

## 無線センサネットワークの適用可能性と課題

### Applicabilities and Problems of Wireless Sensor Networks

末 永 俊 一 郎

**要 約** 無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network : WSN) は, センサデータを取得できる多数のノードで構成されるネットワークである。WSN は, センシングを行うプログラムをノードに配備することにより, 現実世界の動態の把握を可能にし, 既存技術では不可能であったアプリケーションを実現できることから, 非常に注目されている。本稿では, WSN のアプリケーションと, アプリケーションを実現する際に必要となる技術を研究事例から紹介し, 今後の産業界における WSN の適用可能性と課題を考察する。

**Abstract** Wireless Sensor Networks (WSNs) are composed of a plenty of sensor nodes which can obtain sensor data and make up a multi-hop adhoc network. WSNs allow system integrators to deploy sensing programs on sensor nodes and integrate applications which can not be realized by existing devices, therefore, WSNs are attracting attention throughout academia and industrial world. In this paper, we introduce some existing works which are proposed in the academia and consider WSNs' domains of applicability and problems.

#### 1. はじめに

無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network : WSN) は, 近年非常に注目されている技術であり, 広く利用されることが期待されている。WSN を構成するノードは, 温度, 照度, 加速度等のセンサデータを取得し, 取得したデータを無線波を利用してパケットリレー方式で転送する “マルチホップ・アドホックネットワーク” を構成することができる<sup>\*1</sup>。WSN は, ノードを配置するだけで自律的なネットワークを構成できるために, 利用現場での敷設作業を軽減することができる。また, センサデータを取得することで, 現実世界の動態を捉えることができるため, 対象物のトラッキングや自然環境のモニタリングが WSN における有望なアプリケーションとして期待されている<sup>[1]</sup>。また, 総務省においても, ユビキタスセンサネットワーク技術に関する調査研究会において, 災害・防災のための情報収集や, 高齢者の健康管理, 物流の管理等の幅広い分野で WSN の応用が期待されている<sup>[2]</sup>。

WSN を用いたアプリケーションの一般的な構成を図1に示す。各ノードはセンサ機能を用いて周辺環境を観測する。観測されたデータは, ノード間のマルチホップ・アドホック通信によりベースステーションに集められる。ベースステーションは, WSN へアクセス可能なコンピュータであり, WSN から得られた環境データを集約・保持している。WSN から環境データを取得したいシステム運用者は, ベースステーションにアクセスして必要なデータを取得し, 取得したデータを解析することで実環境の状態を把握し, 解析された状態に基づいてアプリケーションで要求されている処理を実施する。

無線センサネットワークを構成するノードの代表例に MOTE<sup>[3]</sup>がある<sup>\*2</sup>。MOTE はカリフ

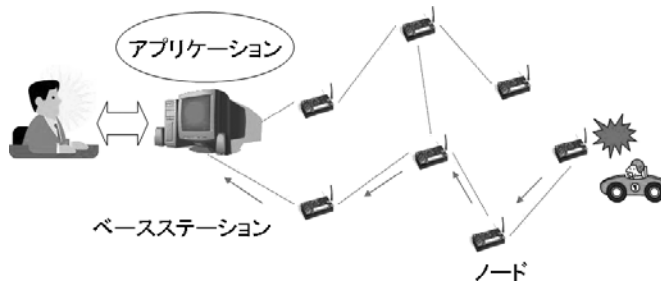


図1 WSNの一般的な構成

オルニア大学バークレー校におけるスマートダストプロジェクト<sup>[4]</sup>によって開発された。アプリケーション開発を容易にするために、MOTEにはTinyOS<sup>[5]</sup>という機能・資源が限られたノードで稼働するよう設計されたオペレーティングシステムが搭載される。TinyOS上で稼働するアプリケーションは、nesC<sup>[6]</sup>というC言語の拡張言語を用いて記述される。また、NesCで記述されたTinyOSのアプリケーションをそのまま稼働させることができるシミュレーション環境(TOSSIM<sup>[7]</sup>)が準備されている。すなわち、MOTEはハードウェア、オペレーティングシステム、開発言語、シミュレータの他ライブラリ\*<sup>3</sup>までのアプリケーション開発環境を提供している。MOTEはセンサネットワークの事実上のスタンダードであることから、本稿ではMOTEを前提とした記載を行う。

WSNアプリケーションを業務現場で利用する際には、アプリケーション開発とアプリケーション運用が最大のポイントと考えられる。一般にWSNのアプリケーション開発は資源制約、限られた電力を考慮する点に特徴がある。そのため、センサノードの計算能力やメモリ容量、バッテリーの制限等を考慮しながらデータ観測、マルチホップ・アドホック通信、電源管理などのセンサノード固有の問題を扱わなければならない。これは、システム構築者にとって大きな負担となる。そのため、WSNのアプリケーション開発では、WSNプログラミングの詳細を隠蔽したAPIを備えたミドルウェアを適用することが現実的と考えられる。また、WSNアプリケーションの運用においては、ノードにインストールされたプログラムの変更等が課題となり、WSNの運用を考慮したツールも必要になる。

本稿では、アプリケーション、アプリケーション開発(ミドルウェア)、アプリケーション運用(ツール)に関する研究事例を紹介し、業務現場におけるWSNの適用可能性を考察する。そのため、WSNを構成する際のルーティング、通信プロトコル(Zigbee等)、センサノードの位置同定、セキュリティ、オペレーティングシステム、ミドルウェア、プログラミングモデル等の個々のWSN技術や特定の研究事例に関する詳細な説明は対象としない。

本稿の構成は次のとおりである。2章において研究におけるアプリケーション、代表的なミドルウェア、アプリケーション運用の側面から研究事例を取り上げる。3章で、今後想定されるアプリケーションとWSNの課題からWSNの適用可能性を考察する。4章で本稿をまとめる。

## 2. 研究事例の紹介

### 2.1 アプリケーション例

学界におけるWSNアプリケーションの代表的な研究例として、自然環境のモニタリング、対象物のトラッキング、オフィスや家における利用が挙げられ<sup>[1]</sup>、これらのアプリケーション

については多くの提案がされている。

例えば、Mainwaring ら<sup>[8]</sup>は、繁殖期における海鳥の巣の利用状況を観測するために、32 個のノードを 1km 四方の空間に配置してフィールドワークを実施した。Mainwaring らは、作成した WSN アプリケーションの現場におけるパフォーマンスデータを測定することで、環境モニタリングへの WSN の適用可能性を示した。また、Romer ら<sup>[9]</sup>は、対象物のトラッキングを WSN を用いて実現する手法を示し、ノードの位置同定、ノードの時間同期、メッセージングに関するポータブルなアルゴリズムの開発を行い、対象物のトラッキングに対する WSN の適用可能性を示した<sup>\*4</sup>。また、オフィス等のビル内における WSN の利用では、物や人の位置把握が重要な成功要因となることから、数多くの位置管理に関する提案がされている (Lorincz<sup>[10]</sup>等)。

これらのアプリケーション以外にも、ヘルスマニタリング、人の動態の把握、構造物の状態の測定など様々な利用シーンが取り上げられているが、学界で取り上げられる例は、一般に、産業界で実際に適用されるアプリケーションを抽象化している。そのため、研究で提示されているアプリケーションを産業界でそのままの形で適用することは難しい。産業界における WSN の適用可能性については、3 章で考察する。

## 2.2 アプリケーション開発 - ミドルウェア

WSN のミドルウェアは以下の三つに分類される<sup>[11]\*5</sup>。本節では各分類における代表例を紹介する。なお、ここで紹介するミドルウェアはオープンソースとして公開されている。

- 1) データベースアプローチ
- 2) モバイルエージェントアプローチ
- 3) イベントベースアプローチ

1) の代表例に TinyDB<sup>[12]</sup>がある。TinyDB は WSN 全体を一つのデータベースに見立て、プログラマが SQL に似た言語を用いてクエリを記述することで、必要とするデータを取得することができる。ミドルウェアはクエリに従いデータを観測、収集することができるため、プログラマはアプリケーション毎に、センサノード用のプログラムを記述する必要はない。例えば、図 2 では、6 階の平均気温を 30 秒間隔で観測する、という簡単なクエリの記述例を示している。データベースアプローチは、敷設された WSN を利用して、定期的なモニタリングを行うような用途に非常に適している。

なお、TinyDB では、木構造のトポロジを用いて観測データの収集を行っているが、データ収集時に、集約関数<sup>\*6</sup>を用いて子ノードと親ノードの観測データを部分的に集約することで、通信データ量を低減する工夫を行っている。

```
SELECT AVG(volume), room FROM sensors
WHERE floor = 6
GROUP BY room
HAVING AVG(volume) > threshold
SAMPLE PERIOD 30s
```

図 2 TinyDB のクエリ例 (文献<sup>[12]</sup>より引用)

2)の代表例として Agilla<sup>[13]</sup>がある。Agillaでは、プログラマはミドルウェアによって提供される API を利用してセンシングデータを取得するプログラムを記述する。この API はプログラム自体の移動と複製をサポートしており、プログラマは、プログラムを動的にノードに配備することが可能である。例えば、図3に示すように、1の火災検知エージェントが、定期的にノード間を移動して火災の検知を行い、火災を検知すると自身を複製して火を取り囲む。その後消防士に連絡を行い、2、3の情報提供エージェントが消防士を安全な経路で火災まで誘導する。火災を鎮火した後は、再び1の火災検知エージェントを巡回させ異常の監視を行うことや、森の動物の動態を把握するエージェントを WSN 内部に注入すること等ができる。センシング情報に応じてプログラムを動的に配備できることは、状況に応じた WSN の利用を可能にする長所と、資源の限られた一つの WSN において複数のアプリケーションを実現できる長所がある。

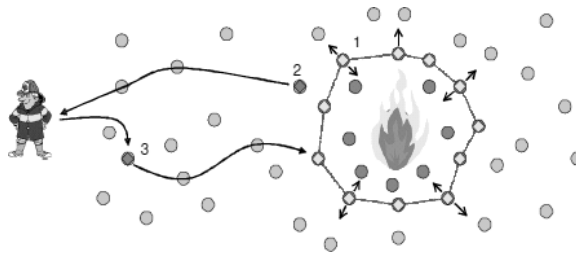


図3 火災追跡プログラムの動作例 (文献<sup>[14]</sup>より引用)

3)の代表例として EnviroTrack<sup>[15]</sup>がある。EnviroTrack は、移動する対象物の状態観測に着目したイベントベースの WSN ミドルウェアである。図4に示すように、プログラマは、Context Labelと呼ばれるイベント(測定したい事象)の定義を記述する。Context Labelには、観測したい対象物の条件や観測方法、観測データの収集方法、イベント発生時の動作などを記述できる。EnviroTrackでは、与えられた Context Label を基に、対象イベントの観測を行うセンサグループに参加するノードを動的に決定し対象物の観測を可能にすることで、プログラマから個々のノードの動態の記述を隠蔽している。このアプローチは、移動する人や車等の動態を把握したい場合に適している。

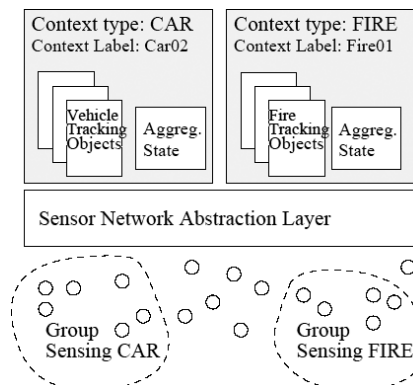


図4 EnviroTrack のプログラミングモデル (文献<sup>[15]</sup>より引用)

なお、本節ではミドルウェアに着目したが、WSN アプリケーションの構築時にはプログラミング手法も重要な要素となる。WSN プログラミングの研究として、個々のノードに着目せずに、WSN 全体を一つの計算資源と見立ててプログラミングを行うマクロプログラミング<sup>[16]</sup>といわれる手法が注目されている。マクロプログラミングは、一般に WSN 全体の振る舞いを記述した言語を、プリプロセッサによって個々のノードに配備するプログラムに変換する。個々のノードの振る舞いを気にせずにプログラミングを記述できることは、開発工数を減らすことができるために、システム構築者の WSN アプリケーション実装技術として有効な手段になると考えられる。

### 2.3 アプリケーション運用-運用ツール

ノードにインストールされたプログラムの更新等の維持管理を行うことが必要な場合がある。配備されたノードを人手によって回収し、インストールされたプログラムを PC に接続<sup>\*7</sup>して更新することは非常に手間となるため、無線波経由でソフトウェアを更新する技術（ネットワーク・リプログラミング<sup>[17]</sup>）が提案・研究されている。代表的な研究例に Deluge<sup>[18]</sup>がある。Deluge は更新を伝播させるモデルを適用して WSN におけるプログラムを維持管理する。各ノードが自分の持っているプログラムのバージョンを周囲のノードに通知することで、古いバージョンを持つノードは新しいバージョンの存在を知り、プログラムの更新を行うことになる。なお、Deluge は TinyOS の標準的なライブラリとして提供されている。

また、WSN のアプリケーション運用の特有の難しさとして、実際の現場におけるデバッグや調整の難しさが挙げられる。EnviroLog<sup>[19]</sup>は、プログラムの登録したイベントを記録・再生することができるログツールである。業務現場におけるデバッグの際、WSN の観測する現象は動的に変化するためにエラーを再現することが難しいという課題がある。こうしたツールの適用によって、業務現場における調整は効率化されることから、システム構築者の差別化要素になると考えられる。

## 3. 産業界への適用と WSN の課題

### 3.1 RFID との比較

ユビキタス社会実現の基盤技術の一つとして、WSN は非常に期待されているが、同様に期待されている RFID と何が異なるのか比較を行う。図 5 は、1999 年にオート ID センタ<sup>[20]</sup>によって提唱された RFID 適用のシナリオである。

表 1 に、本シナリオにおける RFID の課題と、その課題を WSN によって解決するアプローチを示す。ここで想定する WSN は WSN のノードがさらに小型化された場合を考える。表 1 に示すように、RFID で顕在化した課題は、WSN の性質を上手く活かすことによって解決できると考えられる。費用対効果や、業務環境に合わせて、二つの技術を組み合わせたアプリケーションが構築されていくと想定される。なお、表 1 に示す項目番号は、図 5 における項目番号に対応している。

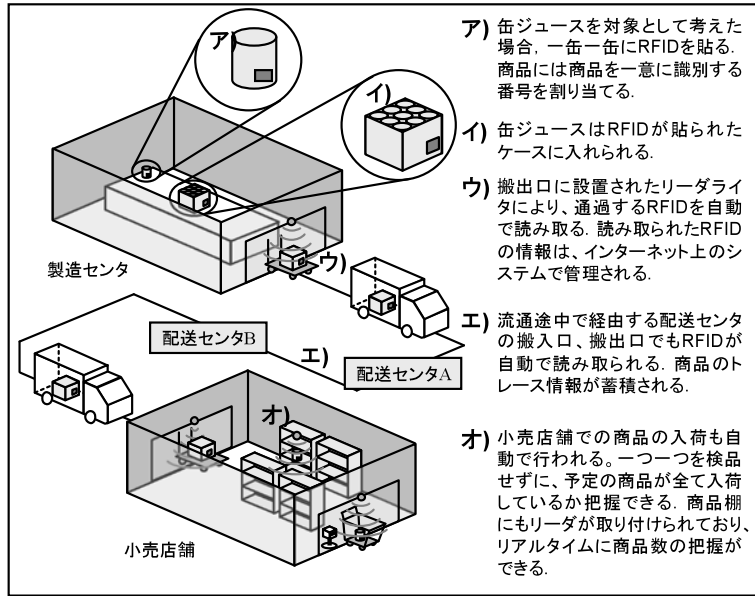


図5 オートIDセンタのシナリオ

表1 RFIDとWSNの比較

	RFIDの課題	WSNの可能性
イ)	製品と、ケースのIDをリーダライタで紐付ける運用を行う必要が生じる。	製品とケースに付けられたノード群で自律的に通信を行い、紐付けを自動化できる。
ウ)	RFIDリーダとRFIDタグの間で1対1の通信が実施される。そのため、リーダがタグを読み取れなかった場合には、製品の数が増えて登録されるといった不都合がある。	ある特定地域(位置情報を利用)でシステムと通信ができない場合にマルチホップ・アドホック通信を行って、イ)で紐付けられた情報をシステムに再度送信する。
エ)	温度センサ付きのRFID等の適用によって記録を行うことはできるが、個々の製品毎に取得データを流通過程や場所毎に変更する用途に向かない。	種別の異なる製品、持ち主の異なる製品毎にプログラムをマルチホップ・アドホック通信で送り込むことで、特定の製品・持ち主・場所毎に製品の状態を記録することができる。また、マルチホップ・アドホック通信経由でその情報を取得することができる。
オ)	商品全てを読み取れる場所(商品棚全て等)にRFIDリーダを敷設する必要が生じる。入荷時は、ウ)と同様。	商品に付与されたノード間でマルチホップ・アドホック通信を行うことで、在庫情報やセンシング情報を収集することができる。また、特定の商品を探したい場合に、ノード間で通信を行って、対象となる商品を検索することもできる。入荷時は、ウ)と同様。

### 3.2 WSNの適用可能性

WSNの最大の特徴は、要求に応じたプログラムを各ノードに配備できる点と、マルチホップ・アドホック通信を行う点にある。この特徴を産業界からのニーズに当てはめた場合、要求に対する柔軟性（特定の物品、人に対するサービスの提供）、敷設コストの低下（有線ネットワークに対して）が期待できる。WSNのアプリケーションに対する網羅性は、1章の冒頭で挙げた総務省の報告書に明るい。本稿の目的はアプリケーションの網羅性の追求ではないため、ここでは、物、人の把握という一般化した例を取り上げて考察を行う。

- a) 製品の状態の把握
- b) 作業員の動態管理

a)の例として、倉庫における特定の製品の保存状態の監視を行う場合を考える。例えば、一時間毎に温度と湿度を記録するプログラムを特定の製品に貼付されたノードに配備することで、保存状態を記録し、異常がある場合には、倉庫業者に連絡をするといった用途を実現できる。また、配備されたプログラムは状況に合わせてプログラムの振る舞いを変更することを可能にする。例えば、輸送中（加速度が観測される場合）のみ、温度を観測することが可能である。こうした適用によって、製品の所持者は消費者に対して、一定の品質状態を保った製品を提供できる。

倉庫業者は、製品を出荷したい場合に、無線波経由で位置を問い合わせることによって、製品の大まかな位置を知ることができる。位置管理が難しい平置き倉庫などでは効果が期待できる。

b)の例として、工場や工事現場のように作業員の安全管理を求められる場合の位置管理や動態管理が考えられる。例えば、工場において、各作業員に小型のノードを貼付し、加速度が観測されない場合には、体調不良や事故によって移動できないものと検知し、周囲の監視員に無線波経由で警報を通知するといった適用方法がある。また、ノード群で構成されるネットワークによって、作業員の位置管理を動的に実現し、作業員の配置の最適化や、作業員の状態を把握することが可能である。

ここで提示した例は一般化したものであるが、業務現場における電力使用量の把握、空調システムへの適用などが報告されており、WSNの産業界における実利用は既に開始されている。産業界における事例は、現在多いと言えないが、3.3節で挙げる課題の解決によって増加していくと思われる。

### 3.3 WSNの課題

実利用を行う上でのWSNの最大の課題は電源枯渇問題である。現在のところ、バッテリーの限られた電力を節約して利用すること以外、有効なアプローチは存在せず、根本的な解決策は存在しない。運用が許せばバッテリーの交換は考えられるが、そうでない場合は、太陽電池のような技術が必要になると考えられている。電源枯渇問題以外に、産業界の業務現場でWSNを適用する際の課題は以下のとおり考えられる。

- 1) 費用対効果

- 2) 頑健性・信頼性
- 3) 業務現場における調整

1)は、WSNを構成するノード単価が高額であることに起因する。高額なWSNの有効活用のために、ベースステーションにノードが無線経由で接続可能であればアプリケーションを稼働できる長所と、有線ネットワークに比べて敷設コストが安い長所を最大限に活用することが求められる。本課題は、ノードの再利用、利害関係者間での費用負担が必要となり、解決はビジネスモデルの設計に依存するところが多い。ビジネスモデルの設計とその運用は一般に難しく、時間を要する。費用対効果を算出することが最優先事項ではない用途（人命に関わる用途、法改正への対策）への適用が、現段階では最も現実的と考えられる。

2)は、技術的な観点でWSNの最大の課題になると考えられる。現在のWSNノードは、特定の社会ニーズに対応したレベルまでハードウェアとして最適化されていないのがほとんどである。例えば、流通工程で利用するパレットにノードを貼付する場合には、風雨・衝撃に対する加工が必要になる。加えて、無線波経由で通信を行うために、通信相手との通信失敗時の処理に対する対策を考慮する必要がある。これらの課題に対しては、産業界における実利用による知見の集約により用途毎に解決方法が構築されると考えられる。なお、WSNの固有の性質として、悪意をもった人間がノードを乗っ取り、データを盗聴・改竄したりするセキュリティの問題がある。WSNにおけるセキュリティは正にホットトピックであり、学界において盛んに研究<sup>[21], [22], [23], [24]</sup>がされている。

3)は、無線波を扱うために、現場毎に無線波の調整が必要なことを意味している。システム構築者が特定の環境（開発環境）で実装したシステムが、システム運用者の業務現場で期待されたパフォーマンスを発揮できるとは限らない。例えば、ノード間の通信の失敗頻度が増すだけでアプリケーションの運用は難しくなり、調整のために通信の再送回数を変更したり、通信失敗時の例外処理を実装することが必要になる可能性がある。システム運用者の業務環境におけるアプリケーションの最適化のための調整を実施しやすくする工夫、運用時の障害の切り分け、例外処理に対する対策等は、システム構築者の差別化要素になると考えられる。

#### 4. おわりに

WSNの研究は現在非常に盛んに行われており、ルーティング、センサノードの位置同定、セキュリティ、オペレーティングシステム、ミドルウェア、プログラミングモデル等の幅広い研究が行われている。本稿では、WSNのアプリケーション開発とアプリケーション運用に着目し代表的な研究例を紹介した。また、業務現場におけるWSNの適用を考慮した場合の課題と、適用の可能性を考察した。WSNは現在非常に注目されている一方で、現場で広く適用されるために乗り越えるべき課題がある。WSNはまだ成熟した技術ではないため、否定的な観点に立てば“適用しない理由”を作り出すことに困らない。ただし、小型のコンピュータ+無線ネットワークという拡張性・柔軟性のある技術を正確に捉えた肯定的・中長期的な取り組みによってWSNならではの効果的なアプリケーションが構築されると期待する。



- \* 1 MANET (Mobile AdHoc NETWORK) との違いとして、WSN ではデータの利用者 (観測者) が存在すること、WSN では MANET ほどノードが頻繁に移動しないことが挙げられる。
- \* 2 MOTE の他には、SunSpot<sup>[25]</sup>、BTnodes 等がある。SunSpot は JVM を搭載している。
- \* 3 本稿で紹介する研究例の多くが TinyOS のライブラリやオープンソースとして提供・公開されている。
- \* 4 ノードとして BTnode を利用している。
- \* 5 文献中の Service Discovery Based Approach は割愛した。
- \* 6 平均値や最大値など、ベースステーションに全てのノードから結果を集めて計算せずに、途中で順々に計算を行い、結果をベースステーションに送信する。
- \* 7 無線波経由でプログラムを更新できない場合は、専用の PC にノードを接続してプログラムを更新する必要がある。

- 参考文献**
- [1] M. Kuorilehto, M. Hannikainen and T. D. Hamalainen: "A survey of application distribution in wireless sensor networks", EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., 5, 5, pp. 774-788 (2005).
  - [2] "ユビキタスセンサーネットワークの実現に向けて最終報告". [http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040806\\_4\\_b2.html](http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040806_4_b2.html).
  - [3] "Crossbow mote". <http://www.xbow.jp/motemica.html>.
  - [4] J. M. Kahn, R. H. Katz and K. S. J. Pister: "Next century challenges: Mobile networking for "smart dust"", MOBICOM, pp. 271-278 (1999).
  - [5] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler and K. Pister: "System architecture directions for networked sensors", SIGPLAN Not., 35, 11, pp. 93-104 (2000).
  - [6] D. Gay, P. Levis, R. von Behren, M. Welsh, E. Brewer and D. Culler: "The nesc language: A holistic approach to networked embedded systems" (2003).
  - [7] P. Levis, N. Lee, M. Welsh and D. Culler: "Tossim: accurate and scalable simulation of entire tinyos applications", SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, New York, NY, USA, ACM Press, pp. 126-137 (2003).
  - [8] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler and J. Anderson: "Wireless sensor networks for habitat monitoring" (2002).
  - [9] K. Römer: "Tracking real-world phenomena with smart dust", EWSN 2004 (2004).
  - [10] K. Lorincz and M. Welsh: "Motetrack: a robust, decentralized approach to rf-based location tracking", Personal and Ubiquitous Computing, 11, 6, pp. 489-503 (2007).
  - [11] K. Henricksen and R. Robinson: "A survey of middleware for sensor networks: state-of-the-art and future directions", MidSens '06: Proceedings of the international workshop on Middleware for sensor networks, New York, NY, USA, ACM, pp. 60-65 (2006).
  - [12] S. R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein and W. Hong: "Tinydb: an acquisitional query processing system for sensor networks", ACM Trans. Database Syst., 30, 1, pp. 122-173 (2005).
  - [13] C.-L. Fok, G.-C. Roman and C. Lu: "Rapid development and flexible deployment of adaptive wireless sensor network applications", ICDCS '05: Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'05), Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp. 653-662 (2005).
  - [14] C.-L. Fok, G.-C. Roman and C. Lu: "Mobile agent middleware for sensor networks: an application case study", IPSN, pp. 382-387 (2005).
  - [15] T. Abdelzaher, B. Blum, Q. Cao, Y. Chen, D. Evans, J. George, S. George, L. Gu, T. He, S. Krishnamurthy, L. Luo, S. Son, J. Stankovic, R. Stoleru and A. Wood: "Envirotrack: Towards an environmental computing paradigm for distributed sensor networks" (2004).
  - [16] R. Newton, G. Morrisett and M. Welsh: "The regiment macroprogramming system", IPSN, pp. 489-498 (2007).
  - [17] J. Jeong, S. Kim and A. Broad: "Network reprogramming". <http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/NetworkReprogramming.pdf>.
  - [18] J. W. Hui and D. Culler: "The dynamic behavior of a data dissemination protocol for network programming at scale", SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, New York, NY, USA, ACM Press, pp. 81-94 (2004).

- [19] L. Luo, T. He, G. Zhou, L. Gu, T. F. Abdelzaher and J. A. Stankovic: "Achieving repeatability of asynchronous events in wireless sensor networks with envirolog", INFOCOM (2006).
- [20] "Auto-id laboratory". <http://autoid.mit.edu/cs/>.
- [21] Z. Yu and Y. Guan: "A dynamic en-route scheme for filtering false data injection in wireless sensor networks.", IEEE INFOCOM, IEEE (2006).
- [22] F. Ye, H. Yang and Z. Liu: "Catching "moles" in sensor networks", IEEE ICDCS (2007).
- [23] F. Li and J. Wu: "A probabilistic voting-based filtering scheme in wireless sensor networks", ACM MOBICOM, pp. 27-32 (2006).
- [24] C. Karlof, N. Sastry and D. Wagner: "Tinysec: A link layer security architecture for wireless sensor networks".
- [25] "Sunspot world". <https://www.sunspotworld.com/>.

**執筆者紹介** 末 永 俊 一 郎 (Shunichiro Suenaga)

1999年東北大学理学研究科地球物理学専攻修了。他企業を経て、2001年日本ユニシス(株)入社。SCM, RFID等のソリューション開発、ネットワークミドルウェア開発に従事。情報処理学会会員。