

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00131

研究課題名(和文) 時間/空間ダイナミクスを考慮した統括的トラフィックエンジニアリングの評価と実現手法

研究課題名(英文) Study on Temporal/Spatial Traffic Engineering for both Load Balancing and Energy Saving

研究代表者

川原 憲治 (Kawahara, Kenji)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：40273859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：インターネットの普及やIoTによる情報量の増加に伴い、トラフィックエンジニアリングの重要性は高まっている。その本質は、1)個々のトラフィックの要求品質を満たしつつ、2)ネットワーク資源を有効に活用する、ことであるが、収容トラフィック量の減少時には、2')トラフィックを集約して低利用ネットワーク資源を遮断、することで省電力化を図る。

本研究課題では、トラフィック発生ノード群の空間的なダイナミクス、および、発生時点や送信量の時間的なダイナミクスを考慮し、余剰資源を遮断する省電力TE、もしくは、転送品質の充足を優先する輻輳緩和TEを行う統括的な手法を提案し、その実現技術を評価した。

研究成果の概要(英文)：In IoT(Internet of Things), the number of network devices are rapidly increasing for dealing with a huge amount of traffic, so that Traffic Engineering (TE) has still been the important issue, 1) to satisfy the QoS(Quality of Service) of each traffic, and 2) to utilize some network equipments efficiently, or 2) to shut down some equipments of relatively low utilized for energy saving.

In this study, we firstly proposed the "totally controlling" TE for load balancing and congestion avoidance when network traffic gets high whereas for network greening with low traffic with considering both the spatial dynamics of source nodes and the temporal dynamics the amount of traffic in networks, and investigated the method for realizing the concept of spatial TE by using Multi-Path TCP(MPTCP) and for achieving energy saving of low utilized routers/APs without transmission performance degradation by temporally tune some parameters on TCP.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：トラフィックエンジニアリング 輻輳制御 省電力化 マルチパスTCP IoT 省電力TCP

### 1. 研究開始当初の背景

ネットワークにおいて送受信ノード間のトラフィック到達可能経路が複数あり、かつ、収容トラフィック量が増加した時、

1) 収容トラフィックの要求 QoS(Quality of Service)を満たしつつ、

2) 複数経路を活用してネットワーク資源を有効に活用する、

ためのネットワーク構成要素の空間的配置を考慮した転送経路選択/制御をトラフィックエンジニアリング(Traffic Engineering, TE)と呼ぶが、インターネットの普及・発展、および、M2M(Machine-to-Machine)やIoT(Internet of Things)といった人間が直接的な主体でない情報(ビッグデータ)の爆発的な増加に伴いその重要性はますます高まっている。TEの実現を従来の経路制御プロトコルであるOSPFで行う場合、制御に利用するリンクコスト値の変動に伴う転送経路の不安定性が生じる恐れがあることからノード間のトランスポートプロトコルで対応することが効果的であると考えられる。

MPTCP(Multipath TCP)は、データセンタ間に複数経路を設定し、全経路上で従来のTCPのフロー制御/輻輳制御に基づく一斉転送によりスループットを向上させる目的で提案されているが、各経路、および、その構成リンクの利用状況をフィードバックし制御に反映させる機構を検討することでTEの実現に寄与すると考えられる。

無線アクセス網の増加に伴い断続性を有する経路において、時間的な転送性能をある程度許容可能なトラフィックに対する通信技術としてDTN(Delay-Tolerant Networking)の枠組みが提案されているが、アクセスポイントや中継ルータにおけるストレージを十分量実装し、かつ、経路上の転送トラフィック量の推移予測機能を付加することで、時間的なトラフィック変動を考慮したTEへの応用が考えられる。

従来のテキスト、音声、動画に加え、爆発的に増加する多様かつ膨大な量のビッグデータの収容を考慮するとネットワークの増大は避けられず、構成機器による消費電力量も増加する。日本では2006年の総発電量1兆kWh(1000TWh)の5%程度をIT関連機器が占めており、省エネ技術の進歩を考慮しても2050年には10倍程度の増加が予想されると経済産業省より報告されている。そのため、ネットワーク省電力化を検討することは非常に重要であり、NEDOでは2008年度から「グリーンITプロジェクト」の名目で研究開発費が計上されている。

長期的なトラフィック予測に基づくネットワーク設計により物理的な構成機器の設置は避けられないが、トラフィック発生ノードの空間的な変動、および、夜間トラフィック量の減少などによる短期的なトラフィック変動に基づく省電力化を意識したTE(省電力TE)は今後ますます重要となる。この省電力TE

において、従来TEの目的2)は以下のようになると考えられる。

2) 少数経路/リンク/構成機器にトラフィックを集約して低利用資源を遮断する。

### 2. 研究の目的

1.で述べた背景やこれまでの研究動向をもとに、トラフィック発生ノード群の空間的なダイナミクスや発生状況、および、ネットワーク内の収容トラフィック量の時間的なダイナミクスを考慮し、トラフィック転送品質の充足を前提として、状況に応じて存在するネットワーク資源を最大限に活用する本来のTE、もしくは、最低限の利用に留めて余剰資源を遮断する省電力TEを行う統括的な手法について検討する。具体的には、以下の項目を調査する。

(1) 時間的/空間的な省電力TEの性能解析

(2) 統括的TE問題の定式化と経路割当/利用リンク・ルータの決定アルゴリズムの提案

(3) MPTCPを活用したEnd-to-EndTEの実現手法の検討

(4) 時間/空間ダイナミクスを考慮した統括的TEの枠組みの提案と実装実験による評価

### 3. 研究の方法

(1) 時間的/空間的な省電力TEの性能解析

トラフィック量の空間的な変動、および、DTN技術を活用した中継ノードにおける強制待機による時間的な変動の双方を考慮した省電力TE手法の提案と通信トラフィック(待ち行列)理論を適用した解析的な評価を行う。

(2) 統括的TE問題の定式化と経路割当/利用リンク・ルータの決定アルゴリズムの提案

グラフ理論に基づくネットワークのモデル化を行い、本来のTEについては発生トラフィックの通信経路割当問題として、省電力TEに関してはリンク・ルータなどの通信資源削減問題として定式化し、それぞれにおいて解決のためのアルゴリズムを提案する。

(3) MPTCPを活用したEnd-to-EndTEの実現手法の検討

任意の送受信ノード間に複数転送経路(コネクション)が事前設定されている前提でスループット特性を向上するMPTCPを活用し、ネットワークの利用状況に応じたコネクションの設定手法、および、通信資源削減時の転送コネクション選択手法を検討し、MPTCPの機構に実装する。

(4) 時間/空間ダイナミクスを考慮した統括的TEの枠組みの提案と実装実験による評価

上記(2),(3)の成果をもとに、(1)で検討する時間的/空間的な省電力TE手法を発展させ、トラフィック発生状況(ネットワーク利用状況)に基づく従来TEと省電力TEの適用領域を明確にし、両者を統括的に扱う枠組みを構築するとともに、テストベッドネットワークにおける実証実験を通して、その有効性を評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 時間的 / 空間的な省電力 TE の性能解析

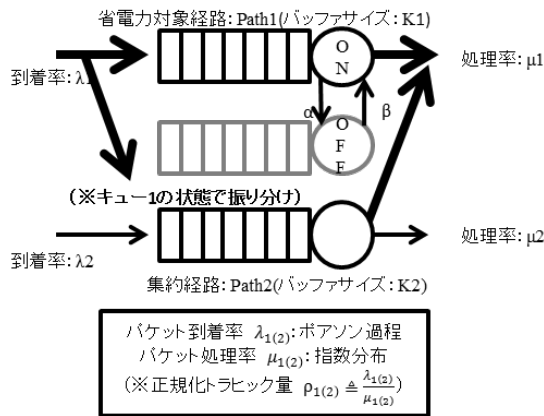


図 1 : 省電力 TE の解析モデル

図 1 に示すように送受信ノード間に 2 経路存在し、通常転送する省電力対象経路の利用状況に応じて、空間的に集約経路へ迂回、もしくは、時間的に省電力対象経路中で待機する待ち行列モデルを考案し、利用状況（各経路における滞在パケット数）に対する閾値と転送遅延やパケットロス率の関係を解析的に導出し評価した[発表、助成対象年度以前であるが、申請書類提出後の成果]。

上記の成果を基にした時間的 / 空間的な（省電力）TE をネットワーク中の中継ルータで各々独立して実現すると経路の不安定さに起因する性能劣化の恐れから、End ノード間で実現することが望ましい。そのため、時間的な省電力 TE の実現にあたりトランスポートプロトコルである TCP のフロー制御機構において、経路利用状況に応じて、

- 1) 連続パケット転送時間を待機し、転送経路の未使用時間を集約して省電力化を図り、
- 2) 連続転送パケット数を増加することで、転送待機に伴う性能劣化を解消

する省電力 TCP を既に提案しているが、その実装方法を明らかにし[発表]、経路利用状況の推定方法の提案[発表]、ならびに、2)の詳細な検討[発表]を行った。特に、無線アクセス網を経由する場合、アクセスポイント(AP)の省電力化が重要となるが、[発表]においてアクセスポイントが有するスリープ機能と省電力 TCP の連携を提案し評価した。図 2 に示すように、AP が収容するノード数の増加に伴い省電力効果は落ちるが、1)の待機時間と2)の増加数を適切に設定することにより、15~20%の改善がみられることを明らかにした。

さらに、無線アクセス網において収容ノード数が膨大で個々の転送パケットサイズは微小な IoT 環境における AP のデータ集約 / 中継方式の検討[発表]、および、障害環境における AP の移動を考慮した集約方式の評価を行った[発表]。

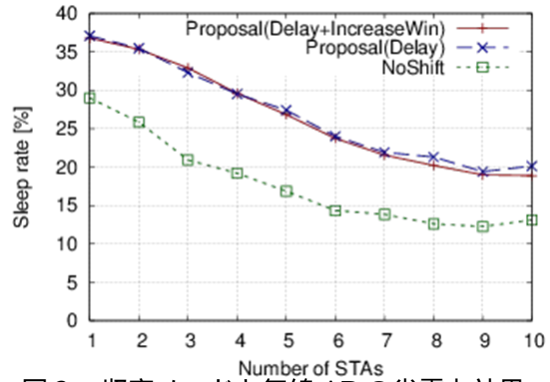


図 2 : 収容ノードと無線 AP の省電力効果

##### (2) 統括的 TE 問題の定式化と経路割当 / 利用リンク・ルータの決定アルゴリズムの提案

一方、空間的な省電力 TE の実現においては、ネットワークポロジと End ノード間のトラフィック量に依存した中継ルータ / リンク削減（省電力化）が効果的であることから、高い次数（接続リンク数）を有するルータを基点とした最短経路木を構成するリンクへのトラフィック集約、ならびに、基点ノードを複数設定 / 利用リンクの重畳によりトラフィック変動に対応する XEAR(eXtended Energy Aware Routing)を提案していたが、最短経路木作成時のリンクコスト調整方法の検討[発表]を行った。さらに、ネットワーク省電力問題としての定式化を行い、基点ノードの選択方法、最短経路木作成方法と省電力性能の関係について評価した[発表]。

##### (3) MPTCP を活用した End-to-End TE の実現手法の検討

(2)の空間的な省電力 TE の定式化や評価は、中継ルータ間の連携により事前に利用リンクを決定して経路制御を行うことを前提としているが、(1)で述べたようにトラフィック転送の安定性を考慮すると、送受信ノード間による End-to-End 制御であることが望ましい。しかしながら従来の TCP では、トラフィック転送要求に対して事前に単一経路にコネクションを設定して通信するため、利用リンクの変動への対応や複数経路を想定した空間的な TE の実現は困難である。一方、そのオプションとして提案されているマルチパス TCP(Multi-Path TCP, MPTCP)は、複数コネクションを設定して同時利用することによりスループットの改善や耐故障性の保証が可能となるが、ネットワーク状況に応じて転送経路集約 / 分散する機能を付加すれば End-to-End の空間的 TE を実現できる。

そこで、[発表]においてシミュレーションにより省電力化可能であることを評価し、[発表]においてテストベッドネットワークにおいて必要機能の整理と簡易な実装による実現可能性を示した。

(4) 時間 / 空間ダイナミクスを考慮した統括的 TE の枠組みの提案と実装実験による評価

(3) において、MPTCP を適用した End-to-End の空間的省電力 TE の実現方法を明確にしたが、ネットワーク内のトラフィック量が高い場合は、MPTCP 本来の目的である複数経路を同時利用した負荷分散による輻輳回避やスループット向上が必要となる。そのため、MPTCP で確立された複数経路の利用状況を観測し、

- 1) 低利用状況では、少数経路による集約転送により未使用経路の省電力化を目指し
  - 2) 中利用状況では、従来 TCP で確立される単一経路転送により転送性能の改善を図り
  - 3) 高利用状況時は、複数経路への負荷分散による輻輳回避 / 緩和を実現
- する統括的 TE の枠組みを提案し、利用方針を切り替えるための経路利用率に関する閾値について調査した[発表 ]。

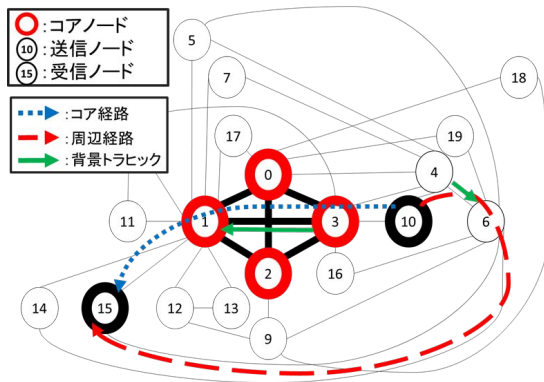


図3 : 統括的 TE の評価ネットワークモデル

さらに[発表 ]において、図3に示すようなインターネットのトポロジ特徴であるスケールフリー性を有するネットワークモデルにおいて、複数の送受信ノードペアが統括的 TE を実行する場合の転送性能について評価した。図4より低利用状況時の省電力効果を改善するとともに、図5に示すように高利用状況時の負荷分散によりファイル転送時間の削減を可能とすることを明らかにした。

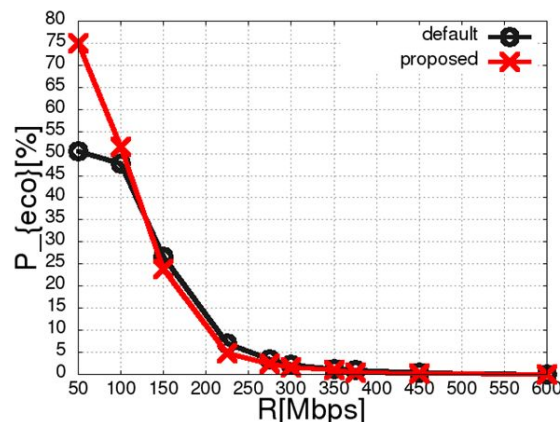


図4 : 経路利用率と省電力性能

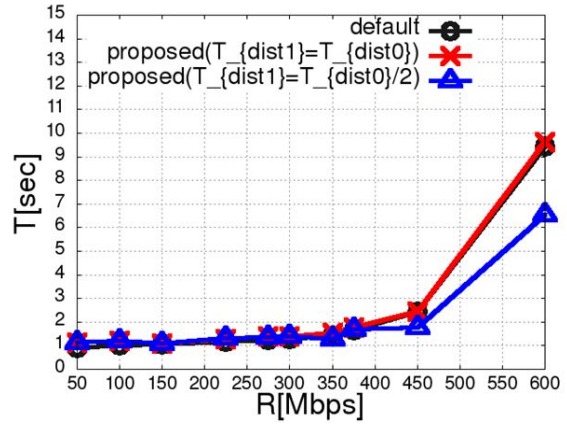


図5 : 経路利用率とファイル転送時間

以上より、時間的 / 空間的ダイナミクスを考慮した「空間的な」、すなわち、複数経路を利用した統括的 TE の実現手法の確立とその評価は達成されたと考えられるが、その枠組みに(1)で提案した「時間的な」、すなわち、待時させる機能を組み込んだ方式の確立には至っていないため、その点を発展させる必要がある。

さらに、統括的 TE の枠組みの提案と性能評価は行っているが、その実現のためには、(MP) TCP のフロー制御機構内において効果的な経路利用状況の計測 / 推定が必要であり、新規通信時や下部ネットワーク構造の変化に伴う複数経路の自動的な確立 / 再確立方式について検討する必要がある。

## 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 14 件 )

菅沼 昂平, 川原 憲治, " 劣悪な無線環境における能動型アクセスポイント位置制御, " 2018 年電子情報通信学会総合大会, B-7-3, 2018 年 3 月 20 日 ~ 23 日, 東京電機大学. ( 査読無 )

柳瀬 亘汰, 川原 憲治, " 無線アクセスポイントにおけるスリープ制御のための省電力 TCP, " 電子情報通信学会技術研究報告, IN2017-115, 2018 年 3 月 1 日 ~ 2 日, 宮崎県フェニックスシーガイアリゾート. ( 査読無 )

波左間 貴大, 川原 憲治, " マルチパス TCP を適用した End-to-End 空間的統括 TE の性能評価, " 電子情報通信学会技術研究報告, IN2017-96, 2018 年 3 月 1 日 ~ 2 日, 宮崎県フェニックスシーガイアリゾート. ( 査読無 )



波左間 貴大, 川原 憲治, "マルチパス TCP を利用した End-to-End 空間的統括 TE," 2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-7-18, 2017 年 9 月 12 日 ~ 15 日, 東京都市大学. (査読無)

柳瀬 巨汰, 川原 憲治, "省電力 TCP における動的ウインドウサイズ増加制御方式の検討," 2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-7-17, 2017 年 9 月 12 日 ~ 15 日, 東京都市大学. (査読無)

頼近 惇志, 川原 憲治, "省電力経路集約における転送性能を考慮した利用リンク決定アルゴリズム," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2016-162, 2017 年 3 月 2 日 ~ 3 日, 沖縄県残波岬口イヤルホテル. (査読無)

野田 暁彦, 川原 憲治, "省電力 TCP における動的セグメント転送移行とウインドウサイズ増加のための経路利用率推定方法," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2016-148, 2017 年 3 月 2 日 ~ 3 日, 沖縄県残波岬口イヤルホテル. (査読無)

伊東 拓海, 川原 憲治, "Multi-Path TCP を利用した End-to-End 省電力 TE の実装," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2016-146, 2017 年 3 月 2 日 ~ 3 日, 沖縄県残波岬口イヤルホテル. (査読無)

照屋 惇一, 川原 憲治, "無線網を用いた微細・大量データ収集における重複データ集約/中継方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2016-137, 2017 年 3 月 2 日 ~ 3 日, 沖縄県残波岬口イヤルホテル. (査読無)

荒木 雅斗, 川原 憲治, "マルチパス TCP を利用した End-to-End 空間的省電力 TE," 2016 年電子情報通信学会総合大会, B-7-31, 2016 年 3 月 15 日 ~ 18 日, 九州大学. (査読無)

高見 真, 川原 憲治, "リンク省電力化のための TCP セグメント転送移行方式の実装," 2016 年電子情報通信学会総合大会, B-7-30, 2016 年 3 月 15 日 ~ 18 日, 九州大学. (査読無)

東島 誠, 川原 憲治, "リンク帯域を考慮したルータ経路木の重畳に基づく省電力経路集約方式におけるコスト設定指針," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2015-123, 2016 年 3 月 2 日 ~ 3 日, 宮崎県フェニックスシーガイアリゾート. (査読無)

稲富 祐希, 川原 憲治, "無線ネットワークにおける微細・大量データ収容のためのデータ集約/中継方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2015-117, 2016 年 3 月 2 日 ~ 3 日, 宮崎県フェニックスシーガイアリゾート. (査読無)

山下 昌裕, 川原 憲治, "時間的/空間的省電力 TE における転送性能解析," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2014-134, 2015 年 3 月 2 日 ~ 3 日, 沖縄コンベンションセンター. (査読無)

〔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

九州工業大学 川原研究室 研究紹介

<http://nile.cse.kyutech.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原 憲治 (KAWAHARA KENJI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号: 40273859