

# アドホックネットワークにおける パッシブ計測による障害管理の方式提案

千田修一郎<sup>†</sup>

シンクノードがシステム全体を管理するアドホックネットワークシステムの障害管理機能として、定期的に各ノードがシンクノードの要求に応じてパケットをブロードキャストし、そのリンク状態を計測する方式が提案されている<sup>3)</sup>。しかし、アプリケーション以外の通信が発生するため、アプリケーション通信処理の圧迫や、電池浪費の課題を生じる。本稿では、障害管理用の通信を抑制しながら、保守に必要な情報を収集する障害管理機能を提案する。提案方式では、アプリケーション通信を用いて、リンク状態を示すパケットロス率とRSSIを受動的に計測し、計測回数が不足するリンクにのみ能動的な計測で補う。これにより、障害管理のための通信量を抑制しながら、計測回数の設計が可能となる。

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

Shuichiro SENDA<sup>†</sup>

In ad-hoc network systems where a sink node controls the whole systems, a fault monitoring function<sup>3)</sup> is proposed, which measures conditions of links using periodical broadcasting by each node. However, because of extra transmissions by the functions except applications, the functions sometimes prevent the applications from transmitting on time, and waste batteries. To reduce transmissions of the fault monitoring function, we propose a way to measure conditions of links for the fault monitoring functions. It measures packet loss rates and RSSIs as link states using communication of applications passively. And it also measures them actively in links where the number of measurement is lacking. The function can design the number of measurement with suppressing network traffic for fault monitoring.

### 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ノードがアドホックネットワーク技術で接続して通信する。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といったインフラ敷設が不要となり、システムの敷設が容易になるため、屋外の監視制御システムへの適用が期待されている。

信頼性の高いアドホックネットワークシステムを維持するには、電池切れ、ノード故障、リンク状態異常を復旧したり未然防止するため、保守を行う必要がある。保守の時期や方法を決定するための方法としてシステムの状態を監視する障害管理機能<sup>3)</sup>が提案されている。この機能は、各ノードにテストフレームと呼ばれるリンク状態計測用のパケットを定期的に送信させ、計測したパケットロス率、RSSI (Received Signal Strength Indicator : 受信電波強度) に加え、電池状態、エラーログ、経路情報をシンクノードが収集することにより、システム管理者の保守作業を支援する。

しかしながら、この機能はリンク状態計測のために付加的な通信を要する。これにより、通信帯域が圧迫されてアプリケーションによる通信処理が遅延したり、付加的な通信でノードの電池が浪費するおそれがある。

本稿では、アプリケーションの通信を利用することで、リンク状態計測の通信量を削減する方式を提案する。提案方式はシンクノードがシステム全体を管理し、定期的にアプリケーションによってシンクノードが他のノードが通信を行うアドホックネットワークシステムを対象とする。アプリケーションによるパケットを受信した際に受信回数とRSSIを計測するパッシブ計測と、計測回数が不足しているリンクに対するテストフレームによる計測であるアクティブ計測を組み合わせで行う。

### 2. 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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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

<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

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。

eScan<sup>1)</sup>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、Sympathy<sup>2)</sup>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。

eScan<sup>1)</sup>とSympathy<sup>2)</sup>の課題を解決するため、障害管理機能<sup>3)</sup>を提案した。障害管理機能<sup>3)</sup>はパケットロス率、RSSI、電池電圧、経路情報、エラーログの5データを収集し、電池切れ、ノード故障、電波伝搬環境の悪化、電波干渉の4種類の障害要因を特定できる方式を提案している。

しかしながら、障害管理機能<sup>3)</sup>はパケットロス率とRSSIを計測するために通信状態計測専用の通信を行っており、通信オーバーヘッドと計測時間が増加する問題がある。

本提案は障害管理機能<sup>3)</sup>において、アプリケーションによる通信をパケットロス率、RSSIの計測に用いることで、通信状態計測専用の通信を削減する。

### 3. 対象のアドホックネットワークシステム

#### 3.1 システム概要

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。

対象とするアドホックネットワークシステムは、シンクノード、中継ノード、センサノードで構成される。草木の成長、建物の建設、ノードの動作不良が原因で、一部の経路の通信環境が悪化しても通信可能にするため、シンクノードとセンサノードの通信経路に冗長な中継ノードを配置し、通信経路を変更してセンシング情報を収集できるように設計されている。

シンクノードはアドホックネットワーク内の全てのノードのアドレスを保持し、通信経路を制御する。シンクノードは定期的にセンサノードにセンシングデータ収集要求を送信し、応答を受信することで、センサノードが監視対象からセンシングした情報を定期的に収集する。

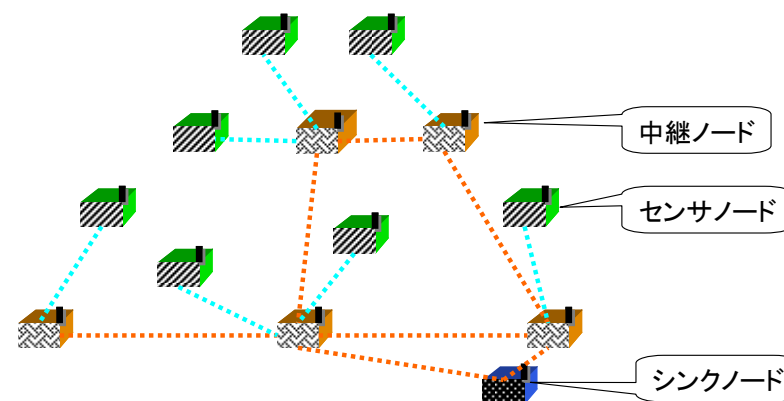


図1 対象のアドホックネットワークシステムの例

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
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し、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。商用電源で駆動する。
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。電池で駆動する。
センサノード	自ノードに搭載しているセンサから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。電池で駆動する。

### 4. 保守

#### 4.1 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をいう。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<sup>3)</sup>。

#### 4.2 障害要因と保守方法

障害解析の目的は、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。障害管理情報は該当する障害要因の障害が発生したかを判定するために、各ノードから収集したデータである。例えば、障害管理機能<sup>3)</sup>によれば、電波伝搬環境の悪化はパケットロス率とRSSIから判定でき、発生している場合は中継ノード追加の保守により対策する。

表 2 障害要因

障害要因	保守方法	障害管理情報
電池切れ	電池交換	電池状態
ノード故障	ノード交換	応答の有無
電波伝搬環境の悪化	中継ノード追加	パケットロス率
電波干渉	チャンネル変更	RSSI

### 4.3 保守の課題

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。

無線通信を用いており通信リソースが限られているため、障害管理による通信回数を抑制することが求められる。また、ノードが電池駆動することから、省電力化のため通信回数を抑制することが求められる。また、アプリケーションの通信を阻害しないよう、障害管理の処理時間を抑えることが求められる。

上記目的を達成するため、少ない通信回数で障害管理を実施する方法が必要となる。

## 5. 障害管理機能

### 5.1 従来方式のリンク状態計測方法

従来の障害管理機能<sup>3)</sup>はアプリケーションの動作の合間に障害管理情報の計測、障害管理情報の収集、障害解析を行うことでアドホックネットワークシステムにおいて保守効率化する機能である。従来方式のリンク状態計測を含めた障害管理情報の計測および収集のフローを図 2に示す。

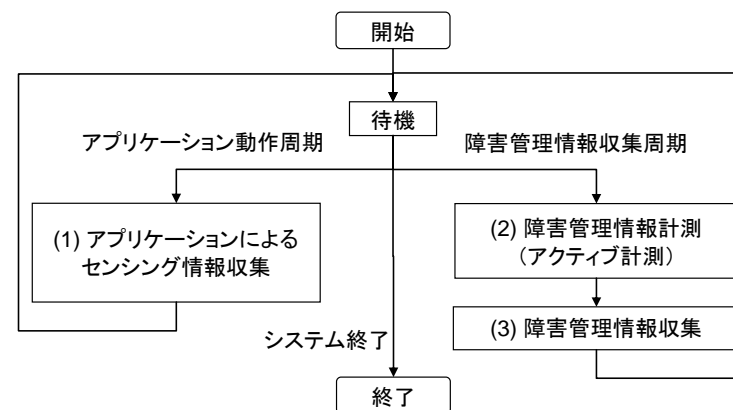


図 2 従来方式の障害管理情報の計測・収集フロー

#### (1) アプリケーションによるセンシング情報収集

アプリケーションによるセンシング情報収集として、シンクノードが各センサノードに対してセンシング情報の収集要求を送信し、応答を受信する。障害管理に関する処理は行わない。

#### (2) 障害管理情報計測

シンクノードが自ノードおよび中継ノードに設定した回数だけのテストフレームの送信を要求する。テストフレームを受信したノードは送信ノードごとに受信回数と平均化した RSSI を記録する。以下では、テストフレームによるリンク状態の計測をアクティブ計測と呼ぶ。

#### (3) 障害管理情報収集

シンクノードが障害管理情報の収集のため、各ノードに障害管理情報の収集要求を送信する。障害管理情報の収集要求を受信したノードは障害管理情報として、RSSI, 受信回数, 電池状態, エラーログを応答として返信する。シンクノードは障害管理情報の収集が完了したら、設計したテストフレームの送信回数と各ノードの受信回数から各リンクのパケットロス率を算出する。

また、収集した障害管理情報からノードおよびリンクにおける障害解析を実施する。

### 5.2 従来方式の問題

従来の障害管理機能<sup>3)</sup>では(2)において、障害管理情報計測ごとにシンクノードおよ

び中継ノードが設定した回数だけのテストフレームの送信を行うため、計測処理に時間を要しアプリケーション通信処理が遅延する問題がある。また、各ノードの電池消費を速める問題もある。

### 5.3 提案方式のリンク状態計測方法

提案する障害管理機能では、アプリケーション通信を活用してリンク状態を計測するパッシブ計測を行うことで、テストフレーム送信による時間、電池の消費を低減する。提案方式の動作イメージを図 3 に示す。

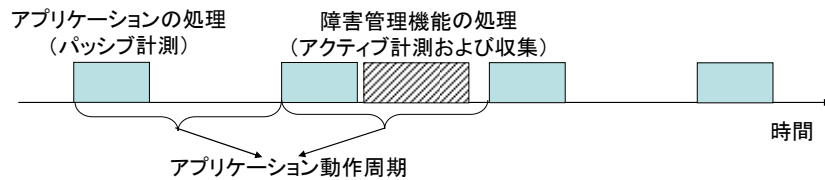


図 3 提案方式のリンク状態計測の動作イメージ

図 3 のように、障害管理機能の処理はアプリケーション処理の合間に実施される。提案方式では、アプリケーション通信のリンク状態を計測することで、テストフレームによるアクティブ計測を短縮し、障害管理機能の処理がアプリケーション処理の合間に実施できる。パッシブ計測を導入したリンク状態の計測フローを図 4 に示す。

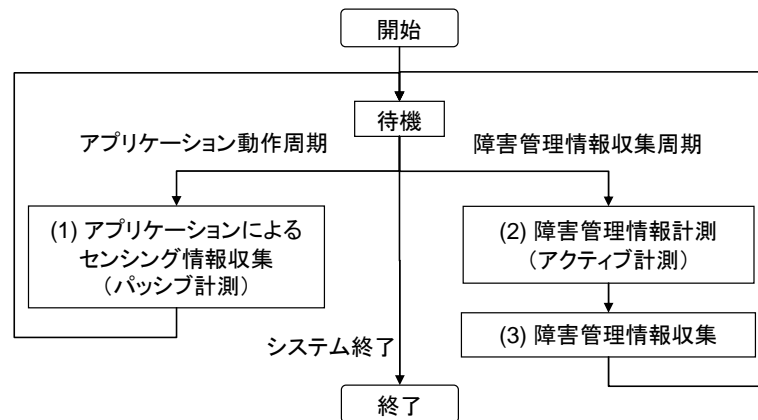


図 4 提案方式のリンク状態の計測フロー

#### (1) アプリケーションによるセンシング情報収集

アプリケーション通信に対して、フレームを受信したノードは図 5 のように自局がフレームの宛先ノードでなくても、RSSI の計測と受信回数のカウントを行う。図 5 において、フレームを受信して、CRC (Cyclic Redundancy Check) により、データが正しいことを確認した後、送信ノードアドレスと RSSI を取得する。障害管理情報として、それまでに該当する送信ノードからの通信で計測した RSSI を平均化して記録する。また、受信回数をインクリメントする。その後、自局宛かを確認し、自局宛なら、上位のアプリケーションに転送し、異なれば棄却する。

送信ノードは送信回数をインクリメントする。

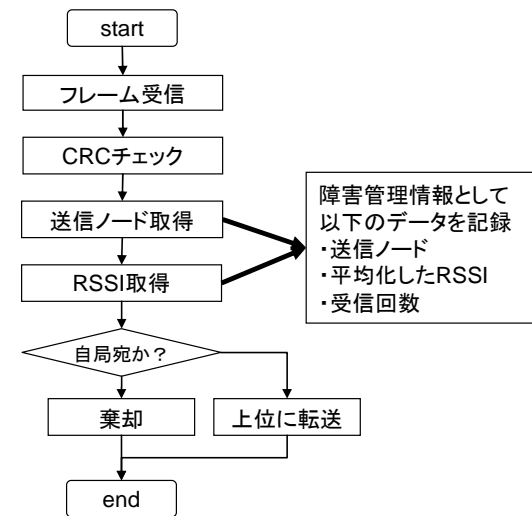


図 5 フレーム受信時のリンク状態計測のフロー

シンクノードは経路情報から各ノードの送信回数をカウントする。例えば、シンクノードが中継ノード 1 を中継してセンサノード 1 に要求を送信し、応答を受信する場合、表 3 に示すように、各ノードが実施する送信回数を更新する。以下では、テストフレーム以外の通信によるリンク状態の計測をパッシブ計測と呼ぶ。

表 3 送信回数のカウント例

ノード	送信回数
シンクノード	n → n+1
中継ノード 1	m → m+2
センサノード 1	k → k+1

## (2) 障害管理情報計測

シンクノードが各ノードの送信回数から各リンクの計測回数を調べ、全リンクの計測回数が設定された最低計測回数以上となるよう、自ノードおよび中継ノードに対して計測要求を送信し、テストフレームを送信させる。例えば、シンクノードと中継ノード 1 とセンサノード 1 からなるシステムで、各ノードの送信回数が表 4 の場合、最低計測回数が 10 回とすると、中継ノード 1 とセンサノード 1 とのリンクの計測回数が 6 回であるので、中継ノード 1 のテストフレーム送信回数は 4 回となる。また、シンクノードとセンサノードとのリンクの計測回数は表 4 および中継ノードへのテストフレーム送信要求の 1 回を合わせて 5 回だから、シンクノードのテストフレーム送信回数は 5 回となる。

表 4 障害管理情報計測時の送信回数のカウント例

ノード	送信回数
シンクノード	2
中継ノード 1	4
センサノード 1	2

計測要求を受信したノードは要求されたテストフレーム送信回数だけテストフレームをブロードキャストで送信する。計測要求およびテストフレームを受信したノードは(1)と同様にリンク状態を計測する。以下では、テストフレームによるリンク状態の計測をアクティブ計測と呼ぶ。

## (3) 障害管理情報収集

シンクノードが障害管理情報の収集のため、各ノードに障害管理情報の収集要求を送信する。障害管理情報の収集要求を受信したノードは RSSI, 送信回数, 受信回数, 電池状態, エラーログを応答として返信する。なお、各ノードの送信回数と受信回数のズレを防ぐため、本フェーズでは、各ノードはリンク状態の計測は行わない。

シンクノードは障害管理情報の収集が完了した後、各ノードの送信回数と受信回数から、下式により各リンクの packet loss rate を算出する。

$$p_{ab} = \frac{r_a + r_b}{s_a + s_b}$$

ただし、 $p_{ab}$  はノード A-B 間のリンクにおける packet loss rate,  $r_a, r_b$  はそれぞれノード A, B の受信回数,  $s_a, s_b$  はそれぞれノード A, B の送信回数である。

## 6. 性能比較

提案方式と従来方式<sup>3)</sup>との性能比較として、障害管理機能による通信処理時間、通信回数、通信全体のうちの障害管理機能による通信オーバーヘッドの比較を行う。

### 6.1 モデルネットワーク

信頼性が高いネットワークシステムを運用するためには、少なくとも 2 通り以上の disjoint な通信経路をとるようにネットワーク設計することが重要である<sup>4)</sup>。disjoint な通信経路とは、互いに共通な中継ノードやリンクを持たない通信経路である。図 6 にシンクノードと他のノードとの通信経路全てに disjoint な通信経路を持つ条件を満たす、性能比較で使用するモデルネットワークを示す。

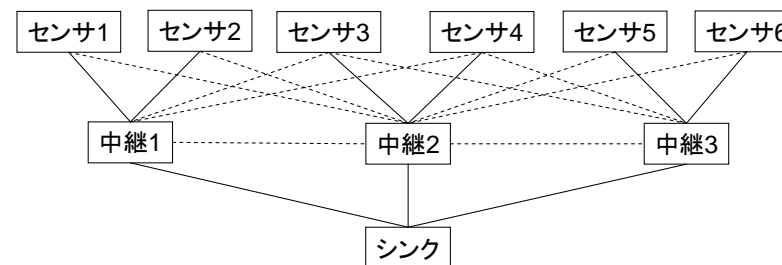


図 6 モデルネットワーク

図 6 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」はセンサノードを示す。実線のリンクは通信経路として使用しているリンクである。破線のリンクは、両端のノードが互いに通信範囲内であり、代替経路として利用可能なリンクである。実線もしくは破線で接続されていないノード同士は通信範囲外である。例えば、シンクノードとセンサノード 1 は中継ノード 1 を中継して通信し、中継ノード 1 が使用不能になったときは中継ノード 2 を代替使用して通信可能である。

## 6.2 通信モデル

モデルネットワークのシステムでは、周期的に図 4の(1)のアプリケーションによるセンシング情報の収集を行う。このフェーズでは、シンクノードが各センサノードにセンシング情報収集の要求を送信し、その応答を受信する。これにより、図 6のネットワークでは、シンクノード、中継ノード、センサノードは、それぞれ 6 回、4 回、1 回の送信処理を行う。

また、周期的に図 4の(2), (3)の障害管理機能の処理を行う。障害管理情報収集周期までに 1 回アプリケーション動作が行われた場合、(2)では、例えば最低計測回数が 10 回とすると、シンクノードは各中継ノードに 5 回のテストフレーム送信を要求する。(3)では、シンクノード、中継ノード、センサノードは、それぞれ 9 回、5 回、1 回の送信処理を行う。

表 5に性能比較で用いるパラメータを示す。

表 5 パラメータ一覧

パラメータ	設定値
障害管理情報収集周期	30 分
最低計測回数	10 回
伝送速度	4800 bps
内部処理時間	1 ミリ秒
フレーム長	1000 bytes
フレーム間ギャップ	32 マイクロ秒

## 6.3 性能比較結果

性能指標として、アプリケーション動作周期に対する障害管理機能の処理時間、中継局通信回数、通信オーバーヘッドの平均値の比較結果を示す。

### 6.3.1 障害管理機能の処理時間

提案方式と従来方式の 1 回の平均の障害管理機能の処理時間の比較結果を図 7に示す。また、図 7中に提案方式による処理時間の削減率を示す。

図 7によると、従来方式では計測時間が一定だが、提案方式ではアプリケーション動作周期が 15 分までは一定で、それ以降増加している。これは従来方式がアプリケーション動作周期に影響なく障害管理機能の通信回数が決まるのに対して、提案方式はアプリケーションによる通信回数によってアクティブ計測が減少するためである。

アプリケーション動作周期が 15 分以下のとき、削減率が約 64%となり、最も高い。これはアプリケーション通信によるパッシブ計測で最低計測回数を上回るため、アク

ティブ計測が完全に省略できるためである。

一方、アプリケーション動作周期が 15 分より大きいとき、提案方式の計測時間が増加している。これは障害管理情報の収集周期に対してアプリケーションによる通信頻度が下がり、アクティブ計測が実施されるようになったためである。このとき、提案方式の効果は小さいもの、帯域に余裕があるため、通信処理の圧迫などの課題は発生しない。

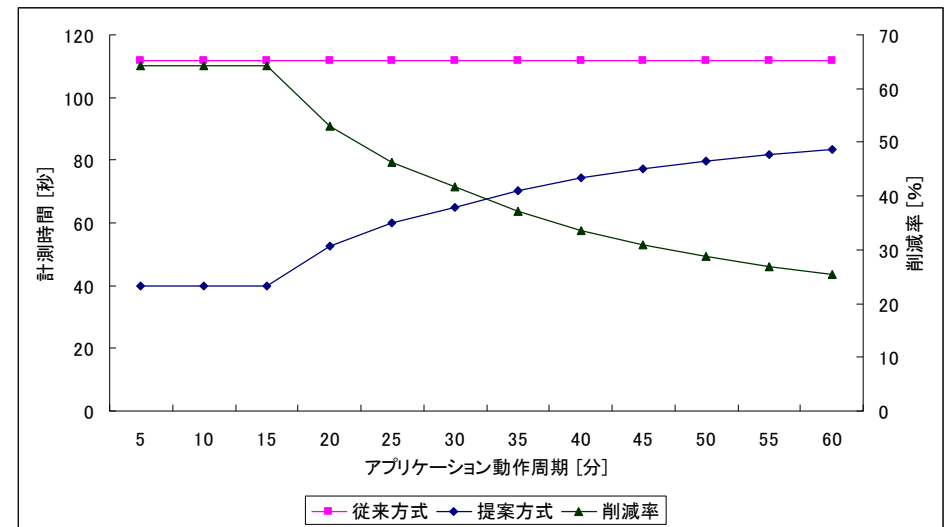


図 7 障害管理機能の処理時間

### 6.3.2 中継局通信回数

1 時間あたりの平均中継局通信回数の比較結果を図 8に示す。

図 8より、従来方式では通信回数が単調に減少するのに対して、提案方式はアプリケーション動作周期が 15 分まで減少し、それ以上で増加する。これは従来方式がアプリケーション通信頻度の減少に合わせて単純に減少するのに対して、提案方式は障害管理機能の通信回数がアプリケーションの通信回数によって変化するためである。

また上記の傾向から、通信回数の削減率はアプリケーション動作周期が 15 分のとき、約 45%で最大となる。

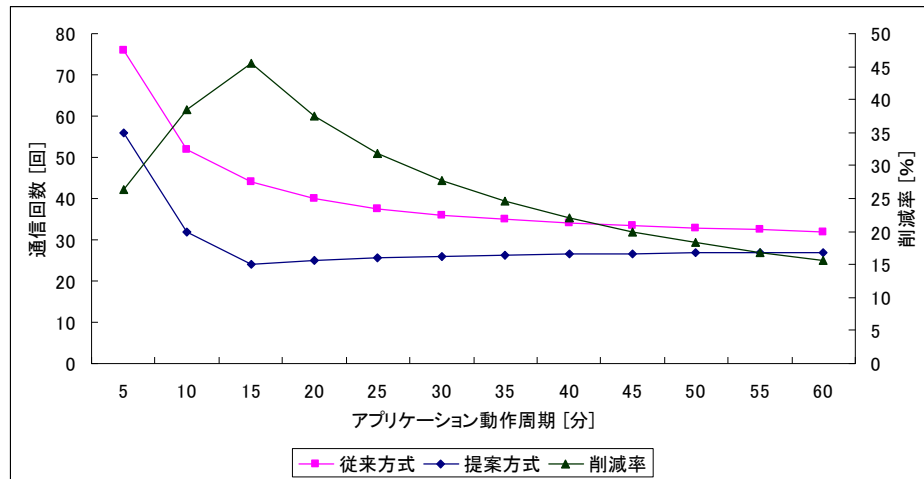


図 8 中継局通信回数

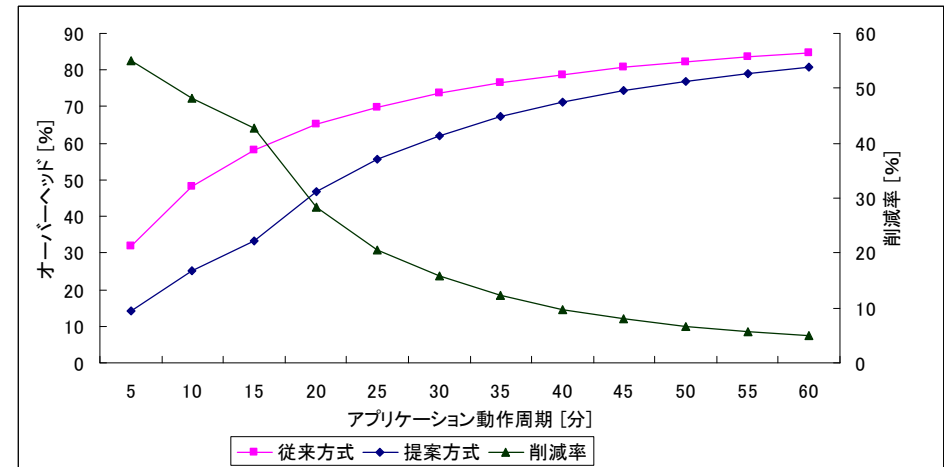


図 9 障害管理機能による通信オーバーヘッド

### 6.3.3 障害管理機能による通信オーバーヘッド

最後に、障害管理機能による通信オーバーヘッドの比較結果を図 9 に示す。

図 9 より、従来方式と提案方式共にオーバーヘッドはアプリケーション動作周期とともに増加する。従来方式では、障害管理機能の通信回数は一定なので、アプリケーションの通信頻度が減少するとオーバーヘッドは増加する。提案方式では、アプリケーション通信周期が 15 分まではアクティブ計測を行わないため、計測情報の収集によるオーバーヘッドのみが発生する。この通信回数はアプリケーション動作周期によらず一定のため、従来方式と同様にアプリケーション通信頻度が減少するとオーバーヘッドは増加する。アプリケーションの通信周期が 15 分より長いとき、アクティブ計測が必要となるため、増加傾向が変化する。

削減率は周期が短いほど高くなり、5 分のとき約 51% となる。これは、アプリケーション動作周期が長いほど、パッシブ計測によるオーバーヘッドの削減効果がなくなるためである。

## 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ための障害管理機能におけるリンク状態の計測方法の提案をした。提案方式では、アプリケーションによる通信を利用したパッシブ計測と、計測回数を補完するアクティブ計測を併用する。これにより、パッシブ計測のみの方式では不可能であった計測回数設計が可能にした。また、従来方式であるアクティブ計測のみの場合と比べて、リンク状態を計測するためのテストフレームの送信を省略できるようになるため、最大で計測時間を約 64%、通信量を約 45% 削減することを示した。

## 参考文献

- 1) Y. Zhao, R. Govindan, and D. Estrin: Residual energy scan for monitoring sensor networks, IEEE WCNC (2002)
- 2) N. Ramanathan, K. Chang, L. Girod, R. Kapur, E. Kohler, and D. Estrin: Sympathy for the sensor network debugger, SenSys, pp. 255-267 (2005)
- 3) 千田修一郎, 西山博仁: アドホックネットワークにおける障害管理の方式提案, MBL 研究会 MBL59, pp. 1-8 (2011)
- 4) S. J. Lee, and M. Gerla "Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks", ICC, pp. 3201-3205 (2001)