

OpenFlow 技術を用いたデータセンタネットワークにおける消費電力量削減のためのフロー最適化

Flow Optimization in DCNs to reduce energy consumption using OpenFlow

津田 徹† 市川 昊平† 猪俣 敦夫† 藤川 和利†
Toru Tsuda Kohei Ichikawa Atsuo Inomata Kazutoshi Fujikawa

1. はじめに

データセンタは災害に強い地域に建設されることや、通信網、電源、情報機器などが物理的に冗長構成をとることで信頼性と拡張性をもった情報基盤をインターネットサービスにおいて提供している。しかし、その一方で情報機器の高性能化によって、データセンタ内の消費電力量が増加している問題がある。アメリカ議会の研究結果によると、2011 年には、1 兆 kWh 超の電力が消費されると報告がある[1]。我が国では、経済産業省によるグリーン IT 推進協議会の報告の中で、情報化社会に伴う日本国内の IT 機器、システムの消費電力は、2025 年度には 2006 年に比べ 5.2 倍(国内総発電量の 20%)、世界中では 9.4 倍(世界総発電量の 15%)になるとの試算を出している[11]。また、災害時など電力供給量が多く望めない状況などを考えると、消費電力量を削減することは、データセンタ管理者にとって急務である。Asami らの研究による一般的なデータセンタの消費電力の内訳を図 1 に示す[4]。データセンタ内での消費電力量は冷却設備が最も多く、サーバ、ストレージに関するもの、そしてネットワークと続いている。これまでに、データセンタ内における消費電力の削減を目的とする、サーバの制御や負荷の分散、冷却設備の変更などに関する研究が多数行われ、様々な手法が提案されている。データセンタネットワークの消費電力は、データセンタ内においておおよそ 10-20%の電力を消費しているが、今後サーバなどの省電力化が進んだ際に、相対的にネットワークの電力消費の割合が増加すると考えられる。ネットワーク機器は、サーバ機器同様に、ハードウェアリソースを全て使用することはまれと考えられるため、未使用分のリソースを停止状態、もしくは機能の低下を行うことによって、電力消費量を削減することは可能であると考えられる。

本論文の構成は、以下のとおりである。2 章では、データセンタネットワークにおける消費電力の問題に関して説明し、続く 3 章では、ネットワークの省電力化を目的とした関連研究を説明する。4 章では、提案する省電力化を目的としたフロー最適化手法に関して方針を示し、最後に 5 章で結論を述べる。

†奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科,
Nara Institute of Science and Technology, Graduate
School of Information Science

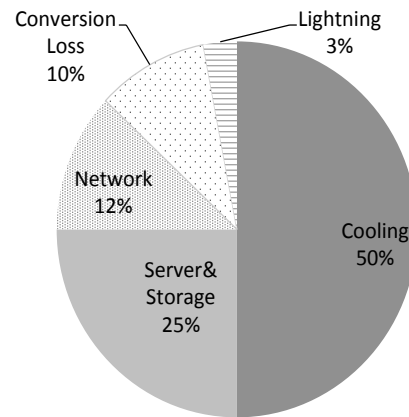


図 1 : データセンタの消費電力例

2. データセンタネットワーク

従来のデータセンタネットワークは、スパニングツリープロトコルを用いたツリートポロジで形成されている。

スパニングツリープロトコル(Spanning Tree Protocol : 以下, STP)は, Layer2 ネットワークにおいてループ構成を回避するためのプロトコルであり, IEEE802.1D で定義, 規格化されている。イーサネットフレームは, Layer3 の IP のように TTL に相当する値がないため, 2 つの機器を 2 本の線で繋ぐなどの冗長構成をとっている場合など, 機器間にループ構成が存在すると, ブロードキャストされたフレームが延々と転送されネットワーク機器のリソースを消費し尽くしてしまうことがある。そこで Layer2 ネットワークにおいて冗長構成をとる際はスパニングツリープロトコルを利用することで, スイッチ間で制御フレームを交換し, ループの箇所をブロックすることでループ経路のない論理的なツリーを構成し, 冗長化を実現している。しかし, スパニングツリープロトコルは, 冗長構成をとったネットワークの一方をブロックポートとしてしまうため, 回線の利用率に問題があるとされる。

2.1. 新たな形態のネットワーク

STP による非効率的な回線利用や, 管理者負担の増加を解決する技術として, イーサネットファブリックや, Software Defined Networking(以下, SDN)と呼ばれる技術が

提唱されている。これらは、現状の Layer2 ネットワークでは実現できなかった、拡張性が高く、構成を柔軟に変更できるネットワークの要求を満たすために提案、策定されている。以下にそれぞれを紹介する。

2.1.1. イーサネットファブリック

イーサネットファブリックとは、従来の Layer2 ネットワークでは実現できなかったマルチパスや、任意のトポロジへ対応することで、大規模複雑化したデータセンタネットワークにおける回線利用効率の向上や、運用の手間を減らすことを目的とした技術である。従来の機器では、この要求を満たすことができないため、機器ベンダ各社は近年、この技術を製品群に適用し、データセンタ市場に投入している。近年のデータセンタネットワークは、システムの大規模化や、データトラフィックの急速な増加などが原因で、Link Aggregation などの技術を用いて、見せかけ上大きなトラフィックが流れるように設定している。しかし、広帯域のインターフェースの大量採用は価格コストが高いため、効率良く通信できる新たな通信規格が求められている。イーサネットファブリックでは、Layer2 ネットワークの柔軟な拡張を目的として、マルチパス制御や新規機器の自動参画機能などがベンダごとに実装されている。マルチパス制御は、Ethernet ヘッダをカプセル化し、エンドツーエンドのルーティングやマルチキャストなどを Layer2 で行うことで実現する。新規機器の自動参画機能は、OSPF や RIP のような Layer3 ルーティングプロトコルのように、ネットワーク機器同士でメッセージを継続的に交換することで実現している。しかし、実現方法がベンダごとに異なり、IETF の TRILL[8]や、IEEE の SPB[2]を応用したものなど、国際的な標準をベースとして各社で独自のアレンジを加えており、相互接続性の確保に問題がある。

2.1.2. Software Defined Networking (SDN)

既存のネットワークはルータやスイッチの設定や、IDS (Intrusion Detection System) やファイアウォールなどのその他ネットワーク機器の設定、VLAN の設定などを構築の際に必要とする。これらの機器の設定を利用者ごとの要求に応じて柔軟に行うことは、VLAN 数の制限など、機能的な制限から難しい。そこでユーザが望む構成を柔軟に組むことができるようにソフトウェアでネットワークを構成する形として SDN が提唱されている。SDN とは、ネットワークのリソースを外側のソフトウェアにより制御する概念である。これによって、従来では、機器それぞれに対して設定を行うことで実現していたネットワークを、装置の制約にとらわれることなく、柔軟に設計構築することが可能となる。

2.1.3. OpenFlow

OpenFlow は、Open Networking Foundation(以下、ONF)の提唱する SDN の 1 つである。Layer3 スwitch のコントロ

ールプレーンとデータプレーンを分離した形で構成されており、コントロールプレーンである OpenFlow コントローラからデータプレーンである OpenFlow スwitch を操作する。ONF は、これらの OpenFlow 規格を策定しており、スィッチとそれらのスィッチに指示を与えるコントローラの仕様およびプロトコルを提供している。OpenFlow スwitch はフローと呼ばれる単位で通信トラフィックを制御する。各々のフローはスィッチ内のフローテーブルにて保持される。スィッチは、フローテーブルに格納されたフロー指示に基づいて動作を決定する。フローテーブルは、マッチング条件、条件にマッチした時に起こすアクション、条件にマッチしたパケットの統計情報から成る。OpenFlow 仕様 version1.0 の場合、マッチング条件部は、物理ポート、送信元 MAC アドレス、送信先 MAC アドレス、VLAN ID、VLAN priority、送信元 IP アドレス、送信先 IP アドレス、送信元 TCP/UDP ポート、送信先 TCP/UDP ポートからなる。アクションの種類は、Forward、Enqueue、Drop、Modify-Field の 4 つが定義されている。コントローラからスィッチに対する制御としては、フローの書き換え要求、フロー単位、ポート単位のパケット数、バイト数の取得、パケットの送出などのやりとりが定義されており、コントローラとスィッチ間は Secure channel を介して通信を行う。

2.2. 形態変化に伴う問題点

イーサネットファブリックや、SDN の概念を実用化したデータセンタネットワークは、現状の階層型構造のネットワークに比べ、より柔軟なトポロジを実現可能であるが、トラフィック量の増加や、各ポートの利用率の平坦化によるルータやスィッチなど、ネットワーク機器の消費電力が増加する問題がある。

2.2.1 スィッチのエネルギー消費量

表 1 に Wang らによる OpenFlow 対応スィッチ(Pica8 社製 PRONTO 3240 スィッチ)の消費電力量の調査結果を示す[9]。Pica8 社製 PRONTO 3240 スィッチは、OpenFlow 仕様 ver 1.0 に対応しており、48 個の 1Gbps のポートを持つ。調査では、それぞれ 10、100、1Gbps のトラフィックを処理している際の消費電力量を表しており、すべてのスィッチに対して入力を行った状態で計測を行なっている。また、スィッチの消費電力例として、Asami らの調査による一般的なスィッチの電力消費量を図 2 に示す[4]。48 ポートスィッチの消費電力は、入力がない状態で、76.4W-150.0W であり、最大入力で、102.0W-198.0W となっており、おおよそ 40W ほどの差異が生まれる[7]。これらより、各ポートの消費電力は、1-2W 程度であると考えられる。スィッチやルータのポートごとの利用率を平坦化させると、STP

	Link Rate (Mbps)			
	Inactive	10	100	1000
Power (W)	67.7	70.7	80.2	111.5

表 1 : 異なる Link Rate におけるスィッチ消費電力

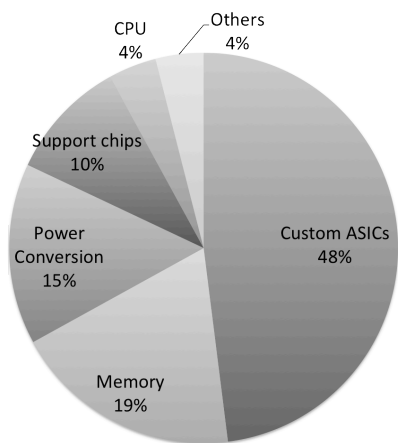


図 2 : スイッチの消費電力例

を用いてループ構造を回避していた場合よりも、動作しているポート数が増加するため、それに比例してポートやメモリ分の消費電力量が少なからず増加する。また、ネットワークの構成を柔軟に変更することが可能となるため、スイッチが常にアクティブ状態で待機が必要となり、余分な消費電力が発生する。しかし、入力のない、またはリソースに余力のある機器をスリープ、または機能を限定させることで、省電力化が可能であると考えられる。近年では、ネットワークの消費電力削減を目的として、スイッチをスリープさせる技術や、リンクの送信レートを動的に変更する技術や、特定のリンク上にトラフィックを集中させて電源を制御する技術などが提案されている。

2.3. データセンターネットワークの省電力化において求められる要件技術

データセンターネットワークの省電力化に求められている要件を、以下に示す。

1. 現在の電力使用状況よりも少ない電力で現状と同じ機能を提供
2. トラフィックパターンの変化に対して動的に対応
3. 機器が増えても同等の機能でスケールアウト
4. 省電力目標の変化に対して構成を変更
5. 耐障害性
 - 冗長経路を考慮したトポロジ形成
 - 現在の通信路と代替通信路のコスト差が小さい

3. データセンターネットワークの省電力に関する研究

データセンターネットワークはスイッチ、ルータ、IDS やファイアウォールなどその他のネットワーク機器から成り、それぞれの箇所ですべて省電力化が可能である。特にネットワーク機器に関する省電力手法として、ネットワーク機器のバッファが溜まっていない、パケットの入力がない場合などはスリープさせる手法や、リンクの入力に合わせてリンクレートを変更する手法などがある。以下、現在までに取り

組まれている DCN における省電力化への取組を説明する。

3.1. Ethernet のリンクの送信レートを動的に変更する省電力化手法

Adaptive Link Rate(ALR)と呼ばれる動的に Ethernet のリンクレートを変えることで、省電力化を測る研究があり、IEEE802.3az にて規格策定されている[3]。ISP のネットワークを対象とし、スイッチに、現在のトラフィックの状態を監視して、その状況に合わせてリンクレートを変更させる機能を追加している。スイッチの機能として追加するため、中央監視するシステムが不要であり、既存のネットワーク技術を利用できるためスケーラビリティや耐障害性には問題がない。しかし、実際のリンクレートの変更にかかる時間が、シミュレーションにて考えられていた時間よりも多くかかることが実装により示されたため、急なトラフィックの変化への対応が困難である。また、実際の ISP やデータセンターネットワークのネットワーク機器は常時何らかのトラフィックを処理しているため、スイッチの状態を監視するのみでは、省電力の効果が薄く、スイッチのコンフィグに関しても、管理者がそれぞれ入力などして、対応する必要があるため、問題が残る。

3.2. 未使用時は機器をスリープさせることによる省電力化手法

ネットワーク機器の省電力化研究の先駆けである Gupta らは IP ルータやイーサネットスイッチなどのネットワーク機器の未使用時間帯はスリープさせることで省電力を図ろうとし、シミュレーションによって、スリープによるネットワーク機器の省電力化が可能であることを示した[5]。スリープさせるためのアプローチとしては、OSPF などの Layer3 トポロジの拡張やトラフィックエンジニアリング(以下、TE)を用いて、通信する機器を最小構成に変化させるものなどがある。以下にそれぞれについて示す。

3.2.1. OSPF の拡張

荒井らは、既存の Layer3 ルーティングプロトコルである OSPF を拡張して冗長経路を考慮した分散省電力ルーティング ECO-PR を提唱している[12]。ISP 内の Layer3 ネットワークを想定しており、トラフィック量の変化に応じて Layer3 のネットワークトポロジを動的に変化させ、入力トラフィックのないルータはスリープさせることで省電力化を図っている。OSPF プロトコルを拡張し、自身のトラフィック量を他のルータに対して広告し、それを受信した他のルータにおいて OSPF のコスト値を変化させることで使用する経路を変更し、動的にトポロジを変化させることで、入力トラフィックのないスイッチを作り出し、省電力化を実現している。各スイッチはトラフィックの流量情報を交換、格納しているため、トラフィックの変化に関して対応しているが、OSPF プロトコルに基づいた変化情報伝播のため、リンク間の距離に比例した時間分対応が遅れてしま

う問題がある。

3.2.2. TE を用いて特定リンク上にトラフィックを集中

トラフィックエンジニアリングを用いて、トラフィック処理を一部のルータに集中させることで、入力のないルータをスリープ状態にさせる省電力化方法が提唱されている[6][10][13].

Heller らは、スイッチがすべてのスイッチの情報ではなく、自身から見て上流下流にいくつスイッチが生存しているかを知ることで、OSPF に代表される様々なルーティングアルゴリズムに対応する Topology-aware Heuristic アルゴリズムを ElasticTree システムに適用し、提案している[6]. ElasticTree システムは、OpenFlow を利用した、ネットワークの調整アプリケーション、ルーティングアプリケーション、スイッチから成る。調整アプリケーションは、ルーティングのモデルや消費電力目標、ポートごとのフローカウンタを入力すると、その時々での最小構成のサブネットを計算し、ルーティングアプリケーションに出力する。ルーティングアプリケーションから出力された最小構成のサブネットを基に、入力のないスイッチ、ラインカード、ポートをそれぞれスリープ状態にすることで省電力を実現している。調整アプリケーションは、フローのカウント数を見てトポロジを決定しているため、トラフィックパターンの変化に柔軟に対応することができる。また、調整アプリケーションはスイッチの死活管理のみを目的としているため、中央管理アプリケーションの負荷原因となる個々のフローのルーティングを計算しないため、拡張性を有する。ただし、トポロジが Fat Tree トポロジに限定されてしまうため、新規スイッチの参加や離脱に対しての対応ができない。

Wang らは、実際に調査したデータセンタ内のトラフィックの特徴から、複数のトラフィックによるネットワークリソースの使用は完全に同時に起きないことから、相関係数を利用したトラフィック集約を行う Correlation-Aware Power Optimization(以下、CARPO)システムを提案している[10]. CARPO システムは、相関関係計算、トラフィック集約、LRA の 3 フェーズからなっており、それぞれが OpenFlow を利用してデータセンタネットワークとやりとりを行う。相関関係計算フェーズでは、実際のフローのサンプルを取り、計算を行い、その結果をトラフィック集約フェーズに出力する。トラフィック集約フェーズでは、相関係数を入力として受取り、最も消費電力が少ない最小構成のサブネットを LRA フェーズに出力し、不要なスイッチやポートをスリープ状態にする。LRA フェーズでは、最小構成サブネットの Active Link 情報をもとにポートのリンクレートを変更する。省電力化は、スイッチやポート、ラインカードのスリープ化、リンクレートの変更によって行われるが、フローの特徴について予め知る必要があるため、トラフィックパターンが時々刻々と変化する次世代のデータセンタネットワークには適応が難しい。また、最小サブネットを割り出し省電力構成に充てるため、省電力化のために冗長経路が失われてしまい全てのスイッチに対して冗

長性を確保できない問題がある。

米津らは、MiDORi PCE (Multi-layer, path, and resources) Dynamically Optimized Routing Path Control Element)に対して、実用時間内でトラフィック量に応じた最適化を行うための省電力トポロジ計算手法を提案している[13]. MiDORi システムは、一定時間ごとに得たトポロジ情報から、1つのリンクを削減するごとにネットワーク性能の制約条件を維持可能なトポロジを局所最適解として選択するアルゴリズムを採用している、この局所最適解を元に、PCE から GMPLS(Generalized Multi-Protocol Label Switching)を利用して不要なポートや、スイッチの電源を制御し、省電力を実現している。一定時間ごとに、PCE において導出された省電力トポロジに基づいて、制御が行われるため、トラフィックパターンの変化に応じた物理ネットワークの再構築が可能である。しかし、局所最適解を導出するアルゴリズムを、リンク数の多い大規模ネットワークに対して適用して計算を行うと、実用時間内に計算を終えることができないため、スケラビリティに問題がある。障害対策としては、protection 方式と restration 方式を提案している。protection 方式は、制約条件に可用性を追加したもので、冗長性は増すが省電力効果は薄れる。restration 方式は、トポロジ決定後、全てのリンク断に対する冗長経路を計算しておいて、障害時にそのリンクを追加するといったものであり、データのロスが少なからず発生する。これらの方式は、それぞれ用途やアプリケーションによって用いる方式が異なるとされている。この冗長構成計算アルゴリズムも省電力化のアルゴリズム同様、リンク数の多い大規模ネットワークには適応が難しい問題がある。

4. フロー最適化の方針

4.1. 問題点の整理

データセンタネットワークにおける省電力化を目的とする 5 つの研究(ALR, ECO-PR, ElasticTree, CARPO, MiDORi)の比較を表 2 に示す。

データセンタネットワークにおいても、広域 ISP ネットワークにおいても、機器の Link Rate の変更や機器そのもののスリープを行うと、確保されていた冗長性を失う問題がある。また、中央集権的なネットワークの管理はスケラビリティが中央のコントローラのスペックに依存する。一方で、それぞれのスイッチやプロトコルに手を加える分散型の管理は、実際の省電力目標に対して対応することが困難になることや、既存の機器では対応できずリプレースが必要になるなどの問題点がある。

4.2. 消費電力削減のための方針

本節では、実用時間内でトラフィック量に応じた最適な省電力サブネットを計算する手法の方針を示す。本方針は、最適な省電力サブネットの計算を 1 次ビンパッキング問題とみなし、オンラインアルゴリズムを用いて解くものである。ビンパッキング問題とは、組み合わせ最適化問題の 1

表 2 : システム比較

システム	省電力方法	トポロジ	ターゲット	アーキテクチャ	冗長性	拡張性
ALR	Adaptive Link Rate	任意	ISP	Switch Modification	○	○
ECO-PR	ノードの停止スリープ	任意	ISP	Implemented OSPF	○	○
Elastic Tree	ノードの停止スリープ	Multi-rooted Fat Tree	Datacenter Network	Traffic Engineering using OpenFlow	考慮しない	△
CARPO	ノードの停止スリープ ALR	Multi-rooted Fat Tree	Datacenter Network	Traffic Engineering using OpenFlow	考慮しない	△
MiDORi	ノードの停止スリープ	100node ほどのネットワーク	MiDORi ネットワーク	Traffic Engineering using PCE/GMPLS	Protection restration	○

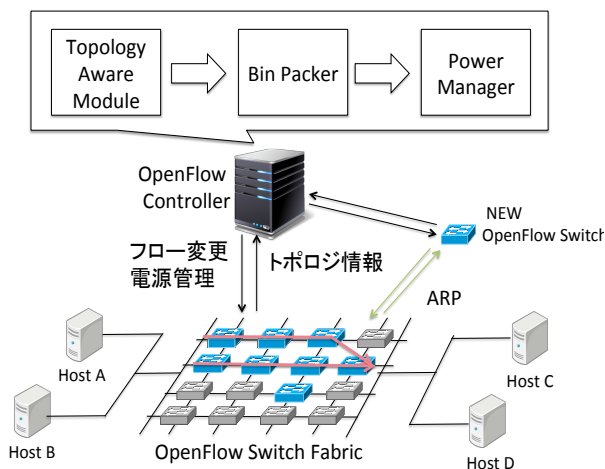


図 3 : システム全体像

つである。0 より大きく 1 以下の数値のリストが与えられている時、容量が 1 の入れ物(ビン)へ、リストの要素の合計値が 1 以下になるように各要素をどれか 1 つのビンに割り当てる。このとき、リストのすべての要素を割り当てるのに必要な最小のビンの数とその要素を割り当てる問題である。オンラインアルゴリズムとは、時系列に沿った入力を順に受け取って、その時点までの入力をもとにその時の行動を決定するモデルであり、ビンパッキング問題の近似解を求めるアルゴリズムの 1 つである。通信ネットワークは、通信がいつ終了するかという指標が存在しないため、オンラインアルゴリズムで解くことが可能である。すべてのフローに対して、送信先に向かうリンクの内、現在の使用容量が最小のリンクに対して、ビンパッキングを行う。もし、詰めることができるリンクが存在しない場合、新しいリンクをアクティブ状態にし、そのリンクにフローを割り当てる。すべてのフローが割り当てられときに active 状態でないルータやポートをスリープ状態にすることで、省電力を実現する。ビンパッキング問題には、全てのビンが使用中であり、新たにリソースを割り当てることができないといった問題が起きる可能性がある。その場合は、割り振り可能なパスを探索することで、問題を解決する。

4.3. システム構成

全体のアーキテクチャを図 3 に示す。スイッチ群の操作には OpenFlow を用いており、OpenFlow スイッチファブリックに対して、トポロジ情報や、フローの変更、電源管理をそれぞれやりとりする。トポロジ情報は、スイッチのフローカウンタ、ネクストホップから成る。Topology Aware Module は、トポロジ情報の入力があると、トラフィックマトリックスを Bin Packer に対して出力する。Bin Packer は、前節での方針を基にフローをパスに割り当て、不要なスイッチ情報を Power Manager に、フローの割り当てをスイッチ群に対してそれぞれに出力する。Power Manager は、省電力の構成に基づいて、スイッチ群に働きかけ、ポートやラインカード、スイッチそのものをスリープ状態にする。

4.4. 考察および今後の課題

本提案システムは、OpenFlow による中央管理のアーキテクチャをとっているため、スイッチ数が増加することによって、計算するトラフィックマトリックスのサイズが大きくなり、コントローラの計算負荷が高まり、単一障害点となる問題が存在する。これは OpenFlow 特有の問題点であるが、省電力を実現するための目的とは異なるため、今後の課題とする。

5. おわりに

本稿では、需要増に伴い新たな形態へと変化しはじめているデータセンタネットワークの電力消費量を削減するための課題確認として、複数の関連研究をまとめ、それぞれを紹介、比較した上で課題点を洗い出した。また提案として、OpenFlow 技術とオンラインアルゴリズムを用いて、データセンタネットワークに対して動的に消費電力量を削減するフロー最適化方針について示した。今後は、提案システムの実装、評価およびスケーラビリティ、冗長性に関する考察を行う。

参考文献

- [1]. U S Environmental Protection Agency. Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency Public Law 109-431. Technical report, 2007.
- [2]. David Allan, Peter Ashwood-Smith, Nigel Bragg, Janos Farkas, Don Fedyk, Michel Ouellete, Mick Seaman, and Paul Unbehagen. Shortest path bridging: Efficient control of larger ethernet networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, No. 10, pp. 128–135, October 2010.
- [3]. Himanshu Anand, Casey Reardon, Rajagopal Subramanian, and Alan George. Ethernet Adaptive Link Rate (ALR): Analysis of a MAC Handshake Protocol. In *Proceedings. 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks*, No. 0519951, pp. 533–534. IEEE, November 2006.
- [4]. Tohru Asami and Shu Namiki. Energy consumption targets for network systems. In *2008 34th European Conference on Optical Communication*, pp. 1–4. IEEE, 2008.
- [5]. Maruti Gupta and Suresh Singh. Greening of the internet. In *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications - SIGCOMM '03*, p. 19, New York, New York, USA, 2003. ACM Press.
- [6]. Brandon Heller, Srini Seetharaman, and Priya Mahadevan. ElasticTree: Saving energy in data center networks. In *Proceedings of the 7th USENIX conference on Networked systems design and implementation*, p. 17, 2010.
- [7]. Priya Mahadevan, Puneet Sharma, and Sujata Banerjee. A Power Benchmarking Framework for Network Devices. In *IFIP Networking*, pp. 795–808. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [8]. R. Perlman, D. Eastlake, D. Dutt, S. Gai, and A. Ghanwani. Routing Bridges (RBridges): Base Protocol Specification. Technical report, Internet Engineering Task Force, 2011.
- [9]. Richard Wang, Dana Butnariu, and Jennifer Rexford. OpenFlow-Based Server Load Balancing Gone Wild Into the Wild: Core Ideas. In *Proceedings of the 11th USENIX conference on Hot topics in management of internet, cloud, and enterprise networks and services*, pp. 1–6, 2011.
- [10]. Xiaodong Wang, Yanjun Yao, Xiaorui Wang, Kefa Lu, and Qing Cao. CARPO: Correlation-aware power optimization in data center networks. In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pp. 1125–1133. IEEE, March 2012.
- [11]. 経済産業省. グリーン IT イニシアティブ. Technical report, 2007.
- [12]. 荒井大輔, 茂木信二, 土岐卓, 吉原貴仁. 冗長経路を考慮した分散省電力ルーティングプロトコルの提案. 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク, Vol. 111, No. 9, pp. 29–34, 2011.
- [13]. 米津 遥, 石井 大介, 岡本 聡, 大木 英司, 山中 直明. 自己組織化省エネルギーネットワーク MiDORi における消費電力最適化のためのトポロジー計算手法 (特集 スマートな社会を支えるインターネットアーキテクチャ論文). 電子情報通信学会論文誌. B, 通信, Vol. 94, No. 10, pp. 1323–1331, 2011.