

特別研究報告

題目

間欠動作に基づく低消費電力アドホック・メッシュネットワークの
性能評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

譜久島 亮

平成 20 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

間欠動作に基づく低消費電力アドホック・メッシュネットワークの
性能評価

譜久島 亮

内容梗概

無線機能を備えたノード同士が有線回線を介さずに自律的にネットワークを構築するアドホックネットワークにおいては、メッシュ構造が通信信頼性の高いトポロジーと考えられている。しかしながら、メッシュ構造のネットワークは一般に消費電力が大きいため、それを抑制することが重要な課題である。消費電力の削減を目的とした通信方式で、ノードがスリープ状態とアクティブ状態を定期的に繰り返し、スリープ状態で電力消費を最小限に抑える間欠通信が注目を浴びている。本研究で対象とするアドホック・メッシュネットワークは、複数の受信側ノードが間欠的に自身の ID を送信し、送信側ノードがそれを受信することで通信を開始する方式を採用している。本方式は、消費電力の抑制を目指して開発されたものであるが、本方式によって構築されたネットワークの基本性能特性は、現在十分明らかではなく、実装されたパラメータ値も実験的に決められたものである。そこで本報告では、シミュレーションにより、システムの動作を決定するパラメータ値が、パケット収集率やパケット平均伝播遅延、電力消費などの基本性能に与える影響を明らかにする。さらに、得られた基本性能特性に基づいて、基本性能を向上するパラメータの設定方法の指針を示す。

まず、パケット発生率の上昇により、センタ隣接ノードで横向き転送回数の増加や、それに伴うパケットの最大中継回数超過が、パケット収集率の減少、パケット平均伝播遅延時間の増加、消費電力の増大につながることを明らかにした。次に得られた基本性能特性をもとにして、センタノードの間欠周期の設定により、センタ隣接ノードで横向き転送を減少させ電力消費を 70% 削減できることを示した。さらにノードごとの負荷によって間欠周期を個別に設定することでパケット転送の負荷の分散を行い、負荷が分散されたノード全体で消費電力が 10% 削減できることを示した。

主な用語

アドホック・メッシュネットワーク、間欠動作、シミュレーション、性能評価、消費電力

目次

1	はじめに	5
2	アドホック・メッシュネットワークの概要	9
2.1	間欠動作	9
2.2	パケットの中継処理と再送処理	9
2.3	ルーティングプロトコル	10
3	シミュレーションによる性能評価	13
3.1	パケット収集率特性	14
3.2	電力消費特性	17
3.3	パケット伝播遅延特性	19
3.4	負荷の集中がないトポロジにおける基本性能特性	21
4	性能を向上させるパラメータ設定	26
4.1	最大中継回数設定	26
4.2	センタノードの間欠周期の設定	26
4.3	ノードの負荷に応じた間欠周期の設定	30
5	おわりに	37
	謝辞	38
	参考文献	39

目 次

1	メッシュ構造とクラスタツリー構造の比較	6
2	アドホックネットワークにおける非同期間欠通信方式	8
3	パケット送信処理の様子	11
4	隣接ノードの区分と構成情報管理テーブルの例	12
5	ノード数 16 のシミュレーションモデル	13
6	パケット収集率の評価	15
7	パケット破棄回数の評価	16
8	トラヒックの集中による横向き転送の増加	17
9	電力消費特性の評価	18
10	パケット転送回数	19
11	パケット平均伝播遅延時間の評価	20
12	負荷の集中がないノード数 16 のトポロジ	21
13	トポロジの違いによる基本性能特性の違い	23
14	図 12 のトポロジの消費電力の評価	24
15	トポロジの違いによるパケット送信時間とパケット破棄回数 の評価	25
16	最大中継回数による基本性能特性の違い	27
17	最大中継回数 10 の場合	28
18	センタノードの間欠周期が性能に与える影響	29
19	センタノードの間欠周期が 1.5 s の場合	31
20	センタノードの間欠周期が 1.5 s の場合の パケット転送回数	32
21	センタ隣接ノードにおける負荷に応じた 間欠周期の設定	32
22	負荷に応じた間欠周期を設定した場合の 基本性能特性の違い	33
23	負荷に応じた間欠周期を設定した場合の 消費電力の評価	34
24	パケット転送回数	35

表目次

1	パラメータ設定値	14
---	--------------------	----

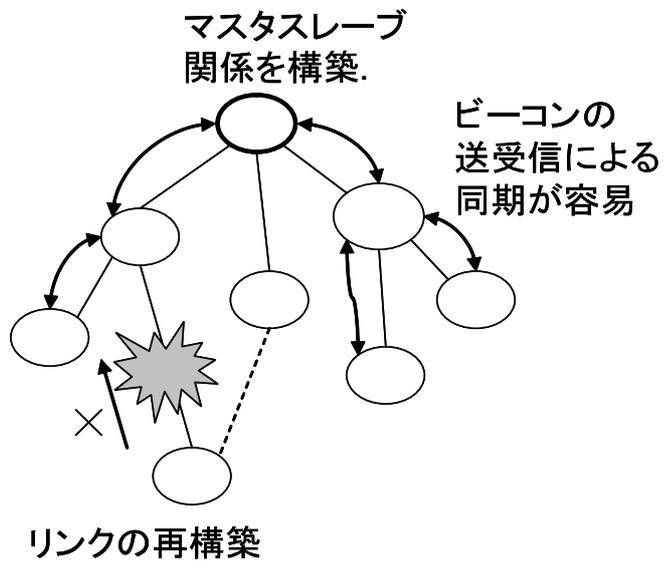
1 はじめに

近年の無線技術の進化と計算機の小型化に伴い、様々な環境下において、通信機能を備えた小型ノードが自律的にネットワークを構築できるアドホックネットワークに関心が集まっている。さらに、センサ機能を兼ね備えたノードによって構成されるセンサネットワークが、災害時の救援活動や有線回路を設置することが困難な環境でのモニタリング、大規模施設内でのセキュリティー管理などで幅広く利用されている。

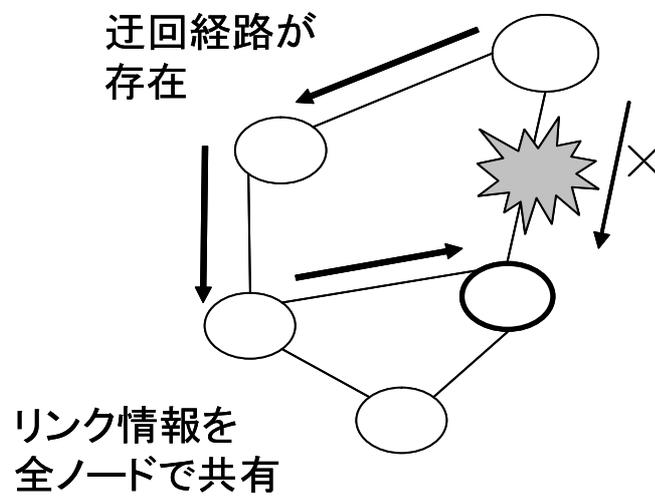
しかし、このような小型の無線ノードはバッテリーによって駆動され、外部からの電源供給を行えない環境下で利用されることが多いため、その低消費電力化が大きな課題である。消費電力を抑制するための通信方式として、ノードに一定周期のスリープ状態と活動状態を設け、活動状態時にノード間での通信を可能にするという間欠動作の通信方式が注目を浴びており、様々な研究がなされている [1, 2, 3, 4]。間欠動作では、ノードがスリープ状態の場合に電力消費を最低限に抑え、周辺ノードから通信要求がある場合に活動状態となり通信を行う。スリープ状態により消費電力が軽減されるが、ノード間で通信を行う際にリンクを確立するための制御を行わなければならない。間欠動作の通信方式は、制御手法により同期式と非同期式に分けることができる。同期式ではリンク確立を容易に行うために、ノード間でビーコンと呼ばれるパケットを定期的に送りあって同期を維持し、非同期式ではノード間の同期を行わない。前者は周期的にパケットを収集するシステムに有利で、後者はパケット収集の頻度が低く、任意のタイミングでのアクセスを行うシステムに有利であることが分かっている。

アドホックネットワークのトポロジの観点から、トポロジがノードの消費電力に与える影響の研究も数多くなされている。ノードが構築するアドホックネットワークトポロジは、大きく分けてクラスタツリー構造とメッシュ構造の2つに分類される。図 1(a) のクラスタツリー構造では、ノードごとにマスタスレーブの関係を保つことが可能で、先に挙げた同期方式の採用が容易であるが、リンク冗長性が低く、ノードが故障した場合や通信路が切断された場合にネットワークの再構築を必要とする。一方図 1(b) のメッシュ構造では、同期方式の採用が困難であるがリンク冗長性が高く通信信頼性がクラスタツリー構造より高い。しかし、リンク情報を全てのノードで共有するための負荷により消費電力が大きくなる [5]。

間欠動作により電力消費を抑制し、低頻度でパケット収集するセンサノードでアドホックネットワークを構築する場合、非同期式の採用が望ましく、パケット収集の高信頼性のためにはメッシュ構造のアドホックネットワークが良い。非同期式のアドホックネットワークシステムに、Low Power Listening (LPL) 方式がある [6]。LPL 方式では、ノードがパケット受信状態とスリープ状態を繰り返す間欠動作を行う (図 2(a))。受信ノード 1, 2 が短い受信状態中に周辺にチャンネルの利用がないかチェックを行い、チャンネル利用がなければスリー



(a) クラスタツリー構造



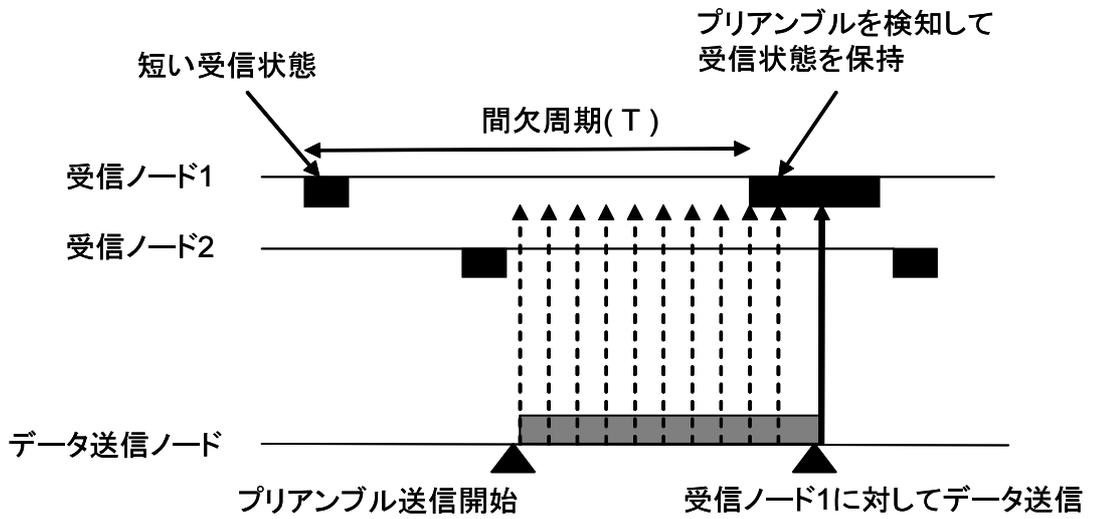
(b) メッシュ構造

図 1: メッシュ構造とクラスタツリー構造の比較

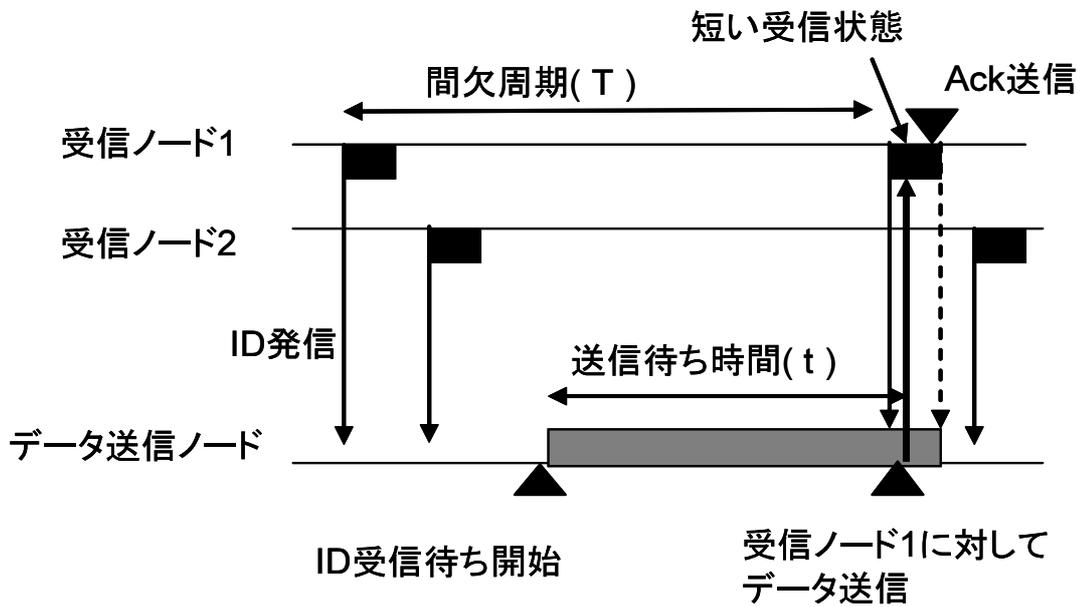
プ状態へ移行する．ノード1にパケットを送信したい送信ノードは，プリアンプルを一定時間送信してパケット送信が起こることを周辺ノードに知らせ，ノード1へパケットを送信する．LPL方式では，送信ノードがプリアンプルを一定時間連続で送信して通信を試みるために，パケット送信時にチャンネルを占有することになる．さらにLPL方式では，特定のノードにしか通信を行えないなど制約が多い．

LPL方式での制限を無くすために考え出された非同期の通信方式として Intermittent ID transmission of Receivers (IIDR)方式がある [7]．IIDR方式では，複数の受信ノード（図2(b)の受信ノード1, 2）が間欠的に自身のIDを送信し，送信ノードがそれを待ち受ける．そして先にIDが届いた受信ノードとの間でリンクを確立し，通信を行なう．IIDR方式では，LPL方式のようにチャンネル占有が起こらず，複数のノードを通信先候補として待ち受けることが可能となるため，通信信頼性を向上できることが期待される．しかしながら現段階では，IIDR方式の基本性能特性は明らかではなく，実装されたパラメータ値は実験的に決められたものである．すなわち，間欠動作の間隔などの値が，ネットワーク遅延や消費電力などのシステム性能に与える影響を明らかにすることは，システムの適用範囲を明らかにするためにも重要である．そこで本報告では，IIDR方式によって動作するアドホック・メッシュネットワークを対象として，その動作を計算機上でシミュレーションすることにより，システムの動作を決定する各パラメータが基本性能特性に与える影響を明らかにする．さらに，より性能を向上させることができるようなパラメータ設定を提案することを目的とする．

以下，まず2章でIIDR方式によるアドホック・メッシュネットワークの動作概要について説明し，3章でシミュレーションによる性能評価を行う．4章では性能を向上させるためのパラメータ設定を提案する．最後に5章で本報告のまとめと今後の課題について述べる．



(a) Low Power Listening(LPL) 方式



(b) Intermittent ID transmission of Receivers(IIDR) 方式

図 2: アドホックネットワークにおける非同期間欠通信方式

2 アドホック・メッシュネットワークの概要

まず、本システムの特徴である間欠動作、パケット中継処理と再送処理、ルーティングプロトコルについて説明する。以降、各ノードから送信されたパケットが最終的に着信する先のノードを目的ノードと呼ぶ。メッシュネットワーク内の各ノードは固有の ID を保持しており、それによって識別される。

2.1 間欠動作

メッシュネットワーク内の各ノードは、パケット受信待ち状態にある場合、図 2(b) で示しているような間欠動作を行う。間欠動作では、各ノードが自身の ID を無線発信し、短い受信待ち状態に移行した後、スリープ状態になる。T 秒のスリープ状態を経て、再び自身の ID を無線発信する。一方、パケットを送信するノードでは、送信待ち時間で周辺ノードからの ID が発信されるのを待ち、送信先として相応しいノードから ID を受信した場合に、そのノードが短い受信状態にあるタイミングでパケットを送信する。受信ノードでは、送られてきたパケットに対する Ack を送信ノードに送り、送信ノードが受信ノードからの Ack を確認すると正常に通信が終了する。図 2(b) では受信ノード 1 と受信ノード 2 が間欠動作を行い、送信ノードが受信ノード 1 からの ID を受信して、受信ノード 1 に対してパケットを送信している。IHDR 方式により送信ノードでは、LPL 方式で用いられていた一定時間チャンネルを占有するプリアンプル送信の必要はない。さらに複数のノードを送信候補として待ち受けることが可能になる。

2.2 パケットの中継処理と再送処理

図 2(b) ではノード間でパケットが送信される様子を示したが、ここではパケットの中継処理と、パケット送信が正常に終了しなかった場合の再送処理について説明する。

図 3(a) では、パケット中継処理の様子を示した。ノード 3 へパケットを送信したいノード 1 は、パケットを中継するノードとして相応しいノード 2 からの ID を待ち受け、ノード 2 へパケットを送信する。ノード 2 は受信パケットのヘッダ情報から受信パケットがノード 3 宛であると判断しノード 3 からの ID を待ち受け、ノード 3 へパケットを送信する。このように各ノードでは、受信したパケットからパケットの最終着信先を判別し、最終着信先が自分でない場合はパケット中継処理へ移行して適切な隣接ノードへパケットを送信していく。

図 3(b) では、パケットの再送処理の様子を示した。ノード 4 は、ノード 5 へ送信したパケットに対する Ack を受信できない場合、次の送信候補であるノード 6 からの ID を待ち受け、ノード 6 へ同じパケットを再送する。このように、パケット送信ノードは送信先ノード

からの Ack を受信することで正常にパケット送信が終了したと判断する．送信先ノードからの Ack が受信できない場合には次の送信候補からの ID を待ち受け，パケットを再送する．

2.3 ルーティングプロトコル

本システムで各ノードは，他のノードへのパケット中継処理を行う．目的ノードまでパケットを迅速に転送するためには，目的ノードまで最短経路となる隣接ノードにパケットを転送することが望ましいが，本システムでは，最短経路でのパケット転送が行えない場合に，メッシュネットワーク内に存在する最短経路以外の迂回経路を導きだし，迂回経路となるノードに対してパケットを転送する [8]．各ノードは，自身の隣接ノードを，目的ノードまでのホップ数別に以下の 3 種類に区分している．図 4(a) でその例を示す．

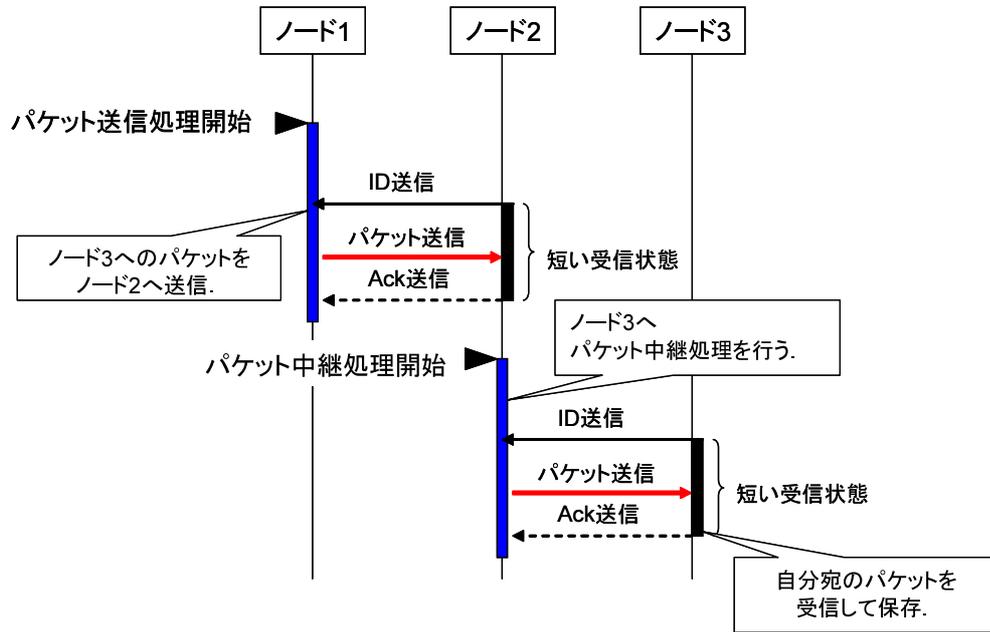
前向き 目的ノードへのホップ数が最短となる隣接ノード．

横向き 目的ノードへのホップ数が最短ホップ数+1 となる隣接ノード．

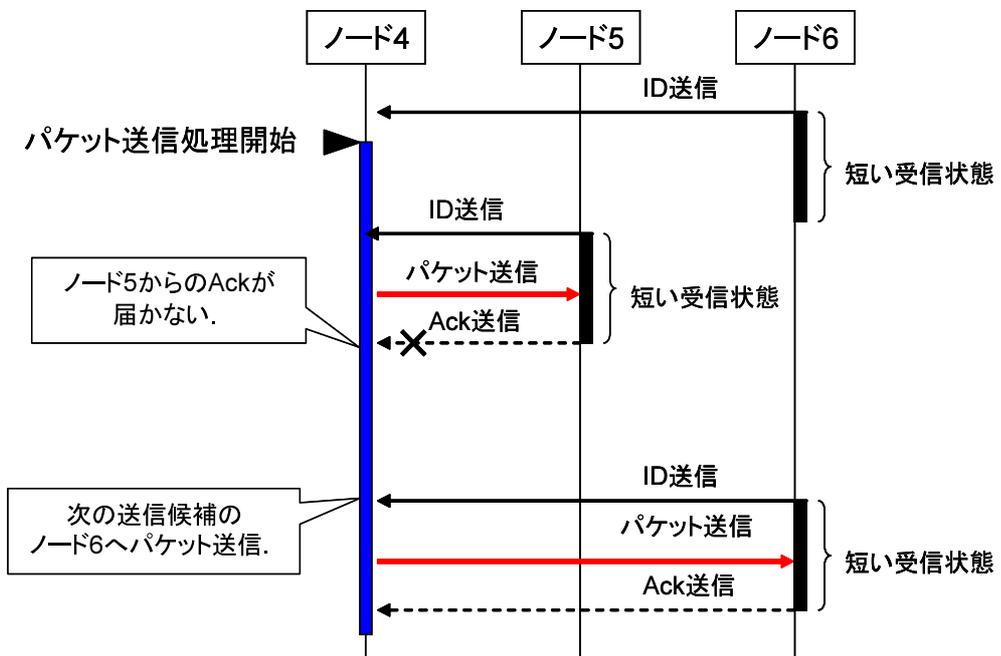
後向き 目的ノードへのホップ数が最短ホップ数+2 以上となる隣接ノード．

パケット転送先ノードとして選択する際の優先順位は，前向きノード，横向きノード，後向きノードの順に高いものとする．優先順位が同じ隣接ノードが複数存在する場合には，送信待ち時間中に先に ID を受信した隣接ノードにパケットを転送する．パケット送信処理中に全ての前向きノードに対して転送失敗した場合は，転送の対象を横向きノードへも広げ，それでも全て転送失敗した場合は，転送の対象を後向きノードに広げる．ここで転送失敗とは，転送候補から送信パケットに対する Ack が確認できない場合とする．このように柔軟に経路を選択することで，通信信頼性を高めることができる．

上述した隣接ノードの選択を適切に行うためには，各ノードがネットワーク内の全てのノードに対しての経路情報を把握しなければならない．そのため本システムでは，各ノードが構成情報管理テーブルというネットワーク内の経路情報を保持したテーブルを所有している．図 4(a) のネットワークの場合，図 4(b) の構成情報管理テーブルを持つ．ノード 0 がノード 7 へパケットを送信するときに図 4(b) の (0, 7) を参照する．各ノード間では，定期的に自身の隣接ノード情報を載せた構成制御パケットを，図 2(b) のパケット送信ノードの動作に従い隣接ノードに送信する．構成制御パケットを受信したノードでは，それを元に自身の構成情報管理テーブルを作成，更新する．

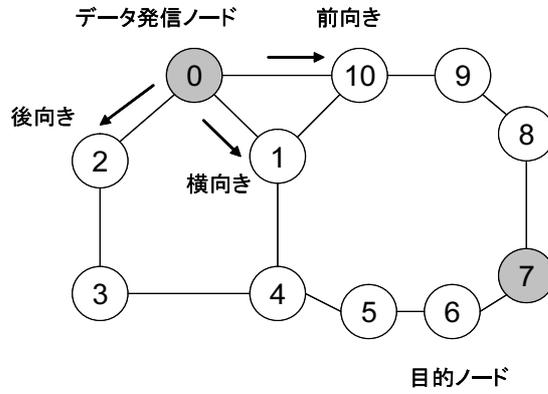


(a) パケット中継処理

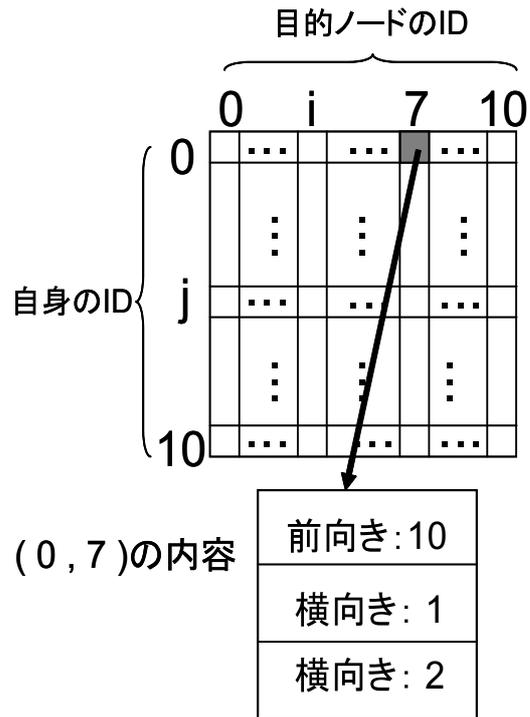


(b) パケット再送処理

図 3: パケット送信処理の様子



(a) 目的ノードまでのホップ数による隣接ノードの区分



(b) 構成情報管理テーブル

図 4: 隣接ノードの区分と構成情報管理テーブルの例

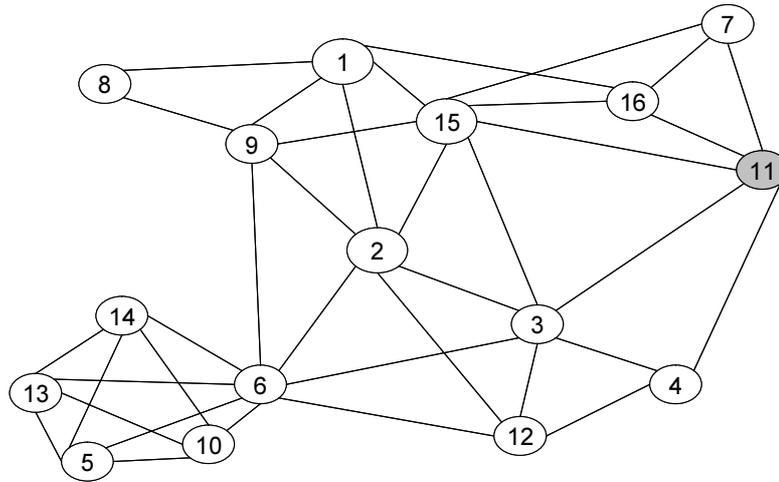


図 5: ノード数 16 のシミュレーションモデル

3 シミュレーションによる性能評価

本章では，IIDR 方式のアドホック・メッシュネットワークをモデル化し，計算機上でシミュレーションを行うことにより基本性能特性を明らかにしていく．基本性能特性を見るために，図 5 のノード数 16 のメッシュトポロジで各ノードが決められたパケット発生率に従って，ノード 11 に対してパケットを送信する場合を考える．ここでパケット発生率とは，1 秒あたりのパケット送信回数と定義する．各ノードでは，シミュレーション期間にパケット発生率を掛けた数のパケットが，シミュレーション期間中のランダム時間にセンタノードに送信されていく．以後ノード 11 のことをセンタノード，ノード 11 の隣接ノードのことをセンタ隣接ノードと呼ぶ．

モデル化を行うにあたって，以下の仮定を導入する．

- ネットワーク構成は変化しないものとする．すなわち，2.3 節で説明した，ノード間での構成制御パケットの送受信は行わず，構成情報管理テーブルはシミュレーション開始前に定めたものを使用する．
- パケットを送信する際には，キャリアセンスによる輻輳制御を行う．また，通信範囲内に存在するノードに対して送信する電波の減衰は起こらないとする．通信範囲内のノードに対しては輻輳が起こらない場合 100% の確率でパケット送信が行えるとする．
- パケット送信処理中のノードが新たな中継パケットを受信した場合には，保持しているパケットの送信を完了していなくても，そのパケットを破棄して新たなパケットの転送処理に移行するものとする．

表 1: パラメータ設定値

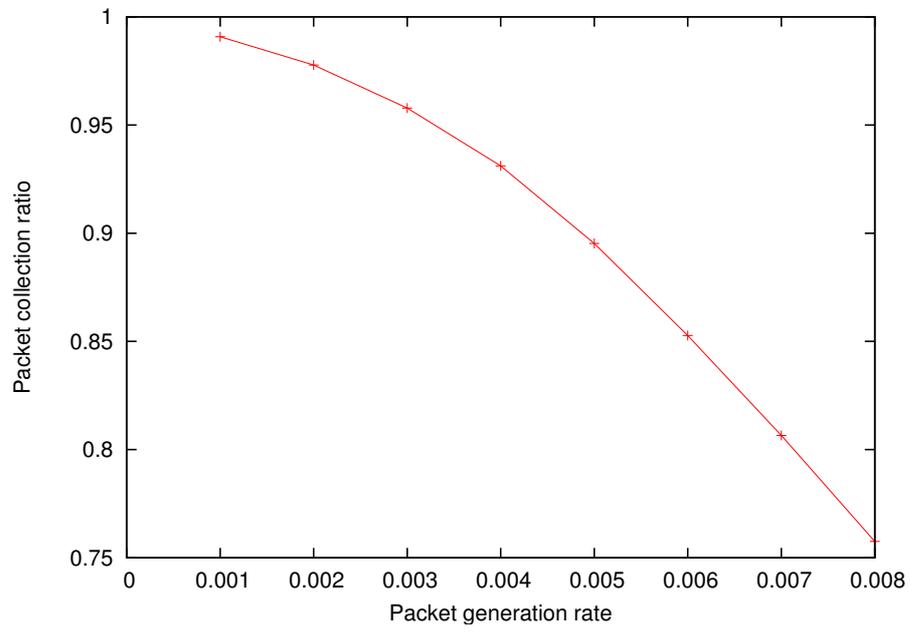
パラメータ名	値
間欠周期	3.0 s
通信可能範囲	100 m
最大中継回数	5 回
送信時電流	20 mA
受信時電流	25 mA
スリープ時電流	0 mA
パケットサイズ	128 byte
無線速度	250 kbps
電池容量	7.1 Ah

シミュレーション中の全ノードのパラメータを表 1 のように設定する．表中の最大中継回数とはパケットが転送される最大回数のことである．このパラメータは，いつまでも転送が完了しないパケットをネットワーク内から排除するためのもので，最大中継回数を超過したパケットは破棄されるものとする．

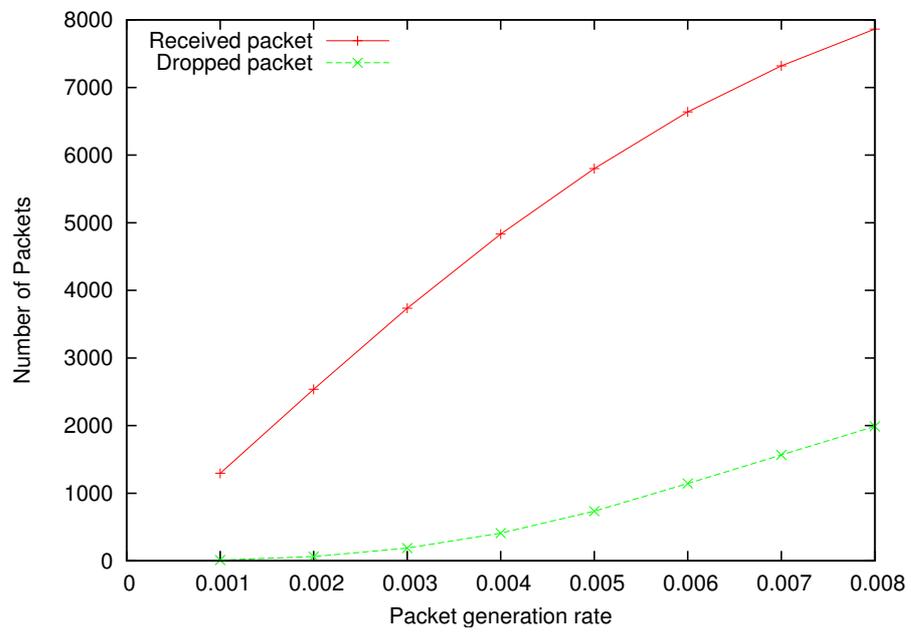
3.1 パケット収集率特性

まず，システムの基本性能を明らかにするために，負荷であるパケット発生率を変化させたときのパケット収集率を調べた．図 6(a) で示したパケット収集率は，センタノードに着信したパケット数をネットワーク内で発生した全パケット数で割った値とする．また，図 6(b) はセンタノードに到着したパケット数とネットワーク内で破棄されたパケット数を示す．負荷の増加とともに図 6(a) のパケット収集率が減少するのは，図 6(b) に見られるネットワーク内で破棄されるパケット数の増加によるものである．ネットワーク内でパケットが破棄される要因は，パケットの転送回数が表 1 中の最大中継回数を超えてしまうためである．シミュレーションモデルは，図 5 に示すように，各ノードからセンタノードまでの最短経路は全て 3 ホップ以内になっているが，パケットが最短経路を通らずに横向きノードを通ると，センタノードに到着するまでのホップ数が増加する．すなわち，パケットの破棄は，横向きノードへの転送が増加したために最大中継回数を超えてしまうことが原因と考えられる．

図 7(a) では，各ノードでのパケット破棄回数を示す．センタ隣接ノードであるノード 3，4，7，15，16 でパケット破棄が多い．センタ隣接ノードでのパケット転送状況を調べるために，図 7(b) でノード 15 のデータ転送回数を隣接ノード別にまとめたグラフを示すが，パ

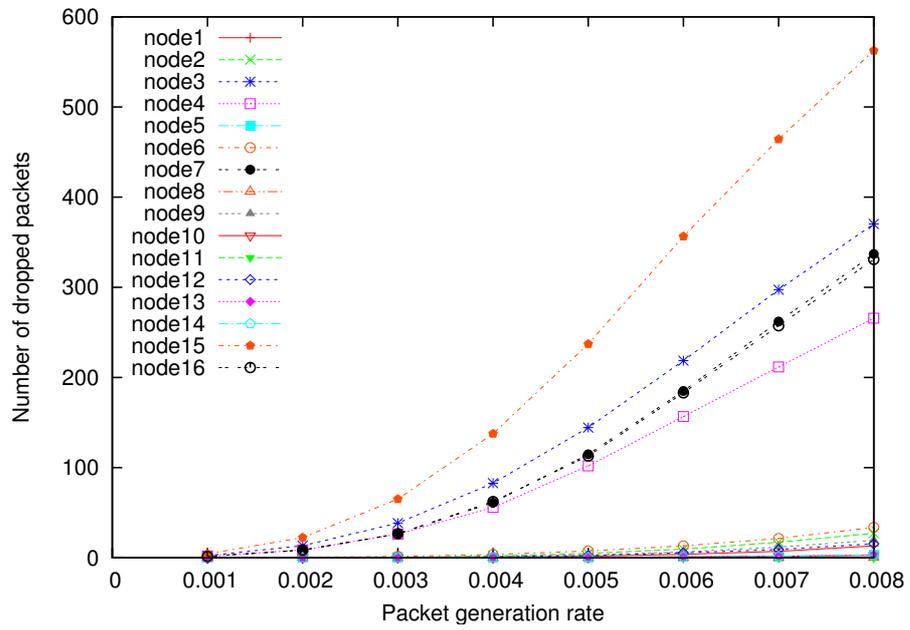


(a) パケット収集率

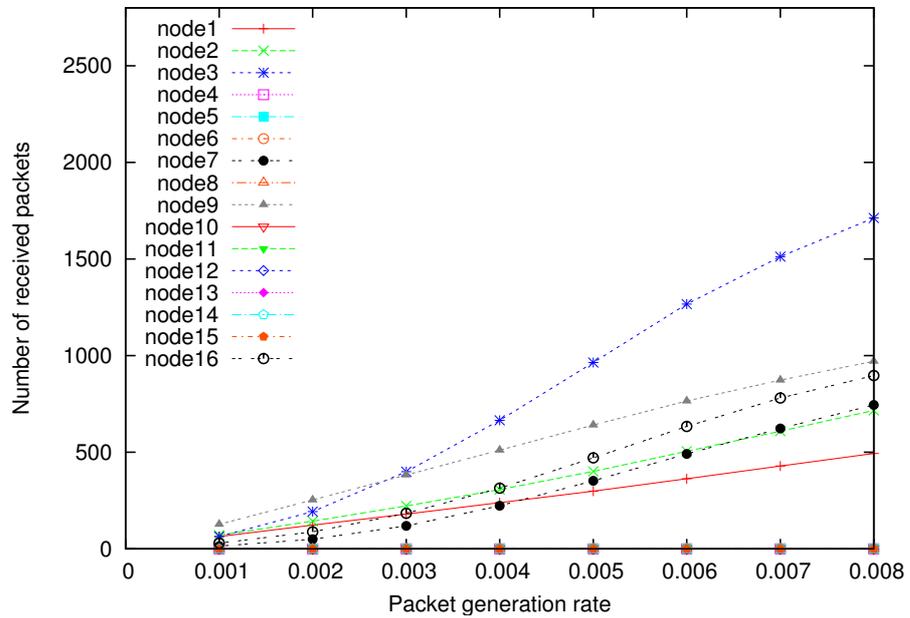


(b) センタノードに到着したパケット数とネットワーク内で破棄されたパケット数

図 6: パケット収集率の評価



(a) 各ノードの最大中継回数超過によるパケット破棄回数



(b) ノード 15 の隣接ノード別の被転送回数

図 7: パケット破棄回数の評価

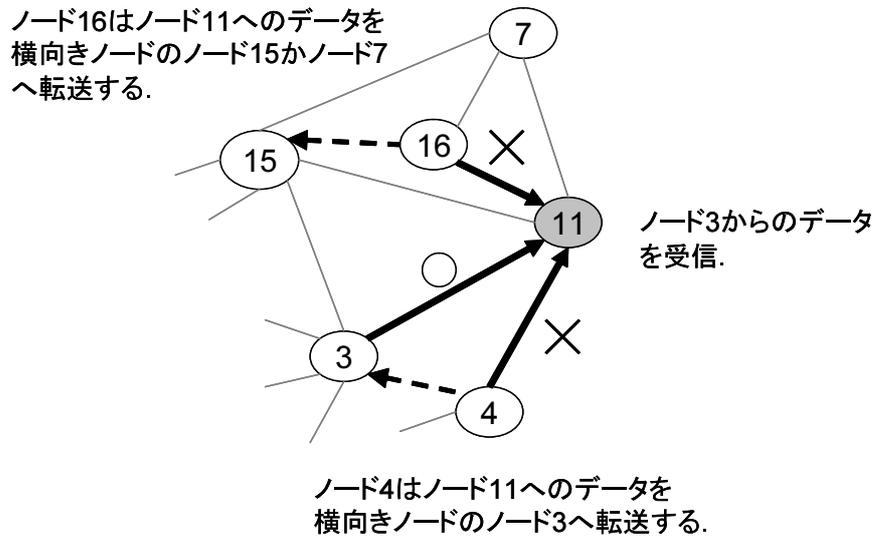


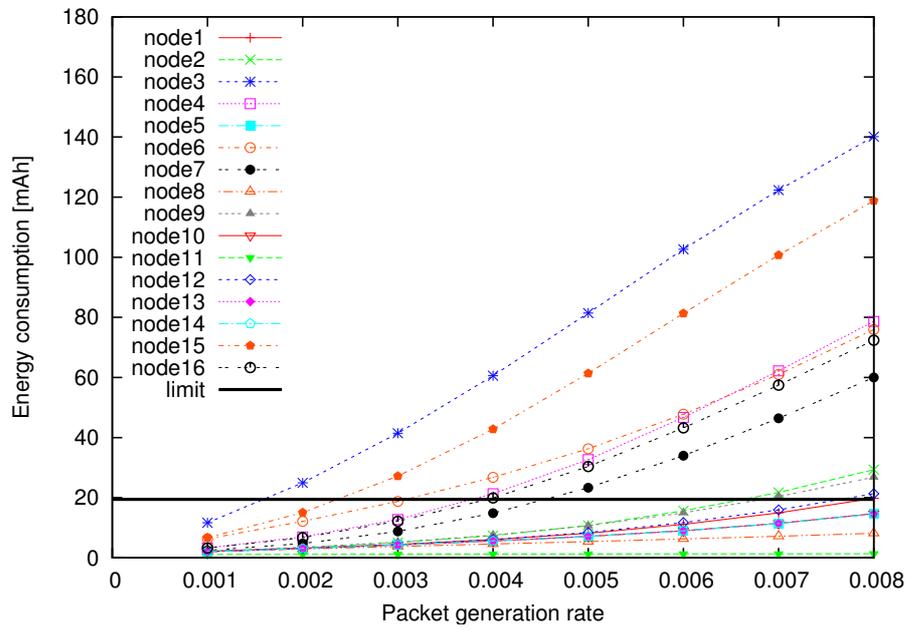
図 8: トラヒックの集中による横向き転送の増加

ケット収集率が上昇するに従ってノード 15 はノード 3 からのパケットを多く受信していることがわかる。これは、ノード 3 がノード 11 へのデータ転送を失敗して横向きノードであるノード 15 へデータを転送していることを示す。図 8 で示すように、負荷が上昇すると、ノード 15 のようなセンタ隣接ノードではセンタノードへのパケット送信が衝突し合うことが多くなり、センタノードへのパケット転送が失敗して横向きノードへの転送が増える。すなわち、センタノードへパケットが転送されるまで横向きノードへの転送を繰り返すために、センタ隣接ノードで転送パケットが最大中継回数を超えてしまうことが多くなる。

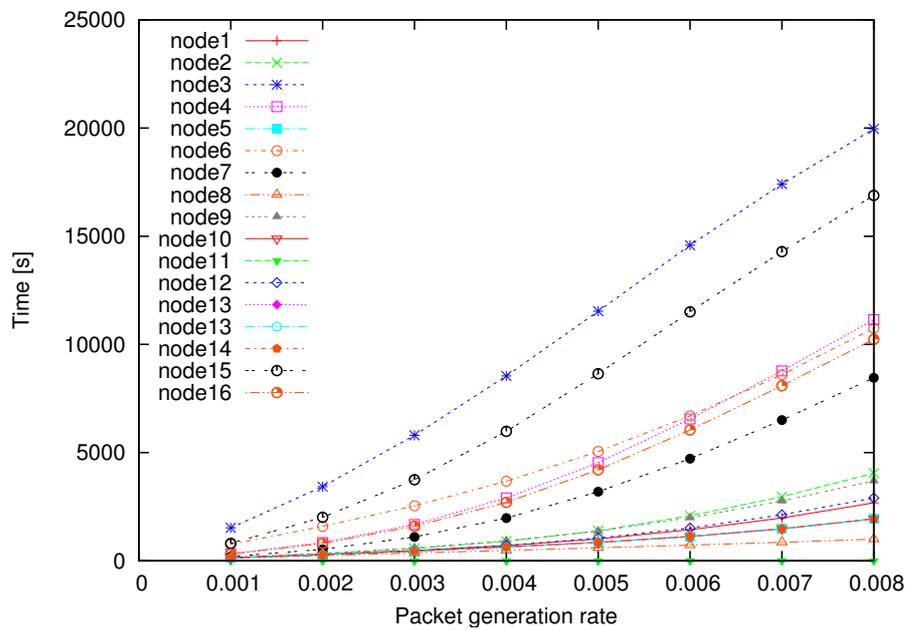
以上により、パケット発生率の上昇に伴いパケット収集率が減少するが、その原因として、パケット発生率の上昇によりセンタ隣接ノードでの横向きノードへの転送が増加し、パケットが最大中継回数超過により破棄されることが挙げられる。

3.2 電力消費特性

次に、パケット発生率を変化させたときの各ノードの消費電力を図 9(a) で示す。図 9(a) 中の limit 値は、容量 7.1 Ah の電池でノードを 1 年間稼働させるための 1 日の消費電力許容量を表す。センタ隣接ノードであるノード 3, 4, 7, 15, 16 と 6 で消費電力が大きくなっている。各ノードが送信したパケット数を調べたのが図 10 であるが、図 9(a) で消費電力が大きいノードでは転送パケット数が多いことが分かる。センタ隣接ノードでは、ネットワーク内で発生したパケットが集中するので転送回数も増加し、ノード 6 はノード 5, 10, 13,



(a) 消費電力



(b) 総受信待ち時間

図 9: 電力消費特性の評価

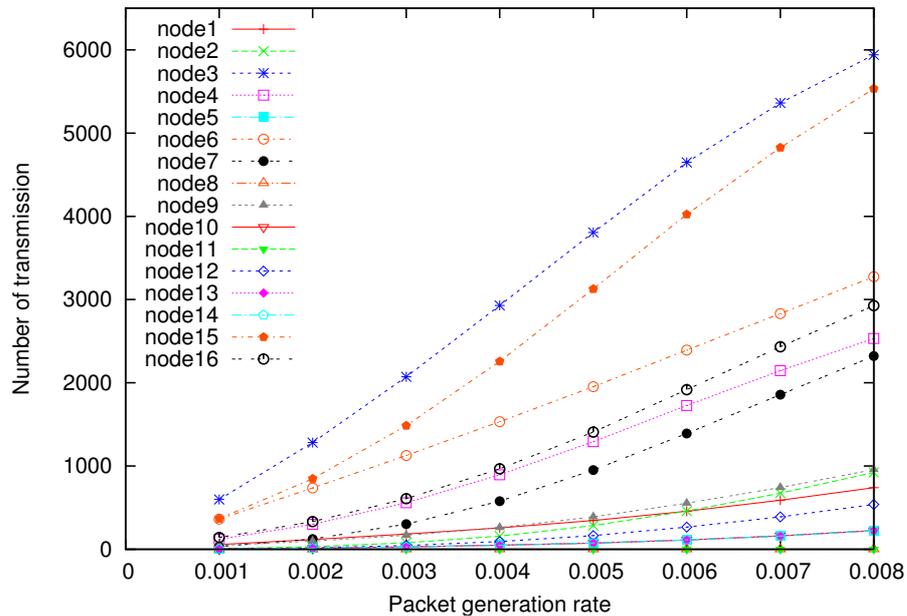


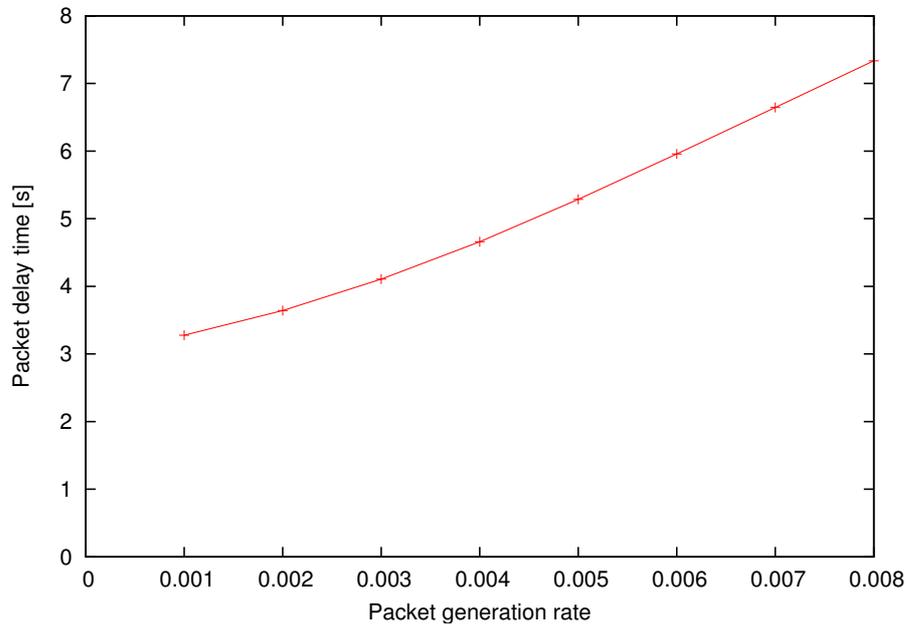
図 10: パケット転送回数

14の唯一の前向きノードであるためにパケットが集中する．さらに，図 2(b) のパケット送信ノードの動作中における，ID 受信待ち時間の合計を各ノードで調べたのが図 9(b) であるが，パケットの転送回数が多いノードは ID 受信待ち時間も多くなっている．

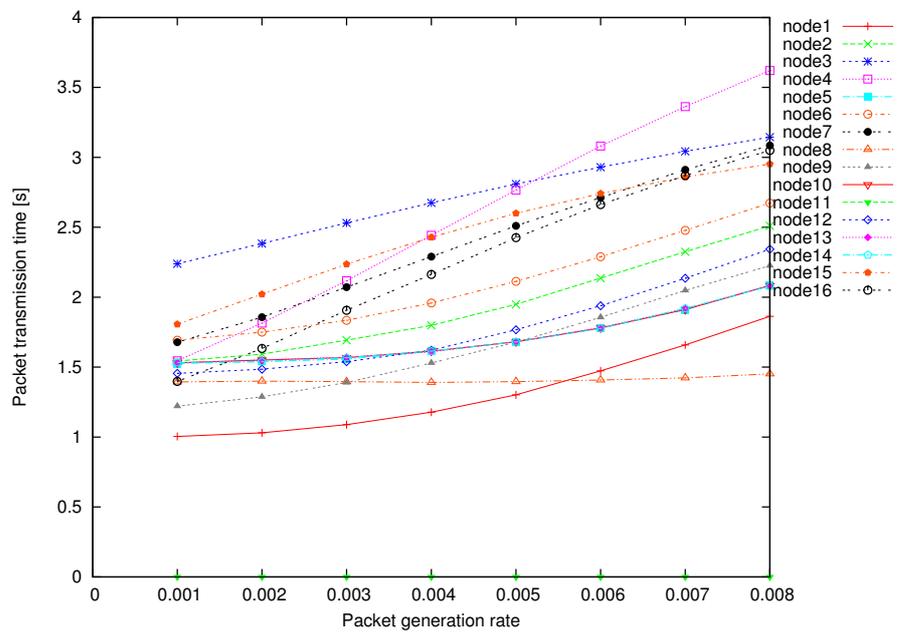
消費電力 (図 9(a)) と送受信待ち時間 (図 9(b)) を比較すると，各ノードでグラフの増加傾向が一致していることから，本システムでノードの消費電力は ID 受信待ち時間に依存していることがわかる．さらにその ID 受信待ち時間の要因は，図 10 で示したパケットの転送回数の増加にある．

3.3 パケット伝播遅延特性

図 11(a) では，パケット平均伝播遅延時間を示した．パケット平均伝播遅延時間は，各ノードで発生した全パケットがセンタノードへ到着した時間の平均値と定義する．パケット発生率が上昇するにつれてパケット平均伝播遅延時間が増加している．各ノードの 1 パケットを送信する平均時間を調べたのが図 11(b) である．各ノードでパケットの送信時間が増加していることがパケット平均伝播遅延時間の増加の要因と考えられる．各ノードの中でもノード 1 のパケット送信時間が短い．図 5 からノード 1 の前向きノードがノード 15，ノード 16 の 2 つであり，横向きノードがノード 2，ノード 9 の 2 つである．このようにパケット転送相手が多いほど 1 パケットあたりの送信時間は短くなると考えられる．図 11(b) でセンタ隣接



(a) パケット平均伝播遅延時間



(b) 各ノードの1パケットあたりの平均送信時間

図 11: パケット平均伝播遅延時間の評価

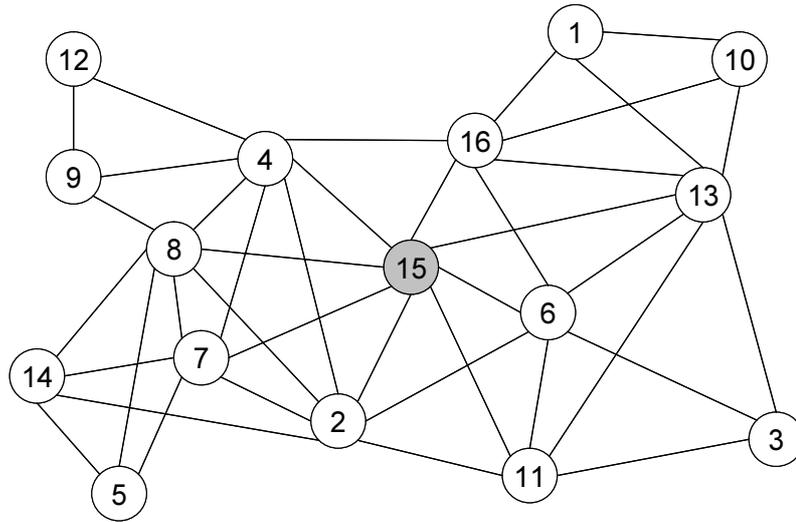


図 12: 負荷の集中がないノード数 16 のトポロジ

ノードでは 1 パケットあたりの送信時間が長いですが、センタ隣接ノードの前向きノードがセンタノードのみであることが原因である。このように、前向きノードの数が多いノードほど 1 パケットあたりの送信時間が短くなる。

3.4 負荷の集中がないトポロジにおける基本性能特性

3.1 ~ 3.3 節では図 5 のトポロジを用いて基本性能特性を調べたが、図 5 のトポロジはネットワーク内でノードごとの負荷に偏りがある。本節では、図 12 の負荷の集中がないトポロジを用いて基本性能特性を調べる。ここで、負荷が高くなるノードは以下のノードであると考えられる。

1. 前向きノードが 1 つしか存在しないノード (図 5 のノード 6 やセンタ隣接ノード)。
2. 複数のノードの唯一の前向き転送相手であるようなノード (図 5 のノード 6) 。

センタノードへ各ノードがパケットを送信する場合、パケットが集中するセンタ隣接ノードで負荷が増大することは、どのようなトポロジを用いても共通の特徴であると言える。よって、以下のルールに従って配置したノード数 16 の図 12 のトポロジを考える。センタノードはノード 15 である。

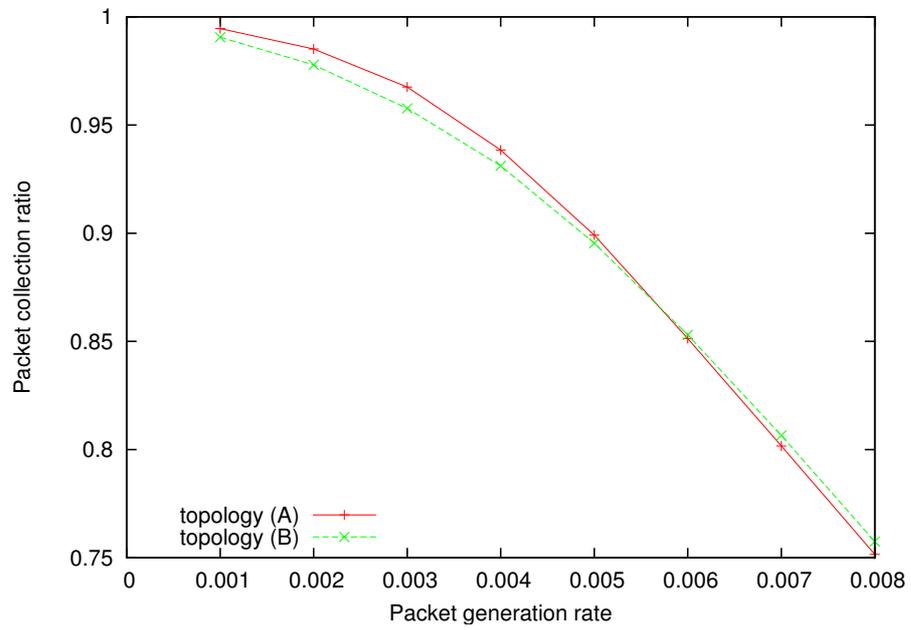
- センタ隣接ノード以外で、前向きノードが 1 つしかないノードをできるだけ減らす。
- 複数のノードの前向きノードであるようなノードを減らす。

- センタ隣接ノードを増やす。

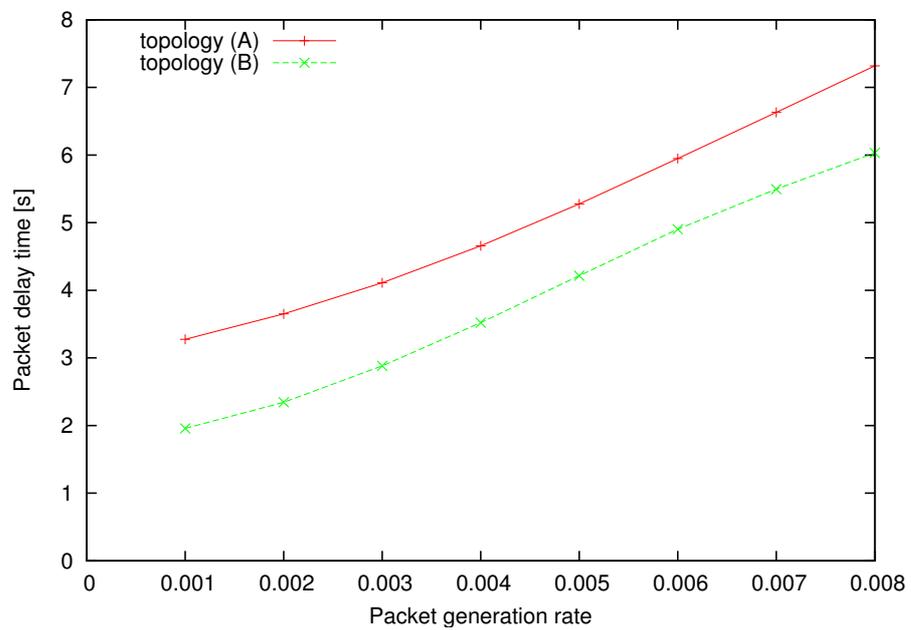
表1の設定のもと、図12を対象として、各ノードがセンタノードであるノード15にパケット発生率に従ってパケットを送信するシミュレーションを行った。図5と図12のトポロジでの性能の比較を行ったのが図13、図14である。図13中の topology (A), topology (B) はそれぞれ図5、図12のトポロジを示す。図13(b)のパケット収集率は大きな違いが見られなかったが、図13(b)のパケット平均伝播遅延時間で差が見られる。図14(a)、14(b)は各ノードの消費電力とID受信待ち時間を示したグラフであるが、センタ隣接ノードであるノード2, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 16とその他のノードで大きな差がある。センタ隣接ノードでは負荷が分散されているために図9(b)に見られるようなID受信待ち時間の偏り見られない。その結果、図9(a)に見られた消費電力の偏りが図14(a)で軽減されている。

各ノードでの1パケットあたりの送信時間を示したのが図15(a)であるが、センタ隣接ノードとその他のノードではっきりと分かれる結果となった。センタ隣接ノードでは、センタノードが唯一の前向きノードであるために送信に時間がかかるのに対し、その他のノードでは前向きノード、横向きノードとも複数存在するのでセンタ隣接ノードに比べ送信に時間がかからない。また、各ノードでの最大中継回数超過によるパケット破棄回数を示したのが図15(b)であるが、負荷の偏りがある図5で同じ項目について調べた図7(a)と比べて、センタ隣接ノードでパケット破棄回数が多いという傾向は変わらなかった。センタ隣接ノードはどのようなトポロジにおいてもネットワーク内のパケットが集中するノードであり、前向きノードがセンタノードのみであるため、トポロジによらず横向きノードへの転送が増加する。

以上により、負荷の集中がないように配置したトポロジの場合、パケット平均伝播遅延時間を短くすることができる。その要因としては、センタ隣接ノードとその他のノードでパケット送信にかかる時間が平均化されて安定するからである。また消費電力も負荷の集中をなくしたことにより、センタ隣接ノード間、その他のノード間で偏りがなくなる。しかしパケット収集率の大きな改善は見られず、センタ隣接ノードで最大中継回数超過によるパケット破棄が多いという構造は変わらなかった。

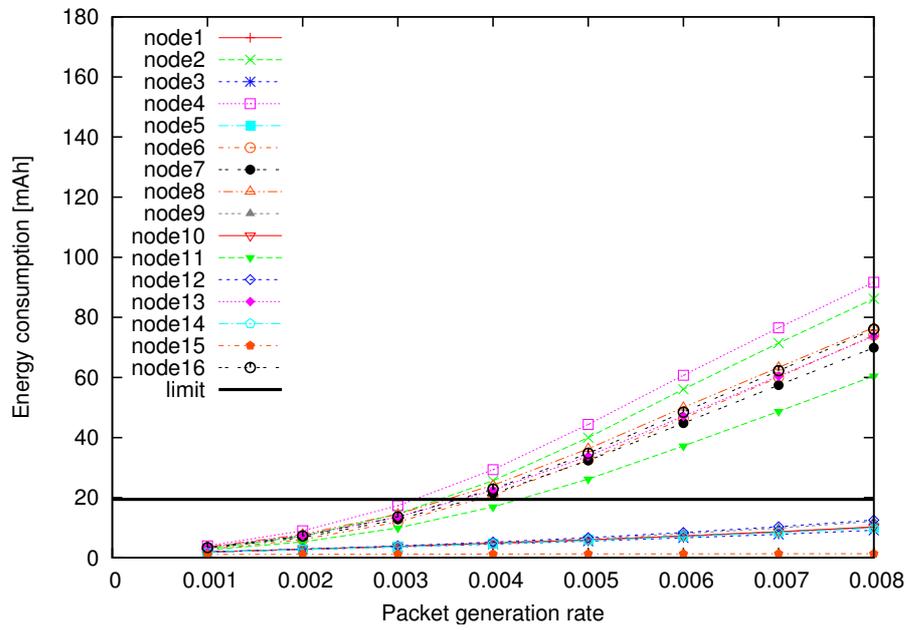


(a) パケット収集率

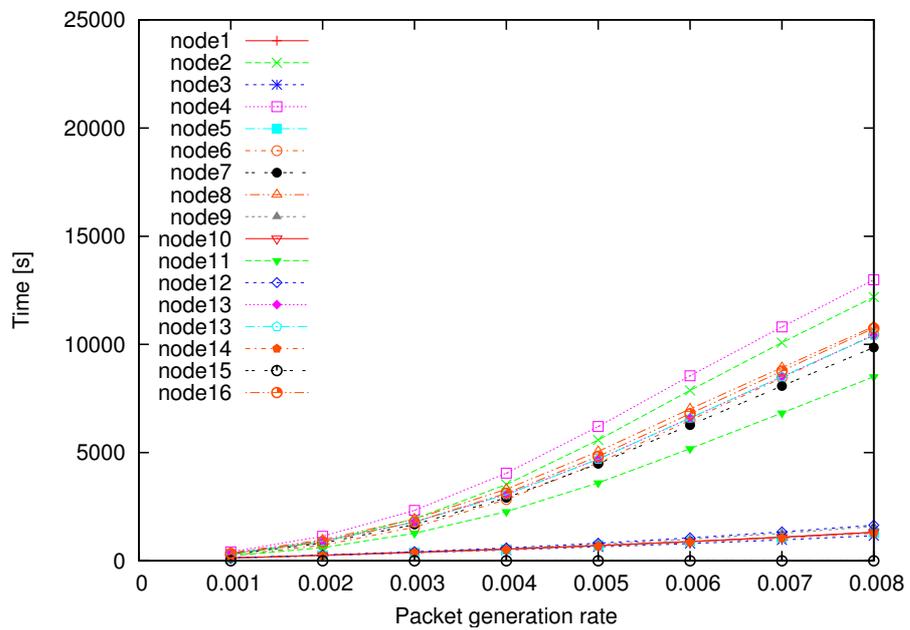


(b) パケット平均伝播遅延時間

図 13: トポロジの違いによる基本性能特性の違い

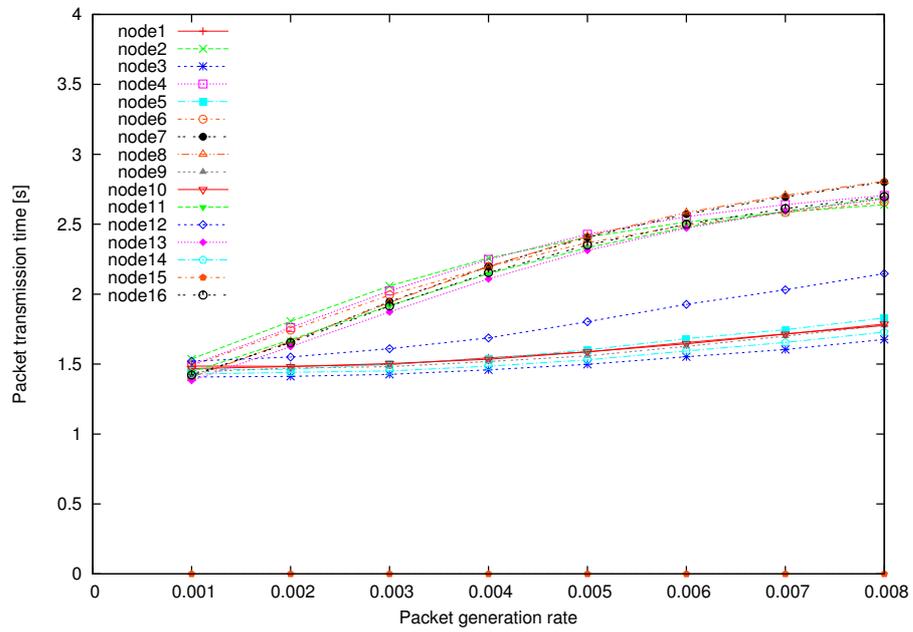


(a) 消費電力

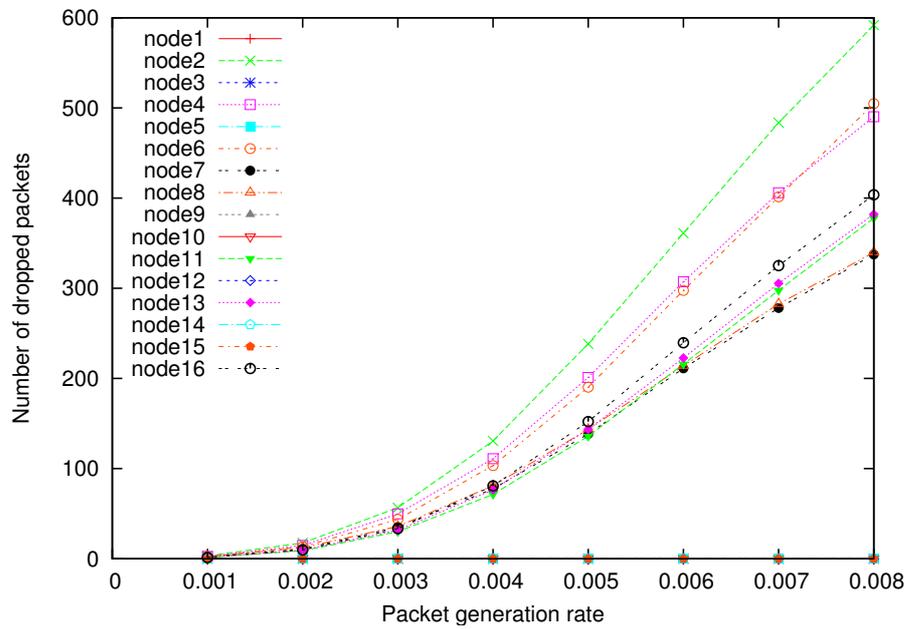


(b) ID 受信待ち時間

図 14: 図 12 のトポロジの消費電力の評価



(a) 1 パケットあたりの送信時間



(b) パケット破棄回数

図 15: トポロジの違いによるパケット送信時間とパケット破棄回数の評価

4 性能を向上させるパラメータ設定

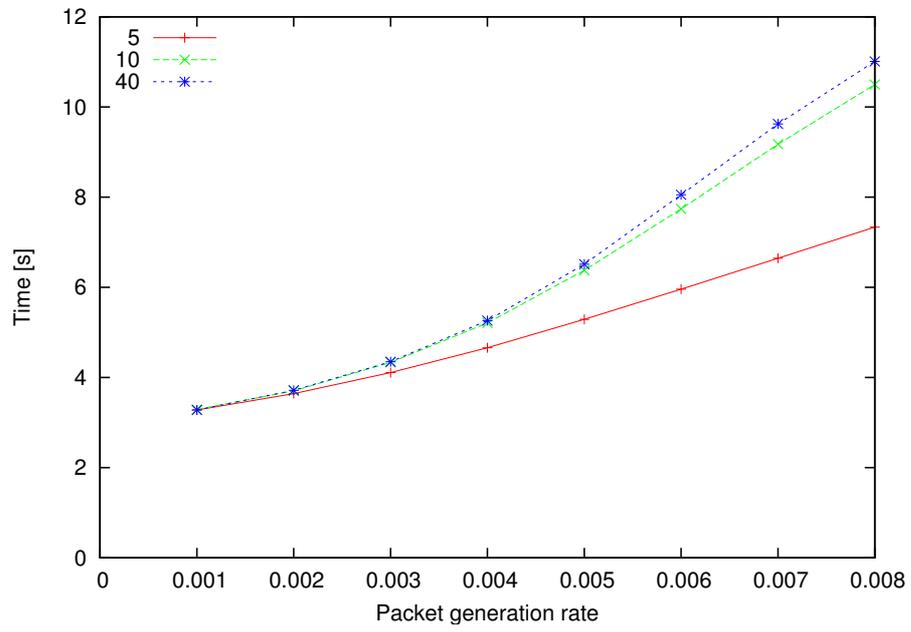
4.1 最大中継回数の設定

本章では、3章において得られた結果をもとに、最大中継回数と間欠周期の設定が基本性能に与える影響を調べ、適切なパラメータ値の設定方法を提案する。3.1節で示したように、センタ隣接ノードでは、パケットの中継回数が最大中継回数を超えてしまい、パケットが破棄されることが多い。そこで、表1のパラメータ設定のもとで、最大中継回数を変化させたときのパケット収集率とパケット平均伝播遅延の変化を調べた。図16(a)は、最大中継回数を5, 10, 40と変化させた場合のパケット平均伝播遅延時間の比較である。最大中継回数10と40では大きな差がない。パケット平均伝播遅延時間(図16(a))は最大中継回数の増加に伴い、最大1.5倍まで増加した。パケット収集率(図16(b))に関しては、パケット発生率0.008の場合でも2%の改善が見られ、最大中継回数10と40の場合で同じ値を示した。最大中継回数が増加するとパケットがより長くネットワーク内に残り転送されていくが、各ノードでパケットを送信完了する前に新たな中継パケットを受信した場合には、送信処理中のパケットを破棄して新たなパケットの送信処理に移行するので、最大中継回数を増加させてもパケット収集率の向上には限度があり、パケット平均伝播遅延時間もある値に収束する。

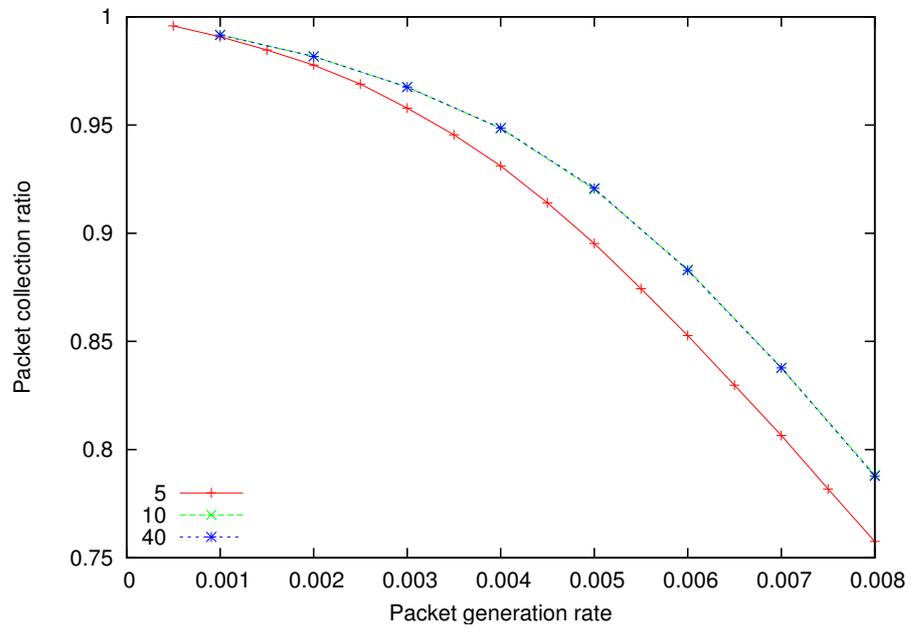
図17(b)は最大中継回数10の各ノードでのパケット破棄回数を示したグラフであるが、最大中継回数5の各ノードのパケット破棄回数(図7(a))と比べて、センタ隣接ノードでのパケット破棄回数が減少した。最大中継回数の増加に伴い、ネットワーク内でより多くのパケットが破棄されずに転送されていることが分かる。図17(a)は、最大中継回数10の場合の各ノードの消費電力を示したが、最大中継回数5の各ノードの消費電力(図9(a))と比較して、センタ隣接ノードで16%~60%消費電力が増加している。ノードの電池容量に制限がある場合には最大中継回数を増加させるとセンタ隣接ノードで他ノードよりも早く電力が枯渇してしまい、ネットワークの寿命が短くなってしまうことが分かる。このように、最大中継回数設定は、パケット収集率を2%程度改善できるが、各ノードからセンタノードまでの最短ホップ数を考慮して、電池容量や電池稼働期間に応じた適切な値を設定するべきであると考えられる。

4.2 センタノードの間欠周期の設定

センタノードの間欠周期の変化によるパケット収集率とパケット平均伝播遅延時間の変化を図18で示す。ここでパケット平均伝播遅延時間は、センタノードへ着信した全パケットの平均伝播時間とする。3章ではセンタノードの間欠周期を3.0sとしていたが、図18(a)よりセンタノードの間欠周期が短くなるにつれて、パケット発生率0.008の場合でパケット収

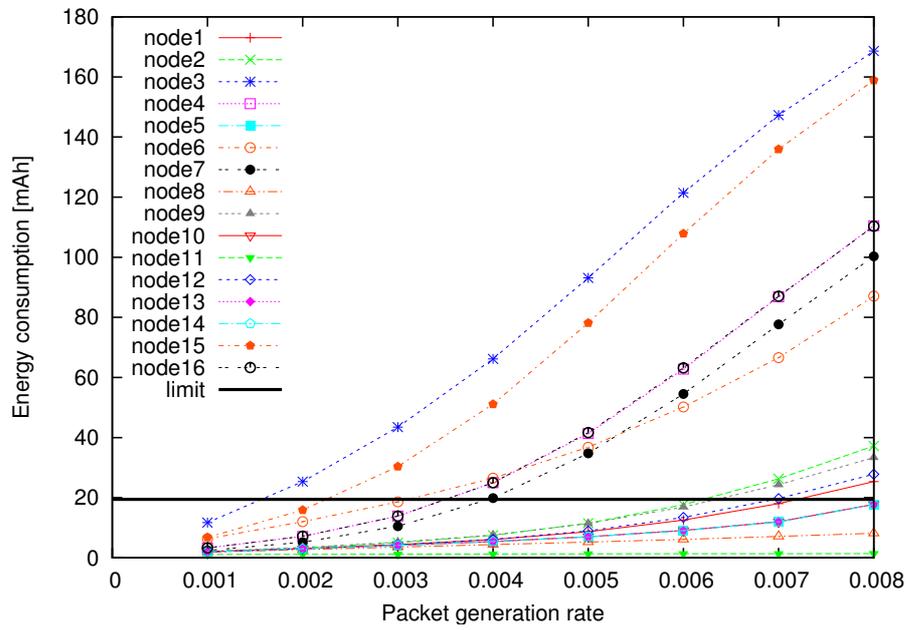


(a) パケット平均伝播遅延時間

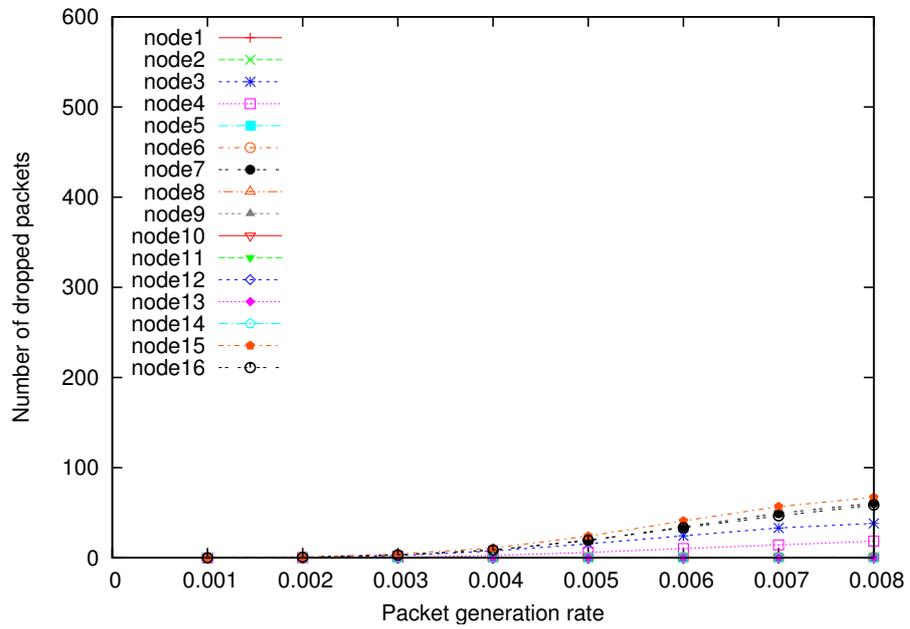


(b) パケット収集率

図 16: 最大中継回数による基本性能特性の違い

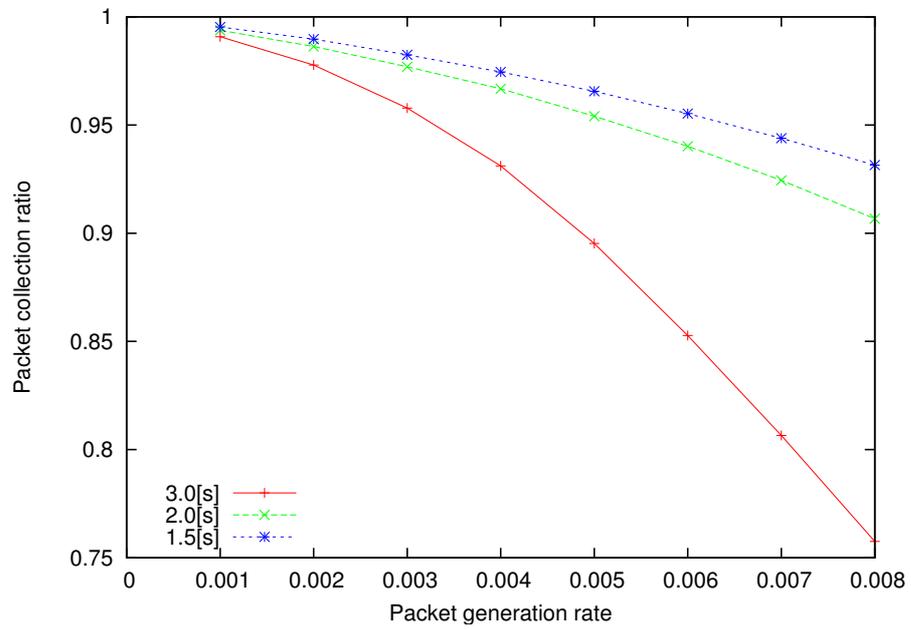


(a) 消費電力

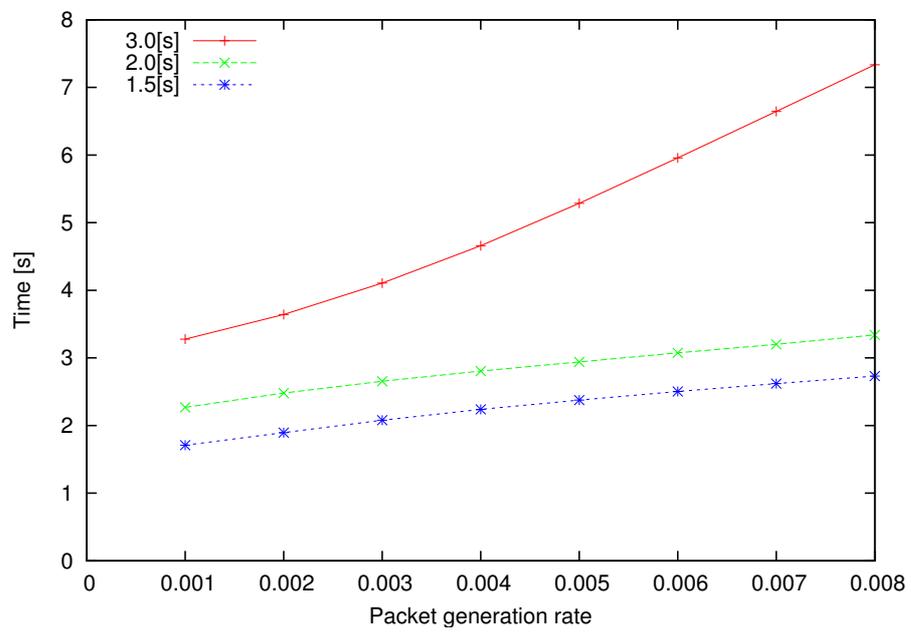


(b) パケット破棄回数

図 17: 最大中継回数 10 の場合



(a) パケット収集率



(b) パケット伝播遅延時間

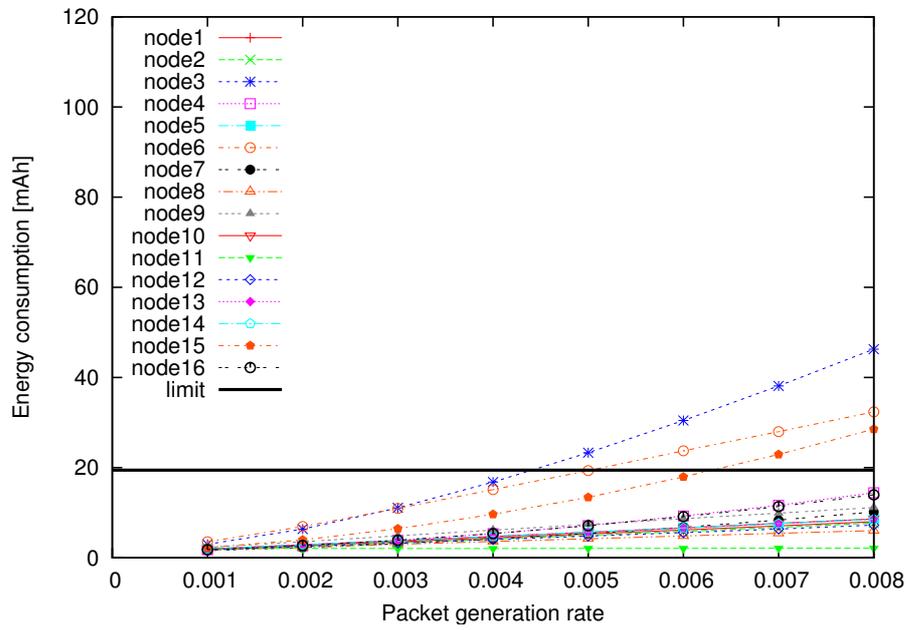
図 18: センタノードの間欠周期が性能に与える影響

集率が 14% 以上改善されていることが分かる．間欠周期が短くなるとセンタノードの活動状態が増加し，センタ隣接ノードからより多くのパケットが受信可能となるため，センタ隣接ノードでセンタノードへのパケット送信が円滑に行われて図 8 で示した横向きノードへの転送も減少する．最大中継回数超過によるパケットの破棄も減少するために図 18(a) のように改善される．

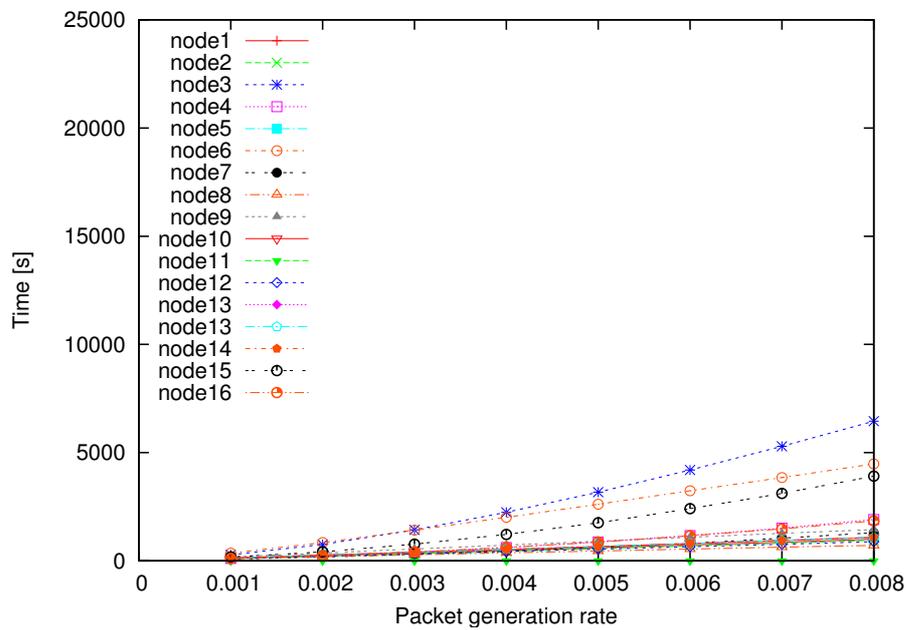
図 18(b) はパケット平均伝播遅延時間の変化であるが，センタノードの間欠周期が短くなるにつれて 0.3 倍程度に減少している．センタノードの間欠周期が短い場合には，転送パケットが滞ることなく円滑に転送されていることがわかる．また，図 19(a) は，センタノードの間欠周期が 1.5 s の場合の各ノードの消費電力を示している．間欠周期が 3.0 s の場合（図 9(a)）と比較すると，各ノードで全体的に消費電力が減少しているのが分かるが，特にセンタ隣接ノードの消費電力の減少が大きく，センタ隣接ノード全体で 70% 以上の減少が見られた．図 19(b) は同様の条件での各ノードの送受信待ち時間を示したグラフであるが，同様に 3.0 s の場合（図 9(b)）に比べて各ノードで大幅に減少している．この受信待ち時間の減少が消費電力の減少の要因である．図 20 で各ノードのパケット転送回数を示すが，センタノードの間欠周期が 3.0 s の場合（図 10）と比べて，ノード 4, 7, 15, 16 のセンタ隣接ノードでパケット転送回数が減少している．ノード 3, ノード 6 でパケット転送回数が多いのは，それぞれ隣接ノードから前向き転送を多く受けているからであり，図 5 のトポロジに依存する特徴と言える．センタ隣接ノードでは，センタノードへのパケット転送が円滑に行われ横向き転送も減少したために負荷が下がり，受信待ち時間が減少したと考えられる．このように，消費電力の削減やパケット収集率の向上，パケット平均伝播遅延時間の削減には，すべてのパケットが集中することを避けられないセンタノードの間欠周期を短く設定することが有効であることが示された．

4.3 ノードの負荷に応じた間欠周期の設定

4.2 節では，センタノードの間欠周期のみを変えた場合を考えたが，ここではネットワーク内の負荷の高いノードの間欠周期や，その隣接ノードの間欠周期を変えたときの変化を調べた．全ノードの間欠周期が 3.0 s の場合の各ノードの消費電力（図 9(a)）は，センタ隣接ノードで多いことが分かるが，センタ隣接ノードの中でもノード 3 とノード 15 の消費電力が大きく，その他のセンタ隣接ノードとの間に負荷の差が存在している．そこで，図 21 のように，センタ隣接ノード内で負荷が高いノード 3, ノード 15 の間欠周期を 6.0 s, ノード 4, ノード 7, ノード 16 の間欠周期を 1.5 s, ネットワーク内のその他のノードの間欠周期を 3.0 s にして，負荷に応じて間欠周期を設定した場合のパケット収集率，パケット遅延時間，各ノードの消費電力を調べた．図 22 が図 21 の間欠周期の設定と通常の設定におけるパケット収集率



(a) 消費電力



(b) 送受信待ち時間

図 19: センタノードの間欠周期が 1.5 s の場合

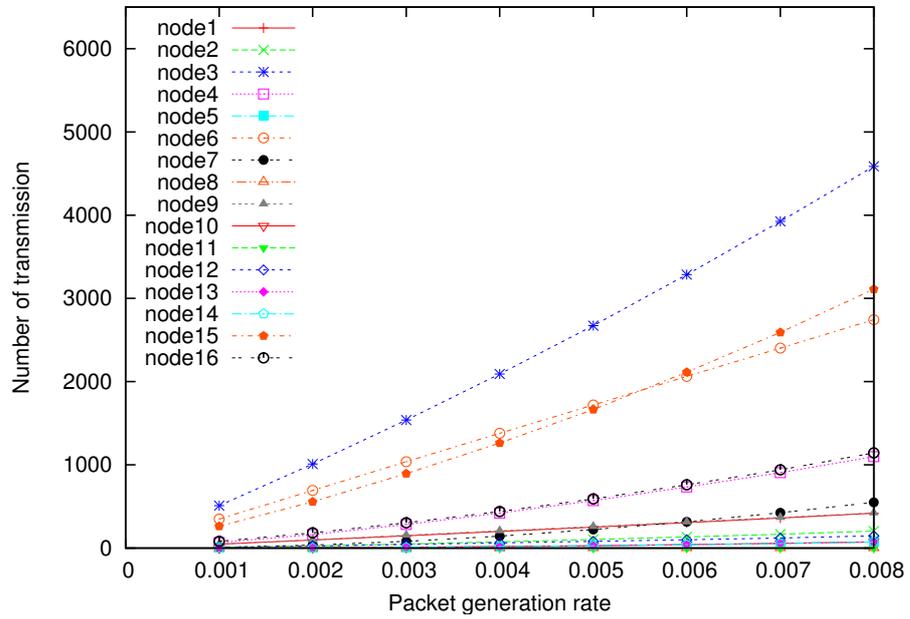


図 20: センタノードの間欠周期が 1.5 s の場合の packets 転送回数

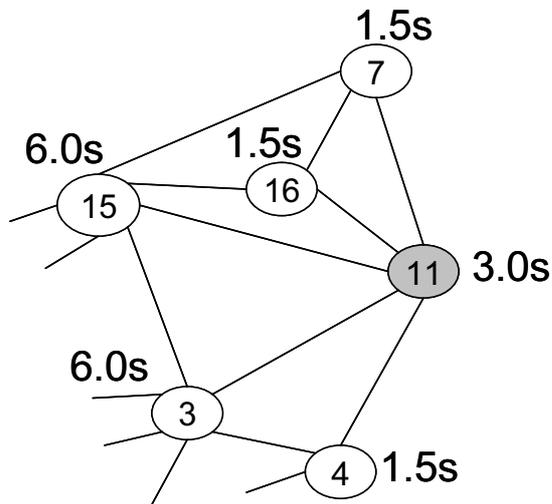
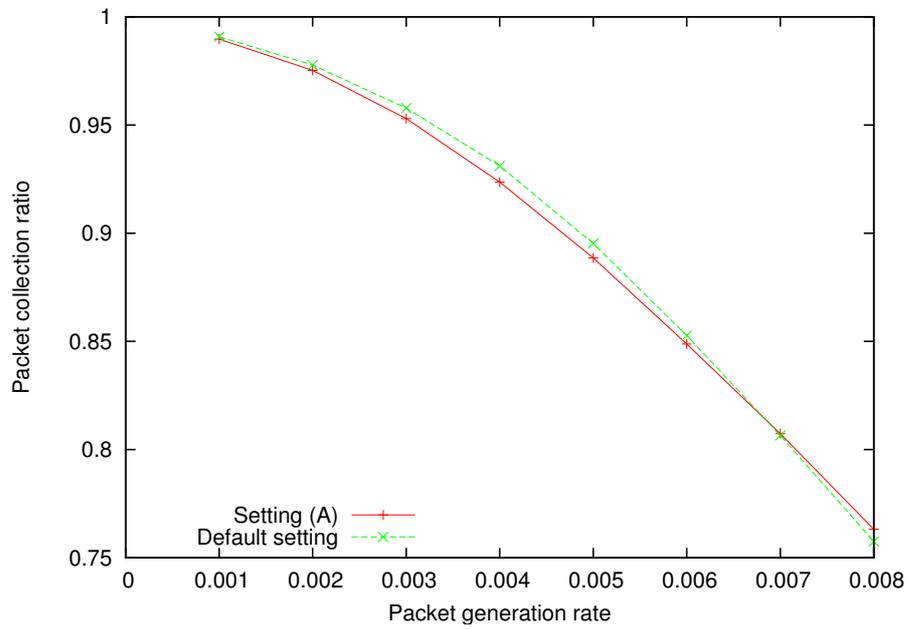
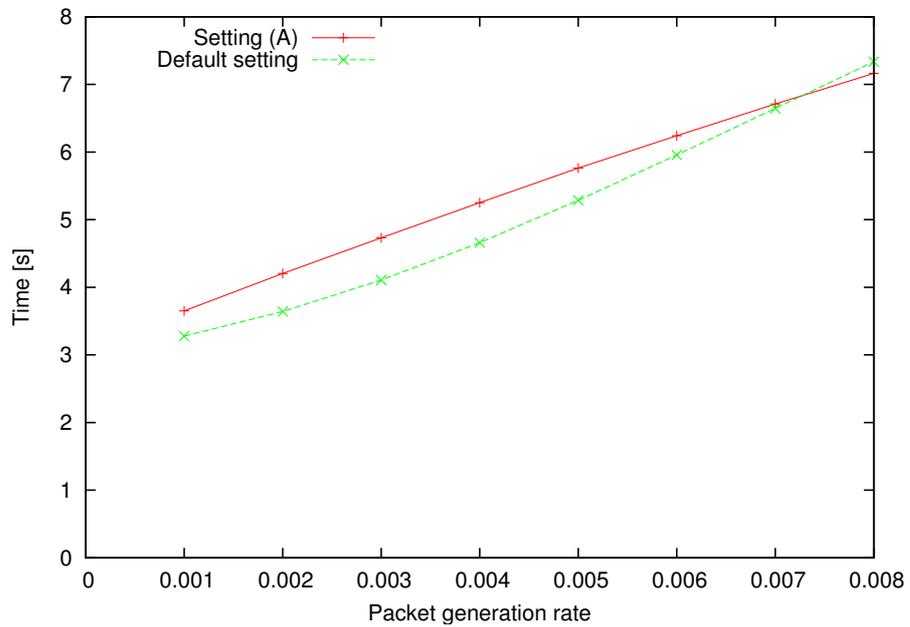


図 21: センタ隣接ノードにおける負荷に応じた間欠周期の設定

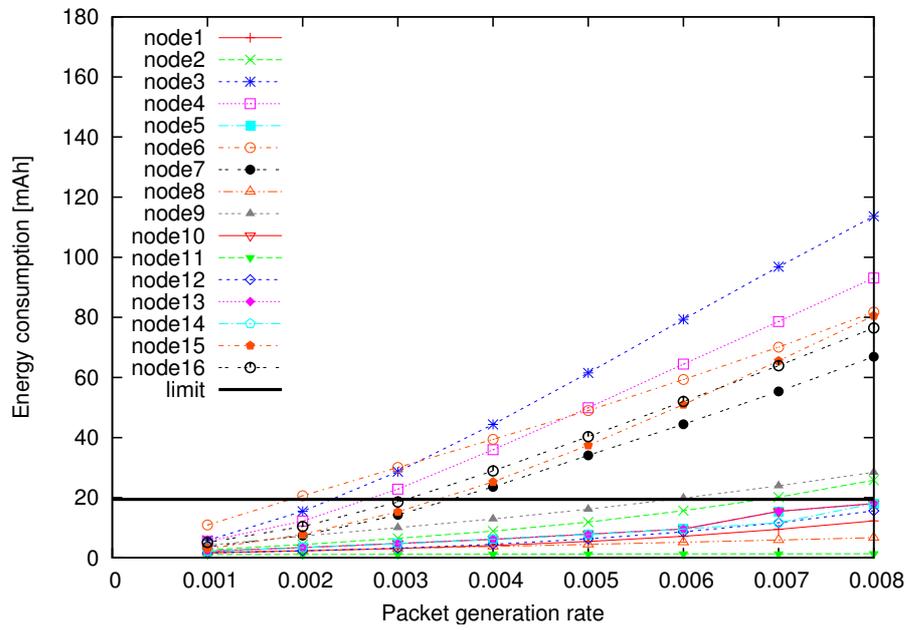


(a) パケット収集率

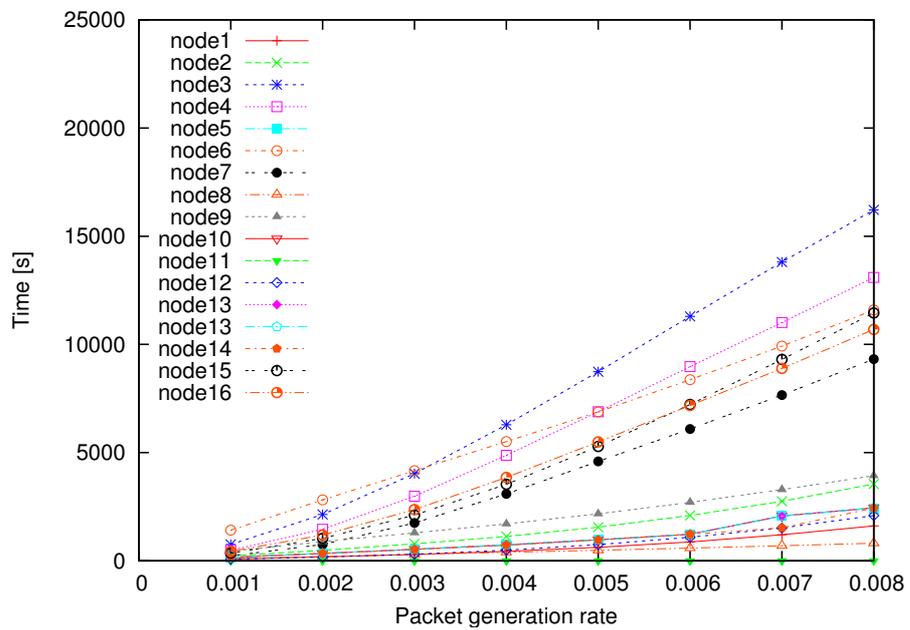


(b) パケット平均伝播遅延時間

図 22: 負荷に応じた間欠周期を設定した場合の基本性能特性の違い



(a) 消費電力



(b) 総受信待ち時間

図 23: 負荷に応じた間欠周期を設定した場合の消費電力の評価

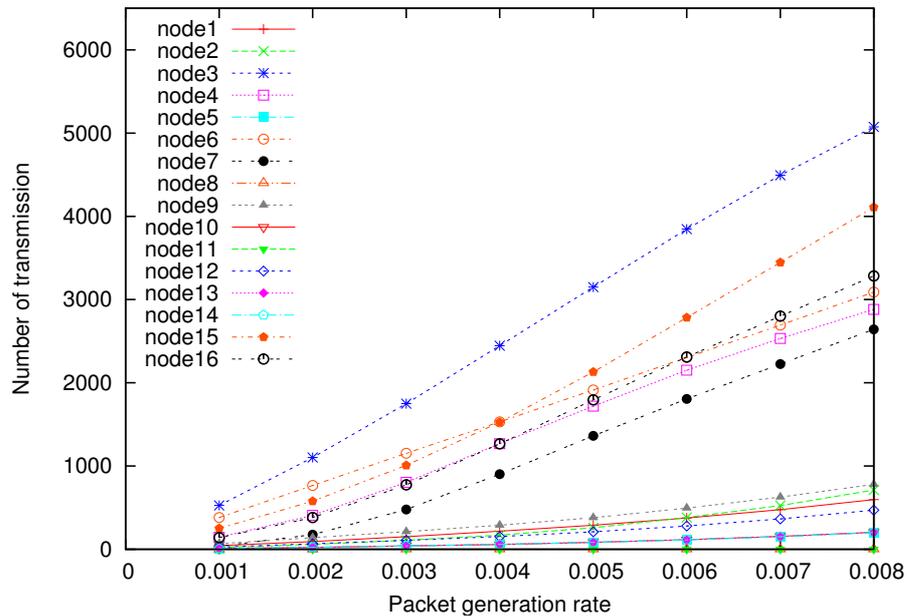


図 24: パケット転送回数

とパケット平均伝播遅延時間の比較である．図 22 中の Setting (A) は負荷に応じた間欠周期の設定を示し，Default setting は全ノードの間欠周期が 3.0 s の設定を示す．間欠周期の設定以外は両者とも表 1 のパラメータ設定となっている．パケット収集率 (図 22(a))，パケット平均伝播遅延時間 (22(b)) とともに大きな差がない．図 23(a) が負荷に応じた間欠周期の設定をした場合の消費電力を表したグラフである．全ノードの間欠周期が 3.0 s の場合 (図 9(a)) で消費電力が大きいノード 3，ノード 15 の消費電力が低くなっているが，ノード 4，ノード 7，ノード 16 では消費電力が高くなっている．センタ隣接ノード全体で見ると 10% 程度消費電力が削減された．図 21 の設定での各ノードの総受信待ち時間 (図 23(b)) と全ノードの間欠周期が 3.0 s の場合の各ノードの総受信待ち時間 (図 9(b)) を比較すると，ノード 3，ノード 15 が図 23(b) で減少しているのに対してノード 4，ノード 7，ノード 16 では増加している．図 24 では，負荷に応じて間欠周期を設定した場合のパケット転送回数を示しているが，全ノードの間欠周期が 3.0 s の場合 (図 10) と比較すると，ノード 3，ノード 15 では転送回数が減少し，ノード 4，ノード 7，ノード 16 では転送回数が増加していることが分かる．

以上の比較より，全てのノードの間欠周期が 3.0 s の場合にノード 3，ノード 15 で転送されていたパケットが，負荷に応じて間欠周期を設定した場合，ノード 4，ノード 7，ノード 16 で転送されるようになったと考えられる．これは，間欠周期が周囲より短いノード 4，ノード 7，ノード 16 へより多くパケットが転送されたことを表す．全ノードの間欠周期が 3.0 s の場合 (図 9(a)) と比べてノード 4，ノード 7，ノード 16 の消費電力が増加したが，センタ隣

接ノード全体で負荷が分散されたことによりネットワークの寿命が延びることになる。このように負荷の高いノードで間欠周期を長く、負荷の小さいノードで間欠周期を短く設定することで負荷の分散を行い、負荷の分散を行ったノード間で消費電力を 10% 程度削減できることが分かった。

5 おわりに

本報告では、複数の受信側ノードが間欠的に ID を送信することでリンクを確立する IIDR 方式に基づくアドホック・メッシュネットワークを対象に、計算機上でシミュレーションを行うことで基本性能特性を調べた。その結果、ノードの消費電力はパケット送信時の ID 受信待ち時間に依存することが明らかとなった。また、最大中継回数を高く設定するとパケット収集率が上昇するが、ネットワークの消費電力が増大しネットワーク寿命を短くすることが明らかとなった。また、トポロジによらず、ネットワーク内のパケットが集中するセンタ隣接ノードでは、負荷が高くなり消費電力が高いことが明らかとなった。

得られた基本性能特性に基づいて、性能を向上させるパラメータ設定方法に関する考察を行ったが、センタノードの間欠周期を適切に設定することでパケット発生率の高い場合でもパケット収集率を 14% 改善でき、さらにセンタ隣接ノードでの ID 受信待ち時間の削減が可能で、センタ隣接ノード全体で消費電力を 70% 削減できることを示した。また、間欠周期を適切に設定することによって、ID 受信待ち時間の要因であるパケット転送回数を隣接ノード間で分散させることにより、負荷分散を行なうことができ、負荷を分散させたノード全体で消費電力が 10% 削減できることを示した。

今後の課題としては、ノードごとに負荷に応じた適切な間欠周期を設定する方式を検討している。ネットワークを構成するノード数が増加し、ネットワーク全体の情報に基づいた集中的な方式では制御が困難になると考えられる。従って、ノード自身が周辺の状況に応じて自律的に設定を行なうような制御方式が必要であると考えられる。

謝辞

本報告を終えるにあたり，御指導，御教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深く感謝いたします．また，本報告において直接御指導いただきました大阪府立大学総合リハビリテーション学部の菅野正嗣准教授には，様々な相談に乗っていただき，多くの助言をいただきました．心よりお礼申し上げます．また，平素から適切なご助言をいただいた大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授，大阪大学サイバーメディアセンタの長谷川剛准教授，大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教に深く感謝いたします．最後に，本報告のために多くの時間を割いて相談に乗っていただき，支えていただいた村田研究室，中野研究室の皆様方に心からお礼申し上げます．

参考文献

- [1] K. Kredo II and P. Mohapatra, “Medium access control in wireless sensor networks,” *Computer Networks*, vol. 51, pp. 961–994, Mar. 2007.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM 2002*, pp. 1567–1576, June 2002.
- [3] Y. Higa and H. Furukawa, “Experimental evaluations of wireless multihop networks associated with intermittent periodic transmit,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E90-B, pp. 3216–3223, Nov. 2007.
- [4] A. Maeki, M. Miyazaki, M. Ohgushi, M. Kokubo, and K. Suzuki, “Intermittent wireless communication system for low-power sensor networks,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E89-B, pp. 3438–3441, Dec. 2006.
- [5] 総務省東海総合通信局, “ネットワークポロジの比較.” online available at http://www.tokai-bt.soumu.go.jp/ict_tokai/kenkyuukai/zigbee/zigbee_oya2-3-2.htm.
- [6] R. Jurdak, P. Baldi, and C. V. Lopes, “Adaptive low power listening for wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 6, pp. 988–1004, Aug. 2007.
- [7] 畠内孝明, 四蔵達之, 木代正巳, 福山良和, “メッシュネットワークの周辺ノード数と通信路マージンに関する検討,” 電子情報通信学会 2007年ソサイエティ大会, Sept. 2007.
- [8] 幸太一, 山本貴之, 菅野正嗣, 村田正幸, 宮原秀夫, 畠内孝明, “アドホックネットワークにおける TCP 性能向上手法に関する一考察,” 信学論 B, vol. J85-B, pp. 2045–2053, Dec. 2002.
- [9] S. Nakamura, M. Sekine, and K. Sezaki, “A study on time synchronization considering intermittent communication in wireless sensor networks,” *IEICE Tech. Rep.*, vol. 105, pp. 213–216, Mar. 2006.
- [10] S. J. Baek and G. de Veciana, “Spatial energy balancing through proactive multi-path routing in wireless multihop networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 15, pp. 93–104, Feb. 2007.

- [11] X. Du, Y. Xiao, and F. Dai, “Increasing network lifetime by balancing node energy consumption in heterogeneous sensor networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 8, pp. 125–136, Jan. 2008.