

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：37112

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：24700081

研究課題名(和文)通信品質を保ちネットワーク機器の電力消費量を抑制するトラフィック集約・分散経路制御

研究課題名(英文)Traffic Aggregation and Distribution Routing for Energy-Efficient Networking  
without degrading Quality of Service in the Internet

研究代表者

田村 瞳 (Tamura, Hitomi)

福岡工業大学・工学部・助教

研究者番号：30423601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、インターネットにおけるルータの電力消費量を削減しながら通信品質を低下させないようインターネットにおけるネットワークトポロジ情報を活用した経路制御手法を提案し、その省電力性能と通信性能を計算機シミュレーションにより評価した。評価結果より、ネットワーク内の各ノードにおける次数中心性(各ノードが持つリンク数)が最大のノードをいったん経由するSource Routingを用いることで、経路長の増加量を最小限にしつつ現在の経路制御手法よりも使用するリンク数やルータ数を大幅に削減できる経路制御手法により電力消費量を抑制できる可能性があることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：For energy efficient networking, the arrival traffic to the network should be efficiently accommodated to the smallest as possible number of paths in the network. This research proposed the Loose Source Routing based on a topological information, namely, degree centrality of a node, for route aggregation in intra-AS networks. Some simulation results showed the effectiveness of proposed route aggregation and power-saving performance by our proposed loose source routing via a node having maximum node degree in some controlled networks. For more detail, our proposed scheme can make about 70 percent of links sleep in the network. Furthermore, the number of hops increased in the proposed scheme is less than two hop. So, we can conclude that the energy efficient routing without degrading delay performance will be achieved.

研究分野：ネットワーク制御技術

キーワード：インターネット 経路制御 省電力化 Source Routing

## 1. 研究開始当初の背景

インターネットにおける画像・動画共有サイトの普及とスマートフォン等の高機能モバイル端末の普及により、インターネット上で交換されるデータ量は増加し続けている。そのため、バックボーンネットワークにおいてネットワーク中継機器の高性能化や増設などの対応を行っているが、これによりネットワーク機器による電力消費量が大幅に増加している。そこで現在、ネットワーク機器全体の電力消費量の削減を目的としたトラヒック制御手法に関する研究<sup>(1)</sup>が盛んであり、これまでにトラヒックの転送経路をネットワークの一部の通信経路に集約する省電力経路制御手法が多く提案されている<sup>(2)(3)</sup>。これらの提案の大部分はトラヒック主導型で、制御対象であるネットワーク内において予め決定されているトラヒック転送経路をトラヒック量に応じて切り替える手法が主流である。しかし、これらの手法ではトラヒックの発生状況によって転送経路が頻繁に切り替わる可能性があり、このような場合に通信性能への影響や消費電力を大きく削減できないことが予想される。

## 2. 研究の目的

現在提案されている省電力化経路制御手法で利用されている転送経路は、現行の最小コスト経路制御に基づく経路や、トラヒック集約を目的としてトラヒック量が多いリンクから構成された経路である。ここで利用されている最小コスト経路は、現行の転送経路決定手法に従っており、必ずしも適切な経路であるとは言えない。また、トラヒック量の多いリンクを利用する場合は、常に変化するトラヒック量に応じて経路を作成する必要があり、その実現は困難である上、実現できたとしてもトラヒック量に応じて転送経路が頻繁に切り替わることで通信が不安定になる可能性がある。

そこで本研究では、ネットワークトポロジから得られる静的な情報に基づいてトポロジに適した転送経路を利用することで、トラヒックをより効率的に収容し、効率的なトラヒックの収容によってネットワークの電力消費量の抑制にも貢献することを目的とする。具体的には、ネットワークトポロジのスケールフリー性に注目し、ネットワークトポロジから得られる情報に基づいた新たな転送経路の設定方法を提案し、手法の適用時の性能を計算機シミュレーションにより評価する。

## 3. 研究の方法

### 3.1 ネットワークトポロジの特徴量

近年の研究成果より、インターネットにお

けるルータレベル・トポロジのスケールフリー性が明らかにされている。スケールフリー・ネットワークでは、ノード次数(ノードの接続リンク数) $k$ がベキ乗則 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ に従う。これはネットワーク内に多数のリンクを有するノードが少数だけ存在する一方、少数のリンクを有するノードが多数存在する特徴を示す。また、多数のリンクを有するハブノードが存在することによりネットワーク内の任意の2ノード間の通信距離が短くなるスモールワールド性と呼ばれる性質がある。

このように、スケールフリー・ネットワークではノードが有するリンク数(次数)に特徴がある。次数中心性(Degree Centrality, DC)は、ネットワークトポロジの特徴を、次数を用いて表現する指標である<sup>(4)</sup>。

次に、近接中心性(Closeness Centrality, CC)は、あるノードを始点とした他のノードへの全最短経路の距離の平均値の逆数で定義される<sup>(5)</sup>：

$$CC(v) = \left\{ \sum_{t \in V, t \neq v} d_{vt} \right\}^{-1}$$

ここで、 $d_{vt}$ はノード $v$ からノード $t$ までのホップ数である。以上のように他のノードとの距離が近いノードほどCloseness Centralityが大きくなる。

これらの指標によってネットワークトポロジに関する情報を得て、転送経路の決定に活用する。

### 3.2 提案手法

任意の2ノード間の通信ホップ数が少ないほどその通信に関わる機器の台数が減り、電力消費量は少なくなるため、省電力経路制御において2ノード間の通信ホップ数をできる限り少なくすることは重要である。本研究ではホップ数が短くトポロジ形状から頻繁にトラヒックを転送すると予想される経路上にトラヒックを集約するため、ネットワークトポロジの特徴量である次数中心性(DC)、もしくは、近接中心性(CC)を利用した転送経路の設定方法を提案する。具体的には、ネットワーク内のすべてのノードの転送経路を、DC、もしくはCCが最大のノードを一旦経由させて宛先まで通信するものとする。DCを利用する場合は、最高次数ノードを経由することで暗にネットワークトポロジのスモールワールド性を利用して転送経路上のホップ数(中継ルータ数)を少なくすることが可能であり、CCを利用する場合は、明示的に全ノードとの平均距離が最短の経路を利用することで転送経路上のホップ数を減少させる。ホップ数を減少させるだけでなく、

DC や CC に基づいて中継ノードを経由することで転送経路の集約を可能とすることが本提案手法である。

提案手法の実現のため、Loose Source Routing を利用する。Loose Source Routing により一旦中継ノードへとトラヒックを送るときには、中継ノードから宛先までの経路として中継ノードの最小コスト経路に従う。以上のようにして、ネットワークトポロジを考慮して、ホップ数の短い経路へとトラヒックを集約することが可能となる。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 シミュレーションモデル

本研究では、実在する ISP におけるルータレベル・トポロジとして Rocketfuel<sup>(6)</sup> において計測された Sprint 社のノード数 604、リンク数 2268 のトポロジを利用する。このトポロジでは、最大 DC をもつノードは次数 44、最大 CC をもつノードは次数 42 であった。

トポロジ上で、全ノードペアが同時に通信するという最悪の状況を想定して、全ノードペア間の提案手法適用時の通信経路を求めた場合の各リンクにおける経路多重度 (Stress Centrality, SC) を性能指標とする。Stress Centrality (SC) とはあるリンク上を通過する任意の 2 ノード間の経路数で定義される：

$$SC(l) = \sum_{s \neq t \in V} \sigma_{st}(l)$$

ここで、 $\sigma_{st}(s, V, t, V)$  ( $V$  は全ノード集合) は、始点  $s$  から終点  $t$  までの経路総数、 $\sigma_{st}(l)$  は、そのうちリンク  $l$  を通過する経路数である。このように、SC は各リンクにおける経路収容数を示すことができる指標である。ここでは、全ノードペア数で SC を正規化した正規化 SC を性能指標とする。あるリンク  $l$  の SC ( $l$ ) が 1 に近いほどそのリンクが経路として利用されやすいことを示す。また、SC ( $l$ ) が 0 となったリンクは電力消費量を抑制する省電力モードに切り替えることが可能なリンクとみなすことができる。

そこで、リンク削減率を全リンク数のうち、正規化 SC が 0 となったリンク数の割合で定義する。

##### 4.2 シミュレーション結果と考察

図 1 に現行の最小コスト経路利用時のリンク毎の正規化 SC とノード次数の関係、図 2 には次数中心性および近接中心性を利用した集約経路におけるリンク毎の正規化 SC とノード次数の関係を示す。両図とも、横軸はノードの次数、縦軸はノード次数  $x$  のノードに接続する各リンクにおける正規化 SC を示す。

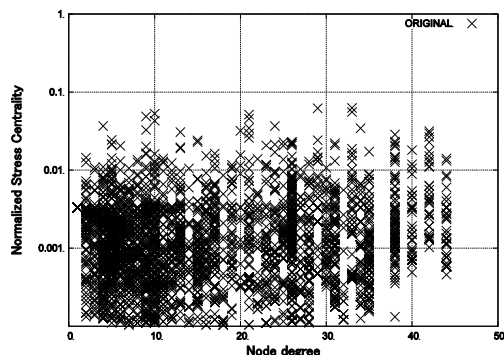


図 1 最小コスト経路適用時の正規化 SC

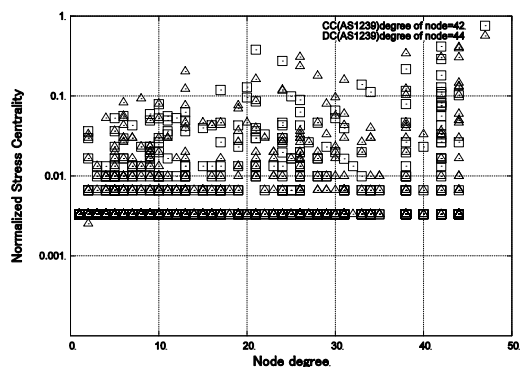


図 2 提案手法適用時の正規化 SC

図 1 と図 2 の比較より、図 2 では各次数の正規化 SC が図 1 より増加しており、特に中継ノードである次数 44、42 のノードの正規化 SC が増加していることから Loose Source Routing による経路集約ができていることがわかる。また、図 1 では、すべてのリンクにおける正規化 SC が 0 ではなかったが、提案手法では正規化 SC が 0 となるリンク数が増加し、リンク削減率は DC 最大のノードに集約した提案手法では 0.695、CC 最大のノードに集約した提案手法では 0.687 となり、トポロジ中の約 7 割のリンクを省電力モードに移転させることができるとわかった。

表 1 に本研究において調査を行った 3 種類の AS において最小コスト経路、最大 DC を持つ中継ノードを経由する Loose Source Routing、最大 CC を持つ中継ノードを経由する Loose Source Routing のそれぞれを適用した場合のリンク削減率を示す。リンク削減率は、全リンクのうち、まったく利用されなかったリンクの割合である。表 1 より、各 AS において現行の最小コスト経路適用時は正規化 SC が 0 となるリンクが存在しなかったが、Loose Source Routing を適用することでリンク削減率を最小で 66%、最大で 87% と大幅に増加させることができた。

また、表 2 には表 1 の経路制御手法適用時の各トポロジにおける平均ホップ数を示している。表 2 より、最小コスト経路利用時と

比較して、最大 DC を経由する場合は平均ホップ数が 2 ホップ程度増加するが、最大 CC のノードを經由する場合は平均ホップ数が 1 ホップ程度減少している場合がある。よって、提案手法により転送遅延時間を減少できる可能性がある。

しかし、各ノードの DC、および、CC の計算に必要な計算量について考慮すると、次数中心性である DC は各ノード自身が即座に得ることが可能な指標である一方、自身を始点とする他のノードへの全経路のホップ数の情報が必要となる CC では、全経路を計算する計算量が必要であり OSPF を用いる場合、その計算量は  $O(M \log N)$  ( $M$  はネットワーク内のリンク数、 $N$  はネットワーク内のノード数) となる。どちらの指標を用いてもほぼ同等の省電力性能が得られるのであれば、指標の計算量が少ない次数中心性を用いた Loose Source Routing による経路集約手法は実ネットワークにおける実現性が高く、省電力経路制御において有効である。

以上のとおり、本研究では提案手法の適用によってトラフィック集約を行い、ネットワーク内で利用されていないリンク数を増加させて省電力化に貢献できることを示した。また、トラフィック集約経路の増加ホップ数は 2 ホップ以内となり、転送性能への悪影響を抑制することができた。以上より、提案したノード次数を利用する Loose Source Routing のネットワーク省電力化への有効性を示すことができた。

#### < 引用文献 >

- (1) M. Gupta, S. Singh, "Greening of the Internet," ACM SIGCOMM 2003 (2003).
- (2) A. Cianfrani, et. al., "An Energy Saving Routing Algorithm for A Green OSPF protocol," Proc. IEEE Infocom '10 (2010)
- (3) J. Restrepo, et. al., "Energy Profile Aware Routing," Proc. IEEE GreenComm '09 (2009)
- (4) H. Zhuge and J. Zhang: "Topological centrality and its e-Science applications", Journal of the American Society for Information Science and Technology, Vol.61, Issue 9, pp.1824-1841 (2010)
- (5) A. Shimbel, "Structural parameters of communication networks," Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 14, no. 4, pp. 501-507, Dec. 1953.
- (6) N. Spring, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Measuring ISP topologies with rocketfuel," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 12, pp. 2 - 16, Feb. 2004.

表 1 各トポロジにおけるリンク削減率

評価対象トポロジ	最小コスト経路	DC を利用した経路集約	CC を利用した経路集約
AS1239	0	0.693	0.687
AS3356	0	0.872	0.876
AS7018	0	0.66	0.636

表 2 各トポロジにおける平均ホップ数

評価対象トポロジ	最小コスト経路	DC を利用した経路集約	CC を利用した経路集約
AS1239	4.17	6.05	3.35
AS3356	5.03	8.35	4.43
AS7018	3.35	6.79	4.35

#### 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)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 上村 尚史, 田村 瞳, 「トポロジ情報を考慮した Loose Source Routing によるネットワーク省電力化の検討」, 電子情報通信学会 九州支部 学生会講演会, 2014 年 9 月 20 日 (鹿児島大学).
2. 上村 尚史, 田村 瞳, 「トポロジ情報を用いた Loose Source Routing によるネットワーク省電力経路制御の性能評価」, 情報処理学会 九州支部 火の国情報シンポジウム 2015, 2015 年 3 月 5 日 (佐賀大学).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/elec/lab/tamuralab/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

田村 瞳 (TAMURA, Hitomi)  
福岡工業大学・工学部・助教  
研究者番号: 30423601