E-101

家電の動作モードの組合せ最適化に基づく電力割当制御システム

Power Allocation Management System Based on Combinatorial Optimization of Appliance Operation Modes

森本 尚之 †
Naoyuki Morimoto†

1　はじめに

近年，様々な分野において電力エネルギーの有効活用が重要な課題となっている．たとえば，いわゆる「デマンドレスポンス」は 電力の需要側の消費量を抑制することで電力需給のバランスを保つ仕組みであるが，需要を抑制するには限られた電力を有効に使うことが求められる．家庭における電力利用者の節電行為を支援する取り組みは盛んになされている．たとえば家庭内の電力消費機器（家電等）の消費電力データを収集し，グラフ化して利用者に見せるいわゆる「電力消費の見える化」には一定の効果が示されている．一方で，家庭内での節電行為は利用者による手動操作が必要なことが多いため，節電に意欲のある利用者にとっても継続して行うことは必ずしも容易ではない．また，利用者が機器の消費電力の値などについて必ずしも熟知していない場合，節電行為を行ったとしても目標を確実に達成できるとは限らない．

こうした状況を踏まえて，新しい需要家サイド電力管理システムとしてオンデマンド型電力制御 (Energy-on-Demand, EoD) システムが提案されている [1]．現在の家庭内電力網においては，家電をコンセントに接続し電源を入れれば無条件に電力が供給される．対して EoD システムにおいては，利用者の生活スタイルなどのポリシーに基づき，電力消費機器は自らが必要とする電力を明示的にシステムに要求し，その要求をシステム内に存在する電力割当マネージャが調停し，総消費電力の上限を超えない範囲で利用者の生活の質 (Quality-of-Life, QoL) をできるだけ高めるように機器への電力供給を制御する．したがって，EoD システムにおける重要課題のひとつは，すべての電力要求を満たすことができないときに，どの機器にどれだけの電力を割り当てるかを決定することである [2].

EoD システムにおいて電力割当を決定する問題は，数学的にはいわゆる組合せ最適化問題として考えることができる．すなわち，様々に考えられる家電への電力の割り当て量の組合せの中から，総消費電力の上限という制約条件を満たしつつ，利用者にとって最適となる割当を決定する問題である．我々は以前に，電力割当問題をシンプルなナップザック問題として解釈した EoD システムのプロトタイプを開発し評価した [3]．そのプロトタイプは，各家電の消費電力情報を収集し，ナップザック問題に対するアルゴリズムを用いて各機器のオン・オフを決定し，機械式リレーによりオン・オフ制御するものであった．しかし，実際の家電はオン・オフ以外に様々な動作モードを持つものが多いため，より現実に近い電力割当制御のためには，複数の家電の動作モードの組合せのなかから最適なものを選ぶ必要がある．この場合，シンプルなナップザック問題と比べて考慮すべき組合せが多くなり，より複雑な問題となる．また，消費電力と利用者にとっての利便性とは必ずしも比例せず，家電によってはモード切り替えにともない消費電力が線形でなく階段状に変動するといった性質があるため，線形計画法のような手法で簡単に解くことは見込めない．

そこで本研究では，家電が複数の動作モードを持つ場合の電力割当問題を組合せ最適化問題の一種である多重選択ナップザック問題 (The Multiple-Choice Knapsack Problem, MCKP) として解釈し，MCKP に対するアルゴリズムを用いて電力割当を行う EoD システムを実装して実験による評価を行った．MCKP はナップザック問題を拡張した問題である．アイテム（動作モード）はサイズ（消費電力）と価値（利用者にとっての利便性）を持つ．また，アイテムはクラス（家電）に分類され，各クラスからはただ 1 つのアイテムをナップザック（電源）に入れることができる．目的は，ナップザックに入れることのできたアイテムの価値の総和の最大化である．実装したシステムは，各家電の消費電力を測定し，その合計が上限値を超えているならば電力割当マネージャが MCKP に対するアルゴリズムにより最適割当を計算し，機器の動作モード変更およびオン・オフ制御を行うことで，求めた最適割当の動作を実現する．家電の動作モードを変更するための手段として，Wi-Fi 経由で制御可能な赤外線リモコンを用いた．これにより，単純なオン・オフだけでなく，一般的なエアコンなどの赤外線対応機器を柔軟にモード制御することが可能である．

2　関連研究

既存の EoD システムにおける電力割当制御は，組合せ最適化としての解釈ではなく，機器ごとに設定された「優先度」

† 京都大学 物質–細胞統合システム拠点 (iCeMS)
† Institute for Integrated Cell-Material Sciences (iCeMS), Kyoto University

パラメータに基づき，消費電力の総和が上限値を超えている場合は優先度の低いものから順番に電力供給を削減するというものが多い [4, 5]．電力割当をナップザック問題として解釈した先行研究としては，Sianaki らによる数値シミュレーション [6] が挙げられる．また本研究での目的とは異なるが，Kumaraguruparan ら [7] は，生活者が電力を消費する「タスク」を 1 日のなかのどの時間帯に割り振るかというスケジューリング問題を複数ナップザック問題と解釈し，シミュレーションによる解析を行っている．

3 コンセプトと定式化

3.1 EoD における電力割当制御のコンセプト

従来の家庭内の電力ネットワークでは，電力消費機器はコンセントに接続され電源を投入されれば無条件に電力供給を受けることができるが，電流値がブレーカで定められた上限値を上回った場合はブレーカが落ち，配電盤下の全ての機器が一斉に利用不可能となってしまう．また，節電の目標を達成するためには機器の消費電力を利用者が理解し，適切に手動で制御することが必要である．こうした背景のもと提案されているオンデマンド型電力制御 (Energy-on-Demand, EoD) [1] システムは，工場やビルといったいわゆる「設備系」の機器にとどまらず，一般家庭や一般オフィスの機器を対象として，電力利用者の利便性や生活の質を可能な限り保ちながら節電目標を達成する電力制御システムである．EoD システムにおいては，まず各電力消費機器が必要とする電力を明示的にシステムに要求する．システムに存在する電力割当マネージャは，複数の機器からの電力要求を消費電力の上限値を超えない範囲で勘案し，利用者の生活の質を最も高めるように電力の割当を求め制御する．このようにして，自動的に総消費電力の上限値を守りつつ，利用者の生活の質をできるだけ落とさずに，自動的に節電やデマンドレスポンスの目標を達成することを目的とする．

図 1 に EoD システムの概要を示す．この例では，2 種類の家電（掃除機と照明）が電力をそれぞれ必要としており，それぞれ電力の要求を電力割当マネージャに伝える．電力割当マネージャは，機器の電力要求と利用者の生活にとっての重要度（生活の質への貢献度），消費電力，消費可能な電力の総和の上限値（これは利用者が設定した節電目標や，デマンドレスポンスにおいて設定された値）にもとづいて，利用者の生活に取って最適となるように電力割り当てを決定し，機器からの要求を受理または却下する．この例では，掃除機からの電力要求は却下されたため利用不可となった一方で，照明からの要求は受理され利用可能である．

3.2 組合せ最適化問題としての定式化

前述の通り，EoD システムにおける電力割当を決定する問題は，一種の組合せ最適化問題として考えることができる．図 2 にその例を示す．家電機器はそれぞれ，たとえば「強」や「弱」といった動作モードを持っている．電力割当制御システムは，設定された消費電力の総和の上限値（節電やデマンドレスポンスの目標値）を守りつつ，これらの動作モードの組合せのなかから利用者にとって最適なものを選択することとなる．

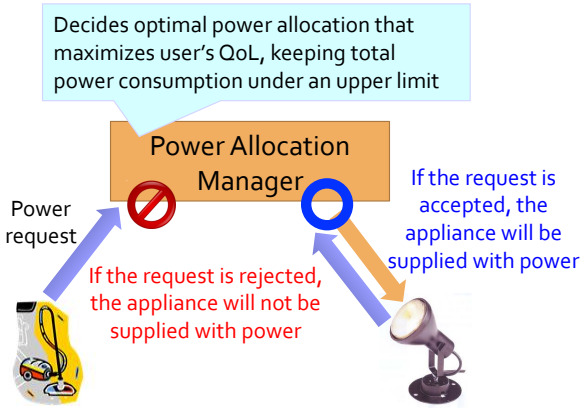

図 1　EoD システムのコンセプト

本研究では，この問題を次のように多重選択ナップザック問題 (The Multiple-Choice Knapsack Problem, MCKP) として考えた．まず単純なナップザック問題とは，「価値」と「サイズ」をパラメータとして持つアイテムと，「容量」を持つナップザックが与えられたときに，ナップザックに入れることにできたアイテムの価値の総和を最大化することを目的とする問題である．MCKP はその拡張である．問題の目的はナップザック問題と同様であるが，アイテムは「クラス」に分類されており，同一クラスに属するアイテムの中から必ず 1 つのアイテムをナップザックに入れなければならず，かつ各クラスから入れることができるアイテムは 1 つだけである，という条件が加えられている．ここで，クラスを家電，動作モードをアイテム，ナップザックを電源と解釈することで，電力割当問題を MCKP として捉えることができる．

以下，クラス（家電）の数を m とする．クラス i $(1 \leq i \leq m)$ は n_i 個 のアイテム（動作モード）j $(1 \leq j \leq n_i)$ からなる集合である．N_i はクラス i に属するアイテムの集合を表す．各アイテムには価値 p_{ij}（利用者にとっての重要性）とサイズ w_{ij}（消費電力）が付与されている．価値が高いほど，家電 i の動作モード j が EoD システムにおいて出す「要求」の程度が強いものと解釈できる．各クラスで選べるアイテムは 1 つである（これは，1 個の家電で選べるモードはただ 1 つであることに相当する．なお，動作モードの中には「オフ」を含めている）．変数 $x_{ij} \in \{0, 1\}$ は，もし $x_{ij} = 1$ であればクラス i においてアイテム j がナップザックに入ったことを表す（$x_{ij} = 0$ はアイテム j はナップザックに入っていないことを表す）．電源をナップザックとみなす．消費電力の上限値はナップザックの容量 c である．

以上の記号を用いて MCKP を定式化すると次のように表される．制約式の 1 番目は，選ばれたアイテムのサイズの総和がナップザックの容量を超えないことを表す．また，2 番目と 3 番目の制約式は，クラスごとに必ず唯一のアイテムが選ばれることを表す．

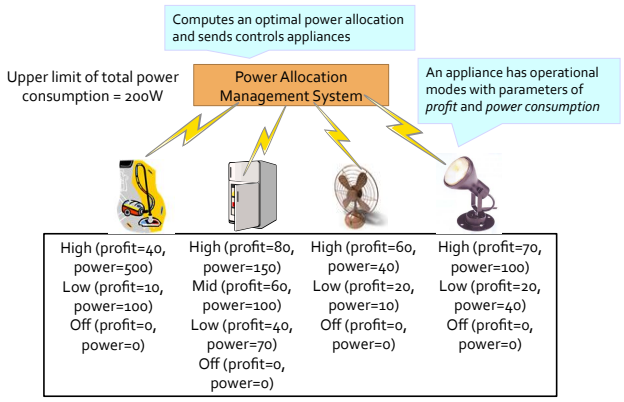

図 2　EoD システムにおける家電の動作モードを考慮した組合せ最適化

$$
\begin{aligned}
\max \quad & \sum_{i=1}^{m} \sum_{j \in N_i} p_{ij} x_{ij} \\
\text{subject to} \quad & \sum_{i=1}^{m} \sum_{j \in N_i} w_{ij} x_{ij} \leq c, \\
& \sum_{j \in N_i} x_{ij} = 1, \ i = 1, ..., m, \\
& x_{ij} \in \{0, 1\}, \ i = 1, ..., m, \ j \in N_i.
\end{aligned}
$$

3.3　全体の設計

本システムの設計は，以前実装したプロトタイプシステム [3] をベースとして行った．システムの中央には電力割当マネージャが位置する．マネージャは各家電のデータとして，各家電の取りうる動作モードとそれぞれのモードにおける「価値」および「消費電力」のパラメータ値，各家電が接続されているスマートタップの ID，各家電に対する制御手段のリスト（赤外線通信による制御が可能か，またはリレーによる制御のみ可能か），赤外線制御可能な家電の動作モード変更のための制御信号，それぞれの家電の状態（現在の動作モード）の情報を保持している．また，マネージャは各家電の現在の消費電力情報を収集し，その総和が総消費電力の上限値を超過している場合に，MCKP に対する動的計画アルゴリズム（後述）を用いて最適な電力割当を決定する．最後に，赤外線制御可能な機器に対しては後述する赤外線リモコンを経由して制御を行う．赤外線による制御が不可の機器には，機器が接続されているスマートタップに，該当ソケットの機械式リレーを開閉するための制御命令を出力する．システムの概要を 図 3 に示す．

3.4　ハードウェアおよびソフトウェア設計

■ハードウェア　機器の消費電力の測定，および機械式リレーによるオン・オフ制御にはスマートタップを利用した．スマートタップは消費電力の測定機能，機械式リレーによるソケットごとのオン・オフ機能，および他機器との通信機能を持つ電源タップである．4 つのソケットを持ち，定格電流は 15A，定格電圧は 100V である．

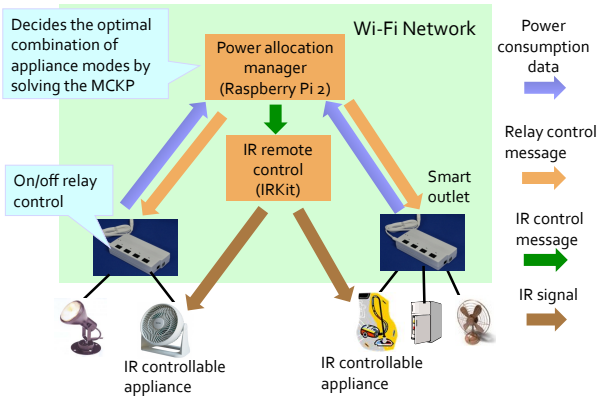

図 3　システムの概要

表 1　電力割当マネージャのスペック

Items	Specs
CPU	ARM Cortex-A7 900MHz Quad-Core
RAM	1GB
OS	Raspbian (Debian-based Linux)
Communication	IEEE 802.11n Wi-Fi

また，機器を赤外線制御するためには，電力割当マネージャが決定した制御内容を実現するための赤外線信号を機器に送信する仕組みが必要である．そこで，Wi-Fi 経由で赤外線信号を送信できる赤外線リモコン IRKit [*1] を用いた．あらかじめ各機器ごとの赤外線信号を電力割当マネージャに記録しておき，HTTP 経由で IRKit に制御命令を送ると，IRKit から機器へと赤外線信号が送信され，所望の制御が実現される．

電力割当マネージャとしては，いわゆるホームゲートウェイのような組み込み機器に近いスペックのものを想定し，Raspberry Pi 2 Model B [*2] を用いた．そのスペックを表 1 に示す．

なお，スマートタップ，IRKit および電力割当マネージャ間の通信メディアは汎用性を重視して Wi-Fi を用いた．

■ソフトウェア　このシステムで制御対象としている家電は，いわゆる「スマート家電」ではなく一般的な家電であり，動作モードなどの状態を外部機器から把握するための直接的な手段が無い．よってシステムには，初期状態からの制御による状態変化を記録し，現在の動作モードを把握しておく仕組みが必要となる．また，計算により求めた最適解の状態に移行するために必要となる具体的な制御方法についてもシステム側で管理する必要がある．本システムでは，赤外線制御可能な家電について，ある動作モードから別のモードへと移行するための赤外線信号と必要な回数をシステム内でデータとして所持している．

[*1] http://getirkit.com
[*2] http://www.raspberrypi.org

赤外線で制御できない機器については，スマートタップの機械式リレーで制御するためのコマンドをシステム側で所持し，機器が接続されているスマートタップに送信する．

また電力割当マネージャは，各家電のモードと，それに応じた（推定）消費電力の値，またそれに応じた価値の値を保持している．これらをパラメータとして，後述するアルゴリズムを用いてモードの最適な組合せを求め，それを実現するように，赤外線制御可能な機器には赤外線信号を，リレー制御のみの機器には対応するソケットを制御するように該当スマートタップに制御命令を出す．

3.5 MCKP に対する動的計画アルゴリズム

MCKP は，全てのクラスにおいてアイテムがただ 1 つの場合，シンプルなナップザック問題と同等になる．したがって，MCKP はシンプルなナップザック問題を特殊ケースとして含んでいるため NP 困難である．しかし MCKP に対しては，擬多項式時間で動作する動的計画アルゴリズムが知られている [8]．Algorithm 1 に動的計画アルゴリズムを示す．前述の通り，家電の数を m，各家電 i のモードの数を n_i で表す．$P(i,j)$ は，$1,...,i$ のクラスだけを利用し，容量 j $(1 \leq j \leq c)$ のナップザックを用いた部分問題の最適解を表す．動的計画アルゴリズムに一般的なように，このアルゴリズムは部分構造最適性に基づいている．具体的には，再帰式 $P_k(i,j) = P(i-1, j-w_{ik}) + p_{ik}$ または $P_k(i,j) = P(i-1,j)$ に基づき，サイズを限定した部分問題の解を利用してより大きな部分問題の最適解を順次求めている．

Algorithm 1 Dynamic-programming Algorithm for the Multiple-Choice Knapsack Problem [8]

```
for j = 0 to c do
    P(0, j) = 0
end for
for i = 1 to m do
    for j = 1 to c do
        for k = 1 to n_i do
            if j ≥ w_ik then
                P_k(i, j) = P(i − 1, j − w_ik) + p_ik
            else
                P_k(i, j) = P(i − 1, j)
            end if
        end for
        P(i, j) = max{P_k(i, j) | k = 1, ..., n_i}
    end for
end for
```

4 評価実験

機器として赤外線制御可能な扇風機と照明，およびリレーでのみ制御可能なバッテリー充電器とノート PC を利用した際の評価実験について述べる．時間の経過に応じて上限値の設定を様々に変更させた場合の，各機器の消費電力とその合計の変動を図 4 に示す．

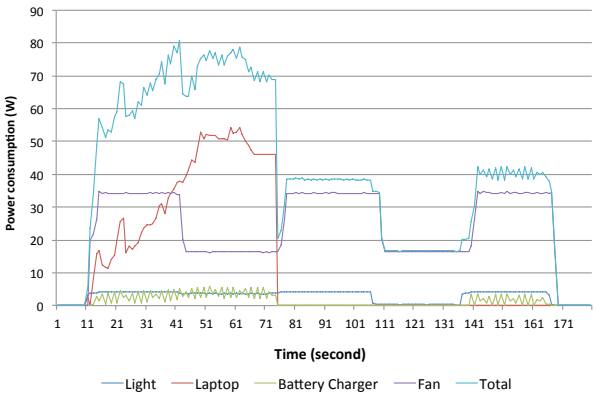

図 4　全機器の消費電力の総和と，個別の機器の消費電力の変動

まず開始から 40 秒後付近において，この時点では上限値は 80W に設定されていたが，消費電力の総和が上限値を超えたため電力割当マネージャによる制御が機能し，扇風機の動作モードを強から弱に変更することで消費電力の合計を上限値以下に収めていることが観察できる．また，開始後 75 秒後付近で上限値の設定を 40W に変更したところ，それまでの動作モードでは新たな上限値を守ることができないため，新しい上限値の範囲での最適割当を再計算している．その結果，ノート PC および充電器への電力供給は停止し，扇風機の動作モードは強に戻っている．同様に，110 秒後に上限値を 20W に，および 140 秒後に 70W に設定した際も，それぞれの上限値設定での再計算がなされ，目的とする制御が実現できている．

なお本システムは，この例で用いた機器以外にも，赤外線制御可能な機器（エアコン，TV，オーディオ機器など），ならびに電気ケトルやドライヤーなどといった一般的な機器は制御可能であり，設定に応じて上限値を正しく守るように制御できることを確認している．

5 総括と今後の課題

本論文では，EoD システムにおける電力割当制御を組合せ最適化問題の一種である多重選択ナップザック問題として解釈し，動的計画アルゴリズムを用いた EoD システムの実装と評価を述べた．

本システムを実際の生活環境に適用させるための課題のひとつは「価値」パラメータの設定方法である．「価値」パラメータは時刻や気温などの様々な要素に応じて変動する動的なものと考えられるため，今後，実際の生活で収集した電力消費情報などを活用し，パラメータの決定手法を追究する予定である．

今回の実験に用いた機器以外であっても，機器が赤外線制御に対応していれば本システムで制御可能である．ただし，汎用的な家電機器を利用する限り，家電の状態を情報通信により直接的に取得することができないため，各家電の状態をシステム側で管理する必要がある．実際の利用環境では利用者が手動操

作で家電の動作モードを変更し得ると考えられるが，現状のシステムは手動での変更の把握には未対応である．この場合，システムで管理している状態と実際の状態とが一致しなくなるため，それ以降の制御に支障が生じる．このような実装上の課題は ECHONET Lite [*3] などのスマート家電プロトコル対応の機器により解決可能と考えられるため，システムの拡張を行い，実際の生活環境における実験を行う予定である．

謝辞

研究協力者である株式会社エネゲートに深謝する．本研究は，JST 京都地域スーパークラスタープログラムおよび JSPS 科研費 15K15979 の助成を受けたものである．

参考文献

[1] Takashi Matsuyama. Creating safe, secure, and environment-friendly lifestyles through i-Energy. *New Breeze*, Vol. 21, No. 2, pp. 1–8, 2009.

[2] Yasuo Okabe. ICE-IT: Integration Technology of Information, Communication and Energy. *Systems, Control and Information*, Vol. 55, No. 6, pp. 221–226, 2011. (In Japanese).

[3] Naoyuki Morimoto, Yuu Fujita, Masaaki Yoshida, Hiroyuki Yoshimizu, Masafumi Takiyamada, Terukazu Akehi, and Masami Tanaka. A power allocation management system using an algorithm for the knapsack problem. In *Proceedings of the IEEE 38th International Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW)*, pp. 590–595, 2014.

[4] Takekazu Kato, Kenji Yuasa, and Takashi Matsuyama. Energy on demand: Efficient and versatile energy control system for home energy management. In *Proceedings of the 2011 IEEE Second International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 392–397. IEEE, 2011.

[5] Tomoki Yoshihisa, Naotaka Fujita, and Mashiko Tsukamoto. A rule generation method for electrical appliances management systems with home EoD. In *Proceedings of IEEE 1st Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 248–250. IEEE, 2012.

[6] Omid Ameri Sianaki, Omar Hussain, and Azadeh Rajabian Tabesh. A knapsack problem approach for achieving efficient energy consumption in smart grid for endusers' life style. In *Proceedings of 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)*, pp. 159–164. IEEE, 2010.

[7] Nallaperumal Kumaraguruparan, Harihara Sivaramakrishnan, and Sachin Sapatnekar Sapatnekar. Residential task scheduling under dynamic pricing using the multiple knapsack method. In *Proceedings of the 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1–6. IEEE, 2012.

[8] Krzysztof Dudziński and Stanisław Walukiewicz. Exact methods for the knapsack problem and its generalizations. *European Journal of Operational Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 3–21, 1987.

[*3] `http://www.echonet.gr.jp/english/index.htm`