

## メッセージフェリーによる効率的な DTN ルーティング方式の提案と評価

阿部涼介<sup>†</sup> 中村嘉隆<sup>††</sup> 白石 陽<sup>††</sup> 高橋 修<sup>††</sup>

近年, 断続性が高い劣悪な通信環境下でも信頼性の高いエンドツーエンド通信を実現する遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking) が注目されている. DTN ルーティングは, 各ノードがメッセージを蓄積して移動し, 通信可能となったノードに複製メッセージを転送する蓄積運搬転送 (Store-Carry-Forward) に基づいている. 一般に, DTN ルーティングではメッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量はトレードオフの関係にある. 本稿では, 予め設定された経路上を移動するメッセージフェリーというノードを活用し, このトレードオフを解消するルーティング方式を提案する. シミュレーションにより, 提案方式と既存方式の性能を比較した. また, メッセージフェリーの経路配置を変化させた場合の提案方式の性能への影響を評価した.

### An Effective DTN Routing Scheme using Message Ferries

RYOSUKE ABE<sup>†</sup>  
YOSHITAKA NAKAMURA<sup>††</sup> YOH SHIRAIISHI<sup>††</sup>  
OSAMU TAKAHASHI<sup>††</sup>

Recently, Delay Tolerant Networking (DTN) is attractive as an effective communication method in unstable network environments where frequent disconnections are easy to occur. DTN Routing is based on the Store-Carry-Forward paradigm. In this paradigm, each node moves with keeping messages until it becomes possible to communicate with other nodes. In traditional DTN routing schemes, there is a trade-off between message delivery delay and buffer consumption. This study proposes a routing scheme with message ferries to resolve the trade-off problem. A message ferry is a node which travels through regular routes. We compare the performance of the proposed scheme with that of traditional schemes through simulations. We also evaluate the ferries' routes which improve the performance of the proposed scheme.

<sup>†</sup>公立はこだて未来大学大学院

Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

<sup>††</sup>公立はこだて未来大学

Future University Hakodate

## 1. はじめに

MANET (Mobile Ad-Hoc Network), 無線センサネットワーク, 車車間通信, 極端な僻地における通信など, 接続関係が不安定な通信環境下でも信頼性の高いエンドツーエンド通信を実現する通信技術として, 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking) が注目されている[1][2]. 従来のインターネットの通信方式である TCP/IP は, エンドツーエンドの通信パスが常に存在し, IP データグラムと呼ばれるパケットの双方向の交換が中継経路に沿って実時間で行われることを前提としているため, 前述の通信環境への適用が困難である. 一方, DTN では物理的なネットワークトポロジが変化し, 断続的にしか通信ができない環境を想定している.

DTN におけるルーティングは, 送信元ノード, 中継ノード, 宛先ノードが連携して情報伝達の制御を行い, ネットワーク資源の共用や通信性能の最適化を目指す. DTN ルーティングは蓄積運搬転送 (Store-Carry-Forward) に基づいている[3]. 蓄積運搬転送は, 各ノードがメッセージを一旦バッファへ蓄積しながら移動し, 他のノードと通信可能となった際に複製メッセージを送信し, 最終的にメッセージを宛先ノードに転送する技術である.

一般に, DTN ルーティングでは, 複製メッセージの生成数が多い程メッセージ転送遅延は小さくなる. これは, 複製メッセージを保持する中継ノードが宛先ノードと接触する機会が増えるためである. ただし, 複製メッセージの生成数の増加に伴い中継ノードのバッファ使用量は大きくなる. これらの性質から, メッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量はトレードオフの関係にある.

そこで本研究では, メッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量のトレードオフを解消することを目的とし, 予め定められた経路上を移動するメッセージフェリー[4]というノードを活用したルーティング方式を提案する. 提案方式では, メッセージフェリーに通常ノードが保持しているメッセージを集約させ, メッセージフェリー相互間で複製メッセージを通信網内に伝播する. また, 宛先ノードに到達済みのメッセージの複製を通信網内から除去する回復手法を適用する.

提案方式をネットワークシミュレータ The ONE (The Opportunistic Network Environment Simulator) [5]上に実装し, 既存方式との性能比較実験を行い, 提案方式の有効性を評価する. また, メッセージフェリーの経路配置を変化させた場合の提案方式の性能への影響を評価する.

## 2. 関連研究

本章では, メッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量のトレードオフを解消する DTN ルーティング方式を実現するための関連研究について述べる.

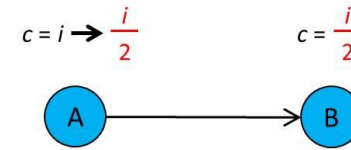
## 2.1 蓄積運搬転送に基づく DTN ルーティング方式

蓄積運搬転送に基づく DTN ルーティング方式の代表例として、Epidemic Routing[6]や Two-Hop Forwarding[7]がある。Epidemic Routing では、メッセージを保持するノードが通信可能となった全てのノードに複製メッセージを転送する。複製メッセージを受信したノードは、バッファにメッセージを保持しながら移動し、他のノードと通信可能となった時に同様に複製メッセージを通信相手のノードに転送する。この手順を繰り返し、複製メッセージを通信網内に伝播させ、宛先ノードにメッセージを配送する。この方式では、複製メッセージの生成数が多いため、メッセージ転送遅延は小さいがバッファ使用量は大きい。Two-Hop Forwarding では、送信元ノードは通信可能となった全てのノードに複製メッセージを転送するが、中継ノードは宛先ノードのみにしか複製メッセージを転送しない。この方式では、複製メッセージの生成数が少ないため、メッセージ転送遅延は大きいがバッファ使用量は小さい。これらの性質から、メッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量はトレードオフの関係にある (表 1)。

このトレードオフ問題の解消を目的とした DTN ルーティング方式の一例として、Spray and Wait[8]が挙げられる。Spray and Wait は、単一のメッセージあたりに生成可能な複製メッセージの数を制限する DTN ルーティング方式である。図 1 に Spray and Wait におけるメッセージ転送の仕組みを示す。Spray and Wait では、送信元ノードで生成されたメッセージはある整数  $M$  が与えられる。複製メッセージはそれぞれ Forwarding Token というカウンタ値  $c$  を保持し、生成されたノードでは  $c=M$  となる。メッセージは Spray 段階と Wait 段階の 2 つの段階を経て転送される。Spray 段階とは、複製メッセージの Forwarding Token が  $c > 1$  で新たに複製メッセージを生成できる状態である。Wait 段階とは、Forwarding Token が  $c=1$  で宛先ノードとの接触による直接の転送を待つ状態である。Forwarding Token が  $c=i > 1$  の複製メッセージを保持するノード A が複製メッセージを持たないノード B と接触した時、ノード B はノード A から複製メッセージを受信しバッファに蓄積する。この時、ノード A に蓄積されている複製メッセージの Forwarding Token は  $c=i/2$  となり、ノード B に蓄積された複製メッセージの Forwarding Token も同様に  $c=i/2$  となる。複製メッセージの Forwarding Token が  $c=1$  の時、ノード A は宛先ノード D と接触したときのみ複製メッセージを転送する。以上の仕組みにより、ネットワーク全体に伝播する複製メッセージの数は、メッセージが生成時に与えられた  $M$  個までに制限される。

Spray and Wait では、複製メッセージの生成数を制御できるため、メッセージ転送遅延とバッファ使用量におけるトレードオフを調節することが可能となる。しかし、ネットワークの大きさやノード数の変化に応じて適切な Forwarding Token を設定することは困難である。

Forwarding tokenが  $c = i (i > 1)$  の場合



中継ノード

Forwarding tokenが  $c = 1$  の場合



宛先ノード

図 1 Spray and Wait

表 1 各 DTN ルーティング方式の特徴

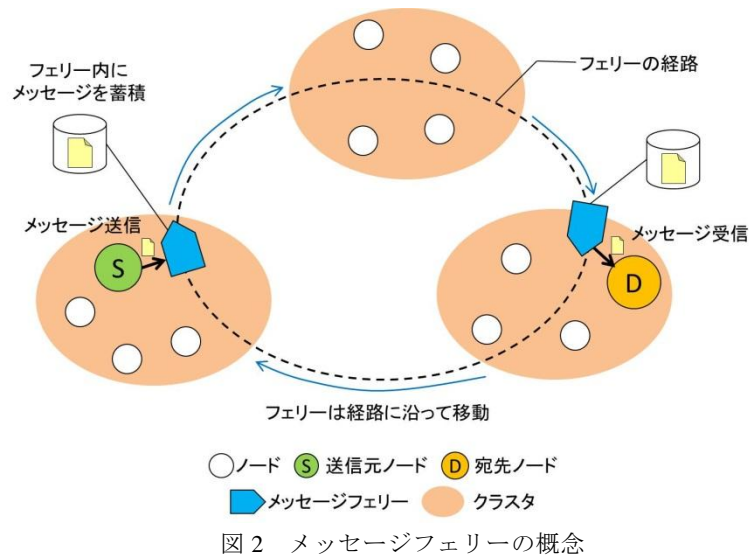
DTN ルーティング方式	複製メッセージ生成数	メッセージ転送遅延	バッファ使用量
Epidemic Routing	多い	小さい	大きい
Two-Hop Forwarding	少ない	大きい	小さい
Spray and Wait	Forwarding Token を設定	調整可能	調整可能

## 2.2 メッセージフェリー

文献[4]では、互いの位置が離れているために直接通信できないノード間でメッセージの送受信を行うために、予め定められた経路上を移動するノード (メッセージフェリー) をメッセージの運搬役として利用する手法を提案している。図 2 にメッセージフェリーにおける概念を示す。

ノード S が通信範囲内に無い他のノード D にメッセージを送信する場合を考える。ノード S はフェリーが近くに来て通信可能範囲に入ると、フェリーにメッセージの複製を転送する。フェリーはノード S から受信したメッセージを自身のバッファに蓄積する。その後、フェリーは通信範囲内に入った他のノードからもメッセージを収集しながら移動し、ノード D と通信可能になった場合、ノード S から受信したメッセージを送信する。

このように、ノードの移動範囲が局所的であっても、クラスタ間をつなぐ経路上をフェリーが移動することで効率的なメッセージ転送が可能となる。また、フェリーを複数台用意しフェリー間でのメッセージ転送も行うことで、メッセージが通信網内に伝播する時間を短縮することができる。



### 2.3 回復手法

回復手法は、ネットワーク内に存在するノードが保持している不要なメッセージを除去するためのアプローチである。

一般に、蓄積運搬転送に基づくルーティング方式ではメッセージが宛先ノードに到達した時点で通信網内に多くの複製メッセージが残存する。これらの複製メッセージは不要となり、ノードのバッファを無駄に消費し続ける。更に、各ノードは通信の完了を通知されるまでは引き続き複製メッセージを通信網内に伝播し続ける。そのため、不要なメッセージを通信網内から除去する回復手法(Recovery Scheme)の研究が行われている。

一般に、回復手法はタイマを利用した方法と明示的通知を行う方法の2種類がある[9][10]。タイマを利用した方法では、全てのメッセージを有限時間内に除去可能であるが、タイマを適切に設定することは困難である。一方、明示的通知を行う方法では宛先ノードがメッセージを受信した時、通信網内に残存する複製メッセージを除去するための除去パケット (Anti-Packet) をブロードキャストする。除去パケットを受信したノードは、該当する複製メッセージを廃棄する。除去パケットは受信確認信号の役割も果たすため、送信元ノードはメッセージが正しく配送されたことを知ることができる。

### 3. 提案方式

本研究では、従来の DTN ルーティング方式におけるメッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量のトレードオフを軽減することを目的とし、メッセージフェリーを用いた DTN ルーティング方式を提案する。また、中継ノードのバッファ使用量を低減させるために、タイマを利用した回復手法と明示的通知による回復手法を併用する。以下、想定環境及び提案方式の動作概要を述べる。

#### 3.1 想定環境

本研究では、VANET (Vehicular Ad-Hoc Network) [11]環境において車両間でメッセージを送信する状況を想定する。VANET とは、アクセスポイント (AP) を用いることなく車両間のみで自律的にトポロジを生成するアドホックネットワークである。VANET の大きな特徴としては、以下の項目が挙げられる。

- 車両の高い移動性のためにネットワークトポロジの変化が激しく、送受信ノード間での通信経路の確立が困難である。
- 車両は道路や交差点などの物理的構造に従い移動する。

本研究では、車両を通常ノード、バス及び路面電車をメッセージフェリーと想定する。メッセージは、交通情報や車両がセンシングした情報を想定し、伝播に遅延が許容されたものとする。各ノードはメッセージを保持するバッファを所有し、車両間通信により他のノードとメッセージを送信し合う。

メッセージが持つ情報を表 2、通常ノード及びメッセージフェリーが持つ情報を表 3 に示す。なお、メッセージフェリーのバッファは通常ノードよりも大容量のものを搭載しているものとする。

表 2 メッセージが持つ情報

<i>msgID</i>	メッセージの ID
$M_{from}$	メッセージを生成した通常ノードの ID
$M_{to}$	メッセージの宛先となる通常ノードの ID
<i>TTL</i>	メッセージの TTL (Time To Live)

表 3 ノードが持つ情報

<i>groupID</i>	ノードのグループ ID 通常ノードの場合は $c$ 、メッセージフェリーの場合は $t$ とする。
<i>nodeID</i>	ノード個別の ID
$L_{msg}$	ノードが保持しているメッセージ ID、メッセージサイズのリスト
$L_{delete}$	除去するメッセージ ID のリスト

通常ノードは一般道路上を移動し、メッセージフェリーは専用の経路上を移動する。メッセージフェリー用の経路は、複数箇所設置する。経路は、巡回型と往復型の2種類存在し、1つの経路上に複数台のフェリーが走行するものとする(図3)。巡回型の経路では、時計回りに走行するフェリーと逆時計回りに走行するフェリーを設置する。巡回型と往復型ともに同経路上に複数台のフェリーが走行する。また、各経路は重複している部分があり、フェリー相互間で接触する機会があるものとする。

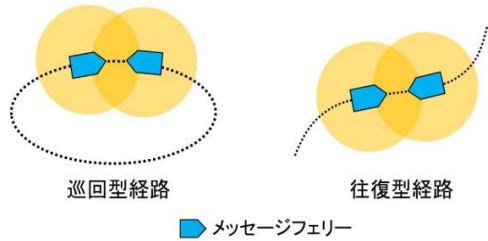


図3 メッセージフェリーの経路の種類

### 3.2 動作概要

提案方式では、接触したノードの種類により異なるルーティング方式を適用する(図4)。通常ノードは、他の通常ノードとの通信時よりもメッセージフェリーとの通信時に積極的な複製メッセージの転送を行う。メッセージフェリーは、集約した複製メッセージを他のメッセージフェリーと送信し合い、通信網内全体に伝播する。また、メッセージフェリーは宛先となる通常ノードのみにメッセージを転送する。

2つのノードが接触した際の通信処理は、4つのフェーズから構成される。フェーズの流れを図5に示す。フェーズ1では、通信相手の情報を取得し、接触パターンを確認する(通信相手の識別)。フェーズ2では、通信相手が宛先に指定されているメッセージを転送する(宛先ノードへのメッセージ送信)。フェーズ3では、明示的の通知による回復手法を行う。宛先ノードに到達済みのメッセージのIDを登録したリストをノード間で交換し、リストに登録されているメッセージを保持していた場合、バッファから廃棄する(不要メッセージの除去)。フェーズ4は、通常ノード相互間通信、メッセージフェリー-通常ノード間通信、メッセージフェリー相互間通信の3種類に分類される(各接触パターンのメッセージ転送)。通常ノード相互間通信では、Spray and Waitに基づいたメッセージ転送を行う。メッセージフェリー-通常ノード間通信では、通常ノードがメッセージフェリーにForwarding Tokenを適用外とした複製メッセージを転送する。メッセージフェリー相互間通信では、Epidemic Routingに基づいたメッセージ転送を行う。なお、3つ以上のノードが通信範囲内に

存在する場合は、接触時間が早いノードの組から通信処理を行う。また、各ノードはTTLの切れたメッセージを順次廃棄する。

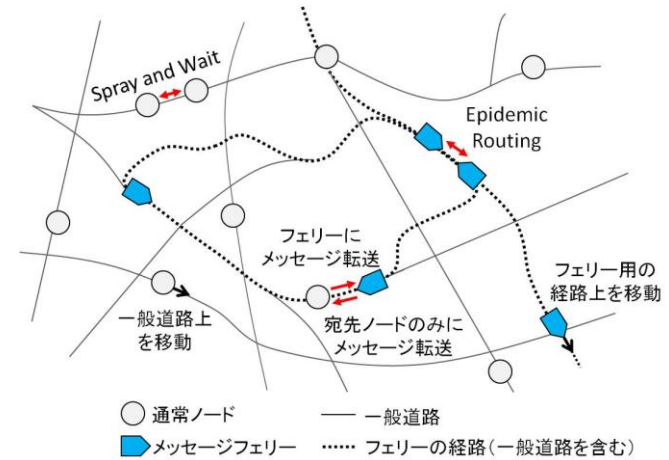


図4 提案方式の動作概要

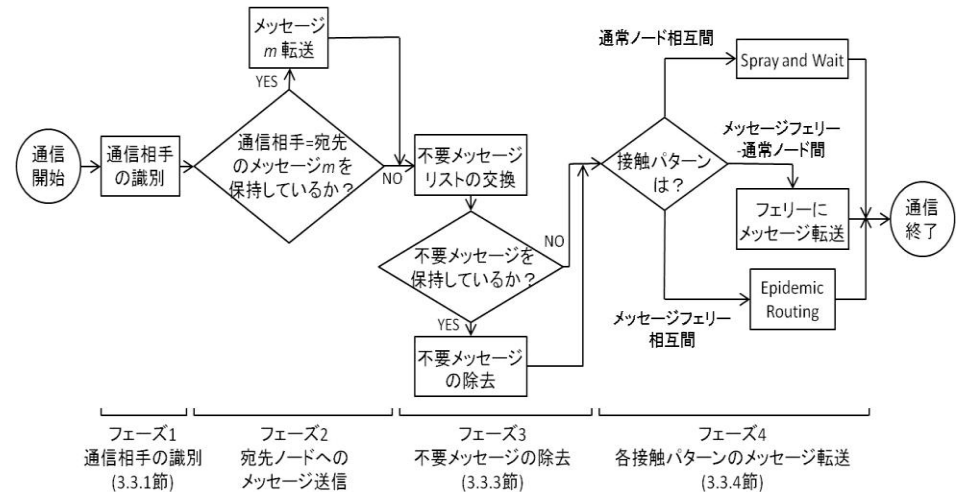


図5 フェーズの流れ



提案方式を適用した場合、単一メッセージあたりの複製メッセージの最大生成数は、Forwarding Token とメッセージフェリーの台数の和となる。つまり、Forwarding Token が小さく設定された場合でも、複製メッセージがメッセージフェリーに転送された以降はフェリーの台数分の複製メッセージが生成される可能性を持つ。

### 3.3 各フェーズの処理

#### 3.3.1 通信相手の識別

各ノードは相互に  $groupID$  を送信し合い、通信相手のノードが通常ノードであるかメッセージフェリーであるかを識別する。この  $groupID$  の交換によって、接触パターンはメッセージフェリー相互間通信、メッセージフェリー-通常ノード間通信、通常ノード相互間通信の3種類のいずれかに分類される。各接触パターンのメッセージ転送に関しては3.3.4項で後述する。また、各ノードは相互に  $nodeID$  を交換し、通信相手を識別する。

#### 3.3.2 宛先へのメッセージ転送

3.3.1項により通信相手を識別した各ノードは、自身の  $L_{msg}$  に  $M_{to}$  が通信相手として指定されているメッセージ  $m$  が存在するかを確認する。メッセージ  $m$  があった場合、通信相手に転送する。また、それぞれのノードは転送されたメッセージ  $m$  の ID を  $L_{delete}$  に登録する。

#### 3.3.3 不要メッセージの除去

各ノードは相互に  $L_{delete}$  を送信し合う。各ノードは通信相手から受信した  $L_{delete}$  を調査し、自身の  $L_{delete}$  に未登録のメッセージの ID を追加登録する。その後、自身の  $L_{delete}$  と  $L_{msg}$  を比較し、ID が一致するメッセージがあった場合、当該メッセージをバッファから廃棄する。なお、 $L_{delete}$  に登録されているメッセージの ID はメッセージの TTL が切れた際に廃棄する。

#### 3.3.4 各接触パターンのメッセージ転送

接触した2つのノードの  $groupID$  の組み合わせにより、異なる通信処理を行う。双方の  $groupID$  が共に  $c$  の場合は通常ノード相互間通信、一方が  $t$  でもう一方が  $c$  の場合はメッセージフェリー-通常ノード相互間通信、双方共に  $t$  の場合はメッセージフェリー相互間通信を行う。以下に、各通信処理の概要を示す。

##### (a) 通常ノード相互間通信

Spray and Wait に準拠したメッセージ転送を行う。

##### (b) メッセージフェリー-通常ノード間通信

メッセージフェリーは、通常ノードに  $L_{msg}$  を送信する。通常ノードはメッセージフェリーから受信した  $L_{msg}$  と自身の  $L_{msg}$  を比較し、メッセージフェリーが保持していないメッセージを転送する。メッセージは、Forwarding Token の値に関わらずメッセージフェリーに対して転送される。メッセージフェリーは、受信したメッセージの情報を自身の  $L_{msg}$  に登録する。

##### (c) メッセージフェリー相互間通信

Epidemic Routing に準拠したメッセージ転送を行う。

## 4. 実験および評価

提案方式の有効性を評価するため、提案方式をネットワークシミュレータ The ONE 上に実装し、既存方式との性能比較実験を行った。また、メッセージフェリーの経路配置を変化させた場合の提案方式の性能への影響を評価した。

### 4.1 実験環境

本実験では、ネットワークシミュレータとして、The ONE (ver. 1.4.1) を用いた[5]。The ONE は、DTN 環境におけるルーティングやアプリケーションプロトコル評価のために開発されたシミュレータである。

シミュレーションに用いるマップは、The ONE に付属されている Helsinki City Scenario (HCS) を用いた (図6)。

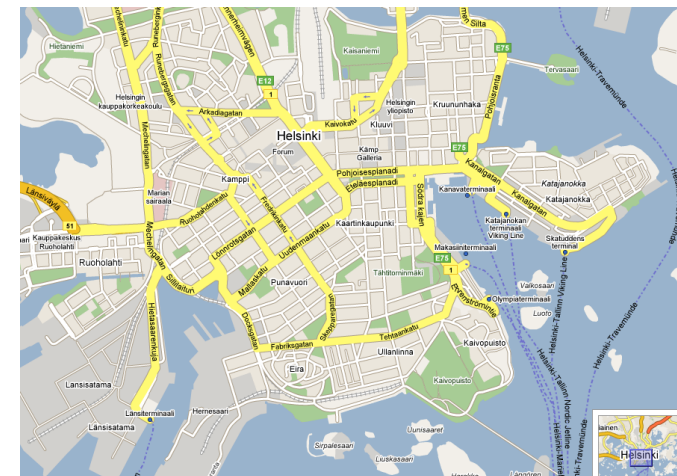


図6 Helsinki City Scenario (HCS)

HCS では、ヘルシンキ近郊の4km四方の道路地図が備えられており、通常ノード(車両)及びメッセージフェリー(路面電車)がそれぞれの設定に従いノードが移動する。シミュレータ上では、全てのノードが一定量のバッファを備え、ノード同

士が無線の通信範囲に入ることによって一定の帯域でノード間のメッセージ転送ができるものとする。

メッセージフェリーの経路は、実際にヘルシンキで運営している路面電車の路線図を元に作成した(図7)。経路は全部で8路線ある。



図7 HCSにおけるメッセージフェリーの経路

通常ノード及びメッセージフェリーのモビリティモデル、シミュレーションパラメータを表4に示す。通常ノードは Shortest Path Map-Based Movement (SPMBM) に従って移動する。SPMBMでは、ノードは道路地図上の任意の交差点を目的地として選び、最短移動距離となる経路を移動速度で移動し、目的地で一定時間停止する。メッセージフェリーは Routed Path Map-Based Movement (RPMBM) に従って移動する。RPMBMでは、道路地図上をあらかじめ設定された経路に沿って一定速度で移動し、決められた停止地点で一定時間停止する。移動速度と停止時間は、各ノードに値域が定められており、停止ごとに正規分布に従って新たな値が設定される。

また、メッセージに関するシミュレーションパラメータを表5に示す。メッセージサイズ及び生成間隔は、メッセージの生成時に正規分布に従って値が決定される。

表4 ノードに関するシミュレーションパラメータ

パラメータ	通常ノード	メッセージフェリー
モビリティモデル	Shortest Path Map-Based Movement	Routed Path Map-Based Movement
ノード数 (nodes)	600 <sup>*1</sup>	10 <sup>*2</sup>
移動速度 (km/h)	10 - 50	25 - 36
停止時間 (sec)	0 - 120	10 - 30
通信可能距離 (m)	10	10
バッファ容量 (MB)	30	150

\*1: シミュレーションの変数として使用しない場合の値とする

\*2: 1 経路あたりの台数とする

表5 メッセージに関するシミュレーションパラメータ

パラメータ	値域
TTL (min)	300
メッセージサイズ (KB)	500 - 1000
メッセージ生成間隔 (sec/packet)	10 - 50

## 4.2 評価方針

### 4.2.1 評価項目

評価項目は、以下の4つとする。

- 平均メッセージ転送遅延 (sec)
  - 宛先ノードに到達したメッセージについて、生成されてから到達するまでに要した時間の平均
- バッファ使用量 (GB)
  - 全通常ノードのバッファに格納されたメッセージのサイズの総和
- 平均バッファ蓄積時間 (sec)
  - 各メッセージが通常ノードのバッファに蓄積されていた時間の平均
- メッセージ到達率
  - 生成されたメッセージの内、宛先ノードに到達したメッセージの割合

### 4.2.2 比較対象

提案方式の比較対象は Epidemic Routing, Two-Hop Forwarding, Spray and Wait とする。各比較対象では、提案方式と同数台のメッセージフェリーを導入する。なお、各ルーティング方式はメッセージフェリーを含めた全ノードに対して適用し、回復

手法を併用する。

また、本実験ではメッセージフェリーの経路配置を変更した際の提案方式の性能差を評価する。図7で示したHCSにおけるメッセージフェリーの経路は、それぞれの部分領域に配置された経路長の短い経路が組み合わせることで都市部全体に構成されている。そこで、都市部全体を大きく周回する経路（仮想経路）を配置した場合では提案方式の性能がどのように変化するかを評価する。HCSにおけるメッセージフェリーの仮想経路を図8に示す。

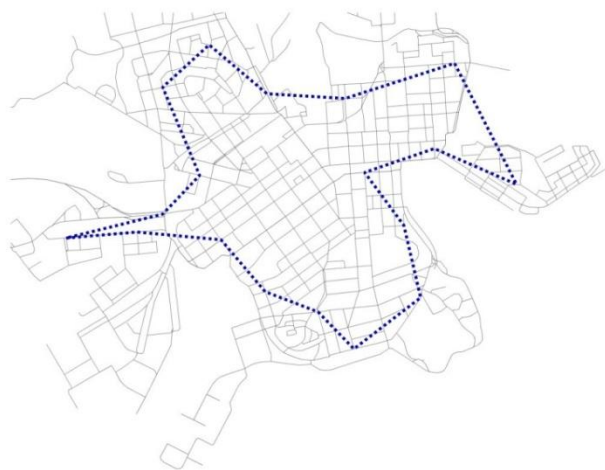


図8 HCSにおけるメッセージフェリーの仮想経路

### 4.3 実験結果

本節では、実験結果及び考察を述べる。以下では、図7のメッセージフェリーの経路を経路1、図8のメッセージフェリーの仮想経路を経路2と記す。

#### 4.3.1 Forwarding Token 毎の評価

Forwarding Token を5-50と変化させた時の各ルーティング方式の性能を評価した。この評価での比較対象は、メッセージにForwarding Tokenを設定しているSpray and Wait、提案方式（経路1）、提案方式（経路2）である。平均メッセージ転送遅延を図9、バッファ使用量を図10、平均バッファ蓄積時間を図11に示す。

メッセージ到達率は、いずれの方式もForwarding Tokenの大小によらず90%以上を保ち、Spray and Waitでは平均93.2%、提案方式（経路1）では平均96.7%、提案方式（経路2）では平均96.3%となった。

図9から、Forwarding Tokenが小さい場合においても、提案方式はSpray and Waitと比較して平均メッセージ転送遅延が小さいことが分かる。これは、提案方式がメッセージフェリー相互間でも複製メッセージを転送することでメッセージがより早く通信網内全体に伝播されるためである。

図10から、いずれの方式もForwarding Tokenが大きくなる程、バッファ使用量が増加していることが分かる。しかし、図11から提案方式はSpray and Waitに比べ平均バッファ蓄積時間が短いことが分かる。そのため、提案方式はSpray and Waitよりも通常ノードのバッファの負担が軽い。図12にメッセージフェリー経由率を示す。メッセージフェリー経由率は、到達した全メッセージの内、メッセージフェリーを経由して到達したメッセージの割合を指す。図12から、Forwarding Tokenが小さい程、提案方式のメッセージフェリー経由率は高く、Spray and Waitのメッセージフェリー経由率は低いことが分かる。提案方式では、メッセージフェリー経由率が大きい程、メッセージフェリーによるメッセージの到達数が多いため、不要メッセージを登録したリストがさかんに交換される。そのため、提案方式はSpray and Waitよりも平均バッファ蓄積時間を低減できたと考えられる。

また、図9-11から経路2よりも経路1を適用した提案方式の方がメッセージ転送遅延、バッファ使用量、平均バッファ蓄積時間を低減していることが分かる。

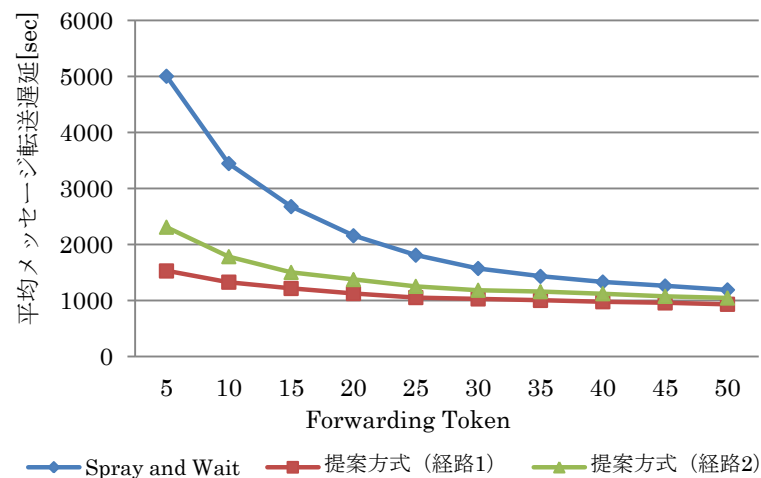


図9 Forwarding Token 毎のメッセージ転送遅延

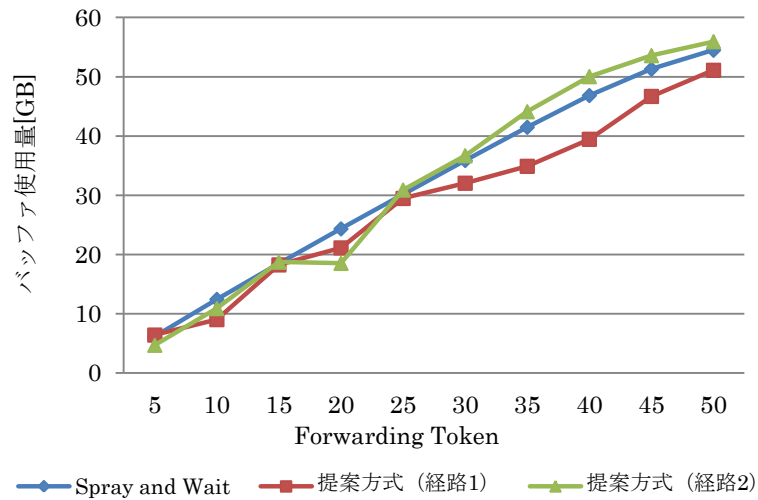


図 10 Forwarding Token 毎のバッファ使用量

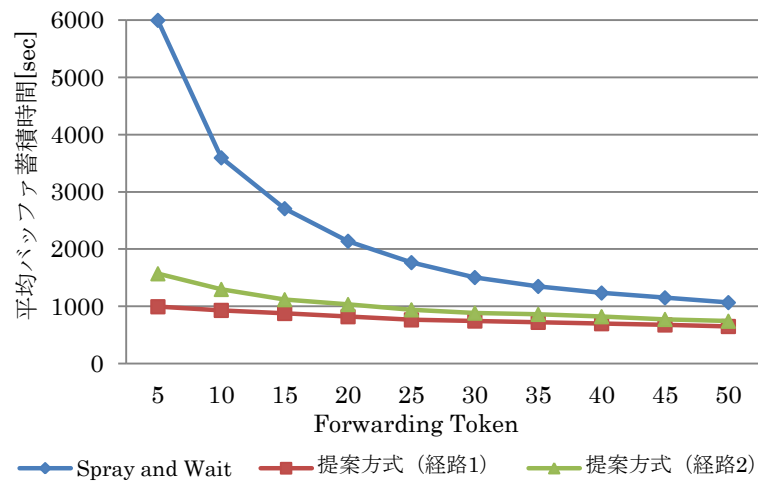


図 11 Forwarding Token 毎の平均バッファ蓄積時間

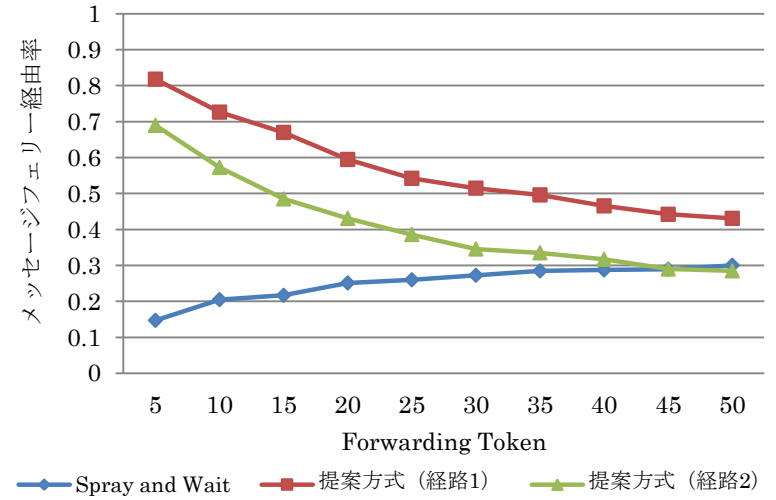


図 12 Forwarding Token 毎のメッセージフェリー経由率

#### 4.3.2 通常ノードの台数毎の評価

通常ノードの台数を 200-1000 台に変化させた時の各ルーティング方式の性能を評価した。Spray and Wait 及び提案方式の Forwarding Token は 20 とした。平均メッセージ転送遅延を図 13、バッファ使用量を図 14、平均バッファ蓄積時間を図 15、メッセージフェリー経由率を図 16 に示す。

メッセージ到達率は、いずれの方式も通常ノードの台数によらず 90%以上を保ち、Epidemic Routing では平均 96.5%、Two-Hop Forwarding では平均 94.6%、Spray and Wait では平均 94.7%、提案方式（経路 1）では平均 96.8%、提案方式（経路 2）では平均 96.2%となった。

図 13 から、通常ノードの台数が少ない場合でも、提案方式や Epidemic Routing は Two-Hop Forwarding や Spray and Wait と比較して平均メッセージ転送遅延が小さいことが分かる。また、図 16 から通常ノードの台数が少ない程、提案方式や Epidemic Routing のメッセージフェリー経由率が高いことが分かる。提案方式では、メッセージフェリー経由率が高い程、メッセージフェリー相互間通信により通信網内全体に複製メッセージが伝播する。そのため、提案方式は平均メッセージ転送遅延を低減した。また、Epidemic Routing は接触した全てのノードに複製メッセージを転送するため、メッセージフェリー経由率が高く平均メッセージ転送遅延が小さいと考えられる。



図 14 から、通常ノードの台数が多い場合でも、Epidemic Routing を除くルーティング方式のバッファ使用量はそれほど増加しなかった。これは、通常ノードが保持できる複製メッセージの数が制限されているためである。また、図 15 では通常ノードの台数によらず、提案方式の平均バッファ蓄積時間が Epidemic Routing に次いで短いことが分かる。これは、提案方式のメッセージ転送遅延が小さいために回復手法が早い時点で始まり、メッセージフェリーの移動によって通信網内全体の不要メッセージが除去されるためである。Epidemic Routing では、メッセージが宛先ノードに到達した時点で通信網内の多くの通常ノードが到達したメッセージの複製を持っている可能性が高い。そのため、ノードの接触が起きる度に複製メッセージが除去され、平均バッファ蓄積時間が短くなったと考えられる。

また、図 13-15 から経路 2 よりも経路 1 を適用した提案方式の方がメッセージ転送遅延、バッファ使用量、平均バッファ蓄積時間を低減していることが分かる。

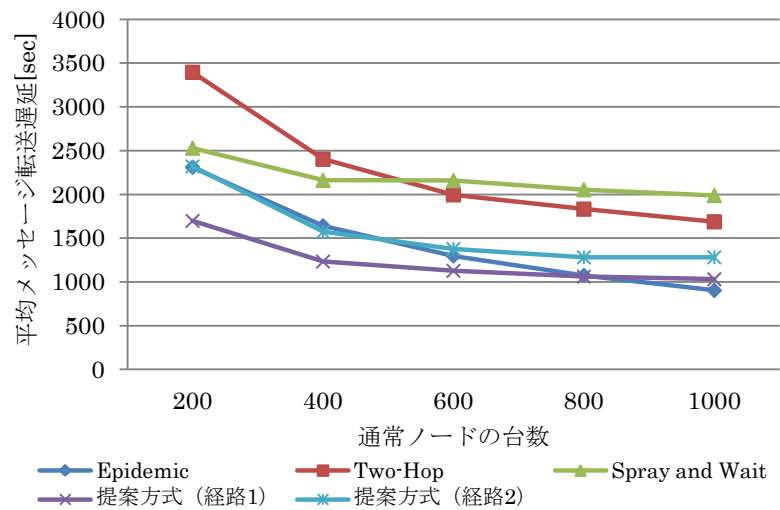


図 13 通常ノードの台数毎の平均メッセージ転送遅延

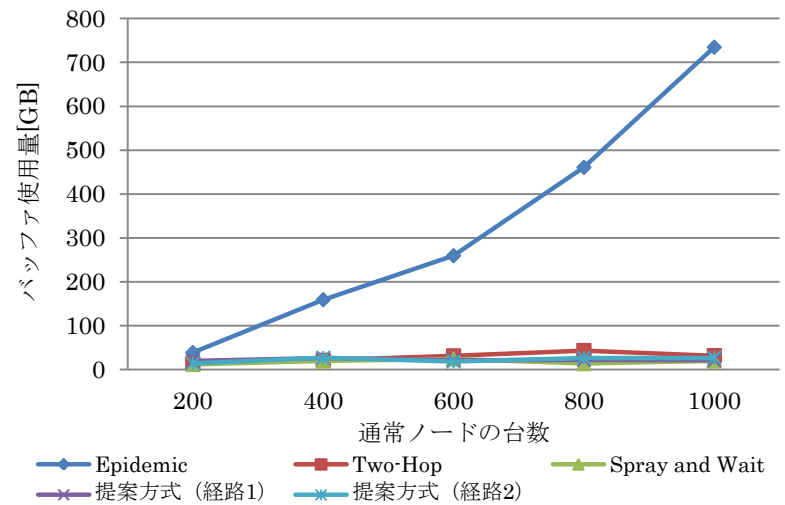


図 14 通常ノードの台数毎のバッファ使用量

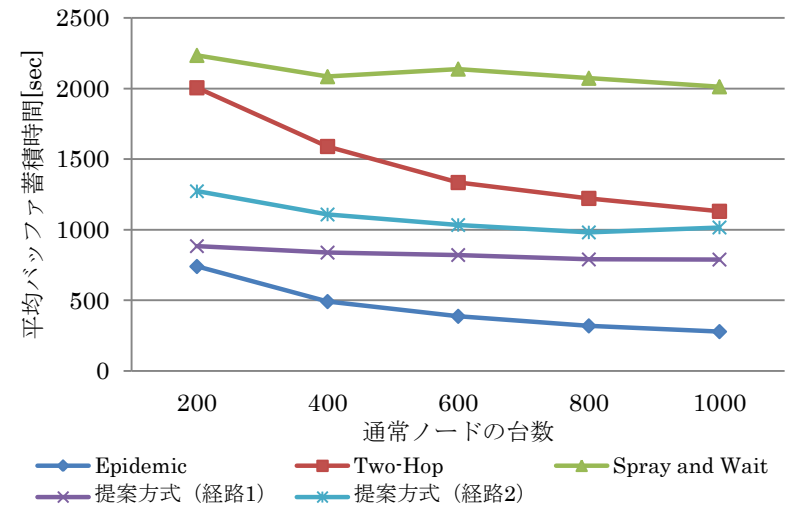


図 15 通常ノードの台数毎の平均バッファ蓄積時間

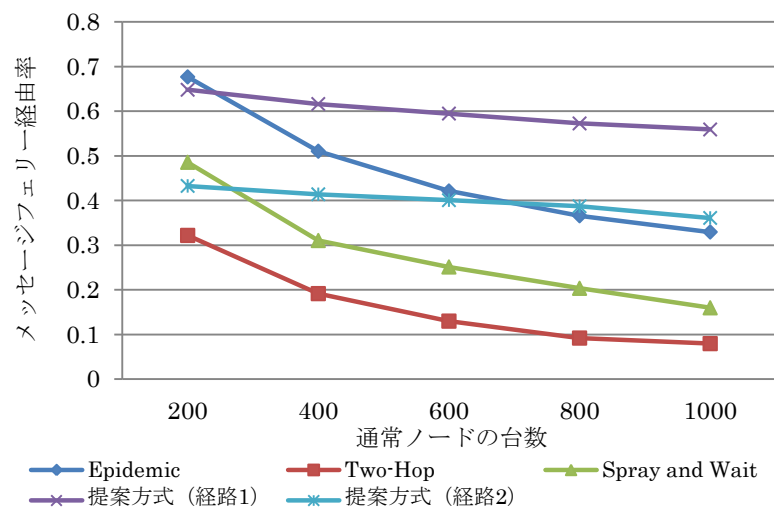


図 16 通常ノードの台数毎のメッセージフェリー経由率

#### 4.4 実験結果のまとめ

本節では、4.3 節の実験結果をまとめ提案方式の有効性を評価する。

最初に、4.3.1 項の実験結果について述べる。提案方式は、Spray and Wait よりも Forwarding Token が小さい場合における平均メッセージ転送遅延を低減した。また、バッファ使用量は Spray and Wait とほぼ同等となったが、Forwarding Token が小さい場合における平均バッファ蓄積時間を低減した。これらの結果から、提案方式は既存のルーティング方式におけるメッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量のトレードオフを解消する効果があることを確認した。

次に、4.3.2 項の実験結果について述べる。提案方式は、通常ノードの台数によらず、既存のルーティング方式よりも平均メッセージ転送遅延及びバッファ使用量を低減した。また、提案方式の平均バッファ蓄積時間は、通常ノードの台数によらず Epidemic Routing に次いで短い結果となった。これらの結果から、提案方式は既存のルーティング方式よりも通常ノードの台数に関わらずメッセージ転送効率が高いことを確認した。

最後に、提案方式におけるメッセージフェリーの経路配置を評価、考察する。4.3 節のいずれの実験においても、経路 2 よりも経路 1 を適用した提案方式の方がメッセージ転送遅延、バッファ使用量及び平均バッファ蓄積時間を低減した。経路長が

短い経路では同経路上のメッセージフェリーの接触回数が増加し、また複数の経路を組み合わせて配置することで、それぞれの経路で収集した複製メッセージを短い時間間隔で共有できるため、このような結果が得られたと考えられる。これらの結果から、メッセージフェリーの経路は、通信網内全体を大きく周回する配置よりも経路長の短い経路を複数重ね合わせて通信網内全体を構成する配置の方がメッセージフェリーの機能を有効にすることを確認した。

## 5. おわりに

本研究では、DTN ルーティングにおけるメッセージ転送遅延と中継ノードのバッファ使用量のトレードオフを解消することを目的とし、メッセージフェリーを活用するルーティング方式を提案した。提案方式の有効性を評価するために、ネットワークシミュレータ The ONE を用いて既存方式と性能を比較した。Forwarding Token 毎の評価及び通常ノードの台数毎の評価から、提案方式は既存方式よりも平均メッセージ転送遅延及びバッファ使用量が小さい結果が得られ、提案方式はトレードオフを解消する効果があることを確認した。また、メッセージフェリーの経路配置を変化させた場合の提案方式の性能への影響を評価した。その結果、メッセージフェリーの経路は、経路長の短い経路を複数重ね合わせて通信網内全体に配置することで提案方式の有効性を高めることを確認した。

今後は、バスや路面電車の停留所に複製メッセージを蓄積する固定端末を提案方式に導入する予定である。また、時間帯ごとの各端末の移動状況を考慮したルーティング方式の効率化を検討したいと考えている。

## 参考文献

- [1] S. Farrell and V. Cahill, "Delay and Disruption Tolerant Networking, Artech House," 2006.
- [2] 鶴正人, 内田真人, 滝根哲哉, 永田晃, 松田崇弘, 巳波弘佳, 山村新也, "DTN 技術の現状と展望," 信学通誌, No.16, pp.57-68, 2011.
- [3] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, "Delay tolerant network architecture," IETF RFC 4838, 2007.
- [4] W. Zhao, and M. H. Ammar, "Message Ferrying: Proactive Routing in Highly-partitioned Wireless Ad Hoc Networks", Proc. 9th IEEE Workshop on FTDCS 2003, pp.308-314, 2003.
- [5] Ari Keränen, Jörg Ott, and Teemu Kärkkäinen, "The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation," Proc. SIMUTools'09, p.10, 2009.

- [6] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks," Duke Technical Report, CS-2000-06, 2000.
- [7] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges," IEEE Communications Surveys, Vol.8, pp.24-37, 2006.
- [8] T. Spyropoulos, K. Psounis, C. S. Raghavendra, "Spray and Wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks" Proc. SICCOMM '05 Workshops, 2005.
- [9] Z. Haas and T. Small, "A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks," IEEE/ACM Trans. Networking, Vol. 14, no.1, pp.27-40, 2006.
- [10] X. Zhang, G. Neglia, J. Kurose, and D. Towsley, "Performance modeling of epidemic routing," Computer Networks, Vol.51, pp.2867-2891, 2007.
- [11] T.L. Willke, P. Tientrakool, and N.F. Maxemchuk, "A Survey of Inter-Vehicle Communication Protocols and Their Applications," IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol. 11, No.2, 2009.