

ルータにおけるキャッシングがネットワークの消費電力に与える影響の評価

多田 知正^{†a)} 村田 正幸^{††} 長谷川 剛^{†††} 馬場崎忠利^{††††}
 中村 二郎^{††††} 松岡 茂登^{††††} 松田 和浩^{††††}

Evaluation of the Effect of Router Caching on Network Energy Consumption

Harumasa TADA^{†a)}, Masayuki MURATA^{††}, Go HASEGAWA^{†††},
 Tadatoshi BABASAKI^{††††}, Jiro NAKAMURA^{††††}, Morito MATSUOKA^{††††},
 and Kazuhiro MATSUDA^{††††}

あらまし 近年、ネットワークの消費電力の増大が問題となっている。ネットワーク上のルータがコンテンツを保持することでトラフィックの削減や応答時間を改善する手法が提案されているが、この手法はネットワークの消費電力の削減にもつながる可能性がある。従来の研究では、ルータのストレージ容量はあらかじめ与えられており、それを有効に利用するための置き換え手法の検討が中心であるが、消費電力の削減に着目すると、適切なストレージ容量については議論の余地がある。また、ルータがコンテンツを保持することが消費電力の削減にどの程度有効であるかについても明らかではない。本論文では、階層型ネットワークにおいて、コンテンツのアクセス頻度の分布を考慮して、コンテンツを適切なルータに配置するための手法を提案し、実際のネットワークを元にしたネットワークトポロジ及びパラメータ設定に基づいて、適切なストレージ容量及び削減できる消費電力量を評価した。その結果、ストレージ装置として SSD を用いることで、ネットワークの消費電力量が最大で約 44%削減された。またコンテンツのアクセス頻度の分布がストレージ容量及び消費電力量に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード Zipf 分布, 階層キャッシュ, コンテンツ, 最適化, CCN

1. ま え が き

近年、ネットワークの大規模化に伴い、ネットワーク機器の消費電力の増大が大きな問題となっており、ネットワークの消費電力の削減を目的とした研究が行われるようになりつつある。Bolla ら [1] によれば、こ

れまでの研究におけるネットワーク省電力化の主なアプローチは、(1) ルータやスイッチの消費電力そのものを低減するための技術開発、(2) ルータやスイッチの転送速度を負荷に合わせて動的に変化させる方法、(3) ネットワークの一部をスリープさせる方法に大別される。

一方 Jacobson ら [2] によって提案された CCN (Content Centric Networking) では、ルータにデータをキャッシュすることで、トラフィックを削減することが考えられている。クライアントからサーバにコンテンツのリクエストを送信した場合、もし途中のルータがそのコンテンツを保持しており、クライアントに提供することができれば、コンテンツの移動はルータからクライアントまでとなり、サーバが直接コンテンツを提供する場合と比べてネットワーク全体のトラフィックは減少することになる。Lee ら [3] は、CCN におけるこのアプローチがネットワークの消費電力の削減に

[†] 京都教育大学教育学部, 京都市
 Faculty of Education, Kyoto University of Education,
 Kyoto-shi, 612-8522 Japan

^{††} 大阪大学大学院情報科学研究科, 吹田市
 Graduate School of Information Science and Technology,
 Osaka University, Suita-shi, 565-0871 Japan

^{†††} 大阪大学サイバーメディアセンター, 茨木市
 Cybermedia Center, Osaka University, Ibaraki-shi, 565-
 0043 Japan

^{††††} 日本電信電話株式会社 NTT 環境エネルギー研究所, 武蔵野市
 NTT Energy and Environment Laboratories, NTT Corpo-
 ration, Musashino-shi, 180-8585 Japan

^{†††††} NTT アドバンステクノロジー, 東京都
 NTT Advanced Technology, Tokyo, 163-0431 Japan

a) E-mail: htada@kyokyo-u.ac.jp

有効であることを示している。本研究は、このようにルータがコンテンツを保持することで、ネットワークの消費電力を削減する手法を対象とする。

ネットワーク内にコンテンツをキャッシュする手法については、WWW (World Wide Web) において階層キャッシュの研究として行われている [4]~[6]。これらの研究では、キャッシュヒット率の向上、コンテンツが通過するホップ数の削減、サーバ負荷の削減などを目的として、キャッシュの置き換えアルゴリズムの検討が主に行われている。従来の階層キャッシュの研究においては、各ノードにおけるキャッシュのためのストレージ容量はあらかじめ与えられている。キャッシュの効果は容量が大きいほど向上するため、キャッシュのためのストレージ容量は可能な限り大きいことが望ましく、その適切な大きさが議論の対象となることはなかった。

しかしネットワークの消費電力の削減を目的とする場合、ストレージ装置自体が電力を消費するため、各ルータに大容量のストレージを備えることが必ずしも全体として消費電力の削減につながるとは限らない。そこで本研究では、消費電力の削減を目的として、ルータの適切なストレージ容量に関する議論を行うとともに、ルータがコンテンツを保持することの有効性について評価する。消費電力を削減するために適切なストレージ容量は、コンテンツのアクセス分布、対象とするネットワークトポロジなどの要素に依存する。本研究では、現実のネットワーク構成を元にしたモデルに基づいて、さまざまな要素がストレージ容量やネットワークの消費電力量に及ぼす影響を評価し、ルータがコンテンツを保持することが消費電力の削減につながるための条件を明らかにする。

以降の構成は以下のとおりである。2. で、関連研究について述べ、3. で本研究で考えるモデルの説明を行う、4. ではルータの適切なストレージ容量を決定する方法について述べ、5. では現実のネットワークに基づく設定によって実際に適切なストレージ容量及び削減できる消費電力量を求め、さまざまな要素が及ぼす影響について考察する。最後に6. でまとめを行う。

2. 関連研究

ネットワークの消費電力の削減を目的とした研究については、Bolla らによるサーベイ [1] がある。この中では、トラフィックに応じてネットワーク機器の消費電力を削減する手法が、(1) ルータやスイッチをより

省電力化するための技術開発、(2) ルータやスイッチの処理能力を動的に変化させる方法、(3) ネットワークの一部をスリープさせる方法に分類されて紹介されている。しかしネットワーク内にコンテンツを配置することにより、トラフィックそのものを削減することでネットワークの消費電力を削減する手法については言及されていない。

ネットワーク内にコンテンツをキャッシュすることは、WWW において、プロキシサーバへのコンテンツのキャッシュの形で従来行われており、階層キャッシュに関する研究がこれまでに行われている。Williamson ら [4] は、階層キャッシュにおいて、下位ノードにヒットすることで上位ノードのアクセス分布が変化するフィルタリング効果が働くことを指摘し、上位ノードと下位ノードでは異なる置き換えアルゴリズムを使うことを提案している。Che ら [5] は、階層キャッシュにおいて個々のキャッシュノードをローパスフィルタとみなすモデルに基づき、キャッシュの置き換え手法を提案している。Laoutaris ら [6] は、階層キャッシュの個々のノードが LRU (Least Recently Used) で置き換えを行うことを前提として、各ノードがコンテンツの置き換えを行うかどうかを決定するメタアルゴリズムを提案している。

また近年では、CCN [2] におけるキャッシュの振る舞いやパケットの置き換え手法に関する研究も行われつつある。Psaras ら [7] は、CCN におけるキャッシュの振る舞いを連続時間マルコフ連鎖でモデル化し、パケットがキャッシュに存在する時間の割合を評価している。Rossi ら [8] は、CCN におけるキャッシュサイズと性能の関係をシミュレーションにより評価している。Chai ら [9] は、CCN において経路上の全てのルータにキャッシュするよりもランダムに選んでキャッシュする方が効率が良いことを示している。

これまでの WWW や CCN におけるキャッシュに関する研究の中で、ネットワークの消費電力に着目したものは少ない。Lee ら [3] は、CCN におけるルータでのキャッシングがネットワークの消費電力の削減につながることを示した。彼らは 1Gbit の動画コンテンツをダウンロードする際のネットワークの消費電力量を、コンテンツがルータにキャッシュされている場合とされていない場合とで比較し、ルータでのキャッシングによりネットワークの消費電力が減少することを示している。本研究では、Lee らの消費電力モデルを拡張し、全てのコンテンツへのアクセスを合計した

ネットワークの消費電力量を評価することで、ルータがコンテンツを保持することがネットワークの消費電力量の削減にどの程度有効であるかどうかを明らかにする。Imai ら [10] は、ネットワーク上のルータにコンテンツをキャッシュする際に、ストレージとネットワークの消費電力を最小化するためのコンテンツ配置の決定を最適化問題として解く手法を提案している。彼らは各ルータが対等な関係にある IP バックボーンネットワークを対象とし、24 台のルータからなるネットワーク上での評価により、提案手法が消費電力の削減に有効であることを示している。本研究は、より下位のネットワークを対象とし、数百台のルータからなる階層型ネットワークを考える。これは NTT のような大規模 ISP が管理するネットワークを想定している。

また、ネットワーク内のプロキシサーバやネットワーク機器がもつストレージ容量とネットワークの消費電力の関係調べた研究は筆者らの知る限り見られない。本研究では、ルータに到着するアクセスの分布が既知であり、コンテンツがアクセス分布に従って配置されるとの仮定のもとで、ルータのストレージ容量と消費電力の関係について議論する。

3. モデル

3.1 ネットワークモデル

本研究では図 1 に示すような木構造のネットワークを対象とする。木の根の部分にサーバ、葉の部分にクライアントがあり、それ以外の節はルータまたはスイッチである。なお、本論文では以降ルータとスイッチは区別せず単にルータと表記する。

クライアントはサーバの保持するコンテンツに対す

るアクセスを行うためにリクエストを送信する。サーバはリクエストに応じてクライアントにコンテンツを送信する。また各ルータはストレージを備えており、サーバのコンテンツのうち幾つかを保持することができる。クライアントからのリクエストがルータに到着したとき、そのルータがリクエストされたコンテンツを保持していれば、そのルータが直接クライアントにコンテンツを送信する。これによりそのルータとサーバの間のトラフィックを削減することができる。

サーバとクライアント間の経路上のルータには上下関係があり、サーバに近い側を上位、クライアントに近い側を下位とする。ルータ x と直接接続されているルータのうち、上位にあるルータを x の親ルータ、下位にあるルータを x の子ルータと呼ぶ。またルータ x と親ルータが同じであるルータを x の兄弟ルータと呼ぶ。最も下位にあるルータのレベルを 1 とし、レベル i のルータの親ルータのレベルを $i+1$ 、子ルータのレベルを $i-1$ とする。レベル i のルータの兄弟ルータ(自分自身を含む)の数は全て同一であると仮定し、これを s_i で表す。

3.2 消費電力モデル

ネットワークは、ルータ及びそれらを結ぶ通信リンク等によって構成されているが、ネットワークの消費電力は、ルータによるものが大半を占めていると考えられる。Baliga ら [11] は、インターネットにおける通信リンク (WDM システム) の消費電力を全体の 2% と推定している。そこで本研究では通信リンクの消費電力は考えないものとし、ネットワークの消費電力を、全てのルータ及びルータが備えているストレージ装置の消費電力の和であるとする。以下では単にルータの消費電力と言った場合、ルータのストレージの消費電力は含まないものとする。また、本研究では評価基準として、ネットワークの 1 日の総消費電力量を考える。ネットワークの 1 日の総消費電力量は、1 日の全アクセスによりコンテンツがルータを流れることで消費される電力量の合計と、全ルータのストレージが 1 日に消費する電力量の合計の和と定義する。

3.2.1 ルータの消費電力

本研究では Lee ら [3] の消費電力モデルにしたがい、コンテンツがルータを流れることにより消費される電力量を定義する。負荷 l におけるルータの消費電力を以下のように定義する。

$$ER(l) = \gamma \left(E_{idle} + (E_{max} - E_{idle}) \frac{l}{R_{max}} \right) \quad (1)$$

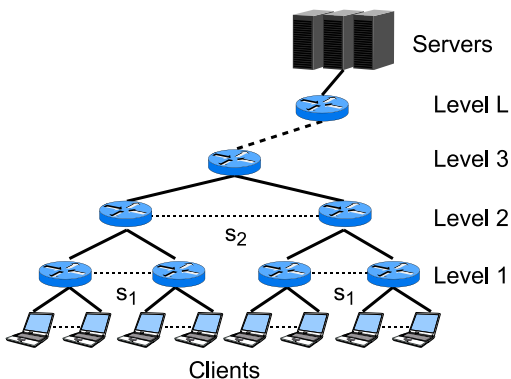


図 1 ネットワークトポロジ
Fig. 1 Network topology.

ここで、 E_{max} はそのルータの最大消費電力、 E_{idle} はアイドル時の消費電力、 R_{max} は最大通信容量である。係数 γ は外部電源や冷却装置などの付加的なオーバーヘッドを表し、全てのルータで同一であるとする。あるルータの平均負荷が l_{ave} であるとき、そのルータの電力効率を $ER(l_{ave})/l_{ave}$ で与える。電力効率の単位はW/Gbpsとなる。あるコンテンツがルータを流れることにより消費される電力量を、そのコンテンツのサイズとルータの電力効率の積で表す。

3.2.2 ストレージ装置の消費電力

Leeら[3]のモデルでは、ルータはあらかじめ決められた容量のストレージを備えるものとし、その消費電力はルータの消費電力に含まれている。本研究では、ルータのストレージ容量について議論するため、ストレージ装置の消費電力を個別にモデル化する。

ストレージ装置はアイドル時とアクセス時で消費電力が異なるが、本研究では簡単のためアクセス時の消費電力の増加については無視する。本研究ではルータがコンテンツを保持することによる消費電力量の削減について考えるが、ストレージからのデータの読み出しは、ルータに置かれたコンテンツにアクセスする場合もサーバのコンテンツにアクセスする場合も同様に発生する。このためストレージ装置におけるアクセス時の消費電力の増加は本研究の結果に影響を与えない。

サイズ s のコンテンツを時間 t の間保持するために必要なストレージ装置の消費電力量を以下のように定義する。

$$ES(s, t) = \gamma \left(\frac{E}{C} \right) t \quad (2)$$

ここで、 E はそのストレージ装置のアイドル時の消費電力、 C は容量である。係数 γ は外部電源や冷却装置などの付加的なオーバーヘッドを表し、ルータと同じ値であるとする。

3.3 コンテンツのアクセス分布

クライアントがコンテンツにアクセスする頻度はコンテンツによって異なっていると仮定する。あるルータにおけるコンテンツごとのリクエストの到着頻度の分布を、そのルータにおけるアクセス分布と呼ぶ。クライアントからのリクエストは、ルータがそのリクエストに対応するコンテンツを保持している場合は、そのルータで処理され、そうでない場合は上位のルータに転送される。

各ルータにおけるアクセス分布について、以下の仮定を設ける。レベル1のルータにはクライアントから

のアクセスのリクエストが最初に到着する。アクセス分布はレベル1の全てのルータで同一であり、かつ時間とともに変化しないと仮定する。また、レベル1のルータにおけるアクセス分布はZipf分布にしたがうとする。以降では、コンテンツの順位はアクセス頻度の順位(最も頻度の高いものが1位)を指す。

3.4 その他の仮定

本研究では、他に以下のような仮定を設ける。

- 同じレベルのルータのストレージ容量は均一である。
- 全てのコンテンツのサイズは均一である。
- ルータは常にコンテンツの全体を保持し、断片に分割しないものとする。

以降ではルータにおけるストレージの容量を保持できるコンテンツの数で表す。

3.5 コンテンツの置き換え

一般に、キャッシュの効果の大きさはキャッシュの容量と置き換え手法に依存するが、本研究では、キャッシュにおけるコンテンツの置き換え手法については考えない。更に、レベル1のルータにおけるアクセス分布が既知であると仮定し、各ルータはそのルータにおけるアクセス頻度の高いコンテンツから順にストレージ容量が許す限り保持するものとする。

上の仮定より、レベル1の全てのルータは全く同じコンテンツの集合を保持することになる。また、レベル2のルータ x のある子ルータがコンテンツ c を保持している場合、 x の全ての子ルータが c を保持しているため、 c へのアクセスのリクエストは全て子ルータで処理され、 x には到着しない。すなわち、ルータ x におけるアクセス分布は、 x の全ての子ルータにおけるアクセス分布の合計から、子ルータの保持する全てのコンテンツを除いたものとなる。また3.1の仮定より、レベル2のルータは、子ルータの数が同じであるため、レベル2の全てのルータにおけるアクセス分布も同一である。したがって、レベル2の全てのルータは全く同じコンテンツの集合を保持することになり、上と同様の議論によりレベル3のルータにおけるアクセス分布はレベル2以下のルータの保持するコンテンツを含まない。同様にして、全てのルータは同じレベルであれば全く同じコンテンツの集合を保持し、かつ自分の下位ルータの保持するコンテンツは保持しない。

4. ストレージ容量の決定

消費電力を削減するために、各ルータの適切なスト

レージ容量を決定することを考える。3.4の仮定より、これはレベルごとに適切なストレージ容量を決定することと等価である。また3.5の議論より、レベル*i*のルータにコンテンツ*c*が置かれる場合、*c*はレベル*i*の全てのルータに置かれ、かつ*i*以外のレベルのルータに*c*が置かれることはない。すなわち、各レベルのルータのストレージ容量を決定することは、それぞれのコンテンツをどのレベルのルータに置くかを定めることと等しい。

したがって、各レベルのルータのストレージ容量は以下のような手続きで決定できる。順位*r*のコンテンツをレベル*i*の全てのルータに置いたときに1日に削減できる消費電力量を $E_i(r)$ とする。 $r=1$ から順に、順位*r*のコンテンツを $E_i(r)$ が最大になるようなレベル*i*に割り当てる。全てのコンテンツについて割り当てが終了した後、各レベルに割り当てられたコンテンツ数の合計が、そのレベルのルータのストレージ容量となる。

レベル*i*のルータの適切なストレージ容量 $C[i]$ を決定するアルゴリズムをリスト1に示す。以下で使用するパラメータの意味を表1に示す。

順位*r*のコンテンツとレベル*i*について、 $E_i(r)$ は以下のようにして求められる。レベル1のルータにおけるアクセス分布がZipf分布にしたがうことから、レベル*i*のルータ1台に到着する順位*r*のコンテンツへの1日のアクセス数 $V_i(r)$ は以下の式であらわされる。

$$V_i(r) = D_i \frac{v_1}{r^\alpha} \quad (3)$$

レベル*i*のルータ1台に順位*r*のコンテンツを置くことで1日に削減される消費電力量は $e_i V_i(r)$ であるから、ストレージによる増加分を差し引いた1日の消費電力の削減量は、

$$\frac{e_i D_i v_1}{r^\alpha} - e_{sto} \quad (4)$$

となる。

したがって、レベル*i*の全てのルータに順位*r*のコンテンツを置いたときに削減できる消費電力量 $E_i(r)$ は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} E_i(r) &= S_i \left(\frac{e_i D_i v_1}{r^\alpha} - e_{sto} \right) \\ &= \left(\frac{e_i S_i v_1}{r^\alpha} - S_i e_{sto} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

v_1 は以下のようにして求められる。レベル1の全

リスト1 ストレージ容量を決定するアルゴリズム

```

for  $i \leftarrow 1$  to  $L$  do
   $C[i] \leftarrow 0$ 
end for
for  $r \leftarrow 1$  to  $N$  do
  for  $t \leftarrow i$  to  $L$  do
    if  $E_t(r) < E_t(r)$  then
       $i \leftarrow t$ 
    end if
  end for
   $C[i] \leftarrow C[i] + 1$ 
end for

```

表1 パラメータ一覧
Table 1 Parameters.

記号	意味
N	コンテンツの総数
V	1日のコンテンツへのアクセス総数
L	階層の深さ(最上位ルータのレベル)
e_{sto}	一つのコンテンツ当たりのストレージの1日の消費電力量
e_i	レベル <i>i</i> のルータにおいて1回のヒットで削減できる電力量
s_i	レベル <i>i</i> のルータの兄弟ルータの数
α	Zipf分布のパラメータ
v_1	レベル1のルータにおける1位のコンテンツの1日のアクセス数
D_i	レベル <i>i</i> のルータ1台の下にあるレベル1のルータの総数
S_i	レベル <i>i</i> のルータの総数

てのルータのアクセス分布は同一なので、レベル1のルータ1台の1日のアクセス数は V/S_1 となる。したがって式(3)より、

$$\frac{V}{S_1} = \sum_{r=1}^N V_1(r) = \sum_{r=1}^N D_1 \frac{v_1}{r^\alpha} \quad (6)$$

これを v_1 について解くと、

$$v_1 = \frac{V}{S_1 D_1 \sum_{r=1}^N \frac{1}{r^\alpha}} \quad (7)$$

また D_i と S_i は s_i から以下の式で求められる。

$$D_i = \prod_{k=1}^{i-1} s_k \quad (2 \leq i \leq L), \quad D_1 = 1 \quad (8)$$

$$S_i = \prod_{k=i}^L s_k \quad (9)$$

5. 数値例と考察

4.で述べた手法にしたがい、実際のネットワークを元にしたネットワークトポロジ及びパラメータ設定に基づいて、適切なストレージ容量及び削減できる消費

表 2 ルータの消費電力

Table 2 Energy consumption of routers.

機種名	通信容量	最大消費電力	電力効率
Nexus 5010	520Gbps	450W	3.375W/Gbps
CRS-3	4480Gbps	12000W	10.45W/Gbps

表 3 ストレージ装置の消費電力

Table 3 Energy consumption of storage devices.

種類	容量	アイドル時消費電力
DRAM	8GB	0.5W
HDD	3000GB	3.9W
SSD	512GB	0.04W

電力量を求めることにより、ルータがコンテンツを保持することが消費電力の削減につながるための条件を明らかにする。パラメータの設定にあたっては、NTTにおいてネットワークの省電力化についての検討が行われていることから、NTTのフレッツ網のネットワーク構成を参考にした。

5.1 消費電力の設定

ルータ及びストレージの消費電力は、現在実際に用いられているものの中で比較的新しく電力効率の良いものを基準として以下のように設定した。

5.1.1 ルータの消費電力

ルータの通信容量及び最大消費電力は、レベル 1 については Cisco 社製 Nexus 5010、レベル 2 以上については Cisco 社製 CRS-3 のデータシートを元に設定した。また、Lee ら [3] による評価と同様に、アイドル時の消費電力を最大消費電力の 95%、平均負荷を 50%、オーバーヘッドの係数 γ を 2 としてそれぞれの電力効率を求めた。表 2 に設定値を示す。

5.1.2 ストレージの消費電力

ストレージ装置として、DRAM、HDD 及び SSD を考える。それぞれの容量とアイドル時の消費電力は、DRAM については Hewlett-Packard 社のホワイトペーパー [12] の実験値、HDD と SSD については tom's hardware [13] によるベンチマーク結果を元に設定した。HDD は Western Digital 社製 WD30EFRX、SSD は Samsung 社製 MZ7PD512BW のデータを使用した。表 3 に設定値を示す。また、オーバーヘッドの係数 γ は 2 とする。

5.1.3 その他のパラメータ設定

その他のパラメータ設定を表 4 に示す。以下、断りがない限り、この表の設定値を用いる。

本評価では、コンテンツとして YouTube [14] などと共有される動画コンテンツを想定する。コンテン

表 4 パラメータ設定

Table 4 Parameter settings.

パラメータ	デフォルト値
N	1.0×10^7
V	5.0×10^7
α	0.7
L	4
$\{s_i \mid 1 \leq i \leq L\}$	{20, 5, 5, 1}

ツに対する総アクセス数は、YouTube の動画再生回数を元に設定した。YouTube は、2011 年における 1 日の動画再生回数を約 40 億回と報告している。また Internet World Stats [15] によれば、世界における日本のインターネットユーザの割合は 4.2% である。動画再生回数がユーザ数に比例すると仮定すれば、日本のユーザによる YouTube への総アクセス数は 1 日あたり約 1.7 億回と推測される。また総務省の調査 [16] によれば、2012 年 3 月時点での日本の固定ブロードバンド契約数における NTT のシェアは 54% であり、NTT のフレッツ網は東西に二つ存在することを考慮すると、一つのフレッツ網のユーザによる YouTube の動画再生回数は 1 日あたり 0.5 億回程度と推測される。これに基づき、1 日あたりの総アクセス数 V を設定した。また、コンテンツの総数 N はルータに保持されるコンテンツ数として十分大きいと考えられる値に設定した。

Cheng ら [17] は YouTube における再生回数の分布を分析するにあたり、ワイブル分布、ガンマ分布、Zipf 分布の三つを当てはめているが、Zipf 分布の係数として 0.668 を採用している。これを参考にレベル 1 のルータにおけるアクセス分布の係数 α を 0.7 に設定した。

e_i 及び e_{sto} は 5.1 で述べた設定値とコンテンツサイズから求められる。コンテンツサイズは 30MB とする。これは YouTube において一般的と考えられる 360p で長さ 5 分の動画のサイズを元に設定した。

ネットワークの規模を表す L 及び s_i は、現在の NTT のフレッツ網の構成を元に設定した。

5.2 総消費電力量の計算

3.2 で、ルータがストレージをもつ場合のネットワークの 1 日の総消費電力量を、1 日の全アクセスによりコンテンツがルータを流れることで消費される電力量の合計 (以下、ルータ電力量) と、全ルータのストレージが 1 日に消費する電力量の合計 (以下、ストレージ電力量) の和と定義した。それぞれは以下のよ

うに求められる。

はじめに、ルータ電力量を求める。4.での議論より、各レベルのストレージ容量を決定すると、それぞれのコンテンツを、どのレベルのルータに置くかが決まる。順位 r のコンテンツを保持するルータのレベルを $L(r)$ とすると、このコンテンツにアクセスする際、データはレベル $L(r) + 1$ 以上のルータには流れない。したがって順位 r のコンテンツへの1回のアクセスによるルータの消費電力量の増加は、コンテンツのサイズを s 、レベル i のルータの電力効率を F_i とすると、 $s \sum_{i=1}^{L(r)} F_i$ となる。また、順位 r のコンテンツへの1日のアクセス回数は、式(3)より、 $(S_1 D_1 v_1)/r^\alpha$ であるから、順位 r のコンテンツへの1日の全アクセスによりルータで消費される電力量の合計は、

$$\frac{S_1 D_1 v_1 s}{r^\alpha} \sum_{i=1}^{L(r)} F_i \quad (10)$$

となる。したがって、ルータ電力量は、

$$\sum_{r=1}^N \left(\frac{S_1 D_1 v_1 s}{r^\alpha} \sum_{i=1}^{L(r)} F_i \right) \quad (11)$$

となる。

次に、ストレージ電力量を求める。レベル i のルータのストレージ容量を C_i とすると、レベル i のルータ1台のストレージが1日に消費する電力量は、 $C_i e_{sto}$ となる。したがって、ストレージ電力量は、

$$\sum_{i=1}^L S_i C_i e_{sto} \quad (12)$$

となる。

5.3 結果

ルータがストレージをもつ場合のネットワークの1日の総消費電力量（以下、総消費電力量）を、ルータがストレージをもたない（全てのコンテンツをサーバが送信する）場合と比較する。以下では、ルータがストレージをもたない場合に対して総消費電力量が削減された割合を削減率と呼ぶ。

5.3.1 ストレージ装置の影響

まず、ストレージ装置の違いによる影響を評価した。それぞれのストレージ装置を用いた場合の総消費電力量及び削減率を表5に示す。DRAMの削減率が約2%である一方で、SSDでは40%を超える削減率となっている。

表5 ストレージ装置が総消費電力量に与える影響
Table 5 Effect of storage devices on total energy consumption.

ストレージ	DRAM	HDD	SSD
総消費電力量	113.3kWh	100.1kWh	64.7kWh
削減率	2.1%	13.5%	44.1%

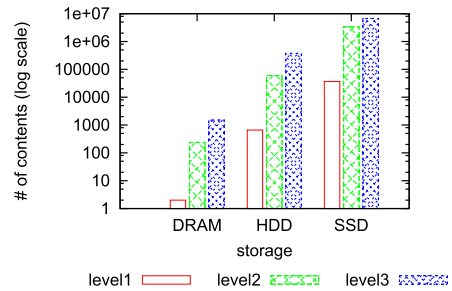


図2 ルータのレベルごとの適切なストレージ容量
Fig.2 Suitable storage capacity at each level of routers.

ルータのレベルごとの適切なストレージ容量を図2に示す。下位のルータほど小さい容量となっているのは、下位ルータのストレージ容量を大きくしても総消費電力量はかえって増加してしまうことを表している。DRAMのストレージ容量が極めて小さいが、これは、DRAM自体の消費電力が大きいため、ほとんどのコンテンツにおいて、ルータが保持することによる消費電力量の削減よりストレージの消費電力量の増大の影響の方が大きく、ルータが保持するメリットがないことを示している。一方で、SSDのストレージ容量が極めて大きくなっている。このことは、非常にアクセス頻度の低いコンテンツであっても、ルータが保持することによって総消費電力量が減少することを意味している。この結果は、近年のSSDの大容量化とアイドル時消費電力の大幅な減少によるものであり、ネットワークの消費電力の削減のためにルータがコンテンツを保持することの有効性が高まりつつあることを示している。

上位 r 位までのコンテンツをルータに置くかと仮定した場合の、 r と総消費電力量の関係を図3に示す。グラフが途中で切れているのは、下位のコンテンツはどのルータに置いても総消費電力量は減少しないことを表しており、実際に下位のコンテンツをルータに置いた場合は総消費電力量は逆に増加する。DRAMではほとんど総消費電力量は減少しておらず、消費電力の面からはDRAMはルータのストレージ装置として適切でないと言える。また、HDDとSSDの結果を比較すると、 r の小さいときには両者の差はそれほど大

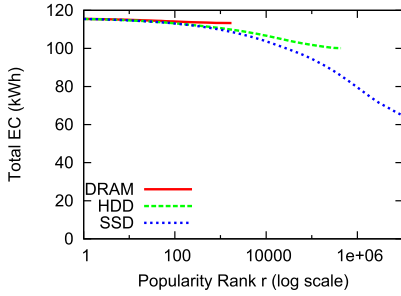


図3 ルータが保持するコンテンツ数と総消費電力の関係

Fig. 3 Relation between # of contents stored on routers and total energy consumption.

きくないが、 r が大きくなるにつれて、HDDでは総消費電力が減少しなくなり、SSDとの差が大きくなる。HDDの特徴は、比較的安価に大容量のストレージを構築できることであるが、この結果から、ルータに大容量のHDDを備えることには、消費電力の面からはメリットがないと言える。また、SSDではグラフは途中で切れておらず、全コンテンツをルータに保持した場合に最も総消費電力が少なくなる。これはストレージの設置コストを考えると現実的ではないが、全コンテンツの1/10をルータに保持した場合でも約31%、1/100でも約18%の削減率が得られることから、現実的なストレージ容量でも十分な効果があると言える。

本研究での仮定とは異なり、現実のネットワークではコンテンツのアクセス頻度は時間とともに変動するため、本研究の結果は到達可能な総消費電力の下限値であると考えられる。したがって上の結果から、現在のネットワーク環境において、ストレージ装置としてDRAMを用いる場合、ルータがコンテンツを保持することによる総消費電力の削減効果はほとんど期待できないと結論できる。一方、HDDやSSDを用いる場合は一定の効果期待できるが、その効果の大きさはアクセス頻度の時間的変動の影響を受けると考えられる。今後、コンテンツのアクセス頻度の時間的変動について明らかにし、これを考慮した評価を行う予定である。以下では特に断らない限り、ストレージ装置としてSSDを用いた場合の結果を示す。

5.3.2 アクセス分布の影響

次に、コンテンツのアクセス分布として用いているZipf分布のパラメータ α が、各レベルのルータの適切なストレージ容量に与える影響を評価した。 α を変

表6 α が総消費電力に与える影響
Table 6 Effect of α on total energy consumption.

α	0.5	0.7	0.9
総消費電力	72.5kWh	64.7kWh	47.7kWh
削減率	37.4%	44.1%	58.7%

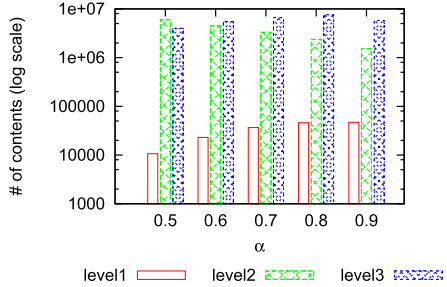


図4 α がストレージ容量に与える影響

Fig. 4 Effect of α to storage capacity.

化させたときの総消費電力と削減率を表6に示す。 α が大きいくほど、削減率が大きくなっている。各レベルのルータの適切なストレージ容量を図4に示す。 α が大きくなるにつれて、レベル1とレベル3のルータの容量が増加し、レベル2のルータの容量が減少している。ただし、レベル3については、 $\alpha = 0.9$ の場合のみ減少している。このように、コンテンツ数や総アクセス数が同じであっても、アクセス分布によって各ルータの適切なストレージ容量は異なることがわかる。

この結果について更に詳しく調べるため、レベル i のルータに順位 r のコンテンツを置くことで削減できる消費電力 $E_i(r)$ を $\alpha = 0.5, 0.9$ のそれぞれの場合で求めた。

$\alpha = 0.5$ の場合の $E_i(r)$ を図5に示す。 r が大きくなるにつれて $E_i(r)$ が急激に減少している。これは、コンテンツのアクセス分布がZipf分布であり、順位が高いコンテンツと低いコンテンツのアクセス数に著しい差があるためである。グラフの横軸が対数スケールであることを考慮すると、ルータのストレージ容量が総消費電力の削減に及ぼす効果は、容量が増えるにつれて急激に低下するといえる。また、 r が小さいときは $i = 1$ で $E_i(r)$ が最大となっている。これは、順位が高いコンテンツについては、最もクライアントに近いレベル1のルータに置くことで、最も総消費電力を削減できることを意味する。しかし、 r が増加するにつれて $i = 1$ の場合は急激に減少し、 $i = 2$ の場合の方が高くなる。この結果は次のように解釈できる。ストレージの消費電力を無視すれば、レベル1の

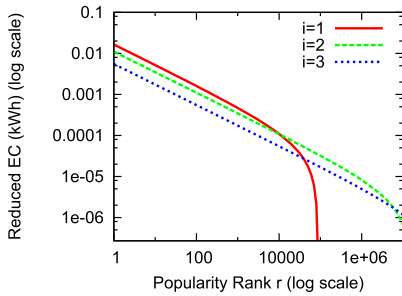


図5 コンテンツの順位と削減される消費電力量の関係 ($\alpha = 0.5$)

Fig. 5 Relation between contents popularity rank and reduced energy consumption ($\alpha = 0.5$).

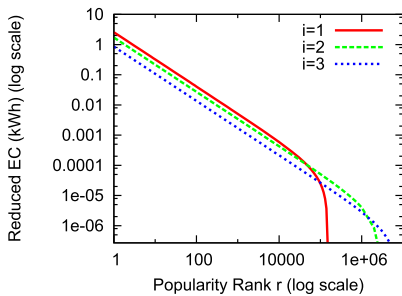


図6 コンテンツの順位と削減される消費電力量の関係 ($\alpha = 0.9$)

Fig. 6 Relation between contents popularity rank and reduced energy consumption ($\alpha = 0.9$).

ルータがコンテンツを保持するのが1回のアクセスにつき削減される電力量は最も大きいですが、順位が低いコンテンツはアクセス頻度が低いため、ストレージの消費電力量の増大の影響の方が大きくなる。一方、上位のルータにはより多数のクライアントのアクセスが集約されるため、順位が低いコンテンツであってもある程度のアクセス頻度が確保できる。このため、順位が低いコンテンツについてはより上位のルータに置く方が総消費電力量の削減が大きくなる。

$\alpha = 0.9$ のときの $E_i(r)$ を図6に示す。図5と比べると、 $i = 1$ で $E_i(r)$ が最も高くなる範囲が広い。これは、 α が大きくアクセス分布の偏りが大きいときは、順位が高いコンテンツのアクセス頻度が高く、レベル1のルータにおいて十分なアクセス頻度が得られるコンテンツの数が増えることを表している。一方で、順位が低いコンテンツはアクセス頻度が低くなるため、レベル2より多数のアクセスが集約されるレベル3のルータに置く方が総消費電力量の削減が大きくなる。図4において α が大きくなるにつれてレベル2の

ストレージ容量が減少し、レベル3のストレージ容量が増加するのはこのためである。また、全体の約20%にあたる順位の低いコンテンツについては、アクセス頻度が低すぎるため、どのルータに置いても総消費電力量が逆に増加する。今回の評価では、このようなコンテンツは $\alpha = 0.9$ のときのみ見られた。図4において $\alpha = 0.9$ のときのみレベル3のストレージ容量が減少したのはこのためである。

これらの結果から、現実のネットワークにおいて、ストレージ装置としてSSDを用いる場合、コンテンツのアクセス分布からルータのストレージ容量を決定するための以下の指針が導かれる。図5、図6からわかるように、下位のレベルのルータに置かれる上位のコンテンツほど、消費電力量の削減に及ぼす影響が大きい。このため下位のレベルのルータのストレージ容量は慎重に決定する必要がある。レベル1のルータでは、アクセス分布の偏りが大きいほど最適なストレージ容量も大きくなっているが、図4からわかるように、レベル1のルータの最適なストレージ容量は比較的小さく、また図5、図6からわかるように、ある順位以下のコンテンツについては、削減される総消費電力量が急激に減少するため、最適なストレージ容量を超えないようにすることが重要である。レベル2のルータでは、逆にアクセス分布の偏りが大きいほど最適なストレージ容量が小さくなる。しかし、最適なストレージ容量がかなり大きい場合、現実には十分なストレージ容量を用意するのは難しく、可能な限り大きいストレージ容量を用意するのが良いと考えられる。レベル3のルータでは、下位のレベルのルータで保持できない残りのコンテンツを保持できるだけストレージ容量を用意するのが望ましいが、レベル2の場合と同様、十分なストレージ容量を用意するのは難しい。ただし、図6からわかるように、アクセス分布の偏りが非常に大きいときは、どのルータに置いても総消費電力量が減少しないようなコンテンツが存在するため、レベル3の最適なストレージ容量は小さくなることに注意が必要である。

5.3.3 コンテンツ数と総アクセス数の影響

今後コンテンツサービスの発展に伴い、コンテンツ数、総アクセス数ともに増大することは明らかである。コンテンツ数が変わらず総アクセス数のみが増えると、個々のコンテンツへのアクセス頻度が上昇するため、削減率は大きくなるが、一方で総アクセス数が変わらずコンテンツ数のみが増えると個々のコンテンツへの

表7 コンテンツ数と総アクセス数が総消費電力量に与える影響

Table 7 Effect of # of contents and # of accesses on total energy consumption.

コンテンツ数 N	2.5×10^6	1.0×10^7	4.0×10^7
総アクセス数 V	1.25×10^7	5.0×10^7	2.0×10^8
ストレージなし	28.9kWh	115.7kWh	462.9kWh
ストレージあり	16.5kWh	64.7kWh	258.5kWh
削減率	42.9%	44.1%	44.2%

アクセス頻度が低下し、削減率は小さくなる。このようにコンテンツ数と総アクセス数の増大は削減率に対して逆の影響を及ぼす。

コンテンツ数 N と総アクセス数 V が削減率に与える影響の大きさを比較するため、 N と V の比を一定 (1:5) に保ったまま変化させて、削減率を求めた。総消費電力量及び削減率を表7に示す。 N と V が大きいほど、削減率は大きくなっているが、その差はわずかである。この結果から、仮に N と V が同じペースで増大するのであれば、両者の影響はほぼ同程度であり、将来的にもルータがコンテンツを保持することは消費電力の削減に有効であると言える。

一方、将来コンテンツサービスが十分に普及すると、総アクセス数の増加が緩やかになり、やがて頭打ちになる可能性もある。この場合は、アクセス分布が変化しない限り、コンテンツ数の増大に伴って、ルータがコンテンツを保持することによる消費電力の削減の効果は減少すると考えられる。

5.3.4 ルータの電力比例性の影響

電力比例性指数 (Energy Proportionality Index: EPI) はネットワークの機器の電力比例性の度合いを示す指標として Mahadevan ら [18] によって導入されたものである。ある機器の EPI は以下の式で定義される。

$$EPI = \frac{E_{max} - E_{idle}}{E_{max}} \quad (13)$$

ここで、 E_{max} はその機器の最大消費電力、 E_{idle} はその機器のアイドル時における消費電力である。

ここまでの評価は、ルータのアイドル時の消費電力が最大消費電力の 95% という設定で行ったが、これは EPI では 0.05 に相当する。将来的にはルータの省電力化が進むにつれて、電力比例性が向上する可能性がある。そこで、ルータの最大消費電力を固定したまま EPI を変化させ、総消費電力量及び削減率を求めた。結果を表8に示す。

EPI が高いほど、削減率は小さくなっている。これ

表8 ルータの EPI が総消費電力量に与える影響
Table 8 Effect of EPI of routers on total energy consumption.

EPI	0.1	0.5	0.9
ストレージなし	112.7kWh	89.0kWh	65.3kWh
ストレージあり	63.4kWh	52.9kWh	41.7kWh
削減率	43.7%	40.6%	36.1%

は、EPI の高いルータは最大消費電力に対して平均消費電力は小さくなるため、消費電力量の削減の余地が小さく、相対的にストレージの消費電力の影響が大きくなるためである。しかし、EPI が高い場合でも、約 36% という高い削減率が得られており、ルータがコンテンツを保持することは消費電力の削減に有効であると言える。

なお、ストレージ装置についても同様に EPI を定義できるが、本研究では、ストレージ装置についてはアイドル時の消費電力のみを考えているため、ストレージ装置の EPI は結果に影響を与えない。

5.4 実ネットワークへの適用

本研究では、簡単のために幾つかの仮定を行っている。本研究の結果を実ネットワークに適用するには以下の課題について考慮する必要がある。

1 点目は、ルータにおけるコンテンツの置き換えについての仮定である。本研究では、コンテンツのアクセス分布に従ってコンテンツをルータに配置し、コンテンツの置き換えは行わないものとして最適なストレージ容量を計算した。しかし、実際にはコンテンツのアクセス分布を事前に知ることは難しく、またアクセス分布は時間とともに変動するため、ストレージ上のコンテンツは何らかのアルゴリズムによって置き換えを行うことになる。この場合、ストレージ容量が小さいと、頻繁にアクセスされるコンテンツがストレージから追い出されてしまう可能性がある。このため、ルータにおけるストレージ容量は、本研究で求めた最適値よりも大きくする必要がありと考えられる。今後、消費電力を削減するための置き換えアルゴリズムについての研究を行い、合わせてそのアルゴリズムを適用した際の最適なストレージ容量を求める予定である。

2 点目は、コンテンツのアクセス分布についての仮定である。本研究では、アクセス分布を Zipf 分布に従うと仮定している。しかし、文献 [17] では、Youtube の動画の再生回数の分布は厳密には Zipf 分布ではなく、特に下位の動画において再生回数が急激に減少すると報告されている。ただし、対象とする動画サン

ルの取得方法が無作為抽出となっていないため、この結果が全体の動画の再生回数の分布を正しく反映しているとは言えず、動画コンテンツの実際のアクセス分布は現時点では不明である。また、コンテンツのアクセス分布に影響する要因として、以下のものが挙げられる。本研究では、全てのコンテンツのサイズを均一としているが、実際にはコンテンツのサイズはさまざまであり、特に近年はサイズの大きいコンテンツが増加している。大きいサイズのコンテンツを、アクセス頻度が等しい同一サイズのコンテンツの集合と考えることにより、本研究の結果を適用できるが、これによりコンテンツのアクセス分布が変化する可能性がある。更に、本研究ではアクセス分布はレベル1の全てのルータにおいて同一としているが、ルータによってアクセス分布が異なる状況が考えられる。例えば、動画コンテンツへのアクセスは言語の影響を強く受けるため、複数の国にまたがるネットワークでは、ルータによってアクセス分布が大きく異なると考えられる。このような場合、本研究の結果をそのまま適用できない。これらの影響を考慮した、動画コンテンツのアクセス分布のより現実的なモデルを構築することが必要である。

6. む す び

本論文では、階層構造のネットワークを対象として、ルータがコンテンツを保持することにより、ネットワークの消費電力を削減する手法について考え、各ルータにおける適切なストレージ容量を決定する手法を提案した。また、実際のネットワークを元にしたネットワークトポロジ及びパラメータ設定に基づき、実際にルータのストレージ容量及び消費電力量を求めた。その結果、ストレージ装置としてHDDを用いる場合には最大で約13%、SSDを用いる場合は最大で約44%の消費電力量の削減の効果が認められた。また、コンテンツのアクセス分布の偏りが、ストレージ容量や消費電力量の削減に与える影響を明らかにした。更にコンテンツ数と総アクセス数、ルータのEPIが総消費電力量に与える影響について調べ、将来的にもルータがコンテンツを保持する手法がネットワークの消費電力の削減に有効であることを示した。

謝辞 本研究の遂行にあたり有益なご討論ご助言をいただいた独立行政法人情報通信研究機構理事の今瀬真先生に深謝する。

文 献

- [1] R. Bolla, R. Bruschi, F. Davoli, and F. Cucchietti, "Energy efficiency in the future internet: a survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol.13, no.2, pp.223-244, 2011.
- [2] V. Jacobson, D.K. Smetters, J.D. Thornton, M.F. Plass, N.H. Briggs, and R.L. Braynard, "Networking named content," *Proc. 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, pp.1-12, 2009.
- [3] U. Lee, I. Rimac, D. Kilper, and V. Hilt, "Toward energy-efficient content dissemination," *IEEE Netw.*, vol.25, no.2, pp.14-19, 2011.
- [4] C. Williamson, "On filter effects in web caching hierarchies," *ACM Trans. Internet Technology (TOIT)*, vol.2, no.1, pp.47-77, 2002.
- [5] H. Che, Y. Tung, and Z. Wang, "Hierarchical web caching systems: Modeling, design and experimental results," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.20, no.7, pp.1305-1314, 2002.
- [6] N. Laoutaris, S. Syntila, and I. Stavrakakis, "Meta algorithms for hierarchical web caches," 2004 IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications, pp.445-452, 2004.
- [7] I. Psaras, R. Clegg, R. Landa, W. Chai, and G. Pavlou, "Modelling and evaluation of CCN-caching trees," *Networking 2011*, pp.78-91, 2011.
- [8] D. Rossi and G. Rossini, "On sizing CCN content stores by exploiting topological information," 2012 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), pp.280-285, 2012.
- [9] W. Chai, D. He, I. Psaras, and G. Pavlou, "Cache "less for more" in information-centric networks," *Networking 2012*, pp.27-40, 2012.
- [10] S. Imai, K. Leibnitz, and M. Murata, "Energy efficient content locations for in-network caching," 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), pp.554-559, 2012.
- [11] J. Baliga, K. Hinton, and R.S. Tucker, "Energy consumption of the internet," *Joint International Conference on Optical Internet, 2007 and the 2007 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology, COIN-ACOFT 2007*, pp.1-3, 2007.
- [12] Hewlett-Packard Company, "DDR3 memory technology." <http://h20000.www2.hp.com/bc/docs/support/SupportManual/c02126499/c02126499.pdf>
- [13] tom's hardware, "Performance Charts." <http://www.tomshardware.com/charts/>
- [14] YouTube, "Holy nyans! 60 hours per minute and 4 billion views a day on youtube." <http://youtube-global.blogspot.com/2012/01/holy-nyans-60-hours-per-minute-and-4.html>
- [15] Internet World Stats, "Top 20 countries with the

highest number of internet users.”

<http://www.internetworldstats.com/top20.htm>

- [16] 総務省, “電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表 (平成 23 年度第 4 四半期 (3 月末)).”

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000039.html

- [17] X. Cheng, C. Dale, and J. Liu, “Statistics and social network of youtube videos,” 16th International Workshop on Quality of Service, 2008, IWQoS 2008, pp.229–238, 2008.

- [18] P. Mahadevan, P. Sharma, S. Banerjee, and P. Ranganathan, “A power benchmarking framework for network devices,” Networking 2009, pp.795–808, 2009.

(平成 25 年 3 月 6 日受付, 6 月 26 日再受付)



多田 知正 (正員)

平成 5 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 7 年同大学大学院博士前期課程修了。平成 10 年同博士後期課程退学。同年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 14 年同大学大学院情報科学研究科助手。平成 18 年京都教育大学教育学部講師。現在, 京都教育大学教育学部准教授。博士 (工学)。情報ネットワーク及び分散システムに関する研究に従事。情報処理学会会員。



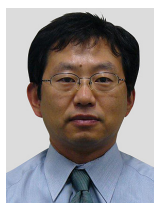
村田 正幸 (正員)

昭和 57 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院博士前期課程修了。同年日本アイ・ビー・エム (株) 入社。同社東京基礎研究所を経て, 昭和 62 年大阪大学大型計算機センター助手。平成 1 年同大学基礎工学部助手。平成 3 年同講師。平成 4 年同助教授。平成 11 年同教授。平成 12 年大阪大学サイバーメディアセンター教授。現在, 大阪大学大学院情報科学研究科教授。工学博士。システムのモデル化と性能評価, 情報ネットワークアーキテクチャなどの研究に従事。IEEE, ACM 会員。



長谷川 剛 (正員)

平成 7 年大阪大学基礎工学部情報工学科退学。平成 9 年同大学大学院博士前期課程修了。同年同博士後期課程退学。同年大阪大学経済学部助手。平成 10 年同大学院経済学研究科助手。平成 12 年同大サイバーメディアセンター助手。平成 14 年同助教授。現在, 大阪大学サイバーメディアセンター准教授。博士 (工学)。主としてトランスポート層プロトコル, オーバレイネットワーク, 無線ネットワーク, ネットワーク計測などの研究に従事。情報処理学会, IEEE 会員。



馬場崎忠利 (正員)

平成 2 年長崎大学大学院工学研究科修了。同年日本電信電話株式会社入社。現在, NTT 環境エネルギー研究所エネルギー供給方式グループ・グループリーダー。博士 (工学)。通信用直流給電システム, 鉛蓄電池, 燃料電池システム, 高電圧直流給電システムの開発に従事。電気学会, IEEE 会員。



中村 二郎 (正員)

昭和 62 年大阪大学工学部応用化学卒業。平成元年同大学大学院博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。平成 17 年日本電信電話株式会社環境エネルギー研究所グループリーダー。現在, 日本電話電話株式会社環境エネルギー研究所企画部長。博士 (工学)。情報通信分野の環境エネルギーに関する研究開発に従事。



松岡 茂登 (正員)

昭和 55 年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業。昭和 57 年同大学大学院修士課程修了。昭和 60 年同大学大学院博士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。平成 11 年 NTT フォトニクス研究所主幹研究員。平成 16 年 (株) 国際電気通信基礎技術研究所経営統括部長。平成 21 年 NTT 環境エネルギー研究所所長。現在, NTT 情報ネットワーク総合研究所主席研究員。工学博士。フォトニックネットワーク, 省エネルギーネットワークなどの研究に従事。IEEE 会員。



松田 和浩 (正員)

昭和 58 年北海道大学工学部電子工学科卒業。昭和 60 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話 (株) 入社。現在, NTT アドバンステクノロジー (株) 先端プロダクツ事業本部。ネットワーク技術及びエネルギーマネジメント技術に関する研究に従事。電気学会上級会員。