

慶應義塾大学 経済学部

電力維新

～見直される電力の使い方～

2011年2月25日

大沼あゆみ研究会 8期生

秋澤祐輔 市川彩乃 大津英子 大塚文博 横山太紀

目次

序論	4
1. 日本の二酸化炭素排出	5
2. 省エネの限界と削減コストの比較	7
3. 省エネの次の削減政策～固定価格買取制度～	9
3-1. 固定価格買取制度の概要と目的	9
3-2. 費用の観点から見た固定価格買取制度	9
3-3. 余剰買取制度から全量買取制度へ	10
4. 財としての電力の特性	12
4-1. 同時同量の原則	12
4-2. 太陽光発電導入による系統安定化コスト	14
4-3. 安定的かつ低コストかつ低二酸化炭素排出電源～ベース電力～	15
5. 問題提起	17
6. 提案	17
6-1. ピーク時補助金制度	17
7. モデル分析	18
7-1. 電力市場の簡易モデルの設定	18
7-2. 家計と企業の行動	19
7-3. 補助金額(S)の導出	20
8. 分析結果	21
9. 考察	25
9-1. 効用指数について	25
9-2. ベース発電の発電量について	26
9-3. ベース発電の発電費用について	27
9-4. 今後の課題	28
終論	30

巻末付録.....	31
7-2. モデル分析途中式	31
8. 分析結果(参考表1, 2より本文図11~16を作成)	32
9-1. 効用指数について(参考表3より本文図17を作成)	33
9-2. ベース発電の発電量について(参考表4, 5より本文図20を作成)	34
参考文献.....	35

序論

地球温暖化は、人間活動由来の数ある環境問題の中でも特異な存在である。温暖化ほど、地球全体に影響を与える環境問題を見つけることは容易ではない。気温上昇によって、海水の膨張や山岳氷河の融解が進めば海面が上昇し、結果として海岸線をもつ全ての国は否応なく影響を受ける。そして、気温上昇による生態系・自然環境への影響も計り知れず、その影響力は地球上の全地域例外なく及ぼされる。さらに、地球温暖化ほど原因が人間の多岐にわたる経済活動と密接に関わっている環境問題も、また稀である。企業がある商品を生み出す生産から最終消費者が消費するほぼすべての工程で、二酸化炭素が発生していると言っても過言ではないからだ。

以上の2点から、地球温暖化問題への人々の関心は非常に高く国際的にも高い注目を浴びている。これに加え、世界的に関心の高い環境問題への取り組みがエネルギー安全保障と国家の競争力に密接に関わるため、政治的にも関心が高い。

日本では、2009年9月に当時の鳩山首相が2020年までに1990年比で25%の二酸化炭素の削減目標を宣言し、国際的に大きな注目を集めた。しかしながら、この目標を達成するための道は平坦ではなく、むしろ困難に満ちていると予想される。

この論文では、日本における二酸化炭素削減への道のりが困難であることを示し、日本の電力市場の特異性を生かした新しい二酸化炭素削減政策を提案する。

1. 日本の二酸化炭素排出

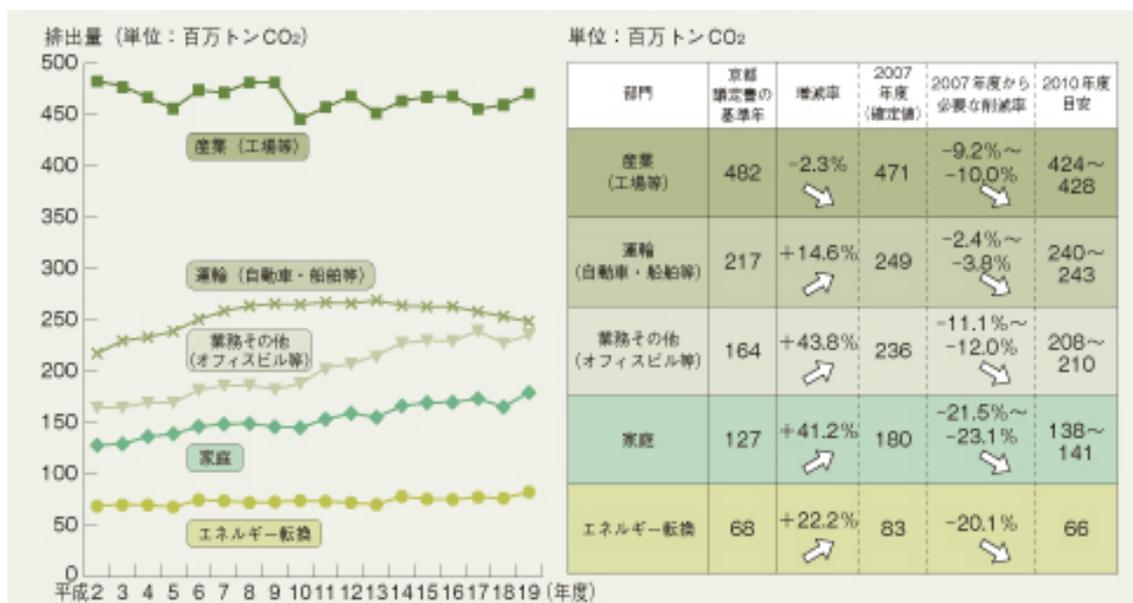


図1 出典:環境・循環型社会・生物多様性白書 2009(環境省)

上図は、部門別のエネルギー起源二酸化炭素排出量と2010年度の削減目標を示している。この図から読み取れることは、大きく三つあると考えられる。

まず1点目は、産業部門及び運輸部門は多少増減があるものの、横ばいもしくは減少傾向にあるということである。平成2年から19年にかけて平均実質経済成長率0.8%で成長していたことを加味すると、エネルギー消費が他部門と比べて大きい産業・運輸部門は、世界最高レベルの省エネ技術の導入及びエネルギー効率化を進めてきたことで二酸化炭素削減を達成し、その効果が表れたと推測できる。

2点目は、家庭部門における排出が一貫して増加していることである。人口増加に加え、経済成長に伴う所得増加によりエネルギー需要が増加し、結果として排出が増加したと考えられる。

3点目は、2010年度目標において家庭部門の削減目標が一番大きく掲げられている点である。これは、産業部門及び運輸部門はすでにエネルギーの高効率化を実現しており、現状から更なる排出削減を見込むのは困難であること。また、省エネ化・エネルギー使用効率化による企業への負担増加に伴う経済への悪影響を併せて考慮し、目標設定に至ったと考えられる。

以上3点を踏まえると、今後の日本における二酸化炭素削減の余地は家庭部門にあることがわかる。次に、この家庭部門のエネルギー消費状況を見て二酸化炭素削減のヒントを探りたいと思う。

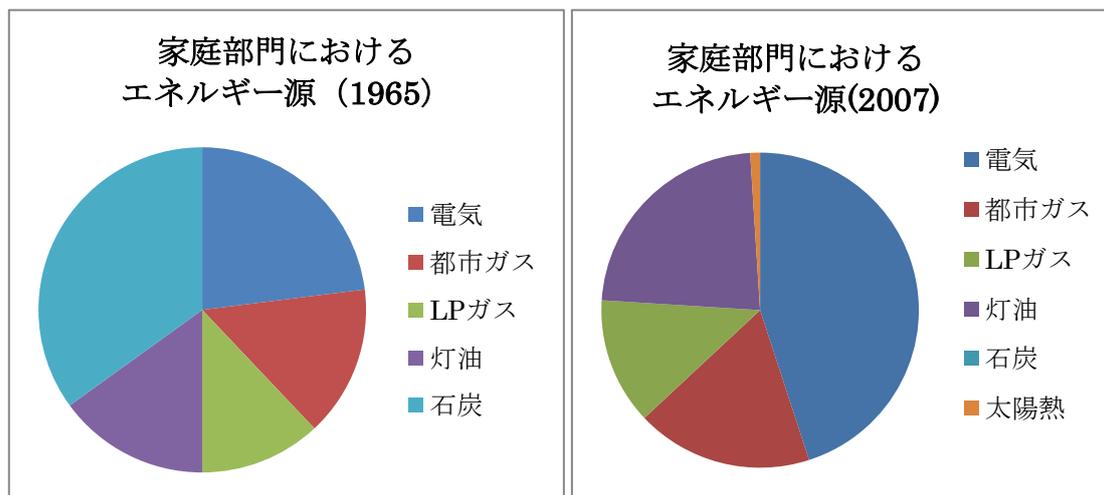


図2 出典:エネルギー白書 2009(経済産業省 資源エネルギー庁)

上図は、家庭部門におけるエネルギー源の推移を示している。この図から、家庭におけるエネルギー源としての電気の割合が 42 年間で 23%から 45%まで増加していることがわかり、日本は経済成長の過程で電力需要を大きく伸ばしてきたことが窺える。こうした状況に加え、近年ではガスコンロの代わりに IH クッキングヒーターを使い、また、給湯の際はエコキュートを使う「オール電化」住宅やマンションの普及が進んでいるため、今後ますます電力需要・電力依存が高まると考えられる。

以上、図1と図2で得られた考察から、我々は日本における二酸化炭素削減の余地は家庭部門にあり、中でも電力使用を抑えることが削減に大きく貢献すると考えた。

2. 省エネの限界と削減コストの比較

1973年の第一次オイルショック以降、政府や企業は一体となって省エネルギー事業に注力してきた。具体的には、1979年に施行され改正を重ねてきた「エネルギーの使用の合理化に関する法律」に基づき、工場・輸送・機器・建築物からのエネルギー消費量を抑えるためにエネルギー使用の効率化・省エネ化を目指し、技術革新や効率的なシステムの構築の開発に努めてきた。その結果、日本のエネルギーの使用効率は、高度な技術力を活かして年々高まっていき、現在もなお世界最高水準を維持している。

しかしながら、依然として日本は高い省エネ技術を有しているものの、エネルギーの使用効率の上昇に大きく依存する二酸化炭素削減政策にも限界が来ていると言わざるを得ない。下の図3を見ると、1990年代初頭までは、日本は他の先進国と比べて一線を画す、高いエネルギー効率性を実現していたが、それ以降他国との差はみるみる縮小してきていることが分かる。ここで、GDP当たりのエネルギー効率は、二酸化炭素を多く排出する製造業と排出量の少ない非製造業を含めた試算であるため、産業構造が各国で異なることを考慮すると必ずしも有効な指標にはならないという意見もあるかもしれない。だが、円高で加速する製造業の工場の海外移転に伴う技術拡散や企業の国際競争力低下の現状を踏まえると、日本の技術力優位を維持することは並大抵でないと考えられる。

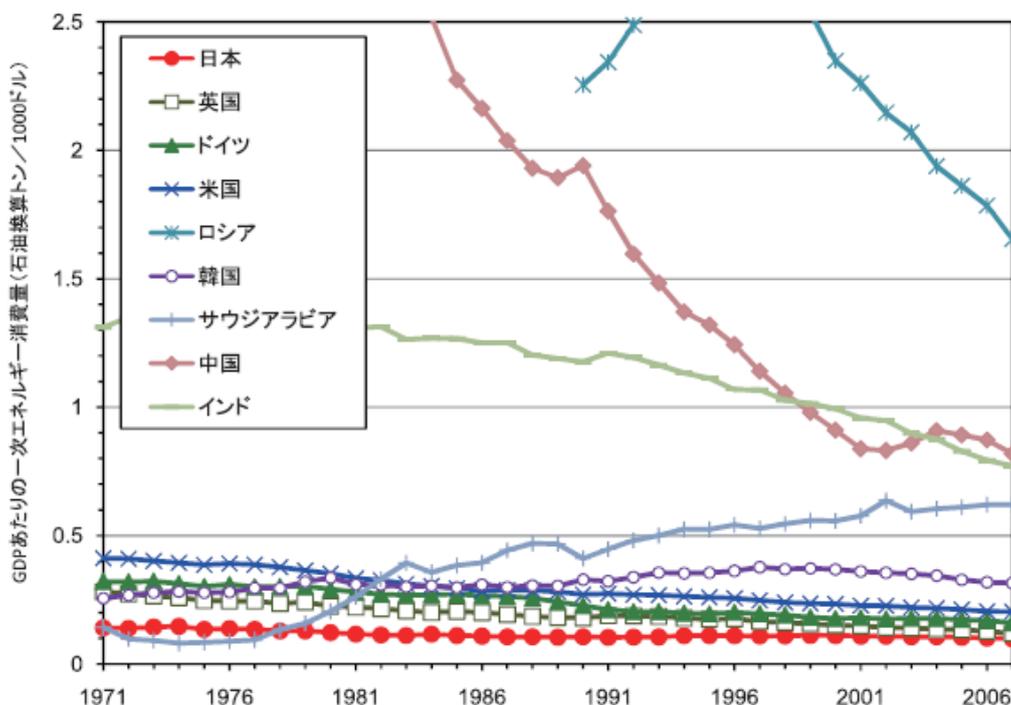


図3 国全体としてのエネルギー効率の国際比較

出典:RITE TODAY vol.5(2010) システム研究グループ

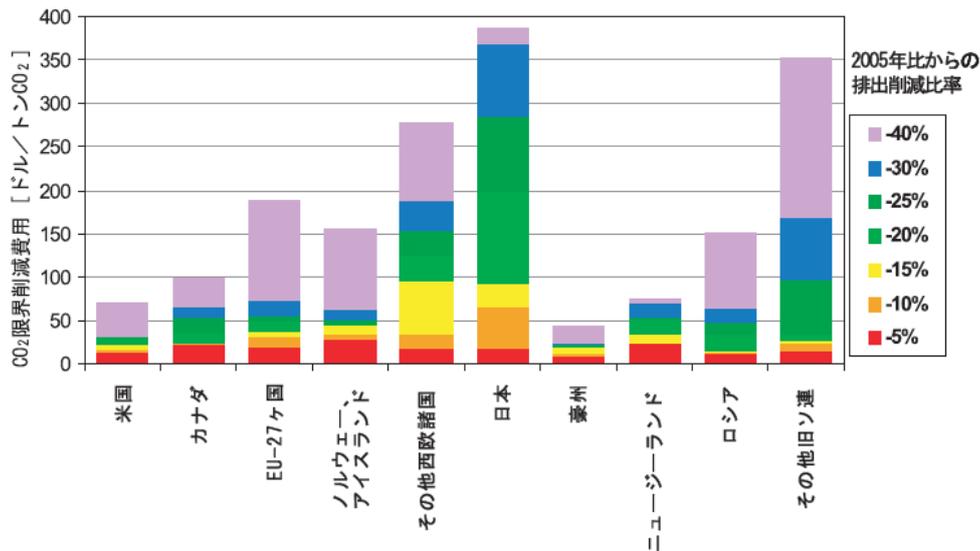


図4 二酸化炭素限界削減費用の比較 出典:RITE TODAY vol.4(2009) システム研究グループ

次に、二酸化炭素削減に必要とされる費用がどれほどのものなのかについて触れていきたい。図4は、1トンの二酸化炭素を削減するためにかかる限界費用が先進各国でどれほど違うかが示されている。2009年9月22日、国連気候変動首脳級会合において当時の鳩山首相は、すべての主要国参加による意欲的な目標の合意を前提に1990年比25%減(2005年比30%減)を目指すと宣言した。すると、日本の限界削減費用は370ドル/1トンとなり、欧州各国の2倍、米国の10倍に達することがわかる。留意すべき点として、これが「限界」削減費用であることを強調したい。一単位追加的な削減を行った場合にかかる費用が他国と比べて高い日本は、最終的に計上する費用負担額が他国を大きく上回ると容易に予測がつく。

では、なぜ削減費用が日本と他の先進各国の間でこれほどの差が生じるのか。考えられる理由として主に2点挙げられる。

1点目は、前述したが日本の省エネ技術は既に世界最高水準にあるため、省エネによる削減効果に期待できないことである。日本は、国内経済における製造業への依存度が欧米諸国に比べて高いこと。また、製造業関係者から「日本は乾いた雑巾」、と形容されるほど既に省エネ技術水準が高いことを踏まえると、技術革新による更なる排出削減を達成することは容易ではないと考えられる。

2点目は、欧米は発電方法のうち石炭火力の割合が高いことである。発電時排出量の多い石炭火力は、逆に言えば削減余地の大きい分野であるため、石炭火力の依存度が高い米国などは、発電の高効率化や燃料転換を行うことで削減を達成することができる。しかしながら、日本における発電構成は、火力発電は依然として高いもののLNGなどの低排出燃料を多く使用しているため、発電部門からの削減も他国と比べて困難であることが言える。

3. 省エネの次の削減政策～固定価格買取制度～

3-1. 固定価格買取制度の概要と目的

固定価格買取制度とは、再生可能エネルギー(住宅用から事業用までを含む太陽光発電、風力発電、30000kW 以下までの中小型水力発電、バイオマス発電、地熱発電)によって生み出された電力を、ある一定期間に一定の価格で、電力会社が生産者から買い取ることを義務付ける制度である。現在、日本において行われている固定価格買取制度は2009年11月より行われている余剰買取制度のことを指す。この制度では、生産者が生み出した電力のうち実際に系統へ流れた量だけ、1kWh 当たり 48 円で 10 年間は当面電力会社が買い取ることを義務付けている。¹

固定価格買取制度を行う政府の目的としては、再生可能エネルギー、特に住宅用太陽光発電設備の普及促進を行い、電力部門における二酸化炭素排出量を削減させようとする狙いが挙げられる。住宅用太陽光発電設備の設置者にとっては売電価格の下落による設置費用回収長期化・困難化は大きなリスクであるが、固定価格買取制度が実施されることによりそのリスクが下がり、設備投資へのインセンティブが増大することが大いに期待できる。

3-2. 費用の観点から見た固定価格買取制度

なお、住宅用太陽光発電設備を設置するのにかかる初期費用は、新エネルギー財団によると2007年度の調査では69.6万円/kWである。²今後こうした初期費用は、大量生産・生産技術の向上により減少していくことが予想されるが、発電単価としてみると依然として高いのが現状で、他の電源の発電単価よりも大幅に上回っている。(表1)

電源	排出量 g-CO ₂ /kWh	発電単価 円/kWh
石炭火力	975	5.0～6.5
石油火力	742	10.0～6.5
天然ガス火力	608	5.8～7.1
原子力	22～35	4.8～6.2
水力	11	8.2～13.3
地熱	15	16～*
太陽光	53	46
風力	29	10～14

表1 電源比較(二酸化炭素排出量と発電単価)

出典:福田遵『改正エネルギー法とその対応策

グリーン企業・グリーン市民になるための基礎知識』、

日刊工業新聞社(2009)

*地熱発電の発電単価のデータのみは

URL:<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90309c05j.pdf> より抜粋

¹ 買取制度ポータルサイト(資源エネルギー庁 再生可能エネルギー推進室)

URL: <http://www.enecho.meti.go.jp/kaitori/>

² 平成19年度住宅用太陽光発電システム及び発電電力量等について

URL: http://www.solar.nef.or.jp/system/html/taiyou_sys080508.pdf

こうした事実から、固定価格買取制度において設定されている買取価格が、他の電源による発電コストを大幅に上回ってしまっていることがわかる。そのため、ただ電力会社が太陽光発電を上述の価格で買い取れば買い取るほど損失を出すことになってしまう。こうした事態を避けるために、固定価格買取制度においては、電力会社が太陽光発電促進付加金(太陽光サーチャージ)と称して電力需要家全般に対して課金を行うことが認められている。その値段に関しては経済産業省より毎年度発表される手はずとなっていて、平成 22 年度は 0 円であった³が、来年度以降は、経済産業省の試算では標準家庭 1 世帯当たり月に 30～100 円程度の負担額が予想されている。

これにより電力会社は損失を抑えることが可能となったが、集合住宅に住む世帯や、家の耐震構造上の理由、経済的な理由などから太陽光発電設備を設けられない世帯からも負担を強いるため、太陽光発電促進付加金に関して批判が起こることは避けられない状況だ。

3-3. 余剰買取制度から全量買取制度へ

また、最近では、政府が余剰買取制度から全量買取制度への移行を検討している。全量買取制度とは、文字通り再生可能エネルギーによって生み出された電力の全てを電力会社に一定期間買い取ることを義務付けるものである。この制度では、これまでの余剰買取制度よりも買い取る電力の量が格段に増えるため、買い取り費用も増大し、その分の太陽光発電促進付加金も 1 世帯当たりの負担金額はより高額で買い取れば買い取るほど、より長い期間買い取れば買い取るほど高くなる。(P.11 表2)

これほど負担金額が大きくなるので、二酸化炭素削減コストも膨大となる。経済産業省の試算によれば、全量買取制度を 15 円・15 年間固定で行った場合の制度導入 10 年目の二酸化炭素削減コストは約 19000 円/t-CO₂、また 20 円・20 年間の場合は 約 22000 円/t-CO₂ となっている。一方、欧州連合域内排出量取引制度(EU-ETS)において取引されている CO₂ 排出権の価格が、2009 年におおむね 15 ユーロ/t で推移していること、2009 年の円/ユーロ為替レートが平均して終値 130 円前後であったことを考慮すると⁴、概算して約 2000 円/t となる。すなわち、全量買取制度による削減コストは、排出権取引による削減コストより 10 倍近く高いということがいえる。

³ 経済産業省 平成 22 年度の太陽光発電買取制度に係る太陽光発電促進付加金の決定について

URL: <http://www.meti.go.jp/press/20100127005/20100127005.html>

⁴ Yahoo!ファイナンスより

URL:

<http://table.yahoo.co.jp/t?c=2009&a=1&b=1&f=2009&d=12&e=31&g=m&s=eurjpy%3Dx&y=0&z=eurjpy%3Dx&x=sb>

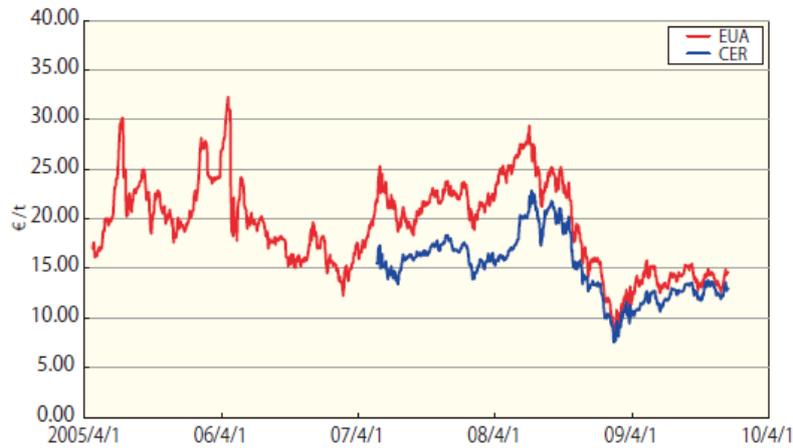


図5 EU-ETS の価格推移

出典:みずほ情報総研 (Point Carbon(ノルウェー)に基づき、みずほ情報総研作成)

URL: <http://www.mizuho-ir.co.jp/publication/contribution/2010/businessi07.html>

EU-ETS はヨーロッパの排出権取引市場であり、日本の排出権市場ではないから、厳密にいえばこの推論は正確ではないが、全量買取制度による二酸化炭素削減コストが他の代替手段によるそれよりあまりにも高いということがわかる。

4. 財としての電力の特性

4-1. 同時同量の原則

さらに、問題点はこれだけではない。電力供給の安定性の面からみても、ただやみくもに太陽光発電を普及させる政策には課題が多い。太陽光発電は、その性質上日射量や天気、また何より昼か夜かによって発電量が大きく異なる電源である。

	買取費用 (億円/年)	CO ₂ 削減量 (万t)	CO ₂ 削減コスト (円/t-CO ₂)	1kWhあたりの 負担額 (円/kWh)	買取費用負担額 (円/月) 標準家庭*2
全量買取制度 15円・15年買取*1	4622	約2600	約19000	0.5	150
全量買取制度 20円・20年買取*1	6292	約2900	約22000	0.68	204
現行制度 (太陽光余剰買取)	3118	—	—	0.34	102

表2 買取費用負担額

(注)いずれも制度導入後 10 年目の試算

*1 太陽光発電以外のエネルギーの買取価格・期間

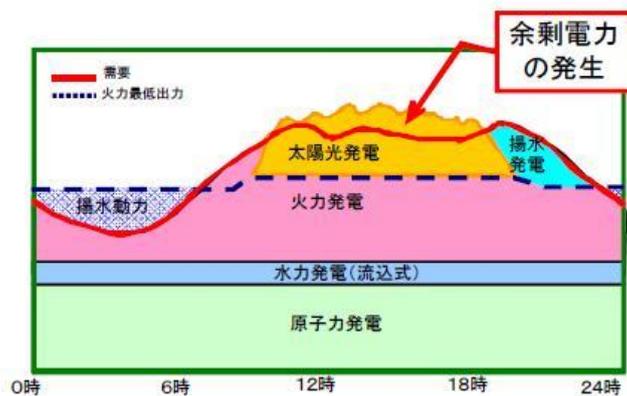
*2 標準家庭の電気使用量は 300kWh/月と想定

出典:「経済産業省 資源エネルギー庁 買取制度小委員会 議事録」より作成

URL: http://www.meti.go.jp/committee/gizi_8/8.html#meti0004601

電気という財は貯蓄しておくことができない。そのため蓄電池を導入することで、一旦電気ではない形にエネルギーを変換し、再び電気に変換して取り出す、といったことは可能である。しかし、電気そのままの状態ですべて貯めておくことはできず、必要な時に発電しなければならない。また、需要量に満たない電力量はもちろん、需要量を大きく上回る電力量が送電網に流れることも許されない。これは電圧や周波数を安定させる必要があるために求められる条件であり、これがひとたび破られると大停電を引き起こしてしまう危険性がある。すなわち、必要な時必要なだけ発電される必要があるのだ。こうした電気独特の財の特殊性を同時同量の原則という。

太陽光発電が大量に普及した場合、昼間の晴天時はあまりに多くの電力が生み出されて、余剰電力が発生してしまう可能性がある。この余剰電力をそのままにしておくと、同時同量の原則が破られてしまうので、系統不安定化とそれに伴う停電を引き起こしかねないと予想されている。



需要の少ない時期に、ベース供給力(原子力+水力+火力最低出力)と太陽光の合計発電量が需要を上回り、余剰電力が発生(上図)。

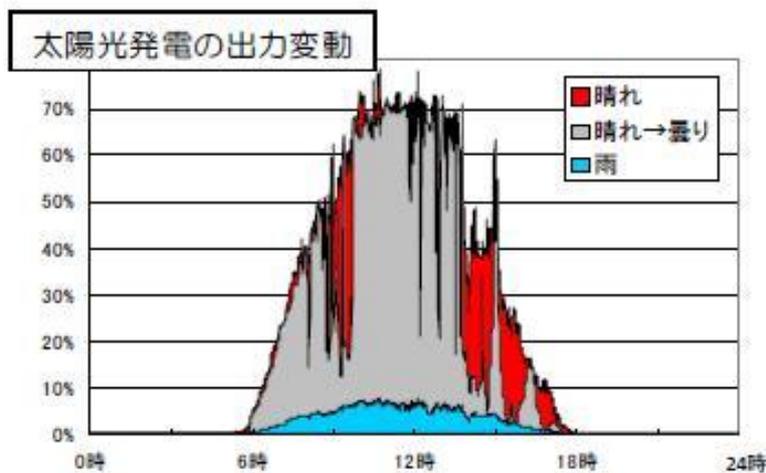


図6 電力発電内訳と出力変動

出典: 経済産業省 再生可能エネルギー大量導入に伴う系統安定化対策コストについて

URL: <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100324a06j.pdf>

停電対策のためには、この余剰電力を貯めておける容量の蓄電池を設ける必要がある。蓄電池設置コストは莫大なものとなるだろう。

4-2. 太陽光発電導入による系統安定化コスト

では、晴れから突然曇りに変わる天気や、1日中雨といった天気のおときはどうだろうか。まず、突然曇りとなった場合は、太陽光の出力が急激に低下する。1日中雨のおときは終日、太陽光発電の出力が低いままである。こうした事態に対応するためには、その出力低下を補うための火力発電等調整電源が必要となる。それに伴い、新たな発電所を建設するコスト、臨機応変に出力調整して火力発電を運転するコストを考慮すると、これも莫大なものとなることが想像に難くない。

実際、太陽光発電導入に必要な系統安定化コストを試算した結果が右に示されている。現在の導入量が200万kW程度⁵であるが、ここから最大限に導入(5321万kW)をした場合、主に余剰電力対策としての蓄電池導入のために、約17.4兆円ものコストがかかる。晴天が続いた場合、ゴールデンウィークや年末年始など、需要が低くなる時期が続く時期は余剰電力が大量に発生することが予想される。この余剰電力のために蓄電池の大量導入が不可欠となり、これほどのコストが増加する結果となってしまったのだ。このコストを誰が負担するのかについては、主張の分かれるところである。経済産業省の次世代送配電システム制度検討会では、太陽光パネル設置者等が負担する発電事業者負担方式と、電気料金に上乗せして需要者全員に負担させる上限付き一般負担方式の2つの方式が検討されている。しかしながら、発電事業者負担方式では太陽光パネルを設置するインセンティブが抑制されてしまう。また、一般負担方式では太陽光発電促進付加金に加えてさらに料金が上乗せされ可処分所得の一層の減少が考えられる上に、上限の設定が難しいであろう。⁶

資料5 系統安定化コスト試算

長期エネルギー需給見通しにおける最大導入ケースの場合

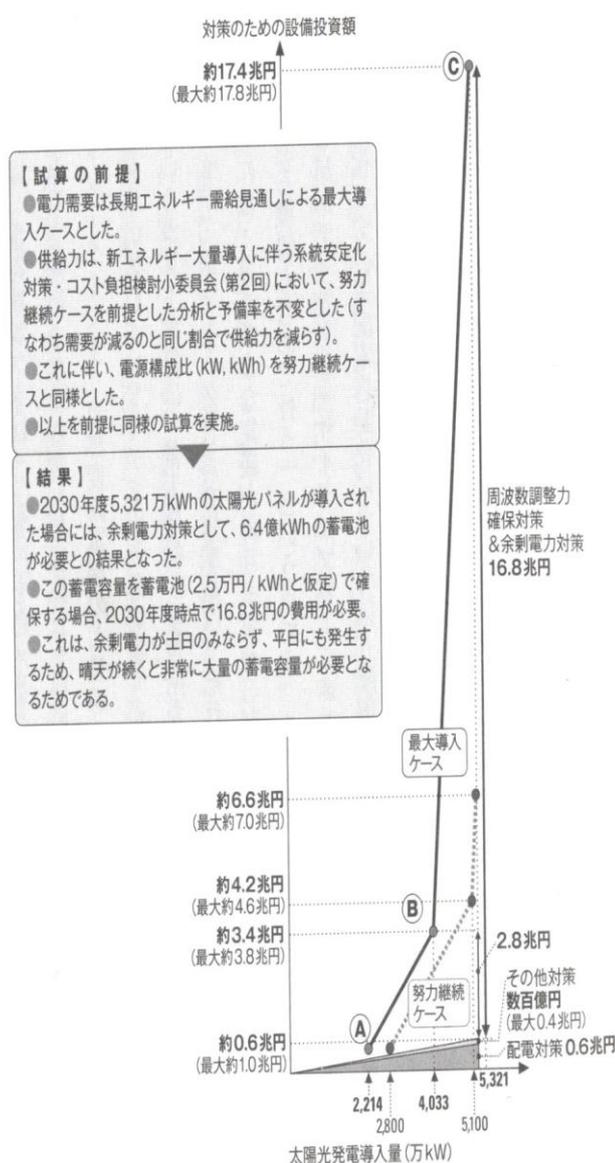


図7 系統安定化コスト試算

出典:『クリーン&グリーンエネルギー革命』

東京大学サステイナビリティ学連携研究機構 p.117

⁵ 出典:『クリーン&グリーンエネルギー革命』 東京大学サステイナビリティ学連携研究機構 p.115

⁶ 「再生可能エネルギーの全量買取制度における詳細制度設計について」

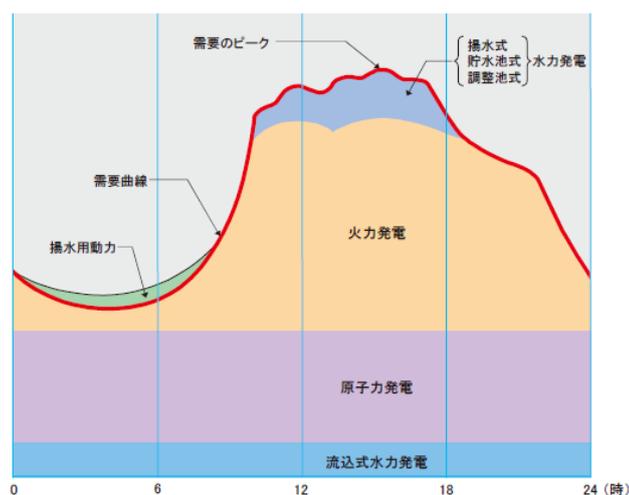
出典:資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 電力・ガス事業部

URL: http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004601/010_02_00.pdf

4-3. 安定的かつ低コストかつ低二酸化炭素排出電源～ベース電力～

それでは、太陽光発電と同等に二酸化炭素排出量が少なく、なおかつ安定した出力でコストもかからない電源はないだろうか。その要求に応えるのが、「ベース電力」と呼ばれるものである。ベース電力には通常、原子力発電や流れ込み式の水力発電、一部の石炭火力発電が含まれている。これらは、初期コストはかかるが連続して運転させるコストが安いので、需要に応じて臨機応変に出力を変えるより、安定して運転する方が向いている電源である。⁷

需要の変化に対応した電源の組み合わせ（ベストミックス）



1-23

出典：資源エネルギー庁「原子力2009」

図8 需要の変化に対応した電源の組み合わせ

出典：原子力・エネルギー図面集 2010年版(電気事業連合会 HP)

URL: http://www.fepc.or.jp/present/jigyou/juyou/sw_index_01/index.html

⁷ 電気事業連合会 HP

URL: http://www.fepc.or.jp/present/jigyou/juyou/sw_index_01/index.html

主要国の原子力発電所設備利用率の推移

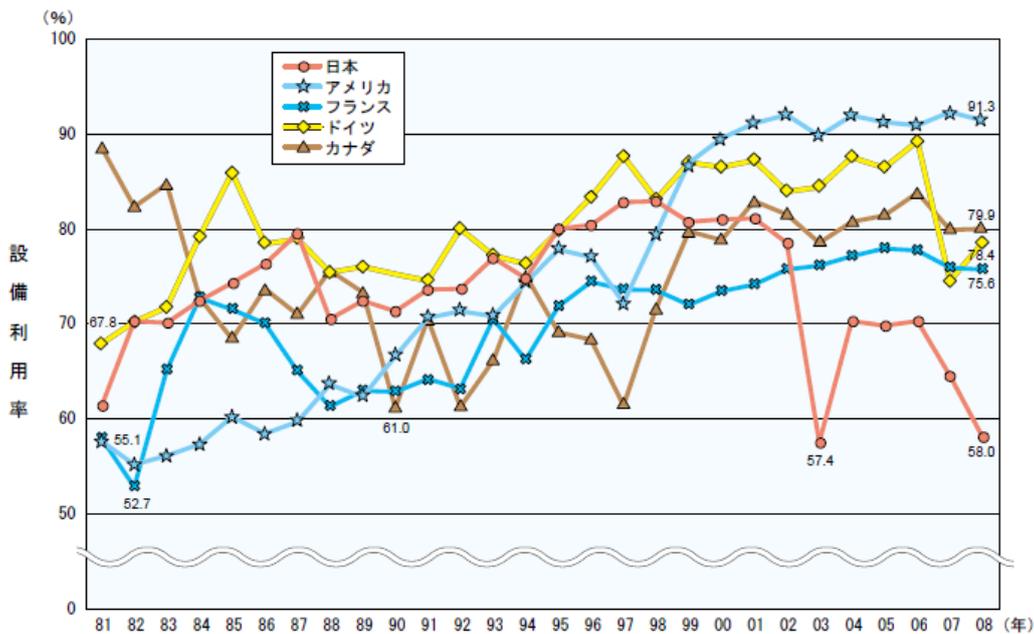


図9 主要国の原子力発電所設備利用率の推移

出典：原子力・エネルギー図面集 2010年版(電気事業連合会 HP)

これらベース電力の総発電量に占める割合をより引き上げることができれば、コスト削減と二酸化炭素排出削減を大幅に達成できるのではないだろうか。

特に、日本の原子力発電に関しては、上図のとおり設備利用率が2008年には58%と主要国に比べ低い水準にある。現在ある設備を最大限に活用することができれば、新たに発電所を建設することもなく安価に目標を達成できると考えられる。

しかし、ベース電力はその性質上、安定した需要量の範囲内で稼働させることが、コストの面で必要条件となっている。ベース発電は安定した電力供給を行える一方で、発電量を急激に変化させるには不向きなのである。そのため、ベース電力の底上げを行うには、同時に需要の底であるオフピーク時の電力需要量を引き上げるなど、1日を通じた電力需要の差を縮めること、つまり、平準化が欠かせないわけである。

5. 問題提起

これまで述べた通り、二酸化炭素排出量の削減の余地は、家庭部門の電力の使い方にあると言える。そのための政策として、まず機器の省エネルギー化を行ったがその機器の変革は限界を迎えた。次に、発電量に占めるグリーン電力の比率を増加させるため、現在は太陽光発電を促進のための固定価格買取制度が導入されている。しかし、固定価格買取制度は太陽光発電が促進されるほど買い取り費用が増加していくことや、太陽光によって発電された電力が逆流することによる系統不安を解消する費用が高いため、太陽光発電の限界費用は今後増加していつてしまうといった問題が考えられる。

そこで今後の二酸化炭素排出量の削減の方法として、ベース電力を拡大していくことが挙げられる。発電による二酸化炭素の排出量が少なく、かつ、発電費用も小さいベース電力(水力・原子力・地熱発電)による発電の比率を増加させることで、火力発電の比率を減少させることができる。そして、排出量が多い火力発電の比率が減少するので、電力分野の二酸化炭素排出量を削減することが可能と言える。

6. 提案

前述したように、発電による二酸化炭素の排出が少なく、よりコストの低いベース電力を増加させたい。しかし、ベース電力は発電出力を変動させることが困難なため、1日の電力需要の変動幅を小さくしなければならない。そのための政策として、ピーク時補助金(払い戻し)制度の導入が有効であると考えられる。

6-1. ピーク時補助金制度

ピーク時補助金制度とは、1日をピーク(電力需要の高い時間帯:ex.6~18時)と、オフピーク(電力需要の低い時間帯:ex.18~6時)に分類する。そして、需要家がピーク時に均一価格時の需要より電力需要量を減少させた場合に、その報酬として電力会社が1kwh当たり、一定の額を削減量に対して支払うという制度である。

この制度の導入により、削減することで補助金が払われるピーク時の需要が減少する。また、その分、補助金が支払われないオフピーク時の需要量が増加すると考えられる。したがって、制度の導入によって、「電力需要の平準化」を実現できることが分かる。

加えて、需要の変化によって、ベース電力の発電量を増加させることが可能になり、火力発電の量が相対的に減少するので、二酸化炭素の排出量を削減する効果があると言える。

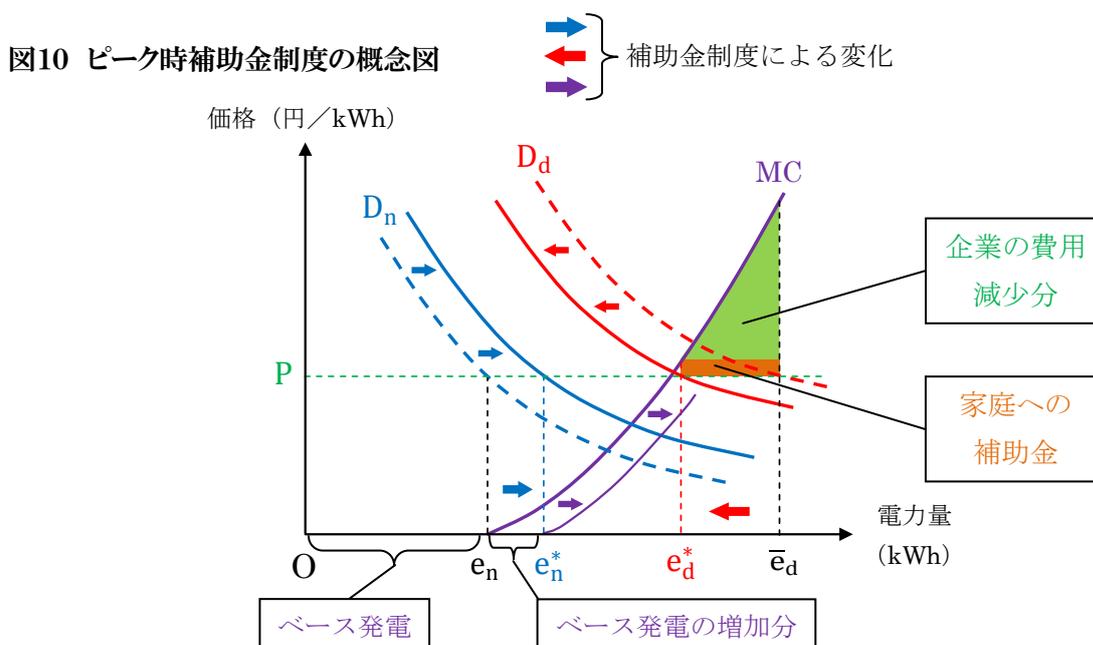
7. モデル分析

私達の政策は、昼の電力需要量を減らすことである。しかし、昼の需要量が減少すれば、利潤も減る可能性がある。そこで、この政策により、利潤を下げずに昼の電力需要量を下げられることを示す。

以下のモデル分析では、電力会社は、需要者に昼の需要量を減らしてもらえるように、電力需要量を削減した需要者に対して、補助金を支払うとする。企業は、昼の需要量の減少によって発電費用を減らすことができ、一方で、需要者へ需要量の削減分を支払う費用が生じる。ここで、

$$(\text{発電費用の減少額}) > (\text{削減に対する補助金額})$$

となれば、政策の導入により、企業の利潤を増加させることが示される。図10は、簡易的にこの仕組みを示したものである。



7-1. 電力市場の簡易モデルの設定

1 企業(電力会社)と1家計からなる生産経済を想定し、

$$\text{家計の効用関数} : U(e_d, e_n) = e_d^a \cdot e_n^b + [M - P \times (e_d + e_n) + S \times (\bar{e}_d - e_d)]$$

$$(0 < b \leq a, 0 < a + b < 1)$$

$$\text{電力会社の費用関数} : C(e_d, e_n) = 2\beta e_b + \alpha \{ (e_d - e_b)^2 + (e_n - e_b)^2 \}$$

$$\text{電力会社の利潤} : \pi = P \times (e_d - e_n) - C(e_d, e_n) - S \times (\bar{e}_d - e_d)$$

とする。ここで想定する家計は、代表的な4人家族である。それぞれの関数は、企業の費用関数は増加関数で限界費用が正であること、家計の効用関数は増加関数であることを表している。また、各文字はそれぞれ、次のことを示す。

e_d :昼の電力需要量(kWh) ($e_d > 0$)

e_n :夜の電力需要量(kWh) ($e_n > 0$)

M:家計の所得(円)

P:電力価格(円) ($P > 0$)

S:電力会社が家庭に支払う補助金額(円/kWh)

\bar{e}_d :政策導入前の昼の電力需要量(kWh)

α :火力発電における 1kWh 当たりの発電費用(円/kWh) ($\alpha > 0$)

β :ベース発電における 1kWh 当たりの発電費用(円/kWh) ($\beta > 0$)

e_b :ベース発電による発電量(kWh) ($e_d > e_n \geq e_b$)

$\rightarrow e_i - e_b$:火力発電量(kWh) ($e_b \leq e_i, i = d, n$)

ここで、電力価格は均一価格で所与とする。また、ベース発電量は急激に変動させることが困難なため、1日の最低需要量を賄える量を発電しているため、「 $e_b \leq e_i$ 」とする。

7-2. 家計と企業の行動

家計の効用最大化行動は以下ようになる。

$$\text{Max } U(e_d, e_n) = e_d^a \cdot e_n^b + [M - P \times (e_d + e_n) + S \times (\bar{e}_d - e_d)]$$

$$\frac{\partial U}{\partial e_d} = a \times e_d^{a-1} \cdot e_n^b - (P + S) = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial e_n} = b \times e_d^a \cdot e_n^{b-1} - P = 0$$

これらを e_d, e_n についてとくと、昼の電力需要量(e_d)と、夜の電力需要量(e_n)はそれぞれ次のように求められる。(途中式は巻末付録7-2)

$$\begin{cases} e_d = \left(\frac{P+S}{a}\right)^{\frac{1-b}{a+b-1}} \cdot \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{b}{a+b-1}} \\ e_n = \left(\frac{P+S}{a}\right)^{\frac{a}{a+b-1}} \cdot \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{1-a}{a+b-1}} \end{cases}$$

一方で、電力会社の利潤は

$$\begin{aligned}\pi &= P(e_d + e_n) - C(e_d, e_n) - S(\bar{e}_d - e_d) \\ &= P(e_d + e_n) - [2\beta e_b + \alpha\{(e_d - e_b)^2 + (e_n - e_b)^2\}] - S(\bar{e}_d - e_d)\end{aligned}$$

となる。ここでは、「電力の供給量=需要量」として考える。また、電力価格(P)、1kWh当たりの発電費用(α , β)、ベース発電量(e_b)は所与とする。したがって、電力会社が決定できる値は、消費者へ支払う削減量 1kWh 当たりの補助金の額(S)だけである。

7-3. 補助金額(S)の導出

ここで、実際に数値を代入して、企業が利潤最大化行動をする中で、どのような補助金額が支払われるのか導出する。まず、所与としたパラメーターを以下のように決める。

電力価格(P) = 0.5 円

火力発電の 1kWh 当たりの費用(α) = 2 円/kWh

ベース発電の 1kWh 当たりの費用(β) = 0.1 円/kWh

ベース発電量(e_b) = 0.015kWh

火力発電の 1kWh 当たりの費用(α)と電力価格(P)は、 $e_n < \bar{e}_d < e_d$ となるような値で設定し、それをもとにベース発電の 1kWh 当たりの費用(β)やベース発電量(e_b)の値を設定した。そして、補助金の基準となる昼の電力需要量(\bar{e}_d)は、補助金がない($S=0$)ときの昼の電力需要量とする。

ここで、消費者の効用関数を見てみる。消費者の効用関数

$$U(e_d, e_n) = e_d^a \cdot e_n^b + [M - P \times (e_d + e_n) + S \times (\bar{e}_d - e_d)]$$

におけるa, bを便宜上、効用指数と呼ぶことにする。効用指数は、 $e_d \geq e_n$ (昼の電力量は夜の電力量よりも大きい)となるので、 $0 < b \leq a$ かつ、 $0 < a + b < 1$ を満たす。

ここで、以下では $a + b = 0.8$ と仮定して分析を行う。効用指数の合計が 0.8 である a と b の組み合わせを考えると、 $a = b = 0.4$ のとき昼の電力量と夜の電力量が等しくなるから、効用指数の条件より $a = 0.79$ から0.4までで成り立つことが分かる。

以上の設定に基づき、次のような計算過程を行った。

① $S = 0$ のときの各電力量(e_d, e_n)を求める。

② 電力会社の利潤(π)を求める。

③ 電力会社の利潤(π)を最大化するような補助金額(S)を excel のソルバーで算出。

分析結果は巻末付録(7-3)に記載する。

8. 分析結果

まず昼と夜の電力量について確認してみる。補助金の導入前後でそれぞれを比較すると、補助金の導入によって、大きく電力量が下がっている。さらに、昼と夜の電力量の差は、補助金がないときよりも補助金を導入したときの方が各昼の効用指数の大きさにおいて小さくなっており、電力の平準化が達成されている(図13)。

また効用指数の差と補助金の関係性について見てみると、効用指数の差($a - b$)が大きくなるにつれ、補助金の額が大きくなっている(図14)。つまり、夜よりも昼に効用を高く感じる人に支払う補助金が増加するということである。

次に企業の利潤について見てみると、代表的家計がどの効用指数を持つ人であっても、制度を導入することにより企業の利潤は増加することが分かる。(図15)

効用指数 $a = 0.79$ から 0.56 まで π がマイナスなので、一見すると利潤が最大化されていないように見える(図16)。しかし、補助金がないときの π もマイナスであり、利潤の増加率をみると全ての昼の効用指数において正の値を取っていることから、制度の導入により利潤が増加していることが分かる。ここで念のため、分析によって導出された補助金額により、本当に企業の利潤最大化を達成出来るのかを確認する。補助金を0から1まで0.01ずつ増加させていくことで、利潤がどのように変化するのかを表した図16のグラフ群で確認する。ここでは掲載の都合上、 $a=0.79, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40$ のときのみについて表す。

このグラフ群からも分かるように、補助金額を大きくするにつれて利潤が増加して、ある額で最大になり、その後は下がっていく。つまり、補助金を用いることで企業の利潤を大きくすることができること、そして、最適解が存在するということが分かる。これより、私達が提案するモデルの整合性が伺える。(分析詳細は巻末付録8)

図11 補助金なしのときの各電力量と利潤

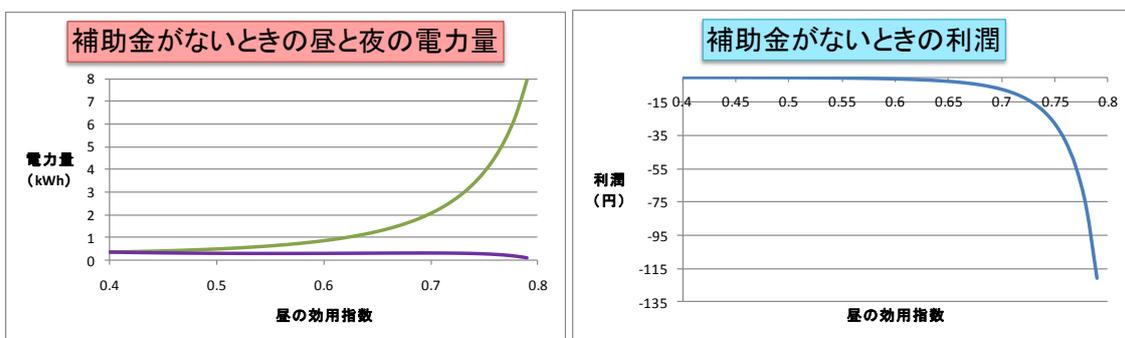


図12 補助金を導入したときの各電力量と利潤

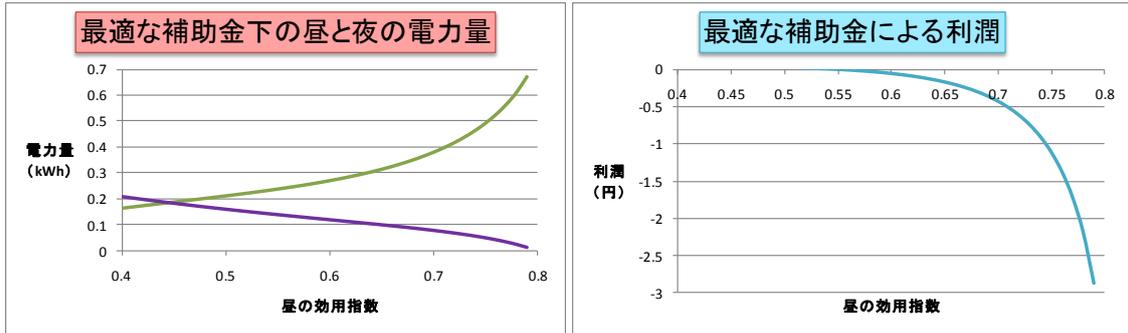


図13 補助金の導入前後での電力量の差

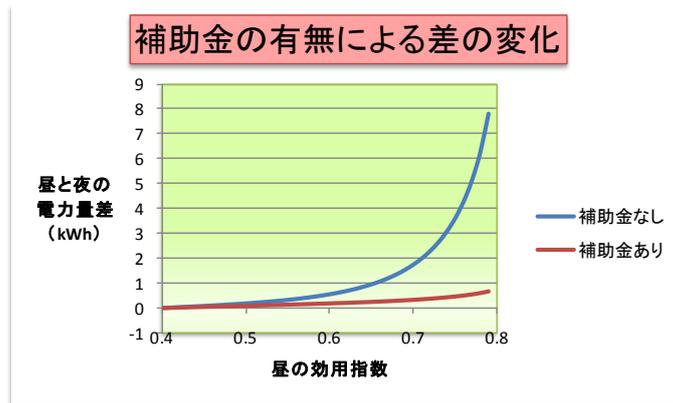


図14 昼と夜の効用指数の差の増加に伴う補助金の変化

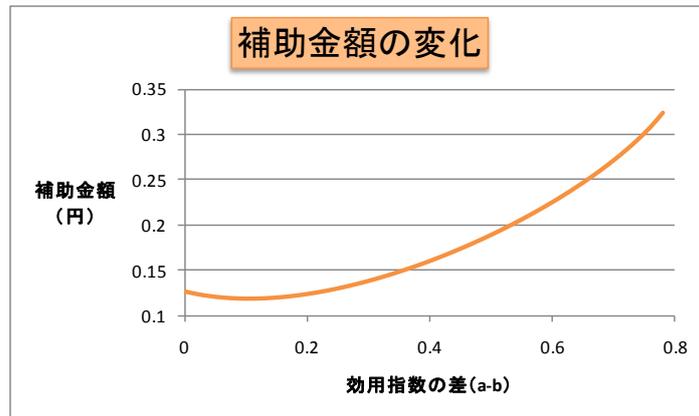


図15 利潤の増加率

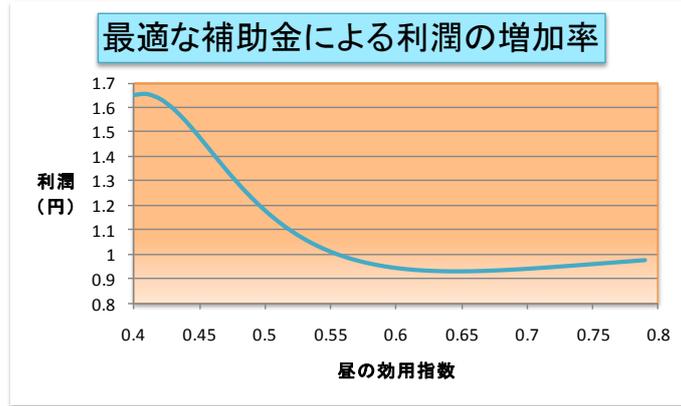
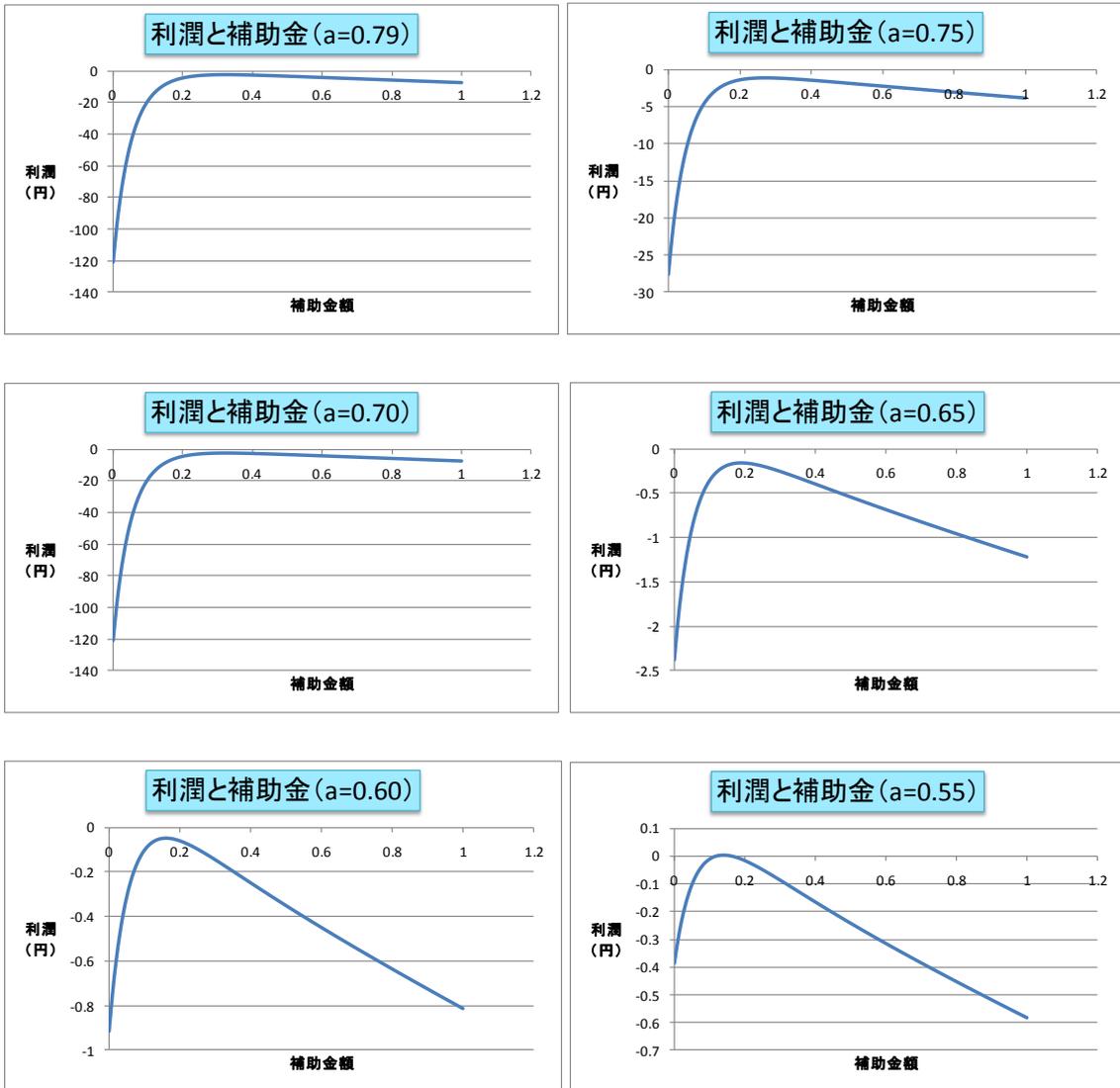
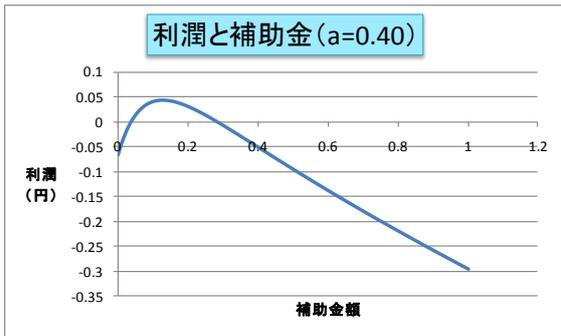
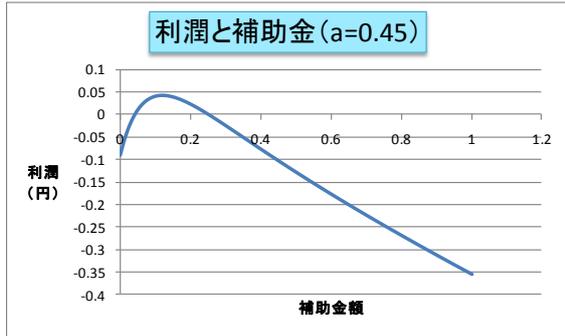
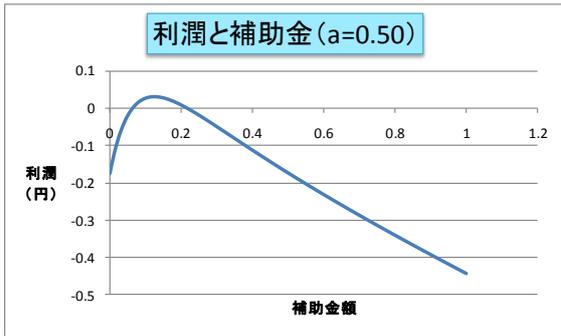


図16 補助金の増加に伴う利潤の変化





(図11~16: 巻末付録 参考表1, 2をもとに作成)

9. 考察

電力会社から家庭への補助金という政策によって、電力会社の利潤を確保しつつ、電力の平準化を達成できることが分かった。

9-1. 効用指数について

効用指数の合計を 0.8 としたが、効用指数の条件内であれば 0.8 である必要はない。

では、効用指数の合計(a + b)を 0.8 ではなく、他の値にしたときを考えてみる。表6は、効用指数の合計を 0.5 にしたときの計算結果であり、図17は効用指数の差に伴う補助金の変化を示している。表7ならびに図18は、効用指数の差が 0.3 から 0.48 までにおける、効用指数の合計が 0.8 のときと 0.5 のときの補助金額の変化を示している。効用指数の合計が低い 0.5 のときの補助金の方が、合計が 0.8 のときよりも高くなっている。つまり、効用指数の合計によっても補助金額に差が生じるということであり、合計が小さいほど補助金額は高くなる。

これが示すことはつまり、a + bが小さい人というのは、電力から得られる効用が少ない人ということであるので、「同じ需要量を動かすためには、合計が 0.5 の人は 0.8 の人より多く払い戻す必要がある」ということである。(分析詳細は巻末付録9-1)

a-b	0.48	0.46	0.44	0.42	0.4	0.38	0.36	0.34	0.32	0.3
a+b=0.8	0.183251	0.177259	0.171538	0.166087	0.160904	0.155988	0.151343	0.146971	0.142879	0.139073
a+b=0.5	0.288791	0.273303	0.259837	0.247701	0.236568	0.226248	0.216618	0.207594	0.199115	0.191137

表7 効用指数の合計と補助金額の関係

図17 a+b=0.5 の時の昼と夜の効用指数の差の増加に伴う補助金の変化

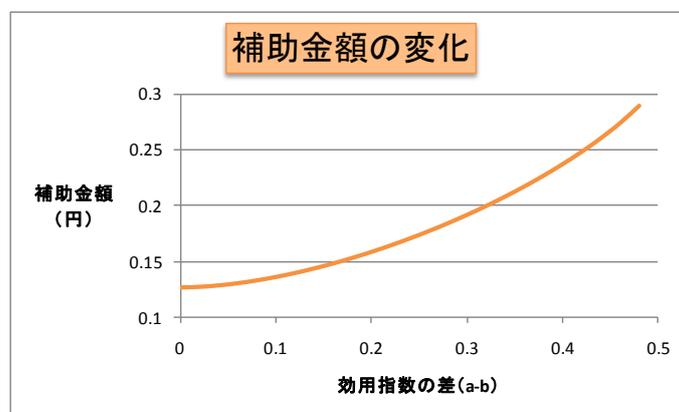


図18 効用指数の合計の違いによる電力差

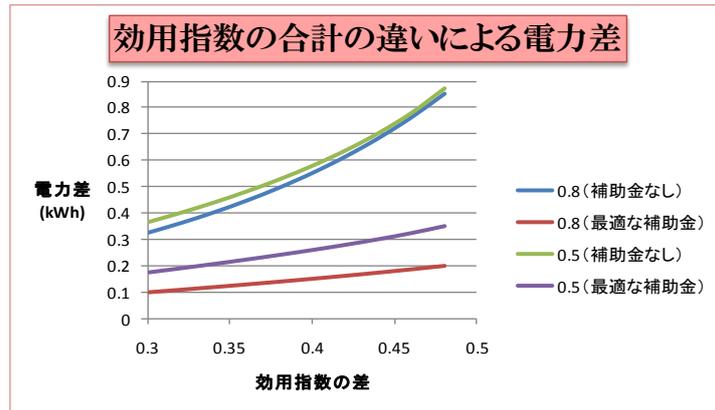
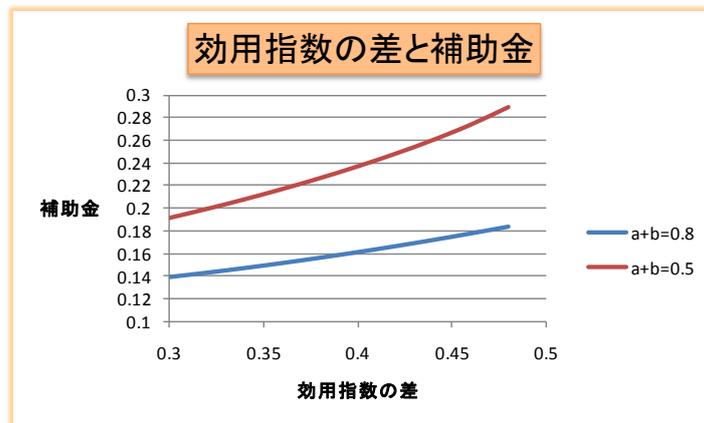


図19 効用指数の合計の違いと補助金



9-2. ベース発電の発電量について

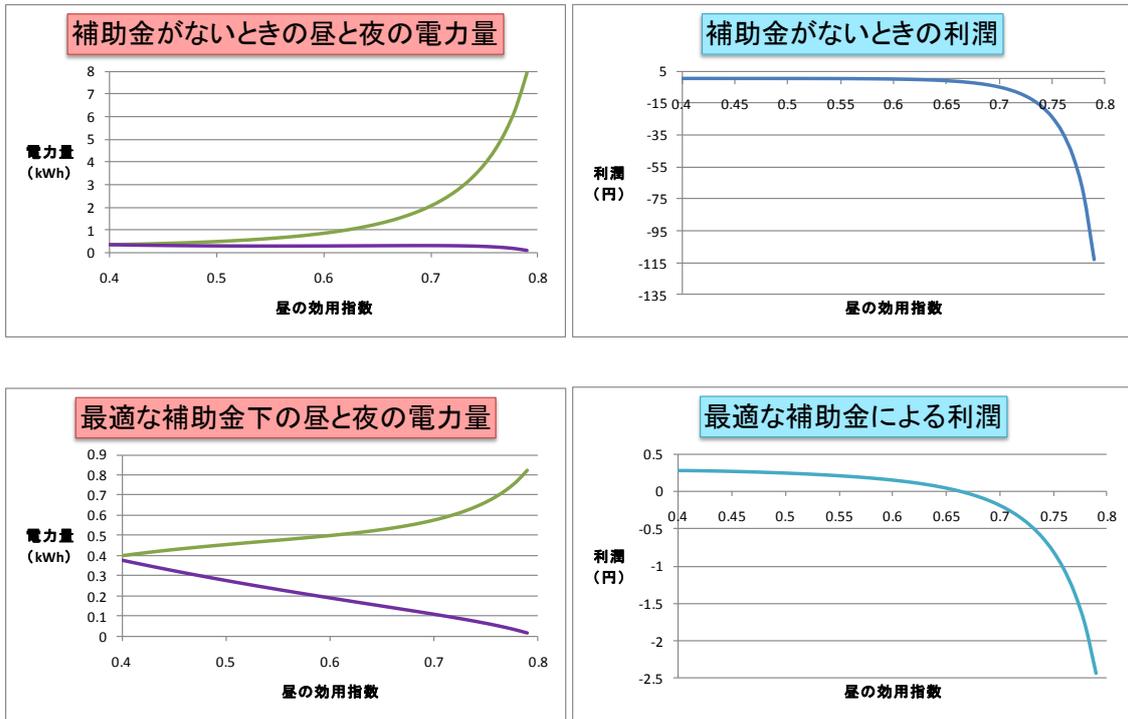
政策を導入することにより、電力需要量の平準化が達成され、将来的にベース発電量を増加させる場合の企業の利潤を見てみる。

計量分析ではベース発電の量を 0.015kWh とした。しかし、夜間の電力量はベース発電で賄われていることから、

$$\text{ベース発電量}(e_b) = \text{夜の電力需要量}(e_n) \text{の平均}(\bar{e}_n)$$

とすることも可能である。効用指数の合計を 0.8 のまま、ベース発電量の設定だけを変えると、次のページの表のようになる。これを最初の設定のときと比較すると、設定変更後の最適な補助金の値と利潤は小さくなっている。一方で、昼と夜の電力量は設定を変更することで増加している。また、設定を変更したときのベース発電量(=夜の電力需要の平均)は 0.274478 であり、変更によってベース発電の量が増加している。したがって、ベース発電の発電量が増加すると、電力会社の利潤と、補助金が減少するとも言える。(分析詳細は巻末付録9-2)

図20 ベース発電の設定を変更した場合の各電力量と利潤、利潤増加率



9-3. ベース発電の発電費用について

将来的に技術進歩などで、 β つまりベース発電の発電費用が小さくなることで、企業の利潤が増加し得るならば、企業はこのような政策を行わないと感じられるかもしれない。しかし、補助金がない時、発電費用が十分の一になっても利潤にはほとんど影響がないことが表10より分かる。そのため、企業は利潤が増加する、この政策を行うと考えられる。

表10 補助金なし

a	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.7
b	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$\beta = 0.1$	-120.803	-78.4262	-53.6722	-38.0096	-27.6095	-20.4632	-15.4217	-11.7882	-9.1223	-7.136
$\beta = 0.01$	-120.801	-78.4235	-53.6695	-38.0069	-27.6068	-20.4605	-15.419	-11.7855	-9.1196	-7.1333
	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.6
	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2
	-5.63607	-4.48988	-3.60461	-2.91426	-2.37117	-1.94049	-1.59643	-1.3197	-1.09573	-0.91341
	-5.63337	-4.48718	-3.60191	-2.91156	-2.36847	-1.93779	-1.59373	-1.317	-1.09303	-0.91071
	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.5
	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3
	-0.76421	-0.64151	-0.54017	-0.45613	-0.38619	-0.32782	-0.27899	-0.23807	-0.20376	-0.175
	-0.76151	-0.63881	-0.53747	-0.45343	-0.38349	-0.32512	-0.27629	-0.23537	-0.20106	-0.1723
	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.4
	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.4
	-0.15093	-0.13086	-0.11425	-0.10062	-0.08963	-0.081	-0.07449	-0.06996	-0.06728	-0.0664
	-0.14823	-0.12816	-0.11155	-0.09792	-0.08693	-0.0783	-0.07179	-0.06726	-0.06458	-0.0637

9-4. 今後の課題

前章のモデルより、払い戻し制度を導入した場合、昼間の需要量を抑え、夜の需要量が増加していることが分かる。つまり、昼と夜の電力需要が近付いているということであり、この論文で繰り返し述べている「電力の平準化」が達成されていることが分かる。また、この制度では、「電力の平準化」が、環境面の効果だけではなく、電力会社の利潤にも貢献しているということも分かるだろう。また、家庭側も節電によってお金を得ることができるとなれば、今まで以上に節電に取り組む可能性がある。このように、払い戻し制度は需要側と供給側両者に制度参加のインセンティブがあると考えられる。加えて、電力会社が家庭へ払い戻すという構図を見ると、環境補助金を企業が家庭へ提供している点でユニークである。

しかし、考えなければならない課題が2点ある。1つは、実際には様々な家計が存在しているということである。今回の分析では、昼間の電力を抑え、その分を夜に移行するための政策であったが、そもそもこの政策は昼間に家にいる家計でなければ成り立たない。実際は、共働きや一人暮らしの大学生など昼間に家にいない家計も存在する。そのような人々は主に夜電気を用いるため、この政策は効かない。そのため、昼間に家におり家事などで電気を使っている、老夫婦や大家族、主婦（主夫）がいる家計に限定される政策である。しかし、あくまでも私達の政策は「平準化を行うことで二酸化炭素の排出量を削減する」ことが目的であるため、ターゲットを広げるのではなく、上記のターゲットに絞ったうえで、政策を行っていくのが望ましいと考える。

2つ目の課題は、今回分析では1家計という設定の下で行ったため、政策に参加しないという選択肢がなかったが、現実世界において複数の家計が存在し、補助金が貰えるからといって、全員が参加するとは限らない。その原因として、企業は削減された電力量を基に、利潤最大化行動を行い、補助金額を決定するため、補助金額は政策に参加する人数や、削減量に影響されてしまうという点が挙げられる。すると、折角政策に参加し、需要量を削減したのにも関わらず、貰える補助金額が小さくなってしまうという場合も考えられる。そのため、この政策に参加し、実際に削減する人が少なくなってしまう可能性もある。この問題を解決するために2つの方法が考えられる。

1つは、前もって補助金額を提示するという方法である。現在、経済産業省が日本型スマートグリッドの構築などの為、スマートメーターなどを取り付け、産業・住民・自治体など、地域が一体となって、民生・運輸部門のCO₂削減を行うことを目指した取り組みを行っている。その実証実験都市として、横浜市、豊田市、京都府（けいはんな学研都市）、北九州市が選定された。そこで、これらの地域でピーク時補助金政策を実験的にいき、どの程度の削減が見込まれ、どれ程の額を補助金として支払うことが出来るのかを検証し、その金額を算出することが出来るのではないかと考えた。そして補助金額の予測が完了した後、次はその補助金額を先に提示することにより、各家計に対して、削減することで必ずある額が支払われることを保証することで、より参加しやすい状況を作り出せる

のではないかと考える。

もう1つは、地域やマンションなどコミュニティ単位で参加してもらうという方法である。これにより、実際に一度に複数の家計が一斉に参加することにより、自分は参加するのに他の人が参加せず、補助金額が小さくなってしまふ状況を、回避することが可能となる。こうしてコミュニティ単位で参加してもらうことで、広くこの政策を知ってもらい、将来的に消費者間での排出権取引も可能になるかもしれない。

終論

「二酸化炭素」という問題点から出発し、家庭からの排出量、特に電力使用からの排出がネックであると、やや長い段階を踏んできたが、分析結果より、この制度が電力需要の平準化を達成し、さらに企業の利潤の増加にも繋がることが分かった。さらに、この政策が、ただ技術の進歩を待つてコストを下げることも、効果があることも示すことが出来た。

ここで環境面についても確認しておこう。「払い戻し制度」によって「電力の平準化」が起きるので、安定した需要が見込める。そこで、原子力や水力などの二酸化炭素の排出が少ないベース発電の供給量を、明確に増やすことができる。これによって、二酸化炭素排出が顕著な火力発電の比率を落とすことができ、結果として二酸化炭素の削減が達成される。これで、ようやく私たちの大元の問題を解決できることを、ご理解頂けたであろうか。

さて、以上のことから「ピーク時補助金制度」が、単なる環境保全政策ではなく、如何に企業の利潤を確保する、「経済と環境」の両面を鑑みた政策か分かっていただけたであろうか。さらに、この制度を達成することで、考察でも述べたように広く環境政策についての認知度を広げ、排出権取引など、新たな環境政策への橋渡しとなる可能性も秘めているといえるのではないだろうか。

実現への道のりは、まだ長いかもしれないが、地球に対する配慮を考えていかなければならない今、この論文をきっかけに、新たな電力消費の幕開けとなることを願ってやまない。

巻末付録

7-2. モデル分析途中式

消費者の効用最大化行動は以下のようになる。

$$\text{Max } U(e_d, e_n) = e_d^a \cdot e_n^b + [M - P \times (e_d + e_n) + S \times (\bar{e}_d - e_d)]$$

$$\frac{\partial U}{\partial e_d} = a \times e_d^{a-1} \cdot e_n^b - (P + S) = 0 \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial e_n} = b \times e_d^a \cdot e_n^{b-1} - P = 0 \dots \textcircled{2}$$

$$\textcircled{2} \text{より } e_d^a = \frac{P}{b \times e_n^{b-1}} = \frac{P}{b} \cdot e_n^{1-b}$$

$$e_d = \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{1}{a}} \times e_n^{\frac{1-b}{a}} \dots \textcircled{2}'$$

また、 $\textcircled{1}$ に代入。

$$a \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{a-1}{a}} \cdot e_n^{\frac{(a-1)(1-b)}{a}} \cdot e_n^b = P + S$$

$$a \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{a-1}{a}} \cdot e_n^{\frac{a+b-1}{a}} = P + S$$

$$e_n^{\frac{a+b-1}{a}} = \frac{P + S}{a} \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{1-a}{a}}$$

$$e_n = \left(\frac{P + S}{a}\right)^{\frac{a}{a+b-1}} \cdot \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{1-a}{a+b-1}}$$

これを $\textcircled{2}'$ に代入。

$$e_d = \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{1}{a}} \left\{ \left(\frac{P + S}{a}\right)^{\frac{a}{a+b-1}} \cdot \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{1-a}{a+b-1}} \right\}^{\frac{1-b}{a}}$$

$$e_d = \left(\frac{P + S}{a}\right)^{\frac{1-b}{a+b-1}} \cdot \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{b}{a+b-1}}$$

以上より、昼の電力需要量(e_d)と、夜の電力需要量(e_n)はそれぞれ次のように求まる。

$$\begin{cases} e_d = \left(\frac{P + S}{a}\right)^{\frac{1-b}{a+b-1}} \cdot \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{b}{a+b-1}} \\ e_n = \left(\frac{P + S}{a}\right)^{\frac{a}{a+b-1}} \cdot \left(\frac{P}{b}\right)^{\frac{1-a}{a+b-1}} \end{cases}$$

8. 分析結果(参考表1, 2より本文図11~16を作成)

参考表1 補助金を用いないときの各電力量と利潤

a	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.7
b	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ed	7.914146	6.404962	5.323511	4.50264	3.858633	3.341831	2.920018	2.571079	2.279211	2.032784
en	0.100179	0.16423	0.20741	0.236981	0.257242	0.270959	0.280002	0.285675	0.288914	0.290398
π	-120.803	-78.4262	-53.6722	-38.0096	-27.6095	-20.4632	-15.4217	-11.7882	-9.1223	-7.136
	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.6
	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.823032	1.643228	1.488122	1.353563	1.236233	1.133449	1.043025	0.963166	0.892384	0.82944
	0.290628	0.289981	0.28874	0.287119	0.285284	0.283362	0.281451	0.279629	0.277956	0.27648
	-5.63607	-4.48988	-3.60461	-2.91426	-2.37117	-1.94049	-1.59643	-1.3197	-1.09573	-0.91341
	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.5
	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.773296	0.723076	0.67804	0.637555	0.601084	0.568162	0.538391	0.511427	0.486969	0.464758
	0.275241	0.27427	0.273595	0.273238	0.27322	0.27356	0.274275	0.275384	0.276904	0.278855
	-0.76421	-0.64151	-0.54017	-0.45613	-0.38619	-0.32782	-0.27899	-0.23807	-0.20376	-0.175
	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.4
	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.444567	0.426197	0.409474	0.394244	0.380373	0.367742	0.356245	0.345789	0.336292	0.32768
	0.281257	0.284131	0.287503	0.291398	0.295846	0.30088	0.306536	0.312857	0.319888	0.32768
	-0.15093	-0.13086	-0.11425	-0.10062	-0.08963	-0.081	-0.07449	-0.06996	-0.06728	-0.0664

参考表2 補助金を導入した時の各電力量と利潤

a	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.7
b	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
S	0.323054	0.307599	0.294261	0.282261	0.271235	0.260974	0.251341	0.242243	0.233613	0.2254
ed	0.67133	0.611239	0.564134	0.525335	0.492498	0.464202	0.439496	0.417701	0.398312	0.380941
en	0.013988	0.025315	0.034914	0.043258	0.050644	0.057283	0.063328	0.068897	0.074081	0.078953
π	-2.8617	-2.17808	-1.70786	-1.36382	-1.10299	-0.90038	-0.74011	-0.61149	-0.50704	-0.42138
	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.6
	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2
	0.217566	0.210082	0.202924	0.196074	0.18952	0.183251	0.177259	0.171538	0.166087	0.160904
	0.36528	0.351083	0.338149	0.32631	0.315426	0.305379	0.296066	0.2874	0.279305	0.271714
	0.083572	0.087987	0.092239	0.096361	0.100381	0.104325	0.108214	0.112065	0.115895	0.119718
	-0.35053	-0.29148	-0.24194	-0.20015	-0.1647	-0.13449	-0.10864	-0.08643	-0.0673	-0.05076
	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.5
	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3
	0.155988	0.151343	0.146971	0.142879	0.139073	0.135561	0.132354	0.129464	0.126903	0.12469
	0.264569	0.257816	0.25141	0.245308	0.239474	0.233872	0.228472	0.223245	0.218164	0.213204
	0.123547	0.127393	0.131265	0.135174	0.139128	0.143135	0.147201	0.151334	0.15554	0.159824
	-0.03643	-0.02399	-0.01318	-0.00377	0.004418	0.01154	0.017723	0.023075	0.027686	0.03163
	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.4
	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.4
	0.122842	0.12138	0.120329	0.119717	0.119576	0.11994	0.120853	0.122361	0.124518	0.127386
	0.208344	0.20356	0.198834	0.194145	0.189477	0.184811	0.180131	0.175423	0.170672	0.165865
	0.164193	0.168651	0.173204	0.177857	0.182615	0.187481	0.19246	0.197558	0.202777	0.208123
	0.03497	0.037755	0.040026	0.041815	0.043146	0.044034	0.044491	0.044518	0.044114	0.043268

9-1. 効用指数について(参考表3より本文図17を作成)

参考表3 効用指数の合計が0.5のとき

a	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41
b	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
a-b	0.48	0.46	0.44	0.42	0.4	0.38	0.36	0.34	0.32
a+b	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
補助金なし									
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ed(S=0)	0.888481	0.811585	0.74913	0.696177	0.650221	0.609718	0.573621	0.541169	0.511788
en(S=0)	0.018132	0.033816	0.047817	0.060537	0.072247	0.083143	0.09338	0.10308	0.112344
$\pi(S=0)$	-1.07565	-0.8501	-0.68457	-0.55679	-0.45533	-0.37324	-0.3059	-0.2501	-0.20348
最適な補助金を導入									
S	0.288791	0.273303	0.259837	0.247701	0.236568	0.226248	0.216618	0.207594	0.199115
ed	0.360267	0.345263	0.332629	0.321502	0.311458	0.302241	0.293679	0.28565	0.278059
en	0.011599	0.022249	0.032265	0.041807	0.05098	0.059864	0.068521	0.077	0.085344
π	-0.20805	-0.16494	-0.13115	-0.10348	-0.08029	-0.06055	-0.04359	-0.02891	-0.01613
	0.4	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33	0.32
	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18
	0.3	0.28	0.26	0.24	0.22	0.2	0.18	0.16	0.14
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.485029	0.460534	0.438009	0.417211	0.397939	0.380017	0.363298	0.347653	0.332969
	0.121257	0.129894	0.138318	0.146588	0.154754	0.162864	0.170964	0.179094	0.187295
	-0.16429	-0.13119	-0.10312	-0.07928	-0.059	-0.04176	-0.02714	-0.0148	-0.00445
	0.191137	0.183628	0.176566	0.169933	0.163722	0.157927	0.152551	0.147599	0.143083
	0.270831	0.263905	0.257232	0.250766	0.244472	0.238314	0.232263	0.226291	0.220372
	0.093591	0.101772	0.109916	0.118052	0.126203	0.134394	0.142648	0.150987	0.159432
	-0.00498	0.004766	0.013284	0.020714	0.027165	0.032727	0.037472	0.041453	0.044715
	0.31	0.3	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25		
	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25		
	0.12	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02	0		
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
	0	0	0	0	0	0	0		
	0.319148	0.306102	0.293752	0.282028	0.270866	0.260208	0.25		
	0.195607	0.204068	0.212717	0.221594	0.230738	0.240192	0.25		
	0.004128	0.011111	0.016645	0.020841	0.023781	0.025523	0.0261		
	0.13902	0.135431	0.132348	0.129807	0.127854	0.126546	0.125953		
	0.214482	0.208597	0.202695	0.196753	0.190751	0.184666	0.178477		
	0.168007	0.176732	0.185631	0.194726	0.204042	0.213603	0.223437		
	0.047285	0.049185	0.050423	0.050999	0.050903	0.050116	0.048607		

9-2. ベース発電の発電量について(参考表4, 5より本文図20を作成)

参考表4 ベース発電の設定を変えて、補助金を用いないときの発電量と利潤

a	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.7
b	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ed	7.914146	6.404962	5.323511	4.50264	3.858633	3.341831	2.920018	2.571079	2.279211	2.032784
en	0.100179	0.16423	0.20741	0.236981	0.257242	0.270959	0.280002	0.285675	0.288914	0.290398
π	-112.838	-71.9603	-48.2839	-33.4426	-23.6899	-17.0658	-12.4527	-9.17552	-6.80916	-5.07709
	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.6
	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.823032	1.643228	1.488122	1.353563	1.236233	1.133449	1.043025	0.963166	0.892384	0.82944
	0.290628	0.289981	0.28874	0.287119	0.285284	0.283362	0.281451	0.279629	0.277956	0.27648
	-3.79463	-2.83572	-2.11273	-1.56372	-1.14431	-0.82231	-0.57408	-0.38213	-0.23336	-0.11791
	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.5
	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.773296	0.723076	0.67804	0.637555	0.601084	0.568162	0.538391	0.511427	0.486969	0.464758
	0.275241	0.27427	0.273595	0.273238	0.27322	0.27356	0.274275	0.275384	0.276904	0.278855
	-0.02827	0.041297	0.095197	0.136848	0.168911	0.193463	0.212137	0.226219	0.236725	0.24446
	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.4
	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.444567	0.426197	0.409474	0.394244	0.380373	0.367742	0.356245	0.345789	0.336292	0.32768
	0.281257	0.284131	0.287503	0.291398	0.295846	0.30088	0.306536	0.312857	0.319888	0.32768
	0.250064	0.254045	0.256806	0.258665	0.259873	0.260625	0.261068	0.261311	0.261428	0.261463

参考表5 ベース発電の設定を変えて、補助金を導入したときの発電量と利潤

a	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.7
b	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
S	0.29002	0.270905	0.254041	0.238581	0.22414	0.210499	0.197524	0.185121	0.173226	0.161792
ed	0.822239	0.767655	0.725835	0.692169	0.664331	0.640906	0.620936	0.603738	0.588797	0.575717
en	0.016445	0.030348	0.042647	0.053813	0.064142	0.073843	0.083064	0.091919	0.100494	0.108859
π	-2.42559	-1.78871	-1.35359	-1.03733	-0.79908	-0.61511	-0.47036	-0.35474	-0.26121	-0.1847
	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.6
	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2
	0.150783	0.140171	0.129934	0.120054	0.110516	0.101308	0.092419	0.08384	0.075562	0.067579
	0.564183	0.553941	0.544784	0.53654	0.529065	0.522237	0.515953	0.510123	0.504671	0.499529
	0.117066	0.125159	0.133174	0.141139	0.149078	0.157013	0.164959	0.172933	0.180948	0.189015
	-0.1215	-0.06882	-0.02455	0.012945	0.044943	0.072443	0.09624	0.11697	0.135145	0.151178
	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.5
	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3
	0.059884	0.052474	0.045343	0.038488	0.031906	0.025597	0.019558	0.013792	0.008298	0.00308
	0.494639	0.48995	0.485414	0.48099	0.476641	0.472331	0.468029	0.463705	0.459329	0.454875
	0.197144	0.205347	0.213631	0.222006	0.23048	0.239061	0.247757	0.256575	0.265522	0.274606
	0.165406	0.178105	0.1895	0.199776	0.209083	0.217547	0.225269	0.232331	0.2388	0.244729
	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.4
	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.4
	-0.00186	-0.00651	-0.01087	-0.01494	-0.01868	-0.02211	-0.02519	-0.02792	-0.03026	-0.03219
	0.450316	0.445624	0.440774	0.43574	0.430493	0.425007	0.419252	0.413199	0.406817	0.400071
	0.283835	0.293213	0.302749	0.312448	0.322316	0.332357	0.342575	0.352974	0.363556	0.374319
	0.250156	0.255113	0.259619	0.263685	0.267314	0.270503	0.273237	0.275499	0.27726	0.278486

参考文献

- 三菱総研山田聡『電力自由化の金融工学』、東洋経済(2001)
- 矢島正之『電力改革再考 -自由化モデルの評価と選択』、東洋経済(2004)
- 山木要一、池田元英『よくわかる 電力取引入門改訂版』、エネルギーフォーラム(2008)
- 福田遵『改正省エネルギー法とその対応策
グリーン企業・グリーン市民になるための基礎知識』、日刊工業新聞社(2009)
- 東京大学サステイナビリティ学連携研究機構
『クリーン&グリーンエネルギー革命 サステイナブルな低炭素社会の実現に向けて』
ダイヤモンド社(2010)
- 八田達夫、田中誠『規制改革の経済分析 電力自由化のケース・スタディ』
日本経済新聞社(2007)
- 穴山悌三『電力産業の経済学』、NTT 出版(2005)
- 中央電力研究所『米国における需要反応プログラムの実態と課題』
- 横山明彦著『スマートグリッド』、エネルギー新書(2010)
- 山藤泰『図解入門 よくわかる 最新スマートグリッドの基本と仕組み』、秀和システム(2010)
- 資源エネルギー庁『エネルギー白書 2009』、経済産業省資源エネルギー庁(2009)
- 日経エレクトロニクス『蓄電池』、2009年10月19日
- RITE TODAY vol.5(2010) 研究行動概説 システム研究グループ
「持続的で実効ある温暖化防止に向けたシナリオの提示」
- RITE TODAY vol.4(2009) 研究行動概説 システム研究グループ
「クールアース 50 に向けた技術的展望と中期目標策定に向けた分析」
- H. Aalami, G. R. Yousefi, M. Parsa Moghadam,
『Demand Response Model Considering EDRP and TOU Programs』 (2008)
- Michael O'Sheasy,
『Demand Response: Not Just Rhetoric, It Can Truly Be the Silver Bullet』 (2003)
- M.H. Albadi, 『A summary of demand response in electricity markets』 (2007)
- Kathleen Spees, Lester B. Lave,
『Demand Response and Electricity Market Efficiency』 (2007)
- 環境省 <http://www.env.go.jp/>
- 経済産業省 <http://www.meti.go.jp/>
- 資源エネルギー庁 <http://www.enecho.meti.go.jp/>
- 財団法人 電力中央研究所 <http://criepi.denken.or.jp/>
- 東京電力 <http://www.tepco.co.jp/index-j.html>
- 関西電力『日本の発電技術ライフサイクル CO2 排出量評価
- 2009年に得られたデータを用いた再推計』
<http://www.kepco.co.jp/knic/post/anser/q1.html>

- JCCCA 全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト <http://www.jccca.org/>
- 財団法人地球環境産業技術研究機構 <http://www.rite.or.jp/>
- 日刊工業新聞『スマートグリッド特集』 <http://www.nikkan.co.jp/>