

招待論文

災害に強いグリーン指向ネバーダイ・ネットワーク

白鳥 則郎^{1,2,a)} 稲葉 勉³ 中村 直毅⁴ 菅沼 拓夫^{5,6}

受付日 2012年4月2日, 採録日 2012年5月18日

概要: 21世紀の科学技術は、温暖化、自然災害など地球環境の変化といかに向き合うかが問われている。本稿では、このような変化を効果的に吸収し、課題の解決へ向けたグリーン指向ネバーダイ・ネットワークを提案する。具体的には、著者らが研究開発を推進し IETF において国際標準化に成功した、ユビキタスネットワークにおけるネットワーク管理に関する先端技術、地域実証実験（平成 22 年度総務省プロジェクト）を通じて研究開発を実施した、情報システムの省電力化のためのグリーン ICT 技術、および災害発生時に途絶することなくサービスを提供し続ける「ネバーダイ・ネットワーク」技術を高度に統合し、情報システム全体のグリーン化（省電力化により CO₂ 排出量の削減化）と耐災害性強化を同時に実現する「グリーン指向ネバーダイ・ネットワーク管理技術」を世界に先駆けて研究開発する。まず、災害の状況、達成すべき性能、省電力性の観点からグリーン指向ネバーダイ・ネットワークのモデルを構成し与える。グリーン化に関しては、新しいグリーン指向 MIB (Green-MIB) の標準化を目指した無駄の「見える化」技術や、学習・データマイニングなどを用いた機器の利用状況の分析結果に基づく無駄削減の自律化機能の創生を試み、本提案管理技術の導入により、実証実験を通してネットワークシステムあたり通常運用時に、10-30%の CO₂ 排出量を削減することを目指す。さらに、ネバーダイ・ネットワークについては、有線・無線ネットワークを重層的に構成し、災害時の耐障害性に優れた情報通信システムのインフラ構築を目指す。本研究開発の一部は、平成 23 年 10 月開始の総務省 ICT グリーンイノベーション推進事業 (PREDICT) の支援の下に推進している。

キーワード: ネバーダイ・ネットワーク, グリーン ICT, 耐災害情報通信システム, ネットワーク管理, Green-MIB

Disaster-resistant Green-oriented Never Die Network

NORIO SHIRATORI^{1,2,a)} TSUTOMU INABA³ NAOKI NAKAMURA⁴ TAKUO SUGANUMA^{5,6}

Received: April 2, 2012, Accepted: May 18, 2012

Abstract: In science and technology of the 21st century, how to face global environmental change such as global warming and natural disasters has come into question. In this paper, we propose a Green-oriented Never Die Network that aims to solve the problem by effectively absorbing such the changes. More specifically, we will highly integrate the following research and development we have been advanced so far: cutting-edge technology for network management in ubiquitous network, successful international standardization in the IETF, green ICT contribute to the power saving technology of information systems based on the regional experiment (a national project of Ministry of Internal Affairs and Communications FY 2010), and “Never Die Network” technology that can continue to provide services without interruption in the event of a disaster. Through these technologies, we will investigate the world’s first “Green-oriented Never Die Network Management Technology” that achieves greening (reduction of CO₂ emissions by power saving) of the entire information system and high disaster tolerance at the same time. First, we will construct the model of Green-oriented Never Die Network from the viewpoints of the disaster situation, performance and energy efficiency to be achieved. With regard to the greening, we will create “visualization technology” of the waste aimed to standardize the new green-oriented MIB (G-MIB), and autonomous function of the waste reduction based on the results of the analysis of usage of equipment by using techniques of learning and data mining. This aims that during normal operation, 10-30% reduction of CO₂ emissions per network system can be expected throughout the experiment. In addition, in terms of the Never Die Network, we aim to construct infrastructure of information and communication systems with fault-tolerance in the event of a disaster, by effectively configuring wired and wireless networks. A part of this R&D has been promoted under the support of the Green ICT Innovation Promotion (PREDICT) of Ministry of Internal Affairs and Communications that has started in October 2011.

Keywords: Never Die Network, Green ICT, disaster-resistant ICT system, network management, Green-MIB

1. はじめに

21世紀の科学技術は、温暖化、自然災害など地球環境の変化といかに向き合うかが問われている。インターネットは現在、自動車の製造にかかわる業界と同等のエネルギーを消費し、2020年までには航空業界と同等の膨大なエネルギーを消費すると予想されている。また、2009年の日本政府（鳩山元首相）によるCO₂削減25%目標の宣言に加えて、東日本大震災により電力供給不足が深刻化しており、ネットワークシステムを省電力化することは喫緊の課題である。これらの課題を解決するため、ネットワークシステムの省電力化へ向け、電力消費に対応するCO₂の排出（環境負荷）を軽減するために、ネットワークシステムの構成要素であるパソコン、サーバ、ネットワーク機器ごとの個別の省電力化（グリーン化）の研究開発が精力的に推進されてい

る[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]。さらに、省電力無線通信規格 ZigBee で接続可能な小型センサと CPU を内蔵した電源タップを用いたり [13]、機器の電源のオン/オフや IR リモコン制御が可能な PLC (Power Line Communication) を用いて簡易的に HEMS (Home Energy Management System) を構築したりする研究開発 [14] も行われている。これらの省電力化の取り組みは、機器ごとの個別的な省電力化に特化した可視化、あるいは特殊な計測機器の設置を必要とする消費電力の計測システムの研究開発が中心であり、複数の機器で構成されるネットワークシステムやオフィス全体の情報システムにおける効果的な省電力化のための管理・制御法などの研究開発は緒についたばかりで、国内外においてその技術は確立されていないのが現状である。

さらに、2012年3月内閣府中央防災会議において中間報告されているように、今後高い確率で発生することが予想されている西日本地域などでの地震災害に備え、災害に対する強い耐性を保持したネットワークシステムが強く望まれている。東日本大震災において、地震の衝撃による機器の故障、停電によるシステムの長時間の停止、津波や火災による設備の損失やネットワークの切断などの影響で、想定外の規模の災害時における情報システムの耐性の低さが浮き彫りになった。この教訓をもとに「災害に強い情報通信システム」の実現に向けた研究開発が進められている。特に、通常時には高機能・高性能・低消費電力性能を維持しつつ、災害時には高い耐障害性を示す動作へシームレスに移行するネットワークシステムが強く求められている。著者らはこれまで、災害発生時に途絶えずにサービスを提

¹ 早稲田大学大学院国際情報通信研究科
Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, WASEDA University, Shinjuku, Tokyo 169-0051, Japan

² 東北大学電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

³ NTT 東日本宮城ビジネス営業部
NTT East-Miyagi, Business Marketing Division, Sendai, Miyagi 984-8519, Japan

⁴ 東北大学大学院医学系研究科
Graduate School of Medicine, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8575, Japan

⁵ 東北大学サイバーサイエンスセンター
Cyberscience Center, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

⁶ 東北大学大学院情報科学研究科
GSIS, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

a) norio@shiratori.riec.tohoku.ac.jp

供し続ける「ネバーダイ・ネットワーク」[15], [16], [17] 技術の研究を進めてきた。この技術とグリーン化の技術を高度に統合、さらには融合することにより、通常時は自然環境に優しく、かつ非常時には自然環境の脅威に果敢に立ち向かう、新世代の情報システムの基盤技術の実現が期待できる。

本稿では、情報システム全体の「省電力化」と「耐障害性強化」を同時に実現するネットワークシステムの実現へ向けた管理フレームワークを提案する。具体的には、著者らが研究開発してきたネットワーク管理に関する先端技術 [18] とそれに基づいて IETF において国際標準化 [19], [20] に成功した実用化技術、これらに基づくグリーン化（省電力化により CO₂ 排出量の削減化）へ向けた「新しい MIB (Management Information Base) の標準化技術」、栗原グリーンプロジェクト（総務省）[21] でのグリーン ICT に関する実証実験の経験、災害に強いネバーダイ・ネットワーク技術を基盤とし、これらを高度に統合することで情報システム全体のグリーン化と、耐障害性強化を同時に実現する「次世代グリーン指向ネットワーク管理技術」を提案する。

本研究開発の一部は、平成 23 年 10 月開始の総務省 ICT グリーンイノベーション推進事業 (PREDICT) の支援 (平成 23 年 10 月-平成 26 年 3 月) を受けて、東北大学、(株) サイバーソリューションズ、東日本電信電話株式会社宮城支店、東北工業大学で研究開発を推進している。

以降、2 章では、グリーン指向ネバーダイ・ネットワークを提案し、その概要を述べる。3 章では、情報システム全体のグリーン化技術について述べ、4 章では、ネバーダイ・ネットワークの構成例について紹介する。最後の 5 章は結論である。

2. グリーン指向ネバーダイ・ネットワーク

2.1 グリーン指向ネバーダイ・ネットワークの基本構造

正常時には、情報システム全体を省電力化する「グリーン・モード」で動作するとともに、障害が発生した異常時や非常時には、「ネバーダイ・モード」で動作するグリーン指向ネバーダイ・ネットワークのモデルを提案する。

具体的には、グリーン指向ネバーダイ・ネットワークのモデルとして、通常時と災害時などの状況に応じてシステムの機能モジュール群の構成を動的に変更し、各状況を考慮した動作モードに移行する自律型アーキテクチャを提案する。すなわち、グリーン化のための機能モジュール群とネバーダイ・ネットワークの機能モジュール群を統一プラットフォーム上で統合し、機能モジュール群の自律的構成・再構成の機構を導入する。これにより、災害などの自然環境の変化や、それにとまなう人間活動の変化に対して適応して動作する情報システムの核となる新たなネットワーク管理フレームワークを実現する。

2.1.1 グリーン・モード

グリーン・モードでは、パソコン、サーバおよび複数のネットワーク機器にまたがる情報システム全体を省電力化する。本モードで削減する無駄の定義は以下のとおりである。

- 情報機器 (PC, サーバ, ルータなど) が使われていないまま電源が入っていることにより消費される電力
- 低負荷の情報機器 (サーバ, ルータなど) で並列にサービスが稼働している場合、そのサービスを 1 つの情報機器に集約することにより節約できる電力
- 個人あるいは組織ごとに情報機器を計画的に ON/OFF することにより、節約できる電力

グリーン化を目指すにあたっては、既存のネットワーク管理システムのセキュリティ基盤と一体的に構成し、不要な機器の電源を停止してグリーン化を実現するとともに、セキュリティ侵害の原因を除去する機能もあわせ持つ特徴を有する。また、端末やプリンタなどから送信されるネットワークトラフィック情報や端末で稼働しているプログラムなどの情報を取得し、データマイニングなどを用いた機器の利用状況の分析結果に基づいた無駄削減の自律化機能の創生を試み、仮想化技術を発展させることで、情報システム全体をグリーン化する。本提案技術の導入により、実証実験を通してネットワークシステムあたり、10-30%の CO₂ 排出量を削減することを目指す。

2.1.2 ネバーダイ・モード

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、既設のネットワークインフラが十分に機能せず、被災地の救援に必要なとされる情報が支援者と被災者に対し災害直後から数週間にわたり適切に届かなかった。そこで、ネバーダイ・モードでは、災害時にネットワークの一部が損傷しても、全体がダウンせず、途絶えることなく動作し、通信機能とサービスを提供し続ける。

<ネバーダイ・ネットワークの基本概念>

ネバーダイ・ネットワーク [15], [16], [17] とは、自然災害などの外部要因によってシステムの一部が損傷しても、システム全体がダウンせずに自律的に代替ルートやノードを検出して通信路を確保することによって、途絶えることのない通信サービスを提供するシステムである。本システムでは、使用可能な通信帯域を分割・多重化などの制御を行うことによりネバーダイ性を向上させる。さらに、本システムでは、通信レベルとサービスレベルの双方において、それぞれ重層的な仕組みを導入することにより、システムの損傷度合いが拡大した場合でも、途絶えることのない通信機能を自律的に確保する。

東日本大震災に直面した著者らの経験をふまえ、ネバーダイ・ネットワークでは、大災害が発生した際の 3 つの状況、1) 災害直後、2) 非難直後～非難完了、3) 避難生活、に対処する途絶えない通信機能とサービスを提供する。

(1) 災害直後（発生直後～数時間）

災害発生後の数時間の期間を指す。この時間帯では、津波、げけ崩れ、建物の倒壊などから人々の安全を守るために、テレビ、防災無線、メールなど複数の情報伝達手段を用いて避難に関する情報を確実に伝達するサービスが必要である。同時に、大都市部においては公共交通機関の運行情報を正確に伝達するサービスも求められる。この期間は、通信網の無停電電源装置や自家発電装置などにより通信網が維持されているが、情報収集や連絡のためにトラフィックの輻輳が急激に増大する。

(2) 避難直後～避難完了（数時間後～1, 2日後）

災害発生から数時間が経過し、被災者が避難所などへ移動する期間を指す。家族全員の無事を確認できた家族と確認できない家族が混在する。また、外部からの生活支援はいまだ開始されないため、被災者は自力での生活を余儀なくされる。このころ、トラフィックの輻輳とともに、携帯や通信網の電源の供給が途絶える設備が増大する。求められるサービスとしては、途絶えない通信、家族の安否確認、現在の状況の情報の共有である。

(3) 避難生活（3日以降）

自分の家に帰ることができなかつたり、帰ることができても自力で生活することが困難な避難生活が始まる期間を指す。食糧や水、衣類などの生活物資を必要な所へ、かつ、不公平が少ない提供が可能となるように情報を共有し、特に小さい子供や老人などの生活弱者や食物アレルギーなどを持つ人々を支援するサービスが重要となる。

2.2 ネバーダイ・ネットワークの特性

グリーン指向ネバーダイ・ネットワークと関連する既存のネットワークとの比較を図1に示す。ここで、関連するネットワークの特徴は、以下のとおりである。

- 通常のネットワーク
障害が発生していない通常のネットワークである。
- 災害指向のネットワーク

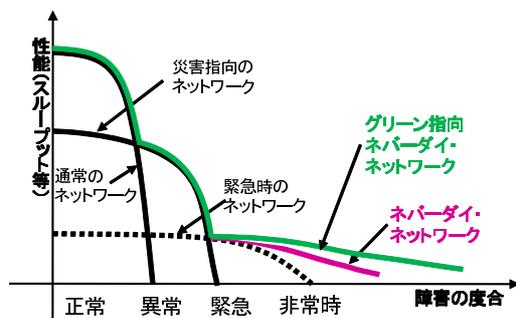


図1 ネバーダイ・ネットワークの性能の特性

Fig. 1 Performance characteristic of Never Die Network.

災害時に備えて、ハードウェアとソフトウェアに冗長性を持たせたシステム構成により、多少の障害でもサービスを維持することが可能なネットワークである。

● 緊急時のネットワーク

緊急時に特化したシステムであり、障害の度合いが大きくなっても、災害指向のネットワークと比較して性能は低下するが、通信サービスを維持することが可能なネットワークである。

図1に示すように、グリーン指向ネバーダイ・ネットワークでは、通常のネットワーク、災害指向のネットワーク、緊急時のネットワークおよびネバーダイ・ネットワークの特性を有するとともに、省電力化により電源などのネットワーク資源を効果的に活用する。これにより、正常時には、グリーン・モードで動作し、性能の低下を抑えつつ省電力化を実現する。また、グリーン指向のネバーダイ・モードでは、故障などの異常時や障害の度合いが大きくなっても、従来のネバーダイ・ネットワークよりも高い性能で長く通信機能を維持しサービスの提供が可能である。

3. グリーン指向ネットワーク管理技術

3.1 グリーン指向ネットワークの概要

グリーン指向ネットワークの監視・管理技術に関して、著者が研究開発してきたネットワーク管理に関する先端技術とそれに基づいてIETFにおいて国際標準化に成功した管理技術[18]を基盤とし、これまで著者が開発してきた国際標準と栗原グリーンプロジェクト（総務省）[21]の推進によるCO₂削減の実績を含むネットワーク管理の世界最先端の成果を、情報システム全体の省電力化の実現へ向けて発展・進化させ、ネットワークのグリーン化（省電力化によりCO₂排出量の削減化）を実現する。

図2に、本研究開発によって実現するグリーン指向ネットワーク管理技術の概要を示す。ネットワークシステムのCO₂排出量の削減のために、著者が国際標準化に成功したネットワーク管理技術[18],[19],[20]を発展させ活用し、ネットワークシステムのCO₂排出量（電力消費）の無駄をリアルタイムで監視・可視化する、(1)無駄の見える化（リアルタイム可視化）により生成されるネットワークマップ

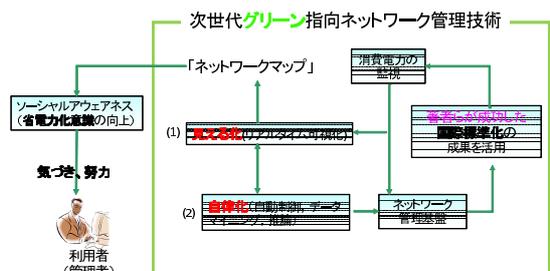


図2 グリーン指向ネットワーク管理技術の概要

Fig. 2 Overview of green-oriented network management technology.

によって利用者（管理者）に対し省電力化意識の向上（ソーシャルウェアネスの喚起）を行うことでCO₂を削減する。また、エネルギーポリシー（電力使用戦略・計画）に基づいて無駄を自動的に削減し、さらに(2)高度なデータマイニング、推論により無駄を自律的に削減する無駄削減の自律化の2つのモジュールを中核として実現する。

3.2 グリーン指向ネットワーク管理技術の構成

グリーン指向ネットワーク管理技術の主要な機能要件を図3に示す。グリーン指向ネットワーク管理技術では、新たに、無駄の見える化および無駄削減の自律化技術を開発する。具体的には、管理者の要求に応じてネットワークに接続されている機器を検出し、機器から排出されるCO₂量に相当する消費電力に関する情報を著者らが国際標準化に成功したネットワーク管理技術 [18], [19], [20] を用いて「リアルタイム」で収集し、そのデータの分析に基づき可視化表示する。この可視化表示により機器の消費電力に関する情報を「見える化」し、管理者がネットワークシステム全体の省電力化に向けた動的な電力使用計画の策定を可能とする機能を実現する。また、利用者にも消費電力の実態を意識付けさせ、ソーシャルウェアネスの向上に貢献する。さらに、エネルギーポリシー（電力使用戦略・計画）に基づき、機器の電源のON/OFFを自動的に制御するとともに、ネットワークシステムの消費電力を自律的に最適化し、無駄に消費されている電力の効果的な削減を可能とする。

本研究開発では、著者らが開発し製品化したネットワーク管理ソフトを基盤技術として、1)「無駄の見える化」、2)「無駄削減の自律化」の2つの仕組みを新しく研究開発し、統合することによってグリーン指向ネットワーク管理技術を実現する。

特に、「無駄の見える化」について、既存研究との相違は、次の2点にある。

- (1) グリーン化に向けた G-MIB (Green-MIB) の標準化技術の開発である。
- (2) 既存研究開発で行われている「消費電力情報のみ」に加えて、「ネットワークの『実際の』利用状況」も見え

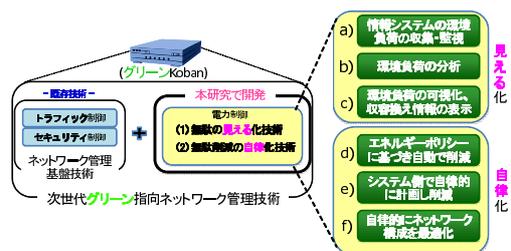


図3 グリーン指向ネットワーク管理技術の主要技術
Fig. 3 Main technologies of green-oriented network management technology.

る化し、消費電力と関連づけた見える化を実現し、真の無駄を明確に提示する。

具体的には、ネットワークの実際の利用状況と消費電力を関連づけて接続機器の環境負荷に関する情報（見える化の対象）を収集、分析し、接続されている機器の稼働（消費電力）状況や電力消費の内訳（利用目的別の分類など）といったシステム全体の環境負荷（電力消費状況）の情報をリアルタイムに表示する。管理者は、表示された情報に基づいて事前に電力使用計画を策定し、環境負荷を削減する。

「無駄削減の自律化」は、収集した情報をもとにデータマイニング解析の効果的な応用によって、サーバや端末の今後の利用状況を推測・予測し、自律的な環境負荷の削減を目指し、管理者が定めたエネルギーポリシーに基づいてネットワーク全体の環境負荷を自動的に削減する。また、サーバおよび端末の機器のCPUの負荷状況、サービスの利用状況、流れているトラフィックの情報などを収集する。さらに、サーバや端末の推測・予測した利用状況をもとに、機器の電源のON/OFFの動的な制御をシステム自身が推論することで、効率的な電源制御を行う。同時に、仮想化の技術を効果的に応用することによって、ネットワークサービスの配置を最適化する仕組みを考案し、自律分散的に環境負荷を削減する。なお、グリーンKobanの実現（設置したセンサなど）による新たな消費電力の増加は1台あたり約0.086Wであり、本管理技術によって得られる無駄の削減効果と比較してきわめて小さいため、導入による消費電力のオーバーヘッドは無視することができる。

3.3 グリーン指向ネットワーク管理技術（グリーンKoban）の詳細

グリーン指向ネットワーク管理（グリーンKoban）は、既存の管理機能に加えて、(1)無駄の見える化機能、(2)無駄削減の自律化機能の2つを追加して実現される。

3.3.1 無駄の見える化技術

無駄の見える化技術は、環境負荷モニタリング機能を基本に構成される。図4に概要に示す。本機能は、消費電力のみを可視化する従来の技術に加えて、接続されている機

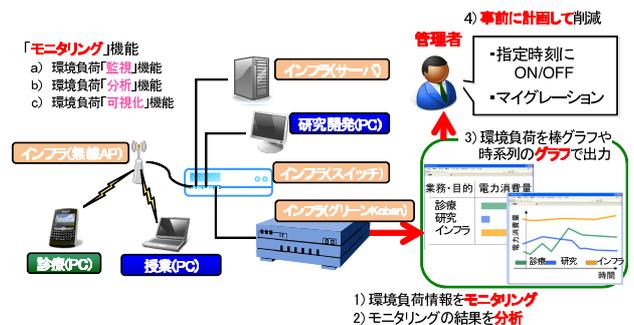


図4 環境負荷モニタリング機能の概要
Fig. 4 Overview of monitoring function of environmental burden.

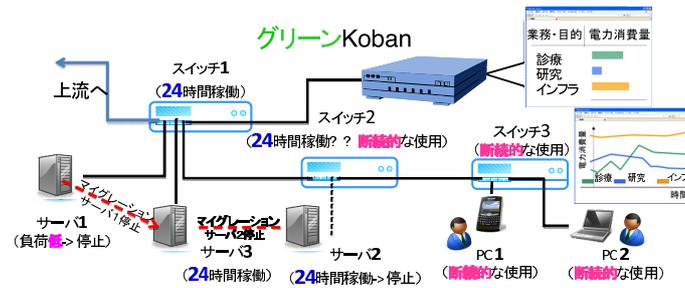


図 5 無駄削減の自律化機能の例

Fig. 5 Example of autonomous function for waste reduction.

器の種類、経理・営業などの業務内容、利用目的によって分類し、どの業務でどのくらいの環境負荷（電力消費に対応するCO₂の排出）が発生しているかを明確にする。この環境負荷を利用者に可視化し提示することによって利用者が各機器の環境負荷を容易に把握することが可能となる。この負荷モニタリング機能を各端末の管理データと連携することにより、機器種別および利用目的に従って環境負荷を分類する。この情報をウェブインタフェースなどで共有することにより、利用者は機器の電源を削減するための機器稼働計画の具体的な策定が可能となる。さらに利用者へ省電力化に対する意識、つまりソーシャルアウェアネスを喚起し、CO₂の排出の削減に大きく貢献することが期待できる。これらを実現する環境負荷モニタリング機能は以下の(a)から(c)の3項目から構成される。

〈環境負荷モニタリング機能〉

- (a) 環境負荷「監視」機能
スイッチ、サーバ、端末などの機器がネットワークへ物理的に接続されているかどうかの情報を収集するセンサ機能である。ネットワークに接続中の機器を稼働中、接続されていない機器を休止中とし、稼働中の機器の消費電力を算出し、機器ごとの環境負荷情報を収集・監視する。
- (b) 環境負荷「分析」機能
収集した機器の電力に関する情報を用いて利用状況を分析し、稼働状況、利用目的に従って、環境負荷の内訳を分析する。
- (c) 環境負荷「可視化」機能
(b)の環境負荷分析機能で分析した結果をウェブインタフェースによって、機器管理者へ可視化・表示し、消費電力削減へ向けた電力使用計画の策定を可能にする情報を提供する。

3.3.2 無駄削減の自律化技術 [28], [29]

無駄削減の自律化技術は、3.3.1項の環境負荷モニタリング機能により収集した機器の利用状況に関する情報を分析することで、システムの利用状況を予測し、システム全体の省電力化に向けた動的な使用計画（エネルギーポリシー）

に基づいて自律的に機器の電源のON/OFFを判断・制御する技術である。たとえば、図5において24時間稼働が必要なサーバ2がスイッチ2に接続されている場合、スイッチ2は24時間稼働する必要があるが、サーバ2で稼働しているサービスをサーバ3へ移転することで、スイッチ2の電源を落とすことが可能となり無駄な消費電力を削減する。また、サーバ1のCPU負荷が小さい場合、サーバ1で稼働しているサービスをサーバ3へ移転することで、サーバ1の電源を落とし、消費電力を削減する。さらに、エネルギーポリシーを導入し、機器の利用状況の分析結果に基づいて、機器の電源のON/OFFの自動制御を行うとともに、ネットワーク構成やサービスを自律的に切り替えることで無駄な消費電力を削減する。

これらを実現する無駄削減の自律化機能は以下の(a)から(c)の3項目から構成される。

〈無駄削減の自律化技術〉

- (a) 機器の動的電源制御機能
「エネルギーポリシー」に基づき、利用されずに電源が入っている場合には、利用者や管理者に警告を出す。また、機器が利用されていない場合、シャットダウンしてもよいとエネルギーポリシーで定義されていれば、機器の電源を自動的にOFFにするとともに、必要に応じて遠隔から機器の電源を自動的にONにする。
- (b) 電力利用計画の自律化機能
本機能では、特に、端末やプリンタなどから送信されるネットワークトラフィック情報や端末で稼働しているプログラムなどの情報を取得し、データマイニングを用いた分析や過去の利用履歴に基づいた帰納学習機能を開発する。この機能により利用されない端末の電源のON/OFFを自律的に制御し、ネットワークシステムの電力利用計画を自律的に運用することで、ネットワークシステムの環境負荷を削減する。
- (c) ネットワーク構成の自律化機能

図5に例示するように、夜間に負荷が小さなサーバの消費電力を削減するため、1つのサーバに各サーバで稼働しているサービスを集約し、ネットワーク構成の論

理的な切替えを行う仮想化機能を開発する。本機能により、機器やサービスの利用状況とネットワーク構成の情報を動的に収集するとともに、消費電力削減に好ましくない構成を自動的に検出し、サービスの配置転換を行うことで効率的なネットワーク構成を自律的に再構成する。たとえば、図5に示すように、サーバ2で動作しているウェブやDNSなどのサービスをサーバ1へ移動することで、サーバ2の電源をOFFにすることが可能となる。また、サーバ1へのアクセス数が多い昼間は、サーバ1とサーバ2の複数台でサービスを稼働させ、アクセス数が比較的少ない夜間には、サーバ2のみで稼働させ、アクセス数に応じて動作するサーバ数を調整する仕組みを構成する。

3.3.3 実証実験

本技術の有用性を確認するため、著者らが所属する東北大学の研究室やパソコンルームに設置されたパソコン、プリンタ、ネットワーク機器から構成される50-150台程度の機器が接続された中規模ネットワークなどにおいて、開発したグリーンKobanを配置し、「無駄の見える化」、「無駄削減の自律化」技術による環境負荷の削減状況を検証する実験を進めている。また、大学の総計約5,000台の端末、サーバ、携帯端末やプリンタなどが接続された大規模ネットワークシステムにおいて、開発したグリーンKobanをネットワーク上に配置し、「無駄の見える化」技術を検証するとともに、中規模ネットワークの検証結果を用いて、「無駄削減の自律化」技術を大規模ネットワークに適用した際の効果を検証・分析し、本研究開発の有効性を示す実験環境を構築中である。

4. 災害に強い情報通信システム

本章では、広域に分散する10カ所程度の支所を持つ地方自治体をモデルとして取り上げ、災害に強い情報通信システムの構成例を示す。特に、ネバーダイ性を実現するために有線と無線による3階層の重層的なネットワークを構成する。

4.1 ネバーダイ・ネットワークの構成

4.1.1 有線と無線による重層構成ネットワーク

例示するシステムは、ネバーダイ性を実現するために図6に示すように有線と無線による3階層の重層的なネットワークで構成される。有線ネットワークは、自治体などが利用する既存の自営ネットワークもしくは公衆ネットワークを利用する。一般にコストパフォーマンスの観点から、インターネットなどの外部ネットワークへの接続は市役所など組織の中心的な庁舎を経由して行われる。しかし、本提案ではネバーダイ性を確保するため、通信事業者の通信設備局の分散化を目的として地理的に遠い場所にある支所からもインターネット接続を行う場合も考慮する。遠隔

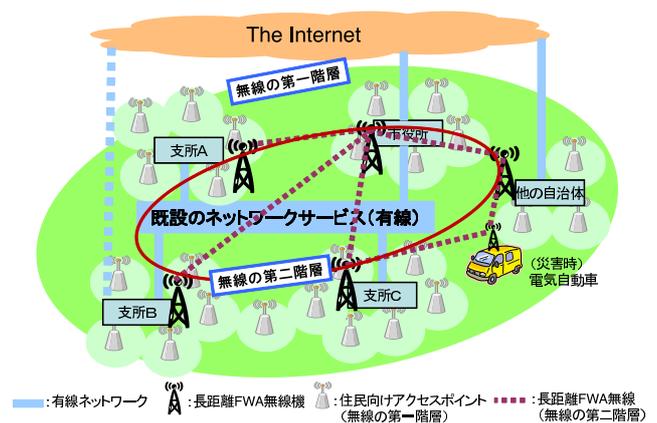


図6 3階層で構成されるネバーダイ・ネットワークの例
 Fig. 6 An example of Never Die Network with three-layered network structure.

地にまたがる複数の通信設備局へ公衆接続回線を収容する結果、ネットワークは大災害時においてもインターネットなどの外部ネットワークとの接続性が保たれる可能性を高めることができる。広帯域・高スループットを確保できるため、通常のトラフィックは主に有線ネットワーク上で通信される。

“正常時”だけでなく“災害直後”から“避難生活”のフェーズにおけるネバーダイ性を実現するため、無線システムは以下に示すような2階層の無線ネットワークで構成する。

〈無線の第1階層〉

第1階層は、802.11s[22]に基づくWiFiフルメッシュのパブリックワイヤレスネットワークで構成される。図6では、住民向けアクセスポイントを円状に連結した領域が第1階層の無線ネットワークである。本ネットワークを構成する各々のアクセスポイントは、ビームフォーミング技術により通信距離を通常の約2倍とすることが可能である。この第1階層の無線ネットワークは、各アクセスポイントがカバーする半径約1kmの無線エリア(セル)で面展開されることとなる。市役所や支所など自治体の中心地を第1階層の無線ネットワークでカバーするため、各アクセスポイントは市役所や支所などの行政の中心地とその周辺の公民館や公園などに設置する。各無線装置は、60-100wh程度の消費電力で運用可能なため、ハイブリッド発電機(風力+太陽電池)による供給電源で稼働させることが可能である。このため、電源の確保の難しい高台などの避難場所にも設置することが可能である。この無線ネットワークは、平時においてはWeb認証などにより住民へ開放するが、災害時には認証を解除し誰もが利用可能となるよう開放する。また、平時においては、プリペイド方式により観光客へ利用開放するなどの有効活用も可能である。

〈無線の第2階層〉

無線システムの第2階層は、市役所と支所、支所どうし

など自治体内の中心地区を接続する有線基本ネットワークを補助するサブネットワークである。この第2階層の無線ネットワークは、4.9 GHzの長距離無線を基本として構成するが、図6における支所Bと支所Cの間のように物理的に距離が近い場合に限り、上記第1階層を担うWiFiフルメッシュのネットワークを利用してマルチホップで接続することができる。第2階層の無線ネットワークでは、通常時には住民や観光客向け無線サービスのインターネット接続や支所・市役所間の電話やテレビ会議、BEMSなどの使用電力の管理のための情報を転送するために利用する。しかし、いざ災害が発生し、有線の基本ネットワークが切断された場合には、すべてのトラフィックをこの第2階層の無線ネットワークへ集約することによって自治体ネットワークの通信接続性を確保する。

また、災害の度合いが大きくこの第2階層の無線ネットワークに障害が発生した場合も考慮して、中継局を搭載した電気自動車を派遣し対応することも想定している。このように、第2階層の無線ネットワークは中継局を利用して接続先を延長することが可能なため、災害で当該自治体のインターネット接続用の外部回線が切断された場合でも、近隣の自治体に協力を求めることによって外部（インターネット）との接続性を保つことが可能となる。この結果、大規模な被災を受けたとしても、外部ネットワークからの孤立を回避することができる。

4.1.2 実証実験

実証実験においては、以下のような基準で評価を行うことが考えられる。

- 無線メッシュ切替えの応答性（遅延時間）の実フィールドでの確認と、アプリケーション動作への影響の評価
- 季節による気象条件の変化の無線特性への影響の評価
- 樹木などの無線減衰への影響の評価
- 支所内無線エリア整備により可能となる被災者支援施策の提案と評価
- 支所間の情報共有により可能となる被災者支援施策とシミュレーションによる評価

4.2 多様なメディアへの情報一括配信

構成するシステムでは、“災害直後”のフェーズにおける人々を支援するため、図7に示すような防災無線伝達制御システムを構成し多様なメディアへ向けた情報の一括配信サービスを行う。

〈入力情報〉

まず、全国瞬時警報システム（J-ALERT）や公共情報コモンズ、気象庁からの情報などパブリックな情報を防災情報伝達制御システムの入力情報とする。また、前節で述べた2階層の無線システムを介して、同一自治体エリア内にあるFBG（Fiber Bragg Grating）などの環境センサや観測カメラなども入力情報として扱うことが可能である。さ

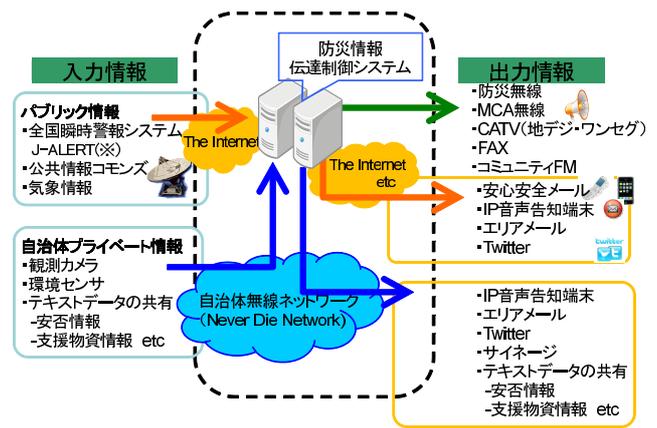


図7 災害に強い情報通信システム

Fig. 7 Disaster-resistant information communication system.

らに、すでに自治体に導入されていると考えられる職員安否確認、参集、見守り、助け合い支援、地域防災情報、被災者支援情報といった外部システムとの連携による入力も可能としている。

〈出力情報〉

災害に強い情報通信システムの出力としての外部システムは、既存のサービスとして普及している多数のメディアを利用する。東日本大震災では、自治体の保有する防災無線が機能しない、もしくは機能したとしても音声を重ねるなどの原因で住民に情報が正しく伝わらないなどの問題が発生することが明らかとなった。このため本システムでは、住民がすでに保有していると考えられる複数の情報機器を介して、生命に関わる重大な情報を粘り強く配信することを主眼としている。たとえ個々の住民が図7に示す外部出力装置の一部しか利用できなくても、集団行動をとることによりすべての住民に情報が正確に伝達できることが期待される。

4.3 情報の一元管理と共有

4.3.1 災害時における情報管理

被災支援作業を行う自治体が、“災害直後”から“避難生活”のフェーズにわたり住民向けに情報を提供する場合、その自治体内で情報を共有し一元管理する必要がある。このフェーズで共有されるべき情報は、“災害直後”から時々刻々と大きく変化することが東日本大震災の経験から明らかになった。たとえば、“災害直後”から“避難完了”までの間は、住民の安否確認が最も重要な情報となる。しかし、被災後3日から物流が回復する1~2週間後までの間は備蓄物資の情報が特に重要であり、さらに物流が回復した2週間~1カ月後は被災者の状況に関する情報が重要性が高くなる。このように、管理すべき情報の重要性は刻々と変わるため、災害時の情報共有システムに求められるものは、特定の情報を管理する専用アプリケーションはなく、情報（文書）を距離を超えて共有できるファイル共有シス

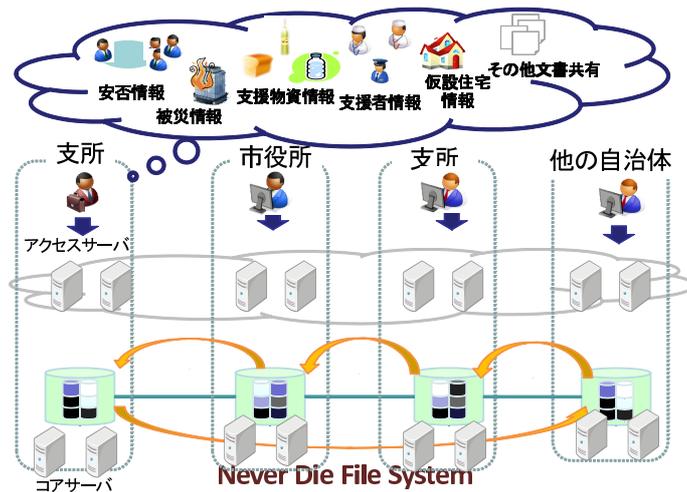


図 8 ネバーダイ・ファイルシステム

Fig. 8 Never Die File System.

テムということになる。

ファイル共有を実現する有効な手段の1つとして、Drop-Box [23]をはじめとするクラウドストレージサービスの利用があげられる。また原始的な方法としては、各々の自治体でファイルサーバを構築するという手法も考えられる。しかしながら、どちらの手法を用いた場合でも、以下に示すような問題が発生する。

[クラウドストレージサービスの問題点]

- 被災者の氏名や性別、血液型といった個人情報扱う場合には、無関係な利用者からのアクセスを回避するため、厳密なアクセス制限が必要になる。
- インターネットが利用できない環境からはアクセスできない。

[ファイルサーバの問題点]

- ファイルサーバの故障によりサービスが停止する（単一障害点：SPF（Single Point of Failure）の存在）。
- 大量にアクセスがある場合に、通信速度が著しく低下する。

これらのことから、災害時に支援作業を行うグループ（自治体）の一元的情報共有には、クラウドサービスの持つ頑強性とファイルサーバの持つ秘匿性をあわせ持つ“閉じたネットワークで実現される分散型ファイルシステム”が有用であると考えられる。

4.3.2 ネバーダイ・ファイルシステム

本項では、前項で記述した問題を解決するため、頑強性を備えたネバーダイ性をファイルシステムに適用した提案を行う。

大災害時においても途絶えなく機能するファイルシステムを実現するためには、まず単一障害点（SPF）を排除する必要がある。このため、自治体ファイルシステムを預かるサーバ室などでシステムの一部が被災したとしても、システム全体としては影響を受けないことを実証により確

かめる必要がある。本稿では、被災地における情報に対する多様なニーズに柔軟に対応できるように、安否情報、被災情報、支援物資情報、支援者情報、災害情報を一元管理できるプラットフォームとしてのファイルシステムを Never Die File System (NDFS) と称することにする。ネバーダイ・ファイルシステムへの要求条件を以下に示す。

〈NDFSの要求条件〉

- (1) 分散ファイルシステムを基本とし、単一障害点を持たない構成とする。
- (2) データの一貫性を保つためのデータ複製までの時間差が極小である。
- (3) 既存のアプリケーションの利用基盤とするため、標準的な POSIX ファイルシステムとして利用可能とする必要がある。
- (4) すべての箇所ですべて同じ内容にアクセス可能である必要があり、タイムラグがなくリアルタイムで使える必要がある。

本システムでは、DR (Disaster Recovery) を実現する広域分散型ストレージアーキテクチャ [24] に基づき、図 8 に示すように複数の自治体の多数の庁舎を利用してストレージを分散配置する。この結果、万が一自治体の庁舎の1つが被災したとしても、残された部分で動作するファイルシステムを提供することができる。本システムは、並列分散コンピューティングを応用したスケールアウト型のストレージであり、メタ情報やタグを利用して情報の鮮度、正当性が管理されるなどの特徴を有する。特に位置情報を考慮してデータが分散格納されるため、データ複製は物理的に離れた位置に行われるという特徴を持つ。利用者は分散配置されるアクセサーバを介して、ファイルシステムにアクセスする。ファイルの実体は分散配置されるコアサーバに蓄積される。

5. おわりに

情報システム全体のグリーン化と耐災害性強化を同時に実現するグリーン指向ネバーダイ・ネットワークを提案した。まず、災害の状況、達成すべき性能、省電力性の観点からグリーン指向ネバーダイ・ネットワークのモデルを構成した。グリーン化に関しては、G-MIBの国際標準化に向けた新しい「見える化」技術と学習やデータマイニングなどを用いた機器の利用状況の分析結果に基づく無駄削減の自律化機能を中心に述べた。ネバーダイ・ネットワークについては、有線・無線ネットワークを重層的に構成し、災害時の耐障害性に優れた情報通信システムの構成例を示した。現在、総務省 ICT グリーンイノベーション推進事業 (PREDICT) の支援の下、研究開発を推進中である。

謝辞 本研究の一部は、平成 23 年 10 月開始の総務省 PREDICT「情報システムの省電力化を実現する次世代ネットワーク管理技術の研究開発」の支援を受けて実施している。

参考文献

- [1] Harle, R.K. and Hopper, A.: The Potential for Location-Aware Power Management, *Proc. 10th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp2008)*, pp.302-311 (2008).
- [2] Kelly, T. and Adolph, M.: ITU-T Initiatives on Climate Change, *IEEE Communications Magazine*, Vol.46, No.10, pp.108-114 (2008).
- [3] Gupta, M., Intille, S.S. and Larson, K.: Adding GPS-Control to Traditional Thermostats: An Exploration of Potential Energy Savings and Design Challenges, *Proc. 7th International Conference on Pervasive Computing (Pervasive2009)*, LNCS, Vol.5538, pp.95-114 (2009).
- [4] Haratcherev, I., Fiorito, M. and Balageas, C.: Low-Power Sleep Mode and Out-Of-Band Wake-Up for Indoor Access Points, *Proc. 2nd International Workshop on Green Communications (GreenComm2009) in Conjunction with the IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM2009)*, pp.1-6 (2009).
- [5] Brebner, P., O'Brien, L. and Gray, J.: Performance Modelling Power Consumption and Carbon Emissions for Server Virtualization of Service Oriented Architectures (SOAs), *Proc. 13th IEEE International EDOC Conference (EDOC2009)*, pp.92-99 (2009).
- [6] Ruth, S.: Green IT More Than a Three Percent Solution?, *IEEE Internet Computing*, Vol.13, No.4, pp.74-78 (2009).
- [7] Francisco, M.-P., Diego, M.-J. and Virgilio, G.-I.: Energy Management System as an Embedded Service: Saving Energy Consumption of ICT, *Architecture of Computing Systems (ARCS)*, LNCS, Vol.5455, pp.195-206 (2009).
- [8] Ochiai, H., Fujiwara, N. and Esaki, H.: Green UT Energy-Aware Facility Networking: A Challenge to the Standardization of Architecture and its Protocol, *Proc. 6th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign)* (2009).
- [9] Kato, T., Cho, H., Lee, D., Toyomura, T. and Yamazaki, T.: Appliance Recognition from Electric Current Signals for Information-Energy Integrated Network in Home Environments, *ICOST2009*, LNCS, Vol.5597, pp.150-157 (2009).
- [10] Rhee, J.M., Lim, D.S. and Chung, S.-Y.: A proposal of GHG inventory implementation for telecommunication sector in Korea, *Proc. 31st International Telecommunications Energy Conference (INTELEC2009)*, pp.1-4 (2009).
- [11] Harmon, R., Demirkan, H., Auseklis, N. and Reinoso, M.: From Green Computing to Sustainable IT: Developing a Sustainable Service Orientation, *Proc. 43rd International Conference on System Sciences (HICSS2010)*, pp.1-10 (2010).
- [12] Green University of Tokyo Project, available from <http://www.gutp.jp/>.
- [13] 若田真琴, 石田和生, 宮崎 徹: 家庭やオフィスの「もったいない」電力を節約する「グリーンタップ」, *NEC 技報*, Vol.62, No.3, pp.92-95 (2009).
- [14] 栗山 央, 峰野博史, 水野忠則: 既存家電製品を用いたホームオートメーションの実現, *情報処理学会論文誌*, Vol.49, No.1, pp.265-275 (2008).
- [15] 菅沼拓夫, 北形 元, 加藤貴司, 白鳥則郎: 無線ネットワークにおける Never Die Network サービス機構の構成, *電子情報通信学会総合大会講演論文集* (2003).
- [16] 久慈 渉, 小出和秀, 白鳥則郎: ネバー・ダイ・ネットワークへ向けたネットワーク管理技術の研究開発, *情報処理学会東北支部平成 19 年度第 5 回研究会*, 07-5-A-23 (2008).
- [17] 久慈 渉, 佐藤剛士, 小出和秀, 柴田義孝, 白鳥則郎: ネバー・ダイ・ネットワークと防災システム, *情報処理学会研究報告*, マルチメディア通信と分散処理研究会報告, Vol.54, pp.131-135 (2008).
- [18] Keeni, G.: RFC4498: The Managed Object Aggregation MIB (2006).
- [19] Keeni, G., Koide, K., Nagami, K., and Gundavelli, S.: RFC4295: Mobile IPv6 Management Information Base (2006).
- [20] Gundavelli, S., Keeni, G., Koide, K. and Nagami, K.: RFC5488: Network Mobility (NEMO) Management Information Base (2009).
- [21] Shiratori, N., Hashimoto, K., Chakraborty, D., Takahashi, H., Suganuma, T., Nakamura, N. and Takeda, A.: Kurihara Green ICT Project - Towards Symbiosis between Human's Life and Nature, *Journal of Internet Technology (JIT)*, Vol.12, No.1, pp.1-11 (2011).
- [22] 青木秀憲, 竹田真二ほか: IEEE802.11s 無線 LAN メッシュネットワーク技術, *NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル*, Vol.14, No.2, pp.14-22 (2006).
- [23] DropBox Web site, available from <https://www.dropbox.com/>.
- [24] 中川郁夫: DR を実現する広域分散型クラウドストレージアーキテクチャの検討, *電子情報通信学会インターネットアーキテクチャ研究会*, *信学技報*, Vol.111, pp.55-60 (2012).
- [25] 中村直毅, 稲葉 勉, 菅沼拓夫, キニ・グレン・マンスフィールド, 白鳥則郎: 次世代グリーン指向ネットワーク管理技術, *2012 年電子情報通信学会総合大会* (2012).
- [26] 小笠原孝志, 稲葉 勉, 中村直毅, 菅沼拓夫, 白鳥則郎: グリーン指向ネットワーク管理に基づくセンサ連動型 ICT システムの省電力化, *2012 年電子情報通信学会総合大会* (2012).
- [27] 稲葉 勉, 小笠原孝志, 中村直毅, 菅沼拓夫, 白鳥則郎:

グリーン指向ネットワーク管理に基づく IP 電話システムの省電力化, 2012 年電子情報通信学会総合大会 (2012).

- [28] 栗原孝太, 大澤由憲, 菅沼拓夫, 橋本和夫: 電力の有効利用を実現するためのプランニングの検討, 第 74 回情報処理学会全国大会 (2012).
- [29] 吉野太郎, 大澤由憲, 菅沼拓夫, 橋本和夫: 消費電力観測値からの生活状況推定手法の提案, 第 74 回情報処理学会全国大会 (2012).



白鳥 則郎 (フェロー)

1977 年東北大学大学院博士課程修了. 1990 年同大学工学部教授を経て, 1993 年同大学電気通信研究所教授. 2010 年東北大学名誉教授, 同大学電気通信研究所客員教授. 2012 年早稲田大学大学院国際情報通信研究科教授. IT に

基づいた人と自然の調和/共生等の研究に従事. IEEE フェロー, 文部科学大臣表彰「研究部門」, 情報処理学会功績賞, 電子情報通信学会功績賞等受賞. 情報処理学会会長 (2009~2011 年). IEEE 仙台セクション Chair (2010~2011 年).



稲葉 勉 (正会員)

1995 年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了. 同年日本電信電話株式会社入社. NTT ネットワークサービスシステム研究所, NTT 東日本研究開発センタを経て, 現在 NTT 東日本—宮城に勤務. 2010 年東北大学大学院

情報科学研究科博士課程修了. 博士 (情報科学). VoIP, P2P, Grid コンピューティング, グリーン ICT の研究開発に従事.



中村 直毅 (正会員)

2006 年東北大学大学院情報科学研究科博士課程単位取退学. 博士 (情報科学). 2006 年同大学院医学系研究科助手. 2007 年同研究科助教. 2012 年同研究科講師. 無線ネットワークおよびネットワーク管理手法の研究開発

に従事. 情報処理学会第 44 回 MBL 研究会優秀発表賞, DICOMO2010 優秀論文賞受賞.



菅沼 拓夫 (正会員)

1997 年千葉工業大学大学院博士後期課程情報工学専攻修了. 1997 年東北大学電気通信研究所助手, 2003 年同研究所助教授を経て, 2010 年同大学サイバーサイエンスセンター教授. やわらかいネットワーク, エージェント

指向コンピューティング, 共生コンピューティング等の研究開発に従事. The 8th JWCC Best Presentation Award, UIC2007 Outstanding Paper Award 等受賞. 博士 (工学). IEEE, 電子情報通信学会各会員.