

## ■ 研究論文 ■

# 情報量の概念によるコージェネレーションシステム における負荷データ影響分析

An Application of Information Theory to the Sensitivity Analysis of  
Cogeneration System Performance

高橋 一喜\*・石坂 匡史\*・本間 勲\*

Kazuki Takahashi Tadashi Ishizaka Isao Honma

(1995年3月2日原稿受理)

## Abstract

Successful cogeneration system performance depends critically upon the correct anticipation of load variation and the accuracy of demand prediction. We need not only aggregate annual heat and electricity demand but also hourly and monthly patterns in order to evaluate cogeneration system performance by computer simulation. These data are usually based on the result of actual measurements of similar building energy demand. However, it is extremely expensive to collect real energy demand data and store them over long period for many buildings. Here we face a question whether it is really necessary to survey hourly demand over years.

This paper provides a sensitivity analysis on the influence of demand prediction error upon the efficiency of cogeneration systems to evaluate the relative importance of variety of demand components. These components are annual energy demand, annual heat-to-electricity ratio, daily load factor, and so forth.

Our approach employs the concept of the information theory to construct a mathematical model. The analysis provides an indication of the relative importance of a variety of demand components, and it identifies what may become a good measure for assessing the energy saving impact for planning purposes.

## 1. はじめに

コージェネレーションシステムは、エンジン等の原動機で発電を行うと同時に、原動機排熱で熱需要を賄い、システム全体として高いエネルギー効率を達成するシステムである。省エネルギーが求められる現在の社会情勢のもとで、近年急速に普及しつつある。

ところで、コージェネレーションシステムの導入意思決定においては、熱と電気のエネルギーバランスを考慮した、省エネルギー性や採算性の試算結果が重視される。試算にあたっては、導入対象となる建物の電

力・熱負荷について、年間の総量のみならず時刻別変動パターンが必要となる。これらのデータは類似建物における過去の実測値をもとに想定されるが、建物の種類によってはデータに乏しいものもあり、このような場合、実測によるデータの蓄積を行う必要がある。しかし、時刻別の負荷データは非常に多量であり、それらの計測には莫大な手間とコストを要する。

ここで、「本当に24時間12ヶ月すべての負荷データを計測・記録する必要があるのか」という疑問が生れる。具体的には、コージェネレーションシステムの導入の意思決定を行うためなら、例えば電力と熱の「年間の総量」だけが正確に把握できれば概ね十分であり、「時刻別の負荷パターン」までは、それ程正確には知る必要はないとか、その逆が成り立つというようなことはないのかという疑問である。「負荷パターン」や

\*東京ガス(株)技術企画部

〒105 東京都港区海岸1-5-20

\*\*東京ガス(株)トータルエネルギーシステム部

〒163-10 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワー27F

「総量」などの項目のうち、ある項目は正確な想定が必要であるが、ある項目は既存の類似データを流用してよいという場合もある。つまるところ、調査すべき項目のうち何を重点的に把握すべきかの指標が必要ということになる。

本稿は上記の要請に応えるために、応用数学における情報理論の発想を用い、負荷総和や負荷率などの負荷情報に関する数理モデルを構築した。また実際のデータに基づき数値計算を行い、負荷情報のコージェネレーションシステムに対する重要度の定量的評価を行った。

## 2. 負荷情報量分析モデル

### 2.1 コージェネレーションシステムの評価関数

コージェネレーションシステム（以下CGSと略す）の導入効果を評価する指標としては「省エネルギー性」や「経済性」などがある。これらは、機器効率、設備容量などのハードの要因から、熱や電気負荷の変動および運転制御方式などのソフトの要因まで多くの要因の影響を受ける。

本稿の目的は、建物負荷のCGS評価に与える影響を分析することにあるので、ハードウェア構成は一定とし、建物負荷のみを独立変数として持つCGSの評価関数、

$$F(\mathbf{Y}) \quad \mathbf{Y} : \text{建物負荷データベクトル} \quad (1)$$

を考える。ここで、建物負荷データは、

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &\equiv (\mathbf{e}, \mathbf{c}, \mathbf{h}, \mathbf{w}) \\ \mathbf{e} &= (e_1, e_2, e_3, \dots, e_{12}) \\ \mathbf{e}_i &= (e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, \dots, e_{i24}) \\ e_{ij} &: i \text{ 月 } j \text{ 時の電力負荷} \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{Y}$ の次元：

$$4 (\text{負荷種類}) \times 12 (\text{月}) \times 24 (\text{時間}) = 1152$$

と定義される。 $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{h}$ ,  $\mathbf{w}$  はそれぞれ冷房、暖房、給湯負荷に対応しており、 $\mathbf{e}$  と同様に定義される。

ここで、負荷データの重要度を定量的に評価するため、建物負荷データベクトルに、

$$\mathbf{X} = T(\mathbf{Y}) \quad \mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{1152}) \quad (3)$$

なる変数変換をおこなう。 $x_1$  から  $x_5$  までは、 $\mathbf{Y}$  という極めて高次元の建物負荷データベクトルのなかで、CGS評価のために重要と考えられる指標である。具体的に、

- $x_1$  : 年負荷総和
- $x_2$  : 年負荷量で比較した熱電比
- $x_3$  : 年負荷量で比較した冷暖房と給湯の比

$x_4$  : 各負荷の年負荷率の和

$x_5$  : 各負荷の日負荷率の和

$$x_1 = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} (e_{ij} + w_{ij} + h_{ij} + c_{ij}) \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} (w_{ij} + h_{ij} + c_{ij})}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} e_{ij}} \quad (5)$$

$$x_3 = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} (h_{ij} + c_{ij})}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} w_{ij}} \quad (6)$$

$$x_4 = \frac{\left( \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} e_{ij} \right) / 12}{\max_i \left\{ \sum_{j=1}^{24} e_{ij} \right\}} + \frac{\left( \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} w_{ij} \right) / 12}{\max_i \left\{ \sum_{j=1}^{24} w_{ij} \right\}} + \frac{\left( \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} h_{ij} \right) / 12}{\max_i \left\{ \sum_{j=1}^{24} h_{ij} \right\}} + \frac{\left( \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} c_{ij} \right) / 12}{\max_i \left\{ \sum_{j=1}^{24} c_{ij} \right\}} \quad (7)$$

$$x_5 = \sum_i \left\{ \frac{\left( \sum_{j=1}^{24} e_{ij} \right) / 24}{\max_j e_{ij}} + \frac{\left( \sum_{j=1}^{24} w_{ij} \right) / 24}{\max_j w_{ij}} + \frac{\left( \sum_{j=1}^{24} h_{ij} \right) / 24}{\max_j h_{ij}} + \frac{\left( \sum_{j=1}^{24} c_{ij} \right) / 24}{\max_j c_{ij}} \right\} \quad (8)$$

である（以下、 $x_1, x_2, \dots, x_5$  を「負荷要素」と呼ぶことにする）。残りの、 $x_6, \dots, x_{1152}$  については包括的に取り扱い、ここでは明示的な定義を与えないものとする。（しかし、 $\mathbf{X}(\mathbf{Y})$  が逆関数の常に存在する微分可能関数であると仮定しても一般性を失わない。）

### 2.2 Kullback-Leibler情報量

偶然を伴う現象は、ある確率分布に従う確率変数であると解釈することが可能である。建物負荷データの予測においても、真の値とは誤差が必ず存在するもので、その予測がどの程度正しいかを確率分布を用いて表現することは極めて自然である。つまり、予測の精

度を確率分布でモデル化するのである。

真の確率密度関数が $f_1(x)$ である現象を、モデルとして確率密度関数 $f_2(x)$ で表現した時、そのモデルの「近さ」を測る基準として、

$$I(f_1(x):f_2(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} \log \left\{ \frac{f_1(x)}{f_2(x)} \right\} f_1(x) dx \quad (9)$$

により定義される Kullback-Leibler 情報量と呼ばれる概念がある<sup>1)</sup>。この概念は、 $f_2(x)$  という確率密度を持つと考えられていた現象について、真の確率密度が $f_1(x)$ であると判明した時に得られる情報量と解釈することができる。

本稿では、負荷データベクトルの各要素  $x_i$  を確率変数と考え、簡単のため  $x_i$  はそれぞれ独立に正規分布に従うものと仮定する。

$$x_i \sim N(\mu_i, \delta_i^2) \quad (10)$$

これにより、 $X$ の関数として定義される $F(X)$ についても確率分布が導入される。実際の $F(X)$ は、CGS全体として各時刻ごとのエネルギーバランスを考慮し、熱回収ポンプや冷却塔などの補助機器、および追い焼きボイラーなどの動力負荷などを考慮した計算機シミュレーションにより求めるため、複雑であり解析的に取り扱うことはできない。しかここでの目的は関数 $F(\cdot)$ の厳密な評価ではないので、簡単のため $X$ の予測範囲における線形性を仮定して、以下のような線形近似を行う。

$$F(X) = \sum_{i=1}^{1152} \frac{\partial F}{\partial x_i} (x_i - \mu_i) + F(\mu) \quad (11)$$

これにより $F(\cdot)$ は、以下の正規分布に従う確率変数とみなすことができる<sup>2)</sup>。

$$N(F(\mu), \sum_{i=1}^{1152} \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_i \right)^2) \quad (12)$$

### 2.3 負荷要素の重要度の測定法

いま、 $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) に関する情報が得られる前における評価関数 $F(\cdot)$ の分散が、

$$\sum_{i=1}^{1152} \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_i \right)^2 \quad (13)$$

であったと仮定したとき、ある一つの負荷要素  $x_k$  に関して極めて信用度の高い情報が得られたときの  $F(\cdot)$  の分散は、その負荷要素の標準偏差  $\delta_k$  のみを、小さくなった新しい標準偏差  $\delta'_k$  (図-1) に入れ換えたものになる (式(14))。

$$\sum_{i=1}^{k-1} \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_i \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial x_k} \delta'_k \right)^2 + \sum_{i=k+1}^{1152} \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_i \right)^2 \quad (14)$$

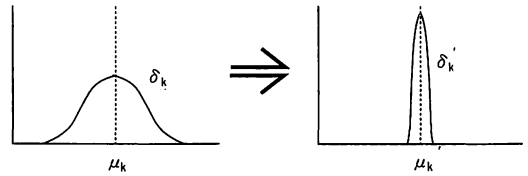


図-1 情報の取得前後における負荷要素の従う確率密度関数の変化

このようにして求められる  $F(\cdot)$  の分散を、Kullback-Leibler 情報量の式、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \log \left\{ \frac{f_B(x)}{f_A(x)} \right\} f_B(x) dx = \frac{1}{2} \left( \log \frac{\delta_A^2}{\delta_B^2} + \frac{\delta_B^2}{\delta_A^2} - 1 \right) \quad (15)$$

但し、 $\delta_A^2$ : 情報取得前の  $F(\cdot)$  の分散

$\delta_B^2$ : 情報取得後の “ ”

に代入したものを、その負荷要素の持つ情報量と定義する。また、明示的な定義を与えてない  $x_6, \dots, x_{1152}$  については、

$$\sum_{i=1}^{1152} \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_i \right)^2 \quad (16)$$

の上限値を評価するものとする (具体的な計算法は付録参照)。

## 3. 数値分析

### 3.1 条件設定

ここでは、集合住宅、ホテル、および事務所ビルにCGSを導入する場合について、それぞれの負荷要素の持つ情報量の分析を行った。

まず、文献3), 4), 5), 6)等の既存物件の負荷データ調査の結果をもとに、それぞれの負荷要素の従う確率分布を想定する。これは、現在の知見をもとにこれから建設される建物の負荷要素の値を予測する時の精度を、その予測が当たる確率分布の形で表現したものである。これは、2.2節における「モデルとしての確率分布」に該当する概念である。図-2は、集合住宅の暖房負荷に関する既存データ例であり、このようなデータをもとに、確率分布関数としては正規分布を仮定して分散の値を推定した (表1, 標準偏差で表示)。但し、日負荷率と年負荷率については既存データがほとんど存在しないため想定値を用いた。シミュレーション条件は、集合住宅は平均床面積100m<sup>2</sup>で100戸程度、ホテルおよび事務所ビルは延床面積30,000m<sup>2</sup>程度とし、標準負荷パターンは既存文献データにもとづいた。システム構成は、図-3に示すように原動機、発電機

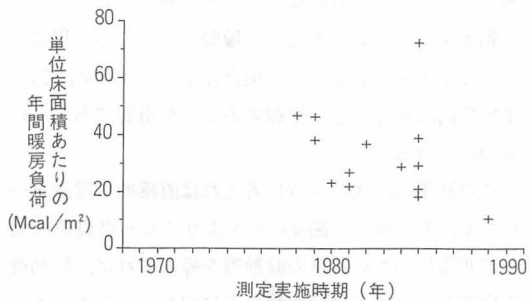


図-2 集合住宅における暖房負荷の実測データ分布

表1 モデル負荷の標準偏差の設定値  
(母平均に対する割合を [%] で表示)

負荷要素種別	負荷総和	熱電比	冷暖・給湯比	年負荷率	日負荷率
集合住宅	38	53	31	10	30
ホテル	26	7	14	10	30
事務所	19	26	73	10	30

吸収式冷凍機からなるCGSに、ガス冷温水機、補助給湯ボイラを組み合わせたものとする。図-3は排熱をすべての熱負荷に利用する構成であるが、暖房と給湯、または給湯のみに利用するシステムについても考慮す

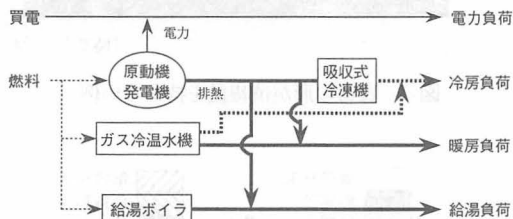


図-3 コージェネレーションシステム構成図

表2 設定条件

原 動 機	: ガスエンジン
計 算 方 式	: 各月代表日に対し1時間単位で、24時間のエネルギー計算
運 転 方 式	: 電主熱従運転
売 電	: 行わない
排熱回収方法	: 温水回収
排熱利用順序	: 給湯, 暖房, 冷房 給湯, 暖房 給湯のみ の3ケース
補 助 熱 源	: ガス冷温水器 (冷暖房) 給湯ボイラ (給湯)

る。また、CGSと比較するシステムは、ガス冷温水器と給湯ボイラのみからなるシステムとし、電力は電力会社からの買電で賄うものとする。

主な条件を表2に示す。

計算は、東京ガス(株)において開発したCGS総合解析ツール(図-4)により行った。本システムは、建物種別ごとの負荷原単位、月別負荷、時刻別負荷パターン、部分負荷運転を考慮した機器の運転効率、気温による効率補正、実際に用いられているガス料金、電力料金テーブル、などの詳細データに基づき、CGSの経済性、省エネルギー性などに関する分析を行う。主な機能として、①各種パラメータに対する感度分析、②原動機容量および運転の最適化計算、③負荷の確率的変動に対する影響分析などを有している。

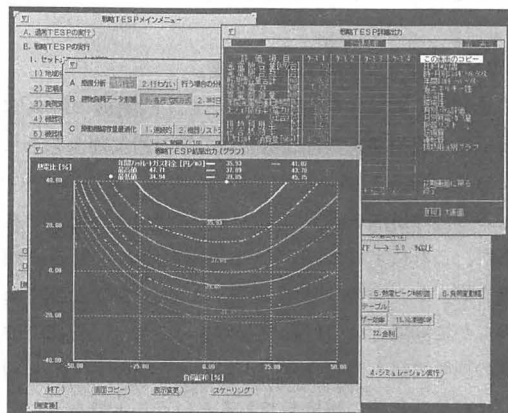


図-4 コージェネレーションシステム総合解析ツール 入出力画面

具体的な計算方法であるが、情報量を数値的に求めるには、式(13)中の各

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_i \tag{17}$$

を計算すればよい。CGSの運転状態は、機器の部分負荷特性や各種ポンプ類の補機動力などの影響が複雑に影響するため、解析ツールにより計算される $F(\cdot)$ は線形関数ではない。しかしここでは、式(11)に示したようにほぼ線形であると仮定して計算を行った(図-5)。また、情報取得後の分散(式(14))は、 $\delta_k$ がほぼゼロに近くなると仮定して計算を行った。ここでは、評価関数が(18)の定義式である省エネルギー性の場合について、負荷要素の持つ情報量の相対的な比較を行った。

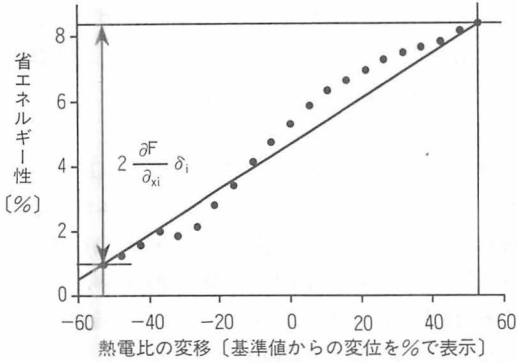


図-5 評価関数  $F(\cdot)$  の線形近似の例

(省エネルギー性)

$$= \frac{(\text{CGSの1次投入エネルギー量}) - (\text{比較システムの1次投入エネルギー量})}{(\text{比較システムの1次投入エネルギー量})}$$

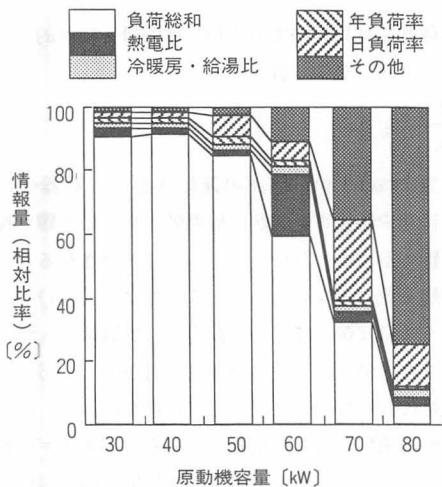
※買電電力の1次換算量を含む (18)

3.2 集合住宅における計算結果

集合住宅におけるCGSにおいて、原動機の導入容量別に各負荷要素の持つ情報量の相対的な割合を示したものが図-6である。

この図は排熱を暖房および給湯に使用した場合であるが、これによれば30kW~50kW程度の容量の原動機を導入した場合、「負荷総和」がすべての負荷要素のなかで90%近い情報量を占める。これは、負荷の予測の誤りで最も影響を及ぼすものは負荷の「パターン」ではなく「負荷の総量」であるということである。

ここで、30kW程度の原動機はベースロードとして稼働する容量であり、ピーク（約110kW）に対して



集合住宅 排熱利用：暖房，給湯

図-6 原動機容量別の負荷要素の持つ情報比率

約40%である。経済的なメリットも考えあわせると、原動機をベースロードとして稼働させることが現実的であると考えられるので、集合住宅における検討では、まず負荷総量を正しく把握することが重要であると結論づけられる。

この結果は、次のように考えれば直感的な常識と一致する。もし仮に、図-7に示すようにピーク負荷に対して非常に小さい容量の原動機を導入すれば、原動機の発電部分は殆ど負荷変動の下に埋もれてしまうことになる。このような状況ではピークや負荷パターンが変わったとしても、CGSは常時に定格運転を行うだけなので省エネルギー性には一切影響しない。このような状況では、負荷の全体量のみが影響を与えることになる。また熱電比の影響が小さいのは、排熱を暖房にも用いているため熱負荷が十分大きく、原動機から

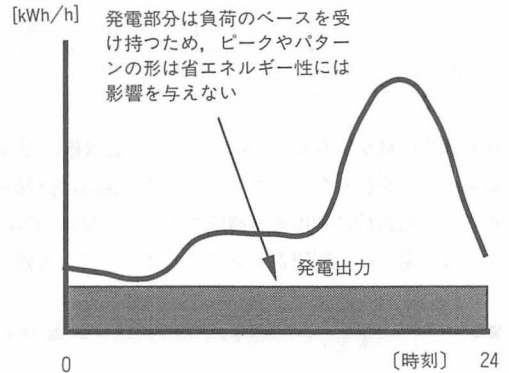
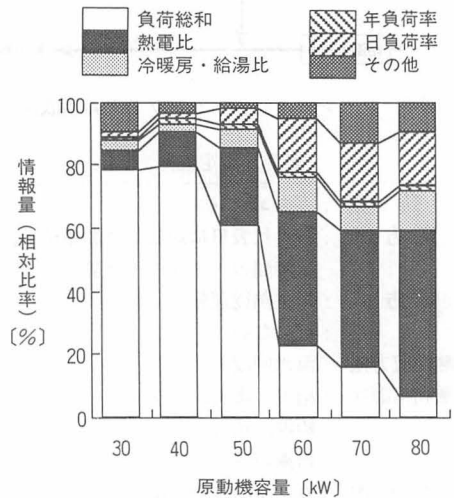


図-7 負荷の形が情報量を持たない例



集合住宅 排熱利用：給湯

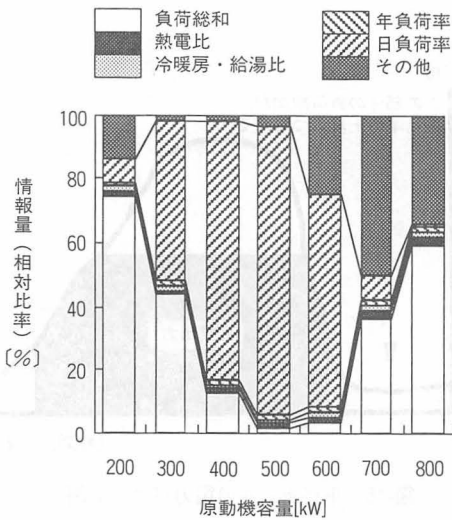
図-8 原動機容量別の負荷要素の持つ情報比率

の排熱をほとんどの時間帯で使い切ることができているためと考えられる。

一方、図-8は排熱の利用用途が給湯のみの場合である。暖房熱源として各戸ごとに電動ヒートポンプを設置する想定のため、暖房負荷は電力負荷に振り替えられ、負荷側の熱電比は小さくなる。この場合は、特に原動機容量の大きい場合はCGS排熱は余剰となり、負荷要素のうち「熱電比」の占める負荷情報量の割合が大きくなる。

3.3 ホテルにおける計算結果

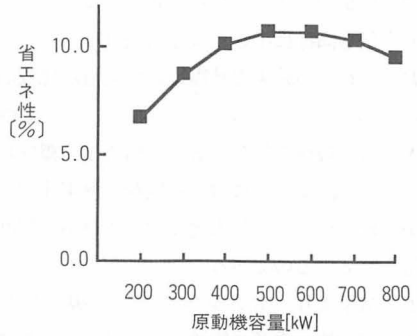
図-9は、ホテルにおいて排熱を冷房、暖房、給湯各負荷に用いた場合の結果である。ホテルは集合住宅と違う傾向を示し、「年負荷率」や「日負荷率」などのパターンに関わる負荷要素が大きい情報量を持つことがわかる。



ホテル 排熱利用：冷房、暖房、給湯

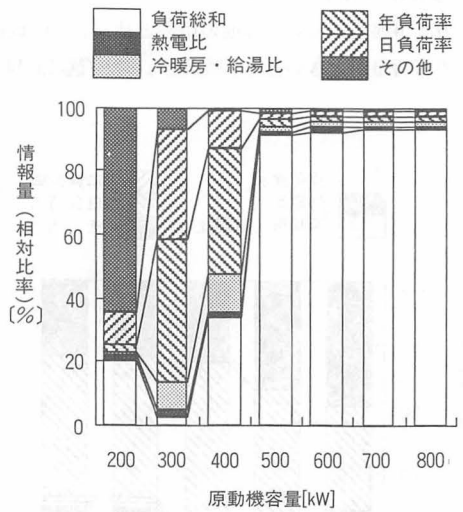
図-9 原動機容量別の負荷要素の持つ情報量比率

この図においては原動機容量が400kWから600kWの領域で日負荷率の持つ情報量のウェイトが大きい。図-10によれば、この容量のCGSは省エネルギー性の最も高い状態(10%)であり、システム全体として極めて効率的に機能した状態と考えられる容量である。熱と電力が過不足がなく利用され、且つ住宅などより全負荷相当の稼働時間も長いと考えられる。熱と電気全体の「総量」としてのバランスがとれているならば、負荷率の影響がCGSの省エネルギー性に重要な影響を及ぼしてこることがこのホテルの例で読みとれる。



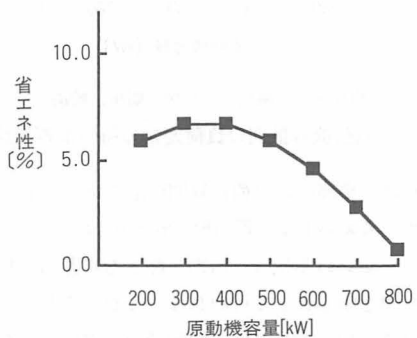
ホテル排熱利用：冷房、暖房、給湯

図-10 原動機容量別の省エネルギー性



ホテル 排熱利用：暖房、給湯

図-11 原動機容量別の負荷要素の持つ情報量比率



ホテル排熱利用：暖房、給湯

図-12 原動機容量別の省エネルギー性

一方、図-11は排熱を冷房に利用しない場合の結果である。図-9とほぼ同様の傾向を示すが、熱負荷が減少するため日負荷率や年負荷率の影響が大きく現れる

原動機容量がやや小さくなる。省エネルギー性が最大となる容量も同様に小さくなる(図-12)。

なお、これらの結果で熱電比の情報量が比較的小さいのは、「よく分からないことに関して知見を得た時に、大きな情報量を得る」という情報量の概念に起因する。つまり、ホテルにおける既存の熱電比データの分散が比較的小さく、熱電比に関してはある程度の知見が得られているのである。

以上の結果より、ホテルへのCGSの導入において省エネルギー性を重要な指標とするならば、特に日負荷率のデータを十分調査することが重要であるということがわかる。

3.4 事務所における計算結果

一方、事務所においては他の用途と比べ、「日負荷率」の情報量が大きいという結果となった(図-13, 14)。

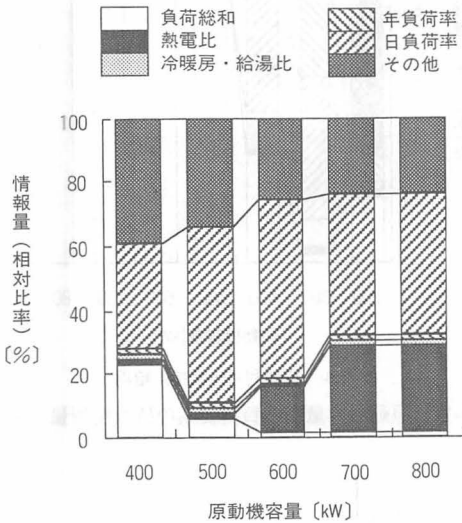


図-13 原動機容量別の負荷要素の持つ情報量比率

これは、事務所の負荷が昼間中心であるという特徴のためと考えられる(図-15)。事務所におけるコージェネレーションの運転は、電力、熱ともに非常に負荷の多い昼間を中心として行われる。しかしこれに夜間の電力負荷増加が加われば、原動機の稼働率が上がり、また夜間の熱負荷増加によって排熱利用も増え、省エネルギー性も増加する。この夜間負荷は、日負荷率を改善させることにより増加に直接的に結びつくため、日負荷率の変化が大きく影響するのである。

従って、事務所においては夜間負荷がどの程度発生

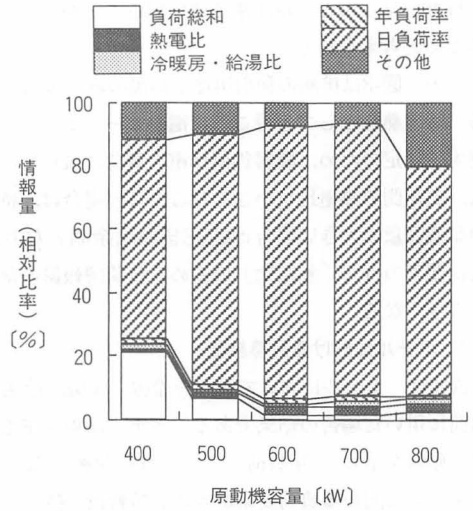


図-14 原動機容量別の負荷要素の持つ情報量比率

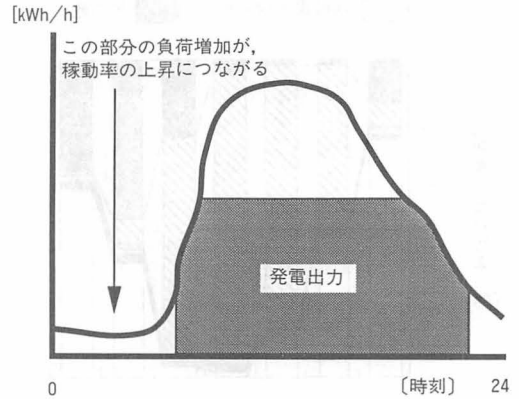


図-15 事務所ビルの電力パターン例

するかについて、正確な推計を行うことが重要であることがわかる。

4. おわりに

環境性に優れた省エネルギーシステムの切り札であり、環境保全、省エネルギー化にその普及が期待されるコージェネレーションシステムであるが、その評価の前提となる熱と電力の負荷データの把握は難しいのが実態であり、効率的な負荷データの収集が求められる。

本稿では、コージェネレーションシステムを省エネルギー性の観点より評価するために必要な負荷要素を把握する際、何を精度よく測定すべきかについて、そ

の基準を情報理論の考え方を利用して提案するとともに、コンピュータシミュレーションによって定量的な評価を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 集合住宅ではベースロード相当の容量を導入する場合には負荷総量を把握することが重要である。例えば、本検討事例では、夏期ピークの電力需要の40%以下程度の原動機導入率の場合は省エネルギー性に対して「負荷総量」が情報量の大部分を占める。
- 2) ホテルにおいて熱と電力をバランスよく利用している場合は、負荷率の情報が重要である。
- 3) 事務所ビルでは原動機容量にかかわらず日負荷率の情報が重要である。これは夜間負荷の増加が省エネルギー性の改善に貢献するためである。

なお、本研究ではコージェネレーションシステムの評価関数として省エネルギー性を取り上げたが、その他にも、経済的メリットや環境特性などの評価があり、今後検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 坂本慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎, 「情報量統計学」, 共立出版, 1983年.
- 2) 竹村彰通, 「多変量推測統計の基礎」, 共立出版, 1991年.
- 3) 尾島俊雄, 佐土原聡他, 「東京の集合住宅のエネルギー消費量に関する実測研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1984年10月.

- 4) 成田勝彦他, 「集合住宅の冷暖房給湯需要の実測調査(その1~2)」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1991年10月.
- 5) 昭和60年度通商産業省研究開発委託事業, 集合住宅用新材料・機器システム開発プロジェクト研究成果報告書, 1986年3月.
- 6) 日本コージェネレーション研究会, 「コージェネレーション負荷推計手法」, 1989年9月.

付録  $x_6 \sim x_{1152}$  の持つ情報量の計算法

式(16)の上限値を評価するためには、 $x_1 \sim x_5$  が全く等しい多数の負荷について  $F(\cdot)$  を求め、その幅を求めればよい。例えば集合住宅負荷の場合、ホテル、オフィスなどの負荷パターン  $Y^H, Y^O$  について、対象としている集合住宅の  $x_1 = \mu_1, \dots, x_5 = \mu_5$  と等しくなるような変換を、式(付1)のように施し、 $F(\cdot)$  の幅を式(付2)のように算出した。

$$X^H = T(Y^H) \equiv (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, x_6^H, \dots, x_{1152}^H)$$

$$X^O = T(Y^O) \equiv (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, x_6^O, \dots, x_{1152}^O) \quad (\text{付1})$$

$$\sum_{i=6}^{1152} \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_i \right)^2 = \max |F(X) - F(X^O)| \quad (\text{付2})$$

但し、 $X, X'$  は、 $\mu, X^H, X^O$  のうち異なる2ベクトルを意味する。

