

## アドホックネットワークでの 浸透閾値を用いたウイルス蔓延抑制

遠野 翔太\* 森口 一郎\*\*

アドホックネットワークではリンクが集中するノードが存在しないため、リンク数の多い端末に免疫を与える既存のウイルス蔓延抑制手法を適用できない。そのためアドホックネットワーク独自のウイルス蔓延抑制手法が必要とされている。アドホックネットワークでは平均リンク数4.52以上になるとフィールド全体を覆う一つの大きなネットワークが出現することが判明している。本研究では、この特性を利用し、ウイルスから感染活動を受けた端末の電波の到達範囲を減らすことでウイルスの周辺のリンクを少なくし、ウイルス蔓延抑制が可能かシミュレーションを行った。この結果、無線LANプロトコルの衝突回避方式によって、ネットワークの平均リンク数が11付近まで蔓延度が上昇するが1.0には達することなく、平均リンク数が11を超えるとブロッキングが強くなり蔓延度が緩やかに下降した。また、ネットワークのリンク数を局所的に下げることでウイルス蔓延の抑制に効果があることを明らかにした。

**キーワード：**アドホックネットワーク、浸透閾値、ウイルス蔓延抑制、クラスター係数

### Virus Epidemic Suppression by Percolation Threshold on Ad-hoc Networks

Shohta TOHNO\* and Ichirou MORIGUCHI\*\*

Conventional virus suppression strategies that immunize nodes possessing many links could not be applied for ad-hoc networks because these networks do not have nodes in which links concentrate. New strategies, therefore, are necessary for the ad-hoc networks. It has been found that a giant network covering whole field emerges suddenly under the situation that the average link number becomes larger than 4.52. In this study, by using this distinctive feature we examined simulations reducing the number of links around viruses, then confirmed whether this method affect the number of infected nodes. Although virus population increases as the average link number increases up to around 11, it does not achieve 1.0 because of the effect of Medium Access Control. For the case of the average link number over 11, the virus population rate gradually decreases since the blocking effect by Medium Access Control becomes stronger there. Furthermore, this study shows that locally reducing the number of links of ad-hoc networks is effective for suppressions of virus epidemic.

**Keywords:** ad-hoc network, virus epidemic suppression, percolation threshold, clustering coefficient

\*東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科 (2013年3月卒業)

2013年7月15日受理

2013年4月より興安計装株式会社に所属

Tokyo University of Information Sciences, Faculty of Informatics, Department of Information Systems

\*\*東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科

Tokyo University of Information Sciences, Faculty of Informatics, Department of Information Systems

## 1. はじめに

アドホックネットワークは基地局やルータなどの特定の機器を用いず、端末がマルチホップ通信を使用してパケットをリレー中継し、目的の端末へと通信を行う。上記の点から特定の端末にトラフィックが集中し通信が不能になることがない等の利点により、今後モバイル端末を中心とした無線通信を利用した発展が見込まれる。

しかし、近年モバイル端末をターゲットとしたウイルスの存在が確認され、今後のスマートフォン等のモバイル端末の普及につれ活発なウイルスの感染活動が行われることが予測される。しかし、アドホックネットワークでは既存のネットワークで存在するルータ、サーバ等の通信が集中する端末が存在しないため、スケールフリー性を利用しリンクを多く持つノードに免疫を与える手法を使用できない[1]。そのためアドホックネットワーク独自のウイルス蔓延抑制手法の必要性が高まっている。

本研究ではアドホックネットワークと同じネットワーク構造を持っているランダムジオメトリックネットワーク (RGN) を使用し、ウイルス蔓延抑制のシミュレーションを行った。RGNには1端末あたりの平均リンク数が4.52を超えると、任意の端末から他の任意の端末へと通信を行うことができるジャイアントネットワークが急激に出現する特徴があることが明らかになっている[2]。このRGNでジャイアントネットワークが構築される境目の値を浸透閾値という。本研究では、ウイルスから感染活動を受けた端末の電波の到達範囲を減少させることでウイルスの周辺の平均リンク数を下げ、ウイルスの周辺のみを局所的に浸透閾値より低いリンク数とすることで、ウイルス蔓延抑制が可能かシミュレーションを用いて検証した。その際、平均リンク数が11付近まではウイルスの感染割合が急激に上昇するが、IEEE802.11で規定されている衝突回避方式CSMA/CAによっ

て蔓延度が1.0にはならず、平均リンク数が11を超えるとブロッキングが強くなり感染割合が緩やかに下降することを発見した。また、ウイルスの接触があったノードの電波の到達範囲を減少させリンク数を変化させることで、局所的に浸透閾値を下回るネットワークを作り、ウイルス蔓延を抑制できることが判明した。

## 2. RGN

RGNはアドホックネットワークと同じネットワーク構造を持つネットワークモデルであり、本研究ではこのネットワークモデルでウイルス蔓延の検証を行った。

RGNの作成方法は、まずノードを配置するフィールドの1辺の長さを設定して面積を決める。次に、フィールド内にノードをランダムに配置し、各ノードに電波到達範囲を与え、電波の範囲内のノード間にリンクを張る。

この際、同じフィールド内で各ノードの電波範囲を違うものにすると片方のノードでは電波範囲内であるため通信を行うことができるが、一方では電波範囲外のため通信を行うことができない片方向リンクが発生する。本研究ではウイルス感染シミュレーションを行う際、各ノードの条件を同等とするため、電波到達範囲は同じものとしてネットワークを作成した。よって、感染シミュレーション初期段階では片方向リンクは発生しない。シミュレーションを行う中で端末にウイルスが接触し電波到達割合を変化させた場合、片方向リンクが発生する。しかし、ウイルスが感染活動を行う場合はTCP通信等の双方向通信が必要になるため、今回のシミュレーションでは片方向リンクが発生した場合、ウイルスは感染活動を行わないものとする。

### 2.1 他のネットワークモデルとの比較方法

Nekoveeによる研究では、フィールドの値を一边1,000m、各ノードの電波到達範囲を50m、ノード数を4,000~20,000個としてRGNを作成している[3]。しかし、本研究ではRGNを作成

するにあたり他のネットワークモデルと条件を合わせるためにネットワーク作成時のパラメータをノード数、平均リンク数の2つとした。

フィールドの1辺の長さを $L$ 、全ノード数を $N$ 、平均リンク数を $\langle k \rangle$ 、ノードの電波到達範囲を $r_t$ とし、あるノードの通信範囲内に他のノードが入る確率を $p$ とする。着目しているノード以外のノードは $N-1$ 個あるので平均リンク数 $\langle k \rangle$ は

$$\langle k \rangle = (N-1)p = \frac{\pi r_t^2 (N-1)}{L^2}$$

となる。RGNのコントロールパラメータは $N$ 、 $r_t$ 、 $L$ の3つがあるが、この式により平均リンク数 $\langle k \rangle$ だけでRGNの構造を指定できることがわかる。

## 2.2 周期的境界条件

フィールド外にはノードは存在しないため境界付近にいるノードは上記の式に当てはめることができない。また、フィールドの境界付近に存在するノードはフィールドの中央に存在するノードに比べ、フィールドの境界外にノードが存在しない影響で平均リンク数が低くなる。本研究ではこの問題点を取り去るため周期的境界

条件を適用し、フィールドの境目を反対側の境目とつなげることで、フィールド境界付近のノードとフィールドの中心付近のノードの条件の違いを解消した。図1は周期的境界条件を適用したRGNを視覚化した図である。ネットワーク作成時は、まずフィールドにノードをランダムに配置し、各ノードが電波到達範囲に存在しているノードにリンクを形成する。この際、フィールド付近のノードが反対側のノードとリンクを持つことによってフィールドの周辺部付近のノードとフィールド中央のノードの条件を同等にしている。

## 2.3 浸透閾値

ネットワークに存在するほとんどのノードがノード間の通信が可能であるネットワークをジャイアントネットワークという。このジャイアントネットワークが生成される境目の値が浸透閾値である。RGNは平均リンク数が4.52未満ではネットワークに存在するノードに対して各ノードの電波到達範囲が狭く、全てのノードに通信を行うことができない。しかし、平均リンク数が4.52を超えるとジャイアントネットワークが生成され、ほとんどのノードが通信可能になるという特徴を持っていることが明らかとなっている[2]。

## 3. シミュレーション方法

本研究ではウイルス蔓延抑制手法の有効性を検証するため、ノードの感染推移が単純なSIモデルを選択した[4]。感染モデルに与えるパラメータとしては時間の推移を示すターンや、ウイルス感染確率である $\lambda$ がある。

### 3.1 SI (Susceptible-Infected) model

SIモデルのシミュレーションはターンごとに各ノードのリンク先のノードの状態を見て、リンク先に感染 (Infected) ノードがいる場合は感染確率 $\lambda$ に従い感染判定を行う。また、未感染ノードの周辺に感染ノードが存在した場合、常に感染ノードは感染ノードから感染活動を受けていることになる。感染確率 $\lambda$ は未感染

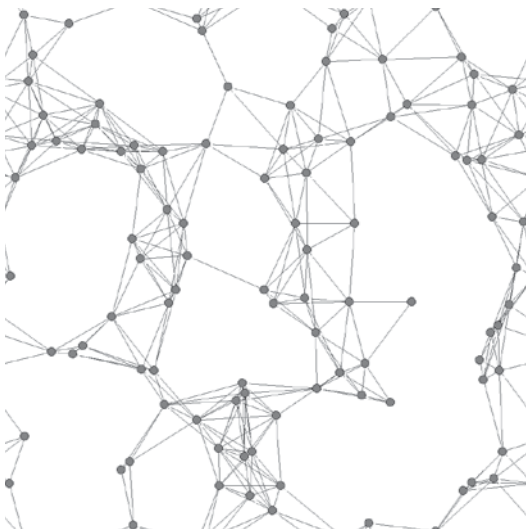


図1 周期的境界条件を適用したRGNの例  
ノード数=100、平均リンク数=8

ノードが感染する確率となるため、リンク先に感染ノードが複数存在したとしても感染ノード数ごとに感染判定を行わず、感染判定を一回とする。ネットワークのノードすべてに判定を終えると1ターンが経過して次のターンに移行する。指定したターンまでターンを経過させることでシミュレーションが終了したと判断する。

SIモデルは感染したノードは未感染(Susceptible)ノードに戻らないモデルとであるため、すべてのノードが1つのネットワークとなっている場合、ターンを重ねることで感染割合は1となる。

### 3.2 CSMA/CAの影響を考慮したSImodel

CSMA/CAとは、IEEE802.11で規定されているMedia Access Controlの1つであり、無線通信を用いる際に電波の混信を防ぐため、自身が電波を出す前にその周波数帯が使用されていないか確認を行うlisten-before-talk (LBT)方式の一種である[5]。しかしこの方式は、自身に対して同時に多数のアクセスがあった際は、たとえ電波混信が起こらなかつたとしても返信しにくい状態に陥り、結果として通信不能状態となる。

アドホックネットワークでは無線を使用した通信が想定され、また多くのウイルスは活発な感染活動を行うことが多いため、本研究ではこのCSMA/CAを想定し、複数のノードから同時に感染活動が行われた場合電波が混信したものとして、本来感染するノードを未感染状態とした(図2)。この図で、感染活動を矢印が出ている先のノードに行っているが、感染活動を受けているノードはCSMA/CAが適用され未

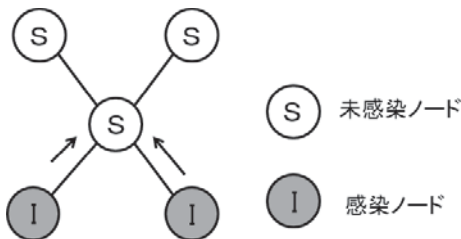


図2 CSMA/CA適用例

感染状態のままとなる。また、正常ノードのリンクに複数感染ノードが存在した場合は常に感染ノードから感染活動が行われているとしてCSMA/CAを適用した。

### 3.3 浸透閾値に着目したウイルス蔓延抑制

ウイルスの周辺のみを局所的に浸透閾値を下回るネットワークを作成するために、ウイルスに感染しているノードに接触したノードの電波の到達範囲を下げる処理を行った(図3)。その際、ネットワーク上でウイルスに接触した際に電波を縮小するノードの割合と縮小率をパラメータとした。

本研究では局所的にウイルスの周りを浸透閾値よりも下回るネットワークにした際のウイルスの挙動や、CSMA/CAの影響を考察するため、一度電波の到達範囲を下げたノードはシミュレーションが終了まで電波の到達範囲を戻していない。また、電波縮小機能を持つ端末はウイルスに対する免疫を持っていないが、不審なアクセスを検知し電波の縮小を行うものとするので、電波縮小機能を持つ端末がウイルスから感染活動を受けた場合、感染確率 $\lambda$ に従い感染判定を行った。

## 4. シミュレーション結果

### 4.1 CSMA/CAの影響を考慮したSIモデル

RGNを使用し、SIモデルにCSMA/CAを適用したシミュレーションと、比較対象としてCSMA/CAが未適用のSIモデルのシミュレーションを行い、ネットワークの平均リンク数に対するノードの感染割合を出力した(図4)。

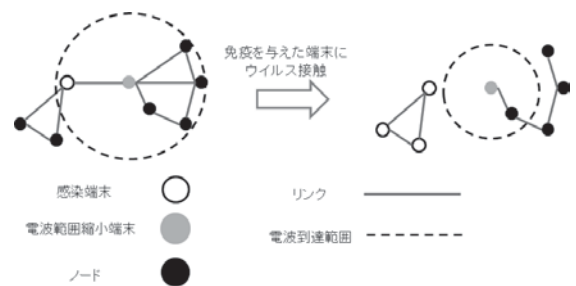


図3 ウイルスが接触した際のノードの挙動



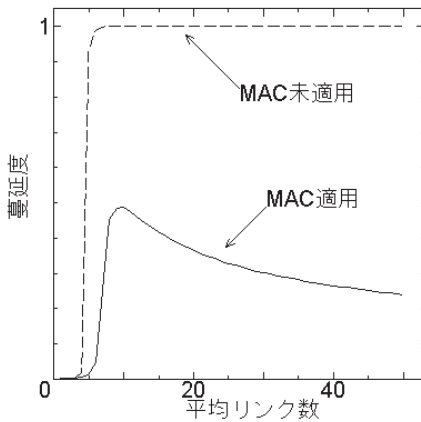


図4 CSMA/CA（図中ではMACと表記）を適用したSIモデル

ノード数 = 1万、感染確率  $\lambda = 1.0$ 。

CSMA/CA未適用のSIモデルのシミュレーションは平均リンク数が5.0付近から急激に蔓延度が上昇し、蔓延度が1になっているのに対して、SIモデルにCSMA/CAを適用したシミュレーションでは平均リンク数が11までは急激に蔓延度が上昇するが、平均リンク数が11付近を境に緩やかに蔓延度が低下している。CSMA/CAを適用したシミュレーションとCSMA/CAが未適用のシミュレーションの両方がともに平均リンク数1～5で蔓延度が著しく低い理由は平均リンク数が浸透閾値より低いため、ジャイアントネットワークが生成されず、ウイルス蔓延が小規模のネットワーク内に限定されているためである。この確認のため、図5ではノード数1万、平均リンク数3のRGNでSIモデルにCSMA/CAを適用してシミュレーションを行った結果を視覚化し、感染活動が行われている箇所の拡大を行った。平均リンク数が浸透閾値を下回っているため、ネットワークがまばらな状態となっていてウイルスが初期に放たれたネットワークでしか活動できず、ネットワーク全体での感染活動が行われていないことがわかる。

CSMA/CAが未適用の場合、平均リンク数6以上では浸透閾値を満たしたネットワークであるため、蔓延度は1.0となる。しかし、ネット

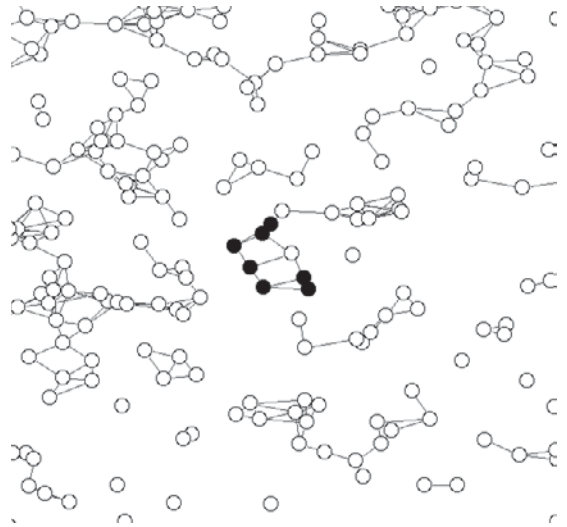


図5 感染活動が行われている付近を拡大

平均リンク数 = 3、白が未感染ノード、黒が感染ノード。

ワークの平均リンク数が浸透閾値付近の場合、電波の到達範囲内にノードが存在せずリンクを持っていないノードの存在や、ウイルスが感染しているネットワークとリンクを生成していないため、感染活動の影響を受けないノード群の影響で蔓延度は1.0には達しない。

一方、CSMA/CAを適用した場合、平均リンク数が6から10のネットワークでは急激に蔓延度が上昇するが、CSMA/CAが未適用の場合に比べ平均リンク数ごとの上昇度は緩やかで蔓延度も0.5程度が最大となっている。これは、CSMA/CAのブロッキングの影響が強く出ていることや、ノードの密集地帯とノードの密集地帯の間のノードの影響でCSMA/CAが適用されてウイルス感染活動が阻害され、ウイルスが拡散できないため感染がネットワーク全体に広がらず局所的に蔓延が行われていることが原因と考えられる（図6）。平均リンク数が増加するに従いノードの密集地帯とノードの密集地帯の間のノードがなくなっていく、ネットワーク全体のノードが多くリンクを持つようになる。よって、平均リンク数が多くなるとウイルスの感染活動が全体に広がる。図7は図6の

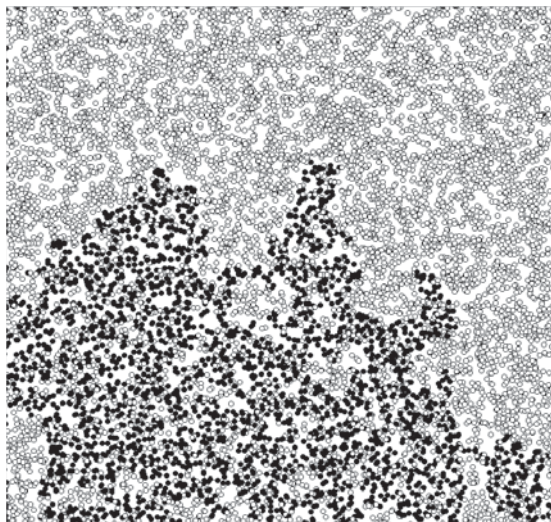


図6 シミュレーション最終ターンでの感染状態  
平均リンク数=7。

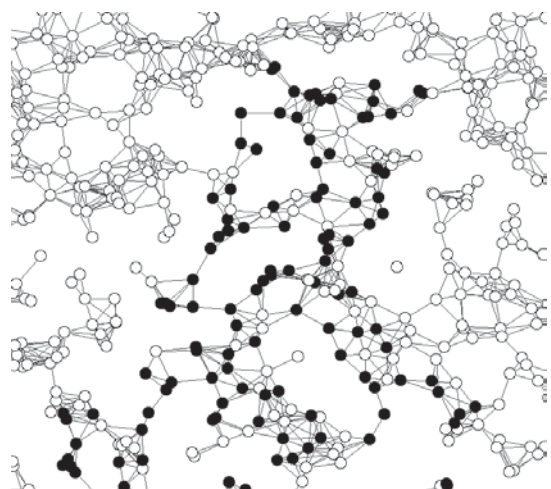


図7 図6の感染箇所を拡大  
平均リンク数=7。

ネットワークの一部を拡大して表示した図である。ウイルスが感染活動を行っている箇所でもまばらにCSMA/CAが適用され、感染していないノードが存在する様子やノードの密集地帯と密集地帯のノードの影響でウイルスの感染活動が阻害され、ウイルスが次のノードの密集地帯に感染活動を行えていない様子がわかる。これは、各ノードのリンク数の上昇によって感染活動を受けているノード自体にCSMA/CAが

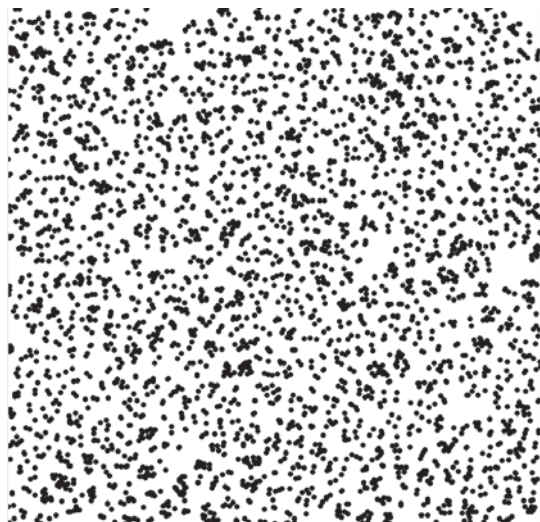


図8 ウイルス感染の様子

平均リンク数=20、ノード数=1万、リンクと未感染ノードは未表示。

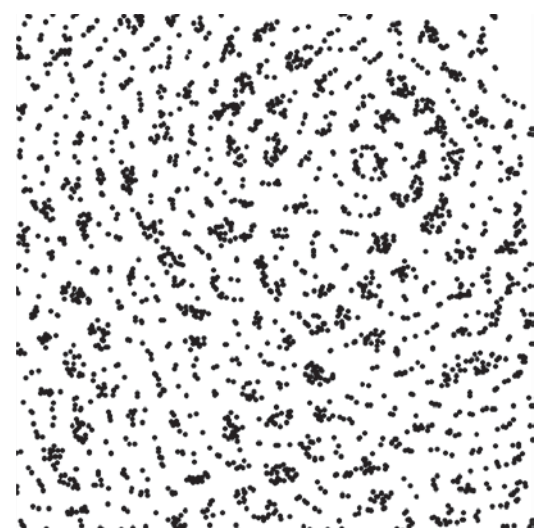


図9 ウイルス感染の様子

平均リンク数=50、ノード数=1万、リンクと未感染ノードは未表示。

適用される確率が上がるため、ネットワーク全体での蔓延度は平均リンク数を増やすほど減少している。

図8はノード数1万、平均リンク数20でウイルス感染活動、図9はノード数1万、平均リンク数50でのウイルス感染活動の様子を表示した

ものになる。図8、図9では感染ノードの割合の推移を明確にするためリンク情報と未感染ノードは表示していない。平均リンク数20、50共にネットワーク全体にウイルスの感染活動が行われているが、平均リンク数が増えたことでCSMA/CAが適用される確率が上昇し、感染するノードの個数が減少していくことが確認できた。RGNは電波到達範囲すべてのノードとリンクを形成するため、ウイルスの活動範囲は初期感染ノードを中心に同心円状に広がっていく(図10、図11)。しかし、各ターンでのウイルスの活動範囲付近のノードは周辺に多数の感染端末が存在するためCSMA/CAが適用され感染活動を受けない。逆に、ウイルスの活動範囲のすれすれに位置するノードはごく少数の感染端末とリンクを持っている。よって、CSMA/CAが適用されないため感染状態となる。このような感染活動がターンごとに繰り返されるため、図9のように同心円状の感染活動となっている。

感染確率 $\lambda$ が低い場合、感染判定により未感染状態となると、次ターンには感染状態となった周りのノードの影響でCSMA/CAが適用さ

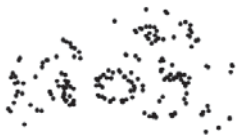


図10 感染5ターン目

平均リンク数=50、ノード数=1万。



図11 感染10ターン目

平均リンク数=50、ノード数=1万。

れ、シミュレーション中は感染状態とならない。このような感染が広がっていくため $\lambda = 1.0$ で行うよりも薄い密度での感染活動になる。よって、 $\lambda = 1.0$ で行う場合よりもネットワークの蔓延度は下がる。しかし、 $\lambda = 1.0$ の場合と同様にウイルスの活動範囲の外周に位置しているノードが感染活動を受けることは変わらず、感染活動自体は同心円状に広がっていく。

#### 4.2 浸透閾値に着目したウイルス蔓延抑制

図12はノード数1万、平均リンク数8でシミュレーションを行った蔓延度と電波範囲縮小端末の関係性になる。電波の縮小割合を0、つまりウイルスとの接触後はそのノードの通信可能距離が0になり、リンクがない状態でシミュレーションを行った場合、電波範囲縮小端末をネットワーク全体に1割存在する状態となるとウイルスの蔓延度が下がり、ネットワーク全体の5割存在する状態だとウイルスはほぼ蔓延しない状態となる。ウイルスを感知し電波の縮小を行う端末をネットワーク上のすべての端末とすると、ノードの通信可能範囲が通常時の6割でウイルスが満足に感染活動を行えない結果となり、ウイルスの蔓延抑制を行うことができ、ウイルスの周辺を浸透閾値以下のネットワークにする手法が有効であることがわかる。

一定割合まで電波範囲縮小ノードを増やし電波の縮小範囲を増やさないと効果が現れない理由は、電波縮小端末が少ない場合は感染が一定

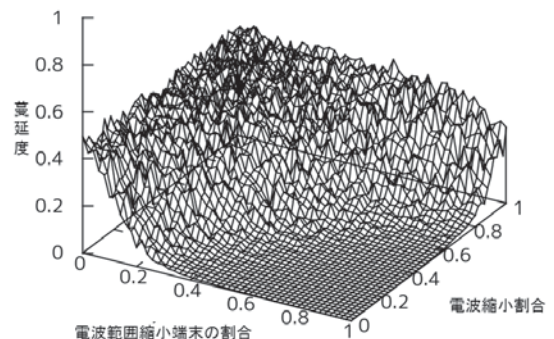


図12 蔓延度と電波範囲縮小端末の関係性

ノード数=1万、平均リンク数=8。



まで広がった後にウイルスとの接触を行っているか接触後も他の経路から蔓延が広がってしまうからである。また、電波の縮小割合が低いとウイルスとの接触後もウイルスの周辺が浸透閾値を下回るネットワークとならないため感染が広がってしまい効果が現れないという結果になった。

シミュレーションに用いるネットワークの平均リンク数が大きくなるにつれ、ノードの密集地帯と密集地帯の境目に位置するノードを出現させることや、ウイルスの周辺を浸透閾値以下にするためにはより多くのノードを、ウイルスに接触を受けた際に電波範囲縮小端末にし、電波の縮小割合を上げることが必要になる。

## 5. まとめ

本研究ではアドホックネットワークに対して感染シミュレーションを行い、ネットワークの平均リンク数を局所的に浸透閾値よりも下げることによってウイルス蔓延抑制を行った。その際、CSMA/CAが適用されたことによってネットワークの平均リンク数ごとにウイルスの蔓延度に大きな変化が現れた。過去の研究でアドホックネットワークは既存のネットワークに比べ、CSMA/CAの影響でウイルス蔓延がしにくいことが判明している。本研究ではさらに、平均リンク数を大きくすることでCSMA/CAの影響が大きくなりウイルス蔓延がしにくいネットワークになることを明らかにした。また、ネットワークに電波範囲縮小ノードを存在させ、電波の縮小割合を上げることでウイルス周辺のネットワークの平均リンク数を局所的に浸透閾値よりも低くする手法が有効であることを明らかにした。

しかし、ネットワークの平均リンク数が大きくなると、浸透閾値以下まで平均リンク数を下げることによって多くのノードに電波縮小の処理をしなくてはならないことや、電波の縮小割合を上げなければならない。また、本研究では電波の範囲を一定の時間で元に戻すという処理を行っ

ていないことから電波の範囲を一定の時間で戻した際の、ウイルス感染の影響を考えなくてはならない等の問題点が今後の課題として残っている。

## 【参考文献】

- [1] 本吉和馬, 森口一郎, 「局所ネットワーク情報を用いたウイルス蔓延抑制」, 東京情報大学研究論集, Vol. 15, No. 2, 1 (2012).
- [2] J. Dall and M. Christensen, "Random geometric graphs", Physical Review E, Vol. 66, 06121 (2002).
- [3] Maziar Nekovee, "Worm epidemics in wireless Ad-hoc networks", New Journal of Physics, Vol. 9, 187 (2007).
- [4] M. E. J. Newman, "Networks: An Introduction", Oxford (2010).
- [5] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall, "Computer Networks 5th ed.", Prentice Hall (2011).