

DTN を用いた災害時通信システム構築法の提案

金田知展^{†1} 中村嘉隆^{†2} 高橋修^{†2}

広域災害発生時に停電や物理的なダメージにより通信インフラが使用不可となった際の情報通信手法として、遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Network) が注目されている。DTN ではスマートフォンのようなバッテリーで稼働する端末を利用してデータの中継・転送を行うことで、インフラレスな状況下においても端末間の情報通信を可能としている。しかし、転送の際にバッファやバッテリーなどの端末資源を消費するため、消費量によっては他端末との通信が不可能となる場合も想定される。災害時には、安否情報や被災状況といった重要性の高い情報が要求されるため、より多くの情報を収集できることが望ましいが、通信可能な端末の減少に従って得られる情報も減少する。そこで本研究では、対象とするネットワーク内における全ての端末のバッテリー残量が可能な限り均等になるように、各端末のバッテリー残量を考慮したデータ転送先の動的な選択を行う通信方式の提案を行い、ネットワーク持続時間を長期化させることを目的とする。

Proposal of the Disaster Communication System Construction Method Using Delay-Tolerant Networks

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

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った[1]。よって、被災者の安否情報が紙媒体によっ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、避難所の情報を一度被災地外へ運び出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。東日本大震災では、Google の取り組みである「避難所名簿共有サービス」がこの一例として挙げられる[2]。「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ぶ必要がある。

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。そこで、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い環境下においても情報通信を可能とする。しかし、中継転送を行う際はバッファやバッテリーなどの端末資源を消費する。特に、通信によってバッテリー切れとなった端末は以降一切の通信が不可能となる。災害時には安否情報や被災状況といった重要性の高い情報があり、それらの情報を多く収集するためには多くの情報源が必要である。よって、情報源を可能な限り減少させずネットワーク持続時間の長期化を図ることが情報を多く収集する一手法として考えられる。

そこで、本稿では被災地内の情報を被災地外へ運び出す災害時通信システム構築法を提案し、避難所内の移動端末のバッテリー残量に焦点をあて、バッテリー残量からデータ転送先を動的に選択する通信方式を提案する。

2. 関連研究

本章では、本稿で提案する手法に関する DTN の基礎技術やルーティングプロトコル、およびメッセージフェリー

^{†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

方式について述べる。

2.1 蓄積運搬転送

蓄積運搬転送は DTN の特徴的な技術である。DTN アーキテクチャでは参照モデルのアプリケーション層とトランスポート層の間にバンドル層と吸収層を挿入している[4]。端末間での通信を行う際に、各ホップはバンドル層で通信を終端し各端末のバッファにバンドルへと変換された情報を保管する。各端末は移動中に見つかった他端末に対し保管したデータを転送する。このようにしてデータの転送を行う技術を蓄積運搬転送という。送信元と宛先の経路確立を事前に行わずに各端末のバッファにデータを蓄積させることで、遅延を許容し断続的な通信に耐えうるネットワークを形成する。

2.2 Epidemic-routing

Epidemic-routing は接触したノードに対してデータ転送が可能であるとき、無条件にデータを転送する DTN の代表的なルーティングプロトコルである[5]。データの中継する端末においても転送可能な端末に対しデータを転送するため、感染するように複製データが生成される。複製データがネットワーク内に多量に生成されるため、宛先へのデータ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、データ転送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。

2.3 メッセージフェリー方式

メッセージフェリー方式は、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[6]。フェリーノードはネットワーク内を計画的に巡回し、通常の移動端末から受信したデータ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、特定地域での不特定多数との通信、といった様々な状況で効果的に使用可能である。災害発生時を例として挙げると、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地上車両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データを収集し運搬することが可能である。携帯電話やスマートフォンのような被災者が所持している端末から得られたデータを被災者の救助に活用することが可能である。

2.4 DTN における電力消費を考慮した通信方式

DTN は端末の資源を消費することで通信を行うことから、資源の消費量の削減について多くの研究がなされてい

る。通信における電力の制限を考慮している研究[7]では、電力の制限について考慮していないデータ転送方式に対して、電力制限を考慮した上で、宛先へのデータ到達率の最大化を目的とした。転送方式の端末間の通信を行うか否かを決定するために使用されている確率の求め方は、静的方式と動的方式に大きく分類される。[7]ではそれぞれの方式の最適化を行い、各転送方式で検証を行った。結果として、閾値を用いた動的方式が最適な方式であることが示された。[7]では電力制限としてネットワーク全体の電力を設定しており、電力の消費はデータの送受信のみを考慮しているためネットワーク内での転送回数に比例する。このことから、データ転送回数を減らすことが電力制限を考慮した上でデータ到達率の最大化を達成することに繋がった。また、転送するデータの数は1つを想定していた。

ネットワーク全体に対してのみ電力制限を設定した場合、個々の端末が持つ電力が考慮されないため、端末の電力使い切りによるネットワークの変化を検証することが不可能となる問題がある。

3. 提案方式

本章では、既存方式の課題に対するアプローチと研究目的を述べ、想定環境、提案方式の構成とその詳細について述べる。

3.1 アプローチと研究目的

本稿では、災害時における通信システムの構築法を提案し、対象とするネットワーク内における全ての端末のバッテリー残量が可能な限り均等になるよう、各端末のバッテリー残量を考慮したデータ転送先の動的な選択を行う通信方式の提案を行い、ネットワーク持続時間を長期化させることを目的とする。

3.2 想定環境

広域災害が発生し通信インフラが機能しない状況で、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内の安否情報や被災状況などの情報を収集し、被災地の外へ運び出すことを想定する。避難所をクラスタと想定してクラスタ間をフェリーノードが移動しており、クラスタ内の移動端末はフェリーノードにデータを集める。その際のクラスタ内の移動端末の通信方式について検討する。

3.3 提案方式の構成

提案方式は、クラスタ内の移動端末間の通信と、クラスタ内の移動端末とフェリーノードとの通信で構成される(図1)。クラスタ内の移動端末間の通信では、バッテリー残量が多い端末へデータが集まるよう通信が行われる。3.4

節と 3.5 節に詳細を述べる。

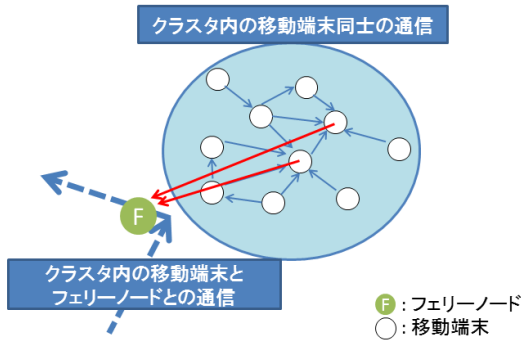


図 1 2 種類のデータ通信

3.4 クラスタ内の移動端末間の通信

クラスタ内の移動端末の通信において、一部の移動端末に負荷が集中しその移動端末のバッテリー残量がなくなってしまう場合、その移動端末は他の移動端末との通信が不可能となる。そこで、特定の端末に負荷が集中しバッテリー残量を消耗しないよう、バッテリー残量を通信に反映させる。

クラスタ内の移動端末間の通信は移動端末の 2 種類の状態により制御される。2 種類の状態とは、バッテリー残量が閾値以上か、閾値より少ないかという状態であり、この閾値により周囲の移動端末の探索を行うかを決定する (図 2)。以下に詳細を述べる。

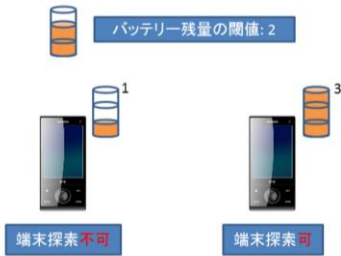


図 2 バッテリー残量によるノード探索制御

各移動端末はデータ生成後に自身のバッテリー残量を確認し、バッテリー残量が閾値以上の場合、その送信端末はバッテリー残量が十分に残っていると判断し、周囲の移動端末の探索を行う。このとき、自身のバッテリー情報を付加した探索 packets を周囲にブロードキャストすることで探索を行う。探索によって見つかった中継端末は、送信端末のバッテリー情報を参照しバッテリー残量を比較し自身のバッテリー残量がより多い場合、送信端末へデータの転送を許可する packets を転送する。この packets には中継端末のバッテリー残量情報が含まれる。中継端末のバッテリー残量が少ない場合は、中継端末は送信端末へデータ

の転送を行う (図 3)。バッテリー残量が閾値を下回っている場合は、その送信端末はバッテリー残量が少なくなっていると判断し、周囲の移動端末の探索を停止する。このとき、送信端末は周囲の移動端末から転送要求が送信されるまで待機する。転送要求が送信されたとき、その転送要求を送信した移動端末のバッテリー残量が送信端末のバッテリー残量より多いことは明らかである。よって、送信端末は転送要求を送信した移動端末に対してデータを転送する (図 4)。このように、周囲の移動端末から転送要求が送信された時のみデータ転送を行うことにより、周囲の移動端末を探索することで生じる電力消費を削減する。

バッテリー残量 ≥ 閾値のとき

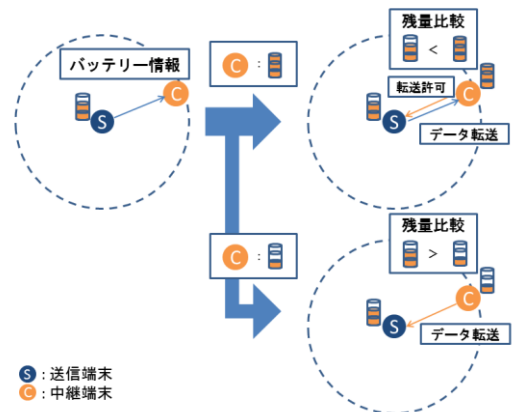


図 3 バッテリー残量 ≥ 閾値 のときの通信

バッテリー残量 < 閾値のとき

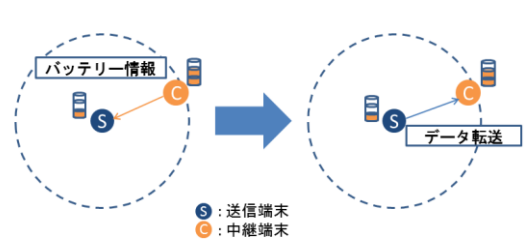


図 4 バッテリー残量 < 閾値 のときの通信

また、バッテリー残量による送信判定を行った上で、送信端末となった移動端末は確率 P で中継端末へデータの転送を行う。 P は以下の式 (1) で求められる。

$$P = \frac{O-C}{O-T} \quad (1)$$

O は中継端末のバッテリー残量を表し、 C は送信端末のバッテリー残量を表しており、 T はバッテリー残量の閾値を表す。 $C < T$ となるとき、 $P > 1$ となることからバッテリー残量が閾値より少ないときは必ず送信端末から中継端末へのデータ転送が行われる。 $C \geq T$ となるときは、 $C \geq (O+T)/2$ となるとき $P \leq 1/2$ となり $C < (O+T)/2$

となる時、 $P > 1/2$ となる。

3.5 クラスタ内の移動端末とフェリーノードとの通信

フェリーノードはクラスタ間を移動し、クラスタ内の移動端末からデータを収集する。その際、クラスタ内の全ての移動端末がフェリーノードとデータ転送を行った場合フェリーノードへのアクセスが集中するため高い負荷がかかり非効率的であるということが課題として挙げられる。そこで、クラスタ内の移動端末とフェリーノードとの通信に条件を設定することでアクセスの集中を回避する。

クラスタ内の移動端末とフェリーノードとの通信はそれぞれの移動端末のデータ送信数と受信数の比を条件とする。各移動端末は式(2)を満たしている時、フェリーノードへデータの転送を行う。係数 N によりフェリーノードへのデータ転送を行う移動端末数の増減が可能である。フェリーノードの性能が低く、負荷が大きくなると障害を起こす場合は N を大きい値にすることでデータ転送可能な移動端末数を抑制することが可能である。フェリーノードの性能が高く、大きな負荷による問題が生じない場合は N を 0 に近づけることによりほぼ全ての移動端末がフェリーノードへのデータ転送が可能となる。

$$\text{受信データ数} > N \times \text{送信データ数} \quad (2)$$

4. 実験と評価

本章では、提案方式の有効性を示すための実験および評価について述べる。

4.1 実験環境

本稿では、シミュレーションによる評価実験を行った。提案方式をネットワークシミュレータ The ONE (The Opportunistic Network Environment simulator) 上に実装し検証した[8]。The ONE は DTN 環境専用のシミュレータであり、シナリオファイルを設定することで DTN 環境でのシミュレーションを可能とする。また、周囲の移動端末の探索やデータの送受信といった動作によるバッテリー消費に関しては、様々な端末が混在することを考慮すると正確にモデル化を行うことは困難であるが、CPU やメモリアクセスによる電力消費を統一して評価をした場合、その結果は一般性に欠ける。よって本研究では、通信の主要なバッテリー消費となる移動端末の探索とデータの送受信のみを扱い、データの送受信にかかる電力を転送にかかる時間に比例するものとし、周囲の移動端末の探索にかかる電力を一定とした。

4.2 評価

Epidemic-routing と提案方式の比較評価を行った。評価指標としてネットワーク持続時間とフェリーノードへのデー

タ到達数、データ到達率、転送遅延を測定した。ネットワーク持続時間とは、フェリーノードが新たなデータを受信しなくなるまでの時間を意味する。また、クラスタ内の移動端末のバッテリー残量を測定し平均と分散を求めた。

4.3 シミュレーションシナリオ

移動端末はクラスタ内をランダムに移動する移動端末 100 台とフェリーノード 1 台で構成されている。シミュレーションは 2 種類のシナリオで行った。1 つ目は通信インターフェースとして Bluetooth を使用した場合のシミュレーションで、2 つ目は Wi-Fi を使用した場合である。それらのシミュレーションパラメータの違いを以下に示す(表 1)。

表 1 インターフェースによるパラメータの違い

	Bluetooth	Wi-Fi
通信速度(Mbps)	2	250
通信範囲(m)	10	100
クラスタ半径(m)	50	200

Wi-Fi は Bluetooth と比較して通信速度が速く、通信範囲が広いといった特徴があるため、それに伴いクラスタ半径を拡張し移動端末の密度が Bluetooth を用いた場合より疎である環境での提案方式の性能を評価することを目的とした。また、両インターフェースに共通するシミュレーションパラメータを以下に示す(表 2)。

表 2 共通するシミュレーションパラメータ

移動端末(nodes)	100
フェリーノード(nodes)	1
フェリーノードの移動速度(m/sec)	30 ~ 60
フェリーノード滞在時間(sec)	300 ~ 600
データ生成間隔(seconds/data)	3 ~ 5
データサイズ(KB)	50 ~ 150
TTL(min)	60
バッテリー容量	1000 ~ 3000
端末探索による電力消費	9.2
端末探索間隔(sec)	15
データ送受信による電力消費	0.8

被災地を巡回しているフェリーノードとしてはトラックやヘリコプターなどが考えられる。しかし、本稿ではフェリーノードが移動中に移動端末と接触することは考慮していない。よって、フェリーノードの移動速度が移動端末との通信に与える影響は少ない。そこで、本稿のシミュレーションではフェリーノードの移動速度を 30 ~ 60(m/s)とした。また、移動端末がフェリーノードと通信を行うタイミングとしてはフェリーノードがクラスタに到着し滞在している時間を考えており、滞在時間を 300 ~ 600(sec)とした。

また、マップは情報収集を行うクラスタが1つと情報収集を行わないダミークラスタ3つにより構成されており、フェリーノードが同じクラスタに再び巡回してくるまでの時間は、最短で約1200(sec)となり最長では約2400(sec)となる。データ生成間隔は3秒から5秒の間に1つのデータがいずれかの移動端末にランダムに生成される。データを生成する移動端末は周囲の移動端末を探索可能である移動端末である。災害時の通信では安否情報や被災状況に関してのデータの需要が高まり、ファイルサイズの大きなデータはあまり生成されないと考え、生成されるデータの容量は50~150(KB)と設定した。また、生成されたデータにはTTL(Time To Live)が設定されており、60(min)経過後にネットワーク内から削除される。移動端末のバッテリー容量は1000~3000の間でランダムに決められる。端末探索によるバッテリーの消費に関しては、端末探索間隔15(sec)毎にバッテリーが消費される。また、データ転送にかかる消費電力は送信や受信に要している時間に比例するものとする。周囲の移動端末の探索可否を決めるバッテリー残量の閾値は420、フェリーノードと通信する条件を、受信データ数 > 0.3×送信データ数、と設定した。また、フェリーノードは被災地の外部で用意したものを想定し、バッテリー容量やバッファ容量は十分に余裕があるものとする。

4.4 Bluetooth におけるシミュレーション結果

Bluetooth における Epidemic-routing と提案方式の実験結果を示す (表 3)。

表 3 Bluetooth における評価結果

	Epidemic-routing	Proposal
ネットワーク持続時間(sec)	3160	6147
宛先データ到達数	769	949
データ到達率	0.70	0.89
平均転送遅延(sec)	661	1182

提案方式のネットワーク持続時間は Epidemic-routing の2倍弱となっており、宛先へのデータ到達数と到達率は共に提案方式がより良い結果となった。しかし、平均遅延時間は提案方式が Epidemic-routing の2倍弱となった。移動端末のバッテリー残量の平均と分散を示す (図 5) (図 6)。図 5 の横軸はシミュレータ内の時間を意味しており、縦軸は100 台の移動端末のバッテリー残量平均を示している。提案方式は、Epidemic-routing より傾きが小さいためバッテリー消費量が抑えられていると言える。提案方式ではバッテリー残量が閾値を下回ったときに周囲の移動端末の探索が行われなくなると同時にデータの生成も行われなくなるため、バッテリーを使いきらずに通信を終える。図 6 の縦軸は移動端末のバッテリー残量の分散を示しており、300 秒毎の分散を示したグラフである。提案方式は

Epidemic-routing と比較して低い値を示していることから、移動端末のバッテリー残量の均等化が行えていると言える。

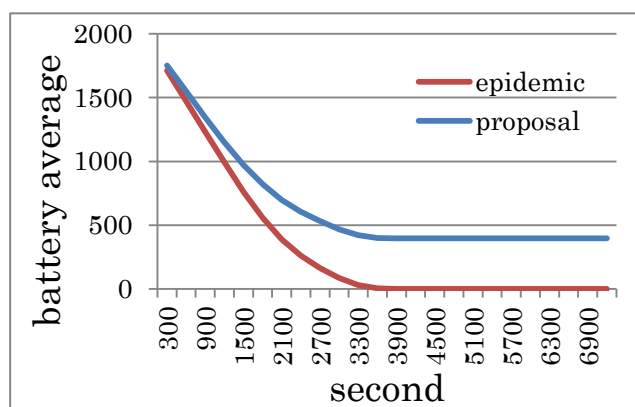


図 5 Bluetooth におけるバッテリー残量の平均

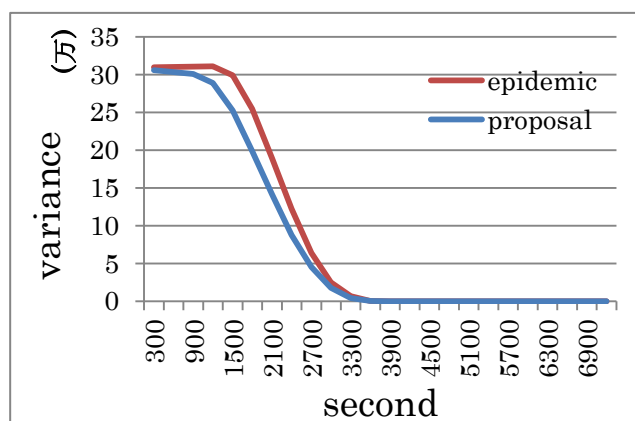


図 6 Bluetooth におけるバッテリー残量の分散

4.5 Wi-Fi におけるシミュレーション結果

Wi-Fi における Epidemic-routing と提案方式の実験結果を示す (表 4)。

表 4 Wi-Fi における評価結果

	Epidemic-routing	Proposal
ネットワーク持続時間(sec)	4109	7226
宛先データ到達数	1091	1065
データ到達率	0.81	0.91
平均転送遅延(sec)	682	1115

Bluetooth におけるシミュレーションの結果と同様に、ネットワーク持続時間は提案方式がより長い時間を示した。しかし、宛先へのデータ到達数は提案方式が少ないという結果を示した。到達率に注目すると提案方式がより優れていることから、データの生成数については Epidemic-routing がより多かったことが示される。データの生成は一定の間隔で行われるため、Epidemic-routing における全ての移動端末のバッテリー残量が 0 になる時間より、提案方式における全ての移動端末のバッテリー残量が閾値より小さくなる

までの時間の方が短かったということを読み取れる。また、この事実はシミュレーション時間によるバッテリー残量の平均値の変化を見ることでも明らかである（図7）。

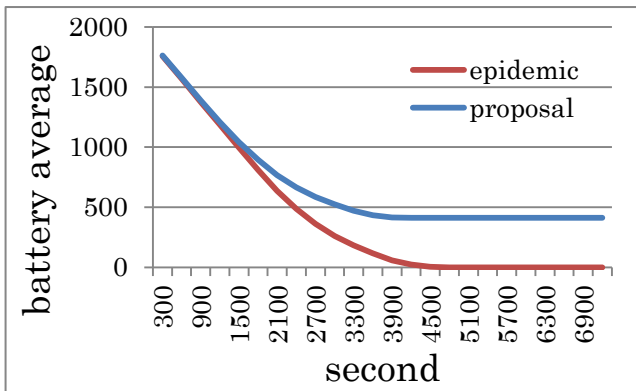


図7 Wi-Fiにおけるバッテリー残量の平均

バッテリー残量の分散グラフ(図8)から Epidemic-routing のバッテリー残量の分散値の収束の速さが Bluetooth と比較して遅いことがわかる。平均値の減り方からも、Wi-Fi を使用したシミュレーションでは Bluetooth での環境と比較し移動端末の密度が疎であったため、データ転送回数が減ったと言える。

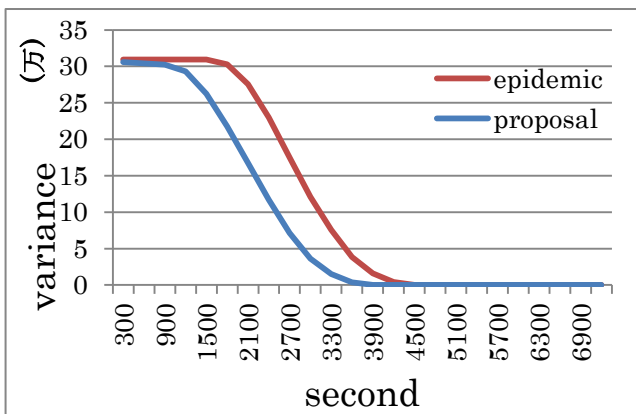


図8 Wi-Fiにおけるバッテリー残量の分散

4.6 考察

Bluetooth と Wi-Fi の両環境において、提案方式のネットワーク持続時間が Epidemic-routing より長く、宛先へのデータ到達率が高かったことに関しては、フェリーノードの巡回が大きく関係している。一度フェリーノードがクラスタに到着した後、再度クラスタに到着するまで 1200 ~ 2400(sec)の時間を要する。Epidemic-routing ではバッテリー残量が残り僅かな状況でもクラスタ内での移動端末間通信を行う。よって、バッテリーを使い切りフェリーノードへ送信不可となったデータが生じる。一方、提案方式ではバッテリー残量が閾値より小さくなったときに周囲の移動端末の探索を停止し、バッテリーの消費を抑えることでフェリーノードが到着した際に転送を行うことが可能となる。このことから、フェリーノードがクラスタを巡回してデー

タの収集を行うというモデルでは、クラスタ内の移動端末間の通信でバッテリーを使い切らないよう考慮する必要があると考えられる。

提案方式において、一割程度のデータが宛先に到達しなかった原因について考察する。最初に考えられることは、TTL によるネットワーク内からの除去である。フェリーノードがクラスタに滞在しているとき、移動端末がフェリーノードとの通信タイミングを逃してしまった場合、次にフェリーノードが到着した時には TTL によって除去されている可能性がある。次に考えられることは、ネットワーク内で唯一のデータを持っている移動端末がフェリーノードと接触した際に通信条件を満たしていないため転送出来ず TTL によってデータが除去されるということである。より多くのデータを収集するためには、ネットワーク持続時間だけではなくデータ到達率も重要となる。本稿では受信データ数 $> 0.3 \times$ 送信データ数という式を条件式として設定していたが、転送率とトラフィックの増大という観点で最適な条件を検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本稿では、広域災害発生時の情報通信システムとして、メッセージフェリー方式を使用してクラスタ内のデータを収集するシステムを提案し、中でもクラスタ内の移動端末間の通信に対して、バッテリー残量情報を利用した通信方式の提案を行った。また、提案方式についてシミュレーションによる従来手法との比較評価と考察を行った。今後は、Epidemic-routing 以外のルーティングプロトコルとの比較評価や、シミュレーション規模の拡大を行いたい。また、フェリーノードと通信を行う端末を決定する条件式の検討を行いパフォーマンスの向上を図りたい。

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, 最終アクセス 2013 年 1 月
- [3] K. Fall, “A delay-tolerant network architecture for challenged internets,” Proc. SIGCOMM’03, pp.27-34, 2003
- [4] K. Scott and S. Burleigh, “Bundle protocol specification,” IETF RFC 5050, 2007
- [5] A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Technical Report CS-200006, 2000
- [6] 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
- [7] Yong Li, “Energy-Efficient Optimal Opportunistic Forwarding for Delay-Tolerant Networks,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, no. 9, pp.4500 – 4512, 2010
- [8] A. Keranen, J. Ott and T. Karkkainen, “The ONE simulator for DTN protocol evaluation,” Proc. SIMUTools’09, 2009