

東京大学大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

2004 年度修士論文

住宅における需要の不確実性を考慮した
コージェネレーションシステムの最適運用戦略の検討

学籍番号 36212
氏名 室園 晃徳
指導教員 山地 憲治教授

(2005 年 2 月 14 日提出)

内容梗概

近年、需要家に合わせた小規模エネルギーシステム、特にコージェネレーションシステム（CGS）が注目されている。その中でも、固体高分子燃料電池（PEFC）やガスエンジン（GE）による戸建住宅向けの数 kW クラスの超小型 CGS、いわゆるマイクロコージェネが開発・発売されつつある。今後の高効率化、低コスト化によってマイクロコージェネが各家庭に広く浸透すれば、民生部門におけるエネルギーコスト削減、省エネルギーを促進できる可能性がある。

コージェネレーションシステムには、高いエネルギー利用効率、需要家のエネルギーコスト削減といった大きなメリットがある。しかし小規模な需要家、とりわけ一般家庭への CGS の導入あたって幾つかの問題点があり、これらのメリットを完全に活かすことは容易ではない。一般家庭においては構成機器が少なく、その利用も個々の生活に依存することから負荷の増減が激しく、負荷の集中する時刻も日々変化し一定でない。そこでこのような不確実性の含まれる需要に対応した効率的な CGS の運用方法というものが必要となる。

そこで、本研究では、ボトムアップシミュレーションによって不確実性のある詳細な負荷データを生成し、確率動的計画法を用いてその需要に対応した最適な CGS の運転スケジュールを決定する手法を考案・検討する。

本論文は、第一章の序論、第二章～第五章の本論、第六章の結論から構成される。

第一章では研究の序論として現状を取り巻く背景を概観した後、本研究の意義を明確にした。

第二章にて、家庭における不確実な需要を生成することの出来るボトムアップシミュレーションモデルを構築する。このモデルでは、需用家の人員構成と各人の行動を決め、その行動に関連する機器の負荷を積み上げることによって詳細な日負荷曲線を得ることが出来る。また、現実の統計値等と比較して、その妥当性を検証する。

第三章では、本研究で設定した CGS モデルの概要について説明した。

第四章では、実際に確率動的計画法を用いて CGS の動作を決定し、CGS 運用シミュレーション手順の実例を示した。

第五章では、CGS 運用シミュレーションの結果と、モデル中で設定した各パラメータの値に対する感度解析を行い、パラメータの決定を行い、本手法の詳細な評価を行った。

最後に、第六章にて本論文で得られる知見および今後の課題・展望を述べた。

目次

第一章 序論	1
1. 1. 本研究の背景	1
1. 2. 本研究の目的	2
1. 2. 本論文の構成	3
第二章 エネルギー需要のボトムアップシミュレーション	4
2. 1. ボトムアップシミュレーションの方法	4
2. 2. 季節依存性のない電気機器のモデリング	4
2. 2. 1. 世帯構成とその生成	4
2. 2. 2. 世帯に付属する電気機器とその生成	5
2. 2. 3. 世帯構成員の在宅起床スケジュール	6
2. 2. 4. 電気機器の起動停止スケジュール	6
2. 2. 5. シミュレーションの実行	6
2. 3. 季節依存性のある機器に関するモデリング	6
2. 3. 1. 冷房機器としてのエアコン	7
2. 3. 2. 暖房機器	8
2. 3. 3. 冷蔵庫	9
2. 4. ガス機器のモデリング	10
2. 4. 実測データとの比較・検討	11
第三章 コージェネレーションシステムのモデル化	14
3. 1. コージェネレーションシステム (CGS) とは	14
3. 2. CGS を導入したモデルの構成	14
3. 2. 1. モデルの特徴	14
3. 2. 2. モデルの仕様	15
3. 3. モデルの定式化	17
3. 3. 1. モデル全体の定式化	17
3. 3. 2. 確率動的計画の定式化	18
第四章 確率動的計画法の手順	20
4. 1. 負荷遷移確率の導出	20
4. 1. 1. 負荷量遷移数の導出	20
4. 1. 2. 正規分布補間	21
4. 1. 3. 負荷遷移確率	23

4. 2. CGS 動作表の作成	23
4. 3. CGS 動作シミュレーション	24
第五章 確率動的計画の結果と考察	27
5. 1. 正規分布補補間時の分散に対する感度解析	27
5. 1. 1. 正規分布補間の感度解析	27
5. 1. 2. 補間の方向に対する詳細な解析	31
5. 2. 過去の日負荷曲線の取得日数に対する感度解析.....	33
5. 3. 離散化の精度に関する感度解析	34
5. 3. 1. 電力負荷の離散化精度に対する感度解析	35
5. 3. 2. 熱負荷の離散化精度に対する感度解析	36
5. 3. 3. タンク内湯量の離散化精度に対する感度解析	37
5. 4. まとめ	38
第六章 結論	39
6. 1. 本研究の成果	39
6. 2. 今後の課題・展望	39
謝辞	41
参考文献	42
発表文献	43

第一章 序論

1. 1. 本研究の背景

1999年の二度目の電気事業法改正により、2000年3月より初めて一般企業に電力の小売りが許された。ここではまだ部分自由化にとどまっているが、自由化の流れは今後本格化していくものと考えられる。

また、家庭部門のエネルギー需要は、第一次石油危機(1973年)以降、生活水準の向上とともに、非常に高い伸び率を示してきた。2001年の家庭用エネルギー消費は1973年のそれと比較して2.2倍となっている[1]。こうした傾向は今後も続くものと予想されている。

そのような中、次世代の省エネルギー技術として、コージェネレーションシステム(以下、CGSと表す)が注目を集めている。CGSとは、その名(Co-Generation System)が示すとおり、一つのエネルギー源から複数の形のエネルギーを生み出すシステムである。現在、一般にCGSと呼ぶ場合には石油・天然ガスを燃料として、エンジンまたはタービンで発電機を動かして電力を得、同時に発生する排熱を暖房・給湯などの熱源として供給するシステムの事を指す場合が多い。これまでにディーゼルエンジン、ガスエンジン、ガスタービン型CGSが実用化・市販されている。また、この他にも発電時に高温となる特性を活かした燃料電池型CGSがある。

大規模集中発電では燃料のエネルギーの約半分を電力に変換できるが、発電したエネルギーの約6%は送電の過程で失われる。一方、分散型発電で電力にできる割合は大規模集中発電より低く、天然ガスを使ったコージェネでは20~25%程度となる[2]。だが送電に伴う損失がほとんどなく、排熱も利用できるため、エネルギー効率は70~85%となり、電力と熱を別個に得る従来のシステムに比べて格段にエネルギーの利用率が高まる。このため、CGSでは電力と熱を含めた総合エネルギー効率で25[%]程度の省エネルギー化が実現できるとされている。

これまでも、ディーゼルエンジンやガスタービンによる自家発電システムやこれらを利用したコージェネレーションシステム(Co-generation System : CGS)は使用されてきたが、発電能力は数百kW~数千kW程度のものを中心とし、最も小さいものでも数十kW程度であった。これらのものは、主として大規模事業所の中でも総エネルギー需要に占める熱需要の割合が大きい業種を中心に導入されてきた。産業用では製紙工場、食品工場などに、民生用では病院、事務所、福祉施設、工場、レジャー施設、ホテル、ショッピングモール、大規模複合施設などである。これに対して、近年、数kWクラスの超小型CGS、いわゆるマイクロコージェネが開発・発売されつつある。特に、固体高分子形燃料電池(Polymer Electrolyte Fuel Cell : PEFC)やガスエンジン(Gas Engine : GE)による戸建住宅向けの数kWクラスマイクロコージェネレーションシステムが注目されている。2002年3月には家庭用の1kWガスエンジンCGSが市販されている。また、2005年2月より1kWPEFCGSがレース販売される。今後の高効率化、低コスト化によってマイクロコージェネが各家庭に広く浸透すれば、家庭部門における省エネルギー化を促進できる可能性がある。

1. 2. 本研究の目的

コージェネレーションシステムには

- ・高いエネルギー利用効率による1次エネルギー削減効果と低い環境負荷
- ・需要家のエネルギーコスト削減

といった大きなメリットがあり、その運用に当たってはこれらのメリットを最大限に生かす必要がある。しかし小規模な需要家、とりわけ一般家庭へのCGSの導入あたって幾つかの問題点があり、これらのメリットを完全に活かすことは容易ではない。一般家庭へのCGSの導入の際に問題となる主な事柄は以下の通りである。

① 熱電比の問題

これまで、CGSの導入が進んできた業種は、業務用では飲食店、クリーニング店、ホテル、銭湯、旅館など、総エネルギー需要の中でも、温水需要に代表されるように熱需要の占める割合が大きい業種であった。現在市販されているCGS製品もエンジン方式の場合で熱電比は3:5程度であり、出力全体に占める熱の割合が大きい。さらに、ガスタービン方式の場合では2:5程度と、さらに熱の占める割合が大きくなる。このため、一定量以上の熱需要が無いとCGSの経済的な運転が困難であり、CGSの導入は難しい。このようにCGSの出力全体に占める熱の割合が大きいため、CGSの運用パターンは需要家の熱需要に大きく依存することになる。しかしながら、CGSの運用パターンは需要家の熱負荷のみに合わせて決定すればよい訳ではない。需要家の電力需要と熱需要の両方を考慮して適切な時刻に適切な時間だけ運転する必要があり、CGSの出力の熱電比も考慮した最適な運用法が必要となる。

② 負荷変動の問題

工場、複合施設などの大規模需要家のように様々な種類の負荷が多数接続されており、電力・熱負荷曲線が比較的平準化されて急激な負荷変動が起こりにくい場合においては、需要家の日負荷曲線の推測及びCGSの運用パターンの決定が比較的容易である。しかし、一般家庭の場合は負荷として接続される機器数も少ないため負荷が激しく増減し、さらに負荷が短時間に集中し(特に、熱負荷)、負荷の集中する時刻も日々変化し一定でない。また、一般家庭の場合では、負荷曲線の形も居住者の家族構成、年齢層、ライフスタイルにより千差万別であり一般的な形は無い。このような需要家ではCGSの効率的な運転は難しく、CGSの持つメリットも十分に活かされない。

一般家庭でCGSを運用するには、以上のように大きく分けて2つの問題がある。とりわけ、後者は重要である。詳しい負荷の情報は、実際に計測を行えば得ることができるが、長期間にわたって計測を行うには、労力や費用がかかるという問題がある。そこで、計測を行わずに、シミュレーションによってこれらの情報を得ることが考えられる。1日の時刻別エネルギー需要(日負荷曲線)を得る1つの方法としてボトムアップシミュレーション

モデルがある[3]。ボトムアップシミュレーションモデルとは世帯の中にある電気・ガス機器個々の時刻別需要をシミュレーションにより生成し、それらの和として世帯の需要を算出するシミュレーション型のモデルである。

また、CGS の排熱出力は大きくないため、ボイラ機器と異なり熱負荷に追従して運転を行うことは出来ない。そのため、熱負荷の訪れる時刻を予想した上で、予め排熱を併設する蓄熱槽に蓄えておき、熱負荷が訪れたときに必要に応じて蓄熱槽から熱を供給する形になる。CGS のメリットを活かす効率的な運転のためには、需要家の電力・熱機器使用傾向、CGS の性能、電力・ガス価格を考慮した CGS 運用パターン決定法の作成が必要不可欠である。その手法として、状態間の移動確率から期待値を求める確率動的計画法の活用が考えられる。

よって本研究では、ボトムアップシミュレーションによって不確実性のある詳細な負荷データを生成し、確率動的計画法を用いてその需要に対応した最適な CGS の運転スケジュールを決定する手法を考案・検討する。

1. 3. 本論文の構成

本章では研究の序論として現状を取り巻く背景を概観した後、研究の目的を述べた。

第二章にて、家庭における不確実な需要を生成することの出来るボトムアップシミュレーションモデルを構築する。このモデルでは、需用家の人員構成と各人の行動を決め、その行動に関連する機器の負荷を積み上げることによって詳細な日負荷曲線を得ることが出来る。また、現実の統計値等と比較して、その妥当性を検証する。

第三章では、本研究で設定した CGS モデルの概要について説明した。

第四章では、実際に確率動的計画法を用いて CGS の動作を決定し、CGS 運用シミュレーション手順の実例を示した。

第五章では、CGS 運用シミュレーションの結果と、モデル中で設定した各パラメータの値に対する感度解析を行い、パラメータの決定を行った。

第六章では、モデルにおいて過去の需要の遷移過程を考慮することによって、さらなる効率の向上を目指した。

最後に、第七章にて本論文で得られる知見および今後の課題・展望を述べる。

第二章 エネルギー需要のボトムアップシミュレーション

2. 1. ボトムアップシミュレーションの方法

世帯の中にある電気・ガス機器個々の時刻別需要をシミュレーションにより生成し、それらの和として世帯の需要を算出する。まず、各世帯の世帯構成員及び世帯に付属する電気・ガス機器を決定する。次に、NHK 国民生活時間調査[4]に基づき、1日毎に各世帯構成員の起床及び外出スケジュールをシミュレートする。各世帯構成員の起床在宅スケジュールが決定された後、各世帯構成員の行動を電気・ガス機器と関連づけ、各時刻における電気・ガス機器の使用状況を決定し、時刻別消費エネルギーを算出する。

シミュレーションの各ステップは以下の通りである。

Step1：世帯構成員及び世帯に付属する電気・ガス機器のリストを作成する。

Step2：世帯構成員の起床在宅スケジュールを作成する。

Step3：各機器について起動停止スケジュールを生成する。

Step4：シミュレーション結果を日負荷曲線などにまとめる。

各ステップについて以下の節で説明を加える。

2. 2. 季節依存性のない電気機器のモデリング

本節では季節依存性のない電気機器の各ステップについて述べる。

2. 2. 1. 世帯構成とその生成

生活行動のパターンを類型化することにより世帯構成員を勤め人、家庭婦人、子供(10～19歳)、大学生、高齢者(70歳以上)の5種類に分類し、世帯種類の構成比を設定する[5]。表2. 1に世帯構成を示す。モデルでは、この世帯構成を外生的に与え、一様乱数により世帯を決定する。

表 2-1 世帯種類の設定

世帯員数	世帯構成員					構成比率 (%)
	勤め人	家庭婦人	子供	大学生	高齢者	
1	1	0	0	0	0	16
1	0	0	0	1	0	2
1	0	0	0	0	1	5
2	2	0	0	0	0	12
2	1	1	0	0	0	7
2	1	0	1	0	0	4
3	2	0	0	0	1	1
3	1	1	0	0	1	1
3	1	1	1	0	0	9
3	1	1	0	1	0	1
3	2	1	0	0	0	7
4	3	1	0	0	0	4
4	2	1	1	0	0	10
4	1	1	2	0	0	6
4	2	1	0	1	0	1
4	1	1	1	1	0	1
4	1	1	0	0	2	1
5	2	1	2	0	0	1
4	1	1	2	0	0	9
5	1	1	1	1	1	2

2. 2. 2. 世帯に付属する電気機器とその生成

住宅で使用される電気機器の表現方法としてここでは行動分類、当該機器使用確率、動作時間、単位消費電力、待機時電力、利用回数限度、普及率の7つの属性を用いた。各属性について以下に詳しく述べる。

- I. 行動分類(睡眠、起床在宅(在宅しており起きている状態)、外出、炊事、洗濯、掃除、身のまわりの用事、テレビ、レコード・CD、ビデオ、PC(マスメディア接触で代用)) : これらの分類はNHK 国民生活時間調査に基づくもので、特にエネルギー消費に関係の深い行動を取り上げている。各機器にこの行動の内の1つを割り当てることによって世帯構成員の行動と機器の使用を関連付けることができる。
- II. 当該機器使用確率 : ある行動が行われている状況下での機器の条件付使用確率。世帯構成員がある行動をしているとき、関連する機器をある確率で使用することを示している。
- III. 動作時間(最小値、最大値) : 機器の動作継続時間。代表的な動作継続時間(分)で表す。
- IV. 単位消費電力(最小値、最大値) : 機器使用時の消費電力。代表的な消費電力(W)で表す。
- V. 待機時電力(最小値、最大値) : 機器の待機時の消費電力。代表的な消費電力(W)で表す。
- VI. 利用回数限度 : 機器の1日最大使用可能回数。これは同一の機器が過度に使用されることを防ぐために用いる。例えば、炊飯器が1日に10回使用されるのは不自然である。
- VII. 普及率 : 該当機器の普及率[1]。各世帯における機器の有無をシミュレートする際に用いる。

季節依存性のない機器として考慮する電気機器及びその属性を表2. 2に示す。

表 2-2 季節依存性のない電気機器とその属性

電気機器	行動分類	動作時間(分)		単位消費電力(W)		待機時電力(W)		利用回数 限度	当該機器使用確率(%)				普及率 (%)
		Min	Max	Min	Max	Min	Max		睡眠後	起床後	外出後	帰宅後	
照明(世帯共通)	起床在宅	10	30	150	225	0	0	999	10	50	5	80	100
照明(各個人)	起床在宅	5	10	100	150	0	0	999	10	30	5	60	100
電気炊飯器	炊事・掃除・洗濯	30	60	200	600	0	10	2	15	40	5	70	70
電子レンジ	炊事・掃除・洗濯	5	5	400	800	0	10	3	0	20	0	60	100
電気ポット	炊事・掃除・洗濯	15	20	800	1200	30	40	2	0	30	0	70	67
掃除機	炊事・掃除・洗濯	20	60	300	900	0	0	2	5	35	10	50	98
ドライヤー	身のまわりの用事	5	5	900	1500	0	0	1	5	10	0	70	85
洗濯機	炊事・掃除・洗濯	30	60	300	400	0	0	2	0	30	10	40	100
テレビ(1台目)	テレビ	10	60	70	210	5	15	999	5	25	10	45	100
テレビ(2台目)	テレビ	5	30	50	150	4	10	999	5	15	5	35	74
オーディオ機器	CD・テープ	30	90	30	100	5	20	999	10	40	5	80	65
ビデオ	ビデオ	20	90	150	250	10	20	999	5	20	10	70	77
パソコン	マスメディア接触	20	90	100	250	5	15	999	0	15	5	50	50

2. 2. 3. 世帯構成員の在宅起床スケジュール

住宅における電気機器の使用は世帯構成員の在宅起床スケジュール（何時から何時まで在宅し、起床しているか）に依存する。起床在宅スケジュールを以下の方法で生成する。

NHK 国民生活調査データより時刻別睡眠確率及び睡眠時間分布が得られ、これらのデータから時刻別起床確率及び起床時間分布を算出する。次に時刻 τ の起床開始確率を未知変数にとり、起床時間分布に基づくシミュレーション（ただし、正規分布、及び1日に1回の睡眠を仮定）により $t > \tau$ の各 t における時刻 τ に起床した世帯構成員の起床確率を求める。これらを全ての t (1日) について合計することにより時刻別起床確率の暫定値が計算できる。そこで、未知変数を、暫定値と上記の時刻別起床確率データとの差の2乗和が最小になるように操作することにより、起床開始確率の推定値が得られる。

次に、外出開始確率が必要となるが、これもNHK国民生活調査データから得られる時刻別在宅確率と在宅時間分布から、在宅開始確率と同様の考え方を適用して推定値を求める。

以上の起床開始確率と外出開始確率に基づいて各世帯構成員の起床在宅スケジュールをシミュレートすることができる。

2. 2. 4. 電気機器の起動停止スケジュール

機器起動確率を以下のように生成する。

(機器起動確率) = (当該機器使用確率) × (起床在宅下における時刻別分類別行動確率)

「起床在宅下における時刻別分類別行動確率」とは分類別行動を行っている世帯構成員の起床在宅している世帯構成員全体に占める割合で、NHK国民生活調査よりデータが得られる。当該機器使用確率は実在しないので、妥当と考える想定値を使用する。機器の停止は、電気機器属性で設定した機器運転継続時間後に行う。

2. 2. 5. シミュレーションの実行

冬期(2月)、中間期(5月)、夏期(8月)のそれぞれ平日と休日、あわせて6パターンのシミュレーションを行った。それぞれの5分毎の各時点での機器起動確率を求め、それに単位消費電力を掛けることによってその機器の使用電力を求めた。その後、それらを積分することによって、日負荷曲線を生成した。

2. 3. 季節依存性のある機器に関するモデリング

住宅には機器の使用、消費電力等が気温に依存する機器が多く存在する。特に冷暖房機器は世帯全体の日負荷曲線を得るためには欠くことができない。そこで、いくつかの機器に注目し、測定結果を用いたモデリングを試みた。なお、本節では、モデルの基本的な部分については前述の季節依存性のない機器と同様であるため省略し、新たに考慮した部分についてのみ述べる。

2. 3. 1. 冷房機器としてのエアコン

簡単のため、居間で使用されているエアコンを対象に冷房需要についてモデル化を行う。エアコンには冷房時にエアコンと同様の動作をするクーラーも含めている。居間で使用されているエアコンについては、消費電力量が外気温と強い相関性があることがわかっている[3]。実際の機器の使用に関しては外気温より室温の影響が強いと考えられるが、室温を用いたモデル化は室温自体をモデル化しなければならないため非常に困難である。そこで、室温ではなく外気温を用いてモデリングを行う。

エアコンを使用するかどうかの起動条件を外気温に従って確率的に決定することが考えられる。そこで、当該機器使用確率が外気温によって変化すると仮定する。世帯毎にエアコンを使用し始める温度 (T_a) とエアコンを高い確率で使用する温度 (T_b) の2つの温度を設定することにより、外気温による使用確率を決定する。さらに、時刻による使用確率として、時刻毎に使用確率を設定する。時刻による使用確率は世帯によって変化させず、一定であるとした。この2つの使用確率と外気温から当該機器使用確率を決定する。当該機器使用確率の算出は以下のように行う。

$$(\text{当該機器使用確率}) = (\text{外気温による使用確率}) \times (\text{時刻による使用確率})$$

$$P_{i,j} = \begin{cases} 0 & (T_j \leq T_{a,i}) \\ 100 \times \frac{T_j - T_{a,i}}{T_{b,i} - T_{a,i}} & (T_{a,i} < T_j < T_{b,i}) \\ 0 & (T_j \geq T_{b,i}) \end{cases}$$

$P_{i,j}$: 世帯 i における時刻 j の使用確率 (%)

$T_{a,i}$: 世帯 i のエアコンを使用し始める温度 (°C) ($22 < T_{a,i} < 26$)

$T_{b,i}$: 世帯 i のエアコンを高い確率で使用する温度 (°C) ($28 < T_{a,i} < 32$)

T_j : 時刻 j の外気温 (°C)

また、機器の属性は以下のように設定した。

稼働継続時間：起動と停止を繰り返すのはあまり現実的ではないと考えられるので、起動した後、30 以上作動し続けるとした。

単位消費電力、待機電力：単位消費電力については、立ち上がり時と定常時において異なることがわかっているが、簡単のため消費電力は一定であると仮定した。代表値として、最大値 800[W]、最小値 200[W]とした。待機電力についても同様に、最大値 10[W]、最小値 0[W]とした。

その他の属性：行動分類については、機器の使用に関連する行動は特にないと思われるので、起床在宅であれば使用できるとした。さらに居間で使用される機器をモデル化するにあたり、起床在宅であれば居間に世帯構成員がいると仮定し、機器を使用できる状態であるとした。普及率については、85%とした[1]。

2. 3. 2. 暖房機器

前述の冷房機器としてのエアコンの場合と同様の考え方をを用いて暖房機器のモデリングを行う。

対象機器として居間で使用されている暖房機器のうち、エアコン、電気ファンヒータ、電気ストーブ、こたつ、ホットカーペットを考慮する。ここで、エアコンは冷房機器としてもモデル化しているが、冷房時に使用するが暖房時には使用しないといった場合が考えられるので、冷房時のエアコンと区別して扱うことにした。また、電気ファンヒータと電気ストーブは使用方法、消費電力において同様と考えられるので、同一の機器（電気ヒータ）として扱う。暖房機器の使用は室温に依存すると考えられるが、冷房機器としてのエアコンの場合と同様に機器の起動については外気温と相関があると仮定し、当該機器使用確率が外気温によって変化すると考える。

当該機器使用確率の算出方法としては、世帯毎に暖房機器を使用し始める温度 (T_c) と暖房機器を高い確率で使用する温度 (T_d) を設定し、これらの温度によって決まる使用確率と機器の種類毎に設定した時刻毎の使用確率を掛け合わせることで当該機器使用確率を算出する。

まず、外気温による使用確率は世帯毎に設定された T_c と T_d と、各時刻の外気温から算出する。 T_c は 13 度から 18 度まで、 T_d は 0 度から 5 度まで 1 度刻みで設定する。なお世帯毎に決定した温度は機器構成の影響はなく、どの機器においても同等であると仮定する。

次に、時刻による使用確率を設定する。これは暖房機器の特徴から機器の種類によって異なると考えられる。しかし、先に算出した使用確率が起床在宅下での使用確率ではないため、その確率をそのまま時刻による使用確率とできないので、1 日を睡眠後、起床後、外出後、帰宅後の 4 時間帯に分けて、各時間帯において妥当であると思われる値を使用確率として用いた。

また、各暖房機器の属性は以下のように設定した。

消費電力、待機電力：暖房機器における消費電力は起動時と定常時において異なり、モデル化が難しいと考えられる。そこで、消費電力は使用中一定であると仮定し、各暖房機器の消費電力の最小値、最大値を決定した。同様にして待機時電力についても、その最小

値、最大値を決定した。

普及率：統計データを用いた[1]。

その他の属性：基本的に冷房機器としてのエアコンと同様であり、行動分類については、起床在宅とした。動作時間については、起動と停止を繰り返すのはあまり現実的ではないと考えられるので、一定時間以上運転を続けることにした。

冷・暖房に用いる機器機器及びその属性を表 2. 3 に示す。

表 2-3 冷・暖房機器とその属性

電気機器	行動分類	動作時間(分)		単位消費電力(W)		待機時電力(W)		当該機器使用確率(%)				普及率(%)
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	睡眠後	起床後	外出後	帰宅後	
エアコン(冷)	起床在宅	30	120	200	800	0	10	2	10	2	25	85
エアコン(暖)	起床在宅	30	120	400	1000	0	10	2	10	1	25	85
電気ヒーター	起床在宅	15	90	300	700	0	0	2	10	2	30	19
ホットカーペット	起床在宅	10	60	100	450	0	0	2	20	2	30	55
こたつ	起床在宅	10	30	80	250	0	0	5	15	5	40	75

2. 3. 3. 冷蔵庫

これまでの研究により、冷蔵庫の電力消費量は気温に依存していることが分かっている[3]。そこで、外気温を用いて電力消費量の変化をモデリングする。

冷蔵庫の年間電力使用量に占める 1 日あたり電力使用量の割合を需要比とすると、1 日平均外気温と需用比の相関は図 2-1 のようになり、強相関がある。この相関を用いてモデリングを行う。

まず、機器属性の中の単位消費電力の代わりに、年間電力消費量を入力とする。最近の冷蔵庫のカタログ値が年間電力消費量で表記されていることから入力データとして不適切ではないと考えられる。

次に、各世帯の冷蔵庫の年間電力消費量と入力として与える気温データから、時刻毎の電力消費量を計算する。実際の消費電力は時刻毎に変化しているので、ここに正規分布に従った乱数を掛ける。年間電力消費量は最大値 500[kWh]、最小値 200[kWh]とした。また、冷蔵庫の普及率は 100%とした。

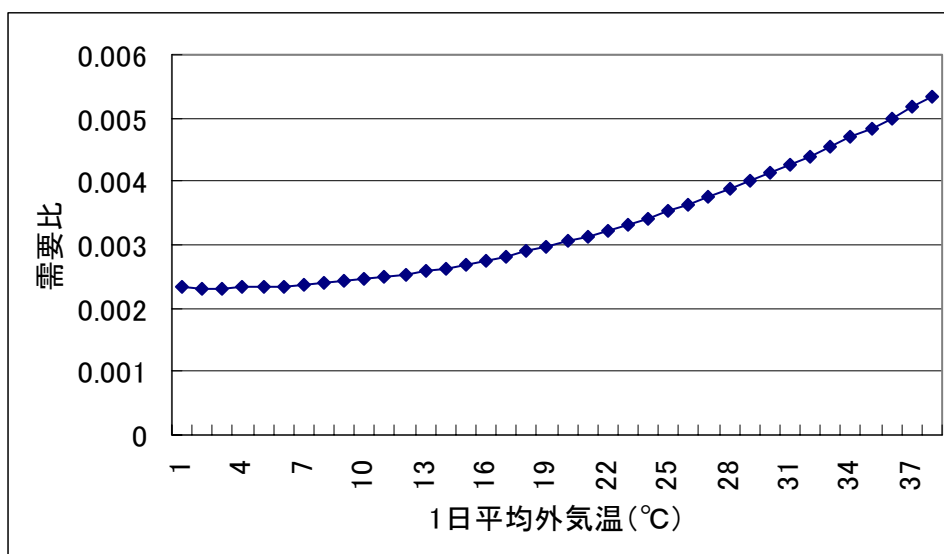


図 2-1 外気温と冷蔵庫の需要比の関係

2. 4. ガス機器のモデリング

コージェネの運用における給湯需要を調べるために、使用するガス機器として給湯器を想定する。給湯需要には、浴槽のお湯張りやシャワーからなる風呂での使用と、食器洗い等に分けられる。よって、給湯器は用途別に属性を持つものとした。また、季節による需要の変化は、給湯出力の関数に水温の変化を導入することによって表現した。なお、モデルの基本的な部分は電気機器と同様である。

動作時間・最大給湯出力・当該機器使用確率は用途ごとに設定した。普及率は 100%とした。

給湯器の用途及びその属性を表 2-4 に示す。

表 2-4 ガス給湯器の用途別属性

ガス給湯器 使用目的	行動分類	動作時間(分)		最大給湯 出力(kW)	当該機器使用確率(%)				普及率 (%)
		Min	Max		睡眠後	起床後	外出後	帰宅後	
浴槽お湯張り	身のまわり	20	25	40	0	10	0	90	100
シャワー	身のまわり	10	15	30	5	40	5	70	100
食器洗い等	炊事・掃除・洗濯	5	10	15	10	70	33	100	100

2. 5. 実測データとの比較・検証

以上のシミュレーションで得られた需要の例を示す。図 2-2 には勤め人 1 人、家庭婦人 1 人、大学生 1 人、子供 1 人から構成された世帯の平日における電力需要の内訳と、1000 軒の需要家の平均を取った日負荷曲線を示している。比較のため、図 2-3 に実際に 1998 年から 2000 年の間に測定された家庭 26 軒分の電力需要の平均[2]と、図 2-2 と同様の需要家 1000 軒の平均を示す。また、図 2-4、図 2-5 には図 2-2、図 2-3 と同様にして給湯需要について示した。

全体的に朝と夕方～夜にピークがきており、電力需要については冬期の総需要が一番大きく、中間期の総需要が一番小さい。給湯需要については、気温の低い時期のほうが大きくなっている。また、1000 軒の需要家をシミュレーションし平均した場合の日負荷曲線の形は、実測データから求められた日負荷曲線の形と類似している。

2001 年度の日本の家庭部門での世帯当り年間エネルギー消費量は 10876Mcal (= 12683kWh) であり、電力はこの内 43.6%の 5530kWh を占める[1]。これに対し、シミュレーションの結果は、1000 軒平均で 11161Mcal (=13015kWh)、この内電力は 4912kWh となる。このことから、エネルギー需要の大きさは CGS の評価を行っていくうえで妥当といえる。

以上より、ボトムアップシミュレーションモデルにより計測対象世帯のエネルギー負荷曲線がほぼ再現できることが確認された。また、これらの需要家一つ一つを見た場合、5 分刻みで需要が大きく変化するが、それらを重ね合わせていくとパルスが取れ、平均的な日負荷曲線になることがわかった。

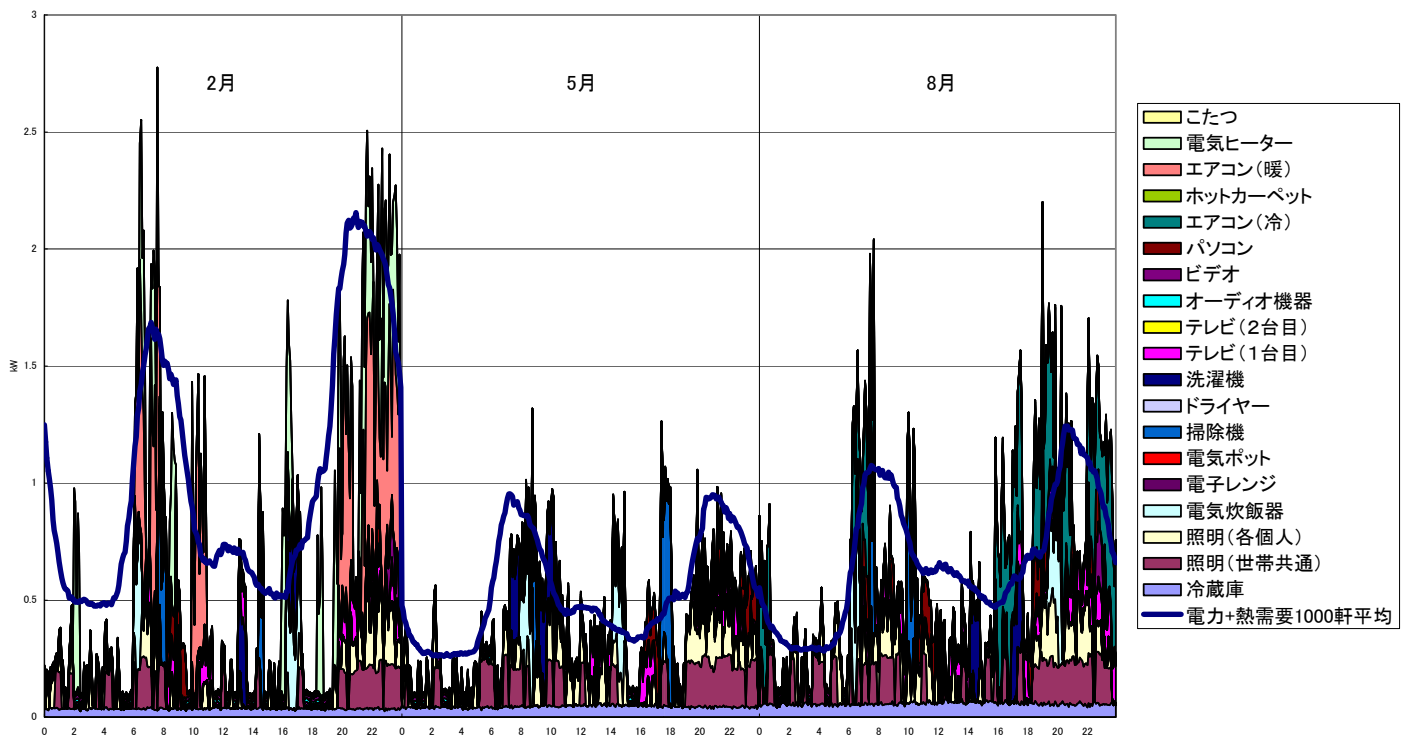


図 2-2 シミュレーションから求められる電力日負荷曲線（各月平日平均）

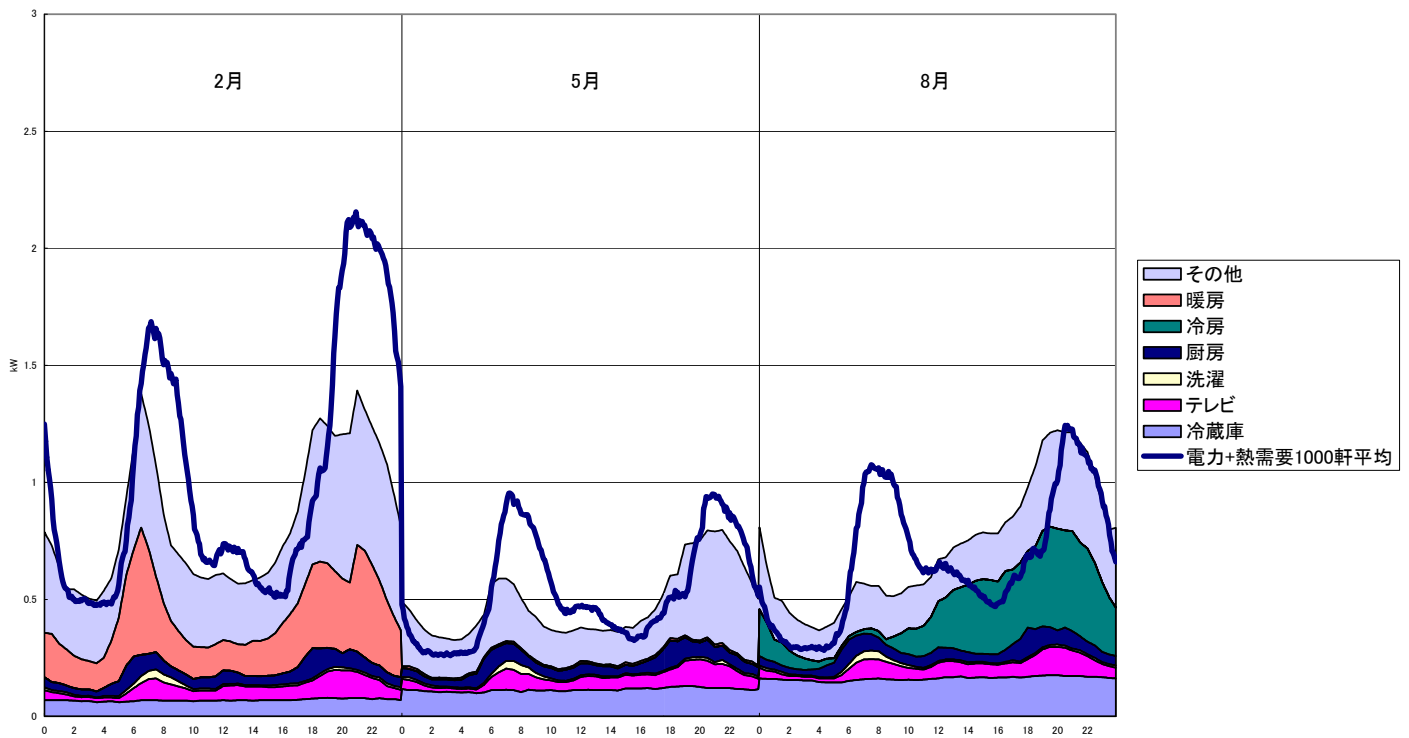


図 2-3 実測値から求められる電力日負荷曲線（26 軒、各月平日平均）

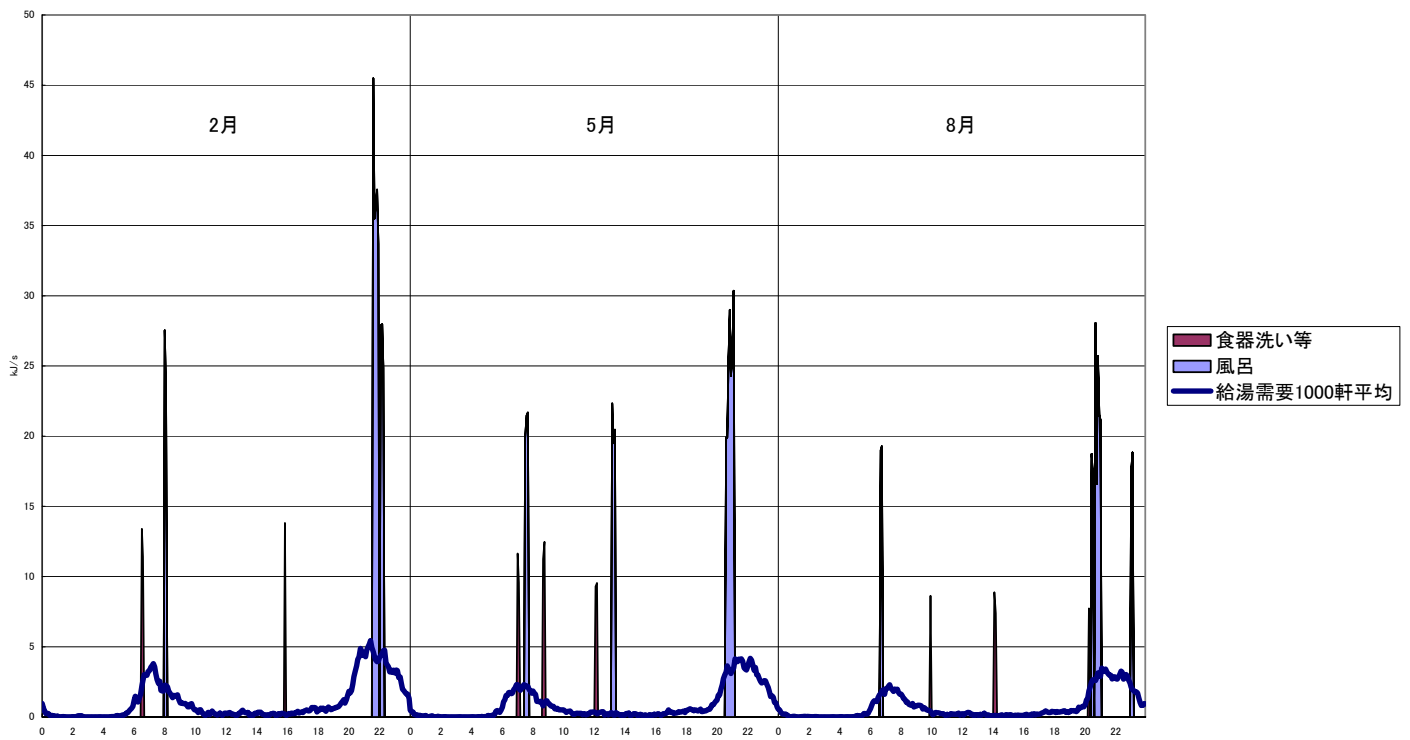


図 2-4 シミュレーションから求められる給湯日負荷曲線 (各月平日平均)

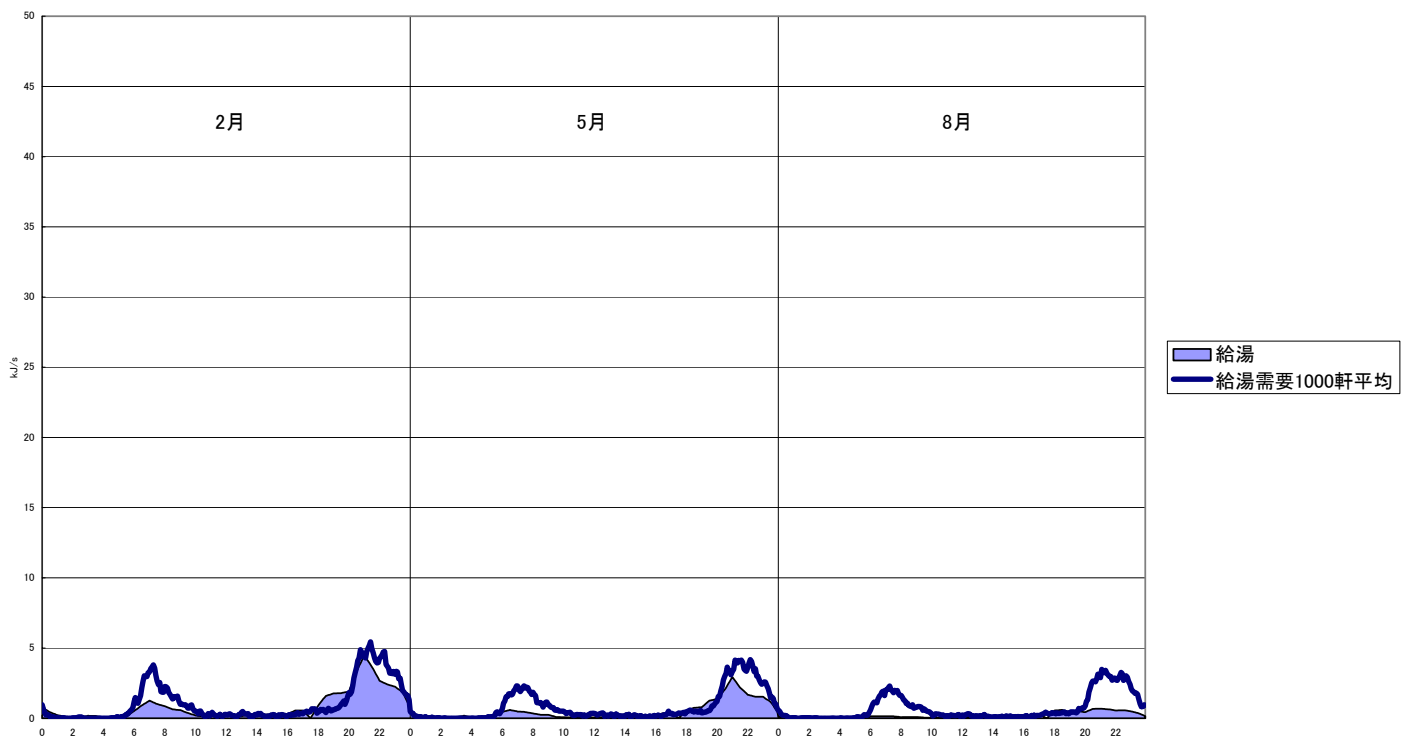


図 2-5 実測値から求められる給湯日負荷曲線 (26 軒、各月平日平均)

第三章 コージェネレーションシステムのモデル化

3. 1. コージェネレーションシステム (CGS) とは

CGS とは、一つのエネルギー源から電気や熱など、二つ以上の有効な二次エネルギーを取り出す総合効率の高いシステムである。燃料には都市ガス、重油、燃料電池等を使用するものがある。この中で、本研究では現在の機器開発状況を考慮して、ガスエンジン型の CGS を想定した。ガスエンジン型 CGS のメリットは次のようなものである。

- I. クリーン性：燃料が天然ガスの場合には、地球温暖化の原因である CO₂ の排出が少なく、また酸性雨の原因となる SO_x (硫黄酸化物) を排出しない。また、NO_x (窒素酸化物) の排出も極めて少ないため、地球環境保全の面から望ましい。
- II. 省エネ性：CGS は従来の火力発電所の発電システム(総合エネルギー効率 35.1%)に比較して、電気エネルギー+熱エネルギーで総合効率が約 70~80%(電気エネルギー 20~25%、熱エネルギー 50~60%、利用困難な排熱 20~30%)と高くなり、地球からの恩恵である一次エネルギーを効率よく使うシステムとして有望視されている。
- III. 経済性：高い総合エネルギー効率は、従来の使用エネルギー量を低減し、トータルエネルギーコストを引き下げることが可能となる。また電力需要のピーク時に買電量を抑えることが出来るため、受電設備の軽減、契約電力の低減が出来、電力基本料金を節約することが出来るメリットがある。
- IV. 非常用電源：CGS は常用防災兼用ガス専焼発電設備(非常用発電機兼用システム)を備えており、常用発電機として日々稼働しているため、災害、長期停電時等の急な起動に対しても、安定した電力を何時間でも供給出来るメリットがある。また、非常用としてのメンテナンスコストは一切不要なので、メンテナンス費の低減が可能である。

3. 2. CGS を導入したモデルの構成

3. 2. 1. モデルの特徴

マイクロコージェネ導入評価モデルとして、戸建住宅を想定した。評価モデル内でのエネルギー供給の概念図を図 3-1 に示す。マイクロコージェネのシステム構築を考える場合、特に給湯需要では大規模な負荷が離散的に発生することが問題となる[6]。現在、一般的に用いられているガス給湯器やボイラの場合には、このような急激な給湯負荷の変動に対して比較的よく対応できる。しかし、ガスエンジンを原動力とするマイクロコージェネの場合、機器の特性から、このような急激に発生する給湯負荷に応じた熱供給は困難なので、蓄熱槽の導入を想定し、マイクロコージェネが運転していない時間帯にも温水の供給ができるものとした。その上で、ガスボイラを補助熱源として併せて設置する。また、蓄熱槽では、マイクロコージェネからの回収熱が 80℃の温水として蓄熱されると想定して蓄熱量を算定した。暖房負荷はマイクロコージェネからの廃熱とヒートポンプエアコンで賄われるものと想定した。なお、厨房で消費されるガスコンロ等のエネルギーは、すべて都市ガスで供給されると想定し、モデルから省いてある。

戸建住宅でのエネルギー負荷として、集合住宅を対象とした場合に用いられる時間オーダーの負荷データを用いると、離散的な負荷の時間変化が CGS の運転や容量、蓄熱槽の容量に及ぼす影響を考慮できない。そこで、本研究では、給湯負荷及び電力負荷負荷には、第二章で得られた 5 分単位のエネルギー日負荷曲線を用いた。

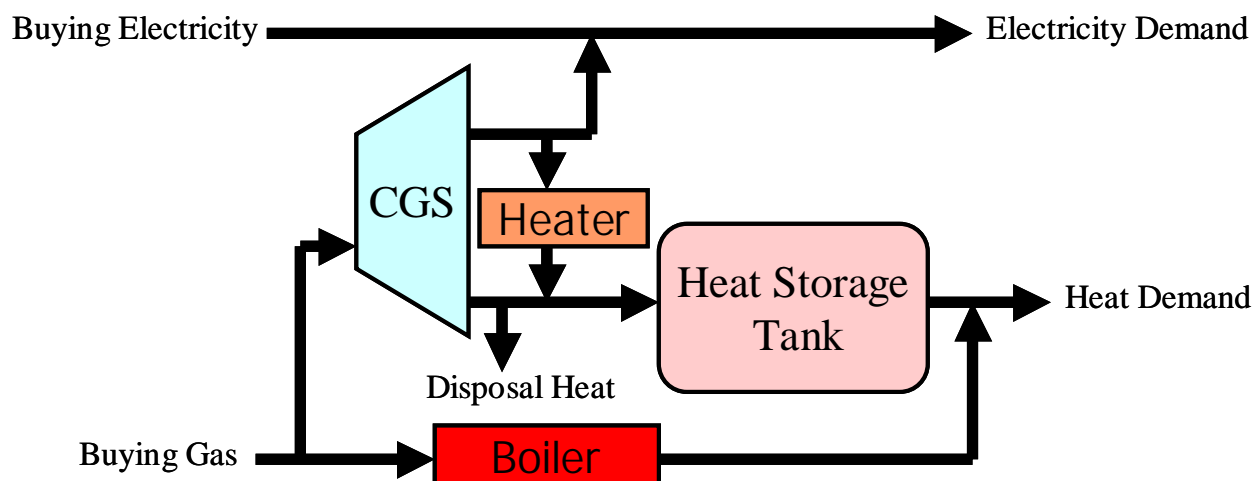


図 3-1 モデル構成図

2. 2. 2. モデルの仕様

CGS モデルの主な仕様を以下に示す[7][8]。

- ① 売電価格が約 4[円/kWh]と安いと、CGS の運転時に需要家で消費しきれず余剰となった電力を電力系統に逆流させて売電することはしない。余剰電力は全てヒータを通じて熱に変換し、蓄熱槽内の湯の加熱に用いる。
- ② CGS の発電量のみで需要家の電力需要を満たせない場合は、電力系統側から不足分の電力を購入するものとし、常に需要家の電力需要を満たす。
- ③ CGS の運転時に需要家で消費しきれず、余剰となった熱は蓄熱槽に蓄える。
- ④ 蓄熱槽内に十分な熱が無く、熱需要を満足することの出来ない場合は CGS に併設する補助ボイラを運転し、不足分の熱を供給する。
- ⑤ CGS の動作は運転(100%出力)と停止(0%出力)の 2 状態のみ。
- ⑥ CGS の電力出力は 1000[W]、排熱出力は 3250[W]。
- ⑦ CGS の動作は 20 分間隔(1 日を 72 時点に分割)。
- ⑧ 需要家の電力負荷曲線・熱負荷曲線は 5 分間隔(1 日を 288 時点に分割)。需要家のエネルギーコストは、ボトムアップシミュレーションにて計算。
- ⑨ 本モデルでは蓄熱槽内湯量は、熱量[Wh]で表す。実際の製品では、蓄熱槽内の湯の温度は約 70[°C]であり、成層貯湯を行うことで所望の温度の湯を得ているが、本モデルでは年間を通じて元水温を一律 60[°C]上昇させるものとし、蓄熱槽容量は 300[l]とし

て換算した熱量を蓄熱槽容量とした。

- ⑩ 電力価格は一般的な住宅の電力メニューを基準に 23[円/kWh]とし、月ごとの電力使用量による電力単価の変動及び基本料金は無いものとし、本モデルでは電力料金は常に一定とした。
- ⑪ ガス料金は、ガス会社の販売する家庭用 CGS 機器を設置する住宅を対象に低廉なガス料金メニューを適用し、冬期を 69[円/m³]、夏期を 84[円/m³]とした。電力料金と同様に、月ごとのガス使用量によるガス単価の変動及び基本料金は無いものとし、ガス料金は常に一定とした。また、CGS が無い場合も比較のためにこの値を用いる。

本モデルにおける CGS の性能は表 3-1 の通りである。

表 3-1 モデル中の CGS 仕様

項目	仕様	備考
発電出力	1000[W]	
廃熱出力	3250[W]	
効率(発電)	20[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
効率(廃熱)	65[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
総合熱効率	85[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
暖機運転時廃熱出力減少率	50[%]	エンジンが停止状態から運転状態に変化した時の熱出力減少率(暖機運転時間は5分間)
最大ガス消費量	0.4343[m ³ /h]	1時間連続動作時のガス消費量
貯湯タンク容量	20000[Wh]	タンク容量を300[l]とし、元水温を一律60[°C]上昇させるものとする。
補助ボイラ熱効率	80[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
ヒーター熱効率	98[%]	余剰電力を熱変換する際のヒーター熱効率
タンク保温効率	99.9[%/5min]	電気温水器の保温効率を参考に決定・5分ごとにタンク内熱量が0.1[%]づつ減少

また、従来の CGS がない構成を比較ケースとして設定した。このケースでは、電力負荷および暖房負荷を系統からの電力、給湯負荷をガス給湯器（効率：80%）で賄うと想定した。この概念図を図 3-2 に示す。

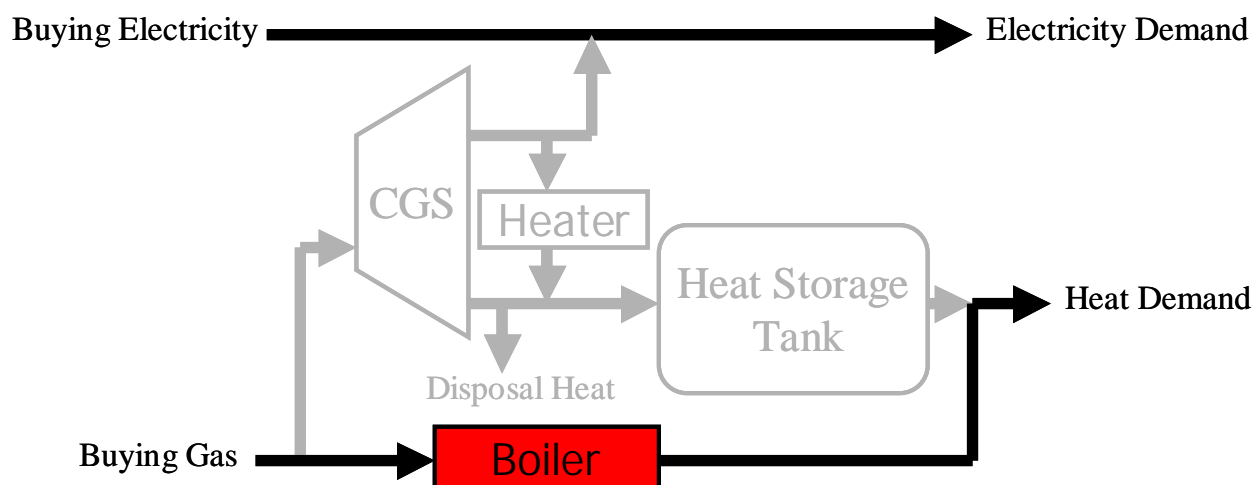


図 3-2 CGS 無しケースのモデル構成図

3. 3. モデルの定式化

3. 3. 1. モデル全体の定式化

モデル内のエネルギー需給を定式化した。モデルでは、冬期(2月)、中間期(5月)、夏期(8月)のそれぞれ平日と休日の計6パターンで1日のエネルギー需給を定式化し、CGSの評価を行っている。定式化に用いた添字、変数、定数を以下に示す。

表 3-2 各定数の値

定数名	説明	設定値
Ecost	電力単価[円/kWh]	23
WGcost	冬季ガス単価[円/m ³]	84
SGcost	夏季ガス単価[円/m ³]	69
Gheat	都市ガス13A低位発熱量[kcal/m ³]	9900
Beff	ボイラ熱効率	0.95
Heff	ヒータ熱効率	0.98
Tloss	貯湯タンク放熱率	0.999
Eout	CGS電力出力[W]	1000
Hout	CGS熱出力[W]	3250
Gcon	CGSガス消費量[m ³ /h]	0.4343
Pdown	CGS暖機運転時出力減少率[%]	50

表 3-3 変数とその説明

変数	説明
t	時間ステップ。1日を24時間を5分間隔288個の時間ステップ(0 ≤ t ≤ 287)に分割
de _t	時点tにおける電力負荷量[Wh] 範囲:0[Wh] ≤ de _t ≤ 3600[Wh]
dh _t	時点tにおける熱負荷量[kWh] 範囲:0[Wh] ≤ dh _t ≤ 36000[Wh]
s _t	時点tにおけるタンク内残湯量[Wh](熱量換算) 範囲:0[Wh] ≤ s _t ≤ 20000[Wh]
a _t	時点tにおけるCGSの動作(運転または停止の2状態 0:停止 1:運転)
BuyElec _t	時点tにおける電力購入量[Wh]。但し、BuyElec _t ≥ 0である
OverElec _t	時点tにおける余剰電力量[Wh]。但し、OverElec _t ≥ 0である
C _t	時点tにおける総コスト
TankOut _t	時点tにおけるタンクからの熱出力量[Wh]。但し、TankOut _t ≥ 1である
Boil _t	時点tにおける補助ボイラ熱入力量[Wh]。但し、Boil _t ≥ 0である

時点 t のランニングコスト C_t は、電力購入費用とガス購入費用の合計であり、式 3-1 の通りとなる。

$$C = BuyElec_t \times Ecost + BuyGas_t \times Gcost \quad \dots \text{式 3-1}$$

電力購入量 BuyElec_t は、電力需要を CGS からの電力出力で賄っても足りない分で、系統から買ってくる。

$$BuyElec_t = de_t - Eout \times a_t \quad \text{但し、} BuyElec_t \geq 0 \quad \dots \text{式 3-2}$$

余剰電力量 OverElec_t は、CGS からの電力出力が t 時点での電力需要よりも大きい場合にヒータにまわる電力である。

$$OverElec_t = Eout \times a_t - de_t \quad \text{但し、} OverElec_t \geq 0 \quad \dots \text{式 3-3}$$

ガス購入量は、CGS でのガス消費量と補助ボイラのガス消費量の和である。

$$BuyGas_t = Gcon \times a_t + \frac{BoilOut_t}{Gheat} \quad \dots \text{式 3-4}$$

補助ボイラ $BoilOut_t$ は、熱負荷量から CGS 排熱量と CGS 余剰電力、蓄熱槽内湯量を差し引いた分である。蓄熱槽内に十分な湯量があり、需要家の熱負荷を満たせる場合、補助ボイラは動作せず $BoilOut_t$ は 0 である。

$$Boil_t \times Beff_t = dh_t - TankOut_t \quad \text{但し、} BoilOut_t \geq 0 \quad \dots \text{式 3-5}$$

次時点蓄熱槽内湯量は、現在の蓄熱槽内湯量に CGS 排熱と余剰電力からのヒータ発電量を加え、熱負荷分を差し引いた残りとなる。前時点で CGS が運転状態にあるとき、即ち $a_t=1$ のときは

$$S_{t+1} = S_t \times Tloss + Hout_t \times a_t + OverElec_t \times Heff - dh_t \quad \text{但し、} S_{t+1} \geq 0 \quad \dots \text{式 3-6}$$

となる。

また、前時点で CGS が停止している場合、即ち $a_t=0$ のとき、 t 時点では CGS は暖機運転を行うため、

$$S_{t+1} = S_t \times Tloss + 0.5 \times Hout_t \times a_t + OverElec_t \times Heff - dh_t \quad \text{但し、} S_{t+1} \geq 0 \quad \dots \text{式 3-7}$$

となり、CGS の動作状態が停止→運転と変化した直後の 5 分間の CGS 排熱出力が半分となるものとした。なお、電力出力の暖機運転に伴う出力減少はないものとする。CGS の暖機運転を考慮することで、CGS を頻繁に起動・停止した場合にエネルギーコストが上昇することになる。よって、CGS の経済的な運転のためにはなるべく CGS を連続動作させたほうが望ましいことになる。

3. 3. 2. 確率動的計画の定式化

本研究では、予め 1 日の初めにその日 1 日の CGS 運用パターンを決定し、固定された運用パターンに従って CGS の運用を行うのではなく、CGS が時点毎に前時点での需要家の電力・熱負荷量から次時点での最適な動作を選択してゆくものである。そこで本研究では CGS の動作を決定する方法として動的計画法を用いる。動的計画法は時間的または空間的に他段階の最適問題を取り扱う手法であり、CGS の運用パターン導出は運転・停止の多段決定過程であるため、動的計画法は本研究で対象とする問題を解くのに適する[9]。本研究では、時点間の状態が一定の確率で遷移するものとして、確率動的計画法を用いることとした。

目的関数を需要家のエネルギーコストとし、エネルギーコストの期待値を最小ならしめるような CGS 動作を求める。CGS は常にエネルギーコスト期待値を最小とする動作(運転もしくは停止)を選択しながら CGS の運用を行うものとする。本モデル中では、まずエネルギーコスト期待値 Q を各時点の 1 つ前の時点での電力負荷量、熱負荷量、CGS 動作、蓄熱槽内残湯別に 20 分間隔で 24 時間後まで計算し、各時点・状態ごとに 24 時間後までのエネルギーコスト期待値 Q が最小となる CGS 動作表(運転 or 停止)を作成する。作成された動作表

中から CGS は次の時点の動作を選択するものとする。CGS のエネルギーコスト期待値を求める漸化式を、式 3-9 に示す。

$$Q_t(dS_t, dDe_t, dDh_t) = \min \left(C_t(S_t, De_t, Dh_t, a_t) + \sum_{i=0}^{AllDe_{t+1}} \sum_{j=0}^{AllDh_{t+1}} Pe_{T, De_t, De_{t+1}} Ph_{T, Dh_t, Dh_{t+1}} Q_{t+1} \right)$$

. . . 式 3-9

式 3-9 における各変数の値とその説明は表 3-4 に示す。

表 3-4 確率動的計画で用いる変数とその説明

変数	説明
T	離散化後時間ステップ。本モデルではCGSの動作間隔を、1日24時間を20分間隔72個の時間ステップ(0 ≤ T ≤ 71)に分割
De _T	時点Tにおける電力負荷量[Wh] 8段階に離散化、範囲:0 ≤ De _T ≤ 7
Dh _T	時点Tにおける熱負荷量[kWh] 8段階に離散化、範囲:0(0[Wh]) ≤ Dh _T ≤ 7
S _T	時点Tにおけるタンク内残湯量[Wh](熱量換算) 8段階に離散化、範囲:0 ≤ S _T ≤ 7
Pe _(T, De_T, De_{T+1})	時点Tにおける電力負荷量がDe _T のとき、時点T+1の電力負荷量がDe _{T+1} へ遷移する確率
Ph _(T, Dh_T, Dh_{T+1})	時点Tにおける熱負荷量がDh _T のとき、時点T+1の熱負荷量がDe _{T+1} へ遷移する確率

第四章 確率動的計画法の手順

4. 1. 負荷量遷移確率の導出

4. 1. 1. 負荷量遷移数の導出

第二章のボトムアップシミュレーションにより生成した過去一定日数分の電力・熱日負荷曲線から、各時点間の負荷量遷移回数を求める。この時、状態を表現するために負荷曲線を離散化することになる。

以下、冬期平日のある1日を例として示す。

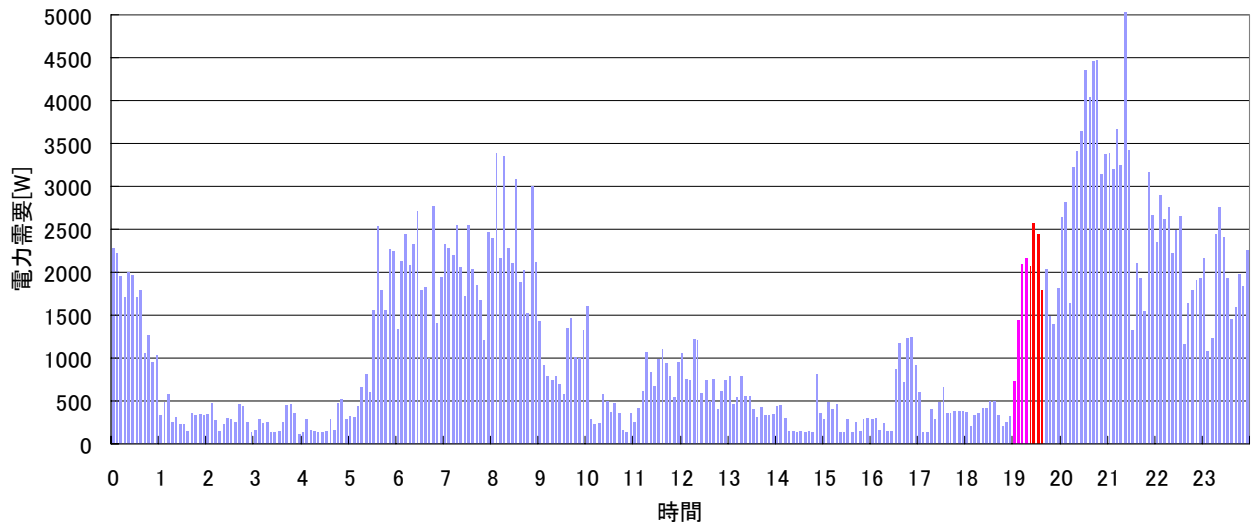


図 4-1 5 分間隔電力負荷曲線(冬期平日)

図 4-1 に 5 分間隔の電力負荷曲線を示した。これを CGS の運転時間単位にあわせて、20 分間隔になるように平均する。20 分間隔の負荷曲線を図 4-2 に示す。

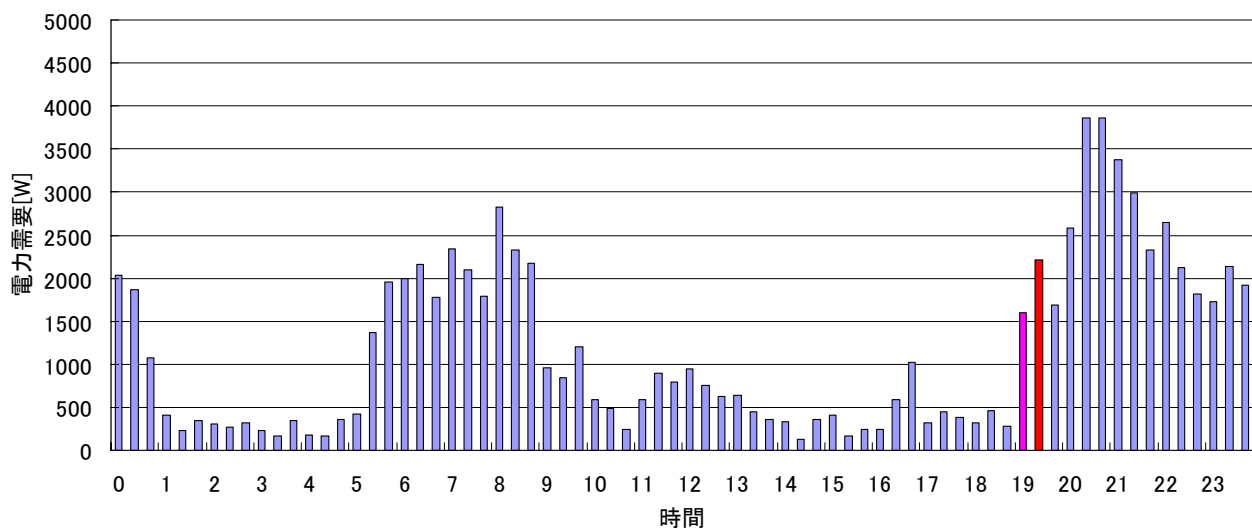


図 4-2 20 分間隔電力負荷曲線(冬期平日)

各時点の電力負荷を $\frac{3600}{7}$ で割り、あまりを切り捨てることによって0~7の8段階の離散値として表す。離散化後の電力負荷を図4-3に示す。

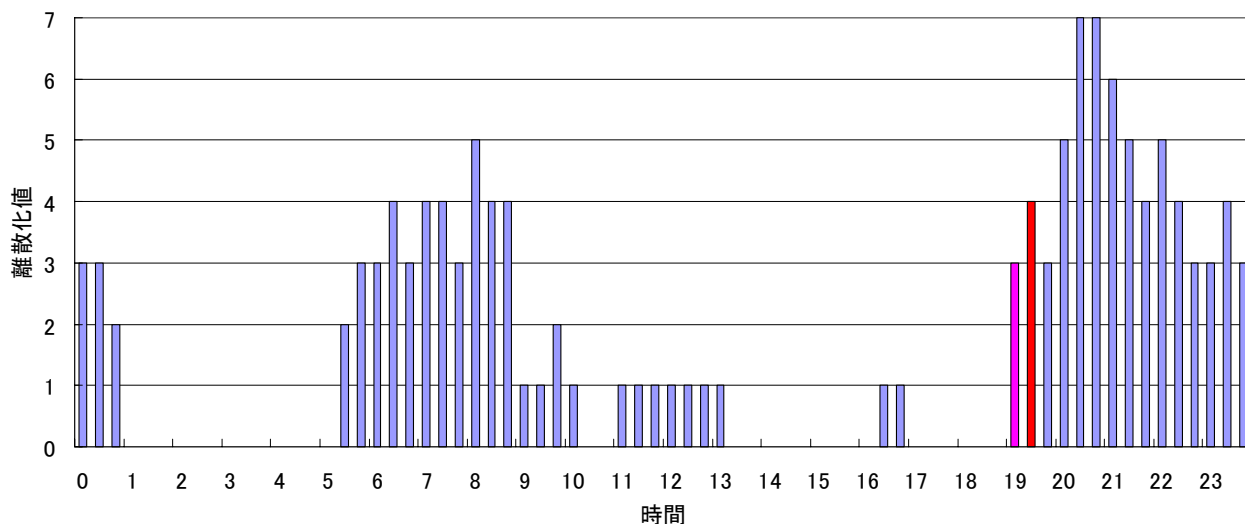


図 4-3 離散化後電力負荷曲線(冬期平日)

ここから、電力負荷の遷移回数表を作成することができる。

表 4-1 離散化後 19 時 00 分台→19 時 20 分台の電力負荷量遷移回数表

		19時20分台 電力負荷							
		0	1	2	3	4	5	6	7
19時00分台	電力負荷	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	1	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	

図4-3において、19時00分~19時19分の電力負荷量は1604[W]、19時20分~19時39分の電力負荷量は2211[W]である。このとき、19時00分台→19時20分台の電力負荷量遷移回数は表4-1の通りとなる。過去1日分の電力負荷曲線から得られた電力負荷量遷移回数は19時00分台電力負荷の離散値3から19時20分台電力負荷の離散値4へと遷移したのが1回、その他の電力負荷の遷移は0回となる。また、過去1日分の電力負荷曲線であるため、表4-1中の全負荷量遷移回数の合計は1となる。

4. 1. 2. 正規分布補間

次に、短期間分の過去日負荷曲線から負荷量遷移回数を求めた場合に於いても、より現

実の再現性の高い負荷量遷移回数を得るため、ここで得られた負荷量遷移回数表を、適当な分散を持った正規分布で補間する。ここで、負荷量遷移回数を $n(De_T, De_T)$ とすると、補間後の負荷量遷移回数 $n'(De_T, De_T)$ は以下の式で表される。

$$n'(De_T, De_{T+1}) = \sum_{All Dh'_T} \sum_{All Dh'_{T+1}} n(De'_T, De'_{T+1}) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ - \frac{\left(\frac{De(T) - De'(T)}{\Delta De} \right)^2 + \left(\frac{De(T+1) - De'(T+1)}{\Delta De} \right)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

・・・式 4-1

ただし、 ΔDe は電力負荷量を離散化する際の刻み幅であり、 $\Delta De = \frac{3600}{7}$ [W] である。

ここで、 $\sigma = 1.0$ として、正規分布により補間した後の負荷量遷移回数表を表 4-2 に示す。

表 4-2 19時00分台→19時20分台(正規分布補間後)($\sigma = 1.0$)

		19時20分台 電力負荷							
		0	1	2	3	4	5	6	7
19時00分台	電力負荷	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0
	0	0	0	0.02	0.08	0.14	0.08	0.02	0
	1	0	0.01	0.08	0.37	0.81	0.37	0.08	0.01
	2	0	0.01	0.14	0.81	1	0.81	0.14	0.01
	3	0	0.01	0.08	0.37	0.81	0.37	0.08	0.01
	4	0	0	0.02	0.08	0.14	0.08	0.02	0
	5	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4-2 において、19時00分台電力負荷の離散値 4 から 19時20分台電力負荷の離散値 5 に遷移遷移した回数が 0.37 回となり、他の近接した電力負荷量遷移回数も同様に補間されている。

負荷量遷移回数の正規分布補間のイメージを図 4-2 に示す。図 4-4 中の黒矢印が実際に発生した負荷量遷移ベクトルとすると、その周辺の灰色のベクトルが補間により生じた負荷量遷移ベクトルである。このようにして近接・類似したベクトルを補間により発生させることで、短期間の過去日負荷曲線から長期間の過去日負荷曲線を取得した場合に相当する負荷遷移の情報を得ることが、正規分布補間の狙いである。

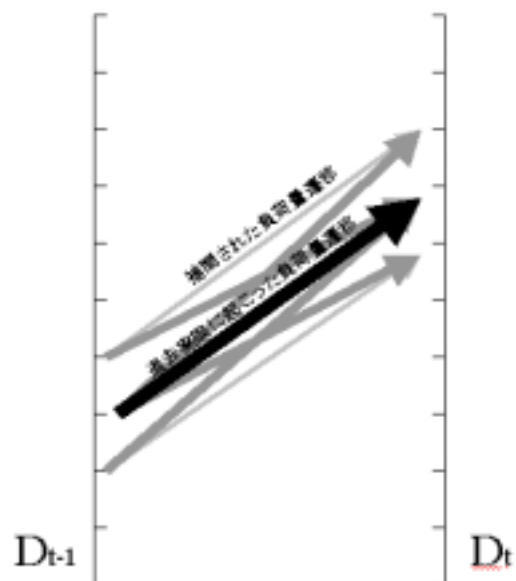


図 4-4 補間イメージ

4. 1. 3. 負荷遷移確率

次に、この負荷量遷移回数表(正規分布補間後)から、19時00分台→19時20分時台の電力負荷量遷移確率を式4-2に従い導出する。

$$Pe_{T,De_T,De_{T+1}} = \frac{n'(De_T, De_{T+1})}{\sum^{All De_T} n'(De_T, De_{T+1})} \quad \dots \text{式 4-2}$$

以上、求められた電力負荷量遷移確率を表4-3に示す。

表 4-3 19時00分台→19時20分台の電力負荷量遷移確率表

		19時20分台 電力負荷							
		0	1	2	3	4	5	6	7
19時00分台 電力負荷	0	0	0	0	0.274	0.452	0.274	0	0
	1	0	0	0.054	0.244	0.403	0.244	0.054	0
	2	0	0.004	0.054	0.242	0.399	0.242	0.054	0.004
	3	0	0.004	0.054	0.242	0.399	0.242	0.054	0.004
	4	0	0.004	0.054	0.242	0.399	0.242	0.054	0.004
	5	0	0	0.054	0.244	0.403	0.244	0.054	0
	6	0	0	0	0.274	0.452	0.274	0	0
	7	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125

表4-3より、19時00分台の電力負荷の離散値が3であるとき、19時20分時台の電力負荷の離散値が4である確率は0.399となる。なお、19時00分台の電力負荷の離散値が7の時に19時20分台の電力負荷の各離散値にいく確率が全て等しいのは、表4-2において補間後も19時00分台→19時20分台の負荷量遷移回数が0回であるである。この領域では過去の負荷量遷移に関する情報が乏しいため、t+1時点においては、全ての次時点負荷量 D_{t+1} が全て等しい確率(0.125)で訪れるものとした。

以上のようにして電力負荷量遷移確率 $Pe(T, De_T, De_{T+1})$ が求められた。同様にして熱負荷量遷移確率 $Ph(T, De_T, De_{T+1})$ も求める。

4. 2. CGS 動作表の作成

4. 1で電力・熱負荷量遷移確率を導出した後、漸化式3-9に従いエネルギーコスト期待値 $Q(S_T, De_T, Dh_T)$ を最小とするCGS動作 $a(T, S_T, De_{T-1}, Dh_{T-1})$ の表を作成する。モデル中では、この動作表を0時00分台から23時40分台までの各時点で作成する。

CGSの動作 $a_t(S_t, De_{t-1}, Dh_{t-1}, a_{t-1})$ は、現在時点での現在時点での蓄熱槽内湯量(=前時点終了時の蓄熱槽内湯量)、前時点での電力・熱負荷量、前時点でのCGS動作により決まる。ただしタンク内熱量が最大の時には、それ以上CGSを運転するとお湯が溢れてしまうので、自動的に「停止」を選択するものとする。作成されたCGS動作表の例を以下に示す。

表4-4より、19時00分台の電力負荷離散値が3、熱負荷離散値が4、蓄熱槽内熱量離散

値が2、16時台のCGS動作が「停止」であったときの、19時20分台の最適なCGS動作は「運転」となる。同様にして、0時00分台から23時40分台まで、72時点全てのCGS動作表を作成する。

表4-4 19時20分台 CGS動作表
(19時00分台 電力負荷分散値=3, 19時00分台 CGS動作「停止」)

		16時00分台 熱負荷量							
タンク内熱量		Dh=1	Dh=2	Dh=3	Dh=4	Dh=4	Dh=5	Dh=6	Dh=7
	残0	運転	運転	運転	運転	運転	運転	運転	運転
	残1	運転	運転	運転	運転	運転	運転	運転	運転
	残2	運転	運転	運転	運転	運転	運転	運転	運転
	残3	停止	停止	停止	停止	運転	運転	運転	運転
	残4	停止	停止	停止	停止	運転	運転	運転	運転
	残5	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
	残6	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止
	残7	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止	停止

4. 3. CGS動作シミュレーション

CGSは各時点で前時点での電力負荷量・熱負荷量、現在の蓄熱槽内残湯量、前時点でのCGS動作状態から、4.2で作成されたCGS動作表を参照してCGSの動作を選択していく。このように確率動的計画法を用いてCGS運用パターンを決定してCGSの運用を行う場合(以後、確率動的計画ケースと表記)と、その日の日負荷曲線の元でのCGS運用パターンの最適解に従って運用する場合(以後、最適運用ケースと表記)の2ケースについて、CGSの動作をシミュレートした結果を以下に示す。なお、負荷量遷移回数の正規分布補間時の分散は $\sigma=1.0$ 、過去の日負荷曲線取得日数は10日間とし、入力に用いた日負荷曲線をはじめCGS仕様、その他の条件は同一とした。

CGS運用シミュレーション結果は、以上の通りとなった。概ね、朝方と夕方にCGSが多く運転されている。確率動的計画法では、最適化ほど細かく需要にあわせた運転はできないが、それでもかなり効率的な運転ができていることがわかる。

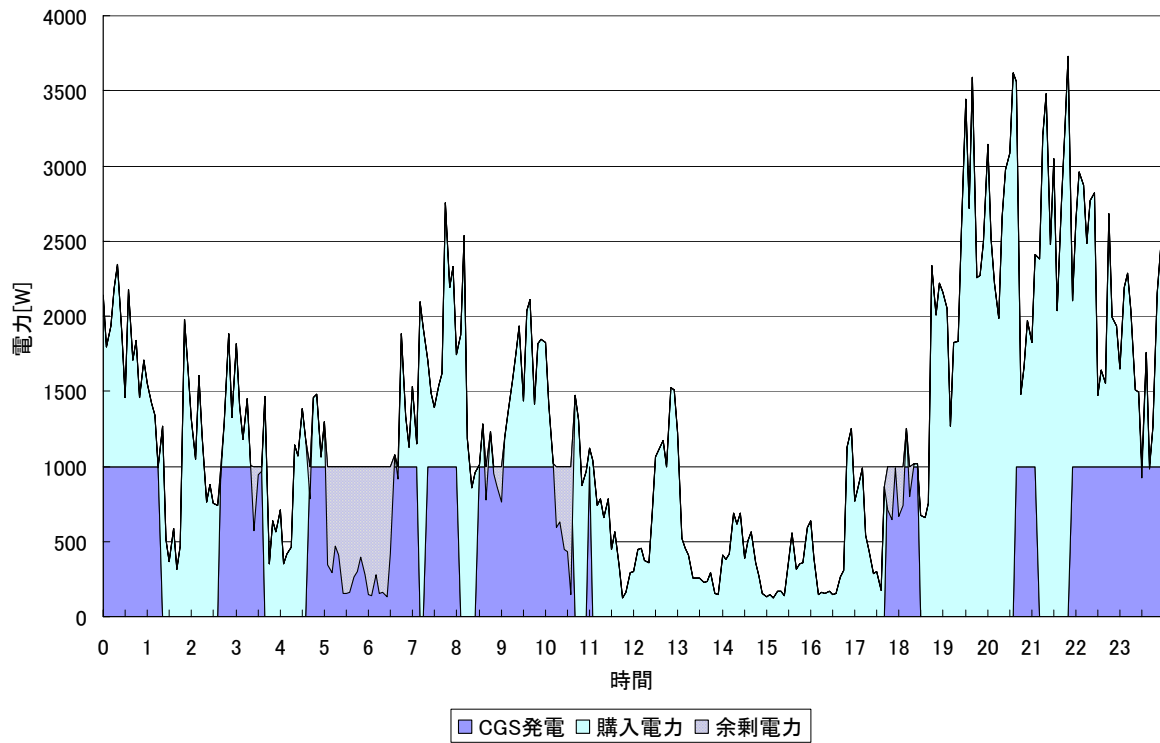


図 4-5 CGS 発電量、電力購入量、余剰電力量曲線(確率動的計画ケース)

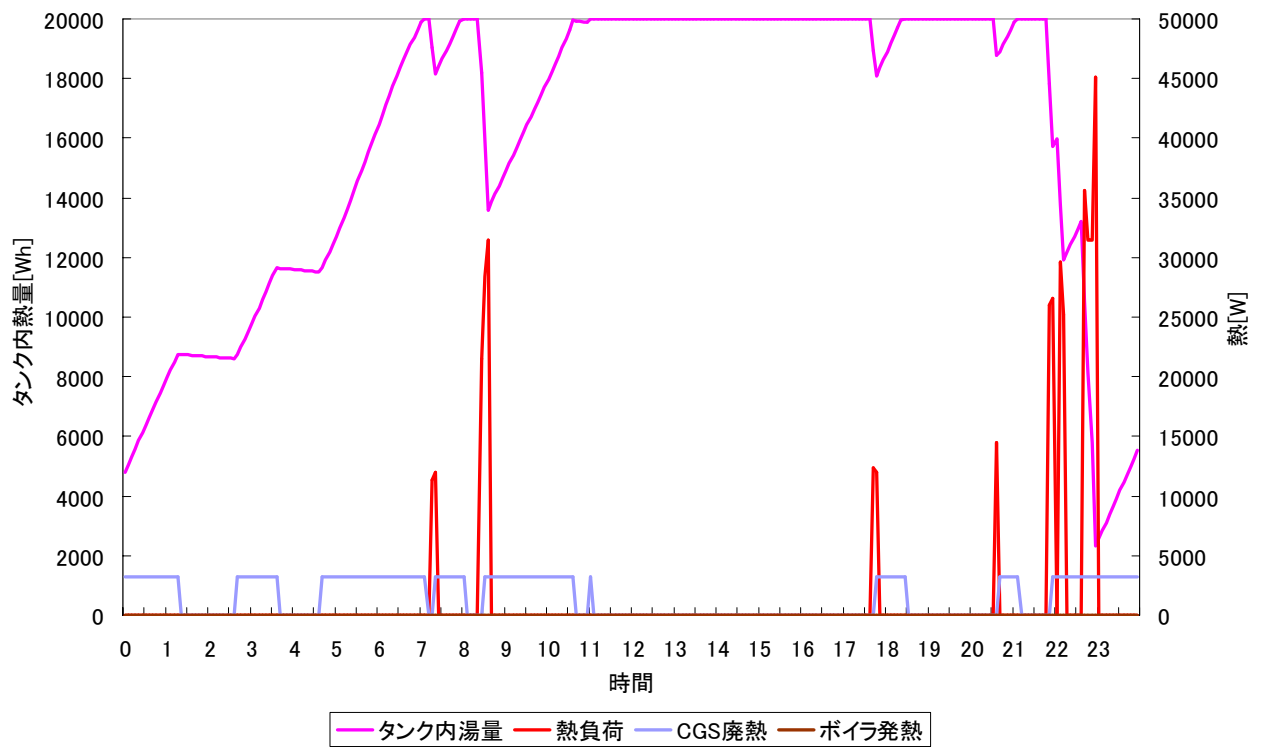


図 4-6 熱負荷量、タンク内湯量、CGS 排熱量、ボイラ発熱量グラフ(確率動的計画ケース)

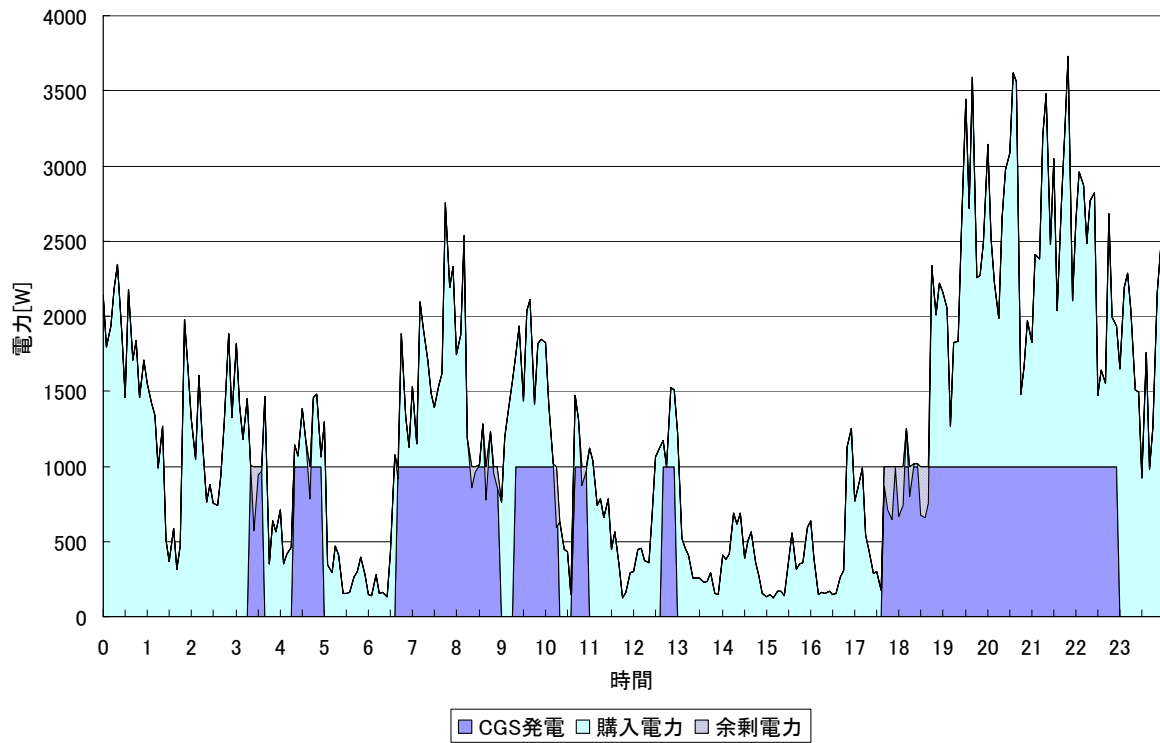


図 4-7 CGS 発電量、電力購入量、余剰電力量曲線(最適運用ケース)

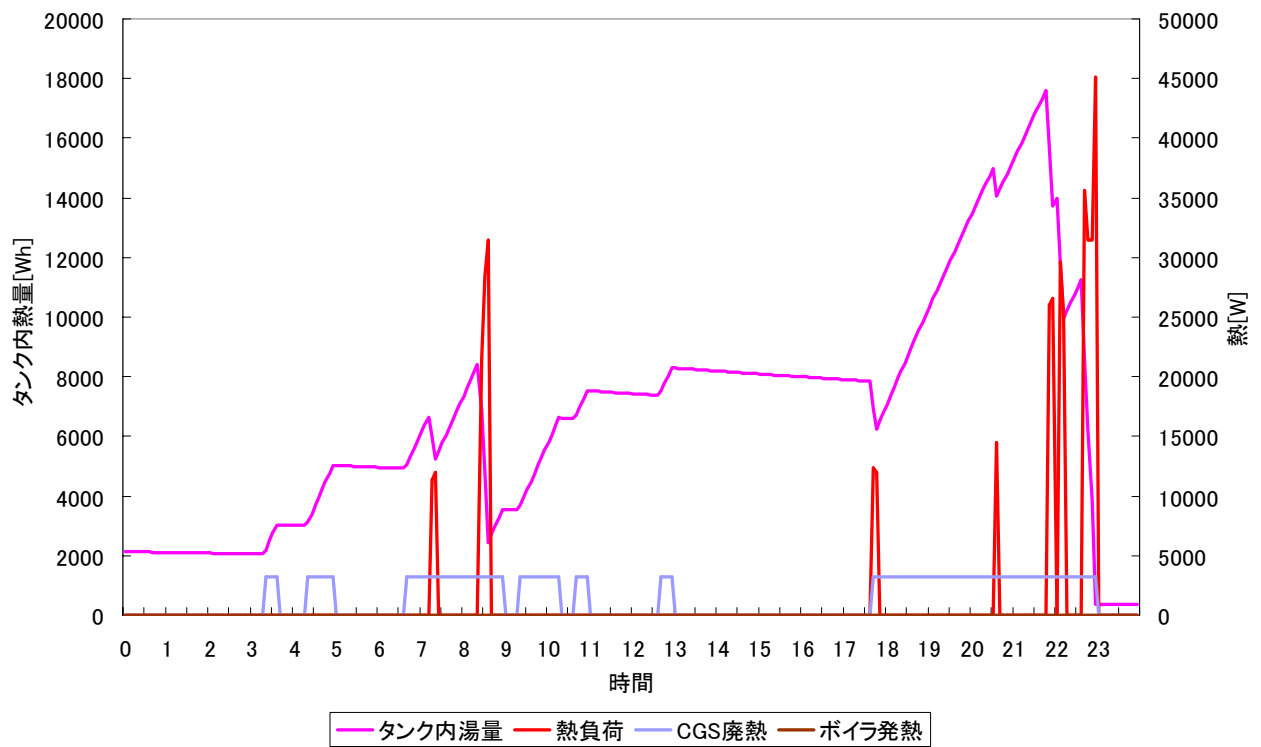


図 4-8 熱負荷量、タンク内湯量、CGS 排熱量、ボイラ発熱量グラフ(最適運用ケース)

第五章 確率動的計画の結果と考察

本章では設定した各パラメータにの値に対するエネルギーコストの感度解析を行い、最適なパラメータの値の探索と、パラメータの値がエネルギーコストに与える影響の考察を行った。また、比較対象としてその日の CGS 運用パターンの最適解を求め、運転を行うケース(最適運用ケース)と、CGS を用いないケース(CGS 無しケース)を設定し、ケース間のコストの比較を行った。

全てのケースでモデルの諸条件・仕様は全て等しいものとした。運用シミュレーションに関する設定条件は以下の通り。

- ① 需要家の家族構成は勤め人 1 人、婦人 1 人、大学生 1 人、子供 1 人の合計 4 人
- ② シミュレーション期間は各季節・各曜日とも代表日の連続 10 日間とし、1 日あたりエネルギーコストは 10 日間の平均値とした。
- ③ 年間エネルギーコストは、各期の 1 日あたり平均値に冬期平日は 81 日、冬期休日は 40 日、中間期平日は 84 日、中間期休日は 38 日、夏期平日は 82 日、夏期休日は 40 日を掛け、その合計とした。

5. 1. 正規分布補間時の分散に対する感度解析

5. 1. 1. 正規分布補間の感度解析

本モデルでは、4. 1 で述べたとおり、過去の短期間の日負荷曲線を元に負荷量遷移回数を求めた場合でもより大きなエネルギーコスト削減効果を得るために、負荷量遷移回数を求める際に正規分布で補間を行っている。この補間により、実際に発生した負荷量遷移ベクトルに近接・類似した負荷量遷移ベクトルを発生させている。この正規分布補間を行う際の最適な分散の値を決定するために、分散の値に対するエネルギーコストの感度解析を行った。年間エネルギーコストの比較を図 5-1 に示す。

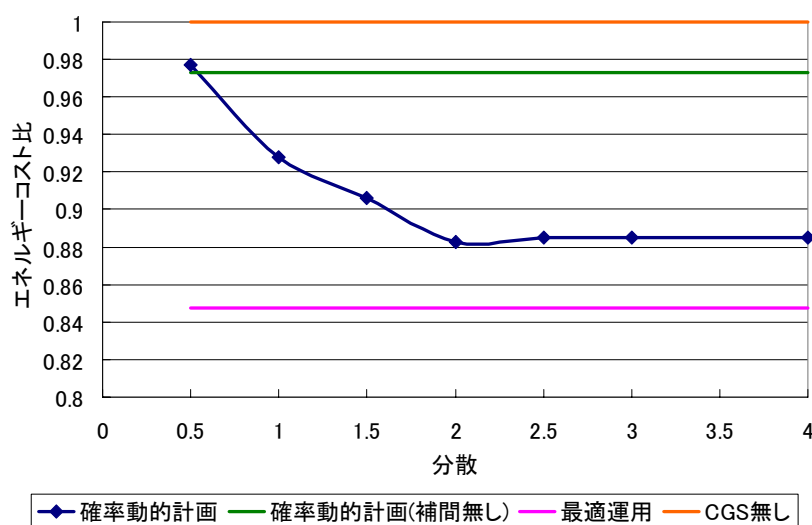


図 5-1 正規分布補間時の分散に対するエネルギーコスト感度解析結果

図では、CGS 無しケースに対する各ケースの年間エネルギーコストの比で各ケースの比較をしている。ちなみにこの時の CGS 無しケースでの年間総エネルギーコストは 274000 円である。よって、例えばコスト比が 0.9 の場合、年間で約 27400 円のランニングコスト削減ができることになる。

図 5-1 から、補間をしない場合に比べて正規分布補間をしている場合のほうがコスト削減を進めることができる。また、補間をするケースの中では、分散の値が $\sigma=2.0$ 程度でエネルギーコスト最小となった。しかし、それでも将来情報がある場合の最適運用までは届かないこともわかる。

$\sigma=2.5$ 以上となるとほぼコストが一定している。これは、負荷量遷移回数の補間が行き過ぎており、負荷量遷移確率が Det+1、Dht+1 の値にかかわらずほぼ等しくなる。このとき、CGS は常に動こうとするもののタンクの上限にかかり運転できず、その結果運転パターンが同じとなる。

23時00分台→23時20分台の熱負荷量遷移確率を図 5-2 ($\sigma=2.0$ の場合)、図 5-3 ($\sigma=4.0$ の場合)に示す。

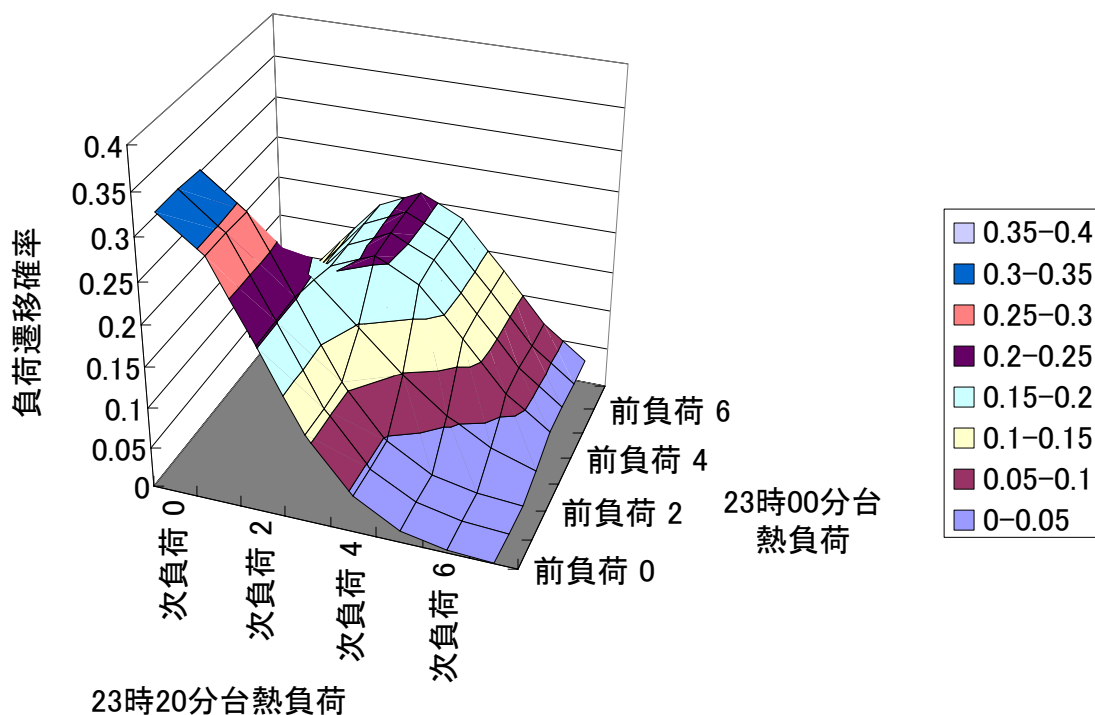


図 5-2 23 時 00 分台→23 時 20 分台熱負荷量遷移確率 ($\sigma=2.0$)

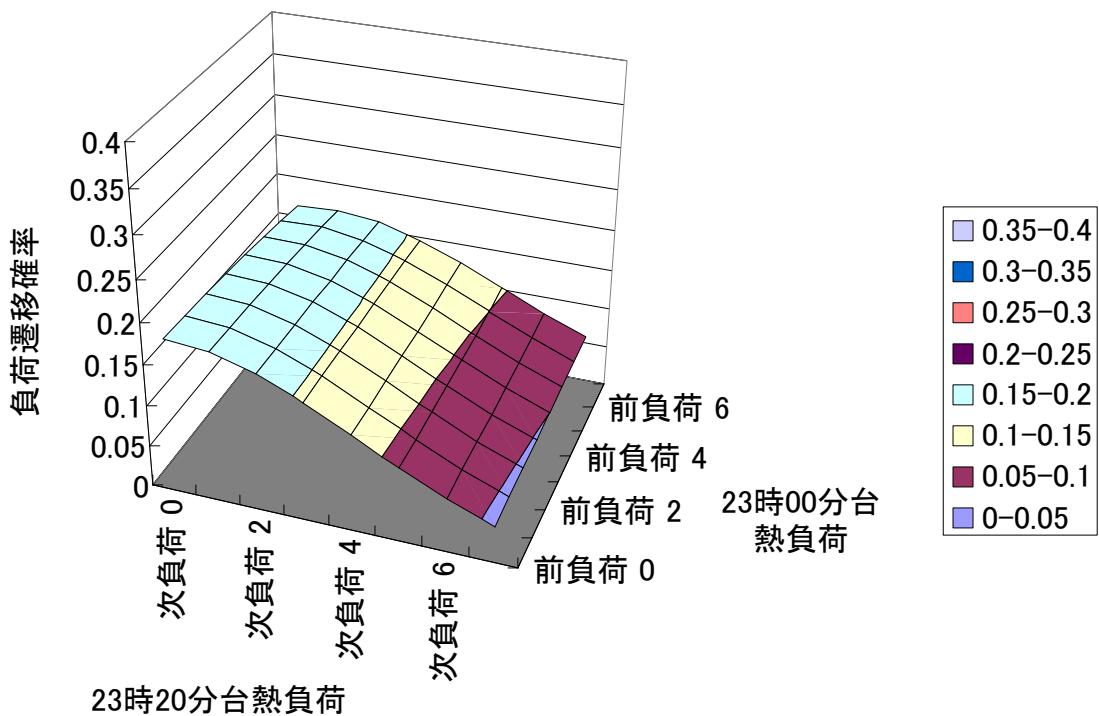


図 5-3 23 時 00 分台→23 時 20 分台熱負荷量遷移確率 ($\sigma=4.0$)

図 5-2 では確率分布に凹凸が目立つのに対し、図 5-3 では、これらの山はなだらかになり凸凹がなくなっている。確率分布に鋭いピークがあるということは、当該部分の負荷量変化が過去に多く発生していることを示している。熱負荷の場合、多くの時間帯で、負荷量遷移回数のピークは D_{h_T} 、 $D_{h_{T+1}}$ ともに 0 に近いところにある。これは、大きな熱負荷が来る時間はわずかであり、残りの殆どの時間において熱負荷量が 0[W]であることによる。しかし、負荷量遷移の際の分散値を大きくするほど D_{h_T} 、 $D_{h_{T+1}}$ の値が大きい領域の負荷量遷移回数も補間される。このため、負荷量遷移確率分布のなかで、 D_{h_T} 、 $D_{h_{T+1}}$ の値が大きい領域の確率も上昇してしまう。このため、エネルギーコスト期待値も上昇し、CGS の運転時間が増加することになる。

そのときの熱負荷量と CGS 動作、タンク内湯量の関係を図 5-4 に示す。図より、タンクに余裕があるときには常に運転していることがわかる。

分散の値を大きくし過ぎるほど確率分布の平滑化が進むということは、即ち過去の負荷量変化に関する情報の劣化であり、過剰な補間は学習にとって逆効果となることがわかる。

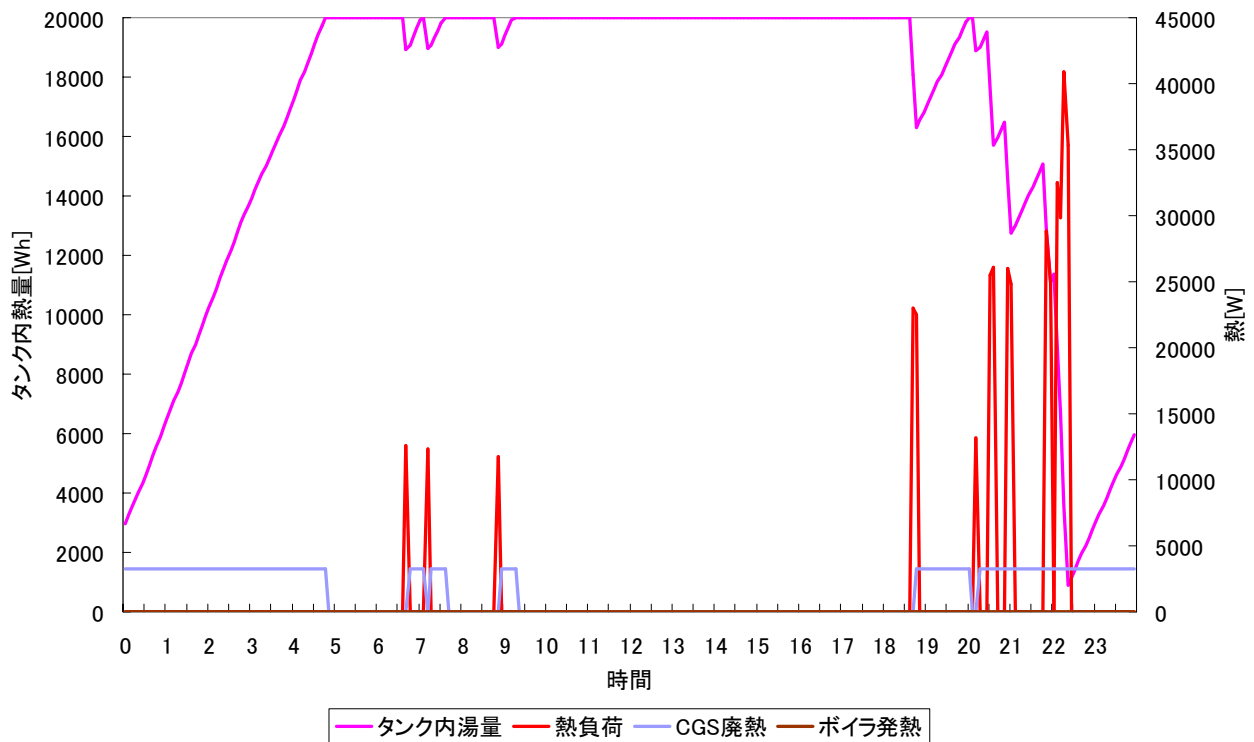


図 5-4 $\sigma=4$ の場合の熱に関する変化

正規分布補間時の分散の値に対する年間 CGS 運転時間の感度解析結果を示す。

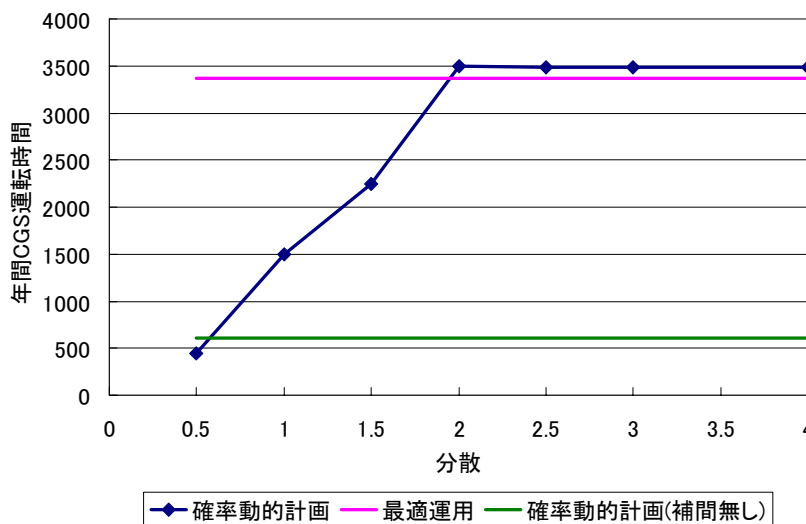


図 5-5 正規分布補間時の分散の値に対する年間 CGS 運転時間の感度解析結果

σ の小さい領域でエネルギーコストが上昇しているのは最適運用ケースと比較して CGS 運転時間が不足しているためであり、 $\sigma > 2.5$ でエネルギーコストが一定なのは、CGS が図 5-4 のように運転できる限り運転しているからである。ここでタンク残量が最大のときは CGS を運転しないという制約をはずすと、需要に関係なく CGS を運転し続けることが考えられる。

5. 1. 2. 補間の方向に対する詳細な解析

ここで、正規分布補間についてもっと詳しく見ていくことにする。

正規分布補間補完をする場合、前時点負荷方向の広がりとは後時点負荷方向の広がりとは、その意味が違ふと考えられる。そこで、図 5-6 で示すように、前時点負荷方向の分散を σ_α 、後時点負荷方向の分散を σ_β として、電力負荷・熱負荷それぞれの $\sigma_\alpha \cdot \sigma_\beta$ について感度解析を行った。

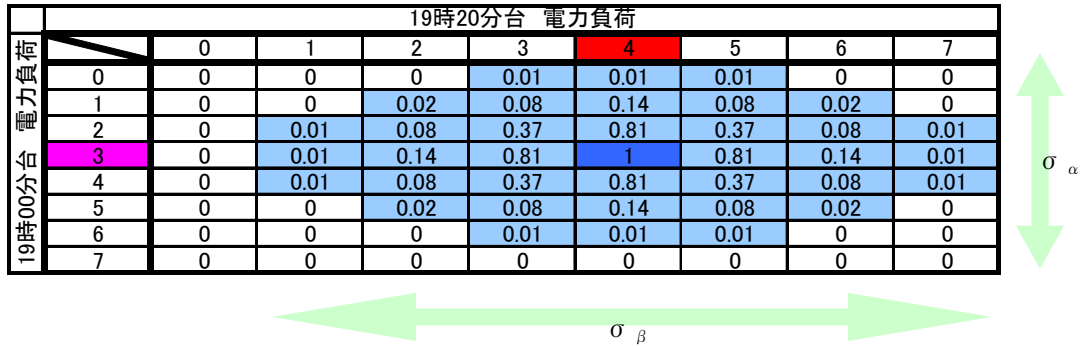


図 5-6 $\sigma=4$ の場合の熱に関する変化

感度解析の結果を図 5-7～図 5-10 に示す。このとき、感度解析しない分散の値は 2 で固定している。

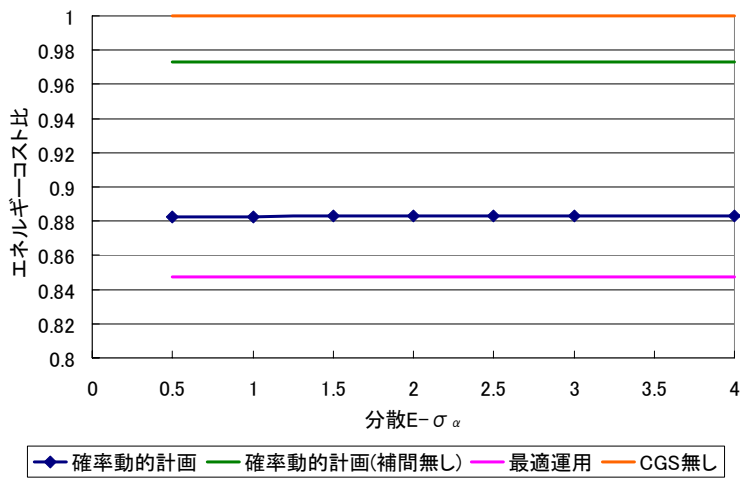


図 5-7 前時点電力負荷方向の分散に対するエネルギーコスト感度解析結果

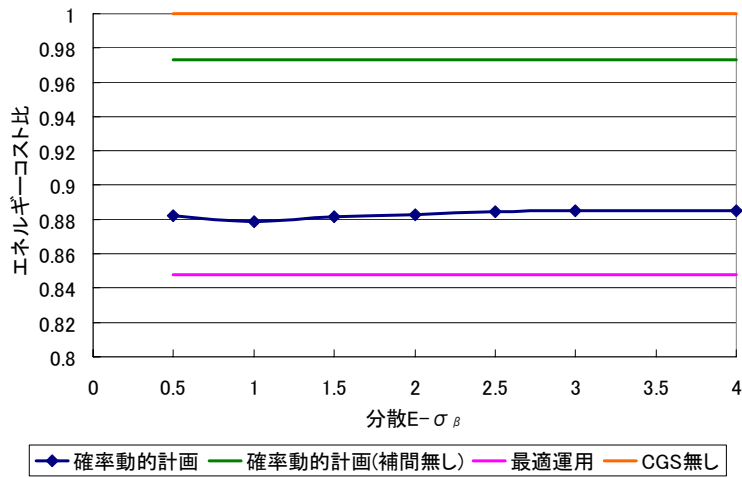


図 5-8 後時点電力負荷方向の分散に対するエネルギーコスト感度解析結果

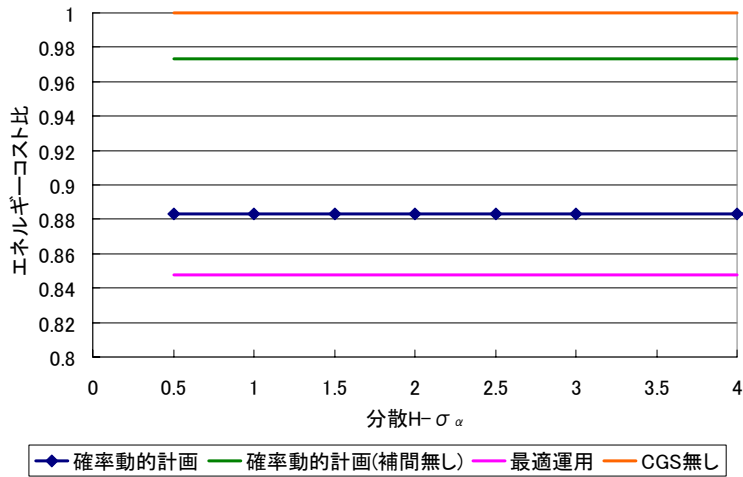


図 5-9 前時点熱負荷方向の分散に対するエネルギーコスト感度解析結果

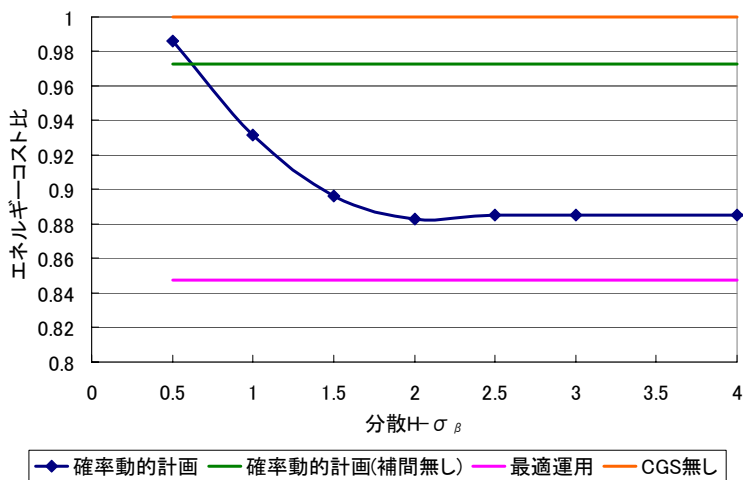


図 5-10 後時点熱負荷方向の分散に対するエネルギーコスト感度解析結果

図 5-7～図 5-10 から、熱負荷に関する図 5-5 における β 方向の分散の影響が大きく、また他のものが分散値 1 あたりでコスト最小になるのに対してこの分散だけが 2 の近辺で最小になることがわかる。これは、この部分の分散が小さいと次時点の熱負荷の予想が 0 に集中してしまうためだと考えられる。

以上より、適切な分散の値は電力負荷に関しては 1、熱負荷に関しては前時点方向に 1、後時点方向に 2 とする。

5. 2. 過去の日負荷曲線の取得日数に対する感度解析

本モデルでは、CGS は需要家の過去の日負荷曲線を一定期間分保存し、それを元に電力・熱負荷量遷移回数を求め、正規分布補間を行い電力・熱負荷量遷移確率を求めている。この際に過去日負荷曲線の取得日数の変化が、需要家のエネルギーコストに与える影響を調べた。即ち、対象となる需要家の電力・熱需要特性についての過去情報量の変化がエネルギーコストに与える影響の評価である。どのくらいの過去情報量があれば、エネルギーコスト削減効果が得られるか確かめるのが狙いである。過去日負荷曲線を数百日以上に長期に渡り取得すれば、より大きなエネルギーコスト削減効果が期待できる。しかし、実際の製品に搭載することを前提とした際に速やかに季節の変化に対応できなくては実用化することは無理であり、短期間でエネルギーコスト削減効果が得られる必要がある。

同時に本節では、確率動的計画ケース(正規分布補間あり)と、確率動的計画ケース(負荷量遷移回数の正規分布補間なし)、最適運用ケース、CGS 無しケースの 4 ケースについて CGS 運用シミュレーションを行った。過去日負荷曲線取得日数に対する年間エネルギーコストの感度解析結果を図 5-11 に、年間 CGS 運転時間の感度解析結果を図 5-12 に示す。なお、本節では正規分布補間時の分散の値を、前節の結果を受けて $E\sigma_\alpha = E\sigma_\beta = H\sigma_\alpha = 1.0$ 、 $H\sigma_\beta = 2.0$ として感度解析を行った。

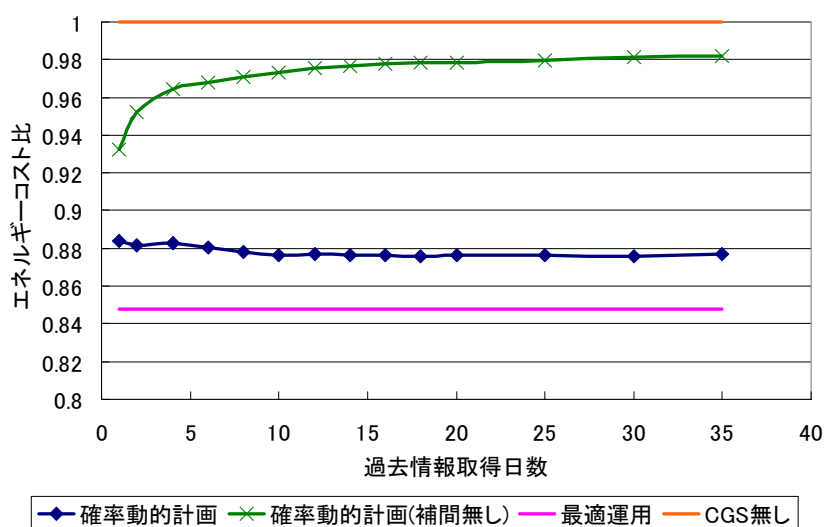


図 5-11 年間エネルギーコストの過去日負荷曲線取得日数に対する感度解析

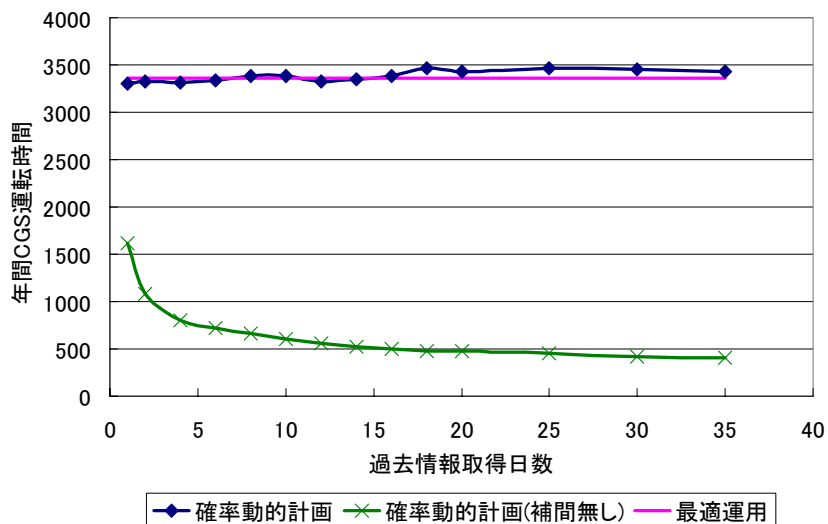


図 5-12 年間 CGS 運転時間の過去日負荷曲線取得日数に対する感度解析

図 5-11 より、確率動的計画法を用いたケース(正規分布補間無し)では、情報取得日数が増えるほど大きく悪化して言っている。これは、図 5-12 からわかるように、CGS の運転時間が減っているからである。補間を用いずに情報取得日数を増やしていくと、前節で熱需要の β 方向の分散を小さくしたときと同じように、例えば $0 \rightarrow 0$ などに遷移確率が集中してしまい、将来熱需要がくるという予想が成り立たなくなるからであると考えられる。

確率動的計画法を用いたケース(正規分布補間あり)では、過去日負荷曲線取得日数が 10 日程度で年間エネルギーコストが収束している。これは、CGS 設置・運転開始後 10 日程度で十分なエネルギーコスト低減の効果が現れ始めることを示している。これにより、季節変動に伴う需要家の電力・熱機器使用傾向の変動の影響を速やかに運用パターンに反映できる。

5. 3. 離散化の精度に関する感度解析

確率動的計画法を用いる場合に負荷の情報を離散化することが必要となるが、このときの離散化の精度で確率動的計画の計算量が大きく違ってくる。具体的には、一日あたりの計算量は $De^2 \times Dh^2 \times S \times T^2 \times 2^2$ となる。

CGS の実機にこのアルゴリズムを実装する場合、需要予想・運転方法決定を行う計算機はそこまで高性能ではないと考えられる。よって、なるべくメモリ消費量・計算回数を減らし、計算機にかかる負担を小さくしておいて、かつ効率的な CGS 動作決定をしていくことが重要になる。

そこで、電力、熱、タンク容量についてそれぞれ変数のとりうる値の範囲を変えていき、どの変数が重要なのかを調べた。

5. 3. 1. 電力負荷の離散化精度に対する感度解析

電力負荷を2~16の間で離散化させ、そのエネルギーコストに対する影響を感度解析した。その様子を図5-13に、計算回数に対する感度解析を図5-14に示す。

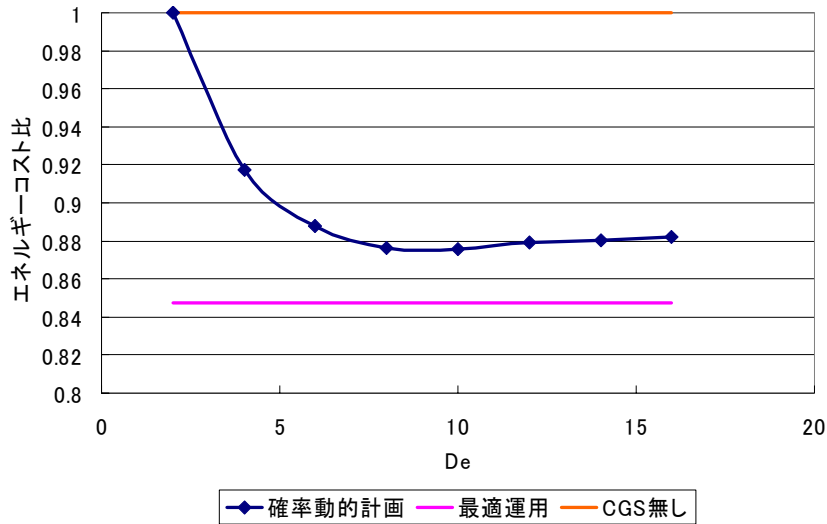


図5-13 年間エネルギーコストの電力負荷離散化数に対する感度解析

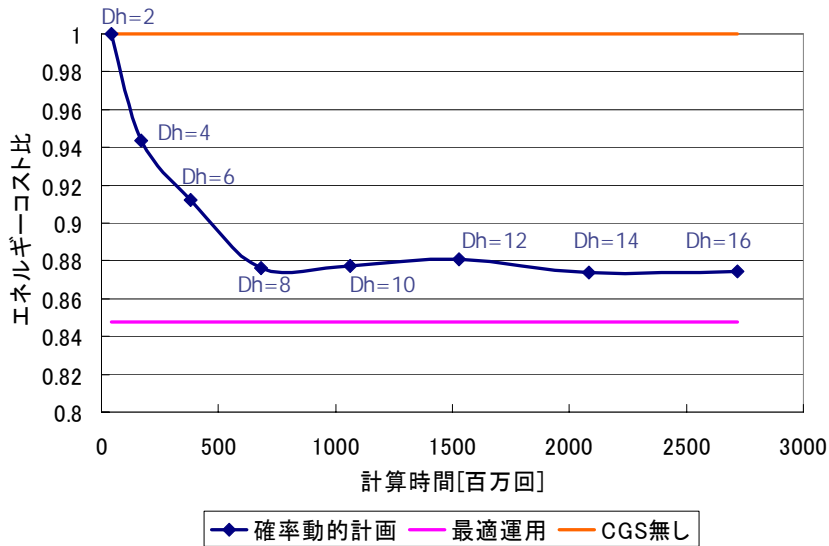


図5-14 電力負荷離散化を変化させたときの

年間エネルギーコストの1日あたり計算回数に対する感度解析

図より、電力負荷の区切りを増やせば増やすほどコスト削減に対して貢献する。ただし、計算時間は計算回数に比例するので、効率的な運転決定方法を考える場合、8段階区切りあたりでよいと考えられる。

5. 3. 2. 熱負荷の離散化精度に対する感度解析

熱負荷を2~16の間で離散化させ、そのエネルギーコストに対する影響を感度解析した。その様子を図5-15に、計算回数に対する感度解析を図5-16に示す。

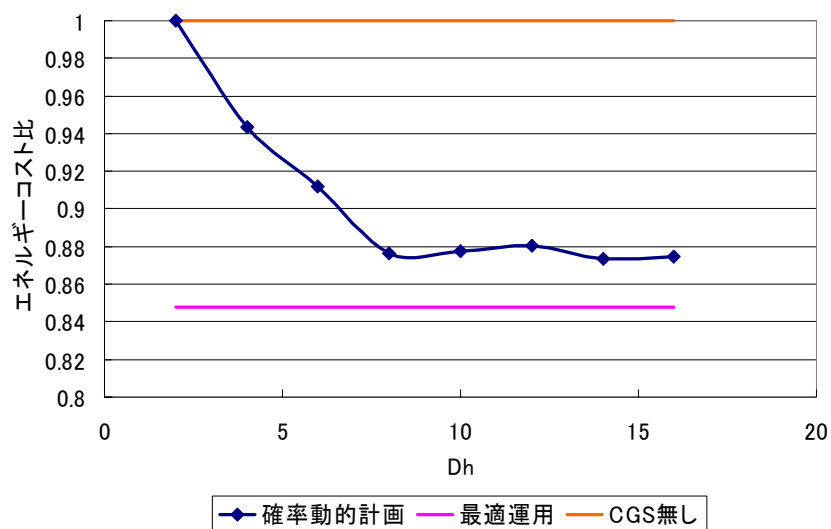


図5-15 年間エネルギーコストの熱負荷離散化数に対する感度解析

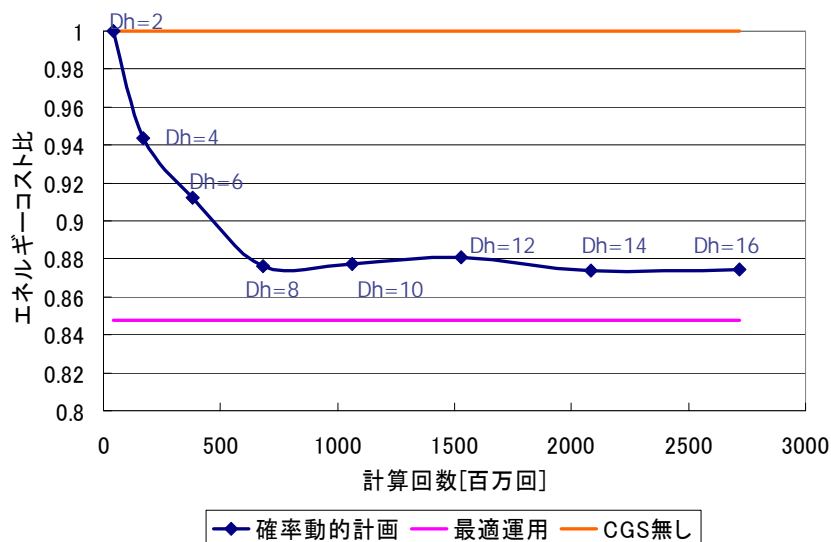


図5-16 熱負荷離散化を変化させたときの

年間エネルギーコストの1日あたり計算回数に対する感度解析

図より、熱負荷の区切りでも、電力負荷の場合と同じことが言える。やはり、効率的な運転決定方法を考える場合、8段階区切りあたりでよいと考えられる。

5. 3. 1. タンク内湯量の離散化精度に対する感度解析

タンク内湯量の刻みを2~16の間で変動させ、そのエネルギーコストに対する影響を感度解析した。その様子を図5-17に、計算回数に対する感度解析を図5-18に示す。

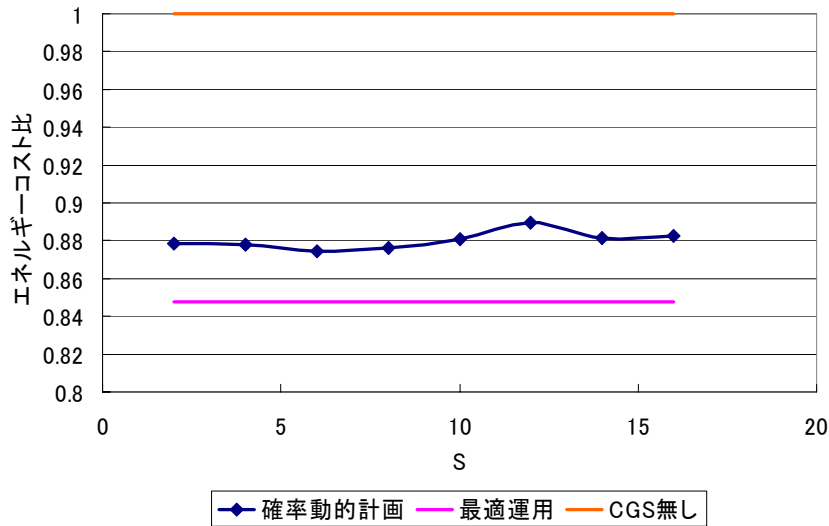


図5-17 年間エネルギーコストのタンク内湯量離散化数に対する感度解析

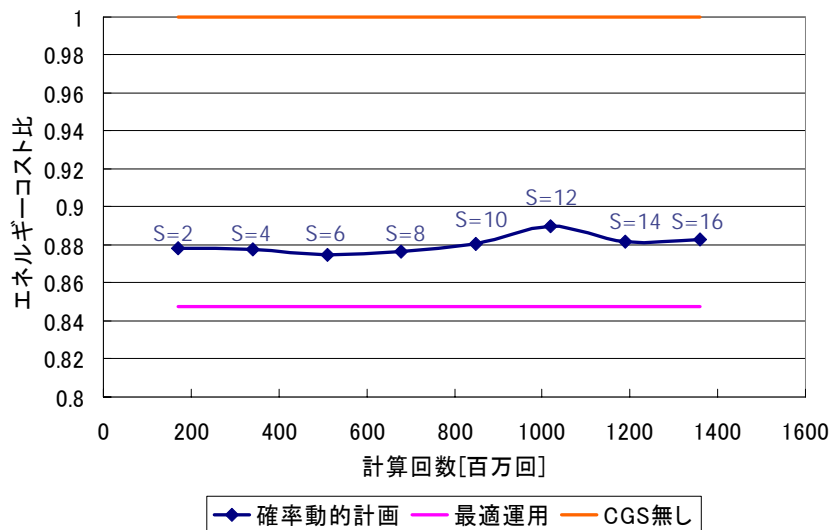


図5-18 タンク内湯量離散化数を変化させたときの

年間エネルギーコストの1日あたり計算回数に対する感度解析

図より、電力負荷や熱負荷とちがひ、タンク内湯量の刻み幅は年間のエネルギーコストには大きな影響を与えないことがわかる。よって、4~8段階の、比較的粗い離散化をしてもよいということになる。

5. 4. まとめ

以上、過去日負荷曲線取得日数を10日間、分散を $E\sigma_{\alpha}=E\sigma_{\beta}=H\sigma_{\alpha}=1.0$ 、 $H\sigma_{\beta}=2.0$ として設定し、CGS運用シミュレーションを行った結果は図5-19の通りとなった。

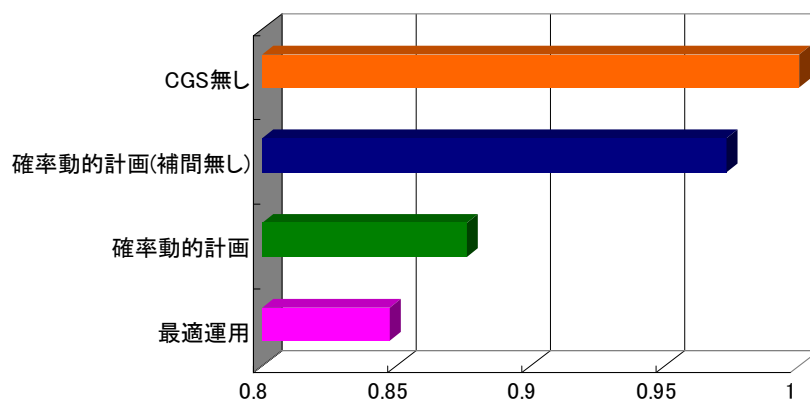


図5-19 各ケース別年間エネルギーコスト

本モデルでの条件(対象とした需要家は4人家族、電力単価23[円/kWh]、ガス単価冬期84[円/m³]、夏期69[円/m³])の場合、確率動的計画ケースではCGS無しケースと比べて削減率で見ると補間無しで約2.7[%]、標準偏差による補完を行えば約12.4[%]のエネルギーコスト削減効果があった。これは、今回の例では年間ランニングコスト27400円中の約34000円にあたる。また、もし最適運用ができるとすると、15.3[%]の年間ランニングコストができることになる。確率動的計画の有効性を最適運用ケースとの比率で評価すると、確率動的計画ケースでは最適運用ケースの81.0[%]ほどのエネルギーコスト削減効果があることとなる。

第六章 結論

6. 1. 本研究の成果

本論文では、戸建住宅を対象として、ボトムアップシミュレーションモデルで生成されたデータを用いて、確率動的計画法を用いて CGS の動作を決定していく方法を評価した。本論文で得られた知見を以下にまとめる。

- ・4 人家族で電力単価が 23[円/kWh]、ガス単価冬期 84[円/m³]、夏期 69[円/m³]の条件下、CGS の運用を行う場合では、CGS 無しの場合と比べ年間 12.4[%]程度のエネルギーコスト削減効果が認められた。仮に CGS の最適運用が行われた場合でもエネルギーコスト削減効果は 15.3[%]であることを考えると、確率動的計画法を用いた CGS の運用法は需要家に十分なエネルギーコスト削減効果をもたらすことが確認された。

- ・負荷量遷移回数を正規分布補間することにより、全体的にエネルギーコスト削減の効果が得られた。

- ・正規分布補間を行う場合、ひとつの前段階熱負荷から多数の後段階熱負荷に遷移する確率をある程度大きくしないと、効果的な CGS の運転ができないということが示された。

- ・10 日程度の過去日負荷曲線データ(=需要家の機器使用傾向に関する過去情報)があればほぼ十分なエネルギーコスト削減効果が得られることを示しており、季節変動による需要家の電気・熱機器使用傾向の変化に速やかに対応することが可能な十分な学習速度を有することが示された。

- ・このアルゴリズムを実際に CGS 付属の計算機に実装する際には、電力の分散化について優先的に精度を上げていくことが有効であることが示された。

以上、確率動的計画法を用いて需要家のエネルギーコストの期待値を計算し、期待値を最小とする CGS 動作を選択する CGS 運用法は、一般家庭のように負荷に不確実性が含まれる状況下で有効であることが示された。

6. 2. 今後の課題・展望

- ・CGS 運用シミュレーションの対象となる需要家の家族構成、所有電気・熱機器構成と電力料金・ガス料金を変化させたときのエネルギーコスト削減効果を調査し、確率動的計画法を用いた CGS 運用法の有用性の検証が必要である。特に、需用家の構成が変化すると需要の特性が大きく変わってくるので、家族構成・機器構成によって CGS の導入が適切である場合とそうでない場合がある。本モデルを活用すればその判定ができるはずである。

- ・本研究では、小型 CGS として市場で先行しているガスエンジン CGS をモデル化したが、手法としては固体高分子燃料電池の CGS などでも活用できる。その際、CGS の特性に沿った再度のモデル化が必要であろう。

- ・今回はランニングコストのみの評価であったが、詳細なコスト削減評価のためにはイニシャルコストについてもモデルに導入しなければならない。

- ・CGS が運転している時に電力需要が小さい場合の余剰電力について、本論文ではヒー

タを介して熱として利用しているが、逆潮流・他需要家との融通などの効率的な運用ができる可能性がある。

・CGS の利用には天然ガスを用いることによる石油代替・CO₂削減効果というメリットもある。CO₂削減効果を評価するためには、系統側を含めたモデルを考慮する必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たって様々な方にご助言、ご指導、ご支援を頂きました。この場を借りてご恩礼申し上げます。

ご多忙の中、本研究をご指導いただきました山地憲治教授、藤井康正助教授には心から感謝いたします。学部四年に山地藤井研究室に配属されて以来、三年間もの長きに渡って一からご指導いただいたことは生涯の宝とします。本当にありがとうございました。

林武人助手、竹下貴之助手には、研究室生活全般にわたって幅広いサポートをして頂きました。厚く御礼申し上げます。

同輩の稲垣憲治君、岡村知暁君、北浦孝啓君、篠原剛君、君たちと二年ないし三年を共に過ごせたことに感謝します。素晴らしい日々でした。

また、修士1年のみなさん、卒論生のみなさん、研究室の秘書の方々にも大変お世話になりました。深く感謝いたします。

電力中央研究所の西尾健一郎さんをはじめ、貴重な時間を割いて相談に乗って頂いた方々にも厚く御礼申し上げます。

最後に、長い学生生活をこれまで支え続けてくれた両親・家族に心より感謝し、謝辞を結びます。

2005年2月
室園 晃徳

参考文献

- [1]EDMC「エネルギー・経済統計要覧」(財)省エネルギーセンター(2002)
- [2]エネルギー活用辞典編集委員会
「エネルギー活用辞典」(株)産業調査会 辞典出版センター
- [3]辻毅一郎、他
「関西文化学術都市における住宅用エネルギー消費の計測調査報告書(第Ⅱ部)」
日本学術振興会(2001)
- [4]NHK放送文化研究所「国民生活時間調査」日本放送出版協会(2001)
- [5]総務省統計局統計センター「国勢調査」(2002)
- [6]若園芳嗣、鈴置保雄、他
「分オーダーの給湯負荷データを用いた住宅用マイクロコージェネの運転方法・蓄熱容量
の検討」電気学会論文誌B、121巻8号、pp.973-981(2001)
- [7]大阪ガスホームページ Eco-Will 商品説明ページ
<http://www.g-life.jp/html/scene/cogeneration/ecowill/index.html>
- [8]大阪ガス(株)越智雅人、他
「家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステムの運転状況について」
第19回エネコン講評論文集、pp275-278(2002)
- [9]鍋島一郎「動的計画法」森北出版(1968)

発表文献

- [1] 「エネルギー使用の不等時性を考慮したコージェネレーションシステムの導入評価」
第 22 回エネルギー・資源学会研究発表会 (2003 年 6 月)

- [2] 「住宅における需要の不等時性を考慮したコージェネレーションシステムの導入評価」
第 23 回エネルギー・資源学会研究発表会 (2004 年 6 月)

- [3] 「家庭での需要の不等時性を考慮したマイクロコージェネレーションシステムの経済性評価」 第 21 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2005 年 1 月)

- [4] 「家庭用コージェネレーションシステムの経済性評価」
平成 17 年電気学会全国大会 (2004 年 3 月予定)