

前田 龍太郎

(独) 産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門・上席研究員

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

本研究は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。本年度は以下の研究を実施した。

i) ULP ユビキタスセンサの開発に関しては、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製造プロセスおよびプロセス装置の開発を行うとともに、プロトタイプ無線電力センサ端末を試作して、その性能検証を行った。

ii) グリッドデータセンター運用管理システムについては、最終的なシステムの統合・運用に先立ち、各要素モジュールである運用決定モジュール、仮想クラスタ構築システムおよび仮想計算機システムの研究開発を行った。これら三つのモジュールのプロトタイプ実装を行うとともに、それらを用いた予備評価を実施して本システムの設計および実装に必要な知見を得た。

iii) ULP 情報システムのデザインでは、本研究課題が対象とする現状の消費電力量は 200～300 億 KWh であり、“運用の効率化”による電力削減ポテンシャルは、十億 KWh のオーダーであることを明らかにした。また電力消費量の今後の増加を推測するため、情報社会の将来像を定性的に描写した。

iv) システム実験グループでは、モジュラー型省エネ DC の実現を目指し、空調エネルギーの削減の観点から、センサ情報によるラック周辺のエアフローの動的制御手法と、空調機によらない排熱可能性について検討を進めた。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

<ULP ユビキタスセンサの開発>

ULP ユビキタスセンサ端末を構成する基幹要素部品である高効率超小型コイルに関し、その製造プロセスの詳細設計およびコイル試作を行った。具体的には、極微細円筒型基材表面パターンニングプロセスおよび専用装置の開発を行った。本プロセスは、主に平面上へ

の微細パターン転写に用いる PDMS モールドを微細円筒表面上への転写に活用した新たな 3 次元転写手法であり、このプロセスにより図 1 に示すような Ni 製マイクロコイルを試作した⁵⁾。

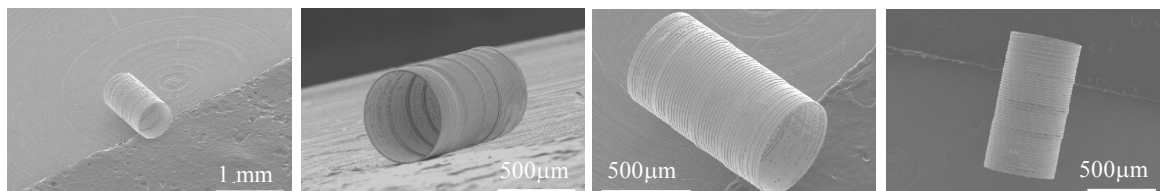


図.1 作製したマイクロコイルの SEM 観察像

また、スパイラル型コイルの作製プロセスおよび付加回路に関して検討した。このコイルは、基板ないしシートにスパイラル型コイル要素を形成したものを 1 対用意し、最内周の端部同士のみを電氣的に接続するように張り合わせコイルユニットを作製したもので、必要に応じ、コイルユニットは適宜スタックすることとした。また、コイル出力電圧を増大させるための共振を利用した付加回路の検討を行った。

また、ULP ユビキタスセンサ端末の詳細設計を行うため、小型クランプ型コイルを用いたプロトタイプ電力測定無線センサ端末を試作した。これは周囲温度の測定も可能であり、データセンターやオフィス・家庭において空調制御と組み合わせた電力制御への応用できる。試作した無線センサ端末を用いて、家庭の PC、通信機器を含めた家庭内の電力消費量の計測を試験的に行い、通信距離や適度な信号送信頻度の検証等、今後エコデザイングループと実施する計画の社会実証試験に向けたセンサ端末の仕様設計を行った。

<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>

昨年度実施した設計書に基づき、各要素モジュール・システムのプロトタイプ実装を行うとともに、それらを用いた予備評価を実施して本システムの設計および実装に必要な知見を得た。今年度開発したモジュールは、運用決定モジュール、仮想クラスタ構築システム、および仮想クラスタシステムの三つである。仮想クラスタ構築システムは、サンディエゴスーパーコンピュータセンターで開発されているクラスタ構築システム Rocks と仮想計算機ソフトウェアである VMWare および Xen を用いて複数サイトに跨った仮想クラスタシステムを構築するためのソフトウェアを実装した¹⁻⁴⁾。仮想クラスタシステムは、データセンターに跨った環境で稼働中のジョブを移動可能とするため、ストレージライブマイグレーションの機能を実装した(図 2)。メモリイメージのコピー完了後に移動先にてジョブを引き継いで実行し、移動元のディスクイメージを移動先から逐次読み込みつつ移動先のローカルなディスクに書き込み、最終的に移動先に処理を完全に移行できる仕組みを実現した。

運用決定モジュールは、複数の仮想クラスタの CPU 利用効率を最大化するサーバ割り当てを GA(遺伝的アルゴリズム)により実装した。仮想クラスタが必要とする CPU のキャパシティをユーザが指定し、その範囲で資源を共有するようにマイグレーションを行い、稼働する物理サーバ数を少なくするように運用方法を決定する手段を実現した。

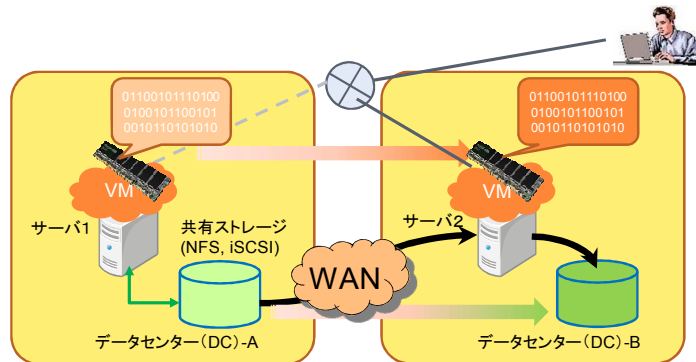


図2 仮想計算機システムにおけるストレージライブマイグレーション

<ULP 情報システムのデザイン>

わが国の情報システム総消費電力量の推定を、PC・サーバの稼働時の消費電力量の計測、および既存のDCの消費電力量調査データをもとに実施した。現状（2007年）の情報システム消費電力量は約420億KWhで、2007年度わが国の電力需要（約9000億KWh）の4~5%の割合であることを明らかにした。このうち、DC（商用および企業内でのマシン室）は約60%、PC（家庭および企業）は約10%を占める。まだPCおよびサーバで動作モードを変えた消費電力測定より、アイドル状態の消費電力は、スタンバイや休止状態に比較して電力消費が大きく、またCPUの高負荷状態との差が小さいこと（10~30%増）が明らかとなった。これにより、電源管理技術や仮想化技術の適用により、運用段階での無駄を排除することが可能となり（アイドル時間の短縮）、数十%の消費電力削減の可能性を有する。さらに、将来の情報システム総消費電力量を推計するため、シナリオ・プランニング手法を用いて、4つの情報社会像を定性的に描写した。4つの社会像で共通した省電力化のための要素は、“平準化（情報トラフィック、電力需要、DC内温度分布）”であり、機器としてはディスプレイ、サーバ、ネットワーク機器の対策が重要であるとの共通認識を得た。現在、4つの社会像のイメージをより具体化するとともに、これら社会像を特徴づける一要素である“クラウド化の進展”について消費電力量の分析を実施している。

<DC電力モニタリングおよび省エネ施策実証実験>

1. ユビキタスセンサを利用したDCの消費電力削減技術の開発（既存DCの省エネ対策）

DCの省エネルギー化を実現するため、(a)ラック周辺の熱だまりをセンサにより検知してエアフローの制御により解消する、(b)サーバに集中する負荷を分散させて熱だまりの発生を抑制する、などによるDCの空調エネルギーの削減を検討する。効果的なエアフロー制御を検討するため、発熱体とファンを内蔵した情報機器ラックのスケールモデルを製作した。

2. パッシブクーリングによる空調エネルギーの大幅削減の検討（新DCの設計）

新規DCの消費電力の大幅削減のため、自然排熱（パッシブクーリング）と、その排熱を有効に活用するモジュラー型DCを構想している。DCの熱バランスを検証するため、実験用のミニDCにおいて、ラックに搭載したIT機器（サーバ10台、ストレージ1台）からの発熱によるDC内の温度上昇を検討した。総発熱量、外気温度、部屋の境界の熱通過、機器の動作温度などの条件を満たせば、空調機を用いないDCも実現可能であることを明らかにした。さらに、数値

シミュレーションにより多様な条件で熱バランスの検討を進めるため、DC 内外の熱の流出入についてのモデル化を検討し、境界面の熱伝導のモデル化の課題と指針を得た。

3. DC における消費電力の実態把握

昨年度実施した DC の消費電力に関する調査をふまえ、DC ごとの電力計測の違いも把握できるよう、継続調査を行い、稼働中の DC の PUE および空調方式に関する現状を把握した。また実稼働中の DC において、機器の稼働状況と消費電力や温度の変動関係を把握するため、ラックごとの消費電力とラック周辺の温度のモニタリングを 12 月中旬より開始し、変動のパターン、変動幅をつかむことができた。また、1U および 2U のラックサーバの消費電力を測定し、メモリや HDD の搭載量、CPU の稼働率とサーバの消費電力の関係を検討した。



図 3：ミニ DC の様子と温度センサの配置

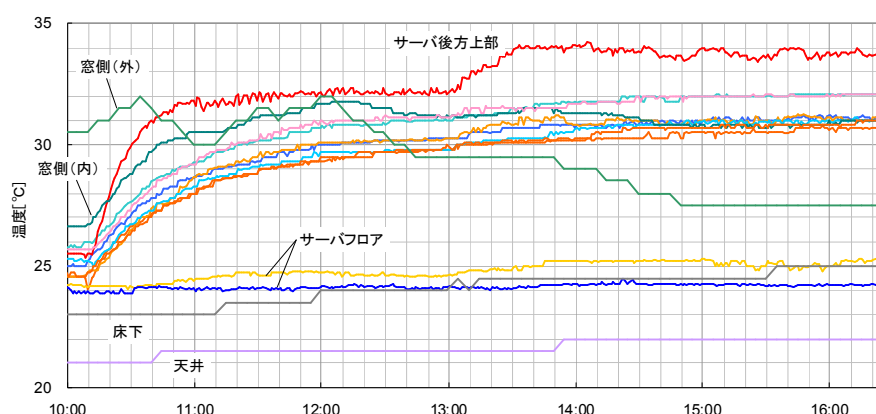


図 4：空調を停止した状態でサーバを稼働させた場合の温度の変動

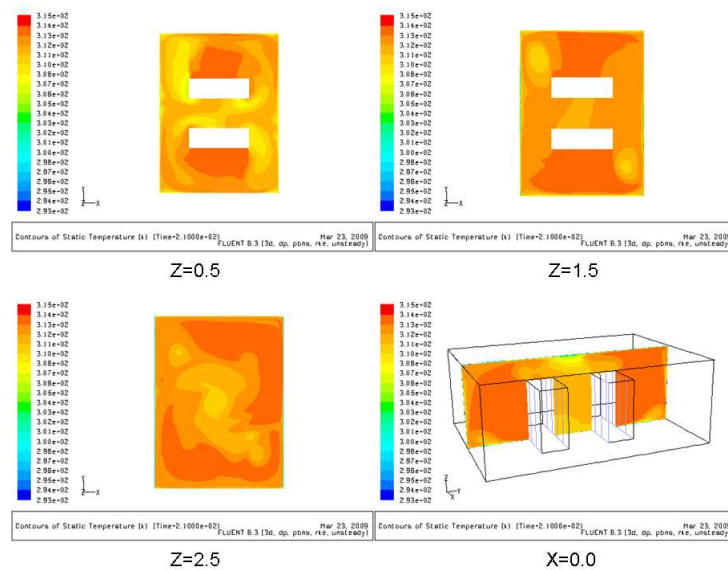


図 5：数値シミュレーション実施例（ラック列からの排熱による温度上昇）

3. 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((独)産業技術総合研究所 上席研究員)

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((独)産業技術総合研究所 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 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 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

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表（原著論文）

1. 広瀬崇宏, 横井威, 江原忠士, 谷村勇輔, 小川宏高, 中田秀基, 田中良夫, 関口智嗣, 複数サイトにまたがる仮想クラスタの構築手法, 第6回先進的計算基盤システムシンポジウム(SACSIS2008), 情報処理学会, pp.333-340, Jun 2008
2. Takahiro Hirofuchi, Takeshi Yokoi, Tadashi Ebara, Yusuke Tanimura, Hirotaka Ogawa, Hidemoto Nakada, Yoshio Tanaka, and Satoshi Sekiguchi, A Multi-Site Virtual Cluster System for Wide Area Networks, In Proceedings of the First USENIX Workshop in Large-Scale Computing, Jun 2008
3. 中田秀基, 横井威, 江原忠士, 谷村勇輔, 小川宏高, 関口智嗣, 仮想クラスタ管理システムの設計と実装, 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム(ACS19), 情報処理学会, pp.13-24, Aug 2008
4. Takahiro Hirofuchi, Takeshi Yokoi, Tadashi Ebara, Yusuke Tanimura, Hirotaka Ogawa, Hidemoto Nakada, Multi-Site Virtual Cluster: A User-Oriented, Distributed Deployment and Management Mechanism for Grid Computing Environments, In Middleware Technologies for Enabling Next-generation Network Services and Applications (Proceedings of the Fourth IEEE/IFIP International Workshop on End-to-end Virtualization and Grid Management), pp.203-216, Sep. 2008
5. Dongkeon Lee, Harutaka Mekaru, Hiroshi Hiroshima, Sohei Matsumoto, Toshihiro Itoh, Masaharu Takahashi, Ryutaro Maeda “3D replication using PDMS mold for microcoil”, Microelectronic Engineering, (Accepted 11 November 2008, *In Press*)

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)