

## アドホックネットワークにおける障害管理の 方式提案

千田修一郎<sup>†</sup> 西山博仁<sup>†</sup>

アドホックネットワークシステムでは、多数のノードが広域に配置されるため、障害発生時の保守に対する労力が増大するという課題がある。そこで、運用中に障害管理情報を収集・解析し、保守労力を削減する障害管理機能を提案する。本稿では、障害要因を保守方法の異なる4つに分類し、これらを特定する障害管理情報の収集方法および障害判別について述べる。

## A Proposal of a Fault Monitoring System for Ad-hoc Networks

Shuichiro SENDA<sup>†</sup> and Hirohito NISHIYAMA<sup>†</sup>

A lot of nodes are distributed widely in ad-hoc network systems. An issue is that a lot of labor is necessary to do maintenance when faults occur. We propose a fault monitoring system that collects and analyzes information for maintenance during system operations to cut down on labor for maintenance. In this paper, we classify causes of faults into four kinds depending on ways of maintenance. And we describe methods of collection and discrimination of the causes of the faults.

### 1. はじめに

アドホックネットワークシステムでは、電池で駆動する複数の無線端末（以下、ノード）が中継経路を自動的に構築して通信する。アドホックネットワークシステムの敷設には、通信ケーブルや電源ケーブルが不要なので、屋外の監視制御システムへの適用が期待されている。

その一方で、ノードが広域に配置されるため、保守を行うには多くの時間と労力を要するという課題がある。例えば、あるノードが通信不能になるという障害が発生した場合、障害要因を特定するために、個々のノードの稼働状態の調査や、経路上の通信状態の計測を行う必要がある。

そこで本稿では、アドホックネットワークシステムの保守の労力を削減するための機能としての障害管理機能を提案する。本機能は、保守方法によって分類された4つの障害要因を特定するのに必要な情報（以下、障害管理情報）を各ノードから収集し、障害の検知と要因の判別を行う。

### 2. 対象システム

本稿が対象とするアドホックネットワークシステムの一例を図1に示す。また、図1のアドホックネットワークシステムの構成要素を表1に示す。

管理センターとシンクノードは広域網を介して接続されている。シンクノードと中継ノード、センサノードはアドホックネットワーク技術により接続されている。

対象のアドホックネットワークシステムでは、センサノードが監視対象からセンシングした情報を、管理センターが定期的に収集する。この際、天候の変化、草木の成長、建物の建設が原因で、一部の経路の通信環境が悪化する可能性があるため、冗長な中継ノードを配置し、別の経路を用いてセンシング情報を収集できるようにしている。

<sup>†</sup> 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所  
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

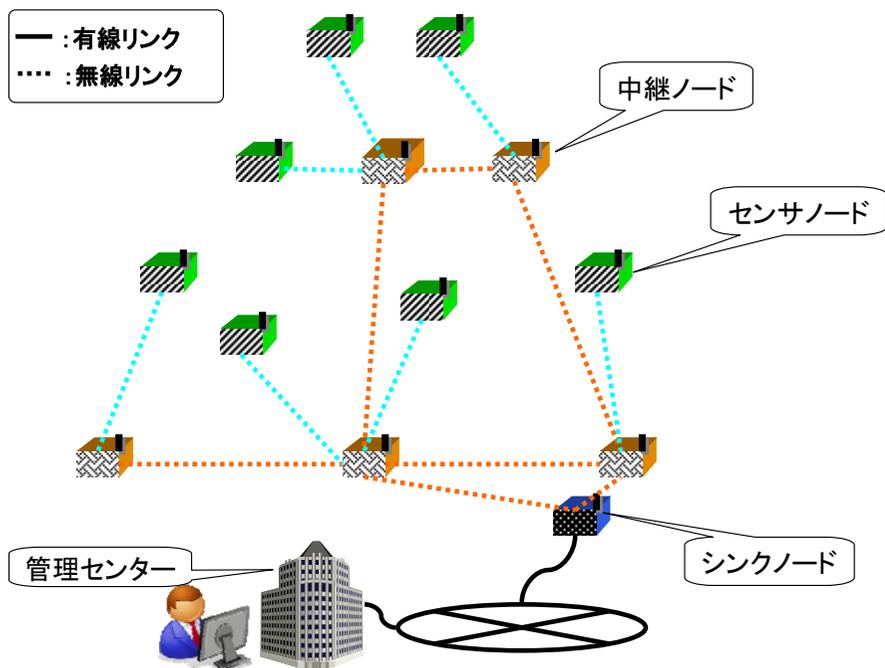


図 1 対象のアドホックネットワークシステムの例

表 1 対象のアドホックネットワークシステムの構成要素

種類	役割
管理センター	システム全体を制御する。センシング情報を収集し、監視対象の状態監視を行う。
シンクノード	中継ノード、センサノードと共にアドホックネットワークシステムを構築する。管理センターと広域網で接続し、管理センターの指示に応じて、センシング情報の収集や、管理センターへの送信を行う。
中継ノード	シンクノードとセンサノードの間の通信を中継する。
センサノード	自ノードに搭載しているセンサから計測値（センシング情報）を取得し、センシング情報をシンクノードへ送信する。

### 3. 保守の定義

保守とは、センシング情報の収集ができるように、システムの信頼性を保つことである。本稿では、システムの信頼性があることを、システムが定める通信性能やノードの状態がシステム要件を満たしていることとする。

#### 3.1 保守フロー

図 2 にシステム管理者が実施する保守フローを示す。システム管理者が障害発生を検知したら、どこでどのような障害が発生しているか障害解析を行い、障害の種類に応じた保守を実施する。

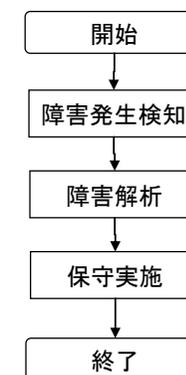


図 2 保守フロー

#### 3.2 障害発生検知

以下の状態の発生を検知することを障害発生検知と定義する。

- ① センシング情報を取得できない状態  
シンクノードがセンサノードと通信ができず、センシング情報を取得できない状態。シンクノードやセンサノードの故障、通信経路上のトラブルなどいくつかの要因が考えられる。
- ② システム要件が定める性能を満たさない状態  
センシング情報を取得できるが、通信品質の低下や冗長性の不足など、システムで定義した性能を満たすことが出来ない状態。例えば、草木の成長や遮蔽物の設置など

により電波伝搬環境が悪化して通信の成功率が下がった場合や、冗長経路上の中継ノードが故障して複数の通信経路が確保出来ない場合などが該当する。

### 3.3 障害解析

障害解析は、障害管理情報から障害要因と障害箇所を特定することである。障害要因は表 2に示す障害が発生した要因で、どのような保守を実施するかを決定する情報である。障害箇所は障害が発生しているノードもしくはノード間の通信路（以下、リンク）で、どこで保守を実施するかを決定する情報である。

表 2 障害要因

障害要因	障害要因の説明
電池切れ	ノード本体に内蔵している電池電圧が低下しており、センサやマイコンを正常に動作させることができない。
ノード故障	通信に関するデバイスが故障しており、通信ができない。
電波伝搬環境の悪化	通信環境が悪化して通信時の電波強度が弱くなり、通信に失敗しやすくなる。
電波干渉	対象のアドホックネットワークシステム外から電波が送信されており、通信パケットのデータが破壊される。

### 3.4 保守実施

表 3に本稿が対象とする保守方法を定義する。システム管理者は、保守の際に、表 3のいずれかの方法を実施して、システムの信頼性を回復する。

表 3 保守方法

保守方法	説明
電池交換	ノード本体に内蔵している電池の出力が低下したとき、デバイスを駆動させられなくなるため、新しい電池に交換する。
ノード交換	通信に関するデバイスが故障すると通信不能となるため、ノード自体を交換する。
中継ノード追加	十分な電波強度が得られず、通信エラーとなるため、十分な電波強度で通信できるよう、中継ノードを追加する。
チャンネル変更	システム外から発せられているノイズにより、通信エラーとなるため、電波干渉の起こらない周波数帯に変更する。

### 3.5 保守効率化の課題

障害が発生した後、速やかに障害発生検知して、保守実施の方法を区分するための障害解析を行う必要がある。しかし、ノードが広域に配置されているため、障害解析に多くの労力と時間が必要となる。そのため、管理センターにおいて、保守に必要な情報を収集・解析する方法が必要となる。

## 4. 障害管理機能の提案

本節では、保守効率化の対策として、アドホックネットワークシステムを対象とする障害管理機能を提案する。

### 4.1 障害要因の特定

#### 4.1.1 保守方法に対する障害要因

対象のシステムで実施する保守方法と対応する障害要因を表 4に示す。

表 4 保守方法と対応する障害要因

保守方法	障害要因
電池交換	(1) 電池切れ
ノード交換	(2) ノード故障
中継ノード追加	(3) 電波伝搬環境の悪化
チャンネル変更	(4) 電波干渉

#### 4.1.2 障害要因の特徴

表 4のそれぞれの障害要因には以下の特徴がある。

##### (1) 電池切れ

電池切れを起こす前に、電源電圧が低下するので、電圧値を適切な頻度で計測すれば、電池切れを検知できる。

##### (2) ノード故障

ノード故障には、通信機能に関わる故障と、通信機能に関わらない故障がある。提案する障害管理機能では、通信に関わる故障のみ対象とする。

ノード故障が発生した場合、故障したノードとは、一切の通信が不能となるため、定期的な通信を行ってれば、連続して通信が失敗することで検知が可能である。

ただし、同様の症状は、ノードは故障していないものの、電波伝搬環境の急激な悪

化により、全ての通信経路が利用できなくなった場合にも見られ、これらを正確に判別することは困難である。

### (3) 電波伝搬環境の悪化

対象のアドホックネットワークシステムは屋外に設置されているため、草木の成長や土木工事による環境変化によって、電波伝搬環境が悪化する場合がある。その結果、RSSI が低下し、パケットロスが増加することで電波伝搬環境の悪化と判別できる。

### (4) 電波干渉

システム外からの同一周波数の電波が送信されると、対象のアドホックネットワーク内のノードが CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) の機能により、所定のタイミングで送信できず CSMA エラーとなることで、電波干渉と判別できる。また、パケットを受信しているノードは RSSI が高いにも関わらず、パケットロスが増加することで、電波干渉と判別できる。

#### 4.1.3 障害判別フロー

全てのノードに対して、図 3 に示すフローを定期的実施することで障害判別を行う。以下に図 3 の(1)~(4)の判別処理について説明する。

- (1) 設定した期間に計測された最新の  $N_1$  個の電圧値の平均値が、ノードの動作が保証される最低電圧以下であれば Yes と判定する。そうでなければ No と判定する。
- (2) 設定した期間に  $N_2$  回連続してシンクノードが送信した定期通信に対して応答できていれば Yes と判定する。応答できていなければ No と判定する。
- (3) 設定した期間に計測された最新の  $N_3$  回のパケットロス率の平均値と、RSSI を平均して算出した RSSI の評価値を算出する。パケットロス率の平均値がシステム要件の定めるしきい値以下で、かつ、RSSI の評価値がシステム要件の定めるしきい値以上なら Yes と判定する。そうでなければ No と判定する。
- (4) (3)で算出したパケットロス率がシステム要件のしきい値以下で、かつ、RSSI の評価値がシステム要件の定めるしきい値以上であれば Yes と判定する。そうでなければ No と判定する。また、CSMA エラーが設定した回数  $N_4$  回以上発生していても、Yes と判定する。

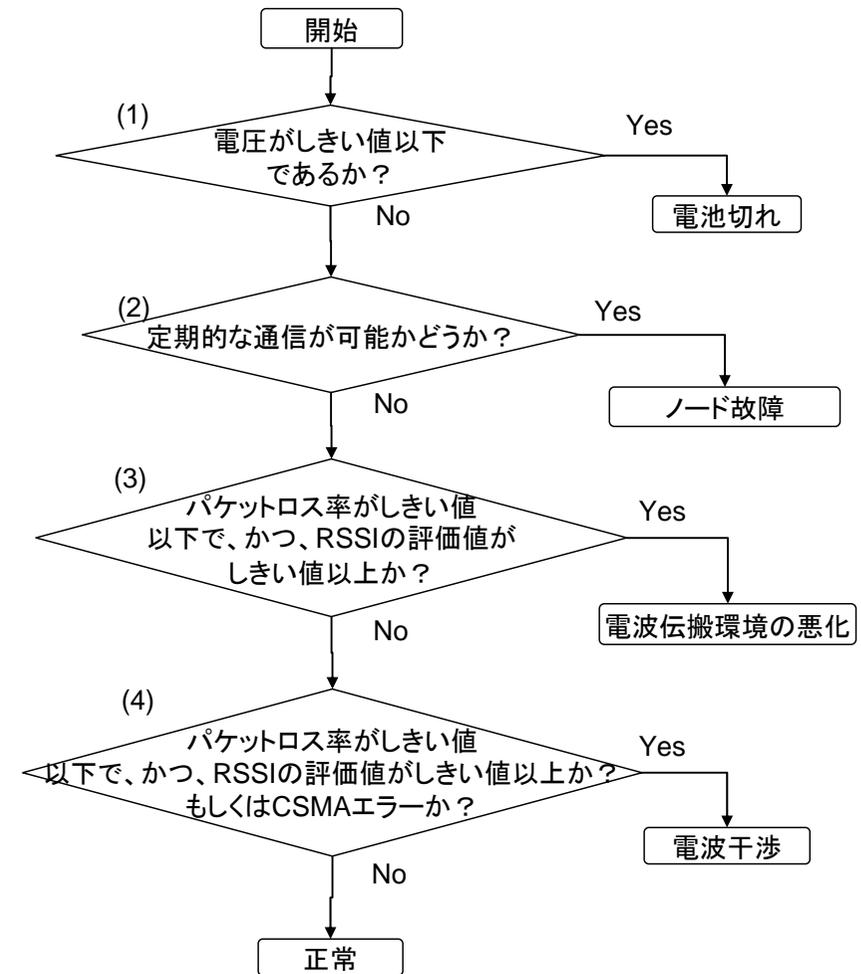


図 3 障害判別フロー

## 4.2 障害箇所

### 4.2.1 障害箇所特定の課題

通信状態が一時的に悪化した場合、管理センターがセンシング情報を取得失敗しても、図 3の障害判別フローでは障害箇所を特定できない場合がある。

例えば、図 4は、センサノードが、管理センターからのセンシング情報の収集の要求に対して送信された応答を、中継ノードB1が中継したときに、一時的に電波伝搬環境の悪化が発生し、通信エラーとなったケースを示したものである。このとき、パケットロス率の増加やRSSIの低下は一時的であるため、図 3の障害管理フローだけでは、中継ノードA1-B1間の通信状態は正常と判定され、具体的な障害箇所を特定できない。

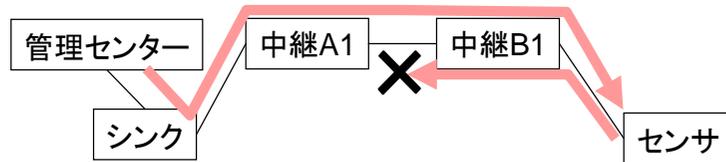


図 4 障害箇所特定が困難なケース

### 4.2.2 障害箇所特定の方法

前述のような課題を解決するために、エラーログを記憶するようにする。通信エラーを検出した場合、通信エラーを検出したノードが、エラーの種類と、通信を識別する識別番号をエラーログとして記憶する。管理センターは、代替経路を使ってエラーログを収集することで、どの通信が失敗したか知ることができるため、障害発生箇所が、通信エラーが発生した通信が利用したリンクか、送信先ノードと特定することができる。

エラーログによる障害箇所特定の例を図 5に示す。図 5では、管理センターはシンクノード、中継ノードA1, B1 を中継してセンサノードと通信する。管理センターが送信した要求に対して、センサノードが応答を送信した後、中継ノードB1が中継したときに通信エラーとなる。このとき、中継ノードB1は通信エラーとなることでエラーログを記録する。管理センターは中継ノードB1のエラーログを収集することで、管理センターからの通信が中継ノードB1により中継されるときに通信エラーとなったことがわかる。

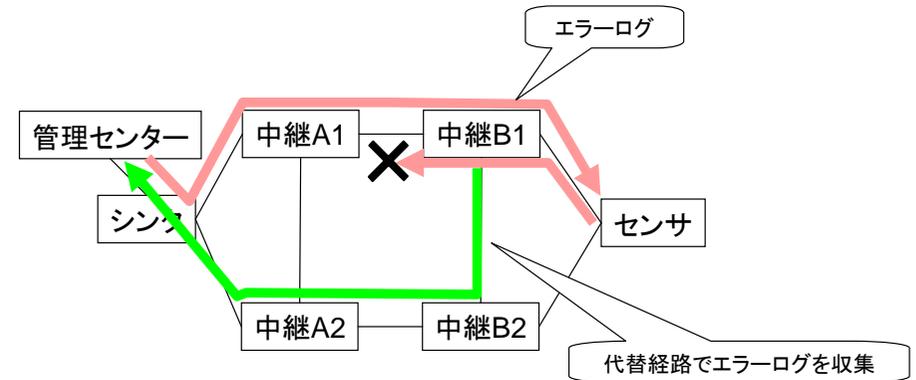


図 5 エラーログを収集する動作の一例

## 5. 障害管理機能の運用

### 5.1 障害管理情報

4.1, 4.2節で示した障害要因と障害箇所の特定に必要な障害管理情報を表 5にまとめる。

表 5 障害管理情報

特定する項目		障害管理情報
障害要因	電池切れ	電池電圧
	ノード故障	応答の有無
	電波伝搬環境の悪化	RSSI, パケットロス率
	電波干渉	RSSI, パケットロス率, エラーログ (CSMA エラー)
障害箇所		経路情報, エラーログ

### 5.2 障害管理情報の計測と収集

障害管理情報の計測および収集のシーケンスを図 6に示す。個々の処理について以下の(1)~(4)で説明する。

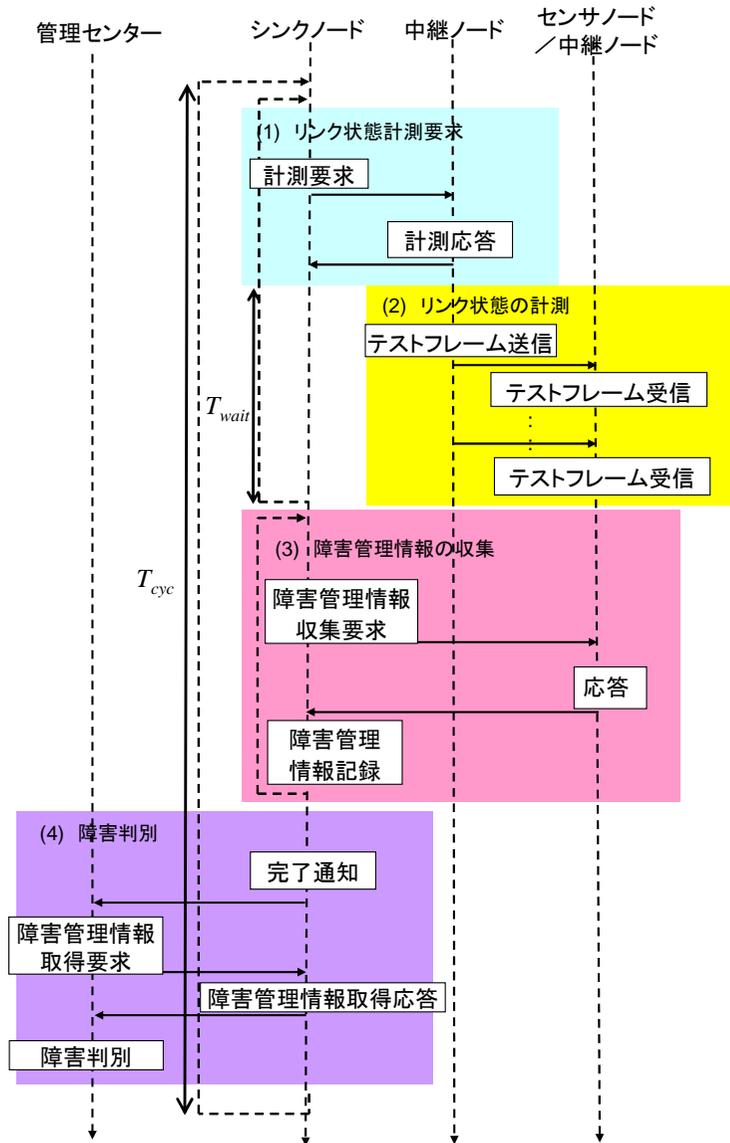


図 6 障害管理情報の計測・収集シーケンス

(1) リンク状態の計測要求

シンクノードが全てのの中継ノードに対して順番にリンク状態の計測要求を送信する。計測要求を受信した中継ノードはシンクノードに応答を送信し、(2)で説明するリンク状態の計測処理を実施する。次の中継ノードへの計測要求は、計測処理の競合を避けるため、 $T_{wait}$ 秒の間隔をおいて送信する。

(2) リンク状態の計測処理

計測応答を送信した中継ノードは、近傍に配置されたノードのリンク状態を計測するため、テストフレームを複数回送信する。テストフレームを受信したノードはリンク状態として、テストフレームのペケットロス率と RSSI を計測し、障害管理情報の一部として記録する。

(3) 障害管理情報の収集

シンクノードは全てのの中継ノードおよびセンサノードに対して障害管理情報収集要求を送信する。障害管理情報収集要求を受信した中継ノードおよびセンサノードは表 5 に示す障害管理情報を含む応答をシンクノードに送信する。シンクノードは受信した障害管理情報を自ノード内の記録領域に記録する。

なお、個々のノードが送信する障害管理情報のうち、電池電圧については障害管理情報の収集に合わせて計測する。エラーログについては、前の障害管理情報の収集処理を行って以降に発生した通信エラーの情報を記録しておくことにする。

(4) 障害判別

管理センターは、シンクノードが発行する障害管理情報収集完了通知を受けて、1シーケンス分の障害管理情報を読み出し、図 3 による障害の有無の確認、および、障害が発生している場合、障害要因の判別を実施する。

図 6 のシーケンスにおいて、シンクノードは明示的な待機時間として、待機時間 $T_{wait}$ と計測周期 $T_{cyc}$ を設計値として持つ。 $T_{wait}$ は、シンクノードがコリジョンを避けるために、中継ノードがテストフレームを送信する間だけ待つ時間である。 $T_{tx}$ を1ホップの通信時間(秒)、 $S_{frame}$ はフレームサイズ(bytes)、 $R_{tx}$ は通信速度(bytes/秒)とすると、

$$T_{tx} = \frac{S_{frame}}{R_{tx}}$$

となる。ここで、 $T_{tf}$ を1ノードが1シーケンスに実施するテストフレームの送信時間、 $N_{tf}$ をテストフレーム送信回数とすると、

$$T_{wait} > T_{tf} = T_{tx} N_{tf}$$

となるように  $T_{wait}$  を設定すればよい。

また、計測周期  $T_{cyc}$  は障害管理情報の収集周期である。 $T_{cyc}$  は以下の(1)~(3)の条件を満たすように設計する。

- (1) システム要件が定める検知時間以内に障害発見するように計測周期を短くする。
- (2) 消費電力を抑制するため、できるだけ計測周期を長くする。
- (3) 各々の通信が干渉しないように全処理の時間より長くする。

検知時間を  $T_{det}$  とし、4.1.3節の  $N_1 \sim N_3$  において、最大のものを  $N_{max}$  とすると、

$$T_{cyc} < T_{det} N_{max}$$

を満たすように設定すれば(1)を満足できる。

ここで、 $M_{router}$  を中継ノードの数、 $M_{sensor}$  をセンサノードの数、 $T_{mea}$  を計測要求の送信および計測応答の受信に要する時間(秒)、 $T_{col}$  を計測結果収集要求および計測結果収集応答に要する時間(秒)とすると、(3)を満たすためには、

$$T_{cyc} > M_{router} T_{mea} + (1 + M_{router}) T_{tf} + (M_{router} + M_{sensor}) T_{col}$$

を満たすように設定すれば(3)を満足できる。ただし、 $T_{mea}$ 、 $T_{col}$  は  $H_{max}$  を最大ホップ数とすると、下式となる。

$$T_{mea} = T_{col} > T_{tx} H_{max}$$

### 5.3 運用例

障害管理機能の机上評価として、図7のモデルトポロジにおける障害検知例を示す。図7において、シンクはシンクノード、中継は中継ノード、センサはセンサノードを表す。

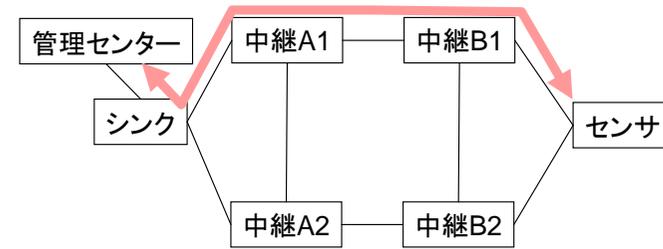


図7 モデルトポロジ

図7では、通常、シンクノードとセンサノードが中継ノードA1、B1を中継して通信する。中継ノードA2、B2は冗長な中継ノードであり、通常の経路が使用できないときに代替経路として使用できる。

- (1) 電池切れが発生した場合

図8に中継ノードB1にて電池切れが発生する例を示す。

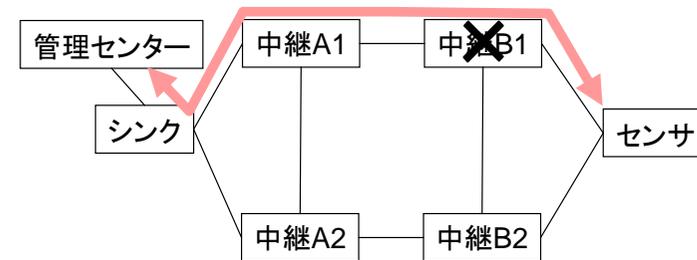


図8 中継ノードB1に障害が発生したとき

中継ノードB1の障害管理情報において、中継ノードB1の電池電圧が時間経過とともに低下している。障害管理機能は中継ノードB1の障害管理情報を障害管理フローに通すことで、電池切れを検知する。

- (2) 電波干渉が発生した場合

図9に中継ノードA1—B1間にて電波干渉が発生した例を示す。

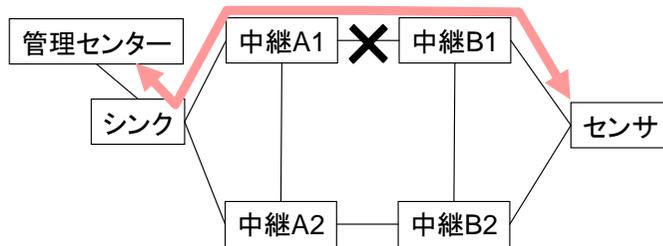


図 9 中継ノード A1—B1 間に障害が発生したとき

中継ノード A1 の障害管理情報において、中継ノード B1 とのリンクにおける RSSI は正常だが、パケットロス率が上がっており、エラーログで CSMA エラーが記録されている。また、中継ノード B1 の障害管理情報において、中継ノード A1 とのリンクにおける RSSI は正常だが、パケットロス率が上がっている。障害管理機能は中継ノード A1 の障害管理情報および中継ノード B1 の障害管理情報を障害判別フローに通すことで中継ノード A1—B1 間において電波干渉が発生していることを検知する。

### (3) 電波伝搬環境の悪化が発生した場合

図 10 に中継ノード B1—B2 間で電波伝搬環境の悪化が発生した例を示す。

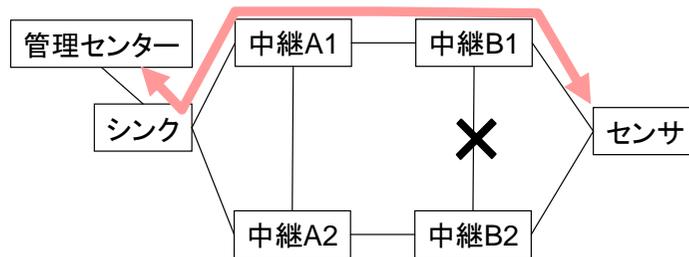


図 10 中継ノード B1—B2 間に障害が発生したとき

中継ノード B1 の障害管理情報において、中継ノード B2 とのリンクにおける RSSI が低下し、パケットロス率が上がる。また、中継ノード B2 の障害管理情報において、中継ノード B1 とのリンクにおける RSSI が低下し、パケットロス率が上がる。障害管理機能は中継ノード B1 の障害管理情報および中継ノード B2 の障害管理情報を障害判別フローに通すことで中継ノード B1—B2 間において電波伝搬環境の悪化が発生していることを検知する。

## 6. 関連研究

アドホックネットワークシステム内のノードの電源状態を監視する方式として、eScan [1] が提案されている。この方式では、まず位置および電池残量の値が近いノード同士で集合を作る。評価値として集合内の電池残量の最小値と最大値を集合ごとに生成する。ネットワークを管理するノードは各集合の評価値を収集し、電池残量を示すマップを得る。

アドホックネットワークシステムに対する障害管理の方式として、Sympathy [2] が提案されている。この方式では、システムを管理するノードが、全てのノードの通信時刻、ノード稼働時間、隣接ノードリスト、ルートテーブル、送信パケット数、受信パケット数を収集する。これらのデータを障害検知のフローでチェックすることにより、ノード故障、ノード再起動発生、隣接ノード設定不良、ルートテーブル設定不良、送信機能の異常、といったノードの動作の不具合の判別を行う。

[1]では、システム内で電池電圧の低下という一部の障害しか検知しない。また、[2]では、ノードの生死やルーティング動作といった内部処理の不具合を検知できるが、受信電波の劣化やノイズといった外部環境の変化が原因の障害を検知できない。

既存の方式では、保守方法を決定するための十分な情報を提供しないという課題があった。提案方式は、保守効率化という観点から、(1) 電池切れ、(2) ノード故障、(3) 電波伝搬環境の悪化、(4) 電波干渉の 4 種類の障害要因を特定できる方式とした。

## 7. おわりに

本稿では、アドホックネットワークシステムにおいて、保守方法を事前に決定することを目的とする障害管理機能の提案をした。本障害管理機能では、検知する障害を、電池切れ、ノード故障、電波伝搬環境の悪化、電波干渉とした。これらの障害判別のためにパケットロス率、RSSI、電池電圧、経路情報、エラーログを障害管理情報として収集する方式および障害判別のフローを提案した。

今後、実機上に本方式を実装し、障害の検知精度を評価する予定である。

## 参考文献

- 1) Y. Zhao, R. Govindan, and D. Estrin, "Residual energy scan for monitoring sensor networks," In Proc. IEEE WCNC (2002).
- 2) N. Ramanathan, K. Chang, L. Girod, R. Kapur, E. Kohler, and D. Estrin, "Sympathy for the sensor network debugger," In Proc. SenSys (2005).