

住宅用太陽光発電システムの発電特性 及び環境負荷削減効果に関する研究

2002年3月

熊本大学大学院自然科学研究科

田中 昭雄

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究	4
1.2.1 家庭用エネルギー消費の構造	4
1.2.2 太陽光発電システムの発電特性	8
1.3 本論文の構成	10
【参考文献】	12
第 2 章 家庭用エネルギー消費構造の分析	14
2.1 研究の目的	14
2.2 研究手法	16
2.2.1 エネルギー消費実態調査	17
2.2.2 エネルギー消費量調査結果	20
2.3 熱源別旬別エネルギー消費原単位の推定	21
2.4 用途別エネルギー消費の推定と重回帰分析	23
2.4.1 熱源別用途別エネルギー消費量	23
2.4.2 用途別エネルギー消費量の重回帰分析	25
2.4.3 重回帰モデルの精度検証	33
2.5 まとめ	34
【参考文献】	37
第 3 章 首都圏における住宅用太陽光発電システムの発電状況	39
3.1 研究の目的	39
3.2 計測概要	40
3.2.1 計測システム	40
3.2.2 計測 PV システムの物理特性	42
3.3 計測結果	44
3.3.1 発電実績	44
3.3.2 発電効率	47
3.4 発電効率変動要因の検討	52
3.4.1 温度補正係数 k_T	52
3.4.2 複合補正係数 k_{oth}	53
3.5 PV システム導入による電力需要削減効果と経済性	56
3.5.1 電力及び二酸化炭素削減効果	56
3.5.2 PV システムの単純投資回収年数	58
3.6 まとめ	59
【参考文献】	60

第4章 九州地域における住宅用太陽光発電システムの発電状況	62
4.1 研究の目的	62
4.2 調査・研究の概要	62
4.3 PVシステム運用実態調査	63
4.3.1 アンケート調査概要	63
4.3.2 PVシステム設置状況	65
4.3.3 発電実績	68
4.3.4 設置前後の電力需給量の変化	70
4.4 計測調査結果	71
4.4.1 発電状況調査	73
4.4.2 PVシステムにおける日影の影響	79
4.5 まとめ	82
【参考文献】	83
第5章 太陽光発電システムのエネルギー代替効果及び環境負荷削減効果 の検討	84
5.1 研究の目的	84
5.2 エネルギー代替効果及び環境負荷削減効果	85
5.2.1 評価方法	85
5.2.2 エネルギー代替効果と環境負荷削減効果	88
5.3 ライフサイクルから見た環境負荷	90
5.3.1 ライフサイクルCO ₂ による環境負荷削減効果	90
5.3.2 代替電力別二酸化炭素ペイバックタイム	91
5.4 経済性の検討	92
5.4.1 評価方法	93
5.4.2 支出内訳	93
5.4.3 収入内訳	94
5.4.4 経済性総合評価	96
5.5 まとめ	98
【参考文献】	99
第6章 結 論	101
謝 辞	104
本論文に関する発表論文	105

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

我が国のエネルギー消費は、戦後の急速な経済成長と同様に増大してきた。図 1.1.1 に戦後の我が国の 1 次エネルギー消費の推移を示す。現在のエネルギー消費は 1955 年度に比べ約 9 倍、石油危機直前の 1970 年度と比べても約 1.8 倍に増えている。我が国は地下資源に乏しく、エネルギー資源もその供給の大部分を海外に依存しており、エネルギー消費の増大でますますエネルギー自給率が低下している。このことから、我が国は省エネルギーの推進及びエネルギー資源の開発に熱心である。さらに近年では化石エネルギー使用による地球環境の悪化が深刻化しており、自給可能でかつクリーンな自然エネルギーの開発が急がれている。ここでいうクリーンな自然エネルギーとは太陽エネルギー、風力、水力、バイオマスなどのことである。

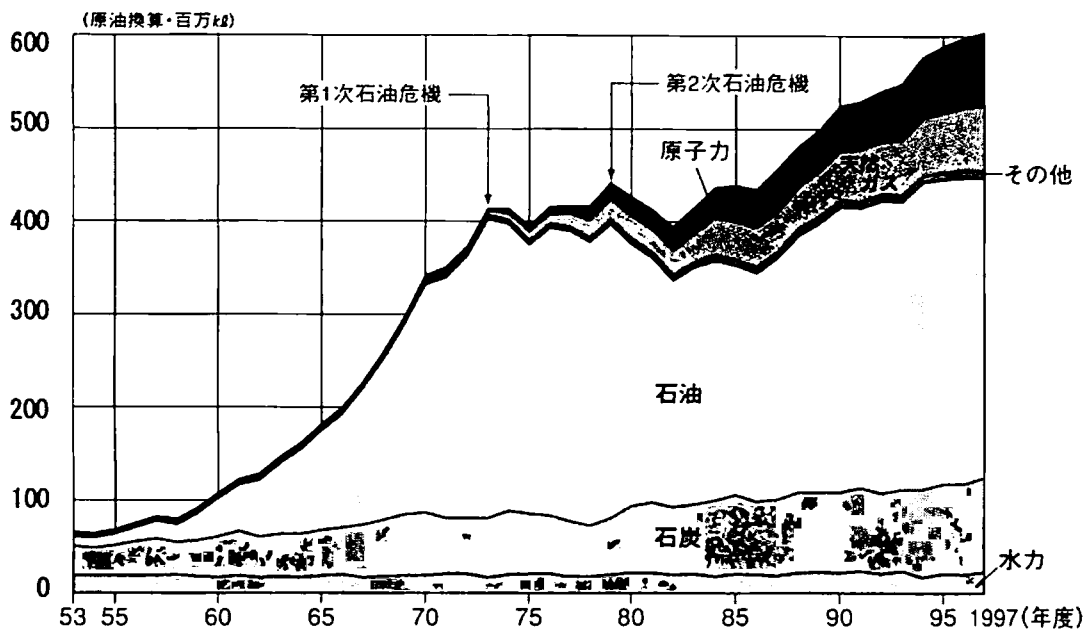


図1.1.1 一次エネルギー消費量の推移¹⁾

戦前の我が国は、今ほど化石エネルギーの依存度は高くなく、薪炭や水力など自然エネルギーを多く使用していた。戦後になって石油による燃料革命が進み、重化学工業が発展し化石燃料、特に石油の依存率が高まったことでエネルギー自給率は急速に低下した。現代産業においては石油が火力発電や産業部門の主役であるが、我が国は国内で、石油が国内でほとんど産出せず大部分を海外に依存しなければならない。このためエネルギー供給構造は不安定となる。その脆弱性を顕著に露呈したのは1973年と1979年の2度の石油危機である。これを契機に我が国のエネルギー政策は安定供給に大きなウエイトをおくようになる。

我が国のエネルギー供給構造を鑑み2度の石油危機後、政府のとった対応は以下の通り

である。

1979 年「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（通称"省エネルギー法"）の施行
1980 年「石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律」（通称"代エネ法"）
の施行

同年 特別会計制度の整備

同年 新エネルギー総合開発機構（現在の新エネルギー・産業技術総合開発機構：
NEDO）の設立

この頃、現在の省エネルギー、石油代替エネルギー政策の骨格がほぼ完成したといえよう。しかしこの段階では、自然エネルギーの位置づけは低く、あくまでも石油代替エネルギーの選択肢の 1 つに過ぎなかった。石油代替エネルギーとしては自然エネルギー以外に石炭、天然ガス、原子力、廃棄物、廃熱等も含まれており、当時は自然エネルギー以外のエネルギー資源の開発にむしろウエイトが置かれていた。

この当時もエネルギー消費と環境問題が関連して論じられることはあったが、自然エネルギーが地球環境に低負荷であることが注目されることはほとんどなかった。なぜなら 1980 年代までのエネルギー問題は大量消費による化石エネルギー資源の枯渇が主な関心事であり、地球規模での環境破壊は一部の科学者間²⁾で問題視された程度であったからである。この頃の環境問題とは、1950 年代～ 60 年代の公害問題で代表される大規模工場や人口密集地域などの局地的なものであった。

しかし 1980 年代に南極や北極でのオゾンホールが発見、異常気象の多発、数々の地球温暖化の証拠の発見、海面上昇による地球規模の被害予想等が報告されるようになると、資源枯渇問題だけでなく地球環境がエネルギーに関わる主要なテーマとして論じられるようになる。1990 年代に入ると人々の地球環境問題への関心は更に高まりを見せ、1991 年の湾岸戦争勃発では第 3 次石油危機への危惧と同時に戦争による大量の火器使用が、地球環境に及ぼす影響が人々の関心の一つとなった。

こうした地球環境問題への関心の高まりは 1992 年の気候変動枠組条約採択、1995 年 4 月のベルリンでの第 1 回締約国会議（C O P 1）開催へと繋がっていく。このとき温室効果ガスの人為的な排出削減及び吸収源での除去の目標値が設定された。引き続き 1997 年京都で開催された C O P 3（気候変動枠組条約第 3 回締約国会議）では京都議定書がまとめられ、先進国の温室効果ガスの削減目標を具体的に定めた。これにより我が国も、2010 年のエネルギー起源の二酸化炭素の排出量を 1990 年度と同水準に抑制する目標を持つにいたった。

この京都議定書の目標達成に向け、現在我が国は、産業部門、民生部門、運輸部門の全分野を挙げて省エネルギーを推進しているが、特に民生部門の省エネルギー推進と自然エネルギー普及への期待が大きい。これは現在の我が国のエネルギー消費の伸びの主因が民生部門を中心としたエネルギー消費の増加であり、産業部門のエネルギー消費は今後も横ばいと考えられるからである。

図 1.1.2 に 1973 年度のエネルギー消費量=100 としたときの部門別エネルギー消費量の推移を示す。第一次石油危機のあった 1973 年度まではエネルギー消費量の伸び方は、各部門ほぼ同じであったが、1973 年度を境に民生部門と運輸部門の伸びが特に大きくなる。1973 年以降の伸び率では、特に民生家庭部門の伸びが最も大きい。これが、我が国の省エネルギー政策の中でも家庭部門の省エネルギー推進が柱とされている所以の 1 つである。

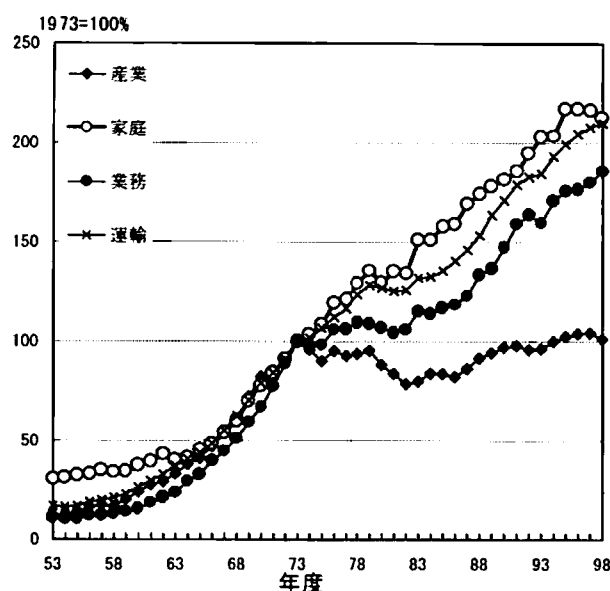


図 1.1.2 部門別エネルギー消費量の推移 (1973=100)¹⁾

民生部門の中でも家庭部門は今後ともライフスタイルの多様化、高齢化社会の到来により電力を中心にエネルギー需要の伸びが大きいと予想される。COP3 に向け大幅な省エネルギー実施を国際公約しているとはいえ、短期間での飛躍的な省エネルギーは困難であり、目標達成には省エネルギーだけでなく化石エネルギーの自然エネルギーによる代替を促進する必要がある。こうした中、自然エネルギー利用の拡大が奨励されているが、中でも風力発電と太陽光発電システム (Photovoltaic systems, 以下"PV システム")は、COP3 に向けた我が国の代替エネルギー政策の中で重要な役割を占めている。特に PV システムは住宅用が全普及の 60 %以上を占める (残り 40%弱のほとんどは業務用である) など、自然エネルギーの普及に家庭部門の果たす役割は大きい。

省エネルギー推進には、そのエネルギー消費構造を定量的に把握し有効な対策から優先的に実施していく必要があるが、家庭部門において各対策の効果を定量的に把握することは難しい。それはライフスタイル、価値観といった定量的に把握しにくい要因の影響が極めて大きいことと、これまでエネルギー消費量の計測といった定量的調査研究が少なかった事が原因である。一方自然エネルギー利用はエネルギー需要の削減には直接つながらな

いが、発電所の代替によるマクロレベルでの化石起源エネルギー使用量、二酸化炭素排出量削減につながる。また住宅は屋根や壁面、屋上などデッドスペースが多数あることから、新エネルギーの中では PV システムの導入がもっとも適している。しかしそのエネルギー代替効果や二酸化炭素削減効果の有効性が定量的に検討され、正当に評価されていない事が PV システム普及の阻害要因の一つとなっている。また年間発電量は 1kWp 当たり約 1000kWh/年と言われるが、多種多様な環境下で稼働する既設システムの実発電量はこの値を下回る事も多く、PV システムの定量的評価を困難にしている。発電量は日射条件（周囲の建物や樹木等による日射遮蔽）、パネル温度上昇、パネル表面の汚れ、日射暴露、物理的刺激の繰り返しによる物理的劣化（結晶粒間の分離、再結晶化等）等の数多くの原因で変動する。それ故、既設システムの実発電量を推測するには、これらの要因の影響を個別に把握するか、統計的な影響として考慮する必要がある。これにより PV システムのエネルギー代替効果及び二酸化炭素の削減効果が現実に近い値として求めることが出来る様になる。また PV システムを推奨するには正確な経済性評価を行い情報公開していく必要があるが、これまでは、発電による電力料金削減のみが取り上げられる事はあっても、発電による社会資本の代替効果が定量的に評価されることはほとんどなかった。

そこで本研究では家庭のエネルギー消費構造と、住宅用 PV システムの発電実態を明らかにするとともに、発電量の推測方法を検討する。またそのエネルギー代替効果及び環境負荷削減効果を検討し更に、その経済性についても検討するものである。

1.2 既往の研究

以下に従来の家庭用エネルギーと太陽光発電システムの研究と本研究の特徴について記す。

1.2.1 家庭用エネルギー消費の構造

第二次世界大戦後の、我が国の家庭用エネルギー消費の急増は、急速な経済発展に伴う生活水準の向上とライフスタイルの多様化によるものと考えられる。我が国は欧米先進国から"ウサギ小屋"と称されるほど狭い住宅水準にあるが、所有する家電製品の数や種類は先進国の中でもトップクラスで、いびつな住環境にある。

更にエネルギー消費の内訳をみると、狭い住宅の中に多くの家電製品を有するため照明・コンセント需要（冷房需要含む。以下同じ）が住宅規模に比べて大きい反面、暖房需要は極端に少ないというこれまたいびつなエネルギー消費構造となっている。図 1.2.1 に 1998 年の日本、米国、フランス、英国、ドイツ、イタリアの一世帯当たりエネルギー消費原単位とその用途内訳を示す。日本の一世帯当たりの年間エネルギー消費量は 46.3GJ で、欧米先進国と比較すると最も低いクラスに位置する。世界一のエネルギー消費国である米国は 106.5GJ と日本の 2.3 倍である。米国を除く他の先進国と比較してもフランスは 77.3GJ で日本の 1.7 倍、英国は 76.4GJ で 1.7 倍、ドイツが 65.3GJ で 1.4 倍、イタリアも 65.1GJ と 1.4 倍であり、いずれの国も日本より多くのエネルギーを消費している。

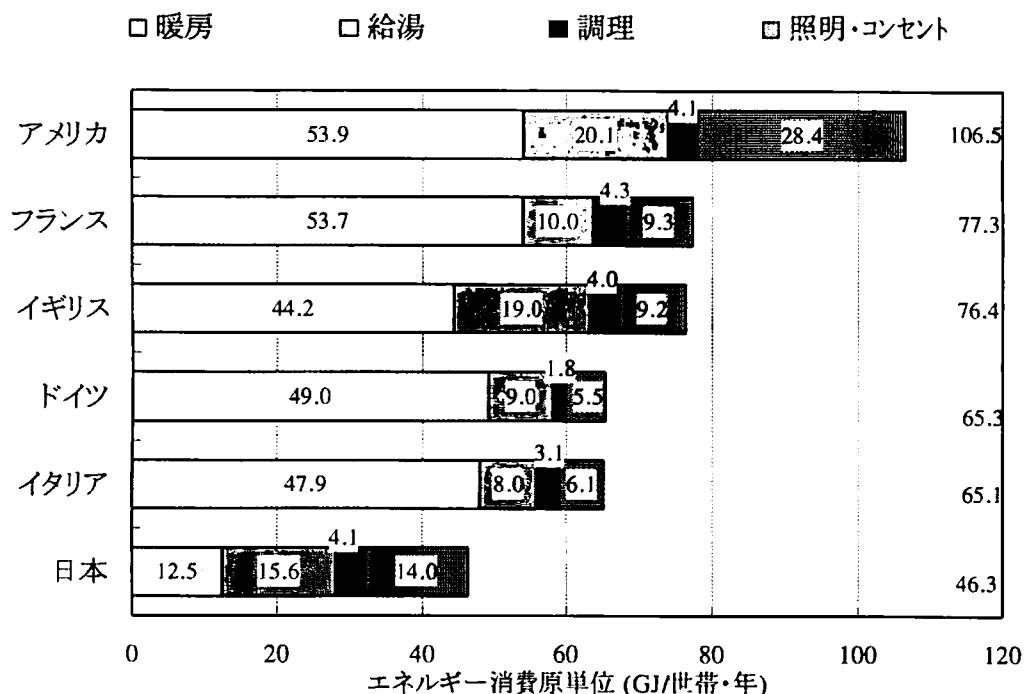


図1.2.1 家庭用エネルギー消費原単位（1998年）の国際比較³⁾

しかし照明・コンセント需要だけみると、日本の 14.0GJ に対し、アメリカを除く先進国は 10.0GJ 以下で我が国の 2/3 以下である。それでも日本のエネルギー消費の総量が少ないのは、暖房需要が少ないからで、欧米先進国の約 1/4 しかない。

暖房需要は気候的要因によるところが大きいですが、冬期の寒冷の程度を暖房度日（18 度基準）で基準化して示すと、日本は 2040 である。これに対し英国が 2970（日本の 1.46 倍）、フランスが 2500（1.23 倍）、ドイツが 3240（1.59 倍）、イタリアが 2350（1.15 倍）である。米国は 2521（1.24 倍）であり、いずれの国も我が国よりも寒冷ではあるが、約 4 倍もの暖房需要の違いを説明できるほどではない。

我が国の暖房用エネルギーの消費が少ないのは暖房水準にある。我が国の暖房は在室空間のみの間欠運転が主流であるが、他の先進諸国では、全居室と廊下や浴室などの非居室も含めた全室 24 時間暖房が標準である。このような低い暖房水準にあるにもかかわらず住宅の断熱水準は欧米先進国よりも低く、暖房のエネルギー効率は先進国では最低クラスとこれまたいびつな状態にある。しかし我が国の住宅の暖房水準は最終的には西欧諸国並まで増大すると考えられる。また夏季が高温で蒸し暑い我が国の場合は、これにより冷房水準も上昇すると予想される。

住宅の断熱水準を向上させエネルギー効率を高めることは省エネルギー推進の上で有効である。住宅の断熱性能は省エネルギー法の施行により年々向上しているが、このままのスピードで向上して、暖房水準が西欧や米国並みとなった場合暖房用エネルギーは、控えめに推測しても現状の 2 倍のエネルギーが必要となる⁴⁾。我が国の暖房水準は北海道や東北地方などの寒冷地方を中心に向上してきており、欧米並みの全室 24 時間暖房の住宅も

徐々に増え始めている。既に北海道、東北地方の日本海側地域では1世帯当たりの暖房エネルギー需要は関東以西の約3倍もある。これらの地方では住宅の高気密化・高断熱化が進みエネルギー効率が向上した結果ヒートポンプエアコンによる暖房が可能となり、採用する住宅も増えてきている。このことは冷房の習慣の無かった地域に冷房の習慣を持ち込む結果となり冷房水準を向上させる結果となった。

更に我が国の家庭は世帯員数の減少による世帯数の増加、高齢化の進行による1人当たりの家電製品の数が増加する傾向にある。結果として照明・コンセント需要の増加が予測される。図1.2.2に主要家電製品の普及率を示す。テレビ、エアコンの普及率は1世帯当たり2台を越えて現在も伸び続けており、パソコン、温水洗浄便座などの普及率も急速に増加しており、機器の省エネルギー化の必要性が叫ばれている。

このように家庭部門のエネルギー消費は、暖房、照明・コンセント需要を中心に更に増大する可能性がある。

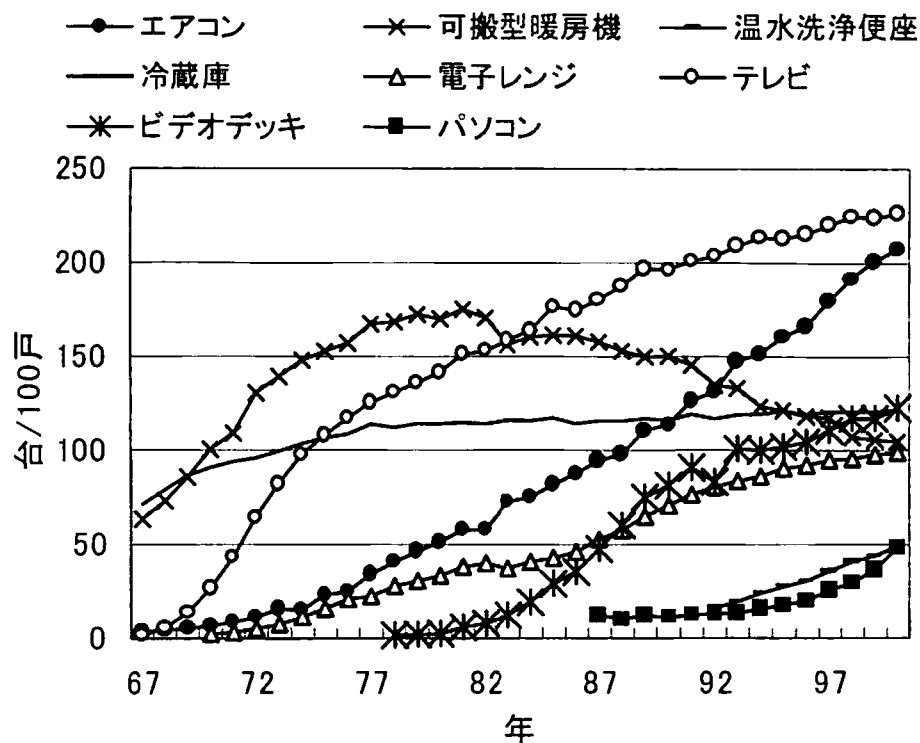


図 1.1.2 家電製品の台数普及率の推移

家庭用エネルギーの研究は、これまで数多く行われてきたが、ライフスタイルが多種多様でエネルギー消費構造が複雑なため、定量的な研究が十分に行われているとはいえない。これまで家庭のエネルギー消費構造を捉えるための研究は、大別して以下の4つの方法が取られてきた。

1. 既存統計や公開されたデータによる推定

地域別の光熱費の支出額と料金算定式及び小売物価などから毎月のエネルギー使

用量を求め、使用量の季節変動から使用用途を推定する。この方法は、低コストでかつ効率的に全国規模のエネルギー消費のマクロな実態を推定する事ができる。これは全国規模で整備されている光熱費支出額や物価情報等の統計資料を利用するもので、Nakagami, et al.,³⁾ は30年間にわたり全国9地域のエネルギー消費の実態を熱源別、使用用途別に調査・分析している。近年では三浦^{1,3)}も同様な手法で地域別の住宅のエネルギー消費原単位を推定している。

(この手法の問題点)

統計データが集計結果のみのため、得られる情報は平均値であり、結果として分析精度も低くなる。また住宅のエネルギー消費構造とは無関係な集計も多く、目的とする集計結果が得られないことも多い。このためこの手法では定量的な要因分析が十分に出来ない。

2. アンケート調査

1と同様で、エネルギー使用量及び用途別エネルギー消費量を毎月の光熱支出額やその季節変動から推定する。1と違うのは個別に住宅や世帯属性とエネルギー消費量と対応させた情報が得られるので、エネルギー消費構造の分析が可能な事である。エネルギー経済研究所⁵⁾、澤地ら⁶⁾は、全国規模のアンケート調査を行い、地域別のエネルギー使用実態を調査している。

(この手法の問題点)

入手できるエネルギー情報が、最低でも月単位で、気象条件やライフスタイルと関連づけた分析を行うには長い。またアンケート調査では定量的な情報が得にくく分析精度に限界がある。しかしこの手法で時系列に個別機器の使い方、エネルギー消費量及び効率等の詳細情報を得ることは事実上不可能である。また調査に協力する世帯はエネルギー問題、環境問題に意識が高い世帯が多く、若年単身世帯や、共働きの世帯からの協力が得にくいなど、調査対象を無作為に選出することが困難である。

3. 計測調査

熱源毎あるいは個別機器毎に計測器を取り付け時系列にデータを収集するので、エネルギー消費量だけでなく機器の使用パターンや、エネルギー効率等も分析可能である。アンケート調査に比べ高コストなので敬遠されがちだが、近年では、計測器具の小型化、低価格化に加え、通信技術の発達により研究例も増加しつつある。これまでの成果としては住宅の消費電力の約1割が待機電力によることがあきらかにされ^{7),8)} 政策や製品開発の目標として待機電力削減が掲げられるようになるなど成果を挙げている。また家庭用コージェネレーションの最適制御法の開発に電力と熱需要の時系列負荷データが有効活用されている。

(この手法の問題点)

コストが安くなったとはいえ、全体像をとらえるには、大量の住宅を対象に多数の項目を計測する必要がある。1件あたりのコストがアンケート調査や既存統計調査利用の場合に比べ大きくなるので大量のデータ収集にはむかない。このためアンケート調査等で得られた仮説の検証に使われる事が多い。ライフスタイルに関する調査は定性的な内容が多く計測が困難なため、やはりアンケート調査に頼らなければ

ばならず曖昧な点が残る。また調査協力者がかたよるなどの問題は、2.の場合と同様である。

4. コンピュータシミュレーションによる需要予測

1～3の研究で得られた知見や、機器性能、住宅躯体性能等の情報からエネルギー消費を物理的にシミュレートとするもの。電算機の計算速度の向上に伴い、従来よりも複雑で多様な条件下でのシミュレーションが可能となってきた。

(この手法の問題点)

ライフスタイルなどを考慮したシミュレーションは1～3の研究成果を利用するのでその精度に左右される。個別建築物の空調負荷を計算するには設計図面から各種情報を入力する必要があるが、多数の建築物を対象とする場合は作業量が膨大となる。また設計図面と竣工建物の構造が異なることがしばしばあり、その場合予測誤差も大きくなる。

このように、家庭用エネルギー消費の研究は様々な方法によって行われてきたが、それぞれ長所・短所がある。しかし費用対効果を考えると、既存統計調査やアンケート調査による方法が当分の間は研究の中心であると考えられる。しかし、これらの情報だけでは十分な予測精度が得られないのも確かであり、3.、4.の方法を併用して、その精度を向上させるような補完的研究が必要である。

1.2.2 太陽光発電システムの発電特性

現在地球上には膨大な量の太陽エネルギーが常時降り注いでいるが、その量は大気圏外で1平方メートル当たり1.4kW、地球全体に換算すると 173×10^{12} kWである。この量は1時間で人類が1年間で消費するエネルギー量に匹敵する。太陽光発電はこの膨大な光エネルギーを直接電気エネルギーに変換して取り出すものである。発電効率は単結晶シリコンが15～18%、アモルファスシリコンで6～8%と低い、通常の火力発電所などと比較すると

- 1) 地球上あらゆる場所で入手できる
- 2) 再生可能で半永久的に得られる。
- 3) クリーンなエネルギー源である

化石燃料を燃したり、発電機を回すことが無いので、排気ガスや有害物質の放出がなく、騒音もない。

- 4) 多様な規模の発電に利用できる

電卓の電源のような小規模システムから、数MW以上の大規模電力発電システムまで同じシステムで利用できる。

- 5) 電気を消費する場所で発電が可能で、独立電源として利用できる

発電所と電気を使う場所を接近させることができ、大規模な送電設備が不要になる。例えば各家庭の屋根や、公共施設の屋上、工場建物の屋根などに設置することが容易で、社会資本の不十分な途上国においても、すぐに導入可能である。

など多くの利点を有している。このような利点から、PVシステムは、早くから山頂の無線中継局や灯台など人が容易に近づけない所、配電線を引くことが困難な場所での各種電気設備用の電源として実用化が進められてきた。また人工衛星の電源として利用されてい

ることも良く知られている。更に家電製品がエレクトロニクス化で消費電力が大幅に低下したことで、電卓、時計などの数多くの民生用機器の独立用電源として応用が広がっている。最近では太陽電池と蓄電池の組み合わせをベースに、自動車への応用（ソーラーカー）、ソーラーボートなどが開発され、また発光ダイオードと組み合わせ交通標識、街路灯、テレビ用の電源などにも使われはじめている。

このような多くの利点を有する反面

1) 入射エネルギーの密度が小さい

単位面積当たりのエネルギー量（エネルギー密度）が小さい（快晴時 $1 \text{ kW} / \text{m}^2$ ）ため、大きな電力を取り出すには大きな面積が必要になる。

2) 気象条件によって発電量が変化する

曇りや雨の日、また日照が雲で遮られたりすると発電出力が変動する。

3) 蓄電機能がない

電気を蓄える機能が無いので、夜間や雨の日に使用できない。使用するためには蓄電池と組み合わせるなどの工夫が必要になる。

などの短所も有している。現在の住宅用 PV システムは、1990 年に電力会社の商業用配電線と相互結線する系統連系システムが利用可能となり、これらの短所も相当克服され急速に普及が進んでいる。

PV システムの発電期待量は工場や実験室レベルで得られる発電効率（定格能力）に地域の平均的な年間累積日射量とシステム係数を乗して推測される事が多い。この方式による期待発電量は、どの計算結果でも 1 kWp 当たり約 1000 kWh/年 である。しかし日射量は局地的な変動が大きく、発電量もそのような気象条件に大きく影響を受けるので、発電実績はこれを下回る事が多い。しかし地域別日射量データの整備が不十分なのでこれまでは地域的日照条件は十分に考慮されていなかった。しかし最近では AMeDAS などの気象データから地域的な日射量を推定する研究がすすみ、地域別の日射量情報が整備されつつある^{10), 11)}。このためこれまでよりは地域性を考慮出来るようになってきている。しかし局地的な日照条件の変動までは予測できない。また局地的な日射量がわかっても、他の外界要因、設置条件等にも影響されることがわかっている¹²⁾。これらの成果を踏まえ、コンピュータシミュレーションによって発電量を予測する研究^{13), 14)}も行われている。しかしこれらの研究は、少数のシステム実測を基礎としており^{16), 17)}、多種多様な条件下で設置・稼働している多数の PV システムの発電実態を統計的に検証した例は少ない。実際の現場は、変動する日射、パネルの温度変化、大気汚染による日射透過率の低下、表面の汚れ、降雨、積雪の影響、周囲の建築物や植栽による日射遮蔽など様々な悪条件に晒されている。更にこのような環境下での長期暴露、連続稼働によるパネル経年劣化等が予想され、統計学的な検討が必要とされる。

2001 年 3 月末現在、我が国の PV システムの導入実績は約 29 万 kWp ⁹⁾である、この内住宅用は 18.0 万 kWp 設置である。これまで毎年ほぼ倍増してきた PV システムではあるが、京都議定書の目標達成に向け、今後より一層の普及が必要とされている。政府の目標によると 2010 年までに 482 万 kWp を普及させるとしている。経済的メリットが無いにも拘わらずこれほど普及した背景には、環境意識が高く経済的ゆとりのある世帯に支えられてきたためである。しかし今後さらに飛躍的な普及のためには、住宅に PV システムが

標準装備されるような時代が実現されなければならない。しかしこれまで PV システムは電力料金の削減効果のみ注目されていたため、PV システムは経済性が望めないものと考えられてきた。しかし今後の価格低下，社会資本である発電所の代替として間接的に社会が受ける経済利益も含めた総合評価を行えば，経済性が見込める時代が近い将来やってくると思われる。

1.3 本論文の構成

本論文では，家庭部門での PV システム普及による化石エネルギー代替促進に資するため，家庭用エネルギーの消費構造分析と住宅用 PV システムの発電実態を調査し，エネルギー代替効果及び環境負荷削減効果について検討するものである。図 1.3.1 に本論文の研究フローを示す。

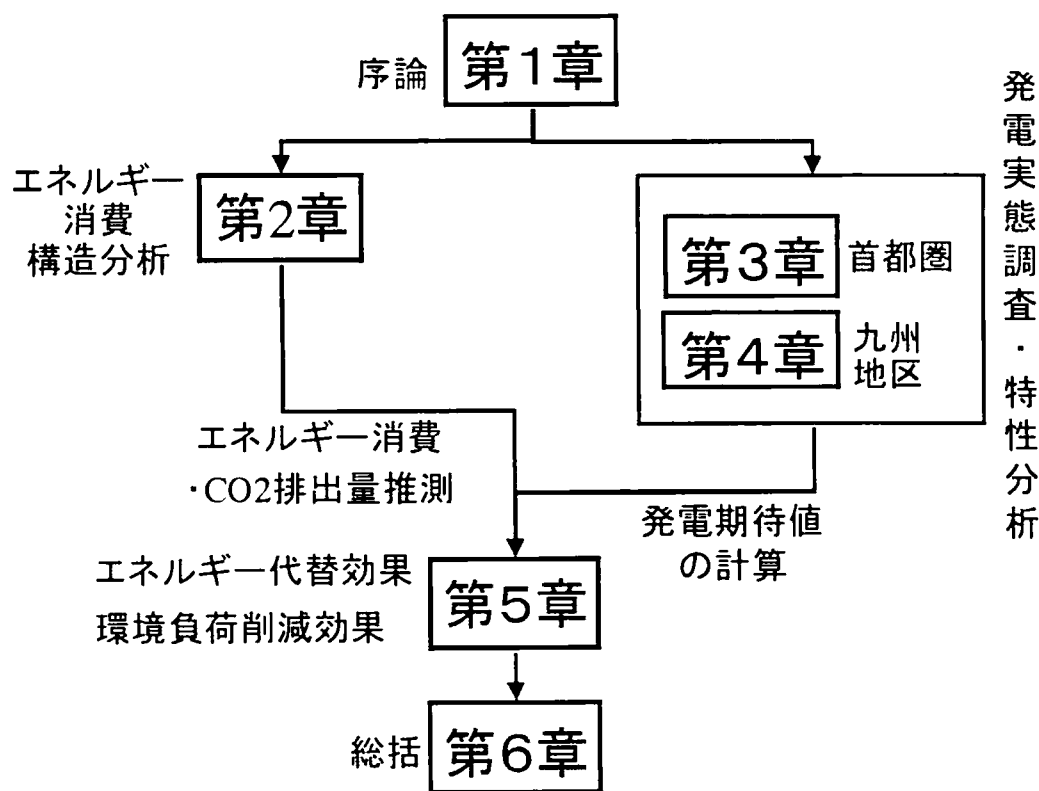


図1.3.1 本論文の研究フロー

第 1 章は序論であり研究の背景と目的，既往の研究と論文の構成について述べた。

第 2 章では，家庭の使用エネルギー消費量を計測調査し，属性情報，機器情報，気象情報等を用いて重回帰分析しエネルギー消費構造を明らかにする。計測調査の対象は，首都圏及び熊本市内の普通世帯計 24 件である。計測は住宅トータルの電力，都市ガス消費量

と主要家電機器で1年間連続計測を行う。ガスの計測は、計測器具の関係から東京ガス管内の都市ガス使用世帯のみである。ガスの使用用途は、全体負荷の変動パターンから、器具別のガス消費量を推定し求める。作成するモデルは実用性を考慮し統計資料やアンケート調査で入手可能なデータで、用途別エネルギー消費量を推測するための詳細モデルと、簡易モデルの2つを作成する。詳細モデルはアンケート調査や統計資料を、簡易モデルは統計資料の使用を想定するものである。

第3章、第4章ではすでに住宅に設置され稼働しているPVシステムの発電状況を分析し、発電実態を明らかにするとともに、発電特性を分析し予測方法を検討する。第3章では、首都圏132件のPVシステムを1988年10月から1999年9月までの1年間計測する。またパネル設置方法やパネル裏面温度を計測し、発電量の決定因子とその影響量を検討し、発電量予測式を作成する。

第4章では、九州地域の既設PVシステム142件の発電実態をアンケート調査し、更にこのうち16件を選び発電量やパネル温度等の計測を行うことで、その発電特性を明らかにする。またパネルの入射日射アンバランスが発電効率の低下を招くという仮説をたて、それを検証するため、実験住宅でパネル部分遮蔽によりアンバランス状態を再現し、発電効率への影響を明らかにする。

第5章では、第2章で作成するエネルギー消費構造モデルを用い、首都圏及び九州地域の戸建住宅のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量を推測する。また第3章、第4章で得られた既設PVシステムの発電量予測式より、各地域の期待発電量を求め住宅用PVシステムのエネルギー代替効果及び環境負荷削減効果を検討する。またライフサイクル環境負荷評価の観点からPVシステムのライフサイクルCO₂を求め、各種発電所の代替として考えた場合の、環境負荷の削減効果を検討する。PVシステムの経済性については、直接・間接的な要因も考慮して評価する。具体的検討内容は直接的経済効果として1.初期投資額と発電収入のバランス、2.炭素税の導入による経済収支、社会的経済効果として3.火力発電所代替効果、4.石油備蓄施設代替効果等の検討である。

【参考文献】

- 1) 日本エネルギー経済研究所(2001), 総合エネルギー統計
- 2) ローマクラブ, 成長の限界, 1972
- 3) Hidetoshi Nakagami , Akio Tanaka, Chiharu Murakoshi, Osamu Ishihara : Changes in Residential Energy Consumption Patterns and Future Trend in Japan, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), (pre publication paper)
- 4) C. Murakoshi, H. Nakagami, A. Tanaka, Y. Murota: Developing a simulation model to forecast Heating/Cooling demand in the Japanese residential sector, ECEEE, ECEEE Summer Study, ID#30, 1995
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999,2000), 民生部門エネルギー消費実態調査
- 6) 澤地孝男, 坊垣和明, 他 8:用途別エネルギー消費量原単位の算出と推定式の作成, 日本建築学会計画系論文集, No.462, pp.41-48, 1994.8
- 7) 田中昭雄,荒木田好之,村越千春,中上英俊:家電製品の待機時消費電力量の実測, 第 13 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 231 頁～ 236 頁, 平成 9 年 1 月
- 8) 大橋博之, 田中昭雄,中上英俊:家庭における待機時消費電力の実態調査, 第 17 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 209 頁～ 214 頁, 平成 13 年 1 月
- 9) 総合資源エネルギー調査会:総合部会会報告書, (.2001), 経済産業省
- 10) (社)日本建築学会, 拡張アメダス気象データ, 2000
- 11) 西川邦彦, 斉藤郁夫, 石原修:自然エネルギーの活用のための気象データの整備と気候マップの作成, 日本建築学会計画系論文集, No.509, pp.15-20, 1998.7
- 12) 小林誠, 谷辰夫:環境因子の変化に対する太陽電池モジュールの出力特性, 太陽エネルギー, Vol.19, No.4, pp.39-46,1993
- 13) 松川洋ほか 4 名:太陽電池を複数の方位角および傾斜角に設置した太陽光発電アレイのシミュレーション,平成 10 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会, pp.29-32,1998

- 14) 車孝軒ほか 5 名：設置条件の異なる太陽電池モジュールで構成される太陽光発電システムの発電特性、太陽エネルギー、 Vol.25, No.5, pp.33-40, 1999
- 15) 三浦秀一：全国における住宅の用途別エネルギー消費と地域特性に関する研究、日本建築学会計画系論文集, No.510, pp.77-83, 1998
- 16) D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson, and W.I. Bower, Sandia : Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays, 2 nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1998
- 17) Sergio Henrique, Roberto Zilles : Grid-connected photovoltaic systems : The Brazilian experience and the performance of an installation, Prog. Photovolt : Res. Appl, Vol.9, No.5, pp. 341-347, 2001

第2章 家庭用エネルギー消費構造の分析

2.1 研究の目的

第一次石油危機以後の我が国のエネルギー需要は、産業部門はほぼ横這いで推移しているのに対し、家庭部門、業務部門、運輸部門のエネルギー需要は毎年増大傾向にある。中でも家庭部門は 1973 年以降も年平均 5.7 %の伸びを示しており¹⁾今後も増大が予想されている。このため我が国の省エネルギー政策において家庭部門の省エネルギーの推進が重要課題の一つとされている²⁾。

住宅におけるエネルギー消費は、建物の温熱性能、気候条件、使用機器のエネルギー効率、居住者の生活習慣などが複合的に関与した結果である。従って家庭部門の省エネルギー推進を考える上で、地域レベル、住宅属性、世帯属性レベルでエネルギー需要の実態を把握するとともに、その差異の発生する要因を特定し影響を定量化（以下ではこれを”マクロなエネルギー像”と記す）する事が重要となる。

住宅のエネルギー消費実態を研究する方法としては、アンケート調査^{3)~5)}や統計資料^{6), 7)}による推定^{8)~10)}などがよく行われる。この他にも、直接エネルギー消費量を計測するもの¹¹⁾や負荷計算¹²⁾による把握も可能であろう。本研究では、前者をマクロなエネルギー像を把握する事に良く用いられる事から”マクロ的手法”、後者を個別の事象を捉えるのに良く用いられることから”ミクロ的手法”と記すこととする。

マクロ的手法は比較的手軽にかつ広域を対象にエネルギー消費の実態を把握できるので、住宅のマクロなエネルギー像解明に最も広く用いられている。統計資料は、全国規模で光熱費支出や小売物価情報等が整備されており、手軽に住宅のエネルギー消費量を推定する事が出来る。しかしこれらの統計資料が、目的とする解析に必要な十分条件となるデータを整備しているとは限らない。統計資料の多くは、主要都市単位か、全国九行政区分単位でまとめられており、都道府県単位の集計データは無い場合が多い。この制約から、都道府県単位でエネルギー消費量を予測した研究例は少ない。

マクロ的手法のうちアンケート調査は、このような統計資料の不備を補うことが可能である。しかもミクロ的手法に比べれば低予算で実施できる。しかしエネルギー消費量の説明変数と考えられる情報が得られるとは限らない。中には計測しなければ得られない説明変数もある。

さらにマクロ的手法では、月別光熱費支出からエネルギー使用量を推定するので、分析精度の限界が月単位という問題がある。また用途別エネルギー使用量は、エネルギー需用の季節変動要素と非変動要素から推定する¹³⁾ので、各用途の推定値の信頼性は必ずしも十分とは言えない。

一方ミクロ的手法は、エネルギー消費量を直接計測したり、物理的な計算によりエネルギー消費量や負荷を求めるのでマクロ的手法より高い精度の情報が得られる。しかしマクロ的手法に比べ膨大な作業や調査費用を要するためマクロなエネルギー像の解明に用いられることは少なく、実態調査の個別事象の検証や、個別建築物の熱性能の評価等に使われる事が多い。

マクロ的手法、ミクロ的手法いずれもエネルギー消費構造の解明がその目標であるが、費用対効果を考えると、マクロ的手法が今後も住宅のエネルギー消費研究の中心であると考えられる。しかしマクロ的手法は用途別エネルギーの推定精度がミクロ的手法に比べ劣るという課題はそのままである。そこで本章では、ミクロ的手法である計測調査により得られた用途別エネルギー消費量の情報からマクロ的手法に応用できる用途別エネルギー消費量推定モデルを作成する。

2.2 研究手法

本章では、住宅の主要機器の電力消費量及びガス消費量を計測するとともに光熱費の支出状況から、その他のエネルギー消費量を求め、気候条件や住宅属性、世帯属性、機器所有状況等の説明変数の中で統計学的に有意な説明変数とその影響量を明らかにする。その作業は大きく次の4つのステップよりなる。

ステップ 1：エネルギー消費の実態調査

ステップ 2：熱源別旬別エネルギー消費量の計算

ステップ 3：用途別エネルギー消費への分解[注1]

ステップ 4：重回帰分析によるエネルギー消費量の推定モデルの作成

これら4つの作業フローを図2.2.1に示す。なお本研究では、エネルギー消費量を比較する最小単位を旬単位で示す。これは季節変動がある用途のエネルギー消費の分解精度を従来のマクロ的手法よりも向上させる事が目的である。図2.2.1中の"旬別エネルギー消費"とは、各月を上・中・下旬に3区分したときの、1日平均のエネルギー消費量を指す。

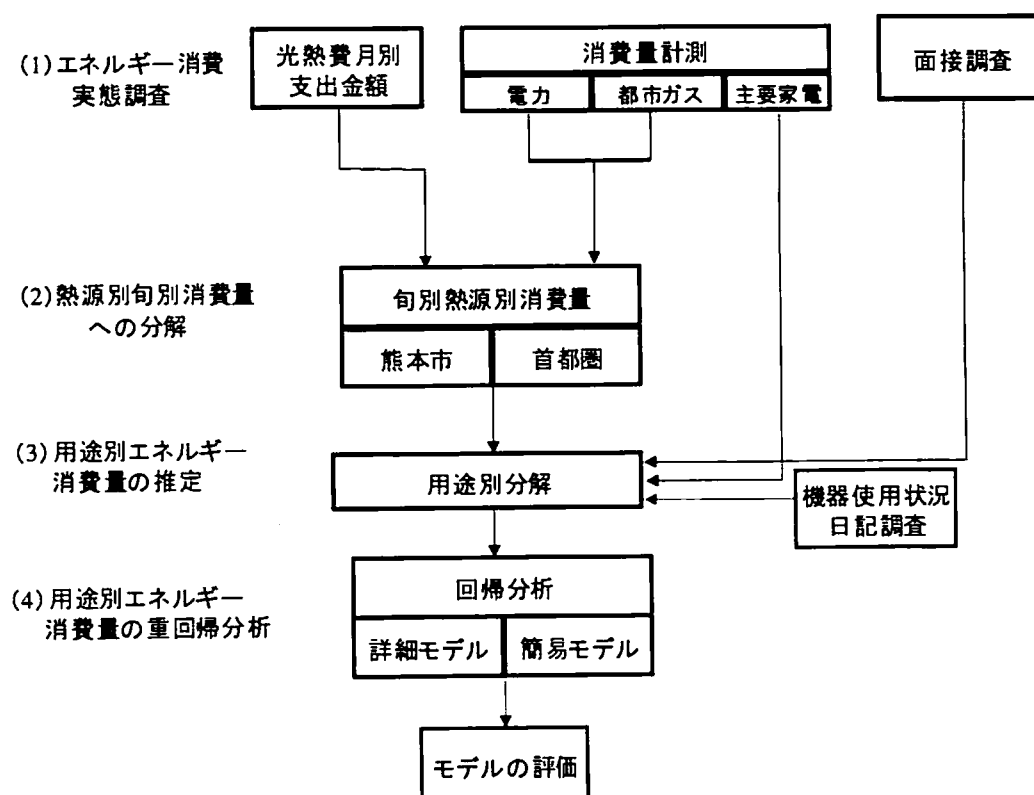


図2.2.1 本章の作業フロー

2.2.1 エネルギー消費実態調査

エネルギー消費実態調査は、電力及びガスの消費量計測、光熱費支出状況調査、面接調査及び機器使用状況日記調査の4つからなる。以下にこれら調査内容の概略を示す。

①電力及びガス消費量計測

調査対象住宅は 首都圏（1都3県）14世帯と 熊本市内10世帯、併せて24世帯である。首都圏と熊本市は、我が国でもっとも人口の集積する東海地方、近畿地方、山陽・四国地方、九州地方（沖縄を除く）の代表として選んだもので、この地域の人口は日本全国の70%以上を占めている¹⁸⁾。これらの地域のエネルギー消費構造を記述できれば日本の民生部門のエネルギー消費の平均像に近い構造を記述出来ると考えられる。また外気温の年間の変動幅（最高気温と最低気温の幅）もこの地域内は類似している。

調査対象世帯を選定するにあたっては、首都圏は消費生活アドバイザーから、熊本市は大学関係者、九州電力関係者の中から協力世帯を募り、その中から世帯員数が2人以上で、住宅延床面積が、戸建住宅で200㎡以下、集合住宅は100㎡以下、世帯構成員の年収（税込み）の合計が1500万円以下の世帯を抽出し計測対象とした。これは平均的な世帯像から著しく離れた属性を持つ世帯が混入することを避けるためである。

計測対象は戸建住宅が15戸、集合住宅は9戸である。調査対象世帯の属性と計測内容を表2.2.1に示す。

表 2.2.2.1 調査対象世帯属性と調査項目及び分析内容

地域	世帯・住宅属性				計測調査								用途別エネルギー消費量 把握可能用途						全エネルギー 需要予測		
	住宅 種類	世帯 員数	延床 面積 [㎡]	エアコン 所有 台数	電力	主要家電機器計測対象機器数					都市 ガス	把握可能用途									
						エアコン	TV	冷蔵庫	OFF	EC		こた つ	扇風 機	冷房	暖房	TV	冷蔵庫	照明・ 他		厨房	給湯
首都圏	戸建	1	4	94	1	○	1	1	1	1	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		2	4	60	1	○	1	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		3	4	90	2	○	1	1	1	1	0	0	1	×	○	○	○	○	○	○	
		4	5	115	3	○	0	1	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		5	4	104	2	○	0	1	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		6	4	132	3	○	0	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		7	3	116	2	○	0	1	0	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		8	5	130	4	○	1	1	1	0	0	1	0	○	○	○	○	○	○	○	
		9	4	165	2	○	1	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		10	2	80	1	○	1	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
熊本市内	集合	11	4	70	2	○	1	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		12	2	69	1	○	1	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		13	2	76	2	○	1	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		14	2	60	2	○	1	1	1	0	0	0	0	○	○	○	○	○	○	○	
		101	3	123	1	○	0	0	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		102	6	188	6	○	6	0	0	0	1	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		103	4	100	4	○	0	0	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		104	3	130	3	○	0	0	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		105	2	100	3	○	0	0	0	1	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		106	4	111	6	○	0	0	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
熊本市内	集合	107	3	85	2	○	0	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	○	
		108	4	61	2	○	2	0	0	0	1	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		109	3	73	2	○	0	0	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	
		110	2	61	2	○	0	0	0	0	0	0	0	×	○	○	○	○	○	○	

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

○：計測調査対象

×：計測調査対象外

○：計測値等より推定

●：光熱費より推定

EC：電気カーペット

OFF：石油ファンヒーター

○：計測調査対象

計測対象は、首都圏が都市ガスと電力の総消費量と、主要家電製品（冷暖房機器、テレビ、冷蔵庫）の消費電力量、熊本市内は総消費電力と冷暖房器具の消費電力である。計測期間は首都圏が1995年1月から12月、熊本市内が1995年8月から1996年7月の各1年間である。

計測器の仕様を表2.2.2に示す。電力は15分間の移動平均消費量、都市ガスは、マイコンガスメータの発するパルスの時刻別発信密度である。電力及びガスの単位時間当たり使用量は、これらから計算により求めた。電力の計測器は、誤差が定格入力 $\pm 2.5\%$ 以内となるよう校正済みの機器である。ガスは検針用ガスメータのパルスを直接読みとるので誤差はない。

表2.2.2 電力及びガス計測器仕様

計測器	計測内容	記録間隔	定格入力	測定精度
電力記録計 (タケモトデンキ, PRMC-340)	電力消費量	15分間の 移動平均 値	5kW	定格入力 の±2.5% 以内
電力記録計 (タケモトデンキ, PRMC-341, 342)	個別機器消 費電力		2kW	
ガス流量記録計 (金門製作所, CDL-05)	ガスマイコンメータの パルス発信時刻記録		誤差なし	

②光熱費支出状況調査

計測データ欠落時の補間及び計測対象外熱源の消費量を把握する目的で、全世帯を対象に計測期間中の熱源別光熱費支出額を調査した。熱源別の月別消費量は得られた支出金額と電力会社及びガス会社の料金表、小売物価統計⁷⁾を用いて求めた。

③面接調査

エネルギー消費の説明要因となる情報を収集するため全世帯に面接調査を実施した。調査内容は、住宅種類、延床面積、部屋数、所有機器とそのサイズ、個別機器の定格消費電力、居住者の属性、昼の在宅状況、熱源別使用用途である。これらの設問はアンケート調査においても、同様に設問として設ける事が望ましいと思われる内容である。

④機器使用状況日記調査

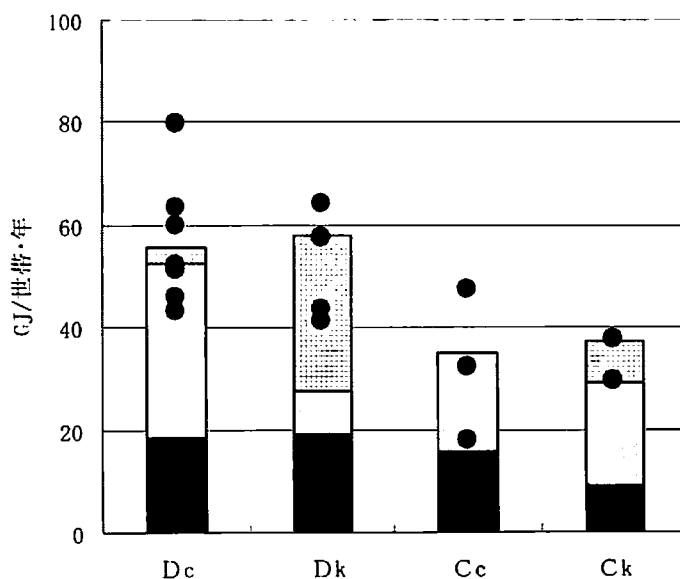
主要家電製品を対象に、中間期・夏期・冬期の各1週間、機器毎の時間別使用状況を日誌に記録した。記録の最小単位は、エネルギーの計測同様15分間隔である。

2.2.2 エネルギー消費量調査結果

調査対象世帯の住宅種別エネルギー消費原単位と世帯別エネルギー消費量[注2, 3]を図2.2.2 に示す。戸建住宅のエネルギー消費原単位は首都圏が 55.6GJ/年、熊本市内が 57.9GJ/年、集合住宅では首都圏が 35.3GJ/年、熊本市内が 37.3GJ/年である。戸建住宅は集合住宅よりもエネルギー消費が約 1.5 倍と大きい。

データを集計に当たっては、エネルギー消費量に地域差や住宅種別違いがあるかどうかを事前に検討する。検定には各グループのエネルギー消費量の平均値と分散を用いて t 分布検定¹⁴⁾を行う。この結果エネルギー消費原単位の地域差に有意性は認められない。住宅種別のエネルギー消費量の差については危険率1%以下で有意な差が認められた。地域別エネルギー消費の差が有意でないのは、両地域とも都市部の住宅地にあるため住宅規模、機器の普及状況、居住者の生活スタイル等に差異が小さいためと思われる。

■ 電力 □ ガス □ 石油 ● 世帯別エネルギー消費量



文字 D：戸建住宅，C：集合住宅 添字 c：首都圏、k：熊本市

図2.2.2 住宅種別エネルギー消費原単位と世帯別エネルギー消費量

2.3 熱源別旬別エネルギー消費原単位の推定

2章2節の調査結果から世帯別熱源別に旬別の1日当たりのエネルギー消費量を求め、この平均値を住宅種別エネルギー消費原単位として表2.2.3に示す。2章2節で記したとおり、エネルギー消費原単位に地域差は認められないが、両地域の調査期間が異なるため、地域別、住宅種別にそれぞれの原単位を示す。計測対象外の熱源は、光熱費から該当月の1日平均の消費量を求めたものである。

電力の旬別エネルギー消費原単位には、夏期と冬期に需要のピークが見られる。またガスと灯油は冬期に需要のピークが見られる。夏期の電力ピークが発生するのは熊本市の戸建住宅が8月上旬と中旬で79MJ/日である。しかし首都圏の戸建住宅と2地域の集合住宅は8月下旬である。このときの首都圏戸建住宅の電力負荷は67MJ/日で熊本市より12MJ/日小さい。集合住宅は首都圏が59MJ/日、熊本市が56MJ/日とほぼ同じである。

冬期の電力ピークは、首都圏集合住宅では1月下旬から中旬にかけて発生している。しかし熊本市の集合住宅と2地域の戸建住宅は12月下旬に見られる。ピーク時の電力消費量でみると熊本市集合住宅が24MJ/日と夏期の約半分に減少しているのに対し、他の地域はほぼ同じである。熊本市集合住宅のみ冬期のピークが夏期ピークよりも大幅に小さい理由は、冬期の暖房が灯油中心のため電力ピークが大きくならなかったものと考えられる。

ガスと灯油のピークは冬に発生するが、その発生時期は電力とわずかにずれており、首都圏では戸建・集合住宅ともに2月上旬である。熊本市は光熱費支出からの推定のため旬別には不明であるが、戸建・集合住宅ともに2月中に需要ピークが発生していると考えられる。ガスと灯油のピーク時の合計消費量は、熊本市が首都圏よりも戸建住宅で30MJ/日、集合住宅で52MJ/日大きい。これは熊本市が灯油を給湯と暖房に使用しているのに対し、首都圏は暖房にのみ使用しているためである。灯油を給湯、暖房に使用する傾向は都市ガスの普及率が低い地方都市に共通した特徴である。両地域の都市ガスの使用用途の差は都市ガスの普及率を反映しており、首都圏でも都市ガスの普及率が低い地域は、灯油を給湯や暖房に利用する傾向がある⁸⁾。

表 2.3.1 住宅種別熱源別旬別エネルギー消費原単位

単位MJ/日

首都圏										熊本市									
戸建住宅					集合住宅					戸建住宅					集合住宅				
月	旬	電力	ガス	灯油	合計	電力	ガス	灯油	合計	月	旬	電力	ガス	灯油	合計	電力	ガス	灯油	合計
95年1月	上旬	55	145	17	217	52	72	0	124	95年8月	上旬	79	18	34	131	47	40	0	87
	中旬	62	150	18	230	56	83	0	139		中旬	79	18	34	130	53	40	0	93
	下旬	62	151	17	230	57	82	0	139		下旬	73	18	34	125	56	40	0	96
2月	上旬	63	166	33	262	57	85	0	142	9月	上旬	53	19	36	108	38	44	0	82
	中旬	58	158	32	248	54	84	0	138		中旬	39	19	36	94	24	44	0	68
	下旬	57	156	32	245	56	81	0	137		下旬	39	19	36	94	24	44	0	68
3月	上旬	61	138	27	225	50	82	0	132	10月	上旬	38	17	53	107	24	47	0	70
	中旬	54	130	26	209	47	82	0	129		中旬	38	17	53	108	23	47	0	69
	下旬	51	124	26	201	46	71	0	117		下旬	38	17	53	107	23	47	0	70
4月	上旬	45	117	7	169	40	69	0	109	11月	上旬	40	22	72	135	22	59	28	109
	中旬	42	112	7	160	37	60	0	97		中旬	45	22	72	139	23	59	28	109
	下旬	38	90	6	134	36	52	0	88		下旬	63	22	72	158	24	59	28	111
5月	上旬	38	81	0	120	29	50	0	79	12月	上旬	73	22	164	259	23	57	59	140
	中旬	38	78	0	116	29	48	0	77		中旬	69	22	164	256	23	57	59	139
	下旬	37	78	0	115	28	45	0	73		下旬	79	22	164	265	24	57	59	140
6月	上旬	37	69	0	106	29	41	0	71	96年1月	上旬	76	28	168	273	20	67	59	146
	中旬	39	65	0	104	30	45	0	75		中旬	62	28	168	259	20	67	59	146
	下旬	40	65	0	105	31	41	0	72		下旬	71	28	168	267	20	67	59	147
7月	上旬	45	65	0	110	33	38	0	71	2月	上旬	74	29	180	283	21	71	66	158
	中旬	47	61	0	108	37	36	0	74		中旬	58	29	180	266	21	71	66	157
	下旬	65	60	0	125	39	22	0	61		下旬	68	29	180	277	19	71	66	156
8月	上旬	65	45	0	110	57	22	0	79	3月	上旬	56	26	96	178	20	63	38	121
	中旬	59	43	0	101	53	19	0	72		中旬	47	26	96	169	20	63	38	121
	下旬	67	45	0	111	59	23	0	82		下旬	41	26	96	163	20	63	38	121
9月	上旬	46	52	0	98	48	26	0	74	4月	上旬	46	27	67	140	20	62	11	93
	中旬	43	54	0	97	47	36	0	83		中旬	42	27	67	136	20	62	11	93
	下旬	40	53	0	92	46	34	0	80		下旬	36	27	67	130	18	62	11	92
10月	上旬	40	66	0	106	32	41	0	73	5月	上旬	35	26	53	113	17	63	0	80
	中旬	38	65	0	103	30	42	0	72		中旬	33	26	53	112	17	63	0	80
	下旬	38	70	0	108	31	48	0	79		下旬	32	26	53	111	16	63	0	79
11月	上旬	41	78	7	126	30	51	0	81	6月	上旬	32	23	41	97	18	51	0	69
	中旬	47	91	8	146	33	58	0	91		中旬	35	23	41	99	19	51	0	70
	下旬	53	102	9	164	37	64	0	100		下旬	38	23	41	102	20	51	0	72
12月	上旬	55	113	14	181	46	67	0	113	7月	上旬	38	22	34	93	19	47	0	66
	中旬	58	121	14	194	47	73	0	120		中旬	53	22	34	108	27	47	0	74
	下旬	65	130	15	209	53	80	0	133		下旬	67	22	34	122	35	47	0	82
合計[GJ/世帯・年]										合計[GJ/世帯・年]									
18.1										19.1									
34.3										8.5									
3.2										30.3									
55.6										58.0									
15.4										8.9									
19.8										20.4									
0.0										8.0									
35.3										37.3									

2.4 用途別エネルギー消費の推定と重回帰分析

電力とガスの計測結果及び毎月の光熱費支出状況から、以下に示す方法で世帯毎に旬別用途別エネルギー消費量を推定する。

2.4.1 熱源別用途別エネルギー消費量

(1) 電力

電力需要は、調査世帯に電気温水器や電気厨房を備えた住宅が無いので式(2.4.1)により冷蔵庫、テレビ、冷暖房(計測分)、冷暖房(非計測分)、照明・コンセントの5つの要素(用途)に分解する。

$$E(t) = \sum E_i(t) \quad (2.4.1)$$

ここで i は要素、 t は時刻である。この分解の原理を模式的に図2.4.1に示す。

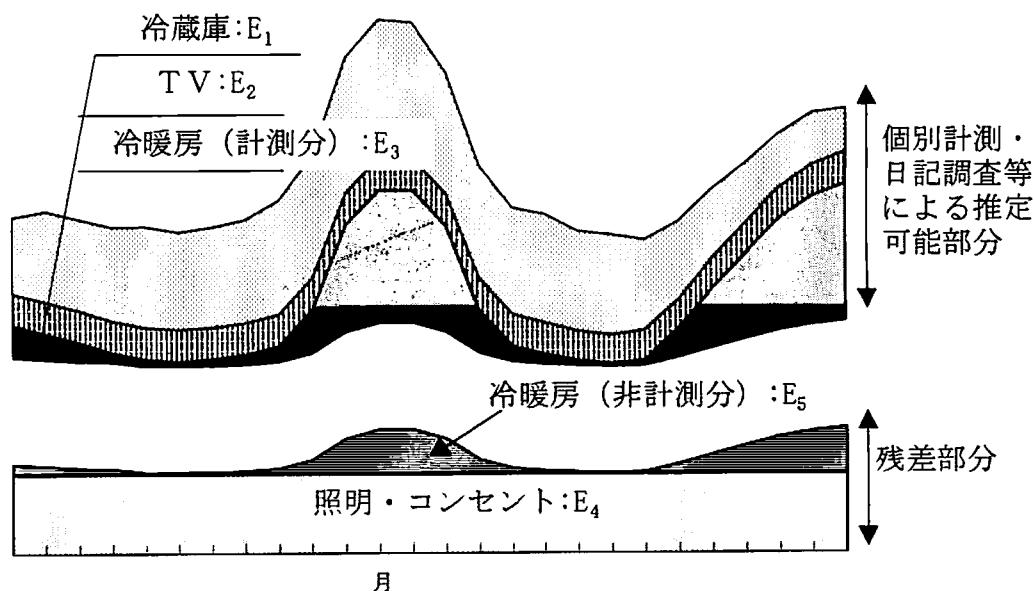


図2.4.1 電力消費量用途別分解の原理

次いで各要素の推定方法を以下に示す。

①冷蔵庫の消費電力 E_1

計測結果を適用する

②テレビの消費電力 E_2

計測対象機器の計測値と、非計測機器の推定消費電力合計より求める。

非計測分のテレビの消費電力量は、機器毎の定格消費電力と季節毎の平均使用時間に0.8[注4]を乗じて求める。個別機器の季節別平均使用時間は、機器の使用状況の日記調査により得た値である。

③冷暖房機器消費電力 E_3

計測対象とした冷暖房機器の消費電力を適用する。

④照明・コンセント E_4

テレビ、冷蔵庫、冷暖房、電気給湯、電気厨房以外の住宅内の消費電力で、式(2.4.2)より求める。

$$E_4 = ave \left\{ \sum_{t=5月,11月} \left[E(t) - \sum_{i=1}^3 E_i(t) \right] \right\} \quad (2.4.2)$$

⑤冷暖房機器消費電力 E_5

冷暖房機器の中の非計測機器分で式(2.4.3)により求める。

$$E_5(t) = E(t) - \sum_{i=1}^4 E_i(t) \quad (2.4.3)$$

冷暖房機器の総消費電力量は E_3 と E_5 の合計値である。

(2)都市ガス

ガス消費量の計測値を用途別に分解する原理を図2.4.2に示す。

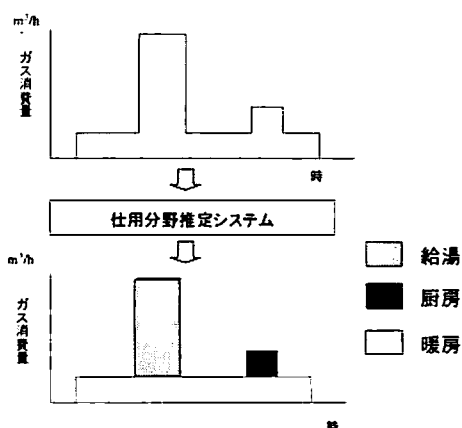


図2.4.2 ガス消費量用途別分解の原理

この原理に基づき、式(2.4.4)に示す回帰モデル¹⁵⁾の最適解を求めることにより、時刻別の給湯用、厨房用、暖房用のエネルギー消費量を求める。

$$G = \sum_i a_i \cdot x_i + e_i \quad (2.4.4)$$

i : 器具

G : 総ガス使用量

a_i : 器具 i の1台当たりエネルギー使用量

x_i : 器具 i の使用台数

e_i : 誤差

(3) LPG、灯油

LPG、灯油はともに計測していないので、エネルギーの使用用途とその使用量は、単一熱源を単一用途に使用している世帯の場合には光熱費から求めた。旬別の使用量は、該当月の使用量の1日当たりの平均使用量を求め、上・中・下旬とも同値とした。

2.4.2 用途別エネルギー消費量の重回帰分析

前項のエネルギー需要の用途別分解方法を世帯毎に適用して用途別旬別1日当たりエネルギー消費量を求め、気候要因、住宅属性、世帯属性、機器属性を説明変数に重回帰分析を行った。

作成した重回帰式は、アンケート調査と統計資料の利用を想定した詳細モデルと、統計資料のみを想定した簡易モデルの2種類である。

重回帰分析は住宅種別に行い、説明変数の選択の条件は、回帰係数=0の帰無仮説に対するt検定の結果得られる危険率が10%以下となることである¹⁴⁾ [注5]。

重回帰分析より得られた用途別エネルギー消費量推定式の回帰係数と推定値と実績値の関係を各々表2.4.1～2.4.7、図2.4.3～2.4.9に示す。なおここで暖房用エネルギー消費は、機器効率を考慮した熱負荷換算値である[注6]。

外気温は冷暖房・給湯・冷蔵庫のエネルギー消費との相関性が認められた。特に暖房用エネルギーは外気温の影響が最も大きく、単位暖房度日(1deg・日/日)当たりのエネルギー消費への影響は戸建住宅で+18～20MJ/日である。集合住宅の単位暖房度日当たりの影響は、戸建住宅の半分の+10.5MJ/日である。冷房と給湯では外気温の影響は冷房が単位冷房度日当たり+2.5MJ/日、給湯が外気温1℃当たり－2.23MJ/日である。なお給湯需要は住宅種別に有意性はなく、詳細モデルと簡易モデルは同じものである。説明変数としては、世帯員数と平均気温が有効である。これに対し冷暖房需要は住宅種別に異なる回帰式となったが、これは住宅躯体の熱特性の違いが室内の熱負荷の差となって現れたものと思われる。一方給湯が住宅種別で差がないのは、住宅躯体の熱性能の影響が小さい上、入浴スタイルの差も小さいためと考えられる。

冷蔵庫は外気温1℃上昇につき、エネルギー消費が+0.3MJ/日となる。冷房需要に比べてエネルギー消費への影響は1/8と小さい。冷蔵庫が室内に設置されているため、外気温の影響が冷房に比べて小さいと考えられる。詳細モデルでは、更に定格内容積[L]と、JISA法[注7]による月当たり消費電力量[kWh/月]も説明変数として用いている。

テレビ、厨房、照明・コンセント需要の3用途は季節変動は無視できるほど小さい。テレビのエネルギー消費の説明変数は世帯員数や定格消費電力、画面サイズ、所有台数である。これらは、アンケート調査や統計資料から正確な情報が得にくいと思われるので、機器の使用時間や、使用時の消費電力の代理変数として用いている。なおテレビを複数台所有する場合は、居間のテレビの使用頻度が最も大きいと考えて、居間テレビの画面サイズも説明変数に用いている(テレビの画面サイズと定格消費電力との関係については[注8]参照)。

一方、厨房、照明・コンセントのエネルギー需要は、有意な説明変数は確認出来なかった。住宅種別平均値とその標準偏差を示した。

表2.4.1 冷房用エネルギー消費の回帰分析結果

変数名 [単位]	詳細モデル		簡易モデル	
	偏回帰係数		偏回帰係数	
住宅種類	戸建	集合	戸建	集合
定数項 [MJ/日]	0.0	-74	0.0	-5.2
冷房D18-18 [deg・日/日]	2.41	2.60	2.41	2.57
エアコン所有台数 -1 [台]	—	12.6	—	—
延床面積 [m ²]	—	0.87	—	—
重相関係数	0.55	0.60	0.55	0.51
分析対象世帯数	7	6	7	6
目的変数：1日当たり冷房用エネルギー消費量				

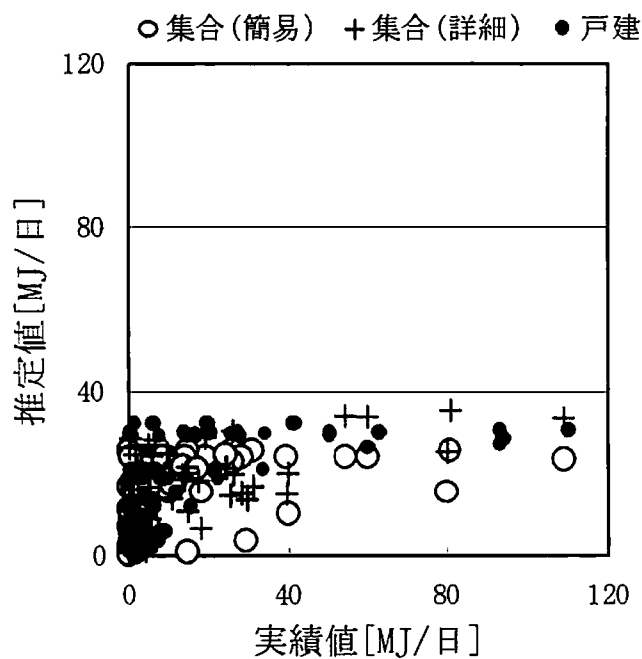


図2.4.3 冷房用エネルギー消費

表2.4.2 暖房用エネルギー消費の回帰分析結果

変数名 [単位]	詳細モデル		簡易モデル	
	偏回帰係数		偏回帰係数	
住宅種類	戸建	集合	戸建	集合
定数項 [MJ/日]	0.0	-103	13.0	-103
暖房D14-14 [deg・日/日]	17.9	10.50	19.7	10.50
世帯員数 [人]	5.65	—	—	—
延床面積 [m ²]	—	1.61	—	1.61
重相関係数	0.78	0.71	0.76	0.71
分析対象世帯数	7	6	7	6
目的変数：1日当たり暖房用エネルギー消費量				

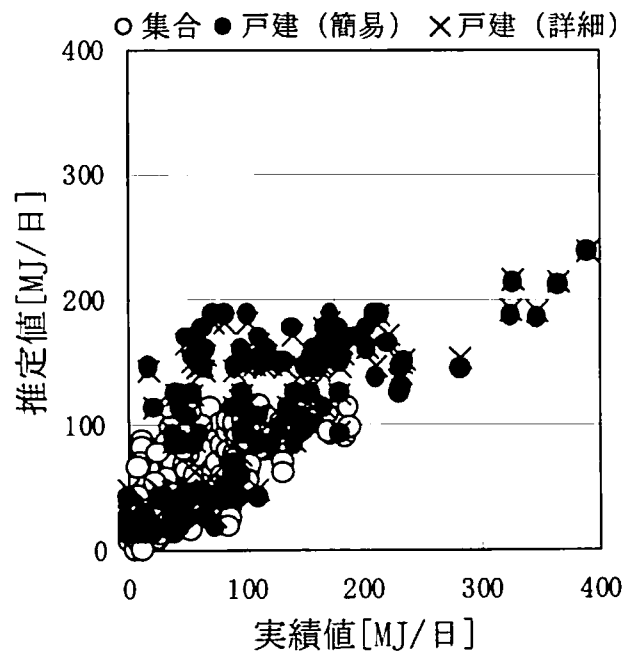


図2.4.4 暖房用エネルギー消費（熱負荷相当値[注6]）

表 2.4.3 給湯用エネルギー消費の回帰分析結果

変数名 [単位]	詳細及び簡易モデル	
	偏回帰係数	
住宅種類	区分無し	
定数項	[MJ/日]	35.5
平均気温	[°C]	-2.23
世帯員数	[人]	17.6
重相関係数		0.76
分析対象世帯数		14
目的変数：1日当たり給湯用エネルギー消費量		

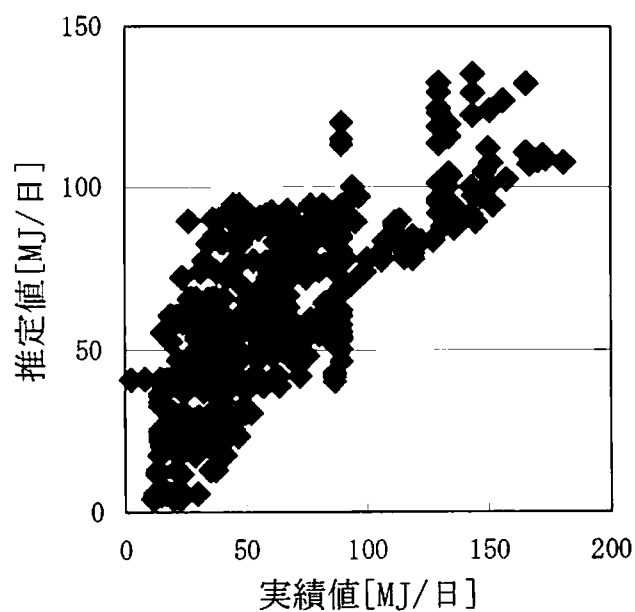


図2.4.5 給湯用エネルギー消費

表2.4.4 冷蔵庫用エネルギー消費の回帰分析結果

変数名 [単位]	詳細モデル		簡易モデル	
	偏回帰係数		偏回帰係数	
住宅種類	戸建	集合	戸建	集合
定数項 [MJ/日]	-2.7	3.06	3.41	2.28
平均気温 [°C]	0.3	0.174	0.3	0.17
定格内容積 [L]	0.0	0.01	—	—
カタログ値※ [kWh/月]	0.11	-0.09	—	—
重相関係数	0.90	0.87	0.71	0.80
分析対象世帯数	6	4	6	4
目的変数：1日当たり冷蔵庫エネルギー消費量 ※1月当り消費電力カタログ値（測定JISA法）				

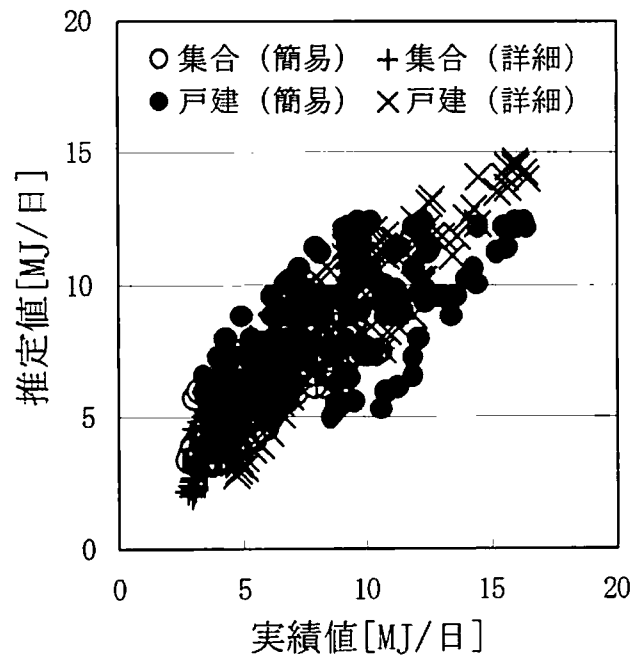


図 2.4.6 冷蔵庫用エネルギー消費

表2.4.5 テレビ用エネルギー消費の回帰分析結果

変数名 [単位]	詳細モデル	簡易モデル
	偏回帰係数	偏回帰係数
住宅種類	区分無し	区分無し
定数項 [MJ/日]	-0.84	0.908
世帯員数 [人]	0.374	0.524
1台目画面サイズ [インチ]	0.0931	—
TV所有台数-1 [台]	0.0942	—
重相関係数	0.68	0.54
分析対象世帯数	14	14
目的変数：1日当たりテレビエネルギー消費量		

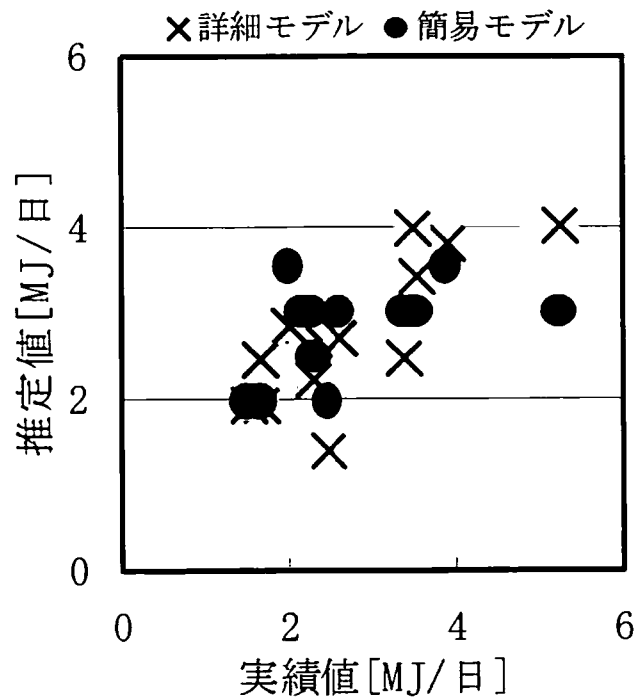


図2.4.7 テレビ用エネルギー消費

表2.4.6 厨房用エネルギー消費

単位：[MJ/日]

	厨房	
	戸建	集合
平均エネルギー消費量	14.1	5.84
標準偏差	5.3	1.9
分析対象世帯数	9	5
※有意な説明変数無し		

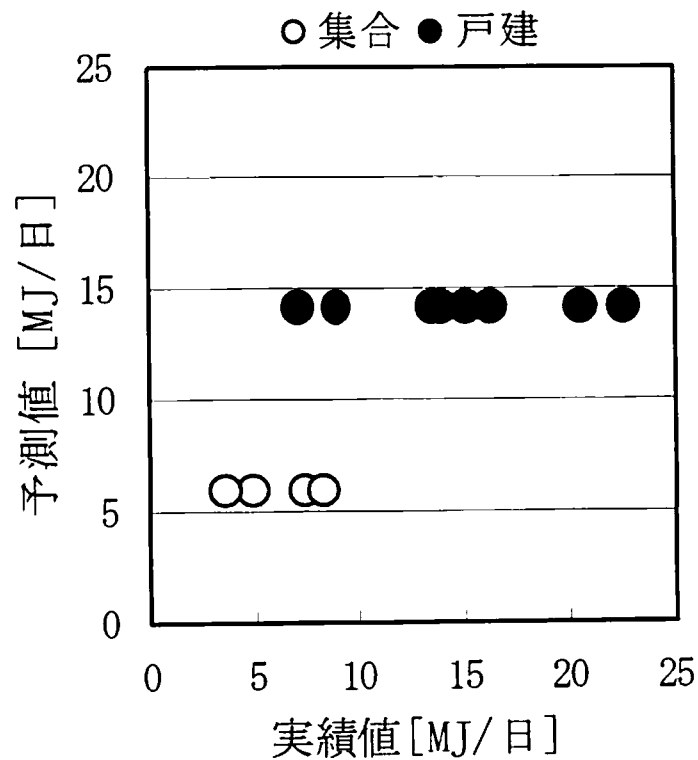


図2.4.8 厨房用エネルギー消費

表2.4.7 照明・コンセント用エネルギー消費

単位：[MJ/日]

	照明・コンセント	
	戸建	集合
平均エネルギー消費量	25.0	21.0
標準偏差	9.1	10.1
分析対象世帯数	6	5
※有意な説明変数無し		

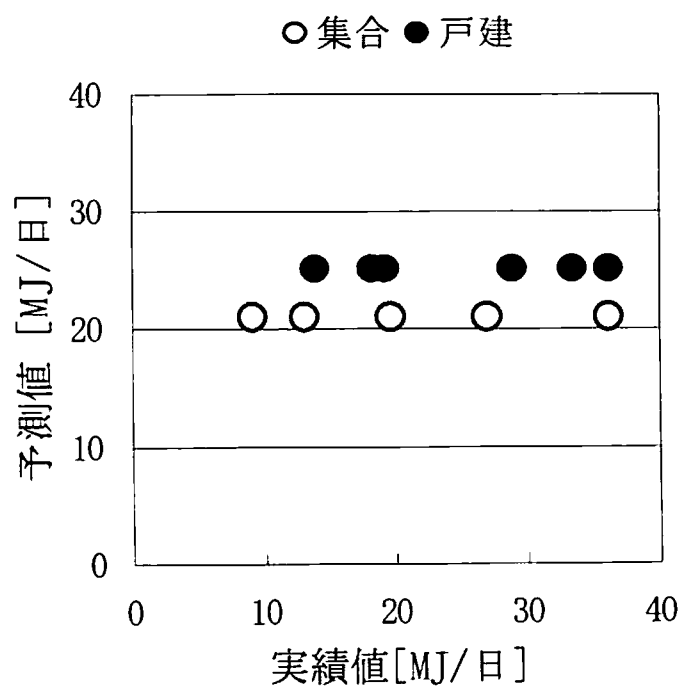


図2.4.9 照明・コンセント用エネルギー消費

2.4.3 重回帰モデルの精度検証

前項ではアンケート調査や統計資料を用いて、住宅のエネルギー需要の詳細モデルと簡易モデルを作成した。本項ではこの2つのモデルの予測精度を検討する。図2.4.10に住宅種別エネルギー消費量実績値と、簡易モデルによる推定値との関係を示す。詳細モデルについては実績値との重相関係数のみを記す。検証に用いた住宅は、暖房が電力のみの世帯と、燃焼系暖房器具のエネルギー消費量が特定できた世帯の計20世帯である。

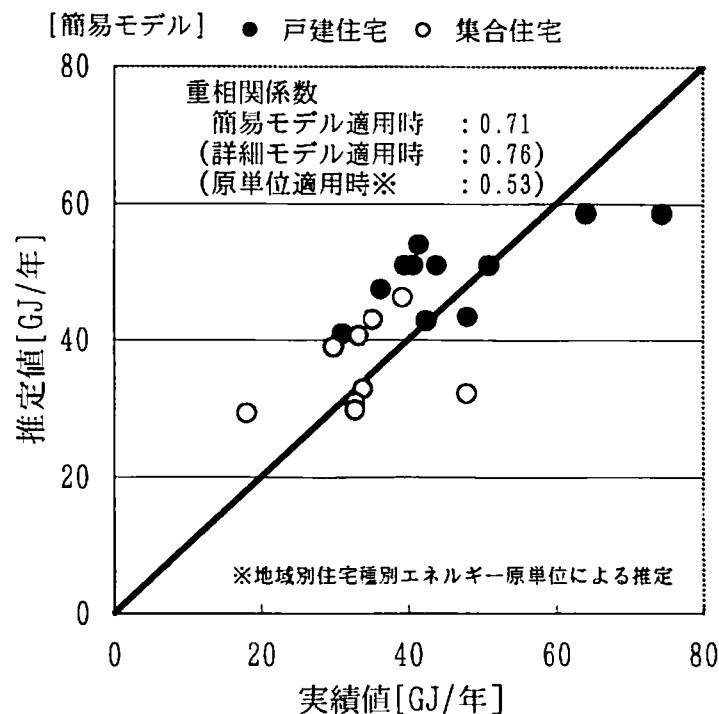


図2.4.10 世帯別エネルギー消費量実績値と簡易式による推定値

エネルギー消費実績値と簡易モデルとの重相関係数は0.71である。また詳細モデルの重相関係数は0.76である。また実績値と地域別住宅種別エネルギー消費原単位との重相関係数は0.53であるから、詳細モデルで0.23ポイント、簡易モデルでも0.18ポイント、住宅種別エネルギー消費原単位を用いた推定より精度が向上している。

実績値と簡易、詳細両モデルに見られる誤差のほとんどは給湯需要と暖房需要の推定誤差である。給湯需要と暖房需要が住宅のエネルギー需要の60～70%を占めるので、両用途の精度が飛躍的に向上する事が、モデルの精度向上の鍵となる。

また今回用いた手法では説明変数とそのエネルギー消費への影響量を全て線形と想定している。これは今回検討した変数については、全て非線形よりも線形の方がモデルの適合度が高かったためであるが、今回考慮できなかったライフスタイルを反映する要因の場合はエネルギー消費と非線形に関与している可能性もあり、今後モデルの非線形要素への対応も含めた改良が必要である。

本モデルの適用範囲であるが、我が国でもっとも人口の集積する東海地方、近畿地方、山陽・四国地方、九州地方（沖縄を除く）を想定している。これに対し北海道、東北地方などは冬期の気候が氷点下を下回るなどこれらの地域とは気候的に大きな差異がありエネルギー消費構造にも影響が出てくると予想される。今回提案したモデルをこれらの地域へ適用することはモデルの外挿にあたると判断されるので、適用は望ましくない。これらの地域については同様な計測調査を実施し、あらためてエネルギー消費構造モデルを作成すべきである。

2.5 まとめ

本研究では電気とガスのエネルギー消費量を実測し、使用用途別のエネルギー消費量を旬別に求めるとともに、そのエネルギー消費量の予測式として詳細モデルと簡易モデルの2つを作成した。このモデルを用いて統計データやアンケート調査結果から従来のマクロ手法よりも高い精度でエネルギー消費量を用途別に推測することが出来る。本モデルの特徴と課題は以下の通りである。

- 1) 詳細モデルはアンケート調査や統計資料を、簡易モデルは統計資料のみを使用して地域別住宅種別のエネルギー消費量を予測する事が出来る。
- 2) 簡易モデル、詳細モデルともに、住宅種別エネルギー消費原単位による推定よりも精度が高い。
- 3) 統計資料による制約が少なくなるので、既存統計のみで、都道府県や市町村といった地方公共団体レベルの予測が可能となる。
- 4) 今後は暖房需要と給湯需要の予測精度の向上が必要である。そのためにはライフスタイルなど、非線形な影響因子も取り扱えるようにモデルの改良が必要である。
- 5) 本モデルは首都圏以西の住宅のエネルギー需要推定に適している。今後は東北・北陸・北海道などの寒冷地域にも適用可能なモデルの開発が必要である。

〔注釈〕

注 1) エネルギー用途区分

冷暖房、テレビ、冷蔵庫、照明・コンセント、厨房、給湯の 6 区分を指す。なお厨房は、煮炊きコンロのエネルギー消費の事であり、炊飯器、ジャーポット等は照明・コンセントに含まれる。

なお冷暖房は、冷房と暖房に分けて記す場合がある。

注 2) “エネルギー消費原単位”と“エネルギー消費量”

エネルギー消費原単位：該当するカテゴリー毎のエネルギー消費の平均値を示す。

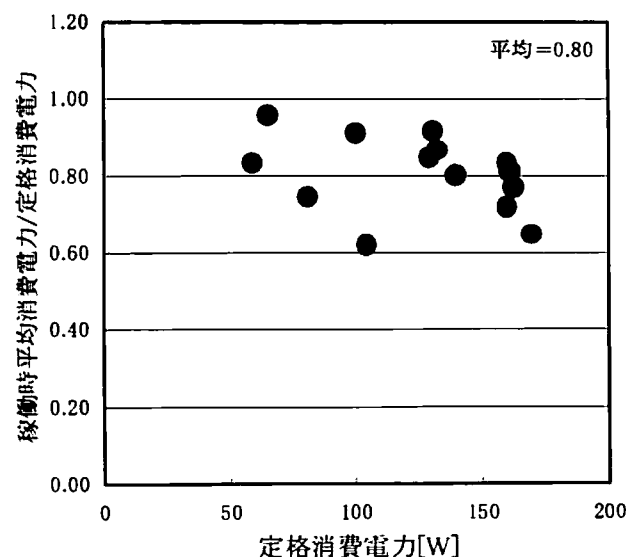
エネルギー消費量：世帯毎のエネルギー消費量を示す。

注 3) エネルギー消費量表示と熱量換算方法

エネルギーは全て熱量換算した値で示した。なお電力の熱量換算は、二次エネルギー換算値とした。

注 4) テレビの定格消費電力と実消費電力の関係

計測した 14 台のテレビの計測結果との稼働時の消費電力の関係を付図 2.1 に示す。稼働時の消費電力は定格消費電力の平均 80 % である。



付図2.1 テレビの定格消費電力と実消費電力の関係

注 5) 説明変数採用の危険率

統計学では危険率として 5 %ないし 1%を採用することが一般的である。しかし母集団の分散が大きい事が事前に明らかな場合はこの条件を緩和して 10%を使用する場合がある。これは危険率 5%, 1%という数値が慣例的な値で、理論的根拠によらないためである。家庭のエネルギー消費はライフスタイルや嗜好, 社会情勢等様々な要因に左右され, 母集団の分散が大きいと推測されるので, ここでは説明変数の採用時の危険率の基準を 10 %に緩和している。

注 6) 暖房熱源装置の熱効率の設定と熱負荷

暖房器具の機器効率を付表 2.1 に示す。暖房の熱負荷は暖房器具のエネルギー使用量に機器効率を乗して求めた。

付表 2.1 暖房器具の燃焼効率

暖房器具	機器効率	出典
燃焼型暖房器具	80%	19)
ヒートポンプエアコン	306%	15)

注 7) 冷蔵庫の消費電力カタログ値[kWh/月]

1993 年以前の、冷蔵庫の消費電力試験法 JIS C9607 (通称 A 法) による測定値を示す。1999 年 3 月以降の製品は JISC9801 (通称 C 法) による標記に変更となっている。

なお冷蔵庫の JISA 法による 1 月当たりの消費電力と、今回調査対象冷蔵庫の定格内容積との関係は、次式の通りである。

$$y = 4.75 + 0.0816 x \quad (\text{重相関係数}=0.90)$$

y : 消費電力カタログ値 (JISA 法) [kWh/月]

x : 定格内容積 [L]

注 8) テレビの画面サイズと定格消費電力の関係

調査対象 24 世帯について、テレビの消費電力を計測した結果テレビの画面サイズと定格消費電力との関係は次式が得られる。

$$y = -21.6 + 6.18 x \quad (\text{重相関係数}=0.90)$$

y : 定格消費電力 [w]

x : 画面サイズ [インチ]

【参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁:総合エネルギー統計 (平成 10 年版), 1999
- 2) 総合エネルギー調査会:需給部会中間報告, 1998
- 3) 洗元和:集合住宅における住戸属性と年間用途別エネルギー量の分析, 日本建築学会計画系論文集, No.445, pp.53-61, 1993.3
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構:民生部門エネルギー消費実態調査, 1988-1999
- 5) 長谷川兼一, 吉竹秋宣, 他 4:長野市を中心とした戸建住宅の居住環境データベースの活用ー断熱気密住宅におけるエネルギー消費量の実態ー, 日本建築学会計画系論文集, No.521, pp.95-101, 1999.7
- 6) 総務庁統計局:家計調査年報
- 7) 総務庁統計局:小売物価統計調査報告
- 8) 住環境計画研究所:家庭用エネルギー統計年報, 1983-1999
- 9) 三浦秀一:全国における住宅の用途別エネルギー消費と地域特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.510, pp.77-83, 1998
- 10) 三浦秀一:全国都道府県庁所在都市の住宅におけるエネルギー消費と CO2 排出量の推移に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.528, pp.75-82, 2000.2
- 11) (財) 省エネルギーセンター:家庭におけるライフスタイルの変化とエネルギー消費に関する実態調査研究報告書, 1997
- 12) 佐藤誠, 宇田川光弘:住棟セントラル暖房・給湯システムにおけるエネルギー消費量のシミュレーションによる検討, 日本建築学会計画系論文集, No.522, pp.75-82, 1999.8
- 13) 澤地孝男, 坊垣和明, 他 8:用途別エネルギー消費量原単位の算出と推定式の作成, 日本建築学会計画系論文集, No.462, pp.41-48, 1994.8
- 14) 林周三:統計学講義, 丸善(株), 1973
- 15) 住環境計画研究所:家庭用エネルギーハンドブック, (財) 省エネルギーセンター, 1999

- 16) Shin Yamagami, Hajime Nakamura, Alan Meier: Non-intrusive Sub metering of Residential Gas Appliances, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 1996.
- 17) (財) 日本気象協会: S D P ・気象官署の地上気象観測データ, 1996
- 18) 総務庁: 平成 10 年住宅・土地統計調査, 総務庁, 1999
- 19) 環境庁: 平成 8 年度地球温暖化対策技術評価調査 (民生部門) 報告書, 1997

第3章 首都圏における住宅用太陽光発電システムの発電状況

3.1 研究の目的

地球環境負荷を削減しつつ、持続的な発展をとげるために自然エネルギー利用への関心が高まっている。中でもPVシステムは国や地方公共団体等の導入支援策の実施や、価格の低下もあって、設置する住宅が年々増加している。またPVシステムは、日中に発電ピークがあるため、同時刻に需要ピークのある電力のピークカット効果の面で期待されている。

PVシステムの電力需要のピークカット効果や、環境負荷の削減効果を検討するには、全天日射量の変動要因や発電効率の変動要因を考慮しなければならない。全天日射量は気候要因や地形要因による地域的変動が大きく、加えて周辺の構造物や植生の影響も大きい。またPVシステムの発電効率は、日射光のスペクトル分布やパネルの汚れの影響を受けるほか、パネルの設置方法やパネル温度上昇の影響を受ける。またモジュールで発生した電力がインバータを経て交流に変換される際のロスなどもあり、PVシステムの発電量はこれら多くの要因が複合的に関わっている。

日照条件等の気候要因については、AMeDAS など気象データを基にした気象情報が整備されつつあり^{1)~4)}、地域性を考慮出来るようになってきている。一方PVシステムの発電特性に影響を与える外界要因、設置条件等に関する研究も行われている⁵⁾。またこれらの成果を踏まえ、コンピュータシミュレーションによって発電量を予測する研究^{6), 7)}も行われている。しかしこれらの研究は、単体のPVシステムの実測を基礎としており現実に設置・稼働している多数のPVシステムの実測を行って発電実態及び特性について検証した例は少ない。

そこで本章では首都圏の多種多様な設置条件におかれた住宅用PVシステムの発電実績を明らかにし、その発電特性の解析を行うとともに、二酸化炭素の排出量及び夏季電力ピーク発生時の戸建住宅の購入電力削減効果、PVシステムの単純投資回収年数を検討した。九州地区の住宅用PVシステムの発電状況については、第4章で報告する。

3.2 計測概要

3.2.1 計測システム

実測対象としたPVシステムは1997年度および1998年度に、クリーンエネルギー普及調査会と東京電力㈱が設置費用の一部を補助して設置した132件である。これらのシステムは、東京都および神奈川県内に設置されたもので、定格発電容量合計は412.3kWpである。このうち59件は発電量と電力会社への売電量、電力会社からの購入電力量を計測した（以下“簡易計測”）、残り73件はこの他に水平面全天日射量と太陽電池の裏面温度を計測した（以下“詳細計測”）。それぞれの計測項目と設置件数等を表3.2.1に、また計測ポイントと計測方法を図3.2.1に示す。

簡易計測は小型のデータロガーを各住宅の分電盤付近に設置し、半年に1回本体とデータを回収する。詳細計測は、データ収集用専用パソコンを住宅毎に設置し、内蔵モデムを経由して電話回線で毎日データサーバに回収する。詳細計測の太陽電池裏面温度の計測はT熱電対(0.3mmφ)を用いる。熱電対はPVモジュールの裏面にエポキシボンドで接着した後、アルミ箔テープで覆い放射の影響をカットする。水平面全天日射量の計測にはネオ日射計（波長範囲300～2800nm;総合精度±1.5%）を用いる。

発電量の評価には、水平面全天日射量から宇田川、木村の方法⁹⁾によりパネル面入射日射量を推定した値を用いる。水平面日射量を計測していない簡易計測ポイントでは、最も近い詳細計測ポイントと日照条件を同一と見なして分析を行う。最も近い詳細計測ポイントの日射量が欠測等により不良の場合は、次いで近い計測ポイントの順に採用する。3番目に近いポイントも欠測の場合は、最も近いAMeDASポイントの日照時間データから水平面日射量を推定する¹¹⁾。詳細計測システムで日射量データに欠測がある場合も簡易計測システムに準じ日射量を求める。

表3.2.1 計測システム概要

		詳細計測	簡易計測
計測項目	水平面全天日射量	○	×
	太陽電池裏面温度	○	×
	インバータ出力電力量 (発電量)	○	○
	系統供給電力量 (買電量)	○	○
	逆潮流電力量 (売電量)	○	○
記録間隔		1時間	1時間
データ計測回収方法		データ通信	ロガー回収
設置件数		72件	60件
	東京都	42件	21件
	神奈川県	30件	39件

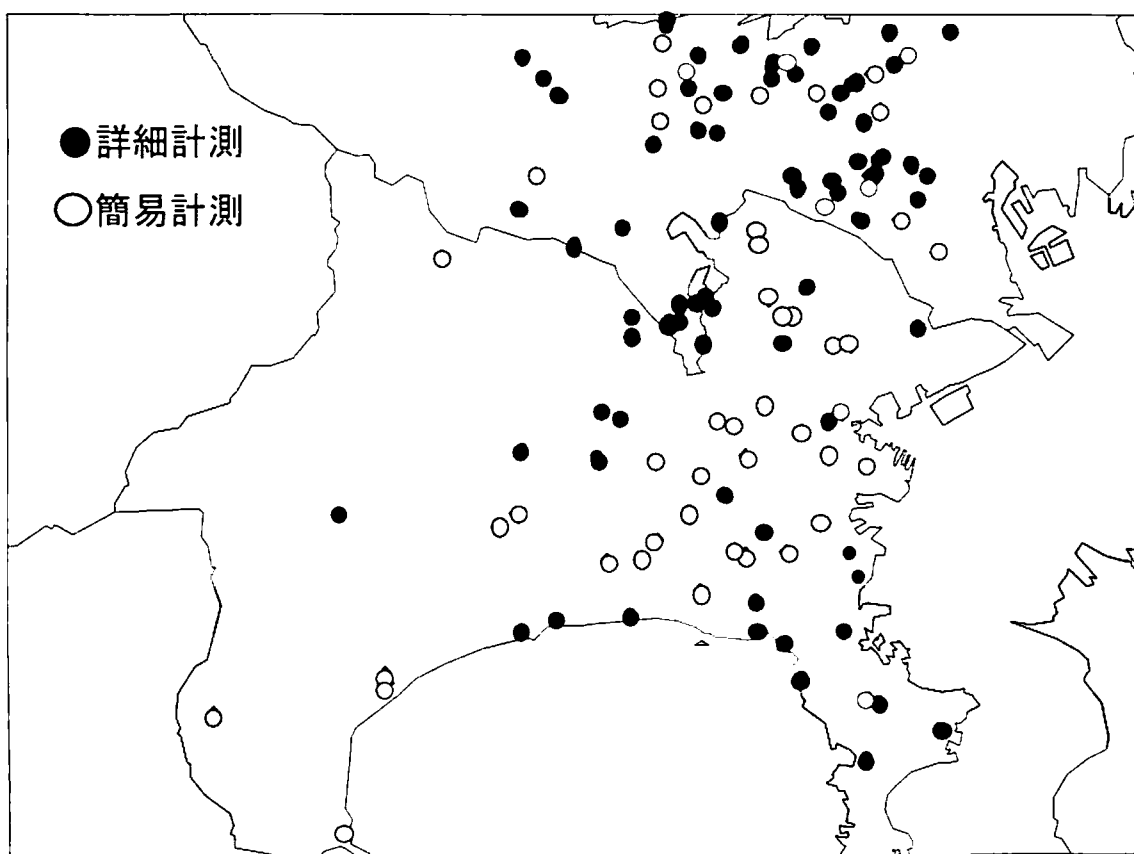


図3.2.1 計測対象住宅位置と計測方法

3.2.2 計測PVシステムの物理特性

PVモジュールの特性値を表 3.2.2 に示す。モジュールは単結晶タイプと多結晶タイプの2種類であるが、ほとんどが単結晶タイプで定格出力の合計が391.7kWp(全体の95%)、多結晶タイプが20.6kWp(全体の5%)である。変換効率は単結晶タイプが16～17%、多結晶タイプが14.8%である。

インバータの諸特性を表 3.2.3 に示す。インバータの定格容量は3.1～4.5kWで、定格時の変換効率は最低が90%で最大が96%である。パネル定格出力/インバータ定格容量は、平均0.78である。

表3.2.2 太陽電池モジュールの諸特性と設置容量

モジュール	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	C	D-1	D-2	E-1	E-2
公称最大出力W※	126	130	136	140	130	150	180	85	44	111	126	145
最大動作電流A	5.27	5.42	5.05	5.1	2.88	3.29	3.55	4.72	3.2	3.2	6.56	7.29
最大動作電圧V	23.9	24	26.9	27.5	45.1	45.6	50.7	18	16.8	34.8	19.2	19.9
設置件数	2	13	33	1	18	6	4	35	12	1	6	1
設置容量合計kWp	8.06	41.4	106	2.94	58.4	18	10.8	109	34.7	2.8	17.7	2.9
モジュール種類	単結晶										多結晶	

※測定条件：AM-1.5, 照射光強度1kW/m²,モジュール温度25℃

表3.2.3 インバータの諸特性

インバータ	Ai-1	Ai-2	Bi-1	Bi-2	Ci-1	Ci-2	Di	Ei
定格入力電圧V	200	200	202	202	200	200	202	202
定格出力kW	3.1	4.0	3.5	4.0	3.0	4.1	4.5	3.3
電力変換効率	90%	94%	93%	95%	94%	94%	95%	96%
設置件数	3	46	1	27	1	34	13	7

各パネルの傾斜方位ベクトルを、等角ステレオ投影法により、球面の下半球に投影した結果を図 3.2.2 に示す。この投影法では球の中心からパネルの傾斜方位ベクトルを伸ばし、下半球球面と交差する点を求め、この交点を水平面に再投影したものである。図の内円は、パネル傾斜角を示し、大円は傾斜角0度を示す。例えば南面30度に設置されたパネルは、傾斜角30度を示す内円とNS軸とのS軸寄りの交点に投影される。

パネルの設置方法は単面設置が132件中85件、複数面設置が47件である。パネル面は南向きが多く、ほぼ南向きと言えるS30°E～S30°W内の方位を示すパネルは244kWp(全体の59%)である。しかしほぼ北向きのパネルも8kWp(全体の2%)ある。パネル傾斜角の平均は25°である。一面設置は、ほぼ南向きと南東向きに集中しているが、西、及び東向きのパネルもある。複数面設置ではパネル方位は全方位に分散し、傾斜角は30°近辺に集中している。複数面設置のうち、ほぼ南北2面を向いたシステムが6件、ほぼ東西2面を向いたシステムが14件である。残り27件はそれ以外の方位を向いた組み合わせか、3面以上の組み合わせである。

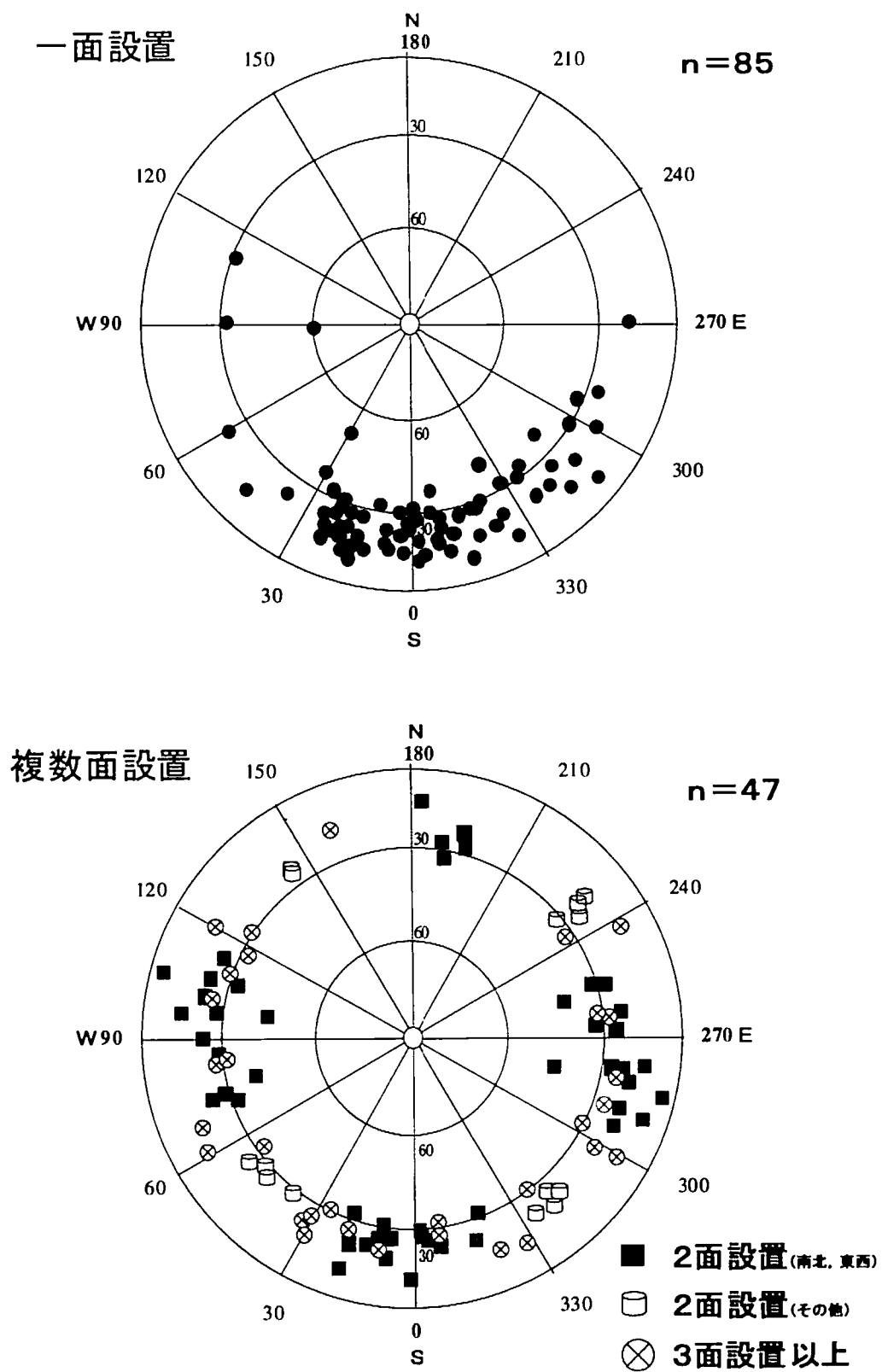


図3.2.2 パネル面方位のステレオ投影図（等角投影法，下半球投影）

3.3 計測結果

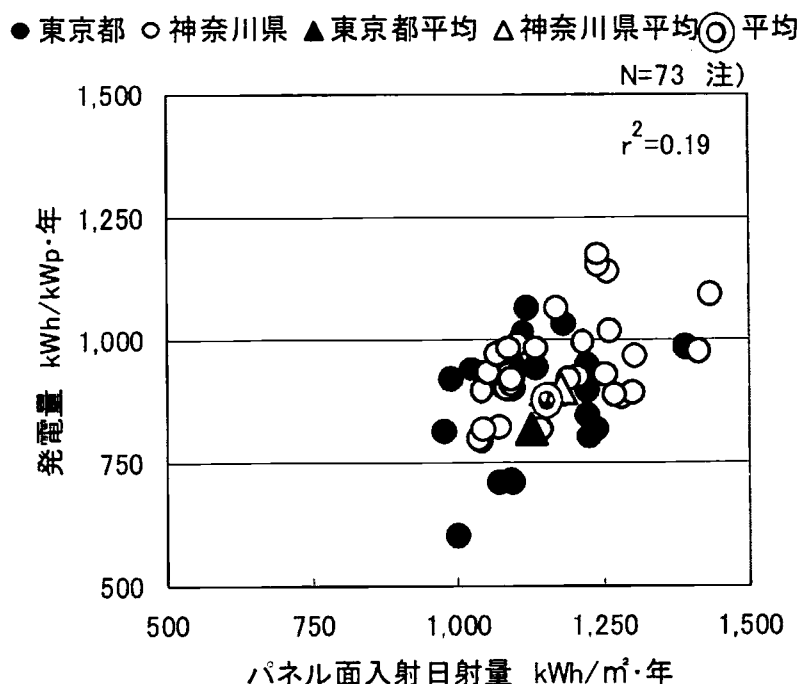
3.3.1 発電実績

計測期間中の発電実績を以下に記す。ここで発電量とは、インバータから出力後の交流電力の値である。

①年間発電実績

1998年10月から1999年9月まで1年間の計測で、発電データの欠測が年間10%以下であった73システムの1kWp当たりの積算発電実績とパネル面入射日射量を図3.3.1に示す。欠測データのある日の発電量及び平均パネル面入射日射量は、その月の平均値と同一と見なした。年間のパネル面入射日射量は $1,156\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{年}$ で、発電量の平均は $868\text{kWh}/\text{kWp}\cdot\text{年}$ である。都県別では、神奈川県のパネル面入射日射量は平均 $1,177\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{年}$ で発電量は平均 $901\text{kWh}/\text{kWp}\cdot\text{年}$ である。東京都はパネル面入射日射量 $1,126\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{年}$ で平均発電量は $818\text{kWh}/\text{kWp}\cdot\text{年}$ である。神奈川県は東京都よりもパネル面入射日射量で約10%、発電量で約5%大きい。

発電量はパネル面入射日射量との相関性は高いと予想されたが、図3.3.1を見ると年間パネル面入射日射量と年間発電量との決定係数は $r^2 = 0.19$ と小さい。発電量の決定因子が入射日射量以外にもありその影響が大きいことが示唆される。



注：データ欠測が10%以下のシステムのみ

図3.3.1 1kWp当たりの年間発電量とパネル面入射日射量

②月別発電実績

図 3.3.2 には全システムの月別の発電状況（1 日あたり平均発電量で示す。以下同じ）と全 P V システムの月別発電量の変動係数を示す。ここで変動係数とは、P V システム 1 ヶ月あたり発電量の標準偏差を全システムの 1 ヶ月当たりの平均発電量で除した値である。この変動係数はシステム毎の発電量のばらつきを評価する指標である。

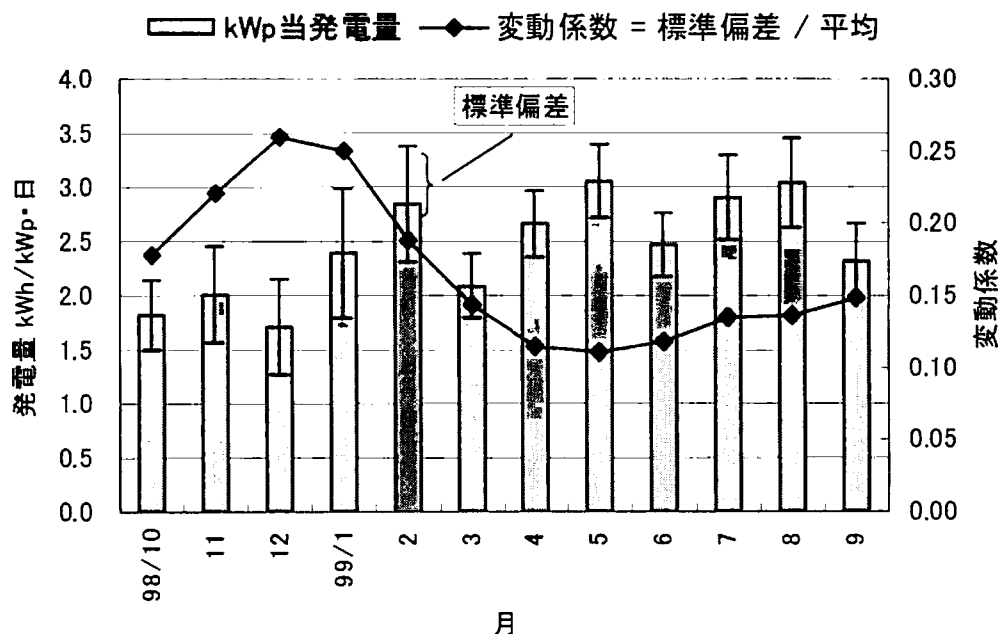


図3.3.2 月別1kWp当たり発電量実績と発電量の変動係数

発電量が最小の月は 12 月で 1.97kWh/kWp・日である。11 月から 1 月にかけての 3 ヶ月間は変動係数が最も大きくなる時期であるが、これは個々のシステムの発電効率の差異が大きくなるためである。この時期の個々のシステムの発電量は年間で上位の発電量を示すシステムもあるが最低を示すシステムもあり、平均すると年間で最も発電量が少ない時期である。中でも 12 月は変動係数は 0.26 と最大で、発電量は 1.7kWh/kWp・日と最低である。逆に発電量が大きな時期は変動係数が小さい月が多い。変動係数が小さいことは発電効率の個別差が小さい事を示している。発電量が最大となるのは 5 月と 8 月で 3.0kWh/kWp・日である。ついで 7 月と 2 月が約 2.9kWh/kWp・日と多い。変動係数は 5 月、8 月とも最低位に位置し、とくに 4 ～ 6 月の 3 ヶ月は、変動係数が最も小さい時期で、0.11 ～ 0.12 を示している。これは 12 月の変動係数の 1/2 以下である。発電量は 3 ヶ月平均で、2.7kWh/kWp・日である。発電量最大の 5 月と 8 月の発電量は最も少ない 12 月の 1.5 倍である。6 月の発電量が少ないのは、降雨の影響と考えられる。

冬季の変動係数が大きいのは、この時期の太陽高度が低いために周囲の構築物や植栽による日射遮蔽の影響を受けるシステムが多いためと考えられる。また多面設置の場合は、設置形態によっては、各面の日照条件にアンバランスが生じ、回路内の抵抗が増大することで、発電量が減少すると考えられる。太陽高度の高い夏季は各面に均等に日射が当たる

時間が多いため、変動係数が小さくなると考えられる。しかし夏季の 1kWp 当たり発電量が 5 月と同程度であるのは、外気温が高いためモジュール温が上昇し発電効率が低下するためである。夏季の変動係数が小さいのは、太陽高度が高く、周囲の構造物や植生の影響も小さいため、多面設置でも日射量にパネル間の差が小さい事が原因と考えられる。発電量が大きくなるのは、入射日射量が多いためである。しかし夏季は外気温が高いためパネルは冷却しにくく、長時間の日照によりパネル温度が高温に達するので発電効率が低下するものと考えられる。

③日射量と発電量の関係

図 3.3.3 に発電量の最も少ない 98 年 12 月と、発電量の最も多い 99 年 5 月の一面設置のパネル面入射日射量と発電量の関係を示す。各月とも日射量と発電量は相関性は良いが、発電量の多い 5 月の 1kWp 当たり発電量は単位面積当たりパネル面入射日射量に 0.70 ($r^2 = 0.96$) を乗じた値となっている。発電量の最も少ない 98 年 12 月の 1kWp 当たり発電量は、単位面積当たりパネル面入射日射量に 0.90 ($r^2 = 0.90$) を乗じた値である。

このようにパネル面日射量と発電量の関係には季節変動が認められる。この原因は季節により外気温の変動がパネル温度の上昇率に影響する事と、複数面設置の場合にはこれに加え、パネル内での日射量のアンバランスの発生も主な原因と考えられる。

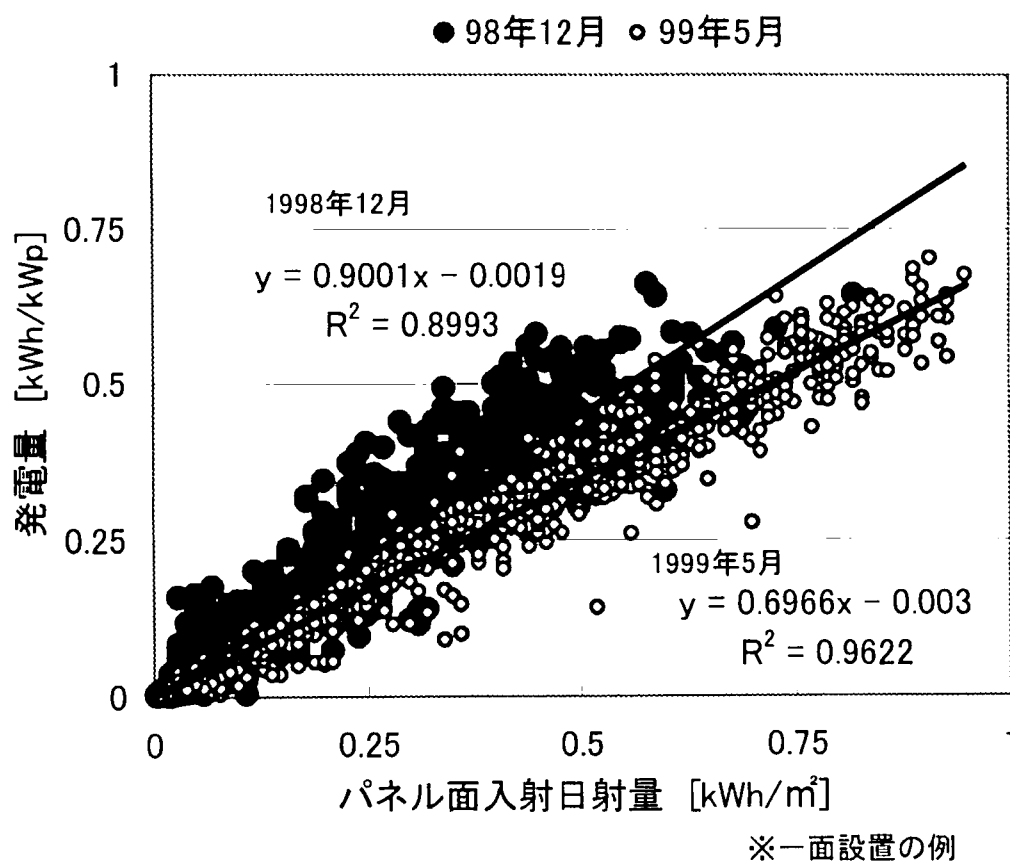


図3.3.3 パネル面入射日射量と発電量

3.3.2 発電効率

PVシステムの発電効率は、パネル面入射日射量当たりの発電量で示すことが出来るが、ここでは発電効率を評価する方法として、システム出力係数 k （以下” k 値”）を用いる。

k 値は式(3.3.1)式で定義され^{2), 10)}、基準状態の太陽光発電パネルの発電効率を1としたときの、現実のPVシステムの発電効率との相対値である。

$$k = \frac{E_p}{P_{AS} \cdot \frac{H_A}{G_s}} \quad (3.3.1)$$

E_p : システム出力電力量[kW]

P_{AS} : 基準状態におけるPVシステムの定格出力[kW]

H_A : パネル面入射日射量[kW/m²]

G_s : 基準日射量[kW/m²]

① k 値の月別変化

図 3.3.4 に k 値とパネル面入射日射量の月別平均値の推移を示す。 k 値が最も大きいのは冬季であるが、これは図 3.3.2 の月別発電量の変動係数が大きく、発電量が少ない時期とほぼ一致する。中でも1月は k 値が最大で $k=0.91$ である。夏季は k 値が最も小さくなる時期で6～8月は $k=0.70$ である。この値は冬季よりも約20%小さい。しかし夏季の変動係数は冬季よりも小さく発電量が多い。変動係数が最も小さい4、5月の k 値も夏季に準じて小さく、発電量は夏季に準じて大きい。一方冬季は、 k 値が年間を通して最大で、発電量は年間で上位を占める月もある。

図 3.3.5 には、1月と5月、8月のシステム毎、月平均 k 値の頻度割合と平均発電量、変動係数を示す。 k 値の平均が最も大きい1月は、 $k=0.90$ 以上のシステムが51%を占める。これに対し k 値が小さい5月、8月は $k=0.90$ 以上のシステムはみられない。1月は k 値の小さいシステムは少なく $k=0.60$ 以下のシステムは全体の5%である。これに対し、8月は19%と1月の約4倍である。

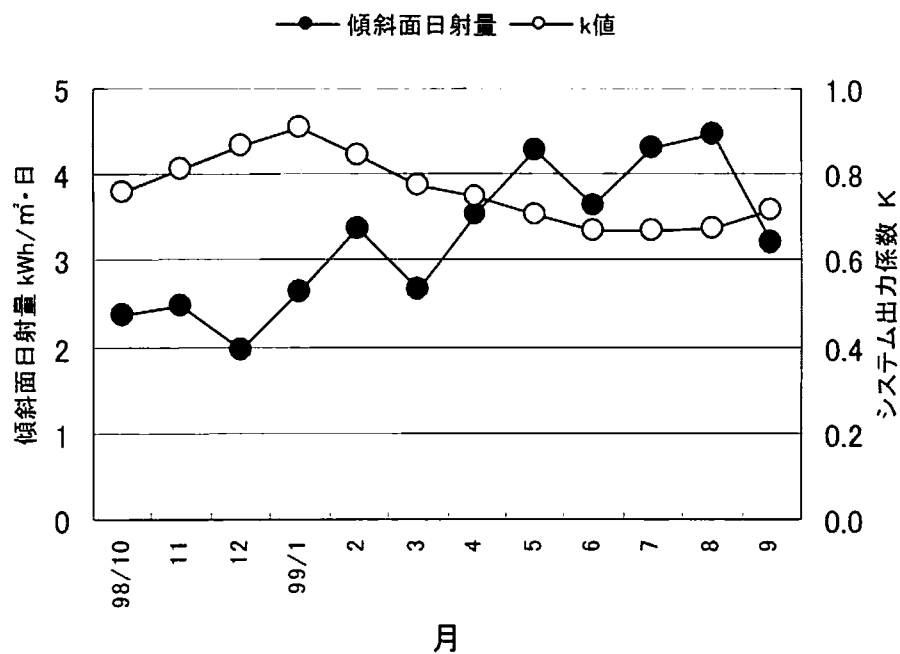


図3.3.4 月別発電実績とパネル面入射日射量およびk値の変化

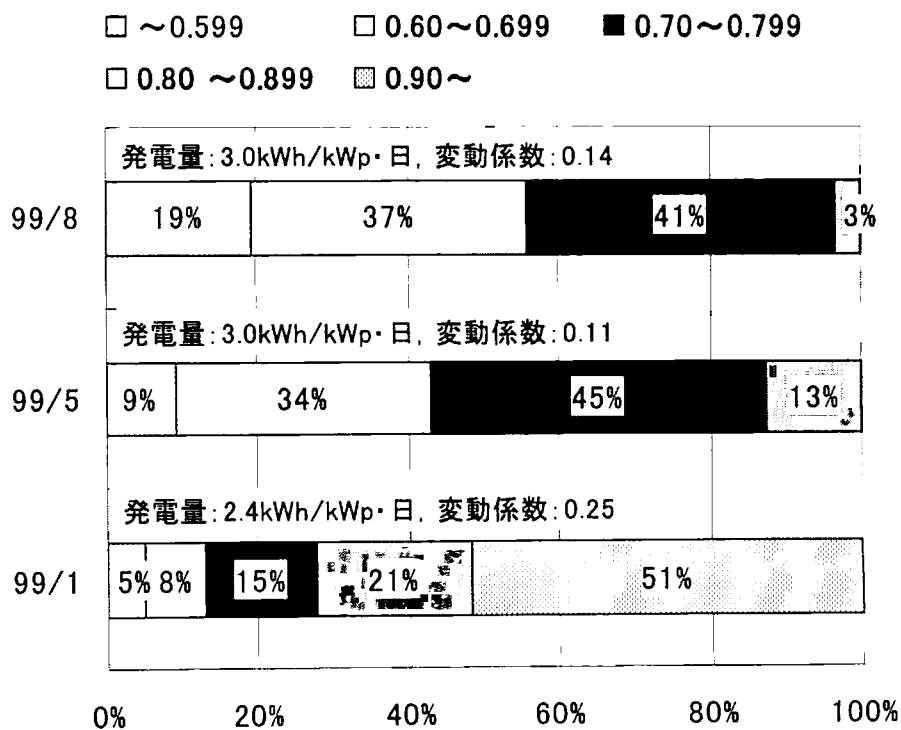


図3.3.5 システム別月平均k値の割合

②時間帯別パネル裏面温度と k 値

結晶系P Vシステムの発電効率は、パネル温度上昇に伴い、低下することが知られている。冬期の k 値がその他の季節よりも大きいのは、このパネル温度が低い事が大きな原因と考えられる。

一面設置のP Vシステムについて月別時間別裏面温度と k 値平均値の推移を図 3.3.6 に示す。1月は、10～15時の時間帯で k 値が0.9以上を示し、5月の0.78、8月の0.75に比べて20%以上も大きい。パネル裏面温度は、1月の10時～15時の平均は25℃～30℃であるが、5月は30℃～40℃、8月は50℃近い値を示す。

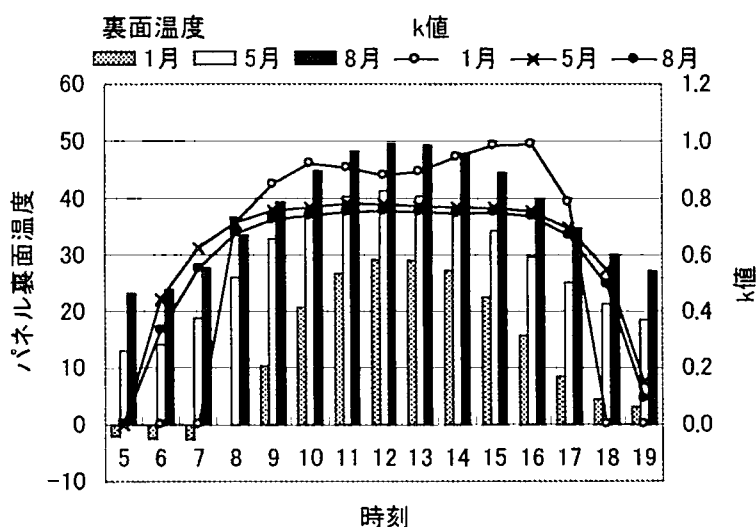


図3.3.6 月別時間別 k 値・パネル裏面温度の図

③パネル面入射日射量とパネル裏面温度と k 値

図 3.3.7 にパネル面入射日射量、パネル裏面温度、 k 値 3 要素の関係を示す。3つの日射帯に分けて示したのは、パネル裏面温度の日射量依存性を明瞭に示すためである。 k 値は何れのパネル面入射日射量でも $k=0.7 \sim 0.8$ に最頻値があり、1kWp 当たり発電量は、単位パネル面積入射日射量に 0.75 を乗ずれば、ほぼ予測可能である。しかし日射量が小さいほど k 値の変動は大きいため、予測精度は悪化する。パネル面入射日射量 200 ～ 299Wh/m²・h では、 $k=0.2 \sim 1.5$ と大きく変動する。800 ～ 899Wh/m²・h 以上では、 $k=0.5 \sim 0.9$ にほぼ集中する。パネル裏面温度はパネル面入射日射量が 800Wh/m²・h 以上では、50℃前後が最も多いが、80℃を越える事もある。しかし冬季には 30℃以下になる場合もある。一方パネル面入射日射量が 200 ～ 299Wh/m²・h では、パネル裏面温度は 20 ～ 30℃がもっとも多いが、夏季には 50℃程度まで上昇し、冬季は 0℃前後まで下がる事もある。

裏面温度上昇により k 値が低下する傾向は、パネル面入射日射量が大きくなるほど明瞭になる。パネル面入射日射量が 800Wh/m²・h 以上では、裏面温度が高くなると k 値が小さくなる傾向が若干みられる。日射量が小さいと、 k 値は裏面温度との依存性が小さくなり他の因子の影響を強く受けようになると思われる。

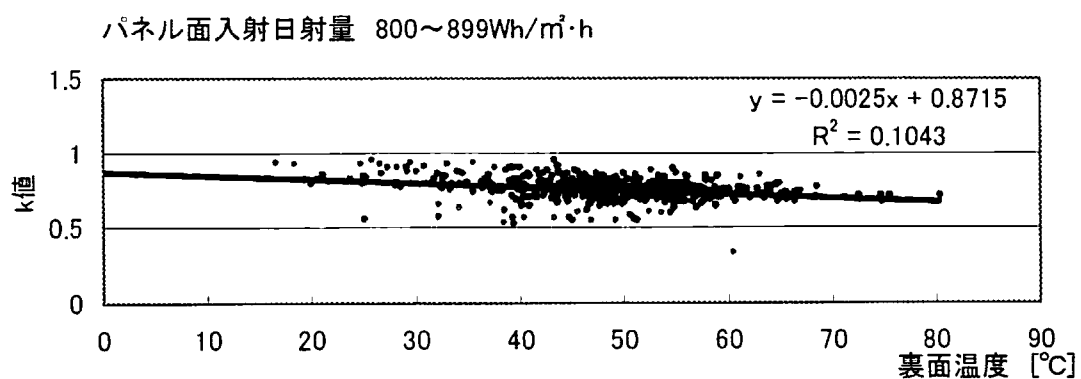
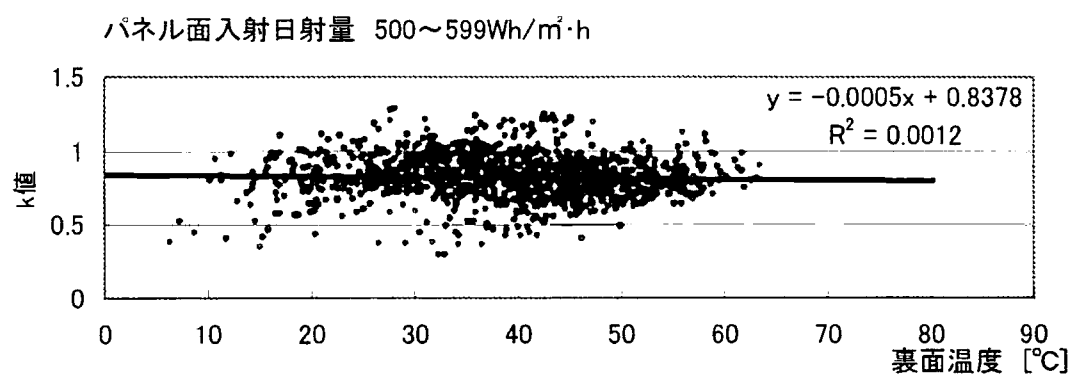
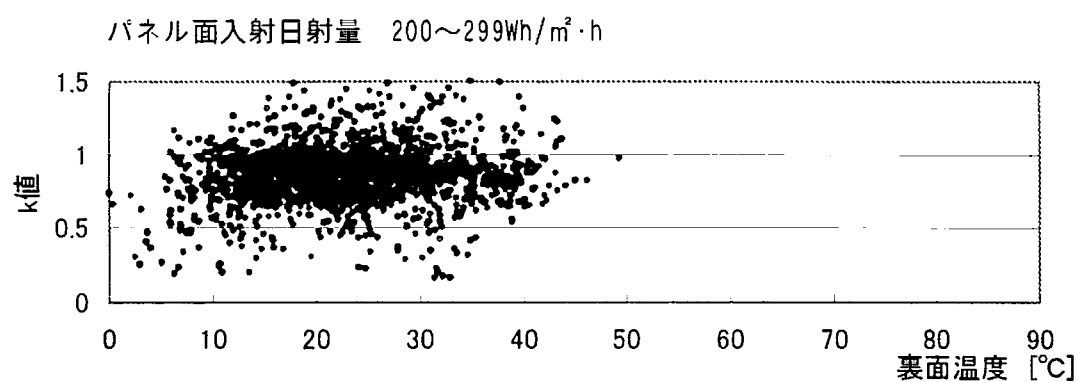


図3.3.7 裏面温度と k 値の散布図

④パネルの設置方法と k 値

パネルを一面設置した場合と、多面設置の場合の月別の k 値を図 3.3.8 に示す。月別にみると、太陽高度の低い冬期に多面設置（南北）及び同（東西）の k 値が一面設置および多面設置（その他）よりも低い。結果として年間 k 値は一面設置が最大で 0.74 と最も大きく、次いで多面設置（その他）が 0.73、多面設置（南北）及び同（東西）はそれぞれ 0.69 と 0.70 と最も小さい。

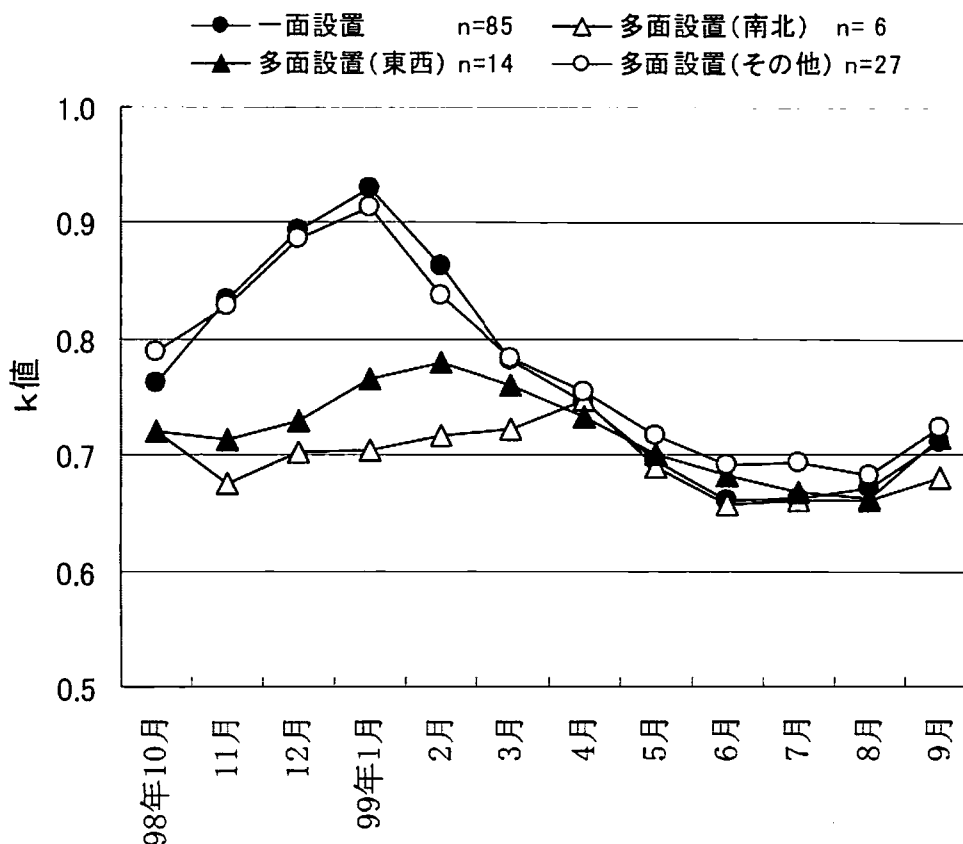


図3.3.8 パネル配置と月別 k 値

特に多面設置（南北）及び同（東西）の k 値が小さいのは冬季である。これは太陽高度が低いためパネル日射量にアンバランスが発生するためと考えられる。一面設置では、部分影の存在を除けば、パネル間日射量のアンバランスの影響は考えにくい。多面設置（その他）のシステムの k 値が冬季も一面設置並に大きいのは、パネルに真北方向がないこと、各面の方位が、各システムで最も日照条件の良い面を中心に左右 90 度しか振れていないことから、パネル間日射量アンバランスが小さく損失が少ないためと考えられる。

3.4 発電効率変動要因の検討

PV システムの発電効率の変動要因としては数多く考えられるが、ここでは効率変化をパネル温度（パネル裏面温度）変化と、その他要因との複合による影響の2つに分けて検討する。その他要因には、直流回路の I - V カーブ特性による損失、インバータ回路の DC/AC 変換効率、また一部のセルが日陰になることによるモジュール内に発生する抵抗の影響などが考えられる。解析対象は、多面設置のパネル間日射量アンバランスの影響を排除するため一面設置の PV システムとし、パネル温度の影響を考慮するため詳細計測対象システムとする。

パネル裏面温度 T による効率変化を温度補正係数 k_T （以下 k_T 値）、その他要因の複合による効率の変化を複合補正係数 k_{oth} （以下 k_{oth} 値）とすると

$$E_p = k \cdot \frac{H_A}{G_s} \cdot P_{AS} = k_T \cdot k_{oth} \cdot \frac{H_A}{G_s} \cdot P_{AS} \quad (3.4.1)$$

E_p : システム出力電力量[kW]

P_{AS} : 基準状態における PV システムの定格出力[kW]

H_A : パネル面入射日射量[kW/m²]

G_s : 基準日射量[kW/m²]

と記すことができる。本節ではこの k_T 値及び k_{oth} 値の値を求める。

3.4.1 温度補正係数 k_T

裏面温度 T と k 値の関係を図 3.4.1 に示す。この図は裏面温度を 1℃幅で区切り、その平均発電量と平均日射量を用いて (3.3.1) 式から k 値を求めたものである。パネル裏面温度 30～60℃までは、裏面温度 1℃の低下に伴い k 値の上昇が認められ式 (3.4.2) で近似される。

$$k = 0.8211 + 0.0023 \times (25 - T) \quad (r^2 = 0.9377) \quad (3.4.2)$$

T : パネル裏面温度 [℃]

なお、パネル温度 25℃の時 $k_T = 1$ となるよう (3.4.2) 式を正規化すると (3.4.3) 式が得られる。

$$k_T = 1 + 0.0028(25 - T) \quad (3.4.3)$$

つまり k 値はパネル裏面温度 T の関数であり、裏面温度 1℃上昇により PV システムの総合発電効率は 0.28% 低下する。

3.4.2 複合補正係数 k_{coh}

図 3.4.1 では 30℃以下の裏面温度では、(3.4.2)式と異なり k 値は温度とともに減少する傾向がみられた。この原因はインバータの DC/AC 変換効率の特性に関係すると思われる。

k_{coh} 値はインバータの DC/AC 変換効率の関数と考えられる。インバータの DC/AC 変換効率は、 E_d/W_{inv} と示すことができ、これをインバータ負荷係数 l_{inv} とすると

$$\frac{E_d}{W_{inv}} \equiv l_{inv} = f\left[\frac{E_0}{W_{inv}}\right] \quad (3.4.4)$$

E_d : 直流発電電力量[kW]

E_0 : 定格時発電電力量[kW]

W_{inv} : インバータ定格容量 [kW]

と記すことができる。この E_0/W_{inv} を用いて

$$\frac{E_0}{W_{inv}} = l'_{inv} \quad (3.4.5)$$

として、式 (3.4.3) と式(3.4.5) により k_{coh} 値と l'_{inv} 値の関係を求めた結果を図 3.4.2 に示す。

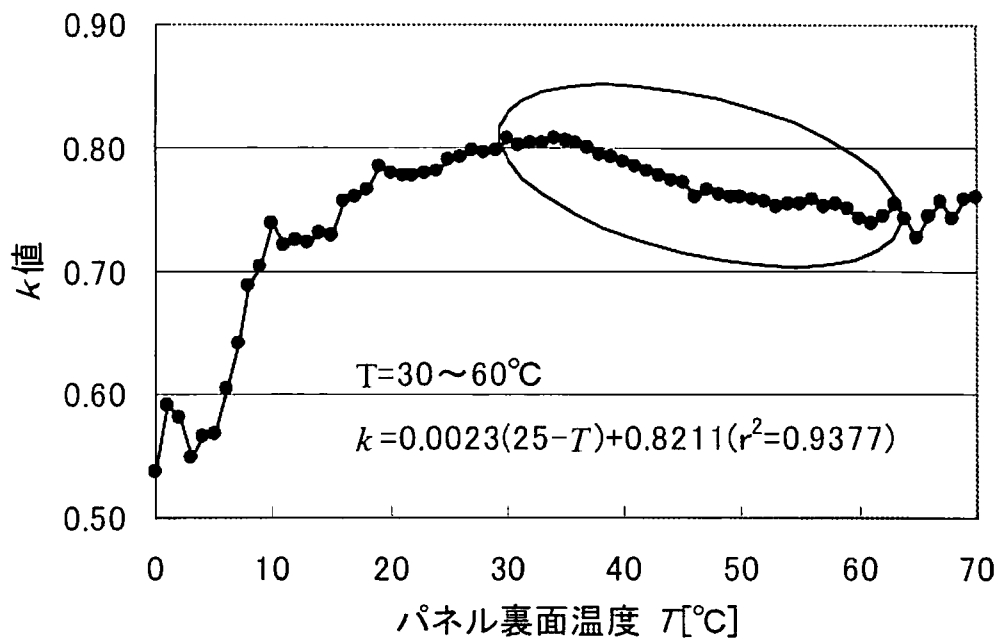


図3.4.1 裏面温度別 k 値

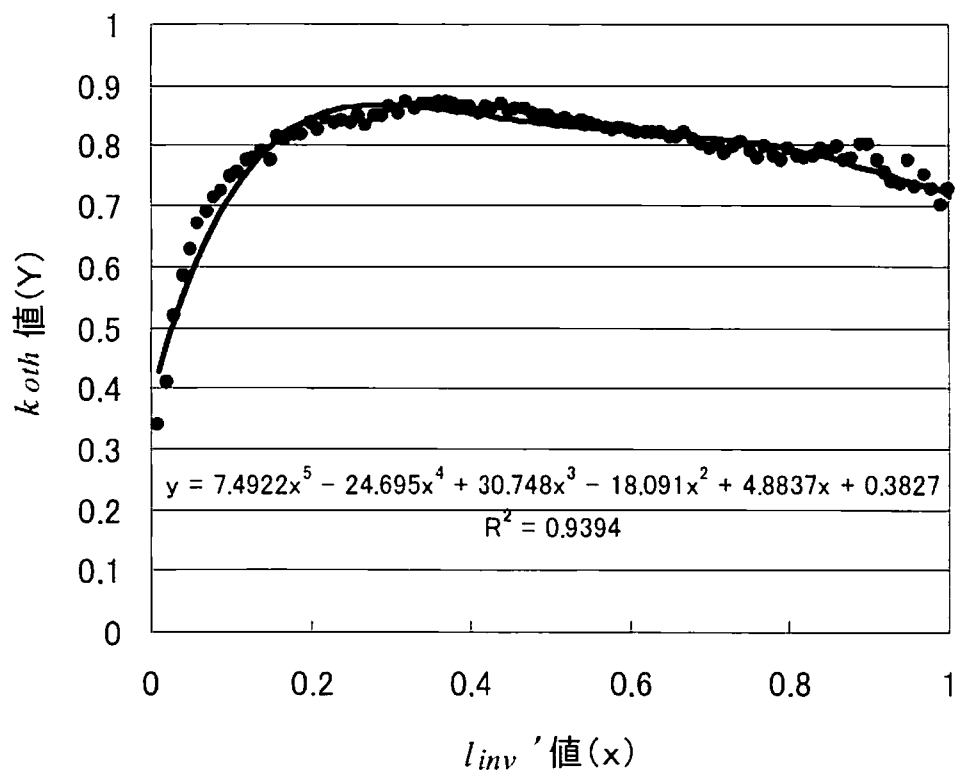


図3.4.2 l_{inv} 値と k_{oth} 値の関係

この図は計測値毎に I'_{inv} 値と k_{oht} 値を求めた後、 I'_{inv} 値を 0.01 刻みで層分けし、 k_{oht} 値の平均を求めたものである。 I'_{inv} 値が 0.2 付近で k_{oht} 値が急変するが、これは k 値の場合と同様にインバータの DC/AC の変換効率の急変の影響が大きい。図 3.4.2 と (3.4.1) 式と (3.4.3) 式より発電量 E_p の予測式 (3.4.6) が求められる。

$$E_p = k_{oht} \cdot [1 + 0.0028 \cdot (25 - T)] \cdot \frac{H_A}{G_s} \cdot P_{AS} \quad (3.4.6)$$

ただし

$$k_{oht} = 7.492 I'^5_{inv} - 24.695 I'^4_{inv} + 30.748 I'^3_{inv} - 18.091 I'^2_{inv} + 4.884 I'_{inv} + 0.383 \quad (3.4.7)$$

である。

この式 (3.4.6) 式を用いて発電量を予測した結果と実測値との関係を図 3.4.3 に示す。この時の決定係数は $r^2 = 0.93$ である。

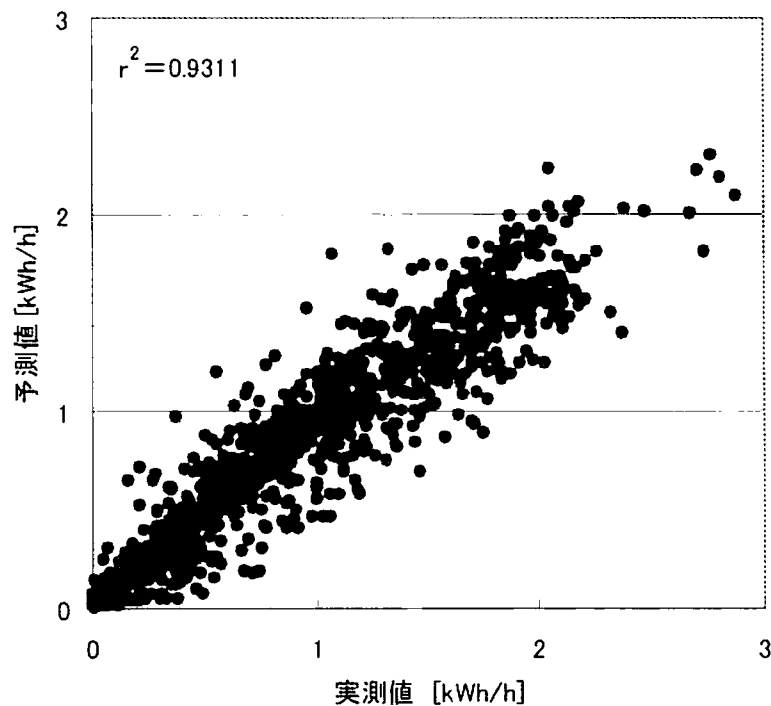


図3.4.3 予測値の精度

3.5 PVシステム導入による電力需要削減効果と経済性

3.5.1 電力及び二酸化炭素削減効果

1 都3県（以下“首都圏”）の戸建住宅の年間消費電力と、PVシステム設置世帯の年間平均消費電力及び3kWpのPVシステムの発電可能量を表3.5.1に示す。首都圏戸建住宅の消費電力は、第2章の首都圏の住宅のエネルギー消費実態調査による。PVシステム設置世帯の消費電力は、インバータ出力電力と系統供給電力量の合計から逆潮流電力量を減じて求めた。PVシステムの発電可能量と二酸化炭素削減量は、今回の調査の実績値である。首都圏戸建住宅の年間消費電力は5,032kWh/年・世帯である。PVシステム設置世帯は東京都が6,981kWh/年・世帯、神奈川県で5,387kWh/年・世帯とともに首都圏平均よりも大きい。これはPVシステム設置世帯の年収が1000万円以上が54%（関東地方平均年収723.8万円¹¹⁾）、平均世帯員数4.1人（関東地方平均2.1人¹²⁾）と高収入、大家族のためと思われる。

表3.5.1 戸建住宅の年間消費電力と3kWp相当発電量

		P Vシステム設置世帯		首都圏
		東京都	神奈川県	
A：消費電力（1世帯平均）		6981 kWh/年	5387 kWh/年	5032 kWh/年
B：発電量（3kWp相当）※		2454 kWh/年	2703 kWh/年	2604 kWh/年
二酸化炭素排出量	全電源代替	240 kg	265 kg	-255 kg
	火力発電所代替	461 kg	508 kg	-490 kg
A - B		4527 kWh/年	2684 kWh/年	2428 kWh/年

※計測実績値より

図3.3.1より3.0kWpのPVシステムの発電可能量は2,604kWh/年で、これは首都圏の戸建住宅の消費電力の52%にあたる。二酸化炭素の削減効果は全電源を代替する場合は1kWh当たり0.098kg-C/kWh、火力発電所を代替する場合は0.188kg-C/kWh¹³⁾であるから、PVシステム設置により全電源代替で255kg-C/年、火力発電所を代替で133kg-C/年の削減となる。

首都圏のPVシステムの潜在的な導入可能量を戸建住宅総数¹⁴⁾の30%²⁾とすると、首都圏では158万戸の住宅で導入可能で、474万kWpのPVシステムの設置が期待できる。この値は2010年までの我が国のPVシステム導入目標482万kWp¹⁵⁾の約98%である。また削減される二酸化炭素は40万t-C/年で、これは政府が計画している民生部門の2010年の削減目標1900万t-C/年¹⁶⁾の2.1%に相当する。

1999年東京電力管内で電力需要の最大を記録したのは、9月1日15時¹⁾である。図3.5.1には、第2章の住宅のエネルギー消費実測調査で計測した9世帯の9月上旬における平均電力負荷カーブと、今回の計測で得られた1999年9月1日の発電実績を3kWpのPVシステムの発電カーブに換算した値を示す。15時の戸建住宅の電力需要は0.48kWh/hであり、その時刻の発電量は1.17kWh/hが期待されピーク発生時にもPVシステムからの逆潮流は0.69kWh/h期待できる。

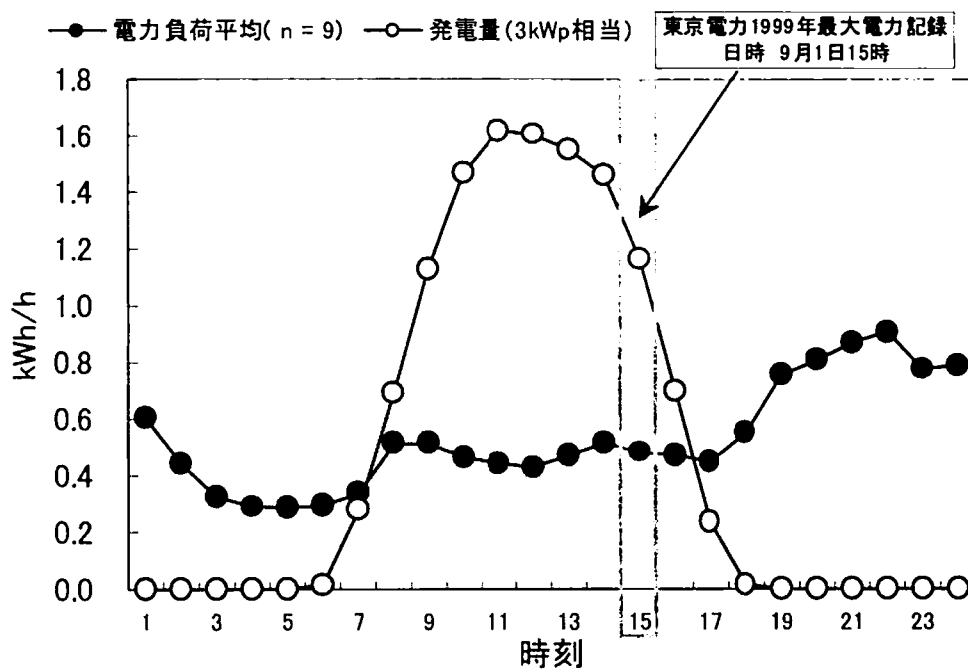
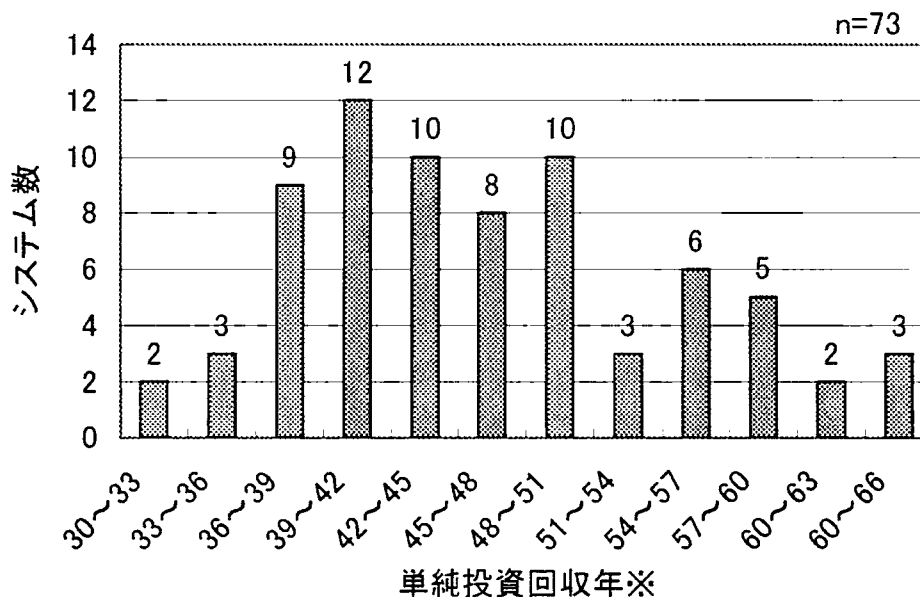


図3.5.1 1999年夏季最大電力発生日の発電電力期待値と同時期の住宅の平均電力需要

3.5.2 P Vシステムの単純投資回収年数

図 3.3.1 で示した 73 の P V システムについて、設置工事費と設備購入費を含むコスト（以下”設置コスト”）と発電実績から、P V システム毎に単純投資回収年数を計算した結果を頻度分布で、図 3.5.2 に示す。73 システムの設置コストは平均 1kWp 当たり 105.3 万円である。発電量は図 3.3.1 の各システムの発電実績を用いた。設置助成金と設置費用に関わる金利の支出は無いものとし、電力会社の余剰電力買い取り価格と電力販売価格は 1999 年 9 月現在の電気供給約款のままとした。これによると P V システムの発電による電気料金の節減額は 1 システム当たり年間 4 ～ 8 万円であり、単純投資回収年数は平均 45 年である。最頻値は 39 ～ 42 年で、最長期間は 66 年である。最短期間は 31 年であるが、35 年以下のシステムは、設置コストが部材費のみで、自前で取り付け工事を行ったシステムである。太陽電池パネルのメーカー出力保証期間は 10 年、期待寿命は 20 ～ 30 年であり、この結果からはいずれのシステムも発電だけで投資回収は出来無いことがわかる。



※前提条件：金利無し、助成金無し、購入価格：実績値（設置時期1997～1998年）

図3.5.2 住宅用 P V システムの単純投資回収年数

3.6 まとめ

本研究では、首都圏の住宅に設置されたPVシステム 132 件について、1988 年 10 月から 1999 年 9 月までの 1 年間の発電量、日射量等を計測するとともに、発電効率への影響因子について検討し、また首都圏の戸建住宅平均の電力消費から PV システムの単純投資回収年数を検討した。この結果は以下の通りである。

- ① PVシステムの発電効率は、一面設置の発電効率が最も大きく、システム出力係数 k で示すと $k=0.74$ である。一方南北、東西の 2 面に設置された PV システムは約 0.70 である。一面設置は冬季の k 値が最も大きく、夏季よりも約 20 % 小さい。多面設置は、南北または東西に向き合った 2 面のシステムでは k 値が一面設置よりも約 20 % 小さくなるが、夏季は一面設置とほぼ同じ k 値を示す。
- ② 太陽光発電システムの発電量の変動指標として、パネル裏面温度補正係数 k_r 値と複合補正係数 k_{mh} 値を求めた。 k_r 値は、パネル裏面温度 T の関数で、 T の 1°C 上昇により発電効率が 0.28 % 低下する。また k_{mh} 値はその他要因の複合であり、インバータ負荷係数 I'_{inv} の 5 次式で近似でき、 I'_{inv} 値が 0.2 付近で急変し、 k 値も低下する。発電効率の季節変動は、パネル温度や I'_{inv} 値を説明変数として説明できる。
- ③ 首都圏の戸建住宅に 3kWp の PV システムを導入する事により 1999 年では 2,604kWh/年の発電が期待でき、二酸化炭素排出量の削減効果は、255kg/年である。もし首都圏で 30 % の戸建住宅に 3.0kWp の PV システムを設置できれば、その二酸化炭素削減量は、民生部門の削減目標の 2.1 % に相当する。
- ④ 1997 年と 1998 年の設置コストから計算した PV システムの単純投資回収年数は、電力会社の余剰電力買い取り価格と電力販売価格を現状のままとした場合平均 45 年かかる。条件の悪いシステムでは 60 年以上かかる場合もある。

【参考文献】

- 1) 西川邦彦, 斉藤郁夫, 石原修: 自然エネルギーの活用のための気象データの整備と気候マップの作成, 日本建築学会計画系論文集, No.509, pp.15-20, 1998.7
- 2) 太陽光発電技術研究組合: 太陽光発電評価の調査研究, NEDO, 1998
- 3) 赤坂裕: 建築環境設計への AMeDAS の応用その 1 目的・現状と今後の課題, 日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会第 27 回熱シンポジウム, pp.1-8, 1997
- 4) 赤林伸一, 坂口淳, 田村優佳: 東北地方を対象とした太陽光発電の地域特性に関するシミュレーション, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), pp.465-466, 1997
- 5) 小林誠, 谷辰夫: 環境因子の変化に対する太陽電池モジュールの出力特性, 太陽エネルギー, Vol.19, No.4, pp.39-46, 1993
- 6) 松川洋ほか 4 名: 太陽電池を複数の方位角および傾斜角に設置した太陽光発電アレイのシミュレーション, 平成 10 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会, pp.29-32, 1998
- 7) 車孝軒ほか 5 名: 設置条件の異なる太陽電池モジュールで構成される太陽光発電システムの発電特性, 太陽エネルギー, Vol.25, No.5, pp.33-40, 1999
- 8) 石原修, 酒井孝司, 平川真由美: 創・省エネルギー性能に関する研究, 平成 9 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会, pp.37-40, 1997
- 9) 宇田川光弘, 木村健一: 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, 第 267 号, pp.83-90, 1978.5
- 10) 黒川浩助, 若松清司: 太陽光発電システム設計ガイドブック, オーム社, 1994
- 11) 総務庁統計局: 家計調査年報, 1999
- 12) 自治省: 住民基本台帳人口要覧, 1999
- 13) 鶴崎敬大, 中上英俊: 地球温暖化対策評価における CO₂ 排出原単位に関する考察, エネルギー・資源学会, 第 19 回研究発表会講演論文集, pp.159-162, 2000
- 14) 総務庁: 平成 10 年住宅・土地統計調査, 総務庁, 1999
- 15) 総合エネルギー調査会: 需給部会中間報告, 2001

16) 東京電力： <http://www.tepco.co.jp>

(本研究に関する既発表論文)

- i) 石原修，藤広聖，吉原文子：太陽電池モジュールの発電効率と外界影響因子に関する研究－太陽光発電システムの住宅への応用に関する研究その 1－,日本建築学会論文報告集, No.481, pp.33-40,1996.3
- ii) 田中昭雄ほか 5 名：首都圏に設置された住宅用 P V システムシステムの計測・解析その 1 太陽光発電システムの季節別発電効率に関する考察, 平成 11 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会, pp.85-88,1999
- iii) 田中昭雄ほか 5 名：首都圏に設置された住宅用太陽光発電システムの計測・解析その 2 太陽光発電システムの発電特性の分析 , エネルギー・資源学会,第 19 回研究発表会講演論文集, pp.41-46, 2000
- iv) 石原修ほか 4 名：九州地域の住宅用太陽光発電システムの運用実績に関する研究第 1 報 九州地域の太陽光発電システム実態調査,日本建築学会九州支部研究報告, 第 39 号, pp.41-44,2000
- v) 石原修ほか 4 名：九州地域の住宅用太陽光発電システムの運用実績に関する研究第 2 報 調査住宅の概要と発電実績,日本建築学会九州支部研究報告, 第 39 号,pp.45-48,2000

第4章 九州地域における住宅用太陽光発電システムの発電状況

4.1 研究の目的

建築物における太陽光発電システム（以下"PV システム"）は、1990 年からの電力各社による余剰電力購入制度の開設と、1992 年からの国による個人住宅用システム支援制度等の導入により年々普及が進んでおり、九州地域でも毎年倍増の割合で普及が進み、2000 年度末現在では 7,642 件のシステムが稼働している。第 3 章では首都圏で稼働中の 132 件のシステムの発電状況と、発電効率の変動特性について計測を行いその結果を報告したが、本章では九州地域の PV システムについてアンケート調査で明らかになった発電実績と、発電特性を明らかにするために行った計測調査及び実験住宅でのパネル被覆実験の結果について報告する。

4.2 調査・研究の概要

本章の流れを図 4.2.1 に示す。本報告は九州地域の PV システムに関する実態調査と、計測調査の 2 つからなり、計測調査は、既存住宅での計測と、実験住宅での計測の 2 つに分かれる。

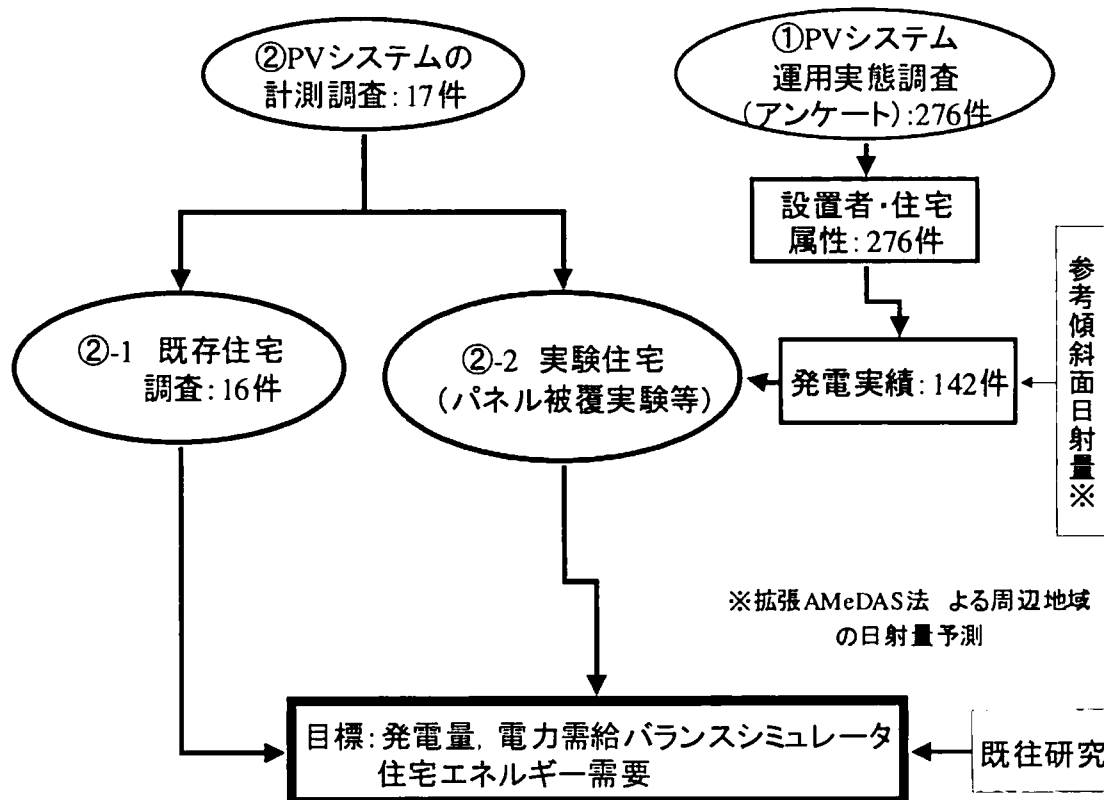


図4.2.1 本章の作業フロー

① PV システム運用実態調査

九州内で稼働する住宅用 PV システムを対象に、アンケート調査を行い稼働後 1 年間の発電実績及び、設置前後の住宅内消費電力の調査を行う。

② PV システムの計測調査

九州電力と系統連系している住宅用 PV システム 16 件と熊本大学実験住宅の PV システムを対象に、発電量、売・買電力量等の計測を行う。

既存の PV システム設置住宅では、発電量と住宅の電力需要とのバランス及び発電特性を検討するため、発電量と系統連系時の売・買電力量等の測定を行う。またこの中で発電効率の変動要因について検討する。実験住宅の PV システムでは、複数面パネル設置の発電効率低下の原因を検討する。

4.3 PV システム運用実態調査

本調査は、九州内で稼働する住宅用 PV システムを対象に、1999 年 11 月にアンケート調査を実施し、設置後 1 年間の発電実績と設置前後の住宅内の電力消費の実態及び住宅属性を調査したものである。

4.3.1 アンケート調査概要

調査は九州電力（株）の協力を得て、1997 年度までに PV システムの逆潮流系統連系システムを導入している住宅 667 件にアンケート調査協力依頼のはがきを郵送し、承諾を得た 360 件を対象にアンケート用紙を配布・回収した。

アンケート調査項目を表 4.3.1 に記す。調査内容は PV システムの概要、住宅の概要、設置前・後 1 年間の電力購入量（買電量）及び設置後の九州電力への売電量と発電量である。

図 4.3.1 に、県別アンケート回収数と発電実績の有効回答が得られた設置住宅の所在地を示す。アンケート用紙の回収は 276 件で、1997 年度末現在の九州地域の住宅用 PV システムの約 41% にあたる。県別には福岡県が 133 件で最も多く、次いで熊本県の 73 件、最低は宮崎県の 18 件である。図中の発電実績有効データとは、系統連系後 1 年間の発電実績が得られた回答で、総計 142 件である。有効回答は、福岡県が 52 件で最も多く、次いで熊本県の 27 件である。もっとも少ないのは宮崎県の 6 件である。

表4.3.1 アンケート調査項目

分 類	項 目
太陽光発電ユニット概要	①発電容量 ②太陽電池メーカー ③インバータメーカー ④パネルの設置方 ⑤パネルの方位・傾斜角・枚数
太陽光発電システム概要	①逆潮流連系システム稼動開始日 ②設置費用 ③国からの補助金額
住宅の概要	①建て方 ②構造 ③築年数 ④屋根形状 ⑤床面積 ⑥居室数 ⑦給湯用熱源
設置前電力使用量実績	①設置前の電気契約種別 ②設置前1年間の電力使用実績
設置後電力使用量実績	①設置後の電気契約種別 ②設置後1年間の電力使用実績
意識調査	太陽光発電システムの導入動機

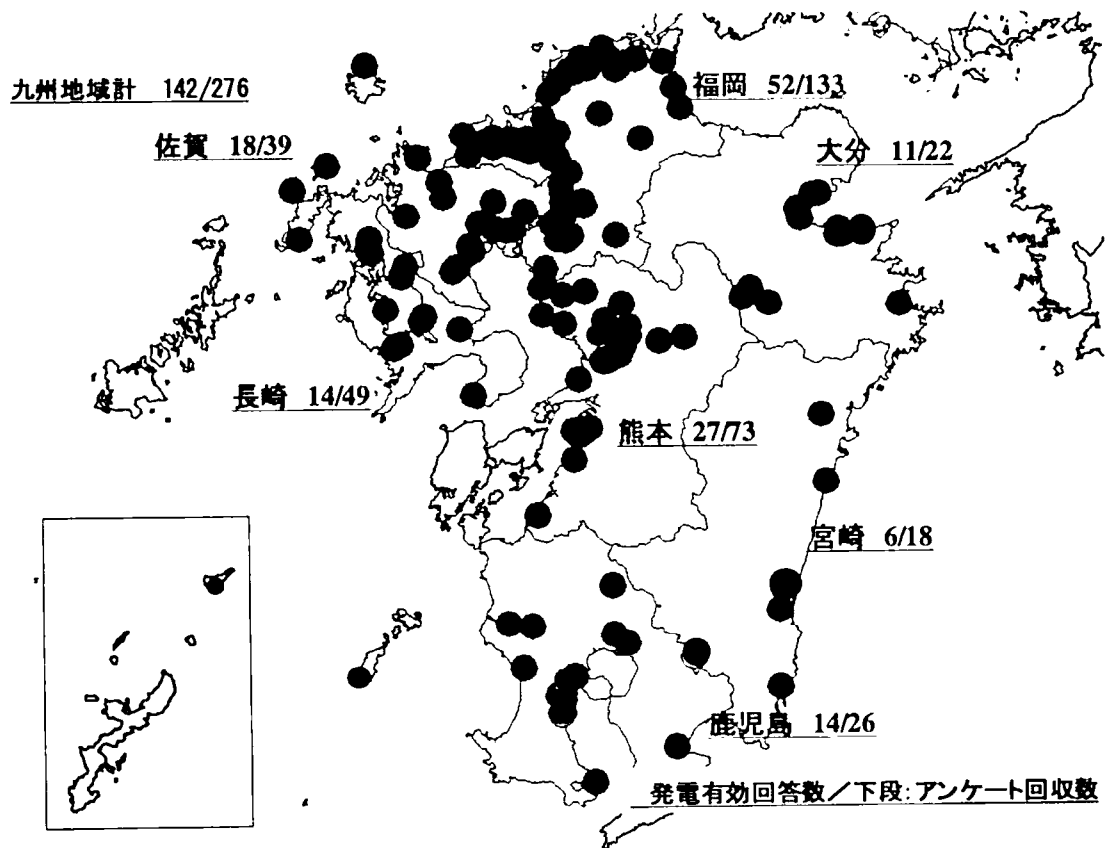


図4.3.1 有効回答の得られた住宅の所在地とアンケート回収数

4.3.2 PVシステム設置状況

①設置住宅

図 4.3.2 に九州地域の PV システム設置住宅の平均延床面積と、第 3 章の首都圏調査対象住宅の平均延床面積を示す。九州地域の PV システム設置住宅の平均延床面積は 173 m² であり、首都圏は 136 m² である。PV システム設置住宅の延床面積は、九州地域が首都圏よりも 25% 以上大きい事がわかる。九州地域の 1997 年度戸建住宅の平均床面積が 120 m²¹⁾ であるから、九州の PV システム設置住宅は、平均的な戸建住宅よりも延床面積で約 40% 大きく、PV システムを設置する住宅は平均的な住宅よりも規模が大きいことがわかる。

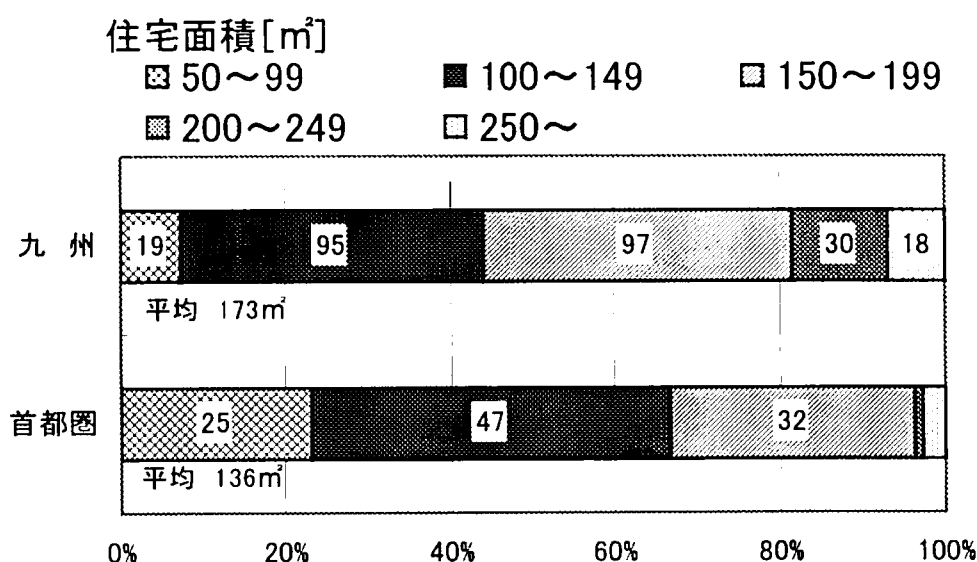


図4.3.2 設置住宅の延床面積

②パネル設置状況

系統連系開始から1年間の発電実績が得られた 142 件のシステムの合計容量は 515.9kWp である。システム容量の平均は 3.6kWp/件である。パネルの容量は 3.0 ～ 3.4kWp が最も多く 77 件で、全体の 54 %を占めている。続いて 4.0 ～ 4.4kWp が 30 件、4.5kWp 以上が 14 件である。

パネルの設置屋根面数別件数と設置容量を表 4.3.2 に示す。1 面設置が 142 件中 109 件と最も多い（ただしこのうち 4 件は水平面に設置）。2 面または 3 面に設置された PV システム（以下“複数面設置”）は 33 件である。1 面設置と複数面設置の割合は、約 3 : 1 である。第 3 章の首都圏調査ではこれが約 1.8 : 1 であった。九州の PV システムが首都圏に比べて南向き 1 面設置が多いのは、首都圏に比べ住宅規模が大きく、周囲の建物等の密集が少なく、屋根の配置にも制約が小さいという住宅環境が原因と考えられる

表4.3.2 パネル設置屋根面数と設置容量

	件数		総容量	
1面設置	109	77%	397.5kWp	77%
2面設置	21	15%	75.4kWp	15%
3面設置	12	8%	42.9kWp	8%
計	142	100%	515.9kWp	100%

図 4.3.3 に各パネルの傾斜方位ベクトルを、等角ステレオ投影法で、球面の下半球に投影した結果を示す。この投影法は球の中心からパネルの傾斜方位ベクトルを伸ばし、下半球球面と交差する点を求め、この交点を水平面に再投影したものである。図の内円は、パネル傾斜角を示し、大円は傾斜角 0° を示す。例えば南面 30° に設置されたパネルは、傾斜角 30° を示す内円と NS 軸との S 軸寄りの交点に投影される。

515.9kWp のパネルのうち設置方位は、ほぼ南面 $\pm 5^\circ$ に集中し全容量の 54% を占める。わずかに東向き及び西向きのパネルもあるが、北向きのパネルは 1 枚も無い。これに対し図 3.2.2 の首都圏の住宅では、真南 $\pm 30^\circ$ の範囲に 59% のパネルが分散して配置されている。しかも複数面設置の場合には、北向きに設置されたパネルもあった。

しかしパネルの傾斜角は、九州と首都圏ともに $21 \sim 30^\circ$ が最も多い。これは我が国の住宅の平均的な屋根勾配を反映しているためと思われる。

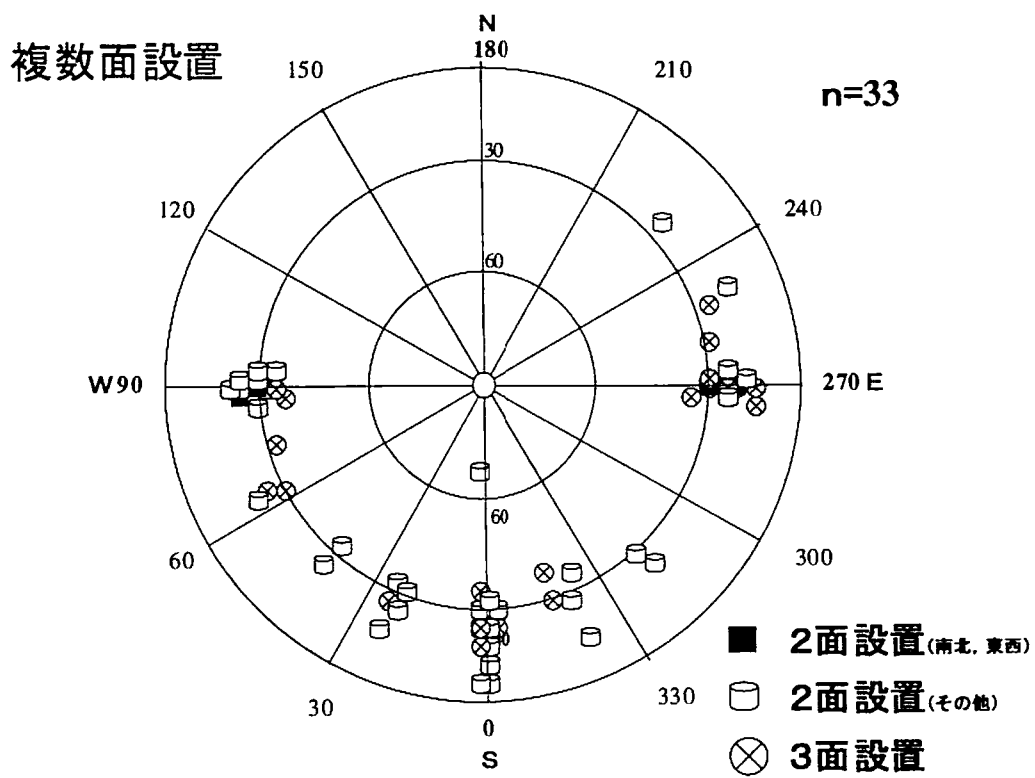
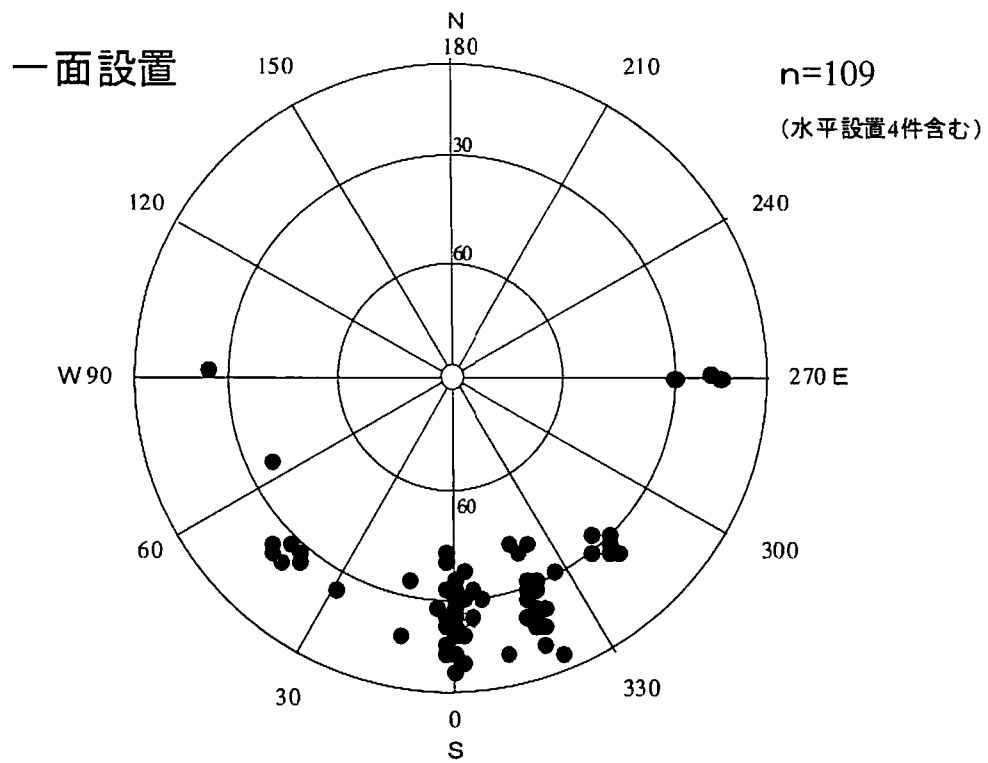


図4.3.3 パネル面方位のステレオ投影図（等角投影法，下半球投影）

4.3.3. 発電実績

PV システムの発電実績を図 4.3.4 に示す。PV システム年間発電量の平均は 3,361kWh/年である。1kWp あたり、1000kWh/年以上の発電量を示すシステムは 1 面設置が多く、複数面設置では少ない。図 4.3.5 に設置屋根面数毎の平均発電量を単位パネル容量当たりで示す。平均発電量は 925.9kWh/kWp・年であるが、最も発電量が多いのは 1 面設置で平均 939.2kWh/kWp・年である。これに対し 2 面設置は 896.0kWh/kWp・年、3 面設置は 853.9kWh/kWp・年と、設置面が増えると発電量は減少し、3 面設置は 1 面設置よりも約 10 % 発電量が少ない。

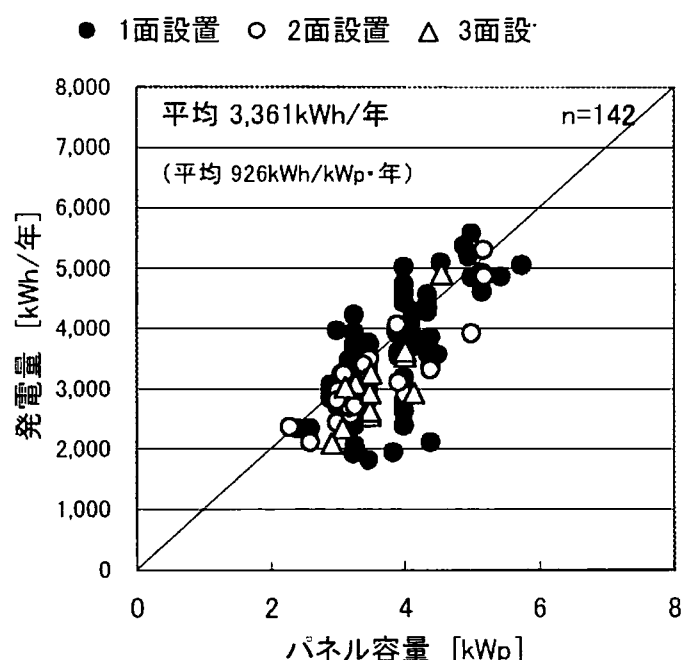


図4.3.4 システム発電実績とパネル面日射量

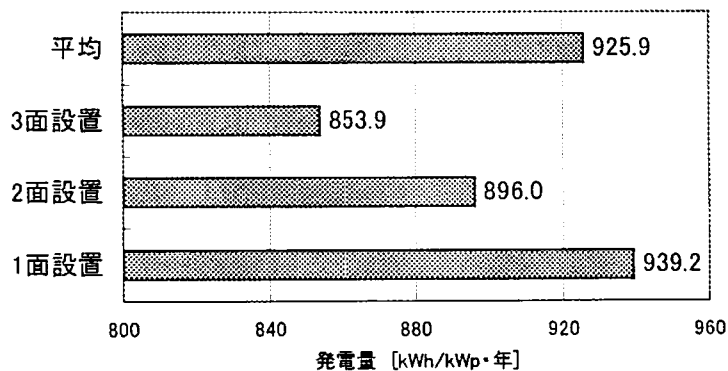


図4.3.5 設置屋根面数別発電実績順位

図 4.3.6 に発電有効データと同時期の水平面日射量を AMeDAS や気象台観測データから求めて、近接する PV システムのパネル面と同じ傾斜面の入射日射量を推定した値（以下“参考傾斜面日射量”）を示す。なお AMeDAS 観測点の水平面日射量は拡張 AMeDAS 法²⁾（以下“EA”法）により求め、傾斜面日射量は宇田川等の方法³⁾により直散分離を行って求めた。複数面設置の場合の参考傾斜面日射量はパネル容量で加重平均して求めた値である。発電量は、参考傾斜面日射量と比例する傾向があると考えられるが、参考傾斜面日射量が大きくても発電量が少ない場合もある。これは、参考傾斜面日射量が、PV システム設置箇所の局地的な日照条件を反映していないこと（例えば設置システムの一部が影になる）などの要因も大きいと思われる。

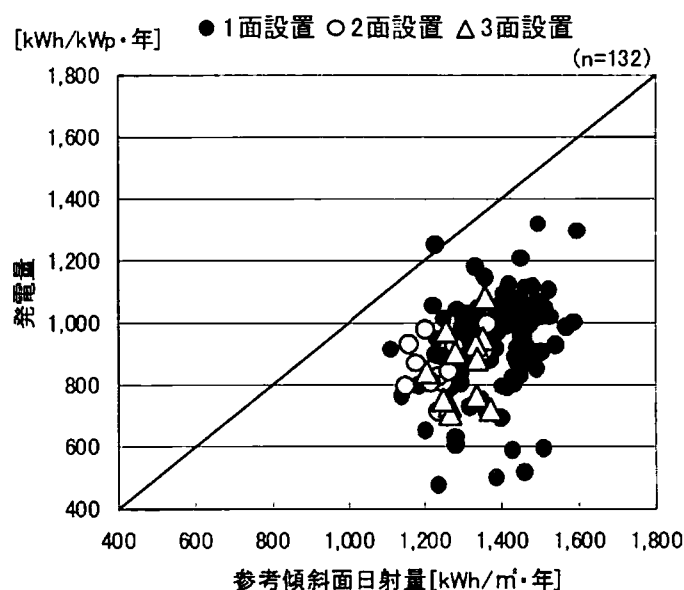


図4.3.6 参考傾斜面日射量と発電量の関係

4.3.4 設置前後の電力需給量の変化

PVシステム導入前後の年積算電力需給実績の平均値を図4.3.7に示す。解析には、既築住宅にPVシステムを設置し、電力の契約種別を変更していない住宅で、延床面積200㎡以下の23件を用いた。住宅規模を限定したのは、大規模住宅は、多世帯同居、多世帯員数の場合が多く、設置前後の2年間で世帯構成員が変化する可能性が大きいことや、事業所等との兼用の可能性もあり、経年変化を正しく評価できない事があるためである。図中の正値は電力消費量を表し、負値は売電量を表す。電力消費があまり変化しなかった住宅もあるが、システム導入後電力消費が減少した世帯が多くみられ、地域別平均値では福岡で約2割、鹿児島・長崎で1割以上の減少が確認された。全体平均では、設置後1割程度減少しており、システム導入による電力消費の抑制傾向が示唆される。

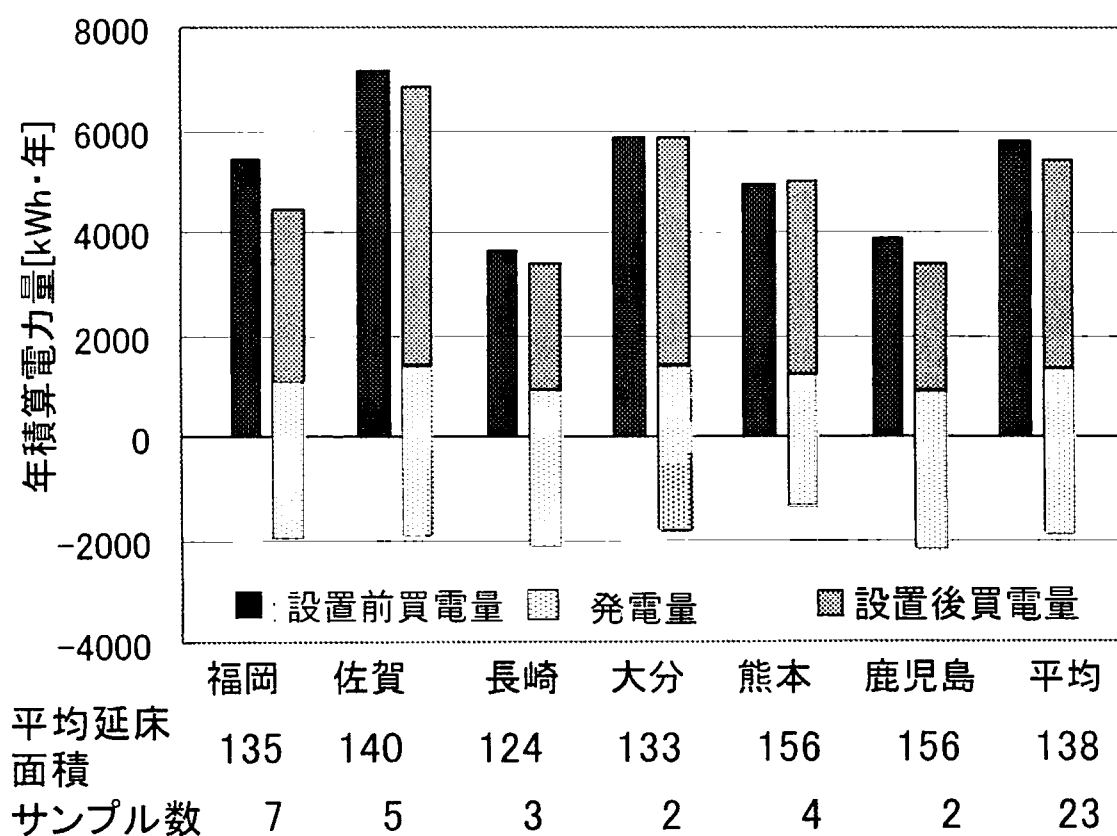


図4.3.7 PVシステム設置前・後電力需給量

4.4 計測調査結果

PVシステムの発電量と、住宅の電力需給とのバランス及び発電特性の検討を目的とし、発電量と系統連系時の売・買電力量等の測定を行った。

計測したのは、PVシステム導入住宅の16件(S01～S16)と熊本大学実験住宅の合計17件である。計測対象住宅の位置を図4.4.1に示す。また計測システムの概要を表4.4.1、測定対象システムの概要を表4.4.2に示す。計測はPVシステムのインバータからの出力電力量と、九州電力からの購入電力(買電)、逆潮流電力(売電)を5分間隔で計測したものである。日射量は既存住宅では気象台観測データを用いる。このため対象住宅は、気象台と近接していることを条件に選定した。なお、熊本大学実験住宅(S00)では、水平面日射量とパネル傾斜面の入射日射量をそれぞれ計測している。また2000年夏季には、パネル面温度等の計測をそれぞれの住宅で行った。

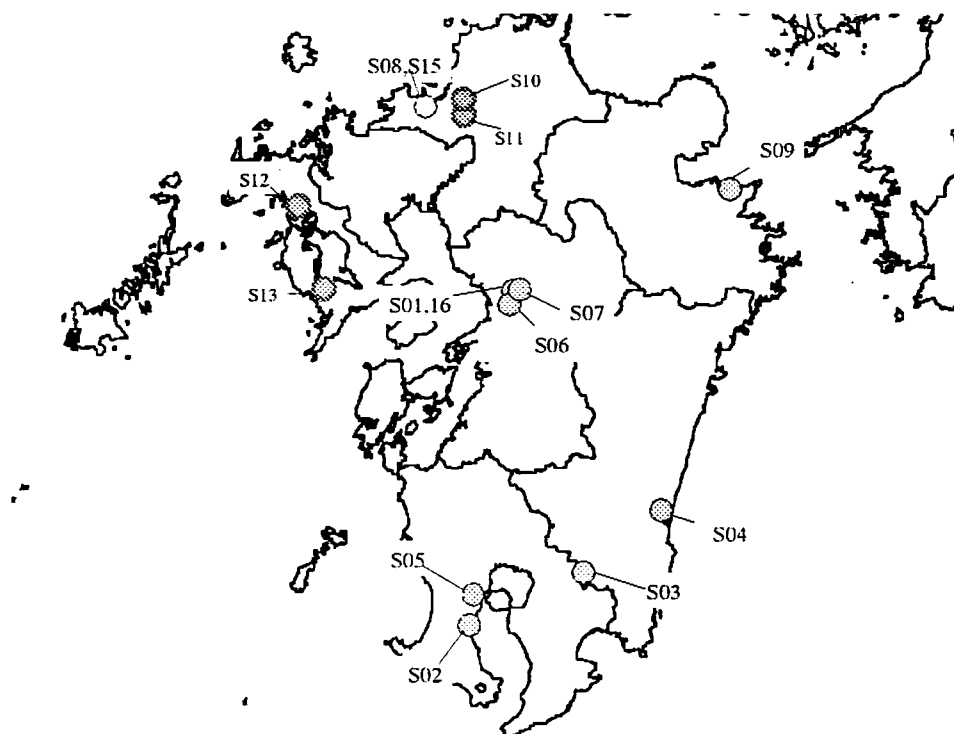


図4.4.1 計測住宅位置図

表4.4.1 測定概要

	電力測定
測定機器	コンパクト電力レコーダー
測定項目	発電量(インバータ出力)
	売電量
	買電量
測定内容	5分間平均有効電力

表 4.4.2 対象住宅の概要

ID	S00*	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
所在地	熊本	熊本	鹿児島	都城	宮崎	鹿児島	熊本	熊本	福岡	大分	福岡	福岡	佐世保	長崎	福岡	福岡	熊本
種類**	多	単	多	単	多	多	多	多	単	多	多	多	単	多	多	HIT	多
電池特性																	
最大出力[W]	52	70	145	55	150	145	82	82	129	125	135	145	136	145	108	180	65
最適動作電流	2.60	3.05	7.29	3.15	3.29	7.29	3.52	3.52	4.91	4.8	6.92	7.29	5.05	7.29	3.2	3.55	6.86
最適動作電圧	20.0	23.0	9	17.4	45.6	19.9	23.3	23.3	26.2	26.0	19.5	19.9	26.9	19.9	33.8	50.7	9.5
規格値発電効率	11.4	12.6	13.3	12.9	12.7	13.0	9.6	9.6	12.9	13.0	12.5	13.0	14.1	13.0	12.3	15.2	10.3
設置方式	架台	直置	架台	架台	架台	直置	一体	一体	直置	直置	直置	直置	直置	直置	架台	直置	一体
設置方位角[°]	0,180	+40	0	+10	-15	-30	0	-5	+15	+10	-50	***	-40	-110	+15	+8	-15
設置傾斜角[°]	各30	30	20	40	10	30	30	30	26	24	30,70	各30	—	20	25	30	34
パネル枚数[枚]	各48	45	20	72	20	24	40	40	24	32	15,18	2,15,3	24	30	30	28	72
設置面積[m ²]	51.4	25.5	22.3	30.9	23	26.8	33.1	33.1	23.1	30.8	35.9	21.8	23.1	33.5	26.5	33.1	15.1
発電容量[kWp]	5.0	3.0	2.9	3.96	3.0	3.48	3.28	4.0	3.1	4.0	4.4	2.9	3.24	4.4	2.9	2.9	4.0
1kW容量[kW]	3+3	3.0	3.3	3.5	4.0	3.3	4.0	4.0	3.1	4.0	4.4	4.4	4.0	4.4	3.2	5.4	—
発電量	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
販売電力量	○	○	○	○	—	○	△	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
購入電力量	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
測定開始月	95/8	99/8	99/8	99/8	99/8	99/8	99/8	99/8	99/10	99/10	00/5	00/5	00/5	00/5	00/7	00/7	00/7

***:複数面設置(方位角75,-15,-105°)

** : 多 = 多結晶, 単 = 単結晶, HIT = ハイブリッド

*: 熊本大学実証住宅

4.4.1 発電状況調査

① PV 依存率の解析

ここでは、PV システムの発電量と住宅内の消費電力の関係を"PВ 依存率"と定義する。
この定義は(4.4.1)式による。

$$\text{PV 依存率} [\%] = \text{発電量} / \text{消費電力量} \times 100 \quad (4.4.1)$$

図 4.4.2 に年間の販売電力と購入電力量の判明している 6 件の PV 依存率を示す。6 件の発電量の平均は 3,344kWh/年で住宅内の消費電力の平均は 6,187kWh/年である。PV 依存率は 6 件の消費電力加重平均で 54.0%である。購入電力の平均は 4,453kWh/年であり、自家消費分は 1,734kWh/年である。消費電力最大は S01 の 9,262kWh/年で、PV 依存率は 42.6%である。最小は S02 の 2,457kWh/年で、PV 依存率は最大の 123.8%である。

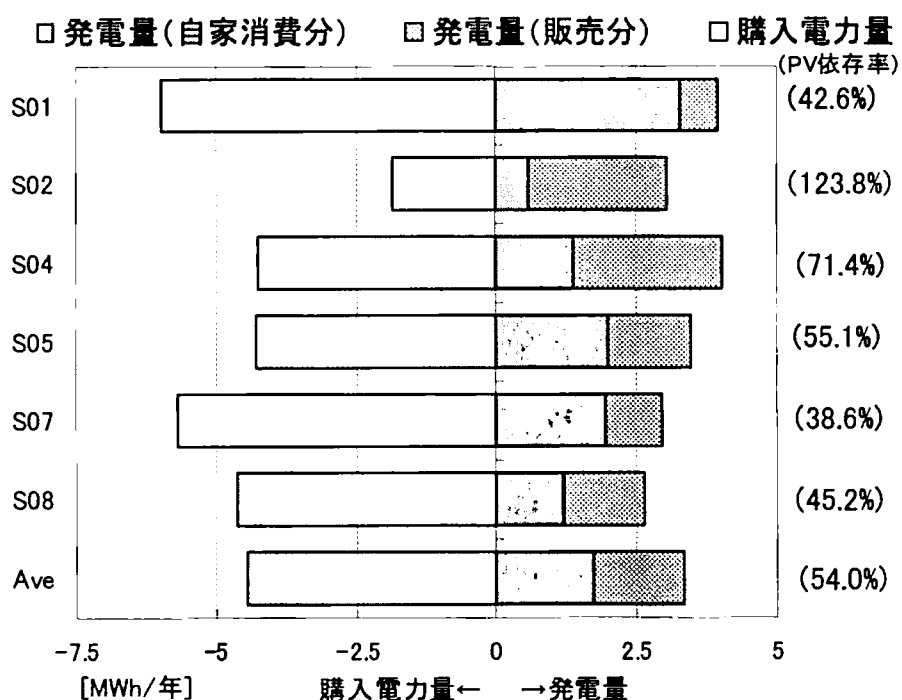


図4.4.2 年間電力需給バランスとPV依存率

②月別発電実績とシステム出力係数

図 4.4.3 に S01 ～ S09 の 9 件のシステムの 1kWp あたり発電実績の月別平均値とシステム出力係数 k 値 (3.3.1 式) の推移を示す。

図 4.4.3 から発電量は 1 月が最も小さく 1.9kWh/kWp・日であることがわかる。最大は 3 月と 7 月、8 月で 3.2kWh/kWp・日である。 k 値の 11 件の平均は 12 月が最も低く 0.6 程度であるが、発電量の最小の月は 1 月である。これは、1 月が太陽高度の低い期間のため、パネル面への直達日射が遮られるシステムがあるためと推定される。また、発電量が増加する 6 月から 8 月にかけても k 値は低下しており、日射量の増加に伴うパネル温度上昇による効率低下が予想される。一方 S04, S08 のように年間を通して k 値が、平均値より 10% 程度低効率で運転しているものもある。

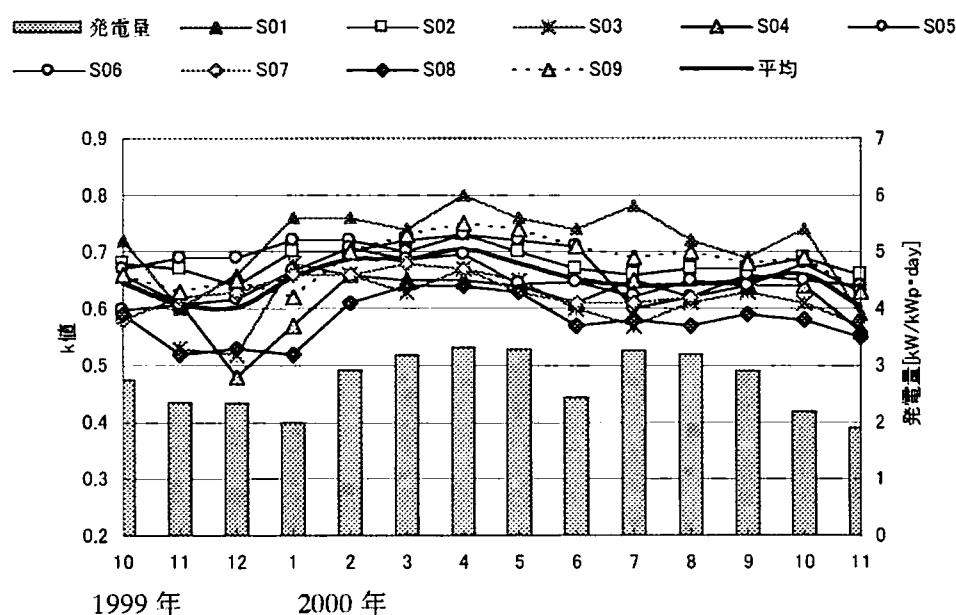


図4.4.3 月別発電量とシステム出力係数 k 値

9 件のシステムの年間 k 値平均は 0.65 である。第 3 章では、首都圏 PV システムの k 値を平均 0.74 と報告した。しかし本章の 9 件の平均 k 値は、0.65 と 0.09 小さい。これは、第 3 章が日射量を PV システムと同一地点で計測していたのに対し、本報告では気象台観測データを用いたためと思われる。気象観測点は、周囲に日射遮蔽物が無いのに対し、既存住宅の周辺では、構築物や樹木などによる日射遮蔽も予想され、気象観測点より日射量が少なくなることがある。気象観測データを参照する場合は、このように日射量を過大に予測する可能性を留意する必要がある。

③複数面設置における発電量低下要因の検討

複数面設置の住宅では、発電量が他に比べて少ない。主因は受光日射量が少ないことであるが、日射量で正規化された値である k 値で比較しても、他に比べて小さい場合がある。

図 4.4.4 には、複数面設置で年間発電量が少ないシステムの月別発電実績を示す。S10 は年間発電量 721.6kWh/kWp で、S11 は 761.4kWh/kWp である。これは図 4.3.4 の九州地域の年間平均発電量 925.9kWh/kWp に比べ、約 20%少ない発電量である。

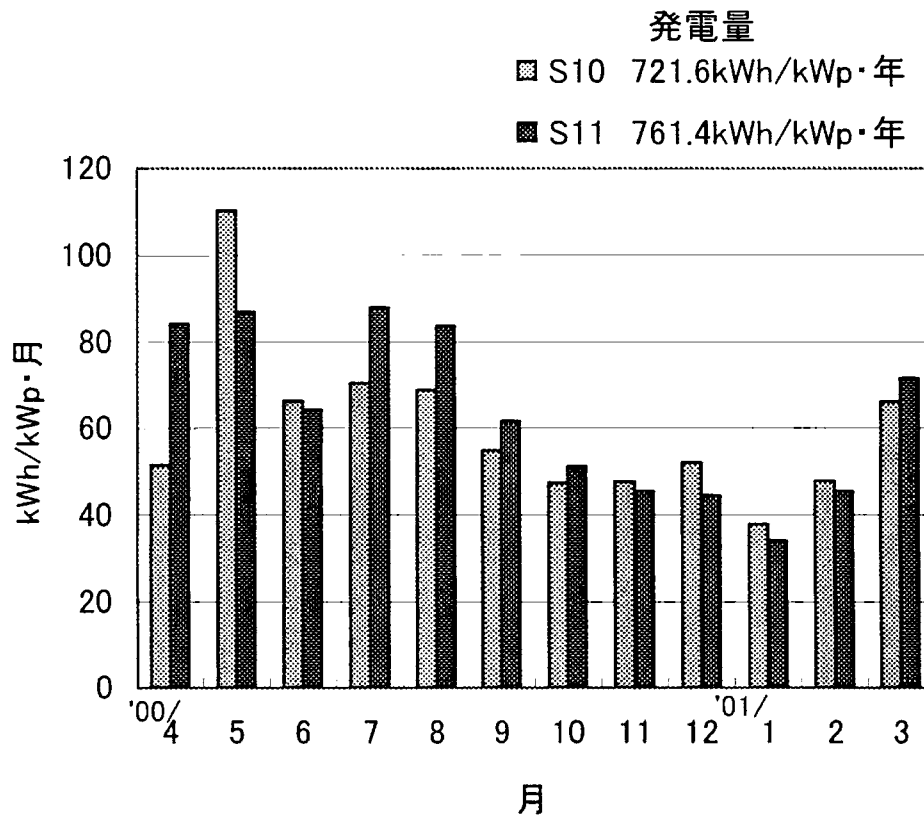


図4.4.4 複数面設置における月別発電量の推移

S10は各パネルに入射日射量の差異が大きくなると、 k 値が小さくなる例である。図 4.4.5 に S10 の夏期晴天日の理想発電量と発電量、各面の入射日射量の比較と k 値の時間変動を示す。

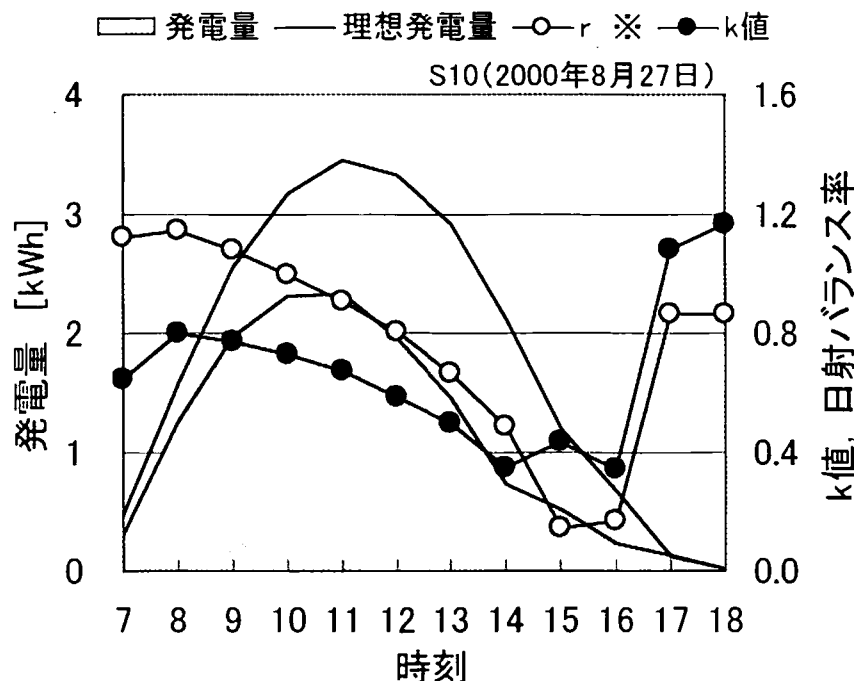


図4.4.5 複数面設置で 設置傾斜角の異なる場合(S10)
※ r = 傾斜角 70°面入射日射量／傾斜角 30°面入射日射量

ここで理想発電量とは(4.4.2)式で定義した値である。

$$\begin{aligned} \text{理想発電量} &= \text{各パネル面への入射日射量} \times \text{パネル面積} \\ &\quad \times \text{基準状態におけるパネル効率} \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

また r は、2つの屋根面に入射する日射量の比である。S10 のパネルは 2つの屋根面からなり、設置方位はともに南から 50°東向であるが、傾斜角は 30°と 70°の 2面である。

ここで

$$r = \text{傾斜角 70°面入射日射量} / \text{傾斜角 30°面入射日射量} \quad (4.4.3)$$

とすると、午前中は $r = 0.8$ 以上と大きくパネル間の日射量の差は小さいことがわかる。この時 k 値も最大 0.8 と比較的大きな値を示すが、 r と k 値は時間の経過とともに低下する。 r が最低の 14 時～16 時は k 値も最低の 0.4 前後を示す。そして夕方日射量が減り、 r が上昇すると再び k 値は上昇する。

S11 は、ストリングス[註 2]内で、受光する日射量に差が生じていると思われる事例である。このシステムは屋根 3面に設置されている。1面は南面(方位角 - 15°)でパネル 15枚、東面(方位角 - 105°)は 2枚、西面(方位角 + 75°)は 3枚からなる。パネルの配列は、10枚直列×2並列である。パネルの配線は不明であるが、各面の設置枚数から考えて 1つのストリングスは、確実に 2面にまたがって設置されていることになる。2面にまたがったストリングス内では、入射日射量に差異が生じることになる。

④日射障害物による発電量の減少

次に季節の太陽軌道の変化によりパネルに影が発生し k 値が低下している事例を示す。

図4.4.6に S04 の各季節晴天日の k 値の変動と、発電量、日射量を示す。この住宅は1面設置で、12月を除く11ヶ月の k 値の平均値は0.63と、対象住宅9件の平均値0.65よりもやや小さい値で、特に12月は0.48と低い値を示す。12月の正午前後に発電量の低下と k 値の低下が見られるが、これは、太陽高度の低い冬期に隣接する樹木による影の影響が出たためである。気象台の日射量観測値は増加しているが、この時間帯はパネルの一部は、樹木の影となっており、これが原因で発電量は減少したものである。これは気象台の観測日射量を用いると各システム周囲の状況を考慮できないため、 k 値を見かけ上小さく評価してしまう例である。

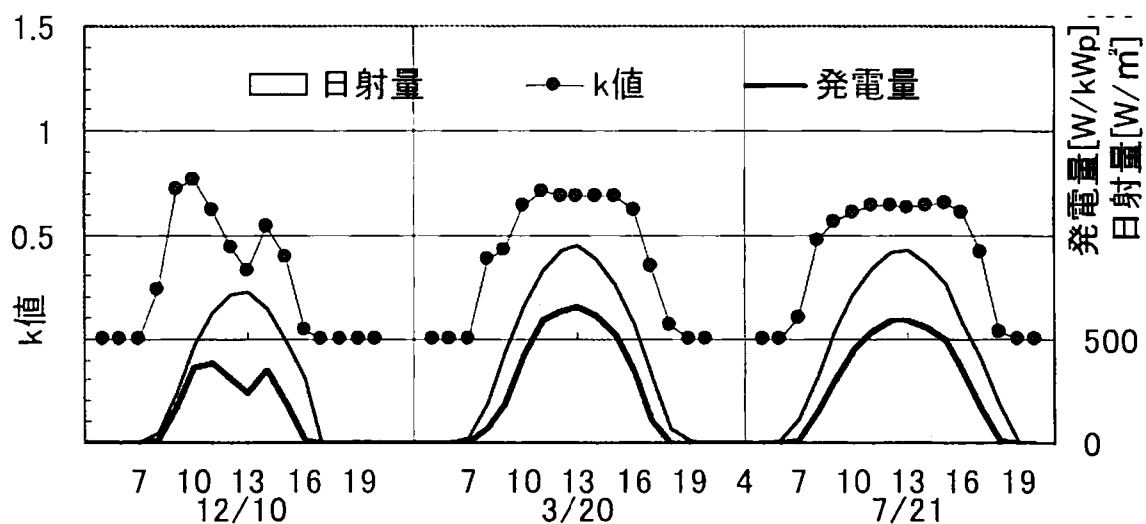


図4.4.6 各季節の k 値・発電量の経時変化 (S04)

⑤日射量とパネル温度

外界気象因子の影響を詳しく検討する為に、2000年6月～9月に、発電量、パネル温度の計測を行った。なお、解析には、測定期間で晴天日の多かった1週間のデータを用いた。用いたデータはS08、S14、S15が8月8日～8月14日、S16が7月26日～8月1日である。

図4.4.7にパネル温度（外気温基準）と入射日射量の関係を示す。これより、入射日射量の増加とともにパネル温度（外気温基準）も上昇する傾向が確認され、日射量の多い夏の効率低下が予想される。

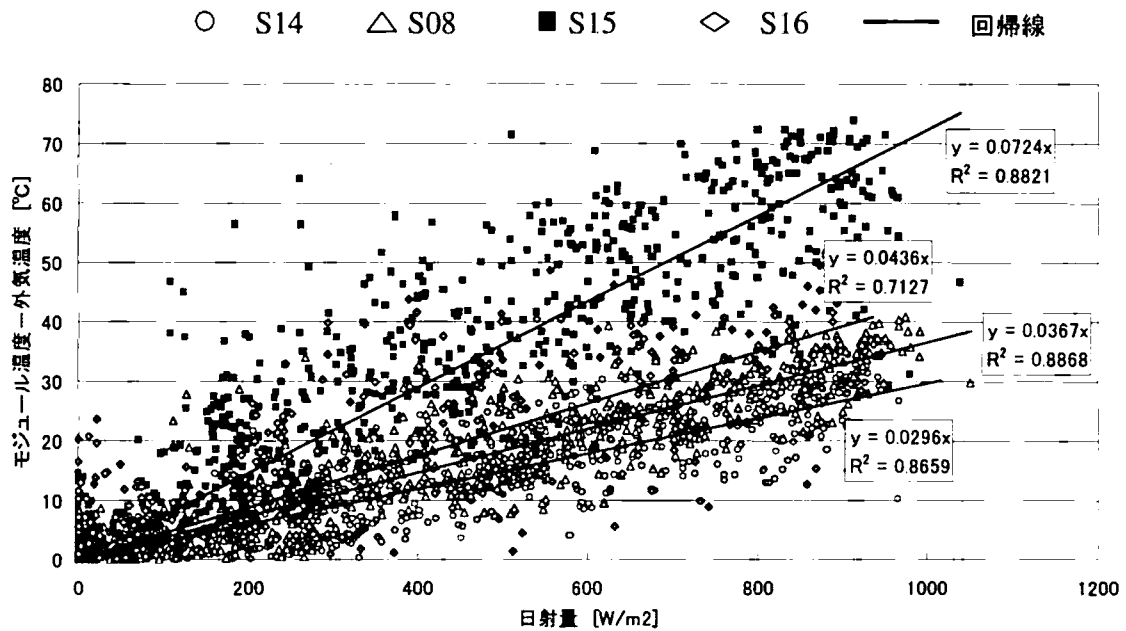


図4.4.7 入射日射量に対するパネル温度

4.4.2 PVシステムにおける日影の影響

パネル面に入射する日射量はその設置方位や傾斜角により異なるので、パネル面毎に出力電流は異なる。それらを直列に接続した場合、それぞれの電流－電圧特性（I-V カーブ）の最大出力点が合わない Pmax ミスマッチ損失⁴¹が生じ発電効率が低下する事が予想される。第3章では、南北、東西の2面にパネルを設置したシステムの k 値が冬期に一面設置より約30%小さくなるのに対し、夏期は一面設置とほとんど差が無いこと、本章では表4.3.5で九州地区の23%の住宅が複数面設置であること、図4.4.4、図4.4.5では複数面設置の中でも発電量が少ない事例を示し、そのシステムにおいてパネル間の入射日射量の相違によって発電効率が変動する事例と、同ースtringス内で入射日射量に差異が発生し、発電効率が低下が予想される事例を示した。また図4.4.6では日影により発電量の低下する例を示した。

このように複数面設置のPVシステムや日影のあるシステムにおいて発電効率の低下や発電量減少が見られることから、本項では複数面設置及び同ースtringス内で受光日射量に差異の発生する状態をパネル被覆実験で再現し、パネルに入射する日射総量が同じでも、被覆パターンの違いで効率低下の違いがあるかどうかを観測する。

①実験概要

実験は、松川ら^{51, 61}のパネル被覆実験を参考に、熊本大学地域共同研究センターの実験住宅（S00）で行った。ここでは陸屋根面に南向きと北向きに、傾斜角度 30° の架台に多結晶太陽電池パネル96枚が設置されている。これらは2台のインバータを介し、約5kWpの逆流系統連系システムとして、商用電源と接続されている。このシステムは10枚直列 \times 4並列と4枚直列 \times 2並列の計48枚のパネルからなり、発生電力は一つのインバータに入力されている。2台のインバータへの入力方法は手動で切り替えることが可能で、1995年8月から2000年5月までは南面パネル48枚からの発生電力をインバータNo.1へ、北面48枚からをインバータNo.2へ入力させ、5月以降は複数面設置のPVシステムを想定し南面24枚と北面24枚のパネルからの発生電力をそれぞれのインバータに入力させている。

②1面設置と複数設置の発電量比較

複数面設置のPVシステムを想定して、2000年5月から、図4.4.8に示すtypeCのように、南面24枚と北面24枚からの出力を一つのインバータに入力させる実験を行い、typeA、typeBとの比較を行った。

図4.4.9にパネル面入射日射量と k 値の月変動を示す。入射日射量は夏季6月から8月においては各タイプも同程度で推移しているが、9月から11月にかけて、差が大きくなっている。 k 値についても、5月から8月までは各タイプとも0.52程度で推移している。11月になると k 値はtypeAで0.6、typeBで0.3、typeCで0.5と北面48枚からの効率が低くなっている。本実験の複数面設置タイプでは方位角の異なるパネルの k 値がtypeBより大きいのは、並列に接続しているためと考えられる。

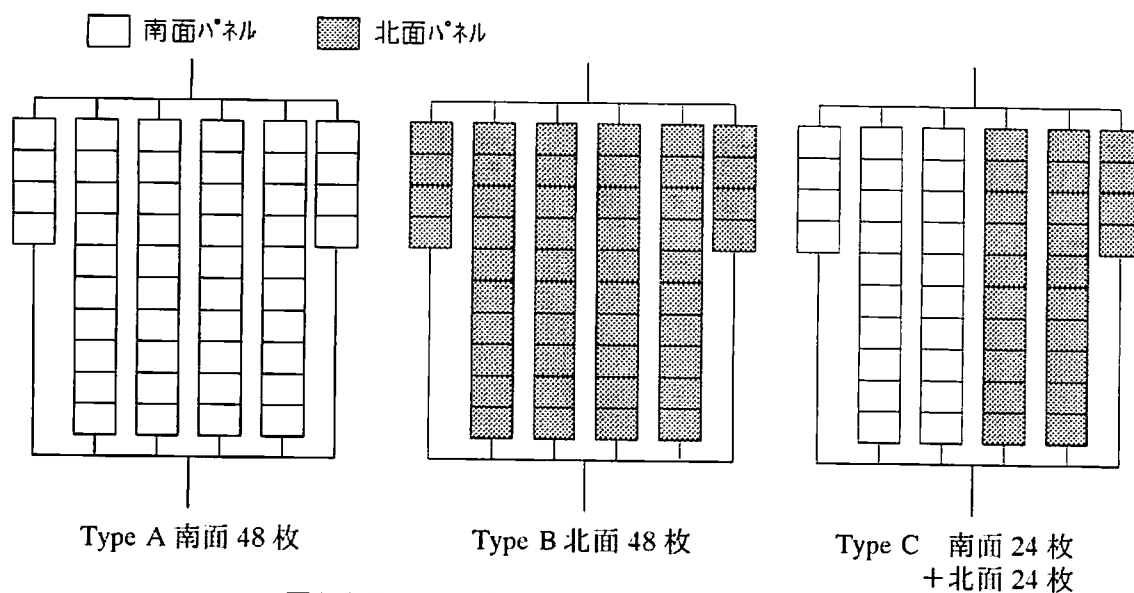


図4.4.8 インバータ入力結線タイプの模式図

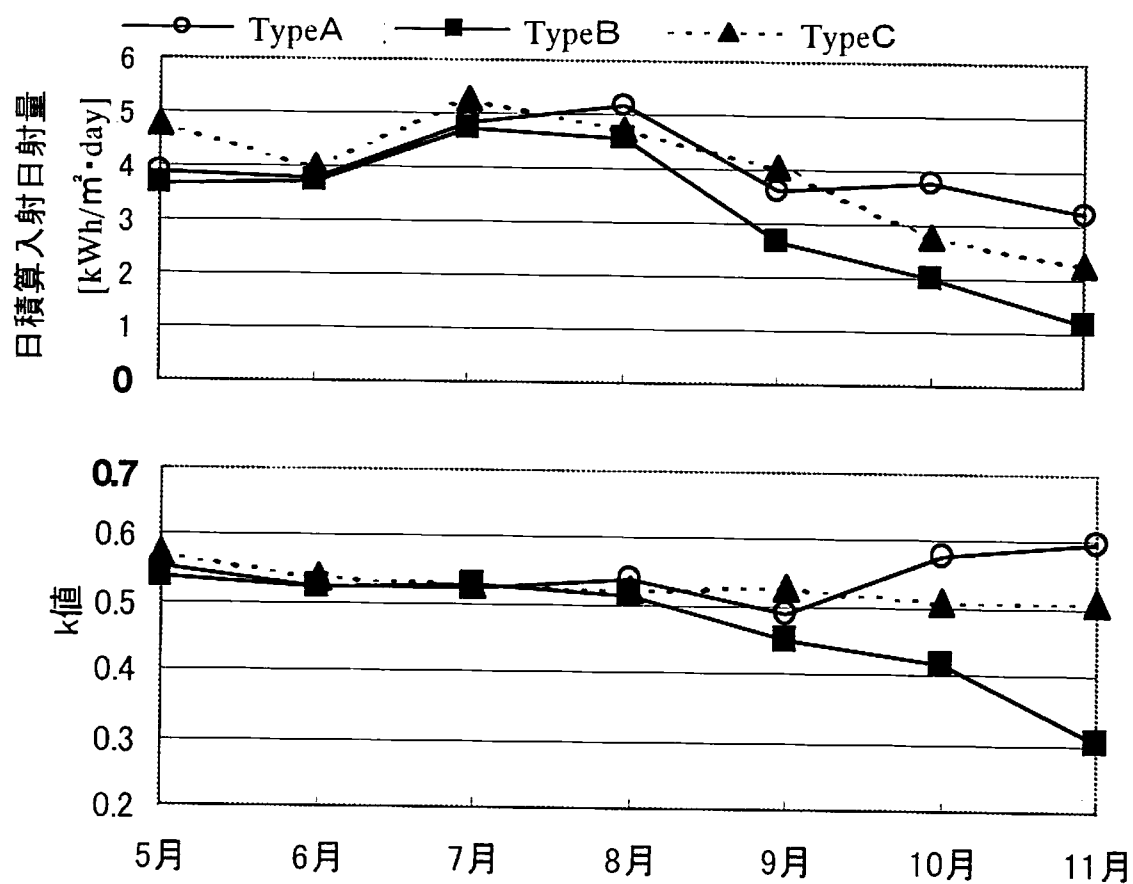


図4.4.9 入射日射量とk値の月変動

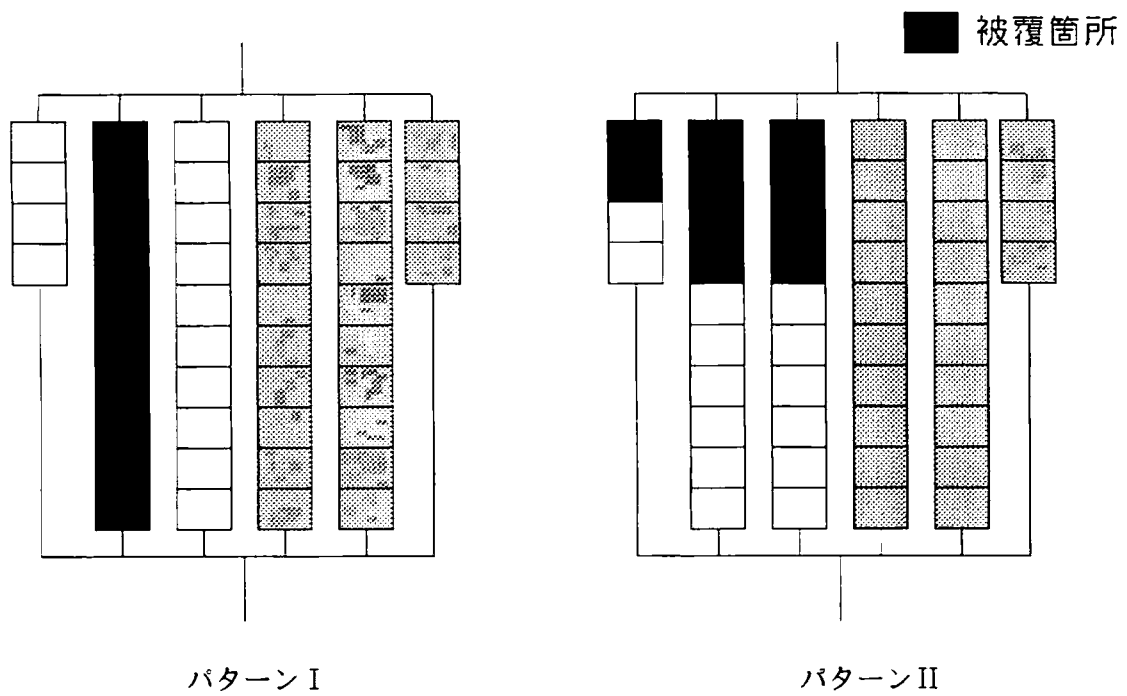


図4.4.10 被覆率21%影の状況の模式図

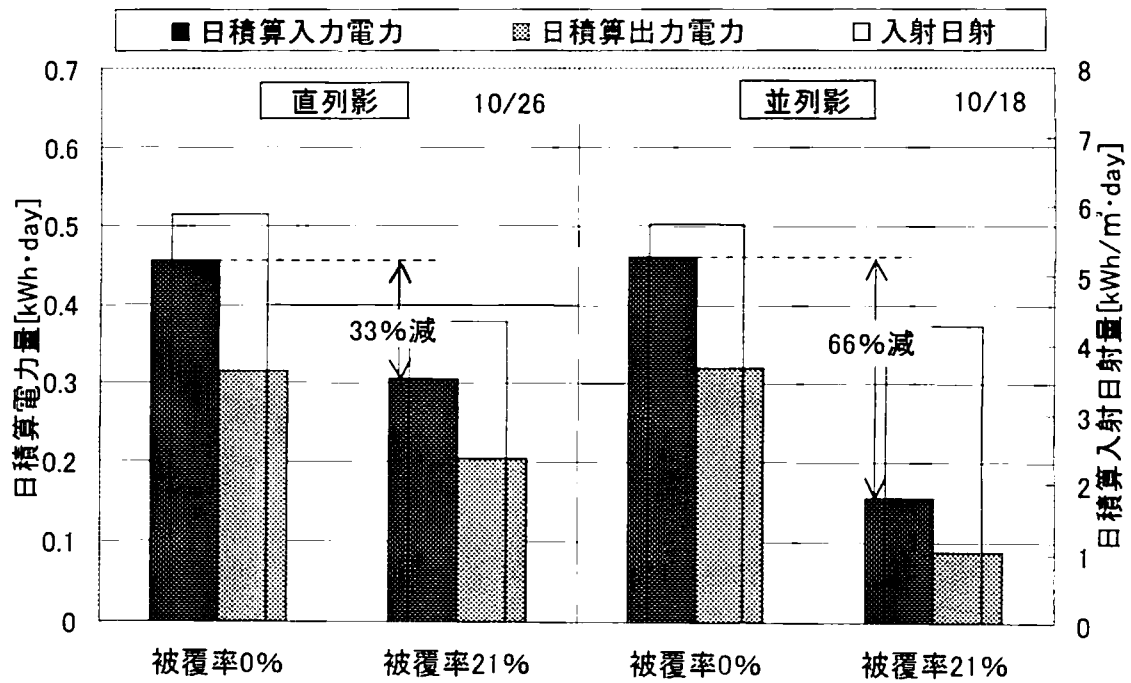


図4.4.11 影の状況による発電量低下の比較

③パネル被覆実験

太陽電池アレイの発電量は、入射日射量は同じでも日影のでき方（パターン）によって、出力が大きく変わる。ここでは、2000 年 10 月からインバータ入力 TypeC の状態でインバータ No.2 について、図 4.4.10 の日影パターンでの実験を行った。ここではアレイ面積に対する暗幕の面積の割合を“被覆率”とし(4.4.5)式で定義する。

$$\text{被覆率}[\%] = \text{暗幕の面積} / \text{アレイ面積} \times 100[\%] \quad (4.4.5)$$

図 4.4.11 に被覆率 21 %の影をつくった場合の発電状況を示す。パターンⅠは南面のストリング1列に、パターンⅡは南面の3列のストリングに横断するように影をつくった。同じ被覆率であっても1つのストリングにのみ影ができた場合の日積算入力電力は、被覆率 0 %の場合よりも発電量が 33 %低下したのに対して、並列につながる複数ストリングに横断して影ができた場合は 66 %低下と、低下率が異なることがわかる。

このように、同一ストリングスに日影が生じた場合は、日影面積にほぼ比例して出力が低下することもあるが、複数のストリングスに横断して生じる場合は出力の低下が大きくなっている。これは②の実験結果とも一致する。

4.5 まとめ

本調査研究で得られた結果を以下に示す。

- ①九州地区の住宅用 PV システムの平均発電量は 925.9kWh/kWp・年である。このうち 1 面設置のシステムの発電量が複数面設置のシステムよりも大きな発電量を示す傾向があった。特に 1 面設置と 3 面設置では平均 10%の発電量の差がみられた。
- ②システム導入後の住宅の電力消費は、設置前に比べ約 1 割減少した。
- ③ PV システムの発電量は、住宅の電力消費の約 54 %に相当する。
- ④ PV システムの発電量は、気象観測点の日射量を参照して予測する事が多いが、この場合は、 k 値を 0.65 程度で予測した値が現実に近い。
- ⑤複数面設置の PV システムの発電量が少ない原因は、入射日射量が少ないほかに、日影の発生や同一ストリング内のパネル設置方位の相違による日射量のアンバランスが原因である。この日射アンバランスは、直列する同一ストリング内よりも、並列する複数ストリングに横断して生じた方が発電効率の低下は大きい。21%のパネルを被覆する実験においては、影が無い場合の発電量を 100 とすると、直列した同一ストリングに影を発生させた場合の発電量は 67、並列する複数ストリングに横断して発生させた場合は 34 であった。

【注 記】

注 1) 本来パネル面入射日射量を用いるが、今回は参考傾斜面日射量（隣接する気象観測点の観測値またはEA法を用いた予測値）を用いる。

注 2) スtringス：直列接続した太陽電池パネル群

【参考文献】

- 1) 住環境計画研究所，1999家庭用エネルギーハンドブック，1999
- 2) (社)日本建築学会，拡張アメダス気象データ，2000
- 3) 宇田川光弘，木村健一：水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定，日本建築学会論文報告集，No.267，pp. 83-90,1978.5
- 4) 黒川浩助，若松清司：太陽光発電システム設計ガイドブック，オーム社，1994
- 5) 松川洋，ほか3名：太陽光発電システムの建築的利用に関する研究(その1)部分日影が発電特性に及ぼす影響評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 445-446，2000
- 6) 松川洋，ほか3名：太陽光発電システムの建築的利用に関する研究(その2)異傾斜角・異方位角の混在が発電特性に及ぼす影響評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 447-448，2000

第5章 太陽光発電システムのエネルギー代替効果及び 環境負荷削減効果の検討

5.1 研究の目的

京都議定書の環境負荷削減目標達成に向け、政府は省エネルギーの推進と新エネルギーの利用促進について数値目標を掲げている。この目標によると我が国は 2010 年のエネルギー消費量を 1990 年度並まで削減するとしているが、政府の長期需給見通しによると、2010 年の家庭部門のエネルギー消費は 1990 年よりも 30%以上増加している¹⁾。つまり家庭部門は 10 年以内に 30 %の省エネルギーを達成しなければならないことになるが、ライフスタイルや機器効率の改善といった従来型の省エネルギーの推進だけでこのような大幅な目標達成は困難であり、新エネルギーの利用拡大など環境負荷削減努力も併せて行う必要がある。家庭部門で導入可能な新エネルギーとしては、PV システムがもっとも可能性が高いが、そのエネルギー代替効果や環境負荷削減効果について検討した例は少ない。また設置コストが高く経済性が見込めないことも今後の普及の阻害となっている。

PV システムについては製造段階で大量のエネルギーを消費することから、ライフサイクル二酸化炭素（以下 LCCO₂）からみて環境負荷はどうかと懸念する声も聞かれる。PV システムの LCCO₂についてはシリコン原料の輸入から設置までの検討例がある³⁾。しかしシステムの廃棄時まで考慮し真の LCCO₂を求めた例は少ない。また PV システムの二酸化炭素ペイバックタイムは発電した電力がどの発電所の電力を代替するかによって異なってくる。これについては火力発電所代替の場合の二酸化炭素削減効果を検討した例⁴⁾があるが、その他電源については検討した例が少ない。

そこで本章では

- ①首都圏及び九州地域の戸建住宅のエネルギー需要
 - ②①に基づく PV システム導入によるエネルギー代替効果及び環境負荷削減効果
 - ③ PV システムの LCCO₂評価と発電所代替発電所別二酸化炭素ペイバックタイム
 - ④ PV システムの経済性評価
 - 1.設置・メンテナンス等による支出と、発電収支等による収入のバランス時期
 - 2.炭素税による投資コスト償却期間の短縮効果
 - 3.火力発電所代替による社会的経済効果
 - 4.石油備蓄施設代替による社会的経済効果
- について検討する。

5.2 エネルギー代替効果及び環境負荷削減効果

本節では、首都圏（一都三県）と九州地域の戸建住宅のエネルギー消費量を第2章のエネルギー消費構造モデルから推測するとともに、これら地域の戸建住宅に3kWpのPVシステムを取り付けた場合のエネルギー代替効果と環境負荷削減効果を検討する。

5.2.1 評価方法

(1) 戸建て住宅のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の推定

家庭のエネルギー消費量については第2章で住宅種別エネルギー用途別にその構造を分析し、詳細モデルと簡易モデルを作成した。本章ではこの簡易モデルと地域の戸建住宅延床面積、世帯員数、気象情報、ストック機器の機器効率情報を用い、使用熱源、使用機器を想定すればエネルギー消費量及び各種要因の影響量を推定する。使用熱源とその使用量がわかれば二酸化炭素排出量も推定できる。本節ではこれにより、首都圏及び九州地域の戸建て住宅のエネルギー消費量及び二酸化炭素排出量を推定する。推定には簡易モデルを用い、首都圏や九州地域といった広域代表値の算出は各県の値を戸建住宅戸数で加重平均した値を求める。

住宅で使用する機器及びその熱源は表5.2.1として想定した。住宅の使用熱源は、電気、都市ガスのみとする。都市ガスの使用用途は、給湯と厨房の2用途とし電気はその他の全ての用途で用いる。冷暖房には、ヒートポンプ式エアコンを使用するものとし、効率（COP）は1995年全国の家庭用エアコンのストック平均である冷房2.53、暖房3.06¹⁸⁾を用いる。気象条件は、1981年から1995年までの15年間の気象データから作成された標準気象データ¹⁹⁾の中で各地の県庁所在地に近接する気象官署の地上気象観測点の値を用いる。住宅の延べ床面積及び住宅種類別の世帯員数は、平成10年の住宅・土地統計調査²⁰⁾による。

表 5.2.1 シミュレーションの前提条件

a. 使用熱源及び機器

用途	熱源	使用機器
冷房	電気	ヒートポンプエアコン (COP 2.53) ¹⁸⁾
暖房	電気	ヒートポンプエアコン (COP 3.06) ¹⁸⁾
給湯	都市ガス	ガス給湯付風呂釜
厨房	都市ガス	ガスコンロ
その他	電気	その他機器

b. その他条件

エネルギー消費量	第2章 簡易モデルによる推定
気象条件	標準E A気象データ ¹⁹⁾
戸建住宅属性	延床面積 ²⁰⁾
	世帯員数 ²⁰⁾
重み付け値	戸建住宅数 ²⁰⁾

PV システムの環境負荷削減効果は発電した電力がどの発電所の電力を代替するかで評価が大きく変わる。これは電気の二酸化炭素排出量が発電所タイプにより異なるからである。表 5.2.2 に発電所タイプ別の需要端の二酸化炭素排出原単位¹¹⁾を示す。原子力、水力、その他エネルギーも含めた全電源の炭素発生量は 98g-C/kWh である。しかし火力発電所平均では 188g-C/kWh とその 2 倍である。火力発電所の稼働は昼の負荷変動分を担う役割が大半で、この負荷変動分の大半は業務用、産業用であり、住宅用電気の昼の負荷変動は全体から見るとベース負荷の一部である。通常住宅で使用される電気は全電源からの供給と考えて差し支えない。しかし PV システムは昼のみ発電するので、その発電電力は火力発電所の代替と考える事が妥当である。なお都市ガスの二酸化炭素排出原単位は 10,000kcal/m³ の場合 584g-c/m³ である。

表5.2.2 発電所のタイプ別二酸化炭素排出原単位（1998年度，需要端）¹¹⁾

単位：g-c/kWh		
火力 発電 所	石炭火力	244
	石油火力	202
	LNG火力	131
	火力平均	188
全電源平均		98

(2) PV システムの発電能力

①初年度発電量： E_{p0}

シミュレーションに用いた PV システムの仕様を表 5.2.3 に示す。PV システムは南向き、傾斜角 30° で発電能力は 3kWp である。この方位・傾斜角は年間発電量の最大値が期待出来る設定である。日射量はこの場合も標準 EA 気象データ¹⁹⁾の県庁所在地の水平日射量データから、パネルに入射する日射量を推定したものである。初年度発電量 E_{p0} は、首都圏の住宅用 PV システムの計測により得られた(3.4.6)式でもとめる。

PV システムの発電効率はパネルの質的变化、表面の汚れ等により、経年で低下すると予想される。アモルファス太陽電池では、初年度発電効率 5 %が 6 年後に 4 %に低下したと報告されている⁶⁾。発電効率の低下が経年で連続的であると仮定するとアモルファス太陽電池は $d=0.965$ である。結晶系太陽電池についても、発電効率の低下が予想される^{6),7)}が、アモルファスタイプに比べて小さいと推定されるので、毎年対前年発電効率が 1%低下するものと仮定し、 $d=0.99$ とする。またこの時の期待発電量は、設置から撤去までの平均発電量になる。PV システムは既存住宅への設置が過半数を占めており、その平均稼働期間は、住宅の平均寿命約 26 年¹⁶⁾ [注 1]よりも短いと考えられる。そこで PV システムの平均寿命を 20 年と仮定する。20 年間の平均期待発電量は、 E_{p0} の 90 %である。

表 5.2.3 導入 PV システム

	仕様
定格容量	3kWp
種類	単結晶
パネル方位	南向き
傾斜角	30°
初年度発電量： E_0	(3.4.6) 式
発電効率経年変化： d	0.99
期待発電量	20年間の平均発電量

5.2.2 エネルギー代替効果と環境負荷削減効果

住宅に PV システムを設置する前後のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量、発電期待値の計算結果を表 5.2.4 に示す。ここで PV 導入後のエネルギー消費量及び二酸化炭素排出量とは、発電による火力発電所代替効果も考慮された値である。

戸建住宅のエネルギー消費原単位が最も大きくなるのは埼玉県で47.9GJ/年、次いで佐賀県の47.0GJ/年である。最小は鹿児島県の40.5GJ/年である。東京都の戸建住宅のエネルギー消費原単位は43.5GJ/年である。

図5.2.1に東京都の戸建住宅のエネルギー消費量を基準に、その他の県の住宅とエネルギー消費原単位に差の出る要因とその効果を示す。埼玉県の住宅のエネルギー消費原単位が大きくなる理由は、冬期の気候が寒冷であること、世帯員数が多い事が影響している。一方、佐賀県の住宅のエネルギー消費量が多いのは世帯員数が多い事が主要因で、気象要因による増大効果は小さい。鹿児島県の戸建住宅のエネルギー消費が小さいのは世帯員数が少ないことが原因である。

表 5.2.5 に、各県の戸建て住宅数で加重平均した期待発電量、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量及び削減率を示す。3kWp の PV システム導入により首都圏、九州地域平均では 2.687kWh/年の発電量が期待される。エネルギー消費量は 45GJ/年で、二酸化炭素排出量は 901kg-C/年である。PV システム発電による住宅内消費エネルギー代替効果は、自家消費電力分だけでなく、電力会社に売電した電力分も加えて考える。これは最終的に他の需要家が消費する電力を PV が発電した電力で賄うので、この分を発電した住宅のエネルギー代替と考えるものである。またそれが火力発電所の燃料使用を削減したと考えるとエネルギー代替効果は 22%、二酸化炭素排出量削減効果は 56%である。

表 5.2.4 県別エネルギー消費量及び二酸化炭素排出量及び削減効果のシミュレーション結果

		エネルギー需要		PV導入前		PV導入後		
		電力 [kWh]	都市ガス※ [m ³]	エネルギー消費量 [MJ]	CO2排出量 [kg-c]	期待発電量 [kWh]	エネルギー消費量 [MJ]	CO2排出量 [kg-c]
首都圏	埼玉県	6,119	619	47,922	961	2,709	38,169	452
	千葉県	5,753	593	45,542	910	2,713	35,774	400
	東京都	5,808	541	43,538	885	2,552	34,351	405
	神奈川県	5,727	580	44,887	900	2,722	35,089	388
九州地区	福岡県	5,667	561	43,879	883	2,650	34,341	385
	佐賀県	5,913	614	46,986	938	2,610	37,591	448
	長崎県	5,541	540	42,544	858	2,521	33,468	384
	熊本県	5,981	575	45,607	922	2,764	35,658	403
	大分県	5,720	541	43,213	876	2,826	33,038	345
	宮崎県	5,795	515	42,392	868	2,942	31,801	315
	鹿児島県	5,775	472	40,517	841	2,799	30,441	315

※都市ガス：1m³=41.84MJ

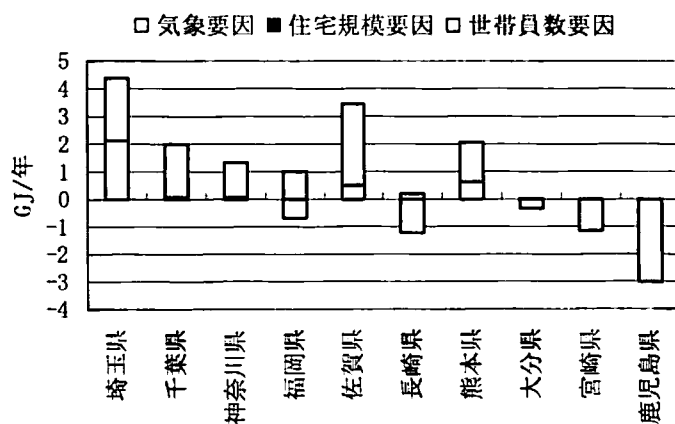


図5.2.1 県別住宅エネルギー消費の変動要因とその効果 (東京都戸建住宅との比較)

表 5.2.5 エネルギー代替効果と環境負荷削減効果

	期待発電量 [kWh/年]	エネルギー消費量[MJ/年]			CO2排出量[kg-c/年]		
		導入前	導入後	削減率	導入前	導入後	削減率
首都圏	2,668	45,409	35,802	21%	913	412	55%
九州地域	2,721	43,399	33,604	23%	880	369	58%
両地域平均	2,687	44,675	35,000	22%	901	396	56%

5.3 ライフサイクルから見た環境負荷

5.3.1 ライフサイクルCO₂による環境負荷削減効果

PV パネルの製造から、関連設備の製造にかかる二酸化炭素排出量は、これまでの研究³¹⁾で 1,336kg-c/3kWp、インバータ製造時の二酸化炭素排出量は 28kg-c/台と考えられるが、これには施設の運搬・廃棄時の二酸化炭素排出量が考慮されていない。そこで本節では PV システム設置時及び解体時の運搬に伴う二酸化炭素排出量を、表 5.3.1 の前提条件により求める。

表5.3.1 設置・廃棄時運搬の二酸化炭素排出量算出の前提条件

PVシステム総重量	450 kg
運搬距離（トラック）※	200 km/片道
トラック輸送燃費	905 kcal/t-km
ガソリンCO ₂ 排出係数	0.77 kg-c/10 ⁴ kcal
運搬時CO ₂ 排出量※	6.2 kg-c/件

※設置時と廃棄時運搬距離は同じとした

運搬時の二酸化炭素排出量は、運搬物の重量と運搬距離によって決まる。架台も含めた 3kWp の PV システム総重量は 450kg¹⁵⁾である。設置時、廃棄時の運搬物はほぼ同じと見なし、それぞれトラックで片道 200km 運搬するものとして計算した。この時のトラックのエネルギー消費原単位は 905kcal/t-km¹⁷⁾で、それぞれ 6.2kg-c / 件である。

この結果得られた薄型多結晶シリコン 3kWp 分の原料輸入から廃棄及び関連施設の製造・廃棄までのライフサイクル CO₂排出量の内訳を図 5.3.1 に示す。

- 原料輸入～PV製品製造
- インバータ製造
- 解体時運搬(廃棄・リサイクル場)
- 架台・配線材料・開閉器製造
- 施工時運搬

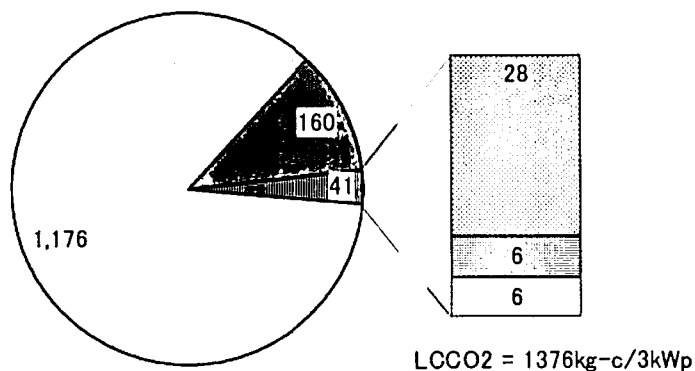


図5.3.1 PVシステム(3kWp)のLCCO₂内訳

5.3.2 代替電力別二酸化炭素ペイバックタイム

代替する発電所のタイプ別に二酸化炭素ペイバックタイムの計算結果を図 5.3.2 に示す。首都圏、九州地域での期待発電量から推測されるペイバックタイムは、全電源を代替すると考えた場合で 4.8 年、火力発電所を代替とした場合で 2.5 年となる。最も短いのは石炭火力発電所を代替した場合で 1.9 年である。PV システムは昼しか発電しないので、負荷変動分を担っている火力発電所の代替と考える事が適当であろう。

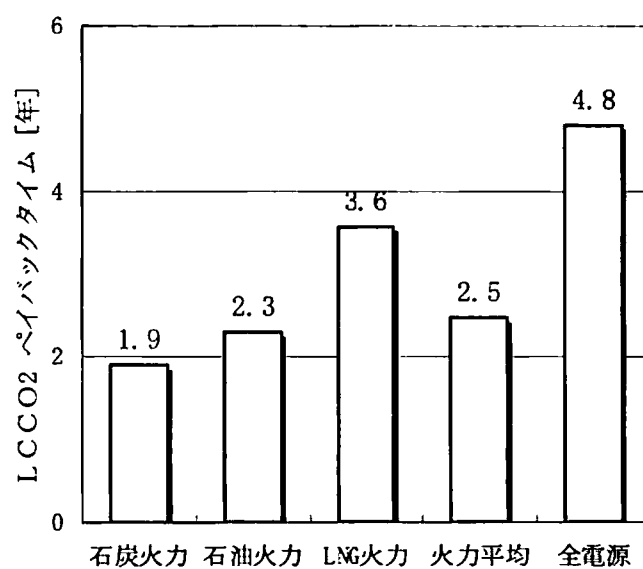


図5.3.2 代替電力別二酸化炭素ペイバックタイム

5.4 経済性の検討

設備の経済性評価は、一般に償却年数をベースに行われる。償却年数は従来の購入エネルギーシステムに追加された PV システムの初期投資額としての増分及びシステムにより節約されるエネルギーの価格をベースとして、種々の要素を考慮して総合的に評価される。表 5.4.1 に本節で用いる主な記号を示す。

また表 5.4.2 には、PV システムの経済性を検討するための前提条件を示す。

表5.4.1 主な記号

[経済性評価]	
C	: 初期投資額 (PV システム設置価格) [万円]
M	: 年間設備補修費 [万円/年]
E_0	: 初年度電力料金節約額 [万円/年]
N	: 償却年数 [年]
j	: 経過年
T_c	: 電力使用にかかる炭素税 [円/kWh]
D	: 直接的経済利益
O	: 間接的経済利益
D_E	: 電力料金節減額 [万円/年]
D_c	: 炭素税削減額 [万円/年]
[PV システム]	
P_{AS}	: 基準状態の定格出力 [kW]
H_A	: パネル面入射日射量 [kW/m ²]
G_S	: 基準日射量 [kW/m ²]
k	: システム出力係数
k_t	: 温度補正係数
k_{cat}	: 複合補正係数
E_p	: 初年度発電量 [kWh/kWp・年]
d	: 対前年発電率 (E_{p+1}/E_p)

表5.4.2 経済性検討の前提条件

電力単価	時間帯別電灯	28.0 円/kWh
炭素税		1.2 万円/t-c
火力発電所炭素発生量		188 g-c/kWh ※1
PV 設備初期投資額	C	80 万円/kWp
		40 万円/kWp
		20 万円/kWp
初年度発電量※2	E_{p0}	995 kWh/kWp・年
対前年発電率	d	0.99
年間設備補修費	M	0.015・C 円/年

※1 火力発電所平均値

※2 首都圏、九州地域平均

5.4.1 評価方法

PV システム設置者の経済利益を直接経済利益及び間接経済利益に分けて検討する。ただし現在（財）新エネルギー財団が行っている設置の助成金は考慮しない。これはこの助成事業が 2002 年度で終了予定のためである。また支出については初期投資額、経常支出、金利等を考慮する。

外部コストを考慮して PV システムの経済性が成立する条件は(5.4.1)式である。

$$C \frac{(1+r)^N}{(1+if)^N} + \sum_{j=1}^N M \frac{(1+r)^{j-1}}{(1+if)^{j-1}} < C' \frac{(1+r)^N}{(1+if)^N} + \sum_{j=1}^N M' \frac{[(1+r)(1+u)]^{j-1}}{(1+if)^{j-1}} \quad (5.4.1)$$

(5.4.1)式の左辺は償却期間中のシステムの総支出で、右辺は外部コストも含めた総収入である。左辺の C は初期投資額、 M は経常的な支出を表す。右辺の C' は初期投資削減により得られる利益及び設置補助金額、 M' は経年で得られる収益を表す。また r は金利、 if はインフレ率、 u は燃料価格上昇率である。

ここで、インフレ率 $if = 0\%$ 、年金利 $r = 2\%$ 、燃料価格上昇率 $u = 0\%$ とすると(5.4.1)式は、(5.4.2)式の通り簡略化できる。

$$1.02^N C + \sum_{j=1}^N 1.02^{j-1} M < 1.02^N C' + \sum_{j=1}^N 1.02^{j-1} M' \quad (5.4.2)$$

5.4.2 支出内訳

(1) 初期投資額： C

対象とする PV システムは、太陽電池（PV パネル）と付属機器（インバータ等）からなる住宅用 PV システムである。PV システム設置にかかる 2000 年度平均価格は 1kWp 当たり 79.5 万円である⁸⁾。設置価格は、過去 5 年間で約 1/2 に下がっており¹⁾、今後も量産化により価格の低下が期待される。そこで PV システムの初期投資額 C を 80 万円、40 万円、20 万円の場合について検討する。

(2) 設備改修費： M

設備改修費 M についてはソーラーヒートポンプ PV システムの場合²⁾と同様に初期投資額の 1.5% ($M=0.015C$) とする。

5.4.3 収入内訳

(1) 直接経済利益：D

直接経済利益は、発電による売電収入と、購入電力量削減によるトータルの電力料金の削減及び、炭素税が導入されている場合の減税分よりなる。

① 発電による収入： D_{Ej}

j 年目の発電による収入 D_{Ej} は

$$D_{Ej} = E_0 \cdot d^{j-1} \quad (5.4.3)$$

である。

住宅用 PV システムから逆潮流する電力は、現在電力会社が販売単価とほぼ同額で購入している [注 2]。住宅用電灯契約には、従量と時間帯別があるが、その単価が異なるので逆潮流電力の販売価格も契約により異なる。従量電灯契約者の電力購入価格は 1999 年関東地区の平均電力価格 24.5 円/kWh¹¹⁾、時間帯別電灯契約の場合は 28.0 円/kWh なので、経済的に有利な時間帯別料金を採用する。初年度発電量 $E_{p0} = 995\text{kWh}$ であるから、これを年間の電力料金に換算すると、 $E_0 = 2.8$ 万円/kWp・年となる。

② 炭素税削減： D_{Cj}

j 年目の炭素税削減額 D_{Cj} は

$$D_{Cj} = Tc \cdot E_{p0} \cdot d^{j-1} \quad (5.4.4)$$

である。

近い将来我が国でも炭素税の導入が予想され、欧米先進国では、1 t 当たり 2000 円～18000 円（2000 年 10 月為替レート平均による換算値）¹²⁾である。また世界的な排出権取引価格も 20 ～ 125 ドル¹³⁾程度である。そこでここでは、炭素税額を 1 t 当たり 100 ドル（12,000 円）として計算する。

(2) 間接経済利益： O

間接経済利益としては、火力発電所の代替による建設費及び公害防止設備投資の削減、国家備蓄への貢献などが考えられる。表 5.4.3 に外部コスト毎に間接利益換算値を示す。

表5.4.3 外部コストの間接利益換算結果

間接経済利益換算		
火力発電所建設コスト分	O_{c1}	3.2 万円/kWp
公害防止コスト節約	O_{c2}	0.03 万円/kWp・年
建設コスト節約	O_{c3}	0.79 万円/kWp
原油購入コスト節約	O_{c4}	0.48 万円/kWp

①火力発電所の代替： O_{c1}

我が国の火力発電所の建設に毎年投入される金額は、1kW の設備当たり 21.8 万円である¹¹⁾。火力発電所の年間設備利用率は約 40 %¹²⁾であるが、新設の場合はこれより大きいものと考えられる。原子力発電所の設備利用率は 80 %前後であるから、新設火力発電所は原子力発電所よりやや低めの 70%と仮定する。また送電ロス⁹⁾は電力会社平均 5.5%である。これらを考慮すると、平均的な PV システム 1kWp の火力発電所代替期待値は 0.15kW と考えることができる。これより $O_{c1}=3.2$ 万円/kWp が得られる

②発電所の公害防止対策設備投資の削減： O_{c2}

電力会社は、発電所の公害防止対策として、脱硫・脱硝対策や水質汚濁防止対策、廃棄物対策など毎年多額の投資を行っている。東京電力の 1999 年度の公害防止対策にかけた費用は火力・水力発電所合計で 481 億円、火力及び水力発電の年間発電量は 1,481 億 kWh である¹³⁾。電力会社は、発電所建築時に既に大規模な公害防止対策を終えているので、481 億円を公害防止設備の維持管理コスト（人件費は除く）と見なすと、公害防止設備の維持管理コストは需要端当たり 0.34 円/kWh である。1kWp 当たりは 0.03 万円/年（ $=O_{c2}$ ）となる。

③石油国家備蓄への貢献： O_{c3}, O_{c4}

我が国がエネルギー安全保障のために備蓄している石油は 150 日分（9200 万 kL）である。このうち約半分は国家備蓄であり、国は約 1 万円/kL・年の費用を支払っている¹⁴⁾。火力発電所の発電効率は九電力平均で 2,455kcal/kWh¹²⁾であるから、石油備蓄 1L は、需要端で 3.6kWh の発電に相当する。平均的な PV システム 1kWp の年間発電量は、石油火力発電所の 238L に相当し、これを発電用石油の備蓄でもあると考えると、原油の購入は不要となる。平成 12 年度の原油平均価格は 1.96 万円/kL であるから、原油価格 2.0 万円/kL とすると、石油備蓄のための初期原油購入価格にかかる経費 $O_{c4}=0.47$ 万円/kWp の購入コストが削減できることになる。

また石油備蓄に係る建設コストは、菊間地下石油基地の場合で、150 万 kL の備蓄設備の建設に約 500 億円を投じているので、1kL あたり 3.2 万円/kL の建設コストとなる。こ

の建設コストを PV の建設コストに充てるとすれば $O_{c1} = 0.79$ 万円/kWp の補助が可能となる。

5.4.4 経済性総合評価

本章での各要素の検討結果を(5.4.2)式にあてはめると、

$$1.02^N C + \sum_{j=1}^N 1.02^{j-1} M < 1.02^N (O_{C1} + O_{C3} + O_{C4}) + \sum_{j=1}^N 1.02^{j-1} (O_{C2} + D_{Ej} + D_{Cj}) \quad (5.4.5)$$

となる。

(5.4.5)式より電力契約別、初期投資額別に PV システムの経済性を検討した結果を図 5.4.1 に示す。また図 5.4.2 に、経済収支の分岐点となる年の支出と収入の内訳を示す。

この計算によると、初期投資額（設置コスト）80 万円の場合は、直接・間接の経済利益を最大限考慮しても収入が支出を上回ることはいない。40 万円まで低下すると、20 年で直接・間接収入の合計が支出を上回る。このとき炭素税減税による効果は 5.0 万円（20 年間累計）である。外部コスト代替効果は 7.4 万円である。電力収入のみの場合は 29 年以上かかるが、我が国の住宅の平均寿命 26 年¹⁶⁾ [注 1] よりも長く非現実的な数字である。

初期投資額が 20 万円となると、発電収入だけで 10 年、直接・間接収入の合計で 7 年後に支出を上回る。太陽電池の法定耐用年数が 15 年という事を考えると、1kWp 当たり 20 万円という金額が、経済性を検討する上では現実的な数字といえる。

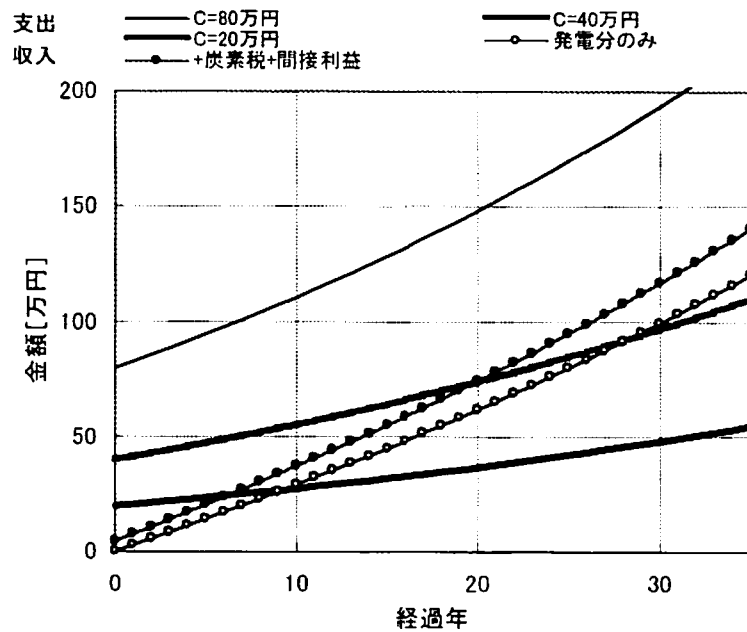


図5.4.1 PVシステムの経済収支

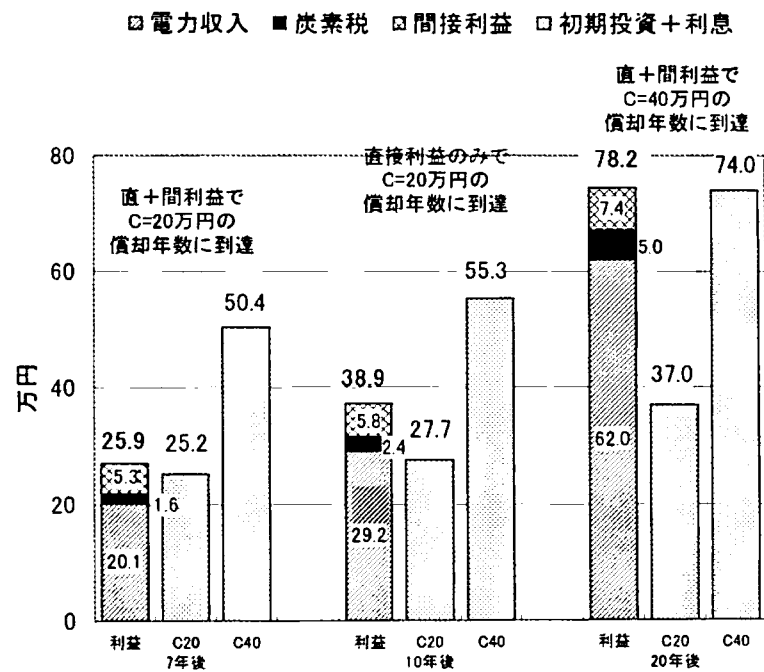


図5.4.2 PVシステムの経済収支内訳

5.5 まとめ

首都圏及び九州地域の戸建住宅のエネルギー消費量を推定するとともに、この地域での住宅用 PV システムによるエネルギー代替効果及び環境負荷削減効果を求めた。また PV システムのライフサイクル CO₂ を求め、PV システムが真に環境負荷低減に寄与することを示した。また PV システムの経済収支が成立する条件を、設置者の直接経済利益と、社会が間接的に得る経済利益（外部コスト）を含め検討した。

首都圏、九州地域の戸建住宅のエネルギー消費量は、第 2 章で作成した簡易モデルを用いたもので県別にもとめた。計算には既存統計データの各県の戸建住宅の平均延床面積、平均世帯員数を用いた。気象条件は標準気象データを用い、使用する機器は冷暖房が電気式ヒートポンプエアコンで、給湯・厨房の熱源には都市ガスを使用するものとした。この場合の両地域の戸建住宅のエネルギー消費量は、戸建住宅戸数の加重平均で 45GJ、二酸化炭素発生量は 901kg-C/年である。南向きに傾斜角 30°、3kWp の PV システムを取り付けた場合の期待発電量（20 年間の平均発電量）は、同様に加重平均で 2,687kWh/年である。これより PV システム発電によるエネルギー代替効果は 22%、二酸化炭素排出量削減効果はその 2 倍以上の 56%となる（ただし電力会社に売電した電力があるが、その分は他の需要家が使用するので、その分も発電した住宅のエネルギーを代替したものと考えらる）。

PV システムのライフサイクルの二酸化炭素排出量は 1376kg-C/3kWp で、この値は全電力源を代替とした場合で 4.8 年、火力発電所代替で 2.5 年で、ライフサイクル分の二酸化炭素排出分は精算され、以降クリーンなエネルギー源として電力を生産し続ける事となる。このことから PV システムの環境負荷の削減効果は大きいと言える。京都議定書の目標年度である 2008～2012 年に温室効果ガス排出量を 1990 年の 6%削減を実現するには、クリーンエネルギーの早急な開発が求められており、導入時に技術的問題は解決している PV システムを中心に自然エネルギーの大量導入を積極的に推進すべきと考えられる。

しかしこれまで以上に PV システムを普及させるためには経済的なメリットが必要条件となる。2000 年度末現在の PV システム設置工事費用も含めた初期設置コストは約 80 万円/kWp であるが、この金額では、直接・間接的収入を最大限に考慮しても経済性は成立しない事が確認された。近い将来、この価格が半分の 40 万円/kWp となれば、20 年で収支バランスがとれるが、発電収入のみではまだ 29 年以上かかり、現実的にはさらに半額の 20 万円/kWp となるまで待たなければならない。この時発電収入は 10 年で支出を上回り、外部コストを考慮すれば 7 年で経済収支は成立する。PV システムの大幅な普及を期待するのであればこの 20 万円/kWp という数字が一つの目安と言えよう。それまでは、設備価格引き下げの努力は勿論であるが、炭素税の検討、外部コスト代替による社会的経済利益分の設置者への還元（助成金等）などが必要である。

〔注釈〕

注 1) 住宅平均寿命

この数値は昭和 30 年代から 40 年代での住宅ストックの建て替えによるもので、その後の住宅性能を考慮すると今後はもう少し伸びるものと考えられる。

注 2) 時間帯別電灯契約時の電力単価

時間帯別電灯契約時の購入単価と逆潮流電力の販売単価の決定方法は電力会社によって異なるが、購入価格と同額ないしほぼ同額である。しかし逆潮流電力の販売価格を比較する場合は、販売価格で単純比較はできない。これは、時間帯電灯契約の電力単価が時間帯で異なるからである。両者を比較する場合は、電力の時間帯別消費割合とその時間帯の単価を総合的に考慮する必要がある。首都圏の住宅 132 件の実績¹⁾⁵⁾では、時間帯別電灯契約への切り替えによりメリットが得られる住宅は 132 件中 129 件であった。更に購入電力分の単価を従量電灯契約と、時間帯別電灯契約が同値となる様に正規化した場合、時間帯別電灯契約の逆潮流電力販売単価は平均 32 円/kWh 強である。ただしこの 132 件は高い省エネ意識を持つ世帯が多く一般的でないと考えられるため本研究ではこの値を用いない。

【参考文献】

- 1) 総合資源エネルギー調査会：総合部会報告書，経済産業省，2001
- 2) 金山公夫，趙春江，馬場弘，遠藤登：ソーラーヒートポンプ P V システムの経済性評価，太陽エネルギー，Vol.25, No.1, pp.43 - 48, 1999
- 3) 太陽光発電技術研究組合：太陽光発電評価の調査研究，新エネルギー・産業技術総合開発機構，1998
- 4) 手塚哲央，奥島啓介，佐和隆光：炭素税による太陽光発電導入促進とその二酸化炭素排出削減効果，エネルギー資源，Vol.22, No.5, pp.379-509, 2001
- 5) 田中昭雄，酒井孝司田中昭雄，酒井孝司，中上英俊，石原修，首都圏に設置された住宅用太陽光発電システムの計測・解析－太陽光発電システムの住宅への応用に関する研究その 2－，日本建築学会計画系論文集，No.544, pp.39-46, 2001
- 6) 酒井孝司，石原修，清水淑子：太陽光発電システムの発電効率と影響因子に関する計測・解析その 5 太陽電池モジュールの発電効率に関する長期実測結果，太陽/風力エネルギー講演論文集，pp.145-148, 1999
- 7) 守田賢吾，菱川善博，阪本貞夫，大城壽光：結晶計太陽電池モジュールの屋外暴露に

- よる外観変化と出力低下の関係, 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.287-290, 2000
- 8) (財) 新エネルギー財団: http://www.solar.nef.or.jp/josei/m12_pricer.htm/, 2001
- 9) (株) 住環境計画研究所: 家庭用エネルギー統計年報, 住環境計画研究所, 2001
- 10) 環境経済・政策学会: 「地球温暖化への挑戦」, 東洋経済新聞社, 1999
- 11) 鶴崎敬大, 中上英俊: 地球温暖化対策評価における CO₂ 排出原単位に関する考察, エネルギー・資源学会第 19 回研究発表会論文集, pp.159-162, 2000
- 12) 資源エネルギー庁: 電力需給の概要 2000, 中和印刷㈱, 2001
- 13) ㈱東京電力: TEPCO 環境行動レポート 2000, ㈱東京電力, 2001
- 14) 福田研二他: 太陽エネルギーの価値ならびに我が国における賦存量の評価と導入戦略, エネルギー・資源学会, 第 18 回研究発表会論文集, pp.407-412, 1999
- 15) クリーンエネルギー普及調査会: 太陽光発電モニター事業報告書 (最終版), クリーンエネルギー普及調査会, 2001
- 16) 建設白書: 建設省平成 8 年度版, 建設省, 1997
- 17) 省エネルギーセンター: 省エネルギー便覧 1999・2000 年版, (財) 省エネルギーセンター, 2001
- 18) 住環境計画研究所: 家庭用エネルギーハンドブック, (財) 省エネルギーセンター, 1999
- 19) (社) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 2000
- 20) 総務庁: 平成 10 年住宅・土地統計調査, 総務庁, 1999

第6章 結 論

本研究は家庭部門使用エネルギーの自然エネルギーへの代替促進に資するため、住宅用 PV システムのエネルギー代替効果及び環境負荷削減効果を検討したものである。以下に各章で得られた知見を述べる。

第 1 章では、PV システムをはじめとするクリーンエネルギー開発の必要性を、民生家庭部門のエネルギー消費の増大と深刻化する地球環境問題に関連づけて述べるとともに、これまでの家庭用エネルギー消費研究及び PV システムの発電特性に関する研究動向について概説した。

第 2 章では、家庭の用途別エネルギー消費の構造分析のため、エネルギー消費量の計測調査を行い、この結果に基づき住宅種別用途別エネルギー消費構造モデルを 2 つ作成したが、これらのモデルは既存統計やアンケート調査による従来からの研究手法にも適用されることを想定したものである。実測調査は首都圏及び熊本市内の普通世帯 24 件を対象に行い、電気と都市ガスのエネルギー消費量を計測した。更にヒアリング調査などを併用して非計測エネルギーの使用量調査、構造分析のための住宅属性、世帯属性情報の収集を行った。得られたエネルギー消費データ、属性データ、気象データ等から、詳細モデルと簡易モデルの 2 つの用途別エネルギー消費構造モデルを作成した。詳細モデルはアンケート調査と統計資料、気象データの併用、簡易モデルは統計資料と気象データのみの使用を想定したモデルで、いずれもアンケート調査や既存統計データを利用する従来手法よりも高い推定精度が得られた。

第 3 章、第 4 章では、首都圏及び九州地区の既存住宅に設置された PV システムの発電データを分析し、多種多様な環境下での発電実態を明らかにし、既設システムの期待発電量の推定式を作成した。

第 3 章は首都圏に設置された 132 件の住宅用 PV システムの 1988 年 10 月から 1999 年 9 月までの 1 年間の発電量、日射量、パネル裏面温度を計測し分析したものである。この調査では発電効率が季節変動すること、また一面設置と複数面設置のシステムでは年間の発電効率や効率の季節変動パターンが異なり、特に複数面設置のシステムは冬期に一面設置のシステムより効率が低くなることを示した。更にその発電効率がパネル裏面温度やインバータの直流/交流変換特性により変化する事を示し、一面設置 PV システムの年間の発電量推定式を作成した。第 4 章では九州地域の住宅用 PV システム 142 件について、設置後 1 年間の発電実績と設置前後 1 年間の住宅内の電力消費をアンケート調査した。このうち 16 件についてはさらに発電量とパネル温度の計測調査も行った。

首都圏と九州地域のいずれの調査でも、複数面設置 PV システムの発電量が一面設置のシステムよりも小さくなる傾向が認められたが、この原因は一面設置は主に南向きに設置されるのに対し、複数面設置では南向き以外にも東・西・北向きにも設置されるため日照条件が悪く入射日射量が少なくなることが主因と考えられるが、複数面設置の発電量は入射日射量のみでは説明できないほど小さいことも多く、他の要因として複数面設置ではパ

ネルへの入射日射量にアンバランスが発生し発電効率が低下する可能性を示した。

この"日射量アンバランスによる発電効率低下"という仮説を検証するため、第4章では熊本大学地域共同研究センター内実験住宅において、パネルの部分遮蔽（部分日陰）実験を行いアンバランス状態を再現し仮説の検証を行った。PVシステムは直列するストリングが並列して設置され1つのシステムを形成しているが、この再現実験では、パネルへの入射日射量は同じでも、その部分日影のつき方で発電量に差異が生じることが確認された。具体的には直列する同一ストリング内で生じる影よりも、並列する複数ストリングに横断して生じる影の方が発電量の低下率が大きい。第3章で報告した冬期の複数面設置システムの発電効率の低下原因も、低い太陽軌道による日射アンバランス発生が原因と考えられる。更にこの調査において、PVシステム導入世帯の電力消費が設置前に比べ約1割減少することも確認され、PVシステム設置が家族の電力消費行動にも影響を与える事が示唆された。

第5章では、第2章と第3章、第4章の研究結果に基づき、住宅にPVシステムを導入した場合のエネルギー代替効果と二酸化炭素排出量の削減効果を検討した。この検討で住宅用PVシステム3kWpは発電により22%のエネルギー代替効果が期待でき、二酸化炭素排出量の削減効果は56%とエネルギー代替効果よりも大きい事が判明した。

次にPVシステムのライフサイクルCO₂と代替する電力別の二酸化炭素ペイバックタイムを計算した。全電力源を代替とした場合のペイバックタイムは4.8年、火力発電所代替は2.5年で、PVシステムが環境負荷削減効果の大きいシステムである事が再確認された。更にPVシステムの経済性の評価も行った。この評価には設置者の直接経済利益だけでなく、社会が受ける間接的経済利益（外部コスト）を含め検討した。外部コストとしては火力発電所の代替、発電所の公害防止設備投資コストの削減、国家備蓄への貢献である。この結果2000年度末現在の設置コスト約80万円/kWpでは、直接・間接の経済利益を最大限考慮してもその経済性は望めないと結論した。この価格が半分の40万円/kWpとなれば、20年で収支バランスがとれるが発電収入のみで収支を考えると約30年かかる。住宅やシステムの法定耐用年数等を考慮すると、現実的にはさらに半分の20万円/kWpとなるまで待たなければ経済性が成立するとは言い難い。20万円/kWpとなれば発電収入だけでも10年で支出を上回り、外部コストを考慮すれば7年で経済収支が成立する。PVシステムの大幅な普及を期待するのであればこの20万円/kWpという数字が一つの目安と言えよう。それまでは、設備価格引き下げの努力は勿論であるが、炭素税の検討、外部コスト代替効果の設置者への還元（助成金等）などが必要と考える。

このように住宅用PVシステムは、家庭部門のエネルギー代替及び環境負荷の削減に大きな効果が期待できる。しかし経済性が成立するには、まだまだコストは高く現状の1/4の約20万円/kWpまで価格が低下する必要がある。

技術的課題としては、定格発電能力に対して、実際の発電量（システム効率）が80%に達していないことから更なるシステム効率の向上やPVシステムの発電効率の向上が期待される。このためには、

1. パネル温度上昇の防止対策、温度による効率低下の低いパネルの開発

- 2.入力値が小さいときのインバータの変換効率の改善
- 3.部分日影など日射アンバランスによる効率低下の最小化
- 4.発電可能波長領域の拡大，散乱光の利用

などが挙げられる。

1 及び 4 については，パネル冷却を促進するようなパネル構造や設置方法の開発，温度依存性の少ない太陽電池の開発やアモルファス太陽電池等異種太陽電池とのハイブリッド化などが考えられる。2 についてはインバータ容量の適正化の検討が必要である。3 についてはパネルの結線や配置方法の工夫，インバーター一体型太陽電池"AC モジュール"の開発，バイパスダイオード導入などが効果的と考えられる。

京都議定書の目標年度である 2008 ～ 2012 年に温室効果ガス排出量を 1990 年の 6%削減を実現するには，化石エネルギー代替としてのクリーンエネルギーの早急な開発が必要であり，家庭部門においては PV システムを中心に自然エネルギー資源の積極的利用を推進すべきである。