



世帯の電力需要関数の推定： デマンドレスポンス実験を用いた実証分析

田中, 拓朗

(Degree)

博士 (経済学)

(Date of Degree)

2016-03-25

(Date of Publication)

2019-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6585号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006585>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

平成 27 年 12 月

神戸大学大学院経済学研究科

経済学専攻

指導教員 柳川 隆

田中 拓朗

博 士 論 文

世帯の電力需要関数の推定：
デマンドレスポンス実験を用いた実証分析

平成 27 年 12 月

神戸大学大学院経済学研究科

経済学専攻

指導教員 柳川 隆

田中 拓朗

世帯の電力需要関数の推定：
デマンドレスポンス実験を用いた実証分析

目次

序章.....	1
第1章 デマンドレスポンスについて.....	5
1 電力の安定供給に対する関心の高まり.....	5
2 デマンドレスポンスとは.....	6
2.1 本稿におけるデマンドレスポンスの定義.....	6
2.2 代表的なデマンドレスポンス.....	7
2.2.1 価格誘導型デマンドレスポンス.....	7
2.2.2 インセンティブ型デマンドレスポンス.....	9
2.2.3 非価格型デマンドレスポンス.....	10
3 デマンドレスポンスの実行可能性.....	10
3.1 デマンドレスポンス導入のメリット.....	10
3.2 デマンドレスポンス導入の課題.....	12
第2章 デマンドレスポンスの節電効果に関する実証分析.....	17
1 はじめに.....	17
2 データ.....	19
2.1 大規模デマンドレスポンス実験について.....	19
2.2 分析に使用する変数.....	20
3 分析方法.....	22
4 推定結果.....	24
5 シミュレーション結果.....	26

6	おわりに.....	29
第3章	デマンドレスポンスの節電効果の持続性に関する分析.....	44
1	はじめに.....	44
2	先行研究.....	46
2.1	持続的な節電効果に関する実証研究.....	47
2.2	電力消費の非効率性に関する先行研究.....	47
3	データ.....	48
3.1	大規模デマンドレスポンス実験について.....	48
3.2	使用する変数について.....	49
4	分析方法.....	50
4.1	電力需要関数の理論的背景.....	50
4.2	推定モデル.....	50
5	推定結果.....	54
5.1	需要関数の推定.....	54
5.2	非効率性の推定.....	55
5.3	非効率性改善の要因：節電行動と省エネ家電の影響.....	56
6	おわりに.....	58
第4章	非効率的な電力消費行動を考慮した電力需要関数の推定.....	68
1	はじめに.....	68
2	先行研究.....	70
2.1	デマンドレスポンスに関する先行研究.....	70
2.2	非効率性を考慮した電力需要関数に関する先行研究.....	71
3	分析方法.....	71
3.1	電力需要関数の理論的背景.....	71

3.2 推定モデル.....	72
3.3 個人の異質性と非効率性の関係.....	75
4 実験内容・データ.....	76
4.1 実験内容.....	76
4.2 データ.....	78
5 推定結果.....	78
5.1 需要関数の推定結果.....	78
5.2 電力消費の非効率性.....	80
6 おわりに.....	81
結章.....	89
1 本論の結論.....	89
2 今後の課題.....	91
参考文献.....	93
参考資料.....	99

図表一覧

【図】

図 1.1	代表的な価格誘導型デマンドレスポンスの例.....	14
図 1.2	インセンティブベースのデマンドレスポンスの例.....	15
図 1.3	メリットオーダーの例.....	16
図 3.1	時間を通じた非効率性の変化.....	67
図 4.1	非効率的な電力消費行動を考慮した電力需要関数.....	88
図 4.2	デマンドレスポンス別非効率性の推定値.....	88

【表】

表 2.1	主な先行研究.....	31
表 2.2	記述統計.....	33
表 2.3	グループ別記述統計.....	34
表 2.4	DR_{peak} , DR_{pos} , DR_{pos} の定義.....	35
表 2.5	推定結果.....	36
表 2.6	気温, 所得, 昼間在宅者数の変動による DR の節電効果の違い.....	41
表 2.7	シナリオ別 DR 節電効果.....	42
表 2.8	シナリオ別 DR の純節電効果.....	43
表 3.1	使用する変数の説明.....	60
表 3.2	記述統計.....	61
表 3.3	グループ別記述統計.....	62
表 3.4	デマンドレスポンスによる非効率的な電力消費の持続的な改善効果...	63
表 3.5	非効率性の記述統計.....	64
表 3.6	デマンドレスポンス実験後の買い替え行動に関する推定結果.....	65
表 3.7	買い替え行動を考慮した非効率的な電力消費の持続的な改善効果.....	66
表 4.1	分析に使用する変数のリスト.....	83
表 4.2	記述統計.....	84
表 4.3	グループ別記述統計.....	85
表 4.4	需要関数の推定結果.....	86

序章

近年、我が国では電力の安定供給に対する関心が高まっている。2011年3月11日に起きた東日本大震災や福島原子力発電所の停止は、我が国の電力会社の供給能力を大幅に低下させた。東京電力管内においては、同年3月14日から18日にかけて計画停電が実施され、自家発電を所有していない病院は手術を行うことができず、また交通道路では信号機の停止による交通事故も発生していた¹。更には、メッキ工場などでは、長時間の電力供給が必要となる作業ができなくなるなど、我が国の社会経済は大きな損害を受けた。

同年夏においても、東日本大震災から甚大な被害を受けた東京電力と東北電力は、電力需要に対して十分な電力供給力を確保できず、再び電力不足問題に直面することとなった。このような事態を重く見た政府は、「電力使用制限令」を発令し、2011年7月1日から9月22日の8時から20時の間、東京電力管内と東北電力管内の大口需要家に対して電力需要を約15%（前年比）削減することを命じた²。更には福島原子力発電所以外の国内の他の原子力発電所も次第に停止したこともあり、東京電力以外の電力会社も電力需要に対する供給力の確保が急務となっていた。

しかしながら、各電力会社の供給力不足は、同年の冬を迎えても解決されないままであった。そのため、経済産業省は同年11月1日に冬季の節電目標値を発表し、各電力会社は電力の需給対策に追われることとなった。

こうした電力不足の経験もあってか、我が国ではデマンドレスポンスを用いた需給調整が注目されるようになった³。一般に、デマンドレスポンスとは、電力需要に対する供給が不足する時に、何らかの方法を用いて電力需要を抑制するものである。したがって、我が国で実施された電力使用制限令や法的強制力を伴わない節電要請もデマンドレスポンスの1つと言えよう。

¹ 東北電力管内においても計画停電は予定されていたが、当面の電力供給に不安はないとの判断により、実施が見送られた。

² 病院、鉄道といった公共性の高い施設は例外的に制限が緩和されていた。

³ デマンドレスポンスに関する詳しい説明は次章で行う。

デマンドレスポンスの需要抑制効果については、学术界においても多くの議論がなされている。特に、我が国の電力市場よりも自由化が進んでいる米国⁴では、これまでに様々な種類のデマンドレスポンスが実験されている。それらの実験データを用いた実証分析の蓄積も進んでおり⁵、多くの先行研究ではデマンドレスポンスの節電効果が確認されている。こうした背景もあり、我が国においてもデマンドレスポンスの今後の普及が期待されている。

しかしながら、我が国においてデマンドレスポンスを本格的に導入するためには、解決すべき課題も幾つか存在する⁶。本論は、その中から次の3つの課題に注目して分析する。第1に、世帯の異質性がデマンドレスポンスの節電効果に与える影響について、より詳細に分析することである。どのような世帯がデマンドレスポンスに対して効果的に反応するのかを理解することは、デマンドレスポンスの制度設計を考える上で重要であろう。しかしながら、データの制約もあってか、これまでの先行研究では世帯の異質性がデマンドレスポンスの節電効果に与える影響について詳しく分析されてこなかった。多くの先行研究では、所得や平均電力使用量の違いがデマンドレスポンスの節電効果に与える影響を分析するに留まっているが、保有家電数や世帯人数などもデマンドレスポンスの節電効果に影響を与える可能性も考えられる。したがって、今後はより詳細な世帯属性に関する情報を用いた分析が必要であると考えている。この点については第2章で分析する。

第2に、デマンドレスポンスによる持続的な節電効果に注目した分析である。デマンドレスポンスによる節電効果が持続的に継続する可能性があることは容易に想像できる。例えば、世帯がデマンドレスポンスを経験することによってこれまで以上に節電に関心を持つようになり、効率的な電力消費に関する知識が蓄積されていくことで、電力消費行動を変化させるかもしれない。また、こうした節電に関する知識の蓄積や行動の変化だけではなく、世帯は保有する家電を省エネ性の高い製品に買い替えることによって節電することも考えられる。

⁴ 米国は州や地域レベルで電力システムを構築しているため、全ての州で電力自由化が行われているわけではない。

⁵ 先行研究については、第2章以降の分析で適宜紹介している。

⁶ ここで取り上げる3つの課題は、潜在的に削減可能な電力消費量に関するものである。したがって、ここで取り上げたもの以外にも、解決すべき課題があることに留意する必要がある（その他のデマンドレスポンスの導入課題については第1章で紹介する）。

ところが多くの先行研究では、こうした持続的な節電効果が考慮されず、短期的な節電効果にのみ注目した研究が多い。デマンドレスポンスの持続的な節電効果を考慮しないで短期的な節電効果にのみ注目して分析すると、デマンドレスポンスの節電効果が過少に評価されてしまう。したがって、デマンドレスポンスの節電効果を分析する際には、短期的な節電効果だけではなく、持続的な節電効果にも注目した長期的な分析が必要であろう。この点については第3章で分析する。

第3に、非効率的な電力消費を考慮した電力需要関数を推定することである。幾つかのデマンドレスポンスの実験結果の中には、デマンドレスポンスが行われても電力消費を抑制できなかった世帯がいることに気づく。節電できなかった要因として、こうした世帯は普段から効率的に電力を消費しており、そもそも削減の余地がなかったためではないかと考えられる。したがってデマンドレスポンスの節電効果を考える上でも、電力消費の非効率性がどの程度なのかを明らかにすることは、実務・学術の両面において重要な課題である。加えて、International Energy Agency (IEA) や Energy Information Administration (EIA) が非効率的な電力消費の改善を今後解決すべき課題の1つとして考えていることから分かる通り、電力消費の非効率性がどの程度なのかを明らかにすることは重要であろう⁷。この点については、第3章、第4章の分析で扱う。

本論は、2012年7月23日から9月28日の間にけいはんな地域⁸で行われたデマンドレスポンス大規模社会実験のデータを使用し、世帯レベルのデマンドレスポンスについて分析する。本実験はスマート設備やデマンドレスポンスの導入による節電の可能性を検証するために、経済産業省が主体となって進めている「次世代エネルギー・社会システム実証」の一つである。

本論の構成は以下の通りである。第1章では、デマンドレスポンスの概要を紹介し、その導入可能性について述べる。デマンドレスポンスに関する議論では、多くの専門用語が使用されている。こうした専門用語を正しく理解することは、デマンドレスポンスの節電効果や制度を議論する上で重要な第1ステップである。また、デマンドレスポンスを実際に導入するために解決すべき課題を明らかにして

⁷ 例えば、IEA (2009) を参照のこと。

⁸ けいはんな地域とは京都府、大阪府、奈良県にまたがる地域のことであり、本分析では京田辺市、木津川市、精華市が分析対象地域となっている。

おく必要がある。以上の理由から、第 1 章ではデマンドレスポンスの定義や種類、メリット、今後の普及のための課題についてまとめておく。

第 2 章では、世帯属性の異質性や気温の変化が、デマンドレスポンスの節電効果に与える影響について分析する。具体的には、I. 詳細な世帯属性のデータを用いてデマンドレスポンスの節電効果を推定し、II. その推定結果を用いて、様々な状況におけるデマンドレスポンスの節電効果のシミュレーションを行っている。詳細な世帯属性として、本研究では所得、世帯人数、昼間在宅者数、エアコン保有台数、冷蔵庫保有台数を考えている。また、注目するデマンドレスポンスのタイプとして、節電要請、TOU、CPP⁹を取り上げている。

第 3 章では、世帯の非効率的な電力消費¹⁰の存在を考慮し、I. デマンドレスポンスの（非効率的な電力消費の改善を通じた）持続的な節電効果を分析するとともに、II. 非効率的な電力消費の時間を通じた推移についても分析する。具体的な分析方法は、Filippini and Hunt (2011, 2012) で提案されている確率的フロンティアモデルを用いた電力需要関数の推定方法を応用し、デマンドレスポンスが電力消費の非効率性に与えた長期的な影響を推定する。

第 4 章では、非効率的な電力消費を考慮した電力需要関数を推定するとともに、デマンドレスポンスによって非効率的な電力消費がどのように変化するかを分析する。具体的には、第 3 章と同様に確率的フロンティアモデルを応用し、非効率的な電力消費と価格の関係を考慮した電力需要関数の推定を行う。その際、世帯の電力消費に対する観測不可能な選好の異質性に注意した分析を行う。ここで、世帯の電力消費に対する観測不可能な選好の例として、「暑がりである人が多い世帯が夏場にエアコンを多く使用するような選好」がある。こうした選好の違いによる電力消費を非効率的であると見ることも可能ではあるが、その世帯にとっては効率的な電力消費であるとも言える。そこで第 4 章では、Greene (2005a, 2005b) で提案された True Random Effect Model を用いることで、このような選好をコントロールした電力消費の非効率性を推定する。

最後に、本研究で得られた結果と今後の課題を結章でまとめる。

⁹ TOU とは Time of Use の略であり、CPP は Critical Peak Pricing の略である。詳しくは第 1 章で説明する。

¹⁰詳しくは、第 3 章で説明する。

第 1 章

デマンドレスポンスについて

1. 電力の安定供給に対する関心の高まり

2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災や福島原子力発電所の停止は、我が国の電力会社の供給能力を大幅に低下させた。東京電力管内においては、同年 3 月 14 日から 18 日にかけて計画停電が実施され¹、自家発電を所有していない病院は手術を行うことができず、また、交通道路では信号機の停止による交通事故も発生していた。更には、メッキ工場などでは、長時間の電力供給が必要となる作業ができなくなるなど、我が国の社会経済は大きな損害を受けた。

同年夏においても、東日本大震災から甚大な被害を受けた東京電力と東北電力は、電力需要に対して十分な電力供給力を確保できず、再び電力不足問題に直面することとなった。この時、東北電力管内では、8 月の想定需要 1300 万-1380 万 kW に対して、最大供給量が 1230 万 kW であり²、東京電力管内では、7 月の想定需要が 5500 万-5620 万 kW に対して最大供給量 5520 万 kW であった³。このような事態を重く見た政府は、「電力使用制限令」を発令し、2011 年 7 月 1 日から 9 月 22 日の 8 時から 20 時の間、東京電力管内と東北電力管内の大口需要家に対して電力需要を約 15% (前年比) 削減することを命じた⁴。

また、福島原子力発電所以外の国内の他の原子力発電所も次第に停止したこともあり、東京電力以外の電力会社も電力需要に対する供給力の確保が急務となっていた。関西電力では、同年 6 月 10 日に強制力の無い 15% の節電要請を行っており⁵、北陸電力でも同年 6 月 15 日に節電要請を行った⁶。この他にも、四国電力や

¹ 東北電力管内においても計画停電は予定されていたが、当面の電力供給に不安はないとの判断により、実施が見送られた。

² 「今夏における当社の供給力の見通しについて」、東北電力 2011 年 5 月 13 日 (プレスリリース) を参照。

³ 「今夏の需給見通しと対策について(第 3 報)」, 東京電力 2011 年 5 月 13 日 (プレスリリース) を参照。

⁴ 病院、鉄道といった公共性の高い施設は例外的に制限が緩和されていた。

⁵ 「今夏の需給見通しと需給対策の状況について」、関西電力 2011 年 6 月 10 日 (プレスリリース) を参照。

⁶ 「今夏の電力需給の見通しについて」、北陸電力 2011 年 6 月 15 日 (プレスリリ

中国電力、九州電力といった他の西日本の電力会社の供給地域においても、定期検査等を終了予定の原子力発電所が再稼働できない場合を考慮して、「国民生活及び経済活動に支障を生じない範囲での節電」が呼びかけられた⁷。中部電力に関しても、供給力の予備率が通常の 8%を下回るという理由から、「国民生活及び経済活動に支障を生じない範囲での節電」に取り組んでいた⁷。こうした節電努力もあり、同年夏の停電危機は回避された。

しかしながら、各電力会社の供給力不足は依然として解決されないまま、電力需要が再び増加する冬を迎えることとなった。東北電力管内では、前冬の最大需要が 1470 万 kW であったのに対して、復旧や他社融通を含めた同年の予想供給力が 1300 万 kW であり、電力供給不足が懸念されていた⁸。また、関西電力や九州電力についても、最大需要が供給量を上回ることが予想されていた⁹。こうした理由から、経済産業省は同年 11 月 1 日に冬季の電力需給対策を発表した⁹。東北電力は、北海道電力と東京電力の融通により供給力を補い、関西電力と九州電力の供給地域に対しては、「日常生活や経済活動に支障のない範囲」での節電を呼びかけた。関西電力管内では、2011 年 12 月 19 日から 2012 年 3 月 23 日の平日 9 時から 21 時の間、10%の節電を呼びかけ、九州電力管内では、2011 年 12 月 19 日から 2012 年 2 月 3 日の平日 8 時から 21 時の間、5%の節電を呼びかけた。なお、これらの呼びかけに法的な強制力は無かった。

2. デマンドレスポンスとは

2.1. 本稿におけるデマンドレスポンスの定義

東日本大震災に伴う電力不足問題を経験したこともあり、我が国ではデマンドレスポンスを用いた需給調整が注目されるようになった。一般に、デマンドレスポンスとは、多くの電力が必要とされるピーク時などに、何らかの方法を用いて電力

ース)を参照。

⁷ 「西日本 5 社の今夏の需給対策について」、経済産業省 2011 年 7 月 20 日を参照。

⁸ 「9 月定例社長記者会見概要」、東北電力 2011 年 9 月 30 日 (プレスリリース)を参照。

⁹ 「今冬の電力需給対策について」、経済産業省 2011 年 11 月 1 日を参照。

需要を抑制するものである。

一方、米国連邦エネルギー規制委員会 (FERC) によると、デマンドレスポンスは価格誘導型デマンドレスポンスと、インセンティブ型デマンドレスポンスに大別して定義される¹⁰。価格誘導型デマンドレスポンスとは、時間帯 (又は季節) 別に料金を設定することで、ピーク時の電力需要をオフピーク時にシフトをさせる枠組みであり、代表的なものとして、時間別料金 (Time of Use) や、直近の需給状況を反映したリアルタイムプライシング (Real Time Pricing) などがある。インセンティブ型デマンドレスポンスとは、電力需給の逼迫状況や卸電力価格が暴騰した時に、供給予備力の確保を目的として、電力需要の抑制を図るものである。インセンティブ型デマンドレスポンスには、我が国でも採用されている需給調整契約や、家電設備の直接制御などが含まれる。

ところで、我が国で実施された「電力使用制限令」や各電力会社の法的強制力の無い節電対策は、節電要請という形で電力需要の抑制を目的としたものであり、ある種のデマンドレスポンスと言えよう。しかしながら、これらは FERC が定義する価格誘導型デマンドレスポンスとインセンティブ型デマンドレスポンスのどちらにも該当しない。そこで本研究では、こうした価格やインセンティブを用いない方法を非価格型デマンドレスポンスと呼ぶ。そしてこれに価格誘導型デマンドレスポンスとインセンティブ型デマンドレスポンスを加えたものを、本研究におけるデマンドレスポンスとして定義する。すなわち、本研究で考えるデマンドレスポンスとは、I. 価格誘導型デマンドレスポンス、II. インセンティブ型デマンドレスポンス、そして III. 非価格型デマンドレスポンスのいずれかのことを指す。なお、これらのデマンドレスポンスの代表的な例については、本章第 2.2 節で詳しく紹介する。

2.2. 代表的なデマンドレスポンス¹¹

2.2.1. 価格誘導型デマンドレスポンス

¹⁰ FERC によるデマンドレスポンスの定義は、「卸市場価格の高騰時または系統信頼性の低下時において、電気料金価格の設定またはインセンティブの支払に応じて、需要家側が電力の使用を抑制するように電力消費パターンを変化させること」である。

¹¹ 本節の内容は、「デマンドレスポンス (Demand Response) について」、経済産業省 2013 年 1 月 5 日を参考にまとめた。

代表的な価格誘導型デマンドレスポンスには、I. Time of Use (TOU) , II. Critical Peak Pricing (CPP) , III. Real Time Pricing (RTP) , IV. Critical Peak Pricing with Control, そして V. System Peak Transmission Tariffがある。ここでは、国内外の電力会社で多く用いられている I. TOU と II. CPP, そして今後の導入が期待されている III. RTP を中心に、価格誘導型デマンドレスポンスについて詳しく紹介する。図 1.1 は TOU, CPP, RTP の例を図示したものである。

はじめに、I. TOU について説明する。TOU とは、時間帯別の平均発電・送配電コストを反映した電力料金体系であり、通常 1 時間以上 24 時間以内の間隔で電力料金に変化するプログラムである。例えば、昼間のピーク時間帯の電力料金を高くし、それ以外のオフピーク時間帯の電力料金を抑えることで、電力消費をピーク時間帯からオフピーク時間帯にシフトさせることを目的としている。

II. CPP とは、平常時は時間帯別料金 (i.e. TOU) であるが、卸売価格高騰時や不測の電力需給逼迫などの緊急時 (クリティカルピーク時) に、予め指定された高い電力価格を課すことで、電力消費の抑制を促すような料金体系構造が設定されているプログラムのことである。なお、CPP では、月に実施できる回数や時間が予め制限されていることが多い。具体的な例は、図 1 の II. Critical Peak Pricing を参照していただきたい。ここで、実線は通常時の時間帯別料金であり、点線が緊急時 (クリティカルピーク時) の電力価格を表している。

III. RTP とは、卸電力価格と連動させて、日々の時間ごとの電力価格を変動させるものである。この時、連動される卸電力価格は、1 日前ないしは 1 時間先の電力価格を反映させることが多い。RTP の実施には、電力需給に関する迅速な情報通信が必要であったため、これまであまり応用されてこなかったが、スマートメーター等の技術進歩により、今日では実施が可能となった。

最後に、IV. Critical Peak Pricing with Control と V. System Peak Transmission Tariff について簡単に説明しておく。IV. Critical Peak Pricing with Control とは、卸売価格高騰時や不足の電力需給逼迫などの緊急時 (クリティカルピーク時) に発動され、電力需給調整者が、需要家の保有する家電製品を直接制御しつつ、CPP を実施するデマンドレスポンスである。また、V. System Peak Transmission Tariff とは、インターバル・メーターを付けて、特定の条件の下でピーク時に電力需要を削減して託送料金を削減する料金体系のことである。

2.2.2. インセンティブ型デマンドレスポンス

インセンティブ型デマンドレスポンスを実施する方法は、次の 2 つの方法に大別される (図 1.2 参照)。1 つ目は、デマンドレスポンス実施者が需要家の電力需要を直接抑制・遮断するものである。これは、電気事業者、系統運用者といったデマンドレスポンス実施者が、需要家と契約を結び、卸売価格高騰時や不足の電力需給逼迫時に、需要家に負荷抑制・遮断を要請し、その対価として定額付与や負荷遮断期間中の割引を行う枠組みである。

2 つ目は、需給調整市場を用いて実施する方法である。この場合は、需要家による需要削減量を供給量と見立てて市場等で取引する形態であり、ネガワット取引とも呼ばれる。なお、アメリカでは、複数の需要家の調整量をまとめて、この市場で取引するアグリゲーターが新たなサービスを提供している。

これらの枠組みを用いたインセンティブ型デマンドレスポンスは、現在数多く提案されている。ここではその代表的なものとして、次の 6 つを紹介する。1 つ目は、**Direct Load Control (DLC)** である。これは、電気事業者、系統運用者といったデマンドレスポンス実施者が直前の通知により、需要家の電気機器を遠隔で遮断もしくは循環運転する手法である。DLC は、原則的に家計や小規模商業者に向けたデマンドレスポンスである。

2 つ目は、**Load as Capacity Resource** と呼ばれるものであり、卸売価格高騰時や不足の電力需給逼迫時に、予め規定された電力消費量の削減を需要家に約束させることで供給力を確保するメニューである。

3 つ目は、**Emergency Demand Response** である。これは、卸売価格高騰時や不足の電力需給逼迫時に得られた電力削減量に応じて需要家にインセンティブを付与するデマンドレスポンスである。

4 つ目は、**Interruptible Load (IL)** と呼ばれるものであり、卸売価格高騰時や不足の電力需給逼迫時に、需要家に電力消費量の削減を同意させる代わりに、料金割引等を提供する契約のもとで、電気消費量を削減または遮断する方法である。IL は、1 つ目の **Direct Load Control** と、3 つ目の **Emergency Demand Response** を組み合わせたものとも言える。

5 つ目は、**spinning Reserve** である。これは、緊急時の最初の数分間、需要と供

給のインバランスの解決策を需要家に提供できるようにするプログラムである。

最後に、Demand Bidding and Buyback (DBB) について説明する。これは、需要家に対して、卸売・小売市場において、デマンドレスポンス実施者が電力価格ごとの電力消費の削減量を提案することや、特定の電力価格のもとでどれくらいの電力を進んで削減するかを特定することを許可するメニューである。DBB は、需給調整市場を用いた代表的なインセンティブ型のデマンドレスポンスと言えよう。

2.2.3. 非価格型デマンドレスポンス

第 2.1 節でも説明したとおり、本研究におけるデマンドレスポンスには、非価格型デマンドレスポンスが含まれている。ここでは Ferraro et al. (2013) を参考に、非価格型デマンドレスポンスの中から代表的なものを 2 つ簡単に紹介する。1 つ目は、需要家のモラルに訴える方法である。例えば、我が国も実施されたような「電力使用制限令」や法的強制力の無い各電力会社の節電要請は、これに該当する。2 つ目は、需要家同士の電力消費量を比較させる方法である。多くの心理学者は、個人は他者の行動と自分の行動を比較することで、自身の行動の妥当性を判断する傾向があると主張している¹²。今日では、こうした人間行動の特性を活かした節電政策が、どの程度の節電効果を持つのかについて、多くの実証分析がなされている¹³。

3 デマンドレスポンスの実行可能性¹⁴

3.1. デマンドレスポンス導入のメリット

第 2.1 節でも説明したとおり、デマンドレスポンス導入の社会的なメリットは、電力需給が逼迫する時に電力需要を抑えることで、停電リスクを抑えることである。しかしながら、デマンドレスポンス導入によるメリットはこれだけではない。デマンドレスポンスには、需要側・供給側にも個別のメリットがあると言われている

¹² Festinger (1954) や Shafir (2013) を参照。

¹³ 例えば、Allcott (2011) や Allcott and Rogers (2011) などがある。また、電力事業以外では、水道事業を対象とした Ferraro and Price (2013) や、Ferraro and Miranda (2013) などがある。

¹⁴ 本節の内容は、Kim et al. (2011) を参考にまとめた。

る。ここでは、それらのメリットを紹介する。

まず企業側のメリットとして、ピーク時の需要に合わせた過剰な設備投資の削減がある。一般に、電力会社にはピーク時、オフピーク時に関わらず、契約する需要家の電力需要量を供給する義務がある¹⁵。そのため、電力会社はピーク時の電力需要に備えるために、電力供給のために莫大な設備投資が必要となる。しかしながら、こうした供給設備は、オフピーク時の電力需要から見ると過剰設備であり、オフピーク時の需要に対しては、その設備の一部しか使用されない。この時、デマンドレスポンスによってピーク時間帯の電力価格を上昇させて電力需要を抑制させることができれば、ピーク時にあわせた設備投資を削減することが可能であろう。

また、企業側には電力供給の限界費用を低下させるというメリットもある。多くの電力会社は、特別な理由がない限り、メリットオーダーによる発電を行っている。メリットオーダーとは、様々な形態の発電所を発電コストの低い順に並べたものである。図 1.3 はメリットオーダーの例を示したものである¹⁶。ここでは、燃料費のかからない水力発電や太陽光、風力発電といった再生可能エネルギー¹⁷が最初に置かれ、次に原子力発電、続いて火力発電の順になっている。火力発電については、使用する燃料や発電効率によって細かな順序が決まるが、平均的には石炭火力、ガス火力、そして重油火力の順となる。この時、デマンドレスポンスによってピーク時の電力需要を抑えることができれば、ガス火力や重油火力といった限界費用の高い発電所を稼働させずに済むと考えられている。

次に、需要家側のメリットについて紹介する。需要家のメリットとして考えられるのが、総合的な電力支出額の削減である。多くのデマンドレスポンスは、ピーク時間帯の電力価格を上げる一方で、オフピーク時間帯の電力価格を下げる仕組みとなっている。したがって、ピーク時の電力消費をオフピーク時にシフトさせることができれば、総合的な電力支出額を減らすことができよう。

¹⁵ 我が国では、電気事業法第 18 条において電力会社に対する供給義務が定められている。

¹⁶ 「メリットオーダーとは」, 日経テクノロジーonline 2013 年 2 月 6 日を引用。

¹⁷ 再生可能エネルギーは、エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用および化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律において、「エネルギー源として持続的に利用することができる」と認められるもの」として定義されている。ちなみに、この中には、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然発生の熱、そしてバイオマスが規定されている。

また、デマンドレスポンスを行うことで、需要家がこれまで以上に電力消費に関心を持つようになれば、彼らが自身の電力消費行動を見直すきっかけになると考えられる。こうした電力消費行動の見直しも、電力支出の削減に貢献するだろう。例えば、需要家が自身の電力消費パターン認識し、その結果、過剰な電力消費の存在が明らかとなった場合は、彼らは日々の電力消費行動を変えることや、保有家電を省エネ性が高いものに買い換えるなどして、効率的に電力を消費するようになるかもしれない。ただし、需要家の保有家電が効率的になった結果、電力支出額がかえって増加する可能性がある点に留意する必要がある¹⁸。

3.2. デマンドレスポンス導入の課題

デマンドレスポンスには上述したようなメリットがあるにもかかわらず、今日の電力産業で十分な支持を得ているとは言いがたい。このような状況において、Kim et al. (2011) は、今後デマンドレスポンスを普及させていくために解決すべき課題を、I. 需要家側の要因、II. 企業側の要因、そして III. 構造的な要因に分けて幾つか指摘している。ここでは、彼らが指摘している需要家側の課題について3つ紹介する¹⁹。

第1に、需要家のデマンドレスポンスに関する知識の欠如である。これまでに行われたデマンドレスポンス実験の多くは、少数の参加世帯を対象としたものであり、多くの世帯はデマンドレスポンスの存在を知らないことが多かった。また、実際にデマンドレスポンスを料金メニューに入れている電力会社が、その存在を需要家に対して積極的に告知していないことや、デマンドレスポンス普及のための公的な政策が少ないことも、多くの需要家にデマンドレスポンスが知られてこなかった原因であろう。今後は、デマンドレスポンスの存在を多くの需要家に知ってもらえるような政策が必要である。

第2に、潜在的な電力削減可能量の大きさである。デマンドレスポンスを行った時に削減できる電力消費量が少なければ、費用対効果の観点からデマンドレス

¹⁸ 例えば、Mizobuchi (2008) や Filippini et al. (2015) は省エネ家電の買い替えによる電力消費の効率化が、かえって電力消費を増加させる可能性を指摘している。彼らは、こうした電力消費の増加を「リバウンド効果」と呼んでいる。

¹⁹ 本論は、デマンドレスポンスが世帯の電力需要に与える影響に注目しているため、需要家の要因のみを紹介しておく。

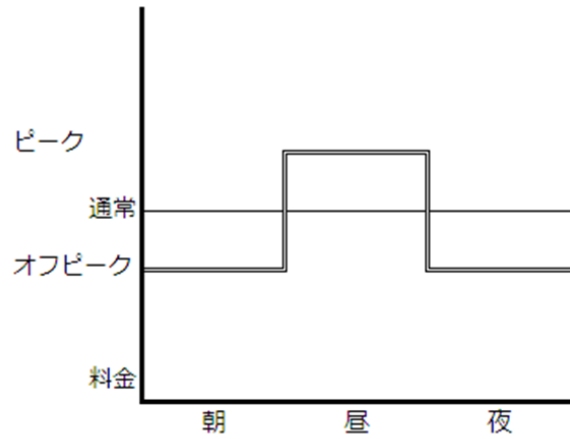
ポンスの導入は経済的ではない。したがって、需要家の電力消費にどの程度の削減余地があるのかを明らかにすることは重要である。

第 3 に、スマートメーターをどのように普及させるかである。デマンドレスポンスを導入するためには、需要家が自身の電力消費量を正しく把握できる環境を作るとともに、企業側も需要家の電力消費量をリアルタイムで把握することが必要となる。スマートメーターは、こうしたリアルタイムの通信を可能にするため、デマンドレスポンスの導入には不可欠である。しかしながら、誰がこのスマートメーターを設置すべきであるのかという問題がある。

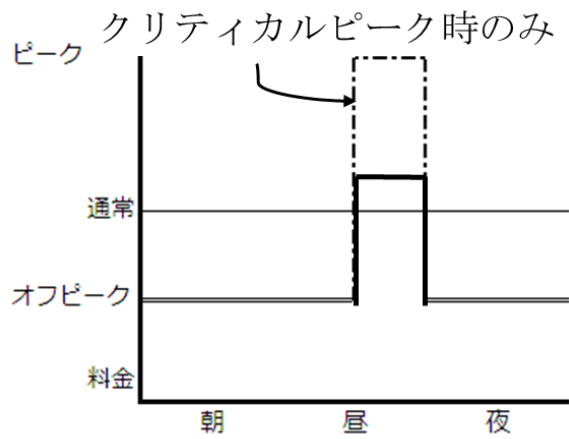
こうした需要側の課題の中でも、本論は、特に第 2 の課題に注目している。本研究の目的は、I. デマンドレスポンスを行うことによって、どの程度の節電が可能であるのかを明らかにすること、II. そもそも、世帯の電力消費量の中には、どの程度の節電可能な電力消費量があるのかを明らかにすること、そして III. デマンドレスポンスの持続的な節電効果を明らかにする。次章以降では、これらの課題について計量経済学的手法を用いて分析していく。

図 1.1：代表的な価格誘導型デマンドレスポンスの例

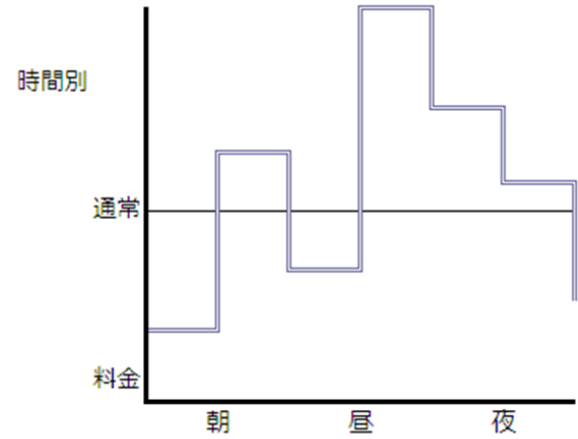
①ToU : Time of Use



②CPP : Critical Peak Pricing

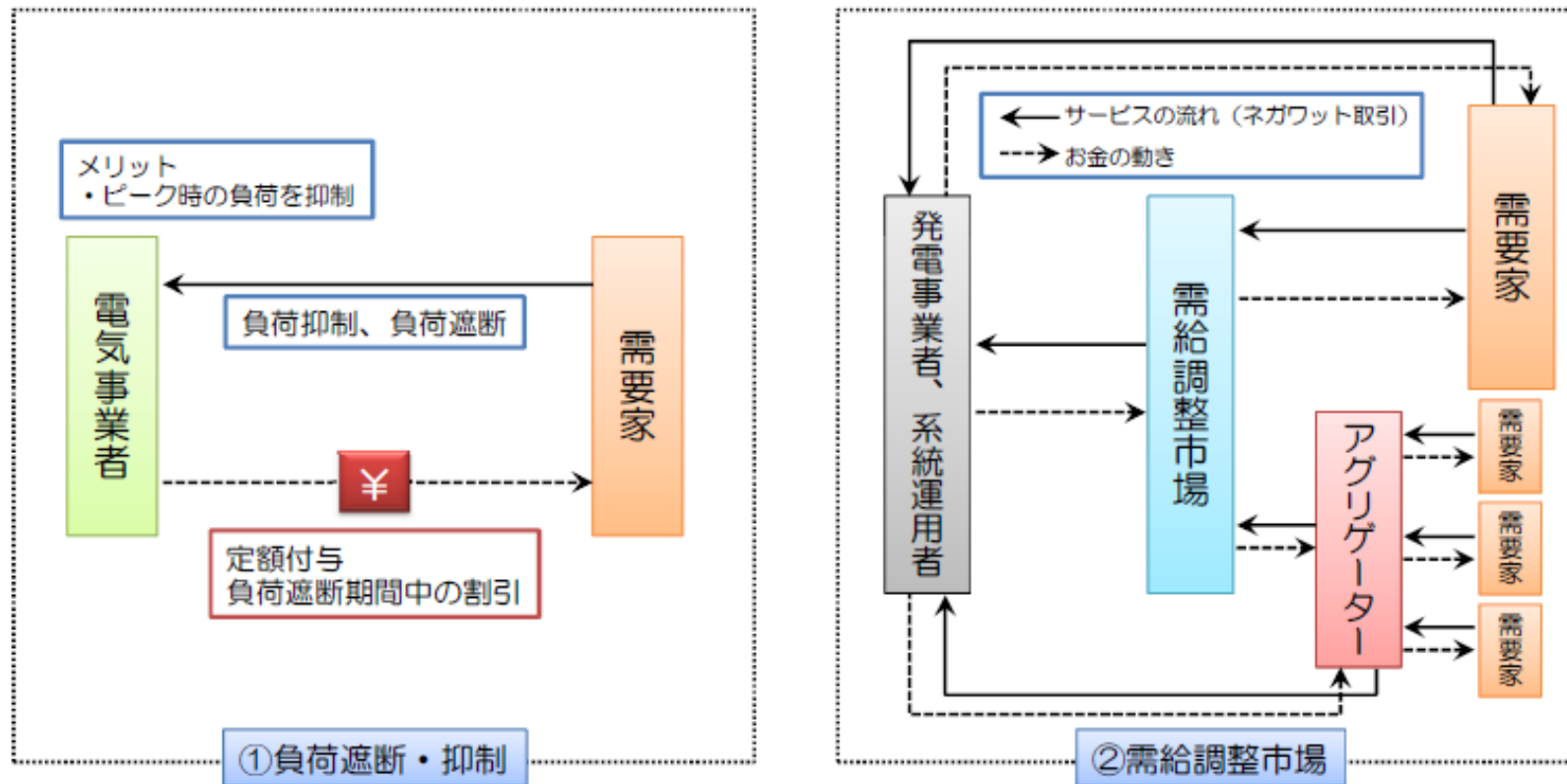


③RTP : Real Time Pricing



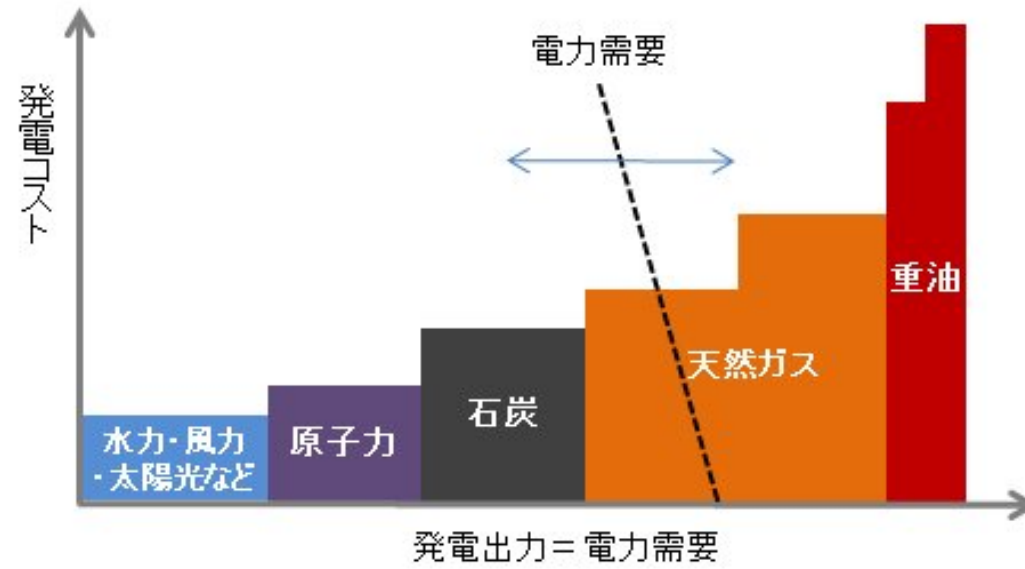
出所：「電力不足解消のカギは家計部門にある 価格メカニズムとスマートグリッドの活用で需要をコントロール」, 大和総研レポート 2011年11月2日をもとに編集した.

図 1.2 : インセンティブベースのデマンドレスポンスの例



出所：「デマンドレスポンス(Demand Response)について」，経済産業省 2013年1月5日を引用。

図 1.3：メリットオーダーの例



出所：「メリットオーダーとは」, 日経テクノロジーonline 2013年2月6日を引用.

第 2 章

デマンドレスポンスの節電効果に関する実証分析

1. はじめに

本章では、世帯属性の異質性や気温の変化が、デマンドレスポンスの節電効果に与える影響について分析する。第 1 章でも述べた通り、電力需給が逼迫している時に、需要家の電力消費を抑制させることは、電力の安定供給の観点からも重要な課題の 1 つとなっている。こうした背景もあり、デマンドレスポンスは、効果的な電力需給の調整方法として、学術・実務の両面から注目されてきた。特に、学術面においては、デマンドレスポンスの節電効果を分析したものが数多く存在し、それらの多くでは、デマンドレスポンスの節電効果の存在を確認している。表 2.1 はデマンドレスポンスに関する代表的な先行研究をまとめたものである。

これらの先行研究には、次の 4 つの特徴がある。第 1 に、デマンドレスポンスの節電効果は確認されるが、その節電効果は状況によって異なることが明らかとなっている。例えば、Herter and Wayland (2010) では、デマンドレスポンス実施時間帯の電力消費の削減が確認される一方で、その前後の時間帯の電力消費が増加することが明らかとなっている。また、Jessee and Rapson (2014) は、世帯が持つ自身の電力消費に関する情報量の違いが、デマンドレスポンスの節電効果にどのような影響を与えるのかについて分析している。分析の結果、自身の電力消費に関する情報量が多い世帯のデマンドレスポンスによる節電効果は、その情報が少ない世帯と比較して大きいことが明らかとなっている。更には、Faruqui et al. (2014) は、省エネ家電を保有することによる節電効果の違いについて分析し、省エネ家電を持つ世帯のデマンドレスポンスの節電効果は、そうでない世帯に比べて大きいことを明らかにした。

第 2 に、先行研究の多くは、世帯レベルのデータを用いて分析している。Jessee and Rapson (2014) は、コネチカット州に住む世帯の電力消費データを使用して分析し、Ida et al. (2013) は、日本のデータを利用して分析している。また、Faruqui and Sergici (2011) は、メリーランド州ボルチモアに住む世帯の電力消費データを用いて分析している。この他にも、カリフォルニア州に住む世帯のデー

タを利用したものとして、Faruqui and George (2005) , Herter et al. (2007) , Herter and Wayland (2010) がある。一方、企業レベルのデータを用いた研究は少なく、今後の研究の蓄積が必要とされている。なお、企業レベルのデータを用いて分析した代表的な研究として、Faruqui et al. (2014) がある。

第 3 に、デマンドレスポンスの効果に加えて、気温、省エネ家電の保有といった要因が世帯の電力消費に与える影響にも注目している点である。例えば、Herter et al. (2007) や Faruqui and Sergici (2011) , そして Faruqui et al. (2014) は、省エネ家電の保有が世帯の電力消費に与える影響について分析している。また、Herter and Wayland (2010) や Faruqui and Sergici (2011) , そして Faruqui et al. (2014) は、気温が世帯の電力消費に与える影響について分析している。また、彼らは、これらの要因がデマンドレスポンスの節電効果にどのような影響を与えているのかについても分析している。

第 4 に、様々なデマンドレスポンスの形態について研究されている。Faruqui and George (2005) は、CPP と VPP (Variable Peak Pricing) , TOU の効果を比較し、VPP が最も節電に効果的であると結論付けた。Faruqui et al. (2014) は、TOU, CPP, そして RTP の節電効果について分析している。また、Ida et al. (2013) では、TOU や CPP 加えて、節電要請の節電効果についても分析している。

この他にも、デマンドレスポンスの政策評価に関する研究として、Nishimura (2014) がある。彼は、アメリカやフランスなどの国で実施されたデマンドレスポンス形態を評価し、日本での導入可能性について議論している。

このように、デマンドレスポンスについては様々な視点から研究されているが、世帯属性がデマンドレスポンスの節電効果に与える影響について分析したものが少ないようにも思える。例えば、多くの先行研究では、気温や省エネ家電の保有によるデマンドレスポンスの節電効果に対する影響を分析しているが、これらの要因以外にも、世帯人数や昼間在宅者数がデマンドレスポンスの節電効果に影響を与えることは容易に想像できよう。このような世帯属性がデマンドレスポンスに与える影響を考慮することは、様々な状況におけるデマンドレスポンスの節電効果を想定し、シミュレーションする上でも重要であると考えられる。

以上の点を踏まえて、本章では、I. 詳細な世帯属性を考慮しながらデマンドレスポンスの節電効果を推定し、II. その推定結果を用いて、様々な状況におけるデ

マンドレスポンスの節電効果をシミュレーションする。ここで、詳細な世帯属性として、本研究では所得、世帯人数、昼間在宅者数、エアコン保有台数、冷蔵庫保有台数を考えている。また、注目するデマンドレスポンスのタイプとして、節電要請、TOU、CPP を取り上げる。分析の結果、以下の 3 点が明らかとなった。第 1 に、デマンドレスポンスは電力消費を削減させる効果があることが明らかとなった。ただし、デマンドレスポンス実施後の電力消費量は増加傾向にあることも確認されており、異時点間の需要の代替が行われていることも示唆している。

第 2 に、デマンドレスポンスの節電効果は I. 節電要請、II. TOU、III. CPP の順に大きくなることが明らかとなった。また、CPP の金額が高くなるにつれて節電効果が大きくなることも確認されている。

第 3 に、デマンドレスポンスの節電効果は世帯属性、気温に依存することが確認された。例えば、デマンドレスポンスの節電効果は、所得と正の相関があり、所得が高くなると節電効果が大きくなることが明らかとなった。一方、昼間在宅者数や気温の増加は、デマンドレスポンスの節電効果を減少させることが確認された。

本章の構成は以下の通りである。第 2 節では本研究で使用するデータについて紹介し、第 3 節で推定モデルについて説明する。続く第 4 節、第 5 節はそれぞれ推定結果とシミュレーション結果について紹介する。そして第 6 節で、本研究のまとめと今後の課題について言及する。

2. データ

2.1. 大規模デマンドレスポンス実験について

本分析では、2012 年 7 月 23 日から 9 月 28 日の間にけいはんな地域¹で行われたデマンドレスポンス大規模社会実験のデータを使用する。本実験は、スマート設備やデマンドレスポンスの導入による節電の可能性を検証するために、経済産業省が主体となって進めている「次世代エネルギー・社会システム実証」の一つである²。

¹ けいはんな地域とは京都府、大阪府、奈良県にまたがる地域のことであり、本分析では京田辺市、木津川市、精華市が分析対象地域となっている。

² けいはんな地域のほかに、横浜市、豊田市、北九州市が実験対象地域となってい

本実験の参加世帯数は 681 世帯であり、そのうち 212 世帯はオール電化の世帯である。参加対象世帯の中には、1 戸建てに住む世帯に加えて、アパートのような集合住宅に住む世帯も含まれている。参加世帯は次の 4 つのグループにランダムに振り分けられる。グループ A はコントロールグループであり、このグループはデマンドレスポンスを受けない。グループ B は節電要請を受けるトリートメントグループ、そしてグループ C, D は価格誘導型デマンドレスポンスを受けるトリートメントグループである³。価格誘導型デマンドレスポンスについては、TOU と CPP の 2 つに注目している。

TOU は、平日の 13 時から 16 時の間の電力料金に +20 円/kWh を加えるものである。CPP40, CPP60, CPP80 はそれぞれ +40/kWh, +60 円/kWh, +80 円/kWh を、TOU に代わって加えるものであり、前日にその実施有無を知らされることになる。また、CPP40, CPP60, CPP80 の実施条件は、翌日の予想気温が摂氏 30 度を超える場合であり、実施回数はそれぞれ 5 回、計 15 回である。なお、節電要請は、CPP が実施される日に行われる。

2.2. 分析に使用する変数

ここでは、本分析に利用する変数を紹介する。表 2.2 は、分析に使用する変数の説明と全サンプルにおける記述統計であり、表 2.3 は、グループ別の記述統計である。まず、 E は 1 時間当たりの電力消費量である。 P は電力価格を表し、各世帯の電力消費に依存した電力体系となっている。具体的には、累積消費量が 120kWh 以下の場合には 20 円/kWh、120kWh より多く 300kWh 以下の場合には 25 円/kWh、そして 300kWh より多い場合は 26 円/kWh の値をとる⁴。

次に、デマンドレスポンス変数について説明する。本研究では、デマンドレスポンスに関する変数を、カウント変数で定義する場合とダミー変数で定義する場合の両方について分析する。まず、カウント変数の場合について説明する。表 2.4 はデマンドレスポンスのカウント変数の定義をまとめたものである。例えば、TOU

る。詳しくは、「スマートコミュニティ実証について」、経済産業省を参照。

³ グループ C, D は別のグループに分けられているが、同じトリートメントを受けているため、本分析では同一のグループとして扱うことにする。

⁴ 詳しくは、関西電力の従量電灯 A (2012 年 8 月, 9 月) を参照。

が実施される日における 13 時から 16 時の DR_{peak} は、グループ C・D に属する世帯で 2 の値をとり、それ以外のグループに属する世帯で 0 となる。また、CPP40 が実施される日の 13 時から 16 時の DR_{peak} は、グループ C・D に属する世帯で 3 の値をとる。なお、CPP を実施する日は、グループ B に対して節電要請を行っているため、同時間帯におけるグループ B の DR_{peak} は 1 の値をとる。なお、カウント変数の場合は、デマンドレスポンスの程度が I. 節電要請, II. TOU, III. CPP40, IV. CPP60, V. CPP80 の順に厳しくなり、その限界効果は一定であると仮定している点に留意する必要がある。

ところで、デマンドレスポンスは、DR 実施時間帯前後の電力消費にも影響を与えたと考えられる。そこで本研究では、デマンドレスポンス実施時間帯の前後 7 時間を表す変数を作成して分析に用いる。 DR_{pos} はデマンドレスポンス実施後 7 時間を表し、 DR_{pre} はデマンドレスポンス実施前 7 時間を表している。また、これらの変数は、 DR_{peak} と同様に定義される。例えば、TOU が実施される日における 6 時から 12 時の DR_{pre} は、グループ C・D に属する世帯で 2 の値をとり、それ以外のグループに属する世帯で 0 となる。また、CPP40 が実施される日の 6 時から 12 時の DR_{pre} は、グループ C・D に属する世帯で 3 の値をとる。先ほども述べたが、CPP を実施する日は、グループ B に対して節電要請を行っている。したがって、節電要請が行われている日のグループ B の 6 時から 12 時の DR_{pre} は 1 の値をとる。

次に、ダミー変数の場合について説明する。ダミー変数の場合には、それぞれのデマンドレスポンスに対してダミー変数を作成する。例えば、TOU は、TOU 実施時間帯かつグループ C・D に属する世帯なら $TOU_{peak} = 1$ をとり、それ以外の世帯は $TOU_{peak} = 0$ となる TOU ダミー変数を作成した。同様に、節電要請についても、節電要請実施時間帯かつグループ B に属する世帯なら $RQ_{peak} = 1$ をとり、それ以外の世帯は $RQ_{peak} = 0$ としている。また、CPP40 についても、CPP40 実施時間帯かつグループ C・D に属する世帯なら $CPP40_{peak} = 1$ 、それ以外の世帯なら、 $CPP40_{peak} = 0$ となる。CPP60, CPP80 についても、同様にダミー変数を作成している。

DR 実施時間帯前後 7 時間に関する変数についても、グループ C・D かつ TOU 実施前 7 時間なら $TOU_{pre} = 1$ 、それ以外なら $TOU_{pre} = 0$ となるような TOU 変数を作

成した．同様に，TOU 実施後 7 時間についても， TOU_{pos} となる変数を作成した．CPP や節電要請についても同様に変数を作成している．

最後に，世帯属性と住宅属性，その他の外的要因について紹介する．本章第 1 節でも説明したとおり，本研究では世帯属性の異質性や保有家電数，気温の変化によるデマンドレスポンスの節電効果の違いにも注目している．本研究では，所得 (N_{inc})，昼間在宅者数 (N_{home})，世帯人数 (N_{fam}) を世帯属性の情報として利用する．所得 (N_{inc}) は 1 から 12 の値をとるカウント変数である．昼間在宅者数⁵ (N_{home}) は昼間 (13 時から 16 時) の間に在宅している人数を表している．また，住居属性として，築年数 (H_{age})，延べ床面積 (H_{size})，オール電化ダミー (H_{all}) そして住居タイプ (H_{type}) に関する情報を利用する．延べ床面積は (H_{size}) は 1 から 7 の値をとるカウント変数である．住居タイプ (H_{type}) は集合住宅なら 1 戸建てなら 1，そうでないなら 0 の値をとるダミー変数である．更には，保有家電に関する情報として，冷蔵庫保有台数 (N_{refrig})，エアコン保有台数 (N_{air}) を利用する．最後に，外的要因として，気温 (O_{temp})，休日ダミー (O_{week})，9 月ダミー (O_{sep}) を利用している．

3. 分析方法

本分析では，世帯の 1 時間当たり電力需要関数を考える．一般に，世帯の電力需要は暖房，照明，調理，給湯といったエネルギーサービスを享受するために生じると考えられ，経済学では世帯の電力需要を Household Production Theory を用いて定式化することが多い．Household Production Theory とは，消費者が効用を得るための財を直接市場で購入して消費するのではなく，投入要素を市場で購入し，効用を得るための財を自身で生産し，消費する場合を想定した理論であり，ミクロ経済学における消費者理論と企業理論を統合したものであると言える⁶．このフレームワークのもとでは，電力は投入要素，エネルギーサービスは消費者が効

⁵ ここでの昼間在宅者数とは，世帯の実験開始前の日々の生活における 1 日の平均的な昼間在宅者数を表したものであり，実験期間中の 1 時間ごとの昼間在宅者数を観測したものではない点に留意する必要がある．

⁶ Household Production Theory の詳細については，Deaton and Muellbauer (1980) や Filippini (1999)，Filippini (2011) を参照．

用を得るために生産される財であると考えため、電力需要関数は要素需要関数として扱うことができよう。ただし、我々は世帯が生産・消費するエネルギーサービスをデータとして観測することができないため、本研究ではこのエネルギーサービスを世帯属性や気温によって代理することを考える。

以上の背景をもとに、次の電力需要関数を推定する。なお、ここではデマンドレスポンス変数をカウント変数とした場合の推定モデルを説明する⁷。

$$E = E(P, \mathbf{DR}, \mathbf{N}, \mathbf{H}, \mathbf{O}) \quad (1)$$

ここで、 E は1時間当たりの電力消費量、 P は電力価格、 \mathbf{DR} はデマンドレスポンス変数ベクトルであり、これには DR_{peak} 、 DR_{pre} そして DR_{pos} が含まれる。 \mathbf{N} は世帯属性、保有家電に関する変数ベクトルであり、これには所得 (N_{inc})、昼間在宅者数 (N_{home})、世帯人数 (N_{fam})、冷蔵庫保有台数 (N_{refrig})、エアコン保有台数 (N_{air})が含まれる。 \mathbf{H} は、延べ床面積 (H_{size})、築年数 (H_{age})、住居タイプ (H_{type})、オール電化ダミー (H_{all})を含む住居属性ベクトルである。そして、 \mathbf{O} は外的要因ベクトルであり、これには気温 (O_{temp})、休日ダミー (O_{week})、9月ダミー (O_{sep})を含む。本分析では、式(1)を固定効果モデルと変動効果モデルを用いて推定する。推定モデルの定式化は以下の通りである。

(変動効果モデル)

$$\begin{aligned} \ln E_{it} = & \alpha + \beta_p \ln P_{it} + \beta_{DR} \mathbf{DR}_{it} + \beta'_N \mathbf{N}_i + \beta'_H \mathbf{H}_i + \beta'_O \mathbf{O}_t \\ & + \beta'_{DRN} DR_{peak,it} \cdot \mathbf{N}_i + \beta_{DRtemp} DR_{peak,it} \cdot O_{temp,t} + u_i + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

(固定効果モデル)

$$\begin{aligned} \ln E_{it} = & \alpha + \beta_p \ln P_{it} + \beta_{DR} \mathbf{DR}_{it} + \beta'_O \mathbf{O}_t \\ & + \beta'_{DRN} DR_{peak,it} \cdot \mathbf{N}_i + \beta_{DRtemp} DR_{peak,it} \cdot O_{temp,t} + u_i + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (3)$$

⁷ ダミー変数の場合は、式(2)と式(3)のデマンドレスポンス変数ベクトルを、本章第2.2節で紹介したダミー変数に置き換えることで推定できる。

where $\mathbf{DR} = DR_{peak}, DR_{pre}, DR_{pos}$

$\mathbf{N} = N_{inc}, N_{home}, N_{fam}, N_{refrig}, N_{air}$

$\mathbf{H} = H_{type}, H_{age}, H_{type}$

$\mathbf{O} = O_{temp}, O_{week}, O_{sep}$

ここで、 $\ln E_{it}$ は1時間当たり電力消費量の対数値、 $\ln P_{it}$ は電力価格の対数値である。 u_i と ϵ_{it} はそれぞれ個人効果、誤差項を表している。また、 DR_{peak} と世帯属性、保有家電変数、気温との交差項は、デマンドレスポンスの節電効果が世帯属性等によってどう違うのかを推定するためのものである。変動効果モデルでは、個人効果 u_i が説明変数と相関しないことを仮定している。一方、固定効果モデルでは、個人効果 u_i と説明変数が相関することを許しているため、個人効果 u_i と説明変数に相関がある場合でも一致推定量を得ることができる。固定効果モデルを推定する方法は幾つかあるが、本研究は、その中でも代表的な Within 推定を行う。ただし、Within 推定の場合は、時間に不変な説明変数の係数を推定することができない点に留意する必要がある⁸。なお、世帯レベルのパネルデータを使用するため、世帯内のデータ間に系列相関がある可能性がある。したがって、本研究ではクラスター分散を用いて分析する。

4. 推定結果

表 2.5 は推定結果である。ケース 1 からケース 4 は、固定効果モデルによる推定結果を表しており、ケース 5 からケース 8 は、変動効果モデルによる推定結果を表している。なお、本研究では、時間効果として 24 時間ダミーを用いている⁹。

また、本章第 2-2 節でも説明したとおり、本研究はデマンドレスポンスに関する変数をカウント変数とする場合と、ダミー変数する場合の両方を考えて分析し

⁸ Within 推定の他にも LSDV による推定がある。この推定方法は、時間に不変な説明変数の効果も推定できるが、世帯のダミー変数を利用するため説明変数が増加して係数が不安定になりやすいというデメリットがある。そのため、本研究では LSDV を使用しなかった。

⁹ 本来であれば、パネルデータの時系列方向の時間ダミーを使用すべきであるが、推定に時間がかかるため、本研究は 24 時間データを用いた。なお、パネルデータの時系列方向の時間効果を利用しても同様の結果が得られた。

ている。固定効果モデルのケース 1 とケース 3，変動効果モデルのケース 5 とケース 7 がカウント変数を用いた分析であり，残りのケースがダミー変数を用いた推定結果となっている。

最後に，世帯の電力消費行動は，休日と平日で異なることが考えられる。そのため，本研究では，休日の電力消費データを除いた場合についても分析している。表 2.5 では，固定効果モデルのケース 1 とケース 2，変動効果モデルのケース 5 とケース 6 が休日の電力消費データを含んだ推定結果となっている。

それでは推定結果を詳しく見ていく。まず，モデルの特定化のために回帰ベースのハウスマン検定を行った。検定の結果，固定効果モデルが採択された。したがって，以下では固定効果モデルの推定結果を中心に議論を進める¹⁰。

以下では，各変数の推定結果を紹介する。はじめに，価格係数について見ていく。本研究では，価格を自然体数値に変換しているため，価格係数は需要の価格弾力性として解釈できる。（固定効果モデルの）どのケースを見ても，結果は安定しており，需要の価格弾力性は約 0.08%であることが伺える。

次に，デマンドレスポンス変数をカウント変数として分析したケース 1 とケース 3 の推定結果を紹介する。推定結果を見ると， DR_{peak} の係数は負であり，デマンドレスポンスのピーク時間帯の節電効果はデマンドレスポンスの程度が厳しくなるにつれて大きくなることが分かる。

また， DR_{peak} と所得， DR_{peak} と昼間在宅者数，そして DR_{peak} と気温の交差項が統計的に有意であることから，デマンドレスポンスの節電効果は世帯属性や外的要因に依存することが伺える。推定の結果から，所得が高い世帯のほうがデマンドレスポンスの節電効果が大きく¹¹，昼間在宅者数が多い世帯や気温が高い時には，デマンドレスポンスの節電効果が小さくなることが明らかとなった¹²。

¹⁰ ただし，世帯属性の影響を見ることや，固定効果モデルの結果との比較のために，変動効果モデルの推定結果も載せておく。

¹¹ 本章第 2 節でも説明したが，本分析で使用した所得変数はカテゴリー変数となっており，所得弾力性ではない点に留意する必要がある。

¹² 本章第 2 節でも説明したが，本分析における昼間在宅者数とは，世帯の（実験開始前の）平均的な昼間在宅者数であるため，この変数はデマンドレスポンスの実施有無によって変化するものではない。したがって，この変数からは，普段から昼間在宅者数の多い世帯が，デマンドレスポンスの実施によって外出行動をとったかどうかを判断することができない点に留意する必要がある。

一方で、デマンドレスポンスには、(ケース 1 の係数 DR_{pos} が正で統計的に有意であることから分かる通り) オフピーク時の電力消費を増加させる効果があることも伺える¹³。ただし、ケース 3 では、この電力消費の増加が有意でなかった。この原因として、デマンドレスポンスを受けたことによる電力消費に対する習慣形成の影響が考えられる。ここで習慣形成とは、昼間の節電行動が夕方以降にも持続して行われることである。習慣形成の影響により、オフピーク時の電力消費の増加が相殺されたため、 DR_{pos} が有意とならなかったと考えられる。ケース 3 は平日のみのデータを使用しているため、休日データを含んだケース 1 と比べてこの習慣形成の影響が大きく出たと推測される。

最後に、ダミー変数を用いたケース 2 とケース 4 について説明する。推定結果を見ると、 $CPP40_{peak}$ や $CPP80_{peak}$ の係数が正であり、我々の直感とは異なる推定結果が得られている。こうした結果となったのは、推定する係数が増加すると、推定結果が不安定になることが原因ではないかと考えられる¹⁴。なお、推定モデルの変数を減らすために、節電要請グループと DR グループを分けて推定したが、係数の不安定性に変化はなかった。

5. シミュレーション結果

本節では、前節で得られた推定結果を用いて、様々な状況におけるデマンドレスポンスの節電効果をシミュレーションする。はじめに、どの推定結果を用いてシミュレーションするのかを決定する必要がある。シミュレーションを行うためには、係数の安定性や符号条件は重要である。カウント変数とダミー変数の推定結果を見ると、ダミー変数の推定結果は不安定であった。したがって、ここでは、カウント変数を用いたケース 1 とケース 3 の推定結果を用いてシミュレーションを行う¹⁵。

¹³ すなわち、デマンドレスポンスが実施された日では、世帯が昼間(13時から16時)の電力消費を夕方以降(17時から23時)にシフトさせていた可能性がある。

¹⁴ Maddala (2001) によると、ダミー変数を用いた分析は、カウント変数を用いた分析と比べて使用する変数が多くなり、推定結果が不安定となる傾向があることを指摘している。

¹⁵ 本研究でもダミー変数を用いた場合のシミュレーションを行ったが、現実的に整合的な結果が得られなかった。

ここで、カウント変数を用いた分析では、デマンドレスポンスの効果を線形で特定化しているため、サンプル平均から大きく離れたデータはモデルに上手くフィットしない可能性がある。そのため、本分析では、各変数を取りうる値の範囲を、サンプルの約 35%点から約 65%点に絞ってシミュレーションを行う¹⁶。なお、変動効果モデルの場合についてもシミュレーションしたが、結果はほとんど変わらないことを確認している。以下では、各シミュレーション結果を紹介する。

表 2.6 は、気温、所得、そして昼間在宅者数の違いが、デマンドレスポンスの節電効果に与える影響を計算したものである。前節でも説明したように、これらの変数は、デマンドレスポンスとの交差項が有意であった変数である。表 2.6 の最初の 3 列は、気温の変化がデマンドレスポンスの節電効果に与える影響を見るものであり、この時、他の変数はサンプルの 50%点の値を用いている¹⁷。また、所得や昼間在宅者数についても、気温と同様に計算した。シミュレーション結果から、気温が 30.3℃から 32.23℃の場合にデマンドレスポンスを行うことで約 2.964%から約 17.580%の節電効果が期待される。また、所得については約 2.401%から約 24.218%、そして昼間在宅者数については約 2.645%から約 16.874%の節電効果が期待される。

次に、デマンドレスポンスの節電効果が最も大きくなる場合や、最も小さくなる場合について分析する。表 2.7 はデマンドレスポンスの節電効果が、I：最も小さくなる場合、II：平均点で評価した場合、そして III：最も大きくなる場合について、それぞれ計算したものである。

デマンドレスポンスの節電効果が最も小さくなる場合は、次のように計算した。ここでは、デマンドレスポンスの節電効果を促進する要因に関しては、その変数の 35%点の値を用いており、節電効果を抑制する要因に関しては、その変数の 65%点の値を使用して計算している。ここで、表 2.5 の推定結果を見ると、デマンドレスポンスの節電効果を高める要因は、所得、世帯人数である。反対に、節電効果を抑制する要因として、昼間在宅者数、エアコン保有台数、冷蔵庫保有台数、そして

¹⁶ ダミー変数を用いた分析はデマンドレスポンスの限界効果を柔軟に推定できる。したがって、ダミー変数を用いた上で安定的な推定結果を得ることは今後の課題である。

¹⁷ 各変数の 50%点は、所得カテゴリー：5、世帯人数：3人、冷蔵庫保有台数：1台、エアコン保有台数：4台、気温：31.4℃、そして昼間在宅者数：1人である。

気温がある。したがって、デマンドレスポンスの節電効果が最も小さくなるケースでは、所得カテゴリー：4.5，世帯人数：2.5人，昼間在宅者数：1.5人，エアコン保有台数：4.5台，冷蔵庫保有台数：1台，そして気温：32.23℃を用いて，デマンドレスポンスの節電効果を評価している。

デマンドレスポンスの節電効果が最も大きくなる場合についても同様に計算できる。すなわち，デマンドレスポンスの節電効果を促進する要因は，その変数の65%点の値を用い，節電効果を抑制する要因に関しては，その変数の35%点の値を使用する。したがって，所得カテゴリー：6.5，世帯人数：3.5人，昼間在宅者数：1人，エアコン保有台数：3台，冷蔵庫保有台数：1台，そして気温：30.03℃を用いて，デマンドレスポンスの節電効果を評価している。

また，平均点で評価する場合は，全ての変数について50%点の値で評価している。すなわち，所得カテゴリー：5，世帯人数：3人，冷蔵庫保有台数：1台，エアコン保有台数：4台，気温：31.4℃，そして昼間在宅者数：1人を用いて，デマンドレスポンスの節電効果を評価している。

デマンドレスポンスの節電効果は，以下の通りである。節電要請による節電効果は，Case1(休日データ有り)で約2.290%から約6.245%である。一方，Case2(休日データ無し)では，約0.519%から4.313%となっている。また，TOUの節電効果は，Case1で約4.528%から12.099%，Case2で約1.036%から約8.439%となっている。CPPの節電効果については，Case1で約6.715%(CPP40)から約27.560%(CPP80)，Case2で約1.550%(CPP40)から約19.782%(CPP80)である。

最後に，電力消費のピークシフト効果について分析する。前節の推定結果からも明らかのように，デマンドレスポンスはピーク時間帯の前後に電力消費をシフトさせる効果がある。ここでは，こうしたピークシフト効果と，ピーク時間帯の節電量を比較することで，デマンドレスポンスの1日当たりの純節電効果を計算する。表2.7は，ピーク時間帯のデマンドレスポンスの節電効果がI：最も小さくなる場合，II：平均点で評価した場合，そしてIII：最も大きくなる場合について，デマンドレスポンスの純節電効果をそれぞれ計算したものである。表2.8の第2列目は，デマンドレスポンスのピークシフト効果を表しており，第3列目以降は，純節電効果を表している。

計算の結果，以下のことが明らかとなった。まず，ピークシフト効果はCase1(休

日データ有り)で約 1.410% (節電要請) から約 7.251% (CPP80) であり, Case2 (休日データ無し) で約 0.302% (節電要請) から約 1.557% (CPP80) である. また, 表 2.8 から明らかなように, ピーク時間帯のデマンドレスポンスの節電効果が小さい場合においても, Case1 で約 0.880% (節電要請) から約 3.688% (CPP80), Case2 で約 0.217% (節電要請) から約 1.013% (CPP80) の純節電効果が確認されている. 一方, ピーク時間帯のデマンドレスポンスの節電効果が最大となる場合の純節電効果は, Case1 で約 4.835% (節電要請) から約 20.309% (CPP80), Case2 で約 4.010% (節電要請) から約 18.225% (CPP80) であった.

6. おわりに

本章では, 1 時間当たり電力消費量のデータを用いて, 世帯の異質性や気温の変化がデマンドレスポンスの節電効果に与える影響について分析した. 具体的には, I. 詳細な世帯属性を考慮しながらデマンドレスポンスの節電効果を推定し, II. その推定結果を用いて, 様々な状況におけるデマンドレスポンスの節電効果をシミュレーションした. 詳細な世帯属性として, 所得, 世帯人数, 昼間在宅者数, エアコン保有台数, 冷蔵庫保有台数に注目した. また, デマンドレスポンスのタイプとして, 節電要請, TOU, CPP を取り上げた. 分析の結果, 以下の 3 点が明らかとなった. 第 1 に, デマンドレスポンスは電力消費を削減させる効果があることが明らかとなった点である. 一方で, デマンドレスポンス実施後の電力消費量は増加傾向にあることも確認されており, 異時点間の需要の代替が行われていることを示唆している.

第 2 に, デマンドレスポンスの節電効果は I. 節電要請, II. TOU, III. CPP の順に大きくなることが明らかとなった. また, CPP の金額が高くなるにつれて節電効果が大きくなることも確認されている.

第 3 に, デマンドレスポンスの節電効果は, 世帯属性, 気温に依存することが確認された. 例えば, デマンドレスポンスの節電効果は, 所得と正の相関があり, 所得が高くなると節電効果が大きくなることが明らかとなった. 一方, 昼間在宅者数や気温の増加は, デマンドレスポンスの節電効果を減少させることが確認された.

最後に、今後の研究課題について述べておく。第 1 に、デマンドレスポンスが社会厚生にどのような影響を与えるのかについて分析することである。特に、どのような世帯がデマンドレスポンスによって効用が悪化するのかということや、デマンドレスポンスを実施することで、企業の利潤がどうなるのかについて分析することは政策面において重要な課題である。

第 2 に、よりバイアスを取り除いた実証分析を行うことである。本研究ではデマンドレスポンスの変数をカウント変数として議論した。しかしながら、カウント変数を用いた場合は、デマンドレスポンスの限界効果が一定であると仮定されているため、限界効果に関して柔軟な分析を行うためにはダミー変数を用いた分析が必要である。また、本研究で使用した電力価格体系は、**Increasing Block Rate** であるため、価格は需要とともに増加する。その結果、計量経済学における同次性の問題が発生するため、これを考慮した分析が必要であろう。

最後に、非効率的な電力消費がどの程度なのかを明らかにすることである。電力消費には世帯が生活するうえで最低限必要な電力消費と、非効率的な電力消費があるとされている¹⁸。生活をするために必要な電力消費を削減することは容易ではないが、非効率的な電力消費であれば、世帯に大きな負担を強いることなく電力消費の削減が可能であると考えられる。そのため、非効率的な電力消費が総電力消費に占める割合を理解することは、こうした電力消費の削減を達成するための重要な第 1 ステップであろう。次章以降では、こうした非効率的な電力消費にも注目して、世帯の電力需要関数およびデマンドレスポンスの節電効果を分析する。

¹⁸ 例えば、Filippini and Hunt (2011, 2012) や Mizutani and Nakamura (2015) は、非効率的な電力消費を考慮した電力需要関数について分析している。

表 2.1： 主な先行研究

著者・年	データ・分析方法	主な結果
Faruqui and George (2005)	データ: カリフォルニア州, US; 世帯, 小規模 商業施設; 2003年7月から2004年12月 分析方法: 説明なし(おそらく回帰分析)	- VPP (-), CPP (-), TOU (-)
Herter et al. (2007)	分析方法: カリフォルニア州, US; 世帯レベ ル; 2003年7月から2004年9月 分析方法: マッチング推定	- CPP (-)
Faruqui and Sergici (2010)	アメリカで行われた15のDR実験の結果をま とめたもの 分析方法: サーベイ研究	- VPP (-), CPP (-), TOU (-)
Herter and Wayland (2010)	データ: カリフォルニア州, US; 世帯レベル, 2004年7月から9月 分析方法: OLS	- ピーク時間帯のDR節電効果 (-) - DR実施日翌日の節電効果 (+) - DR実施日前日の節電効果 (+)
Kim and Shchervakova (2011)	デマンドレスポンスのメリット・デメリッ ト・実行可能性についてまとめたもの	- DR実施のための課題 消費者: DRに対する知識 企業: 収益性 政府: DRプログラムの設計
Faruqui and Sergici (2011)	データ: ボルチモア, US; 世帯レベル, 2008 年・2009年 分析方法: SUR, 固定効果モデル, PRISM	- モデル 1: 価格のピーク・オフピーク比・THI*の差 (-), THIの差(+), 価格のピーク・オフピーク比・THI の差・PTR(+), 価格のピーク・オフピーク比・THIの 差・Tech (-) - モデル 2: 1日当たりの電力価格・THI (-)

		*THI; 気温や湿度を総合的に表す指数
Joskow and Wolfram (2012)	先行研究から DR プログラムの教訓をまとめたもの	- DR プログラムのメリット: (i) ピーク時の電力消費の抑制, (ii) 過剰な設備投資の削減, (iii) 電力会社の市場支配力の抑制 - DR プログラムの課題: (i) スマートメーター設置のコスト, (ii) 料金体系の複雑化, (iii) 消費者の DR に対する知識不足, (iv) 所得分配の不公平性
Ida et. al. (2013)	データ: 京都・北九州, 日本; 世帯レベル; 2012年7月から9月 分析方法: 固定効果モデル	- 節電要請 (-), 節電要請・所得 (-), CPP (-) - CPP・所得 (+), CPP・平均電力使用量 (+)
Faruqui et al. (2014)	データ: コネチカット州, US; 世帯, 小規模商業施設; 2009年6月から8月 分析方法: SUR, 固定効果モデル, PRISM モデル 1; 電力消費のピーク・オフピーク比率への影響 モデル 2; 1日当たり電力消費量への影響	- モデル 1: 価格のピーク・オフピーク比・THI の差 (-), THI の差 (+), 価格のピーク・オフピーク比・THI の差・PTR (+), 価格のピーク・オフピーク比・THI の差・Tech (-) - モデル 2: 1日当たりの電力価格・THI (-)
Jessoe and Rapson. (2014)	データ: コネチカット州, US; 世帯レベル; 2011年7月から8月 分析方法: ITT(OLS), TOT(2SLS),	- 価格 (-), 価格+IHD (-), (価格+IHD)・(IHD を見る回数) (-), (価格+IHD)・(DR 実施通知の確認) (-), (価格+IHD)・DR 後(+)

注. 括弧内の符号は, その変数が電力消費を増加させる場合は(+)となり, 減少させる場合には(-)となる.

表 2.2 : 記述統計

変数 (定義 : 単位)	Mean	Std. Dev.	Min	Max
E (1 時間あたり電力消費量 : kWh)	-0.878	0.761	-4.605	2.625
P (電力価格 : 円/kWh)	3.146	0.115	2.996	3.258
DR_{peak} (13 時から 16 時のデマンドレスポンス変数 : 0-5)	0.169	0.701	0.000	5.000
DR_{pre} (6 時から 12 時のデマンドレスポンス変数 : 0-5)	0.297	0.908	0.000	5.000
DR_{pos} (17 時から 23 時のデマンドレスポンス変数 : 0-5)	0.297	0.908	0.000	5.000
N_{inc} (所得カテゴリー : 1-12)	5.915	2.722	1.000	12.000
N_{home} (昼間在宅者数 : 人)	1.295	0.959	0.000	4.000
N_{fam} (世帯人数 : 人)	3.190	1.200	1.000	7.000
N_{refrig} (冷蔵庫保有台数 : 台)	1.134	0.432	0.000	3.000
N_{air} (エアコン保有台数 : 台)	3.573	1.710	0.000	10.000
H_{age} (築年数 : 年)	3.181	1.615	1.000	6.000
H_{size} (延べ床面積カテゴリー : 1-7)	4.302	1.055	1.000	7.000
H_{type} (住居タイプダミー : 集合住宅=1, それ以外=0)	0.770	0.421	0.000	1.000
H_{all} (オール電化ダミー : オール電化=1, それ以外=0)	0.312	0.463	0.000	1.000
O_{temp} (気温 : °C)	26.635	4.074	14.900	35.800
O_{week} (休日ダミー : 休日=1, それ以外=0)	0.339	0.473	0.000	1.000
O_{sep} (9 月ダミー : 9 月=1, それ以外=0)	0.475	0.499	0.000	1.000

注 : サンプル数は 685,524

表 2.3 : グループ別記述統計

変数	コントロールグループ				節電要請グループ				DR グループ			
	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>E</i>	0.581	0.596	0	7.4	0.585	0.669	0	7.9	0.537	0.536	0	7.52
<i>P</i>	23.565	2.599	20	26	23.456	2.618	20	26	23.402	2.613	20	26
<i>DR_{peak}</i>	0	0	0	0	0.064	0.245	0	1	0.442	1.105	0	5
<i>DR_{pre}</i>	0	0	0	0	0.12	0.325	0	1	0.774	1.371	0	5
<i>DR_{pos}</i>	0	0	0	0	0.12	0.325	0	1	0.774	1.371	0	5
<i>N_{inc}</i>	6.018	2.792	1	11	5.964	2.588	2	12	5.852	2.744	1	12
<i>N_{home}</i>	1.22	0.961	0	4	1.259	1.033	0	4	1.337	0.923	0	4
<i>N_{fam}</i>	3.202	1.255	1	6	3.277	1.151	1	7	3.148	1.199	1	6
<i>N_{refrig}</i>	1.11	0.414	0	3	1.17	0.516	0	3	1.129	0.397	0	3
<i>N_{air}</i>	3.661	1.587	0	8	3.554	1.913	0	10	3.542	1.667	0	9
<i>H_{age}</i>	3.147	1.647	1	6	3.232	1.737	1	6	3.17	1.546	1	6
<i>H_{size}</i>	4.404	1.015	2	7	4.348	1.075	2	7	4.239	1.059	1	7
<i>H_{type}</i>	0.835	0.371	0	1	0.839	0.367	0	1	0.712	0.453	0	1
<i>H_{all}</i>	0.321	0.467	0	1	0.393	0.488	0	1	0.273	0.445	0	1
<i>O_{temp}</i>	26.491	4.29	14.9	35.8	26.491	4.29	14.9	35.8	26.491	4.29	14.9	35.8
<i>O_{sep}</i>	0.487	0.5	0	1	0.487	0.5	0	1	0.487	0.5	0	1
サンプル数	102024				104832				247104			

表 2.4 : DR_{peak} , DR_{pre} , DR_{pos} の定義

DR_{peak}	グループ	日	時間帯
$DR_{peak} = 1$	グループ B	節電要請実施日	13:00 から 16:00
$DR_{peak} = 2$	グループ C・D	TOU 実施日	13:00 から 16:00
$DR_{peak} = 3$	グループ C・D	CPP40 実施日	13:00 から 16:00
$DR_{peak} = 4$	グループ C・D	CPP60 実施日	13:00 から 16:00
$DR_{peak} = 5$	グループ C・D	CPP80 実施日	13:00 から 16:00
$DR_{peak} = 0$	それ以外		
DR_{pre}	グループ	日	時間帯
$DR_{pre} = 1$	グループ B	節電要請実施日	6:00 から 12:00
$DR_{pre} = 2$	グループ C・D	TOU 実施日	6:00 から 12:00
$DR_{pre} = 3$	グループ C・D	CPP40 実施日	6:00 から 12:00
$DR_{pre} = 4$	グループ C・D	CPP60 実施日	6:00 から 12:00
$DR_{pre} = 5$	グループ C・D	CPP80 実施日	6:00 から 12:00
$DR_{pre} = 0$	それ以外		
DR_{pos}	グループ	日	時間帯
$DR_{pos} = 1$	グループ B	節電要請実施日	17:00 から 23:00
$DR_{pos} = 2$	グループ C・D	TOU 実施日	17:00 から 23:00
$DR_{pos} = 3$	グループ C・D	CPP40 実施日	17:00 から 23:00
$DR_{pos} = 4$	グループ C・D	CPP60 実施日	17:00 から 23:00
$DR_{pos} = 5$	グループ C・D	CPP80 実施日	17:00 から 23:00
$DR_{pos} = 0$	それ以外		

表 2.5：推定結果

モデル	固定効果モデル				変量効果モデル			
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7	ケース 8
休日変数	有	有	無	無	有	有	無	無
DR 変数	カウント	ダミー	カウント	ダミー	カウント	ダミー	カウント	ダミー
$\ln P$	-0.079*** (0.024)	-0.080*** (0.024)	-0.077*** (0.024)	-0.081*** (0.025)	-0.064*** (0.023)	-0.064*** (0.024)	-0.059** (0.024)	-0.064** (0.025)
DR_{peak}	-0.761*** (0.101)		-0.495*** (0.108)		-0.765*** (0.101)		-0.499*** (0.107)	
DR_{pre}	0.000 (0.004)		-0.003 (0.005)		0.000 (0.004)		-0.002 (0.005)	
DR_{pos}	0.014*** (0.005)		0.006 (0.006)		0.014*** (0.004)		0.006 (0.006)	
$DR_{peak} * N_{inc}$	-0.006** (0.002)		-0.005** (0.002)		-0.006** (0.002)		-0.005** (0.002)	
$DR_{peak} * N_{home}$	0.019*** (0.007)		0.018** (0.007)		0.019*** (0.007)		0.018** (0.007)	
$DR_{peak} * N_{fam}$	-0.004 (0.005)		-0.007 (0.005)		-0.004 (0.005)		-0.007 (0.005)	
$DR_{peak} * N_{refrig}$	0.015 (0.013)		0.017 (0.013)		0.015 (0.013)		0.017 (0.013)	
$DR_{peak} * N_{air}$	0.002 (0.004)		0.003 (0.004)		0.002 (0.004)		0.003 (0.004)	
$DR_{peak} * \ln O_{temp}$	0.208*** (0.028)		0.136*** (0.029)		0.209*** (0.028)		0.137*** (0.029)	
RQ_{peak}		-2.513*** (0.674)		-2.257*** (0.676)		-2.509*** (0.674)		-2.252*** (0.676)
RQ_{pre}		0.002 (0.014)		0.002 (0.015)		0.001 (0.014)		0.001 (0.015)
RQ_{pos}		0.014 (0.016)		-0.007 (0.018)		0.014 (0.016)		-0.007 (0.018)

$RQ_{peak} * N_{inc}$	-0.026** (0.012)	-0.024** (0.012)	-0.026** (0.012)	-0.024** (0.012)
$RQ_{peak} * N_{home}$	0.086*** (0.024)	0.085*** (0.024)	0.086*** (0.024)	0.085*** (0.024)
$RQ_{peak} * N_{fam}$	0.013 (0.028)	0.008 (0.027)	0.013 (0.028)	0.008 (0.027)
$RQ_{peak} * N_{refrig}$	0.034 (0.051)	0.031 (0.052)	0.034 (0.051)	0.030 (0.052)
$RQ_{peak} * N_{air}$	-0.018 (0.015)	-0.015 (0.015)	-0.018 (0.015)	-0.014 (0.015)
$RQ_{peak} * \ln O_{temp}$	0.708*** (0.193)	0.656*** (0.194)	0.707*** (0.193)	0.655*** (0.194)
TOU_{peak}	-2.043*** (0.261)	-1.670*** (0.264)	-2.052*** (0.261)	-1.681*** (0.264)
TOU_{pre}	0.020 (0.016)	0.026 (0.030)	0.020 (0.016)	0.026 (0.028)
TOU_{pos}	0.042** (0.018)	0.027 (0.033)	0.041** (0.018)	0.027 (0.032)
$TOU_{peak} * N_{inc}$	-0.019*** (0.007)	-0.018** (0.007)	-0.019*** (0.007)	-0.018** (0.007)
$TOU_{peak} * N_{home}$	0.063*** (0.022)	0.059*** (0.022)	0.063*** (0.022)	0.059*** (0.022)
$TOU_{peak} * N_{fam}$	-0.020 (0.014)	-0.029** (0.015)	-0.020 (0.015)	-0.029** (0.015)
$TOU_{peak} * N_{refrig}$	0.030 (0.038)	0.035 (0.040)	0.030 (0.038)	0.035 (0.040)
$TOU_{peak} * N_{air}$	0.003 (0.011)	0.009 (0.011)	0.003 (0.011)	0.009 (0.011)
$TOU_{peak} * \ln O_{temp}$	0.581*** (0.075)	0.495*** (0.075)	0.584*** (0.074)	0.498*** (0.075)
$CPP40_{peak}$	1.112**	1.387**	1.124**	1.401**

	(0.556)	(0.556)	(0.556)	(0.556)
<i>CPP40_{pre}</i>	-0.018 (0.017)	-0.018 (0.030)	-0.018 (0.017)	-0.018 (0.029)
<i>CPP40_{pos}</i>	0.078*** (0.020)	0.056* (0.034)	0.078*** (0.020)	0.056* (0.033)
<i>CPP40_{peak} * N_{inc}</i>	-0.019** (0.009)	-0.017* (0.009)	-0.019** (0.009)	-0.017* (0.009)
<i>CPP40_{peak} * N_{home}</i>	0.047 (0.029)	0.044 (0.029)	0.047 (0.029)	0.044 (0.029)
<i>CPP40_{peak} * N_{fam}</i>	-0.010 (0.019)	-0.019 (0.019)	-0.009 (0.019)	-0.019 (0.019)
<i>CPP40_{peak} * N_{refrig}</i>	0.067 (0.052)	0.073 (0.053)	0.067 (0.052)	0.072 (0.053)
<i>CPP40_{peak} * N_{air}</i>	0.018 (0.015)	0.024 (0.015)	0.018 (0.015)	0.024 (0.015)
<i>CPP40_{peak} * ln O_{temp}</i>	-0.377** (0.157)	-0.435*** (0.157)	-0.380** (0.157)	-0.439*** (0.157)
<i>CPP60_{peak}</i>	-1.746** (0.734)	-1.588** (0.742)	-1.721** (0.734)	-1.561** (0.742)
<i>CPP60_{pre}</i>	0.018 (0.017)	0.017 (0.030)	0.018 (0.017)	0.017 (0.028)
<i>CPP60_{pos}</i>	0.078*** (0.019)	0.057* (0.033)	0.078*** (0.019)	0.057* (0.032)
<i>CPP60_{peak} * N_{inc}</i>	-0.017* (0.010)	-0.015 (0.010)	-0.017* (0.010)	-0.015 (0.010)
<i>CPP60_{peak} * N_{home}</i>	0.048* (0.025)	0.045* (0.026)	0.048* (0.025)	0.045* (0.026)
<i>CPP60_{peak} * N_{fam}</i>	0.001 (0.020)	-0.009 (0.020)	0.001 (0.020)	-0.008 (0.020)
<i>CPP60_{peak} * N_{refrig}</i>	0.027 (0.052)	0.032 (0.054)	0.027 (0.052)	0.032 (0.054)

$CPP60_{peak} * N_{air}$	0.012 (0.015)	0.018 (0.015)	0.012 (0.015)	0.018 (0.015)
$CPP60_{peak} * \ln O_{temp}$	0.464** (0.211)	0.439** (0.213)	0.456** (0.211)	0.431** (0.213)
$CPP80_{peak}$	-0.487 (0.769)	-0.163 (0.766)	-0.521 (0.769)	-0.203 (0.766)
$CPP80_{pre}$	-0.009 (0.016)	-0.009 (0.029)	-0.009 (0.016)	-0.010 (0.028)
$CPP80_{pos}$	0.034* (0.020)	0.013 (0.034)	0.034* (0.020)	0.013 (0.033)
$CPP80_{peak} * N_{inc}$	-0.016* (0.009)	-0.014 (0.009)	-0.016* (0.009)	-0.014 (0.009)
$CPP80_{peak} * N_{home}$	0.054** (0.027)	0.050* (0.027)	0.053** (0.027)	0.050* (0.027)
$CPP80_{peak} * N_{fam}$	-0.012 (0.019)	-0.021 (0.019)	-0.011 (0.019)	-0.021 (0.019)
$CPP80_{peak} * N_{refrig}$	0.097** (0.048)	0.102** (0.049)	0.097** (0.048)	0.102** (0.049)
$CPP80_{peak} * N_{air}$	0.001 (0.013)	0.007 (0.013)	0.001 (0.013)	0.007 (0.013)
$CPP80_{peak} * \ln O_{temp}$	0.074 (0.218)	0.002 (0.217)	0.084 (0.218)	0.013 (0.217)
N_{inc}			0.012** (0.006)	0.011* (0.006)
N_{home}			0.039** (0.017)	0.041** (0.017)
N_{fam}			0.107*** (0.013)	0.115*** (0.013)
N_{refrig}			0.112*** (0.041)	0.109*** (0.040)
N_{air}			0.076*** (0.077***)	0.074*** (0.074***)

H_{age}					(0.013)	(0.013)	(0.013)	(0.013)
					0.021**	0.021**	0.020**	0.020**
					(0.010)	(0.010)	(0.010)	(0.010)
H_{size}					0.038**	0.038**	0.038**	0.038**
					(0.019)	(0.019)	(0.019)	(0.019)
H_{type}					0.037	0.038	0.020	0.022
					(0.049)	(0.049)	(0.049)	(0.049)
H_{all}					0.325***	0.325***	0.329***	0.330***
					(0.034)	(0.034)	(0.034)	(0.034)
$\ln O_{temp}$	0.355***	0.356***	0.396***	0.393***	0.361***	0.362***	0.404***	0.401***
	(0.021)	(0.021)	(0.022)	(0.022)	(0.021)	(0.021)	(0.022)	(0.022)
$O_{weekend}$	0.033***	0.035***			0.033***	0.035***		
	(0.006)	(0.008)			(0.006)	(0.008)		
O_{sep}	-0.079***	-0.079***	-0.092***	-0.094***	-0.078***	-0.078***	-0.091***	-0.092***
	(0.006)	(0.007)	(0.007)	(0.007)	(0.006)	(0.007)	(0.007)	(0.007)
定数項	-1.702***	-1.704***	-1.829***	-1.802***	-2.995***	-3.000***	-3.123***	-3.102***
	(0.117)	(0.118)	(0.123)	(0.125)	(0.142)	(0.143)	(0.147)	(0.148)
24 時間ダミー	yes	yes	yes	yes	Yes	Yes	yes	yes
サンプル数	685,524	685,524	453,139	453,139	685,524	685,524	453,139	453,139
決定係数	0.138	0.139	0.168	0.169	0.262	0.262	0.281	0.281
世帯数	485	485	485	485	485	485	485	485
対数尤度	-582820	-582451	-376473	-376131	-	-	-	-

注. Clustered robust standard errors in parentheses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

表 2.6 : 気温, 所得, 昼間在宅者数の変動による DR の節電効果の違い

DR タイプ	気温(°C)			所得			昼間在宅者数	
	30.3	31.4	32.23	4.5	5	6.5	1	1.5
<i>Case 1 (include weekends)</i>								
節電要請	-5.018%	-4.540%	-3.793%	-4.253%	-4.540%	-5.395%	-4.540%	-3.629%
TOU	-9.784%	-8.874%	-7.442%	-8.325%	-8.874%	-10.499%	-8.874%	-7.126%
CPP40	-14.311%	-13.011%	-10.953%	-12.224%	-13.011%	-15.328%	-13.011%	-10.496%
CPP60	-18.611%	-16.960%	-14.331%	-15.958%	-16.960%	-19.896%	-16.960%	-13.744%
CPP80	-22.695%	-20.730%	-17.580%	-19.532%	-20.730%	-24.218%	-20.730%	-16.874%
<i>Case 2 (exclude weekends)</i>								
節電要請	-2.964%	-2.645%	-2.147%	-2.401%	-2.645%	-3.372%	-2.645%	-1.764%
TOU	-5.839%	-5.219%	-4.249%	-4.744%	-5.219%	-6.630%	-5.219%	-3.498%
CPP40	-8.630%	-7.726%	-6.305%	-7.031%	-7.726%	-9.779%	-7.726%	-5.201%
CPP60	-11.338%	-10.166%	-8.317%	-9.263%	-10.166%	-12.821%	-10.166%	-6.873%
CPP80	-13.965%	-12.542%	-10.285%	-11.442%	-12.542%	-15.761%	-12.542%	-8.517%

注. 変動させる変数以外の他の変数は, サンプルの 50%点の値を用いて計算している.

表 2.7: シナリオ別 DR 節電効果

DR タイプ	最も小さくなるケース	平均的となるケース	最も大きくなるケース
<i>Case 1 (include weekends)</i>			
節電要請	-2.290%	-4.540%	-6.245%
TOU	-4.528%	-8.874%	-12.099%
CPP40	-6.715%	-13.011%	-17.588%
CPP60	-8.851%	-16.960%	-22.735%
CPP80	-10.939%	-20.730%	-27.560%
<i>Case 2 (exclude weekends)</i>			
節電要請	-0.519%	-2.645%	-4.313%
TOU	-1.036%	-5.219%	-8.439%
CPP40	-1.550%	-7.726%	-12.388%
CPP60	-2.061%	-10.166%	-16.166%
CPP80	-2.570%	-12.542%	-19.782%

注.

- (1) 最も小さくなるケース：節電効果を促進させる変数はサンプルの 35%点，節電効果を抑制させる変数はサンプルの 65%点の値を使用.
- (2) 最も大きくなるケース：節電効果を促進させる変数はサンプルの 65%点，節電効果を抑制させる変数はサンプルの 35%点の値を使用.
- (3) 平均的となるケース：全ての変数についてサンプルの 50%点の値を使用.

表 2.8：シナリオ別 DR の純節電効果

DR Type	DR 実施前後 7 時間の電力消費量の増加	DR の純効果		
		最も小さくなるケース	平均的となるケース	最も大きくなるケース
<i>Case 1 (include weekends)</i>				
節電要請	1.410%	-0.880%	-3.130%	-4.835%
TOU	2.840%	-1.689%	-6.034%	-9.260%
CPP40	4.289%	-2.425%	-8.721%	-13.299%
CPP60	5.760%	-3.092%	-11.200%	-16.975%
CPP80	7.251%	-3.688%	-13.479%	-20.309%
<i>Case 2 (exclude weekends)</i>				
節電要請	0.302%	-0.217%	-2.342%	-4.010%
TOU	0.908%	-0.128%	-4.312%	-7.532%
CPP40	0.920%	-0.630%	-6.806%	-11.468%
CPP60	1.236%	-0.825%	-8.930%	-14.930%
CPP80	1.557%	-1.013%	-10.985%	-18.225%

注.

- (1) DR の純効果は、DR 実施日におけるピーク時間帯の電力消費の変化量と、ピーク時間帯前後の電力消費量の変化量を加えたもの。
- (2) 最も小さくなるケース：節電効果を促進させる変数はサンプルの 35%点，節電効果を抑制させる変数はサンプルの 65%点の値を使用。
- (3) 最も大きくなるケース：節電効果を促進させる変数はサンプルの 65%点，節電効果を抑制させる変数はサンプルの 35%点の値を使用。
- (4) 平均的となるケース：全ての変数についてサンプルの 50%点の値を使用。

第 3 章

デマンドレスポンスの節電効果の持続性に関する分析： 非効率的な電力消費¹行動を考慮した実証分析

1. はじめに

前章では、デマンドレスポンス実験期間中における世帯の 1 時間当たり電力消費データを用いて、節電要請、TOU、そして CPP の節電効果を分析した。また、これらの節電効果は世帯属性や気温等によって異なることが考えられるため、こうした世帯の異質性や気温の変化による節電効果の違いについても分析した。分析の結果、どのデマンドレスポンスも、その実施時間帯²の世帯の電力消費を減少させることが明らかとなった。この結果は、多くの先行研究と整合的であり、デマンドレスポンスは節電に有効的であると言える。また、デマンドレスポンス実施時間帯前後の世帯の電力消費行動についても分析したところ、デマンドレスポンス実施時間帯後 7 時間の電力消費量が増加する傾向にあることが確認された。

本章では、デマンドレスポンスの節電効果について次の 2 点に注目して分析する。第 1 に、デマンドレスポンスの持続的な節電効果に注目する点である。デマンドレスポンスはその実施期間中のみに節電効果をもたらすのではなく、実施期間後の世帯の電力消費行動にも持続的な影響を与えているかもしれない。例えば、世帯がデマンドレスポンスを経験することでこれまで以上に節電に関心を持つようになり、その結果として節電に対する知識の蓄積や電力消費行動の変化を生じさせるかもしれない。また、節電に関する知識の蓄積や行動の変化だけではなく、世帯は保有する家電を省エネ性の高い製品に買い替えるなどして節電することも考えられる。デマンドレスポンスがもたらすこうした節電行動は、デマンドレスポンスが持つ持続的な節電効果と言えよう。この持続的な節電効果を推定することは、興味深い課題であると考えている。

¹ 非効率的な電力消費については、本章第 4 節で説明する。

² デマンドレスポンス実施時間帯とは、デマンドレスポンス実験期間中に、デマンドレスポンスを実施した時間帯のことを言い、デマンドレスポンス実験期間全体のことではない点に留意する必要がある。

また持続的な節電効果を分析することは、デマンドレスポンスの費用対効果を考える上でも重要である。なぜなら、デマンドレスポンスに持続的な節電効果がある場合、デマンドレスポンス実施期間のみに注目した短期的効果だけではデマンドレスポンスの節電効果を過少に推定していることになるためである。そのため、持続的な節電効果を考慮しないまま費用対効果を分析すると、本来であれば費用対効果の観点から社会的に望ましいかもしれないデマンドレスポンスを、社会的に望ましくないと判断してしまう可能性もある。したがって、デマンドレスポンスの節電効果を分析する際には、デマンドレスポンス実験期間中のみに注目した短期的分析だけではなく、デマンドレスポンス実験終了後の持続的な節電効果にも注目した長期的な分析が必要であろう。

しかしながら、既存の実証研究の多くは、短期的な節電効果に注目しており、持続的な節電効果を分析した実証研究は少ない³。その上、持続的な節電効果を検証した論文の多くは、非価格型デマンドレスポンスに注目しており、価格誘導型デマンドレスポンスについて分析したものは更に少ない。

そこで本分析は、先行研究で注目されていた非価格型デマンドレスポンスの持続的な節電効果に加えて、価格誘導型デマンドレスポンスの持続的な節電効果に注目して分析する。この時、非価格型デマンドレスポンスについては節電要請、価格誘導型デマンドレスポンスについては **TOU**、**CPP** の節電効果に注目する。

本研究が注目する第2のポイントは、世帯の非効率的な電力消費の存在である。第1章や第2章の最後でも述べた通り、デマンドレスポンスを導入するためには、世帯の電力消費の中にどの程度の潜在的に削減可能な電力消費量が存在するのかわることが重要である。そのためには、世帯の電力消費に占める非効率的な電力消費の割合を明らかにすることが必要であろう。なぜなら、非効率的な電力消費を削減することは、生活のために最低限必要な電力消費を削減することと比べて社会的にも心理的にも許容的であると推測されるためである。また、普段から効率的に電力を消費している世帯に対してデマンドレスポンスを行ったとしても、十分な節電効果が得られないと考えられることも、非効率的な電力消費の大きさを推定することの重要性を示唆しているであろう。加えて、**Energy Information**

³ 持続的な節電効果に関する先行研究の詳細については、本章第2.2節で説明する。

Administration (EIA) や International Energy Agency (IEA) が、非効率的な電力消費の改善を今後の解決すべき重要な課題の 1 つとして考えていることから分かる通り、非効率的な電力消費に関する分析は重要である⁴。

以上の 2 点を考慮し、本章では、世帯の非効率的な電力消費の存在を考慮した電力需要関数を推定し、価格誘導型・非価格型デマンドレスポンスの持続的な節電効果を分析するとともに、非効率的な電力消費の時間を通じた推移についても分析する。

分析の結果、以下の点が明らかとなった。第 1 に、価格誘導型デマンドレスポンスには、持続的な節電効果があることが明らかとなった。一方、節電要請には持続的な節電効果が確認されなかった。この結果から、非効率的な電力消費の改善による節電を達成するためには、価格誘導型インセンティブが有効であることがわかる。第 2 に、非効率的な電力消費は、時間を通じて増加傾向にあることが明らかとなった。また、この増加傾向はグループ間 (i.e. コントロールグループ、節電要請グループ、価格誘導型デマンドレスポンスグループ) で差がないことも確認された。これは、本章の分析に使用したデータが秋から冬にかけてのものであり、夏のデマンドレスポンス実験で体得した節電知識や習慣が全て冬に応用できるものではないことが原因でないかと考えられる。第 3 に、本研究で推定された非効率的な電力消費の改善を通じた持続的な節電効果は、保有家電を省エネ性の高い家電に買い替えたことによるものではないことが明らかとなった。この結果は、持続的な非効率性の改善が世帯の節電に対する知識や行動の習慣化によって達成された可能性が高いことを示唆している。

本章の構成は以下の通りである。第 2 節で分析に使用するデータを紹介する。第 3 節では非効率的な電力消費を考慮した需要関数の理論的背景と推定モデルについて説明し、第 4 節でその推定結果を紹介する。そして本章のまとめを第 5 節で行う。

2. 先行研究

⁴ 例えば、IEA (2009) を参照。

2.1. 持続的な節電効果に関する実証研究

持続的な節電効果を検証した論文の多くは、非価格型デマンドレスポンスに注目している (Ito et. al. 2015; Costa and Kahn 2013; Allocett and Rogers 2012; Allcott 2011) . 例えば, Allocett and Rogers (2012) は, Opower が実施した電力消費に関する社会実験のデータを用いて, 非価格型デマンドレスポンスによる節電の長期的な効果を推定した. 彼らは非価格型デマンドレスポンスとして, I. 他の世帯の平均的な電力消費情報と, II. 節電知識の提供を同時に行っている. 分析の結果, これらの非価格型デマンドレスポンスは持続的な節電に有効であることが明らかとなった.

また, Houde et.al. (2013)は, 非価格型デマンドレスポンス以外の持続的な節電効果を分析している. 彼らは Google と協力して, 各世帯に各自の電力消費量をフィードバックさせることによる持続的な節電効果について分析している. 分析の結果, 世帯に電力消費量をフィードバックすることには持続的な節電効果があることが確認された.

電気事業以外では, 水道需要に関して同様の研究が行われている (Ferraro et.al. 2011; Ferraro and Price 2013; Bernedo et.al. 2014) . これらの研究は, ジョージア州アトランタの水道事業を担っている Cobb County Water System (CCWS) が行った水道需要に関する社会実験のデータを用いて, 非価格型デマンドレスポンスによる節水の持続的な効果を推定したものである. これらの研究の中で取り上げられている非価格型デマンドレスポンスは, I. 節水知識の提供, II. 節水要請, そして III. 水道消費に関する世帯間比較のデータの提供である. 分析の結果, 水道消費に関する世帯間比較が持続的な節水に最も効果的であることが明らかとなった. また, この節水効果は時間が経つにつれて徐々に減少していくものの, 4年間は持続していることが確認された.

本分析は, 先行研究で注目されていた非価格型デマンドレスポンスの持続的な節電効果に加えて, 価格誘導型デマンドレスポンスの持続的な節電効果についても分析する. 具体的には, 非価格型デマンドレスポンスについては節電要請, 価格誘導型デマンドレスポンスについては TOU, CPP の節電効果に注目する.

2.2. 電力消費の非効率性に関する先行研究

これまでの先行研究には、非効率的な電力消費に関する明確な定義はなかった。この問題に対して **Filippini and Hunt (2011, 2012)** は、確率的フロンティアモデルを応用した電力消費の非効率性の推定方法を提案している。彼らは、確率的フロンティアモデルにおける非効率項を、非効率的な電力消費と見立てて分析している。非効率的な電力消費に関する研究で、この手法を用いた研究は幾つかある (**Filippini and Orea 2014; Filippini et al 2014 Filippini et al 2015**)。本研究でも **Filippini and Hunt (2011, 2012)** に従って、確率的フロンティアモデルを用いた電力需要関数を推定する。

3. データ

3.1. 大規模デマンドレスポンス実験について

本分析では、2012年7月23日から9月28日の間にけいはんな地域⁵で行われたデマンドレスポンス大規模社会実験のデータを使用する。本実験は、スマート設備やデマンドレスポンスの導入による節電の可能性を検証するために、経済産業省が主体となって進めている「次世代エネルギー・社会システム実証」の一つである⁶。

本実験の参加世帯数は681世帯であり、そのうち212世帯はオール電化の世帯である。参加対象世帯の中には、1戸建てに住む世帯のほかにアパートのような集合住宅に住む世帯も含まれている。参加世帯は次の4つのグループにランダムに振り分けられる。グループAはコントロールグループであり、このグループはデマンドレスポンスを受けない。グループBは節電要請を受けるトリートメントグループ、そしてグループC、Dは価格誘導型デマンドレスポンスを受けるトリートメントグループである⁷。本実験では、価格誘導型デマンドレスポンスとして、TOUとCPPの2つに注目している。TOUは、平日の13時から16時の間の電力料金に+20円/kWhを加えるものである。CPP40、CPP60、CPP80はそれぞれ+40円/kWh、+60円/kWh、+80円

⁵ けいはんな地域とは京都府、大阪府、奈良県にまたがる地域のことであり、本分析では京田辺市、木津川市、精華市が分析対象地域となっている。

⁶ けいはんな地域のほかに、横浜市、豊田市、北九州市が実験対象地域となっている。詳しくは「スマートコミュニティ実証について」、経済産業省を参照。

⁷ グループC、Dは別のグループに分けられているが、同じトリートメントを受けているため、本研究では同一のグループとして扱うことにする。

/kWh を、TOU に代わって電力料金に加えるものであり、前日 17 時までにはその実施有無を知らされることになる。また、CPP40、CPP60、CPP80 の実施条件は、翌日の最高気温が 30 度を超えると予想される場合であり、実施回数はそれぞれ 5 回、計 15 回実施される。なお、節電要請は CPP が実施される日に行われる。

3.2. 使用する変数について

デマンドレスポンスの節電効果の持続性を分析するため、本研究は、デマンドレスポンス実験終了後の世帯の 1 日当たり電力消費量のデータに注目する。具体的には、453 世帯 ($i = 1, \dots, 453$) の 2012 年 10 月 1 日から 2012 年 12 月 16 日 ($t = 1, \dots, 79$) のパネルデータを利用して分析する。ここで、各グループの世帯数は、グループ A : 103 世帯、グループ B : 106 世帯、グループ C・D : 244 世帯となっている。なお、休日・祝日の電力消費行動は平日のそれと異なると考えられるため、本研究では休日・祝日のデータを排除している。また、原データには自家発電設備を保有する世帯の電力消費に関する情報も含まれているが、こうした設備を持つ世帯の電力使用量の中には、スマートメーターで観測できない電力消費量⁸があるため、自家発電設備を保有する世帯も本分析から排除している。

表 3.1、表 3.2 は本研究で使用する変数の説明および記述統計である。 E は 1 日当たりの電力使用量である。 N_{inc} は所得を表すカテゴリ変数であり、1 (200 万円未満) から 12 (1500 万円以上) までの値をとる。 N_{air} はエアコン保有台数であり、 H_{size} は延べ床面積を表すカテゴリ変数であり、1 ($20m^2$ 未満) から 7 ($200m^2$ 以上) の値をとる。また、 N_{child} 、 $N_{student}$ 、 N_{elder} はそれぞれ、世帯における 5 歳以下の人数、6 歳から 18 歳の人数、60 歳以上の人数を表している。 $O_{temp,t}$ は最高気温である。 Rep_a はエアコン買い替えに関するダミー変数、 Buy_a はエアコン新規購入に関するダミー変数である。また、表 3.3 はグループ別の記述統計であるが、この記述統計を見る限り、参加世帯は各グループにランダムに振り分けられていると考えられる。

⁸ 本研究における電力使用量とは、各世帯に取り付けられたスマートメーターによって記録された電力消費量のことである。この電力使用量は、関西電力が保有する配電設備を通して使用されたものだけが記録されており、世帯が自家発電して使用した電力使用量はスマートメーターには記録されていない。

4. 分析方法

4.1. 電力需要関数の理論的背景

本研究では、世帯の1日当たり電力需要関数を考える。一般に、世帯の電力需要は暖房、照明、調理、給湯といったエネルギーサービスを楽しむために生じると考えられ、経済学ではこの電力需要を **Household Production Theory** を用いて定式化することが多い。**Household Production Theory** とは、消費者が効用を得るための財を直接市場で購入して消費するのではなく、投入要素を市場で購入し、効用を得るための財は自身で生産して消費する場合を分析した理論であり、ミクロ経済学における消費者理論と企業理論を統合したものであると言える⁹。このフレームワークのもとでは、電力は投入要素、エネルギーサービスは消費者が効用を得るために生産される財であると考えられる。したがって、電力需要関数は要素需要関数として扱うことができる。すなわち、電力需要 E は電力価格 p とエネルギーサービス S の関数として次のように表現される。

$$E = E(p, S) \tag{1}$$

4.2. 推定モデル

我々は世帯が生産、消費するエネルギーサービスをデータとして観測することができない。そこで本研究では、このエネルギーサービスを世帯属性や気温によって近似することを考える。すなわち、式(1)を以下のように書き換える。

$$\begin{aligned} E^T &= E(p, S) \\ &= E(N_{inc}, N_{air}, N_{child}, N_{student}, N_{elder}, H_{size}, O_{temp}, \eta_i) \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 E^T は電力需要の理論値、 N_{inc} は所得を表すカテゴリ変数、 N_{air} はエアコ

⁹ Household Production Theory の詳細については、Deaton and Muellbauer (1980) や Filippini (1999) , Filippini (2011) を参照。

ン保有台数¹⁰， H_{size} は延べ床面積を表すカテゴリー変数，そして $N_{child}, N_{student}, N_{elder}$ はそれぞれ，世帯における5歳以下の人数，6歳から18歳の人数，60歳以上の人数である．また， O_{temp} は1日の最高気温である．最後に， η_i は研究者が観測できない世帯*i*の電力消費に対する選好の異質性を表している．

異質性 η_i を上式に含めた意義を理解するために，ここでは冬場の暖房需要を例に考えてみる．寒がりである人が多い世帯は，そうでない世帯と比べて暖房というエネルギーサービスを生産，消費のために冬場に多くの電力を消費すると考えられる．こうした選好の違いは，世帯の電力需要に大きな影響を与えるが，世帯人数や所得だけでこれを代理することは難しい．したがって，これらの要因を考慮するためにも式(2)に個人の異質性を含めることが重要である．

それでは，実際の推定モデルの特定化について考える．式(2)の電力需要 E^T は理論値であるため，実際の世帯の電力消費量 E^a は上式から乖離する可能性がある．実際の電力消費データ E^a が理論値 E^T から乖離する要因として考えられるのが，I. 非効率的な電力消費 EF と，II. 攪乱項 ϵ の存在である．非効率的な電力消費とは，保有家電の省エネ性や節電に対する知識の欠如によって生じる非効率的な電力消費ことである．世帯は，経済学が想定しているような効率的な電力消費をいつも行っているとは限らない．したがって，電力を効率的に消費していない世帯は無意識のうちに過剰に消費している可能性がある．そのため，実際のデータを用いて電力需要関数を推定するときには，これらの要因を考慮する必要がある．そこで本分析では，式(2)の右辺にこれらの要因を加えた推定モデルを考える．すなわち，

$$\begin{aligned} E^a &= E^T + EF + \epsilon \\ &= E(N_{inc}, N_{air}, N_{child}, N_{student}, N_{elder}, H_{size}, O_{temp}, \eta_i) \\ &\quad + EF + \epsilon \end{aligned} \quad (3)$$

である．なお，こうした非効率的な電力消費量はデータから直接観測できないため，本研究では確率的フロンティアモデルを応用して電力需要関数を推定する．

¹⁰ **Household Production Theory**では，エアコンはエネルギーサービスを生産するための資本ストックとして考えられる．そのため，資本ストックを調整できる長期の状況を考える場合には，こうした資本ストックは電力需要関数に含まれない．しかしながら本研究で使用しているデータは2ヶ月間のデータであり，資本ストックを調整するには十分な期間とは言えないであろう．したがって，本研究におけるエアコン保有台数を電力需要関数に含めた．

一般に、確率的フロンティアモデルは生産活動の効率性や費用最小化の非効率性を推定するために利用されることが多い。ここでは、経済主体が最大限生産（最小限削減できる）できる確率的生産（費用）フロンティア関数を推定し、その生産（費用）フロンティア関数と各経済主体の生産量（費用）との乖離を効率性（非効率性）として推定している。本研究における電力需要関数は要素需要関数であり、エネルギーサービスを一定量の生産するために最小限必要な電力需要量を表しているため、費用フロンティア関数を応用することで推定できよう¹¹。

以上をもとに、本研究では次の確率的フロンティアモデルを推定する。

$$\begin{aligned} \ln E_{it}^a = & \alpha + \beta_1 N_{inc,i} + \beta_2 H_{size,i} + \beta_3 N_{air,i} + \beta_4 N_{child,i} \\ & + \beta_5 N_{student,i} + \beta_4 N_{elder,i} + \beta_5 \ln O_{temp,it} + u_{it} + v_{it} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\ln E_{it}^a$ は1日当たりの電力消費量の自然対数値であり、 $N_{inc,i}$ は所得を表すカテゴリ変数、 $N_{air,i}$ はエアコン保有台数、 $H_{size,i}$ は延べ床面積を表すカテゴリ変数、そして $N_{child,i}$ 、 $N_{student,i}$ 、 $N_{elder,i}$ はそれぞれ、世帯における5歳以下の人数、6歳から18歳の人数、60歳以上の人数である。また、 $\ln O_{temp,t}$ は最高気温の自然対数値を表している。 v_{it} は分布 $N(0, \sigma_v^2)$ に従う誤差項であり、 u_{it} は非効率的な電力消費を表し、 $N^+(\mu_{it}, \sigma_u^2)$ の分布に従うと仮定する。

ここで、推定方法の制約により、式(4)では研究者が観測できない世帯の異質性 η_i が非効率項 u_{it} の中に含まれている点に留意する必要がある。先にも述べたが、電力消費に対する選好の異質性が世帯の電力消費に与える例として、冬場の暖房需要があったことを思い出してもらいたい。もちろん、こうした電力消費を非効率的な消費であると断定することは恣意的であると言える。しかしながら、これは世帯の節電努力によって削減できる電力消費であるという点で、世帯人数や家の大きさなどによって決まる物理的な電力消費とは性質が異なると考えられる。したがって、本分析ではこのような電力消費も潜在的に非効率的な電力消費として分析する¹²。

¹¹ 要素需要関数における非効率性に関する議論は Kumbhakar and Lovell (2000) を参照のこと。

¹² 個人の価値観をコントロールする方法として、True Random Effect Model (TRE) や True Fixed Effect Model (TFE) を用いた確率的フロンティアモデルがあるが、これらの手法を用いた推定結果は不安定であったので、本研究では使用しない。詳しく

本研究の目的は、世帯の非効率的な電力消費の存在を考慮した電力需要関数を推定し、価格誘導型・非価格型デマンドレスポンスの持続的な節電効果を分析するとともに、非効率的な電力消費の時間を通じた推移についても分析することであった。そのため、本研究は Battese and Coelli (1995) で提案された手法を用いることで、非効率項 u_{it} の決定要因について分析する。具体的には、非効率項 u_{it} を次の3つのパターンとして定式化し、式(4)と同時に推定することを試みる。第1に、非効率項 u_{it} の時間を通じた推移に注目したモデルである。

$$\begin{aligned} u_{it} &= \gamma_0 + \gamma_T Trend_t + w_{it} \\ w_{it} &\sim N^+(0, \sigma_u^2) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $Trend$ はトレンド変数($t = 1, \dots, 79$)を表している。

第2に、時間の推移に加えて、デマンドレスポンスが非効率項 u_{it} に与える長期的な影響にも注目したモデルである。ここでは、非効率項 u_{it} を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} u_{it} &= \gamma_0 + \gamma_{Warn} Warn_i + \gamma_{DR} DR_i + \gamma_T Trend_t + w_{it} \\ w_{it} &\sim N^+(0, \sigma_u^2) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $Warn$ は節電要請を受けた世帯を表すダミー変数であり、 DR はTOUおよびCPPを受けた世帯を表すダミー変数である。また、 $Trend$ はトレンド変数である。

第3に、非効率項 u_{it} の時間を通じた推移が、デマンドレスポンスを受けたことによってどのように異なるのかを分析するモデルを考える。ここでは、非効率項 u_{it} を、

$$\begin{aligned} u_{it} &= \gamma_0 + \gamma_1 Warn_i + \gamma_2 DR_i + \gamma_3 Trend_t + \gamma_4 Warn_i * Trend_t \\ &\quad + \gamma_5 DR_i * Trend_t + w_{it} \\ &\text{where } w_{it} \sim N^+(0, \sigma_u^2) \end{aligned} \quad (7)$$

として定義する。

最後に、式(3)における非効率的な電力消費量 EF の求め方について説明しておこ

は本章第4節の注釈13を参照のこと。

う。まず、得られたパラメータを利用して非効率項の推定値 \hat{u}_{it} を計算する。次に、この推定値を用いて電力消費の非効率性を表す尺度を次のように計算する。

$$\xi_{it} = 1 - \frac{E_{it}^F}{E_{it}^a} = 1 - \exp(-\hat{u}_{it}) \quad (8)$$

ここで、 E_{it}^F はフロンティア関数上の電力需要量であり、これは式(4)における $(\alpha + \beta_1 \text{Income}_i + \beta_2 H_{size,i} + \beta_3 N_{air,i} + \beta_4 N_{child,i} + \beta_5 N_{student,i} + \beta_4 N_{elder,i} + \beta_5 \ln O_{temp,it})$ のことである。 E_{it}^a は実際の電力消費量であり、非効率性 ξ_{it} は0(最も効率的なケース)から1(最も非効率なケース)の値をとる。この非効率性 ξ に、実際の電力消費量 E^a を乗じることで、非効率的な電力消費量 EF が求まる。

5. 推定結果

5.1. 需要関数の推定

表 3.4 は推定結果を表している。Model I は式(4)と式(5)を用いた推定結果である。Model II は式(4)と式(6)の推定結果である。Model III は式(4)と式(7)の推定結果である。はじめに、確率的フロンティアモデルにおける非効率性 u_{it} の重要性を表す指標である λ について見ていく。 λ は σ_u^2/σ_v^2 であり、これは研究者が観測不可能な u_{it} と v_{it} の比率を表したものである。この値が1を超える場合は、観測不可能な要因に占める非効率性の割合が比較的大きいことを意味しているため、その場合には非効率性と誤差項を区別して分析すべきであると考えられている。各モデルの推定結果は、Model Iで0.910、Model IIで0.927、そしてModel IIIで0.934となっており、全てのモデルにおいてこの値がほぼ1となっている。従って、非効率性が電力消費に与える影響は誤差項の影響と同等である¹³。

次に、フロンティア項の推定結果について見ていく。表 3.4 のパート I はフロンティア項の推定結果である。どの変数も経済学的に予想された符号を持ち、統計的に有意な結果となっている。また、係数の大きさについても安定的な結果が得られ

¹³ しかしながら、各モデルにおける OLS 推定から得られる決定係数を見ると、観測不可能な電力消費に与える影響は大きいことが推測される。したがって、観測不可能な要因を、誤差項と非効率項に分けて分析することは重要であろう。

ている。所得については、どのモデルにおいてもカテゴリーが1つ上がるごとに、電力消費が約2%増加することが確認された。この結果から、電力需要は所得に対して非弾力的であることが推測される。また、エアコン保有台数が多い世帯ほど、電力消費が増加することが明らかとなった。エアコン保有台数が1台増えるごとに、Model Iでは約9.1%、Model IIでは約9%、Model IIIでは約8.9%の電力消費量の上昇が見込まれる。延べ床面積の増大による電力消費の増加量は、Model Iで約4.5%、Model IIとModel IIIで約4.2%となっている。世帯人数の影響については、5歳以下の人数が1人増えるごとに、電力消費がModel Iでは約9.5%、Model IIとModel IIIでは約9.6%増加し、6歳から18歳的人数が1人増えると、Model Iでは約11.1%、Model IIとModel IIIでは約11.4%の電力消費の増加が予測される。また、60歳以上的人数が1人増えるごとに、Model Iでは約11.4%、Model IIでは約12%、Model IIIでは約12.1%電力消費が増加すると推測される。またこの結果から、世帯人数の増加の中でも、高齢者の増加が電力消費に最も影響を与えることが確認できる。最高気温は自然体数値となっているため、係数は弾力性を表している。すなわち、気温が1%上昇するとModel Iでは約0.68%、Model IIでは約0.78%、Model IIIでは約0.87%電力消費が減少することが分かる。最高気温が高くなるにつれて電力消費が減少しているのは、使用したデータが秋から冬にかけてのデータであることが大きいと考えられる。

5.2. 非効率性の推定

表3.4のパートIIは非効率項 u の推定結果である。非効率項 u の時間を通じた変化(i.e. *Trend*項の係数)を見ると、どのモデルにおいても時間が経過するにつれて電力消費が非効率になる傾向がうかがえる。次に、デマンドレスポンスの節電効果の持続性について見ていく。Model IIの推定結果を見ると、価格誘導型デマンドレスポンスは、非効率的な電力消費を持続的に改善させることが明らかとなった。一方、節電要請(非価格型デマンドレスポンス)は持続的な改善に有意でないことが分かる。しかしながら、Model IIIでは、どちらのデマンドレスポンスも有意でないことに留意する必要がある。ただし、片側検定で判断すれば、Model IIIにおいても価格誘導型デマンドレスポンスは、10%有意で非効率的な電力消費を持続的に改善させることが確認される。

ところで、世帯の電力消費は時間を通じて非効率的になる傾向があったが、その大きさがデマンドレスポンスによってどのように異なるのかを分析することは興味深いと考えられる。Model III における係数 $Warn*Trend$ と $DR*Trend$ は、こうした効果を推定するものである。この結果から、非効率項の時間を通じた悪化傾向の大きさには、グループ間で差がないことが分かる。ただし片側検定で見ると、価格誘導型デマンドレスポンスは 10% で有意であった点には留意する必要がある。図 3.1 は、モデル II の結果を用いて時間を通じた非効率性 ξ の変化をグループ別に図示したものである。この図からも、世帯の電力消費は時間を通じて非効率的になり、その大きさは価格誘導型デマンドレスポンスを受けたグループと、そうでないグループとの間で差がないことが伺える。

表 3.5 は 10 月 1 日から 12 月 16 日までの電力消費の非効率性 ξ に関する記述統計である。この表を見ると、世帯の潜在的な非効率性 ξ の平均値は約 19% から約 21% となっている。ここで、前節でも述べたが、この非効率性 ξ には個人の電力消費に対する異質性が含まれている点に留意する必要がある。したがって、非効率性 ξ のうち、どの程度が世帯の異質性によるものなのかを明らかにすることは興味のある課題であるが、これは今後の研究課題とする¹⁴。

5.3. 非効率性改善の要因：節電行動と省エネ家電の影響

これまでの分析から、デマンドレスポンスは、世帯の非効率的な電力消費を持続的に改善する傾向があることが確認された。ここでは、こうした持続的な非効率性の改善が保有家電の省エネ性改善によるものなのか、節電知識の習得・節電行動の習慣形成によるものなのか、それともこれらの両方によるものなのかを明らかにする。

表 3.6 はデマンドレスポンス実験後の世帯の家電買い替え行動について分析した結果である。表 3.6 における Model I はデマンドレスポンスがエアコンの買い

¹⁴ 先にも述べたが、Greene (2005a, 2005b) は、こうした世帯の異質性をコントロールして非効率性を計算する方法として TRE モデルと TFE モデルを提案している。しかし、これらの方法には 2 つの欠点がある。第 1 に、時間に不変となる世帯の異質性をコントロールすると、時間に不変な非効率性が推定不可能となる。第 2 に、これらのモデルの尤度関数は複雑であるため、最適化計算が収束しない場合がある。本研究でも尤度関数の最適化計算が収束しなかったため、TRE モデルと TFE モデルの結果を載せなかった。

替えに影響を与えたのかを分析したものであり、Model II は洗濯機の買い替え、そして Model III は LED 照明の買い替え行動を分析したものである。なお、推定には OLS を用いた。この結果を見ると、価格誘導型デマンドレスポンスや節電要請は世帯のエアコンの買い替え行動に影響を与えていたことが伺える。一方、その他の財については価格誘導型デマンドレスポンス、節電要請ともに買い替え行動に影響を与えていないことが分かる。したがって、第 4-2 節で得られた結果は、こうした省エネ家電への買い替え行動によるものであるかもしれない。どのような要因が非効率的な電力消費の改善に重要であるのかを明らかにすることは、政策的にも学術的にも興味深いテーマであろう。そこで本節では、家電の買い替え行動が非効率性の改善にどの程度貢献しているのかを分析する。なお、ここでは掲載しないが、デマンドレスポンスがエコ家電の新規購入に与えた影響を分析すると、デマンドレスポンスを受けた世帯は統計的に有意にエアコンを新規購入する傾向が見られた。したがって、推定の際には、式(4)の右辺のフロンティア項にエアコンの新規購入の有無を表す buy_i ダミー、非効率項にエアコンの買い替えの有無を表す rep_i ダミーを追加したモデルを推定する。

表 3.7 は買い替えや新規購入行動の影響を考慮したもとの非効率的な電力消費の長期的な改善効果について分析したものである。表 3.7 の Model I は、エアコンの買い替え行動に関するダミー変数を加えることで、買い替え行動をコントロールした上でのデマンドレスポンスによる非効率性の改善効果を推定したものである。この結果を見ると、買い替え行動による非効率性の改善効果は確認されない一方で、金銭的デマンドレスポンス効果は統計的に有意となっている。

もちろん、買い替え行動が電力消費に与える影響はグループ間で異なる可能性があるその結果、Model I において買い替え行動の効果が統計的に有意とならなかったということも考えられる。こうした点を考慮して、グループ別に買い替え行動の効果を分析した。Model II はコントロールグループに関する推定結果であり、Model III は節電要請グループ、Model IV は価格誘導型デマンドレスポンスのグループに関する結果である。分析の結果、どのグループにおいても買い替え行動の有効性が確認されなかった。

以上の結果から、デマンドレスポンスによる持続的な非効率性の改善効果は、保有家電の省エネ性の改善によるものではなく、世帯の節電に対する知識や行動の

習慣化によるものである可能性が高いことが明らかとなった。

6. おわりに

本章では、世帯の非効率的な電力消費の存在を考慮することで、価格誘導型・非価格型デマンドレスポンスの非効率的な電力消費の改善を通じた長期的な節電効果を分析するとともに、非効率的な電力消費の時間を通じた推移についても分析した。分析の結果、以下の点が明らかとなった。第 1 に、価格誘導型デマンドレスポンスには持続的な非効率性の改善効果があることが明らかとなった。一方、節電要請には持続的な改善効果が確認されなかった。この結果は、持続的な非効率性の改善をもたらすためには、価格誘導型デマンドレスポンスが有効であることを示唆している。

第 2 に、非効率性は時間を通じて増加傾向であることが明らかとなった。また、この増加傾向は、グループ間 (i.e. コントロールグループ、節電要請グループ、金銭的デマンドレスポンスグループ) で差がないことが確認された。これは、本章の分析に使用したデータが秋から冬にかけてのものであり、夏のデマンドレスポンス実験で体得した節電知識や習慣が全て冬に応用できるものではないことが原因でないかと考えられる。

第 3 に、本研究で推定された非効率的な電力消費の持続的な改善は、保有家電を省エネ性の高い家電に買い替えたことによるものではないことが明らかとなった。この結果は、持続的な非効率性の改善が、世帯の節電に対する知識や節電行動の習慣化によるものである可能性が高いことを示唆している。

最後に、今後の課題として次の 2 点を述べる。第 1 に、世帯の異質性をコントロールした上で非効率的な電力消費量を推定することである。第 3 節でも説明したとおり、本分析では世帯の価値観や生活スタイルを非効率的な電力消費の決定要因として分析した。したがって、こうした要因が、電力消費の中で、どの程度の割合を占めているのかを明らかにすることは重要であろう。

第 2 に、データ期間を拡張する必要がある。本研究ではデマンドレスポンス実験終了後の約 2 ヶ月半を分析対象とした。しかしながら、この 2 ヶ月半の分析をもって長期的な効果を考えるには期間が短いようにも思われる。したがって、他の

先行研究で行われているように、3年後や4年後のデータを用いることで、より長期的な効果を分析する必要がある。

表 3.1 : 使用する変数の説明

変数	説明 (単位)
E	1 日当たり電力消費量
N_{inc}	所得 (カテゴリー変数 : 1-12)
N_{air}	エアコン保有台数 (台)
H_{size}	延べ床面積 (カテゴリー変数 : 1-7)
N_{child}	世帯内の 6 歳以下の人数 (人)
$N_{student}$	世帯内の 12 歳以上 18 歳以下的人数 (人)
N_{elder}	世帯内の 60 歳以上的人数 (人)
O_{temp}	1 日の最高気温 (°C)
Rep_a	エアコン買い替えダミー (1 : 買い替え, 0 : それ以外)
Buy_a	エアコン新規購入ダミー (1 : 新規購入, 0 : それ以外)

表 3.2 : 記述統計

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>E</i>	10.554	5.911	1.010	142.700
<i>N_{inc}</i>	5.863	2.686	1.000	12.000
<i>N_{air}</i>	3.455	1.700	0.000	10.000
<i>H_{size}</i>	4.194	1.084	1.000	7.000
<i>N_{child}</i>	0.245	0.587	0.000	4.000
<i>N_{student}</i>	0.589	0.903	0.000	3.000
<i>N_{elder}</i>	0.678	0.911	0.000	3.000
<i>O_{temp}</i>	17.832	5.674	7.900	28.500
<i>Rep_a</i>	0.080	0.271	0.000	1.000
<i>Buy_a</i>	0.025	0.158	0.000	1.000
obs.	16642			

表 3.3 : グループ別記述統計

Variable	Group A				Group B				Group C・D			
	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>E</i>	11.784	7.788	1.500	142.700	10.965	6.109	1.200	49.000	9.907	4.761	1.010	52.750
<i>N_{inc}</i>	6.183	2.750	2.000	11.000	6.212	2.568	2.000	12.000	5.605	2.675	1.000	12.000
<i>N_{air}</i>	3.690	1.562	0.000	8.000	3.500	1.917	0.000	10.000	3.345	1.657	0.000	8.000
<i>H_{size}</i>	4.352	1.050	2.000	7.000	4.288	1.125	2.000	7.000	4.096	1.072	1.000	7.000
<i>N_{child}</i>	0.282	0.586	0.000	2.000	0.212	0.477	0.000	2.000	0.243	0.622	0.000	4.000
<i>N_{student}</i>	0.549	0.819	0.000	3.000	0.621	0.981	0.000	3.000	0.593	0.904	0.000	3.000
<i>N_{elder}</i>	0.521	0.837	0.000	3.000	0.773	0.950	0.000	3.000	0.706	0.917	0.000	3.000
<i>O_{temp}</i>	17.832	5.675	7.900	28.500	17.832	5.675	7.900	28.500	17.832	5.674	7.900	28.500
<i>Rep_a</i>	0.028	0.165	0.000	1.000	0.106	0.308	0.000	1.000	0.090	0.287	0.000	1.000
<i>Buy_a</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.171	0.000	1.000	0.034	0.181	0.000	1.000
Obs.	3763				3498				9381			

表 3.4 : デマンドレスポンスによる非効率的な電力消費の持続的な改善効果

	Model I	Model II	Model III
Part I			
N_{inc}	0.021*** (0.008)	0.021*** (0.008)	0.021*** (0.008)
N_{air}	0.087*** (0.015)	0.086*** (0.014)	0.085*** (0.014)
H_{size}	0.044*** (0.017)	0.041** (0.017)	0.041** (0.017)
N_{child}	0.090*** (0.030)	0.092*** (0.030)	0.092*** (0.030)
$N_{student}$	0.105*** (0.021)	0.108*** (0.021)	0.108*** (0.021)
N_{elder}	0.108*** (0.028)	0.113*** (0.027)	0.114*** (0.028)
$\ln O_{Temp}$	-0.068*** (0.026)	-0.078** (0.031)	-0.087*** (0.033)
<i>Constant</i>	1.404*** (0.128)	1.444*** (0.140)	1.493*** (0.152)
Part II			
<i>Trend</i>	0.019*** (0.002)	0.018*** (0.003)	0.015*** (0.003)
<i>Warn</i>		-0.092 (0.113)	-0.408 (0.362)
<i>DR</i>		-0.176* (0.099)	-0.469 (0.321)
<i>Trend*Warn</i>			0.008 (0.007)
<i>Trend*DR</i>			0.007 (0.005)
<i>Constant</i>	-0.535*** (0.129)	-0.401** (0.202)	-0.354** (0.176)
Other Parameters			
σ_u	0.296*** (0.048)	0.300*** (0.051)	0.306*** (0.057)

σ_v	0.328*** (0.019)	0.323*** (0.019)	0.328*** (0.017)
λ	0.910*** (0.064)	0.927*** (0.065)	0.934*** (0.068)
Obs.	16309	16309	16309
Log-Likelihood	-7024.925	-6970.106	-6956.872

注. Clustered robust standard errors in parentheses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

表 3.5 : 非効率性の記述統計

	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Model I	0.207	0.102	0.053	0.610
Model II	0.208	0.102	0.053	0.617
Model III	0.191	0.100	0.049	0.611

注. 計算に使用したサンプル数は 16309 であり, 期間は 2011 年 10 月 1 日から 12 月 16 日である.

表 3.6 : デマンドレスポンス実験後の買い替え行動に関する推定結果

	Model I	Model II	Model III
N_{inc}	-0.006 (0.007)	0.001 (0.006)	0.003 (0.008)
N_{air}	0.029** (0.012)	0.003 (0.005)	-0.006 (0.013)
H_{size}	-0.005 (0.016)	0.000 (0.012)	0.013 (0.025)
N_{child}	-0.030** (0.012)	-0.002 (0.022)	-0.009 (0.030)
$N_{student}$	-0.004 (0.016)	0.013 (0.015)	0.054** (0.027)
N_{elder}	0.031 (0.022)	-0.002 (0.017)	0.071** (0.032)
$Warn$	0.078** (0.038)	0.034 (0.041)	-0.073 (0.057)
DR	0.066** (0.026)	-0.008 (0.026)	-0.030 (0.052)
$Constant$	-0.028 (0.068)	0.020 (0.063)	0.046 (0.108)
Obs.	16309	16309	16309
R-Squared	0.084	0.011	0.038
Log-Likelihood	-1023.758	2540.440	-5513.020

注. Clustered robust standard errors in parentheses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.

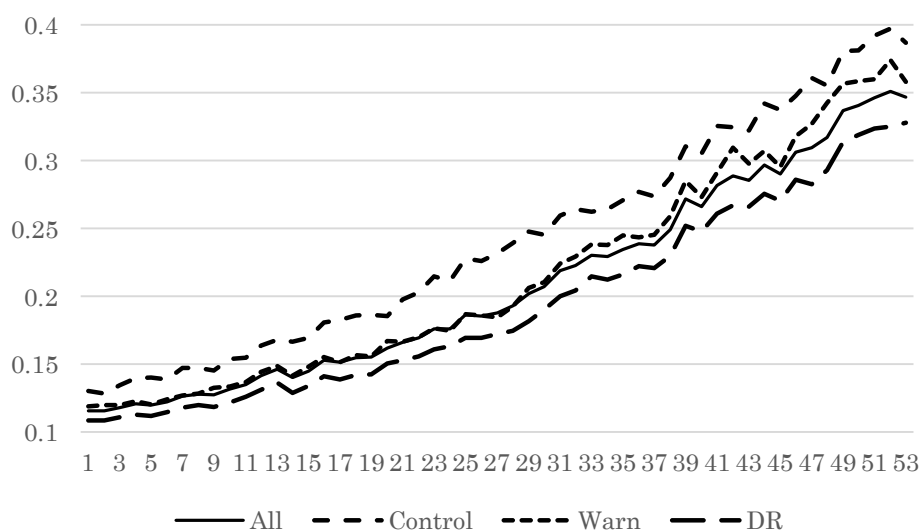
表 3.7 : 買い替え行動を考慮した非効率的な電力消費の持続的な改善効果

	Model I	Model II	Model III	Model IV
Part I				
N_{inc}	0.021*** (0.008)	0.028* (0.017)	0.022** (0.010)	0.023 (0.017)
N_{air}	0.085*** (0.014)	0.097*** (0.035)	0.088*** (0.019)	0.077*** (0.023)
H_{size}	0.042** (0.017)	0.066 (0.041)	0.028 (0.021)	0.032 (0.034)
$\ln O_{temp}$	-0.077** (0.031)	-0.092 (0.064)	-0.023 (0.030)	-0.167*** (0.048)
N_{child}	0.090*** (0.030)	-0.038 (0.066)	0.159*** (0.035)	-0.073 (0.077)
$N_{student}$	0.108*** (0.021)	0.137*** (0.045)	0.128*** (0.026)	0.058 (0.047)
N_{elder}	0.110*** (0.027)	0.185*** (0.063)	0.087*** (0.034)	0.139* (0.074)
buy_a	0.099 (0.124)		0.114 (0.149)	0.162 (0.104)
$Constant$	1.439*** (0.141)	1.211*** (0.200)	1.293*** (0.161)	1.955*** (0.288)
Part II				
$Trend$	0.018*** (0.003)	0.025*** (0.009)	0.018*** (0.003)	0.009*** (0.002)
$Warn$	-0.107 (0.113)			
DR	-0.189* (0.099)			
Rep_a	0.102 (0.121)	0.414 (0.416)	0.159 (0.116)	-0.040 (0.161)
$Constant$	-0.389** (0.195)	-1.059 (0.880)	-0.486** (0.198)	-0.193*** (0.046)
Other Parameters				
σ_u	0.297*** (0.052)	0.577*** (0.184)	0.269*** (0.050)	0.024 (0.061)

σ_v	0.323*** (0.019)	0.249*** (0.035)	0.304*** (0.023)	0.371*** (0.024)
λ	0.919*** (0.066)	2.320*** (0.201)	0.887*** (0.066)	0.064 (0.067)
Obs.	16309	3641	9262	3406
Log-Likelihood	-6947.775	-1609.157	-3402.046	-1460.579

注. Clustered robust standard errors in parentheses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

図 3.1 : 時間を通じた非効率性の変化



第 4 章

非効率的な電力消費行動を考慮した電力需要関数の推定

1. はじめに

本章では、非効率的な電力消費を考慮した電力需要関数を推定するとともに、デマンドレスポンスによって、非効率的な電力消費がどのように変化するかを分析する。これまでも説明してきた通り、非効率的な電力消費が全体電力消費に占める割合を明らかにすることは、実務的にも学術的にも重要な課題である。また、電力価格が非効率的な電力消費にどのような影響を与えるのかを明らかにすることも、同様に重要である。なぜなら、電力価格は、非効率性の改善を通して電力消費を削減させる可能性もあると考えられるためである。

図 4.1 は、この状況を図示したものである。ここで、縦軸 P は電力価格、横軸 Q は電力消費量を表している。この時、 D_e は効率的に電力を消費している世帯の電力需要曲線であり、 D_{ie} は非効率的な電力消費を行っている世帯の電力需要曲線を表している。従来の経済学で考えられている需要曲線は D_e であるが、本章では、これに非効率的な電力消費を加えたものが、実際に観測される世帯の電力需要曲線であると考えている。この仮説の下では、非効率的な電力消費をしている世帯は、効率的な需要曲線 D_e に非効率性を加えた需要曲線 D_{ie} 上にいると考えている一方、効率的に電力を消費している世帯は、この世帯の電力需要曲線は D_e 上になる。また、この非効率性は電力価格が高くなるにつれて改善されていくと考えられるため、非効率的な電力消費を行う世帯の電力需要曲線 D_{ie} の傾きは、効率的な需要曲線 D_e のそれと異なってくる。その結果、非効率的な電力消費がある世帯は、効率的な世帯と比べて価格に弾力的となり、電力価格上昇時の消費削減量が大きくなることが予想される。

電力価格の上昇による非効率性の改善が行われる要因の一つとして、世帯の自身の電力消費に対する関心の高まりが考えられる。すなわち、電力価格が高くなると、世帯がこれまで以上に自己の電力消費に関心を持ち、スマートメーターなどから自己の電力消費に関する情報を得ようとすることが考えられる。その結果、世帯は過剰で非効率な電力使用がある場合にはそれを抑制することが予想される。電

力価格の上昇による電力消費量の変化を I.効率的な電力消費量の変化と、II.非効率性の変化に分けて分析することは、価格誘導型デマンドレスポンスのような節電政策を考える上で重要である。しかしながら、世帯レベルの電力需要関数に関する先行研究では、こうした非効率性が考慮されていない。

本章では、デマンドレスポンス大規模実験のデータを用いて電力消費行動の非効率性を考慮した 1 時間当たりの電力需要関数を推定するとともに、非効率的な電力消費が総電力消費に占める割合を明らかにする。具体的には、確率的フロントティアモデルを用いることで、世帯の総電力消費を効率的な電力消費と非効率な電力消費に分割することを試みる。その上で、電力需要の価格弾力性を計算し、価格を用いたデマンドレスポンスの節電効果についても考察する。なお、前章でも指摘したとおり、世帯の電力消費行動に関する非効率性を推定する際には、研究者が観測不可能な個人の異質性に留意する必要がある。本章では Greene (2005a, 2005b)で提案された True Random Effect Model を用いて、こうした観測不可能な異質性を考慮する。また、使用するデータの特性を活かして節電要請の効果についても電力価格と同様に分析する。

分析の結果、以下の 3 点が明らかとなった。第 1 に、世帯の非効率な電力消費が確認される点である。この非効率な電力消費は、個人の異質性を除いた上でも存在しており、世帯の電力消費には更なる節電の余地があると言えよう。第 2 に、効率的な電力消費行動をとっている世帯の電力需要曲線は垂直であり、価格に対して非弾力的である一方、非効率な世帯の需要曲線は右肩下がりであることが明らかとなった。言い換えると、非効率な電力消費は、デマンドレスポンスが厳しくなるにしたがって改善される。第 3 に、節電要請のような非価格型デマンドレスポンスは、非効率な電力消費に影響を与えないことが明らかとなった。

本章の構成は以下の通りである。第 2 節では、先行研究を紹介する。第 3 節では非効率な電力消費を考慮した電力需要関数を導出する。第 4 節において、本章で使用するデータの実験内容、変数の定義について説明し、続く第 5 節で推定結果を考察する。最後の第 6 節において、本章のまとめと今後の研究課題について述べる。

2. 先行研究

2.1. デマンドレスポンスに関する先行研究

電力需要関数に関する研究は数多く行われている。その中でもデマンドレスポンスに関する研究は、電力需要関数を考える上でも重要である¹。そこで本節では、デマンドレスポンスに関する実証分析を中心に先行研究を紹介する。デマンドレスポンスに関する先行研究には次のような特徴が見られる。第 1 に、世帯の個票レベルのデータを用いた研究が多く、企業に対するデマンドレスポンスについて分析した研究は少ない点である。今後は企業レベルの研究の蓄積が必要とされている。

第 2 に、多くの先行研究ではデマンドレスポンスが電力消費の抑制に有効であるという結果が得られているが、その効果はデマンドレスポンスの種類によって異なることが確認されている点である。先行研究では TOU, CPP, RTP, Peak Time Rebate (PTR) といった、金銭的インセンティブを伴う様々なデマンドレスポンスに加えて、節電要請といった非価格誘導型のデマンドレスポンスの効果についても研究されている。Faruqui and George (2005) では、デマンドレスポンスとして VPP, CPP, TOU の効果について分析しており、その中でも VPP が電力消費の抑制に最も効果的であるという結論を得ている。また、Faruqui et al. (2014) は TOU, CPP, PTR について分析している。同様に、Faruqui and Sergici (2011) においても、TOU, CPP, PTR について分析しており、そこではピーク時における電力消費量が約 18~33%削減されたことが明らかとなっている。非価格的なデマンドレスポンスに関する研究には、Mizutani et al. (2015) や Ida et al. (2013) がある。どちらの研究においても、こうした非価格的デマンドレスポンスは電力消費量の抑制に有効であることが明らかとなっているが、価格誘導型デマンドレスポンスに比べるとその効果は小さいことが確認されている。

第 3 に、気温や世帯属性、保有家電の違いによるデマンドレスポンス効果の異質性についても多くの研究がなされている。特にエアコン保有台数、世帯の所得、気温といった要因が、デマンドレスポンスの効果にどのような影響を与えている

¹ なぜなら、価格誘導型のデマンドレスポンスは電力価格を外生的に変化させるため、推定上の内生性の問題を回避して需要の価格弾力性を推定することが可能となるためである。

のかについての研究が盛んに行われている。例えば、Heter et al. (2007) や Faruqui and Sergici (2011) , Faruqui et al. (2014) ではエコ設備の影響を分析している。また、Heter and Wayland (2010) や Faruqui and Sergici (2011) , Faruqui et al. (2014) , Ida et al. (2013) , そして Mizutani et al. (2015) では気温の影響について分析している。Mizutani et al. (2015) は気温以外にも所得や昼間在宅者数、住居に対する情報を用いることで、デマンドレスポンスについて、より詳細な分析を行っている。

2-2. 非効率性を考慮した電力需要関数に関する先行研究

世帯の非効率的な電力消費の存在を考慮した研究は少ないが、代表的な先行研究として Filippini and Hunt (2011), Filippini and Hunt (2014)などがある。しかしながら、これらの研究は、デマンドレスポンスの効果に注目したものではなく、また国別・州別の世帯レベルの集計データを用いており、世帯の個票レベルのデータを用いて電力消費の非効率性を推定したものではない。

本研究の特徴は、世帯レベルの個票データを用いて非効率性を考慮した世帯の電力需要関数を推定するとともに、デマンドレスポンスの効果についても分析を行うという点である。

3. 分析方法

3.1. 電力需要関数の理論的背景

本章では、世帯の1時間当たり電力需要関数を考える。一般に、世帯の電力需要は暖房、照明、調理、給湯といったエネルギーサービスを楽しむために生じると考えられ、経済学ではこの電力需要を Household Production Theory を用いて定式化することが多い。Household Production Theory とは、消費者が効用を得るための財を直接市場で購入して消費するのではなく、投入要素を市場で購入し、効用を得るための財は自身で生産して消費する場合を分析した理論であり、ミクロ経済学における消費者理論と企業理論を統合したものであると言える²。このフ

² Household Production Theory の詳細については、Deaton and Muellbauer (1980) や Filippini (1999) , Filippini (2011) を参照。

レームワークのもとでは、電力は投入要素、エネルギーサービスは消費者が効用を得るために生産される財であると考えられる。したがって、電力需要関数は要素需要関数として扱うことができる。すなわち、電力需要 E は電力価格 p とエネルギーサービス S の関数として次のように表現される。

$$E = E(p, S) \quad (1)$$

3.2. 推定モデル

我々は世帯が生産、消費するエネルギーサービスをデータとして観測することができない。そこで本研究では、このエネルギーサービスを世帯属性や気温によって近似することを考える。すなわち、式(1)を以下のように書き換える。

$$\begin{aligned} E^T &= E(p, S) \\ &= E(P, Warn, N_{inc}, N_{home}, N_{air}, N_{refrig}, H_{size}, H_{type}, H_{age}, H_{all}, O_{temp}, \eta_i) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 E^T は1時間当たりの電力需要の理論値、 P は電力価格、 $Warn$ は節電要請ダミー、 N_{inc} は所得を表すカテゴリー変数、そして N_{Home} は昼間在宅者数を表している。また、 N_{air} はエアコン保有台数³、 N_{refrig} は冷蔵庫保有台数である。 H_{size} は延べ床面積を表すカテゴリー変数、 $H_{age}, H_{type}, H_{all}$ はそれぞれ築年数、住居タイプダミー、オール電化ダミーを表している。また、 O_{temp} は最高気温である。最後に、 η_i は研究者が観測できない世帯 i の電力消費に対する選好の異質性を表している。

異質性 η_i を上式に含めた意義を理解するために、ここでは冬場の暖房需要を例に考えてみる。寒がりである人が多い世帯は、そうでない世帯と比べて暖房というエネルギーサービスを生産、消費のために冬場に多くの電力を消費すると考えられる。こうした選好の違いは世帯の電力需要に大きな影響を与えるが、世帯人数や所得だけでこれを代理することは難しい。したがって、これらの要因を考慮するため

³ Household Production Theory では、エアコンや冷蔵庫はエネルギーサービスを生産するための資本ストックとして考えられる。そのため、資本ストックを調整できる長期の状況を考える場合には、こうした資本ストックは電力需要関数に含まれない。しかしながら本研究で使用しているデータは2ヶ月間のデータであり、資本ストックを調整するには十分な期間とは言えないであろう。したがって、エアコン保有台数と冷蔵庫保有台数を電力需要関数に含めた。

にも式(2)に個人の異質性を含める必要がある。

それでは、実際の推定モデルの特定化について考える。式(2)の電力需要量 E^T は理論値であるため、実際の世帯の電力消費量 E^a は上式から乖離する可能性がある。実際の電力消費データ E^a が理論値 E^T から乖離する要因として考えられるのが、I. 非効率的な電力消費 EF と、II. 攪乱項 ϵ の存在である。非効率的な電力消費とは、保有家電の省エネ性や節電に対する知識の欠如によって生じる非効率的な電力消費ことである。世帯は、経済学が想定しているような効率的な電力消費をいつも行っているとは限らない。したがって、電力を効率的に消費していない世帯は無意識のうちに過剰に消費している可能性がある。そのため、実際のデータを用いて電力需要関数を推定するときには、これらの要因を考慮する必要がある。そこで本分析では、式(2)の右辺にこれらの要因を加えた推定モデルを考える。すなわち、

$$\begin{aligned} E^a &= E^T + EF + \epsilon \\ &= E(P, Warn, N_{inc}, N_{home}, N_{air}, N_{refrig}, H_{size}, H_{type}, H_{age}, H_{all}, O_{temp}, \eta_i) \\ &\quad + EF + \epsilon \end{aligned} \quad (3)$$

である。なお、こうした非効率的な電力消費量はデータから直接観測できないため、本研究では確率的フロンティアモデルを応用した電力需要関数を推定する。

一般に、確率的フロンティアモデルは生産活動の効率性や費用最小化の非効率性を推定するために利用されることが多い。ここでは、経済主体が最大限生産（最小限削減できる）できる確率的生産（費用）フロンティア関数を推定し、その生産（費用）フロンティア関数と各経済主体の生産量（費用）との乖離を効率性（非効率性）として推定している。本研究における電力需要関数は要素需要関数であり、エネルギーサービスを一定量の生産するために最小限必要な電力需要量を表しているため、費用フロンティア関数を応用することで推定できる⁴。

以上の背景をもとに、本研究では次の確率的フロンティアモデル推定する。

$$\begin{aligned} \ln E_{it} &= \alpha + \beta_1 \ln P_{it} + \beta_2 Warn + \beta_3 N_{inc,i} + \beta_4 N_{home,i} + \beta_5 H_{size,i} \\ &\quad + \beta_6 H_{age,i} + \beta_7 H_{type,i} + \beta_8 H_{all,i} + \beta_9 N_{air,i} + \beta_{10} N_{refrig,i} \\ &\quad + \beta_{11} \ln O_{temp,it} + \beta_{12} O_{Aug} + u_{it} + v_{it} \end{aligned} \quad (4)$$

⁴ 要素需要関数における非効率性に関する議論は Kumbhakar and Lovell (2000) を参照のこと。

ここで、 $\ln E_{it}^a$ は1時間当たりの電力消費量の自然対数値であり、 $\ln p_{it}$ は電力価格の対数値、 $N_{inc,i}$ は所得を表すカテゴリー変数、そして $N_{home,i}$ は昼間在宅者数を表している。また、 $N_{air,i}$ はエアコン保有台数、 $N_{refrig,i}$ は冷蔵庫保有台数である。 $H_{size,i}$ は延べ床面積を表すカテゴリー変数、 $H_{age,i}$ 、 $H_{type,i}$ 、 $H_{all,i}$ はそれぞれ築年数、住居タイプダミー、オール電化ダミーを表している。 $\ln O_{temp,it}$ は最高気温の対数値、 O_{Aug} は8月ダミーである。 v_{it} は分布 $N(0, \sigma_v^2)$ に従う誤差項であり、 u_{it} は非効率的な電力消費を表し、 $N^+(\mu_{it}, \sigma_u^2)$ の分布に従うと仮定する。

ここで式(4)では、研究者が観測できない世帯の異質性 η_i が非効率項 u_{it} の中に含まれている点に留意する必要がある。先にも述べたが、電力消費に対する選好の異質性が世帯の電力消費に与える例として、冬場の暖房需要があったことを思い出してもらいたい。もちろん、こうした電力消費を非効率的な消費であると断定することは恣意的であると言える。しかしながら、これは世帯の節電努力によって削減できる電力消費であるという点で、世帯人数や家の大きさなどによって決まる物理的な電力消費とは性質が異なると考えられる。前章では、こうした電力消費を非効率的な電力消費として場合のみを分析したが、本章ではGreene (2005a, 2005b)で提案されたTrue Random Effect Model (TRE)⁵を用いることで、こうした観測不可能な世帯の電力消費に対する異質性を考慮した分析もする。詳しくは、第3-3節で説明する。

本研究の目的は、非効率的な電力消費を考慮した電力需要関数を推定するとともに、デマンドレスポンスによって非効率項がどのように変化するかを分析することであった。そのため、本研究はBattese and Coelli (1995)で提案された手法を用いることで、デマンドレスポンスが非効率項 u_{it} に与える影響を考慮した電力需要関数を推定する。具体的には、非効率項 u_{it} を次のように定式化し、式(4)と同時に推定することを試みる。

$$u_{it} = \gamma_0 + \gamma_w Warn_{it} + \gamma_p \ln p_{it} + w_{it} \quad (5)$$

$$w_{it} \sim N^+(0, \sigma_u^2)$$

ここで、 $Warn$ は節電要請を、 $\ln p$ は電力価格の自然対数値を表している。

⁵ 詳しくは、本章第3-3を参照。

最後に、式(3)における非効率的な電力消費量 EF の求め方について説明しておく。まず、得られたパラメータを利用して非効率項の推定値 \hat{u}_{it} を計算する。次に、この推定値を用いて電力消費の非効率性を表す尺度を次のように計算する。

$$\xi_{it} = 1 - \frac{E_{it}^F}{E_{it}^a} = 1 - \exp(-\hat{u}_{it}) \quad (6)$$

ここで、 E_{it}^F はフロンティア関数上の電力需要量であり、これは式(4)における $(\alpha + \beta_1 \ln P_{it} + \beta_2 W_{arn} + \beta_3 N_{Inc,i} + \beta_4 N_{home,i} + \beta_5 H_{size,i} + \beta_6 H_{age,i} + \beta_7 H_{type,i} + \beta_8 H_{all,i} + \beta_9 N_{air,i} + \beta_{10} N_{refrig,i} + \beta_{11} \ln O_{temp,it} + \beta_{12} O_{Aug})$ のことである。 E_{it}^a は実際の電力消費量であり、非効率性 ξ_{it} は 0 (最も効率的なケース) から 1 (最も非効率的なケース) の値をとる。この非効率性 ξ に、実際の電力消費量 E^a を乗じることで、非効率的な電力消費量 EF が求まる。

3-3. 個人の異質性と非効率性の関係

第 3-2 節でも説明したとおり、非効率的な電力消費を考える際には、研究者が観測不可能な世帯の異質性にも注意する必要がある。本研究は、TRE モデルを用いることで、世帯の異質性を除いた場合の非効率的な電力消費についても分析する⁶。TRE は式(4)で非効率項に加えていた世帯の異質性 η_i を、明示的に表現することで以下のように定義できる。

$$\ln E_{it}^a = (\alpha + \eta_i) + \beta \mathbf{Z}_{it} + u_{it} + v_{it} \quad (7)$$

ここで、 η_i は平均 0、分散 θ_η の i.i.d.正規分布に従うと仮定される。また、 \mathbf{Z}_{it} は説明変数ベクトル、 β はそのパラメータベクトルである。このとき、個人効果 η_i を所与とした世帯 i の尤度関数は、

⁶ 個人効果を除く別の方法として、Greene (2005a, 2005b) では個人効果を固定効果として扱う True Fixed Effect Model (TFE) も提案されているが、この手法は各個人のダミー変数を用いた推定であるが、世帯数が多くなるにつれて推定するパラメータが多くなることや、第 4 節で説明するように、本研究では時間に対して一定の値をとるデータが多いため、本研究では使用していない。

$$L_i(\boldsymbol{\theta} | \ln E_{it}, \mathbf{Z}_{it}, w_i, t \in T) = \prod_{t=1}^T \frac{2}{\sigma} \Phi\left(\frac{\epsilon_{it}}{\sigma}\right) \Phi\left(\frac{\lambda \epsilon_{it}}{\sigma}\right) \quad (8)$$

となる．次に，個人効果 η_i について積分すると，世帯 i の尤度関数は，

$$L_i(\boldsymbol{\theta} | \ln E_{it}, \mathbf{Z}_{it}, t \in T) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{t=1}^T \frac{2}{\sigma} \Phi\left(\frac{\epsilon_{it}}{\sigma}\right) \Phi\left(\frac{\lambda \epsilon_{it}}{\sigma}\right) G(\eta_i) \quad (9)$$

となる．ここで，個人効果に関する積分により式(9)を解析的に解くことが困難となるため，本分析はモンテカルロ積分を用いて数値的に計算する．このとき，パラメータ $\boldsymbol{\theta}$ の推定に用いる Simulated Log Likelihood は

$$\begin{aligned} L_s(\boldsymbol{\theta} | \ln E_{it}, \mathbf{Z}_{it}, t \in T, i \in N) \\ = \sum_{i=1}^N \log \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \left[\prod_{t=1}^T \frac{2}{\sigma} \Phi\left(\frac{\epsilon_{it}}{\sigma}\right) \Phi\left(\frac{\lambda \epsilon_{it}}{\sigma}\right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

となる．ここで， R はシミュレーション抽出回数を表している．なお，TREによる推定は，時間に関して不変な非効率性と個人効果を識別できない点に留意する必要がある．

4. 実験内容・データ

4.1. 実験内容

本分析では，2012年7月23日から9月28日の間にけいはんな地域⁷で行われたデマンドレスポンス大規模社会実験のデータを使用する．本実験は，スマート設備やデマンドレスポンスの導入による節電の可能性を検証するために，経済産業省が主体となって進めている「次世代エネルギー・社会システム実証」の一つである⁸．

本実験の参加世帯数は681世帯であり，そのうち212世帯はオール電化の世帯である．参加対象世帯の中には，1戸建てに住む世帯のほかにアパートのような集合住宅

⁷ けいはんな地域とは京都府，大阪府，奈良県にまたがる地域のことであり，本分析では京田辺市，木津川市，精華市が分析対象地域となっている．

⁸ けいはんな地域のほかに，横浜市，豊田市，北九州市が実験対象地域となっている．詳しくは「スマートコミュニティ実証について」，経済産業省を参照．

に住む世帯も含まれている。参加世帯は次の4つのグループにランダムに振り分けられる。グループAはコントロールグループであり、このグループはデマンドレスポンスを受けない。グループBは節電要請を受けるトリートメントグループ、そしてグループC、Dは価格誘導型デマンドレスポンスを受けるトリートメントグループである。

9. 本実験では、価格誘導型デマンドレスポンスとしてTOUとCPPの2つに注目している。TOUは、平日の13時から16時の間の電力料金に+20円/kWhを加えるものである。CPP40、CPP60、CPP80はそれぞれ+40円/kWh、+60円/kWh、+80円/kWhを、TOUに代わって電力料金に加えるものであり、前日17時までにその実施有無を知らされることになる。CPP40、CPP60、CPP80の実施条件は、翌日の予想気温が30度を超える場合であり、実施回数はそれぞれ5回、計15回実施される。節電要請はCPPと同じ日に実施される。

ここで、価格誘導型デマンドレスポンスは、実験終了後に1P=1円で交換できるポイントを用いて実験を行っている点に留意する必要がある。したがって、本実験における価格誘導型デマンドレスポンスの実験は実際の（電力会社が設定している円単位の）電力価格を用いたものではなく、ポイントを使用した擬似的なものである。しかしながら、1P=1円であることから、このポイントは円と同値であると考えても問題ないであろう。そこで本章ではデマンドレスポンスの電力価格を円単位として分析を行う。また、世帯の電力消費は本実験のポイントだけではなく、電力会社が設定する実際の電力価格にも依存していると考えるのが妥当である。本章では関西電力の従量料金A¹⁰を電力会社に支払う実際の電力価格としている。

以上の仮定のもと、本章で考える電力価格は次の通りである。まず、グループC、D（価格誘導型デマンドレスポンスの対象世帯）の料金体系は従量料金Aに、平日の13時~16時の間だけ20円/kWhを加えたものが基本（i.e. TOUが基本料金）となり、緊急時にのみCPPが実施される。CPPは前日時点で翌日の平日13時~16時の気温が30度を超えると予想される場合において、緊急的に+40円/kWh、+60

9 グループC、Dは別のグループに分けられているが、同じトリートメントを受けているため、本研究では同一のグループとして扱うことにする。

10 従量料金Aの料金体系は以下の通りである。累積消費量が120kWh以下⇒20円/kWh、累積消費量が120kWhより多く、300kWh以下⇒25円/kWh、累積消費量が300kWhを超える⇒26円/kWh。

円/kWh, +80 円/kWh のいずれかを従量料金 A に加算するものであった。つまり、本実験における価格誘導型デマンドレスポンスは、従量料金 A に+20 円/kWh, +40 円/kWh, +60 円/kWh, +80 円/kWh を加算する Variable Critical Peak Pricing (VCPP) といえるかもしれない。グループ A (コントロールグループ) 及びグループ B (非価格誘導型デマンドレスポンスグループ) の料金体系は従量料金 A で固定されている。

4.2. データ

表 4.1, 表 4.2 は分析に使用する変数の一覧と記述統計である。第 3 節で説明したとおり、世帯属性は電力消費量に影響を与えられられる。本分析では、世帯の属性として昼間在宅者数 D_{exist} , エアコン保有台数 APP_{air} , 冷蔵庫保有台数 APP_{refrig} , 築年数 H_{age} , 延べ床面積 H_{size} , 住居タイプダミー H_{type} を使用する。また、気温 O_{temp} や時間 O_{time} , 月 O_{month} といった外的要因にも依存することが予想されるため、これらも考慮して分析を行う。電力価格 P については第 4.1 節で述べた通りである。また、非価格誘導型デマンドレスポンスの効果进行分析するために、節電要請 $Warn$ を分析モデルに加えている。また、表 4.3 はグループ別の世帯属性に関する記述統計である。この表からもわかるとおり、各グループの世帯属性には大きな差は見られず、世帯をランダムに振り分けられているといえる。なお、本章では、ピーク時におけるデマンドレスポンスによる外生的な価格変化を利用して電力需要関数を推定するため、分析対象期間を平日の 13 時~16 時に限定している。

5. 推定結果

5.1. 需要関数の推定結果

表 4.4 は電力需要関数の推定結果である。Model I は、本章の第 3 節で説明した推定モデルを、Battese and Coelli (1988) の手法を用いて推定したものであり、Model II は、Greene (2005a, 2005b) の手法を用いて推定したものである。また、表 4.4 における Frontier パートは、式(4)の推定結果であり、Inefficiency パートは、式(5)に関する推定結果を表している。なお、頑健性チェックのため、本分析では、価格変数と節電要請変数を推定モデルから出し入れした場合についても分析して

いる。Model III と Model IV は、Inefficiency パートから価格変数と節電要請変数を外して推定したものであり、価格や節電要請が非効率的な電力消費に影響を与えないと仮定したモデルとなっている。一方、Model V と Model VI は、Frontier パートから価格変数と節電要請変数を外したものであり、価格や節電要請が、世帯が生活をする上で最低限必要な電力消費に影響を与えないと仮定したモデルとなっている。λは、非効率項の分散 σ_U と攪乱項の分散 σ_v の比率であり、モデルにおける非効率項の変動要因の大きさを表すパラメータである。全てのモデルにおいて、λが 1%有意で 1 以上であることから、世帯の電力需要関数を推定するには非効率的な電力消費を考慮する必要があるといえる。最後に、 θ_η は TRE モデルで考慮した個人効果に関する分布の分散推定量である。

まず、世帯属性について見ていく。所得、昼間在宅者数、住居タイプ、冷蔵庫保有台数、そしてエアコン保有台数は、全てのモデルにおいて統計的に有意であり、その符号も現実と整合的であるといえる。一方、築年数や延べ床面積、オール電化ダミーについては、TRE を用いた Model II や Model IV、Model VI において、当初の予想に反した結果が得られている。こうした結果が得られたのは、TRE モデルに個人効果が含まれていることが原因ではないかと考えられる。すなわち、個人効果が、築年数やオール電化ダミー変数が持つ本来の効果を捕らえてしまい、その結果、築年数やオール電化ダミー変数が別の要因を表す変数となることが原因であると推測される。実際、個人効果をコントロールしていない Model I と Model II、そして Model III では、これらの変数の符号は予想と整合的であつ、統計的にも有意な結果が得られている。なお、8 月ダミーや気温変数といった外的要因については、妥当な結果が得られているといえる。

次に、電力価格と節電要請について見ていく。Model I と Model II では、価格係数は Frontier パートで統計的に有意でないが、Inefficiency パートでは統計的に有意である。この結果から、電力価格は非効率的な電力消費にのみ影響すると推測することもできるが、価格係数が Frontier パートで有意とならなかったのは、同じ価格変数を Frontier パートと Inefficiency パートの両方に入れたためであるとも考えられる。この点を検証するために、Inefficiency パートから価格変数と節電要請変数を除いたモデルを推定した。Model III と Model V は、その分析の結果である。そこでは、価格係数の符号は負で、統計的に有意となっている。従って、

電力価格は **Frontier** パートにも影響を与えているようにも見える。

しかしながら、別の見方をすれば、**Model III** と **Model V** は、本来ならば **Inefficiency** パートに入るかもしれない価格変数を除外しているため、その効果が **Frontier** パートの価格変数に表れているとも考えられる。そこで今度は、**Frontier** パートの価格変数を除いた **Model IV** と **Model VI** を推定し、そこで得られる対数尤度と、**Model III** と **Model V** から得られた対数尤度を比較することで、価格変数がどちらのパートに入るのが尤もらしいのかを検証する。**Model III** と **Model V**、**Model IV** と **Model VI** の対数尤度をそれぞれ比較すると、どちらも場合も、価格変数を **Inefficiency** パートに入れることが望ましいという結果となる。したがって、価格変数は、まずは **Inefficiency** パートに含めるべきであることが分かる。

もちろん、この結果だけをもって、**Frontier** パートに価格変数を入れるべきではないと結論付けることはできない。先にも述べた通り、**Model III** と **Model V** では、価格変数は **Frontier** パートでも有意となっている。そこで今度は、**Model V** と **Model VI** の対数尤度を、**Model I**、**Model II** のそれとそれぞれ比較することで、価格変数を両方のパートに含めるべきかどうかを検証する。それぞれの対数尤度を比較すると、**Model I** と **Model II** がデータに適合する適切な推定モデルと言えよう。

Model I と **Model II** の推定結果からは、効率的な電力消費行動をとっている世帯に対して価格誘導型デマンドレスポンスを行っても、彼らの電力消費量を抑制することができないことを示唆する一方で、非効率的な世帯に対しては、非効率的な電力消費の改善を通じた節電効果があることが推測される¹¹。

一方、節電要請は、**Model I** では **Frontier** パートにおいて負で有意となり、**Model II** では **Inefficiency** パートにおいて負で有意となった。この結果は、先行研究や著者の直感と異なる結果となっているため、今後のより詳細な分析が必要である。

5.2. 電力消費の非効率性

¹¹ 実験終了後の被験者を対象としたアンケートの回答の中にも、“普段から節電に心がけていたので、80 円のとくに普通に暮らしてみたが、あまり減額レベルは変わらなかった”という意見や、“40 円と 80 円で大きな差があり高いと損をした気がするが、出来ることに差は無く、生活自体は大して変わらない”といった意見が寄せられていることから、現実に即した推定結果であるといえよう。

以下では、第 5.1 節で得られたパラメータを用いて、非効率性の期待値を計算する。図 4.2 は、Model I と Model II の推定結果を用いて、デマンドレスポンスごとに非効率性 ξ の期待値を推定したものである。この図が示すとおり、デマンドレスポンスの程度を厳しくすることによって非効率性 ξ が改善されている。この傾向は、Model I で特に顕著である。

非効率的な電力消費の大きさについては、Model II による推定結果からも明らかのように、第 3.3 節で議論した個人効果を除いても、電力消費の非効率性 ξ が確認される。この時、Model II における電力消費の非効率性 ξ は、Model I の非効率性 ξ の約半分以下となっている。この結果は、個人の電力消費に対する選好をコントロールした上での非効率的な電力消費が、総電力消費量の約 2 割程度であることを示唆している。これらの非効率性 ξ を改善することで、更なる電力消費量の削減が可能であることがわかる。最後に、電力消費を節電するためには、どのような世帯に、どのような政策を行うことが望ましいのかについては今後の研究課題であることを述べておく。

6. おわりに

本章では、世帯レベルの 1 時間当たりの電力消費量のデータを用いて、非効率的な電力消費を考慮した電力需要関数を推定するとともに、デマンドレスポンスによって、非効率的な電力消費がどのように変化するのかを分析した。分析の結果、以下の 3 点が明らかとなった。第 1 に、世帯の非効率的な電力消費が確認される点である。非効率的な電力消費は、個人の異質性を除いた上でも存在しており、世帯の電力消費には更なる節電の余地があるといえよう。第 2 に、効率的な電力消費行動をとっている世帯の電力需要曲線は垂直であり、価格に対して非弾力的である一方、非効率的な世帯の需要曲線は右肩下がりであることが明らかとなった。このことを言い換えると、非効率的な電力消費は、デマンドレスポンスが厳しくなるにしたがって改善される。これは、電力価格が高くなると、これまで以上に自己の電力消費に関心を持つようになり、スマートメーターから自己の電力消費に関する情報を得るようになれば、過剰な電力使用がある場合にはそれを認識し、無駄な電力消費量を削減したためではないかと考えられる。このことから、デ

マンドレスポンスが有効となるのは、非効率的な電力消費が存在している世帯に対してであり、効率的な世帯に対しては、節電効果が期待できないことを意味している。また、この結果は、デマンドレスポンスが電力消費の抑制に有効であるという点で先行研究と同じ結論といえるが、その電力消費量の抑制が非効率的な電力消費の改善によるものであるという点では、先行研究と異なっている。第3に、節電要請のような非価格型デマンドレスポンスは、非効率的な電力消費に影響を与えないことが明らかとなった。

最後に、今後の研究課題について述べておく。本章では、デマンドレスポンスの実施による非効率的な電力消費の改善に注目してきた。しかしながら、本分析では、デマンドレスポンスに対して世帯がどのように行動を変化させ、その行動がどの程度非効率性の改善に貢献したのかについては、明らかとなっていない。より効果的なデマンドレスポンスのデザインを考えるためには、具体的な世帯の行動と非効率的な電力消費との関係を明らかにすることが重要である。

表 4.1 : 分析に使用する変数のリスト

変数	説明 (単位)
E	1 時間あたり電力使用量 (kWh)
P	電力価格 (従量料金 A 参照) + デマンドレスポンス ¹ 時の価格 (円/kWh)
$Warn$	節電要請のお知らせ
N_{inc}	所得 (百万円) カテゴリー変数
N_{air}	エアコン保有台数 (台)
N_{refrig}	冷蔵庫保有台数 (台)
H_{all}	オール電化ダミー (1 : オール電化, 0 : それ以外)
N_{home}	昼間在宅者数 (人)
H_{age}	築年数 (年)
H_{type}	住居タイプダミー (1 : 1 集合住宅, 0 : それ以外)
H_{size}	延べ床面積 (m^2) カテゴリー変数
O_{temp}	1 時間ごとの気温 ($^{\circ}C$)
O_{Aug}	8 月ダミー

注)1 本章での価格誘導型デマンドレスポンスは TOU, CPP40, CPP60, CPP80 を想定しており, それぞれ +20 円/kWh, +40 円/kWh, +60 円/kWh, +80 円/kWh の価格上昇を考えている.

表 4.2 : 記述統計

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>E</i>	0.456	0.385	0.000	5.000
<i>P</i>	35.511	21.301	20.000	106.000
<i>Warn</i>	0.059	0.236	0.000	1.000
<i>N_{inc}</i>	5.915	2.715	1.000	12.000
<i>N_{air}</i>	3.576	1.705	0.000	10.000
<i>H_{all}</i>	0.312	0.463	0.000	1.000
<i>N_{refrig}</i>	1.136	0.432	0.000	3.000
<i>H_{size}</i>	4.306	1.057	1.000	7.000
<i>H_{type}</i>	0.773	0.419	0.000	1.000
<i>H_{age}</i>	3.156	1.616	1.000	6.000
<i>N_{home}</i>	1.298	0.965	0.000	4.000
<i>O_{temp}</i>	31.008	2.730	21.200	35.800
<i>O_{Aug}</i>	0.525	0.499	0.000	1.000
Obsevation	116348			

表 4.3 : グループ別記述統計

	Group A				Group B				Group C, D			
	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>E</i>	0.499	0.415	0.000	5.000	0.463	0.405	0.000	4.700	0.436	0.361	0.000	4.090
<i>N_{inc}</i>	6.054	2.783	1.000	11.000	5.965	2.597	2.000	12.000	5.835	2.733	1.000	12.000
<i>H_{size}</i>	4.396	1.007	2.000	7.000	4.357	1.065	2.000	7.000	4.247	1.070	1.000	7.000
<i>H_{type}</i>	0.838	0.369	0.000	1.000	0.843	0.363	0.000	1.000	0.715	0.451	0.000	1.000
<i>H_{age}</i>	3.108	1.657	1.000	6.000	3.209	1.727	1.000	6.000	3.154	1.547	1.000	6.000
<i>N_{air}</i>	3.667	1.573	0.000	8.000	3.557	1.917	0.000	10.000	3.547	1.658	0.000	9.000
<i>H_{all}</i>	0.315	0.465	0.000	1.000	0.409	0.492	0.000	1.000	0.270	0.444	0.000	1.000
<i>N_{refrig}</i>	1.108	0.410	0.000	3.000	1.183	0.521	0.000	3.000	1.127	0.395	0.000	3.000
<i>N_{home}</i>	1.243	0.988	0.000	4.000	1.243	1.027	0.000	4.000	1.345	0.925	0.000	4.000
Observation	26196				27140				63012			

表 4.4 : 需要関数の推定結果

Variable	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V	Model VI
Frontier						
$\ln P$	0.054 (0.042)	0.019 (0.020)	-0.088*** (0.023)	-0.145*** (0.012)		
$Warn$	-0.127** (0.062)	0.003 (0.031)	-0.106*** (0.035)	-0.052*** (0.013)		
N_{inc}	0.015** (0.007)	0.023*** (0.004)	0.015** (0.007)	0.038*** (0.003)	0.014** (0.007)	0.025*** (0.003)
N_{home}	0.103*** (0.021)	0.099*** (0.008)	0.102*** (0.021)	0.033*** (0.007)	0.103*** (0.021)	0.160*** (0.008)
H_{age}	0.020* (0.011)	0.012** (0.005)	0.021* (0.011)	-0.071*** (0.005)	0.020* (0.011)	-0.018*** (0.003)
H_{size}	0.022 (0.022)	-0.055*** (0.013)	0.026 (0.022)	-0.026*** (0.009)	0.024 (0.022)	-0.095*** (0.009)
H_{type}	0.147*** (0.054)	0.143*** (0.037)	0.146*** (0.054)	0.188*** (0.020)	0.143*** (0.055)	0.171*** (0.024)
H_{all}	0.059 (0.041)	-0.002 (0.016)	0.063 (0.041)	-0.115*** (0.015)	0.060 (0.041)	-0.137*** (0.013)
N_{refrig}	0.201*** (0.047)	0.233*** (0.014)	0.199*** (0.047)	0.335*** (0.026)	0.200*** (0.047)	0.282*** (0.012)
N_{air}	0.089*** (0.014)	0.147*** (0.011)	0.089*** (0.014)	0.076*** (0.006)	0.089*** (0.014)	0.181*** (0.004)
$\ln O_{temp}$	0.476*** (0.042)	0.525*** (0.039)	0.488*** (0.042)	0.546*** (0.040)	0.477*** (0.042)	0.531*** (0.037)
O_{aug}	0.107*** (0.010)	0.106*** (0.010)	0.107*** (0.010)	0.107*** (0.010)	0.107*** (0.009)	0.106*** (0.009)
$constant$	-4.755***	-4.084***	-4.270***	-3.292***	-4.557***	-4.115***

	(0.243)	(0.141)	(0.187)	(0.131)	(0.176)	(0.117)
Inefficiency						
Term						
<i>ln P</i>	-0.349*** (0.076)	-0.994*** (0.138)			-0.256*** (0.060)	-0.956*** (0.142)
<i>Warn</i>	0.044 (0.129)	-0.263* (0.152)			-0.180** (0.081)	-0.258*** (0.082)
<i>Constanat</i>	1.657*** (0.320)	2.854*** (0.340)	0.352** (0.161)	-1.068*** (0.294)	1.293*** (0.176)	2.690*** (0.302)
Other						
Parameters						
σ_u	0.735*** (0.039)	0.815*** (0.064)	0.746*** (0.045)	0.910*** (0.072)	0.742*** (0.041)	0.825*** (0.057)
σ_v	0.384*** (0.351)	0.327*** (0.021)	0.404*** (0.030)	0.349*** (0.018)	0.394*** (0.029)	0.328*** (0.019)
λ	1.912*** (0.054)	2.488*** (0.073)	1.846*** (0.057)	2.609*** (0.083)	1.886*** (0.055)	2.515*** (0.065)
θ_η		0.749*** (0.017)		0.678*** (0.013)		0.853*** (0.012)
Household	485	485	485	485	485	485
Obs.	114243	114243	114243	114243	114243	114243
Log-Likelihood	-112102.66	-85620.65	-112336.24	-86313.975	-112166.39	-85708.149

Robust standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

図 4.1：非効率的な電力消費行動考慮した電力需要関数

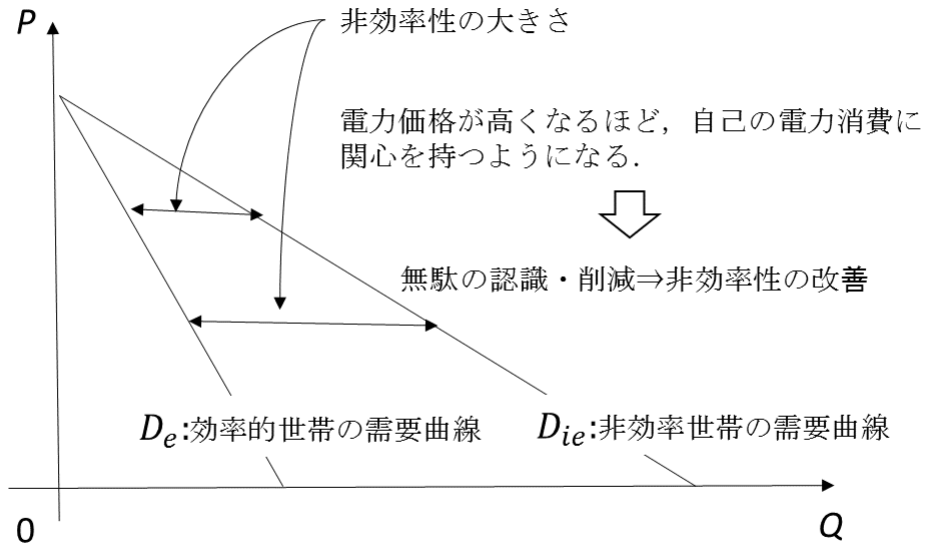
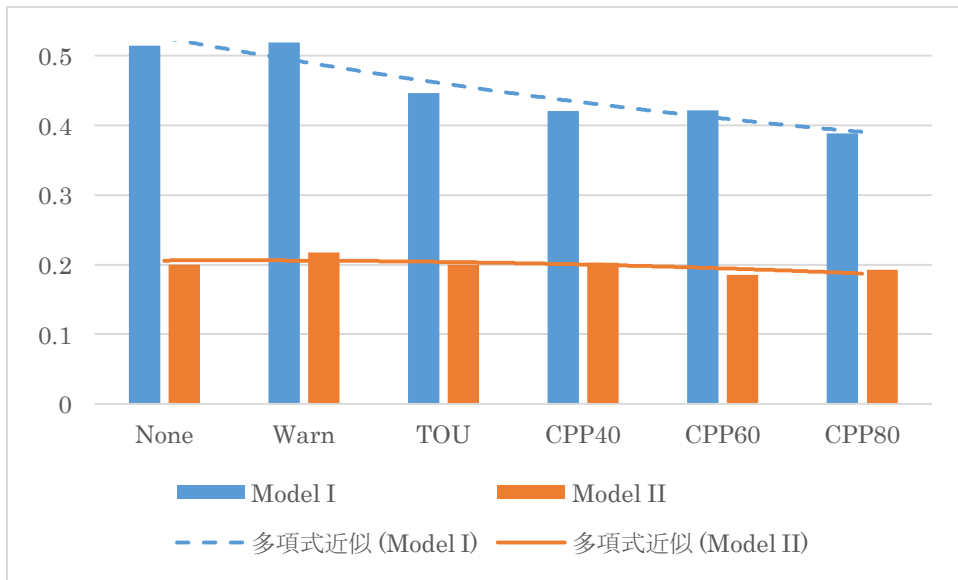


図 4.2：デマンドレスポンス別非効率性の平均値



結章

1. 本論の結論

本論では、2012年7月23日から9月28日の間にけいはんな地域で行われたデマンドレスポンス大規模社会実験のデータを使用し、世帯レベルのデマンドレスポンスに関する次の3つの課題に取り組んだ。第1に、デマンドレスポンスの節電効果に関する分析である。第2に、デマンドレスポンスの持続的な節電効果に関する分析である。第3に、電力消費行動の非効率性を考慮した電力需要関数の推定である。以下では、各章の分析内容と結果を整理する。

第1章では、デマンドレスポンスの定義や種類、メリット、今後の普及のために解決すべき課題について整理した。はじめに、我が国における電力不足問題を整理し、その解決策として注目されているデマンドレスポンスについて説明した。また、デマンドレスポンスのメリットを紹介するとともに、デマンドレスポンスの今後の普及のために解決すべき需要家側の課題を整理した。

第2章では、世帯属性の異質性や気温の変化が、デマンドレスポンスの節電効果に与える影響について分析した。具体的には、I. 詳細な世帯属性を考慮しながらデマンドレスポンスの節電効果を推定し、II. その推定結果を用いて、様々な状況におけるデマンドレスポンスの節電効果についてシミュレーションを行った。分析の結果、以下の点が明らかとなった。第1に、デマンドレスポンスは電力消費を削減させる効果があることが明らかとなった点である。一方、デマンドレスポンス実施後の電力消費量は増加傾向にあることも確認されており、異時点間の需要の代替が行われていることを示唆している。第2に、デマンドレスポンスの節電効果はI. 節電要請、II. TOU、III. CPPの順に大きくなることが明らかとなった。また、CPPの金額が高くなるにつれて節電効果が大きくなることも確認されている。第3に、デマンドレスポンスの節電効果は世帯属性、気温に依存することが確認された。例えば、デマンドレスポンスの節電効果は、所得と正の相関があり、所得が高くなると節電効果が大きくなることが明らかとなった。一方、昼間在宅者数や気温の増加は、デマンドレスポンスの節電効果を減少させることが確認された。

第 3 章では、世帯の非効率的な電力消費の存在を考慮し、I. 価格誘導型・非価格型デマンドレスポンスの（非効率的な電力消費の改善を通じた）持続的な節電効果を分析するとともに、II. 非効率的な電力消費の時間を通じた推移についても分析する。具体的には、Filippini and Hunt (2011, 2012) で提案されている確率的フロンティアモデルを用いた電力需要関数の推定方法を応用し、デマンドレスポンスが電力消費の非効率性に与えた持続的な影響を推定した。分析の結果、以下の点が明らかとなった。第 1 に、価格誘導型デマンドレスポンスには、持続的な非効率性の改善効果があることが明らかとなった。一方、節電要請には持続的な改善効果が確認されなかった。この結果は、持続的な非効率性の改善をもたらすためには、価格誘導型インセンティブが有効であることを示唆している。第 2 に、非効率的な電力消費は時間を通じて増加傾向であることが明らかとなった。また、この増加傾向は本分析で使用したグループ (i.e. コントロールグループ、節電要請グループ、価格誘導型デマンドレスポンスグループ) 間に差がないことが確認された。これは、本章の分析に使用したデータが秋から冬にかけてのものであり、夏のデマンドレスポンス実験で体得した節電知識や習慣が全て冬に活用できるものではないことが原因でないかと考えられる。第 3 に、本研究で推定された持続的な非効率性の改善は、保有家電を省エネ性の高い家電に買い替えたことによるものではないことが明らかとなった。この結果は、持続的な非効率性の改善が世帯の節電に対する知識や行動の習慣化によって達成された可能性が高いことを示唆している。

第 4 章では、非効率的な電力消費を考慮した電力需要関数を推定するとともに、デマンドレスポンスによって、非効率的な電力消費がどのように変化するかを分析した。具体的には、第 3 章と同様に、確率的フロンティアモデルを応用し、非効率性と価格の関係を考慮しながら電力需要関数の推定を行った。その際、世帯の電力消費に対する観測不可能な選好の異質性に注意するために、**True Random Effect Model** を用いて電力需要関数を推定した。分析の結果、以下の 3 点が明らかとなった。第 1 に、世帯の非効率的な電力消費が確認される点である。この非効率的な電力消費は、個人の異質性を除いた上でも存在しており、世帯の電力消費には更なる節電の余地があるといえよう。第 2 に、効率的な電力消費行動をとっている世帯の電力需要曲線は垂直であり、価格に対して非弾力的である一方、非効率的な世帯の需要曲線は右肩下がりであることが明らかとなった。このことを言

い換えると、非効率的な電力消費は、デマンドレスポンスが厳しくなるにしたがって改善されるということである。第 3 に、節電要請のような非価格型デマンドレスポンスは、非効率的な電力消費に影響を与えないことが明らかとなった。

2. 今後の課題

最後に、2 章から 4 章の分析における今後の課題を述べておく。第 2 章では、次の 2 点の課題がある。第 1 に、デマンドレスポンスが社会厚生にどのような影響を与えるのかについて分析することである。特に、どのような世帯がデマンドレスポンスによって効用が悪化するのかということや、デマンドレスポンスを実施することで企業の利潤がどうなるのかについて分析することは政策面において重要な課題であろう。

第 2 に、よりバイアスを取り除いた実証分析を行うことである。本研究では、デマンドレスポンスの変数をカウント変数として議論した。しかしながら、カウント変数を用いた場合は、デマンドレスポンスの限界効果が一定であると仮定されているため、限界効果に関して柔軟な分析を行うためには、ダミー変数を用いた分析が必要である。また、第 2 章の分析で使用した電力価格体系は、**Increasing Block Rate** であるため、価格は需要とともに増加する。その結果、計量経済学における同時性の問題が発生するため、これを考慮した分析が必要である。

第 3 章では、次の 2 点の課題がある。第 1 に、世帯の異質性をコントロールした上で非効率的な電力消費量を推定することである。第 3 節でも説明したとおり、本分析では世帯の価値観や生活スタイルを非効率的な電力消費の決定要因として分析した。したがって、こうした要因が、電力消費の中で、どの程度の割合を占めているのかを明らかにすることは重要であろう。

第 2 に、データ期間を拡張する必要がある。本研究ではデマンドレスポンス実験終了後の約 2 ヶ月半を分析対象とした。しかしながら、この 2 ヶ月半の分析をもって長期的な効果を考えるには期間が短いようにも思われる。したがって、他の先行研究で行われているように、3 年後や 4 年後のデータを用いることで、より長期的な効果を分析する必要があるだろう。

第 4 章における課題は、どのような行動が非効率性の改善に貢献しているのか

を明らかにすることである。第 4 章の分析では、デマンドレスポンスの実施による非効率的な電力消費の改善に注目してきた。しかしながら、本分析では、デマンドレスポンスに対して世帯がどのように行動を変化させ、その行動がどの程度非効率性の改善に貢献したのかについては、明らかとなっていない。より効果的なデマンドレスポンスのデザインを考えるためには、具体的な世帯の行動と非効率的な電力消費との関係を明らかにすることが重要である。

<参考文献>

- Aigner, D., C.A.K. Lovell and P. Schmidt (1977) "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Function Models," *Journal of Econometrics*, Vol.6, pp.21-37.
- Alexander, B.R. (2010) "Dynamic Pricing? Not So Fast! A Residential Consumer Perspective," *Electricity Journal*, Vol.23, No.6, pp39-49.
- Allcott, H. (2011) "Social Norms and Energy Conservation," *Journal of Public Economics*, Vol.95, pp.1082-1095.
- Allcott, H., and T. Rogers (2012) "The Short-Run and Long-Run Effects of Behavioral Interventions: Experimental Evidence from Energy Conservation," *NBER, Working Paper*.
- Allcott, H., and T. Rogers (2012) "How Long Do Treatment Effects Last? Persistence and Durability of a Descriptive Norms Intervention's Effect on Energy Conservation," *HKS Faculty Research Working Paper*
- Ayres, I., S. Raseman, and A. Shin (2012) "Evidence from Two Large Field Experiments that Peer Comparison Feedback Can Reduce Residential Energy Usage," *Journal of Law, Economics, and Organization*, Vol.29, No.5, pp.992-1022.
- Battese, G.E. and T.J. Coelli (1993) "A Stochastic Frontier Production Function Incorporating a Model for Technical Inefficiency Effects," Working Papers in Econometrics and Applied Statistics, No.69, Department of Econometrics, University of New England, Armidale.
- Battese, G.E. and T.J. Coelli (1995) "A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data," *Empirical Economics*, Vol.20, pp.325-332.
- Bailey, E.E. and L.J. White (1974) "Reversals in Peak and Offpeak prices," *Bell Journal of Economics and Management Science*, Vol.5, No.1, pp.75-92.
- Becker, G.S. and K.M. Murphy (1988) "A Theory of Addiction," *Journal of Political Economy*, Vol.96, No.4, pp.675-700.
- Belotti, F., S. Daidone, and G. Ilardi (2012) "Stochastic Frontier Analysis Using Stata," *Stata Journal*, Vol.55, No.11, pp.1-39.
- Berry, L. (1993) "A Review of the Market Penetration of U.S. residential and Commercial Demand Side Management Programmes," *Energy Policy*, Vol.21, No.1, pp.53-67.
- Bernedo, M., J. Ferraro, and M. Price (2014) "The Persistent Impact of Norm-Based Messaging and Their Implications for Water Conservation," *Journal of Consumer Policy*, Vol.37, pp.437-452.

- Borenstein, S. (2013) "Effective and Equitable Adoption of Opt-In Residential Dynamic Electricity Pricing," *Review of Industrial Organization*, Vol.42, pp.127-160.
- Borenstein, S. and S. Holland (2005) "On the Efficiency of Competitive Electricity Market with Time-Invariant Retail Prices," *RAND Journal of Economics*, Vol.36, No.3, pp.469-943.
- Brounen, D., N. Kok, and J.M. Quigley (2012) "Residential Energy Use and Conservation: Economics and Demographics," *European Economic Review*, Vol.56, pp.931-945.
- Brown, G.Jr. and M.B. Johnson (1969) "Public Utility Pricing and Output under Risk," *American Economic Review*, Vol.59, No.1, pp.119-129.
- Bye, R.T. (1926) "The Nature of Fundamental Elements of Costs," *Quarterly Journal of Economics*, Vol.41, pp.30-63.
- Bye, R.T. (1929) "Composite Demand and Joint Supply in Relation to Public Utility Rates," *Quarterly Journal of Economics*, Vol.44, pp.40-62.
- Cameron, A.C. and P.K. Trivedi (2009) *Microeconometrics Using Stata*, Stata Press, first edition.
- Cappers, P., C. Goldman and D. Kathan (2010) "Demand Response in U. S. Electricity Markets: Empirical Evidence," *Energy*, Vol.35, pp.1526-1535.
- Carlton, D.W. (1977) "Peak Load Pricing with Stochastic Demand," *American Economic Review*, Vol.67, No.5, pp.1006-1010.
- Carrasco, R., J.M. Labeaga, and J.D. Lopez-Slido (2005) "Consumption and Habits: Evidence from Panel Data," *Economic Journal*, Vol.115, pp.144-165.
- Chao, H.P. (1983) "Peak Load Pricing and Capacity Planning with Demand and Supply Uncertainty," *Bell Journal of Economics*, Vol.14, No.1, pp.179-190.
- Chao, H.P. and Mario DePillis (2013) "Incentive Effects of Paying Demand Response in Wholesale Electricity Markets," *Journal of Regulatory Economics*, Vol.43, pp.265-283.
- Coelli, T.J., D.S. Prasada Rao, C.J. O'Donnell, and G.E. Battese (2005) *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, Springer, second edition.
- Costa, D.L. and M.E. Kahn (2011) "Electricity Consumption and Durable Housing: Understanding Cohort Effects," *American Economic Review: Papers and Proceedings*, Vol.101, No.3, pp.88-92.
- Costa, D.L. and M.E. Kahn (2013) "Energy Conservation "Nudges" and Environmentalist Ideology: Evidence from Randomized Residential electricity Field Experiment," *Journal of European Economic Association*, Vol.11, No.3 pp.680-702.
- Crew, M.A., C.S. Fernando, and P.R. Kleindorfer (1995) "The Theory of Peak-Load Pricing: A Survey," *Journal of Regulatory Economics*, Vol.8, pp.215-248.
- Crew, M.A. and P.R. Kleindorfer (1971) "Marshall and Turvey on Peak Load or Joint Product Pricing," *Journal of Political Economy*, Vol.79, No.6, pp.1369-1377.
- Crew, M.A. and P.R. Kleindorfer (1976) "Peak Load Pricing with a Diverse Technology," *Bell*

- Journal of Economics*, Vol.7, No.1, pp.207-231.
- Crew, M.A. and P.R. Kleindorfer (1978) "Reliability and Public Utility Pricing," *American Economic Review*, Vol.68, No.1, pp.31-40.
- Deaton, A. and J. Muellbauer (1980) *Economics and Consumer Behavior*, Cambridge University Press.
- Faruqui, A. and S. George (2005) "Quantifying Customer Response to Dynamic Pricing," *Electricity Journal*, Vol.18, pp.53-63.
- Faruqui, A. and S. Sergici (2010) "Household Response to Dynamic Pricing of Electricity: A Survey of 15 Experiments," *Journal of Regulatory Economics*, Vol.38, pp.193-225.
- Faruqui, A. and S. Sergici (2011) "Dynamic Pricing of Electricity in the Mid-Atlantic Region: Econometric Results from the Baltimore Gas and Electric Company Experiment," *Journal of Regulatory Economics*, Vol.40, pp.82-109.
- Faruqui, A., S. Sergici, and L. Akaba (2014) "The Impact of Dynamic Pricing on Residential and Small Commercial and Industrial Usage: New Experimental Evidence from Connecticut," *Energy Journal*, Vol.35, pp.137-160.
- Ferraro, P.J., J.J. Miranda, and M.K. Price (2011) "The Persistence of Treatment Effects with Norm-Based Policy Instruments: Evidence from a Randomized Environmental Policy Experiment," *American Economic Review: Papers & Proceedings*, Vol.101, No.3, pp.318-322.
- Ferraro, P.J. and M.K. Price (2013) "Using Nonpecuniary Strategies to Influence Behavior: Evidence from A Large-Scale Field Experiment," *Review of Economics and Statistics*, Vol.95, No.1, pp.64-73.
- Festinger, L. (1954) "A theory of social comparison processes," *Human Relations*, Vol.7, pp.117-140.
- Filippini, M. (1999) "Swiss Residential Demand for Electricity," *Applied Economics Letters*, Vol.6, pp.533-538.
- Filippini, M. (2011) "Short- and Long-Run Time of Use Price Elasticities in Swiss Residential Electricity Demand," *Energy Policy*, Vol. 39, pp.5811-5817.
- Filippini, M. and L.C. Hunt (2011) "Energy Demand and Energy Efficiency in the OECD Countries: A Stochastic Demand Frontier Approach," *Energy Journal*, Vol.32, pp.59-80.
- Filippini, M. and L.C. Hunt (2012) "US Residential Energy Demand and Energy Efficiency: A Stochastic Frontier Approach," *Energy Economics*, Vol.34, pp.1484-1491.
- Filippini, M., L.C. Hunt and J. Zoric (2014) "Impact of Energy Policy Instruments on the Estimated Level of Underlying Energy Efficiency in the EU Residential Sector," *Energy Policy*, Vol.69, pp.73-81.
- Filippini, M. and L. Orea (2014) "Application of the Stochastic Frontier Approach in Energy

- Economics,” *Economics and Business Letters*, Vol.3, pp.35-42.
- Gilbert, B. and J.G. Zivin (2014) “Dynamic Saliency with Intermittent Billing: Evidence from Smart Electricity Meters,” *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol.107, pp.176-190.
- Greene, W. (2005a) “Reconsidering Heterogeneity in Panel Data Estimators of the Stochastic Frontier Model,” *Journal of Econometrics*, Vol.126, pp.269-303.
- Greene, W. (2005b) “Fixed and Random Effects in Stochastic Frontier Models,” *Journal of Productivity Analysis*, Vol.23, pp.7-32.
- Herter, K. (2007) “Residential Implementation of Critical-Peak Pricing of Electricity,” *Energy Policy*, Vol.32, pp.2121-2130.
- Herter, K., P. McAuliffe, and A. Rosenfeld (2007) “An Exploratory Analysis of California Residential Customer Response to Critical Peak Pricing of Electricity,” *Energy*, Vol.32, pp.25-34.
- Herter, K. and S. Wayland (2010) “Residential Response to Critical-Peak Pricing of Electricity: California Evidence” *Energy*, Vol.35, pp.1561-1567.
- Houde, S., A. Todd, A. Sudarshan, J.A. Flora, and K.C. Armel (2013) “Real-Time Feedback and Electricity Consumption: A Field Experiment Assessing the Potential for Saving and Persistence,” *Energy Journal*, Vol.34, No.1, pp.87-102.
- Hung, M. and T. Huang (2015) “Dynamic Demand for Residential Electricity in Taiwan under Seasonality and Increasing-Block Pricing,” *Energy Economics*, Vol.48, pp.168-177.
- IEA (2009) “Progress with implementing energy efficiency policies in the G8,” *International Energy Agency Paper*.
- Ida, T., K. Ito, and M. Tanaka (2013) “Using Dynamic Electricity Pricing to Address Energy Crises Evidence from Randomized Field Experiments,” *Kyoto University, Working Paper*.
- Ito, K., T. Ida, and M. Tanaka (2015) “The Persistence of Moral Suasion and Economic Incentives: Field Experimental Evidence from Energy Demand,” *NBER, Working Paper*.
- Jessoe, K. and D. Rapson (2014) “Knowledge is (Less) Power Experimental Evidence from Residential Energy Use,” *American Economic Review*, Vol.104, pp.1417-1438.
- Jondrow, J., I. Materov, C.A.K. Lovell, and P. Schmidt (1982) “On the Estimation of Technical Inefficiency in the Stochastic Frontier Production Function Model,” *Journal of Econometrics*, Vol.19, pp.233-238.
- Joskow, P. and C. Wolfram (2012) “Dynamic Pricing of Electricity,” *American Economic Review, paper and proceedings*, Vol.102, pp.381-385.
- Kim J. H. and A. Shchervakova (2011) “Common Failures of Demand Response,” *Energy*, Vol.36, pp.873-880.
- Kleindorfer, P.R. and C.S. Fernando (1993) “Peak-Load Pricing and Reliability under

- Uncertainty,” *Journal of Regulatory Economics*, Vol.5, pp.5-23.
- Kumbhakar, S., S. Ghosh, and J. McGuckin (1991) “A Generalized Production Frontier Approach for Estimating Determinants of Inefficiency in US Dairy Farms,” *Journal of Business and Economic Statistics*, Vol.9, pp.279-286.
- Kumbhakar, S.C. and C.A.K. Lovell (2000) *Stochastic Frontier Analysis*, Cambridge University Press.
- Lim, K.M., S. Lim, and S. Yoo (2014) “Short- and Long-Run Elasticities of Electricity Demand in the Korean Service Sector,” *Energy Policy*, Vol.67, pp.517-521.
- Maddala, G.S. (2001) *Introduction to Econometrics*, Wiley, Third edition.
- Meghir, C. and G. Weber (1996) “Intertemporal Nonseparability or Borrowing Restrictions? A Disaggregate Analysis Using a U.S. Consumption Panel,” *Econometrica*, Vol.64, No.5, pp.1151-1181.
- Mizobuchi, K. (2008) “An Empirical Study on the Rebound Effect Considering Capital Cost,” *Energy Economics*, Vol.30, No.5, pp.2486-2516.
- Nailk, N.Y. and M.J. Moore (1996) “Habit Formation and Intertemporal Substitution in Individual Food Consumption,” *Review of Economics and Statistics*, Vol.78, No.2, pp.321-328.
- Nakajima, T. (2010) “The Residential Demand for Electricity in Japan: An Examination Using Empirical Panel Analysis Techniques,” *Journal of Asian Economics*, Vol.21, pp.412-420.
- Nakajima, T. and S. Hamori (2010) “Change in Consumer Sensitivity to Electricity Prices in Response to Retail Deregulation: A Panel Empirical Analysis of the Residential Demand for Electricity in United States,” *Energy Policy*, Vol.38, pp.2470-2476.
- Nishimura, K. (2014) “Prospects for Demand Response to Capacity Value in Japan (Wga Kuni ni Okeru Dhimando Risuponsu no Genjo to Tenbo),” *Journal of Public Utility Economics (Koeki Jigyo Kenkyu)*, Vol.66, No.2, pp. 57-63 (in Japanese).
- Flaig, G (1990) “Household Production and the Short- and Long-Run Demand for Electricity,” *Energy Economics*, Vol.12, No.2, pp.116-121.
- Okajima, S. and H. Okajima (2013) “Estimation of Japanese Price Elasticities of Residential Electricity Demand, 1990-2007,” *Energy Economics*, Vol.40, pp.433-440.
- Orea, L., M. Llorca, and M. Filippini (2015) “A New Approach to Measuring the Rebound Effect Associated to Energy Efficiency Improvements: An Application to the US Residential Energy Demand,” *Energy Economics*, Vol.49, pp.599-609.
- Pollak, R.A. (1970) “Habit Formation and Dynamic Demand Functions,” *Journal of Political Economy*, Vol.78, No.4, Part.1, pp.745-763.
- Reifschneider, D. and R. Stevenson (1991) “Systematic Departures from the Frontier: A Framework for the Analysis of Firm Inefficiency,” *International Economic Review*, Vol.32, pp.289-328.

- Shafir, E. (2013) *The behavioural foundations of public policy*, New Jersey: Princeton University Press.
- Sherman, R. and M. Visscher (1978) “Second Best Pricing with Stochastic Demand,” *American Economic Review*, Vol.68, No.1, pp.41-53.
- Steiner, P.O. (1957) “Peak Loads and Efficient Pricing,” *Quarterly Journal of Economics*, Vol.71, No.4, pp.585-610.
- Stern, P.C. (1986) “Blind Spots in Policy Analysis: What Economics Doesn’t Say about Energy Use,” *Journal of Policy Analysis and Management*, Vol.5, No.2, pp.200-227.
- Stevenson, R. (1980) “Likelihood Function for Generalized Stochastic Frontier Estimation,” *Journal of Econometrics*, Vol.13, pp.57-66.
- Tanishita, M. (2009) “Estimation of Regional Price Elasticities of Household’s Electricity Demand (Setai Denryoku Jyuyou no Kakaku Danryokusei no Chiikibetsu Suitei),” *Journal of Japan Society of Energy and Resources (Enerugie Shigen Gakkai Ronbunshi)*, Vol.30, No.5, pp. 1-7 (in Japanese).
- Wooldridge, J.M. (2010) *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, The MIT Press, second edition.
- Yamaguchi, K. (2007) “Estimating Energy Elasticity with Structural Changes in Japan,” *Energy Economics*, Vol.29, pp.1254-1259.
- 八田達夫 (2010) 「電力システム改革をどう進めるか」, 日本経済新聞出版社.

<参考資料>

- 東北電力(2011)「今夏における当社の供給力の見通しについて」, <http://www.tohoku-epco.co.jp/news/normal/1183251_1049.html> 2015年11月28日にアクセス
- 東北電力(2011)「9月定例社長記者会見概要」, <http://www.tohoku-epco.co.jp/news/press/1183530_1067.html> 2015年11月28日にアクセス
- 東京電力(2011)「今夏の需給見通しと対策について(第3報)」, <<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11051304-j.html>> 2015年11月28日にアクセス
- 関西電力(2011)「今夏の需給見通しと需給対策の状況について」, <<http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2011/0610-1j.html>> 2015年11月28日にアクセス
- 関西電力(2011)「今冬の需給見通しと節電のお願いについて」, <http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2011/pdf/1101_1j_01.pdf> 2015年11月28日にアクセス
- 関西電力(2012)「従量電灯A電気料金早見表 2012年8月」, 2014年3月31日にアクセス
- 関西電力(2012)「従量電灯A電気料金早見表 2012年9月」, 2014年3月31日にアクセス
- 北陸電力(2011)「今夏の電力需給見通しについて」, <<http://www.rikuden.co.jp/press/attach/11061501.pdf?1308175206>> 2015年11月28日にアクセス
- 経済産業省(2011)「スマートコミュニティ実証について」, <http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/smart_community/community.html> 2015年11月28日にアクセス
- 経済産業省(2011)「西日本5社の今夏の需給対策について」, <<http://www.meti.go.jp/setsuden/pdf/east01.pdf>> 2015年11月28日にアクセス
- 経済産業省(2011)「今冬の電力需給対策について」, <<http://www.meti.go.jp/setsuden/pdf/touki01.pdf>> 2015年11月28日にアクセス
- 経済産業省(2013)「デマンドレスポンス(Demand Response)について」, <http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/sougou/denryoku_system_kaikaku/002_s01_01_05.pdf> 2015年11月28日にアクセス
- 日経テクノロジー *online* (2013)「メリットオーダーとは」, <<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/WORD/20130121/261302/?rt= nocnt>> 2015年11月28日にアクセス
- 大和総研(2011)「電力不足解消のカギは家計部門にある 価格メカニズムとスマートグリッドの活用で需要をコントロール」, <<http://www.dir.co.jp/souken/research/report/japan/mlothers/11110201mlothers.pdf>> 2015年11月28日にアクセス

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりましたことを、心より感謝申し上げます。

特に、神戸大学大学院経済学研究科 柳川隆教授には、研究活動全般にわたり格別なご指導・ご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。私が3年間で博士論文をまとめることができたのは、先生が忍耐強くご指導していただいたからに他なりません。

更には、貴重なご教示を賜りました神戸大学経営学研究科 水谷文俊教授、中村絵里准教授、法政大学経済学部 明城聡准教授に深く感謝の意を表します。私と所属機関が異なるにも関わらず、ご丁寧なご指導ご鞭撻を頂いたことで、論文の完成度を高めることができました。

また、三菱重工株式会社様には博士論文を作成するために不可欠で貴重なデータを提供していただきました。加えて、数回のミーティングを開催していただいたことで、学術面だけでなく実務的な問題も意識した論文を執筆することができました。心より感謝申し上げます。

最後に、5年間ともに切磋琢磨しながら研究を続けて支えてくださった同期の皆様、先輩、後輩、そして私の大学院進学について理解をしていただき、経済的に支えてくださいました、両親に感謝します。