

修士論文

電力系統の需要特性を考慮した
新型電力機器の環境負荷低減効果の評価

Evaluation of environmental burden reduction by modern power
equipments in consideration of power demand characteristics

指導教官

山地 憲治 教授

2008年8月18日提出

東京大学大学院工学系研究科

電気工学専攻

学籍番号 66974

高木 雅昭

内容梗概

温室効果ガスによる地球温暖化を緩和するため、省エネルギーによる環境負荷低減効果のある様々な新型電力機器が開発されている。機器の中でも、電力システムに不可欠な省エネ型変圧器、および風力発電の連系可能量の増加のためのプラグインハイブリッド車との組み合わせは注目される。これらの機器は電力システムの一部として機能するため、機器単体ではその性能や効果を正確に評価することはできない。本論文の目的は電力系統の需要特性を考慮した上で、これらの電力機器を電力システムの一部として捉えて、評価することにある。

本論文は3部構成とし、それぞれに次のようなタイトルをつけた。

第1部「柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の評価」

第2部「需要家の負荷パターンに基づいた最適容量選定手法によるアモルファス変圧器の評価」

第3部「系統連系されたプラグインハイブリッド車の充電制御による風力発電連系可能量の評価」

第1部および第2部では、省エネ型の変圧器であるアモルファス変圧器の評価を行った。アモルファス変圧器は無負荷損が小さいという点で省エネ性能が高いと言われているが、実際の省エネ効果は負荷パターンに大きく依存する。第1部の電力会社が所有する柱上変圧器と、第2部の需要家が所有する配電用変圧器という所有形態の違いを考慮した上で、それぞれの負荷パターンに対するアモルファス変圧器の評価を行った。柱上変圧器の場合は、家庭の需要パターンをボトムアップシミュレーション手法で作成し、さらに柱上変圧器に接続されている数件分の需要パターンを合成した上で、独自に開発した手法を用いて柱上変圧器の最適選択を求める。対して、配電用変圧器の場合は需要家が自らの負荷パターンを推計する簡易で実用的な手法を提案する。そして、需要家別の負荷パターンに基づいて、機種および容量を含めた統合的な評価から最適な変圧器を選定する。分析の結果、柱上変圧器で発生する損失は過半が無負荷損であり、省エネルギーや環境負荷低減のためには変圧器の無負荷損のパラメータを小さくした方が効果的であることが明らかとなった。従って、無負荷損が少ないアモルファス変圧器は現状存在する変圧器の中では柱上変圧器に最も適しているといえる。需要家所有の配電用変圧器については、機種としてアモルファスを選定することで、日本全体における年間CO₂排出量を業務・産業部門合計で、189万[t-CO₂/year]削減できるという結果が得られた。これは京都議定書のCO₂排出削減目標値(1990年の排出量である12億6,100万tの6%)である約7,600万tの2.49%に相当する。更に需要家が自らの負荷パターンを分析し、コスト最適な容量を選定した場合には227万[t-CO₂/year]の削減となり、CO₂排出削減目標値の2.99%に相当する効果が期待できる。

第3部では、風力発電の出力変動に起因する周波数変動問題を緩和するために、プラグ

インハイブリッド車に搭載された蓄電池の活用の可能性を評価した。周波数変動問題を解決するには発電量と需要量のバランスを維持する必要があるので、風力発電の出力変動に応じて、プラグインハイブリッド車の充電電力を制御することを考える。プラグインハイブリッド車の充電電力が風力発電の出力変動に対して、どの程度の規模で貢献できるかを評価して、地域別にプラグインハイブリッド車の活用による風力発電の系統連系可能容量を求めた。風力発電の連系容量に対して、3~5割程度の充電電力の制御によって、現状の周波数品質を維持することが可能であるという分析結果が得られた。風力発電を導入する上で制約の一つとなる短周期面での問題については、充電制御を行うことで大幅に改善され、再生可能エネルギー導入促進に有効な手段となりうる。

目次

第1章	序論	1
第一部	柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の評価 .	3
第2章	柱上変圧器のモデル化	4
2. 1	はじめに	4
2. 2	変圧器の損失電力コスト	4
2. 3	柱上変圧器の寿命と容量	7
第3章	ボトムアップシミュレーションを用いた世帯で消費する電力需要の作成 .	10
3. 1	シミュレーションの方法	10
3. 2	季節依存性のない電気機器のモデリング	10
3. 3	季節依存性のある機器に関するモデリング ¹⁾	12
第4章	柱上変圧器 1 台あたりの家庭用電力需要	16
4. 1	全国モデル	16
4. 2	地域モデル	18
4. 3	シミュレーション条件とパラメータ	24
第5章	結果と考察	25
5. 1	負荷率の時間変化	25
5. 2	変圧器で発生する損失電力	29
5. 3	アモルファス変圧器ブレークイーブン価格	33
5. 4	地域モデル	34
5. 5	まとめ	36
第二部	需要家の負荷パターンに基づいた最適容量選定手法によるアモルファス変圧器の評価	37
第6章	変圧器の容量選定	38
6. 1	はじめに	38
6. 2	変圧器容量をパラメータとしたトータルコスト関数	39
6. 3	平均等価負荷	39
第7章	分析結果	40
7. 1	トータルコスト関数	40
7. 2	平均等価負荷	42
7. 3	変圧器パラメータの関数近似	43

7. 4	近似関数による分析	47
第8章	現状分析	51
8. 1	現状の容量選定	51
8. 2	平均等価負荷の近似	55
第9章	考察	57
9. 1	業務部門	57
9. 2	産業部門	58
9. 3	日本全体における評価	60
9. 4	ブレークイーブン価格	64
9. 5	まとめ	67
第三部	系統連系されたプラグインハイブリッド車の充電制御による風力発電連系可能量の評価	68
第10章	モデル作成	69
10. 1	はじめに	69
10. 2	負荷変動モデル	70
10. 3	風力変動モデル	71
10. 4	充電制御	72
10. 5	周波数変動シミュレーションモデル	73
10. 6	充電パターン	75
第11章	シミュレーション結果	77
11. 1	系統周波数偏差	77
11. 2	風力発電の連系可能容量の算出	78
第12章	充電電力量の最適配分	81
12. 1	定式化	81
12. 2	結果	81
12. 3	考察	84
12. 4	まとめ	84
第13章	結論	85
13. 1	本論文の結果	85
13. 2	今後の展望	86
謝辞	87
参考文献	88
発表実績	90
付録	91

表目次

表 2-1	アモルファスはけい素鋼板の違い.....	5
表 3-1	季節依存性のない電気機器とその属性.....	11
表 3-2	冷・暖房機器とその属性.....	14
表 4-1	全国における変圧器容量と年間消費電力量.....	16
表 4-2	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（全国モデル）	17
表 4-3	変圧器1台当りの年間消費電力量（地域モデル）.....	18
表 4-4	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域A）.....	18
表 4-5	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域B）.....	19
表 4-6	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域C）.....	19
表 4-7	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域D）.....	20
表 4-8	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域E）.....	20
表 4-9	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域F）.....	21
表 4-10	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域G）..	21
表 4-11	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域H）..	22
表 4-12	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域I）..	22
表 4-13	変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域J）..	23
表 4-14	シミュレーション条件.....	24
表 5-1	柱上変圧器のパラメータ.....	29
表 7-1	変圧器のパラメータ.....	40
表 8-1	単位面積当たりのピーク負荷と年間需要量.....	51
表 8-2	単位面積当たりの平均等価負荷[VA/m ²].....	55
表 9-1	使用用途による分類.....	60
表 9-2	ブレークイーブン価格を算出する変圧器のパラメータ.....	64
表 10-1	自家用乗用車台数と最低需要電力.....	73
表 10-2	LFC容量と負荷制限器設定値.....	74
表 10-3	周波数変動モデルのパラメータ.....	74
表 10-4	1日の総充電電力量.....	75
表 12-1	充電電力量の最適配分.....	82
表 12-2	風力発電連系可能量の比較.....	82

目次

図 2-1	ヒステリシス曲線	5
図 2-2	うず電流	5
図 2-3	鉄心の構造	5
図 2-4	負荷率に対する変圧器全損失の変化	6
図 2-5	電力会社向け出荷台数	7
図 2-6	電力会社向け出荷容量	8
図 2-7	1 台当たりの平均容量	8
図 2-8	柱上変圧器総容量の推移	9
図 2-9	30kVA変圧器 1 台当たりの推定価格	9
図 3-1	外気温と冷蔵庫の需要比の関係	15
図 4-1	気温の変化（全国モデル）	17
図 4-2	気温の変化（地域A）	23
図 4-3	気温の変化（地域B）	23
図 4-4	気温の変化（地域C）	23
図 4-5	気温の変化（地域D）	23
図 4-6	気温の変化（地域E）	24
図 4-7	気温の変化（地域F）	24
図 4-8	気温の変化（地域G）	24
図 4-9	気温の変化（地域H）	24
図 4-10	気温の変化（地域I）	24
図 4-11	気温の変化（地域J）	24
図 5-1	負荷率の時間変化（2月）	26
図 5-2	負荷率の時間変化（5月）	27
図 5-3	負荷率の時間変化（8月）	28
図 5-4	柱上変圧器(30kVA)1 台当たりの日間損失電力量	30
図 5-5	年間の電力損失量（変圧器 1 台当たり）	31
図 5-6	年間の電力損失量（日本全体）	32
図 5-7	年間のCO ₂ 排出量（日本全体）	32
図 5-8	アモルファス変圧器ブレークイーブン価格	33
図 5-9	年間平均等価負荷率	34
図 5-10	年間消費電力量と平均等価負荷率の関係	35
図 7-1	トータルコスト（横軸は容量 500kVAにおける平均等価負荷率）	41
図 7-2	平均等価負荷に対する最小コスト容量	42
図 7-3	変圧器パラメータの関数近似（無負荷損）	44

図 7-4	変圧器パラメータの関数近似（負荷損）	45
図 7-5	変圧器パラメータの関数近似（設備本体価格）	47
図 7-6	容量に対する限界費用（ $Q_e=100$ ）	47
図 7-7	コスト最適容量と環境最適容量	48
図 7-8	トータルコストの比較	49
図 7-9	CO ₂ 排出量の比較	49
図 7-10	コスト・環境最適な年間平均等価負荷率	50
図 8-1	需要家の負荷パターン	53
図 8-2	床面積に対する変圧器容量	54
図 8-3	床面積に対する平均等価負荷率	54
図 8-4	年間需要量に対する平均等価負荷	55
図 9-1	コスト最適な容量と現状の変圧器容量の比較	57
図 9-2	業務部門におけるトータルコストの比較	58
図 9-3	高負荷率運用時のトータルコストの比較	59
図 9-4	産業部門におけるトータルコストの比較	59
図 9-5	変圧器1台当たりの年間損失電力量（業務部門）	60
図 9-6	変圧器1台当たりの年間損失電力量（産業部門）	62
図 9-7	コスト最適な平均等価負荷率（30%低減）	62
図 9-8	年間の電力損失量（日本全体）	63
図 9-9	年間のCO ₂ 排出量（日本全体）	63
図 9-10	アモルファス変圧器ブレイクイーブン価格（容量30~200kVA）	65
図 9-11	アモルファス変圧器ブレイクイーブン価格（容量300~750kVA）	65
図 9-12	アモルファス変圧器ブレイクイーブン価格（容量1000~2000kVA）	66
図 10-1	負荷変動モデル	70
図 10-2	負荷変動パターン（総需要：5000[MW]）	70
図 10-3	風力変動モデル	71
図 10-4	風力変動パターン（定格出力：1000[MW]）	71
図 10-5	充電制御の特性	72
図 10-6	周波数変動シミュレーションモデル	73
図 10-7	1日の充電パターン	76
図 11-1	系統周波数偏差	77
図 11-2	充電電力に対する周波数の標準偏差	79
図 11-3	基準ケースと同レベルとなる充電電力	80
図 12-1	PHEVの普及割合と風力発電連系可能量	83

第 1 章 序論

温室効果ガスによる地球温暖化を緩和するため、省エネルギーによる環境負荷低減効果のある様々な新型電力機器が開発されている。機器の中でも、電力システムに不可欠な省エネ型変圧器、および風力発電の連系可能量の増加のためのプラグインハイブリッド車との組み合わせは注目される。これらの機器は電力システムの一部として機能するため、機器単体ではその性能や効果を正確に評価することはできない。本論文の目的は電力系統の需要特性を考慮した上で、それぞれの電力機器をシステムの一部として捉えて、経済性および環境負荷低減効果を評価することにある。次にそれぞれの機器に関する研究背景を述べる。

本論文は 3 部構成とし、それぞれに次のようなタイトルをつけた。

第 1 部「柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の評価」

第 2 部「需要家の負荷パターンに基づいた最適容量選定手法によるアモルファス変圧器の評価」

第 3 部「系統連系されたプラグインハイブリッド車の充電制御による風力発電連系可能量の評価」

第 1 部および第 2 部では、省エネ型の変圧器であるアモルファス変圧器の評価を行う。通常、変圧器の鉄心に用いられるけい素鋼板は原子が周期的に配列した結晶構造である。それに対して、アモルファス合金は熔融状態から急激に冷却することで作られる非結晶の固体である。変圧器の鉄心部分にアモルファス合金を使用することで損失電力を低減することが出来る。原子配列に規則性がないアモルファス合金では、鉄心に磁束が通る際の損失（ヒステリシス損）が少なくなる。また板厚はけい素鋼板と比べて約 1/10 となるので、渦電流損も低減される。アモルファス変圧器は無負荷損が小さいという点で省エネ性能が高いと言われているが、実際の省エネ効果は負荷パターンに大きく依存する。第 1 部の電力会社が所有する柱上変圧器と、第 2 部の需要家が所有する配電用変圧器という所有形態の違いを考慮した上で、それぞれの負荷パターンに対するアモルファス変圧器の評価を行う。柱上変圧器の場合は、家庭の需要パターンをボトムアップシミュレーション手法で作成し、さらに柱上変圧器に接続されている数件分の需要パターンを合成した上で、独自に開発した手法を用いて柱上変圧器の最適選択を求める。対して、配電用変圧器の場合は需要家が自らの負荷パターンを推計する簡易で実用的な手法を提案する。そして、需要家別の負荷パターンに基づいて、機種および容量を含めた統合的な評価から最適な変圧器を選定する。

第 3 部では、風力発電の出力変動に起因する周波数変動問題を緩和するために、プラグインハイブリッド車に搭載された蓄電池の活用の可能性を評価する。再生可能エネルギーの中でも、特に風力発電は太陽光発電などと比較し、発電単価が安く、欧米を中心に導入が進んできている。わが国でも、クリーンなエネルギー源として、評価が高まるとともに、

コストダウンも進み、導入数が増加している^[1]。しかしながら、風力発電は風況に応じて出力が変動するため、風力発電が電力系統に大量に連系されると、系統の周波数変動が増大し、電力品質に悪影響を与える可能性がある。特に系統の周波数制御(LFC: Load Frequency Control)容量が減少する夜間においては、周波数変動の問題は顕著となる。一方、運輸部門においても、石油依存度の低下およびCO₂排出量の低減を実現する車として、近年、プラグインハイブリッド車(PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)が注目を集めている。PHEVとはハイブリッド車に搭載されている蓄電池を大型化することによって、数十kmまでの電気走行を可能とし、かつ家庭用電源等の外部からの充電もできる車である。特徴としては、急速充電設備等の新規インフラを必ずしも必要としないこと、ガソリン走行まで含めれば長距離走行可能なこと、およびハイブリッド車以上のCO₂削減が可能なことである^[2]。周波数変動問題を解決するには発電量と需要量のバランスを維持する必要があるので、風力発電の出力変動に応じて、プラグインハイブリッド車の充電電力を制御することを考える。プラグインハイブリッド車の充電電力が風力発電の出力変動に対して、どの程度の規模で貢献できるかを評価して、地域別にプラグインハイブリッド車の活用による風力発電の系統連系可能容量を求める。

本論文は全13章から構成されており、1章が序論、2章から5章が第1部、6章から9章が第2部、10章から12章が第3部、13章がまとめとなっている。

1章では、現状を取り巻く背景を概観し、研究の目的について述べる。

2章では、変圧器の一般的な特徴を述べ、柱上変圧器のモデル化を行う。

3章では、世帯が消費する電力需要を模擬するためのボトムアップシミュレーションについて解説する。

4章では、柱上変圧器の負荷パターンを定めるためのモデル構築を行う。

5章では、上記のモデルを用いて、アモルファス変圧器の省エネルギー効果および経済性の評価を行う。

6章では、変圧器の容量選定に関する手法について述べる。

7章では、上記の手法を用いて、2種類の変圧器（トップランナー変圧器とアモルファス変圧器）の分析を行う。

8章では、現状の容量選定について分析し、提案した容量選定手法の適用における問題点について考察する。

9章では、前章で考察した問題点を考慮した上で、容量選定をしたアモルファス変圧器の省エネルギー効果を分析する。

10章では、周波数変動シミュレーションを行うためのモデル構築を行う。

11章では、上記のモデルを用いて、プラグインハイブリッド車の充電制御が風力発電出力変動に対して、どの程度貢献できるかを評価する。

12章では、プラグインハイブリッド車の充電電力量を時間軸にて最適配分した時の、風力発電連系可能容量を算出する。

最後に13章では、本論文で得られた知見をまとめた。

第一部 柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の評価

第2章 柱上変圧器のモデル化

2.1 はじめに

電力会社の配電系統で使用される柱上変圧器（高圧配電線に沿って分散配置される変圧器には他に地中変圧器もあるが、ここではそれも含んだ名称として「柱上変圧器」を使用する）にアモルファス変圧器を用いることで、大幅な損失電力の削減が期待できる。ただし、省エネルギーに対して期待ができる反面、アモルファス合金は材料コストや加工コストが高く、けい素鋼板変圧器と比べ高コストとなる。また、飽和磁束密度が低いので鉄心が大型化し、それに伴い巻き線も大型化するため負荷損が増加するというデメリットもある。

経済性の評価は変圧器購入金額と損失電力コストの和であるトータルコストを用いて行うが、柱上変圧器の損失電力コストを算出するためにはその負荷パターンを知る必要がある。本研究では、柱上変圧器の負荷パターンを定める手法を提案し、柱上変圧器にアモルファス変圧器を適用した場合の省エネルギー効果、環境負荷低減効果、経済性を評価することを目的とする。

2.2 変圧器の損失電力コスト

変圧器が運転中に発生する全損失には無負荷損と負荷損があり、次式で表すことができる。

$$W_t = W_i + P^2 W_c \quad (2-1)$$

ここで、 W_t ：全損失[W]、 W_i ：無負荷損[W]、 W_c ：負荷損（全負荷時）[W]、 P ：負荷率
 無負荷損とは変圧器に電圧を印加（励磁）することによって変圧器の鉄心から発生する損失であり、負荷の大きさによらず常時一定の損失を発生する。無負荷損の主な発生要因としてはヒステリシス損とわず電流損がある。ヒステリシス損は外部磁界を周期的に変化させたとき発生する損失であり、図 2-1 に示すようなヒステリシス曲線（外部磁場と磁石が作る磁場の関係）が囲む面積に比例する。アモルファスでは、このヒステリシス面積が小さいためにヒステリシス損が低減される。わず電流とは図 2-2 に示すように金属板を通過する磁界が変化した場合、磁界の変化を打ち消すように、金属内で生じるうず状の電流のことである（レンツの法則）。この電流により発生する熱エネルギー損失がわず電流損である。従って、この損失を低減させるには図 2-3 に示すようにわず電流が流れる面に対して垂直方向（板の厚み）を薄くするとよい。わず電流損は垂直方向の厚みの 2 乗に比例し、電気抵抗に反比例する。アモルファスはけい素鋼板と比較して、厚みが約 1/10 であり、電気抵抗も 3 倍あるためわず電流損は著しく低減される（表 2-1）。

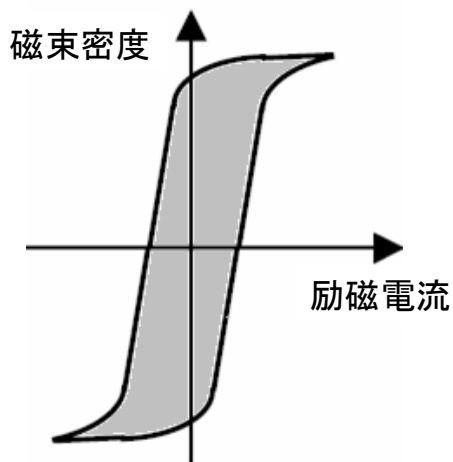


図 2-1 ヒステリシス曲線

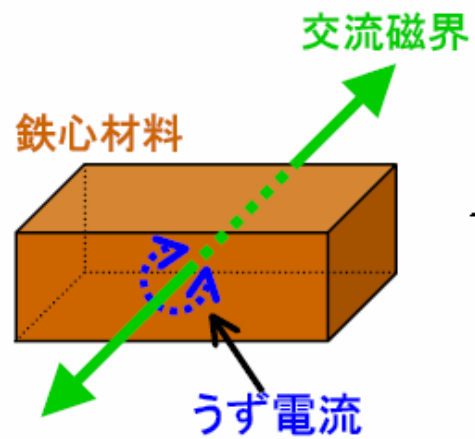


図 2-2 うず電流



図 2-3 鉄心の構造

表 2-1 アモルファスはけい素鋼板の違い

	アモルファス	けい素鋼板
厚さ [μm]	25	230
抵抗 [$\mu\Omega\text{cm}$]	130	45

負荷損とは変圧器に電流が流れることによって生じる損失で、主に巻線の抵抗で発生する熱損失であり、負荷の2乗に比例して発生する^[8]。

一般的に負荷率という言葉はある期間中における最大電力に対する平均電力の比で使われているが、本論文では変圧器業界で通常用いられている言葉を採用し、次のように定義する。負荷率とは変圧器の定格容量に対する負荷の割合であり、次式のように表す。

$$P = \frac{Q(t)}{S} \quad (2-2)$$

ここで、 S : 変圧器の定格容量[kVA], $Q(t)$: 負荷[kVA]

図 2-4 に負荷率に対する変圧器全損失の変化例を示す。図から明らかなように変圧器で発生する全損失は負荷率によって大きく異なる。

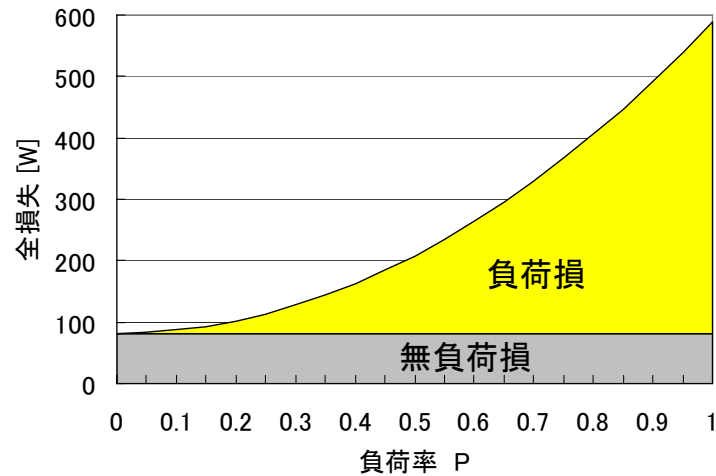


図 2-4 負荷率に対する変圧器全損失の変化

平均等価負荷率 P_e は各時間の負荷率の加重平均で表わされ、次式のように定義される。負荷率を 2 乗しているのは負荷損が負荷の 2 乗に比例するためである。

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^N \left(\frac{Q(t)}{S} \right)^2 \Delta t} \quad (2-3)$$

ここで、 T : 等価平均する期間[h] , $\Delta t=T/N$: 期間 T を N 等分したときの時間間隔[h]
変圧器から発生する年間の損失電力量 P_{loss} [Wh]は平均等価負荷率 P_e を用いると次式のようになる。

$$P_{loss} = \{W_i + P_e^2 W_c\} \times 8760 \quad (2-4)$$

従って、変圧器を購入した際に発生するトータルコスト C_{total} [yen]は損失電力コストと変圧器購入金額の和であり、変圧器の寿命を M 年とすると次のようになる。

$$C_{total} = \sum_{m=1}^M \frac{1}{(1+r)^m} \times \{W_i + P_e^2 W_c\} \times 8760 \times \frac{EP}{1000} + C_{tr} \quad (2-5)$$

ここで、 EP : 電気料金[¥/kWh], r : 割引率, C_{tr} : 変圧器の価格[yen]

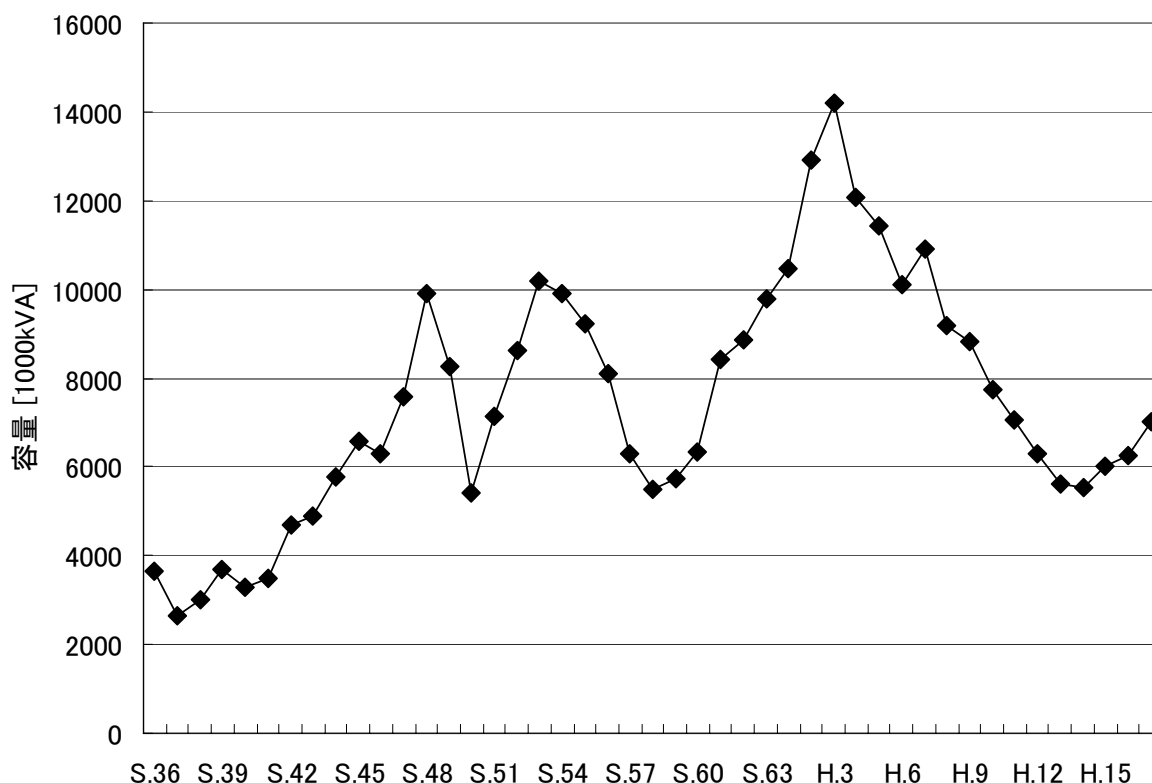
以上のことから、柱上変圧器の損失電力コストを算出するには平均等価負荷率 P_e を求める必要があることが分かる。

2. 3 柱上変圧器の寿命と容量

まず、モデルに用いる柱上変圧器の容量を決定する。図 2-5 および図 2-6 に電力会社向けに出荷された柱上変圧器（電力会社向け標準変圧器）の容量と台数を示す^[4]。昭和 56 年以前は電力会社向けという分類が無かったため、昭和 57 年以降の出荷実績を参考にし、年間に出荷された標準変圧器台数の 8 割を、容量については 5 割を電力会社向けと推定した。また、各年の台数と容量から、1 台当たりの平均容量を算出したものを図 2-7 に示す。近年の平均的な容量は 20~30kVA の間にある。柱上変圧器の製品としては 20kVA と 30kVA が存在する。本研究では上位の容量を採用し、モデルとなる柱上変圧器を 30kVA とした。

次に柱上変圧器の寿命の推定を行う。推定は 1 年ごとに寿命となった変圧器を総容量から差し引き、出荷された変圧器を総容量に加算することで行い、その総容量が電気事業便覧^[5]に記載されている設備総容量と近くなるようにした。図 2-8 に寿命を 33 年とした時の推移を示す。図より両者の推移はほぼ一致しており、柱上変圧器の平均的な寿命は約 33 年と推定される^[6]。ただし、柱上変圧器の法定耐用年数が 18 年であることも考慮し、経済性の評価は耐用年数を 30, 25, 20 年とした 3 ケースについて行う。

電力会社向け出荷容量と金額から、30kVA 変圧器 1 台当たりの金額を算出した結果を図 2-9 に示す。図より電力会社が購入する価格は 140~160 千円程度と推定されるので、今回の分析では 150 千円とした。



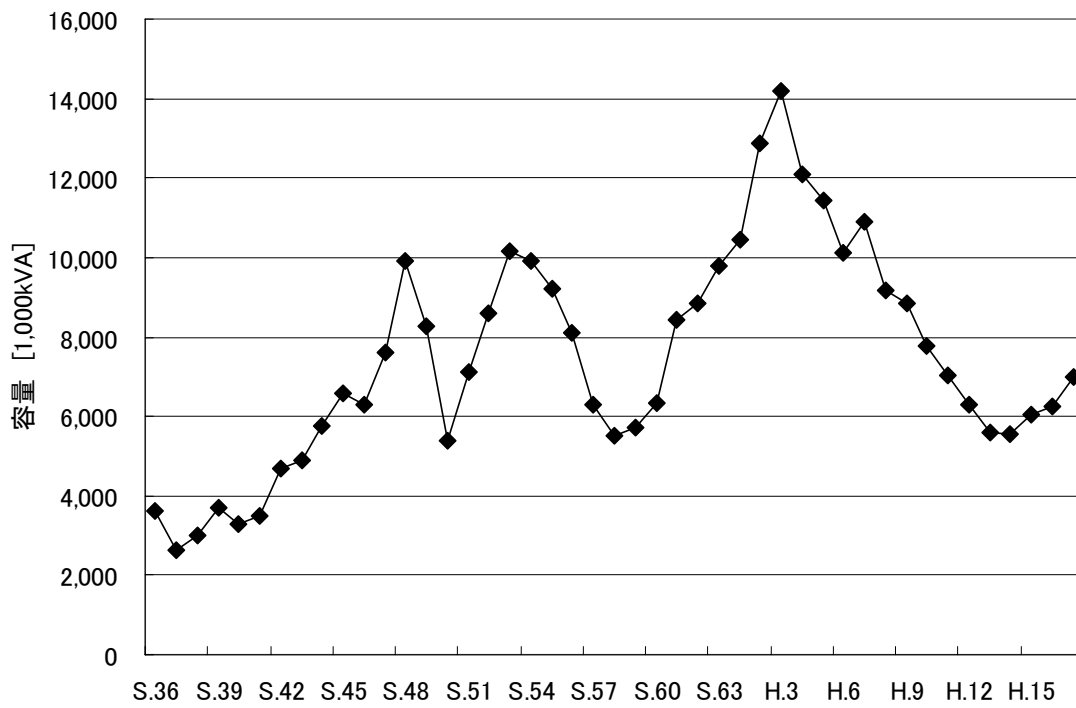


図 2-6 電力会社向け出荷容量

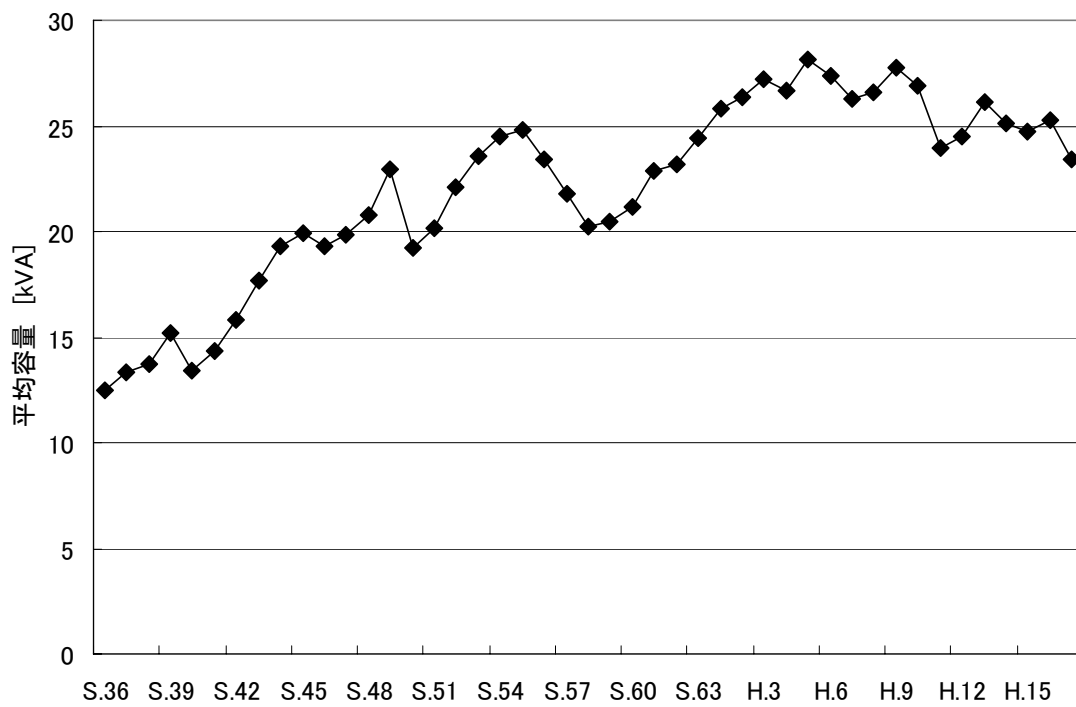


図 2-7 1台当たりの平均容量

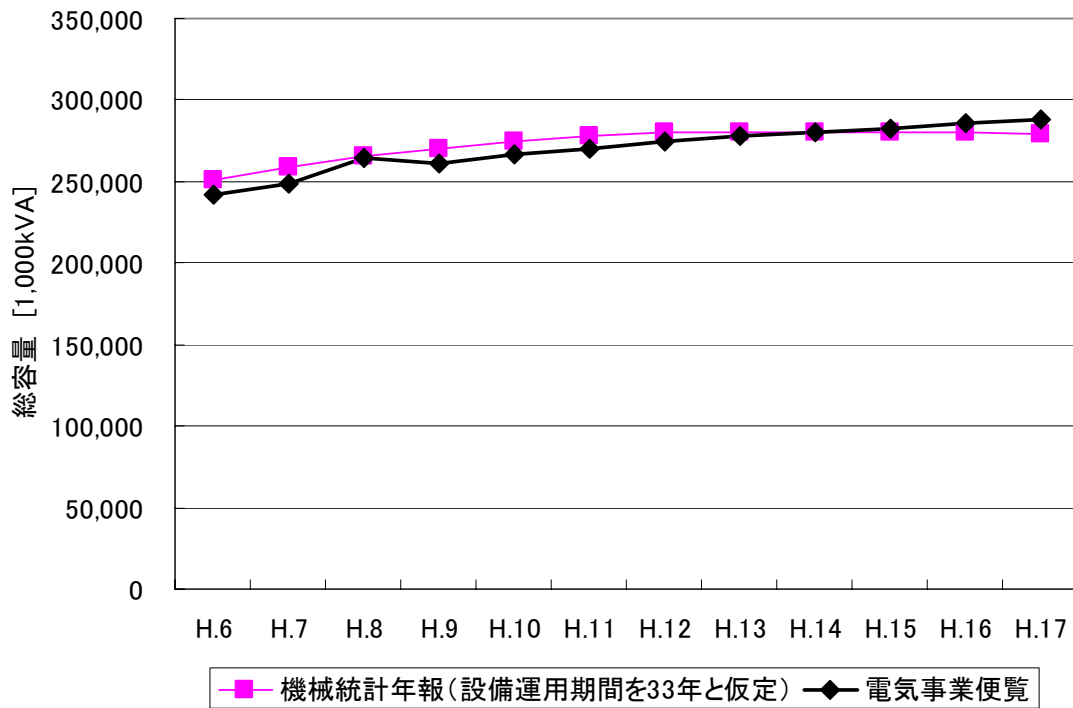


図 2-8 柱上変圧器総容量の推移

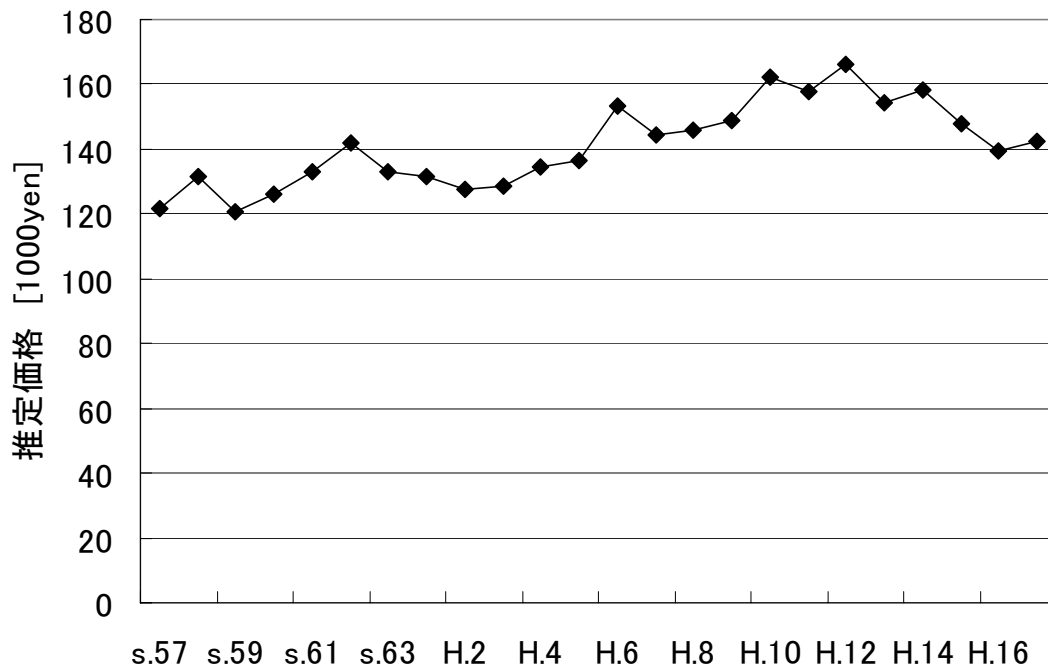


図 2-9 30kVA変圧器1台当たりの推定価格

第3章 ボトムアップシミュレーションを用いた世帯で消費する電力需要の作成

3. 1 シミュレーションの方法^[7]

家庭における電力需要は不確実性を伴っている。そこで、世帯が保有する電気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当たりの電力需要を算出する。まず、世帯構成員及び世帯が保有する電気機器を決定する。次に、NHK国民生活時間調査^[8]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ションする。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機器と関連づけ、各時刻における電気機器の使用状況を決定する。

シミュレーションの各ステップは以下の通りである。

Step 1 : 世帯構成員及び世帯が保有する電気機器のリストを作成する。

Step 2 : 世帯構成員の起床在宅スケジュールを作成する。

Step 3 : 各機器について起動停止スケジュールを生成する。

Step 4 : シミュレーション結果を日負荷曲線にまとめる。

各ステップについて、以下の節で詳しい説明を加える。

3. 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。

(1) 世帯が保有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、利用回数限度の6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、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[minute]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100回使用されるのは不自然である。

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3-1に示す。

表 3-1 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(%)			
		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	9.0	45.0	4.5	72.0
照明(各個人)	起床在宅	5	10	100	150	0	0	999	9.0	27.0	4.5	54.0
電気炊飯器	炊事・掃除・洗濯	30	60	200	600	0	10	2	10.5	28.0	3.5	49.0
電子レンジ	炊事・掃除・洗濯	5	5	400	800	0	10	3	0.0	14.0	0.0	42.0
電気ポット	炊事・掃除・洗濯	15	20	800	1200	30	40	2	0.0	21.0	0.0	49.0
掃除機	炊事・掃除・洗濯	20	60	300	900	0	0	2	3.5	24.5	7.0	35.0
ドライヤー	身のまわりの用事	5	5	900	1500	0	0	1	3.5	7.0	0.0	49.0
洗濯機	炊事・掃除・洗濯	30	60	300	400	0	0	2	0.0	21.0	7.0	28.0
テレビ(1台目)	テレビ	10	60	70	210	5	15	999	3.5	17.5	7.0	31.5
テレビ(2台目)	テレビ	5	30	50	150	4	10	999	3.5	10.5	3.5	24.5
オーディオ機器	CD・テープ	30	90	30	100	5	20	999	7.0	28.0	3.5	56.0
ビデオ	ビデオ	20	90	150	250	10	20	999	3.5	14.0	7.0	49.0
パソコン	マスメディア接触	20	90	100	250	5	15	999	0.0	10.5	3.5	35.0

(2) 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。外出開始確率についても，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。

(3) 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。

(4) シミュレーションの実行

5分毎に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る。機器個別の使用電力を足し合わせるによって、日負荷曲線を生成する。

3. 3 季節依存性のある機器に関するモデリング^{[9][10]}

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。

(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。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。

(当該機器使用確率) = (外気温による使用確率) × (時刻による使用確率)

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

$P_{i,j}$: 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) ($28 < T_{b,i} < 32$)

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。

- 稼動継続時間：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分以上運転し続けるとした。
- 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 800W，最小値 200W とした。待機電力についても同様に、最大値 10W，最小値 0W 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く思われるので、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。

(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 、 T_d および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。

- 単位消費電力、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。
- 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とした。

冷・暖房に用いる電気機器及びその属性を表 3-2 に示す。

表 3-2 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(%)			
		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	1.4	8.4	3.5	18.9
エアコン(暖)	起床在宅	30	120	400	1000	0	10	0.8	4.0	0.4	10.0
電気ヒーター	起床在宅	15	90	300	700	0	0	0.8	4.0	0.8	12.0
ホットカーペット	起床在宅	10	60	100	450	0	0	0.8	8.0	0.8	12.0
こたつ	起床在宅	10	30	80	250	0	0	2.0	6.0	2.0	16.0

(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。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が占める 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 3-1 のようになり、強い相関関係があることが分かる。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 500kWh、最小値 200kWh とした。また、冷蔵庫の普及率は 100% とした。

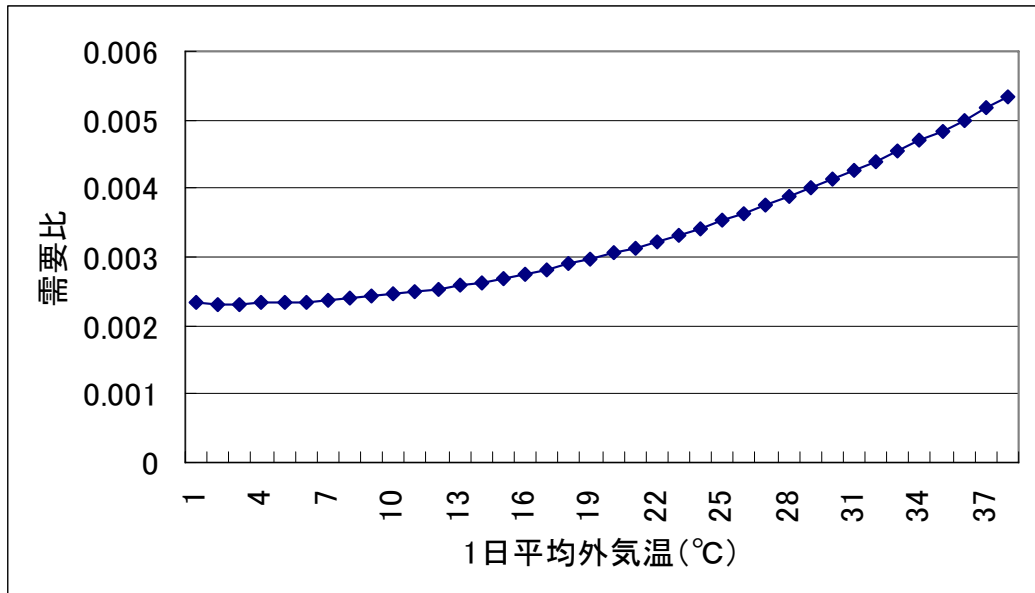


図 3-1 外気温と冷蔵庫の需要比の関係

第4章 柱上変圧器1台あたりの家庭用電力需要

4.1 全国モデル

表4-1に全国における変圧器容量と年間消費電力量を示す^[5]。表の中で変圧器容量の架空分と地中分を合計したものが、変圧器総容量となる（C欄）。変圧器に接続される負荷は電灯合計と低圧電力であり、これらの合計電力量が変圧器を介して負荷に供給される（D欄）。合計電力量と変圧器総容量から単位容量当たりの年間消費電力量が求まり（E欄）、これを今回のモデル容量である30kVAに換算することで、変圧器1台当たりの年間消費電力量となる（F欄）。この年間消費電力量とボトムアップシミュレーションによる年間消費電力量が近くなるように変圧器1台に接続される世帯の数を調整した後、機器使用確率にて微調整を行った。世帯構成員を勤め人、家庭婦人、学生、無職の4種類に分類し、各世帯の構成は国勢調査の世帯構成の出現確率から定めた^[11]。その結果、変圧器1台に接続される世帯数は7軒となり、調整後の年間消費電力量は30891[kWh/year]となった。表4-2に世帯構成と各世帯が所有する電気機器を示す。世帯が所有する電気機器の所有割合は文献^{[12][13]}の普及率を参考に決定した。

表 4-1 全国における変圧器容量と年間消費電力量

A	変圧器容量(架空) [1,000kVA]	288,527
B	変圧器容量(地中) [1,000kVA]	27,021
C=A+B	変圧器総容量 [1,000kVA]	315,548
D	年間消費電力量（電灯合計+低圧電力） [1,000kWh/year]	320,706,932
E=D/C	単位容量当たりの年間消費電力量 [kWh/kVA/year]	1,016
F=E*30	変圧器1台当たり(30kVA換算)の年間消費電力量 [kWh/year]	30,490

表 4-2 変圧器 1 台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（全国モデル）

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ（2台目）	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン（冷）	エアコン（暖）	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○	○			○		○				○	○
2	2	0	0	0		○	○	○	○		○		○	○		○	○
3	2	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○
4	1	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	1	1	2	1	○	○	○	○	○	○		○	○	○			○
6	1	0	0	0	○	○		○				○			○		○
7	1	1	0	0	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	○

シミュレーションで用いる気温の変化を月毎に設定した。冬季（2月）、中間季（5月）、夏季（8月）の気温を代表して図 4-1 に示す。

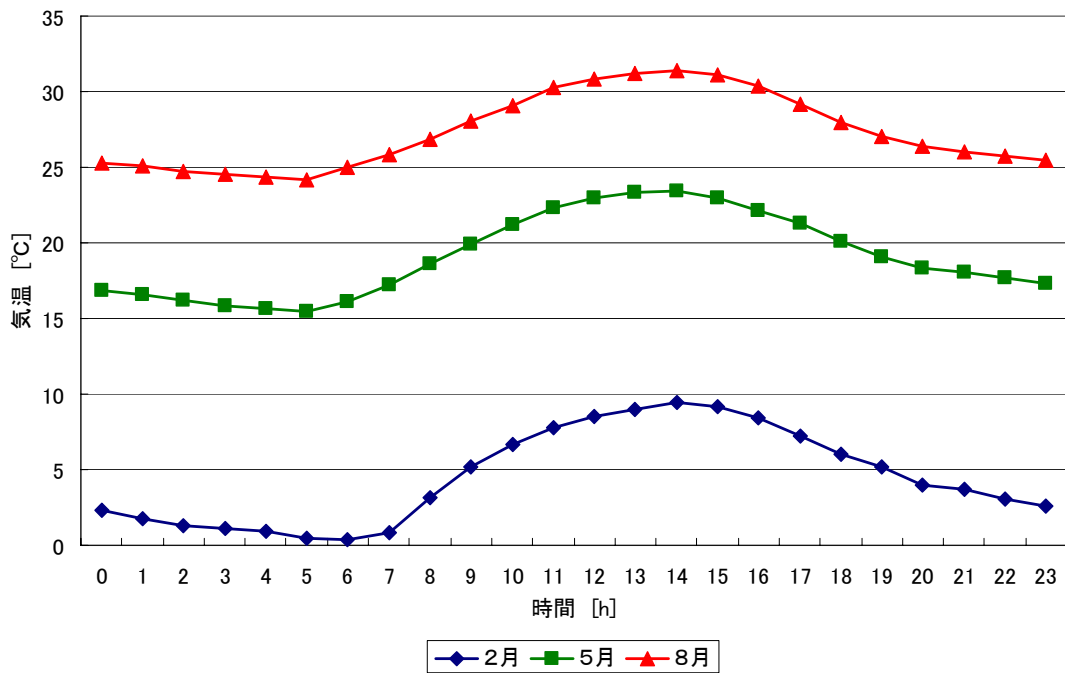


図 4-1 気温の変化（全国モデル）

4. 2 地域モデル

わが国の各地域の特徴を反映した10個の地域モデルを作成した(表4-3)。各地域で気温や年間消費電力量、電気機器の普及率がそれぞれ異なる。機器使用確率については全国モデルの値をそのまま使用している。表4-4～表4-14に地域モデルの世帯構成と世帯が所有する電気機器を示す。また、図4-2～図4-11に気温の変化を示す。

表 4-3 変圧器1台当たりの年間消費電力量(地域モデル)

地域	変圧器1台に接続される世帯数	変圧器1台当たりの年間消費電力量 [kWh/year]
A	8	35,540
B	9	39,366
C	8	35,239
D	5	21,052
E	9	28,523
F	8	36,860
G	7	31,640
H	8	32,725
I	9	39,746
J	8	34,452

表 4-4 変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器(地域A)

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ(2台目)	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン(冷)	エアコン(暖)	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○	○	○	○		○		○
2	1	1	2	1	○	○	○	○	○		○		○		○	○	○
3	2	0	0	0		○	○		○	○	○	○	○	○			○
4	1	1	1	0	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○
5	1	0	0	0	○		○	○		○			○	○			○
6	1	1	0	0	○	○	○	○	○		○	○	○		○	○	○
7	1	1	2	1	○	○		○	○	○			○	○	○	○	○
8	2	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○

表 4-5 変圧器 1 台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器 (地域B)

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ (2台目)	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン (冷)	エアコン (暖)	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○	○	○	○	○	○		○
2	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
3	1	1	1	0	○	○	○	○	○		○		○	○		○	○
4	1	0	0	0		○				○		○	○	○	○		○
5	1	1	0	0	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
6	1	1	2	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	2	0	0	0	○	○		○	○	○	○		○	○	○	○	○
8	2	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	2	1	0	0	○	○		○	○	○	○	○	○	○		○	○

表 4-6 変圧器 1 台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器 (地域C)

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ (2台目)	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン (冷)	エアコン (暖)	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○	○	○	○	○	○		
2	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	
3	1	0	0	0		○	○			○			○	○			○
4	1	1	1	0	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○
5	2	1	1	0	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
6	1	1	0	0	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	
7	1	1	2	1	○	○		○	○	○	○		○	○	○	○	○
8	2	1	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○		○	

表 4-7 変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域D）

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ（2台目）	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン（冷）	エアコン（暖）	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○		○	○	○	○		○
2	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○		○	○
3	1	1	2	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	1	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○
5	1	0	0	0	○						○	○	○	○		○	○

表 4-8 変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域E）

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ（2台目）	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン（冷）	エアコン（暖）	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○	○	○			○		
2	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○						
3	1	0	0	0		○	○			○	○	○			○		
4	1	1	1	0	○	○		○	○	○	○	○	○				
5	1	1	0	0	○	○	○	○	○	○					○		
6	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	○				○	
7	1	0	0	0	○	○		○		○					○		
8	0	0	0	1	○	○	○	○	○	○							○
9	2	1	1	0	○	○		○	○	○		○			○		

表 4-9 変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域F）

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ（2台目）	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン（冷）	エアコン（暖）	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○	○		○		○		○
2	1	1	2	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	2	0	0	0		○	○		○	○	○		○	○		○	○
4	1	1	1	0	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○		○
5	1	0	0	0	○			○		○		○	○	○		○	○
6	2	1	1	0	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○
7	1	1	2	1	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	1	1	0	0		○	○	○	○				○	○	○		○

表 4-10 変圧器1台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器（地域G）

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ（2台目）	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン（冷）	エアコン（暖）	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○	○	○	○	○	○		○
2	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	1	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○		○	○
4	1	0	0	0		○				○	○	○	○	○	○		○
5	2	1	1	0	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
6	1	1	0	0	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○

表 4-1 1 変圧器 1 台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器 (地域H)

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ (2台目)	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン (冷)	エアコン (暖)	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0	○			○		○	○	○	○		○		○
2	1	1	2	1	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	
3	2	0	0	0	○		○	○	○	○			○			○	○
4	1	1	1	0	○	○		○	○		○	○	○		○		○
5	1	0	0	0	○		○	○		○	○		○			○	○
6	2	1	1	0	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○
7	2	1	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○		○		○
8	1	1	2	1	○	○	○	○	○	○			○			○	○

表 4-1 2 変圧器 1 台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器 (地域I)

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ (2台目)	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン (冷)	エアコン (暖)	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○			○	○	○	○	○		○
2	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
3	1	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
4	1	1	2	1	○	○		○	○	○	○		○	○	○	○	○
5	1	0	0	0		○							○	○	○		○
6	1	1	0	0		○	○	○	○	○		○	○	○	○		○
7	2	0	0	0	○		○	○		○		○	○	○		○	○
8	2	1	1	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	2	1	0	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表 4-1 3 変圧器 1 台に接続される世帯構成と各世帯が所有する電気機器 (地域J)

世帯	勤め人	家庭婦人	学生	無職	電気炊飯器	電子レンジ	電気ポット	ドライヤー	テレビ (2台目)	オーディオ機器	ビデオ	パソコン	エアコン (冷)	エアコン (暖)	電気ヒーター	ホットカーペット	こたつ
1	1	0	0	0		○		○		○	○	○	○	○			○
2	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
3	1	1	1	0	○	○	○		○	○			○	○		○	○
4	1	0	0	0		○		○			○	○	○	○	○		○
5	1	1	0	0	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
6	1	1	2	1	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○
7	2	1	1	0	○			○	○	○			○	○	○		○
8	2	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○		○	○		○	○

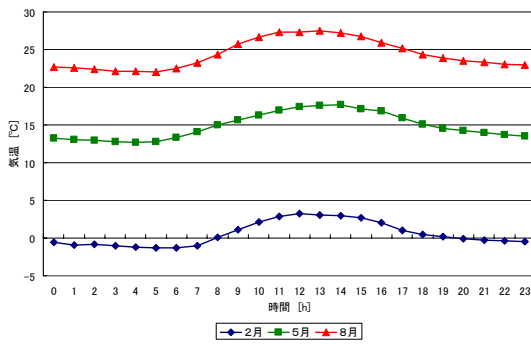


図 4-2 気温の変化 (地域A)

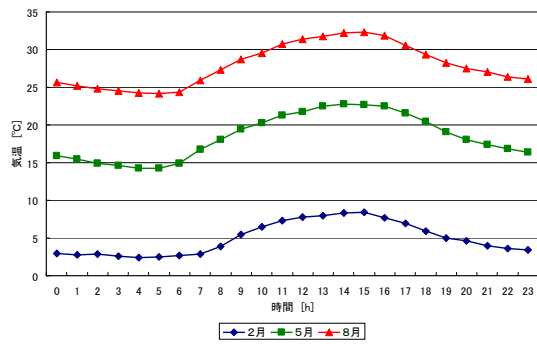


図 4-3 気温の変化 (地域B)

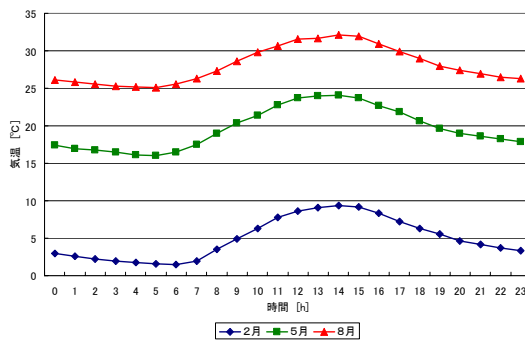


図 4-4 気温の変化 (地域C)

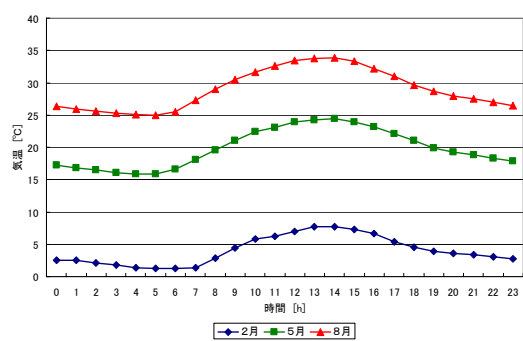


図 4-5 気温の変化 (地域D)

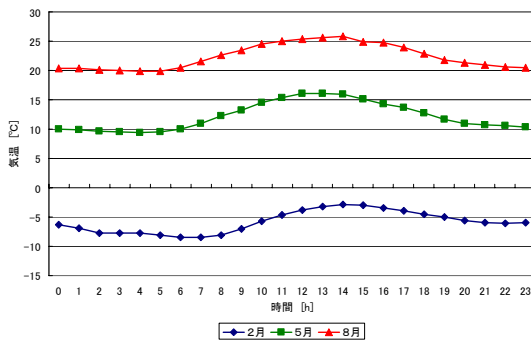


図 4-6 気温の変化 (地域E)

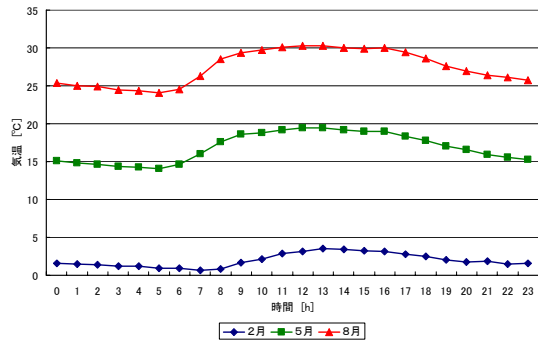


図 4-7 気温の変化 (地域F)

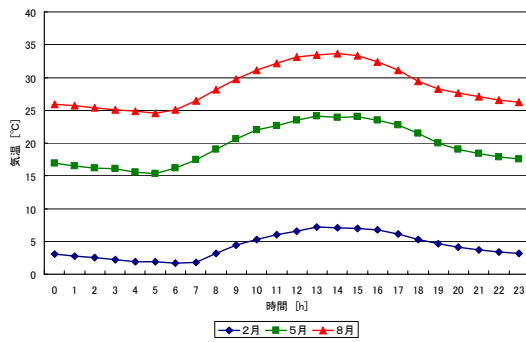


図 4-8 気温の変化 (地域G)

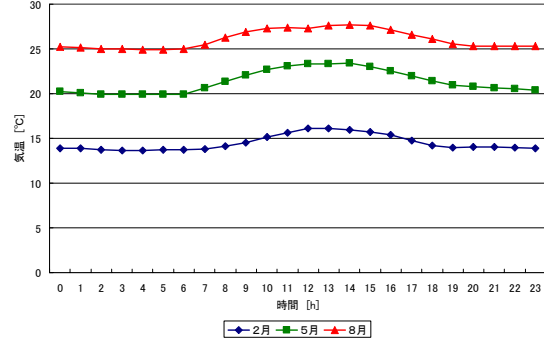


図 4-9 気温の変化 (地域H)

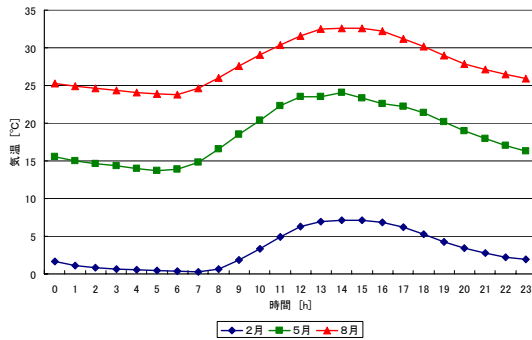


図 4-10 気温の変化 (地域I)

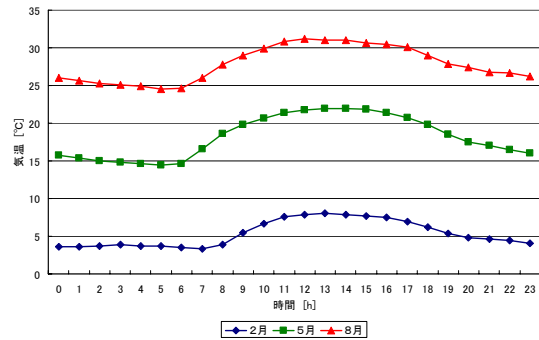


図 4-11 気温の変化 (地域J)

4. 3 シミュレーション条件とパラメータ

表 4-14 にシミュレーション条件を示す。電力会社の場合、トータルコストを算出する式(2-5)における電気料金 EP は送電損失を考慮した発電単価とした。

表 4-14 シミュレーション条件

時間ステップ	5[minute]
力率	0.9
発電単価*	7.37[yen/kWh]
割引率	3[%]
使用端CO ₂ 排出係数	0.41[kg-CO ₂ /kWh]

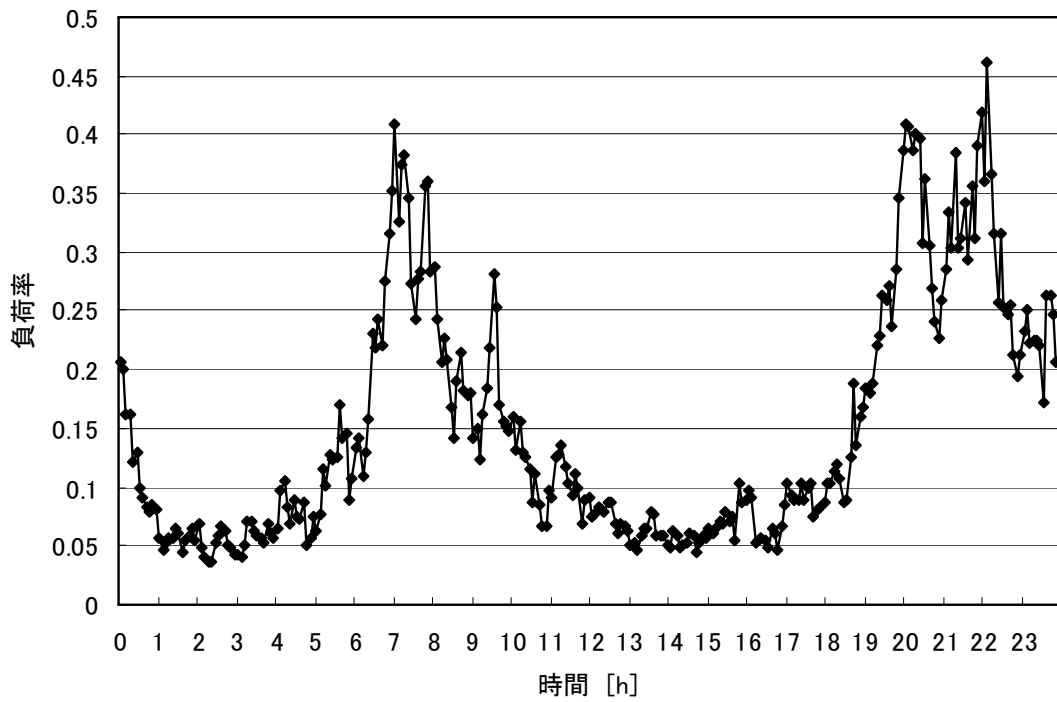
*全電源平均の発電コスト 7[yen/kWh]^{[14][15]}に送電損失 5%^[5]を考慮した値

第5章 結果と考察

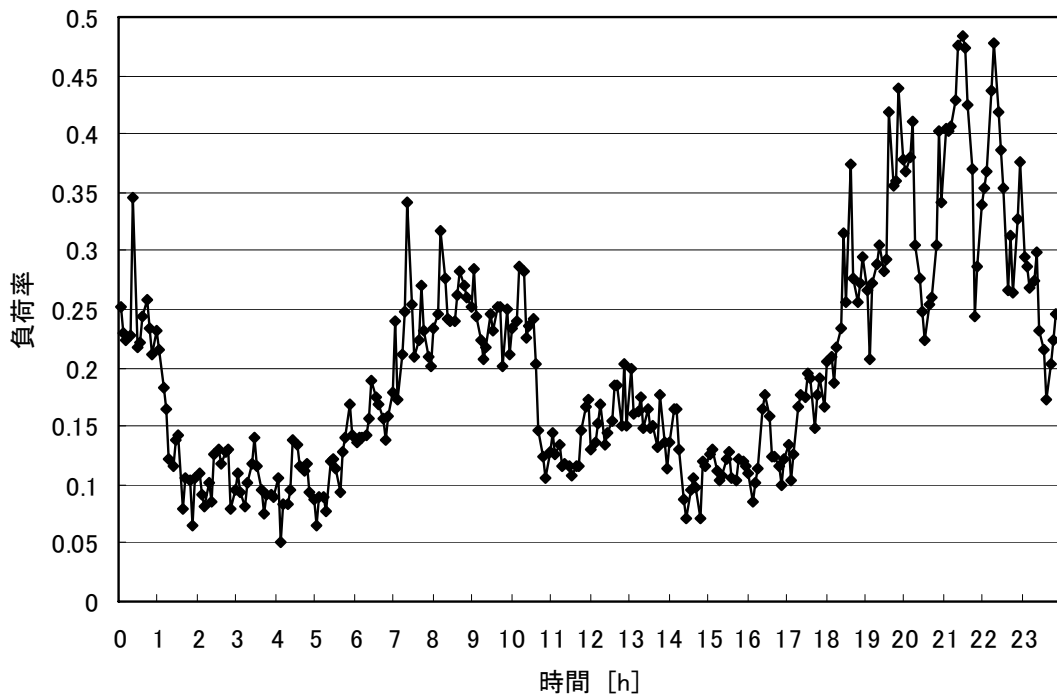
5.1 負荷率の時間変化

全国モデルの結果を用いて、負荷率について概説する。負荷率の時間推移について1日分を図5-1～図5-3に示す。それぞれ冬季(2月)、中間季(5月)、夏季(8月)の平日分と休日分である。

全体の傾向として家庭の需要は朝と夜に一度ずつピークがあるのが分かる。また、平日に比べて休日の方が日中の負荷率が高くなっており、特に冷房需要がある8月に顕著に現れている。家庭の需要において負荷率のピークが一番高くなるのは冬季で、次いで夏季、中間期の順となった。冬季には需要のピークの時間帯と暖房需要の時間帯が重なり、夏季はピークの時間帯と冷房需要の時間帯がずれるためであり、直感的にも理解できる。

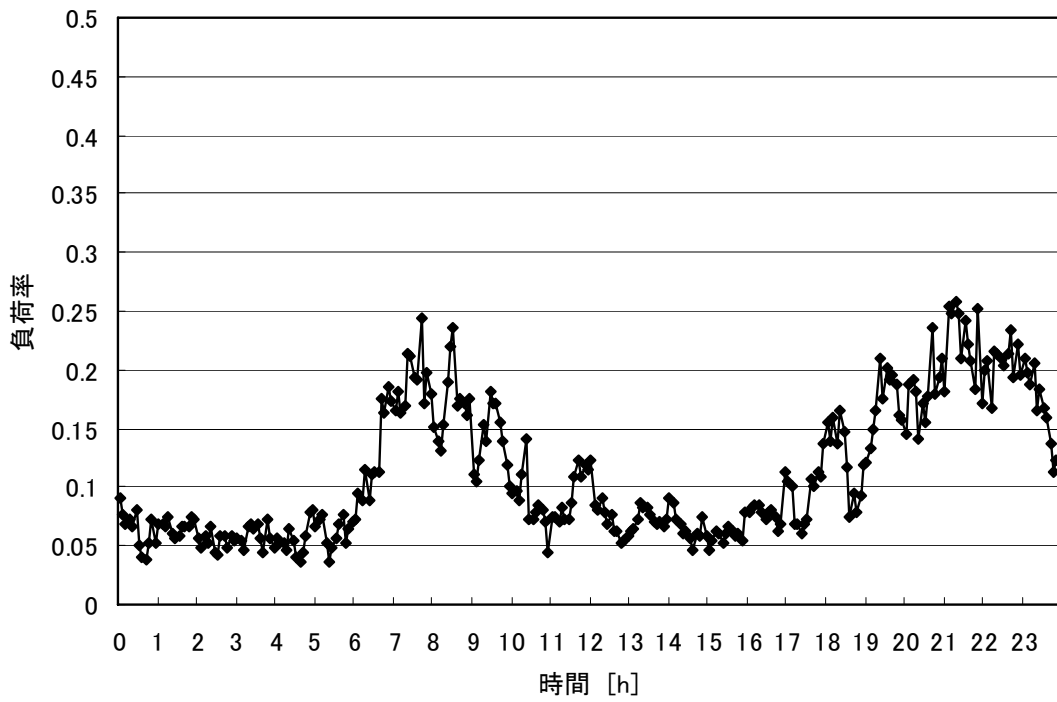


(a) 平日

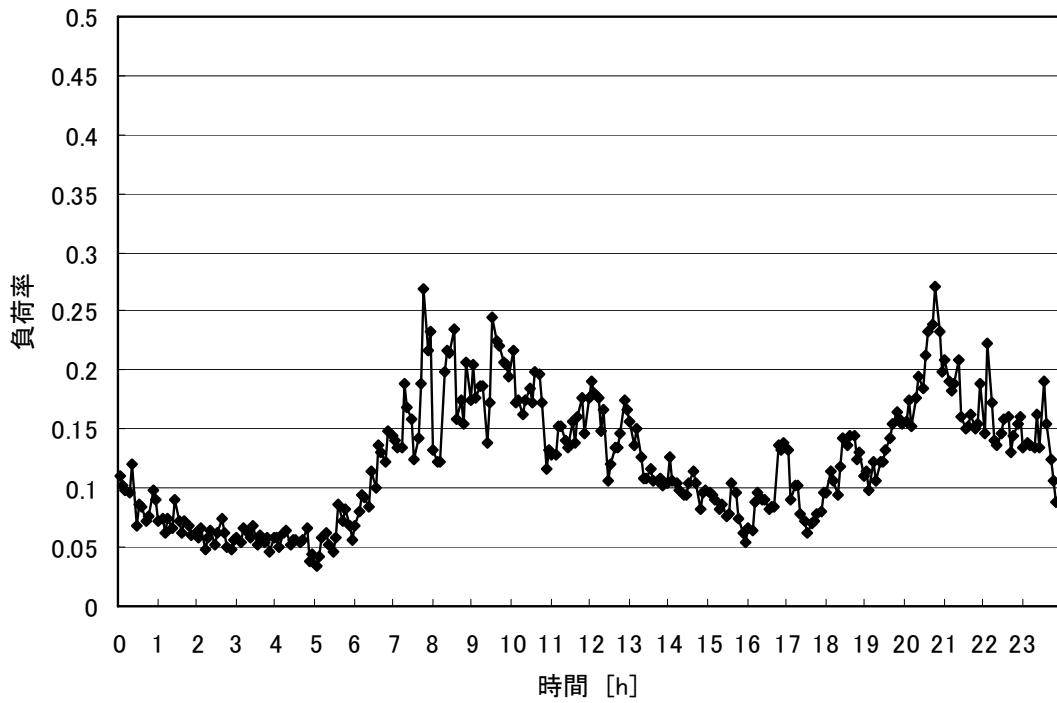


(b) 休日

図 5-1 負荷率の時間変化 (2月)

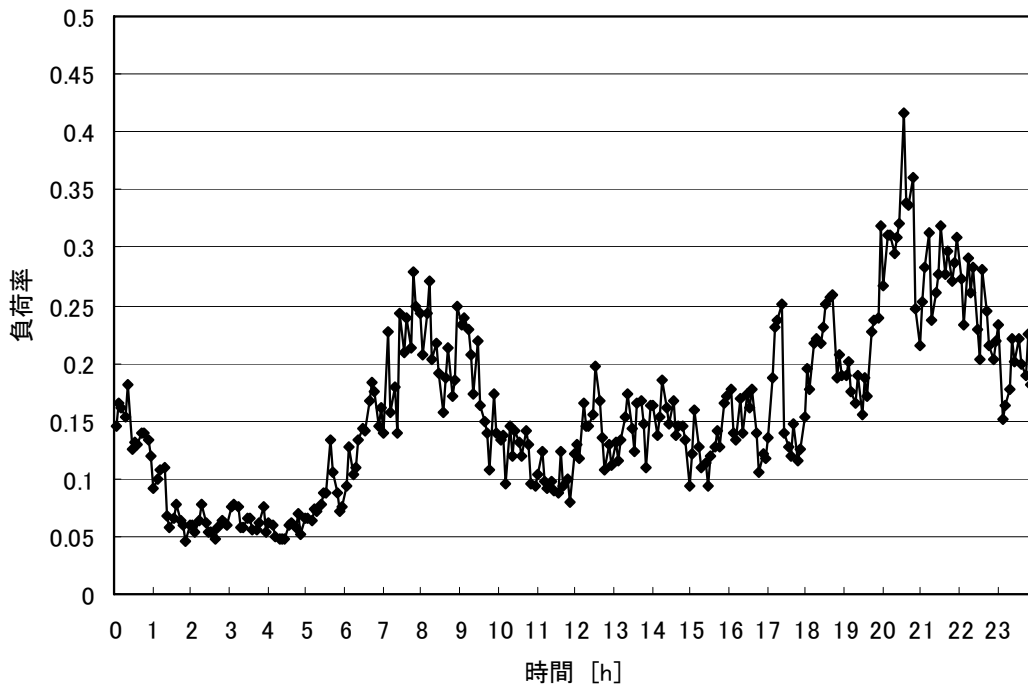


(a) 平日

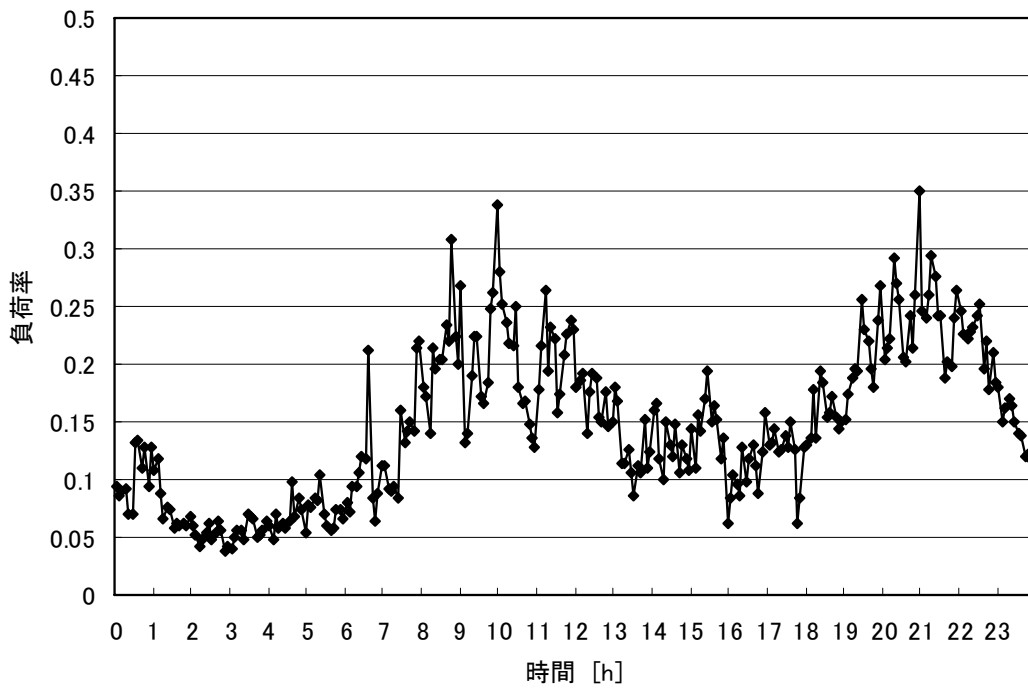


(b) 休日

図 5-2 負荷率の時間変化 (5月)



(a) 平日



(b) 休日

図 5-3 負荷率の時間変化 (8月)

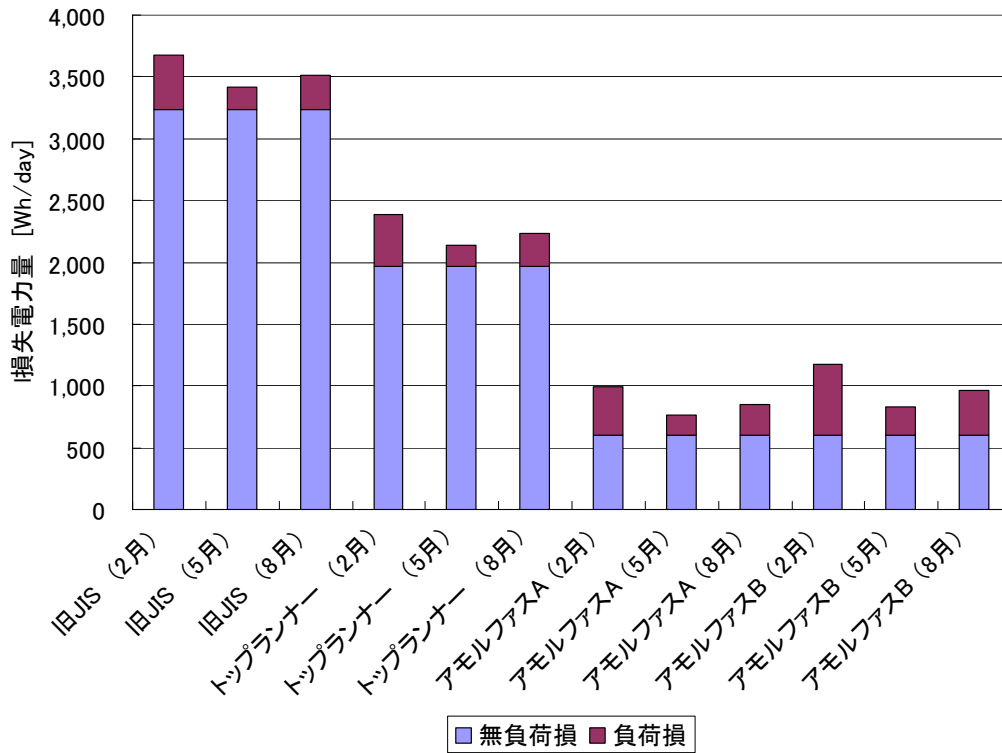
5. 2 変圧器で発生する損失電力

表 5-1 に評価の対象とする変圧器（仕様：単相，30kVA，50Hz，油入）のパラメータを示す。旧JISとは 1999 年制定のJIS規格で定められた無負荷損と定格時効率を満足するものである^[16]。変圧器は省エネ法（エネルギー使用の合理化に関する法律）の特定機器に指定され，エネルギー消費効率の基準値（トップランナー基準）が定められている。トップランナーとはトップランナー基準が反映された新JIS対応のものである^[17]。アモルファス変圧器は負荷損の異なるアモルファス Aとアモルファス Bについて分析する。アモルファスAが現在，実際に製作されている変圧器で^[18]，アモルファスBが本論文の中で仮定した変圧器である。アモルファスBでは，負荷損のパラメータを大きくすることで巻き線に使用する銅の量を削減し，アモルファスAよりも安価な変圧器を想定している。

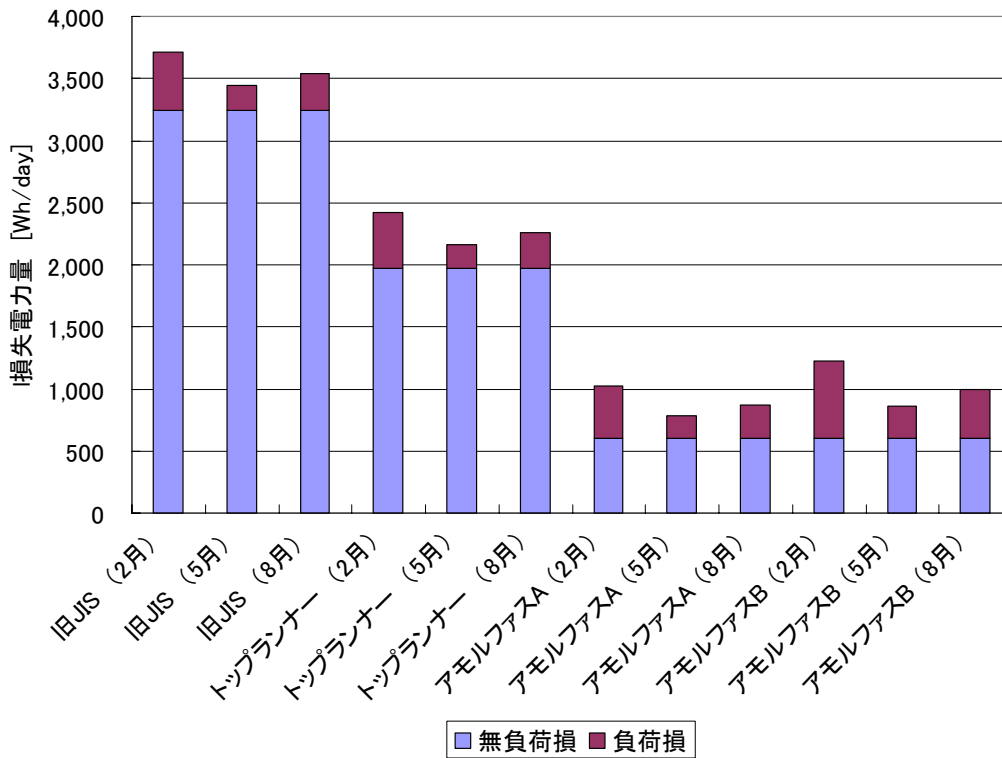
表 5-1 柱上変圧器のパラメータ

	無負荷損[W]	負荷損[W]
旧JIS	135	530
トップランナー	82	506
アモルファスA	25	480
アモルファスB	25	700

全国モデルから計算された各変圧器の 1 日当たりの損失電力量を図 5-4 に示す。図から明らかのように旧 JIS 及びトップランナーでは無負荷損が支配的である。また，平日に比べて休日の方が多少，損失電力量が多くなったが，両者の差は負荷損で 12%以下，損失全体では 4%以下と大きな違いは生じなかった。



(a) 平日



(b) 休日

図 5-4 柱上変圧器(30kVA)1台当たりの日間損失電力量

変圧器 1 台当りの年間損失電力量を図 5-5 に示す。旧 JIS とトップランナーの差は、469[kWh/year]となり、トップランナーとアモルファス A, B の差がそれぞれ 505[kWh/year]と 461[kWh/year]となった。また、アモルファス A とアモルファス B の損失電力量の差は 44[kWh/year]と小さい。これらの結果から、家庭用の柱上変圧器に関しては損失電力量に対する負荷損の影響は小さく、無負荷損が支配的であることが分かる。

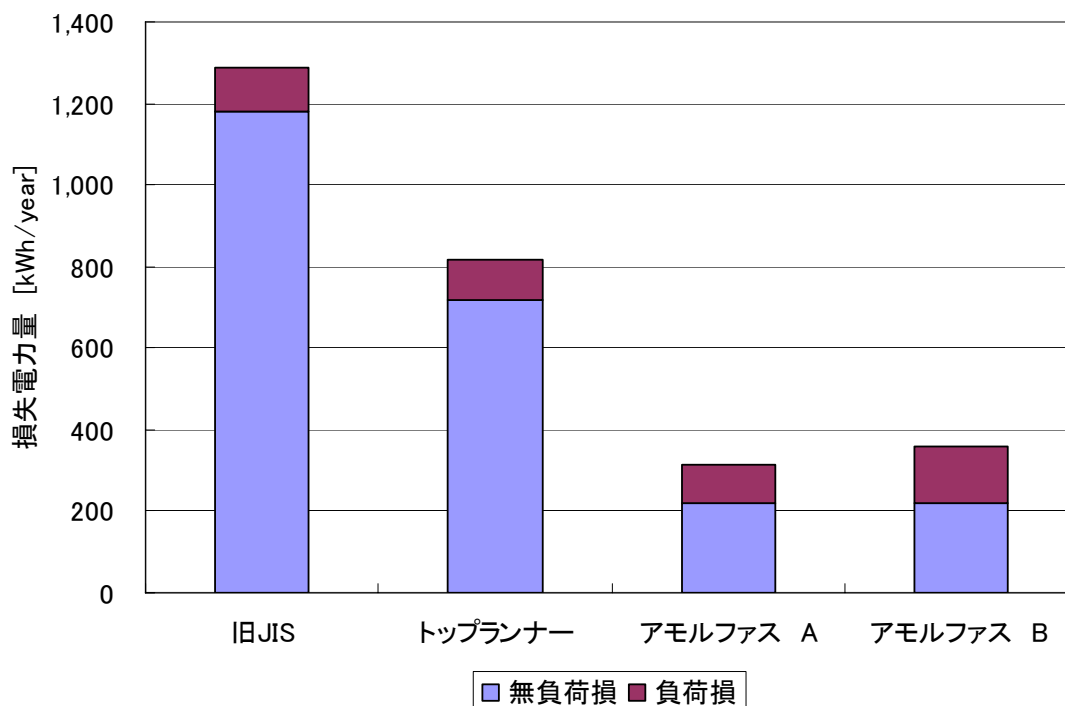


図 5-5 年間の電力損失量 (変圧器 1 台あたり)

日本全体における年間損失電力量を図 5-6, 年間のCO₂排出量を図 5-7 に示す。旧 JIS とトップランナーの差が 49 億[kWh/year], CO₂換算で 202 万[t-CO₂/year]になった。トップランナーとアモルファス A, B の差がそれぞれ 53 億[kWh/year]と 48 億[kWh/year], CO₂換算でそれぞれ 218 万[t-CO₂/year]と 199 万[t-CO₂/year]となる。旧 JIS をトップランナーに変更することに比べて、旧 JIS をアモルファスに変更すると省電力, CO₂削減効果が倍以上になる。負荷率の低い柱上変圧器に関しては、トップランナーに比べても、アモルファスの省電力, CO₂削減効果が大きいことが示された。

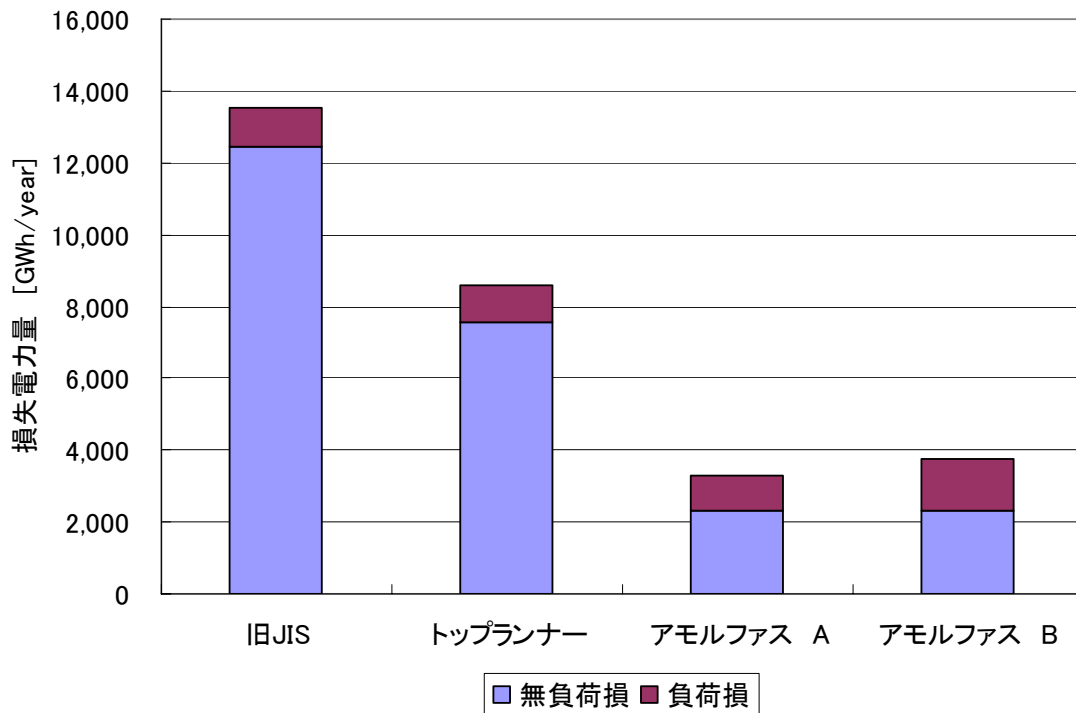


図 5-6 年間の電力損失量 (日本全体)

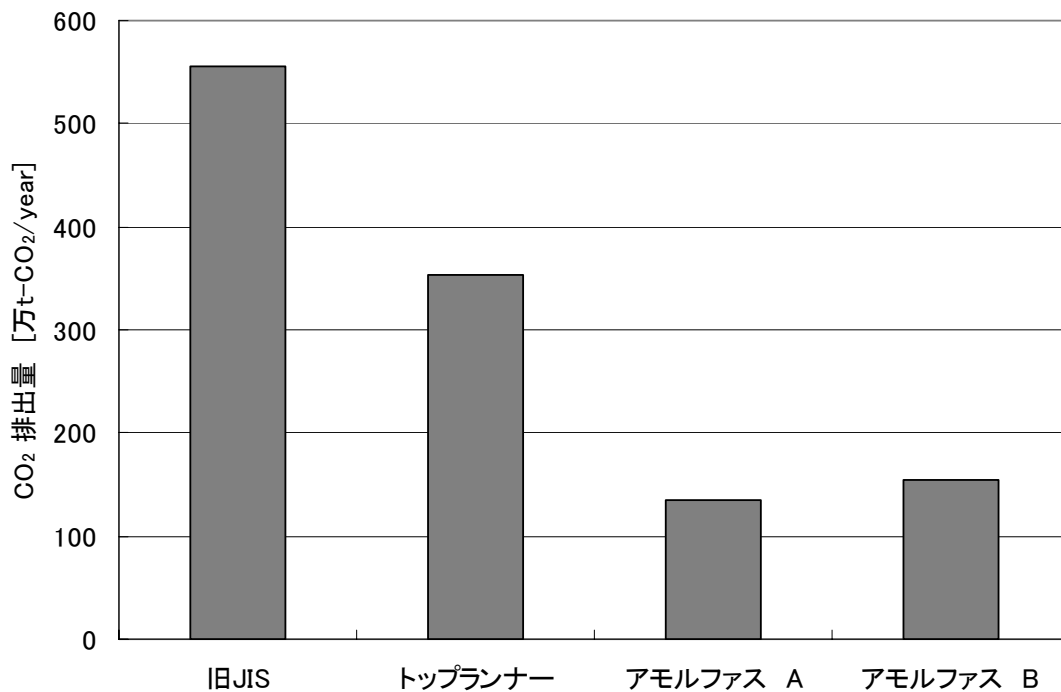


図 5-7 年間のCO2 排出量 (日本全体)

5. 3 アモルファス変圧器ブレイクイーブン価格

トッランナー変圧器の価格を 150,000 円としたときのアモルファス変圧器ブレイクイーブン価格を図 5-8 に示す。アモルファス A で約 1.5 倍、アモルファス B で約 1.45 倍の価格となり、両者の差はほとんど無いと言える。これは前述したように柱上変圧器の損失の大部分を無負荷損が占めており、負荷損の影響は小さいためである。ブレイクイーブン価格が同程度であるということは、製造コストが安くなる程、市場競争力を持つことになる。アモルファス B のような負荷損パラメータが大きくても、コストが安い変圧器を製造することで、アモルファス変圧器導入の壁となっているコスト面での問題を解決することができる。特に昨今は銅の価格が高騰しているので、負荷損パラメータと製造コストの関係はより顕著になってきている。また、利用年数 (30 年, 25 年, 20 年) による価格の差はほとんど見られなかった。これは損失電力コストを現在価値換算する際に割引率 (3%) を用いているためであり、変圧器のように長寿命の機器においては、20 年以上の耐用年数が経済性に与える影響が小さいことが分かる。

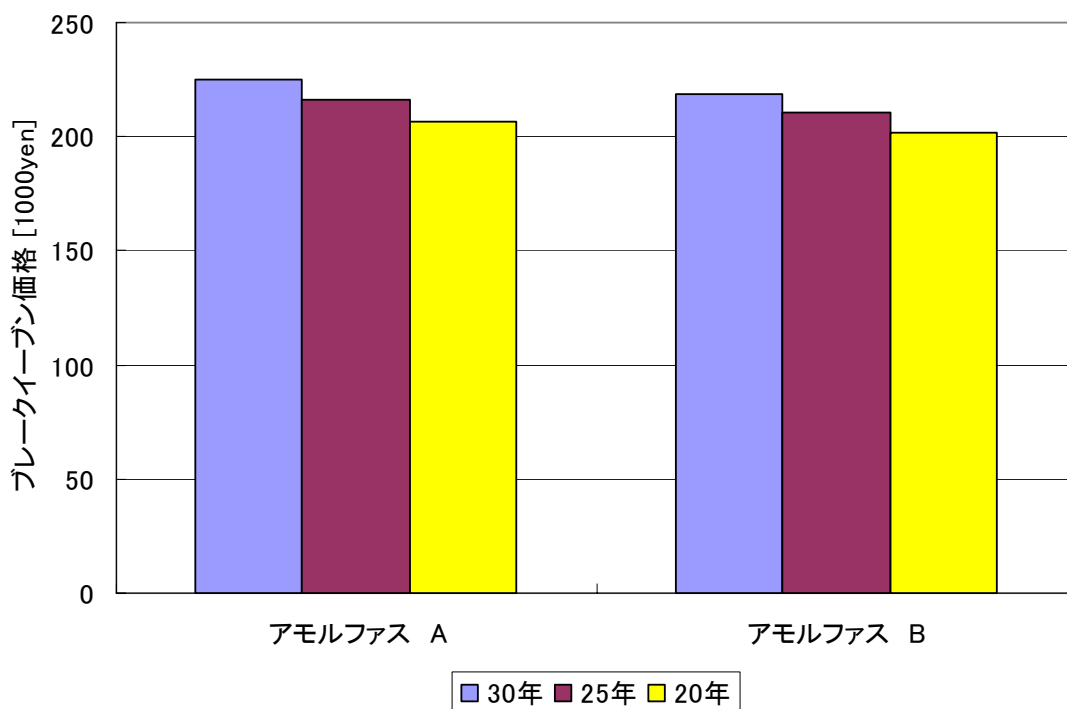


図 5-8 アモルファス変圧器ブレイクイーブン価格

5. 4 地域モデル

図 5-9 より地域ごとの年間平均等価負荷率は 0.1~0.2 の間にあることが分かる。全国モデルが 0.15 であり、全体をとおして年間平均等価負荷率は低い結果となった。これは家庭における電力需要が時間的に局所集中しているためであると考えられる。1 日の中では朝や夕方集中し、1 年の中では 2 月や 8 月に集中する。設備の建設段階では、年間の最大電力需要や将来の需要増、予備率を考慮した容量を選定するためピーク以外の時間帯の負荷率はどうしても低くなる。更に年間を通して大部分はピーク以外の時間帯となるので、年間平均等価負荷率は低くなる。

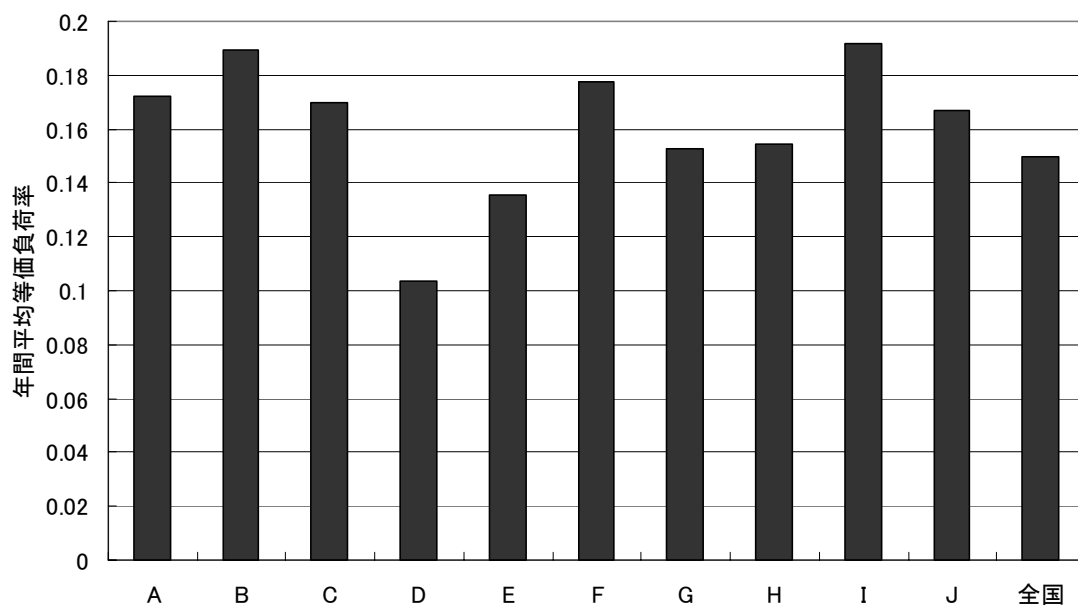


図 5-9 年間平均等価負荷率

図 5-10 に変圧器 1 台あたりの年間消費電力量と平均等価負荷率の関係を示す。プロットした点は線形近似され、両者はほぼ比例関係にあることが分かる。線形近似式は次のようになっている。

$$P_e = 4.783 \times 10^{-6} \times Demand \quad (5-1)$$

ここで、 P_e : 年間平均等価負荷率, $Demand$: 年間消費電力量[kWh/year]

一般的には年間消費電力量が同じであっても、負荷パターンが異なれば平均等価負荷率も異なる。ただし、家庭の需要のように朝と夜に一度ずつピークを持ち、ある程度規則性を持った負荷が数軒分合わさった場合には、負荷パターンは固定され、地域による気温等の差よりも年間消費電力量が平均等価負荷率に与える影響が大きくなると考えられる。変圧器に接続されている世帯の年間消費電力量は電力会社で把握しているので、このデータ

と線形近似式を用いることで平均等価負荷率を推計できる。求めた平均等価負荷率から変圧器個別の経済性評価を行い、最適な機種選定を行うことが可能となる。

なお、2章で述べたように柱上変圧器の近年の平均的な容量は20~30kVAであり、今までの検討は容量を30kVAとして行ってきた。ここでは柱上変圧器の容量を20kVAとしたときの年間平均等価負荷率を式(5-1)から算出してみる。容量を20kVAとした場合、表4-1、F欄が20,320[kWh/year]となり、これを式(5-1)に代入すると年間平均等価負荷率は0.097となる。ただし、この近似式は容量30kVAを基準としているので、20kVAに換算するため1.5倍すると0.1455となる。全国モデルの年間平均等価負荷率である1.5とほぼ同じ値になることが確認できた。

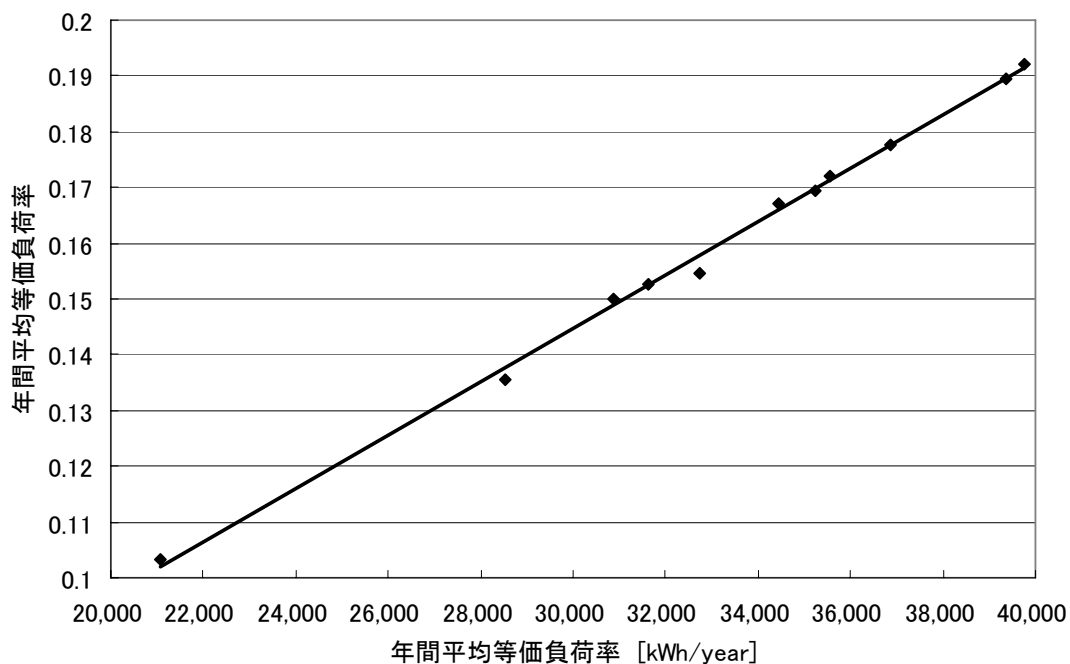


図 5-10 年間消費電力量と平均等価負荷率の関係

5. 5 まとめ

柱上変圧器の負荷パターンを求めるモデルを提案し、そのモデルを用いて柱上変圧器の負荷パターンの特徴を把握した。また、柱上変圧器にアモルファス変圧器を適用した場合の省エネルギー効果、環境負荷低減効果、経済性を分析した。シミュレーション分析より、以下の結果が得られた。

- (1) 柱上変圧器の年間平均等価負荷率は 0.1~0.2 の間にあり、全体的に低い傾向が見られた。
- (2) 柱上変圧器で発生する損失は過半が無負荷損であり、省エネルギーや環境負荷低減のためには変圧器の無負荷損のパラメータを小さくした方が効果的である。従って、無負荷損が少ないアモルファス変圧器は現状存在する変圧器の中では柱上変圧器に最も適している。
- (3) アモルファス変圧器に関しては負荷損のパラメータが大きくても、コストが安い変圧器を製造することで、アモルファス変圧器導入の壁となっているコスト面での問題を解決することができる。

第二部 需要家の負荷パターンに基づいた最適容量選定手法によるアモルファス変圧器の評価

第6章 変圧器の容量選定

6.1 はじめに

配電用変圧器は、省エネ法（エネルギー使用の合理化に関する法律）の特定機器に指定され、エネルギー消費効率の目標基準を達成することが義務付けられている。この省エネ基準のことをトップランナー基準といい、製造事業者が出荷する配電用変圧器はこのトップランナー基準に適合していなければならない。現在のトップランナー基準は基準負荷率における全損失（負荷損＋無負荷損）でのみ規定されているので、負荷損と無負荷損の値は変圧器の種類によって異なってくる。大別すると鉄心にけい素鋼板を使用したけい素鋼板変圧器（以下、これをトップランナー変圧器という）と鉄心にアモルファス合金を使用したアモルファス変圧器がある。鉄心部分にアモルファス合金を使用することでヒステリシス損と渦電流損が低減され、その結果無負荷損が大幅に削減される。反面、アモルファスは飽和磁束密度が低いので鉄心が大型化し、それに伴い巻き線も大型化するため負荷損が増加するというデメリットもある。また、機器の大型化によりトップランナー変圧器と比べ高コストとなる傾向がある。

このような環境下でどのような負荷パターンにはどのような変圧器が適しているのかというような調査・分析はなされておらず、主に初期購入費用によって選定しているのが現状である。変圧器のような非常に長寿命の機器においては、購入時の機種選定がその後も大きく影響する。従って、ユーザは自らの負荷パターンを分析し、経済性、環境性を考慮した最適な変圧器を選定するべきである。また、変圧器は機種の他に容量のレパートリーもあり、変圧器を購入するユーザの選択肢の幅は更に広がる。そこで、本研究では機種のみではなく、容量も可変とした変圧器選定手法を提案する。本提案手法の有用性は機種と容量の2つの側面から統合的な評価を行うことで、変圧器が本来持っている性能を明らかにする点にある。例えば、同容量のトップランナーとアモルファスを比較し、トップランナーの方がコスト面で勝っていたとしても、容量が一つ上のアモルファスと比較すると、アモルファスの方が経済的であるといったことも明らかとなる。つまり、負荷損や無負荷損などのパラメータのみからでは、変圧器の経済性や環境性について正当な評価をすることは出来ず、需要家がどの容量を選定し、どのような負荷パターンであるかを含めて評価しなければならない。また、機種が異なれば、選定される容量の傾向も異なってくるはずであり、最適な容量を選定した時に、始めてその機種が持つ本来の性能を発揮できるといえる。従って、本研究の目的は容量と機種を統合して評価する手法を提案し、最適な変圧器を選定した上で、変圧器の性能を評価することにある。

6. 2 変圧器容量をパラメータとしたトータルコスト関数

変圧器の更新を行う場合、年間負荷パターンより平均等価負荷率を算出し、これに基づいてコスト的に最適な変圧器を選定することが可能である。式(2-5)において変圧器の更新前後で容量が異なる場合、平均等価負荷率 P_e の容量換算が必要となる。現在使用している変圧器の容量を S [kVA]、新規に購入する変圧器の容量を S_{new} [kVA]とすると容量換算を考慮したトータルコストは次式のようになる。

$$C_{total} = \sum_{m=1}^M \frac{1}{(1+r)^m} \times \left\{ W_i + \left(\frac{S}{S_{new}} P_e \right)^2 W_c \right\} \times 8760 \times \frac{EP}{1000} + C_{tr} \quad (6-1)$$

式(6-1)において新規に購入する変圧器容量 S_{new} をパラメータとし、横軸を平均等価負荷率、縦軸をトータルコストとしたグラフを作成する。パラメータとなっている変圧器をそれぞれ比較することで、トータルコストが最小となるものを選定することができる。

6. 3 平均等価負荷

トータルコスト関数を用いた場合、変圧器の容量ごとにグラフがあり、全体をとおしたそれぞれの変圧器の特徴が見えてこない。そこで、容量に依存しない指標として、式(2-3)の平均等価負荷率 P_e に現在使用している変圧器の定格容量 S [kVA]を掛けたものを平均等価負荷 Q_e [kVA]とし、次のように定義する。

$$Q_e = S \times P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^N Q(t)^2 \Delta t} \quad (6-2)$$

式(6-2)に示すように平均等価負荷は負荷の二乗平均平方根であり、需要家の負荷パターンのみに依存する。平均等価負荷を式(6-1)に代入すると次式のようになる。

$$C_{total} = \sum_{m=1}^M \frac{1}{(1+r)^m} \times \left\{ W_i + \left(\frac{Q_e}{S_{new}} \right)^2 W_c \right\} \times 8760 \times \frac{EP}{1000} + C_{tr} \quad (6-3)$$

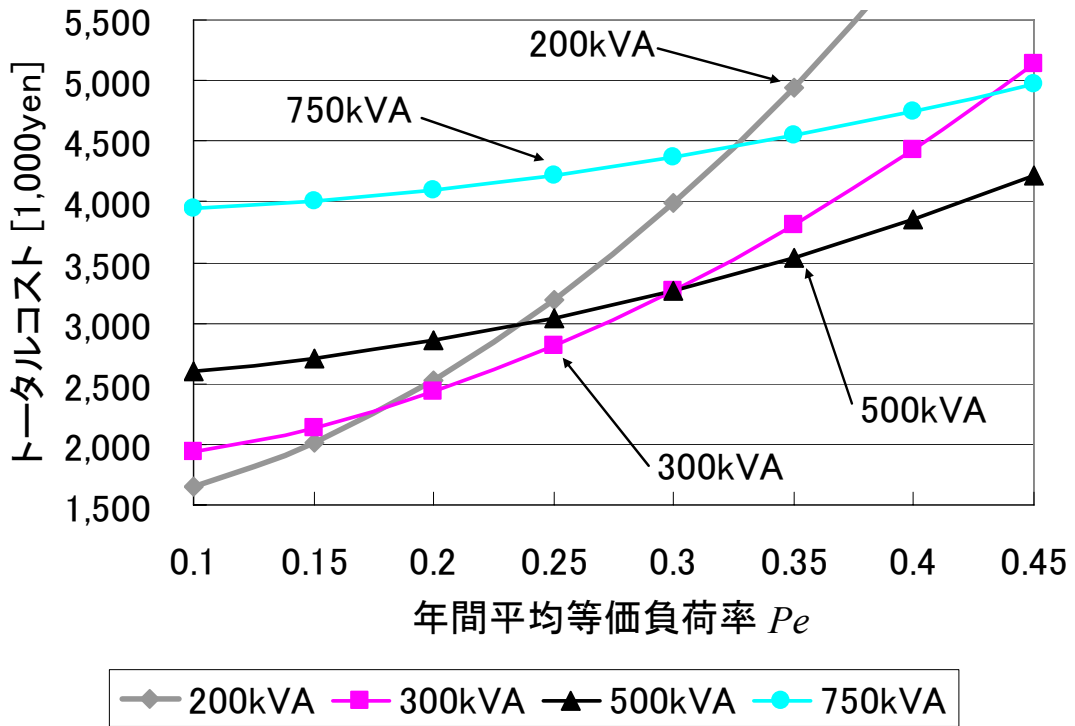
第7章 分析結果

7. 1 トータルコスト関数

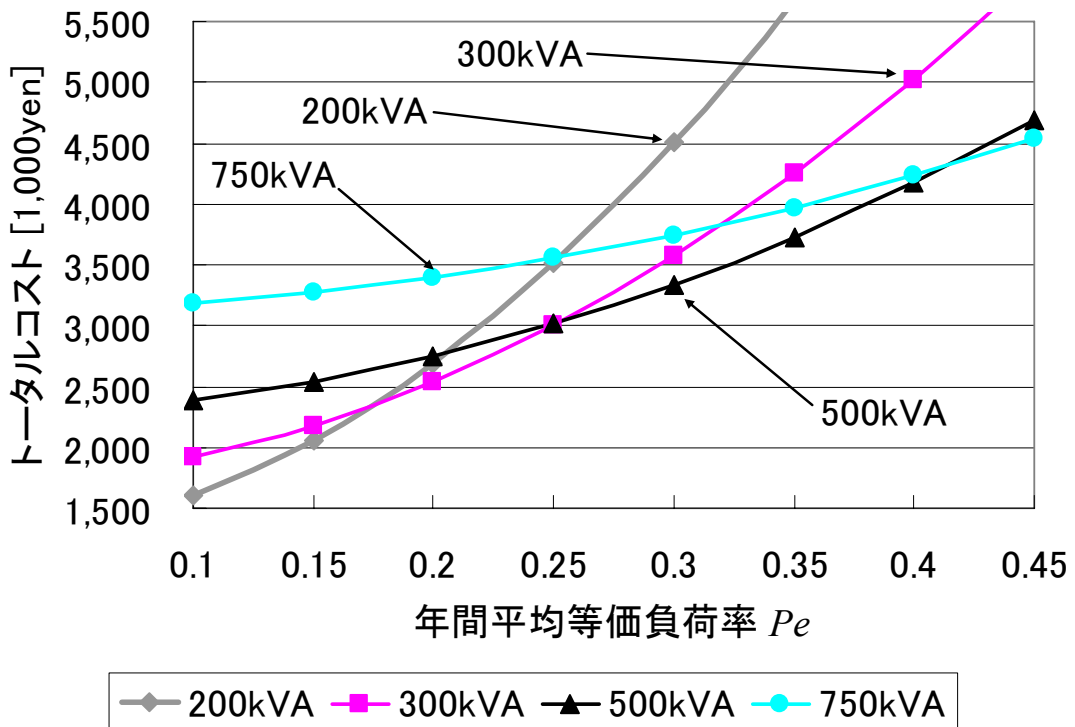
表 7-1 に評価の対象となる変圧器（仕様：三相，油入，50Hz）のパラメータを示す^[18]。前述したようにトッランナーとはトッランナー基準を充たしたけい素鋼板変圧器のことである。価格については，トッランナーは積算資料^[19]，アモルファスはメーカーヒアリング調査結果を参考にした。式(6-1)を用いて，現在使用している変圧器の容量 S が 500kVA である需要家のトータルコストグラフを作成した（図 7-1）。なお，算出条件は，変圧器の寿命を 26 年^[25]，電気料金を 12[¥/kWh]，割引率を 3%とした。図 7-1 のトータルコストは，容量換算後の平均等価負荷率を用いて算出しているので，異なる容量間の変圧器であっても，現在使用している変圧器における平均等価負荷率と同一直線上でトータルコストを比較することができる。例として変圧器の容量が 500kVA で平均等価負荷率が 0.25 である需要家を考えると，トッランナー変圧器で 300kVA，アモルファス変圧器で 500kVA が最適であることが分かる。同様に平均等価負荷率が 0.45 のケースでは，トッランナー変圧器で 500kVA，アモルファス変圧器で 750kVA が最適となる。

表 7-1 変圧器のパラメータ

容量 S [kVA]	トッランナー			アモルファス		
	無負荷損 W_i [W]	負荷損 W_c [W]	価格 C_{tr} [1,000yen]	無負荷損 W_i [W]	負荷損 W_c [W]	価格 C_{tr} [1,000yen]
30	120	586	236	55	580	520
50	155	916	284	60	900	586
75	211	1,009	344	70	1,280	664
100	236	1,359	408	85	1,640	750
150	307	1,878	528	105	2,365	900
200	361	2,428	652	120	3,000	1,007
300	453	3,098	888	160	3,850	1,400
500	602	4,337	1,350	220	6,200	1,836
750	981	6,278	1,985	255	8,150	2,621
1,000	1,237	8,202	2,654	325	10,300	3,107



(a) トップランナー

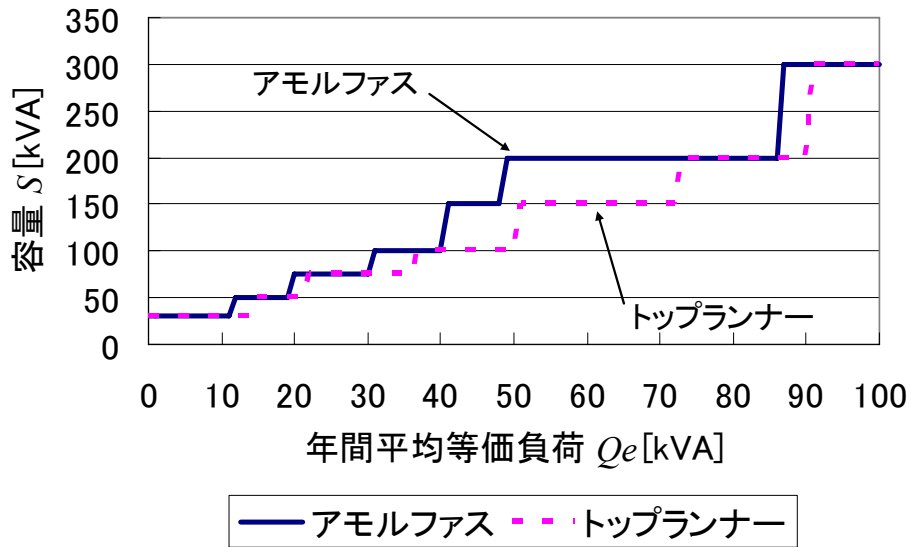


(b) アモルファス

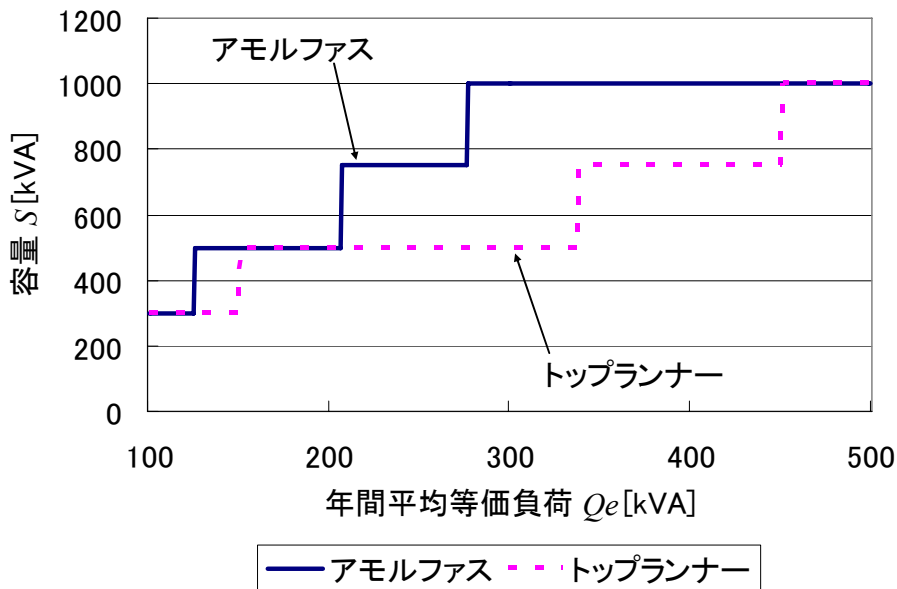
図 7-1 トータルコスト (横軸は容量 500kVA における平均等価負荷率)

7. 2 平均等価負荷

表 7-1 に示す変圧器について横軸に平均等価負荷 Q_e をとり、トータルコストが最小となる容量をプロットしたものを図 7-2 に示す。例として、平均等価負荷が 300 となる需要家を考えるとトップランナーで 500kVA、アモルファスで 1000kVAが選定される。図よりトップランナーに対して、アモルファスの方が大きめの容量を選定することでコスト最適となることが分かる。



(a) Q_e (0 ~ 100)



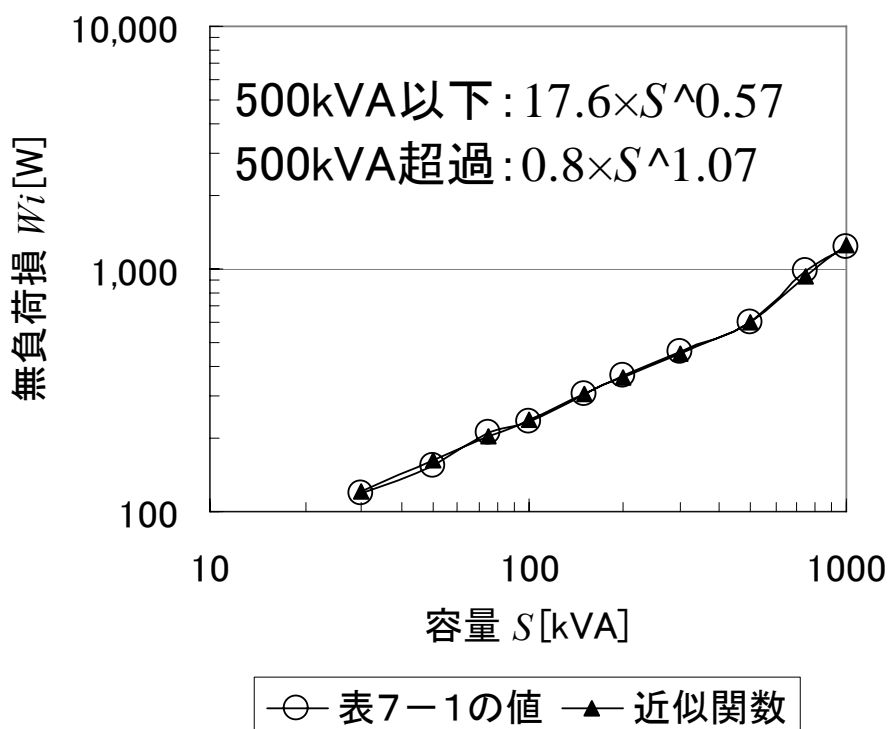
(b) Q_e (100 ~ 500)

図 7-2 平均等価負荷に対する最小コスト容量

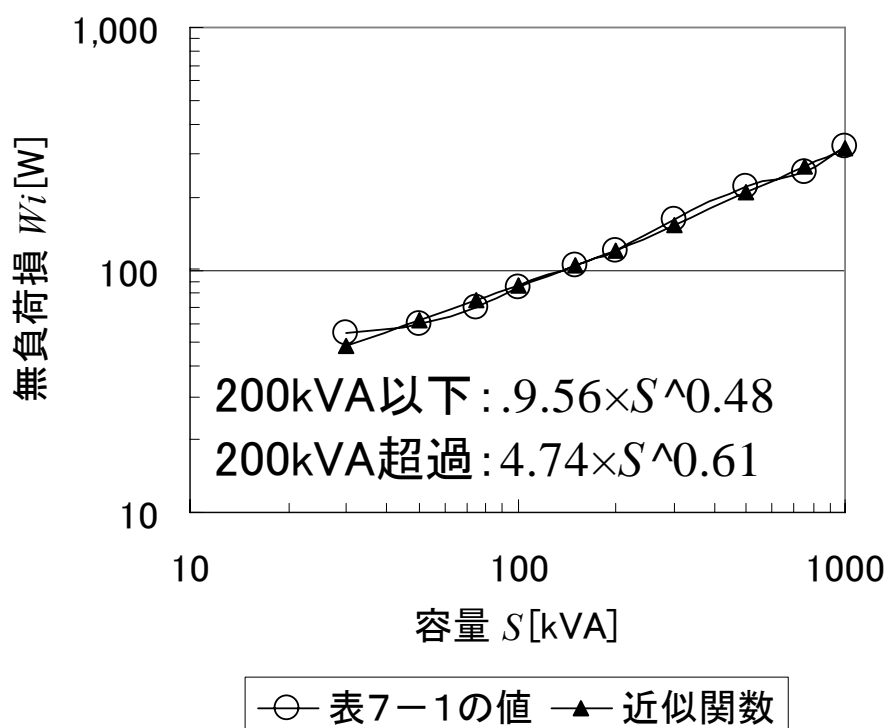
7. 3 変圧器パラメータの関数近似

変圧器のパラメータと経済性についての関係をより明確にするため、表 7-1 に示す変圧器のパラメータである負荷損、無負荷損、価格を近似関数にて表現する（図 7-3, 7-4, 7-5）。近似関数を用いることで、ある決まった容量のみではなく、連続的な容量の架空の変圧器を考えることが可能となる。

式(6-3)のトータルコストの式は第 1 項が損失電力コスト、第 2 項が変圧器の固定資本コストを表す。この式を容量 S で微分すると、第 1 項が容量を一単位増加させることに伴う限界損失電力コスト、第 2 項が容量を一単位増加させることに伴う限界固定資本コストとなる。限界損失電力コストの特徴として、ある一定の容量までは負の値を持ち、この間は容量の増加に伴って損失電力コストが減少する。これは容量の増加による無負荷損の増加分よりも負荷損の減少分の方が大きいためである。例として平均等価負荷 Q_e が 100kVA のときの曲線を図 7-6 に示す（限界損失電力コストについては符号を反転したものを表示）。従って、トータルコストが最小となる容量は次のように求まる。容量を 1 単位増加させることによる損失電力コストの減少分と固定資本コストの増加分を比較し、減少分が大きい間は容量を増加させていくことでトータルコストは減少する。最終的に両曲線の交点が最適な容量となり、トップランナーで 255kVA（図 7-6、ピンクの破線の交点）、アモルファスで 310kVA（図 7-6、青い実線の交点）程度となることが分かる。

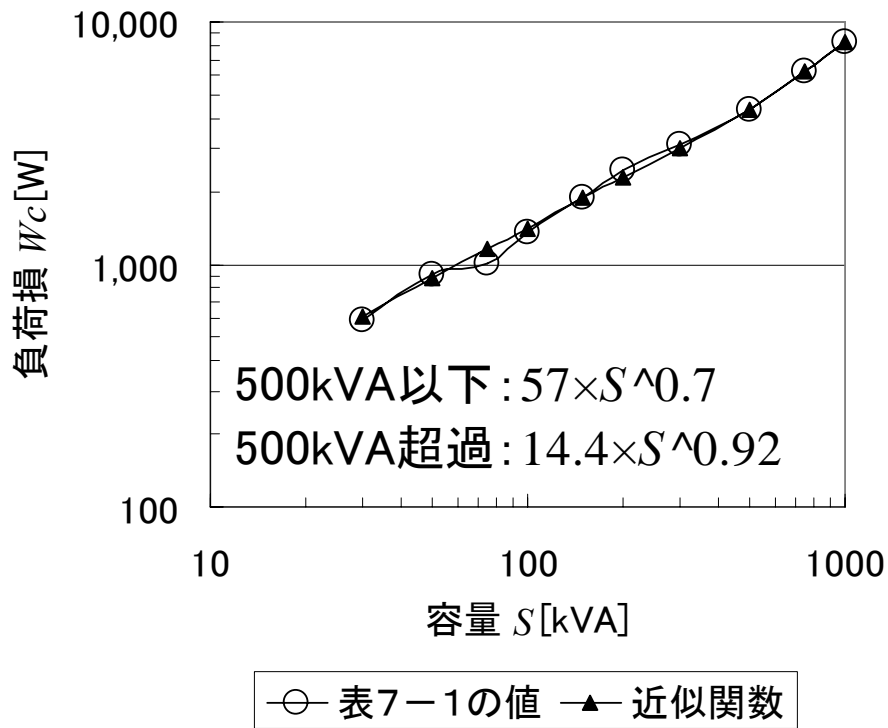


(a) トップランナー

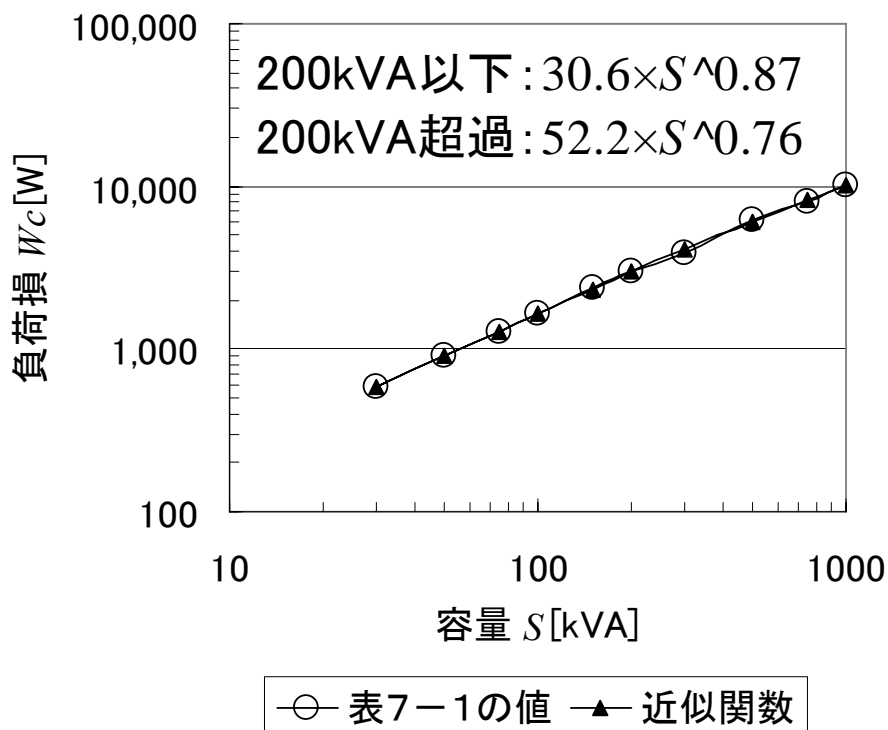


(b) アモルファス

図 7-3 変圧器パラメータの関数近似 (無負荷損)

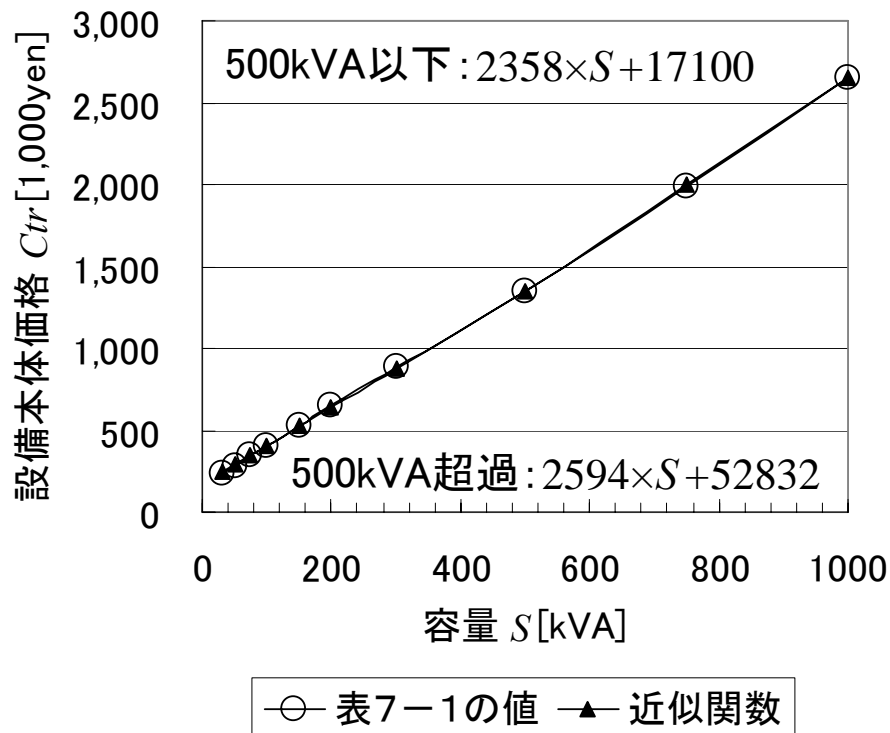


(a) トップランナー

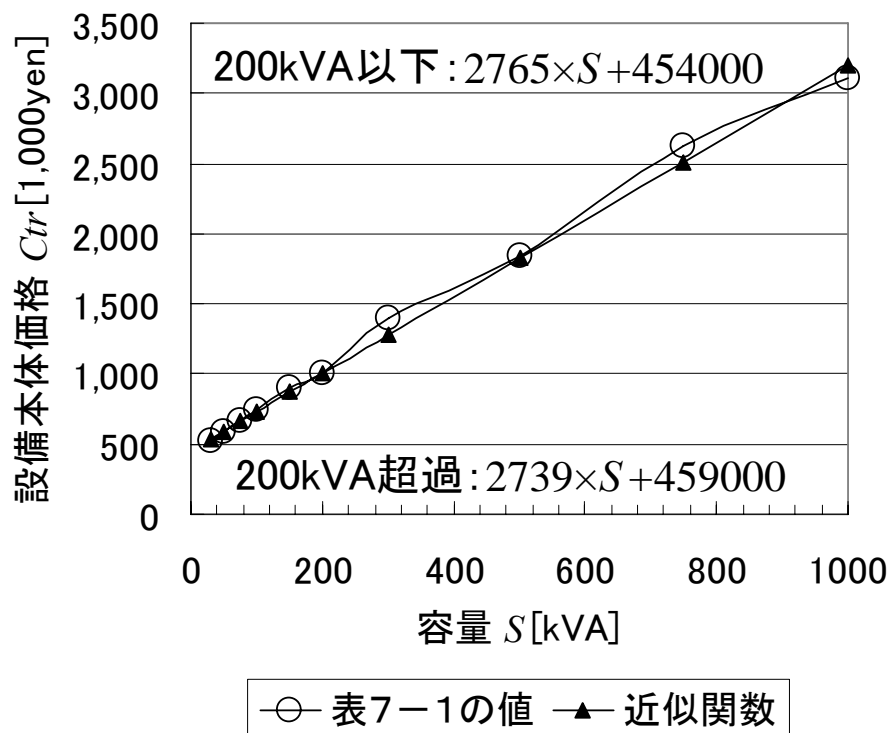


(b) アモルファス

図 7-4 変圧器パラメータの関数近似 (負荷損)



(a) トップランナー



(b) アモルファス

図 7-5 変圧器パラメータの関数近似 (設備本体価格)

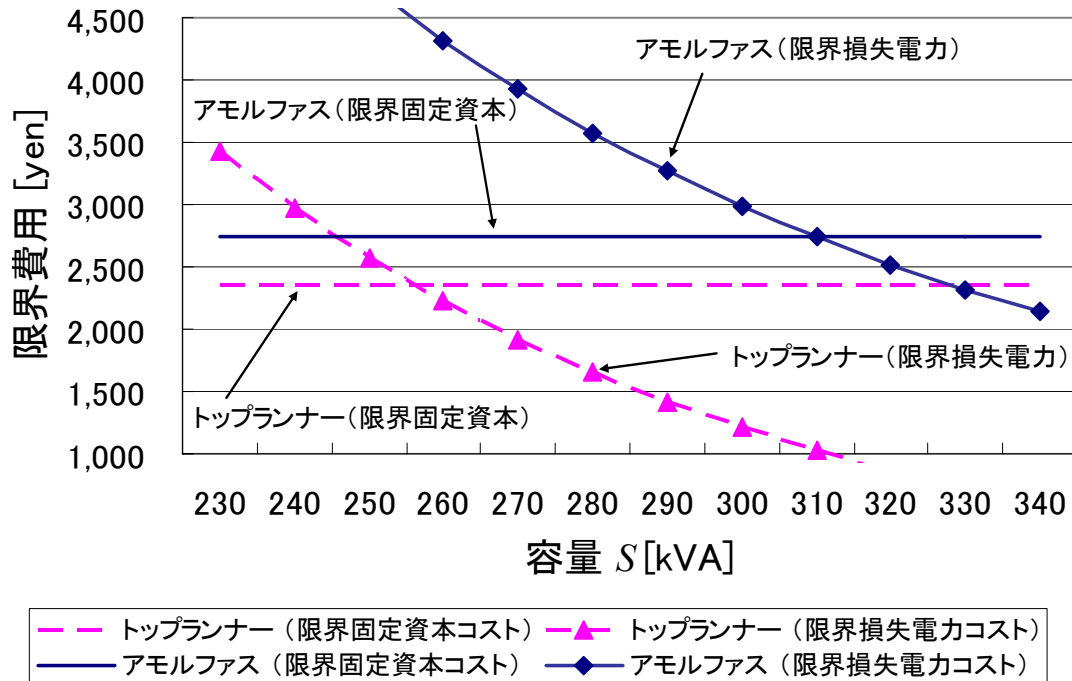


図 7-6 容量に対する限界費用 ($Q_e=100$)

7. 4 近似関数による分析

近似関数で表現した変圧器を用いて、経済性と環境性の両側面から分析を行う。図 7-7 にトータルコストが最小となる容量 (以下、コスト最適容量という) と損失電力量が最小となる容量 (損失電力量とCO₂排出量は比例するので、これはCO₂排出量が最小となる容量のことである。以下、環境最適容量という) をプロットしたものを示す。また、この時のトータルコストを図 7-8 に、年間のCO₂排出量を図 7-9 にそれぞれ示す。図の中で、ピンクの破線がトッランナー、青の実線がアモルファスのコスト最適な容量を示し、それぞれの記号付きのものが環境最適な容量を示す。図 7-7 では、図 7-2 で述べたそれぞれの変圧器の特徴がより明確となっているのが分かる。図中、トッランナー変圧器のプロットが不連続となっているが、これは 500kVA を境にして、変圧器パラメータの近似関数が大きく変わっているためである (図 7-3, 7-4, 7-5 参照)。500kVA 以下と 500kVA 超過で変圧器の構造上、パラメータの傾向が変化するためであり、500kVA のトッランナー変圧器が選定される範囲が広いために不連続点が発生している。需要家が単純に経済性だけを追求した場合、図 7-8 のトータルコストを比較することになる。平均等価負荷が小さい間は同程度か僅かにトッランナーの方に優位性があり、平均等価負荷が大きくなるにつれてアモルファスが有利となっている。次に、図 7-9 に示す年間CO₂排出量を用いて環境面の評価を行う。なお、

機器製造時のCO₂排出量は運用時に比べ十分小さいため^[6]、本稿では運用時のCO₂排出量のみを評価している。コスト最適な容量で比較すると、アモルファスはトプルランナーに対して4割程度、排出量が削減される。また、環境最適な容量を選定した場合、トプルランナーでは効果が小さいのに対して、アモルファスでは更に5分の2程度の削減効果があり、環境負荷低減に対する高い潜在能力が期待できる。

以上のことから、アモルファスの導入はコスト面では同程度か、あるいは僅かに優位性があり、CO₂排出量は大幅に削減できるということが分かった。コスト面について言及すると、アモルファスが市場に普及することによる大量生産の効果で設備単価が安くなることも期待できる。

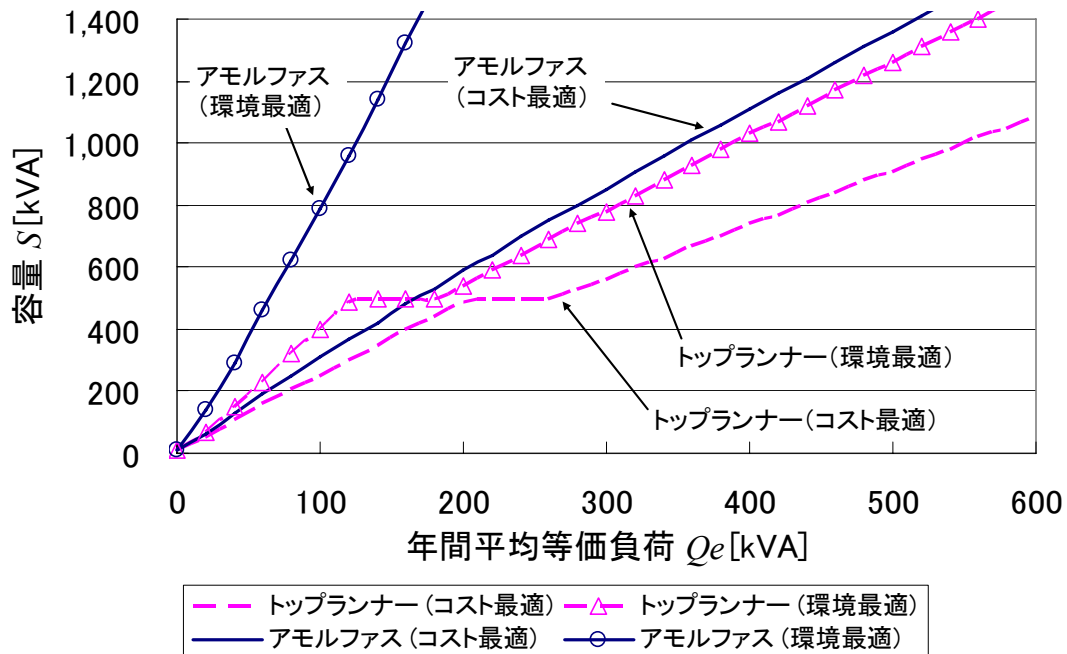


図 7-7 コスト最適容量と環境最適容量

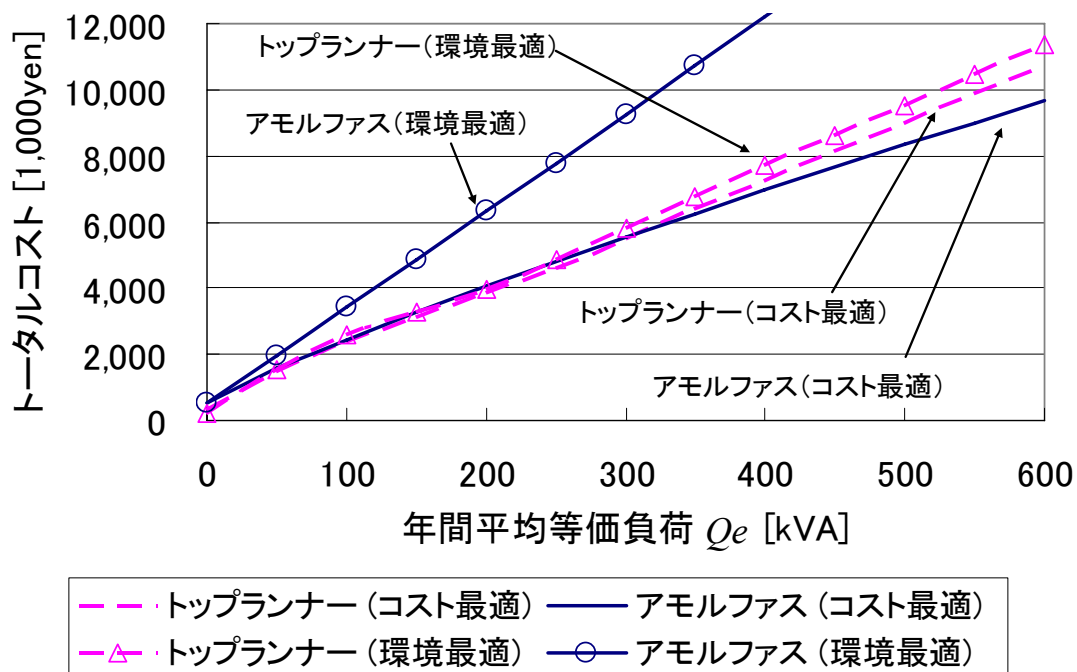


図 7-8 トータルコストの比較

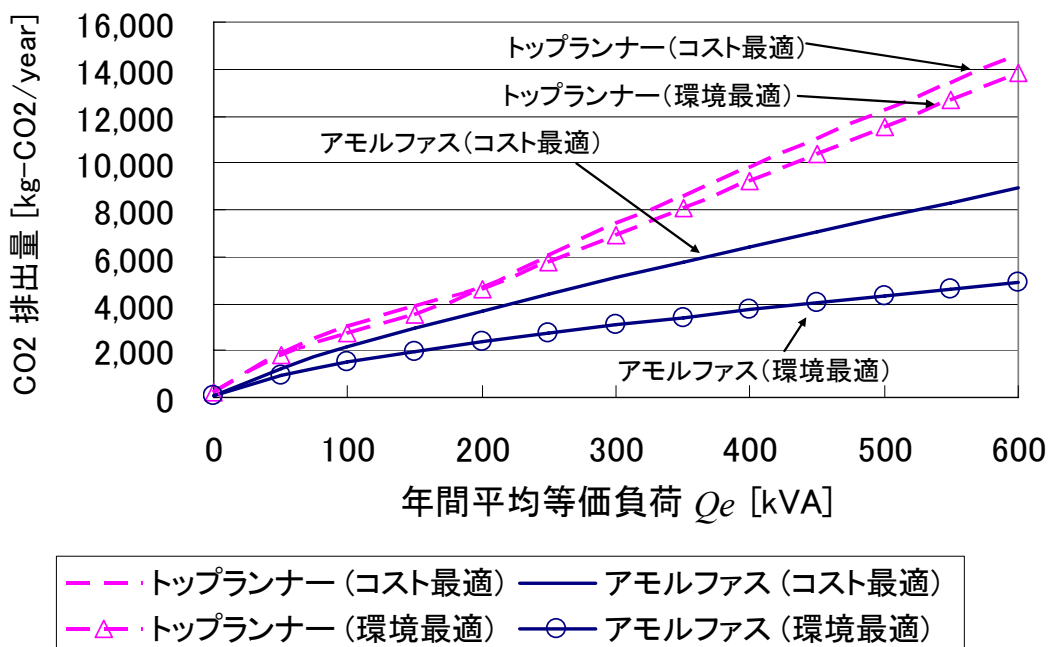
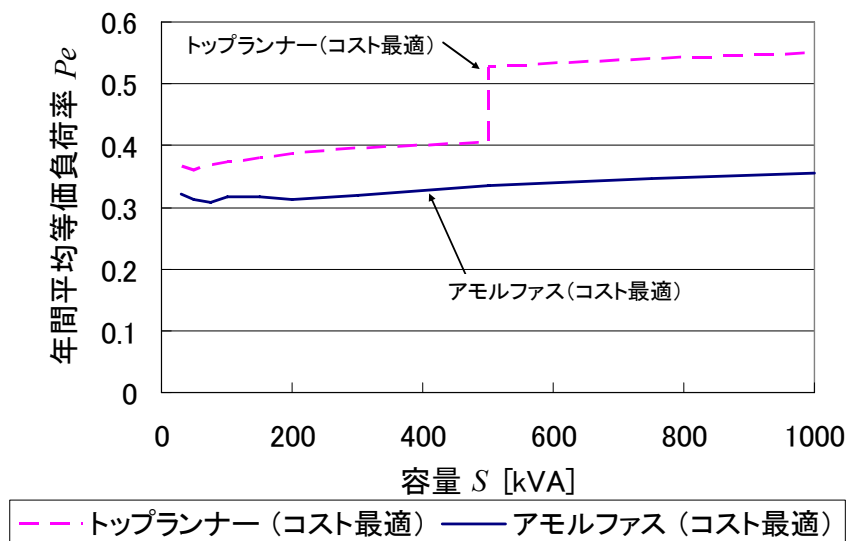


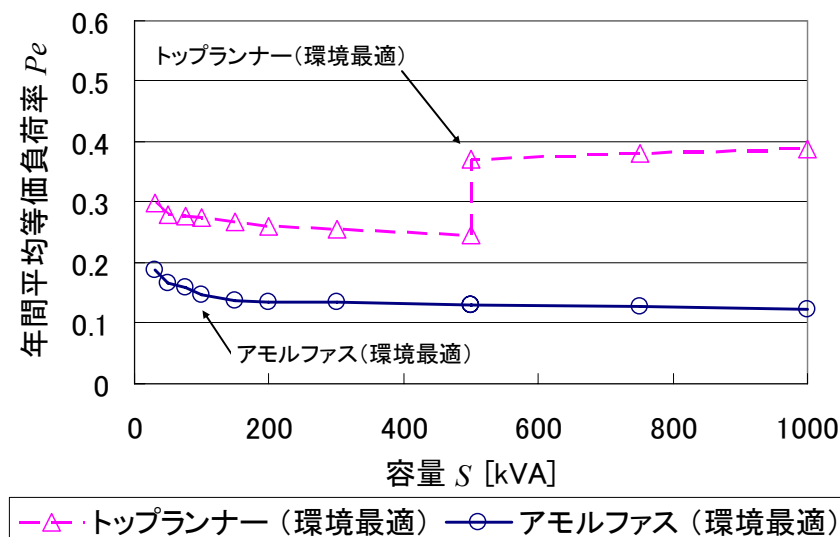
図 7-9 CO₂排出量の比較

使用端CO₂ 排出原単位=0.41[kg-CO₂/kWh]^[14]

図 7-7 のような容量選定をしたときの変圧器容量に対する平均等価負荷率を図 7-10 に示す。コスト最適となる平均等価負荷率は、トップランナーでは容量 500kVA 以下で 0.4, 500kVA 以上で 0.55 程度となった。アモルファスでは全体を通して 0.3~0.35 程度となり、トップランナーよりも低い負荷率で運用するのに適した機種であることが分かる。同様に、環境最適となる平均等価負荷率はトップランナーでは容量 500kVA 以下で 0.25, 500kVA 以上で 0.4 程度となった。アモルファスでは全体を通して 0.14 程度となり、環境面で考えるとかなり低い値で運用することが好ましいといえる。



(a) コスト最適



(b) 環境最適

図 7-10 コスト・環境最適な年間平均等価負荷率

第8章 現状分析

8.1 現状の変圧器容量

現状の変圧器容量は負荷設備の効率、力率および需要率を用いて、一般的に次のように決定されている。電灯・コンセント負荷の場合、各入力値を集計したものに需要率(式8-1)を掛け、これに予備容量を考慮する(式8-2)。動力負荷の場合、各負荷の出力値と効率、力率から入力値を算出する。これに需要率を掛け、予備容量を考慮したものを変圧器容量とする(式8-3)。

$$\text{需要率} = \frac{\text{最大需要電力}[kVA]}{\text{総設備容量}[kVA]} \quad (8-1)$$

$$S = \sum (\text{入力設備容量} \times \text{需要率}) + \text{予備} \quad (8-2)$$

$$S = \sum \left\{ \frac{\text{動力容量}[kW]}{(\text{力率}) \times (\text{効率})} \times \text{需要率} \right\} + \text{予備} \quad (8-3)$$

これらの算出した容量に電圧変動や高調波対策を考慮して、最終的に変圧器容量が決定される^[21]。以上のことから、現状の変圧器容量を決定している大きな要因はピーク負荷と予備率ということが分かる。

表8-1に代表的な業務部門における単位面積当たりのピーク負荷と年間需要量を示す。また同様に単位面積当たりの年間負荷パターンを図8-1に示す^[22]。

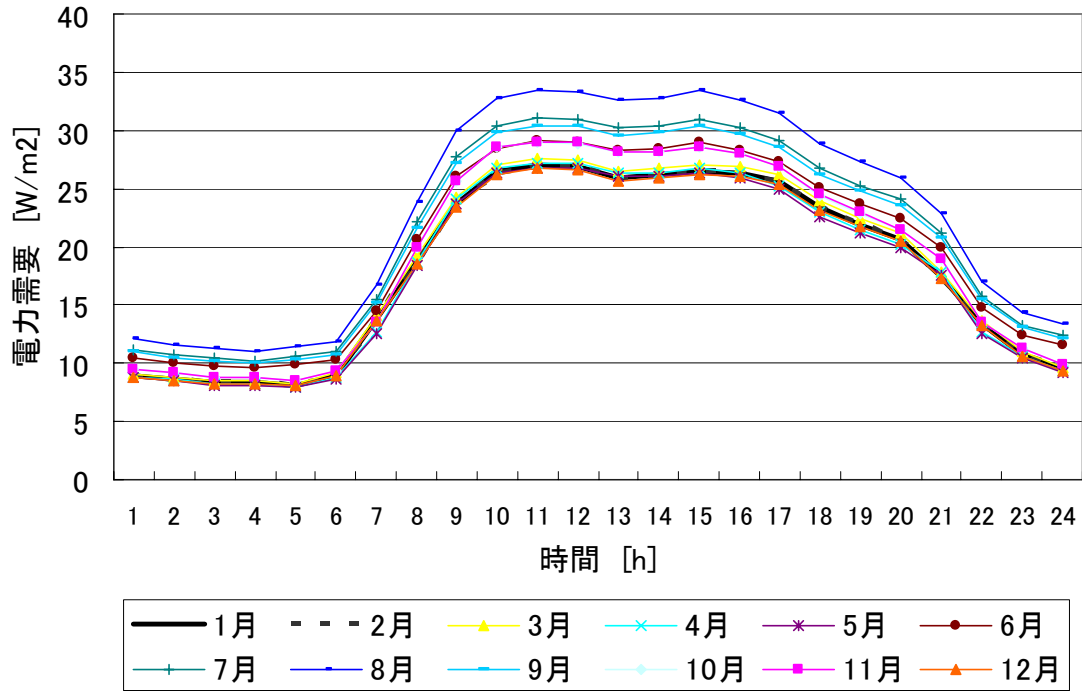
表 8-1 単位面積当たりのピーク負荷と年間需要量

	病院	ホテル	店舗
ピーク負荷 [W/m ²]	50	50	70
年間需要量 [kWh/m ² /year]	170	200	226

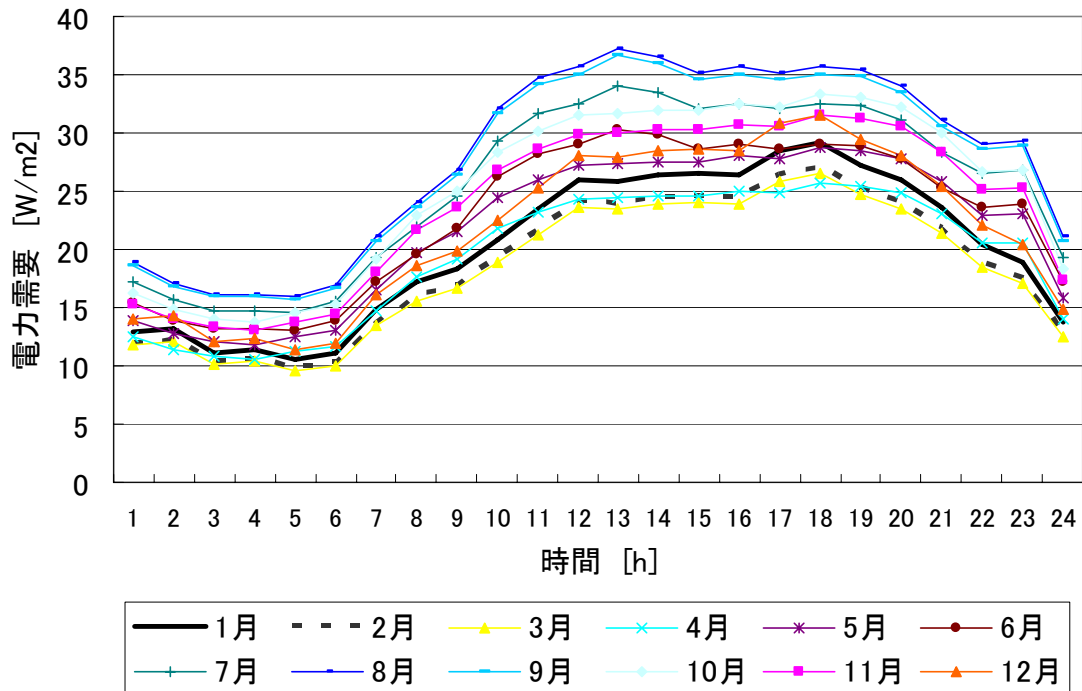
表8-1のピーク負荷に対して力率0.9を考慮し、予備率を30%とした時の変圧器容量を図8-2に示す。この時の平均等価負荷率は図8-3のようになり、平均すると0.27程度となる。日本電機工業会の調査結果によるとオフィスビル・公共施設の平均等価負荷率は約0.2となっている^[23]。変圧器では、1ランク上の容量を選定しても価格はそれほど変化しない。従って、ピーク負荷による選定手法に将来の負荷増加や需要の不確実性を考慮すると、やや大きめの容量を選定することになり、その結果0.2という低い値になったと推測される。

産業部門に関しては、業種や負荷の組み合わせによって設備形態は様々であり、一般的な負荷パターンを定めることは困難を極める。従って、負荷パターンの詳細な分析は行わず、日本電機工業会の調査結果を元に以降の評価を行うこととした。調査結果によると、

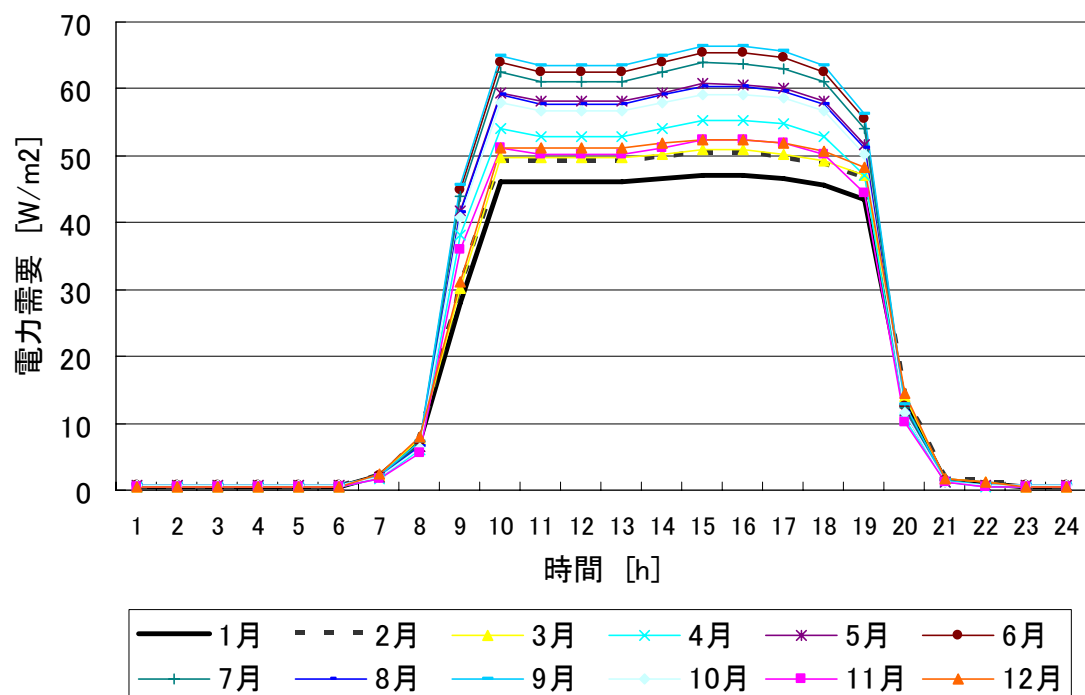
産業部門の年間平均等価負荷率は約 0.4 となっている^[23]。



(a) 病院



(b) ホテル



(c) 店舗

図 8-1 需要家の負荷パターン

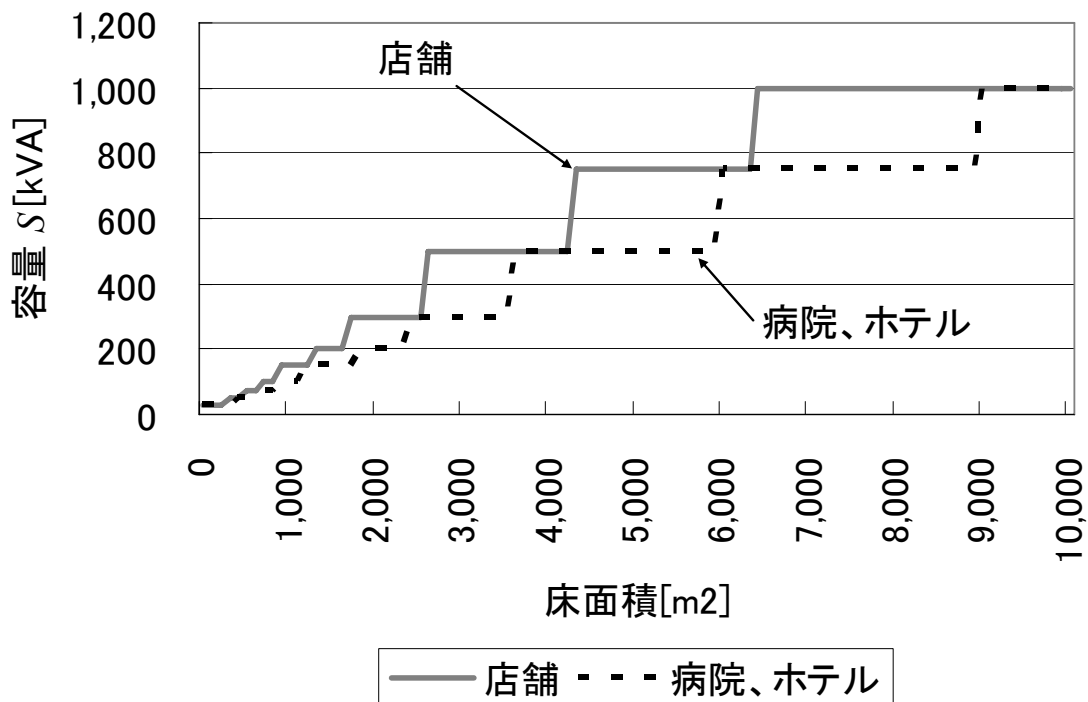


図 8-2 床面積に対する変圧器容量

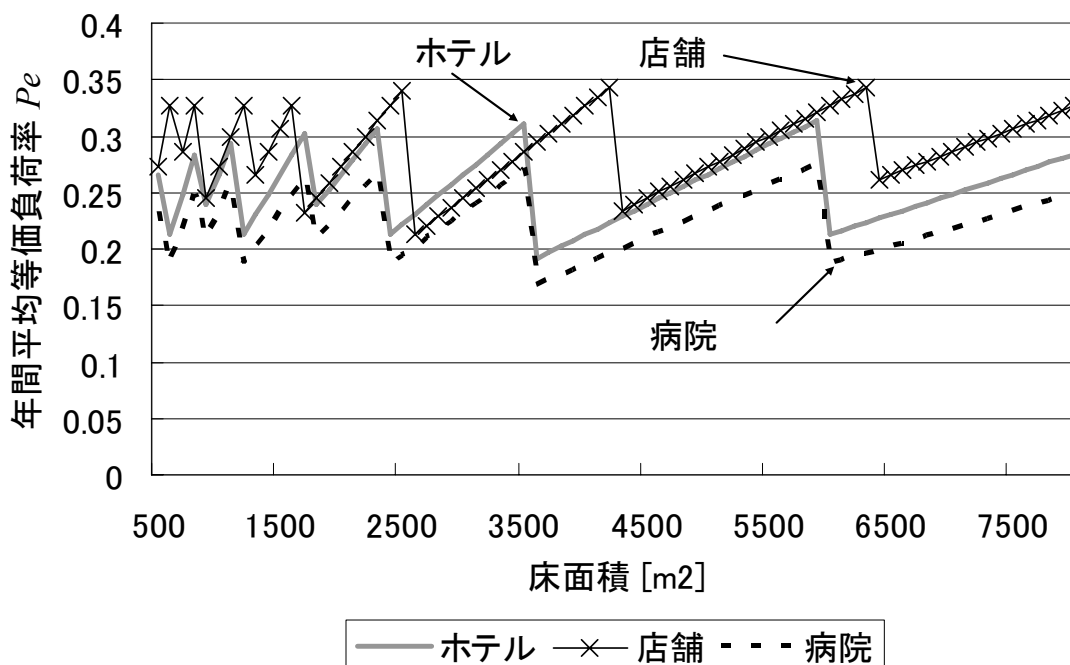


図 8-3 床面積に対する平均等価負荷率

8. 2 平均等価負荷の近似

一般的に需要家が自分の設備の詳細な負荷パターンを知っていることは稀であり、調査をするとなると費用とある程度の期間を必要とする。そこで次のような近似を行う。図 8-1 に示す需要曲線と式(6-2)から各需要家の単位面積当たりの平均等価負荷を算出する(表 8-2)。これと表 8-1 に示す年間需要量を用いて、各業務部門の年間需要量に対する平均等価負荷を算出した(図 8-4)。

平均等価負荷は負荷の散らばり具合を反映した数値であるので、年間需要量と平均等価負荷の関係で差が生じる大きな原因は、昼夜間の需要差であるといえる。従って、同じ年間需要量であっても、昼夜間の需要差が小さい病院やホテルでは平均等価負荷の値が小さく、需要差が大きい店舗では平均等価負荷の値も大きくなる(図 8-4)。同様に昼夜間の需要差比が同程度である病院とホテルでは、ほぼ同じ傾向が示されている(図 8-4)。

表 8-2 単位面積当たりの平均等価負荷[VA/m²]

	病院	ホテル	店舗
平均等価負荷 Q_e [VA/m ²]	23.3	26.6	40.9

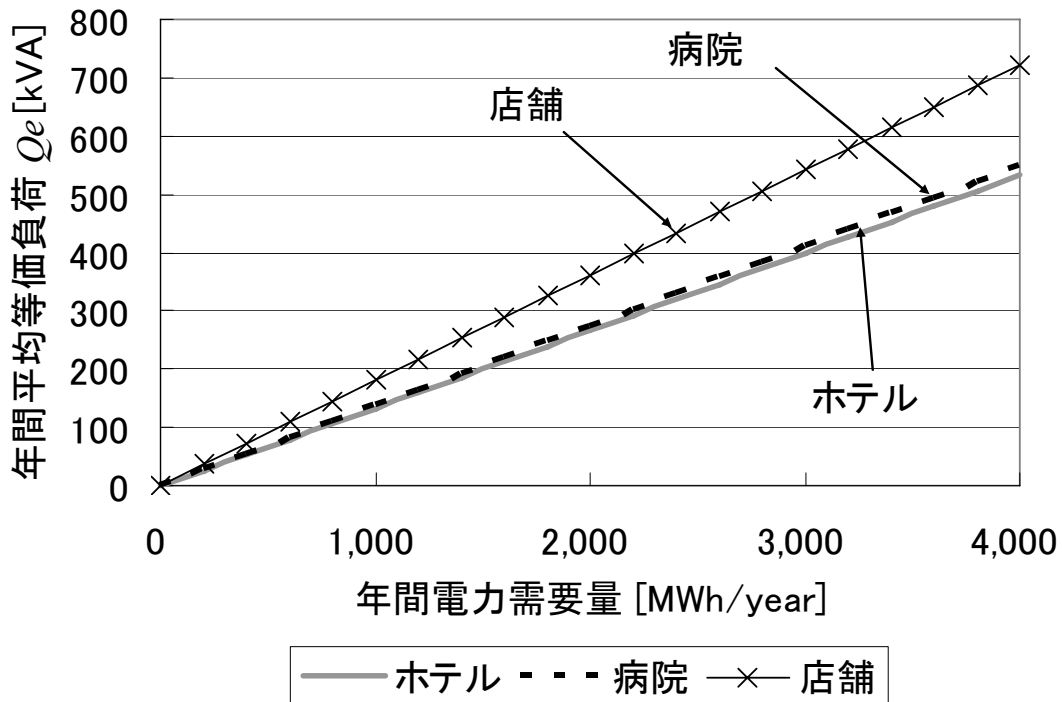


図 8-4 年間需要量に対する平均等価負荷

また、図 8-1 で示した負荷パターン以外の需要家については、次の方法にて近似した平均等価負荷を求めることも可能である。二乗平均平方根と相加平均、標準偏差の関係から次式が成立する。

$$Q_e^2 = \bar{Q}^2 + \sigma^2 \quad (8-4)$$

ここで、 \bar{Q} : 平均負荷[kVA]、 σ : 負荷の標準偏差[kVA]

式(8-4)より、平均等価負荷は常に平均負荷以上となることが分かる。まず、年間需要量から平均負荷 \bar{Q} を算出する。次に1日分の負荷パターンの計測、またはより精度を高めた場合には、一定期間の負荷パターンの計測を行う。計測した負荷パターンの平均値と標準偏差から変動係数を算出し、これに平均負荷 \bar{Q} を掛けたものを式(8-4)における負荷の標準偏差 σ とする。負荷の標準偏差 σ の算出式を次に示す。

$$\sigma = \frac{\text{計測した負荷パターンの標準偏差}}{\text{計測した負荷パターンの平均値}} \times \bar{Q} \quad (8-5)$$

第9章 考察

9.1 業務部門

8章で述べたようにオフィスビル・公共施設の年間平均等価負荷率は約0.2である。この値はコスト最適よりもむしろ環境最適に近い値である(図7-10参照)。ピーク負荷による選定手法が環境的に好ましい結果に繋がったといえる。図9-1に示すように平均等価負荷率が0.2となるような選定の仕方はコスト最適な容量よりも大きな容量を選定していることになる。従って、コスト最適とするには現状より小さい容量を選定することになるが、これはピーク負荷による制約があるため、短時間過負荷運転の許容や負荷平準化等の対策が無い限り難しい。従って、オフィスビル・公共施設に関しては、コスト最適な容量よりも大きめの容量を選定する現状の傾向が今後も続くと推測され、変圧器選定に関しては機種のみを最適化することになる。なお、実運用に当たっては、需要家毎で平均等価負荷率が異なるので個別の検討が必要になる。

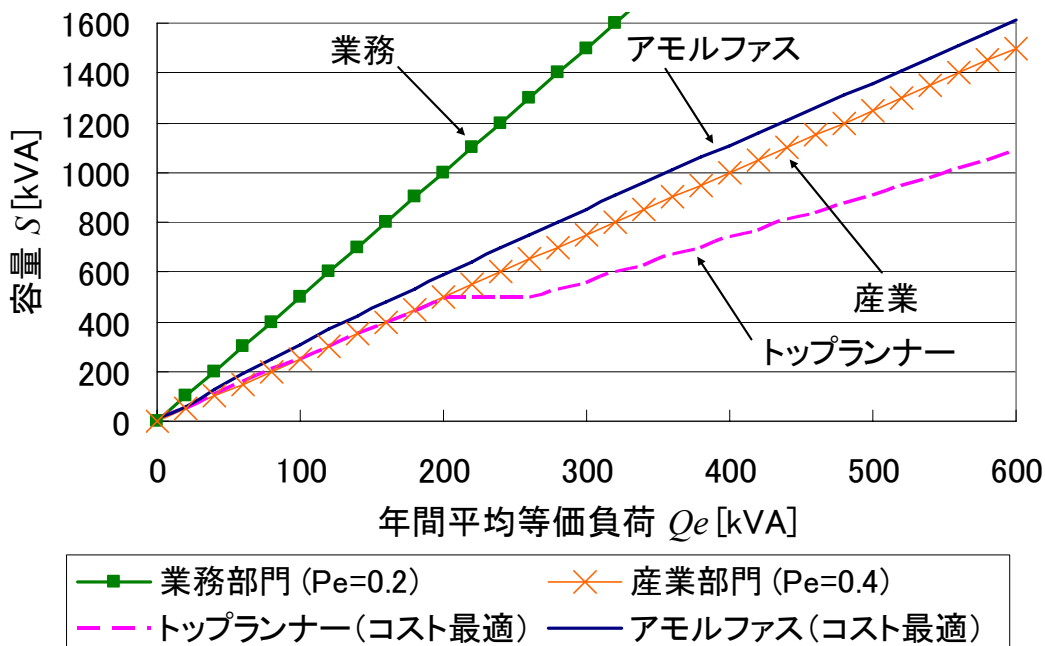


図 9-1 コスト最適な容量と現状の変圧器容量の比較

図 7-8 に示すトータルコストの比較は、ピーク負荷による制約無い、理想的な状態を仮定した上で行っている。ピーク負荷という技術的側面を考慮すると、業務部門においては、平均等価負荷率が 0.2 となる容量でトータルコストを比較した方が現実に即した評価となる (図 9-2)。図 7-9 と比較して、トップランナーのトータルコストが大幅に増加する結果となった。つまり、ピーク負荷による制約があり、平均等価負荷率が低くならざるを得ない業務部門は相性が悪く、トップランナー変圧器が本来持っているコストに関する性能 (図 7-9 参照) を発揮できていないことになる。

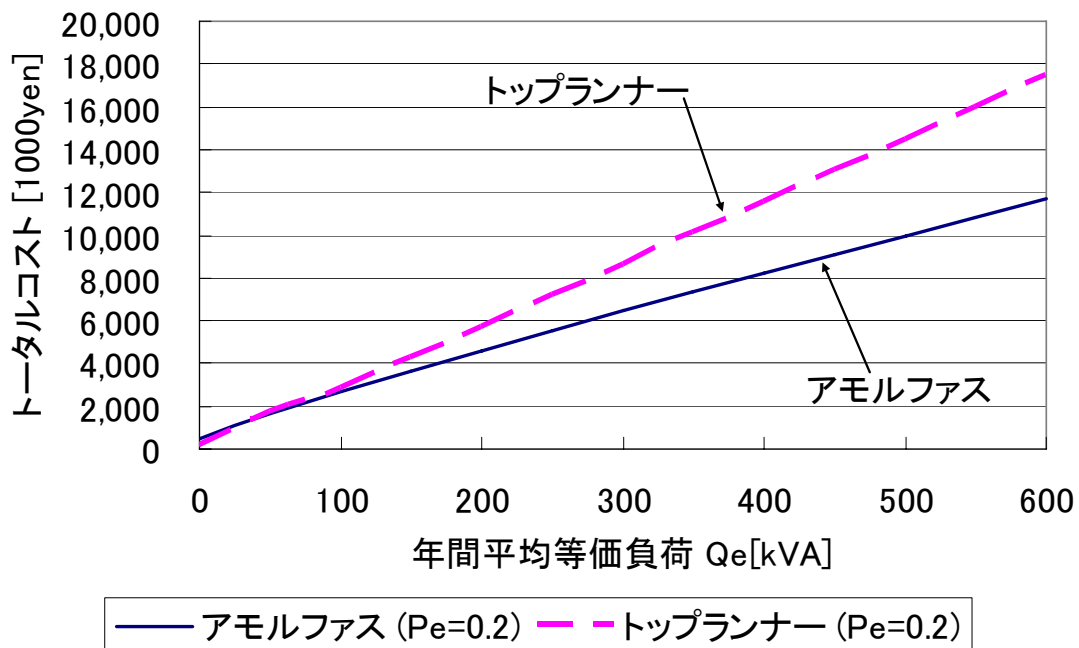


図 9-2 業務部門におけるトータルコストの比較

9. 2 産業部門

8 章で述べたように産業部門の年間平均等価負荷率は約 0.4 である。図 9-1 に示すように平均等価負荷率が 0.4 となるような選定はトップランナーで見るとコスト最適に近いが、またはそれよりも大きな容量となっている。アモルファスで見ると、コスト最適よりも小さな容量を選定していることになる。従って、アモルファスを選定するに当たってはそのままの容量を選定するのではなく、やや大きめの容量を選定することで、経済的にも環境的にもメリットが生じる。特に平均等価負荷率が高い工場でメリットが生じる。例えば、インターネットデータセンターのように 1 日中一定負荷の需要に対して、平均等価負荷率が 1 となるような容量を選定すると、コスト最適な容量を選定したときよりもトータルコストが増加する (図 9-3)。また、主に産業部門で使用される 500kVA 超過の容量のレパトリーは 500kVA 以下に比べて少ない。コスト最適な容量選定を実現するためには容量のレパ

トリー拡大も必要と考える。

前節と同様に産業部門においても現実に即した評価を行う。トップランナーは平均等価負荷率が 0.4 となる容量, 容量選定が可能なアモルファスはコスト最適となる容量におけるトータルコストを図 9-4 に示す。図 7-8 と比較して, あまり大きな変化はみられなかった。

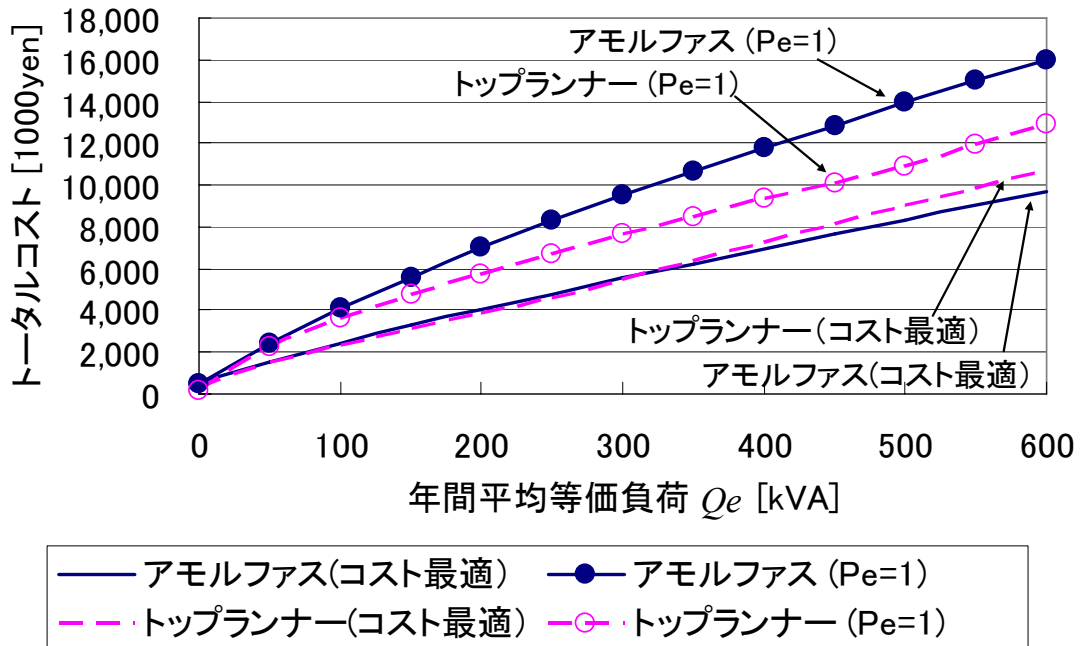


図 9-3 高負荷率運用時のトータルコストの比較

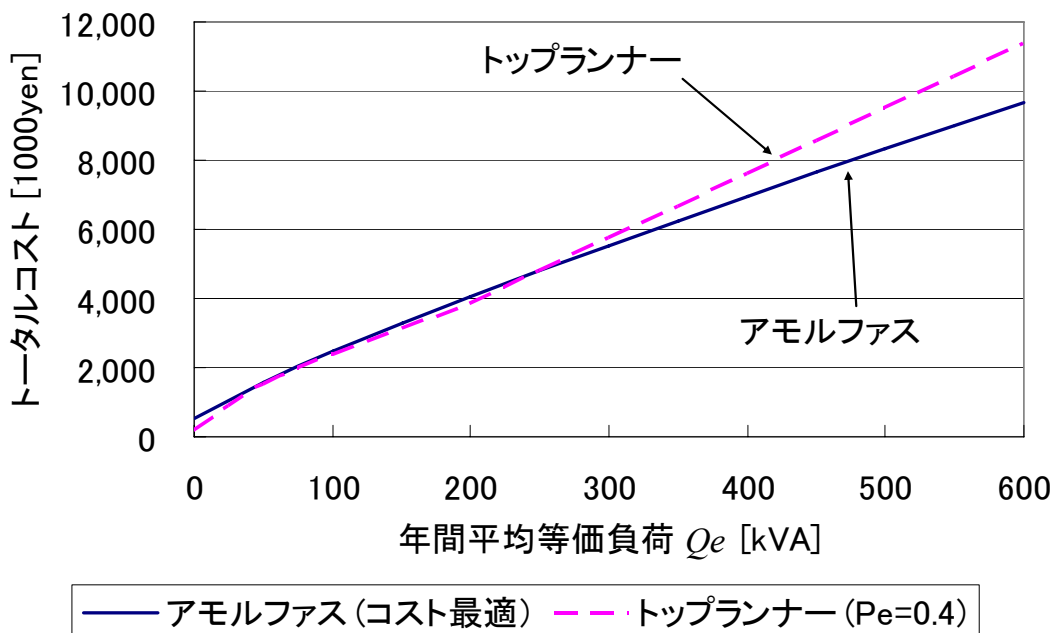


図 9-4 産業部門におけるトータルコストの比較

9. 3 日本全体における評価

日本電機工業会の調査によると、変圧器の平均的な更新時期は約 26 年となっている^[25]。機械統計年報で過去 26 年間に出荷された変圧器の総容量を算出すると約 6.8 億kVAとなり^[24]、これを使用用途によって分類する^[25]と表 9-1 のようになる。1 契約当たりの平均電力は業務用電力が 146 [kW/口]、大口電力が 2718 [kW/口] なので^[26]、業務部門を 150kVA、産業部門では複数の変圧器を所有していることも考慮し、500kVAの変圧器を用いて評価を行った。年間平均等価負荷率を 0.2 として、業務部門の変圧器 1 台当たりの年間損失電力量を算出した図 9-5 に示す。トップランナーとアモルファスの差は 1580[kWh/year]となり、業務部門ではアモルファスを選定すると年間損失電力量をほぼ半減できる結果となった。

表 9-1 使用用途による分類

	総容量[1000kVA]	モデル容量[kVA]	台数
業務	377,787	150	2,518,582
産業	302,484	500	604,968

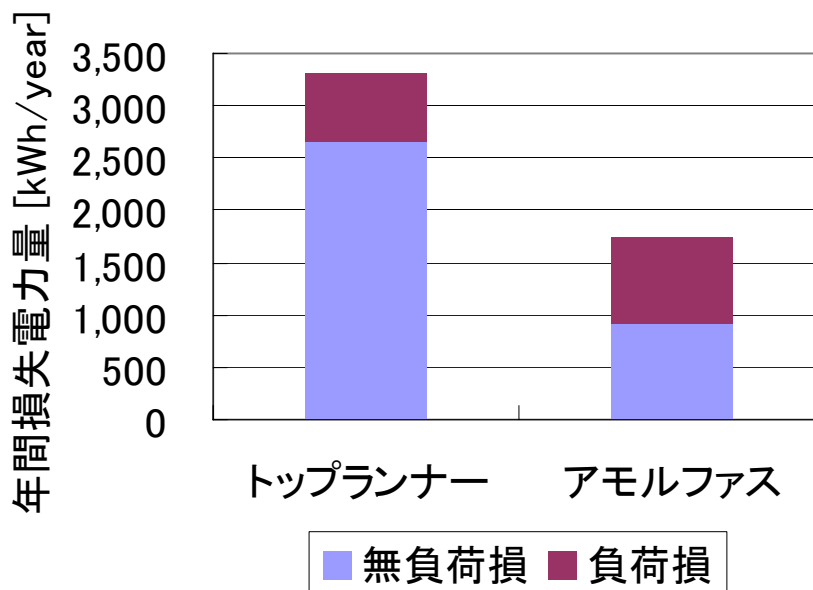


図 9-5 変圧器 1 台当たりの年間損失電力量 (業務部門)

年間平均等価負荷率を 0.4 として、産業部門の変圧器 1 台当たりの年間損失電力量を算出した (図 9-6 左 2 つの棒グラフ)。なお、図の中で () 内の数字はその変圧器を用いた時の年間平均等価負荷率を示す。トッランナーとアモルファスの差は 1043[kWh/year] となり、産業部門では現状の容量のまま機種としてアモルファスを選定すると、年間損失電力量を約 10% 削減できる結果となった。

アモルファスのコスト最適な年間平均等価負荷率は 0.33 であるので (図 7-10 参照)、産業部門では現状よりも大きい容量を選定することでコスト最適となる。より大きい容量の選定はピーク負荷制約や電圧降下の問題も無く、技術的な課題もクリアされる。ここでは、需要家が年間平均等価負荷率を 0.33 となるような容量選定を実施したとして、それと等価となるように容量 500kVA に対して 606kVA の変圧器を考え、年間損失電力量を算出した (図 9-6 左から 3 つ目の棒グラフ)。容量の増加による無負荷損の増加分よりも負荷損の減少分が大きいので、トータルとして年間損失電力量は減少する。この時のトッランナーとアモルファスの差は 2606[kWh/year] で、約 23% の削減効果となった。

生産性の向上や補助金制度によって、表 7-1 に示すアモルファス変圧器の価格が 3 割低減したケースを考える。このケースではコスト最適な年間平均等価負荷率は 0.29 となるので (図 9-7 参照)、先ほどと同様に容量 690kVA の変圧器を考え、年間損失電力量を算出した (図 9-6 左から 4 つ目の棒グラフ)。トッランナーとアモルファスの差は 3422[kWh/year] となり、約 30% の削減効果となった。アモルファス変圧器本体価格の低減は、アモルファス購入のインセンティブとなるだけでなく、コスト最適な年間平均等価負荷率を下げることによって間接的に年間損失電力量を削減する効果もある。

表 9-1 に示す変圧器台数を用いて、業務・産業部門における日本全体の年間損失電力量 (図 9-8) と年間 CO₂ 排出量 (図 9-9) を算出した。日本全体の変圧器が全て取り替わるには年数を必要とするが、ここでは本提案手法によって最適な変圧器が選定され続け、全ての変圧器が取り替わるのに十分な期間が経過したことを前提としている。また、平均等価負荷率のばらつきによる影響については、業務部門では平均等価負荷率の大きさ自体が小さく、ばらつきによる影響を無視できること、産業部門では需要家が経済性を考慮し、積極的にコスト最適な平均等価負荷率となるよう行動するため、ばらつきの範囲も小さく、その影響が無視できることを仮定している。業務部門ではトッランナーとアモルファスの差が 40 億[kWh/year]、CO₂換算で 163 万[t-CO₂/year]になる。産業部門ではトッランナーとアモルファス (平均等価負荷率=0.4, 0.33, 0.29) の差がそれぞれ 6 億[kWh/year]、16 億[kWh/year]、21 億[kWh/year]、CO₂換算でそれぞれ 26 万[t-CO₂/year]、64 万[t-CO₂/year]、85 万[t-CO₂/year] となった。機種としてアモルファスを選定することで、日本全体における年間 CO₂ 排出量を業務・産業部門合計で、189 万[t-CO₂/year]削減できる。これは京都議定書の CO₂ 排出削減目標値 (1990 年の排出量である 12 億 6,100 万 t の 6%) である約 7,600 万 t の 2.49% に相当する。更に需要家が自らの負荷パターンを分析し、コスト最適な容量を選定した場合には 227 万[t-CO₂/year]の削減となり、CO₂排出削減目標値の 2.99% に相当する効果が期待できる。

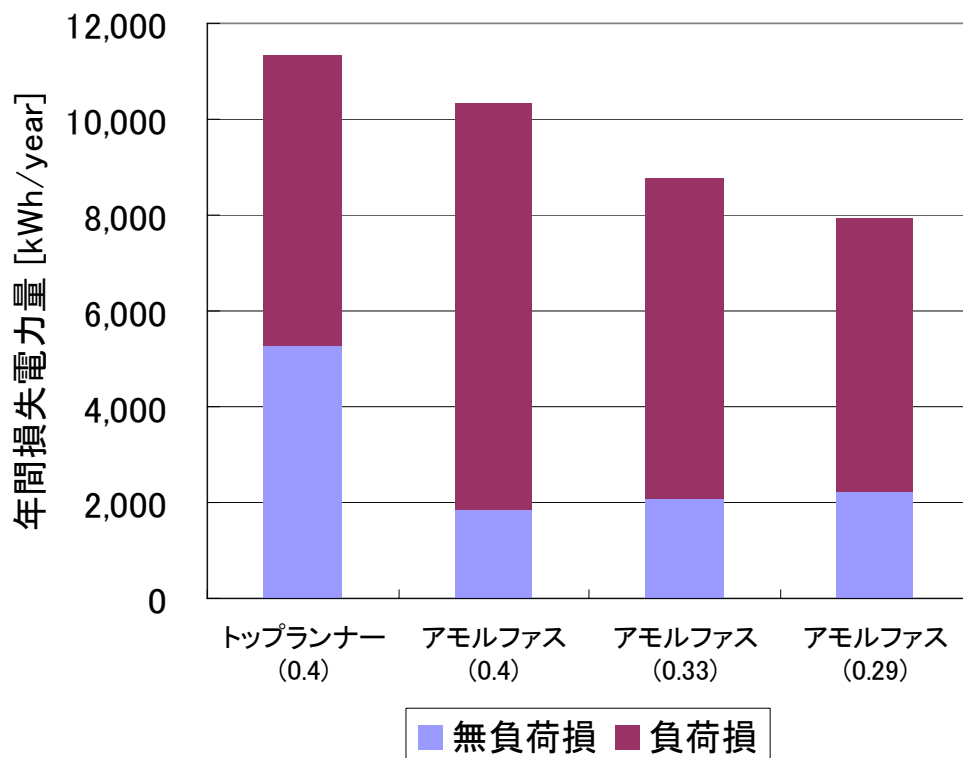


図 9-6 変圧器 1 台当たりの年間損失電力量 (産業部門)

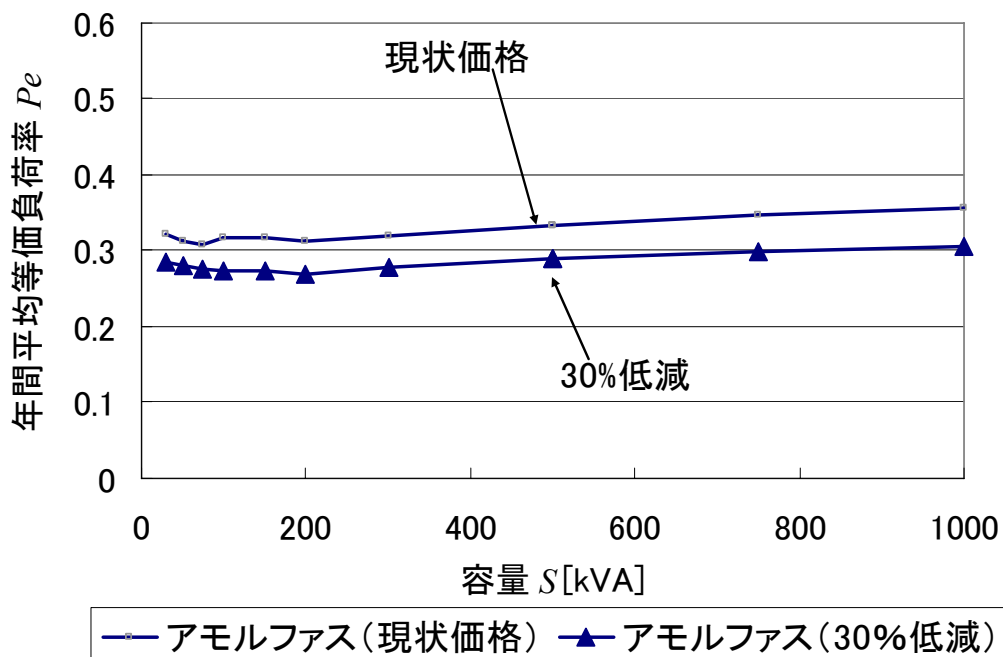


図 9-7 コスト最適な平均等価負荷率 (30%低減)

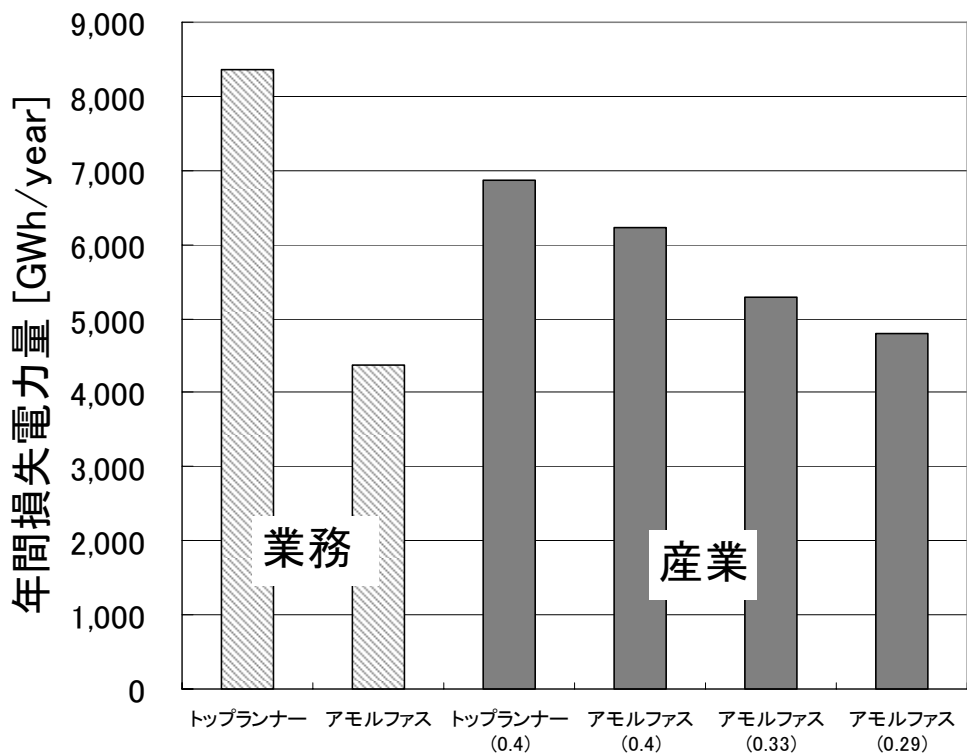


図 9-8 年間の電力損失量 (日本全体)

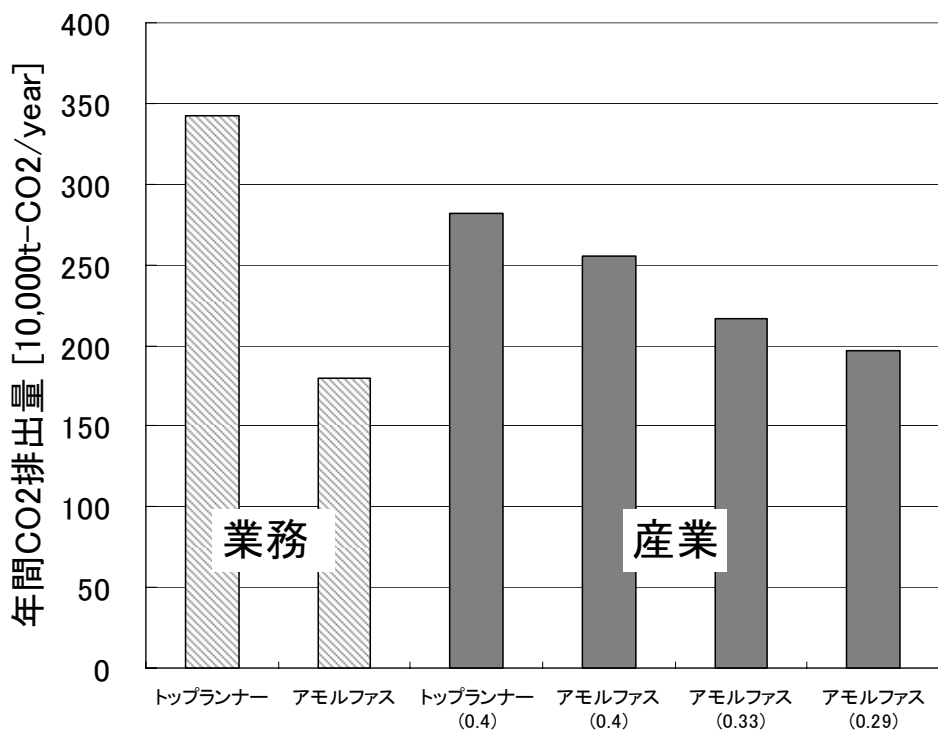


図 9-9 年間のCO₂排出量 (日本全体)

9. 4 ブレークイーブン価格

本節では容量選定は実施せず，単純に同容量の変圧器間での経済性を評価した。表 9-2 に示すトッランナー変圧器に対するアモルファス変圧器のブレークイーブン価格を図 9-10～図 9-12 に示す。Super アモルファスとはアモルファス変圧器の負荷損パラメータをトッランナー以上に削減した機種であり，価格は通常のアモルファス変圧器よりも高価となる。平均等価負荷率が高くなるほど，アモルファス変圧器のブレークイーブン価格が低く，Super アモルファスのブレークイーブン価格が高くなっているのが分かる。従って，平均等価負荷率が高い需要家ほど Super アモルファスを購入するメリットがあるといえる。ただし，業務部門のような平均等価負荷率が低い需要家では両者のブレークイーブン価格は同程度であり，この場合は製造コストの安いアモルファス変圧器の方が経済性を向上させる可能性が高いと推測される。

表 9-2 ブレークイーブン価格を算出する変圧器のパラメータ

容量 S [kVA]	トッランナー			アモルファス		Super アモルファス	
	無負荷損 W_i [W]	負荷損 W_c [W]	価格 C_{tr} [1,000yen]	無負荷損 W_i [W]	負荷損 W_c [W]	無負荷損 W_i [W]	負荷損 W_c [W]
30	120	586	236	55	580		
50	155	916	284	60	900		
75	211	1,009	344	70	1,280		
100	236	1,359	408	85	1,640		
150	307	1,878	528	105	2,365		
200	361	2,428	652	120	3,000		
300	453	3,098	888	160	3,850	160	1,850
500	602	4,337	1,350	220	6,200	220	3,500
750	981	6,278	1,985	255	8,150	295	5,500
1,000	1,237	8,202	2,654	325	10,300	360	7,350
1,500	1,400	11,818	4,624			420	10,600
2,000	1,959	15,685	5,739			750	15,350

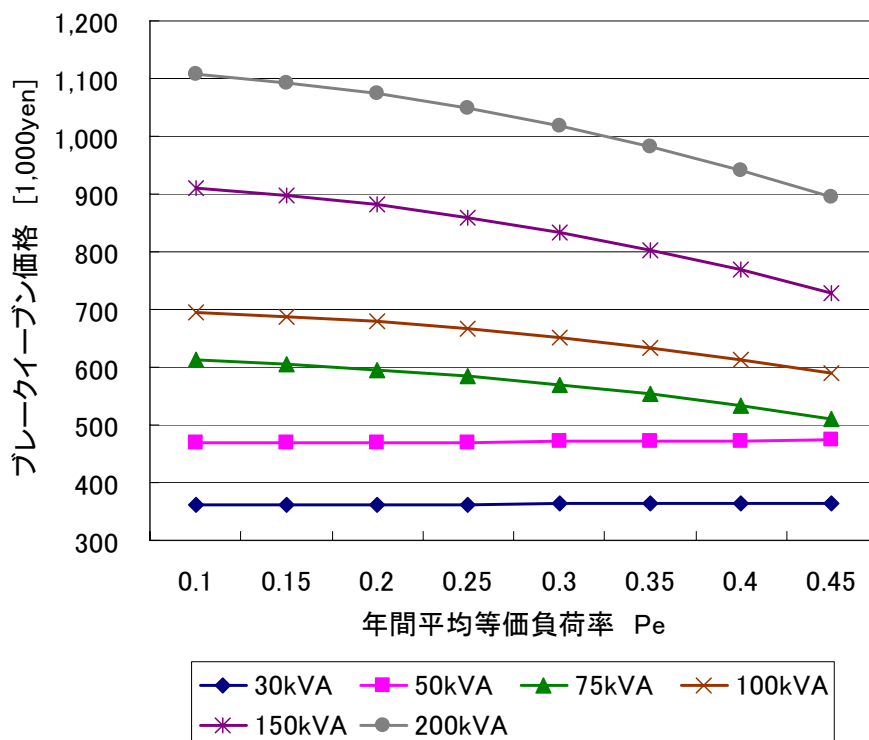


図 9-10 アモルファス変圧器ブレークイーブン価格 (容量 30~200kVA)

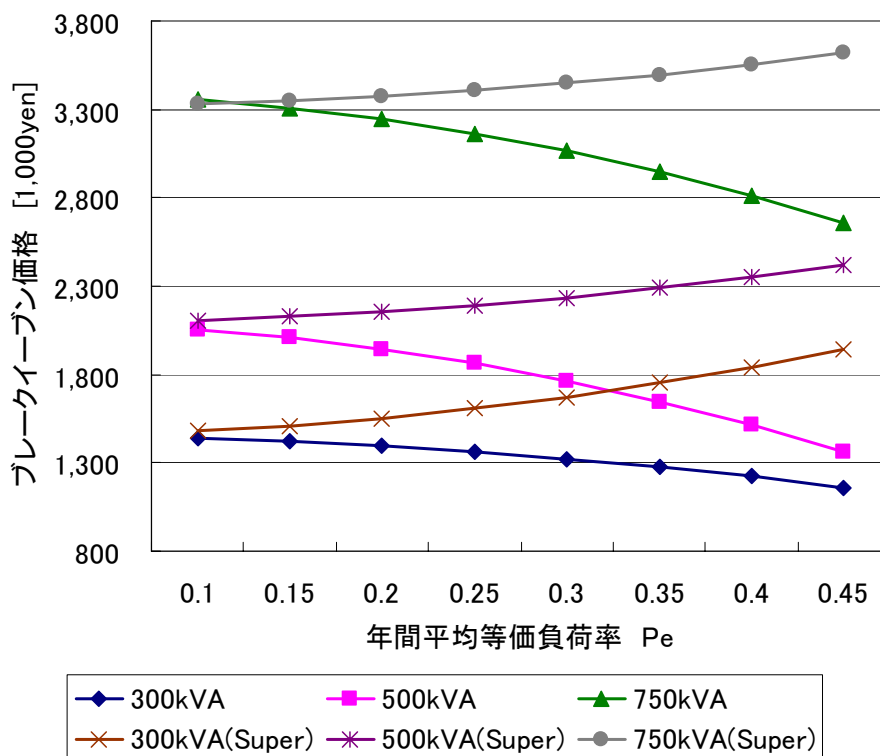


図 9-11 アモルファス変圧器ブレークイーブン価格 (容量 300~750kVA)

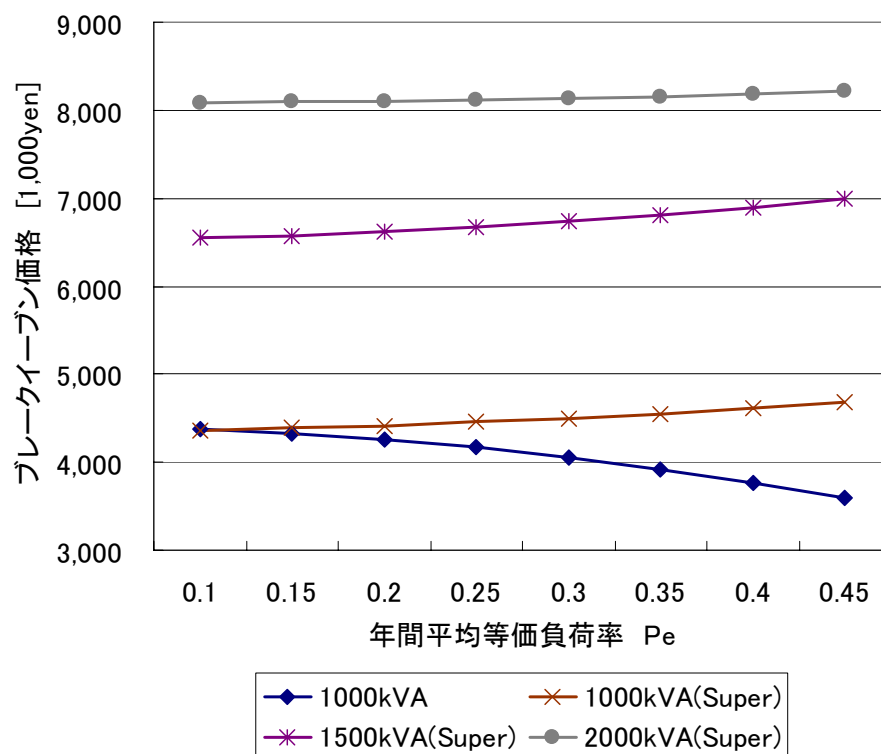


図 9-1 2 アモルファス変圧器ブレークイーブン価格 (容量 1000~2000kVA)

9. 5 まとめ

容量と機種を統合した変圧器選定手法として平均等価負荷を提案した。現状抱える問題点を踏まえた上で、変圧器が本来持っている性能を評価した結果を以下に示す。

- (1) 負荷の2乗平均平方根である平均等価負荷 Q_e を用いることでコスト最適な容量が一意に定まり、機種毎の特徴が明らかとなった。トップランナーと比較して、アモルファスはやや大きめの容量を選定することでコスト最適となる。
- (2) アモルファス変圧器のコスト最適な平均等価負荷率は0.3~0.35程度、環境最適では更に低い値となった。
- (3) 業務部門では、現状の容量のまま機種としてアモルファスを選定することで年間損失電力量をほぼ半減できる。
- (4) 産業部門では、現状の容量のまま機種としてアモルファスを選定することで年間損失電力量を約10%、コスト最適な容量選定を実施すると、約23%の削減効果が期待できる。
- (5) 機種としてアモルファスを選定することで、日本全体における年間CO₂排出量を業務・産業部門合計で、189万[t-CO₂/year]削減できる。これは京都議定書のCO₂排出削減目標値(1990年の排出量である12億6,100万tの6%)である約7,600万tの2.49%に相当する。更に需要家が自らの負荷パターンを分析し、コスト最適な容量を選定した場合には227万[t-CO₂/year]の削減となり、CO₂排出削減目標値の2.99%に相当する効果が期待できる。

第三部 系統連系されたプラグインハイブリッド車の充電制御による風力発電連系可能量の評価

第10章 モデル作成

10.1 はじめに

PHEVを商用電力系統ではなく、再生可能エネルギーを電源とする独立系統へ接続し、充電するという提案もなされている^[27]。一方、PHEVを既存の商用電力系統に接続して充電する場合、そのエネルギーは、電力価格が安く、車の稼働率の低い夜間に主に充電されると考えられる^[2]。そこで、本研究では、PHEVに搭載された蓄電池の充電電力を変化させることで、風力発電の出力変動の影響を緩和し、需給バランスを維持することを提案する。風力発電の出力変動による影響を蓄電池の充放電によって抑制する研究に関しては、既に様々な有用な手法が提案されている^{[28][29]}。残された主な課題として、次の点が挙げられる。

- 蓄電池を新規に設置することにより設備コストが増加し、経済性が悪化する。
- 運用時に充放電バランスを維持、管理する必要がある。

これらの課題に対して、PHEVの蓄電池を用いる利点を次に挙げる。経済性に関しては、PHEVが普及したことを前提とすれば、追加的に発生する設備コストは充電を制御するコントローラ部のみである。また、放電は電気走行時に行われるため、充電電力のみを制御し、運用時に充放電バランスを管理する必要性は無い。本論文の新規性は普及したPHEVの充電電力のみを制御した場合に、その規模が風力発電導入可能量に対して、どの程度貢献できるかを明らかにする点にある。以上のような主旨から、本研究における評価は最も簡便な制御である、周波数偏差のみに基づく自律分散制御を用いている。従って、制御方式自体にオリジナリティは無く、追加的なインフラを仮定すれば、より高度な制御方式^{[30][31]}の適用も可能である。

本研究では、風力発電の短周期出力変動（LFCが対象とする約20分周期以下の成分）に起因する周波数変動を、PHEVに搭載されている蓄電池の充電電力を制御することによって抑制し、PHEVの普及割合に応じて、風力発電連系可能量がどのように変化するか定量的に評価する。なお、風力発電を導入する際には、短周期の変動以外に、長周期の変動や電圧変動等の様々な制約が存在するが、本稿で示される風力発電連系可能量は短周期面からのみ評価した値であることを注意してほしい。

10.2 負荷変動モデル

負荷変動モデルを図 10-1 に示す。白色ノイズによって発生させたランダム変動のうち、LFC対象周期以外の成分を除いたものを負荷変動とした^[32]。また、総需要 P [MW]に対して、負荷変動の標準偏差が $0.6\sqrt{P}$ となるように負荷変動の大きさを調整した^[33]。総需要が5000MWの時の負荷変動パターン1時間分を図 10-2 に示す。

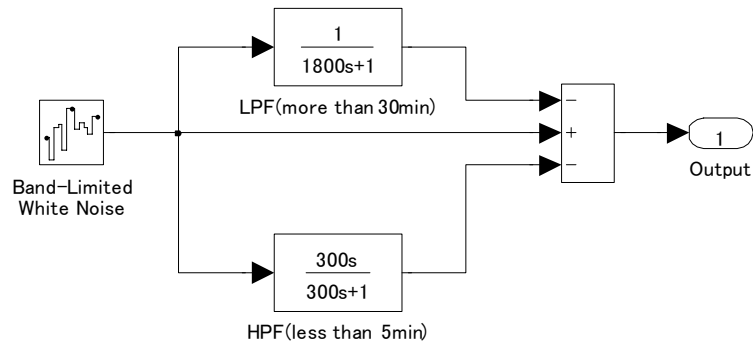


図 10-1 負荷変動モデル

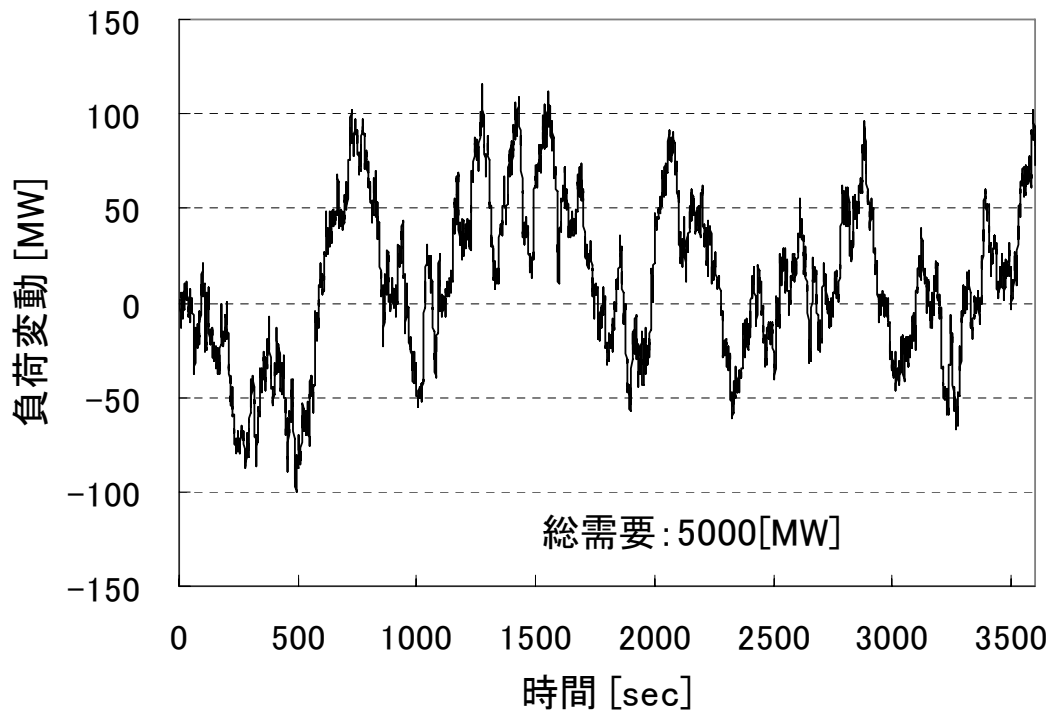


図 10-2 負荷変動パターン (総需要: 5000[MW])

10.3 風力変動モデル

実際の出力波形^[34]を参考に作成した風力変動モデルを図 10-3 に示す^[35]。風力発電の設置箇所としては、電力会社供給区域内の複数地点に大規模ウインドファームまたは数本単位の独立した発電サイトが配置されることを想定している。この場合、平滑化効果により、時間間隔 20 分での最大出力変動幅は定格出力の約 30%程度とされる^[36]。ただし、気候や設置条件が変われば、出力変動の大きさも変化することを考慮し、本モデルでは最大出力変動幅が定格出力の 40%と想定して、風力変動の大きさを調整した。図 10-4 に風力発電の定格出力が 1000MWの時の出力変動パターン 1 時間分を示す。

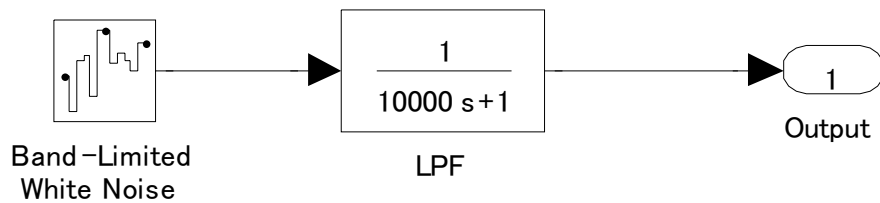


図 10-3 風力変動モデル

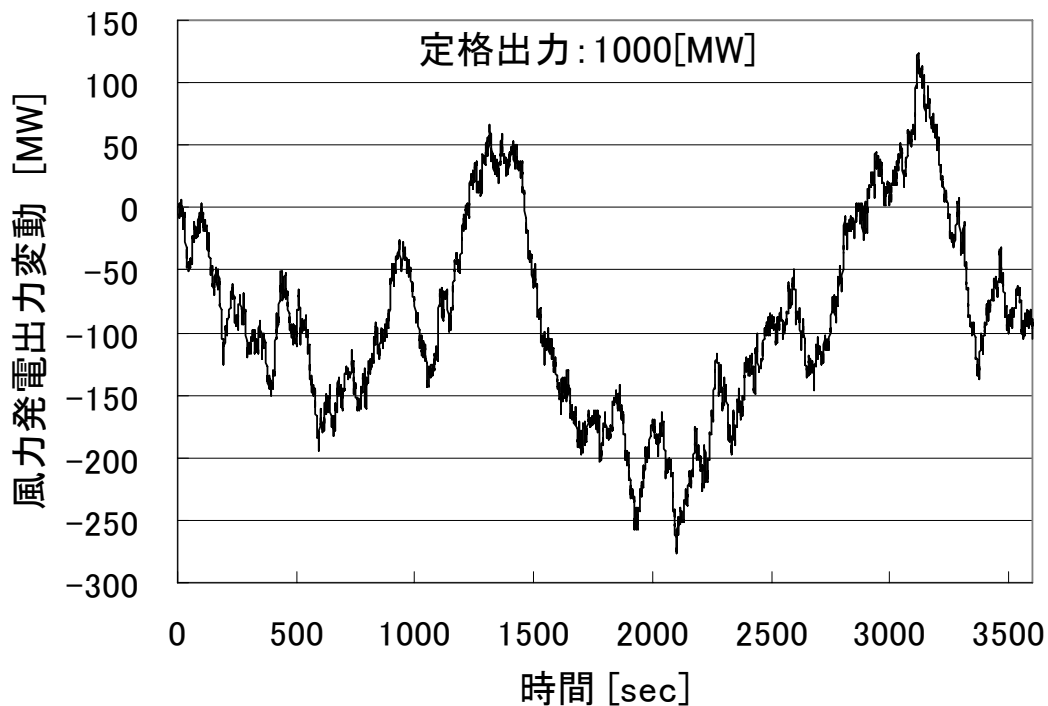


図 10-4 風力変動パターン (定格出力: 1000[MW])

10.4 充電制御

PHEV は充電を行う際、系統の周波数偏差を検出し、自律分散的に充電制御を行うと仮定した。充電制御は図 10-5 に示すような線形特性とし、常時（基準周波数である 50Hz のとき）は 1 台あたり 500W で充電し、周波数が減少した時はそれに比例して充電電力を下げ、周波数が上昇した時はそれに比例して充電電力を上げる制御を行う。充電電力の変動幅は基準周波数 $\pm 0.2\text{Hz}$ に対して、0W から 1kW の範囲内であり、家庭用電源でも十分対応が可能である。以上のような制御は負荷の周波数特性定数を大きくすることと等価であり、系統に与える影響も小さい。また、充電電力のみを制御するので、逆潮流によって発生する電圧上昇等の問題も無いといったメリットもある。蓄電池の時定数については、図 10-4 に示す風力発電の出力変化速度に比べて十分早いことを仮定し、1 秒とした。

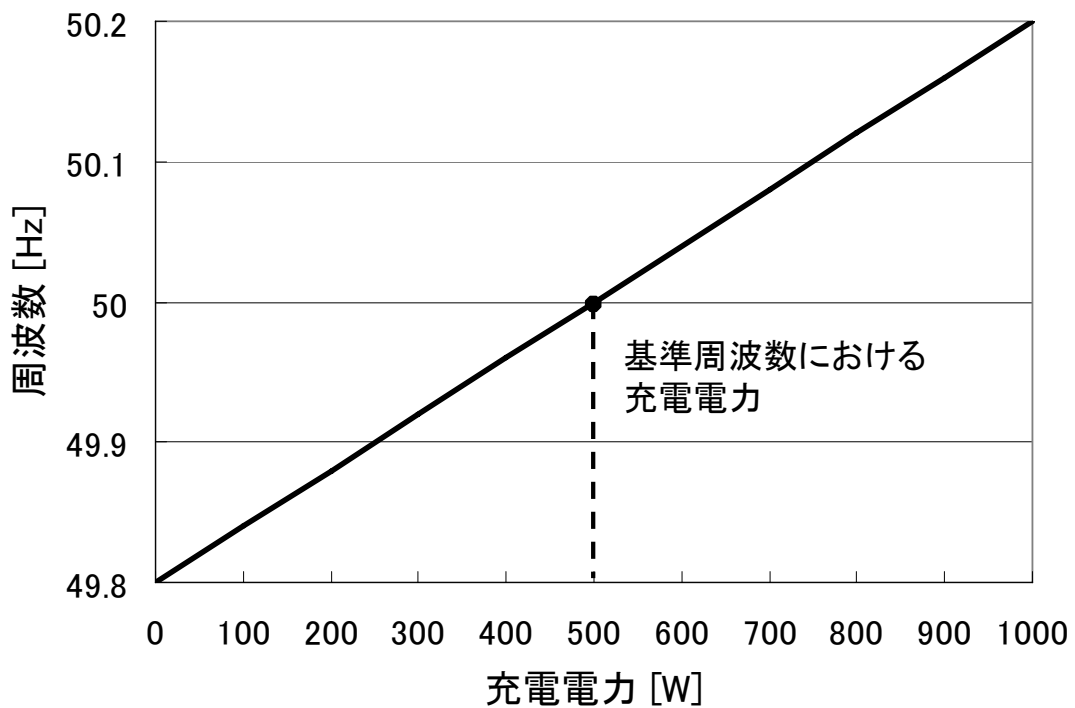


図 10-5 充電制御の特性

10.5 周波数変動シミュレーションモデル

本研究では地域別の乗用車台数と最低電力需要を組み合わせ、3つの地域モデルを作成した(表10-1, 10-2)。地域モデルについて概説すると、エリアAは乗用車台数と最低電力需要が最も小さい。エリアBはエリアAに対して、乗用車台数が約2.3倍、最低電力需要が約2.6倍であるとした。また、エリアCはエリアAに対して、乗用車台数が約3.2倍、最低電力需要は約2.4倍とした。つまり、他のエリアよりもエリアCでは乗用車台数の割合が多いことを仮定している。また、各時間帯における電力需要およびLFC容量、負荷制限器設定値は表10-2のように設定した。表は1時間毎の状態を示しており、例えば、23時の欄は23時~0時の系統状態を示すことになる。周波数制御シミュレーションに用いるブロック図を図10-6に、パラメータを表10-3に示す[5][37]。系統に連系されている各発電機については水力発電機群、火力発電機群として、それぞれ1つの発電機モデルとして表現している。LFC部は系統周波数の偏差から地域要求量(発電出力と電力需要の差)を算出し、PI制御後、出力を火力発電と水力発電の容量に応じて比例配分している。充電制御部では検出した周波数偏差から図10-5の特性に応じた充電制御を行う。図10-5の直線の傾きのように、PHEVは1台当たり250[W/0.1Hz]の充電特性を持つと仮定した。従って、N台の場合 $250 \times N$ [W/0.1Hz]の充電特性となり、充電制御を行っている台数の割合が多くなる程、周波数偏差1単位に対する充電電力の変化分は大きくなる。つまり、ある一定の充電電力の変化を実現する場合、台数が多くなる程一台当たりの充電電力の変化は小さくなる。

表 10-1 自家用乗用車台数と最低需要電力

エリア	自家用乗用車台数 [1,000]	最低需要電力 [MW]
A	2,400	2,513
B	5,410	6,320
C	7,640	6,085

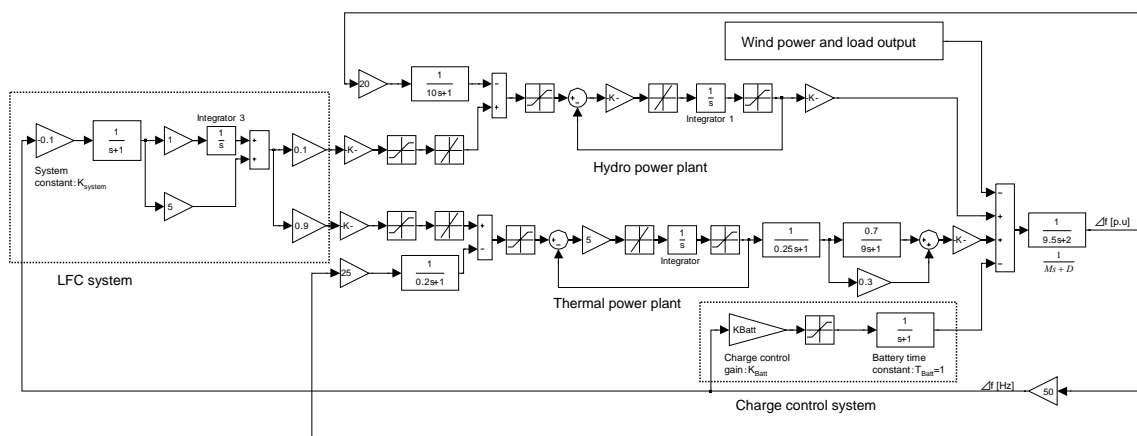


図 10-6 周波数変動シミュレーションモデル

表 10-2 LFC 容量と負荷制限器設定値

(a) エリア A

時間 [h]	総需要 [MW]	LFC 容量				ガバナフリー容量			
		火力 [MW]	水力 [MW]	合計 [MW]	系統容量比 [%]	火力 [MW]	水力 [MW]	合計 [MW]	系統容量比 [%]
23	3,095	60	4	64	2.06	105	7	112	3.61
0	3,042	58	4	62	2.03	101	7	108	3.55
1	2,937	53	4	57	1.96	94	7	101	3.42
2	2,778	47	4	51	1.84	82	7	89	3.22
3	2,646	42	4	46	1.73	73	7	80	3.03
4	2,540	38	4	42	1.64	66	7	73	2.87
5	2,513	37	4	41	1.61	64	7	71	2.82
6	2,646	42	4	46	1.73	73	7	80	3.03

(b) エリア B

時間 [h]	総需要 [MW]	LFC 容量				ガバナフリー容量			
		火力 [MW]	水力 [MW]	合計 [MW]	系統容量比 [%]	火力 [MW]	水力 [MW]	合計 [MW]	系統容量比 [%]
23	7,566	140	10	151	1.99	245	18	264	3.48
0	7,388	133	10	144	1.94	233	18	251	3.40
1	7,210	126	10	136	1.89	221	18	239	3.31
2	7,032	119	10	129	1.84	208	18	226	3.22
3	6,676	105	10	115	1.72	183	18	201	3.02
4	6,409	94	10	104	1.63	164	18	183	2.85
5	6,320	90	10	101	1.59	158	18	176	2.79
6	6,587	101	10	111	1.69	177	18	195	2.96

(c) エリア C

時間 [h]	総需要 [MW]	LFC 容量				ガバナフリー容量			
		火力 [MW]	水力 [MW]	合計 [MW]	系統容量比 [%]	火力 [MW]	水力 [MW]	合計 [MW]	系統容量比 [%]
23	7,389	142	10	152	2.05	248	17	265	3.59
0	7,172	133	10	143	1.99	233	17	250	3.49
1	6,882	122	10	131	1.91	213	17	230	3.34
2	6,592	110	10	120	1.82	193	17	209	3.18
3	6,303	99	10	108	1.72	172	17	189	3.00
4	6,085	90	10	99	1.63	157	17	174	2.86
5	6,230	96	10	105	1.69	167	17	184	2.96
6	6,665	113	10	123	1.84	198	17	215	3.22

表 10-3 周波数変動モデルのパラメータ

パラメータ	値
発電機慣性定数 M	9.5 [sec]
負荷特性定数 D	2 [p.u.]
蓄電池時定数 T_{Batt}	1 [sec]
LFC制御周期	5 [sec]
速度調停率(水力)	5 [%]
速度調停率(火力)	4 [%]
系統定数 K_{system}	10 [%MW/Hz]
LFC指令配分(水力:火力)	1:9
PHEVの充電特性 K_{Batt}	$250 \times N$ [W/0.1Hz]

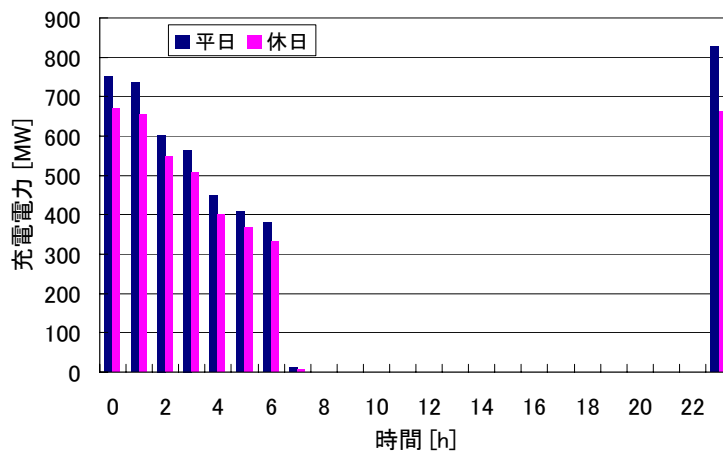
10.6 充電パターン

全国起終点調査^[38]ならびに文献^[39]の手法に基づき、家庭で夜間に充電可能な自家用乗用車を対象に走行パターンの詳細化を行った。文献^[39]では、全国の自家用乗用車 5000 万台を「平日のみ出勤する車」「平日も休日も出勤する車」「非出勤車」の 3 つに分類後、10 万台を 1 グループとし、それぞれのグループ毎に走行パターンを求めている。また、PHEVの電気走行可能距離は 30km（搭載する電池容量は約 4.3kWh）、電気走行時の燃費は 7[km/kWh]とし、毎日の走行開始時から電気走行を行い、電気走行可能距離を越えた後はハイブリッド走行するとしている。本研究では、上記と同様の想定を各エリア内の乗用車に適用し、1 万台を 1 グループとし、それぞれのグループ毎に走行パターンを求めた。走行距離に応じて消費した分の電力については、帰宅以降に家庭用電源から平均 500Wにて充電を行う（図 10-5 参照）。エリア内の自家用乗用車が全てPHEVとなった場合（PHEVの普及率が 100%となった場合）の充電パターンを図 10-7 に、1 日における総充電電力量を表 10-4 に示す。なお、送電損失⁵およびインバータの充電効率を考慮し、充電に関する総合効率は 90%とし、電気料金の安い深夜帯（23 時から翌朝 7 時までの 8 時間）に充電するようにタイマーを利用している。図より、平日の充電電力は各時間帯において、休日の値を上回っていることが分かる。従って、本節以降のシミュレーションは充電制御可能な容量の小さい休日の充電パターンに基づいて行う。

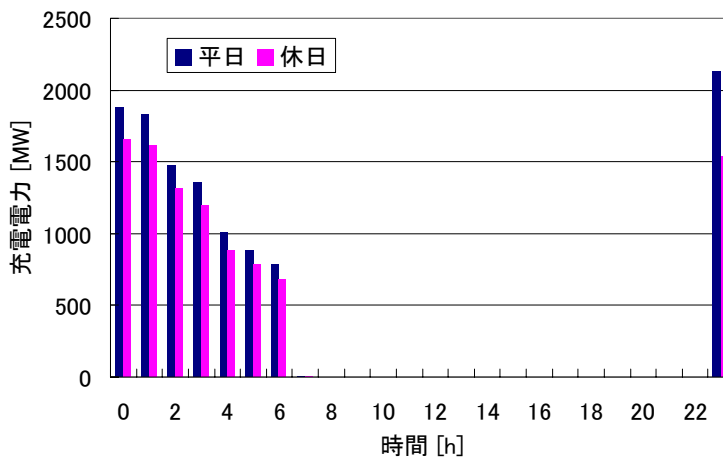
ここで、PHEVの充電パターンが日負荷曲線に与える影響について考察する。文献^[40]において、日本の全登録車両約 8000 万台に電気走行可能距離 96kmのPHEVが普及した場合、必要となる年間充電電力量を 793 億kWhと算出している。同様に、電気走行可能距離 96kmのPHEVが深夜充電を行った場合の日負荷曲線を算出し、約 3000 万kWの負荷平準化効果が得られるとしている。本稿では、全国の自家用乗用車約 5000 万台に電気走行可能距離 30kmのPHEVが普及することを想定しており、その場合の年間充電電力量は 242 億kWhとなる。負荷平準化が充電電力量の大きさに比例すると仮定すると、これは約 920 万kWの負荷平準化効果となる。従って、本稿で想定した電気走行可能距離 30kmのPHEVが普及し、夜間に充電を行った場合であっても、依然として昼夜間の需要差は生じており、昼間と比較して夜間の周波数調整能力が不足する状況に変化は無いといえる。

表 10-4 1 日の総充電電力量

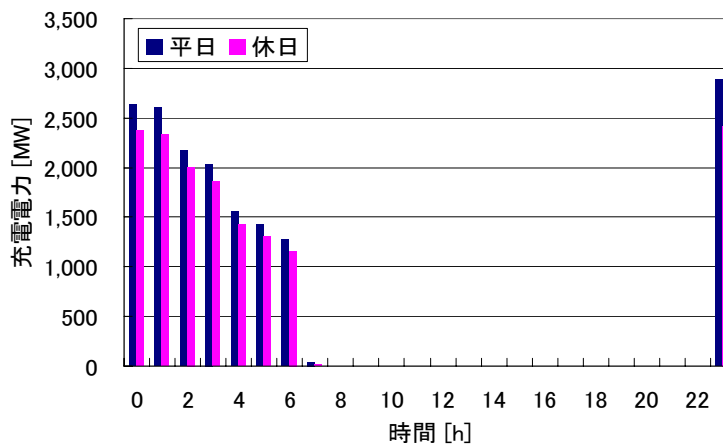
エリア	自家用乗用車台数 [1,000]	1日当たりの総充電電力量 [MWh/day]	
		平日	休日
A	2,400	4,735	4,155
B	5,410	11,340	9,650
C	7,640	16,628	14,894



(a) エリア A



(b) エリア B



(c) エリア C

図 10-7 1日の充電パターン

第 1 1 章 シミュレーション結果

1 1. 1 系統周波数偏差

本節では、エリア C を代表として取り上げ、充電制御による周波数変動の抑制効果を時間軸波形にて評価する。エリア C に風力発電を 1200MW 導入したときの系統周波数偏差を図 11-1 に示す。なお、需要断面は L F C 容量が最も低下する 4 時とし、パラメータは充電制御無しおよび 50, 150MW の充電制御有りの 3 ケースとした。なお、1 台当たりの平均充電電力を 500W としたので、50MW は台数換算で 10 万台、150MW は 30 万台で制御を行っていることになる。図より充電制御を行うことで、周波数偏差を抑制できている様子が見てとれる。充電制御無しケースの周波数偏差が大きく変動しているのは周波数調整容量が不足しているためであり、この時に調整容量の不足分を充電制御が補うことで、効果的に周波数偏差を抑制できている。例えば 780 秒付近で、充電制御無しケースの周波数偏差が約 0.41Hz であるのに対して、30 万台で充電制御を行ったケースでは約 0.1Hz まで抑制されているが、これは次のように説明できる。周波数調整容量が不足した場合には、負荷の周波数特性によって需給バランスを維持することになるが、今回モデルで仮定した負荷の周波数特性定数は $2[\text{p.u.}] = 2 \times 6,085/50 = 243.4[\text{MW/Hz}] = 24.34[\text{MW}/0.1\text{Hz}]$ であり、30 万台で充電制御を行った場合の充電特性は $250 \times 300,000 = 75,000,000[\text{W}/0.1\text{Hz}] = 75[\text{MW}/0.1\text{Hz}]$ である (表 10-3 参照)。つまり、充電制御を行った場合、 $24.34 + 75 = 99.34[\text{MW}/0.1\text{Hz}]$ の周波数特性定数を持つことと等価となり、これは充電制御を行わなかった場合の約 4.1 倍となる。従って、周波数偏差を約 4.1 分の 1 まで抑制できたといえる。

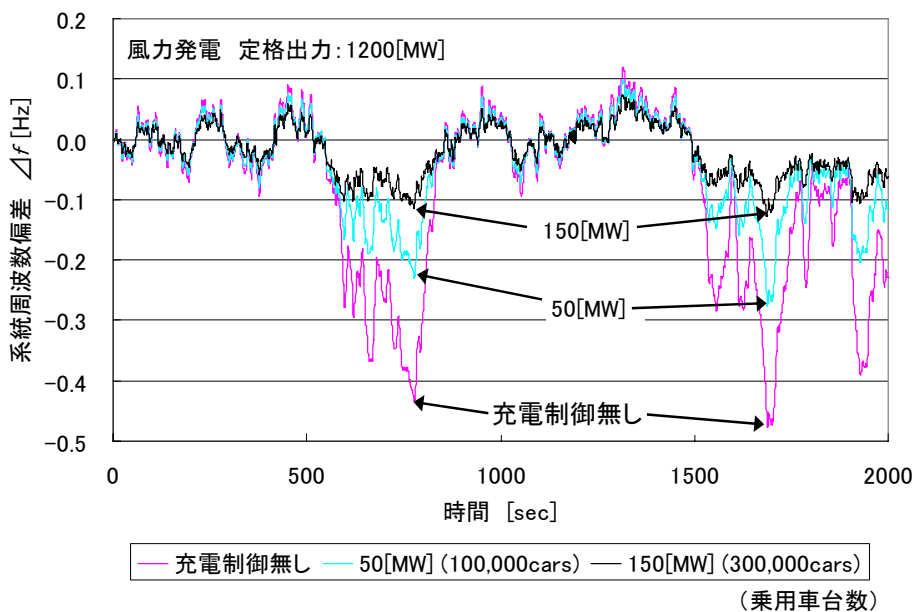


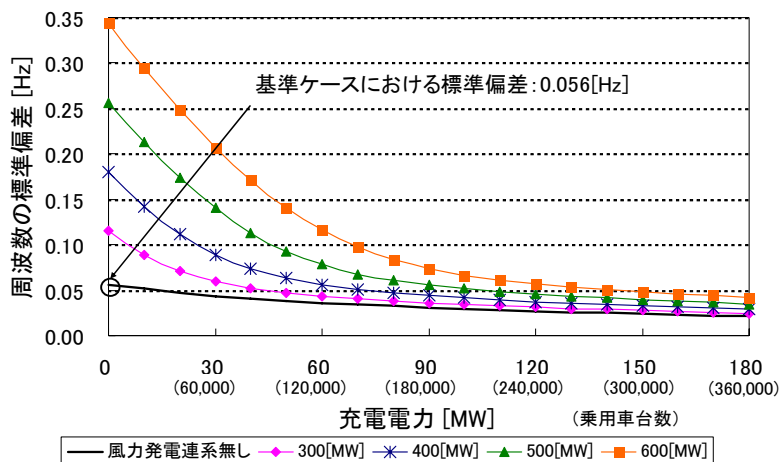
図 1 1 - 1 系統周波数偏差

11.2 風力発電の連系可能容量の算出

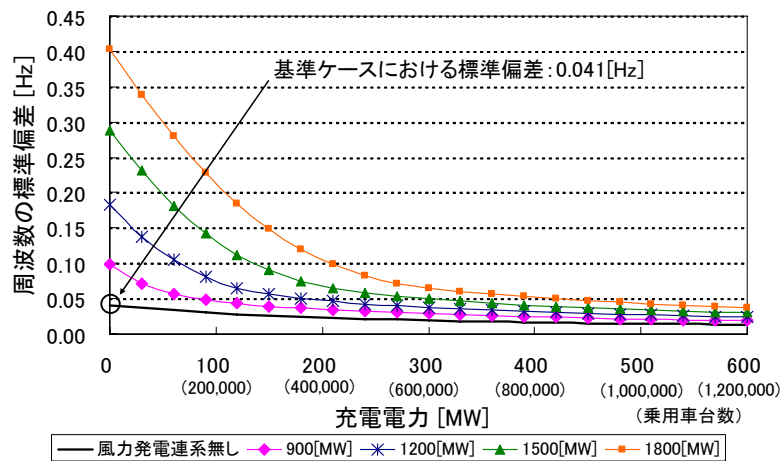
本節では、風力発電の導入量に対する充電制御の抑制効果を定量的に評価する。評価は基準周波数からの標準偏差（50Hz からの偏差 Δf の二乗平均平方根）を用いて行った。系統に風力発電を連系していない場合を基準ケースとし、標準偏差がこれと同レベルとなれば風力発電を連系したことによる電力品質の悪化は無く、風力発電の導入に問題は無いと判断する。シミュレーション時間は 1 時間とし、需要断面は LFC 容量が一番低下する時間帯を選び、エリア A と B を 5 時、エリア C を 4 時とした。図 11-2 に風力発電の導入量をパラメータとしたときの、基準周波数からの標準偏差を示す。充電電力を増やすことで、周波数の標準偏差が減少しているのが分かる。基準ケースにおける標準偏差はエリア A が 0.056Hz、エリア B が 0.041Hz、エリア C が 0.042Hz となった。

基準ケースの標準偏差と同レベルとなるのに必要な充電電力を図 11-3 に示す。風力発電の導入量が少ない範囲で、必要となる充電電力がゼロとなっているのは、系統側の周波数調整容量によって電力品質が維持されているためである。風力発電出力の周波数への影響度合いは、常時の需要変動の大きさと風力発電出力変動の大きさの相対関係で異なる。つまり、常時の需要変動に対して風力発電の出力変動が小さい範囲では、風力発電の導入による影響は小さい。今回は基準ケースにおける周波数調整容量にまだ余裕があったため、一定容量までの風力発電の導入に対しては、追加の充電制御無しでも、電力品質を維持できたといえる。図より風力発電が大量に連系された場合、風力発電の導入量と電力品質を維持するための充電電力の大きさはほぼ比例関係となるのが分かる。直線部分の傾きはエリア A、B、C でそれぞれ約 0.37、0.45、0.5 となった。これは、風力発電の変動幅（定格出力の 40%）と同程度の充電電力の制御によって、風力発電導入による影響をキャンセルできることとなり、直感的にも理解できる。以上の結果より、風力発電の連系容量に対して 3～5 割程度の充電電力制御によって現状の周波数品質を維持できることが分かった。

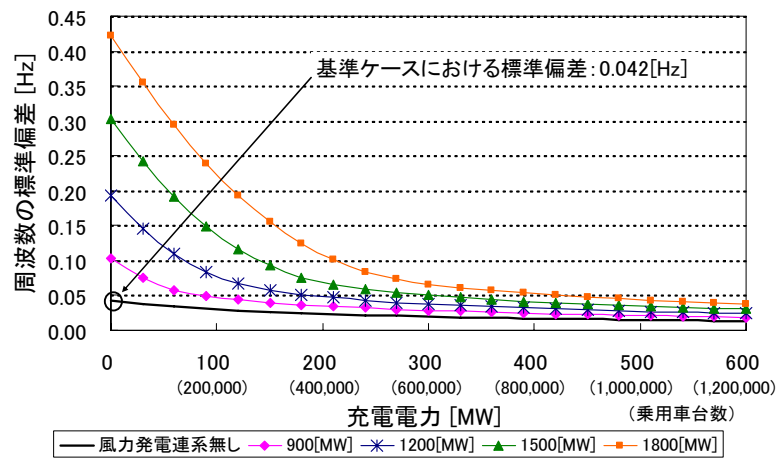
図 10-7 の充電パターンにおいて、23 時から翌朝 7 時までにおける充電電力の最小値はエリア A、B、C でそれぞれ、約 330、650、1100MW となる。つまり、LFC 容量が不足する夜間帯をとおして、この最小値以上の充電電力は確保されることになる。従って、この場合の風力発電の連系可能量はエリア A が 1100MW、エリア B が 2000MW、エリア C が 2800MW となる。（図 11-3 参照）



(a) エリア A



(b) エリア B



(c) エリア C

図 1 1-2 充電電力に対する周波数の標準偏差

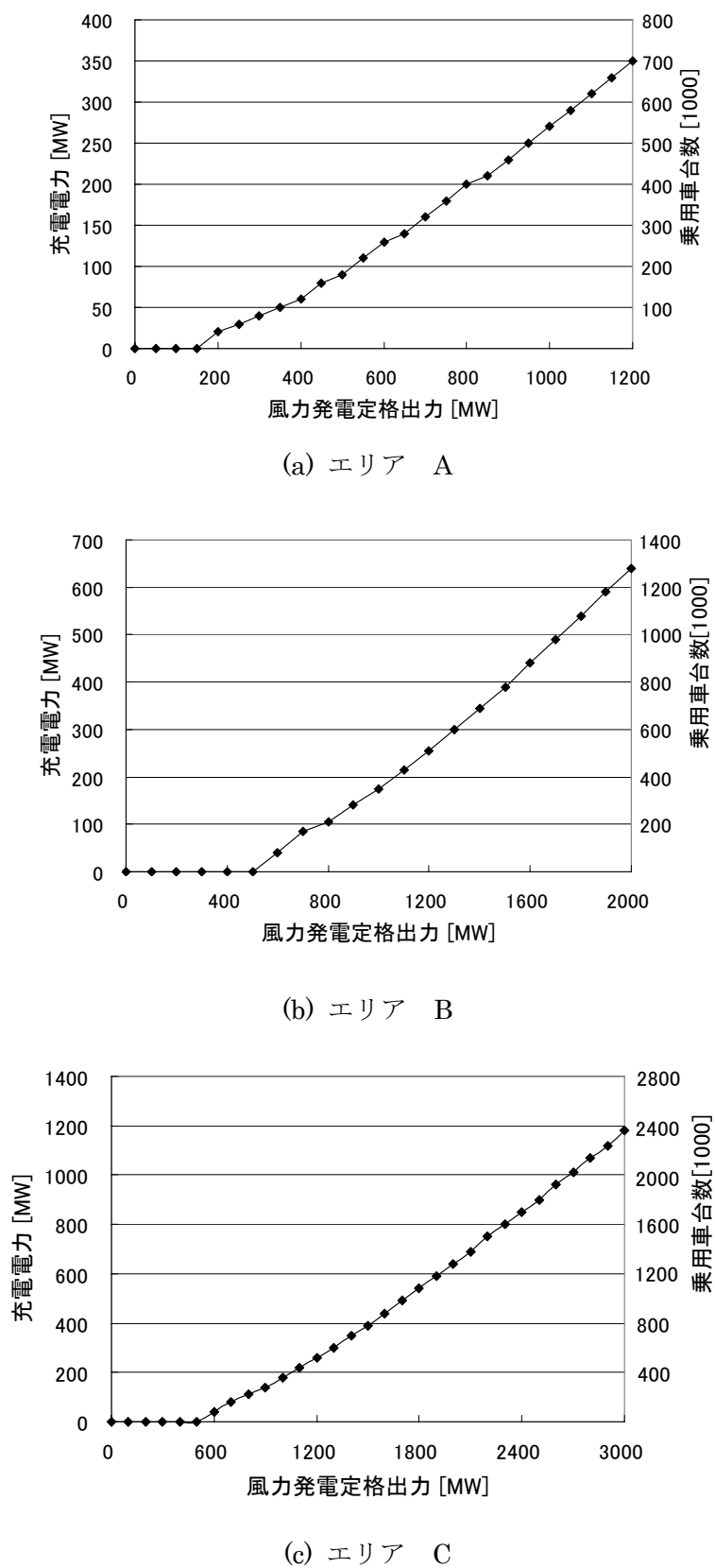


図 1 1-3 基準ケースと同レベルとなる充電電力

第 12 章 充電電力量の最適配分

12.1 定式化

前節ではタイマー設定による充電パターンに基づき、自律分散的な制御を行った場合の風力発電の連系可能量を算出した。本節では集中制御を仮定し、LFCの側面からみて最適な充電パターンを導出することを目的とする。つまり、1日におけるPHEVの充電電力量 P_{total} [MWh/day]が分かっているとき、これを夜間における各時間帯に分配 p_i [MWh] ($i=1, 2, 3, \dots, 8$)し、それぞれの時間帯で充電制御を行うことで、系統の周波数変動をより効率的に抑制することを考える。11.1 節で述べたように、周波数偏差は調整容量が不足したときに大きく変動する。従って、どの時間帯においても風力発電の最大出力変動幅を許容できる調整容量を確保する必要がある。本稿では各時間帯で図 10-4 に示す風力変動パターンを適用し、どの時間帯においても最大出力変動が発生することを仮定した。また、負荷変動については各時間帯の総需要に応じて、図 10-2 に示す変動パターンの大きさのみを調整した。次に最適化問題の定式化を示す。時間帯 i において、PHEVが p_i [MW]の充電制御を1時間行った時の周波数の分散 (50Hzからの偏差 Δf の二乗平均) を $f_i(p_i)$ で表す。

[目的関数]

$$\text{周波数の分散の最小化 : minimize } \sum_{i=1}^8 f_i(p_i)$$

[制約式]

$$\text{充電電力量の総和 : } \sum_{i=1}^8 p_i = P_{total} (\text{const.})$$

p_i : 充電電力量 (1時間分), P_{total} : 充電電力量 (1日分) $f_i(p_i)$: 周波数の分散,

ここで、目的関数の平方根は夜間 (23時~7時) における周波数の標準偏差となる。PHEVの普及割合に応じて、充電電力量 P_{total} [MWh/day]は変化するので、それぞれの普及割合について風力発電の導入量を100MWずつ増加させたときの標準偏差を求めた。各時間帯の充電電力量 p_i [MWh]を最適配分することで標準偏差を最小化し、これが基準ケースにおける標準偏差以下となれば風力発電の連系は可能であるとし、離散的配分問題とした動的計画法^[41]を用いて計算を行う。なお、PHEVが100%普及した時の充電電力量については表 10-4 に示す休日の値以下とし、エリアA, B, Cでそれぞれ4000, 9000, 14000[MWh/day]とした。

12.2 結果

計算結果である最適解を表 12-1 に、PHEVの普及割合と風力発電連系可能量の関係を図 12-1 に示す。図中、一番左が充電制御を行わなかった場合の風力発電連系可能量を示し、これを基準として、PHEVの普及割合に応じて風力発電連系可能量がほぼ比例的に増加していることが分かる。また、最適配分を行った場合の風力発電連系可能量はタイマー充電

と比較し、5割程度増加している（表 12-2 参照）。仮に充電制御を行う PHEV の台数が少ない場合であっても、集中制御により充電電力量を最適配分することで、効率的に周波数変動を抑制することが可能である。

表 12-1 充電電力量の最適配分

(a) エリア A

PHEVの普及割合 [%]	充電電力量 (1日分) P_{total} [MWh]	各時間帯における充電電力量 p_i [MWh]								周波数の標準偏差 [Hz] (基準ケース:0.056)	風力発電連系可能容量 [MW]
		23	0	1	2	3	4	5	6		
10	400	30	30	30	50	60	70	70	60	0.050	400
20	800	70	80	90	100	110	120	120	110	0.054	600
30	1,200	120	120	140	150	160	170	180	160	0.050	700
40	1,600	170	170	180	200	210	230	230	210	0.055	900
50	2,000	220	220	230	250	260	280	280	260	0.053	1,000
60	2,400	260	270	280	300	310	330	330	320	0.051	1,100
70	2,800	320	320	330	350	360	380	380	360	0.056	1,300
80	3,200	360	370	380	400	420	430	430	410	0.054	1,400
90	3,600	410	420	430	450	470	480	480	460	0.053	1,500
100	4,000	460	470	480	500	520	530	530	510	0.053	1,600

(b) エリア B

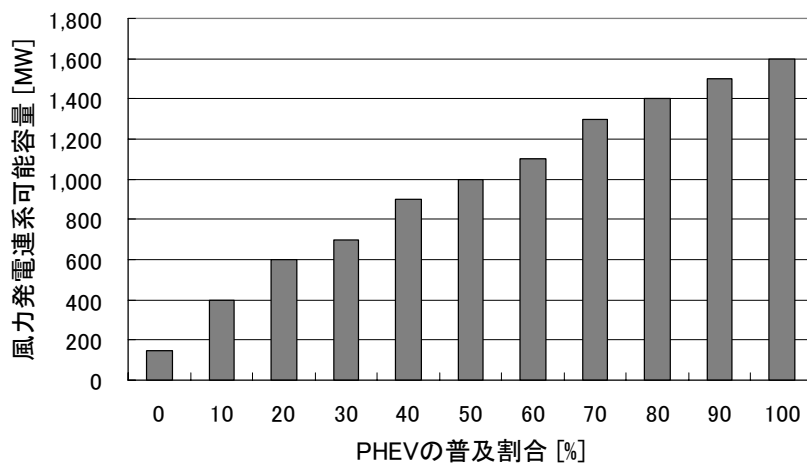
PHEVの普及割合 [%]	充電電力量 (1日分) P_{total} [MWh]	各時間帯における充電電力量 p_i [MWh]								周波数の標準偏差 [Hz] (基準ケース:0.056)	風力発電連系可能容量 [MW]
		23	0	1	2	3	4	5	6		
10	900	60	60	80	100	140	160	160	140	0.038	900
20	1,800	160	180	200	200	240	280	280	260	0.039	1,200
30	2,700	260	280	300	320	360	400	400	380	0.039	1,500
40	3,600	360	400	400	440	480	520	520	480	0.041	1,800
50	4,500	480	500	520	540	600	620	640	600	0.040	2,000
60	5,400	580	600	640	660	700	740	760	720	0.040	2,200
70	6,300	700	720	740	760	820	860	860	840	0.040	2,400
80	7,200	800	820	860	880	940	980	980	940	0.039	2,600
90	8,100	920	940	960	1,000	1,040	1,080	1,100	1,060	0.039	2,800
100	9,000	1,020	1,040	1,080	1,100	1,160	1,200	1,220	1,180	0.039	3,000

(c) エリア C

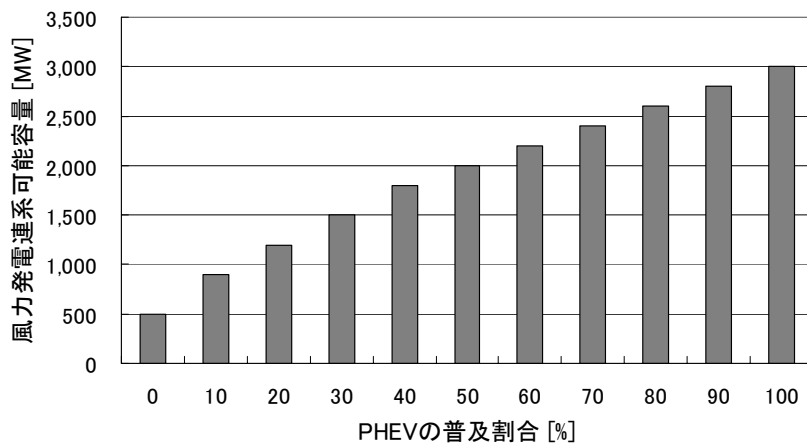
PHEVの普及割合 [%]	充電電力量 (1日分) P_{total} [MWh]	各時間帯における充電電力量 p_i [MWh]								周波数の標準偏差 [Hz] (基準ケース:0.056)	風力発電連系可能容量 [MW]
		23	0	1	2	3	4	5	6		
10	1,400	100	120	160	180	200	240	220	180	0.040	1,100
20	2,800	260	300	320	360	400	420	400	340	0.039	1,500
30	4,200	440	460	500	540	560	600	580	520	0.040	1,900
40	5,600	600	640	680	700	740	780	760	700	0.041	2,300
50	7,000	780	800	840	880	920	960	940	880	0.041	2,600
60	8,400	940	980	1,020	1,060	1,100	1,140	1,120	1,040	0.040	2,900
70	9,800	1,120	1,140	1,200	1,240	1,280	1,320	1,280	1,220	0.042	3,300
80	11,200	1,280	1,320	1,360	1,420	1,460	1,500	1,460	1,400	0.041	3,600
90	12,600	1,460	1,500	1,540	1,580	1,640	1,660	1,640	1,580	0.041	3,900
100	14,000	1,640	1,660	1,720	1,760	1,800	1,840	1,820	1,760	0.041	4,200

表 12-2 風力発電連系可能量の比較

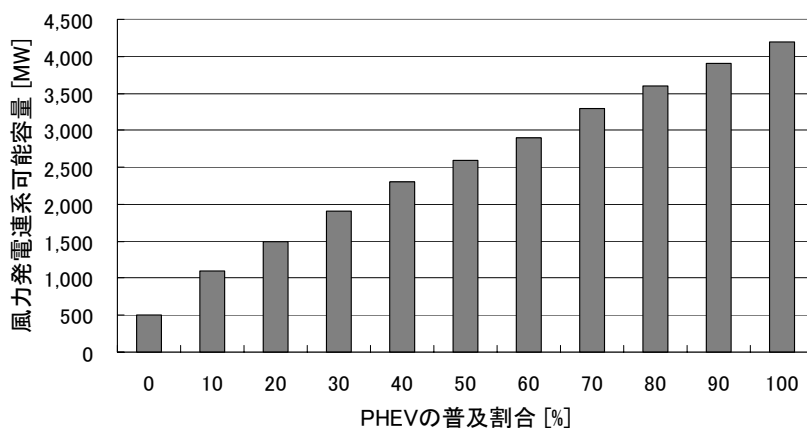
エリア	風力発電連系可能容量 (PHEVの普及割合:100%) [1,000kW]		
	充電制御無し	タイマー充電	充電電力量の最適配分
A	150	1,100	1,600
B	500	2,000	3,000
C	500	2,800	4,200



(a) エリア A



(b) エリア B



(c) エリア C

図 1 2 - 1 PHEV の普及割合と風力発電連系可能量

12.3 考察

本研究の計算結果から、3つのエリアを合計した風力発電連系可能量は、PHEVが普及せず充電制御を行わない場合 115 万kW、PHEVが 100%普及して分散型の充電制御を行った場合 590 万kW、PHEVが 100%普及して集中型の最適配分を行った場合で 880 万kWとなる（表 12-2 参照）。充電制御を行わない場合を 1.0 とすると、分散型の充電制御を行った場合約 5.1 倍、集中型の最適配分を行った場合で約 7.7 倍に増加する。従って、充電制御を行うことは、風力発電を導入する上で制約の一つとなる短周期面での問題を大幅に改善し、再生可能エネルギー導入促進に有効な手段となりうる。参考のため、風力発電の 2010 年度導入目標値は日本全体で 300 万kWであり、2007 年 3 月末時点での導入量は約 149 万kW^[42]である。PHEVの普及と充電制御を組み合わせることで、周波数品質を悪化させることなく、風力発電の連系容量を増加することが期待できる。

12.4 まとめ

風力発電の短期出力変動に起因する電力系統の周波数変動を PHEV に搭載された蓄電池の充電制御によって抑制する効果を評価した。そのために、自家用乗用車の走行パターンから、PHEV が普及した場合の一日の総充電電力量を算出した。算出した充電電力量に基づき、充電制御を行った場合に風力発電連系可能量がどのように変化するかを定量的に把握した。分析結果を次に示す。

- (1) PHEV に搭載された蓄電池の充電電力を分散制御することで、周波数変動を効果的に抑制できる。
- (2) 風力発電の連系容量に対して、3～5 割程度の充電電力の制御によって、現状の周波数品質を維持することが可能である。
- (3) 風力発電を導入する上で制約の一つとなる短周期面での問題については、充電制御を行うことで大幅に改善され、再生可能エネルギー導入促進に有効な手段となりうる。
- (4) 充電制御を行う PHEV の台数が少ない場合であっても、集中制御等により充電電力量を最適配分することで、効率的に周波数変動を抑制することも可能である。

第 13 章 結論

13.1 本論文の結果

近年、世界的な環境意識の向上により、省エネと新エネがますます注目を集めてきている。本論文では、新型の電力機器であるアモルファス変圧器と風力発電、PHEVに着目して分析を行った。これらの機器は、電力システムの一部として機能するため、本研究の目的は電力システムの需要特性を考慮した、システム分析を行うことにある。本論文で得られた結果をまとめると以下のようになる。

第1部では、電力会社が所有する柱上変圧器にアモルファス変圧器を適用した場合の省エネルギー効果、環境負荷低減効果、経済性を分析した。柱上変圧器の負荷パターンを求めるモデルとして、各家庭の需要をボトムアップシミュレーションにより再現する手法を用いた。分析結果を次に示す。

- (1) 柱上変圧器の年間平均等価負荷率は0.1~0.2の間にあり、全体的に低い傾向が見られた。
- (2) 柱上変圧器で発生する損失は過半が無負荷損であり、省エネルギーや環境負荷低減のためには変圧器の無負荷損のパラメータを小さくした方が効果的である。従って、無負荷損が少ないアモルファス変圧器は現状存在する変圧器の中では柱上変圧器に最も適している。
- (3) アモルファス変圧器に関しては負荷損のパラメータが大きくても、コストが安い変圧器を製造することで、アモルファス変圧器導入の壁となっているコスト面での問題を解決することができる。

第2部では、需要家が所有する配電用変圧器にスポットを当てた評価を行った。容量と機種を統合した変圧器選定手法として平均等価負荷を提案し、最適な変圧器を選定した上で、変圧器が本来持っている性能を評価した結果を以下に示す。

- (1) 負荷の2乗平均平方根である平均等価負荷 Q_e を用いることでコスト最適な容量が一意に定まり、機種毎の特徴が明らかとなった。トップランナーと比較して、アモルファスはやや大きめの容量を選定することでコスト最適となる。
- (2) アモルファス変圧器のコスト最適な平均等価負荷率は0.3~0.35程度、環境最適では更に低い値となった。
- (3) 業務部門では、現状の容量のまま機種としてアモルファスを選定することで年間損失電力量をほぼ半減できる。
- (4) 産業部門では、現状の容量のまま機種としてアモルファスを選定することで年間損失電力量を約10%、コスト最適な容量選定を実施すると、約23%の削減効果が期待できる。

- (5) 機種としてアモルファスを選定することで、日本全体における年間CO₂排出量を業務・産業部門合計で、189万[t-CO₂/year]削減できる。これは京都議定書のCO₂排出削減目標値（1990年の排出量である12億6,100万tの6%）である約7,600万tの2.49%に相当する。更に需要家が自らの負荷パターンを分析し、コスト最適な容量を選定した場合には227万[t-CO₂/year]の削減となり、CO₂排出削減目標値の2.99%に相当する効果が期待できる。

第3部では、風力発電の短期出力変動に起因する電力系統の周波数変動をPHEVに搭載された蓄電池の充電制御によって抑制する効果を評価した。そのために、自家用乗用車の走行パターンから、PHEVが普及した場合の一日の総充電電力量を算出した。算出した充電電力量に基づき、充電制御を行った場合に風力発電連系可能量がどのように変化するかを定量的に把握した。分析結果を次に示す。

- (1) PHEVに搭載された蓄電池の充電電力を分散制御することで、周波数変動を効果的に抑制できる。
- (2) 風力発電の連系容量に対して、3~5割程度の充電電力の制御によって、現状の周波数品質を維持することが可能である。
- (3) 風力発電を導入する上で制約の一つとなる短周期面での問題については、充電制御を行うことで大幅に改善され、再生可能エネルギー導入促進に有効な手段となりうる。
- (4) 充電制御を行うPHEVの台数が少ない場合であっても、集中制御等により充電電力量を最適配分することで、効率的に周波数変動を抑制することも可能である。

13.2 今後の展望

第1部と第2部に関しては、需要特性に応じた最適な変圧器の選定を行ったが、変圧器の設計段階を考慮すれば、最適な変圧器設計を行うことも可能である。年間平均等価負荷率、負荷損、無負荷損、材料費等から最適は変圧器の製造を行う。また、省エネ機器の普及を妨げる問題として、ビルのテナントとオーナーのような設備設置者(設置コスト負担)と設備運用者(運用コスト負担)が異なる状況が挙げられる。これについては制度の面からの解決が必要である。

第3部における風力発電導入可能量は短周期面のみに着目した評価を行った。現実的に風力発電を導入するには、短周期面に合わせて長周期面での問題（下げ代制約等）や電圧変動も同時に解決する必要がある。これらについては今後の課題としたい。また、連系系統を考えた場合、風力発電出力の変動が発生したエリア以外のPHEVが充電制御を行うと、連系線の潮流が大きく変化するといったことも考えられる。連系線潮流も調整可能なアルゴリズムを構築する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご多忙な中、貴重な時間を割いてご指導下さいました山地憲治教授に心から御礼申し上げます。基本的問題構造を明らかにし、学際領域から問題の解決を行うシステム研究の醍醐味に日頃から触れることができ、研究のおもしろさを実感することができました。また、挑戦意欲を掻き立てるようなエネルギーシステムに関する課題を与えていただき、大変感謝しております。

山本博巳客員准教授には、全体打ち合わせや個別打ち合わせで、常に的確な指摘とアドバイスをして頂きました。また、研究室生活に関して常に親身な対応をしていただき、大変感謝しております。

竹下貴之助教には、研究室運営や研究に関するアドバイスをしていただきました。研究に対する心構え等、大変刺激になりました。

秘書の松方恵美様、岩本瑠璃子様には、研究室生活全般にわたって、常に心温かいサポートをしていただきました。

同期として、1年半を共に過ごした大和久崇君、矢田尚君、奈良雅文君、上杉春奈さんにも深く感謝いたします。深い知識と幅広い物の見方など大変刺激となり、見習うべきところが多数ありました。

現研究室のメンバーには研究に関する相談や、研究室のシステム環境の管理などの面で多大なサポートをしていただきました。心より感謝いたします。

最後に、本論文は常に自分のことを温かく見守ってくれた両親に捧げるものとし、謝辞を結びます。

2008年8月 高木雅昭

参考文献

- [1] 山地憲治編著：「分散エネルギーシステム」，エネルギー・資源学会 (2004)
- [2] IEEE-USA Board of Directors: “Position Statement Plug-in Electric Hybrid Vehicles”, IEEE-USA, (2007)
- [3] 社団法人日本電機工業会：地球環境保護・温暖化防止に貢献するトップランナー変圧器(2006)
- [4] 経済産業省産業政策局調査統計部：機械統計年報 (1961～2005)
- [5] 電気事業連合会統計委員会編：電気事業便覧 平成 18 年版
- [6] 柴田栄顕：「配電用変圧器の無負荷損削減による省エネ効果」，第 23 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集， pp.85-88 (2007)
- [7] 辻毅一郎・佐伯修：「電力日負荷曲線生成のためのボトムアップシミュレーションモデル」，第 14 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集」， pp.239-214 (1998)
- [8] 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)
- [9] 島崎大輔・佐野史典・上野剛・佐伯修・辻毅一郎：「電力日負荷曲線生成のためのボトムアップシミュレーションモデルー季節依存性のある機器の取り扱いー，エネルギー・資源学会第 20 回研究発表会講演論文集」， pp.49-54 (2001)
- [10] 島崎大輔・佐野史典・上野剛・佐伯修・辻毅一郎：「電力日負荷曲線生成のためのボトムアップシミュレーションモデルー暖房機器を含めたモデル化ー」，第 18 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集， pp.173-178 (2002)
- [11] 総務省統計局統計センター：国勢調査 (2002)
- [12] 総務省統計局資料：平成 16 年全国消費実態調査
- [13] 電気事業連合会統計委員会編：電気事業便覧 平成 14 年版
- [14] 電気事業連合会ホームページ：<http://www.fepc.or.jp/index.html>
- [15] 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会コスト等検討委員会資料 (2004)
- [16] 日本工業標準調査会：日本工業規格ー配電用 6 k V 油入変圧 (1977)
- [17] 日本工業標準調査会：日本工業規格ー配電用 6 k V 油入変圧 (2005)
- [18] 日立産機システム：配電用変圧器総合カタログ (2007)
- [19] 経済調査会：積算資料 2 月号(2007)
- [20] 社団法人 日本電機工業会：受変電設備の保全に関するアンケート調査 (1991)
- [21] 社団法人 日本電設工業会：高圧受変電設備の計画・設計・施工 (2006)
- [22] 社団法人 空気調和・衛生工学会：都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価 (1994)
- [23] 社団法人 日本電機工業会：変圧器の年間平均負荷率の業種別調査結果 (2002)

- [24] 経済産業省産業政策局調査統計部：機械統計年報 (1961～2005)
- [25] 太田完治：「LCA 的視点からみた鉄鋼製品の社会における省エネルギー貢献に係る調査」日本エネルギー経済研究所技術報告 (2002)
- [26] 電気事業連合会統計委員会編：電気事業便覧 平成 11 年版
- [27] 浜松照秀：「再生可能エネルギー利用拡大のトリガー」, 月刊エネルギー2006 年 12 月号, 日本工業新聞社出版局 (2006)
- [28] 千住 智信, 菊永 康朗, 與那 篤史, 舟橋 俊久: “風力発電機に用いる最適蓄電池設備容量 に関する検討”, 電学論 B, Vol. 128, No. 1, pp.321-327 (2008)
- [29] 村上 明子, 横山 明彦, 多田 泰之: “大容量風力発電が導入された電力系統における周波数制御のための蓄電池容量評価に関する基礎的検討”, 電学論 B, Vol. 126, No. 2, pp.236-242 (2006)
- [30] 小野 泰弘, 三谷 康範, 武田 寛: “分散電源による電力系統負荷周波数制御への貢献”, 電気学会電力技術研資, PE-07-115, pp.13-18 (2007)
- [31] 谷中 大介, 三谷 康範, 小野 泰弘, 武田 寛: “AR 信号を用いた分散電源による負荷周波数制御への貢献度の評価”, 平成 20 年電気学会全国大会, No.6-257 (2008)
- [32] 道上 勉, 大石孝穂: “ATC 制御対象の動的負荷変動モデルの構築と BTB の AFC 連系時の解析検討”, 電学論 B, Vol. 120, No. 7, pp.954-961 (2000)
- [33] 電力系統における常時および緊急時の負荷周波数制御調査専門委員会：「電力系統における常時および緊急時の負荷周波数制御」, 電気学会技術報告, No.869 (2002-3)
- [34] 新エネルギー・産業技術総合開発機構/電力中央研究所：「風力発電電力系統安定化等調査」, NEDO-NP-0012(2001-3)
- [35] 進士 誉夫, 関根 剛史, 秋澤 淳, 柏木 孝夫, 藤田 吾郎, 松原 正芳: “分散型電源によるマイクログリッド内の電力変動抑制に関する考察”, 電学論 B, Vol. 126, No. 1, pp.14-20 (2006)
- [36] 総合資源エネルギー調査会, 新エネルギー部会, 風力発電系統連系対策小委員会：「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書」 (2005-6)
- [37] 電力系統標準化モデル調査専門委員会：「自電力系統の標準化モデル」, 電気学会技術報告, No.754 (1999-11)
- [38] 国土交通省：「平成 11 年道路交通センサス OD 調査」
- [39] 橋本篤樹・山本博巳・山地憲治・日渡良彌・岡野邦彦：「充電パターンの変化がプラグイン・ハイブリッド車の CO₂ 削減効果に与える影響の分析」, 第 24 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.289-292 (2008)
- [40] 日渡良爾, 岡野邦彦, 山本博巳, 高崎昌洋, 藤井康正：「プラグインハイブリッド車導入が日本の電力需要へ及ぼす影響」, 電力中央研究所報告, L05008 (2006)
- [41] 長尾智晴：「最適化アルゴリズム」, 昭晃堂 (2000-5)
- [42] NEDO ホームページ： <http://www.nedo.go.jp/enetai/other/fuuryoku/index.html>

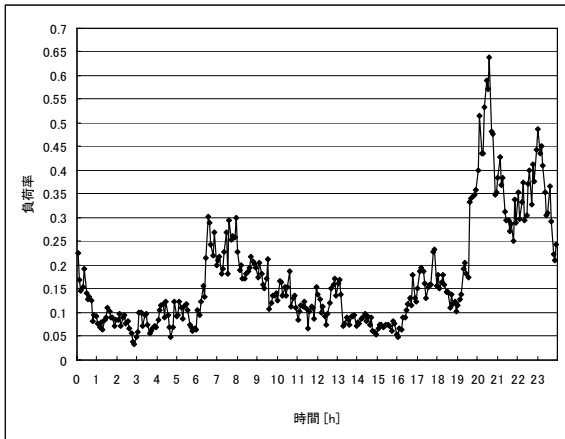
発表実績

- [1] 高木雅昭, 山本博巳, 山地憲治: 「柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の評価」第 24 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2008 年 1 月
- [2] 高木雅昭, 山本博巳, 山地憲治: 「需要家の負荷パターンに基づいた最適変圧器選定アルゴリズムの提案」第 24 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2008 年 1 月
- [3] 高木雅昭, 山本博巳, 山地憲治: 「柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の分析」平成 20 年電気学会全国大会, 2008 年 3 月
- [4] Masaaki Takagi, Hiromi Yamamoto, and Kenji Yamaji: “An Analysis of Amorphous Transformer using Load Curve Pattern Model for Pole Transformer”, Proceedings of International Symposium on Secure-Life Electronics for Quality Life and Society, Tokyo, March, 2008
- [5] 高木 雅昭, 山本 博巳, 山地 憲治: “柱上変圧器負荷パターン作成モデルを用いたアモルファス変圧器の評価”, *電学論B*, Vol. 128, No. 6, pp.885-892 (2008) .
- [6] Masaaki Takagi, Hiromi Yamamoto, and Kenji Yamaji: “An Evaluation of Amorphous Transformer using Load Curve Pattern Model for Pole Transformer”, The International Conference on Electrical Engineering, Okinawa, July, 2008
- [7] 高木 雅昭, 山本 博巳, 山地 憲治: “需要家の負荷パターンに基づいた最適容量選定手法によるアモルファス変圧器の評価”, *電学論B*, (投稿中) .
- [8] 高木 雅昭, 山本 博巳, 山地 憲治: “系統連系されたプラグインハイブリッド車の充電制御による風力発電連系可能量の評価”, *電学論B*, (掲載予定)

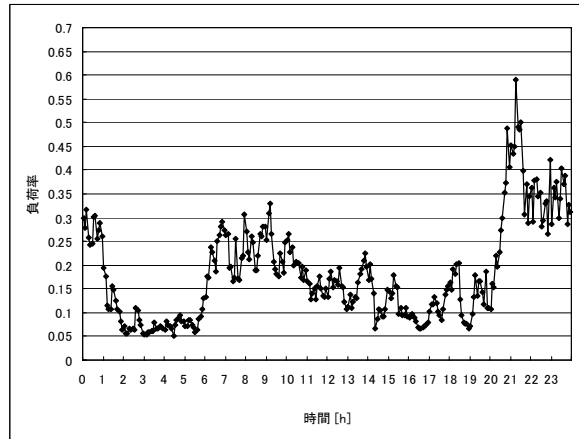
付録

地域モデルにおける負荷率の時間変化

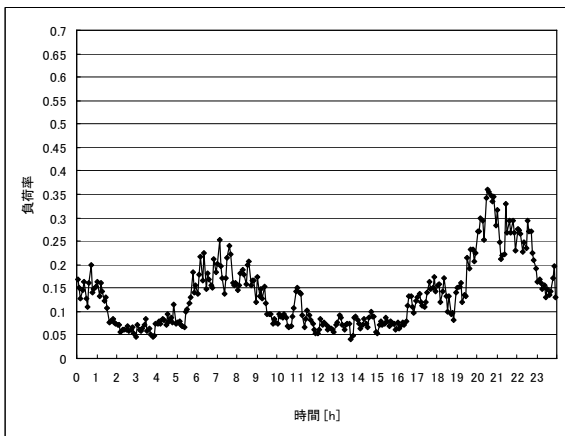
地域 A



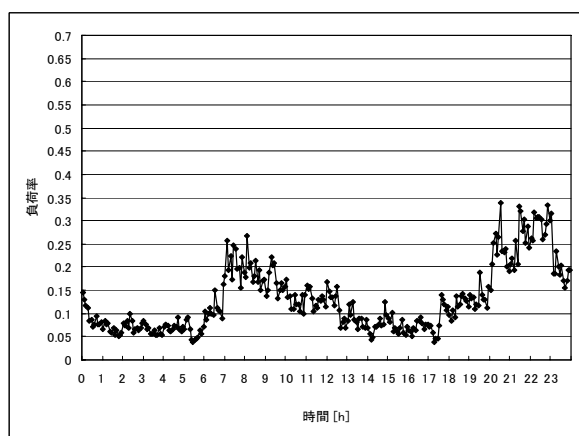
(a) 2月 平日



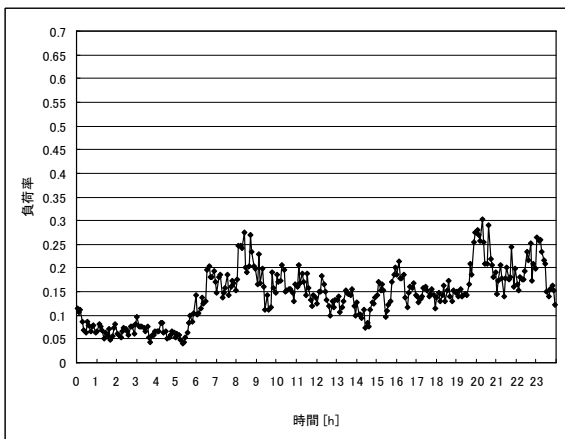
(b) 2月 休日



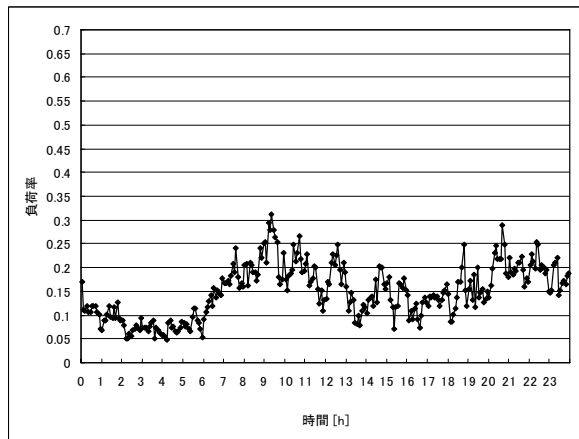
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

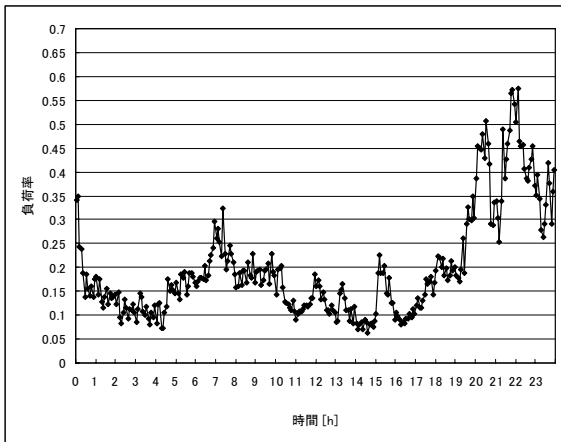


(e) 8月 平日

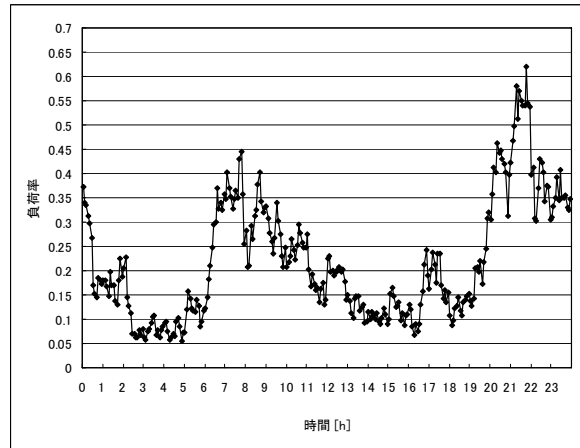


(f) 8月 休日

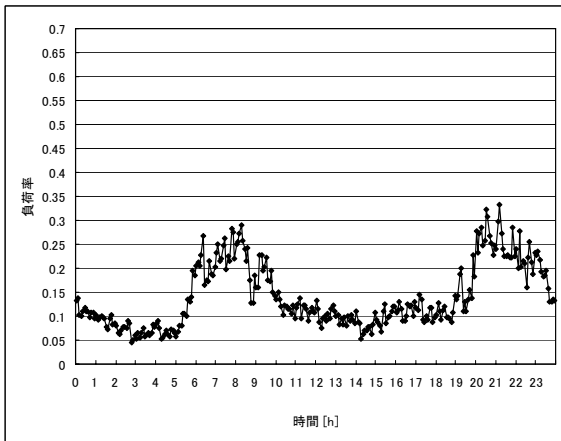
地域 B



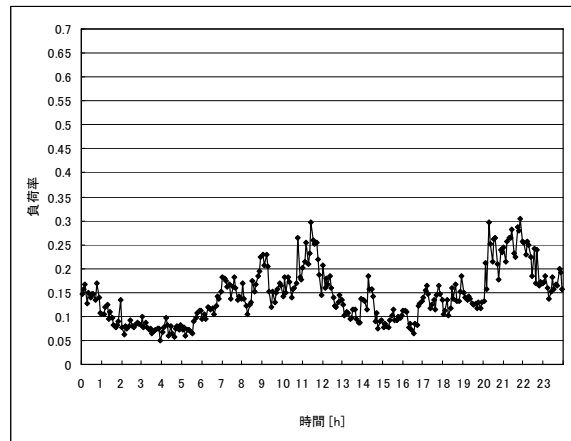
(a) 2月 平日



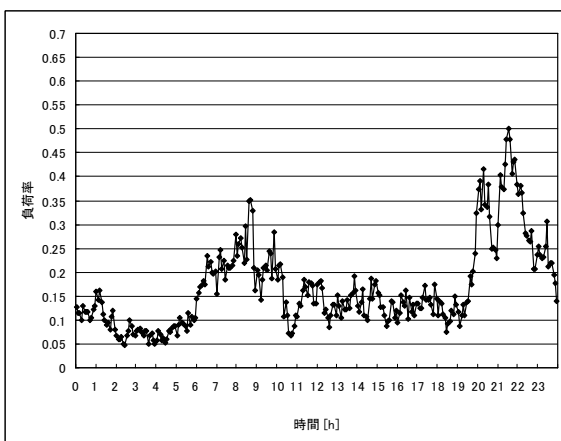
(b) 2月 休日



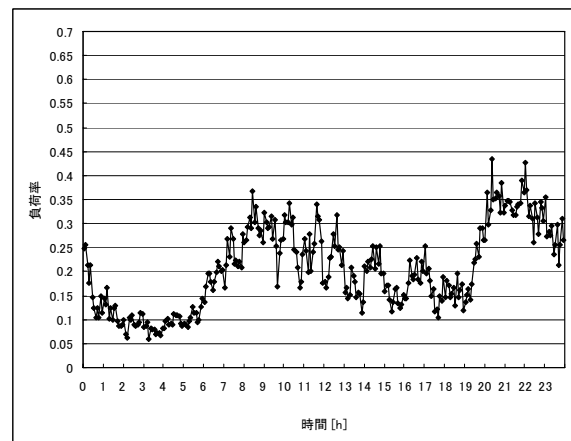
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

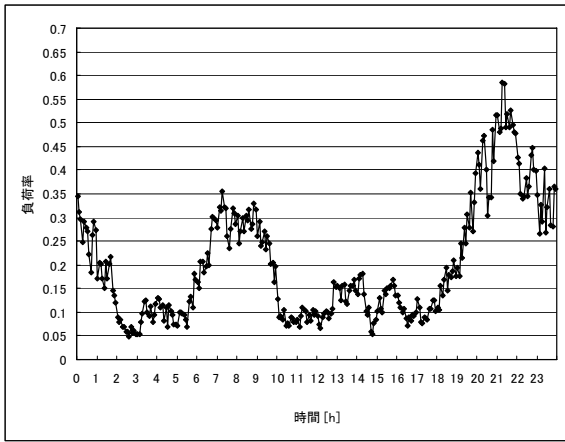


(e) 8月 平日

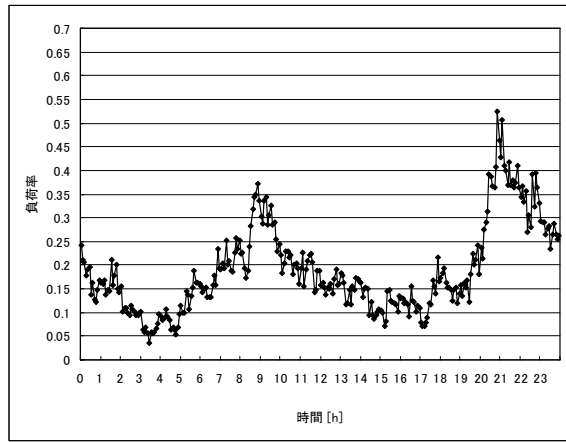


(f) 8月 休日

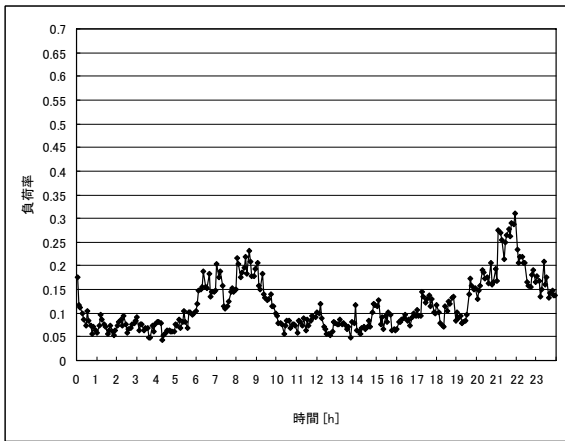
地域 C



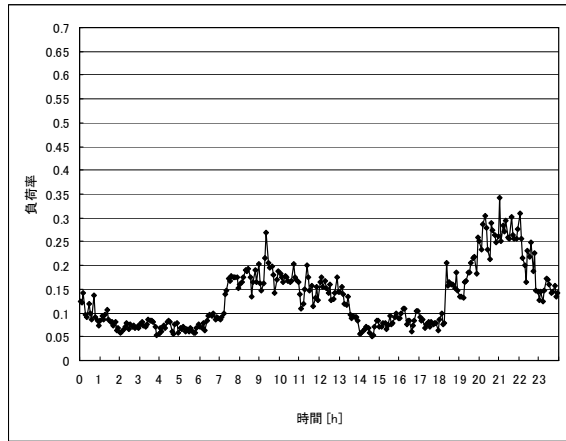
(a) 2月 平日



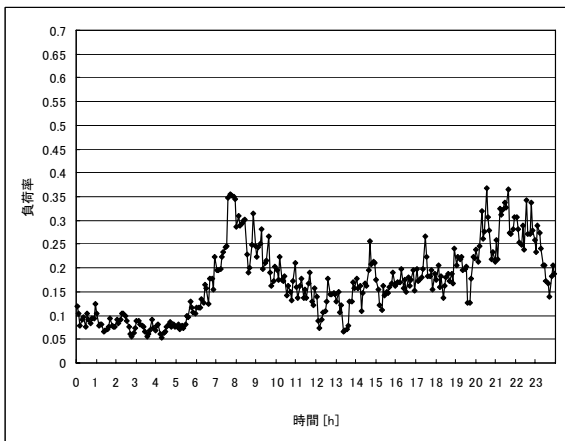
(b) 2月 休日



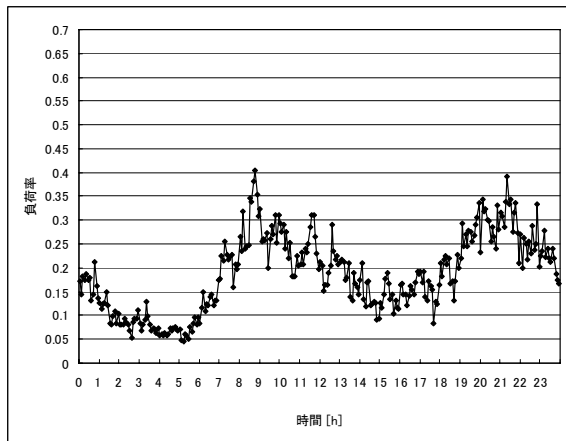
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

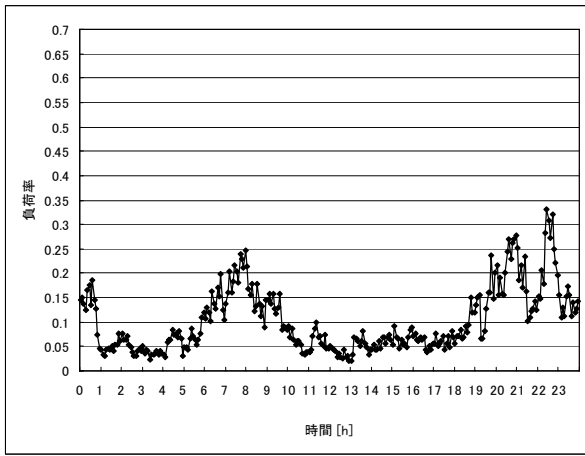


(e) 8月 平日

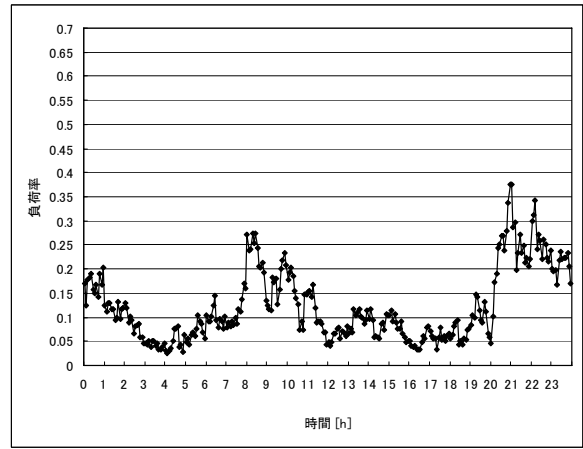


(f) 8月 休日

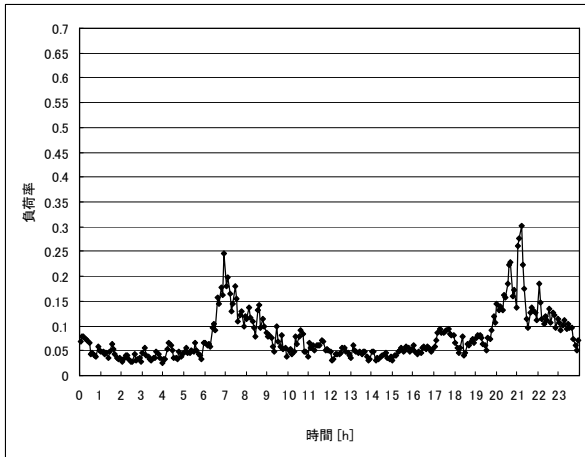
地域 D



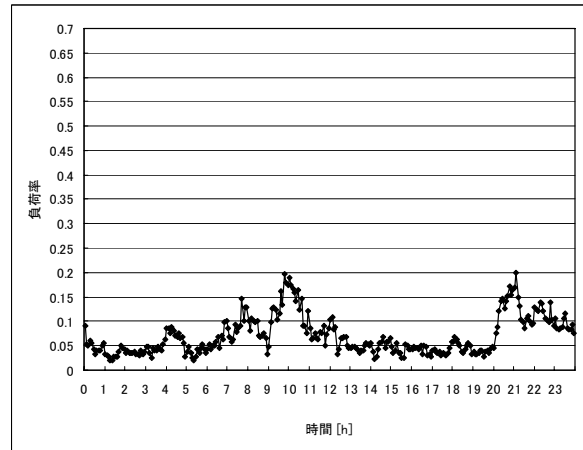
(a) 2月 平日



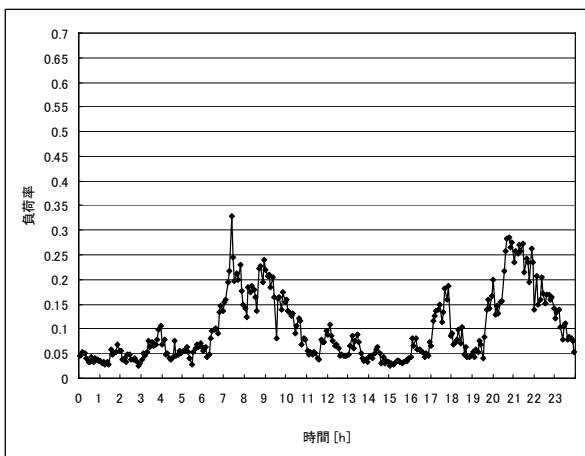
(b) 2月 休日



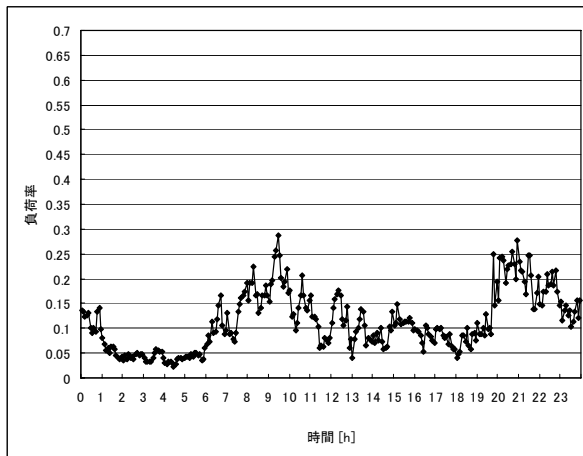
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

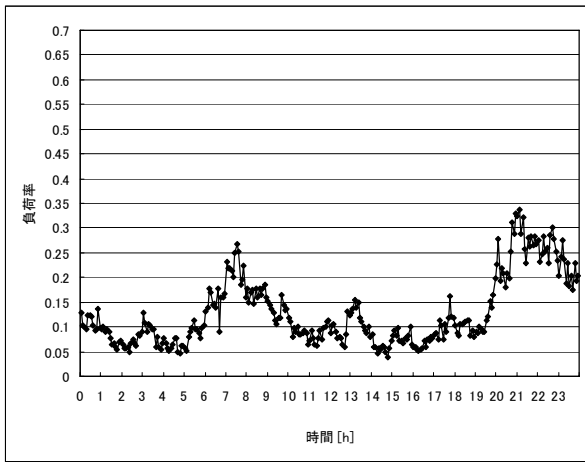


(e) 8月 平日

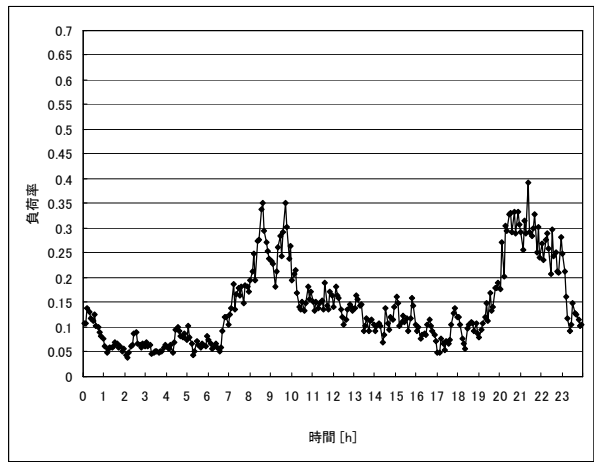


(f) 8月 休日

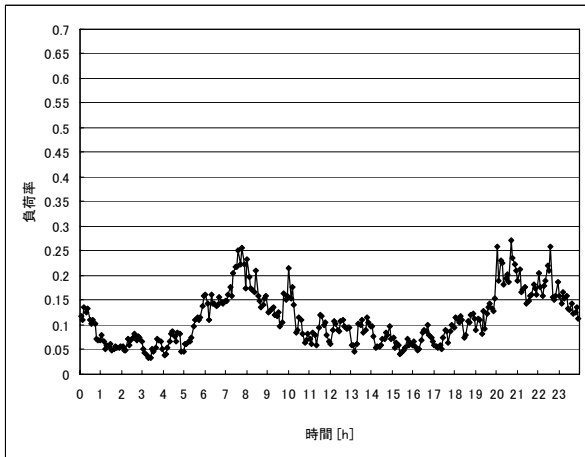
地域 E



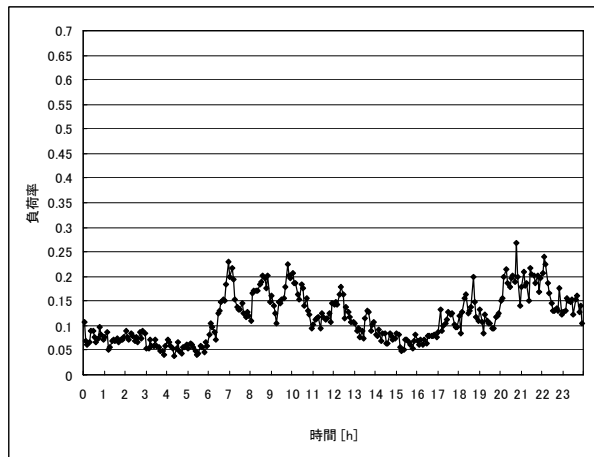
(a) 2月 平日



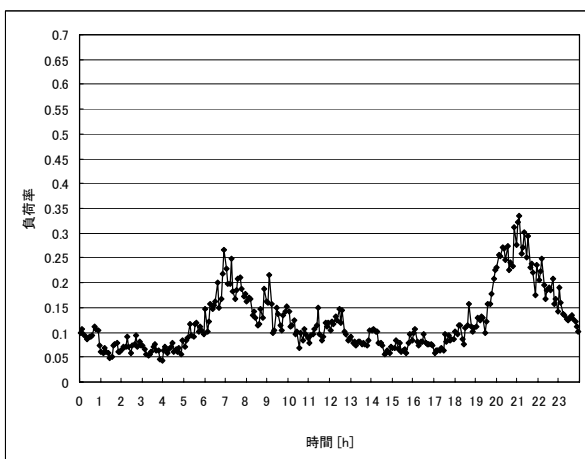
(b) 2月 休日



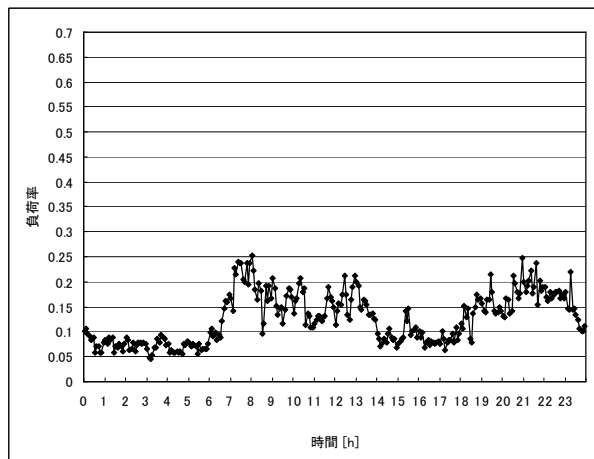
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

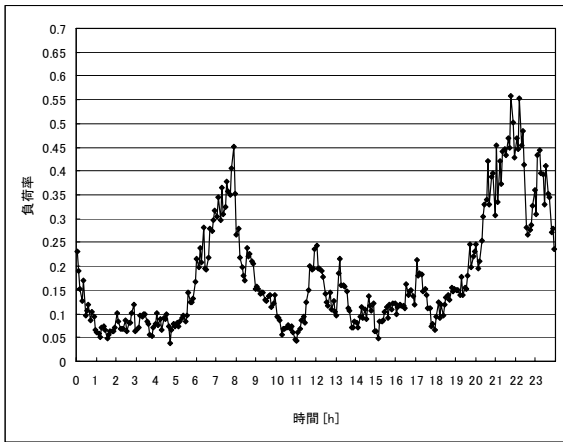


(e) 8月 平日

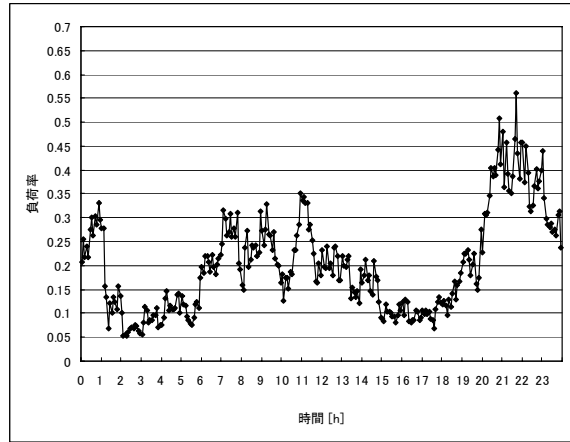


(f) 8月 休日

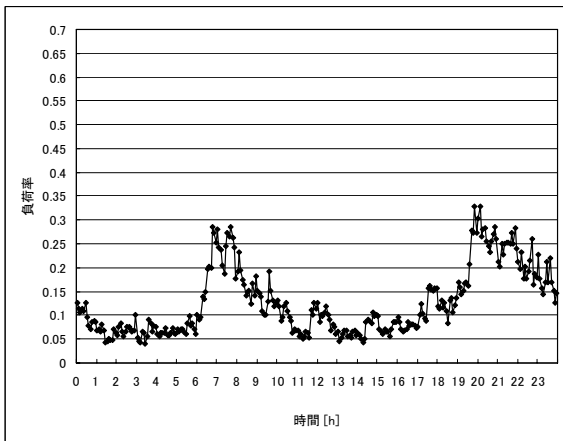
地域 F



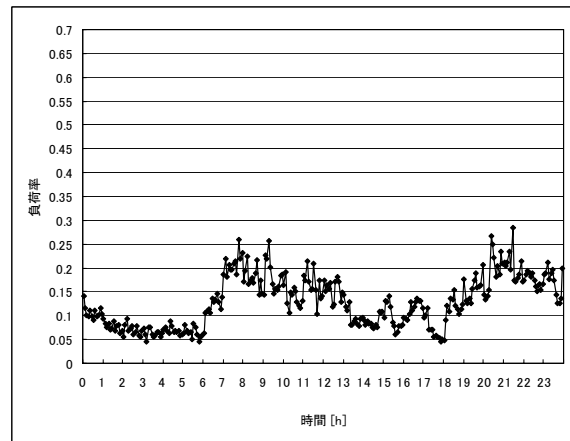
(a) 2月 平日



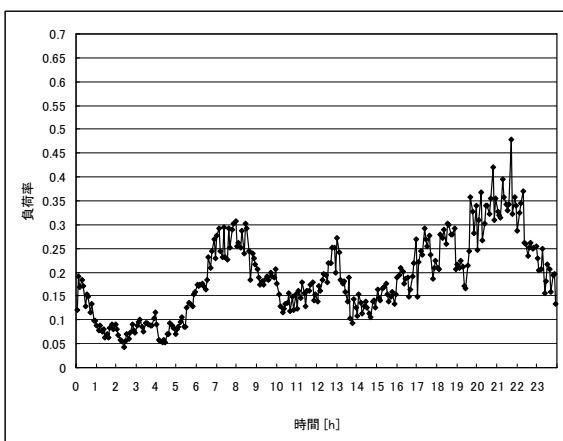
(b) 2月 休日



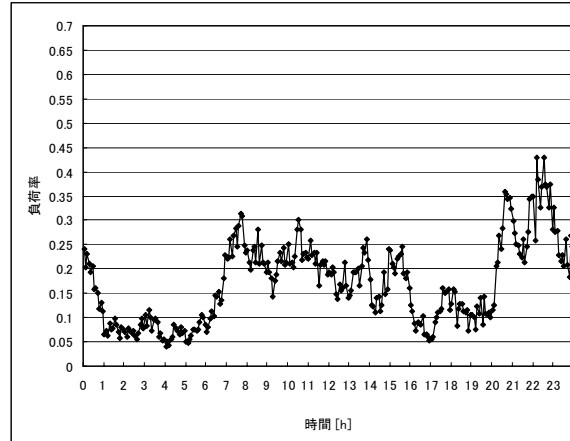
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

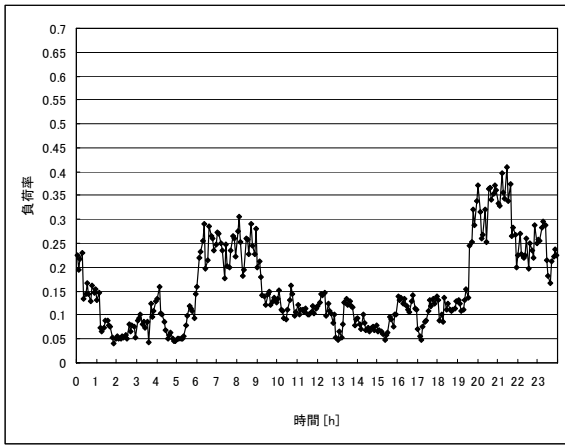


(e) 8月 平日

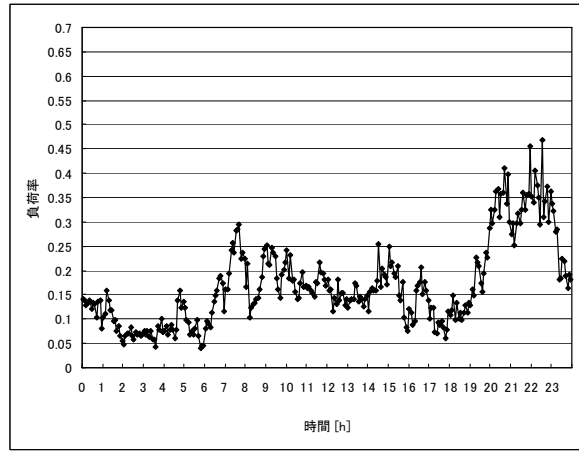


(f) 8月 休日

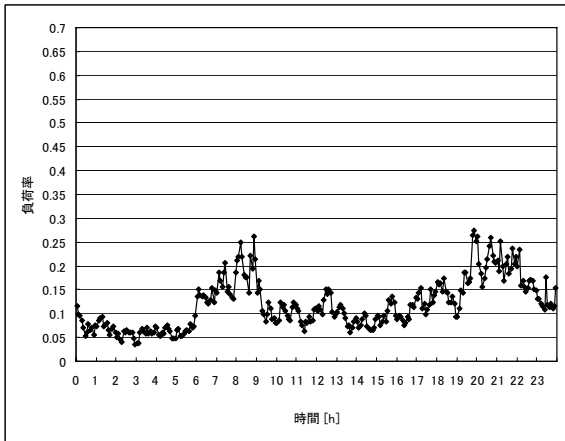
地域 G



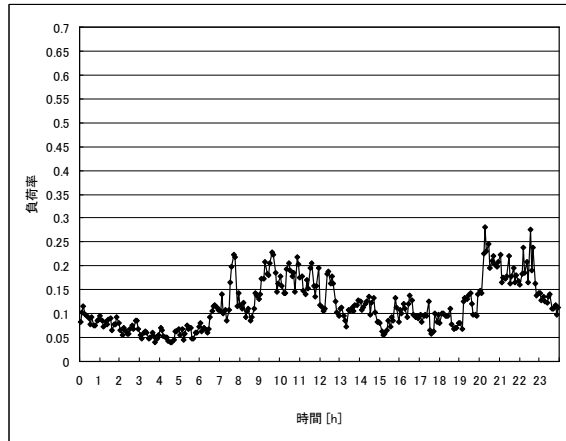
(a) 2月 平日



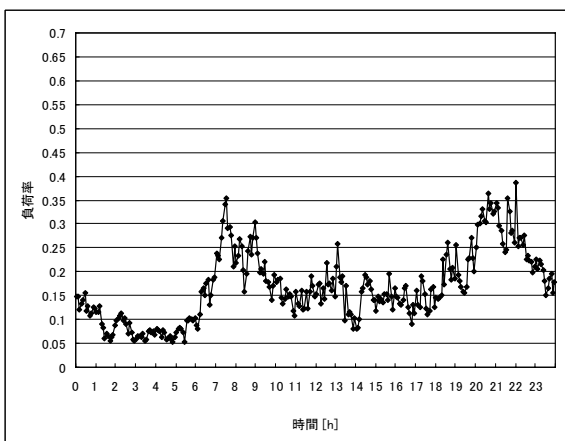
(b) 2月 休日



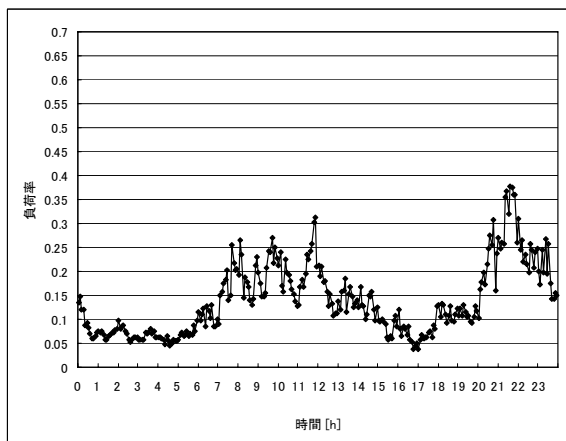
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

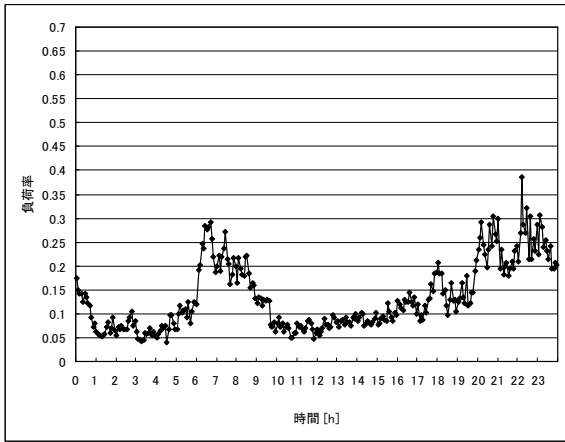


(e) 8月 平日

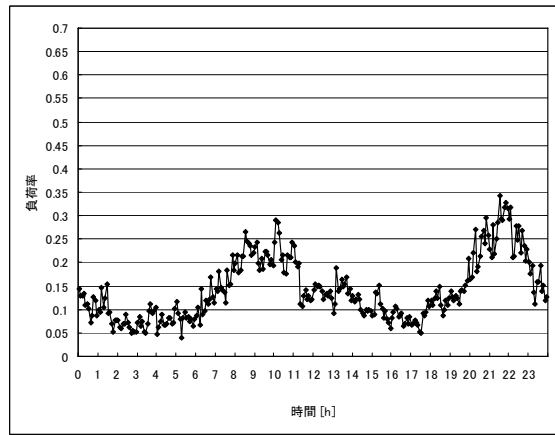


(f) 8月 休日

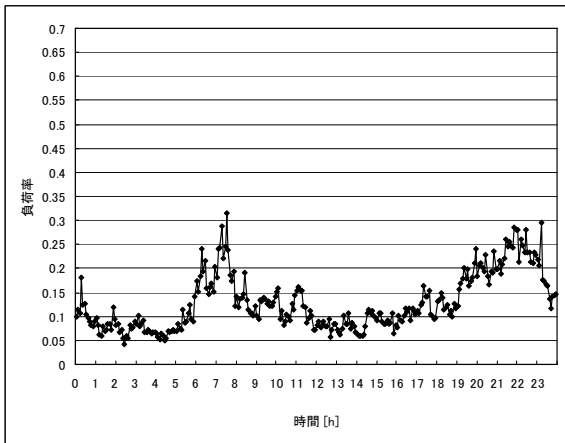
地域 H



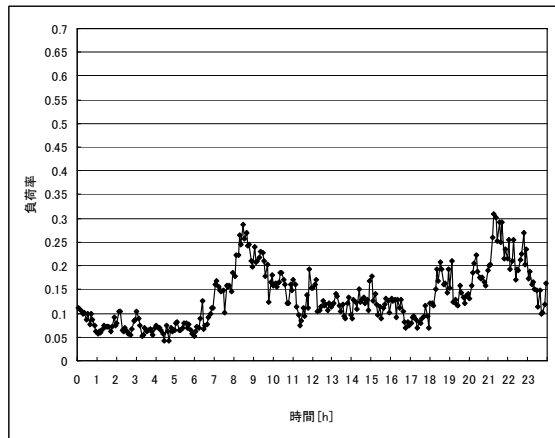
(a) 2月 平日



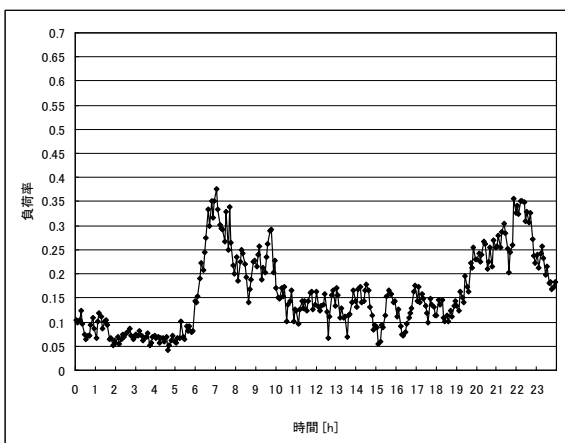
(b) 2月 休日



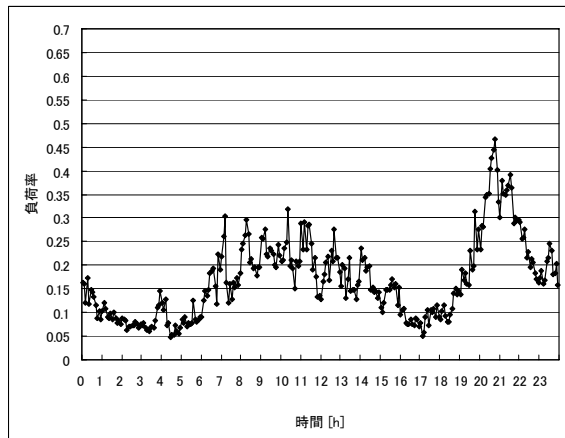
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

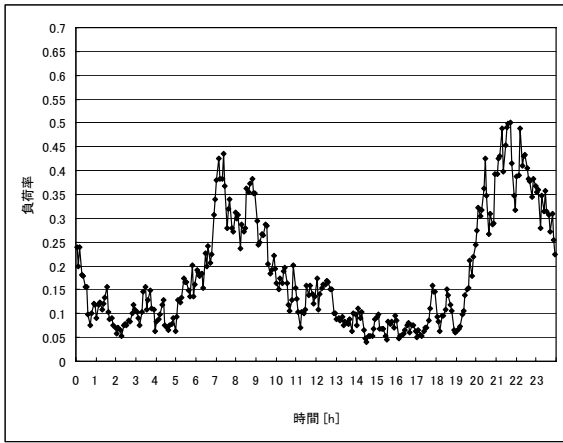


(e) 8月 平日

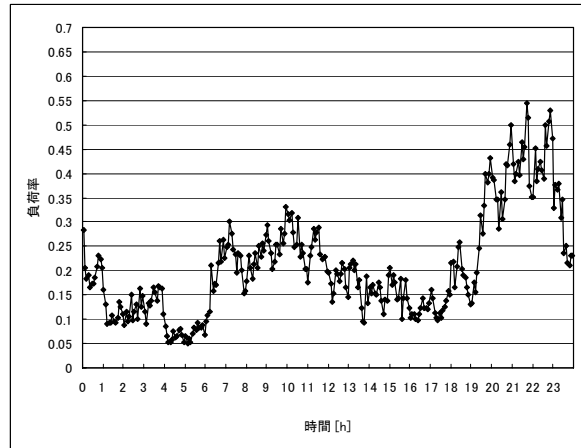


(f) 8月 休日

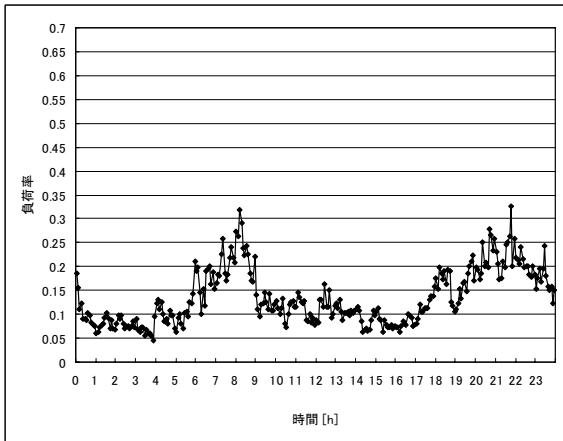
地域 I



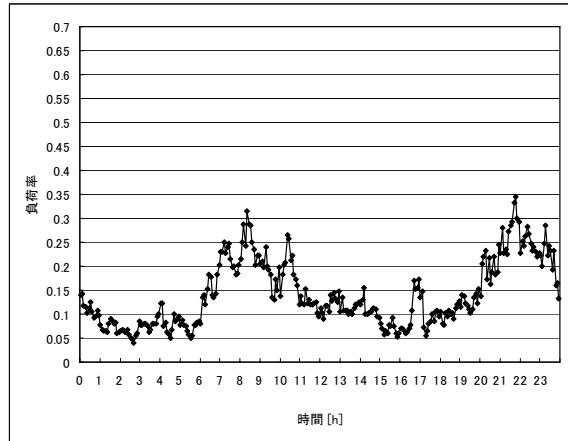
(a) 2月 平日



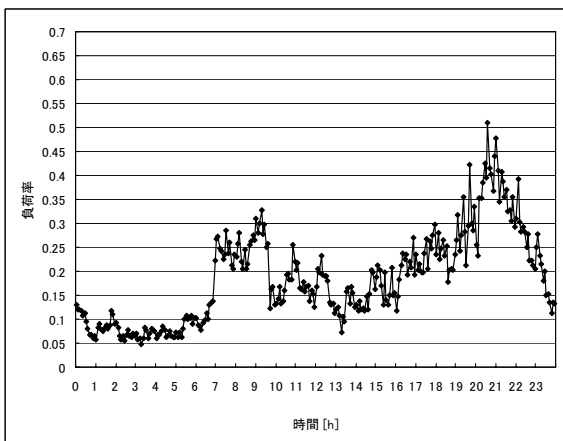
(b) 2月 休日



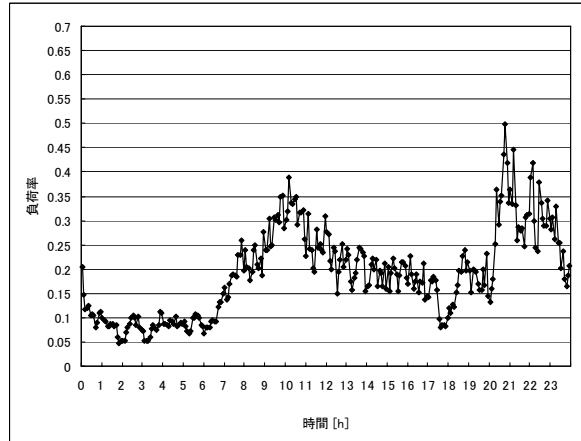
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日

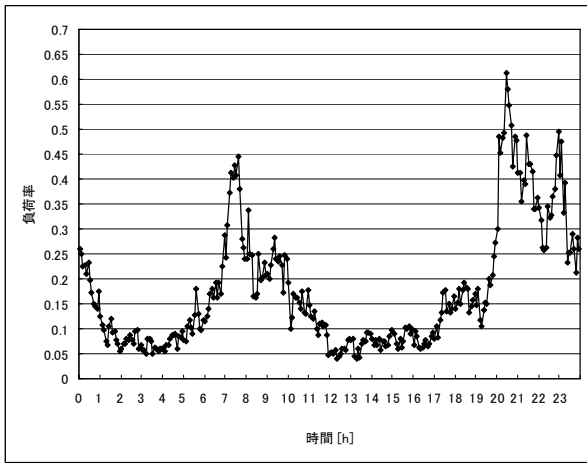


(e) 8月 平日

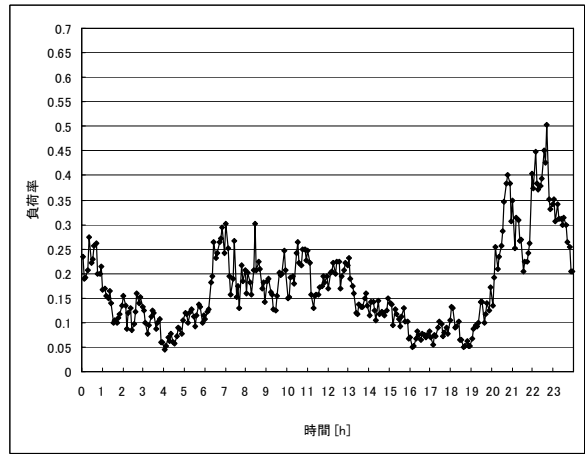


(f) 8月 休日

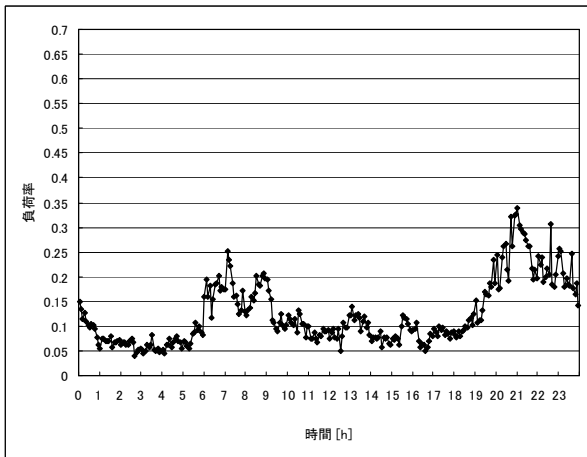
地域J



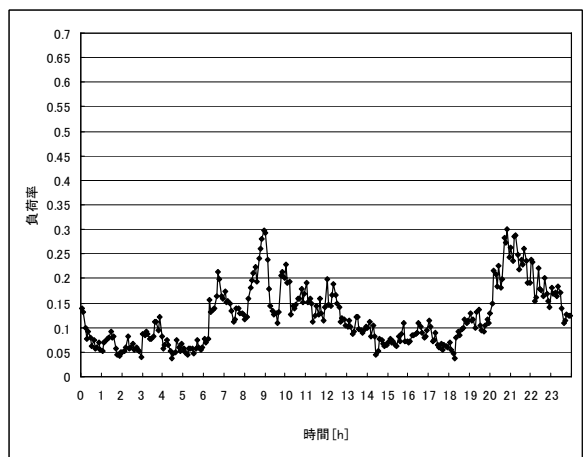
(a) 2月 平日



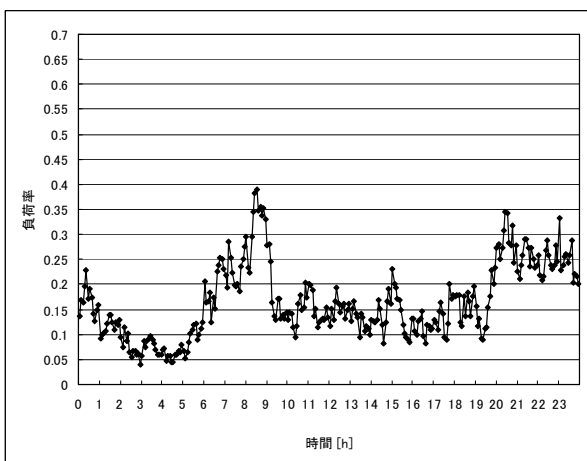
(b) 2月 休日



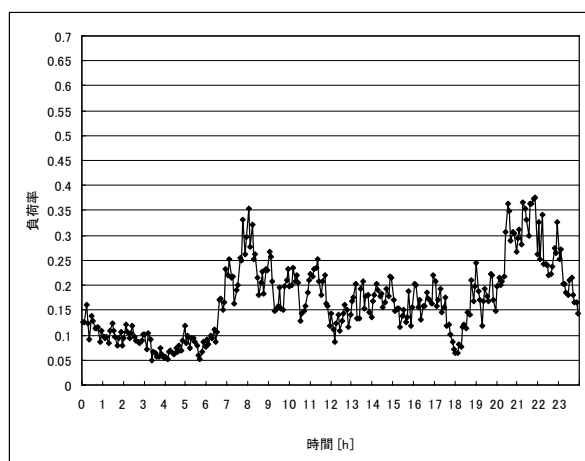
(c) 5月 平日



(d) 5月 休日



(e) 8月 平日



(f) 8月 休日