

# 都市におけるコージェネレーション 有効利用の可能性

市川 徹

## 1. はじめに

わが国におけるエネルギー消費は、歴史的に産業部門が大きな比重を占めてきたが、近年、民生部門の伸びが著しく、最終エネルギー消費に占める割合は1973年度の18%から1995年度には26%にまで増加した。また、2000年までのエネルギー消費増加分のうち、42%は民生部門が占めるものと見込まれている。

一方エネルギーフローをみると、一次エネルギーのうち有効に利用されている部分は35%程度で、残りの大部分は、工場や発電所などからの排熱として捨てられている。したがって、電気と熱を高い総合効率で同時に作り出すコージェネレーションを、都市などのエネルギーの大量消費地に導入すれば、発電時の排熱を冷暖房や給湯用熱源として利用でき、省エネルギーが推進されることは明らかである。都市におけるコージェネレーションの普及は、そのような意味から有効なエネルギー施策と考えられるが、その推進のためには、コージェネレーションを巡る以下の二つの論点に対するコンセンサスの形成が必要である。

第一は都市の環境問題である。自動車交通量の増大などに起因する大気汚染の悪化が、都市中心部での大規模なコージェネレーションの導入を困難にしている。しかし、既存の火力発電所をコージェネレーションに置き換えれば、ビル単位でのボイラーの使用が減り、発電所を含む地域全体ではエネルギー供給効率が改善され、CO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>の排出量が削減される。したがって、コージェネレーションの都市への導入は、環境問題改善のための有効な手段として位置づけられるべきである。また、コージェネレーションの導入を推進するために、都心中心部における自動車交通量を削減す

るなど、思い切った施策も合わせて検討されるべきである。

第二に、電力会社の送電システムとコージェネレーションとの関係についての問題がある。ピーク負荷の先鋭化を助長するのではないかと電力会社の懸念などにより、民生用コージェネレーションから一般系統への逆送電が、最近まで認められていなかった。このため、コージェネレーションは主に建物単位で導入されてきたが、3節で示すように、この方法では電力と熱の適正な消費バランスが得られにくく、導入対象が限定されたり、発電容量が制限される原因になっている。一方、各種の用途建物が混在する地域単位で導入すれば、電力と熱消費が平準化され、建物単位に比べコージェネレーションを導入しやすい消費パターンが得られるばかりか、既存の発電所との間で運転パターンを相互に調整すれば、電力会社系統のピーク負荷の平準化にもつながる。したがって、今後は法制度的にも、地域レベルでのコージェネレーションに対するきちんとした位置づけがなされるべきである。

本稿は、コージェネレーションをその地域のエネルギー負荷パターンに適合した形で導入し、省エネルギーを推進すると同時に環境問題を改善するためのコンセンサスづくりに資するため、地域レベルでのコージェネレーションの導入効果を、理論とケーススタディにより明らかにすることを目的としている。

## 2. コージェネレーションの省エネルギー性

筆者らは文献[1]においてコージェネレーションの省エネルギー性を考察した。以下にその概要を示す。

まず、コージェネレーションと比較対照するシステムとして、電気を電力会社の送電系統から、また冷温熱をボイラーや吸収式冷凍機で構成される「専用熱源」から供給する「専用熱源方式」を定めた。また電力消費(E)に対する熱消費(H)の比を「熱電比」( $\sigma$ ) (注1)

表1 記号および諸条件

(1) 諸記号

高位発熱量基準

記号	説明
Q <sub>0</sub>	コージェネレーション一次エネルギー投入量
Q <sub>1</sub>	専用熱源方式一次エネルギー投入量
Q <sub>2</sub>	逆送電電力量に相当する系統電力の一次エネルギー投入量
r	専用熱源方式に対するコージェネレーションの一次エネルギー削減率
E	電力消費量
H	熱消費量 (冷房・暖房・給湯用消費量の合計)
σ	(消費の) 熱電比 (σ = H/E, Eは1KWh=860Kcalで換算)
EX	逆送電電力量
η <sub>e</sub>	コージェネレーション発電効率
η <sub>h</sub>	コージェネレーション排熱発生率
η <sub>b</sub>	蒸気ボイラー熱効率
η <sub>p</sub>	系統電力供給効率
η <sub>a</sub>	コージェネレーションによる発生熱の有効利用率
η <sub>f</sub>	専用熱源による発生熱の有効利用率

(2) コージェネレーションの運転形態

条件 運転方式	σ = η <sub>a</sub> · η <sub>h</sub> / η <sub>e</sub>	σ < η <sub>a</sub> · η <sub>h</sub> / η <sub>e</sub>	σ > η <sub>a</sub> · η <sub>h</sub> / η <sub>e</sub>
電力消費 追従	(a) コージェネレーションのみで供給 (電力・熱均衡)	(b) コージェネレーションのみで供給 (余剰熱廃棄)	(d) 不足熱を補助熱源より供給
熱消費 追従		(c) 不足電力を系統電力より買電	(e) コージェネレーションのみで供給 (余剰電力逆送電)

(3) 諸定数

高位発熱量基準

システム種別	項目	発電効率 (η <sub>e</sub> )	排熱発生率 (η <sub>h</sub> )			系統電力供給効率 (η <sub>p</sub> )	発生熱の有効利用率 (η <sub>a</sub> )	
			低温	高温	合計		冬期	夏期
ガスタービン	A	0.22	-	0.40	0.40	0.36	1.00	1.10
	B	0.27	-	0.42	0.42			
	C	0.32	-	0.34	0.34			
ガスエンジン		0.31	0.27	0.13	0.40			
ディーゼルエンジン		0.35	0.15	0.17	0.32		1.00	0.90
燃料電池		0.36	0.18	0.22	0.40			
専用熱源		-	(ボイラー熱効率: η <sub>b</sub> =0.78)				1.00	1.10

注: 1) η<sub>e</sub>, η<sub>h</sub>, η<sub>b</sub>は定格出力時の値  
2) ガスタービンの出力はA:3000kW/基, B:10000kW/基, C:30000kW/基を想定

として表した。表1(1)に本稿で用いる記号を示す。η<sub>h</sub>は、コージェネレーションで発生・回収される熱量の一次エネルギー投入量に対する割合で、「排熱発生率」と定義する。また η<sub>a</sub>は、コージェネレーションで発生した温水・蒸気などが、消費される熱 (冷水・温水・蒸気) に変換される割合で、システムや季節により変動するものの、1に近い値で近似できることが文献[2]で確認されている。同様に「専用熱源による発生熱の有効利用率」η<sub>f</sub>を定めた。

コージェネレーションの運転形態は、消費する電力すべてをコージェネレーションにより発電した場合の発生熱量 (E · η<sub>h</sub> / η<sub>e</sub>) と必要熱量 (H / η<sub>a</sub>) との過不足関係と、コージェネレーションを電力消費に追従させて運転するか、あるいは熱消費に追従させて運転するかの選択により決定され、表1(2)に示す(a)~(e)の5種類にまとめられる。

これら各運転形態と専用熱源方式のエネルギーフローを、表2のようにモデル化した。コージェネレーシ

ョンの補助熱源には専用熱源を用いることとした。実際には、コージェネレーションの発電容量を消費電力量以下に設定し、足りない電力を買電する一方、不足する熱を補助熱源から補う場合があるが、これは表2におけるコージェネレーションと専用熱源方式を併用した供給方式と位置づけることができる。

次に専用熱源方式に対するコージェネレーションの一次エネルギー削減率(r)を定義する。

$$r = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1} \quad (1)$$

a~eを表1(2)のコージェネレーションの各運転形態に対応した添字とすれば、表2より式(2)~(7)が得られる。

(1)コージェネレーションの一次エネルギー消費量

$$Q_{0a} = Q_{0b} = \frac{E}{\eta_e} \quad (2)$$

$$Q_{0c} = (E - \frac{E \cdot \sigma \cdot \eta_e}{\eta_a \cdot \eta_h}) / \eta_p + \frac{E \cdot \sigma}{\eta_a \cdot \eta_h} \quad (3)$$

$$Q_{0d} = \frac{E}{\eta_e} + (E \cdot \sigma - \frac{E \cdot \eta_a \cdot \eta_h}{\eta_e}) / (\eta_b \cdot \eta_f) \quad (4)$$

$$Q_{0c} = \frac{E \cdot \sigma}{\eta_a \cdot \eta_h} \quad (5)$$

(2)専用熱源方式の一次エネルギー消費量

$$Q_1 = \frac{E}{\eta_p} + \frac{E \cdot \sigma}{\eta_f \cdot \eta_b} \quad (6)$$

(3)逆送電電力量の一次エネルギー換算

$$Q_2 = \frac{EX}{\eta_p} = (\frac{\sigma \cdot E \cdot \eta_e}{\eta_a \cdot \eta_h} - E) / \eta_p \quad (7)$$

式(1)に式(2)~(6)を代入しr(rb~re)を求めた。reを求める場合にはQ<sub>1</sub>にQ<sub>2</sub>を加えた。またraは、rbの式に運転形態(a)の熱電比条件(σ = η<sub>a</sub> · η<sub>h</sub> / η<sub>e</sub>)を代入して求めた。各項を整理すれば式(8)~(12)が得られる。

(4)コージェネレーションの一次エネルギー削減率

$$r_a = 1 - \frac{\eta_b \cdot \eta_f \cdot \eta_p}{\eta_b \cdot \eta_e \cdot \eta_f + \eta_a \cdot \eta_h \cdot \eta_p} \quad (8)$$

$$r_b = 1 - \frac{\eta_b \cdot \eta_f \cdot \eta_p}{\eta_e (\eta_b \cdot \eta_f + \sigma \cdot \eta_p)} \quad (9)$$

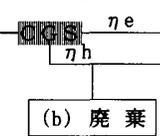
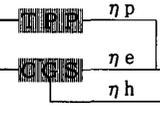
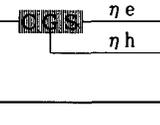
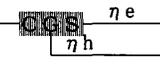
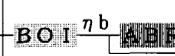
$$r_c = 1 - \frac{\eta_b \cdot \eta_f [\eta_a \cdot \eta_h - \sigma (\eta_e - \eta_p)]}{\eta_a \cdot \eta_h (\eta_b \cdot \eta_f + \sigma \cdot \eta_p)} \quad (10)$$

$$r_d = 1 - \frac{\eta_p (\eta_b \cdot \eta_f + \sigma \cdot \eta_e - \eta_a \cdot \eta_h)}{\eta_e (\eta_b \cdot \eta_f + \sigma \cdot \eta_p)} \quad (11)$$

$$r_e = 1 - \frac{\eta_b \cdot \eta_f \cdot \eta_p}{\eta_b \cdot \eta_e \cdot \eta_f + \eta_a \cdot \eta_h \cdot \eta_p} \quad (12)$$

rb, rc, rdはいずれも熱電比(σ)の関数となった。ま

表2 コージェネレーションおよび専用熱源方式エネルギーフロー

エネルギーフロー 供給方式 運転形態		記号 (式)	投入一次エネルギー量(Q)	系統電力発電所 コージェネレーションプラント	熱製造プラント	消費量 (E)(H)
コージェネレーション方式	コージェネレーションのみで供給 (a) (電力・熱消費均衡) (b) (余剰熱廃棄)	Q <sub>0a</sub> Q <sub>0b</sub> (2)	$\frac{E}{\eta_e}$			E E·σ
	(c) 不足電力を 系統電力より買電	Q <sub>0c</sub> (3)	$(E - \frac{E \cdot \sigma \cdot \eta_e}{\eta_a \cdot \eta_h}) / \eta_p$ $\frac{E \cdot \sigma}{\eta_a \cdot \eta_h}$			E E·σ
	(d) 不足熱を 補助熱源より補給	Q <sub>0d</sub> (4)	$\frac{E}{\eta_e}$ $(E \cdot \sigma - \frac{E \cdot \eta_a \cdot \eta_h}{\eta_p}) / (\eta_b \cdot \eta_f)$			E E·σ
	(e) コージェネレーションのみで供給 (余剰電力逆送電)	Q <sub>0e</sub> (5)	$\frac{E \cdot \sigma}{\eta_a \cdot \eta_h}$			EX E E·σ
専用熱源方式	Q <sub>1</sub> (6)	$\frac{E}{\eta_p}$ $\frac{E \cdot \sigma}{\eta_f \cdot \eta_b}$			E E·σ	
逆送電電力の一次 エネルギー換算	Q <sub>2</sub> (7)	$\frac{EX}{\eta_p}$			EX	

凡例：：コージェネレーション ：系統電力火力発電所 ：蒸気ボイラー  
：熱源駆動冷凍機（吸収式冷凍機、蒸気熱源ターボ冷凍機など）  
—— ガス・石油      —— 電力      —— 熱

注：<sup>1)</sup> 運転形態(e)より：EX = σ · E · η<sub>e</sub> / η<sub>a</sub> · η<sub>h</sub> - E

た ra = re となり、熱消費追従運転により余剰電力の逆送電を行う運転形態(e)では、電力消費と熱消費が均衡する場合(a)と同様の高い省エネルギー効果が得られることが実証された。式(8)~(12)は、コージェネレーションの省エネルギー性を表す一般式と考えられる。

η<sub>b</sub>, η<sub>e</sub>, η<sub>h</sub> は、機器の性能や運転状態により異なるものの、一般的に用いることのできる値がある。また η<sub>p</sub> は、近年の東京湾岸の火力発電所の加重平均送電端効率0.38と送電損失率0.053から、0.36(一次エネルギー換算2,400kcal/kWh)と推定される。夏期の η<sub>a</sub> · η<sub>f</sub> は、冷凍機のタイプによる性能差を考慮して0.9と1.1に定めた(注2)。またガスタービンは、発電容量により性能が大きく異なるので、A・B・Cの3種類を想定した。これらの値を表1(3)にまとめた。

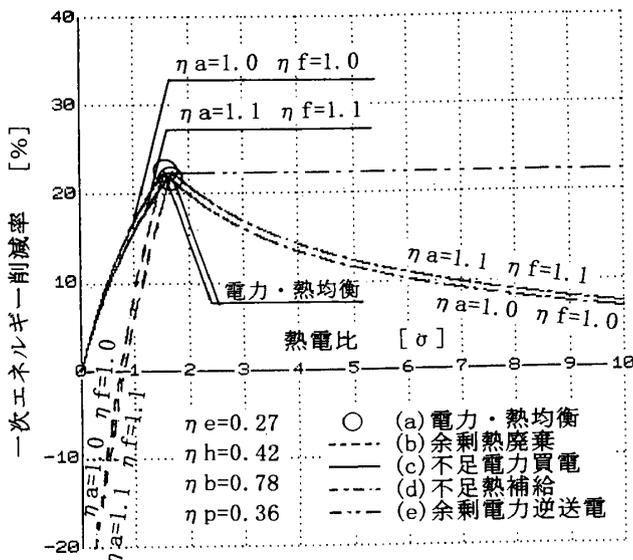
図1は、ガスタービンBと燃料電池の2種類の原動機について、式(8)~(12)を線図として表したものである。一次エネルギー削減率は、発電すると同時に発生する熱を利用できる場合において大きくなり、その最大値は、発電電力と発生熱を使い切り、しかも追加の電力や熱源を必要としない電力・熱均衡点(図1中で○を

付記した点)における ra である(注3)。熱電比がこれを越える領域では、余剰電力を逆送電する運転形態(e)では ra が保たれるが、専用熱源に別に一次エネルギーを投入する(d)では、補給する熱の割合が増加するに従い省エネルギー性は減少する。一方、熱電比が均衡点よりも小さい場合、余剰熱を廃棄する運転形態(b)では、一次エネルギー削減率は減少し、ガスタービンではマイナスとなる。不足電力を買電する運転形態(c)も、熱電比の低下とともに削減率は減少し、全電力消費が買電となる σ = 0 において 0 となる。

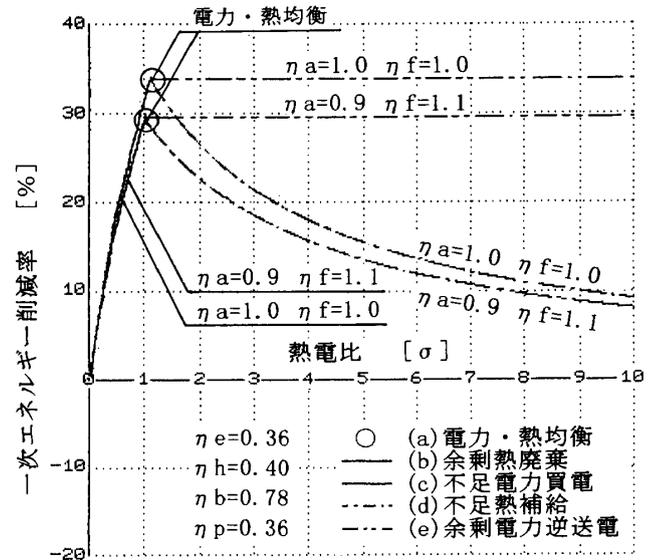
コージェネレーションは、発生・回収した排熱を廃棄しなければ、いかなる熱電比においても専用熱源方式に比べ一次エネルギー消費を削減できる。特に燃料電池では、電力・熱均衡点において30%以上の一次エネルギー削減効果が得られる。

### 3. 建物と地域の熱電比分布

熱電比分布は、建物の用途により大きく異なっている。図2(1)に、業務、宿泊、住宅の3用途の熱電比分布を示す。縦軸は、専用熱源方式による毎時間の一次

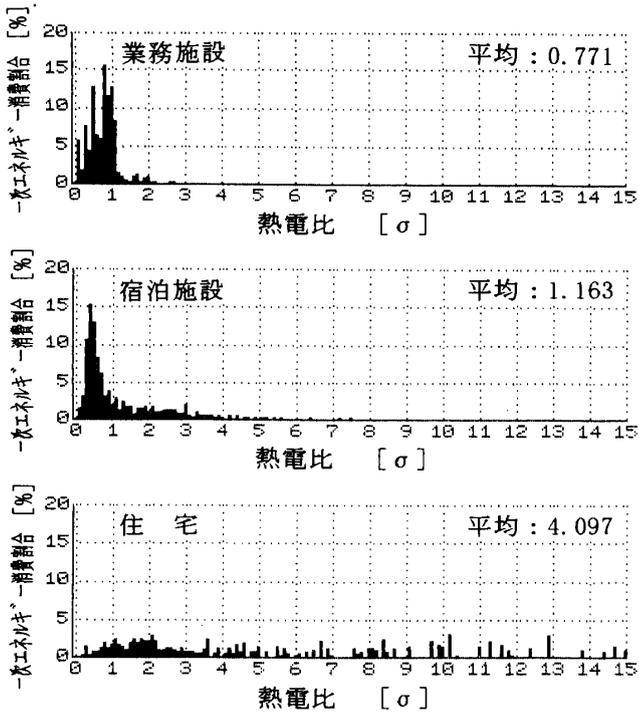


ガスタービンB

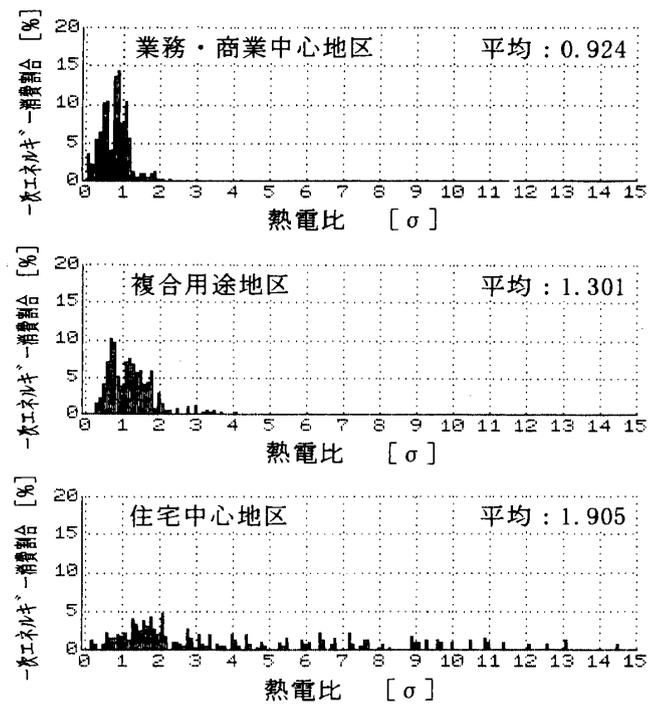


燃料電池

図1 コージェネレーションの専用熱源方式に対する省エネルギー性



(1) 単一用途建物



(2) 首都圏の開発地区

図2 年間の熱電比分布

エネルギー消費量を熱電比の区間0.1毎に集計して、年間消費量に対する割合として表したものである。業務施設は電力消費は多いものの、熱消費が少ないため、省エネルギー効果が低い均衡点以下の熱電比領域にエネルギー消費が集中している。宿泊施設は、熱消費が大きいので、熱電比が2以上の領域における分布も見られ、また住宅では、熱消費の時間と量がまちまちな

ため、エネルギー消費が熱電比の大きい領域に広く分散しており、専用熱源を補助熱源とする運転形態(d)では高い省エネルギー効果は期待できない。熱追従運転による逆送電、昼間時発生熱の蓄熱、ヒートポンプや清掃工場排熱など、専用熱源以外の補助熱源の利用が望まれる。

筆者らは、文献[3]において首都圏の主な開発地区

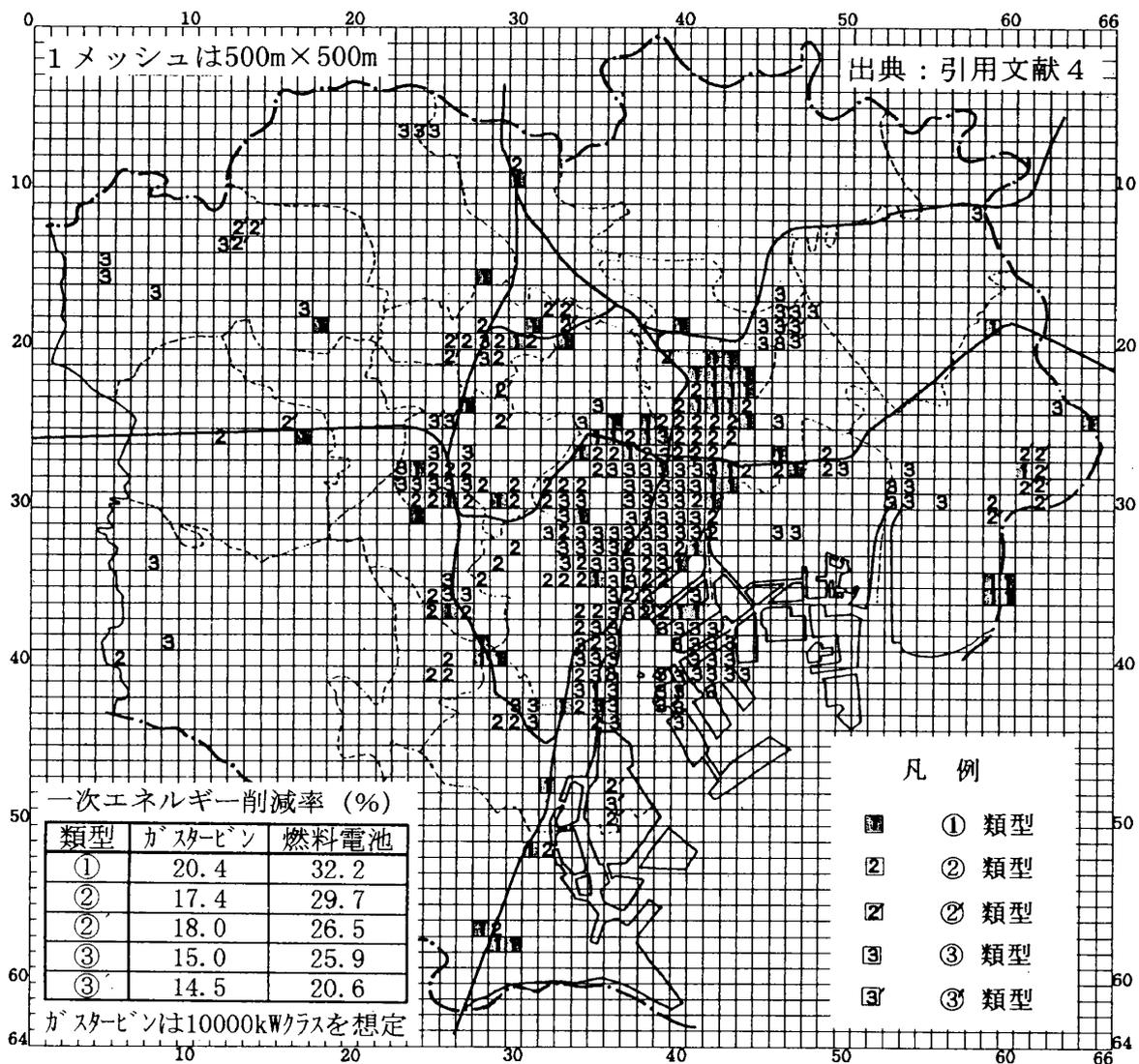


図3 地区レベルでのコージェネレーション導入を推進すべき地区（東京23区）

60地区を熱電比と熱消費密度により10類型に分類した。図2(2)は、そのうちの3類型（業務施設が主体の類型、各用途が混在する類型、住宅が主体の類型）の熱電比分布である。どの類型も、個別建物に比べ省エネルギー性の高い均衡点まわりの領域（熱電比が0.5~3.0の範囲）にエネルギー消費が集中している。これらのことから、コージェネレーションの一次エネルギー削減効果は、単一用途の建物より、用途が複合化された「地域」においてより大きいものと考えられる。

#### 4. 東京都区部における導入の評価

図1の省エネルギー曲線に図2に例示した熱電比分布を重ね合わせ、両者の積和を求めることにより、コージェネレーションの理論的一次エネルギー削減率を算定することができる。

筆者らは、文献[4]において東京都区部を500mメッシュで分割した各エリアを一つの地区として、地区

単位でのコージェネレーション導入による一次エネルギー削減効果を考察した。以下はその概要である。

導入検討対象は、東京都が指定している地域暖冷房推進地区とした。これらは、図3の中で1~3のいずれかの数字が記されたメッシュである。建物用途別延床面積比率を考慮して、これらの中から35メッシュをサンプルとして抽出し、熱電比頻度分布特性をクラスター分析によって類型化した結果、①②②'③③'の5類型にまとめることができた。③②①②'③'の順で業務、商業施設の占める割合は小さくなり、反対に住宅の占める割合が大きくなる。①類型は、業務、商業、住宅、その他が最も近い割合で混在した類型であり、③③'は、業務、住宅に最も偏った類型である。

表1(3)の値を用いて、コージェネレーション導入による各類型の一次エネルギー削減率を算出した。ガスタービンは、A：9~12%、B：15~20%、C：15~24%、ガスエンジンは17~26%、燃料電池は20~32%と

いう高い効果が得られた。類型別には、①類型の省エネルギー効果が最も大きくなった。①類型は、用途が最も混在しているため、エネルギー利用のピークを相互に補完し、結果として平均的に電気と熱の利用率が高い均衡点まわりの熱電比の領域にエネルギー消費が集中する。このため省エネルギー効果が大きくこれら地区に対してはコージェネレーションの導入を優先的に進めることが望まれる。①類型に属する地区は、台東区上野の北東側や隣接する文京区に比較的まとまって見られるほか、山手線や東海道線のターミナル付近にも点在している。都心部の大手町、日比谷、銀座、霞ヶ関や臨海部は③類型に属する地区が多く、コージェネレーション導入の優先度は低い。優先度が高い①②地区の分布から将来の導入のあり方を展望すると、鉄道の路線空間を活用した電力・熱供給設備のネットワーク化、鉄道電力網との系統連系などにより、コージェネレーションシステムの有効性をさらに高められるものと考えられる。

## 5. おわりに

エネルギーの地域特性に見合った形式で電力と熱を供給できるコージェネレーションを地域に導入することにより、省エネルギーを推進すると同時に環境問題を改善できる可能性がある。また、その効果を一層高いものにするために、異なる特性を有する市街地の間の関係を利用した、新しい都市エネルギー供給システムの構築が望まれる。

## 注

- [1] 一定時間内に消費される電力量に対する熱量の比を「熱電比」という。熱電比は、電力量と熱量の単位をそのまま用いてMcal/h/kWhなどと表す場合と、1 kWhを860Mcalで熱量換算して無次元数として表す場合とがある。本研究では後者を用いる。
- [2] 給湯用熱消費が含まれているため、吸収式冷凍機の成績係数とは値が異なる。
- [3]  $\eta_a = \eta_f = 1.0$ の場合の $ra$ は、ガスタービンAでは14%、Cでは25%、ガスエンジン・ディーゼルエンジンでは28%程度である。

## 引用文献

- [1] 市川徹、尾島俊雄：民生用コージェネレーションの省エネルギー性に関する理論的研究，日本建築学会計画系論文報告集第433号，pp.21～29，1992年3月
- [2] 市川・柴田理・佐土原聡・尾島：コージェネレーションシステムの省エネルギー性に関する理論的研究—その5・熱有効利用率を用いた省エネルギー率の算定に関する考察—，日本建築学会大会学術講演梗概集集（東海），pp.1363～64，1994年9月
- [3] 佐土原・柴田・市川・尾島：コージェネレーション導入面から見た地区分類に関する研究(1)・(2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.1221～24，1992年9月
- [4] 佐土原・柴田・市川・尾島：東京都区部におけるコージェネレーション導入地区の選定に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集第468号，pp.47～54，1995年2月