

前田 龍太郎

(独)産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 研究センター長

ULP ユビキタスセンサの IT システム電力最適化制御への応用

§1. 研究実施の概要

情報機器が集積したデータセンター (DC) を主な対象とし、その省電力化を機器稼働時の“運用効率化”により実現する。具体的には、ULP ユビキタスセンサによる消費電力等の“可視化”データを活用し、仮想化技術による計算機資源の削減および空調等を含む建屋全体の効率化により大幅な省電力化を狙う。

DC 消費電力量を、機器単独からビジネス運用 DC (シンククライアント/基幹系) まで計測することで、DC での電力消費構造を、空調等を含めて明らかにした。このデータを基に、本テーマで検討する省エネ対策 (仮想化技術、モジュール構造/空調レス) の有効性と、現在から将来にわたる削減貢目標を 200 億～400 億 kWh と定めた。この削減長期目標は、シナリオ・プランニング手法を用いて「2025 年わが国の情報社会像」を描写し、現状のトレンド (機器稼働台数、消費電力等) と整合する形で求めたものである。仮想化技術では、ライブマイグレーションの方法を大きく改善し、負荷増加の予測なしに短時間で仮想サーバの移動が可能な方法や、ディスク情報を含めた移動によりデータセンター全体の移動を可能とするシステムを開発し、数台の小規模なシステムを用いて、省エネ効果が得られることを確認した。また、DC 電力消費の約半分を占める空調の消費電力削減を目的に、レイアウトの最適配置方法の検討を行い、サーバの暖気と冷気側の隔離により最大空調の 20% 程度の削減があることを明らかにした。また、将来の空調レス・データセンターの要素技術として、建て屋壁面からの熱通過や自然換気による冷却の可能性を検討した。これらの革新的な省エネ対策の導入においては、“ディペンダビリティ”の担保が鍵となる。対策導入による“故障率”への影響を明らかにするため、大規模計算システムを用いた実験を行った。

ULP ユビキタスセンサについては、プロトタイプ無線電力センサ端末を数百台規模で開発し、社会実証実験を行った。国内最大のコンビニエンスストアでの実験では、最初の 2 店舗実験 (5 月実施) において、消費電力削減だけでなく売り上げ増加につながる可能性が高く評価された。現在 11 店舗での実験を実施しており、今後段階的に数を拡大していくことが期待される。また、平均消費電力 $1 \mu W$ レベルの無線センサ端末の完成形に向け、センサ端末を構成する基幹要素部品である超小型コイルの電磁界シミュレーションを用いた最適化設計を行うとともに、専用のコイル製造装置を構築した。

§ 2. 研究実施体制

(1)「ユビキタスセンサ」グループ

① 研究分担グループ長:前田 龍太郎(産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター・研究センター長)

② 研究項目

IT 機器の消費電力を無給電 (バッテリーレス)・非接触で測定する平均消費電力 $1 \mu\text{W}$ レベルの無線センサ端末およびネットワークシステムを開発するため、以下の研究項目を実施する。

- ・高効率超小型コイル開発
- ・超低消費電力専用回路開発
- ・超低消費電力無線センサ端末の開発
- ・ネットワーク測定システムの開発
- ・情報システムの将来予測モデルの開発

(2)「グリッド」グループ

① 研究分担グループ長:伊藤 智(産業技術総合研究所 情報技術研究部門・副研究部門長)

② 研究項目

地理的に分散された複数の DC を仮想的に統合し、DC 間で資源を共有することにより、設備の過剰投資抑制および資源の利用効率向上を実現しつつ、電力消費量を最適化可能な “グリッドデータセンター” の運用管理システムの研究開発を行う。

(3)「エコデザイン」グループ

① 研究分担グループ長:藤本 淳(東京大学 先端科学技術研究センター・特任教授)

② 研究項目

情報機器の消費電力の実測値を活用し、わが国の情報システムの総消費電力量を試算することで、情報システムの省エネ施策立案に資する。わが国の民生部門からの二酸化炭素排出量削減 (電力由来) を目的に、ユビキタスセンサを用いた電子・電気製品の消費電力の “可視化” の社会実証試験を実施する。

(4)「システム実験」グループ

① 研究分担グループ長:田村 徹也(日本電気株式会社 IT プラットフォームソリューション事業部・シニアマネージャー)

② 研究項目

- ・省エネを実現するモジュラー型データセンターのコンセプト立案
- ・データセンターの消費電力実態調査、消費電力モニタリング
- ・ユビキタスセンサを利用したデータセンターの省エネ施策の開発と実証実験

§3. 研究実施内容

<ULP ユビキタスセンサの開発>

平成21年度開発した高効率超小型コイル作製専用パターンニング装置を用い、高透磁率のパーマロイ芯材をエポキシ樹脂で被覆した表面に、銅メッキ微小コイル構造作製プロセスを開発し、コイル線幅約30 μm 、コイル高さ5 μm 、ピッチ40 μm 、内径約630 μm 、コイル長さ8mm、両端電極部2mm、コイル巻き数200の銅メッキ微小コイルを作製することができた。

また、平成21年度の電磁界シミュレーションを用いた高効率超小型コイルの設計結果に基づいて、電流検出部のプロトタイプ的设计、試作および誘導電圧の測定を行った。試作したデバイスでは、コイルの保持、検出感度、検出部の強度、使用便利性・安全性などを考慮した結果、検出部はコンセントの端部に入れ、コイルはその保持のため検出部の中央にコイルを位置させることにした。誘導電圧測定によって試作デバイスを評価した結果、誘導電圧は消費電力測定に利用できるレベルであり、開発した銅メッキ微小コイルを検出部に利用することで、高精度の測定が可能であることがわかった。

さらに、小型クランプ型コイルを用いたプロトタイプ無線電流センサ端末の改良を行って、10 秒に1回の測定・データ送信で平均消費電力 10 μW が可能な端末を実現するとともに、携帯情報端末からもアクセス可能なネットワーク測定システムの試作を行った。

<消費電力を削減するグリッドデータセンター管理システムの研究>

計画当初は、グリッドデータセンター運用システムの研究開発は4年度目からを予定していたが、開発を加速するべく、3年度目から開始した。その結果、仮想マシンが必要とする CPU リソース量の情報に基づいて、可能な限り少ない物理サーバ上に集約し、不要な物理サーバの電源を落とすことを、一つのサイト内で可能とした。サーバの電源を落とすにあたっては、ACPI の S3 スリープモードを使うことにより、シャットダウンおよび起動を数秒で実施し、より柔軟な電力量管理が行えるようになった。2)-7)

グリッドデータセンターの省エネ運用シナリオでは、稼働していないマシンをなるべく多くし、電源を落とすことで消費電力の削減を図ろうとしている。一方で、停電後の復旧時にマシンが良く故障する、という通説があり、電源を落とすことは提供者として損失につながるため、積極的に電源を落とす操作はするべきではない、との考えもある。そこで、破棄することが予定されているマシンを使用して、高負荷を与えた場合のマシンの故障率を評価する実験を実施した。2004 年度に導入した AIST スーパークラスタの一部を活用し、電源に電流センサを、ラックのフロントとリアに温度センサを設置した。電源 ON/OFF を繰り返す回数が多いと、故障を起こす確率が増えることを示すデータが得られたが、ON/OFF の回数を管理することにより、故障発生の確率の増加を抑制することが可能であるとの見通しを得た。

<ULP 情報システムのデザイン>

試作無線センサを用いた社会実証実験を、民生部門(家庭、業務)を中心に開始した。

ユビキタスセンサグループが試作した小型無線電流センサを用いた消費電力“可視化”の実験を、社会の幅広いフィールドで実施した。平成 22 年度では、オフィス、データセンター、コンビニエンスストア、サービスステーション、個人商店、飲食業結果で 29 フィールド、および家庭 50 世帯でモニタリング実験を実施した。データ取得量は 33,000 センサ・日で、これは仮に平均 10 日間の測定だとすると、3,300 のブレーカーで測定したことに相当する。これらの実験を通じて、本モニタリングシステムは、社会の幅広い領域、特に民生部門での電力モニタリングに適していることが明らかとなった。これはセンサが小型であるため、小さな分電盤や、ブレーカーの線間スペースが狭いといった、社会で実際に使われている多様な分電盤内ブレーカーに設置が容易であり、さらに無線通信方式で受信も AC 供給が不要なバッテリー駆動の受信器を選択できるため分電盤の周辺環境に左右されることが少なく測定システムを構築できる、という特性による。この内、コンビニエンスストアでは、春季に都内の 2 店舗で予備実験を行い、モニタリング手法を確定した後、7 月より都内 11 店舗で実験を継続中である。この実験を通じて、約 10%の省エネが可能であることが確認されている。今後、100 店舗規模の実験を行う予定である。また、本研究チームのこれまでの成果を、書籍にまとめた。これは、“ULP 情報システムのデザイン”の第一ステップである。

<DC 電力モニタリングおよび省エネ施策実証実験>

データセンターにおける電力消費の特徴をつかむため、昨年度から継続してデータセンターの IT 機器や空調機の電力、温度のモニタリングを実施した。夏季の外気温度が高い期間に空調機の電力消費が大きくなることを確認した。

データセンター単位での省エネのためには負荷が小さいサーバをシャットダウンすることが効果的であるが、電源を落とすことでサーバの物理的な故障が増加するリスクがあると言われている。そこで、グリッドグループと連携し、サーバの電源の ON/OFF の繰り返しによる故障発生を実験した。サーバのシステムと電源の ON/OFF を周期的に繰り返すことで、OS が起動しないなどのシステムエラーが生じたり、CPU や電源などのコンポーネントに物理的な障害が発生したりすることが確認された。物理的な障害を抑えるように OFF にするサーバを集中しない、サーバに内蔵されたセンサ以外のセンサ情報を利用することなどにより、よりディペンダビリティの高い運用方法を継続して検討する。

これまでのモニタリングの結果などから、データセンター内の情報システムの運用方法の改善による省エネに加え、空調などのファシリティの省エネが有効であることがわかっている。空調機に依存しない排熱を実現するため、数値シミュレーションにより換気や放熱に適した DC モジュールの検討を進めるとともに、実物大の DC モジュールを用いた実験を企画し、実験条件の検討、実験設備の準備を行った。

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Dongkeon Lee, Harutaka Mekaru, Hiroshi Hiroshima, Sohei Matsumoto, Toshiro Itoh, Masaharu Takahashi, Ryutaro Maeda, 3D UV-microreplication using cylindrical PDMS mold, *Microsystem Technology*, 16, pp.1399-1411, 2010.
2. Takahiro Hirofuchi, Hidemoto Nakada, Satoshi Itoh and Satoshi Sekiguchi, Enabling Instantaneous Relocation of Virtual Machines with a Lightweight VMM Extension, *The 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid2010)*, pp. 73--83, IEEE Computer Society, May 2010.
3. 広渕崇宏, 中田秀基, 伊藤智, 関口智嗣, 既存 VMM への適用が容易でゲスト透過なポストコピー型仮想マシン再配置機構, *情報処理学会論文誌コンピューティングシステム*, pp. 248—262, 情報処理学会, Aug. 2010.
4. 広渕崇宏, 中田秀基, 伊藤智, 関口智嗣, 高速マイグレーションを利用した仮想マシン配置最適化システムの検討, *情報処理学会研究報告(2010-OS-115)*, pp. 1--13, 情報処理学会, Aug. 2010.
5. 中田秀基, 竹房あつ子, 広渕崇宏, 伊藤智, 関口智嗣, 仮想計算機パッキングへの最適化手法の適用, *電子情報通信学会技術研究報告コンピュータシステム(SWoPP2010)*, pp. 55--60, 電子情報通信学会, Aug 2010
6. Takahiro Hirofuchi, Hidemoto Nakada, Hirotaka Ogawa, Satoshi Itoh, Satoshi Sekiguchi, Eliminating Datacenter Idle Power with Dynamic and Intelligent VM Relocation, *Distributed Computing and Artificial Intelligence (7th International Symposium)*, pp. 645--648, Springer, Sep 2010
7. 広渕崇宏, 横井威, 江原忠士, 谷村勇輔, 小川宏高, 中田秀基, 工藤知宏, 田中良夫, 伊藤智, 関口智嗣, 複数拠点にまたがる e-Science アプリケーション環境構築を目的としたソフトウェア導入・管理機構, *電子情報通信学会和文論文誌*, pp. 2197--2208, Vol.J93-D, No.10, 電子情報通信学会, Oct 2010
8. Y. Zhang, D. K. Lee, H. Hiroshima, T. Itoh and R. Maeda, Soft Photolithography-based Fabrication Process of On-Chip Solenoid-type Micro Inductor for Micro Energy Application, *Power MEMS 2010, Technical Digest, The 10th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications*, pp.179-182, Leuven,Belgium, Nov. 30-Dec. 3, 2010.
9. Jun Fujimoto and Tomonori Hata, POWER CONSUMPTION MONITORING USING WIRELESS SENSOR NODES IN RESIDENTIAL, COMMERCIAL, AND BUSINESS AREAS FOR ACHIEVING LOW CARBON SOCIETY, *Care Innovation 2010*, 3.8.2,Vienna Austria

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 0 件)