

土砂災害監視のための無線センサネットワーク の実用化に向けた実験的研究

小泉 圭吾¹・藤田 行茂²・平田 研二³・小田 和広⁴・上出 定幸⁵

¹正会員 大阪大学大学院助教 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: koizumi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²非会員 地球観測株式会社 モニタリング事業室 (〒564-0051 大阪府吹田市豊津町1-10-206室)

E-mail: fujita@earth-watch.jp

³非会員 長岡技術科学大学准教授 工学部機械系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

E-mail: hirata@nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 大阪大学大学院准教授 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: oda@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁵正会員 西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 道路技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前5-26)

E-mail: s_kamide@w-e-kansai.co.jp

近年、局地的かつ突発的な集中豪雨による土砂災害が頻発している。本研究は緊急時のライフラインとして重要な役割を果たす高速道路に焦点をあて、豪雨による表層崩壊を対象とした土砂災害監視システムの構築を目的とする。特長は、電池で長期運用が可能であること、フルメッシュネットワークと呼ばれる無線通信技術により、対象範囲を限定せず、多点で面的な計測が行える点が挙げられる。また、崩壊検知だけでなく、崩壊に至るまでの地盤の性状を段階的に診断できるシステムの構築を目指している。ここでは、本システムの無線通信機能に焦点を絞り、その性能評価および実証実験を行った。その結果、基地局とセンサノード間の無線通信距離に依存することなくセンサを配置でき、少なくとも129日間の連続稼働時間が確認できた。

Key Words : sensor network, slope disaster, wireless, multipoint monitoring, road management

1. はじめに

地震、集中豪雨などの自然災害による被害が毎年各地で報告されており、各種構造物の防災、安全管理について新たな管理手法が望まれている¹⁾²⁾。また、供用開始から数十年経過した土木構造物の維持管理手法の確立はここ数年の大きな課題であり、多くの構造物の劣化状況をいち早く検知する構造物健全度診断システムの開発を進めるとともに、頻発する地震や集中豪雨から構造物の被害をいち早く予測あるいは検知するための土砂災害監視システムの開発が急務となっている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

本稿では土木構造物の中でも、緊急時のライフラインとして重要な役割を果たす高速道路に着目し、特に山間部を通る高速道路沿いの土構造物(例えば、のり面)を対象とする。安心・安全な道路交通網を維持するためには、日常点検において構造物の健全度を診断し、緊急時には災害を常に監視できる体制をとる必要がある。高速

道路が通行規制になるような災害を想定した場合、国道が寸断され、鉄道が不通の状態に陥っている可能性が考えられる。従って、高速道路は災害時の復旧作業や物資輸送のためのライフラインとして、一刻も早く通行規制を解除する必要がある。高速道路で発生する土工関連の災害としては、のり面表層崩壊、地すべり、落石、土石流、地震時の盛土崩壊、豪雨時の切盛境界の崩壊などがあるが、近年の異常気象を考慮すると、これらに対する監視体制の強化がより一層重要になってきていることがわかる。

そこで筆者らは、地盤災害の中でも発生頻度の高い表層崩壊を対象とし、豪雨時における高速道路の管理体制を円滑に行える監視システムの構築が必要と考えた。具体的には、表層崩壊を未然に予測するだけでなく、豪雨による通行規制および通行規制解除を安全かつ効率よく行うためののり面監視システムである。近年の局地的かつ短時間に大量の雨を降らす集中豪雨による土砂災害は、

管理者の想定外の場所で発生しているケースも少なくなく、従来の点検や地形・地質図による素因分析のみでは把握しきれない現状が指摘されている。また、一般の土砂災害監視システムは崩壊を検知或いは予測することが主目的とされているが、崩壊を未然に防ぐことに加え、降雨の変化と共に表層地盤の安定性がどのように変化するかを観測できるシステムが望ましい。これに対し小山らは、1秒ごとに雨量が計測できるリアルタイム雨量計を開発し、地盤中への水分の浸透挙動を把握することで、斜面の安定性を評価するための研究を行っている⁸⁾。また、深川らは土壌水分、サクシオンおよび地下水位などの挙動を計測することで降雨による表層地盤の変化を捉えるための研究を行っている⁹⁾。これらはいずれも地盤中の水分挙動の変化を精度よく捉えることを目指したものであり、本研究の目的に近い。一方、これらの計測手法を土砂災害監視システムとして実運用化するためには、計測機器類の設置の簡便さに加え、データの伝送手法にも着目する必要がある。

高速道路沿いののり面を対象とする場合、道路沿いに電源を確保することは可能である一方、のり面上に電源を配線することはメンテナンスおよびコスト面で好ましくない。そのため、通常はのり面上に基地局を設置し、計測器から有線にてデータを基地局のロガーに収集するという手法が採用されている。この場合、電源は全て基地局に集約されることから大型のバッテリーとソーラー電池などを併用されることが多い。また、計測器と基地局間是有線のため、複数台の計測器を設置する場合は配線の取り回しや、断線時の対応など、長期運用の場合には予想以上の手間とコストが発生する。そのため、最近では計測器に無線通信機を内蔵することで、データをワイヤレスで基地局へ送ることができる無線計測システムが実用化されつつある¹⁰⁾。現在、免許を必要とせず使用が可能な無線周波数帯域としては、2.4GHz帯および429MHz帯が挙げられる。2.4GHz帯は通信距離が見通しで約100m、通信速度が250kbpsである。一方、429MHz帯は通信距離が見通しで約1km、通信速度は2.4kbpsである。両者を比較すると、通信距離は429MHz、通信速度は2.4GHzの性能が優るが、静的なデータを最速でも数分間隔で送信する場合、数十台程度の通信であれば429MHz帯を使用しても実用上問題ない¹¹⁾。一方、計測地点と親局の間に無線電波を遮蔽するような障害物が存在する場合、通信距離に関係なく、データを転送することができない。一般的に429MHz帯は2.4GHz帯に対して、周波数が低いために直進性が弱く、電波の回り込みが良いとされているが、屋外での計測においては、例えば通信距離が仕様内であったとしても、必ずしも計測位置から親局への通信が保証される訳では無い¹⁰⁾。

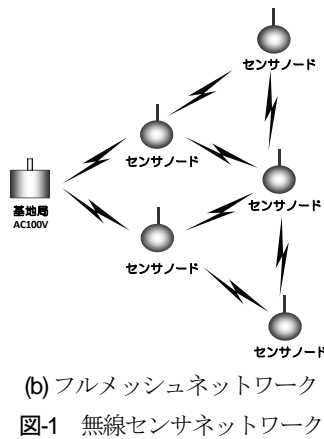
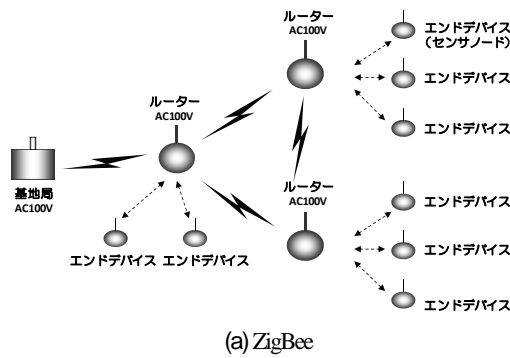
そこで本稿では、計測範囲が基地局と無線通信機の通

信間距離に依存しない無線センサネットワークの1つであるフルメッシュネットワークと呼ばれる無線通信手法を構築することで、任意の位置で計測が行え、またのり面を多点で監視できる無線センサネットワークシステムを開発し、その性能評価を行った。2章では無線センサネットワークの代表例としてZigBeeを取上げ、本システムの特長であるフルメッシュネットワークの優位性を考察する。3章では無線モジュールの基本性能を把握するために、大阪大学構内の平地およびのり面にて通信の性能評価を行う。4章では3章の結果を踏まえ、高速道路沿いののり面で通信システムの構築に際する課題を抽出し、5章では4章での課題を改良することで、フルメッシュネットワークの有効性を検証する。6章でこれらを総括し、開発された無線通信システムの有効性と課題を評価する。

2. 無線センサネットワーク

(1) システムの概要

のり面崩壊の予測・検知に加え、豪雨時の地盤の性状を精度よく観測するためには、事前にある程度の崩壊予測箇所を推定することは重要であるが、いずれにしてもその範囲内を面的に、かつリアルタイムに監視する必要がある。また、高速道路の通行規制および通行規制解除を目的とする場合は、崩壊の危険性の高い複数ののり面に本システムを設置する必要がある。そのため、設置に際しては、時間を要さず、ローコストでシステムを構築できることが望まれる。そこで本研究では、ユビキタス技術の1つであり、ここ数年で通信性能の向上が進んでいる無線センサネットワークを用いた土砂災害監視システムの構築を検討する。無線センサネットワーク（以下、センサネットワークと記述）とはセンサ技術と無線ネットワーク技術を連携させ、複数の計測器（以下、センサノードまたはノードと記述）をネットワークに接続し、センサノード群のまとまりとして、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¹²⁾。現在、図-1に示すように、センサネットワークには主としてZigBee規格およびフル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き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-1(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。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-1(b)に示すフル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。このようなセンサネットワークの通信手法をフル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が行えることから、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、長期運用が可能である。以上のことから、本システム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フルメッシュネットワークによる通信方式を採用するこ

表-1 無線モジュールの仕様

	MICAz		IRIS
型番	MPR2600J	MPR2600X	XM2110J
CPU	Atmega128L	Atmega128L	Atmega1281
無線周波数	2.4GHz		
通信方式	IEEE 802.15.4		
通信速度	250kbps		
無線チップ	CC2420		RF230
メモリ	512KB		
通信距離	MPR2600Jの2~3倍		
電源	DC3~4V	DC3~4V	DC3V
サイズ	70×35×18	76×36×15	70×35×18

とでシステムの開発を行った。

(2) 無線モジュール

本研究では Crossbow 社の研究開発用無線モジュール、MPR2600J、MPR2600X および XM2110J を使用した。各仕様を表-1 に記す。無線モジュールは年々改良が加えられており、通信距離や消費電流に性能の向上が見られる。本研究で使用する無線モジュールも MPR2600J に比べ MPR2600X および XM2110J の通信距離は約 2~3 倍（メーカー公表値）に向上しているとされている。改良点は、MPR2600J のアンテナを高効率タイプに変更したのが MPR2600X、CPU と無線チップを変更し、高出力タイプに改良したのが XM2110J である。MPR2600X に比べ、XM2110J は消費電流に若干の優位性が見られる。そこで本研究では、3 章の通信性能評価にベースタイプの MPR2600J を用い、現場での実証実験には XM2110J および MPR2600X を用いることとした。また、長期運用を実現するために、バッテリーの消費電流を抑えた LP 機能（ローパワーモード）によりシステムを構築した。LP とは、計測以外の時間はノードをスリープさせることで、バッテリーの消費を抑える機能のことをいい、本無線モジュールに実装されている機能である。具体的には、全てのセンサノードを同期しながらスリープさせる。ウェイク・アップ時に計測を行い、メッシュネットワークの通信状況を判断し、各センサノードから基地局へデータが送信され、再び同期しながらスリープする。なお、同期については、計測対象からして 1/1000 秒単位で同期する必要はなく、秒単位で同期させるレベルのため、各ノードの内部時計を利用する同期で十分であり、特別な操作は必要ない。

3. 無線モジュールの性能評価

(1) 平地での通信性能

本研究で用いる無線通信機(MPR2600J)の性能を実験により検証する。検証にはデシベル値を評価指標として用いる。デシベル値とは受信で生じる電力1mWを0dB（デシベル）と定義することで、親機が子機から受信する電力を評価するのに用いられる値のことを示し、無次元値

である。デシベル値の算出式を式(1)に示す。

$$Y = 10 \log_{10}(X / 1 \text{ mW}) \quad (1)$$

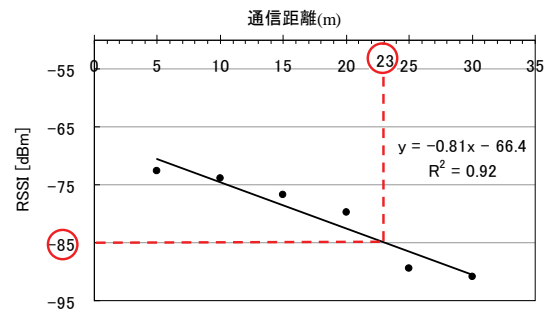
X は受信機の受信電力 (mW), Y はデシベル値 (dBm) として表され, 工学では一般的に, デシベル値に絶対基準値を定め, 絶対単位として用いる。式(1)では, 受信で生じる電力 1mW を 0dB と定義しているが, このときの単位は dBm (ディービーエム) を用いるのが通例である。また, デシベル値は一般的に RSSI 値 (Receiving Signal Strength Intensity: 電界強度) とも呼ばれていることから, 本稿においても以降デシベル値を RSSI 値と記す。RSSI 値はセンサノードの設置間隔および地表面からの高さに影響される。本稿で使用する通信機の場合, 経験的に RSSI 値が -85dBm 付近までは通信が安定していることが確認されている¹³⁾。ここでは屋外実験により RSSI 値とセンサノード間の通信距離の関係を求めるとともに, のり面にセンサノードを設置した際の電波環境についても確認を行った。

実験は大阪大学構内の平地にて実施した。RSSI 値を計測するために親機 (以後, 基地局と記述する) を地面から高さ約 50cm に設置する。次に, センサノードの設置高さを 0 cm, 50cm の 2 パターンに設定し, 各設置高さでセンサノードを基地局から遠ざけていき, 各地点での RSSI 値を計測する。計測が終了したら, 設置高さを変更し, 同様の計測を行う。この結果を基に, 各設置高さにおいて, RSSI 値が -85dBm を示したときの距離を閾値として設定する。RSSI 値は同地点でも多少の上下が生じるため, 3 秒の計測間隔で 3 分間記録し, その平均値をその地点の代表値として用いることとした。実験結果を図-2 に示す。図中の黒丸は各距離において計測された RSSI 値の平均値を示している。また, 設置高さの違いによる通信距離と電界強度の関係を把握するためにそれぞれの計測結果を直線回帰による近似式で表した。この図より, 設置高さ 0cm に比べ, 設置高さ 50cm の近似式の傾きは緩やかである。設置高さを高くすることで電界強度の減衰率が小さくなり, 通信距離を延ばせることが確認できた。また, 図-2(a)より, RSSI 値 -85dBm に対応する距離は設置高さが 0cm のときおよそ 23m, 図-2(b)より, 設置高さが 50cm のときおよそ 50m であることが確認された。

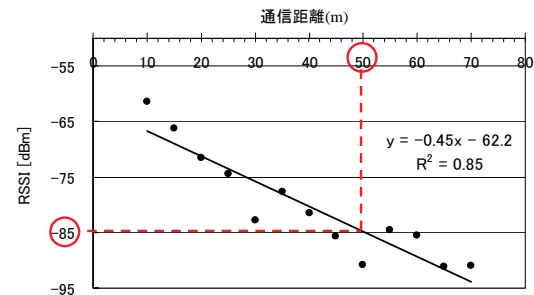
一方, 図-2(b)の各距離における RSSI 値を見ると, 30m, 45m, 50m 付近での RSSI 値は -85dBm 付近かそれを下回っていることがわかる。この様に, 電界強度と通信距離の関係は必ずしも安定しているとは言い難く, 無線により安定した通信環境を構築するためには, 実験結果を目安にしてそれよりも安全側にノードを配置する必要がある。

(2) 大学構内におけるのり面での通信性能

次に, 大学構内でののり面におけるフルメッシュネッ



(a) 設置高さ0cm



(b) 設置高さ50cm

図-2 平地での無線通信距離実験

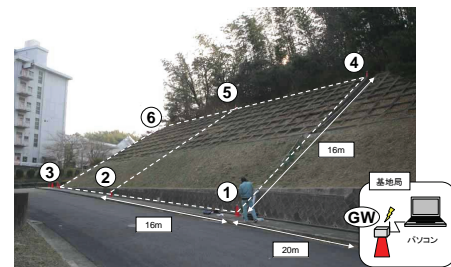


図-3 のり面での無線通信実験概要

トワークの通信状況を確認した。図-3に実験概要を示す。平地での通信実験結果を基に, 十分通信が行えると考えられる16m間隔でセンサノードを配置し, 10秒に1回の間隔で計測を行い, 通信経路がどのように構築されるかを確認した。また, 各地点におけるセンサノードのRSSI 値を約60サンプルずつ測定し, その平均値をとることで構築された通信経路を評価した。表-2に各地点において計測されたセンサノードのRSSI値を示す。表より, 通信が安定しているとされる-85dBmを下回る経路はあるものの, 通信は遮断されなかった。この結果, 本実験で設置したノード間距離であれば, 各ノードが複数のノードと通信可能な環境であることからネットワークが遮断される危険性は低く, 堅牢 (ロバスト) な通信環境が構築できているものと考えられる。センサノードの設置高さが50cmの場合, RSSI値が-85dBmとなる通信距離はおよそ50mであると算出された。しかし, 平地の実験と異なり, のり面上での通信実験結果においては, 通信距離が

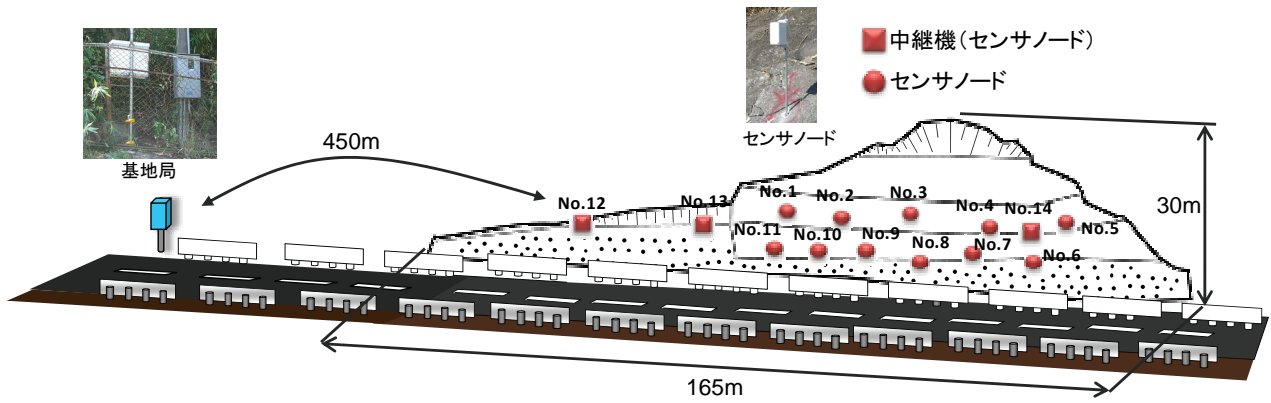


図-4 基地局とセンサノードの設置位置

表-2 各地点におけるRSSI値[dBm]

		送信側					
		1	2	3	4	5	6
電 信 機	gw	-81.0	-89.1	88.4	-86.6	-89.4	-92.1
	1	-	-67.1	-80.0	-88.8	-83.4	-90.0
	2	-63.1	-	-68.2	-75.0	-84.7	-89.1
	3	-76.7	-65.9	-	-74.7	-74.7	-77.3
	4	-88.9	-81.4	-83.8	-	-74.3	-85.2
	5	-88.5	-81.2	-75.6	-74.1	-	-68.7
	6	-92.0	-89.1	-73.0	-83.2	-66.0	-

着色箇所はRSSI値が通信が安定する目安である-85dBmを下回った値を示している。

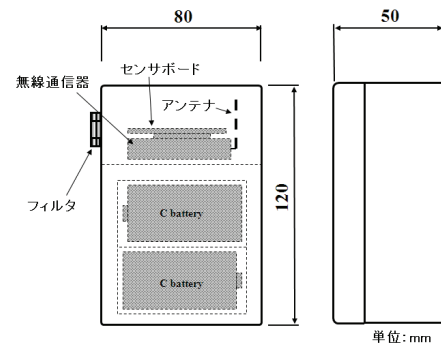


図-5 センサノードの概要図

50m以下でもRSSI値が-85dBmを下回っている地点が複数確認された。この原因として、設置位置の問題により、図-3に示す基地局(GW)、1番のすぐ手前の擁壁が障害物となり、上部4、5、6との通信に影響を与えたものと考えられる。また、4の地点において、6からの電界強度が-85.2dBmであったことは、6が受信側、4が送信側のRSSI値-83.2dBmと比較して、誤差の範疇であると推測できる。一方、3が受信側、4が送信側および逆の3が送信側、4が受信側とを比べると、同じ経路であってもRSSI値が-74.7dBm、-83.8dBmと大きく異なる事例も確認されており、ロバストなネットワークを構築するためには、電界強度の低い結果を考慮したシステム構築が必要と考えられる。

4. フルメッシュワークの実証実験(その1)

ここでは、高速道路沿いののり面にセンサノードを多点配置し、基地局を介して遠隔地にて監視するシステムを構築する際のフルメッシュネットワークの通信環境およびその課題について検証を行う。対象は中国自動車道沿いの吹付け工による切土のり面とした。

(1) システムの概要

図-4に示すように、対象のり面には計11台(No.1-No.11)のセンサノードと3台の中継機(No.12-No.14)を設置する。11台のセンサノードの設置位置は道路管理者

と協議し、将来、風化の進行に伴う崩壊の監視が必要と想定されるエリアに配置する。No.12-No.14の3台は中継機としているが、仕様はセンサノードと全く同じものである。中継機とした理由は、No.1-No.11の通信の安定性を確保するために、中継機としてNo.12-No.14の設置が必要であると判断したためである。センサノードの概要を図-5に示す。通信モジュールとして、通信距離および消費電流の性能が高いXM2110J(表-1参照)を採用し、電源は単二アルカリ電池2本を直列で用いる。また、センサノードは屋外仕様としてIP65の防塵防水規格を有し、結露対策としては耐水性と通気性に対応したフィルタを用いる。センサノードは寸切ボルトを用いてのり面上から高さ50cm以上の位置に動かないよう固定する。基地局はセンサノードからのデータを受け取る受信機、PCおよび遠隔地からの操作が可能なブロードバンド回線用の通信機から構成されている。データ閲覧やサンプリングレートの設定変更は遠隔地のPCで行い、閾値を設定することで携帯および指定のPCへアラートメールが送信できるようにシステムを構築する。なお、基地局はAC100V電源を必要とすることから、電源供給が可能な地点に設置する。No.12から基地局までの距離は450m程度である。基地局とNo.12までの距離は、無線モジュールの通信性能を超える距離であることから、基地局およびNo.12には高利得の指向性アンテナ

ナを用いる。

(2) 評価項目

のり面の維持管理にフルメッシュネットワークを応用するためには、無線通信の安定性や電池寿命などの検証が必要となる。ここでは、下記に示す項目を評価することで、本システムの有効性とその課題を検証する。

- フルメッシュネットワークの構築に要する時間
- バッテリー寿命
- フルメッシュネットワークのロバスト性
- データ回収率

(3) フルメッシュネットワークの性能評価

a) フルメッシュネットワークの構築に要する時間

のり面にセンサノードと基地局を設置した後、通信ネットワークが構築されるまでの状況を図-6に示す。サンプリングレートは10分に1回とし、それ以外の時間はスリープ機能を用いてバッテリーの消費電流を抑える設計とした。

横軸は時刻、縦軸はセンサノードの番号で、図中の黒点が基地局と直接あるいは別のセンサノードを介して通信した結果を示している。No.12において最初に通信が確認されて以降、全てのセンサノードが安定した通信環境を構築できたのは、約22時間後であった。図中の全てのセンサノードの通信状況から見てわかるようにこの間、断続的に通信が遮断されている様子が伺える。フルメッシュネットワークの構築には、まず、基地局と各センサノードとの距離や遮蔽物による送受信環境（受信できなかったパケットの割合）を通信コストとして評価し、通信コストが小さいセンサノードは基地局を自身の親ノードとして選定する。次にそれらのセンサノードは他のセンサノードとの通信コストを評価し、それぞれのセンサノードが自身の親ノードを決めていく。その際、複数の親ノード候補に対し、基地局からの通信コストを積算し、親ノード決定時の評価に使用される。そのため、基地局からのホップ数（センサノードを中継する回数）なども通信コストに影響を及ぼす。つまり、通信経路は個々のセンサノード間の通信コストだけでなく、ネットワーク全体の通信コストが低くなるように決定される¹⁴⁾。なお、通信経路はネットワーク環境の変化に応じて自律的に改善される。また、通信コストには閾値を設け、それ以下でなければ通信が行えないように設計されている。

このアルゴリズムを基に、図-6の通信状況を考察すると、ネットワークの構築に時間を要した主要因は、基地局とセンサノード間の距離が本来の通信性能を上回る450mと長かったことが挙げられる。この通信間距離を補うためにNo.12に高利得で指向性の強いアンテナ

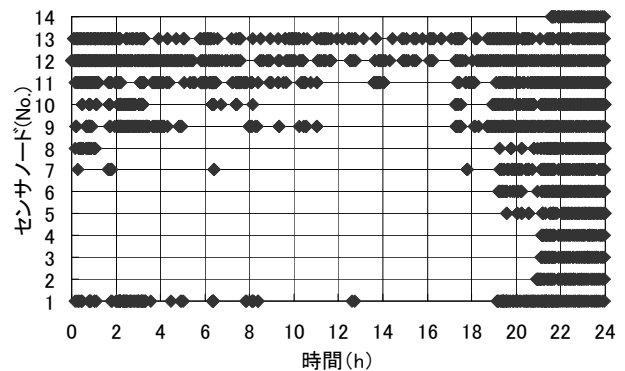


図-6 フルメッシュネットワーク構築に要した経過時間

を用いたものの、基地局とNo.12の送受信環境が安定するまでに時間を要した。その影響でNo.12を親ノード候補とするセンサノードとの通信コストも大きくなり、図のような通信が安定しない状況が続いたものと推測される。

また、もう一つの要因としては、センサノード間の通信がフリーズした場合、ソフトウェア上でリセット機能が働くが、その機能の一部障害が見られ、全体の通信が構築するまでに時間を要した可能性が挙げられる。全ての通信が構築された以降はネットワークが安定したものの、長期運用の際には再び通信がフリーズすることでネットワークが停止する可能性も考えられる。そこで、本無線モジュール (XM2110J) に対し、どのような環境下でも通信が遮断されないようプログラムを改良した。まず、通信が何らかの原因で遮断された場合、ソフトウェア上でのリセット機能を実行させる。次に、ソフトウェアが何らかの理由でフリーズした場合、ハードウェアのリセット機能を実行させ、通常の状態へ回復する機能を持たせる。その結果、一時的に通信が遮断されても、ネットワーク機能が停止せず、数時間以内に自動的にネットワークが再構築されるシステムとした。

b) バッテリー寿命

対象のり面での計測環境を表-3に示す。実験期間は、2008年10月8日～2009年2月22日で、無線モジュールのメンテナンスを行った8日間を除く129日間である。なお129日後にはバッテリーの電圧が規定値を下回り、正常に動作しなくなった。メンテナンスを挟み、最初の40日間は緊急時を想定して計測間隔を5分とし、後半の89日間は平常時の計測間隔として、電池寿命を考慮した30分間隔とした。なお、本システムでは遠隔から計測サンプリング間隔を任意に変更する機能がある。従って、天気予報などから降雨の発生状況を確認し、降雨発生前には計測サンプリング間隔を30分から5分或いは1分など、任意に変更することが可能である。

表-1のXM2110Jをスリープ機能のあるLP（ローパワーモード）で使用した場合、メーカーの参考値から換算

表-3 計測環境

バッテリー	アルカリ単二電池×2(直列)
計測期間	2008/10/8-2009/2/22 (11/18-11/25のメンテナンス期間を除く)
計測間隔	5分(40日間) & 30分(89日間)
ケース内温度(最低/最高)	-6°C/40°C
ケース内湿度(最低/最高)	34%/98%

すると、前半の40日間は5分間隔の計測で4608mAh、後半の89日間は30分間隔の計測で1708.8mAh、合わせて6316.8mAhを消費したことになる。単二アルカリ電池の容量の目安が5700~7700mAh程度とされていることから、概ねメーカーからの参考値に近い結果が得られた。一方、長期観測を目的とする場合は、129日の計測期間は不十分である。センサノードのメンテナンスが年に1回程度必要であることから、屋外での耐久性を考慮して2~3年運用できるバッテリーの設計が必要であると考えられる。なお、この実験期間中のセンサノードケース内の温度は-6°C~40°C、湿度は34%~98%を示したが、通信機の故障などの障害は確認されなかった。

c) フルメッシュネットワークのロバスト性

フルメッシュネットワークの特長であるロバストなネットワークを構築するためには、各センサノードは複数のセンサノードと通信が行える環境が好ましい。そこで、実験期間中にセンサノード間で行われた通信の状況を表-4に、図-7に送信の割合が最も高かった通信経路を示す。表-4において、送信側はNo.1~No.14、受信側はNo.0~No.14とし、各センサノード間で行われた通信の割合を示した。例えば、送信側センサノードのNo.1の場合、No.13へのデータ送信が42%と最も高く、次いでNo.11の26%、No.10の10%と続く。表中の着色箇所は送信側センサノードに対する各受信側センサノードの受信割合が10%以上の場合を示しており、一印は通信が行われなかったことを示している。なお、受信側のNo.0は基地局のことを指す。この表より、基地局と直接通信が行えたのはNo.12のみであることが確認された。高速道路の非常電話は通常1km毎に設置されており、基地局は電源供給の必要性から非常電話付近に設置した。この場合、非常電話間のちょうど中間の500mまでの無線通信が可能であれば、沿線全てののり面でのシステム構築が可能となる。そこで本実験ではその点を考慮して、基地局とのり面の距離を450m程度離すことでその通信環境を検証した。その結果、フルメッシュネットワークの特長を生かすためには、複数のセンサノードが基地局と通信できる環境が好ましく、No.12のみが基地局と通信している本実験ではその条件を満たしていないことが確認された。

一方、No.12以外の中継機であるNo.13およびNo.14の受信側に着目すると、いずれも複数のセンサノードのデータの中継しており、中継機としての役割を果たし

表-4 センサノード毎の送受信の割合

	送信側センサノード(No.)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100%	-	-
1	-	25%	10%	-	-	-	-	-	2%	3%	4%	-	1%	-
2	6%	-	4%	2%	-	-	1%	-	2%	2%	4%	-	-	-
3	6%	15%	-	7%	-	2%	3%	6%	3%	3%	4%	-	-	6%
4	1%	1%	2%	-	-	-	2%	5%	2%	1%	1%	-	-	3%
5	-	-	-	-	-	-	1%	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	1%	-	4%	13%	-	2%	-	-	-	1%
7	-	1%	2%	6%	-	15%	-	12%	-	2%	5%	-	-	4%
8	-	-	1%	-	3%	1%	1%	-	1%	-	1%	-	-	1%
9	3%	4%	18%	5%	-	1%	-	13%	-	7%	4%	-	-	-
10	10%	14%	7%	10%	3%	20%	16%	10%	4%	-	1%	-	1%	18%
11	26%	28%	30%	32%	-	17%	35%	23%	25%	17%	-	-	17%	16%
12	8%	2%	1%	5%	-	-	1%	-	2%	2%	49%	-	82%	-
13	42%	11%	7%	-	-	16%	-	60%	54%	26%	-	-	-	52%
14	-	-	19%	34%	93%	44%	23%	18%	-	7%	1%	-	-	-

着色箇所は送信側センサノードに対する各受信側センサノードの受信割合が10%以上の場合を示しており、一印は通信が行われなかったことを示している。

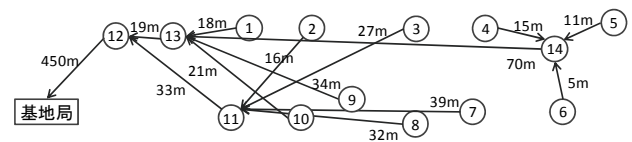


図-7 ネットワーク・トポロジー

ていることが確認された（図-7参照）。特に、基地局から最も離れているNo.5はNo.14への送信が全体の90%を占めていることから、No.14の中継機としての役割は大きい。No.5は他のセンサノードとの見通しが無かったことから、その間の見通しが確保できる位置にNo.14を設置した。No.11に着目すると複数のセンサノードからのデータが中継されていることから、No.13のみに通信が集中することなく、分散してデータがNo.12へ送信されていることがわかった（図-7参照）。また、No.12を除いた全ての送信側センサノードが複数のセンサノードへデータを送信できるロバストな環境であることが確認された。更に、複数のセンサノードを中継しながらデータを伝送するマルチホップ型のネットワークが構築されており、フルメッシュネットワークの特長を生かした通信形態になっていることが確認された（図-7参照）。

d) データ回収率

従来の有線による計測の場合、断線や劣化によるデータの欠損やエラーが生じる場合があるが、無線による計測の場合はその障害は発生しない。一方、本システムでは計測データを基地局サーバーでリアルタイムに観測でき、かつバッテリーの消費電流を抑えることを目的としていることから、センサノードにロガー機能を搭載しない設計としている。そのため、センサノードからの通信環境が悪い場合はデータ欠損が生じることとなる。そこで、各センサノードのデータ回収率を求めることで、通信障害に伴うデータ欠損状況を検証する（表-5）。対象期間は通信が安定した計測開始後の2日目12時から40日間とする。表-5より、基地局から最も離れているNo.5の通信が81.1%と相対的に低かったが、それ以外のセンサノードでは85%前後のデータ回収率を示すことが確認された。図-8にセンサノードの通信間距離とその受信割合の関係を示す。No.1および

表-5 センサノード毎のデータ回収率

No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
85.1%	87.3%	86.5%	86.8%	81.1%	83.4%	86.4%
No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14
83.4%	86.2%	84.0%	83.4%	87.0%	85.2%	85.1%

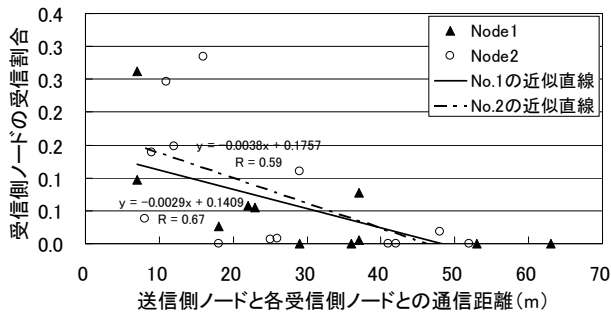


図-8 通信距離と受信割合の関係

No.2のケースを一例として取り上げた。図より、概ね通信距離が長くなるほど受信割合が小さくなることがわかる。一方、その相関性を評価すると、相関係数は0.59および0.67といずれも高くない。このことから、通信コストには、通信距離以外に、見通しも少なからず影響を及ぼしていることが考えられる。図-9は表-5に示したデータ回収率が最も高かったNo.2と最も低かったNo.5の時系列変化と降雨の関係を示した図である。観測期間はサンプリング間隔を30分に変更した41日目0時から89日間とする。降雨データは対象のり面に最も近い気象庁観測所（三木）のデータを採用した。この図より、降雨量とデータ回収率との間に明確な関連性は確認できない。一方、日によって、データ回収率が極端に低くなっている日が確認された。気象観測データより、降雪を含めた降雨との関連性は確認できないものの、観測時期が冬季であることから気温との関連性についても検証を行うこととした。図-10はデータ回収率と日最低気温との関係を示した図である。この図より、気温がマイナスになる付近でやや負の相関が見られる。そこで、観測期間中でデータの回収率が最も低く、気温の低かった2月9日のデータと、降雨量が最も多かった2月20日のデータをそれぞれ図-11および図-12に示す。図-11より、午前0時から13時までのデータ回収率は0%であることから何らかの原因で通信が遮断されていることが分かる。一方、午前0時から7時頃までの気温が0℃以下であることから、低温による影響が考えられるものの、午前8時以降は気温が上昇していることから、気温とデータ回収率には明確な関連性は確認できない。また図-12より、降雨の有無に関わらず、データの回収率が100%を示していることから、降雨との関連性は確認できなかった。以上のことから、本実験においては、降雨や気温の低下などの気象条件がデータの回収率に影響を与える可能性は低いことが確認された。

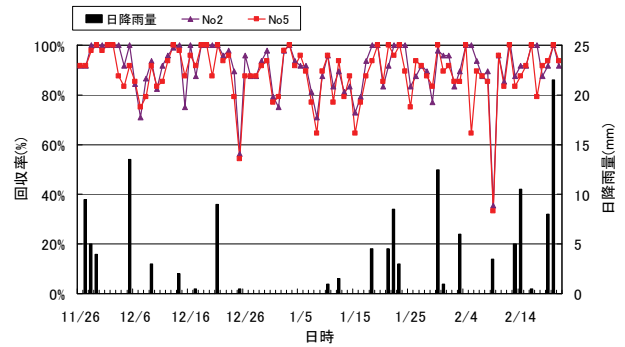


図-9 データ回収率と日降雨量の関係

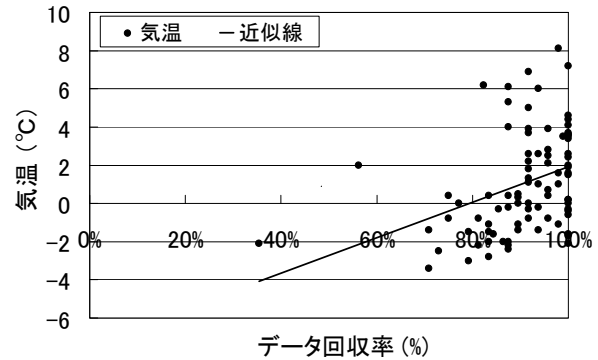


図-10 データ回収率と気温との相関関係

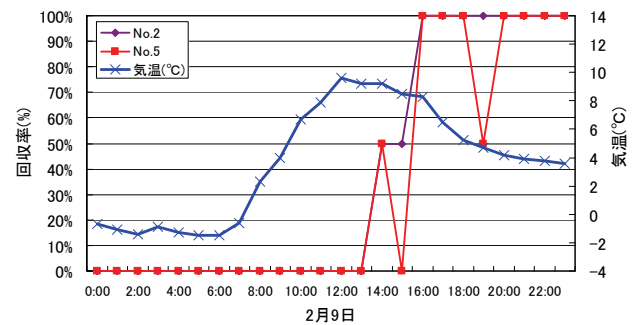


図-11 データ回収率と気温との関係

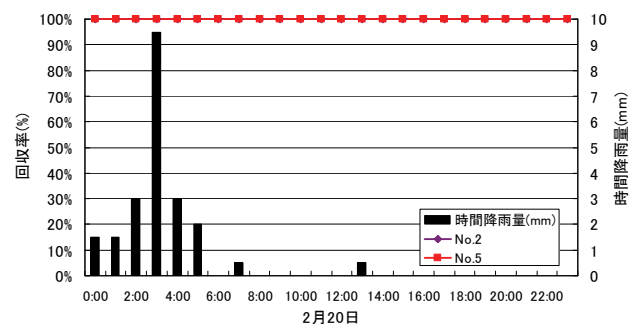


図-12 データ回収率と時間降雨量との関係

(4) 結果

のり面の維持管理を目的にフルメッシュネットワークを用いた監視システム構築の可能性について検討した。その結果、次の知見と課題が明らかとなった。

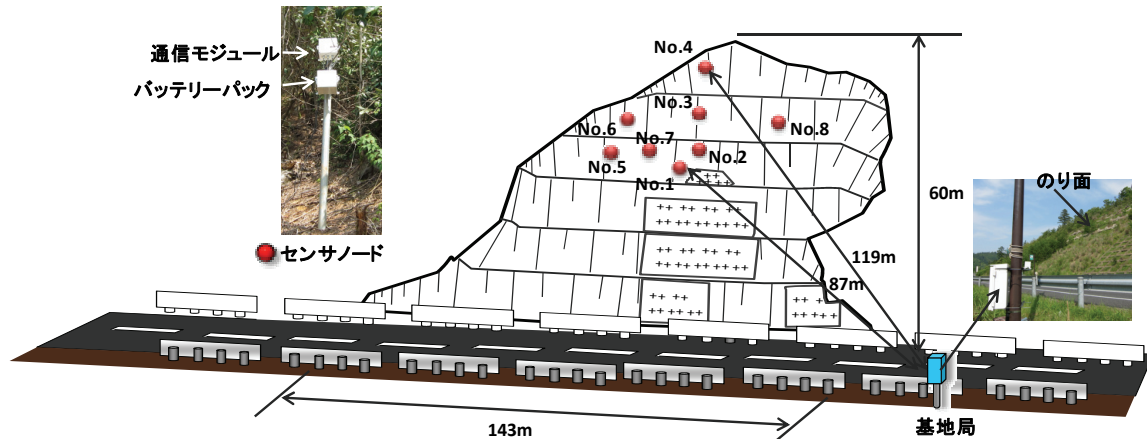


図-13 基地局とセンサノードの設置位置

- a) 耐環境性として、センサノードケース内の温度は $-6^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、湿度は34%~98%を示したが、無線モジュールの不具合などは見られなかった。
- b) スリープ機能によるバッテリーの電流消費量はほぼ設計どおりであった。
- c) 中継機として配置したノードは複数のノードあるいは見通しの悪いノードの中継役として有効に機能した。
- d) 複数のノードを中継しながらデータを伝送するマルチホップ型の通信ネットワークが構築されており、フルメッシュネットワークの特長が有効に機能していることが確認された。また、この通信形態においてデータの回収率は85%前後であることがわかった。
- e) 基地局とノード間の通信環境の不良および無線モジュールの不具合により、ネットワーク構築に1日を要したことから、基地局との通信距離を再考する必要がある。また、よりロバストなネットワークを構築するためには複数のノードが基地局と通信できる環境を設計することが必要である。
- f) 長期運用のためにはバッテリー寿命が4ヵ月の単二アルカリ電池では不十分であり、2~3年の交換サイクルを見込んだバッテリーの再設計が必要である。
- g) 降雨、気温の低下などの気象条件がデータ回収率に与える影響は小さいことが確認された。一方、気象条件とは別の原因で一時的に通信が途絶える現象が見られたことから、基地局とセンサノードとの通信距離など、より安定した通信ネットワークを構築するための見直しが必要である。

5. フルメッシュネットワークの実証実験（その2）

4章のフルメッシュネットワークの性能評価から抽出された課題を基に、基地局とセンサノードの位置関係を再考し、合わせてバッテリーの設計を見直すことでその

性能を再評価する。対象は舞鶴若狭自動車道沿いの切土のり面とし、評価項目は4章と同一とする。

(1) システムの概要

図-13に対象のり面におけるセンサノードと基地局の設置状況を示す。設置位置は道路管理者と協議し、過去に対策工がなされた上部の風化層を対象に配置した。なお、実証実験にあたっては、4章の課題をもとに次の点を考慮した。

- a) 基地局と最も近いノードとの距離が無線モジュールの通信性能を超えないよう、基地局は対象のり面から100m以内の地点に設置する。
- b) ロバストなネットワークを構築するために、複数のノードを基地局と通信できる100m前後の範囲に設置する。
- c) 4章では無線モジュールにXM2110Jを用いたが、筆者らの動作検証において、通信の起動時にセンサノード間の通信が行えない現象が確認されたことから、4章においてプログラムの修正を行っている。ここでは通信性能の評価項目を絞りたいことから、XM2110Jと同等の性能を有し、筆者らの動作検証でその性能を確認しているMPR2600Xを用いることとする。
- d) センサノードのメンテナンスが年に1度程度必要であることから、耐環境性を考慮して約3年の運用が可能なコンパクトなバッテリーパックを設計する。
- e) ノードの設置位置を考慮することで、データ回収率に対する見通しの影響性を検証する。具体的には、No.4について、他のノードとの通信距離を短くする一方、それらのノードとの見通しが効かない位置に設置する。その他のノードは距離は長い、全て基地局と見通せる位置に設置する。

図-14にセンサノードの概要を示す。ケースはIP65の防塵防水規格を有し、結露対策用のフィルタを用いる。バッテリーパックとして7600mAhの容量をもつリチウ

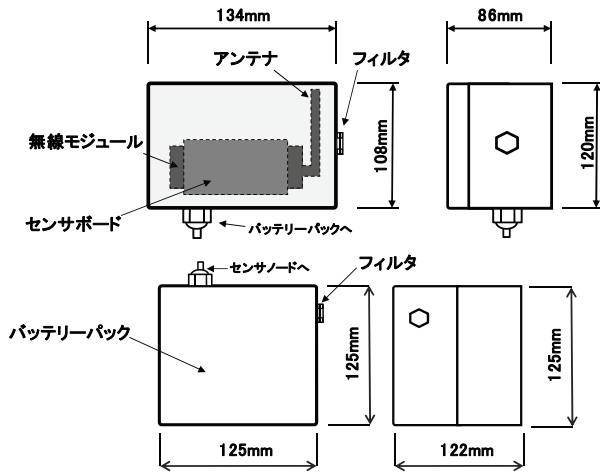


図-14 センサノードの概要図

ムの一次電池を内蔵した。無線モジュールとバッテリーパックで構成されるセンサノードは単管に専用金具で固定し、単管は動かないようにのり面に打設する。ノードは通信環境を考慮してのり面上から高さ100cm前後に設置した。基地局の様子は4章と同様であるが、基地局から最も近いNo.1までの距離は87m、最も距離が遠いNo.4までは119mである(図-13参照)。

(2) フルメッシュネットワークの性能評価

a) フルメッシュネットワーク構築に要する時間

のり面にセンサノードと基地局を設置した後、ネットワークが構築されるまでの通信状況を図-15に示す。サンプリングレートは10分に設定する。横軸に時刻、縦軸にノード番号を示し、図中の黒点が基地局と直接あるいは別のノードを介して通信した結果を示している。ノードはNo.1, 2, 3, 7, 6, 5, 8, 4の順に設置を行い、設置直後にNo.1の通信が確認されてから、5時間半後にNo.4の通信が確認された。このことから、移動および休息時間なども含めて、1ノードあたり約47分で設置から通信までが完了することがわかった。

b) バッテリー寿命

対象のり面での計測環境を表-6に示す。実験期間は2011年4月29日～2012年2月22日であるが、この約10カ月にバッテリーの電圧低下は確認されていない。バッテリーパックの容量が7600mAhであるのに対し、メーカー参考値から換算すると、無線モジュールの消費電流が1年間で21024mAhであることから、理論上約3.6年間の使用が可能である。ただし、センサの消費電流を考慮すると、10分間隔での計測で3年間の使用は難しい。一方、平常時のサンプリングレートを1時間とすれば、豪雨時に10分、更には警報発令時に数分のサンプリングレートを採用したとしても、実用上3年程度の運用は可能と考えら

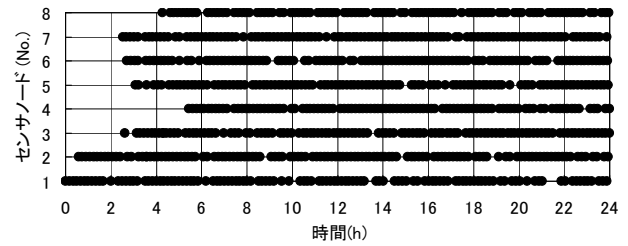


図-15 フルメッシュネットワーク構築に要した経過時間

表-6 計測環境

バッテリー	専用バッテリーパック
計測期間	2011/4/29-2010/2/22 (このうち92日間は基地局の電源不良。ただし、子機の電源は入った状態。)
計測間隔	10分間
ケース内温度(最低/最高)	-6°C/42°C
ケース内湿度(最低/最高)	27%/99%

れる。なお、バッテリーの寿命については平常時に不要なノードを休止させることにより更なる長寿命化を実現させるための研究もなされている¹⁵⁾。実験期間中のノードケース内の温度は-6°C～42°C、湿度は27%～99%を示したが、通信機の故障などの障害は確認されなかった。

c) フルメッシュネットワークのロバスト性

実験期間中にセンサノード間で行われた通信の状況を表-7に、図-16に送信の割合が最も高かった通信経路を示す。送信側はNo.1～No.8、受信側はNo.0～No.8とし、各センサノード間で行われた通信の割合を示す。なお、受信側のNo.0は基地局を指す。この表より、全てのセンサノードにおいて基地局と直接通信が行えていることが確認された(表-7参照)。特に、No.1, 5, 7, 8は基地局との通信の割合が90%以上を占めている。一方、No.4はNo.8との通信が全体の76.1%と高く、それ以外のセンサノードとの通信の割合は低い。この原因は、恣意的にNo.4から他のセンサノードへの見通しを悪くしたことが挙げられる。直線距離で近いNo.3よりも距離が遠いNo.8との通信の割合が高かった理由は、前者が地形形状による障害であるのに対し、後者は樹木、草本が主要因であると考えられる。一般に、周波数の高い2.4GHz帯においても樹間の無線の透過性は高い。一方、コンクリートや土砂地盤などで構成される地形起伏による見通しの悪さは通信の障害になる。このことは3章の通信実験結果からも明らかである。以上のことから、通信距離に加え、地形起伏の見通しの悪さも通信コストに大きな影響を与えることが確認された。

d) データ回収率

各センサノードのデータ回収率を求めることで、通信障害に伴うデータ欠損状況を検証した(表-8)。実験期間中に基地局の電源供給に障害があり、センサノードの通信は継続されているものの、サーバーにデータが収集

表-7 センサノード毎の送受信の割合

受信側センサノード (No.)	送信側センサノード(No.)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	95%	85%	53%	3%	100%	69%	91%	91%	
1	-	10%	12%	1%	-	-	5%	6%	7%
2	1%	-	8%	-	-	-	1%	-	-
3	-	-	-	17%	-	-	1%	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2%	2%	10%	1%	-	17%	2%	2%	
6	-	-	-	-	2%	-	-	-	-
7	2%	3%	17%	-	-	-	6%	-	-
8	-	-	-	76%	-	-	-	-	-

着色箇所は送信側センサノードに対する各受信側センサノードの受信割合が10%以上の場合を示しており、-印は通信が行われなかったことを示している。

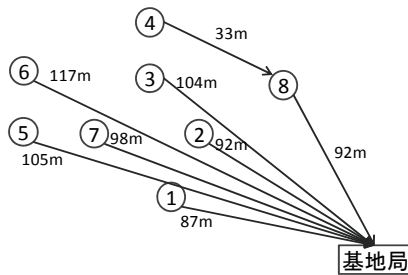


図-16 ネットワーク・トポロジー

表-8 センサノード毎のデータ回収率

No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
91.0%	91.1%	86.6%	74.2%	92.3%	88.9%	91.0%	89.3%

されない期間があった。そこで、本実験の対象期間は連続してデータ収集が行えた、2011年10月23日から2012年2月22日の122日間とする。表-8より、No.4を除く全てのセンサノードで86%～91%の回収率を示した。一方、No.4については74.2%と相対的に低い値を示した。この原因としてc)の結果にも表れている他のセンサノードとの見通しの悪さが挙げられる。対策としては、4章で示したNo.5に対するNo.14の中継機の役割と同様、No.4が設置されている直下の小段付近に中継機を設置することで、No.3、No.6およびNo.8との通信コストを小さくすることが挙げられる。

(3) 結果

4章の課題を基にフルメッシュネットワークの性能を再度評価した結果、次の知見と課題が明らかとなった。

- 複数のセンサノードが基地局と通信できる環境を構築することで、ネットワークの構築に要する時間を大幅に短縮できることが確認された。
- センサノードケース内の温度が -6°C ～ 42°C 、湿度が27%～99%において無線モジュールの障害などは確認されなかった。
- 通信コストには通信距離以外にも見通しの影響が大きいことがわかった。特に、地形起伏の影響による見通しの悪さは、通信距離よりもデータ回収率に影響を及ぼすことが明らかとなった。従って、ネットワーク構築の

際には、地形起伏の影響によってノード間の見通しが悪い場合は、中継機により通信コストを小さくすることが重要である。一方、見通しが良ければ、メーカーの仕様である100m程度の通信が可能であることがわかった。

- データの回収率は4章と比較すると若干高めの86%～91%という結果になったが、これはマルチホップ型の通信形態ではなく、基地局とノードが直接通信する環境であったことも一因と考えられる。

6. 結言

本研究では、数少ないフルメッシュネットワークの通信アルゴリズムを有する開発用無線モジュールを用いて、のり面を対象としたシステム構築の可能性を実地的見地から評価した。この結果、のり面での計測において、スリープ機能を用いた長期運用のためのフルメッシュネットワークの有効性が明らかとなった。

3章において通信モジュールおよびフルメッシュネットワークの基本性能を把握した。4章では屋外仕様のセンサノードを開発し、のり面にて実証実験を行った。その結果、フルメッシュネットワークの特長である複数のノードとの通信が行えるロバスタなネットワークであること、マルチホップ通信により、対象範囲を限定することなくネットワークが構築できることを明らかにした。5章では、短時間でロバスタなネットワークを構築するための設置手法を検討するとともに、耐環境性を考慮したコンパクトなバッテリーパックを設計することで、現場で長期運用が可能なフルメッシュネットワークシステムを実現した。

一方、無線通信におけるデータ回収率は74.2%～91.1%と100%に近付けるためには課題が残る。対策としては、ノード間のパケット通信レート（ルートアップデートタイム）をより短くすることで、ノード間の同期を取るタイミングを増やし、通信の安定性を確保することが可能となるが、相反してバッテリーの消費が上がる。データ欠損率に対する許容度は監視対象および管理者のポリシーに依存することから、今後はこれらのニーズも考慮した最適なフルメッシュネットワークの設計が必要となる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、実証実験の現場を提供頂いた、西日本高速道路(株)福岡高速道路事務所および福岡山高速道路事務所の関係者の皆様に多大なるご協力を頂きました。また、本研究の一部は国土交通省・建設技術研究開発助成金（H23実用化研究開発公募）によるものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 北村良介：降雨時の斜面モニタリングと崩壊予測技

- 術の現状, 土と基礎, Vol.55, No.9, pp.1-3, 2007.
- 2) 天野淨行, 松山裕幸, 足立智之: 土構造物のメンテナンス, 土と基礎, Vol.54, No.6, pp.59-66, 2006.
 - 3) 大津宏康, 前田良刀, 竹國一也, 米澤裕之, 高橋健二, 矢部満: タイと日本との自然斜面崩壊発生要因に関する比較検討, 土木学会論文集 C, Vol. 67, No. 3, pp.387-398, 2010.
 - 4) 池川洋二郎, 細谷真一: 地盤環境のモニタリングの広域化とコストダウンのための無線センサネットワークの開発と検証, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演, pp.433-438, 2008.
 - 5) 西山哲, 大西有三, 矢野隆夫, 山本剛, 西川啓一: リアルタイム岩盤斜面モニタリングネットワークシステムの研究, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演, pp.439-442, 2008.
 - 6) Ramesh, M. V. : Real-time wireless sensor network for landslide detection, *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pp. 405-409, 2009.
 - 7) Tu, X. B., Kwong, A. K. L., Dai, F. C., Tham, L. G. and Min, H. : Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides, *Engineering Geology*, Vol. 105, pp. 134-150, 2009.
 - 8) 小山倫史, 高橋健二, 西川啓一, 大西有三: ゲリラ豪雨による斜面安定性評価のためのリアルタイム雨量計の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.161-67, 2009.
 - 9) 深川良一, 酒匂一成, 里見知昭: 表層すべり型斜面崩壊に対するモニタリングシステムの現状と新たな試み, *Journal of MMIJ*, Vol.126, pp.49-57, 2010.
 - 10) 藤田行茂, 湯尻克宏, 横尾裕, 小泉圭吾, 上出定幸: 簡便型ワイヤレス現場計測手法及び実用システムの開発, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008, pp.147-150, 2008.
 - 11) 松村謙治, 名合牧人, 志波由紀夫, 青木智幸, 澤田茉伊, 武田幸司, 藤田行茂, 小泉圭吾: 大規模地下空洞の情報化施工における無線センサの利用, 第 65 回土木学会年次学術講演会, VI-492, 2010.
 - 12) 阪田史郎: ユビキタス技術センサネットワーク, p.8, オーム社, 2006.
 - 13) XMesh 簡易設置マニュアル, p.15, Crossbow (株), 2006.
 - 14) 宮本哲: センサ・データの取得からノード間の送受信までをプログラミング, *Design Wave Magazine*, No.95, pp. 56-77, 2005.
 - 15) Hirata, K., Yoshitake, M. and Koizumi, K. : Probabilistic Sensor Management Strategy for Slope Disaster Detections, *International Workshop on ICT in Geo-Engineering*, pp. 99-106, 2012.

(2012.6.27 受付)

EXPERIMENTAL RESEARCH TOWARD PRACTICAL USE OF WIRELESS SENSOR NETWORK FOR SLOPE DISASTER MONITORING

Keigo KOIZUMI, Yukishige FUJITA, Kenji HIRATA,
Kazuhiro ODA and Sadayuki KAMIDE

These days, slope disasters occur due to unexpected heavy rains. Expressways that play an important role as a main lifeline for emergency basis should be protected from the disasters. The purpose of this project is to develop multipoint monitoring system for the slope disaster prevention using wireless sensor network. It is the future that the system can perform not only disaster detection but also hazard assessment by three steps, that is "safe", "caution necessary" and "dangerous". In addition, long-term operation without battery exchange is possible and there is no limitation of a slope size for the monitoring. Here we focus on the evaluation of wireless communication performance of the wireless sensor network called mesh-network by primary experiments and demonstration experiments on the slopes. It is confirmed that time required for constructing the network is sharply shortened when two or more sensor nodes can communicate with the base-station. Battery life can maintain for three years by using the developed battery pack. The visibilities among the sensor nodes strongly affect the data recovery rate compared with the effect of the distance among the sensor nodes. To solve the problem, the communication cost can save by installing relay nodes among the sensor nodes. On the other hand, when the visibility between sensor nodes is high, not less than 100m communication distance is possible, and the data recovery rate of 90% is realized. The tolerance to a data deficit rate is dependent on a slope condition and policy of the road administrator. Therefore, the design of the optimal mesh network system in each slope is a future subject.