

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500091

研究課題名(和文) ネットワーク省電力化を意識したトランスポートプロトコルの検討と実証実験

研究課題名(英文) Study and Experiment on Transport Protocol for Network Greening

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) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：これまでICT関連機器単体、もしくはネットワークシステムの機能を維持しつつ省電力化を行う方式の多くはUDP(User Datagram Protocol)、すなわち、時間的にトラフィック量の変動が少ないことを仮定している。しかし、大容量データやweb通信など利用されるTCP(Transmission Control Protocol)においては、そのフロー制御、誤り制御のメカニズムにより、断続的なトラフィック転送が発生する。本研究では、まず、ネットワーク省電力化に適した経路制御手法を調査し、そのうえで転送性能の劣化を抑えて省電力化を実現するTCPを提案、評価した。

研究成果の概要(英文)：On performance evaluation of power-saving scheme of network equipments and energy efficient routing, traffic has been assumed to UDP, namely, time variance of the amount of traffic arriving at switches/routers is relatively small. Therefore, it is effective to reduce the transmission rate on links/ports of such equipments with only the amount of traffic on them. However, by assuming TCP traffic, which has some flow/congestion control mechanism in accordance with the amount of traffic on transmission path, it results in performance degradation of due to the reduction of actual bandwidth.

In this study, we firstly investigated the effective path selection scheme for energy efficient routing and then proposed the energy-aware TCP in which data(segments) transmission is forced to delay in accordance with the utilization on its path for power-saving and the amount of transmission data(segments) is simultaneously increasing for relieving transmission performance degradation.

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：Green ICT TE(Traffic Engineering) 省電力経路制御 省電力TCP MCTCP(Multipath TCP) 媒介中心性

## 1. 研究開始当初の背景

昨今のインターネットの普及、および、ネットワーク転送帯域のブロードバンド化により、ISP・大企業・教育機関に留まらず、中小企業や SOHO などにより家庭内におけるネットワーク構築が増大している。そのため、計算機などをネットワークに収容するためのスイッチ/ルータの利用総数は莫大なもので、それらのネットワーク構成機器が消費する電力量は比例して増加している。

米国においては、2000年のネットワーク構成機器による総消費電力量が 6.05TWh、2005年の家庭内ルータやアクセス装置のみの総消費電力が 2.5TWh に達していると報告され、LAN スイッチによる電力消費がネットワーク構成機器による総電力使用の半分を占めている。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。

使用電力削減による省エネルギー対策とそれに伴う地球環境保全、すなわち greening を目指す時、省電力化を意識したネットワーク構成機器の利用のみならず、経路制御や転送方式に基づく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る。米国では IEEE の 802.3 委員会において 2006年 11月に "Energy Efficient Ethernet" Study Group を設立し、日本でも経済産業省により 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。

スイッチやルータ等の機器単体における省電力化としてリンクインターフェースの低転送帯域設定や通電 OFF がある。前者は NIC の設定転送帯域の増加に伴い消費電力も増加、特に IC の動作環境などから理論的に帯域の 3 乗に比例することが示されていることから、転送トラフィック量に応じて設定帯域を切り替える方式で、後者においては、無転送時間帯の電力消費を抑制する方式で、これまでに我々はその効果を理論的に明らかにしている。ネットワーク省電力化についても最近では国内外広く着手されており、転送経路を集約することによる使用リンクやルータの集中化によりリンクの低転送帯域設定や無使用ルータの通電 OFF を行う方式などがある。

## 2. 研究の目的

これまで ICT 関連機器単体、もしくはネットワークシステムの機能を維持しつつ省電力化を行う方式の多くは end-to-end のトラフィック転送の信頼性を提供するトランスポートプロトコルとして UDP(User Datagram Protocol)を、すなわち、時間的にトラフィック量の変動が少ないことを仮定している。しかし、大容量データや web 通信などで広く利用される TCP(Transmission Control Protocol)においては、そのフロー制御、誤り制御のメ

カニズムにより、断続的なトラフィック転送が発生する。本研究テーマでは、転送性能の劣化を抑えて省電力化を実現する TCP のメカニズムを検討・提案し、種々の機器単体やネットワーク省電力化手法との親和性を精査して、提案手法の有効性や実用性に関する実装評価を行い、最終的に省電力化を意識したトラフィックエンジニアリング (Traffic Engineering, TE) について体系化して整理することを目的とする。具体的に以下項目を検討する。

### (1) 時間的な省電力 TE

通信機器単体、および、単一経路上の通信機器の省電力化は、それら機器の利用状況、具体的には、到着トラフィック量に応じて通電 OFF、もしくは転送帯域制御することで達成できる。しかし、到着トラフィックが TCP に基づくものであるとそれらのイベントが長期的な実行転送帯域の減少につながるため転送性能の劣化を引き起こす。そのため、送信ホストにおける TCP の機構を見直し、転送性能の劣化を抑制しつつ省電力化を達成する手法を検討する。

### (2) 空間的な省電力 TE

ネットワーク規模の拡大により、ある送受信ホスト間のトラフィック転送可能経路は複数存在するが、現在のインターネットは経路ルータ数が最小となる経路を利用して転送するため、ネットワーク構成ルータや接続リンクの利用状況の多寡に関わらず万遍なく利用される。そのため、ネットワーク全体として省電力化を図るには、転送性能劣化をある程度許容して、低利用ルータ/リンクの通電 OFF を行うことが望ましい。そのような低利用箇所はネットワーク流入トラフィックの時間的な変動により特定が困難であるが、接続トポロジ情報などを利用し特定する手法を検討する。

### (3) 時間・空間的な省電力 TE

ネットワーク階層化モデルにおける機能において、(2)は第 3 層インターネット層における経路制御手法の省電力化対応、(1)はその上位第 4 層トランスポート層における転送プロトコルの省電力化対応と位置づけられる。したがって、両層における省電力 TE を効果的なものにするためには連携する必要があり、その方法について検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 時間的な省電力 TE

ある送受信ホスト間が TCP を利用してトラフィックを転送する場合、第 3 層インターネット層の経路制御により提供される経路ルータ数最小経路が利用されるが、そのフロー制御機構により送信ホストは該当経路におけるルータの利用状況に応じて転送トラフィック量を調整し、受信ホストの受信状況を受け取ることで間欠的に転送する。このフロー制御における送受信ホスト間のフィードバック機構を変更し、転送性能と省電力性能(経

路上機器の通電 OFF 可能時間) についてコンピュータシミュレーションにより明らかにする。

#### (2) 空間的な省電力 TE

まず、既存の省電力経路制御手法の効果をテストベッドネットワークにおける実装実験により明らかにする。次に、ネットワークにおける通電 OFF 可能箇所 (ルータ/リンク) の選択のために、時間的に変動する収容/転送トラヒック量とトポロジ情報から静的に導出される指標との相関を調査し、静的指標の有効性についてシミュレーションにより明らかにする。さらに、トラヒックの動的変化に追従して転送性能の劣化を抑えて省電力効果を得るための通電 OFF 可能箇所の選択アルゴリズムについて調査する。

#### (3) 時間・空間的な省電力 TE

数理的なアプローチにより、まず、空間的な省電力 TE の定量的評価のための確率解析モデルを構築し転送性能や省電力性能指標を導出する。次に、上記モデルに到着するトラヒックの時間的な省電力 TE の効果を評価可能なモデルへと拡張し、両者連携による効果について評価する。最終的に、連携実現のための TCP 機能の調査と実装実験により、その効果を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 時間的な省電力 TE

TCP 通信で利用される経路においては、その送信ホストの間欠的な転送から、その期間中の通電 OFF、すなわち、省電力化が可能である。したがって、間欠転送開始時刻を強制的に遅延することにより、経路中ルータ/リンクにおけるアイドル時間を増加することは省電力性能の改善とみなすことができる。

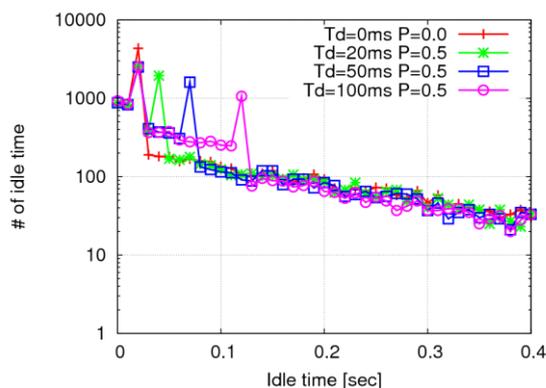


図 1: 移行時間/確率がアイドル時間分布に及ぼす影響

図 1 より移行時間 ( $T_d$ [msec]) を大きく設定するとリンクのアイドル時間のピークはその時間分移動することが明らかとなったため、

- ・セグメント間欠転送開始時に
- ・確率  $P$  にて
- ・移行時間  $T_d$ [msec]

で強制遅延するよう TCP のフロー制御機構を変更した結果、経路利用率が 10%程度以下の

場合に省電力効果が改善可能であることが示された[発表⑩]。そのため、確率的ではなく、経路利用状況に応じて転送移行を行うよう変更したところ、経路利用率が 35%程度まで省電力効果の改善がみられた[発表⑥, ④]。

しかしながら、間欠転送の強制移行回数が多くなると、その分 TCP フローの継続時間、すなわちデータ転送完了時間は長くなり、転送性能は劣化する。そこで、強制移行時の転送データ量 (セグメントサイズ) についても意図的に増加することにより、転送性能 (データ転送完了時間) の劣化を抑制しつつ、省電力性能 (経路中ルータ/リンクの通電 OFF 時間) の改善を図る TCP の実現が可能となった[発表①]。

#### (2) 空間的な省電力 TE

7 ルータ 3 送受信ホストペアで構成される小規模テストベッドネットワークを構築し、既存の省電力経路制御手法である KDDI 研 ECO-friendly Distributed Routing Protocol と富士通研 Path-based Traffic Control を実装し、その省電力効果を評価した[発表⑫]。

その結果をもとに、実際のインターネットトポロジにみられるスケールフリー性を有する 100 ルータ規模のシミュレーションにおいて、全ルータ間のトラヒック転送を仮定した場合の各リンクにおける仮想的な転送経路数 (多重度) を静的指標と定義し、その値が低いリンクは実際のトラヒック転送時の利用率も低いと考えられることから省電力化対象リンクとして通電 OFF、すなわち削除する手法を提案、転送性能 (パケット損失率) の劣化を抑制しつつ削除リンクの増大、すなわち、省電力効果の改善が可能であることを示した[発表⑪]。なお、時間的に変動するトラヒックの流入を想定したリンク利用率と仮想的な利用率とみなされる多重度の間に非常に強い相関がみられることも明らかにした[発表②]。

一方、トラヒック変動を意識して削除対象リンクの動的変更を行う省電力経路制御手法として、EAR (Energy Aware Routing) が提案されている。この手法では、ネットワーク中のあるルータを起点として他ルータまでの最短経路木を作成し、起点ルータとその隣接ルータは最短経路木を構成するリンクを利用してトラヒック転送し、転送に利用しないリンクを削除する。しかし、他ルータは通常転送により全リンクを利用することから省電力効果が芳しくないため、全ルータが起点ルータの最短経路木を構成するリンクのみを利用してトラヒックを転送するよう改良し、ネットワークトラヒック量の増加に伴い、起点ルータを増加して最短経路木の重ね合わせを行うことにより転送性能の劣化に考慮しつつ省電力性能の改善を図る手法を提案、起点ルータの選択手法やリンク削除後の経路制御方法についても検討した。図 2 より、基本手法である EAR では、起点ルータ数

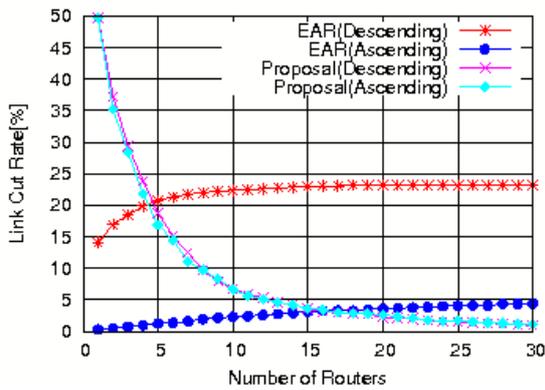


図 2：起点ルータ数－削除リンク割合特性

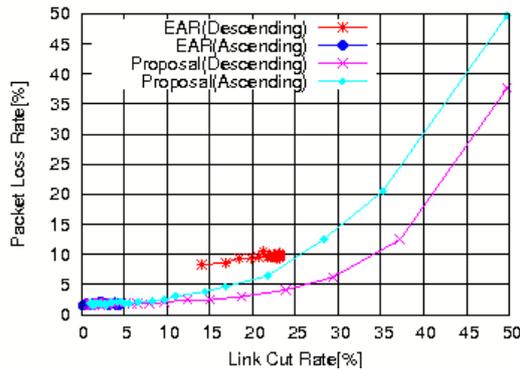


図 3：削除リンク割合－パケット損失率特性

の増加に伴い削除リンク数が増加するが、その変動幅は 5～10%、すなわち、トラヒック変動に伴う制御が困難であるのに対し、提案手法では、起点ルータ数 1 の時に約半数のリンクが削減可能で、トラヒックの変動に応じて起点ルータ数を増加することにより柔軟に対応可能であることがわかる [発表⑦, ⑤]。また、図 3 に示すように、EAR では設定ネットワークトラヒック量に対し起点ルータ数を変更してもパケット損失率は 2%、もしくは、10%程度で変化しないのに対し、提案手法では、起点ルータ数制御が可能となる。

(3) 時間・空間的な省電力 TE

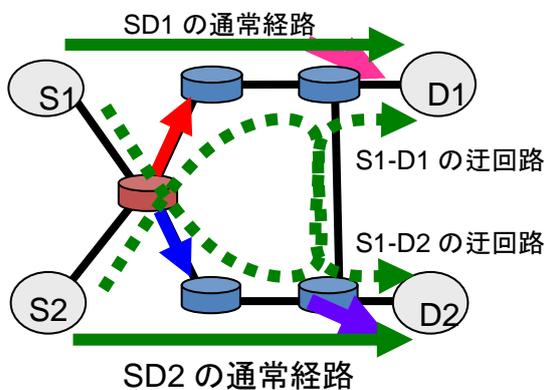


図 4：空間的省電力 TE 解析モデル

図 4 に示すように 2 送受信ホストペアの通信経路が左端のルータで相互に切替可能なモデルを想定し、各々通常は最短経路にて転送、ただし、利用率が低いリンクの省電力化を図る場合は他方のリンクに迂回して転送できるものとする。このようなモデルにて、

- ・ IP ルーティング：各々最短経路転送
- ・ PSR (Power-Saving Routing)：トラヒック発生時に最短経路リンクの利用率が低消費電力動作可能閾値、および、1 のときのみ他経路に迂回
- ・ EPSR (Enhanced-PSR)：両経路の利用率が低消費電力動作可能閾値を越え、かつ、最短経路より他経路の利用率が高い時に迂回

を定義し、各リンクにおけるトラヒック発生率と低消費電力滞在割合を評価した図 5 より、通常の IP ルーティングでは、発生率 20% の時点で省電力効果はなくなるが、PSR は 30%、EPSR だと 40% 付近まで半分の時間を低消費電力状態で各リンクの動作が可能となることわかる [発表⑧]。

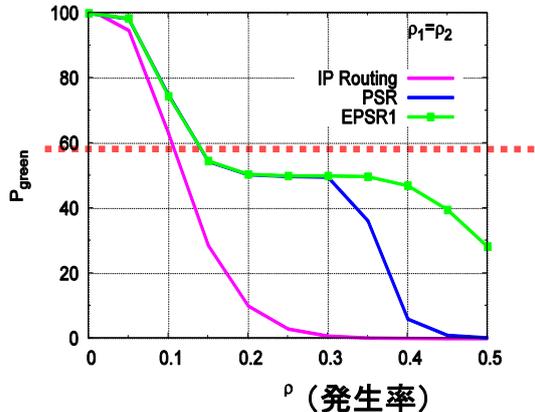


図 5：各リンクの低消費電力滞在割合

さらに、時間的省電力 TE の定量的評価のための解析モデルとして、待ち行列 M/M/1 において、サービス率が  $\mu$  と 0 でそれぞれ指数分布に従い変化するモデルを同定し、サービス率が 0 の時間、すなわち、転送待ち時間が転送性能である待ち時間に及ぼす影響を評価した [発表③]。

以上、成果を総括し、今後の予定を記す。

- (1) 時間的省電力 TE のための省電力 TCP の提案、ならびに特性評価を終え、論文として準備中である。
- (2) 空間的省電力 TE のための削除リンク選択手法とトラヒック変動に対する制御アルゴリズムを提案したが、省電力経路制御手法としての確立に至っていないので、その点を継続して調査する必要がある。
- (3) 時間的 TE と空間的 TE 各々の評価モデルの構築とアルゴリズム評価は終了しているが、両 TE の連携を評価するモデルの構築に及んでいないので継続して調査する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 12 件)

- ① 古屋貴之, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, "TCP セグメント転送移行とウィンドウサイズ制御による省電力化のためのリンク利用時間集約方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2013-191, 2014 年 3 月 7 日, 宮崎フェニックス・シーガイアリゾート. (査読無)
- ② 近藤健司, 川原憲治, "次数情報を利用したリンク重要度推定およびネットワーク特性との相関調査," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2013-166, 2014 年 3 月 7 日, 宮崎フェニックス・シーガイアリゾート. (査読無)
- ③ 内村吟太, 田村瞳, 福田豊, 川原憲治, 尾家祐二, "スイッチ/ルータ省電力化におけるポート転送速度切替時間の影響解析," 電子情報通信学会 2013 総合大会, BS-3-6, 2013 年 3 月 20 日, 岐阜大学. (査読無)
- ④ 村上慎, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, "ネットワーク機器省電力化のための TCP セグメント転送移行によるリンクアイドル時間集約方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2012-151, 2013 年 1 月 25 日, 鹿児島県産業会館. (査読無)
- ⑤ 川本和樹, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, "最短経路木を利用した省電力経路制御における集約ルータ/転送経路選択方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2012-149, 2013 年 1 月 25 日, 鹿児島県産業会館. (査読無)
- ⑥ 川原憲治, 古屋貴之, 窪園晃一, 田村瞳, 尾家祐二, "リンク状況を考慮した TCP フローのデータ転送移行による省電力化のためのリンク利用時間の集約方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2012-18, 2012 年 5 月 19 日, 東京工業大学. (査読無)
- ⑦ 川本和樹, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, "複数ルータの最短経路木を利用した省電力経路集約方式," 電子情報通信学会 2012 総合大会, B-7-79, 2012 年 3 月 22 日, 岡山大学. (査読無)
- ⑧ 青木ゆう, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, "ネットワーク省電力化のための経路集約/分散アルゴリズムの性能評価," 情報処理学会火の国シンポジウム 2012, C-4-4, 2012 年 3 月 16 日, 九州工業大学情報工学部. (査読無)
- ⑨ 前田祐樹, 川原憲治, "多点観測型移動ターゲット捕捉センサネットワークの性能解析," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2011-190, 2012 年 3 月 9 日, 宮崎フェニックススリゾートホテル. (査読無)
- ⑩ 窪園晃一, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, "TCP フローのデータ転送移行による省電力化のためのリンク利用時間の集約方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2011-178, 2012 年 3 月 9 日, 宮崎フェニックススリゾートホテル. (査読無)
- ⑪ 岩村幸歩, 田村瞳, 川原憲治, 尾家祐二, "

省電力経路制御におけるトポロジ情報を利用した削減対象リンク選択方式," 電子情報通信学会技術研究報告, IN2011-177, 2012 年 3 月 9 日, 宮崎フェニックススリゾートホテル. (査読無)

⑫ S.Akimoto, H.Tamura, K.Kawahara, Y.Oie, "Study on Energy-efficient Routing Protocol based on Experimental Evaluation," Proc. IEEE INCOS2011, Dec.1, 2011, Fukuoka Inst. Tech. (査読有)

〔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