

# 交換代数を用いた電力消費行動モデルの構築

○小西啓貴 出口弘 (東京工業大学)

Construction of A Power Consumption Behavior Model using Exchange Algebra

\*H. Konishi and H. Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

**概要一** 電力に関するエネルギーマネジメントは近年注目を集めているが、家計の実際の消費に踏み込んだ会計に関する分析は、ほとんど行われていない。本研究では、ボトムアップ的にエネルギーマネジメントを行うために、家計での生活行動に焦点を当てる。具体的には、生活行動を、東工大出口考案の交換代数で、電力の利用を一種のサービス生産として実物簿記により会計的に記述することによりエネルギー会計データの見える化が為され、家計での電力消費の可視化が為される。それに加え、生活行動に基づくモデルに基づき、次世代型電力システムであるデマンドレスポンスや、電力小売完全化に伴う合意形成を可能とするモデルの作成を行う。

## 1 原背景

2011年に起きた東日本大震災以降世間では、原子力発電の廃止活動などから、電力不足が懸念され、電力に関する関心が高まっている。特に今現在の日本においては、電力小売完全自由化が2016年4月に解禁となることもあり、関心を集めている。その中でも特にエネルギーマネジメントに関しての議論は、化石燃料の枯渇、世界人口の爆発的な増大からも世界的に急務であると考えられる。

東日本大震災により、我が国ではエネルギーマネジメントは注目を集めたが、購入されたエネルギーがどこにどの程度投入されているのかなどの、家庭の実際の消費に踏み込まない、ブレーカで測定できる範囲を超えた、会計やオフィスでの詳細なエネルギー需要に関する分析は、ほとんど行われていないままである。エネルギーマネジメントの主体である家計やオフィスや地域の中でのエネルギーフローの解析とエネルギー利用の見える化と、それに基づくエネルギーマネジメントを可能としていないのが現状である。依田<sup>1)</sup>や、川村ら<sup>2)</sup>による次世代型電力システム(デマンドレスポンス)による分析のほかに、兵頭ら<sup>3)</sup>によるコミュニティ間の電力融通による電力消費の分析等はなされているが、これらのいずれも会計データとしての分析は為されていない。

## 2 研究目的

エネルギーマネジメントをボトムアップ的に行うためにも、エネルギーマネジメントの主体の一つである家計に焦点を当てる。家計のエネルギーマネジメントを行うことにより、よって全体の最適化がなされることを目的としている。具体的な手法として、本研究では家庭での電力消費行動を交換代数で記述し、分析することにより行う。この交換代数とは簿記を抽象化した代数系で、東工大出口<sup>4) 5) 6)</sup>によって導入されたものである。この交換代数を用いることにより、電力の利用を一種のサービス生産として実物簿記により会計的に記述することにより、家庭でのエネルギー会計

データの見える化が為され、家計でどの部分にどの程度電力が費やされているのかが分かるようになる。それに加え、電力会社側が電力価格を変化することによって、需要側も価格に反応し需要や、生活行動を変化させることができるような次世代型の電力システム(デマンドレスポンス)や、電力小売完全自由化により電力会社を選べる場合や、明確にどの程度のメリットがあるのか曖昧な自己発電、蓄電装置が存在する場合であっても、需要側での明確な意思決定を可能にすることを目的とする。

## 3 先行研究

エージェントベースモデリングシミュレーションを用いた電力消費モデルとして、川村らの生活行動に基づく電力消費行動モデルの分析がある。これは、電力消費行動をエージェントベースシミュレーションに基づいてモデル化を試みたものである。それに加え、供給量に応じて需要側が需用量を抑制する、デマンドレスポンス(Demand Response, DR)というものも取り扱っている。これは、電力供給側は、今までピーク時間帯には調整電源によって供給量を確保することで対応してきたが、供給者側でなく、需要側で需用量を抑制することで、需要供給バランスを確保することが可能になるものである。このような、この中の手法の一つで、需要の予測に応じて、時間帯によって電気料金の価格差を設けることで、需要側の電力消費パターンを変化させる方法について川村らはモデル化を行った。そして、兵頭らの研究では、この電力消費行動モデルに、分散型電力システム下のコミュニティにおける電力融通のあり方について検討できるモデルを構築し、分析している。しかし、上記の量研究も、電力を会計的に解析するまでに至っていない。

そこで本研究では、電力を会計的にサービス単位で記述し、モデル化する。電力をサービス単位で行うことによって、それぞれの状態をサービスの扱うことが可能となり、どこにどの程度エネルギーが費やされているかが、可視化することができるようになる。

## 4 研究方法

本研究では、今まで会計的手法を用いて、詳細に解析されてこなかった電力エネルギーについて新たな会計的手法を用いて表現し、その解析を行う。この章ではまず初めに本研究に用いる手法の交換代数、AADL (Algebraic Accounting Description Language, 代数的会計記述言語) について詳しく述べる。

次に、本研究で取り扱う対象について、データも含めて記述する。それに加えて、本研究では家庭における電力消費行動について取り扱うが、それをそれぞれモデルに落とし込んだ、生活行動モデル及び、電力消費モデルについて記述する。

最後に、電力消費行動モデルの交換代数による定式化について具体的な事例を含めて記述する。それに続けて、この交換代数化して取り扱うことによる、優位性について述べる。そして、この定式化によっての今後の拡張性についても述べる。

### 4.1 交換代数

本研究では、電力を会計的に扱うために、東工大出口考案の、簿記的システムの数理的定式化をした交換代数 (Exchange Algebra) という代数系及び、これを実装したプログラム言語 AADL (Algebraic Accounting Description Language, 代数的会計記述言語) を用いる。交換代数による表現は、一般的に、〈勘定科目 (name), 単位 (unit), 時間 (time), 主体 (subject)〉といふ4つの基底によってデータを表現する。これは誰が (subject), 何を (name), いつ (time), どれだけ (unit) 処理したかを表現している。そして、それぞれの基底は基底集合を持っている。交換代数はそれぞれの基底からなる要素によって構成されている。

交換代数を用いた具体的な例を挙げると、500〈お酒, ml, Y2016M01D01, 酒屋〉と表記すると、酒屋による2016年1月1日の500mlのお酒を表現している。このように表現することにより、それぞれの状態を明確に記述することが可能となる。

この交換代数による表現でデータを処理する場合には、ストック・フロー的にデータを表現することができる。交換代数による表現がなぜストック・フロー的に表現できるかという点、交換代数による表現が簿記で記述される複式 (ダブルエントリー) 記述を可能としているからである。交換代数による記述では、500<sup>^</sup>〈お酒, ml, Y2016M01D01, 酒屋〉というようにマイナスの数を使わずに、代わりに<sup>^</sup> (ハット) をつけたハット基底と、通常基底によって表現する。このハット基底と通常基底により相殺する表現方法により、簿記というダブルエントリー記述を可能としている。このような簿記的表現をすることによって、経済システムでの経済の流れをそれぞれの場面で、データの的に表現することができる。この例として、100円のりんごを

買ったことを表現すると、

$$x = 100 \text{ <りんご, 円> + } 100 \text{ } ^{\wedge} \text{ <現金, 円>}$$

となる。これは、りんごという資産が増え、現金100円が減るというイベントを表現している。ここでりんご, 円>は、分類基底と計算基底を表す複式表現であり、100はその単位であり、計算した数量である。この表現方法は、簿記での借方貸方による表現方法を意識すると理解が早い。なお、上記のように単純化するときには、〈勘定科目, 単位〉で表現する。

本研究では、交換代数のダブルエントリー記述を応用して、エネルギーがどのように使われているのかのブレイクダウンを行う。簿記による、損益計算の流れでは、“光熱費”のようにただ単純にコストとして表現される。ここでは、コストとしてしか考えられていなかったエネルギーを、サービスとして表現し、そのサービスの消費という形で表現する。この表現方法によって、エネルギーのサービスとしての利用を、ダブルエントリーの状態空間上で可視化することを考える。そして、AADLとは交換代数に近い表現を持つ仕様記述言語である。つまりAADLでは、交換代数記述された状態や、集合論的記述が容易に可能であり、その実装を行うことができる。

### 4.2 研究対象・利用データ

全体のエネルギーマネジメントをボトムアップ的に行うことを踏まえて、本研究では家庭での電力消費行動を研究対象とする。そこで生活行動に関するデータとしては、NHK放送文化研究所による生活行動に関する統計データ<sup>7)</sup>を用いる。このデータには、調査対象の性別、年齢、職業、在学状態、都市規模の属性集合のもと、行為分類ごとのデータが存在する。行為分類については、28分類のデータを用いるが、より正確に表現するために、総務省データ<sup>8)</sup>の90分類と比較し、“炊事・就業・洗濯”行為については、時刻別行為者率を用いて按分を行うことにより、30分類とする。これらの分類をまとめたものを、Table 1に示す。

各行為の電力消費分類の設定については、EDMC/エネルギー・経済統計要覧<sup>9)</sup>を参考とした。その文献によると、家庭におけるエネルギー消費の用途は、動力負荷、厨房負荷、給湯負荷、冷房負荷、暖房負荷の5つの分類に分けられている。ここでは、さらに生活行動における消費を詳細に分割している西尾、浅野らの研究<sup>10)</sup>を参考にし、動力負荷をベース負荷、テレビ負荷、照明負荷、その他の家電に分割して、エネルギー消費分類の設定を行う。各行為の電力消費の設定については、家庭内での電力消費のみに焦点を当てるため、電力や化石燃料を含むエネルギー全般の文献<sup>10) 11)</sup>だけでなく、電力消費に関する実データ<sup>12) 13)</sup>を用いつつ、EDMCによる調査<sup>9)</sup>や、厚生労働省の家計調査<sup>14)</sup>による電力使用量を考慮して電力消費を設定する。Table 2に本研究で使用する行為別電力消費量を示す。

Table 1 生活行動属性分類

分類方法	分類	分類数
職業分類別	1. 農林漁業者, 2. 自営業者, 3. 販売職・サービス職, 4. 技能職・作業職, 5. 経営職・管理職, 6. 専門職・自由職・その他, 7. 主婦, 8. 無職, 9. 学生	9分類
男女就業状態別	1. 男性有職者, 2. 男性勤め人, 3. 男性勤め人以外の有職者, 4. 女性有職者, 5. 女性勤め人, 6. 女性勤め人以外の有職者	6分類
在学別	1. 高校生, 2. 中学生, 3. 小学生	3分類
曜日別	1. 平日, 2. 土曜, 3. 日曜	3分類
行為分類別	1. 睡眠, 2. 食事, 3. 身の回りの用事, 4. 療養・静養, 5. 仕事, 6. 仕事のつきあい, 7. 授業・学内の活動, 8. 学校内の学習, 9. 炊事, 10. 掃除, 11. 洗濯, 12. 買い物, 13. 子どもの世話, 14. 家庭雑事, 15. 通勤, 16. 通学, 17. 社会参加, 18. 会話・交際, 19. スポーツ, 20. 行楽・散策, 21. 趣味・娯楽・教養, 22. インターネット, 23. テレビ, 24. ラジオ, 25. 新聞, 26. 雑誌・マンガ・本, 27. CD・テープ, 28. ビデオ・DVD, 29. 休息, 30. その他	30分類

Table 2 行為別電力消費量の設定

属性	小分類	対応行為	消費電力[Wh/min]
動力負荷	ベース負荷	-	3.33
	照明負荷	テレビ	2.50
	その他家電負荷	住宅行為全般	3.00
		掃除	13.33
		洗濯	8.13
		インターネット	0.67
		ラジオ	0.67
CD・テープ	0.67		
ビデオ・DVD・HDD	3.17		
厨房負荷	厨房負荷	炊事	4.99
給油負荷	給油負荷	身の回りの用事	$0.46 \times \min(0.60 - T_t)$
冷房負荷	冷房負荷	住宅行為全般	$[起床時]1.20 \times (0, T_t - 24) [就寝時]1.20 \times \min(0, T_t - 40)$
暖房負荷	暖房負荷	住宅行為全般	$[起床時]0.80 \times (0, 18 - T_t) [就寝時]0.80 \times \min(0, -10 - T_t)$

### 4.3 生活行動・電力消費モデル

#### 4.3.1 生活行動モデル

生活行動に関するモデル化は、本研究室川村ら<sup>2)</sup>が構築したモデルをベースとして考える。このモデルについての説明を以下に記載する。

生活行動モデルは、世帯各人の属性 $a_{ij}$ ごとの生活行動 $b_{kl}$ (行為分類)を作成するモデルである。生活行動の作成においては、NHK放送文化研究所による生活行動に関する統計データ<sup>7)</sup>を使用する。この統計データについては、前節で述べたように属性 $a_{ij}$ ごとに行為分類 $b_{kl}$ のデータが存在する。これらの統計データを利用して、各人の一日の生活行動が決定され、各行為が実行される。しかし、NHK放送文化研究所によるデータにはそれぞれの行為が一日に何回行われたかの記述がない。それぞれの行為の回数が一般的に定義でき、複数回行われることが想定される行為(通勤、通学は一日2回、食事は一日3回等)は各行為を一日何回行うかを規定する。そうすることによって、現実に近い生活行動が表現されている。そして、これらによって多様性のある生活行動を実現している。なお行為を表す変数を $b_{kl}$ は、 $k=\{1, 2, 3, \dots, 28, 29, 30\}$ ,  $l=\{1, 2, 3, \dots, a|a \in \text{行為回数}\}$ , 行為回数 $=\{1, 2, 3, 4, 5\}$ と定義している。

#### 4.3.2 電力消費モデル

電力消費に関するモデル化は、本研究室兵頭ら<sup>3)</sup>が構築した世帯の電力消費モデルから考える。以下、このモデルについて説明する。

この電力消費モデルは、世帯の各人が、“行為を世帯内で行うか”、“行為において電力消費を行うか”という二つの意思決定を行い、それによって世帯の電力消費を決定する。以下で、この二つの行為について説明する。

行為が世帯内で行われるかどうかは、文献<sup>7)</sup>の行為の定義等から行為を「在宅」, 「非在宅」, 「在宅率に依存」の三つに分類し、それに応じて決まるものとしている。行為の分類が「在宅」の場合、その行為は常に世帯内で行われる。行為の分類が「非在宅」の場合、その行為は常に世帯外で行われる。そして「在宅率に依存」の場合、NHK放送文化研究所による文献<sup>7)</sup>の在宅についての時刻別行為者率 $P_{Home}(a_{ij}, b_{kl}, t)$ ( $t=\{0, 1, 2, \dots, 1438, 1439\}$ :時刻を表す変数)を使用し決定する。行為決定時の $P_{Home}(a_{ij}, b_{kl}, t)$ を在宅判断の選択確率として用いて、在宅と判断されれば、該当行為の継続時間の間は在宅、判断されない場合及び、該当行為の継続時間でない場合は非在宅となる。

行為において電力消費を行うか、モデル内における電力消費は大きく分けて「行為による消費」「照明による消費」の2つに分類される。「行為による消費」は文献<sup>7)</sup>の行為の定義から、行為ごとに「電力消費可能性あり」と「電力消費可能性なし」の二つに分類し、「電力消費可能性あり」の行為が在宅にて行われる時、確率的に電力消費が生じる。そして各行為による電力消費量は、各行為とその行為により使用が想定される一般的な電力機器、電力機器の消費電力、使用時間、使用確率を基に算出される。使用時間、使用確率については、省エネルギーセンターの資料<sup>13)</sup>を利用し設定している。電力機器の選定については、先行研究<sup>10) 15)</sup>及び機器の普及率、さらには、行為との関係性を踏まえ行われている。また、想定した機器で待機電力が生じると考えられるものは、常に待機電力が発生するとされている。

#### 4.4 交換代数による電力消費行動モデル

本研究の電力消費行動モデルでは、上記の生活行動モデルと、電力消費モデルをベースに行う。Fig. 1 図に、家計の電力消費行動のどのような側面に注目するかを示す。特に電力消費によるエネルギーのサービスの部分に焦点を当て、交換代数化を行う。その交換代数化されたものを、必要な視点で集めその分析を行う。具体的なエネルギーサービスの交換代数化としては以下のように行う。

$$\begin{aligned}
 & X1[\text{掃除機によるサービス変換}] \\
 & = 130 \hat{\langle} \text{電力量, Wh, Time, 掃除機} \rangle \\
 & + 130 \langle \text{掃除サービス, Wh, Time, 掃除機} \rangle
 \end{aligned}$$

## X2[掃除サービスの消費]

=130<掃除サービス消費, Wh, Time, 家計>  
+130^<掃除サービス, Wh, Time, 掃除機>

上記の表現は掃除機によって電力のサービス変換と、そのサービスの自己消費が同時に行われたことを意味する。この場合は掃除機（機器）を4項基底の主体においているが、家計主体のエネルギーマネジメントを考える場合には、以下のように記述する。

## X[電力量購入]

=100<電力量, Wh, Time, 家計>  
+100^<買掛金, Wh, Time, 家計>

これは買掛金という形で、電力量を購入したことを表現している。このような形でそれぞれを表現して、電力消費プロセスを明確化する。そしてこのような表現でモデル化したものについて会計的に分析を行う。

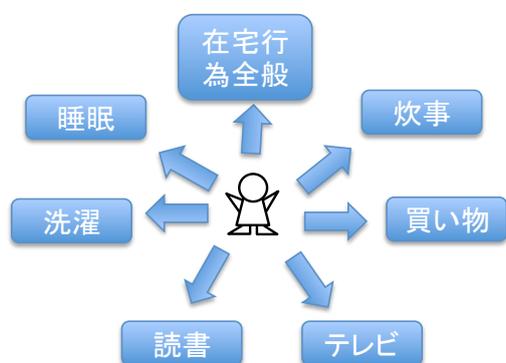


Fig.1 電力消費行動モデルイメージ図

## 4.5 本モデルの優位性・拡張性

交換代数によって電力消費をモデル化することにより、電力消費モデルはただ単純に、社会をシミュレーションするものではなく、よりミクロな視点でエネルギーの見える化を為すことができるようになる。つまり、より具体的にどのような部分で電力が費やされているのかが会計的な形で見える化が可能となる。

本モデルでは家計に対する電力、つまり生活行動からの電力消費行動を交換代数により定式化、モデル化する。この表現方法では、前節の電力購入の記述のように記述することにより、太陽光電池による発電及び、蓄電池の使用をも表現することができる。以前では明確に、どの程度のメリット、デメリットがあるかがわからなかったものをも、明確に表現出来るものとする。

## 5 今後の目標

エネルギーフローコスト会計の概念、簿記会計によるダブルエントリー、生活行動による電力消費及び、家計電力におけるシミュレーションにおける先行研究論文を参考にして、家庭での生活行動について、交換代数による定式化を行う。そしてこの定式化したものを

研究室の社会シミュレーション言語 SOARS によってモデル化を試みる。そのモデルに基づき、太陽光電池に発電や、蓄電池の使用、電力小売完全自由化による新たな構造の交換代数による定式化及び、そのモデルを構築し、シナリオ分析することを目標とする。

## 参考文献

- 1) 依田高典, 田中誠, 伊藤公一朗: 北九州市における変動型 CPP 社会実証-2012 年度夏期評価結果-, 次世代エネルギー社会システムにおけるデマンド・レスポンス経済効果調査事業, (2013)
- 2) 川村淳貴, 出口弘: シミュレーション手法による生活行動に基づく電力消費行動の分析, 東京工業大学価値システム専攻修士論文, (2015)
- 3) 兵頭峻, 出口弘: 世帯類型電力消費モデルに基づいたコミュニティ電力融通モデルの研究, 東京工業大学知能システム科学専攻修士論文, (2015)
- 4) 出口弘, 竹林知善, 吉田宏章: エネルギー会計によるエネルギー運用計画デザイン, 国際 P2M 学会誌, Vol.10 No. 1, 191/214, (2015)
- 5) 出口弘: トランザクションベースの経済システム学, 進化経済学会第 17 回大会報告論文集 (2013)  
<[http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~jafee/papers/Deguchi\\_Hiroshi2.pdf](http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~jafee/papers/Deguchi_Hiroshi2.pdf)>
- 6) 榎俊吾: メディア学体系8 ICTビジネス, コロナ社
- 7) NHK放送文化研究所: データブック 国民生活時間調査 2010, NHK出版, (2011)
- 8) 総務省統計局: 社会生活基本調査, (2011)
- 9) (財) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット: EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (2013年版), (財) 省エネルギーセンター, (2013)
- 10) 西尾健一郎, 浅野浩志, 世帯の多様性を考慮した家庭部門エネルギー需要生成ツールの開発, 電力中央研究所研究報告, Y05008, (2006)
- 11) 渡邊裕美子, 岩船由美子: 人口構成の変化を考慮した地域における長期的なエネルギー需要の推計, エネルギー資源学会論文集34 No. 6, 18/28, (2013).
- 12) 資源エネルギー庁: 家庭の節電対策メニュー, (2011)
- 13) (財) 省エネルギーセンター: 平成24年度待機時消費電力調査, (2013)
- 14) 厚生労働省: 家計調査, (2013)
- 15) 相良博善, 谷本潤, 萩島理: エネルギー計算に用いる生活スケジュールに関する研究 第4報 - 生成データの検証, 空気調和・衛生工学会論文集 (110), 35/41, (2006)