

## コンテンツオリエンテッドネットワーク

Content Oriented Network

山本 幹

### Abstract

現在インターネット上の主要サービスとなっているコンテンツ流通サービスでは、ユーザはコンテンツがどこから得られるかという点には関心がなく、コンテンツそのものが得られれば十分である。この観点から、ネットワーク自体がコンテンツ流通サービスに適したコンテンツオリエンテッドなアーキテクチャに移行しようという、新しい研究の潮流が生まれてきた。本稿では、幾つかの研究例を用いて、その歴史的背景や理念について説明する。

キーワード：コンテンツ配信，コンテンツオリエンテッド，キャッシュ，ランデブー型通信モデル

#### 1. はじめに

現在、インターネット上を流れるトラフィックの多くは、ユーザが映像やテキストなど様々な形態のコンテンツを取得する際に発生するコンテンツ配信トラフィックである。コンテンツ流通を支えるインターネットは、IPアドレスにサブネットのロケーション情報が含まれていることから分かるように、「どこ」通信するかに重きを置いたロケーションオリエンテッド通信モデルに基づき設計されている。コンテンツ流通サービスという観点で見れば、ユーザはコンテンツがどこから得られようが、所望コンテンツを手に入れれば全く問題ない。すなわち、ユーザはコンテンツオリエンテッド通信モデルによるコンテンツ獲得を期待している。このように、ユーザ若しくはユーザが直接使用するアプリケーションはコンテンツオリエンテッド通信モデルを指向しているのに対し、それを支えるネットワークはロケーションオリエンテッド通信モデルに基づくアーキテクチャを採用しているという、上下階層のかい離が生じている。本稿では、この上下階層のかい離を埋めるべく、ネットワーク自体をコンテンツオリエンテッド通信モデルに基づくものに変革しようという新しい研究動向としてのコンテンツオリエンテッドネットワークについて、それが近年活

発に研究されるに至った歴史的背景から説明し、その基本的考え方について現在進められている研究例を用いて説明する。

#### 2. コンテンツ流通の変遷

##### 2.1 コンテンツ流通の基本

ネットワークを介してコンテンツを取得する際、ユーザは以下の二つの過程を経てコンテンツ取得に至る。

- ① コンテンツ発見：コンテンツがどこにあるのかを発見する。
- ② コンテンツ転送：①で発見したコンテンツに対し要求を送り、実際にコンテンツをコンテンツ保持者から転送する。

基本的なクライアントサーバモデルに基づくコンテンツ取得においては、まずコンテンツを保持するサーバのIPアドレスをコンテンツのURLを基に何らかの方法で取得する。このIPアドレスの取得がコンテンツ発見に相当する。コンテンツ発見で得られたIPアドレス宛てにコンテンツ要求を送信し、その応答としてサーバからコンテンツが転送され、コンテンツ取得が完了する。

コンテンツ流通は、コンテンツを提供するサーバへのトラフィック及び負荷集中の回避などを目的に、ユーザが指定するURLに基づき適切なサーバを選択するCDN (Contents Delivery Network) などへその流通形態を変

山本 幹 正員：フェロー 関西大学システム理工学部電気電子情報工学科  
E-mail yama-m@kansai-u.ac.jp  
Miki YAMAMOTO, Fellow (Faculty of Engineering Science, Kansai University, Suita-shi, 564-8680 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.95 No.4 pp.341-346 2012年4月  
©電子情報通信学会 2012

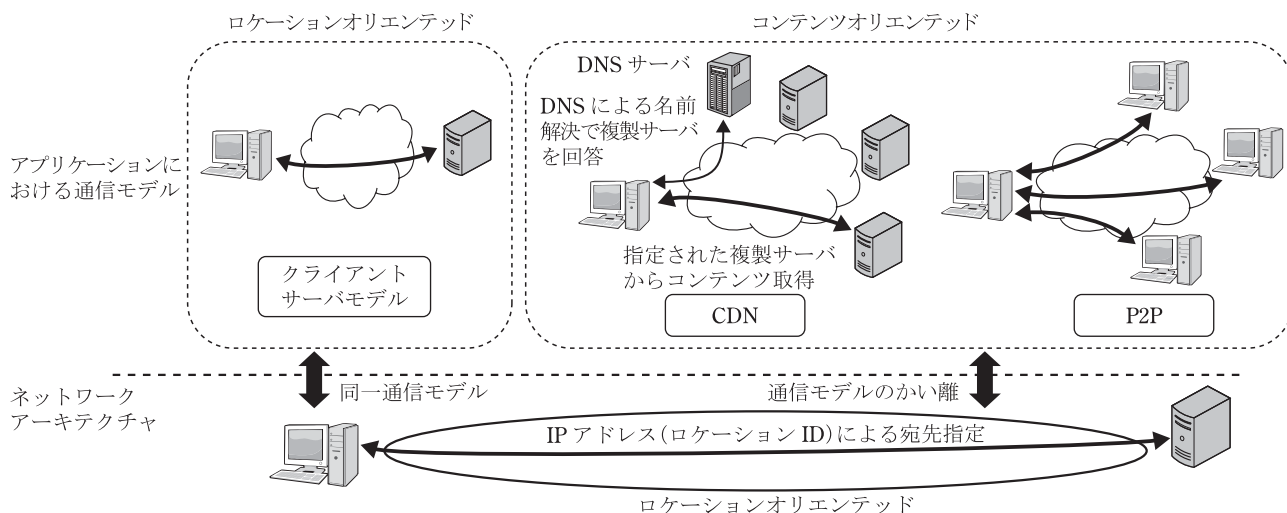


図1 コンテンツ流通の変遷 当初は上下層ともロケーションオリエンテッドモデルに基づき設計されていたが、上位層すなわちアプリケーションのユーザに見せるサービスがコンテンツオリエンテッドに変化し、現在は上下層の通信モデルに乖離が見られる。

化させてきた(図1)。本章の以下の節において、コンテンツ流通がどのように変遷してきたかについて説明する。

## 2.2 CDN

CDN<sup>(1)</sup>においては、同一コンテンツを提供する複数のサーバを用意し、これらのサーバを地理的に分散して配置する。DNSにおいてユーザが指定したURLからIPアドレスを解決する際に、近隣サーバ若しくは負荷の軽いサーバなど適切なサーバを選択し、そのIPアドレスをユーザに知らせる。この動作により、その後にユーザから出されるコンテンツ要求を適切なサーバへ誘導する。

CDNにおけるコンテンツ発見においては、ユーザはURLというドメイン名を含むロケーションオリエンテッドな識別子によりコンテンツを指定しているが、CDNにより提示されるIPアドレスは、ユーザが指定したサーバとは異なる複製サーバのものとなる可能性がある。つまり、コンテンツ流通サービスの観点では、どこからコンテンツを得るかというロケーション情報には全く関心がなく、コンテンツそのものが得られればよい、というコンテンツオリエンテッド通信モデルに、CDNは既に移行している。

## 2.3 P2P

P2P<sup>(2)</sup>においては、コンテンツ発見のためのプラットフォームとして、アプリケーション層でユーザ(ピア)間を接続するオーバーレイネットワークを構成する。コンテンツ発見はこのオーバーレイネットワーク上で行われ、所望コンテンツを保持するピアをこのオーバーレイネットワーク上で発見したのちは、そのピアからコンテンツ転

送を行う。近年のBitTorrentなどでは、コンテンツ(ファイル)単体の大きな交換単位ではなく、コンテンツを分割したより小さいチャンクと呼ばれる交換単位でコンテンツ流通を行っている。すなわち、複数のコンテンツ提供者からコンテンツの一部ずつを得ることで、コンテンツ全体を取得している。

このように、複数のピアからコンテンツ取得を行うというモデルは、既にロケーションオリエンテッド通信モデルから大きく脱却し、「どこから」コンテンツが得られるのかだけでなく、「誰から」コンテンツを取得するかという点にまで全く関心がなくなっている。すなわち、P2PはCDNより更に進化したコンテンツオリエンテッド通信サービスを提供している。

## 3. コンテンツオリエンテッドネットワークとは

現在インターネットで提供されるコンテンツ流通サービスは、クライアントサーバモデルにおける1サーバへのアクセスという「点」から、CDNにおける複製サーバの「網の目」、更にP2Pにおけるコンテンツ保持ユーザというよりきめ細かい「面」へと、その形態を大きく変えてきた。単なる形態の変化にとどまらず、その本質はコンテンツを保持するサーバを指定してそこからコンテンツを得るというロケーションオリエンテッドなものから、同一コンテンツを提供するのであれば「どこから」また「誰から」コンテンツを得るのかには全く関心のないコンテンツオリエンテッド通信モデルへと大きく変貌してきた。

ただし、その情報流通を支えるネットワーク、すなわちIP層以下のネットワークアーキテクチャは、依然としてロケーションオリエンテッドなまま変化していな

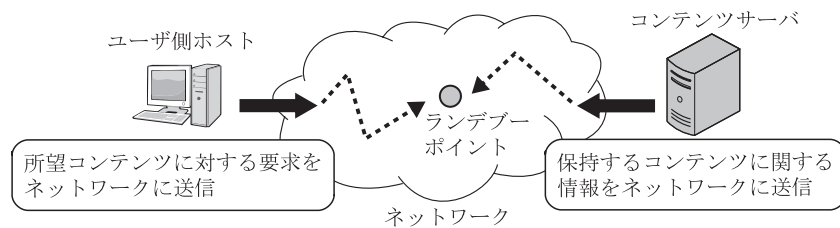


図2 ランデブー型通信モデル ユーザは所望するコンテンツに対する要求をネットワークに送信する。コンテンツサーバは、保持するコンテンツの情報をネットワークに送信する。両者の遭遇する場所をネットワークが提供する。両者のランデブーによりコンテンツ発見に至る。

い。いわば、上位層の提供するコンテンツオリエンテッドな通信サービスと、下位層のロケーションオリエンテッドなアーキテクチャの乖離を、アプリケーション上で埋めているのが現状である。このことに起因する技術的課題として、以下のものが顕在化しつつある。

- ・ コンテンツ発見のオーバーヘッド

ネットワーク自体がコンテンツ発見機能を提供していないことから、アプリケーションでコンテンツ発見の枠組みが提供されているが、アプリケーションでの解決にはオーバーヘッドが伴う。DNSを例にとると、DNSサーバへの問合せに際し、階層構造を持つDNSサーバに繰り返し問合せが発生する可能性があるなど、様々な手順を経る必要がある。

- ・ コンテンツ転送のオーバーヘッド

アプリケーションでコンテンツ発見を行う場合、例えば位置情報やトラフィック状況などのネットワーク内部の情報を使わずにコンテンツ取得先を決定しなければならない。例えば、P2Pでは下位の実ネットワークの情報を使わずにオーバーレイネットワークが構成されることから、コンテンツ転送が非効率になることが知られている<sup>(3)</sup>。このように、上下階層の乖離は、コンテンツ転送のオーバーヘッドをもたらす。

これまでのインターネットではアプリケーション層が下位層のロケーションオリエンテッドなアーキテクチャを隠蔽する形でコンテンツ流通サービスが展開されていたのに対し、ネットワーク自体がコンテンツオリエンテッドなアーキテクチャに移行し、上下階層の乖離をなくすものがコンテンツオリエンテッドネットワークである。コンテンツオリエンテッドネットワークにより、上記の技術課題の解決が期待できる。近年、インターネットのアーキテクチャを根底から再検討し、全く新しいネットワークアーキテクチャを創り上げようという機運が、日米欧で高まっている。コンテンツオリエンテッドネットワークはこの動向の一つに位置付けられる。本稿では、以下の各章において、コンテンツ発見、コンテ

ンツ転送、更にキャッシングに関するコンテンツオリエンテッドネットワークの興味深い取組みを紹介する。

## 4. コンテンツ発見へのアプローチ

### 4.1 ランデブー型通信モデル

コンテンツ発見においては、ユーザからのコンテンツ要求と、コンテンツそのもの、若しくはコンテンツがどの方向にあるかという情報とが、ネットワーク内でうまく遭遇する仕組みが必要となる。コンテンツ要求とコンテンツとのランデブーポイントをネットワークが提供するという形のランデブー型通信が、コンテンツオリエンテッドネットワークにおけるコンテンツ発見の基本通信モデルとなる(図2)。

### 4.2 *i3*

Internet Indirection Infrastructure (以下 *i3* と表記する)<sup>(4)</sup>は、ランデブー型通信モデルをオーバーレイネットワークを利用して具体的に実現したものである。コンテンツ要求は、コンテンツ識別子である *id* と、コンテンツを要求するホストのIPアドレス *addr* の組 (*id*, *addr*) で表現される。コンテンツは、コンテンツ識別子 *id* とコンテンツそのものを表す *data* の組 (*id*, *data*) で表現される。コンテンツを取得したいユーザはコンテンツ要求 (*id*, *addr*) を、コンテンツを保持するサーバはコンテンツ (*id*, *data*) を、ネットワークに送信する。これら二つのランデブーポイントを、*i3* では各コンテンツ識別子 *id* に対応した *i3* サーバで実現している(図3)。例えば、*id1* に対するコンテンツ要求は、*id1* に対応する *i3* サーバに送られる。また *id1* のコンテンツは、同様に *id1* に対応する *i3* サーバに送られ、ここでコンテンツ要求とコンテンツとのランデブーが実現される。

*i3* においては、*id* を用いて対応する *i3* サーバを見つける作業が重要となるが、これをオーバーレイ<sup>(5)</sup>で実現する方法を提案している。*i3* サーバを発見した後の、コンテンツ要求の転送、コンテンツサーバから *i3* サーバ並びに *i3* サーバからユーザまでのコンテンツ転送は、

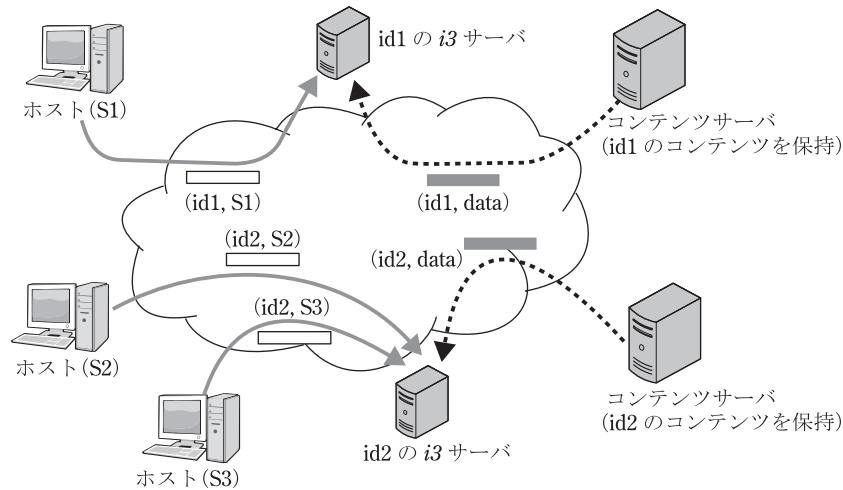


図3 i3におけるランデブー型通信 i3においてはオーバーレイネットワーク上にあるi3サーバがランデブーポイントとなり、ユーザのコンテンツ要求とコンテンツとの遭遇が実現される。この遭遇のあと、i3サーバからユーザホストへコンテンツが転送される。

全て IP アドレスに基づくロケーションオリエンテッドな方法を前提としている。i3 が 2002 年というかなり早い段階での提案であり、IP とは全く異なるアーキテクチャを導入することが概念的にも難しい時期であったという背景を考えると、むしろこのアプローチは妥当なものである。ロケーションオリエンテッド通信モデルが一般的であった当時において、IP をベースにしながらもコンテンツオリエンテッド通信モデルとしてランデブー型通信モデルを取り上げ、それを具体的に実現する方法を提示したという点で、特筆すべき研究である。

### 4.3 DONA

DONA<sup>(6)</sup> は、複数の複製サーバが地理的に散在する状況において、ネットワークが最近隣サーバを発見するコンテンツオリエンテッドな手法を提案している。DONA では、コンテンツサーバは自身の持つコンテンツ情報をレジスタとして送信する。コンテンツ要求とコンテンツ情報レジスタのランデブーポイントとして、RH (Resource Handler) を設けている。

RH は ISP 階層構造と同様の階層構造を持っており、レジスタはコンテンツサーバの属するローカル RH から上位 RH に向けて送信され、途中の RH にはサーバまでの距離とレジスタの到着方向が State として保持される。RH があるコンテンツに対してのレジスタを既に上位に送信した後に、下位 RH から同一コンテンツのレジスタを受け取ると、既に自身の方向にコンテンツがあることは上位 RH に State として保持されているので、再度送信する必要はない。ただし、より近いサーバからのレジスタであった場合には、下記に示すように最近隣サーバを選択するために必要な情報としての距離情報を更新するために、これを上位へ送信する。

ユーザがコンテンツを取得するためには、まずコンテンツ要求を自身のローカル RH へ送信する。RH は自身の保持する State に該当コンテンツに合致するものがあれば、その登録 RH の方向へ要求を送信する。もし合致するものがなければ、上位 RH へ送信する。コンテンツがどこかに存在すれば、少なくとも最上位 RH には該当コンテンツの State が登録されているので、最上位に至るいずれかの RH で該当コンテンツの State に出会う。このランデブーの後には、各 RH が保持する State の登録 RH 情報を逆にたどることで、コンテンツ要求は所望コンテンツにたどりつくことができる。なお、RH において、同一コンテンツに対する複数の RH 情報が State として保持されていることもあるが、その場合にはより距離の近いサーバの情報をもたらした RH の方向へたどることで、最近隣サーバへとコンテンツ要求を誘導できる。

このように、DONA ではネットワーク内に設置された RH が、コンテンツ情報に基づくコンテンツ要求のルーティングを実現している。RH にネットワーク構造を反映し、サーバへの距離情報も保持させることで、最近隣サーバ選択機能をネットワーク内部で実現している。DONA は、コンテンツ提供サーバの発見を、ネットワーク内部でコンテンツオリエンテッドな方法により実現している点で、i3 より更に進化したコンテンツオリエンテッドネットワークの実現手法である。ただし、コンテンツ発見のあとのコンテンツ転送は依然 IP によるロケーションオリエンテッドなものであり、完全なコンテンツオリエンテッドネットワークには至っていない。



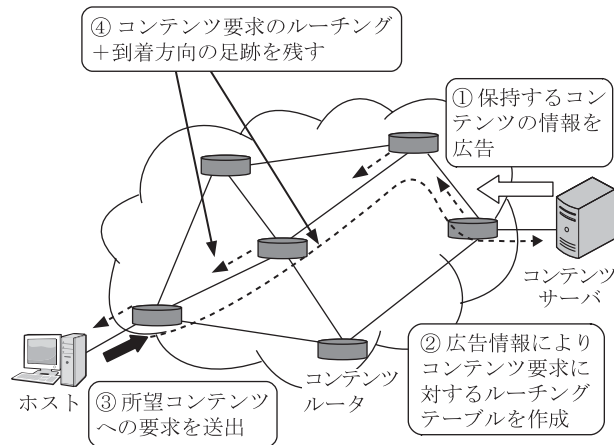
## 5. コンテンツ転送へのアプローチ

コンテンツ発見のみならずコンテンツ転送もコンテンツオリエンテッドな方法で実現するものに、CCN (Content-Centric Network)<sup>(7),(8)</sup>がある。CCNもコンテンツ発見において、ユーザからのコンテンツ要求 (CCNではInterestと呼ばれる)とコンテンツ (Data)とのランデブー型通信モデルを用いている。CCNでは、コンテンツ発見のみならずコンテンツ転送にも重要な役割を果たすコンテンツルータの構造を、現在のIPルータに対応する類似構造を用いて、詳しく示している。

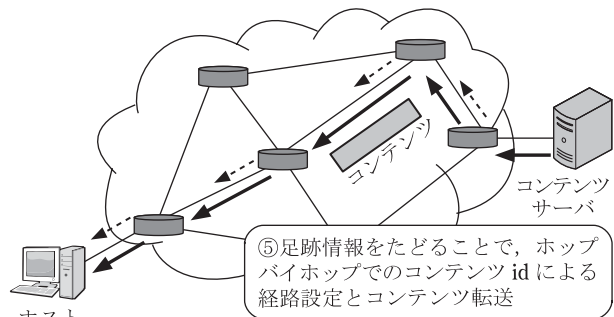
コンテンツルータは、FIB (Forwarding Information Base)、バッファ、PIT (Pending Interest Table)から構成される。FIBはコンテンツ名をエントリに持つルーティングテーブルであり、各ルータが自身のカバーするコンテンツ名のプレフィックスを広告する naming-based ルーティングプロトコルにより作成される。バッファはIPルータと同様に、到着したパケットを一旦蓄積するが、IPルータでは一旦フォワーディングすればバッ

ファ内から該当パケットが削除されるのに対し、フォワーディング後も一時的にパケットを保存しキャッシュとして振る舞う。これは、IPルータではパケットが宛先IPアドレスに対応付けられており他のIPアドレスに対する要求には再利用できないのに対し、CCNではコンテンツ名が宛先となっていることから同一コンテンツに対する他のホストからの要求に対してパケットを再利用可能であることに基づく。PITはInterestが到着したインタフェースを保持するテーブルである。コンテンツは、各ルータに残されたPITの情報をたどることで、ユーザから送信されたInterestの転送経路を逆方向にたどり、要求を出したユーザに届けられる。

CCNは、コンテンツ発見をFIBにおけるコンテンツ名に基づいたルーティングを用いたランデブー型通信モデルにより行うだけでなく、コンテンツ転送に対してもPITを用いてコンテンツ名によりコンテンツ発見と逆方向をたどることで実現している (図4)。つまり、コンテンツ発見とコンテンツ転送の双方をコンテンツオリエンテッドな方法で実現している点で、一部をIPベースのアーキテクチャに依存する他の研究例とは一線を画した、完全なコンテンツオリエンテッドなアプローチとなっている。



(a) コンテンツ発見フェーズ



(b) コンテンツ転送フェーズ

図4 CCNにおけるコンテンツ発見とコンテンツ転送 コンテンツ要求は、ルータがランデブーポイントとなって、ルーティングテーブルによりコンテンツへと転送され、コンテンツ発見が行われる。その際、足跡としての経路情報が残され、これをたどることでコンテンツ id に基づくコンテンツ転送が実現される。

## 6. キャッシングへのアプローチ

コンテンツオリエンテッドネットワークにおいては、コンテンツが「どこから」、更に「誰から」届いても全く問題がない。このため、コンテンツをコンテンツオーナーから直接得る必要がなく、複製サーバや更にはネットワーク内のキャッシュから得てもよい。このため、コンテンツオリエンテッドネットワークにおいては、キャッシュの積極的利用が期待される。

従来のキャッシングは、コンテンツ要求が通過するポイントに所望コンテンツがキャッシュされていれば、ここからコンテンツを取得するという受動的なものであった。前章のCCNのキャッシュもこの範ちゅうに入る。これに対し、コンテンツ要求の通過地点とコンテンツがキャッシュされている場所が一致していなくても、コンテンツ要求をキャッシュへと誘導し、キャッシュされたコンテンツを有効利用する方法としてBreadcrumbs<sup>(9)</sup>が提案されている。Breadcrumbsでは、コンテンツのダウンロード時にその方向への足跡 (Breadcrumbs)を途中のルータに残す。その後、コンテンツ要求がサーバへ転送される途中でこのBreadcrumbsにヒットすると、先のダウンロード方向へホップバイホップで転送を行い、コンテンツのキャッシュされている方向へと誘導するものである (図5)。Breadcrumbsはコンテンツを「どこから」また「誰から」得てもよいというコンテン

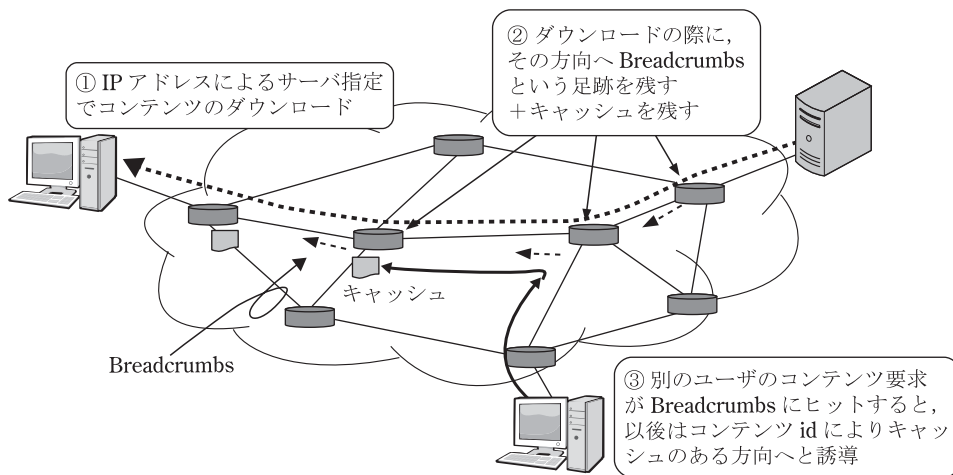


図5 Breadcrumbs におけるコンテンツ要求の誘導 コンテンツ要求は IP アドレスにより指定したサーバへ送られる。途中で Breadcrumbs にヒットすると、以後コンテンツ id に基づき Breadcrumbs をたどることで、キャッシュへと誘導される。

ツオリエンテッドネットワークの特徴を巧みに利用している。キャッシュを従来の受動的な方法に比べより積極的に利用するという点で、能動的なランデブー型通信である。

## 7. ま と め

本稿では、ユーザはコンテンツそのものの取得に関心があり、それがどこから得られているかという点には関心がない、というコンテンツオリエンテッドな観点に基づくアーキテクチャにより、ネットワーク自体を大きく変革しようという取組みとしての、コンテンツオリエンテッドネットワークについて説明した。誌面の都合で重要な研究例などについて解説したが、更に詳しい内容については文献(10)を参照されたい。コンテンツオリエンテッドネットワークを実現するには、コンテンツを統一的に扱うための naming 技術、更にどこから得られてもそれがオリジナルコンテンツと同一であることを保証するセキュリティ技術など、コンテンツ流通を支えるフレームワークの研究開発、更にはネットワークアーキテクチャの変革に伴うトラフィック制御やルーティングなどのネットワーク制御技術、そしてスイッチング技術など、幅広い分野での研究・開発が有機的に統合しながら進むことが必要である。このような取組みを通して、ネットワーク自体がユーザの所望コンテンツを発見し転送するという、コンテンツ配信の本来の目的に合致した情報流通基盤となることが期待されている。

## 文 献

- (1) F. Douglis and M. Kaashoek, "Scalable internet services," IEEE Internet Comput., vol. 5, no. 4, pp. 36-37, July 2001.

- (2) E. Lua, J. Crowcroft, M. Pias, R. Sharma, and S. Lim, "A survey and comparison of peer-to-peer overlay network schemes," IEEE Communications Survey and Tutorials, vol. 7, no. 2, pp. 72-93, 2005.
- (3) H. Xie, Y. Yang, A. Krishnamurthy, Y. Liu, and A. Silbershatz, "P4P: Provider portal for applications," ACM SIGCOMM 2008, pp. 351-362, Seattle, USA, Aug. 2008.
- (4) I. Stoica, D. Adkins, S. Zhuang, S. Shenker, and S. Surana, "Internet indirection infrastructure," ACM SIGCOMM 2002, pp. 73-86, Pittsburgh, USA, Aug. 2002.
- (5) I. Stoica, R. Morris, D. Karger, M. Kaashoek, and H. Balakrishnan, "Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications," ACM SIGCOMM 2001, pp. 149-160, San Diego, USA, Aug. 2001.
- (6) T. Koponen, M. Chawla, B. Chun, A. Ermolinskiy, K. Kim, S. Shenker, and I. Stoica, "A data-oriented (and beyond) network architecture," ACM SIGCOMM 2007, pp. 181-192, Kyoto, Japan, Aug. 2007.
- (7) V. Jacobson, D. Smetters, J. Thornton, M. Plass, N. Briggs, and R. Braynard, "Networking named content," ACM CoNEXT 2009, pp. 1-12, Rome, Italy, Dec. 2009.
- (8) L. Zhang, D. Estrin, J. Burke, V. Jacobson, J. Thornton, D. Smetters, B. Zhang, G. Tsudik, K. Claffy, D. Krioukov, D. Massey, C. Papadopoulos, T. Abdelzaher, L. Wang, P. Crowley, and E. Yeh, "Named data networking (NDN) project," PARC Technical Report, Oct. 2010, <http://named-data.net/ndn-proj.pdf>
- (9) E. Rosenweig and J. Kurose, "Breadcrumbs: Efficient, best-effort content location in cache networks," IEEE INFOCOM 2009, pp. 2631-2635, Rio de Janeiro, Brazil, April 2009.
- (10) 山本 幹, "コンテンツオリエンテッドネットワークーコンテンツ流通の新しい潮流一," 信学技報, NS2011-36, pp. 109-114, May 2011.

(平成 23 年 9 月 30 日受付 平成 23 年 10 月 31 日最終受付)



やまもと みき  
山本 幹 (正員:フェロー)

昭 58 阪大・工・通信卒。昭 63 同大学院博士課程了。阪大・工・助手、助教授を経て、平 17 関西大・工・先端情報電気・教授 (改組により現在はシステム理工・電気電子情報)。マルチキャスト通信、次世代インターネット及びこれらの性能評価に関する研究に従事。平 14, 19 本会ネットワークシステム研究専門委員会ネットワークシステム研究賞受賞。工博。IEEE, ACM, 情報処理学会各会員。