

## 第3章. 社会的厚生分析

本章では、社会的厚生分析を行うための準備とその結果について述べる。

### 3-1. 本章の目的と全体像

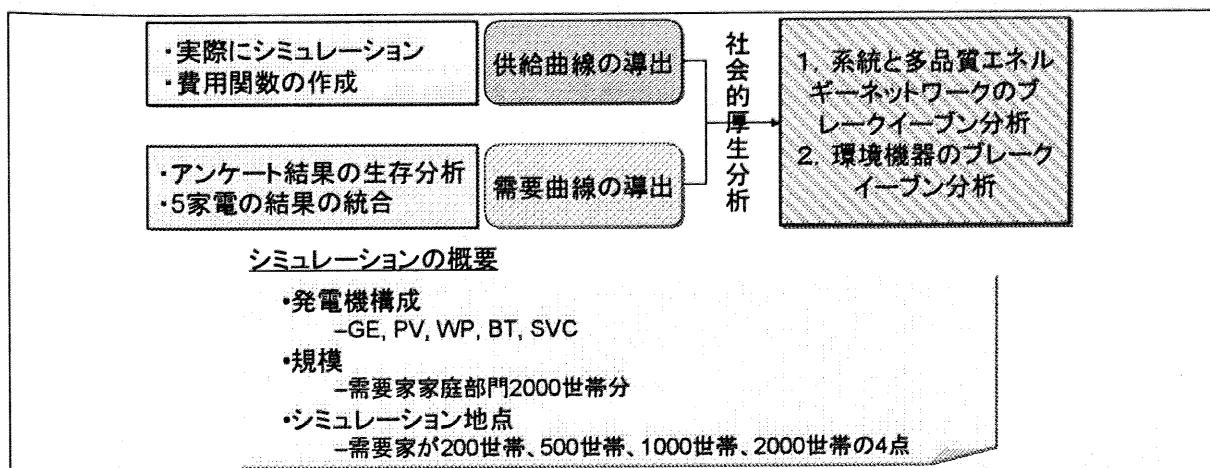
本研究では多品質エネルギーネットワークの価値を見出すことを目的としており、第2章により家電毎の多品質需要が定量的に把握できた。ではこの需要の下で、果たして多品質エネルギーネットワークは商用系統(以下系統と呼ぶ)と比べてどの程度「優れて」いるのだろうか、あるいは「劣って」いるのだろうか。

本章では、多品質エネルギーネットワークが実現するか否かについての判断基準(優劣)を厚生経済学における社会的厚生とすることを提案する。すなわち、社会的厚生がより大きい方の供給システムが社会的に選択されるものであると仮定する。

本章は、まず需要曲線と供給曲線を導出することから始まる。需要曲線はアンケートにより得られた結果をもとに算出する。供給曲線はいくつかの供給システムを仮定することにより費用関数をまず求め、それを微分することで限界費用関数すなわち供給曲線を導く。費用関数を求める際は、ある多品質エネルギーネットワークを設定してコスト最小化シミュレーションを解くことにより、その需要量に対する費用を求める。需要曲線と供給曲線が導出されたら社会的厚生を示す部分の面積を計算する。2つの供給システムそれぞれで計算し、またそれらがブレークイーブンとなる点も計算で求める。また環境機器の導入による需給均衡点の変化も考察し、各種ブレークイーブン分析を行う。

本章のオリジナリティは、エネルギー供給システムの選択問題として社会的厚生を基準にとり、実際に均衡点分析を行ったことである。

本章の構成は、社会的厚生の解説、需要曲線の作成、供給曲線の作成、社会的厚生分析、という流れである。全体像は図3-1に示す通りである。



### 3-2. 社会的厚生とは

社会的厚生(social welfare)とは、経済学において消費者余剰と生産者余剰の和で表現され、社会全体の満足度を表す<sup>11)</sup>。図3-2の通りである。

消費者余剰とは、消費者の最大留保価格から取引価格を引いた値であり、その取引から消費者が得る便益を表す。具体的には、消費者がある財やサービスを購入するとき、最大限支払ってもよいと考える額と実際に支払った額との差分を表す。

生産者余剰とは、取引価格と生産者の限界費用との差額の和であり、取引から得られる企業の便益を表す。費用には変動費用と固定費用があるが、厳密には生産者余剰は収入から変動費用を引いたものに一致するので、固定費用を無視した場合の利潤に等しい。

本研究では、供給曲線を固定費用も含めた限界生産費用(長期限界費用曲線)として表現する。その理由は、多品質エネルギーネットワークを新規に構築することを考えた場合、その設備投資を無視することは非現実的であるからである。

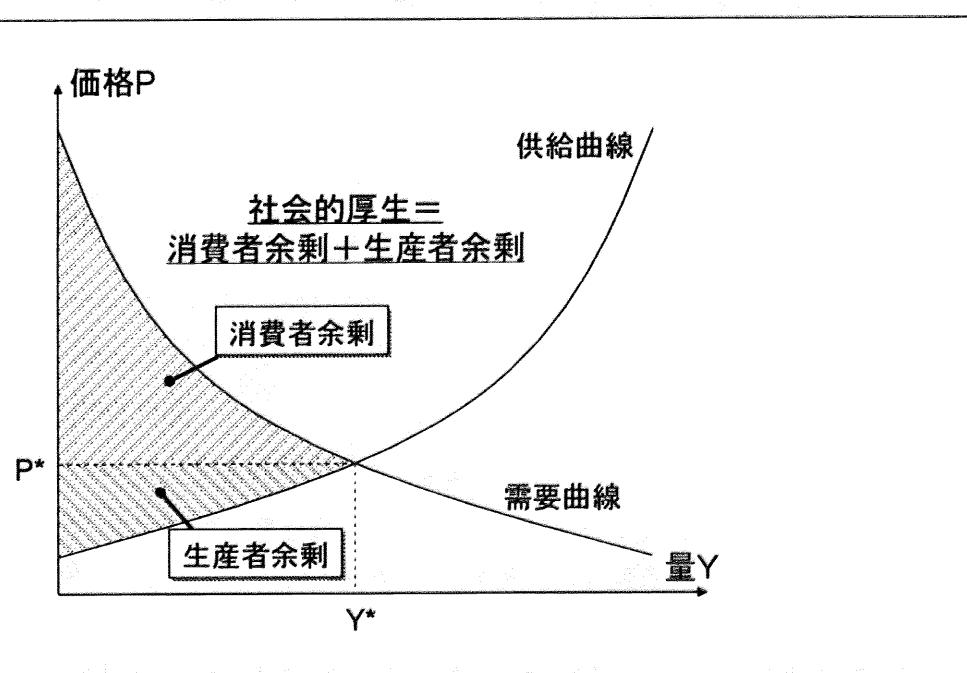


図 3-2 社会的厚生と消費者余剰・生産者余剰の関係

### 3-3. 需要曲線の作成

ここでは、社会的厚生分析の準備として、需要曲線を作成する。

各家電・各品質の電力について需要曲線を作成する。この導出には第3章のアンケート結果を用いる。現状の電気料金を基準として、高品質は支払意思額を加えた値をそのまま支払意思額とし、中・低品質は受入補償額を引いた値を求めて支払意思額に換算し、それらを再び分布として表現した。

アンケートは属性別分析において年収別には支払意思額・受入補償額の違いは有意では無かった。ここではなるべく多くのサンプルを用いることで信頼度を上げるために、サンプル全員の分布をそのまま用いた。

#### 3-3.1 基準値の設定

基準となる現状の電気料金等を以下の通り設定した。系統の電気料金単価は広く用いられている値<sup>6</sup>を使用した。需要家の月々の電気料金はアンケート結果から全回答者平均値をとった。各家電の電力使用割合はエネルギー白書<sup>26)</sup>から引用した。

・電気料金単価	:22 円/kWh
・月々の電気料金	:9475.15 円/月
・各家電の電力使用割合	テレビ:9.6%、エアコン:24.7%、冷蔵庫:16.1%、 照明:15.8%、PC:1%

#### 3-3.2 需要曲線の作成方法

各家電・各品質について、需要曲線を作成する。

月々の電気料金に各品質の上乗せ金額の支払意思額を足す(削減金額の受入補償額を引く)ことでその品質の支払意思額が求まる。これが縦軸の値となる。この値は電気料金単価(円/kWh)として表すこととする。

各家電の月々の電力使用量(kWh/月)を、月々の電気料金と各家電の電力使用割合、そして電気料金単価から算出する。これが横軸の値となる。この値はアンケート回答者全員分の総計(テレビでは602世帯分、エアコン・冷蔵庫では594世帯分、照明・PCでは611世帯分)として表すこととする。

<sup>6</sup> 例えば、経済産業省「標準年間エネルギー使用料金等の表示のあり方について(案)」

### 3-3.3 結果の読み方

#### (1) 全品質について

需要曲線の作成結果の例(エアコン)を図3-3に示す。図の読み方を併記する。

- ・縦軸の価格(例えば下図の  $p^*$ )が決まると、曲線の交点を経由して横軸の電力量( $e^*$ )が求まるが、これは価格  $p^*$ であれば市場で売買される電力量が  $e^*$  であるということを意味する。したがってその価格よりも低価格の支払意思を有している人は、その品質が供給されないことになる。つまり、より高額の支払意思を有している人ほど電力が供給されやすくなることになる。
- ・高品質以外の品質では、支払意思額が途中からゼロになっている。これはアンケートに高額の受入補償額を記入した人たちのことを示しており、電気料金がマイナスとなってしまうのを防ぐため次善策としてゼロとしている。

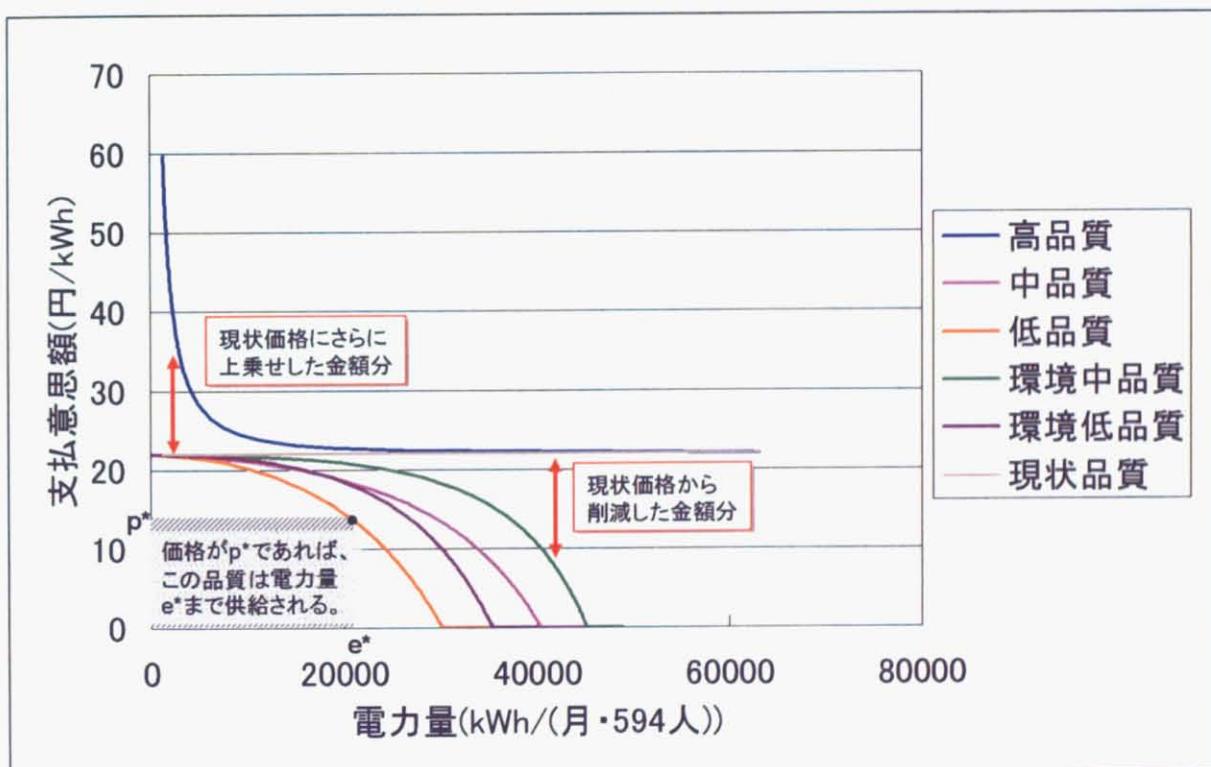


図 3-3 需要曲線の読み方

## (2) (補足)中・低品質の需要曲線の作成方法

中・低品質の需要曲線が、なぜ上に凸のグラフとなっているかを説明する。

まずアンケート結果からは下の上左図のような生存曲線を導いた。この図の横軸の値は受入補償額、すなわち「中・低品質と現状品質の間の価格差」を示している。例えば中品質の受入補償額が400円であれば、現状品質が1000円であった場合に中品質が600円以下であれば中品質を受け入れる、ということを意味する。

縦軸は受諾率を示すが、ある価格XにおけるYの値は、価格X以上の値で「YES」と回答する人(X以上の価格でないと受け入れられないという人)の存在割合を示している。

のことから下の上左図中に※印で示した部分は、その価格以下で受け入れることが可能であると回答した人の割合を示している。生存率を人数と置き換えて横軸にとり、提示額を縦軸にとり、横軸には提示額が低い人から順に並べるとする、下の上右図のような図が描ける。ちょうど下の上左図を左に90度回転したものを同様である。

この提示額は現状の電気料金からの削減額を示している。提示額を電気料金支払意思額に換算するため、現状の電気料金からこの提示額分を差し引く。こうして求めたのが下の下図である。これが中・低品質の支払意思曲線の形である。あとは横軸を人数ではなく電力量に置き換えれば、上図の需要曲線ができ上がる。

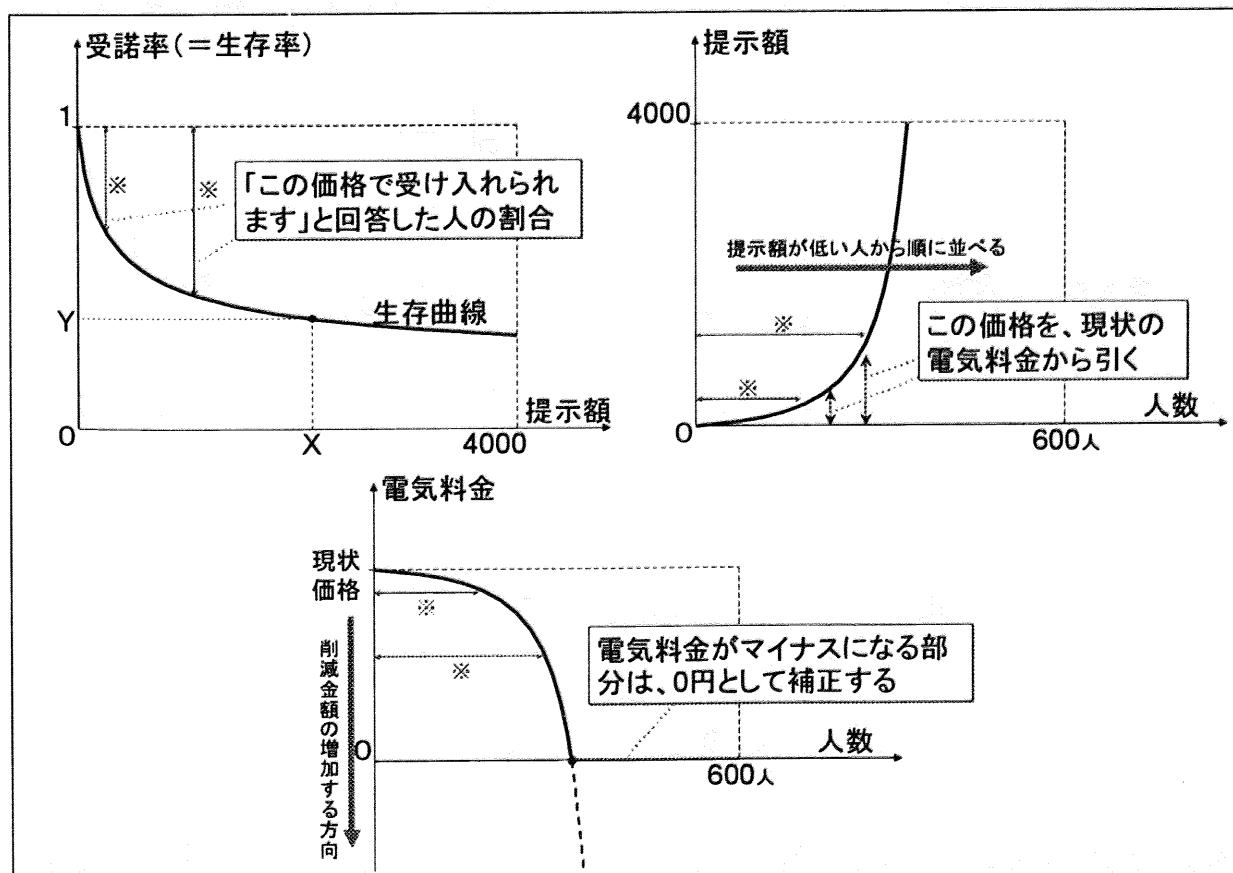


図 3-4 中・低品質の需要曲線の作成方法

### 3-3.4 結果一覧

図3-5は家電別の結果の比較である。縦軸・横軸のスケールが各家電により異なることに注意する。

エアコンが縦軸にも横軸にも最も幅のある結果となっている。縦軸の幅は支払意思額の高さを示しており、横軸の幅は需要電力量の多さを示している。したがってエアコンは、各品質への支払意思額が高くかつ需要電力量が多いため多品質電力をより供給しやすい家電であると言える。

同様の考え方から、多品質電力を求める傾向が強い順に、エアコン、照明、冷蔵庫、テレビ、PCと並べることができよう。

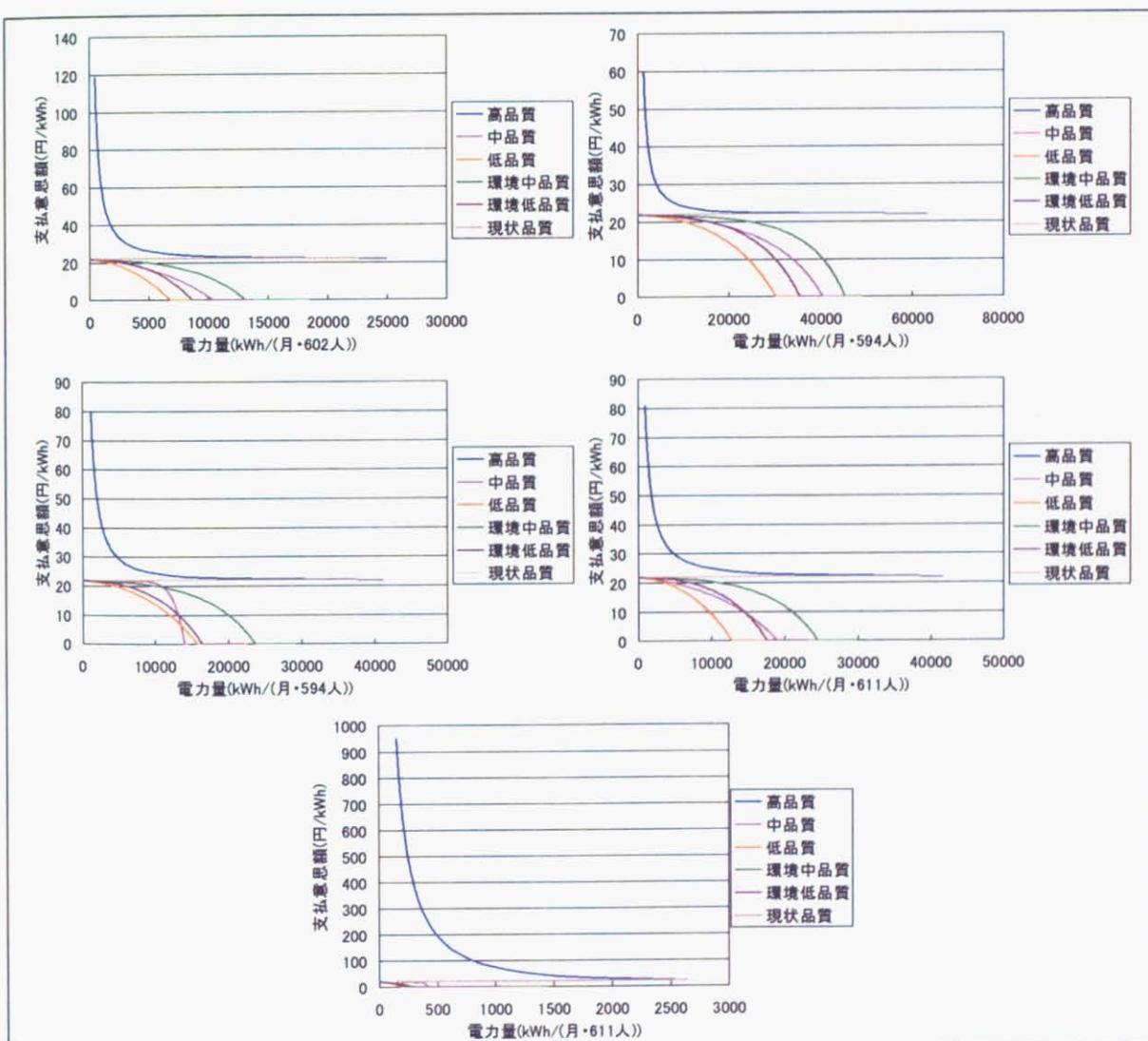


図 3-5 家電別需要曲線の結果一覧  
(左上:テレビ、右上:エアコン、中左:冷蔵庫、中右:照明、下:PC)

### 3-3.5 5家電の統合

5家電それぞれの支払意思曲線をひとつにまとめる。まとめることで、5家電の区別無く電力供給を行う場合の総需要電力量が横軸となる。

個々の家電についてはある電気料金についての受け入れ可能な電力量が定まっている。つまり家電*i*について、縦軸の値Yが求まれば横軸の値 $X_i(Y)$ が求まる。

5家電についての総需要を求めるには、縦軸の値がYのときの横軸の値の合計値

$$\sum i X_i(Y) \quad i:\text{テレビ、エアコン、冷蔵庫、照明、PC}$$

を算出すればよい(図3-6参照)。

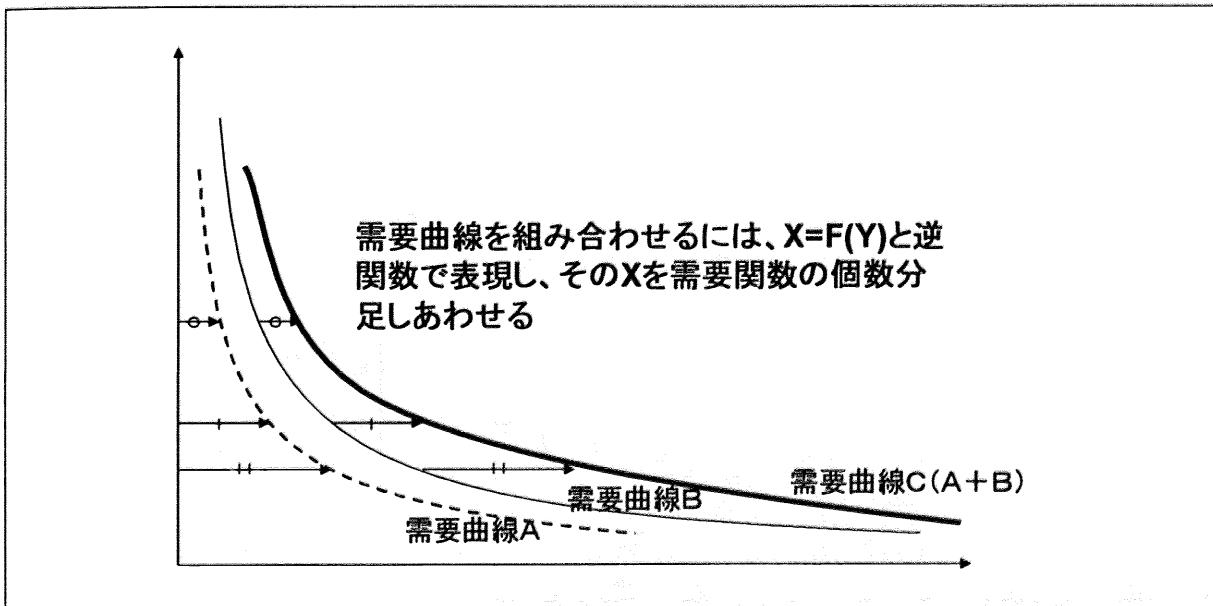


図 3-6 需要曲線の足しあわせ方

この結果ひとつのグラフ上に、5家電総計での各品質の供給曲線が描けた。結果を図3-7に示す。なお横軸は2000世帯あたりの値に換算してある。これは以降の供給曲線算出の際のシミュレーション規模にあわせるためである。

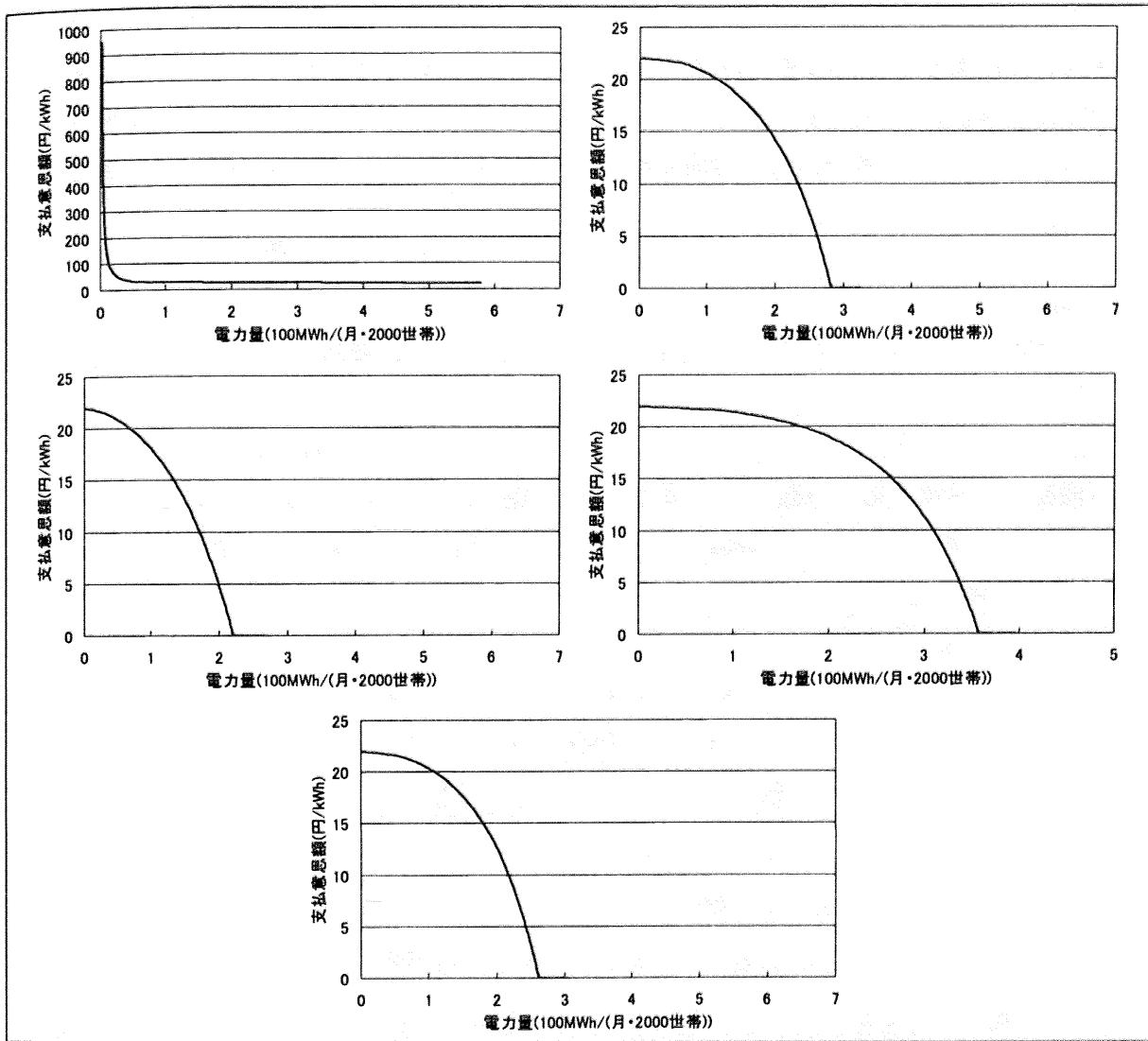


図 3-7 需要曲線

(上左：高品質、上右：中品質、中左：低品質、中右：環境中品質、下：環境低品質)

### 3-3.6 需要曲線作成のまとめ

以上で5家電統合した各品質の支払意思曲線、すなわち需要曲線が求められた。アンケート結果を単純に加工することで作成したが、単価が高くなるほど需要が少くなり、また環境価値が付加されると需要が多くなるという妥当な値が得られた。

### 3-4. 供給曲線の作成

本節ではまず、これまで需要家の視点から一概に「品質」と呼んできた電力品質のそもそもの考え方と品質対策方法について供給側の視点から述べ、次にその情報を基にして系統の供給曲線、多品質エネルギーネットワークの供給曲線を作成する。

#### 3-4.1 品質の定義(供給機器)

2-2.4.(2)ではアンケートのための品質の定義を行ったが、ここではエネルギー(特に電力)供給機器の観点から、各品質についてここで定義する。

##### 3-4.1.1 電力の品質とは<sup>27)</sup>

電力品質とは、交流の場合、制限は電圧の振幅、周波数、位相、波形が所定の範囲を逸脱して需要家装置などの動作に影響が出る度合を表す指標の総称である。電力品質を表すパラメータは、国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission: 略称 IEC)で定義され、IEC61000 シリーズの個々の企画で規定されている。我が国の場合、特に電圧、周波数、平均停電回数、停電時間、瞬時電圧低下、高調波に主眼が置かれていた。

電力品質パラメータの種類とその定義は表 3-1 の通り整理される。また、特に電圧振幅の変化が要因のパラメータについて、各パラメータの電圧変化および継続時間の範囲を図 3-8 に示す。

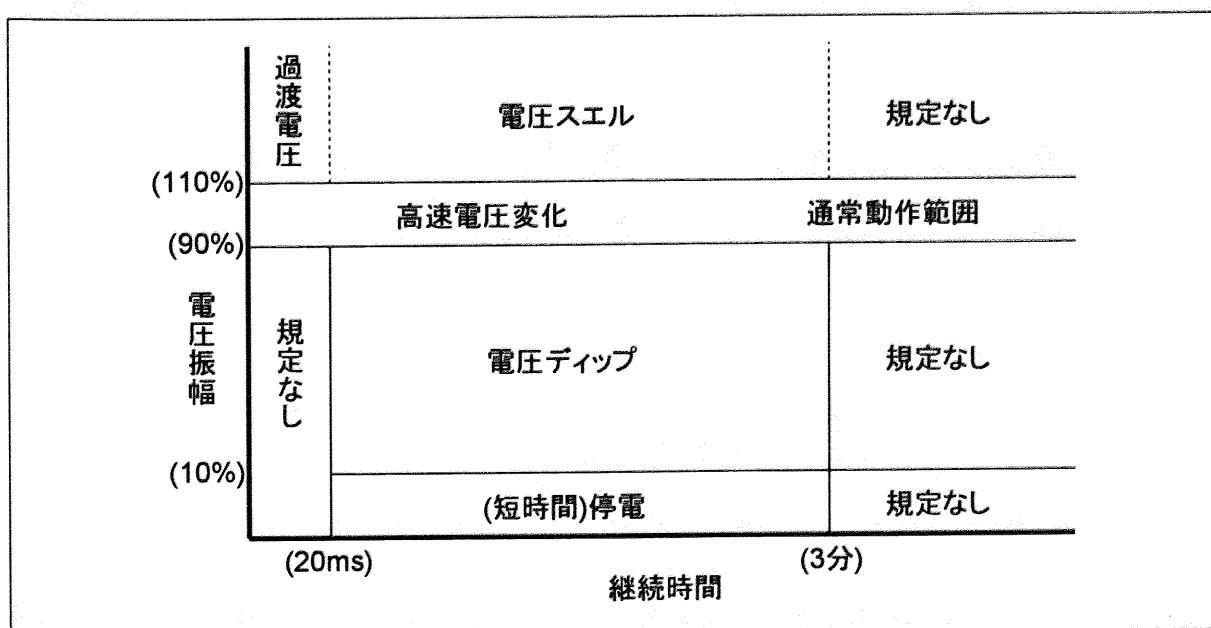


図 3-8 電圧振幅パラメータの範囲

表 3-1 電力品質パラメータの種類と定義

パラメータ	定義	発生要因	影響
周波数(変動)	商用周波数の50Hzまたは60Hzのこと。	有効電力の需給バランスの変化、大容量発電機の遮断や系統事故による系統分離等。	同期電動機の回転数変動による製品不良の発生。
供給電圧(変化)	-	大容量負荷の開閉、誘導電動機の始動、変圧器の投入等による無効電力の需給バランスの変化。	回転機のトルク変動、回転数変動による生産設備への影響。
フリッカ	光度またはスペクトル分布が時間とともに変動する光の刺激によって誘起される視覚上の不安定さに対する印象。	ほとんどがアーク炉の始動、停止。	照明のちらつき。
電圧ディップ	指定された閾値を下回る、電力系統のある地点における一時的な電圧低下。我が国では瞬時電圧低下(瞬停)と呼ばれることが多い。	落雷などの自然現象が大半を占める。電力系統の地絡または短絡故障の発生から、故障を検出し遮断するまで電圧低下が発生する。	放電灯の消灯、制御装置の誤動作、電動機の速度変動または停止、接触器の外れ、コンピュータや電子装置をもつ計測器の故障および計算エラー、同期電動機および発電機の同期はずれ、逆変換モードで運転するサイリスタブリッジの転流失敗。
電圧スエル	指定された閾値を上回る、電力系統のある地点における一時的な電圧上昇。	一線地絡、大容量負荷の切り離し、大容量コンデンサバンクのスイッチング。	-
(短時間)停電	指定された停電閾値を下回り短時間で電圧が回復するような電力系統のある地点におけるすべての相での突然の電圧低下。	電圧ディップと同じ。	電圧ディップと同じ。
電圧不平衡	多相系統において、相電圧の実効値(基本周波数成分)または隣り合う相間の位相角差のすべてが等しいというわけではない状態。	線路インピーダンスの不均衡、負荷のアンバランス(特に不均衡の単相負荷)。	電動機の温度上昇、出力トルクの低下、騒音、振動の増加、コンデンサ平滑形整流器の損失増加等。
高調波	周期的変動量のフーリエ級数における一次を超える基本周波数の整数倍の周波数をもった成分。	位相制御機能をもつ高出力の機器、コンデンサ入力形整流器。	制御装置の不具合、誤動作、コンデンサや回転機の損失増加、電動機やその他の機器からの騒音増加。設備障害としては直列リクトルの加熱、焼損が多い。
次数間高調波	基本波の整数倍ではないあらゆる周波数における次数の成分。	静止形周波数変換装置、サイクロコンバータ、セルビウス装置、誘導電動機、溶接機、アーク炉。	電圧波形のゼロクロス変位による機器の故障、誤動作、性能劣化。

### 3-4.1.2 電力品質を高めるための対策

以上で説明した電力品質の適正化を図るために、現在様々な対策が取られている。ここではその対策のうち、本研究に関連の深いものについて概要を示す。

#### (1) UPS

UPS (Uninterruptible Power Supply : 無停電電源装置) とは、電力供給信頼性を高めるために電化製品に UPS を取り付け、電力の瞬低・停電から電化製品を守る品質調整装置である。この装置を用いれば、他の系統が停電した時は、その系統との接続を切断し、内蔵されたバッテリーから電力が供給される。仕組みは図 3-9 に示す通りである。バイパス有りの場合、正味の停電確率は系統の停電確率と UPS の故障確率の積で表される。

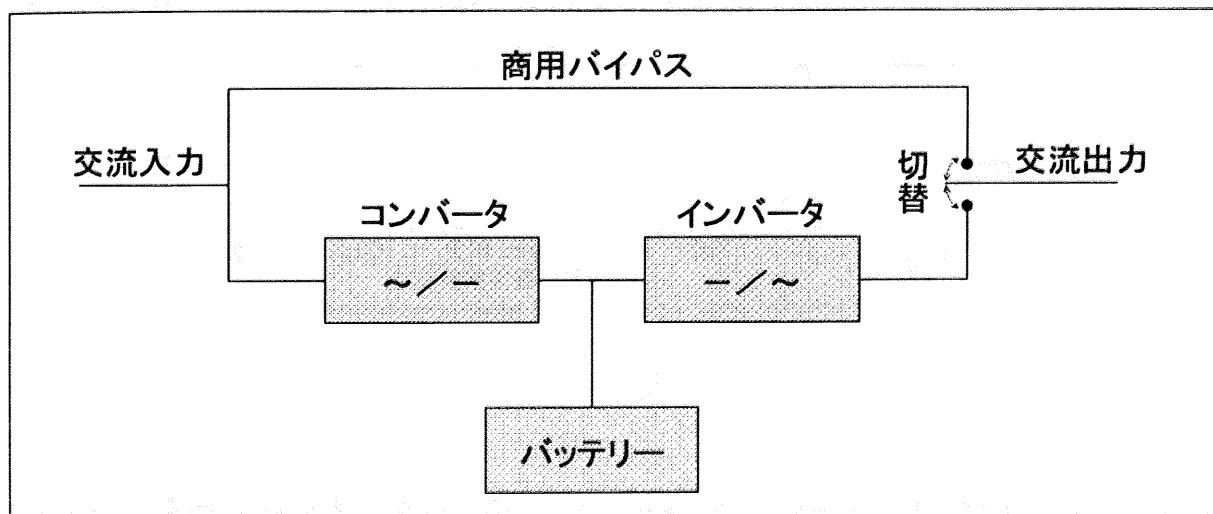


図 3-9 一般的な UPS の仕組み

蓄電池(バッテリー)の種類には表 3-2 のものがある。特に二次電池では、電力貯蔵用として鉛蓄電池が実用化されてきている。電気二重層キャパシタは比較的高速応答が可能であるが、浅野ら<sup>28)</sup>はガスエンジンや PV の負荷変動分は鉛蓄電池の規模適正化により補償可能であるとしている。

また鉛蓄電池の初期費用は、坂東ら<sup>29)</sup>によると以下の通りである。

$$BT \text{ 初期費用(インバータ含む)} = 50186(\text{円}/\text{kWh}) \times BT \text{ 容量}(\text{kWh}) + 410570(\text{円})$$

表 3-2 蓄電池の種類と特性<sup>28)</sup>

	揚水式水力	二次電池	電気二重層 キャパシタ	フライホイール	SMES
貯蔵エネルギー形態	位置エネルギー	電気化学エネルギー	電気エネルギー	運動エネルギー	電気エネルギー
発電装置	交流発電機	インバータ	インバータ	可変速交流発電機	インバータ
貯蔵効率(システム)概数	65~70%	65~90%	70% (運用形態等による)	~80% (軸受や運用形態等による)	80%~90%
エネルギー密度	小	小~大	小~中	小~大(超電導FW)	小
負荷応答	数分	瞬時	瞬時	瞬時	瞬時
運用単位	日・週	~分~日	~分	~分	~日
規模	大	小~大	小	小	小~大
立地制約	地形の制約有	なし(消防法による規制のある場合あり)	なし	なし	なし
実用化・検討されている主な用途	ピーク電源(運転・瞬動予備力を含む)	変動負荷対策、負荷平準化など	瞬低対策装置	変動負荷、発電対策	瞬低対策、系統対策
実用化例	事業用発電所:2,513万kW(2005年末時点)	NaS電池:6MW(網島変電所)、レドックスフロー電池:500kW、他に無停電電源等多数	瞬低対策装置など	周波数調整用(沖縄)	マイクロSMES(1MW、1MJなど):瞬低対策装置

## (2) 発電機の追加

本来分散型電源とは各需要家の近傍に停電補償装置として活用されてきた。多品質エネルギーネットワークでは分散型電源をメインのエネルギー供給源として考えているが、分散型電源を単純に増設することも品質向上策のひとつとして考えられる。

具体的な稼働イメージは、他の系統が停電したときにブラックアウトスタートとして自立的に稼働を開始する形式が一般的である。容量によって起動にかかる時間が異なるが、25kW 級のガスエンジンでは 10 秒強、300kW 級以上のガスエンジンでは数 10ms で起動するため<sup>7</sup>、それだけ停電の継続時間が少なく抑えられる。

<sup>7</sup> 専門家ヒアリングによる。

### (3) 電圧調整機器

現状の系統における品質調整は、配電網上に電圧調整機器(配電系統の電圧上昇対策機器)を配置することによって達成されている。これら電圧調整機器には多種多様なものがあるが、原理理解の容易性、情報の入手容易性等の観点から、SVR、SVC、等の機器に注目する<sup>30)</sup>。以下、ひとつずつ概要を整理する。

#### ① SVR

Step Voltage Regulator (ステップ式自動電圧調整器)。高圧配電線に単巻変圧器を直列に接続し、単巻変圧器のタップを無停電で調整し、SVR の二次側電圧を目標電圧に維持する。現在、系統変更や分断型電源の逆潮流にも適切な制御が可能な分散型電源対応型 SVR や高速応答可能な SVR(TVR)なども開発されている。既に国内の配電系統に適用されている、信頼性の高い機器。比較的安価であるが、応答性・タップ切換の寿命などが課題である。

費用は、3000kVA<sup>8</sup>で一台当たり初期費用が 700 万円であり、各種税金や運用コストを考慮した 10 年間総費用現在価値累計が、約 818 万円である(耐用年数は 18 年として換算)。

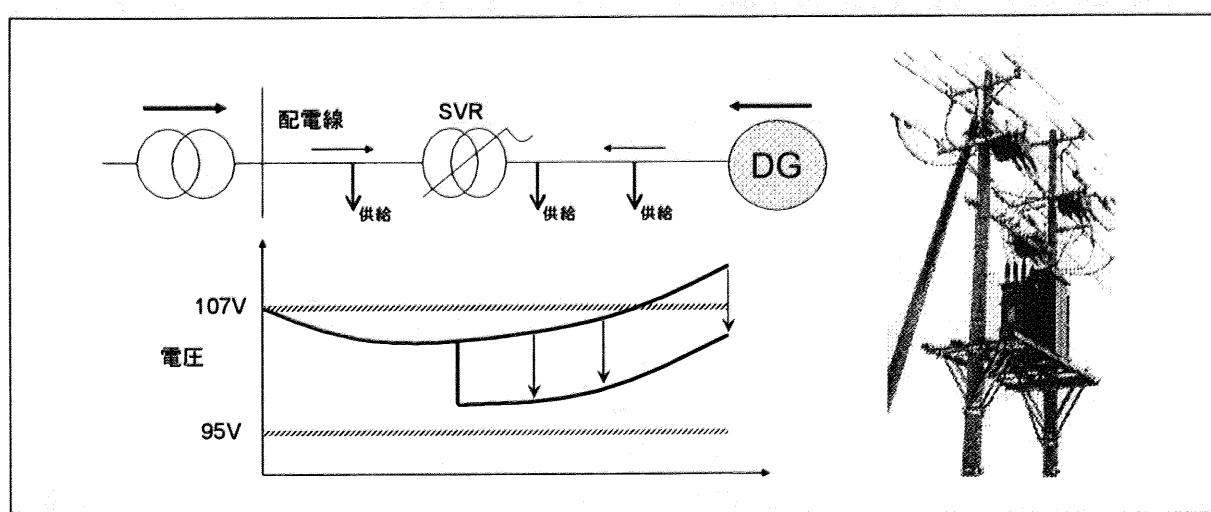


図 3-10 SVR による電圧改善イメージと SVR 本体画像

#### ② SC, SR

Shunt Capacitor (並列コンデンサ), Shunt Reactor (分路リアクトル)。高圧配電線に SC または SR を並列に接続し、配電線に流れる無効電力を変化させることで SC は電圧降下を、SR は電圧上昇を抑制する。電圧式の SC・SR は比較的安価であるが、適用実績が少ないとや応答性などが課題である。

<sup>8</sup> キロボルトアンペア。皮相電力の単位。有効電力(kWh)=皮相電力(kVA)×力率。

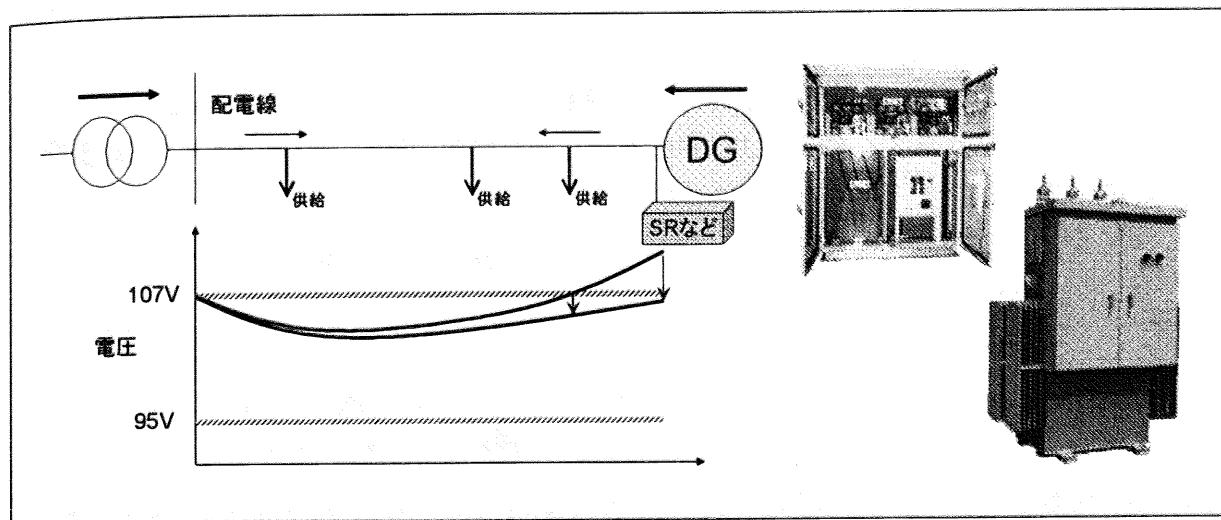


図 3-1-1 無効電力による電圧改善イメージと SC・SR 本体画像

### ③ SVC

Static Var Compensator (静止型無効電力補償装置)。インバータで系統に無効電力を供給し、系統電圧を高速に制御することができる。瞬時電圧変動分を補償することで、SVRとの協調制御が可能である。低コストで効率的な電圧管理を実現できる。

費用は、300kVAで一台当たり初期費用が1700万円であり、各種税金や運用コストを考慮した10年間総費用現在価値累計が、約2276万円である(耐用年数は18年として換算)。

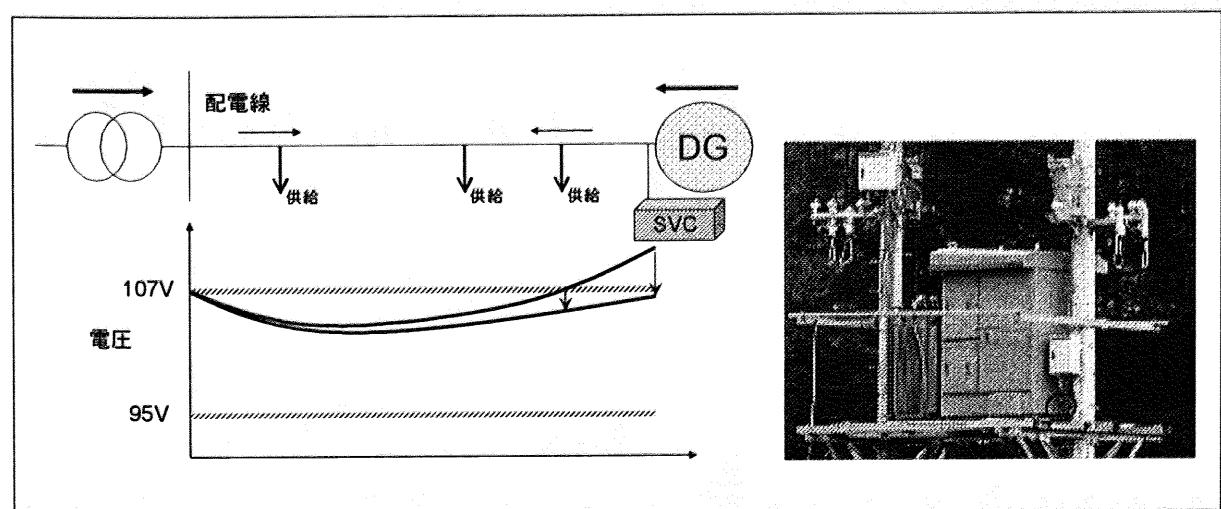


図 3-1-2 SVCによる電圧改善イメージと SVC 本体画像

#### ④ 電圧調整機器最適構成問題

電圧調整機器の最適化を目指す既往研究<sup>31)</sup>では、例えば下に示すような複雑な機器設定ケースを設定し、実に多様な調整形態を考慮している。このことから電圧調整機器をどのように配置するべきかはいまだ検討中の段階であり、品質を調整する能力やそのための費用も模索している段階であると考えることができよう。

- ・ケース 1-1 ; SVC 1箇所設置
- ・ケース 1-2 ; SVC 2箇所設置
- ・ケース 2-1 ; 新制御 SVR 1箇所設置
- ・ケース 3-1 : SVC 1箇所設置(遠隔制御有り)
- ・ケース 3-2 ; SVC 2箇所設置(遠隔制御有り)
- ・ケース 3-3 ; SVC+新制御 SVR(遠隔制御有り)
- ・ケース 4-1 ; ループ連系装置(高速遮断器、遠隔操作無し)
- ・ケース 4-2 ; ループ連系装置(ループコントローラ、遠隔操作無し)
- ・ケース 4-2-2 ; ループ連系装置(ループコントローラ、遠隔操作無し、2 フィーダ導入時)
- ・ケース 5-1 ; ループ連系装置(高速遮断器+SVC、遠隔操作無し)
- ・ケース 5-2 ; ループ連系装置(ループコントローラ+SVC、遠隔操作無し)
- ・ケース 6-1 ; ループ連系装置(ループコントローラ、遠隔操作有り)
- ・ケース 6-1-2 ; ループ連系装置(ループコントローラ、遠隔操作有り、2 フィーダ導入時)
- ・ケース 7-1 ; ループ連系装置(高速遮断器+SVC、遠隔操作有り)
- ・ケース 7-2; ループ連系装置(ループコントローラ+SVC、遠隔操作有り)

### 3-4.1.3 本研究における品質の考え方

本研究においては研究の専門境界を明確にするため簡単な品質対策を考慮することとし、上で紹介したような品質調整機器の最適構成問題は扱わないこととする。

またここで考慮する品質対策は、多品質エネルギーネットワークにおいてのみ適用するものとし系統には適用しないものとする。系統ではより大規模な対策がとられておりその把握と定量化は困難であると考えたためである。ここでは、高品質は現在の電気料金の1.2倍、中品質は0.9倍、低品質は0.8倍であるものと仮定する。

各品質と対策の関係を以下述べる。

- ・電力の品質を考える場合、蓄電池は必須機器であるといえる。本研究ではそう遠くなき将来を見据えた現実的な多品質エネルギーネットワークを考慮しているため、現状でもすぐに普及可能な鉛蓄電池を採用することとする。高品質と現状品質に適用する対策として考慮する。
- ・分散型電源を加えることも重要である。本研究では特に性能データが揃っており、また普及台数も多いガスエンジンを採用することとする。高品質と現状品質と中品質に適用する対策として考慮する。
- ・電圧調整機器としては現状の配電網にSVRは既に導入されていると考え、SVCを導入することを考える。導入台数は発電機ひとつあたりに一台とする。高品質に適用する対策として考慮する。

本研究では、以上の品質対策を考慮する。各品質に対応する品質対策は以下に示すとおりである。

表 3-3 本研究で考慮する各品質と品質対策の対応

高品質	鉛蓄電池と、分散型電源1台と、SVCが追加された状態
現状品質	鉛蓄電池と、分散型電源1台が追加された状態
中品質	分散型電源1台が追加された状態
低品質	発電機単体の状態

ただし、多品質エネルギーネットワークでは系統に連系しているため、そこからの品質調整も考える必要がある。この場合、系統からは現状品質のみが供給されるとし、それを高品質に高める場合は蓄電池のみを設置するという設定とする。系統からの今日入電力による中・低品質は、過剰であるが現状品質をそのまま使用するものとする。無理に品質を下げる必要は無いからである。

### 3.4.1.4 整合性の検証

第2章では供給側の都合ではなく需要側の都合を基に品質を定義した。つまり周波数のずれや電圧のずれといったことを一切無視し、「その電化製品が使用可能か否か」の一点のみを判断基準として品質を定義した。結果、停電頻度を基準として、高品質が現状品質の1/2の停電頻度、中品質が同10倍、低品質が同100倍と設定した。

3.4.1.3.で各品質の対策を設定したが、ここではその対策と第2章における品質の定義との整合性を検証する。また需要と供給の定義をなるべく同等とするために必要な品質対策機器の容量もここで検証する。

ただし現状品質については、SVCの効果を除くと高品質と同程度の品質となっているが、現状ではこの品質対策(蓄電池追加と分散型電源追加)が行われていることが多いため、検証を省く。したがって認識としては、多品質エネルギーネットワークによる現状品質供給は多少過剩品質であるということである。

#### (1) 低品質の検証

低品質の対策は無く、その提供する品質は多品質エネルギーネットワークを構成する発電機そのものの品質となる。分散型電源の故障率や修理時間といったデータは大変入手困難であり、したがって朴<sup>32)</sup>が仮定したガスエンジンの故障率3%を用いることとして考える。故障率が3%であるということは、年間365日のうち非稼働の日がその3%の11日であるということを意味する。これは1ヶ月に1回弱の頻度であり、第2章で設定した定義(3週間に1回)と比べ、ほぼ同等の品質を提供することとなる。以上の検証の結果、低品質は需要と供給の定義がほぼ一致することが確認できた。

#### (2) 中品質の検証

中品質の対策は、低品質のそれに分散型電源を一台追加したものであった。故障率3%の分散型電源が、補償用のものとベース電源用のものとが同時に故障する確率が、中品質が停電する確率であると考えることができる。

補償用の分散型電源の規模を、中品質需要量の約2割であると仮定すると、 $3\% \times 3\% \times (1/0.2)$ が中品質の故障率として表され、これは年間365日のうち非稼働の日が1.64日であるということを意味する。つまり7.3ヶ月に1回の停電頻度である。第2章で設定した定義(7ヶ月に1回)と比べ、ほぼ同等の品質を提供することとなる。以上の検証の結果、追加する分散型電源の容量を中品質需要の約2割とすれば、中品質は需要と供給の定義がほぼ一致することが確認できた。

### (3) 高品質の検証

高品質の対策は、中品質のそれに鉛蓄電池と SVC を追加したものであった。鉛蓄電池が含まれる UPS の故障確率は、その構成によって様々ではあるが、室山<sup>33)</sup>によるとバイパス付き単一 UPS の MTBF は 70 年程度、つまり  $1/(70 \times 365)$  の故障率であると試算されている。ただし他の電力供給が正常であっても UPS が故障すると停電することに注意する。

鉛蓄電池の容量が高品質需要の約 2 割であると仮定すると、 $(1/(70 \times 365)) \times (1/0.2)$  が高品質の故障率として表され、これは年間 365 日のうち非稼働の日が 0.072 日であるということを意味する。つまり 14 年に 1 回の停電頻度である。第 2 章で設定した定義(12 年に 1 回)と比べ、ほぼ同等の品質を提供することとなる。以上の検証の結果、鉛蓄電池の容量を高品質需要の約 2 割とすれば、高品質は需要と供給の定義がほぼ一致することが確認できた。

### 3-4.2 系統の供給曲線

ここでは系統の供給曲線を作成する。系統が単独で(分散型電源を用いずに)多品質供給を達成する場合を想定している。つまり現状の配電線が品質毎に(例えば3本)敷設されるようなイメージである。

供給曲線は限界費用曲線と等しく、これを正確に描くには系統による電力供給コストを、その設備投資等も含めて求めなければならない。しかし本研究では、系統に係る設備投資は詳細事項の把握が大変困難であることから、非常に簡略化した形で表現することとする。

本研究では、供給量に関係なく高品質の提供価格を現状価格の20%増、中品質・環境中品質を10%減、低品質・環境低品質を20%減、と想定する。この場合、供給曲線は図3-13の通り直線で表現できる。現状価格は3-3.1.と同様22円/kWhとする。

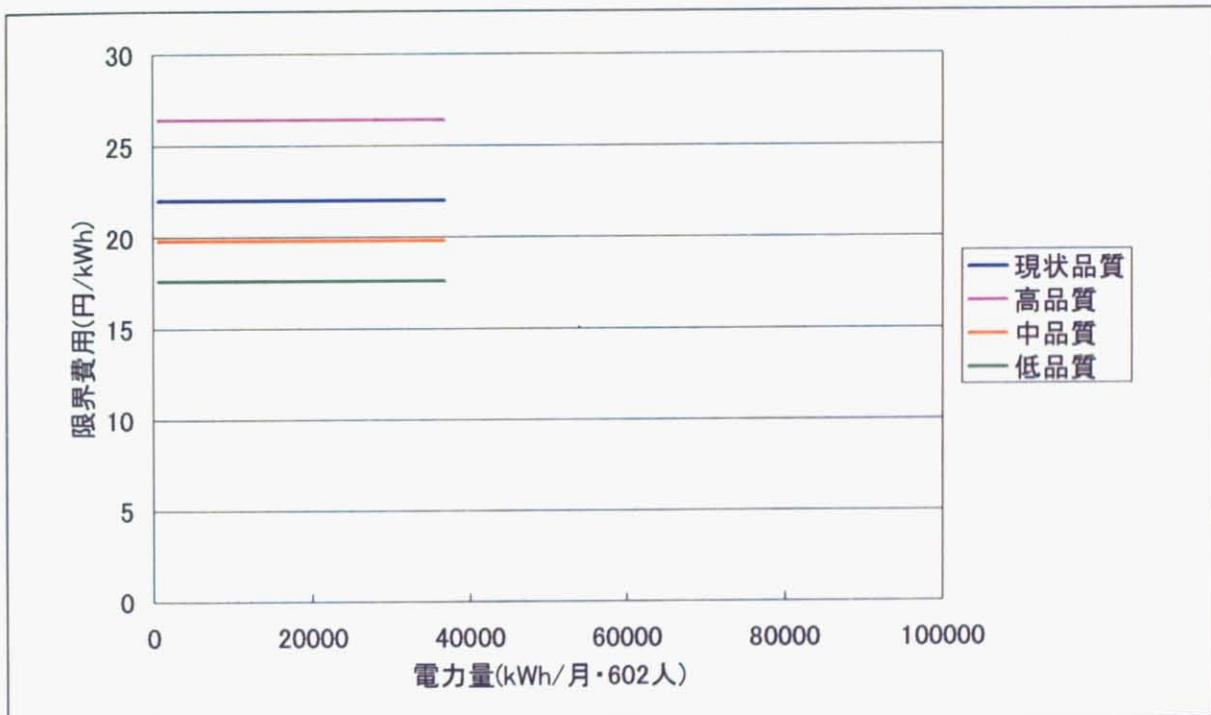


図 3-13 系統の供給曲線(テレビの例)

### 3-4.3 多品質エネルギーネットワークの供給曲線

ここでは多品質エネルギーネットワークの供給曲線を作成する。具体的にエネルギー需給計画問題を解くことで需要量(X軸)と供給価格(Y軸)の関係を導き、その関数を微分することで横軸に電力量、縦軸に限界費用をもつ供給曲線を算出する。

#### 3-4.3.1 供給曲線の作成方法

ある規模の多品質エネルギーネットワークを想定し、ある一定の需要量のもとでエネルギー需給計画をコスト最小化で解き総費用を求める。いくつかエネルギーネットワークの規模を変化させ、それに応じた供給費用をその都度最適化して求める。それらの点をつなぐで費用関数を求め、その微分をとることで限界費用関数、つまり供給曲線を導く<sup>9</sup>。下図にその概念を示す。

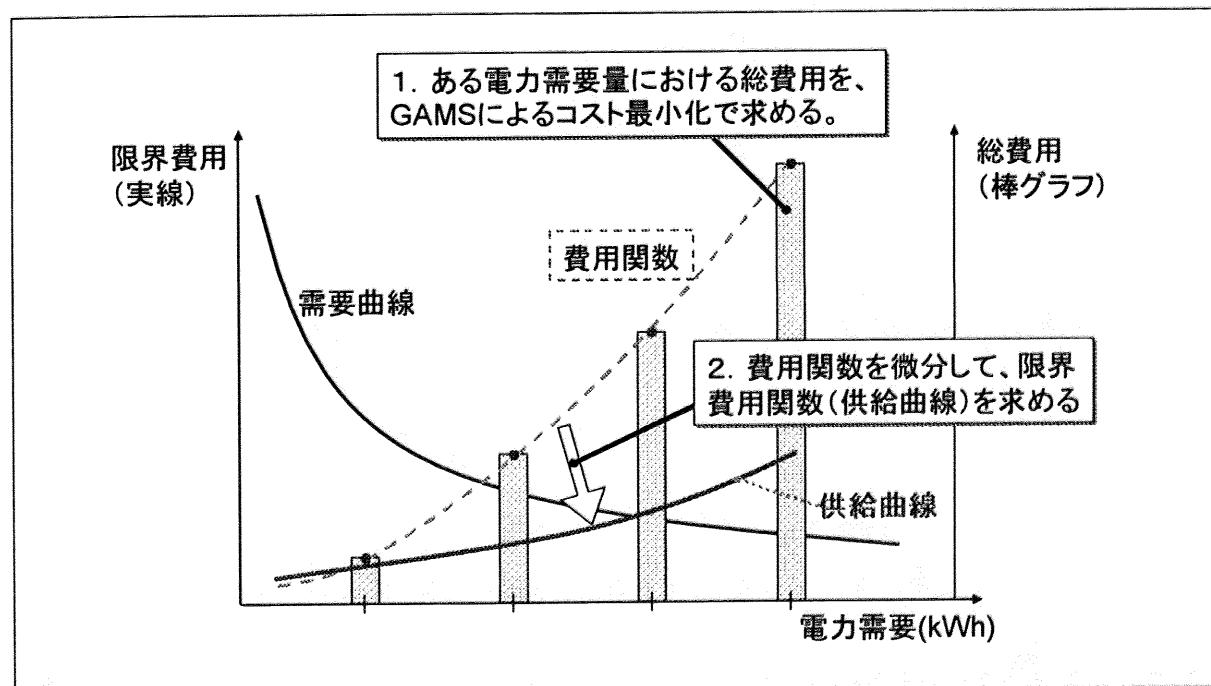


図 3-14 供給曲線の算出方法

注意点として、ここで考えている需要はアンケートで尋ねた5家電のみであることがある。GAMS(後述)で計画問題を解くときは、需要モデルとしてはその5家電の需要と給湯需要のみを考慮することとした。ここで給湯需要を考慮しているのは、多品質エネルギーネットワークが有する特長のひとつであるコーディネレーション(電熱併給)の利点を失わないようとするためである。

<sup>9</sup> より厳密には、ここで考慮している供給曲線は長期限界費用曲線であり、固定費用もすべて可変的としてみる。したがって設備投資等も費用関数には含まれる。

### 3.4.3.2 多品質エネルギーネットワークモデルの構築

#### (1) モデルの概要

費用関数を作成するため、多品質エネルギーネットワークモデルの需給構造をモデル化する。主に電力需給と熱需給の2つから構成される。図3-15がその概念図である。上側の図は電熱需給の全容図、下側の図は電力のみについて品質を分解した場合の需給概念図である。

多品質エネルギーネットワークの構造は、多品質な需要に応じるべく分散型電源で品質調整を行うシステムを想定する。系統からの購入契約も結んでいるが、系統自体からは現状品質のみの供給がなされるものとする(つまり多品質需要への対応を、各種分散型システムに任せているという想定。3.4.1.3.でも記述)。

ここでは各品質についての供給曲線を作成するので、下側の図の品質調整はある特定の品質についてのみの需給を考えるものであり、各品質を同時に生産することはない。なお系統からの供給電力を中・低品質に下げるとは想定しないが、中・低品質需要には過剰品質ながら供給可能であるとしている。

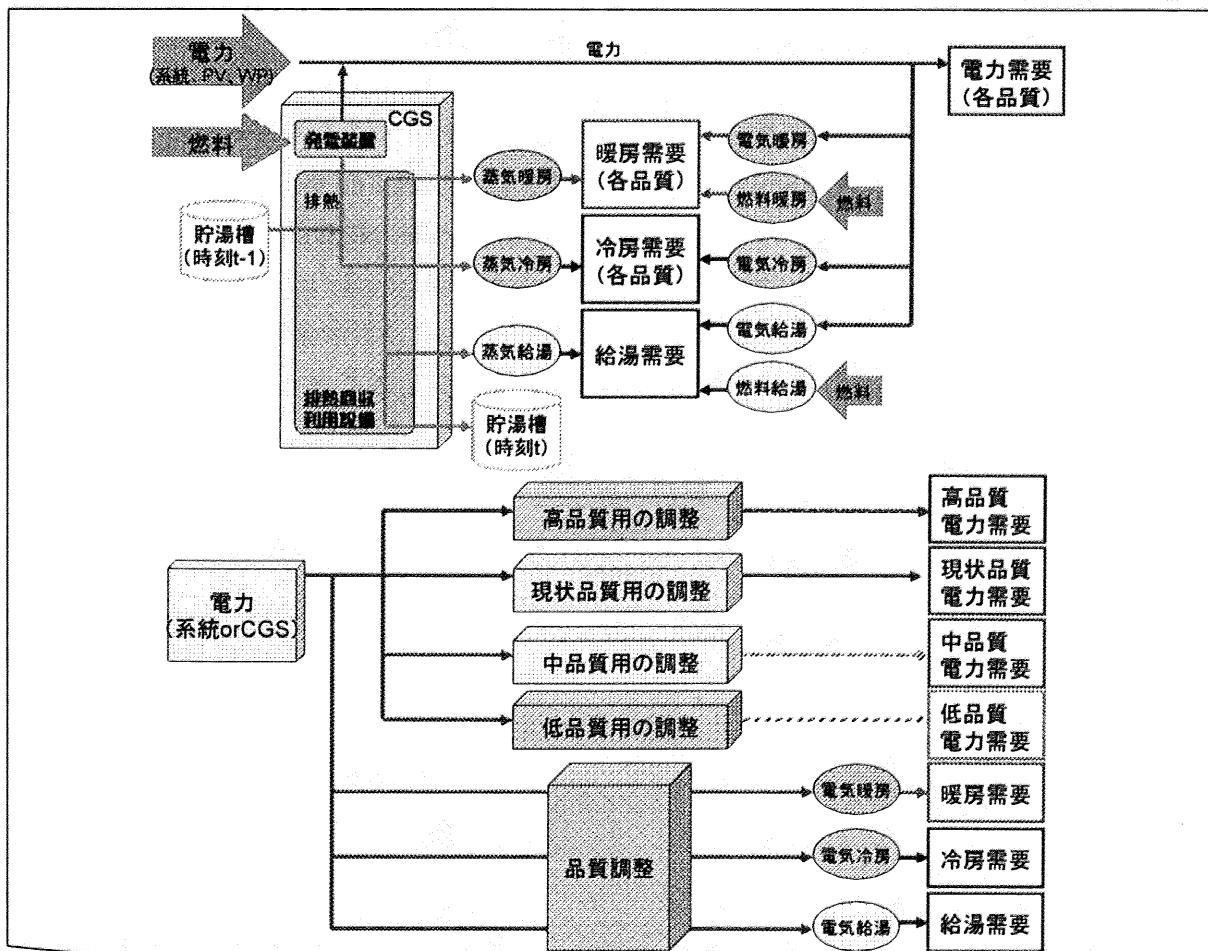


図 3-15 需給計画のイメージ

## (2) 使用したソフト

需給計画に使用したソフトは、GAMS (General Algebraic Modeling System) である。

GAMS は主として途上国の経済分析を行うために世界銀行で開発されたソフトウェアであり、現在では GAMS Development Corporation が開発・管理・販売している。GAMS の長所は解を求めるアルゴリズムの強力さだけでなく、数式を代数式のまま書き込むことができることとメモを書くのが容易なことが挙げられる<sup>34)</sup>。

## (3) 想定した多品質エネルギーネットワークシステム

ここでは想定した多品質エネルギーネットワークシステムにおける需要家の構成、供給側の機器構成等を設定する。

### 1) 規模の設定

約 2000 世帯の家庭が居住する小規模な地域を想定した。この規模を設定した理由は、この規模は国内にいくつもあるマイクログリッド実証研究<sup>35)</sup>の規模と同等であり、現実的に多品質エネルギーネットワークの導入可能性があると考えられるからである。

また一種の大規模団地であれば、100 世帯の集合住宅が 20 棟程度あるというのは現実離れしていない規模であり、シミュレーション対象としても十分現実的である。

### 2) 発電機の規模と台数の設定

想定したマイクログリッド内供給設備を表 3-4 に整理する。八戸市<sup>36)</sup>や坂東ら<sup>29)</sup>を参考にした。ただし各発電機はその台数がシミュレーションケースによって可変である。

「最大台数」は各発電機の導入台数の最大値であり、コスト最小化シミュレーションにおいては導入されないという結果もあり得る。PV、WP の最大台数は、最大電力需要の約 1 割程度の値を参考にした。また購入電力の上限値も、最大電力需要の約半分としてシミュレーションケースごとに設定した。

表 3-4 想定した発電機の種類、規模、最大台数

発電機	規模	最大台数(ケース 1, 2, 3, 4)
GE(ガスエンジン)	300kW	(1, 1, 2, 4)
PV(太陽光発電)	6kW	(1, 3, 5, 10)
WP(風力発電)	5kW	(1, 3, 5, 10)

### 3) 自然エネルギー機器の設定

太陽光発電の変換効率は 17% とし、イニシャルコストは 70 万円/kWh とした。発電規模  $y$  (kW) は、太陽光パネルの面積  $x$  (m<sup>2</sup>) を用いて以下の式の通り求めた。

$$y = 0.1217x + 0.0031 \quad (R^2 = 0.9991)$$

この式は、(株)シャープの製品情報カタログを用いて回帰的に求めた ( $N=4$ )<sup>36)</sup>。また発電に際する各種損失<sup>37)</sup>として、パワーコンディショナー損失 7%、素子温度上昇による損失(12~2月:冬期…10%、3~5月、9~11月:中間期…15%、6~8月:夏期…20%)、その他の損失(配線、受光面の汚れによる損失等)5%を想定した。ここでは発電規模を 6kW とするため、太陽光パネルの面積を 50m<sup>2</sup> と設定した。

風力発電は 5kW の規模を想定した。イニシャルコストは 30 万円/kWh とした。風速  $x$  (m/s) と発電量  $y$  (kWh/h) の関係は、風力発電ネットワークのホームページ<sup>38)</sup>より下式の通り回帰的に求めた ( $N=6$ )。

$$y = 0.0444x^2 - 0.3374x + 0.7421 \quad (R^2 = 0.9693)$$

以上の回帰式を元にした発電単価は、太陽光発電が 66.91 円/kWh、風力発電が 28.86 円/kWh となった。これは中間法人日本風力発電協会が公表した資料<sup>39)</sup>(太陽光発電 46~73 円/kWh、風力発電 10~14 円/kWh)と比較して、太陽光発電では大きく外れてはおらず妥当な数値であると言える。風力発電では約 2 倍の発電単価となっているが、この回帰式では 1 時間毎の平均風速を基にして計算しているため、短時間に吹く突風は平均化されている。このため発電量が本来より低く算出され、単価が高くなってしまったと考えられる。またこの発電単価は、各発電機の耐用年数 15 年、晴れの日が一年の 3.8 割として、耐用年数期間の平均値として算出したものである。

太陽光発電、風力発電の回帰は、図 3-16 に示す通りである。

今回のモデルで想定した具体的な全天日射量と風速は、現地データとの整合性検証の容易性の観点から、青森県八戸市の 05/2/11(冬期)、05/5/10(中間期)、05/8/27(夏期)のデータをアメダスより入手した。これらの日はいずれも晴天であった。

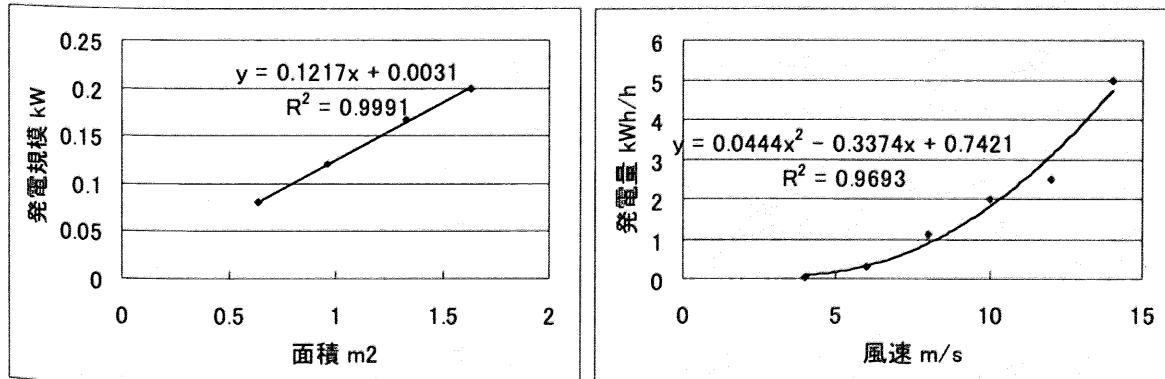


図 3-16 太陽光発電、風力発電の回帰図

#### 4) 部分負荷の設定

プログラム内では部分負荷率を内生変数とした。1時間毎の部分負荷率を求めた後、発電効率や熱回収量、各種コスト等を内生計算するという流れである。

最低負荷率は考慮せず、部分負荷の値は各機 0%～100%を自由にとる。また複数台ある発電機はすべて平等な発電量を生産するとする。例えば4台ある発電機の全体の負荷率が40%であれば、負荷率10%が4台あるとみなす。吉田ら<sup>40)</sup>による具体的な式を、発電機 ag(GE・300kWを表す便宜的な変数)を例として以下に列挙する。ただし熱回収量の式中の“0.3517”は定格出力による発電時の発電効率である。総合効率は80%として設定した。

・i 時の負荷率	:ag(i)
・発電機 ag の発電規模	:GE300("scale")
・発電機 ag の数	:numag
・i 時の発電量	:ag(i)*GE300("scale")
・i 時の発電効率(effag(i))	:0.1*ag(i)+(0.0324*log(GE300("scale")))+0.0669)*numag
・i 時の燃料消費量	:(ag(i)*GE300("scale")/effag(i))*numag
・i 時の熱回収量	:(ag(i)*GE300("scale")/effag(i))*numag*(0.80-0.3517)

#### 5) 各種効率の設定

各種変換効率<sup>29) 41)</sup>を以下の通り設定した。蒸気暖房効率と蒸気給湯効率は、CGSの排熱総量に熱回収効率を乗じた分からの効率として表現している。

蒸気暖房効率:1、蒸気吸収式冷凍機効率:0.9、蒸気給湯効率:1、電気暖房 COP:3.2、電気冷房 COP:2.6、電気給湯効率(ヒートポンプ COP):4、ガス暖房効率:1、ガス給湯効率:0.9

## 6) コストの設定

考慮したコストは、燃料費(天然ガス:NatureGasCost(i))、購入電力料金(電気料金と購入電力量の積(Elprice(i)\*Elpur(i)))、ガスエンジンイニシャルコスト(Ini)、その他各種イニシャルコスト(PV、WP、CGS にかかる各機器、鉛蓄電池)、ランニングコスト(人件費、メンテナンスコスト)、自家発補給電力料金の 6 種である。耐用年数はすべて 15 年と仮定し、15 年間の和を総コスト(万円/15 年)として下式の通り定義した。下記 TmpRunCost は、ランニングコストと自家発補給電力料金の和である。

$$\begin{aligned} \text{AllCost} = & (365/3) * (15) * (\sum(i, \text{TmpRunCost}(i)) + \sum(i, \text{NaturegasCost}(i))) \\ & + \sum(i, \text{ElPrice}(i) * \text{ElPur}(i)) + \text{Ini} \\ & + (\text{ガス基本料金}) * 12 * 15 + (\text{電力基本料金}) * 12 * 15 \\ & + (\text{RS 初期費用}) + (\text{GB 初期費用}) + (\text{RG 初期費用}) + (\text{TS 初期費用}) \\ & + (\text{PV 初期費用}) + (\text{WP 初期費用}) + (\text{BT 初期費用}) \end{aligned}$$

### ① 燃料費、購入電力料金

燃料費、購入電力料金は、下式<sup>4) 29) 42) 43)</sup>の通り設定した。需要家を大規模にネットワーク化しているため契約形態が産業用となっている。

・ガス従量価格(円/kWh)	:3.732 (=42.5 円/m <sup>3</sup> )
・ガス基本料金(円/月)	:18,900+420.71×(契約最大時間流量 <sup>10</sup> )+ 5.78×(契約最大需要月使用量 <sup>11</sup> )
・電力従量料金(円/kWh)	:ピーク時間 <sup>12</sup> :14.75、昼間時間 <sup>13</sup> :14.10(夏季) / 12.80 (その他季)、夜間時間 <sup>14</sup> :7.10
・電力基本料金(円/kW・月)	:1,175

### ② イニシャルコスト、ランニングコスト、自家発補給電力料金

イニシャルコスト、ランニングコスト、自家発補給電力料金は、吉田ら<sup>40)</sup>により下式の通り設定した。

・イニシャルコスト(万円)	: $(44 - 2.3886 * \ln(\text{発電規模(kW)})) * (\text{発電規模(kW)})$
・ランニングコスト(円/時)	: $(8.3429 - 0.8643 * \ln(\text{発電規模(kW)})) * \text{ag}(i) * \text{GE300("scale") / 10000}$
・自家発補給電力料金(円/月)	: $((\text{発電規模(kW)}) * 1,600 * 1.1 * 0.3)$

<sup>10</sup> 契約期間における 1 時間あたりの最大の使用予定量(m<sup>3</sup>/h)。

<sup>11</sup> 契約期間における最大需要期の契約月別使用量(m<sup>3</sup>/月)のうち最も大きいもの。

<sup>12</sup> 夏季の毎日 13 時から 16 時までの時間。ただし、休日等は除く。

<sup>13</sup> 毎日 8 時から 22 時までの時間。ただし、ピーク時間および休日等は除く。

<sup>14</sup> ピーク時間および昼間時間以外の時間。

### ③ CGSにかかる各機器

CGSにかかる各機器の設備費用は、専門家ヒアリングにより以下の通り設定した。

蓄熱槽の体積は50℃の湯を17℃の水から生成するのに必要な熱量を基に算出した。

・ RS(蒸気吸収式冷凍機) (円/台)	: 51,136(円/kW) × RS 出力規模(kW)
・ GB(ガスボイラ) (円/台)	: 28,409(円/kW) × GB 出力規模(kW)
・ TS(蓄熱槽) (円/台)	: 40,000(円/m <sup>3</sup> ) × TS 容量(m <sup>3</sup> )

### ④ ヒートポンプ

電気給湯としては家庭用ヒートポンプが導入されると仮定した。価格を以下の通り設定し、電気給湯における出力電力量から全体にかかる台数分の費用を算出した。17度の水を80度の湯に高めるという仮定をし、熱量計算を行った。

・ HP(ヒートポンプ) (円/台)	: 70(万円/台・400L) = 23,946(円/kWh)
--------------------	---------------------------------

### ⑤ 鉛蓄電池

鉛蓄電池の初期費用は、坂東ら<sup>5)</sup>により下式の通り設定した。

・ BT(インバータ含む) (円/台)	: 50,186(円/kWh) × BT 容量(kWh) + 410,570(円)
---------------------	---

## ⑥ 配電線費、地代

ここで想定している多品質エネルギーネットワークは、系統が既存である地域に対し新たにそのネットワークを構築するものである。したがってその構築にかかる各費用を考慮しなければならない。ここでは代表的なシステム構築費用として、配電線費と地代を考慮する。

配電線費は、ケーブルコスト、ケーブル施設コスト、地下埋設コストの合計として IAE で使用されており<sup>5)</sup>、本研究ではこれを引用する。引用元のデータは下表の通りである。

表 3-5 ケーブルの緒元と配電線費<sup>5)</sup>

容量、電流値	電圧、相数	配線長	ケーブルサイズ他	回線数	配電線費
1500kVA 131A	6.6kV 三相	230m	60sq 3芯(難燃)	2回線	400 万円

本来、配電線費は配電経路を確定した上で計上する必要があるが、ここでは仮に家庭用住居で構成される大規模な団地(20棟程度)を想定し、総配線経路を GE300kW 一台につき 1200m であるとする。また償却年数をガスエンジンと同じく 15 年と仮定すれば、配電線費は下式に基づき 417.4 万円/15 年と求まる。

$$400 \times (300/1500) \times (1200/230) = 417.4(\text{万円}/15 \text{年})$$

地代は IAE と同じく単価 8000 円/(m<sup>2</sup>・月)として計算する。GE300kW に要する面積を 4m × 4m とすれば、年間 153.6 万円/台の地代がかかる。

GE300kW の初期費用は約 9000 万円であり、配電線費、場所費用はその約 30%を占める。そこで本シミュレーションでは、配電線費、地代はガスエンジンのイニシャルコストの 0.3 倍分として算出することとする。

## 7) 品質調整方法の設定

3-4.1.3.で各品質の品質対策は設定した。ここで補償用の分散型電源と鉛蓄電池の容量を定める。

このシミュレーションでは、追加する分散型電源として GE300kW 1台を想定した。追加する鉛蓄電池の容量は、その対象品質の最大電力需要の1割とし、ケース毎に設定した。1割とした理由は、3-4.1.3.で電力需要総量の約2割を鉛蓄電池の容量とすることと最大電力需要を平均電力需要の2倍と仮定することから、鉛蓄電池の容量は最大電力需要の1割と求められるからである。

ただし PV、WP で高品質を供給する場合は、鉛蓄電池はその最大電力需要(最大電力供給)の3割とした。自然エネルギーはその出力変動の大きさから、本体のみを考えると GE よりは低い品質を提供していると考えられるためである。

また系統からの購入電力(現状品質)を高品質に高める場合、鉛蓄電池の容量はその高品質用購入電力の最大電力供給の1割とし、GE や SVC の追加は無いものとした。ただし GAMS の都合上、高品質用購入電力の最大電力供給量を表現することができなかつたため、図 3-17 の通り高品質電力(供給)量と鉛蓄電池の毎時価格を関係付けてモデルに組み込んだ。この式は、高品質電力量の1割の容量を満たす鉛蓄電池を購入した場合、そのために返済すべき購入金額を1時間あたりに換算したものである。年利は4%、耐用年数は15年と仮定している。具体的な元利均等返済方式の計算方法については、3-4.3.3.(1)の③に記述している。

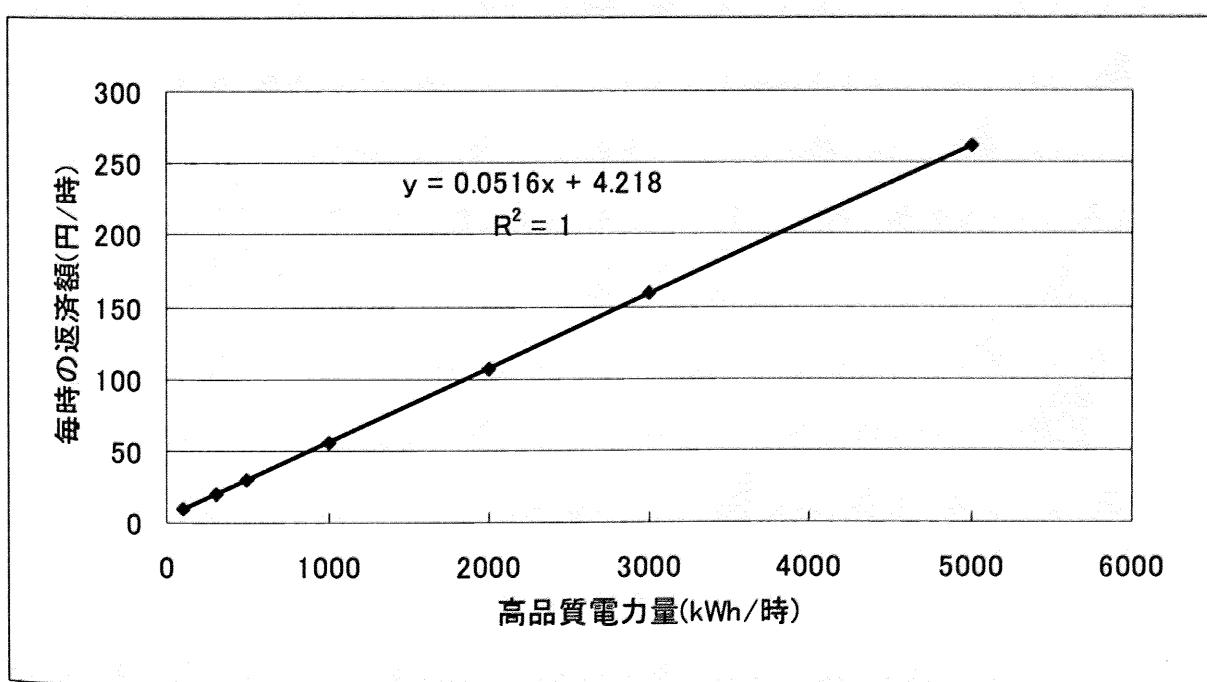


図 3-17 高品質電力量と鉛蓄電池の時間あたり返済額の関係

## 8) 需要家の設定

需要家としては、核家族世帯と単独世帯を考慮した。各世帯、河野<sup>44)</sup>によってエネルギー消費行動パターンが1時間間隔でばらつきをもって再現されており、その平均値をとって1世帯当たりのエネルギー需要を考慮した。需要値としては、アンケートで尋ねた5家電と、それ以外の熱需要(つまり給湯需要)のみとした。

具体的な需要値は図3-18の通りである。

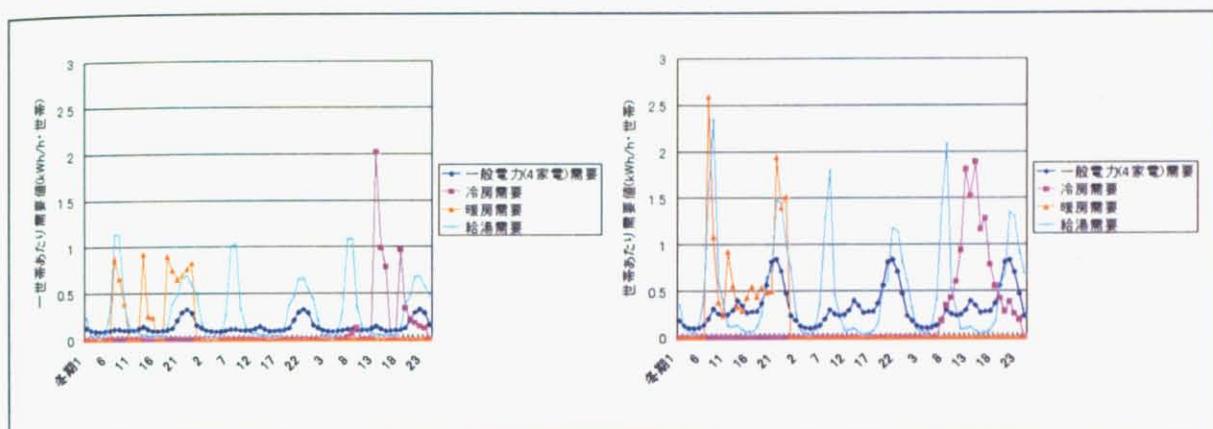


図 3-18 5家電と給湯のエネルギー消費パターン(左:単独世帯、右:核家族世帯)

## 9) 環境制約の設定

環境中品質、環境低品質の費用関数作成のため、これらの供給システムでは供給機器に制約を設けることを考慮する。その制約では、PVとWPを最大台数導入することを義務づける。当然CO<sub>2</sub>排出量は削減され、総コストは上昇することが予想される。

## 10) 発電単価、発電原単位の考察

以上で作成してきたモデルの妥当性を確認するため、ガスエンジン 300kWについて現状品質の生産における発電単価・原単位、熱単価・原単位を算出した。結果、GE300kWの総合単価が 16.3 円/kWh(負荷率 100%時)となり、概ね現状を再現できているとみなせる。

ただしこの値は蒸気吸収式冷凍機の出力規模を 400kWh、蓄熱層の容量を 900kWhとして算出した。また、電気料金、ガス料金共に基本料金を考慮していない。また、分散型電源の配電線費、地代も考慮していない。

また、参考までに CO<sub>2</sub>排出原単位を掲載するが、CO<sub>2</sub>排出原単位は次章 4-3.2.(4)で設定したものを利用した。

表 3-6 供給設備ごとの発電単価・原単位、熱単価・原単位

		発電		熱	
		発電単価 (円/kWh)	発電原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)	熱単価 (円/kWh)	熱原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)
CGS※1	GE300	30%	13.067	0.250	20.795
		70%	8.343	0.237	11.626
		100%	7.154	0.228	9.119
購入電力※2 ※2 夏期の時間 帯平均値。	1~8,23~24	7.100	0.196		
	9~13,17~22	14.100	0.301		
	14~16	14.750	0.318		
ガス暖房				3.387	0.182
購入電力暖房 COP 3.2	1~8,23~24			2.219	0.061
	9~13,17~22			4.406	0.094
	14~16			4.609	0.100
ガス給湯				3.763	0.203
購入電力給湯 COP 4.0	1~8,23~24			1.775	0.049
	9~13,17~22			3.525	0.075
	14~16			3.688	0.080

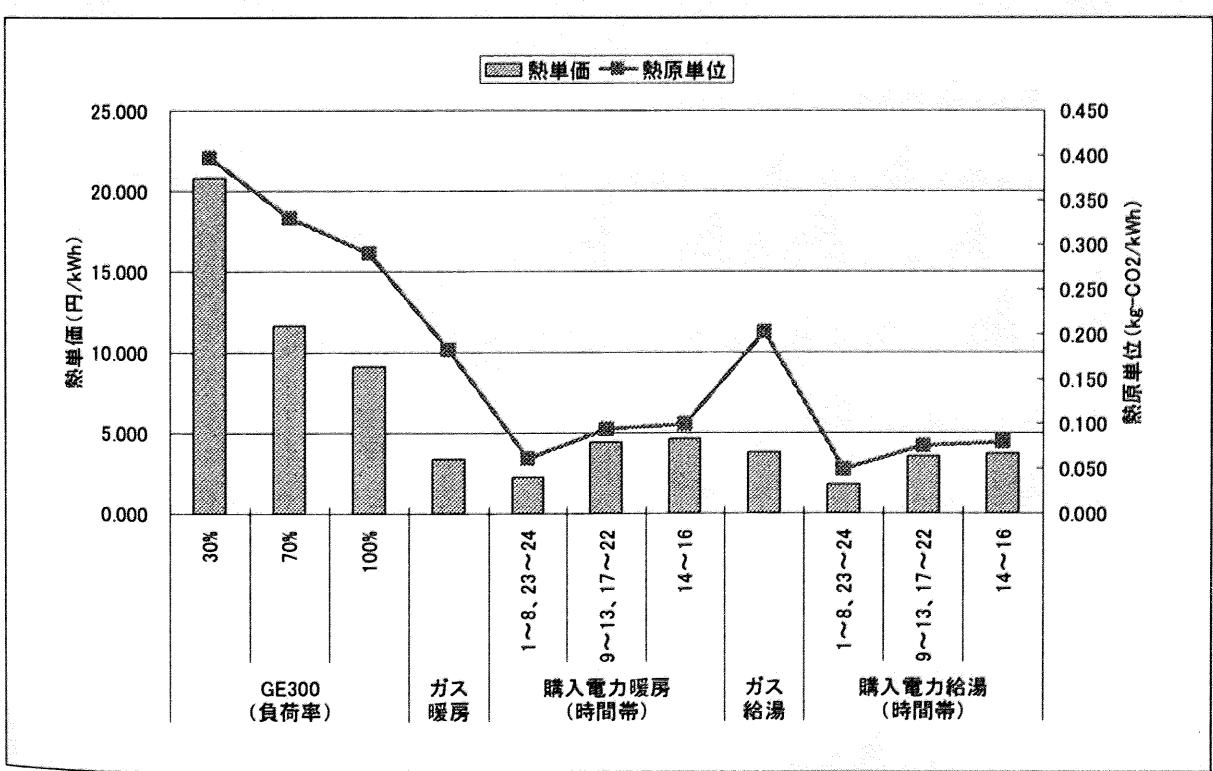
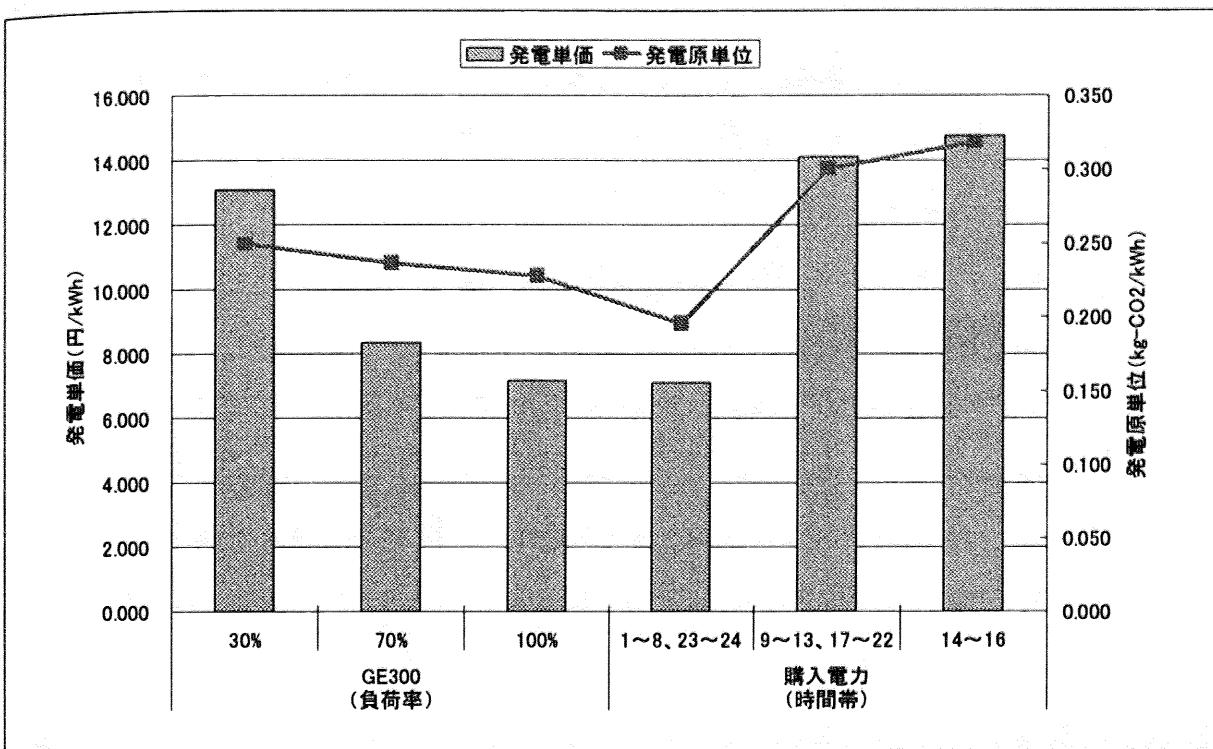


図 3-20 供給設備ごとの熱単価(円/kWh)と熱原単位(kg-CO<sub>2</sub>/kWh)

#### (4) シミュレーションケース

想定したケースは4つである。2000世帯分の需要曲線とうまく重なるよう供給曲線を算出するため、需要曲線上の複数の点を取り(ここではケース数、すなわち4点)、近似することとした。表3-7がケースごとの設定である。

表 3-7 ケース設定

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
核家族世帯数	100	250	500	1000
単独世帯数	100	250	500	1000
GE300kW の台数	1台	1台	2台	4台
一般電力需要と冷暖房需要(需要負荷を電力購入量に換算)の総量(kWh・月(3期平均値))	47134	117835	235671	471342
最大電力需要(kWh/h)	113.2	282.9	565.8	1131.6
購入電力量の上限(kWh)	50	125	250	500