

推薦論文

ノート PC バッテリーを活用したピーク電力削減のための 充放電統合制御システム

篠原 昌子^{1,a)} 村上 雅彦¹ 岩根 秀直¹ 高橋 悟¹ 山根 昇平¹ 穴井 宏和^{1,2}
園田 俊浩¹ 湯上 伸弘¹

受付日 2012年12月4日, 採録日 2013年7月3日

概要: 本論文では, ノート PC の内蔵バッテリーを活用してピーク電力を削減する充放電統合制御システムについて述べる. 本システムでは, オフィスの使用電力をもとにこれからの電力需要を複数予測し, 予測結果とノート PC の情報をもとに各ノート PC の充放電スケジュールを計画する. これにより, オフィスの電力需要に応じてノート PC バッテリーを充放電し, ユーザの使い勝手を損なわずにピーク電力を削減する. また本論文では, シミュレーションおよび実証実験により, 充放電制御によるピーク電力削減の効果を評価した結果についても述べる.

キーワード: ピーク電力削減, 充放電制御, ノート PC バッテリー, 需要予測, 最適化

Integrated Control System Using Notebook PC Batteries for Peak Power Demand Reduction

MASAKO SHINOHARA^{1,a)} MASAHIKO MURAKAMI¹ HIDENAO IWANE¹ SATORU TAKAHASHI¹
SHOHEI YAMANE¹ HIROKAZU ANAI^{1,2} TOSHIHIRO SONODA¹ NOBUHIRO YUGAMI¹

Received: December 4, 2012, Accepted: July 3, 2013

Abstract: In this paper, we propose an integrated control system that reduces peak power demand by using the internal batteries of notebook PCs. The system forecasts multiple power demand curves based on the power consumption of an office, and plans a charging/discharging schedule for each PC battery by considering the forecasts and information about the notebook PCs. By controlling the charging and discharging of PC batteries, the system reduces the peak power demand without restricting usability. We also evaluated the efficiency of peak power demand reduction in the simulation experiments and during field testing.

Keywords: peak power demand reduction, control of charging and discharging, internal batteries of notebook PCs, demand forecasting, optimization

1. はじめに

東日本大震災の影響による電力の供給力不足にともない, 2011 年夏, 電気事業法第 27 条に基づく電気の使用制限 (前年のピーク電力から 15%削減した値を使用電力の上限とする) が, 大口需要家に対して実施された. 小口需要

家や家庭に対しては, また 2011 年冬以降は, 制限こそないものの, 自主的な対応が求められており, 需要家はピーク電力を削減する必要性に迫られている. 解決策の 1 つとして今後は, 多数の蓄電池がビルや家など様々な場所に配置され, 電力需要の少ない時間帯に蓄電池に充電しておいた電力をピーク時に放電することで, ピーク電力を削減する仕組みが重要になると予想される. 一方企業などの組織

¹ 株式会社富士通研究所
Fujitsu Laboratories Ltd., Kawasaki, Kanagawa 211-8588, Japan

² 九州大学
Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

a) m-shinohara@jp.fujitsu.com

本論文の内容は 2012 年 7 月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2012) シンポジウム 2012 にて報告され, コンシューマ・デバイス&システム研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

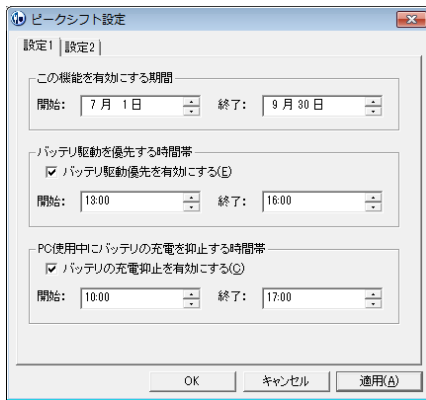


図 1 富士通 (株) のピークシフト設定ユーティリティ

Fig. 1 Peak shift setting utility released by Fujitsu Limited.

においては、業務や管理の効率化と責任の明確化のため、各部門や部署に権限と責任を委譲して経営資源（ヒト、モノ、カネ）を管理しており、ピーク電力の削減についても同様に、オフィスなどの小規模な単位で使用電力を管理しながら施策を実施することが効果的と考えられる。

ここでオフィスにおける喫緊のピーク電力削減手段として、価格や運用面で早期導入が困難な蓄電池に代わり、オフィスに多数存在するノート PC の内蔵バッテリーの活用が注目されている。実際 2011 年夏には、多くの PC メーカーがノート PC バッテリーの充放電を制御可能なソフトウェアを提供した。図 1 は、富士通 (株) が提供したピークシフト設定ユーティリティ [2] である。これらのソフトウェアでは、ユーザが設定したノート PC をバッテリー駆動させる（バッテリーを放電する）時間帯や充電する時間帯に従って、3つの電源駆動状態（バッテリー駆動、AC 駆動、AC 駆動+充電）を切り替える。これにより、ピーク時にノート PC をバッテリー駆動させ、電力需要が少ない時間帯に充電するよう設定することで、ピーク時におけるノート PC の消費電力を抑え、ピーク電力の削減を実現できる。

しかし、上記の方法には2つの課題がある。まず、オフィスなどの小規模環境では、在席ユーザ数やユーザの利用機器により使用電力が大きく変動するため、これからの電力需要を正確に予測することが困難であり、バッテリー駆動させるべき時間帯や充電すべき時間帯を判断できない。次にノート PC は、バッテリーを充電している間の消費電力が非常に高い（図 2）ため、複数のノート PC が同時にバッテリーを充電してしまうと、その時間帯が新たなピークになる可能性がある。また、バッテリーを無計画に充放電すると、バッテリーの劣化や出先など必要なときのバッテリー切れを起し、ユーザの使い勝手を損なう可能性もある。

そこで筆者らは、ユーザの使い勝手を損なわずにピーク電力を削減することを目的として、オフィスの電力需要に応じてノート PC バッテリーを充放電する統合制御システムを開発した。

以下では、2章で充放電統合制御システムについて述べ、

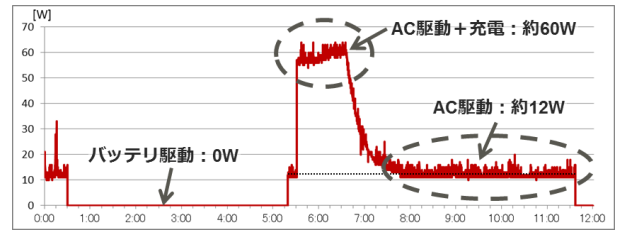


図 2 ノート PC の消費電力

Fig. 2 Power consumption of a notebook PC.

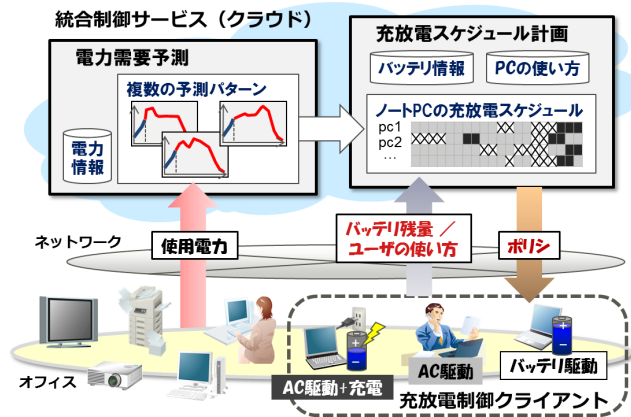


図 3 システム概要

Fig. 3 System schema.

3章でシステムの実装と、実装したシステムを用いたピーク電力削減効果の評価結果について述べる。4章で関連研究を紹介し、5章で本論文のまとめと今後の課題を述べる。

2. 充放電統合制御システム

図 3 に充放電統合制御システムの概要を示す。本システムは、個々のノート PC で動作する充放電制御クライアントと、クラウド上の統合制御サービスからなる。

充放電制御クライアントは、ノート PC のバッテリー残量を定期的に取得し、ユーザの使い方の情報と合わせて統合制御サービスに送信する。また、統合制御サービスから通知されたポリシー（ノート PC バッテリーの充放電制御情報）に従ってノート PC バッテリーの充放電を制御する。これらはすべて充放電制御クライアントが行うため、ユーザが作業する必要はない。

一方、統合制御サービスは、充放電制御クライアントが送信する情報およびオフィスの使用電力の情報について、ネットワークを通じて収集する。また、オフィスの使用電力をもとにこれからの電力需要を複数予測し、予測結果とノート PC の情報をもとに充放電スケジュールを計画する。さらに、充放電スケジュールからポリシーを作成し、個々のノート PC に通知する。

以下では、充放電制御クライアントと統合制御サービスの機能の詳細について説明した後、1章で述べた課題を解決する2つのアルゴリズムについて説明する。

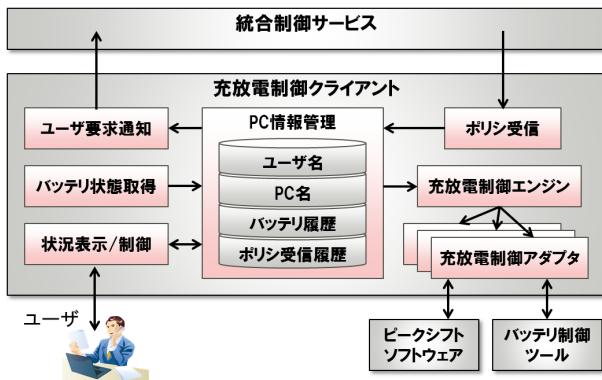


図 4 充放電制御クライアントのアーキテクチャ
Fig. 4 Architecture of battery control client.

2.1 充放電制御クライアント

図 4 に充放電制御クライアントのアーキテクチャを示す。各モジュールの機能を説明する。

(1) PC 情報管理

充放電制御クライアントに関する以下の情報を管理する。

- ユーザ名：ノート PC を利用するユーザの名前
- PC 名：ノート PC のホスト名
- バッテリ履歴：[(2) バッテリ状態取得] で取得した バッテリ状態の履歴
- ポリシ受信履歴：[(4) ポリシ受信] で受信したポリシの履歴

(2) バッテリ状態取得

ノート PC の電源駆動状態、バッテリ残量 [%]、バッテリ駆動できる残り時間 [秒] を定期的に取り得し、取得時刻とともに [(1) PC 情報管理] に保存する。

(3) ユーザ要求通知

[(1) PC 情報管理] で管理されているユーザ名、PC 名、および最新のバッテリ状態を、現在時刻とともに統合制御サービスに送信する。統合制御サービスが接続中の充放電制御クライアントを把握できるように、情報は定期的を送信する。

(4) ポリシ受信

統合制御サービスからポリシを受信し、受信時刻とともに [(1) PC 情報管理] に保存する。また、受信したポリシを [(5) 充放電制御エンジン] に通知する。

(5) 充放電制御エンジン

[(4) ポリシ受信] から通知されたポリシを、ノート PC が利用可能な [(6) 充放電制御アダプタ] の 1 つに通知する (充放電制御の一時停止中を除く)。

(6) 充放電制御アダプタ

[(5) 充放電制御エンジン] から通知されたポリシに基づき、ノート PC バッテリの充放電を制御する。実際の充放電手段はノート PC によって異なる (各社のピークシフトソフトウェアやその他のバッテリ制御ツールなど) ため、充放電制御アダプタでこの違いを隠す。

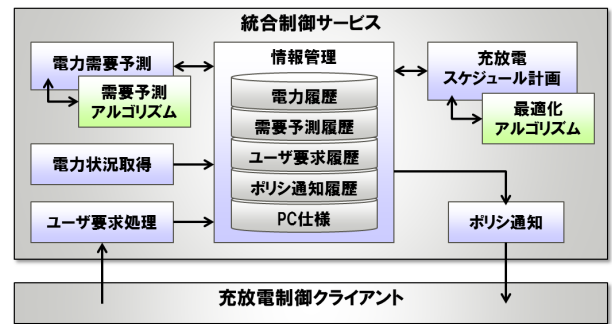


図 5 統合制御サービスのアーキテクチャ
Fig. 5 Architecture of integrated control service.

(7) 状況表示/制御

ユーザに対して、統合制御サービスとの接続やポリシ受信の状況、バッテリ状態やポリシを表示する。またユーザから、充放電制御の一時停止や再開、充放電制御クライアントの終了を受付ける。

2.2 統合制御サービス

図 5 に統合制御サービスのアーキテクチャを示す。各モジュールの機能を説明する。

(1) 情報管理

統合制御サービスに関する以下の情報を管理する。

- 電力履歴：[(2) 電力状況取得] で取得した使用電力の履歴
- 需要予測履歴：[(3) 電力需要予測] で生成した予測結果 (予測した電力需要とその特徴量) の履歴
- ユーザ要求履歴：[(4) ユーザ要求処理] で受信したユーザ要求の履歴
- ポリシ通知履歴：[(6) ポリシ通知] で送信したポリシの履歴
- PC 仕様：充放電制御クライアントが動作するノート PC の仕様。以下を含む。
 - 電源駆動状態ごとの消費電力 [W]
 - バッテリ容量 [Wh]
 - 最大バッテリ残量 [%]
バッテリを充電できる最大の残量。100%より小さく設定することで、100%付近の充電を防ぎ、バッテリの劣化を抑える。
 - 最小バッテリ残量 [%]
バッテリ駆動できる最小の残量。指定値を超えて放電しないことで、バッテリ切れを防ぐ。ユーザの使い方 (出先などでの利用頻度) に応じて設定することで、必要なときのバッテリ切れも防ぐ。
 - 充電開始残量 [%]
充電を開始できる最大の残量。指定値までは充電を開始しないことで、充放電の繰り返しを防ぎ、バッテリの劣化を抑える。

○ バッテリー残量の変化曲線

バッテリーを充電および放電したときの経過時間とバッテリー残量の関係.

(2) 電力状況取得

オフィスの使用電力を定期的を取得し、取得時刻とともに [(1) 情報管理] に保存する.

(3) 電力需要予測

2.3 節で述べる需要予測アルゴリズムを呼び出し、これからの電力需要を予測する (入力は [(1) 情報管理] で管理されているすべての電力履歴). 予測結果がアルゴリズムから返却されると, [(1) 情報管理] に保存する. なお電力履歴は時間の経過とともに増えるため, 電力需要予測は定期的に行う.

(4) ユーザ要求処理

充放電制御クライアントからユーザ要求を受信し, 受信時刻とともに [(1) 情報管理] に保存する.

(5) 充放電スケジュール計画

2.4 節で述べる最適化アルゴリズムを呼び出し, 充放電スケジュールを計画する (入力は [(1) 情報管理] で管理されている当日の電力履歴, 最新の予測結果, PC 仕様, およびユーザ要求履歴). 充放電スケジュールがアルゴリズムから返却されると, ポリシを作成し, [(6) ポリシ通知] に通知する. なおユーザがノート PC を持ち運ぶことで, ネットワーク接続状況が変化するため, 充放電スケジュール計画は統合制御サービスに接続中の充放電制御クライアントに対して, 定期的に行う.

(6) ポリシ通知

[(5) 充放電スケジュール計画] から通知されたポリシを, 受付時刻とともに [(1) 情報管理] に保存し, 充放電制御クライアントに送信する.

2.3 需要予測アルゴリズム

オフィスでは, 1 章で述べたとおり, 在席ユーザ数や利用機器により使用電力が大きく変動するため, これからの電力需要を単純な方法で予測することが困難である. また, 予測結果をもとに充放電スケジュールを計画するため, 予測が外れると, ピーク時にバッテリーを充電してピーク電力を増加させる危険性がある.

そこで需要予測アルゴリズムでは, まず事前分析として, オフィスの過去 1 日ごとの電力履歴を, ピーク時刻と日中の電力差分 (ただし早朝や昼休みなど, 多くのユーザが不在で使用電力が少ない時間帯は除く) でパターン分類する. このとき, クラスタ内の分散が最も小さくなるようにクラスタリングするウォード法 [15] を利用し, 各パターンの特徴が最も明確であった 5 つのパターン (午前前半/午前後半/午後前半/午後後半の使用電力が多い, および使用電力があまり変わらずピークがない) に分類した. 次に, 予測時刻までの当日の電力履歴に対して, 過去 1 日ごとの同じ

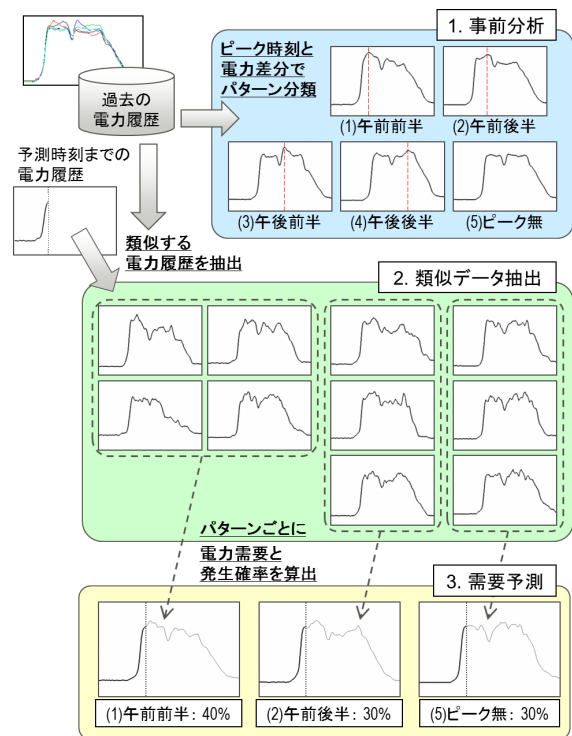


図 6 需要予測アルゴリズムの具体例
Fig. 6 Example of demand forecasting algorithm.

時刻までの電力履歴とのユークリッド距離を計算し, 距離が短い (電力履歴が類似している) k 日分の電力履歴を抽出する. 最後に, 抽出した電力履歴を事前分析で分類したパターンごとに平均し, 各パターンの電力需要を予測する. また特徴量として, 予測した電力需要の発生確率を, 抽出した電力履歴に占めるパターンの割合から求める.

図 6 に $k = 10$ とした場合の具体例を示す. 類似した 10 日分の電力履歴のうち 4 日分が午前前半の使用電力が多いパターン (1) であるため, この 4 日分の電力履歴の平均が予測した電力需要, $4/10 = 40\%$ が特徴量 (発生確率) となる.

複数の予測結果をもとに充放電スケジュールを計画することで, どのような電力需要にも対応できるため, オフィスにおいてもピーク電力を削減できる.

2.4 最適化アルゴリズム

ノート PC バッテリーを活用してピーク電力を削減するためには, 電力需要に応じてバッテリーを効率良く充放電する必要がある. またこのとき, ユーザの使い勝手を損なわないよう, バッテリーの劣化や出先などでのバッテリー切れを起さない充放電スケジュールを計画する必要がある.

そこで本論文では, 充放電スケジュールの計画を, 各時間における各ノート PC の電源駆動状態 (バッテリー駆動, AC 駆動, AC 駆動+充電) を決定する以下の組合せ最適化問題として求める.

- 目的関数（優先度順）
 1. ピーク電力の最小化
 2. ノート PC のバッテリー残量の終了時刻での最大化：
当日中にバッテリーを充電し、翌日のピーク電力削減に備える。
 3. 総使用電力の最小化：
 unnecessary 充放電をなくし、バッテリーの劣化を防ぐ。
 4. 最小電力需要（電力需要の最小値）の最大化：
 1. と合わせ、使用電力を平準化する。
 5. 電源駆動状態の切替回数の最小化：
 ユーザの使い勝手が損なわれることを防ぐ。

● 制約条件

ノート PC のバッテリー残量の範囲（最小バッテリー残量から最大バッテリー残量まで）と充電開始残量

この問題は、ノート PC の電源駆動状態ごとの消費電力とバッテリー残量の変化曲線を線形近似することで、混合整数計画問題に帰着できる。しかし、1 番目の目的関数がミニマックス型、似た仕様のノート PC が多く問題の対称性が高いなど、ソルバーが苦手とする特徴が多いため、計算時間が長大になってしまう。そこで最適化アルゴリズムでは、局所探索法 [16] により効率的に近似解を求める。アルゴリズムの概要を以下に示す。詳細は文献 [9] を参照のこと。

1. バッテリーを充放電しない場合の充放電スケジュールを初期解とし、目的関数の値を計算する。
2. 現在の充放電スケジュールの近傍から充放電スケジュールを選択し、目的関数の値を計算する。近傍は、ある時刻にあるノート PC の電源駆動状態を変更したものとした。これにより、充放電スケジュールとその目的関数の値が、最初は大きく、徐々に細かく変化するため、近似解を効率的に探索できる。またこのとき、バッテリー残量が制約条件を満たさないノート PC を AC 駆動させ、目的関数の値を必ず計算可能にした。
3. 2. で計算した目的関数の値が、現在の充放電スケジュールに対する目的関数の値より良い（ピーク電力が小さいなど）場合、2. で選択した充放電スケジュールを現在の充放電スケジュールとする。なお本アルゴリズムでは目的関数に優先度をつけ、上位の目的関数の値が同じ場合に、下位の目的関数の値を比較する。
4. 一定の実行時間が経過するか解が変化しなくなるまで、2. 以下の手順を繰り返す。

最適化アルゴリズムにより、ピーク電力を削減しつつも、ユーザの使い勝手を損なわない制御が実現できる。特に、最小バッテリー残量をユーザの使い方に応じて設定することで、出先などでの利用が多いユーザのノート PC のバッテリー残量を多く残し、必要なときのバッテリー切れを防ぐ。

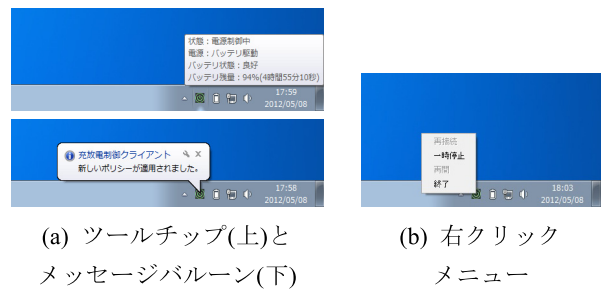


図 7 ユーザへの状況表示と制御
Fig. 7 Status monitor and control menu.

3. システムの実装と評価

2 章で述べた充放電統合制御システムを実装し、ノート PC バッテリーの充放電制御によるピーク電力削減効果を評価した。以下では、まずシステムの実装について説明し、次にシミュレーションおよび実証実験の結果を述べる。

3.1 充放電統合制御システムの実装

充放電制御クライアントは、Windows 上で動作する Java アプリケーションとして実装した。また、図 1 のピークシフト設定ユーティリティ、および富士通 (株) 製 PC のハードウェア拡張機能をサポートする富士通拡張機能ユーティリティを制御する充放電制御アダプタを実装した。ユーザの負担を軽減するため、充放電制御クライアントはログイン時に起動し、タスクトレイに常駐する。ユーザにはツールチップとメッセージバルーンで、現在の状況とその変化を表示 (図 7(a)) するとともに、右クリックメニューから一時停止、再開、終了を可能にした (図 7(b))。

一方統合制御サービスは、Java サーブレットとして実装し、Tomcat 6.0 上で実行した。オフィスの使用電力は分電盤電力データを ftp サーバから取得する。需要予測アルゴリズム、最適化アルゴリズムはプラグインとして実装した。

3.2 シミュレーション実験

シミュレーション実験では、ピーク電力の理想的な削減効果を評価するため、需要予測アルゴリズムは利用せず、筆者らの部署 (約 40 名) の分電盤電力データ (2011 年 8 月の平日 5 日間) を予測した電力需要として利用した。未制御時においては、ユーザは出先などでは利用せず、全ノート PC がつねに AC 駆動すると想定した。また、充放電スケジュールに基づいたバッテリーの充放電によるノート PC の消費電力の変化分から、制御後の電力需要を計算した。

また、図 8 に示す仕様のノート PC (Fujitsu LIFEBOOK A561/C) が N 台あると想定した。なお各電源駆動状態の消費電力はスマートコンセント [1] を用いて測定し、バッテリー残量の変化曲線は、ノート PC をバッテリー駆動、充電した際の残量を定期的に測定して生成した。さらに、セキュ

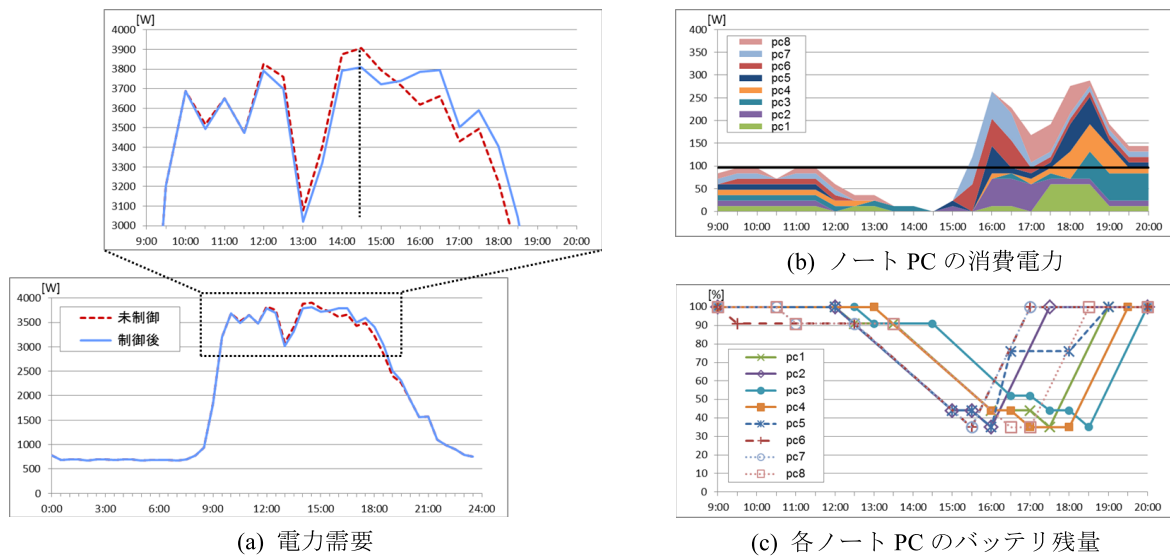


図 9 ピーク電力の削減効果

Fig. 9 Effectiveness of peak power demand reduction.

項目		値
消費電力	AC 駆動 [W]	12
	AC 駆動+充電 [W]	60
	バッテリー駆動 [W]	0
バッテリー容量 [Wh]		63
最大バッテリー残量 [%]		100
最小バッテリー残量 [%]		20
充電開始残量 [%]		89

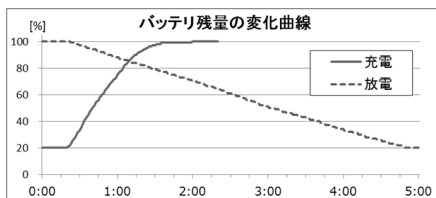


図 8 PC 仕様

Fig. 8 Specifications of a notebook PC.

リティの観点でユーザの帰宅時にノート PC を鍵付きロッカーなどに収納するオフィスを想定し、ノート PC バッテリーの充放電を制御する時間帯は 9:00 から 20:00 までとした。その他、最適化アルゴリズムの実行時間は 1 分とした。

3.2.1 評価結果

まず、制御可能なノート PC 数 N を 8 に固定した実験を行った。図 9(a) は電力需要、図 9(b) はノート PC の消費電力、図 9(c) は各ノート PC のバッテリー残量を示す。なお 5 日間の電力需要は異なっていたが、結果には同じ傾向が見られたため、1 日分の結果のみを示す。

図 9(a) より、ピーク電力は 3,906 W から 3,810 W に 96 W (約 2.5%) 減少している。ピーク時刻は 14:30 で、このとき全ノート PC をバッテリー駆動させてノート PC による消費電力を 0 W に抑え (図 9(b), (c)), ピーク電力を

削減している。また、2 番目に電力需要が多い 12:00 においても、この時刻が新たなピークにならないよう、一部のノート PC をバッテリー駆動させている。全ノート PC のバッテリー残量はつねに最小バッテリー残量 20% を超えていた (図 9(c))。一方、バッテリー駆動により残量が減少したバッテリーを、電力需要が少なくなる 15:40 以降から制御終了時刻である 20:00 までの間に分散して充放電している。なお総使用電力は、バッテリーの充放電により電力が損失するため、48,032 Wh から 48,272 Wh に 240 Wh (約 0.5%) 増加している。

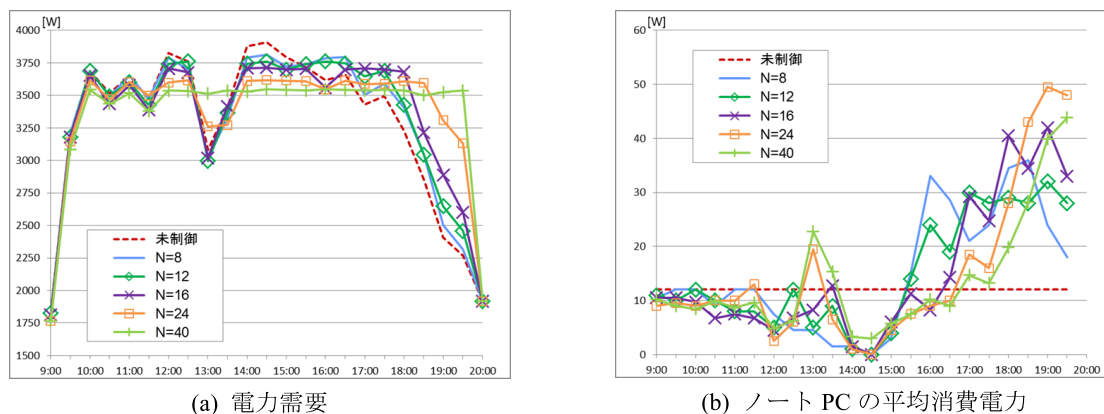
3.2.2 制御可能なノート PC 数による影響

次に、制御可能なノート PC 数 N を 8 から 40 に変化させて同様の実験を行った。図 10(a) は電力需要、図 10(b) はノート PC の平均消費電力を示す。

図 10(a) より、 N が大きくなると、バッテリー駆動により抑えられる消費電力が増加するため、ピーク電力をより削減できている。また $N = 40$ では、電力需要が少ない 13:00 頃にもバッテリーを充電し、平準化も実現している。図 10(b) より、 $N \neq 40$ ではピーク時に全ノート PC をバッテリー駆動させ、ピーク電力を最大限削減している。一方 $N = 40$ では、電力需要が平準化され、充放電する余地が残っていないため、ピーク時にバッテリー駆動していないノート PC が存在する。これは、 $N = 8, 12, 16, 24, 40$ の削減したピーク電力が、96 W, 144 W, 192 W, 288 W, 360 W と、 $N \leq 24$ で N に比例していることから分かる。

3.2.3 最適化アルゴリズムの目的関数の優先度による影響

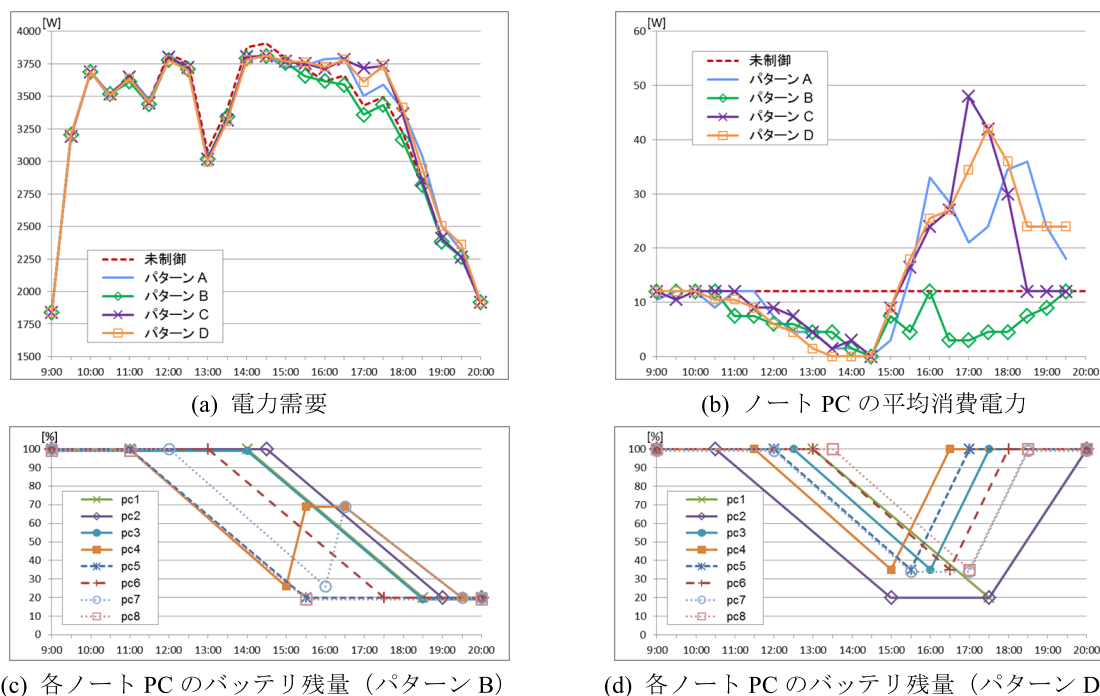
最後に、 $N=8$ として、最適化アルゴリズムの目的関数の優先度順を表 1 に示すパターンで変化させて同様の実験を行った。なお、ここまでの実験はすべてパターン A (2.4 節で述べた順) を用いている。図 11(a) は電力需要、図 11(b) はノート PC の平均消費電力を示す。また図 11(c), (d)



(a) 電力需要 (b) ノート PC の平均消費電力

図 10 制御可能なノート PC 数による影響

Fig. 10 Effects of number of controllable notebook PCs.



(a) 電力需要 (b) ノート PC の平均消費電力

(c) 各ノート PC のバッテリー残量 (パターン B) (d) 各ノート PC のバッテリー残量 (パターン D)

図 11 目的関数の優先度順による影響

Fig. 11 Effects of priority order of objective functions.

表 1 各パターンでの目的関数の優先度順

Table 1 Priority order of objective functions in each pattern.

目的関数	パターン			
	A	B	C	D
ピーク電力の最小化	1	1	1	1
終了時刻でのバッテリー残量の最大化	2	5	2	2
総使用電力の最小化	3	2	4	4
最小電力需要の最大化	4	3	3	5
電源駆動状態の切替回数の最小化	5	4	5	3

はパターン B, D における各ノート PC のバッテリー残量を示す。

図 11(a), (b) より、いずれのパターンも「ピーク電力の最小化」を最優先しているため、ピーク時に全ノート PC

をバッテリー駆動させ、ピーク電力を 96 W (約 2.5%) 削減している。またこのとき、全ノート PC のバッテリー残量は最小バッテリー残量 20% を下回らなかった (図 11(c), (d))。

パターン B では、「総使用電力の最小化」を「終了時刻でのバッテリー残量の最大化」より優先したことで、当日中にバッテリーを充電せず (図 11(c))、ノート PC の消費電力が非常に少ない (図 11(b))。実際、総使用電力は 48,032 Wh から 47,588 Wh に 444 Wh (約 0.9%) 減少している。パターン B では、翌日の開始時刻においてノート PC のバッテリー残量が少なく、ピーク電力を削減できないが、夜間に充電できる場合や、翌日の電力需要が少ないとあらかじめ分かっている場合には、有効と考えられる。

パターン C では下位 3 つのうち「最小電力需要の最大化」を優先したが、最小電力需要は他のパターンと変わら

表 2 実証実験で用いたノート PC の PC 仕様

Table 2 Specifications of notebook PCs used in field testing.

項目		pc1	pc2	pc3	pc4	pc5	pc6	pc7	pc8	pc9	pc10
機種		A561/C			A540/C	S761/C		P770/B	S8490	S560/B	
消費電力	AC 駆動 [W]	11			11	10		13	22	14	
	AC 駆動+充電 [W]	70			65	79		68	89	70	
	バッテリー駆動 [W]	0			0	0		0	0	0	
バッテリー容量 [Wh]		63			56	67		63	63	63	
最大バッテリー残量 [%]		100	100	100	80	80	100	100	100	80	80
最小バッテリー残量 [%]		20	25	23	20	40	40	40	40	40	40
充電開始残量 [%]		89	89	89	69	69	89	89	89	69	69

表 3 設定項目

Table 3 Parameter configuration.

項目	項目	値
充放電制御クライアント	バッテリー状態の取得間隔	1 分間隔
	ユーザ要求の通知間隔	10 分間隔
統合制御サービス	電力状況の開始時刻と取得間隔	8:44, 10 分間隔
	需要予測アルゴリズムの開始時刻と呼出間隔	8:45, 30 分間隔
	類似した電力履歴の抽出日数 (k)	20 日
	最適化アルゴリズムの開始時刻と呼出間隔	8:46, 30 分間隔
	充放電を制御する時間帯と時間単位	9:00~20:00, 10 分単位
	最適化アルゴリズムの実行時間	1 分

なかった。しかし 3.2.2 項では、 N が大きい場合に最小電力需要を増加させ、平準化を実現していたことから、 N が大きい環境で実験を行う必要がある。

パターン D では下位 3 つのうち「電源駆動状態の切替回数の最小化」を優先したため、各ノート PC のバッテリー残量の増減回数が他のパターンより少なかった (図 11 (d))。電源駆動状態の切替による画面輝度の変化はユーザのストレスとなる可能性があるため、実運用する場合には検討する必要がある。

3.3 実証実験

2011 年 9 月 21 日~10 月 20 日の 1 カ月間、筆者らの部署において、10 台のノート PC に充放電制御クライアントをインストールし、実証実験を行った。ただし分電盤電力データは 2011 年 6 月 23 日から取得し、過去の電力履歴として用いた。実証実験で用いたノート PC の機種 (すべて Fujitsu LIFEBOOK) とその仕様を表 2 に示す。なおシミュレーション実験とは異なり、消費電力はカタログ値を用いた。また、出先や打合せでの利用が多いユーザのノート PC (pc5~10) の最小バッテリー残量を高く設定した。その他、実証実験で用いた設定項目とその値を表 3 に示す。

3.3.1 実験結果

ある 1 日の結果を図 12 に示す。上部のグラフは電力需要で、折れ線は予測した電力需要、棒グラフは実際の使用

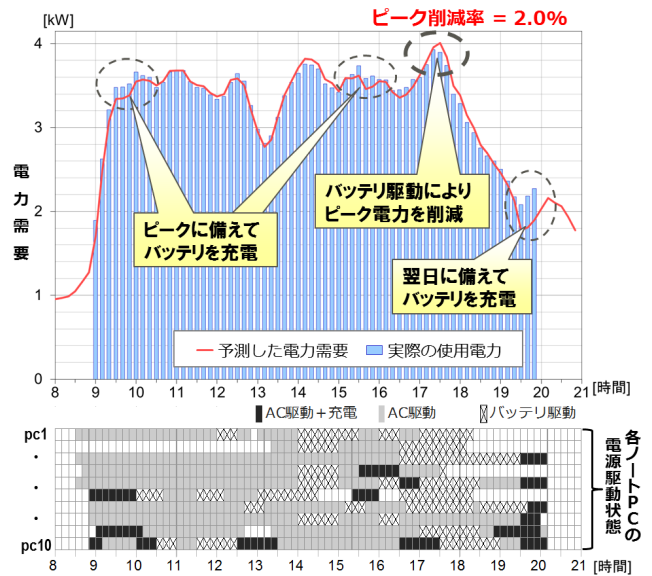


図 12 実証実験の結果

Fig. 12 Result of field testing.

電力をそれぞれ表す。また下部の表は実証実験で用いた各ノート PC の実際の電源駆動状態を示し、黒色は AC 駆動+充電、灰色は AC 駆動、白色に × 印はバッテリー駆動を表す。白色は、出先でネットワークから切断されている、ノート PC が起動していないなど、充放電制御クライアントが統合制御サービスと接続していない状態を表す。なお

統合制御サービスは、ユーザ要求を 15 分以上連続して受信できない充放電制御クライアントを上記の状態にあると判断し、制御可能なノート PC から除外するようにした。

図 12 より、ピーク電力は 4,006 W から 3,926 W に 80 W (約 2.0%) 削減していた。ピーク時刻は 17:30 で、このとき 9 台 (pc8 以外) のノート PC をバッテリー駆動させて消費電力を抑え、ピーク電力を削減していた。また、2 番目に電力需要が高い 14:10 においても、一部のノート PC をバッテリー駆動させていた。一方 18:50 以降は、翌日のピーク電力削減に備え、バッテリーを充電していた。

ここで、ピーク時に pc8 がバッテリー駆動していない原因を調べたところ、pc8 の利用ユーザが 16:00 からの打合せで pc8 をバッテリー駆動させており、この結果 pc8 のバッテリー残量が最小バッテリー残量を下回り、ピーク時にバッテリー駆動させることができなかったことが分かった。ただしこのような場合もバッテリーの充電によりピーク電力が増加しないよう、ノート PC を AC 駆動させている。またユーザの使い方に応じて最小バッテリー残量を高く設定したことで、打合せ中のバッテリー切れは起こらなかった。

また、18:50 以前にバッテリーを充電しているノート PC を調べたところ、前日の制御終了後、自宅でバッテリー駆動させて制御開始にバッテリー残量が減少していたものと、2 番目に電力需要が高い 14:10 にバッテリー駆動させて残量が減少していたものであった。つまり、ピーク時にバッテリー駆動させるため、残量が減少しているバッテリーを充電していたと考えられる。

以上の傾向は、ピーク時刻やノート PC の電源駆動状態が異なる他の実験日でもみられた。以上のことより本システムは、ピーク時に多くのノート PC をバッテリー駆動させ、ピーク電力を削減できる。

3.3.2 実験結果に対する考察

本システムでは、過去の電力履歴を用いて電力需要を予測するため、ノート PC バッテリーの充放電制御により変化した、制御後の使用電力をそのまま保存すると、この変化分を加味した誤った電力需要を予測してしまう。しかし本実験では、実験で用いたノート PC が 10 台と少なく、充放電制御による使用電力の変化分がオフィスの使用電力に対して無視できるほど小さいこと (全ノート PC をバッテリー駆動させても使用電力は 123 W (約 3.0%) しか減少しない)、および電力履歴に実験前 3 カ月分のデータを含み、類似した電力履歴として実験中の電力履歴を抽出し、誤った電力需要を予測する確率が低いことから、この影響を無視した。

ただし多くのノート PC を用いて、長期間の実験を行う場合には、制御による電力需要予測への影響を無視できなくなるため、制御後の使用電力から制御しなかった場合の電力需要を求めて電力履歴に保存する必要がある。

4. 関連研究

電力需要予測は、供給側である電力会社を中心に様々な研究が行われている。従来は、供給予備力の確保や発電機の効率運用を目的としたピーク電力の予測が重要とされ、過去の使用電力と気象情報の相関関係に基づいた予測モデルを用いて予測する研究が行われてきた [7]。一方近年では、電力需要曲線を予測する研究も行われており [6]、特に東日本大震災後は、需要家におけるピーク電力の削減或使用電力の平準化を目的とした研究も行われている [11], [12]。

たとえば文献 [6] では、供給側において、過去の使用電力と気象情報、曜日、日射量を考慮して、1 時間ごとの電力を個別の回帰モデルで予測し、予測値をつなげて電力需要曲線を予測する手法を提案している。また文献 [12] では、過去の電力需要から特徴が類似したものを複数抽出して合成するとともに、重回帰分析で推定したピーク電力により各時刻の電力を補正することで、利用可能な情報が少ない需要家においても、電力需要曲線を高精度に予測する手法を提案している。これらの研究では大規模環境を想定し、大数の法則に基づいて電力需要曲線を予測するため、本論文で想定するオフィスなどの小規模環境では、在席ユーザ数やユーザの利用機器の変化により予測結果が外れる可能性がある。一方文献 [11] では、需要家など、電力需要曲線の予測が困難な小規模環境に対して、複数の予測手法を比較評価し、また評価結果をもとに電力需要の分散や気温との相関度合に応じて予測手法を選択する基準を検討している。この研究は、単一の電力需要曲線を予測する点で本研究とは異なるものの、複数の予測手法を用いるアプローチは本研究でも有効と考えられるため、今後検討する必要がある。

蓄電池の充放電制御については、ピーク電力の削減よりも使用電力の平準化を目的とした研究が行われている [5], [10], [13]。文献 [10] では、使用電力が閾値を超えたかどうかに応じて、蓄電池の充放電を制御する平準化システム、文献 [13] では、ニューラルネットワークを用いて予測した電力需要に応じて、複数の発電機と蓄電池の運転スケジュールを計画する需給制御システムを、それぞれ提案している。一方文献 [5] では、大規模な蓄電池を用いた完全平準化を目的として、蓄電池の容量と、ピーク電力の尖度と継続時間による平準化効果への影響を検証している。これらの研究は、蓄電池を使用電力の平準化以外の用途で用いることを想定していないため、本論文で想定する環境では、蓄電池が必要なときにバッテリー切れを起こす可能性がある。

ノート PC バッテリーの充放電制御により、ピーク電力の削減或使用電力の平準化を実現する研究もいくつか行われている [8], [14]。文献 [8] では、時間設定に基づいてバッテリーを充放電することで、ピーク電力を削減する手法を提案している。また文献 [14] では、一定時間における使用電

力が閾値を超えるとノート PC をバッテリー駆動させ、超えないと判断した場合はバッテリーを充電することで、使用電力を平準化する手法が提案されている。これらの研究も、ノート PC バッテリー本来の用途を考慮していないため、出先などでのバッテリー切れを起こす可能性がある。

ノート PC バッテリーの充放電を制御することでピークシフトを実現可能なソフトウェアが、多くの PC メーカーから提供されている [2], [3], [4]。富士通 (株) のピークシフト設定ユーティリティ [2] では、図 1 の設定画面で、ピークシフトを有効にする期間、ノート PC をバッテリー駆動させる時間帯、バッテリーを充電しない時間帯を設定できる (他のソフトウェアもほぼ同様)。これらのソフトウェアは、ユーザがオフィスの電力需要を把握して、手動で設定する必要がある。日本電気 (株) のピークシフト設定ツール [3] では、電力会社が予測した電力需要に応じて自動で設定できるが、予測結果がオフィスの電力需要と異なる形状の場合、ピーク時にバッテリーを充電してピーク電力を増加させる危険性がある。

5. まとめと今後

本論文では、オフィスの電力需要に応じてノート PC バッテリーを充放電する統合制御システム (統合制御サービス、充放電制御クライアント) を開発した。統合制御サービスは、収集した情報から複数の電力需要の予測と充放電スケジュールの計画を行い、個々のクライアントにポリシーを通知する。一方充放電制御クライアントは、通知されたポリシーに従ってノート PC バッテリーの充放電を制御する。

シミュレーションおよび実証実験の結果、ピーク時に多くのノート PC をバッテリー駆動させてピーク電力を約 2.5% (実証実験では約 2.0%) 削減し、また残量が減少したバッテリーを電力需要の少ない時間帯に充電することが分かった。

今後は、様々な環境でのピーク電力削減の効果や、電力需要予測手法による予測結果の差異がピーク電力削減の効果に与える影響について検証を進める。また、ユーザの行動から制御しなかった場合のノート PC の電源駆動状態を推定し、フィードバックにより制御しなかった場合の電力需要を求める方法や、各オフィスにおけるピーク電力削減の状況を管理しながら、オフィス間でバランスを調整し、組織全体のピーク電力を削減する仕組みについても検討する。さらにオフィスと同様、分散する蓄電池の統合制御が鍵となるスマートシティへの展開に向けても検討を進めていく。

参考文献

[1] スマート電源コンセント：富士通コンポーネント株式会社、<http://www.fcl.fujitsu.com/services/smart-power-strip/>
 [2] ピークシフト設定ユーティリティ：富士通株式会社、<http://www.fmvworld.net/biz/fmv/powersaving/peakshift/>

[3] ピークシフト設定ツール：日本電気株式会社、<http://www.nec.co.jp/products/bizpc/promotion/eco/peakshift/>
 [4] 東芝ピークシフトコントロール：株式会社東芝、http://www3.toshiba.co.jp/pc/business/detail/peak_shift/
 [5] Dupont, G. and Baltus, P.: Dimensioning and Grid Integration of Mega Battery Energy Storage System for System Load Leveling, *Proc. IEEE Bucharest Power Tech Conf.*, pp.1-6 (2009).
 [6] 灰田武史：日種別・日射量を考慮した時刻別回帰型トレンド調整項付き需要モデリングによる電力ロードカーブ予測手法、電気学会論文誌 B, Vol.129, No.12, pp.1477-1485 (2009).
 [7] 長谷川淳, 田中英一：電力の翌日最大需要予測システムの研究開発動向、電気学会論文誌 B, Vol.114, No.9, pp.835-838 (1994).
 [8] Hatori, M.: Peak-Shift Method for Notebook Computers - A power management approach for load leveling, *Proc. IEEE Int'l Symposium on Electronics and the Environment*, pp.117-121 (2004).
 [9] 岩根秀直, 穴井宏和, 篠原昌子, 村上雅彦：ピーク電力削減のためのノート PC のバッテリー制御、計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.2, pp.237-245 (2013).
 [10] Jung, D.Y., Ji, Y.H., Lee, S.W., Won, C.Y., Jung, Y.C. and Seo, K.D.: Grid-Connected Peak-Load Compensation System Based on Lithium-Polymer Battery, *Proc. IEEE Int'l Telecommunications Energy Conf.*, pp.1-4 (2009).
 [11] Subbayya, S., Jetcheva, J.G. and Chen, W.-P.: Model Selection for Short-Term Microgrid-Scale Electricity Load Forecasts, *Proc. IEEE PES Conf. Innovative Smart Grid Technologies* (2013).
 [12] 高橋 悟, 山根昇平, 吉田由起子, 園田俊浩, 湯上伸弘, 竹林知善：スマートシティのエネルギー管理における需要予測技術、第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, P0009 (2012).
 [13] Tanabe, T., Ueda, Y., Suzuki, S., Ito, T., Sasaki, N., Tanaka, T., Funabashi, T. and Yokoyama, R.: Optimized Operation and Stabilization of Microgrids with Multiple Energy Resources, *Proc. Int'l Conf. Power Electronics*, pp.74-78 (2007).
 [14] 角田忠信, 大島弘敬, 山本 寛, 原 政博, 藤野信次：複数台ノート PC のバッテリー充放電制御による供給電力最適平準化、情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, pp.940-952 (2011).
 [15] Ward, J.H.: Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.58, No.301, pp.236-244 (1963).
 [16] 柳浦睦憲, 茨木俊秀：組合せ最適化—メタ戦略を中心として、朝倉書店 (2001).

推薦文

本論文は社内でも利用されているノート PC の充放電を制御することで、事務所などのピーク電力を下げることを目的としたアルゴリズムについて論じられている。非常に丁寧な評価が実用的であり、本研究会の趣旨であるコンシューマデバイスの活用方法として大変有用な論文と認められるため、推薦する。

(コンシューマ・デバイス&システム研究会主査
石川憲洋)



篠原 昌子 (正会員)

2009年大阪大学大学院情報科学研究科博士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。博士(情報科学)。現在、ユーザの状況や環境に合わせて最適なサービスを提供する技術の研究開発に従事。



村上 雅彦 (正会員)

1992年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。EMSをはじめとして、人の状況に合わせて適切なICTサービスを提供するヒューマンセントリックコンピューティングの研究開発に従事。



岩根 秀直

2002年神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。同年株式会社富士通ハイパーソフトテクノロジーに入社。2007年株式会社富士通研究所に転籍。現在、数式処理のアルゴリズムとシステムの研究開発に従事。日本数

式処理学会会員。



高橋 悟

2004年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年株式会社富士通研究所に入社。現在、エネルギー管理システムに関する研究に従事。



山根 昇平

2011年京都大学大学院情報学研究科博士課程研究指導認定退学。同年株式会社富士通研究所入社。博士(情報学)。現在、マルチエージェントシステム、社会シミュレーションの研究開発に従事。



穴井 宏和

1991年鹿児島大学大学院理学研究科博士前期課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。1999年より2000年までUniversität Passau 数学・情報学部客員研究員。現在、九州大学大学院数理学府/マス・フォア・インダストリ研究所教授(兼務)および国立情報学研究所客員教授。博士(情報理工学)。計算機代数、数値/数式最適化のアルゴリズムとその応用の研究開発に従事。日本数式処理学会、計測自動制御学会各会員。



園田 俊浩 (正会員)

1995年東京工業大学大学院知能工学科修士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。ユビキタス・コンピューティングの研究後、現在、エネルギー管理システムに関する研究に従事。



湯上 伸弘 (正会員)

1989年東京工業大学理工学研究科修士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。2000年九州大学大学院システム情報学府博士課程修了。博士(理学)。現在、機械学習や最適化等の分析技術の研究開発に従事。