

エpidemick通信，情報フローティングと安全・安心

Epidemic Communication, Information Floating and Safety/Security

中野敬介 Keisuke NAKANO

アブストラクト 従来の移动通信システムとは異なり，インフラを使用しない移动通信ネットワークとしてマルチホップ無線ネットワークがある．マルチホップ無線ネットワークでは送信元ノードと宛先ノードの間の連結なマルチホップ無線経路で通信を行う．それを更に柔軟にしたものとして，移動ノード間の直接無線通信と移動ノードの移動により情報を空間的に拡散し情報を伝えるというエpidemick通信や，直接無線通信を特定領域だけで許可することにより無秩序な情報拡散を防ぎながら特定の領域の不特定のノードに情報を伝えるという情報フローティングがある．これらのように，移動体同士の情報交換と移動により情報を伝えることができるという性質を生かした手法が注目されている．本論文ではエpidemick通信，情報フローティングとその安全・安心への応用について，安全・安心への応用における移動ノードの特徴的な移動との関係に着目しながら解説する．また，情報フローティングによる情報配信がノードの行動変化を促し，この行動変化により情報フローティング自体も影響を受けること等に着目して，新たな観点から行われている情報フローティングの研究について解説する．

キーワード エpidemick通信，情報フローティング，移動，行動変化

Abstract Multihop wireless networks are mobile communication systems that do not require infrastructure, unlike cellular systems. In the multihop wireless networks, information is sent to a destination node via a connected multihop wireless path between the source and destination nodes. Epidemic communication and information floating are more flexible networking technologies than multihop wireless networks. Epidemic communication delivers information by spatially spreading information through direct wireless communication and the movement of mobile nodes having information. Information floating delivers information to unspecified nodes in a specific area, without the disordered spread of information, by permitting direct wireless communication only in a designated area. These methods of information delivery utilizing direct information exchange between mobile nodes and the movement of mobile nodes carrying information have gathered attention. In this paper, we explain epidemic communication, information floating, and their applications to safety and security focusing on the relationship with the characteristic mobility of mobile nodes in applications to safety/security. We also explain research on information floating from a new viewpoint, considering new factors such as that information floating causes changes in the behavior of mobile nodes, and this change in behavior affects information floating.

Key words epidemic communication, information floating, mobility, behavior change

1. ま え が き

現在多くの人々にとって移动通信は生活に欠かせないものとなっているが，最初の移动通信システムから一貫して用いられているのが，セルラシステム⁽¹⁾と呼ばれる基本システムである．セルラシステムにおいては，基地局と呼ばれる固定局が地上に数多く設置される．基地局はネットワークでつながれており，基地局の無線通信可能範囲であるセルによりサービスエリアが隙間なく被覆され，移動局はセル内に存在する限り基地局を経由

して他との通信を行うことができる．しかし，セルラシステムも万能ではなく，常に基地局を含むインフラを経由して移动通信サービスが提供されるため，インフラに大きな障害が生ずるような状況にいかに対応するのかが課題となっている．衛星通信の適用⁽²⁾等の対策が考えられているが，インフラの問題であるのならば，インフラそのものを使用しないという異なるアプローチからの研究も進められている．その中の一つにマルチホップ無線通信がある⁽³⁾⁽⁴⁾．

マルチホップ無線通信とは，移動端末同士が無線で直接つながり，更に移動端末が中継を行うことにより構成されるマルチホップ無線ネットワーク（図1）による通信である．マルチホップ無線ネットワークにおいては，送信元ノードから宛先ノードへの連結な経路に沿って情報が送られる．このようにマルチホップ無線通信はセルラシステムのようにインフラを必要としない

中野敬介 正員：シニア会員 新潟大学大学院自然科学研究科
E-mail nakano@ie.niigata-u.ac.jp
Keisuke NAKANO, Senior Member (Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ
Fundamentals Review Vol.10 No.4 pp.282-292 2017 年 4 月
©電子情報通信学会 2017

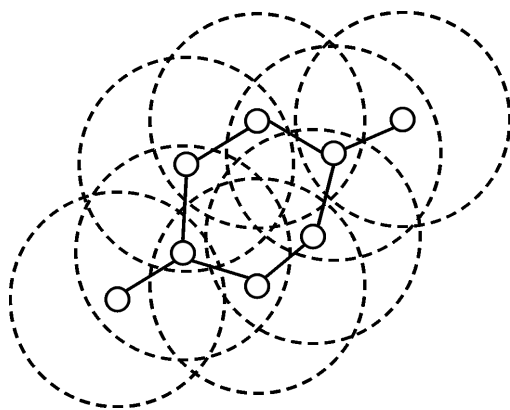


図1 マルチホップ無線ネットワーク(1) 点は移動ノードであり、その周囲の点線は電波が届く範囲である。2点間の枝は直接無線通信を行えることを示している。

分散形無線通信であるため、災害時のネットワーク構築⁽⁵⁾⁽⁶⁾等に应用できると考えられている。

しかし、セルラシステムと同様にマルチホップ無線通信も万能ではない。マルチホップ無線ネットワークにおいて送信元ノードと宛先ノードの間に連結なマルチホップ無線経路を常に形成できるわけではなく、送信元ノード、宛先ノードと中継を行う移動ノード群の位置関係と各ノード間の無線リンクの有無の状況によっては、送信元ノードと宛先ノードの間に連結な経路が全く存在しない場合もある。移動ノードの密度が小さい場合には、このようなことが頻繁に起こる可能性があり、マルチホップ無線通信が有効に機能しないこともある。

この問題を解決するために、送信元ノードと宛先ノードの間に連結なマルチホップ無線経路を構築することをあえて前提とせず、情報を持つ移動ノードが周辺の移動ノードに情報を渡しながら「移動」することにより、情報を空間的に拡散し宛先ノードに伝える手法であるエビデミック通信⁽⁷⁾が注目されている。エビデミック通信では無線通信だけでなく人間の移動により情報が運搬されるため、従来のコンピュータネットワークにおけるデータ通信と比較して情報の伝達速度は極端に遅くなり遅延時間が非常に長くなる場合もある。このような長い遅延時間を許容した上で情報伝達を重視するネットワークは遅延耐性ネットワーク(DTN: Delay Tolerant Network)⁽⁸⁾と呼ばれ、災害時のネットワークのように遅延時間よりも情報伝達が優先されるような分野で有効であると考えられている。

エビデミック通信により無秩序に情報を拡散すると、その結果として情報のコピーの不必要な拡散や移動ノード間での不必要な通信が数多く行われることになる。これを防ぐためにエビデミック通信による情報のやり取りを特定の領域内だけに制限し、不必要な拡散を防ぎながら情報を伝えるという手法が検討されており、これを使うと指定された領域内に情報が浮遊、滞留しているようになるので、情報フローティング(IF: Information Floating)等と呼ばれている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

情報フローティングはエビデミック通信の一形態であると考えられ、エビデミック通信が宛先が存在する地域を限定せずに情報伝達を行うための用途に使用されるのに対し、情報の宛先

が存在する地域が限定されるような用途に適している。情報フローティングの応用として特定の地域への様々な情報配信が考えられるが、例えば交通事故の現場周辺への事故情報配信⁽¹¹⁾等、安全・安心な生活のための地域情報配信も考えられている。

このようにエビデミック通信、情報フローティングは応用面で人間との密接な関わりがあることに加えて、これらの技術の本質的な機能は人間の動きを利用して情報を運ぶことにより実現されるので、技術的な側面からも人間との関わりが深い。このようなことから、エビデミック通信、情報フローティングの研究は、移動ノードがどのように動き、ネットワークの性質へどのような影響を与えるのかといったことを考えながら行わなければならない。

従来から、移動通信のために移動体の動きを把握する研究は行われてきた。ネットワーク設計・制御・最適化のため、セルラシステムでは端末の移動によるハンドオフへの影響⁽¹⁾を考慮することは重要であり、マルチホップ無線通信ではノードの移動によるネットワーク構造の時間変化や連結性への影響を知る必要がある⁽³⁾。エビデミック通信では移動ノードの移動の特徴が情報の伝わり方に直接影響する⁽⁷⁾。このような移動によるネットワークへの影響を考えると、情報フローティングにおいては、新しい観点からの研究も始まっている。情報フローティングはその応用として情報を伝え移動体に行動変化を促すこともあり、例えば、事故現場周辺の交通管制情報を受け取った移動ノードは行動を変えることになる。この場合情報フローティングを行う移動ノード群の行動が変化するということなので、情報フローティングが移動ノードに行動変化を促し、この行動変化が情報フローティング自体にも影響を与えるということになる⁽¹²⁾。この部分は、移動のモデル化、移動体の移動によるトラヒック特性やネットワーク特性への影響の解明といったセルラシステムやマルチホップ無線ネットワークの研究としてはなされなかったものであり、移動ネットワーク研究の新しい展開となる可能性があると考えられる。

このようなことから、本論文では、安全・安心への応用とそれに付随するノードの特徴的な移動、行動変化を考えながら、エビデミック通信、情報フローティングの解説を行う。DTNやエビデミック通信のプロトコルの詳細等は調査論文が他にもあるのでそちらに譲り⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、安全・安心への応用における移動体の様々な特徴的な移動や情報を受け取った移動体の行動変化により、エビデミック通信、情報フローティングのネットワーク制御、設計のために新しい考え方が必要になること、またその重要性を中心に述べる。

2. でマルチホップ通信と対比しながらエビデミック通信について説明する。3. では、継続して行われてきた移動ネットワークと関連した移動のモデル化、移動の影響を考慮に入れたネットワークの研究について説明した後、エビデミック通信において用いられる移動モデルを災害時の移動モデルを含めて説明する。また、専用ノード、他の目的に使われている移動ノードによるエビデミック通信についても述べる。これらの説明から、安全・安心のための応用分野におけるノードの移動・行動は非常に多様であり、これらを十分に考慮しながら目的に合わせた設計・

制御をしなければならないことを説明する．4. では情報フローティングについて説明する．5. では，移動ノードの移動，行動変化による情報フローティングへの様々な影響について解説する．事故情報配信のための情報フローティングにおいて，これらの影響を考えた性能評価事例を幾つか紹介し，移動や行動変化の情報フローティングへの影響を考えることの必要性，重要性を説明する．6. でまとめる．

2. マルチホップ無線通信からエビデミック通信へ

マルチホップ無線ネットワークは当初パケット無線 (Packet Radio) と呼ばれ 1970 年代から研究されていた^{(15) (16)}．その後も，端末を持つ人間，通信機能を持つ自動車等の移動ノードが構成するマルチホップ無線ネットワークは，移動アドホックネットワーク (Mobile Ad Hoc Network: MANET) と呼ばれ盛んに研究されている^{(3) (4)}．

マルチホップ無線ネットワークにおいては，移動ノード同士の直接無線通信，各移動ノードの中継機能により，送信元ノードから宛先ノードへのマルチホップ無線経路を形成し，その経路に沿って情報を送ることが基本的な情報配送の方法となる．移動ノード間の無線リンクの有無は送信電力，電波伝搬状況など様々な要素に依存するが，ここではノード間の距離が最大通信可能距離よりも短い場合に無線リンクがあり，長い場合には存在しないものとする．このように仮定しノードの配置が与えられると，図 1 や図 2 のようにグラフ (Random Geometric Graph と呼ばれる⁽¹⁷⁾.) を作ることができるが，このグラフの送信元ノードと宛先ノード間にある連結なパスが連結なマルチホップ無線経路ということになる．

情報を送っている最中に移動ノードが移動するとネットワーク構造が変化する．これによりそれまで使用していた経路が使えなくなることがあるので，その場合には新しい経路を探し，見つかった代替経路で通信を継続することになる．このようなノードが移動することによるネットワーク構造の頻繁な時間変化に対応することが MANET のプロトコル (AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector)⁽¹⁸⁾ や OLSR (Optimized Link State Routing)⁽¹⁹⁾ 等) の重要な役割となる．

しかし，送信元ノードと宛先ノード間の代替経路が見つければそのような工夫が生きてくるのであるが，図 2 (a) のようにネットワーク全体が非連結になっており送信元ノード S と宛先ノード D の間に連結な経路が全くない場合もある．このような場合にはルーチングの工夫ではどうにもならず，移動によりネットワーク構造が変わりノード S とノード D の間に図 2 (b) のようにマルチホップ無線経路が構築されることを期待して，経路を見つけるためにリトライが繰り返されることになる．このような性質を踏まえあらかじめ連結性を高めるために，送信電力制御等によるトポロジー制御⁽²⁰⁾，気球等の専用中継ノードの追加配置⁽⁵⁾が考えられている．前者は電波の到達範囲の広範囲化，後者はノードの高密度化により連結性を高めるものである．

これらの方法とは異なる前提で連結性の問題を解決しようとするものがエビデミック通信である．マルチホップ無線通信とは

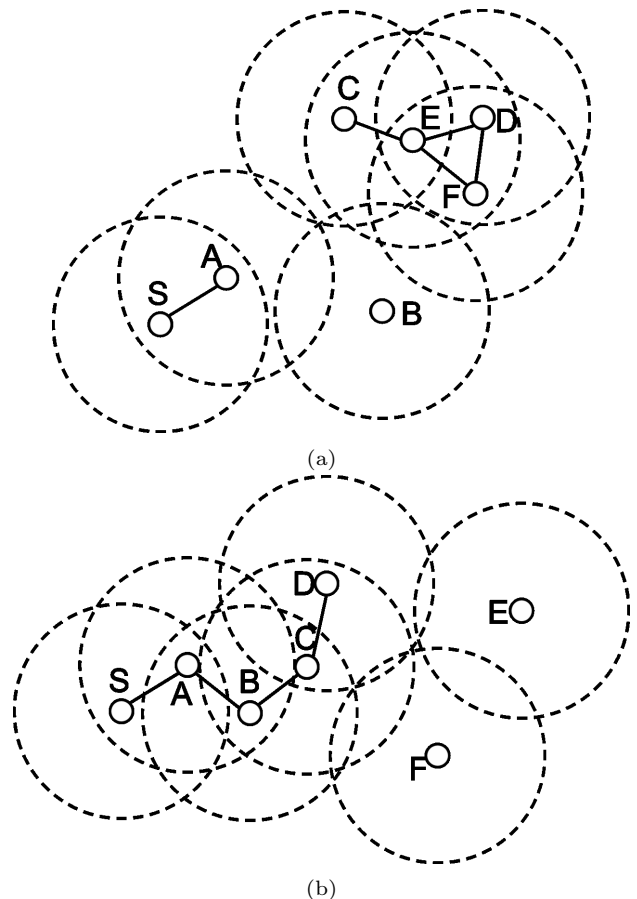


図 2 マルチホップ無線ネットワーク (2) マルチホップ無線経路がない状態から時間が経過し連結なマルチホップ無線経路が形成されることもある．(a) 送信元ノード S と宛先ノード D の間にマルチホップ無線経路がない状態．(b) 時間が経過しノードが移動した結果，SD 間にマルチホップ経路ができた状態．

異なり，エビデミック通信では送信元ノードから宛先ノードへのマルチホップ無線経路が見つかるまで探すのではなく，送信元ノードの周囲に通信可能なノードがいたら，それらに情報を渡し，情報を受け取ったノード群が移動し，また別のノード群に情報を渡すということを繰り返すことで，宛先ノードに情報を伝える．図 3 はエビデミック通信によりノード S から D へ情報を伝えているが，特に S と D の間に連結なマルチホップ経路が構築されることはなくとも，情報の到達が可能となる．ただし，エビデミック通信の情報伝達は移動ノードの移動に依存したものであり，一般に情報の伝達には長時間を要するため，DTN での使用が前提となる．また，フラッディングを繰り返すことで情報を拡散するようなものであるため，何も工夫しなければ無秩序に情報が広がり，無駄な情報伝達も伴うことになる．そのため，エビデミック通信のルーチングには無駄な送信を減らす工夫，情報の拡散の方向や範囲の制御等が必要とされる．初期の研究で Epidemic Routing⁽⁷⁾が提案されて以降，無秩序な情報の拡散，無駄な情報送信等を防ぐことを主眼に置いた様々なルーチング手法の研究が行われている^{(21)~(26)}．

例えば，文献(21)においては PROPHET (Probabilistic

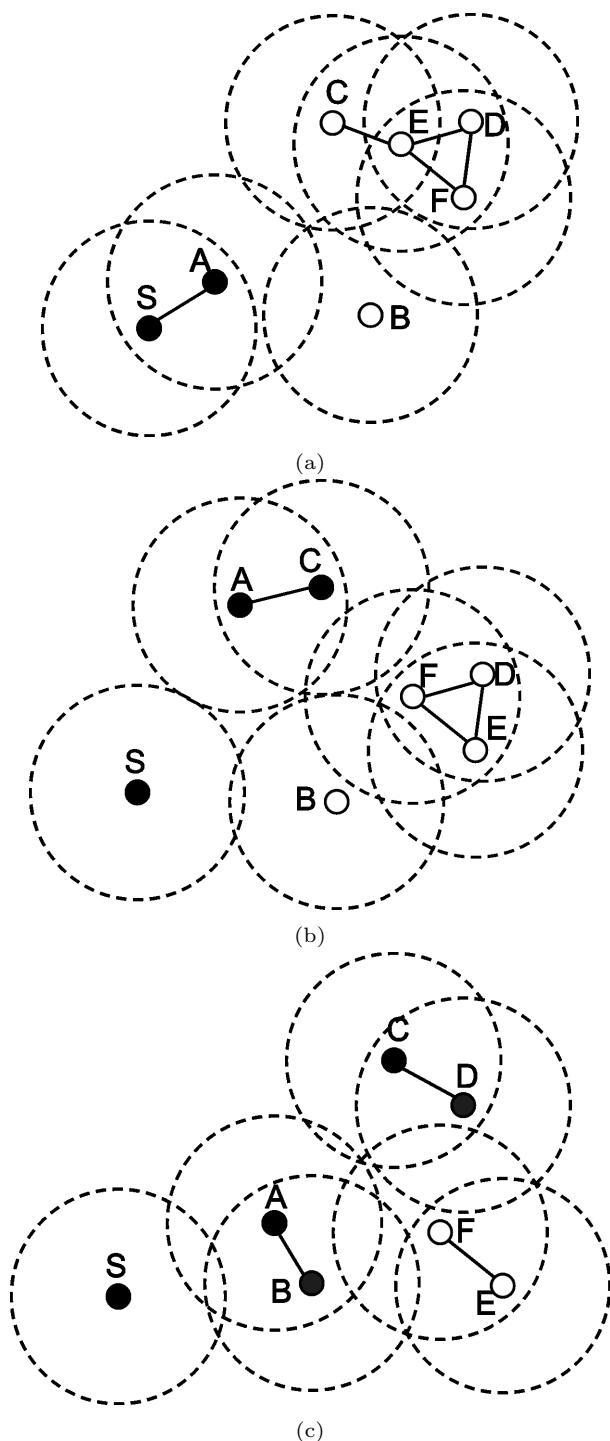


図3 エピデミック通信 黒い点が情報を持ち、白い点は情報を持っていない。(a) 送信元ノードSから移動ノードAへの直接送信(時刻 $t = \tau_1$)。(b) 情報を持つノードAが移動しノードCに情報を渡している($t = \tau_2 > \tau_1$)。(c) ノードCが移動した結果、宛先ノードDと直接通信できるようになり、宛先に情報が伝わった($t = \tau_3 > \tau_2$)。

ROuting Protocol using History of Encounters and Transitivity) と呼ばれる手法が提案されている。これは各移動ノードの宛先ノードに情報を運ぶ可能性を過去の履歴から推測し、これを利用して無駄を減らしながら情報が伝わりやすくなることを目指したものである。

また、エピデミック通信はインフラ不要であり、ノードの密度が小さくマルチホップ無線通信が使えない場合でも使えるということもあり、災害時の情報通信への応用も考えられている⁽²⁷⁾。更に、移動ノードとして端末を持つ人間を想定するだけでなく、エピデミック通信専用移動ノードを導入した場合^{(28) (29)}、災害時の救助や復旧作業等のための車両のような他用途の移動体を用いた場合⁽³⁰⁾等、様々なエピデミック通信が考えられている。多様な移動ノードを利用するということは、様々な動き方や特徴を考慮しながらエピデミック通信を考える必要があるということであり、この部分もエピデミック通信の特徴的な部分である。

このようなことから、次章では移動通信における移動の影響について過去の研究に触れながら、エピデミック通信の安全・安心への応用を考えたときの特徴的な移動ノードや移動モデルと、そのエピデミック通信への影響について考えていく。

3. 移動とエピデミック通信

移動通信では端末の移動が何らかの影響をシステムに及ぼすため、従来のセルラシステムの時代から移動のモデル化と移動通信研究とは切り離すことができないものとなっている。これは、マルチホップ無線通信と移動の関係においても同様である。エピデミック通信では、情報伝達の「移動」への依存度が更に高く、移動ノードの移動や行動が性能に及ぼす影響を考えるとより重要となる。そこで本章では、従来の移動通信研究(セルラシステム、マルチホップ無線通信)における移動モデルを紹介した上で、エピデミック通信で想定される災害時を含む様々な状況における移動ノードの移動モデルを説明し、エピデミック通信において様々な移動ノードの特徴を十分に考慮してネットワークを設計、制御することの重要性について説明する。

まず、セルラシステムにおいては、あるセルで通信している端末が隣接セルに移動して継続して通信を行うために、移動前のセルの基地局から移動先の基地局に接続を切り換えることをハンドオフというが、呼損率特性などの通信トラヒック特性を評価する際にはこのハンドオフの影響を考慮する必要がある。そのため、セルラシステムの研究が始まった当初から移動のモデル化が必要となった。

当初は自動車電話から始まったということもあり、自動車の実走行データを用いた移動のモデル化が行われ、走行距離センサ、方向センサによる実測結果を用いて、進路変更角度分布、速度分布、直進時間分布が求められた^{(31) (32)}。これらの分布を乱数発生に用いて以下の手順を繰り返し端末の動きを決める。(Step 1) 初期位置の決定。(Step 2) 移動方向、直進時間及び速度をそれぞれ乱数により計算。(Step 3) 次の進路変更時の位置を決め、そこまで直進。(Step 4) Step 2へ。図4が移動体の軌跡の例である。このような移動モデルをシミュレーションに反映しトラヒック特性の評価が行われた。その後、GPSにより移動体の軌跡を直接計測し移動をモデル化⁽³³⁾することが可能になっている。また、交通工学の分野で蓄積された様々な結果も応用できる⁽³⁴⁾。

更に、近年ではプローブカーシステム⁽³⁵⁾のように、GPSを

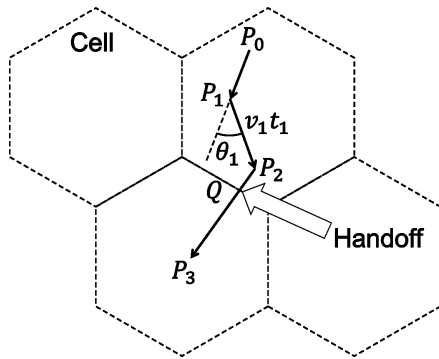


図4 セルラシステムのハンドオフ 直進時間 t_i , 速度 v_i , 進路変更角度 θ_i を実測に基づく乱数により計算し, P_i からの移動体の動きを模擬する. P_0 から P_3 に移動する間に Q でハンドオフが起こる.

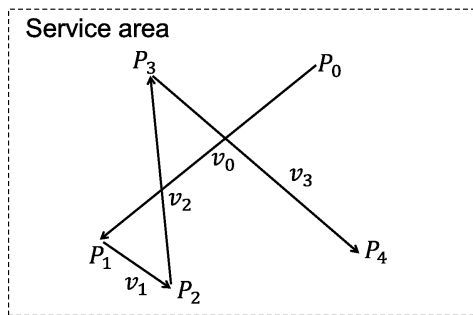


図5 Random Way Point 移動モデル ランダムに選ばれた P_0 から P_4 を順番に移動する. 有向枝に書かれた v_0 から v_3 は速度.

搭載した自動車センサとなり,自動車から移動通信によりデータを収集し,各道路網の状況をビッグデータとして収集し,それをフィードバックすることでカーナビゲーションを高度化する試みがあるが,これこそ移動のモデル化にほかならず,このようなデータの移動通信ネットワークの設計・最適化への応用も検討すべきかと考えられる. また,ピープルセントリックセンシング⁽³⁶⁾やセルラシステムのデータを用いた移動のモデル化⁽³⁷⁾等,新しい試みもあり更に高度化していくことが予想される.

マルチホップ無線ネットワークの性能評価にも移動ノードは必要であり,例えば評価用の移動モデルとして Random Way Point モデル (RWP) がよく用いられる. 上の移動モデルと同じようなものであるが,サービスエリアとして定められた領域を考えて,以下を繰り返す. (Step 1) 初期位置の決定. (Step 2) 速度を乱数により計算. (Step 3) 次の進路変更時の位置としてサービスエリア内の1点を決め,そこまで直進. (Step 4) Step 2へ. 進路変更位置において pause time と呼ばれる時間(ランダムまたは固定長)の間とどまることを仮定することも多い. 移動体の軌跡は図5のようになり,移動ノードがこれに従って動く場合の空間的なノードの分布の解析なども行われている⁽³⁸⁾.

上記のような移動体のモデルを用いればエビデミック通信の一般的な開発・評価を行うことができると考えられるが,例えば,PROPHET⁽²¹⁾のように移動ノードが他の移動ノードに情報を渡す可能性が高いかどうかという情報を利用するような手

法は,RWPのように行き先が均等に選ばれるような移動ではなく,移動ノードは通常過去に何回も訪れているところには訪れやすいのではないかと実世界を意識した状況に基づいて考えられている. 評価には,コミュニティモデルと呼ばれる移動モデルが使われている. コミュニティモデルでは,サービスエリアが幾つかの小領域(コミュニティ)に分割され,各移動ノードがホームコミュニティを持ち,ホームコミュニティには他のコミュニティよりは存在する可能性が高くなるように移動する.

このように人間や自動車の動き方の特徴を観察して,その特徴を利用したルーチング手法の評価のために様々な移動モデルが用いられている. これらはもちろん平時の移動モデルだけではない. エビデミック通信は災害時の通信として有効といわれているが,例えば文献(27)では,災害発生,救急車の到着,治療などのかなり細かい状況を想定した移動モデルを仮定した上でエビデミック通信の評価を行っている.

ここまでは,移動ノードとして主に端末を持つ人間あるいはその人間が乗った自動車等を想定した. そのため,移動ノードの移動は人間の行動パターンによるものを暗に想定した. このような想定とは異なる移動ノードとして,エビデミック通信を専用に行う特殊移動ノードを用いたエビデミック通信も検討されている. 文献(28)(29)では,この特殊移動ノードを ferry と呼び(本論文では情報フェリーと呼ぶことにする),情報フェリーが情報の受信,送信を行うために固定ノード間を回るというシステムが提案されている. この場合,目的の情報配信,情報収集のために情報フェリーをどのように動かすかを考えることや,情報フェリーの移動スケジュール制御を考えることが重要になる. 情報フェリーとしては陸上の移動体だけでなく無人飛行機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)も想定できる⁽³⁹⁾. UAVであれば航続距離,燃料,バッテリーの残量等を考慮したスケジューリングも必要になるが,障害物等の影響を受けずに自由に情報収集を行えるという魅力があり,災害時にも有効であると考えられる.

また,情報フェリーのようなエビデミック通信専用の移動ノードとは異なり,他の用途に用いられている特殊な移動体をエビデミック通信の移動ノードとして用いることも考えられている⁽³⁰⁾. 例えば,災害時にネットワークインフラ障害が起こっている状況において避難所間の情報共有を行う必要が生じた場合を考える. この場合,避難所間を行き来する人間が少ないこともあり得るが,救助や復旧作業等のために,例えば物資輸送車両により避難所への物資輸送を行うことは最優先に考えられるであろう. そこで,エビデミック通信の特殊移動ノードとしてこれらの物資輸送車両を用いれば,物資運搬をしながら情報を集めることができるし,特別な移動体を用意し,展開する必要もなくなる. マルチホップ無線ネットワークの連結性を高めるための追加ノードとして気球が機能したのと同様に,エビデミック通信の能力を高めるための移動ノードとして物資輸送車両を捉えることもできる.

図6は例である. 集積所に運び込まれた物資を輸送車両 T_1, T_2, T_3 が経路 R_1, R_2, R_3 に沿って避難所に輸送している. 避難所に運び込む際に,エビデミック通信により避難所と情報交

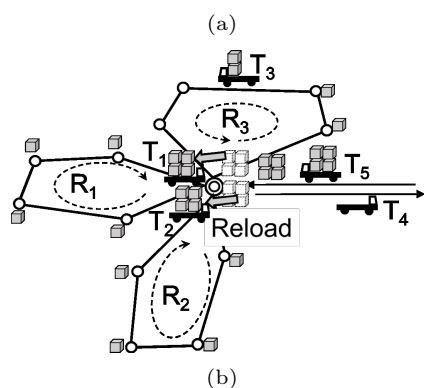
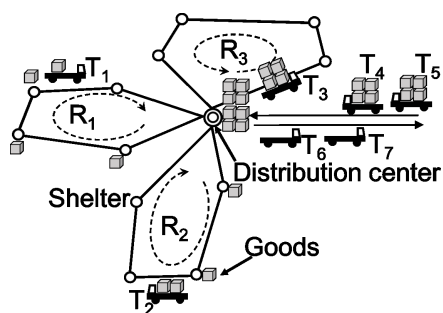


図 6 物資運搬車両によるエビデミック通信 (a) 物資輸送車両 $T_4 \sim T_7$ により物資が集積所に運ばれ、その物資を物資輸送車両 T_1, T_2, T_3 が輸送経路 R_1, R_2, R_3 に沿って避難所へ輸送する。物資を避難所に届ける際に情報交換も同時に行うことで避難所間の情報共有を行える。(b) 物資輸送車両は繰り返し集積所で物資を積み込むので、異なる輸送経路上の避難所の情報は集積所経由で交換される。

換を行い、これを各避難所で行うことで避難所間の情報共有を行うことができる。また、輸送車両は繰り返し集積所で物資を積み込み、避難所への輸送を行うので、物資輸送の経路が複数ある場合には、異なる経路上の避難所間の情報は集積所を経由して共有がなされることになる。この例のように、 m 台の輸送車両が分担して集積所から n 箇所の避難所へ物資を輸送するような場合には、Route First Cluster Second Methods⁽⁴⁰⁾のようなアルゴリズムで物資運搬経路を作ることができる。

このようなエビデミック通信を考える場合、情報フェリーののように情報収集のためだけに物資輸送車両の移動を制御できるわけではなく、あくまでも物資輸送を行いながら情報を集めることになるので、物資運搬のスケジュールが移動を制限することになり、情報伝達の性能が物資輸送車両の移動の仕方に依存することになる。例えば、集積所への物資の到着特性が各輸送車両の集積所での滞在時間に影響するので、各輸送車両が持つ情報の同期性能が物資の到着特性に依存するという性質もある⁽⁴¹⁾。つまり、物資運搬と情報運搬を同時に考慮に入れて、エビデミック通信を考える必要があるということである。

ここまで述べたように、エビデミック通信におけるノードの移動は、平時のモデル、災害時のモデルだけでなく、UAV のような専用ノードの利用や物資輸送車両のような他目的のノードの利用等、前提条件も多岐に渡り、またそれぞれが特徴的な影響

をエビデミック通信に対して及ぼす。一見情報通信とは無縁に思える物資の到着特性や輸送経路形成アルゴリズム、輸送制御等が情報共有性能に影響を及ぼすこともある。このように、安全・安心への応用においては、様々な観点から移動の影響を考えてエビデミック通信の設計、制御を行うことが必要かつ重要である。

4. 情報フローティング

エビデミック通信においてルーティング手法を工夫することで情報の不必要な拡散を抑制することができるが、これとは異なり、情報フローティングは拡散範囲、拡散時間を指定、制限することにより不必要な拡散を防ぐというものである。

情報フローティングを考えると、まず宛先ノードについて説明する必要がある。ここまでマルチホップ無線通信、エビデミック通信の宛先ノードとして特定のノードを暗に想定して説明したが、災害情報、地域情報、交通情報等を考えたときには、宛先ノードを特定するのではなく、ある領域を特定し、その領域にいる不特定のノードを宛先とすることが想定される。この場合、この指定された領域だけで情報が流通すればよい。エビデミック通信において宛先が特定の領域内の不特定のノードであるような場合、例えば、指定された領域内だけで直接無線通信による情報送信を許可することで、不必要な情報拡散を抑えながら情報を伝えることができる。これが情報フローティングである。情報送信を行うことができる領域を送信可能エリア (TA: Transmittable Area) と呼ぶことにする。

情報フローティングを実現するためには、各移動ノードは自身の位置を把握できることが必要となる。屋外では GPS 等を用いることになるし、屋内では位置情報を得るための何らかの手法を用いる必要がある。送るべき情報の送信と同時にその情報を送信できる TA の範囲に関する情報を送り、移動ノードは TA 内にいるときだけ情報送信を行う。これにより情報フローティングが継続する。

また、情報フローティングを開始するために、情報の発信源 (情報源) が必要である。情報源はその情報を送信できる TA を指定する。情報源が自ら情報フローティングの TA において情報を発信し情報フローティングを開始することもあるだろうし、情報源が他のノードに情報を送り、そのノードが TA において情報フローティングを開始することもある。一般に情報源は固定的に設置された機器である必要はなく、移動ノード (人間、自動車など) が情報源であることも想定される。

例を図 7 に示す。図 7(a) において、情報源の S からノード A が情報を受け取る。ノード A が移動し、図 7(b) のようにノード C と直接無線通信可能な距離まで近づくと、ノード A 自身が TA に入っていないので情報送信を行わない。更に時間が経過し、図 7(c) のようにノード A が TA に入ると、ノード A からノード B, C, D に情報が送信され、そこから情報フローティングが始まる。その後も TA 内での情報伝達が継続することで情報フローティングが継続し、図 7(d) のようにノード B, D から F, G に伝わる。図 7(d) における A と C のように移動ノード

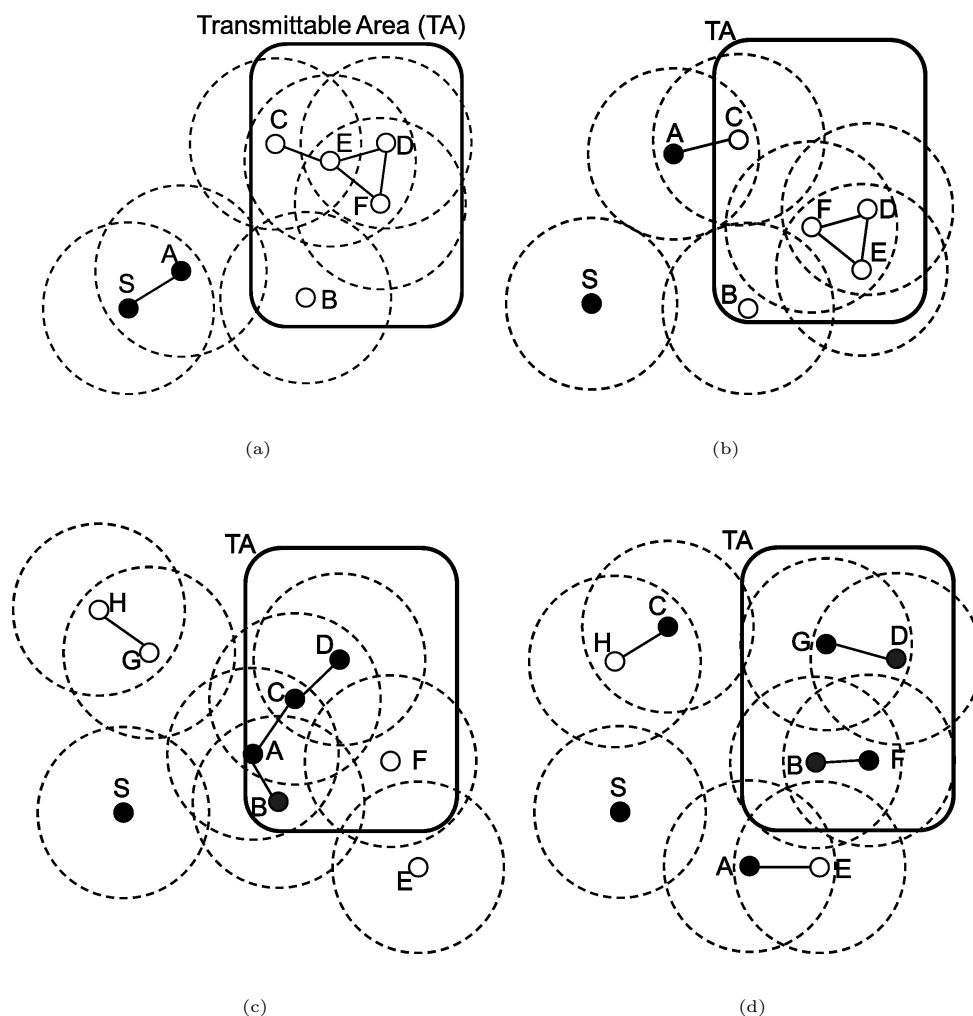


図7 情報フローティング (a) 情報源であるノードSから移動ノードAへの直接送信 (時刻 $t = \tau_1$) . (b) 情報を持つ移動ノードAがまだ送信可能エリアTAに入っておらず情報を送らない ($t = \tau_2 > \tau_1$) . (c) 情報を持つ移動ノードAがTAに入ったので移動ノードB, Cに情報を渡している. 移動ノードCから移動ノードDにも情報が渡される ($t = \tau_3 > \tau_2$) . (d) 情報を受け取り, その後もTAにいるノードB, Dが, 移動ノードF, Gに情報を送信している ($t = \tau_4 > \tau_3$) . ここで, 情報を持つノードA, CはもはやTAにいないので, ノードE, Hに情報を送信することはない. このようにして, TA内だけから情報が送信され, TAに情報が浮いているようになる.

はTA以外では情報を送らない. TAに情報を持つノードがいなくなり, 外部から情報を持つノードが入ってこなければ, 情報フローティングは終わることになる.

情報フローティングの研究においても, 様々な移動モデルが考えられる⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾⁽⁴²⁾⁻⁽⁵¹⁾. RWPやランダムウォークのようなランダムな移動, 道路網に沿った移動等が考えられるが, その他に, 広場にノードが集まり, 広場の中はRWPで移動し, その後出て行くような移動が考えられている⁽⁴⁶⁾. 同様に, 繁華街などを想定して端末の速度がある領域では遅くなり, その領域外では速くなるような移動も考えられる. また, ある場所からノードが現れ, 移動し, また消えるというモデルもある⁽⁴⁴⁾. これは, 地下道の出入口付近での情報フローティングであれば地上から移動ノードが地下に入り消え去り, 地下から移動ノードが現れるというような移動ノード群と同様のモデルであると

考えられる. また, 上のような移動ノードが単独で消えたり現れたりする移動モデルとは異なり, 移動ノードの集団として消えたり現れたりするようなことを考えると, 鉄道のホームにおいて情報フローティングを行い, 電車が来るとホームにいた移動ノードが電車に乗り込んで消え去り, 新たに電車から情報を持たないノードが降りてくるような状況を考えることができる. これらの移動モデルを仮定して, 情報フローティングの様々な性質が理論的手法あるいはシミュレーションにより研究されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽⁴²⁾⁻⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁶⁾⁻⁽⁴⁹⁾⁽⁵¹⁾. これらの移動モデルは情報フローティングに影響を与えやすいものとして考えられている場合も多く, 情報フローティングの基礎的な性質を詳細に明らかにするためにも有用である.

宛先が領域となり, その地域に流入するノード群への情報伝達が目的になると, 安全・安心のための警告情報の緊急配信が

一つの応用となる。最近では、豪雨による突然の冠水等が発生した際に、緊急の通行止めを行うために、自動的に空気で膨らむ遮断機が危険な場所にあらかじめ設置されるようになっていく⁽⁵²⁾。これはあくまでも事前に設置するものであるが、事前に何かを設置することはせずに、同じような観点から安全・安心のための情報をできるだけ早く共有するため、警報をその地域で緊急に出すということが情報フローティングの一つの応用として考えられる。この場合、その情報を知らせることにより行動変化を促すことが目的となる。

情報フローティングの警告情報の緊急配信の研究として、事故情報を事故現場周辺に緊急配信することが考えられている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽⁴⁵⁾⁽⁵⁰⁾。この情報は現場から遠い所では意味をなさないの、このことから、この場合はエビデミック通信ではなく情報フローティングが適していると考えられる。これらの研究においては、2車線の道路上を行き来する移動体による情報フローティングの性能評価を通して様々な議論がなされている。その中で、情報源の位置、車線ごとの交通量の違い、TAの位置や大きさ、交差点の有無、事故情報を受信したことによる移動体の行動変化（進路変更）等の前提条件の組合せにより、様々な移動モデルが想定された。交差点がないような単純なモデルにおける基礎的な性質の把握から始まり、車線ごとの交通量の違いにより生ずる解析手法の拡張が行われてきた。また、事故現場に近づかないようにすることを促すためという、事故情報配信の本来の目的に即したモデルの拡張も行われている。このように事故情報緊急配信という応用を考えただけでも、様々な移動に関わる事柄を考えて性能評価や設計を行う必要性が生じ、その重要性が認識されている。このようなことから、次章では事故情報緊急配信への応用における情報フローティングの性能評価事例を幾つか取り上げ、そこからノードの移動、行動変化と情報フローティングの関わりについて考えていく。

5. 移動、行動変化と情報フローティング

図8のような2車線の道路上を行き来する移動体による情報フローティングが、文献(11)において解析されている。事故現場の事故車両が情報を発信し（ただしこの車両からの送信は1回だけである）、その情報がその周辺に設定されたTAに情報フローティングされ、TAを通行する自動車に情報を伝えるというものである。対向車線の交通量、速度が同じであるので空間的な密度も同じであるとして、情報フローティングが継続する長さが解析されている。また、文献(45)では文献(11)と同じモデルにおいて解析手法の補正が行われている。文献(11)(45)において単純な手法による近似がうまくいくことが示されているが、この近似では対向車線を走行しすれ違う車両同士だけで情報がやり取りされると仮定している。本来の情報フローティングでは、情報の伝達はすれ違うときだけに行われるのではないが、対向車線の交通量、速度、空間的な密度が同じであるときにはこの単純化が効果的なのである。

しかし、図8のような単純なモデルであっても、TAを通過する間に他の車両とはすれ違うことがない場合には、前方を走行

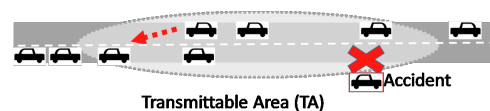


図8 事故情報を配信する情報フローティング(1)

このモデルは情報フローティングの基礎的な理論解析のために使用されている⁽¹¹⁾。情報源がTA内にあるが送信は1回だけ行うという前提で解析が行われている。これは一つの情報からどれだけ情報フローティングを継続できるかという観点からの仮定である。

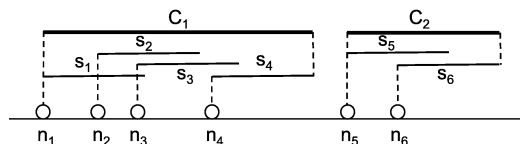


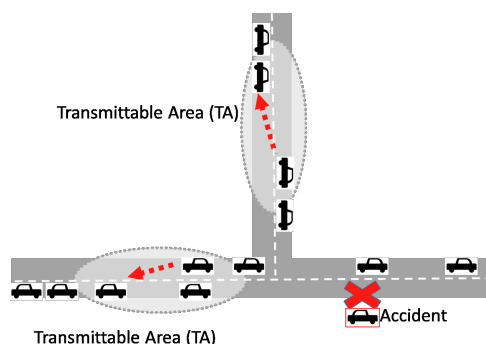
図9 ランダムクランプ 一定の長さ r の線分 s_1, \dots, s_4 が重なってクランプ C_1 ができ、線分 s_5 と s_6 からクランプ C_2 ができる。

する同車線の車両から情報を受け取るしかない。このような状況は対向車線の交通量が異なる場合に大いに起こり得るが、文献(11)(45)の解析法ではすれ違う移動ノード間での情報交換だけが考えられているので対応できない。同車線の自動車間での情報の受け渡しは文献(50)にあるように、マルチホップ無線ネットワークの連結性を解析するための手法が必要になる。

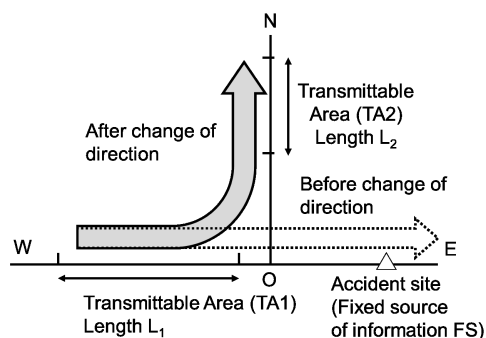
具体的には、図9のように直線状にランダムに点が並んでいるときに、長さ r の線分を各点から右側に伸ばす。これらの線分が重なってできる線分をクランプというが、これの長さに関わってくる。クランプの長さの確率密度関数は文献(53)にあるが、 r を電波の届く範囲として、道路上のノード群から成る一次元のマルチホップ無線ネットワークを作る場合に、送信元ノードと宛先ノードの間に連結なマルチホップ無線経路が存在する確率を求めるために必要となるものである⁽⁵⁴⁾。

クランプの確率密度関数を使うと、すれ違うノード間での情報のやり取りだけでなく、先行する前方の移動ノードから情報を受け取ることも考慮に入れて情報フローティングの解析を行うことができる⁽⁵⁰⁾。

このように単純な移動モデルを想定した情報フローティングを考えるだけでも様々なことを考える必要があるが、応用から考えるとシステムのモデルについても更に考えなければならない事柄が多い。例えば、上記のように道路上での事故情報を配信することの意味合いである。もし事故が発生することにより道路が通りにくくなっている、あるいは危険であるような状況があれば、事故現場周辺を通行しない方がよいことを接近してくる自動車に伝え、事故現場に近づかないように進路変更を促すことが情報フローティングの目的となる可能性がある。このような場合、上記のような一次元の道路上の情報フローティングを評価するだけでは目的に即した解析やそれを利用した性能予測、設計を行うことは難しい。なぜなら図8のモデルでは自動車が進路変更できないからである。



(a)



(b)

図 10 事故情報を配信する情報フローティング (2) ⁽¹²⁾

(a) TA は事故現場及び交差点の手前にあり、情報を受け取った自動車が進路変更を行うことができる。また、情報源（事故車両あるいは事故車両の運転手の通信端末）から度々情報が発信される。(b) 上の (a) のモデル図。W から E に向かって移動しているノードに、TA1 における情報フローティングにより情報を渡し、N 方向に進路変更することを促す。同様に N から E に向かって移動ノードに TA2 で情報を渡し W 方向への進路変更を促す。

では進路変更を促すような場合には、どのようなことを考える必要があるのだろうか。また、送信可能エリアの位置、大きさをどのように決めればよいだろうか。情報フローティングで行動変化を促す場合には、これらを考慮に入れた新しい問題を考えなければならない。この問題を文献(12)では、図 10 のような構造を持ち、以下のような特徴を持つシステムにおいて考えている。

- (1) 情報を受け取った移動ノードが事故現場を避けるように行動変化を促すのであるから、事故現場の手前に交差点があり、送信可能エリア TA は交差点の手前にある。複数道路区間があれば TA も複数設定する必要がある。
- (2) 事故現場には事故車両がある。この場合、事故車両が TA を設定し、情報フローティングを開始するための最初の情報を反対方向から来る車両に渡し、情報を受け取った車両が TA に入り情報フローティングが開始される。または、事故現場の反対車線を通過する車両が事故現場を認識し、TA を設定し、自ら TA で情報を発信し情報フローティングを始める。
- (3) 事故現場を通過する車両は事故車両から情報を受け取

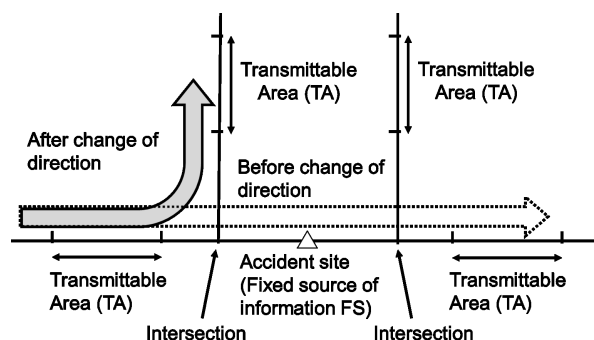


図 11 事故情報を配信する情報フローティング (3) ⁽⁵¹⁾

図 10 の拡張であり、情報源が交差点に囲まれることで情報フローティングによる行動変化指示が徹底すると特殊な現象が起こる。

る、あるいは事故を認識できるので、TA にはあらかじめ情報を持つノードが度々進入する。

TA をどこに定めればよいか、という問いの答えは (1) になる。TA の大きさを決めるには次のような事柄を考える必要がある。

まず、文献(11)(45)(50)は、あくまでも情報フローティングの基礎的な性質を明らかにするために、あえて情報を持つノードは一度しか TA に入らないとして、ここからどのくらい情報フローティングが続くのかに着目した。しかし、上のように応用が明確になれば、情報源がどこにいるのかも明確になるので、上の (3) のように情報が TA に入ってくる頻度も明確になり、情報フローティングの前提も変わってくる。

更に、従来の移动通信研究で余り検討されていない事柄として、情報を受け取った移動ノードの行動変化が起こり、その行動変化によって TA 上の交通量が変化し、それによって情報フローティングの性能も変わるということが起こる。例として図 10 を考える。図 10(b) において、W から E に向かって移動ノードは TA1 における情報フローティングにより事故情報を受信する。その情報から、事故現場を迂回するために交差点 O を曲がり、N 方向に進路を変える。すると、情報フローティングが行われる前と比較して、O から N への交通量が増える。TA2 の情報フローティングは N から O に向かう移動ノードと O から N に向かうノードによる情報交換により継続されるので、O から N に移動する移動ノードが増えれば情報フローティングも続きやすくなり、その結果、TA2 の大きさ L_2 も小さめに設定することができる可能性もある。このように、情報フローティングによる行動変化により、情報フローティング自体に影響が及び、TA の大きさ L_1 や L_2 の設計にも影響が及ぶことになる。

事故現場方向に移動しているノードが交差点に到達するまでに情報を受け取れない確率 P_f が要求値 $P_{f,desired}$ 以下になるように TA1 の長さ L_1 を決めるためには、上のような事柄を考慮に入れて P_f を解析する必要がある。例えば文献(12)の近似手法を使うと図 10 のシステムの L_1 は以下の式で計算できる。

$$L_1 = - \frac{\log \left\{ \frac{\lambda_{WO} + \Lambda_{OW,2} e^{(\Lambda_{OW,2} + \lambda_{WO})r}}{\Lambda_{OW,2} + \lambda_{WO}} P_{f,desired} \right\}}{2\Lambda_{OW,2}} - \frac{r}{2}. \quad (1)$$

ここで、 λ_{WO} は W から O に向かう移動体の密度、 r は通信可能距離である。速度は全て同じで導出の過程で消えている。また、 $\Lambda_{OW,2} = \lambda_{NW} + p\lambda_{NE} + \lambda_{EW}$ であり、この中の λ_{NW} は N から W、 λ_{NE} は N から E、 λ_{EW} は E から W へ向かう移動体の密度であり、 p は情報を受け取ったノードが進路変更を行う確率である。もちろん L_2 も同様に計算できる。

上のモデルでは単純化のため、単一の交差点だけが考えられていたが、事故現場を囲むような交差点は当然複数ある。また、これを TA で囲んで図 11 のような状況を作ると場合によっては移動ノードが情報源を通過しなくなり、新たな問題が発生する⁽⁵¹⁾。このような拡張は数多く残されており、今後の課題である。

6. あとがき

本論文では、応用として安全・安心を想定したエビデミック通信、情報フローティングを考え、特にこれらの手法と移動ノードの移動の関係に重点を置き解説を行った。

また、情報フローティングにより配信された情報が移動ノードの行動変化を促し、情報を受け取ったノードが行動変化することにより情報フローティング自体にも影響を及ぼすこと等、従来の移動ネットワークにはない観点も必要になることを、情報フローティングにより安全情報を配信することを例として説明した。

今後、移動ネットワークの更なる多様化、高度化により、本論文に述べたような移動ノードの振る舞いとネットワークの関係が更に変化する可能性もある。この場合、また新しい移動ネットワークの設計・制御指針が必要になり、移動ネットワーク研究の新たな課題が数多く出てくると考えられる。

また、情報フローティング自体の技術的な課題としても、様々な行動変化を考慮した上での送信可能エリアの大きさや配置の最適化と設計、理論的な問題、拡散した情報の更新や誤った情報の訂正等、今後の課題も多いので更なる研究が必要であると考えられる。

最後に常日頃議論して頂く宮北和之博士（新潟大学）に感謝する。本研究の一部は JSPS 科研費 16K06344、24246068 の助成を受けたものである。

文 献

- (1) W. C. Y. Lee, Mobile Communications Engineering: Theory and Applications, McGraw-Hill, Oct. 1997.
- (2) K. Okada, T. Shimazu, A. Fujiki, Y. Fujino, and A. Miura, "A performance study to ensure emergency communications during large scale disasters using satellite/terrestrial integrated mobile communications systems," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E98-A, no. 8, pp.1627-1636, Aug. 2015.
- (3) C. E. Perkins, Ad Hoc Networking, Addison-Wesley, 2001.
- (4) 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, "アドホックネットワーク," 信学誌, vol. 84, no. 2, pp.127-134, Feb. 2001.
- (5) 間瀬憲一, "大規模災害時の通信確保を支援するアドホックネットワーク," 信学誌, vol. 89, no. 9, pp. 796-800, Sept. 2006.
- (6) W. Guo and X. Huang, "On coverage and capacity for disaster area wireless networks using mobile relays," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2009, pp. 1-17, Jan. 2009.
- (7) A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks," Technical Report, Duke University, April 2000.
- (8) K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," Intel Research Technical Report, IRB-TR-03-003, Feb. 2003.
- (9) A. V. Castro, G. D. M. Serugendo, and D. Konstantas, "Hovering information-self-organising information that finds its own storage," Technical Report, School of Computer Science and Information Systems, BBKCS-07-07, Birkbeck College, London, UK, Nov. 2007.
- (10) J. Virtamo, E. Hyttiä, and P. Lassila, "Criticality condition for information floating with random walk of nodes," Perform. Eval., vol. 70, no. 2, pp. 114-123, Feb. 2013.
- (11) B. Liu, B. Khorashadi, D. Ghosal, C. N. Chuah, and H.M. Zhang, "Analysis of the information storage capability of VANET for highway and city traffic," Transp. Res. C, Emerg. Technol., vol. 23, pp. 68-84, 2012.
- (12) K. Nakano and K. Miyakita, "Analysis of information floating with a fixed source of information considering behavior changes of mobile nodes," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E99-A, no.8, pp.1529-1538, Aug. 2016.
- (13) Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges," IEEE Communications Surveys, vol.8, no.1, pp.24-37, 2006.
- (14) 鶴 正人, 内田真人, 滝根哲哉, 永田 晃, 松田崇弘, 已波弘佳, 山村新也, "DTN 技術の現状と展望," 信学通誌, no. 16, pp. 57-68, 2011.
- (15) L. Kleinrock and J. Silvester, "Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number," Proc. the IEEE National Telecommunications Conference, vol. 4, pp. 4.3.1-4.3.5, Dec. 1978.
- (16) H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals," IEEE Trans. Commun., vol. 32, no. 3, pp. 246-257, March 1984.
- (17) M. Penrose, Random geometric graphs (Oxford Studies in Probability, 5), 2003.
- (18) <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- (19) <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- (20) P. Santi, "Topology control in wireless ad hoc and sensor networks," ACM Comput. Surv., vol. 37, no. 2, pp. 164-194, June 2005.
- (21) A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelen, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," Proc. First International Workshop on Service Assurance with Partial and Intermittent Resources (SAPIR) 2004, LNCS, vol. 3126, pp. 239-254, Fortaleza, Brazil, Aug. 2004.
- (22) 落合秀也, 江崎 浩, "DTN 環境を想定したトポロジ変化に強いメッセージルーティング," 情処学論, vol. 50, no. 9, pp. 2312-2326, Sept. 2009.
- (23) Z. Feng and K.W. Chin, "A unified study of epidemic routing protocols and their enhancements," Proc. the 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops, pp. 1484-1493, May 2012.
- (24) Y. P. Kim, K. Nakano, K. Miyakita, M. Sengoku, and Y. J. Park, "A routing protocol for considering the time variant mobility model in delay tolerant network," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol. E95-D, no. 2, pp. 451-461, Feb. 2012.
- (25) H. Yao, H. Huang, D. Zeng, B. Li, and S. Guo, "An energy-aware deadline-constrained message delivery in delay-tolerant networks," Wirel. Netw., vol. 20, no. 7, pp. 1981-1993, Oct. 2014.
- (26) S. Eshghi, M. H. R. Khouzani, S. Sarkar, N. B. Shroff, and S. S. Venkatesh, "Optimal energy-aware epidemic

- routing in DTNs,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 60, no. 6, pp. 1554–1569, June 2015.
- (27) A. Martin-Campillo, J. Crowcroft, E. Yoneki, and R. Marti, “Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 36, no. 2, pp. 870–880, March 2013.
- (28) W. Zhao and M. H. Ammar, “Message ferrying: proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks,” *Proc. 9th IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing System (FTDCS '03)*, pp. 308–314, May 2003.
- (29) W. Zhao, M. H. Ammar, and E. Zegura, “Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network,” *Proc. the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, pp. 1407–1418, March 2005.
- (30) 中野敬介, “孤立領域間 DTN におけるマルチホップ・エビデミック伝送に関する基礎検討,” 2011 信学総大, ABI-1-3, March 2011.
- (31) 仙石正和, 和泉寛人, 吉越明彦, “自動車電話システムのトラヒック解析のための自動車の動きの測定 (I),” *信学信越支部大*, 59, Oct. 1984.
- (32) 仙石正和, 大塚 晃, 工藤和光, 阿部武雄, 山口芳雄, 阿達 透, 井口幸一, “自動車電話システムのトラヒック解析のための自動車の動きの測定 (II),” *信学信越支部大*, 79, Oct. 1985.
- (33) T. Kobayashi, N. Shinagawa, and Y. Watanabe, “Vehicle mobility characterization based on measurements and its application to cellular communication systems,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E82-B, no. 12, pp. 2055–2060, Dec. 1999.
- (34) K. Nakano, K. Saita, M. Sengoku, Y. Yamada, and S. Shinoda, “Mobile communication traffic analysis on a road systems model,” *Performance and Management of Complex Communication Networks*, IFIP, pp. 3–20, Chapman & Hall, May 1998.
- (35) 横田孝義, “次世代交通情報通信システムを担うブローブ技術,” *信学誌*, vol. 95, no. 8, pp. 718–723, Aug. 2012.
- (36) A. T. Campbell, S. B. Eisenman, N. D. Lane, E. Miluzzo, and R. A. Peterson, “People-centric urban sensing,” *Proc. the 2nd annual international workshop on Wireless internet (WICON '06)*, Aug. 2006.
- (37) R. Becker, R. Caceres, K. Hanson, S. Isaacman, J. M. Loh, M. Martonosi, J. Rowland, S. Urbanek, A. Varshavsky, and C. Volinsky, “Human mobility characterization from cellular network data,” *Commun. ACM*, vol. 56, no. 1, pp. 74–82, Jan. 2013.
- (38) C. Bettstetter, H. Hartenstein, and X. Perez-Costa, “Stochastic properties of the random waypoint mobility model,” *Wirel. Netw.*, vol. 10, no. 5, pp. 555–567, Sept. 2004.
- (39) A. E. A. A. Abdulla, Z. Md. Fadlullah, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono, and R. Miura, “Toward fair maximization of energy efficiency in multiple UAS-aided networks: A game-theoretic methodology,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 305–316, Jan. 2015.
- (40) J. Beasley, “Route first cluster second methods for vehicle routing,” *OMEGA International Journal of Management Science*, vol. 11, no. 4, pp. 403–408, 1983.
- (41) K. Miyakita, K. Nakano, M. Yamashita, and H. Tamura, “Simulation study of relief goods delivery and information sharing by epidemic transmission in disaster areas,” *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 114–135, Aug. 2016.
- (42) E. Hyttiä, J. Virtamo, P. Lassila, J. Kangasharju, and J. Ott, “When does content float? characterizing availability of anchored information in opportunistic content sharing,” *IEEE INFOCOM*, pp. 3123–3131, 2011.
- (43) J. Ott, E. Hyttiä, P. Lassila, J. Kangasharju, and S. Santra, “Floating content for probabilistic information sharing,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 7, no. 6, pp. 671–689, 2011.
- (44) E. Hyttiä, P. Lassila, J. Ott, and J. Kangasharju, “Floating information with stationary nodes,” *Eighth Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SpaSWin)*, pp. 361–366, 2012.
- (45) B. Xie, Y. W. Chen, M. Xu, and Y. G. Wang, “Mathematical modeling of locally information storage capability of VANET for highway traffic,” *Applied Mechanics and Materials*, vols. 373–375, pp. 1914–1919, 2013.
- (46) M. S. Desta, E. Hyttiä, J. Ott, and J. Kangasharju, “Characterizing content sharing properties for mobile users in open city squares,” *10th Annual IEEE/IFIP Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*, pp. 147–154, 2013.
- (47) 早津峻佑, 中野敬介, 宮北和之, “DTN における情報滞留制御の解析,” *信学技報*, CAS2013-30, pp. 165–170, July 2013.
- (48) M. Ciocan, C. Dobre, C. X. Mavromoustakis, and G. Matorakis, “Analysis of vehicular storage and dissemination services based on floating content,” *Proc. International Workshop on Enhanced Living Environments (ELEMENT 2014)*, 6th International Conference on Mobile Networks and Management (MONAMI 2014), Sept. 2014.
- (49) 萩原 涼, 小倉一峰, 山崎康広, 大崎博之, “フローティングコンテンツ配信制御の提案および安定性解析,” *信学技報*, CQ2015-21, pp. 7–12, July 2015.
- (50) K. Nakano and K. Miyakita, “Information floating on a road with different traffic volumes between opposite lanes,” *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 97–113, Aug. 2016.
- (51) 宮北和之, 中野敬介, “情報フローティングの基本性質に関する一考察,” *信学技報*, ICTSSL2016-22, pp. 13–18, Oct. 2016.
- (52) <http://www.advic.co.jp/pdf/29-30.pdf>
- (53) P. Hall, *Introduction to the theory of coverage processes*, John Wiley & Sons, 1988.
- (54) K. Nakano, K. Miyakita, M. Sengoku, and S. Shinoda, “Analysis and relative evaluation of connectivity of a mobile multi-hop network,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E91-B, no. 6, pp. 1874–1885, June 2008.

(ICTSSL 研究会提案, 平成 29 年 1 月 27 日受付)



中野敬介 (正員: シニア会員)

平元新潟大・工・情報卒・平 6 同大学院博士課程了・博士(工学)・現在, 新潟大・教授・ネットワーク工学に関する研究に従事・平 8 IEEE ICNNSP'95 論文賞, 平 9 本会論文賞各受賞・平 11-12 イリノイ大客員研究員・平 24 回路とシステム研専委員長, 平 28 安全・安心な生活と ICT 研専副委員長・IEEE, ACM 各会員.