

平成28年度修士論文

ネットワーク内キャッシュによる  
大規模ネットワーク通信電力の削減

大学院情報システム学研究科  
情報ネットワークシステム学専攻

学籍番号： 1552017

氏名： 野島 幸大

主任指導教員: 吉永 努 教授

指導教員： 笠井 裕之 准教授

指導教員： 檜木 勘四郎 客員教授

提出年月日： 平成29年1月26日

(表紙裏)

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	ネットワークの通信量と電力の増加	1
1.2	キャッシュによる電力削減	1
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>3</b>
2.1	ネットワーク電力の評価	3
2.2	キャッシュによるネットワーク電力の削減	4
<b>第3章</b>	<b>電力の計算</b>	<b>5</b>
3.1	対象とするネットワーク	5
3.2	ネットワークで消費される電力の概要	6
3.3	電力の算出	8
3.4	電力計算の仕組みの作成	10
<b>第4章</b>	<b>評価</b>	<b>11</b>
4.1	実験設定	11
4.2	キャッシュの電力削減効果	14
4.2.1	概要	14
4.2.2	結果	15
4.3	通信量最小配置と電力最小配置の比較	18
4.3.1	概要	18
4.3.2	結果	18
4.4	推定したホップ数を用いた評価	23
4.4.1	概要	23
4.4.2	結果	23
<b>第5章</b>	<b>議論</b>	<b>26</b>
5.1	評価の有用性についての考察	26
5.2	キャッシュによる電力削減の今後についての考察	27
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>28</b>
	謝辞	29
	参考文献	31

# 目次

1.1.1 予測される通信量の増加 [1]	2
3.1.1 通信事業者ネットワーク	6
3.2.1 キャッシュの効果	7
3.2.2 キャッシュ配置と平均ホップ数の関係	8
3.3.1 1ホップ中に経由する機器	10
3.4.1 電力計算スプレッドシート	10
4.1.1 実験ネットワーク	12
4.1.2 コンテンツアクセス頻度 (ガンマ分布)	13
4.2.1 実験ネットワークの色付け	16
4.2.2 キャッシュ配置の電力削減効果	17
4.3.1 表 4.2 使用時のキャッシュ配置と電力の関係	19
4.3.2 表 4.2 使用時のキャッシュ配置と平均ホップ数の関係	20
4.3.3 表 4.5 使用時のキャッシュ配置と電力の関係	21
4.3.4 表 4.5 使用時のキャッシュ配置と平均ホップ数の関係	22
4.4.1 シミュレーションにより求めた電力と推定により求めた電力の比較	25

# 表目次

4.1	各階層のネットワーク設定 . . . . .	11
4.2	各階層の電力計算に用いるパラメータ . . . . .	15
4.3	2008 年の電力パラメータ . . . . .	16
4.4	各キャッシュ配置の平均ホップ数 . . . . .	17
4.5	各階層の電力計算に用いるパラメータ . . . . .	18
4.6	表 4.2 使用時の各階層の保持コンテンツ (人気順位) . . . . .	19
4.7	表 4.5 使用時の各階層の保持コンテンツ (人気順位) . . . . .	19
4.8	色数とホップ数の関係 . . . . .	23
4.9	推定ホップ数 . . . . .	24

# 第1章 序論

## 1.1 ネットワークの通信量と電力の増加

YouTube や Netflix などのオンデマンド動画配信サービスの普及やインターネットを利用できる端末、回線速度の増加といった理由により、インターネットの通信量が増大している。大手ネットワーク機器ベンダーの Cisco の調査によると、図 1.1.1 のようにインターネットを流れる通信量は 2016 年から 2020 年にかけて 3 倍近くまで増加すると見込まれている [1]。通信量の内訳を見ると、通信の 8 割以上を動画通信が占めており、動画通信がインターネットの通信量増加を牽引している。インターネットの通信量増加に伴い、インターネットで消費される電力量も年々増加している。インターネットで消費される電力は年 10% のペースで増加しているのに対し、世界全体の電力消費の増加率は年 3% であり、電力消費におけるインターネットの占める割合は年々増加している [2]。電力の増加に伴い二酸化炭素の排出量も増えており、2020 年の情報通信分野における排出量 14 億トンの内 25% がインターネットでの電力消費によるものであり、日本の年間二酸化炭素排出量 13 億トンの 27% に相当する量となる [3][4]。

電力の急速な増加は通信事業者のバックボーンネットワークで起きている [5]。バックボーンネットワークとは通信事業者の中核となる全国・世界規模のネットワークであり、インターネット利用者がダウンロードする動画はバックボーンネットワークを通過している。そのため、バックボーンネットワークで消費される電力の削減は、ネットワーク事業者の電気代の削減、二酸化炭素排出量の低減にも寄与するため、社会的意義が大きい。

## 1.2 キャッシュによる電力削減

通信電力は転送データ量に伴い増加するため、通信量を減らすことにより電力を削減できる。そこで、キャッシュを活用して通信量を減らし、電力削減を図る。キャッシュとは、一度アクセスされたコンテンツのコピーを保存し、再度アクセスされた時に再利用することでアクセス時間を短縮する仕組みであり、コンテンツ配信の高速化に用いられる [6][7]。通信経路上にキャッシュサーバを設置し通信路を通過する動画のコピーを保存して再利用すると、クライアントは通信経路中の最も近くにあるキャッシュサーバからコンテンツを取得する。すると、クライアント近くのネットワークで通信が完結し、バックボーンネットワークを通過する通信量が減少するため、電力消費量が減少する。ネットワーク中を流れる通信の大部分は動画であり、動画は一度アップロードされると、そのデータが変更されることはほとんどないため、キャッシュサーバはコピーした動画データを長期間利用し続け、効果的に通信量と電力を削減できる。

以前からキャッシュサーバの導入に伴う電力削減効果を明らかにする取り組みは行われていた [8][9]。しかし、それらの研究はネットワークシミュレータに電力パラメータを導入し通信電力を算出するという形で電力評価を行っていたため、一度のシミュレーションに長い時間を要する。さらに、電力評価にはルータやリンクが消費する電力やキャッシュ内に設置するコンテンツの内容と

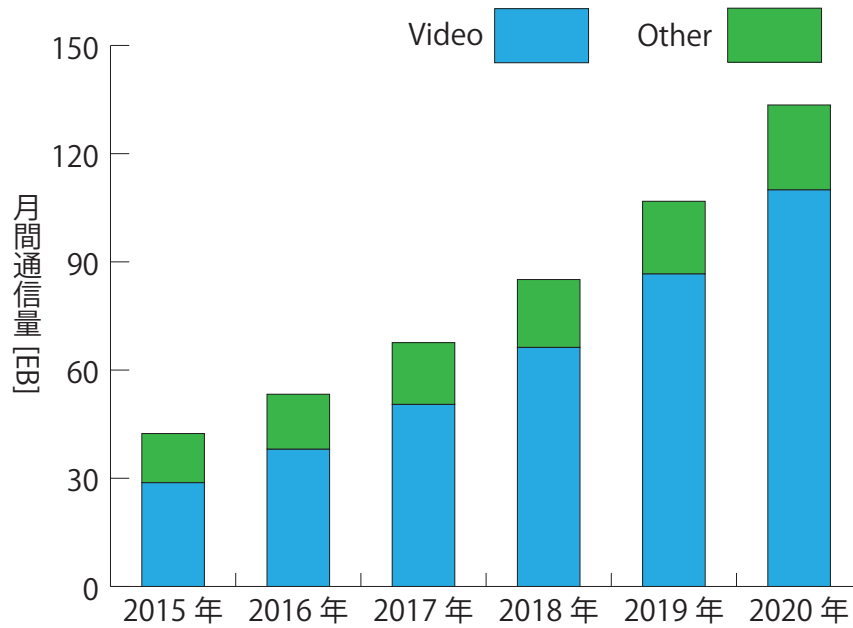


図 1.1.1: 予測される通信量の増加 [1]

いった複数のパラメータが必要となるが、これらのパラメータを変更するたびにシミュレーションの再実施が必要となる。その結果、各電力パラメータが全体の通信電力に与える影響が分かりにくく、キャッシュ導入時の効果を考察しにくいという欠点があった。

本研究では、キャッシュサーバを導入したネットワークシミュレーションの結果を再利用し、長時間の計算を行うことなく複数の電力パラメータで消費電力を比較できる仕組みを提案する。提案した仕組みはネットワークシミュレータと電力計算モデルを入力したスプレッドシートで構成されており、シミュレーションで得られた平均ホップ数と電力パラメータを用いてネットワーク消費電力を算出する。通信事業者のネットワークを模したシミュレーション環境で電力評価を行い、キャッシュサーバが消費電力削減に与える効果を、複数の電力パラメータで短時間で確認した。また、単純なアクセスパターンにおいてシミュレーションを行わずにネットワーク構造とキャッシュ配置から推定した平均ホップ数を用いて電力評価を行った結果、シミュレータで得たパラメータを用いた場合に対し 2.44%程度の誤差で評価を行うことができた。

## 第2章 関連研究

### 2.1 ネットワーク電力の評価

従来よりネットワークの電力計算を試みる研究は複数存在する．文献 [5], [10] はインターネットで消費される電力の見積もりを行い，今後の電力消費量の推移を予測している．どちらの研究も今後電力は増加していき，通信事業者のバックボーンネットワークで特に増えると予測している．

文献 [5] によると，インターネットで消費される電力の見積もりには2種類の方法がある．一つ目はトップダウンな手法であり，企業の電気代等の統計情報から電力消費量を推計する．消費電力の大きさを正確に見積もることはできるが，電力消費の内訳がわからず今後の推移がわかりづらいという欠点がある．二つ目はボトムアップな手法であり，通信事業者のネットワーク構成，ネットワーク機器の電力消費量，トラフィック量を仮定し，これらの要素を用いた計算モデルを組み立て電力を計算する．この方法では機器の電力消費やトラフィックの推移から今後の電力増加量を予測することができるが，通信事業者はネットワーク構成を公開していないため，ネットワーク構成を正確に再現できず計算誤差が大きくなるという問題がある．そこで，この論文ではボトムアップ手法で求めた電力を，トップダウン手法で求めた電力でスケールすることにより今後の電力の推移を見積もっている．

本研究では，ボトムアップな手法による電力計算に着目し，電力を求める計算モデルを作ることによりキャッシュの電力削減効果を評価する．ボトムアップな手法では通信時に経由するネットワーク機器数，ネットワーク機器の電力消費量，トラフィック量の積を取ることで電力を算出している．ネットワーク中にキャッシュを設置しサーバが配信するコンテンツのコピーを保持させると，クライアントは近くに存在するキャッシュからコンテンツをダウンロードするようになり，ダウンロード時に経由するネットワーク機器数が減少する．すると，電力計算式中のコンテンツの通信時に経由するネットワーク機器の数が減少し，電力がどの程度減少するか定量的に評価することができる．



## 2.2 キャッシュによるネットワーク電力の削減

キャッシュにより通信時に経由するネットワーク機器の数を減らし、ネットワークで消費される電力を削減する試みは複数行われている。

文献 [8] は、新たなネットワークアーキテクチャとして提唱されている Content Centric Network (CCN) においてネットワーク内のルータがキャッシュ機能を有する場合の電力削減効果を評価して、電力が小さくなる配置を明らかにしている。この研究ではアメリカのバックボーンネットワークを模した実験環境において、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて電力削減に準最適なキャッシュ配置を導出し電力評価を行った。導出された配置はコンテンツ取得までの経由ネットワーク機器数であるホップ数が小さく、かつキャッシュの必要量が小さくなる。

文献 [9] は、通信事業者のネットワークを 6 段の B-Tree 構造で模したネットワークにおいて、キャッシュの電力削減効果を評価している。B-Tree の根から見た深さを階層としてキャッシュを分割し、階層ごとに同一のコンテンツを持つ条件下で GA を用いて電力が最小となるコンテンツ配置を導出した。導出された配置は、アクセスの多いコンテンツがクライアントの近くである下位階層に、アクセスの少ないコンテンツが上位階層に配置されるようになった。この時、フランスとモロッコの通信事業者ネットワークを想定して設定された分岐数の異なる 2 種類の B-Tree においてそれぞれ 7% と 11% の電力削減効果を得られた。

これらの研究は、いずれもキャッシュからのコンテンツ取得によりネットワークからのコンテンツ取得に要するホップ数を削減することで電力削減を実現しており、削減効果をネットワーク構造、通信時に消費される電力量のパラメータを用いた評価関数を作ることで評価している。これらの研究では遺伝的アルゴリズムを用いて最も電力削減効果の高いキャッシュ配置を導出しているが、遺伝的アルゴリズムは計算時間が長く、電力に関するパラメータを変更した時の再評価に時間がかかり、変更したパラメータが電力に与える影響の評価もしづらいという問題がある [11]。そこで、本研究ではキャッシュによるホップ数の削減効果から電力を容易に計算する方法を用いる。ホップ数の削減効果を一度シミュレーションすれば、その結果を利用するだけでパラメータを変更しながらの電力評価を短時間で行うことができるようになる。

## 第3章 電力の計算

### 3.1 対象とするネットワーク

本論文では日本の通信事業者ネットワークを対象として電力計算を行う。通信事業者のネットワークは図 3.1.1 に示す階層構造になっており，上位階層から順に Long Haul, Metro, Edge Aggrigation と呼ばれる [10]。クライアントがダウンロードするコンテンツは，Origin サーバから Long Haul, Metro, Edge Aggr. と下位階層に向け階層内，階層間リンクを順に転送されクライアントにたどり着く。Long Haul は日本全国規模のメッシュネットワークであり，このネットワークはクライアントが求める全てのコンテンツを保存している Origin サーバと接続される [5]。Metro は下階層の通信を集約する都道府県や都市規模のネットワークであり，トポロジは単方向リングである [12]。Edge Aggr. は Edge Aggrigation の略であり，クライアント宅からの回線を収容するスイッチが置かれ，Metro のノードとのみ接続される直線ネットワークである [10]。

各階層では使用される機器が異なるため電力消費量に差があり，上位階層ほど電力が大きくなる傾向にある。Metro, Long Haul では，Optical Transport Network(OTN) と呼ばれる光通信の規格により通信を行い，ルーティングにはルータが用いられる。ルータ間を接続するリンクでは通信の高速化のために，Wavelength Division Multiplexing(WDM) と呼ばれる手法により光信号が多重化される。長距離の伝送中に光信号が弱まるため，リンク中には光信号を増幅する装置が設置される。伝送距離が長いほど必要数が増加するため，大規模なネットワークになる上位階層ほど設置数が多い。Edge Aggr. は回線を収容する役割のみを持っているためルータではなくスイッチが用いられる。リンクでは通信の多重化は行われておらず，WDM 用の機器と増幅装置は設置されない。

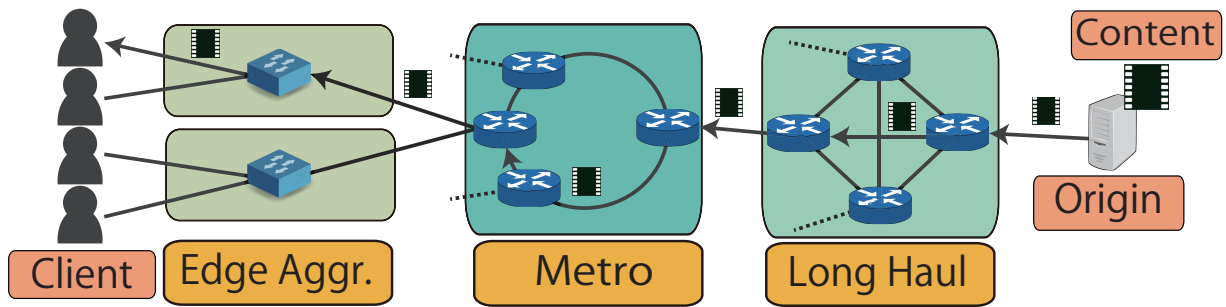


図 3.1.1: 通信事業者ネットワーク

### 3.2 ネットワークで消費される電力の概要

ネットワーク中で消費される電力とは、ネットワークで使用されている機器が消費する電力であり、動的電力と静的電力の2種類がある。動的電力は機器が通信を処理するために消費する電力であり、通信量が増えるほど消費量も増加していく。静的電力は機器を稼働させるために必要な電力であり、通信量と関係なく常に一定量消費される。この内、静的電力は通信量増加による動的電力増加により相対的に小さくなっていくため、本論文では動的電力のみを対象とし電力評価を行う。

動的電力はネットワークに接続されているクライアントがネットワーク中の Origin サーバからコンテンツをダウンロードする時に消費され、コンテンツが通過した経路中に設置されている全てのネットワーク機器が、通信を処理するためにコンテンツサイズに応じた量を消費する。そのため、動的電力はコンテンツダウンロードに要するホップ数とダウンロードするデータサイズに比例して増加する。キャッシュはこれらの要素の内コンテンツダウンロードに要するホップ数を減らす効果がある。ネットワーク中のキャッシュが Origin サーバが保有するコンテンツのコピーを保持すると、クライアントは Origin サーバからではなく図 3.2.1 のようにネットワーク中に設置されたキャッシュからコンテンツを取得する。キャッシュからのコンテンツ取得により、コンテンツがクライアントに辿り着くまでの経路が短縮され動的電力を消費するネットワーク機器の数が減るため、動的電力を削減することができる。ネットワーク中に設置されたキャッシュも電力を消費するが、ルータ等のネットワーク機器の消費電力は十数 kW であるのに対し、キャッシュを保持するための Solid State Drive(SSD) の消費電力は数 W と非常に小さいので無視する [13][14]。

キャッシュを配置するとコンテンツ毎のホップ数が異なり電力計算が煩雑になるため、コンテンツ毎のダウンロードに要するホップ数とアクセスパターンから平均ホップ数を求め簡単にする。平均ホップ数はコンテンツ  $cnt$  のダウンロードに要するホップ数  $H_{cnt}$  とアクセス確率  $p_{cnt}$  の積を取り総和を取ることで求められるコンテンツダウンロードに要するホップ数の期待値であり、式 3.2.1 で求められる。

$$H_{est} = \sum_{cnt} (H_{cnt} \times p_{cnt}) \quad (3.2.1)$$

平均ホップ数はコンテンツの配置方法によって異なり、図 3.2.2 のように人気が高くクライアントがアクセスする確率の高いコンテンツをユーザの近くに設置するといった工夫や、複数のキャッシュで協調し多種類のコンテンツを持つことで小さくすることができる。

キャッシュ設置によって起こる変化はホップ数のみであり、ネットワーク機器の電力やクライア

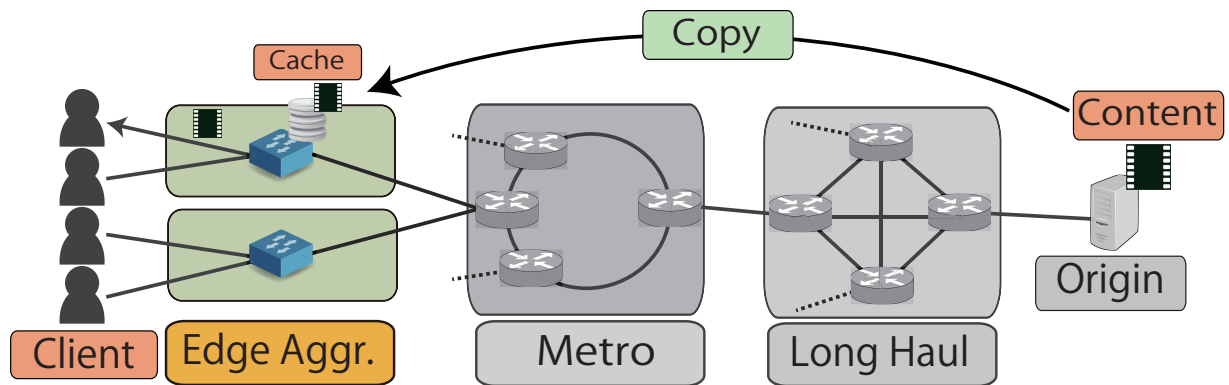


図 3.2.1: キャッシュの効果

ントの通信量といった他の電力に関わる要素に変化は起きない。また、ホップ数の変化はキャッシュ配置とアクセスパターンにのみ依存し、キャッシュ配置とアクセスパターンが同じならホップ数も同じである。そこで、一度シミュレーションから平均ホップ数を取得し再利用することで、短時間で様々なパラメータでの電力を評価できる。

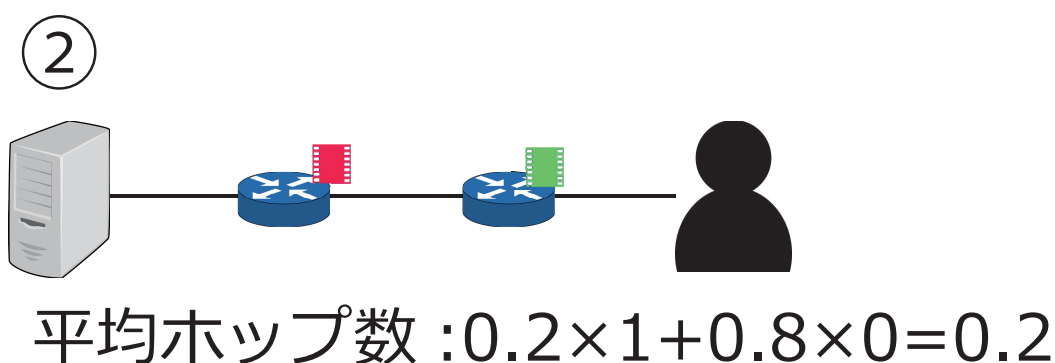
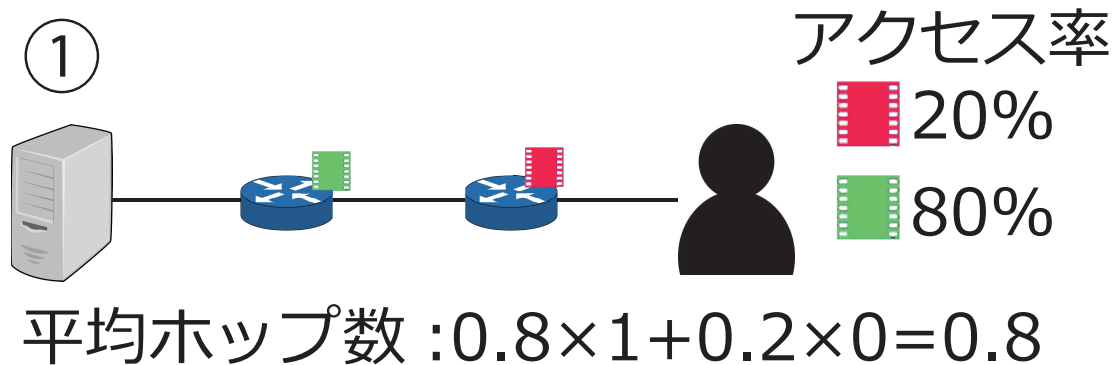


図 3.2.2: キャッシュ配置と平均ホップ数の関係

### 3.3 電力の算出

ネットワーク全体の動的電力算出方法を定め、キャッシュの通信量削減効果のシミュレーション結果を用いた電力計算を可能にする。ネットワーク全体の動的電力は、全クライアントが一定のアクセスパターンでコンテンツをダウンロードする際に消費される動的電力であり、クライアントのダウンロード量が増えるほど電力が増加する。コンテンツをダウンロードする際に消費される電力はダウンロードされたデータ量に比例して増えるため、1bit のデータをダウンロードする際に消費される電力とクライアントが1秒間にダウンロードするデータ量の積を取れば動的電力を求めることができる。よって、電力計算式は式 3.3.1 のようトラフィック  $Tr[\text{bit/s}]$  とクライアントが 1bit のデータをダウンロードする際に要する電力  $P_{DL}[\text{J/bit}]$  の積である。

$$P_{dyn} = Tr \times P_{DL} \quad (3.3.1)$$

1bit のデータをダウンロードする際に要する電力は、クライアントが 1bit のデータを取得する際にデータを転送したネットワーク機器が消費する電力である。そのため、機器が 1bit のデータを 1 ホップさせる際に消費する電力と、経由した機器の数である平均ホップ数の積を取れば 1bit のデータをダウンロードする際に要する電力が求まる。ネットワークの階層ごとに用いられるネットワーク機器の違いから、1 ホップに要する電力は階層ごとに異なる。そのため、1 ホップに要する電力は階層ごとに別々に計算し合計する。従って、1bit のデータを転送する際に消費する電力は式 3.3.2 に示す階層ごとの平均ホップ数  $H_{layer}$  と 1 ホップに要する電力  $P_{layer}[\text{J/bit}]$  の積の総和で表

される.

$$P_{DL} = \sum_{layer} (H_{layer} \times P_{layer}) \quad (3.3.2)$$

$layer$  はネットワーク内に存在する階層を表しており, 本研究では Long Haul, Metro, Edge Aggr. の三階層である [10]. 平均ホップ数はシミュレーションの結果, あるいはネットワーク構造やキャッシュ配置から推定した値を用いる. 1 ホップに要する電力は論文・データシート等から得ることができる. データがリンクをホップする際, 図 3.3.1 のように複数の機器を経由し, 機器毎に電力消費量が異なり, 1 ホップに要する電力はそれらのネットワーク機器の電力を合計することで求まる [10]. 従って, 1 ホップに要する電力は階層ごとの 1 ホップ中に経由する機器  $dev_{layer}$  の電力  $P_{dev_{layer}}$  の総和となり, 式 3.3.3 で表される.

$$P_{layer} = \sum_{dev_{layer}} P_{dev_{layer}} \quad (3.3.3)$$

本研究では 1 ホップの間に, Long Haul と Metro では, ルータ, OTN スイッチ, WDM, 増幅装置, Edge Aggr. ではスイッチを経由する [10]. ルータは通信のルーティング先を決定する装置であり, ルーティング処理を行う際に電力を消費する. OTN スイッチは OTN の規格で用いられるスイッチであり, 通信をスイッチングする際に電力を消費する. WDM は光信号を多重化して通信を高速化する装置であり, 光信号を多重化する際に電力を消費する. 増幅装置は弱まった光信号を増幅し長距離の信号の伝送を行うための装置であり, 光信号を増幅する際に電力を消費する. 伝送距離が長くなるほど必要な増幅装置の数は増加するため, ネットワークが大規模になる上位階層ほど設置数が増え消費電力が増加する. スイッチはイーサネットのスイッチであり, 通信のスイッチングをする際に電力を消費する.

上記計算式を用い, 以下の手順でキャッシュ配置毎の電力を算出できる.

1. 評価したいネットワーク上でシミュレーションを行いキャッシュ配置毎の平均ホップ数を算出
2. 論文・データシート等から機器の電力を調べ, 式 3.3.3 を用いて 1 ホップに要する電力を計算
3. 任意のトラフィック量を設定し, 式 3.3.2, 式 3.3.1 から電力を計算

キャッシュ配置毎に電力を算出し比較することで, キャッシュの効果も電力の観点から評価する. また, 動的電力を算出する際にトラフィックではなくクライアントのダウンロードするデータサイズを用いることで電力 [J] を得ることができ, 1 コンテンツのダウンロードが電力に与える影響も見積もることができる.

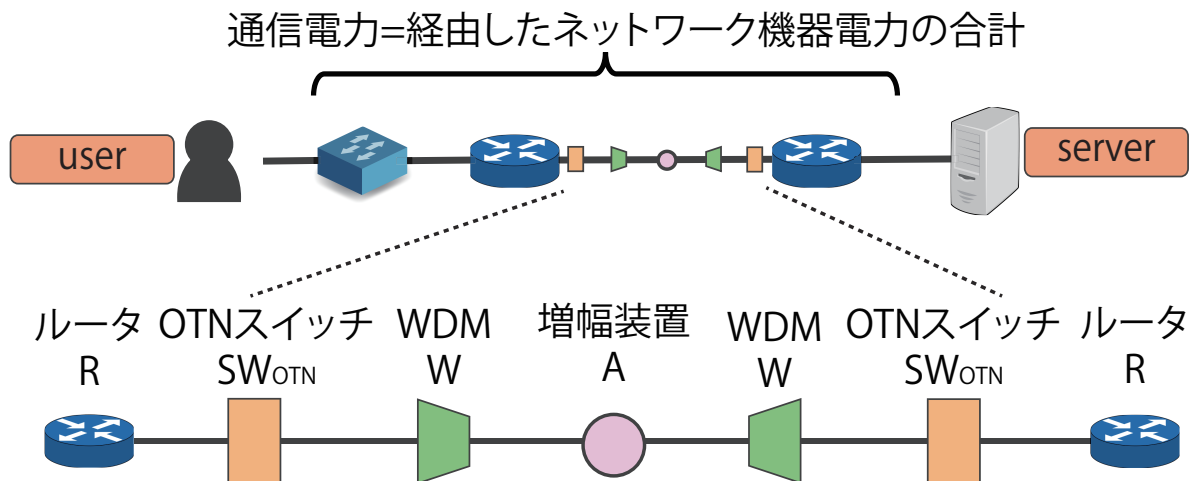


図 3.3.1: 1 ホップ中に経由する機器

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		NW階層		合計	Long Haul	Metro	Edge Aggr.
3		ネットワークパラメータ	トラフィック[Gbit/sec]			1.00E+00	
4			階層内の平均ホップ数		5.47	4.5	1
5		電力パラメータ[J/bit]	ルータ		6.05E-09	6.05E-09	
6			OTNスイッチ		1.68E-09	1.68E-09	
7			WDM		2.49E-09	2.49E-09	
8			増幅装置		6.30E-10	3.10E-10	
9			スイッチ				3.84E-09
10		電力[W]	階層内の合計	118.7E+0	63.7E+0	50.9E+0	4.1E+0
11							
12		ネットワークパラメータ					
13		電力パラメータ					
14		自動計算・入力不要					

図 3.4.1: 電力計算スプレッドシート

### 3.4 電力計算の仕組みの作成

3.3 で導出した電力計算式を用い、平均ホップ数を入力することで電力を導出するスプレッドシートを作成する。スプレッドシートは図 3.4.1 のようになっており、各ネットワーク機器の 1 ホップに要する電力を青色のセルに、ネットワーク内の平均ホップ数、トラフィック量を黄色のセルに入力する。計算結果は階層ごと及びネットワーク全体の動的電力としてオレンジ、灰色のセルに出力され、パラメータを入力するだけで容易に電力計算が可能である。電力パラメータが変動した時の評価も固定パラメータの欄を変更するだけで容易に評価することができ、評価の度に再シミュレーションする必要がない。

## 第4章 評価

### 4.1 実験設定

3で提示した電力計算方法を用いて、キャッシュ配置方法と電力削減効果の関係を評価する。評価の際に用いる実験設定について本節で述べる。実験ネットワークは、図4.1.1の通信事業者のネットワークを模した3階層構造のネットワークを用いる [10][12][15]。Origin サーバはユーザが求める全てのコンテンツを保持しているサーバであり、1000個の同じサイズを持つコンテンツを保持する。最上段の Long Haul は Origin サーバと接続される55ノードのメッシュネットワークであり、ネットワーク構成は文献 [15] を参照した。中段の Metro は8ノードのリングネットワークであり、Long Haul の全ノードの下にそれぞれ独立した Metro ネットワークが存在する [12]。最下段の Edge Aggr. はクライアントの通信を集約するネットワークであり、階層内の接続がなく Metro とのみ接続される直線ネットワークである [10]。各階層のネットワーク設定は表4.1であり、キャッシュ無しの場合と3階層の全ノードにキャッシュを配置した場合の動的電力を比較する。表中のキャッシュ容量は各階層の1ノードが持てるコンテンツ数を表しており、上位階層は大容量のキャッシュを設置できると仮定し Long Haul のみキャッシュ容量が大きい。

実験ネットワーク上でクライアントがコンテンツをダウンロードするシミュレーションを行い、階層ごとのコンテンツダウンロードに要する平均ホップ数を測定する。全クライアントは一定のアクセスパターンに従い、コンテンツを Origin サーバ、または通信経路中のキャッシュからダウンロードする。この時全クライアントがダウンロードに要したホップ数の平均が平均ホップ数である。各クライアントは、図4.1.2の Youtube に対するアクセスパターンを模した  $k=0.475$ ,  $\theta=170.6067$  のガンマ分布に従う [16]。この分布は人気の高いコンテンツに非常にアクセスが集中するという特徴を持っており、人気上位4%のコンテンツで全アクセスの50%を占める。

表 4.1: 各階層のネットワーク設定

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
トポロジ	直線	単方向リング	メッシュ
ノード数	440	440	55
キャッシュが保持できるコンテンツ数	20	20	100



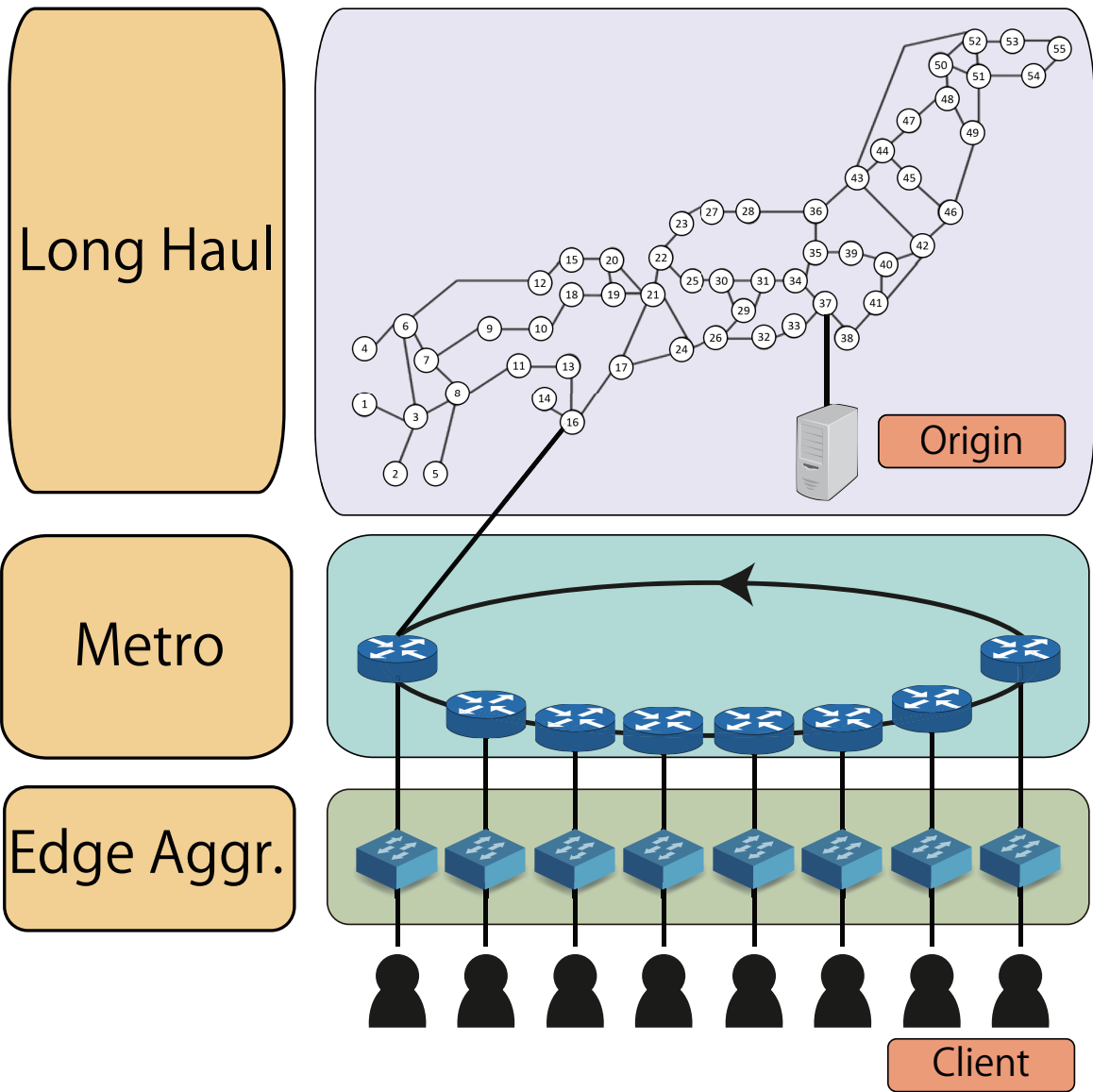


図 4.1.1: 実験ネットワーク

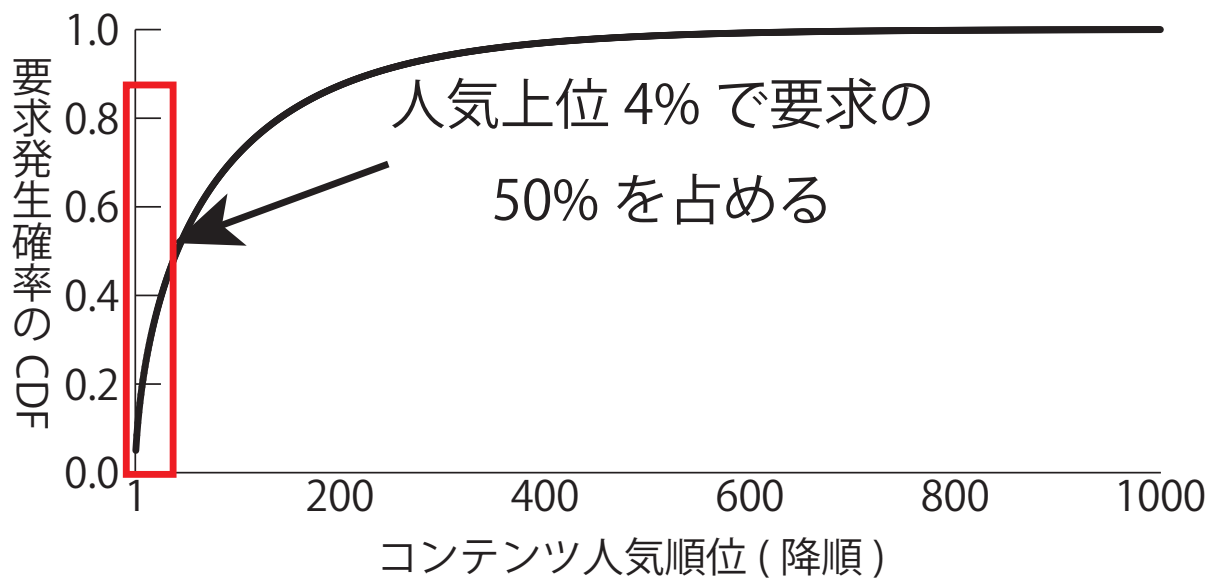


図 4.1.2: コンテンツアクセス頻度 (ガンマ分布)

## 4.2 キャッシュの電力削減効果

### 4.2.1 概要

キャッシュの有無による電力を比較することで、キャッシュによる電力削減効果の大きさを示す。キャッシュ制御方式には、各キャッシュが単体で保持コンテンツを決定する方式である LFU(Least Frequently Used) と、キャッシュ同士で協調・分散してコンテンツを保持する Colored Cache の 2 種類を用いる [17]。LFU は、各キャッシュが自らの受けたアクセスを集計し、アクセスの多いものから順に保持するという方法である。LFU キャッシュを用いた場合、各クライアントのアクセスパターンは同一であるため階層内の全ノードでキャッシュ内容が同一となり、最下層は最も人気の高いコンテンツ、上位階層ではそれに次いで人気の高いコンテンツが保持される。Colored Cache は文献 [17] で提案されている、キャッシュとコンテンツに色を割り振り、各キャッシュは対応する色を持つコンテンツのみを保持する分散協調キャッシュ方式である。人気のあるコンテンツに複数の色を着けることにより、人気のあるコンテンツは多数、人気の無いコンテンツは少数のキャッシュサーバで保持されるようになり、限られたキャッシュ容量を有効に活用し高いホップ数削減効果を達成できる。本実験では、キャッシュにはネットワーク内のノードに階層ごとに異なる色付けを行い、図 4.2.1 のように Long Haul, Metro をそれぞれ 8 色に分け、Edge Aggr. は階層内の接続がなく分散・協調ができないため 1 色とする。コンテンツにはダウンロードに要するホップ数が最小となる色付けを行う。これらのコンテンツ配置とキャッシュを置かない場合でシミュレーションを行い平均ホップ数を測定し、3 章で提案した計算式を用いキャッシュ無し及び各キャッシュ配置での消費電力を計算する。電力計算には表 4.2 に示すパラメータを用いる。階層ごとの 1 ホップの間に経由する機器とそれら消費電力は、文献 [10] で用いられた表 4.3 の 2008 年の機器のパラメータを、同論文内で提示された電力効率の改善を推定する式 4.2.1, 4.2.2 を用いて 2015 年の推定値に変換したものである。ルータ・OTN スイッチ・スイッチの電力推定は式 4.2.1 を用いる。 $P_{2008}$  は 2008 年の表 4.3 に示す機器の電力、 $P_{2015}$  は 2015 年の予測電力であり、これらの機器の電力は年に 10% ずつ改善することを示している。WDM, 増幅装置は機器の電力全体の 90% が年に 10% ずつ改善していくため、電力推定には式 4.2.2 を用いる。

$$P_{2015} = P_{2008} \times 0.9^{(2015-2008)} \quad (4.2.1)$$

$$P_{2015} = P_{2008} \times (0.1 + 0.9 \times 0.9^{(2015-2008)}) \quad (4.2.2)$$

Metro と Long Haul は使用機器が同じであり、増幅装置の設置数のみが異なるとしているため 1 ホップに要する電力はほぼ同じとなる [10]。

## 4.2.2 結果

キャッシュ無し, LFU, Colored Cache でシミュレーションを行った結果, 表 4.4 に示す平均ホップ数を得た. 得られた平均ホップ数を用いて計算した各キャッシュ配置の電力を図 4.2.2 に示す. キャッシュ配置を行うとキャッシュ無しに対して大幅に電力が減少し, LFU では 65.1%, Colored Cache を用いた場合 76.6% の削減となる. ネットワーク内のノードで協調し多種類のコンテンツを保持できるため, Colored Cache の方が高い削減効果を達成している. 階層ごとの電力削減量を比較すると, 上位階層ほど電力が大きく削減できている. これは, 下位階層でキャッシュヒットすることにより上位階層との通信が行われなくなるためである. そのため, キャッシュを設置する場合アクセスの多いコンテンツを下位階層に置くと高い電力削減効果を得られる. 最下層の Edge Aggr. では, LFU と Colored Cache で電力削減率が同じとなっている. この原因は, この階層の色数が 1 色であり, Colored Cache と LFU のキャッシュ配置が同じとなったためである.

表 4.2: 各階層の電力計算に用いるパラメータ

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
$R$ [J/bit]	–	$6.03 \times 10^{-9}$	$6.03 \times 10^{-9}$
$SW_{OTN}$ [J/bit]	–	$1.67 \times 10^{-9}$	$1.67 \times 10^{-9}$
$W$ [J/bit]	–	$2.49 \times 10^{-9}$	$2.49 \times 10^{-9}$
$A$ [J/bit]	–	$0.31 \times 10^{-9}$	$0.63 \times 10^{-9}$
$SW$ [J/bit]	$3.83 \times 10^{-9}$	–	–
1 ホップ電力 [J/bit]	$3.83 \times 10^{-9}$	$10.50 \times 10^{-9}$	$10.82 \times 10^{-9}$
トラフィック [bit/s]		1	

$H$ : 平均ホップ数  $R$ : ルータ電力  $SW_{OTN}$ : OTN スイッチ電力  
 $W$ : 光波長多重化装置電力  $A$ : 増幅装置電力  $SW$ : スイッチ電力

表 4.3: 2008 年の電力パラメータ

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
$R$ [J/bit]	-	$12.6 \times 10^{-9}$	$12.6 \times 10^{-9}$
$SW_{OTN}$ [J/bit]	-	$3.5 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-9}$
$W$ [J/bit]	-	$4.7 \times 10^{-9}$	$4.7 \times 10^{-9}$
$A$ [J/bit]	-	$1.18 \times 10^{-9}$	$0.59 \times 10^{-9}$
$SW$ [J/bit]	$8.0 \times 10^{-9}$	-	-

$R$ : ルータ電力  $SW_{OTN}$ : OTN スイッチ電力

$W$ : 光波長多重化装置電力  $A$ : 増幅装置電力  $SW$ : スイッチ電力

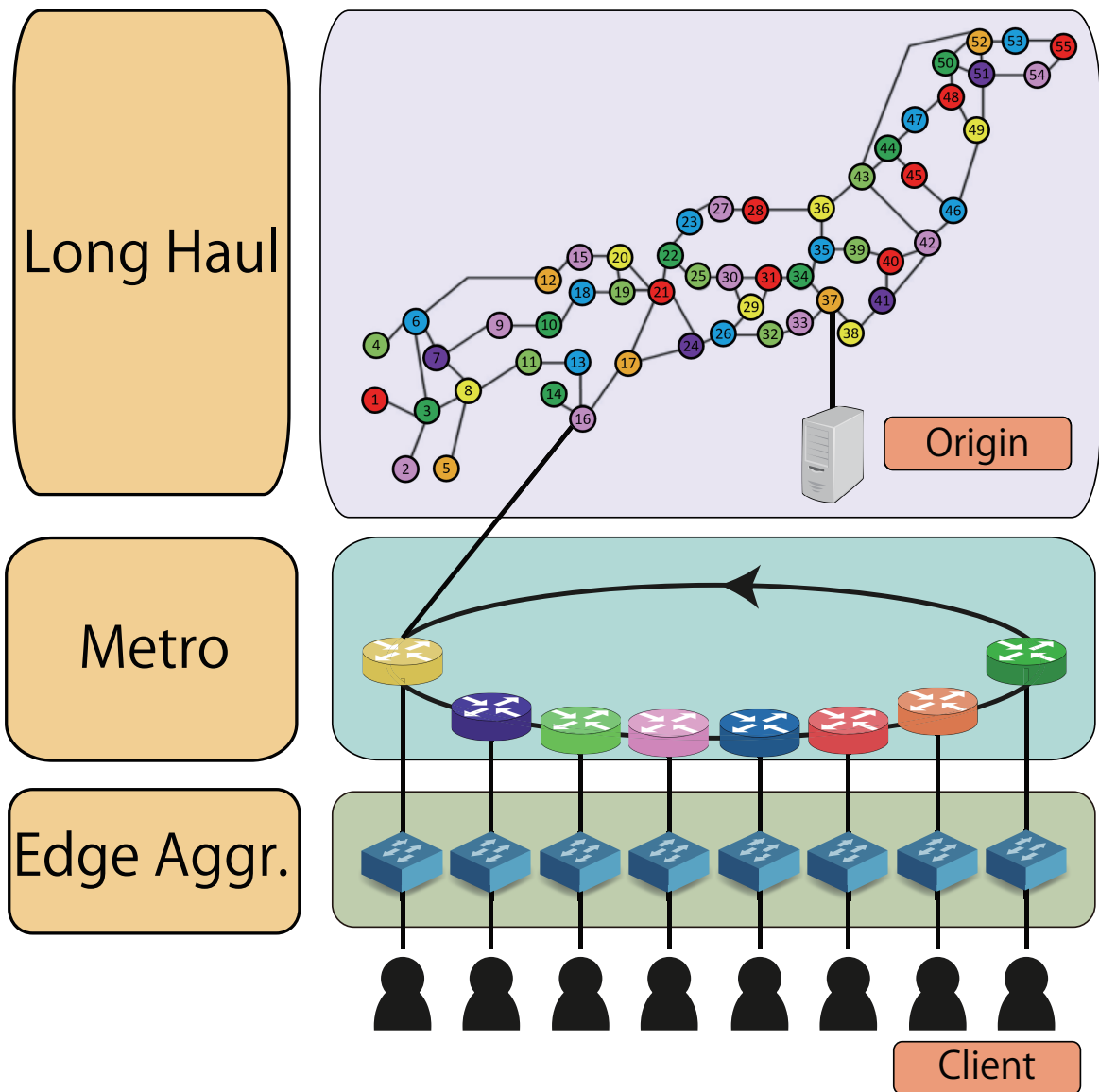


図 4.2.1: 実験ネットワークの色付け

表 4.4: 各キャッシュ配置の平均ホップ数

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
no Cache	1	4.5	5.47
LFU	0.65	2.28	1.11
colored cache	0.65	1.90	0.31

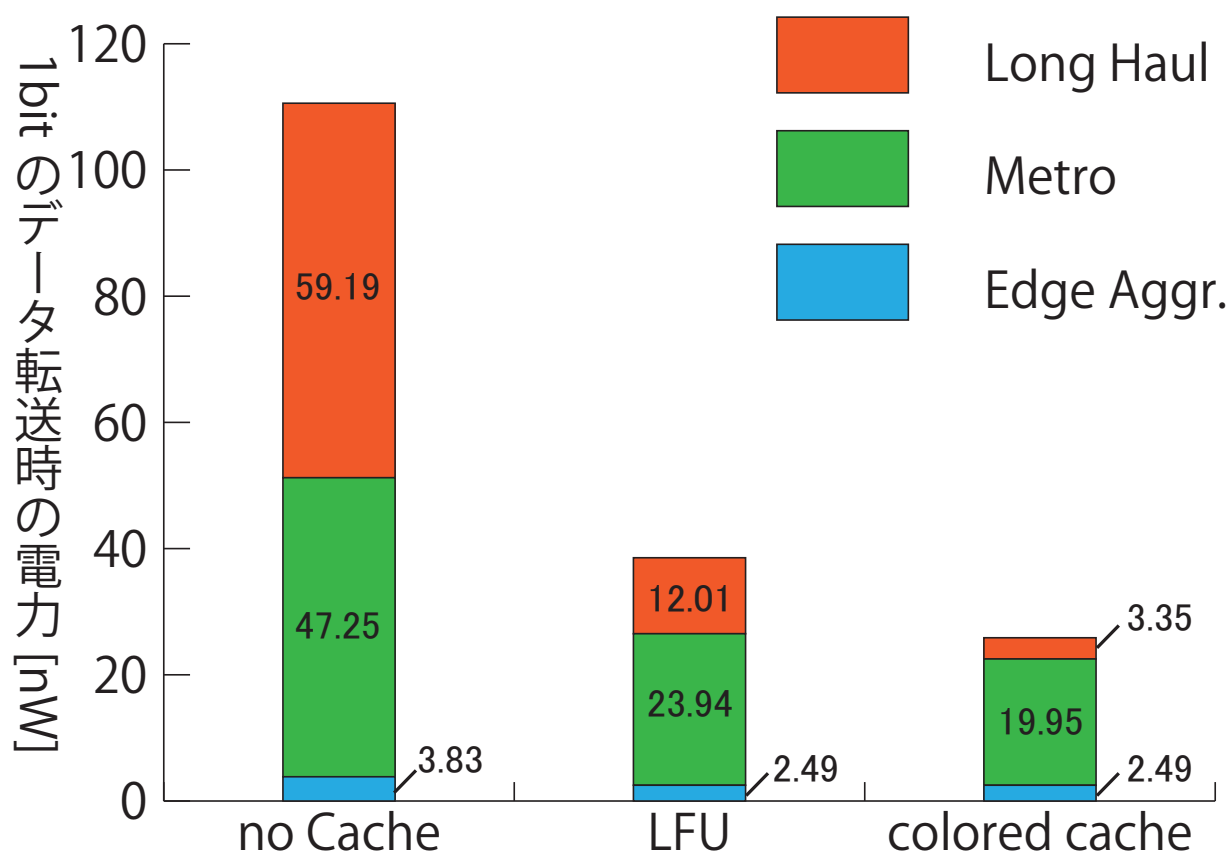


図 4.2.2: キャッシュ配置の電力削減効果

## 4.3 通信量最小配置と電力最小配置の比較

### 4.3.1 概要

二つの評価関数で Colored Cache におけるコンテンツ配置を決定し、それぞれの電力を計算し比較する。一つ目の評価関数は通信量の最小化であり、取得に要するホップ数が最小になるようにコンテンツに色付けし、ネットワーク内にキャッシュを配置する。二つ目の評価関数は電力の最小化であり、コンテンツ取得に要する電力が最小になるように色付けを行う。階層ごとに1ホップに要する電力が異なるため、電力の小さい階層で多種類のコンテンツを保持し賄える通信の量を増やすことで、電力が大きい階層の通信を減らし電力をより削減できる。この場合、通信量最小配置よりもネットワーク全体の平均ホップ数が増えるが電力は小さくなる。

電力評価には2種類のパラメータを用いる。一つ目は、表 4.2 を用いた計算である。電力の大きい階層である Long Haul と Metro で差がほぼ無く、Edge Aggr. ではどの方式でも同じキャッシュ配置となるため、通信量最小配置と電力最小配置の電力差は小さくなる。二つ目は、表 4.5 を用いた計算である。Long Haul の電力が Metro の5倍と大きくなっているため、Metro 内で多数のコンテンツを保持し Long Haul に到達する通信を減らすとより電力が小さくなる。その結果、電力最小配置は通信量最小配置より Long Haul の平均ホップ数が減少し Metro の平均ホップ数が増加する。これにより、全体の通信量は増加するが電力が減少する。

### 4.3.2 結果

表 4.2 のパラメータを用いた場合の通信量最小配置と電力最小配置の電力比較を図 4.3.1、平均ホップ数の比較を図 4.3.2、各階層の保持コンテンツを表 4.6 に示す。電力最小配置は Long Haul の電力が少なく Metro の電力が大きくなる。ホップ数も電力最小配置は Long Haul が少なく、Metro が多い傾向になっている。これは、電力の大きい Long Haul での通信を避けるために Metro で多種類のコンテンツを持った結果であり、表 4.6 から見て取ることができる。一方、Long Haul と Metro の1ホップに要する電力の差はわずかであるため、通信量最小配置と電力最小配置の差はほぼ無く、電力削減率は共に 76.6%である。

表 4.5 のパラメータを用いた場合の通信量最小配置と電力最小配置の電力比較を図 4.3.3、平均ホップ数の比較を図 4.3.4、各階層の保持コンテンツを表 4.7 に示す。Long Haul と Metro の1ホップに要する電力の差の拡大に伴い、通信量最小配置と電力最小配置の電力、平均ホップ数、保持コンテンツの差がさらに拡大している。電力では、Metro の電力が 14.7%増加し Long Haul の電力が 29.1%減少した結果、電力最小配置は通信量最小配置より 4.6%小さくなっている。それに対し平均ホップ数は通信量最小配置より 13%増加しており、電力パラメータによっては通信量増加と引き換えにより電力削減を行うことができるキャッシュ配置が存在することがわかった。コンテンツ配置も表 4.7 のように大きな差がでており、電力最小配置は通信量最小配置よりも Metro で多種類のコンテンツを保持するようになっている。

表 4.5: 各階層の電力計算に用いるパラメータ

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
1ホップ電力 [J/bit]	$3.84 \times 10^{-9}$	$10.53 \times 10^{-9}$	$52.65 \times 10^{-9}$

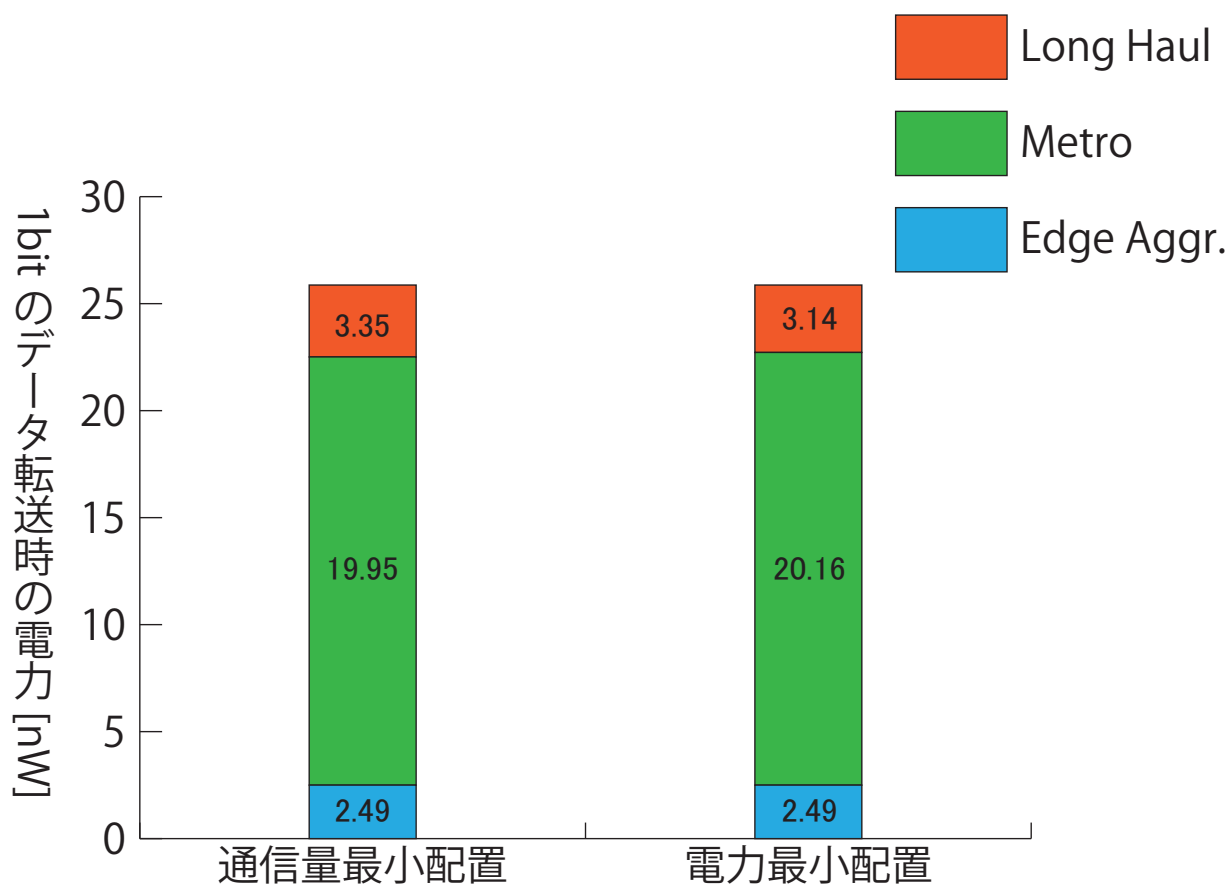


図 4.3.1: 表 4.2 使用時のキャッシュ配置と電力の関係

表 4.6: 表 4.2 使用時の各階層の保持コンテンツ (人気順位)

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
通信量最小配置	1~20 位	21~103 位	104~610 位
電力最小配置	1~20 位	21~107 位	108~520 位

表 4.7: 表 4.5 使用時の各階層の保持コンテンツ (人気順位)

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
通信量最小配置	1~20 位	21~103 位	104~610 位
電力最小配置	1~20 位	21~147 位	148~594 位



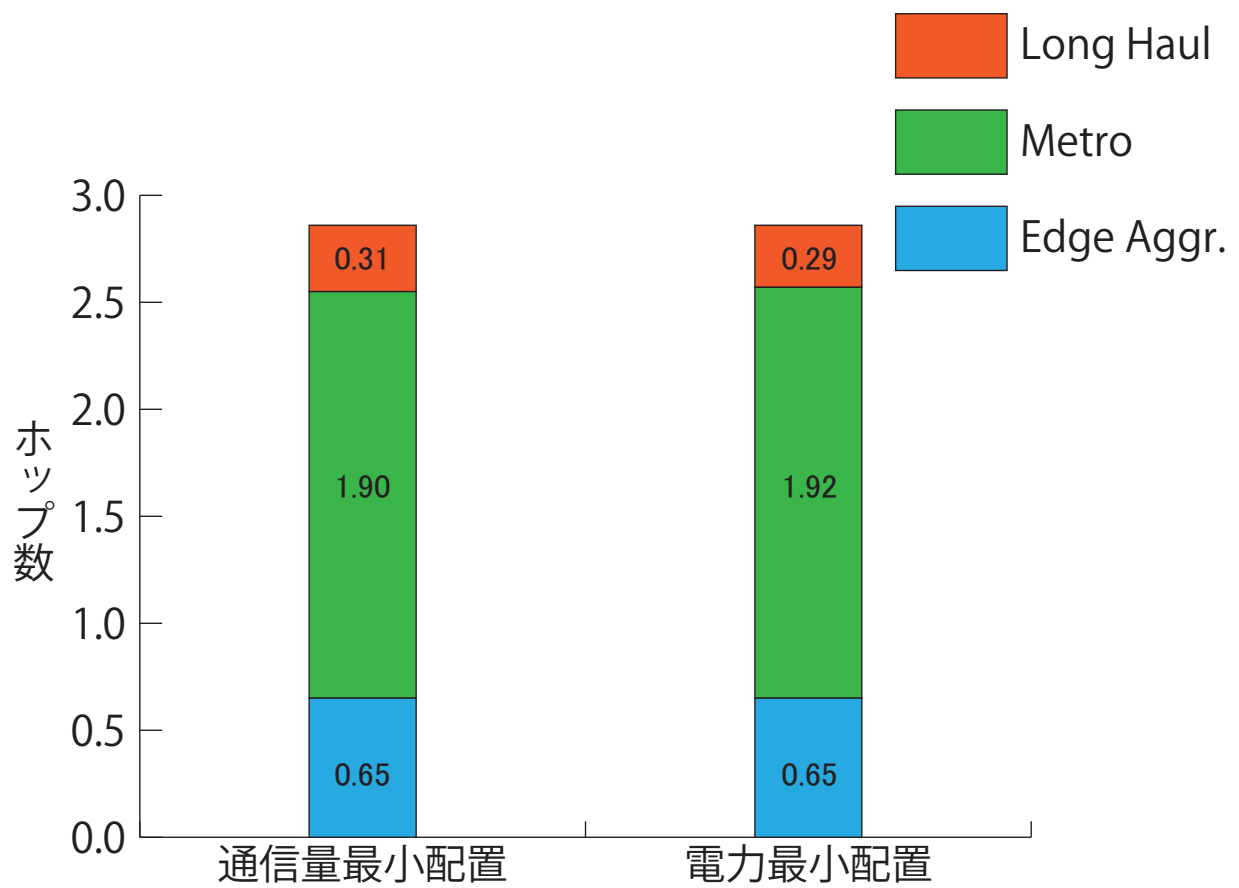


図 4.3.2: 表 4.2 使用時のキャッシュ配置と平均ホップ数の関係

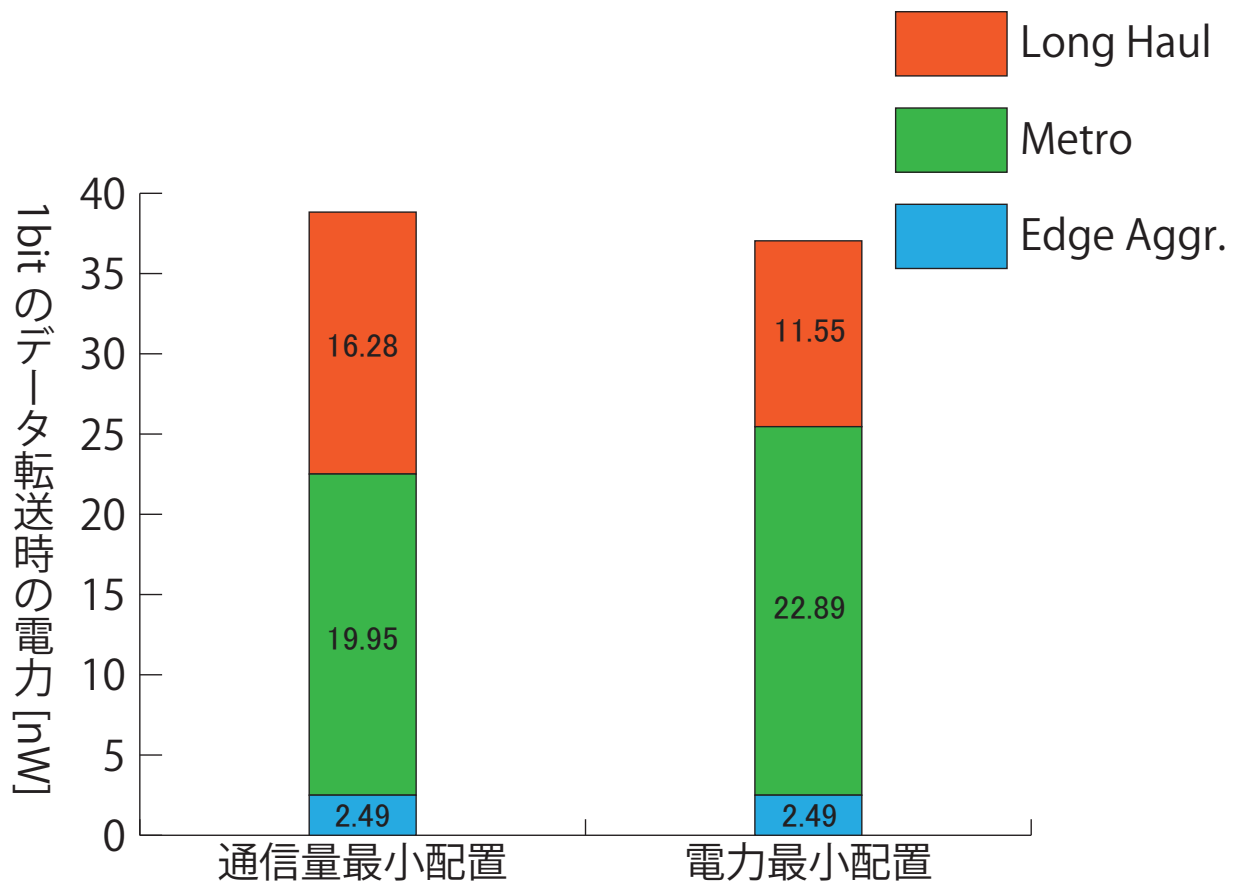


図 4.3.3: 表 4.5 使用時のキャッシュ配置と電力の関係

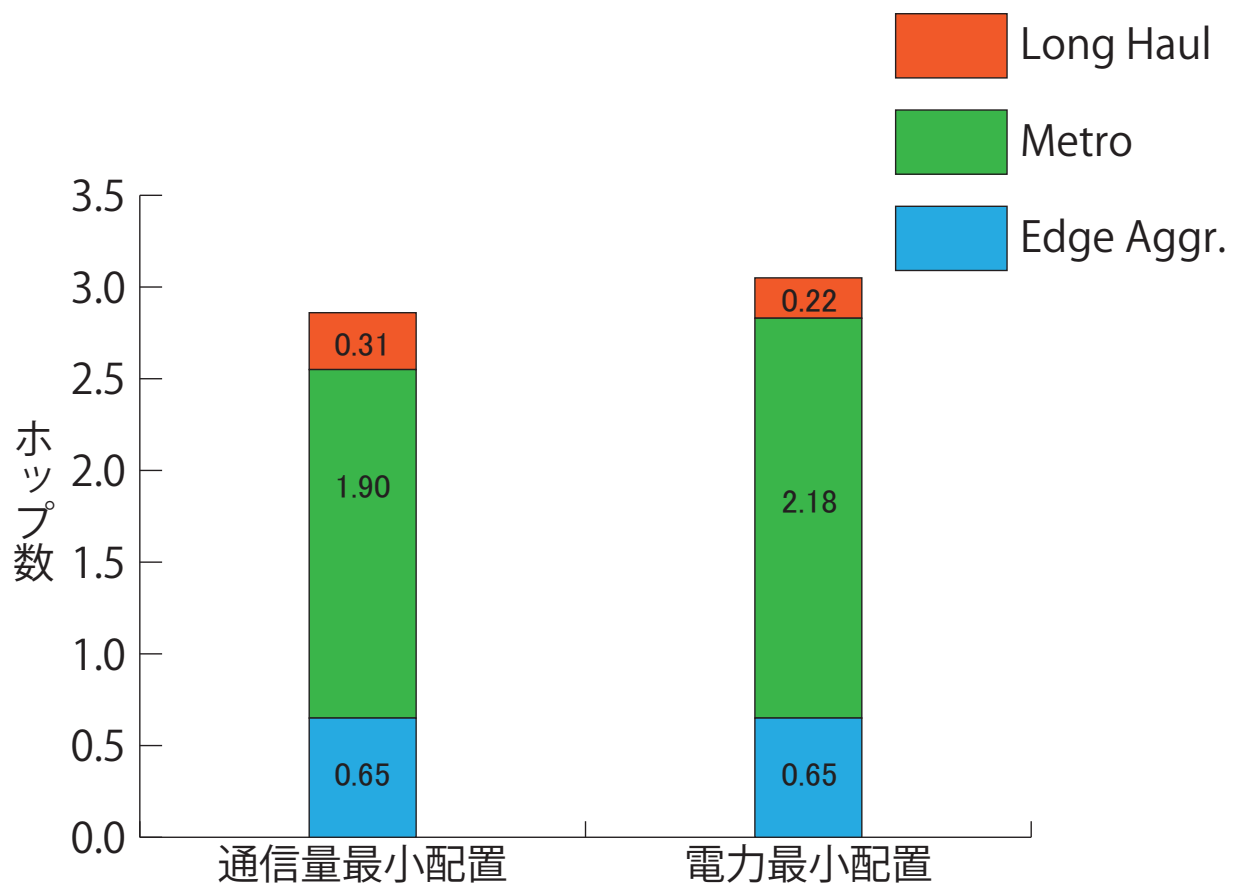


図 4.3.4: 表 4.5 使用時のキャッシュ配置と平均ホップ数の関係

## 4.4 推定したホップ数を用いた評価

### 4.4.1 概要

シミュレーションから得た平均ホップ数とシミュレーションを行わず推定した平均ホップ数を用いて計算した電力を比較する。クライアントのアクセスパターンとネットワーク構造、キャッシュ配置が既知ならば、シミュレーションを行わずおおよそのコンテンツ取得に要する平均ホップ数を推定できる。推定した平均ホップ数とシミュレーションで取得した平均ホップ数の電力計算結果に大きな差がないならば、シミュレーション無しで容易に電力評価が可能である。そこで、4.2節で計算した電力と、アクセスパターン、ネットワーク構造、キャッシュ配置から推定した平均ホップ数により計算した電力を比較し、誤差の大きさを確認する。

平均ホップ数を求める式3.2.1の要素の内、 $p_{cnt}$ はアクセスパターンで用いているガンマ分布から得ることができるため、 $H_{cnt}$ を推定できれば平均ホップ数が求まる。 $H_{cnt}$ の推定方法はキャッシュ配置毎に異なり、キャッシュ無しの場合コンテンツはOriginサーバからのみ供給されるため、全コンテンツのダウンロードに要するホップ数はクライアントからOriginに至る経路のホップ数の平均となる。LFUでキャッシュ配置する場合、同一階層内ノードの保持コンテンツは全て同じになるため、階層の最初のノードでヒットしない場合階層内の別ノードでもヒットしない。従って、キャッシュヒットした階層以上でのダウンロードに要するホップ数は0、それより下の階層ではキャッシュ無しと同じとなる。Colored Cacheを用いる場合コンテンツ毎に置かれるノードが異なり、多くの色が付与されるコンテンツほど多数のノードに置かれホップ数が少なくなる。そこで、表4.8に示す階層ごとに付与された色数とホップ数の関係を導出し、ダウンロードに要するホップ数を求める。色数とホップ数の関係は、実験ネットワーク内で各コンテンツ取得に要するホップ数をシミュレーションにより求め、同じ色数同士のコンテンツでホップ数を平均することで求める。シミュレーションはキャッシュ配置を決定せずホップ数を求めるだけであるので、短時間で電力を評価できる。

### 4.4.2 結果

キャッシュ無し、LFU、colored cacheの推定ホップ数を表4.9に示す。推定したホップ数を用いて計算した電力と4.2節で述べたシミュレーションから得た平均ホップ数を用いて計算した電力の比較を図4.4.1に示す。推定したホップ数を用いた場合とシミュレーションを行った場合の電力差はほとんどなく、シミュレーション無しでほぼ正確に電力評価をできることが見て取れる。キャッシュ無しの場合電力に誤差は発生していない。これは、シミュレーションではOriginからクライアントまでの最短経路のみを用いてコンテンツのダウンロードを行うため、ホップ数が全く同じ

表 4.8: 色数とホップ数の関係

色数	0	1	2	3
Long Haul	5.47	1.61	1.06	0.76
Metro	4.5	3.5	1.5	0.875
Edge Aggr.	1	0	-	-

になったためである。キャッシュありの場合も、LFU ではコンテンツ配置を正確に推定できたため誤差は、0.02%に留まっているものの Colored Cache の誤差は 2.44%とほとんど誤差なく評価できることがわかった。

表 4.9: 推定ホップ数

	Edge Aggr.	Metro	Long Haul
no Cache	1	4.5	5.47
LFU	0.65	2.30	1.09
colored cache	0.65	1.84	0.31

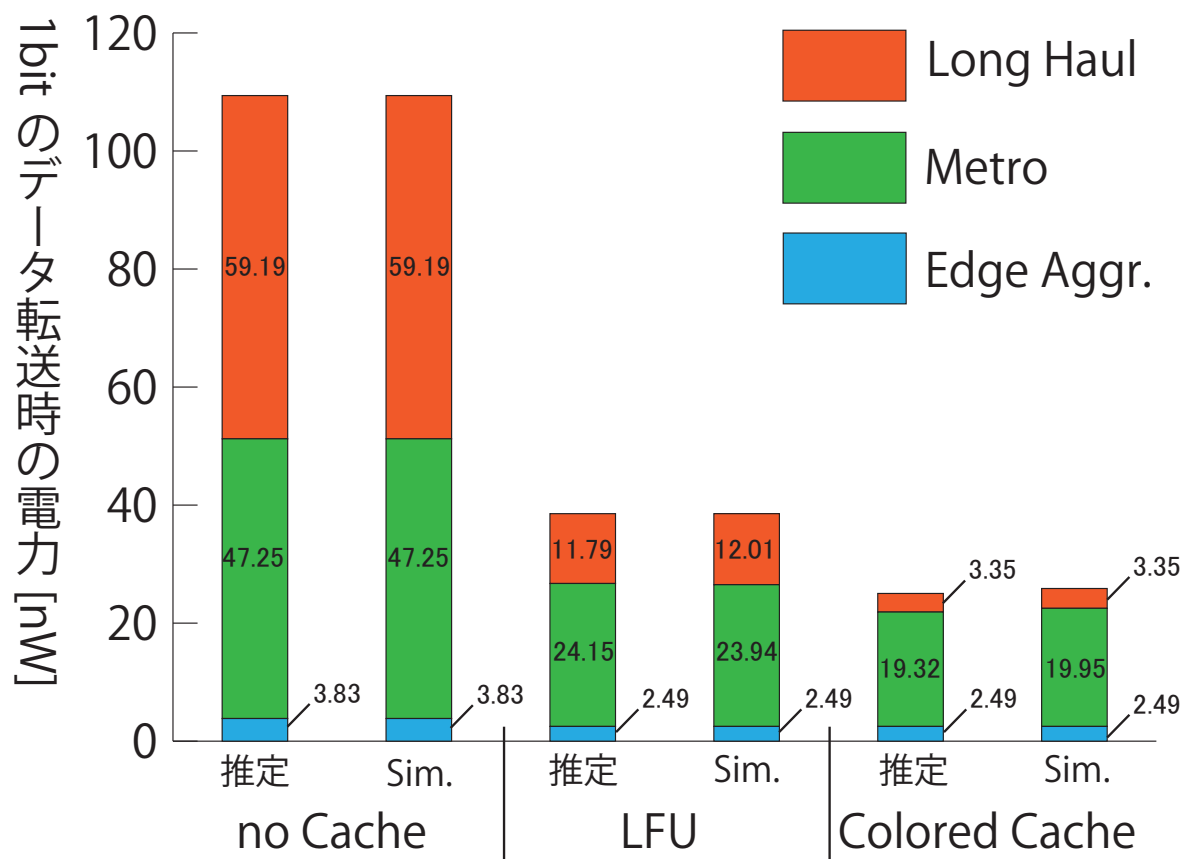


図 4.4.1: シミュレーションにより求めた電力と推定により求めた電力の比較

## 第5章 議論

### 5.1 評価の有用性についての考察

平均ホップ数を用いて容易にネットワークで消費される電力を評価できる仕組みを提案し、キャッシュの電力削減量を指標として提示することを容易にした。本研究で提示した仕組みは平均ホップ数を入力するだけで電力評価を行うことができるため、キャッシュ配置、ネットワーク構成を問わず同じように電力を評価できる。また、ネットワーク機器の電力パラメータも自由に変更できるため、ネットワークで用いる機器を変更し電力が変動した場合でもシミュレーションを行うことなく影響を評価できる。

キャッシュによる電力削減を行う場合、4.2 で示したように分散協調キャッシュを用いネットワーク中のキャッシュで多種類のコンテンツを保持すると効果が高まる。分散協調キャッシュを実現する方法として今回実験した Colored Cache の他に遺伝的アルゴリズムを用いた方法がある [8][9]。常にアクセスの多いコンテンツが変動するインターネットにおいては短い計算時間でキャッシュ配置を決定できる方法が望ましいため、計算時間の短い Colored Cache の使用が効果的であると考えられる。

4.3 で行った評価により、階層ごとの電力によっては通信量の上昇と引き換えに電力をより削減できる配置が存在することを示した。このことから、電力コストを入力するだけで電力最小となるキャッシュ配置を導出できる仕組みを作ることができる可能性がある。あらかじめアクセスパターン、ネットワーク構造、キャッシュ配置からキャッシュ配置と平均ホップ数の関係を記録し、入力された電力パラメータからキャッシュ配置毎の電力を計算することで、短時間で電力最小となるキャッシュ配置を導出できる。

4.4 において推定したホップ数を用いてシミュレーションを行う場合と遜色なく電力評価を行うことができることを示した。正確なシミュレーションを行うことができたのは全クライアントのアクセスパターンが同一であるという単純なパターンでホップ数の推定が容易であったためであり、クライアントごとに異なるアクセスパターンを持つ、アクセスパターンが時間とともに変動するという条件では推定した電力とシミュレーションで得られる電力の誤差が拡大する。しかし、単純なアクセスパターンならばシミュレーションとほぼ差の無い電力評価を行うことができるため、キャッシュの電力削減効果を時間をかけず概算し見積もることができる点で有効である。

## 5.2 キャッシュによる電力削減の今後についての考察

ネットワーク機器の電力効率の改善速度は緩やかになっていく一方 [18], インターネット中を流れる通信量は増加し続けている [1]. そのため, 今後はネットワークで消費される電力は増加し続け, これを抑える方法としてキャッシュを用いた電力削減が有力になる.

現在の多くの研究は通信量に比例して電力が増加するという前提で電力評価を行っている. しかし, 低負荷時にクロスバースイッチの転送速度を減じることで電力効率を向上させる研究が存在するなど [19], 将来的には通信時の電力効率は機器にかかる負荷に応じて変動するようになる可能性がある. キャッシュを用いると通信をが下位階層で完結し, 上位階層のネットワークにかかる負荷を大きく減らすことができる. よって, 負荷に応じて電力効率が変動する環境ではキャッシュの電力削減効果は現在よりもさらに高まると期待できる.



## 第6章 結論

キャッシュ方式の利点を議論する指標として消費電力という尺度を提示し、平均ホップ数を用いて容易に電力を評価できる仕組みを提案した。この仕組みを用いて複数のキャッシュ配置の電力削減効果を求めた結果、キャッシュによりネットワークで消費される電力を大幅に削減できること、電力パラメータによっては通信量の増加と引き換えにより電力を削減できる配置が存在することを示した。また、ネットワーク構造、キャッシュ配置、アクセスパターンから推定したホップ数を用いてシミュレーション無しでほぼ正確な電力評価を行うことができることも示した。これにより、キャッシュ配置を設計する際に時間をかけずに電力削減効果を概算することができる。

今後の課題として、ネットワーク機器の電力効率が負荷に応じて増減する場合の電力評価を行い、キャッシュによりネットワーク機器の負荷を減らすことにより大きな電力削減効果を得られることを示すこと、電力パラメータを入力することで電力最適なキャッシュ配置を自動的に算出する仕組みの開発などが挙げられる。

## 謝辞

本研究に際して、熱心なご指導を頂きました吉永努教授に感謝の意を表します。また、日常の議論を通じて研究について多くの知識や示唆を頂いた吉見真聡助教に、感謝致します。最後に、研究方針や実験について様々な指摘、協力を下さいましたネットワークコンピューティング学講座の皆様にも、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] The Zettabyte Era—Trends and Analysis. Cisco, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>.
- [2] Sofie Lambert, Ward Van Heddeghem, Willem Vereecken, Bart Lannoo, Didier Colle, and Mario Pickavet. Worldwide electricity consumption of communication networks. *Opt. Express*, Vol. 20, No. 26, pp. B513–B524, Dec 2012.
- [3] Global e Sustainability Initiative (GeSI). Smart 2020: Enabling the low Carbon Economy in the Information age. <http://gesi.org/files/Reports/Smart%202020%20report%20in%20English.pdf>.
- [4] 環境省. 日本の温室効果ガス排出量の算定結果. <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/>.
- [5] K. Ishii, J. Kurumida, K. i. Sato, T. Kudoh, and S. Namiki. Unifying Top-Down and Bottom-Up Approaches to Evaluate Network Energy Consumption. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 21, pp. 4395–4405, Nov 2015.
- [6] Erik Nygren, Ramesh K. Sitaraman, and Jennifer Sun. The Akamai Network: A Platform for High-performance Internet Applications. *SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 44, No. 3, pp. 2–19, August 2010.
- [7] Van Jacobson, Diana K. Smetters, James D. Thornton, Michael Plass, Nick Briggs, and Rebecca Braynard. Networking named content. *Commun. ACM*, Vol. 55, No. 1, pp. 117–124, January 2012.
- [8] N. Choi, K. Guan, D. C. Kilper, and G. Atkinson. In-network caching effect on optimal energy consumption in content-centric networking. In *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 2889–2894, June 2012.
- [9] R. Modrzejewski, L. Chiaraviglio, I. Tahiri, F. Giroire, E. Le Rouzic, E. Bonetto, F. Musumeci, R. Gonzalez, and C. Guerrero. Energy efficient content distribution in an ISP network. In *Proceedings of 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 2859–2865, Dec 2013.
- [10] D. C. Kilper, G. Atkinson, S. K. Korotky, S. Goyal, P. Vetter, D. Suvakovic, and O. Blume. Power Trends in Communication Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 275–284, March 2011.
- [11] Zhe Li and Gwendal Simon. In a Telco-CDN, Pushing Content Makes Sense. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Vol. 10, No. 3, pp. 300–311, 9 2013.

- [12] A. Bianco, T. Bonald, D. Cuda, and R. M. Indre. Cost, power consumption and performance evaluation of metro networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 5, No. 1, pp. 81–91, Jan 2013.
- [13] Cisco. Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System. [http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/CRS-3-16-Slot\\_DS.pdf](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/CRS-3-16-Slot_DS.pdf).
- [14] Samsung. Samsung SSD 850 PRO. [http://www.samsung.com/semiconductor/minisite/ssd/downloads/document/Samsung\\_SSD\\_850\\_PRO\\_Data\\_Sheet\\_rev\\_2.1.pdf](http://www.samsung.com/semiconductor/minisite/ssd/downloads/document/Samsung_SSD_850_PRO_Data_Sheet_rev_2.1.pdf).
- [15] Adolfo Arteta, Benjamín Barán, and Diego Pinto. Routing and wavelength assignment over wdm optical networks: A comparison between moacos and classical approaches. In *Proceedings of the 4th International IFIP/ACM Latin American Conference on Networking*, LANC '07, pp. 53–63, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [16] X. Cheng, J. Liu, and C. Dale. Understanding the Characteristics of Internet Short Video Sharing: A YouTube-Based Measurement Study. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 15, No. 5, pp. 1184–1194, Aug 2013.
- [17] Takuma Nakajima, Masato Yoshimi, Celimuge Wu, and Tsutomu Yoshinaga. A light-weight content distribution scheme for cooperative caching in telco-cdns. In *Proceedings of The Fourth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR'16)*, pp. 126–132, 2016.
- [18] 佐藤 健一. コンテンツプロバイダがもたらす環境変化と将来の光ネットワーク. *電子情報通信学会誌*, Vol. 99, No. 11, pp. 1053–1059, Nov 2016.
- [19] A. Bianco, P. Giaccone, and M. Ricca. Dynamic voltage and frequency scaling control for crossbars in input-queued switches. In *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 3013–3018, June 2014.

## 発表論文

- [1] 野島 幸大, 城間 隆行, 中島 拓真, 吉見 真聡, 策力木格, 吉永 努 “ネットワーク内キャッシュによる ISP ネットワーク通信電力の削減” In 信学技報, pp. 223-228, 電子情報通信学会 2016.