

# コンテンツ配信ネットワーク(CDN)における サロゲート間協調動作の検討

村田 啓<sup>†</sup> 國近 洋平<sup>†</sup> 甲藤 二郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 早稲田大学大学院理工学研究科 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1  
E-mail: <sup>†</sup> {kei,yohei,katto}@katto.comm.waseda.ac.jp

**あらまし** 現在、コンテンツ配信において、オリジンサーバと複数のサロゲート間で連携し、人気度等に応じて動的に情報を複製するためのプロトコルの検討が進められている。その一例として ICP が挙げられるが、これはスケーラビリティの問題を抱えている。そこで、本稿ではその問題点を改善するために、グルーピングを用いたサロゲート間協調動作の一手法について提案する。さらに、シミュレーションによって、提案方式の有効性を定量的に明らかにする。

**キーワード** CDN, ICP, Cache Cooperation

## A Study on Cache Cooperation Strategy for Content Delivery Network

Kei MURATA<sup>†</sup> Yohei KUNICHIKA<sup>†</sup> and Jiro Katto<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {kei,yohei,katto}@katto.comm.waseda.ac.jp

**Abstract** Recently, in CDN, various protocols are developed for cooperation among an origin server and two or more caches, and for dynamic content replication according to the degree of popularity or server load. Although ICP is mentioned as the example, this protocol suffers from a scalability problem. In order to solve this problem, this paper proposes a novel method of cache cooperation which applies grouping of surrogates in a localized manner. Furthermore, validity of our proposal is quantitatively clarified by the simulations.

**Keyword** CDN, ICP, Cache Cooperation

### 1. はじめに

近年、インターネットの急激な普及とともに、WWW (World Wide Web) 閲覧、E-mail などのサービスは身近なものとなり、こうした技術の普及を背景に、ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line) や CATV (Cable TV) などの高速デジタルサービスに使用可能なメディアの実用化、さらには光ファイバの直接接続などが進み、家庭とインターネットとを結ぶアクセスリンクの高速化が進んでいる。これに伴い、インターネットを介して流通する、いわゆるデジタル・コンテンツについても、音楽や動画などの利用が広がり、大容量化が進むとともに有料化も進んでいる。

有料化の進展により、配信されるコンテンツが最終的にどのような品質、例えば動画や音声を途切れなく届けられること、利用者の待ち時間がある範囲内に抑えること、すな

わち QoS (Quality of Service) 保証が重要視されるようになってきた。もちろん、高速化の進む利用者のアクセスリンク速度に見合ったものでなくてはならず、ベストエフォート配信に任せるというやり方では不十分なものとなってきている。インターネットを構成する各部のネットワークの速度がすべて十分に高速であれば何も心配することはない。しかし現実には、コンテンツ提供者と利用者をつなぐネットワークの性能は多様であり、また、もし通常は十分な性能が出たとしてもいつ輻輳による性能低下が起きるか分からないという不安もある。配信にかかるコストの総計を低く抑えることも重要な要求である。

このような状況のなかで、分散したキャッシュサーバを中心とした CDN (Content Distribution Network) と呼ばれる技術が広がってきている[1]。コンテンツを高品質で届けるための網側からのアプローチに QoS 制御技術、あるいは

IP マルチキャスト技術といったものがあるが、CDN は主にアプリケーション層の技術により同様の目的を達成しようというアプローチである。

CDN では、通常、オリジンサーバと複数のサロゲート間でコンテンツを共有し、クライアントからのリクエストに応じて適切なサロゲートを選択する(リクエストルーティング)ことで、データの配信を行う。しかし、オリジナルサーバのすべてのコンテンツを各サロゲートがミラーリングすることは効率が悪く、現在、オリジンサーバと複数のサロゲート間で連携し、人気度等に応じて動的に情報を複製するためのプロトコルの検討が進められている。その一例として ICP(Internet Cache Protocol)が挙げられる。これは、連携サロゲート間で問合せを行うプロトコルであるが、UDPを用いた非常にシンプルなものであるため、発生するトラフィック量は小さく、効率的であるとされている。しかし、連携サロゲートが多くなればなるほど問い合わせメッセージは増加し、これに伴い、大量の packets が発生するため、ネットワーク、及びルータへ大きな負荷を与えるというスケーラビリティの問題がある([2],[3])。

そこで、本研究では、問い合わせメッセージの増加を抑えつつ、クライアントへの応答速度の向上を図ることを目的とし、グルーピングに基づくサロゲート間協調動作を提案する。

以下、2 章では ICP について、3 章では提案方式について述べ、4 章ではシミュレーションにより本研究の有効性を検討する。最後に、5 章においてそのまとめを行うこととする。

## 2. ICP (Internet Cache Protocol)

ICP とは、WWW キャッシュサーバ間でのキャッシュデータをやりとりするためのプロトコルである。Web キャッシュは、オブジェクト転送のために HTTP を用いることもできるが、キャッシュにはより単純で負荷の軽い通信プロトコルの方が有効であるため、UDP を使う ICP がよく用いられる。このため、コネクションの確率、破棄に伴うオーバーヘッドは発生しない。

ICP の主要な用途は、目的のデータがどのキャッシュサーバにあるのか、素早く調べることにあり、得られた情報はキャッシュサーバの選定に役立てることができる。ただし、データそのものに対するアクセス要求には HTTP が使われる。ICP はまた、キャッシュサーバの相対的な応答速度を判別する手段としても利用される。目的のデータが複数のキャッシュサーバに存在すれば、それぞれの応答時間を判別し、最も応答時間が短いものを優先することも可能である。

ICP の処理は非常にシンプルであり、そのメッセージは、照会対象となるデータの URL をペイロードに格納し、20byte のヘッダを付加した簡潔なものである。要求を行なった近傍のキャッシュサーバからの応答には“HIT”もしくは

“MISS”が含まれ、これを見て目的のデータがキャッシュにあるかどうかを判別できる。以下に、その基本的な動作を示し、また、図 2.1 にその概念図を示す。

1. キャッシュサーバから neighbor サーバへ URL を指定して“query”を出す。
2. neighbor サーバは URL で指定されたオブジェクトが自分のキャッシュにあれば“HIT”、なければ“MISS”を返す。
3. キャッシュサーバは“HIT”が返って来た neighbor サーバから HTTP によりオブジェクトを転送する。
4. どの neighbor サーバからも“HIT”がなかった場合、静的設定によってオリジンサーバ、もしくは指定された parent サーバに HTTP リクエストを出す。(もし、キャッシュサーバが ICP による問い合わせに応じない場合、そのキャッシュサーバが停止、または過負荷の状態、もしくは、ネットワークの輻輳、障害が起きていると推測することができる。)

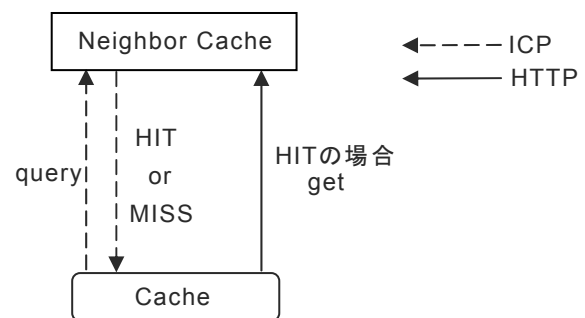


図 2.1 ICP における基本動作

## 3. 提案方式

本研究では、問い合わせメッセージの増加を抑えつつ、クライアントへの応答速度の向上を図ることを目的とし、これを以下の三つの方法を用いて実現することとする。

- RTT を用いたサロゲートのグルーピング
- グループ内におけるプロアクティブな情報共有
- グループ内におけるコンテンツ配置管理

### 3.1. RTT を用いたサロゲートのグルーピング

分散キャッシュシステムでは、複数存在するサロゲートをどのように連携させるかが重要であり、ネットワーク距離がオリジンサーバよりも遠いようなサロゲートを連携させた場合、クライアントへの応答速度が低下する恐れがある。そこで、応答速度の低下を防ぎ、またその応答速度を保証するため、図 3.1 に示すように、各サロゲートはオリジンサーバ、及び近隣のサロゲートに対し ping メッセージなどのメッセージを投げることで、ネットワーク距離を測り、オリジンよりも近い距離にあるサロゲートを自身のグループとする。ただし、これは各サロゲートが独立して行うためサロゲートの数だけ

グループは存在する。

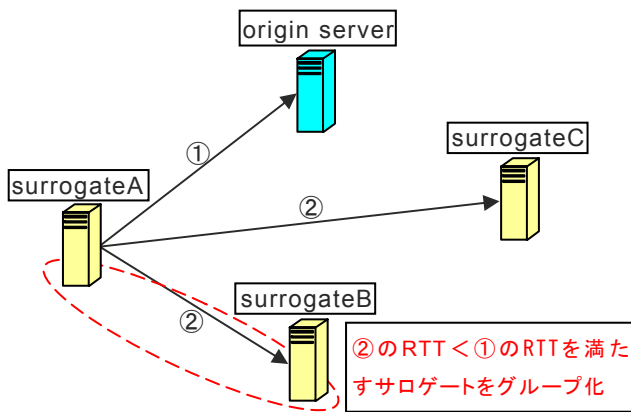


図 3.1 サロゲートにおけるグループ化手順

### 3.2. グループ内におけるプロアクティブな情報共有

このグループ内のサロゲートはクライアントへの応答を効率よく、素早く処理するために、プロアクティブに情報を共有する。まず、最初に自身の保持しているコンテンツの ID[4] のリストを交換し合い、サロゲートはそれぞれグループ内のコンテンツの ID とそれを保持するサロゲートを記述した cache-table を作成する。これにより、どのコンテンツをどのサロゲートが保持しているのかを事前を知ることができるため、クライアントへの応答速度の向上が期待できる。

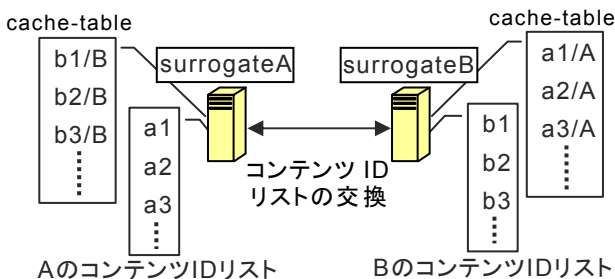


図 3.2 cache-table 作成

また、図 3.3 に示すように通常のサロゲートにおける動作に cache-table 探索を加え、さらに cache-table において Hit した場合には、クライアントにコンテンツ所持サロゲートの所在を通知し、クライアントが所持サロゲートに直接要求を行うこととする。

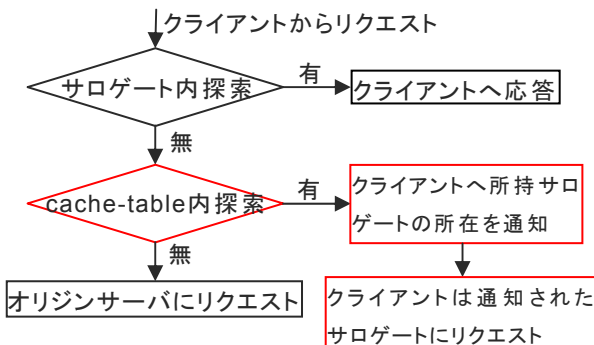


図 3.3 サロゲートにおける動作

次に、この cache-table の更新について述べる。cache-table が更新されるのは、グループ内のサロゲートからキャッシュ内容の変化を含んだメッセージを受信したときである。各サロゲートは、新しくコンテンツをキャッシュ、あるいはキャッシュしていたコンテンツを削除したとき、グループ内の他のサロゲートにその情報をブロードキャストする。これにより、グループ内のサロゲートが所持しているコンテンツについて常に新鮮な情報を保持することができる。

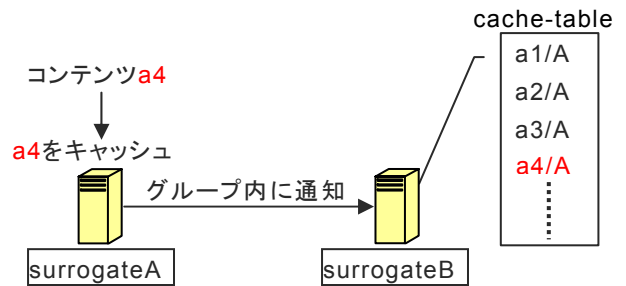


図 3.4 cache-table の更新

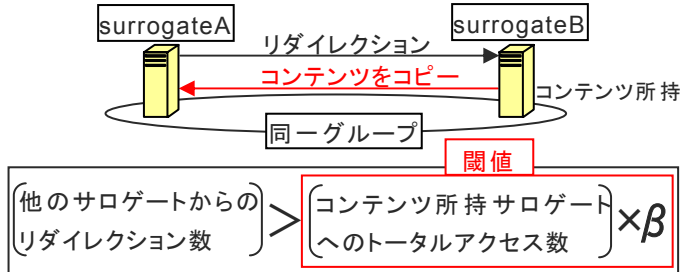
### 3.3. グループ内におけるコンテンツ配置管理

コンテンツを配信する際、もっとも重要なのはコンテンツをどこに配置するか、という点である。コンテンツ要求者であるクライアントにとって最も近くにあるということが、クライアントへの応答速度の低下を防ぐにはベストなことである。しかし、コンテンツ全てを各サロゲートに配置 (ミラーリング) することは無駄が多く、また、クライアントに最も近いサロゲートに要求される全てのコンテンツを配置することは難しい。これは、インターネットに存在するコンテンツは膨大な数であるため、一つのサロゲートで対応するには容量的に無理があるからである。

そこで、本提案では、一つのサロゲートで対応するのではなく、RTT を用いてグルーピングを行なった複数のサロゲートで対応を図ることとする。最も近いサロゲート、及び RTT によりクライアントへの応答速度を保証したサロゲートで対応することで、サロゲート全体におけるヒット率を向上させるとともに、クライアントへの応答速度の低下を防ぐことが狙いである。

まず、グループ内において“同一グループ内で重複してコンテンツを保持しない”というキャッシュポリシーを定義する。これにより、グループ内でのキャッシュ効率を最大限に生かすことができると考えられる。しかし、このポリシーだけでは特定の人気の高いコンテンツが存在した場合、そのコンテンツを保持したサロゲートにアクセスが集中するという問題が生じてしまう。そのため、“グループ内の他のサロゲートからのリダイレクション数が閾値を超えた場合、そのコンテンツのコピーを許可する”というもう一つのポリシーを設定することとする。ただし、これはコンテンツごとに行なうものとし、リダイレクションの数を増加させる原因となったサロゲート

トにのみコピーを渡すものとする。このポリシーを設定することで、特定のサロゲートにアクセスが集中するという問題を回避でき、さらにはクライアントへの応答速度の向上を期待できる。図 3.5 に、その閾値、及び、コピー時の概念図を示す。



ただし、 $\beta$  は 0 以上 1 未満の係数とする。

図 3.5 コピー許可

#### 4. シミュレーション評価

ns-2[5]を用いて、シミュレーション評価を行い、従来方式と提案方式の性能を比較する。なお、従来方式としての比較対象は、サロゲート間の情報交換を行わない CDN、ICP で情報交換を行う ICP とし、提案方式としては、コピー許可を用いない提案 1、コピー許可を用いる提案 2 とする。

評価指標は、平均転送時間（クライアントがオブジェクトを要求してから取得するまで）、サロゲートにおける制御メッセージ数、オリジンサーバ、及びサロゲートにおける負荷（10 秒ごとの平均値）を用いる。

ただし、ICP では、近隣サロゲート全てを連携させることとし、また、近隣サロゲートからオブジェクトを取得した場合、自身にキャッシュしてからクライアントへ転送することとする。さらに、制御メッセージに関しては、ICP マルチキャストを用いた場合も評価する。ICP マルチキャストとは、Query メッセージを送信する際、マルチキャストアドレスを用いることで、メッセージ数の減少を図るものであり、Hit などの応答に関しては、通常通りユニキャストで行なわれる。

さらに、前提条件として、今回シミュレーションに用いるサロゲートはプロキシ・キャッシュとし、クライアントが一番近いサロゲートを発見できているが、そのサロゲートが目的のコンテンツを所持しているかどうかは分からないとする。

##### 4.1. シミュレーション条件

クライアントが各コンテンツにアクセスする確率は、Zipf's law に従うものとする。

ここで、Zipf's law とは、オリジンサーバ内のコンテンツ総数を  $N$  としたとき、 $i$  番目に人気のあるコンテンツへのアクセス確率  $P_N(i)$  が次式で与えられるというものである ([6],[7])。

$$P_N(i) = \frac{\Omega}{i^\alpha} \quad (4.1)$$

ただし、

$$\Omega = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{i^\alpha} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

次に、シミュレーション条件を表 4.1、表 4.2、シミュレーショントポロジを図 4.1 に示す。

表 4.1 シミュレーション条件

キャッシュアルゴリズム	LRU or LFU
キャッシュ容量	10 [個]
オブジェクト数	40 [個]
オブジェクトサイズ	500 [kB]
総リクエスト数	400
$\alpha$ (Zipf's law)	0.6
$\beta$ (図 3.5 参照)	平均転送時間が最小になる値

表 4.2 リンク遅延

	リンク遅延 [Mb]
origin server-surrogate 間	20~60
surrogate 0-1,1-2,3-4	30
surrogate 0-2,1-4	40
surrogate 0-4	50
surrogate-client 間	20

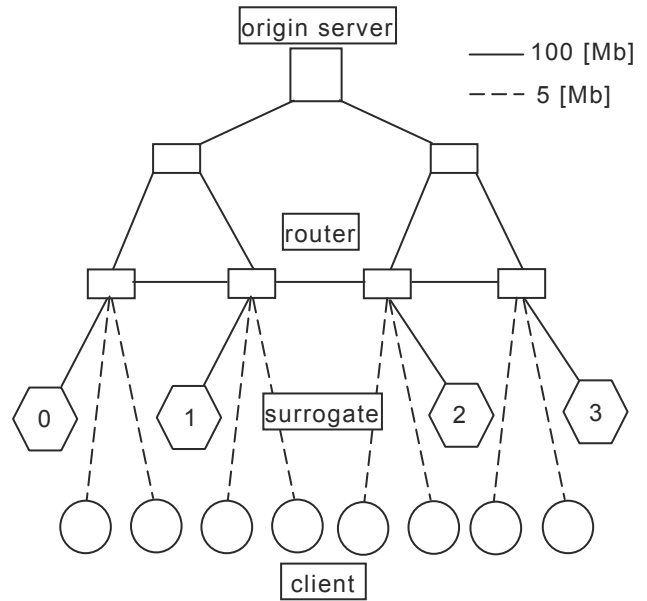


図 4.1 シミュレーショントポロジ

##### 4.2. シミュレーション結果

図 4.2 に平均転送時間、図 4.3 に制御メッセージ数、図 4.4 にオリジンサーバ、及びサロゲートにおける負荷を示す。図 4.2 ではサロゲート、オリジンサーバ間の片方向リンク遅延が変化するに従い、その連携サロゲート数が増加しており、60[ms]のとき全てのサロゲートが連携することとなる。また、図 4.3、4.4 は、提案において全てのサロゲートが連携し、最も制御メッセージ数が増加するサロゲート、オリジンサーバ間の片方向リンク遅延が 60[ms]のときの結果である。

### 4.3. シミュレーション結果に対する考察

#### 平均転送時間

図 4.2 から、CDN、ICP に比べ、提案 1、提案 2 の方が低く、提案 1、提案 2 を比較すると、提案 2 の方が僅かであるが低く抑えられていることが分かる。提案 1、提案 2 が CDN、ICP より低く抑えられているのは、図 4.4 において CDN、ICP、提案手法の間でオリジンサーバの送信レートが大きく異なっていることから、オリジンサーバへのアクセス数の差であることが推測できる。つまり、CDN、ICP に比べて提案 1、提案 2 の方がサロゲートにおけるヒット率が高いことである。また、提案 1 に比べて提案 2 が僅かに低いのは、図 4.4 において提案 1 がサロゲート 0 に負荷が集中しているのに対し、提案 2 ではサロゲート 1 に分散されていることから、人気オブジェクトがサロゲート 1 にコピーされ、サロゲート 1 のローカルヒットが上昇し、さらに、サロゲート 2、及びサロゲート 3 は、より近いサロゲート 1 にリダイレクションできるようになったためであると考えられる。

#### 制御メッセージ数

まず、図 4.3 から、ICP が最も数多く、次に ICP マルチキャスト、提案 2、提案 1 の順に制御メッセージ数が多い。ICP が一番多いのは、サロゲートにおいてローカルでキャッシュミスした数に比例して多くなるからである。さらに、LRU と LFU を比較すると、LFU の方が、キャッシュミスが少ないため、その分だけ減少する。提案 1 では、ローカルとリモートどちらでもヒットしなかった数が多い分だけ新しくキャッシュされるオブジェクト、あるいは、削除されるオブジェクトが増加するため、それに伴いキャッシュ通知と削除通知が増加し、また、リモートヒットが上昇すれば、リダイレクション通知が増加するのであるが、この条件では、総オブジェクトサイズに対するキャッシュサイズの割合が高いため、ローカルヒット率、及びリモートヒット率が高く、リダイレクションは多くなるがキャッシュ通知、削除通知は増加せず、制御メッセージ数が低く抑えられている。提案 2 に関しては、提案 1 にコピー通知を加えたため、コピー通知が多いほどリダイレクション通知が減少し、キャッシュ通知、削除通知が上昇する傾向になる。

#### オリジンサーバ、サロゲートにおける負荷

図 4.4 から、オリジンサーバの負荷が CDN、ICP、提案 2、提案 1 の順に軽減されていることが分かる。ICP においてサロゲートの負荷が一様が高くなっているのはオブジェクトを所持しているサロゲートからオブジェクトを取得する際、自身を経由してクライアントへ転送するためである。提案 1 と提案 2 を比較すると、提案 1 は人気オブジェクトを所持しているサロゲート 0 の負荷がリダイレクションの増加に伴い、高くなっているが、提案 2 ではその人気オブジェクトをサロゲ

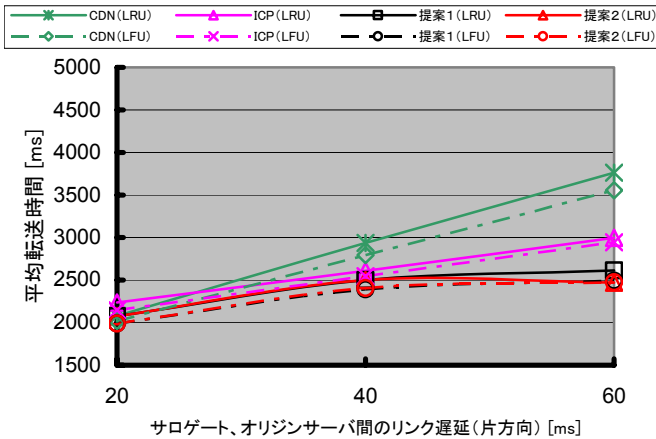


図 4.2 リンク遅延を変化させたときの平均転送時間

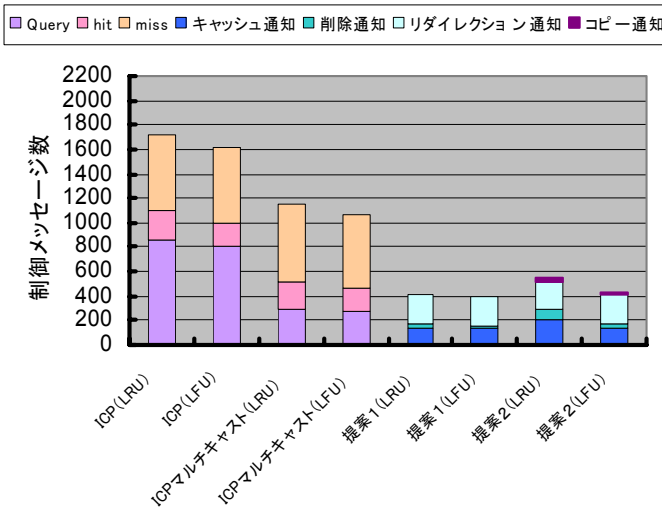


図 4.3 サロゲートにおける制御メッセージ数の比較

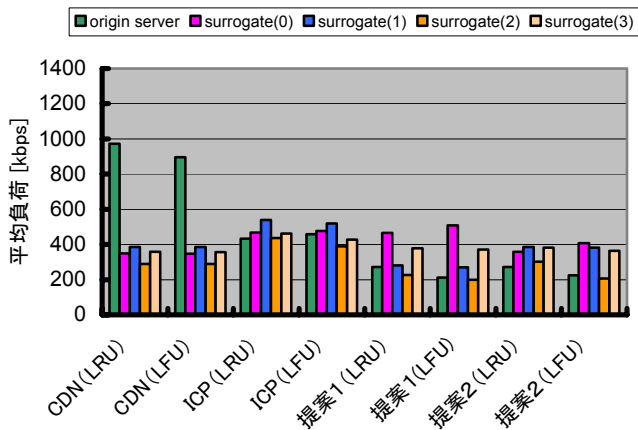


図 4.4 オリジンサーバ、サロゲートにおける負荷

ート1にコピーしているため、サロゲート1の負荷が軽減されていることが分かる。しかし、コピーによりサロゲート全体でのキャッシュしているオブジェクトの数が減少したため、リモートヒット率が下がり、さらにローカルヒット率とリモートヒット率の合計が下がったために、オリジンサーバの負荷が僅かであるが高くなっている。

### 5. $\beta$ (提案2)に対する考察

提案2において、シミュレーション評価に用いた $\beta$ の値は、最も平均転送時間が最小になったものである。そこでまず、図 5.1 に $\beta$ と平均転送時間の結果を示す。次に、 $\beta$ と制御メッセージ数の関係を図 5.2、図 5.3 に示す。

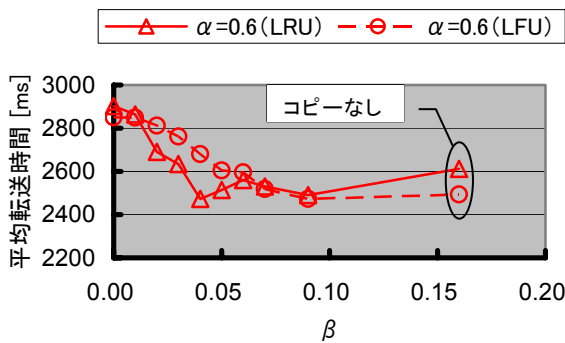


図 5.1  $\beta$ と平均転送時間の関係

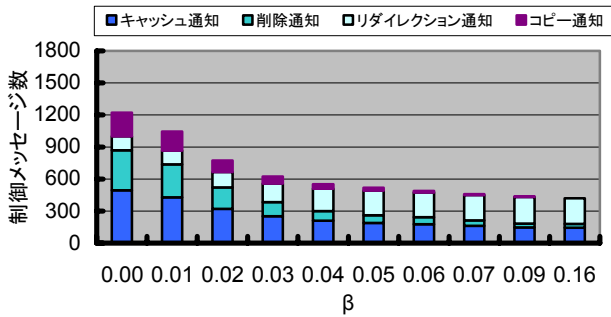


図 5.2  $\beta$ と制御メッセージ数の関係 (LRU)

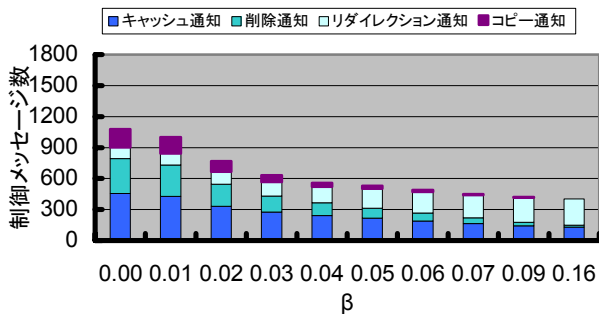


図 5.3  $\beta$ と制御メッセージ数の関係 (LFU)

LRUにおける平均転送時間について、図 5.1 を見ると、 $\beta$ が小さくなるに従い、平均転送時間が一定ではないが上昇傾向にある。これは、LRU ではオブジェクトの人気度を考慮しないため、コピーが増加するに従い、キャッシュ内容の入れ替わりも激しくなり、ヒット率が一定でないためである。

また、LFU では、図 5.1 を見ると、 $\beta$ が小さくなるに従い、一定して平均転送時間が増加している。これは、コピーによりサロゲート全体で重複した人気オブジェクトの占める割合が高く、ローカルヒット率が上昇するがリモートヒット率が下がってしまうためである。

制御メッセージに関しては、LRU、LFU とともに $\beta$ が小さくなるにつれて閾値が小さくなるため、コピーが増加し、制御メッセージもまた増加する傾向にある。

### 6. まとめ

今回、コンテンツ配信ネットワーク(CDN)において、問い合わせメッセージの増加を抑えつつ、クライアントへの応答速度の向上を図るため、グルーピングに基づくサロゲート間協調動作を提案した。

その結果、今回のシミュレーション条件では、LFU を用いた場合に、提案1では、最も制御メッセージ数を減らすことができ、提案2では、最も平均転送時間が減少できるという有効性を示すことができた。また、提案1では、特定のサロゲートに人気偏り、負荷が上昇する結果となったが、提案2では、その問題点を解決することができた。

ただし、閾値の最適値はシミュレーション条件によって異なるため、コピー方法、及びその閾値の設定の仕方に改良を加えることが今後の課題である。

### 文 献

- [1] Gang Peng, "CDN: Content Distribution Network", Research Proficiency Exam report, Computer Science Department, SUNY at Stony Brook, Jan 2003.
- [2] D.Wessels and K.Claffy, "Application of Internet Cache Protocol(ICP),Version2",RFC2186, 1997.
- [3] 河合栄治, 知念賢一, 砂原秀樹, 尾家祐二, "分散型キャッシュシステムにおけるICP 問い合わせホスト数とパケット数の解析", Internet Conference '98 論文集, pp.66—76, 1998.
- [4] "ciDf", <http://www.cidf.org>
- [5] "Network Simulator-ns-2", <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>, UCB/LBNL/VINT
- [6] Lee Breslau, Pei Cao, Li Fan, Graham Philips and Scott Shenker, "Web Caching and Zipf-like Distributions: Evidence and Implications", Proceedings of IEEE Infocom '99, March 1999.
- [7] Lee Breslau, Pei Cao, Li Fan, Graham Phillips and Scott Shenker, "On the Implications of Zipf's Law for Web Caching", Proceedings of the 3rd International Web Caching Workshop, June 1998.