

機関番号：17104  
 研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：H21 年度 ～ H22 年度  
 課題番号：21700082  
 研究課題名 (和文) 大規模・複雑なネットワークの特徴を考慮したトラフィックエンジニアリングに関する研究  
 研究課題名 (英文) Study on Traffic Engineering considering the characteristics of Large-scale and Complex Networks  
 研究代表者  
 田村 瞳 (TAMURA HITOMI)  
 九州工業大学・ネットワークデザイン研究センター・助教  
 研究者番号：30423601

研究成果の概要 (和文)：本研究では、スケールフリーネットワークにおける通信の観点からの特性を明らかにし、さらに、スケールフリーネットワークにおいて特徴的なノード次数（ノードに接続するリンク数）を考慮することで、網内に少数しか存在しない高次数ノードへの過負荷を軽減しつつ、転送遅延や情報の拡散度を低下させない負荷分散のための経路決定手法を提案し、負荷分散経路制御におけるノード次数情報の有用性を示した。

研究成果の概要 (英文)：In this study, I focused on the scale-free nature of the Internet. I proposed new traffic load distribution scheme by route selection considering node degree, which is the representative characteristic of scale-free nature. I showed that most of congestion points of the scale-free network were some links attached with high-degree node, and the proposed scheme using node degree along the path was effective for reducing traffic load at some links attached with few high-degree nodes.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2010年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：トラフィックエンジニアリング, スケールフリーネットワーク

#### 1. 研究開始当初の背景

(1) 急速に発展したインターネットでは、5億4千台以上の膨大な数のノードが接続されており、複雑、かつ、大規模に成長した。近年、このインターネットの特徴として、スケールフリー性が確認された。スケールフリーネットワークでは、各ノードの次数  $k$  (他ノードとの接続リンク数) の分布がべき乗則  $P(k) \propto k^{-\gamma}$  に従い、これは少数の高次数ノード (ハブ) と多数の低次数ノードによりネットワークが構成されることを示している。

これは従来からネットワークモデルとして利用されてきたランダムネットワークとは異なり、任意の2点間の通信経路長 (ホップ数) が短く、代替経路が多い、ランダムなノード/リンク故障には強いが、ハブにおける故障/攻撃には弱い、さらに、網内の局所的な故障や異常が周囲に伝搬しやすく、カスケード故障となってネットワーク全体の機能を損なう可能性が高い。

(2) 一方、現在のインターネットでは多様なアプリケーションが展開されて通信品質

(QoS)向上に関する要求が高まっている。しかし、運用されている経路制御プロトコル(OSPF, Open Shortest Path First 等)はネットワーク状態に依存せず、送受信ノード間のコストやホップ数が最小となる経路を選択するため、一部のノードやリンクにトラヒックが集中して輻輳しやすい。そこで、負荷分散を目的としたトラヒックエンジニアリング(TE, Traffic Engineering)がこれまでに提案されている。しかし、一般的なトラヒックエンジニアリングは、変動するトラヒック量に応じて動的に経路とトラヒックとを適切に割り当てるトラヒック主導の方法であり、トラヒック量の変動状況によっては経路の切替が頻繁となり、通信品質への影響が懸念される。そこで、本研究では、トポロジ情報を利用して、トポロジとトラヒックとを効率よくマッピングすることで負荷分散を実現することについて検討する。

## 2. 研究の目的

項目1.における(1),(2)の背景の双方を考慮すると、スケールフリーネットワークでは高次数ノードへの負荷の集中が著しく、通信品質の劣化に繋がる可能性が高い。そこで、本研究では現在のインターネットにおいて、負荷分散のための経路制御を検討するために、トポロジの特徴を考慮した制御手法を提案する。そのために、まず、通信の観点からのスケールフリーネットワークの特徴を明らかにし、それを踏まえ、大規模、かつ、複雑なスケールフリーネットワークに適した負荷分散経路制御手法を提案し、その評価を通して、負荷分散のために適切なトポロジ情報、および、トポロジ情報の活用方法について明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、数千オーダーのノードにより構成される大規模かつ複雑なネットワークトポロジに関して、次の2項目についての調査や提案、評価を行う。

(1) 現在の経路制御プロトコル(Open Shortest Path First, OSPF)適用時の通信性能の調査:

① OSPFにより提供されるシングルパスを利用する場合の、様々な通信形態による輻輳箇所の調査として、全ノードペアが同時に通信する場合や、サーバが高次数ノードでそれらのクライアントが低次数ノードである場合等の様々な通信形態を想定した場合に、現在のインターネットで適用されているOSPFによる経路制御を適用するときにトポロジ上で比較的トラヒックが集中しやすい部分の特徴を調査する。特に、輻輳ノ-

ドの次数や、輻輳リンクの両端の2ノードの次数相関について、明らかにする。

② トポロジ上の経路特性(最小コスト経路の数や共有リンク/ノード)の調査として、送受信ノードペア間の経路についての特徴も調査する。ある送受信ノードペア間に複数の最小コスト経路が存在するか、またそれらの最小コスト経路が共有リンクや共有ノードを有するかについても調査を行い、複数の最小コスト経路の利用によるTEの可能性について検討する。さらに、複数の最小コスト経路が共有部分を有する場合は、共有リンク/共有ノードの次数特性について明らかにする。

(2) トポロジのスケールフリー性を考慮した新たなTEの提案と有効性の評価:  
検討項目(1)-①の調査結果を基に、トラヒックの変動状況に依存せずにトポロジの特徴を生かした新たなTEを検討する。具体的には、以下の2項目について着目する。

① 輻輳箇所のノード次数、および、リンク両端の2ノードの次数相関を利用したTEの提案として、OSPFを適用する場合に、輻輳が生じやすいノードに接続したリンクコストや、輻輳が生じやすいリンクの両端のノードが該当リンクのコストを他のリンクよりも大きく設定することにより、負荷分散のための経路作成について検討する。

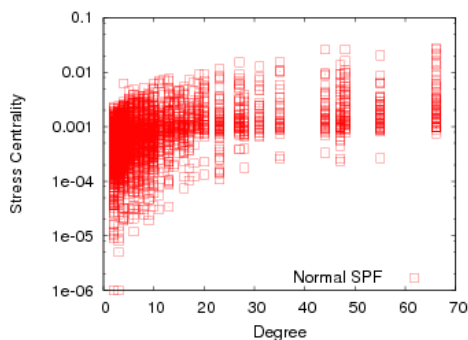
② 複数の最小コスト経路を効果的に利用するTEの提案として、OSPFによる経路作成時に複数の最小コスト経路から負荷分散に適した経路を選択する方針を検討する。具体的には、各経路が経由するノードの次数に基づいた経路選択による負荷分散を検討する。

## 4. 研究成果

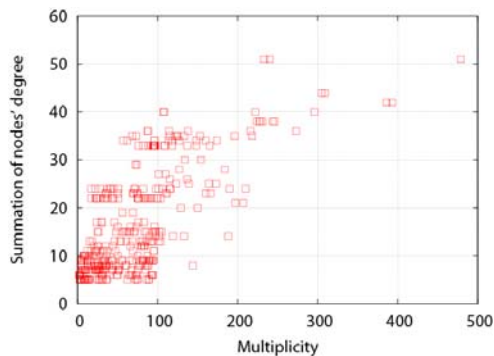
本研究では、(1)スケールフリーネットワークにおける既存インターネット経路制御による輻輳箇所とトポロジとの関係調査を行い、その結果を踏まえて(2)ノード次数を利用した最短ホップ経路選択による負荷分散経路制御手法、(3)ノード次数を利用した負荷分散のためのコスト調整リンク決定手法、の2つの負荷分散経路制御手法を提案し、計算機シミュレーションによってその有効性を評価した。

(1) スケールフリーネットワークの生成モデルとして代表的なBarabasi-Albert(BA)を対象として、既存インターネットで採用されている経路制御プロトコルである(Open Shortest Path First, OSPF)適用時の通信性能を調査した。結果から、

OSPF により選択される最小コスト経路を利用する場合、高次数ノードに接続されたリンクの一部におけるトラフィック負荷の集中度合いが著しく、その他のリンクにおける負荷は比較的少ないことを明らかにした (図 1). また, 図 2 に示すように, 負荷が集中して輻輳状態となる可能性の高いリンクにおいて, リンクの両端のノード次数は比較的大きいことも判った. さらに, スケールフリーネットワークでは任意の 2 ノード間において, コストをホップ数とした場合に最小コスト経路が複数存在することが判った.



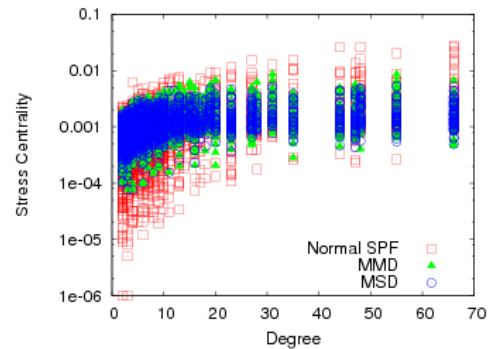
[図 1: (x 軸)リンクが接続するノード次数, (y 軸)次数  $x$  のノードに接続するリンクにおける多重経路数の全経路数における割合]



[図 2: (x 軸)各リンクにおける多重経路数, (y 軸)リンク両端のノード次数の和の関係]

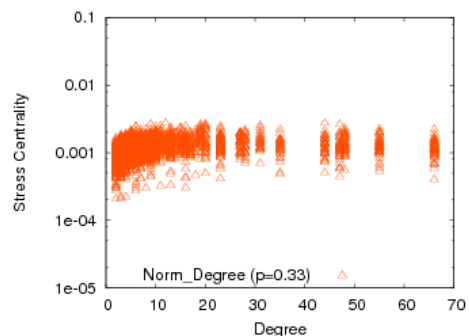
- (2) (1)の結果より, 高次数ノードに集中する可能性のあるトラフィック負荷を分散させるためには, ノード次数を考慮することが有用であると考えた. 転送遅延への悪影響について配慮し, 複数の最小コスト経路 (コスト=ホップ数と想定する) から次数を考慮して転送経路を決定する手法を考案した. 経路中の最大ノード次数が最小である経路を選択する MMD 手法, 経路上の全経路ノードの次数和を最小とする経路を選択する MSD 手法を提案した. 1000 ノードの BA モデルにおける評価結果より, MMD 手法よりも MSD 手法が有効

であることを示した (図 3).



[図 3: (x 軸)リンクが接続するノード次数, (y 軸)次数  $x$  のノードに接続するリンクにおける多重経路数の全経路数における割合]

さらに, 経路上のノード次数列に基づいてノード間距離を定義する手法を提案した. そこでは, ノード次数列に基づく  $p$  次ノルム (距離の一般的な定義) が最小となる経路を選択する手法を適用した. ここで,  $p$  次ノルムが最小となる経路については, 必ずしも最小コスト経路 (ここでは最短ホップ経路と同等) とはならない. 1000 ノードの BA モデルにおける評価結果より,  $p$  次ノルムで距離を定義することで, MSD 手法よりも負荷分散に貢献できることを示した. さらに,  $p$  の調整により負荷分散の度合いを変更でき, BA モデルに関しては  $p=0.33$  とすると最大負荷を最小化可能で, かつ, 平均経路長も最短ホップ経路利用時とほぼ同一であることを明らかにした (図 4).

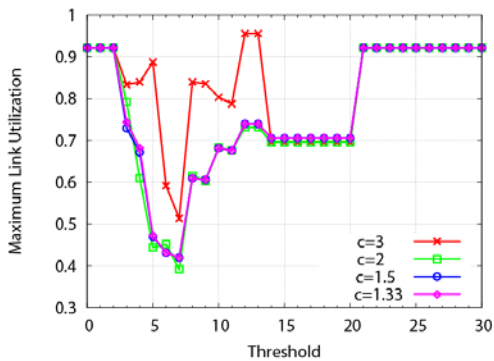


[図 4: (x 軸)リンクが接続するノード次数, (y 軸)次数  $x$  のノードに接続するリンクにおける多重経路数の全経路数における割合 ( $p$  次ノルム適用時,  $p=0.33$ ) ]

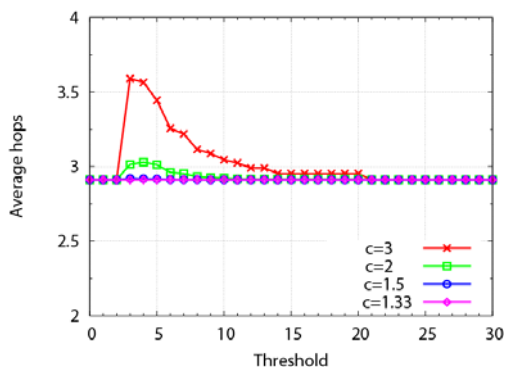
- (3) (1)の結果より, 高次数ノードに集中する可能性のあるトラフィック負荷を分散させる手法として, リンクコスト調整による OSPF トラフィックエンジニアリングの改良を行った. 具体的には, リンク両端のノード次数に応じてリンクコストを調整す

ることによって負荷分散を実現する。あるリンクにおいて、そのリンクの両端のノード次数が予め与えられた閾値  $T$  以上である場合にリンクコストを  $c$  ( $c > 1$ ) と設定する。なお、その他のリンクにおける基本のリンクコスト値は 1 と設定されているものとする。

100 ノード、および、1000 ノードの BA モデル、さらに、米国の ISP である AT&T のルータレベルトポロジを対象として評価を行った結果、適切な閾値  $T$  に設定することで網内の最大リンク利用率を約 50% に減少できることが示された (図 5)。さらに、適切な変更後リンクコストの値は、ネットワークトポロジの半径に依存し、適切なリンクコスト値に設定すれば通信ホップ数が大きく増加することがないことを示した (図 6)。以上より、比較的高い次数を有するノード同士が隣接関係にあるリンクのリンクコストを変更することで、任意の 2 ノード間のホップ数を増加させることなくネットワーク内における最大負荷を減少させ、トラヒック収容量を増加できることを示した。



[図 5: (x 軸) ノード次数に関する閾値, (y 軸) 評価対象ネットワークでの最大リンク利用率]



[図 6: (x 軸) ノード次数に関する閾値, (y 軸) ネットワーク内の全経路の平均ホップ数]

以上の提案・評価を通して、スケールフリーネットワークを対象とした負荷分散経路制

御において、ネットワークの物理トポロジから得られる情報であるノード次数は有用であることを示し、さらに、ノード次数の適用方法について様々な議論を行うことができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 田村瞳, 内田真人, 鶴正人, 尾家祐二, 「大規模ネットワークにおける負荷分散のためのノード次数を利用した経路選択指標に関する検討」, 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 110, no. 448, NS2010-241, pp. 433-437, 2011 年 3 月.
- ② 兼崎望, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, 「ネットワークトポロジ情報を利用した自律的な負荷分散のための制御対象リンク選択方式」, 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 110, no. 449, IN2010-155, pp. 67-72, 2011 年 3 月.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ndrc.kyutech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田村 瞳 (TAMURA HITOMI)

九州工業大学・ネットワークデザイン研究センター・助教

研究者番号: 30423601

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: