地の一次エネルギー消費が削減されていることが確認できる。

## 8.5.3 両方式併存の場合の最適プラント立地

これまでコジェネ利用型と工場排熱利用型がそれぞれ単独に導入される状況を想定した。現実には両方が同時に立地することも十分考えられる。その場合には相互に影響しあうため、エネルギー消費を最小化する立地点や土地利用は前述の結果とは異なってくると予想される。

## (1) 工場排熱利用型の供給比率の影響

まず、コジェネ利用型に対する工場排熱利用型の影響を分析する。コジェネ利用型プラントが立地している地点の近傍まで工場排熱利用型が熱供給を行う状況を考える。このとき、工場排熱利用型の供給比率（供給区域面積／供給範囲面積）が上昇した場合の土地利用の変化を調べた。パラメータは次の通り設定した。コジェネプラントは単独導入の結果で最適な地点に立地するとした。

コジェネ利用型：	立地点	....	9.6	(km)
	供給範囲	....	8.3～11.0	(km)
	供給区域面積	....	70	(km <sup>2</sup> )
工場排熱利用型：	立地点	....	15.0	(km)
	供給範囲	....	11.0～15.0	(km)
	供給比率	....	21, 27, 32, 36, 42	(%)

なお、工場排熱利用型の供給比率が21（％）のとき、供給区域面積はコジェネ利用型と同じ70（km<sup>2</sup>）になる。また、ここでの基準ケースはコジェネ立地のみで工場排熱利用型がない場合の結果とした。

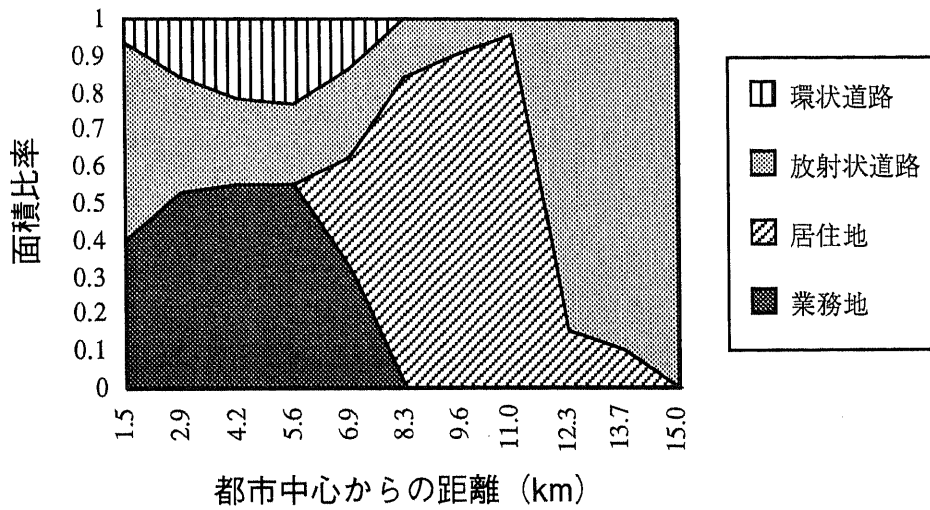
基準ケースと併せて最適化の結果を図8-12に示す。

工場排熱利用型の供給比率が比較的低く、面積的にコジェネ利用型と同等程度のうちは基準ケースの土地利用からあまり変化しない。やや居住地の裾部分が外側に寄る程度にとどまる。しかしながら、供給比率が上昇し面積的に1.5倍を超えると、居住地の大部分が工場排熱利用型供給範囲に移動し始め、居住地比率のピークがコジェネ供給範囲の最も都心側と工場排熱供給範囲の2つに分かれる。さらに供給比率が増加すると居住地比率の分断がはっきりするが、面積的に2倍に達すると居住地は完全に工場排熱供給範囲に引き寄せられてしまう。

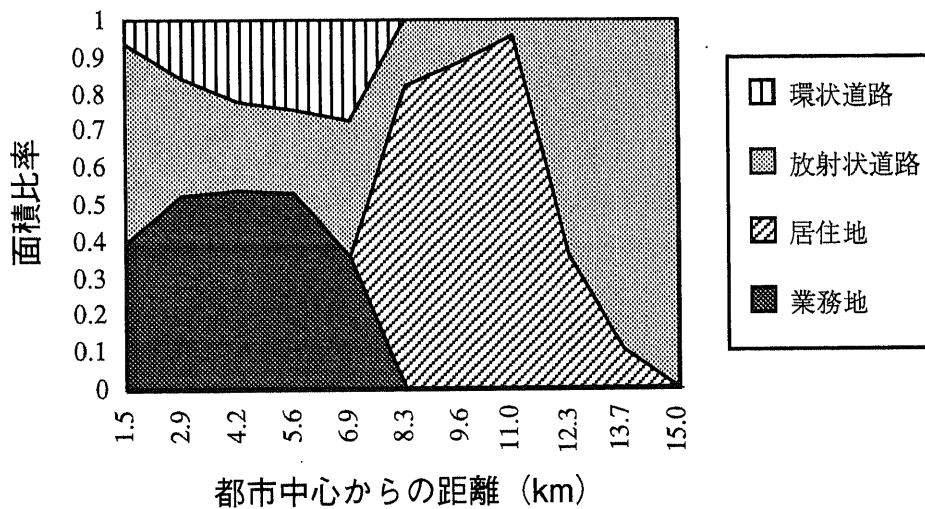
供給比率の拡大に伴う熱供給源別構成の変化を図8-13に示した。工場排熱利用型の熱供給事業が拡大・浸透してくると、住宅系の熱需要に対する供給は工場排熱に急速に置き換わる。その結果、近接して立地するコジェネ利用型がの影響力が急激に低下することが表われている。以上からコジェネと工場排熱利用型が同時に立地する場合には両者は代替関係にあり、最適土地利用は工場排熱利用型地域熱供給の普及状況に依存して大きく変化することが指摘できる。

図8-12 コジェネと工場排熱利用型併存の場合の最適土地利用

〈基準ケース〉



〈供給比率：21%〉



〈供給比率：27%〉

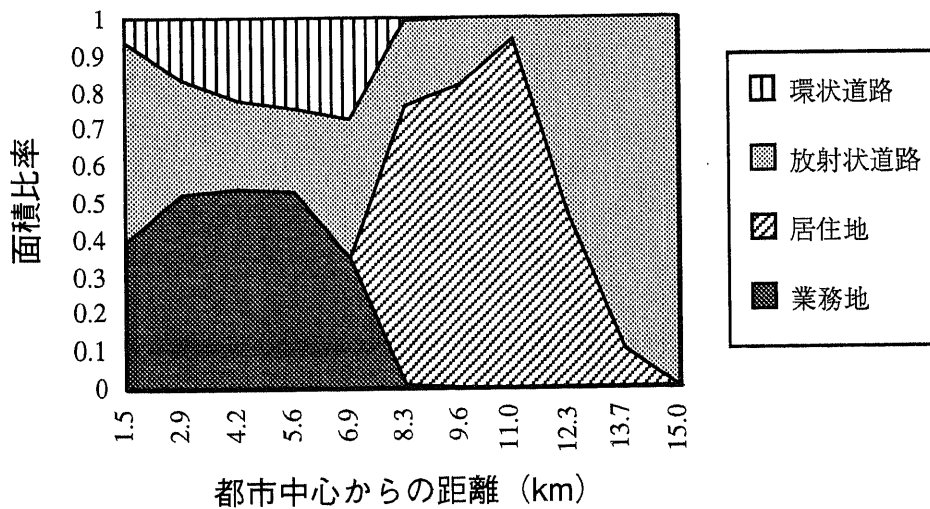
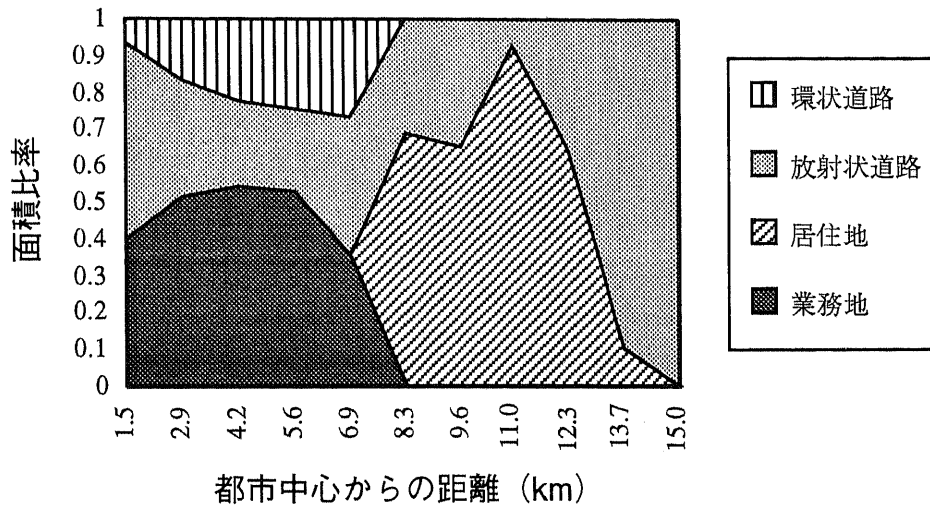
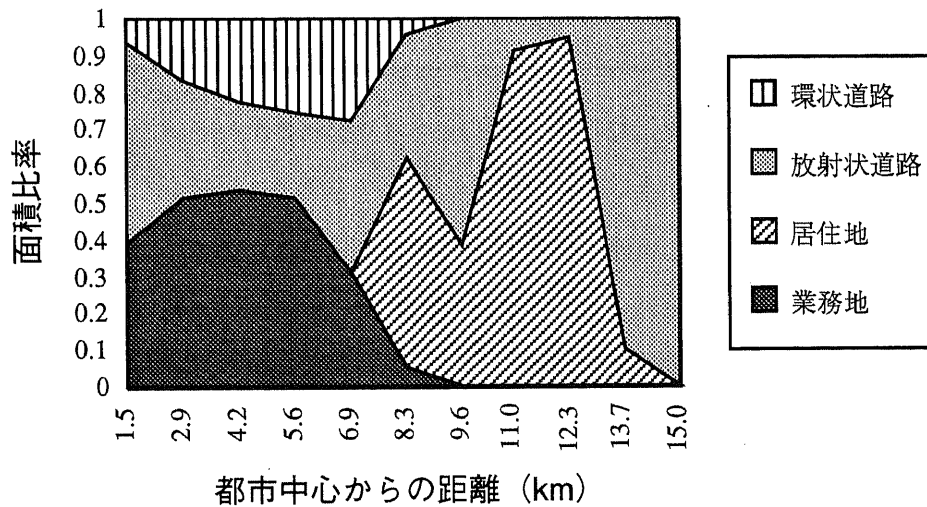


図8-12 コージェネと工場排熱利用型併存の場合の最適土地利用（つづき）

〈供給比率：32%〉



〈供給比率：36%〉



〈供給比率：42%〉

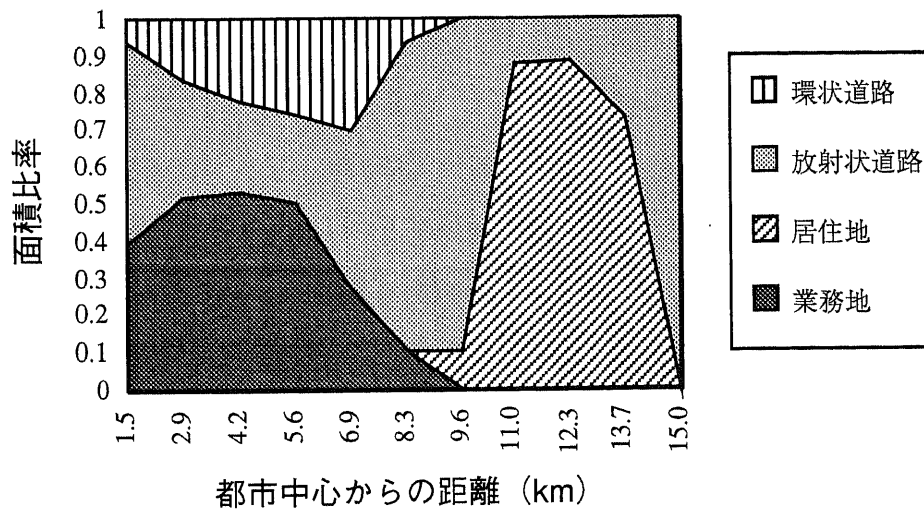
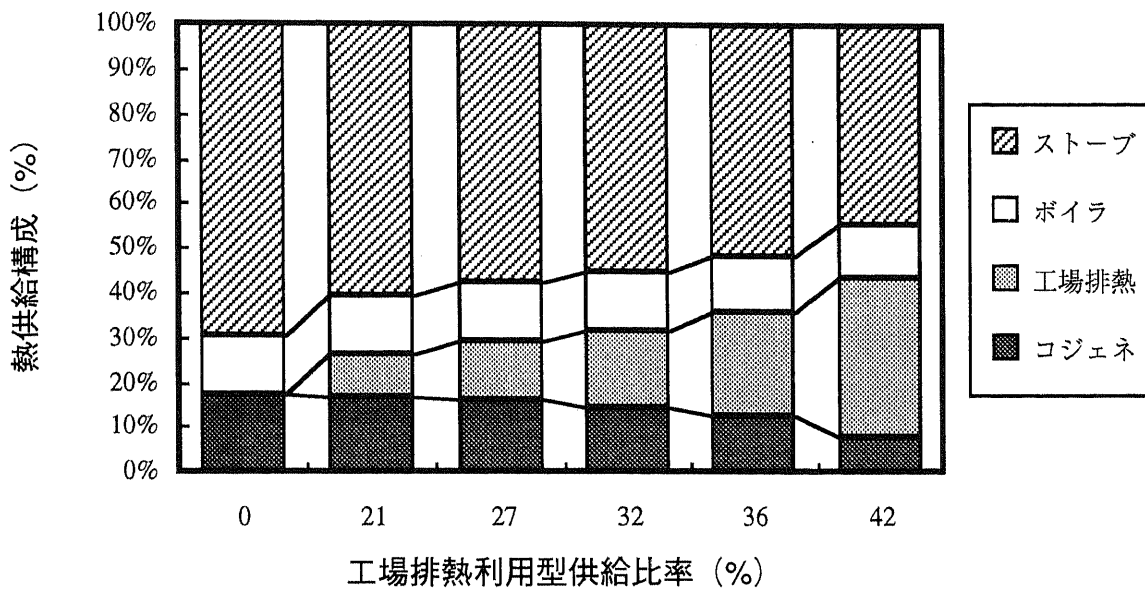


図8-13 工場排熱利用型供給比率の熱供給構成に対する影響



(2) 工場排熱利用型が併在する場合のコジェネプラントの最適立地

コジェネが単独で最適立地点に導入されたとしても、その後に排熱利用型の地域熱供給が普及してくると居住地分布は大きく変化し、その立地点の最適性は失われると考えられる。経済性のある都心業務地区から地域熱供給が導入され、遅れてごみ処理排熱を利用した住宅向け地位熱供給が開始される現象は現実の傾向でもある。そこで、工場排熱利用型が都市外縁部に熱供給している場合を想定し、コジェネプラントの立地点の影響をみる。パラメータは次の通り設定した。

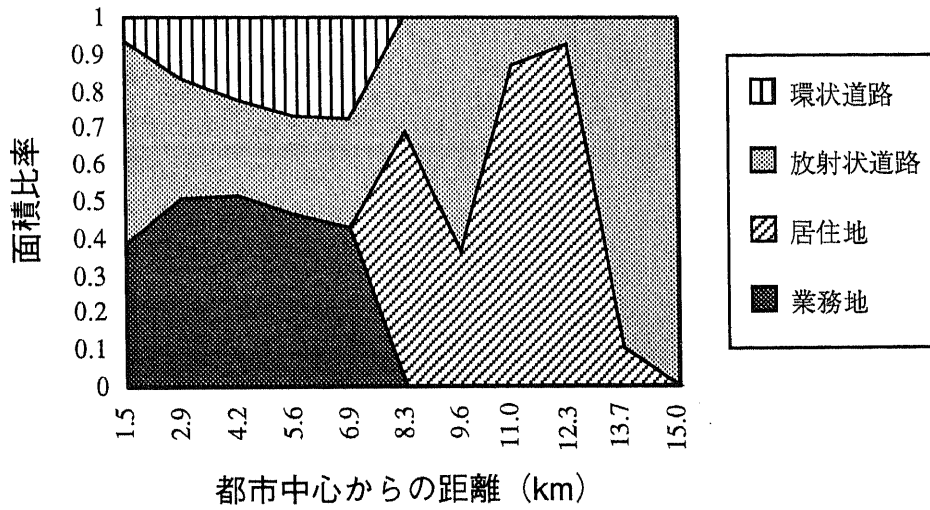
コジェネ利用型：	立地点	....	8.3, 6.9, 5.6, 4.2	(km)
	供給範囲	....	内側外側それぞれ1区間	
	供給区域面積	....	70	(km <sup>2</sup> )
工場排熱利用型：	立地点	....	15.0	(km)
	供給範囲	....	11.0～15.0	(km)
	供給比率	....	36	(%)

ここでは、コジェネ立地点が9.6 (km) , 工場排熱の供給比率が36 (%) の場合を基準ケースとする。

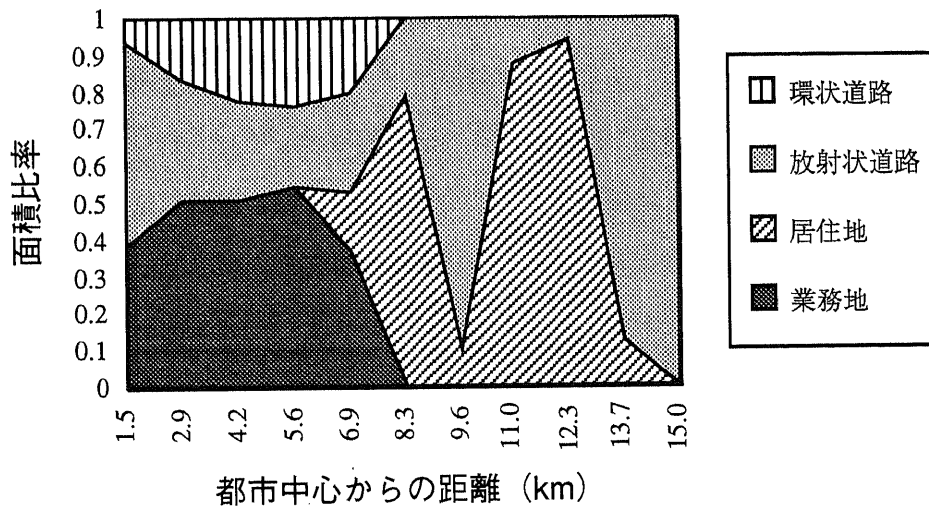
各立地点に対して最適化された土地利用を図8-14に示す。コジェネ立地点が都市中心側に移動するに従って居住地の一部がひきずられていく。ただし、都心に近づくにつれて移動する居住地は減少する傾向を示す。また、コジェネ供給範囲の下限となる地点において業務地比率がやや高くなる。これはコジェネ立地によって多少運輸エネルギー消費増になっても電力、熱エネルギー面で節約になることに起因する。

図8-14 工場排熱利用型併存の場合のコジェネ立地点別最適土地利用

〈立地点：8.3km〉



〈立地点：6.9km〉



〈立地点：5.6km〉

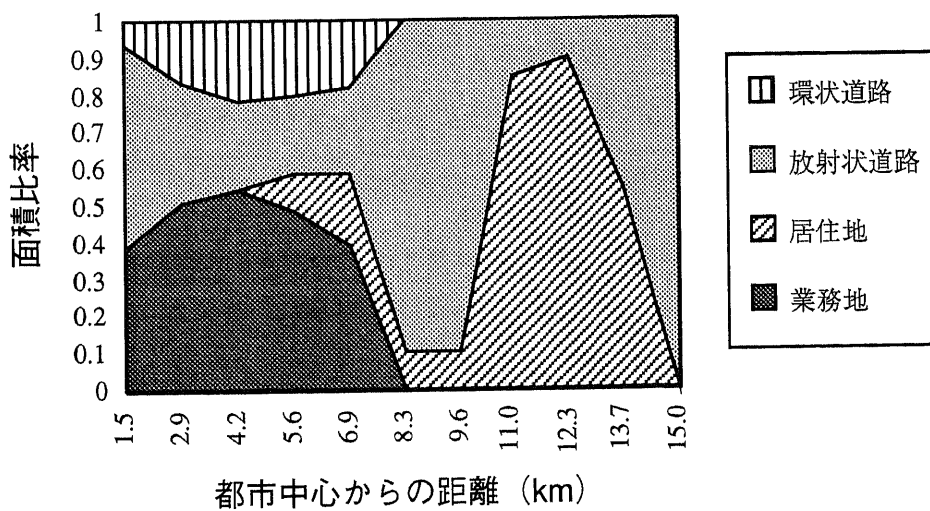
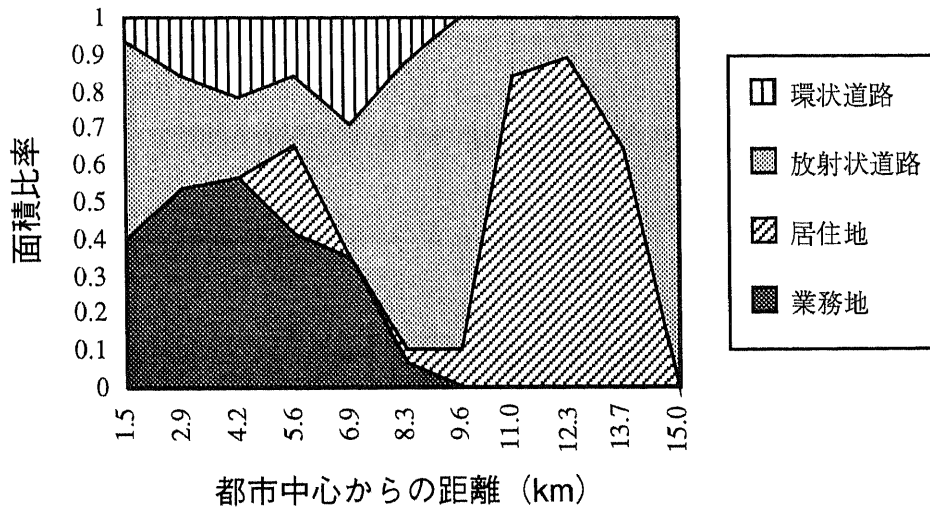


図8-14 工場排熱利用型併存の場合のコジェネ立地点別最適土地利用（つづき）

〈立地点：4.2km〉



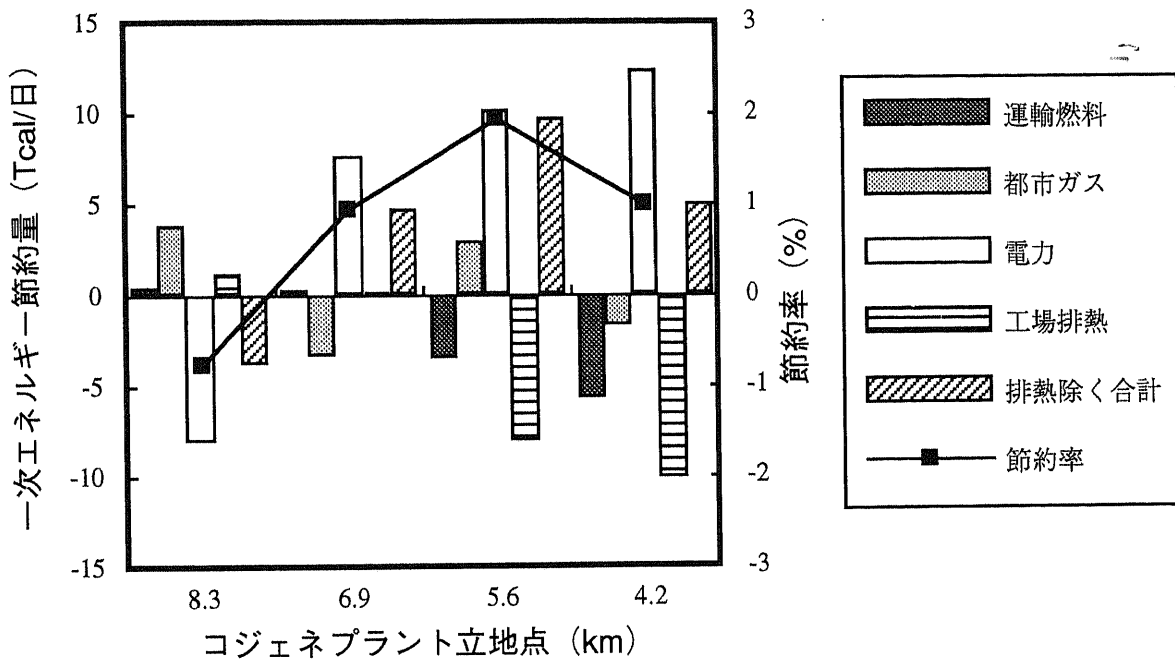
コジェネが6.9 (km) 地点から5.6 (km) 地点に変化するところで土地利用に大幅な変化が現われ、それまでコジェネの熱供給範囲に立地していた居住地の部分は、ほとんどが工場排熱利用型供給範囲に移動する。この変化には、コジェネが都心部の業務地域内に立地したため居住地を引き寄せることが道路面積を圧迫し、道路混雑を引き起こすことによって運輸エネルギー消費の増大につながる点が生じたと考えられる。都心境界付近におけるコジェネの立地点は都市全体の土地利用に非常に大きな影響を与えることが確認された。また、一部ながらもコジェネによって居住地が都心部に引き寄せられ、業務地と居住地の混在が実現される点は興味深い。現状の地域熱供給はコストが高いためただちに居住地向けに適用されるとは考えにくい。将来コストが低減されたならばコジェネの熱供給範囲をめざして住宅が立地することもありうる。今回の結果は居住地の配置が地域熱供給によって二分され、都心部と郊外部に分離されることを示している。このことから、実際に都心部にコジェネ利用型地域熱供給が導入される一方、郊外に立地するごみ処理場や下水処理場などの排熱を利用した地域熱供給事業が構想されていることを考え合わせると、モデルに表われた立地誘因が現実の都市にも働く可能性が予想される。逆に言えば、地域熱供給の導入は土地利用を制御する働きを持ちうると解釈できる。

コジェネ立地点別のエネルギー消費状況を図8-15に示す。コジェネ立地点が都心部側に移動するにつれて運輸エネルギー消費が悪化する様子が見て取れる。都市ガス消費は土地利用分布の大きな変化に伴い変動するが、電力消費は電力系統からコジェネへの転換により削減量が増大傾向を示す。全体として排熱を除く一次エネルギー消費節約量は5.6 (km) 地点に立地する場合に最大となる。すなわ



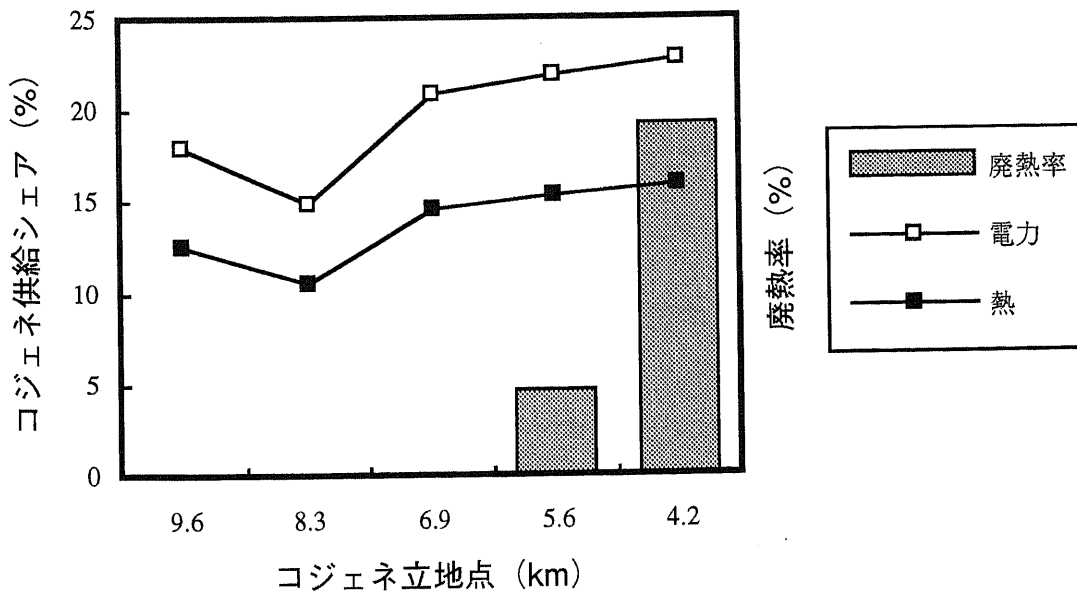
ち、コジェネ単独で導入される場合よりも都心側に立地する方が最適となる。このとき、基準ケースに比較して節約率は約2（%）となる。なお、図8-16に示すコジェネ挙動からわかるように、最適点より都心に立地するとコジェネの廃熱が急増するため、エネルギー的に不利になる。

図8-15 工場排熱利用型と併存の場合のコジェネ立地点別エネルギー消費



注：工場排熱の節約量のプラスは供給減，マイナスは供給増を意味する。

図8-16 工場排熱利用型と併存の場合の立地点別コジェネ挙動



## 8.6 本章のまとめ

### 8.6.1 結果のまとめ

本章では運輸エネルギー消費とともに民生部門のエネルギー消費を同時に考慮して、エネルギー消費を最小化する都市内の土地利用構造を導いた。運輸エネルギー消費モデルには第6章のモデルを用い、さらに民生部門に対応して工場排熱利用型およびコジェネ利用型の地域熱供給を導入したモデルを作成した。このモデルに基づいて、地域熱供給の導入が都市における土地利用・人口分布に及ぼす影響、コジェネプラントの最適立地、およびコジェネ利用型と工場排熱利用型の相互影響について分析した。結果は次のようにまとめられる。

- (1) コジェネ利用型、工場排熱利用型のどちらにしても、地域熱供給の立地は最適土地利用に大きく影響する。特に居住地が地域熱供給範囲に移動する。全般に業務地は運輸部門の影響が強いため、土地利用分布に大きな変化は現われない。
- (2) コジェネプラントの立地には最適点が存在する。都市外縁部への立地は運輸エネルギー消費増をもたらす一方、都心部への立地ではコジェネから廃熱が発生する。
- (3) 工場排熱利用型が外縁部に集中的に熱供給する場合、居住地を強く都市外縁部に引き寄せる。運輸エネルギー消費を悪化させるが、排熱利用の効果により全体として一次エネルギー消費の削減になる。
- (4) コジェネ利用型と工場排熱利用型は代替関係にある。コジェネプラントに近接して工場排熱利用型が導入されると、工場排熱型が普及するとコジェネの熱供給量は急速に減少する。
- (5) 両方式が併存している場合、コジェネは単独導入に比べてやや都心側に立地するのが最適となる。このとき、居住地分布はコジェネ側（都心部）と工場排熱利用型側（都市外縁部）とに2分される。

都市全体のエネルギー消費を最小化しようとする場合、最適土地利用分布は地域熱供給に敏感に反応することが明らかに示された。言い替えれば、都市内の人口配置を最適になるように制御しなければ、地域熱供給の省エネルギー効果も活かされてこない。今回の結果は新たに都市を建設する場合には一つの評価指標となりうる。一方、既存の都市に対しては土地利用が確立しているだけに変更することには社会的な困難が伴う。都心業務地にコジェネ利用型地域熱供給を導入することは既に行われ

ているが、遠隔地の排熱源から熱供給することは経済性の壁に阻まれており、容易に実現はしそうもない。また、地域住民のNIMBY (Not In My Back Yard) 現象は従来から指摘されるところであり、ごみ処理場などの住宅地近辺の立地には依然課題が多い。しかしながら、既存の居住地分布を前提条件とするならば、需要地に近接して排熱源を配置することが重要であり、地球温暖化抑制のためにいずれは実施されなければならない。今後、地域熱供給を制度として確立させるためには以下のことが必要と考えられる。すなわち、

- いわゆる“迷惑施設”が迷惑でなくなるような技術的支援策  
(臭気、騒音、景観、交通などの対策)
- 従来のような消費側の立場からの都市開発ではなく、供給処理を中心においた都市整備  
の考え方の確立

前者は古いながら未だに解決がついていない問題である。ウィーン市ではおとぎの国の建物のようなごみ焼却場が都市内部に設置されており、迷惑施設どころか観光的なランドマークにならんとしている。この問題に対する一つの参考例と考えられる。後者は“臭いものにフタをする”のではなく、正面から対処することを意味する。“なるべく遠く”から“なるべく近く”へと発想を転換しなければ、抜本的・構造的な省エネルギーは実現できない。都市整備の全く新しい方法論が不可欠である。

### 8.6.2 今後の課題

都市内の土地利用は歴史的な流れの中で形成されてきたものである。したがって、ただちに土地利用分布を変えることは無理である。しかしながら、徐々に望ましい方向に誘導することは可能と考えられる。一方、地域熱供給プラントも一旦立地させたならば後から移動させるわけにはいかない。地域熱供給が私企業として運営されることを考えれば、経済性が成り立つ時点・場所において事業が開始される。このため、土地利用の誘導と地域熱供給事業には密接な関係が発生する。したがって、省エネルギー型都市の形成には動学的な分析が求められる。

都市の成長とエネルギー供給を結び付けた研究例はあまり見受けられない。豊田ら<sup>[96]</sup>は都市の成長に伴う業務地・居住地の立地分布を求め、それに基づいた電力供給設備の最適配置を報告している。ただし、都市の成長の考慮は需要分布を求めるまでにとどまり、電力供給設備側は動学的にモデル化されてはいない。本章の結果にみられたように地域熱供給の普及状況がプラントの配置に影響するため、望ましいプラント立地や拡張を導くためには、都市の成長と併せて動学的なモデルに表現する必要がある。

## 第9章

### 結 論

## 第9章 結論

### 9.1 主要な結果

本研究では“都市”を軸として、民生部門・運輸部門の省エネルギー方策の分析を行った。民生部門では主としてコジェネレーションと電力託送を中心に、運輸部門では土地利用構造に注目した。最終的に民生・運輸部門を統合し、コジェネなどによる地域熱供給と土地利用の最適配置を導き、都市形態とエネルギー消費抑制との関係を明らかにした。次のような従来とは異なるエネルギー利用の考え方をベースとして、構造的な省エネルギーを考えたことが本研究の特徴である。

- － 熱の多段階利用（ヒート・カスケディング）
- － 都市構造，土地利用の適正化

本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

#### 9.1.1 民生部門の対策

##### (1) 電力託送を含めたコジェネレーション自家発の最適挙動

- － コジェネ自家発の最適挙動（電力，熱の供給量）はコジェネ熱電比に大きく依存する。
- － 電力託送は，電力料金がコジェネ自家発側の限界価値に託送料金を加えた額を上回ったときに発生する。
- － 電力託送を含めることによってコジェネシステムのエネルギー効率は改善される。改善度はコジェネ熱電比に依存する。

##### (2) 電力託送によるコジェネ保有者の最適ネットワーク化

- － 需要家を組み合わせることによって，組み合わせた需要の熱電比は元々の需要の熱電比よりも分散が小さくなりうる。需要側の熱電比はコジェネのエネルギー効率と密接に関連するので，需要の組み合わせは効率の安定化に寄与する。
- － 具体的な需要パターン例に基づき最適な組み合わせを求めた結果では，託送による電力融通

は夏季、冬季の夜間に発生する頻度が高い。中間季にはほとんど託送は起こらない。

- － 最適な組み合わせは、高い効率の需要家と低い効率の需要家とを結合し、中間的なエネルギー効率と同時に設備を抑制して経済性を高める解を与える。

(3) コジェネ分散型電源の効率が導入規模に与える影響

- － 分散型電源と集中型電源が電力料金を媒介として相互に影響しあう結果、分散型電源が市場に導入される上でエネルギー効率の下限が存在する。
- － エネルギー効率が高ければ安定解のみとなり、分散型電源導入規模に対する効率の影響は小さくなる。
- － 時間帯別料金制の下では料金比が高くなると分散型電源の運転モードの転換が発生する可能性がある。

9.1.2 運輸部門の対策

(1) 混雑度一定の都市モデルによる総トリップ長を最小化する土地利用構造

- － 混雑度一定条件の下では、交通の集中を反映し都市中心部の道路比率はかなり高くなる。
- － 総トリップ長を最小化する土地利用は、都市中心部で業務地の比率が高く、外縁部に向けて居住地比率が高まる形態となる。この傾向は実際の都市の土地利用分布とよく似ている。
- － 最適解と比較して東京23区の土地利用は都心部の道路比率がかなり小さい。この点は現実の交通混雑発生を裏付けている。
- － 通勤トリップが距離に依存する職住近接の場合には、総トリップ長を最小化する適当な距離選好が存在する。

(2) 運輸エネルギー消費を最小化する土地利用構造

- － 混雑を内生化した場合、燃料消費を最小化する土地利用は都心部に業務地が集中し、その周囲に居住地が立地する形態となる。混雑度一定モデルの結果に比べ明確に業務地・居住地が分離される点が特徴である。
- － 都心の交通混雑のため、都市中心部では道路面積比率を高くとらざるをえない。
- － 都市半径を変化させた感度分析の結果、一人あたり運輸エネルギー消費を最小化する最適な（平均）人口密度が存在する。

## (3) エネルギー消費を抑制する最適都市圏構造の評価

- － 中心都市－衛星都市からなる都市圏では、運輸関連エネルギー消費を最小化する最適な衛星都市数が存在する。ただし、最適値は都市間距離に依存し近いほど衛星都市は多くなる。
- － 都市間距離がある程度離れると人口は中心都市に一極集中する。これは離れた都市は独立した都市圏を形成することを示す。
- － 衛星都市の大きさには適度な規模があり、中心都市よりかなり小さい。
- － 同程度の都市が併存する解がないことから、その場合には互いに自立的な都市になると解釈される。

## 9.1.3 民生部門・運輸部門の統合

- － 地域熱供給の立地は都市内の最適土地利用に大きく影響する。運輸エネルギー消費を犠牲にしても地域熱供給範囲に業務地・居住地が移動する傾向を示す。
- － コージェネ利用型の地域熱供給プラントの立地には都市内エネルギー消費を最小化する最適点が存在する。
- － コージェネ利用型と工場排熱利用型は代替関係にある。両者が併存する場合には工場排熱利用型の影響により、コージェネ・プラントは都心部寄りに立地することが最適となる。
- － 都市全体を省エネルギー的にするには、排熱利用を考慮して土地利用や人口配置を適正化することが重要である。

## 9.2 省エネルギー型都市の方向性

本研究では都市それ自身の中に省エネルギー機能を組み込むことを目指した。特に都市構造や人口配置については従来定量的にはほとんど議論されてこなかった点であり、エネルギー消費に関して今回新たな知見を得ることができた。

省エネルギーは一つの考え方だけを重視すべきものではなく、様々な要素技術を問題に対応して柔軟に適用していくべきである。ただし、個別的・単発的に省エネ方策を適用しても効果は必ずしも十分でなく、系統立てて整合のとれた省エネルギー体系を構築しなければならないことが課題である。この点は今回の分析の中では、電力託送がコジェネの効率を改善する点、時間帯別料金制によりコジェネ導入量が抑制される点、コジェネと工場排熱利用型地域熱供給が代替関係にある点などにも表われている。

省エネルギー方策には6段階あると考えられる。すなわち、

	レベル	省エネルギー方策の領域
i)	技術 ....	設備・機器
ii)	運用 ....	マニュアル
iii)	基盤 ....	インフラ（社会資本）
iv)	社会 ....	法制度
v)	習慣 ....	ライフスタイル
vi)	理念 ....	教育

技術が最も具体的問題に直面し、理念が基礎的役割を担う。その大部分はいわゆる技術的対応策ではない。例えば、ごみ発電を考える。ごみ焼却の際には腐食性のガスが発生するため、燃焼温度を高くすることができない。そのため、発電を行うにも発電効率は20%以下の低いレベルにならざるをえないのが現状である。これに対し、各レベルの対策は以下のように整理できる。

レベル1 .... 耐腐食性材料を用いて、燃焼温度の高温化を図る。

リパワリング技術を応用し、低温燃焼のままで発電効率を上げる。

レベル2 .... ごみの分別により、高温燃焼に適したごみを発電の燃料にする。



すべてのごみを焼却処理する必然性はない。現状はごみがごちゃまぜなので一括して焼却されている。紙ごみが増えて燃焼温度が上がるのが逆に問題になっているが、焼却炉の動作条件とごみ質の整合を図ることが重要である。

レベル3 .... 発電分を処理場内部だけで使い切れない場合は結局無駄になる。他の公共施設で消費するにはそこまで送電線を設置しなければならない。ごみ収集車を電気自動車にし、余剰電力を利用した事例もある（外部に電力を販売できなかったため）。

レベル4 .... 逆潮流は近年制度的に認められ、余剰電力の電力会社への販売が行われるようになった。しかしながら、販売価格は電力会社側の回避コストに設定され低価格に抑えられているので、ごみ発電拡大のインセンティブに欠ける。電力小売の解禁や託送の自由化などの規制緩和はごみ発電の潜在的能力を顕在化することに寄与する。

レベル5 .... ごみとして排出する前に分別してリサイクルすれば、資源の節約やごみ処理に要するエネルギー消費の削減につながる。ごみ発電のためにごみがあるわけではなく、ごみを出さないことが重要である。ごみ発電はリサイクルの最終段階として物理的機能を終えた物からエネルギーを回収する手段と位置づけられる。

レベル6 .... ごみの発生のは元は消費物資の購入から始まる。消費が生産を誘発し、資源・エネルギーの使用を喚起する。後処理よりも前処理を充実させることが重要である<sup>[97]</sup>。近年リサイクル可能な設計の製品が出回っているが、これは消費者の動向を市場が反映したものである。製品や企業行動は市場を離れては成立し得ないので、資源・エネルギーの節約を基礎と考えることが一般化するような教育、啓蒙が必要である。

ここにみられるように、耐腐食性材料を用いてごみ発電を強化することは社会批判に全くならず、長期的な視点から省エネルギー型の構造を作り出すことには役立たない。技術的な対応策は省エネルギーを包括的に進める観点から評価される必要があり、さらに高位のレベルとの整合性・統合性を問

われるべきである。

本研究で対象とした“都市の省エネルギー”はレベル3～レベル4に該当する。エネルギーの面での社会基盤として送電系統、地域熱供給を位置づけ、コジェネレーション技術を電力託送制度と組み合わせて考察した。コジェネが優れた技術であっても社会基盤や制度的支援がなければ可能性を十分発揮することができない。また、既存の社会基盤である道路や都市そのものを再編成することを目指した。土地利用も好き勝手にしたのでは地球温暖化による海面上昇で水没することにもなりかねない。いずれも、現在の東京の閉塞的状况から技術的改良や運用面の改善などでは間に合わないと考えたことが発端である。社会基盤や社会制度の性格から長期的な対応が必要であるが、東京周辺のあちこちで都市再開発が行われているように、構造的改善のチャンスがないわけではない。全体の計画性の下に機会を捉えて将来の省エネルギーのためのインフラを整備していくことが重要な課題と考えられる。

さらに、レベル5のライフスタイルやレベル6の教育も、いい意味でも悪い意味でも都市が常に先導する領域である。したがって、レベル1からレベル6までの全ての段階において、都市を対象とした総合的な省エネルギー対策が“都市”において成立しうる。しかしながら、従来地方自治体レベルにおいて省エネルギー政策の体系化は見受けられない。それぞれの都市が環境調和型になるための条件を洗い出すこと、総合的な省エネルギー政策の考え方を構築すること、必要な経済的・制度的支援策を整備することが実効的な対策を作るために必要となる。

一方、世界的には発展途上国において都市への人口集中が進み、一部の都市では交通混雑や大気汚染がひどい。都市を構造的に省エネルギーにすることは、世界的に都市人口が拡大する状況の中で急務の課題になると考えられる。先進国がまずモデル的な都市整備を行うことによって技術的・社会的課題を解決し、一つの開発モデルを提供することが求められる。

## 9.3 今後の課題

### 9.3.1 最適化型モデルによる都市エネルギーシステムの評価

環境調和型都市の考え方を踏まえた具体的な都市の設計<sup>[98][99][100][101]</sup>が研究または提案されている。その中では様々な省エネルギー設備を導入することによるエネルギー消費削減効果などが試算されている。本研究におけるコジェネと工場排熱利用の地域熱供給が代替関係にあることにみられたように、省エネ技術は相互に補完的なものとは限らない。その点を考えれば、技術的組み合わせは最適化型の都市エネルギーモデルによって評価される必要がある。従来の研究では、辻ら<sup>[23]</sup>は都市エネルギーシステムの評価をシナリオ分析によって行っている。また、森ら<sup>[29]</sup>は最適化型モデルを用いて分散型電源の導入評価を中心として分析している。太陽光発電、ごみ発電、未利用エネルギーを活用した地域熱供給など、現在考えられている都市向け省エネルギー技術の包括的な評価モデルはまだ提案されていない。環境調和型都市はまだイメージレベルでしかないので、より実質的な議論のためには現実的な技術導入の条件を明かにしていく必要がある。

また、産業部門と民生部門を結合して熱エネルギーを多段階利用することは、高温から低温までエネルギーを有効に利用する点で省エネルギーに大きく寄与すると期待される。産業部門は比較的高温の熱を利用するが低温の需要は少ない。そのため、300℃程度的高温であっても廃棄される場合がある。全ての熱は最終的に低温に落ちるので、その受け手として民生部門を位置づけることが重要である。従来の研究の中にも都市内に立地する工場排熱を積極的に取り込んでカスケード利用することを評価した報告がある<sup>[102]</sup>。実際にわが国においても、工場排熱の民生利用はセメント工場（日立市<sup>[84]</sup>）、コークス工場（いわき市<sup>[85]</sup>）で行われている。工場排熱利用については本研究の関連研究として一部検討を行った<sup>[103]</sup>が、都市エネルギーシステムの観点からはまだ十分ではない。省エネルギーを第一に考えなければならない状況になれば、従来とは逆に排熱利用を目的として工場の都市内立地を図る場合もあるかもしれない。都市内のエネルギーフローと回収・利用との整合がとれた都市形態を見い出すことが課題である。

### 9.3.2 都市におけるエネルギー消費の可観測性と可制御性

さて、都市におけるエネルギー消費はオブザーバブルか。交通の渋滞はいたるところで発生しているが、具体的に空間的・時系列的な変化は不明である。家庭用エアコンの普及は拡大しているが、いつエアコンを使用しているかは個々に明確にはわからない。ミクロには把握できないが、地域単位の電力消費量やガス販売量などマクロにはわかるものもある。都市をエネルギーの観点から議論するに

は信頼できるデータが不可欠である。しかしながら、大都市についてはエネルギー消費実態を推定した報告<sup>[104][105][106]</sup>があるが、地方自治体レベルではデータは整備されていないといえる。従来の統計の取り方も産業系、業務系、住宅系、運輸系と部門別に縦割りにされており、“場”を基盤に統合された統計データは見受けられない。都市を軸としたデータの観測が求められる。

都市におけるエネルギー消費はコントローラブルか。最近のデマンドサイド・マネジメントにみられるように、価格情報を用いて需要を制御することはある程度可能と考えられる。通信メディアの発達により自動車に交通情報を流し、渋滞回避を図ることも近い将来可能になりそうである。しかしながら、消費者個人の選好は極めて制御しにくい。大型車や4輪駆動車、様々な装備のついた車を求める消費者は少なくない。非力な省エネ・カーや高コストの電気自動車を求める消費者はどれだけいるだろうか。これらに対する可制御性は時間的レンジに大きく依存する。その意味でも動学的な観点から、都市におけるエネルギー消費挙動を分析することが求められる。また、不可制御な要素を明らかにすることも意味がある。

現状の都市は人為的な要因から不可観測・不可制御な領域が大きいと思われる。これをどこまで可観測・可制御の状態に転換できるかが大きな評価点となる。また、そのときの都市の“状態量”が何であるかを把握することが重要である。不可制御であっても観測は不可欠であるので、可観測性を確保することも重要となる。社会システムを制御系になぞらえてモデル化することは既に古い話題である。かつてのアーバン・ダイナミクス・モデル（SDモデル）は都市の成長経路を把握することが主目的であったと考えられるが、ここでめざす都市モデルは厳密なダイナミクスを表現することではなく、システム状態の観測、時変パラメータの推定などを主眼とするものである。状態－モニタリング－政策－評価のフィードバック体系の確立、機能化を目的として、都市のモデル化と評価は再度あらためて取り組むべき課題であると考ええる。

### 9.3.3 地球温暖化問題の物理法則的解釈

物理的系はポテンシャル・エネルギーが最も小さい安定位置に向かって移動する。今、人間社会に対してポテンシャルをエネルギー消費と置き直して考える。人間社会ではエネルギー消費は派生需要であり、基本的な指標は利益や収益率などの経済性である。エネルギー消費は指標として二の次であるので、社会的な状態はエネルギー消費最小にはなっていない。近年、省エネルギー曲線、省電力曲線または省炭素曲線がいくつか報告されている<sup>[107][108]</sup>。我が国の家庭用については、2010年において現在のエネルギー価格以下のコストで20%近いエネルギーが節約できるとの結果が出されている<sup>[109]</sup>。しかしながら、一旦設備の購入や施設が建設されてしまうと、一般的にその後の変更は容易で

ない。現在において近視眼的に経済性を優先させてしまえば、将来のエネルギー消費抑制の障壁となる。この因果関係の時間遅れもエネルギー消費最小を阻む一因と考えられる。

初めにあげた物理的系のアナロジーから考えると、地球温暖化問題は人間社会に対してエネルギー消費の最小化を要求しているのではないだろうか。言い替えれば、社会的系においても物理法則が貫徹しようとしていると解釈できる。全ては物理法則に従っているのであるから、当然、人間社会も物理法則から逃れられない。経済的な最適性を維持することにエネルギーを消費する負担が物理的に見過ごせない程度になってきたと考えられる。

ここで、温暖化対策を振り返ると二酸化炭素放出抑制には次の対策が基本的である。

- i)  $\text{CO}_2/\text{Energy}$ 比を下げる。 ( $\text{CO}_2$ は放出量を意味する)
- ii)  $\text{Energy}/\text{GDP}$ 比を下げる。
- iii) GDPを下げる。

第一の方策として、熱量あたり炭素含有量の小さい燃料への転換（天然ガス、原子力など）、 $\text{CO}_2$ の回収・廃棄（深海貯留、廃ガス田への注入）などが考えられている。しかしながら、前述のように物理法則が貫徹しようとしているならば、エネルギー消費を減らさずに $\text{CO}_2$ 放出を抑えても何ら物理法則の求めるところには応えていない。となれば、 $\text{CO}_2$ は抑制できても温暖化ではない別の地球環境問題に置き換わるだけだと予想される。

以上の観点から本質的な対策は第二、すなわち省エネルギーであると考ええる。第一の対策は、いわば緊急避難的方策と位置づけるべきである。当面～30年程度はやむをえないと思われるが、その間に50年～100年で有効な省エネルギー対策の種を撒き、育成する必要がある。現在のところ我が国において具体的な温暖化対策の時間レンジに関する計画はあまり明確でない。相対的低エネルギー消費社会へのソフト・ランディングを支援する技術や社会システムの評価が必要と考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、終始適切なご指導を下された茅 陽一教授には大変感謝申し上げます。国内留学にあたって考えていた研究方向に、まさに合致した指導をいただけたことは本当に喜びでした。また、茅 宏子御奥様には家内ともどもひとかたならず御世話になりましたことを感謝いたします。オーストリアでの楽しい経験はわれわれ夫婦にとって生涯忘れられないものになるでしょう。IIASAで3ヶ月を過ごせたことは茅教授と奥様のお陰だと思っております。

堀 洋一助教授には分野が異なる立場から、別の視点でご意見をいただきましたことを感謝いたします。私が修士の学生だった1987年以来にもかかわらず、以前と変わらぬ若々しさと行動力には強く刺激を受けるものがありました。かつて先生が実験室で制御回路を組み立てておられた姿をなつかしく思い出します。

浅野浩志地球環境工学講座助教授にはとりわけ電力システムに関してご助言をいただきましたことを感謝いたします。ヒアリングで各工場に出かけた際に学生をリードし、適切に補助する姿が印象強く残っています。また、山地憲治教授には博士課程1年目と3年目の約半年に助言をいただく機会を得ました。すばやく深い洞察と鋭い質問などを含め、研究姿勢から多くを教わったことに感謝申し上げます。ただ一つ、先生が多忙のあまり、いっしょに酒を楽しむ機会が持てなかったことは今後の課題だと思っております。

林 武人助手にはマックをはじめ研究室の事務処理全般にわたって大変お世話になりました。なにしろ1987年当時のNEC98+テラクイーンと現在のマックでは雲泥の差があり、研究環境の進歩には目を見張るものがあります。私専用のマックがSE30→LCIII→Quadra650と長足の進化をとげたことは、ひとえに林さんのご支援によるものでした。厚く感謝いたします。あと願わくばプリンタのメンテナンスを完備していただけたらと思います。

内田利之技官は実務と合わせて常に学生のとりまとめ役をこなしていました。明るい性格が研究室を活気づけていたことは、私にとっても研究しやすい環境づくりに役立っていたといえるでしょう。1987年当時内田君は研究室内で最も若かったのが、現在は既に学生・院生よりも年上になってしまったことにはやや驚きを感じます。早く結婚した方がいいんじゃないかと家のかみさんも心配しています。

出口洋子夫人、八上佑子嬢、茅恵理子御嬢様には電話、FAX、郵便、コーヒー、etc. 日常の諸事万端にわたってお世話になりましたことを感謝いたします。

そう、南方英明君と中田秀樹君（現松下電器産業株式会社）の貢献もあげなければいけない。両君

がパソコンとワークステーションのシステム管理者として日常的に支援してくれたことを忘れてはいません。3年を経過してもろくにワークステーションのコマンドも覚えられない私がしでかすエラーを、顔で笑って（心で怒って）直してくれたことは本当に感謝に堪えない。ネットワークがダウンした原因の一つは私にあります（ただし、一つだけのはず）。

また、本研究の第6章については宮武昌史君との共同研究に負うところが大きでした。記して謝意を表します。

そのほか、研究室の大学院生、学部生の諸君にも大変お世話になりました。最近の若者像を知る上でも、もうちょっと酒につきあえばよかったかもしれないと少し思います。

筑波大学腰塚武志教授には、都市内の流動など都市の解析に関する資料を多数送っていただきました。どれもが興味深く大変参考になりました。東京大学先端科学技術研究センターの一ノ瀬俊明助手には、東京23区の土地利用を求めるデータ処理に関して少なからぬご協力をいただきました。また、建設省道路局道路経済調査室には自動車燃費関数に関する貴重なデータの提供を受けました。それぞれご協力下さった各位に厚く御礼申し上げます。

さて、論文も終わりに近づいてきた。本研究を完成させるにあたって妻の貢献は評価を超えるものであった。何にもまして感謝しなければならない。通常、3年も会社の実務を離れることはサラリーマンにとって普通でない事態である。その点で妻の深い理解があってこそ実現した留学であった。さらには留学してほどなく、ドイツ語もできないのにウィーンに滞在し、\*\*\*は落とすわ、\*\*\*はとれるわで大騒ぎする一方、知らないうちにドイツ語を習いに\*\*\*にいくという心臓の強さ！結婚以来の認識を新たにした次第である。3年間にわたる妻の支えなくしてこの論文はできなかったといっ

ってよい。

いよいよ最後になった。思い返せば3年経つのも早いものである。健康で楽しく研究生活をおくれたことを感謝したい。かつて湖のほとりで飲んだビールはよく冷えていておいしかった。いままた、そのビールで乾杯したい思いである。すべてに感謝を込めて、Hallstattのビールで乾杯！！

## 参考文献

- [1] 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編：「総合エネルギー統計 平成3年度版」，通商産業研究社（1992）
- [2] 森口他：「わが国における部門別・起源別CO<sub>2</sub>排出量の推計」，第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1992）
- [3] 総務庁統計局：「平成2年国勢調査報告 別巻 我が国の人口集中地区」，日本統計協会（1992）
- [4] A. Gruebler："TECHNOLOGY AND GLOBAL CHANGE: LAND-USE, PAST AND PRESENT" ，Working Paper, WP-92-2, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria（1992）
- [5] 総務庁統計局：「昭和60年国勢調査報告 大都市圏の人口」，摘要データ・シリーズ no.2, 日本統計協会（1992）
- [6] 桑原：「道路渋滞 緩和の方策はあるか」，東京大学工学部交通工学研究共同体編『東京の交通問題』，第3章，技報堂出版（1993）
- [7] 日本エネルギー経済研究所・エネルギー計量分析センター編：「エネルギー・経済統計要覧 '93」，省エネルギーセンター（1993）
- [8] 柏木：「電力とガスの共存社会」，OHM, vol.79, no11, pp.66-72（1992）
- [9] 平田：「未利用エネルギー活用とエネルギー融通システム」，計測と制御, vol.31, no.5, pp.561-565（1992）
- [10] H.-M. Groscurth, R. Kuemmel and W. Van Gool："Thermodynamic Limits to Energy Optimization"，Energy, vol.14, no.5, pp.241-258（1989）
- [11] 「コージェネレーション導入実績表（1994年版）」，日本コージェネレーション研究会（1994）
- [12] 「地域暖冷房給湯」，東京熱供給光が丘支社パンフレット
- [13] 「八潮パークタウン 地域暖冷房給湯」，東京熱供給八潮支社パンフレット
- [14] 「幕張新都心ハイテク・ビジネス地区」，東京電力パンフレット
- [15] 「環境にやさしい街づくり」，研究資料 no.38, エネルギー・資源学会（1992）
- [16] 前田：「電力システムにおける料金制と需要家行動の数理分析」，東京大学修士論文（1990）
- [17] 重次他：「自家発電を考慮した電力時間帯別料金」，電気学会論文誌B, vol.112, no.12, pp.1139-1145（1992）



- [18] 浅野：「欧米電気事業における規制と競争－電力託送を中心に－，電気学会雑誌，vol.111，no.9，pp.755-762（1991）
- [19] 諸岡：「我が国電気事業における規制緩和の動向」，電気学会論文誌B，vol.114，no.11，pp.1087-1090（1994）
- [20] M. A. Crew and P. R. Kleindorfer："The Economics of Public Utility Regulation"，Macmillan Press（1986）
- [21] 「コージェネレーション負荷推計手法」，日本コージェネレーション研究会（1989）
- [22] 浅野他：「非電気事業者の電力市場参入－時間帯別供給分担の解析－」，第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1993）
- [23] 辻他：「都市域における分散型エネルギーシステムの導入効果の一評価」，文部省科学研究費補助金重点領域研究「エネルギー変換と高効率利用」，『エネルギーに関する社会的・経済的諸問題 二酸化炭素排出低減技術に関する基礎的研究 平成2年度研究成果報告書』，pp.95-104（1991）
- [24] 「都市の熱需要とヒートポンプ利用によるエネルギーシステムの展望 報告書」，ヒートポンプ技術開発センター（1991）
- [25] 森他：「MARKALによるコージェネレーションシステムの評価」，第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1993）
- [26] 二階他：「地域エネルギーシステムの熱力学的計画と最適システムの選定」，第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1992）
- [27] 重次：「電力における季時別料金制の総合評価に関する研究」，東京大学修士論文（1991）
- [28] 佐賀井他：「コー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（1992）
- [29] 上野他：「複数のコージェネレータと需要家によるネットワークを考慮したCGSの導入と運用の評価」，第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1994）
- [30] 伊東他：「マルチエリア強調型コージェネレーション・システムの最適計画」，第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1993）
- [31] 藤井他：「コージェネレーションシステムの民生利用評価－熱電力需要比率に基づくエネルギー評価手法の検討－」，文部省科学研究費補助金重点領域研究「エネルギー変換と高効率利用」，『エネルギーに関する社会的・経済的諸問題 平成元年度研究成果報告書』，pp.67-

74 (1990)

- [32] エネルギー総合工学研究所：「大型燃料電池導入形態調査 第1編 平成2年度調査報告書」，新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1991)
- [33] 「堺第2地区未利用地総合開発計画 環境調和型エネルギーコミュニティ事業調査報告書」，新日本製鐵 (1994)
- [34] 平田他：「分散型電源システムの最適化に関する調査」，NIRA OUTPUT，NRS-83-16，省エネルギーセンター (1985)
- [35] 「コージェネレーション設計マニュアル」，日本コージェネレーション研究会 (1993)
- [36] 石坂：「都市におけるコージェネレーションシステム導入の評価方式に関する研究」，東京大学修士論文 (1993)
- [37] 木村：「新エネルギー等からの余剰電力の購入について」，エネルギー総合工学，vol.15，no.2，pp.18-29 (1992)
- [38] 森他：「分散型エネルギーシステムの評価と計画について」，第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会 (1993)
- [39] 松橋他：「不確実な需要の下での電源の最適規模構成」，電気学会論文誌C，vol.111，no.8，pp.332-339 (1991)
- [40] 浅野：「自家発保有需要家向け料金のゲーム論的分析」，電力中央研究所 研究報告，Y91004 (1991)
- [41] 山地：「電力市場のシナジェティックス」，電気学会論文誌C，vol.107，no.11，pp.994-999 (1987)
- [42] Danzig：「コンパクト・シティ」，日科技連出版社 (1973)
- [43] 大河原他：「職住の最適割当による通勤時間の削減効果－東京大都市圏での実証分析－」，電力中央研究所 研究報告，Y92015 (1993)
- [44] 粕谷：「道路網容量を考慮した土地利用最適配分モデル」，土木計画学研究・講演集，no.14(1)，(1991)
- [45] 転馬：「整数計画法による土地利用と道路網の同時最適化モデルに関する研究」，オペレーションズ・リサーチ，vol.35，no.1，pp.59-61 (1990)
- [46] 田口他：「ネットワーク構造に基づく道路の重要度評価－都市内道路網への適用例－」，オペレーションズ・リサーチ，vol.38，no.9，pp.465-470 (1993)
- [47] 腰塚：「都市域の流動に関する理論的考察」，1992年度第27回日本都市計画学会学術研究論

文集 (1992)

- [48] 田口：「交通渋滞のない都市のモデル」，1993年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会 (1993)
- [49] Comptroller General："Greater Energy Efficiency Can Be Achieved Through Land Use Management"，Report to The Congress of The United States, EMD-82-1, General Accounting Office (1981)
- [50] P. Laconte："Towards a More Energy-Efficient Community Through Planning and Design : The Case of Louvain-la-Neuve, Belgium"，Proceedings of an International Conference on New Energy Conservation Technologies and Their Commercialization，Berlin, April, 1981, vol.3, pp.2833-2842, Springer-Verlag (1981)
- [51] 腰塚：「一極集中問題をめぐって」，文部省科学研究費補助金重点領域研究“高度技術社会のパーспекティブ”第15回研究懇談会講演録 (1992)
- [52] 鈴木：「Tanner-Sherratt型職住分布に従った業務地分散の評価」，1994年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会 (1994)
- [53] 鈴木：「職住分布構造と通勤距離の関係についての理論的考察」，1994年度第29回日本都市計画学会学術研究論文集 (1992)
- [54] 「第44回東京都統計年鑑 (平成4年)」，東京都総務局統計部 (1994)
- [55] 「昭和55年度東京都市圏総合都市交通体系調査報告書ーパーソントリップ調査総括編ー」，東京都市圏交通計画委員会 (1981)
- [56] 「昭和60年度道路交通センサス 自動車起終点調査集計報告書 集計編」，建設省道路局 (1987)
- [57] 建設省道路局：「平成2年度道路交通センサス 一般交通量調査基本集計表」，交通工学研究会 (1991)
- [58] 山田：「都市の経済分析」，東洋経済新報社 (1980)
- [59] 杉浦：「立地と空間的行動」，古今書院 (1989)
- [60] 「東京の土地利用 昭和61年東京都区部」，東京都都市計画局
- [61] 一ノ瀬他：「細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布構造解析」，環境工学研究論文集, vol.31 (1994)
- [62] 林：「環境負荷削減のための都市の土地利用・交通政策」，環境研究, no.86, pp.66-73 (1992)
- [63] R. ハーバーマン：「交通流の数学モデル」，現代数学社 (1981)

- [64] 石谷他：「省エネルギーを目的とした交通流制御方式」，第2回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源研究会（1985）
- [65] 「道路整備の省エネルギー効果に関する調査研究報告書」，建設省道路局・国土開発技術センター（1981）
- [66] 建設省道路局資料（1994）
- [67] 金本：「東京一極集中の経済学」，宇沢・堀内編『最適都市を考える』，第4章，pp.95-105，東京大学出版会（1992）
- [68] 小川：「最適都市の構造－都市間の均衡と社会的共通資本－」，宇沢・堀内編『最適都市を考える』，第2章，pp.45-71，東京大学出版会（1992）
- [69] D. L. Keyes : "Energy and Land Use - An instrument of US conservation policy?" , ENERGY POLICY, vol.4, no.3, pp.225-236（1976）
- [70] 宮武：「都市構造と運輸エネルギーに関する研究」，東京大学卒業論文（1994）
- [71] 鈴木：「人口分布の構造解析」，大明堂（1985）
- [72] 秋山：「図説 都市構造」，鹿島出版会（1990）
- [73] 松岡他：「都市構造及び都市配置と地球温暖化」，環境研究，no.86, pp.51-65（1992）
- [74] 「都市整備における省エネルギー推進調査」，建設省都市局・日本都市計画学会（1982）
- [75] 田頭：「通勤と業務交通からみた最適なオフィス分布について」，1994年度第29回日本都市計画学会学術研究論文集（1992）
- [76] 腰塚：「道路の密度と所要時間」，オペレーションズ・リサーチ，vol.39, no.5, pp.237-242（1994）
- [77] 国土庁大都市圏整備局監修：「平成5年 大都市圏の整備」，首都圏整備協会（1993）
- [78] 日高：「モーダルシフトとエネルギー効率－トラックと鉄道との比較を中心として－」，日本エネルギー経済研究所 研究調査報告，IEE-SR243（1993）
- [79] 運輸省運輸政策局情報管理部編：「運輸経済統計要覧 昭和63年版」，運輸経済研究センター（1988）
- [80] 日本国有鉄道編：「国鉄統計ダイジェスト鉄道要覧 昭和59年版」，日本国有鉄道情報システム部（1984）
- [81] 運輸省運輸政策局監修：「平成5年版 都市交通年報」，運輸経済研究センター（1993）
- [82] 吉岡他：「発電所の配置を考慮した排熱利用による省エネルギー可能性の検討」，第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1993）

- [83] 「日立駅前地区」，東京電力パンフレット
- [84] 「廃熱エネルギー利用事業－化学工場の廃熱利用による地域熱供給システム－」，新エネルギー財団パンフレット
- [85] 「機械設計便覧」，丸善（1973）
- [86] 桜井他：「ライフスタイルによる将来のエネルギー消費変化の分析」，エネルギー経済，vol.20, no.9, pp.11-28（1994）
- [87] 通産省編：「エネルギー '94」，電力新報社（1994）
- [88] 「民生部門エネルギー消費実態調査（業務部門編Ⅱ）」，EDMC 調査研究シリーズ no.2, 日本エネルギー経済研究所・エネルギー計量分析センター（1987）
- [89] 「空気調和衛生工学便覧Ⅱ 空調設備編」，オーム社（1987）
- [90] 片山他：「九州地域における事務所ビルのエネルギー消費量に関する調査と解析」，空気調和・衛生工学会論文集，no.39（1989）
- [91] 片山他：「九州地域における事務所ビルの使用水量に関する調査と解析」，空気調和・衛生工学会論文集，no.39（1989）
- [92] 石野他：「事務所建築の年間エネルギー消費特性に関する理論研究」，空気調和・衛生工学会論文集，no.23（1983）
- [93] 矢作：「事務所建物のエネルギー消費量の多変量解析第一報－多変量解析結果」，空気調和・衛生工学会論文集，no.14（1980）
- [94] 日本建築学会編：「建築設計資料集成8 建築－産業」，丸善（1981）
- [95] 「都市ガスによる地域冷暖房」，東京ガスパンフレット
- [96] 豊田他：「都市型電力貯蔵設備の需要端に及ぼす効果」，第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，エネルギー・資源学会（1993）
- [97] 中西：「水の環境戦略」，岩波新書324，岩波書店（1994）
- [98] P. Calthorpe: "Marin Solar Village: A Paradigm for Growth and Sustainability" , Proceedings of an International Conference on New Energy Conservation Technologies and Their Commercialization , Berlin, April, 1981, vol.3, pp.2843-2852, Springer-Verlag（1981）
- [99] 環境共生省エネ都市共同研究会：「環境共生省エネ都市モデルの概要」，電力中央研究所有識者会議第二研究グループ第10回研究会資料（1993）
- [100] 田中：「エネルギー消費からみた環境調和型都市の設計および評価」，東京大学卒業論文（1994）

- [101] 「コンソーシアムプロジェクト エネルギーコミュニティ21-II 第2回総会資料」, (株) 日本総合研究所 (1994)
- [102] H.-M. Groscurth, TH. Bruckner and R. Kuemmel : "Energy, Cost, and Carbon Dioxide Optimization of Disaffregated, Regional Energy-Supply Systems", Energy, vol.18, no.12, pp.1187-1205 (1993)
- [103] 古谷他 : 「産業排熱の多段階利用に関するエクセルギーモデル」, 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.317 (1994)
- [104] 松尾他 : 「都市のエネルギー消費構造比較」, 東京大学工学部総合試験所年報, vol.50, pp.49-54 (1992)
- [105] 松尾他 : 「日本の7大都市におけるエネルギー消費構造比較」, 東京大学工学部総合試験所年報, vol.51, pp.49-54 (1992)
- [106] Nakamura et.al : "Analysis on Energy Demand, and Evaluation of Energy Conservation Measures in Urban Districts", Proceedings of IEA International Conference on TECHNOLOGY RESPONSES TO GLOBAL ENVIRONMENTAL CHALLENGES, Kyoto, November, 1991, pp.617-624 (1991)
- [107] N. Nakicenovic : "Energy Strategies for Mitigating Global Change" , Working Paper WP-92-1 , International Institute for Applied Systems Analysis (1992)
- [108] P. L. Joskow and D. B. Marron : "What Does a Negawatt Really Cost? Evidence from Utility Conservation Programs", THE ENERGY JOURNAL, vol.13, no.4, pp.41-74 (1992)
- [109] 「平成5年度国立環境研究所委託業務結果報告書 地球温暖化対策技術の評価及び評価手法の開発に関する研究」, 住環境計画研究所 (1994)

## 発表論文等

### 〈掲載論文〉

1. 秋澤・茅：「電力託送を含めたコージェネレーション自家発挙動のモデル分析」，電気学会論文誌B, vol.114, no.10 (1994)
2. 秋澤・浅野・茅：「コージェネ分散型電源と系統発電所との分担に関する分析」，エネルギー経済, vol.20, no.4 (1994)
3. Akisawa, Kaya : "International Comparion of the Effects of Installing Cogeneration Systems", International Journal of Glabal Energy Issues (印刷中)

### 〈解説〉

1. 秋澤：「民生部門におけるコージェネレーション導入効果の国際比較」，コージェネレーション, vol.9, no.1 (1994)

### 〈卒業論文・修士論文〉

1. 卒業論文：「システム構造を考慮したクロス・インパクト法」 (1985)
2. 修士論文：「統合型エネルギーシステムに関する研究」 (1987)

### 〈学会講演発表〉

#### クロス・インパクト法：

1. 秋沢・茅：「システム構造を考慮したクロス・インパクト法」，計測自動制御学会第24回学術講演会, No.3201 (1985)

#### 統合型エネルギーシステム：

2. 秋沢・茅：「IES（統合型エネルギーシステム）のシミュレーション分析」，昭和61年度電気学会電力技術研究会, PE-86-21 (1986)
3. 秋沢・茅：「統合型エネルギーシステム（IES）のシミュレーション分析」，エネルギー・資源研究会第4回エネルギーシステム・経済コンファレンス (1987)
4. 秋沢・茅：「統合型エネルギーシステムのロバスト性の検討」，日本シミュレーション学会

第6回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス（1987）

放射性物質の海上輸送時安全評価：

5. 尾崎・飯田・佐藤・宮尾・野口・高野・秋沢：「海上輸送時リスク評価方法，（I）腐食と外圧による密封健全性」日本原子力学会昭和63年年会（1988）
6. 尾崎・飯田・佐藤・宮尾・野口・高野・秋沢：「海上輸送時リスク評価方法，（II）核種放出量の算定方法」日本原子力学会昭和63年年会（1988）
7. 尾崎・飯田・佐藤・宮尾・野口・高野・秋沢：「海上輸送時リスク評価方法，（III）被曝線量に及ぼす海象条件の影響」日本原子力学会昭和63年年会（1988）

コジェネレーション導入効果：

8. 秋澤・茅：「民生部門におけるコジェネレーション導入効果の国際比較」，エネルギー・資源学会第12回研究発表会（1993）

電力託送とコジェネレーション：

9. 秋澤・茅：「電力託送を含めたコジェネレーション自家発の挙動分析」，平成5年電気学会全国大会，No.1637（1993）

コジェネ保有者のネットワーク化：

10. 秋澤・浅野・茅：「コジェネ・ネットワーク化による電力託送の効果分析」，平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.234（1993）
11. 秋澤・浅野・茅：「コジェネレーションに適した需要家組合せの検討」，平成5年電気学会電力技術研究会，PE-93-142（1993）
12. 秋澤・浅野・茅：「電力託送によるコジェネを持つ需要家の最適ネットワーク化」，平成6年電気学会全国大会，No.1649（1994）

コジェネ分散型電源と集中型電源の電源構成：

13. 秋澤・浅野・茅：「コジェネ分散型電源と系統発電所との分担に関する分析」，エネルギー・資源学会第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス（1994）



14. 秋澤・浅野・茅：「コジェネ分散型電源の導入比率の分析－発電効率の与える影響－」，平成6年電気学会電力技術研究会，PE-94-21（1994）

運輸エネルギー消費削減のための都市構造：

15. 宮武・秋澤・茅：「運輸エネルギー消費を最小化する最適都市構造」，平成6年電気学会全国大会，No.1650（1994）
16. 秋澤・茅：「混雑度一定の都市モデルによる運輸エネルギー消費と都市構造との関係」，平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.319（1994）

排熱の多段階利用：

17. 古谷・中田・秋澤・茅：「産業排熱の多段階利用に関するエクセルギーモデル」，平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.317（1994）

## 付 録

### 民生部門における コジェネレーション導入効果の国際比較

## 付録 民生部門におけるコジェネレーション導入効果の国際比較

### 0.1 本研究の目的

コジェネレーション（以下コジェネ）は地球温暖化抑制のための化石燃料消費削減の一方策として有望視されている。日本においては近年、産業分野や民生分野において導入が進められてきている。一方、コジェネはヨーロッパではCombined Heat and Power（CHP）と呼ばれ、以前よりその導入・利用は盛んである。

コジェネの原理は発電の際に排出される熱を熱需要に供給することにある。通常、発電効率は高々40%程度であり、残りの約60%は廃熱として捨てられてきた。その活用は熱を多段階に利用することとなり、全体として一次エネルギー投入を削減することができる。ただし、このためには発電と同時に熱需要が十分存在することを前提とする。言い替えれば、コジェネ導入によるエネルギー効率改善の効果は電力および熱の需要状況に依存する。したがって、電力・熱需要は気候などの要因に依存するため、コジェネの効果は国によって異なると予想される。

そこで、本研究では、民生部門を対象にOECD諸国および旧ソ連・東欧諸国におけるコジェネ導入状況を統計データから調査し、マクロ的な視点から国際比較を行った。また、エネルギー需要特性がコジェネを導入した時のエネルギー効率に与える影響について、簡単なモデルを用いて考察した。なお、本研究ではOECD/IEAのエネルギー統計<sup>[1][2]</sup>を使用した。

## 0.2 発電排熱状況の国別実態調査

### 0.2.1 調査の前提

今回対象とした国は表0-1に示す19ヶ国である。ただし、コジェネの熱供給に関するデータが収集できたものに限定した。なお、旧共産圏諸国については、コジェネの熱供給分が地域熱供給に含まれた表記であったため、過大評価である点に注意が必要である。

OECDの統計にはコジェネによるエネルギー供給量が示されている。一方、民生部門において消費した電力と発電効率から、それに伴う火力発電所の排熱量が推計できる。これらを基に、発電排熱の内の有効利用された割合、熱需要と排熱の相対的比率を調べた。ただし、マクロ的検討のため熱需要の温度帯は区別せず、全てコジェネで供給可能な低温熱とみなした。

表0-1 調査対象国

地域	国 名	数
OECD	オーストラリア, オーストリア, ベルギー, カナダ, デンマーク, 旧西ドイツ, オランダ, ノルウェー, ポルトガル, スペイン, スウェーデン, スイス, イギリス, アメリカ	15ヶ国
旧共産圏	旧チェコスロバキア, ハンガリー, ユーゴスラビア, 旧ソ連	4ヶ国

### 0.2.2 コジェネ導入状況

各国のコジェネ熱供給の状況を、全体および民生用に分けて図0-1に示した。旧共産圏が目立って多く、OECDの中では旧西ドイツ、北欧諸国、アメリカが多い。また、産業部門のみにコジェネが導入されている国も見られ、民生部門で大規模に利用されている国は限られている。

### 0.2.3 国別の排熱利用状況

統計データに基づき各国の排熱利用状況およびエネルギー需要構成を整理した。その結果を図0-2に示す。ここで、内側の円が民生部門における電力および熱需要の構成比率を示す。なお、熱需要はさ

らにコジェネで賄われている分とそれ以外に分けている。外側の円は、民生部門の電力消費に起因する発電排熱が同部門のエネルギー需要に占める割合を示す。ただし、コジェネの供給量をその内の有効利用された分として、残りを未利用分とみなして分けて表示した。外側の発電排熱が内側の熱需要を越えている場合には、発電所を全面的にコジェネに置き換えれば、排熱で低温熱需要の全てを賄い得ると期待できる。

図0-1 国別コジェネ熱供給量（1989年）

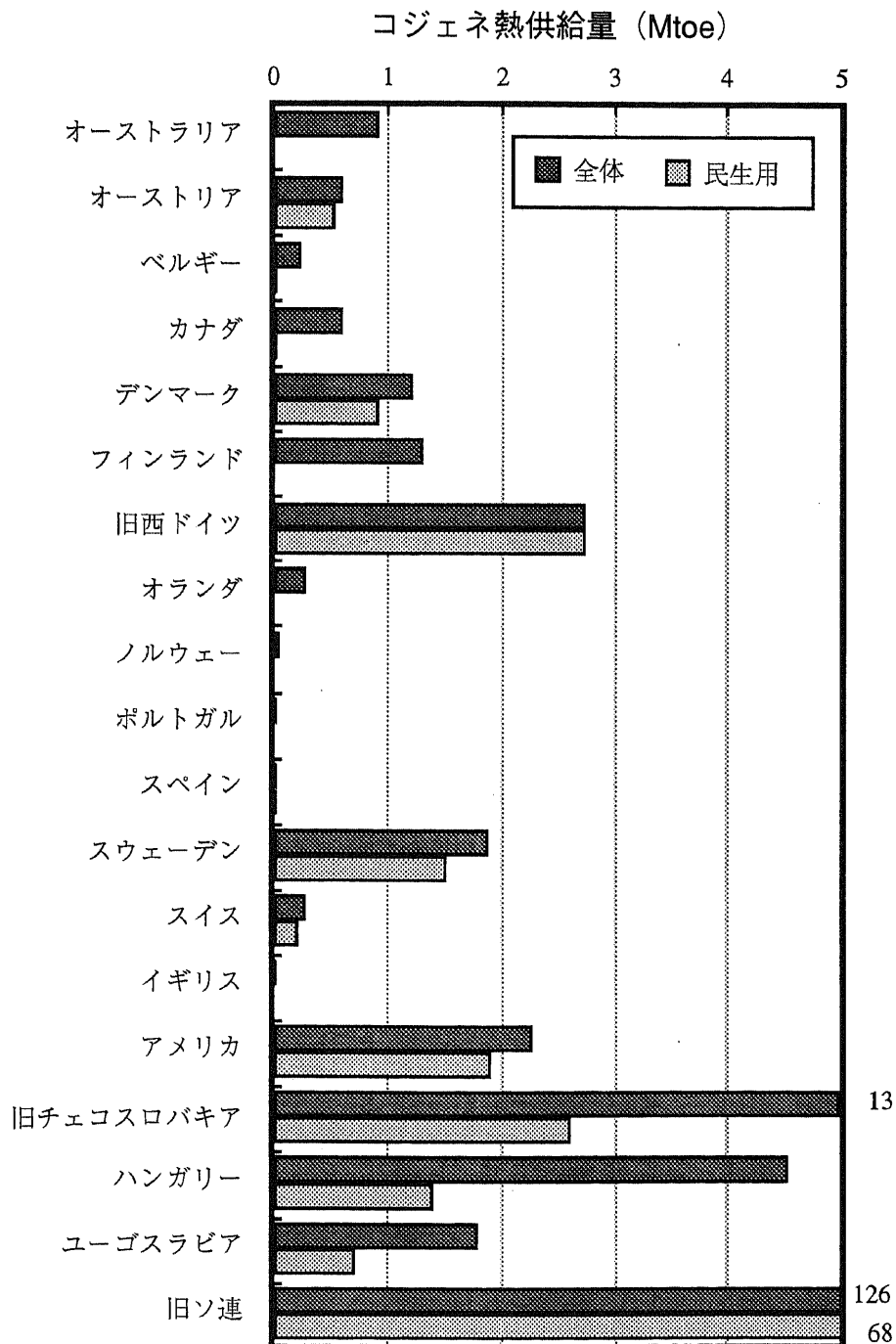
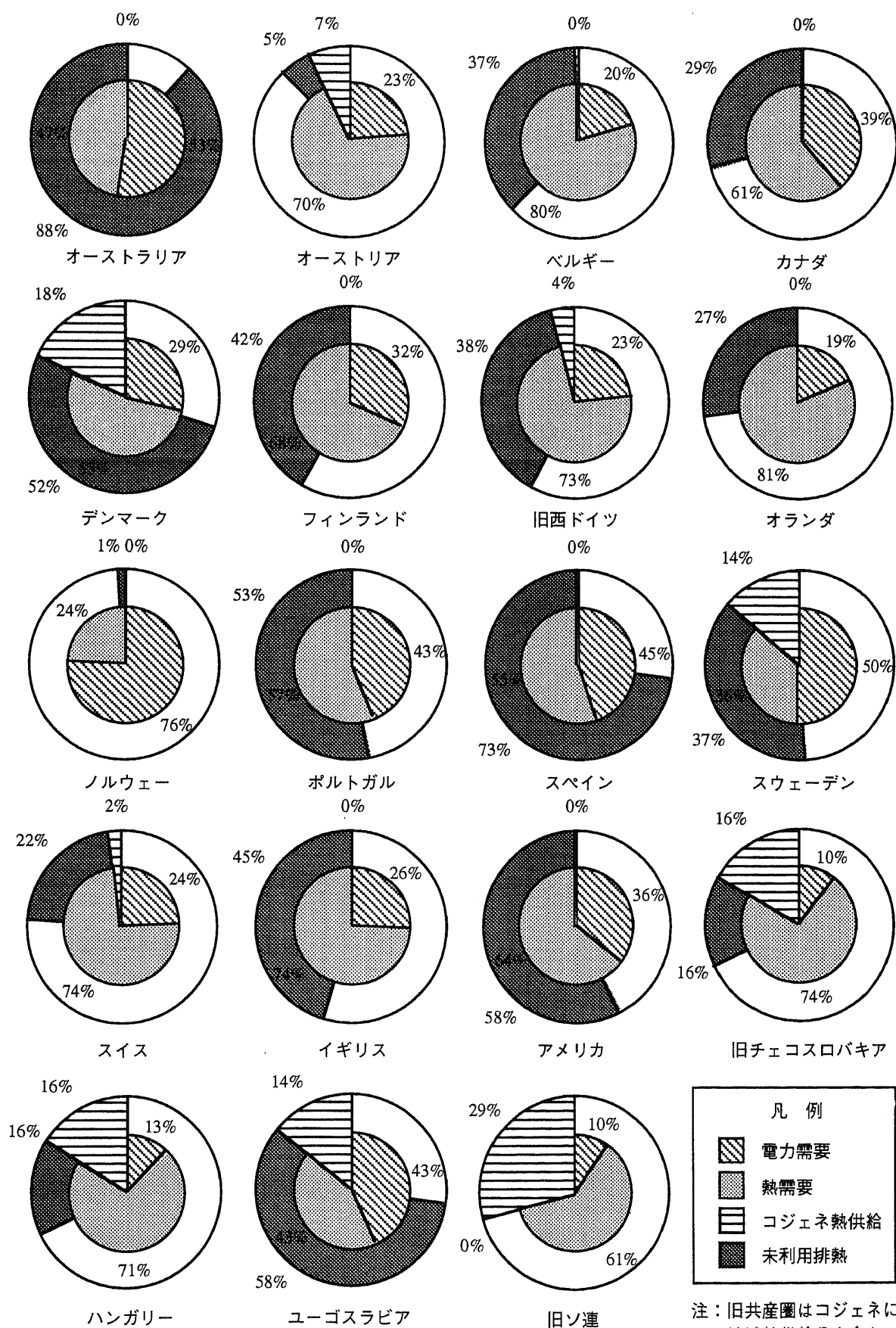


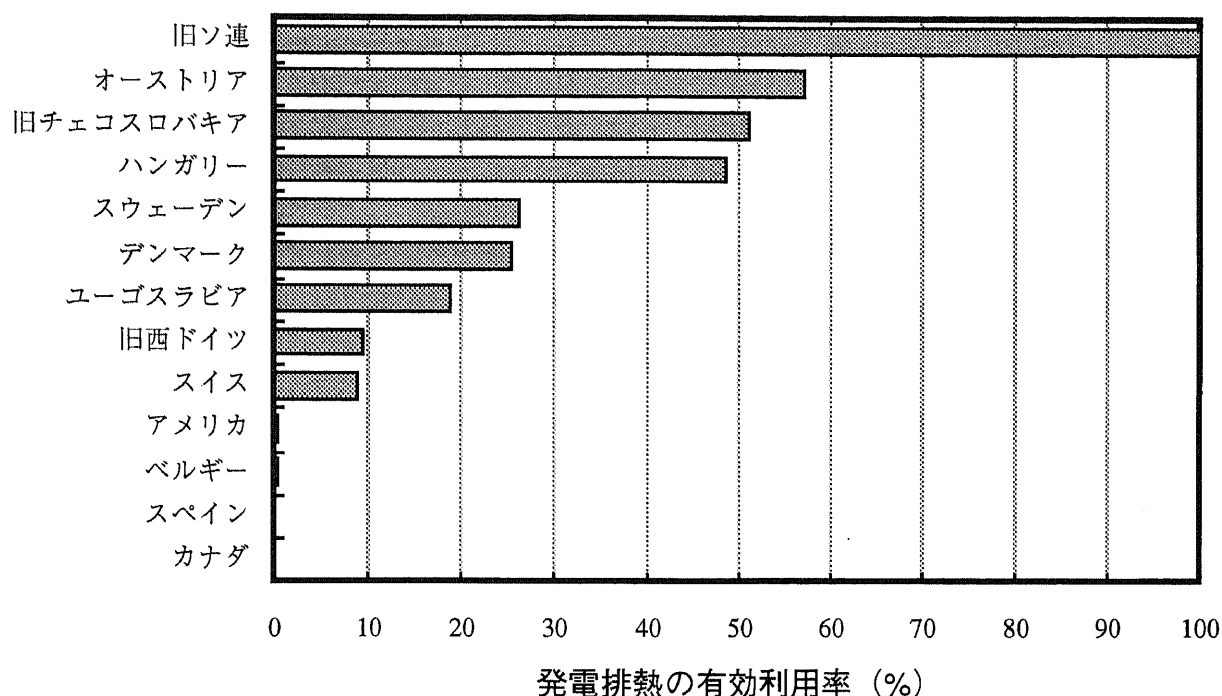
図0-2 国別発電排熱利用状況



#### 0.2.4 排熱有効利用率

発電排熱に占めるコジェネ供給分の比率を排熱有効率と定義する。すなわち、図0-2におけるコジェネ供給分／（コジェネ供給分+未利用排熱）に相当する。図0-3には発電排熱を有効利用している比率が高い順を示した。オーストリア、旧共産圏、北欧諸国、旧西ドイツでは20%～50%の排熱有効利用が進んでいる。これは冬の暖房需要が大きいことに起因すると考えられる。旧ソ連が100%を示しているのは地域熱供給を含むための過大評価である。

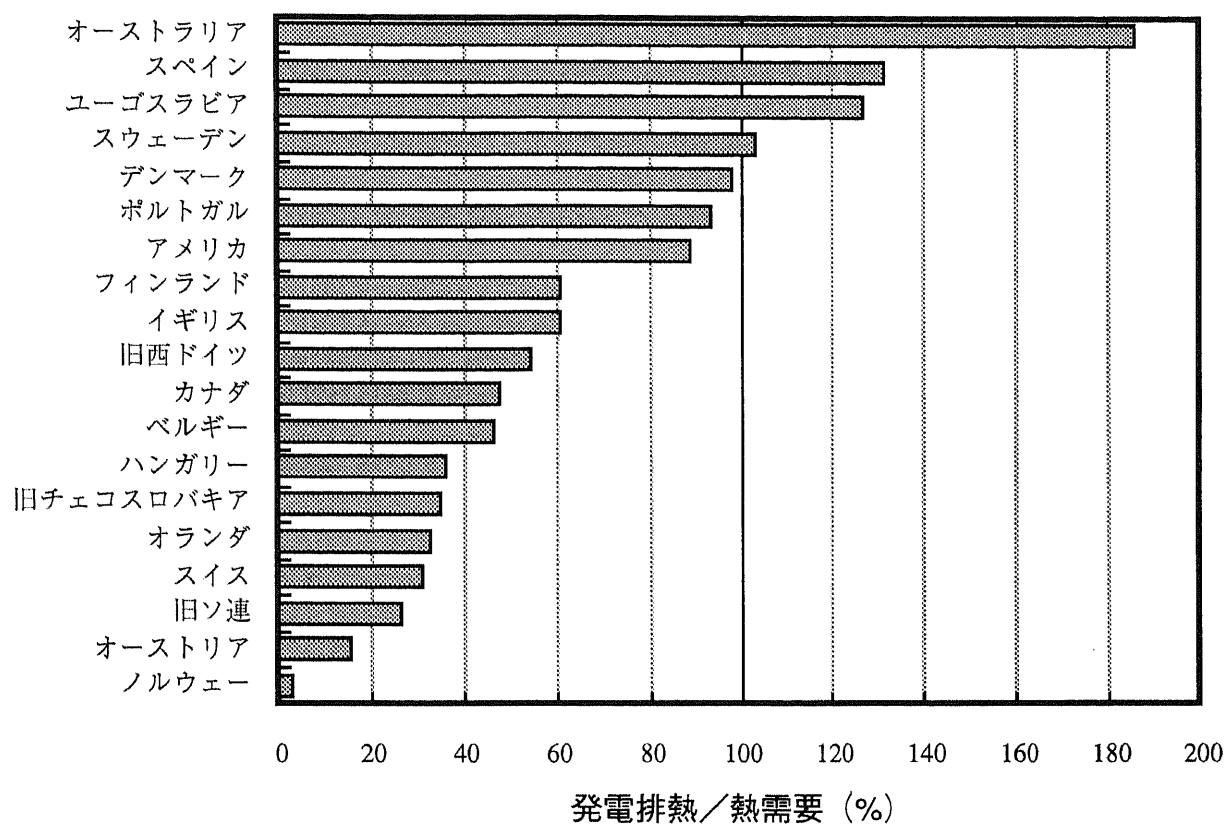
図0-3 国別のコジェネによる発電排熱有効利用率



#### 0.2.5 熱需要に対する排熱の比率

当然ながら、発電排熱に比較して熱需要そのものが大きくなければ排熱の有効利用は十分実現できない。その意味で熱需要に対する発電排熱の比率をコジェネ導入の有効性を表す指標とみなすことができる。ただし、民生部門の熱は民生部門の発電に起因する排熱で賄うものとし、産業部門の発電の寄与は含めなかった。民生部門の電力消費に伴う排熱と熱需要の比率が高い順を図0-4に示す。比率が100%を越える国もあり、人口が都市部に集中していれば、コジェネの導入が大きな省エネルギー効果を生むと期待される。オーストリア、ノルウェーの比率が小さいのは、水力発電の割合が高いために発電排熱が元々少ないことに起因する。

図0-4 国別の熱需要に対する発電排熱の比率



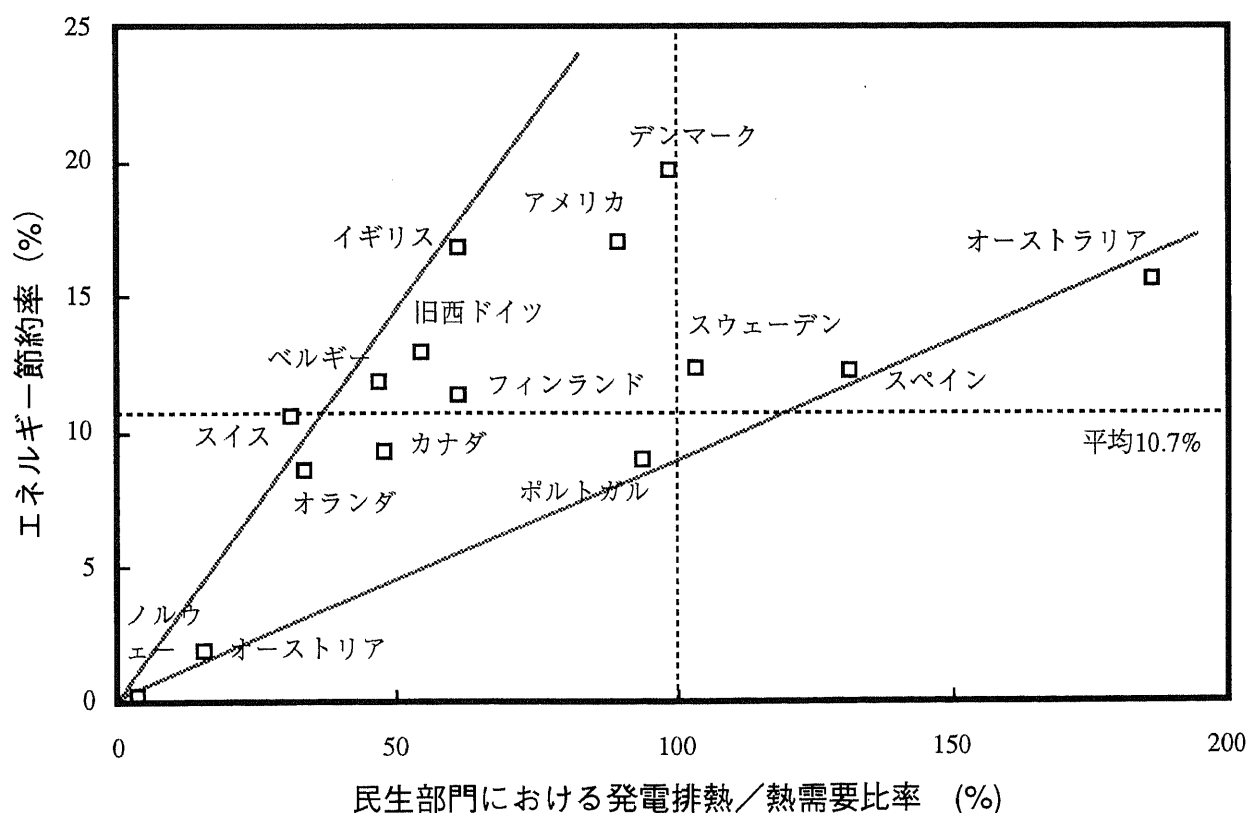


### 0.3 発電排熱利用による省エネルギー効果の概算

ここでは、民生部門の電力供給を全てコジェネに置き換えた理想的な状態を想定し、各国のエネルギー節約率を算出した。民生部門に起因する発電排熱の熱需要に対する比率とエネルギー節約率の平面にOECD諸国をプロットしたものを図0-5に示した。熱需要に対する排熱の比率が増加するにつれて節約率が高まる傾向が表れている。国全体のエネルギー需要に占める産業部門の割合が高ければ民生部門のコジェネ導入の寄与は小さくなることが、直線的傾向からの変動に影響している。

デンマーク、アメリカではほぼコジェネで熱需要を賄うことができ、20%近いエネルギー節約が予想される。全体の平均として約10%の節約が見込まれる。なお、民生需要の空間的分布、時間的分布や温度的分布を無視していることから、ここで求めたエネルギー節約率は、総体としてのコジェネ導入効果の上限を表していると考えられる。したがって、実際の民生用コジェネの効果としてはさらに割り引いた値になる点に注意が必要である。

図0-5 民生部門におけるコジェネ導入のエネルギー節約効果



## 0.4 エネルギー需要性向がエネルギー効率に与える影響

### 0.4.1 民生部門コージェネレーション導入時のエネルギー効率モデル

ここでは、民生部門の熱需要を全て発電排熱で賄うとした場合、すなわち、コージェネが民生部門における電力、熱供給の主体となった状態を考える。この時、電力・熱需要構成や産業・民生部門構成などのエネルギー需要特性が国全体のエネルギー利用効率に及ぼす影響を、簡単なモデルで分析し実際の傾向に当てはめる。

民生部門をコージェネで賄うとした時の国全体のエネルギー効率は以下で求められる。ただし、運輸部門のエネルギー消費は無視する。まず、一次エネルギー投入量は次式で表される。

一次エネルギー消費：

$$S = \alpha E_t + \beta H_t + A_r \quad \dots (0.1)$$

ただし、

$E_t$  : 総電力消費量

$H_t$  : 総熱エネルギー消費量

$A_r$  : 民生部門における追いだき燃料消費量（排熱不足分）

$\alpha$  : 火力発電所の発電効率の逆数

$\beta$  : 熱需要に占める産業部門の比率

ここで、追いだき燃料消費量は排熱状況に応じて次式で与えられる。

排熱が民生部門熱需要より少ない場合：

$$\begin{aligned} A_r &= H_r - W_r \\ &= H_r - \frac{1-g}{g} E_r = (1-\beta) H_t - (\alpha-1) \delta E_t \end{aligned} \quad \dots (0.2)$$

排熱が民生部門熱需要を上回る場合：

$$A_r = 0 \quad \dots (0.3)$$

ただし、

$E_r$  : 民生部門の電力消費量

$H_r$  : 民生部門の熱エネルギー消費量

$W_r$  : 民生部門電力消費に伴う排熱量

$g$  : 発電効率

$\delta$  : 電力需要に占める民生部門の比率

したがって、一次エネルギー消費量は次式となる。

$$S = \begin{cases} \{(1-\delta)\alpha + \delta\} E_t + H_t & (W_r < H_r) \\ \alpha E_t + \beta H_t & (W_r \geq H_r) \end{cases} \quad \dots (0.4)$$

以上から、エネルギー効率 $\eta$ は発電排熱と熱需要との大小関係によって2通りに定式化される。電力負荷と熱負荷の時間的パターンの整合性や排熱回収時のロスなどを無視しているため、この $\eta$ はエネルギー効率の上限値と解釈される。

$$\eta = \frac{E_t + H_t}{S} \quad \dots (0.5)$$

排熱が熱需要より小さい場合：

$$\eta = \frac{1}{\{(1-\delta)\alpha + \delta\}\gamma + 1 - \gamma} \quad (W_r < H_r) \quad \dots (0.6)$$

排熱が熱需要以上の場合：

$$\eta = \frac{1}{\alpha\gamma + \beta(1-\gamma)} \quad (W_r \geq H_r) \quad \dots (0.7)$$

ただし、

$\eta$  : 全体のエネルギー効率

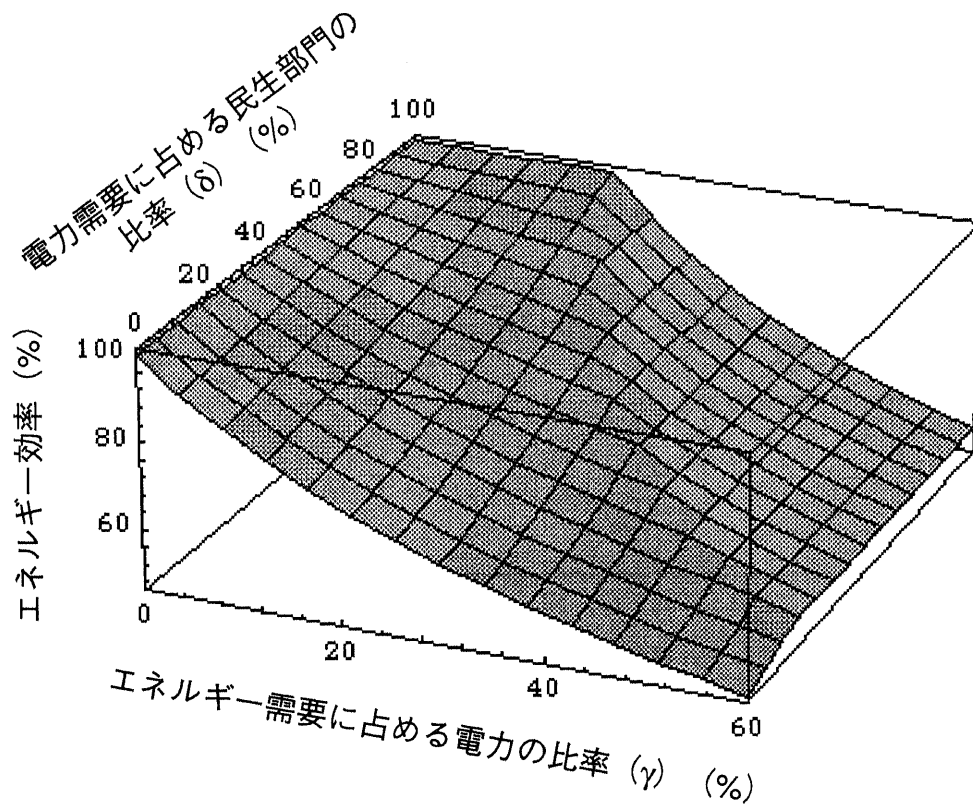
$\gamma$  : エネルギー需要に占める電力の比率

$$\gamma = \frac{E_t}{E_t + H_t} \quad \dots (0.8)$$

熱需要と発電排熱の均衡点を境界に、エネルギー効率の $\delta$ （電力需要における部門構成）への依存性が消え、 $\beta$ （熱需要における部門構成）への依存性に転換する構造的変化が特徴である。図0-6に $\beta=50\%$ の時のエネルギー効率の変化を図示した。X軸が $\gamma$ 、Y軸が $\delta$ を示す。

$\delta$ が一定で $\gamma$ が増加することによる効率低下は産業部門の電力消費増大に伴う発電排熱増加に起因する。一方、 $\delta$ が大きくなるとコージェネによる改善効果の寄与が増大するため、エネルギー効率は上昇する。 $\gamma$ が増加するに従ってエネルギー効率は低下傾向を示すが、図0-6で均衡点によって2つの斜面に分かれていることが見てとれる。すなわち、ある $\gamma$ 以上では余剰排熱の発生に伴い、急激にエネルギー効率が低下する。

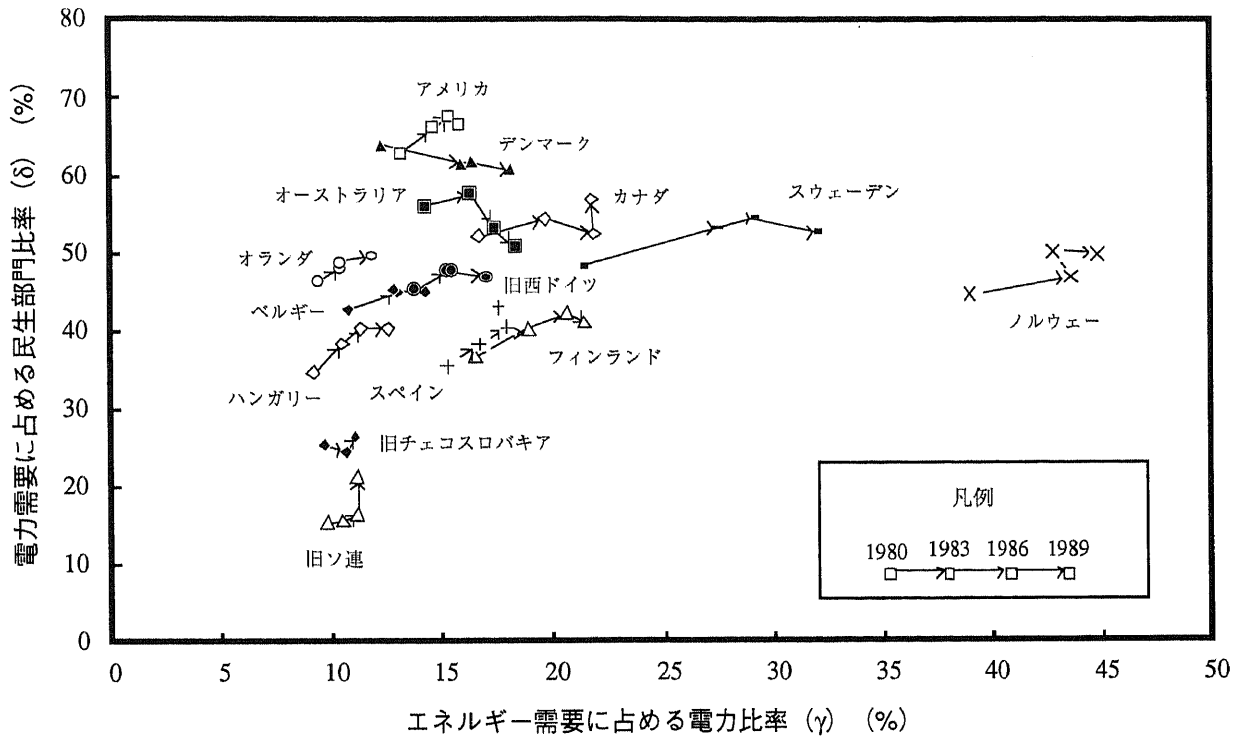
図0-6 エネルギー需要性向に対するエネルギー効率



#### 0.4.2 各国のエネルギー需要特性

エネルギー需要特性として、先の $\gamma$ - $\delta$ 平面に各国の1980年～1989年の実績値をプロットしたものを図0-7に示す。矢印の向きに時系列的に変化する様子を示す。どの国も概ねエネルギー需要に占める電力比率 ( $\gamma$ ) が増加するとともに、電力需要における民生部門比率 ( $\delta$ ) が高まる傾向を示している。

図0-7 各国のエネルギー需要性向のトレンド



#### 0.4.3 エネルギー需要特性がエネルギー効率に与える影響

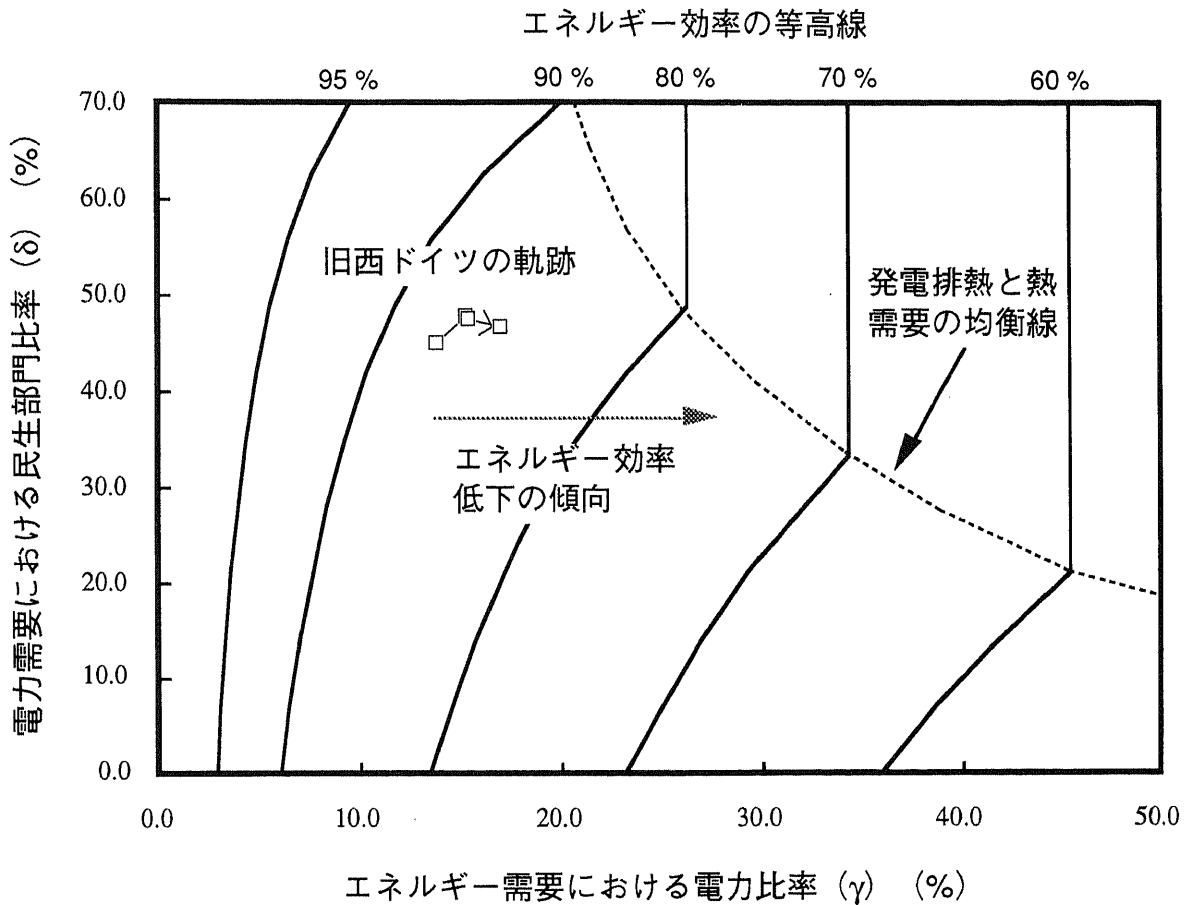
図0-6において排熱が熱需要より小さい場合については、エネルギー効率一定の等高線は効率 $\eta$ をパラメータにとり次式で与えられる。一方、排熱が熱需要以上の場合は、効率が $\delta$ に依存しなくなるため均衡線上の $\gamma$ に対する値で一定となる。

$$\delta = 1 - \frac{1 - \eta}{\eta(\alpha - 1)} \left( \frac{1}{\gamma} \right) \quad \dots (0.9)$$

$\gamma$ - $\delta$ 平面におけるこの等高線に、例として旧西ドイツの実績の推移を重ねたものを図0-8に示す。 $\gamma$ が増大の傾向を有しているので、基本的にエネルギー効率の等高線を低下する方向に横切っており、90%から80%の等高線に近づきつつあることがわかる。この傾向がさらに進めば、やがて発電排熱と熱需要の均衡点を越え、急激なエネルギー効率低下の領域に入ることが予想される。図0-7に見たように、各国とも旧西ドイツと同様な電力比率および民生部門比率の増大傾向を示しているので、今後民生部門にコジェネを大量導入した場合でもエネルギー効率改善の上限値がますます抑えられていく方向にあると考えられる。これは基本的に電力需要と合わせて熱需要を確保しなければならないことに起因する。逆に発電排熱の利用先を開発できれば、図の等高線に沿って成長することによってエネルギー効率上限を一定にすることも可能と考えられる。ただし、その場合でも排熱余剰の状態に陥れば

効率は低下せざるを得ないことに注意が必要である。このことは、民生部門におけるエネルギー効率改善のためにはコジェネの導入だけではなく、マクロなエネルギー需要特性を制御する構造的な対策も必要であると解釈できる。

図0-8 旧西ドイツのエネルギー効率曲面上のトレンド



## 0.5 結果のまとめ

今回はOECD諸国および旧共産圏諸国についてコジェネによる発電排熱の有効利用状況を把握するとともに、コジェネ転換によるエネルギー効率改善の可能性を評価した。また、電力需要と熱需要の整合性の観点から需要性向がエネルギー効率に及ぼす影響を分析し、需要コントロールの必要性を指摘した。結果は次の通りまとめられる。

- (1) 民生部門の電力供給をすべてコジェネに転換することによって、OECD平均で10%程度のエネルギー節約になる。一部の国ではほとんどを発電排熱で賄い得る。
- (2) コジェネ導入時のエネルギー効率の上限は電力、熱の需要特性に依存する。排熱余剰になると急速に効率が低下する。
- (3) 各国は電力利用の比率が高くなる傾向を持つ。
- (4) 電力の比率拡大はエネルギー効率上限値を低下させる。需要特性のトレンドから、多くの国では上限値が低下する方向に進みつつある。

今回のモデル分析は極端な状態を想定した簡単な分析であるため、定性的な傾向を導いたに留まっている。さらに、都市部におけるエネルギー需要規模や需要の季節的・時間的变化など、より実際的な条件を加味してコジェネ導入効果を評価することが必要と考えられる。

### 謝辞

本研究は国際応用システム解析研究所（International Institute for Applied Systems Analysis）において実施したものである。Environmentally Compatible Energy Strategies グループのDr. Nebojsa Nakicenovic, Dr. Arnulf Gruebler, Dr. Leo Schrattenholzer, Mr. Andreas Schaefer, その他のメンバーには貴重な助言をいただいたことを感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] IEA : ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES, OECD (1991)
- [2] IEA : ENERGY STATISTICS AND BALANCES OF NON-OECD COUNTRIES, OECD (1991)