

## 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

伊藤 昌毅<sup>†1</sup> 片桐 由希子<sup>†1,†2</sup>  
石川 幹子<sup>†1,†2</sup> 徳田 英幸<sup>†1,†3</sup>

本論文では、ユビキタスコンピューティングの研究者と緑地計画の研究者のコラボレーションによって、緑地計画における利用を目指した環境モニタリングシステムを構築する研究プロジェクトを紹介する。緑地計画が対象とする都市の自然環境は、高密度なセンサ設置を実現する無線センサネットワーク技術により定量的な観測が可能となる。本研究では、新宿御苑に160個のセンサを設置して行った実証実験によって、新しい環境モニタリングシステムの可能性を明らかにした。また、本研究プロジェクトにおいて緑地計画の研究者とともに構築した環境モニタリングシステムの機能を紹介し、システムに必要な機能を明らかにする。

### Airy Notes: Environmental Monitoring by Wireless Sensor Network System for Landscape Planning

MASAKI ITO,<sup>†1</sup> YUKIKO KATAGIRI,<sup>†1,†2</sup> MIKIKO ISHIKAWA<sup>†1,†2</sup>  
and HIDEYUKI TOKUDA<sup>†1,†3</sup>

This paper presents the collaboration research project between ubiquitous computing researchers and landscape planning researchers to develop the unique environmental monitoring system, which is aimed to be used in a future landscape planning. The natural environment of the questioned city in the landscape planning is able to be studied quantitatively by using the wireless sensor network system that enables the high density placement of sensors. Our research project that placed 160 sensors in Shinjuku Gyoen garden in its field research proved the effectivity of the new environmental monitoring system which uses the ubiquitous computing system. This paper presents the feature of the environmental monitoring system that we developed with a landscape planning researcher and discusses the requirement for the system as well as the possibility of the new landscape planning which was drawn from our research project.

#### 1. はじめに

本論文では、無線センサネットワーク技術を応用した環境モニタリングシステムの構築、運用プロジェクトを報告する。Airy Notes プロジェクトと名付けた本プロジェクトでは、情報処理技術の研究者（伊藤、徳田）に、緑地計画の研究者（片桐、石川）が加わり、ユビキタスコンピューティング研究の最先端で用いら

れている無線センサネットワーク技術を、緑地計画の研究や実践領域へ応用した。

ユビキタスコンピューティング環境とは、遍在する計算機の自律的な働きによって、人間活動を利用者意識させずに支援する環境である<sup>1)</sup>。センサを活用したモノや環境、人間活動の把握は、ユビキタスコンピューティング環境を実現するための重要な研究課題であり、様々な無線センサネットワーク技術やその応用システムが提案されている<sup>2)-6)</sup>。Mica Mote<sup>7)</sup> や Smart Its<sup>8)</sup> などのセンサと通信機能を備えた小型計算機が開発され、自律的なネットワーク形成技術やセンサデータの集約技術などが議論されている。

センサを空間に広く設置することで可能になる環境モニタリングは、無線センサネットワーク技術の応用例としてしばしばあげられる。センサネットワーク技

†1 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科  
Graduate School of Media and Governance, Keio University

†2 東京大学大学院工学系研究科  
School of Engineering, The University of Tokyo

†3 慶應義塾大学環境情報学部  
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

術の研究開発では、小型で安価なセンサ機器を多数利用し、マルチホップ通信などの通信技術により効率的に広範囲にわたるネットワークを構築することを目標としている。こうした技術を用いることで、現在の環境モニタリングを大きく上回る範囲の観測や低コストによる観測が可能となり、手軽な環境モニタリングの実現が期待できる。

緑地の保全や創造、緑化の推進により都市環境の向上を目指す緑地計画の分野は、環境モニタリングの成果を活用できる研究分野の1つである。緑地計画では、自治体による公園の整備や樹林地の保全、都市農業の振興など、土地利用の規制を含む様々な施策を提案している。しかし現在は計画の根拠となる環境の分析手法や計画の妥当性の検証、事後の評価手法などが十分に確立されておらず、その際必要となる環境データの入手も困難である<sup>9)</sup>。環境モニタリングの実現が手軽になる今後、緑地計画の計画立案や評価を、環境モニタリングによる定量的な環境情報に基づき行うことは、緑地計画の手法を刷新する新しい挑戦課題となる。

本研究では、緑地計画への応用を目指し無線センサネットワークを利用した環境モニタリングシステムを構築する。環境モニタリングシステムの構築や運用を通して、システムの緑地計画への利用可能性を探り、システムの機能や要件を整理する。また、環境モニタリングシステムを緑地計画の対象となる場所で実際に運用し、環境モニタリングシステムの性能を評価する。これらの研究によって、センサネットワークの緑地計画への応用へのロードマップを示すことを目指している。

また、ユビキタスコンピューティング技術の研究者と緑地計画の研究者との共同研究体制をとることで、研究の推進を加速させるばかりでなく、無線センサネットワーク技術の研究成果を応用システム開発へとつなげる橋渡しとなることを目指している。本研究の遂行にあたっては、異なる専門分野の研究者間で研究課題やアプローチを共有する機会を増やす工夫をしている。

本論文の構成は以下のとおりである。次章で、環境モニタリングが緑地計画に利用される機会や状況を整理する。3章では、本プロジェクトの目的や研究形態を述べる。4章で本プロジェクトで構築するソフトウェアについて述べ、5章ではその実証実験を紹介する。6章では、実験をふまえたシステムの改良について述べ、7章で関連研究を紹介した後、8章で本論文をまとめる。

## 2. 環境モニタリングを活用した緑地計画

緑地計画<sup>10)</sup>では、都市における緑地の適切な保全および緑化の推進を通じ、自然環境と人間活動との調和の実現を目指す。その際、審美的な観点だけでなく、地域の生態系保全や環境保全機能の維持、防災、レクリエーションなど、緑地の持つ様々な機能を総合的に検討する。

### 2.1 市民参加による緑地計画

住民が、自らの住むまちづくりに関与する市民参加は、地方分権や地方自治の独自性が重視される現在、重要な手法となっており、緑地計画においても例外ではない。市民参加では、土地所有者やその土地の企業、まちづくりに関わるNPOなどが、行政と意見交換や共同作業を行ったり、ときには住民主導の形によって、都市計画などまちづくりに関わる案件に参加する。

緑地計画では、国土全体から地域までの様々なスケールにおいて環境を調査、評価し、緑地に関わる土地利用計画を設定する。基礎自治体の単位では、緑やオープンスペースを計画する緑の基本計画の策定が制度化されている。一方、ある程度の規模で行われる開発事業に対しては、計画との整合性や環境への影響を予測し、環境保全処置を検討する環境アセスメントが義務付けられている。事業実施後も、継続的に環境への影響を調査し環境保全に努める必要がある。

市民参加は、こうした計画立案、事業評価、事後評価といった緑地計画の様々な場面で試みられている。住民による情報提供や住民を巻き込んだ計画策定、インターネットなどを利用した意志決定への参加などの形がある。また、義務教育や生涯教育の機会を通じた環境教育によって、自然環境への関心を持ち行動を起こせる市民を育てることも重要である。緑地環境の継続的な維持、管理には制度整備だけでは不十分であり、市民参加の促進によって地域環境の状況や問題点が地域住民に共有され、土地利用が環境へ与える影響を考慮しながら地域環境の保全や向上を目指すことが求められている。

### 2.2 都市における緑地計画

人口や業務施設、商業施設などの集積する都市は、土地が人工物に被われ、大量のエネルギーが排出されることなどで環境が劣化しやすい。都市部の気温が高くなるヒートアイランド現象や、大気汚染などによる人々の生活への悪影響も少なくない。都市空間における緑地は、人々の快適な生活を左右する重要な要素であり、視覚的、心理的な潤いを与えているだけでなく、都市特有の局所的な気候変動を緩和するなど自然現象

へも影響を及ぼし、快適で安全な都市環境の実現に寄与している。

緑地計画では、こうした都市の気候の特徴をとらえ、それを緩和する視点が重要となる。様々な人工物の密集する都市では、木1本、建物1つが生活環境に与える影響が大きく、空間的に細かい粒度で環境を把握し、ヒューマンスケールでの計画立案が必要となる。

### 2.3 緑地計画における環境モニタリング

緑地計画では、立案段階や遂行に際した説明段階、実現後の評価など、様々な段階において計画や事業の妥当性を把握する環境の調査が重要となる。環境モニタリングによって、事業を行ったことによる環境の変化を把握し、事業評価や計画の修正などにつなげる。

環境調査の際に必要とされる情報は、土地利用や植生、生物の分布などのデータや河川の水質や水量、温度分布や大気成分など様々である。土地利用や植生などは、ある一時点の様相を示す情報をGISデータとして整備し用いることができる。しかし河川や大気の情報などは刻々と変わる情報であり、情報の取得にはセンサを用いた環境モニタリングが必要となる。

### 2.4 センサネットワーク技術がもたらす可能性

従来、環境モニタリングは衛星を利用した広域を対象とするものであったり、高価なセンサ機器を用いた専門家によるものであったりした。しかしユビキタスコンピューティング技術によって環境モニタリングが手軽になることによって、市民参加の促進や都市環境の把握につながる、以下のような特徴を備えた環境モニタリングが可能になると考えられる。

#### 情報共有インフラ機能の実現

環境モニタリングのための情報システムには、センサデータの管理にとどまらず、生態系や植生の情報なども含め環境評価に必要な情報やその解釈手法などを、市民や行政、専門家など間で共有するプラットフォームとなることが求められる。特定の地域や事業ごとに関連する情報が整理され、データに加え専門家による解釈なども交換できるシステムであることが望ましい。

#### 市民参加による情報発信の実現

環境調査や環境モニタリングは、環境情報の取得手段としてだけでなく、初等教育や市民参加のイベントとして実施することで市民の環境への関心を高めるきっかけともなっている。市民参加による環境モニタリングは、現在は試薬を用いた水質調査や生物、植生の調査などが行われているが、ユビキタスコンピューティング技術によって、広範囲に及び継続的なモニタリングを多数の市民の協力によって行うなど、市民が情報

発信者となる環境モニタリングの実現が期待できる。その際には、観測結果を効果的に示すことで市民が環境とのつながりを実感し、環境モニタリングへの参加意識が高まることが望ましい。

#### 都市環境に適したセンサ設置の実現

建造物や樹木、水の流れといった環境の要素と、その場の環境との関連性を発見しやすい環境モニタリングが期待される。温度を中心とした熱環境の測定や、空間的に高密度な観測の実現などが必要である。また周辺との観測値の差異を容易に比較できるなど、観測値の解析を支援する機構が望まれる。

## 3. Airy Notes プロジェクト

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を緑地計画に活用することを目指し、2006年4月よりAiry Notesプロジェクトを進めている。本プロジェクトはユビキタスコンピューティングの研究者と緑地計画の研究者によるコラボレーションプロジェクトであり、環境モニタリングシステムの構築からデータ解析手法の開発、さらに実際の緑地計画への応用まで視野に入れ活動している。

### 3.1 研究目的

本研究では、センサネットワーク技術の研究に用いられているセンサ機器を用い、環境情報を誰もが発信、閲覧できるシステムの構築を目指す。環境モニタリングのためのソフトウェアを整備し、データの発信や解析を誰でも容易に行える環境を構築する。ソフトウェアの整備により、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市民まで、環境を定性的に評価する機会が広がる。

### 3.2 プロジェクト形態

研究者間の相互理解を促進しプロジェクトの活動を加速するために、論文講読や定期ミーティングといった通常の研究プロジェクトの手法に加え、以下の特徴を備えた活動を進めている。これらの特徴は、緑地計画の専門家に対しセンサ技術やソフトウェア技術への理解を深めただけでなく、ソフトウェア開発者の緑地計画における議論や方法への理解も深めた。プロジェクトの後半においては、お互いの専門領域を踏み越えた提案や議論が活発となった。

#### 対話を通じたシステム構築

異なる専門分野の研究者の合同プロジェクトである本プロジェクトでは、問題意識をはじめから共有したうえで研究課題を設定し、研究を遂行することは困難であった。センサネットワークの機能や特徴、また緑

地計画で必要とされているデータの種類やデータの見方などを相互に理解することは困難であり、システム開発において、事前に要求を定義し開発するアプローチは不可能であった。

そのため、本プロジェクトにおけるシステム開発は、基本機能をひとつとおり完成させ利用した後にフィードバックを得、さらに修正するプロセスを繰り返すアプローチをとった。これは、アジャイルソフトウェア開発と呼ばれる手法を参考にしている。この手法を実現させるために、モジュール化や拡張性に配慮したソフトウェア設計を行い、試行錯誤を支える柔軟なアーキテクチャを構築した。

#### 観測実験をともなったプロジェクト推進

本プロジェクトでは、環境モニタリングシステム構築の初期段階からセンサを屋外に設置し、実際の気象データを扱いながらシステムを構築した。新宿御苑、大学キャンパス、丸の内と具体的な観測地点を定め、それぞれの観測地点において単にデータを収集するのみでなく、その場所の自然環境を明らかにする実験として環境モニタリングを行った。

この手法により、プロジェクトの初期段階から技術開発のチームと環境モニタリングシステムを利用するチームとの連携が不可欠となり、実際の使用感に基づいたシステム構築へのフィードバックが得やすくなった。また、実際のデータが出力されることで、緑地計画の研究者においてもシステムの利用可能性や限界などを把握しやすくなった。

#### データ可視化を重視したシステム開発

本プロジェクトでのシステム開発では、得られたデータを可視化する機構の構築を重視した。センサデータの地図上への出力やグラフ出力などを、システム構築の早い段階から実現した。データの可視化は、システムの機能を計算機システムになじみの薄い人が理解するのに効果的な手法であった。この結果をもとに機能の議論を進め、開発に反映した。また可視化の重視は、環境モニタリングシステムが広く一般に利用されることを目指すプロジェクトの目的にも合致しており、効果的な可視化手法について議論を進めている。

## 4. Airy Notes システム

本プロジェクトで開発するソフトウェアシステムを Airy Notes システムと名付けた。後述する uPart ワイヤレスセンサシステムを用い、以下にあげる要件を満たしたプロトタイプを構築した。

### 4.1 システム要件

環境モニタリングシステムの緑地計画への応用を検

証するため、本プロジェクトでは以下の要件を備えた環境モニタリングシステムを開発した。

### センサネットワークの特徴を生かしたモニタリングシステム

ユビキタスコンピューティング技術が可能にする環境モニタリングの特徴の1つは、安価な無線センサネットワーク技術による空間的に高密度な観測網の構築にある。これは、建築物や構造物の存在により少し離れただけで大きく環境の様相が変わる都市の環境を調べるのに役に立つ特徴である。

また、ネットワークを通じ観測データがリアルタイムに交換される特徴も、広く市民一般が環境モニタリングシステムを利用する際に有意義な特徴である。身体的に把握している環境が同時に定量的にも把握できることで、多くの人への環境への理解を深めると考えられる。本研究では、こうした特徴を生かした都市環境のモニタリングのためのシステムを構築した。

### 標準的なデータ形式のサポート

本プロジェクト開始以前にすでに整備していた環境データの利用を可能にしたり、観測結果を使い慣れたソフトウェアなどからも利用したりできるように、本システムで取り扱うデータは標準的なデータ形式を取り扱える必要がある。シェープファイル形式や OpenGIS で定義されている Web Map Service (WMS) 形式などの、GIS で広く用いられるデータの利用を可能にしたり、観測データの CSV 形式での出力などを実現した。

### 拡張可能なアーキテクチャ

本システムで構築するソフトウェアは、プロジェクトを通じて頻繁に機能を追加したり改良したりすることになる。そのため、ソフトウェアの拡張が容易である必要がある。システム構築に際しては、XML などの標準的な規格を用いたインタフェースを定義することで、機能ごとの粗結合を実現したほか、ソフトウェア構築においても拡張を前提とした設計を行った。

### 4.2 システム構成

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と、センサデータ集約しサーバへ転送する部分、センサデータを閲覧する部分に大きく分かれる。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 や XML といった標準的な規格によって接続され、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可視化アプリケーションなどの追加が容易である。

観測対象となる地域には、センサデータ集約用の

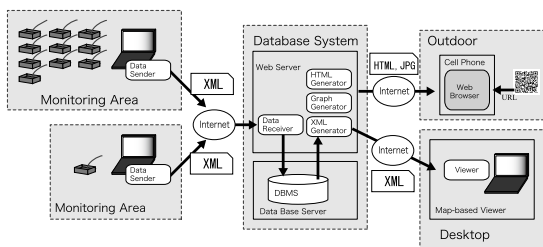


図 1 ソフトウェア構成  
Fig. 1 System architecture.



図 3 携帯電話によるデータ閲覧  
Fig. 3 Cell phone viewer.

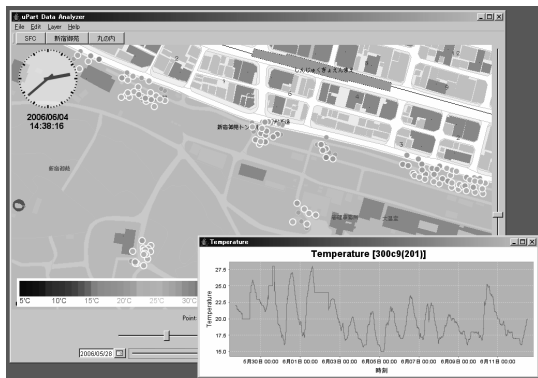


図 2 データ解析ソフトウェア  
Fig. 2 Data analyzer.

本ソフトウェアの表示画面は複数のレイヤから構成されており、それぞれのレイヤは共通のインタフェースを備えたソフトウェアモジュールに対応している。レイヤを開発し追加することで新しいデータの表示手法や解析手法が追加できる。プロジェクト開始当初は地図上へのデータ表示機能のみを備えた単純なものだったが、その後の議論を通じて効果的な表示手法を検討し、追加していった。現在、時系列の変化を表示するグラフ表示機能や、任意の軸線上の温度分布をグラフ表示する機能などが追加され、環境の特徴をよりとらえやすくなっている。

携帯閲覧システム

センサの設置場所にいながら、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できれば、体感している気象状況と容易に関連づけながらその場所の特性を理解できる。Airy Notes システムにおいて、携帯電話を用いて現在気温やその変化を、その場所から閲覧できるシステムを構築した。図 3 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。

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 4 に本システムのスクリーンショットを示す。

4.3 センサシステムの選定

センサの選定においては、気象観測に必要なセンサ

PC を設置し、センサが値を観測するごとに XML 形式で HTTP を通し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て管理した。

保存されたセンサデータを利用するクライアントアプリケーションとして、地図を利用したデータ解析ソフトウェアと、センサ設置場所で利用する携帯閲覧システムとを開発した。また、センサの設置状況を登録するための設置支援システムを構築した。以下にそれぞれの詳細を述べる。

データ解析ソフトウェア

Airy Notes システムで扱うデータは、特定の時間と空間とに関連づけられた時空間データである。主に地理空間を扱う既存の GIS アプリケーションや、地理的な処理機能や可視化機能が不十分な統計解析ソフトは、本プロジェクトには不足であり、新しく時空間データの処理を実現するソフトウェアを開発した。図 2 に画面を示す。

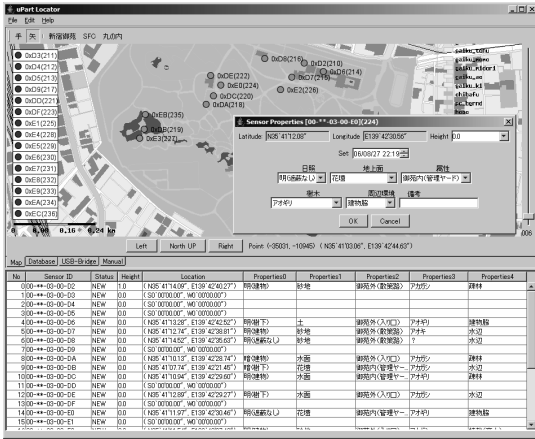


図 4 センサ設置支援システム  
Fig.4 Sensor registration system.

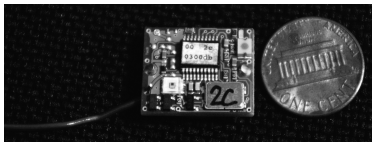


図 5 uPart センサモジュール  
Fig.5 uPart sensor module.

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、低消費電力や太陽電池などにより長期間の稼働が期待できること、十分な無線の到達距離やマルチホップ通信などにより広範囲への設置が可能であることを条件とした。一方でセンサは環境に固定されるため、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、Airy Notes システムの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<sup>11)</sup>を利用した。uPart は、カールスルーエ大学 TecO で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。1 つの uPart センサモジュールは 30 ユーロ程度の価格であり、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を備えており、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。1 つのボタン型電池 (CR1620) で 6 カ月以上動作し、発信間隔を 40 秒間にした場合には 1 年を越える動作を確認している。

一方、uPart センサシステムは広範囲へのセンサの

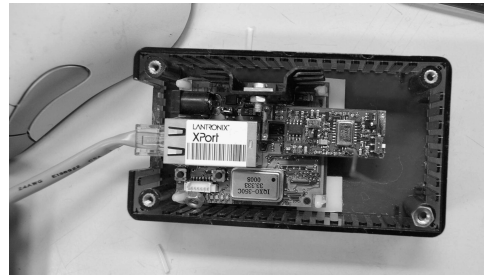


図 6 XBridge  
Fig.6 XBridge.



図 7 センサパッケージ  
Fig.7 Sensor package.

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 からの無線信号の到達距離は約 30 m 程度に限られるため、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。uPart センサシステムを利用したために、実証実験においては観測区域が限定されることになった。

#### 4.4 センサパッケージ

野外への 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作成した。図 7 にパッケージの形状を示す。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。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。

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。本プロジェクトでは、パッケージの形状は気温センサの測定条件を整え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

響を低減させること、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。実験で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も考慮した。耐用期間は1カ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。

## 5. 実証実験

本プロジェクトの最初の実証実験を、2006年5月から6月にかけて新宿御苑において行った。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、新宿御苑の温度分布やその変化を測定した。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。

### 5.1 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、1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分かってきている<sup>12)</sup>。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。



図8 新宿御苑

Fig. 8 Shinjuku Gyoen National Garden.

### 5.2 実証項目

新宿御苑における実証実験は、本プロジェクトにおける最初の実証実験であった。特に以下の観点からシステムを評価し、システムの改良やプロジェクトの方向性の検討を行った。

#### 観測データの妥当性検証

新宿御苑は先行研究が充実しており、観測地点の選定や観測結果の分析などの議論がすでに行われている場所である。Airy Notes システムの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した。

#### センサの屋外設置手法の検討

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く、屋外への無線センサノード設置方法はまだ十分に議論されていない。本実証実験を通して、作成したセンサパッケージの防水性能や耐久性などを調べ、屋外への設置手法を検討した。

#### 設置作業手順の整理

実証実験を通しセンサの設置作業に必要な手順を洗い出し、センサ設置に必要な時間や作業量、知識などを整理した。また、開発したセンサ設置作業を支援するソフトウェアを運用し、その機能や利便性を評価した。

#### センサデータ可視化手法の検討

Airy Notes システムを市民参加による緑地計画のためのツールとするためには、データ可視化によって温度や環境への関心や理解を促進する必要がある。本システムにおける可視化では、手軽な情報閲覧により多くの人の温度変化や環境への関心を高めるきっかけとなること、観測しているその場での可視化により、体感をともなった環境理解が深まること、場所ごとの差異を環境条件と関連づけ理解する手がかりとなることを目指しており、実験を通してこれらの実現に必要な要件を探った。

### 5.3 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、新宿御苑内の様々な箇所や、新宿御苑外の市街地にもセンサを設置し、その値を比較した。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条件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

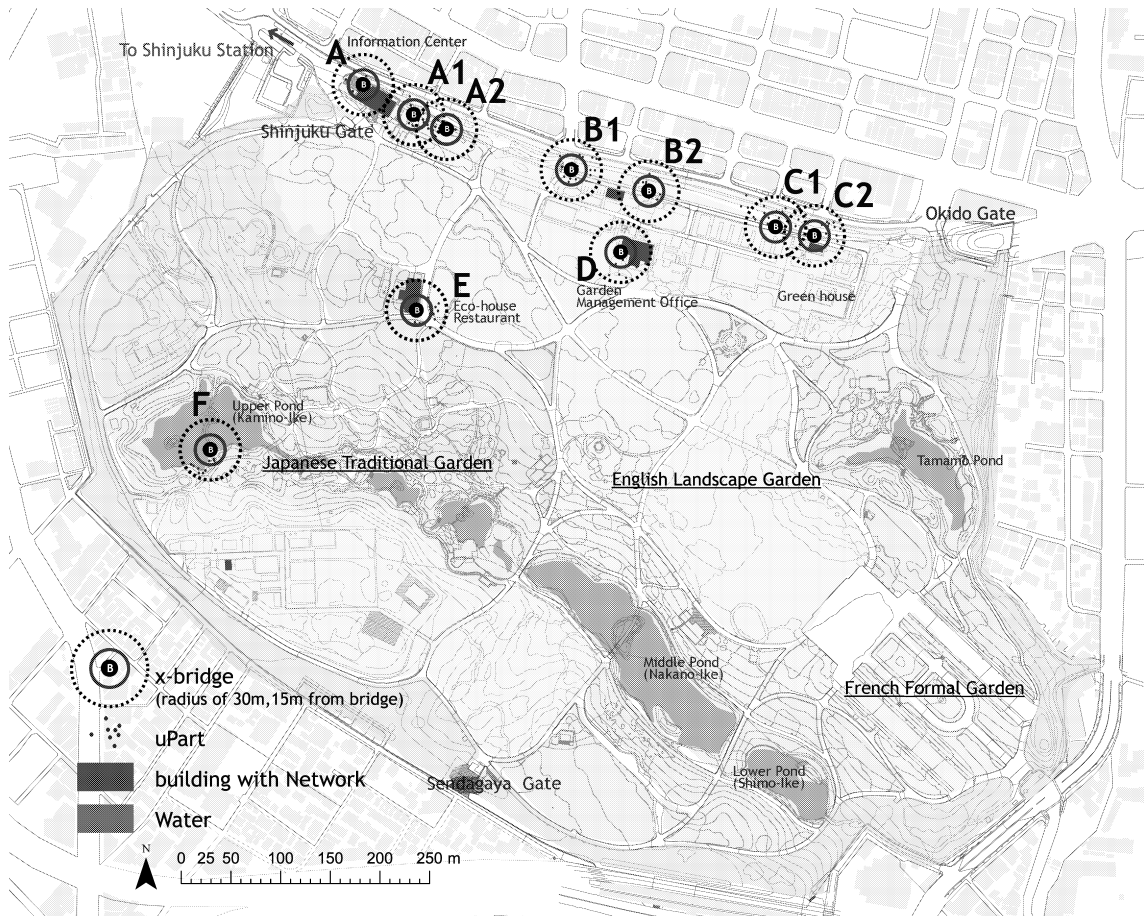


図 9 新宿御苑へのセンサ設置状況  
 Fig. 9 Locations of sensors within Shinjuku Gyoen.

を設置した箇所を示す。

新宿御苑に加え、約 700 m 程度北に離れた歌舞伎町に位置する新宿区役所の屋上へも、1 つの XBridge と 10 個のセンサを設置した。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ふさわしい場所である。新宿区役所への設置に際しては、PHS の定額接続サービスを利用してネットワークへの接続を確保した。

5.4 センサ設置作業

新宿御苑への Airy Notes システムの設置には、1 日あたり約 3 人による作業で合計 6 日間要した。2006 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ケーブル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。

前半の作業において、XBridge への Ethernet は新宿御苑の既設ネットワークの利用許可を得られたため、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方式とした。市販の Power over Ethernet (PoE) 機器を用い、1 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パに収納し、テープやビニール袋などで防水した。設置箇所の 1 つは日本庭園に掛かる橋であり、XBridge は船を用いて橋の裏に固定した。

後半の作業では、設置した各 XBridge の周辺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うえ、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た。この作業を円滑にするため、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支援システムをタブレット PC 上で利用した。センサ設置時に一時的に無線 LAN を設置し、タ



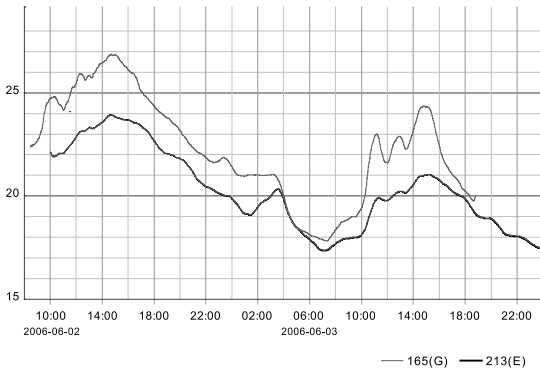


図 10 新宿御苑と新宿区役所との比較

Fig. 10 The temperature of Shinjuku Gyoen and Shinjuku ward office.

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．

センサの撤去作業は 6 月 12 日に行った．2 人による 1 日の作業で個々のセンサからケーブルの撤去まで含めすべての撤去作業が完了した．

### 5.5 観測結果

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．本システムで採用した uPart の温度センサでも，十分な個数を観測地点に設置することで細かな気象の特徴をとらえることに成功した．以下に，本システムによって観測された新宿御苑の温度分布や温度の変化を示し，その特徴を述べる．

図 10 は，6 月 2 日から 3 日にかけての新宿御苑内部と新宿区役所との気温変化の比較である．灰色が市街地にある新宿区役所に設置したセンサの観測値であり，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である．これらは，それぞれの箇所において安定しデータ受信ができたセンサの観測値の，1 時間の移動平均の結果である．本結果は，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分かる．

図 11 に，御苑内 5 か所での 6 月 10 日の気温変化を示す．6 月 10 日は観測期間中では比較的日照時間が長く，気温が上昇した日であり，御苑各所の特徴や差異が顕著に観測された．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る．

市街地との境界部分 (A)，庭園地 (D, E, F)，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った．気温変化が最

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，つね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．

センサを高密度に設置したことは，空間的な温度分布を明確に読み取ることに貢献した．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，その特徴をとらえることができた．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．

### 5.6 センサ設置手法の検証

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，ほぼすべてのセンサは実験期間中正常に動作し続けた．パッケージも十分にセンサを保護し，浸水や破損といった問題はなかった．

センサからの信号の受信状態は設置した XBridge により差異が出た．15 m 程度離れるとほとんど受信できなくなるものもあれば，事前の実験どおり 30 m 程度の受信性能が確認できた場所もあった．これは，XBridge の防水の際に金属を含んだ防水テープを利用しアンテナを固定したためと考えられた．

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では十分な情報を得られないという問題もあった．

### 5.7 設置作業手順の検証

設置作業の前半のインフラ構築作業は，ほとんどがケーブルの敷設作業であった．新宿御苑においては既設のネットワークが整備されていたことやネットワーク管理者の協力を得られたことで作業は比較的効率良く行えた．ただし，タッパやビニール袋などによる防水作業はケーブルを固定したあとの現場での作業となったため，工具の運搬や作業場所の確保に苦労することもあった．この段階の作業は実験場所の設備や協力の有無などに大きく依存し，標準的な作業手順を定

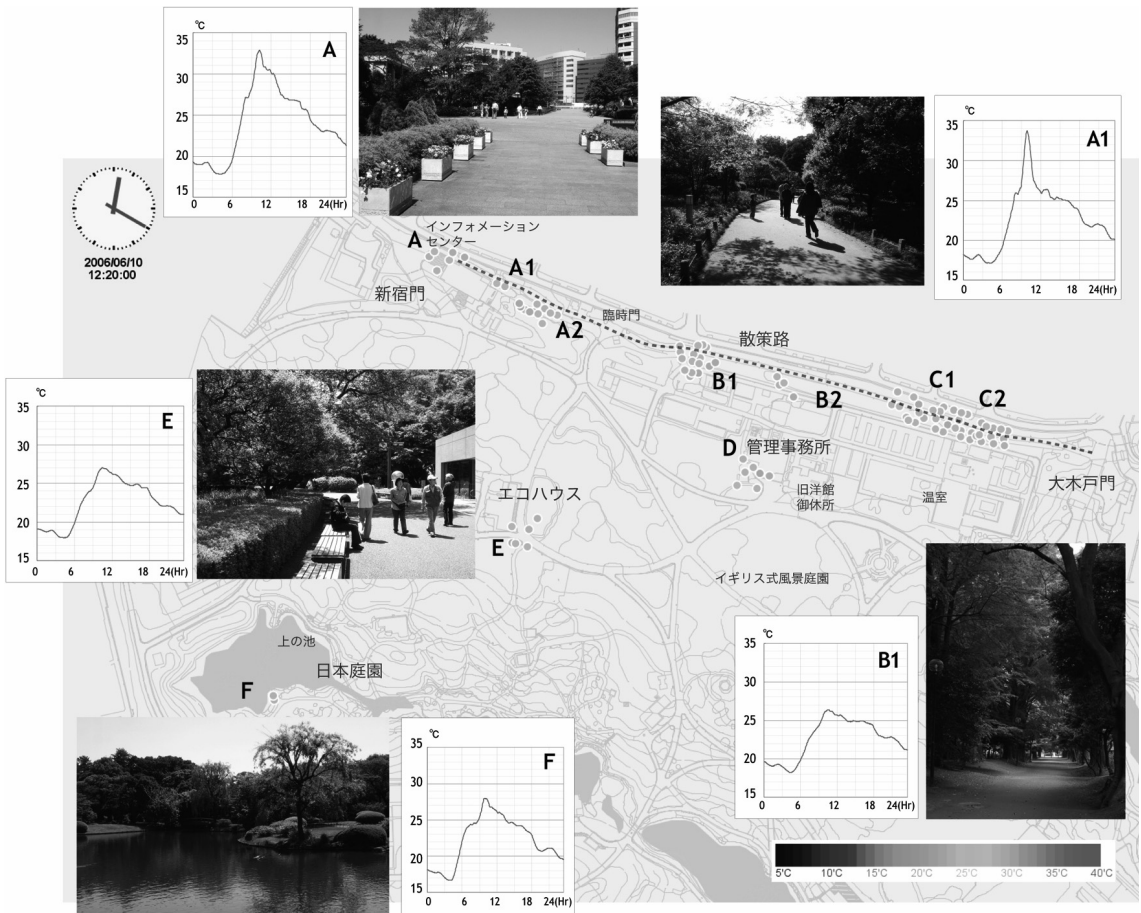


図 11 6月10日の新宿御苑の温度分布  
 Fig. 11 Distribution of temperature in June 10th.

義することは困難だと考えられる。

後半のセンサ設置作業は、作業手順や作業に必要な技能が明確でない状態から始め、試行錯誤を経て以下の作業手順が定まった。はじめに実験目的を理解し環境の様相を判断できる者がセンサの設置箇所を数カ所大まかに決定し、センサを仮置きする。次に信号の受信状況から観測の可否を検討し、設置を決めたセンサを固定し位置や環境を記録する。この手順を繰り返すことでセンサを設置した。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、作業にあたることのできる人員は限られる形となった。

開発した設置支援システムは、センサ設置手順の理解が不十分であったため、設置の現場で十分に活用することはできず、紙の地図へのメモや Excel, ArcGIS などの既存アプリケーションで情報を整理しデータベースに登録する必要が生じた。システムの設計段階では、1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、作業効率の向上やセンサそれぞれの設置環境を差別化するために、近隣の複数個のセンサをまとめて設置する手順となった。いったん決定した設置箇所も、電波状況に応じて移動することがあり、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分かった。センサの位置を調整しているうちに木陰のセンサを見失うことが何度もあり、位置調整への支援の必要性も感じた。

また設置支援システムを運用する際の機器やインフラの問題も明らかとなった。設置の際には様々な工具を持つ必要があり、同時に 1kg を超えバッテリー駆動時間が限られたタブレット PC を利用するのは困難であった。ネットワーク接続の確保も問題となった。センサデータの受信状況を確認するためにはネットワーク接続が必要であり、センサ設置時に一時的に無線 LAN を設置していた。しかし無線 LAN を設置作業は煩雑であり、作業場所によっては電波が届かないという問

題もあった。

### 5.8 観測結果の可視化の検証

実験の際運用した可視化システムは、センサパッケージに張ったQRコードによって、携帯電話を通してそのセンサの温度変化グラフを閲覧できるシステムと、地図上に丸で示したセンサ設置位置の色を変化させることによる温度表示システムである。前者はすべてのセンサに用意しており、実験期間中は一般来場者を対象に稼働させていた。後者は、6月3日のイベント時にイベント会場のPCディスプレイを用いて稼働させており、イベント来場者に対し対面にてシステムや新宿御苑の温度分布について説明を行った。

これらのシステムはまだ初歩的な段階の実装であり、機能や実現性の確認以上の評価は行っていない。しかし、来場者や説明を行った学生の感想などから、今後の改良につながる以下のような知見を得た。

地図による可視化は、空間的な温度分布を説明する際の資料として役立った。イベント会場への来場者に対し、地図表示を用いながら新宿御苑の環境の特徴や周辺市街地への影響を分かりやすく説明できた。データがリアルタイムに更新されていることを伝えと、地図上に示された温度分布への関心は高まった。さらに過去に観測した特徴的な温度分布を示すデータを提示したあと、アニメーションによって連続的にリアルタイムデータ表示に移行させることで、過去の情報に対する関心も高めることができた。

一方、データの表示方法は不十分であり様々な改良点が浮かび上がった。温度の表示に関して、より直感的に差異を見い出せる表示方法の必要性を感じており、等高線や3Dグラフなどによる表示を議論している。また「1日の平均気温」「30度を超えた時間の合計時間」など、観測データを処理することで得られる情報も環境の特徴をとらえる際に有効だと考えられる。こうした情報へも事後のデータ処理を経ずにリアルタイムにアクセスできる必要性を感じた。ただし現状の一部分のみを被うセンサの設置方法ではこうした表示手法を十分生かせず、センサの設置領域を含めた改良が必要である。

携帯電話による閲覧は、機能としては関心を集めたが実際のアクセスはほとんどなかった。センサパッケージそのものは目立っており多くの人が興味を示したものの、それが温度を測定しているセンサであるということ、携帯電話によって情報にアクセスできるという点は説明が不十分であった。また事前の学生を対象とした実験では、QRコードの扱いに不慣れな学生や、機種によって認識しにくい携帯電話があり、誰に

とっても使いやすいインターフェースとはいえない状況が明らかとなった。

また、携帯電話からアクセスできる1地点の情報から、地図で表現するような俯瞰的な視点へつなげる方法にも課題が残った。現在地の気温やその履歴をきっかけに、周辺との比較などを通して各場所ごとの特徴への理解を深めることが望まれた。しかし、地図やリンクによる周辺データへの誘導以上に積極的にデータの比較を行わせる手法は議論の途上である。

実験後に、取得した温度分布地図をアニメーション化し、1日の変化を約10秒に圧縮した動画を作成した。これは環境の特徴や温度変化を読み解ききっかけとして好評だった。変化の特徴を際立たせるためには、こうした時間的圧縮や、俯瞰的な視点の導入などによる空間的整理が有効であることを、ここでも確認できた。リアルタイムであること、現地で閲覧できることによる興味の喚起や説得力も本システムならではの特徴であり、こうした特徴と俯瞰的な視点による理解の促進とを結び付けることが、データ可視化における今後の課題である。

## 6. Airy Notes システムの改良

本研究プロジェクトは異なる分野の専門家が実験を通して問題意識を共有し研究を進めることで、相互理解を深め、システムの問題点や改良の必要性を早い段階で共有することを目標としていた。新宿御苑での実験を受け、システムを改良し新たな実験を通じて検証した。

### 6.1 システム改良点

実験で明らかになった問題点をふまえ、以下のシステムの改良を行った。

#### データ解析ソフトウェアへの機能追加

当初の、地図上への色によるデータ表示機能のみを備えた単純なソフトウェアに対し、時間的な変化や空間的な差異を分かりやすく表示する改良を行った。任意のセンサの任意の期間のデータをグラフ表示したり、任意の時刻における温度分布を、マウスで指定した軸線で整理しグラフ表示したりする機能などを追加している。

#### センサパッケージの改良

新宿御苑での実験結果をふまえて、改良を加えたパッケージを作成した。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

実現した。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た。

#### センサ設置支援システムの改良

当初構築したセンサ設置支援システムは、5月の新宿御苑における設置においては十分に役割を果たせなかった。支援システムが実用的でなかった理由の1つは、機器の重量や形態、ネットワークインフラの問題である。携帯電話やPDAの利用も考えられたが、システム開発の手間や携帯電話の限られた操作性などから、現時点での利用は見送っている。こうした問題は、今後のスマートフォンの発展などに合わせて解決を探っていく。

もう1つの理由はソフトウェアの機能や使い勝手にある。システムがセンサの設置手順を規定しており、ウィザード型のインタフェースを採用していたのに対し、実際の設置場面では設置位置の頻繁な修正や複数個をまとめた設定などの想定手順を外れた作業が生じた。実際の設置作業に利用する際には、特定の手順を規定しないインタフェースが必要であることが明らかとなった。

改良したシステムでは、センサ位置やセンサ属性の変更をいつでも行え、複数のセンサを選択することで位置や属性を同時に変更できる。ペン操作による位置の微調整も容易である。これにより、本システムをセンサ設置前の計画段階から利用できるようになった。多様な通信環境で利用するため、PHSなどの狭帯域インターネット接続での実用的な動作も実現した。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る際の資料を作成できるようにした。

#### 6.2 改良システムの実証実験

以下の実験を通し、システムの機能検証や改良点の検討を行った。

##### 大学キャンパス

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、2006年8月末より現在(2007年4月)までシステムを稼働させ続けている。本実験では、長期にわたる実験でのシステムの問題点を検証している。今まで、データベースのパフォーマンスの問題や長期データの分かりやすい可視化の問題などを議論している。また本実験を通して、センサパッケージの耐久性も検証した。紙製のパッケージであるが、半年以上の稼働を経ていまだ十分機能しており、パッケージは十分な性能を持つと考えられる。

##### 丸の内地区

東京都丸の内地区において、2006年11月22日、

23日にシステムの実験を行った。これは、慶應義塾大学SFC Open Research Forumに合わせたデモンストレーションであり、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。本実験に際しては、事前にネットワークが敷設されていたためセンサ設置は容易であった。しかし十分な設置時間が確保できなかったため、設置支援システムの改良を評価する機会となった。改良したセンサ設置支援システムを用いることで、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。

#### 7. 関連研究

センサネットワークを利用した大規模な実証実験には、グレートダック島における鳥の生態調査実験<sup>13)</sup>の事例などがある。環境モニタリングにおいては、Martinezらの研究<sup>14)</sup>やCardell-Oliver<sup>15)</sup>の事例などがある。また日本ではLive E!プロジェクト<sup>16)</sup>がWIDEプロジェクトを中心に行われている。こうした研究はセンサの機能やデータ収集の手法を検証するなどの技術検証の段階であり、具体的な応用事例を前提としたプロジェクトではない。しかし、地球科学や環境学などの分野では、センサネットワーク技術への期待が高まっており、その適用可能性が議論され始めている<sup>17)</sup>。センサネットワークの基礎研究が充実してきた今後、こうした応用研究も広がると考えられる。

#### 8. おわりに

本論文では、ユビキタスコンピューティングの研究者と緑地計画の研究者とのコラボレーションによって、緑地計画において利用する環境モニタリングシステムの構築を目指す研究プロジェクトを紹介した。都市における緑地の保全や緑化の推進を中心に都市環境を設計する緑地計画では、計画の立案や評価など様々な段階において環境モニタリングの成果を活用できる。また、身近な環境を定量的に表現することは緑地計画への市民参加を促進する有効な手段となる。

本研究では、無線センサネットワーク技術を利用し、高密度なセンサ網によるリアルタイムでの環境モニタリングを実現するAiry Notesシステムを構築した。システムを利用し、新宿御苑に160個の温度センサを設置し行った実証実験によって、新しい環境モニタリングシステムの可能性を明らかにした。

また、本研究は緑地計画の研究者とユビキタスコンピューティングの研究者とのコラボレーションによって遂行された。異なる専門分野のチームでの議論を通して、システムの機能を改良していったほか、システ

ムそれ自体の設計もコラボレーションに適したものとした。

今後は、本プロジェクトで構築し、有効性が検証されたシステムを、緑地計画の研究者らのプロジェクトを通し、実際の緑地計画の現場での利用を推進してゆく。

謝辞 本研究の一部は、慶應義塾大学 21 世紀 COE プログラム“次世代メディア・知的社会基盤”，および総務省委託研究 Ubila プロジェクトの一環として実施した。また、実証実験の場となった新宿御苑 100 周年記念イベント“玉川上水復活に向けて”を慶應義塾大学とともに主催した新宿区，協力いただいた環境省新宿御苑管理事務所に感謝する。

### 参 考 文 献

- 1) Weiser, M.: The Computer for the 21st century, *Scientific American*, Vol.265, No.3, pp.66-75 (1991).
- 2) Beigl, M., Krohn, A., Zimmer, T. and Decker, C.: Typical Sensors needed in Ubiquitous and Pervasive Computing, *1st International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS) 2004*, pp.153-158 (2004).
- 3) Estrin, D., Govindan, R., Heidemann, J. and Kumar, S.: Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks, *Proc. ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Seattle, Washington, USA, ACM, pp.263-270 (1999).
- 4) Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: A Survey on Sensor Networks, *IEEE Communications Magazine*, pp.102-114 (2002).
- 5) Tapia, E.M., Stephen, S., Intille, L.L. and Larson, K.: The Design of a Portable Kit of Wireless Sensors for Naturalistic Data Collection, *Proc. Pervasive2006*, pp.117-134 (2006).
- 6) Chong, C., Kumar, S. and Hamilton, B.: Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges, *Proc. IEEE*, Vol.91, No.8, pp.1247-1256 (2003).
- 7) Hill, J. and Culler, D.: A wireless embedded sensor architecture for system-level optimization, *Intel Research IRB-TR-02-00N* (2002).
- 8) Beigl, M. and Gellersen, H.: Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects, *Smart Objects Conference (sOc)*, Vol.2003 (2003).
- 9) 片桐由希子, 山下英也, 石川幹子: 小流域を基礎とした緑地計画の検討手法に関する研究, *日本造園学会誌*, Vol.70, No.5 (2007).
- 10) 柳井重人: ランドスケープ計画, 環境都市計画辞典, 丸田頼一 (編), pp.74-75, 朝倉書店 (2005).
- 11) Beigl, M., Krohn, A., Riedel, T., Zimmer, T., Decker, C. and Isomura, M.: The uPart experience: Building a wireless sensor network, *Proc. ACM/IEEE 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, Memphis, USA, pp.366-373 (2006).
- 12) 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).
- 13) Szewczyk, R., Osterweil, E., Polastre, J., Hamilton, M., Mainwaring, A. and Estrin, D.: Habitat monitoring with sensor networks, *Comm. ACM*, Vol.47, No.6, pp.34-40 (2004).
- 14) Martinez, K., Hart, J. and Ong, R.: Environmental sensor networks, *Computer*, Vol.37, No.8, pp.50-56 (2004).
- 15) Cardell-Oliver, R., Smettem, K., Kranz, M. and Mayer, K.: Field Testing a Wireless Sensor Network for Reactive Environmental Monitoring, *Proc. International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing* (2004).
- 16) 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 (2006).
- 17) Hart, J. and Martinez, K.: Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science?, *Earth-Science Reviews*, Vol.78, pp.177-191 (2006).

(平成 19 年 4 月 14 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



伊藤 昌毅

2004 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。現在、同大学院政策・メディア研究科後期博士課程在学中。地理情報や行動履歴の解析技術を中心に、ユビキタスコンピューティングの研究に従事。



片桐由希子

2007年慶應義塾大学大学院政策メディア研究科後期博士課程単位取得退学。博士(学術)。現在、東京大学大学院工学系助教、慶應義塾大学政策・メディア研究科助教。流域圏

の視点に基づく緑地環境計画、都市域における自然環境データベースの構築に関する研究に従事。日本造園学会、日本都市計画学会各会員。



石川 幹子

東京大学農学部卒業、ハーバード大学デザイン学部大学院卒業。東京大学大学院農学系研究科博士課程修了。農学博士、技術士(建設部門、都市および地方計画)。工学院大学

建築学科等を経て、現在、東京大学大学院工学系研究科教授、兼慶應義塾大学政策・メディア研究科教授。東京都公園審議会委員、横浜市緑の審議会委員等。全国約200の市町村の水と緑の計画・設計に携わる。新宿御苑再生設計、各務原市水と緑の回廊計画等を担当。著書に『都市と緑地』(岩波書店)、『流域圏プランニングの時代 自然共生型流域圏・都市の再生』(技報堂出版・共著)等。日本建築学会、日本都市計画学会、日本造園学会、土木学会各会員。日本学術会議会員。



徳田 英幸(正会員)

1977年慶應義塾大学大学院工学研究科修士。1983年ウォータールー大学 Ph.D.(Computer Science)。同年カーネギーメロン大学計算機科学科勤務。1990年同学科研究准教授。

現在、慶應義塾大学環境情報学部長。主に、分散リアルタイムシステム、マルチメディアシステム、超並列・超分散システム、ユビキタスシステムの研究に従事。IEEE、ACM、日本ソフトウェア科学会各会員。