

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. 研究実施体制

### (1)「ユビキタスセンサ」グループ

① 研究代表者: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)

#### 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

また、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。

### (2)「グリッド」グループ

① 主たる共同研究者:伊藤 智((独)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)「システム実験」グループ

①主たる共同研究者: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

## § 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

### <ULP ユビキタスセンサの開発>

昨年度開発したコイル作製手法では、径  $630\mu\text{m}$  のパーマロイを芯材として用いていたが、この芯材は曲がりやすいため、歩留まりが悪く、またコイルの実装時に破損しやすいという問題が生じていた。この問題を解決するため、本年度は外径  $1\text{mm}$ 、内径  $600\mu\text{m}$  のガラスチューブを芯材として用いて銅メッキコイルのパターニングを行い、作製後にパーマロイの線材をガラスチューブに通す手法の開発を行った。更に銅メッキコイルの作製可能な線幅を昨年度から  $10\mu\text{m}$  低減し、 $20\mu\text{m}$  の線幅のパターニングを可能とするよう装置を改善した。これによりコイルの巻数を増加できるため電流検出感度の増加が可能となる[1]。

一方、無線電流センサ端末の開発では、端末をバッテリーレスとするため、コンセントに端末の電極を接触させ、直列抵抗分割回路を用いて端末の駆動電力を取得する回路の開発を行った。端末の送信時の電力は少なくとも  $15\text{mW}$  以上となるが、送信は  $300\mu\text{s}$  程度であるため、コンデンサによりこの電力を供給することが可能である。そこで、送信動作以外の時間に充電するよう電源回路を設計し、電源回路の消費電力を低減した。高抵抗を用いた直列抵抗分割回路により、電源回路の電力消費を  $10\text{mW}$ 、端末への供給電力を  $10\mu\text{W}$ 、送信電力供給用コンデンサを  $40\mu\text{F}$  としてプロトタイプ電源供給回路の設計を行った。

### <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>

運用管理システムの開発において、物理マシンへの仮想マシン設定方法に関するアルゴリズムの効率化を行った[5,6,7,10]。各物理マシンの消費電力を、アイドル時の固定的な消費電力量と CPU 使用量に比例する部分の和としてモデル化した上で、システムの総消費電力量を最小化するため整数計画法とヒューリスティックなグリーディアルゴリズムの二通りで実装した。グリーディアルゴリズムにより、現実的なスケジューリング時間で消費電力削減効果の高いパッキングが可能であることを示した。また、広域データセンター間で仮想マシンのマイグレーションを行う場合に、仮想マシンの OS が IP アドレスを維持したまま透過的に通信を継続可能とする Mobile IP v6 トンネ

リング機構を検討し、プロトタイプ実装を行った。提案機構は正しく動作し、トンネリングオーバーヘッドが僅かであることを確認した[8]。さらに、以前 VM を動かしていたことのあるマシンに、再度マイグレーションを行う場合、メモリ内容が残っていた場合にそれを再利用することにより、マイグレーション時間を短縮することが可能であることを示した[9]。

グリッドデータセンター運用システムを構築するために必要なソフトウェアのパッケージ化を行った。また、それらのソフトウェアを用いて、産総研内で実証評価するためのシステム構築を行った。

データセンターで運用するサーバの故障確率を考慮した電源 ON/OFF 管理の方式を検討した。サーバを構成するコンポーネントの故障を定式化した上で、導入後の運用実績を加味し、現時点のサーバの故障確率を推定する。その情報に基づいて、電源 ON/OFF を行う候補サーバを選定することにより、省エネ運用時に電源 ON/OFF によって故障する確率を通常運用時の故障確率より低く抑えることが可能となる。

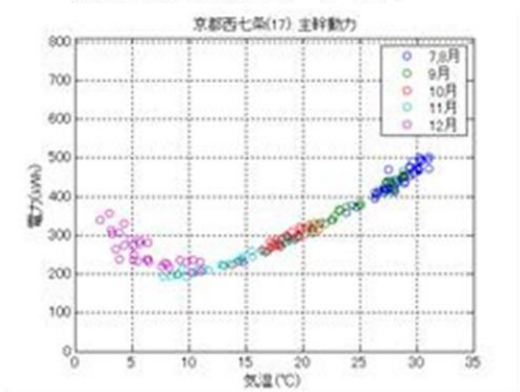
#### <ULP 情報システムのデザイン>

ユビキタスセンサグループで試作した無線端末を用いた社会実証実験を、昨年度に続き、民生部門(家庭、業務)を中心に展開した[2, 3, 4]。

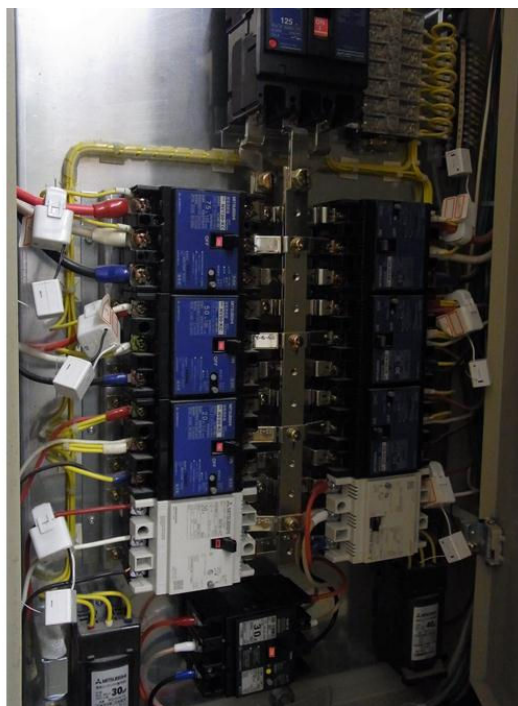
震災後の節電対策への貢献として、東京西部にある銀行の電力モニタリングを行い、夏季の節電目標 19%を達成するための対策立案に貢献した(8月3日朝日新聞多摩版)。また、コンビニエンスストア(CVS)の電力モニタリングでは、昨年度の西東京 10 店舗のモニタリングに加え、京都 50 店舗のモニタリング(無線端末 500 個、受信機 100 個)を 7 月より開始した(図1)。この実験に



京都50店舗用センサセット



主幹動力の消費電流と気温との関係(例)



分電盤への実装

図1 京都 50 店舗実験

においては、LANを介して店舗システム(ストアコンピュータ)等と接続し、telnetの通信プロトコルでデータの受け渡しが可能である受信機を開発した。昨年からの実験(60店舗、600端末)により、バッテリーの持続性、無線通信の安定性、および設置容易性など、本プロジェクトで試作した無線端末システムの実用性を確認できた。今後、このシステムの実用化を、NEDOプロジェクト(グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発)で検討する予定である。

CVSへの無線端末システムの実装により、約10%の省エネを達成したが、さらに大きな削減を狙うには、「条件群の個別性」、すなわち地域/建物/設備/店員オペレーション違いを考慮した分析が必要となる。現在、個店毎の省エネ対策を立案するための分析システム(電力プロファイリングシステム)の概念設計を、60店舗600機器のデータ分析をベースに実施している。

さらに、システムグループが実施している「自然冷却」を活用したデータセンター電力消費削減のために必要となる温湿度をモニタリングできる環境センサを、遠距離通信が可能な950MHz帯で試作した。

#### <DC電力モニタリングおよび省エネ施策実証実験>

データセンターの省エネでは、機器の省エネやシステムの運用方式の改善に加え、データセンターの消費電力の大きな部分を占める空調などのファシリティに対する省エネ対策の効果が大きいことがわかっている。システム実験グループでは、モジュール型DCにおいて空調機に依存しない排熱による大幅な省エネを実現するため、空調機によらない換気の可能性を数値シミュレーションおよび実スケールの設備を用いた実験により検証した。

実スケールの実験では、外気温度を再現できる実験装置を構築し、モジュール内部にサーバの発熱・風量をシミュレーションできる模擬負荷を設置し、温度分布の計測、エアフローの可視化ができる中で、外気温度やエアフローの誘導方法などの条件を変化させて実験をおこなった。実験結果および実験結果を反映したモデルを用いた数値シミュレーションにより、理想的なモジュールのサイズや内部エアフローの誘導方法を確認することができた。また、IT機器の動作保証条件を考慮するとフィルタの設置は必須となるが、フィルタの通気抵抗による換気量の損失は大きく、換気のみでの運用は難しくなるため、換気量を増やすための改善策を検討した。

換気による排熱をデータセンター運用に利用するには、許容範囲を外れるような外気の温度や湿度の変動を検知したり、ITシステムの負荷変動にともなう発熱量やサーバ風量の変動に対応したりする必要がある。データセンターの省エネのためのシステム統合を目指し、外部条件の変動検知にユビキタスセンサを効果的に利用するための課題の整理、グリッドデータセンターの運用技術を前提とした発熱量の変動などの条件の整理を進めているところである。



図2 実験用モジュール内部(ラック前面側)



図3 外気条件再現用の空調設備

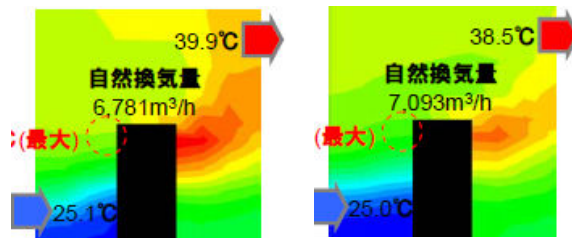
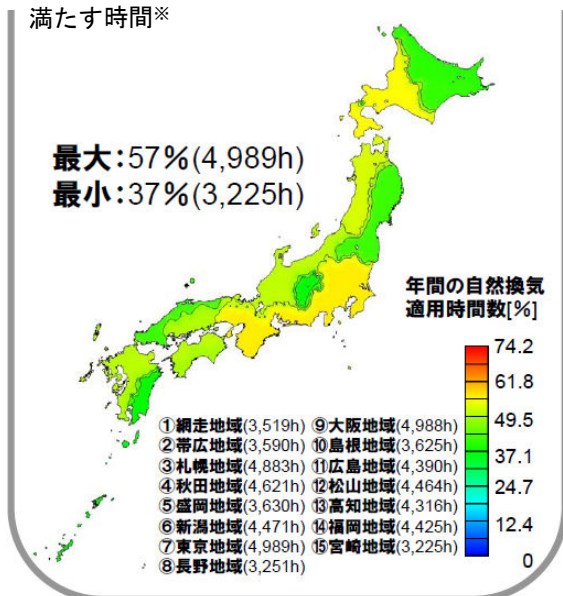
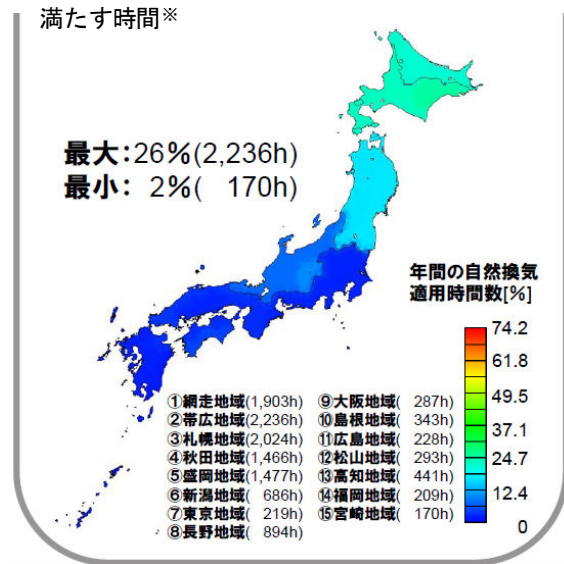


図4 実験室での計測結果と数値シミュレーションの比較(左:実測、右:数値シミュレーション)

機器の動作保証条件 (10~35°C/20~80%) を満たす時間\*



機器の動作保証条件 (10~35°C/20~80%) を満たす時間\*



(通気抵抗なし、モジュール高さ 4m の場合) (通気抵抗あり、モジュール高さ 4m の場合)

図5 換気のみで運用できる時間の割合

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ●論文詳細情報

1. Dongkeon Lee, Hiroshi Hiroshima, Yi Zhang, Toshihiro Itoh, Ryutaro Maeda, Cylindrical projection lithography for microcoil structures, *Microelectronic Engineering* 88 (2011) 2625-2628.
2. Toshihiro Itoh, Jun Fujimoto, Ryutaro Maeda, Application of Wireless Sensor Nodes to Commercial Power Consumption Monitoring, *Proceedings of Symposium on Design, Test, Integration, & Packaging of MEMS/MOEMS (Aix-en-Provence, France, 11-13 May 2011)*, 227-230.  
無線電流センサプロトタイプ端末の開発とその要素部品であるマイクロコイル開発について報告するとともに、プロトタイプ端末を用いて行ったコンビニエンス・ストアにおける社会実証実験およびその省エネ削減効果について述べた。
3. 藤本淳, 秦智之, 伊藤寿浩, 無線ユビキタスセンサを用いた電力モニタリング第一報:社会実証実験とセンサの普及課題, *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, Vol. 32, No. 3, pp. 9-15, May, 2011.
4. 藤本淳, 三谷庸, 伊藤寿浩, 前田龍太郎, 無線ユビキタスセンサを用いた電力モニタリング第二報: コンビニエンス・ストアへの応用, *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, Vol. 32, No. 3, pp. 16-23, May, 2011.
5. Takahiro Hirofuchi, Hidemoto Nakada, Satoshi Itoh and Satoshi Sekiguchi, Reactive consolidation of virtual machines enabled by postcopy live migration, *Proceedings of the 5th International Workshop on Virtualization Technologies in Distributed Computing (VTDC2011)*, pp. 11--18, ACM Publishing, Jun 2011.
6. 竹房あつ子, 中田秀基, 広渕崇宏, 伊藤智, 関口智嗣, 省電力化にむけた仮想計算機パッキングアルゴリズムの提案, *電子情報通信学会技術研究報告コンピュータシステム(SWoPP2011)*, pp. 73--78, 電子情報通信学会, Aug 2011.
7. Takahiro Hirofuchi, Hidemoto Nakada, Satoshi Itoh, Satoshi Sekiguchi, Making VM Consolidation More Energy-efficient by Postcopy Live Migration, *CLOUD COMPUTING 2011: The Second International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization*, pp. 195--204, IARIA, Sep 2011.
8. 広渕崇宏, 中田秀基, 伊藤智, 関口智嗣, 仮想マシンの広域ライブマイグレーションを実現するゲスト透過な Mobile IPv6 トンネリング機構, *日本ソフトウェア科学会研究会資料シリーズ*, pp. 101--110, 日本ソフトウェア科学会, インターネットカンファレンス 2011, Oct 2011.
9. 穂山空道, 広渕崇宏, 高野了成, 本位田真一, 都鳥:メモリ再利用による連続するライブマイグレーションの最適化, *情報処理学会論文誌:コンピューティングシステム*, pp. 74--85, 情報処理

学会, Mar 2012.

10. Takahiro Hirofuchi, Hidemoto Nakada, Satoshi Itoh, Satoshi Sekiguchi., Reactive Cloud: Consolidating Virtual Machines with Postcopy Live Migration, IPSJ Transactions on Advanced Computing Systems, pp. 86-98, Information Processing Society of Japan, Mar 2012.