

特集

分散型都市エネルギーシステム

電源構成における分散型システム

Decentralized Systems in Power Generation System

森 俊 介*

Shunsuke Mori

1. はじめに

エネルギー供給設備は、かつてはスケールメリットが強調され、原子力発電所に代表されるように大規模化、集中化が進められてきた。しかし、近年の環境問題の高まりの中、この特集号にも見られるようコジェネレーションシステム、太陽光発電という分散型エネルギーシステムが注目されている。本稿では電源構成における分散型システムの位置づけと評価を、(1). 発電設備の規模の経済性、(2). 将来の電源需要の不確実性、(3). マクロな環境への寄与、(4). 競争と協調、の4点から筆者の行った研究を交えつつ論じることとしたい。

2. 規模の経済性の問題

近年大規模システムの経済性の問題がしばしば指摘されている¹⁾²⁾。例えば P. L. Joskow は文献2)で火力発電所を例として、スケールメリットがあるはずの新技术のプラントが決して大規模化の傾向をとっていないことを指摘し、実証分析の結果、信頼性が規模に対し負の相関を持つという結論を得ている。

規模とプラントの稼働率の関係は、J. F. Stewart³⁾や G. J. van Helden⁴⁾らによっても指摘されている。これに対し D. E. Coates⁵⁾は、稼働率に影響を与えているのはおもに燃料の相対価格であって、プラントの規模に固有の問題ではないと批判している。

このように、米国では電源の大規模・集中化に対する疑問が提示されているが、電気事業の状況が異なるわが国ではどうであろうか。資本設備、労働という電気事業者全体としての規模の経済性の分析は阿波田や新庄⁶⁾によって行われており、やはり規模の経済性が失われつつあることが指摘されている。

これに対し、分散型電源の導入の意義という観点か

らは、個々の発電設備、あるいは送配電システムを考慮にいたれた際の規模の経済性の分析が重要と考えられる。筆者は、「電力需給の概要」⁷⁾、「電源開発の概要」⁸⁾からプラント毎に抽出した原子力発電所と石炭火力発電所の設備利用率と、種類別発電施設、送電施設、変電施設、配電施設等の電力施設の設備規模と工事費概算額をもとに分析を行った⁹⁾。

詳細は文献9)に譲るが、主な分析結果は以下のようなものとなった。なお、出力は設備認可出力(MW)を表す。まず、原子力及び石炭火力発電所(348データ)の設備利用率(%)については

$$\begin{aligned} \text{利用率} &= -4.06 * \log \text{出力} + 1.77 * \text{年} & (1) \\ & (2.95) & (6.78) \\ & -8.83 \\ & (549) \end{aligned}$$

$$R^2 = .127 \quad R'^2 = .122$$

となった。()内はt-値である。R²はきわめて低いものの、認可出力に対して負、運転年度に対し正の係数を得ている。多くの留保条件は残るものの、わが国の場合も米国と同様、設備利用率については規模の不経済性が認められる、と言えることになる。

次に、発電設備、送電設備に関する分析を行う。個々の建設費用のデータは上記文献より得られる。しかし、新設の発電設備に対しこれに付帯する送電設備を特定化することには、多くのあいまいさが残らざるを得ない。

ここでは、ある電源施設が一応の完成を見た時点までに、ここに端を発する送電設備の建設費用合計をデータに用いることとし、原子力12、地熱1、火力25、水力14の発電施設について分析した。なお、発電設備のデフレータは存在しないため、右辺はいずれも名目の建設費用である。

$$\begin{aligned} \log \text{発電所} &= .576 * \log \text{出力} + .083 * \text{完成年} \\ & (13.9) & (6.56) & (2) \\ & + .629 * (\text{原子力ダミー}) - .996 \end{aligned}$$

*東京理科大学理工学部経営工学科助教
〒278 野田市山崎2641

$$(5.50) \quad (1.15)$$

$$R^2 = .880 \quad R'^2 = .872$$

$$\log \text{総費用} = .610 * \log \text{出力} + .087 * \text{完成年}$$

$$(16.4) \quad (7.64)$$

$$+ .537 * (\text{原子力ダミー}) - 1.49$$

$$(5.21) \quad (1.92) \quad (3)$$

$$R^2 = .905 \quad R'^2 = .899$$

$$\log \text{送電費} = 1.010 * \log \text{出力} + .104 * \text{完成年}$$

$$(10.7) \quad (3.68)$$

$$+ 1.543 * (\text{地熱ダミー}) - 9.93$$

$$(1.93) \quad (5.04) \quad (4)$$

$$R^2 = .744 \quad R'^2 = .728$$

このように、わが国の場合、発電設備については規模の経済性が依然として成立していること、また送電設備は発電設備の規模の経済性を損なうほどではないにせよ、そのウェイトが規模とともに大きくなっていることが見て取れる。同様の傾向は、有価証券報告書に基づく電気事業者が保有する送配電設備試算の分析からも窺うことができる⁹⁾。

ただし、1974年から1987年の間に新設された394の送電設備の建設費用のみを取り出し分析を行うと

$$\log \text{建設費} = .762 * \log \text{電圧} + .668 * \log \text{亘長}$$

$$(7.46) \quad (19.3)$$

$$+ .090 * \text{完成年} - 2.96$$

$$(6.41) \quad (3.18) \quad (5)$$

$$R^2 = .605 \quad R'^2 = .602$$

のように送電設備単独の建設費用の規模の経済性はきわめて高い。送電の容量は、ほぼ電圧の自乗に比例すると考えられるので、高電圧化による効率化は技術面からも経済面からも支持されることになる。

以上をまとめると、わが国では大規模・集中型の電源設備には、依然として規模の経済性があるものの、送配電設備を加味したシステム全体としては、ややかげりが見える傾向があると言える。ことに、いずれの式もタイムトレンドの係数が高い値となっており、設備規模の経済性のみではいずれ補いきれなくなるであろうことが示唆されている。

3. 電力需要の不確実性

分散型電源の特長として、建設までの期間を短くできるため、将来の電力需要の不確実性に対処しやすい、

という点が上げられる。ここで、電力需要の不確実性という場合、そこには電力量としての不確実性だけでなく、季節間あるいは日間の需要パターンの将来予測の問題が絡む。

本特集でも取り上げられるコジェネレーションシステムは、発電時の排熱も有効利用するため、エネルギー利用効率は上昇する。しかし、そのためにはそれに見合う熱需要が存在しなくてはならない。また常に熱需要に合わせて運転すればエネルギー利用効率は向上しても今度は設備利用率が低下する恐れがある。

また、太陽光発電は夏の冷房需要のピークカット効果を期待できるものの、冬期の朝夕の暖房需要には単体では寄与が望めず、蓄電池等の電力貯蔵設備を必要とする¹⁰⁾。さらに、これらのシステムの余剰電力を逆潮流により系統と連携すればよりエネルギー利用効率の向上が望めるが、これには広範囲の需給パターンの将来変化をにらんだ上での、既存の電力供給システムと制度の整備が必要となる。

このように、分散型電源の導入計画を検討するには、需要パターンの将来予測が重要な意味を持つことがわかる。

そこで、本章ではこのような観点から分散型電源の評価を行った試みを述べる。分散型電源の建設計画の柔軟性の研究は、西川ら¹¹⁾や松橋ら¹²⁾、電力中央研究所¹³⁾によって、また、日負荷曲線と最適計画の関係について、西川ら¹⁴⁾、辻ら¹⁵⁾は電力と熱の日負荷需要パターンを基礎とするエネルギー需給モデルを開発している。

ここでは、筆者等が行った研究の結果を紹介する¹⁶⁾。これは、まず電力需要日負荷曲線の分析と将来の予測を行い、次に年間、季節間、そして日間利用の予測日負荷曲線に対して各種電源を用いた最適電源構成のモデル化を行うものである。電力需要の将来の不確実性の取り扱いにシナリオ統合化モデル¹¹⁾の考え方をを用い、予測日負荷曲線および不確実性に対する中小規模分散型電源の評価を目的とする。

3.1 日負荷曲線の分析と予測

1979から88年度までの日負荷曲線のデータに基づいて以下の手順で季節・用途別需要の分析を行う。次いで、基準ケースとしてGDP成長率を2000年まで3.5%/年、その後を3.0%/年と設定し、将来の日負荷曲線の予測を行う。ここで、簡単のため土曜、日曜日を分析の対象から外す。

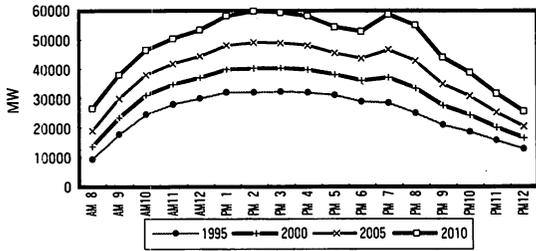


図-1 冷房日負荷曲線予測結果

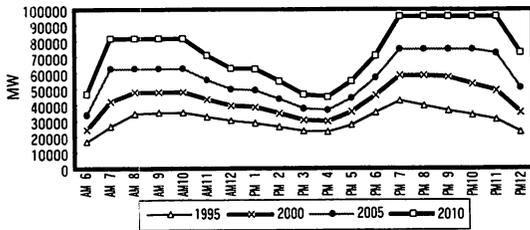


図-2 暖房日負荷曲線予測結果

(1) ベースロード需要

ベースロード日負荷曲線として、4月後半から6月前半の間で、一日の需要量が最も少ない5日間の平均日負荷曲線を用いる。

(2) 冷房需要とピーク需要

夏季においては、7、8月の平均日負荷曲線からベース日負荷曲線の値を引いたものを冷房日負荷曲線と考える。とくに、一日の最大電力が最も大きい5日間の平均日負荷曲線からベース日負荷曲線を引いたものをピーク日負荷曲線と考える。電力需要を時刻別に回帰分析を行う。冷房用需要の説明変数にはln(GDP)と平均気温を用いるが、ピーク需要に対してはln(GDP)、電力価格、最高気温を用いることとする。この結果、予測をそのまま延長すると、最大電力が13-15時から19時に移行することとなった。ここでは、これをやや不自然なものと考え、各時刻の予測値が13-15時の予測値を越さないとして仮定し補正を行った。

(3) 暖房用需要

冬季(1-3)月における平均日負荷曲線からベース需要を除いた値を暖房需要とする。その時刻別回帰分析モデルの説明変数にはGDP、電力価格、そして平

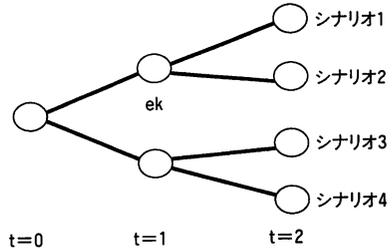


図-3 不確実下の意思決定プロセス

均気温を用いる。予測数値をそのまま将来に延長すると、ピーク需要の最大電力を追い越す。ここでは、予測値がピーク需要の最大電力を越えないと仮定し補正を行った。

以上の補正は一つの仮定にすぎず、設備、機器普及率等を考慮した今後の検討を必要とする。予測の結果の例を図-1、図-2に示す。

3.2 将来電力需要の不確実性の取り扱い

前節から、将来の電力需要は経済成長によって量的だけでなく時間毎の需要パターンも大きく変化することがわかる。

将来の不確実性は、このモデルでは西川¹¹⁾らと同様に取り扱われている。すなわち、図-3のように将来の不確実性のシナリオが樹木状に分岐して広がるとする。事前にどのシナリオが実現するかわかれば、そのパスのみに対する電源計画を行うことができる。これを以下確実モデルと呼ぶ。

しかし、実際にはt=2の分岐はt=0では未知である。そのため、「実行可能な計画」とは、シナリオ1に対する最適解とシナリオ2に対する最適解がt=0で決定される電源計画に対して同一のものであればならないという条件をつける。これは、事前に決定可能なシナリオが、将来からの影響を受けないという自然な考え方といえる。以下、これを不確実モデルと呼ぶ。

こうして、将来のGDPの成長に高・中・低の3通りの不確実シナリオを設定し、各シナリオ毎に用途・季節別電力需要を求め、これらに対する最適電源計画

表1 各種電源の特性値

	建設単価	可変費用	建設期間	稼働率上限
原子力発電所	310¥/W	1.8¥/kWh	2期	75%
火力発電所	200¥/W	5.0¥/kWh	2期	70%
中小規模電源	620¥/W	3.4¥/kWh	1期	70%
揚水発電所	120¥/W	...	1期	70% ^(*)

(*) 揚水発電効率。日間設備利用率上限は、1987年実績値から10.8%とした。

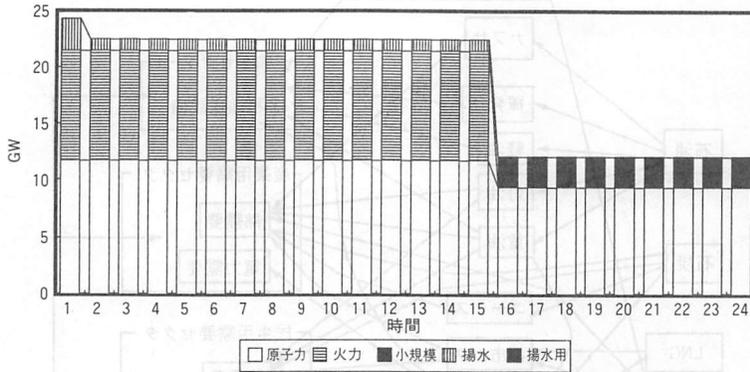


図-4 確実モデル・ピーク日発電構成（新規建設分：高成長ケース）

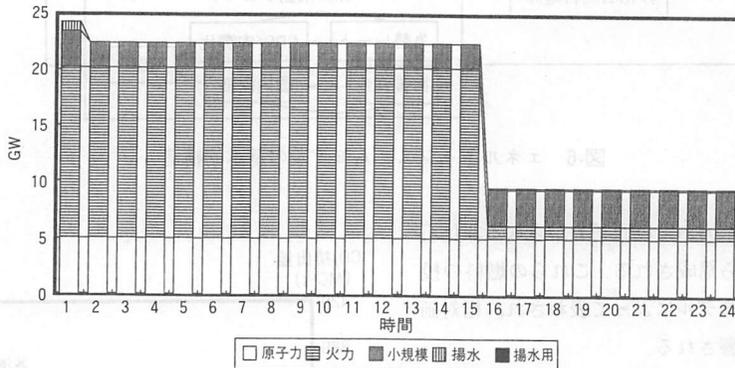


図-5 不確実モデル・ピーク時間帯の発電構成（新規建設分）

を求める。

ここでは、電源設備として原子力発電所、火力発電所、中小規模電源および揚水発電の4通りを考える。各電源の費用を表1に示す。モデルの定式化やこのほかのデータ等の詳細は文献16)に譲り、ここでは高成長シナリオ確実モデルと不確実モデルの新設電源のピーク時間帯の発電構成の計算結果を比較する。図-4は高成長ケース確実モデルの、図-5は不確実モデルの結果である。

このように、不確実性を考慮すると、原子力発電所と小規模発電について電源構成が大きく変化することがわかる。ことに、将来の電力需要の不確実性を考慮すると、経済性では明らかに不利な小規模発電の寄与が大きくなっていることが見て取れる。

4. 分散型電源のマクロな環境への影響

コジェネレーションシステムは、発電時の排熱を利用するものであるためエネルギー利用効率を向上させられるだけでなく、比較的環境負荷の少ない天然ガス

を利用できるため、近年問題となる地球環境問題に寄与するところが大きいと考えられる。このような環境問題を考える際は、各エネルギー機器単独ではなく、よりマクロな社会・経済システムの中に位置付け評価することで、他の環境対策、例えば炭素税との比較を行えることができる。

ここでは、このような立場からの研究の例として、筆者のマクロエネルギー経済モデルによるコジェネレーションシステムの評価の試みを述べる¹⁷⁾。

このモデルは、図-6のように構成される。一次エネルギー源として、化石燃料に石油、LPG、石炭、LNGおよび水力と原子力を採用した。これらは、重油、灯油、都市ガス、軽油、ガソリン、コークス等の製品を経て、熱需要として最終需要セクタに投入される。本モデルでは、簡単のため最終需要ブロックは産業セクタ、民生セクタ、輸送セクタと集約している。ただし、輸送セクタは用途の差を考慮し、ガソリン、軽油、LPG、ジェット燃料等個別に需要を求めている。電力供給は石炭、重油、LNG3種の化石燃料による火

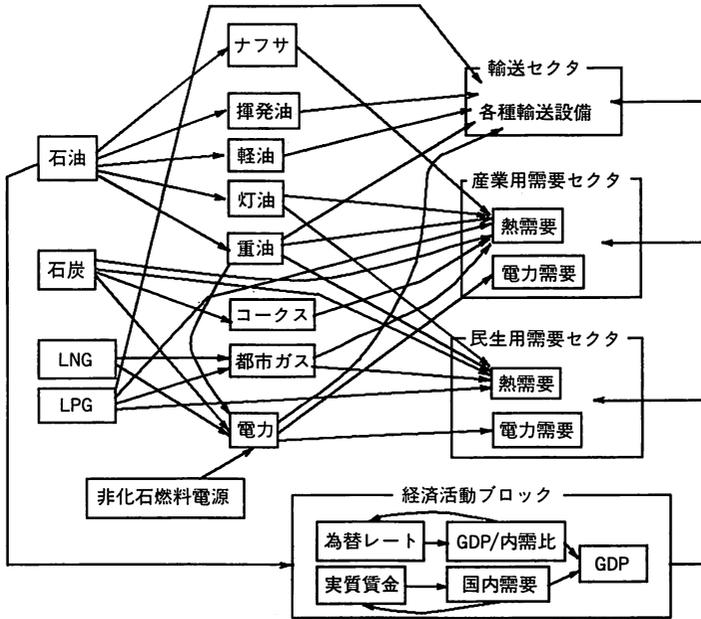


図-6 エネルギーシステムモデルの基本的構造

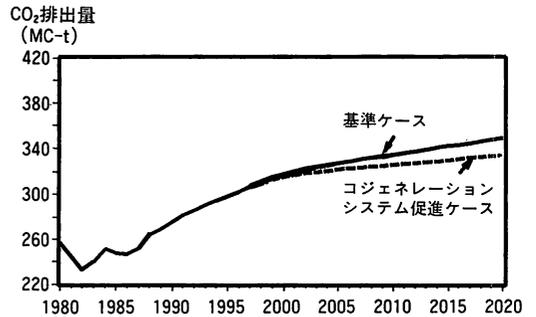
力発電ブロックと、水力および原子力からなる非化石燃料発電ブロックから構成される。これらの燃料の投入シェアはロジットモデルによって表わされ、相対価格の変化によって影響される。

図では省略しているが、国内総生産（GDP）は基本的に全エネルギー需要に影響する。

全体に簡素な構成のモデルであるが、すべての構造方程式は過去のデータに基づき計量経済学的に推定されており、また簡単な経済活動ブロックを持つため石油ショックや税制の変化、エネルギー技術の変化の影響をシミュレートできる特徴を持つ。モデルやシミュレーションの詳細は文献(17)に譲り、ここではコージェネレーションシステムの評価結果について述べる。

このモデルでは、コージェネレーションシステムは次のように扱われる。

1. コージェネレーションの導入規模をシナリオとして設定する。
2. コージェネレーションの稼働率、熱効率、発電効率、ボイラ熱効率等を与え、発電電力量と熱供給量を求める。ここでは燃料電池を想定しそれぞれを50%、80%、40%、90%と設定した。
3. コージェネレーションの熱供給はすべて民生用に用いられるとし、民生用熱需要セクタで与えられる熱需要から、この分を差し引く。
4. 電力需要合計値からコージェネレーションシステム



(基準ケースとコージェネレーション促進ケース)

図-7 シミュレーション結果 二酸化炭素排出量合計

電力供給を差し引く。

5. コージェネレーションの燃料をすべてLNGと仮定し、LNG需要合計値に加える。

基準ケースとして経済成長率を2000年まで3.5%/年、それ以降2.5%/年に設定する。基準ケースではコージェネレーションシステム導入規模を2000年で8GW、2020年で15GWとし、これに対しコージェネ導入促進ケースでは2000年で15GW、2020年で30GWと設定して比較感度分析を行うこととする。結果として図-7を得た。

これは、コージェネレーションシステムは、導入設備規模1KWに対し、我が国の二酸化炭素排出量の約0.96~0.99炭素t/年の削減に寄与することを示す。

同様の効果は炭素税によっても達成できるが、その場合のGDPの損失は、二酸化炭素排出の1炭素tの削減に対し約40万円前後に達してしまう。単純なモデルではあるが、この結果を見る限り、炭素税導入のみに頼る方法はあまり賢いとは言えず、税収を分散型エネルギーのような新エネルギー技術の開発と導入の補助金とバランスさせる道をより検討すべきであると言うことになる^{*1,18)}。

5. 競争と協調

分散型電源が既存の電力需給システムに入る場合、その形態はどのようなものとなるか。ここまでに述べた3点は、いずれかと言えば電気事業者にとっての設備選択の得失であって、必ずしも新たな電力供給者が電力市場に参入することを意味しない。また、自家発電設備の保有者が自分だけで使う限りは、既存のエネルギーシステムに与える影響はそれほど大きくはないと考えられる。しかし、分散型電源の保有者が余剰電力を系統に連繫できる道の開けた現在、電力供給システムは上水道のような一方通行のネットワークから通信のような双方向ネットワークに近づいたと言える。

すると複数の売り手が市場に参入できることになるため、市場の形態も独占状態から寡占状態、さらには競争市場へと変化しうることを意味する。

完全情報・完全競争の市場において、パレート最適な需給と価格が定まることは教科書の教えるところであるが、その前にまず送配電ネットワークと大規模な供給設備を持つ電気事業者と、余剰電力(と余剰排熱)を売る程度のコジェネレータ、そして電力(と熱)の需要家の3者の場合、市場がどのように動くかを検討する必要がある。

この場合、コジェネレータ(太陽光発電)は電気事業者に売電するか、あるいは他の需要家に既存の送配電線の使用料を支払いつつ売電することとなる。従って、電気事業者は価格を操作することで、必要なら分散型電源の参入をいつでも排除できることになる。

浅野¹⁹⁾は、このような観点から各主体の行動をゲーム論的に分析し、電気事業者がどのような価格を設定するかを検討している。また、デマンドサイドマネジメントの方法として近年注目される電力の季時別料金

制度と自家発保有者の行動を論じたものに、土屋²⁰⁾、前田²¹⁾を上げられる。

これらの研究はいずれも単一のコジェネレータが余剰電力のみを売る場合を扱っている。しかし、コジェネレーションの評価は、熱供給の効率化も合わせ、トータルな視点から行う必要がある。筆者等は、熱供給を考慮に入れた上で、3者の便益の総和(社会的便益)に着目した問題をモデル化し検討を試みている²²⁾。便益を総和すると、売買による金銭のフローが互いに打ち消しあうため、取り引き価格が決まらなくなる。そこで、便益が公平に再配分されるよう価格を決定する必要が生じるが、燃料費や設備費の設定によっては取引価格が負、すなわち社会的便益最大化へのインセンティブが働かないケースが現れる。

このように、分散型電源の参入には、競争による効率化と協調による効率化の2つの側面があり、望ましいシステムのための今後の研究課題は多い。

6. おわりに

以上、分散型電源の評価を多面的に論じた。コジェネレーションや太陽光発電に代表される分散型電源の位置付けと評価は、既存のエネルギー需給システム中に既存の発電技術と競合する形で行われるべきではなく、熱などを含めたエネルギー需給システム全体をいかに効率化するかという大きなシステムデザインの一要素として、未利用エネルギーや熱のカスケード利用という様々な技術とともに位置付け、行われるべきではないかと思われる。このとき、分散型電源は必ずしも既存のシステムの小規模分割ではなく、より精緻で大規模なエネルギーと情報のネットワークフロー上の1ノードとして機能することとなる。

なお、本稿で述べた筆者の研究は、いずれも文部省科学助成金(重点領域・エネルギー)の研究の一環であることを付記する。

参考文献

- 1) エイモリー、B. ロビンス、L. ハンター、ロビンス、室田泰弘、榎屋治紀訳、ブリトルパワー、時事通信社、1987
- 2) P. L. Joskow, "Productivity Growth and Technical Change in the Generation of Electricity", The Energy Journal, 1987. 1
- 3) J. F. Stewart, "Plant Size, Plant Factor and the Shape of the Average Cost Function in Electric Power Generation: A Non Homogeneous Capital Approach",

*1)ただし、わが国において炭素税がGDPにおよぼす影響については様々な研究が報告されており、このモデルのように高いとするものと、ほとんど影響しないとするものにはほぼ2分され、現在その原因の研究が続いている。(文献18)参照

- Br: Journal of Economics, Vol.10, No.2, 1979, 549/565
- 4) G.J. van Helden and J. Muysken, "Diseconomies of Scale for Plant Utilization in Electricity Generation", Economic Letters, Vol.11, 1983, 285/289
 - 5) D. E. Coates and J.G.Mulligan, "Scale Economies and Capacity Utilization-The Importance of Relative Fuel Prices", Energy Economics, Vol. 10, No. 2, 1988, 140/146
 - 6) 新庄浩二, 「電気事業における規模の経済性の計測」, 第6回エネルギーシステム・経済コンファレンス, 1989
 - 7) 電力需給の概要, 通産省資源エネルギー庁公益事業部
 - 8) 電源開発の概要, 通産省資源エネルギー庁公益事業部
 - 9) S. Mori, "A Study on Generation Expansion Planning under the Uncertainties on Scale Economies", Energy Systems, Management and Economics (edited by Y. Nishikawa et. al.), IFAC Symposium series, No.14, PP. 241/246, 1990
 - 10) 今村栄一他, 「太陽光発電装置設置住宅の電力供給利用システムの最適計画モデル」, 第18回システムシンポジウム (計測自動制御学会), 1992
 - 11) 西川禎一他, 「シナリオ統合アルゴリズムを用いた不確実な需要下での最適電源計画」, 電気学会論文誌C, Vol. 112-C, No. 6, 1992
 - 12) 松橋隆治他, 「不確実な需要の下での最適規模構成」 電気学会論文誌C, Vol. 111-C, No. 8, 1991
 - 13) 電力中央研究所: 電気事業における長期限界費用の計測, 電力中央研究所報告579001, 1979
 - 14) 西川禎一他, 「電力負荷との相関を考慮した太陽光発電システムの経済性評価」, 電気学会論文誌B, Vol. 111-B, No. 6, 1991
 - 15) 辻穀一郎他, 「パネルデータに基づく民生用都市ガスの需要構造の分析」, 電気学会論文誌C, Vol.108-C, No.2, 1988
 - 16) 森 俊介他, 「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, 1993
 - 17) 森 俊介他, 「我が国のエネルギーと環境のセキュリティ評価モデル」, 電気学会論文誌, Vol. 112-B, No. 12, 1992
 - 18) "Global Warming and Economic Growth"(A. Amano ed.), CEGR-1001-92, 国立環境研究所, 1992
 - 19) 浅野浩志他, 「競争的電力市場のゲーム論的考察」, 第18回システムシンポジウム (計測自動制御学会), 1992
 - 20) 土屋幸男他, 「燃料不確実性のもとで季時別料金制度を導入する自家発電需要家の最適運用」, 電気学会論文誌, Vol. 112-B, No. 12, 1992
 - 21) 重次治樹他, 「自家発電を考慮した電力時間帯別料金」, 電気学会論文誌, Vol. 112-B, No. 12, 1992
 - 22) 岩田寛哲他, 「分散型エネルギーネットワークの分析とモデル化」, OR学会平成5年度春季研究発表会, 1993

