

都市の電力供給システムと電力貯蔵設備

Electric Power Supply System and Storage Devices in Metropolitan Area

豊田 淳一*

Junichi Toyoda

1. まえがき

都市が健全に成長し、その機能を発揮するためには、電力・ガス・水道の供給システムや道路網など基盤となる要件が整っていて、適正な都市計画が実施される必要がある。著者らは都市のインフラストラクチャの中でも中核をなす電力供給システムにおいて、電力貯蔵設備の有効利用の可能性について検討しており、本稿はその結果を概述している。

電力貯蔵設備をうまく利用すると、その実現性はともかく、次のような効用を期待してもよい。

(1) 線路を流れる電力潮流の昼夜の差や季節的变化を平準化して、線路容量を削減して、流通ネットワークのスリム化を通り、土地の有効利用につなげる。

(2) 電圧変動や電力の瞬断など電力の質の劣化に対して、貯蔵設備を系統安定化制御機器の代替として利用する。その結果、業務用OA機器や住宅用エレクトロニクス器具の不正常動作を防止する。

(3) 停電など緊急時の非常用電源の代替として利用し、需要端信頼度の向上に役立たせる。

(4) コージェネ電源と組み合わせて、コージェネの電気需要の時間的变化を熱需要のそれに整合させて、熱電比率を一定に維持し、コージェネの効率的運用を実現させる。

(5) 光・風力など自然エネルギーを利用する分散型電源の発電出力の変動を吸収して、電気需要の変化に整合させる。また余剰エネルギーの処理にも役立つ。

これら貯蔵設備の効用について分析するためには、まず都市電力需要の空間的なひろがりや時間的な変化の特徴を把握する必要がある。次に、都市外部から都市への電力の供給形態と流通ネットワークの構成をモデル化して、想定したシナリオにそって都市における電力貯蔵設備の効用を分析することになる。

2. 都市電力需要のひろがりや経年変化

2.1 既存の都市電力需要の分析¹⁾

既存の都市は、中心部に業務地域があり、それを周辺部の住宅地域が取り囲んでいる構造になっている。マクロな視点から、都市を細分化した地区に分け、昼間人口が夜間人口より多い地区を業務地区とし、それ以外の地区を住宅地区として、都市需要のひろがりを知ることができる。図-1は仙台市の例であるが、分析の結果、業務地域は12km²、住宅地域は225km²となり、それぞれ半径2kmと9kmの円形地域で近似できる。さらに需要家データとして、事業所数・住宅数、需要基本データとして電燈需要・電力需要の実績値を組み合わせることで、業務地域と住宅地域の昼間(12時間)と夜間(12時間)の電力需要のひろがりや時間的变化を知ることができる。

仙台市については、その結果を図-2のように集約できる。業務地域では需要密度の集中が大きくなり、また昼夜間の需要格差の大きなことがわかる。業務地域の需要密度を住宅地域のそれと比較すると、昼間で11倍、夜間で3倍となる。また昼間の需要密度を夜間と比較すると、業務地域で7倍、住宅地域で2倍となっている。これらの数値は都市毎に異なり、都市の特徴を示

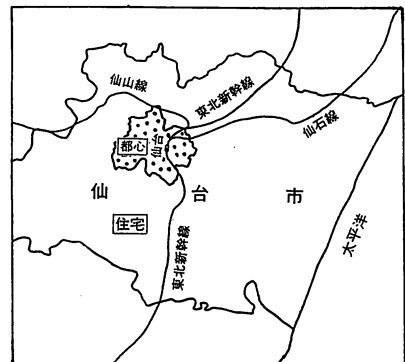


図-1 仙台市における電力需要のひろがり

*東北大学工学部電気工学科教授
〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

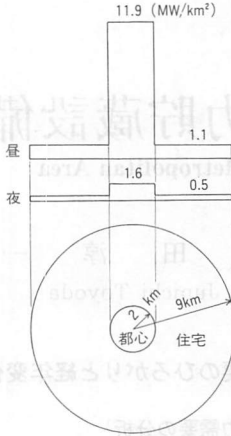


図-2 都市需要分布のモデル化(仙台市)

すパラメータともなりうる。図-2に示す都市需要の構造は、単純化しすぎているともみられるが、本稿では貯蔵設備の効用を分析するためにモデルとして利用している。

2.2 都市需要の経済モデルと経年変化の推定²⁾³⁾

次に、都市需要のひろがりの経年変化を推定してみよう。このためには、都市そのものの成長プロセスをモデル化する必要がある。成長プロセスに関連する経済因子には、都市の住民の賃金・消費・人口・宅地・地代・社会的共通資本(インフラストラクチャ)の他に、都市計画法・地区計画・税金など行政上の制約が含まれ、大変複雑な問題になる。本稿では、古典的なミューズ・ミルス・モデルによる需要家立地モデルを用いて都市需要の経年変化の推定を行っている。

すなわち都市の住民は、住宅地区から業務地区に通勤して就業し所得を得る。この所得で、住宅とそれ以外の財を購入する。この財を購入するために支出できる額は、所得から通勤の費用を差し引いた額(可処分所得)であり、都心から離れるほど小さくなる。住民が一定の効用水準を得る上で、居住地点に対して最大

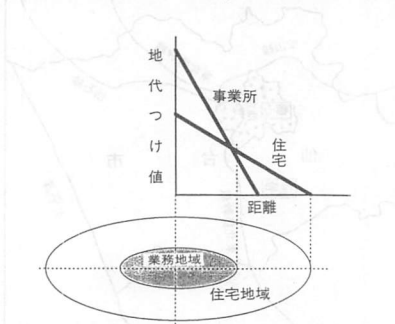


図-3 地代つけ値曲線と需要家の立地エリア

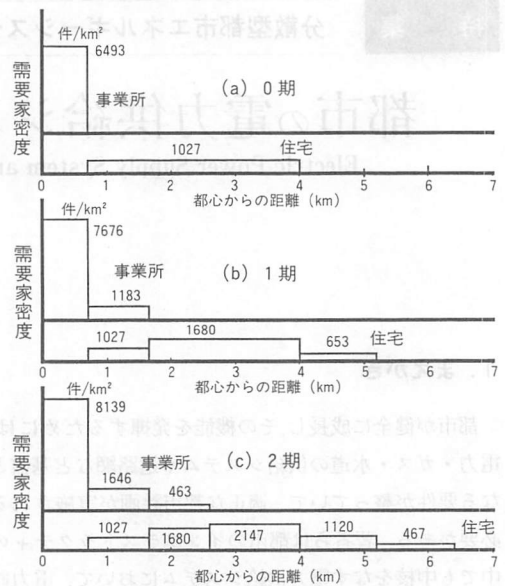


図-4 都市需要の経年的変化

限支払える住宅の価格を“つけ値”という。つけ値曲線は、都心から離れるにつれて減少する曲線となる。

一方、業務地域における事務所のつけ値は、利潤の一定水準を達する上で最大限に支払い得る額から定まるが、都心の方が業務上のエッセンシャルな情報が得易いということから考えても、業務地域の事務所についても都心ほど高いつけ値曲線で表される。都市の中では、住民の住宅と業務地区の事務所は、地代つけ値に関して競争的市場を形成する。図-3に示すように、両者の均衡点を境にして、中心部は業務地域、周辺部が住宅地域と色分けされることになる。

都市が経年的に成長する場合には、事務所と住宅の需要が増大し、それぞれのつけ値曲線も右側にシフトしていくことになる。その結果、都市圏の拡大と業務・住宅の混在地域が生じてくる。仙台市や新潟市のような中規模の都市を想定し、図-4に示すように、第0期は業務地域と住宅地域が完全に2分されている初期状態であるとする。各期毎に都市が活性化すると仮定すれば、土地つけ値曲線は右側にシフトし、第2期目には都心より1~2kmあたりが事務所と住宅の混在地域になることがわかる。都市圏も第0期の4kmから第2期目には6kmに拡大していることがわかる。

3. 都市への電力供給状態

都市へ電力をどのように運び込むかについては、色々な形態が考えられる。都市内部に発電設備がなけれ

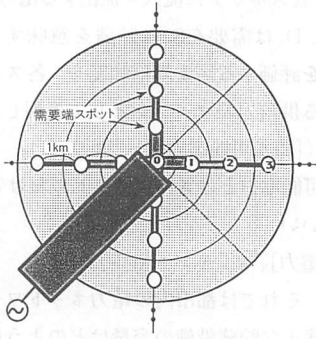


図-5 中心部給電方式

ば、全電力を外部から持ち込む必要がある。超電導ケーブル等大容量送電線を用いて、図-5に示すように都心部に電力を引き込み、順次周辺部に電力を分配するという中心部給電方式がある。この場合には、業務地域の信頼度が高くなると考えられる。中心部への供給ルートが確保できない場合には、周辺部から中心部に電力を分配する周辺部給電方式となる。この場合には、業務地域の信頼度が若干低くなると考えられる。周辺部の一端から給電する場合には、信頼度に地域的な偏りが生じるので、次章で述べる需要端信頼度による評価が有効である。

都市内部に発電設備が存在する場合には、

- (1) 熱と電気の併給を行うコージェネ
- (2) 光や風力を利用する小型分散電源

の2通りの場合が考えられる。コージェネは、数百米以内に熱需要が集中しているような立地条件が必要となる。コージェネの熱需要と電気需要の時間特性は必ずしも一致していないので、コージェネは出力特性に制約のある電源として取り扱う必要がある。

光や風力など自然エネルギーを利用する小型分散電源が、ある程度の割合を占めてきた場合には、発電出力に雲まかせ、風まかせの面があるので、そのエネルギーの有効利用については工夫を要する。

4. 電力貯蔵設備の効用

4.1 都市への電力引込と貯蔵設備の集中配置効果⁴⁾⁵⁾

図-2に示した都市需要分布のモデルをベースに、図-6のような都市電力供給システムを想定し、中心部 B_0 、業務地域と住宅地域の中間部 B_1 、周辺部 B_2 のいずれかを都市への電力引込口とした。引込口 B_1 と B_2 は理想化して、都市内と周辺部を巻く環状母線としている。電力引込口に貯蔵設備を集中配置し場合の経済

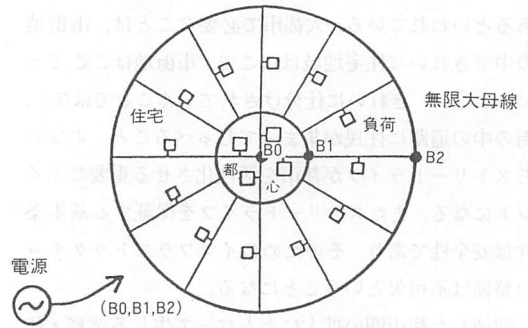


図-6 都市へ電力引込と電力供給システム

効果を評価した。ただし負荷の時間変化は図-2と同じにし、総需要のベース部はベース電源で供給し、ピーク部はピーク電源で供給するものとした。貯蔵設備の固定費を、ベース電源の固定費の3分の1程度として、線路の建設コストや地価を考慮している。

図-7は、貯蔵設備を集中配置した場合の経済効果を示している。図中、□で示した点は貯蔵設備なしの場合の年経費であり、●で示した点は貯蔵設備を集中配置したときの年経費である。これにより次の点が明らかになった。

- (1) 貯蔵設備を設置すると、経済メリットがある。
- (2) 電力引込口は、業務地域と住宅地域の境界に置き、さらに貯蔵設備を集中配置をすると、大きな経済メリットが得られる。
- (3) 電力引込口に関係なく、貯蔵設備は境界母線 B_1 に設置するのがよい。

都市の成長と安定化のためには、理想の都市空間と

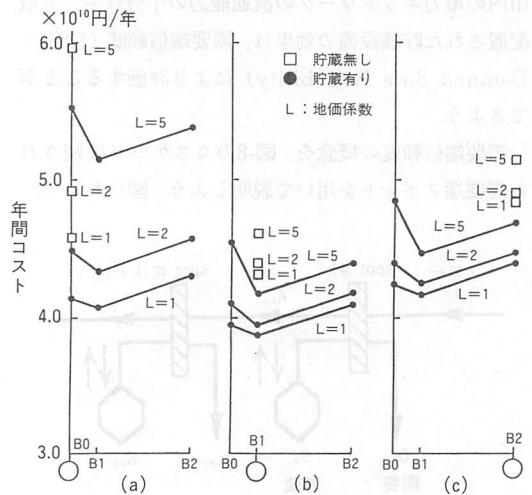


図-7 貯蔵設備の集中配置による経済効果

してストリートライフが成立できる都市計画が必要であるといわれている。大都市に必要なことは、市街地の中できれいな住宅地域はここで、市街地はここでというように、きれいに仕分けされていくことではなく、街の中の道路に住民が集まってしゃべること、すなわちストリートライフが都市を活性化させる重要なポイントになる。またストリートライフを保证する基本条件は安全性であり、そのためのインフラストラクチャの整備は不可欠ということになる。

前述した都市圏の拡大にもなって生じる業務・住宅の混在地域は、多少乱暴ない方になるが、一種のストリートライフ候補地域とも考えられる。そのような地域に貯蔵設備を集中配置すると、電力供給システム全体として経済メリットがあるだけでなく、貯蔵設備の系統安定化効果も考えれば、ストリートライフ地域への電力供給の安全性の向上にも結びつく。このようにして、貯蔵設備の設置が間接的に都市の活性化をうながすとも考えられる。

4.2 需要端スポットと需要信頼度⁹⁾

需要端スポットとは、都市の中のある地区の需要家のエネルギーを効率的に管理するための拠点のようなものである。都市内に貯蔵設備を分散配置する場合には、需要端スポットにそれを配置して、その地区のローカルなエネルギー管理を行うことになる。需要端スポットで電力だけでなく熱も取り扱う場合には、都市エネルギーのより効率的な運用が可能になるかもしれない。需要端スポットの運用基準は、信頼性と経済性により評価されることになる。とくに信頼性については、需要端スポット毎の評価が必要であり、都市内の電力ネットワークの流通能力の十分性や、分散配置された貯蔵設備の効果は、需要端信頼度 (DSR: Demand Side Reliability) により評価することができよう。

需要端信頼度の概念を、図-8のカスケード接続された需要端スポットを用いて説明しよう。図において、

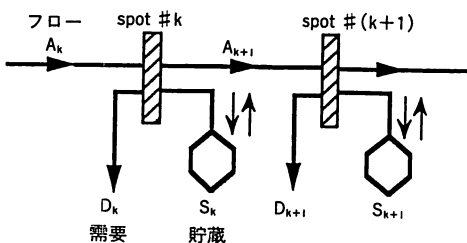


図-8 需要端スポットと電力フロー

A_k と A_{k+1} は# K スポットに流入・流出する電力フローを表しており、 D_k は需要を S_k は貯蔵を意味する。供給力の十分性を評価する需要端信頼度を、各スポットの需要に対する供給力のマージンとして表現しよう。

$$DSR_k = ([\text{着水可能電力}]_k - D_k) / D_k$$

ここで、着水可能電力とは# K スポットにおける潜在的な供給力をいい、

$$[\text{着水可能電力}]_k = [A_k - A_{k+1}] \pm [S_k]$$

と表現できる。それでは都市内の電力ネットワークの流通能力や、適正な貯蔵設備の容量はどのように決められるであろうか。これらの評価は、都市内の需要スポットの信頼度の分布が与えられれば決まる。一般に、都市内のどの地点でも均等な供給力のマージンがあれば、都市内の需要家は同じ満足度が得られる筈なので、都市電力供給システムの計画や運用目標は需要端信頼度 DSR_k を均等化することになろう。

$$\text{Equalize } [DSR_k]_{k=1, \dots, N}$$

$$[A_i], [S_i]$$

s.t. [電力供給システムの総制約]

[都市における総制約]

ここで A_i はピーク運用時の線路フローで線路容量に対応させ、 S_i は貯蔵設備の容量に対応させている。

4.3 DSR均等化による貯蔵設備の分散配置効果¹⁾

電力需要のひろがり、図-4の2期目で与えられるとき、事業所1ヶ所あたりの需要を(昼間10kw, 夜間1kw)とし、住宅1軒あたりの需要を(昼間0.2kw, 夜間0.6kw)として、需要端信頼度DSRを均等化する貯蔵設備の分散配置を考えてみよう。需要端スポットは1km毎に図-5のイメージで都市内に分布しているものとする。この図で同心円は貯蔵スポットの管理地域を表している。

比較は、①貯蔵設備なしの場合、②貯蔵設備を分散配置する場合、③貯蔵設備を特定のスポットに集中配置する場合の3ケースで行っている。貯蔵設備の運用目標は、負荷の平準化であり、②の場合は各スポット毎の負荷の平準化を行い、③の場合は都市全体の負荷変動の平準化を特定のスポットで集中して行うことになる。貯蔵設備を配置した効果は、貯蔵設備なしの場合に比べてどの程度線路容量が節約できるかにより評価する。図-9に貯蔵設備の分散配置に対して、どの程度線路容量が節約できるか、スポット毎に示してある。図-10は、特定スポットに貯蔵設備を集中配置する場合も含めて、①、②、③の結果を総合的に示してある。

分散配置の場合、合計した貯蔵容量は55MWとな

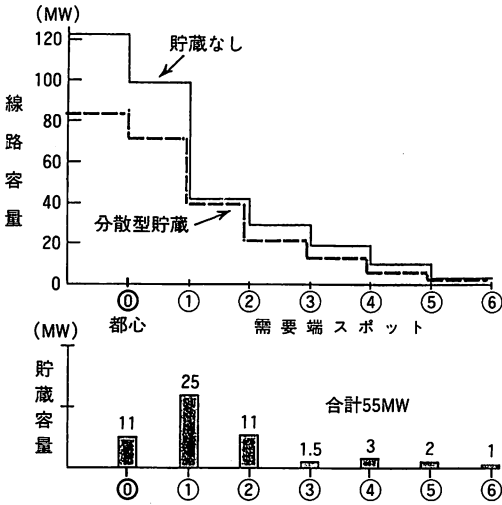


図-9 貯蔵設備の分散配置による線路節約

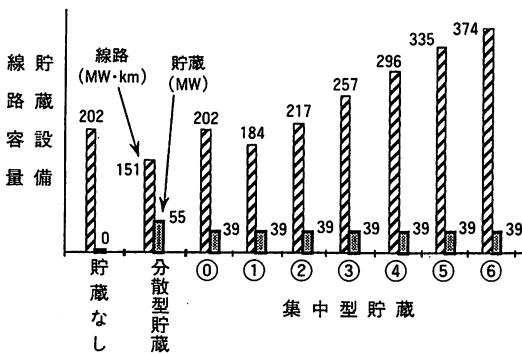


図-10 貯蔵設備の分散配置と集中配置の比較

り、集中配置の39MWに比べて40%増しの容量を必要とするが、全スポットで線路を節約できる。貯蔵設備なしの202MW・kmの線路容量に対して、分散配置の場合は151MW・kmの線路容量となり、線路節約効果は25%に達する。この線路節約効果は都市の中心部ほど大きいこともわかる。都市全体の需要のピークは、業務地域の事務所負荷が中心であり、約100MWである。夜間の事務所負荷は小さいので、負荷の平準化のためにピーク需要の約半量の貯蔵設備を必要とするので、分散配置の55MW、集中配置の39MWは妥当な結果である。

集中配置の場合、その線路節約効果は貯蔵設備の設置スポットにより大幅に異ってくる。効果のあるのはスポット1に集中配置した場合であり、貯蔵設備なしの202MW・kmに比べ、184MW・kmの線路容量でよいので、10%の線路節約効果がある。その他のスポ

ットに貯蔵設備を集中配置した場合、都市全体の負荷変化の平準化を集中して行うため、平準化のための電力フローが大きくなり、全体の線路容量は貯蔵設備がない場合よりも大きくなり、線路節約効果はなくなる。

また分散配置でも、集中配置でも効果の大きな設置スポットは、業務と住宅の混在地域の近傍であり、前述したストリートライフ候補地域に貯蔵設備を配置すると経済メリットが大きくなるのがわかる。結局、貯蔵設備を分散配置することにより、

- (1) 都市内の負荷変動の平準化が行われるので、都市へ供給される電力エネルギーの省エネルギー効果が期待できる。
 - (2) 各需要端スポット毎に負荷平準化が行なわれるので、都市内の線路の節約が期待できる。
 - (3) 需要端スポット毎の供給のマージン、すなわち需要端信頼度を均等化できる。
 - (4) 都市活性化のポイントである業務と住宅の混在地域に貯蔵設備を多く配置することにより、混在地域の安全性を高めることになるので、都市活性化に寄与できる。
 - (5) 需要端毎にエネルギー調整機能をもつことになるので、ローカルな電力や熱のエネルギー管理がし易くなる。
- などの効用が期待されることになる。

5. 都市向け開放型エネルギーネットワーク⁸⁾

将来の都市エネルギー供給形態として、既存の大規模電源を供給源とした大規模電力ネットワークと、中小規模の分散電源をうまく協調したエネルギー供給形態が必要になるかもしれない。これを実現する一つの

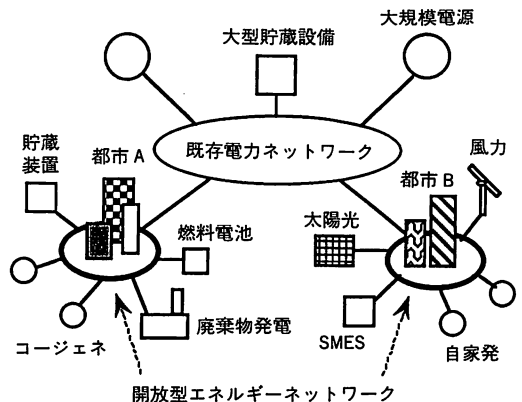


図-11 開放型エネルギーネットワークの構成

形態として、図-11に示す開放型エネルギーネットワークシステムが考えられる。このシステムでは、各都市がそれぞれに開放型エネルギーネットワークを持ち、各種の分散電源はゆるやかな連系の要件のもとに、開放型エネルギーネットワークにアクセスできるものとする。各都市のピーク需要は、主として各種分散電源を用いてまかない、ベース需要に対しては、既存システムから供給するものとする。

開放型エネルギーネットワークには、各種の分散電源の併列・解列を容易にするため、電力変換設備を各所に設けておく必要がある。また供給力の平準化やピーク供給力のシフトのために、貯蔵設備の分散配置が必要となる。もしこのようなシステムが実現できれば、各都市毎に自律的なエネルギー管理が可能になるので、その都市の地域性を重視したエネルギー供給システムを構築することができよう。またこのようなシステムの導入により、全体として調和のとれたエネルギー供給システムが実現できることになろう。

開放型エネルギーネットワークにおける貯蔵設備の運用には、これまでよりも自律性の高い運用が要求されることになろう。そのような自律的貯蔵設備の運用を必要とする例として、ラベル付き電力エネルギーの貯蔵設備による処理が考えられる。分散型電源で電力を発生したが、当面自所では必要ないときに、この余剰エネルギーにラベルをつけて開放型ネットワークに送り出す。オープンネットワークのいずれかの貯蔵設備が自律的に、このエネルギーを保管することになる。発生元の要求があれば、保管料を差し引いたエネルギーを送り戻すというようなシステムになるかもしれない。

開放型エネルギーネットワークについては、現在基本コンセプトを検討中である。大規模電源、分散電源、貯蔵設備、都市需要の諸特性を含めたトータルなエネルギーシステムの中で考える必要があろう。

6. むすび

本稿は、都市における電力貯蔵設備の役割や効用について、諸面から検討した結果を述べた。主要なポイントは以下の通り。

- (1) 貯蔵設備を集中配置する場合、事務所と住宅地域の境、あるいは混在地域の設置が効果がある。
- (2) 貯蔵設備を分散配置すると、負荷平準化だけでなく、線路節約効果も得られる。
- (3) 需要端信頼度の考え方が分析に役立つ。
- (4) 将来的には、自律的運用を行う貯蔵設備についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 佐々木、斎藤、豊田、“都市型需要向け電気エネルギー供給システムの検討”，電気学会電力技術研究会資料，PE-91-101，1991。
- 2) 細江守紀，“応用ミクロ経済分析”，有斐閣，1990。
- 3) 宇沢弘文他，“最適都市を考える”，東京大学出版会，1992。
- 4) 豊田、斎藤、佐々木，“都市型需要に適したエネルギー供給システムの検討”，第7回エネルギーシステム経済コンファレンス，# 4-4，1991。
- 5) 伊藤滋，“東京の都市計画を考える”，学会会報，No.798，1993。
- 6) J. Toyoda et al.，“New Indices and Computational Techniques for Composite Systems Reliability Evaluation”，CIGRE Symp.，1 A-01，1991。
- 7) 佐々木、豊田，“都市エネルギー供給システムにおける貯蔵設備の分散配置”，電気学会電力技術研究会資料，PE-92-182，1992。
- 8) 斎藤、佐々木、豊田，“分散した中都市群の電気エネルギー供給を支える開放型ネットワークの可能性”，電気学会電力エネルギー部門大会，164，1992。