

コンテンツ流通網におけるキャッシュノードの 過負荷を抑制する誘導情報制御方式の検討

Investigation of Control of In-network Guidance Information for Avoiding Node-overload in Content Distribution Network

柿田 将幸† 谷川 陽祐† 戸出 英樹†
Masayuki Kakida Yosuke Tanigawa Hideki Tode

概要

近年、大容量コンテンツ配信に起因するサーバ負荷の増大が問題となっている。コンテンツキャッシュを用いてサーバの負荷軽減を実現しつつ、コンテンツ指向なネットワークを自律的に形成する手法として、コンテンツ名に基づいてキャッシュへの誘導を行う Breadcrumbs (BC) と呼ばれる方式が提案されている。また、筆者らは、特定状況下でクエリがルータ間をループするという本方式の問題を解決した Breadcrumbs+ (BC+) 方式、および誘導情報をより積極的に配布制御する Active Breadcrumbs (ABC) 方式を提案している。しかし、従来の ABC 方式において誘導情報の適応的制御に関しては、方針が定められるに留まっており、具体的な方式の規定、評価は行われていなかった。本稿では、ABC のみならず BC を含んだ誘導情報の基本的な適応的制御を提案し、計算機シミュレーションによりその有効性を示す。

1. はじめに

近年、大容量コンテンツ配信に起因するサーバ負荷の増大が問題となっており、解決策としてサーバ以外のノードにキャッシュをもたせるアプローチが存在する [1][2]。また、新世代ネットワークにおける枠組みとして、コンテンツ指向ネットワークという概念が提案されている [3][4][5]。これは、現在のネットワークが IP アドレス等の位置情報を中心に運用されている一方で、ユーザの興味はコンテンツそのものにあり、位置情報にあるのではないという観点から生まれたものである。このような背景から、i3 [6] や DONA [7] に代表される“キャッシュ”と“コンテンツ指向”というアイデアを組み合わせた研究が注目されつつある [8][9]。Van Jacobson らが提唱する Content Centric Networking [10] も同様のコンセプトに基づいており、コンテンツの名前空間に基づくルーチング原理が提案されている。

このような研究の一つとして、Breadcrumbs (BC) [11][12] と呼ばれるコンテンツキャッシュへの誘導情報を扱う方式が提案されている。本方式では、コンテンツキャッシュを用いてサーバの負荷軽減を実現しつつ、コンテンツ指向なネットワークを自律的に形成する。また、筆者らは、クエリがルータ間を無限にループしコンテンツに到達できなくなるという BC 方式の問題を解決した拡張方式 Breadcrumbs+ (BC+) [13] および、この BC+ 方式をベースとし、ユーザが保持するキャッシュの利用を促進するために誘導情報を積極的に周辺ノードに配布する方式 Active Breadcrumbs (ABC) [14] を提案している。

しかし、これまでの ABC 方式において、ノードの状況を考慮した誘導情報の適応的制御に関しては、方針が定められるに留まっており、具体的な手法の規定、評価は行われていなかった。

本稿では、クエリの集中によるコンテンツ保持ノードの過負荷状態を回避するために、ABC だけでなく BC を含んだ誘導情報の適応的制御方式を提案する。この局所的な適応的制御を通して、ネットワーク全体での負荷分散を図る。最後に、計算機シミュレーションにより、各ノードの負荷やネットワーク全体の負荷分散状況、さらには適応的制御の有無がノード負荷以外の指標へ与える影響について評価する。

2. Breadcrumbs+の概要

本章では、提案方式のベースとなる Breadcrumbs+ (BC+) 方式 [13]、および Active Breadcrumbs (ABC) 方式 [14] の概要を説明する。以降、キャッシングポリシーは Least Recently Used (LRU) 規律が採用されているものとする。

表 1 BC エントリ

属性	説明
ContentID	コンテンツ ID
UpHopS	上流ノード ID (複数登録可)
DownHop	下流ノード ID
DownloadTime	コンテンツが最後に転送された時刻

2.1 Breadcrumbs+

Breadcrumbs 方式 [11][12] は複雑な情報管理を要さず、構成は非常にシンプルであるが、そのために細かい制御を行うことができない。その結果として、特定状況下でクエリがルータ間をループ状に転送され続け、コンテンツを取得できなくなる問題が発生する。BC+方式は、上記の問題を解決するために、BC エントリの一部を拡張し、さらに誘導情報を無効化する手法を改良したものである。

本方式では、ユーザがサーバからコンテンツをダウンロードする際、その経路上の各ノードがコンテンツキャッシュに加えて“breadcrumb” (BC) という誘導情報を記録する。BC のエントリには、表 1 に示す 4 種類の項目が記録されている。ここで、上流とはコンテンツが転送されてきた方向、下流とはコンテンツが転送されていった方向を指す。ContentID、DownHop、DownloadTime は 1 エントリにつき 1 情報のみが、UpHopS については、1 エントリにつき 1 つ以上の情報が記録される。UpHopS または

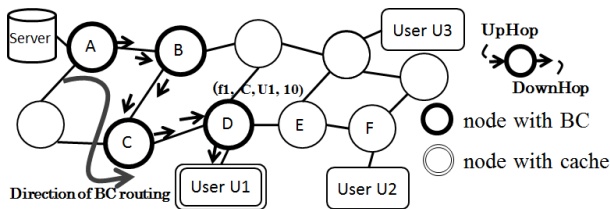


図 1 BC trail の例

DownHop が null となる場合、そのノードが下記に示す BC trail の末端であることを表している。図 1 は、ユーザ U1 があるコンテンツをサーバからダウンロードした直後の状況を表している。例えば、ルータ D の BC エントリには ContentID が f1, UpHopS がルータ C, DownHop がユーザ U1, 最後にコンテンツが転送された時刻が 10 という情報が記載されている。

あるコンテンツのダウンロード経路上のノードに新たなクエリが到達した場合、対応する BC エントリに記録されている DownHop を順に辿ることによって、過去にダウンロードされたコンテンツの後を追うことができる。この一連の BC の集合を trail と呼ぶ。クエリがコンテンツの後を追うように誘導されるのは、上流よりも下流のノードにキャッシュが残っている可能性が高いためである。これは各ノードが LRU 規程に基づいてキャッシュを保持していることによる。

クエリがキャッシュを保持するノードに辿りついた場合、そのノードは最短経路に基づく IP ルーティングに従いキャッシュされた当該コンテンツをユーザに返送する。

また、ある BC trail の末端ノードにてキャッシュが消去された場合は、BC 無効化制御用パケット (Invalidation Message, IM) を用いて、当該 BC trail 全体の無効化 (trail invalidation) を行う。

2.2 Active Breadcrumbs

本方式は、従来の誘導情報 BC に加え、BC に優先する特殊な Active Breadcrumbs (ABC) を用いて、コンテンツ保持ノードが自ら能動的に誘導情報を配置する。なお、ABC エントリには、表 2 に示す 3 種類の項目が記録されている。

表 2 ABC エントリ

属性	説明
ContentID	コンテンツID
CacheNodeID	キャッシュノードID
LifeTime	タイムアウトする時刻

本方式では、サーバを含むコンテンツ保持ノードから送信されるメッセージを用いて、ABC の配布や無効化に関する制御が行われる。具体的には、コンテンツの人気度を反映しながら周辺ノードに ABC 配布メッセージを送信し、ABC の配布範囲を広げる。一方、コンテンツ保持ノードにかかる負荷が高い場合、ABC を無効化することで当該ノードが処理するクエリ量を抑制する。

キャッシュノードにおいて、キャッシュが LRU 規程にしたがって削除された場合は、当該 ABC に対する無効化メッセージを、配布メッセージを送信したノード群に送信する。また、キャッシュノードによる制御が一定期間行われずに LifeTime に記載された時刻を迎えた ABC は、

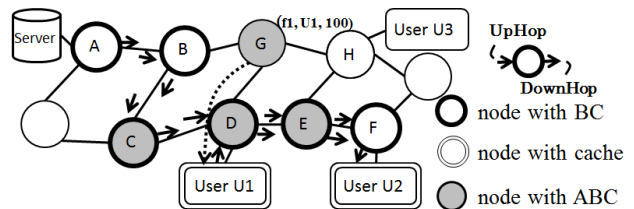


図 2 ABC 配布の例

制御用メッセージが輻輳などにより失われたと判断し、無効化される。

あるコンテンツを要求するクエリが当該コンテンツ ID の ABC エントリを保持するノードに到達した場合、クエリは ABC に記録されているキャッシュノードまで IP ルーティングに基づいて転送される。クエリがキャッシュノードに到達した時点でキャッシュが削除されていた場合、再びサーバに向かって転送される。

図 2 はユーザ U1 が ABC を周辺ノード (ルータ C, D, E, G) に配布した状況を表している。ノード G の ABC エントリに記録されている情報は、ContentID が “f1”, CacheNodeID が “U1”, LifeTime が “100” であることを示している。例えば、ユーザ U3 がクエリをサーバに送信した場合、従来ならクエリはノード B まで IP ルーティングされてから BC trail に従ってユーザ U2 まで誘導されていた。ABC を用いた場合、クエリはノード G において ABC にアクセスし、ノード G-D-U1 の順に IP ルーティングされる。ここで、ABC は BC に優先するため、BC trail の誘導 (図中の実線矢印の向き) とは異なる方向 (図中の点線矢印) に誘導されていることに注意する。このようにクエリは、コンテンツ保持ノードの近隣に存在する ABC の誘導に従うことで、より短いホップ数でキャッシュに到達することができる。

3. 提案方式 - ABC 配布範囲の適応的制御 -

これまでの Active Breadcrumbs 方式において、ノードの状況を考慮した誘導情報の適応的配布制御に関しては、方針が定められるに留まっておらず、具体的な手法の制定は行われていなかった。また、キャッシュノードにかかる負荷に関しても、定量的な評価は行われていない。

しかし、実ネットワークでの運用を考えた場合、各ノードにかかる負荷はシステムの安定性に影響を及ぼす重要な要因である。したがって、各キャッシュノードの過負荷状態を回避するために、ABC 配布範囲の適応的制御法の確立、および本制御手法がシステムに与える影響の評価が必要である。

本章では、ABC の適応的制御に関する提案を行う。この制御により、各キャッシュノードにおいて、過剰なコンテンツアップロードに起因する過負荷状態の回避を図る。また、各キャッシュノードが局所的な視点から行う自律分散的な制御を通してネットワーク全体での負荷分散を図る。

3.1 誘導情報の制御方針

本方式における誘導情報制御は、以下に挙げる方針の下で行う。

1. コンテンツ保持ノードに過負荷がかからないこと
2. キャッシュ利用率を高めること

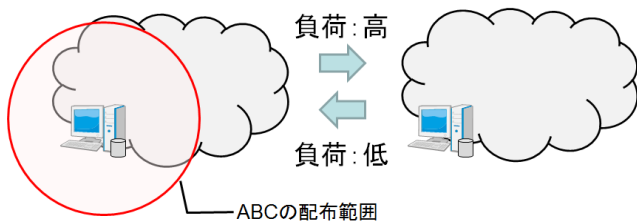


図3 ABC 配布範囲の適応的制御

ここで、「過負荷状態の回避」は「キャッシュ利用率の向上」よりも高い優先度をもつものとする。仮に過負荷状態の回避を行わずにキャッシュ利用率の向上のみに注目すると、キャッシュノードの同時アップロードコネクション数が大きくなりすぎること、過負荷状態に陥る可能性があり、その場合、各コネクションに割り当てることができるネットワーク帯域、さらにはキャッシュノード自身の余剰処理能力が小さくなる。その結果、最終的には、コンテンツを要求している各ユーザがコンテンツを取得するのに必要な時間が大きくなる、キャッシュノードとして動作しているユーザのコンテンツキャッシュ配信以外を目的としたネットワーク利用が制限されるといった状況が想定される。「過負荷状態の回避」を本方式が満たす条件の最優先課題としたのは、上記の事態に陥ることを防ぎ、安定的にネットワークの性能を引出すことで、コンテンツキャッシュの配信、取得に関わるユーザエクスペリエンスを悪化させないためである。

3.2 誘導情報の無効化

2.2節でも述べたように、ABCは各キャッシュノードに周辺ノードからのクエリを自ノードへ積極的に誘導するために配布される。しかし、キャッシュされたコンテンツの人气が高過ぎた場合や、クエリを送信したノード付近のネットワーク帯域がボトルネックとなりコンテンツアップロードにかかる時間が悪化した場合に、特定のキャッシュノードにクエリが集中しすぎて大きな負荷がかかる。このような場合、自ノードへのクエリ誘導情報を無効化することで、過負荷状態を回避することができる。具体的には、BCに対してはtrail invalidation開始のためのIMの送信、ABCに対しては無効化メッセージの配布を行い、それぞれの誘導情報の無効化を試みる。例えば、図2において、ユーザU1が周辺ノードにおける自ノードへのクエリ誘導情報の無効化を行った場合を考える。ユーザU1が配布したABCエントリについては、ノードC、D、E、Gがそれぞれ保持しているものが削除される。ノードAからユーザU2に続くBC trailについては、ユーザU1がIMを送信したとしても、trail invalidationに失敗する。これは、ユーザU1の隣接ノードであるノードDのもつBCエントリのDownHopがノードEであり、ユーザU1へクエリを誘導するものではないためである[13]。したがって、新たなクエリはBC trailにしたがってユーザU2に誘導され、そこでキャッシュを発見することができる。

3.3 誘導情報の再配布

過負荷状態を回避するために周辺の誘導情報を無効化した後、負荷の原因となったキャッシュのアップロードが終わることで、キャッシュノードにかかる負荷が十分に低減した場合、クエリを再び自身のキャッシュに誘導

するためにABCを再配布する。ここで、あるキャッシュノードで無効化制御が機能した、つまりキャッシュノードにクエリが集中し過負荷状態になりかけたということは、当該キャッシュノードの保持するキャッシュは高人気度のコンテンツである可能性が高い。よって、ABCはできるだけ広範囲に再配布される。

このように、本提案方式では、自身のもつコンテンツに関する誘導情報の無効化と再配布を繰り返すことで、誘導情報の配布範囲に関する適応的制御を行う(図3)。

ここで、「過負荷状態の回避」を最優先課題としたため、誘導情報の無効化によって、負荷に関するもの以外の指標でシステムの性能が悪化する可能性が考えられるが、誘導情報の再配布によりこの影響は最小限に抑えられる。負荷に関するもの以外の指標としては、コンテンツ取得にかかる時間、ネットワーク中を流れるパケット量、キャッシュ利用率などが挙げられる。

4. 性能評価

提案方式の有効性を確認するために、C++を用いて作成したシミュレータにより性能評価を行う。

4.1. シミュレーション条件

シミュレーションで使用した諸パラメータを表3に示す。なお、オリジナルのBC方式[11][12]とは異なり、文献[13]で論じたように、実現可能性を重視して、キャッシュを行うのはネットワークの末端に存在するSTBやユーザノードに限定されることに注意する。また、その他の各条件を以下に示す。

表3 シミュレーション中のパラメータ

パラメータ	値
ルータ数	1000
ユーザ数	5000
サーバ数	50
コンテンツ数	10000
1ユーザがキャッシュ可能なコンテンツ数	2
1ユーザ当たりの平均クエリ発生間隔	2000
T_f	90000

・ネットワークトポロジ

ルータのネットワークトポロジはWaxmanモデル[15]に従う。サーバはルータのいずれかに一様分布に従ってランダムに接続され、ユーザはすべてのルータに5つずつ接続されている。また、作成されたトポロジに対し、任意のノード間の距離はたかだか18ホップである。

・ABCの制御ルール

今回は簡単化のために、ABCの配布範囲の適応的制御は、各キャッシュノードにおいて2種類の閾値を利用した制御ルールに従うものとする。

配布について：コンテンツキャッシュのダウンロード回数に対して閾値を設けることで配布範囲を決定する。具体的には、各キャッシュノードにおいて、ダウンロード回数が一定回数(1,3,8)を超えたコンテンツに対し、対応するTTL(1,2,3)を設定したABC作成メッセージをフラグディングすることにより配布する。

無効化について：各キャッシュノードに対し同時アップロード数の上限(閾値)を設ける。この上限に達した

場合、自身にクエリを誘導するBCおよびABCをすべて無効化することを試みる。ここで、無効化の対象となるコンテンツの種類は、自身がキャッシュしている全てのコンテンツとなることに注意する。具体的には、BCに対してはInvalidation Messageを隣接ルータに送信、ABCに対しては配布時に使用したTTLと同じ値をもつABC無効化メッセージをフラッディングする。

再配布について：同時キャッシュアップロード数が上限に達したキャッシュノードにおいて、キャッシュ送信終了時に同時アップロード数が上限値よりも低くなった場合、当該キャッシュノードは保持している全コンテンツをキャッシュについてTTL=3を設定したABC作成メッセージをフラッディングする。

・各コンテンツに対するクエリの発生

各ノードにおいて、独立同一な指数分布に従うランダムな時間間隔でクエリ要求イベントが発生し、人気度を加味した「Zipfの法則($\alpha = 1.0$)」に従ってコンテンツを要求する。

・各種パケットのサイズ

全パケットサイズを一定 (1500Byte / packet) とし、クエリ、各種制御用パケットはともに1個、コンテンツについては768000個のパケットから構成されているとする。このコンテンツのサイズはビットレートが5Mbps、長さが30分の映像ファイルとおおよそ一致する。

・各種遅延

ベースとしたBC方式 [11] に従い、輻輳が発生しないネットワークを近似的に表現し、シミュレーションを行う。具体的には、今回のシミュレーションで扱うルータは各々が十分な処理能力をもつと仮定し、伝送遅延、キューイング遅延といった各種遅延は一定値をとるものとした。本シミュレーション中では、1個のパケットが隣り合う任意の2ノード間を移動するのにかかる時間を2.3msとした。これにより、768000個のパケットからなるコンテンツ1つを転送するのにかかる時間はおよそ30分となる。

・評価対象

評価対象は以下の3種である。

1. ABC：適応的制御を行わないABC方式 (同時アップロード数制限なし)
2. ABC (5)：適応的制御を行うABC方式 (同時アップロード数上限値：5)
3. ABC (3)：適応的制御を行うABC方式 (同時アップロード数上限値：3)

4.2 実験結果

実験結果を表4および図4 - 8に示す。ここで、評価指標となっているのはクエリ受信時の同時アップロード数 (キャッシュノード)、平均クエリホップ数、平均コンテンツホップ数、サーバ集中率、および単位時間当たりのネットワーク中のパケット量の5つである。クエリ受信時の同時アップロード数 (キャッシュノード) とは、各キャッシュノードがクエリを受信した時点でキャッシュされたコンテンツを送信している接続の数の数である。平均クエリホップ数とは、ユーザがクエリを送信してからコンテンツに到達するまでに要したホップ数の平均値である。平均コンテンツホップ数とは、コンテンツがユーザに届くまでに要したホップ数の平均値である。サーバ集中率とは、各ユーザノードで発生したクエリの

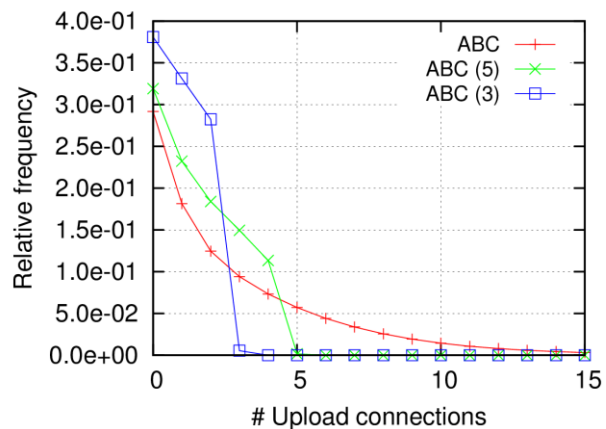


図4 クエリ受信時の同時アップロード

うち、実際にサーバからコンテンツを取得したクエリの割合を表す。この値が低いほど、キャッシュに到達したクエリの割合が大きく、キャッシュを効率的に利用していることになる。なお、シミュレーション内ではサーバの数は50であったが、紙面の都合により、グラフに掲載するサーバは10個 (ID 0 - 9) のみとする。

実験結果より、大きく分けて以下の3点がわかる。

まず、図4より、各キャッシュノードにおける誘導情報の適応的制御によって、各ノードが過負荷状態を回避できていることがわかる。適応的制御を行わない2方式では分布に広範囲の裾野が存在するのに対して、適応的制御を行う2方式では、同時アップロード上限数より大きな値を取っていない。このことから、キャッシュノードが誘導情報を適応的に無効化するだけで、過負荷状態が回避されていることがわかる。さらに、上限値よりも低い同時アップロード数をもつノードに到達するクエリの割合が大きくなっていることから、適応的制御を通じてネットワーク中でのキャッシュアップロードに関する負荷分散を促進していることがわかる。

次に、表4、図5 - 8より、適応的制御を行った場合でも、キャッシュノードの負荷に関係しない指標が大きく悪化していないことがわかる。まず、図5 - 6に注目する。双方の図において、適応的制御を行う2方式は、同制御を行わない方式に比べてホップ数4のピークが小さく、ホップ数5-10の相対頻度が大きくなっていることがわかる。これは、適応的制御を行わない方式において、過負荷状態のキャッシュノードに対し、ABCにより誘導されていたクエリの一部が他のコンテンツ保持ノードに誘導されることで、負荷が分散されたことを示している。また、図7に注目すると、適応的制御を行う2方式は、同制御を行わない方式に比べて、全てのサーバでのクエリ処理数がわずかに大きくなっていることがわかる。さらに、図8においても、適応的制御を行う2方式のほうが、同制御を行わない方式に比べて、わずかに大きな値をとっている。これら2つの傾向からも、ABCによって短いホップ数でキャッシュノードに誘導されていたクエリの一部が、過負荷状態回避のためにサーバを含む他のコンテンツ保持

表4 平均ホップ数

方式	クエリ	コンテンツ
IP	7.76	7.09
BC+	8.43	7.24
ABC	8.31	7.31

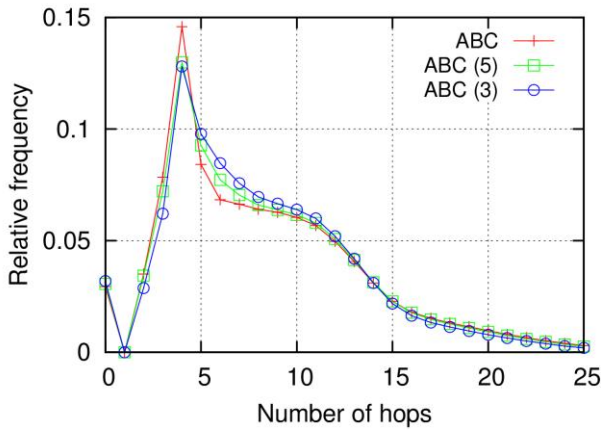


図5 クエリホップ数分布

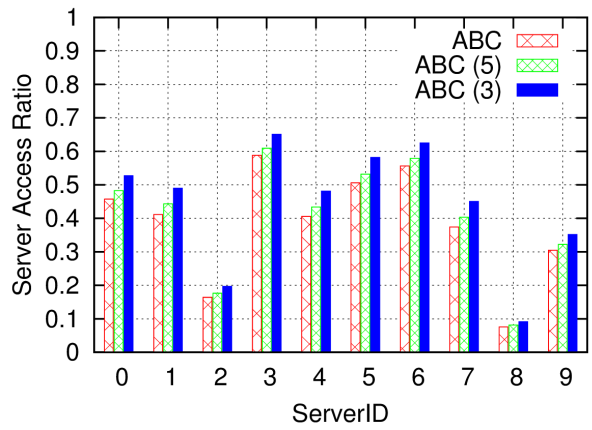


図7 サーバ集中度

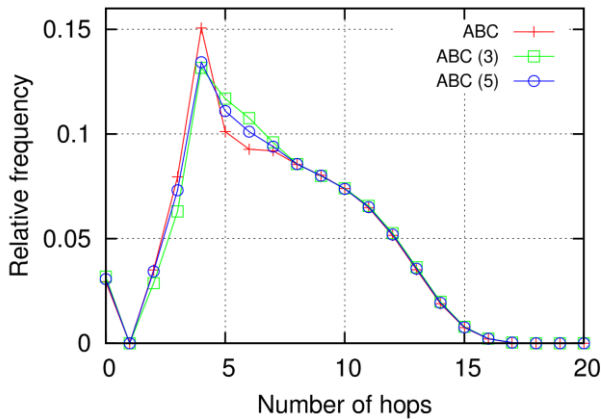


図6 コンテンツホップ数

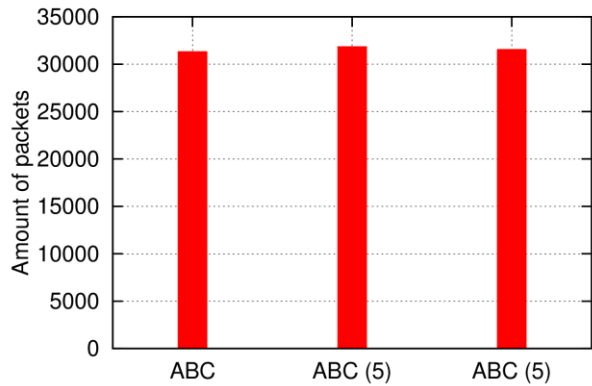


図8 ネットワーク中のパケット量

ノードに誘導され、負荷分散が促進されたことが読み取れる。

最後に、誘導情報の適応的制御における同時アップロード上限値の差によって、キャッシュノード間での負荷分散の度合いが変化していることがわかる。図4に注目すると、上限値が5である方式に比べ上限値が3である方式では、クエリ受信時の同時アップロード数が少ない、つまり処理能力に余裕があるノードにクエリが誘導されやすいことがわかる。また、図7より、キャッシュノードあたりの上限値が低い方式ほどサーバが処理するクエリ数が増えていることが読み取れる。したがって、キャッシュノードあたりの同時アップロード上限値が低いときほど、サーバの負荷を抑制するために各キャッシュノードのリソースをより有効に活用する必要があることがわかる。この点は今後の課題の一つに挙げられる。

6. まとめ

本稿では、コンテンツキャッシュを効率的に運用するBreadcrumbs+方式およびActive Breadcrumbs方式において、ABC方式の適応的制御の提案、シミュレーションを通じた評価を行った。その結果、提案手法によって負荷分散が促進されたこと、提案手法の導入によって負荷以外の指標は悪化しなかったことが確認された。今後の課題としては、次の3つが挙げられる。まず、キャッシュノードだけでなくオリジンサーバにおける誘導情報制御法の確である。キャッシュノードとオリジンサーバでは置かれている状況が異なるため、本稿の提案手法よりも細かい

誘導情報制御が必要になる。次に、環境情報を利用したよりスマートな適応的制御方式の確立である。最後に、実ネットワーク上での実証実験である。

謝辞

本研究の一部は、情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究の成果である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] G. Barish and K. Obraczka, "World wide web caching: Trends and techniques," *IEEE Communications Magazine*, May 2000.
- [2] J. Wang, "A Survey of Web Caching Schemes for the Internet," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 29, no. 5, Oct. 1999.
- [3] A. Carzaniga and A. L. Wolf, "Content-based networking: A new communication infrastructure," *NSF Workshop on an Infrastructure for Mobile and Wireless Systems*, Oct. 2001.
- [4] J. Choi, J. Han, E. Cho, K. Kwon and Y. Choi, "A Survey on Content-Oriented Networking for Efficient Content Delivery," *IEEE Communications Magazine*, 第 49 卷, 第 3 号, pp. 121-127, Mar. 2011.
- [5] D. Lagutin, K. Visala and S. Tarkoma, "Publish/Subscribe for Internet: PSIRP Perspective," *Towards the Future Internet - A European Research Perspective*, pp. 75-85, 2010.

- [6] I. Stoica, D. Adkins, S. Zhuang, S. Shenker, "Internet Indirection Infrastructure," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 2, pp. 205-218.
- [7] T. Koponen, M. Chawla, B.-G. Chun, A. Ermolinskiy, K. H. Kim, S. Shenker, and I. Stoica, "A Data-Oriented (and Beyond) Network Architecture," *SIGCOMM*, 2007.
- [8] Y. Zhu, M. Chen and A. Nakao, "CONIC: Content-Oriented Network with Indexed Caching," in *Proc. 13th IEEE Global Internet Symposium*, pp. 1-6, Mar. 2010.
- [9] A. Carzaniga, M. Rutherford, and A. Wolf, "A Routing Scheme for Content-Based Networking," in *Proc. IEEE INFOCOM 2004*, Mar. 2004.
- [10] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. Plass, N. Briggs, and R. L. Braynard, "Networking named content," in *Proc. 5th ACM CoNEXT*, Dec. 2009.
- [11] E. J. Rosensweig and J. Kurose, "Breadcrumbs: efficient, best-effort content location in cache networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2009*, Apr. 2009.
- [12] E. J. Rosensweig and J. Kurose, "Breadcrumbs: efficient, best-effort content location in cache networks," *UMass Amherst, MA, Tech. Rep. UM-CS-2009-005*, Aug. 2008.
- [13] 柿田 将幸, 谷川 陽祐, 戸出 英樹, "Breadcrumbs+: コンテンツ流通網におけるインネットワーク誘導のための改良型 Breadcrumbs 方式," *電子情報通信学会論文誌 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特集号*, Vols. J94-B, no. 10, pp. 75-80, Oct. 2011.
- [14] 柿田 将幸, 谷川 陽祐, 戸出 英樹, "コンテンツ流通網におけるインネットワーク誘導情報の配布制御に関する評価," *平成 23 年度 情報処理学会 関西支部 支部大会 講演論文集*, pp. F-11, Sep. 2011.
- [15] B. M. Waxman, "Routing of multipoint connections," *IEEE J. Selected Areas in Communications (Special Issue on Broadband Packet Communication)*, vol. 6, no. 9, pp. 1617-1622, Dec. 1998.