

インターネットアーキテクチャの現状と 新しいアーキテクチャに関する議論

串田 高幸

日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所

概要

インターネットは、30年近く前にAPRAの研究としてネットワークが確立された。その後、多くの技術が研究されてきて実用化された。しかし、インターネットは、この間、当初のアーキテクチャから大幅な変更がなく、現在もおお多くの問題点を残しながら、共通の基盤として使われている。この論文は、Position Paperとして、インターネットのアーキテクチャに関する研究について、現状と方針及びアーキテクチャの問題点を述べて、今後、新しいアーキテクチャとして、どのような方針で研究を行なっていくべきかについて議論する。

Discussion on a new challenge theme for the next generation of the Internet architecture

Takayuki Kushida

IBM Research, Tokyo Research Laboratory

Abstract

The Internet was started in the operation over 30 years ago, and there are a lot of technologies that have been developed and deployed. Although the Internet is successfully deployed as a common infrastructure, there is no major architectural change. There are still a number of unresolved issues that exist until today. This is the position paper for the next generation of Internet architecture. The paper describes the previous related studies and results of the architecture and explores how the network research should be focused on studying the next generation of the Internet architecture.

1. はじめに

インターネットは、現在、社会の基盤として使われている。その一方で、インターネットの脆弱性および問題点が浮き彫りになってきている。しかし、根本的な対処が、十分になされていない。このことから、ネットワークを新しくするための研究開発が、次世代ネットワーク(NGN)として進められている[1][2][3][4][5][6]。この論文では、ネットワークの研究として、現在のインターネットの限界や問題を把握して、新しいネットワークアーキテクチャを作るための研究を行なうため、インターネットのアーキテクチャに関する説明と、アーキテクチャを作るための関連研究について言及して、新しいアーキテクチャは、どのようにすべきかについて議論する。

2. アーキテクチャ

2.1 最初のインターネット

当初、インターネットは、コンピュータと端末、あるいはコンピュータ同士を相互接続するために、データを細かい塊(データグラムあるいはパケット)に

して転送するためのプロトコルとしてAPRANETにおいて研究がはじめられた。この研究では、単にコンピュータ間を接続するに留まらず、ネットワーク間の相互接続するためにInter-networkという新しい概念が提案された[7]。さらにネットワークを相互接続するための問題点を解決するため、ゲートウェイと呼ばれたネットワークを相互接続する機器が実装された。この結果が、一般的なネットワークの機能となるパケット交換のサブネットのアイデアとなった。インターネットでは、1. メディア層において、全く異なったアドレス体系をすでに持っているため、すべてのネットワークで共通に使用できる単一のアドレス体系(IPアドレス)が必要となること。2. 各ネットワークでは、最大パケットサイズが全く異なる。そのため、途中のすべてのネットワークを通じて、最小サイズのパケットを送るようになるための、パケットサイズを決める必要があること。また、それよりも大きなサイズのパケットは、途中のサブネット境界において、分割する必要があること。

3. パケットの転送が成功したかどうかは、データを転送したサブネットごとに異なるので、多くのネットワークで転送されたデータが、うまく到達したかどうかを判定するため、トランスポートの実装を注意深く行なう必要があること。4. サブネットでは、データの損失や損傷が常に起こるので、エンド・エンドにおいて完全にデータを回復する機能が必要になること。5. 状態の情報、経路、フォールト検出及び分離は、各ネットワークにおいて全く異なるので、この情報を正確に得ること。

以上の5つの要件をもとにしてインターネット・アーキテクチャが構築された。

2.2 問題点

D. Clark は、インターネットのアーキテクチャとプロトコルの成功が、上記の5つの明確な目標をセットしたことと、それらの目標に対して、十分なアテンションをかけて研究したためであると、成功した理由について分析している [8]。一方でインターネット・アーキテクチャには次のような問題点がある。

- 基本的なサービスは、途中のノードではなく、ホストとゲートウェイだけで行なわれている
- 分散管理のための十分なツールがない
- 転送では、常に 40 バイトの固定長ヘッダのオーバーヘッドがある
- 損失したパケットを再送によって復旧することは、非効率的である
- 他のネットワークアーキテクチャと比べて、設置に比較的高いコストがかかる
- ホスト側に間違った実装をすると、ネットワークに大きなダメージを与える可能性がある。(例えば、TCP の輻輳制御)
- 会計及び管理機能が実装されていない。この機能は、当初から必要とされていたにもかかわらず、未だに実装に至っていない。
- 十分なバリエーションを持った実用的なシミュレータが、未だに実装できていない

インターネットにおける単純化されたコネクションレスのデータグラムでの転送は、ネットワークの相互接続という重要な問題を解いている。しかし、それよりも低いゴールであるはずの上記の問題が、解けていない。例えば、ネットワークの資源管理や

アカウントについては、V. Cerf や R. Kahn のインターネットの古い論文 [7] において、すでに重要な機能であることを言及されていた。それにもかかわらず、現在のインターネットのアーキテクチャで、未だに十分な解決方法を持っていない。

次世代アーキテクチャでは、単純なデータグラムというよりも、さらに効率的なデータ転送のビルディングブロックを持つ必要がある。このビルディングブロックの特徴は、特定のサービスのタイプを想定することがなく、またソースから目的に転送されているパケットの順番を識別するだけでよいその場合、“フロー”という単語として定義して、このステータスは、エンドホストに持つ必要がある。

2.3 QoS とキャッシュサーバ

ベストエフォートサービスの問題に対処するため、Diffserv のようなネットワークのルータにおいて、少しでも差別化できるサービスを行なうための技術が研究開発された [15]。一方で、Intserv として保証された QoS を統合したサービスとして提供する技術が研究開発された [16]。しかし、これらのサービスを提供するためには、すでに設置された、すべてのルータに新しい機能を付け加えて、さらに End-to-End において、この新しい方式に統一する必要がある。

一方で、パフォーマンスの問題は、アプリケーションとして Web のコンテンツやストリーミングコンテンツを既存のインターネットにおいてサービスしようとするすると顕著な問題となる。既存のインターネットをそのまま使うことを想定すると、コンテンツをキャッシュするためのサーバ (Edge Servers) をネットワークの各所に配置して、実質的な速度を改善する必要がある。この方式では、既存のインターネットのアーキテクチャを改善しないで、そのまま利用して外部に接続するサーバに付加的な価値をつけて、全体のサービスレベルを高くするアプローチがある。キャッシュサーバを利用することによって、本来のサーバと同じコンテンツを、ユーザからみてネットワーク上の近い場所にあるキャッシュサーバから転送してもらえらることになり、その結果、改善されたレスポンスタイムで、ユーザにコンテンツを転送する。 [17]。

2.4 End-to-End システムのデザイン

インターネットは、中間ノードではなく End-to-End システムによって、多くの機能を実現してきた。Saltzerらは、エンド・エンドシステムのデザインについて

報告している [9]. システム設計の基本的なデザインとして、機能の間に適切な境界を入れることは重要である。これは、通信の階層化においても同様であって、どの機能がどこに配置されるかを明確に決定する必要がある。例えば、通信システムの実装では、システム内に実装すること、クライアントに実装すること、あるいは両方に実装することのように、大きく3つの選択肢がある。基本は、アプリケーションの利用方式によって、コミュニケーション・システムのエンドポイントにおいて、正しく完全に機能を実装することである。これをエンド・エンドの議論として考える必要がある。

通信の低い階層では、信頼性を向上させる機能だけに単純化すべきである。例えば、まったく信頼性のないネットワークにおいて、数百のメッセージを送ったとき、その一つが落ちたことを想定する。仮に低い階層において、信頼性を上げることができれば、アプリケーションからみて、パフォーマンスが明確に上がったことになる。そのため、データ通信の信頼性は、パフォーマンスを基本にしている。仮に通信システムにまったく信頼性がなければ、ファイル転送では、エンド・エンドでの転送の失敗やチェックサム処理を使って、データを再送する必要がある。その結果、パフォーマンスが大きな影響を受ける。一方で、重複して送ったデータによって消費されたバンド幅と、データの矛盾をなくすため、配信の直前と直後に、完全なチェックをする余分の処理時間の間に遅延のバランスが依存する。**パフォーマンス：**

低い階層において、単純な信頼性を得るための機能があればよいという単純なことである。例えば、ファイルを送ったとき、正しく送られたか問い合わせをする必要がある。ファイルの長さによって送信する時間が十分に長くなる。低い階層でネットワークの信頼性を改善することが、アプリケーションのパフォーマンスに大きな影響を持つ。

配信の保障：

古くからのよく行なわれている研究として、配信の確認と保障の問題がある。受信者から送信者にすべてのメッセージの確認を簡単に戻す方法がある。APRANET は、メッセージが配信されたとき、例えば、Request For NextMessage(RFNM) パケットを送り返していた。この確認方法は、輻輳制御の一部としても有効である。(APRANET では、前の RFNM が送られてくるまで、同じターゲットに、次

のメッセージが送られないようにしていた。) 。しかし、APRANET で使ったアプリケーションは、この機能があまり助けになっていない。この原因は、メッセージをターゲットホストに配信することが、あまり重要な事柄ではなかったためである。

データのセキュアな送信：

エンド・エンドの、もう一つの技術エリアは、データを暗号化することである。この議論は、次の3項目がある。第一にデータが暗号化や復号化されるならば、必要なキーが、セキュアに管理されていること。第二に、データは、明確になっていて、ターゲットノードに渡された後でも攻撃されやすく、問題がアプリケーションにまで広がる懸念があること。第三は、メッセージを信頼性に関して、必ずアプリケーションでチェックすることである。もしアプリケーションが、エンド・エンドで暗号化されたならば、必要になる証明をチェックして、キー管理をしておき、そのデータは、アプリケーションの外側で不用意にさらされないようにする。

以上の要件を満たす必要はあるが、通信システムが、必ずしもすべてのトラフィックに自動暗号化の機能を用意しているわけではない。

終端の種別の識別：

終端のアプリケーションを識別する方法も重要である。完全なデータ転送を行なうことを想定すると、何度、再送してもよく、その結果、不安定なリンクに多くの時間がかかることになる。

もし終端のアプリケーションが事前にわかっているならば、必ずしも完全なデータ転送を行なう必要はない。特定のデザインが必要ということではなく、特定の機能を取り入れてアプリケーションを作るようにすることである。階層をもった通信プロトコルの要件及び必要な機能は、自明になってきているが、各階層に機能を割り当てる時の明確な基準がなく行なわれている。階層化は、単にモジュール化する要求の拡張として行なわれている。

以上の項目を考慮して、エンド・エンドのネットワーク・アーキテクチャを設計する必要がある。

2.5 理論的研究

F. Kelly らが、インターネットの数学を使った理論的研究について報告している [11]. この報告では、キューされた遅延のスケーリング、パケットスケールの振る舞い、分散アドミッション制御、短い転送に関する理論的な研究をまとめている。キュー遅延は、転送遅延に比べて小さくなくてもよく、ネット

ワーク内部において、トラフィッククラスの間
の差は、冗長であると結論づけている。その代わり単純なパケットネットワークでは、差別化できるサービスをサポートしてよいということも言及している。しかし、この理論的な研究は、まだ途中であって、最終結果が出たわけではない。一方、S. Floydらは、インターネットがインフラストラクチャーとして日々、利用されているため、十分なモデル化あるいは、シミュレーションの実験が必要であるが、できていないと報告している [12]。多くのノードが、自立的に動作するインターネットの実際の特性について、未だによくわかっていないために、アーキテクチャー及びプロトコルの改善に関して、正しい方向で研究する明確な指標が立てられないと結論している。

2.6 オーバーレイ・ネットワーク

インターネットは、固定間のユニキャストの二点間通信のサービスが基本である。しかし、アプリケーションにおいて、マルチキャスト、エニキャスト、ホストモビリティあるいは、より一般的な通信アブストラクションが役立つことがわかっている。一般にホストにおいて、受信ホストの識別を行なう必要はなく、受信ホストにおいてはモビリティをサポートする必要がない。一般的な通信アブストラクションは、将来、エンドユーザにとって役立つことがわかっているが、どのように実装したらよいかまだ明確になっていない。

I. Stoicaらは、Internet Indirection Infrastructure(i3)として新しいアブストラクションを定義して、オーバーレイネットワークの基本機能として提案している [14]。i3は、ランデブーを基本としたパワフルで柔軟な通信機能を提供しており、アプリケーションから簡単にこのアブストラクションを利用できる。i3では、受信動作と送信動作を切り離している。このサービスモデルは、極めて単純である。送信者は、logical id にパケットを送って、受信者は、id に送られたパケットに興味があるかを表現している。配信のサービスは、現在のインターネットと同じベストエフォートのサービスである。i3のサービスモデルは、IP マルチキャストとよく似ているが、i3のサービスへ加入は、「トリガー」を使って行なわれており、マルチキャストに比べて柔軟になっている。この理由は、受信側がパケットの経路制御をするからである。このサービスモデルには、次の2つの利点がある。一つは、アプリケーションレベルのモビ

リティ、エニキャストあるいは、基本サービス以外にも新しく組み立ててサービスを作ることができる。第二にインフラストラクチャーは、エンドホストにおいて効率的な木構造の責任を持つことができる。i3のサービスモデルは、ランデブーを基本とした通信アブストラクションによって実現される。i3を実装する上で、最も重要チャレンジは、パケットとトリガーの中に入っている識別子のidをうまくマッチングさせることである。

2.7 次世代インターネットの要件

インターネットは、到達性とヘテロジェネリシティという大きな2つの特徴によって成功していると、P. Molinero-Fernandezらは、論文で述べている [10]。

一般にIP(インターネット)は、下の層が持っている複雑な機構を隠して単純なサービスを提供することができる。もう一つは、IPルーターがネットワーク構成要素のなかで最も重要であって、ネットワーク内において、唯一のスイッチング・デバイスである。IPは、回線交換よりも単純であって、管理したり設置した場合に経済的になってもよい。

将来のIPを作っていく上で、次のことを要件として考える必要がある。

- IPネットワークの信頼性を十分に上げること。IPが、ユニバーサルなインフラストラクチャーになるならば、高い信頼性が必要である。これは、安定していて、強靱であって、トラフィックを柔軟に分割できる機能である。さらにトラフィック工学、故障管理、管理機能、パフォーマンス予測の機能が必要となる。
- IPが回線交換と相互接続すべきか。現在のインターネットは、パケット交換ネットワークであって、回線交換ネットワークと相互接続していない。回線交換のメリットを使うと考えると、ネットワークプロバイダーは、すでに設置していて強固で信頼性がある。また予測可能な回線交換ネットワークをわざわざ撤去して、それよりも複雑で信頼性が低く、より高価であり、まだ設置されていない技術に置き換えようとはしない。それよりも相互接続する方法を考えた方がよい。
- ネットワーク・エッジを交換すること。パケット交換で使っているスイッチは、リンクを効率的に扱っている。また、各リンクが持っているすべての使用可能なバンド幅をも

らってきて、エンドユーザへの応答の改善に使っている。それらを一緒にして、中心に容量を持った回線交換ネットワークを設置して転送する。

- コアネットワークを交換すること。
回線交換は、強固であって障害から素早い回復能力が必要である。回線交換は、低価格で大容量の光スイッチを採用している。そのため、データ転送を行なっているとき、少しの作業で素早く回復する。その結果、単位容量あたりの仕事量を少なくすることができる。
- 両方の交換機構を統合すること。
両方の交換機構を別々に動作させるよりもタイトに統合させる。例えば、パケット交換は、QoSをしなければならないし、回線交換は出てきたデータ量によって動的な応答をする必要がある。この場合、回線交換とパケット交換の2つの世界を相互接続するハイブリッドなスイッチを開発する。
- 何も無いところから、はじめること。
歴史的な理由で、現在のインターネットは成立している。もし今までのよい点や問題点が、十分にわかっているとして、最初から再度ネットワークを構築した場合、コアネットワークを回線交換にして、エッジをパケット交換にしてネットワークを構築することがよいかを検討することが必要である。

2.8 他の分野との融合

ネットワークだけで研究を進めていく以上に、コンピュータ・サイエンスの別な分野の研究との緊密な連携が必要となる。J. Considineらは、センサーネットワーク分野でネットワークとデータベースの連携する研究を報告している[13]。センサーネットワークのデータ転送は、一般に損失が高く、電源を極端にセーブすることが必要となることが多い。そのため、センサーのデータを集約して転送する必要がある。しかし、データの数や平均値のように複数のデータを集約して表現する値については、途中のデータ損失によって誤差が大きくなってしまふ。そのため、センサーで集めたデータを効率よく転送するための方式が必要となる。

他の分野との連携及び融合の研究は、センサーネットワークに限らず、次世代ネットワーク全体

で、今後、必要なアクティビティとなってくる。

3. 新しい世代のアーキテクチャ

D. Clarkらは、新しいネットワークに何が必要かその項目に関する研究を行なっている[18]。プロトコルは、階層によって設計されているが、例題やモデルでコンポーネント化することは、実装において効果的ではない。アーキテクチャのプロトコルの構成と、特定のエンドシステムやリレーノードでプロトコルを実装することは、明確に区別すべきである。アーキテクチャにおいて、機能モジュールを分割して記述し、個々のモジュールのセマンティクスや構文がプロトコルに対して効果的に利用すべきである。これは、プロトコル・アーキテクチャを分割することになる。しかし、事前にシステム工学の設計での分割は、必要ではない。階層アーキテクチャの場合、工学的な設計を行なうにあたって、今までの経験が強力なサポートになる。開発者は、プロトコル・アーキテクチャの構造を考えなくてもよい。この構造で作業することは、複雑な作業になったり、不必要な制約となる。実際に重要なアーキテクチャの原理は、順番に分解していく必要がある。

階層構造の問題点として、以下のことがわかっている。

- ファイルの転送の操作よりもデータの操作により多くのコストがよりかかっている。
- プレゼンテーション層が、すべての他の操作を合わせたものよりも、多くのコストがかかっている。
- プレゼンテーション層を効率的に実行するため、アプリケーション・プロセスを含んだ処理でパイプラインを保つことが必要になる。
- アプリケーション層のデータユニットは、パイプラインのユニットであって、現在、何のアプリケーションが必要であって、さらに今日のネットワーク技術だけではなくて、将来、変化することが可能なようにする。
- アーキテクチャにおいて、キーになることは、アプリケーション・レベルのフレーミングである。
- 重要な工学的な原理は、統合された処理階層によって行なわれ、データの操作に対して、アプリケーションで段階的にデータを処理することで、より効果的な実装が可能である。

D. Clarkらは、現在のインターネットの新しいアーキテクチャとして Knowledge Plane という新機能を追加することを提案している [19]。この Knowledge Plane が対処する問題として、欠陥の診断とその軽減、自動的な構成、オーバーレーネットワークに対するサポート、知識を使って拡張した侵入の検出という例を述べている。この研究は、まだアーキテクチャを作りはじめたばかりで、どのようにして Knowledge を表現して使用するか、拡張性をどのようにして持たせるか、さらに Knowledge をどのようにして分散させるか、さらに経済的にみて、どのように Knowledge Plane をネットワーク・サービス・プロバイダーに入れてもらうか、あるいは、悪意があつて信頼できないコンポーネントをどのように扱うか、といった課題については、今後、研究を行なう必要がある。

4. 終わりに

本稿では、インターネットのアーキテクチャに関しての、歴史、現在の問題点、関連する研究について述べてきた。現在のインターネットを超える新しいアーキテクチャと実装に関して、今後、集中して多くの基礎的な研究と実証できる研究をしていくことが重要である。このような新しいアーキテクチャの研究が、数多く行なわれることによって、ネットワークの新しい分野が開かれてくると考えられる。

参考文献

- [1] 松島裕一: 新世代ネットワークの研究開発に向けて, 情報処理, Vol. 47, No. 10, pp. 1072–1076 (2006).
- [2] 齊藤忠夫: 新世代ネットワークへの期待と課題, 情報処理, Vol. 47, No. 10, pp. 1077–1082 (2006).
- [3] 小林清澄: キャリア IP ネットワークの最新動向, 情報処理, Vol. 47, No. 10, pp. 1083–1090 (2006).
- [4] 村上龍郎, 中島伊佐美, 大羽巧: 世界のキャリア取り組む NGN の技術的要素, 情報処理, Vol. 47, No. 10, pp. 1091–1099 (2006).
- [5] 矢崎武己, 矢野大機, 能見元英: 新世代ネットワークを支えるルータ・スイッチと技術, 情報処理, Vol. 47, No. 10, pp. 1100–1105 (2006).
- [6] 浅羽登志哉: 新世代ネットワークとインターネット, 情報処理, Vol. 47, No. 10, pp. 1106–1111 (2006).
- [7] Cerf, V. G. and Kahn, R. E.: A Protocol for Packet Network Intercommunication, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 22, No. 5, pp. 00–00 (1974).
- [8] Clark, D. D.: The design philosophy of the DARPA internet protocols, *SIGCOMM*, Stanford, CA, ACM, pp. 106–114 (1988).
- [9] Saltzer, J. H., Reed, D. P. and Clark, D. D.: End-To-End Arguments in System Design, *ACM Transactions on Computer Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 277–288 (1984).
- [10] Molinero-Fernández, P., McKeown, N. and Zhang, H.: Is IP going to take over the world (of communications)?, *ACM HotNets-I*, Princeton, NJ (2002).
- [11] Kelly, F.: Models for a self-managed Internet (1999).
- [12] Floyd, S. and Kohler, E.: Internet Research Needs Better Models, *Proceedings of HorNets-I* (2002).
- [13] Considine, J., Li, F., Kollios, G. and Byers, J.: Approximate Aggregation Techniques for Sensor Databases, *ICDE '04: Proceedings of the 20th International Conference on Data Engineering*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, p. 449 (2004).
- [14] Stoica, I., Adkins, D., Zhuang, S., Shenker, S. and Surana, S.: Internet indirection infrastructure (2002).
- [15] Teitelbaum, B., Hares, S., Dunn, L., Neilson, R., Narayan, R. and Reichmeyer, F.: Internet2 qbone: Building a Testbed for Differentiated Services (1999).
- [16] Stoica, I. and Zhang, H.: Providing Guaranteed Services without Per Flow Management, *SIGCOMM*, pp. 81–94 (1999).
- [17] Krishnamurthy, B., Wills, C. and Zhang, Y.: the use and performance of content distribution networks, *Proceedings of ACM Workshop on Internet Measurement* (2001).
- [18] Clark, D. D. and Tennenhouse, D. L.: Architectural considerations for a new generation of protocols, *SIGCOMM '90: Proceedings of the ACM symposium on Communications architectures & protocols*, New York, NY, USA, ACM Press, pp. 200–208 (1990).
- [19] Clark, D. D., Partridge, C., Ramming, C. J. and Wroclawski, J. T.: A knowledge plane for the internet, *SIGCOMM '03: Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, New York, NY, USA, ACM Press, pp. 3–10 (2003).