

# 新世代ネットワークにおけるトランスポート制御に関する一考察

松原 大典

日立製作所中央研究所 〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

E-mail: daisuke.matsubara.pj@hitachi.com

あらまし 1975年のTCP/IPの誕生から30年以上経った現在、IPネットワークは社会において必要不可欠な社会インフラとして幅広く活用されている。一方近年では、IPノードの消費電力量やネットワーク管理コスト増加への対策、高度な信頼性の実現、エンド・エンドでの帯域確保などIPネットワークの課題が顕在化し始めている。日米欧では2015年から2020年あたりの実現を見据えて、既存のIPネットワークのアーキテクチャおよびプロトコルに囚われない、全く新しいネットワークアーキテクチャ（新世代ネットワーク）の研究が始まっており、上記のようなIPネットワークの課題を解決する研究として期待されている。本稿では、新世代ネットワークの研究動向を紹介し、トランスポート制御の課題を述べる。

キーワード future internet, 新世代ネットワーク, トランスポート制御

## 1. はじめに

TCP/IPに代表されるIPネットワーク技術は、その接続の容易性と構築・運用の低コスト性から、1990年代より急速に普及し、現在ではインターネット、企業LAN、VPN、データセンタ、ホームネットワークなどで広く使われており、情報化社会を支える最も重要なネットワーク技術の一つとなっている。特にデータ通信の分野においては、IPネットワークは他のネットワークと比較すると、高速で広範囲なコネクティビリティをより安価に実現できるという点で、大きな優位性を持つ。また、一般的にIPでの実現が難しいと言われていた音声通話に関しても、ネットワークの広帯域化と適切な網設計・運用管理によって、交換網と同等の音質のIP電話サービスが実現できている。さらに、今後はNGN[1][2]などによってHD (High Definition) 品質の映像配信も可能となると予想される。

一方、近年ではIPノードの消費電力量やネットワーク管理コストの増加への対策、高度な信頼性の実現、エンド・エンドでの帯域確保などIPネットワークの課題も顕在化し始めている。これらの課題は、各要素技術の発展によって一部解消されるものもあるが、後述するIPネットワークのアーキテクチャおよびプロトコル上の限界により、2015年以降にIPベースのネットワークインフラの抜本的な見直しが必要になる可能性がある。

また、日米欧では2015年から2020年あたりの実現を見据えて、既存のIPネットワークのアーキテクチャおよびプロトコルに囚われない、全く新しいネットワークアーキテクチャ（新世代ネットワーク）の研究が始まっている。これらの研究の目的は、従来研究がIPを前提としていたため下位互換性などに囚われ漸進的な対策に終始していたのに対し、全く白紙状態からの検討 (Clean Slate) を開始し、根本的に新しいコンセプトからスタートすることによって革新的な技術を創出することにある。新世代ネットワークの研究は、現時点では課題設定が具体的には定まっていない部分が多いが、上記で述べたようなIPネットワークの課題を解決する研究として期待されている。

以上のように、2006年から2007年にかけて新世代ネットワークの研究に関する機運が国内外で高まってきている。新世代ネットワークは PSTN(Public Switched Telephone

Networks)や ATM(Asynchronous Transfer Mode)のような回線交換ネットワーク技術が1990年代にパケット交換ネットワーク技術であるIPによって席巻されたような、技術や市場の大きな変化をもたらす可能性がある。本稿では新世代ネットワークの技術動向を調査し、トランスポート制御に関する課題を整理する。

## 2. 新世代ネットワークの研究動向

### 2.1 AKARI

AKARI[3]は独立行政法人情報通信研究機構（以下 NICT）が推進している研究プロジェクトで、日本における新世代ネットワークの研究の推進を目的としている。AKARIは新世代ネットワークアーキテクチャに関する概念設計書を2007年4月に発表しており、本仕様書は問題提起、要件、必要となる技術などを提示している。本仕様書にある、新世代ネットワークの要求を表1に示す。（AKARI概念仕様書設計書要約および2章より抜粋）

表1: AKARIにおける社会的要求と設計要求

#	要件	内容
1	大容量	現在に対して10年後には1000倍のトラフィック量。ペタビット級バックボーン、10G FTTH、e-Science。
2	スケーラブル	高性能サーバから単機能のセンサまで1000億デバイスがネットワークに接続。ネットワーク中のアドレスや状態の数が膨大になる。
3	オープン性	適切な競争原理による、自律的な発展。ユーザがサービスを提供し、ネットワークをユーザが制御できるようなユーザ志向性。
4	頑強性	医療、交通の信号制御などにも使える頼れるネットワーク。フォーナイン(99.99%)以上の可用性。
5	安全性	全ての有無線の接続に対して認証を行えるアーキテクチャ。災害時に応じた安全性と頑強性の発揮。トレーサビリティ

		イ。
6	多様性	特定のアプリケーションや利用傾向を前提としない多様な通信要求を前提。
7	偏在性	地球環境を様々な視点で広範にモニタリングするネットワーク。
8	統合単純化	各機能を詰め合わせるだけの統合ではなく、選択肢共通部分を括りだすことによって単純にする。
9	ネットワークモデル	サービス提供者や通信事業者に対する適切な経済的インセンティブが働くよう、ビジネス・コストモデルを含んで設計する。
10	省電力	トラフィック量の増加によるルータなどの消費電力の問題への対応。
11	発展性	社会の発展にあわせてネットワークも発展できる柔軟性が必要。自己変革できる、持続発展するアーキテクチャ。

FTTH: Fiber-to-the-Home

## 2.2 FIND

FIND はアメリカ国立科学財団 (NSF: National Science Foundation) が資金提供している研究で、現在のインターネットを置き換えるネットワーク (Future Internet) の検討を 2006 年より開始している。FIND としての明確な要件はないが、主にセキュリティや経済メカニズムなどに踏み込んだ研究が行われている。表 2 に FIND の研究プロジェクトをいくつか紹介する。

表 2: FIND のプロジェクト概要

プロジェクト名	内容
Postmodern Internet Architecture(PoMo)[4]	アドレスを用いないthin layerな通信方式。送信先ではなく、リンク (インタフェース) を指定してパケットを転送。
Secure Architecture for Networked Enterprise (SANE)[5]	Domain Controllerによって、グローバルなポリシーに応じてネットワークの接続を制御。
Network Fabric for Personal, Social and Urban Sensor Applications[6]	自動付与される goocode とセンサのデータをなどの情報を活用したアプリケーション。
Market Enabling Architecture[7]	インセンティブに基づいたネットワーク制御。

## 3. トランスポート制御における課題

本章では、上記のような新世代ネットワークの研究課題のうちトランスポート制御に関するものを整理する。

ATM ネットワークがパス接続を基本としたコネクション指向のネットワークであるのに対し、IP ネットワークはパスを意識しないコネクションレス指向のネットワークである。IP ネットワークはパケット転送開始の際に通信路の確保が不要で、広範囲で頻繁なデータ通信を行うネットワークにおいても中継ノードの経路制御負担が小さく、ネットワークの運用管理コストが低いなどの利点がある。

一方、IP ネットワークは以下のような課題がある。

- 管理性：ノード同士が自立的に経路情報を交換しているため、ネットワーク全体の経路を把握・制御することが困難である。また、トラフィック・エンジニアリングなど、ネットワーク全体のリソース状態などに応じた経路・リソースの最適化が困難である。
- 信頼性：各ノードは OSPF (Open Shortest Path First) などによる最短経路のみを利用し冗長経路などを保持しないため、サービス毎の経路選択や障害時の瞬時経路切り替えなどが困難である。

現在の IP ネットワークでは、MPLS (Multi-Protocol Label Switching) や EoE (Ether over Ether) など、レイヤ 2 (またはレイヤ 2.5) のパス接続を利用したコネクション指向のネットワークを IP の下位レイヤで用いてこれらの課題に対処しているが、IP レイヤにおけるエンド・エンドでの課題解消にはなっていない。

本章では、上記のような課題や、その他のトランスポートの課題を、「パケット転送」、「経路選択」、「アドレス体系」の 3 つの要素に整理する。

### 3.1 パケット転送

IP ノードはパケットの転送先を特定するために、32bit(IPv4)または 128bit(IPv6)アドレスの longest match 検索を行う。Longest match は exact match と比較すると検索処理が複雑だが、近年では高性能な検索エンジン等により同等の処理能力を得ることが可能となっている。今後もインタフェースの転送速度向上に応じて検索エンジンの処理能力を改善することで対応できる可能性はあるが、検索 bit 長の縮小や検索処理の exact match への単純化などによって、装置コストや消費電力の低減が期待できる。

### 3.2 経路制御

IP では送信元は送信先のアドレスを指定してパケットを送信するが、経路は指定しない。このため、送信元でサービス毎の経路選択や障害切り替えを行うことが困難である。

### 3.3 アドレス体系

インターネットの爆発的な普及に伴う IP アドレスの枯渇に対しては IPv6 アドレス利用などが検討されている。一方、IP ノードにおける経路テーブルの肥大化を防止するには、ネットワークの経路を拡張していく間もアドレス階層との整合性を保ち続ける必要がある。

## 4. 方式比較と評価

3章で述べた 3 つの要素に関して実現方式の例を述べ、それらの方式比較を行う。

### 4.1 パケット転送

パケット転送では、どの識別子で転送先を決定するかによって、以下の 3 つに分類する。

- 1-1. 送信先の識別子:最終的な送信先ノードの識別子(アドレス)に基づいてノードは転送先を決定する。転送先の検索は longest match で行う。IP はこの方式を取る。
- 1-2. パスの識別子:送信元から送信先までの経路(パス)の識別子に基づいてノードは転送先を決定する。転送先の検索は exact match で行う。MPLS はこの方式を取る。
- 1-3. 転送先の識別子:送信元が送信先までの各ノードの転送先インタフェースの識別子を指定し、ノードはその識別子に基づいて転送を決定する。転送先の検索は exact match で行う。FIND の PoMo はこの方式を取る。

1-2, 1-3 は exact match による検索のため、検索処理が longest match と比較すると単純になる。1-2 は端末間のエンド・エンドのパスの識別子をノードが経路テーブルとして保持すると、テーブルの容量が膨大になるため、パスの集約などの対策が必要となる。(C)は転送先インタフェースの数だけ識別子を保持する(実装としてはキャッシュ等を利用することも可)ため、(A)や(B)と比較するとネットワーク複雑化によるテーブル容量の肥大化を抑制できる。

#### 4.2 経路制御

経路制御では、送信元が経路を指定するかどうかによって、以下の2つに分類する。

- 2-1. 送信元が経路を指定しない:送信元が経路を指定せずにパケットを送信するため、経路選択はできない。IP はこの方式を取る。
  - 2-2. 送信元が経路を指定する:送信元の経路を指定してパケットを送信する。経路選択が容易となる。MPLS や PoMo はこの方式を取る。
- 2-2. は送信元が経路を指定するため、経路選択が容易になるが、パケット送信の前に送信元ノードと送信先ノードの間の経路の設定が必要となる。また、所望の送信先に対応する経路を選択する機能は別途必要となる。

#### 4.3 アドレス体系

アドレス体系では、アドレスがロケーションに依存するかどうかによって、以下の2つに分類する。

- 3-1. ロケーション依存:アドレスは、ネットワーク上のロケーションに応じて階層化されている。IP アドレスはこの方式を取る。
  - 3-2. ロケーション非依存:アドレスはロケーションには依存しない。PoMo はこの方式を取る。
- 3-2. はアドレスがロケーションに依存せず、経路とアドレス階層の整合性を保つ必要がないため、ノードへのアドレス割り当ての制限が(A)と比較して小さくなる。

#### 4.4 評価

上記分析を元に、通信方式として「アドレス指定」、「パス指定」、「インタフェース指定」の3方式について比較した。

- アドレス指定:送信元ノードは経路をしてせずに送信先ノードの識別子(アドレス)だけを指定してパケットを送信する。中継ノードは送信先ノードの識別子を longest match で検索して転送する。IP はこの方式を取る。
- パス指定:送信元ノードは経路をパス識別子として指定してパケットを送信する。この時、送信先ノードの識別子(アドレス)は、パス識別子を選択する際に利用するが、中継ノードでは参照しない。また、アドレスはロケーション依存でも非依存でも良い。MPLS はこれと同様の方式を取る。
- インタフェース指定:送信元ノードは経由する各ノードの転送先インタフェースを指定してパケットを送信する。中継ノードは指定された転送先インタフェースに応じてパケットを転送する。PoMo はこの方式を取る。

これらの方式を比較したものを表3に示す。

表3: 方式比較

方式	アドレス指定	パス指定	インタフェース指定
パケット転送	送信先ノードの識別子で転送 longest match	パスの識別子で転送 exact match	転送先インタフェースの識別子で転送 exact match
経路制御	送信元は経路を選択しない。	送信元が経路を指定する。	送信元が経路を指定する。
アドレス体系	ロケーション依存。	ロケーション依存/非依存	ロケーション非依存。

以上より、パス指定とインタフェース指定は、アドレス指定と比較して送信元による経路選択が可能であることと、アドレスのロケーション非依存が可能である点で有利となる。

また、パス指定とインタフェース指定を比較した場合、パス指定はパス識別子の配布やパス集約などのパス管理が必要となる。パス管理は運用コスト増につながる一方で、障害切り替えやトラフィック制御などが容易になる。インタフェース指定は上記のようなパス管理が不要であるが、ネットワークの管理性や信頼性を向上させるためには別途管理手法を考案する必要がある。

#### 5. まとめと今後の課題

本稿では、新世代ネットワークにおけるトランスポート制御の課題を整理し、トランスポート制御の要素であるパケット転送、経路制御、アドレス体系を分類した。また、

「アドレス指定」「パス指定」「インタフェース指定」の3方式に関してそれぞれの要素の比較を行った。

パス指定とインタフェース指定は、送信元が経路を選択できる方式であるため、アドレス指定と比較してトランスポート制御における管理性と信頼性を向上させることが容易となる。一方、大規模網におけるパス管理は課題として残るため、今後は効率的なパス管理手法などに関する検討を行う。

#### 参考文献

- [1] Functional Architecture of NGN”, 2007 IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E90-B, NO.5, (2007).
- [2] Keith Knightson, et al., “NGN Architecture: Generic Principals, Functional Architecture, and Implementation”, IEEE Communication Magazine, (2005).
- [3] AKARIプロジェクト／著, 「新世代ネットワークアーキテクチャ AKARI 概念設計書」, NICT 公開資料, (2007).
- [4] Bobby Bhattacharjee, et al., “Postmodern Internetwork Architecture”, NSF FIND Proposal, (2006).
- [5] Martin Casado, “SANE: A Protection Architecture for Enterprise Networks”, Usenix Security '06, pp. 137-151, (2006).
- [6] Andrew Parker, Sasank Reddy, Thomas Schmid, Kevin Chang, Ganeriwal Saurabh, Mani Srivastava, Mark Hansen, Jeff Burke, Deborah Estrin, Mark Allman, Vern Paxson, “Network System Challenges in Selective Sharing and Verification for Personal, Social, and Urban-Scale Sensing Applications”, Fifth Workshop on Hot Topics in Networks, (2006.).
- [7] Jean Walrand, Venkat Anantharam, John Musacchio, Shyam Parekh, “Collaborative Research: NeTS-FIND: Market-Enabling Network Architecture, NSF FIND Proposal, (2006).