

# MANET 上のトラフィック状況をメトリクスとした クラスターベースルーティングアルゴリズムの提案

浅沼佑紀<sup>†1</sup> 中村嘉隆<sup>†2</sup> 高橋修<sup>†2</sup>

端末の小型化や無線技術の発展によって端末同士が移動しながらも通信できる MANET(Mobile Ad-hoc Network)はさまざまな用途で用いられ始めており, 大規模な MANET を対象とした研究が多く行われている. MANET に代表される高移動頻度通信において安定した通信を実現するために用いられる手法としてクラスタリングを用いたルーティングが挙げられる. クラスタリングを用いることで, 経路の作成を効率化でき, 輻輳を防ぐことができる. これを発展させた Cluster-by-Cluster ルーティングでは経路作成の処理を効率化し, ルーティングオーバーヘッドの削減やパケット到達率の向上などといった効果が得られた. しかし, 各ノードの通信状況の変化には対応できず, 単一経路をそのまま使い続けるため, 複数の通信が混在する環境においてはネットワーク全体のスループットが低下する可能性があるという問題がある.

本稿では, Cluster-by-Cluster ルーティングアルゴリズムへ経路選択機能を設け, トラフィックを中心とした指標により柔軟な経路選択を可能とし, ネットワーク全体のスループットの向上を目指す.

## A proposal of cluster-based routing algorithm considering traffic condition on MANET

YUKI ASANUMA<sup>†1</sup> YOSHITAKA NAKAMURA<sup>†2</sup> OSAMU TAKAHASHI<sup>†2</sup>

### 1. はじめに

近年, 無線技術の進展によって端末の小型化や高性能化が進み, MANET(Mobile Ad-Hoc Network)環境は浸透しつつある. MANET は基地局などのインフラストラクチャを必要とせず, 移動無線端末(ノード)が自律的に形成するネットワークである. MANET に適したアドホック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ればなるほど, 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とが知られている. MANET のような高移動頻度環境において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, 通信信頼性が低下する. 従って, 安定した通信を実現するためには, 長経路通信の発生を抑制する必要がある. このような高移動頻度環境において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. ネットワーク上の物理的に近いノード同士でグループ(クラスター)形成するため, DSR などの非クラスター

ベースのルーティングと比べて通信時の経路構築などの処理を効率化できる. このクラスタリングを用いたルーティングに長経路通信の発生を抑制する仕組みを搭載したのが, 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通信を実現している. これによって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, この手法は一つの経路を通信開始時から終了時まで使い続けることを前提としており, 経路を切り替える仕組みが存在しない. 複数の通信が混在する環境においては各ノードの通信状況は随時変化するため, 通信の輻輳やトラフィックの増加によるスループットの低下が発生する.

そこで本稿では, ネットワーク上のトラフィック状況などをメトリクスとした経路切り替え機能を Cluster-by-Cluster ルーティングに追加することで, 同時に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手法を提案する.

<sup>†1</sup> 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 Sciences, Future University Hakodate

<sup>†2</sup> 公立はこだて未来大学 システム情報科学部  
Systems Information Sciences, Future University Hakodate

## 2. 関連研究

### 2.1 クラスタベースルーティング

一般的なクラスタベースルーティングの例を図1に示す。通常、クラスタリングでは、物理的に近いノード同士でクラスタヘッド(CH: Cluster Head)を中心としたクラスタを形成する。CHは自分のクラスタに属しているノードの情報を集中管理する。また、異なるクラスタの境界に位置するノードはクラスタゲートウェイ(CG: Cluster Gateway)として、クラスタ同士の通信の橋渡しをする。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)と呼ぶ。

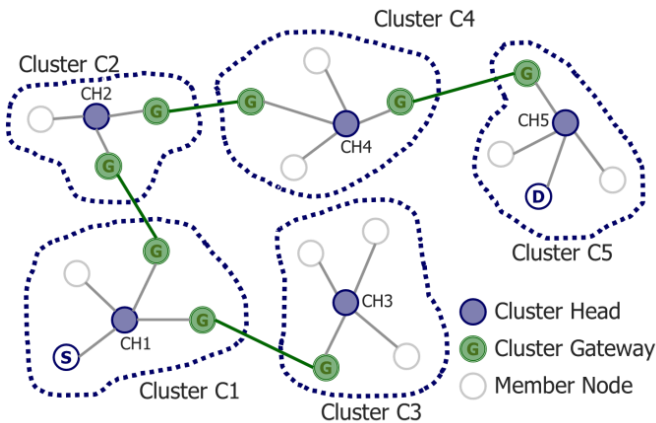


図1 MANETにおけるクラスタリング

既存のアドホックルーティングプロトコルでは経路作成時に発生する制御メッセージである、RREQ(Route Request), RREP(Route Reply)を一斉にフラッディングした際、最悪の場合でネットワーク上のすべてのノードが経路作成に参加する必要がある。これに対し、クラスタベースルーティングでは図2のようにネットワーク上の各CHに制御メッセージを送信するだけでよいため、これらの制御メッセージを大幅に抑制できる。制御メッセージを受け取った各CHは自身が管理するクラスタ内のノードに、宛先ノードが含まれていなければRREQを廃棄、もしくは隣接クラスタへ転送する。この仕組みによって通信経路を素早く構築することができる。このようなクラスタベースルーティングの代表的なものとしてCBRP(Cluster Based Routing Protocol)[6]がある。

しかし、大規模ネットワークにおいて送信元ノードから宛先ノードまでの距離が遠い場合、中継ノードの多い長経路通信となる場合が多い。この場合、中継ノードの移動によって経路切断の可能性が高まったり、パケット到達率が低下する可能性がある。

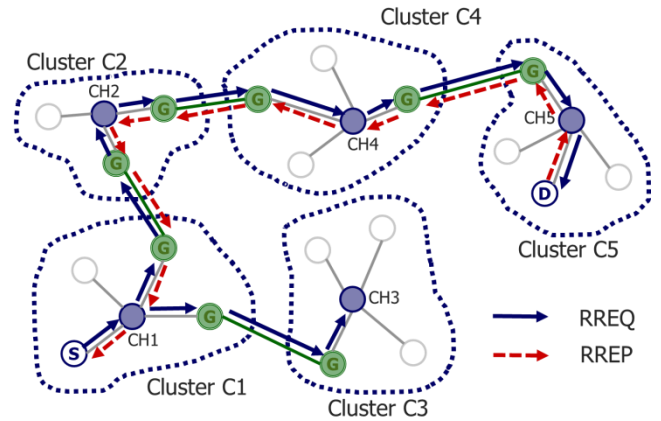


図2 クラスタリングを用いたネットワークにおけるRREQ, RREPの送信例

### 2.2 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、クラスタ上にオーバーレイネットワークを構築する。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。具体的には、送信元ノードは宛先ノードまでの経路のほか、送信元クラスタから宛先クラスタまでのクラスタレベルでの経路を持つ。このように、ノードレベルの経路とクラスタレベルの経路の2つのレイヤでルーティングを管理する。クラスタレベルでの経路を作成するに当たり、まず送信元クラスタはネットワーク上に存在している全クラスタの位置関係を把握する必要がある。これはNeighbor Feedbackという、隣接クラスタ情報を集める仕組みを利用する(図3)。

まず、それぞれのクラスタでは、CHが自クラスタに属しているCG, MNを管理するために定期的にビーコンを送信する。このビーコンは事前に設定したホップ数まで隣接ノードへ送信され、ビーコンには送信してきたCH属しているクラスタIDが付加されている。すると、とあるCHからのビーコンを2個以上受け取るMNが発生する。たとえば、メンバノードAがクラスタC2に属していた場合、Aは最初にクラスタC2のCHからビーコンを受信する。その後、クラスタC1のCHからのビーコンを受信する。この時、メンバノードA最初に受信したクラスタC2のビーコンに付加しているクラスタIDを参照し、自身がどのクラスタに属しているか判断する。続いてメンバノードAは、次に受信したクラスタC1のビーコンからクラスタC1の存在を知る。クラスタC2の次にクラスタC1のビーコンを受信したことから、メンバノードAはクラスタC2とC1が隣接していることがわかる。この時、メンバノードAは一時的なクラスタゲートウェイ (Temporal Cluster Gateway) となり、2番目に受け取ったビーコンの送信元クラスタに属するCHへ”C2はC1に隣接している”というメッセージを送信する。このメッセージをNeighbor Feedbackという。

ノード A がクラスタ C1 の CH に送信する Neighbor Feedback で送信するメッセージには、これまで C2 がローカルに保存していた隣接クラスタ情報を追加する。このようにして送信元クラスタはネットワーク全体の隣接クラスタ情報を集める(図 3)。

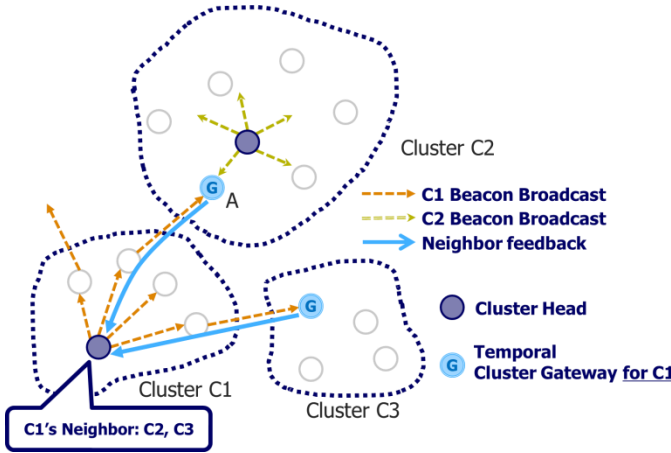


図 3 Neighbor Feedback による隣接クラスタ情報の収集(1)

クラスタ C1 の CH が次回ビーコンをクラスタ内にブロードキャストする際は、ビーコンに”C1 に隣接するクラスタは C2 である”という情報を追加して送信する。この処理を各クラスタで定期的に行い、最終的にネットワークのすべてのノードがネットワーク上のすべてのクラスタの隣接クラスタ情報を集める(図 4)。

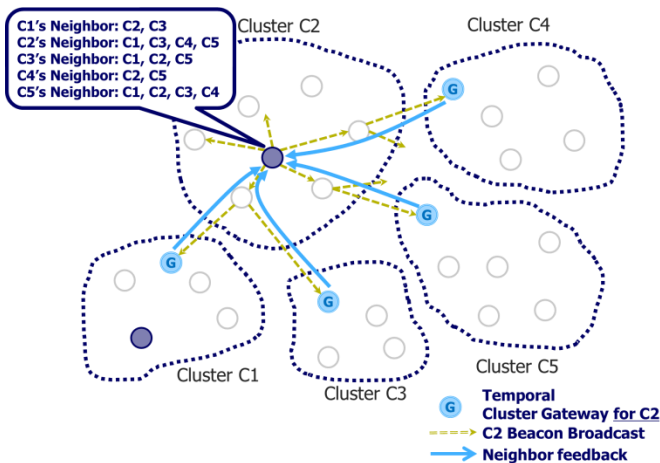


図 4 Neighbor Feedback による隣接クラスタ情報の収集(2)

このビーコン送信と Neighbor Feedback 返信の仕組みにより、各クラスタに属するノードは自クラスタを起点とするネットワーク上の他クラスタとの相対的な位置関係を把握できる(図 5)。このクラスタの相対的な位置関係をクラスタマップという。

|    |    |    |                        |
|----|----|----|------------------------|
| C6 | C7 | C8 | C0: C1, C3             |
| C3 | C4 | C5 | C1: C0, C3, C4, C2     |
| C0 | C1 | C2 | C2: C1, C5             |
|    |    |    | C3: C0, C1, C6, C4     |
|    |    |    | C4: C1, C3, C7, C5, C6 |
|    |    |    | C5: C2, C4, C7, C8     |
|    |    |    | C6: C7, C3, C4         |
|    |    |    | C7: C4, C5, C7, C8     |
|    |    |    | C8: C7, C5             |

図 5 クラスタマップの例

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 6)。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 7,8)

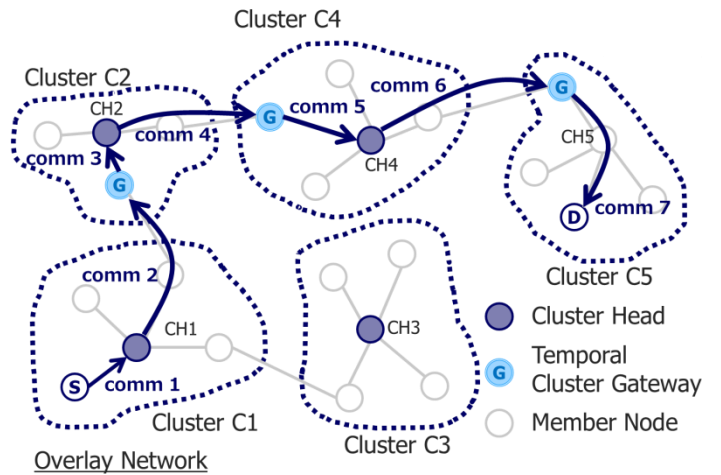


図 6 Cluster-by-Cluster ルーティング

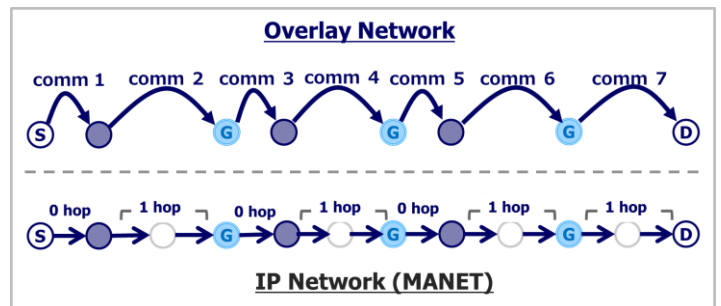


図 7 Cluster-by-Cluster ルーティングにおける通信分割

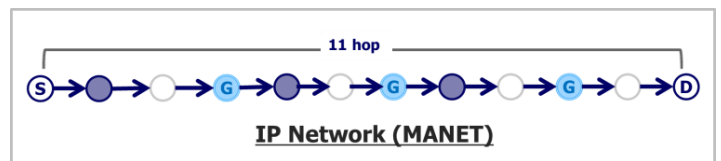


図 8 従来のルーティングの通信経路

### 2.3 課題

従来の Cluster-by-Cluster ルーティングでは一本の長経路通信を複数の短経路通信に分割する手法をとっている。しかし最終的に使用する短経路通信は1通りだけであるため、この短経路のどこかで接続が切れたり、スループットが低下したりした場合には、代替経路に切り替えることができない。また、経路を作成する際には最小ホップ数となるものを選択するため、それぞれのノード間のリンク状態や、通信トラフィックなどは考慮されていない。

## 3. 提案手法

### 3.1 メトリクスを決めるにあたっての基本戦略

本提案手法では Cluster-by-Cluster ルーティングを拡張し、各通信経路について本来の経路とは別に代替経路を持たせる[7]。この2種類の経路に対して、通信トラフィックを考慮した経路切り替えを行うことで通信状況の変化にも対応できる、安定化したルーティングを実現する。

Cluster-by-Cluster ルーティングは DSR をベースに構築されており、単一経路の構築しか考慮に入れていない。本提案手法ではプライマリ経路と代替経路の2種類を構築し、プライマリ経路は必ず1本、代替経路は1本以上とする[8]。

経路切り替えの基準としてスループットを維持するためのメトリクスが必要である。一般にスループットに影響を与える要素として、送信元ノードから宛先ノードまでの通信経路のホップ数、リンク状態(クラスタ間の遅延時間)、経路上のトラフィック、CH・CGなどクラスタ間通信に用いるノードのバッテリー容量などが考えられる。通信経路のホップ数が増える、すなわち多くのノードを経由するほど、また経路の遅延時間が長いほどスループットは低下する。一方、経路内に別の通信のトラフィックが発生した場合はそれぞれの通信が干渉し輻輳が発生する。さらに、クラスタを管理する CH・他クラスタとの通信を仲介する CG のバッテリーがなくなると通信の継続が不可能となる。したがって、本提案手法では、ホップ数、トラフィック、リンク状態(クラスタ間の遅延時間)、バッテリー残量の4つをメトリクスとし、送信元クラスタの CH がこれらを総合的に判断し、ネットワーク全体の安定性が向上するようにルーティングする。以下ではそれぞれの収集アルゴリズムを提案する。

### 3.2 ホップ数収集アルゴリズム

図9のように行う。

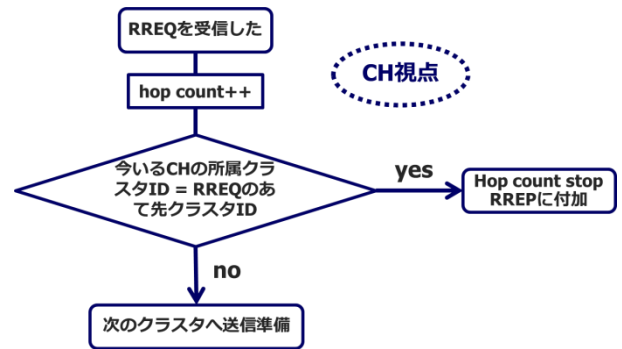


図9 ホップ数収集アルゴリズム

RREQ の hop count を利用してホップ数を測定する。RREQ が CH に到着した際に hop count をインクリメントし、次のクラスタへと引き渡す。宛先クラスタの CH に到着した時点で hop count の値を保存し、この経路のホップ数とする。

なお、Cluster-by-Cluster ルーティングにおいて動的にホップ数が変化するのは各ノードの移動により MN や CG が通信不可能な場所へ移動してしまった時が考えられる。本稿では、ノードの移動によるクラスタ構成の変更は考慮に入れない。

### 3.3 トラフィック量収集アルゴリズム

トラフィックの収集はクラスタ内の MN 同士および MN-CH 間の経路、クラスタ間の CH 同士の経路の二段階に分けて考える。まずクラスタ内の MN および CH が自身のキューを参照し、パケット量(pkt\_size)とパケット個数(pkt\_count)を調べる(図10)。なお、それぞれのクラスタの CH は自身に隣接クラスタ情報(map)、自クラスタ ID(Cx)、ビーコンシーケンス番号(s)、トラフィック情報(traffic)を持つ。

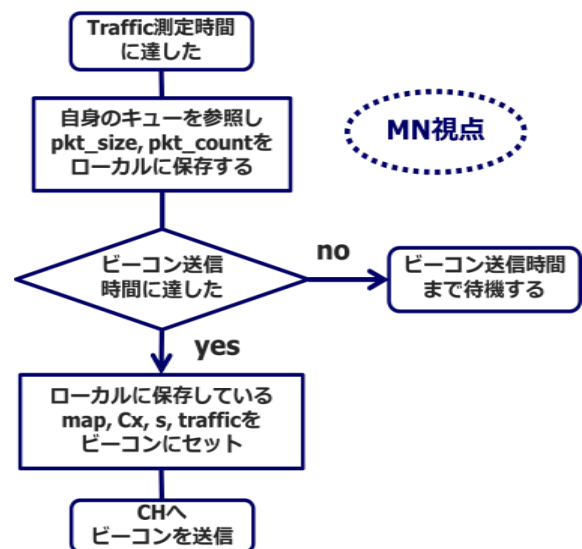


図10 MN のトラフィック測定アルゴリズム



MN は CH へ定期的にビーコンを送信するため、そのビーコンに計測したトラフィックを付加する。CH へ届けられたビーコンは、ネットワーク全体でクラスタの情報を共有するために隣接クラスタへビーコンを送信する。この時にビーコンのタイムスタンプを設定する(図 11,12)。

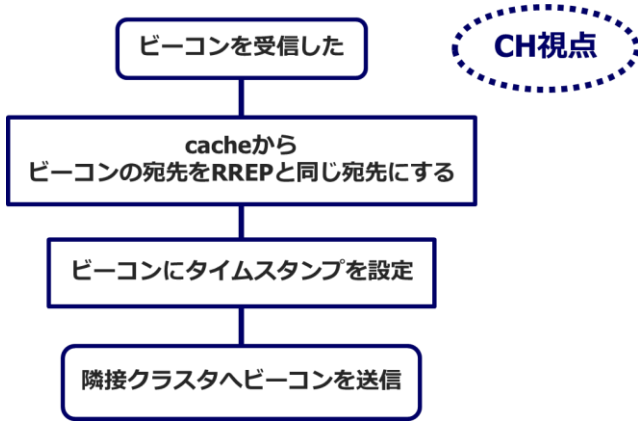


図 11 CH が次の宛先クラスタを決める流れ

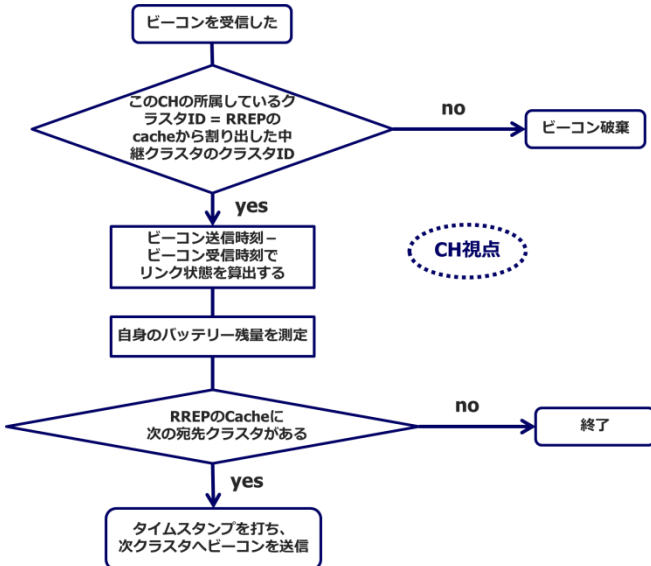


図 12 CH-CH 間でトラフィックを共有するアルゴリズム

CH 同士でトラフィックを共有し、送信元クラスタの CH まで到着したとき、それぞれのクラスタのトラフィックを合計し、*traffic* として保存する。

### 3.4 その他のメトリクス

リンク状態の収集は図 12 の通りを行う。本提案手法におけるリンク状態とは、隣接クラスタ間における、送信元クラスタの CH と宛先クラスタの CH 間の遅延時間とする。測定方法は、トラフィックを共有するアルゴリズム(図 12)で使用しているビーコンを利用し、隣接クラスタの CH がビーコンを送信した時刻から、宛先となっているクラスタの CH がそのビーコンを受信した時刻の差をとる。このようにしてクラスタ同士で通信における遅延時間を求め、リ

ンク状態とする。その後、リンク状態は CH が管理し、隣接クラスタ情報の収集で使用するビーコンに便乗させる。送信元クラスタの CH にそれぞれのクラスタ間のリンク状態が集まったら、ホップ数に対しての平均をとり、*LLT* として保存する

バッテリー残量は、各クラスタの CH が自身のバッテリー残量について測定する。測定後、*B* として CH が管理し、これも隣接クラスタ情報を収集する際に使用するビーコンに便乗させ、他のクラスタへと情報を共有する。そして送信元クラスタの CH へ到着した時、ホップ数に対しての平均をとり、*B* として保存する。

### 3.5 メトリクスを用いた経路切り替え手法

経路を選択するための基準として、3.1 から 3.4 までで収集したメトリクスに基づいて送信元クラスタの CH は各経路について優先度 *W* を計算する。*W* は以下の式で求める [9]。

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

ここで、*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、*LLT* は該当経路におけるクラスタ間の平均遅延時間。*B* は該当経路における CH の平均バッテリー残量を表している。また、 $\omega_1$  から  $\omega_4$  までのパラメータを用いて、それぞれのメトリクスに重み付けを行っている。スループットに対し、最も影響をあたえるのはホップ数であり、トラフィック、リンク状態、バッテリー残量の順に重みを与える。経路の切り替えは図 13 の様に行う。まず一定時刻に達したら、送信元ノードが属するクラスタの CH がプライマリ経路・代替経路の全ての経路に対し、優先度 *W* の計算を行う。*W* が最大の経路を選択することとし、一定時間後に同様に再計算した結果、*W* の値が変化した場合、その時点で *W* が最大の経路に切り替える。プライマリ経路・代替経路の全てが使用できない場合は、送信元クラスタから改めて送信要求を行い、通信経路を再構築する(図 14)。

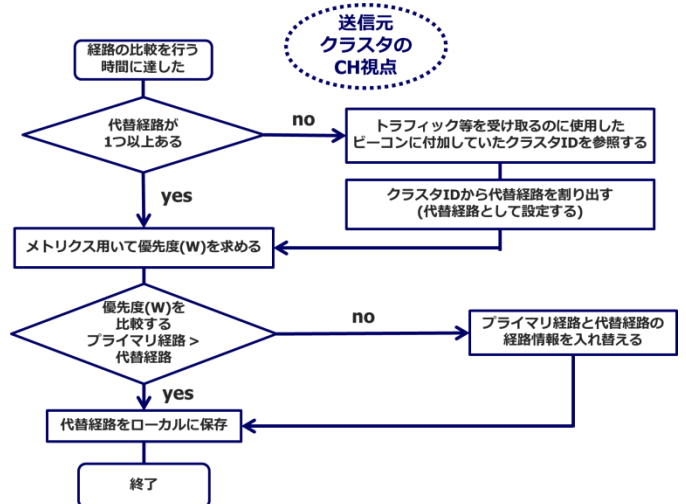


図 13 優先度による経路切り替えアルゴリズム

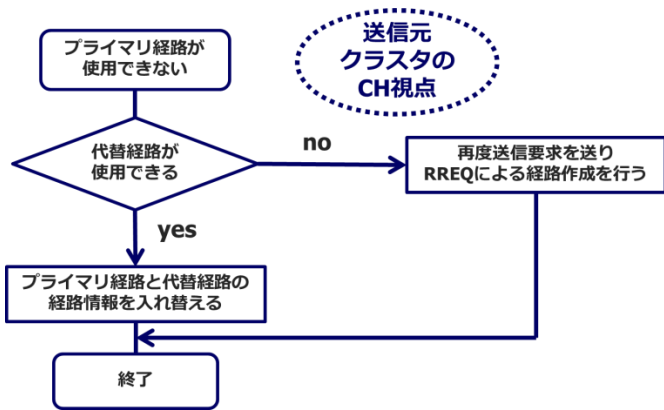


図 14 プライマリ経路も代替経路も使用できない場合

## 4. 実験と考察

### 4.1 基礎実験

提案方式の基礎実験として、メトリクスを用いたルーティングの必要性を調べるため、ネットワークシミュレータ ns-2(Network Simulator version 2) [10]上で評価実験を行った。本実験では図 15 で示したトポロジで Cluster-by-Cluster ルーティングを行い、提案手法(a)と従来のルーティング(b)でネットワーク全体のスループットを比較した。シミュレーションパラメータを表 1 に示す。実験では一定の時刻に達したら特定のノードが周囲のノードと通信を始め、クラスタ内のトラフィックが増加する。また、複数の通信を混在させることでクラスタ間での通信速度が一部低下するようになっている。

表 1 シミュレーションパラメータ

|             |              |
|-------------|--------------|
| 計測時間        | 1000s        |
| 各ノードの帯域幅    | 1Mbps        |
| 通信プロトコル     | UDP, 200byte |
| ルーティングプロトコル | DSR          |

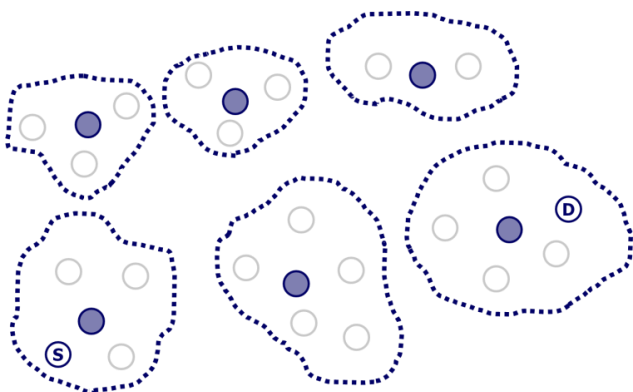


図 15 基礎実験のトポロジ

### 4.2 考察

図 16 の実験結果より、600s 時点で他の通信のトラフィックが発生したため、従来手法のスループットが急激に低下している。一方、提案手法は他のトラフィック発生後も

高いスループットを維持することができている。これは経路のスループットに関するメトリクスを監視し、最適な経路に切り替えていることの効果であると考えられる。

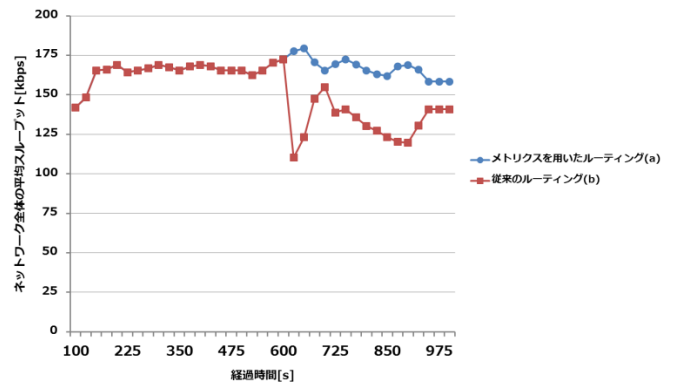


図 16 実験結果

## 5. おわりに

本稿では、Cluster-by-Cluster ルーティングを拡張し、通信経路のスループットに影響を与えるメトリクスの収集アルゴリズム、およびメトリクスを用いたルーティング手法を導入することにより、動的に経路を作成・切り替えできるようにした。ns-2 上による評価実験でネットワーク全体のスループットが従来手法より向上することを確認した。今後はノードの移動を考慮し、クラスタメンバの変動や CH や CG の入れ替わりへの対応を考える必要がある。

## 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] Hiroyuki Narumi, Shiraishi Yoh, and Takahashi Osamu, "A Reliable Cluster-based Routing Algorithm for MANET," Proceeding of the International workshop on Informatics (IWIN2009), pp.44-51, 2009
- [6] M.Jiang, J.Li, and Y.C.Tay, "Cluster based routing protocol (CBRP)", functional specification, IETF Internet Draft, MANET working group, draft-ietf-manet-cbrp-spec-01.txt, Aug. 1999.---
- [7] Hassan, Braun, "Simulations on Multipath Routing Based on Source Routing", [http://cds.unibe.ch/research/pub\\_files/Ha08.pdf](http://cds.unibe.ch/research/pub_files/Ha08.pdf), 2008
- [8] S.-J. Lee, and P. Alato, "Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks", Proceeding of the ICC2001, Vol.10, pp.3201-3205, 2001
- [9] 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
- [10] The Network Simulator version 2 (ns-2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>