

# 〔報告〕 ハギヤソフィア大聖堂における 無線式常時環境計測システムの開発

小泉 圭吾\*・石崎 武志・小椋 大輔\*<sup>2</sup>・佐々木 淑美・日高 健一郎\*<sup>3</sup>

## 1. はじめに

2010年9月にトルコのハギヤソフィア大聖堂(図1)において、聖堂内および周辺環境を把握するための環境モニタリング装置の設置を行った。ハギヤソフィア大聖堂のレンガ造壁体および壁面の劣化には、壁面の結露や壁体内の水分量の変化などが影響していると考えられている<sup>1)</sup>。そこで、これらの劣化原因を明らかにするために、建物内外に、小型温湿度センサを36台、気象観測装置を1台設置した。この小型温湿度センサのうち21台は、空間全体の環境を把握する目的で、常時モニタリングが可能となるようシステムを構築した。このシステムの特長としては、小型の無線機とセンサを搭載し、電池で長期間の運用が可能であること、インターネットが接続できる環境下であれば、国内外を問わず遠隔地からデータの閲覧、ダウンロードが可能である点が挙げられる。目的は、現況をリアルタイムに確認できることに加え、長期観測の際のメンテナンスの省力化、関係者間で情報を共有できる点にある。ここでは、ハギヤソフィア大聖堂内の環境モニタリングに採用した無線センサネットワーク技術と、この技術を用いて開発した観測システムの概要について報告する。

## 2. システム開発

ハギヤソフィア大聖堂内の空間的な温湿度環境を把握するためには、図2に示す、地上階、ギャラリー階、第2コーニス、ドームコーニスの4層から構成される各層にセンサを配置し、その変化を時系列的に観測する必要がある。通常、このような場合にはデータロガー機能を内

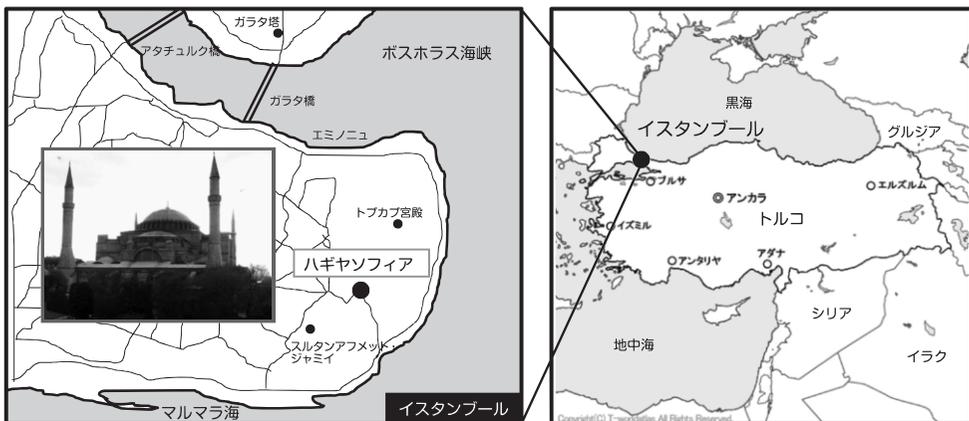


図1 トルコ・ハギヤソフィア大聖堂

\*大阪大学大学院工学科

\*<sup>2</sup>京都大学大学院工学科

\*<sup>3</sup>筑波大学大学院人間総合科学研究科

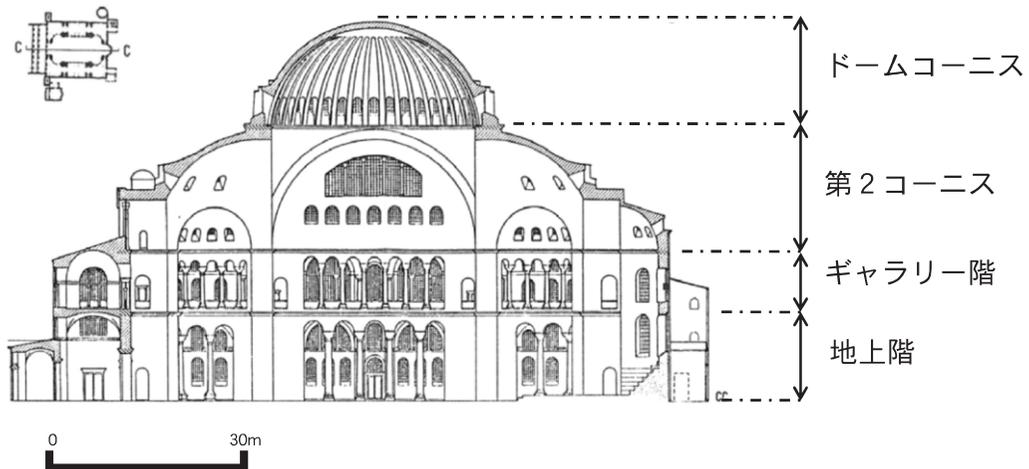


図2 トルコ・ハギヤソフィア大聖堂断面図（西-東）

蔵した温湿度センサを用いるのが一般的である。定期的にデータを回収することにより過去から現在までの温湿度環境の分析が可能となる。一方、温湿度の日変動あるいは雨季、乾季などの季節変動をできるだけタイムリーに把握したい場合、データロガーに収集されたデータを頻繁に回収する作業が必要となる。遠隔地を対象とした場合、この計測手法によって現況を即座に把握することは難しい。本調査対象地においても同様、頻繁に現地に行くことは難しく、現況をリアルタイムに観測でき、現地に行かずとも必要な際に自由にデータが回収できるシステムの構築が望まれる。そこで本調査では、データロガー方式とは異なり、遠く離れた場所からでも全ての計測データをリアルタイムに閲覧できるシステムの開発を検討した。

聖堂内で温湿度環境観測を行う場合、使用する計測機器はAC電源などの常時電源やケーブル配線などが不要でかつコンパクトな装置が望ましい。一般にデータをリアルタイムに閲覧、収集するためには計測機器がサーバーと接続されていなければならない。ケーブルを用いることが困難な場合は無線通信を用いることになるが、小型電池で長期間の運用を実現するためには、電力消費量を低く抑え、かつ必要な通信距離を確保する必要がある。一般に、無線通信距離と電力消費量には相関性があることが知られており、通信距離を延ばそうとすると電力消費量が増加し、バッテリーの消耗が早くなるという課題が浮上する。このような課題に対し、1999年3月、米国の電気・電子技術の学会であるIEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 内にIEEE802.15ワーキンググループが立ち上がり、上記要求性能を満たすために無線PAN (Wireless Personal Area Network) 用の規格 (IEEE802.15.4) が検討され始めた。現在、この規格で開発された通信システムの1つをワイヤレスセンサネットワーク (以下、センサネットワークと記述。)と呼んでいる。センサネットワークとはセンサ技術と無線ネットワーク技術を連携させ、複数のセンサノード (端末) をネットワークに接続し、センサノード群のまとめりとして、特定あるいは複数の目的に対して必要な機能を提供することをいう<sup>2)</sup>。現在、図3に示すように、センサネットワークには主としてZigBee規格およびメッシュネットワークと呼ばれる通信方式があるが両者の特徴は異なる。一般にセンサネットワークというとZigBeeのことを指し、既に多くのメーカーにより開発キットなどが提供されており、一部は既に製品化されている。図3(a)に示すZigBeeはコーディネータ (基地局)、ルーター (中継機) およびエンドデバイス (センサノード) から構成されており、ルーターは互いにデータを送受

信することが可能である。エンドデバイスはルーターと1対N（複数）の関係で通信する方式が採用されている。この通信方式の特長は、エンドデバイスが特定のコーディネータとのみ通信を行うことから消費電流を抑えることができ、エンドデバイスの長期間運用が可能となる。一方、ルーターを長期間電池で運用することは難しく、通常はAC電源が必要となる。更に、エンドデバイスの設置位置はルーターの設置位置に依存する。ルーターとエンドデバイスの屋内での通信距離は障害物に応じて、10m～30m程度で変化する。従って、ルーターの電源が確保できる箇所が制限されていれば、必然的にエンドデバイスの設置位置も制限され、結果として必要な箇所にエンドデバイス（センサノード）を設置することが出来なくなる。

これに対し、図3(b)に示すメッシュネットワークは、基地局とセンサノードから構成される。センサノードは互いにデータを送受信することができ、任意のセンサノードと自律的に通信が行えることから、必要な箇所に自由にセンサノードを配置できる。仮にノード間の距離が遠く、通信が出来ない場合でも、その間に新たなセンサノードを設置することでネットワークの構築が可能となる。また、あるセンサノードが故障した場合でも、それ以外のセンサノードは別の通信経路を自動的に再構築し、データを基地局に送ることができる。このような無線センサネットワークの通信手法をメッシュネットワークと呼んでいる。短所としては、複数のセンサノードと送受信を行えることから、ZigBeeのエンドデバイスと比べると、電池の寿命は短くなる。一方、データの送受信時以外はセンサノードをスリープさせることにより電池の消耗を防ぐ機能を有していることから、長期運用も可能である。以上のことから、本調査ではセンサノードが全て電池で運用でき、無線通信距離に依存しないメッシュネットワークによる通信方式を採用することでシステムの開発を行った。

センサノードはメッシュネットワークの構築が可能な無線センサユニット（地球観測株式会社製、M-Watch）を図4に示すようにハギヤソフィア専用に改良した。センサノードは無線通信機、温度・湿度センサおよび単一型リチウム電池で構成されており、外形は80×120×40mm（図4）。基地局は受信機と観測用PCで構成されており、こちらはAC電源が必要となる。使用する電池は計測間隔を10分間にした場合、理論上約24ヶ月間稼働する計算になることから、実運用においても計測間隔が30分であれば、約2年以上の運用が可能である。なお、バッテリーの電圧変

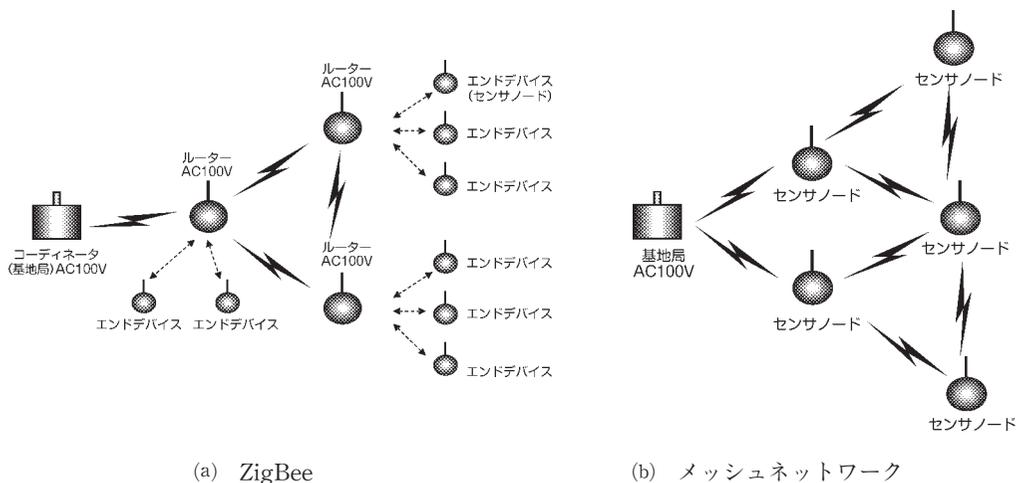


図3 無線センサネットワーク

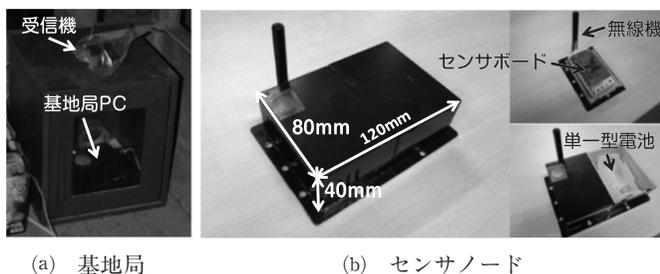


図4 ハギヤソフィアの環境計測システム

表1 センサノードの仕様

測定要素	温度・湿度
測定範囲	温度：-40℃～80℃ 湿度：0%～100%
測定精度	温度：±0.3℃@5℃～40℃ 湿度：±2.0%@10%～90%
分解能	温度：0.01℃ 湿度：0.1%
電源	単一型リチウム3.6V
電池寿命	約24ヶ月@30分間隔（間欠駆動）
通信形式	メッシュネットワーク
通信周波数	2.4GHz
通信距離	100m程度（見通し）
本体寸法	80mm×120mm×40mm

化は基地局のPCで常時確認することができる。本システムで使用したセンサノードの仕様を表1に示す。

### 3. 大聖堂内環境観測

#### 3-1. 設置位置

ハギヤソフィア大聖堂の各階（地上階，ギャラリー階，第2コーニス，ドームコーニス）の平面図を図5に示す。聖堂内の空間全体（鉛直および水平方向）の温湿度環境を把握するために，ドームを構成する4つのピアに沿って縦方向に各階4箇所，計16台のセンサノードを設置した。加えて，東西方向の温湿度環境を把握するために，ギャラリー階のバルコニーに東西各1箇所，および第2コーニスの東西各1箇所にそれぞれ設置した。これら20箇所についてはそれぞれが建築構造の対称軸線上に位置し，鉛直方向に位置が重なるよう配置した。また，外気に近い環境を計測するためにノード21を地上階の西側外壁近くに設置した。基地局はAC電源およびLAN回線が確保できる地上階の北東ピア付近に設置した。図中のコメントは，観測期間中に外的要因で設置位置を移動したノードを示している。主な原因として，雨滴によるセンサ

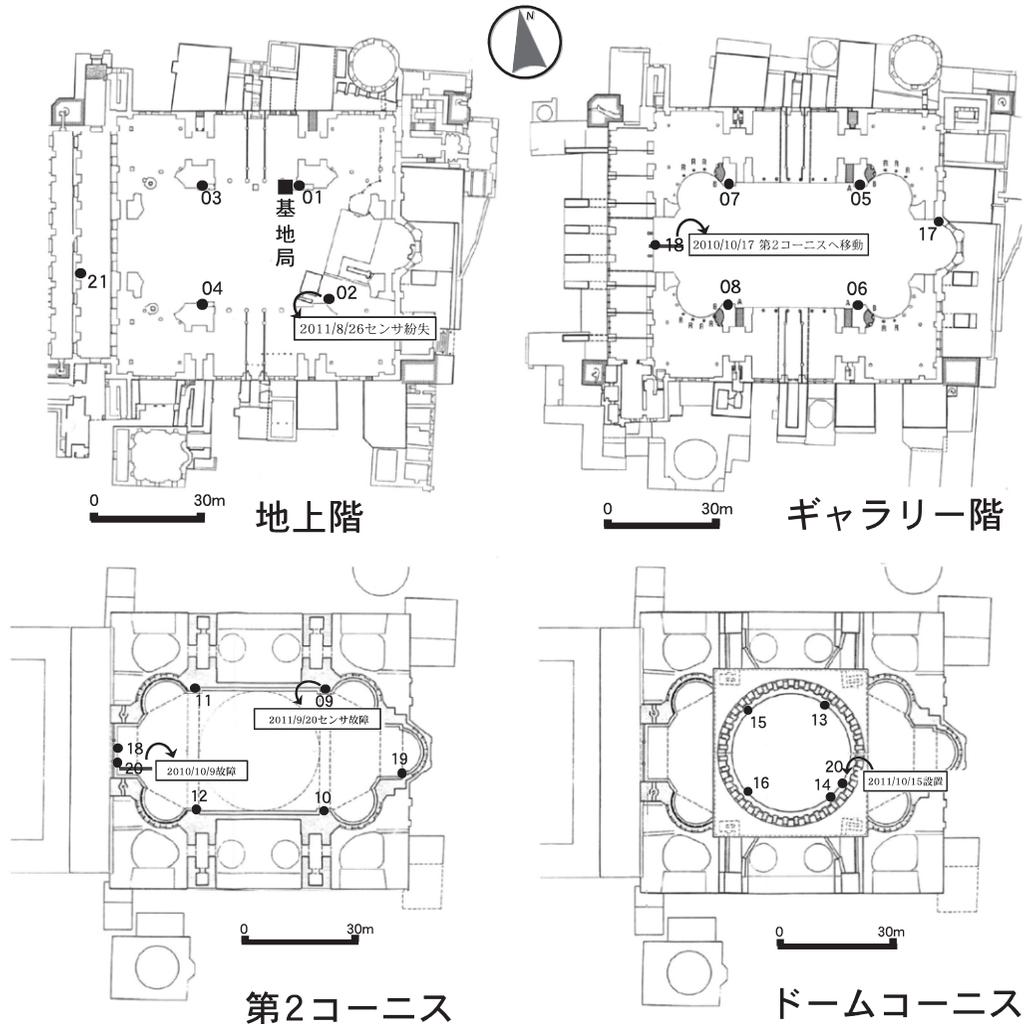
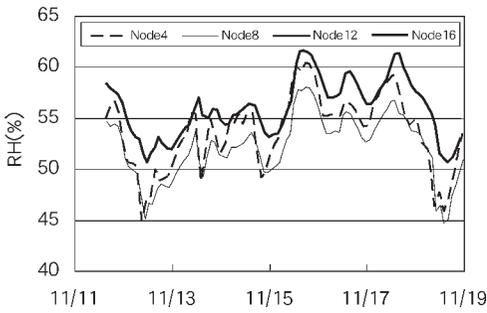


図5 ハギヤソフィア大聖堂の各階のセンサノード設置位置

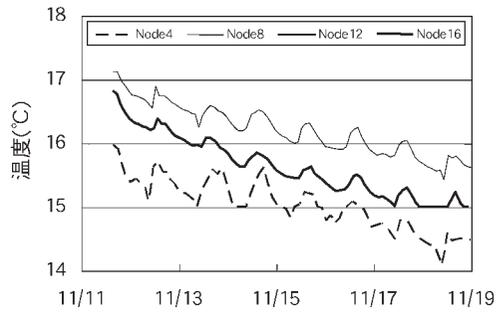
損傷や修復工事に伴う紛失が挙げられる。

### 3-2. 観測手法

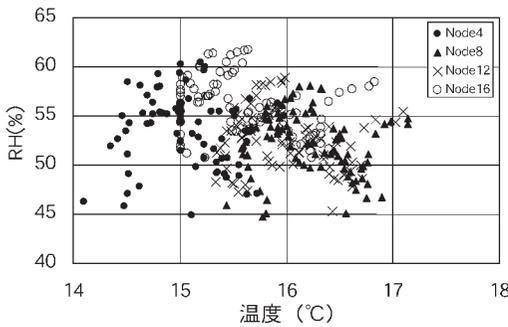
計測は2010年9月27日午後から開始した。図6は大聖堂内の環境計測結果の一例を示している。図6(a), (b)は2011年11月11日～19日までの南西ピア各階に設置したセンサノード4, 8, 12および16の温湿度を表したグラフである。また図6(c)は同時期, 同位置の温湿度の関係を散布図に表した図である。これらの図より鉛直方向の温湿度の特徴を捉えることができる。図6(d)は観測開始から約1年間のセンサノードの電圧の変化を示した図である。ここでは一例としてノード4およびノード16の電圧変化を取上げたが、いずれも一年間で電圧の低下は見られなかった。残りのセンサノードについても同様の傾向が確認された。本システムは、図6に示すような任意のノードの時系列変化グラフ、散布図以外に、ヒストグラム、各階毎の温湿度の等温、等湿分布図が常時確認できる。



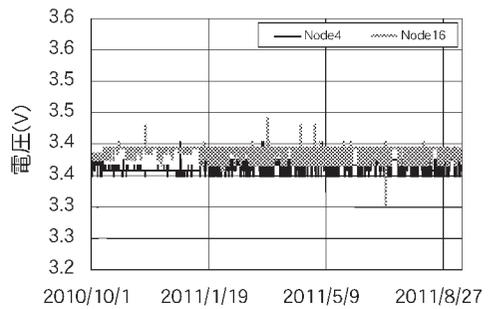
(a) 南西ピア鉛直方向の相対湿度分布 (2011)



(b) 南西ピアの鉛直方向の温度分布 (2011)



(c) 南ピアの鉛直方向の温湿度の関係



(d) センサノードの電圧変化

図6 モニタリングソフト上で閲覧可能な情報の一例

図7は本計測システムの通信経路を示した図である。無線センサネットワークにより得られた観測データは基地局の観測用PCに任意のサンプリング間隔(現在は30分間隔)で取り込まれる。基地局は大聖堂内のLAN回線に接続されており、関係者はインターネットを介して、国内

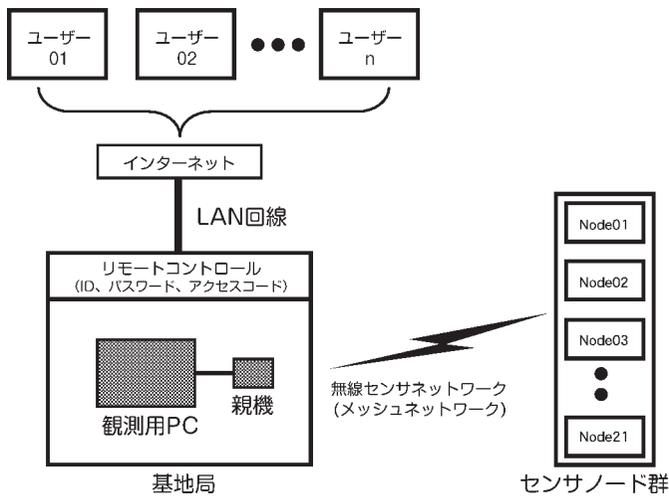


図7 本計測システムの通信経路

外からアクセスすることが可能である。ただし、セキュリティを確保するために、ID、パスワード、アクセスコードによる制限を設けた。

### 3-3. 観測状況

図8は2011年11月11日22時4分現在の各センサノードの基地局までの通信経路を示した図である。図8(a)より、マルチホップ機能により基地局と通信が行われていることが確認できる。図8(b)は基地局とセンサノードの位置関係とその通信経路を示した図である。これらの図より、例えばノード14のように通信距離が50m離れていても直接基地局へデータを送信できることが確認された。これ以外でも、ノード間あるいはノードと基地局間での通信距離が40mを超える箇所が複数確認された。

図9は観測期間中の各ノードの通信履歴を表した図である。例えばノード7はノード1, 20, 21以外のノードとの通信履歴が確認できる。他のセンサノードも同様に複数のセンサノードとの通信履歴があることから、万が一複数のセンサノードが停止した場合でも残りのセンサノードは自動的に通信経路を再構築し、データを基地局へ送信することが可能であることを示している。

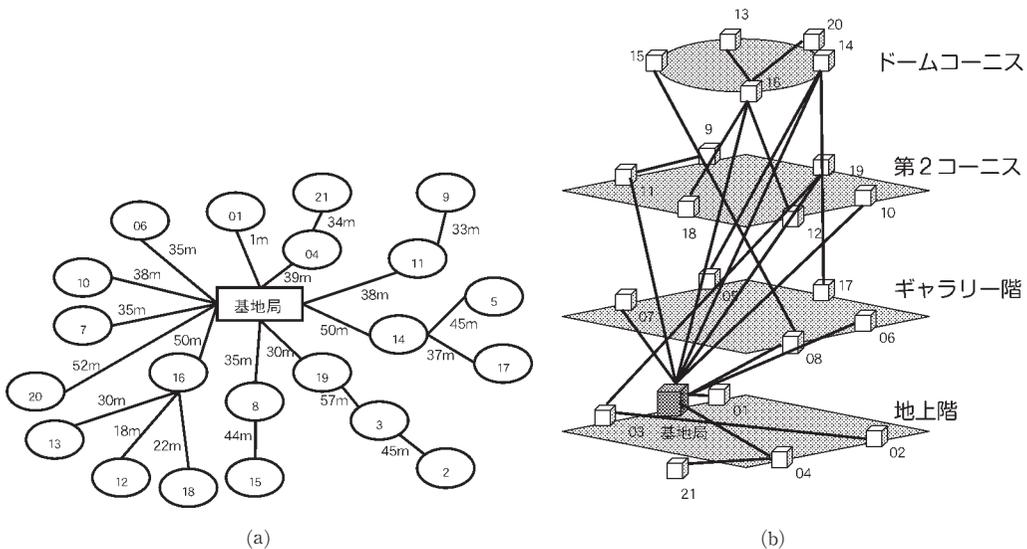


図8 2011年11月11日10時4分現在のメッシュネットワークの通信経路

一方、表2は各センサノードのデータ回収率を示している。この表より、ノード2および9の回収率が極端に低くなっていることがわかる。これは、図5に示すように、外的要因によって通信機とセンサボードの接触不良が発生し、何らかの通信障害が発生したことに起因するものと考えられる。現在、この2つのセンサノードを回収できない状況にあることから、これらを回収した後に詳細な原因調査を行う予定である。それ以外のノードについてはノード8の回収率が91%と最も高く、ノード21が75%と低かった。ノード21は図5(地上階)に示すようにドームから離れた外壁に近い位置に設置されているため、基地局までの中継器となるノードとの通信環境が良くないことが主な原因である。これは図9のノード21の送信相手ノード数が他のノードよりも少ないことから確認できる。一方、それ以外のノードは概ね80%~90%の回収率であることがわかった。

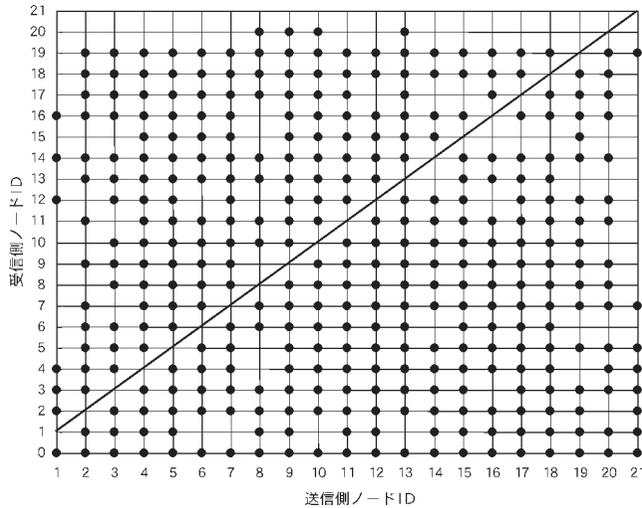


図9 各センサノードの通信履歴

表2 各センサノードのデータ回収率

Node ID	データ回収率	Node ID	データ回収率	Node ID	データ回収率
01	88%	08	91%	15	77%
02	26%*	09	25%*	16	88%
03	86%	10	80%	17	86%
04	87%	11	85%	18	85%
05	85%	12	89%	19	87%
06	83%	13	85%	20	78%
07	87%	14	90%	21	75%

#### 4. 結論

関係者間でのデータ共有というキーワードを基に、リアルタイム環境モニタリングシステムの開発に関する報告を纏めた。ここで開発された無線式の環境モニタリングシステムはロガータイプと異なり、聖堂内の環境を常時確認できる点が特長として挙げられる。特にハギヤソフィアのような大空間を対象とする場合、電池で駆動し、基地局からの通信距離に依存せずに任意の位置にセンサノードを設置できるメッシュネットワーク型の無線通信手法の有効性が確認できた。一方、この環境を堅持するためには、基地局への安定した電源供給およびLAN回線の確保が必須であることから、トラブルが生じた場合の現地の関係者との協力体制を構築しておく必要がある。

### 参考文献

- 1) 小椋大輔, 石崎武志, 小泉圭吾, 佐々木淑美, 日高健一郎: ハギア・ソフィア大聖堂内の環境測定と解析, 文化財保存修復学会第33回大会, P051 (2011)
- 2) 阪田史郎: ユビキタス技術センサネットワーク, オーム社, p.8 (2006)

キーワード: 無線センサネットワーク (wireless sensor network); メッシュネットワーク (mesh network); 環境計測 (environmental monitoring); 常時観測 (real-time monitoring); データ共有 (data sharing)

## Development of a Real-time Environmental Monitoring System by a Wireless Sensor Network in Hagia Sophia

Keigo KOIZUMI\*, Takeshi ISHIZAKI, Daisuke OGURA \*<sup>2</sup>,  
Juni SASAKI and Kenichiro HIDAKA \*<sup>3</sup>

Weathering and deterioration of the brick walls of Hagia Sophia Museum have accelerated due to dew condensation and wet-dry cyclic condition. To clarify the problems, temperature and relative humidity sensors and one weather station have been installed. This report focuses on a real-time monitoring system for understanding the environmental condition in the museum.

When a real-time environmental monitoring system is installed, power-supply and data communication needs to be designed simply and compactly. To solve this problem, wireless sensor networks, especially a monitoring system by mesh network method was developed. The size of the sensor node is 80×120×40 mm. It consists of a small wireless communication device, a size D battery and a sensor board with temperature and RH sensors. The monitoring-station is composed of a mobile PC and a receiver module. To understand the environmental condition, 21 sensor nodes are set up on lines of symmetries in the plane view and the section view of the dome construction. Data is observed on screen displays as values, time series graphs and distribution maps. To monitor the data, remote access is used through the Internet. In this case, ID password and access code are demanded.

Monitoring has been conducted since September 27, 2010. Sampling interval is 30 min. Data collection rates by this monitoring system are around 80% to 90%. There has been no voltage reduction for more than one year. These results indicate that the wireless sensor network is an effective solution to build a real-time monitoring system in Hagia Sophia.

---

\*Graduate School of Engineering, Osaka University

\*\*Graduate School of Engineering, Kyoto University

\*\*3Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba