

Cluster-by-Cluster ルーティングにおけるメトリクスを用いた 経路及びノードの役割切り替え手法の提案と評価

浅沼佑紀^{†1} 中村嘉隆^{†2} 高橋修^{†2}

近年、無線通信技術の進展によって、アドホックネットワーク環境は私たちの社会生活に浸透しつつある。アドホックネットワークにおいて端末を階層的に管理し、安定した通信を実現する有用な手法としてクラスタリングが挙げられる。これを用いた Cluster-by-Cluster ルーティングでは経路作成の処理を効率化することで、ルーティングオーバーヘッドの削減とパケット到達率の向上が実現可能である。しかし、通信状況の変化に対応していないため、複数の通信が混在する環境ではネットワーク全体のスループットが低下するという問題がある。また、クラスタベースルーティングではクラスタ内の特定のノードに処理が集中する問題があり、これもネットワーク全体のスループットを低下させる原因になると考えられる。

そこで本稿では複数の通信が混在する環境下でもネットワーク全体のスループットを維持するルーティングの実現を目的とし、経路を切り替える手法とノードの役割を切り替える手法をそれぞれ提案し、2つの手法を組み合わせることで従来の Cluster-by-Cluster ルーティングで発生していたネットワーク全体のスループットの低下を防ぐ。

Proposal of the communication path and node role switching method using metrics in Cluster-by-Cluster routing, and its evaluation

YUKI ASANUMA^{†1} YOSHITAKA NAKAMURA^{†2} OSAMU TAKAHASHI^{†2}

1. はじめに

近年、無線通信技術の進展によってアドホックネットワーク環境は社会生活に浸透しつつある。アドホックネットワークは基地局などを必要とせず、端末同士が自律形成するネットワークである。アドホックネットワークに適したルーティングプロトコル[1]として DSR(Dynamic Source Routing)[2]や AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)[3]に代表されるリアクティブ型プロトコルがある。これらはデータ通信時に使用する経路が長くなると、パケット到達率の低下やルーティングオーバーヘッドの増大が引き起こされる。このため複数の通信が混在した場合、長経路通信によって輻輳が発生して通信信頼性が低下しやすくなる。このような環境において通信時の経路構築等の処理の効率化に有効な手法として挙げられるのが、クラスタリングを用いたルーティング[4]である。このクラスタリングを用いたルーティングに対し、長経路通信の発生を抑制する改良を加えたのが、Cluster-by-Cluster ルーティング[5]である。Cluster-by-Cluster ルーティングでは経路キャッシュの仕組みを活用することで新鮮な短経路を生成し、それらを複数組み合わせることで任意の経路を実現している。これにより長経路通信によって生じるパケット到達率の低下やオーバーヘッドの増大などといった問題を解決している。しかし、Cluster-by-Cluster ルーティングは単一経路を通信開始時か

ら終了時まで使い続け、経路を切り替える仕組みが存在しない。従って、複数の通信が混在する環境では、通信の輻輳やトラフィックの増加によるネットワーク全体のスループットの低下が発生する。また、クラスタベースルーティングではクラスタ内の特定のノードに処理が集中することで、バッテリーの著しい消費やトラフィックの集中が発生し、ネットワーク全体のスループットを低下する原因になる。

そこで本稿では、複数の通信が混在する環境下でもネットワーク全体のスループットを維持するルーティングの実現を目的とし、クラスタ間とノード間の2つの階層で手法を提案する。まずクラスタ間の通信に注目し、経路を切り替える仕組みとしてメトリクスを用いた経路切り替えを追加した手法[6]を提案し、通信時の柔軟な経路選択を実現する。次にクラスタ内のノード間の通信に注目し、ノードの役割切り替え手法を追加提案し、特定ノードへの負荷の集中を防ぐ。これら2つの提案手法を Cluster-by-Cluster へ追加し、従来手法で発生していたネットワーク全体のスループットの低下を防ぐ。提案手法はネットワークシミュレータ ns-2[7]上に実装し、従来の Cluster-by-Cluster との比較実験を行い、提案手法の有効性を評価する。

^{†1} 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

^{†2} 公立はこだて未来大学 システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University Hakodate

2. 関連研究

2.1 Cluster-by-Cluster ルーティング

Cluster-by-Cluster ルーティングでは、通常のアドホックルーティングにおける、中継ノードを記録した経路のほかにクラスタ上にオーバーレイネットワークを構築することでそのオーバーレイネットワーク上でクラスタ間ルーティングを行う。この Cluster-by-Cluster ルーティングの例を図 1 に示す。

Cluster-by-Cluster ルーティングは一般的なクラスタベースルーティングと同様、物理的に近いノード同士でクラスタヘッド(CH: Cluster Head)を中心にクラスタを形成する。CH は各クラスタに 1 つずつ存在し、自クラスタ内のノードの情報を集中管理する。異なるクラスタ間と通信をする際には、クラスタの境界に位置するノードをゲートウェイ(CG: Temporal Cluster Gateway)に設定し、クラスタ同士の通信の橋渡しを行う。CH, CG どちらにも属していないノードはメンバノード(MN: Member Node)となる。

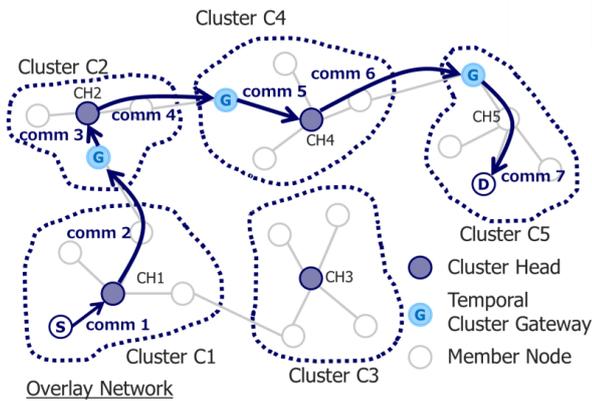


図 1 Cluster-by-Cluster ルーティング

ノード間のデータ通信時には、送信元ノードから宛先ノードが所属するクラスタまで Cluster-by-Cluster でデータを転送する(図 1)。各クラスタの CG と CH から構成されるオーバーレイネットワーク上で宛先ノードを指定することにより送信元ノードから宛先ノードまでの 1 本の長経路通信が、各クラスタを単位とする短経路通信に分割される(図 2,3)

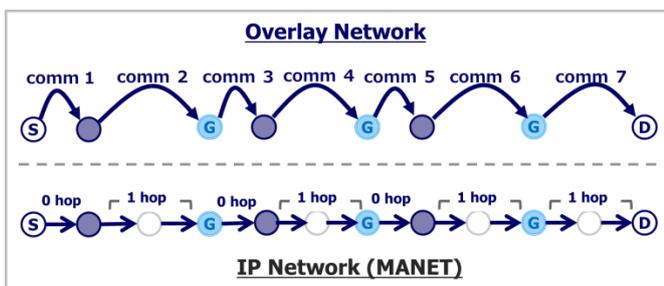


図 2 Cluster-by-Cluster ルーティングにおける通信分割

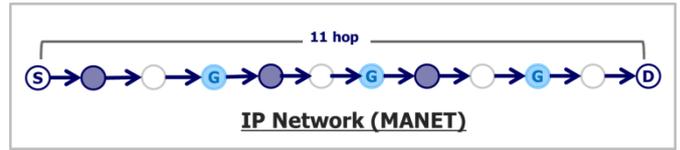


図 3 従来のルーティングの通信経路

2.2 隣接端末を考慮した Cluster-by-Cluster ルーティング

Cluster-by-Cluster ルーティングは大規模なアドホックネットワークで使われることが想定されており、同一ネットワーク内に複数の通信が混在する場合もある。その場合、ある通信が他の通信のパフォーマンスを低下させる恐れがある。この問題に対してネットワークにおけるある種のメトリクスを用いた経路切り替えを適用したのが、隣接端末を考慮した Cluster-by-Cluster ルーティングである[8]。この手法では隣接端末数 N 、平均リンク切断予測時間レベル LLT 、バッテリー残量 B 、ノードの振る舞い T 、を用い、以下の式によってある経路における優先度を求める。

$$\text{優先度} = \omega_1 \times \frac{1}{N} + \omega_2 \times \frac{1}{LLT_{average}} + \omega_3 \times \frac{1}{B} + \omega_4 \times \frac{1}{T_{role}}$$

求めた優先度 W を各経路で比較し、 W の値が大きな経路に動的に切り替える。この結果、ネットワークの全体の負荷を分散し、スループットの向上を実現している。

3. 先行研究

3.1 メトリクスを用いた経路切り替えを行う

Cluster-by-Cluster ルーティング

著者らが先行研究で提案した Cluster-by-Cluster ルーティング[6] (以下、本方式) では、以下の 3 ステップで経路切り替えを行う。

- (1) メトリクスの測定と収集
- (2) 経路における優先度の計算
- (3) 経路の切り替え

Cluster-by-Cluster ルーティングは DSR をベースに構築されており、単一経路しか構築・保持できない。そこで本方式では Cluster-by-Cluster ルーティングを拡張し、プライマリ経路 1 本と代替経路 2 本を構築するようにした。これらの経路を対象に状況に応じて経路切り替えを行うことで、安定化したルーティングを行う。この経路切り替えの基準に 4 つのメトリクス(ホップ数、トラフィック量、リンク状態、バッテリー残量)を用いて経路切り替えを行っている。

メトリクスを各ノードで測定した後、送信元ノードへメトリクス情報を渡す際には Cluster-by-Cluster ルーティングに搭載されている Neighbor Feedback を使用する。

メトリクスのうちホップ数については RREQ の hop count を利用して測定する。また、トラフィック量については各ノードが自身のキューを参照し保持しているパケットの量を調べ、traffic として保存する。リンク状態は隣接クラスタ同士の通信遅延時間を指し、Link としてリンク状

態を表わす指標として用いる。また、各ノードが自身のバッテリ残量を参照し、 B として保存する。

送信元ノードは、収集したこれらのメトリクスに基づき各経路について優先度 W を計算し、経路選択基準として用いる。 W は以下の式で求める。

$$W = \omega_1 \times \frac{1}{N} + \omega_2 \times \frac{1}{\text{traffic}} + \omega_3 \times \frac{1}{\text{Link}} + \omega_4 \times B$$

N は送信元クラスタから宛先クラスタまでのホップ数、 traffic は該当経路における各クラスタのトラフィックの和、 Link は該当経路におけるクラスタ間の遅延時間。 B は該当経路におけるクラスタのバッテリー残量を表している。また、それぞれのメトリクスに対し、 ω_1 から ω_4 までのパラメータによって重み付けを行っている。経路切り替えは図4のフローチャートに基づいて行う。本方式には図5のように2種類の経路が存在し、送信元ノードの送信要求に対して宛先ノードまでの実際にパケットを通信するプライマリ経路が1本と、経路切り替えの候補になる代替経路が1本以上構築される。一定時刻に達したら、送信元ノードはプライマリ経路、代替経路の全ての経路に対して優先度 W の計算を行い、 W が最も大きい経路をプライマリ経路とし、プライマリ経路を使用して通信を行う。

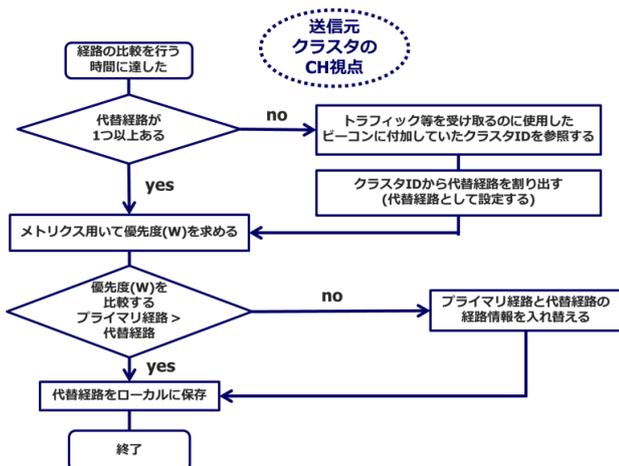


図4 優先度による経路切り替えアルゴリズム

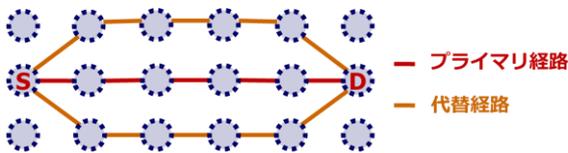


図5 プライマリ経路と代替経路

メトリクスを用いたルーティングの効果を調べるため、ネットワークシミュレータ ns-2 上で評価実験を行った[9]。本評価実験の結果、4つのメトリクスを組み合わせる場合にネットワーク全体のスループットが最も向上した。経路切り替えに用いるメトリクスにトラフィックを用いることでネットワーク全体のスループットは向上し、バッテリー残量は通信を長期的に行うためには必要なメトリクスで

あることがわかった。また、リンク状態のメトリクスについては実験環境により効果がある場合とそうでない場合があった。

4. 提案手法

4.1 ノードの役割切り替え手法の追加

2つの提案手法を組み合わせた全体の流れとしては、ある時刻において、まずはノードの役割切り替え手法を用いて、クラスタ内の特定のノードに対する負荷の分散を行う。これを一定回数行い、クラスタ内において全体のノードが使い回された段階で、経路切り替え手法を用いて、通信に使用するクラスタを切り替える。

Cluster-by-Cluster ルーティングはクラスタベースルーティングであり、クラスタを管理するために各CHに負荷が集中する、そのため、もしCHにトラフィックが集中してピーコンメッセージを喪失したり、バッテリー残量がゼロになると、それ以降の通信が不可能になる可能性があり、大きなスループットの低下の原因になる。従って、これらの問題を解決するためにノードの役割切り替え手法を追加提案する。ここでいうノードの役割とはCH、CG、MNの3種類を指しているが、本稿ではCHとMNの切り替えのみを考慮し、図6、7のようにCGの変更は考慮しないこととする。

ノードの役割切り替え手法は先述の経路切り替え手法で測定・収集したメトリクスを活用する。あるクラスタにおいてCHがメトリクスを用いて同一クラスタ内の各ノードで役割優先度 R を計算し、比較することで、より R が大きいノードへCHを切り替える。これによって特定のノードに負荷が集中することを防ぎ、ネットワーク全体のスループットの低下を防ぐ。

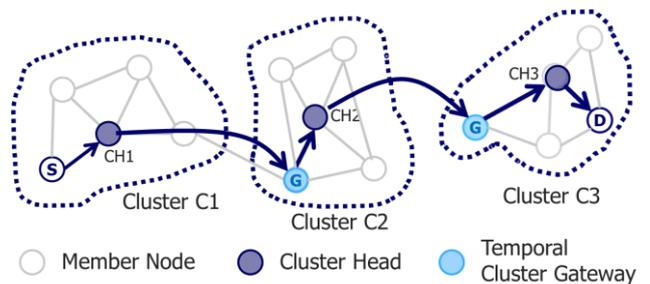


図6 ノードの役割切り替え前

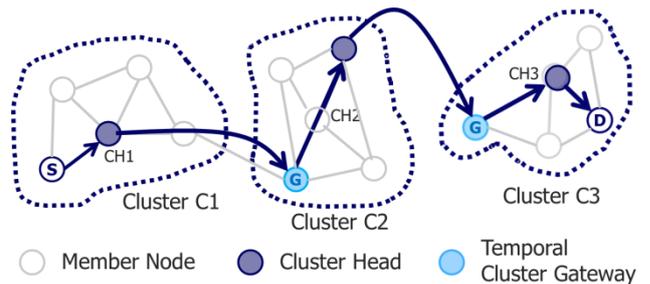


図7 ノードの役割切り替え後

4.2 ノードの役割切り替え手法のメトリクス基本戦略

ノードの役割切り替え手法では、基本戦略として、経路切り替え手法と同じメトリクスを用いる。ノードの役割切り替えで新たなメトリクスを定義し測定・収集を行うと通信のオーバーヘッドが増大してしまう。従って、**traffic**と**B**については経路切り替え手法と全く同じメトリクスを使用する。しかし、ホップ数(**N**)とリンク状態(**Link**)については既存のビーコンメッセージを利用し、測定・収集方法を変更する。**N**の場合の動作例を図8に示す。**N**と**Link**はあるクラスタにおいて、自クラスタ内のCHと、オーバーレイ上の次にホップするクラスタのCG間に注目する。これをIPネットワークの通信経路で表現すると、CH-CG間の途中にCHと同じクラスタ内のMNを中継することになる。CHはこのMNを特定し、CH-特定MN間の**N**および**Link**を参照する。その後、**N**の場合は、この特定MNから同じクラスタ内の別のノードへ対し、ホップ数が**N**のノードにホップ数のメトリクスとして**N**を与える。また、**Link**も同様に考える。

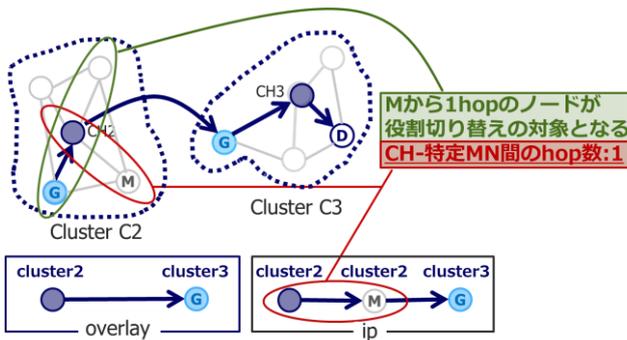


図8 ノードの役割切り替えのホップ数の動作例

5. 実験と考察

5.1 実験

メトリクスを用いた経路切り替え手法及びノードの役割切り替え手法の効果を調べるため、ネットワークシミュレータ ns-2 上で比較実験を行った。シミュレーションパラメータを表1に示す。本実験は従来の Cluster-by-Cluster ルーティングと、提案手法を追加した Cluster-by-Cluster ルーティングでの比較実験を以下の通り4つ行う。

- 実験1: ネットワーク全体の平均スループット比較
- 実験2: 複数の通信経路が他の通信経路と直交する時としない時の比較
- 実験3: ノードの役割切り替えの有効性
- 実験4: 同一ネットワーク内における通信本数によるスループットの変化と提案手法の有効性

比較実験ではノードを固定したアドホックネットワー

クにおいて、5つのノードに対して1つのクラスタを形成し、クラスタを6×6でグリッドに配置して行う。なお、クラスタは事前に形成済みのもとし、最初のCHも予め決めてあるものとする。また、送信元ノードおよび宛先ノードのバッテリー残量が著しく減少すると、通信経路によらず通信が不可能になってしまうため、送信元ノードと宛先ノードのバッテリー容量を他のノードの2倍とすることで、実験中に通信が途切れないようにしている。このトポロジ上で n 本の通信を同一ネットワーク内に同時に発生させる。また、それぞれの通信の送信元ノード及び宛先ノードはランダムで決まるものとする。

表1 シミュレーションパラメータ

計測時間	2000s
ネットワークサイズ	1200m×1200m
ノード数	180 個
クラスタ数	36 個
通信プロトコル	UDP
ルーティングプロトコル	Cluster-by-Cluster
通信帯域幅	250kbps
ノードの役割切り替え判断時刻	300s, 900s, 1500s
経路切り替え判断時刻	600s, 1200s, 1800s

5.2 実験結果と考察

実験1では従来の Cluster-by-Cluster ルーティングと提案手法でネットワーク全体の平均スループットについて比較した。なお、同一ネットワーク内の通信本数は3本とし、同時刻にランダムで選ばれた送信元ノードと宛先ノードのペアで通信を開始することとする。実験結果を図9に示す。300s 時点では従来手法も提案手法もスループットに大きな差は無いが、時刻が経過するにつれてその差は大きくなっていく。300s から 1800s では従来手法よりもネットワーク全体のスループットがおおよそ 14% 向上している。従来手法ではスループットが下がり始めた際に対処することができず、その後もスループットが下がり続けてしまう。スループットが下がる要因としてトラフィックの集中によってパケットロスが発生してしまうことや、経路の再構築が頻繁に発生することが挙げられる。また、バッテリー残量がゼロとそのノードで通信が不可能になってしまうため、スループットを低下させる原因となる。提案手法ではノードの役割と経路の両面で切り替えることにより、特定のノードへの負荷の集中を防ぐことができていると考察される。

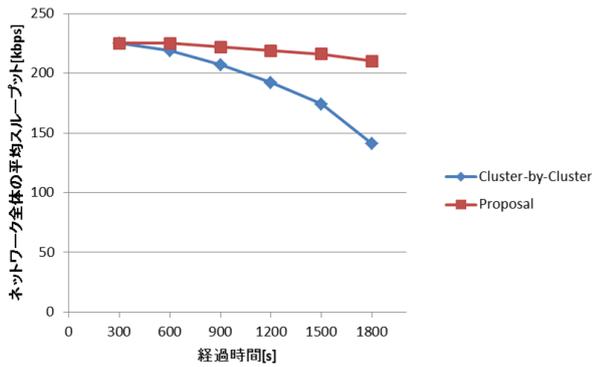


図 9 ネットワーク全体の平均スループット

同一ネットワーク内に複数の通信が混在する場合、ある通信が他の通信へ影響を与えるパターンはいくつか存在する。なかでも通信経路が他の通信経路と直交する場合、提案手法では効果が期待できない可能性がある。一方で通信経路が並列に並ぶような状況では提案手法は有効であると考えられる。従って実験 1 を発展させ、ランダムな位置で通信が行われる中でも、通信経路が直交する場合とそうでない場合で抽出し、実験 2 で結果を考察する。実験結果を図 10 と図 11 に示す。複数の通信が直交している場合は従来手法と提案手法を比較しても、提案手法においてあまりスループットの低下を防ぐことはできていない。一方で通信が直交していない場合においては提案手法が有効に働き、ネットワーク全体のスループットの大きな低下を防ぐことができている。この原因は経路の切り替えの仕組みにある。通信が直交している場合、経路を切り替えても他の通信と共有するクラスタが存在してしまう。Cluster-by-Cluster ルーティングにおいて、同一クラスタを複数の通信で使い回すことはスループットを下げる要因になってしまい、ノードの役割切り替えを用いても僅かのスループットの向上しかできないと考えられる。

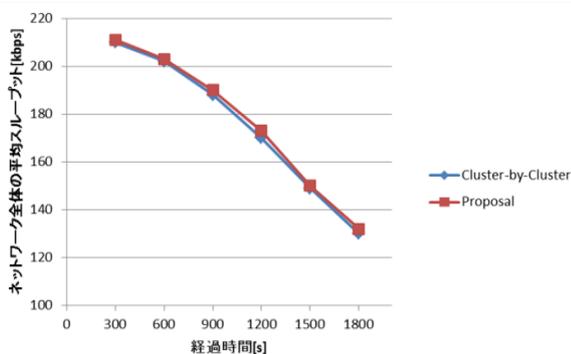


図 10 複数の通信が直交している場合

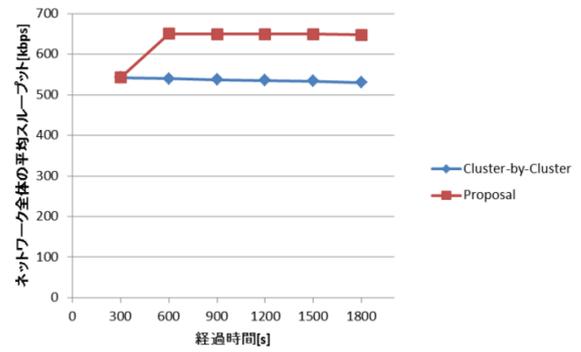


図 11 複数の通信が直交しない場合

実験 3 では提案手法は経路切り替えとノードの役割切り替えの 2 つの切り替えがあるため、それぞれがどれだけネットワーク全体のスループットの維持に効果があるかを評価した。実験結果を図 12 に示す。経路切り替えのみを適用した手法は従来の Cluster-by-Cluster ルーティングと比べ、スループットが平均して 11% 向上していることがわかる。また、ノードの役割切り替えも、平均して 5% スループットが向上している。従って、経路切り替えだけでなく、ノードの役割切り替えもネットワーク全体のスループットの維持に効果があると考えられる。

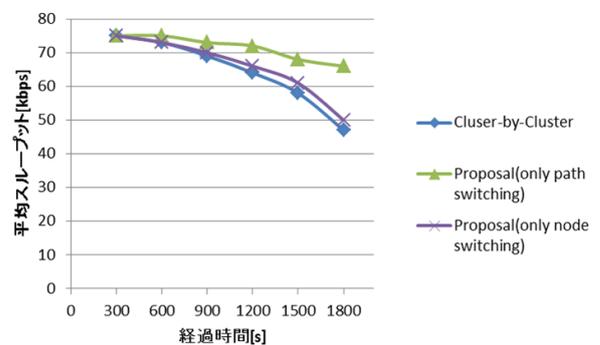


図 12 両切り替え手法の平均スループットの比較

一般に、同一ネットワーク内に存在する通信本数が多くなれば多くなるほど経路間のスループットは低下し、ネットワーク全体のスループットが低下すると考えられる。そこで、従来手法と提案手法で通信本数によってどれほどスループットが低下するのか、実験 4 では通信本数が 1 本から 5 本のときの経路間の平均スループットを調査した。実験結果を図 13 に示す。

通信本数が増えるごとに従来手法と提案手法の両方でスループットが低下している。通信本数が 1 本の時はスループットに大きな差は無く、通信本数が 2 本の時には 15%、3 本の時には 16% だけスループットが向上している。従って、同一ネットワーク内に通信が 2 本から 3 本存在する時に提案手法が非常に有効に効いていることがわかる。一方

で通信本数が4本以上になると提案手法でもあまりスループットの大きな改善は見られない。これは提案手法によって経路やノードを切り替えてもほとんど別の通信で使用されており、影響を受けてしまっているためだと考えられる。

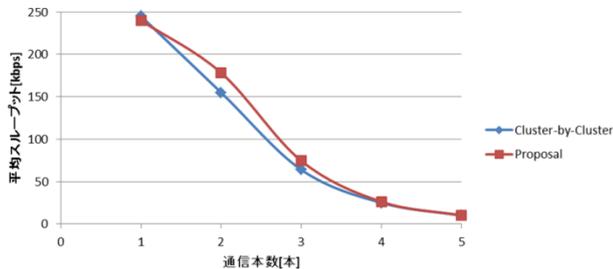


図 13 同一ネットワーク内における通信本数による変化

5.3 提案手法の考察

実験結果から、提案手法は大規模なアドホックネットワークにおいて、ある環境においてはネットワーク全体のスループットの低下を防ぐことができる有効な手法であると考えられる。ただし、複数の通信経路が直交する場合と、同一ネットワークにおいて宛先ノードの異なる通信本数が3本を超えた場合に、スループットの低下を防ぐ効果は薄くなる。従って、例えばセンサネットワークのような、複数のセンサノードが一つのシンクノードに対して通信するような場合には有効であると考えられる。この場合にはネットワーク全体のスループットの低下を防ぐことが出来る有効な手法であると言える。

さらに提案手法を拡張するのであれば、通信経路の直交と通信本数の問題のほか、ビーコンの効率的な制御が必要になる。クラスタベースルーティングはクラスタの管理にビーコンが必要になり、ノードへ負荷を掛ける要因となる。そこに提案手法によってメトリクスの測定や収集、優先度の計算を行うことは、さらにノードへ負荷を掛けることになる。そのため、さらにメトリクスの種類を増やすことや、メトリクスの測定や優先度の計算の精度を高めることは、経路切り替え後の通信瞬断後の復帰を遅くし、平均スループットの低下といった問題が発生することが予測される。ネットワーク内の通信状況等の変化をより監視し、変化後に即対応できるルーティングが一番望ましいが、これを実現するにはビーコンの効率的な制御技術が必須であり、この問題が解決できた場合、提案手法よりもさらにネットワーク全体のスループットを維持できるルーティングが提案できるのではないかと考えられる。

6. おわりに

本研究では、複数の通信が混在する環境下でもネットワーク全体のスループットを維持するルーティングの実現を目的とし、メトリクスを用いた経路切り替え手法とノードの役割切り替え手法を追加した Cluster-by-Cluster ルーティングを提案した。提案手法ではメトリクスとして、ホップ数、トラフィック量、リンク状態、バッテリー残量を経路およびノードの役割切り替えの指標として用いた。この4つのメトリクスから通信中に優先度を計算し、柔軟な経路およびノード選択を可能とした。

実験結果から、あるネットワーク環境においては、4つのメトリクスを組み合わせることでネットワーク全体のスループットの維持を達成できることを確認した。従来手法と比べ、提案手法はネットワーク全体のスループットを平均で14%向上させ、特に同一ネットワークにおいて通信本数が1本~3本で通信経路が直交しない場合に提案手法は非常に有効であることがわかった。そのため、上記の条件であれば大規模なアドホックネットワークにおいてネットワーク全体のスループットを維持しながら通信を提供できることが考えられる。

参考文献

- [1] M. Kumar, R. Rishi, and D.K. Madan "Comparative Analysis of CBRP, DSR, AODV Routing Protocol in MANET," International Journal on Computer Science and Engineering, Vol.2, No.9, pp.2853-2858, 2010.
- [2] DSR (Dynamic Source Routing):RFC4728, <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>.
- [3] AODV (AD-hoc On-Demand Distance Vector):RFC3561, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
- [4] J.Y.Yu, P.H.J.Chong, "A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.7, No.1, pp.32-48, 2005.
- [5] H. Narumi, Y. Shiraishi, and O. Takahashi, "A Reliable Cluster-based Routing Algorithm for MANET," Proceeding of the International workshop on Informatics (IWIN2009), pp.44-51, 2009.
- [6] 浅沼佑紀, 中村嘉隆, 高橋修, "MANET 上のトラフィック状況をメトリクスとしたクラスタベースルーティングアルゴリズムの提案," 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム論文集, pp.809 - 814, 2014.
- [7] The Network Simulator version 2 (ns-2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [8] 鈴木翔太, "MANETs における隣接端末情報を考慮した Cluster-by-Cluster ルーティングプロトコルの研究," 中央大学大学院研究年報, 理工学研究科篇, 第 40 号, 2010.
- [9] Yuki Asanuma, Yoshitaka Nakamura, and Osamu Takahashi, "An evaluation of the influence of communication metrics in realizing multi-path routing in consideration of the communication situation on an ad hoc network," Proceedings of the International Workshop on Informatics (IWIN2015), pp.35-40, 2015.