

東大グリーン ICT プロジェクト

江崎 浩^{†a)} 落合 秀也[†]

The Green University of Tokyo Project

Hiroshi ESAKI^{†a)} and Hideya OCHIAI[†]

あらまし 持続可能なシステムの設計には、エコシステムの考え方が適用されなければならない。インターネットは、自律性、自立性そして相互接続性を持ち、常に、システムを構成するモジュールに対する選択肢 (Alternatives) を提供することで、エコシステムを構成した。本論文では、エネルギーと環境問題を解決しながら、同時に継続的なイノベーションを実現するための、社会基盤の研究開発と普及を実現する手法を議論し、その具現化を目指して設立・運用されている東大グリーン ICT プロジェクトの概要を概観する。

キーワード エコシステム、インターネット、東大グリーン ICT プロジェクト、ファシリティー

1. ま え が き

21 世紀の社会・産業基盤は、情報通信システムがその創造性と持続性の実現には必須であり、情報通信システムと実空間で展開されるオブジェクトとの連携、すなわち、実空間に存在する物 (シングズ; Things) の状態の把握 (センシング; Sensing) と制御 (アクチュエーション; Actuation) の設計と実装が、社会全体の効率を決定することになる。グリーン IT/ICT は、IT/ICT 機器・システム自身の省電力化・環境負荷低減 (of IT) と、IT/ICT 機器を用いた省電力化・環境負荷低減 (by IT) を実現するものである。

IT/ICT 技術を用いたグリーン IT/ICT (by IT) の推進にあたっては、社会全体のエネルギー消費量の正確な把握に基づいた戦略の策定が必要である。IT/ICT 機器自体のエネルギー消費量は、空調や照明などの Non-IT/ICT 機器のエネルギー消費量に比べて小さいが、IT/ICT 機器なしには、これらの効率化と省エネ化は実現できない。人間にたとえれば、IT/ICT 機器や IT/ICT 機器が仕事をする場所であるコンピュータールームや IDC (Internet Data Center) は『脳』にあたり、ネットワークは『神経系』である、『賢く能率的

な脳』と『俊敏に動作する神経』が、人間の効率的で機能的な活動を実現するのは明らかである。更に、これは、イノベーションの持続性を実現するに資するインフラでなければならない。

2. 21 世紀の都市設計

効率的で持続的な都市空間の発展を実現するスマートシティーの実現には、地球全体を覆うセンサネットワークの構築と、センサノードやアクチュエータノードをはじめとしたすべてのデジタル機器の協調動作が実現されなければならない。更に、これらの動作は、中央集散的に管理制御することは不可能であり、ローカル及びグローバルの両方において自律分散的な協調動作環境が構築・管理・運用され、持続的 (Sustainable) な進化 (Innovation と Revolution) を実現するに資する基盤を前提としなければならない。このようなシステムは、エコシステムと捉えることができる。

エコシステムとは、『食物連鎖など生物の相互関係と、生物とそれを取り囲む無機的環境の間の相互関係を総合的に捉えた生物社会のまとまりを示す概念』であり、『エコシステムは周辺の状況などにより変化するが、その系の中で互いに働きかけて安定化する性質がある』(Wikipedia より) とされている。ビジネスにおいては、関係する企業・組織がビジネス活動もにおいて協調と競争を行うことで、利益やイノベーションと創造を持続し、その構造を変化させていくことを意味している。エコシステムは、以下のシステムの要件を

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科, 東京都
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo,
113-8654 Japan

a) E-mail: hiroshi@wide.ad.jp

満足しなければならないと考える。

- (1) 自立性 (Independent)
- (2) 自律性 (Autonomous)
- (3) 交流性 (Interaction, Interoperability)
- (4) 適応性 (Adoptability, Agility)

21世紀の都市を『人体』にたとえれば、インターネットは『神経系統』に相当し、クラウドコンピューティング基盤に代表されるサーバシステムは『頭脳』に相当する(図1)。ヒトは、いくら、すばらしい筋肉や骨(=コンポーネント)をもっている、コンポーネントを上手に制御するための神経と頭脳がなければ、非効率な動作しかできず、時に、機能しない事態も発生してしまう。また、優れた制御システム(=神経系+頭脳系)は、同じエネルギーでより多くのアウトプットを生産することができる。一方で、システムに、コンポーネントやモジュールの取り換え性(Alternativeness)をもつことを可能とするシステム設計を行うことによって、革新的な新しいコンポーネントの導入を可能にしなければならない。

ICTを用いた省エネ・環境対策は、その本来の目的だけではなく、結果的に、デジタルユビキタスセンサネットワークを構築することになる。このデジタルユビキタスセンサネットワークは、新しいサービスや産業を、容易にかつ安価に展開可能としなければならない。そのために、透明性と相互接続性をもったインフラの展開と整備が進められなければならない。

[Step.1] センサや制御機器が、相互接続され、協調動作し、エネルギー流の制御が自在に可能なインフラの構築。

[Step.2] ユビタスに存在するセンサや制御機器、更

に、これらの機器が生成するデジタル情報が、ほぼゼロの低コストで流通可能なインフラの登場。

[Step.3] このユビキタス・デジタル・インフラを用いた新しいサービスが、グローバル規模で創造・展開。

すなわち、効率的で持続可能な自律型のグリーンICTシステムは、エコシステムの特長をもつように設計されなければならない。

3. 東大グリーンICTプロジェクト

3.1 プロジェクトの概要 [3]~[5]

グリーン東大工学部プロジェクト(2010年4月より『東大グリーンICTプロジェクト』に名称変更、英文名はGreen University of Tokyo Project, 略称GUTP)では、ファシリティの設計、構築、運用、管理並びに制御に関するステークホルダからなる、エコシステムの共同研究開発コンソーシアムを形成した[3]。

東京大学本郷キャンパスの中心部に位置する工学部新2号館を実フィールドとした実証モデルの設計と構築・運用・評価を通じて、先端的で実践的なICT技術を用いた、効率的で持続可能な発展を実現するビル(スマートビルディング)、更に多様なビルの集合体であるキャンパス(スマートキャンパス)を具現化するものである。すなわち、東京大学工学部2号館(2005年竣工地上12階総合研究教育棟)を用いて、総合的で先進的なファシリティマネジメントシステム技術の検証と評価、更に、運用技術の確立を目指すとともに、本実証実験フィールドでの成果を、他の大学組織への横展開と、公共施設等への縦展開、更に新しいビジネス領域を創造するに資する研究開発成果を目指している。

3.2 研究開発の概要 [5]

以下に、本共同研究コンソーシアムにおける研究開発計画の概要を述べる。

(1) ファシリティマネジメントシステムの稼働実態の正確な計測と解析

(a) マルチベンダー、マルチサブシステム環境での統合的データ収集技術の確立

複数のマルチベンダーからなるサブシステム間での、計測・制御データの相互乗り入れ環境の構築に必要な技術仕様の策定と実システムにおける導入と、その動作検証を行う。サブシステム間での統合的な計測・制御データの相互乗り入れに必要な技術仕様は、関連する技術標準化機関への提案などを行い、

人(Human-being)	都市(City)
脳+頭骸骨(Brain)	Cloud Computing
頭骸骨(Skull), 血管(Blood vessels) 神経(Brain nerves)	Data Center Servers, switches
神経(Nerves)	Internet
各器官(Organs)	Facilities (i.e., Things)
骨等(Bone)	Building(構造物)
センシング器官(Sensor)	Sensor
筋肉(Muscle)	Actuator

図1 ICTと都市設計の概念

Fig.1 Concept of smart city using ICT.

その普及と標準化を推進する。

このような、マルチベンダー環境でのファシリティマネージメントの実現に資する技術の確立は、サステイナブルなファシリティシステムの実現を可能にする。すなわち、継続的な先進技術の導入と、複数技術の共存（システムの Availability 性の向上）を可能なものにし、ファシリティシステムの継続的進化と稼働信頼性の向上の実現に資する。

(b) 大学における総合教育研究棟におけるデータ収集指針の確立

大学等の教育研究施設（並びに公共設備）における、環境対策や省エネ対策に利用可能な、ファシリティ（ビルそのものだけでなく、その中で稼働する実験装置などを含む）の計測と制御に対する指針を確立する。

(2) 計測データの解析・表示による効果の検証

計測データの解析結果を、ファシリティの運用者及び利用者に表示並びにフィードバックすることで、利用者の活動形態が改善され、活動の効率化や省エネが実現されることが広く知られている。今回取り組む、大学における総合教育研究棟は、利用者の統制が容易ではない典型的な事例である。

(3) 先進的制御技術・制御システムの導入と効果の検証

計測・解析したデータをもとに、ファシリティの管理・制御を行わなければならない。データの測定に関しても、どのような測定システム並びに測定技術が、このような環境に効果的であるのか。どのように、既設のファシリティに、付加的な測定装置を設置し運用するのか、また、どのような測定データ並びに測定装置が、効果的な管理制御に資するのかを実証環境において検証する。

3.3 研究開発計画の推進体制

ファシリティの設計、構築、運用、管理並びに制御に関係するステークホルダからなる、エコシステム的な共同研究開発コンソーシアムの形成を目指した。すなわち、ICT 機器のベンダー、建築会社、総合電機会社、情報家電会社、セキュリティサービス会社、ビル管理会社、更に、ファシリティのデベロッパ会社など、川上から川下まで、関連する企業が研究開発の情報を共有し、マルチベンダー環境で動作可能な、ファシリティシステムの研究開発を推進している。

3.4 今後の展開

本プロジェクトの成果は、他学への展開、教育・

研究設備への展開、自治体を含む公共設備への展開に資する技術仕様の策定と普及を国内のみならず国外に展開すること、更に相互接続性確立を目指した国際標準化活動の展開を計画している（図2）。我々は、FIAP (Facility Information Access Protocol) [6] を研究開発し、現在、ASHRAE BACnet [7] の拡張及び IEEE1888 (UGCCnet Protocol; Ubiquitous Green Community Control Network Protocol) [8] への提案活動を展開している。

また、GUTP とほぼ、同様の構造をもつ産官学連携プロジェクトを中国北京市において、清華大学を中心に設立・展開しており、GUTP と密接な協調関係を確立、中国国内での実証実験と IEEE1888 の標準化活動に関する協業を展開している。

更に、本プロジェクトを通じた知見は、新しいアプリケーションやビジネス領域の創成へと展開しようとしている。すなわち、新しい情報基盤の構築と提供によって、その本来の目的とは異なる創造的な展開が実現されようとしている。また、本プロジェクトの成果は、ファシリティにおける環境対策や省エネ対策にとどまらず、積極的にファシリティシステムの構造設計や、これらが相互に作用して構築される都市空間の構造設計へと進化する可能性ももっている。ファシリティを構成するコンポーネントの協調動作を用いた最適化問題を解くのではなく（Reactive な対策）、最適な運用を実現するコンポーネントの配置の最適化を行う Proactive な対策への進化と進展の推進が今後の方向性とならなければならない。

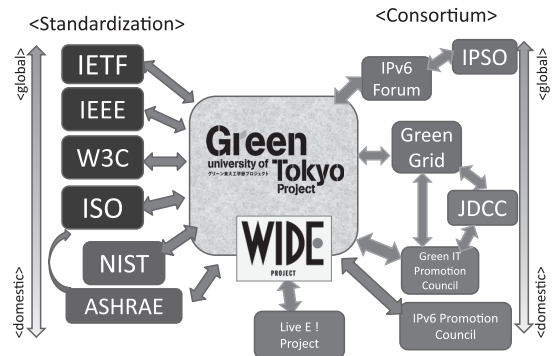


図2 グリーン東大 標準化関係図
Fig.2 Standardization map around GUTP.

4. システム概要と要素技術

4.1 システム設計の概要

設備ネットワークにおけるセンサやアクチュエータ間でアクセス・通信プロトコルとしては、BACnet/WS, oBIX [9], SNMPなどが存在するが、これらは、アクセス先にセンサやアクチュエータ機器が存在することを想定して設計されており、基本的にはこれらの機器へのゲートウェイとしてしか機能しない。また、大量のデータ転送・保存及び蓄積されているデータセットに対する種々の操作（検索や集約化など）を行うことは想定されていない。GUTPでは、データベースセントリックな機能・動作が、これまでのセンサとアクチュエータ間のゲートウェイ機能と共存・両立可能なシステムアーキテクチャプロトコルであるFIAP (Facility Information Access Protocol) [10] の設計を行った(図3)。すなわち、センサアクチュエータ及びゲートウェイ(GW)に、データの蓄積機器(Storage)とアプリケーション(APP;データの加工やユーザとのインタラクションを行うモジュール)を加えたシステムコンポーネントが相互接続可能となるためのプロトコル体系を設計した。これらコンポーネントの区別を行うことなく、すべての多様なコンポーネントが自律的に通信可能となる。FIAPにおいては、三つの通信プロトコル(FETCH, WRITE, TRAP), 二つのMethods (data, query), そして、四つのコンポーネント(GW, APP, Registry, Storage)を定義した。今後、二つの通信プロトコル(REGISTRATION, LOOKUP), 二つのMethod (registration, lookup)を拡張予定である。FIAPのアーキテクチャ上の特長は、以下のとおりである。

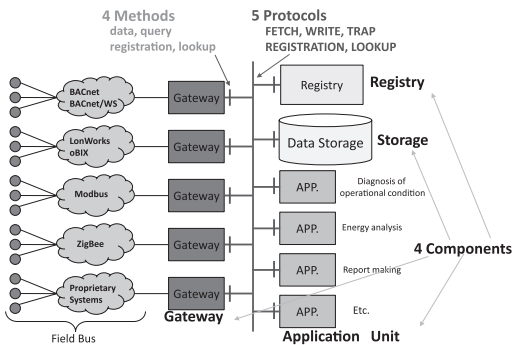


図3 FIAP 参照システム構成
Fig.3 Referenced system architecture of FIAP.

- (1) 多様なサブシステム (Field Bus) を共用する Federation Networking 構造
- (2) データベースセントリックなシステム構造
- (3) XML/UML を用いたデータ表記とデータ処理アルゴリズムの記述
- (4) データ転送パイプとデータ処理モジュールの相互連結によるデータフローのパイプライン管理
- (5) 大容量データ転送のためのファイルインタフェースの導入

4.2 実装概要とアプリケーション

東京大学本郷キャンパスの中心部に位置する工学部2号館(2005年竣工, 地上12階・地下1階の総合研究教育棟)を実フィールドとして, 実証モデルの設計と構築・運用を行った。

図4及び図5に, システムの概要を示した。図4に示した右下の5系統のサブシステムが既存の設備であり, それぞれが異なる通信プロトコルを用いており, データフォーマットも異なり, データの共有もシステムの連携動作もできない状態であった。各サブシステムはゲートウェイを通じて, 共通のプロトコルで

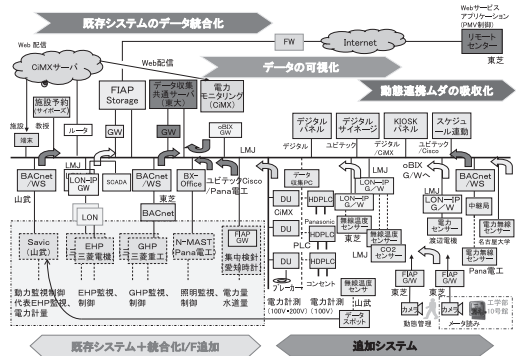


図4 グリーン東大システム概要(1)
Fig.4 System overview of GUTP (1).

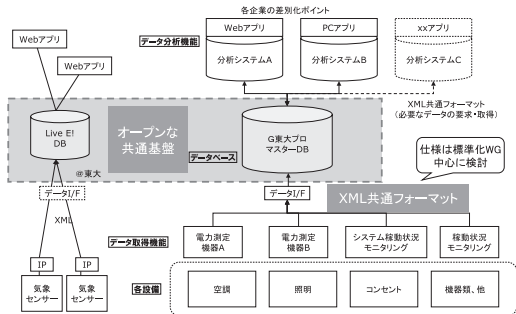


図5 グリーン東大システム概要(2)
Fig.5 System overview of GUTP (2).

ある FIAP を適用したバックボーンネットワークに接続し、共通のデータベース及び各種アプリケーションとの間でデータ通信が可能にした。また、図 4 右下の部分は、新規に導入した各種センサ機器（温度、二酸化炭素、人感センサなど）である。これら各種センサ機器が生成するデータは、ゲートウェイを介して、上記サブシステムと同様に、共通のデータベース及び各種アプリケーションとの間でデータ通信が可能にした。複数の自律動作可能なアプリケーションが実装され、各フィールドバスとのデータ通信や、デジタルサイネージ技術を用いた施設の動作状況のリアルタイム表示などを可能にした。

2011 年 1 月時点で、11 の異なる機器が導入され、合計 1714 ポイント^(注1)の計測が行われている。それぞれの内訳は、以下のとおり。

- 分電盤 (908 ポイント)
- コンセント (67 ポイント)
- 空調機器 (639 ポイント)
- 人感センサと照明機器 (40 ポイント)
- 屋内の環境 (36 ポイント)
- 水道・ガスの配給 (17 ポイント)
- 気象 (7 ポイント)

対象とするポイントによって、データ生成頻度は異なり、1 分ごとに生成されるものもあれば、30 分ごとに生成されるものもある。2010 年の総データ数は、4.3 億レコードとなっている。

図 5 は、本システムの構造を抽象化して表現している。データベースも 2 系統（Live E! システムとグリーン東大マスターデータベース）共存しながら動作させている。すなわち、FIAP の特長である、各コンポーネントが自由に相互接続され、更に、パイプライン状にデータの転送と処理が実現されている。

図 6 に、いくつかの典型的なアプリケーションの動作状況を示した。

(1) スマートメータ [11]

クラウド型システムとして実装されており、計測された電力使用量は、東京大学本郷キャンパスには存在せず、別の場所のデータセンターで稼動するサーバに報告される。電力使用量は、毎分報告され、Web サービスとして、ユーザは、各系統ごとあるいは集約された使用量など、自由に測定データの見える化と監視が実現されている。環境条例対応のための帳票作成機能も実装されている。

(2) スマート照明 [12]

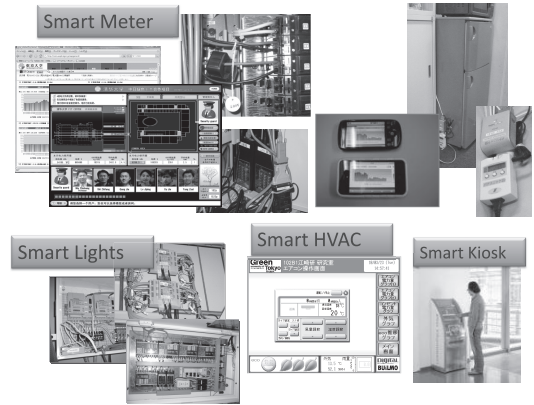


図 6 グリーン東大 アプリケーション例
Fig. 6 Applications in GUTP.

Web インタフェース、及び XMPP インタフェース（具体的には MS Messenger）を用いて、照明の ON/OFF 及び調光が可能とした。更に、照明システムに付随していた人感センサの情報は、共通データベースに報告・蓄積され、2次利用が可能となっている。

(3) スマート空調

Web インタフェース、及びタッチパネルを用いた空調制御を可能とした。タッチパネルの設置場所には、制限はなく、任意の場所に設置可能である。また、タッチパネルには、通常のコントールの制御機能だけでなく、省エネ指標の表示や気象情報の表示など、多様な情報表示の実現を可能とした。

(4) スマート KIOSK

単なる情報提示（デジタルサイネージ）ではなくユーザとのインタラクティブ性をもつタッチパネル型の情報提示・機器制御 KIOSK 端末を実装・設置した。

(5) スマートフォン表示

上記のシステムのほぼすべてが、Web サービス型のシステムとして実装されており、インターネットを経由して、表示並びに制御が可能となっている。すなわち、スマートフォンを用いた情報の表示並びに機器制御が可能となる基盤となっている。

4.3 今後の拡張機能

今後、以下の機能に関する拡張を検討している。

(1) Place-and-Play 機能

センサやアクチュエータが設置されたときに、機器

(注1)：ポイント数はデータシーケンスの数を表している。つまり、あるコンセントで、例えば、電圧 (V)・電流 (A)・電力 (W) の 3 種類のデータを計測していれば、3 ポイントと数え上げる。

への設定を行うことなしに、機器が動作可能にする。AAA 機能を含む、詳細設計を今後予定している。

(2) DTN 機能 [13], [14]

無線技術を用いた機器の接続は、システムの実装コストの削減に必須であり、その結果、データリンクの不安定・低品質な環境に対応可能なシステムを導入する必要がある。経路制御を含む安定動作可能な DTN システムの研究を進めている。

(3) Pub/Sub 型データ転送機能 [15]

多量の機器が相互に不安定・低品質の通信基盤を用いてデータ交換を行う環境においては、従来のコネクションオリエンティッドな TCP/IP を用いたシステムでは、多数コネクションの管理によって、システムが安定動作しないことが懸念される。コネクションごとの状態管理を必要としない、Pub/Sub 型データ転送機能の導入を検討する。

(4) データ処理プログラミング環境 [16]

FIAP で定義したコンポーネント間でのデータ転送とデータ処理を実現するためのプログラミング環境を研究開発している。ネットワーク型のコンパイラと言語の研究開発が必要となる。Registration 機能を用いて、システム内で利用可能な資源とそのアクセス手法の把握を行い、ユーザが作成するプログラムを用いて、各モジュールに実行可能なオブジェクト (Execution Script など) の送付を行う。

5. む す び

グリーン IT/ICT の活動を推進するにあたって、社会全体のエネルギー消費量の把握に基づいた戦略の策定が必要である。ICT 機器自体のエネルギー消費量は、空調や照明などの Non-ICT 機器のエネルギー消費量に比べて小さい、しかし、ICT 機器なしには、これらの効率化と省エネ化は実現できない。人間にたとえれば、ICT 機器や ICT 機器が仕事を場所であるコンピュータルームや IDC (Internet Data Center) は『脳』にあたり、ネットワークは『神経系』である、『賢く能率的な脳』と『俊敏に動作する神経』が、人間の効率的で機能的な活動を実現するのは明らかである。『優れた筋肉をもった運動選手』でも、その制御が最適化されていなければ、『優れた筋肉をもたない運動選手』に負けてしまう。我々 ICT システムの展開に、地球の未来が依存しているも考えられるであろう。

文 献

- [1] H. Esaki, "A consideration on R&D direction for

future Internet architecture," *Int. J. Commun. Syst. (IJCS)*, vol.23, no.6-7, pp.694-707, April 2010.

- [2] H. Esaki, "Eco-system design based on Internet architecture framework," *EcoDesign 2009*, Sapporo(Japan), Dec. 2009.
- [3] 東大グリーン ICT プロジェクト, www.gutp.jp
- [4] 江崎 浩, "インターネット技術を用いたオープン環境・省エネ対策," *映情学誌*, pp.423-427, April 2009.
- [5] K. Yoshida and H. Esaki, "Energy saving with ICT—Green University of Tokyo Project," *EcoDesign 2009*, Sapporo(Japan), Dec. 2009.
- [6] H. Ochiai, N. Fujiwara, and H. Esaki, "Green UT energy-aware facility networking: A challenge to the standardization of architecture and its protocol," *EcoDesign 2009*, Sapporo(Japan), Dec. 2009.
- [7] ASHRAE BACnet, <http://www.bacnet.org/>
- [8] IEEE 1888, <http://standards.ieee.org/index.html>
- [9] oBIX, <http://www.obix.org/>
- [10] 落合秀也, *Sensor Data Management and Transportation over Unreliable Networks*, 東京大学大学院情報理工学系研究科博士論文, Feb. 2011.
- [11] T. Nakajima, "Electric power measurement and its practical applications in Green University of Tokyo Project," *EcoDesign 2009*, Sapporo(Japan), Dec. 2009.
- [12] K. Ito, T. Ogino, T. Nakamura, and S. Nagata, "Case study of energy saving and smart measurement for small and mid-size offices," *EcoDesign 2009*, Sapporo(Japan), Dec. 2009.
- [13] 落合秀也, 江崎 浩, "DTN 環境を想定したとポリシー変化に強いメッセージルーティング," *情処学論*, vol.50, no.9, pp.2312-2326, Sept. 2009.
- [14] H. Ochiai, K. Shimotada, and H. Esaki, "DTIPN: Delay tolerant IP networking for opportunistic network applications," *ACM MobiOpp 2010*, Pisa, Italy, Feb. 2010.
- [15] S. Carrilho and H. Esaki, "A Pub/Sub message distribution architecture for disruption tolerant networks," *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, vol.E92-D, no.10, pp.1886-1896, Oct. 2009.
- [16] A. Sugiyama, H. Ochiai, and H. Esaki, "CCDM: Central controller-based device management architecture and method to split management scripts," *IEEE/IPSJ SAINT 2009*, Seattle, USA, July 2009.

付 録

東大グリーン ICT プロジェクト参加組織

(2011 年 1 月現在)

[企業]

旭化成エレクトロニクス (株), 伊藤忠商事 (株), オリックス (株), 鹿島建設 (株), (株) 関東コーワ, コクヨ (株), 三機工業 (株), シスコシステムズ (合), Citrix System Japan, シムックス (株),

Schneider Electric Group, 新日鉄エンジニアリング (株), 三菱冷熱工業 (株), ダイキン工業 (株), (株) 竹中工務店, (株) デイー・エス・アイ, 東京電力 (株), (株) 東芝, 日本 IBM (株), 日本電信電話 (株), パナソニック (株), パナソニック電工 (株), (株) 日立製作所, 富士通 (株), 富士ゼロックス (株), 三井情報 (株), 三井不動産 (株), (株) 三菱総合研究所, 三菱商事 (株), (株) 山武, (株) ユビテック.

[その他の組織]

IPv6 普及・高度化推進協議会, 東京都環境科学研究所, Lon Mark Japan, 岡山 IPv6 コンソーシアム, グリーン IT 推進協議会, 社団法人電気学会, 社団法人電気設備学会, WIDE プロジェクト, 慶應義塾大学, 静岡大学, 名古屋大学, 奈良先端科学技術大学院大学, 首都大学東京, 新潟大学, 東京大学.

(平成 23 年 1 月 28 日受付, 4 月 8 日再受付)



江崎 浩 (正員：シニア会員)

1987 九州大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程了。同年 (株) 東芝入社。1991 米国ニュージャージー州ベルコア社。1994 コロンビア大学客員研究員。1998 東京大学大型計算機センター助教授。2001 同大学院情報理工学系研究科助教授。2005 同研究科教授, 現在に至る。工博 (東大)。WIDE プロジェクト代表, MPLS-JAPAN 代表, JPNIC 副理事長, IPv6 普及高度化推進協議会専務理事。



落合 秀也 (正員)

昭 58 年生。平 18 年東京大学・工・電子情報工学科卒。平 20 年同大学院・情報処理工学系研究科・修士課程了。平 23 年同大学院・同研究科・博士課程了。同年同大学大規模集積システム設計教育研究センター・助教, 現在に至る。情報理工学博士 (東京大学)。設備ネットワーク, 広域センサネットワーク, 遅延耐性ネットワーク研究の他, IEEE 1888 および ASHRAE での設備ネットワーク標準化活動にも従事。