

電力需要特性から見た都市の地域分類

目黒公郎¹・副高紀代²・山崎文雄³・片山恒雄⁴

¹ 正会員 工博 東京大学助手 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)
² 正会員 工修 (株)大林組 (元東京大学大学院生 〒106 東京都港区六本木 7-22-1)
³ 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)
⁴ 正会員 Ph. D 東京大学教授 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

近年、都市生活の電力への依存が高まる一方で、自然災害や事故などの様々な原因による停電が発生し、都市機能に大きな影響を及ぼしている。本研究では、都市停電の定量的影響度評価への第1ステップとして、電力需要特性から都市部の地域特性評価を試みた。すなわち、電力需要と地域特性のデータベースを構築するとともに、電力需要から見た都市部の地域特性評価と分類を行い、都市部の電力需要が、基本となる4つの構成要素(住宅・オフィス・工場・店舗/飲食店)の重ね合わせとして評価できることを示した。そして、東京23区内314カ所の配電エリアについて、各構成要素の重ね合わせの割合を寄与率として算定した。

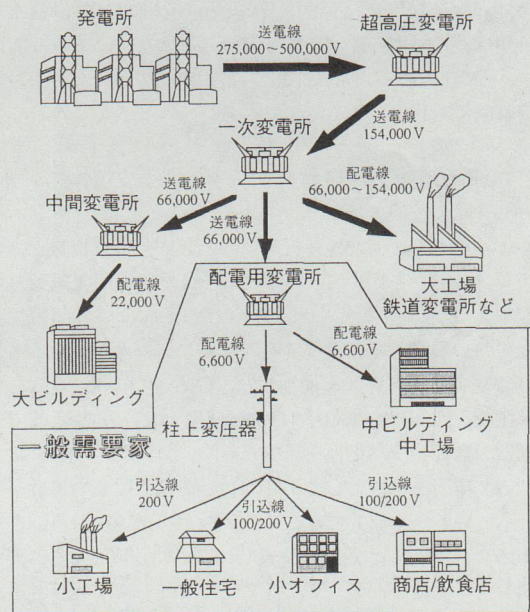
Key Words : power outage, power load curve, Tokyo Metropolis, geographical information system, land use

1. はじめに

現代社会の電力に対する依存の高まりとともに、停電によって都市社会が受ける障害の形態も変化しつつある。最近においても、釧路沖地震^{1),2)}・ロマンブリエタ地震^{3),4)}・ノースリッジ地震⁵⁾などの地震によって停電が発生し、社会生活に大きな影響を与えたことが報告されている。また1991年の台風19号の際には、全国で700万戸もの停電が発生し、直接的な生活支障に加え、停電によるライフラインの機能損失や社会機能への様々な影響が大きな問題となった^{6),7)}。

主要電力設備の自然災害などに対する安全性は、近年の設計・施工技術や構造材料の進歩にともな大きく向上している。しかし、機能障害の面からの検討はまだ十分とは言えず、機能障害によって引き起こされる新たな災害が懸念されている。大規模な構造被害を発生させるには至らないものの、様々な機能障害を引き起こす地震や各種の自然災害は、今後も数多く発生すると考えられることから、災害時の停電にともなう他のライフラインや社会生活への影響の解明が強く望まれている。

ところで、一口に停電の社会生活への影響といっても、その範囲は、「電灯がつかない」ことから始まって、「交通システムの停止」「上下水道の障害」「銀行オンライン停止」「放送・通信システムの障害」など広域にわたる。そこで本研究では、小規模産業や家庭などの一般需要家



図一 電力設備の系統

に電力を供給する配電用変電所の分担区域(配電エリア)を基本単位として、社会生活への停電影響度評価を検討する。

一般需要家というのは、図一に示すように、配電系

表-1 各季節の電力需要記録日と諸元

	記録日	曜日	天候	最高気温	平均湿度	平均風速
秋	1991/10/16	水曜日	曇時々晴 一時雨	21.1℃	54%	2.7m
冬	1992/1/22	水曜日	曇後晴	11.7℃	45%	2.3m
春	1992/4/15	水曜日	曇時々晴	15.7℃	66%	2.9m
夏	1992/8/19	水曜日	晴	31.3℃	68%	3.0m

統の末端に位置する最も地域に密着した需要家であり、住民レベルでの影響を考える上での基本である。ここでは、この一般需要家を対象として、業種の違いによる影響や、停電発生時刻による影響、停電の継続時間の違いによる影響などを考慮し、停電影響度の定量化をめざす。

停電による都市生活への影響は、その地域に住む人々の生活様式や産業形態によって大きく異なり、しかも季節・天候などの自然条件と、停電の発生時刻・継続時間などの影響を強く受ける。これは地域別の電力需要特性が、上記のような様々な要因で決定されるためである。本研究ではまず、都市停電の定量的影響度評価への第1ステップとして、電力需要特性から都市部の地域特性評価を試みる。すなわち、電力需要と地域特性のデータベースを構築するとともに、電力需要から見た都市部の地域特性評価と分類を行う。電力需要からの地域特性評価と分類は、地域別の停電影響度評価の基本データのみならず、停電被害の効率的な復旧対策や事前の有効な設備投資戦略にも利用できるものである。

2. 電力需要/地域特性データベースの構築

まず電力需要の特性分析を目的として、地理情報システム (GIS) を用いて、東京23区内の配電用変電所・配電エリアの座標データ (314カ所)、および各配電用変電所の季節別電力需要 (時間稼働) データからなる電力需要データベースを構築した。GISソフトとしては、米国ESRI社のARC/INFOを使用した。電力会社では電力需要状況の把握を目的として、毎月第2水曜日に、配電変電所を単位として1時間ごとの電力需要の集計を行っている。本研究では、この集計データの中から、各季節を代表すると見なせる表-1に示す記録日の電力需要データを選び、データベース化した。

図-2に東京23区の配電エリア区分を示す。各配電エリアには配電用変電所が1つ置かれている。これらの配電用変電所には、通常3基 (一部は2基) の変圧器 (トランス) が設置されており、電力需要に応じてエリア内の各需要家に電力を送り出している。配電エリアの大きさは、需要家数やその地域の重要度に応じて決められ、基本的に各変圧器の稼働率が一定値になるようにされて

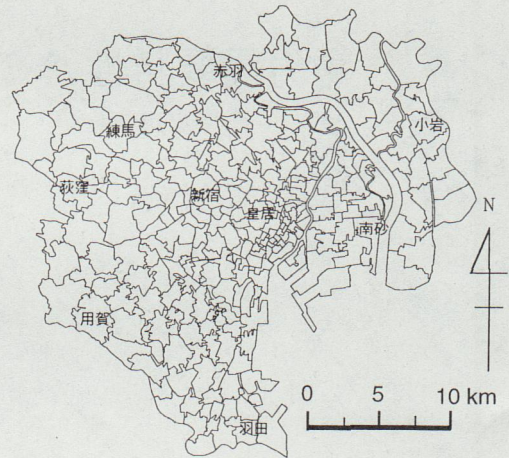


図-2 東京23区の配電エリア区分

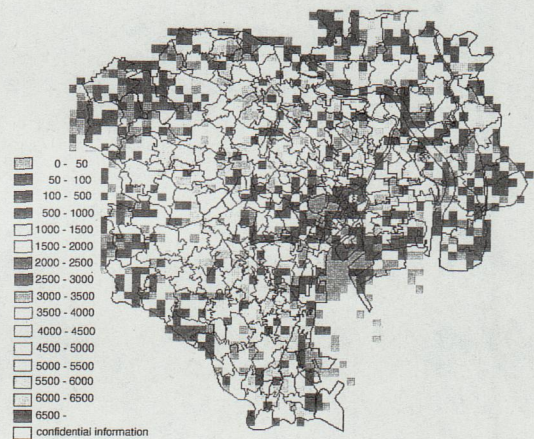
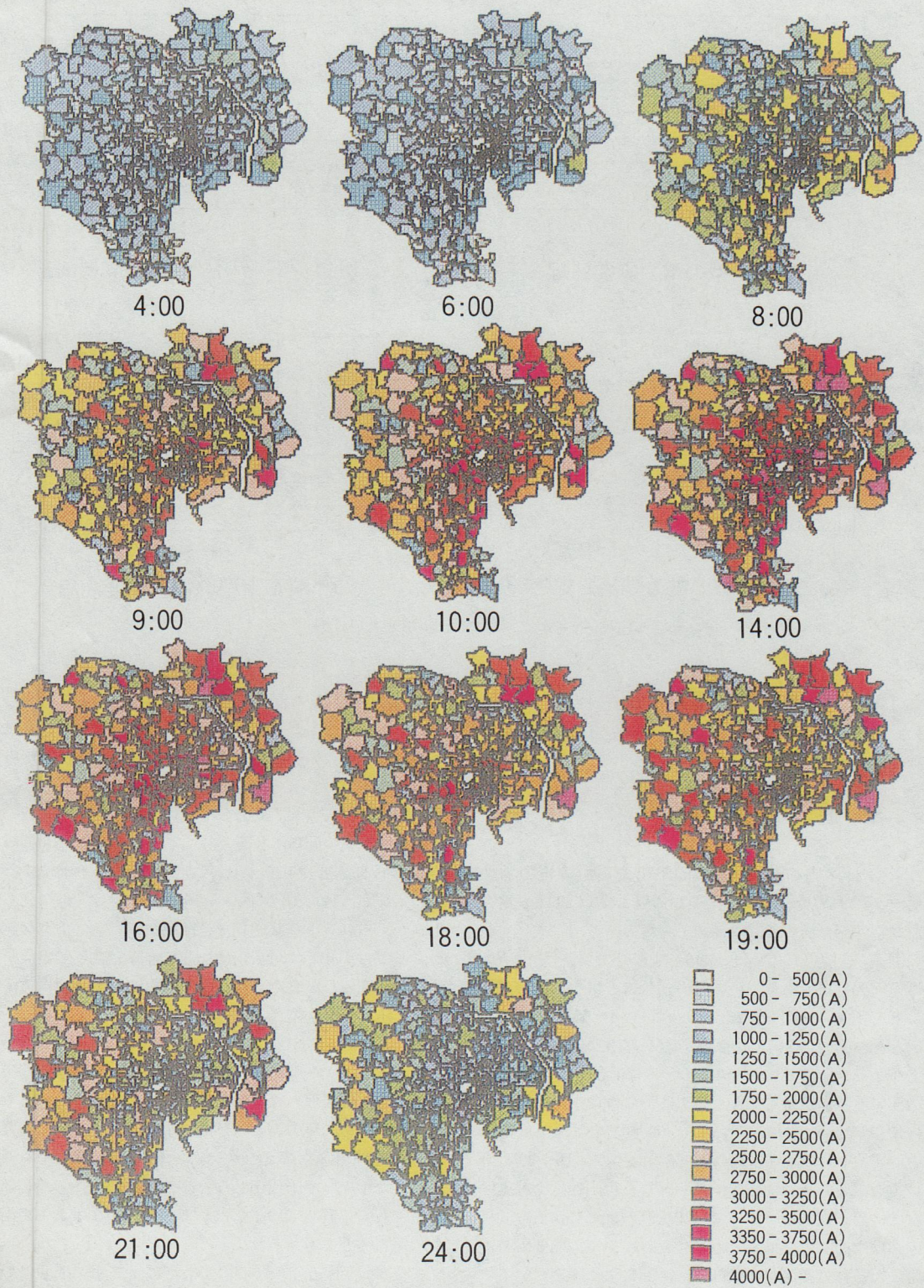


図-3 地域内の人口分布

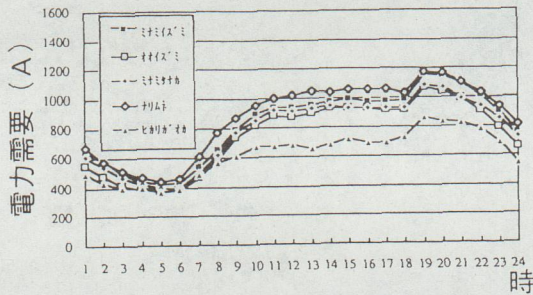
いる。その結果、需要家の密度が高い地域の配電エリアは狭く、逆に低い地域の配電エリアは広がっている。また、都心部などでは安全率を高めるため、稼働率を低めに設定しているため、エリアの面積はさらに小さくなっている。

各変電所の電力需要データは、3基の変圧器の電圧 (kV)・電流 (A)・電力量 (MWh) の毎時の記録から構成されているが、変圧器の電圧変動は非常に小さく、ほぼ一定値 (6.6 kV) を保っているため、以下では電流 (A) を電力需要量を表す指標として用いている。

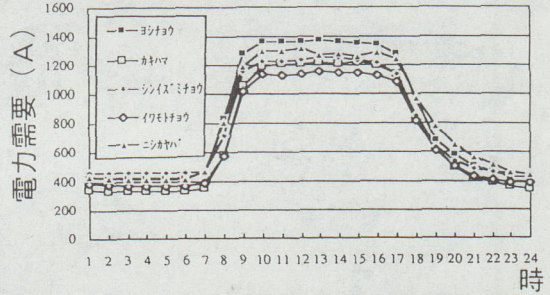
次に、昭和60年度国勢調査⁸⁾と、昭和61年度事業所統計調査⁹⁾によるメッシュ統計データ (500m×500m) を同じくGIS上に取り込んで、地域特性データベースを構築した。図-3にメッシュごとの人口を1例として示すが、ここで構築した地域特性データベースは、各メッシュ単位で、次のようなものを含んでいる。国勢調査か



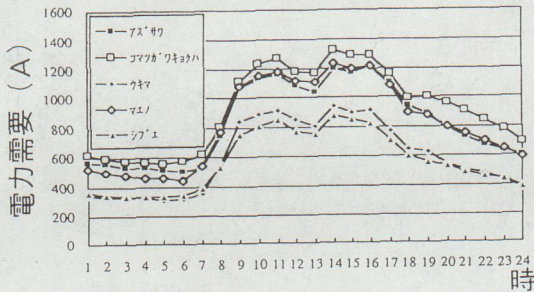
圖—4 電力需要分布 (夏期：1992年8月19日)



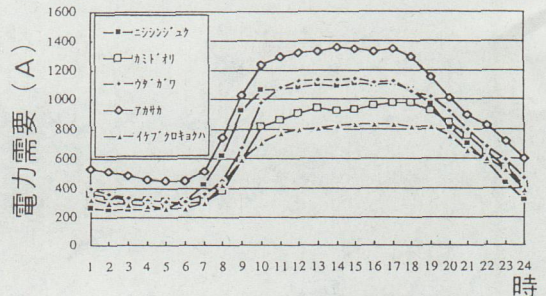
(a) 住宅地型の電力需要曲線



(b) オフィス街型の電力需要曲線



(c) 工場地型の電力需要曲線



(d) 繁華街型の電力需要曲線

図-5 配電エリア別に見た電力需要特性 (夏期)

らの「人口」「世帯数」、事業所統計調査からの「事業所数」「事務所/営業所数」「工場/作業所/鉱業所数」「店舗/飲食店数」である。

3. 東京 23 区の電力需要特性

東京 23 区内の 314 カ所の配電用変電所の電力需要データベースから、まずマクロに見た東京 23 区の電力需要特性を分析した。

図-4 は夏 (1992 年 8 月 19 日) の各配電用変電所の電力需要分布である。色の濃い部分ほど電力需要が高いことを示す。電力需要は、4:00 から 6:00 にかけて最低となり、9:00 頃には都心や臨海部の工業地帯で立ち上がる。そして 14:00 になると、都心部だけでなく周辺部の電力消費量もぐんと増える。これは季節的に冷房の使用によるものである。18:00 頃までは、都心部を中心に高い水準の電力需要が見られるが、19:00 以降は電力需要の多い地域が、都心部から世田谷区や練馬区などの周辺住宅地に移っていく状況がよくわかる。同様の図は季節ごとに描くことができるが、電力需要の時間帯による移り変わりの傾向は、季節によらず似ている。

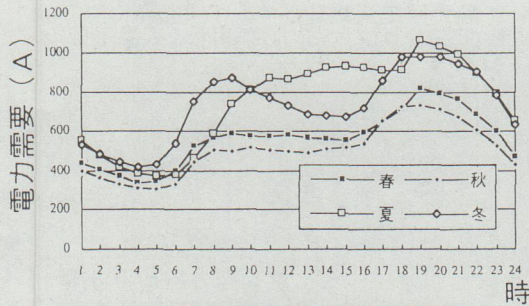
次に、電力需要形態から見た地域特性の違いを明らかにするために、各配電エリアにおける電力需要の時系列変化を分析した。その結果、電力需要曲線の特徴から、

いくつかの典型的なパターンに分類できることに気づいた。なお、電力需要量は各配電エリアとも、おおむね夏 > 冬 > 春・秋という傾向にあるので、ここでは夏の電力需要曲線について、その特徴を論ずる。

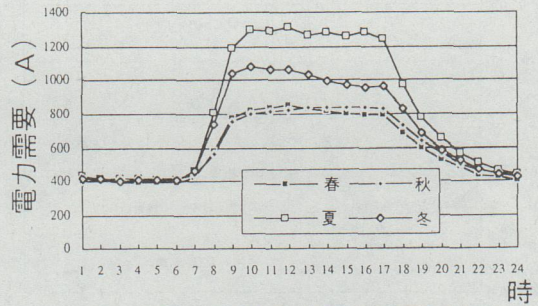
第 1 のパターンは、図-5 (a) に示す練馬・杉並・世田谷区などの配電エリアで見られる傾向で、6:00~7:00 ごろに需要が立ち上がり、23:00 ごろまで継続するものである。特に 18:00 から 19:00 にかけて急な立ち上がりが見られるのが共通した特徴である。このような配電エリアは、東京 23 区周辺の住宅地に位置している。住民が帰宅し、夕食から夜の団らんを迎える時間に対応して、電力需要が増えている。

第 2 は、図-5 (b) の需要曲線が示すように、7:00~9:00 にかけて需要が一気に立ち上がり、17:00 ごろまではほぼ一定値を保った後、急速に減少していくタイプである。この型の電力需要は、高い水準で一定の電力需要を保つ時間が通常のオフィスの業務時間に対応すること、また中央区や千代田区など、オフィスの多い都心部に主として位置していることから、典型的なオフィス街型の電力需要と考えられる。

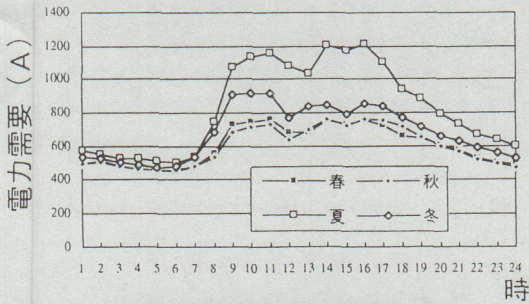
第 3 は、図-5 (c) に示すようにオフィス街型に似ているが、昼どきに一時使用量が落ちるタイプのものである。このタイプの電力需要を示すエリアは、東京 23 区周辺部の海岸や河川沿いに多く位置していることか



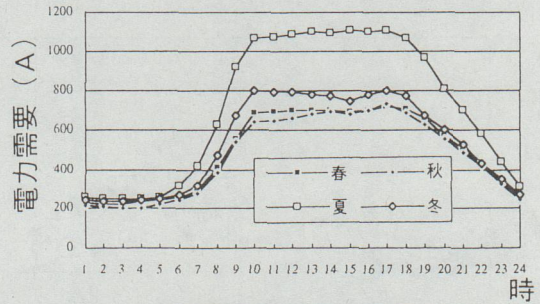
(a) 住宅地型の電力需要の変化



(b) オフィス街型の電力需要の変化



(c) 工場地型の電力需要の変化



(d) 繁華街型の電力需要の変化

図-6 パターン別に見た電力需要の季節変化

ら、中・小工場が多い地域（工場地型）と考えられる。18:00以降の電力需要が住宅地型と似ているが、これは住居を兼ねるような小工場が多く含まれていることを示していると考えられる。12時と13時の間に見られる一時的な電力需要の低下は、昼食時に工場の機械類を一時停止させるためと思われる。なおこの時間帯の電力需要の低下は、もっと細かい時間間隔で計測した電力需要曲線にはより顕著に見られ、毎時0分という計測時間は、この傾向を見る上では、あまり適切とはいえない。

第4は、一見オフィス街型に似ているが、18:00以降の減少の仕方がオフィス街型と異なっているものである（図-5 (d)）。オフィス街型は21時ごろまで急激に減少し、その後緩やかな減少に変わっていくが、こちらは、上に凸の形状で減少していく。このタイプの電力需要は、夕方から夜に営業する店舗／飲食店が多い豊島区・新宿区・渋谷区などの繁華街で見られる。ただし、繁華街はオフィス街に隣接している場合が多いので、昼間はオフィス型と同様な傾向も示している。

次に、4パターンの電力需要の季節による違いを検討する。図-6に示すように、業務に関係するオフィス街型・工場地型・繁華街型の3パターンでは、需要量の絶対量の変化（夏>冬>春・秋）は見られるが、曲線としての傾向は、四季を通して共通する点が多い。ところが住宅地型では、夏と冬では電力需要に大きな差が見られ

る。夏は、冷房による電力のため日中の電力需要が高く、朝方は低い。一方冬は、日照時間が短いことと暖房の必要性から、早朝から電力需要が高まり、朝食の準備・出勤・後かたづけなどの時間である午前8-9時ごろに最初のピークを迎える。照明や暖房の必要性が低下する日中には電力需要も一旦低下し、照明・暖房が必要で、かつ夕食の準備・団らんの時間となる午後6-9時ごろに、再び2度目のピークを迎える。

4. 電力需要の構成要素の算定

前節で述べた例は、いずれも典型的な4つのパターンに分類可能な配電エリアの電力需要曲線である。しかし一般の配電エリアは、これら4つの要素が重なり合ったもので、この4つに強いて分類するのが困難なエリアも多い。また、各パターンの典型的な配電エリアといえども他の要素をかなり含んでおり、特にその傾向は工場地や繁華街で強い。したがって、配電エリアの電力需要特性を詳細に分析するには、個々の構成要素（住宅、オフィス、工場、店舗／飲食店）の1件当たりの電力需要曲線の推定が不可欠と考えられる。

すべての配電エリアの電力需要が、4つの構成要素の電力需要の重ね合わせとして表現できると仮定すると、配電エリア j の時刻 t における電力需要 $y_j(t)$ は、

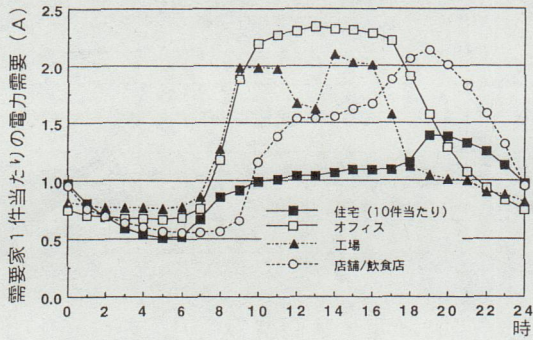


図-7 需要家1件当たりパターン別電力需要曲線 (夏期)

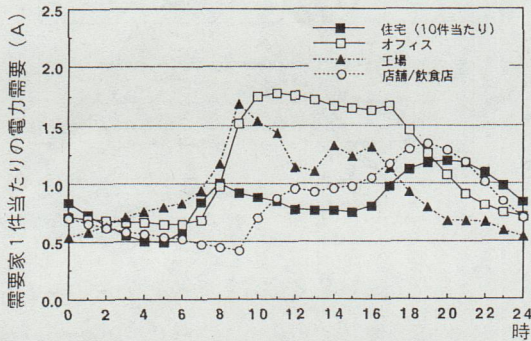


図-8 需要家1件当たりパターン別電力需要曲線 (冬期)

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^4 \alpha_{ji} x_i(t) \quad (1)$$

と表すことができる。ただし、 i は各構成要素 ($i=1$:住宅, 2:オフィス, 3:工場, 4:店舗/飲食店)を示す。また、 α_{ji} はエリア j 内の構成要素 i の件数、 $x_i(t)$ は時刻 t における構成要素 i の1件当たりの平均電力需要量である。

ここで、 α_{ji} が既知であれば、各季節ごとに4つの構成要素の $x_i(t)$ を説明変数とする重回帰分析を行い、最適な $x_i(t)$ を求めることができる。しかし、 α_{ji} は電力会社でも把握されていないことから、前述の地域特性データベースを用いて、面積が著しく小さいなどの特殊なエリアを除く150カ所の配電エリアに関して α_{ji} を算出した。配電エリア(ポリゴン)データと地域特性(メッシュ)データ間のデータ変換には、面積比例配分法を用いた。そして、算出した150カ所の α_{ji} から回帰分析を行って $x_i(t)$ を試算したところ、住宅・オフィス・工場の電力需要曲線は、図-5のグラフと整合する結果が得られたが、繁華街だけは不相当であった。この理由としては、事業所統計の「店舗/飲食店」が、夕方~夜型の飲食店だけでなく、スーパーや住宅地の商店街など、いわば「オフィス型」の店舗をかなり含んでいることが、まず考えられる。また図-6からもわかるように、繁華

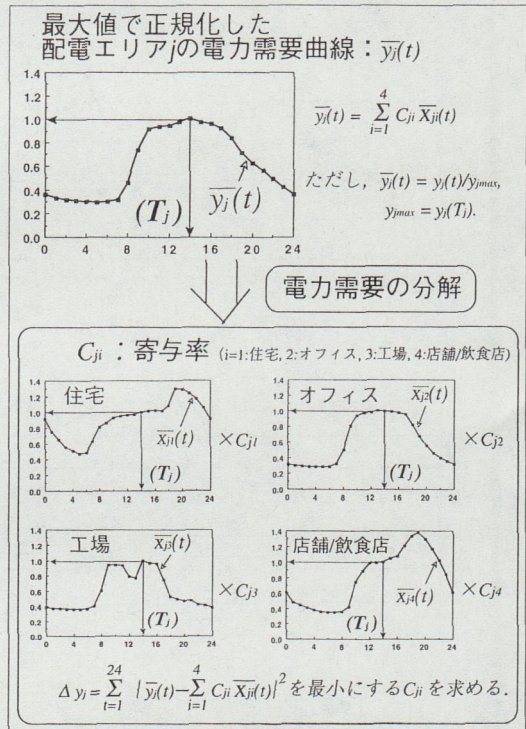


図-9 タイプ別電力需要算定法の概要

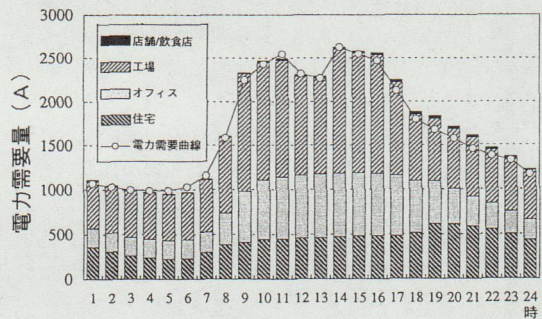


図-10 寄与率から逆算したタイプ別電力需要と実際の電力需要曲線の比較

街の特徴を含む地域は、ほとんどが他のタイプの特性も合わせ持っており、純粋な夜型の繁華街というエリアが少ないことも一因と言える。

そこで、これらの影響を少なくするために、150カ所の配電エリアから、繁華街の影響が小さいと思われる、すなわち店舗/飲食店の少ない80カ所エリアを選び出した。そして、そのエリア内の店舗/飲食店はすべてオフィス型の電力需要を示すものと仮定し、店舗/飲食店数をオフィス数に含めて、住宅・オフィス(店舗/飲食店を含む)・工場の3項目で重回帰分析を行い、これら3タイプの電力需要曲線を算定した。次に、典型的な繁

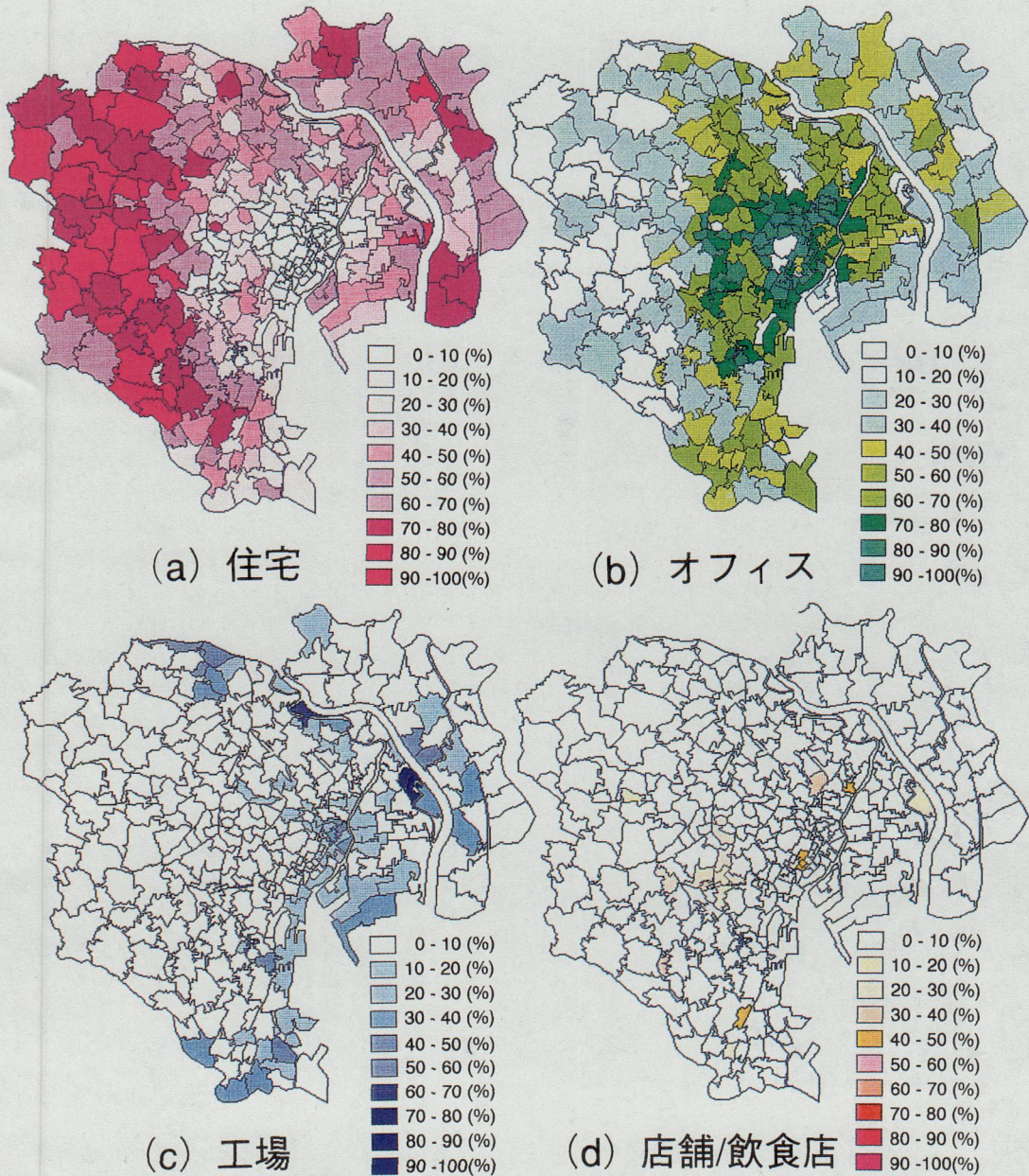


図-11 東京23区における4構成要素の寄与率分布(夏期)

華街を有する配電エリアを選び、先の方法で求めた住宅・オフィス・工場の電力需要曲線を用いて、繁华街型以外の要素を総電力需要から差し引いた。ただしこの場合には、エリア内の店舗/飲食店は、全て繁华街型の店舗/飲食店の電力需要を示すと仮定した。このようにして得られた電力需要を店舗/飲食店数で割って、繁华街型の店舗/飲食店の1件当たりの電力需要を求めた。

図-7と図-8に、以上の方法で算出した夏期と冬期

の4タイプの1件当たりの電力需要曲線をそれぞれ示す。これらの曲線は、図-5で示した各タイプの特徴をより明確に持った曲線であることがわかる。季節による電力需要の差は、図-6で示したグラフ同様、住宅で最も顕著である。電力需要の絶対値は、いずれの構成要素においても夏>冬となっている。

ところで、図-7と図-8に示した1件当たりの電力需要曲線は、東京都23区内80カ所の配電エリアの平均

値であるため、その値をそのまま全ての地域に用いることは不適當である。なぜなら、例えば同じオフィスであっても、都心部の比較的規模の大きなオフィスと郊外の住宅街の小オフィスでは消費電力が大きく違い、 $x_i(t)$ をそのまま用いると都心部では過小評価、郊外では過大評価されるなどの問題が生じるためである。しかし、百件、千件を単位として都市をマクロに見る場合には、規模が多少違って電力需要曲線はほぼ相似であると推察されるので、以下では曲線の形から電力需要特性を議論することにする。

5. 電力需要から見た各配電エリアの構成要素別寄与率の算定

前節で求めた住宅・オフィス・工場・店舗／飲食店の1件当たりの電力需要曲線を用いて、各エリアにおいて、そのエリア全体の電力需要に占める4つの構成要素の電力需要の割合（寄与率）を算定する。

図-9に寄与率の算定法の概要を示す。まず式(2)に示すように、314カ所の各配電エリア j の電力需要曲線 $y_j(t)$ を、各エリアの最大電力需要 y_{jmax} を1とする曲線に正規化し、 y_{jmax} に達する時刻を T_j とする。

$$\bar{y}_j(t) = y_j(t) / y_{jmax} \quad (2)$$

ただし、 $y_{jmax} = y_j(T_j)$ である。

次に4つの構成要素の電力需要曲線を、式(3)に示すように時刻 T_j の需要値が1となる曲線に正規化する。

$$\bar{x}_{ji}(t) = x_i(t) / x_i(T_j) \quad (3)$$

配電エリア j の時刻 t における正規化した電力需要 $\bar{y}_j(t)$ は、4パターンの正規化した電力需要 $\bar{x}_{ji}(t)$ と寄与率 C_{ji} を用いて、式(4)のように表すことができる。

$$\bar{y}_j(t) = \sum_{i=1}^4 C_{ji} \bar{x}_{ji}(t) \quad (4)$$

ここで、 $0 \leq C_{ji} \leq 1$ 、 $\sum_{i=1}^4 C_{ji} = 1$ である。

そこで、各配電エリアに関して、式(4)の両辺の差の自乗和

$$\Delta y_j = \sum_{i=1}^4 \left\{ \bar{y}_j(t) - \sum_{i=1}^4 C_{ji} \bar{x}_{ji}(t) \right\}^2 \quad (5)$$

を最小にする C_{ji} の組み合わせを記録日ごとに求めた。求めた寄与率から逆算した電力需要と実際の電力需要曲線の関係の1例を図-10に示すが、両者が良い一致を示すことがわかる。寄与率は、そのエリアにおける最大電力需要に占める住宅・オフィス・工場・店舗／飲食店でそれぞれ使われる電力の割合を表し、電力の消費内容を間接的に示す指標である。

図-11に夏期の記録日の各構成要素の寄与率を配電エリア図上に示す。住宅の寄与率は23区の周辺部、特に西部の練馬・杉並・世田谷方面で大きい。一方オフィスの寄与率は都心部で大きくなっている。住宅の寄与率

の大きい23区西部では、JR中央線・西武池袋線・東武東上線・小田急線などの沿線で、オフィスの寄与率が周辺より高くなっており、その合間を埋めるような形で住宅の寄与率が8割以上の地域が存在していることがわかる。工場の寄与率の高い地域は、主に東京湾周辺と荒川沿いに分布しているが、その分布は非常に偏っている。店舗／飲食店の分布も鉄道ターミナル周辺などに比較的限られ、その寄与率は高くても50%程度である。

6. まとめ

本研究では、地域特性を考慮した停電影響度の定量的評価を目的として、東京23区の電力需要と地域特性のデータベースを構築し、都市の電力需要の特性を明らかにすることを試みた。その結果、都市の電力需要量は、地域や時刻、季節などにより様々に変化するが、配電エリア別に見るとその電力消費曲線の特徴により、住宅・オフィス・工場・店舗／飲食店がそれぞれ卓越する4通りに分類できることがわかった。そしてどのエリアの電力需要もこの4つの構成要素の重ね合わせとして表現できると仮定し、構成要素別の1件当たりの電力需要曲線を回帰分析によって求めた。さらに地域特性と電力需要特性を関連づけるために、「寄与率」という概念を用いて、そのエリア全体の電力需要量に占める各構成要素の電力需要の割合を求めた。その結果を地図上に示すと、電力需要から求められた、住宅地・オフィス街・工場地帯・繁華街、またこれらの混在地域が、実際とよく一致し、電力需要の寄与率を用いて地域特性を評価できることが示された。

今後は、この研究を発展させて停電影響度の定量的評価へとつなげる予定である。

参考文献

- 1) 研究代表者（鏡味洋史）：1993年釧路沖地震による被害の調査研究，文部省科学研究費突発災害調査研究費成果総合研究（A），1993。
- 2) 電力中央研究所：1993年釧路沖地震被害調査報告，1993。
- 3) 土木学会耐震工学委員会：ロマプリータ地震震害調査報告，1990。
- 4) 国土庁防災局：1989年サンフランシスコ湾岸地震（ロマプリータ地震）記録，1990。
- 5) 研究代表者（大町達夫）：1994年カリフォルニア・ノースリッジ地震による被害の調査研究，文部省科学研究費突発災害調査研究費成果総合研究（A），1994。
- 6) 山崎，原田，目黒，永田，立川，片山：台風19号による長崎市の停電と都市機能被害，生産研究，第44巻，第4号，pp.187~193，1992。
- 7) 目黒，永田，立川，片山：台風19号による大規模停電の都市機能への被害波及に関する調査研究—広島地域における大規模停電の影響，生産研究，第44巻，第4号，pp.194~201，1992。

- 8) (財) 日本統計協会：昭和 60 年国勢調査地域メッシュ統計。
9) (財) 日本統計協会：昭和 61 年事業所統計調査地域メッ

シュ統計。

(1994. 7. 4 受付)

CLASSIFICATION OF URBAN AREAS BY CHARACTERISTICS OF POWER LOAD CURVES

Kimiro MEGURO, Michiyo SOEJIMA, Fumio YAMAZAKI and Tsuneo KATAYAMA

Modern societies heavily rely on electric power. These societies will suffer from functional losses resulting from power outage when natural disasters such as earthquakes and typhoons strike. A database which consists of regional characteristics and electric power demands in the Tokyo Metropolis was constructed using a geographic information system (GIS). As the first step of evaluation of the effects of power outage, the power demands were examined as a function of time, season and region. Four typical power load curves, which correspond to residential, office, factory and entertainment regions, were found. The power load curve of each region served by a distribution substation was then considered to be a combination of the four elements and the contribution rates were evaluated.

