The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	住宅における太陽光発電の普及影響と電力需要調整の評価
Author(s)	藤本, 卓也
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/67154
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

住宅における太陽光発電の普及影響と電力需要調整の評価

藤本　卓也

２０１７年７月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第１章　緒論 1
1.1　背景 1
1.1.1　太陽光発電の動向 1
1.1.2　太陽光発電大量導入による影響と対策 2
1.1.3　配電線電圧上昇問題とその対策 4
1.1.4　住宅地域での電力需要調整の取り組み状況 7
1.2　既往研究 8
1.2.1　太陽光発電の普及に関する研究 8
1.2.2　住宅設備による電力系統安定化に関する研究 9
1.2.3　住宅設備による電力需要調整に関する研究 9
1.2.4　住宅の電力需要推計に関する研究 10
1.3　研究目的 10
1.4　論文の構成 12
参考文献 13

第２章　PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の評価 15
2.1　序論 15
2.1.1　背景および目的 15
2.1.2　電力系統に及ぼす影響の評価方法の概要 16
2.2　家庭用エネルギー最終需要モデルの概要 17
2.3　PV 導入世帯の経済性評価 19
2.3.1　PV 導入世帯の経済性の評価方法 19
2.3.2　PV 導入世帯の電力需要・発電量の推計結果 20
2.3.3　PV 導入世帯の NPV 推計結果 23
2.4　PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の評価 24
2.4.1　PV の大量導入が電力系統影響の評価方法 24
2.4.2　対象地域の設定 26
2.4.3　PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の推計結果 29
2.5　PV の大量導入が配電系統に及ぼす影響の評価 32
2.5.1　PV の大量導入が配電系統に及ぼす影響の評価方法 32
2.5.2　配電線電圧計算モデル 34
2.5.3　対象地域の設定 37
2.5.4　高低圧配電線電圧の推計結果 40
2.5.5　PV の分布が配電線電圧に及ぼす影響の推計結果 42
2.6　まとめ 43
参考文献 44

第３章　住宅における電力需要調整能力および効果の評価 45
3.1　序論 45
3.2　住宅における電力需要調整の概要 46
3.3　住宅における電力需要調整能力の評価 49
3.3.1　電力需要調整能力の評価方法 49
3.3.2　各住宅の電力需要および発電量の推計結果 50
3.3.3　各住宅の電力需要調整能力の推計結果 55
3.4　住宅における電力需要調整効果の評価 58
3.4.1　住宅における電力需要調整効果の推計方法 58
3.4.2　最適機器運用モデルの概要 59
3.4.3　余剰電力買取シナリオにおける電力需要調整効果の推計結果 64
3.4.4　余剰電力抑制シナリオにおける電力需要調整効果の推計結果 68
3.5　まとめ 73
参考文献 74

第４章　電力需要調整が配電系統に及ぼす影響の評価 76
4.1　序論 76
4.2　配電系統の電力需要調整能力の評価 76
4.2.1　配電系統における電力需要調整能力の評価方法 76
4.2.2　配電系統における電力需要調整能力の推計結果 77
4.3　配電系統における電力需要調整効果の評価 80
4.3.1　配電系統における電力需要調整効果の評価方法 80
4.3.2　配電系統における電力需要調整効果の推計結果 81
4.3.3　制御単位別電力需要調整効果の推計結果 84
4.4　まとめ 87
参考文献 88

第５章　総括 89
5.1　総括ならびに結論 89
5.2　論文の課題と発展 93
参考文献 94

謝辞 95

第１章　緒論

1.1　背景

1.1.1　太陽光発電の動向

2015年11月30日から12月13日に開催された国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において、「パリ協定」が採択された。パリ協定では、「世界共通の長期目標として2℃目標のみならず1.5℃への言及」、「主要排出国を含むすべての国が削減目標を5年ごとに提出・更新すること、共通かつ柔軟な方法でその実施状況を報告し、レビューを受けること」が含まれており[1)]、より一層の温室効果ガス排出量の削減が求められている。パリ協定において、日本政府は2030年までに2013年比で26%の温室効果ガスの削減を公約している。この削減目標達成のため「長期エネルギー需給見通し」[2)]では、徹底した省エネルギーによるエネルギー消費量の削減と再生可能エネルギーおよび原子力の活用を盛り込んでいる。図1.1-1に示すように2030年度の電源構成における自然由来エネルギー（再生可能エネルギーのうち水力を除くエネルギー）の占める割合は13.2～15.8%としており、2013年度の2.2%[3)]から大幅な再生可能エネルギーの導入が求められている。

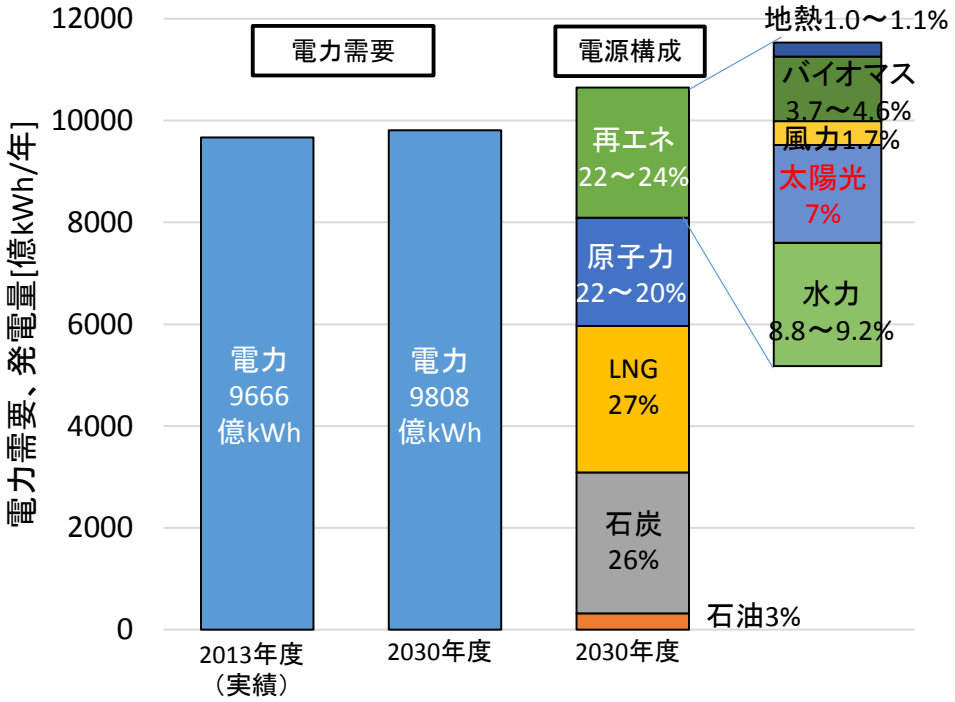


図1.1-1　2030年度における電力需要と電源構成[2)]

再生可能エネルギーの普及促進施策として、2012年より固定価格買取制度（Feed in Tariff : FIT）が施行された。FITは再生可能エネルギーである太陽光発電（Photovoltaic : PV）・風力・地熱・中小水力・バイオマスにより発電された電力を、電力会社からの購入電力よりも高い価格での買取を保障する制度である。図1.1-2はFIT制度による再生可能エネルギーの導入状況[4)]を示す。FITによる再生可能エネルギーの導入の大半をPVが占めていることがわかる。またエネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）において、「住宅については、2020年までに標準的な新築住宅で、2030年までに新築住宅の平均で住宅の年間の一次エネルギー消費量が正味（ネット）でゼロとなる住宅（net Zero Energy House、ZEH）の実現を目指す」[5)]とする政策目標を設定されている。ZEHの達成のためには、住宅

の年間一次エネルギー消費量が正味でゼロとする必要があり、住宅の屋根に設置しやすく、再生可能エネルギーによる発電装置である PV が必須であるため、今後も PV の導入量は拡大するものと予想される。

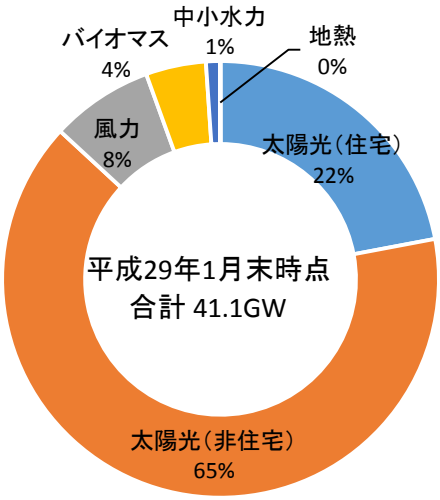


図 1.1-2　再生可能エネルギーの導入状況（既存発電設備の移行認定分を含む）[4)]

1.1.2　太陽光発電大量導入による影響と対策

PV などの再生可能エネルギーは太陽光や風といった自然エネルギーを利用して発電を行うため、得られる自然エネルギー量により発電量が大きく変動するという特徴を有している。このため、PV などの再生可能エネルギーが大量に電力系統へ連系された場合、大きく以下の 4 つの問題が発生することが懸念されている。

- 電力需給バランスの不整合
- 周波数変動の増大
- 配電線電圧の上昇
- 再生可能エネルギー発電促進賦課金の増大

電力は貯蔵が困難なため、電力需要に合わせて同時同量の供給を行う必要がある。PV は日射量に応じて発電量が決定されるため、晴天日の昼間に集中して電力が発生する。PV が大量に導入された場合、昼間の発電量が大きくなり特に休日などの電力需要が小さい時間帯において、原子力発電や水力発電といった出力調整が困難なベース電源と PV の電力のみで電力需要を超過する可能性がある。発電量が電力需要を超過した場合、同時同量の需給バランスが崩れ大規模な停電を引き起こす可能性がある。

また曇天日において雲の影響などにより太陽光の日射量が変動する場合、PV の発電量も大きく変動する。発電が需要を上回る場合、火力発電などの発電機が系統全体で余剰となったエネルギーをその回転エネルギーとして蓄えるため、回転数が速くなり周波数が上昇する。反対に、発電が需要を下回った場合、発電機がその回転エネルギーを放出するため周波数は低下する[6)]。火力・水力発電を主とする周波数調整用発電所の発電機出力を調整することで周波数変動の調整を行っているが、PV が大量に導入された場合、周波数変動が増大するため周波数調整能力が不足する可能性がある。周波数

調整能力を確保するためには、周波数調整用発電所をより多く用意する必要があり、二酸化炭素発生量の多い火力発電所の割合が大きくなる。

一方、PV の主たる設置先のひとつである新築戸建住宅が集まる新興住宅地等などの街区単位でみると、配電線電圧の上昇が懸念される。住宅地域において PV は各住宅の屋根に設置され、発電量の一部を住宅内の電力需要に利用する。一方、電力需要を超過する発電電力は余剰電力となり、電力系統側へ逆潮流として流入する。交流電力は位相差により流れ、逆潮流が発生すると配電線下流の配電線電圧が上昇する。逆潮流が配電系統内で大量に発生した場合、需要家の受電端電圧が電気事業法[7]で定められる規定範囲を超過し、需要家の精密機器等を破壊する可能性がある。

FIT による再生可能エネルギー発電量の買取にかかる費用は、再生可能エネルギー発電促進賦課金という名目で一般家庭や法人から徴収する電力料金に賦課されている。PV をはじめとする再生可能エネルギーの導入量が増大すると再生可能エネルギー発電促進賦課金が増大し、家計に占める割合が大きくなる。図 1.1-3 に示すように、PV の買取価格は減少しているが、再生可能エネルギーの買取総額は年々増加しており家計への影響が懸念されている。

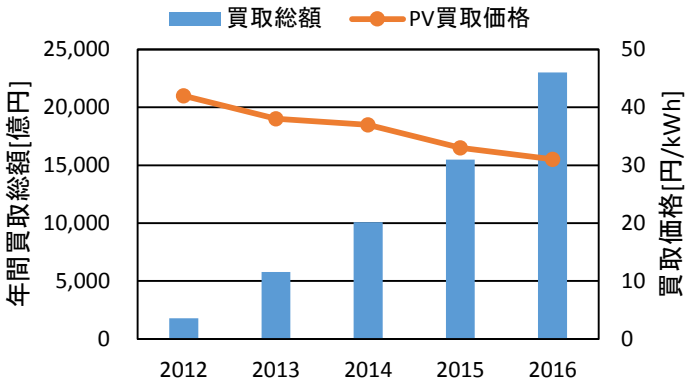


図 1.1-3　再生可能エネルギー発電促進賦課金

また日本の FIT においては PV 発電量の買取は、発電量の全量を買取対象とする全量買取方式と自己消費分を除いた余剰買取方式がある。設置する PV 容量が 10kW 未満の場合、余剰買取方式が採用されている。大部分の住宅の PV 設置容量は 10kW 未満である。余剰買取方式の場合、発電量のうち自己消費分が買取対象とならないため、住宅内の電力需要により PV 導入の経済性が異なると考えられる。後述するが、PV 導入の意思決定の上で最も大きな要因の 1 つは PV の経済性であるため[8]、PV の普及世帯に偏りが生じることが予想される。PV の普及世帯に偏りが生じ発生する余剰電力量に差異が発生した場合、上記の PV 大量導入に起因する諸問題に影響を及ぼすと考えられる。具体的には、PV 導入を検討する際に余剰電力買取方式においては余剰電力が大きい世帯ほど経済性に優れ、導入意欲が高まるため、地域内の導入容量が同じであっても全量買取方式と比較して余剰電力量が大きい世帯の普及率が高まり、上記の諸問題がより早期に顕在化することが予想される。

電力需給バランスの崩壊や周波数調整能力の不足に対する対策として、2014 年 9 月に九州電力をはじめとする大手電力会社が PV の系統連系を保留し、電力系統への連系する PV を規制した[9]。また種子島などの離島では、軽負荷期晴天日等において火力発電機等の出力を抑えても PV を含めた発電量が需要量を超過する場合、大規模太陽光発電所（メガソーラー）に対して出力抑制を指示し、発電量そのものを制御している[10]。一方、住宅地においては PV の余剰電力により局所的に配電線電圧が

上昇する問題が既に顕在化しており、需要家電圧を適正に維持するため、後述するように PV のパワーコンディショナ（Power conditioning system、PCS）において PV 発電量の抑制が行われている。今後の PV 普及のためにもこれら問題への対策が望まれている。以下では、PV の大量導入に向けた直近の問題として、住宅地域における配電線電圧上昇問題を取り上げ、その影響と対策について詳述する。

1.1.3　配電線電圧上昇問題とその対策

一般的な電力系統システムおよび配電系統の構成を図 1.1-4、図 1.1-5 に示す。電力系統システムにおいて、配電系統は配電用変電所で変圧された 6,600V の電力を供給する高圧配電系統、柱上変圧器で変圧された 100V あるいは 200V の電力を供給する低圧配電系統で構成される。図 1.1-5(a)に示す高圧配電系統の電気方式は放射状方式と呼ばれ、日本の配電系統で最も一般的な方式である。放射状方式は、建設費が比較的安価であるが、事故時に他の配電線から送電できないので、停電範囲が広くなり信頼度が低いという特徴がある[11]。一方、図 1.1-5(b)に示す環状（ループ）式がある。環状式は線路の途中に事故が発生してもループ点を通じて他の配電線からも送電できるので信頼度が高く、電力損失、電圧降下が小さいという利点があるが、建設費が高く配電系統がやや複雑となるといった欠点がある。

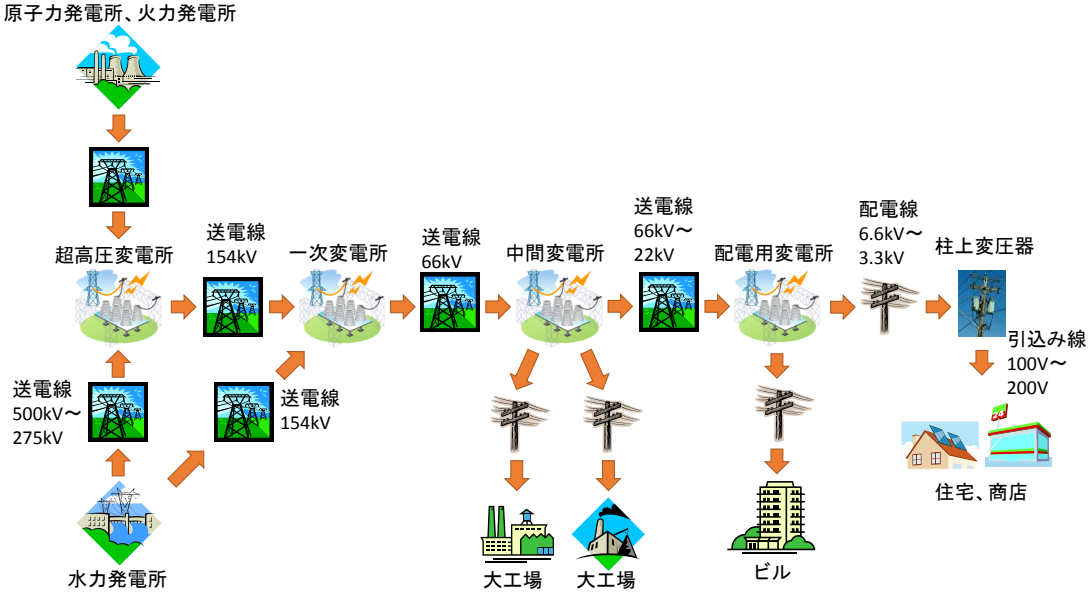


図 1.1-4　電力系統システム

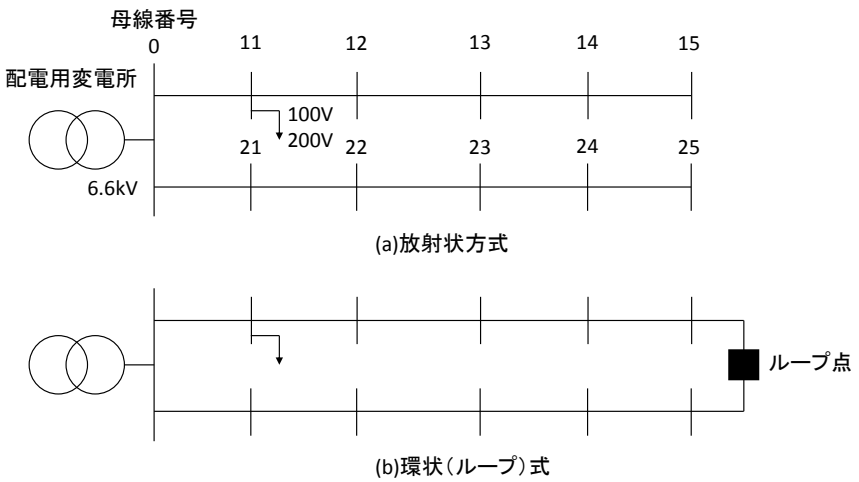


図 1.1-5　配電系統

配電線電圧の上昇は、逆潮流電力が大きいほど、また線路インピーダンスが大きい（線路が細い、線路長が長い）ほど生じやすくなる。したがって、昼間の電力需要が比較的小さい住宅地域の配電系統では、PV の連系量が増加すると逆潮流電力が大きくなり配電線電圧の上昇が生じやすい。低圧配電系統における需要家の受電端電圧は、100V の場合電気事業法[12)]で 101±6V と規定されており、電気事業者は供給電力の電圧を規定範囲内に維持する義務がある。したがって、現在では電圧逸脱が生じた際は、PV に内蔵されている PCS で回路を遮断することにより発電を停止し、電圧上昇が抑制される。この電圧上昇による発電機会の損失は PV 設置者の不利益となることから、PCS での発電抑制が頻発することは PV 大量導入の障壁となる。また電圧上昇は配電系統単位で生じること、系統の末端に近いほど影響が大きくなることから、配電系統の末端に連系する需要家において特に発電機会の損失が大きくなり需要家間での不平等が生じることも問題となる。そのため、経済産業省主導の次世代送配電系統最適制御技術実証事業[13)]においても配電系統の電圧変動抑制技術開発が検討課題として挙げられており、様々な対策の検討が行われている。

配電系統における電圧影響を決定する要因は、表 1.1-1 に示すように配電系統側要因と需要側要因の大きく 2 つに分類することができる。配電系統側要因は、主に配電系統全体で決定されるものである。一方需要側要因は地域における需要家の構成と位置や個々の需要家特性によって多様なばらつきが生じる。電圧上昇抑制対策は、これら電圧影響要因を適切に管理・制御することにより行われる。

表 1.1-1　配電系統における電圧影響要因

分類	電圧影響要因
配電系統側要因	配電用変電所送出電圧
	柱上変圧器タップ比
	線路インピーダンス
需要側要因	世帯構成
	住宅の偏在性
	PV の偏在性
	PV 導入量
	PV 力率
	機器保有・仕様
	負荷力率

ここで、配電系統における電圧上昇対策を表 1.1-2 にまとめる。配電線電圧の上昇に対して、配電用変電所変圧器、高圧配電系統、低圧配電系統など系統全体で制御を行う対策と、分散型電源、需要家など個別に制御を行う対策がある。系統全体の対策には、負荷時タップ切替変圧器（Load ratio control transformer：LRT）、ステップ式自動電圧調整器（Step voltage regulator、SVR）、静止型無効電力補償装置（Static var compensator、SVC）、自動タップ型柱上変圧器などが用いられる[14]。LRT は変圧器二次側に流れる電流をもとに、系統末端の電圧値を推定し、重負荷時には二次側電圧が高く、軽負荷時には二次側電圧が低くなるようにタップ比（変圧比）を切り替える変圧器である。SVR は高圧配電系統の途中に設置される変圧器で、LRT と同様に二次側電流をもとに、系統末端の電圧値を推定し、タップ比を切り替える装置である。SVC は高圧配電系統の途中に設置され、無効電力を連続的かつ高速に調整することで電圧を維持する装置である。自動タップ型柱上変圧器は低圧配電系統の電圧を適正範囲に維持するため、インバータおよびコンバータを用いて変圧器二次側の電圧を調整する変圧器である。

一方、個別の対策としては PV などの分散型電源の出力抑制、進み力率運転（進相無効電力出力）、需要家の可制御機器制御がある。分散型電源の出力抑制は電圧逸脱時に PV の PCS が回路を遮断することにより発電を停止し、有効電力の逆潮流防止により電圧逸脱を回避することである。進み力率運転（進相無効電力出力）は分散型電源設置需要家の受電端電圧に応じてインバータを進相力率運転することにより、進み無効電力を供給することで電圧上昇を緩和することである[15]。需要家可制御機器制御は、家庭用蓄電池・電気自動車（Electric vehicle、EV）車載用蓄電池の充放電による逆潮流の防止、自然冷媒ヒートポンプ給湯機の昼間運転などによる系統負荷の増加などが検討されている[16]。

表 1.1-2　配電系統における電圧上昇対策 [14),15),16)]

管理体系	適用箇所	調整パラメータ	配電線電圧上昇抑制対策	適用状況
一括管理	配電用変電所変圧器	タップ比	負荷時タップ切換変圧器(LRT)	適用済
	高圧配電系統	タップ比	ステップ式自動電圧調整器(SVR)設置	適用済
		無効電力出力	静止型無効電力補償装置(SVC)設置	一部適用済
	低圧配電系統	タップ比	自動タップ型柱上変圧器の設置	試験段階
分散管理	分散型電源	有効電力出力	出力抑制	適用済
		無効電力出力	進み力率運転（進相無効電力出力）	試験段階
	需要家	有効電力出力	可制御機器制御	試験段階

これら対策の中で、配電用変電所変圧器、高圧配電系統、低圧配電系統における電圧管理は送配電所有者が一括で行い、分散型電源、需要家における電圧管理は各受電端において各制御機器が分散的に管理することにより行われる。特に分散型電源では、各 PCS による制御のほか、需要家では住宅エネルギー管理システム（Home Energy Management System、HEMS）や地域エネルギー管理システム（Community Energy Management System、CEMS）を利用して家庭内の機器・設備を系統側と協調的に制御することが検討されている。系統側の対策では、装置の設置コストが高いため局所的な対策に限定されること、需要家側の対策では個々の装置を制御する必要があることや、需要家の状態を考慮して制御する必要があることなど、制御手法が複雑さや料金体系、インフラ整備など新たな仕組みづくりが必要なことが主な課題となっている。系統側の対策の多くは実用化されており、配電系統に適用されている。しかし社会的費用最小化のため系統側のみではなく需要家側での対策を適用することが望ましく、特に住宅で導入されている可制御機器を活用した電力需要調整に注目が集まっている。本論文では配電系統における電圧上昇対策として住宅における電力需要調整を検討する。

1.1.4　住宅地域での電力需要調整の取り組み状況

ZEH 支援補助事業において、HEMS の導入が必須要件に盛り込まれるなど、HEMS の普及が促進されている。現状の HEMS は住宅内の回路別の電力消費量や発電量、水道、ガスの使用量を時刻別に「見える化」し、さらに通信ネットワークを利用して、家電機器を HEMS コントローラの操作によって一元的に制御する機能を有する。制御可能な機器としては、照明、空調、冷蔵庫、テレビ、ヒートポンプ給湯機、燃料電池、蓄電池、EV などがある。また将来的には、電力料金の安い時間帯に機器を稼働して、電力料金の高い時間帯に機器の稼働を自動的に抑えるようなデマンドレスポンス（Demand response、DR）機能を搭載した HEMS や CEMS の普及が予想される。さらに、2016 年 4 月より、電力小売が全面自由化され、家庭部門にも一般電気事業者（大手電力会社）以外の事業者（Power producer and supplier : PPS）から電力が供給される。PPS は、それぞれ自社の供給量と需要量を一致させる必要があるため、供給対象の電力消費量および可制御機器による調整能力を把握することは重要である。

2010 年より横浜市、豊田市、けいはんな学研都市、北九州市の 4 地域において経済産業省主導で進められている「次世代エネルギー・社会システム実証事業」[17]において、HEMS や CEMS に関する実証実験は主要テーマの一つとして掲げられている。特に横浜市実証では約 2,000 世帯の住宅に HEMS を導入し、DR によるピークカット、ピークシフトの効果を検証するなど大規模な実証実験が行われている。

HEMS および CEMS の普及により、今までは不可能であった電力系統側と需要家側、あるいは需要家間を相互連携する電力需要調整が可能となる。例えば、電力需給逼迫時には中央給電指令所または地域の情報を統括する CEMS から各需要家の HEMS に対して節電要請信号を送り出すことにより、自動的に電力需要を制御することができる。また、配電系統の電圧上昇時に各需要家の HEMS が家庭内の機器を協調的に制御することにより電圧逸脱に起因する発電抑制を回避することが可能となる。

表 1.1-3 は住宅における電力需要調整に影響を及ぼす要因を示す。本論文では電力需要調整に影響を及ぼす要因を環境要因、建物要因、人的要因、機器要因、方法的要因に大別した。環境要因は、気象条件やエネルギー価格など住宅の外部環境に起因する要因である。建物要因は床面積や断熱性能、室内環境といった建物のハード面に関する要因である。人的要因は家族構成、生活スタイル、生活行為、在宅状況、機器稼働状況といった居住者の行動に関する要因である。機器要因とは、機器の消費電力などの機器仕様およびその機器の保有状況である。環境要因、建物要因、人的要因、機器要因は、住宅のエネルギー需要に影響を及ぼす要因であり、各要因によって住宅地域の電力需要調整能力は大きく異なることが予想される。

最後に電力需要調整を考える際の特有の要因として、可制御機器の操作方法や制御単位、制御の目的といった方法的要因がある。可制御機器の操作方法としては、HEMS 等からの信号による自動制御と居住者による手動操作が考えられ、可制御機器の稼動時間帯が異なることが予想される。自動制御の場合、居住者が不在の時も機器の制御が可能であるが、手動操作の場合、少なくとも 1 人の居住者が在宅している時間帯のみに制御可能な時間帯が限られると考えられる。制御単位としては、機器単体、住宅内の機器を連携した制御、さらに地域内の世帯間で連携した制御が考えられる。制御目的としては、ランニングコストの最小化や電力系統への影響の最小化などが考えらえる。制御単位や制御

目的により、可制御機器の挙動は大きく異なることが予想される。また、機器の運用方法の変更を居住者が受け入れられるかといった居住者の受容性が重要となる。

表 1.1-3　電力需要調整の影響要因

分類	要因
環境要因	気象条件
	エネルギー価格
建物要因	床面積
	断熱性能
	室内環境
人的要因	家族構成
	生活スタイル
	生活行為
	在宅状況
	機器稼働状況
機器要因	機器仕様
	機器保有状況
方法的要因	操作方法
	制御単位
	制御目的
	居住者の受容性

1.2　既往研究

1.2.1　太陽光発電の普及に関する研究

PV の普及に関する既往研究は、PV の普及予測に関する研究と PV の普及が及ぼす影響に関する研究に分けられる。PV の普及予測に関する研究では、白井ら[8]や吉岡ら[18]はアンケートにより PV 導入の意思決定要因について検討している。PV 導入の最も大きな意思決定要因は、PV 導入による売電収入や光熱費の低減といった経済性であることを示している。その他の要因として、イニシャルコストの負担容易性や地球温暖化対策への貢献といった社会性が挙げられている。三谷ら[19]は意思決定木を用いて PV 導入者を推定する手法を提案している。本手法では、PV 導入者の意思決定が近隣の需要家の PV 導入に影響を受けるものと仮定しており、局所的な PV 導入動向を考慮している。村上[20]はマルチエージェントシミュレーションにより住宅地域における PV の普及シミュレーションを行い、PV の普及分布により電力系統への影響が異なることを示した。特に配電系統においては配電用変電所付近での導入は容易であるが、PV の普及分布が配電用変電所からの離れた位置に偏在する場合、配電線電圧の維持が困難となることを示した。

PV の普及が及ぼす影響に関する研究として、柳川ら[21]は 1 分間隔の実測電力需要データと日射量の多地点同時観測結果を用いて、PV の大規模導入が周波数変動に与える影響の評価を行った。その結果、PV 導入後も導入前と同じ周波数品質を維持するために必要な周波数調整容量は、PV 導入量の増加に伴い増加し、PV を系統容量の 5%まで導入した場合、周波数調整に必要な発電機容量が導入前から 46%増加する結果を示した。矢島ら[22]は電力需要データと傾斜面日射量データを用いて、PV の導入に伴う周波数調整に必要な発電機容量の増加について検討しており、PV が系統容量の 10%程度普及すると必要発電機容量が系統容量比で 1.0～2.5%増加するという結果を得た。また平原ら[15]は配電系統に PV が連系された場合の逆潮流による電圧上昇の検討を行った。その結果 PV 導入率が 5～10%で適正電圧の上限値を逸脱する需要家が発生することを示した。

1.2.2　住宅設備による電力系統安定化に関する研究

電力系統における需給バランスや周波数の調整、配電線電圧上昇の対策として住宅設備の活用が検討されている。電力系統における周波数調整の検討として、木村ら[23]は需要家に設置された蓄電池の一部を利用し、蓄電池による周波数調整効果を評価した。最大需要 30GW の電力系統において、蓄電池の運用により 12.5MW～75MW の周波数調整容量を確保できることを示した。蓄電池以外の周波数調整の検討として、入江[24]は風力発電の大量連系がもたらす電力系統の周波数変動を抑制するためにヒートポンプ給湯機の電力消費と蓄電池の充放電電力を制御することを想定したシミュレーションにより、両機器による周波数調整効果を評価した。その結果ヒートポンプ給湯機と蓄電池を協調制御することにより、電力系統全体での周波数変動が約半減されることを示した。また益田ら[25]はヒートポンプ給湯機と EV による周波数変動抑制効果を評価した。その結果、ヒートポンプ給湯機と EV の群制御により周波数変動量が昼間の時間帯で約 40%減少させることが可能であることを示した。

PV からの逆潮流に起因して発生する電圧上昇対策としては、前述のように LRT による配電系統全体の電圧管理手法、SVR や SVC などの電圧調整装置を用いた配電線電圧適正管理、需要家側の分散型電源の無効電力制御による電圧調整、そしてヒートポンプ給湯機、蓄電池などの需要家側の可制御機器を用いた余剰電力の削減による電圧上昇の緩和などが挙げられる。関崎ら[26]は、住宅に導入されている蓄電池の一部を利用し、SVR と連携した配電線電圧上昇抑制手法を提案している。分岐のない簡易系統において、最大負荷容量が約 1MVA の典型的な住宅の負荷パターンと、負荷と同容量の PV 連系量を想定し、晴天日、曇天日、雨天日の実測日射データから算出した発電パターンを用いたシミュレーションを行い、提案手法の有効性を示した。大嶺ら[27]は、ヒートポンプ給湯機を用いた逆潮流抑制について、各住宅に PV 発電出力上限値を設け、それにより生じる PV 抑制電力をヒートポンプ給湯機の昼間運転によって低減する手法を提案し、1,284 軒の需要家が連系する高圧配電系統 1 フィーダにおいて、世帯人員に応じた 7 種類の需要データを用いてその低減効果を評価した。PV 導入率が約 60%（回線容量比）においてヒートポンプ給湯機を昼間に運転させない場合では平均 6.4%の出力抑制が生じるのに対して、提案手法では 0.7%まで低減できることを示した。以上の様に、PV の大量導入に起因する電力系統影響問題に対して、電力系統側での対策のほかに、蓄電池や EV、ヒートポンプ給湯機などの需要家側機器の制御に対する期待が高まっており、その有効性が示されている。

1.2.3　住宅設備による電力需要調整に関する研究

前節で述べたように蓄電池や EV は電力を直接充電したり放電したりすることができるため、電力需要調整効果が大きい。しかし蓄電池や EV は高価であるため、多くの住宅ではいまだ導入されていない。したがって家電機器やエアコンといった住宅で既に利用されている機器による電力需要調整効果を把握することは重要である。住宅設備による電力需要調整に関する既往研究として、Bozchalui ら[28]はエアコン、給湯器、冷蔵庫、照明、食器洗い乾燥機、洗濯機、衣類乾燥機を可制御機器とし、これら機器の稼働時間のシフトによる光熱費の削減効果を評価した。その結果、約 20%の光熱費を削減可能であり、ピーク電力需要を約 50%抑制可能であることを示した。

家電機器やエアコンを可制御機器として運用方法を変更する場合、各機器の本来の目的を損なう運用は許容されないと考えられる。Yuce ら[29]は家電機器の運用方法変更の制約条件として、家電機器が動作可能な時間範囲を制限し、家電機器の制御による電力消費削減効果を評価した。D'hulst ら[30]は

実測調査により家電機器の可制御機器としての有効性を評価しており、家電機器の電力消費の 44～71 %は居住者の行動や許容性といった制約により有効活用できていないことを示した。また Cetin ら[31]は、居住者の温熱快適性を予測不快者率（Predicted Percentage of Dissatisfied、PPD）により評価し、エアコンの運用方法変更による影響を評価した。その結果、冷房時のエアコン設定温度を 1 ℃上昇させた場合、電力消費を 9～31 %削減可能であるが、PPD が 2～7 %悪化することを示した。

1.2.4　住宅の電力需要推計に関する研究

住宅の電力需要推計方法として、居住者の行動や世帯毎の用途別エネルギー需要を積み上げることで対象とするエネルギー需要を推計するボトムアップ手法がある。ボトムアップ手法は評価対象の違いから、都市や地域を対象としたマクロ評価（ｉ）と一戸の住宅を対象としたミクロ評価（ⅱ）に分けられる。岩船ら[32),33)]は住宅の居住者を５類型、住宅構成を３類型に分類し、熱負荷計算および統計データから各類型の用途別エネルギー需要量を算出した。さらに算出したエネルギー需要量に各類型の世帯数を積和することで地域全体のエネルギー需要量を評価した。岩船らの手法はボトムアップ手法によるマクロ評価に分類され、気象条件等の地域差や建物の断熱性能の違いが地域のエネルギー需要量に及ぼす影響の評価に適する。辻ら[34)]は５種の世帯人員それぞれに行動データを与え、実測調査とアンケート結果から算出した機器使用確率等を用いることにより、時刻別に用途別エネルギー需要量を算出した。本手法はボトムアップ手法のミクロ評価に分類され、家族構成や生活スタイル、機器の仕様、保有状況が世帯ごとのエネルギー需要量に及ぼす影響の評価に適する。またボトムアップ手法の特徴として、世帯数の変化、高効率機器の普及予測と組み合わせることにより、将来のエネルギー需要量を評価することができる。

PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の評価や住宅における電力需要調整能力および効果を把握するためには、世帯レベルから地域レベルの電力需要を詳細に推計する必要があるためボトムアップ手法のミクロ評価が適していると考えられる。筆者の研究チームが開発した「家庭用エネルギー最終需要モデル」[35)]はボトムアップ手法に分類され、家族構成や床面積、生活スタイル、機器の仕様、保有状況などを考慮し、5 分間隔に機器別のエネルギー需要量を詳細に算出することができる。また 4,272 類型の世帯を用意しており、各類型のエネルギー需要量に世帯類型別世帯数を積和することで任意の地域スケールでのエネルギー需要量を評価することが可能であり、PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の評価や住宅における電力需要調整の評価に適する。

1.3　研究目的

PV が大量に普及する将来を見据え、PV の大量導入が電力需給バランス、周波数変動、配電線電圧といった電力系統や再生可能エネルギー発電促進賦課金といった家計に及ぼす影響を把握することは将来のエネルギーバランスや制度の設計を行う上で重要である。既往研究[15),22)]では電力系統あるいは配電系統全体の電力需要および発電量の実測結果を用い、PV の大量導入が及ぼす影響を評価し、PV 導入率が 5～10%を超過すると系統周波数や配電線電圧に影響を及ぼすことを明らかにした。実測結果を用いることで、現状の電力需要および発電量に関しては精度の高い評価が可能である。しかし将来の電力需要や発電量の変化を考慮した評価は難しく、特に PV の主たる設定先の一つである住宅の電力需要は世帯によりさまざまであるため、同じ PV 導入容量であっても PV 設置世帯の偏りに

より電力系統に及ぼす影響が異なることが予想される。

また上記の電力系統への影響の緩和策として、住宅などの需要側での対策に注目が集まっており、需要家側での電力需要調整能力を把握することは重要である。しかし住宅における可制御機器である家電機器やエアコンの電力需要調整には居住者の行動や受容性に基づくさまざまな制約があるため、可制御機器が持つ電力需要調整能力を最大限利用することができない。これらの制約を考慮して、実運用上得られる電力需要調整効果を把握することは重要である。また家族構成や床面積、家電の効率や保有状況、ライフスタイルなど世帯により電力需要調整能力および効果が大きく異なることが予想される。既往研究では、家電機器やエアコンの運用方法変更に関する制約を考慮した電力需要調整の効果の評価が行われており、ヒートポンプ給湯機や蓄電池のほか、エアコンや家電機器による電力需要調整の可能性を示した[28]。特に蓄電池や EV を用いることで、PV が大量に導入された場合においても配電線電圧を適正範囲内に抑制することの可能性が示された[26]。しかし広域での協調制御などは考慮されておらず世帯単位で評価されたものが多い。配電系統における電圧維持の観点からは配電系統などの地域単位での評価が重要であると考えられる。PV 大量導入に起因する電力系統に及ぼす影響の評価および電力需要調整の評価に関する既往研究の課題を以下に示す。

1) PV の普及世帯に偏りがある場合の電力系統への影響が評価されていない。
2) 可制御機器の制約条件が電力需要調整効果に及ぼす影響が明らかにされていない。
3) 可制御機器の操作方法の違いによる電力需要調整効果に及ぼす影響が評価されていない。
4) 世帯のばらつきや制約条件の違いを考慮した可制御機器による配電系統電圧の維持効果が評価されていない。

現在、PV の普及促進政策として日本で導入されている FIT は PV の余剰電力を購入電力よりも高額で買取る余剰電力買取方式であり、PV 購入者の経済性は世帯により大きく異なる。PV 導入の意思決定には経済性が大きく影響するため[8]、余剰電力買取方式では余剰電力が大きい世帯に PV の導入が偏ることが考えられるが、既往研究ではこの点を考慮した評価はされておらず世帯の偏りが余剰電力量や配電線電圧に及ぼす影響が明らかにされていない。一方、住宅における家電機器やエアコンによる電力需要調整の評価では、家電機器の稼働時間の制約や温熱快適性の制約を考慮した電力需要調整効果は評価されているが、各制約条件の有無が電力需要調整効果に及ぼす影響が評価されておらず、稼働時間や温熱快適性の制約を緩和した場合の効果は明らかにされていない。同様に可制御機器の制御方法は自動制御を前提とした評価が多く、操作方法の違いが電力需要調整効果に及ぼす影響は評価されていない。現在、住宅で導入が進められている DR では対価によって制約条件を緩和する可能性があり、HEMS を導入することで可制御機器の自動制御が可能となるが、自動制御による効果は明らかにされていない。また PV 導入による配電線電圧上昇問題について、蓄電池や EV による緩和効果は示されているが、家電機器を用いた電力需要調整の評価は少なく、上述の世帯のばらつきや制約条件の違いを考慮した評価はなされていない。これらの背景を踏まえ本研究では以下の 3 点を明らかにし、民生家庭部門における PV 大量導入がもたらす影響に対する実現可能な対策とその効果を定量的に提示することを目的とする。

① PV 導入世帯の偏りによる PV 大量導入に起因する電力系統に及ぼす影響の違い
② 世帯のばらつきおよび機器運用の制約を考慮した住宅地域における電力需要調整能力
③ 配電系統における住宅の可制御機器による電力需要調整効果

まず PV 大量導入が電力系統に及ぼす影響評価では、電力需給バランスの不整合、周波数変動の増大、配電線電圧の上昇および再生可能エネルギー発電促進賦課金の増大といった問題と PV の普及率の関係を評価する。この際、PV 導入世帯に偏りが生じる場合と平均的に導入が進む場合を想定し、再生可能エネルギー普及促進制度のあり方について議論する。

次に住宅における可制御機器が持つ電力需要調整能力を評価する。家族構成や床面積、家電の保有状況などの世帯のばらつきによる電力需要調整能力の違いを評価し、電力需要調整に適する世帯を明らかにする。さらに可制御機器の運用方法変更に関する時間・受容性、操作方法に関する制約の有無による電力需要調整能力の違いを評価し、HEMS の導入や CEMS による DR を実施した場合に得られる最大限の効果を明らかにする。

さらに PV 大量導入に起因する直近の問題として、配電系統における配電線電圧上昇問題を捉え、住宅地域の可制御機器による電力需要調整効果を評価する。世帯のばらつき、運用方法変更に関する制約のほか、住宅地域における可制御機器への運用指示方法の違いが電力需要調整効果に及ぼす影響を評価し、家電機器（洗濯機、衣類乾燥機、食器洗い乾燥機、炊飯器、電気ポット）およびエアコン、ヒートポンプ給湯機の制御の有効性および住宅地域の電力需要調整のあり方について議論する。

1.4　論文の構成

本論文の構成を図 1.4-1 に示す。

第１章では、PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響について解説し、特に住宅地域における電圧上昇問題が PV の大量普及の障壁となることを示した。また需要家電圧の適正維持のための住宅における電力需要調整に関する既往研究の課題について述べ、世帯間のばらつきや電力需要調整方法の違いを考慮した住宅地域における電力需要調整能力および配電線電圧への影響といった電力需要調整効果を定量的に評価することの必要性を明らかにした。

第２章では、PV が大量導入された場合を想定し、電力需給バランス、周波数変動、配電線電圧、再生可能エネルギー発電促進賦課金といった電力系統に及ぼす影響を評価する。また PV の普及分布の違いが電力系統に及ぼす影響を評価し、現状の PV 普及促進政策の問題点について検討する。

第３章では、配電系統の安定化手法として住宅での電力需要調整を想定し、各住宅が持つ電力需要調整能力および電力需要調整効果を定量的に評価する。家族構成・住宅形式・規模・断熱性能・機器保有状況・機器仕様といった世帯のばらつきが住宅の電力需要調整能力に及ぼす影響を評価する。また電力需要調整における制約条件の違いが電力需要調整能力に及ぼす影響を評価する。さらに実際に電力需要調整を行った場合に各住宅で得られる電力需要調整効果を定量的に評価し、電力需要調整に適する世帯について検討する。また制約条件、制御手法や制御目的の違いが住宅における電力需要調整効果に及ぼす影響を評価し、住宅における可制御機器の望ましい制御方法について検討する。

第４章では、1,200 軒の住宅が立地する地域（高低圧配電系統）を想定し、電力需要調整が系統負荷および配電線電圧に及ぼす影響を評価し、配電系統における PV 大量導入の可能性を検討する。また電力需要調整を行う制御単位を住宅１軒とした場合と地域全体で協調制御を行った場合を比較し、電力需要調整を行う制御単位の違いが電力需要調整効果に及ぼす影響を評価し、地域の電力需要調整のあり方を検討する。

第５章では、以上の内容を総括し、結論および今後の展望を述べる。

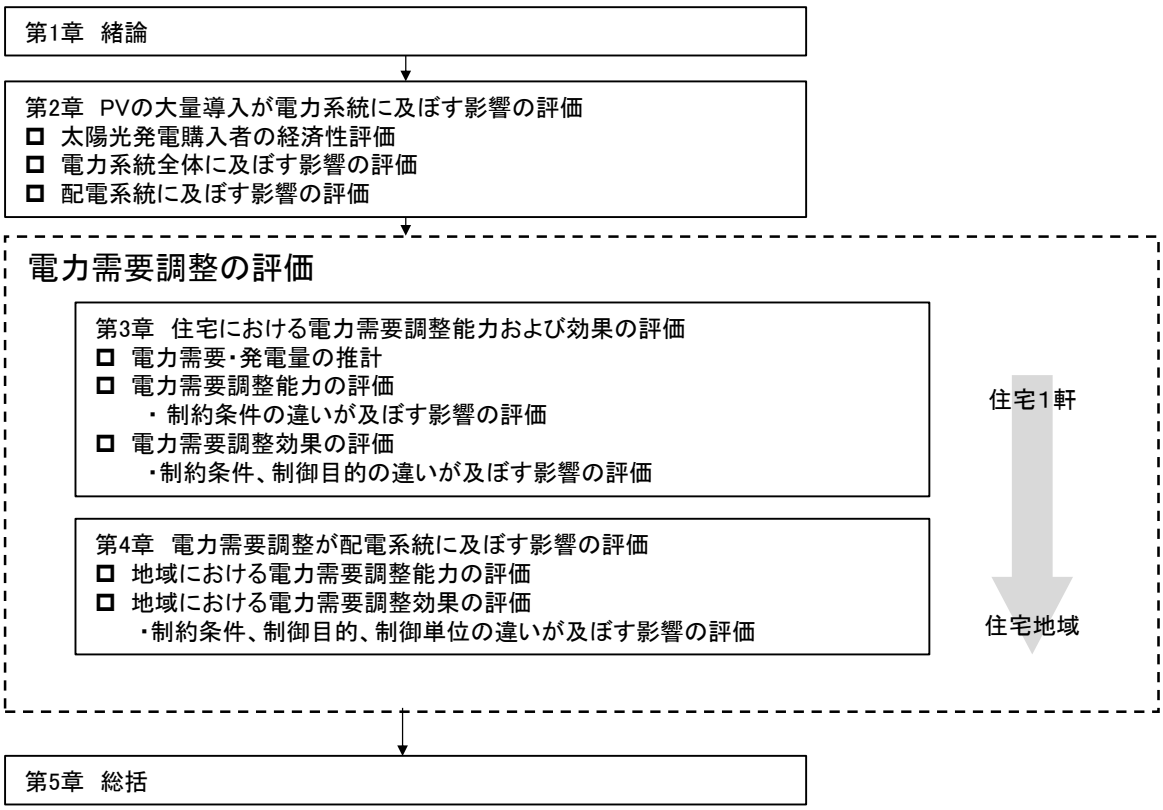


図 1.4-1　本論文の構成

参考文献

1) 環境省：国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）及び京都議定書第 11 回締約国会合（COP/MOP11）の結果について，http://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/

2) 経済産業省：長期エネルギー自給見通し，http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf

3) 経済産業省：日本のエネルギー2014，http://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2014.pdf

4) 固定価格買取制度　情報公表用 Web サイト：A 表　都道府県別認定・導入量（平成 29 年 1 月末時点），http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html

5) 資源エネルギー庁：エネルギー基本計画，http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf

6) 大久保仁他：電力システム工学，オーム社，2008，pp.63-77

7) 経済産業省：電気事業法　第二十六条第一項　電気事業法施行規則第四十四条，2013 年 7 月 8 月改正

8) 白井信雄他：住宅用太陽光発電の設置者特性と設置規定要因の分析，エネルギー資源，33-2，pp.1-9，2012

9) 九州電力：九州本土の再生可能エネルギー発電設備に対する接続申込みの回答保留について，http://www.kyuden.co.jp/press_h140924-1.html

10) 九州電力：種子島における再生可能エネルギーの出力制御の指示に関する報告，http://www.kyuden.co.jp/9437tanegashima5628

11) 道上勉：送電・配電　改訂版，オーム社，2001，pp166-167

12) 経済産業省：電気事業法　第二十六条第一項　電気事業法施行規則第四十四条，2013 年 7 月 8 月改正

13) 東京大学ホームページ：「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」の実施について，http://www.k.u-tokyo.ac.jp/news/20100521press-bessi.pdf

14) 高橋省他：次世代の電力流通を支えるシステム技術，富士技報，84-3，2011
15) 平原義輝他：太陽光発電システムにおける配電線電圧制御方式の開発―電圧上昇抑制のための新しい無効電力制御―，電力中央研究所報告，R06012，2007
16) 八太啓行他：需要地系統におけるエネルギー需給運用の検討，電力中央研究所報告，R07013，2008
17) 経済産業省：次世代エネルギー・社会システム実証　横浜スマートシティプロジェクトマスタープラン，2010 年 8 月
18) 吉岡剛他：住宅用太陽光発電の設置者に対するアンケート調査について，第 31 回エネルギー・資源学会研究発表会　講演論文集，1-1，2012
19) 三谷崇他：住宅用太陽光発電導入に対する需要家行動を意思決定木を用いて推定する手法の提案―普及の偏りが配電電圧へ与える影響―，エネルギー資源，37-2，2016，pp.9-16
20) 村上朝之：複雑系モデルによる分散型太陽光発電普及シミュレーション，成蹊大学理工学研究報告，52-2，2015，pp.13-18
21) 柳川茂幸他：日射量の多地点同時観測結果に基づく PV システム出力変動の LFC への影響評価，電気学会論文誌 B，123-12，2003，pp.1504-1512
22) 矢島浩二他：太陽光発電の出力変動による系統運用への影響評価，電気学会電力技術研究会資料，PE-94-18，1994，pp.1-8
23) 木村操他：需要家の二次電池を用いた系統制御手法とその検証，電気学会論文誌 B，127-3，2007，pp.451-458
24) 入江寛：大容量風力発電導入時における需要家ヒートポンプ給湯器と蓄電池の協調による系統周波数制御，東京大学工学系研究科修士論文，2009
25) 益田泰輔他：大量の再生可能エネルギー電源が導入された電力系統における多数台のヒートポンプ給湯機と電気自動車を利用した負荷周波数制御，電気学会論文誌 B，132-1，2011，pp.23-33
26) 関崎真也他：太陽光発電大量導入時における小容量蓄電池群を用いた配電系統電圧制御手法，電気学会論文誌 B，133-5，2013，pp.439-448
27) 大嶺英太郎他：ヒートポンプ式給湯機と電力貯蔵装置を用いた太陽光発電余剰電力利用のための需要地系統運用手法，電気学会論文誌 B，133-7，2013，pp.631-641
28) M. C. Bozchalui, et al.：Optimal Operation of Residential Energy Hubs in Smart Grids，IEEE Trans Smart Grid，3-4，2012，pp.1755-1766
29) B. Yuce, et al.：ANN-GA smart appliance scheduling for optimized energy management in the domestic sector，Energy and Buildings，111，2016，pp.311-325
30) R. D'hulst, et al.：Vanthournout. Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium，Applied Energy，155，2015，pp.79-90
31) K. S. Cetin, et al.：Effect of thechnology-enabled time-of-use energy pricing on thermal comfort and energy use in mechanically-conditioned residential buildings in cooling dominated climates，Building and Environment，96，2016，pp.118-130
32) 岩船由美子他：住宅部門における省エネルギー施策の評価，電気学会電力技術電力系統技術合同発表会，2000，pp.122-127
33) 岩船由美子他：住宅部門における各種省エネルギー施策の総合的評価，電気学会論文誌 B，121-9，2001，pp.1076-1084
34) 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業：環境負荷低減を目的とした新しい自律分散エネルギーシステム，関西文化学術研究都市における住宅用エネルギー消費の計測調査報告書（第Ⅱ部），2002
35) 下田吉之他：家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測，エネルギー・資源，30-3，2009

第２章　PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の評価

2.1　序論

2.1.1　背景および目的

本章では、今後想定される PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響を評価する。PV などの再生可能エネルギーは太陽光や風といった自然エネルギーを利用して発電を行うため、得られる自然エネルギー量により発電量が大きく変動するという特徴を有している。このため、第１章で示したように PV などの再生可能エネルギーが大量に電力系統へ連系された場合、大きく以下の４つの問題の発生が懸念されている。

- 電力需給バランスの不整合
- 周波数変動の増大
- 配電線電圧の上昇
- 再生可能エネルギー発電促進賦課金の増大

電力は貯蔵が困難なため、電力需要に合わせて同時同量の供給を行う必要があるが PV は日射量に応じて発電量が決定されるため、晴天日の昼間に集中して電力が発生する。PV が大量に導入された場合、昼間の発電量が大きくなり特に休日など電力需要の小さい時間帯において、PV の発電量が電力需要を超過する可能性があり、同時同量の需給バランスが崩れ大規模な停電を引き起こす可能性がある。

また太陽光の日射量の変動に応じて、PV の発電量が変動する。発電と需要のアンバランスは電力系統の周波数に影響し、PV 発電量の変動が増大すると周波数の変動も増大する。周波数の変動は火力発電などの周波数調整用発電所の発電機出力を調整することで抑制しているが、PV が大量に導入された場合、周波数変動が増大するため周波数調整能力が不足する可能性がある。柳川ら[1)]は 1 分間隔の実測電力需要データと日射量の多地点同時観測結果を用いて、PV の大規模導入が周波数変動に与える影響の評価を行った。その結果、PV 導入後も導入前と同じ周波数品質を維持するために必要な周波数調整容量は、PV 導入量の増加に伴い増加し、PV を系統容量の 5%まで導入した場合、周波数調整に必要な発電機容量が導入前から 46%増加する結果を示した。

一方、PV の主たる設置先のひとつである新築戸建住宅が集まる新興住宅地等など街区単位でみると、配電線電圧上昇問題が懸念される。電力需要を超過する発電電力は余剰電力となり、電力系統側へ逆潮流として流入する。逆潮流が発生すると、配電線下流の配電線電圧が上昇する。逆潮流が配電系統内で大量に発生した場合、需要家電圧が電気事業法[2)]で定められる規定範囲を超過し、局所的な停電などを引き起こす可能性がある。平原ら[3)]は配電系統に PV が連系された場合の逆潮流による電圧上昇の検討を行った。その結果 PV 導入率が 5～10%で適正電圧の上限値を逸脱する需要家が発生することを示した。

FIT による再生可能エネルギー発電量の買取にかかる費用は、再生可能エネルギー発電促進賦課金という名目で一般家庭や法人から徴収する電力料金に賦課されている。PV をはじめとする再生可能エネルギーの導入量が増大すると再生可能エネルギー発電促進賦課金が増大し、家計に影響を与える。

このように PV が電力系統に及ぼす影響は PV の導入容量によって影響の度合いが異なることが予想される。また PV 導入の意思決定における主要な要因の１つとして、PV 導入による経済性があり、

FIT による余剰電力の買取が行われる場合、余剰電力の大きい世帯ほど PV 導入メリットが大きくなる。このため、余剰電力の大きい世帯において PV の導入がより促進されることが予想され、PV を導入する世帯特性に偏りが生じることが予想される。既往研究では PV 導入世帯の違いが電力系統に及ぼす影響の評価は行われていない。PV 導入世帯に偏りが生じた場合、各世帯から生じる余剰電力量が増加することが予想されるため、PV の導入に起因する電力系統に及ぼす影響がより早期に顕在化することが懸念される。本論文ではこのような PV 導入世帯の偏りが電力系統に及ぼす影響を評価する。

2.1.2 電力系統に及ぼす影響の評価方法の概要

PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響は、PV 導入容量の増加に伴い、影響が大きくなることが予想される。本論文では PV 導入による経済性が優れる世帯に優先して PV が導入されるものとして、PV 導入容量の増加が電力系統に及ぼす影響を評価する。この際、PV の買取方式として PV の発電量のうち余剰電力のみを買取対象とする「余剰買取方式」と PV 発電量の全量を買取対象とする「全量買取方式」を想定する。余剰買取方式では余剰電力の大きい世帯で PV 経済性が優れることが予想され、PV 導入世帯に偏りが生じることを想定し、全量買取方式では世帯の電力需要に依存せず、平均的に PV が導入されることを想定する。

本章では、まず 2.2 節において、PV 導入による経済性および PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響を評価するため、家族構成、床面積、断熱性能の異なる住宅の電力需要および発電量の推計方法を示す。各住宅における電力需要や発電量は筆者らの研究チームが開発したボトムアップ手法によるエネルギー需要シミュレーションモデルである「家庭用エネルギー最終需要モデル」を用いる。家庭用エネルギー最終需要モデルの主な特徴として、家族構成・住宅形式・規模・断熱性能・機器保有状況・機器仕様の異なる多様なモデル世帯を用意していること、居住者の行動パターンに基づいてエネルギー消費を算出していること、1 年間 5 分間隔でのエネルギー消費を算出できることが挙げられる。電力需要および発電量を多様なモデル世帯について居住者の行動に沿って時刻別に算出することができるため、電力需要のばらつきを考慮して電力系統への影響を評価することができる。

次に 2.3 節において PV 導入の経済性に及ぼす影響を評価し、余剰買取方式および全量買取方式において導入が促進される世帯の特徴を明らかにする。

次に 2.4 節において「電力需給バランスの不整合」、「周波数変動の増大」、「再生可能エネルギー導入促進賦課金の増大」の評価を行う。「電力需給バランスの不整合」、「周波数変動の増大」、「再生可能エネルギー導入促進賦課金の増大」は広域の電力系統における問題であると考えられるため、本論文では大阪府の民生家庭部門を対象に行う。PV の導入容量や PV 普及世帯の偏りが電力系統に及ぼす影響を評価し、PV の普及促進施策のあり方について検討する。

2.5 節においては、「配電線電圧の上昇」の評価を行う。「配電線電圧の上昇」は、電力系統全体といった広域ではなく配電用変電所以下の地域スケールでの問題であると考えらえる。本論文では 1,200 軒の住宅で構成される高低圧配電系統を想定し、PV の導入による配電線電圧に及ぼす影響を評価する。PV の導入量や分布が配電線電圧に及ぼす影響を明らかにし、配電系統における PV 導入のあり方について検討する。

最後に 2.6 節で PV の大量導入が電力系統および配電系統に及ぼす影響の評価結果をまとめる。PV の買取方式の違いにより PV 導入世帯の偏りが電力系統に及ぼす影響を把握することができ、今後の

PV の普及促進施策のあり方について検討することができる。

2.2　家庭用エネルギー最終需要モデルの概要

PV 導入による経済性や住宅における家電機器を用いた電力需要調整を評価するためには、居住者のライフスタイルや家族構成、住宅形式、規模、家電機器の保有台数・性能、気象条件などを考慮しエネルギー需要構造を詳細に再現したシミュレーションモデルを開発することが必要である。筆者らは上述の要因のばらつきと分布を考慮し、住宅のエネルギー需要を算出することのできるボトムアップ型シミュレーションモデルとして「家庭用エネルギー最終需要モデル」を開発してきた。本モデルはまず大阪市を対象とするモデルとして開発された。その後、対象地域を全国に拡張し、全国 20 都市および日本全体のエネルギー需要を算出することが可能となっている[4),5),6)]。

住宅におけるエネルギー需要の決定要因は「居住者」、「建物」、「機器」の３つに大別される。「居住者」は住宅の使用者を示す。住宅におけるエネルギー需要の多くは居住者の行為に起因して発生するため、居住者の行為によってエネルギー需要が発生する場所やタイミングが決定される。住宅の居住者による行為は家族構成やライフスタイルによって異なる。「建物」は住宅の規模や断熱仕様といった住宅の構造的特性を示す。住宅におけるエネルギー需要全体の 1/4 を占める暖冷房エネルギー需要は、外気温度やエアコン等の機器効率、使用状況など様々な要因に影響されるが、その中でも特に重要な要因の一つに住宅の熱性能や規模がある。断熱材厚さと暖冷房エネルギー需要の関係は非線形[7)]であるため、暖冷房エネルギー需要を正確に推計するためには、平均的な熱性能を想定して計算するのではなく、複数の熱性能や規模の住宅のモデルを設定することが望ましい。「機器」は住宅に導入されている家電機器やエアコンなど実際にエネルギーを消費するものである。機器の仕様や保有状況により最終的なエネルギー消費量が決定される。したがって、住宅における電力需要の多様性を考慮するためには、多様な「居住者」、「建物」、「機器」を想定する必要がある。本論文では各世帯の電力需要・発電量は、「家庭用エネルギー最終需要モデル」を用いて推計する。本モデルは世帯の居住者の属性と住宅設備の仕様、気象条件を入力項目として各種エネルギー需要を 5 分間隔で推計する。家庭用エネルギー最終需要モデルの入力パラメータ及びそれを用いたエネルギー需要推計フローを図 2.2-1 に示す。

まず、住宅におけるエネルギー消費に及ぼす影響が大きい「居住者」、「建物」について多様性を考慮するために表 2.2-1 に示す家族構成・床面積、断熱性能に応じた住宅モデルを設定する。本論文で設定した 4 種類の断熱性能は、「エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネルギー法）」[8)]で定められた住宅・建築物の熱性能基準（省エネルギー基準）に基づくものである。省エネルギー基準は昭和 55 年に制定された後、平成 4 年・11 年に改正・強化された。昭和 55 年に制定の基準を「旧基準」、平成 4 年制定の基準を「新基準」、平成 11 年制定の基準を「次世代基準」とし、「無断熱」を合わせて 4 基準の断熱性能を設定した。

次に、計算対象のすべての日を対象として、24 時間の生活行為を確率的に生成する[9)]。ここでの生活行為は睡眠やテレビの視聴などの時間の使い方を意味する。本モデルでは入力条件として人々の時間の使い方に関する統計情報である社会生活基本調査[10)]の結果を用い、居住者の属性ごとに異なる行為を想定しエネルギー需要の推計を行う。

さらに生活行為に伴って使用される部屋、機器・設備を決定する。生活行為は約 50 種が定義されており、使用する部屋、機器・設備との関連付けが可能である。これに基づいて、空調、照明などの

環境調整機器、洗濯機など生活行為に応じて稼動する家電機器の稼動を決定し、機器ごとの定格消費電力・待機電力を考慮して電力消費を算出する。なお、環境調整機器である照明、空調の稼動判定には、照度、室内温度を推計し、機器稼動の必要性の判定を行っている。給湯についても、入浴、炊事という給湯利用を伴う生活行為に合わせて時刻別の給湯需要量を算出する。気象データは 2012 年の大阪市における 1 分間隔のデータ[11]を用いた。なお，PV による発電量は、方位別に斜面日射量と PV 設置容量を掛け合わせることにより推計する。この際、PV のセル温度や PCS での損失などを考慮している。

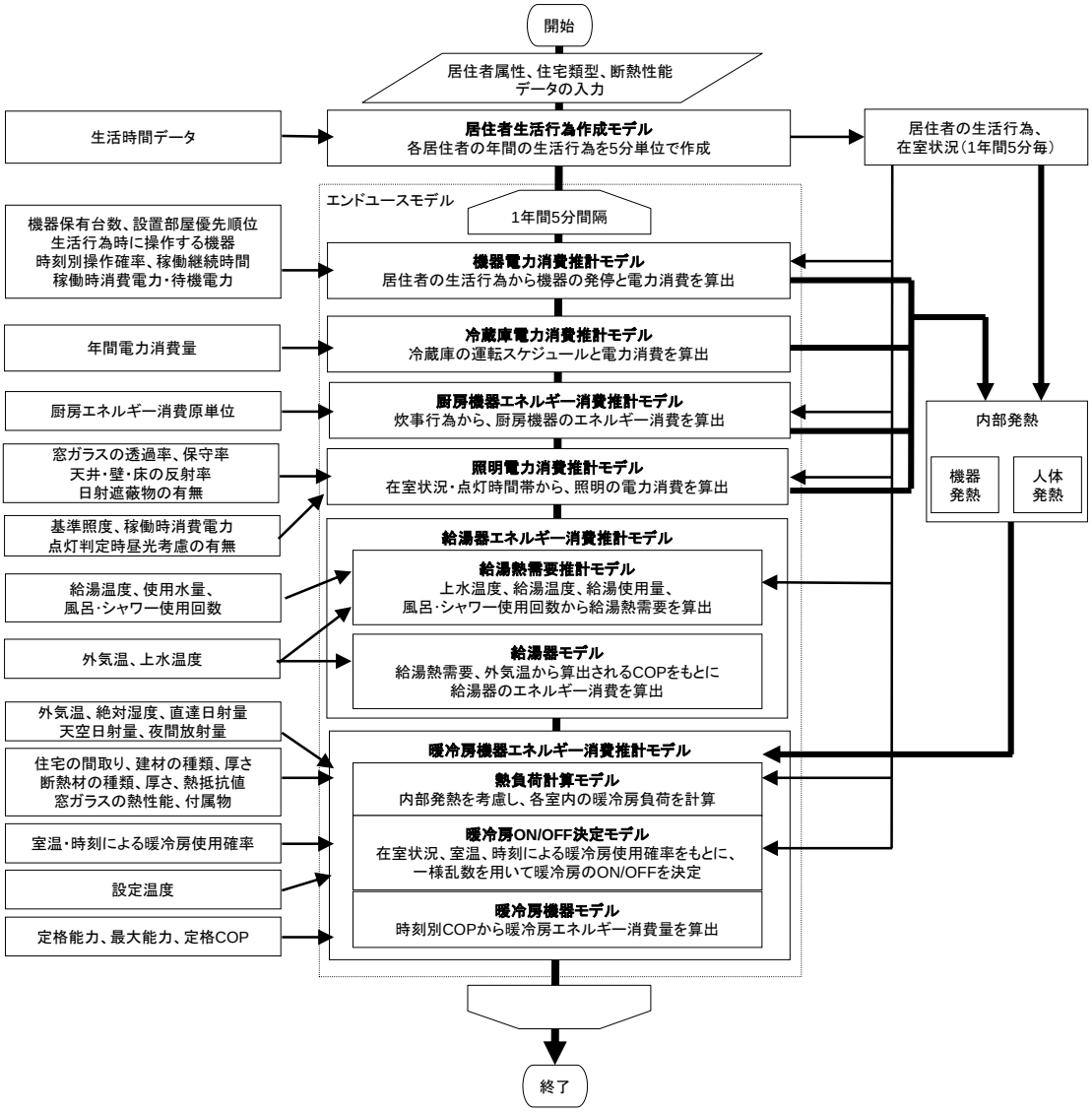


図 2.2-1　家庭用エネルギー最終需要モデルによるエネルギー需要推計フロー

表 2.2-1　想定する家族構成・床面積・断熱性能

<table>
<tr><td rowspan="29">家族構成</td><td rowspan="4">1人世帯</td><td>単独世帯（若・中年男性）</td><td rowspan="16">4人世帯</td><td>男親と子供 3 人（就業）</td></tr>
<tr><td>単独世帯（若・中年女性）</td><td>男親と子供 3 人（非就業）</td></tr>
<tr><td>単独世帯（高齢男性）</td><td>女親と子供 3 人（就業）</td></tr>
<tr><td>単独世帯（高齢女性）</td><td>女親と子供 3 人（非就業）</td></tr>
<tr><td rowspan="8">2人世帯</td><td>夫婦（若・中年、共働き）</td><td>両親と夫婦（共働き）</td></tr>
<tr><td>夫婦（若・中年、夫のみ就業）</td><td>両親と夫婦（夫のみ就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦（若・中年、妻のみ就業）</td><td>両親と夫婦（妻のみ就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦（若・中年、非就業）</td><td>両親と夫婦（非就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦（高齢）</td><td>片親と夫婦と子供 1 人（共働き）</td></tr>
<tr><td>男親と子供（就業）</td><td>片親と夫婦と子供 1 人（夫のみ就業）</td></tr>
<tr><td>男親と子供（非就業）</td><td>片親と夫婦と子供 1 人（妻のみ就業）</td></tr>
<tr><td>女親と子供（就業）</td><td>片親と夫婦と子供 1 人（非就業）</td></tr>
<tr><td>女親と子供（非就業）</td><td rowspan="17">5・6・7人世帯</td><td>夫婦と子供 3～5 人（共働き）</td></tr>
<tr><td rowspan="12">3人世帯</td><td>夫婦と子供（共働き）</td><td>夫婦と子供 3～5 人（夫のみ就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦と子供（夫のみ就業）</td><td>夫婦と子供 3～5 人（妻のみ就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦と子供（妻のみ就業）</td><td>夫婦と子供 3～5 人（非就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦と子供（非就業）</td><td>男親と子供 4～6 人（就業）</td></tr>
<tr><td>男親と子供 2 人（就業）</td><td>男親と子供 4～6 人（非就業）</td></tr>
<tr><td>男親と子供 2 人（非就業）</td><td>女親と子供 4～6 人（就業）</td></tr>
<tr><td>女親と子供 2 人（就業）</td><td>女親と子供 4～6 人（非就業）</td></tr>
<tr><td>女親と子供 2 人（非就業）</td><td>両親と夫婦と子供 1～3 人（共働き）</td></tr>
<tr><td>片親と夫婦（共働き）</td><td>両親と夫婦と子供 1～3 人（夫のみ就業）</td></tr>
<tr><td>片親と夫婦（夫のみ就業）</td><td>両親と夫婦と子供 1～3 人（妻のみ就業）</td></tr>
<tr><td>片親と夫婦（妻のみ就業）</td><td>両親と夫婦と子供 1～3 人（非就業）</td></tr>
<tr><td>片親と夫婦（非就業）</td><td>片親と夫婦と子供 2～4 人（共働き）</td></tr>
<tr><td rowspan="4">4人世帯</td><td>夫婦と子供 2 人（共働き）</td><td>片親と夫婦と子供 2～4 人（夫のみ就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）</td><td>片親と夫婦と子供 2～4 人（妻のみ就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦と子供 2 人（妻のみ就業）</td><td>片親と夫婦と子供 2～4 人（非就業）</td></tr>
<tr><td>夫婦と子供 2 人（非就業）</td><td colspan="2">※5・6・7 人世帯は子供の人数のみ異なる</td></tr>
<tr><td rowspan="2">床面積</td><td colspan="2">集合住宅</td><td colspan="2">19.87m²、33.12m²、52.16m²、69.56m²、89.43m²、107.65m²</td></tr>
<tr><td colspan="2">戸建住宅</td><td colspan="2">36.42m²、52.99m²、69.56m²、92.75m²、112.63m²、130.85m²</td></tr>
<tr><td rowspan="4">断熱性能</td><td colspan="4">無断熱（昭和 55 年省エネルギー基準未満）</td></tr>
<tr><td colspan="4">旧基準（昭和 55 年省エネルギー基準）相当</td></tr>
<tr><td colspan="4">新基準（平成 4 年省エネルギー基準）相当</td></tr>
<tr><td colspan="4">次世代基準（平成 11 年省エネルギー基準）相当</td></tr>
</table>

2.3　PV 導入世帯の経済性評価

2.3.1　PV 導入世帯の経済性の評価方法

本節では PV 導入世帯の経済性の評価方法について述べる。本論文では PV 購入者の経済性は PV のイニシャルコストおよび PV 導入による光熱費の低減効果を考慮し、正味現在価値（Net Present Value : NPV）[円]を用いて評価する（式(2.3-1)）。

$$NPV = \frac{n \times \left(C_p - C_a + E_{Sell} \times V_{Sell}\right)}{\left(1+r\right)^{n+1}} - C_0 \times P_{AS} \qquad (2.3\text{-}1)$$

ここで、n は NPV の評価期間[年]、C_p は PV 導入前の電気料金[円/年]、C_a は PV 導入後の電気料金[円/年]、E_{Sell} は年間売電量[kWh/年]、V_{Sell} は PV 電力買取単価[円/kWh]、r は割引率[%]（=0.75%）、C_0 は 1 kW 当たりの PV のイニシャルコスト[円/kW]（=30 万円/kW）、P_{AS} は PV 設置容量[kW]であ

る。本論文では NPV の評価期間は、固定価格買取制度の買取対象期間である 10 年間とする。なお電気料金には基本料金と従量料金があるが PV 導入前後において基本料金は同一であるとし、従量料金の差額により NPV を推計するものとした。

また PV の買取方式として、表 2.3-1 に示す余剰電力買取と全量買取を想定し、買取方式の違いが NPV に及ぼす影響を評価する。余剰電力買取では PV 発電量のうち自己消費されず余った電力である余剰電力のみを買取対象とするため余剰電力が多い世帯ほど NPV が大きく経済性に優れ、導入世帯に偏りが生じることが想定される。全量買取では PV 発電量を自己消費せず全量を買取対象とするため、PV 購入者の経済性が PV の発電量のみに依存し、PV 導入世帯の偏りは小さいことが想定される。したがって、買取方式による PV 導入世帯の偏りを考慮して電力系統に及ぼす影響を把握することが可能である。

表 2.3-1　PV 買取方式

買取方式	買取対象	PV 電力買取単価	電力購入単価
余剰電力買取	余剰電力のみ	31 円/kWh	25 円/kWh
全量買取	発電電力の全量	28 円/kWh	25 円/kWh

NPV を推計するためには各世帯の電力需要および発電量を推計する必要がある。本章では本論文で想定する 4,272 類型のモデル世帯のうち、PV を導入する戸建住宅（2,136 類型）を対象に家庭用エネルギー最終需要モデルを用いて電力需要および発電量を推計し、家族構成や床面積、断熱性能の違いが PV 経済性に及ぼす影響を評価する。ただし全ての住宅で従来型ガス給湯器を導入するものとした。また図 2.3-1 は各住宅の方位別 PV 導入容量を示す。図の横軸は床面積を示し、各方位の屋根面積を考慮し、日射量の多い南、東、西、北の順に PV 設置容量を決定した。なお 52.99m² 以下の住宅では 3kW、69.56m² 以上の住宅では 5kW の PV を導入するものとした。

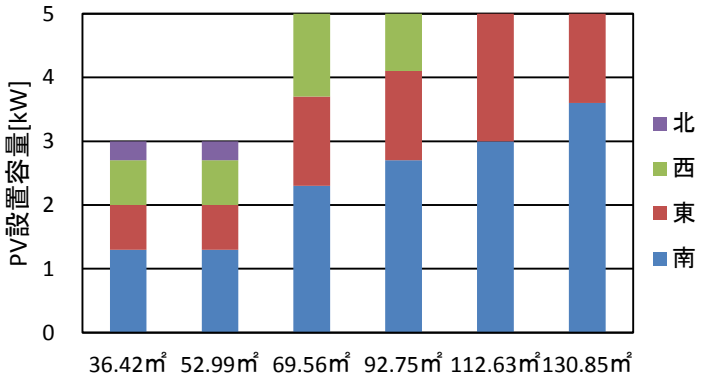


図 2.3-1　PV 設置容量

2.3.2　PV 導入世帯の電力需要・発電量の推計結果

図 2.3-2 は代表世帯（「夫婦と子２人（夫のみ就業）」世帯、床面積 112.63m²、次世代基準）の 5 月 11 日における電力需要および発電量の推計結果を示す。ここで 5 月 11 日は大阪府全体の余剰電力最大発生日である。夕方から深夜にかけての起床在室時間帯に照明の消費電力が発生した。また家電機器の消費電力は居住者の行動に応じて発生する。代表世帯の場合、午前中は在宅者がおり家電機器の

消費電力が発生しているが、午後は外出のため消費電力が発生してない。一方、PV 発電量は昼間に発生するため特に午後において大きな余剰電力が発生した。代表世帯と同様に 4,272 世帯類型について 1 年間 5 分間隔のシミュレーションを行い、電力需要、PV 発電量、余剰電力を推計した。以下にその結果を示す。

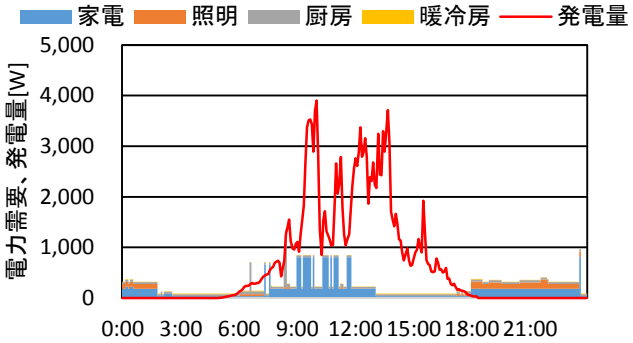


図 2.3-2　代表世帯の電力需要および発電量推計結果（5 月 11 日）

図 2.3-4 は世帯類型ごとの戸建住宅における年間電力需要量の推計結果を示す。横軸は床面積を示し、凡例は家族人数を示す。世帯類型により年間電力需要量は大きくばらつき、年間電力需要量は 1,360kWh/年/世帯～8,719kWh/年/世帯であった。年間電力需要量は家族人数が大きいほど部屋の使用数や家電機器の使用頻度が多くなるため増加した。また床面積が大きいほど暖冷房電力需要や照明電力需要が大きくなるため電力需要が増加した。

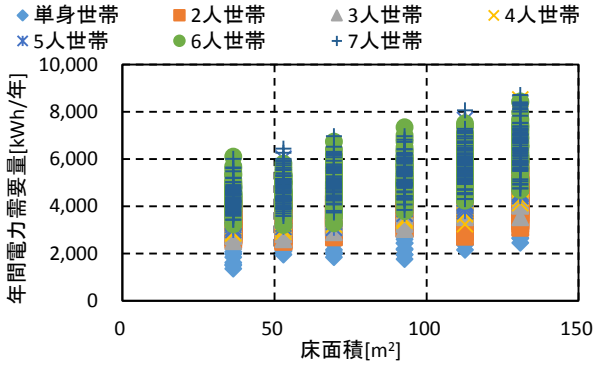


図 2.3-4　戸建住宅の年間電力需要量推計結果

図 2.3-4 は次世代基準の断熱性能を持つ住宅に住む 4 人家族の年間電力需要量の推計結果を示す。家庭用エネルギー最終需要モデルでは 4 人世帯として 16 種類の家族構成を想定している。 4 人家族の年間電力需要量は 2,853kWh/年/世帯～6,038kWh/年/世帯と床面積、家族構成によって大きく異なる。また同じ 112.63m² の床面積に居住する 4 人家族では 3,233kWh/年/世帯～5,728kWh/年/世帯と家族構成によって年間電力需要量にばらつきが生じた。これは「夫婦と子 2 人（共働き）」世帯といった在宅時間の少ない世帯ほど年間電力需要量は小さいのに対し、「夫婦と子 2 人（夫のみ就業）」世帯や「両親と夫婦（夫のみ就業）」世帯といった専業主婦や高齢者などの在宅時間の長い家族構成は年間電力需要量が大きいという様に居住者の生活スタイルの違いによるものが大きい。

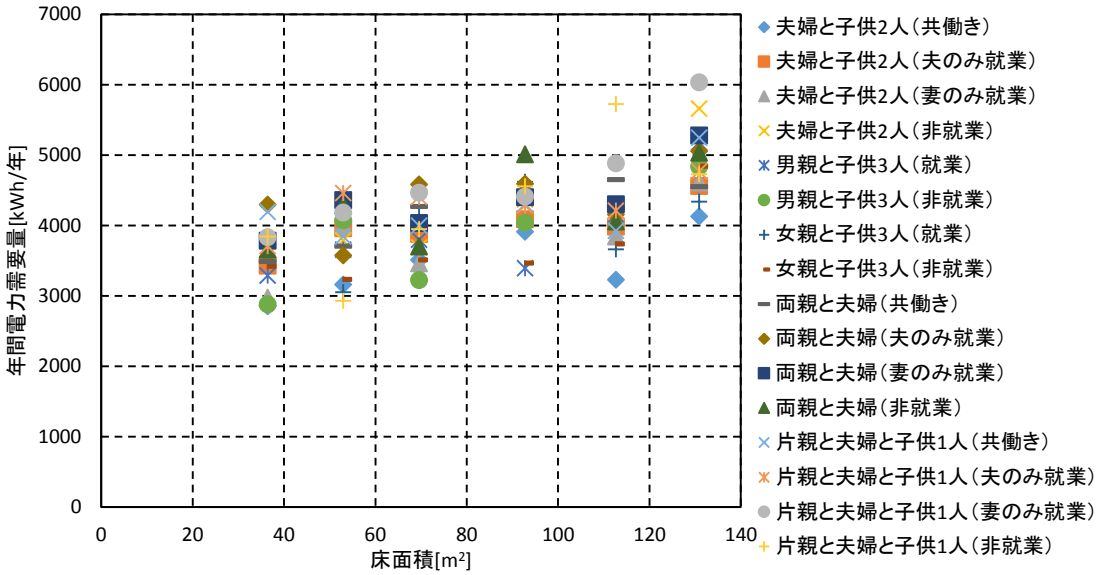


図 2.3-4　４人家族世帯の年間電力需要量推計結果（次世代基準）

図 2.3-5 は「夫婦と子２人（夫のみ就業）」世帯の断熱性能別年間電力需要量の推計結果を示す。床面積 112.63m² の「夫婦と子２人（夫のみ就業）」世帯では断熱性能によって年間余剰電力量が 3,988kWh/年/世帯～5,189kWh/年/世帯とばらつきが生じた。これは断熱性能の低い住宅ほど特に暖房負荷が増え、暖冷房電力需要が大きくなるためである。

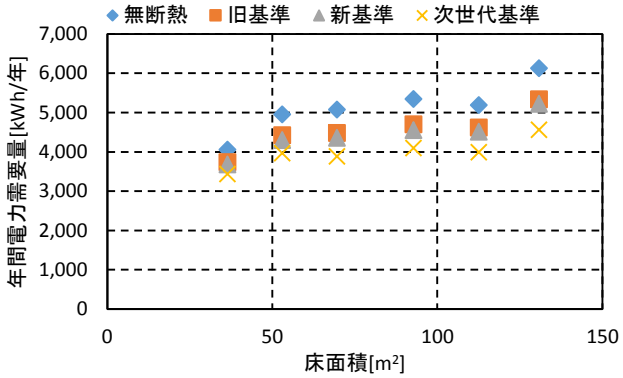


図 2.3-5　断熱性能別年間電力需要量推計結果（夫婦と子２人（夫のみ就業））

図 2.3-6 は床面積別年間発電量の推計結果を示す。2.4.2 節で示したように床面積が 36.42m² および 52.99m² の住宅は 3kW の PV を導入し、床面積が 69.56m² 以上の住宅は 5kW の PV を導入した。PV 発電量は家族構成や断熱性能に依存せず床面積にのみ依存し、床面積が大きい住宅ほど発電量の大きい南面に設置できる PV の割合が増えるため PV 発電量が大きい。3kW の PV を導入した住宅では約 3,200kWh、5kW の住宅では約 5,500kWh の発電量が得られた。

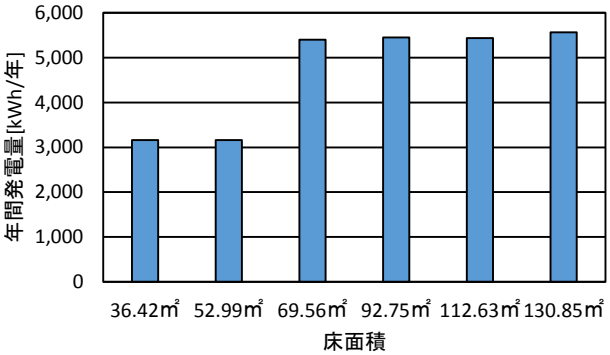


図 2.3-6　年間発電量推計結果

図 2.3-7 は世帯類型別年間余剰電力量の推計結果を示す。図中の横軸は年間電力需要量を示す。余剰電力は各タイムステップの PV 発電量のうち電力需要を上回り住宅内で使用できず余剰となる発電量である。年間余剰電力量は世帯類型により大きく異なり、1,222kWh/年/世帯～4,903kWh/年/世帯である。床面積が 36.42～52.99m² の世帯では年間余剰電力量は 1,222kWh/年/世帯～2,752 kWh/年/世帯であり、床面積が 69.56m² 以上の世帯では年間余剰電力量は 2,784kWh/年/世帯～4,903 kWh/年/世帯であった。床面積が 36.42～52.99m² の住宅では PV 設置容量が 3kW、69.56m² 以上の住宅では 5kW を導入し年間発電量が大きく違うため、年間余剰電力量が大きく異なる。年間余剰電力量は家族人数が少なく年間電力需要量が小さい世帯ほど大きい。

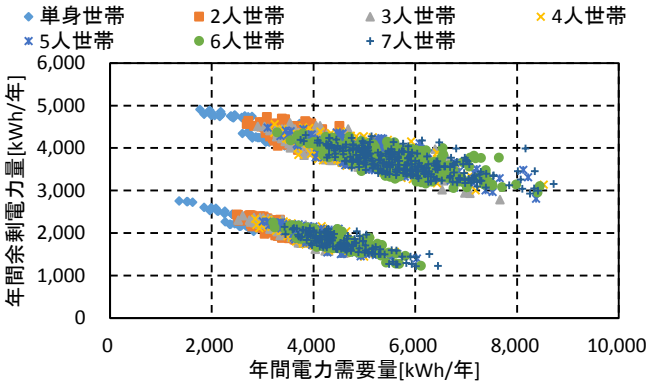
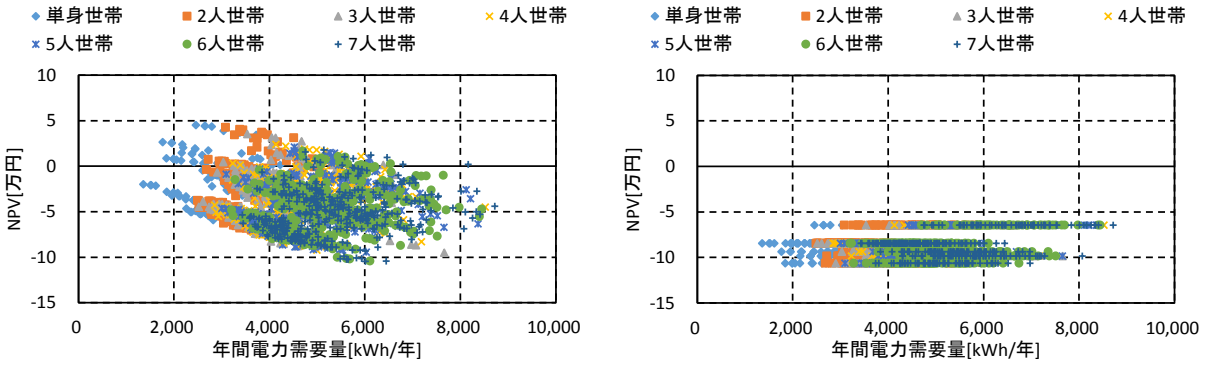


図 2.3-7　世帯類型別年間余剰電力量推計結果

2.3.3　PV 導入世帯の NPV 推計結果

図 2.3-8 は余剰買取方式および全量買取方式における世帯類型別 NPV 推計結果を示す。図中の横軸は年間電力需要量を示す。NPV が正の値の場合、PV のイニシャルコストを光熱費の削減額で回収可能であることを示す。余剰買取方式における NPV は世帯類型により大きく異なり、－10.4 万円～4.5 万円とばらついた。3kW の PV を導入している世帯では－10.4 万円～－2.0 万円であり、5kW の PV を導入している世帯では－9.5 万円～4.5 万円であった。PV 導入量の大きい世帯ほど NPV に優れる傾向にある。また余剰電力量は購入電力単価よりも高い単価で買取が行われるため、年間電力需要量が小さく余剰電力量の大きい世帯で NPV は大きい。特に単身世帯や 2 人世帯といった PV 発電時間帯に在宅者のいない世帯で NPV は大きい。したがって PV を導入する世帯が経済性を示す NPV のみで決定される場合、余剰買取方式では余剰電力量の大きい世帯から順に導入が進むと考えられ、PV 普及世帯に偏りが生じることが懸念される。

全量買取方式では家族構成によって NPV は変化せず、NPV は床面積に応じて決定される PV 導入容量のみに依存する。全量買取方式における NPV は－6.5 万円～－10.7 万円であり、床面積が 130.85m² の世帯で最大となった。一方、PV 導入容量が 3kW である床面積が 36.42m² および 52.99m² の世帯では NPV は-8.5 万円であった。したがって全量買取方式では PV 導入世帯に偏りが生じず、多様な世帯に平均的に PV の導入が進むと考えられる。なお全量買取方式においては全ての住宅で NPV が負となっており、光熱費の削減効果に対してイニシャルコストの負担額が大きいことを示す。



(a)余剰買取方式　　(b)全量買取方式

図 3.2-8　NPV 推計結果

2.4　PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の評価

2.4.1　PV の大量導入が電力系統影響の評価方法

本節では、PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響として、「電力需給バランス」、「周波数変動」、「再生可能エネルギー発電促進賦課金」の評価方法を詳述する。

まず「電力需給バランス」は電力系統全体の電力需要と発電量の関係を示すものであり、通常は PV の発電量よりも電力需要のほうが大きい。しかし PV の大量導入により特に晴天日の昼間では発電量が増大するため、電力需要を超過する可能性がある。住宅以外を含めた電力系統全体の発電量と需要量を同量とする必要があり、PV の発電量が需要量を超過した場合、大規模な停電を引き起こすなど電力系統への悪影響を及ぼす可能性がある。この関係から、本論文では電力需給バランスの評価を電力需要 $E_{Demand,t}$[kW]と発電量 $E_{PV,t}$[kW]の差である系統負荷 L_t[kW]（式(2.4-1)）のうち電力需要よりも発電量が超過する場合の「系統全体の余剰電力量」により評価する（式（2.4-2)、(2.4-3)）。

$$L_t = E_{Demand,t} - E_{PV,t} \tag{2.4-1}$$

$$E_{S,t} = \begin{cases} 0 & \left(E_{Demand,t} \geq E_{PV,t}\right) \\ L_t & \left(E_{Demand,t} < E_{PV,t}\right) \end{cases} \tag{2.4-2}$$

$$E_S = \sum_{t=1}^{N} E_{S,t} \tag{2.4-3}$$

ここで、$E_{S,t}$ は時刻 t における余剰電力[kW]、$E_{PV,t}$ は時刻 t における PV 発電電力[kW]、$E_{Demand,t}$ は時刻 t における電力需要[kW]、E_S は年間余剰電力量[kWh/年]、N は 1 年間のタイムステップ数（288step/日×365 日）である。

次に「周波数変動」について考える。電力系統の発電量が系統負荷を上回る場合には、発電機が系統全体で余剰となったエネルギーをその回転エネルギーとして蓄えようとするため、回転数が早くなり、周波数が上昇する。逆に、電力系統の発電量が系統負荷を下回った場合には、発電機がその回転エネルギーを放出しようとするため周波数は低下する。周波数は±0.2～0.3Hz[12)]以内に維持する必要があり、周波数が増減する場合には周波数調整用火力発電所の出力を増減し調整している。本論文では PV の出力変動に伴う周波数変動への影響を電力系統側からみた「正味の系統負荷の変動」を推計することによって評価する。特に、電力需要のみの変動と PV を含めた系統負荷の変動を比較することにより、PV の大量導入が系統負荷変動に及ぼす影響を評価する。ここで、正味の負荷変動 D_t[kW]を PV の出力変動に最も影響を受ける 30 分以下の変動と定義し、系統負荷 L_t[kW]（式(2.4-1)）の移動平均からの偏差[13)]として式(2.4-4)により推計する。

$$D_t = L_t - \frac{1}{m+1}\sum_{i=-m/2}^{m/2} L_{t-i} \tag{2.4-4}$$

式(2.4-4)により移動平均区間の設定によって任意の周期の変動を定量化することができる。本稿では、30 分以下の正味の負荷変動を評価するため、移動平均区間を 30 分(本モデルのタイムステップは 5 分であるから m＝5)とした。また 1 年間の正味の負荷変動の程度を評価するため、負荷変動の二乗平均平方根を評価指標として用いる。

「再生可能エネルギー発電促進賦課金」は各住宅で発生する余剰電力量の買取にかかる費用であり、この費用は全需要家で負担するものとされている。したがって、再生可能エネルギー発電促進賦課金は PV の普及に伴う余剰電力量の増加により高騰することが予想され、家計への負担も増加する。そこで本論文では、再生可能エネルギー発電促進賦課金の評価指標として FIT で買取対象となる「各住宅から発生する余剰電力量」を用いる。各住宅の余剰電力量は電力需要と発電量の差のうち発電量の超過量であり、各世帯の $E_{Demand,h,t}$[kW]と発電量 $E_{PV,h,t}$[kW]を対象に式（2.4-5）～式（2.4-7）により算出する。

$$L_{h,t} = E_{Demand,h,t} - E_{PV,h,t} \tag{2.4-5}$$

$$E_{S,h,t} = \begin{cases} 0 \left(E_{Demand,h,t} \geq E_{PV,h,t}\right) \\ L_t \left(E_{Demand,h,t} < E_{PV,h,t}\right) \end{cases} \tag{2.4-6}$$

$$E_{S,h} = \sum_{t=1}^{N} E_{S,h,t} \tag{2.4-7}$$

ここで、$L_{h,t}$は世帯 h の系統負荷[kW]$E_{S,h,t}$は時刻 t における世帯 h の余剰電力[kW]、$E_{PV,h,t}$は時刻 t における世帯 h の PV 発電電力[kW]、$E_{Demand,\ h,t}$は時刻 t における世帯 h の電力需要[kW]、$E_{S,h}$は世帯 h の年間余剰電力量[kWh/年]である。

本論文では余剰買取方式または全量買取方式の下で PV が戸建住宅の 0～50%に導入される場合を想定し、「系統全体の余剰電力量」、「正味の負荷変動」および「各世帯の余剰電力量」を推計し、PV の大量導入および PV 導入世帯の偏りが電力系統へ及ぼす影響を評価する。

2.4.2　対象地域の設定

本論文では、広域の電力系統として大阪府の民生家庭部門を対象に「系統全体の余剰電力量」、「正味の負荷変動」および「各世帯の余剰電力量」の推計を行う。本来、電力系統全体の評価では日本全国または電力会社供給地域の全電力需要を対象に評価を行うべきであるが、全ての電力需要を予測することは困難であり、本論文では民生家庭部門のみを対象とする。また本論文では特に住宅の電力需要の多様性が及ぼす影響を評価するため、同じ気象地域とみなせる大阪府の住宅のみを対象とする。

本論文で想定する住宅形式（集合住宅または戸建住宅）、住宅規模（延床面積別に 6 区分）、断熱性能（4 区分）、家族構成（89 区分）の計 4,272 区分の世帯類型（表 2.2-1）に従って、総務省統計局が取りまとめている国勢調査[14]を基に世帯類型世帯数を決定する。類型化のために用いた資料を表 2.4-1 に示す。国勢調査は 5 年ごとに行われ、わが国に住んでいるすべての人と世帯を対象に、男女の別、出生の年月、世帯主との続き柄、在学および就業状況などの世帯員に関する事項と、世帯の種類、世帯員の数、住居の種類、住宅の床面積、住宅の建て方などの世帯に関する事項について調査し、都道府県別、市区町村別に結果をまとめたものである。本論文では 2010 年（平成 22 年）度に実施された国勢調査の結果を用いて世帯の類型化を行う。国勢調査とは世帯人数や家族構成、住宅形式、延床面積といった世帯情報および居住者の性別や年齢、就労状況といった世帯人員情報における地域内での実態把握を目的とした調査である。全国の住宅とその居住者を対象に 5 年ごとに行われており、本研究で用いたのは 2010 年の統計資料である。これらの調査結果を用いて図 2.4-1 の手順に従い類型化を行った結果を表 2.4-2 に示す。さらに住宅の断熱性能について大阪府の住宅ストックの熱性能構成比[5]（表 2.4-3）を用いて世帯類型別世帯数を算出した。

表 2.4-1　類型化に用いた国勢調査集計結果一覧

資料番号	表番号	統計表
①	1 次 11 表	世帯の家族類型(16 区分)，世帯人員(7 区分)別一般世帯数(3 世代世帯及び 6 歳未満・12 歳未満・15 歳未満・18 歳未満・20 歳未満世帯員のいる一般世帯－特掲)
②	1 次 13-2 表	世帯の家族類型(16 区分)，世帯主の年齢(5 歳階級)，世帯主の男女別一般世帯数及び一般世帯人員(3 世代世帯，間借り・下宿などの単身者及び会社などの独身寮の単身者－特掲)
③	1 次 21 表	延べ面積(14 区分)，世帯人員(7 区分)，住居の種類・住宅の所有の関係(7 区分)別一般世帯数，一般世帯人員及び 1 世帯当たり人員
④	1 次 24-2 表	延べ面積(14 区分)，住宅の建て方(6 区分)，住居の種類・住宅の所有の関係(3 区分)別一般世帯数及び一般世帯人員
⑤	2 次 23 表	世帯の家族類型(3 区分)，子供の有無・数・年齢(49 区分)，夫婦の就業・非就業(4 区分)別夫婦のいる一般世帯数及び一般世帯人員(雇用者及び夫婦のいる 3 世代世帯－特掲)
⑥	2 次 24 表	世帯の家族類型(4 区分)，親の就業・非就業(4 区分)，子供の年齢(各歳)，子供の男女別子供の数(母子世帯及び父子世帯並びに子供のいる一般世帯数－特掲)
⑦	1 次 25-1 表	世帯の家族類型(16 区分)，住居の種類・住宅の所有の関係(7 区分)，住宅の建て方(8 区分)別一般世帯数及び一般世帯人員(3 世代世帯及び世帯が住んでいる階－特掲)
⑧	1 次 26 表	世帯の家族類型(5 区分)，世帯主の男女，世帯主の年齢(3 区分)，住居の種類・住宅の所有の関係(3 区分)，延べ面積(6 区分)，住宅の建て方(8 区分)別一般世帯数及び一般世帯人員
⑨	1 次 29 表	世帯の家族類型(16 区分)，住居の種類・住宅の所有の関係(3 区分)，延べ面積(14 区分)別一般世帯数及び一般世帯人員(3 世代世帯－特掲)
⑩	2 次 13-2 表	在学学校・未就学の種類(7 区分)，男女別在学者数及び未就学者数
⑪	1 次 16-2 表	世帯の家族類型(16 区分)，配偶関係(3 区分)，年齢(5 歳階級)，男女別一般世帯人員(3 世代世帯－特掲)

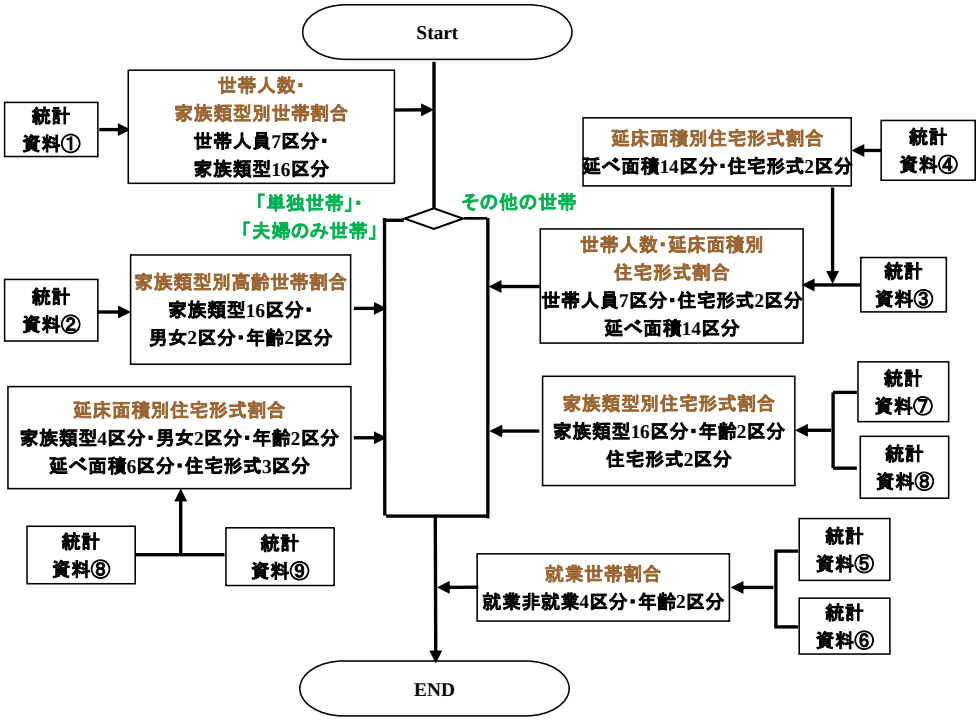


図 2.4-1　世帯類型別世帯割合算出フロー

表 2.4-3　大阪府の世帯数

		集合住宅						戸建住宅					
		19.87m²	33.12m²	52.16m²	69.56m²	89.43m²	107.65m²	36.42m²	52.99m²	69.56m²	92.75m²	112.63m²	130.85m²
1人家族	単独世帯（若・中年男性）	70,095	136,989	71,696	47,476	2,458	12,110	50,346	37,876	59,604	35,161	17,142	19,202
	単独世帯（若・中年女性）	19,089	47,002	48,763	49,909	8,854	1,919	36,903	39,092	42,053	16,324	20,730	41,442
	単独世帯（高齢男性）	33,437	49,151	6,708	30,281	50	0	9,258	852	7,938	87	0	0
	単独世帯（高齢女性）	28,769	93,117	78,212	22,272	16,771	2,886	7,576	9,538	6,580	8,604	7,041	10,605
2人家族	夫婦（若・中年、共働き）	2,403	17,460	33,144	36,545	18,623	1,453	5,901	8,069	13,938	11,975	12,683	14,681
	夫婦（若・中年、夫のみ就業）	1,178	10,064	22,945	31,011	14,445	1,612	2,795	9,766	15,483	13,192	11,727	11,291
	夫婦（若・中年、妻のみ就業）	32	2,660	5,894	6,242	1,079	23	1,464	2,625	2,759	2,078	1,160	2,660
	夫婦（若・中年、非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦（高齢）	3,204	19,061	46,664	41,874	18,271	4,420	16,817	36,076	61,990	49,097	34,336	79,396
	男親と子供（就業）	396	1,860	2,914	3,321	879	206	569	1,554	1,892	2,233	1,704	3,107
	男親と子供（非就業）	150	1,157	2,380	2,448	641	124	360	1,033	1,477	1,920	1,465	2,174
	女親と子供（就業）	2,669	13,780	20,995	25,582	6,872	1,619	2,397	7,419	9,086	10,566	7,520	14,224
	女親と子供（非就業）	1,982	10,379	22,203	23,721	5,600	1,141	2,145	6,467	9,219	11,562	8,485	12,163
3人家族	夫婦と子供（共働き）	2,527	14,093	30,912	41,741	13,764	3,739	4,645	13,011	20,580	27,049	22,432	36,509
	夫婦と子供（夫のみ就業）	1,385	12,045	29,704	38,162	10,945	2,037	3,248	12,266	21,085	29,816	21,855	30,140
	夫婦と子供（妻のみ就業）	317	433	1,608	2,714	464	479	92	538	1,806	3,091	2,226	3,175
	夫婦と子供（非就業）	321	3,908	6,124	7,764	3,463	283	1,016	2,378	4,798	9,616	8,115	11,668
	男親と子供2人（就業）	86	462	983	1,277	393	115	130	404	714	869	688	1,143
	男親と子供2人（非就業）	33	315	712	998	315	53	81	254	465	784	578	786
	女親と子供2人（就業）	628	4,041	8,317	11,375	3,748	909	615	2,497	3,649	4,949	3,777	6,197
	女親と子供2人（非就業）	461	3,198	7,786	11,320	3,133	599	598	1,799	3,701	5,327	4,206	5,250
	片親と夫婦（共働き）	101	497	1,282	1,371	555	88	440	1,515	2,013	2,466	2,119	3,740
	片親と夫婦（夫のみ就業）	31	257	891	1,062	225	105	364	937	1,842	2,544	2,011	2,708
	片親と夫婦（妻のみ就業）	2	112	190	142	103	2	20	179	241	441	408	712
	片親と夫婦（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4人家族	夫婦と子供2人（共働き）	1,321	6,999	23,207	37,392	16,424	4,410	1,835	8,366	18,955	28,158	26,112	36,301
	夫婦と子供2人（夫のみ就業）	747	4,486	21,877	37,946	11,509	2,710	1,241	6,942	17,628	32,591	25,190	30,116
	夫婦と子供2人（妻のみ就業）	169	263	1,182	2,267	871	444	64	31	1,320	3,144	2,519	3,093
	夫婦と子供2人（非就業）	153	1,974	4,595	8,804	3,683	464	271	2,031	3,542	8,199	9,429	10,957
	男親と子供3人（就業）	15	57	197	265	104	36	14	52	127	173	211	266
	男親と子供3人（非就業）	1	33	137	211	87	20	7	45	68	187	143	181
	女親と子供3人（就業）	119	532	1,951	3,226	1,399	292	50	406	870	1,594	1,241	1,627
	女親と子供3人（非就業）	95	456	1,609	3,321	1,061	250	64	302	884	1,547	1,403	1,605
	両親と夫婦（共働き）	4	15	56	94	48	2	44	255	531	690	656	1,009
	両親と夫婦（夫のみ就業）	0	12	13	61	22	0	39	172	417	720	606	791
	両親と夫婦（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	49	63	130	118	194
	両親と夫婦（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供1人（共働き）	35	160	605	783	378	76	156	937	1,937	2,996	2,486	3,908
	片親と夫婦と子供1人（夫のみ就業）	4	97	261	607	120	34	150	592	1,756	2,955	2,462	2,891
	片親と夫婦と子供1人（妻のみ就業）	0	14	35	21	14	2	9	178	277	509	528	741
	片親と夫婦と子供1人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5人家族	夫婦と子供3人（共働き）	376	1,770	6,516	10,098	5,150	1,576	314	1,552	3,541	6,063	6,125	11,201
	夫婦と子供3人（夫のみ就業）	178	1,224	6,160	10,288	3,757	1,130	145	1,245	3,062	6,995	6,260	9,591
	夫婦と子供3人（妻のみ就業）	51	91	402	482	258	112	22	14	224	463	782	1,092
	夫婦と子供3人（非就業）	50	399	1,217	2,382	1,016	159	97	394	658	1,748	2,232	3,617
	男親と子供4人（就業）	0	1	3	1	1	0	1	0	3	2	3	6
	男親と子供4人（非就業）	0	0	0	2	0	0	0	1	0	6	2	3
	女親と子供4人（就業）	4	25	86	139	39	26	4	9	39	49	55	52
	女親と子供4人（非就業）	2	9	38	127	72	7	0	10	11	57	48	74
	両親と夫婦と子供1人（共働き）	5	32	94	117	83	3	38	236	542	960	883	1,805
	両親と夫婦と子供1人（夫のみ就業）	1	11	48	101	18	6	40	185	399	887	865	1,350
	両親と夫婦と子供1人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	3	23	82	129	206	284
	両親と夫婦と子供1人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供2人（共働き）	17	156	613	759	399	119	120	608	1,358	2,313	2,151	4,464
	片親と夫婦と子供2人（夫のみ就業）	22	85	243	633	134	63	58	485	1,084	2,348	2,099	3,474
	片親と夫婦と子供2人（妻のみ就業）	0	1	39	40	35	0	11	54	235	423	464	738
	片親と夫婦と子供2人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6人家族	夫婦と子供4人（共働き）	39	293	985	1,305	787	303	41	177	304	731	721	2,234
	夫婦と子供4人（夫のみ就業）	34	152	952	1,339	563	237	22	128	279	685	817	1,971
	夫婦と子供4人（妻のみ就業）	3	16	83	66	25	17	0	1	25	44	69	235
	夫婦と子供4人（非就業）	5	73	197	312	141	69	13	50	52	171	202	734
	男親と子供5人（就業）	0	2	6	10	5	2	0	0	2	8	5	13
	男親と子供5人（非就業）	1	0	5	5	3	1	0	2	0	5	4	10
	女親と子供5人（就業）	1	9	41	42	25	8	0	4	2	33	14	87
	女親と子供5人（非就業）	0	8	41	26	15	7	3	10	11	11	26	53
	両親と夫婦と子供2人（共働き）	8	44	105	116	44	16	35	215	415	870	922	2,733
	両親と夫婦と子供2人（夫のみ就業）	0	9	67	117	39	15	17	143	274	776	871	2,294
	両親と夫婦と子供2人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	41	76	105	142	507
	両親と夫婦と子供2人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供3人（共働き）	10	71	267	288	160	61	51	179	348	710	738	2,202
	片親と夫婦と子供3人（夫のみ就業）	7	30	130	234	59	36	13	128	225	618	699	1,877
	片親と夫婦と子供3人（妻のみ就業）	0	0	15	9	11	10	2	32	58	85	143	404
	片親と夫婦と子供3人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7人家族	夫婦と子供5人（共働き）	19	117	585	791	276	141	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供5人（夫のみ就業）	9	104	524	650	263	141	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供5人（妻のみ就業）	0	2	26	63	14	6	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供5人（非就業）	0	23	69	199	81	28	0	0	0	0	0	0
	男親と子供6人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供6人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供6人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供6人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（共働き）	49	276	1,142	1,497	641	334	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（夫のみ就業）	17	183	898	1,357	409	212	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（妻のみ就業）	0	21	149	250	93	60	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（共働き）	4	50	204	282	115	53	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（夫のみ就業）	6	38	202	258	106	44	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（妻のみ就業）	1	3	14	48	17	10	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.4-2　熱性能構成比（大阪府）[5)]

	無断熱	旧基準	新基準	次世代基準
集合住宅	30.1%	39.3%	25.4%	5.2%
戸建住宅	27.2%	38.6%	28.3%	5.9%

大阪府の全 380 万世帯について電力需要を推計することは、計算負荷の観点から現実的ではない。そこで世帯類型ごとに推計した電力需要および発電量と世帯類型別世帯数を積和することにより大阪府全体の電力需要および発電量を推計する。したがって同じ類型世帯は同じロードカーブを持つ。なお世帯類型の違いが電力需要や PV 購入者の経済性に及ぼす影響を評価するため、全ての世帯で従来型のガス給湯器を採用するものとした。また、図 2.4-2 に示すように PV の方位別搭載容量は床面積ごとに決定し、52.99m² 以下の住宅では 3kW、69.56m² 以上の住宅では 5kW の PV を導入するものとした。なお、大阪府の全ての戸建住宅に PV を導入した場合の合計導入容量は約 7GW である。

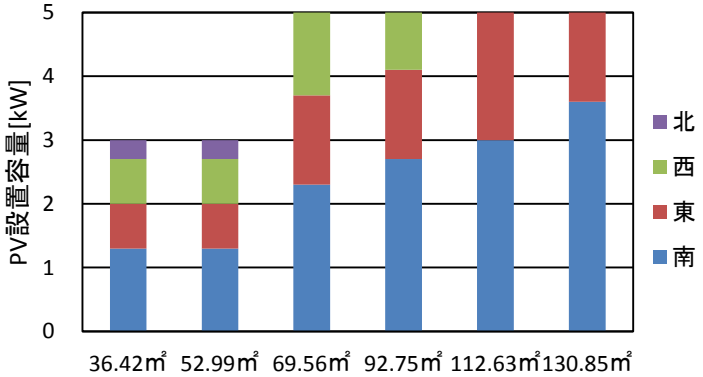


図 2.4-2　PV 設置容量（再掲）

2.4.3　PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の推計結果

図 2.4-3 は余剰買取方式および全量買取方式において、PV が 10～50%まで導入された場合の PV 導入世帯の内訳を示す。余剰買取方式においては家族人数が少なく、余剰電力量の大きい世帯割合が大きい。したがって、余剰買取方式においては PV 導入世帯に偏りが生じる。一方、全量買取方式の NPV は同じ PV 設置容量においても床面積の大きい世帯で大きくなるため、PV 世帯割合がおおむね大阪府全体の世帯割合と一致しており、平均的に普及が進むと考えられる。

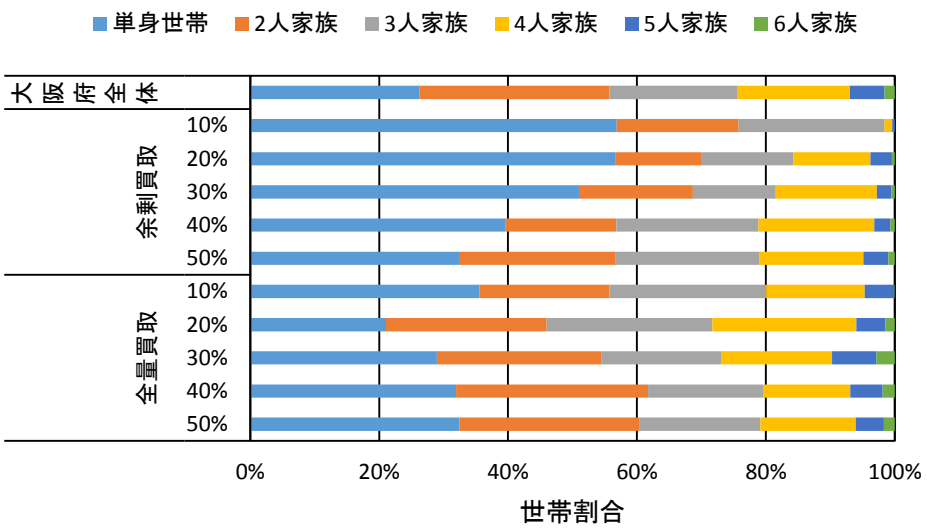
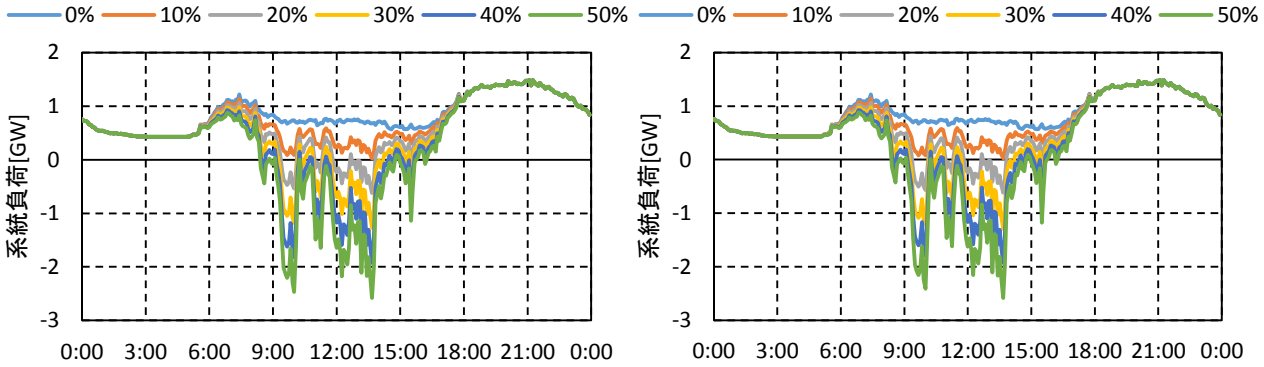


図 2.4-3　PV 導入世帯の内訳

図 2.4-4 は余剰買取方式または全量買取方式のもとで PV が導入された場合の 5 月 11 日の系統負荷を示す。PV は NPV の優れる世帯から順に導入が進むものとし、PV 導入世帯が 0%～50%まで普及した場合を想定する。ここで系統負荷とは電力需要から発電量を差し引いた電力であり、系統負荷が負である場合、対象とする系統において電力が余剰であることを示す。普及率 0%は電力需要のみを示す。余剰買取方式の場合、PV 発電量の大きい 5 月 11 日の 9:00～15:00 の電力需要は 0.57GW～0.85GW であった。PV 普及率が 20%以上の場合、9:00～15:00 の系統負荷はすべて負であり電力需要よりも PV 発電量が大きくなった。PV 普及率が 50%の場合、最大 2.6GW の余剰電力が発生した。

全量買取方式においても余剰買取方式の場合と同様に PV 普及率が 20%以上の場合、9:00～15:00 の系統負荷はすべて負となり、PV 普及率が 50%の場合、最大 2.6GW の余剰電力が発生した。



(a)余剰買取方式　　(b)全量買取方式

図 2.4-4　5 月 11 日の系統負荷推計結果

図 2.4-5 は余剰買取方式および全量買取方式における電力系統全体の年間余剰電力量推計結果を示す。PV 普及率が大きくなるほど電力系統全体の年間余剰電力量は大きくなり、PV 普及率が 50%の場合、電力系統全体の年間余剰電力量は余剰買取方式において 1,453GWh/年、全量買取方式において 1,420GWh/年であった。これらの年間発電量に占める割合はそれぞれ 31.2%および 30.7%であり、PV 買取方式の違いによる電力系統全体の年間余剰電力量に及ぼす影響は小さい。したがって系統負荷および電力系統全体の余剰電力量は PV 普及世帯の偏りよりも PV 導入量によって変動する。

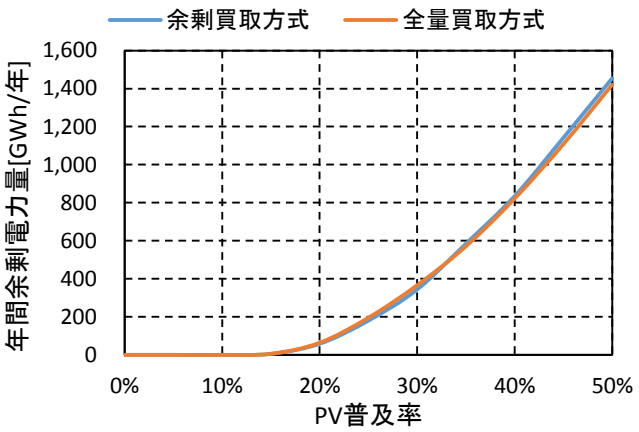
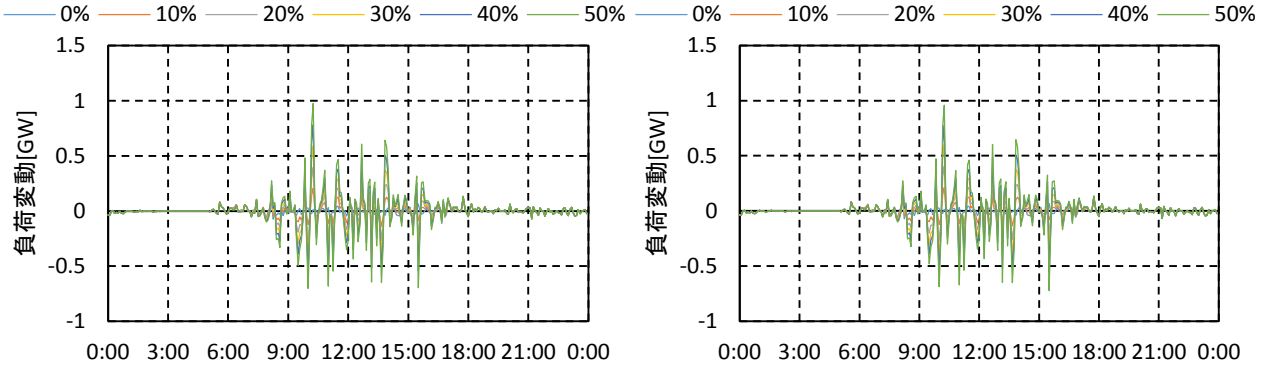


図 2.4-5　電力系統全体の年間余剰電力量推計結果

図 2.4-6 は 5 月 11 日における余剰買取方式または全量買取方式のもとで PV が導入された場合の正味の負荷変動を示す。ここで負荷変動は周期 30 分以下の変動を対象とする。5 月 11 日における電力需要のみの負荷変動は-0.07 GW～0.12GW である。PV 普及率が大きくなるほど負荷変動は大きくなり、PV 普及率が 50%の場合、負荷変動は-0.70GW～0.97GW まで増加した。これは日射量の増減などによる PV の発電量の変動による影響が大きくなるためである。

全量買取方式の場合も同様に PV 普及率が大きくなると負荷変動が増加した。PV 普及率が 50%の場合、負荷変動は-0.72GW～0.96GW であった。



(a)余剰買取方式　　(b)全量買取方式

図 2.4-6　5 月 11 日の負荷変動推計結果

図 2.4-7 は余剰買取方式および全量買取方式における 1 年間の負荷変動の二乗平均平方根の推計結果を示す。二乗平均平方根が大きいほど正味の負荷変動の振幅が大きいことを示す。電力需要のみの変動の二乗平均平方根は 0.047GW であったのに対し、PV 普及率が 50%の場合、負荷変動の二乗平均平方根は 0.14GW であり、電力需要のみの場合と比較しておよそ 3 倍となった。このため PV が大量導入された場合、この負荷変動に応じて周波数変動の増加が懸念されるため電力系統の周波数調整容量を高める必要があることがわかる。一方、余剰買取方式と全量買取方式の負荷変動の差異は小さく、PV の普及世帯の偏りが負荷変動に及ぼす影響は小さく、負荷変動は PV 導入量によって変動すると考えられる。

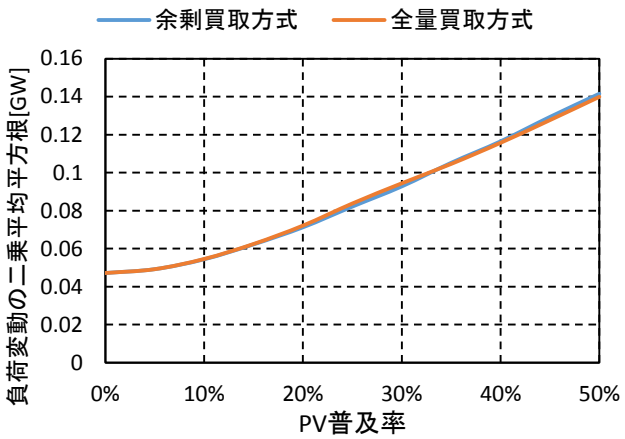


図 2.4-7　負荷変動の二乗平均平方根推計結果

図 2.4-8 は余剰買取方式および全量買取方式における各世帯から発生する余剰電力量の合計値の推計結果を示す。FIT における PV 余剰電力の買取費用はすべての需要家で負担するものとされており、買取対象となる余剰電力が増加すると需要家の負担は増加する。PV 普及率が 50%の場合、各世帯の年間余剰電力量の合計は余剰買取方式において 3,682GWh/年、全量買取方式において 3,442GWh/年であった。各世帯の年間余剰電力量が PV 発電量に占める割合はそれぞれ 79%および 74%であり、同じ普及率においても余剰買取方式のほうが全量買取方式よりも発生する余剰電力量が大きい。これは余剰買取方式の場合、電力需要が小さく余剰電力の大きい世帯で PV 導入の経済性である NPV が大きくなり、優先して PV の普及が進むと考えられるためである。したがって余剰買取方式のような PV 経済性に偏りのある PV 普及施策では PV の普及世帯の偏りが生じ、同じ PV 導入容量において全量買取方式のように PV が平均的に導入される場合と比較して買取費用が増加する傾向にあることがいえる。

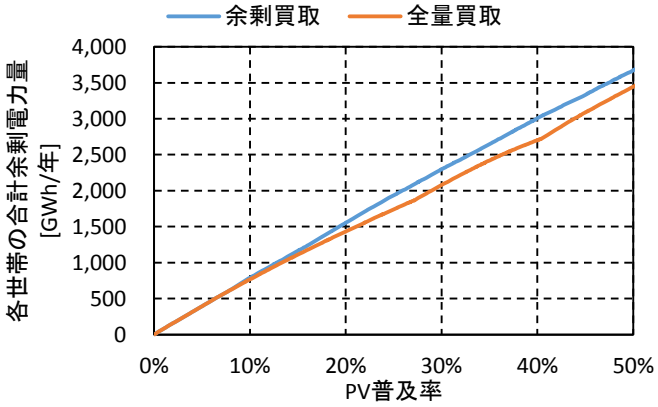


図 2.4-8　各世帯から発生する余剰電力量の合計推計結果

2.5　PV の大量導入が配電系統に及ぼす影響の評価

2.5.1　PV の大量導入が配電系統に及ぼす影響の評価方法

本節では PV の大量導入が配電系統に及ぼす影響の評価方法を述べる。配電線電圧の評価指標として、時刻別配電線電圧、需要家電圧の適正範囲逸脱時 PV 抑制量を用いる。逸脱時 PV 抑制量とは需要家電圧が適正範囲の上限を逸脱した世帯で PV の発電量を全て抑制した場合の PV 発電量の抑制量である。本論文では需要家電圧の適正範囲の上限を 100V における上限（107V）を 200V 換算した

214V とした。なお本論文では配電系統側での対策は講じず、配電線電圧が逸脱した場合、PCS による発電抑制によってのみ配電線電圧の調整が行われるものとした。

本論文で想定する高低圧配電系統を図 2.5-1 に示す。実際は三相三線式のため配電線は 3 本存在するが、図では単線で示している。図中の「#」で始まる数字はノード番号を示している。#000 は配電用変電所であり 66kV で送電された電力を 6,600V に変圧して高圧配電系統に電力を供給している。本配電系統は配電用変電所の変圧器二次側以下の高圧配電系統（高圧配電線 1 フィーダ）および単相低圧配電系統で構成される。高圧配電系統は電協研モデル[15]を参考に作成した分岐のある放射状配電系統であり、1 本のメインフィーダ、8 本のサブフィーダ、25 個のノード（配電用変電所を含む）で構成される。高圧配電系統のメインフィーダの線路容量は 3MVA、線路長は 4.0km である。ノード間の配電線路におけるインピーダンスを表 2.5-1 に示す。配電用変電所ノード（#000）以外のノードには高圧需要家または低圧需要家のいずれかが連系している。ただし、低圧需要家は低圧配電系統を介して電力が供給されるものとする。低圧配電系統は 1 つの柱上変圧器から低圧配電線、引込み線を介して 12 軒の低圧需要家が連系するものとする[16]。1 つの高圧配電系統ノードからは各相 1 台ずつ計 3 台の単相柱上変圧器が連系している。柱上変圧器、低圧配電線、引込み線のインピーダンスを表 2.5-2 に示す。

配電線電圧は次節で詳述する配電線電圧計算モデルにより推計する。電力系統に及ぼす影響の評価と同様に PV の導入量を戸建住宅の 0～100%に導入した場合を想定し、PV の導入量が配電線電圧に及ぼす影響を明らかにする。また PV の導入世帯を上流ノード（#101～#104 とそのサブフィーダ）または下流ノード（#105～#108 とそのサブフィーダ）に集中して導入した場合を想定し、PV の導入世帯の分布が配電線電圧に及ぼす影響を評価する。

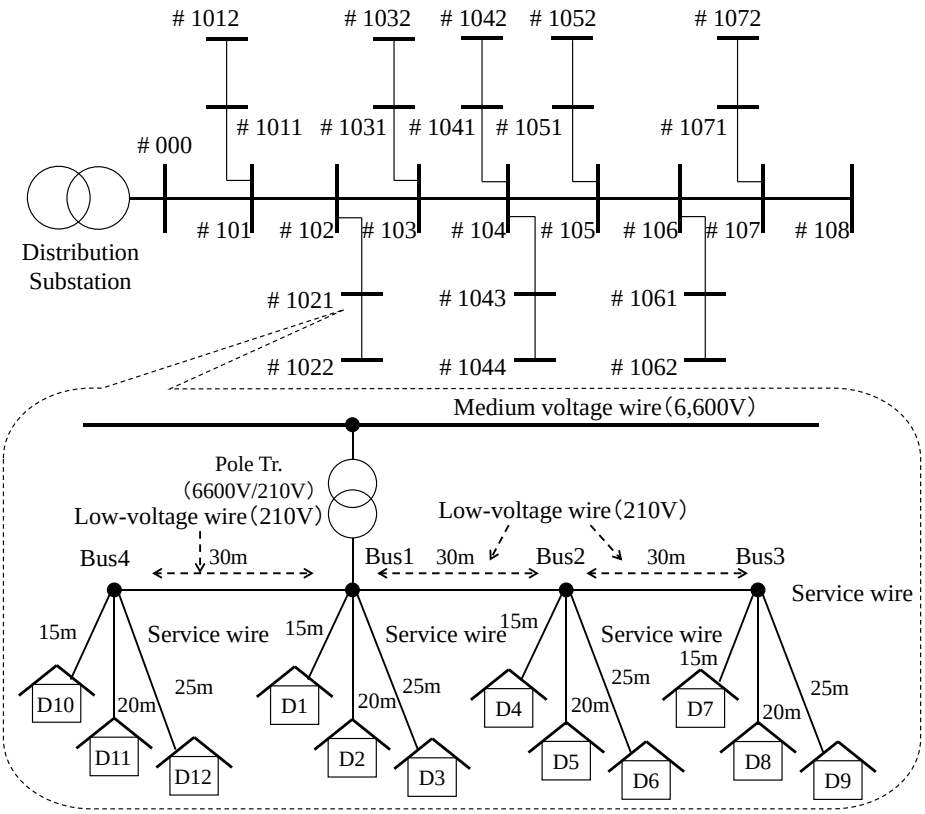


図 2.5-1　高低圧配電系統 [15),16)]

表 2.5-1　高圧配電線路インピーダンス [15)]

Node No.	R[Ω]	X[Ω]	Node No.	R[Ω]	X[Ω]
101	0.110	0.142	1043	0.052	0.061
1011	0.052	0.061	1044	0.079	0.103
1012	0.246	0.122	105	0.110	0.142
102	0.110	0.142	1051	0.052	0.061
1021	0.052	0.061	1052	0.079	0.103
1022	0.169	0.112	106	0.110	0.142
103	0.110	0.142	1061	0.052	0.061
1031	0.052	0.061	1062	0.079	0.103
1032	0.079	0.103	107	0.110	0.142
104	0.110	0.142	1071	0.052	0.061
1041	0.079	0.084	1072	0.391	0.122
1042	0.449	0.139	108	0.122	0.070

表 2.5-2　柱上変圧器、引込み線インピーダンス、低圧配電線 [16)]

	R[Ω/km]	X[Ω/km]
Pole transfer	0.0313	0.0416
Service wire	1.3	0.209
Low voltage wire	0.313	0.343

2.5.2　配電線電圧計算モデル

配電線電圧計算モデルでは放射状の高圧配電系統 1 フィーダを対象として、配電線電圧および需要家における受電端電圧を推計する。本論文では配電用変電所、高圧配電線で構成される高圧配電系統と柱上変圧器、低圧配電線、引込み線で構成される低圧配電系統を統合した高低圧一括配電系統を模擬して DistFlow 法[17)]による電圧計算を行う。DistFlow 法は図 2.5-2 に示すような放射状系統における潮流計算法である。ここで図中に示されている記号は以下のとおりである。

k　:　対象とするノード番号[-]

$\dot{V}_k$　:　ノード k の電圧値[V]

$\dot{S}_k$　:　ノード k から流出する電力潮流[VA]

P_k　:　ノード k から流出する有効電力[W]

Q_k　:　ノード k から流出する無効電力[Var]

$\dot{S}L_k$　:　ノード k に接続されている負荷[VA]

PL_k　:　ノード k に接続されている負荷の有効成分[W]

QL_k　:　ノード k に接続されている負荷の無効成分[Var]

$\dot{Z}_k$　:　ノード $k-1$ とノード k の間のインピーダンス[Ω]

r_k　:　ノード $k-1$ とノード k の間の抵抗[Ω]

x_k　:　ノード $k-1$ とノード k の間の抵抗[Ω]

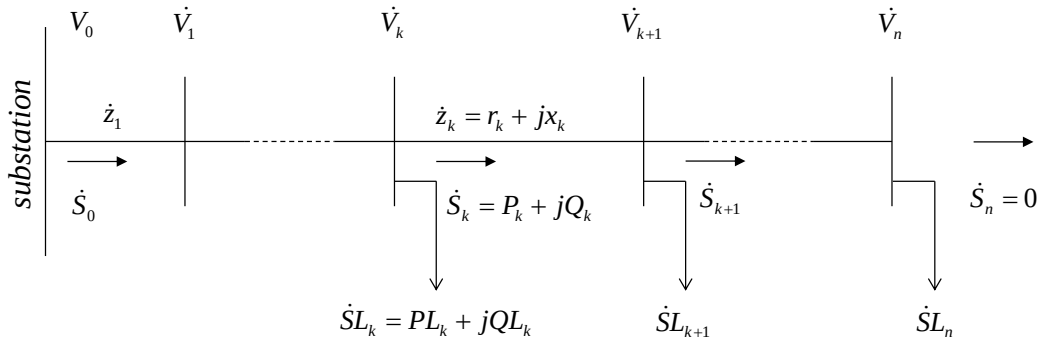


図 2.5-2　1 ラインのみの系統例

Dist Flow 法では上流側ノードの有効電力・無効電力および電圧が判明すれば、下流方向に逐次的に各ノードの物理量を計算することができ、ノード $\boldsymbol{k}$ から流出する有効電力・無効電力およびノード $\boldsymbol{k}$ の電圧は、式（2.5-1）～式（2.5-3）のように示される。

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= P_k - P_{loss,k} - PL_{k+1} \\ &= P_k - \left(r_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{|V_k|^2} \right) - PL_{k+1} \end{aligned} \tag{2.5-1}$$

$$\begin{aligned} Q_{k+1} &= Q_k - Q_{loss,k} - QL_{k+1} \\ &= Q_k - \left(x_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{|V_k|^2} \right) - QL_{k+1} \end{aligned} \tag{2.5-2}$$

$$V_{k+1} = V_k - (r_x + jx_k) \frac{(P_k + jQ_k)^*}{V_k^*} \tag{2.5-3}$$

したがって、ノード $\boldsymbol{k}$ の電圧は式（2.5-4）により算出する。

$$V_{k+1}{}^2 = V_k{}^2 - 2(r_k P_k + x_k Q_k) + (r_k^2 + x_k^2) \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k{}^2} \tag{2.5-4}$$

各ノードの電圧を決定するためには、配電用変電所からの送り出し有効電力および無効電力を決定する必要がある。この際、ライン末端から流出する電力はないと考えられるため、ライン末端から流出する電力が 0 となる境界条件を満たす必要がある。本論文では、非線形の連立方程式の近似解を求めるニュートン・ラフソン法（NR 法）を用いて、以下の収束計算により送り出し有効電力・無効電力を決定する。

① 適当な送り出し有効電力 P_0[W], 無効電力 Q_0[Var]を代入し、各ライン末端から流出する電力を求める。

② 系統ヤコビアン行列 $\boldsymbol{J}$ を求める（式（2.5-5））。

$$J(P_0,Q_0)=\begin{pmatrix} \dfrac{\partial P_n}{\partial P_0} & \dfrac{\partial P_n}{\partial Q_0} \\ \dfrac{\partial Q_n}{\partial P_0} & \dfrac{\partial Q_n}{\partial Q_0} \end{pmatrix} \tag{2.5-5}$$

③ 有効電力・無効電力の修正量を求め、送り出し有効電力 P_0[W], 無効電力 Q_0[Var]を更新する（式（2.5-6））。

$$\left(P_0^{'},Q_0^{'}\right)^T=\left(P_0,Q_0\right)^T-J\left(P_0,Q_0\right)^{-1}\left(P_n,Q_n\right)^T \tag{2.5-6}$$

なお、実際の計算における境界条件を式（2.5-7）に示す。

$$P_n \le 10^{-6} \text{かつ} Q_n \le 10^{-6} \tag{2.5-7}$$

図 2.5-1 に示すように、本論文で想定する高圧配電線系統では、メインフィーダ（#000～#108）からの分岐線も含まれる。図 2.5-3 に分岐線がある場合の系統例を示す。ここで、最上流ノード電圧を一定であると仮定し、上記の上流ノードと下流ノードの関係を考慮すると、各ラインおよびその分岐線に流入する電力量のみを状態変数とすることにより、各ノードの電圧は配電用変電所側ノードから逐次計算により求めることができ、計算手順はメインフィーダの場合と同様である。ある分岐線に対して流入する有効電力 $P_{i,0}$[W]・無効電力 $Q_{i,0}$[Var]と分岐ノードでの電圧 $V_{i,0}$[V]が与えられれば、メインフィーダの場合と同様のことが分岐線に対しても適用することができる。言い換えれば、分岐ノードをその分岐線の変電所ノードと考える。メインフィーダでの計算で決定された推定値を利用して分岐ノードを変電ノードと仮定し、ここから終端に向けて有効電力・無効電力および電圧を求める（①）。これをすべての分岐線に対して行う。系統ヤコビアン行列 J は、L 本の分岐線がある場合、式（2.5-8）に示す 2(L+1)×2(L+1)の行列となる（②）。

$$J=\begin{pmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} & \cdots & J_{1,L} & J_{1,0} \\ J_{2,1} & J_{2,2} & \cdots & J_{2,L} & J_{2,0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ J_{L,1} & J_{L,2} & \cdots & J_{L,L} & J_{L,0} \\ J_{0,1} & J_{0,2} & \cdots & J_{0,L} & J_{0,0} \end{pmatrix} \tag{2.5-8}$$

ただし、

$$J_{i,k}=\begin{pmatrix} \dfrac{\partial P_{i,n_i}}{\partial P_{i,0}} & \dfrac{\partial P_{i,n_i}}{\partial Q_{i,0}} \\ \dfrac{\partial Q_{i,n_i}}{\partial P_{i,0}} & \dfrac{\partial Q_{i,n_i}}{\partial Q_{i,0}} \end{pmatrix} \tag{2.5-9}$$

である。さらに、すべての分岐ノードの有効電力 $P_{i,0}$・無効電力 $Q_{i,0}$を更新し（③）、収束計算を行うことにより、各ノードの電圧を求めることが出来る。

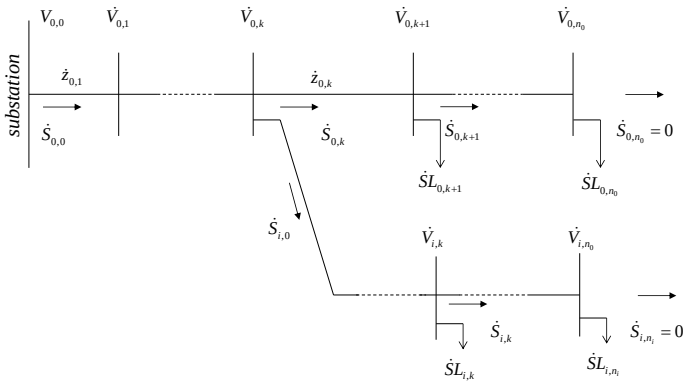


図 2.5-3　分岐線のある系統例

低圧配電系統についても DistFlow 法を用いて同様に潮流計算を行う。低圧配電系統の送出電圧は高圧配電系統の電圧計算結果を柱上変圧器のタップ比を用いて低圧換算した値を用いる。なお、柱上変圧器のタップ比は 6,600V / 210V とする。また高圧配電系統のメインフィーダの先頭ノードである配電用変電所の送出電圧は 6,600V、負荷の力率は 95%、PV 力率は 100%でそれぞれ一定値とする。先頭ノードの有効電力、無効電力の初期値は各ノードの有効電力、無効電力の合計値とする。

また高圧配電系統は三相三線式回路であるが、本論文では負荷は三相間で平衡しているものと仮定し、一相分のみ計算を行う。したがって、三相対称回路における電圧降下と単相回路の電圧降下を等しくするため、各ノード間のインピーダンスを 3 倍して計算する必要がある。

2.5.3　対象地域の設定

本節では配電線電圧の評価のため、本論文で想定する配電系統について説明する。本論文では PV の大量導入による影響を受けやすい地域として、戸建住宅が密集する住宅地域を対象とする。図 2.5-1 に示す配電用変電所を除く全てのノードには高圧需要家または低圧需要家が連系している。本論文では 24 ノードの内、#101、#102、#103、#104 の 4 ノードに高圧需要家である集合住宅が、その他の 20 ノードに柱上変圧器および低圧配電線を介して低圧需要家である戸建住宅が連系するものとした。低圧配電系統が連系するノードには各相に単相変圧器が 1 台ずつ、計 3 台の柱上変圧器が接続しており、1 台の柱上変圧器から 12 軒の低圧需要家に電力を供給している。線路容量、ノード数、低圧需要家数の制約条件を考慮して、本論文では集合住宅 480 世帯（1 棟当たり 120 世帯)、戸建住宅 720 世帯の計 1,200 世帯からなる高低圧配電系統を対象とした。ただし、本論文では三相平衡を仮定して電圧計算を行うため､低圧需要家である戸建住宅については 1 相分のみを取り出して評価を行う。したがって、実際に電力需要・PV 発電量を推計するのは集合住宅 480 世帯、戸建住宅 240 世帯の計 720 世帯である。

本論文ではより実態に近い電力ロードカーブを推計するために、実在する地域の世帯構成に基づいて対象地域の世帯構成の分布を決定した。対象地域は、戸建住宅が多く郊外住宅地である大阪府高槻市とした。世帯分布の決定方法は大阪府を対象とした場合と同一の手法である。なお新興住宅地を想定するため、全ての住宅で次世代基準の断熱性能を有するものとした。表 2.5-3 に配電系統に居住する世帯類型別世帯数を示す。また給湯器は戸建住宅の 50%にヒートポンプ給湯機が導入されるものとし､その他の戸建住宅および集合住宅では潜熱回収型ガス給湯器（熱効率 92%）を用いるものとした。ヒートポンプ給湯機の仕様を表 2.5-3 に、ヒートポンプ給湯機の COP を図 2.5-4 に示す。ヒートポン

プ給湯機は 1 日の給湯需要量に相当する熱量を深夜電力を利用して製造する。ここで、ヒートポンプ給湯機導入世帯はオール電化とし調理器具として IH 調理器を使用するものとする。各世帯の PV 導入容量は正規分布（平均 5kW、標準偏差 1kW）に基づいてランダムに決定した。ここで図 2.5-5 に示すように床面積に応じて各方位に導入可能な PV 容量を設定し、南、東、西、北の順に優先して PV の設置方位を決定した。なお、本論文で想定する高低圧配電系統の全ての戸建住宅に PV を導入した場合の合計導入容量は 3.3 MW である。配電系統の評価では、各世帯の多様性を考慮した評価を行うため 720 世帯それぞれの世帯モデルを作成し、各世帯モデルについて電力需要、発電量を推計した。なお各世帯の高圧配電系統内の配置はモンテカルロシミュレーションにより、平均的な配電線電圧となるように決定した。

表 2.5-3　ヒートポンプ給湯機の仕様 [6)]

加熱能力	4.5kW
タンク容量	370 L
放熱損失	13%/日

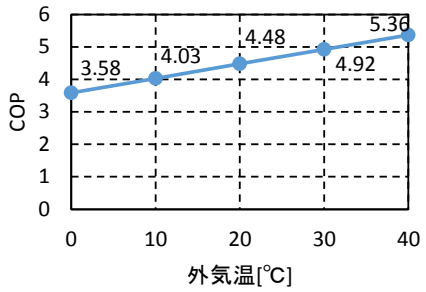


図 2.5-4　COP と外気温の関係 [6)]

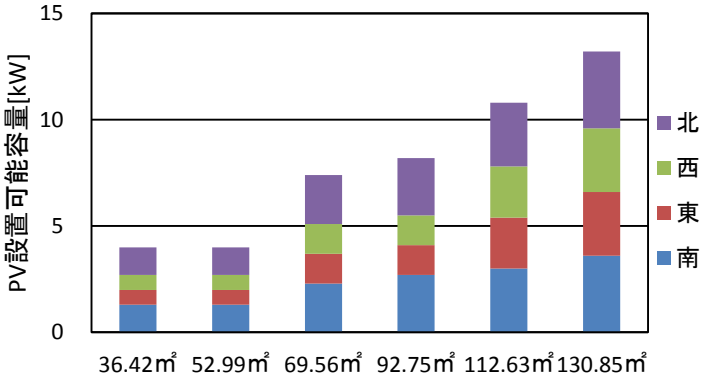


図 2.5-5　方位別 PV 設置可能容量

表 2.5-3　配電系統の世帯類型別世帯数

		集合住宅						戸建住宅					
		19.87m²	33.12m²	52.16m²	69.56m²	89.43m²	107.65m²	36.42m²	52.99m²	69.56m²	92.75m²	112.63m²	130.85m²
1人家族	単独世帯（若・中年男性）	5	16	13	8	5	8	0	0	0	0	0	0
	単独世帯（若・中年女性）	0	7	12	7	2	8	0	0	0	0	0	0
	単独世帯（高齢男性）	5	5	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	単独世帯（高齢女性）	4	10	10	3	4	1	0	0	0	0	0	0
2人家族	夫婦（若・中年、共働き）	0	3	6	10	6	3	15	9	21	9	6	15
	夫婦（若・中年、夫のみ就業）	0	3	3	8	3	2	0	9	12	3	6	6
	夫婦（若・中年、妻のみ就業）	0	0	0	3	0	1	0	3	3	0	0	0
	夫婦（若・中年、非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦（高齢）	0	3	9	14	10	22	6	30	45	18	24	21
	男親と子供（就業）	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供（非就業）	0	0	2	2	0	0	0	0	6	0	3	0
	女親と子供（就業）	2	1	9	5	4	0	0	0	0	0	3	3
	女親と子供（非就業）	0	4	4	4	0	0	0	0	0	6	0	3
3人家族	夫婦と子供（共働き）	1	6	10	14	8	1	6	9	18	9	15	24
	夫婦と子供（夫のみ就業）	0	1	11	18	2	0	0	3	3	18	9	21
	夫婦と子供（妻のみ就業）	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	3
	夫婦と子供（非就業）	0	1	0	3	2	0	0	3	3	3	3	9
	男親と子供2人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
	男親と子供2人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	女親と子供2人（就業）	0	2	0	2	1	0	0	6	3	3	6	6
	女親と子供2人（非就業）	0	0	2	2	1	0	0	0	3	3	3	0
	片親と夫婦（共働き）	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
	片親と夫婦（夫のみ就業）	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	3
	片親と夫婦（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	片親と夫婦（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4人家族	夫婦と子供2人（共働き）	0	1	9	14	3	1	0	3	15	15	18	21
	夫婦と子供2人（夫のみ就業）	0	2	4	16	5	0	0	3	3	24	6	15
	夫婦と子供2人（妻のみ就業）	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	3
	夫婦と子供2人（非就業）	0	1	1	4	2	0	0	3	3	3	6	3
	男親と子供3人（就業）	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供3人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供3人（就業）	0	0	0	2	0	0	0	0	0	6	0	3
	女親と子供3人（非就業）	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0
	両親と夫婦（共働き）	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦（夫のみ就業）	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供1人（共働き）	0	0	1	1	0	0	0	3	3	3	0	3
	片親と夫婦と子供1人（夫のみ就業）	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0
	片親と夫婦と子供1人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供1人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5人家族	夫婦と子供3人（共働き）	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	6
	夫婦と子供3人（夫のみ就業）	0	2	2	6	1	0	0	0	0	0	0	6
	夫婦と子供3人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供3人（非就業）	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3
	男親と子供4人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供4人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供4人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供4人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
	両親と夫婦と子供1人（共働き）	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供1人（夫のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供1人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供1人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供2人（共働き）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
	片親と夫婦と子供2人（夫のみ就業）	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	片親と夫婦と子供2人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
	片親と夫婦と子供2人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6人家族	夫婦と子供4人（共働き）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供4人（夫のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供4人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供4人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供5人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供5人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供5人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供5人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供2人（共働き）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	6
	両親と夫婦と子供2人（夫のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
	両親と夫婦と子供2人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供2人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供3人（共働き）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供3人（夫のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供3人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供3人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7人家族	夫婦と子供5人（共働き）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供5人（夫のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供5人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	夫婦と子供5人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供6人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	男親と子供6人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供6人（就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	女親と子供6人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（共働き）	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（夫のみ就業）	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	両親と夫婦と子供3人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（共働き）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（夫のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（妻のみ就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	片親と夫婦と子供4人（非就業）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.5.4　高低圧配電線電圧の推計結果

図 2.5-6 は 5 月 11 日の高低圧配電系統における電力需要および発電量の推計結果を示す。凡例は PV 普及率を示す。高圧配電系統における電力需要が朝方および夕方に多く発生している。これは住宅の居住者の行為に伴って家電機器等の電力需要が発生するためである。また朝方の電力需要にはヒートポンプ給湯機による電力需要が含まれている。一方、PV の発電量は電力需要の小さい昼間に発生する。したがって電力需要を超過する発電量は余剰電力となり、配電系統へ逆潮流として流入する。PV 普及率が 60%以上の場合、発電量の多くが余剰電力となり配電系統へ流入する。

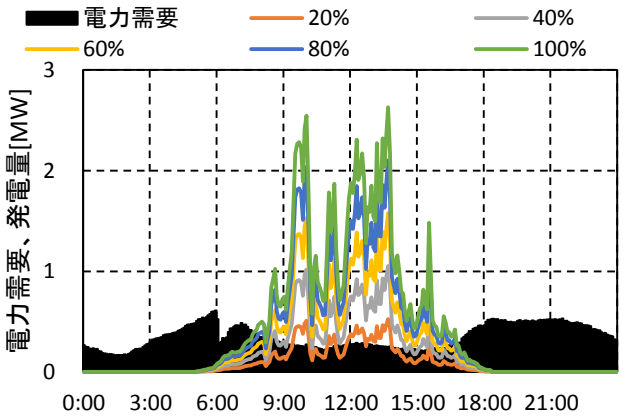


図 2.5-6　配電系統の電力需要・発電量推計結果（5 月 11 日）

図 2.5-7 は一年間で配電線電圧が最大となった 5 月 11 日の 13:40 における高圧配電系統のメインフィーダの配電線電圧推計結果を示す。横軸は配電用変電所からの距離を表す。電力需要のみ（図中の PV 普及率 0%）の場合、配電用変電所から送り出された電力が各住宅に届けられるため、配電線において電圧降下が発生し配電用変電所から距離が遠いほど配電線電圧は小さくなる。一方、PV が大量に導入され各住宅から余剰電力が逆潮流として配電系統へ流入する場合、配電用変電所よりも各住宅の電圧は高くなる。PV 普及率が 100%における末端ノード（#108）の高圧配電線電圧は 6,682V であり配電用変電所の送り出し電圧（6,600V）を大きく上回った。PV 大量導入時の高圧配電線電圧の上昇傾向は末端ノードで大きい。

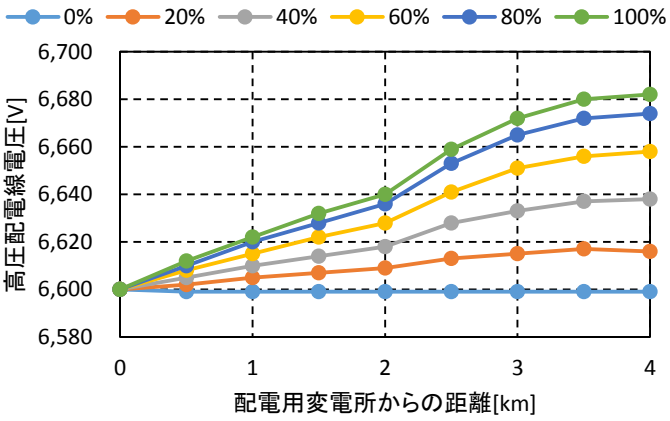


図 2.5-7　メインフィーダの高圧配電線電圧（5 月 11 日　13:40）

図 2.5-8 は 5 月 11 日の高圧配電系統の末端ノード（#108）における高圧配電線電圧の推計結果を示す。電力需要のみの場合、高圧配電線電圧は配電用変電所の送り出し電圧（6,600V）より小さくなり、全ての時間帯で配電用変電所から住宅に向けての順潮流で電力の供給がなされていることがわか

る。一方、PV が導入された場合、高圧配電線電圧が配電用変電所の送り出し電圧より大きくなり住宅から配電用変電所へ向けての逆潮流が発生していることがわかる。PV 発電量が大きく電力需要の小さい時間帯で高圧配電線電圧は大きい。

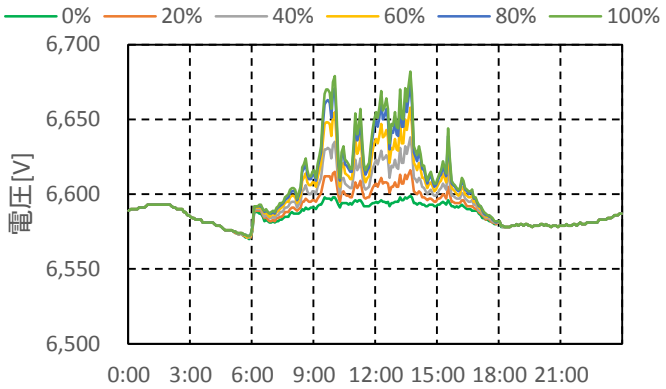


図 2.5-8　末端ノード（#108）の高圧配電線電圧推計結果（5 月 11 日）

図 2.5-9 は高圧配電系統の末端ノードで柱上変圧器を介して連系する戸建住宅における低圧配電線電圧の推計結果を示す。低圧配電線電圧においても同様に PV 普及率が大きくなるほど、低圧配電線電圧は大きい。需要家電圧の適正範囲の上限は 214V であり、適正範囲を逸脱した PV 発電量は PCS で抑制され有効に活用できない。5 月 11 日の場合 PV 普及率が 60%以上で低圧配電線電圧の適正範囲を逸脱し、PV 発電量の抑制が発生した。

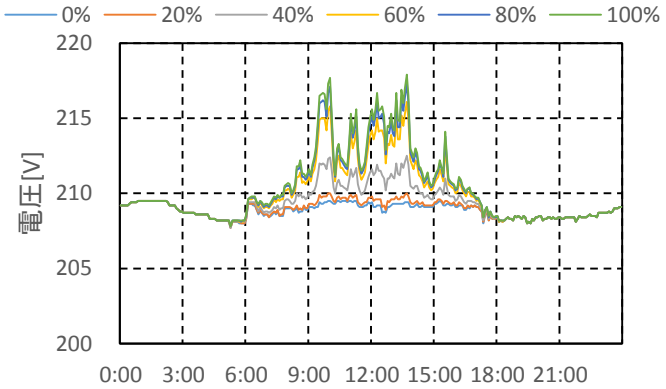


図 2.5-9　末端ノード（#108）の低圧配電線電圧推計結果（5 月 11 日）

図 2.5-10 は年間発電量および年間 PV 抑制量の推計結果を示す。高低圧配電系統における年間発電量は PV 導入容量に応じて増加し、すべての戸建住宅に PV を導入した場合（PV 普及率 100%）、3,300MWh/年の PV 発電量が得られる。一方、各住宅の受電端電圧が低圧配電線電圧の適正範囲を逸脱した場合、PV の発電量は抑制される。高低圧配電系統において PV 普及率が 40%以上の場合で PV 発電量の抑制が発生した。PV 普及率 100%の場合、年間 PV 抑制量は 391MWh/年であり、年間発電量の 11.9%が PCS による抑制によって有効に活用できない。

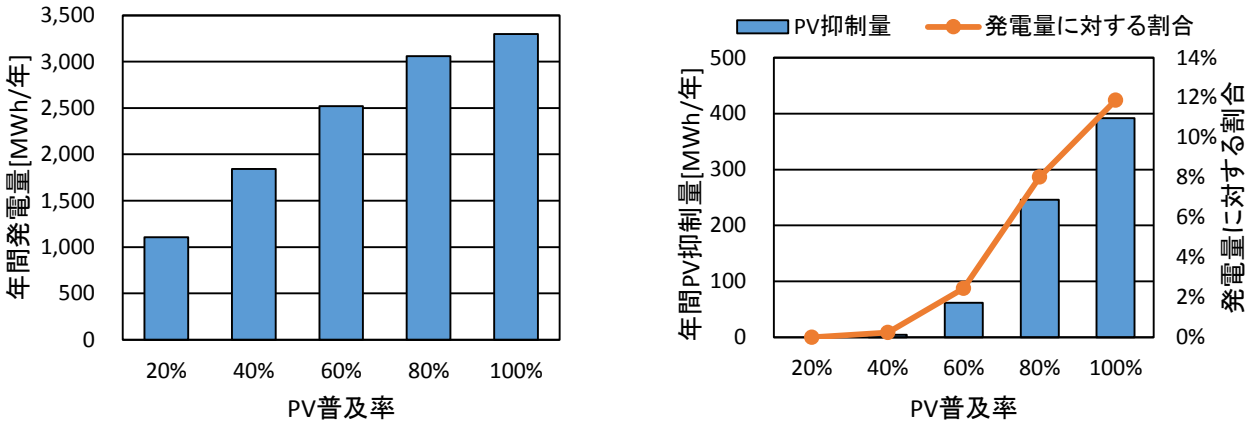


図 2.5-10　年間発電量（左）、PV 抑制量（右）の推計結果

2.5.5　PV の分布が配電線電圧に及ぼす影響の推計結果

図 2.5-11 は PV の普及世帯を配電系統の上流ノード（#101～#104 とそのサブフィーダ）または下流ノード（#105～#108 とそのサブフィーダ）に集中させた場合の 5 月 11 日 13:40 におけるメインフィーダの配電線電圧の推計結果を示す。PV 普及率は 50%に相当する。PV を上流ノードに配置した場合、配電用変電所から PV 連系点（2km 地点）までは高圧配電線電圧が上昇するが、PV 連系点以降の配電線では電圧降下により配電線電圧が低下した。これは 2km 地点までに発生した余剰電力が配電線末端の方向へ供給されているためである。一方、下流側に PV を集中して連系した場合ではメインフィーダの全線にわたって余剰電力を逆潮流させる必要があるため、特に末端ノードの配電線電圧が上昇した。下流側に集中させた場合の末端ノード（#108）における高圧配電線電圧は 6,663V であり、平均的に分布させた場合の PV 普及率 60%と同等の電圧となった。

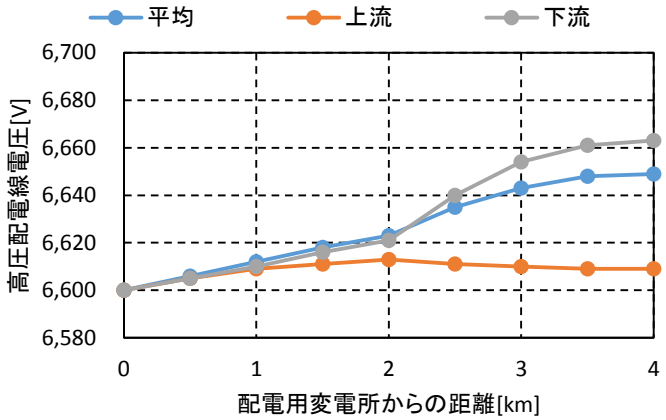


図 2.5-11　高圧配電線電圧推計結果（5 月 11 日 13:40）

図 2.5-12 は PV 普及世帯を上流側または下流側に集中させた場合の年間 PV 抑制量の推計結果を示す。下流側に PV を集中して設定した場合年間 PV 抑制量は 186MWh/年であり、平均的に PV を分布させた場合の PV 普及率 60%よりも大きい。したがって、PV を下流側に集中して設置する場合、配電線電圧上昇が起こりやすく PV 発電量の抑制がより顕在化しやすい。一方、上流側に集中して配置する場合と平均的に設置する場合を比較すると集中して配置する場合のほうが PV 抑制量は大きい。これは上流の分岐ノードの末端において PV が集中して配置されているため、平均的に分布する場合と比較して需要家電圧が適正範囲を逸脱しやすくなっているためである。したがって、特定の連系点

に PV を集中させることは PV 発電量の有効利用の観点から望ましくないといえる。

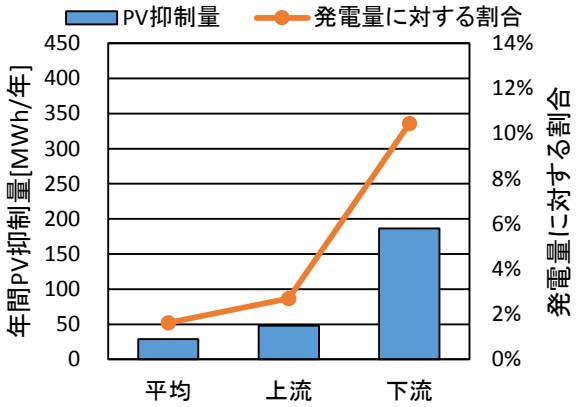


図 2.5-12　PV 分布が異なる場合の年間 PV 抑制量推計結果

2.6　まとめ

本章では、PV が電力系統に大量に導入された場合を想定し、電力系統に及ぼす影響として、「電力需給バランス」、「周波数変動」、「配電線電圧」、「再生可能エネルギー導入促進賦課金」を評価した。まず PV の大量導入が及ぼす影響を評価するためには PV の導入順位を決定する必要があり、本論文では PV の導入意思決定は NPV に依存するものとし、PV 導入時の各世帯における経済性である NPV を推計した。この際、PV の買取方式として PV の発電量のうち余剰電力のみを買取対象とする「余剰買取方式」と PV 発電量の全量を買取対象とする「全量買取方式」を想定した。余剰買取方式の場合、電力需要が少なく余剰電力の大きい世帯ほど NPV に優れるが、全量買取方式の場合、PV 発電量のみに NPV が依存するため、世帯による経済性の違いは少ない。

次に「電力需給バランス」、「周波数変動」、「再生可能エネルギー導入促進賦課金」の評価指標として「系統全体の余剰電力量」、「正味の負荷変動」および「各世帯の余剰電力量」を推計し、PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響を評価した。その結果、PV 大量導入により電力系統全体の余剰電力量および正味の負荷変動が増大することが明らかとなり、電力系統全体の需給バランスのひっ迫や周波数調整容量の増強の必要性を示した。ただし、電力系統全体の余剰電力量および負荷変動は PV 導入量のみに依存し、PV の導入世帯の偏りが及ぼす影響は少ない。一方、各世帯の余剰電力量は PV 導入世帯の偏りによって異なることが明らかとなった。余剰買取方式では余剰電力の大きい世帯で PV の経済性を示す NPV が大きくなるため、各世帯から発生する余剰電力量の合計値が全量買取方式よりも大きい。

一方、「配電線電圧」の評価では、1,200 軒の住宅で構成される高低圧配電系統を想定し、PV の導入による配電線電圧に及ぼす影響を評価した。PV 導入量が大きいほど PV 発電時間帯の高低圧配電系統における配電線電圧は上昇し、PV 普及率が 40%以上の場合で需要家電圧の適正範囲を逸脱する世帯が発生した。すべての戸建住宅に PV を導入した場合、年間発電量の 11.9%が需要家電圧の逸脱を原因に PV 発電量が抑制されることが明らかとなり、PV 発電量の有効利用のためには余剰電力の削減による配電線電圧の調整が必要であると考えられる。一方、PV の普及世帯を高低圧配電系統の上流側または下流側に集中して配置した場合、平均的に分布させる場合と比較して PV 抑制量が増加した。特に下流側に集中して配置した場合、PV 抑制量が 6.5 倍に大きく増加した。

以上の結果より、PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響として、電力需給バランスおよび周波数変動は PV 導入量の増加により影響が大きくなるが、PV 導入世帯の分布の影響は小さいことが明らかとなった。一方、PV の導入世帯に偏りがある余剰買取方式において、平均的に普及する全量買取方式よりも再生可能エネルギー促進賦課金が大きくなり、買取費用を負担する需要家の負担額が増大することが懸念される。したがって、再生可能エネルギー促進賦課金の抑制のためには、世帯間で経済的メリットの違いを生まず、平均的に PV の導入が促進される普及促進策が望ましい。配電系統においては PV 導入量の増加に伴い、配電線電圧が上昇し、PV 発電量の一部が有効に活用できないことが明らかとなった。また特に配電系統の下流側に PV が偏在する場合、配電線電圧の上昇に伴って発生する PV 抑制量が増加するため、高低圧配電系統内に PV の地理的な偏りをなくすように PV 導入世帯の分布を検討することが望ましい。こういった PV の導入に伴う配電線電圧の上昇問題は新興住宅地などの PV 普及率が高い地域において顕在化しており、余剰電力の抑制などによる対策が望まれている。以降では、PV 大量導入による直近の問題として配電線電圧の上昇を考え、住宅における電力需要調整による効果を評価する。

参考文献

1) 柳川茂幸他：日射量の多地点同時観測結果に基づく PV システム出力変動の LFC への影響評価，電気学会論文誌 B，123-12，2003，pp.1504-1512

2) 経済産業省：電気事業法　第二十六条第一項　電気事業法施行規則第四十四条，2013 年 7 月 8 月改正

3) 平原義輝他：太陽光発電システムにおける配電線電圧制御方式の開発―電圧上昇抑制のための新しい無効電力制御―，電力中央研究所報告，R06012，2007

4) Yoshiyuki Shimoda, et al.：Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model，Energy，32，2007，pp.1617-1633

5) 下田吉之他：家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測，エネルギー・資源，30-3，2009

6) 谷口綾子：家庭部門エネルギー最終需要予測モデルの開発と応用に関する研究，大阪大学大学院博士論文，2015

7) 環境省：地球温暖化対策推進大綱の進捗状況, 2003

8) (財)建築環境・省エネルギー機構：住宅事業主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説，pp.82-102，http://ees.ibec.or.jp/documents/img/kaisetsu200903_04_danreibou.pdf

9) Yohei Yamaguchi, et al.：Evaluation of a Behavior Model of Occupants in Home Based on Japanese National Time Use Survey，14th International Buildings Simulation Conference BS2015，Paper Number p2520，2015

10) 総務省統計局：平成 18 年社会生活基本調査, http://www.stat.go.jp/data/shakai/2011/index2.htm#kekka

11) 財団法人気象業務支援センター：地上気象観測 1 分値データ，2010 年

12) 電力系統における常時及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及び緊急時の負荷周波数制御，電気学会技術報告，869，2002

13) 奥田靖男他：太陽光発電システムの出力変動抑制技術，東芝レビュー，65-9，2010

14) 総務省統計局：2010 年版国勢調査, http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.htm

15) 電気共同研究会：配電系統の高調波障害防止対策，電気共同研究，37-3，1978

16) 草清和明他：住宅地における太陽光発電大量連系に伴う配電線電圧上昇の抑制を目的とした蓄電池利用の検討，第 32 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集，2013

17) M. Baran et al.：Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system，IEEE Transactions on Power Delivery，4-1，1989，pp.735-74

第３章　住宅における電力需要調整能力および効果の評価

3.1　序論

前章で示したようにPVが大量に電力系統に導入された場合、余剰電力が増加し電力需給バランスや配電線電圧に悪影響を及ぼす。このようなPVの大量導入が電力系統へ及ぼす影響の緩和策の１つとして住宅における電力需要調整が注目されている。池上ら[1)]はヒートポンプ給湯機と蓄電池の運用方法を最適化することで、PVの余剰電力の抑制が可能であることを示した。Kamら[2)]は、EVによる余剰電力削減効果について検討し、EVに余剰電力を充電することにより、30～70％の余剰電力を削減可能であることを示した。Mustapha ら[3)]は電力価格を電力系統全体の電力需要および発電量により変更する場合における EV の運用について検討している。その結果、EV の充放電による負荷平準化により電力系統全体の燃料費を削減可能であることを示した。以上の様に、PV の大量導入に起因する電力系統影響問題に対して、電力系統側での対策のほかに、蓄電池や EV、ヒートポンプ給湯機などの需要家側機器の制御に対して期待が高まっており、その有効性が示されている。しかし蓄電池やEVは高価であるため、多くの住宅ではいまだ導入されていない。したがって家電機器やエアコンといった住宅で既に利用されている機器による電力需要調整効果を把握することは重要である。

家電機器やエアコンによる電力需要調整の方法として、「稼働時間の変更」と「サービス水準の変更」がある。前者はヒートポンプ給湯機や洗濯機などの稼働時間をシフトすることを考え、後者はエアコンの設定温度の変更を想定する。しかし家電機器やエアコンを可制御機器として運用方法を変更する場合、各機器の本来の目的を損なわない範囲での運用変更が求められ、電力需要調整に制約が生じることが考えられる。D’hulstら[4)]は実測調査により家電機器の可制御機器としての有効性を評価しており、家電機器の電力消費の 44～71 %は居住者の行動や許容性といった制約により有効活用できていないことを示した。Yuceら[5)]は家電機器の運用方法変更の制約条件として、家電機器が動作可能な時間範囲を制限し、家電機器の制御による電力消費削減効果を評価した。また Cetinら[6)]は、居住者の温熱快適性を PPD により評価し、エアコンの運用方法変更による効果を評価した。その結果、冷房時のエアコン設定温度を１℃上昇させた場合、電力消費を9～31 %削減可能であるが、PPDが2～7 %悪化することを示した。また家電機器の操作方法として HEMS 等による自動制御と居住者による手動操作が考えられ、手動操作においては電力需要調整可能な時間帯が居住者が在宅している時間帯に限定される。既往研究では家電機器の電力需要調整に関する制約を考慮した評価は行われているが、制約の有無が電力需要調整に及ぼす影響は評価されていない。また世帯の多様性を考慮した評価は十分に行われていない。

一方、電力需要調整の評価方法には「実測調査」、「実証事業」、「シミュレーション」の３つに大別される。以下に電力需要調整の評価について適用例を示す。実測調査は多くの場合、限られた範囲で行われ得られるサンプル数が限られるため、地域スケールなど世帯の多様性を考慮した評価に拡張することは難しい。D’hulstら[7)]はベルギーにおけるダイナミックプライシングの実証事業において、居住者に家電機器の稼働時間をシフト可能な時間枠を定義してもらうことにより家電機器の自動制御を行いその効果を評価している。Kobusら[8)]やKlaassenら[9)]も同様の実証事業をオランダで実施している。実証事業では居住者の行動や許容性を正確に反映した評価を行えることが強みである。しかし実証事業を実施するためには莫大な費用が発生し、また限られた数の家電機器のデータしか収集することができない。住宅における家電やエアコンの電力需要は家族構成や床面積、家電機器の性能や保

有状況、ライフスタイルによって大きく異なることが知られており[2),3)]、「実測調査」や「実証事業」ではこれらの多様性を考慮することには限界がある。Baetens ら[10)]は各世帯の電力需要のばらつきが家電機器による配電線電圧抑制効果に及ぼす影響をシミュレーションを用いて評価した。その結果、電力需要のばらつきの程度により配電線電圧抑制効果は 88～130%までばらつくことを示した。

家電機器やエアコンによる電力需要調整においては機器の本来の役割を阻害する運用変更は受け入れられないため、家族構成や床面積、家電機器の性能や保有状況といった電力需要に影響を及ぼす要因だけではなく、食事時間や就寝時間など機器の稼働に直接関連しない居住者の行動や機器運用変更に対する許容性といった制約条件を考慮した評価が必要である。

そこで本論文では電力需要調整に関する制約条件の違いおよび世帯の多様性が電力需要調整能力および電力需要調整効果に及ぼす影響を評価する。制約条件を考慮した評価を行うことにより、実際に運用可能な範囲での電力需要調整能力および効果を把握することができる。さらに電力需要調整効果の評価では PV の余剰電力買取価格として購入電力単価よりも高い価格で買取を行う場合と、余剰電力の抑制を想定し購入電力単価よりも低い価格で買取を行う場合を想定し、買取価格の違いが電力需要調整効果に及ぼす影響を評価する。本章ではまず住宅における電力需要調整の概要を示し、可制御機器の制約条件について述べる。次に世帯のばらつきや制約条件の違いが電力需要調整能力に及ぼす影響を評価する。最後に各世帯の電力需要調整効果の推計結果を示し、世帯、制約条件、目的関数の違いが電力需要量、余剰電力量、光熱費といった電力需要調整効果に及ぼす影響を評価する。これら評価により、住宅における電力需要調整のあり方について検討する。

3.2　住宅における電力需要調整の概要

本節では住宅における電力需要調整方法について詳述する。本論文では可制御機器として、ヒートポンプ給湯機・洗濯機・衣類乾燥機・炊飯器・食器洗い乾燥機・電気ポット・エアコンを対象とする。表 3.2-1 はヒートポンプ給湯機の仕様を示し、図 3.2-1 はヒートポンプ給湯機の COP と外気温の関係を示す。ヒートポンプ給湯機は通常 1 日の給湯需要に相当する熱量を深夜電力を利用して製造する。またヒートポンプ給湯機の COP は外気温に依存し、外気温が高いほど COP は向上する。表 3.2-2 は洗濯機・衣類乾燥機・炊飯器・食器洗い乾燥機・電気ポットの定格消費電力・待機電力および稼働時間を示す。エアコンの COP は表 3.2-3 に示すように製造年、大きさ別に設定した。電力需要調整能力および電力需要調整効果は可制御機器の保有状況や仕様、使用方法によって大きく異なり、世帯によってばらつきが生じると予想される。洗濯機・衣類乾燥機・炊飯器・食器洗い乾燥機・電気ポット、エアコンの台数別普及率を図 3.2-2 に示す。また洗濯機・衣類乾燥機・食器洗い乾燥機については使用方法・機種等によって稼働時間にばらつきが生じることが想定されるため、実測調査[11)]を基に算出した稼働継続時間の累積頻度分布（図 3.2-3）と一様乱数により世帯ごとに設定した。また食器洗い乾燥機および衣類乾燥機の機器操作確率は図 3.2-4 のように設定した。機器操作確率とは居住者が特定の行為を行った後に、機器が操作される確率を表す。特定の行為とは、食器洗い乾燥機であれば食事行為、衣類乾燥機であれば洗濯行為である。食器洗い乾燥機は夕食後に機器が操作される確率が高く、衣類乾燥機については約 40%の世帯で使用していないことがわかる。機器の保有状況や仕様、使用方法は一様乱数に応じて世帯ごとに個別に設定した。

表 3.2-1　ヒートポンプ給湯機の仕様（再掲）[12)]

加熱能力	4.5kW
タンク容量	370 L
放熱損失	13%/日

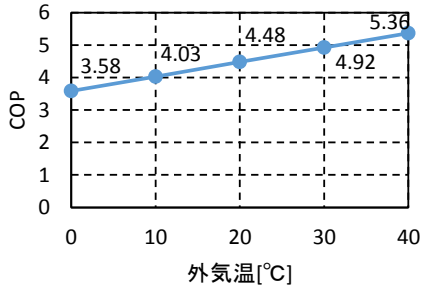


図 3.2-1　COP と外気温の関係（再掲）[12)]

表 3.2-2　家電機器の定格消費電力・待機電力・稼働時間 [11)]

機器名称	定格消費電力［W］	待機電力［W］	稼働時間［分］
洗濯機	111.8	0.3	15～80
衣類乾燥機	1251.7	0	20～220
炊飯器	240.6	18.6（保温時消費電力）	45
食器洗い乾燥機	388	1.0	20～150
電気ポット	816	33（保温時消費電力）	15

表 3.2-3　製造年別及び能力別エアコン COP[12)]

	冷房					暖房				
製造年	2.2kW	2.5kW	2.8kW	3.6kW	4.0kW	2.2kW	2.5kW	2.8kW	3.6kW	4.0kW
'01	3.98	3.70	4.21	3.89	3.59	4.23	4.21	4.45	4.39	3.88
'01～'04	4.60	4.44	4.59	4.01	3.78	4.79	4.78	4.81	4.62	4.08
'04～'06	5.37	5.26	5.20	4.02	3.97	5.67	5.65	5.53	4.73	4.41
'06～'08	5.20	5.11	4.86	3.70	3.73	5.72	5.72	5.42	4.42	4.33
'08～'10	5.11	5.05	4.79	3.77	3.74	5.74	5.82	5.48	4.54	4.45
'11	5.08	5.03	4.74	3.78	3.80	5.75	5.76	5.50	4.57	4.52

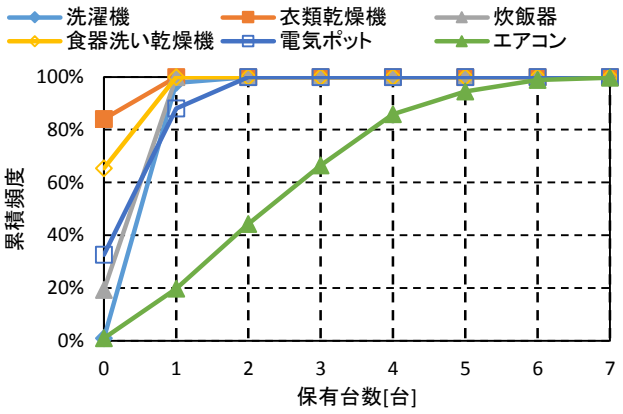


図 3.2-1　可制御機器の台数別普及率 11)

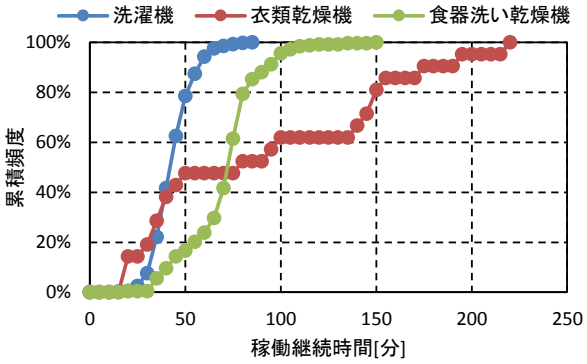


図 3.2-2　稼働継続時間の累積頻度分布 11)

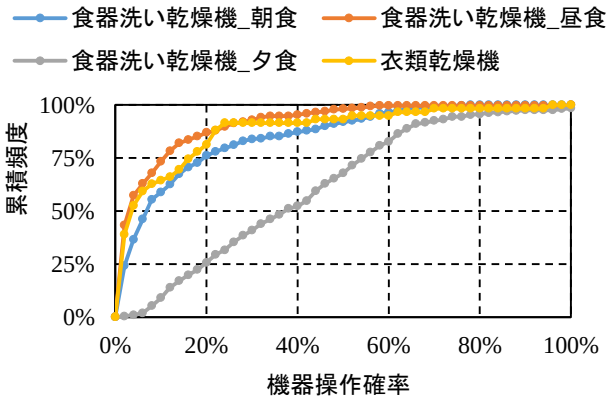


図 3.2-3　機器操作確率の累積頻度分布 11)

ヒートポンプ給湯機・洗濯機・衣類乾燥機・炊飯器・食器洗い乾燥機・電気ポットの電力需要調整として、稼働時間の変更を想定する。エアコンの電力需要調整として設定温度の変更を考え、エアコンの設定温度として標準モード（暖房 22 °C、冷房 26 °C）と省エネモード（暖房 20 °C、冷房 28 °C）の２つのサービスレベルを想定した。

可制御機器の電力需要調整を行う場合、可制御機器を利用する本来の目的を阻害するような運転変更は居住者に受け入れられず、電力需要調整の実現が困難であると考えられる。そこで本論文ではこのような居住者の電力需要調整に対する許容性を考慮するため、「稼働可能時間」、「温熱快適性」、「操作方法」といった３つの電力需要調整の制約を考慮する。

「稼働可能時間」は洗濯機・衣類乾燥機・炊飯器・食器洗い乾燥機・電気ポットといった家電機器の居住者の行為に応じて生じる稼働時間の制約を想定する。例えば、洗濯機は「午前中に洗濯物を干す」や「入浴後に利用する」など世帯のライフスタイルにより稼働時間が決定されていることが想定される。本論文では洗濯機の稼働可能時間を「午前」または「午後」の２パターンを想定する。衣類乾燥機は洗濯機の稼働後に利用されるものと想定した。一方、炊飯器・食器洗い乾燥機・電気ポットは食事の準備または後片付けの際に利用されるものであるため、次の食事時間までに稼働が完了することを制約とした。このように洗濯機・衣類乾燥機・炊飯器・食器洗い乾燥機・電気ポットの電力需要調整では各機器が本来の目的を損なわずに稼働可能な時間が限定されることを考慮する。

「温熱快適性」はエアコンによる暖房および冷房を行う際の居住者の快適性に関する許容性の制約を想定する13)。居住者が空調空間の温熱環境に満足していない場合、許容可能な設定温度に変更する

ことが予想される。本論文では省エネモードで運転した場合の温熱快適性が許容できない場合、標準モードのみで稼働可能とした。温熱快適性の指標には PPD を用いる。PPD はある温熱環境において不快と感じる人の割合を示す指標であり、室温 T[℃]、相対湿度 RH[%]、平均放射温度 Tr[℃]、平均風速 Vel[m/s]、着衣量 CLO[clo]、活動量 MET[met]から算出される予想平均冷温感申告 PMV（Predicted Mean Vote：PMV、式（3.2-1））に応じて式（3.2-2）により算出される。

$$\mathrm{PMV} = (0.303 \times e^{-0.036M} + 0.028) \times (M - W - E_d - E_S - E_{re} - C_{re} - R - C) \quad (3.2\text{-}1)$$

$$\mathrm{PPD} = 100 - 95 \times e^{-0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2} \quad (3.2\text{-}2)$$

ここで、M は代謝量[W/m²]、W は機械的仕事量[W/m²]、E_d は不感蒸泄量[W/m²]、E_S は皮膚面よりの蒸発熱損失量[W/m²]、E_{re} は呼吸による潜熱損失量[W/m²]、C_{re} は呼吸による顕熱損失量[W/m²]、R は放射熱損失量[W/m²]、C は対流熱損失量[W/m²]である[14)]。本論文ではある温熱環境における PPD が一様乱数よりも大きい場合、居住者はその温熱環境に満足していないと判断するものとした。

可制御機器の操作方法として、本論文では「自動制御」と「手動操作」の２手法を想定する。自動制御は HEMS などによる操作を想定し、手動操作は居住者のスイッチ操作を想定する。したがって自動制御では居住者の在宅状況に関係なく自由に可制御機器の操作が可能であるが、手動操作では住宅内に１人も起床・在宅者が存在しない場合、可制御機器の操作を行うことができない。表 3.2-4 に可制御機器の制約条件をまとめる。なおヒートポンプ給湯機は貯湯タンクに製造した温水を貯めることができ、給湯需要に合わせた自動制御を前提とした機器であるため居住者の在宅状況による制約はないものとした。

表 3.2-4　可制御機器の制約条件

<table>
<tr><th>可制御機器</th><th>稼働可能時間</th><th>温熱快適性</th><th>操作方法</th></tr>
<tr><td>ヒートポンプ
給湯機</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>洗濯機</td><td>午前または午後の
いずれかで稼働</td><td>-</td><td rowspan="5">起床・在宅者が存在する場合のみ稼働可能</td></tr>
<tr><td>衣類乾燥機</td><td>午前または午後のいずれか、かつ洗濯機稼働後</td><td>-</td></tr>
<tr><td>炊飯器</td><td rowspan="3">次の食事時間までに
稼働完了</td><td>-</td></tr>
<tr><td>食器洗い乾燥機</td><td>-</td></tr>
<tr><td>電気ポット</td><td>-</td></tr>
<tr><td>エアコン</td><td>-</td><td>温熱環境に不満な場合、標準モードで運転</td><td>起床・在宅者が存在する場合のみ変更可能</td></tr>
</table>

3.3　住宅における電力需要調整能力の評価

3.3.1　電力需要調整能力の評価方法

本節では住宅における電力需要調整能力の評価方法を述べる。電力需要調整能力とは各世帯に導入されている可制御機器が、ある時刻においてどれだけ電力需要調整が可能かを示し、電力需要調整効果は実際に可制御機器の運用を行った場合に得られる効果を示す。電力需要調整能力を推計することにより、各時刻における電力需要調整の最大値を把握することができる。電力需要調整能力は世帯に

より大きく違うことが予想されるため、世帯のばらつきが電力需要調整能力に及ぼす影響を評価する。

電力需要調整能力は各時刻における稼働可能な可制御機器の電力需要の合計として推計する。ただしエアコンなどのサービス水準が複数存在する機器では基準となるサービス水準（標準モード）と変更対象のサービス水準（省エネモード）の電力需要の差で表される。

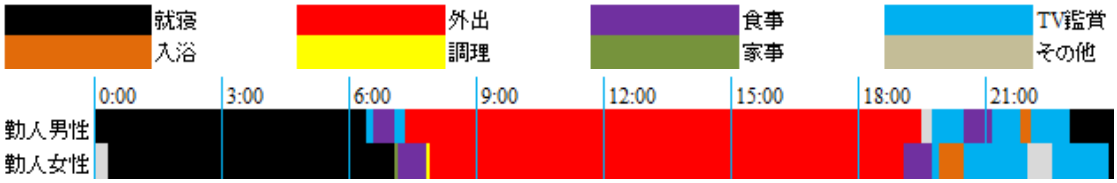
本論文では、上記で述べた制約条件の違いが電力需要調整能力に及ぼす影響を評価するため、表 3.3-1 に示す「ポテンシャルケース」、「自動制御ケース」、「手動制御ケース」といった制約条件の組み合わせが異なる 3 つのケースを想定する。ポテンシャルケースでは可制御機器の電力需要調整に制約条件が無い場合を想定し、可制御機器を電力需要調整に最大限利用可能なものとした。これにより可制御機器によって得られる最大限の電力需要調整能力を推計することができる。「自動制御ケース」は HEMS による可制御機器の制御を想定し、居住者の在宅状況によらず制御可能とした。ただし、稼働可能時間および温熱快適性の制約条件を考慮し、各機器の本来の機能を損なわない範囲でのみ電力需要調整が可能である。ポテンシャルケースでは全ての機器が機器の稼働時間や温熱快適性に依存することなく電力需要調整が可能であるが、自動制御ケースにおいては、例えば炊飯器等の調理機器は次の食事時間までに稼働を完了する必要があり、エアコンの省エネモードにおいて居住者が不快と感じる場合は標準モードに自動的に切り替わる。「手動制御ケース」は稼働可能時間および温熱快適性に加え、起床・在宅者が少なくとも 1 人以上いる場合にのみ可制御機器の操作が可能であるものとした。「自動制御ケース」および「手動制御ケース」により居住者が許容可能な電力需要調整能力を推計することが可能である。また「自動制御ケース」と「手動制御ケース」を比較することにより、HEMS による制御の効果を評価することが可能である。電力需要調整能力の評価は「夫婦（若・中年、共働き）」世帯および「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯を代表世帯とし、世帯の違いが電力需要調整能力に及ぼす影響を評価する。

表 3.3-1　電力需要調整の想定ケース

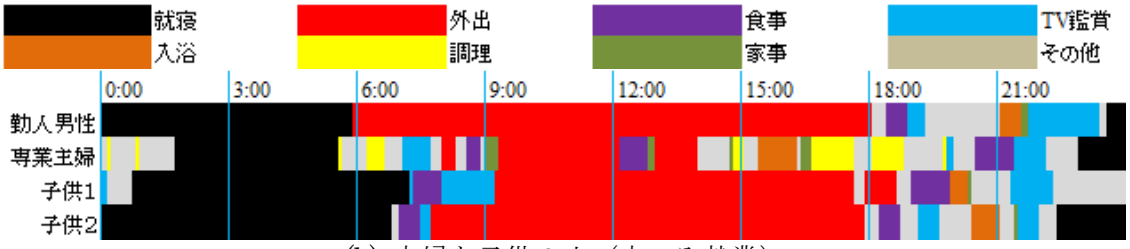
	稼働可能時間	温熱快適性	操作方法
ポテンシャルケース	-	-	-
自動制御ケース	○	○	-
手動制御ケース	○	○	○

3.3.2　各住宅の電力需要および発電量の推計結果

図 3.3-1 は代表世帯（「夫婦（若・中年、共働き）」世帯および「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯）の 5 月 11 日における各居住者の行為を示す。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯では 8:00～20:00 にすべての居住者が外出した。また調理や家事の占める時間帯の割合が少ない。一方、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯では全ての居住者が外出する時間帯は少ない。また「夫婦（若・中年、共働き）」世帯と比較して調理や家事に従事する時間帯や TV 鑑賞の時間帯が多い。



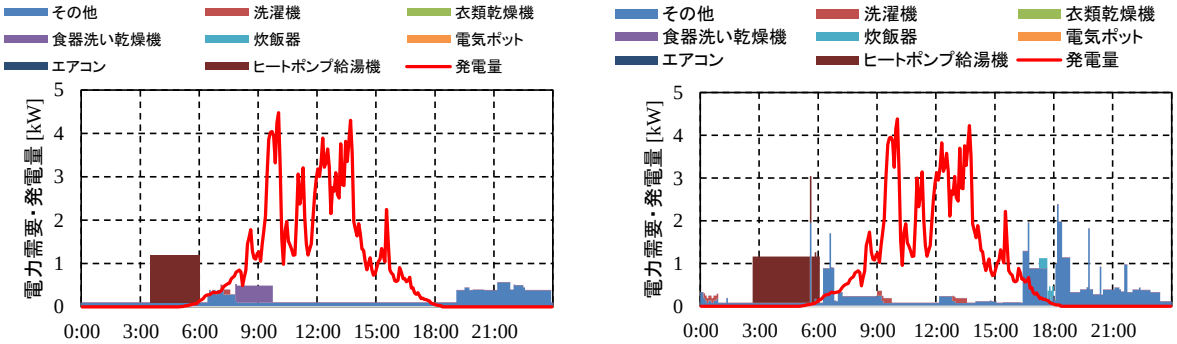
(a) 夫婦（若・中年、共働き）



(b) 夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）

図 3.3-1　居住者行為の推計結果（5 月 11 日）

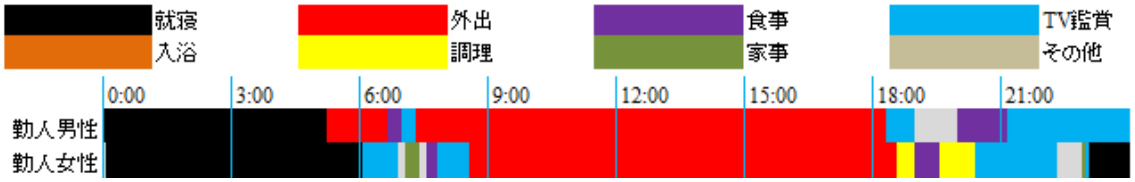
図 3.3-2 は、5 月 11 日の代表世帯の電力需要および発電量の推計結果を示す。2 世帯とも昼間の電力需要が小さく、余剰電力が発生した。ヒートポンプ給湯機の電力需要は「夫婦（若・中年、共働き）」世帯で 2.7kWh であったのに対し、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯では 3.7kWh であった。これは「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」は家族人数が多く、給湯需要が大きいためである。



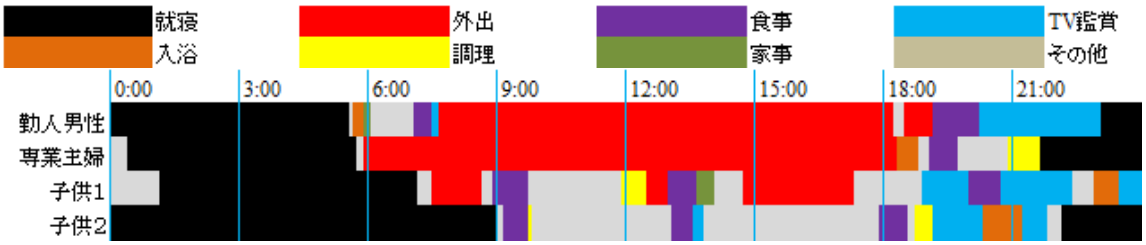
(a) 夫婦（若・中年、共働き）　(b) 夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）

図 3.3-2　電力需要および発電量の推計結果（5 月 11 日）

図 3.3-3 は夏期代表日（8 月 29 日）の居住者行為の推計結果を示す。中間期代表日と同様に「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の日中にすべての居住者が外出する時間帯が生じたが、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯ではすべての居住者が外出する時間帯は生じない。



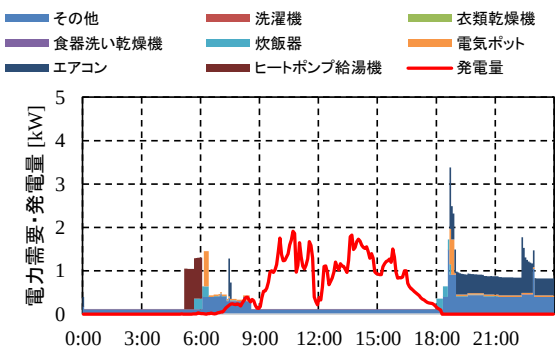
(a) 夫婦（若・中年、共働き）



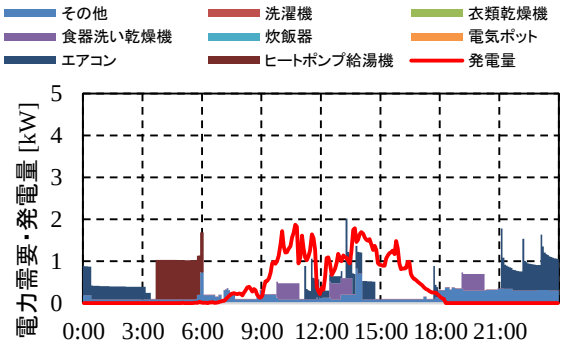
(b) 夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）

図 3.3-3　居住者行為の推計結果（8 月 29 日）

図 3.3-4 は、夏期代表日（8 月 29 日）の電力需要および発電電力の推計結果を示す。夏期代表日では在宅時間帯にエアコンの電力需要が発生しており、中間期代表日と比較して電力需要が大きい。また曇天日であり PV の発電量が小さいため、日中に発生する余剰電力は小さい。ヒートポンプ給湯機の電力需要は「夫婦（若・中年、共働き）」で 0.86kWh、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」で 2.3kWh であり、中間期代表日と比較して小さい。これは水温の上昇により給湯熱需要量が減少したためである。



(a) 夫婦（若・中年、共働き）



(b) 夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）

図 3.3-4　電力需要・発電量の推計結果（8 月 29 日）

図 3.3-5 は、代表世帯の年間電力需要量、年間発電量および年間余剰電力量を示す。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の年間電力需要量は 4,550kWh/年、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯で 6,540kWh/年であった。「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯では家族人数が多いため年間電力需要量が大きい。年間発電量はそれぞれ 6,280kWh/年、6,180kWh/年でありほぼ同等である。なお PV 搭載容量はそれぞれ 5.75kW、5.64kW である。一方、年間余剰電力量はそれぞれ 5,260kWh/年、4,700kWh/年であり「夫婦（若・中年、共働き）」世帯で大きい。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯は電力需要が小さく、日中に外出している時間帯が大きいため余剰電力量が大きくなった。年間発電量に占める年間余剰電力量に占める割合はそれぞれ 84%、76%である。

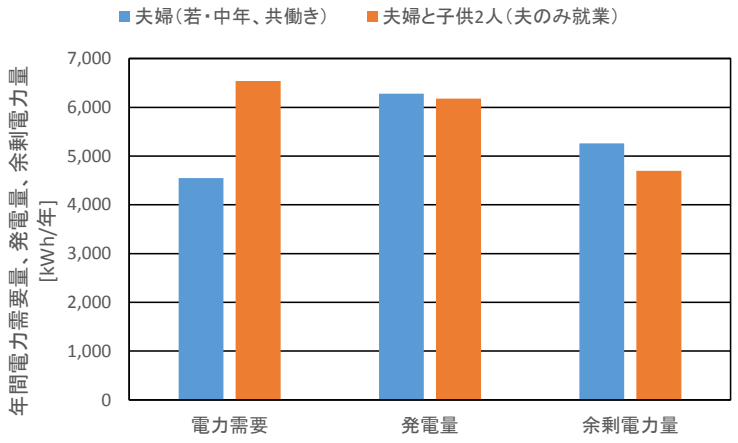


図 3.3-5　代表世帯の年間電力需要量、発電量、余剰電力量の推計結果（ベースケース）

図 3.3-6 は代表世帯の年間光熱費の推計結果を示す。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の購入電気代は 67,817 円/年、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の 94,706 円/kWh であった。PV 売電額はそれぞれ 162,975 円/年、145,522 円/年であり余剰電力量の大きい「夫婦（若・中年、共働き）」世帯のほうが大きい。合計光熱費はそれぞれ－95,158 円/kWh、－50,816 円/kWh であり両世帯とも購入電気代よりも売電収入のほうが大きい。

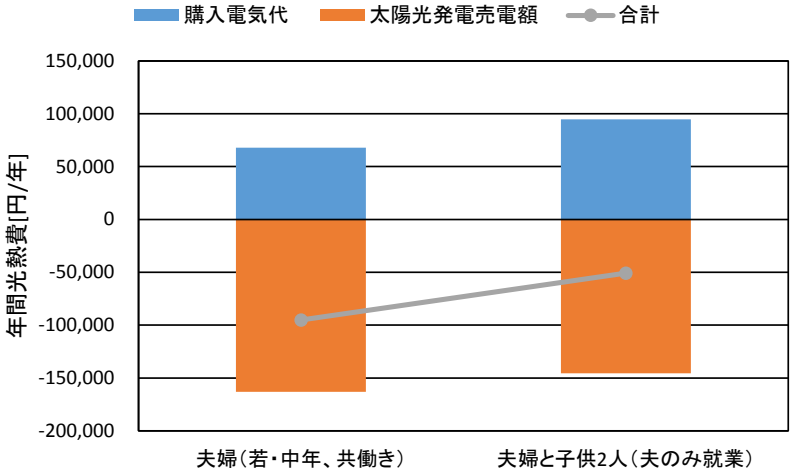
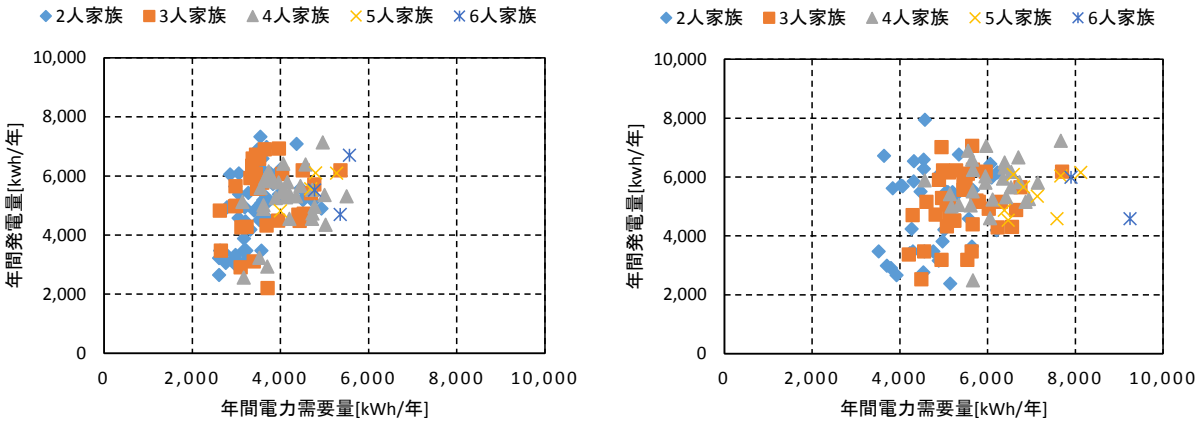


図 3.3-6　代表世帯の年間光熱費推計結果（ベースケース）

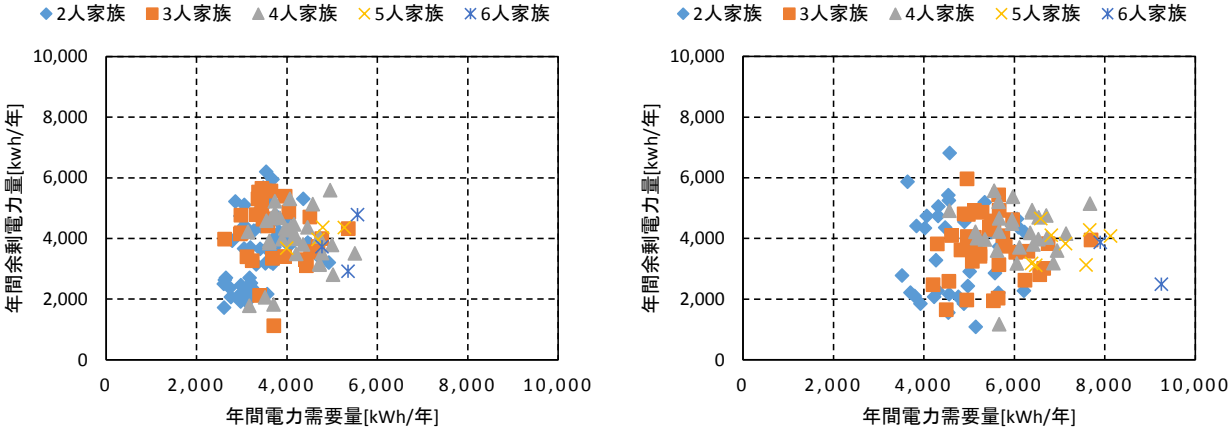
図 3.3-7 は本論文で想定する全戸建住宅の年間電力需要量と年間発電量の推計結果を示す。年間電力需要量は導入する給湯器によって大きく異なる。潜熱回収型給湯器を導入した世帯の年間電力需要量は 2,610kWh/年～5,560kWh/年（平均 3,770kWh/年）、ヒートポンプ給湯機を導入した世帯では 3,515kWh/年～9,249kWh/年（平均 5,550kWh/年）であり、ヒートポンプ給湯機の電力需要による影響が大きいことがわかる。また家族人数の大きい世帯で電力需要量が大きい傾向にある。年間発電量は各世帯の電力需要量には依存せず 2,206kWh/年～7,940kWh/年（平均 5,162kWh/年）であった。



(a) 潜熱回収型給湯器導入世帯　　(b) ヒートポンプ給湯機導入世帯

図 3.3-7　年間電力需要量と年間発電量の推計結果

図 3.3-8 は全戸建住宅の年間電力消費量と年間余剰電力量の推計結果を示す。潜熱回収型給湯器を導入した世帯の年間余剰電力量は 1,117kWh/年～6,195kWh/年（平均 3,891kWh/年）、ヒートポンプ給湯機を導入した世帯では 1,088kWh/年～6,816kWh/年（平均 3,797kWh/年）であり、給湯器の種類による差異は小さい。これはヒートポンプ給湯機の電力需要の大部分は PV が発電しない夜間に発生するためである。年間余剰電力量は家族人数が多く年間電力需要量の多い世帯で小さくなる傾向があるが、PV 設置容量が及ぼす影響が大きいため、世帯により大きく異なる。年間余剰電力量が年間発電量に占める割合は 46%～87%（平均 74%）であり、年間発電量のおよそ半分以上が逆潮流として配電系統に流入している。



(a) 潜熱回収型給湯器導入世帯　　(b) ヒートポンプ給湯機導入世帯

図 3.3-8　年間電力需要量と年間余剰電力量の推計結果

図 3.3-9 は全戸建住宅の年間光熱費推計結果を示す。年間光熱費は世帯により異なり－145,767 円/年～62,717 円/年であった。家族人数が多いほど電力需要量が大きくなるため年間光熱費は増加した。家族人数が少なく電力需要量が小さい世帯の年間光熱費は PV 搭載容量により大きくばらついた。

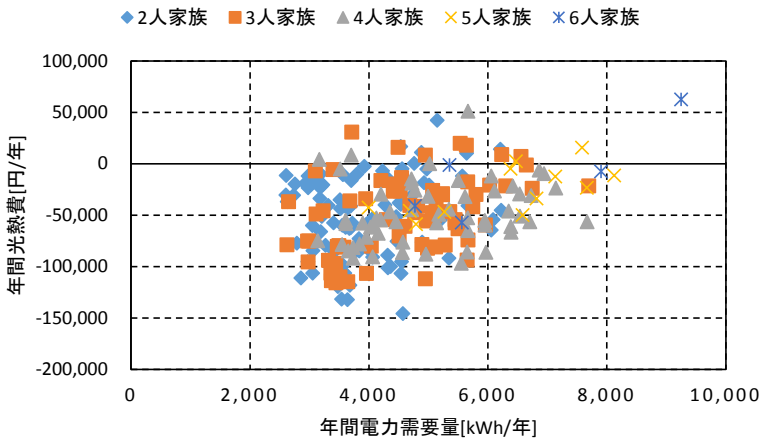


図 3.3-9 年間光熱費推計結果

3.3.3 各住宅の電力需要調整能力の推計結果

図 3.3-10 は、「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の中間期代表日（5 月 11 日）における電力需要調整能力の推計結果を示す。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の中間期代表日において、洗濯機、食器洗い乾燥機、ヒートポンプ給湯機が可制御機器として利用可能である。ポテンシャルケースでは全時間帯において上記の 3 機器を利用可能であり約 1.5kW の電力需要調整能力が得られた。ヒートポンプ給湯機の電力需要は外気温により変動し、外気温の高い昼間の電力需要は小さい。一方、自動制御ケースでは洗濯機および食器洗い乾燥機の可制御時間帯が制限される。洗濯機は午前中のみに稼働時間が限定される。食器洗い乾燥機は朝食から夕食までに稼働を完了する必要があるため、日中のみに 0.39kW の電力需要調整能力が得られる。ヒートポンプ給湯機は全時間帯で稼働可能であり約 1kW の電力需要調整能力がある。手動制御ケースでは洗濯機、衣類乾燥機の稼働可能な時間帯は居住者が在宅起床時間帯のみに限定され、電力需要調整能力が得られる時間帯は午前中の限られた時間帯のみとなった。

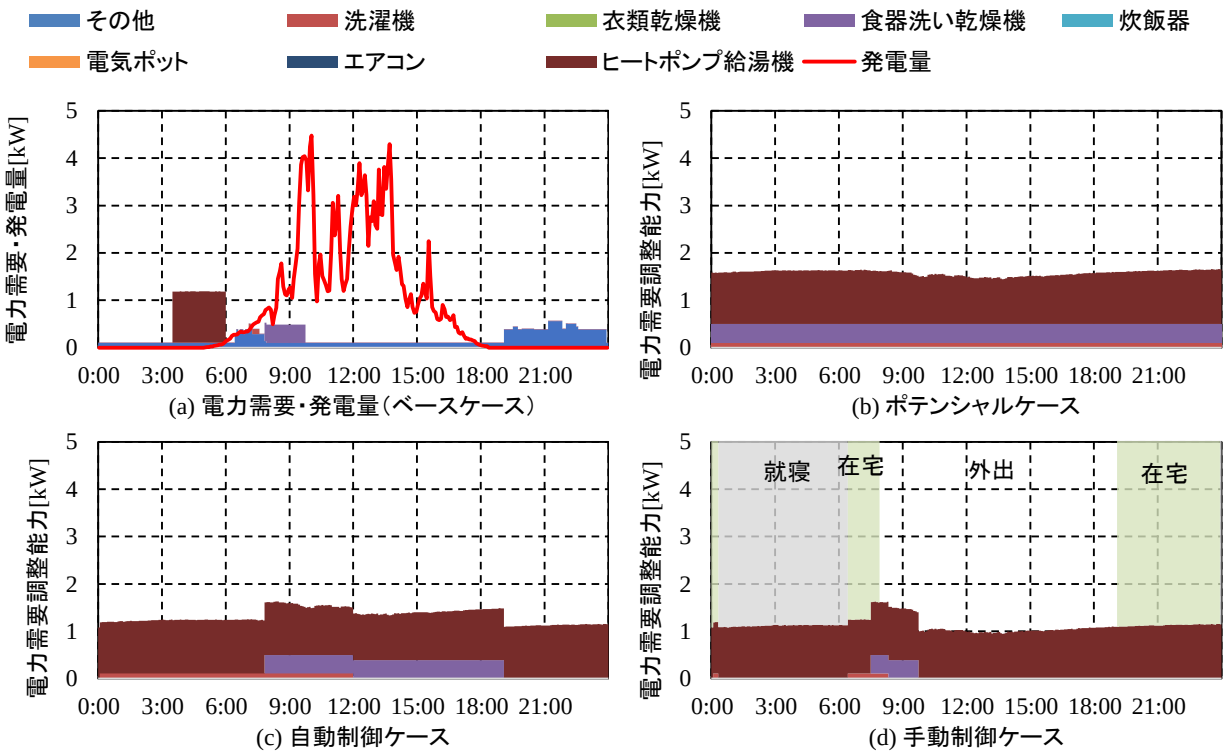


図 3.3-10　「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の電力需要調整能力推計結果（5 月 11 日）

図 3.3-11 は、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の中間期代表日（5 月 11 日）における電力需要調整能力の推計結果を示す。「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の中間期代表日において利用可能な可制御機器は洗濯機、炊飯器およびヒートポンプ給湯機である。洗濯機はベースケースにおいて午前に 2 回および午後に 1 回の計 3 回稼働した。ポテンシャルケースにおいて洗濯機、炊飯器、ヒートポンプ給湯機による約 1.5kW の電力需要調整能力が全時間帯において得られた。自動制御ケースにおいても同様に洗濯機およびヒートポンプ給湯機による電力需要調整能力が全時間帯において得られた。自動制御ケースにおいて洗濯機の稼働可能時間は午前または午後のどちらかに限定されるが、「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の中間期代表日においては午前に 2 回および午後に 1 回の計 3 回稼働しているため、全時間帯で電力需要調整能力が得られた。一方、炊飯器は昼食から夕食の間での電力需要調整能力が得られた。手動制御ケースでは就寝時間を除き洗濯機の電力需要調整能力が得られた。また一部の外出時間を除き自動制御ケースと同等の電力需要調整能力が得られた。「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯は昼間に在宅しているため、昼間においても電力需要調整能力が得られ、「夫婦（若・中年、共働き）」世帯などの昼間に外出する機会の多い世帯と比較して電力需要調整能力が得られる時間帯が多い。

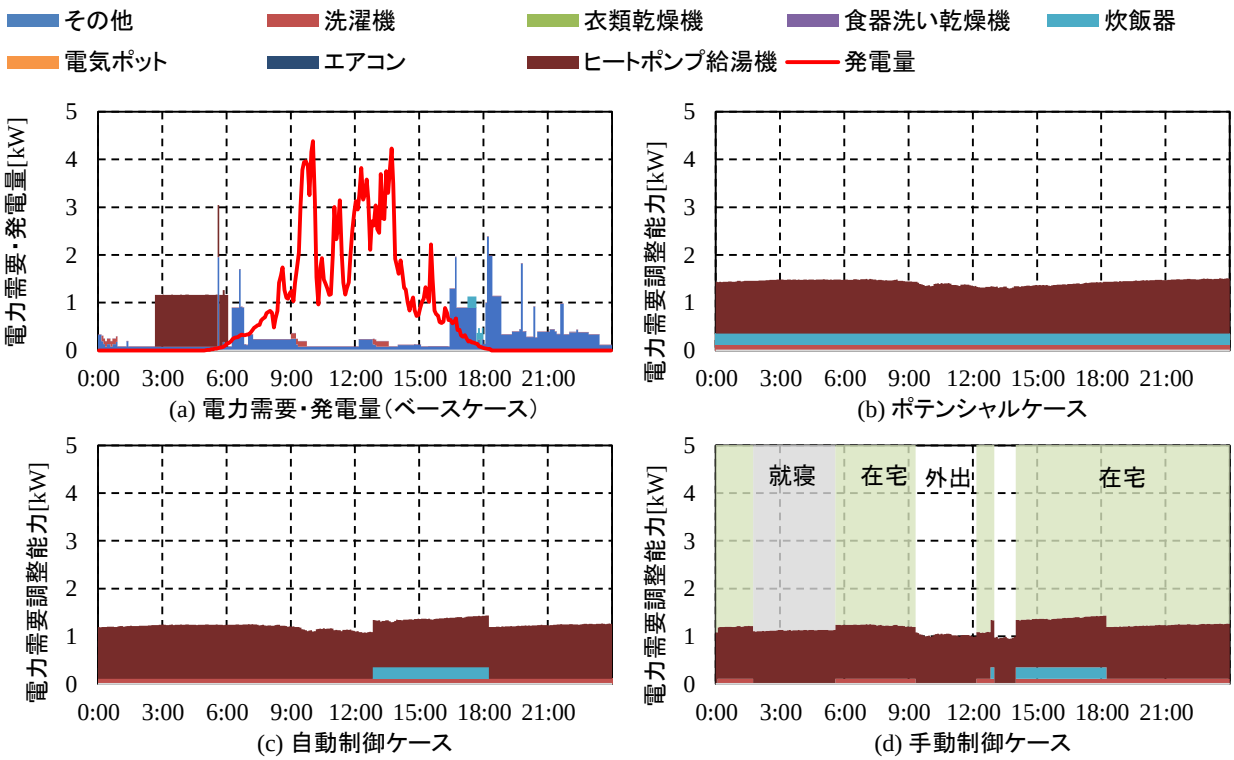


図 3.3-11　「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の電力需要調整能力推計結果（5 月 11 日）

図 3.3-12 は、「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の夏期代表日（8 月 14 日）における電力需要調整能力の推計結果を示す。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の夏期代表日においては炊飯器、電気ポット、エアコンが可制御機器として利用可能である。エアコンの電力需要調整能力は標準レベルと省エネレベルの電力需要の差である。ポテンシャルケースにおいて炊飯器、電気ポット、ヒートポンプ給湯機による電力需要調整能力が全時間帯で得られた。電気ポットは定格消費電力が大きいため電力需要調整能力が大きい。ヒートポンプ給湯機の電力需要は外気温が中間期と比較して高いため、ヒートポンプ給湯機の COP の上昇により減少した。エアコンによる電力需要調整能力はエアコンを使い始める時間帯で多く得られた。これは標準レベルと省エネレベルではエアコン立ち上がり時の暖房負荷が異なるためであり、標準レベルのほうが暖房負荷および電力需要が大きい。自動制御ケースでは炊飯器は朝食までの時間帯で利用可能であり、電気ポットは昼食から夕食の間で利用可能である。手動制御ケースではさらに午前中の起床時間帯のみに限定される。

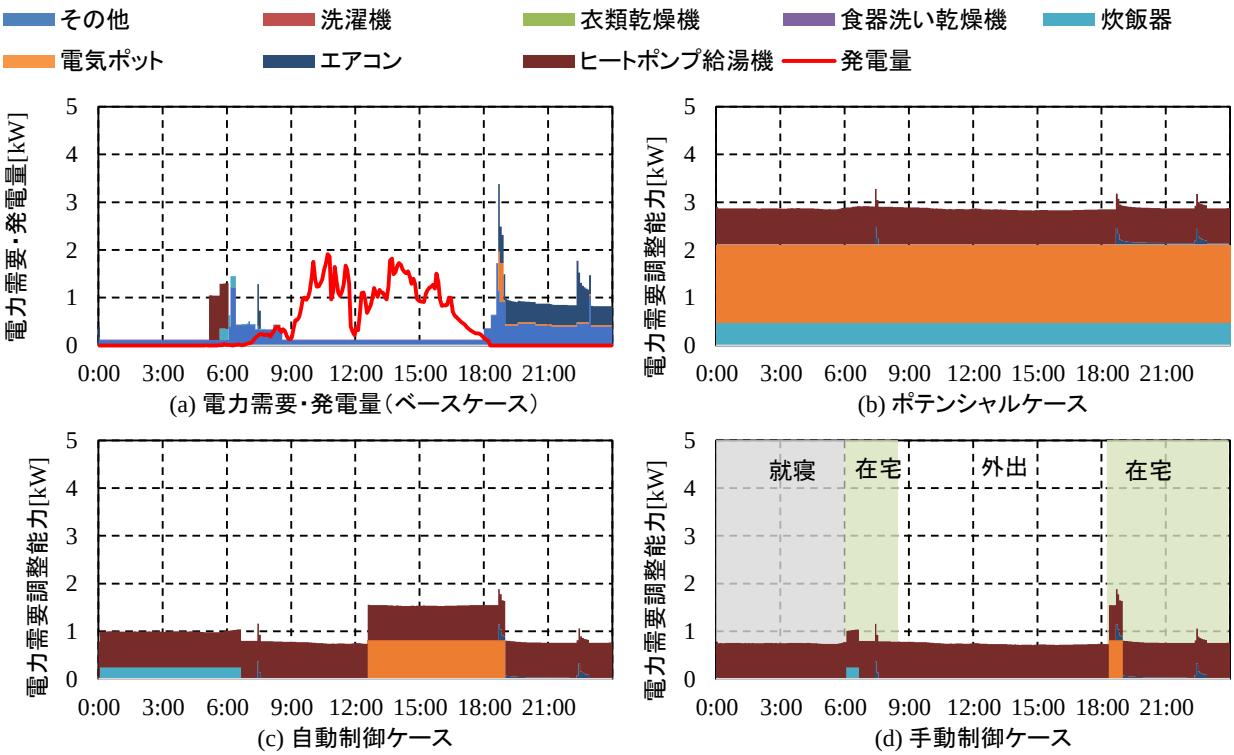


図 3.3-12　「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の電力需要調整能力推計結果（8 月 14 日）

3.4　住宅における電力需要調整効果の評価

3.4.1　住宅における電力需要調整効果の推計方法

本節では、各世帯の電力需要調整効果の評価方法について詳述する。電力需要調整能力は各時刻の電力需要調整の最大値を示すが、電力需要調整効果は実際に可制御機器の運用を行った場合に得られる効果を示す。本論文では各住宅の電力需要調整効果として余剰電力削減効果、光熱費削減効果を評価する。電力需要調整能力の評価と同様に制約条件の異なる「ポテンシャルケース」、「自動制御ケース」、「手動制御ケース」を想定し、可制御機器の制約条件が電力需要調整効果に及ぼす影響を評価する。可制御機器の運用方法の決定には、混合整数線形計画法に基づく「最適機器運用モデル」を用いる。最適機器運用モデルは、可制御機器の制約条件を考慮し、光熱費（式（3.4-1））が最小となる可制御機器の運用方法を決定することができる。

$$\sum_{t=1}^{\mathrm{MAX\,STEP}}\left(\mathrm{V}_{\mathrm{Purchase,t}} \times E_{P,t} - V_{Sell,t} \times E_{S,t}\right) \rightarrow \mathrm{minimize} \tag{3.4-1}$$

ここで、$E_{P,t}$は時刻 t における購入電力[kWh/年]（式(3.4-2)）、$V_{Purchase,t}$は時刻 t における購入電力単価[円/kWh]を示す。また最適機器運用モデルの最適化対象期間は 5 分間隔で 1 日（*MAX STEP*=288 ステップ）とした。最適機運用モデルについては次節で詳述する。

$$E_{P,t} = \begin{cases} L_t & \left(E_{Demand,t} < E_{PV,t}\right) \\ 0 & \left(E_{Demand,t} \geq E_{PV,t}\right) \end{cases} \tag{3.4-2}$$

図 3.4-1 は電力価格を示す。ヒートポンプ給湯機を導入する世帯は時間帯別電力料金を採用し、潜熱回収型給湯器を採用する世帯の電力単価は一定とした。また余剰電力買取価格として、電力会社

からの購入単価よりも高い 31 円/kWh と、電力会社の余剰電力買取に係る回避可能費用である 9.74 円/kWh[15]とする２つの買取価格パターンを設定した。前者は FIT を想定した「余剰電力買取シナリオ」、後者は余剰電力の抑制を目的とすることを想定した「余剰電力抑制シナリオ」であり、買取価格の違いが電力需要調整効果に及ぼす影響を評価する。

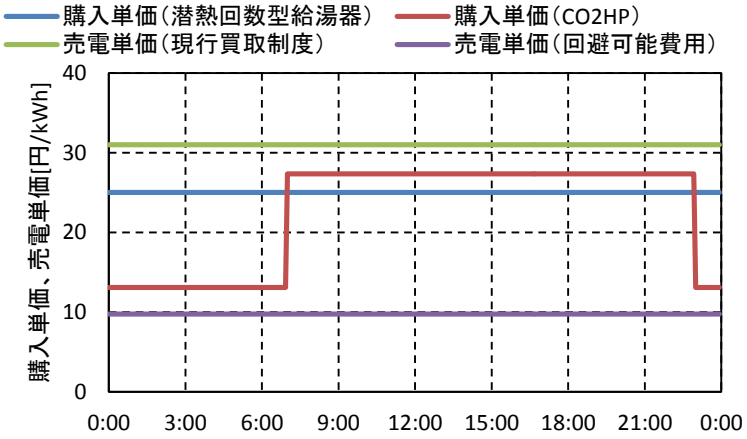


図 3.4-1　購入単価および売電単価 [15]

3.4.2　最適機器運用モデルの概要

住宅における電力需要調整効果を評価するためには、洗濯機・衣類乾燥機・食器洗い乾燥機・炊飯器・電気ポット・エアコン・ヒートポンプ給湯機といった可制御機器の運用方法を決定する必要がある。最適機器運用モデルは、各住宅の電力需要・発電量・給湯需要を入力とし、可制御機器の運用方法を混合整数線形計画法に基づき最適化するモデルである。また可制御機器の運用に関する制約条件を考慮して運用方法を最適化することも可能である。本モデルにおいて対象とする住宅のエネルギーフローを図 3.4-2 に示す。最適化の目的は光熱費の最小化とする（式（3.4-1））。

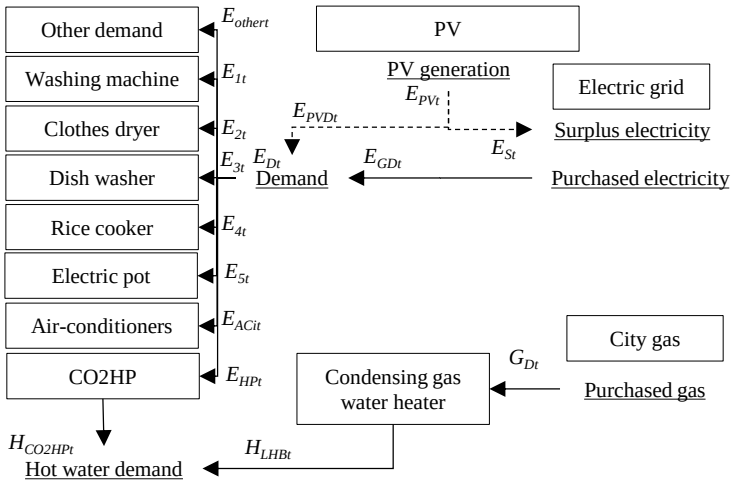


図 3.4-2　電力需要調整のエネルギーフロー

以下では最適機器運用モデルで考慮する制約式（3.4-3）～（3.4-23）について詳述する。また、モデルで用いる内生変数を表 3.4-1 に、外生変数を表 3.4-2 に示す。

式（3.4-3）および式（3.4-4）は住宅における電力需要を示し、式（3.4-3）は電力需要の供給元の

内訳を示す。本モデルでは電力の供給元として電力会社などの電力系統と PV を想定する。式（3.4-4）は電力需要を発生する機器の内訳を示す。本モデルでは可制御機器（洗濯機、衣類乾燥機、食器洗い乾燥機、炊飯器、電気ポット、ヒートポンプ給湯機、エアコン）以外の電力需要をその他電力需要 E_{Othert} としてまとめている。式（3.4-5）は PV 発電電力の内訳を示す。PV 発電電力は住宅内で利用される自己消費電力と電力系統への逆潮流である余剰電力に分けられる。

$$\mathrm{E}_{D_t} = E_{PVD_t} + E_{P_t} \tag{3.4-3}$$

$$\mathrm{E}_{D_t} = \sum_{a=1}^{MaxApp} E_{a_t} + E_{HP_t} + \sum_{i=1}^{MaxAC} E_{ACi_t} + E_{Other_t} \tag{3.4-4}$$

$$E_{PV_t} = E_{PVD_t} + \mathrm{E}_{s_t} \tag{3.4-5}$$

式（3.4-6）～（3.4-11）は洗濯機、衣類乾燥機、食器洗い乾燥機といった保温機能を持たない家電機器の運用に関する制約式を示す。式（3.4-6）は家電機器の電力需要を示す。家電機器の状態変数 OPI_{at} はバイナリ変数（0 または 1 の値を持つ変数）であり、状態変数が 1 の場合、稼働状態を表し定格消費電力を消費する。一方、0 の場合は待機状態を表し、待機電力を消費する。式（3.4-7）～式（3.4-9）は家電機器の状態を決定する式であり、前述の状態変数に加え、家電機器の稼働開始フラグ OPS_{at} および稼働終了フラグ OPF_{at} を表現している。式（3.4-10）は 1 日の各家電機器の稼働回数を示す。家電機器の稼働回数は家庭用エネルギー最終需要モデルの推計結果に合わせて各世帯で 1 日ごとに設定している。式（3.4-11）は家電機器の 1 回あたりの稼働時間を示しており、稼働開始フラグから規定の稼働時間において家電機器が稼働するものとした。

$$\mathrm{E}_{a_t} = P_{a_{day}} \times OPI_{a_t} + P_{a_sb_{day}} \times \left(1 - OPI_{a_t}\right) \tag{3.4-6}$$

$$OPI_{a_t} - OPI_{a_{t-1}} = OPS_{a_t} + OPF_{a_t} \tag{3.4-7}$$

$$OPS_{a_t} \leq OPI_{a_t} \tag{3.4-8}$$

$$OPF_{a_t} \leq 1 - OPI_{a_t} \tag{3.4-9}$$

$$\sum_{t=1}^{MAX_STEP} OPS_{a_t} = \mathrm{N}_{day} \tag{3.4-10}$$

$$T_{a_{day}} \times OPS_{a_t} = \sum_{T=t}^{T_{a_{day}}} OPI_{a_T} \tag{3.4-11}$$

式（3.4-12）～（3.4-23）は炊飯器および電気ポットといった保温機能を持つ家電機器の制約式を示す。式（3.4-12）は家電機器の電力需要を示す。保温機能を持つ家電機器の状態として、運転（$OPW_{at} = 1$）、保温（$OPH_{at} = 1$）、待機（$OPS_{at} = 1$）を考え、状態変数に応じて、稼動時定格消費電力、保温時消費電力または待機電力のいずれかを消費する。式（3.4-13）～式（3.4-19）は家電機器の状態を決定する式であり、前述の状態変数に加え、家電機器の稼働開始フラグ OPS_W_{at} および稼働終了フラグ OPF_W_{at}、保温開始フラグ OPS_H_{at}、保温終了フラグ OPF_H_{at} を表現している。

式（3.4-20）は、炊飯器および電気ポットの稼動が終了した場合に保温状態に移行することを表している。さらに式（3.4-21）により食事時間においては必ず待機状態とすることとしており、炊飯器および電気ポットは次の食事時間までに稼動を完了し、かつ稼動終了から次の食事時間までは保温を行う。式（3.4-22）は１日の各家電機器の稼働回数を示す。洗濯機・衣類乾燥機・食器洗い乾燥機と同様に炊飯器・電気ポットの稼働回数は家庭用エネルギー最終需要モデルの推計結果に合わせて各世帯で１日ごとに設定している。式（3.4-23）は家電機器の１回あたりの稼働時間を示しており、稼働開始フラグから規定の稼働時間において家電機器が稼働するものとした。

$$\mathrm{E}_{a_t} = P_{a_{day}} \times OPW_{a_t} + P_{a_H_{day}} \times OPH_{a_t} + P_{a_sb_{day}} \times OPN_{a_t} \tag{3.4-12}$$

$$OPW_{a_t} + OPH_{a_t} + OPN_{a_t} = 1 \tag{3.4-13}$$

$$OPW_{a_t} - OPW_{a_{t-1}} = OPS_W_{a_t} + OPF_W_{a_t} \tag{3.4-14}$$

$$OPS_W_{a_t} \leq OPW_{a_t} \tag{3.4-15}$$

$$OPF_W_{a_t} \leq 1 - OPW_{a_t} \tag{3.4-16}$$

$$OPH_{a_t} - OPH_{a_{t-1}} = OPS_{H_{a_t}} + OPF_H_{a_t} \tag{3.4-17}$$

$$OPS_H_{a_t} \leq OPH_{a_t} \tag{3.4-18}$$

$$OPF_H_{a_t} \leq 1 - OPH_{a_t} \tag{3.4-19}$$

$$OPF_W_{a_t} = OPS_H_{a_t} \tag{3.4-20}$$

$$OPN_{a_t} = 1 \text{ (Only meal time)} \tag{3.4-21}$$

$$\sum_{t=1}^{MAX_STEP} OPS_W_{a_t} = \mathrm{N}_{day} \tag{3.4-22}$$

$$T_{a_{day}} \times OPS_W_{a_t} = \sum_{T=t}^{T_{a_{day}}} OPW_{a_T} \tag{3.4-23}$$

式（3.4-24）～（3.4-25）はエアコンの運用に関する制約式を示す。式（3.4-24）はエアコンの電力需要を示し、式（3.4-25）はエアコンの動作モードを示す。エアコンは標準モード（暖房：22℃、冷房：26℃）または省エネモード（暖房：20℃、冷房：28℃）のどちらかで動作する。

$$E_{ACi_t} = \mathrm{ACi}_{M1_t} \times \mathrm{OPM1}_{i_t} + \mathrm{ACi}_{M2_t} \times \mathrm{OPM2}_{i_t} \tag{3.4-24}$$

$$\mathrm{OPM1}_{i_t} + \mathrm{OPM2}_{i_t} = 1 \tag{3.4-25}$$

式（3.4-26）～（3.4-33）はヒートポンプ給湯機の運用に関する制約式を示す。式（3.4-26）はヒートポンプ給湯機の消費電力を示す。ヒートポンプ給湯機の電力需要は外気温に応じて決定する COP（図 3.2-1）で加熱能力 H_{HP}を除すことで算出する。式（3.4-27）はヒートポンプ給湯機の貯湯タンクの熱収支を示す。ヒートポンプ給湯機の運転により貯湯タンクに温水を蓄熱し、給湯需要 H_{Dt}に合わせて貯湯タンクから温水を供給する。式（3.4-28）および式（3.4-29）は貯湯タンクの最大蓄熱量および最低蓄熱量を示す。貯湯タンクは通常、空となることは考えられないため常時最低蓄熱量以上の温水を蓄熱するものとした。式（3.4-30）～式（3.4-32）はヒートポンプ給湯機の稼働状態

を表し、家電機器と同様に状態変数 OPI_{HPt}、稼働開始フラグ OPS_{HPt} および稼働終了フラグ OPF_{HPt} を決定する。式（3.4-33）はヒートポンプ給湯機の１日あたりの稼働回数を示す。本モデルでは頻繁な発停を避けるため、１日の稼働回数は２回以下とした。

$$\mathrm{E}_{HP_t} = {}^{H_{HP}}/_{COP} \times OPI_{HP_t} \tag{3.4-26}$$

$$\mathrm{STH}_{HP_t} = (1 - r_{HP}) \times STH_{HP_{t-1}} + H_{HP} \times OPI_{HP} - H_{D_t} \tag{3.4-27}$$

$$\mathrm{STH}_{HP_t} \leq MAX\ STH_{HP} \tag{3.4-28}$$

$$\mathrm{STH}_{HP_t} > MIN\ STH_{HP} \tag{3.4-29}$$

$$OPI_{HP_t} - OPI_{HP_{t-1}} = OPS_{HP_t} + OPF_{HP_t} \tag{3.4-30}$$

$$OPS_{HP_t} \leq OPI_{HP_t} \tag{3.4-31}$$

$$OPF_{HP_t} \leq 1 - OPI_{HP_t} \tag{3.4-32}$$

$$\sum_{t=1}^{MAX_STEP} OPS_{HP_t} = \mathrm{N}_{day} \tag{3.4-33}$$

式（3.4-3）～式（3.4-33）は可制御機器の運用に関する制約条件にかかわらず可制御機器の運用方法の決定に必要な制約式である。一方、式（3.4-34）および式（3.4-35）は制約条件に関わる制約式である。式（3.4-34）は家電機器の運用変更が可能な時間帯を制限する制約式である。制約条件として「稼働可能時間」を考慮する場合、稼働可能時間以外の状態変数 OPI_{HPt} を 0（待機状態）と設定することにより、家電機器の稼働時間は「稼働可能時間」のみに限定される。また制約条件として「操作方法」を考慮し居住者の手動操作のみを想定する場合、居住者全員が外出または就寝している時間帯において状態変数 OPI_{HPt} を 0 と設定すれば、居住者が在宅・起床時のみに家電機器の稼働を制限することが可能である。式（3.4-35）は「温熱快適性」の制約条件に関連するエアコンの動作モードを規定する制約式である。本論文では PPD により居住者の温熱快適性を判断している。具体的には一様乱数が省エネモードにおける PPD を下回る場合に居住者は省エネモードの温熱環境に不満足であると判断する。居住者が温熱環境に不満足である場合、省エネモードの状態変数を 0 に設定することにより、エアコンの運転を標準モードに限定することができる。

以上の制約式により、「稼働可能時間」、「温熱快適性」、「操作方法」といった制約条件を考慮して可制御機器の運用方法を最適化することが可能である。

$$OPI_{a_t} = 0 \tag{3.4-34}$$

(Only if the appliances are not permitted to operate at that time)

$$\mathrm{OPM2}_{i_t} = 0 \tag{3.4-35}$$

(Only if thermal condition for the lower service level is not satisfied)

表 3.4-1　内生変数

変数	定義	単位
t	タイムステップ (1～288)	-
day	日数 (1～365)	-
a	家電機器の種別 (1:洗濯機、2:衣類乾燥機、3:食器洗い乾燥機、4:炊飯器、5:電気ポット)	-
i	エアコン設置部屋の種別 (1: LDK、2:主寝室、3～5:個室)	-
E_{Dt}	タイムステップ t における電力需要	kW
E_{PVDt}	タイムステップ t における PV の自家消費電力	kW
E_{Pt}	タイムステップ t における購入電力	kW
E_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の消費電力	kW
E_{ACit}	タイムステップ t におけるエアコン i の消費電力	kW
E_{HPt}	タイムステップ t におけるヒートポンプ給湯機の消費電力	kW
E_{St}	タイムステップ t における余剰電力（売電電力）	kW
OPI_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の稼動状態 （1:稼動、0:停止）、(a=1,2,3)	-
OPS_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の稼動開始フラグ（a=1,2,3）	-
OPF_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の稼動停止フラグ（a=1,2,3）	-
OPW_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の運転フラグ （1:稼動、0:その他）、(a=4,5)	
OPH_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の保温フラグ （1:保温、0:その他）、(a=4,5)	
OPN_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の待機フラグ （1:待機、0:その他）、(a=4,5)	
OPS_W_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の稼動開始フラグ（a=4,5）	
OPF_W_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の稼動停止フラグ（a=4,5）	
OPS_H_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の保温開始フラグ（a=4,5）	
OPF_H_{at}	タイムステップ t における家電機器 a の保温停止フラグ（a=4,5）	
$OPM1_{iday}$	タイムステップ t におけるエアコン i のモード 1 での稼動フラグ	-
$OPM2_{iday}$	タイムステップ t におけるエアコン i のモード 2 での稼動フラグ	-
OPI_{HPt}	タイムステップ t におけるヒートポンプ給湯機の動作状態 （1:稼動、0:停止）	-
OPS_{HPt}	タイムステップ t におけるヒートポンプ給湯機の稼動開始フラグ	-
OPF_{HPt}	タイムステップ t におけるヒートポンプ給湯機の稼動停止フラグ	-
STH_t	タイムステップ t におけるヒートポンプ給湯機の蓄熱量	kWh

表 3.4-2　外生変数

変数	定義	単位
E_{PVt}	タイムステップ t における PV 発電電力	kW
E_{Othert}	タイムステップ t における可制御機器を除く消費電力	kW
Aci_{M1t}	タイムステップ t におけるエアコン i の標準モードの場合の消費電力	kW
Aci_{M2t}	タイムステップ t におけるエアコン i の省エネモードの場合の消費電力	kW
P_a	家電機器 a の定格消費電力	kW
P_{a_sb}	家電機器 a の待機電力	kW
N_{aday}	日付 day における家電機器 a の稼動回数	times
T_a	家電機器 a の１回あたりの稼動時間	slot/time
H_{HP}	ヒートポンプ給湯機の定格加熱能力	kW
COP_t	タイムステップ t におけるヒートポンプ給湯機の COP	-
r_{HP}	ヒートポンプ給湯機の放熱損失割合	%
H_{Dt}	タイムステップ t における給湯需要	-
$MAX\ STH_{HP}$	ヒートポンプ給湯機の最大蓄熱量	kWh
$MIN\ STH_{HP}$	ヒートポンプ給湯機の最低蓄熱量	kWh
$MAX\ STEP$	１日のタイムステップ数 (=288)	slots

3.4.3　余剰電力買取シナリオにおける電力需要調整効果の推計結果

図 3.4-3 は余剰電力買取シナリオにおける「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の 5 月 11 日における電力需要調整の結果を示す。ポテンシャルケースでは光熱費の最小化のため、洗濯機、食器洗い乾燥機、ヒートポンプ給湯機はすべて電力単価の安い深夜時間帯（23:00～7:00）に稼働した。また PV 発電時間帯に可制御機器が稼働しないため、余剰電力量が大きい。一方、自動制御ケースでは食器洗い乾燥機は朝食終了後から夕食までに稼働を完了する必要があるため、深夜電力を活用することはできなかった。ヒートポンプ給湯機および洗濯機はポテンシャルケースと同様に深夜電力を利用して稼働した。手動制御ケースでは食器洗い乾燥機は在宅起床時間に限定されるため外出前に稼働を開始し、PV の発電量で賄われた。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の 5 月 11 日における洗濯機の電力需要量は 0.056kWh、食器洗い乾燥機の電力需要量は 0.74kWh、ヒートポンプ給湯機の電力需要量は 1.05kWh であった。

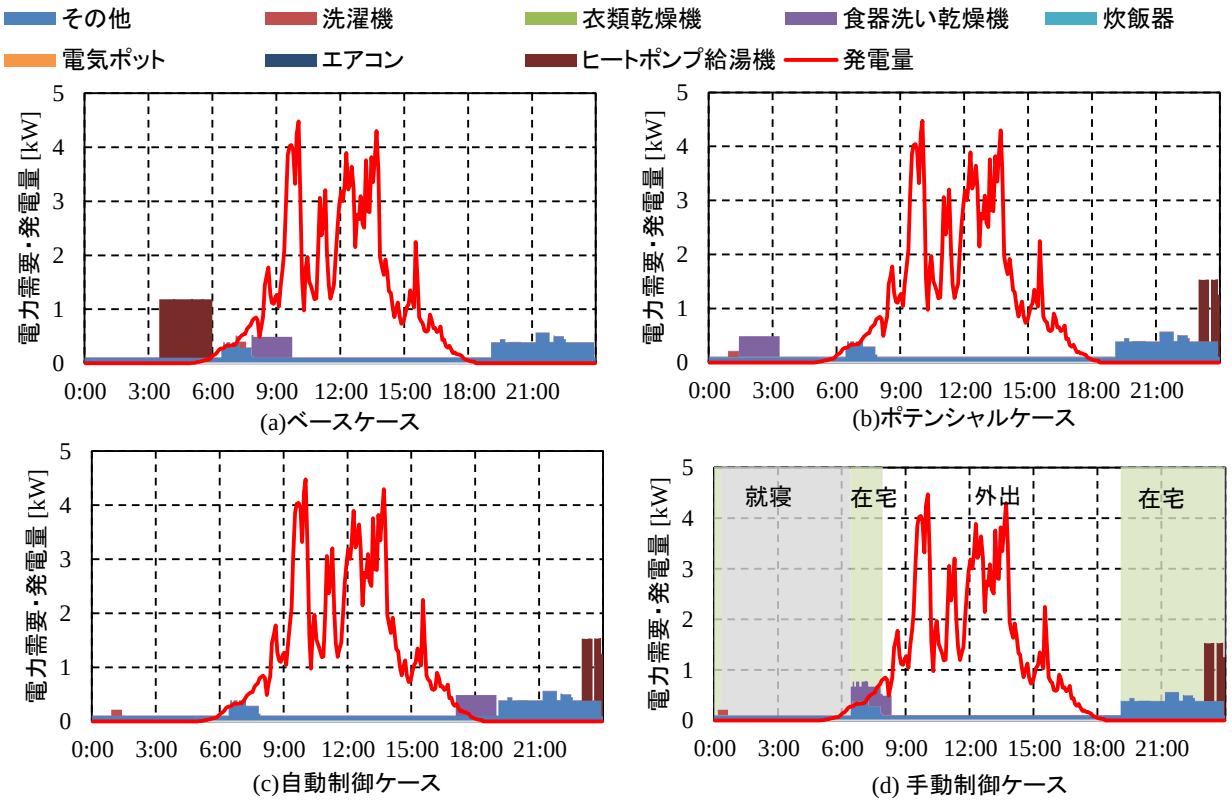


図 3.4-3　「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の電力需要調整結果（5 月 11 日、余剰電力買取）

図 3.4-4 は「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の 5 月 11 日における電力需要調整結果を示す。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯と同様にポテンシャルケースにおいて、洗濯機、炊飯器、ヒートポンプ給湯機の可制御機器は深夜電力時間帯に稼働時間が移行した。自動制御ケースでは同様に洗濯機およびヒートポンプ給湯機は深夜時間帯に稼働したが、炊飯器は昼食から夕食の間に稼働時間が限定されるため、深夜時間帯に稼働できない。一方、手動制御ケースでは洗濯機の稼働時間は起床時間に移行したが、深夜時間帯に在宅起床者がいるため稼働時間が変わらない。

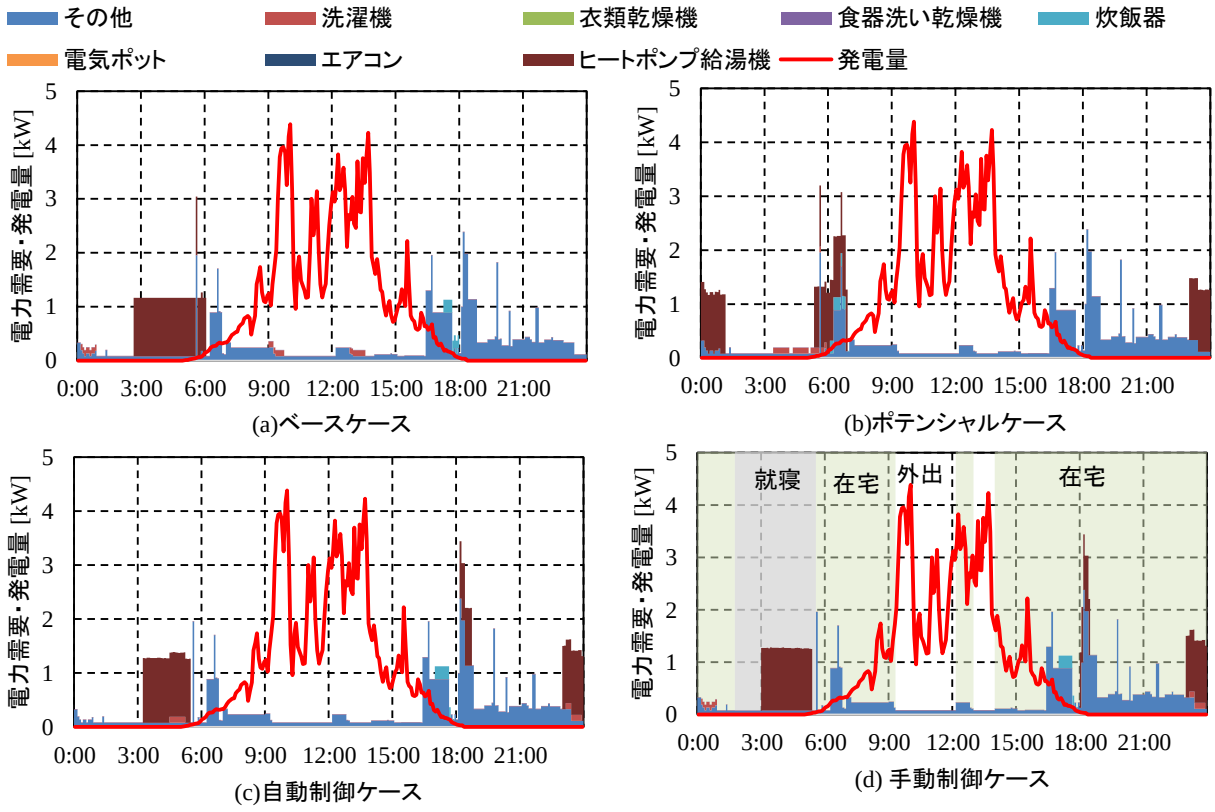


図 3.4-4　「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の電力需要調整結果（5 月 11 日、余剰電力買取）

図 3.4-5 は「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の 8 月 29 日における電力需要調整結果を示す。ポテンシャルケースにおいて電気ポット、ヒートポンプ給湯機は深夜電力時間帯に稼働時間が移行した。エアコンは光熱費低減のため省エネモードで運転された。自動制御ケースにおいてヒートポンプ給湯機はポテンシャルケースと同様に深夜電力時間帯に稼働したが、電気ポットは夕食までに稼働を完了する必要があるため、深夜電力時間帯に移行することができない。一方、エアコンの運転モードは快適性によって制約される。図 3.4-6 に LDK において省エネモードでエアコンを運転した場合の 18:00～24:00 における居住者の快適性を示す PPD の推計結果を示す。PPD は温熱環境に対する不満足率を表す。PPD と一様乱数を比較して PPD のほうが大きい場合、エアコンは居住者の快適性要求を満足させるため標準モードで運転する。18:00～19:00 のエアコン立ち上がり時の不満足者率が 20～40%と高いため、標準モードで運転した。手動制御ケースにおける可制御機器の動作は自動制御ケースと同様であった。また夏期において給湯熱需要量が減少するため、ヒートポンプ給湯機の電力需要調整効果が小さくなった。

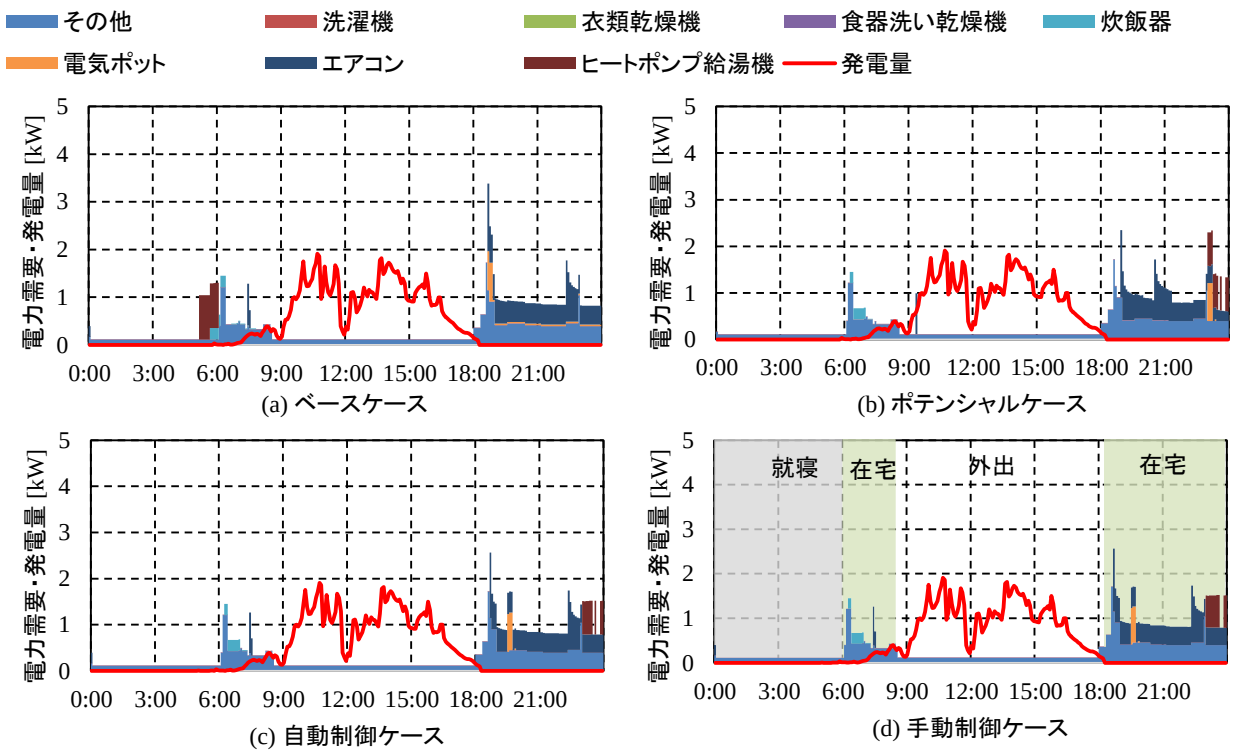


図 3.4-5　「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の電力需要調整結果（8 月 14 日、余剰電力買取）

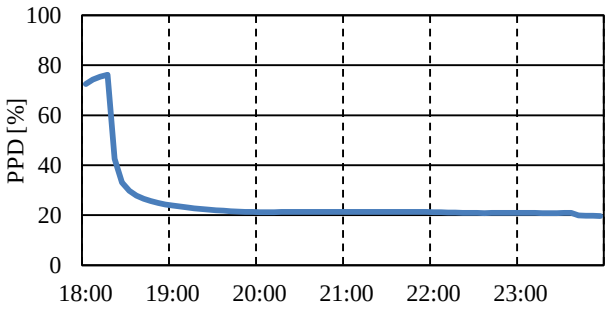


図 3.4-6　「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の PPD 推計結果（8 月 14 日）

図 3.4-7 は余剰電力買取シナリオにおける全戸建住宅の年間電力需要量および年間余剰電力量の推計結果を示す。余剰電力買取シナリオにおいては電力需要調整によりエアコンが省エネモードで運転することにより年間電力需要量は減少した。また可制御機器が PV 発電時間帯を避けて運転するため年間余剰電力量は増加した。年間余剰電力量のベースケースとポテンシャルケースの差異は 27～225kWh/年（平均 100kWh/年）、ポテンシャルケースと自動制御ケースの差異は 0～135kWh/年（平均 31kWh/年）、自動制御ケースと手動制御ケースの差異は 0～70kWh/年（平均 10kWh/年）であり、ポテンシャルケース、自動制御ケース、手動制御ケース、ベースケースの順で大きい。

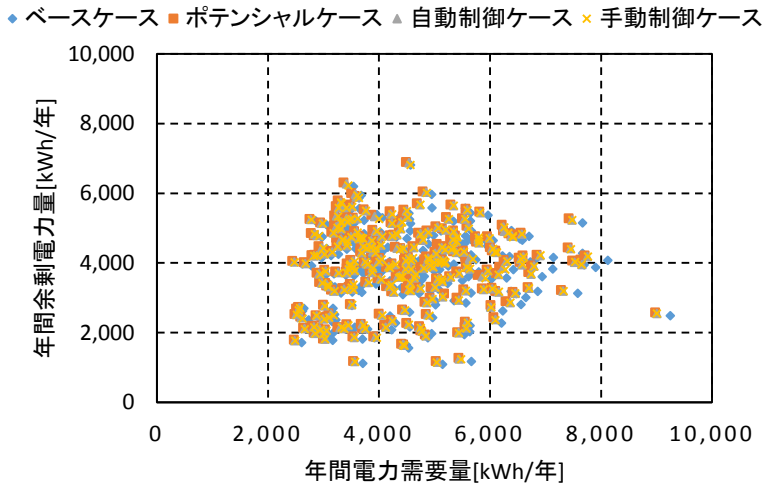


図 3.4-7　全世帯の年間余剰電力量推計結果（余剰電力買取）

図 3.4-8 は余剰電力買取シナリオにおける全戸建住宅の年間光熱費の推計結果を示す。余剰電力買取シナリオにおいては PV の余剰電力が増加し、売電額が増加するため年間光熱費は減少した。年間光熱費のベースケースとポテンシャルケースの差異は 720～11,148 円年（平均 5,566 円/年）、ポテンシャルケースと自動制御ケースの差異は 0～6,239 円/年（平均 1,802 円/年）、自動制御ケースと手動制御ケースの差異は 0～3,189 円/年（平均 497 円/年）であり、ポテンシャルケース、自動制御ケース、手動制御ケース、ベースケースの順で小さい。したがって現行の余剰電力買取制度において光熱費の最小化を目的に電力需要調整を実施した場合、電力需要量、光熱費を削減できるが余剰電力量が増加する。

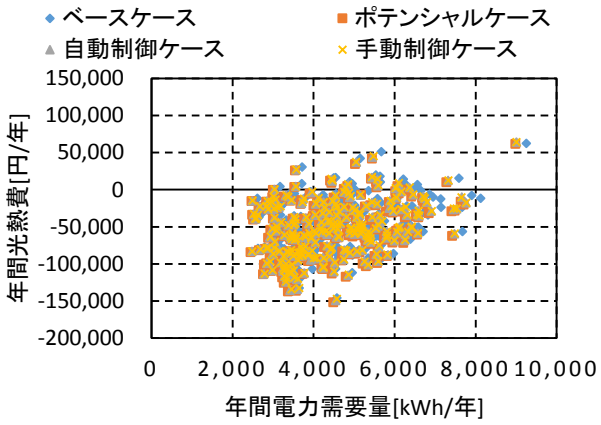


図 3.4-8　全世帯の年間光熱費推計結果（余剰電力買取）

3.4.4　余剰電力抑制シナリオにおける電力需要調整効果の推計結果

図 3.4-9 は余剰電力抑制シナリオにおける「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の 5 月 11 日における電力需要調整の推計結果を示す。余剰電力抑制を目的とした場合、可制御機器は PV の発電量で稼働した。ポテンシャルケースにおいてすべての可制御機器が PV の発電量で賄われた。自動制御ケースおよび手動制御ケースにおいても稼働時間が制約条件により異なるが、PV の発電量で賄われた。

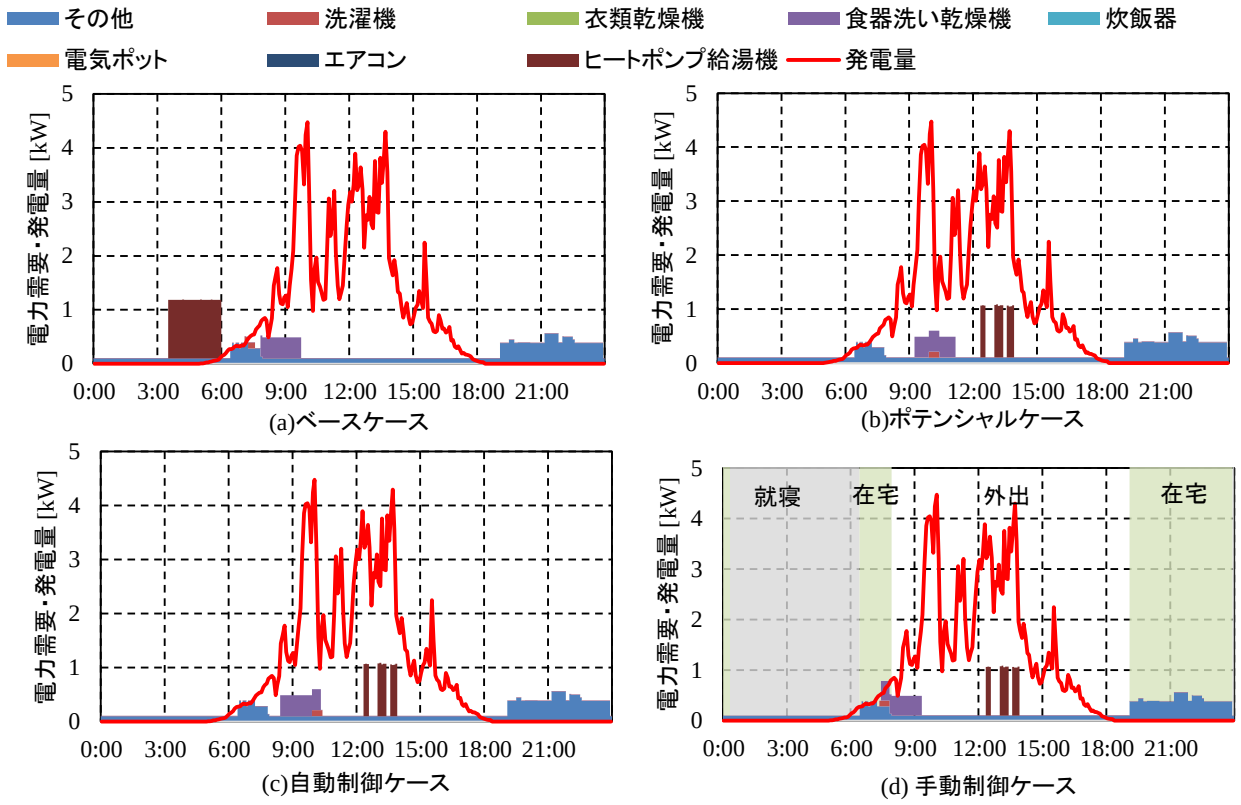


図 3.4-9　「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の電力需要調整結果（5 月 11 日、余剰電力抑制）

図 3.4-10 は「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の 5 月 11 日における電力需要調整結果を示す。「夫婦（若・中年、共働き）」世帯と同様に可制御機器は PV 発電時間帯に稼働した。「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯は昼間に在宅しているため、自動制御ケースおよび手動制御ケースにおいても可制御機器の電力需要をすべて PV 発電量で賄えた。

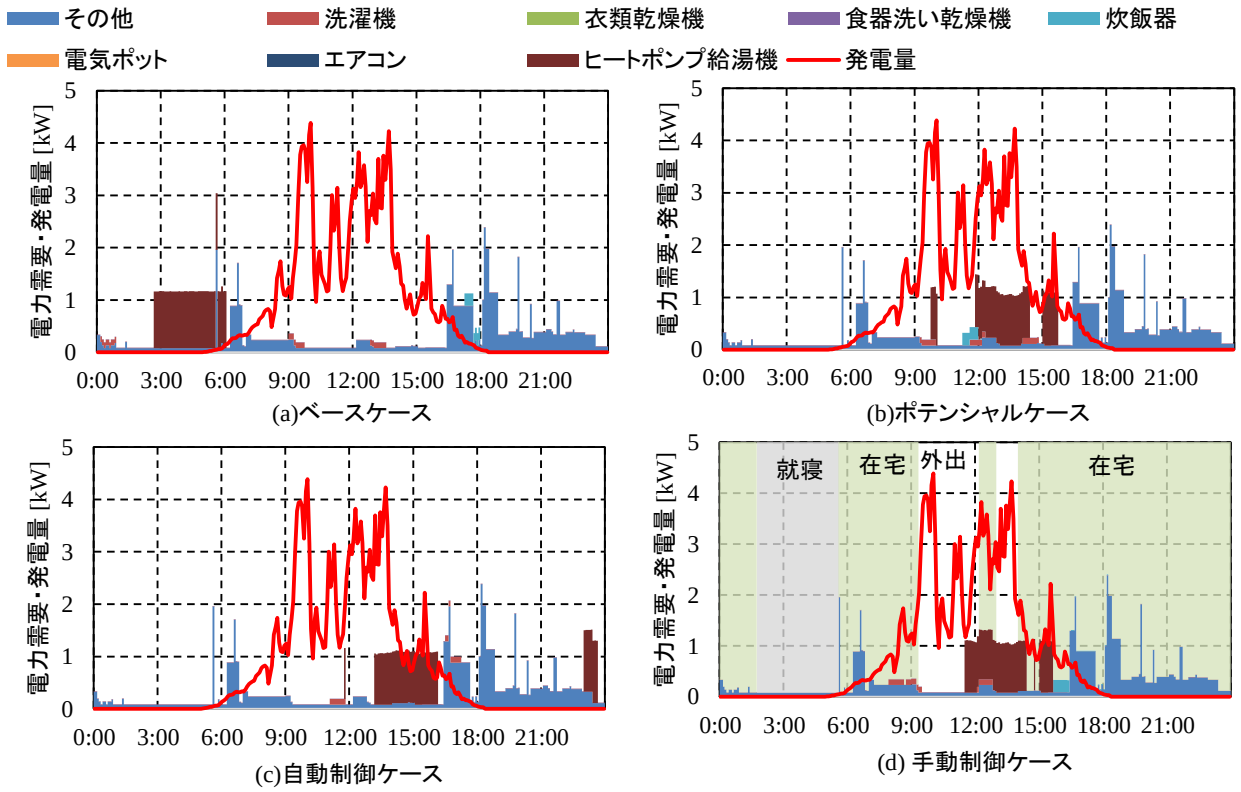


図 3.4-10　「夫婦と子供 2 人（夫のみ就業）」世帯の電力需要調整結果（5 月 11 日、余剰電力抑制）

図 3.4-11 は「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の 8 月 14 日における電力需要調整結果を示す。ポテンシャルケースにおいて、炊飯器、電気ポット、ヒートポンプ給湯機が PV 発電時間帯に稼働し、夏期の曇天日においても余剰電力が抑制された。自動制御ケースにおいて電気ポットおよびヒートポンプ給湯機は PV 発電時間帯に稼働したが、炊飯器は朝食までに稼働する必要があるため、深夜時間帯に稼働した。手動制御ケースにおいてはヒートポンプ給湯機のみ PV 発電時間帯に稼働したが、PV 発電時間帯において外出しているため炊飯器、電気ポットは PV 発電時間帯以外で稼働した。なお、エアコンは余剰電力買取シナリオの場合と同様に、ポテンシャルケースでは省エネモードで運転され、自動制御ケース・手動制御ケースでは快適性を担保するため標準モードで運転された。ただし、晴天日においては余剰電力削減のため PV 発電時間帯は標準モード、その他時間帯は居住者の快適性が許容される限り省エネモードで運転される。

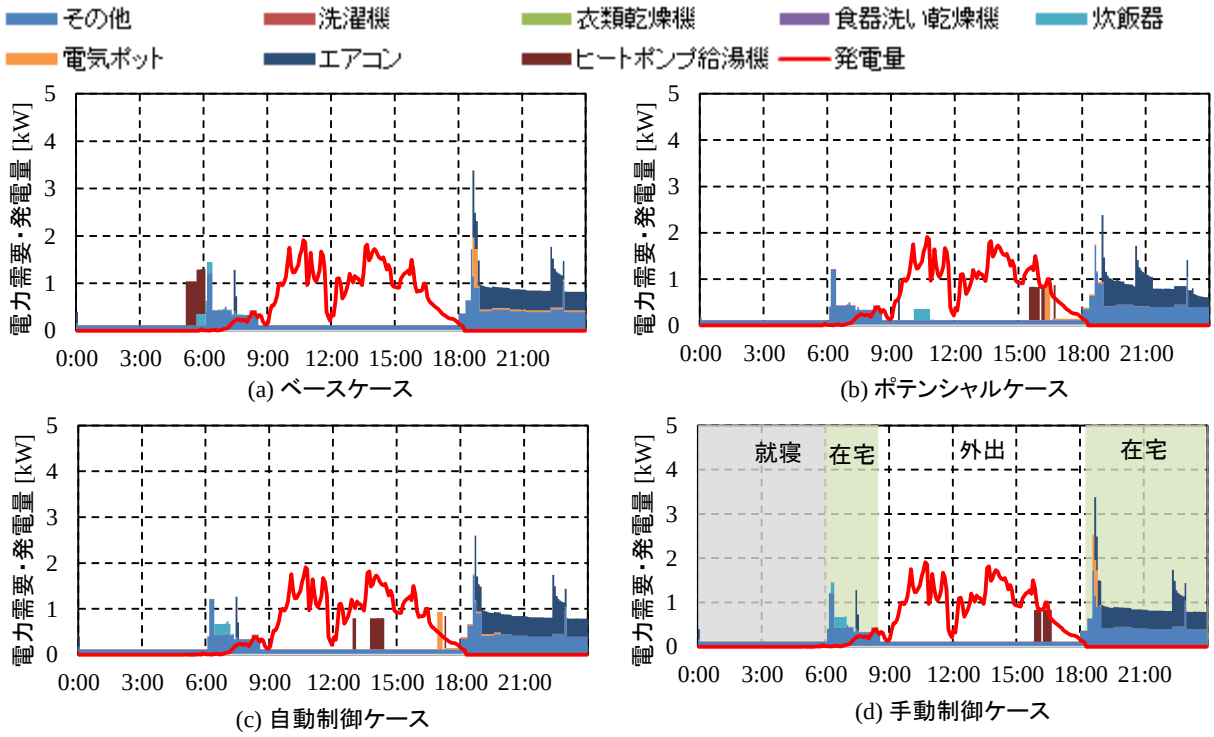


図 3.4-11　「夫婦（若・中年、共働き）」世帯の電力需要調整結果（8 月 14 日、余剰電力抑制）

図 3.4-12 は全戸建住宅の年間余剰電力量の推計結果を示す。余剰電力抑制を目的とした場合、ベースケースと比較して、ヒートポンプ給湯機が昼間に稼働することによる COP の向上により年間電力需要量は減少した。また PV 発電時間帯に可制御機器が稼働することにより年間余剰電力量が減少した。ポテンシャルケース、自動制御ケース、手動制御ケース、ベースケースの順に年間電力需要量、年間余剰電力量は小さい。

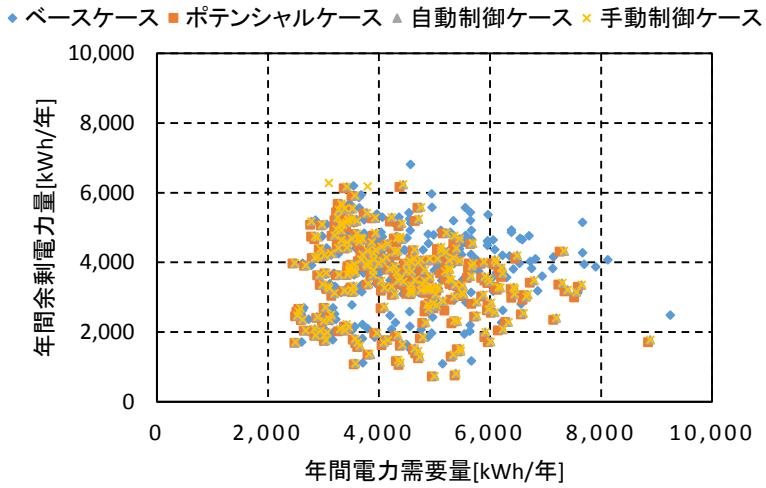


図 3.4-12　全戸建住宅の年間余剰電力量推計結果（余剰電力抑制）

図 3.4-13 は全戸建住宅の余剰電力削減効果の推計結果を示す。潜熱回収型給湯器導入世帯とヒートポンプ給湯機導入世帯で年間余剰電力量削減効果は大きく異なる。潜熱回収型給湯器導入世帯による効果は家電機器およびエアコンの電力需要調整で得られる効果を示す。潜熱回収型給湯器導入世帯のポテンシャルケースにおける余剰電力削減効果は 0kWh/年～300kWh/年（平均 49kWh/年）、自動

制御ケースにおいては 0kWh/年～48kWh/年（平均 7kWh/年）、手動制御ケースにおいては 0kWh/年～33kWh/年（平均 6kWh/年）であった。一方、ヒートポンプ給湯機導入世帯のポテンシャルケースにおける余剰電力削減効果は 363kWh/年～1,072kWh/年（平均 700kWh/年）、自動制御ケースにおいては 329kWh/年～961kWh/年（平均 651kWh/年）、手動制御ケースにおいては 325kWh/年～963kWh/年（平均 646kWh/年）であった。潜熱回収型給湯器導入世帯とヒートポンプ給湯機導入世帯の余剰電力削減効果の違いは平均 645kWh/年であった。

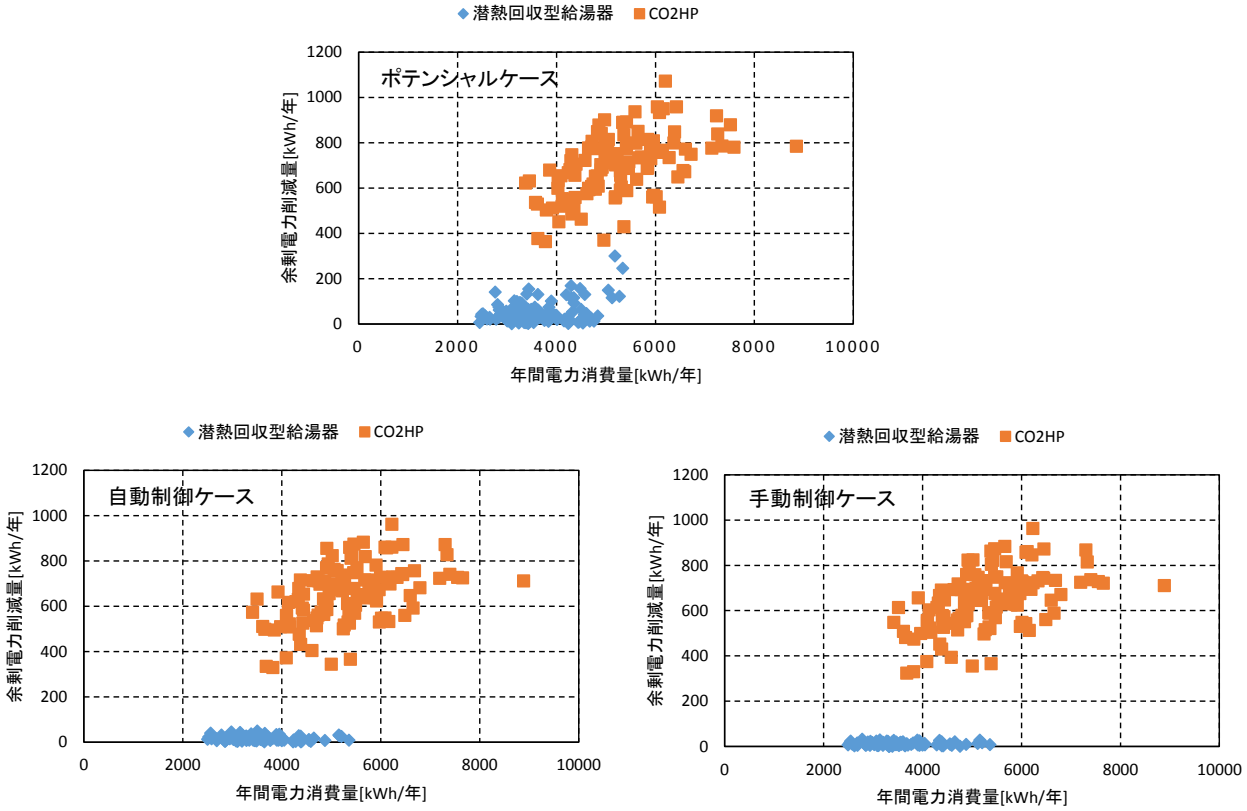


図 3.4-13　余剰電力削減効果の推計結果（余剰電力抑制）

図 3.4-14 は余剰電力抑制シナリオにおける全戸建住宅の年間光熱費推計結果を示す。代表世帯と同様に電力需要調整により年間光熱費は減少した。年間光熱費のベースケースとポテンシャルケースの差異は 2,959 円/年～10,596 円/年（平均 6,037 円/年）、ポテンシャルケースと自動制御ケースの差異は 855 円/年～4,370 円/年（平均 1,756 円/年）、自動制御ケースと手動制御ケースの差異は 1,000 円/年未満でありほぼ同等である。したがって余剰電力買取価格を購入電力単価よりも小さく設定した場合、電力需要調整により電力需要量、余剰電力量、光熱費のすべてを削減することができる。ただし、余剰電力買取シナリオと比較すると余剰電力買取単価の違いにより光熱費は平均 8.1 万円/年増加した。

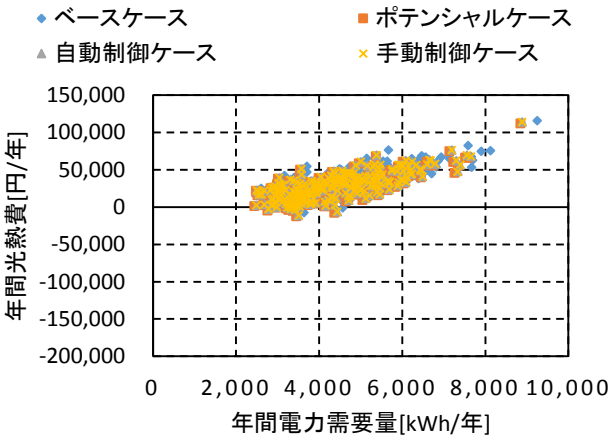


図 3.4-14　全戸建住宅の年間光熱費推計結果（余剰電力抑制）

3.5　まとめ

本章では PV 大量導入に伴う電力系統の影響の緩和策の一つとして、住宅の可制御機器による電力需要調整を考え、住宅の可制御機器が持つ電力需要調整能力および電力需要調整効果の評価を行った。本章ではまず高低圧配電系統の戸建住宅に居住する 240 世帯について電力需要および発電量を推計した。電力需要は家族構成・床面積、居住者のライフスタイル、導入する給湯器の種類等により大きくばらつき、ヒートポンプ給湯機導入世帯の電力需要が大きい。一方、年間発電量は各世帯の電力需要量には依存せず PV の搭載容量によって決まった。また、年間余剰電力量が年間発電量に占める割合は平均 74%であり、年間発電量のおよそ半分以上が逆潮流として配電系統に流入しており、配電線電圧の抑制のためには余剰電力量の削減が必要である。

次に電力需要調整能力を推計した。居住者の行動によらず可制御機器の運用を決定する場合、可制御機器の電力需要調整能力は 1 日を通して得られる。居住者の行為および居住者の快適性に関する制約を考慮した場合、例えば食器洗い乾燥機は朝食と昼食の間に稼働可能な時間が限定されるなど、電力需要調整能力が得られる時間帯が限られた。可制御機器の制御を居住者の手動操作のみとした場合、昼間に外出する機会が多い世帯では可制御機器の電力需要調整能力がさらに限定された。一方、日中に居住者のいずれかが在宅していることが多い世帯では特に日中において電力需要調整能力は自動制御を想定した場合と同等であった。ただし、本論文では起床在宅時間帯において必ず機器の手動操作が可能であると想定しており、本論文の推計結果は手動操作で得られる電力需要調整の最大値を示すことに留意する必要がある。

次に可制御機器の電力需要調整によって得られる効果を評価した。電力会社からの購入電力単価よりも高額で余剰電力の買取が行われる場合、可制御機器は PV 発電時間帯を避けて稼働する。可制御機器の運用上の制約条件により PV 発電時間帯に稼働する場合もあるが、概ね上記の通り PV 発電時間帯を避けて可制御機器が稼働した。したがって余剰電力を高額で買取する場合、電力需要調整を実施すると余剰電力が増大することが示された。第 4 章にて推計するが配電線電圧はさらに上昇し、PV 抑制量が増大することが予想され、PV 大量導入による電力系統影響の緩和効果は得られないと考えられる。

最後に余剰電力買取価格を電力会社からの購入電力単価よりも安い価格とし電力需要調整効果の評価を行った。余剰電力買取価格を安価にした場合、可制御機器は PV 発電時間帯に集中して稼働し

た。可制御機器の制約条件を考慮した場合でも同様に可制御機器は PV 発電時間帯に稼働した。一方、居住者の手動操作のみで稼働時間変更が可能とした場合、PV 発電時間帯に在宅していないと可制御機器を稼働することができないため PV 発電時間帯の稼働頻度が小さくなった。またヒートポンプ給湯機を昼間に稼働することによりヒートポンプ給湯機の電力需要が減少した。これは外気温の高い昼間に稼働することで COP が向上したためである。年間余剰電力削減効果は潜熱回収型給湯器導入世帯とヒートポンプ給湯機導入世帯で大きく異なる。潜熱回収型給湯器導入世帯による効果は家電機器およびエアコンの電力需要調整で得られる効果を示す。制約条件を考慮しない場合、余剰電力削減効果は平均 49kWh/年であった。しかし、制約条件を考慮する場合では平均 7kWh/年、手動操作のみとした場合は平均 6kWh/年に減少し、実際に家電機器の制御で得られると想定される年間余剰電力量の削減効果は小さい。一方、ヒートポンプ給湯機導入世帯の制約条件を考慮しない場合における余剰電力削減効果は平均 700kWh/年であった。制約条件を考慮する場合では平均 651kWh/年、手動操作のみとした場合は平均 646kWh/年であり、制約条件を考慮した場合でもヒートポンプ給湯機導入世帯では年間余剰電力量の削減効果を期待することができる。

以上の結果より家電機器の制約条件により電力需要調整能力および電力需要調整効果は限定されることが明らかとなった。制約条件が及ぼす影響として「稼働可能時間」および「温熱快適性」により余剰電力削減効果が約 13%減少し、「操作方法」によりさらに約 1%減少することを示した。これは既往研究 [4]において 44～71 %が有効に活用できないとの結果よりも小さいが、本論文では制約のないヒートポンプ給湯機を含んでいるためである。「稼働可能時間」および「温熱快適性」が電力需要調整効果に及ぼす影響が大きく、「操作方法」による影響が小さいため、HEMS での自動化による効果は小さいといえる。ただし、本論文では居住者の在宅中において必ず機器の操作が可能としているが、実際には行為状況等により操作できない場合も考えられるため、実際に手動操作によって得られる電力需要調整効果は減少すると考えられる。余剰電力買取価格を購入電力単価よりも小さく設定した場合、電力需要調整により電力需要量、余剰電力量、光熱費のすべてを削減することができ、PV 大量導入による電力系統影響の緩和策として有効であると考えられる。ただし、余剰電力が購入電力よりも高額で買取が行われる場合と比較すると余剰電力買取単価の違いにより光熱費は平均 8.1 万円/年増加するため、電力需要調整に対するインセンティブを付与する必要があると考えられる。

参考文献

[1] 池上貴志他：電力需要調整力確保に向けた家庭内機器最適運用計画モデルの開発，電気学会論文誌 B，130-10，2010，pp.877-887

[2] M. van der Kam, et al.：Smart charging of electric vehicle with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in a microgrid; a case study，Applied Energy，152，2015，pp.20-30

[3] Mustapha Aachiq 他：電力系統の需給バランスのための住宅用 PV-EV システムの評価，電気学会論文誌 B，135-1，2015，pp.27-34

[4] R. D'hulst, et al.：Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium，Applied Energy，155，2015，pp.79-90

[5] B. Yuce, et al.：ANN-GA smart appliance scheduling for optimized energy management in the domestic sector，Energy and Buildings，111，2016，pp.311-325

[6] K. S. Cetin, et al.：Effect of thechnology-enabled time-of-use energy pricing on thermal comfort and energy use in mechanically-conditioned residential buildings in cooling dominated climates，Building and Environment，96，2016，pp.118-130

[7] R. D'hulst, et al.：Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium，Applied Energy，155，2015，pp.79-90
[8] Kobus, C. B. A., et al.：A real-life assessment on the effect of smart appliances for shifting households' electricity demand，Applied Energy，147，2015，pp.335–343
[9] Klaassen, E., et al.：Load shifting potential of the washing machine and tumble dryer，IEEE International Energy Conference，2016，pp.1-6
[10] R. Baetens, et al.：Modeling uncertainty in direct energy simulations by stochastic residential occupant behavior，Building Performance Simulation，9-4，2016，pp.431-447
[11] M. Higashino, et al.：Simulation of Home Appliance Use and Electricity Consumption to Quantify Energy Management Resources，2nd Asia Conference on International Building Performance Simulation Association，2014
[12] 谷口綾子：家庭部門エネルギー最終需要予測モデルの開発と応用に関する研究，大阪大学大学院博士論文，2015
[13] K. S. Cetin：Effect of thechnology-enabled time-of-use energy pricing on thermal comfort and energy use in mechanically-conditioned residential buildings in cooling dominated climates，Building and Environment，96，2016，pp.118-130
[14] Fanger, P.O：Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering，New York，McGrow-Hill，1970
[15] 一般財団法人低炭素投資促進機構：回避可能費用，http://www.teitanso.or.jp/fit_avoidable_cost

第４章　電力需要調整が配電系統に及ぼす影響の評価

4.1　序論

PV が大量に電力系統に導入された場合、住宅から発生する余剰電力により配電線電圧が上昇し、需要家電圧を適正範囲内に維持することができない可能性がある。需要家電圧の適正維持方法として LRT や SVC などの電力系統側の対策と住宅などの需要家側の対策が検討されている。需要家側の対策として、大嶺ら[1)]はヒートポンプ給湯機の昼間運転によって余剰電力を低減する手法を提案し、その低減効果を評価した。PV 導入率が約 60%においてヒートポンプ給湯機を昼間に運転させない場合は平均 6.4%の出力抑制が生じるのに対して、提案手法では 0.7%まで低減できることを示した。同様に Fazeli ら[2)]は EV による電圧上昇緩和効果の評価を行っており、地域内の 90%に PV が導入された場合においても配電線電圧を適正範囲内に抑制可能であることを示した。以上の様に、蓄電池や EV、ヒートポンプ給湯機などの需要家側機器の制御に対して期待が高まっており、その有効性が示されている。一方、社会的費用最小化のためには家電機器など既に住宅に導入されている機器を配電線電圧の調整に利用することが望ましい。しかし第４章で示したように家電機器による電力需要調整においては本来の機能を阻害する運用変更は受け入れられないため、家電機器の電力需要調整には制約が生じるが、余剰電力の削減効果が得られることが明らかとなっている。しかし、既往研究では制約条件を考慮した家電機器による電力需要調整が配電系統に及ぼす影響の評価は行われていない。また配電系統における電力需要調整の方法として需要家電圧が逸脱した場合にのみ余剰電力を抑制し、配電線電圧を適正範囲に維持する制御方法が望ましいと考えられる。需要家電圧の逸脱時における制御方法として、HEMS 等が住宅の配電線電圧を監視し当該住宅のみの余剰電力を抑制する場合と、CEMS 等の地域全体を監視するシステムにより地域内のいずれかの住宅で適正範囲を逸脱した場合に全住宅で余剰電力を抑制する方法がある。

本章では高低圧配電系統における電力需要調整能力および電力需要調整効果について家電機器の制約条件や操作方法の違いが及ぼす影響を評価する。さらに居住者の経済性損失を最小限に抑えるため、配電線電圧が逸脱する時間帯のみにおいて余剰電力を抑制することで、需要家電圧の維持と居住者の経済性損失の抑制の両立の可能性を検討する。本論文では、各世帯において需要家電圧が逸脱した場合に当該住宅の余剰電力を抑制する場合と、地域内のいずれかの住宅において需要家電圧の逸脱が生じた場合に高低圧配電系統全体の余剰電力を抑制する場合を想定し、余剰電力抑制範囲の違いが電力需要調整効果に及ぼす影響を評価する。これら評価により地域における電力需要調整のあり方について検討する。

4.2　配電系統の電力需要調整能力の評価

4.2.1　配電系統における電力需要調整能力の評価方法

本節では高低圧配電系統における電力需要調整能力の評価方法を述べる。高低圧配電系統における電力需要調整能力は、高低圧配電系統に連系する戸建住宅 720 世帯の電力需要調整能力を積算することにより推計する。各住宅の電力需要調整能力と同様に、表 4.2-1 に示す可制御機器の制約条件が異なる「ポテンシャルケース」、「自動制御ケース」、「手動制御ケース」を想定し、制約条件が地域の電力需要調整能力に及ぼす影響を評価する。「ポテンシャルケース」は可制御機器の電力需要調整に制約条件が無い場合を想定し、可制御機器を電力需要調整に最大限利用可能なものとした。「自動制御ケース」は HEMS による可制御機器の制御を想定し、居住者の在宅状況によらず制御可能とした。ただし、稼働可能時間および温熱快適性の制約条件を考慮し、各機器の本来の機能を損なわない範囲でのみ電力需要調整が可

能である。例えば炊飯器等の調理機器は次の食事時間までに稼働を完了する必要があり、エアコンの省エネモードにおいて居住者が不快と感じる場合は標準モードに自動的に切り替わる。「手動制御ケース」は稼働可能時間および温熱快適性に加え、起床・在宅者が少なくとも 1 人以上いる場合にのみ可制御機器の操作が可能であるものとした。なおすべての戸建住宅に PV を導入した場合を想定する。PV の合計導入容量は 3.3MW である。本論文では低圧配電系統の電力負荷は三相平衡を想定しているため、実際に推計したのは 720 世帯の三分の一にあたる 240 世帯であり、本章では 240 世帯の推計結果を 3 倍した数値を高低圧配電系統全体の系統負荷および電力需要調整能力とした。

表 4.2-1　可制御機器の制約条件と想定ケース

<table>
<tr><th>可制御機器</th><th>ポテンシャルケース</th><th>自動制御ケース</th><th>手動制御ケース</th></tr>
<tr><td>ヒートポンプ給湯機</td><td>居住者行為によらず稼働時間変更可能</td><td>居住者行為によらず稼働時間変更可能</td><td>居住者行為によらず稼働時間変更可能</td></tr>
<tr><td>洗濯機</td><td>居住者行為によらず稼働時間変更可能</td><td>午前または午後のいずれかで稼働可能</td><td rowspan="4">自動制御ケースに加え、起床・在宅者が存在する場合のみ稼働可能</td></tr>
<tr><td>衣類乾燥機</td><td>居住者行為によらず稼働時間変更可能</td><td>午前または午後のいずれか、かつ洗濯機稼働後でのみ稼働完了</td></tr>
<tr><td>炊飯器</td><td rowspan="3">居住者行為によらず稼働時間変更可能</td><td rowspan="3">次の食事時間までに稼働完了</td></tr>
<tr><td>食器洗い乾燥機</td></tr>
<tr><td>電気ポット</td></tr>
<tr><td>エアコン</td><td>温熱環境によらず運転モードの変更が可能</td><td>温熱環境に不満な場合、標準モードで運転</td><td>自動制御ケースに加え、起床・在宅者が存在する場合のみ変更可能</td></tr>
</table>

4.2.2　配電系統における電力需要調整能力の推計結果

図 4.2-1 は高低圧配電系統の中間期代表日（5 月 11 日）の電力需要および発電量の推計結果を示す。電力需要には集合住宅を含む 1,200 世帯の電力需要の合計である。中間期代表日における高低圧配電系統の電力需要は朝方および夕方以降で大きく、昼間の電力需要は小さい。6 時頃に電力需要のピークが発生しているがこれはヒートポンプ給湯機の電力需要によるものである。一方、発電量は昼間に多く発生するため、発電量が電力需要を超過し余剰電力が発生した。中間期代表日における最大余剰電力は 2.38MW であり 13:40 に発生した。

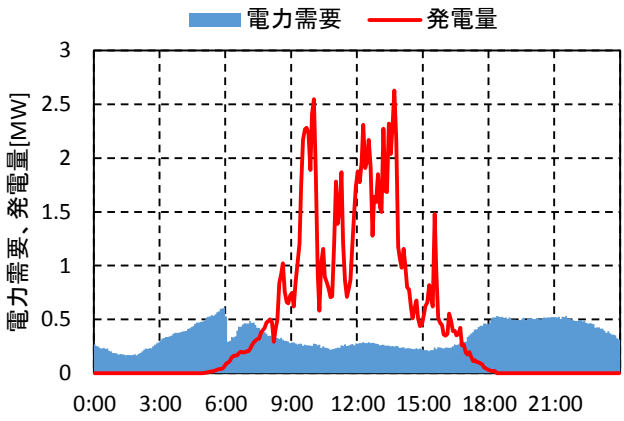


図 4.2-1　高低圧配電系統の電力需要および発電量（5 月 11 日）

図 4.2-2 は高低圧配電系統の中間期代表日（5 月 11 日）の電力需要調整能力の推計結果を示す。中間期代表日において洗濯機、衣類乾燥機、食器洗い乾燥機、炊飯器、電気ポット、ヒートポンプ給湯機の電力需要調整能力が得られた。ポテンシャルケースにおいては全時間帯で約 1.2MW の電力需要調整能力が得られた。特に電気ポットおよびヒートポンプ給湯機の電力需要調整能力が大きい。これは電気ポットの定格消費電力が大きくまた使用頻度が高いためである。またヒートポンプ給湯機については戸建住宅の半数に設置されており、基本的に毎日運転されるため、電力需要調整能力が大きい。一方、衣類乾燥機および食器洗い乾燥機の定格消費電力は大きいが電力需要調整能力は小さくなった。これは衣類乾燥機および食器洗い乾燥機の利用頻度が小さく、利用する世帯が少ないためである。自動制御ケースにおいては家電機器の電力需要調整能力が減少し、特に夜間の電力需要調整能力が少ない。これは家電機器の運用に関する制約条件により、洗濯機および衣類乾燥機は午前中または午後のどちらか一方に稼働時間が限定され、炊飯器、電気ポットは次の食事までに運転を完了する必要があるためである。ただし食器洗い乾燥機は夜間の使用頻度が高いため夜間において電力需要調整能力が得られた。自動制御ケースにおける電力需要調整能力は約 0.6MW であり、ポテンシャルケースのおよそ半分以下となった。手動制御ケースでは自動制御ケースからさらに夜間および昼間の電力需要調整能力が減少した。これは手動制御ケースでは住宅に起床在宅者がいる場合のみ制御が可能であるとしているためであり、夜間は居住者が就寝し、昼間は外出しているため電力需要調整能力が減少した。手動制御ケースにおける電力需要調整能力は約 0.5MW である。

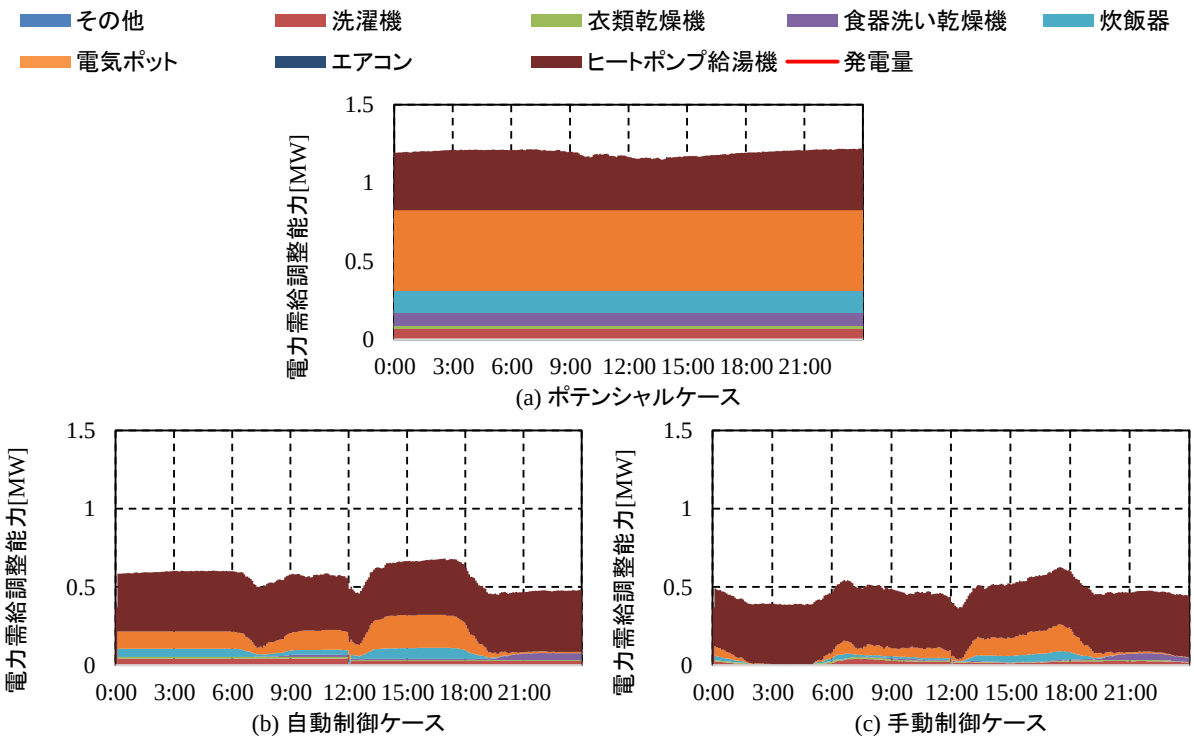


図 4.2-2　高低圧配電系統の電力需要調整能力（5 月 11 日）

図 4.2-3 は高低圧配電系統の夏期代表日（8 月 14 日）の電力需要および発電量の推計結果を示す。中間期代表日と比較して夏期代表日の電力需要は増加した。これはエアコンによる冷房を行っているためである。特に夜間の電力需要が大きく最大 0.9MW の電力需要が発生した。また昼間の電力需要も中間期代表日と比較して大きい。一方、夏期代表日は曇天日であるため発電量は少ない。このため高低圧配電系統全体で発生する余剰電力は最大 1.1MW と小さい。

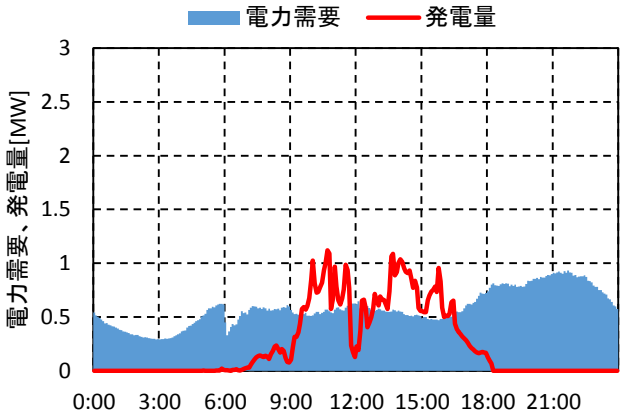


図 4.2-3　高低圧配電系統の電力需要および発電量（8 月 14 日）

図 4.2-4 は高低圧配電系統の夏期代表日（8 月 14 日）の電力需要調整能力の推計結果を示す。中間期代表日と同様にポテンシャルケースでは全時間帯で大きな電力需要調整能力が得られた。中間期代表日と比較して夏期代表日の電力需要調整能力は約 1.2MW に減少した。これは外気温の上昇によりヒートポンプ給湯機の電力需要が減少したことによる。エアコンによる電力需要調整能力は標準モードと省エネモードの電力需要の差で推計しており、最大 0.03MW と小さい。自動制御ケースにおける電力需要調整能力は約 0.4MW であり、中間期代表日と同様に家電機器の電力需要調整能力が減少し

た。手動制御ケースにおいても同様に夜間および昼間の電力需要調整能力が減少した。

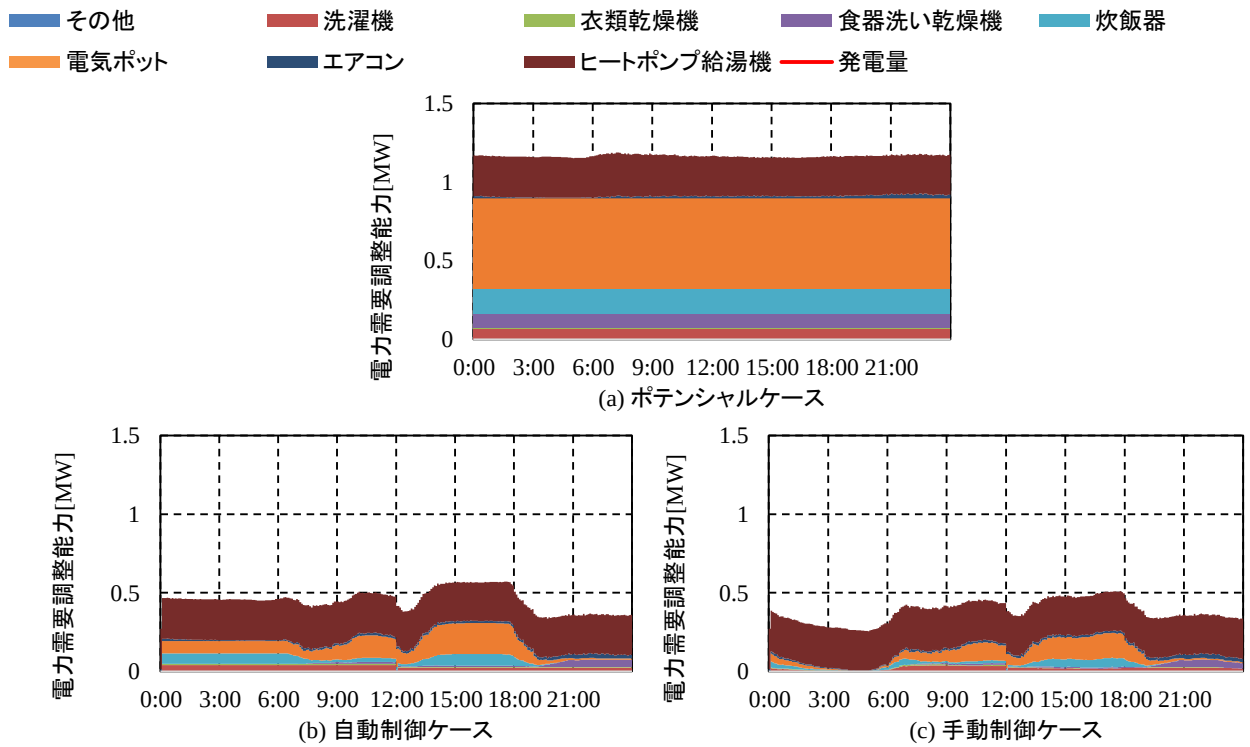


図 4.2-4　高低圧配電系統の電力需要調整能力（8 月 14 日）

4.3　配電系統における電力需要調整効果の評価

4.3.1　配電系統における電力需要調整効果の評価方法

本節では高圧配電系統における電力需要調整効果の評価方法を述べる。高圧配電系統における電力需要調整効果の評価指標として配電線電圧を考える。配電線電圧は 3.4.2 節で詳述したように、配電線電圧計算モデルにより時刻別配電線電圧および逸脱時の PV 抑制量を推計する。なお、全ての世帯において PV を導入する場合を想定して評価を行う。

各住宅における可制御機器の電力需要調整方法は 3.4.2 節に示す最適機器運用モデルにより、光熱費の最小化を目的関数として決定する。この際、可制御機器の制約条件が異なる 3 ケース（「ポテンシャルケース」、「自動制御ケース」、「手動制御ケース」）を想定し、制約条件が地域の電力需要調整能力に及ぼす影響を評価する。各ケースの想定条件は 4.2.1 節に示した。また各住宅の余剰電力の買取価格について、FIT の買取価格（31 円/kWh）と回避可能費用（9.74 円/kWh）とする場合に加え、図 4.3-1 に示すように電力需要調整を実施しない場合に電圧逸脱が発生する時間帯のみ買取価格を回避可能費用とする場合を考慮する。なお各住宅において需要家電圧が逸脱する時間帯は電力需要調整を行わない場合の電力需要および発電量を用い、あらかじめ配電線電圧を推計することにより算出する。これは余剰電力買取価格による電力需要調整指示を想定したものであり、この際、電力需要調整指示を各住宅の受電端電圧が適正範囲を逸脱する場合のみに限定して個別に指示する場合と、地域内のいずれかの住宅で逸脱する場合に全ての住宅に電力需要調整指示を実施する場合を考慮する。前者の個別に電力需要調整を行う場合は、受電端電圧が上昇しやすい配電線末端の住宅において電力需要調整指示が頻繁に行われるが、配電用変電所に近い住宅においては受電端電圧が適正範囲を逸脱する機会

が少ないため、電力需要調整指示の頻度が少ないことが予想される。一方、地域全体で余剰電力の抑制指示を行う場合、地域内の全ての戸建住宅において電力需要調整を行う頻度・タイミングは同じである。表 4.3-1 に想定シナリオをまとめる。余剰電力買取シナリオは住宅で発生する余剰電力を購入電力単価よりも高い単価で買取を行う場合を想定し、余剰電力抑制シナリオは余剰電力買取単価を購入電力単価よりも安い単価に設定することで余剰電力を抑制することを想定する。個別最適シナリオは HEMS 等の住宅内で完結するシステムによる制御を想定し、地域最適シナリオは地域全体で余剰電力の抑制指示を行い、CEMS による各住宅の協調制御を想定する。各シナリオを比較することにより、地域での効果的な電力需要調整方法を明らかにする。

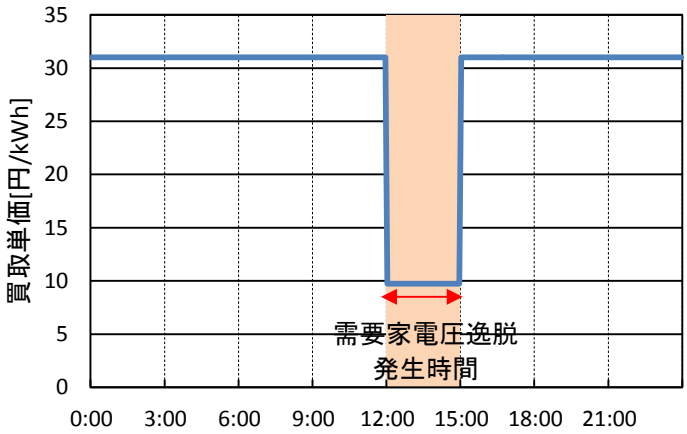


図 4.3-1　価格設定のイメージ

表 4.3-1　配電系統における電力需要調整の想定ケース

シナリオ名	通常時買取単価	逸脱時買取単価
余剰電力買取シナリオ	31 円/kWh	31 円/kWh
余剰電力抑制シナリオ	9.74 円/kWh	9.74 円/kWh
個別最適シナリオ	31 円/kWh	9.74 円/kWh （各住宅の受電端電圧が逸脱時に設定）
地域最適シナリオ	31 円/kWh	9.74 円/kWh （いずれかの住宅で逸脱時に全住宅で設定）

4.3.2　配電系統における電力需要調整効果の推計結果

図 4.3-2 は余剰電力買取シナリオにおける高低圧配電系統の中間期代表日（5 月 11 日）における電力需要調整結果を示す。電力単価の安価な深夜時間帯の電力需要が増加した。一方、PV が発電する昼間時間帯の電力需要に大きな差異はないが、ポテンシャルケース、自動制御ケース、手動制御ケース、ベースケースの順に余剰電力は大きい。

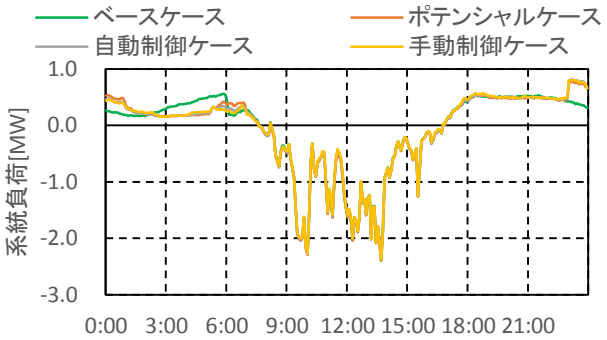


図 4.3-2　電力需要調整結果（5 月 11 日、余剰電力買取）

図 4.3-3 は余剰電力抑制シナリオにおける高低圧配電系統の中間期代表日（5 月 11 日）における電力需要調整結果を示す。深夜時間帯の電力需要が減少し、昼間の PV 余剰電力が減少した。これは余剰電力買取価格が深夜電力単価よりも安価であるため PV 発電量を自己消費するように電力需要調整が行われたためである。余剰電力の削減効果は制約条件の違いによりポテンシャルケース、自動制御ケース、手動制御ケースの順で大きい。

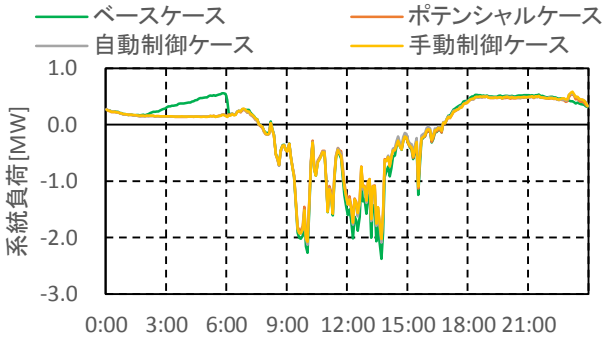


図 4.3-3　電力需要調整結果（5 月 11 日、余剰電力抑制）

図 4.3-4 は余剰電力買取シナリオにおける中間期代表日（5 月 11 日 13:40）におけるメインフィーダの高圧配電線電圧の推計結果を示す。最大電圧発生時間の高圧配電線電圧に大きな差異は発生せず、どのケースにおいても配電用変電所から離れた末端ノードほど高圧配電線電圧が上昇した。

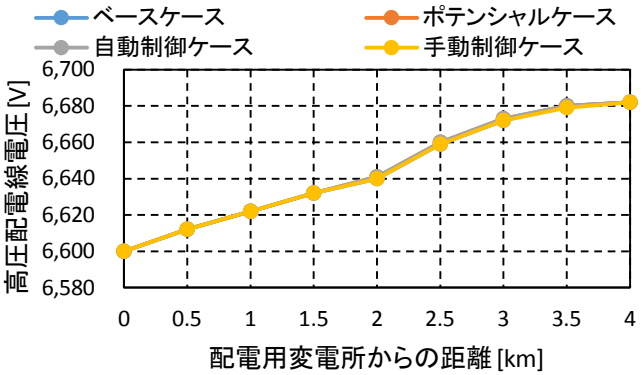


図 4.3-4　メインフィーダの配電線電圧推計結果（5 月 11 日、余剰電力買取）

図 4.3-5 は余剰電力抑制シナリオにおける中間期代表日（5 月 11 日 13:40）におけるメインフィーダの高圧配電線電圧の推計結果を示す。中間期代表日の最大電圧発生時間における高圧配電線電圧は電力需要調整により抑制された。末端ノードにおける高圧配電線電圧はベースケースで 6,682V であ

ったのに対し、ポテンシャルケースでは 6,664 V、自動制御ケースおよび手動制御ケースでは 6,668V であり、可制御機器の制約条件が厳しいほど配電線電圧の抑制効果は小さくなった。

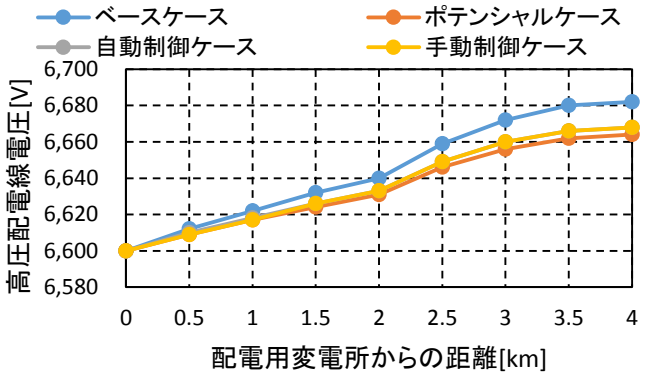


図 4.3-5　高圧配電線電圧推計結果（5 月 11 日、余剰電力抑制）

図 4.3-6 は余剰電力買取シナリオにおける年間 PV 抑制量の推計結果を示す。余剰電力買取シナリオでは電力需要調整により PV 抑制量は増加した。ベースケースにおいて PV 抑制量は 392MWh/年であり年間発電量の 11.9%を占めていたが、ポテンシャルケースでは 459MWh/年（13.9%）、自動制御ケースで 410MWh/年（12.4%）、手動制御ケースで 407MWh/年（12.3%）であった。これは PV 発電量を余剰電力として売電することにより光熱費を削減できるため、余剰電力が増加し配電線電圧も上昇したためである。ポテンシャルケースと自動制御ケースの差異が大きく、「稼働可能時間」、「温熱快適性」による影響が大きい。一方、自動制御ケースと手動制御ケースの差異は小さく「操作方法」の違いが及ぼす影響は小さい。

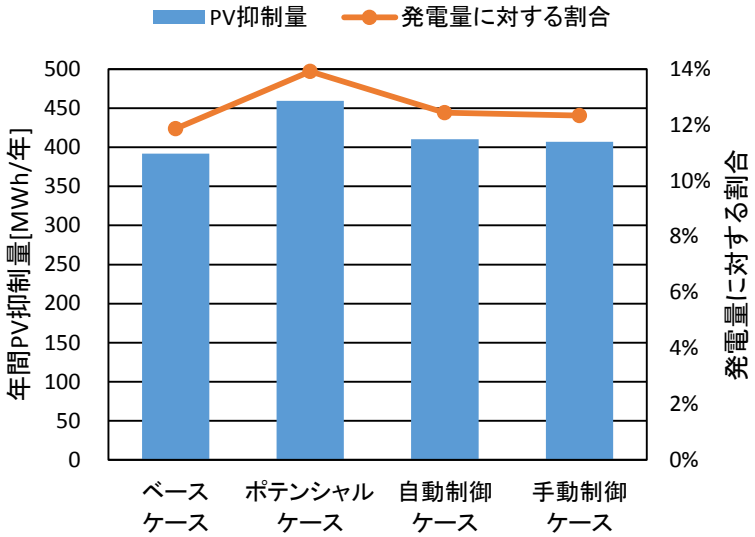


図 4.3-6　PV 抑制量推計結果（余剰電力買取）

図 4.3-7 は余剰電力抑制シナリオにおける年間 PV 抑制量の推計結果を示す。余剰電力抑制を目的とした電力需要調整により PV 抑制量は大幅に減少した。ポテンシャルケースでは 222MWh/年（6.7%）、自動制御ケースで 267MWh/年（8.1%）、手動制御ケースで 268MWh/年（8.1%）であった。これは余剰電力の抑制により配電線電圧が減少し適正範囲を逸脱する時間帯が減少したためである。ポテンシャルケースと自動制御ケースにおける差異が大きく、「稼働可能時間」や「温熱快適性」とい

た電力需要調整に関する居住者の許容性に関する制約条件の影響が大きく、HEMS 等による自動制御の効果は比較的小さいといえる。

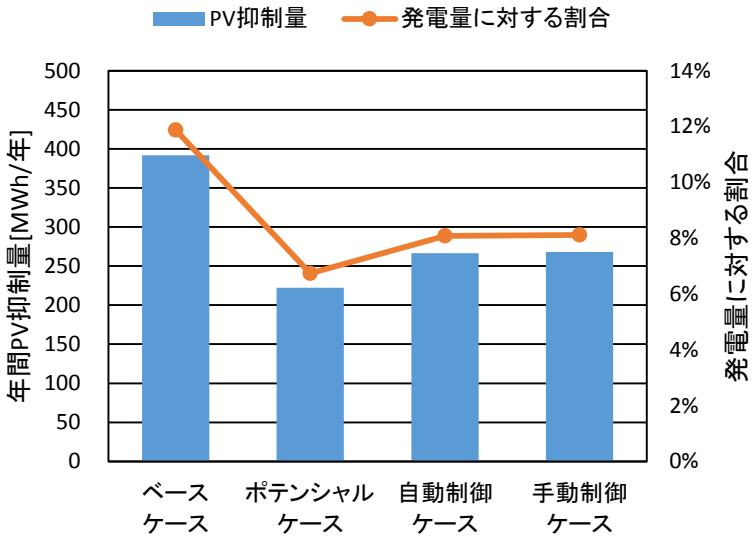


図 4.3-7　PV 抑制量推計結果（余剰電力抑制）

4.3.3　制御単位別電力需要調整効果の推計結果

図 4.3-8 は個別最適シナリオにおける高低圧配電系統の中間期代表日（5 月 11 日）における電力需要調整結果を示す。余剰電力抑制シナリオと同様に個別最適シナリオにおいても PV 発電時間帯の余剰電力が抑制された。しかし、個別最適シナリオでは 23:00 以降の系統負荷が増加した。これは余剰電力を抑制する時間帯および世帯が限定されるため、余剰電力の買取価格の低下の無い世帯では深夜電力時間帯に可制御機器の稼働時間が移行したためである。余剰電力抑制シナリオと比較して、PV 発電時間帯の余剰電力抑制効果は小さく、ベースケースにおいて大きな余剰電力が発生する時間帯に集中的に余剰電力抑制効果が得られた。

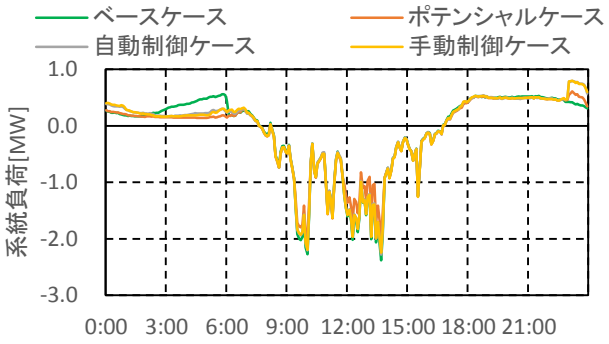


図 4.3-8　電力需要調整推計結果（5 月 11 日、個別最適）

図 4.3-9 は地域最適シナリオにおける高低圧配電系統の中間期代表日（5 月 11 日）における電力需要調整結果を示す。地域最適シナリオの中間期代表日においては PV 発電が得られる多くの時間帯で余剰電力の低減効果が得られた。特に余剰電力の大きい時間帯で需要家電圧の適正範囲逸脱が生じやすいため、当該時間帯の余剰電力抑制効果が大きい。適正範囲を逸脱する時間帯において全ての戸建住宅において電力需要調整による余剰電力抑制が行われるため、個別最適と比較して、余剰電力抑制

効果が大きい。またポテンシャルケース、自動制御ケース、手動制御ケースの順に余剰電力抑制効果は大きく、制約条件により余剰電力抑制効果が減少した。

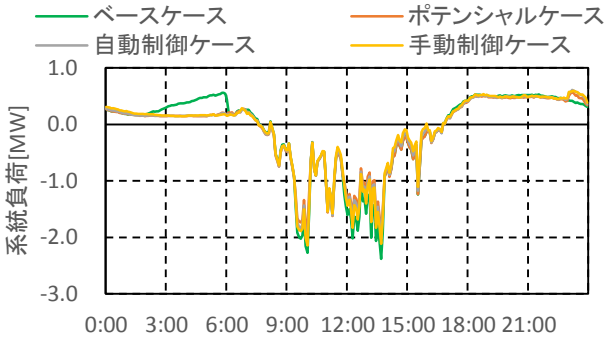


図 4.3-9　電力需要調整推計結果（5 月 11 日、地域最適）

図 4.3-10 は個別最適シナリオにおける中間期代表日（5 月 11 日 13:40）におけるメインフィーダの高圧配電線電圧の推計結果を示す。電力需要調整により高圧配電線電圧は抑制された。末端ノードにおける高圧配電線電圧はベースケースで 6,682V であったのに対し、ポテンシャルケースでは 6,675 V、自動制御ケースおよび手動制御ケースでは 6,677V であり、余剰電力抑制シナリオと比較して抑制効果は小さい。これは個別最適シナリオでは特に上流ノードに連系する世帯において配電線電圧が逸脱していない場合、余剰電力の抑制運転を行わず深夜電力時間帯への移行が行われるためである。

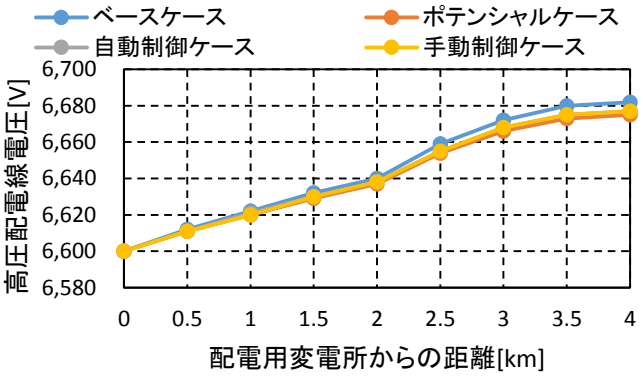


図 4.3-10　高圧配電線電圧推計結果（5 月 11 日、個別最適）

図 4.3-11 は地域最適シナリオにおける中間期代表日（5 月 11 日 13:40）におけるメインフィーダの高圧配電線電圧の推計結果を示す。地域最適シナリオでは全ての戸建住宅が余剰電力抑制に参加するため、高圧配電線電圧の抑制効果が大きい。末端ノードにおける高圧配電線電圧はポテンシャルケースでは 6,661 V、自動制御ケースでは 6,665V、手動制御ケースでは 6,670V であり、余剰電力抑制シナリオおよび個別最適シナリオよりも抑制効果が大きい。これは電力需要調整による余剰電力抑制を実施する時間帯を限定していること、および全戸建住宅が余剰電力抑制に参加しているためである。また制約条件の違いによる高圧配電線電圧の抑制効果に違いが生じた。

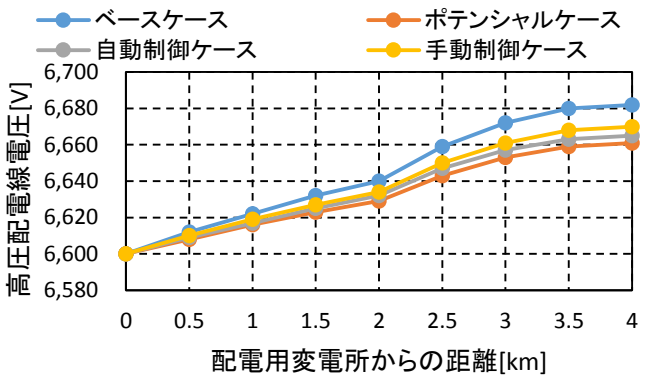


図 4.3-11　高圧配電線電圧推計結果（5 月 11 日、地域最適）

図 4.3-12 は個別最適シナリオおよび地域最適シナリオの PCS による年間 PV 抑制量の推計結果を示す。個別最適シナリオおよび地域最適シナリオにおいてベースケースから PV 抑制量は減少した。ベースケースにおいて PV 抑制量は 392MWh/年であり年間発電量の 11.9%を占めていたが、個別最適シナリオのポテンシャルケースでは 342MWh/年（10.4%）、自動制御ケースで 358MWh/年（10.9%）、手動制御ケースで 374MWh/年（11.3%）であり、余剰電力抑制シナリオより増加した。一方、地域最適シナリオにおいてはポテンシャルケースでは 222MWh/年（6.7%）、自動制御ケースで 239MWh/年（7.2%）、手動制御ケースで 270MWh/年（8.2%）であり、余剰電力抑制シナリオと同等の効果が得られた。

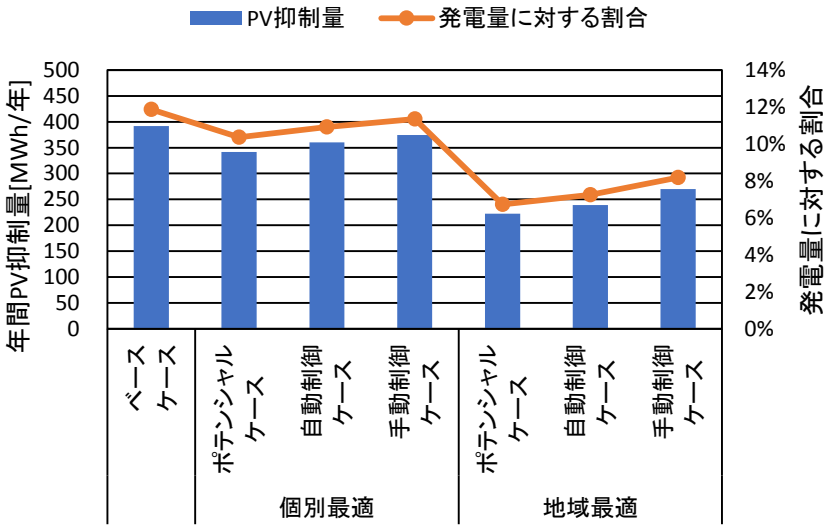
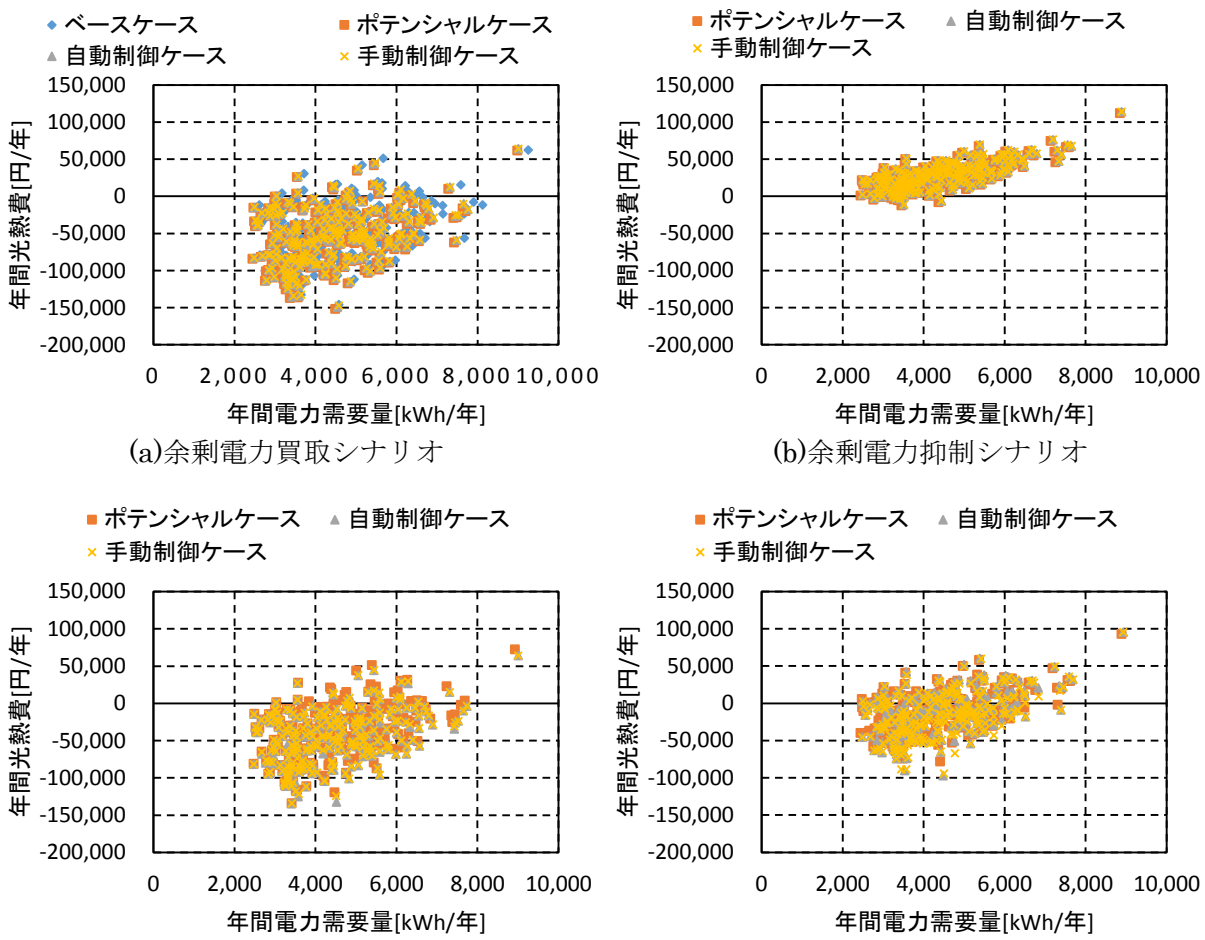


図 4.3-12　PV 抑制量推計結果（個別最適・地域最適）

図 4.3-13 は余剰電力買取、余剰電力抑制、個別最適、地域最適の各シナリオにおける光熱費推計結果を示す。余剰電力買取価格を 31 円/kWh とした場合のベースケースにおける平均光熱費は-48,940 円/年/世帯であった。余剰電力買取シナリオでは、手動制御ケースにおいて平均-52,207 円/年/世帯とベースケースより光熱費が減少した。一方、余剰電力抑制シナリオにおいては平均 28,600 円/年/世帯と大幅に悪化した。これは余剰電力買取価格の単価設定の違いである。個別最適シナリオにおいては、平均-44,430 円/年/世帯とベースケースと同等の光熱費となった。地域最適シナリオでは平均-15,996 円/年/世帯であり、ベースケースと比較して光熱費が増加したが、余剰電力抑制シナリオよりは小さくなった。



(a)余剰電力買取シナリオ　(b)余剰電力抑制シナリオ

(c)個別最適シナリオ　(d)地域最適シナリオ

図 4.3-13　光熱費推計結果

4.4　まとめ

本章では PV 大量導入における高低圧配電系統への影響の緩和策として、住宅における電力需要調整を想定し、高圧配電系統における電力需要調整能力および電力需要調整効果を評価した。本章における電力需要調整能力は高圧配電系統の戸建住宅に居住する 720 世帯の電力需要調整能力の合計値であり、高低圧配電系統全体で調整可能な電力の最大値を示す。一方、高低圧配電系統における電力需要調整効果として、配電線電圧の抑制効果および需要家電圧が適正範囲を逸脱した場合に PCS で発生する PV 抑制量の削減効果を想定する。

まず中間期代表日および夏期代表日を対象に電力需要調整能力を推計した。制約条件を考慮しない場合においては全時間帯を通して約 1.2MW の電力需要調整能力が得られることを明らかにした。一方、可制御機器の「稼働可能時間」の制約により特に夕食後の時間帯の電力需要調整能力が減少した。また手動制御のみを想定する場合においては居住者が就寝する深夜や外出する昼間の電力需要調整能力が減少した。中間期と夏期を比較すると夏期の電力需要調整能力が小さい。これは外気温上昇によるヒートポンプ給湯機の電力需要の減少によるものである。

次に電力需要調整効果を評価した。購入電力よりも高額での余剰電力買取を想定する場合、PV 発電時間帯の電力需要を抑制し余剰電力が増加した。また深夜電力時間帯の電力需要が増加した。このため PV 発電時間帯の高低圧配電線電圧は上昇し、需要家電圧の適正範囲を逸脱する時間帯が増加し

た。ベースケースにおいて PV 抑制量は年間発電量の 11.9%を占めていたが、可制御機器の操作により 13.9%に増加した。したがって余剰電力を高額で買取る場合、電力需要調整により PV 抑制量が増加し、有効に利用可能な PV 発電量が減少することが示された。なお「稼働可能時間」、「温熱快適性」による影響が大きく「操作方法」の違いが及ぼす影響は小さい。

一方、配電線電圧上昇問題への緩和策として、余剰電力抑制を目的に電力需要調整を実施した場合の効果を評価した。余剰電力抑制のため PV 発電時間帯の電力需要が増加し、余剰電力が抑制された。余剰電力の抑制に応じて、高低圧配電線電圧は減少し、PCS での PV 抑制時間帯が減少した。ただし、家電機器およびエアコン、ヒートポンプ給湯機による電力需要調整では全ての時間帯で需要家電圧を適正範囲内に維持することは難しく、PV 抑制量が発生した。余剰電力抑制により生じる PV 発電量に占める PCS での PV 抑制量の割合は、制約条件を考慮しない場合で 6.7%、HEMS による自動制御を想定する場合で 8.1%、手動操作を想定する場合で 8.1%であった。「稼働可能時間」や「温熱快適性」といった電力需要調整に関する居住者の許容性に関する制約条件の影響が大きく、HEMS 等による自動制御の効果は比較的小さいといえる。

最後に居住者の経済性損失を最小限に抑えるため、需要家電圧が逸脱する時間帯のみにおいて余剰電力を抑制する場合の電力需要調整効果を評価した。本論文では、各世帯において需要家電圧が逸脱した場合に当該住宅の余剰電力のみを抑制する場合では、余剰電力の抑制効果および高低圧配電線電圧の抑制効果が小さい。これは特に上流に連系する住宅では需要家電圧が適正範囲を逸脱していないため、余剰電力の抑制に参加しないためである。PV 発電量に占める PV 抑制量の割合は制約条件を考慮しない場合で 10.4%、HEMS による自動制御を想定する場合で 10.9%、手動操作を想定する場合で 11.3%であった。一方、全ての戸建住宅が余剰電力の抑制が必要な時間帯に集中して電力需要調整を実施する場合、余剰電力および高低圧配電線電圧の抑制効果が大きい。制約条件を考慮しない場合で 6.7%、HEMS による自動制御を想定する場合で 7.2%、手動操作を想定する場合で 8.2%であった。また余剰電力買取単価の変更を需要家電圧が逸脱する時間帯のみに限定することにより各住宅の光熱費の増加額が抑制された。

以上の結果より、配電系統おいても家電機器やエアコン、ヒートポンプ給湯機による電力需要調整が活用可能であり、電力需要調整により余剰電力を削減することで配電線電圧の上昇が抑えられ、PCS による PV 発電量の抑制量を削減することが可能であることを示した。また配電系統における電力需要調整方法としては需要家電圧逸脱時に逸脱した世帯のみで余剰電力の抑制を行うのではなく、配電系統全体で協調して余剰電力の抑制を行うことが望ましい。しかし光熱費の増加は依然存在するため電力需要調整を実施するためにはその他のインセンティブを付与する必要があると考えられる。

参考文献

1) 大嶺英太郎他：ヒートポンプ式給湯機と電力貯蔵装置を用いた太陽光発電余剰電力利用のための需要地系統運用手法，電気学会論文誌 B，133-7，2013，pp.631-641

2) A. Fazeli, et al.：Power Flow Control for Power and Voltage Management in Future Smart Energy Communities，3rd Renewable Power Generation Conference，2014

第５章　総括

5.1　総括ならびに結論

PV は地球温暖化防止対策技術の１つとして注目されており、固定価格買取制度をはじめとした政策により大規模な普及促進が図られているが、PV が大量に電力系統へ連系された場合、電力系統の安定性や家計負担の増大など悪影響を及ぼすことが懸念されている。PV の大量導入が及ぼす影響の緩和策の１つとして電力需要調整が注目されており、社会的費用最小化のためにもこれまで活用されていなかった住宅での電力需要調整を有効活用することが望ましい。本論文では、PV の大量導入に起因する電力系統への影響およびその対策として住宅における電力需要調整能力および効果を明らかにすることを目的に以下の評価を行った。

① PV 導入世帯の偏りによる、PV 大量導入に起因する電力系統に及ぼす影響の違いの評価
② 世帯の電力需要のばらつきおよび機器運用の制約を考慮した住宅地域における電力需要調整能力および電力需要調整効果の評価
③ 配電系統における住宅の可制御機器による電力需要調整能力および電力需要調整効果

各章で得られた知見および本論文の総括を以下に示す。

<u>第１章　緒論</u>

PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響について解説し、特に住宅地域における電圧上昇問題が PV の大量普及の障壁となることを示した。また需要家電圧を適正に維持するための住宅における電力需要調整に関する既往研究の課題について述べ、世帯間のばらつきや電力需要調整方法の違いを考慮した住宅地域における電力需要調整能力および配電線電圧への影響といった電力需要調整効果を定量的に評価することの必要性を明らかにした。

<u>第２章　太陽光発電大量導入が電力系統に及ぼす影響評価</u>

PV が電力系統に大量に導入された場合を想定し、電力系統に及ぼす影響として、「系統全体の余剰電力量」、「正味の負荷変動」、「配電線電圧」、「各世帯の余剰電力量」を評価した。

PV の大量導入が及ぼす影響の評価を行うためには PV の導入順位を決定する必要があるため、PV 導入による経済性が優れる世帯から導入されるものとし、各世帯における経済性である NPV を推計した。この際、PV の買取制度として PV の発電量のうち余剰電力のみを買取対象とする「余剰買取方式」と PV 発電量の全量を買取対象とする「全量買取方式」を想定した。余剰買取方式の場合、電力需要が少なく余剰電力の大きい世帯ほど NPV に優れるが、全量買取方式の場合、PV 発電量のみに NPV が依存するため、世帯による経済性の違いは少ないことが明らかとなった。

推計した NPV に応じて PV 導入順位を決定し、「系統全体の余剰電力量」、「負荷変動」および「各世帯の余剰電力量」を推計し、PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響を評価した。その結果、PV 大量導入により電力系統全体の余剰電力量および負荷変動が増大することが明らかとなり、電力系統全体の需給バランスのひっ迫や周波数調整容量の増強の必要性を示した。ただし、電力系統全体の余剰電力量および負荷変動は PV 導入量のみに依存し、PV の導入世帯の偏りが及ぼす影響は少ない。一方、各世帯の余剰電力量は PV 導入世帯の偏りによって異なることが明らかとなった。余剰買取方式では余剰電力の大きい世帯で NPV が大きくなるため、各世帯から発生する余剰電力量の合計値が全量買取方式よりも大きい。したがって余剰買取方式においては買取対象となる余剰電

力量が全量買取方式よりも多くなるため、買取費用を負担する需要家の負担額が増大することが懸念される。

「配電線電圧」の評価では、1,200 軒の住宅で構成される高低圧配電系統を想定し、PV の導入による配電線電圧に及ぼす影響を評価した。PV 導入量が大きいほど PV 発電時間帯の高低圧配電系統における配電線電圧は上昇し、PV 普及率が 40%以上の場合で需要家電圧の適正範囲を逸脱する世帯が発生した。すべての戸建住宅に PV を導入した場合、年間発電量の 11.9%が需要家電圧の逸脱により抑制されることが明らかとなり、PV 発電量の有効利用のためには余剰電力の削減による配電線電圧の調整が必要であると考えられる。一方、PV の普及世帯を高低圧配電系統の上流側または下流側に集中して配置した場合、平均的に分布させる場合と比較して PV 抑制量が増加した。特に下流側に集中して配置した場合で PV 抑制量が大きく増加した。このため、高低圧配電系統内に PV の地理的な偏りをなくすように PV 導入世帯の分布を検討することが望ましいことが明らかとなった。

第３章　住宅における電力需要調整能力および効果の評価

PV 大量導入に伴う電力系統への影響の緩和策の一つとして、住宅の可制御機器による電力需要調整を考え、住宅の可制御機器が持つ電力需要調整能力および電力需要調整効果の評価を行った。まず高低圧配電系統の戸建住宅に居住する 240 世帯について、各世帯の電力需要および発電量を推計した。電力需要および余剰電力量は家族構成・床面積、居住者のライフスタイル、導入する給湯器の種類等により大きくばらつき、年間余剰電力量が年間発電量に占める割合は 46%～87%であり、年間発電量のおよそ半分以上が逆潮流として配電系統に流入しており、配電線電圧の抑制のためには余剰電力量の削減が必要であることが明らかとなった。

次に電力需要調整能力を推計した。居住者の行動によらず可制御機器の運用が行うことができることを想定した場合、可制御機器の電力需要調整能力は 1 日を通して得られ、どの時間帯でも活用可能であった。居住者の行為に関する制約および居住者の快適性に関する制約を考慮した場合、例えば食器洗い乾燥機は朝食と昼食の間に稼働可能な時間が限定されるなど、電力需要調整能力が得られる時間帯が限られた。可制御機器の制御を居住者の手動操作のみとした場合、昼間に外出する機会が多い世帯では可制御機器の電力需要調整能力がさらに限定された。一方、日中に居住者のいずれかが在宅していることが多い世帯では特に日中において電力需要調整能力は自動制御を想定する場合と同等であった。

住宅における電力需要調整効果として各住宅の電力需要量、余剰電力量、光熱費を評価した。余剰電力買取価格が電力会社からの購入電力単価よりも高額である場合、可制御機器は PV 発電時間帯を避けて稼働する。特にヒートポンプ給湯機を搭載した住宅では深夜電力時間帯（23:00～7:00）に稼働が集中した。自動制御ケースおよび手動制御ケースにおいては可制御機器の運用上の制約条件により PV 発電時間帯に稼働する場合もあるが、概ね上記の通り PV 発電時間帯を避けて可制御機器が稼働し、余剰電力量は増加した。また電力需要の削減および余剰電力量の増加により年間光熱費は減少した。したがって現行余剰電力買取制度においてランニングコストの低減を目的に電力需要調整を実施すると余剰電力が増大することが示された。余剰電力の抑制を目的に電力需要調整を行った場合、PV 発電量を売電するよりも自己消費するほうが光熱費を削減することができるため、可制御機器は PV 発電時間帯に集中して稼働した。可制御機器の稼働可能時間に関する制約条

件を考慮した場合においても同様に可制御機器はPV発電時間帯に稼働した。一方、居住者による手動操作を想定した場合PV発電時間帯に在宅していないと可制御機器を稼働することができないためPV発電時間帯の稼働頻度が小さくなった。また家電機器による年間余剰電力削減効果は平均49kWh/年であり、ヒートポンプ給湯機による削減効果は平均645kWh/年であった。余剰電力抑制を目的とした場合、電力需要調整により電力需要量、余剰電力量を削減することができ、PV 大量導入による電力系統影響の緩和策として有効であると考えられる。ただし、現行の余剰電力買取制度と比較すると余剰電力買取単価の違いにより光熱費は平均8.1万円/年増加するため、電力需要調整に対するインセンティブを付与する必要があると考えられる。

第4章　高低圧配電系統における電力需要調整が配電系統に及ぼす影響の評価

PV 大量導入における高低圧配電系統への影響の緩和策として、住宅における電力需要調整を想定し、高圧配電系統における電力需要調整能力および電力需要調整効果を評価した。高圧配電系統における電力需要調整能力は、制約条件を考慮しない場合、全時間帯を通して約1.2MWの電力需要調整能力が得られることを明らかにした。一方、可制御機器の「稼働可能時間」の制約により特に夕食後の時間帯の電力需要調整能力が減少した。また居住者の手動操作を想定した場合、居住者が就寝する深夜や外出する昼間の電力需要調整能力が減少した。中間期と夏期を比較すると夏期の電力需要調整能力が小さい。これは夏期においては外気温上昇によるヒートポンプ給湯機の電力需要の減少によるものである。

現行の余剰電力買取制度下において電力需要調整を実施した場合、PV 発電時間帯の電力需要を抑制し余剰電力が増加した。また深夜電力時間帯の電力需要が増加した。このためPV発電時間帯の高低圧配電線電圧は上昇し、需要家電圧の適正範囲を逸脱する時間帯が増加した。ベースケースにおいてPV抑制量は年間発電量の11.9%を占めていたが、電力需要調整により約1.7%増加した。したがって余剰電力買取制度においては電力需要調整によりPV抑制量が増加し、有効に利用可能なPV発電量が減少することが示された。

余剰電力抑制を目的に電力需要調整を実施した場合、PV 発電時間帯の電力需要が増加し、余剰電力が抑制された。余剰電力の抑制に応じて、高低圧配電線電圧は減少し、PCSでのPV抑制時間帯が減少した。ただし、家電機器およびエアコン、ヒートポンプ給湯機による電力需要調整では全ての時間帯で配電線電圧を適正範囲内に維持することは難しく、PV抑制量が発生する。PV発電量に占めるPV抑制量の割合は約4.0%減少した。なお「稼働可能時間」、「温熱快適性」を考慮した場合、PV発電量に占めるPV抑制量の割合は1.2%増加し、その影響は大きいが「操作方法」が及ぼす影響は0.5%の増加に留まり操作方法の影響は小さい。

居住者の経済性損失を最小限に抑えるため、配電線電圧が逸脱する時間帯のみにおいて余剰電力を抑制することを想定し電力需要調整効果を評価した。本論文では、各世帯において配電線電圧が逸脱した場合に当該住宅のみ余剰電力を抑制する場合と、地域内のいずれかの住宅において配電線電圧の逸脱が生じた場合に高低圧配電系統全体の余剰電力を抑制する場合を想定した。その結果、当該住宅のみで余剰電力抑制を行った場合、余剰電力の抑制効果および高低圧配電線電圧の抑制効果が小さい。これは特に上流に連系する住宅では電圧が適正範囲を逸脱していないため、余剰電力の抑制に参加しないことが理由である。一方、全ての戸建住宅において余剰電力の抑制が必要な時間帯のみに電力需要調整を実施する場合、余剰電力および高低圧配電線電圧の抑制効果が大きい。

PV 発電量に占める PV 抑制量の割合は前者において約 1.0%の削減に留まったが後者では約 4.7%削減された。前者は HEMS 等の住宅内で完結するシステムによる制御を想定し、後者は CEMS 等の広範囲の情報を取得可能なシステムによる制御を想定しており、高低圧配電系統における PV 抑制量の削減のためには地域全体での配電線電圧を把握した制御が望ましい。また可制御機器の制約条件を考慮した場合、全時間帯で余剰電力を抑制する場合よりと PV 抑制量の減少効果が同等であるため、光熱費の抑制の観点から余剰電力の抑制を必要な時間帯のみに限定することが望ましい。

総括

本論文では今後予想される PV の大量導入について、電力系統に及ぼす影響および電力需要調整による電力系統影響の緩和効果について検討を行った。まず PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響について、電力需給バランス、周波数変動および再生可能エネルギー促進賦課金は PV 導入量の増加に伴ってその影響が大きくなることが明らかとなった。ただし、電力需給バランス、周波数変動については PV 導入世帯の分布の影響は小さいことが分かった。一方、再生可能エネルギー促進賦課金については PV の導入世帯に偏りが生じる場合において、平均的に導入される場合と比較して再生可能エネルギー促進賦課金が大きくなる可能性があり、買取費用を負担する需要家の負担額が増大が懸念される。したがって、再生可能エネルギー促進賦課金の抑制のためには、世帯間で経済的メリットの違いを生まず、平均的に PV の導入が促進される普及促進策が望ましい。配電系統においては PV 導入量の増加に伴い、配電線電圧が上昇し、PV 発電量の一部が有効に活用できないことが明らかとなった。また特に配電系統の下流側に PV が偏在する場合、配電線電圧の上昇に伴って発生する PV 抑制量が増加するため、高低圧配電系統内に PV の地理的な偏りをなくすように PV 導入世帯の分布を検討することが望ましい。

電力系統に及ぼす影響の緩和策として住宅における家電機器やエアコン、ヒートポンプ給湯機による電力需要調整が活用できることを示し、特にヒートポンプ給湯機による余剰電力削減効果が大きいことを示した。家電機器による電力需要調整効果は「稼働可能時間」および「温熱快適性」といった制約条件により限定されることが明らかとなった。「稼働可能時間」および「温熱快適性」による電力需要調整効果に及ぼす影響が大きく約 13%の電力需要調整効果が有効に活用できない。一方、「操作方法」が電力需要調整効果に及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。

配電系統おいても家電機器やエアコン、ヒートポンプ給湯機による電力需要調整が活用可能であり、電力需要調整により余剰電力を削減することで配電線電圧の上昇が抑えられ、PCS による PV 発電量の抑制量を削減することが可能であることを示した。また配電系統における電力需要調整方法として、需要家電圧逸脱時に逸脱した世帯のみで余剰電力の抑制を行うのではなく、配電系統全体で協調して余剰電力の抑制を行うことで､効率的に PV 抑制量の削減が可能であることを示した。したがって、配電系統における配電線電圧の適正維持のためには CEMS に代表されるような地域内の情報を統合して制御を行うことができるシステムが有効である。

5.2　論文の課題と発展

以下にカテゴリーごとの課題と今後の発展について述べる。

（1）シミュレーション手法の課題と発展

・電力系統における影響の評価

本論文では PV の大量導入が電力系統に及ぼす影響の評価において大阪府の民生家庭部門を対象とした。本来、電力系統の評価を行うためには電力系統内の全電力需要を対象に行う必要があり、民生家庭部門のほか、民生業務部門、産業部門の電力需要および各部門に連系される再生可能エネルギーを含めた評価とすることが望ましい。民生家庭部門のみを対象としているため、昼間の電力需要が大きい民生業務部門や産業部門を含めていないため、電力系統全体での余剰電力は過剰評価となっている可能性がある。また電力系統の需給バランスの評価においては PV の連系量が増大することにより電力の発電構成が変化することが予想される。また周波数変動の増大により周波数調整用火力発電の割合が増加することも懸念され、PV の導入効果を把握するためには電力系統側の評価を同時に行う必要がある。需要側と供給側の連携した評価を行うことにより、再生可能エネルギー導入によるメリットおよびデメリットを正確に把握することができ、今後の電源構成や再生可能エネルギー導入目標の策定に活かすことができると考えられる。

また PV の導入意思決定には世帯の経済状況、新築・既築の別、日照条件、周囲の導入状況など様々な要因が考えられるが、本論文では PV の導入順位を PV 導入世帯の経済性のみに依存するものとした。したがって本論文で評価した余剰電力買取制度による余剰電力量および買取費用の増加量は最不利の試算となっていることに留意する必要がある。ただし、PV 導入意思決定において PV 経済性が大きな要因の１つであることは明らかであるため、余剰電力買取制度と全量買取制度を比較した場合、余剰電力買取制度において余剰電力量および買取費用が増加する傾向にあるといえる。より詳細な評価のためには複数の PV 導入要因を考慮した普及シナリオとの組み合わせ評価が必要である。

・住宅における電力需要・発電量の推計

本論文では住宅の電力需要および発電量をシミュレーションにより推計した。シミュレーション精度の信頼性については既往文献[1)]において確認しているが、実際の電力需要は本論文の試算結果よりもさらに多様であると考えられ、特に配電系統など特定規模の需要家を対象とする場合にはさらなる精度向上が必要であると考えられる。また本論文では PV の発電量を１地点の気象データを用いて複数の住宅に適用した。各住宅の日射量の違いや隣棟や雲による影の影響も考慮できていない。実際の発電量は各地点において雲による影の影響の発生時間や影響度合いが異なるため、地域全体の発電量としてみた場合、上記の影響が平均化される。したがって１地点の気象データのみを用いた本論文の負荷変動や余剰電力は一部の時間帯に集中して発生している可能性があり、負荷変動の増大や配電線電圧が過大に評価されている可能性がある。各住宅における日射量や雲の影響の違いを考慮した PV 発電量の推計方法の確立が必要である。

・可制御機器の運用方法の決定手法

可制御機器の運用方法は混合整数線形計画法により算出した。本手法により目的関数を最小化または最大化する可制御機器の運用方法を決定することができる。ただし、制約条件や入力条件により混

合整数線形計画法では局所解に陥る懸念もあるため、非線形計画法や遺伝アルゴリズムなど他の最適化手法の適用可能性の検討が必要である。また本論文では居住者が在宅している場合に必ず可制御機器の操作が可能であるとしたが、居住者の行為状態等により可制御機器の操作が困難であったり操作までに時間がかかったりする場合が想定され、本論文における手動操作を想定した電力需要調整効果よりも実際に得られる効果は減少する可能性がある。居住者の手動操作による電力需要調整効果の評価のためには居住者の可制御機器に対する反応を考慮した評価が必要である。

（2）住宅における電力需要調整の課題と発展

本論文では既に住宅に導入されている家電機器やヒートポンプ給湯機を対象として電力需要調整の評価を行ったが、燃料電池や電気ガス併用型の給湯器など給湯器の種類は多様化しており、蓄電池や電気自動車が導入されている住宅が増加している。これら設備による電力需要調整能力および効果を把握することが必要である。また本論文では将来の電力需要、発電量を既知の情報として可制御機器の最適化を行った。本来電力需要調整は電力需要、発電量、配電線電圧の予測情報に基づいて行うため、実際に得られる電力需要調整効果は予測精度によって減少する可能性がある。また本論文では電力需要側での電力需要調整のみを対象としたが、電力系統側での対策も可能であり、社会的費用最小化のため、電力供給側と電力需要側の対策を連携して実施する場合を想定した評価が必要である。最後に本論文では余剰電力の抑制を余剰電力買取価格を低減する手法により実施した。これにより余剰電力および PV 抑制量を減少することが可能であることを示したが、各住宅の光熱費の増加が避けられない。このため余剰電力抑制を目的とした電力需要調整を実施するためには別に何らかのインセンティブを与える必要がある。

参考文献

[1] 下田吉之他：家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測，エネルギー・資源，30-3，2009

謝辞

本論文は著者の大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻における研究の成果をまとめたものである。

本研究を進めるにあたり、大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻　下田吉之教授、山口容平准教授には、終始懇切丁寧なご指導、有益なご助言を賜ると共に、数々の激励のお言葉を頂きました。下田吉之教授には、研究会議など折に触れて、研究方針などの有益なご助言を賜りました。同教授のご指導がなければ、本論文を体系的にバランスよくまとめることは困難であったと考えます。山口容平准教授には研究の着手から完了まで直接指導していただき、終始一貫して懇切丁寧なご指導を賜りました。学術的な価値を見出す重要性をご教示いただき、研究のレベルを昇華させることができたのはその適切なるご指導によるところが非常に大きいと考えます。改めて厚く御礼申し上げます。

また、大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻　東海明宏教授、大阪大学工学研究科電気電子情報工学専攻　杉原英治准教授には本論文をまとめるに当たり多くの貴重なご意見を賜りました。ここに感謝申し上げます。

大和ハウス工業株式会社の大槻卓也様、七岡寛様には、業務に少なからず影響する研究活動に対して寛大なご理解と多大なご支援を賜り、社会人として業務を継続しながら研究活動を続けることができました。ここに厚く御礼申し上げます。

共同研究者である大阪大学下田研究室（当時）の岡村朋様、松田しおり様、草清和明様、東野正和様には、シミュレーションプログラムの作成やデータ解析などあらゆる面でご協力を頂きました。以上の皆様に対し、深く感謝の意を表します。

最後に、著者の博士後期課程進学に賛同し、卒業まで応援して下さった祖父母、両親、妻に対し、心より感謝いたします。

2017 年 7 月　藤本　卓也