

センサネットワーク技術を活用した環境モニタリングの実現

伊藤 昌毅 (慶應義塾大学)

Environmental Monitoring Project with Sensor Network Technology
Masaki Ito (Keio University)

Abstract

Environmental monitoring with wireless sensor network (WSN) technology increases the chance to acquire and exchange spatiotemporal data. This talk introduces the field experiment of environmental monitoring using WSN technology, and discusses the needed technology to deploy environmental monitoring sensors and enable distribution of the environmental data captured by the WSN.

キーワード：環境モニタリング, センサネットワーク, 実証実験

(Keywords, Environmental Monitoring, Wireless Sensor Network, Field Experiment)

1. はじめに

空間にネットワーク機能を備える小型センサを配置するセンサネットワーク技術⁽¹⁾は、環境情報に代表される時空間情報の取得や流通機会を大幅に拡大させる技術でもある。本稿では、新宿御苑や大学構内で行っている環境モニタリング実験の具体例を交えながら、センサネットワークの設置や環境情報の流通に必要なプラットフォーム技術について議論する。

環境モニタリングは、無線センサネットワーク技術の有力な応用分野として早くから議論されてきているが、環境モニタリングの実践例はまだそれほど多くない⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。センサが取得する情報は、時間、空間それぞれに紐付けられた時空間情報であり、その流通が可能にするリアルタイムの空間情報の交換は、人々の行動支援を別次元のものにする可能性を持っている。例えば混雑情報や快適さの情報、交通情報や局地的な豪雨の情報などが、それに相当する。

本稿では、筆者らによる環境モニタリングを例にリアルタイムでの時空間情報の流通を実現する試みを紹介する。本稿を通じて、環境モニタリング実験を実施するための開発事項や手順などを明らかにする。また今後技術的にはより敷居が下がってゆく環境モニタリング背景に、参加型のリアルタイム時空間情報の流通を促進する技術開発を進めてゆくことを提案する。

2. Airy Notes: 新宿御苑における環境モニタリング実験

筆者らは、センサネットワーク技術による環境モニタリングシステムとして、緑地計画の研究者らとともに2006年よりAiry Notesシステムを開発し、2006年5月から6月にかけて新宿御苑において実証実験を行った⁽⁵⁾。実験では、2週間にわたって新宿御苑に温度センサを150個以上設置し、新宿御苑の温度分布やその変化を測定した。これらの観測結果をその場においてリアルタイムに閲覧できる閲覧システムを構築したほか、無線センサの設置手順を補助するセンサ設置支援システムを開発し、迅速なセンサ設置を

可能にした。

Airy Notesの開発にあたっては、従来の環境モニタリングとは全く異なる時間的、空間的解像度の実現を目指した。例えば気象庁によるアメダスでは、約20km程度の粒度で観測が行われ、2008年までは気温などを10分間隔で観測していた(現在は10秒間隔)。Airy Notesでは、数メートルごとのセンサ設置、数十秒ごとのデータ送信を可能にし、これまで捉えることが難しかった微気象観測を実現した。

2.1 Airy Notes システム 無線センサネットワーク技術を利用した環境モニタリングシステムのプロトタイプとして、筆者らはAiry Notesシステムと呼ぶソフトウェアを開発した。Airy Notesシステムは、センサデータを蓄積するデータベースサーバ、センサデータを集約しサーバへ送信する転送ソフトウェア、観測結果を視覚化する環境情報閲覧ソフトウェアとで構成される。図1に、Airy Notesシステムのソフトウェア構成を示す。ソフトウェアコンポーネント間はHTTPでXMLを交換することで通信しており、新たなセンサ機器や可視化アプリケーションなどの追加が容易である。サーバ内では、時刻と位置とを鍵としてセンサデータを保存しており、任意の場所の任意の時刻のセンサデータが検索可能である。本システムは、サーバ側のソフトウェアをRuby on Railsで、センサデータ集約、転送部分や可視化ソフトウェアをJavaで実装した。センサデータはPostGISというPostgreSQLにGIS機能を付加したデータベースシステムを利用し管理した。

2.1.1 利用センサとセンサパッケージ Airy Notesシステムの開発では、環境センサとしてuPartワイヤレスセンサシステム⁽⁶⁾(図2)を利用した。uPartは、カールスルーエ大学TecOにて開発された超小型で安価なセンサシステムである。単価30ユーロ程度の一つの基板上に、温度、照度、振動を検知するセンサを備えており、定期的に観測値を無線で発信する。実験で用いた10秒間隔の場合、ボタン型電池(CR1620)1つで6ヶ月以上動作する。一方でuPartからの無線信号の到達距離は約30m程度に限られ、

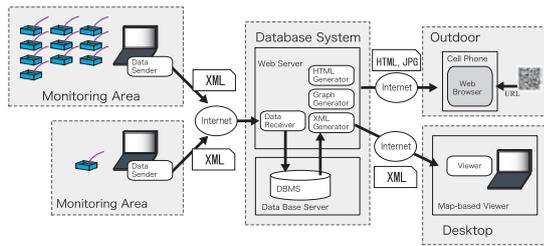


図 1 ソフトウェア構成
Fig. 1. System Architecture

マルチホップ通信も不可能であるため、広い領域の観測のためには電源とネットワークに接続されたシンクノードを多数用意する必要があった。



図 2 uPart センサモジュール
Fig. 2. uPart Sensor Module

野外への uPart の設置にあたり、図 3 に示す雨や日射の遮蔽のためのパッケージを作成した。パッケージは A4 版耐水用紙に薄いプラスチック板を補強のために貼り筒状にしたもので、表面にはセンサの観測データへアクセスする URL を示す QR コードを印刷した。本パッケージは主に温度センサの測定条件を考慮して設計しており、自然通風が可能で地上からの熱の影響を低減し、パッケージの熱がセンサに伝導しにくいことを目指して設計した。



図 3 センサパッケージ
Fig. 3. Sensor Package

2.1.2 環境情報閲覧ソフトウェア 環境モニタリングによって得られた観測データは、後日のバッチ処理により取得、分析することも可能ではあるが、データが常にリアルタイムに収集される無線センサネットワーク技術の長を活かし、より対話性が高く、多くの人に環境への気付きを与えられるシステムを目指し、以下の 2 種類のアプリケーションを開発した。

一つは、センサの設置場所に居ながら、その場所の現在

の気象状況や過去の変化などを知ることが出来る、携帯電話を用いた閲覧ソフトウェアである。ユーザは体感している気象状況と容易に関連付けながらその場所の特性を理解できる。図 4 に、携帯電話からのデータ閲覧の例を示す。センサパッケージ上に印刷した QR コードによって、気温の変遷グラフが示された Web の URL を取得できる。



図 4 携帯電話によるデータ閲覧
Fig. 4. Cell Phone Viewer

もう一つが、PC の大画面を用いて対話的に時空間データの閲覧を実現するシステムである。図 5 に画面を示す。ユーザは、マウス操作で自在に時間軸、空間軸をそれぞれ操作でき、ある瞬間における温度の分布を知ることが出来る。

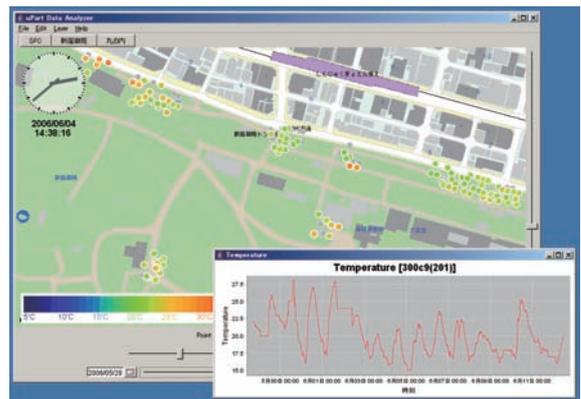


図 5 時空間データ解析ソフトウェア
Fig. 5. Spatiotemporal Data Analyzer

2.1.3 センサ設置支援システム Airy Notes システムでは、GPS を備えた Tablet PC 上で動作するセンサ設置支援システムを開発し、センサ情報登録作業を容易にした。本システムでは、現在位置が地図上に表示されており、ペン操作によってセンサの設置位置の緯度経度を登録できる。また、センサを設置した場所の地表面の様相や日光の差し具合、植物の育成状況などといったセンサ設置環境もペンによる選択操作で登録できる。図 6 に本システム

のスクリーンショットを示す。

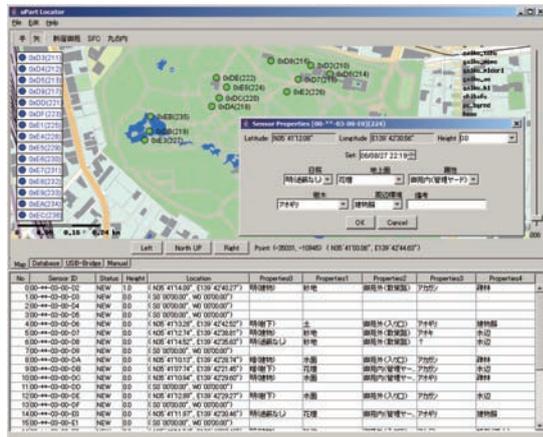


図 6 センサ設置支援システム
Fig. 6. Sensor Registration System

2.2 観測結果 実験の舞台となった新宿御苑は、58.3haの広さをもつ都市公園であり、近年の調査によって、周辺の高層ビルや繁華街が密集する地域の環境保全に大きな役割を果たしていることがわかってきてきた⁽⁷⁾。新宿御苑は周辺地域に比べ2-3度気温が低く、新宿地域における冷気溜まりとなっており、冷気が周辺にしみ出すことで周辺地域の温度を下げていることなどが明らかにされている。

実証実験における観測結果は、新宿御苑での既存研究が明らかにしていた御苑内の温度分布の特徴とよく適合するものだった。図7は、6月2日から3日にかけての新宿御苑内部の温度変化と、比較のため歌舞伎町にある新宿区役所に設置したセンサとの気温変化の比較である。灰色が新宿区役所の、黒が新宿御苑のエコハウス周辺に設置したセンサの観測値の移動平均の結果である。この結果は、新宿御苑が周辺より2、3度低いという既存研究を裏付けている。また、昼間のほうが温度差がより顕著であることもわかる。

2.3 その後の展開 Airy Notes システムは、その後2006年8月末より慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス、およびその周辺に50個程度のセンサを設置し1年間以上稼働を続けた。2006年11月22日、23日の慶應義塾大学SFC Open Research Forumの際に、東京都丸の内地区の丸ビルやTOKIAを中心に、屋外、屋内空間に合わせて22個のセンサを設置し稼働させた。これらの実験を通して開発ソフトを改良したほか、センサ設置のプロセスを洗練させ、丸の内においては限られた準備時間の中で2時間でのセンサ設置が実現でき、設置効率の向上が確認できた。

3. Mebius Sensor プロジェクト

新宿御苑での環境モニタリングプロジェクトに引き続き、筆者らは2009年より慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおいて環境モニタリングプロジェクト Mebius Sensor プロ

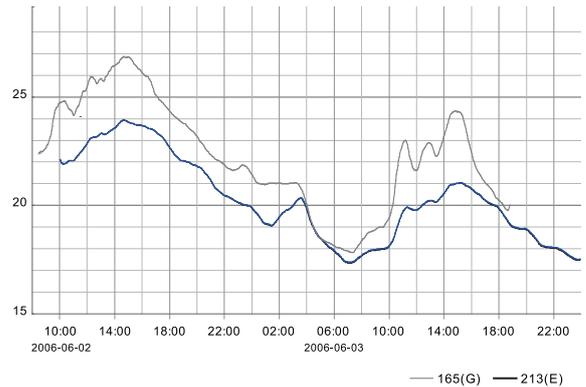


図 7 新宿御苑と新宿区役所との比較
Fig. 7. The temperature of Shinjuku Gyoen and Shinjuku Ward office

ジェクトを開始した。このプロジェクトでは、大学キャンパスを対象にキャンパス全域の気温を中心とした環境を観測、APIやWebなどを通して広く提供し、Ethernetによるキャンパスネットワークや無線LANといった情報インフラに引き続く、新世代大学キャンパスの情報インフラの構築を目指している。

3.1 利用センサ・ソフトウェア Airy Notes プロジェクトを進めた2006年当時と異なり、Mebius Sensor プロジェクトを開始した2009年においては商用の無線センサや一般的なWebサービスが広まっており、本プロジェクトではまずはこれらを活用する形でセンサインフラの構築を進めている。センサとしては、米Crossbow社の農業向けの無線センサネットワークeKo Moteを利用した。eKo Moteは、これまで研究用に開発が続けられていたMoteを防水ハウジングに納め、太陽電池や蓄電池によって外部電源の供給なしに運用を可能にしたセンサネットワークデバイスである。購入時の状態でマルチホップネットワークを構成するプロトコルスタックを備えており、数百メートル間隔で設置することで広範囲の環境観測が可能になる。観測は15分ごとに行われ、この間隔を変更することは出来ない。各ノードにはセンサ接続用に4つの外部端子を備え、気温、湿度、日照、葉上水分といった農業向けのセンサを接続できるほか、仕様に合わせて開発した独自のセンサを接続できる。観測データはマルチホップネットワークを経て最終的に組込Linux端末に転送され、端末内のファイルに蓄積されてゆくほか、Webブラウザ経由で閲覧が可能である。

Mebius Sensor プロジェクトでは、各センサノードに気温/湿度センサ、日照センサを取り付け、全体を図8に示すセンサポールに据え付けたあとに大学キャンパスに設置した。設置したセンサの詳細は図9に示す。

センサデータを共有するWebサービスとしては、APIを通じて時間軸に沿ったデータ投稿が可能なPachubeやTwitterを利用している。Pachubeは、センサ情報の共有

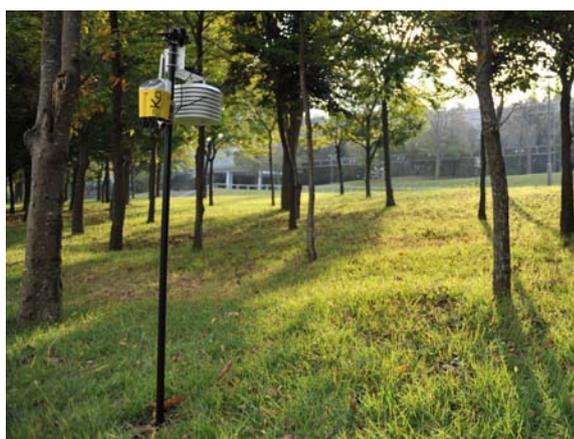


図 8 慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスに設置した Mebius Sensor ポール
Fig. 8. Mebius Sensor Pole at Shonan Fujisawa Campus, Keio University

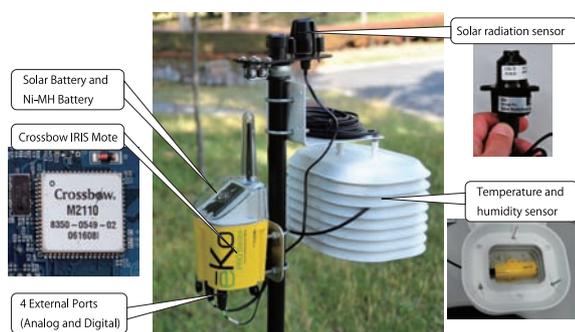


図 9 Mebius Sensor ノードの詳細
Fig. 9. The Detail of the Mebius Sensor Node

を目的とする Web サービスであり、地図上でのセンサの確認や、データのグラフなどの形式での閲覧が可能である。またセンサデータを提供する API を備え、センサを活用するサービス構築のハブとなることを目指している。Twitter は、本来” つぶやき (Tweet)” と呼ばれる 140 文字以内の短い文字情報を投稿、共有するサービスだが、センサの観測値を文字として投稿することで観測結果の共有や API を通じた活用のためのプラットフォームとしても利用が可能である。

3.2 システムの運用と今後 Mebius Sensor プロジェクトは、2009 年 9 月に 3 基のセンサの設置から始まり、2010 年 8 月現在まで観測実験を続けている。自作した設置器具などの設備は現在まで変わらず性能を保っている。観測結果は Twitter アカウント (@mebius_sensor、ただし現在停止中) に毎時つぶやいているほか、不快指数を算出するなどの学生のプログラミング練習用途にも用いられている。

現在、観測領域を広げるべく、システムの拡張を計画している。センサの台数を 16 基まで追加し、キャンパス全域の観測を予定している。台数を増加させることで、クリ

ングによる空間内挿の手法が可能になる。面的な観測を実現した上で改めてセンサ情報取得の API などを整備し、キャンパスの情報インフラとしての整備を続けてゆく予定である。

4. 環境モニタリングの実現プロセス

無線センサネットワーク技術の研究者にとって、環境モニタリングは容易にその実現が想像できる応用領域であるものの、実現するためには観測対象地との調整やセンサを覆うハウジングの開発などネットワーク分野とは大きく異なる雑多な作業が必要となる。そのためか、開発中の無線センサネットワーク技術を実際に屋外に設置し環境モニタリングを実現した事例は、それほど多くない。

ここでは、2006 年の Airy Notes プロジェクト、2009 年の Mebius Sensor プロジェクトそれぞれの事例を通して、標準的な環境モニタリング実現のプロセスの記述を試みる。環境モニタリングの実現プロセスは、大きく、センサ設置計画の立案、事務的折衝、設置器具の準備、実際の設置作業からなる。3 年間の技術進歩などで環境モニタリングの実現性は大きく高まったが、Mebius Sensor プロジェクトにおける商用センサを利用したアプローチでさえ、準備作業の煩雑さは大きく変わっていない。

4.1 センサ設置計画の立案 新宿御苑や大学キャンパスといった、大まかに設置箇所を決めたあと、まずはセンサの設置場所と設置方法を具体的に決めるセンサ設置計画を立てる。センサの設置場所の決定においては、1) センサノードの無線到達距離以内に宛先が存在すること (uPart の場合 30m 程度、eKo Mote の場合は数百メートル) 2) 人の活動を妨げたり、人間活動の影響を受けにくいこと、3) 周辺の環境を代表する場所であり極端な条件下にないこと (観測対象にもよるが送風口の前や街灯の直下などは避ける) 4) 設置作業やメンテナンス作業が可能なこと、といった条件を考慮する必要がある。リアルタイムにセンサデータを収集する場合、インターネットへの接続も考慮する必要がある。また、自立する設備を用意するか環境に既にある設備に取り付けるかなどといったセンサの設置方法も同時に検討する。それぞれのプロジェクトにおいて、大まかな計画を紙上で立てたあと、紙地図やカメラ、巻き尺などを持ちキャンパス中を踏破し、設置方法や設置箇所を検討、記録した。

4.2 対象地管理者との折衝 センサ設置計画を文書にまとめ、関連する部署などと調整する。このプロセスは、観測対象地により大きく異なるが、センサの機能や設置場所を説明するだけでなく、実験の学術的、社会的意義や危険性について十分に説明し理解を得る必要がある。プライバシーの問題や人や環境への安全性、対象地に関する不都合な情報が流通する可能性など、施設の管理者が当然抱く懸念を拭うような説明を心がける必要がある。

4.3 設置器具の準備 センサの設置のためには、電子機器を風雨から守る観点と、センサを外環境にさらすという相反する要件を考慮する必要がある。十分な耐久性や

頑強性を持ちながら、万が一の際に人や環境を傷つけない工夫も必要である。定期的な器具や電池の交換などメンテナンス性を考慮する必要もある。Airy Notes プロジェクトでは、短期間の観測であり大量のセンサを準備する必要があったため、コストの掛からない紙製のケースを利用し、設置の際も木や柵といった既にある設備を活用した。Mebius Sensor プロジェクトでは、センサ自体が防水のハウジングを備えており、そのまま屋外への設置が可能だった。しかし、センサを環境に固定するための設備に関しては十分な準備が必要だった。今回は、2m のポールを地面に刺し、自立する形でセンサノードやセンサを設置するアプローチを選択した。センサのポールへの取り付けのための金具が用意されておらず、汎用的な金具類に適するものがなかったため、金属板やアクリル板を加工してアタッチメントを自作した。

4.4 設置作業 センサ設置の全体プロセスの中では、実際に環境にセンサを設置する設置作業の比重は比較的小さい。センサ設置器具の組み立てやセンサの取り付けなどは事前に屋内で済ませることが可能であり、現場において必要な作業は、センサの固定作業と、センサノード ID と場所情報との対応付けである。このとき、無線の品質や設置環境の様相から、設置場所の微調整が必要になる。Mebius Sensor プロジェクトでは、センサの固定作業は専用のショベルで掘った穴にあらかじめ用意したセンサポールを差し込むという作業であり、二人で一基あたり 20 分程度で完了する作業であった。Airy Notes プロジェクトにおいてもセンサを木の枝などに掛けるだけの簡単な手順であったが、無線到達の可否に応じて設置箇所を微調整する場合があった。

モニタリングシステムが取得する観測情報は、一般にセンサノード ID に紐付けられているだけで、そのままではセンサの位置やその場所の様相といった情報はわからない。そのため、センサノード ID と位置や場所の情報とを紐付ける必要が生じる。同一のセンサを多数設置し、後になっては容易には現地を確認できない環境モニタリングにおいて、この紐付けは特に重要な作業となる。センサノード ID の取得には、デバイス自体に書かれている場合 (uPart) や初期化の手続き中に取得できるもの (eKo Mote)、センサを一つだけ反応させ変化が起こった ID から推測するなどいくつかの方法がある。この ID を地図上で緯度経度座標を指定するなどの方法で位置や場所に紐付けする。Airy Notes プロジェクトにおいて開発したセンサ設置支援システムは、主にこのプロセスを支援するシステムであった。システムの地図画面上で、設置したセンサ ID に加えて観測地点の表土や樹木などの情報、センサを設置した状態を撮影した写真などの登録が可能であった。

5. 議論

環境モニタリングは、無線センサネットワーク技術の研究当初から想定されてきた応用領域である。また、環境モニタリング自体は、無線技術や情報技術が発達する以前から気象観測、都市計画や環境保全のための環境調査など、

様々な領域の研究者や組織によって、研究や意志決定の基礎資料を得るために広く行われている。しかしこれまでの環境モニタリングは、専門知識や予算を持った者が、特定の目的のために計画、実施する大規模な活動だったと言えるだろう。

本稿では、2006 年の環境モニタリング実験と 2009 年の実験とを並べて紹介した。この 3 年を比較するだけでも、商用の屋外向け無線センサノード、Twitter などの Web サービスの登場、高度なプログラム可能性を備えるスマートフォンの登場など、環境モニタリング実施の敷居を下げる技術が次々と登場し普及が始まっている。一方で、環境モニタリングの実現プロセスそのものには大きな変化はなく、環境モニタリングの実施は依然として容易なものではない。

一方で、環境モニタリング実現の敷居を下げ、広く一般の参加者を巻き込んだ環境調査を可能にすることで、企業や国の活動では十分に届かないところに対しても、住民の関心に基づき適切な精度での環境モニタリングが実現する参加型の環境モニタリングは、環境や地域社会への関心を高めるきっかけにもなるだろう⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

今後の研究開発の方向の一つとして、本稿では、上に挙げた環境モニタリングの手順の標準化、パッケージ化を提案する。センサの接続端子や設置金具、センサデータを交換する Web API、センサの安全性やプライバシーへの懸念度合いの表記など、規格化に相応しい要素は多い。またセンサを設置する手順そのものに関して、標準化することでチェックシートのような形でそのノウハウの流通が可能だろう。これらが規格化され、また製品として十分流通するようになれば、センサ設置のコストが大きく下がるだろう。

もう一つの提案は、環境モニタリングの実施とデータの利用の分離の促進である。現在は、特定の領域や課題に関心のある人によって、特定の期間だけモニタリングが行われている。これは、十分に制御した条件のデータのみを集める、効率的な方法でもある。しかし近い将来、センサのコストや電池寿命などはほとんど意識せずすむようになり、負担なくセンサの観測情報を流通させることが可能になるだろう。スマートフォンを用い、所有者のいる場所を常時観測するような形の観測も可能になるだろう。そこでは、環境モニタリングシステムは検索エンジンのようなインターネットにおける情報インフラとして運用され、観測データは、特定の観測目的に閉じることなく、位置情報や精度などのメタ情報とともにリアルタイムで流通するようになるだろう。こうした情報システムを構築することが、データ利用の機会を増やすとともに、十分な精度のないセンサを補完する技術の開発などを促し、結果として高精度、高粒度な環境モニタリングデータの流通を実現するのではないだろうか。

技術の進歩を背景とした環境モニタリング情報の流通の促進で、これまで多く議論されながらなかなか進まなかった空間情報の流通を促進するきっかけとなることを願う。

6. おわりに

本稿では、2006年の新宿御苑での実施を中心とする Airy Notes プロジェクト、2009年からの慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスを中心とする Mebius Sesnsor プロジェクトを中心に筆者らが進めてきた環境モニタリング実証実験を説明した。どちらの実証実験も、気温や照度など環境センサを備えた無線センサノードを環境に広く設置し、現在の気象観測網では捉えきれない微細な気象観測を実現するとともに、リアルタイム、オンサイトでの環境観測を実現し、環境へのアウェアネスの向上を目指した。またセンサデータの API を通じた収集、取得を実現し、こうした情報を利用したアプリケーション開発を推進した。

本稿では、これらの二つのプロジェクトを比較しながら、技術の進歩による環境モニタリング実現の容易さの違いや、環境モニタリングを実現するための標準的なプロセスなどについて議論した。そして、環境や地域社会への関心につながる、参加型のリアルタイム時空間情報の流通を促進する方策として、環境モニタリングの手順の標準化、パッケージ化と、環境モニタリングの実施とデータの利用の分離の促進とを提案した。

謝辞

本研究は、NICT 委託研究「ダイナミックネットワーク技術の研究開発」の研究成果の一部である。

参考文献

- (1) C.Y. Chong, SP Kumar, and B.A. Hamilton. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. In *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, pp. 1247–1256, 2003.
- (2) 深津時広, 平藤雅之. 圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発. *農業情報研究*, Vol. 12, No. 1, pp. 1–12, 2003-04.
- (3) 江崎浩. サイバーワールド 地球環境の“今”がネットでわかる. *Newton*, Vol. 1, , 1 2006.
- (4) 戸辺義人, 蔵田英之. 細粒度気象センサネットワーク構築の実際-群馬県館林市の例. *情報処理*, Vol. 51, No. 6, pp. 692–699, 2010-06.
- (5) 伊藤昌毅, 片桐由希子, 石川幹子, 徳田英幸. Airy Notes: 緑地計画のための無線センサネットワークによる環境モニタリング. *情報処理学会論文誌*, Vol. 49, No. 1, pp. 69–82, 2008.
- (6) Michael Beigl, Albert Krohn, Till Riedel, Tobias Zimmer, Christian Decker, and Manabu Isomura. The uPart Experience: Building a Wireless Sensor Network. In *Proceedings of the ACM/IEEE Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 366–373, Memphis, TN, USA, April 2006.
- (7) 成田健一, 三上岳彦, 菅原博史, 本條毅, 木村圭司, 桑田直也. 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象. *地理学評論*, Vol. 77, No. 6, pp. 403–420, 2004.
- (8) C. Gouveia, A. Fonseca, A. Camara, and F. Ferreira. Promoting the use of environmental data collected by concerned citizens through information and communication technologies. *Journal of Environmental Man-*

agement, Vol. 71, No. 2, pp. 135–154, 2004.

- (9) N.R. Budhathoki, B.C. Bruce, and Z. Nedovic-Budic. Reconceptualizing the role of the user of spatial data infrastructure. *GeoJournal*, Vol. 72, No. 3, pp. 149–160, 2008.