

## 独立アクセスモデルに基づく CDN における

### コンテンツの効率的配信・削除方法の提案

石井 充, 服部 進実

金沢工業大学工学部情報工学科

〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

e-mail: ishii@infor.kanazawa-it.ac.jp

CDN (Content Distribution/Delivery Network)を始めとして、キャッシュサーバーを用いて、コンテンツを効率的に配置し、ネットワークにかかる負荷や、エンドユーザーの負担を減らす試みは、既に多くなされている。これまでの研究では、特定の方針のもとでコンテンツを配信する実験を行いその結果を検討するものが多い。これらの研究においては、過去のトラフィックから将来のトラフィックをどのように予想して、将来における最適化を行うかという視点に立った数学的な枠組みを欠いている。本論文では、最も簡単な例として、独立アクセスという仮定の下で、定常ポアソン分布に基づくトラフィック解析を行い、効率的なキャッシュサーバーの構築方法を提案する。提案する方法はコンテンツを配信するだけでなく、一般的に多段階キャッシュサーバーの構築に活用でき、配信したコンテンツの削除にも応用できる。

## A Proposal of Effective Distribution/Removal Policy for CDN Based on Random Access Assumption

Mitsuru Ishii and Shimmi Hattori

Department of Information Engineering, Kanazawa Institute of Technology

7-1 Ogigaoka, Nonoichi, Ishikawa 921-8501

e-mail: ishii@infor.kanazawa-it.ac.jp

In this paper, we propose a way to construct effective cooperative caching system based on random access assumption. So far, there have been a lot of works to allocate web objects such as CDN (Content Distribution/Delivery Network) in order to reduce the load to network and end users. Those works, however, analyze the empirical result carried out under a policy, and are not based on mathematical background to optimize and to estimate the access frequency in the future from the past access frequency. The way we propose in this paper gives a solution to these circumstances, which can be applied both to moving web objects to downstream servers and also to removing unnecessary objects on downstream servers.

## 1.序論

ADSL, FTTH, CATV などのブロードバンドネットワークが急速に普及するにつれて、ネットワーク上でやり取りされるコンテンツの量も増加している。コンテンツそのもののサイズの増加と、アクセス数の増加という効果により、今後ますますネットワークへの負荷が大きくなるものと予想される。こういった背景の元で、コンテンツを効率よく配信するため、CDN(Content Distribution/Delivery Network) やマルチキャストなどの技術が注目され研究される[1],[2]と同時に商業サービスとしての試みもされている[3]。

著者らの以前の研究においても、CDN を対象として、効率的なコンテンツの配置を行うための多段階キャッシュシステムを調べた[4],[5],[6]。

しかしながら、それらの研究は、さまざまなコンテンツ配置方針のもとでシミュレーションを行い、その結果を元に、いわば事後的に、どういったやり方が適しているかを調べるものであり、何らかの数学的モデルの基づいて、合理的に最適な配置方法を見出すという方法ではなかった。

例えば、複数のキャッシュサーバー間で連携しながら、アクセス頻度の多いコンテンツを、末端のユーザーに近いところに配置するといったことはしばしば行われるが、本来はアクセス頻度が多いコンテンツでも、たまたま特定の期間のアクセス数が少なかったがために、末端のユーザーから遠いところに配置されてしまうという場合も考えられる。こういったことがどの程度の確率で生じるのか、また、こういったことを避けるためにはどうすればよいのかということを経験的に解析しておく必要がある。

そこで、本論文では、アクセスが独立に生じるものとして、多段階キャッシュサーバー

において、上記のような取りこぼしが生じる可能性を検討し、更にその解決方法を提示する。この手法は、単に上流のキャッシュサーバーから下流のキャッシュサーバーにコンテンツを移動するだけでなく、下流に配置したコンテンツが何らかの理由でアクセス頻度が下がった際に、合理的に判断して可能な限り速やかにキャッシュサーバーから消去するのにも活用可能であり、その枠組みとシミュレーションの結果を提示する。

このような分析は、CDNに限らず、キャッシュサーバーが多段階になっている場合であれば常に適用可能である。例えば、企業において、本社と支社とが社内ネットワークでつながれており、本社から外部ネットワークにつながっている場合や、企業や大学などで、いくつもの部署に分かれており、各部署ごとにキャッシュサーバーがあり、情報を一括管理する部署にも全体を統括するキャッシュサーバーがあるといった場合が考えられる。これらの場合に、本論文で提案する方法を適用することにより、各部署ごとに適したコンテンツをキャッシュサーバーにおくことが可能になる。

## 2.基本的枠組み

最も簡単な多段階キャッシュサーバーとして、図 1(a)に挙げたものを考える。一般的には、図 1(b)のように下流のキャッシュサーバーが複数になっているであろうが、本章で以下に述べる枠組みはどちらにも適用可能である。

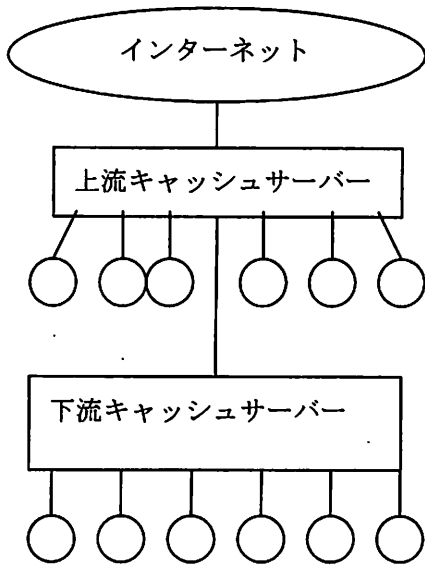


図 1(a) 本論文で取り上げる多段キャッシュ。円はキャッシュサーバーを利用するエンドユーザーのクライアントを表す

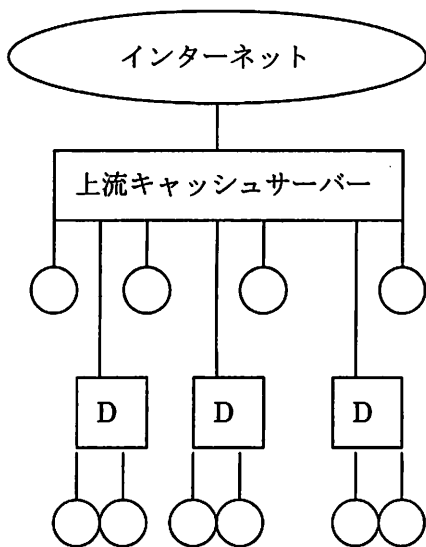


図 1 (b) 一般的には、上流キャッシュサーバーの下に複数のキャッシュサーバーがある。Dは下流キャッシュサーバーを表す。

下流キャッシュサーバーが空である状態から始めるものとする。下流キャッシュサーバー下にあるエンドユーザーのクライアント

からのアクセスがそれぞれのコンテンツに対して独立に生じるものとする、最終的に上流キャッシュサーバーへの、個々のコンテンツへの単位時間内のアクセス回数が  $n$  である確率  $p(n)$  は、単位時間あたりの平均アクセス回数  $q$  を用いて、ポアソン分布

$$p(n) = \frac{q^n}{n!} e^{-q}$$

で与えられる。

このコンテンツが単位時間内に  $m-1$  回以下のアクセス数である確率は、

$$\sum_{k=0}^{m-1} p(k) = \frac{\Gamma(m, q)}{\Gamma(m)}$$

で与えられる。ここで  $\Gamma(m)$  はガンマ関数であり、 $\Gamma(m, q)$  は

$$\Gamma(m, q) = \int_q^{\infty} t^{m-1} e^{-t} dt$$

により与えられる不完全ガンマ関数である。

特に、平均アクセス回数である  $q$  よりも小さい回数しかアクセスされない確率は、

$$\frac{\Gamma(q, q)}{\Gamma(q)}$$

となる。また、アクセスされる確率が  $r$  である  $m$  の値は

$$\frac{\Gamma(m, q)}{\Gamma(m)} = r$$

を解くことにより求められる。

### 3. 具体的事例

単位時間あたり 100 回のアクセス数があるコンテンツを、上流キャッシュサーバーから下流キャッシュサーバーに移動させるものとする。あるコンテンツは、単位時間あたり 100 回のアクセスが期待されるものとする、特定の単位時間あたりにアクセスが 100 回未満である確率は、

$$\frac{\Gamma(100,100)}{\Gamma(100)} = 0.487$$

で与えられる。このことは、単純に、単位時間内に 100 回のアクセスがあったものを下流のキャッシュサーバーにコピーするという方法では、実際に単位時間あたり 100 回のアクセスが期待されるコンテンツのうち、約半分を取りこぼしていることを意味する。100 回のアクセスが期待されるコンテンツでも、実際の特定の単位時間内に 100 回以上アクセスされることもあれば 100 回未満のこともあり、そのどちらになるかがほぼ等確率であると理解することができ、妥当な結果であるといえる。

単位時間あたり 10 回のアクセスが期待されるコンテンツも同様に、

$$\frac{\Gamma(10,10)}{\Gamma(10)} = 0.457$$

になり、やはり約半分が取りこぼしとなる。

それでは、取りこぼしを少なくするにはどのようにすればよいであろうか。単位時間あたり 100 回のアクセスが期待されるコンテンツでも、特定の単位時間内に 95 回しかアクセスがないといった場合に備えて、特定の単位時間内にあったアクセス数が 100 回よりも少ないものでも、下流のキャッシュサーバーにコピーすれば取りこぼしは少なくなる。では、どれくらいアクセス回数のもをとればよいのであろうか。そのしきい値を  $m$  とすると、取りこぼしを  $r$  にするためには、 $m$  は

$$\frac{\Gamma(m,100)}{\Gamma(m)} = r$$

を満たせばよい。例えば、 $r=0.1$  すなわち全体の 90% を下流のキャッシュサーバーに渡すには、

$$\frac{\Gamma(m,100)}{\Gamma(m)} = 0.1$$

から、 $m=87.8$  が得られる。つまり、単位時間内に、88 回以上のアクセスがあったコンテン

ツを下流キャッシュサーバーにコピーすれば良いことがわかる。同様に、99% を下流のキャッシュサーバーに渡すには、

$$\frac{\Gamma(m,100)}{\Gamma(m)} = 0.01$$

を解いて、 $m=78.0$  を得るから、単位時間内に 78 回以上のコンテンツを下流にコピーすれば良いとわかる。

このような定式化が、実際のプロクシーサーバーに対して適用できるかどうかを調べた。商業インターネットプロバイダーのキャッシュサーバーのログを解析し、単位時間に 1 日をとって、1 日あたり 100 回のアクセスがあるコンテンツを選び出すため、5 日間にわたるログから、1 日あたりの平均のアクセス数を調べた。1 日あたりの平均でちょうど 100 回になるコンテンツの数が少なく、統計的に有意の結果が得られなかったので、1 日あたりの平均のアクセス数が 95 から 115 までの間のコンテンツ 52 個を選び出して、特定の一日の間のアクセス数を調べた。これを上記理論で  $q=100, 105, 110$  としたものと比較したのが表 1 である。

$m$	実データ	$q=100$	$q=105$	$q=110$
70	100%	100%	100%	100%
80	94%	98%	99%	100%
90	88%	85%	93%	97%
95	75%	70%	85%	93%
100	62%	51%	75%	84%
105	50%	32%	51%	70%
110	38%	17%	32%	51%
115	25%	8%	18%	33%
120	13%	3%	8%	18%
130	2%	0%	1%	3%

表 1 商業プロバイダーのキャッシュサーバーから得られたデータと理論値との比較。左端の  $m$  はアクセス数を表し、 $m$  以上のアクセス数を持つコンテンツの割合が、第 2 列以降に示してある。 $m < 100$  では  $q=100$  の場合

がおおむね妥当であるが、 $100 < m < 105$  では  $q=100$  と  $q=105$  の間の値になっており、 $m > 110$  では  $q=105$  と  $q=110$  の間の値になっている。

表 1 から、標本数が十分に多くなく統計誤差があることや、1 日あたりの平均のアクセス数を得るために用いた期間が 5 日と短いことを考えると、理論式が現実のデータをおおむね説明できていると言える。

#### 4.問題点と解決方法

こういった方針に基づいて多段階キャッシュシステムを用いることには問題点もある。単位時間内に 88 回以上のアクセスがあるコンテンツを下流にコピーすれば、将来、単位時間内に 100 回のアクセスがあると予測されるコンテンツの 90%を確実にコピーできるが、同時に将来にわたってアクセス頻度が単位時間あたり 100 回未満のコンテンツも多く下流にコピーされてしまう。

単位時間内に 88 回以上のアクセスがあれば下流のキャッシュサーバーにコピーとした場合は、単位時間内に 95 回のアクセスしか期待できないコンテンツに関しても、

$$\frac{\Gamma(87.8, 95)}{\Gamma(87.8)} = 0.217$$

により、78%がコピーされてしまう。

このように、取りこぼしを少なくし、将来アクセス数が一定数以上になると期待されるコンテンツを確実に下流のキャッシュサーバーに渡そうとすると、アクセス頻度の少ないコンテンツをもコピーしてしまうこととなる。多くのコンテンツを下流に渡せばネットワークへの負荷は軽減されるが、下流のキャッシュサーバーへの負荷は増加することになる。このように、ネットワークとキャッシュサーバーへの負荷は常にトレードオフの関係

にある。

この問題を解決するには、下流のキャッシュサーバーで、コンテンツをコピーした後に継続的にアクセス数を数え続け、不要と判断したものから速やかに消していくようにすればよい。

#### 5.時間的変動がある場合のコンテンツ削除

一度下流のキャッシュサーバーにコピーした内容を、その後不要であれば消去するという方針は、コンテンツのアクセス頻度が時間と共に変動する場合に特に有効に活用できる。

例えば、天気予報などのコンテンツはアクセス数の時間変動が激しい。明日の天気予報を今日知ろうとする人は多いが、明日になれば、前日に出された当日の天気予報を知ろうとする人はいないであろう。その場合でも前日のアクセス数が多いと、数日間の間、平均アクセス数が多いことになり、下流キャッシュサーバーからは消えずに残ることとなる。

こういった状況を避けるために、下流のキャッシュサーバーで、今後アクセス数が期待できないコンテンツを速やかに消去する必要がある。

例えば、単位時間あたりに 100 回のアクセスがあったコンテンツを下流にコピーし、その後、単位時間の 1/10 ごとに 99%の確率でありそうにないアクセス数のコンテンツを削除するものとする。単位時間の 1/10 では 10 回のアクセスが期待されるので、

$$\frac{\Gamma(m, 10)}{\Gamma(m)} < 0.01$$

を満たす最大の整数  $m$  を求めると 4 になる。すなわち、アクセス数が 4 回未満である確率は 0.01 以下である。従って、単位時間の 1/10 が経過した時点で、4 回未満のアクセスしか

なかったコンテンツを削除しても、それが将来、単位時間あたり 100 回以上のアクセスとなる確率は 0.01 以下と判断し消去できる。以降単位時間の 1/10 の時間が経過するごとに、しきい値は変わり、表 2 のようになる。

経過時間	しきい値
0.1	4
0.2	11
0.3	19
0.4	27
0.5	35
0.6	44
0.7	52
0.8	61
0.9	70
1.0	78

表 2 下流キャッシュサーバー上にコンテンツをコピーしてから、単位時間の右列倍の時間が経過したときに 99% の確率で消去してよいと判断できるアクセス数が左列に示されている

## 6. シミュレーション結果

以上の方針に従って、シミュレーションを行った結果を示す。下流キャッシュサーバーにおいて、上流キャッシュサーバーからコピーされるまでは単位時間あたり 100 回のアクセス数があったものが 100 種類あるとし、コピー後単位時間あたり 70 回のアクセス数に減少したとした場合に、下流サーバーにおいて削除したコンテンツの数を時系列に示したものが図 2 である。効率的にコンテンツが削除されていることがわかる。

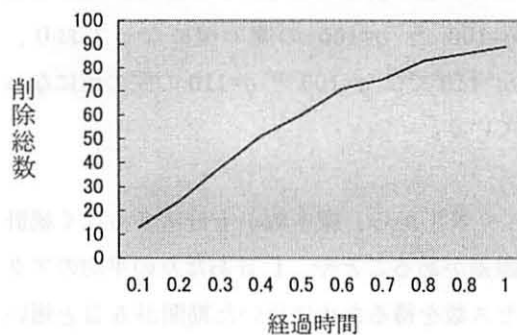


図 2 下流キャッシュサーバーにコピーされてからの経過時間（横軸）と消去されたコンテンツの総数（縦軸）

## 7. まとめ

独立アクセスの仮定の下で、多段階キャッシュを効率的に構成する基本原理を提示した。その方法が、上流・下流のキャッシュサーバーで共に有効であることが確認できた。

## 謝辞

本論文の研究にあたっては、金沢工業大学の中沢実氏・胡天成氏との議論が有用であったので、ここに感謝したい。

## 参考文献

- [1] R. Brussee et. al. "Content distribution network state of the art," Telematica Instituut, June 2001
- [2] Current situations, <http://www.net.intap.or.jp/INTAP/cdn/data/13-cdn-report.pdf>
- [3] Akamai web site, <http://www.akamai.com>
- [4] Y.Ikeda et. al. "Implementation of automated content distribution system using clustering mechanism," IPSJ-DPS,