

端末の電力利用効率を考慮した DTN 型災害時通信システムの提案と評価

金田知展^{†1} 中村嘉隆^{†2} 高橋修^{†2}

広域災害発生時の停電や通信インフラの破壊は被災状況や安否情報などの緊急性の高い情報の伝達を困難にする。インフラレスな通信手法である DTN (Delay Tolerant Network) が解決手法のひとつとなるが、広域災害時の情報通信の実現に向けて電力消費の課題が挙げられる。被災地で通信を行う端末は被災者のスマートフォンやタブレット端末が想定される。それらの端末は電力に限りがあるため電力利用効率を考慮した通信手法を用いることが好ましい。そこで本稿では、被災状況や安否情報の交換や収集を目的としたメッセージフェリー方式を用いる災害時通信システムを検討し、ネットワークの電力利用効率を改善するために、電力残量に多段階閾値を設定し通信に活用する手法を提案及び評価する。

Disaster communication system using DTN for improving power consumption of mobile devices

TOMOHIRO KANETA^{†1} YOSHITAKA NAKAMURA^{†2}
and OSAMU TAKAHASHI^{†2}

The power supply interruption and the destruction of the information infrastructure by the disaster make transmission of high emergency information such as the suffering situation or the safety information difficult. DTN (Delay Tolerant Network) which is infrastructure less communication technique becomes one of the solution techniques. However DTN has a problem of the energy consumption for realization of the information communication at the time of the disaster. The victims communicate with others by using own smartphone or tablet device. Because those devices are limited in electric power, the communication technique in consideration of power consumption is required. In this paper, we examine a communication system at a disaster with a message ferrying technique of the purpose of exchange and the collection of the suffering situation and the safety information. And we propose a communication method that utilizes the multistage threshold of the remaining battery capacity for communication, so as to improve efficiency of battery utilization of network.

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット型端末の普及と基地局の増加や公衆無線 LAN の普及により、屋外においてもインターネットへの接続が容易に行える環境が整いつつある。しかし、広域災害が発生し停電や物理的な損壊によりそれらのインフラが使用不可となった場合、端末による情報通信が不可能となる。2011 年の東日本大震災では、長期に渡る停電や基地局から局舎へつながる通信ケーブルの切断により、一切の情報通信が一時的に不可となった地域があり[1]、このために被災者の安否情報確認が紙媒体を用いて行われるケースがあった。被災地に点在している避難所間の情報共有の有効な手段として、避難所の情報を被災地外へ運搬しデータの整理を行ってから再度被災地へ情報提供する、という手段がある。東日本大震災で活用された例として、Google の取り組みである「避難所名簿共有サービス[2]」が挙げられる。「避難所名簿共有サービス」では、避難所で作成した待機者名簿の写真を撮り Google のサービス担当宛てにメールを送ることで被災者名と待機避難所

を集約していく。集約されたデータはウェブ上で確認が可能である。しかし、写真をメールで転送する必要があり、確認はウェブ上で行うため通信が不可能である地域では通信が可能な地域まで情報を運搬する必要がある。このように、通信インフラが使用不可となった際の情報通信には困難が生じるため、インフラレスな情報通信が要求される。インフラレスな情報通信手法としてアドホックネットワークがあるが、特に遅延や移動による端末間の通信切断といった劣悪環境に耐えうる情報通信手法として、遅延耐性ネットワーク(DTN: Delay Tolerant Network)がある[3]。DTN はデータ転送を中継する端末のバッファに複製データを蓄積し転送する蓄積運搬転送技術により、大きな遅延やネットワーク変動が大きな環境下においても情報通信を可能とする。DTN ではエンドツーエンドの通信経路を確立せずに通信を行うため、メッセージの複製を周囲の複数の端末に対して行い、宛先へのメッセージ到達率を向上させている。しかし、電力供給が途絶えた被災地で DTN を使用した場合、通信端末として想定される被災者のスマートフォンやタブレット端末、ノートパソコンなどのバッテリーがメッセージ送受信によって消費されるということが考えられる。従って、被災地で DTN 型通信を行う際には電力消費の課題がある。

^{†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

筆者らはこれまでに、被災地内で使用する DTN の通信方式を提案しメッセージフェリー方式[4]を用いた災害時通信システムを想定した既存手法との比較評価を行った[5]。メッセージフェリー方式を用いた災害時通信システムはフェリーノードの移動モデルが結果に大きな影響を与えることが明らかであり、より具体的なシステムを想定した実験を行うことが課題として挙げられる。

そこで本稿では、より具体的な災害時通信システムを想定し、提案する通信方式を既存方式と比較評価する。

2. 関連研究

本章では、DTN の通信方式、筆者らが提案した通信方式である MultistageStdDev, メッセージフェリー方式、災害時通信システムについて述べる。

2.1 Epidemic Routing

Epidemic-routing[6]は接触したメッセージ転送が可能な端末に対して、メッセージを転送する DTN の代表的な確率的中継転送方式である。データを中継する端末においても同様に動作するため、あたかも感染が拡大するかのよう複製メッセージが生成される。ネットワーク内に複製が多量に生成されるため、メッセージ宛先到達率や遅延時間において非常に優れた性能を示す。一方、送受信回数が多いため各端末のバッファやバッテリーといったネットワーク資源を最も多く消費する方式でもある。一般に、データ到達率や転送遅延とバッファやバッテリーなどのネットワーク資源の消費量はトレードオフの関係にある。

2.2 Two-Hop Forwarding

Two-Hop Forwarding[7]は Epidemic Routing の課題であるネットワーク資源の消費量を抑制する代表的な転送方式である。送信端末は複製メッセージを持たないノードと接触し、転送が可能である際にメッセージを転送する。複製メッセージを保持する端末は宛先と接触した時のみ転送が可能である。このことから、最大でも 2 ホップでメッセージが宛先に到達することがわかる。複製メッセージの生成が抑えられるため、Epidemic Routing よりネットワーク資源の消費を抑制することが可能である。

2.3 MultistageStdDev

筆者らが[5]で提案した MultistageStdDev は移動端末のバッテリー残量を探索ビーコンの発信や通信の可否に活用する通信方式である。メッセージの送信は自身のバッテリー残量と周囲の端末のバッテリー残量を比較し、自身より残量の多い端末にのみ行う。バッテリー残量に多段閾値を設定し、残量が閾値に達した場合、探索ビーコンの発信を停止し、周囲の端末からのビーコンを受信した時のみ応答することで

節電する。閾値が変更された際にメッセージ転送確率を変更し転送回数を減らすことで、バッテリー残量が少ない移動端末の電力消費を削減する。閾値の変更は、単位時間あたりの送受信回数を各移動端末に保存し、平均 μ と標準偏差 ρ を算出、最新の単位時間あたりの送受信回数 $unit$ との関係が式 (1) を満たし、かつバッテリー残量が閾値以下となるときに行う。

$$unit \leq \mu - 2 \times \rho \quad (1)$$

また、閾値の初期値は各移動端末のバッテリー容量の 1/2 とし、変化量は設定された閾値の 1/2 とする。転送確率は、転送確率の初期値を P 、閾値変更回数を α として (2) のように定義されている。

$$P_{new} = P/(\alpha + 1) \quad (2)$$

2.4 メッセージフェリー方式

メッセージフェリー方式[4]は、計画的に移動する端末をフェリーノードとして使用することで効果的なデータ転送を行う転送方式である。フェリーノードはネットワーク内を巡回し、通常の移動端末から受信したメッセージを宛先端末へ転送する役割を担う。メッセージフェリー方式は、災害時における救助活動のための情報共有、広域エリアのセンシング、といった状況で効果的に使用可能である。災害発生時には、大容量のバッファやバッテリーを搭載した高所作業車やヘリコプターがフェリーノードの役割を担うことで、隔たれたエリア間でメッセージを収集し運搬することが可能である。また、被災者が所持している端末から得られたメッセージを救助活動に活用することが可能である。

2.5 災害時通信システム

災害時通信システムは企業向けや救助活動への活動、被災者間の情報共有など多様な用途で研究されている。インフラが機能していない環境において、情報通信を行う手法として可搬型情報通信ボックス (リソースユニット) を被災地に設置しネットワークを形成する手法[8]や、MANET や DTN を使用して被災者の端末間でメッセージをバケツリレー状に運搬する方法[9]がある。前者の方法では、リソースユニットを被災地に設置することにより通話機能の提供や、災害発生から復旧期までを意識した幅広いサービスを提供する。しかし、これらのサービスを提供するためにはリソースユニットの搬送から各種設定が必要であり、迅速復旧のためのプロセス最適化についても検討されているが、被災直後にサービスを提供することは困難である。一方後者の方法は、情報通信のために要するものはスマートフォンのアプリケーションのみであり、被災直後においてもアプリケーションがインストールされていればサービスを提供可能である。サービスとしては、安否情報や避難場所などの情報をメッセージとして宛先に送信することが可能である。宛先が被災地外の場合にはゲートウェイまでメ

ッセージをバケツリレーする。また、端末のバッテリー残量や加速度センサといった情報を使用して MANET モードと DTN モードを自動的に切り替える機能があり状況に応じて適切なネットワーク形成モードを選択する。

このように、災害時情報通信システムについては検討がいくつかなされているが、本研究では災害発生からの即時性を優先しバケツリレー式のシステムを検討する。特に、被災者が持つ端末のバッテリー残量について考慮し、効率の良い電力運用を目標とする。

3. 提案方式

3.1 研究目的

本研究の目的は、DTN を用いた災害時通信システムにおいて避難所内の移動端末の電力利用効率を改善することである。本稿では、宛先へのメッセージ到達率を維持したままバッテリー消費を削減することを効率の良い電力運用と定義する。また、電力消費は通信の主要な消費となるメッセージの送受信と探索ビーコンの発信を主に想定している。本研究が提案する通信方式を評価する上で、フェリーノードの運用やアドレス解決手法など具体的な災害時通信システムを提案する。

3.2 想定環境

広域災害が発生し通信インフラが機能せず電力供給が途絶えている状況で、被災者は各避難所に避難している。そこで、メッセージフェリー方式を用いて避難所間でメッセージを交換することを想定する。避難所をクラスタと想定してオフラインエリアにあるクラスタ間をフェリーノードが巡回し、クラスタ内の情報を収集してオンラインエリアに運搬する。フェリーノードはオンラインエリアに出た時にメッセージを集約するサーバにメッセージを転送する。そして、サーバでアドレス解決されたメッセージをフェリーノードがオフラインエリアの宛先端末が存在する避難所へ運搬する。

3.3 アドレス解決

DTN におけるメッセージ送信は宛先のネットワーク上の位置が明らかでないため、出会い頭の通信で宛先を見つける以外の方法で送信を行いたい場合はアドレス解決の仕組みが必須となる。本稿では、オンラインエリアにあるサーバを用いたアドレス解決を想定している。まず、オフラインエリアの移動端末は送信したい相手の電話番号やメールアドレスを宛先に指定しメッセージを送信する。この際に、メッセージには発信者の位置情報が記録される。送信されたメッセージはやがてフェリーノードが回収し、オンラインエリアに出た際にサーバへと送信される。サーバはフェリーノードから受信したメッセージをデータベースに

登録する。このとき、宛先となっている移動端末からのメッセージがデータベースに登録されていないかを参照し、メッセージが存在していた場合その発信位置を宛先位置として登録する(図1)。このようにしてアドレス解決されたメッセージをフェリーノードが運搬し、宛先位置に近いクラスタの移動端末にメッセージを転送する。また、アドレス解決されていないメッセージの宛先端末がフェリーノードの通信圏内にいる場合についてもメッセージ送信を行う。サーバ上にメッセージを記録することで、被災者の安否確認や避難所の不足物資の情報など必要に応じてオンラインエリアからの参照も可能となる。

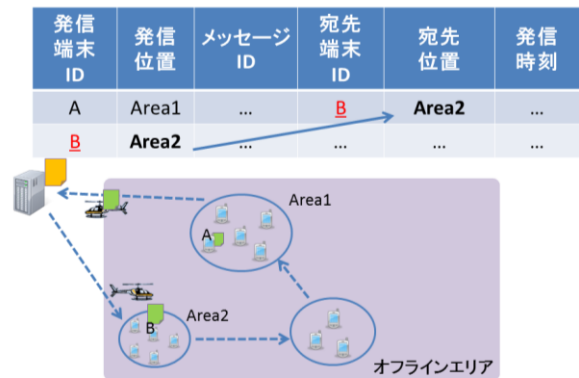


図1. サーバによるアドレス解決

3.4 フェリーノードの移動経路

メッセージフェリー方式を使用した災害時通信システムでは避難所への巡回頻度や滞在時間などが評価へ大きく影響を与える。しかし、フェリーノードの台数や種類、避難所の数や収容人数、フェリーノード間の通信の有無などの要素からフェリーノードの移動経路を動的に割り出し最適化することは非常に困難である。そこで本稿では、より単純なフェリーノードの移動経路を使用する。フェリーノードは UAV のような無人ヘリコプターの使用を想定する。ヘリコプターは道路の状態に経路を左右されない点でトラックのような車両と比較し柔軟に経路作成が可能である。単純な移動経路とは、避難所の数だけフェリーノードを用意し各フェリーノードが最低でも一箇所の避難所の上空を通過するようにオフラインエリアを横断する経路である。避難所の数が多くなるにつれ無人ヘリコプターにかかる費用が大きくなり現実的ではないが、避難所内で行う通信を既存手法と比較評価する上では支障がなく具体的な移動経路である。また、フェリーノードは一定の速度でオフラインエリアを通過し、避難所では滞在しないものとする。

4. 実験と評価

4.1 実験環境

3章で提案した災害時通信システムをDTNに特化したネ

ネットワークシミュレータである The ONE (The Opportunistic Network Environment simulator) [10]上に実装し検証を行う。本研究では Wi-Fi での通信を想定したシミュレーションを行うが、実環境での移動端末の電力消費は通信以外に因るものも多くあるため絶対的な評価を行うためにはシミュレーションによる検証は困難であり、実地検証を要する。従って、本稿では既存ルーティングアルゴリズムとの比較評価に重きを置く。

4.2 評価指標と実験パラメータ

メッセージ宛先到達率、バッテリー平均残量、宛先到達遅延を評価指標とする。また、実験するにあたって以下の様なシナリオを想定している。広域災害が発生し、通信インフラが使用不可という状況で複数の避難所に被災者が集まっている。被災者は安否情報や避難場所といった情報を他の避難所に避難していると思われる家族や友人に連絡しようとする。そこで、フェリーノードはそれらのメッセージを避難所から収集しオンラインエリアや他の避難所に運搬する役目を担う。また、フェリーノードのバッファ容量やバッテリーは十分にあるものとし、サーバとのメッセージの同期には時間を要さないものとする。

今回の実験では避難所を5ヶ所とし、フェリーノードを5台とした。シミュレーションのマップは北海道函館市の五稜郭近辺を利用し、避難所の位置は函館市が公開している函館市避難所マップ[11]を基に設定した。マップや避難所の位置、オフラインエリア、フェリーノードの経路を示す(図2)。オフラインエリアは東西3800m南北3100mの矩形とし、フェリーノードの移動速度は20km/hと設定しているため、オフラインエリアの横断には約11.4分要する計算となる。また、シミュレーション時間は7200秒とする。

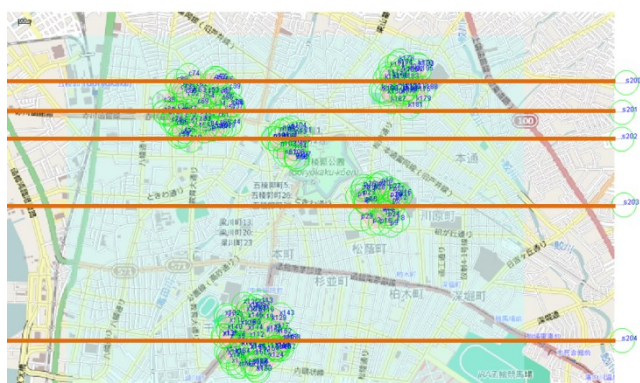


図2. 避難所の配置とフェリーノードの経路

今回の実験ではクラスタを大きさで大, 中, 小の3種類に分類してパラメータを設定した(表1)。被災者が避難所の周辺を歩きまわるとを想定してクラスタサイズを設定している。また、収容人数に関しては実際の場合1つの避難所に数十人から数千人までと多様であったが、本研究で

は数十人程度で実験を行った。クラスタサイズ大が2箇所、中が2箇所、小が1箇所として合計200人の被災者がメッセージフェリーを介してメッセージを送受信する実験を行った。

表1. クラスタサイズによるパラメータ差異

クラスタサイズ	クラスタ半径 (m)	収容人数
大	300	60
中	200	30
小	150	20

クラスタ内の移動端末の設定は表2の通りである。通信インタフェースは移動端末とフェリーノード共に Wi-Fi Direct を想定している。

表2. 移動端末のパラメータ

端末移動速度 (m/sec)	0.5 ~ 1.0
移動停止時間 (sec)	0 ~ 120
通信速度 (Mbps)	250
通信可能範囲 (m)	100

メッセージについては、安否情報や被災情報といったテキストや小さい画像程度を想定しており、サイズの大きい動画などは考慮していない。メッセージ生成頻度は3秒から5秒の間に1のメッセージが、バッテリー残量が0でない端末のうちの1つに生成される程度を想定している。宛先端末は同じ避難所内の移動端末か他の避難所の移動端末のどちらかとなる。また、シミュレーション時間7200秒のうち、3600秒までに生成されたメッセージについて宛先への到達率や遅延時間を測定する。生成頻度が3秒から5秒にひとつであるため約900メッセージが合計で生成される計算になる。以下にメッセージに関するパラメータを示す(表3)。今回の実験では、各移動端末のバッファ容量には制限がないものとして、メッセージの除去はTTLでのみ行うこととした。

表3. メッセージに関するパラメータ

生成頻度 (sec/message)	3 ~ 5
メッセージサイズ (KB)	50 ~ 150
TTL (sec)	3600
最終生成時間 (sec)	3600

実験環境では、探索ビーコンの発信とメッセージ送受信でのみ電力が消費される。どの程度の時間バッテリーがなくならずに端末が稼働するかを絶対的にシミュレーションで検証する場合は、探索や送受信にかかる正確な電力量を求める必要があるが、今回は既存ルーティングプロトコルとの相対評価を行うため各電力消費についてはスマートフォン SH-10D のパワープロファイルの値を参考に設定した。

また、各端末の電力残量の初期値は 4200~6000 の間でランダムに設定され、探索ビーコンの頻度は 15 秒おきに 15 秒間の発信を行うものとした (表 4)。

表 4. 電力消費に関するパラメータ

バッテリー初期残量	4200 ~ 6000
端末探索による電力消費 (15 秒あたり)	22
送受信による電力消費 (1 メッセージあたり)	12
端末探索間隔 (sec)	15
探索継続時間 (sec)	15

比較評価の対象は Epidemic Routing と Two-Hop Forwarding である。Two-Hop Forwarding は避難所内での通信方式のみに適用し、フェリーノードがメッセージを収集した際には複製可能回数をリセットするよう設定した。フェリーノードは宛先端末が存在する避難所の中継端末にメッセージを転送し、受信した中継端末が Two-Hop Forwarding に基づき宛先端末にメッセージを送信する。よって、避難所間での通信ではメッセージの最大ホップ数は 3 となる。

また、MultistageStdDev の転送確率の初期値 P は $P=1$ とした。閾値が変更される毎に転送確率は半減されていく。

5. 結果と考察

シミュレーション経過時間によるバッテリー残量平均値の変化の推移を図 3 に示す。バッテリー残量平均値は 5 つの避難所の計 200 台の移動端末が持つバッテリー残量の平均値である。MultistageStdDev は Epidemic Routing より電力消費が少ないことがわかる。また、シミュレーション時間 2 時間のうちの 90 分以降の 30 分間のグラフを参照すると、シミュレーション終了時には MultistageStdDev が Two-Hop Forwarding よりわずかにバッテリー残量が多い (図 4)。

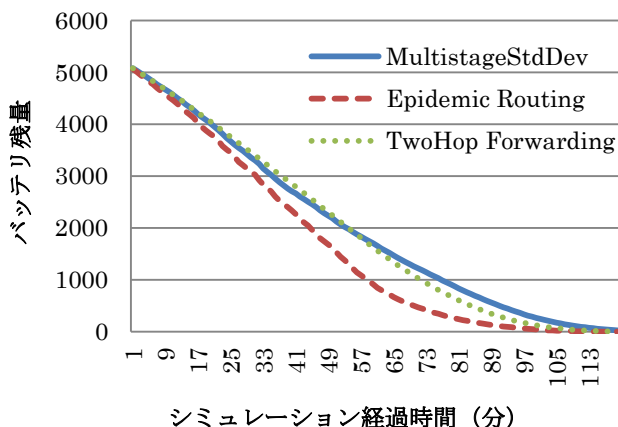


図 3. 経過時間によるバッテリー残量平均の推移

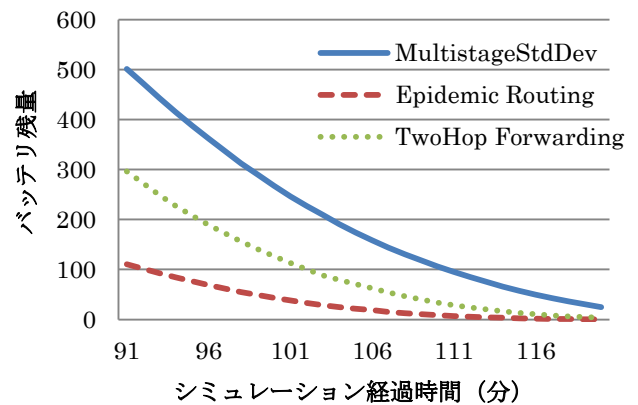


図 4. 90 分以降のバッテリー残量平均の推移

宛先到達率、転送遅延平均、平均ホップ数の結果は表 5 の通りである。MultistageStdDev は Epidemic Routing と同等の宛先到達率を保持している。また、転送遅延は Epidemic Routing が最も少なく、Two-Hop Forwarding が最も大きかった。平均ホップ数が少ないほどメッセージの複製が抑制されていることになり、それに伴い転送遅延が大きくなる。Two-Hop Forwarding はメッセージの送信元と宛先が異なる避難所にいる場合に宛先への転送が困難となる。原因としては、避難所外の移動端末へメッセージを送信するためには Two-Hop Forwarding の特性上メッセージの送信元端末が直接フェリーノードへメッセージ送信する必要があることが考えられる。

表 5. 3 方式の宛先到達率、転送遅延平均、平均ホップ数の結果

	Multistage StdDev	Epidemic Routing	Two-Hop Forwarding
宛先到達率 (%)	94	99	70
平均転送遅延 (秒)	724	334	831
平均ホップ数 (回)	4.3	6.9	2.2

平均ホップ数が Two-Hop Forwarding より多いにも関わらず、MultistageStdDev のバッテリー消費が Two-Hop Forwarding と同等であった要因としては、バッテリー残量閾値を用いた探索ビーコンの発信や転送確率のコントロールが行われていることが挙げられる。バッテリー残量で探索ビーコンの発信や転送確率を変化させることは、バッテリー消費の削減に効果的である。

クラスタサイズ毎の電力消費では移動端末数が多い程 Epidemic Routing と他方式の差が大きく現れた (図 5, 図 6)。

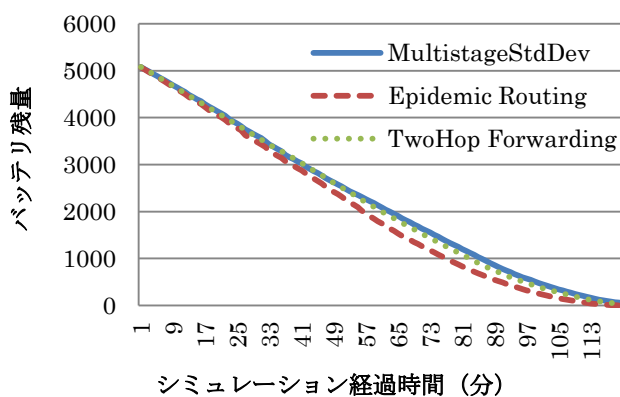


図5. クラスタサイズ小のバッテリー残量平均の推移

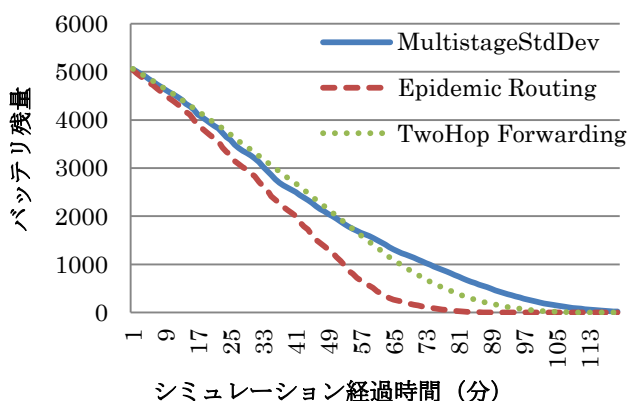


図6. クラスタサイズ大のバッテリー残量平均の推移

本稿でのパラメータではクラスタサイズが大きくなるにつれて人口密度は小さくなるが、人口そのものは増加して、生成されるメッセージが多くなるために Epidemic Routing ではそれらのメッセージ転送回数が多くなり、電力消費が大きくなっていると考えられる。

以上の結果を表6にまとめる。

表6. 3方式の強みと弱み

	Multistage StdDev	Epidemic Routing	Two-Hop Forwarding
宛先到達率	高	高	低
電力消費	少	多	少
転送遅延	中	小	大

MultistageStdDevは宛先到達率がEpidemic Routingと同等に高く、電力消費はTwo-Hop Forwardingより若干優れているため、本研究の目的である電力利用効率の改善が達成されたと言える。

6. おわりに

本稿では、メッセージフェリー方式を用いた災害時通信システムを提案し、シミュレーションによって本研究が提

案する通信方式である MultistageStdDev の評価実験を行った。結果として、DTNの代表的な通信方式である Epidemic Routing と Two-Hop Forwarding と比較して、MultistageStdDev が最も効率の良い電力運用が可能であることが示された。

今後の課題としては、ネットワーク資源の消費とトレードオフの関係にある宛先到達遅延の削減の検討が挙げられる。考えられる手法としては、フェリーノードの避難所巡回間隔を短縮することが挙げられる。また、メッセージフェリー型の災害時通信システムではフェリーノードへのメッセージ送信の機会を逃した場合、再びフェリーノードが巡回してくるまで待機する必要がある。よって、フェリーノードの巡回間隔を短くすることが宛先到達遅延の改善に繋がる。このことから、フェリーノードの移動経路決定アルゴリズムの検討が課題として挙げられる。今後は上記課題に取り組み、より現実的な災害時通信システムの提案を行う。

参考文献

- 1) 総務省, “情報通信白書平成23年版,” 第1部 東日本大震災における情報通信の状況, 2011.
- 2) Google, “避難所名簿共有サービス,” http://googlejapan.blogspot.jp/2011/03/blog-post_14.html, 参照 Oct. 2014.
- 3) K. Fall, “A delay-tolerant network architecture for challenged internets,” Proc. SIGCOMM’03, pp.27-34, 2003.
- 4) W. Zhao, M. Ammar and E. Zegura, “A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks,” Proc. MobiHoc 2004, pp.187-198, 2004.
- 5) 金田知展, 中村嘉隆, 高橋修, “DTNを用いた災害時通信システムにおける電力利用効率改善手法の提案,” 信学技報 vol.113, No.398, MoNA2013-51, pp.13-18, 2014.
- 6) A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Technical Report CS-200006, 2000.
- 7) M. Grossglauser and D. N. C. Tse, “Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol.10, no.4, pp.477-486, Aug.2002.
- 8) 坂野寿和, “大規模災害時に被災サービスの即時復旧を可能とする可搬型 ICT 基盤技術,” 災害・危機管理 ICT シンポジウム 2013, <http://ictfss.nict.go.jp/yokohama2013/DL/lecture5.pdf>, 参照 Oct. 2014.
- 9) 加藤寧, “スマホ de リレー-圏外でも通信可能なデュアルモードアドホックネットワーク技術-,” ROEC シンポジウム, 2013.
- 10) A. Keränen, J. Ott and T. Kärkkäinen, “The ONE simulator for DTN protocol evaluation,” Proc. SIMUTools’09, 2009.
- 11) 函館市役所, “避難所マップ,” <http://www.city.hakodate.hokkaido.jp/docs/2014022400500/>, 参照 Oct. 2014.