

**広域災害対応型クラウド基盤構築に向けた研究開発
(省電力アクセスネットワーク制御技術)**
Research and Development on Cloud Service Infrastructure for
Recovering Wide-area Disaster
(Power-saving access network control technology)

研究代表者

西原 基夫 日本電気株式会社
Motoo Nishihara NEC Corporation

研究分担者

福永 茂[†] 楯 勇一^{††}
Shigeru Fukunaga[†] Yuichi Kaji^{††}
[†]沖電気工業株式会社 ^{††}奈良先端科学技術大学院大学
[†]Oki Electric Industry Co., Ltd. ^{††}Nara Institute of Science and Technology

研究期間 平成 23 年度～平成 24 年度

概要

「クラウドサービス」には企業の ICT 設備投資の負担軽減や情報処理の集約等による環境負荷低減効果が期待されるが、その利用範囲の拡大に向けては、信頼性の向上（安定・確実なサービス稼働の維持）とともに、ネットワーク利用の拡大等に伴う通信トラフィックの急増への対応（消費電力の増大抑制）が重要である。これらの課題に対応するため、本研究開発では、ネットワーク全体として一層の消費電力（CO₂）の削減を図る。

1. まえがき

今後、我が国の ICT 産業がクラウド分野で国際競争力強化を確保するとともに、クラウドサービスが社会インフラ分野で広範に活用されて、クラウド化のメリットを社会全体で享受できるようになることが重要である。一方で、ICT サービスの高度化は、ネットワークの情報流通の拡大をもたらすため、消費電力（CO₂ 排出）の大幅増の改善が急務となっている。

こうした課題を解決するため、本研究開発を実施し、高信頼・高品質で省電力な次世代クラウドサービスの基盤（『グリーンクラウド基盤』）を世界に先駆けて構築することを目標とする。

本研究開発課題においては、当該要素技術のひとつとして、クラウドネットワークに膨大かつ多種多様なセンサ等が接続されるような利用形態の普及に伴う消費電力の増加に対応するための、センサ等により構成される多様なアクセスネットワーク（センサネットワーク）に適用可能な「省電力型アクセスネットワーク制御技術」の研究開発を実施する。屋外・野外にバッテリー駆動のセンサを設置して利用するクラウドサービスには、センサネットワークの高信頼化および高安全化が必要な上、さらに省電力化が不可欠である。省電力型アクセスネットワーク制御技術では、高信頼・高安全を実現し、かつ省電力な運用を実現する。本研究開発では、研究開発技術の性能評価を行うとともに、福島県の高등학교において約60台の試作機による実証実験を行った。

2. 研究開発内容及び成果

センサネットワークを高信頼および高安全に、かつ省電力に運用するための省電力システムを策定し、システムの中核となる4つの省電力型アクセスネットワーク制御技術について、開発および性能評価した。省電力システムでは、

図2に示すように、MAC層およびAPL層に以下の提案技術を配置する。

MAC層技術

- ・課題（1）ーア 省電力アクセスネットワークの高信頼化技術

APL層技術

- ・課題（1）ーイ 省電力センサ遠隔管理技術
- ・課題（2）ーア 省電力アクセスネットワーク向け暗号通信路確立技術
- ・課題（1）ーイ 省電力暗号鍵更新方式

本研究開発における成果について、図 1 に示す。図 1 の成果は、図 2 に示す通りに本研究開発における各課題が連携した上で、シミュレーション評価を行った結果に基づく。シミュレーション評価により、1,000 台規模のセンサ機器で構築されるネットワークにおいて、ネットワーク内のセンサ機器の消費電力を、従来技術と比較して 50%削減することを確認した。課題間連携によるシミュレーションでは、主に MAC 層の技術となる課題（1）ーアと他のアプリケーション層の技術となる課題（1）ーイ、課題（2）ーア、課題（2）ーイを各々同一のシミュレータ上に実装して動作することにより、消費電力削減効果の評価した。以下の各項における各課題のシミュレーション評価結果は、課題間連携を行った結果である。また福島県の高등학교で行った試作機による実証実験において、実センサネットワーク上における開発成果の実用性を確認した。以上により、本研究開発において、電源供給が不安定な環境下でも、センサネットワークの省電力化を実現し、長期運用が可能とする技術を実現した。各課題の成果詳細は、以下の各項で述べる。

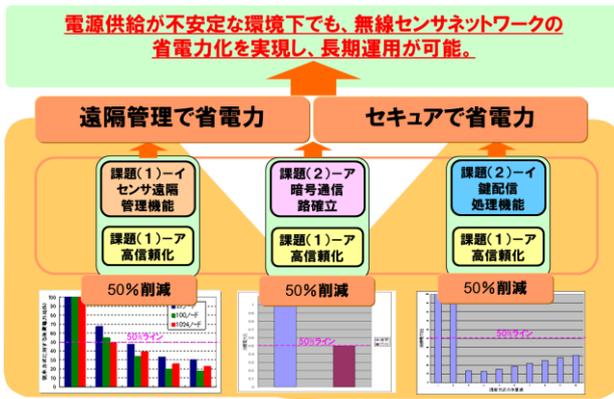


図1 全体成果イメージ

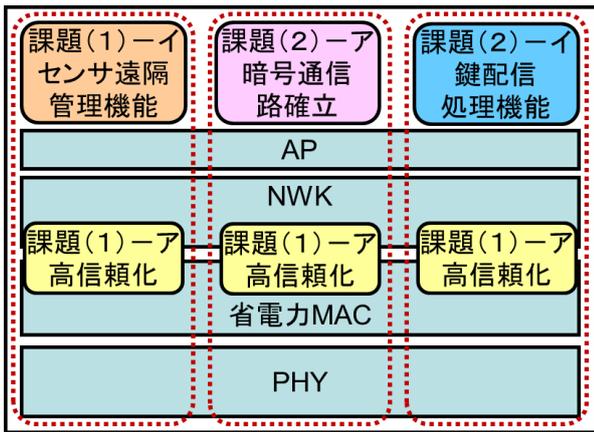


図2 省電力システム概要

課題1 省電力アクセスネットワーク通信品質管理・制御技術に関する研究開発

課題(1)-ア 省電力アクセスネットワークの高信頼化技術の研究開発

平成23年度は、従来の省電力MAC方式(IEEE802.15.4e)ではブロードキャスト時の制御パケットの送信コストが高いことや、トラフィックにあわせたスリープ周期の事前設計を行わないと消費電力増加やパケットロスが発生するという課題を解決する方式開発を行った。開発方式の概要図を図3に示す。開発方式はデータ送信時に送信先ノードの間欠受信のタイミング情報を取得し、その同期情報を利用することでブロードキャスト送信時に発生する制御パケットの送信数を削減する方式と、ネットワーク内のトラフィック変動に応じて、最適な間欠受信周期を動的に決定し、トラフィックが少ない時には間欠受信を減らし、無駄な受信待機を削減する方式であり、シミュレーション評価によって、デューティ比を最大で50%改善し、パケットロス率を0.26から0.018に改善できることを確認した。

平成24年度は、前実施期間に開発した方式を実機検証用の920MHz帯無線装置に実装し、省電力効果の評価を行った。20台の無線センサノードを使用した評価実験において、開発した方式を用いることで既存方式と比較して、消費電力を最大で70%削減できることを確認している(図4)。また、福島県の高等学校で行ったフィールド実験では、開発方式を利用したセンサネットワークを構築し、各種センサデータ収集実験を行い、実用性を確認した。

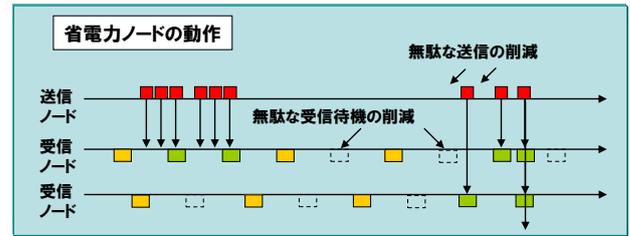


図3 開発方式の概要
(赤は送信、緑は受信、黄色は受信待機)

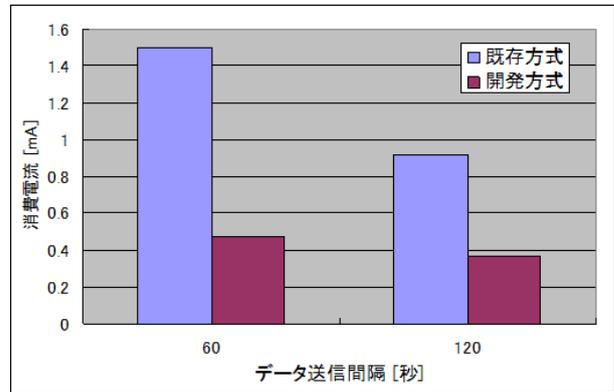


図4 消費電流の比較

課題(1)-イ 省電力センサ遠隔管理技術の研究開発

クラウドに設置されたセンサネットワークの管理サーバより、インターネット向けの技術であるTR-069やSNMPなどの汎用的な管理通信プロトコルによって管理要求を受信したゲートウェイが、その管理要求に対応してゲートウェイ配下のセンサネットワークを省電力に管理する、省電力センサ遠隔管理技術の研究開発した。本遠隔管理技術は、ゲートウェイがクラウドから管理要求を受信した際、あるいはそのような要求に備えてあらかじめ、ゲートウェイが配下の膨大な数のセンサノードから構成されるセンサネットワークを効率的に管理することで通信トラフィックを低減し、省電力な管理を実現する。

平成23年度は、センサネットワーク運用のユースケースや運用ポリシーによって、様々なセンサネットワークの運用管理の手法が求められることを想定し、十分な運用管理を実現しつつも不要な管理情報に関する通信トラフィックを低減することで省電力化を実現する省電力センサ遠隔管理技術の研究開発を進めた。

本遠隔管理技術は、ゲートウェイが管理情報要求メッセージ内に各センサノードの効率的な応答方法である応答ポリシーを指示し、各センサノードが同ポリシーの指示に従って効率的に応答することで管理通信トラフィックを低減する。また、ゲートウェイは、管理情報要求メッセージをブロードキャストすることで管理通信トラフィックの低減を図る。また、本管理においては、指示した応答ポリシーに基づきセンサノードが応答しない場合もあるため、ゲートウェイにおいて応答しなかったセンサノードの管理情報が不足することもある。これに対して、不足管理情報を補うためにゲートウェイに蓄積した管理情報を用いて推定を行う。このような動作を実現するゲートウェイとセンサノード間の管理通信プロトコルとして、省電力センサ遠隔管理プロトコルを策定した(図5)。

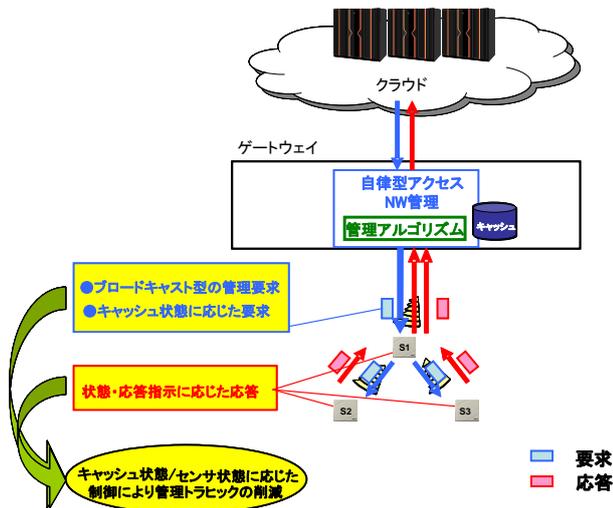


図5 省電力センサ遠隔管理プロトコルの概要

策定した省電力センサ遠隔管理プロトコルについて、消費電力の削減効果を確認するため、計算機シミュレーションを用いた通信トラフィックの低減効果の評価および通信トラフィックの低減結果より導き出される消費電力削減効果の評価を行った。評価の結果、通信トラフィックの低減効果が最大で77%、消費電力削減効果が最大で71%であることを確認した。また、策定した省電力センサ遠隔管理プロトコルの実機開発を行い、動作検証を行った。検証の結果、策定した省電力センサ遠隔管理プロトコルが正常に動作することを確認した。

平成24年度は、自律型省電力センサ遠隔管理方式を研究開発した。センサネットワークの管理における管理情報の精度と省電力な管理を自律的に考慮する自律型省電力センサ遠隔管理方式を策定し、策定した自律型省電力センサ遠隔管理方式の消費電力削減効果および管理情報の精度を計算機シミュレーションにより評価した。評価の結果、最大1,000台規模のセンサネットワークにおいて、センサノードの遠隔管理通信で消費する電力を、従来方式に対して最大約80%削減することを確認した(図6)。図6では、従来方式CMに対する自律的にバッテリー残量を効率管理する場合の提案方式ARCEM_BG_x-yの効果を示しており、1,000ノード規模の評価において約80%の消費電力削減効果を示している。さらに、このときの管理情報精度の劣化率が消費電力削減効果の割合に対して小さいことを確認した。また、策定した自律型省電力センサ遠隔管理方式を実機にて開発し、福島の高専をフィールドとした実センサネットワーク上で実証実験を行い、策定した提案方式の動作検証などから実用性を確認した。

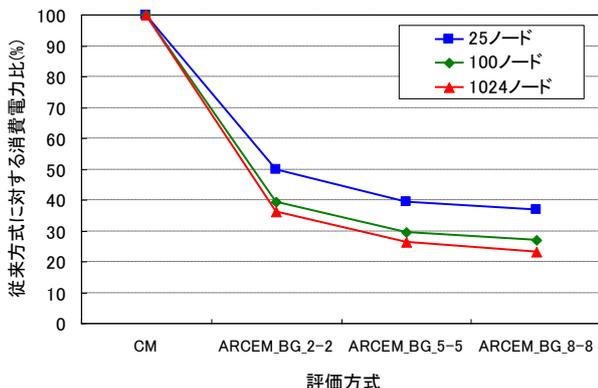


図6 従来方式に対する自律型省電力センサ遠隔管理方式の消費電力比

計画以上の先進的な技術として、平成24年度の実機開発においては、計画していた自律型省電力センサ遠隔管理方式のコア機能に加え、より高精度な死活判定を実現する機能を開発した。無線通信を行うセンサノードの管理においては、無線通信のペケットロスなどに影響され、正確な死活判定が困難になる問題がある。そこで各センサノードに指示した応答方法を考慮した上で、通常管理時の応答メッセージの受信によるパッシブ型の死活判定と規定の応答ロスが発生した場合に死活を問い合わせるアクティブ型の死活判定が連携した高精度な死活判定機能を策定し、開発した。また、福島の高専での実証実験において、本機能の動作検証を行い、高精度に死活を判定することを確認した。特に応答が抑制される管理環境での死活判定の精度向上技術は、他に検討の類を見ない技術である。

課題2 省電力アクセスネットワーク暗号通信技術に関する研究開発

課題(2)ーア 省電力アクセスネットワーク向け暗号通信路確立技術の研究開発

平成23年度は、クラウド上のサーバとセンサ等との間で、TLS等の汎用的なプロトコルを利用してエンド・エンドの暗号通信路を確立するために、センサ等が処理する暗号通信路の確立処理を、センサ等に代わって代行装置が安全に処理する暗号通信路確立処理代行方式を設計した。サーバ装置、代行装置、センサのそれぞれに見立てた検証用装置上でTLSをベースにした暗号通信路確立処理代行方式を実装し、代行方式の適用によって省電力アクセスネットワークを流れるトラフィック量を50%以上削減できる見込みがあることを確認した。また同時に、平成24年度の組み込み無線装置上への方式実装に向けて、組み込み無線装置上で動作するIPv6、IPsecおよびTLSを開発し、実機上でこれらプロトコルを動作させた場合のオーバーヘッドを確認した。

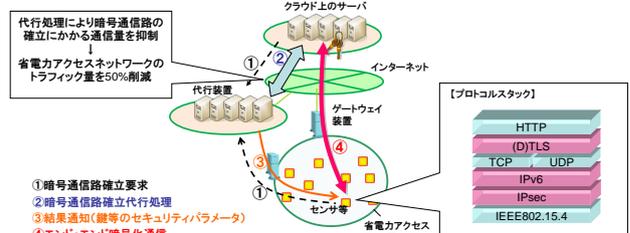


図7 省電力アクセスネットワーク向け暗号通信路確立代行方式の開発

平成24年度は、平成23年度に検証用装置上で実装した方式をベースに、組み込み無線装置上で動作可能な暗号通信路確立処理代行方式を開発した。開発方式の概要図を図7に示す。福島の高専を実フィールドとして、20台規模の実機で構成したアクセスネットワーク内の実機と検証用装置との間で、エンド・エンドの暗号通信路を確立できることを確認し(図8)、最大で約21.5%のトラフィック削減効果が得られることを確認した(図9)。また、課題(1)ーアで開発した省電力MACと連携した総合的な評価をシミュレーションにより行い、消費電力の総量を約25%に削減できることを確認した(図10)。

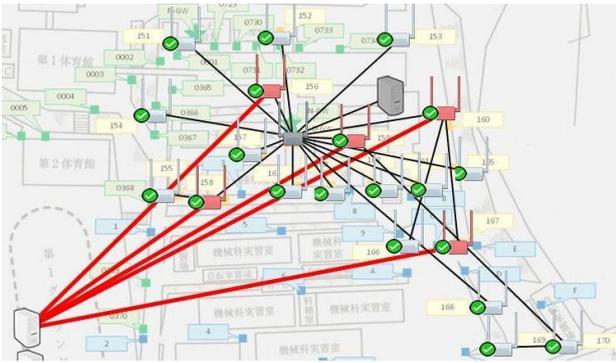


図8 構築した920MHz帯IPv6対応無線マルチホップネットワークとデータ収集の様子

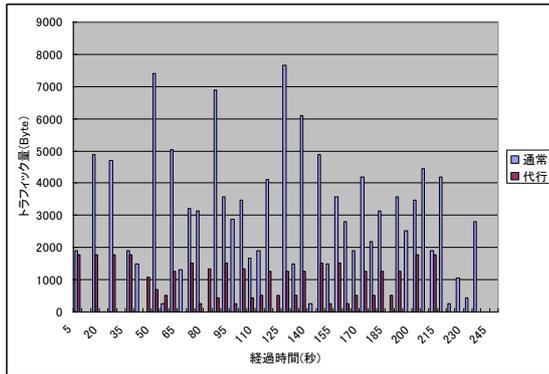


図9 トラフィック量の削減効果 (TLSを利用したセンサ値通知, 20台)

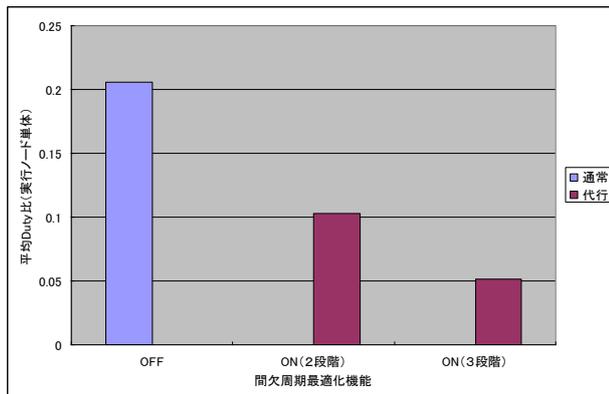


図10 TLS通常処理に対する提案代行方式の省電力効果

課題(2)-イ 省電力アクセスネットワーク向け暗号通信路確立技術の研究開発

課題(2)-イ)-1 省電力暗号鍵更新方式の研究開発

平成23年度は、ネットワークに存在する多数のグループのグループ鍵を管理するため、センサが自ら持つ属性をベースとするグループ構造(属性集合)の形式化を行った。そして、属性集合の部分集合として、サービスにおいて意味的に重要なグループを設計、管理するものとした。この部分集合の族をグループ鍵の更新範囲にあわせて適切に選択するアルゴリズムによって、効率的な複数グループのグループ鍵の更新管理を安全に実現した。本方式の注目すべき点は、センサが必然的に複数の属性集合に含まれることを利用した、クロスレイヤメカニズムに基づくグループ鍵の更新プロトコルにある。具体的には、互いに異なる属性集合の族を多重に利用することにより、鍵更新に係

わる通信を多重化し、再送を含む通信量を大きく削減する。計算機による現実的な条件下での小規模シミュレーションにおいて、従来の無線センサネットワークに適用可能なグループ鍵管理方式に比べ、通信量を1/2以下でグループ鍵更新を実現することを定量的に確認した。

平成24年度は上記方式が無線センサネットワークにおいて実用的な「多数のノードからなる複数のグループ」におけるグループ鍵を効率的に更新管理できることを大規模な計算機シミュレーションによって確認した。具体的には、約1,000台規模のセンサネットワークにおいて、64グループの鍵更新にかかる通信量を評価したところ、通信量が最少となる多重度を適切に選択したとき、鍵更新にかかる通信量を従来方式と比べて約12%以下に抑制できることを確認した。シミュレーションによる提案方式の消費電力削減効果を図11に示す。さらに、福島の高専においての実証実験において、実センサネットワークに提案方式を導入し、実機上での鍵情報の更新管理を実現できることを確認した。

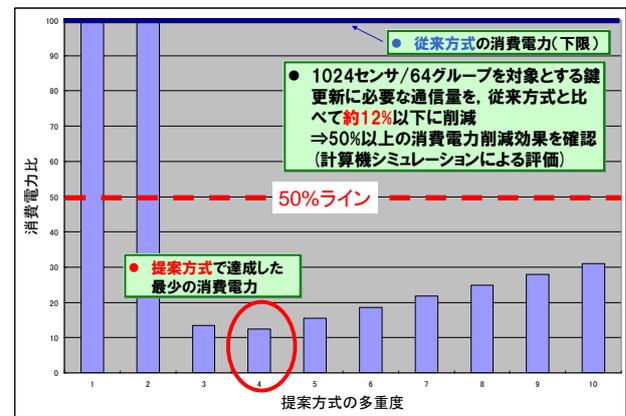


図11 提案方式による消費電力削減効果

課題(2)-イ)-2 省電力暗号鍵更新方式の安全性評価

平成23年度の目標は、(A) センサネットワークにおけるセキュリティ確保の要件について明確化し、(B) 安全性を確保したうえでの通信量最適化(消費電力量の最小化)に関する基礎的検討を行うことであった。目標(A)について、センサネットワークにおける最大のリスク要因は、環境に配置されたセンサノードが物理的に攻撃され、その内部情報(暗号鍵)が不正に流出する可能性が高い点にある。平成23年度の研究では、ある種の集合被覆問題の解に従って課題(2)-イ)-1の鍵管理方式を運用すれば、危険化したノードをシステムから排除し、生き残ったノードの暗号鍵を安全かつ迅速に更新できることを示した。これにより課題(2)-イ)-1開発方式のセキュリティ要件が明確となり、(A)の目標を達成することができた。さらに、当初計画になかった成果として、集合被覆問題の計算量下界(NP完全性)に関する証明に成功した。この結果は、ノード属性の設計に関して大きな示唆を与えるものであり、課題(2)-イ)-1方式を効率的に運用するための重大な知見を得ることができたといえる。目標(B)、すなわち通信量の最適化について、当初は多重度を固定した単純な運用のみを想定していたが、課題(2)-イ)-1方式の挙動が明確になるに従い、多重度を動的に制御することの有効性が明らかとなった。この性質は想定外の発見であったが、課題(2)-イ)-1方式の一層の効率改善に資する可能性があるため、当初計画をさらに進め、開発手法の性能評価を可能とする数理モデル

を構築することとした。構築した数理モデルが示す性能特性(図12)は課題(2)ーイ)ー1の研究で行われた実験的評価の結果ときわめて高い精度で一致しており、この数理モデルの妥当性を確認することができた。以上の結果は所期の目標を完全に上回るものであり、課題(2)ーイ)ー1方式の有効性を数理的に保証するという予想以上の結果に到達することができた。

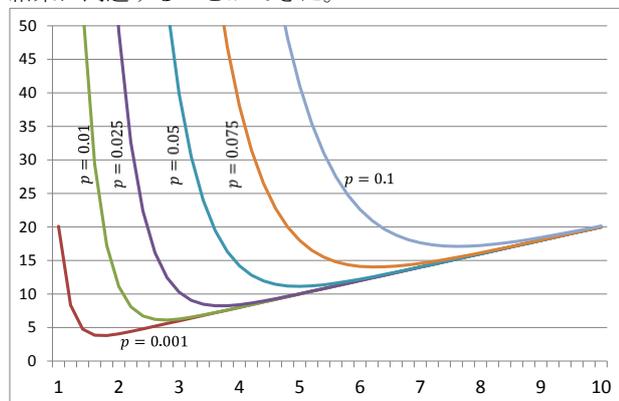


図12 数理モデルから得られる性能曲線

平成24年度の研究においては、(C)平成23年度に検討を行った数理モデルの改善および開発方式の実用性を改善するための方策検討と、(D)その方策がもたらすセキュリティ的な影響について検証を行うことを目標とした。(C)の数理モデルの改善にあたっては、パケットの消失等、実環境において生じる様々な要因をモデルに内包し、設計パラメータの変化が、通信量および安全性にどのような影響を与えるか詳細に検討した。さらに、一連の成果をふまえて大規模災害等を想定した様々なシナリオについて検討を行い、課題(2)ーイ)ー1の方式が、ネットワーク敷設や運用管理に必要となる時間および人的資源も削減することを明らかにした。この特性は、専門家の確保が困難な過疎地域や人が分け入ることの難しい山間部、あるいは大規模被災地等へのネットワーク敷設を容易にし、今日の社会が直面する諸問題に対して直接的なソリューションを与える可能性がある。また、目標(D)に関連し、本研究開発手法を実用化フェーズに移行するにあたって生じる問題についても検討を行い、問題解決のための基礎的解法を検討した。具体的には、多数のノードに対してデータの受領確認を安全かつ効率的に実現するための仕組みの開発や、本研究開発で得られたクロスレイヤ的なセキュア通信の概念を既存の他方式に適用した場合の効果等について検討を行った。前者の成果は課題(2)ーイ)ー1方式の運用効率化に有効であり、後者の成果は、課題(2)ーイ)ー1方式が広く普及するまでの過渡期間における省電力化の実現に資すると考えられる。

以上を総括すると、研究開発着手段階で掲げた所期目標については完全に達成し、当初想定よりも深化した結果を得ることができたと評価することができる。また、開発手法の周辺分野、すなわち、運用にあたって解決すべき問題や、技術移行の際に取り組むべき問題についても十分な検討を行うことができた。単なる技術開発・評価にとどまらず、次のステップを考えるうえで有益な知見をも得られたことは、当初の想定以上の結果であるということが出来る。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

○標準化

日本電気株式会社

BBF(Broadband Forum)に対し、本研究開発で開発する省電力型の遠隔管理プロトコルに関する技術の標準化を推進する。平成21年度第2次補正予算「ネットワーク統合制御システム標準化等推進事業」において、BBFに対しM2M(センサ)管理に関する技術の標準化を提案している。本実績を活用し、省電力型の遠隔管理プロトコルに関する技術の標準化を推進する。

活動実績として、BBFの2011年9月会合に参加し、キーマンへのコンタクトや標準化を進めるために意見交換や情報収集などの活動を実施し、2012年8月会合にて、広域災害時の省電力型管理ユースケースの提案活動を実施した。

今後は、2011年9月会合におけるBBFのキーマンらとの意見交換結果を参考に、BBFにおける標準化活動について内部検討を行う。

沖電気工業株式会社

本研究開発成果の1つである省電力マルチホップ技術は、IEEE802委員会では標準化されつつあるIEEE802.15.4eの省電力機能を利用したNWに適用することを想定している。そこで、研究成果を広く利用できるようにするために、無線マルチホッププロトコルの標準化団体として参加企業数が世界最大であり広く知られているZigBee Allianceの標準として、IEEE802.15.4eの省電力機能を利用した無線マルチホッププロトコルを規定する活動と、センサネットワーク等に用いる無線方式を標準化しているIEEE802委員会の15WGでマルチホップルーティングの機能を標準化する活動を実施した。

ZigBee Allianceでは、国際的に共通して利用できる2.4GHz帯の標準化が先行して進められてきたが、周波数が低くより省電力な通信が可能な920MHz帯もZigBee標準として規定する動きがあり、この動きと同調して我々が提案してきた省電力機能とその他いくつかの追加機能の標準化が審議されている。このような状況の中で、まず920MHz帯をZigBee標準として規定し、その後追加機能を審議することとなった。このため、ZigBee Allianceでの省電力機能の標準化は、平成25年度以降に実施する予定である。

IEEE802委員会15WGでは、我々が実施したマルチホップルーティング機能の標準化開始の提案に対し、興味を示した参加者でインタレストグループを結成し、標準化の必要性について審議した。その結果、標準化の審議を開始することが認められ、2013年1月からスタディグループとして具体的な標準化すべき項目についての審議を開始した。来年度以降も継続して、方式提案などの活動を実施する予定である。

○事業化・製品化

日本電気株式会社

本研究開発の成果について、短期的には、実証実験で使用した検証サービスをベースとした環境モニタリングサービスを、東日本大震災の被災地への導入提案を行っている。中長期的には、成果を適用した「省電力センサネットワークサービス」として平成27年度の製品化を目指す。

また、課題(2)ーイ)省電力鍵更新技術については、某大学の研究開発支援を目的とした基盤として、新たに環境情報やユーザ情報の収集を可能とする、センサネットワーク実験基盤システムを平成26~27年に実現することを目標に検討を行っている。

沖電気工業株式会社

省電力なアクセスネットワーク用無線ノードとして、通信の信頼性・安全性を高めた組み込み機器を平成 26～27 年に実現することを目標に検討中である。

4. むすび

実世界の環境情報を収集して活用するクラウドサービスの実現に必要な、センサネットワークの高信頼および高安全な運用と省電力化を図る省電力型アクセスネットワーク制御技術について、提案および開発し、計算機シミュレーションにより性能を評価した。さらに、福島県の高等学校をフィールドとした実証実験を実施し、各提案技術の効果と実用性を検証した。性能評価の結果、各提案技術は、各々の従来技術より少なくとも 50%の省電力化を達成することを確認した。また、実証実験からは、各提案技術の実用性を確認すると共に、センサネットワークを用いたクラウドサービスにおいて、現場運用からでは分からない注意点や検討事項を確認することができた。今後は、通信ハードウェアの高性能化に対応する提案技術の拡張を行っていく。

【誌上发表リスト】

- [1] 鈴木 孝明、野田 潤（日本電気（株）久保 祐樹、八百 健嗣（沖電気工業（株））楯 勇一（奈良先端科学技術大学院大学）、“省電力センサネットワークの開発・導入と社会への展開—福島県の屋外フィールドにおける実証実験を通して—”、情報処理学会デジタルブックティス Vol.4 No.4 ppS0404-S05（Oct.2013）
- [2] 楯 勇一、野田 潤、“センサネットワークにおけるグループ鍵管理の通信量について”、情報処理学会第 65 回モバイルコンピューティングとユビキタス通信・第 37 回ユビキタスコンピューティングシステム合同研究発表会（東京）（2013 年 3 月 15 日）
- [3] Jun Noda, Yuichi Kaji, “Attribute-Based Group Key Management for Wireless Sensor Network —A Cross-Layer Design Approach for Group Key Management— ”、Infoware2012: The Eighth International Conference on Wireless and Mobile Communications(ICWMC 2012), Venice, Italy, pp.242-247, 2012.（2012 年 6 月 25 日）

【申請特許リスト】

- [1] 野田 潤、センサネットワーク、センサ管理サーバ、鍵更新方法および鍵更新プログラム、海外(PCT 国際)、2013 年 1 月 30 日
- [2] 鈴木 孝明、角丸 貴洋、山口 一郎、自律的にネットワーク管理方法を制御する通信装置、通信方法、及び通信システム、日本、2013 年 2 月 20 日
- [3] 中嶋 純、暗号通信装置、代行サーバ、暗号通信システム、暗号通信装置プログラム及び代行サーバプログラム、日本、2013 年 1 月 30 日

【国際標準提案リスト】

- [1] Broadband Forum・Third Quarter Meeting, Add use case to bbf2012.878.00 for resilience in case of emergency、2012 年 8 月 28 日

【参加国際標準会議リスト】

- [1] IEEE802 委員会・Wireless Interim 会合、バンクーバー、2013 年 1 月 14-17 日
- [2] ZigBee Alliance・メンバ会合、デンバー、2012 年 6 月 18-21 日
- [3] IETF・第 82 回会合、台北、2011 年 11 月 13-18 日

【報道掲載リスト】

- [1] “センサネットワーク運用管理に必要な通信を従来比 50%省電力化する技術を開発～ 福島県の高等学校における実証実験に成功 ～”、プレスリリース、2012 年 12 月 10 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://news.infoseek.co.jp/article/20121210jcn58042>