

ノード中心性の拡張概念を利用した効率的転送を実現するオーバーレイネットワーク設計・制御技術

代表研究者 高野知佐 広島市立大学 情報科学研究科 准教授

1 はじめに

IoT時代の到来に向け、Web、ストリーミング、ソーシャルネットワーキングサービス(Facebook, Twitter等)等の情報だけでなく、車や家電等の「モノ」から発生する膨大な量の情報がネットワーク上で交換されると予想されている。IoT環境に必要なサービスレベルをサポートする技術として、SDN (Software Defined Networking)を適用したネットワーク仮想化技術が注目されており[1]、SDNを実現する方法の1つとして、既存のネットワーク機器を用いて目的に応じた仮想的ネットワーク(論理ネットワーク)を構築するオーバーレイ方式が提案されている。本研究では、超スマート社会での円滑なサービス提供に影響を与えるDDoS攻撃のような脅威に対して、情報ネットワークにおけるオーバーレイ構築技術を使ってDDoS攻撃の影響を削減するシステムを提案し、その有効性を評価する[2][3][4]。この課題については2章で説明する。

また、スマートフォンやタブレット端末などモバイルデバイスの普及を背景に「個人間のコミュニケーション」に基づく情報交換が活発化している。このような背景のもと、情報ネットワークの安定運用を図るためには、情報ネットワークを対象とした設計・制御技術の検討だけでは不十分であり、情報ネットワークと相互作用しているオンライン社会ネットワーク(ユーザネットワーク)の構造も含めた「情報ネットワークとオンライン社会ネットワークのオーバーレイモデル」を意識した検討が不可欠である(図1)。3章では、オンライン社会ネットワーク上のアクティビティの伝播を記述するためのモデルをスペクトラルグラフ理論の観点から検討し、この提案モデルの拡張概念を示す[5][6][7]。



図1 オンライン社会ネットワークを含めたオーバーレイモデル

2 情報ネットワークにおけるオーバーレイ構築技術を利用したDDoS攻撃緩和システム[2][3][4]

2.1 あらまし

コンテキストウェアなサービスの提供や消費者生活の利便性向上のため、IoT機器でのデータ収集や消費者の要求に対してきめ細やかな対応を行うクラウドサービスなど常時通信を行うサービスが創出され、周りのあらゆるモノが高機能化(スマート化)した超スマート社会[8]が今後到来すると言われている。インターネットにつながる家電やセンサなどIoT機器の増加とともに、既にIoT機器をターゲットにしたMirai[9]のようなマルウェアの出現が影響してDDoS(Distributed Denial of Service)攻撃が問題となっている。今後、IoT機器の爆発的な増加に伴ってDDoS攻撃は業務停止にもつながる深刻さを増す一方、消費者が安心してスマートな生活をおくるためには、このような脅威に対して早急な対策を検討しておく必要がある。

本課題では、サービスの packets 損失を防ぐために、DDoS攻撃検知後からの正規パケットの損失を防ぐシステムを提案し、その有効性を評価する。

2.2 拡散型フロー制御

拡散型フロー制御[10][11]とは、物理学における拡散現象を指導原理とし、ネットワークの輻輳回避を目

的とした自律分散型フロー制御である。エンドホスト間で経由されるネットワーク機器（以下、ノード）が隣接するノードとの相互作用のみで自律分散的に転送レートの制御を行い、バッファ使用量の平滑化を実現する。ノードの動作モデルを図 2 に示す。

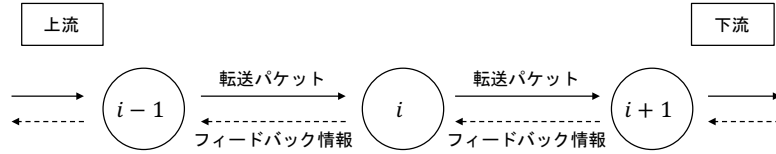


図 2 ノードの動作モデル

送信元エンドホスト側を上流、宛先エンドホスト側を下流とすると拡散型フロー制御におけるノードの動作は以下の 4 つである。

- ・ 上流ノードへ自ノードのバッファ使用量とパケットの転送レートを含んだフィードバック情報を送信
- ・ 下流ノードから送られてきたフィードバック情報を受け取り、その情報と自ノードのバッファ使用量を元にパケットの転送レートを計算
- ・ 上流ノードから送られてきた宛先宛のパケットを受け取りバッファリング
- ・ 下流ノードへ自ノードの転送レートに従って宛先宛パケットを転送

拡散型フロー制御方式では、ノード i のバッファ使用量 $n_i(t)$ と下流ノードのバッファ使用量 $n_{i+1}(t - d_i)$ の差に応じて、フィードバック情報から求める転送レート $\tilde{J}_i(t)$ は式 (1) となる。

$$\tilde{J}_i(t) = r_i(t - d_i) - D_i(n_{i+1}(t - d_i) - n_i(t)) \quad (1)$$

ただし、下流ノードから送られてきた転送レート $r_i(t - d_i)$ をフィードバック情報として用い、 d_i はノード i とノード $i+1$ 間の伝搬遅延時間、 D_i は拡散係数である。転送レートは非負の値であるということ、また使用できる帯域以下でなければならないことから、実際に利用される転送レート $J_i(t)$ は式 (2) のようになる。

$$J_i(t) = \max(0, \min(\tilde{J}_i(t), L_i(t))) \quad (2)$$

ここで、 $L_i(t)$ はノード i とノード $i+1$ 間の帯域を制御中のフロー数で割ったものであり、フロー単位で使用できる帯域を示している。本稿ではこれを使用可能帯域と呼ぶことにする。

2.3 DDoS 攻撃緩和システム

2.3.1 システムの概要

提案システムは下流での輻輳を回避するために、DDoS 攻撃緩和の対象となるネットワーク（以降、緩和ネットワーク）が連携して標的サーバ宛のトラヒックの転送レートを制御し、正規パケットの損失を防ぐものである。緩和ネットワークにて DDoS 攻撃トラヒックの転送レートを制御するために、提案システムでは大きなバッファ容量を持つ専用サーバを設置し、専用サーバに DDoS 攻撃トラヒックを経由させる。この時、専用サーバの転送レートを越えた DDoS 攻撃トラヒックのパケットはバッファリングされるが、任意の専用サーバにバッファが偏った場合バッファ溢れを引き起こす。そのため、専用サーバのバッファの偏りを防ぐために、転送レートを制御してバッファ使用率の平滑化を行い、バッファを効率的に使用する。このトラヒックの転送レート制御を以降ミチゲーションと呼び、提案するシステムでは拡散型フロー制御を応用する。

2.3.2 システムの構成

提案システムの全体構成を図 3 に示す。提案システムは各緩和ネットワーク（以下、 M_NW ）にてミチゲーションを行うバッファリングノード（以下、 bn ）、常時ネットワークを監視し、DDoS 攻撃を検知するネットワーク監視機器、 bn と連携してトラヒックを学習し、フィルタリングルールを生成する緩和装置から構成される。各 M_NW の bn 同士はオーバーレイネットワークを構成しており、隣接する bn 間で連携して下流に転送するパケットの転送レートを制御する。この「オーバーレイネットワーク」の bn のうち特に、送信元からのパケットを受信する bn を流入 bn 、最下流に位置する標的サーバにパケットを転送する bn を流出 bn と呼ぶことにする。

bn は M_NW の境界に配置することを想定しており、攻撃元から標的サーバ間の全てのルータ間に必ず bn を

設置する必要はない。標的サーバ以外へのトラフィックの影響を最小限にするために、図 4 のように bn を配置して DDoS 攻撃の検知後に標的サーバ宛の packets のみを bn に誘導する。

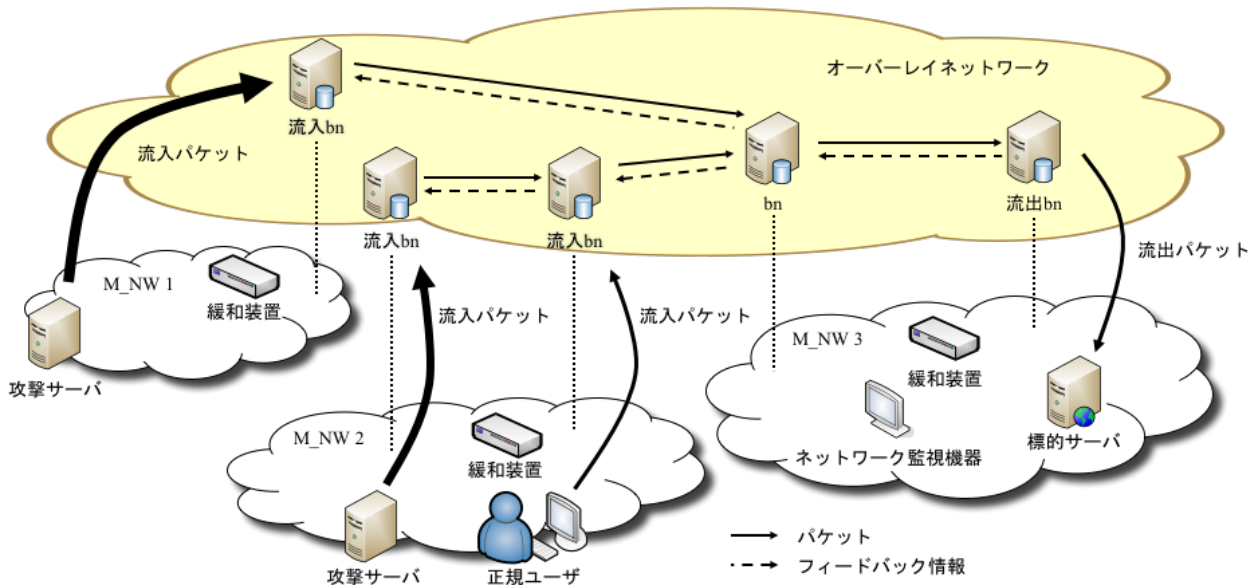


図 3 オーバーレイ構造をもつ提案システムの全体構成

2.3.3 転送レート算出式の拡張

式 (1) はノードが直列に繋がった一次元のトポロジ (フロー毎の制御) を想定し、かつバッファ使用量の平滑化を目的とした転送レート算出式である。しかし、DDoS 攻撃の送信元は複数あり、また各 bn のバッファ容量が異なることが想定されるため、提案システムでは二次元トポロジに対応し、かつバッファ使用率の平滑化を行うものとする。この 2 つの条件を満たすように式 (1) の転送レート算出式を拡張したものが式 (3) である。また、その要素を式 (4)、式 (5)、式 (6) 示す。ただし、 f をフロー番号、 i をノード番号、分散係数を $D'_{f,i}$ 、拡散係数を $D_{f,i}$ 、スケール係数を $S_{f,i}$ とすると、 $J_{f,i}(t)$ は、下流ノードから送られてきた転送レート $r_{f,i}(t - d_{f,i})$ 、バッファ使用率 $u_{f,i}(t)$ 、下流ノードから送られてきたバッファ使用率 $u_{f,i+1}(t - d_{f,i})$ 、使用可能帯域 $L_{i,j}$ より算出される。

$$\tilde{J}_{f,i}(t) = D'_{f,i} * r_{f,i}(t - d_{f,i}) - D_{f,i} * S_{f,i}(u_{f,i+1}(t - d_{f,i}) - u_{f,i}(t)) \quad (3)$$

$$J_{f,i}(t) = \max(0, \min(\tilde{J}_{f,i}(t), L_{f,i})) \quad (4)$$

$$D'_{f,i} = \frac{1}{\text{下流ノード } i+1 \text{ が持つ上流ノード数}} \quad (5)$$

$$D_{f,i} = \frac{1}{\text{下流ノード } i+1 \text{ が持つ上流ノード数} + 1} \quad (6)$$

また、スケール係数 $S_{f,i}$ はフロー f 、ノード i のバッファ容量とする。また、転送レート算出式の拡張に伴い、フィードバック情報も「転送レート」、「バッファ使用率」、「上流ノード数」とする。

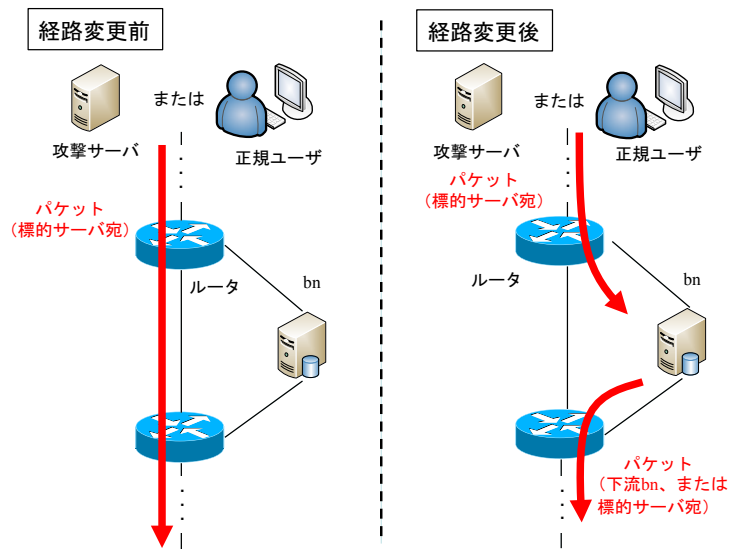


図 4 DDoS 攻撃検知後の bn へのパケットの誘導

2.4 シミュレーションによる評価

2.4.1 シミュレーションにおけるパラメータ

提案システムを評価するために、標的サーバ宛の DDoS 攻撃を開始した後、提案システムのみチゲーションを行うようなシミュレータを一台の物理マシン上に作成した。シミュレーションの流れは以下の通り

(1) 複数の送信元が標的サーバ宛に DDoS 攻撃を開始 (2) 全送信元からのパケットが標的サーバに到達したことをトリガーに、流出 bn にみチゲーション通知を送信 (3) みチゲーション通知を受け取った bn はみチゲーションを開始するとともに、上流 bn にみチゲーション通知を送信

シミュレータの入力パラメータを表 1 に示す。

表 1 シミュレーションパラメータ

パラメータの種類	値		
	測定(1)	測定(2)	測定(3)
bn 数	60	60	60
DDoS 攻撃送信元数	20	20	20
攻撃トラフィック送信レート [pps]	5.0×10^2	1.0×10^5	1.0×10^5
流出 bn 送信レート [pps]	1.0×10^4	1.0×10^4	1.0×10^4
bn のバッファ容量 [packet]	2.0×10^6 ~ 6.0×10^6	1.0×10^5 ~ 16.0×10^6	2.0×10^6
bn 間使用可能帯域 [pps]	1.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^6
bn 間の伝搬遅延時間 [ms]	10	10	10
フィードバック情報送信間隔 [ms]	10	10	10

2.4.2 バッファ使用率の効率化に関する評価

10 パターンのトポロジでのバッファ使用率の分散の経時変化を図 5 に示す。

トポロジ 10 パターンの全ての分散がシミュレーション開始後数秒で下降し、その後は横這い、もしくは緩やかに減少している。このことから、バッファ容量のばらつきの大きさにかかわらず、拡張した転送レート算出式を用いることで各 bn のバッファ使用率の平滑化を数秒で行うことができることがわかった。一方で、バッファ使用率の初期値やトポロジの違いに関わらず、バッファ使用率の分散がある一定値から下降しないことも判明した。[12]では 30 秒以内に対策を開始できることが示されているが、提案システムは数秒でバッファを平滑化できており、みチゲーションによりパケット損失の発生を遅らせることが可能なため、通信セッションの維持や提供サービス継続に有効である。

次に上流側と下流側の bn のバッファ使用率について調査した。平滑化後のバッファ使用率の分散値が最も大きかったトポロジにおいて特徴的な 2 つのフロー（フロー1、フロー2）を選択し、30 秒経過時の各 bn のバッファ使用率を図 6 に示す。横軸は流出 bn（最下流 bn）からの深さ（ホップ数）を表し、フロー1 およびフロー2 の流入 bn（最上流 bn）はそれぞれ深さ 4 および 6 に位置する。

ただし、DDoS 攻撃を想定して測定(1)の攻撃トラフィック送信レートを 200 倍にし、全攻撃トラフィック送信レートの合計が流出 bn 送信レートに比べて高い状況で同様の測定を行った。

図 6 のフロー1 より、最上流の bn と最下流の bn のバッファ使用率の差が 10% 程度あり、全攻撃トラフィック送信レートの合計が大きいほど上流と下流の bn のバッファ使用率に差が出ることが分かった。他の 9 つのトポロジで同様の測定を行ったところ、バッファ使用率の差はトポロジごとに異なるが同じ傾向が見られ

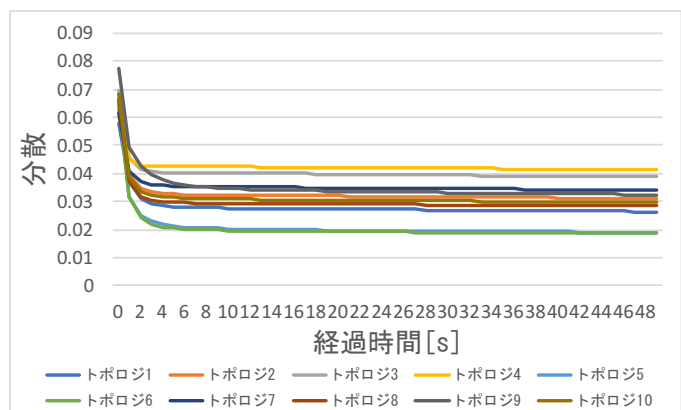


図 5 バッファ使用率の分散の経時変化

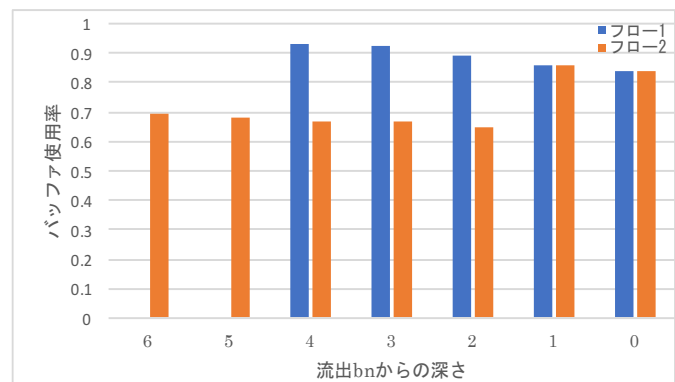


図 6 フロー毎の bn のバッファ使用率

た。フロー2に関してはバッファ使用率の高いフローと合流するbnのバッファ使用率が高くなっていることが確認できる。これらの結果より、上流と下流のbnのバッファ使用率の差は全攻撃トラフィック送信レートの合計とトポロジに依存することが分かった。

2.4.3 バッファ容量の総量の違いに関する評価と結果

パケット損失時の全bnの平均バッファ使用率を示す。図7より10パターンのトポロジ全てにおいて、bnのバッファ容量が大きいほどパケット損失時の全bnの平均バッファ使用率が高いという結果が得られた。バッファ容量が小さな場合にパケット損失時の全bnのバッファ使用率が低い理由は、攻撃トラフィックの転送レートを制御する以前に任意のbnにてバッファ溢れを引き起こしているためである。またバッファ容量が大きいと転送レートを制御するまでの時間ができるため全bnのバッファを効率良く使用できる。攻撃トラフィックに対して大きなバッファ容量を用意することで、早期のバッファ溢れを防ぐことができ、正規パケットの損失を小さくすることができる。

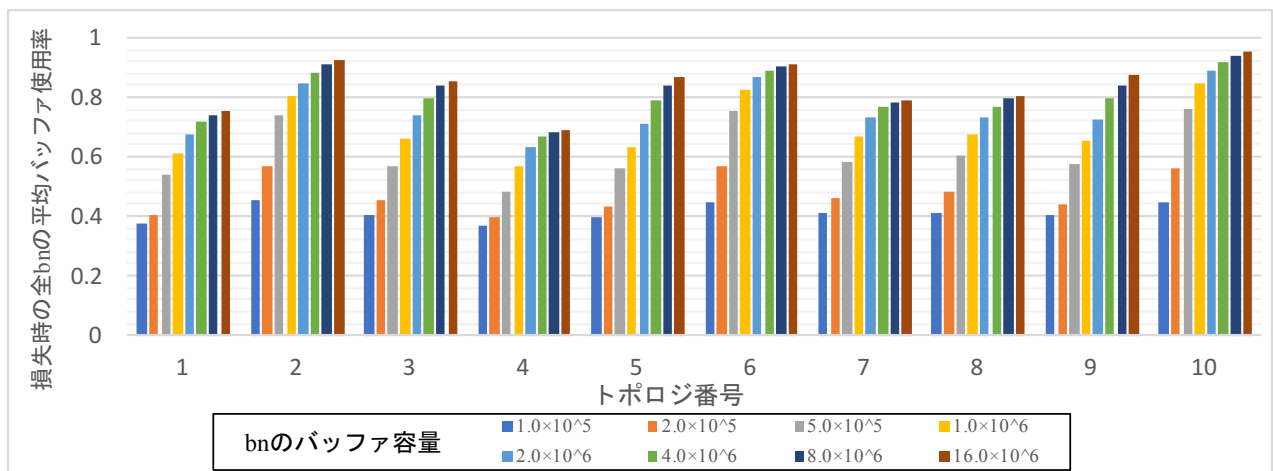


図7 パケット損失発生時のノードの平均バッファ使用率

3 オンライン社会ネットワークと情報ネットワークのオーバーレイに関する課題[5][6][7]

3.1 あらまし

近年、インターネットやクラウドコンピューティングの発展によりソーシャルメディアを利用した情報交換が活発に行われている。特にFacebookやTwitterのようなソーシャルネットワーキングサービスによる、個人との繋がりを促進する双方向コミュニケーションに対して、情報の流通やアクティビティの伝播に関するダイナミクスは興味深い研究対象となっている。我々はこれまで、ソーシャルネットワーク上のアクティビティの伝播を記述するための振動モデルを検討し、その振動エネルギーをノード中心性指標とする枠組みを提案した。このノード中心性指標は、従来の次数中心性や媒介中心性を統一的に解釈するだけでなく、多様なネットワーク状況を反映可能な一般化された指標を与える。特定の事象に対するユーザの関心が時間と共に薄れるなどの現象は、ネットワーク上の減衰振動で表現可能である。従来は減衰の強さを表す減衰係数を振動数に依らない定数としていたが、一般の振動現象では減衰係数が振動数に依存することが知られている。本課題では、ネットワーク上の減衰振動モデルを減衰係数が振動数に依存する場合について検討し、オンライン社会ネットワーク上での自然な減衰係数の様相について議論する。

3.2 オンライン社会ネットワークを表現する振動モデル

オンラインソーシャルネットワークでは、ノード（ユーザ）間に働く影響の強さは一般に非対称であるため、有向グラフを用いたモデル化が必要である。ここでは、オンラインソーシャルネットワーク上でユーザが相互に影響を及ぼし合う様子を記述する為に用いられているネットワーク上の振動モデルについて、[5][6][7]に基づいて簡単に紹介する。

ネットワーク上の振動モデルでは、ユーザの状態とユーザ間の相互作用の規則について、最も単純で普遍性のあるモデル（所謂ミニマルモデル）を前提とする。ユーザの状態は一次元の変数で記述されるものとし、時刻 t でのユーザ i の状態を $x_i(t)$ とする。但し、ユーザ数を n として $i = 1, 2, \dots, n$ である。また、全ユーザの状態を要素に持つ状態ベクトルを

$$\mathbf{x}(t) := {}^t(x_1(t), \dots, x_n(t)) \quad (7)$$

とする。

ユーザ i の状態 $x_i(t)$ は、隣接ノードから影響を受け、隣接ノードの状態との差が小さくなる方向に復元力を受ける。ユーザ i がその隣接ノード j から受ける復元力は、状態量の差に比例するとし、 $w_{ij} (> 0)$ を比例定数として

$$-w_{ij}(x_i(t) - x_j(t)). \quad (8)$$

である。

ここで、ユーザ間の影響の強さは一般に非対称であることから、一般に $w_{ij} \neq w_{ji}$ である。このとき、ユーザの状態ベクトルの運動方程式は以下のように与えられる。

$$\frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x}(t) = -\mathcal{L} \mathbf{x}(t) \quad (9)$$

\mathcal{L} は有向リンク ($i \rightarrow j$) のリンクの重みが w_{ij} で与えられる重み付き有向グラフのラプラシアン行列である。有向グラフの特別な場合として、対称化可能な有向グラフという性質の良いクラスが存在する。それは、ある正の数 m_i ($i = 1, \dots, n$) が存在して、以下の関係を満たす場合をいう。

$$m_i w_{ij} = m_j w_{ji} \quad (10)$$

このとき、ノード間に働く影響力は、ニュートンの第三法則で表現される作用と反作用の大きさが等しくなるような力学的な相互作用となる [13]。対称化可能な有向グラフのラプラシアン行列を \mathcal{L} と表すとすると、 \mathcal{L} は $\mathbf{M} := \text{diag}(m_0, \dots, m_n)$ を用いて以下の手順で実対称行列 \mathbf{S} に変換することができる。 \mathbf{S} は対角化可能で、その固有値は常に実数（しかも非負）であることがわかっている。

$$\mathbf{S} := \mathbf{M}^{+1/2} \mathcal{L} \mathbf{M}^{-1/2} \quad (11)$$

また、対称化可能な有向グラフ上の振動モデルでは、振動エネルギーがよく知られたノード中心性（度数中心性と媒介中心性を含む一般化されたノード中心性の概念を与えることが知られていて [5] [6] [7]、その値は（振動の減衰の効果がない限り）時間が経っても変化しないことがわかっている（評価例図 8）。

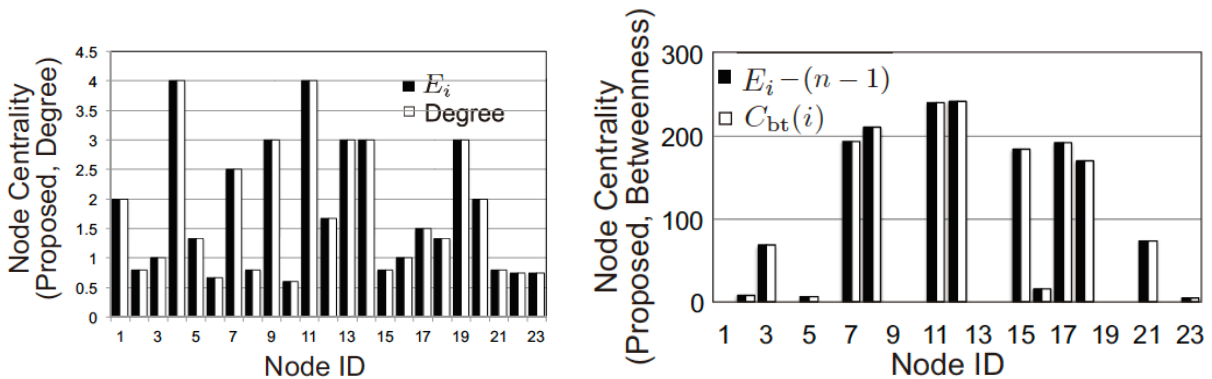


図 8 振動エネルギーと度数中心性（左）および媒介中心性（右）の比較

対称化可能ではない有向グラフでは、ラプラシアン行列の固有値が全て実数とは限らない。固有値に複素数を含む場合、振動エネルギーが発散し、ネット炎上を記述するモデルとなる [13]。

本研究では、ネット炎上のが起こらない条件として、ラプラシアン行列 \mathcal{L} の全ての固有値が実数である状況を想定する。このとき、 \mathcal{L} が必ずしも対称化可能ではないことに注意して欲しい。対角化可能な有向グ

ラフでは、固有値は自動的に実数となり、また、振動エネルギーによりノード中心性が自然に定義できる。一方、対称化可能ではない有向グラフであって、ラプラシアン行列の固有値が全て実数になる状況では、振動エネルギーは発散こそしないが、孤立したシステムであっても時間とともに振動エネルギー増減を繰り返すことがある。本研究の議論は、そのような場合も含め、固有値が互いに異なる実数値となるラプラシアン行列で表現される全ての有向グラフについて成り立つものである。

3.3 減衰振動モデル

身の回りの振動現象の多くは、外部から刺激を加えない限り時間とともに減衰していく。ネットワーク上の振動モデルも、減衰の効果を取り入れることができる。減衰の効果を取り入れるために、ノード間の復元力に加えて、 $\mathbf{x}(t)$ の変化速度に比例して抵抗力がかかる振動モデルを考える。

ノード間に生じる抵抗力の強さがネットワーク上のどのリンクでも同じだとすると、減衰振動の運動方程式は

$$\frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x}(t) + \gamma \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = -\mathcal{L} \mathbf{x}(t) \quad (12)$$

となる。ここで $\gamma (\geq 0)$ は正の定数で減衰係数と呼ぶ。工学的な立場からは、社会ネットワーク構造を表すラプラシアン行列 \mathcal{L} は n 個の異なる固有値 λ_μ ($\mu = 0, 1, \dots, n-1$) を持つとして良いため、 \mathcal{L} は対角化可能であると仮定することができる。ラプラシアン行列 \mathcal{L} の固有値 λ_μ に属する固有ベクトルを \mathbf{v}_μ とすると、 $n \times n$ 行列 $\mathbf{P} := \text{diag}(\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{n-1})$ を用いて \mathcal{L} を

$$\mathbf{\Lambda} := \mathbf{P}^{-1} \mathcal{L} \mathbf{P} \quad (13)$$

により対角化することができ、 $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1})$ である。

減衰振動の運動方程式 (12) に対して、 \mathcal{L} を対角化するように書き直すと

$$\frac{d^2}{dt^2} \boldsymbol{\psi}(t) + \gamma \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}(t) = -\mathbf{\Lambda} \boldsymbol{\psi}(t) \quad (14)$$

となる。ここで、

$$\boldsymbol{\psi}(t) := \mathbf{P}^{-1} \mathbf{x}(t) \quad (15)$$

である。変換した運動方程式 (14) は n 個の独立な微分方程式に分解されている。つまり、ベクトル $\boldsymbol{\psi}(t)$ の成分を $\boldsymbol{\psi}(t) = (\psi_0(t), \psi_1(t), \dots, \psi_{n-1}(t))$ としたとき

$$\frac{d^2}{dt^2} \psi_\mu(t) + \gamma \frac{d}{dt} \psi_\mu(t) = -\lambda_\mu \psi_\mu(t) \quad (16)$$

のように、振動モード μ ($\mu = 0, 1, \dots, n-1$) 毎に独立な微分方程式を得ることができる。

3.4 固有振動数に依存する減衰係数を用いた減衰振動モデル

身の回りの振動現象は、一般に振動の減衰係数は一定値ではなく、振動数に依存することが知られている。これまで、ネットワーク上の振動モデルでは減衰係数 $\gamma (\geq 0)$ を定数としていたが、減衰係数が振動数に依存するとした場合の減衰振動モデルについて考察する。振動モードの固有角振動数 ω に対して、減衰係数は ω の関数として与えられる値 $\gamma(\omega) (\geq 0)$ であるとする。もし $\gamma(\omega)$ が定数でない場合、どのような関数形が可能であるかを考察することが本節の課題である。

振動モード μ 毎に分解した運動方程式 (16) を出発点にし、減衰係数を振動モードの関数として以下のように拡張する。

$$\frac{d^2}{dt^2} \psi_\mu(t) + \gamma(\omega_\mu) \frac{d}{dt} \psi_\mu(t) = -\lambda_\mu \psi_\mu(t) \quad (17)$$

式 (14) と式 (16) の関係に倣って、振動モード毎の運動方程式 (17) を行列を用いて表現すると

$$\frac{d^2}{dt^2} \boldsymbol{\psi}(t) + \mathbf{\Gamma} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}(t) = -\mathbf{\Lambda} \boldsymbol{\psi}(t) \quad (18)$$

となる。ここで

$$\mathbf{\Gamma} := \text{diag}(\gamma(\omega_0), \gamma(\omega_1), \dots, \gamma(\omega_{n-1})) \quad (19)$$

である。式(14)は式(18)の特別な場合で $\mathbf{\Gamma} = \gamma \mathbf{I}$ となる場合である。但し、 \mathbf{I} は $n \times n$ の単位行列である。

減衰係数 $\gamma(\omega)$ の固有振動数 ω 依存性を調べることは、減衰振動の運動方程式 (18) において、対角行列 $\mathbf{\Gamma}$ の成分をどのように選ぶべきか、という問題に帰着される。この問題に対して、次の条件を採用することは自然である：

(条件) ノード間に働く減衰力は、元々の社会ネットワーク構造においてリンクが存在するノード間のみを生じる。

上記の考え方に基いて対角行列 $\mathbf{\Gamma}$ の可能性を考察するために、式(18)の右辺に現れる $\mathbf{\Lambda}$ を元のラプラシアン行列 \mathcal{L} に戻すように変換すると、以下を得る。

$$\frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x}(t) + (\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1}) \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = -\mathcal{L} \mathbf{x}(t) \quad (20)$$

このことから、減衰項に現れる行列 $\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1}$ について、非対角成分が非負のノードペアには、必ず元の社会ネットワークのリンクが存在しなければならない。つまり、

$$(\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1})_{ij} \neq 0 \Rightarrow (\mathcal{L})_{ij} < 0 \quad (21)$$

である。どんなネットワークトポロジの場合にも上記条件を満たすパターンが二つ存在する。

(1) $\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1}$ が単位行列の定数倍の場合、比例定数を γ とすると、

$$\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1} = \gamma \mathbf{I}.$$

これは、 $\mathbf{\Gamma} = \gamma \mathbf{I}$ に対応し、従来の減衰振動の方程式(12)となる。

(2) $\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1}$ がラプラシアン行列の定数倍の場合、比例定数を γ とすると、

$$\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1} = \gamma \mathcal{L}.$$

これは、 $\mathbf{\Gamma} = \gamma \mathbf{\Lambda}$ となるときに対応し、減衰係数の ω 依存性は以下のとおりである。

$$\gamma(\omega) = \gamma \omega^2 \quad (22)$$

3.5 評価

本章では、簡単なネットワークモデルを使って3.4節での述べた条件を満たす減衰係数のパターンを評価する。図9は評価に利用するネットワークグラフである。図中の丸中に書かれた数字はノードIDであり、リンク横に書かれた数字はリンクの重みを表す。リンク(1→4)とリンク(4→1)は存在しないことに注意。この非対称ネットワークは対称化することが可能で、ラプラシアン行列 \mathcal{L} は以下のとおりである。

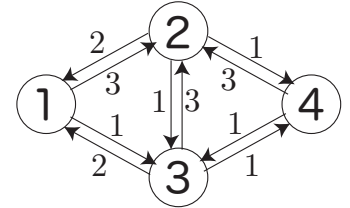


図9 単純な社会ネットワークグラフ (オリジナル)

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} 4 & -3 & -1 & 0 \\ -2 & 4 & -1 & -1 \\ -2 & -3 & 6 & -1 \\ 0 & -3 & -1 & 4 \end{bmatrix} \quad (23)$$

明らかに(1,4)成分および(4,1)成分が0である。この行列の対角行列 $\mathbf{\Lambda}$ は

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

であり、対角成分はラプラシアン行列の固有値になる。ラプラシアン行列 \mathcal{L} の固有ベクトルから構成され

る行列を \mathbf{P} とすると,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.206 & -0.566 & -0.447 & -0.500 \\ -0.481 & 0.425 & 0.000 & -0.500 \\ 0.827 & 0.425 & 0.000 & -0.500 \\ 0.206 & -0.566 & 0.894 & -0.500 \end{bmatrix} \quad (25)$$

対角行列 $\mathbf{\Gamma}$ が固有振動数 $\omega_\mu (= \sqrt{\lambda_\mu})$ に依存した成分をもつとき, 例えば $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(\sqrt{\lambda_0}, \sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_{n-1}})$ のとき,

$$\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.675 & -1.133 & -0.378 & -0.163 \\ -0.756 & 1.512 & -0.378 & -0.378 \\ -0.756 & -1.133 & 2.268 & -0.378 \\ -0.325 & -1.133 & -0.378 & 1.837 \end{bmatrix} \quad (26)$$

となり, オリジナルの社会ネットワークでは存在しなかったリンクが現れる.

一方で, $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1})$ のとき,

$$\mathbf{P}\mathbf{\Gamma}\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} 4.000 & -3.000 & -1.000 & 0.000 \\ -2.000 & 4.000 & -1.000 & -1.000 \\ -2.000 & -3.000 & 6.000 & -1.000 \\ 0.000 & -3.000 & -1.000 & 4.000 \end{bmatrix} \quad (27)$$

となり, ラプラシアン行列 \mathcal{L} と等しくなる.

4 まとめと今後の課題

情報ネットワーク内でのオーバーレイモデルとして, DDoS 攻撃の影響を緩和するシステムを提案した. 提案 DDoS 攻撃緩和システムは ISP 間で連携し DDoS 攻撃トラヒックを制御することで正規パケットの損失を防ぐことができる. 実験的評価により, 提案の緩和システムは拡散型フロー制御を用いたことで, ネットワーク全体の状況を一元管理することなく, 自律的に DDoS 攻撃の緩和をすることができることを示した. また, ネットワーク内に設置する緩和用のバッファリングノードはバッファ容量が異なる場合も数十秒以内に平滑化できることから, ネットワークに設置するバッファリングノードの制約も小さい. ただし, バッファリングノードのバッファ容量が小さい場合やトポロジの違いによってバッファ溢れが早期に発生する可能性があるため, バッファ容量の設定やトポロジの構築方法は今後の検討課題である.

さらに情報ネットワークに跨るオーバーレイとしてのオンライン社会ネットワークのダイナミクスを減衰振動モデルを使って記述し, 減衰係数の決定指針について述べた. 今後は実ネットワークをモデルとした情報ネットワークとオンライン社会ネットワークを対象に, レイヤ間の相互作用について検討する予定である.

【参考文献】

- [1] 総務省, 情報通信白書 H27, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h27.html>.
- [2] 平空也, 高野知佐, 前田香織, “拡散型フロー制御を用いる DDoS 攻撃緩和システムの提案,” 電子情報通信学会 信学技報, vol. 117, no. 173, CCS2017-29, pp.51-56, 2017.
- [3] 平空也, 高野知佐, 前田香織, “拡散型フロー制御を用いる DDoS 攻撃緩和システムの評価,” 電子情報通信学会 信学技報, vol. 117, no. 294, IA2017-23, pp.1-6, 2017.
- [4] 平空也, 高野知佐, 前田香織, “拡散型フロー制御を用いる自律分散的な DDoS 攻撃緩和システム,” 情報処理学会「超スマート社会を支えるコンピュータセキュリティ技術」特集論文, 9月 2018. (in press)
- [5] Chisa Takano and Masaki Aida, “Underlying mechanism of different node centralities based on oscillation dynamics on networks,” IEICE Transactions on Communications, vol. E101-B, no. 8, August 2018. (in press)
- [6] 高野 知佐, “ネットワーク上の振動モデルによるノード中心性の拡張 ~ ノード中心性の統一的な理解に向けて ~,” 電子情報通信学会 情報通信マネジメント研究会, vol. 117, no. 388, pp. 49-50, 2018年 1月. (招待講演)
- [7] Chisa Takano and Masaki Aida, “Fundamental framework for describing various node centralities using an oscillation model on social media networks,” IEEE ICC 2017, Paris, France, May 21-25, 2017.
- [8] 文部科学省:平成 28 年版科学技術白書, 2016.
- [9] <http://jvn.jp/ta/JVNTA95530271/>
- [10] 住達郎, 高野知佐, 会田雅樹, 石田賢治, “拡散方程式に基づく自律分散的輻輳制御技術の実証実験,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J95-D, no. 12, pp. 2048-2058, 2012.

- [11] 高野知佐, 山内正志, 会田雅樹, “拡散現象を指導原理とする自律分散フロー制御の実装に向けたアクティブフロー数計測技術の検討,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J91-B, no. 10, pp. 1254-1266, October 2008.
- [12] ARBOR NETWORKS : Arbor Networks Peakflow® 7.0 が、DDoS 攻撃検知とミティゲーションの時間を大幅に短縮, 入手先 <<http://jp.arbornetworks.com/lorem-post-3/>> (参照 2017-9-26)
- [13] Masaki Aida, Chisa Takano and Masayuki Murata, “Oscillation model for describing network dynamics caused by asymmetric node interaction,” IEICE Transactions on Communications, vol. E101-B, no. 1, pp. 123-136, January 2018.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Underlying mechanism of different node centralities based on oscillation dynamics on networks	IEICE Transactions on Communications	Aug. 2018 (発行予定)
拡散型フロー制御を用いる自律分散的な DDoS 攻撃緩和システム	情報処理学会「超スマート社会を支えるコンピュータセキュリティ技術」特集論文	2018年9月 (発行予定)
無線 LAN のアクセスポイントにおけるスループット保証を目指した TCP 受信ウィンドウ制御方式	電子情報通信学会論文誌 (B)	Feb. 2018
Oscillation model for describing network dynamics caused by asymmetric node interaction	IEICE Transactions on Communications	January 2018.
Throughput Control Method between Different TCP variants based on SP-MAC over WLAN	Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)	May 2018
Generation mechanism of flaming phenomena in on-line social networks described by perturbation of asymmetric link effects	IEEE/IFIP International Workshop on Analytics for Network and Service Management (AnNet 2018)	April 2018
TCP Characteristics Evaluation of Adaptive Throughput Control Method based on SP-MAC	The 6th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS) Poster Session	January 2018
Experimental Evaluation of TCP considering Capture Effect on WLAN	The 6th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS) Oral Session	January 2018
An Adaptive Throughput Guarantee Method based on SP-MAC for WLAN	Proc. 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017)	December 2017
Dynamical model of flaming phenomena in on-line social networks	IEEE/ACM International Conference on Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2017)	July -August 2017
Method for estimating eigenvectors of the scaled Laplacian matrix using the resonance of oscillation dynamics on networks	IEEE/ACM International Conference on Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2017)	July -August 2017
Fundamental framework for describing various node centralities using an oscillation model on social media networks	IEEE ICC 2017	May 2017
ネットワーク上の振動モデルによるノード中心性の拡張 ～ ノード中心性の統一的理解に向けて ～	電子情報通信学会 情報通信マネジメント研究会(招待講演)	2018年1月
縮退した振動モードから生じるネット炎上モデルの初期位相に関する考察	電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会 (奨励講演)	2018年1月
ランダム行列の普遍性を利用した社会ネットワーク上の情報伝搬特性の分析	電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ研究会	2017年12月
拡散型フロー制御を用いる DDoS 攻撃緩和手法の評価	電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ研究会	2017年11月
縮退した振動モードから生じる新しいネッ	電子情報通信学会 ネットワークシステム	2017年9月

ト炎上モデル	研究会	
ランダム行列を用いた社会ネットワーク上の情報伝搬特性の分析	電子情報通信学会 第 12 回 通信行動工学研究会	2017 年 9 月
Scaled Laplacian 行列に基づいた固有ベクトル中心性の考察	電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会	2017 年 8 月
拡散型フロー制御を用いる DDoS 攻撃緩和システムの提案	電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会	2017 年 8 月
確率分布を用いた IEEE802.11 無線 LAN のスループット推定手法の高速化に関する研究	電子情報通信学会 SR 研究会(招待講演)	July 2017