

負荷研究の方法とロードマネジメント 評価への適用事例

キーワード：ロードマネジメント，負荷研究，負荷曲線，サンプリング

小 野 賢 治

〔要 旨〕

本報告は、今後日本において行われるロードマネジメントのための負荷研究の手引きとするために、米国における負荷研究の手法、負荷データ分析のための情報システム、及び負荷研究の適用事例を広い範囲にわたって調査した結果を集約したものである。特に、

- ・ブートストラップ法を用いたサンプリング計画の評価法
- ・負荷研究情報システムに特有の機能
- ・末端機器の負荷曲線推定のための種々のモデル（工学モデルの利用など）

が有用なものとして挙げられる。

- はじめに
- サンプリング計画の方法と評価
 - サンプリング計画の方法
 - ブートストラップ法を用いた比較方法
- 負荷研究情報システム構築の要点
- 負荷曲線の分析・予測モデル、手法について
- 負荷研究のロードマネジメント評価への適用
 - 商業用需要家の分類
 - 省エネルギー計画の評価
- 今後の課題

1. はじめに

近年日本においては、冷暖房機器が急速に普及してきたために、電力の平均的な負荷とピーク負荷との比率（負荷率）が次第に低下してきている。そのため、需要家に積極的に働きかけて負荷を平準化するなど、設備の有効利用のために望ましい需要特性を誘導しようとするロードマネジメントに、高い関心が持たれるようになってきた。

ロードマネジメントの評価を行うためには、種類、層別、末端利用別などさまざまなレベルの負荷の測定・分析・予測を行うことが必要で

ある。本報告は、今後日本において行われるロードマネジメントのための負荷研究の手引きとするために、米国における負荷研究の手法、負荷データ分析のための情報システム、及び負荷研究の適用事例を広い範囲にわたって調査した結果を集約したものである。

2. サンプリング計画の方法と評価

負荷研究では特にメータの設置に多大な費用を必要とする。そこで、できるだけ少ないサンプル数でできるだけ正確な推定を行うことが非常に重要になる。そのためには、統計理論に基づいたサンプリング計画を立てることが必要で

表 2.1 サンプルング計画の方法

サンプルング計画	母集団の全ての個体は正の選択確率を持つか	超母集団の仮定の利用/モデル			ランダム選択の性質を用いるか	分類	負荷研究での利用
		利用タイプ	利用法	選択確率			
単純ランダムサンプルング	○	なし	適用できない	全ての P_i が等しい	○	確率に基づく	限定
比例割当での層別サンプルング	○	暗黙	<ul style="list-style-type: none"> X_i による群分けは Y_i の群内分散ができるだけ小さくなるようになされると仮定 	全ての P_i が等しい	○	確率に基づく	限定
ジャッジメンタル割当での層別サンプルング	○	暗黙	<ul style="list-style-type: none"> X_i による群分けは Y_i の群内分散が小さくなるようになされると仮定 サンプルのジャッジメンタルな層への割当がある意味で最良のサンプルを与える」と仮定 	<ul style="list-style-type: none"> P_i は層内で等しい P_i は層間で変化する P_i はジャッジメンタルな割当に支配される 	○	確率に基づく	普通
最適割当での層別サンプルング	○	暗黙	<ul style="list-style-type: none"> X_i による群分けは Y_i の群内分散ができるだけ小さくなるようになされると仮定 X_i と Y_i との相関が強いと仮定 X_i についてはほぼ最適な計画は Y_i についても最良と仮定 	<ul style="list-style-type: none"> P_i は層内で等しい P_i は層間で変化する どの層の P_i も層内の N と X_i の分散に依存する 	○	確率に基づく	普通
モデルに基づく層別サンプルング (MBSS)	○	明示的	<ul style="list-style-type: none"> Y_i を誤差項 e_i をつけて X_i と関連づける主モデルを推定 Y_i の標準偏差を X_i で説明する副モデルを推定 副方程式を用いて層の境界と割当を決定 	<ul style="list-style-type: none"> P_i は層内で等しい P_i は層間で変化する どの層の P_i もモデルで決まる割当に依存する 	○	モデルに基づく	限定
モデル依存	×	明示的	<ul style="list-style-type: none"> モデルが選択する個体の特定化に用いられる 	<ul style="list-style-type: none"> 全ての P_i が等しいとは限らない $P_i=0$ もある 他の P_i はモデルで決まる 	×	モデル依存	なし

注) Y_i : 第 i 需要家の負荷の値
 X_i : 第 i 需要家の補助変量 (電力使用量など) の値
 P_i : 第 i 需要家がサンプルに選ばれる確率
 N : (部分) 母集団の大きさ

ある。

2.1 サンプル計画の方法と適用状況

〔4〕

表 2.1 は、種々のサンプリング計画の特徴をまとめたものである。尚、サンプリング調査の基礎的な理論は〔8〕を、また、表 2.1 にあるサンプリング計画のうち、「単純ランダムサンプリング」「最適割当ての層別サンプリング」「モデルに基づく層別サンプリング (MBSS)」の詳細については〔1〕,〔2〕あるいは〔10〕を参照願いたい。

現在米国で用いられているサンプリング計画は、大部分が層別ランダムサンプリングである。層別化に用いられる変数は、大部分が kWh である。モデルに基づく単純/層別ランダムサ

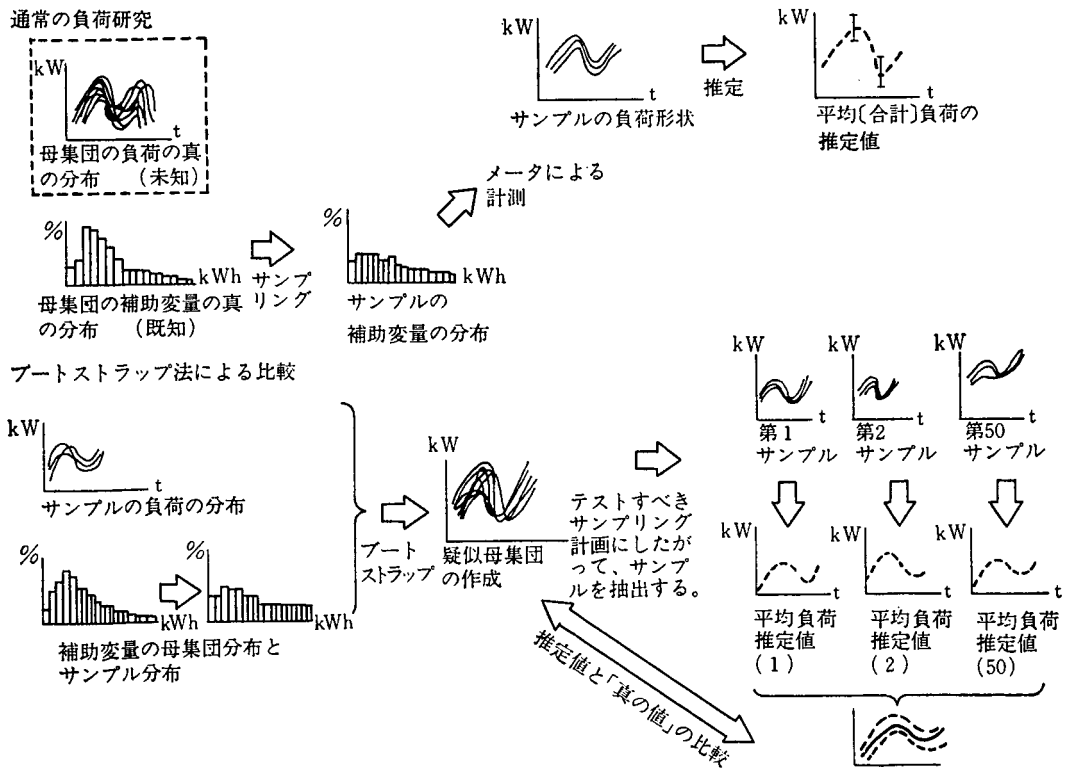
ンプルング (表 2.1 の MBSS とは限らない) が多く用いられている。

2.2 ブートストラップ法を用いた比較方法

本節では、〔5〕で提案されたブートストラップ法によるサンプリング計画の比較方法について述べる。

ブートストラップ法とは、ある観測値に基づく統計量の分布を求める際に、その観測値がしたがる (真の) 分布を用いる代わりに、その近似としてサンプルの経験分布を用いる方法である (〔7〕,〔11〕)。この方法は、仮定した分布が真の分布と大きく食い違っている時や、ある特定の理論分布を仮定することが適切でない場合に有効な方法である。

図 2.1 は、このブートストラップ法を用いた



(*) サンプルの負荷の経験分布をもとに、補助変数の分布を用いて重みづけを行う。テストすべきサンプリング計画による推定値の分布

図 2.1 ブートストラップ法によるサンプリング計画の比較

比較方法を、通常の負荷研究における方法と対比して、図示したものである。

適用例

表 2.2, 2.3 は、住宅用、商業用のそれぞれの負荷研究データについて、要求される精度をみたすために必要なサンプル数を、従来の方法（層別サンプリング、単位当たり平均による拡張）と MBSS による方法について推定した結果である。いずれの場合においても、MBSS のほうが必要とするサンプルサイズは少ない。その差は、MBSS で2つの補助情報を用いている商業用のほうが大きくなっている。

ただし、これらの結果から、MBSS が従来の方法よりも普遍的に優れているということはいできない。サンプリング計画の評価結果は、状況によって変化するので、個々の場合について行うべきである。

3. 負荷研究情報システム構築の要点

米国においては、負荷研究に対するニーズが非常に大きいことから、負荷研究を行うための情報システムも発展しており、数多くのシステムが開発されている。これらのシステムは大別して、

- ①電力会社内で開発した専用システム
- ②ソフトウェア会社やシンクタンクが開発した汎用システム

がある。

ここでは、米国の負荷研究情報システムに関するレポートから要点を抜き出し、KJ 法（〔9〕）によってまとめを行い、負荷研究情報システムを構築するにあたって重要な点や問題となる点を探った。

表 2.2 ブートストラップ法で評価したサンプリング計画の精度の比較（住宅用）

計画された精度を満たすために必要なサンプル数¹⁾

サンプリング計画	計画年の 系統ピーク時	実験年の 系統ピーク時	計 画 年		
			全時間の50%	全時間の75%	全時間の95%
従来の方法 ²⁾	211	225	154	187	270
MBSS ³⁾	195	215	146	182	240

1) 相対誤差の絶対値が 10% 以内に入る確率が 90% 以上であること。

2) 層別化の場合の単位当たり平均による拡張法（層の数は4）。

3) 以下の MBSS モデルを用い、比推定法で拡張する。

〔主方程式〕 $\mu = E(kW) = \beta kWh$ (E は平均を表わす)

〔副方程式〕 $\sigma = SD(kW) = \sigma_0 kW h r$ (SD は標準偏差を表わす)

表 2.3 ブートストラップ法で評価したサンプリング計画の精度の比較（商業用）

計画された精度を満たすために必要なサンプル数¹⁾

サンプリング計画	計画年の 系統ピーク時	計 画 年		
		全時間の50%	全時間の75%	全時間の95%
従来の方法 ²⁾	96	165	220	270
MBSS ³⁾	90.75	73	94	120

1) 相対誤差の絶対値が 10% 以内に入る確率が 90% 以上であること。

2) 層別化の場合の単位当たり平均による拡張法（層の数は3）。

3) 以下の MBSS モデルを用い、回帰推定法で拡張する。

〔主方程式〕 $\mu = E(kW) = \beta_0 + \beta_1 kW h + \beta_2 \max kW$ (E は平均を表わす)

〔副方程式〕 $\sigma = SD(kW) = \sigma_0 \max kW r$ (SD は標準偏差を表わす)

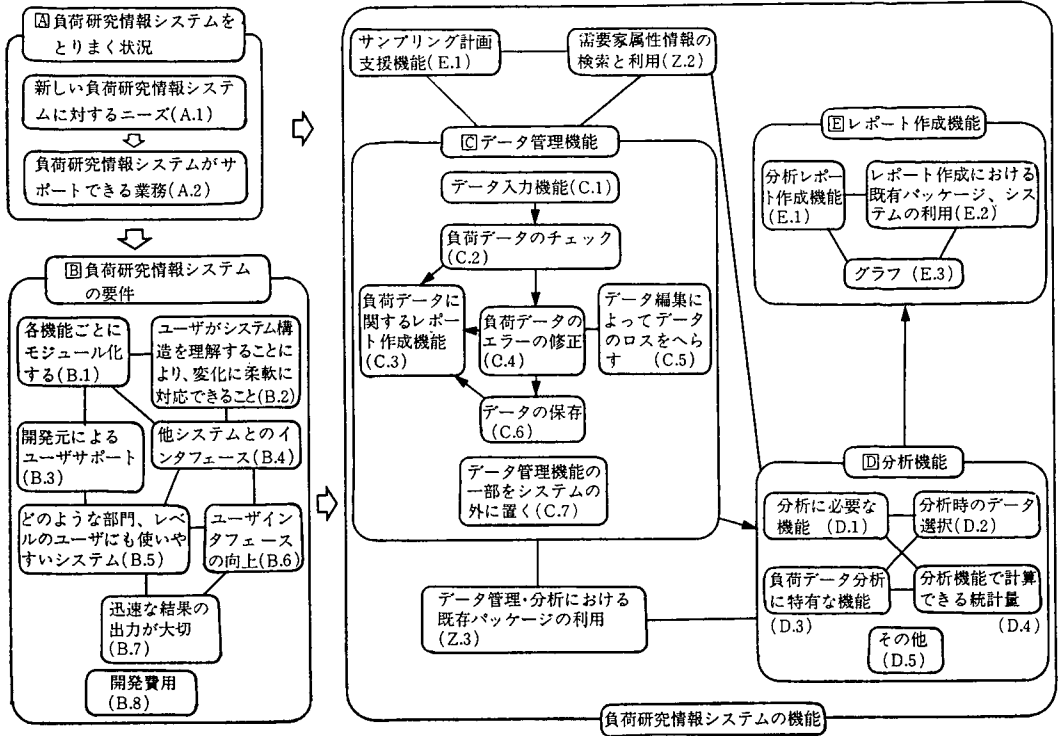


図 3.1 負荷研究情報システム構築の要点

主な調査結果

図 3.1 は、KJ 法によるまとめを行った結果である。

負荷研究情報システムにおいて特に重要な点として、以下の事が挙げられる。

- (1) 負荷データのチェック及び修正は、データのロスを減らし、推定の精度を上げるために非常に重要である。この機能を強力にサポートするシステムが望まれる。
- (2) 負荷データの分析に特有の機能(曜日・時間帯ごとの分析、自動的に識別したピーク時刻における分析等)が充実している事が重要である。
- (3) 分析結果のレポート作成機能(定型レポート、特殊レポート)が充実している事が重要である。

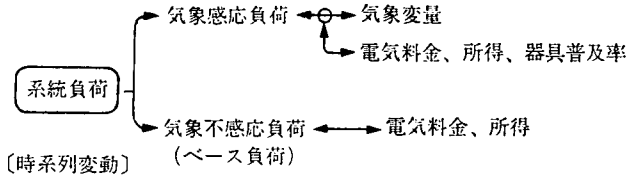
4. 負荷曲線の分析・予測モデル、手法についての調査

負荷の変動要因を分析し、種々のレベルの負荷曲線の推定・予測を行うことは、負荷研究において最も重要な課題である。ここでは、主に EPRI から発行された、負荷曲線の推定・予測に関する 7 件の報告を調査した結果を紹介する。

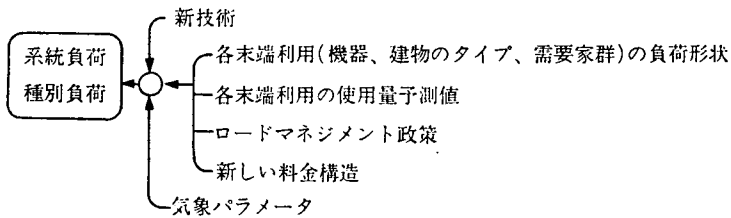
図 4.1 は、これらの報告で述べられているモデルの構造を模式的に表わしたものである。全体的な特徴を概観すると、以下の通りである。

- ・推定・予測する負荷曲線は、系統/種別負荷が 3 件、末端機器の負荷が 4 件であった。
- ・系統/種別負荷曲線の予測では、末端利用・積上型が 2 件、計量経済・集計型が 1

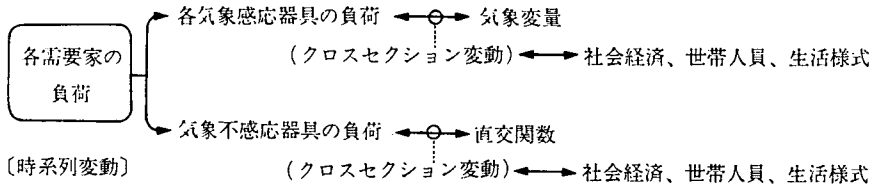
モデルA ([1])



モデルB ([3])



モデルC ([1])



モデルC ([13] で紹介)

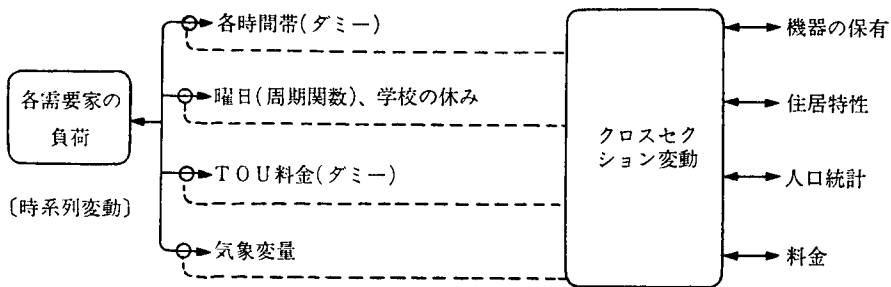
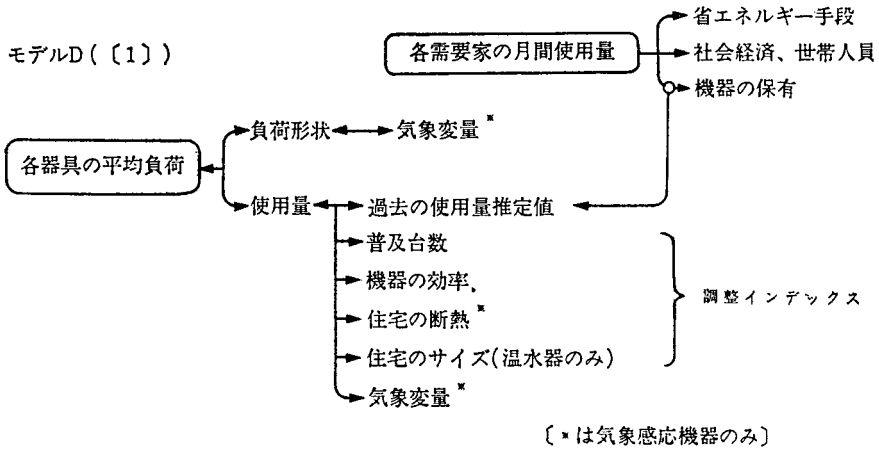
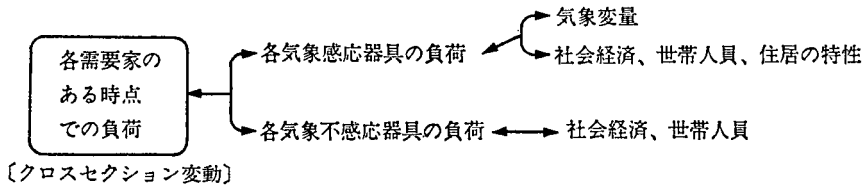


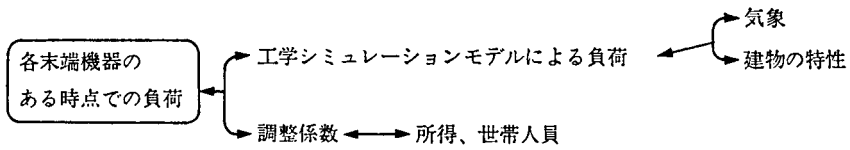
図 4.1 負荷曲線の分析・予測モデルの構造



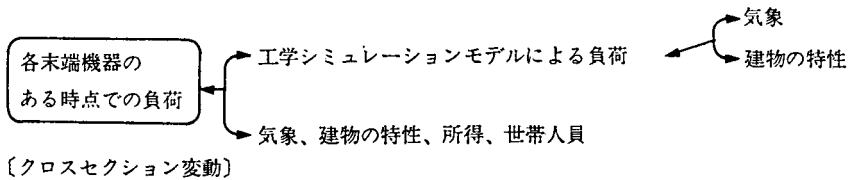
モデルE ([1])、[6])



モデルF ([6])



モデルG ([6])



(注) →は分析を、←は予測をそれぞれ表わす。

件あった。

- ・分析に用いられる気象変数としては、気温、冷房／暖房デグリーデイ、湿度があった。
- ・分析に用いられる気象以外の変数としては、ミクロなレベルでは世帯人員、機器の所有、家の広さ、収入、生活様式（詳細は不明）があった。また、マクロなレベルでは器具普及率、料金、平均所得があった。

各モデル、手法及び適用結果の概要は以下の通りである。

モデルA（〔1〕,〔10〕で紹介）

ここでのモデルは2つの方程式群からなる。第1段階では、負荷を1時間ごとのダミー変数（ベース負荷）、現在の気象、過去24時間の気象（冷房・暖房デグリーアワー）で説明する。過去の気象の影響は現在の気象よりもかなり大きかった。第2段階では、第1段階で求めた1時間ごとのダミー変数についての係数を月のダミー、電気料金、個人の平均所得等で説明し、また気象についての係数を先にあげた独立変数と空調機の普及率で説明する。この結果、所得についての係数は朝の時間帯に大きく、電気料金についての係数の絶対値は午後および夜間に大きい特徴が見られた。これらの推定の結果得られたモデルを用い、他のマクロ経済モデルによる経済変数の予測値を代入して、平均的気象、ピーク日の気象の場合の負荷曲線の予測を行った。その結果、夏は朝の時間帯の伸びが大きく、冬はピークが晩から朝に、しかも次第に早い時刻に移っていくと予測された。尚、このモデルでは、負荷の気象感応度の時間帯変化を考慮していないことが問題である。また、第2段階の方程式は産業用需要の割合が大きい日本の電力会社には不適切である。

モデルB（〔3〕）

このモデルは、HELM (The Hourly Electric Load Model) と呼ばれるものである。このモデルは、長期にわたっての1時間ごとの負荷形状（種別負荷あるいは系統負荷の予測）を行うためのものである。エネルギー管理プログラム、エネルギー利用の新技术、気象等の要因が負荷形状に与える影響をシミュレートできる。

モデルC（〔1〕）

ここでのモデルは2段階のレベルからなる。

〔レベルA〕 各需要家について、その需要家の負荷を気象感応負荷と気象不感応負荷に分ける。具体的には以下のモデルを仮定する：

$$\begin{aligned} & (\text{需要家 } J \text{ の } T \text{ 時における負荷}) \\ & = \sum (\text{電気器具の利用状況}([0, 1]) \\ & \quad \times (\text{その器具の消費電力}) \\ & \quad + (\text{誤差項 [ARIMA モデル]}) \end{aligned}$$

「電気器具の利用状況」はさらに器具の気象感応のタイプによって3種類のモデルで表わし、気象変数等で説明する。器具の消費電力は負荷研究データ等の事前情報を用いる。このモデルの推定にはベイジアン等の高度な手法を用いる。

〔レベルB〕 Aのモデルのパラメータ（気象感応度、設定温度、ARIMAのパラメータ等）の推定値と負荷データの需要家間の変動を、社会経済、人員、生活様式（夫人が昼間働きにできるかどうか等）などで説明する。手法としては、回帰分析とクラスタリングを並行して行なう。

モデルC（〔13〕で紹介）

このモデルでは、まず第1段階で、各需要家の負荷の時系列的変動を、時間ダミー、曜日（平日ダミー及び終末のみ周期関数の値をとるダミー）、TOU料金のダミー、学校の休日に

についてのダミー、気象変量（湿度を考慮した気温、風速）で説明する。第2段階では、第1段階の推定で得られた回帰係数の需要家間の変動を、機器の保有、家族の年齢構成、住居の特性（建築後年数、居住面積、構造物）、料金で説明する。

モデルD ([1])

ここでは、各器具の平均負荷を、各器具の負荷形状及び使用量の推定値から構成する。各器具の負荷形状は、気象不感応器具についてはコンサルタント会社から借りたデータを用い、気象感応器具（石油ファンヒータを含む）の負荷形状は、測定された負荷データと気象データから、その関係を分析し、気象の影響を除いて構成する。各器具の使用量推定値は、過去の（1台当りの）使用量推定値（各需要家の月間使用量を分析するモデルのパラメータ推定値）、普及台数、機器の効率・住宅の断熱・住宅のサイズ（温水器のみ）に関する調整インデックス、気象変量（気象感応器具のみ）から推定する。

モデルE ([1], [10] で紹介)

ここでは原理的には、ある電気器具を持っているかないかを除いては他の重要な特性が同じである2世帯を比較することによって、その器具の負荷を推定する。モデル推定には見かけ上無関係な回帰を用いる。モデル化にあたっては単純化のためにパラメータに制約をおく。分析の第二段階では、全体の負荷から気象不感応負荷を除き、気象感応負荷を求める。そして、その気象感応負荷を気温、湿度、家の容積で説明するモデルをつくり分析する。ここで用いた気象変量は、

$$\sum(\text{温度の多項式}) \times (\text{湿度}) \\ \times (\text{部屋の容積の平方})$$

である。以上の分析結果をもとにして、各時間

帯ごとの全体の負荷の予測を行っている。全体の負荷は、

$$(\text{各時間} \cdot \text{各器具の負荷}) \times (\text{普及率}) \\ + (\text{気象感応負荷})$$

で与えられる。エアコンをもつ家庭について計算を行ったところ、平均的な気温の日、高気温の日とも予測値は実績値とよく適合した。

モデルE ([6] のモデル)

一日を9時間帯に分け、各時間帯の各機器の負荷を、気象、住居の広さ、世帯人員、所得で説明する。

モデルF ([6])

各需要家の気象、住居の特性のデータをもとに、工学モデルによるシュミレーションの結果得られた負荷曲線で、実際の負荷を説明し、調整係数を求める。調整係数は、1. 機器ごとに一定、2. 需要家間で変動、3. 時間帯で変動、4. 需要家間及び時間帯で変動、4のつの場合がある。

モデルG ([6])

モデルEと工学データを組み合わせ、混合推定を行う。工学データに対する信頼度を事前分布に反映させる。

5. 負荷研究のロードマネジメント評価への適用

ここでは、EPRI から出されたいくつかのレポートから、負荷研究の結果をロードマネジメントの評価に適用した事例を紹介する。

5.1 商業用需要家の分類

商業用需要家を、産業分類コードをもとに同質な負荷形状をもつと考えられるグループに分類し、各グループについての日負荷曲線の形状を分析して、マーケティングやロードマネジメントの計画に役立てる研究が[1]にある。

負荷(夏季ピーク=100)

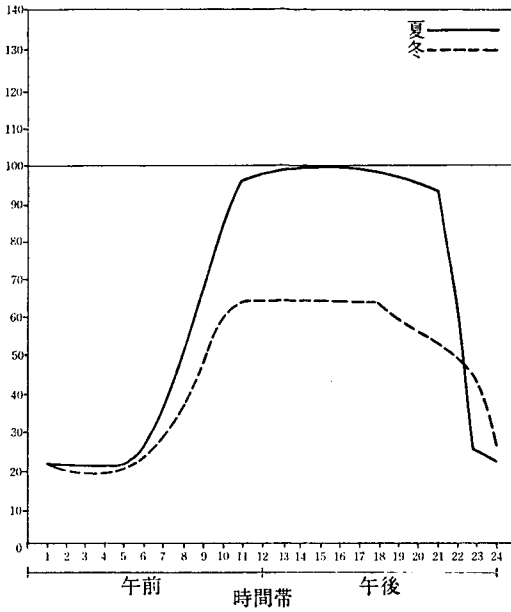


図 5.1 一般小売店舗の平均的負荷曲線

負荷(夏季ピーク=100)

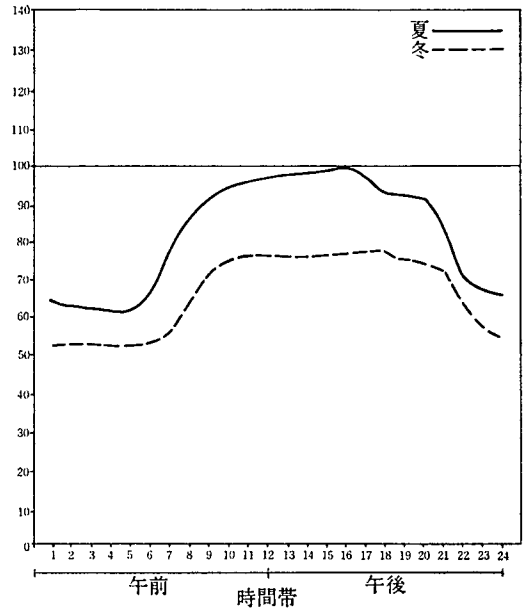


図 5.2 食料品店の平均的負荷曲線

負荷(夏季ピーク=100)

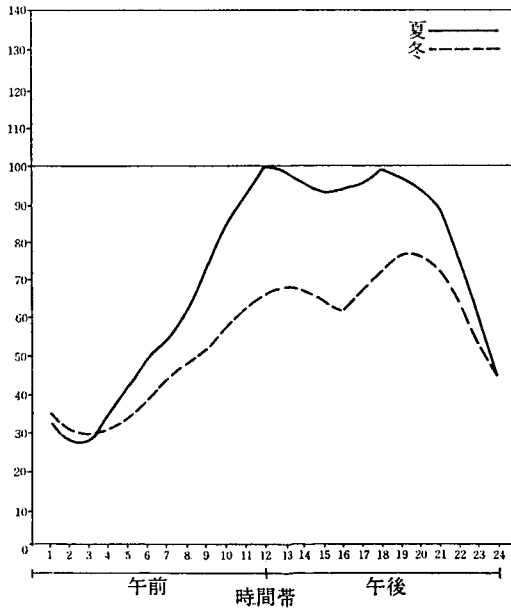


図 5.3 飲食店の平均的負荷曲線

負荷(夏季ピーク=100)

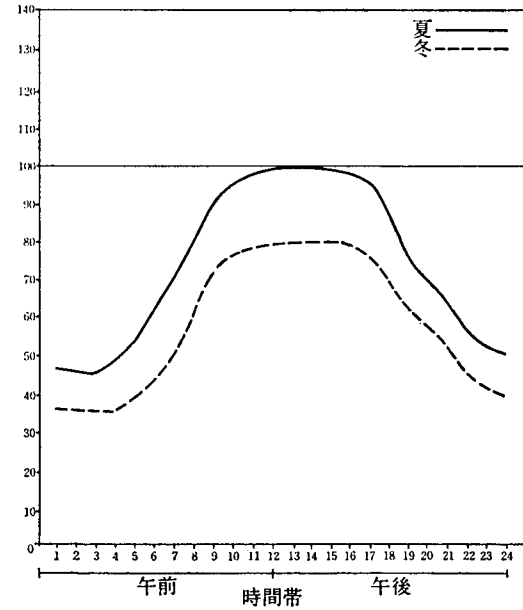


図 5.4 オフィスビルの平均的負荷曲線

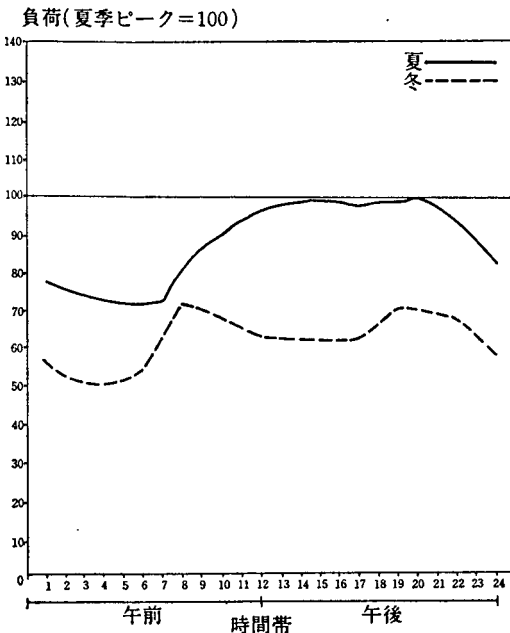


図 5.5 ホテルの平均的負荷曲線

ここでは商業用需要家から7つのグループを構成した。図 5.1~5.5 はそのうちの5つのグループに属する需要家の平均負荷を图示したものである。各グループの負荷曲線の特徴と、考えられるロードマネジメント戦略は以下の通りである。

【一般小売店舗】 このグループの電力消費は主にデパートで占められている。ピークが長く持続する。

【食料品店】 主にスーパーマーケットとコンビニエンスストアである。昼前から夕方にかけてピークがあり、夜おそくに中間的な需要（外部照明のためと考えられる）がある。ピークとオフピークの比は小さい。

【飲食店】 主に食堂である。負荷の形は店内の客数を反映している。負荷率は低い。ピーク持続時間が短いので、小容量の蓄冷設備に向い

ている。冷房・換気のピーク時に湯を多く使うので、温水器と HVAC の統合システムが向いている。皿洗いの負荷もコントロールできる。

【オフィスビル】 SIC コードでは種類が多く特定できない。実際に電気代を払っているのは、「非住居用ビルの管理者」（不動産の中の一分類）が多い。大きなオフィスビルは建物内の負荷が支配的で、夏ピーク型である。負荷形状は人がいる状態を反映しているが、夜間活動のレベルが大きくデパートよりも高負荷率である。オフィスビルのピーク負荷の主要素は、冷房と照明である。照明のコントロールによってピーク負荷を大きく削減できる。ピークの時間帯が予測可能なので、蓄冷設備が使える。

【ホテル・旅館】 負荷率が高いので、ピーク削減は主に効率化に向けられる。ピークの発生する日中は、会議室や食堂などの共通の場所での利用が多いので、この部分のエネルギー管理システムが考えられる。

以上のグループに属する需要家が商業用需要の大部分を占めている。この分類による各グループはそれぞれ異なった特徴を持つ負荷形状を示しており、需要家サービス等に有用である。SICに基づく分類を用いることにより、他の統計との比較等に便利である。

コメント

商業用電力の場合は負荷形状が業種の性質に依存すると考えられるので、このような分類による負荷形状の分析は有用である。各業種の負荷形状は日本でもそれほど大きく変わらないのではないかと考えられる。

5.2 省エネルギー計画の評価

南カリフォルニアエジソン社で実施しようとする住宅用の2つの省エネプログラムについて、それらが末端機器負荷曲線へ及ぼす影響を

評価する2つのモデルにおいて、負荷研究の情報をいかに用いるかについてが〔1〕に述べられている。

ここで取上げたモデルは以下の2つである。

(1) 住宅用末端利用消費モデル

効率のよいエアコン購入にインセンティブを与えるプログラムの評価に用いる。機器購入の意思決定が陽にモデル化される。機器のライフサイクルでのコストが最小になるような技術が選ばれる。このモデルによる推定結果は、平均kW見積りに用いられる。

(2) 住宅用ピーク日モデル

このモデルは、以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} & (\text{ピーク日の1時間ごとの負荷}) \\ & = (\text{kW デマンド}) \\ & \quad \times (\text{機器ごとの負荷形状係数}) \end{aligned}$$

ここで、

負荷研究の方法とロードマネジメント評価への適用事例

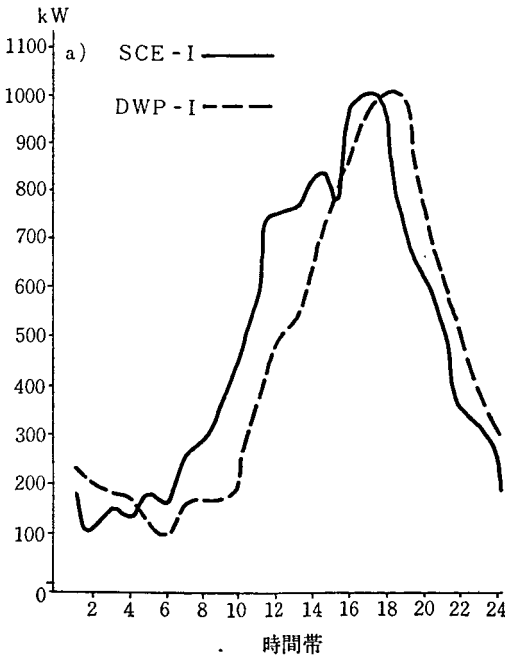
$$\begin{aligned} (\text{kW デマンド}) &= (\text{機器ストックの推定値}) \\ & \quad \times (\text{平均 kW デマンド係数}) \\ & \quad \times (\text{同期率} [\text{個々の機器がピーク日に動いている確率}]) \end{aligned}$$

負荷形状係数は、機器の保有などの調査情報とメータの測定データを用い、個々の時間帯の条件付デマンドモデルから求める。エアコンのサイクリング運転の影響が、同期率と負荷形状係数の変化に反映される。図5.6は、エアコンのサイクリング運転を行わない場合と行った場合の、エアコンの負荷形状を表わしたものである。

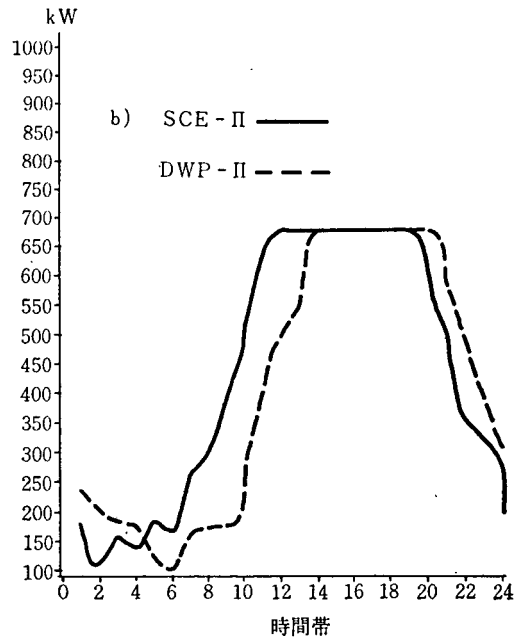
これらの分析によって、機器購入プログラムのピーク日の売上への影響はサイクリング運転に比べるとごく小さいことがわかった。

コメント

南カリフォルニアエジソン社のロードマネジメント政策はかなり進んだものであり（詳細は



①サイクリング運転なし



②サイクリング運転あり

図 5.6 セントラルエアコンの負荷の予測値

[12] 参照), 分析手法もかなり発展していると思われる。特に, 負荷形状数推定のためのモデルは興味あるところである。

6. 今後の課題

本調査の結果を踏まえて, 昭和 61 年度から行われる季時別料金実験の分析において, 米国において有効であった方法を適用するとともに, 日本の状況に適応した分析方法を開発し, 適用していくことが必要である。特に, 季時別料金が種別負荷や末端機器の負荷に及ぼす影響を正確に推定する方法の開発が大きな課題である。

参考文献

A. EPRI レポート

- [1] Electric Power Research Institute, *Proceedings: EPRI Load Research Symposium*, EA-3389, Palo Alto, CA, 1984.
- [2] Roger, L. Wright and Associates, *Model-Based Statistical Sampling for Electric Utility Load Research*. EA-3286, November 1983.
- [3] ICF Incorporated, *The Hourly Electric Load Model (HELM)*. EA-3698, January 1985.
- [4] Applied Management Sciences, Inc., *Sample Design for Load Research: Current Practice and Methods*. EA-3994, April 1985.
- [5] Applied Management Sciences, Inc., *Sample Design for Load Research: The Bootstrap Comparison Procedure*. EA-4232, September 1985.
- [6] Cambridge Systematics, Inc., *Combining Engineering and Statistical Approaches to Estimates End-Use Load Shapes*. EA-4310, October 1985.

B. その他の文献

- [7] Efron, B., *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982.
- [8] コ克蘭著, 鈴木達三, 高橋宏一, 脇本和昌共訳「サンプリングの理論と方法」東京図書, 1972.
- [9] 日本能率協会編「経営のための KJ 法入門」日本能率協会, 1978.
- [10] 小野賢治「ロードマネジメントのための負荷研究—米国における研究動向の現状」電力中央研究所調査報告, No. 584010, 1985.
- [11] 小野賢治, 大屋隆生「電力需要分析のための新しいデータ解析手法とその適用例」電力中央研究所研究報告, No. 584005, 1985.
- [12] 山地憲治, 浅野浩志「ロードマネジメントとその費用便益分析—米国における実施状況と研究の現状」電力中央研究所調査報告, No. 584004, 1985.
- [13] 浅賀幸平「二段階回帰分析手法による米国電力需要の想定」海外電力, 第 27 巻, No. 7, 1985.

(おの けんじ
情報システム部
経営情報研究室)