

[特別講演] コンテンツオリエンテッドネットワーク -モバイル環境の観点から-

山本 幹^{†1}

現在インターネットを流れるトラフィックのほとんどは、WebトラフィックやP2Pトラフィックなどコンテンツ流通に関連するトラフィックである。インターネットの基本通信モデルは、IPアドレスにより指定するホスト間通信、すなわちロケーションオリエンテッド通信である。コンテンツ流通においては、ユーザはコンテンツそのものに関心があり、どこからコンテンツが得られるかという点は問題ではない。このようなコンテンツオリエンテッドな通信をネットワーク自体が提供する枠組みとして、コンテンツオリエンテッドネットワークの研究が活発に進められている。コンテンツオリエンテッドネットワークにおいては、コンテンツ要求とデータとの間のランデブーポイントをネットワークが提供する、ランデブー型通信モデルが一般的に用いられる。本稿では、コンテンツオリエンテッドネットワークについて、モバイル環境の観点からその基本モデルであるランデブー型通信モデルを論じたうえで、最新研究例を紹介する。

Content Oriented Networks - From Mobile Communications Perspective-

MIKI YAMAMOTO^{†1}

The primary use of the current Internet is content distribution and it generates large portion of traffic going through the Internet. Communication model has been point-to-point and location-oriented since creation of the Internet. In content distribution, user's concern is content itself and is not a location where it is obtained. From this viewpoint, content-oriented networks which change communication model to rendezvous-based model becomes recently one of hot research topics concerning new generation network. This paper overviews historical background and basic concept of content-oriented networks from the viewpoint of mobile communications. It also surveys content oriented-network researches in content discovery, content transport and content caching.

1. ま え が き

現在、ユーザ間のコンテンツ流通を支える情報転送基盤としてのインターネットは、その開発当初からホスト-ホスト間通信をベースとした通信モデルを用いている。IPにおいては、通信を行う際に宛先ホストを netid と hostid からなる IP アドレスにより指定する。前者の netid は、ホストのロケーションをあらわす location id であり、IP は本質的に通信相手を場所で指定している。この観点で、IP をベースに設計されたインターネットは、ロケーションオリエンテッド通信モデルを基本としている。

一方コンテンツ流通サービスでは、どこからコンテンツを取得するかという点には全く関心がなく、どのコンテンツを得るかという点が重要であり、いわばコンテンツオリエンテッドなサービスとなっている。例えば、現在広く普及している CDN ではユーザが所望するコンテンツ、特に人気のあるコンテンツは一か所に保持されているのではなく、複製コンテンツが地理的に離れた箇所に多く配置されているのが一般的である。すなわちサービスの観点では、ユーザはロケーションをもとに情報を得ているのではなく、ユーザが本来所望しているコンテンツをどこから得ようが無関心であるという状況にある。つまり、インターネット上で提供されるコンテンツ配信サービスはすでにロケーションに依存しないコンテンツオリエンテッドなものになっているのに対し、それを支えるインターネットはロケーションオリエンテッドなアーキテクチャであるという、サービスとそれを提供する情報流通基盤の間に大きな乖離がみられる。

このような乖離をなくし、ネットワークもコンテンツオリエンテッドな形に変革しようという、コンテンツオリエンテッドネットワークの研究が近年活発に発表されている¹⁾。このようなコンテンツオリエンテッドネットワークが採用する一般的な通信モデルは、ランデブー型通信モデルである。本稿では、モバイル環境で用いられる通信モデルがこのランデブー型通信モデルであることを示し、コンテンツオリエンテッドネットワークをモバイル環境の観点から眺めてみたい。近年のコンテンツオリエンテッドネットワークに関する研究事例をコンテンツ発見、コンテンツ転送ならびにコンテンツキャッシングの観点で紹介したうえで、これらのコンテンツオリエンテッドネットワークに関する研究が、モバイル環境においてどのように適用可能であるかという点について議論する。

^{†1} 関西大学システム理工学部

Department of Engineering Science, Kansai University

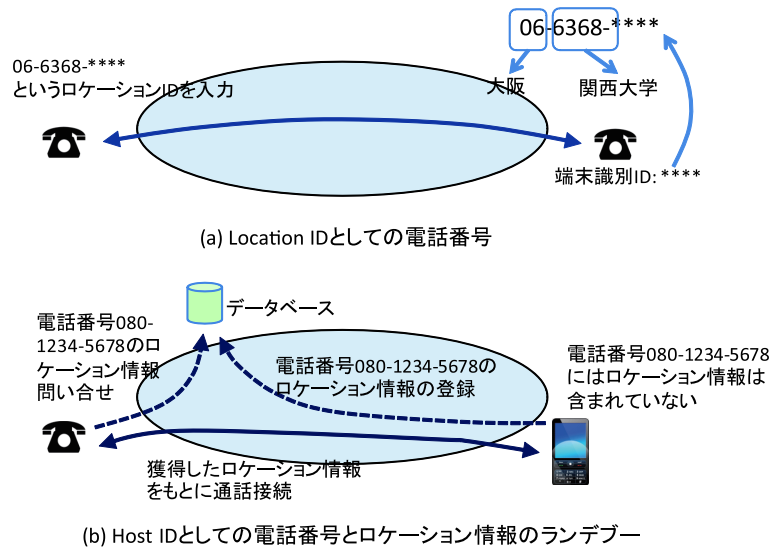


図1 ロケーション ID としての電話番号と Host ID としての電話番号

2. ランデブー型通信モデルとモバイル環境

本章では、ロケーションオリエンテッド通信モデルを用いているインターネットがモバイル環境に適用するためには、何らかの方法でランデブー型通信モデルを採用していることを、いくつかの例を用いて説明する。

2.1 電話のモバイル環境での変遷

電話サービスは、当初は誰と通信するかではなく、どの端末と接続するか、というサービスが基本であった。電話番号は、例えば筆者の場合には 06-6368-**** という電話番号となるが、上位の 6 つの数字は筆者の電話端末の場所を表している。06 は「大阪」、「6368」は関西大学（付近）を示す番号である。後半の 4 桁は電話端末の ID を示している。このように、電話番号は場所を表すロケーション ID である。

ところが、携帯電話になると、電話番号の役割が一変する。携帯電話では、080-1234-5678 などの番号が使用されるが、これらの番号のいずれの部分も場所を表す識別子はなく、端末を表す ID となっている。すなわち、携帯電話では電話番号にはロケーションオリエンテッ

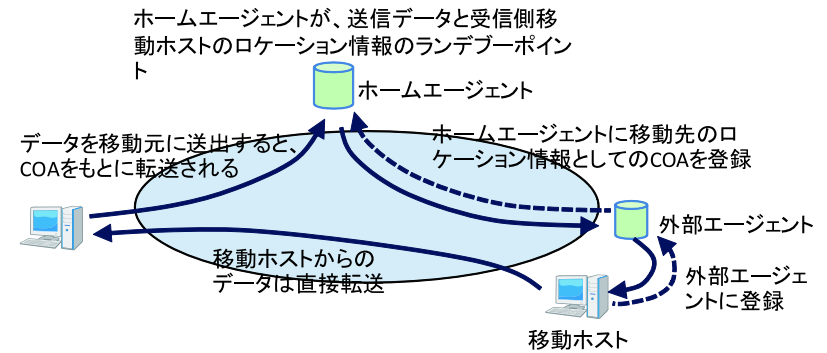


図2 Mobile IP におけるデータとロケーション情報のランデブー

ドな意味づけは全くなく、電話端末の個体識別番号のみの役割を担っている。

携帯電話においては、各端末が自身の存在場所をデータベース（ホームメモリ）に登録している。携帯電話において 080-1234-5678 に電話をかけると、この番号の存在場所をデータベースにより把握し、この場所（セル）と呼接続処理を行う。このように、モバイル環境では、電話番号の役割がロケーション ID から脱却していること、通信を行うに当たっては相手先のロケーション情報が必要なので電話をかけたいという要求とロケーション情報との「遭遇（ランデブー）」をデータベースにおいて実現していること、が特徴である。

2.2 Mobile IP

IP においてモバイル環境へ対応する技術として、Mobile IP がある。本来 IP アドレスはロケーション ID であるが、これをモバイル環境で使用可能とするものが Mobile IP である。図 2 に示すように、移動したホストは外部エージェントに登録を行い、外部エージェントは移動ホストの気付けアドレス (Care of Address: 以下 COA) をホームエージェントへ通知する。移動ホストとの通信を開始したいホストが本来の IP アドレスへと IP データグラムを送信した場合、ホームエージェントが一旦受信し、登録されている COA 宛のデータグラムへとカプセル化して送信する。これを受け取った外部エージェントは、COA などが記載されたヘッダを除去したうえで、移動ホストへと送信する。

この Mobile IP の動作においては、移動ホストは自身の IP アドレスを外部エージェントに登録し、この情報に COA をあわせた情報がホームエージェントに送信され登録される。移動ホスト宛てに送信されたデータグラムと、その転送先としての移動ホストのロケー

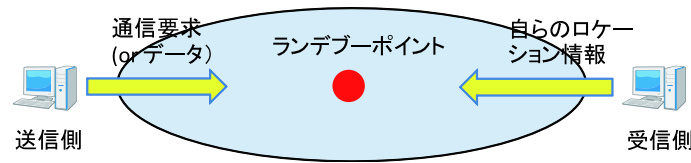


図3 モバイル環境におけるランデブー型通信モデル

ション ID とのランデブーが、ホームエージェントにおいて実現されている。つまり、ホームエージェントが、移動ホストの移動先のロケーション情報と送信されたデータとのランデブーポイントとなっている。

2.3 ランデブー型通信モデルとモバイル環境

2.1 における携帯電話の例と、2.2 における Mobile IP の例をみても分かるように、モバイル環境では通信相手のロケーション ID が容易には得られないので、これを獲得するための方法としてランデブーによる方法がとられている。いずれも移動先のロケーション情報を登録するデータベースがこのランデブーポイントになっている。前者の携帯電話においては携帯電話番号に応じてロケーション ID を登録するデータベースが決まっており、通信したいユーザは相手のロケーション ID を問い合わせるべきデータベースの場所を、携帯電話番号を ID として用いて判別する。つまりランデブーポイントの識別が、携帯電話番号により行われている。Mobile IP においては、データそのものが移動ホストの元の IP アドレスへと送信され、ランデブーポイントであるホームエージェントに届けられる。すなわち、Mobile IP では元の IP アドレスを ID として使用することで、ランデブーポイントの識別が行われている。

このようなモバイル環境におけるランデブー型通信モデルは、図 3 に示すように、通信要求（もしくはデータそのもの）と通信相手のロケーション情報の双方が出会う場としてのランデブーポイントをネットワークが提供するもの、として一般化してとらえることができる。

3. コンテンツオリエンテッドネットワーク

3.1 コンテンツオリエンテッドネットワークにおけるランデブー型通信モデル

コンテンツオリエンテッドネットワークにおけるランデブー型通信モデルは、一般的にはユーザから送出されるコンテンツ取得要求と、コンテンツそのもののランデブーポイントを

ネットワークが提供するものととらえることができる。コンテンツ取得におけるランデブー型通信モデルを初期の段階で実現した方式として、Pub/Sub がある。

Pub/Sub は、コンテンツを提供する Publisher と、コンテンツを要求する Subscriber の間のランデブー型通信モデルである²⁾。Pub/Sub では、Subscriber が自身の所望コンテンツを“interest”と呼ばれるメッセージにより登録し、以後この interest に適合するコンテンツが Publisher により生成されると、これを受け取る。文献²⁾では、Pub/Sub の通信の観点での特徴の一つに Space decoupling を挙げている。Space decoupling とは、Publisher と Subscriber は、お互いの情報を得ている必要はないことを表す概念である。例えば、Publisher は誰が Subscriber として受信しているのか、またどれくらいの数の Subscriber がコンテンツを受信しているのかについて、全く知る必要はない。

このような共通の特徴をもつ Pub/Sub は、いくつか実用に供しているシステムもある³⁾⁴⁾。一般的な Pub/Sub は、Subscriber による interest の登録ならびに Publisher によるコンテンツの生成 (Pub/Sub においてはイベントの notification と呼ばれる) がサーバにおいて行われ、サーバがこれらの情報を集中的に管理している。分散型 Pub/Sub として、TIB Rendezvous³⁾ や Siena⁴⁾ などの例もいくつか存在する。TIB Rendezvous では IP マルチキャストを使った情報の配信機能により分散型アプローチを実現しており、Siena ではアプリケーションレベルでのオーバーレイネットワーク⁵⁾を構成しここでコンテンツベースのルーチング⁶⁾を行うことで分散型アプローチを実現している。Siena では Publisher からのコンテンツ送信においてはコンテンツベースでのツリーが形成されるので、いわばアプリケーションレベルマルチキャストが Subscriber による interest 登録により構成される。ランデブー型通信モデルの観点では、集中型ではサーバがランデブーポイントとなっており、分散型ではマルチキャストツリーが間接的なランデブーポイント形成を行っている。こういった意味では、ネットワーク外のサーバにランデブーポイントを形成する点、もしくはアプリケーションレベルでのオーバーレイを使っているなどの点で、純粋な形でのコンテンツオリエンテッドネットワークとはまだ言えない。

Pub/Sub がもつ Space decoupling の特徴は、コンテンツオリエンテッドなサービスには必要不可欠なものである。従来のインターネットでは、コンテンツを転送する IP データグラムには送信ホストならびに受信ホスト IP アドレスが指定されており、送信者は受信者を、受信者は送信者を、お互いに知っており、Space decoupling は実現されていない。従来のインターネットでは、ネットワーク層以下では実現されていない Space decoupling を実現するために、アプリケーション層で様々な工夫が施されている。例えば CDN において

は DNS への問い合わせに対し複製サーバのうち適切なサーバの IP アドレスを返すことで、ユーザが指定した URL とは異なるサーバにアクセスしている場合がある。これは、Space decoupling をアプリケーション層で実現した例である。

このように、コンテンツオリエンテッドなサービスを展開すべく Pub/Sub を含む様々な試みが上位レイヤで検討されてきたが、近年ネットワーク自体にコンテンツオリエンテッドな機能を具備させるコンテンツオリエンテッドネットワークの研究が活発に行われている。

3.2 コンテンツオリエンテッドネットワークとは

コンテンツオリエンテッドなサービスは、ユーザにどこからコンテンツが得られているのか全く意識させることなくコンテンツを流通させるものである。コンテンツ取得に際し、所望するコンテンツを発見することがまず必要な手順であり、その次にコンテンツが存在する場所からユーザまでコンテンツを転送することが求められる。これらの機能をネットワーク自体が提供するものが、コンテンツオリエンテッドネットワークとして位置づけられる。

コンテンツオリエンテッドネットワークは、これまでのインターネットと違うアーキテクチャを、コンテンツ発見の部分にのみ導入したものと、コンテンツ発見とコンテンツ転送の双方に導入したものの二つに分類できる。前者は、コンテンツ発見の機能をネットワークが提供し、コンテンツ転送機能として従来のインターネットのフレームワークを用いたものである。この場合、コンテンツ転送にはコンテンツの存在箇所（サーバ）の IP アドレスが必要となり、コンテンツ発見においては所望コンテンツをもつサーバの IP アドレスを検索する機能が提供される。この方法は、モバイル環境でのランデブー型通信モデルと類似形態をとっている。モバイル環境ではランデブーポイントが通信相手の IP アドレスを取得するためのものであるのに対し、コンテンツオリエンテッドネットワークではコンテンツの存在する場所を表す IP アドレスを取得するためのものであるという点異なる点である。後者すなわち発見と転送の双方に導入したものでは、コンテンツ発見のみならず、コンテンツ転送も IP とは異なるアーキテクチャを用いる。

4. 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

コンテンツ発見をネットワークで行うものとして、 $i3^{(7)}$ 、DONA⁽⁸⁾、TRIAD⁽¹⁰⁾ などがあ
る。本節では、これらの取り組みのうち $i3$ と DONA について、それぞれ詳しく説明する。

4.1 $i3$

$i3^{(7)}$ は、ランデブーベースの通信モデルを具現化したものである。大前提として、IP による通信がベースにあるとしており、その上に新しいランデブーベースの通信モデルを実現

する方法、すなわちアプリケーション層上のオーバーレイにおいてコンテンツ発見のアーキテクチャを提供する方法をとっている。 $i3$ は、Internet Indirection Infrastructure の頭文字から名付けられているが、2 番目の indirection は送信ホストを受信ホストから分離する概念を示したものであり space decoupling の実現を表現している。

具体的には、受信側は $(id, addr)$ の組で表現される trigger を用いて、パケット（コンテンツの一部もしくはすべてをペイロードにもつパケット）に対する interest を表明する。ここでの id はパケットのペイロード部の内容を表す識別子であり、 $addr$ はこの trigger を送信したホスト（ $data$ を受信したいホスト）の IP アドレスである。パケットは $(id, data)$ の組で表現され、ここでの $data$ はペイロードの内容そのものである。送信側が $(id, data)$ を送出し、送信側の送信するコンテンツである $(id, addr)$ が interest を trigger により表明した受信側に届くには、ネットワークが両者をマッチングさせる機能を提供しなければならない。

$i3$ では、各 id を唯一の $i3$ サーバにマッピングすることでこれを解決している。trigger($id, addr$) が受信ホストによりネットワークに投入されると、この id に該当する $i3$ サーバに格納される。送信ホストが $(id, data)$ のパケットをネットワークに投入すると、これもこの id に該当するサーバへ転送される。 $i3$ サーバでは、送信ホストから届いた $(id, data)$ パケットを、格納されている trigger に対応する受信ホストに IP フォワーディングにより転送される。このように、各 id に対応する $i3$ サーバが、受信ホストの interest (を示す trigger) と送信ホストから送られるパケットとのランデブーポイントとなり、コンテンツ要求とコンテンツのマッチングを行っている。このとき、受信ホストが複数存在しても送信ホストから送信されたパケットは全受信ホストへ届き、送信ホストが複数存在していてもそれらから送信されたパケットは全受信ホストへ届く。

なお、trigger ならびにパケットの双方とも id をもとにしてこれに対応する $i3$ サーバへと転送されなければならないが、これは $i3$ サーバを構成要素とするオーバーレイネットワークにおいて Chord プロトコル⁽⁹⁾ を適用することで解決している。Chord は P2P において所望コンテンツを格納しているピアを効率的に探索するプロトコルであり、 $i3$ では id をキーとした該当サーバ検索にこのプロトコルを応用している。この検索は、trigger に対し id を宛先としたコンテンツルーチングを実現していることに他ならない。

$i3$ は、コンテンツ要求である trigger が所望 id に対応する $i3$ サーバに格納されることで、コンテンツ発見のフレームワークを提供しており、コンテンツ発見後（すなわちランデブーが成功した後）のコンテンツ転送は従来の IP フォワーディングに委ねている。このことが

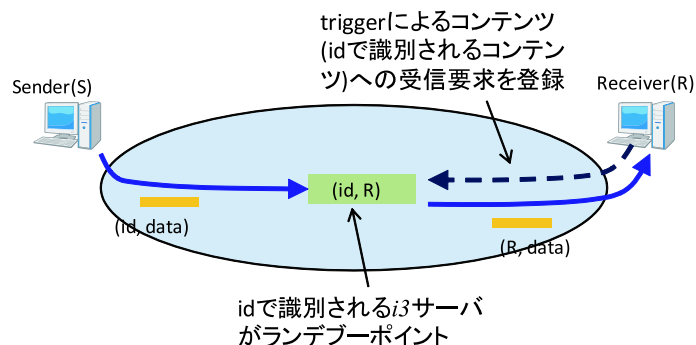


図 4 *i3* におけるランデブー型通信モデル

ら、*i3* は、コンテンツ発見の枠組みとして新しいアーキテクチャを導入したものと位置づけられる。

4.2 DONA

DONA⁸⁾ は、*i3* に類似したランデブー通信モデルを用い、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手法を提示している。現在のインターネットではこの役割を DNS が担っているのに対し、DONA では最近隣サーバの発見をネットワークがコンテンツオリエンテッドな手法で行う。最近隣サーバを発見した後は、サーバからのコンテンツ転送は従来の IP フォワーディングに委ねており、コンテンツ発見をコンテンツオリエンテッドに行う手法として分類できる。

DONA ではコンテンツの naming も提案している。各コンテンツに principal と呼ばれる責任者（一般にはコンテンツオーナー）を設定し、各 principal には公開鍵とそれに対応する秘密鍵が関連付けられる。DONA におけるコンテンツの名前は、principal の公開鍵のハッシュ値である P と、principal がコンテンツにつけたラベル L との組 $(P : L)$ で表現される。DONA においては、URL のような階層構造の名前を用いるのではなく、フラットな固定長ビットの名前を用いている。これにより、以下に示す方法でのコンテンツの自己認証が可能としている。コンテンツは、 $\langle data, public\ key, signature \rangle$ の組として送出される。この *signature* は、データに対する秘密鍵によるデジタル署名である。受信側はコンテンツを受信した際、自身がコンテンツを要求する際に指定した $(P : L)$ の P （公開鍵のハッシュ値）と受信した公開鍵に対し生成したハッシュ値が一致すること、ならびに公開鍵

を用いて受信データより生成した *signature* と受信コンテンツ内の *signature* が一致することで、受信したコンテンツが確かに principal の生成したものであることを保証している。

DONA においては、コンテンツ要求を $FIND(P : L)$ として送信し、コンテンツ側からは $REGISTER(P : L)$ を送信する。この $FIND$ と $REGISTER$ のマッチング（ランデブー）を行う場として、RH (Resolution Handler) を設けている。RH は、DNS のような階層構造を持っており、 $REGISTER(P : L)$ はコンテンツの属するローカル RH から上位の RH に向けて送信され、途中の RH に state を registration table として残す。この state は、コンテンツ要求 $FIND$ をコンテンツの方向へとルーティング処理する際に用いられる。registration table は、コンテンツの名前と、そのコンテンツへ至る経路情報としての次ホップ RH ならびにそのコンテンツ（複製サーバ）までの距離、が対応づけられて記載されている。なお、RH が先に $REGISTER$ を上位に送出し、その後下位の別 RH から同一 $(P : L)$ に対する $REGISTER$ を受け取った場合、すでに上位に対し該当コンテンツがその方向にあることを通知済みであるので、再度上位に送出する必要はない。ただし、より近いサーバから $REGISTER$ を受け取った場合には、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必要があり、これを上位へ送出する必要がある。

ユーザがコンテンツを取得する際には、まず $FIND(P : L)$ を自身のローカル RH へ送信する。RH は自身の registration table に該当するエントリがあれば、そのエントリに記載されている次ホップ RH へ $FIND$ を送出し、エントリがなければ階層構造の親 RH へ送出する。該当するコンテンツが、 $REGISTER(P : L)$ をすでに登録していれば、少なくとも最上位 RH にはエントリが存在する。すなわち、最上位までのいずれかの RH でエントリが見つかり、その後はテーブル内の次ホップ RH をホップバイホップで辿ることで、所望コンテンツに辿り着くこと（ランデブー）ができる。なお、RH において複数エントリにヒットした場合、より近いサーバを選択することで、最近隣サーバへコンテンツ要求を誘導している。

このように、DONA は RH によるコンテンツルーティングを実現し、ユーザのコンテンツ要求を最近隣サーバへ誘導するルーティング機能を提供している。すなわち、コンテンツ発見をコンテンツオリエンテッドに行うものとして位置づけられる。なお、RH 構成に現在のネットワーク構造（階層的 ISP 構成）を反映し、RH が保持するテーブル内にサーバへの距離情報を保持させるなど、現状のインターネットをベースとしてその情報を巧みに利用することで、anycast サービスをネットワーク側で実現している点が独創的な点である。DONA

の要素技術は文献⁸⁾にも書かれているように、TRIAD¹⁰⁾、HIP¹¹⁾、SFS¹²⁾などを用いており、これらのアイデアを統合したものととして DONA が位置づけられる。

5. 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転送

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アプローチで行うものに、CCN(Content-Centric Network)¹³⁾がある。

CCN(Content-Centric Network)¹³⁾¹⁴⁾は、Pub/Sub や *i3*、DONA と同様に、コンテンツ要求を行うユーザからの Interest とコンテンツそのものである Data との間のランデブーの提供という通信モデルに基づく。CCN では、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として、詳しくその構成を示している。

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もルーティングテーブルであり、name-based ルーティングプロトコルにより作成される。IP ルータにおける FIB と同等のものであるが、IP では一エントリに対し出力インタフェースが一つに限定されているのに対し、複数のインタフェースに関連付けることも可能である。この機能により、マルチキャストなども提供可能となっている。バッファは IP ルータにおけるバッファと同様にパケットを蓄積するが、IP ルータでは一度フォワーディングすればバッファ内のパケットは消去されるのに対し、replacement policy に従って一時的に保存される。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 アドレスからの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も再利用可能であることに基づく。すなわち、ルータがコンテンツキャッシュとして動作できる。PIT は、Interest(コンテンツ要求)がフォワーディングされた方向を保持しているテーブルである。データパケットは、この PIT によりホップバイホップで逆方向に辿ることでコンテンツ要求先に転送される。

CCN では、ユーザからのコンテンツ要求 (Interest) がコンテンツルータに届くと、FIB によりコンテンツサーバの方向へとルーティング処理により誘導される。この誘導の過程で各ルータの PIT にエントリが残される。Interest がサーバに到着すると、Interest が辿った経路を PIT に残されたエントリをホップバイホップで用いながら逆方向に辿ることで、コンテンツの転送が行われる。FIB のルーティングテーブルは、各ルータが自身でカバーするコンテンツの name prefix を広告することで作成される。コンテンツを保持するサーバは、自身の提供するコンテンツ名をローカルなルータにブロードキャストで通知する。各ルータ

の広告においては、現状の OSPF や BGP の枠組みを用いて、それぞれ Intra-Domain ならびに Inter-Domain での広告が可能である。

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により行うだけでなく、コンテンツ流通も PIT を用いてコンテンツ名によって逆経路を辿ることで実現しており、コンテンツ発見とコンテンツ流通の双方をコンテンツオリエンテッドな手法としている点で、他の研究例とは一線を画した特徴あるアーキテクチャである。

6. コンテンツオリエンテッドネットワークにおけるキャッシング

コンテンツオリエンテッドネットワークでは、Space decoupling が実現され、コンテンツ送信者とコンテンツ受信者はお互いの情報を得る必要はない。従って、コンテンツをコンテンツオーナーから直接得る必要はなく、複製サーバもしくはネットワーク内のキャッシュから得ても全く問題ない。ロケーションオリエンテッドな従来のインターネットでキャッシングをうまく動作させるには、エンド・エンドセマンティクスを維持するために、途中のプロキシサーバで一旦セッションを分断するなどの手順が必要であった。これに対し、コンテンツオリエンテッドな環境では、誰からコンテンツを得ても全く問題がないため、このような複雑な手順が不要となり、積極的なキャッシュ運用が期待される。

キャッシュには、従来のコンテンツそのものをキャッシュする方法から、パケットレベルでキャッシュを行うもの¹⁵⁾¹⁶⁾まで、様々な粒度での適用が考えられる。パケットレベルで運用する場合、従来はペイロード部までパケットの内容をみて冗長パケットであるかを判断する必要があったが、コンテンツオリエンテッドネットワークではコンテンツ名をみただけで同一パケットであることを判定できるため、高速ネットワークでもラインスピードでの運用が可能となり、適用領域が広くなりキャッシング技術がより有効に利用できる。

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できるという形式が一般的であった。この方法では、コンテンツキャッシュとコンテンツ要求のランデブーは受動的にしか行われていない。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に利用する方法として Breadcrumbs¹⁷⁾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にこの Breadcrumbs にヒットすると、先のダウンロード方向へとホップバイホップで転送を行い、その先にあるコンテンツからのコンテン

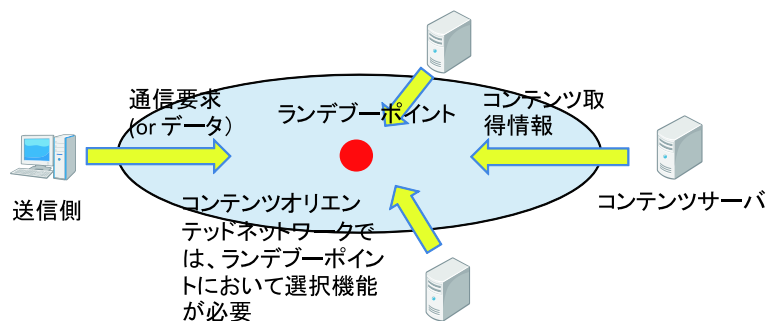


図5 コンテンツオリエンテッドネットワークにおけるランデブー型通信モデル

コンテンツ取得を試みる方法である。Breadcrumbs では、最初はロケーションオリエンテッドなフレームワークで行われているコンテンツ要求転送が、途中のルータで Breadcrumbs にヒットするとコンテンツオリエンテッドなものに切り替わる。このため、従来のネットワークからコンテンツオリエンテッドネットワークへの移行期、すなわちコンテンツオリエンテッドなアーキテクチャが部分普及した状況でも十分利用可能な優れた手法である¹⁸⁾。

7. コンテンツオリエンテッドネットワークとモバイル環境

現在実現されているモバイル環境と、これからの新世代ネットワークの中での取り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は、いずれもランデブー型通信モデルを用いているという、アーキテクチャとしての類似性を有している。ただし、モバイル環境では通信を開始したいユーザが通信相手を発見するという意味で、通信主体としての相手が唯一無二のものである。これに対し、コンテンツオリエンテッドネットワークでは獲得したい情報としてのコンテンツが同一のものであれば複製でも構わないという点に大きな差異がある(図5)。同一コンテンツであればよいという点から、複数接続可能な接続先から適切なものを決定するメカニズムが必要であり、むしろモバイル環境からさらに発展した形態であるといえる。実際、コンテンツオリエンテッドネットワークのアーキテクチャである CCN 上において、音声通話を提供する方法の検討が文献¹⁹⁾ に発表されている。すなわち、コンテンツオリエンテッドネットワークの上で、モバイル環境のサービスは容易に実現可能である。

このようにコンテンツオリエンテッドネットワークは、モバイル環境に親和性が高いものである。コンテンツオリエンテッドネットワークがモバイル環境にもたらす利点としては、

モバイル環境向けの特別な装置 (Mobile IP における外部エージェントなど) を必要としない点、移動に対してネットワークが対応できることから資源管理・運用との連動が可能である点、コンテンツ取得においては移動に対して最近隣に位置するコンテンツを獲得できるなどの最適コンテンツ選択機能をネットワークが提供できる点、など数多くある。このように、モバイル環境とコンテンツオリエンテッドネットワークという、基本アーキテクチャが同一であるものがうまく連携することで、さらに効果的なサービスを展開できる可能性がある。

8. 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変革するアプローチとしての、コンテンツオリエンテッドネットワークについて、モバイル環境の観点からその基本モデルであるランデブー型通信モデル、そのモデルのもつ原理、さらに具体的な研究例について述べた。コンテンツオリエンテッドネットワークを本当の意味で実現するには、コンテンツの naming, セキュリティを含むコンテンツ流通の大きなフレームワークのみならず、アーキテクチャの変革にあわせたトラフィック制御、ルーティングなどのネットワーク制御技術、さらにはスイッチング技術など、幅広い分野での研究・開発が有機的に複合しながら進むことが必要であろう。その先に、基本アーキテクチャとしてランデブー型通信モデルを用いているという移動環境とコンテンツオリエンテッドネットワークの連携により、効果的サービスが展開される可能性がある。このような取り組みを通して、ネットワーク自体がユーザに所望コンテンツを提供するという本来の目的に合致した情報流通基盤となり、ユーザ自身もどこにいても同一ネットワークサービスを享受できるという真のコピキタス環境が実現されることが期待されている。

謝辞 本研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「新世代ネットワークを支えるネットワーク仮想化基盤技術の研究開発」による。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 山本 幹: コンテンツオリエンテッドネットワーク - コンテンツ流通の新しい潮流, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会チュートリアル招待講演, 信学技報 NS2011-36, 2011年5月.
- 2) P.Eugster, P.Felber, R.Guerraoui, A.Kermarrec: The Many Faces of Pub-

- lish/Subscribe, ACM Computing Surveys, Vol.35, No.2, pp.114-131, June 2003.
- 3) TIB/Rendezvous White paper, TIBCO, Palo Alto, CA, 1999.
 - 4) A.Carzaniga, D.Rosenblum, A.Wolf :Design and Evaluation of a Wide-Area Event Notification Service, ACM Trans. On Computer Systems, Vol.19, No.3, pp.332-383, Aug. 2001.
 - 5) A.Carzaniga, A.Wolf : Content-Based Networking: A New Communication Infrastructure, Proc. of NSF Workshop on Infrastructure for Mobile and Wireless Systems, Scottsdale, AZ, Oct. 2001.
 - 6) A.Carzaniga, J.Deng, A.Wolf: Fast Forwarding for Content-Based Networking, Technical Report CU-CS-922-01, Dept. of Computer Science, University of Colorado, Nov. 2001.
 - 7) I.Stoica, D.Adkins, S.Zhuang, S.Shenker, S.Surana: Internet Indirection Infrastructure, ACM SIGCOMM 2002, Pittsburgh, Pennsylvania, August 2002.
 - 8) T.Koponen, M.Chawla, B.Chun, A.Ermolinskiy, K.Kim, S.Shenker, I.Stoica : A Data-Oriented(and Beyond) Network Architecture, ACM SIGCOMM 2007, Kyoto, Japan, August 2007.
 - 9) I.Stoica, R.Morris, D.Karger, M.Kaashoek, H.Balakrishnan: Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications, ACM SIGCOMM 2001, San Diego, California, August 2001.
 - 10) M.Gritter and D.Chariton: TRIAD :A New Next-Generation Internet Architecture, <http://www-dsg.stanford.edu/triad>, July 2000.
 - 11) R.Moskowitz, P.Nikander : Host Identity Protocol Architecture, RFC 4423, IETF, May 2006.
 - 12) D.Mazieres, M.Kaminsky, M.Kaashoek, E.Witchel : Separating Key Management from File System Security, Proc. of SOSP 2009, pp.124-139, Charleston, SC, USA, Dec. 2004.
 - 13) V.Jacobson, D.Smetters, J.Thornton, M.Plass, N.Briggs, R.Braynard : Networking Named Content, ACM CoNEXT 2009, Rome, Italy, Dec. 2009.
 - 14) 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, E.Yeh : Named Data Networking(NDN) Project, PARC Technical Report NDN-0001, Oct. 2010.
 - 15) A.Anand, A.Gupta, A.Akella, S.Seshan, S.Shenker : Packet Caches on Routers: The Implications of Universal Redundant Traffic Elimination, ACM SIGCOMM 2008, Seattle, WA, USA, Aug. 2008.
 - 16) A.Anand, V.Sekar, A.Akella : SmartRE: An Architecture for Coordinated Network-wide Redundancy Elimination, ACM SIGCOMM 2009, Barcelona, Spain, Aug. 2009.
 - 17) E.Losenweig, J.Kurose : Breadcrumbs: Efficient, Best-Effort Content Location in Cache Networks, IEEE INFOCOM 2009 miniconference, Rio de Janeiro, Brazil, April 2009.
 - 18) 筒井達大, 浦林宏行, 山本 幹: コンテンツ流通網におけるインターネット誘導方式の部分普及時の評価, 信学技報, NS2010-260, March 2011.
 - 19) V.Jacobson, D.Smetters, N.Briggs, M.Plass, P.Stewart, J.Thornton, R.Braynard: VoCCN: Voice Over Content-Centric Networks, CoNext 2009 Workshop, ReArch'09, Rome, Dec. 2009.