

ユビキタスセンサネットワークの開発

福永 茂
谷本 晃一

田川 忠道
菅野 秀明

福井 潔

ユビキタスセンサネットワークとは、通信インフラを必要とせず、いたるところに無数の小型無線ノードをアドホックに配置し、環境情報を集めていろいろな機能を実現するものであり、ユビキタス社会の実現手段として注目されている。たとえば、野山の温度を監視して山火事の発生を予測するなどの応用例が考えられている。

ところで、設置したセンサから情報を集めて制御に利用するセンサネットワークは、河川の危険区域の土壌を監視して土砂崩れを防ぐシステムなど、従来から存在する。従来のセンサネットワークは、設置コスト等の問題から、センシングポイントが少なく、個々の観測データが重要であった。ユビキタスセンサネットワークでは、センサノードの小型無線化とアドホックネットワーク化により設置自由度が向上し、センシングポイントを増やすことで、これまで測定できなかった情報を得られるようになった点が異なる。これにより全く新しい機能が提供できるようになった。たとえば、多数の車のワイパーの動きを計測することで、そのエリアの降雨量を推定することができる。ユビキタスセンサネットワークとは、ひとつひとつではあまり重要でない情報を数多く集めることで、大きな重要情報を得るための仕組みと考えることもできる。

ユビキタスセンサネットワークの標準無線方式として ZigBee^{*1)} が期待されている。沖電気は、ZigBee に注力して無線LSIや実証実験用プラットフォームの開発を行っている。また、さらなる省電力化や設定容易化を目指した各種要素技術開発にも取り組んでいる。

本稿では、ZigBee の概説を行った後、各種要素技術を説明し、さらに、開発中の実証実験用プラットフォームと主な応用アプリケーション例を紹介する。

ZigBee とは

ユビキタスセンサネットワークで用いるセンサや制御デバイスは、高速通信は必要としないが低遅延であること、電池駆動のために低消費電力であること、多く配置するために低コストであることが要求される。ZigBee は、これらの要求を満足させるための無線通信規格であり、

^{*1)} ZigBee は ZigBee Alliance の商標です。

ZigBee Alliance¹⁾ が仕様の策定を進めている。ZigBee Alliance は委員制の機関であり、沖電気も活動中である。

(1) ZigBee のプロトコル構成

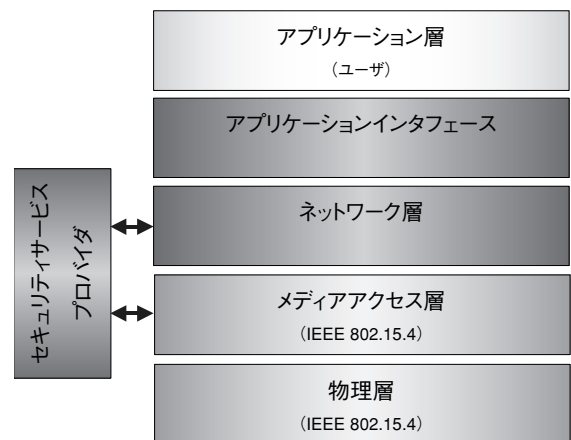


図1 ZigBee のプロトコル構成

図1にZigBeeのプロトコル構成を示す。物理層とメディアアクセス (MAC) 層はIEEE802.15.4²⁾ を採用し、ネットワーク層、セキュリティ機能を実現するセキュリティサービスプロバイダ、アプリケーションインタフェースをZigBee Allianceで規格化している。またアプリケーションは、各ユーザがZigBee仕様に従って作成する。

(2) IEEE802.15.4の概要

IEEE802.15.4は、WPAN (Wireless Personal Area Network) 向け無線通信方式IEEE802.15シリーズの低速版として2003年5月に標準化された。低コスト、省電力の物理層、MAC層を規定しており、次の特徴がある。

- 他システムからの干渉を回避する仕組みがある
- 間欠動作により、電力消費を抑えることができる
- オプションで帯域を保証した通信ができる

表1にIEEE802.15.4の物理層の仕様を示す。周波数帯は3種類あり、日本では2.4GHz帯が使用可能となる。

表1 IEEE802.15.4物理層の仕様

周波数帯	2.4GHz	915MHz	868MHz
チャンネル数	16	10	1
変調方式	O-QPSK	BPSK	BPSK
拡散方式	DSSS	DSSS	DSSS
データレート	250kbit/s	40kbit/s	20kbit/s
使用可能地域	全世界	US	欧州

IEEE802.15.4の物理層は、受信電力測定やリンク品質通知、チャンネルの使用状況を確認するCSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) などの機能を持っており、ネットワーク構築時に各チャンネルの受信電力を測定し、他システムからの干渉電力が少ないチャンネルを探すことができる。また、使用しているチャンネル品質が劣化した場合に、通信チャンネルを変更する仕組みも提供されている。このように、同じ周波数帯を利用する他のシステムと共存する環境で、できる限り干渉を回避し、高品質な通信ができるよう工夫されている。

IEEE802.15.4のMAC層では、間欠動作や帯域保証通信を行うビーコンモードと、全ノード間で互いに直接通信するノンビーコンモードが規定されている。

ビーコンモードは、PANコーディネータと呼ばれるネットワーク管理ノードを中心とするスター型ネットワークで使われる。PANコーディネータがビーコン信号を定期的に送信し、他のノードはビーコン信号に同期して、割り当てられた期間に通信する。コーディネータが割り当てた唯一のノードのみが、チャンネルを占有して衝突が起ることなく通信可能であり、低遅延が要求される通信に利用される。

一方、ノンビーコンモードは、CSMA-CAで常にチャンネルアクセスするモードである。周辺ノードと直接通信するメッシュリンクで使う場合、各ノードがいつでも直接通信できる代りに、常に自分宛のデータを受信できるように受信待機する必要がある。ビーコンモードのように間欠動作により省電力化することはできない。

ノンビーコンモードをスターリンクで使う場合、親機のみを常時受信とし、エンドデバイス側を停止、または待機状態とした間欠動作とする使用方法を取ることで、エンドデバイスの省電力化を実現できる。この方法では、エンドデバイスから定期的に親機へ要求を出して下り方向のデータを受け取るため、下り方向の通信に伝送遅延は出るものの、センサネットワークとして支配的なデータ流であるエンドデバイスからの上り方向の通信は、CSMA-CAを用いて常時可能となる。

(3) ZigBeeネットワーク層

ZigBeeネットワークは、IEEE802.15.4で想定しているスター型のトポロジとメッシュ型のトポロジを融合したクラスタツリー構造のネットワークである。ZigBee Allianceでは、このネットワークで、他の無線ノードを経由してマルチホップ通信するためのルーティングアルゴリズムを策定中である。

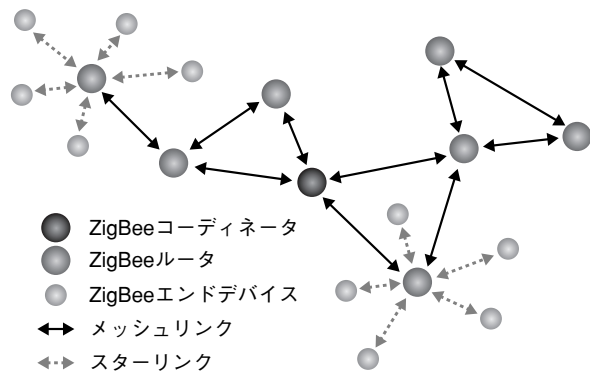


図2 ZigBeeのネットワークモデル

ZigBeeネットワークは、ZigBeeコーディネータ、ZigBeeルータ、ZigBeeエンドデバイスから構成される（図2）。コーディネータとルータは、PANコーディネータの機能を持ち、スターリンク（クラスタ）を形成する。また同時にコーディネータとルータの間で、メッシュリンクを構成することにより、マルチホップネットワークを構成することができる。

一方、エンドデバイスは、コーディネータやルータにスターリンクで接続することにより、ネットワークに参加する。エンドデバイスは、接続したルータを介してマルチホップ通信することにより、ネットワークに接続されている他のデバイスと通信することができる。

IEEE802.15.4準拠無線LSIの開発

沖電気は、アナログ無線回路（RF）、物理層、MAC層を1チップ化し、IEEE802.15.4に完全準拠した無線LSI（ML7065）を世界で初めて開発した³⁾。他社はRFと物理層だけをチップ化しており、MAC層をホストCPU上でソフト実行する必要がある。沖電気は、複雑なMAC処理を無線LSI内部で行うため、8ビット程度の低い能力のホストCPUでZigBeeネットワークを実装・制御することができる（図3上）。無線LSIの特徴は以下の通りである。

- 世界初のIEEE802.15.4 2.4GHz RF+物理/MAC層内蔵ワンチップLSI（パッケージサイズ：7mm×7mm）
- Host CPUとの接続は同期シリアルインターフェース
- 乾電池での長時間駆動可能な低消費電力

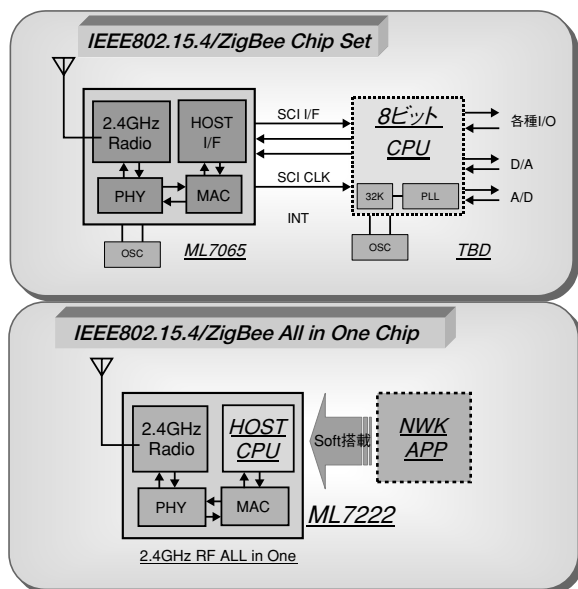


図3 IEEE802.15.4完全準拠の無線LSI（上）と
ZigBee準拠のワンチップ無線LSI（下）

●0.22 μ m低リークCMOSプロセス

無線LSIは、2004年5月に発表、サンプル出荷を9月に開始し、12月には量産提供を始める予定である。今後は図3下のように、ネットワーク層とアプリケーション層までを実装したCPU部も含めた完全なワンチップ構成にして、処理の軽いエンドデバイスに適したZigBee準拠の無線LSIとして開発・提供していく予定である。

ユビキタスセンサネットワークの要素技術

ユビキタスセンサネットワークでは、さまざまな場所に無線ノードを無数に設置することを特徴とするため、小型・省電力化が大きな課題となる。また無線ノードを自由に設置できるようにするために、ネットワーク規模にスケラブルな技術だけでなく、センサや無線、ネットワークの設定を自動で行うゼロコンフィギュレーション技術やメンテナンスを容易にする技術も重要となる。

ここでは大学や研究機関と連携しながら沖電気の研究開発本部で取り組んでいる主な技術を紹介する。

(1) 自律クラスタ形成技術

大規模ネットワークでは、全てのノードをメッシュ型に構成するよりも、図2のようにクラスタに分割して、スケラブルに管理の方が効率的である。その場合、どのようにクラスタを構成するかが鍵となる。

クラスタの中心となるクラスタヘッド（CH：図2のZigBeeコーディネータやZigBeeルータ）はクラスタ内のデータ転送やネットワーク管理を行うだけでなく、隣

接CHとのクラスタ間通信なども行うため、他のノードに比べて電力消費が大きい。そこで、各ノードの電池残量や電源供給状態に合わせて、動的にCHを選択する方式を検討している。ここで、CHの選択を集中管理的に行うと、大規模ネットワークに対応できなくなるため、自律的に選択する仕組みが必須である。

また、ユビキタスセンサネットワークでは、ほとんどがセンサからサーバへの一方方向のデータ流となるため、マルチホップ通信を行うと、データの下流ノード（サーバに近いノード）の転送負荷が大きくなる。このような現象を考慮してCHやクラスタサイズを選定することで、省電力効果を向上させることができる。

(2) 通信タイミング自律制御技術

通信タイミング制御技術としては、TDMA（Time Division Multiple Access）とCSMA-CAが代表的である。通信スロットを固定的に割り当てるTDMAは、通信効率が高く、他ノードに割り当てられたスロットでスリープできるので、省電力効果も高い。ただし、一元管理が必要なため大規模ネットワークでは事前設計が複雑になる。一方CSMA-CAは、衝突回避しながら自律的かつ動的に通信スロットを獲得するため、データ量やトポロジが変化するネットワークに対応できるが、衝突回避プロセスのオーバーヘッドがあるため、最適割当は難しい。

そこで、我々は非線形振動子理論を応用して、大規模ネットワークにも適応可能な自律的通信スロット割当方式^{4) 5)}を検討している。図4のように、近傍ノード間の相互作用信号を介して位相関係を形成し、この位相関係に基づき各ノードが通信スロットを獲得する。トラフィックが多い状況でも効率的な通信が可能であり、センサネットワーク以外にもさまざまな分野へ応用できる。

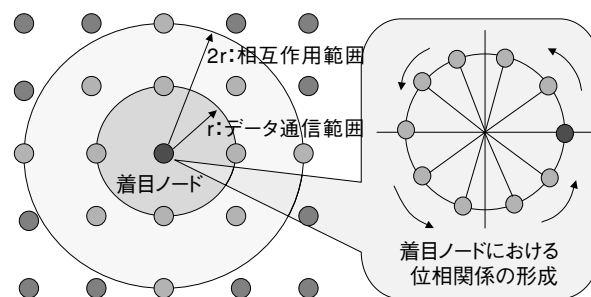


図4 ZigBeeのネットワークモデル

(3) 位置検出技術

位置検出技術は、検出データの発生場所を特定したり、

移動物体をトレースするなど、アプリケーションにとって必要性の高い技術である。また、無線ノードの位置に基づいて電波干渉を低減するよう送信電力を制御したり、配置トポロジに対応した効率的なアドレス付与やルーティング制御を適用したりできるため、ネットワーク層にとっても重要な技術である。

位置検出技術には、GPS方式や、超音波、赤外線を利用する方式もあるが、無線ノードの低コスト・小型・省電力を考慮して、無線のみを利用する方式に取り組んでいる。無線を利用する方式としては、電波伝播時間を測定して距離を算出する方法と、受信電波強度から距離を推定する方法とがあるが、前者は各無線ノードの時間同期精度を高める課題、後者は受信電波強度のばらつきが大きいという課題がある。

我々は、後者の課題に対して、受信電波強度のばらつきを考慮したモデル化を行うことで、位置推定誤差を1m以下にすることを目標に検討を進めている。

(4) ソフトウェア更新技術

設置した多数の無線ノードの障害修正をしたり、機能を追加するためには、各ノードのソフトウェアを書き換える必要があるが、大規模ネットワークでは、全てのノードのソフトウェアを書き換える作業は膨大となる。

そこで、我々は無線経由でソフトウェアを書き換える技術を開発中である。特に、無線ノードのコストを抑えるために、プログラムを格納する必要最低限のメモリしか搭載していないノードに対して、プログラムを更新する検討を行っている。この技術により、場所や状況に応じてプログラムをダウンロードし、異なる機能を実現する無線ノードを実現することも可能となる。

(5) セキュリティ技術

無線ノードは、計算能力や通信レートが低いため、少ない処理で、全体として高いセキュリティレベルを保つことが必要となる。たとえば、ユビキタスセンサネットワークで伝送されるデータは、ひとつひとつの価値は低い、集計した情報の価値は高くなるので、各ノード間のローカルな通信を守る代わりに、サーバに集まるデータをグローバルに守る仕組みを検討している。

また、マルチホップ通信では隣接ノードを経由してデータ通信を行うため、悪意のあるノードが中継に参加してデータを改ざんすることが比較的容易となる。そこで、ノード認証の仕組みが重要となるが、認証にサーバを使う方式では、認証時に周辺ノードを信用できず、サーバまでワンホップ通信を行う必要があり、マルチ

ホップ通信環境の認証には不適切である。そこで、サーバ不要のローカルな認証方式⁶⁾を検討している。

また、サーバからノードへ送信される重要情報を確実に届けるため、転送ルーティング情報を利用して、ノード側が正しい情報を確実に受信したことを確認できる仕組み⁷⁾を検討している。この仕組みを用いると、上述のソフトウェア更新をセキュアに実現することができる。

実証実験用プラットフォームの開発

沖電気では、実証実験を推進するために、(株)沖テクノクリエーションと共同で実証実験用プラットフォームを開発している。

前節で説明したような要素技術は、無線を利用して、複数のノードが関連しあって成り立っているため、机上の理論検討やシミュレーションだけでは考慮しきれないさまざまな要素があり、実機による実験評価が欠かせない。また、技術課題はネットワーク分野に留まらず、多様な分野にまたがっているため、沖電気単独で全てを開発することは不可能である。そこで、実証実験用プラットフォームを広く大学や研究機関などの技術開発パートナーに提供することで、技術の実用化や多様な技術課題への取り組みが加速されることを期待している。

また、ユビキタスセンサネットワークの応用分野は多岐に渡っており、実用に向けて多くの個別課題が潜在している。それらの課題解決には、実際にその分野のプレイヤーである企業に利用してもらい、早期に課題を顕在化させる必要がある。実証実験用プラットフォームを活用しながら、多くのアプリケーション企業と協力し合うことで、その解決を加速したいと考えている。

実証実験用プラットフォームは、図5のように、ZigBee仕様のマルチホップ通信可能な無線ノードと、各無線

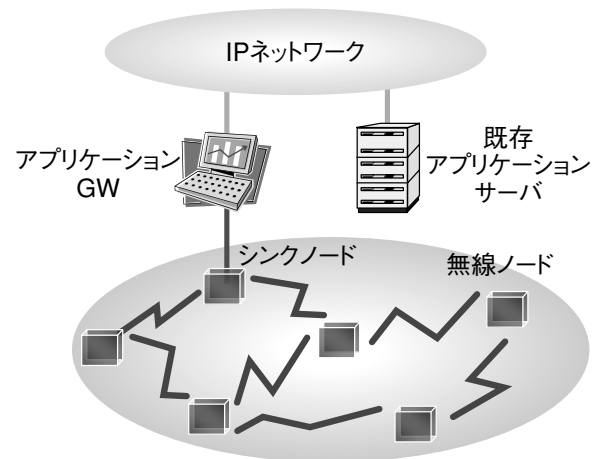


図5 実証実験用プラットフォームの構成

ノードからデータを集めるシンクノード、さらに各種アプリケーションからセンサネットワークを制御しやすくするためのゲートウェイ（GW）とから構成されており、2004年8月から開発パートナーへの提供を開始している。

(1) 実証実験用無線ノード

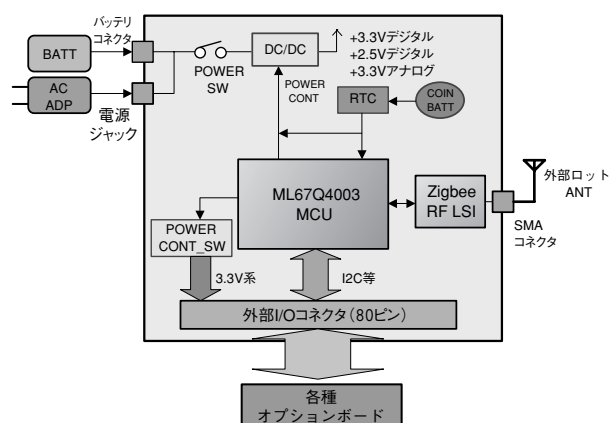


図6 実証実験用無線ノードの外観（上）と構成図（下）

無線ノードは、IEEE802.15.4準拠の2.4GHz無線LSIを搭載し、ZigBee仕様に基いたネットワーク層を実装している。TELEC（（財）テレコムエンジニアリングセンター）による電波の技術適合認証を取得しており、どこでも無線を利用した実験を行うことが可能である（図6）。

実験目的に合わせて、ハードウェアを柔軟に変更できる独自アーキテクチャを採用しており、センサやアクチュエータ、表示装置などを搭載したオプションボードを自由に追加できる。微弱無線や特別小電力無線など他の無線部を追加することも可能である。

さらに、UNIXの最低限の仕様セットであるPOSIXライクなAPIを用意し、C言語での開発が可能であるため、誰でも簡単にネットワークプロトコルやアプリケーションを開発できる。

その他、送信出力制御や受信感度通知、電池残量通知機能を持ち、スリープ制御も自由に設定可能である。電源は筐体内に電池を内蔵する他、外部AC電源も利用できる。また、RS232C経由でPCと接続する。

この無線ノードは、さまざまな機能の検証容易性に主眼を置き、処理能力やメモリ容量に余裕のある32ビットCPUを採用している。商用システムでは、実証実験で確認した機能のうちアプリケーションごとに必要となる機能を抽出し、8ビットCPUで実装することで、小型低コスト低消費電力な無線ノードを提供する予定である。

(2) アプリケーションGW

ユビキタスセンサネットワークを構成する多数の無線ノードを一つのかたまりとしてとらえ、アプリケーションからは無線ノード群が一つのアプライアンスに見えるように構成するために、アプリケーションGWを用意している。既存のアプリケーションサーバは無線ノードひとつひとつを意識せず、アプリケーションGWにアクセスするだけで、各センサ情報を取り出すことが可能となる。

アプリケーションGWは、各無線ノードのIDやセキュリティを管理する機能、既存アプリケーションと無線ノード群のプロトコルを変換する機能を有する。

また、沖電気が提唱する情報通信融合ソリューションコンセプトであるAP@PLATにも対応する予定であり、HTTPやSIPサービスと組み合わせたアプリケーション開発が容易になる。

応用アプリケーション例

ユビキタスセンサネットワークの応用分野は、多岐に渡っているが、ここでは主な適用先のひとつとして、ビルでの利用例を紹介する（図7）。

オフィス内の空調機器は、既に温度センサと連動した制御を行っているが、ユビキタスセンサネットワークを導入することでセンサやアクチュエータを数多く配置でき、ブース単位での空調制御など、制御単位を小さくすることが可能となる。また、これまで天井に設置してあった温度センサを座席の高さに設置することで、体感温度と設定温度の差を縮めることが可能となる。さらに、人が無線ノードを携帯することで、人がいないエリアの空調を弱くして省電力効果を高めるだけでなく、寒がりの人が居るエリアの温度設定を少し高くするなど、人に優しい制御が可能となる。将来は、体調管理システムと連動させ、風邪をひいている人のエリアを温かくしたり、風向をそらすなどの制御も可能となる。

オフィス内の照明機器は、制御線により照明機器とス

イチの対応を取るため、レイアウト変更時に制御線を配線しなおす必要があった。ユビキタスセンサネットワークを導入すると、照明機器とスイッチを無線で対応付けることが可能となり、制御システム上で論理的に対応を変更するだけで、レイアウト変更に対応可能となる。また、これまでは配線コストを削減するために、いくつかの照明機器をまとめて制御していたが、今後は各照明を別々に制御することも可能となる。さらには、人の動きや在席状況と連動して照明を制御することで省電力を高めることも可能であり、PCのディスプレイを使用中は映り込みが少なくなるように、作業状況に応じた制御をすることも可能となる。

さらに、複数の機器連携も容易に実現可能となる。たとえば、外が明るい場合はブラインドが開き、照明を落すことで省電力を図る。窓からの日差しが強くなれば、空調効果が下がらないようにブラインドを閉めて、照明を明るくする。このように、複数のシステムが連動して、トータルでの省電力化を図ることが可能となる。

ビルに火災や地震などの災害が発生した場合は、逃げ遅れた生存者の位置検出や救助隊との連絡に利用できる。また、炎や煙の状況に応じて、生存者を適切な非常口に誘導することも可能となる。さらには、地震や強風による建物の歪を測定することで、ビルのヘルスマモニタリングを行うことも可能となる。



図7 ビルでの利用例

まとめ

ユビキタス社会を実現する手段として期待されているユビキタスセンサネットワークと、その無線標準であるZigBeeを概説し、沖電気が開発中の要素技術や実証実験用プラットフォームの紹介を行った。今後は、アプリケーション企業パートナーと実用化に向けた検討を進めながら、事業化を目指すとともに、技術開発パートナーとの方式開発を加速する。また、IEEE802.15.4a⁸⁾として位置検出精度の高い無線方式であるUWBの標準化策定も始まっており、ZigBeeだけでなくこれらの新しい無線方式を視野に入れながら、技術開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/>
- 2) IEEE802.15.4: "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- 3) 市川武志, 谷本晃一: "次世代近距離無線ネットワークを実現するZigBee™ LSI", 沖テクニカルレビュー200号, Vol.71 No.4, pp.70-73, 2004年10月
- 4) 関山浩介, 久保祐樹, 福永茂, 伊達正晃: "無線通信ネットワークにおける位相拡散時分割通信タイミング制御", FIT2004, 2004年9月.
- 5) K. Sekiyama, Y. Kubo, S. Fukunaga and M. Date: "Phase Diffusion Time Division method for Wireless Communication Network", IEEE IECON 2004, 2004-Nov (予定).
- 6) 松村靖子, 園藤康平, 中川聡: "ランプ型秘密分散法を用いた効率的分散計算法", 信学技法, ISEC-2002-105, 2003年3月.
- 7) 八百健嗣, 川本康貴, 松村靖子, 福永茂: "センサネットワークのツリー構造に適したセキュアな受信確認方式", 情処学会, MBL2004, 2004年9月
- 8) IEEE802.15.4a: "Low Rate Alternative PHY Task Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)", <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>

筆者紹介

福永茂: Shigeru Fukunaga. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

田川忠道: Tadamichi Tagawa. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

福井潔: Kiyoshi Fukui. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

谷本晃一: Koichi Tanimoto. シリコンソリューションカンパニー ビジネス本部 システムLSIマーケティング部 通信ビジネスユニット

菅野秀明: Hideaki Kanno. 株式会社沖テクノクリエーション ビジネス開拓部