

# 移動型ワイアレスセンサネットワークの周囲環境変化に対する信頼性確保のための設置位置推薦手法の提案

大塚 孝信<sup>1,a)</sup> 鳥居 義高<sup>2</sup> 伊藤 孝行<sup>3</sup>

**概要:** 近年、豪雨による河川の氾濫による土砂崩れや、家屋の浸水などの件数が増加している。広域浸水に関しては、河川の構造や、海拔及び、埋立地である箇所など、浸水を完全に防ぐ方法は困難である。現状では、浸水箇所に対しポンプ車を代表とする排水機器を稼働させるという対処のみ可能である。しかし、可能な限り迅速に排水作業を行うためには、浸水箇所全域の水位データによる浸水全水量の把握が必要である。そのために我々は、国土交通省 中部地方整備局、日本工営株式会社と共同で現場での設置を目的とした移動式アドホック簡易水位計の試作を行っている。特に、移動式のワイアレスセンサネットワークでは、移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイアレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響を定量化し、計測ノードの移動による電波品質を考慮したな設置パターンを決定する必要がある。本論文では、特に無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波状況を測定することで、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案する。

## 1. はじめに

ワイアレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) は、近年、IoT (Internet of Things), M2M (Machine to Machine) の中核を成す技術であり、広く研究が行われている [11]。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 [5][10]。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広く研究されている。ワイアレスセンサネットワークは、多数の子機 (センシングノード) からの情報を集約するシンクノード (Sink mode) と、マルチホップでの情報の中継が可能なルータノード (Router node) から構成され、環境情報の観測や、スマート

ホーム等の分野で広く利用されはじめている。研究用途では、1998 年に UC バークレー校で開発された MOTE [1] が有名ではあるが、近年では IEEE802.15.4 として規格化されている、Zigbee ネットワークを用いたセンサネットワークの研究が盛んである。しかし、日本国内において販売されている免許、工事認証ともに不要な通信モジュールは、諸外国と比較して出力が大幅に制限されており、通信距離の制約が大きい。特に、広範囲に環境情報を取得する目的で構築されるセンサネットワークでは、通信距離を必要とするため、農業分野や、河川管理業務においては、設置場所付近の電波状況をあらかじめ測定しておき、事前調査の上、計測ノードの配置を考慮した上で設置を行う手法が広く行われている。近年、豪雨による河川の氾濫による土砂崩れや、家屋の浸水などの件数が増加しており、広域浸水を代表とする災害が多く発生している。しかし、広域浸水に関しては、河川の構造や、海拔及び、埋立地である箇所など、浸水を完全に防ぐ方法は困難である。現状では、浸水箇所に対しポンプ車を代表とする排水機器を稼働させるという対処のみ可能である。よって、可能な限り迅速に排水作業を行うためには、浸水箇所全域の水位データによる浸水全水量の把握が必要である。そのために我々は、国土交通省 中部地方整備局、日本工営株式会社と共同で現場での設置を目的とした移動式アドホック簡易水位計の試作を

<sup>1</sup> 名古屋工業大学大学院 情報工学専攻  
Doctor of Information Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan

<sup>2</sup> 名古屋工業大学 情報工学科

<sup>3</sup> 名古屋工業大学大学院 産業戦略工学専攻

<sup>a)</sup> otsuka.takanobu@nitech.ac.jp

行っている。特に、移動式のワイアレスセンサネットワークでは、移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイアレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響を定量化し、計測ノードの移動による電波品質を考慮したな設置パターンを決定する必要がある。本論文では、特に無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波状況を測定することで、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案する。本論文の構成を示す、まず、2章で本研究と関連する先行研究を紹介し、本研究の位置づけを示す。そして、3章で移動式センサネットワークの構成と課題について述べる。その後、4章において実評価実験結果について示し、5章において想定される移動式 WSN の周辺環境と配置方法を提案する。そして最後に、6章で本稿のまとめと今後の課題を示す。

## 2. 関連研究

近年、個人で運用可能な環境情報取得装置は研究用途や家庭用として広く販売されている。農業用のワイアレスセンサシステムである MEMSIC 社の Eko システム [3] を用いた研究 [2] も行われているが、ユニット単価が 10 万円程度と高く、大量に設置するには敷居が高い。更に、民生用の製品として、米デバイス社の Vantage シリーズ [4] などがあり、通信装置別途で 6 万円と、比較的低価格であるが専用のアプリケーションでのみ動作可能なため、大規模なデータ収集には向いていない。また、実験的な WSN による環境情報取捨の例として、活火山に観測ノードを多数設置することで、噴火の予測などを目的としたデータ収集に関する研究 [13] も行われている。我々は、大規模に高密度の情報を収集可能なセンサネットワークデバイスとサーバーアプリケーションを開発し、環境データの収集を行っている [7]。また、ワイアレスセンサネットワーク分野においては、消費電力の低減を目的としたセンサ配置の最適化に関する研究 [12] や、センサノードアプリケーションの構築にエージェント技術を適用した研究/citeagent も存在する。さらに、運用面での管理容易化を狙い、目的に応じたノードのプログラムを用意しておくことで、用途に応じたセンサネットワークの構築の容易化についての研究 [8]、状況に応じたネットワークトポロジを自律的に構成する研究 [9] も存在している。しかし、WSN に一番求められていることは、ネットワークの安定である。すなわち、継続的なデータ収集を目的とし、固定式センサネットワークの配置を最適化することで、ネットワークの品質を一定に保つ研究が広く行われている。例えば、ノードの形成するトポロジの電波レベル (RSSI 値) を用いて、あらかじめ定義された空間においてノード配置を最適化する研究 [19]、ノード

をクラスタとして捉えることで、通信ルートを最適化する研究 [20]、ノード間のマルチホップを行う中継局の位置を最適化することで、通信エラーを低減させる研究 [21] などがある。また、複数のシンクノードを配置し、シンクノードの位置を最適化する研究 [14] も行われている。

しかし、どの研究も”閉じた環境”での最適化を目的とした研究であり、周囲環境が動的に変化する移動式の WSN の通信品質を維持するアプローチはとられていない。特に、移動式のワイアレスセンサネットワークでは、固定式のワイアレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物などの影響を定量化し、計測ノードの移動による電波品質を考慮した設置パターンを決定する必要がある。我々は、無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士のパケットエラー率を測定することで、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案する。

## 3. 移動式 WSN の開発と課題

近年、豪雨による河川の氾濫による土砂崩れや、家屋の浸水などの件数が増加している。広域浸水に関しては、河川の構造や、海拔及び、埋立地である箇所など、浸水を完全に防ぐ方法は困難である。現状では、浸水箇所に対しポンプ車を代表とする排水機器を稼働させるという対処のみ可能である。しかし、可能な限り迅速に排水作業を行うためには、浸水箇所全域の水位データによる浸水全水量の把握が必要である。そのために我々は、国土交通省 中部地方整備局、日本工営株式会社と共同で現場での設置を目的とした移動式アドホック簡易水位計の試作を行っている。移動式アドホック水位計とは、浸水地域の排水を行うポンプ車にシンクノードを搭載し、任意の箇所に設置された計測ノードからの水位情報を集約することで、浸水地域の水位状況を可視化することで、排水に要する所要時間の算出や、最も水位の高い箇所へポンプ車が移動することで排水に要する時間を短縮することを目的として開発を行っている。本システムの概要を 図 1 に示す。

本システムは、固定式の WSN と異なり、以下の課題が存在する。

- シンクノード、計測ノードが任意の場所に設置されるため、事前に配置位置を検討することが困難
- シンクノードを搭載した排水ポンプ車が移動するため、中継ノードの位置をシンクノードの移動を前提とした配置とする必要がある
- 浸水災害箇所への設置のため、消防車や各種重機が道路上に存在する可能性が高いため、動的に変化する電波障害物を考慮する必要がある
- 大雨などの気象状況下で使用されることが想定され、気象変動による電波品質低下を考慮する必要がある



図 1 システム概要

以上のように、固定式 WSN とは異なり、電波品質に影響する外的要因が動的に変化する可能性が高く、固定式 WSN のように、事前に電波状況を測定し配置を最適化することは困難である。また、計測ノード、ルータノードを設置する作業が、災害現場に位置するため、オペレータの手間を軽減する必要がある。そのため、本研究では無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士のパケットエラー率を測定した。測定結果をもとに、環境要因が電波品質に与える影響をモデル化することで、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案する。

## 4. 電波測定試験

### 4.1 実験環境と測定機材

本章では、名古屋工業大学周辺において実験した、周辺環境が与える、電波品質への影響試験について述べる。本実験では、2種類の通信モジュールを用いて、通信品質の評価を行った。

- 東京コスモス社 TWE-Strong
- デイジ・インターナショナル Xbee Pro S2B

双方ともに 2.4GHz 帯 Zigbee 通信規格を用いており、省電力でマルチホップ・アドホック通信が可能であることが挙げられる。TWE-Strong[15] については、日本国内で認可されている最大出力である 10mAh 出力モジュールでありながらも、アンプ回路を内蔵することにより、見通しで 3km の通信が可能なモジュールである。一方の Xbee モジュール [16] については、Zigbee 通信モジュールでは研究用途で最も多く使用されており、出力も 10mAh と同一なことから、比較のため、実験に使用した。電波品質の測定方法は、シンクノード、ルータノード間のループバックテストによって行い、32byte のパケットを 100ms 間隔で 1000 回シンクノードからルータノードへ送信し、ルータノードか

ら返送されてきたパケットのエラー率を測定するループバックテストを行った。TWE-Strong のループバックアプリケーションには、東京コスモス社製の開発キットを用い、Xbee のループバックテストについては、デイジインターナショナルが提供する評価環境である X-CTU[17] を用いて、PC に USB 接続されたシンクノードよりパケットを送信し、実験を行った。パケットエラー率 (PER: Packet Error Rate) は、測定端から他の測定端へパケットを送信する際に、どれくらいの割合で送信が成功するかで定義され、15% - 30%程度であれば通常、通信品質としては問題無いが、パケットエラー率が 50%を超えると、送受信時の通信エラーが頻発していることになり、通信品質が悪化しているとみなすことができる。TWE-Strong での実験に使用した測定機材を図 2 に、Xbee での実験に使用した測定機材を図 3 に示す。

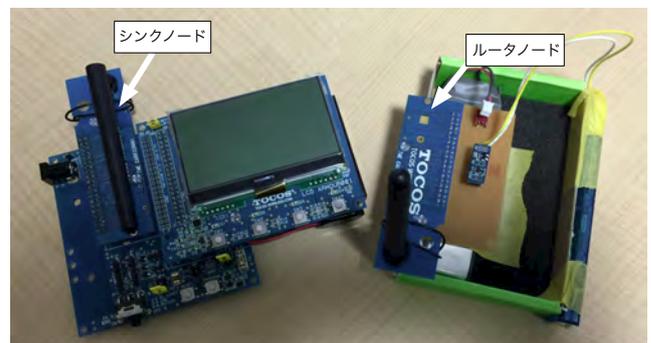


図 2 TWE-Strong モジュール測定機材

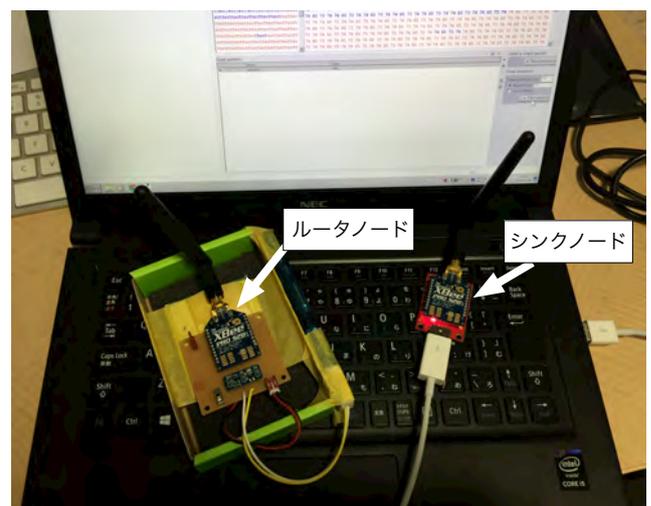


図 3 Xbee モジュール測定機材

## 4.2 実験設定

本実験では、以下の環境を想定して実験を行った。

- (1) 自動車の通行が電波品質に及ぼす影響
- (2) ビル等建築物が電波品質に及ぼす影響
- (3) 森林等が電波品質に及ぼす影響

上記3つの環境を想定した試験を行うことで、周辺条件の変化による電波品質への影響を調査する。測定場所は、愛知県名古屋市昭和区の名古屋工業大学周辺にて2014年11月15日に行った。また、各シンクノード及びルータノードの設置高さについては地上高1.2mとした。

## 4.3 実験結果

### 自動車の通行が電波品質に及ぼす影響

次に、自動車の通行が電波品質に及ぼす影響について調査する。本実験におけるシンクノードの配置と、ルータノードの配置図を図4に示す。



図4 シンクノード及びルータノード配置図

シンクノード(S1)は名古屋工業大学の正門前に設置し、ルータノードR1~R3については同一軸線上に配置している。シンクノードS1からルータノードR1方面の周辺状況を図5に示す。シンクノードS1からルータノードR1の間は、緩やかな坂道となっており、高低差は約4m程度ある。また、ルータノードR1とR2の間には都市高速道路が通っており、鉄骨骨格のコンクリート製のため、非常に高い電波遮蔽効果が想定される。更に、脇道には街路樹が多く植わっており、自動車通過時には、見通しがきかない状況となる。次に、シンクノードS1からルータノードR4方面の周辺状況を図6に示す。シンクノードS1からルータノードR4の間についても、緩やかな坂道となっており、高低差は約3m程度ある。また、向かって左側は大規模な森林公園であり、森林による電波干渉についても多く起こると想定される。さらに、国立病院前のため、交



図5 S1よりR1方面の周辺状況



図6 S1よりR4方面の周辺状況

通量が休日でも比較的多く、自家用車による電波干渉を測定するのに適した場所とも言える。シンクノードS1からルータノードR1~R4の測定結果を表1に示す。電波状況が極度に悪く、通信が不可能な場合はN/Aと示す。

実験結果によると、S1-R1間のTWEモジュールにおける実験結果が自動車通過時の影響を顕著に表しており、自動車が多く通過する際の packets error rate が98.2%に対し、自動車通過していない状況の場合は、packets error rate 85.4%と、約13%の変化が見られた。また、packets error rateが高い(通信状況が悪い)場合は特に自動車の影響を受けることがわかった。本結果より、特に長距離間の通信を行うノード同士は、可能な限り道路をまたいで通信を避けることにより、安定した通信品質を保つことができると考える。

### ビル等建築物が電波品質に及ぼす影響

本章ではビル等建築物が電波品質に及ぼす影響について調査した。実験には、鉄筋コンクリート製のビルが散在する名古屋工業大学内にて行った本実験におけるシンクノード

表 1 自家用車通行有無の電波品質調査結果

シンク	ルータ	モジュール	信号	PER	直線距離	高低差
S1	R1	TWE	青	98.2%	504m	4m
S1	R1	Xbee	青	N/A	504m	4m
S1	R1	TWE	赤	85.4%	120m	4m
S1	R1	Xbee	赤	N/A	412m	4m
S1	R2	TWE	青	65.0%	412m	3m
S1	R2	Xbee	青	82.2%	412m	3m
S1	R2	TWE	赤	57.3%	412m	3m
S1	R2	Xbee	赤	76.0%	412m	3m
S1	R3	TWE	青	20.8%	202m	2m
S1	R3	Xbee	青	26.4%	202m	2m
S1	R3	TWE	赤	17.5%	202m	2m
S1	R3	Xbee	赤	27.2%	202m	2m
S1	R4	TWE	青	19.5%	418m	3m
S1	R4	Xbee	青	25.2%	418m	3m
S1	R4	TWE	赤	17.2%	418m	3m
S1	R4	Xbee	赤	22.1%	418m	3m



図 8 S2 から R5 方面の周辺状況

の配置と、ルータノードの配置図を図 7 に示す。 シ



図 7 シンクノード及びルータノード配置図

シンクノード (S2) は名古屋工業大学の 19 号間前に設置し、ルータノード R5~R8 については以下に基づき設置している。

- R5** シンクノードからの直線上に設置
- R6** シンクノードからの直線上に建築物が存在する状態
- R7** シンクノードからの直線上に建築物が存在するが、開口部がある状態
- R8** シンクノードからの直線上に建築物が 3m 程度張り出している状態

シンクノード S2 からルータノード R5 方面の周辺状況を図 8 に示す。直線上にわずかに建築物が存在するが、電波反射により電波状況は良好と考えられる位置に存在している。

シンクノード S2 からルータノード R7 方面の周辺状況を図 9 に示す。直線上に建築物が存在するが、高さ 3m、横幅 10m、奥行き 10m 程度の開口部がある。



図 9 S2 から R7 方面の周辺状況

シンクノード S2 からルータノード R5~R8 の測定結果を表 2 に示す。電波状況が極度に悪く、通信が不可能な場合は N/A と示す。

表 2 ビル等建築物有無の電波品質調査結果

シンク	ルータ	モジュール	PER	直線距離	高低差
S2	R5	TWE	69.3%	199m	0m
S2	R5	Xbee	N/A	199m	0m
S2	R6	TWE	N/A	203m	0m
S2	R6	Xbee	N/A	203m	0m
S2	R7	TWE	12.5%	74m	0m
S2	R7	Xbee	22.8%	74m	0m
S2	R8	TWE	79.7%	111m	0m
S2	R8	Xbee	89.2%	111m	0m

実験結果によると、S2-R6 間の TWE モジュールにおける実験結果が双方とも通信不能となっており、鉄筋コンクリート製の建築物が直線上を横切る格好で存在する場合は、通信品質が著しく低下、もしくは通信不可能となる。しかし、S2-R8 間のように直線上に建築物が存在する場合でも、ノード間に平行に存在する建築物の場合、通信可能

ではあるが、エラー率が90%近くまで上昇しており、中継局の配置が必要であると考えられる。また、運用上建築物に交差する形で通信をしなければならない場合、開口部が存在するのであれば、通信品質の低下を避け、通信を確立することが可能なことがわかった。本結果より、特に鉄筋コンクリート製の大型建造物に対しては、電波の回り込みも悪く、通信品質が著しく悪化することがわかった。

### 森林等が電波品質に及ぼす影響

次に、森林等が電波品質に及ぼす影響について調査した。実験には、森林及び、古墳が存在する名古屋工業大学内にて行った本実験におけるシンクノードの配置と、ルータノードの配置図を図10に示す。



図10 シンクノード及びルータノード配置図

シンクノード(S3)は名古屋工業大学の19号間デッキ前に設置し、ルータノードR9~R10については同一軸線上に配置している。ルータノードR10は、ルータノードR9と比較して1.5m程度低位置に存在している。シンクノードS1からルータノードR1方面の周辺状況を図11に示す。

シンクノードS3から見たルータノードR11の周辺状況について図12に示す。ルータノードR11は、シンクノードS3からの直線上に、直径36m、高さ8mの一本松古墳の奥に存在している。シンクノードS3から見たルータノードR11の周辺状況について図12に示す。

シンクノードS3からルータノードR9~R11の測定結果を表3に示す。実験結果によると、図11に示す程度の森林等による影響は少ないことがわかった。S3-R10間のパケットエラー率に関しても、30%以下であり、通信品質に顕著な影響を与えないことがわかった。しかし、TWEもジュールとXbeeモジュールのパケットエラー率に関して、S3-R9間では3枚程度の差異が発生しており、Xbeeモジュールの



図11 S3からR9方面の周辺状況

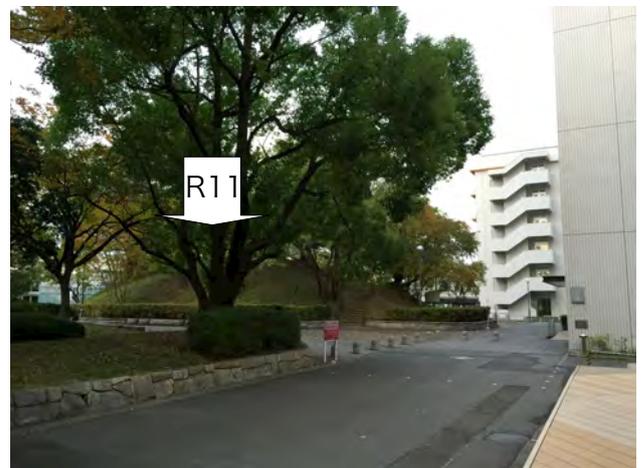


図12 S2からR11方面の周辺状況

表3 森林等有無の電波品質調査結果

シンク	ルータ	モジュール	PER	直線距離	高低差
S3	R9	TWE	7.7%	88m	0m
S3	R9	Xbee	33.4%	88m	0m
S3	R10	TWE	22.0%	102m	1.5m
S3	R10	Xbee	50.8%	102m	1.5m
S3	R11	TWE	22.3%	101m	0m
S3	R11	Xbee	25.4%	101m	0m

森林に対する脆弱性が判明した。本結果より、雑木林などではない限り、森林を避ける必要性は低いことがわかった。

### 4.4 実験結果まとめ

実験結果により、交通量の多い道路に交差して設置する場合や、鉄筋コンクリートの建築物に交差する通信経路は可能な限り避けるべきであることがわかった。森林に対しては、雑木林などの密集地でない限りは、電波品質の低下が少ないことがわかった。今回の実験では、実験フィールドの制約もあり、通信限界点での試験を実施できなかったため、11月下旬に予定している木曾三川公園での長距離通

信試験を行うことにより通信限界域での通信障害の環境要因の分析を行う。

## 5. 移動式 WSN の周辺環境と配置方法

### 5.1 実験フィールドの紹介と配置検討

本章では、本研究の実験フィールドとして予定されている、静岡県三島市、御園地区の浸水時を想定し、実験結果によって得られた知見により配置方法を検討する。御園地区は、狩野川の支線と本線が合流する位置に存在しており、過去 10 年間のあいだに 3 回の浸水を経験しており、三島市の提供するハザードマップ [18] でも浸水多発地点として指定されている。御園地区及び周辺地図を図 13 に示す。



図 13 御園地区周辺状況

衛星画像を見る通り、地区の中心に幹線道路が通っており、浸水時には、堤防上のポンプ車が必要に応じて移動しながら排水を行うことになる。我々は、実験結果によって得られた知見によって、以下の制約を与えた移動式 WSN 設置位置について提案した。

- 幹線道路に沿って見通し通信状況を確認する
- 道路分岐部については周辺に屋根が見えない箇所に優先配置する
- ポンプ車が堤防上を移動した場合にも、ルータノードの中継機能によって、全ノードの情報を取得可能とする

図 14 にポンプ車が初期位置に待機している際のネットワークポロジについて示す。堤防上の道路をポンプ車が必要に応じて移動し、排水作業を行うことを想定している。地図上のグリッドは 100m グリッドとした。

次に、ポンプ車が移動した際のネットワークポロジに

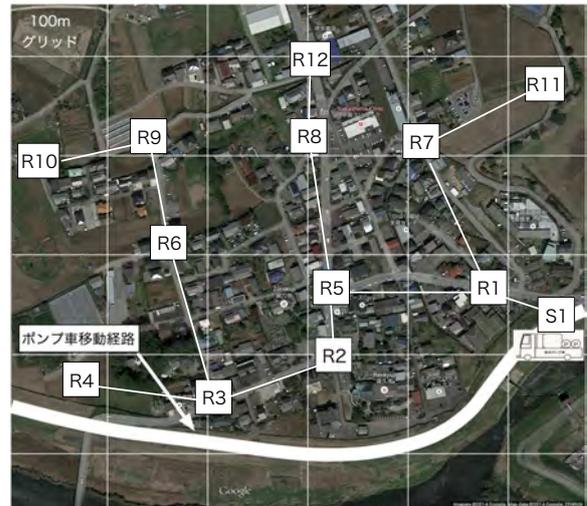


図 14 ポンプ車初期位置とネットワークポロジ

ついて図 15 に示す。ポンプ車が移動するにつれ、ポンプ車に搭載されたシンクノードと直近のルータノードの接続が切り替わることとなり、移動に応じて R1, R2, R3, とルーティングノードとの回路が自動的に切り替わるよう、堤防直近のノードを配置している。



図 15 ポンプ車移動位置とネットワークポロジの変化

以上のように、実際の電波品質試験を基に、移動式 WSN の課題である、動的に変化する周辺環境に対応可能と考える。

## 6. まとめと今後の課題

本論文では、移動型 WSN のために、実際の動的な環境要因による電波品質を測定することで、シンクノードの移動、ルータノードの移動による電波品質の変化に対応可能な移動式 WSN の配置場所について提案した。今回の実験では、実験フィールドの制約もあり、通信限界点での試験を実施できなかったため、11月下旬に予定している木曾三

川公園での長距離通信試験を行うことにより通信限界域での通信障害の環境要因の分析を行うとともに、実際の運用フィールドにおける問題の抽出や、ノードトポロジの自動切り替えに要する時間の取得など、実運用に向けた課題を整理するとともに、移動式 WSN の設置アルゴリズムを構築する。また、多くの電波品質調査結果を収集することにより、現場作業者が容易に扱うことのできる設置位置の推薦アプリケーションについても実装を予定している。

**謝辞** 本研究の一部は、国土交通省中部地方整備局、日本工営株式会社との共同研究によるものである。

## 参考文献

- [1] 住友精密工業センサネットワーク事業部, 無線センサーネットワーク MOTE, "http://www.xbow.jp/01products/index.html", 2014.11.18 閲覧.
- [2] 伊藤昌毅. "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." 電気学会研究会資料. IIS, 次世代産業システム研究会, IEEE Japan. Vol. 2010. No. 66. 2010.
- [3] MEMSIC .inc, Wireless Sensor Network, "Eko", http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks/
- [4] Davis Instruments, "Whether Products", http://www.davisnet.com/weather/.
- [5] 戸部 義人, "無線センサネットワークの技術動向", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol190-B, No.8, pp.711-719, 電子情報通信学会, 2007.
- [6] 長 建太, 大須賀 昭彦, 本位田 真一, "知的移動エージェントによるマルチパーパスワイヤレスセンサネットワークアプリケーション", 情報処理学会論文誌, Vol47, No.12, pp.3165-3178, 情報処理学会, 2006.
- [7] 大塚孝信, 鳥居義高, and 伊藤孝行. "気圧センサノードを用いた局地的異常気象検知アルゴリズムの提案." 情報処理学会研究報告. ICS,[知能と複雑系] 2014.4 (2014): 1-6.
- [8] Hill,J.,Szewczyk, R., Woo, A., Hoilar,S., Culler,D.E., Kristofer,S, and Pister, J,: System Architecture Directions fbr Networked Sensors A,r ehitectural Smpportfor-Programming Languages and Operating System3, pp.93-104, 2000.
- [9] Fbk, C"L., Roman, G.-C. and Lu, C. "Rapid Developmentand FlexibleDeployment of AdaptiveWirelessSensorNetwork Applications", Proe.25thIEEE internationalConference on DistributedComputing SystemsVbl, OO,pp.653-662 (ICDes,05), 2000.
- [10] M. Kuorilehto, M. Hannikainen and T. D. Hamalainen: "A surveyof application distribution in wireless sensor networks", EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., 5, 5, pp. 774-788 (2005).
- [11] I.F. Akyildiz, W. Su\*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey", Computer Networks, Vol.38, pp.393?422, Elsevier Science B.V,(2002).
- [12] Dhananjay Lal, Arati Manjeshwar, Falk Herrmann, Elif Uysal-Biyikoglu, Abtin Keshavarzian, "Measurement and Characterization of Link Quality Metrics in Energy Constrained Wireless Sensor Networks", Proc of IEEE International Conference on Global Communications Conference,pp.446-452, (2003)
- [13] Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Matt Welsh, et.al, "Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano", IEEE INTERNET COMPUTING, March April, 2006, pp18-25, (2006).
- [14] 宇谷 明秀, 山本 尚生, "複数の許容解を探索する Particle Swarm Optimization とその複数シンク無線センサネットワークにおけるシンクノード配置問題への適用", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J93-D, No.5, pp555-567, 電子情報通信学会,(2000).
- [15] 東京コスモス電機 ワイヤレス事業部, TWE-Strong, "http://tocos-wireless.com/jp/products/TWE-001STRONG.html", 2014.11.17 閲覧
- [16] デイジインターナショナル株式会社, Xbee Pro モジュール, "http://www.digi-intl.co.jp/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module.html" 2014.11.17 閲覧
- [17] デイジインターナショナル株式会社, X-CTU, "http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/xctu", 2014.11.18 閲覧.
- [18] 三島市洪水避難地図(ハザードマップ), "http://www.city.mishima.shizuoka.jp/media/05082030\_pdf\_2012926\_rad5B39B.pdf", 2014.11.17 閲覧
- [19] Romer, Kay, and Friedemann Mattern. "The design space of wireless sensor networks." Wireless Communications, IEEE 11.6 (2004): 54-61.
- [20] Younis, Ossama, Marwan Krunz, and Srinivasan Ramasubramanian. "Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges." Network, IEEE 20.3 (2006): 20-25.
- [21] Hongyang, C. H. E. N., et al. "An improved DV-Hop localization algorithm with reduced node location error for wireless sensor networks." IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences 91.8 (2008): 2232-2236.