

—平成 18 年度 修士論文—

社会的厚生と地域の観点に基づく
多品質エネルギーネットワークの研究

指導教員 松橋隆治教授

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学研究系

環境システム学専攻 環境システム情報学分野

修士課程 2 年 56741

河野孝史 

目次

第1章. 序論	1
1-1. 研究の背景.....	1
1-1.1 地球環境問題.....	1
1-1.2 世界的な取り組み	1
1-1.3 日本での取り組み	2
1-1.4 民生部門の対策強化.....	2
1-2. 研究の焦点.....	3
1-2.1 多品質エネルギーネットワーク構想	3
1-2.2 品質を下げるという発想	3
1-3. 既往研究の動向	4
1-3.1 海外の研究動向	4
1-3.2 国内の研究動向	6
1-4. 研究の目的.....	9
1-5. 研究の全体像と本論文の構成.....	10
1-6. 多品質エネルギーネットワークのイメージ.....	11
1-7. 研究の新規性	12
1-8. 本章の参考文献	14
第2章. アンケート	15
2-1. 本章の目的と全体像	15
2-2. アンケートの準備.....	16
2-2.1 アンケートで明らかにすること.....	16
2-2.2 使用するアンケート理論	16
2-2.3 仮想的市場評価法(CVM)の概要	17
2-2.4 アンケート票の作成.....	25
2-2.5 プレテストの実施と結果	27
2-2.6 アンケートの提示価格帯・母数の決定.....	32
2-3. アンケートの実施と基礎情報整理	33
2-3.1 実施方法・時期	33
2-3.2 アンケート回収数の内訳	33
2-3.3 基礎情報整理.....	34
2-3.4 支払意思額・受入補償額の簡易集計	40
2-4. アンケート結果の分析.....	43
2-4.1 分析の全体像.....	43
2-4.2 分布関数による近似方法	43

2-4.3	各種分布関数の説明.....	- 44 -
2-4.4	最尤法によるアンケート分布の分布関数近似.....	- 49 -
2-4.5	アンケート結果分析のまとめ.....	- 66 -
2-5.	(参考)属性別分析.....	- 67 -
2-5.1	年収別.....	- 68 -
2-5.2	在宅時間別.....	- 69 -
2-5.3	環境知識別.....	- 70 -
2-5.4	停電許容度別.....	- 71 -
2-5.5	属性別分析のまとめ.....	- 72 -
2-6.	(参考)効用分析.....	- 73 -
2-6.1	多属性効用分析とは.....	- 73 -
2-6.2	効用関数の作成.....	- 74 -
2-6.3	品質分配率 α の算出結果.....	- 75 -
2-6.4	考察.....	- 78 -
2-7.	本章のまとめと今後の課題.....	- 79 -
2-8.	本章の参考文献.....	- 80 -
第3章.	社会的厚生分析.....	- 81 -
3-1.	本章の目的と全体像.....	- 81 -
3-2.	社会的厚生とは.....	- 82 -
3-3.	需要曲線の作成.....	- 83 -
3-3.1	基準値の設定.....	- 83 -
3-3.2	需要曲線の作成方法.....	- 83 -
3-3.3	結果の読み方.....	- 84 -
3-3.4	結果一覧.....	- 86 -
3-3.5	5家電の統合.....	- 87 -
3-3.6	需要曲線作成のまとめ.....	- 88 -
3-4.	供給曲線の作成.....	- 89 -
3-4.1	品質の定義(供給機器).....	- 89 -
3-4.2	系統の供給曲線.....	- 99 -
3-4.3	多品質エネルギーネットワークの供給曲線.....	- 100 -
3-5.	社会的厚生分析とその結果.....	- 120 -
3-5.1	分析1. 両供給システムの品質別供給ポテンシャル比較.....	- 120 -
3-5.2	分析2. 多品質エネルギーネットワークの環境機器供給ポテンシャル比較.....	- 124 -
3-5.3	分析3. 各家電の各品質需要割合の算出.....	- 131 -
3-5.4	感度分析.....	- 134 -

3-5.5 分析のまとめと考察.....	140
3-6. 本章のまとめと今後の課題.....	141
3-7. 本章の参考文献.....	142
第4章. 民生部門統合分析.....	144
4-1. 本章の目的と全体像.....	144
4-2. 需要モデルの作成.....	145
4-2.1 家庭部門.....	145
4-2.2 業務部門.....	181
4-2.3 家庭と業務の統合.....	201
4-3. 供給モデルの作成.....	212
4-3.1 系統.....	212
4-3.2 多品質エネルギーネットワーク.....	213
4-4. シミュレーション.....	219
4-4.1 目的と全体像.....	219
4-4.2 シミュレーションの結果一覧.....	221
4-4.3 シミュレーション結果の分析.....	238
4-4.4 分析のまとめと考察.....	241
4-4.5 (参考)単品質での需給シミュレーション.....	242
4-5. 本章のまとめと今後の課題.....	252
4-6. 本章の参考文献.....	253
第5章. 結論.....	255

添付資料 アンケート票

謝辞

第1章. 序論

1-1. 研究の背景

1-1.1 地球環境問題

人類が現在直面している最も重要かつ緊急な課題のひとつが、地球規模環境問題である。

我々人類の生存基盤である現代文明は、地球からの資源を採取し、それをもとに経済活動を行い、その廃棄物を地球に還元することによって成り立っている。文明の発達是人类に多大な貢献をもたらし、物質的に豊かな社会をもたらしたが、同時に、地球資源の大量消費および大量廃棄を引き起こした。

近年、地球資源の有限性を強く認識させられるほどに現代文明は拡大を続け、ついには容量を超えた地球の反動として、地域規模では、ゴミの埋め立て処分場の不足、ダイオキシン問題、都市の大気汚染や水質汚濁など、地球規模では、酸性雨、砂漠化、土壤浸食、生物多様性の喪失、森林の減少、オゾン層の破壊や温室効果ガスによる気候変動などの異常現象が顕在化するようになった。

人類としての高度な文明を維持し今後の発展を保つため、我々人類は資源の枯渇と地球環境に与える影響を包括的に考慮し、持続可能な発展を実現しなければならない。

地球規模の問題の中でも、地球温暖化問題は、自然生態系および人類に悪影響を及ぼす可能性の高い、極めて重要な環境問題のひとつである。地球温暖化問題は、人類の活動に伴って発生する温室効果ガス(二酸化炭素、メタン等)が大気中に増大することで地球を温暖化するというメカニズムで生じる問題で、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル)¹⁾によると、地球の平均地上気温は 1990 年から 2100 年までの間に 1.4~5.8℃上昇するとされており、生態系の地球規模での変化が予想されている。

1-1.2 世界的な取り組み

地球温暖化問題対策は地球規模で実施されている。温室効果ガスの長期的な排出削減対策の第一歩として、先進国の温室効果ガスの削減を法的に約束する京都議定書が、1997 年 12 月京都において開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国会議(The Conference of the Parties : COP3)において採択され、2005 年 2 月に発効された。

京都議定書では、排出抑制削減対象となる温室効果ガスを、2008 年から 2012 年までの第 1 期約束期間において、附属書 I 国(先進国及び市場経済移行国)全体で 1990 年レベルと比べて少なくとも 5%削減することを目標としている。主要国の削減率は、1990 年比で、我が国は 6%、米国は 7%(結果、批准しない)、EU は 8%である。

1-1.3 日本での取り組み

我が国では、京都議定書の採択を受けた1998年6月に、地球温暖化対策推進本部²⁾において、2010年に向けて緊急に推進すべき地球温暖化対策をまとめた「地球温暖化対策推進大綱」を制定し、国を挙げての温暖化対策に動き出した。続いて、「地球温暖化対策の推進に関する法律」の施行(1999年4月)、「エネルギー使用の合理化に関する法律」(省エネルギー法)の改正(1999年4月)などを通じ、各種国内対策を進めた。2002年3月に発表された新大綱では温室効果ガスその他区分ごとの対策として具体的な目標値を定め、それを基礎として2005年4月に京都議定書目標達成計画が発表された。2007年現在は、その見直しや京都メカニズムの一部訂正に向けて、政府は努力を重ねている。

しかしながら、2005年度における我が国の温室効果ガスの排出量は、基準年(1990年)比で約8.1%の増加となっており、さらなる効果的対策が急務の課題となっている³⁾。

1-1.4 民生部門の対策強化

温室効果ガスのうち、現在最も温室効果に影響が大きい物質が二酸化炭素(CO₂)である。

国内においては近年、CO₂排出量の大幅な増加が見られる。2005年度の日本におけるCO₂排出量の部門別内訳は、産業部門が約38.6%を占めているが、近年排出量はほとんど増加していない。一方、民生部門(家庭・業務)の占有率は約33.9%にとどまるが、1990年度比で28.9%もの大幅な増加を続けている。国内全体における環境負荷の観点からも、民生部門における具体的な貢献策が望まれている(図1-1参照)。

地球温暖化対策推進大綱は、民生部門におけるCO₂排出量削減のさらなる強化のために、「エネルギー需要面の二酸化炭素排出削減対策」(省エネ対策)(2001年7月)、「国民各界各層によるさらなる地球温暖化防止活動」(2002年3月)を推進している。

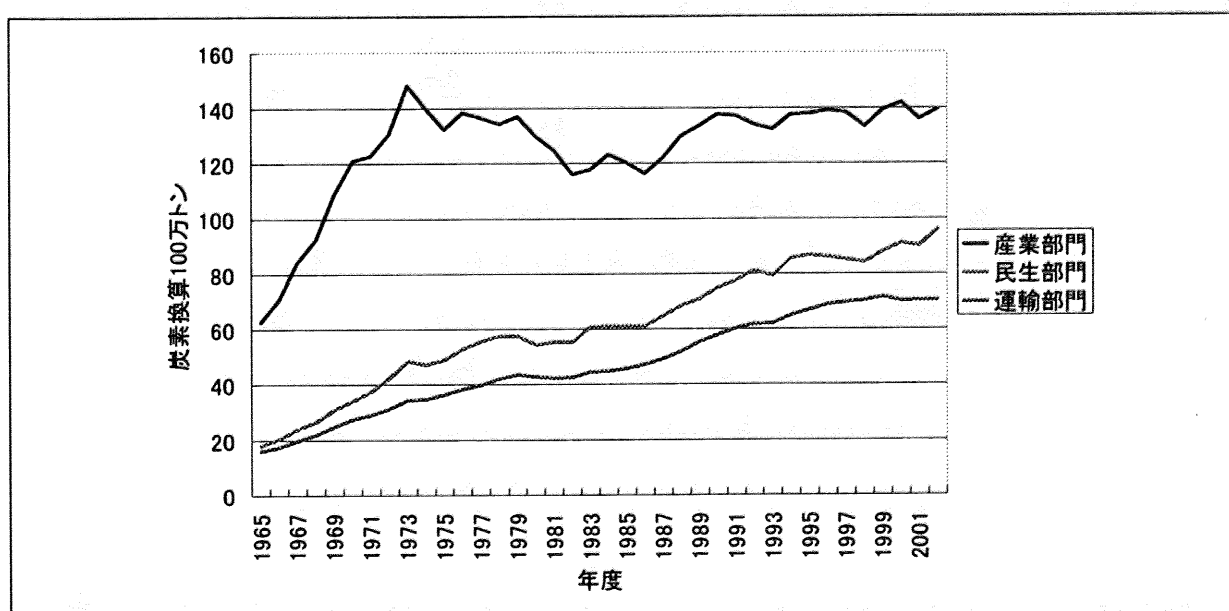


図 1-1 国内の部門別 CO₂ 排出量の推移 (EDMC⁴⁾ より作成)

1-2. 研究の焦点

1-2.1 多品質エネルギーネットワーク構想

民生用の CO₂ 排出量削減に資するエネルギー需給システムにおける具体的で有力な構想として、分散型電源を利用してエネルギーの品質を多品質に分けるという構想と、エネルギー需給をネットワーク化するという構想の2つがある¹。前者は、現状の単一なエネルギー品質を分解し複数の品質を需給させることで、過剰品質による無駄を廃し、需給をより細かく満たすことを目的としている。後者は、小規模なエネルギー需給主体はそれぞれ発電変動・負荷変動が目立つためそれらをネットワーク化し、変動を緩和してエネルギー需給を効率的に達成させることを目的としている。

分散型電源はエネルギーの地産地消という考えに基づき効率的なエネルギー需給が満たせるツールとして重用視されている。燃料電池やコージェネレーション等、今後期待されている技術も多く含まれている。特に自然エネルギーは確率的に挙動が変化する自然が資源であり、出力変動も大きい。これらの普及促進策としても、多品質エネルギーネットワークは注目されている。

1-2.2 品質を下げるという発想

多品質エネルギーネットワーク構想では、IAE⁵⁾等、分解した品質を現状より高めるケースが多い。つまり、現状品質では不足している需要家(例えば銀行やデータセンター等)の満足度向上を目的とした研究が多いのが現状である。

しかし実際そのような需要家は数としては少ない。わが国の電気事業者は国際的にみても非常に高品質な電力を供給しており、むしろ現状品質ですら過剰な品質であると考えられる需要家もわが国には多いのではないだろうか考える。したがって品質をさらに下げるという発想も十分現実的であるといえる。

品質を下げるという発想は、無駄な高品質高コスト構造を省きさらなる効率的・効果的なエネルギー需給構造を構築することの一助になるものと考えられる。

¹ ここでいう「エネルギー」とは、電力だけでなく、熱や水素等の媒体も含む。本研究で取り上げる「エネルギー」は特に電力と熱のみとし、考慮する需要は「一般電力需要」「冷房需要」「暖房需要」「給湯需要」の4つとする。

1-3. 既往研究の動向

1-3.1 海外の研究動向

(1) Berkeley⁶⁾, CERTS⁷⁾

Berkeley, CERTS(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)では、独自のマイクログリッドを提案している。追加的に電力システムシステムを作る場合において、より低コストで追加投資できるというコストメリット、発電機を効果的に組み合わせることによる品質向上(停電頻度の低下)、電熱併給による効率向上というメリットを強調している。品質分解の考え方(図1-2参照)や、発電機の故障率やエネルギー価格についての感度分析も行っており、この分野ではかなり詳細な分析がなされている研究機関のひとつといえる。しかし研究の前提が、米国の広大な土地に新たに電源投資をする場合に焦点が当てられていることと、もともとの電力システムの品質が低いことにあるため、我が国にそのまま応用するには一考を要する。

また、個別具体的なマイクログリッドをある特定の地域に適用しその最適運用計画を求めることで、最適な機器構成を導出する研究も重ねている。

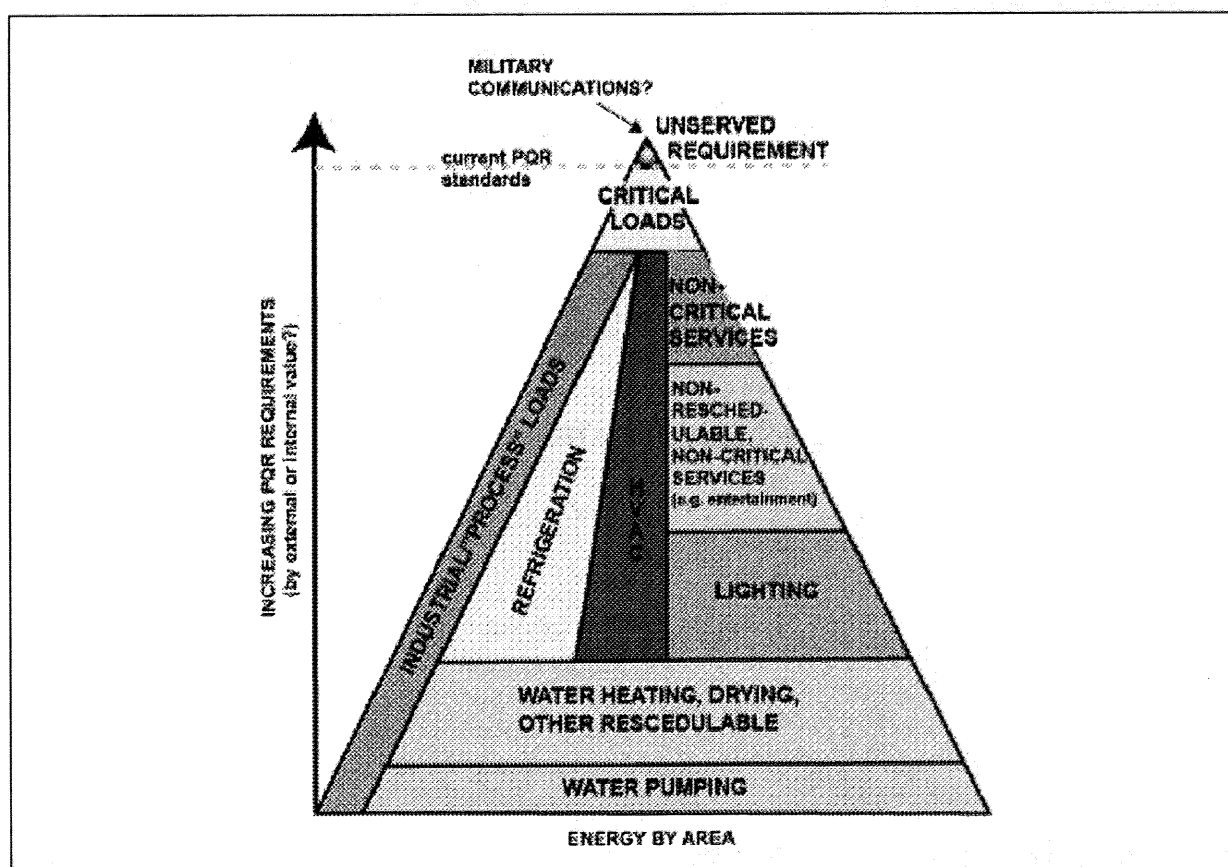


図 1-2 品質別電力需要(PQR ピラミッド) (Berkeley⁶⁾ より)

(2) PNNL⁸⁾

PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)では、追加的に電力システムシステムを作る場合において、低品質を許容する負荷を含むネットワークを作成し、品質が低下した場合にその負荷から順に遮断するというエネルギー需給構造(GridWise と呼んでいる)を提案し、具体的にネットワーク機器を製作している。低品質を許容することで、系統側、配電側、電力消費者の、それぞれに利益がもたらされる仕組みとして考案されている。ただこの仕組みは、系統が停電した場合に(低品質負荷を切断することで系統の品質を維持することによって)高品質負荷を守ることが利点のひとつとして挙げられているが、これは系統の停電頻度が米国に比べ圧倒的に少ない我が国においては大きな効果は期待できないと考えられる。

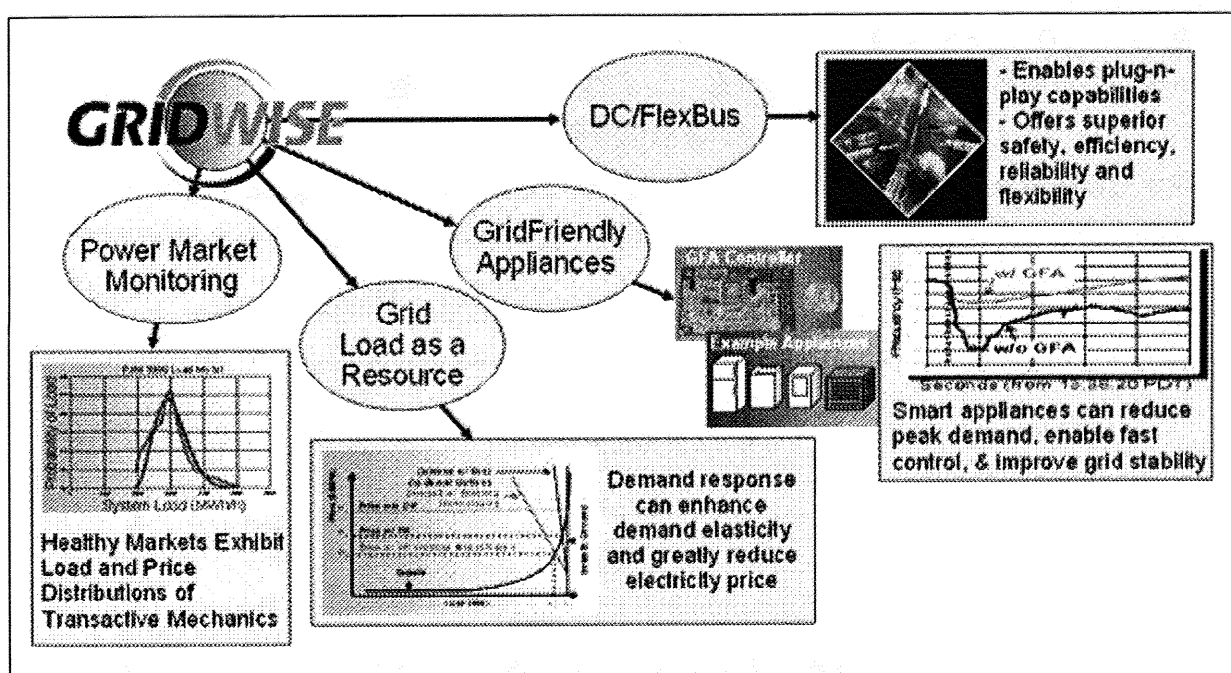


図 1-3 GridWise の全体像(PNNL より)

1-3.2 国内の研究動向

(1) IAE

IAE(The Institute of Applied Energy: 財団法人エネルギー総合工学研究所)では、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業として、平成16年度～平成19年度にかけて、大規模電源と分散型電源の調和のとれた電力供給システムの構築に向けて、新エネルギー等の分散型電源が大量に連系された場合でも系統の電力品質(ここでは適正電圧維持の意)に悪影響を及ぼさないための系統制御技術(電力ネットワーク技術)、及び高品質電力供給を可能とするシステム(品質別電力供給システム)について、実証研究を行っている。

IAEは「新電力ネットワーク技術に係る総合調査」として、新エネルギーを主体とした分散型電源を含む電力供給の技術的課題や研究開発の方向性並びに経済性を明らかにすることを目的として調査研究を実施している。また2006年より、東北福祉大のキャンパスを利用して品質別電力供給の実証事業を進めている。

IAEの品質別電力供給システムは、品質を現状より高めることに焦点がある。そのための発電機や各種制御機器の構成問題を実証実験により解析・定量化することを目指している。

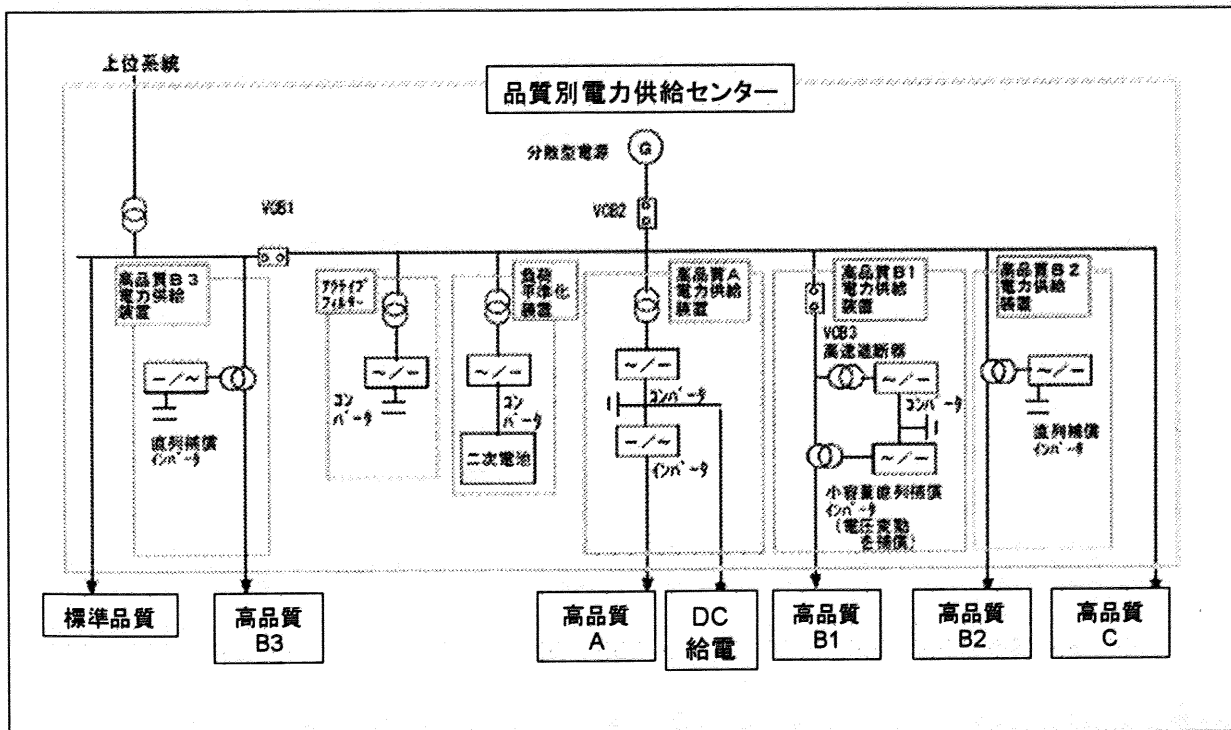


図 1-4 IAE 電力品質要件 (IAE より)

(2) FRIENDS⁹⁾

FRIENDS(Flexible, Reliable and Intelligent Electric eNergy Delivery System)では、高柔軟・高信頼・省エネルギー型電気エネルギー流通システムとして、多品質のエネルギーネットワーク構造を提案している。FRIENDS の最も重要な特徴は、配電用変電所と需要家との間に電力品質を管理する設備(電力改質センター Quality Control Center: QCC)の概念を挿入したことである。FRIENDS の目的は、システムの柔軟な構成変更による無停電供給並びに損失最小化(省エネルギー)、主に停電頻度を評価基準としたマルチメニュー方式、情報サービスとそれを利用した省エネルギーを実現することにある。

研究の方向性としては、各種品質調整機器等の最適構成問題に焦点を当てている。今度の検討課題として、QCC の具体的内部構成、発電機の最適運転方式や時々刻々の料金設定、保護リレー方式の検討等が挙げられている。

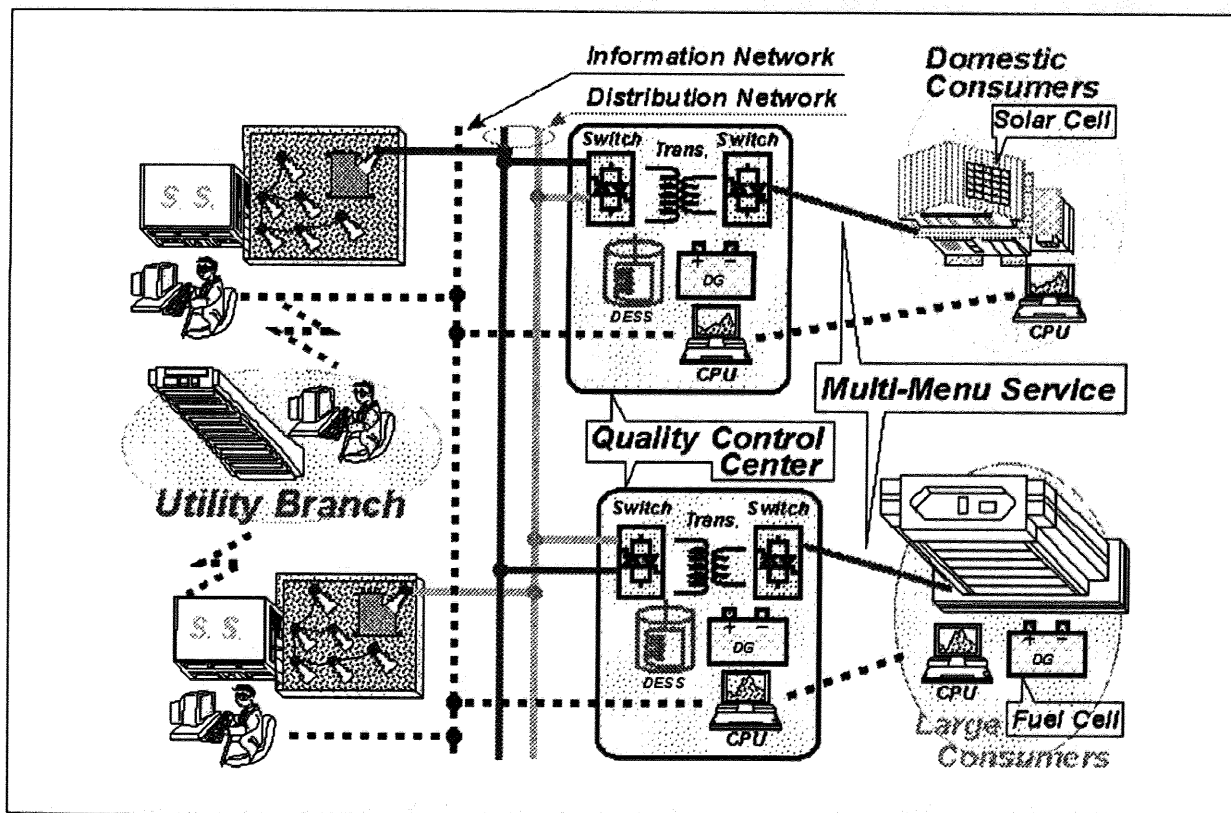


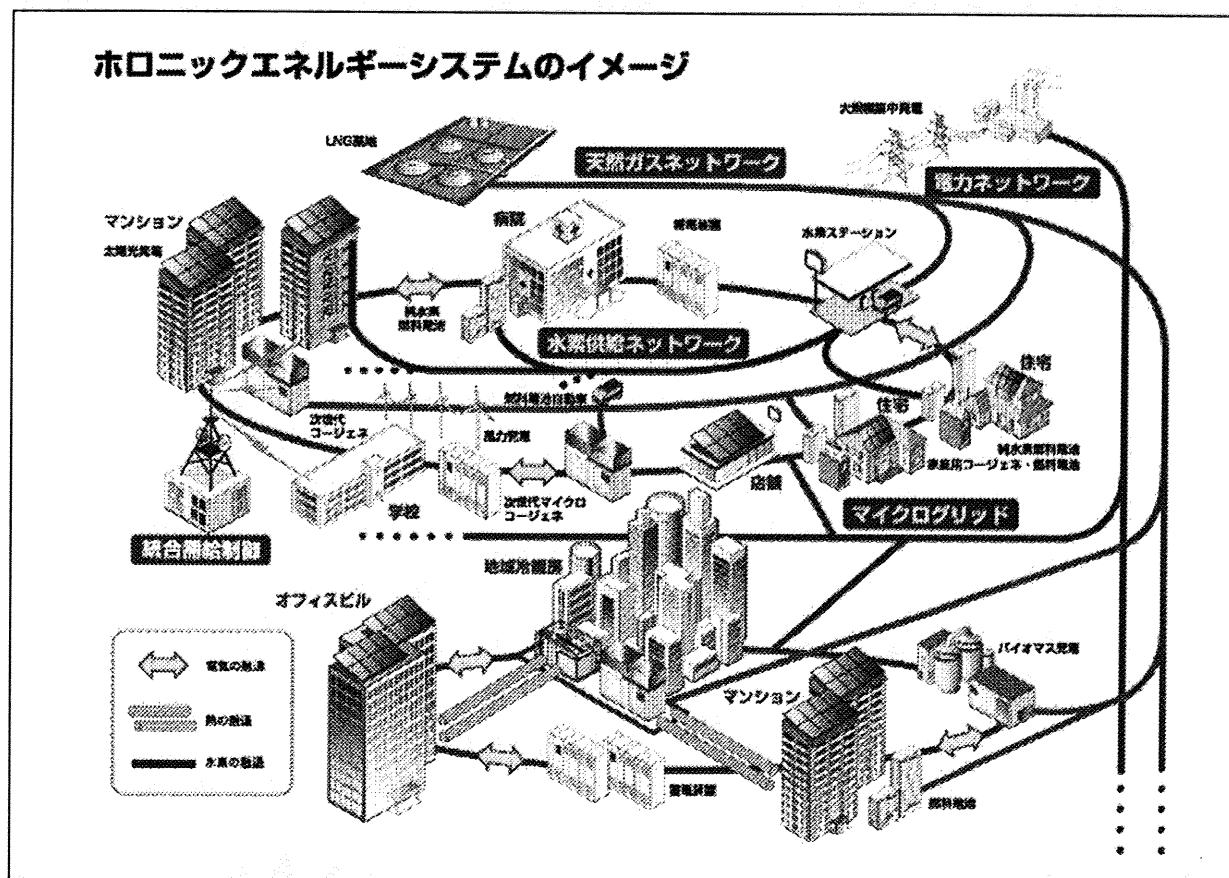
図 1-5 FRIENDS の全体像 (FRIENDS より)

(3) ホロニックエネルギーシステム¹⁰⁾

東京ガス株式会社は、東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻に寄附講座を開き、ホロニックエネルギーシステムを提案している(図1-6参照)。

平成17年4月から3年間にわたり開設された本講座は、エネルギー安定供給・環境問題・経済成長のいわゆるトリレンマ問題を解決し、将来にわたって持続可能な社会を実現するために、分散型エネルギーと全体システムとの最適な調和を図るホロニックエネルギーシステムの構築を目指している。これまで機械系専攻を中心に組み込まれてきた各種エネルギー技術の要素技術研究をもとに、電気系や建築系など専攻横断的にエネルギーシステムの将来像を探索し、既存のネットワークエネルギーと分散型エネルギー資源とを活用するエネルギー需給マネジメントの有効性を示すことを目的としている。

当ネットワークでは水素が考慮されている点が新しいが、想定しているエネルギー品質は単一である。



1-4. 研究の目的

既往研究の動向からは、発電機や各種品質調整機器の最適構成問題や、高品質への更なる追求といった傾向が見られる。また、個別具体的な事例にエネルギーネットワーク構造を当てはめ、その地域での効果を実証実験により解析しようとする傾向が見られる。

これら既存研究には、多品質エネルギーへの需要の把握、そして地域の一般化の概念が不足していると考えられる。IAE はアンケートにより業務部門の高品質需要を把握することには成功しているが、より低品質への需要を把握することはもちろん、業務部門よりも低品質を受け入れる可能性の高い家庭部門の需要も定量的に把握することは、民生部門の多品質エネルギーネットワークを構想する上で欠かせない要素である。エネルギーのように一般生活者にも深く密着した問題では、供給側からの一方的な論理だけでは机上の空論に終わるであろう。需要を考慮し、さらに供給側をも考慮する場合、これは厚生経済学でいうところの社会的厚生¹¹⁾の考え方に辿り着く。社会的厚生¹¹⁾が最大となる供給システムを社会は選択するということを、改めて確認したい。また、個別具体的な事例を積み重ねることも意義としては大きいですが、多品質エネルギーネットワークの供給構造が次第に明確化してきた今、地域を一般化することでどのような地域(需要家集団)にこそこの供給システムは効果的であるのかを把握することも、普及期に差し掛かる直前である今だからこそ意義深いと考える。

以上の流れを踏まえ、本研究の目的は、多品質エネルギーネットワークの価値を、特に社会的厚生の観点、そして地域の観点から、総合的に評価することである。

1-5. 研究の全体像と本論文の構成

本論文は5章で構成されている。研究の全体像を図1-7に示す。

第1章は、序論と題し、本研究の背景と目的を述べる。

第2章は、アンケートと題し、本研究で独自に実施したアンケートの全容を述べる。ここでは多品質エネルギーに対する需要を定量化することを試みる。具体的には一般生活者を対象としたアンケートを採り統計分析を行うことにより、各品質のエネルギーに対する支払意思額の分布を把握する。

第3章は、社会的厚生分析と題し、社会的厚生の考えに基づいた多品質エネルギーネットワークの価値を相対的に評価する。第2章の結果として得られた需要分布に対して需要曲線を、本研究独自に想定した多品質エネルギーネットワークモデルから供給曲線を導出し、社会的厚生の考えを基にした供給システムの比較分析を行う。

第4章は、民生部門統合分析と題し、家庭部門と業務部門の需給構造をモデル化し、地域別の経済性・環境性の違いを評価する。各地域での効果を定量化し比較することにより、より多品質エネルギーネットワークが効果を発揮する地域形態を模索する。

第5章は、結論と題し、本研究の結論を述べる。

また、巻末に本研究で実施したアンケート票を掲載する。

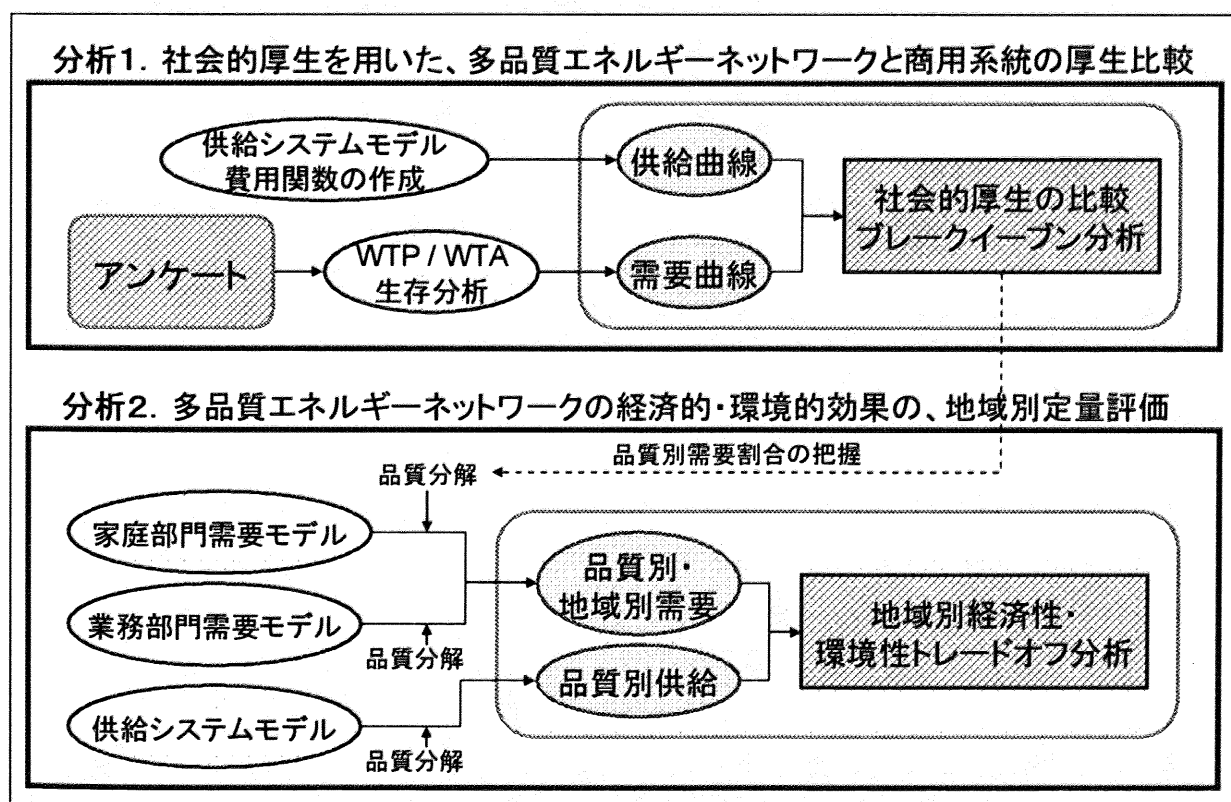


図 1-7 本研究の全体像

1-6. 多品質エネルギーネットワークのイメージ

また、本研究において評価の対象とする多品質エネルギーネットワークのイメージは、図1-8に示す通りである。商用系統は大規模送電線のことを示し、ネットワークとは一点で接しそこで需給制御が行われる。ネットワークにおけるベースの品質は低く設定されており、個別の需要化が必要に応じて品質を高めて使用する。また、同一の品質を求める需要家が近い地域に集まった場合、それら独自にネットワークが構成される。各需要家は、複数のネットワークに所属することも可能である。

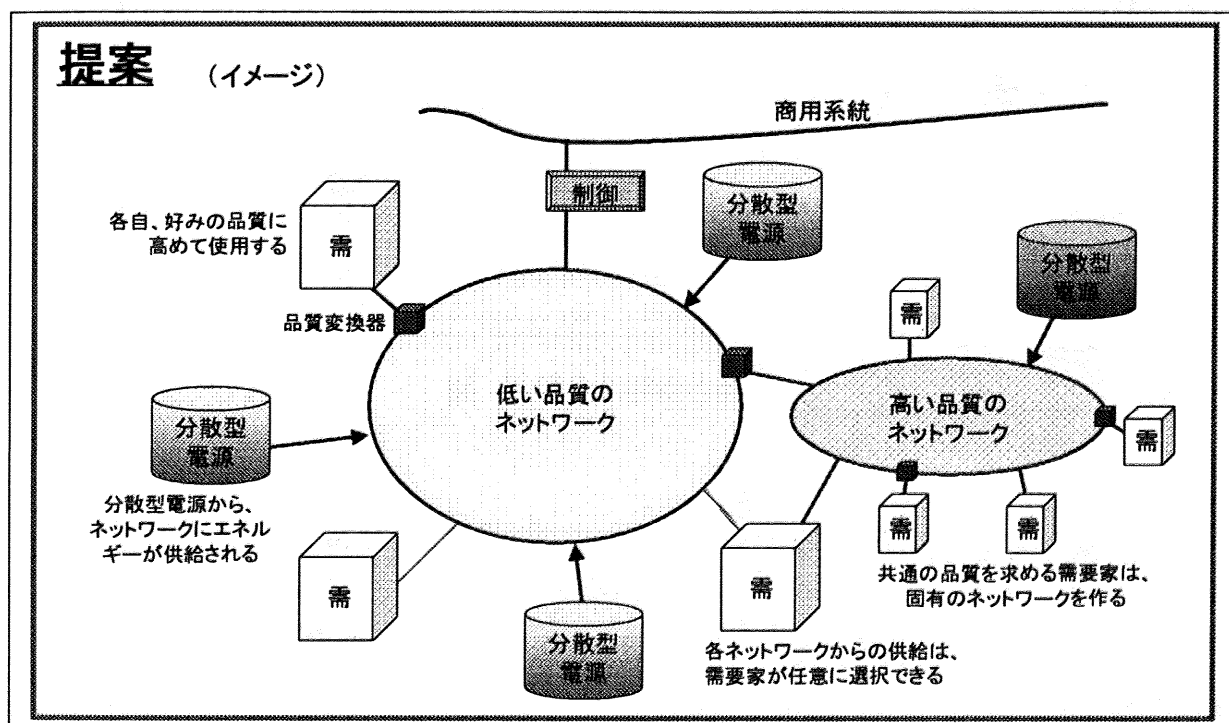


図 1-8 本研究で評価する多品質エネルギーネットワークのイメージ

1-7. 研究の新規性

先行研究と比較した、本研究の新規性を図1-9に整理する。ひとつずつ詳述する。

研究の着眼点	・品質を現状より下げるという発想は少ない
アンケート	・多品質エネルギーの受容性調査は例を見ない ・CVM統計モデルとしてトービットモデルを新しく適用した
社会的厚生分析	・厚生経済学の観点からエネルギー需給構造の価値を説明する研究は例をみない ・多品質エネルギーネットワークの供給曲線を独自に算出した
民生部門統合分析	・地域別に多品質エネルギーの効果をみる研究は例をみない ・業務部門需要家のエネルギーを品質で独自に分類した

図 1-9 本研究の新規性

(1) 研究の着眼点

現状品質に比べて品質をより下げるという発想は、既存研究にはほとんど見当たらない。多くの多品質研究では、現状品質よりも品質を高めることを想定している。これはわが国の国民性が安定志向であることと、拡大・上昇志向の市場経済において品質を下げるということは現実的には考えにくいことが、理由として考えられる。しかし今後は、電力自由化の更なる進展や地球環境制約の観点から、品質が下がることも現実的に考えられなくはない。したがって研究として扱うことには大きな意義があると考ええる。

(2) アンケート

多品質電力について、その受容性を調査するため家庭部門の一般生活者に対してアンケートを実施した。既存研究では、より高品質な電力に対するアンケート調査は業務部門に限り見られるが、家庭部門に対する電力品質アンケートはもちろん、より低品質な電力の受容性を尋ねるアンケートは実施例が無い。

また、アンケートは2段階2肢選択式CVMを採用したが、この分析においては統計モデルとしてワイブル分析、ロジット分析が一般的である。しかし本研究ではこの分野では使用例の少ないトービット分析も用いることとした。トービット分析は分布の裾野をより正確に再現できると考えられるため、本アンケート分析には適する分析ツールだと予想できる。

(3) 社会的厚生分析

これまで家庭部門を対象としたエネルギー需給モデルは、家計出費を目的関数として選択されるケースがほとんどであった。すなわち、総費用の最小化である。しかしそれは現実的であろうか。もちろん景気の影響もあるだろうが、本来ある商品の購入を考えたとき、そのものの良さ(品質)と価格の兼ね合いを考えて購入するか否かの意思決定を下すはずである。本研究では、エネルギー商品の選択基準として、家計出費ではなく社会的厚生とした。エネルギー供給形態の選択問題として社会的厚生を使用している例は無く、これによりさらに現実的な最適解が導き出せると考えられる。

(4) 民生部門統合分析

地域によって存在する需要家は様々であり、当然エネルギー需要は異なる。どの地域に対してより多品質エネルギーネットワークはその効果を発揮するのか。これまでの研究には、具体的な建物の組み合わせ(例えばホテル1棟と家庭1000世帯の組み合わせ、業務ビル2棟と病院1棟の組み合わせ、等)を基にしてエネルギー需要値を作成し、その供給システムによる運用コスト最小化シミュレーションを解く例が散見されるが、これだけではその供給システムが本当にその地域に適しているのかは論ぜない。

本研究ではこの問題点を解消するため、多品質エネルギーネットワークが一体どのような地域にどのような形で導入されるのがより環境的・経済的に適しているのかを明らかにすることを目指す。そのため、用途地域分類に基づいて地域を複数設定し、それぞれに多品質エネルギーネットワークを適用した場合の効果の差を定量化した。このような需要家側の感度分析を行った例は少なく、意義は大きい。

1-8. 本章の参考文献

- 1) IPCC 第三次評価報告書, 第一作業部会, (2001)
- 2) 首相官邸 地球温暖化対策推進本部
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/index.html> (アクセス日 2007.1.17)
- 3) 環境省; 2005 年度の温室効果ガス排出量速報値, (2006)
- 4) 日本エネルギー経済研究所計量分析部; EDMC2004 エネルギー・経済統計要覧, 財団法人省エネルギーセンター, (2004)
- 5) IAE 新システム技術評価分科会品質別電力供給 WG; 「品質別電力供給システム」に関する検討報告書, (2003)
- 6) Chris Marnay, Owen bailey, Kristina Hamachi LaCommare; Optimal Selection of On-Site Power Generation with Combined Heat and Power Applications, Berkeley Lab, (2004)
- 7) CERTS; The CERTS MicroGrid Concept, California energy commission consultant report, (2003)
- 8) M.L. Bosquet; GridWise Standards Mapping Overview, Pacific Northwest National Laboratory, (2004)
- 9) 奈良宏一, 長谷川淳; 新しい柔軟な電気エネルギー流通システム, 電気学会論文誌 B, Vol.117, No.1, pp.47-53, (1997)
- 10) 浅野浩志; 分散型エネルギー資源を活用するホロニック・エネルギー社会の構築, 省エネルギー, Vol.58, No.1, (2006)
- 11) 西村和雄; ミクロ経済学第 2 版, 岩波書店, (2004)