

# Airy Notes: 小型センサを用いた微気象観測システムの構築と実証

伊藤 昌毅<sup>1</sup>, 片桐由希子<sup>1</sup>, 石川幹子<sup>2</sup>, 徳田 英幸<sup>1,2</sup>  
{niya, yukiko77, mikiko, hxt}@sfc.keio.ac.jp

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 <sup>2</sup> 慶應義塾大学 環境情報学部

本稿では、小型センサモジュールを利用した環境モニタリングシステム、Airy Notes システムについて述べ、新宿御苑において微気象観測を行った実証実験を紹介する。Airy Notes システムは高密度、高頻度の気象観測を実現し、携帯電話やデジタル地図などを通じた視覚化を実現するシステムであり、環境の状態の直感的な把握を助ける。センサの導入を支援する機能も備え、新宿御苑では 160 個のセンサを用いた実証実験を可能にした。

## 1. はじめに

ユビキタスコンピューティングの研究領域では、遍在する計算機によって人間活動を支援すべく、センサや通信機能を備えた小型計算機の開発や活用が議論されている。例えば、環境モニターや人々の行動の取得、自律的なセンサ機のネットワーク化を目指すセンサネットワークなどの研究例が挙げられる [2, 3, 4, 6]。

多様で大量のセンサを利用した自然環境の観測も、ユビキタスコンピューティング技術の応用領域の一つである。センサを活用した環境調査は既に専門家によって進められており、自然環境の特徴や変容が定量的に観測されている。しかしこうした調査の多くは特に専門家が興味を持つ環境を対象としており、人々が生活の中で接する身近な自然環境について調べ理解を深めることは考慮されていない。

都市化の問題点が多くの人に共有されるようになった現在、商工業地や宅地に積極的に緑を導入し、生活環境を改善することへの関心が高まっている。例えば都市に設けられた緑地や公園は、単に人々の憩いの場の提供という以上に、都市の環境保全に大きな役割を果たしている。都市の動物の住処として、都市の保水の実現として、また、ヒートアイランドと言われる、都市を覆う高温な大気をもたらす気温の上昇を緩衝する役割として、緑地は都市の環境の急激な変化を抑制し、人々の暮らしやすさを実現している。

本研究では、ユビキタスコンピューティング技術によるセンサ機器を用いることにより、都市の環境情報を誰もが発信、閲覧できるインフラの構築を目指す。インフラの構築に当たっては、地域住民など人々による草の根的なセンサ設置を可能にする。こうした環境が整うことで、専門家以外の多くの一般人まで、住環境や緑地の効

果を定性的に評価できる。また、データによる共通理解に基づいた環境デザインを実現できる。

研究はまず、都市に於ける環境調査で既に実績のある新宿御苑を対象に、Airy Notes システムと名づけた環境観測システムのプロトタイプを構築、運用し、センサやソフトウェアの機能や性能を検証しながら今後の研究開発における問題点を発見する。本実験では、イベントの一環として行われるという性質から、インタラクティブで直感的な手法により人々がデータにアクセスできる点を重点的に実現する。また、センサ設置の支援ツールによって設置作業の簡易化を目指す。

次の段階として、インフラとして利用できるソフトウェアシステムへの発展を目指しており、環境観測実験を行いながら、様々な種類のセンサデータの入力機能や様々なアプリケーションへのデータ出力機能を実現し、センサデータを流通させるインフラへとしての利用を目指す。

Airy Notes システムの構築には uPart という最新の小型センサ技術を利用している。Airy Notes システムは、2006 年 5 月 25 日から 6 月 12 日まで新宿御苑に設置され、観測を行いその機能を実証した。

本稿は、以下 2 章で Airy Notes システムの特徴や技術を説明し、3 章で利用センサの選定方針や設置方法について述べる。4 章で新宿御苑での実証実験を説明し、5 章で実験結果に考察を加える。その後、今後の課題を述べ本稿をまとめる。

## 2. Airy Notes システム

Airy Notes システムは、小型センサを用いた環境モニタリングシステムであり、新宿御苑をはじめとする自然環境や都市環境を観測しその特徴を明らかにするために開発した。Airy Notes システムにより、大量の小型センサを用いた微気象観測が実現する。ユビキタスコンピューティング技術の発達により、こうした小型センサが実現し、従来とは異なる粒度での観測が可能となった。

### 2.1 Airy Notes システムの特徴

Airy Notes システムは以下の特徴を備える。

Airy Notes: A Monitoring System of Micro Scale Environmental Condition

Masaki Ito<sup>1</sup>, Yukiko Katagiri<sup>1</sup>, Mikiko Ishikawa<sup>2</sup>, Hideyuki Tokuda<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Media and Governance, Keio University

<sup>2</sup>Faculty of Environmental Information, Keio University

5322, Endo, Fujisawa, Kanagawa 252-8520, Japan

E-Mail: {niya, yukiko77, mikiko, hxt}@sfc.keio.ac.jp

## リアルタイムでの観測の実現

環境調査用のセンサ機器の多くはデータ保存用のストレージ機器を備えており、定期的にデータを吸い出す必要がある。こうした機器を利用した場合、観測データは最低数日の後に閲覧することになる。しかし、緑が環境に与える影響を体感している気温や快適さなどと結びつけ実感するためには、リアルタイムで温度などの情報を得ることが大切である。

Airy Notes では、無線式のセンサモジュールを用い、ネットワークに接続することにより観測データの即時収集を実現した。収集したデータはソフトウェアでの利用用途に XML 形式で出力しており、これを利用したリアルタイムでのデータ閲覧アプリケーションを開発した。図 1 に示す地図システムには、現在の気温が色によって示されており、場所による温度の違いが直感的に把握できる。また、同じ地図上で数日にわたる観測結果を観察でき、場所による温度変化の違いの直感的な把握も実現されている。

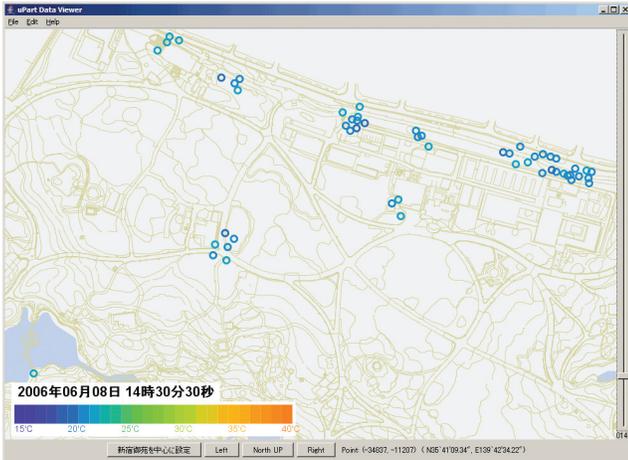


図 1: リアルタイムでの地図表示

## 設置場所でのデータ閲覧の実現

センサの設置箇所に居ながら、その箇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れば、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することが出来る。

Airy Notes システムは、現在気温やその変化を、携帯電話を通じてその場所から閲覧できる。センサシェード上の 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 2 は、携帯電話によるデータ閲覧の例である。

## 容易な設置の実現

センサ装置の設置に際しては、設置場所や設置環境など実験内容に依存して何種類もの情報の登録が必要になる。そのため、システム設置に際しては、その作業の容易さが大きな問題になる。Airy Notes では、以下の工夫



図 2: 携帯電話によるデータ閲覧

によってシステム設置を容易にし、実証実験における 160 個ものセンサ設置を実現した。

センサ機器の設置に際しては、そのセンサの設置位置や設置環境の様相などを詳細に記録する。緯度、経度によって記述された位置やセンサ設置高に加え、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を記録する。GPS 受信機の付属したセンサモジュールも存在するが、こうした環境情報まで記録するためには、手作業による情報登録が不可欠である。

Airy Notes では、GPS を備えた Tablet PC を用いたセンサ設置補助システムを開発し、センサ情報登録作業を容易にした。本システムでは、現在位置が表示された地図を用いてセンサの設置位置を容易に登録することが出来る。また、周辺環境などの情報もペンによる選択操作で容易に設定することが出来る。図 3 に本システムのスクリーンショットを示す。

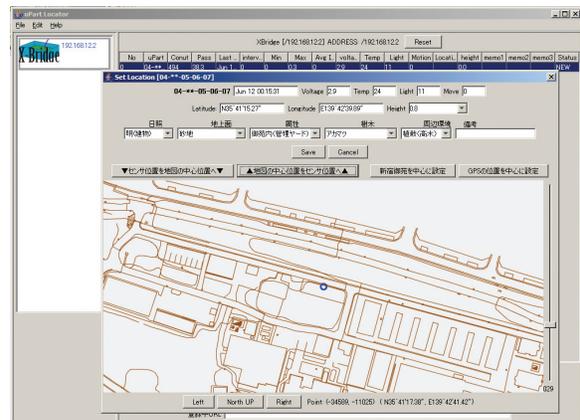


図 3: センサ設置補助システム

## 2.2 ソフトウェア構成

図 4 に、Airy Notes 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 や XML といった標準的な通信規格を通じ接続され、コンポーネントの独立性を実現している。このため、新たなセンサ機器や視覚

化アプリケーションなどの追加は容易である。

観測対象となる地域には、センサデータ集約用の PC を設置し、センサが値を観測する毎に XML 形式にて HTTP を通じてサーバに転送する。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、任意の場所の任意の時刻のセンサデータを検索可能にする。センサデータ閲覧のために携帯電話用のビューアとや地図を利用したデスクトップ用のビューアを実装しており、それぞれのビューアは必要なデータを取得しグラフなどによって視覚化する。本システムは、サーバ側のソフトウェアを Ruby on Rails で、センサデータ集約部分や視覚化のソフトウェアを Java で実装した。

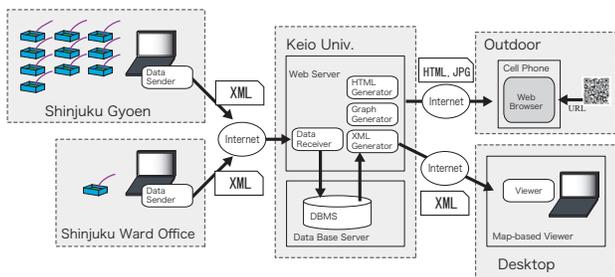


図 4: ソフトウェア構成

### 3. センサシステム

本節では、Airy Notes システムにおいて利用するセンサシステムについて述べる。センサを活用したユビキタスコンピューティングの研究事例は多いが、精密機器であるセンサを屋外で運用した例は多くない。新宿御苑での実証実験ではドイツ カールスルーエ大学 TecO にて開発された uPart センサシステム [1] を利用した。以下にセンサの選定や屋外設置の際のパッケージについて述べる。

#### 3.1 uPart ワイヤレスセンサシステム

センサの選定では、気象観測に必要なセンサを備え、リアルタイムでのデータ収集が可能であるほか、大量に設置するため個々のセンサが低価格であること、長期間の電池寿命が期待できること、十分な無線の到達距離などによる広範囲への設置が可能であることを条件となった。一方でセンサは環境に固定され、位置情報以外に設置環境の様相を入力する必要があるため、GPS などによる位置の自動認識は必ずしも必要ではなかった。

これらの条件を十分に満たすセンサシステムは現在のところ存在しないが、新宿御苑における実証実験ではセンサとして uPart ワイヤレスセンサシステムを利用した。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。図 5 に uPart センサモジュールを示す。ひとつの uPart センサモジュールは 30 ユーロ程度の価格であり、本実験用に 200 個以上のセンサを準備した。uPart センサモジュールは温度、照度、振動を検知するセンサが備えており、10 秒ごとにそ

の観測値を無線で発信する。観測値の発信間隔は、電池挿入時に特定の発光パターンを照度センサに与えることで変更できる。ひとつのボタン型電池 (CR1620) で 3ヶ月以上動作し、発信間隔を 40 秒間にした場合には半年を越える動作を確認している。



図 5: uPart センサモジュール

一方、uPart センサシステムは広範囲へのセンサの設置には必ずしも適していない。uPart からのデータを受信するために、図 6 に示す XBridge と呼ばれる受信機を用いる。XBridge は、複数台の uPart からの信号を受信でき、受信データは UDP パケットとして Ethernet ポートを通じ出力する。uPart からの無線信号は約 30m 程度の距離まで到達するため、広い領域の観測を行うためには Ethernet を敷設し XBridge を高密度に設置する必要がある。実証実験において観測を計画した地域が限られていたため、新宿御苑での実証実験では uPart センサシステムを利用した。



図 6: XBridge

#### 3.2 センサパッケージ

野外での uPart の設置にあたり、雨や日射の遮蔽のためのパッケージをデザインした。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、パッケージの表面には uPart 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。携帯電話から QR コードを通じ Web にアクセスすることで、センサの観測値やグラフによるデータ履歴を閲覧できる。図 7 にパッケージの形状を示す。

uPart センサユニットは温度、照度、振動の 3 種のセンサを備えるが、屋外において正確な観測データを得るためには、百葉箱に相当するような適切な機材によって観測条件を整えることが不可欠である。今回の実証実験では、パッケージの形状は気温センサの測定条件を整え



図 7: センサパッケージ

ることを優先し設計した。日射を遮蔽すること、自然通風が可能であること、地上からの熱の影響を低減すること、パッケージの熱がセンサに伝導しにくいことが要件となっている。本実験は短期間に多数のセンサを用いることから、材料の入手、加工が容易なこと、設置やメンテナンス、回収が容易であることを考慮した。耐用期間は一ヶ月程度に設定している。パッケージ表面は、Airy Notes システムのインタフェースとして人目を引きやすいものであること、一方で設置環境の景観を乱さないことに配慮しデザインした。

#### 4. 実証実験

2006年6月3日に新宿御苑100周年記念イベント「玉川上水復活に向けて」が開催され、その一環として Airy Notes システムを新宿御苑に設置し運用した。イベントでは、新宿区長をはじめとする多くの来園者にシステムを紹介し、好評を得た。5月30日から稼働させたシステムは、イベント後も6月12日に撤収するまで安定して動作した。

##### 4.1 新宿御苑

東京都の中心部、新宿区にある新宿御苑(図8)は、58.3haという広大な敷地を持ち、一日平均3,200人、年間90-100万人の来場者が訪れる都市公園である。新宿御苑は、様々な自然環境調査の対象とされる場所でもある。新宿御苑周辺は高層ビルや繁華街が密集する都内有数のオフィス、商業地域であるが、近年の調査によって、新宿御苑がこれらの周辺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た[5]。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氣溜まりとなっており、冷氣が周辺に滲み出し、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。

##### 4.2 実証項目

新宿御苑における実証実験では、特に以下の観点からシステムを評価し、今後の改良につなげてゆく。

##### センサの屋外設置手法

開発段階のセンサノードを屋外に長期間設置し運用した事例は多くない。本実証実験では、作成したセンサパッケージの性能を調べ屋外への設置手法を検討する。



図 8: 新宿御苑

##### 設置作業

環境観測システムの運用に際し、センサの設置状況などを登録し設置作業を支援するシステムは不可欠である。実証実験におけるセンサ設置作業を通してセンサ設置補助システムを利用し、その機能や利便性を評価する。

##### 観測データの妥当性

センサによって得られた観測値と先行研究における結果とを比較し、利用したセンサによって環境観測に十分なデータが得られたか検証する。

##### 4.3 観測地点

多様な環境下での観測値を収集しそれぞれの特徴を知るためには、新宿御苑内のさまざまな箇所や、新宿御苑外の市街地にもセンサを設置し、その値を比較する必要がある。実証実験では、池のほとりや散策路の付近、アスファルトで覆われた新宿門付近や樹木の密集する地点など、御苑内でも異なる環境となる地点が観測対象となった。それぞれの観測地点に XBridge を設置し、その周辺にそれぞれ15個程度の uPart センサモジュールを設置した。新宿御苑全体では、150個のセンサを設置した。図9に示した新宿御苑の地図上に、センサを設置した箇所を示す。

新宿御苑に加え、約700m程度離れた歌舞伎町に位置する新宿区役所の屋上へも、センサを設置した。新宿区役所は典型的な新宿の市街地にあるため、御苑とその周辺でのデータを比較し、新宿御苑の特徴を知るためには相応しい場所である。

##### 4.4 センサ設置作業

新宿御苑への Airy Notes システムの設置には、一日あたり約3人による作業で合計6日間要した。2005年5月25日に始めた設置は、5月30日に完了しその日から観測を始めた。センサの設置作業は、XBridge の設置やそのためのネットワークケーブルの敷設を中心としたインフラ構築作業と、センサを各 XBridge 周辺の木々の枝に設置するセンサ設置作業とに大別される。実証実験で

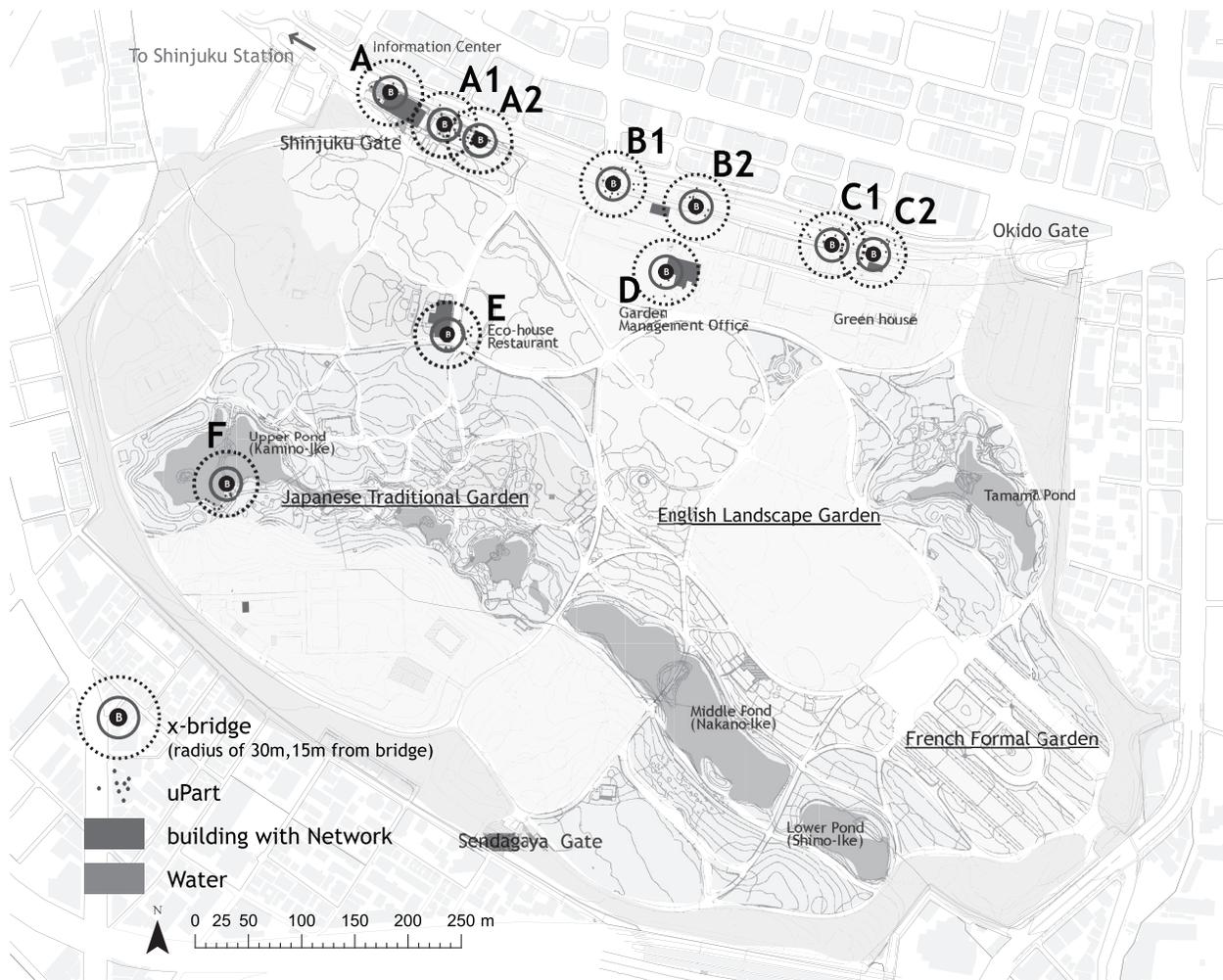


図 9: 新宿御苑への設置状況

は、作業期間の前半 3 日間をインフラ構築作業に、後半 3 日間をセンサ設置作業に費やした。

XBridge への Ethernet は、新宿御苑の既設ネットワークの利用許可を頂けたため、ネットワーク設備がある建物からカテゴリ 5 の Ethernet ケーブルを用いて延長する形式とした。市販の Power over Ethernet(PoE) 機器を用い、一本の Ethernet ケーブルでデータと電源の供給を実現した。XBridge と PoE 受電機器は家庭用タップに収納し、テープなどで防水した。設置箇所のひとつは日本庭園であり、XBridge は船を用いて橋の裏に固定した。

後半作業では、観測エリア内において日差しや地面の様相、通路との位置関係などを勘案の上、条件の異なる数箇所を選定しセンサを樹木などに取り付ける。この作業を円滑にするため、GPS センサ位置や設置環境の状態をデータベースに登録するセンサ設置補助システムをタブレット PC 上で利用した。センサ設置時には補助的に無線 LAN を設置し、タブレット PC をネットワークに接続した。無線 LAN を通じ電波の受信状況を確認できるため、受信状況によってセンサの取り付け位置を調整した。

## 5. 考察

実証実験において運用したプロトタイプシステムからは、以下に述べる問題が見出された。

### 5.1 センサ

一部のセンサがパッケージごとカラスに破壊された点を除き、ほぼ全てのセンサは実験期間中正常に動作し続けた。センサモジュールごとの個体差も問題にならず、パッケージも十分にセンサを保護した。

一部のセンサにおいて、早朝の温度上昇が周辺の他のセンサと比較して急激であるという現象が見られた。これは、パッケージ内に直接差し込む太陽光が原因だと考えられる。また、屋外での使用では照度センサの測定限界を上回る明るさになってしまうため、照度センサの出力値から十分な情報を得られないという問題もあった。

こうした考察を踏まえて、現在改良を加えたパッケージを作成している。新パッケージでは、1) 厚紙の利用とプラスチック骨組みの省略による製作工程の簡素化、2) 筒内部を黒く塗ることによる直射日光の影響の軽減、3) センサ設置向きの調整や照度センサへの減光フィルタ貼

付による、振動、照度センサの活用を目指している。数パターンの試作による比較実験を経て新パッケージの仕様を確定し、2006年9月より慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス(SFC)において2ヶ月程度の運用実験を行う予定である。

## 5.2 設置作業

設置作業の前半のインフラ構築作業は大部分が通常のケーブルの敷設作業であり、事前調査や作業者の習熟度が作業効率を決定すると考えられる。一方で後半のセンサ設置作業は、開始当時は作業手順や作業に必要な技能すら明確ではなく、試行錯誤を経て作業手順が定まった。センサの設置箇所の決定やセンサの設置環境属性を登録する作業は、実験内容や樹木名などに対する知識が必要で、作業に当たれる人員は限られる形となった。

開発した設置補助システムに関しては、センサ設置手順のモデル化が不十分であったため、補助システムに加え紙地図への記録も併用する必要が生じ、システムの問題点が浮き彫りとなった。システムの設計段階では、ひとつのセンサごとに設置箇所を確定し、設置場所や設置環境を登録するという手順を想定していた。しかし実際には、センサそれぞれの設置環境を差別化するために近傍の複数個のセンサをまとめて設置する必要があり、また作業効率もよかった。一旦決定した設置箇所も、電波の受信状況が悪かった場合には移動することもあり、センサ設置位置の確定には現場での試行錯誤が必要であることがわかった。センサの位置を調整しているうちにセンサを見失うことが何度もあり、センサ位置の微調整を含めた作業全体を支援する機能の必要性が明らかとなった。

また、設置補助システムからセンサデータの受信状況を確認するためにネットワークが必要であり、センサ設置時に一時的に無線LAN設置していた。しかし無線LAN設置作業は煩雑であるばかりでなく設置箇所によっては電波が届かないなどの問題もあった。

現在開発中の新バージョンでは、基本機能は踏襲しつつも地図上でのペンを利用したセンサ位置やセンサ属性の変更をより柔軟に行えるよう改良している。複数のセンサの位置や属性を同時に変更できる機能や、PHSなどの狭域インターネット接続での実用的な動作も実現している。またセンサの設置箇所を示した地図を出力する機能を設け、設置作業前に施設管理者などと打ち合わせの際の資料を作成できるようにした。

## 5.3 観測結果

実証実験の目的のひとつは、設置したセンサからこれまでの調査で明らかにされている新宿御苑の気象の特徴が観測できるか判断することである。以下では、システムが出力するグラフや地図を用いて新宿御苑の温度分布や温度の変化を明らかにし、その特徴を調べる。

図10は、6月2日の新宿御苑内部と新宿区役所との気温変化の比較であり、新宿御苑が周辺より2、3度低

いという調査を裏付けている。また、昼間のほうが顕著な温度差が観測されることもわかる。

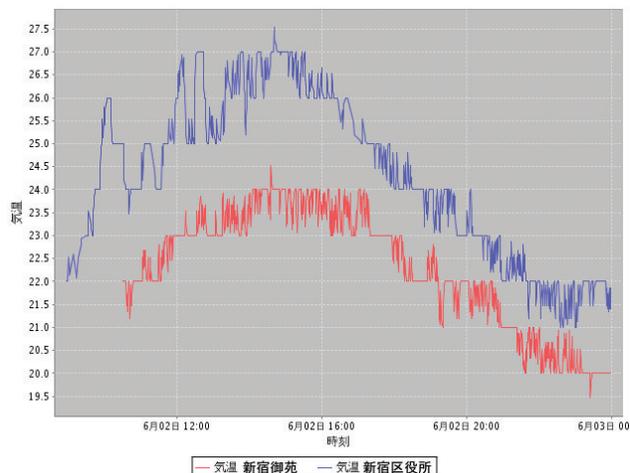


図10: 新宿御苑と新宿区役所との比較

地図ビューからは、市街地(G)、市街地との境界部分(A)、庭園地(E, F, D)、御苑内の樹林地(A1~C1)と、市街地から離れ樹林の緑が増えるにつれて気温が低くなる様子を概観できた。図11に、当時の気温分布を示す。6月3日のイベント参加者の多くは、この現象に強い興味を示した。

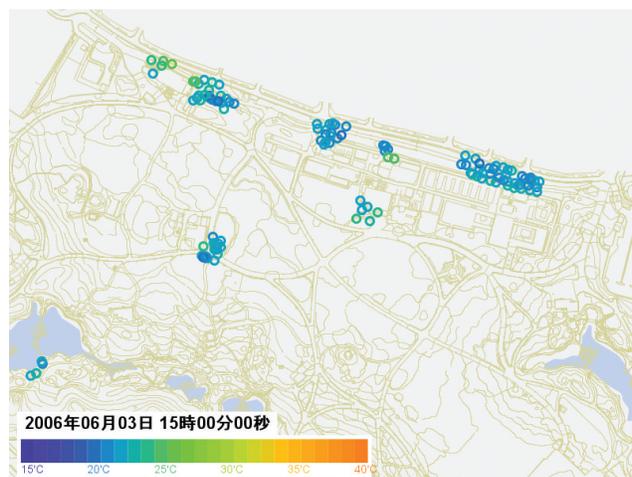


図11: イベント時の気温分布

観測期間中では比較的日照時間が長く、気温が上昇した6月10日のデータから、観測地点の環境と温度との関係に、次のような傾向を読み取ることができた。図12に、御苑内4箇所での6月10日の気温変化を示す。気候が最も安定していたのは、散策路の中でも特に成長した樹木の枝葉に天空が被われたエリア(B1, C1)で、常に他より低い気温を示していた。御苑内部(E)は、散策路よりは気温が若干高く、変化も大きい。これは、センサの設置箇所が果樹園や庭園といった明るい木陰であったことが影響したものと考えられる。市街地や市街地と

の境界部分 (A) では、気温の変化がより急激であった。夜間は、どの地点でも大きな差異は見られなかった。

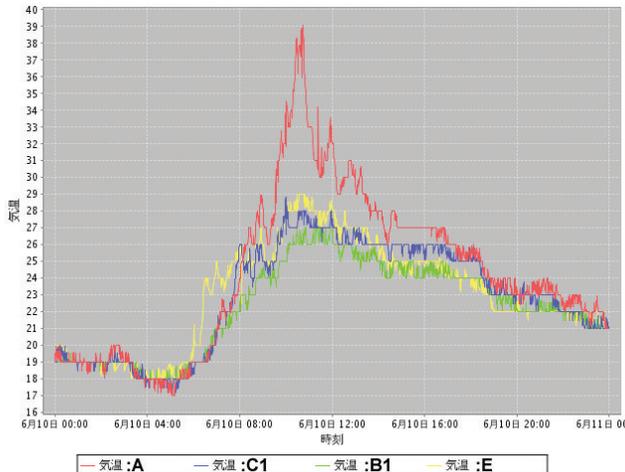


図 12: 6 月 10 日の温度変化

実証実験に際し高密度に設置したセンサによって、空間的な温度分布を明確に読み取ることが出来た。新宿御苑と市街地との違いや、新宿御苑内の温度変化の違いも、その特徴を捉えることが出来た。実証実験における観測期間では、平均気温が 22 度前後 (気象庁発表東京) で日照時間も少なかったため、ヒートアイランドなどの都市気候の影響は顕著ではなかった。今後、夏季に同様の実験を行うことで、より特徴的な気象を観測できると考えられる。

## 6. おわりに

本稿では、小型センサデバイスを用いた環境モニタリングシステムである Airy Notes システムについて述べた。Airy Notes システムはドイツ カールスルーエ大学による uPart センサモジュールを利用し、センサデータの収集やセンサの屋外への容易な設置を実現するシステムである。本システムを利用することで、地図などを通じた容易な環境状態の把握が実現する。観測データは、携帯電話を用いることで観測地点においてリアルタイムに観測することが出来、その場の体感気候と関連付けた理解が可能である。また、地図ビューによって温度やその変化の位置による特徴を把握することも出来る。

6 月 3 日の新宿御苑 100 周年イベントの前後に、新宿御苑において本システムによる微気象観測を行った。実験では新宿御苑内に 160 個のセンサを設置し、新宿御苑が都市気候の特徴を緩和し周辺より温度が低く保たれる様子の観測が実現した。こうした情報は、イベント会場や携帯電話を通じて閲覧され、イベント参加者の興味を引いた。

今回の新宿御苑での実験は Airy Notes システムの最初の実証実験であり、現在得られたデータの詳しい解析を行っている。本システムは、今後慶應義塾大学湘南藤沢

キャンパスや丸の内地区での実験を予定しており、それらを通じてデータの視覚化や解析手法を洗練させ、ユビキタスコンピューティング技術による環境モニタリング技術の確立につなげてゆく。

## 参考文献

- [1] M. Beigl, C. Decker, A. Krohn, T. Riedel, and T. Zimmer. uParts: Low Cost Sensor Networks at Scale. In *UbiComp 2005 Demonstration*, Sept. 2005.
- [2] M. Beigl, A. Krohn, T. Zimmer, and C. Decker. Typical Sensors needed in Ubiquitous and Pervasive Computing. In *First International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS) 2004*, pages 153–158, June 2004.
- [3] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. In *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 263–270, Seattle, Washington, USA, August 1999. ACM.
- [4] Ian F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, pages 102–114, August 2002.
- [5] T. Mikami. A practical Use of Wind and Green Effect for City Planning: Wind System in Tokyo and Its Role for Mitigating Urban Heat Island. *Environmental Research Quarterly*, (141):29–34, April 2006.
- [6] E. M. Tapia, L. L. Stephen S. Intille, and K. Larson. The Design of a Portable Kit of Wireless Sensors for Naturalistic Data Collection. In *Proceedings of Pervasive2006*, pages 117–134, May 2006.