大規模災害時の３Ｇ通信不可能エリアにおける情報発信および収集を可能とするDTNベースメッセージ中継法の提案と評価

小山 由[1] 水本 旭洋[1,2] 安本 慶一[1]

概要：本稿では，大規模災害発生によりセルラー通信が利用不可能になった地域においても，スマートフォンを用いて安否確認情報の送信および取得を可能にするDTN（Disruption / Delay Tolerant Networking）に基づいたメッセージ中継法を提案する．提案手法では各ユーザのセルラー通信状況と時刻を含めた移動履歴に加え，他ユーザ端末との遭遇履歴を記録し経路表を作成する．この経路表を利用し，より短い時間で到達する可能性の高いユーザへメッセージを中継することでセルラー通信が可能なエリアおよび特定ユーザに向けて効率よくメッセージを配送する．現実的なマップおよびモビリティモデルを用いた計算機シミュレーションを行い，メッセージ到達率などに関してエピデミックルーティングと比較を行った結果，通信可能なエリアと通信不可能なエリアのユーザへのメッセージ中継において，それぞれ到達率が80%，70%と，エピデミックルーティングに匹敵する性能を達成した上で，交換された総メッセージ数を，エピデミックルーティングに比べ，それぞれ30%，45%削減することができた．

A DTN-based Message Forwarding Method Enabling Information Transmission and Collection on 3G Unavailable Area in Large Disaster

yoshi Koyama[1] Teruhiro Mizumoto[1,2] Keiichi Yasumoto[1]

1. はじめに

大規模災害が発生すると，基地局の故障や停波等によりセルラー通信（以降，3G通信と呼ぶ）が利用出来なくなることがある．また，この状況は災害発生後，しばらく継続する場合があり，2011年に生じた東日本大震災においては，停波基地局数が1000を下回るまでに一週間以上掛かっていたことが分かっている．通信インフラの断絶が生じると，被災地内の情報収集が困難となり，災害規模の把握や対策の遅れにつながる．災害時に被災地の内外で多くの人に必要とされ，可能な限り早く収集することが望まれる情報として安否情報が挙げられる．しかし通信が利用不可になると，早急な安否情報の収集は難しい．このような安否情報収集の遅れを防ぐためには，通信インフラが断絶した環境においても情報の収集，および発信が可能なシステムが必要である．

通信インフラが利用不可能な場合の情報の伝達方法として，DTN (Delay / Disruption Tole rant Network)[1] を用いたデータ中継手法がある．DTNは送信元から目的地までメッセージを配送する際に，中継地点（中継端末）が通信不可能な間はメッセージを保持し通信可能になった場合に転送を行うストアキャリー・アンド・フォワード型の通信方式である．DTN方式でデータ配送する際に，各端末が出会った全ての端末にメッセージを複製するエピデミックルーティング[2]と呼ばれるルーティング手法を利用すると，輻輳が発生しない限りは，メッセージの到達可能性と到達時間が最も良くなるが，同じメッセージに対して多数の複製が作成されてしまい，DTNで配送可能な通信量を無駄に消費してしまうとともに，各端末が送信するメッセージ総数および送信量が増え端末のバッテリを大きく消耗することに繋がる．DTN方式で効率良くメッセージを

[1] 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology
[2] 日本学術振興会 特別研究員DC

中継する手法として，Uddin ら [3] はノード同士の遭遇パターンを利用し，より目的地に近いユーザにメッセージを中継することで効率的な配送を実現する方法を提案している．また Hossmann ら [4] はソーシャルグラフを利用し，目的地との類似点やノードの媒介中心性等，様々な評価基準やコミュニティの抽出アルゴリズム等を用いて目的地へメッセージを配送するのに適した中継ノードを探す方法を提案している．これらの既存研究では，指定された目的地に到達するのに効率の良いルーティング手法を提案しているが，本研究で対象とする大規模災害のような，3G 通信が不可能なエリア（以降，通信不可能エリア）および 3G 通信が可能なエリア（以降，通信可能エリア）が未知かつ動的に変わり，各端末の物理的な位置や端末のＩＤが既知ではない状況には，そのまま適用することはできない．そのため，災害時に適しており，効率的にメッセージの配送が可能なルーティング手法を考案する必要がある．

提案するルーティング手法では，各ユーザ端末の 3G 通信状況と時刻を含めた移動履歴に加え，他ユーザ端末との遭遇履歴を記録し，通信可能エリアや特定端末に対する経路表を作成する．この経路表を利用し，通信可能エリアおよび特定ユーザに，より短い時間で到達する可能性の高いユーザへメッセージを中継することで，効率的なメッセージ中継を実現する．提案するメッセージ中継法を評価するため，現実的なマップおよびモビリティモデル [5] を用いた計算機シミュレーションを行い，メッセージ到達率などに関してエピデミックルーティングと比較を行った．結果，提案手法は，通信可能エリアと通信不可能エリアのユーザへのメッセージ中継において，それぞれ到達率が約 80%，70%と，エピデミックルーティングに匹敵する性能を達成できることが確認できた．また，その際に交換された総メッセージ数は，エピデミックルーティングに比べ，それぞれ約 25%，40%少なく，送受信に掛かるバッテリ消費量を大幅に抑えることが可能であることを確かめた．

2. 関連研究

DTN ルーティング手法に関連する既存研究として，目的地ノードへ効率的にメッセージ配送を行う手法と，端末のエネルギー効率の向上を目的とした手法について述べる．また既存の DTN を利用した災害時対応アプリケーションについても述べる．

2.1 目的地ノードへの効率的なデータ配送を目的とする研究

Uddin ら [3] は目的地に効率よくデータを到達させるため，ノード同士の遭遇パターンを利用した手法を提案している．災害が生じた際，被災地内には医者やボランティア，自衛隊等，同じ範囲を周期的に巡回する可能性の高いユーザが存在すると考えられる．この研究ではこれを利用し，巡回しているユーザのうち移動パターンがより目的地に近いユーザにデータを中継する．また Hossmann ら [4] はソーシャルグラフを利用し，目的地との類似点や媒介中心性等の様々な評価基準やコミュニティの抽出アルゴリズム等を用いて，目的地へデータを配送する可能性が高いノードを探す方法を提案している．Daly ら [6] は，目的地ノードとの直接的，もしくは間接的な繋がりを基に，より目的地ノードに到達する可能性が高いノードにデータを中継する方法を提案している．

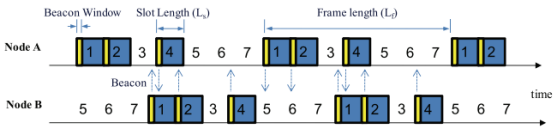


図 1 スリープスケジューリングの例

上記で述べた既存研究は，予め位置が分かっている目的地に対するメッセージ中継法を提案しているのに対し，本研究では通信不可能エリアのどこかに存在する通信可能エリアを目的地としてルーティングを行うことを想定しており，これらのエリアの場所は既知でなく，時間とともに変化する可能性がある．このことから，本研究の目的に既存の DTN ルーティング法をそのまま適用することはできない．本研究で用いるルーティング手法では目的地情報を動的に収集しながら，効率よくメッセージを目的のエリアに中継することが求められる．

2.2 端末のエネルギー効率の向上を目的とする研究

端末のエネルギー効率について考慮した DTN ルーティングに関する研究では，周囲のユーザを検索するために行われるリスニングモードにおいて発生する無駄な電力消費を抑えることが主な目的に挙げられている．Choi ら [7] はスリープスケジューリングモデル [8] を拡張した手法を提案しており，端末の起動インターバルと Cyclic Difference Set を用いることにより，図 1 に示すように，各タイムインターバルにおいて少なくとも一度は他ノードとアクティブスロットが重なるように設定し，最低限の起動インターバルでデータ配送を実現している．また Abdelkader ら [9] は，他ユーザへのデータ配送において，データの到達率を下げることなく配送数に制限をかけてデータの氾濫を防ぐことでエネルギー消費を減らすことを目的とし，保持する情報の異なる 3 種類のノードを用意し，それらを使い分けることで効率的なルーティングを実現する手法を提案している．

本研究で対象とする大規模災害においては，同一ユーザと規則的に遭遇することは考えにくく，平均遭遇周期も頻繁に変更される．また，通信状況が不安定な場合には，ユーザの位置を正確に取得することが困難である可能性がある．このことから，既存研究 [7] のような各ノードの起

動インターバルがあらかじめ決まっており，同一ユーザとの遭遇間隔が一定であるという仮定や，既存研究 [9] のようなノードの移動パターンや位置情報がわかっていると仮定した手法を適用することはできない．

上記で述べた問題点を満たす方法として，本研究ではエリア内を移動するユーザが取得可能な情報を利用して経路表を作成し，メッセージを中継するかどうか決定する手法を提案する．経路表は通信可能エリア，及び特定のユーザとの平均遭遇周期に関する情報を保持する．各ユーザは経路表の情報を基に，自身の保持するメッセージを転送するのに適したユーザに遭遇した時のみ，メッセージを中継する．この時，災害発生時の各ユーザの行動範囲は限られ，かつおおよそ規則的に移動する (避難所間，避難所と自宅間の移動等) と考えられるため，平均遭遇周期の情報を利用することで，本研究の目的を満たすメッセージ中継を実現することができる．この提案手法の詳細は 3 章で述べる．

2.3 災害時対応アプリケーション

通信不可能エリアにおいてつぶやかれた安否情報を DTN を利用して通信可能エリアに配送し，SNS のシステム上に送信するような，アプリケーションが幾つか存在する．ここでは Twitter を対象とした MONAC[10] と Twimight [11] について述べる．

MONAC[10] は，寺西らが開発した防災，災害発生時用の機能を持った Android アプリケーションである．MONAC では公衆網が利用不可能でインターネット接続できない場所であっても，端末同士が P2P 型のすれちがい通信を行い，メッセージを端末間でバケツリレー方式で転送・共有することが可能である．また，Hossmann ら [11] によって開発された Twimight も MONAC と同様に，災害時に対応可能な Android アプリであり，公開鍵と秘密鍵を常に最新情報に更新しておくことによって，ユーザのプライバシーを保持しながら災害に関するツイートを配送することを可能にしている．しかし，これらのクライアントはいずれもエピデミックルーティングにより定期的にメッセージをブロードキャストしているため，投稿メッセージ数が多くなると，複製数の爆発的な増大により，バッテリを激しく消耗してしまう．そのため，単にメッセージをフラッティングするだけではなく，メッセージ数を削減することでバッテリの消耗を抑制する手法が求められる．

3. 通信不可能エリア・可能エリア間のメッセージ中継法

本研究で提案するルーティング手法の目的は，通信不可能エリア内でユーザが SNS へ投稿したメッセージを最短時間で通信可能エリアに配送することと，通信可能エリアに到達したメッセージに対する返信を元のメッセージの送信者に適切に配送することである．このことを解決するためには，(1) より早く通信可能エリアに到達するユーザにメッセージの中継を行うこと，(2) 不可能エリアのどこかに存在する特定のユーザへ適切に配送することを実現する必要がある．本研究ではこれらを解決するため，ユーザが被災地内を移動する中で取得する移動履歴と遭遇履歴を基に算出した各ユーザへの経路表を設定し，これらの問題を解決する．以下にメッセージ中継の際に必要な情報についての詳細を示す．

表 1 移動履歴の例

時刻	通信状況
t_0	false
$t_0 + P$	false
$t_0 + 2P$	true
$t_0 + 3P$	true
$t_0 + 4P$	false

表 2 ユーザ A の遭遇履歴の例

遭遇ユーザ ID	最新遭遇時刻
B	Jan. 20, 10:00
D	Jan. 23, 17:00
E	Jan. 19, 13:30
G	Jan. 20, 08:06
N	Jan. 21, 21:46

3.1 移動履歴の作成

移動履歴の情報は，通信可能エリアへの到達周期を求めるために作成する．各ユーザはエリア内を移動する中で，各時刻における通信状況を移動履歴として記録し，保持する．移動履歴の例を表 1 に示す．表では時刻 t_0 にアプリケーションが起動され，それ以後は周期 P で履歴を取得する場合を示している．この時，各時刻における通信状況については，ユーザがいる場所が通信可能なエリアであれば “true”，不可能なエリアであれば “false” と表記している．

3.2 遭遇履歴の作成

遭遇履歴は，他ユーザとの平均遭遇時間を求めるために作成する．あるユーザ u が他のユーザ v と遭遇した際，「遭遇ユーザ ID」，「最新遭遇時刻」の情報をユーザに関する遭遇履歴として取得し，保持する．ユーザ A の遭遇履歴の例を表 2 に示す．この時，ユーザ A は他ユーザと遭遇する度に情報を追加，及び更新する．

3.3 経路表の設定

経路表は，ユーザ u が他ユーザ v とすれ違った際に 3.2 節で定めた遭遇履歴を基に作成し，過去に直接遭遇した宛先ユーザに遭遇するまでにかかる平均遭遇時間を保持する．経路表はメッセージを中継する際に利用し，その際直接的に遭遇するユーザ v だけでなく，ユーザ v が遭遇するユーザ w へのメッセージ中継も考慮する．この時，間接的に遭遇するユーザも含めて全ての遭遇ユーザのエントリを別々に保持すると，経路表のサイズが肥大化する可能性がある．この問題を防ぐため，本研究では各ユーザが直接遭遇したことがあるユーザ (以後，DHU (Direct Hop User)) を介して間接的に (マルチホップで) 遭遇する複数のユーザを簡略化した情報として保持することで，経路表に保持す

表 3　ユーザ A の経路表の例

		間接遭遇ユーザとの平均遭遇周期			
DHU	平均遭遇周期 (C)	$0 \leqq C < 30$	$30 \leqq C < 60$	$60 \leqq C < 90$	$90 \leqq C$
B	10	3G, H	J	-	R
C	25	G,K	E,F	P, 3G	-
D	60	-	I	N	3G

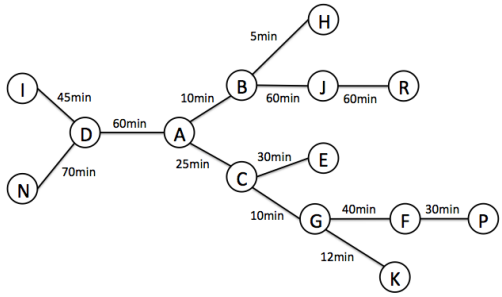


図 2　ユーザ同士の遭遇関係の例

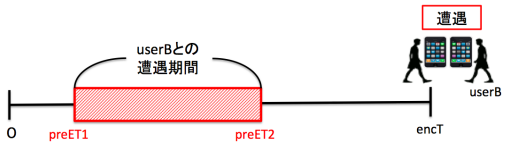


図 3　ユーザ A における B との遭遇関係の例

る情報の圧縮を行う．

経路表の例を表 3 に示す．経路表は図 2 に示す遭遇関係を基に作成しており，この例はユーザ A の経路表を示している．

経路表では DHU や，DHU との平均遭遇周期 ($P(A, DHU)$ と表記する) についての情報の他，DHU が遭遇したユーザ w との平均遭遇周期 ($P(DHU, w)$ と表記する) についても保持し，$P(DHU, w)$ を基に，表のように分けて保持する．この時，表では例として，[30-60]min，[60-90] min, [90-] min, という形で一定の時間区間毎に間接ユーザの情報を保持し，DHU の通信可能エリアへの平均到達周期 ($P(A, 3G)$ と表記する) についても “3G” として表中に含める．

また $P(A, DHU)$ について，適切な平均遭遇周期を得るため，経路表へは 2 回以上遭遇したユーザ情報のみを含める．この時，平均遭遇周期を図 3 を用いて説明する．図より，任意時刻 t_n にユーザ A がユーザ B との n 回目の遭遇が生じた場合，その平均遭遇周期 $P_n(A, B)$ は以下のように求める．

$$P_n(A, B) = \frac{P_{n-1}(A, B) \times (n-1) + (t_n - t_{n-1})}{n}$$

ここで，$P_{n-1}(A, B)$ は，前回に遭遇した際の平均遭遇周期を示す．

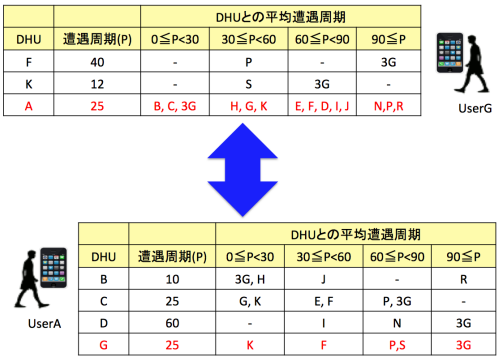
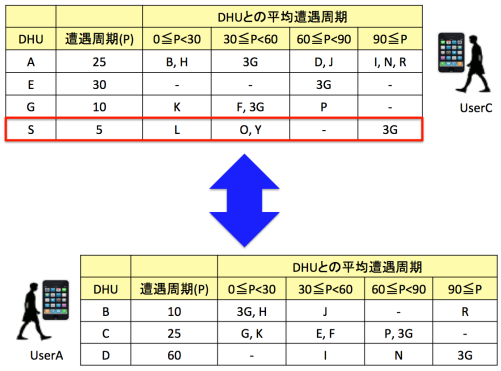
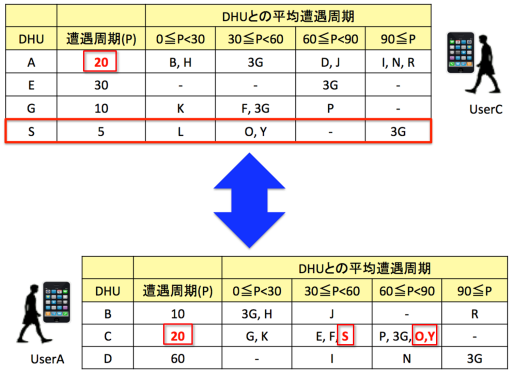


図 4　経路表への追加



(a) 更新前



(b) 更新後

図 5　経路表への更新

3.4　経路表の更新

経路表は他ユーザとすれ違う度に更新する．例を図 4，5 に示す．他ユーザと遭遇した際，相手ユーザが経路表に未登録のユーザであった場合，図 4 のように情報の追加を各経路表で行う．また，相手ユーザと既に 2 回以上遭遇し，情報が登録済みである場合は，経路表の情報を更新する．例として，図 5(a) のような経路表を持つユーザ A, C が遭遇したとする．ユーザ同士は過去に遭遇経験があることが互いの経路表からわかるため，ユーザは互いのユーザ情報のみ，更新を行う．この時，ユーザ C がユーザ A と遭遇する前に新たにユーザ S と遭遇していたとすると，ユーザ A は図 5(b) のように更新を行う．その際，ユーザ同士の平均遭遇時間も再計算し，反映させる．

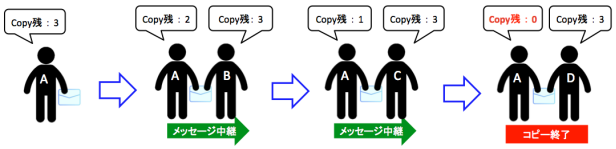


図 6 Max_{copy} によるコピー抑制の例

3.4.1 Bloom Filter によるデータサイズ抑制

経路表の更新を継続して続けると，DHU と DHU が遭遇したユーザが増え続け，経路表のデータサイズが肥大化することが予想される．そこで本手法では，DHU として表に登録するユーザ数を遭遇周期の短いトップ k 人だけ保持し，DHU と遭遇したユーザに関しては，データを固定データ長に集約し検索できる Bloom Filter を利用することで，経路表のサイズを一定に保ち続ける．Bloom Filter は，設定された m ビット配列と配列位置に対応したハッシュ値を返す s 個のハッシュ関数によりデータの登録と検索を可能にするアルゴリズムであり，様々な研究 [12], [13] で活用されている．本手法でも，ハッシュ関数を用いて DHU と遭遇したユーザを登録し，中継を判断する際には，宛先と一致するユーザが経路表に含まれているかどうか検索を行う．

3.5 通信可能エリア，及び特定のユーザへのメッセージ中継

本節では，3.3 節で述べた経路表を用いてメッセージ中継を行う手法について述べる．本手法では，経路表の情報を基に宛先により早く到達する可能性の高いユーザへメッセージ中継を行う．この時，メッセージを多数のユーザにコピーすることによる同一メッセージの大量発生を防ぐため，各メッセージに最大コピー数として Max_{copy} を予め定義する．各ユーザはメッセージを Max_{copy} に達するまでコピーし，コピーし終わると自身の端末からメッセージを消去する．この時，コピーしたメッセージの Max_{copy} は初期化される．$Max_{copy} = 3$ の時のコピー数抑制の例を図 6 に示す．また，各ユーザは過去にメッセージをコピーしたユーザのうち，通信可能エリア宛，及び特定ユーザへの最短予測到達時間 ET_{3G}，及び最短予測遭遇時間 ET_{userID} をそれぞれ保持し，これらの予測時間が短縮される時にのみ，相手ユーザにメッセージ中継を行う．どのユーザにもメッセージをコピーしていない場合，ET_{3G}，及び ET_{userID} を，そのユーザ自身の各宛先への平均予測到達時間で初期化する (到達していない時は，$ET_{3G} = ET_{userID} = \infty$ とする)．

以上の情報を用いたメッセージ中継手法について，通信可能エリアを目指すメッセージ中継方法と，特定のユーザを目指すメッセージ中継方法とに分けて以下で述べる．

3.5.1 通信可能エリアを目指すメッセージ中継

通信可能エリアを目指すメッセージ中継では，経路表の情報を基に，遭遇したユーザが通信可能エリアに自身よりも早く到達する可能性があるかどうかを判断し，相手ユーザのほうがより早く到達するようであれば，メッセージを中継する．ユーザが他ユーザと遭遇した際，ユーザが保持するメッセージの宛先について，両ユーザの宛先への到達状況として，次のような状況が考えられる．

(1) 両ユーザ共に通信可能エリアへ二度以上到達していない
(2) 相手ユーザは到達しているが，ユーザ自身は到達していない
(3) ユーザ自身は到達しているが，相手ユーザは到達していない
(4) 両ユーザ共に到達している

(1) の場合，ユーザは Max_{copy} の範囲内で相手ユーザへメッセージを無条件にコピーする．(2) の場合，相手ユーザのほうが到達する可能性が高いことから，相手ユーザへコピーする．(3) の場合，ユーザ自身のほうが早く到達する可能性があるためコピーは行わない．(4) の場合，相手ユーザが自身より宛先へ早く到達するか，経路表の情報を基に検討する．更により無駄なコピーを防ぐため，相手ユーザと ET_{3G} を比較し，相手ユーザのほうがより短い値を保持している場合のみ，メッセージを中継し，自身の ET_{3G} を更新する．

3.5.2 特定のユーザを目指すメッセージ中継

特定のユーザを目指すメッセージ中継では，経路表の情報を基に，遭遇したユーザがメッセージの宛先ユーザと遭遇する可能性があるかどうかを判断し，相手ユーザにメッセージを中継するかどうかを判断する．この時，各ユーザは遭遇ユーザ q との最短遭遇時間 ET_q をそれぞれ保持し，相手ユーザにメッセージ中継をすべきかどうかの判断に用いる．この時，以下のような状況が考えられる．

(1) 両ユーザ共に宛先ユーザに一度も遭遇していない
(2) 相手ユーザのみ，過去に宛先ユーザと遭遇している
(3) ユーザ自身のみ，遭遇している
(4) 両ユーザ共に宛先ユーザと遭遇している

(1) の場合，コピー残の範囲内で，相手ユーザへメッセージを無条件にコピーする．また (2) の場合，相手ユーザのほうが宛先ユーザへ遭遇する可能性が高いことから，相手ユーザへメッセージをコピーする．(3) の場合，自身のほうが宛先ユーザに遭遇する可能性が高いことから，相手ユーザへはコピーしない．(4) の場合，経路表の情報から宛先ユーザ r との ET_r を比較し，ET_r を短縮する場合のみ相手ユーザへメッセージをコピーする．このようにすることで，より早く，確実な宛先ユーザへのメッセージ中継を実現する．

4. 提案アルゴリズムの評価

提案したメッセージ中継手法を評価するため，シミュ

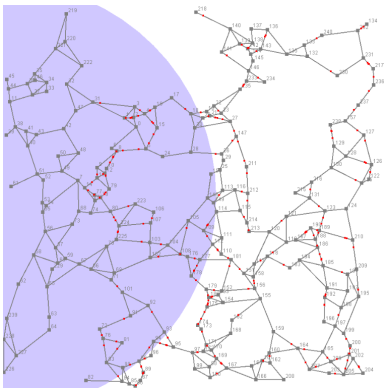


図 7 シミュレーション環境

レーションにより通信可能エリアおよび特定ユーザへのメッセージ到達率，遅延時間，転送されたメッセージ数を求め，エピデミックルーティングと比較した．

4.1 シミュレーションにおける想定環境

本シミュレーションでは，奈良県生駒市が被災し，被災地の一部が通信不可能エリアになった環境を想定する．表 4 は本シミュレーションで使用したパラメタを，図 7 は，シミュレーションで使用した地図情報を表している．図 7 中の色つきの円内を通信可能エリア，それ以外のエリアは通信不可能エリアを表しており，時間経過による基地局の復旧はここでは考慮しない．メッセージの送受信，及び待機中に消費する電力量については，藤本ら [14] による実験結果を基にして求める．藤本らの実験は，NTT ドコモ SO-01C Xperia arc を用いて行われており，純正電池パックの容量は 20,160J としている．Wi-Fi を用いて，1KB のメッセージデータの送信及び受信，待機にかかる消費電力量を表 5 に示す．尚，表 5 における消費電力は，フル充電状態の電池容量を 100%としたときの減少量を示す．またこの実験より，中継状態，待機状態における 1 秒間での消費電力はそれぞれ 1.39×10^{-3}J，22.6J となる．更に，各ユーザが保持する携帯端末上における時刻はそれぞれ絶対時刻に等しいものとし，端末間の時間のずれはないものとする．

また，最大コピー数 Max_{copy} については，予備実験の結果から $Max_{copy} = 3$ と指定した場合に，到達率とメッセージ交換数が最良になることが確認できたため，本シミュレーションでは $Max_{copy} = 3$ と設定した．

4.1.1 ユーザに関する想定

シミュレーションにおける，ユーザに関する想定環境を以下に示す．

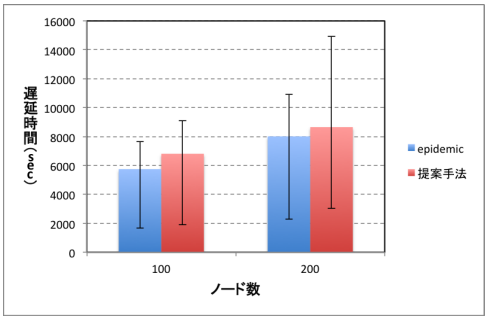
- フィールド内において，提案システムを導入した携帯端末を所持している人をユーザとする．ユーザ数は，100〜200 人を想定する
- ユーザはフィールド内を徒歩で移動する
- ユーザの中には，救助や診察等のために長距離を移動すると考えられる救援者ユーザと，一般市民ユーザの 2 通りが同人数ずつ存在する
- 救援者ユーザがフィールド内全体を移動するのに対し，一般市民ユーザは初期の位置から一定距離（シミュレーションでは，1km）以上は移動しない
- ユーザは災害発生以前に SNS に登録しており，個人 ID を取得している
- ユーザは SNS を活発に利用しており，SNS 上で友人関係を構築している
- 本アプリケーションは，大規模災害が発生したと同時に動作開始し，その後もバックグラウンドで起動し続ける
- 災害が発生すると，各ユーザは自身の安否情報を定期的に SNS へ発信しようとする
- 通信可能エリアに到達し，SNS に投稿された安否メッセージには，すぐに友人からのリプライメッセージが SNS に投稿される
- 通信可能エリアに到達したユーザ宛のメッセージについては，その場で確認し，他ユーザへのメッセージ中

表 4 シミュレーションパラメータ

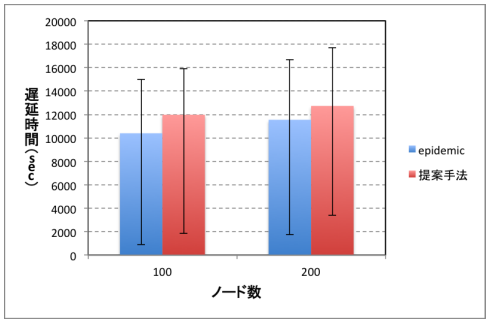
	パラメータ	デフォルト値
ネットワーク	帯域幅	1Mbps
	伝送距離	100m
マップ	マップサイズ	5km x 5km
	3G 通信可能エリア	半径 3km
ノード	ノード数	100-200
	移動速度	1.0-1.4 m/s
	稼働時間周期	6s
	アクティブインターバル	1s
	スリープインターバル	5s
	バッファサイズ	5MB
メッセージ	メッセージ作成間隔	1000s
	サイズ	1KB
	ホットスタート	10000s
	Max_{copy}	3

表 5 携帯端末における 1KB データへの動作にかかる消費電力量

送信にかかる消費電力			
時間 [分]	消費電力 [%]	1 分あたりの消費電力 [%/分]	1 秒あたりの消費電力 [%/秒]
13	2.86×10^{-6}	2.20×10^{-7}	3.67×10^{-9}
受信にかかる消費電力			
時間 [分]	消費電力 [%]	1 分あたりの消費電力 [%/分]	1 秒あたりの消費電力 [%/秒]
14.8	2.86×10^{-6}	1.93×10^{-7}	3.22×10^{-9}
待機にかかる消費電力			
時間 [分]	消費電力 [%]	1 分あたりの消費電力 [%/分]	1 秒あたりの消費電力 [%/秒]
207.8	1.4	6.73×10^{-3}	1.12×10^{-4}

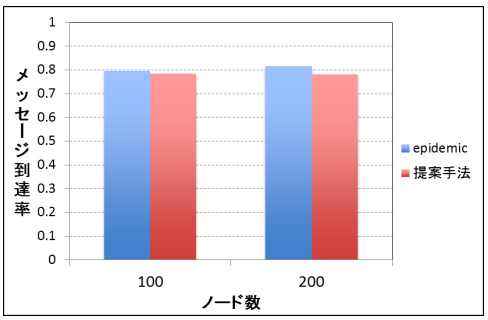


(a) 通信可能エリア宛

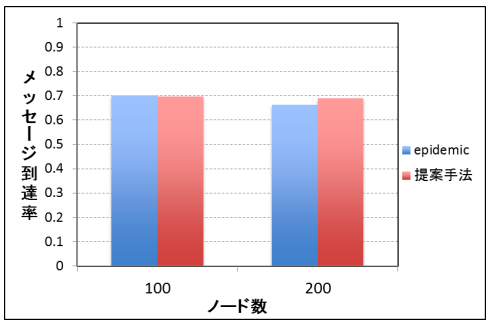


(b) 特定のノード宛

図 8　遅延時間



(a) 通信可能エリア宛



(b) 特定のノード宛

図 9　メッセージの到達率

継は行わない

以上のようなシナリオでシミュレーションを行い，結果についてエピデミックルーティングと比較を行った．シミュレーション結果を，次節で述べる．

4.2　実験結果および考察

提案手法において，ノード数を変化させ，その場合におけるメッセージの到達率，遅延時間，及び到達までにやりとりされたメッセージの総数を調査した．また，以上の結果をエピデミックルーティングの結果と比較し，評価を行った．結果と考察を以下に示す．尚，グラフに示す値は全て平均値を基に作成するものとし，それぞれシミュレーションにより得られた値の平均値を利用する．

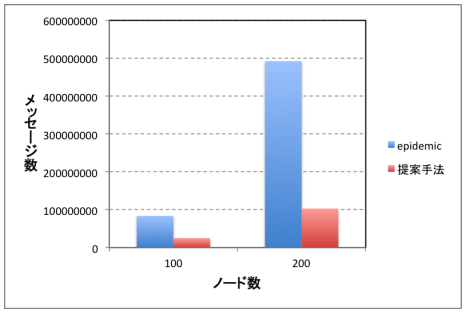
遅延時間についての結果を図 8 に示す．図より，エピデミックルーティングと比べ，わずかに提案手法のほうが遅延時間が大きくなった．提案手法では自身の保持する最短遭遇周期を更新するノードにのみメッセージを中継することから，最悪の場合，目的地に到達せずに長時間エリア内を移動し続けるという場合が起こるためであると考えられる．しかし，エピデミックルーティングとの差を比較すると，ノード数が 100 台の場合に通信可能エリア宛においては 18%(1060 秒) の差，特定ユーザ宛において 15%(1590 秒) の差，つまりノード数が 100 台の場合には通信可能エリアへは 18 分，特定ユーザへは 27 分以内の差でおさめることが出来た．このことから，エピデミックルーティングに匹敵する結果を得ることができた．

次に，メッセージ到達率についての結果を図 9 に示す．通信可能エリア宛においては約 80%，特定ノード宛においては約 70%の到達率を実現し，エピデミックルーティングと同等の結果が得られた．

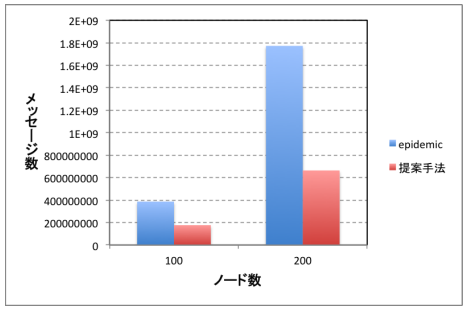
更に，シミュレーション中にノード間でやりとりされたメッセージの総数を図 10 に示す．この結果から，エピデミックルーティングに比べ，通信可能エリア宛のメッセージ交換数と特定のユーザ宛のメッセージ交換数について，ノード数を 100 台とした場合に 30%，45%，ノード数を 200 台とした場合に 20%，37% 削減出来ていることがわかった．

メッセージの削減は，携帯端末上での電力消費の抑制の問題についても重要な課題である言える．よって，消費電力量についても上記の実験結果を用いて求めた．消費電力の結果を表 6 に示す．尚，表 6 では，1 台の携帯端末におけるフル充電状態の電池容量を 100%としたときの消費電力量を示しており，表ではノード数を 100 に設定した場合と 200 に設定した場合の結果を示す．この結果から，ノード数を 100 とした場合と 200 とした場合で，提案手法のほうがエピデミックルーティングに比べ，それぞれ全体の約 43%，34%の電力量の削減が可能であることがわかった．

また，表中における合計の結果より，ノードの増加に伴いやりとりされるメッセージ数についても増加することがわかる．実世界では更に多くのユーザが存在すると考えられ，必然的に多数メッセージがやりとりされることが想定される．やりとりされるメッセージ数が増加すると，消費



(a) 通信可能エリア宛



(b) 特定のノード宛

図 10 ノード間でやりとりされたメッセージ数

表 6 メッセージの送受信における総消費電力率

ノード数	手法名	3G エリア宛 [%]	特定ユーザ宛 [%]	合計 [%]
100	エピデミック	34.66	159.76	194.42
	提案手法	10.43	72.94	83.37
200	エピデミック	203.80	733.41	937.22
	提案手法	42.67	274.41	317.09

電力量も増加することから，バッテリーを出来るだけ長く保つためには，メッセージの抑制は重要な課題である．提案手法は消費電力の削減についても効果的であり，有用性があると言える．

5. まとめ

本稿では大災害時に通信インフラが利用できない状況下においても，安否情報の中継を可能にする DTN に基づいたメッセージ中継法を提案した．提案手法では，人々がエリア内を移動する中で作成可能な経路表を基に，適切なユーザにメッセージを中継する．シミュレーション実験によって提案手法をエピデミックルーティング手法と比較した結果，通信可能エリア及び通信不可能エリアの特定ユーザへのメッセージ中継において，エピデミックルーティングに匹敵するメッセージ配送率，遅延時間を約 20–50% 少ないメッセージ交換数で達成できた．

今後は通信可能エリアが動的に変化するような環境やバッテリの持続時間の考慮など，実環境で起こり得る問題に関する提案手法の効果をシミュレーション実験により検証する．また，提案システムの実世界におけるシステムの有用性を評価する必要がある．そのため，今後は提案したプロトコルを Android アプリケーションとして実装し評価を行う予定である．

参考文献

[1] Fall, K.: A delay-tolerant network architecture for challenged internets, *Proc. SIGCOMM'03*, pp.27-34, ACM (03).

[2] Vahdat, A. and Becker, D.: Epidemic routing for partially connected ad hoc networks, *Duke Tech Report CS-200006*, (2006).

[3] Uddin, M.Y.S., Ahmadi, H., Abdelzaher, T. and Kravets, R.: A low-energy, multi-copy inter-contact routing protocol for disaster response networks, *Proc. SECON'09*, pp.637-645 (2009).

[4] Hossmann, T., Spyropoulos, T. and Legendre, F.: Know thy neighbor: Towards optimal mapping of contacts to social graphs for dtn routing, *Proc. INFOROM'10*, pp.866-874 (2010).

[5] Fajardo, J.T.B., Yasumoto, K., Shibata, N., Sun, W. and Ito, M.: DTN-based data aggregation for timely information collection in disaster areas, *Proc. WiMob2012*, pp.341-348 (2012).

[6] Daly, E.M. and Haahr, M.: Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant manets, *Proc. MobiHoc'07*, pp.-32-40, ACM (2007).

[7] Choi, B.J. and Shen, X.: Adaptive asynchronous sleep scheduling protocols for delay tolerant networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.10, No.9, pp.1283-1296 (2011).

[8] Cao, Q., Abdelzaher, T., He, T. and Stankovic, J.: Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection, *Proc. IPSN'05*, pp.20-27 (2005).

[9] Abdelkader, T., Naik, K. and Nayak, A.: An eco-friendly routing protocol for delay tolerant networks, *Proc. WiMob'10*, pp.450-457 (2010).

[10] Teranishi, Y. and Shimojo, S.: Monac: Sns message dissemination over smartphone-based dtn and cloud, *Proc. P2P'11*, pp.158-159 (2011).

[11] Hossmann, T., Carta, P., Schatzmann, D., Legendre, F., Gunningberg, P. and Rohner. C.: Twitter in disaster mode: Security architecture, *Proc. SWID'11*, No.7, pp.18 (2011).

[12] Broder, A. and Mitzenmacher, M.: Network applications of bloom filters: A survey, *J. Internet Math-ematics*, Vol.1, No.4, pp.485-509 (2005).

[13] 白木徹, 寺西裕一, 竹内亨, 春本要, 西尾章治郎 : P2P ネットワークにおける Bloom Filter を用いた移動履歴に基づくユーザ探索手法の提案，情報処理学会論文誌，Vol.51, No.9，pp.1905-1915 (2010).

[14] 藤本恭平 : 監視・追跡を行う無線マルチメディアセンサネットワークにおける稼働時間延長のための経路制御手法，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文，Vol.59, 修第 5274 号, 3 (2012).