

# スマートホームにおける電力コストと生活満足度を考慮した行動スケジューリング手法の提案

中村 笙子<sup>1,a)</sup> 廣森 聡仁<sup>2,4,b)</sup> 山口 弘純<sup>2,4,c)</sup> 東野 輝夫<sup>2,4,d)</sup> 山口 容平<sup>3,4,e)</sup> 下田 吉之<sup>3,4,f)</sup>

**概要：**省エネルギーが推進される中、各世帯における節電やピークシフトは特に重要な問題となっている。このような状況を受け、電力の売買や蓄積、生成が可能なスマートホームが導入されつつあり、電力消費を伴う家庭行動を効率化することで、消費電力に要する金銭コストの削減が期待できる。しかし、居住者の都合を無視して電力コストの削減を行うと生活の質を下げかねないため、電力コストの削減と生活の質の維持を両立できることが望ましい。本研究では、スマートホーム一世帯を対象とし、そこに居住する人や配置された家電の電力消費モデルを提案する。さらに、このモデルを利用し、人の行動と家電の稼働に対し、電力コストと生活満足度を最適化するような行動スケジューリング手法を提案する。

**キーワード：**スマートホーム、電力コスト、生活満足度、行動スケジューリング、線形計画法

## 1. はじめに

我が国のエネルギー消費量は戦後よりほぼ一貫して伸び続けており、省エネルギーの達成が望まれている。特に、東日本大震災による影響から、各世帯における節電やピークシフトの達成は重要な問題となっている。このような状況を受け、消費電力量の可視化、電力設備の自動制御、そして電力の購入だけでなく、売却、蓄積、生成が可能なスマートホームが導入されつつある。スマートホームの機能を活用して電力消費を伴う家庭行動を効率化することで、世帯における電力コストの削減が期待できる。しかし、居住者の都合を無視し、電力コストを削減するためだけにピークシフトを強いると生活の質を下げかねないため、電

力コストの削減と生活の質の維持を両立できるような節電方法を居住者に提示し、無理のない節電を実現できることが望ましい。

本研究では、電力の購入だけでなく、売却、蓄積、生成が可能なスマートホーム一世帯を対象とし、そこに居住する人や配置された家電の電力消費モデルを提案する。さらに、このモデルを利用し、人の行動と家電の稼働に対し、電力コストと生活満足度を最適化するような行動スケジューリング手法を提案する。電力コストはグリッド（電力網）に対する電力売買の際、時間帯によって変動する電力価格と売買する電力量とに応じて発生する収支の差である。買電は、世帯で消費される電力をグリッドから購入するもので、人と家電が電力を消費するものとする。一方、売電は、ソーラーシステムが発電した電力及びバッテリーで蓄積した電力をグリッドに売却するものであり、これら人や家電、バッテリー等の行動を決定することにより、買電による支出と売電による収入の差を求めることができる。同様に、人の行動時間帯や家電の稼働状況等がユーザの生活スタイルにどの程度適しているかを表す生活満足度も算出する。本研究では、生活満足度として、室内環境の快適性、車の使用に関する利便性、行動実施の時間性を考える。これら電力コストと生活満足度のモデルを利用し、電力の消費、購入、売却、蓄積など電力に関わる手続きと、人の行動、家電の稼働を関連付け、それぞれに対し、電力コストと生活満足度が最適となるような実施時間帯を導出する。さらに、人の行動、家電の稼働をスケジューリングするだけで

<sup>1</sup> 大阪大学基礎工学部情報科学科  
School of Engineering Science, Osaka University,  
1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan  
<sup>2</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University,  
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan  
<sup>3</sup> 大阪大学 大学院工学研究科エネルギー工学専攻  
Graduate School of Engineering,  
Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan  
<sup>4</sup> 独立行政法人科学技術振興機構, CREST  
Japan Science Technology and Agency, CREST  
a) s-nakamr@ist.osaka-u.ac.jp  
b) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp  
c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp  
d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp  
e) yohei@see.eng.osaka-u.ac.jp  
f) shimoda@see.eng.osaka-u.ac.jp

なく、ユーザの好みを反映できるよう、スケジューリング結果に対するフィードバックから、電力コストと生活満足度間の重みを調整するシステムを提案している。

提案手法に対する評価実験では、一般的な世帯における生活パターンに対し、電力コストを削減し、かつ生活満足度の高い行動スケジュールを導出できていることを確認した。また、この行動スケジューリングに対し、電力コストを重視する場合と生活満足度の各項目を重視する場合の異なる5つのフィードバックを行い、再スケジューリングすることにより、それぞれフィードバックでの指示通り、適切な行動スケジュールが導出されることを確認した。

## 2. 関連研究

スマートホームにおいて、生活の質を維持すると同時に総電力使用量を削減することを目的とし、エアコンや照明など一般家庭における家電製品を対象とした機器の自動制御システムや省エネ目標達成支援システムが提案されている [3], [4], [5]。文献 [3] では、過去の家電利用とそれによる快適度を参考に家電を制御することにより、消費電力の削減目標値を達成しつつ、高い快適度を維持し、ユーザの嗜好に沿った家電制御が行えることを示している。また、文献 [4] では、削減電力量の目標値と現在値を比較し、リアルタイムにユーザに家電の設定調整を促すことにより、ユーザにとって適切なエアコンの温度設定や照明の照度設定の発見を支援する。一方、文献 [5] では、ユーザが快適に生活するために必要な電力量を算出し、これを活用することにより、ユーザの家電操作履歴を考慮した家電制御のアドバイスを生成し、必要最低限の電力で快適な生活の実現を支援している。これらの研究では、空調機器や照明機器など限られた家電を対象としており、世帯全体の家電を対象としているわけではない。

しかしながら、日常生活においては、人は様々な行動をとり、また、多種多様な家電が稼働している。加えて、夕食前に炊飯器を使用するなど、人の行動に基づいた家電の使用や、夕食は家族一緒に食べるなど、複数人の行動に関わる要望、他人が車を利用しているため外出できないなど、他人の行動による行動の制約など、人の行動や家電の稼働の間には多種多様な依存関係が想定される。そのため、既存手法のような、特定の人の行動や家電の稼働を対象とした最適化により、世帯全体を改善できるわけではない。

一方、本研究では、様々な人の行動や家電の稼働だけでなく、これらの依存関係を定式化することにより、様々な生活スタイルに対し、普遍的に適用可能かつ、一世帯の生活全体を改善するシステムを提案する。

## 3. 電力コストと生活満足度のモデル化

本章では、電力コストと生活満足度を算出するために、まず、電力の消費、購入、売却、蓄積、生成の各手続きと、

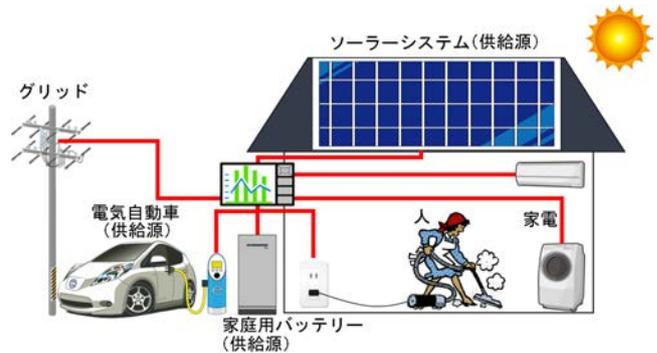


図1 人、家電、供給源の関係

人の行動、家電の稼働、供給源の手続きについてモデル化を行う。スマートホームは、図1のように、人、家電、供給源の三つの要素から構成される。人の行動と家電の稼働に伴う電力の消費は、従来のように料金を支払うグリッドからの電力の購入だけでなく、供給源の電力の蓄積により賄われる。供給源は、家庭用バッテリー、ソーラーシステム、電気自動車の三種類が備えられており、グリッドから購入した電力だけでなく、ソーラーシステムで生成された電力を蓄積することができる。また、蓄積された電力は、グリッドへ売却することが可能で、送電量に応じた金額を収入として得ることができる。消費、購入、売却、蓄積、生成される電力量は電力可視化機能によりリアルタイムにモニター表示されるほか、家電は自動制御機能により統括管理され、予め設定しておいた時間帯にユーザの操作無しに家電を稼働させる予約実行ができるものとする。

まず、人の行動、家電の稼働、供給源の手続きを、スマートホームにおける電力の消費、購入、売却、蓄積、生成の観点からモデル化を行い、電力の購入及び売却から電力コストを、人の行動や家電の稼働状況から生活満足度を算出する。日常生活において、人の行動、家電の稼働、供給源の手続きはそれぞれ時間の経過に伴い変化していくことから、本論文ではこれらをすべて1時間単位で扱う。

### 3.1 人の行動

人の行動とは、日々の暮らしにおいて繰り返される食事、労働、余暇等の日常生活を指すもので、電力の消費を伴うものとする。ある時間帯に、人が行う行動は一つのみとし、二つ以上の行動を同時に行うことはできない。

時間  $t$  において、人  $p$  が行動  $a$  を行う場合には1、行わない場合には0となる変数  $x_{t,p,a}$  を導入する。各時間帯において、各人は二つ以上の行動を同時に行うことができない制約は、式 (1) で表される。 $P$  は世帯に属する人の集合とする。

$$\forall p \in P; \sum_{(p,a) \in A} x_{t,p,a} \leq 1 \quad (1)$$

行動の所要時間  $tn_{p,a}$  は開始時間  $tb_{p,a}$ 、終了時間  $te_{p,a}$  及び  $x_{t,p,a}$  を用いて式 (2) で表すことができる。

$$tn_{p,a} = tb_{p,a} - te_{p,a} = \sum_{t=0}^n x_{t,p,a} \quad (2)$$

これにより、人の行動の実行時間帯は、開始時間、終了時間、所要時間のいずれか2つから求められることが分かる。

人の行動は、人が世帯の敷地内で行う**家庭内行動**と敷地外で行う**外出行動**に分類され、さらにそれぞれ消費電力を伴う行動と消費電力を伴わない行動に分類される。掃除や調理などの行動は、掃除機やIHクッキングヒーター等電力を消費する機器を用いており、電力消費を伴う家庭内行動に該当する。ここで、時間  $t$  において、人  $p$  の行動  $a$  に要する電力消費に対し、供給元  $s$  が供給する電力量を表す変数を  $u_{t,p,a,s}$  とする。行動  $a$  に要する消費電力量  $C_{p,a}$  が電気自動車  $V$ 、家庭用バッテリー  $B$ 、グリッド  $G$  から供給される関係は式 (3) のように表すことができる。

$$C_{p,a} \cdot x_{t,p,a} = u_{t,p,a,V} + u_{t,p,a,B} + u_{t,p,a,G} \quad (3)$$

睡眠、食事など、電力を消費する機器を使用しない行動は、電力消費を伴わない家庭内行動に分類され、行動に紐づく電力消費を式 (3) で算出する必要はない。

**外出行動**は家屋を離れ別の場所へ移動する行動であり、会社に行く、買い物に行くなどが該当する。移動手段は電気自動車または徒歩とする。家屋から目的地への移動、目的地での滞在、ならびに目的地から家屋への移動はすべて一つの外出行動として考える。往路、復路に要する時間は共に1時間として、それ以外は目的地での滞在時間とする。往路移動開始時間を  $tb_{t,p,o}$ 、復路移動開始時間を  $te_{t,p,o}$  で表す。人  $p$  の外出行動  $o$  において、電気自動車を利用する場合、時間  $tb_{t,p,o}$  に往路での電気自動車利用を表す変数  $w_{tb_{t,p,o}}$  が1となり、また、時間  $te_{t,p,o}$  に復路での電気自動車利用を表す変数  $w_{te_{t,p,o}}$  が1となる。1[kWh]あたりの走行距離 [km] を表す電費  $EM$  を用いると、時間  $t$  における移動消費電力量  $u_{t,p,o,V}$  は式 (4) で計算できる。

$$\frac{d_{p,o}}{EM} (w_{tb_{t,p,o}} + w_{te_{t,p,o}}) = u_{t,p,o,V} \quad (4)$$

### 3.2 家電の稼働

人の行動と同様に、家電は稼働に伴い電力を消費するものとする。本研究では、一般的に“家電”と称されるもののうち、スマートホームの制御により自動的、独立的に稼働できる、洗濯機、乾燥機、エアコンなどを家電として扱う。一方で、掃除機のようにそれのみで動作不可能なものや、電子レンジのように開始から終了までが比較的短時間であり、一つの行動中に複数回の稼働が想定されるものは、人の行動と関連付けられ、使用されるものとする。また、冷蔵庫のように常に稼働し続けている家電は提案手法では取り扱わない。

時間  $t$  において家電  $e$  が稼働する場合に1、稼働しない場合に0となる変数  $y_{t,e}$  と、時間  $t$  において家電  $e$  の稼働

に必要な電力消費に対し、供給元  $s$  が供給する電力量を表す変数  $v_{t,e,s}$  を導入する。家電  $e$  の稼働に必要な消費電力量  $C_e$  を電気自動車、家庭用バッテリー、グリッドに分割して供給することは、式 (5) で表される。なお、稼働していない状態における待機電力は考慮しない。

$$C_e \cdot y_{t,e} = v_{t,e,V} + v_{t,e,B} + v_{t,e,G} \quad (5)$$

冷暖房以外の家電は、稼働の所要時間  $tn_e$  が固定であるものとし、開始時間  $tb_e$ 、終了時間  $te_e$  もしくは  $y_{t,e}$  を用いて式 (6) で表すことができる。これより、開始時間か終了時間のいずれかを決定することで実施時間帯が定まる。

$$tn_e = te_e - tb_e = \sum_{t=0}^n y_{t,e} \quad (6)$$

また、同一の家電を複数回稼働させる場合には、それぞれの稼働に関して時間を決定する。ただし、冷暖房家電は、人の行動だけでなく、暑さや寒さなど環境にも大きく影響されることから、スケジュールリング期間の各時間帯において稼働するか否かのみ決定し、開始時間や終了時間、所要時間は考えない。

### 3.3 供給源の手続き

供給源はグリッドに対する電力の購入、売却、蓄積、生成が可能であるもので、本研究では家庭用バッテリー、電気自動車、ソーラーシステムを想定する。家庭用バッテリーは家屋に備え付けられたバッテリーである。電気自動車は、内蔵された電気バッテリーを動力とする車で、バッテリーとしての機能も果たすため、前述の外出行動とも紐付ける。ソーラーシステムは、太陽光発電により電力を生成するもので、その発電量は時間帯によって変化する。

時間  $t$  において供給源  $s$  の電力の手続き  $f$  に要する電力量を変数  $z_{t,s,f}$  で表す。家庭用バッテリーに対しては、グリッドから購入した電力を蓄積する手続き、ソーラーシステムで発電した電力を蓄積する手続き、蓄積した電力をグリッドに売却する手続き、蓄積した電力を人や家電の電力消費に充てる手続きの4つの手続きがあり、それらの手続きに要する電力量は、それぞれ  $z_{t,B,G2B}$ 、 $z_{t,B,S2B}$ 、 $z_{t,B,B2G}$ 、 $z_{t,B,B2H}$  で表す。これより、家庭用バッテリーにおける時間  $t$  と  $t+1$  のバッテリー残量  $bc_{t,B}$ 、 $bc_{t+1,B}$  の関係は式 (7) で表される。

$$bc_{t+1,B} = bc_{t,B} + z_{t,B,G2B} + z_{t,B,S2B} - z_{t,B,B2G} - z_{t,B,B2H} \quad (7)$$

電気自動車に対しては、グリッドから購入した電力を蓄積する手続き、蓄積した電力をグリッドに売却する手続き、蓄積した電力を人の行動、家電の稼働、移動手段で消費する手続きの3つがあり、それらの手続きに要する電力量は、それぞれ  $z_{t,V,G2V}$ 、 $z_{t,V,V2G}$ 、 $z_{t,V,V2VH}$  で表す。したがって、電気自動車における時間  $t$  のバッテリー残量  $bc_{t,V}$  と

時間  $t+1$  のバッテリー残量  $bc_{t+1,V}$  の関係式は式 (8) となる。

$$bc_{t+1,V} = bc_{t,V} + z_{t,V,G2V} - z_{t,V,V2G} - z_{t,V,V2VH} \quad (8)$$

ソーラーシステムは、発電した電力  $z_{t,S,Gain}$  のうち、任意の電力量  $z_{t,S,S2B}$  を家庭用バッテリーの蓄電に充て、残りの電力量  $z_{t,S,S2G}$  をグリッドに売電することができ、式 (9) のように表すことができる。

$$z_{t,S,Gain} = z_{t,S,S2B} + z_{t,S,S2G} \quad (9)$$

人の行動や家電の稼働に伴う消費電力量は、電気自動車もしくは家庭用バッテリーによって賄われる。これはそれぞれ式 (10), (11) で表すことができる。ここで、 $A, E, H$  は、それぞれ人の行動すべての集合、家電の稼働すべての集合、家庭内行動すべての集合とする。

$$z_{t,V,V2VH} = \sum_{(p,a) \in A} u_{t,p,a,V} + \sum_{e \in E} v_{t,e,V} \quad (10)$$

$$z_{t,B,B2H} = \sum_{(p,a) \in H} u_{t,p,a,B} + \sum_{e \in E} v_{t,e,B} \quad (11)$$

時間  $t$  においてグリッドから購入する電力量  $e_t^{G2H}$  は、式 (12) のように、電気自動車を買電した量  $z_{t,V,G2V}$ 、家庭用バッテリーを買電した量  $z_{t,B,G2B}$ 、人の行動や家電の稼働に際して直接グリッドから買電した量の総和となる。

$$e_t^{G2H} = z_{t,V,G2V} + z_{t,B,G2B} + \sum_{(p,a) \in H} u_{t,p,a,G} + \sum_{e \in E} v_{t,e,G} \quad (12)$$

時間  $t$  においてグリッドに対し売却する電力量  $e_t^{H2G}$  は、電気自動車が発電した量  $z_{t,B,B2G}$ 、家庭用バッテリーが発電した量、ソーラーシステムが発電した量  $z_{t,S,S2G}$  の総和となり、式 (13) で表される。

$$e_t^{H2G} = z_{t,V,V2G} + z_{t,B,B2G} + z_{t,S,S2G} \quad (13)$$

### 3.4 電力コスト

電力コストは、グリッドに対する電力売買の際、時間帯によって変動する電力価格と売買する電力量とに応じて発生する金銭的支出であり、買電による支出  $EP_t \cdot e_t^{G2H}$  と売電による収入  $EP_t \cdot e_t^{H2G}$  の差としてモデル化する。これを式 (14) に示す。

$$cost' = \sum_{t=0}^n EP_t \cdot (e_t^{G2H} - e_t^{H2G}) \quad (14)$$

電力価格は 1 時間毎に変動するものとし、時間  $t$  における電力価格を  $EP_t$  とする。

### 3.5 生活満足度

生活満足度は、人の行動時間帯や家電の使用状況等がユーザの生活スタイルにどの程度適しているかを表す指標である。提案手法では、生活満足度として、行動実施の時間性、室内環境の快適性、車の使用に関する利便性を考える。

#### 3.5.1 時間性満足度

時間性満足度は、人の行動が希望通りの時間帯に実施される度合いを表すものである。人の行動に対する希望時間帯  $tb_{p,a}^{in}$ ,  $te_{p,a}^{in}$  とスケジュールリングにより割り当てられた時間帯  $tb_{p,a}$ ,  $te_{p,a}$  の差は、式 (15) により算出できる。

$$\Delta tb_{p,a} = |tb_{p,a} - tb_{p,a}^{in}|, \Delta te_{p,a} = |te_{p,a} - te_{p,a}^{in}| \quad (15)$$

同様に、家電の稼働の希望時間帯  $tb_e^{in}$ ,  $te_e^{in}$  とスケジュールリングされた時間帯  $tb_e$ ,  $te_e$  との差は式 (16) により算出できる。

$$\Delta tb_e = |tb_e - tb_e^{in}|, \Delta te_e = |te_e - te_e^{in}| \quad (16)$$

これらの変数の差が 0 であるときに、時間性満足度が最も高くなるよう、正規分布の確率密度関数を利用し、時間性満足度を定義した。人  $p$  の行動  $a$  に対する時間性満足度を  $tsat_{p,a}$ 、家電  $e$  の稼働に対する時間性満足度を  $tsat_e$  とし、式 (17) に示す。1 つの行動に対しても開始時間と終了時間の両方が指定された場合には、それぞれの決定に対して満足度を算出するため、 $\delta_{p,a} = \Delta tb_{p,a}$ ,  $\Delta te_{p,a}$ ,  $\delta_e = \Delta tb_e$ ,  $\Delta te_e$  とする。

$$tsat_{p,a} = \frac{100}{basis} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\delta_{p,a})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

$$tsat_e = \frac{100}{basis} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\delta_e)^2}{2\sigma^2}\right)$$

また、 $basis = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1.5)^2}} \exp\left(-\frac{0^2}{2(1.5)^2}\right)$  としている。これは、希望時間から 5 時間ずれると時間性満足度がほぼ 0 となることを表している。

時間性満足度は冷暖房家電以外の人の行動と家電の稼働すべてに関して個別に算出し、この総和を世帯の時間性満足度とする。世帯の時間性満足度は、式 (18) で求められる。

$$tsat' = \sum_{(p,a) \in A} tsat_{p,a} + \sum_{e \in E} tsat_e \quad (18)$$

#### 3.5.2 快適性満足度

快適性満足度は、1957 年に米国で考案された不快指数  $DI(Td, H) = 0.81Td + 0.01H(0.99Td - 14.3) + 46.3$  を用いて評価する。 $Td$  は乾球温度、 $H$  は湿度を表す。表 1 に表す不快指数と体感の関係を参考に、快適性満足度は、快いとされる不快指数値 65~70 においては高く、暑いおよび寒いとされる不快指数値においては低くなるようモデル化する。そこで、不快指数 70 を基準値 0 とし、体感が悪化

表 1 不快指数と体感

不快指数	体感
~55	寒い
55~60	肌寒い
60~65	何も感じない
65~70	快い
70~75	暑くない
75~80	やや暑い
80~85	暑くて汗が出る
85~	暑くてたまらない

するにしたがって満足度が低下するよう、式 (19)、式 (20) で快適性満足度を算出する。

$$f_1(Td, H) = \frac{100}{basis} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{f_2(Td, H)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (19)$$

$$f_2(Td, H) = DI(Td, H) \div 5 - 14 \quad (20)$$

式 (19) では、 $basis = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1.0)^2}} \exp\left(-\frac{0^2}{2(1.0)^2}\right)$  としている。これは、不快指数 70 を基準として、体感が 3 段階悪化した場合、つまり、“暑くて汗が出る” もしくは“寒い” と体感した場合に満足度がほぼ 0 になることを表す。

各時間帯における快適性満足度は、式 (21) で算出することができる。

$$csat_t = \begin{cases} 100 & (w_t^{All} = 1) \\ f_1(Td_{hope}, H_{hope}) & (y_{t,Air} = 1) \\ f_1(Td_t, H_t) & (otherwise) \end{cases} \quad (21)$$

人が全員外出しており家屋内に誰も居ない場合は、快適性満足度を最高値 100 とする。人が家屋内に残っており、エアコンが稼働している場合には、時間  $t$  における室内の温度と湿度は、それぞれエアコンに対する設定温度  $Td_{hope}$  と設定湿度  $H_{hope}$  に固定され、これらの値を元に、式 (21) により算出される。エアコンが稼働していない場合は、室内の温度と湿度は、それぞれ時間  $t$  における観測値  $Td_t$ ,  $H_t$  となり、式 (21) により算出される。

最適化指標となる世帯の快適性満足度は、各時間帯における満足度の総和であり、スケジューリング期間を 1 時間で分割したタイムスロット総数を  $n$  とすると、式 (22) で算出できる。

$$csat' = \sum_{t=0}^n csat_t \quad (22)$$

### 3.5.3 利便性満足度

利便性満足度は、移動手段として電気自動車を用いた時と用いない時の目的地への移動に要する時間の割合として、式 (23) のように表される。

$$asat_{p,a} = \frac{\frac{d_{p,o}}{v_{car}} - \frac{d_{p,o}}{v}}{\frac{d_{p,o}}{v_{car}}} \quad (23)$$

$d_{p,o}$  は人  $p$  の外出行動  $o$  の家屋から目的地までの距離を表す。式 (23) は国土交通省の高速バス評価指標を利用しており、電気自動車を移動に用いた場合の移動速度は  $v = v_{car}$ 、用いない場合は  $v = v_{walk}$  となる。利便性満足度は外出行動各々に対し電気自動車を用いるか否かを決定し、それに伴い算出される。

世帯の利便性満足度は、人の外出行動すべてを  $O$  とすると、式 (24) のように表される。

$$asat' = \sum_{(p,o) \in O} asat_{p,o} \quad (24)$$

## 4. 行動スケジューリング問題の定式化

提案手法では電力コストと生活満足度のモデル及び各行動に関わる制約を線形計画式で表現しており、線形計画法を用いて電力コストと生活満足度を最適化するような行動スケジューリングを導出する。

線形計画問題の入力として、ユーザはスケジューリング期間に実施する人の行動と家電の稼働すべてに対し、希望時間帯を与える。ただし、個々の人の行動や家電の稼働に要する消費電力量、外出の移動距離は既に得られているものとする。また、エアコンの温湿度設定、人の行動や家電の稼働の実行順序制限、並びに朝、昼、夜、深夜など各時間帯における買電量制限を設定することができる。線形計画問題では、これらの入力を基に、人の行動と家電の稼働各々の実施時間帯、供給源の時間帯ごとの手続きとそれに伴う電力量、行動や稼働に要する消費電力量を電気自動車、家庭用バッテリー並びにグリッドにどのように割当てるか、外出行動ごとに電気自動車を使用するか否かを決定する。以下、本線形計画問題の目的関数と制約式について説明する。

### 4.1 目的関数

電力コストと生活満足度の各項目 (14), (18), (22), (24) は、それぞれ該当項目以外を無視して最大化、最小化した値を基準として、0 から 100 までの値を取りうる指数値に変換する。このときの最大値と最小値も、予め線形計画問題を解くことによって得ている。

$$cost = \frac{\text{maximize}(cost') - cost}{\text{maximize}(cost') - \text{minimize}(cost')} \quad (25)$$

$$tsat = \frac{tsat' - \text{minimize}(tsat')}{\text{maximize}(tsat') - \text{minimize}(tsat')} \quad (26)$$

$$csat = \frac{csat' - \text{minimize}(csat')}{\text{maximize}(csat') - \text{minimize}(csat')} \quad (27)$$

$$asat = \frac{asat' - \text{minimize}(asat')}{\text{maximize}(asat') - \text{minimize}(asat')} \quad (28)$$

式 (25), (26), (27), (28) より、電力コストは最小化、生

活満足度は最大化した場合に 100 となる。本研究は電力コストと生活満足度の両立を目的とするため、式 (29) を目的関数と定める。

$$\text{maximize} : w_{cost} \cdot cost + w_{sat} \cdot sat \quad (29)$$

$$sat = w_{tsat} \cdot tsat + w_{csat} \cdot csat + w_{asat} \cdot asat \quad (30)$$

ここで、 $w_{cost}$ ,  $w_{sat}$ ,  $w_{tsat}$ ,  $w_{csat}$ ,  $w_{asat}$  はそれぞれ電力コスト、生活満足度、時間性満足度、快適性満足度、利便性満足度の重みであり、 $w_{cost} + w_{sat} = 1$ ,  $w_{tsat} + w_{csat} + w_{asat} = 1$  とする。フィードバックの際にこれら重みの値を調節することで、ユーザの希望に沿ったスケジューリングを可能とする。また、式 (30) に示される通り、生活満足度  $sat$  は時間性満足度  $tsat$ 、快適性満足度  $csat$ 、利便性満足度  $asat$  の重み付け和で算出される。

## 4.2 制約式

人  $p$  の行動  $a$  の開始時間、終了時間が  $t$  である場合にそれぞれ 1 となる変数  $xb_{t,p,a}$ ,  $xe_{t,p,a}$  を導入する。複数時間に及ぶ行動を連続するタイムスロットに割当てては、式 (31) で実現できる。

$$x_{t+1,p,a} = x_{t,p,a} + xb_{t+1,p,a} - xe_{t,p,a} \quad (31)$$

人  $p$  の行動  $a$  の開始時間と終了時間は式 (32) で換算される。

$$tb_{p,a} = \sum_{t=0}^n t \cdot xb_{t,p,a}, te_{p,a} = \sum_{t=0}^n t \cdot xe_{t,p,a} \quad (32)$$

家電を 1 時間以上稼働する場合、所要時間  $tn_e$  をまとめてタイムスロットに割当てて必要があるため、 $t$  から連続する  $tn_e$  つのセルを 1 つのセル  $y_{t,e}^{unit}$  として扱う。 $y_{t,e}^{unit} = 1$  である場合、家電  $e$  は  $t$  から連続して  $tn_e$  時間稼働する。

$$y_{t,e} = y_{t,e}^{unit} + y_{t-1,e}^{unit} + y_{t-2,e}^{unit} + \dots + y_{t-tn_e+1,e}^{unit} \quad (33)$$

家電  $e$  の稼働の開始時間  $tb_e$ 、終了時間  $te_e$  は、稼働時間が 1 時間である場合は  $y_{t,e}$ 、2 時間以上である場合は  $y_{t,e}^{unit}$  を用いて式 (34) で表される。

$$tb_e = \sum_{t=0}^n t \cdot y_{t,e}, te_e = \sum_{t=0}^n t \cdot y_{t,e}^{unit} \quad (34)$$

式 (35) は、時間  $t$  において、人  $p$  が外出行動  $o$  を行うのであれば、電気自動車による移動を表す変数  $w_{t,p,o,U} = 1$  か、徒歩による移動を表す変数  $w_{t,p,o,N} = 1$  のいずれかが 1 となることを示す。

$$x_{t,p,o} = w_{t,p,o,U} + w_{t,p,o,N} \quad (35)$$

人  $p$  の外出行動  $o$  に電気自動車がいわれている場合に 1 となる変数  $w_{p,o}$  を考える。外出行動の往路と復路で電気自動車に乗車するかどうかは、式 (36) によって定まる。

$$wb_{t,p,o} = xb_{t,p,o} \wedge w_{p,o}, we_{t,p,o} = xe_{t,p,o} \wedge w_{p,o} \quad (36)$$

また、 $wb_{t,p,o}$ ,  $we_{t,p,o}$  と  $w_{t,p,o,U}$  との関係は式 (37) で表され、移動手段に電気自動車を使用した場合には外出行動中に継続して専有されるということを示している。

$$w_{t+1,p,o,U} = w_{t,p,o,U} + wb_{t+1,p,o} - we_{t,p,o} \quad (37)$$

乗車中はグリッドに対する電力売買を行うことができないことから、電力移動  $f = G2V, V2G$  に対し、式 (38) の制約を設ける。

$$\begin{aligned} z_{t,V,f} &\leq \infty - \infty \cdot \sum_{(p,a) \in O} wb_{t,p,a} \\ z_{t,V,f} &\leq \infty - \infty \cdot \sum_{(p,a) \in O} we_{t,p,a} \end{aligned} \quad (38)$$

電気自動車が家屋にない場合には、人の行動や家電の稼働に対し、電気自動車から電力を供給することができない。時間  $t$  において、電気自動車が家屋にない状態を表す変数  $w_{t,U}$  を導入すると、この制約は式 (39) のように表すことができる。

$$u_{t,p,a,V} \leq C_{p,a}(1 - w_{t,U}), v_{t,e,V} \leq C_e(1 - w_{t,U}) \quad (39)$$

同時刻に電気自動車をいえることができる行動は高々 1 つであることは、式 (40) で表現できる。

$$\sum_{(p,a) \in O} w_{t,p,o,U} = w_{t,U} \leq 1 \quad (40)$$

変数  $w_t^{All}$  は時間  $t$  において世帯に所属する人が全員外出している場合に  $w_t^{All} = 1$  となる。人の集合の各要素  $P = \{p_1, p_2, \dots\}$  に対し、 $w_t^{All}$  は式 (41) にて求めることができる。

$$w_t^{All} = \sum_{(p_1,a) \in O} x_{t,p_1,o} \wedge \sum_{(p_2,a) \in O} x_{t,p_2,o} \wedge \dots \quad (41)$$

世帯に所属する人が全員外出している場合はエアコンを稼働させないという制約式 (42) を設けておく。

$$y_{t,Air} + w_t^{All} \leq 1 \quad (42)$$

## 5. 行動スケジューリングシステム

行動スケジューリングシステムは、スマートホームにおいて、人の行動、家電の稼働、供給源の手続きをスケジューリングするだけでなく、ユーザの嗜好を反映できるよう、電力コストと生活満足度の重みを調整する。このシステムに対し、スケジューリング期間内にユーザが実施する行動が入力されると、4 章で示した方法を利用し、電力コストと生活満足度が最適化となるよう、人の行動、家電の稼働、供給源の手続きがスケジューリングされる。人の行動や家電の稼働の実施時間帯と、供給源の電菱売買の時間帯及び電力量がスケジューリング結果として提示され、ユーザは

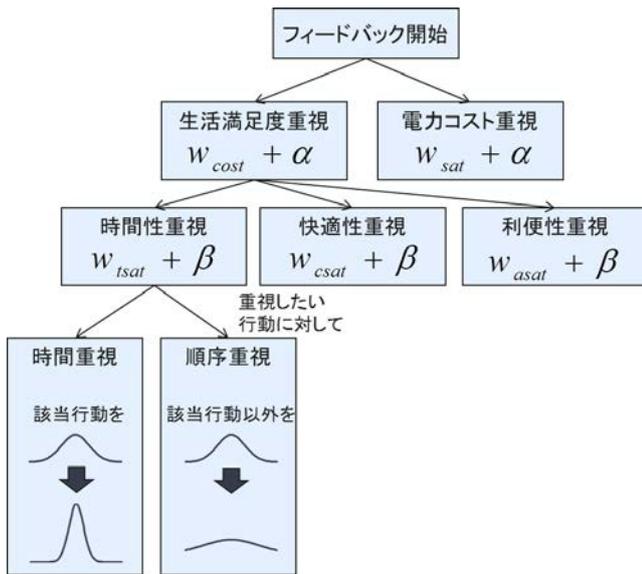


図 2 フィードバックの流れ

この結果に対しフィードバックを行う。システムは、このフィードバックを基に電力コストと生活満足度の重みを変化させることで、次のスケジューリングにユーザの希望を反映させている。

以下、スケジューリング結果に対するフィードバックについて詳しく説明する。フィードバックでは、提示されたスケジューリング結果に対するユーザからの評価を把握しながら、電力コストや生活満足度の各項目の重みを調整する。提案手法において、ユーザからの評価を把握する流れを図 2 に示す。この流れでは、提示されたスケジューリングに対し、ユーザが何を重視しているのかを把握するために段階的に質問する。まず、スケジューリング結果に対し、電力コストと生活満足度のどちらを重視するかをユーザに尋ねる。電力コストを重視する場合には、式 (29) における電力コストの重み  $w_{cost}$  を  $+\alpha$ 、生活満足度の重み  $w_{sat}$  を  $-\alpha$  としてフィードバックを終える。逆に、生活満足度を重視する場合には、 $w_{cost}$  を  $-\alpha$ 、 $w_{sat}$  を  $+\alpha$  とし、さらに時間性満足度、快適性満足度、利便性満足度のうち最も重視するものを選択してもらう。この際、式 (30) における重み  $w_{tsat}$ 、 $w_{csat}$ 、 $w_{asat}$  に対し、最も重視させたい項目の重みを  $+\beta$ 、それ以外の項目の重みをそれぞれ  $-\beta/2$  とする。快適性、利便性が重視された場合にはこの時点でフィードバックを終えるが、時間性を重視する場合は、ピークシフトの影響によりスケジューリング結果の時間帯に不満が発生したと考えられるため、どの行動や稼働を重視させたいのかについてさらに詳しく要望を把握する。このとき、時間を重視させたい行動や稼働に対し、指定時間通りにスケジューリングして欲しい場合と、時間が多少前後してもよいが他の行動よりは優先してスケジューリングしてほしい場合の 2 種類の要望があると考え、前者を時間重視、後者を順序重視としてユーザ評価を得る。時間重視の場合は、該当項目の時間性満足度算出式 (17) のパラメータ  $\sigma$  を小

表 2 生活パターン

人	内容	消費電力 [kWh]	回数
夫	睡眠	—	7
	入浴	—	7
	昼食	0.234	1 (1)
	調理	0.467	2 (1)
	夕食	—	7 (2)
	PC	0.049	3
	テレビ	0.107	3 (2)
妻	睡眠	—	7
	入浴	—	7
	昼食	0.234	7 (1)
	調理	0.467	5 (1)
	夕食	—	7 (2)
	掃除	0.776	3
	テレビ	0.107	7 (2)
人	内容	距離 [km]	回数
夫	仕事	8	5
	外出	10	1
妻	買い物	1	3
夫妻	買い物	5	1
家電	消費電力 [kWh]	回数	
炊飯器	0.286	7	
洗濯機	0.046	5	
乾燥機	1.2	3	

さくすることにより、希望時間通りにスケジューリングした場合の満足度を上昇させる。順序重視の場合は、該当項目以外の式 (17) のパラメータ  $\sigma$  を大きくすることにより、各時間における該当項目の満足度を相対的に上昇させている。

## 6. 性能評価

本章では、実世帯における生活行動 [6] を参考に夫婦の一般的な生活行動パターンを対象とし、提案手法による行動スケジューリングの評価を行った。対象とする一週間の行動パターンを表 2 に示す。それぞれ表に示す回数実施されるものとし、睡眠や夕食のように毎日一回ずつ行われるものもあれば、テレビのように一日に二回行われるものもある。また、昼食、調理、夕食、テレビ、買い物の一部は夫妻が同時に同一の行動を行うとし、その回数を表 2 の括弧内に示している。

この行動パターンに対し、4 章に示した方法により解を求めた結果、電力コストは最大で 6892.46 円、最小で -8101.35 円であるところ、推薦スケジュールでは -5280.37 円となり、81%のコスト削減となった。また、時間性満足度、快適性満足度、利便性満足度の指数値はそれぞれ 98.71%、94.96%、50.00% となり、外出行動 10 回中車利用は 5 回と半分に制限されたものの、時間性、快適性については高い値を維持していると言える。また、推薦内容についても、入浴と食事を同時に行うことがない、電気自動車を同時に別の外出行動に用いることがないなど、定式化した制約式によって

表 3 フィードバックにおける電力コストと生活満足度の変化

シナリオ	cost : sat	tsat : csat : asat	電力コストの差	生活満足度の差
初期	5 : 5	62 : 33 : 5	—	—
A 電力コスト重視	6 : 4	62 : 33 : 5	-633[円]	-5.69[%]
B 快適性重視	4 : 6	57.8 : 40 : 2.2	+190[円]	-1.79[%]
C 利便性重視	4 : 6	60.4 : 29.7 : 9.9	+659[円]	+4.51[%]
D 時間重視	4 : 6	67.7 : 29.8 : 2.5	+237[円]	+4.94[%]
E 順序重視	4 : 6	67.7 : 29.8 : 2.5	+191[円]	-3.52[%]

一般生活として妥当なスケジュールを生成できていることを確認した。

加えて、電力コスト重視、快適性満足度重視、利便性満足度重視、時間性満足度における時間重視、順序重視の5種類の評価によるフィードバックを行い、重み変化の前後で結果の比較を行った。以降、表 3 におけるそれぞれのシナリオとフィードバック前の初期シナリオとの比較を述べる。シナリオ A では 7:00~9:59 と 19:00~22:59 のエアコン使用を抑えること、夫の車使用を控えること、掃除行動を1時間シフトすることにより、633.07 円の電力コスト削減に成功している。シナリオ B では、初期シナリオでエアコンを稼働させなかった 19:00~21:59 においてエアコンを使用し、快適性を 99%まで増加させたが、その分電気自動車を移動に用いておらず、電力コストは 190.04 円ほど増加した。シナリオ C では 10 回中 8 回の外出行動で電気自動車を使用するようになったが、その分バッテリーとして使用される時間が少なくなり、電力コストは 659.33 円増加した。また、初期シナリオにおいては、電力コストの影響により 4 日目の 11:00~15:59 の間に指定されていた乾燥機の稼働が翌 4:00~5:59 稼働に変更されているが、シナリオ D で乾燥機の時間を重視することにより 4 日目の 10:00~11:59 にシフトされ、時間性満足度は 99%まで向上したが、電力コストは 236.59 円増加している。同様に、6 日目の夜において、夫は 21 時に仕事から帰宅し夕食、22 時からテレビを見、23 時から入浴、0 時に就寝というスケジュールとなったが、この日の就寝希望時間は 23 時となっていた。そこで、シナリオ E で睡眠行動の順序を重視することにより、20 時に帰宅して入浴、21 時から夕食、22 時からテレビを見て 23 時就寝というスケジュールに修正されたが、睡眠以外の行動時間帯がシフトされているため、時間性満足度全体としては 86% まで低下している。このように、フィードバックを実施することにより、ユーザの嗜好に合わせ、適切に行動スケジュールリングが行えることを示した。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では、スマートホームにおけるエネルギーの可視化、電力設備の自動制御、そして電力の売買、蓄積などの機能を想定した上で、電力消費に要する電力コストと生活の質に対する満足度を考慮した行動スケジュールリング手法を提案した。一般的な世帯モデルに対して提案手法を適用することにより、行動が改善され、電力コストを削減し、か

つ生活満足度の高い行動スケジュールを導出できていることを確認した。また、ユーザによるフィードバックによって、電力コストと生活満足度の割合を変化させることで、ユーザに嗜好に合わせた行動スケジュールが導出されることを確認した。

今後の課題としては、割り当て時間帯の細分化や行動内容の詳細化などのスケジュールのモデルに関する改善や、一つの世帯だけを扱う個別最適問題だけでなく、複数世帯を総合的に考慮する全体最適問題への取り組み、電力を消費する一般世帯側と電力を供給する電力網側の両者にとって最適なシステムの設計などに取り組みたい。

## 参考文献

- [1] Li, Y., Kaewpuang, R., Wang, P., Han, Z. : An Energy Efficient Solution: Integrating Plug-In Hybrid Electric Vehicle in Smart Grid with Renewable Energy, *2012 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, pp. 73-78 (2012).
- [2] Liang, H., Choi, B. J., Zhuang, W., Shen, X. S. : Towards Optimal Energy Store-Carry-and-Deliver for PHEVs via V2G System, *Proceedings of IEEE INFOCOM 2012*, pp. 1674-1682 (2012).
- [3] 安本慶一, 小倉和也, 山本真也, 伊藤 実 : 快適度の低下を最小限に抑える省エネデバイス制御手法, *情報処理学会研究報告. マルチメディア通信と分散処理研究会報告*, Vol. 2011, No. 9, pp. 1-8 (2011).
- [4] 大木浩武, 安本慶一, 玉井森彦 : 快適さと省エネのトレードオフの発見を支援する家電制御ユーザインタフェース, 第 20 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2012) 論文集, pp. 233-239 (2012).
- [5] 向井政貴, 市川昌宏, 西尾信彦 : HEMS における省電力アドバイス自動生成のための需要度の推定, *情報処理学会研究報告. ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告*, Vol. 2012, No. 18, pp. 1-4 (2012).
- [6] 山口容平, 佐藤大樹, 田中マルコス, 下田吉之 : 家庭における世帯構成員生活時間行動モデルの開発, *エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (CD-ROM)*, Vol. 28th, pp. ROMBUNNO.23-5 (2012).

著者の所属に誤りがありましたので、以下のように訂正致します。

誤	正
山口 容平 <sup>3,4,e)</sup> 下田 吉之 <sup>3,4,f)</sup>	山口 容平 <sup>3,e)</sup> 下田 吉之 <sup>3,f)</sup>

3 大阪大学 大学院工学研究科エネルギー工学専攻  
Graduate School of Engineering, Osaka University,  
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

4 独立行政法人科学技術振興機構, CREST  
Japan Science Technology and Agency, CREST