

学校ネットワークの次世代技術 - IPv6 移行のシナリオ -

朴 紀秉

Ki-byung Park

parkkib@cs.reitaku-u.ac.jp

麗澤大学 国際経済学部国際経営学科

Reitaku University

The international School of Economics and Business Administration

概要：現在、実質的な IPv6(Internet Protocol Version 6 以下 IPv6 と表記する) Address の割り振りはすでに始まっている。今後徐々に IPv6 が普及すると考えられる。これにともなって、学校ネットワークも IPv6 ネットワークへの移行を考えなければならない。しかし、低予算で運用されている学校ネットワークの現状を考慮すると IPv6 への移行コストは押さえなければならない。本稿ではフリーの IPv6 スタックである KAME と Toolnet6 を実装し、IPv6 のネットワークを構築する。さらに、IPv4(Internet Protocol Version 4 以下 IPv4 と表記する)と IPv6 のファイル転送速度比較実験や外部接続実験を行い、学校ネットワークで用いられる PC-UNIX でのパフォーマンスを検討した。

キーワード： IPv6, K12, KIU

1. はじめに

現在、インターネットは人々の日常生活の中で一番多く使われている通信手段の一つになった。インターネットは日常生活に深く入り込んでいくし、急速に使用者とホストが増加している。そのため、全世界で幾何級数的に増加する IP アドレスに対する要求に対して現在の IPv4 address では対処が難しい。このような IPv4 address の不足問題と IPv4 での既知の問題を解決すべく IETF (Internet Engineering Task Force) は次世代インターネットプロトコル (IPng Internet Protocol Next generation) の開発を進めてきた。その結果として IPv6 が誕生した。この IPv6 を既存の IPv4 ベースの現在のインターネット上に構築したものが、6Bone という実験ネットワークであり、この 6Bone 上で実験的な運用が行われてきた。現在では、すでに APNIC などを実質的な IPv6 アドレスの割り当てが開始されている。いずれすべての IPv4 ネットワークを IPv6 ネットワークに移行しなければならないが、同時に全世界のネットワークを IPv6 に移行することは不可能である。そのため、IPv4 と IPv6 は何年間の共存期間があることが予想される。そこで、本研究では、IPv6 の仕様を概観したうえで、千葉県柏地域で展開する、学校教育ネットワークである柏インターネットユニオン (KIU) で学校内サ

ーバの OS として広く使われているフリーの PC-UNIX を使って小規模 IPv6 ネットワークを構築し、学校ネットワーク組織の IPv6 への移行の形態を示す。

2. IPv6 の概要

2.1 IPv6 の登場背景

IPv6 は、インターネットのプロトコルである IPv4 の後継バージョンとして、インターネットの爆発的な拡大によって生じた「IP アドレス枯渇問題」を解消することを第一の目的に 92 年に開発が始まった。94 年 12 月、IETF は 2008 年頃には IPv4 アドレスがたりなくなると報告した。その後 NAT 技術によるプライベート・アドレスが登場し、2018 年頃に先延ばしできると予測し直した。プライベート・アドレスとして利用できる IP アドレスは最大 1600 万で、この数は個々の組織が利用することだけを考えると十分な数である。しかし、複数企業の社内ネットワーク同士を相互接続したエクストラネットなどを構築するような場合、IP アドレスが衝突する可能性が高くなるため、個々のマシンを特定できなくなる。広大なアドレス空間 (2^{128} 個のアドレス空間) を持つ IPv6 を使えば、この問題を解決できる。このように IPv6 は IPv4 が抱えているアドレス枯渇問題を根本的に解決し、将来の新しい要求に応えることができるように拡張された

次世代型のインターネットプロトコルである。

2.2 IPv6 のアドレス空間

IPv4 では 32 ビット長だったアドレス空間は IPv6 では 128 ビット長に拡張されているため、32 ビットでは約 43 億個しか識別できなかったのに対し、128 ビットでは実に 340,282,366,920,938,463,374,607,431,768,211,456 個のアドレスが識別できる。これは人口 60 億人の惑星が 10 兆個あっても一人あたり 5,600 兆個ずつ割り当てられる数字である。

2.3 アドレス表記

IPv4 のアドレスでは、32 ビットのアドレスを 8 ビットごとに 10 進数で表したものを “.” (ピリオド) で区切って表記したが、IPv6 のアドレスは 128 ビットのアドレスを 16 ビットごとに 16 進数で表したものを “:” (コロン) で区切って以下のように表記する。

192.168.1.10 IPv4 のアドレス表記例
 3ffe:0505:2016:fedc:0220:417a:adf1:3210
 IPv6 のアドレス表記例

さらに、それぞれの区切りの最初に 0 がある場合は、その 0 の表記を省略できる。たとえば、つぎのようなアドレスは

3ffe:0000:0000:0000:0008:0900:200c:32e3
 つぎのように省略できる。

3ffe:0:0:0:8:900:200c:32e3

さらにアドレス中に 0 だけの列が続く場合、2 重コロン(::)によって 0 が続いているブロックが連続して存在することを示すことができる。従って、上記のアドレスはさらに次のように簡略することができる。

3ffe::8:900:200c:32e3

アドレス中のどこにある 0 でも 2 重コロンによる簡略はできるが、一つのアドレスの中では 1 度しか使えない。たとえば、次のようなアドレスは

0:0:0:0:0:0:1

次のように簡略化することができる。

::1

2.4 プレフィクスとホスト識別子

128 ビットの IPv6 アドレスは、前半 64 ビットと後半 64 ビットでその役割が異なる。前半の 64 ビットをプレフィクス(Prefix)、後半の 64 ビットをホスト識別子と呼び、プレフィクスは、ホストが接続しているネットワークやサブネットワークを示す識別子であり、ホス

ト識別子は接続しているネットワーク内での識別子になる。64 ビット長のプレフィクスは細分化することができて、柔軟なアドレスの割り当てや経路情報の抑制を実現できる。ホスト識別子は IEEE で標準化された EUI-64 というアドレス生成方法によって、48 ビット長の MAC アドレスから固有な 64 ビット長のアドレスを作る(図.1 参照)。

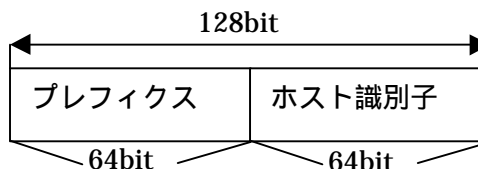


図 1.プレフィクスとホスト識別子

2.5 アドレスアーキテクチャ

IPv4 にはアドレスの種類としてユニキャスト(Unicast)アドレス、ブロードキャスト(Broadcast)アドレス、マルチキャスト(Multicast)アドレスがある。これに対して IPv6 のアドレスではブロードキャストアドレスがなくなって、エニーキャスト(Anycast)アドレスが新しく追加された。それによって IPv6 のアドレスは

ユニキャストアドレス

マルチキャストアドレス

エニーキャストアドレス

という種類になっている。エニーキャストアドレスはホストのグループを指定するアドレスだが、マルチキャストアドレスがグループに参加しているすべてのホストに配送されるのに対して、エニーキャストではある一つ以上のホストにパケットが到達すると、他のホストにはもうパケットが配送されないという特徴がある。このアドレスの特徴を利用すると、例えば、同一のコンテンツを提供する一群のサーバの内、最も近いサーバからデータを取ってくるといったことができると言われる。しかし、現在では有効に利用されている例はなく、有効な使用方法を探している段階である。

2.6 アドレススコープ

IPv6 では、パケットの到達範囲をアドレスの自身で決定することができる。その範囲に応じて以下の 3 種類のアドレスが決められている。

リンクローカルアドレス

サイトローカルアドレス

グローバルアドレス
 リンクローカルアドレス宛てのパケットは、インターフェースが接続されている物理的なデータリンク上にのみ到達する。ネットワークインターフェースが起動した時点で自動的に割り当てられ、利用可能となる。サイトローカルアドレスは、接続しているネットワークの管理組織によって、同一サイトであると判断された範囲で有効なアドレスである。グローバルアドレスは、インターネット上で一意性が保証されたアドレスであり、到達範囲がインターネット全体であるアドレスである。

2.7 IPv6 のヘッダフォーマット

IPv4 から IPv6 への変更点の中、IPv6 のヘッダフォーマットに関するものをまとめてみると次のようである。

ヘッダ形式の単純化

IPv4 ヘッダにあったフィールドが整理されプロトコル処理のオーバーヘッドが減少した。フィールドの一部は削除され、一部はオプションフィールドされた。

拡張ヘッダおよびオプションヘッダに対するサポートの強化

転送効率の向上、オプションの長さ制限の緩和、容易なオプション拡張といった特徴が追加された。

IPv4 Header:

Version	IHL	Type of Service	Total Length	
Identification			Flags	Fragment Offset
Time to Live	Protocol		Header Checksum	
Source Address				
Destination Address				
Options				Padding

IPv6 Header:

Version	Priority	Flow Label		
Payload Length		Next Header	Hop Limit	
Source Address				
Destination Address				

図.2 IPv4 ヘッダと IPv6 ヘッダの比較 (出典 : <http://www.sfc.wide.ad.jp>)

フローラベル機能

特定のトラフィックフローに属するパケットに、特殊処理のためのラベルの付けが可能となった。

認証とプライバシー

認証、データの完全性、および必要に応じて追加可能なデータの機密保持機構がサポートされた。

上で述べたように IPv6 のヘッダフォーマットは IPv4 から大きく変わった。IPv4 では 14 個あったフィールドが 8 個に減った(図.2 参照)。パケットの分割を制御する「フラグメント」やパケットの正否を示す「チェックサム」付加機能を実現する「オプション」などがなくなった。

これらの点は、いずれもルーターの負荷を軽減することが目的である。つまり、標準ヘッダから使用頻度の少ない付加的なフィールドを取り除くことで、必要のない処理に起因するオーバーヘッドによって通常のパケット処理が複雑になってしまうことがないようにしたのである。IPv6 のヘッダ長は 320 ビット固定になったため、192 ビット程度だった IPv4 より約 1.5 倍に増えたが、メモリ消費量やルータの処理時間が増えるわけではない。フィールドが減ったためメモリに格納すべき情報は少ないし、オプションがないため無駄な処理が減るためである。

2.8 IPv6 の割り当て・割り振りの階層

IPv4 でのアドレス割り振りは、インターネットでの効率的経路制御を保証できるほどに階層的になっていない。クラスフル割り振りによる非効率的なアドレスの使用は経路表に含まれる経路制御エントリが多くなりすぎるという事態を招いた。さらに、ネットワークポロジが複雑化したことにより、IPv4 のプレフィクスが異なる経路を通じて何度も公示されるという現象が生じるようになった。IPv4 で生じた問題を IPv6 で繰り返さないようにするため、確実なポリシーとガイドラインによって、インターネット上で公示されるトップレベルプレフィクスの数を抑制する必要がある。そのため、RFC2374 は、集約可能なアドレスをトポロジに基づく階層形式で編成するよう規定している。APNIC の “ Provisional IPv6 Assignment and Allocation Policy Document ” によるとアドレス階層のフォーマット境界とプレフィクス境界は図.3 のようになる。

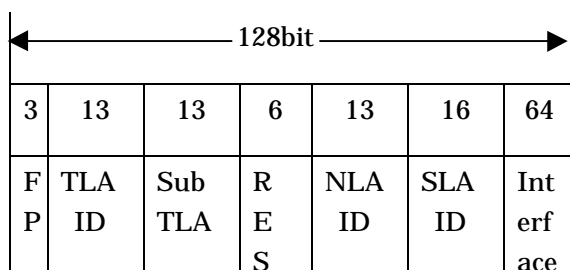


図3.フォーマット境界

APNIC では 1999 年 8 月から APNIC 会員に対して sTLA¹の割り振りを行っている。1999 年 12 月現在、7 つの sTLA が割り振られている。その内三つは日本の WIDE, JENS, NTT-JP に対するものである。

3. IPv6 への移行

3.1 移行の流れ

インターネット上のすべてのネットワークを一気に IPv6 に移行するのは現実的に不可能なことであるため、次のような過程を経て移行されると予想される。

すべてのネットワークが IPv4 のネットワークの段階

IPv4 のネットワークを利用したトンネリングによる IPv6 ホスト間通信

IPv6 化が進んでほとんどのネットワークが IPv6 のネットワークになり、IPv6 ネットワークを利用したトンネリングによる IPv4 ホスト間通信

完全に IPv6 のネットワーク化

以上のように IPv6 化の進み具合によって IPv4 との共存期間が違って来るのだが、かなり長い期間にかけて、IPv4 との混在は避けて通らないのが必須不可欠である。そのため、IPv4 との共存の方法が必要になってくる。

3.2 移行に使われる機構

3.2.1 デュアル IP 層

IPv4 と IPv6 を共存させるために、両方のプロトコルスタックを同時に実装するデュアル IP スタックを用いる(図.4 参照)。デュアルスタックを実装した「IPv6/IPv4 ノード」は IPv4 パケットと IPv6 パケットの両方を送受信することができるので、IPv4 パケットによる IPv4 ノードとの相互通信、および IPv6 パケットによる IPv6 ノードとの相互通信が可

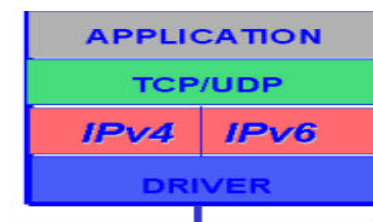


図.4 デュアル IP スタック

能である。

3.2.2 トンネリング

トンネリングとは、あるプロトコルの情報を別のアーキテクチャのフレームまたはパケット内部にカプセル化することである。

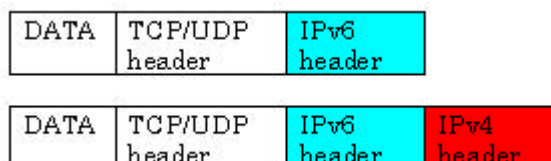


図.5 カプセル化(IPv6 IPv4)

前述のように IPv4 から IPv6 への移行の過程で IPv4 と IPv6 の混在した環境では IPv6 のホスト間通信は IPv4 のネットワークを経由して通信することになる。そこで利用される技術がトンネリングである。つまり、IPv6/IPv4 トンネリングは、IPv6 情報を IPv4 データグラム内にカプセル化し、既存の IPv4 ネットワークを利用して IPv6 パケットを送送することである(図.5 参照)。

4. 実装および実験

4.1 各種 IPv6 実装

IPv6 スタックを設置可能な環境は FreeBSD, Solaris, Linux, Windows NT4.0/98/95 などがある。本実験には、ルータは FreeBSD, PC ホストは Windows98 および FreeBSD を選択し、IPv6 スタックを設置した。FreeBSD の IPv6 スタックには INRIA と KAME があるが、現在の開発状況、安定性、およびアプリケーションの支援などを考慮した結果、KAME を選択した。Windows の IPv6 スタックには Microsoft 社の製品と Hitachi 社の Toolnet6 があるが、Microsoft 社のものは Windows NT4.0 しかサポートしてない。そのため、サポートされている NIC が限られているものの、Windows NT4.0/98/95 をサポートしている Hitachi 社の Toolnet6 を Windows98 に設置した。

4.1.1 KAME

¹ sTLA は sub-TLA である。詳細は参考資料を参照。

KAME は日本の七つの企業が共同で開発し、無料で提供している各種 BSD の IPv6/IPsec 実装である。この実装は、もともと Hydrangea という名前で WIDE Project の v6 分科会によって開発されていたものである。KAME とは Project のオフィスがある KArigoME を省略したものである。

4.1.2 Toolnet6

Toolnet6 は既存の IPv4 アプリケーションを変更することなしに、IPv6 アプリケーションとして利用できるのが特徴である。既存の IPv4 アプリケーションを利用して IPv6 ホストに通信する場合、Toolnet6 によって自動的に IPv4/IPv6 変換が行われ、IPv6 ホストと通信することが可能となる(図.6 参照)。

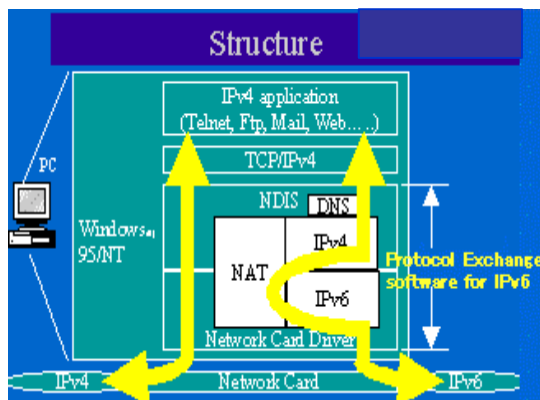


図.6 Toolnet6

4.1.3 実験環境

実験用に用いたホスト PC のスペックを以下に示す。

- IPv6 /IPv4 Router
- OS:FreeBSD3.2
- CPU:Celeron366Mhz
- Memory:64MB
- NIC:3COM509
- IPv6 stack:kame-19990810-fbsd32-stable
- IPv6/IPv4 Host1
- OS:FreeBSD
- CPU:Pentium200MHz
- Memory:128MB
- NIC: ELECOM LD-PNE20/TA
- IPv6 stack:kame-19990810-fbsd32-stable
- IPv6/IPv4 Host2
- OS:Windows98
- CPU:Pentium166Mhz
- Memory:64MB
- NIC: ELECOM LD-PNE20/TA
- IPv6 stack:Toolnet6
- HUB; Centre Com MR820TR

4.2 ファイル転送実験

目的

IPv4 と IPv6 のパケットの処理速度を比較し、IPv6 のヘッダー形式の単純化によるプロトコル処理のオーバーヘッドの減少の検証およびファイル転送時の安定性を確認する。

方法

任意で作成した 10Mbyte、100Mbyte のファイルを同一の環境で転送し、それぞれの転送速度を比較する^{2*}。Router1 から Host1 へ HUB を経由して、それぞれ 40 回ずつ行う。

```
IPv6 /usr/local/v6/bin/ftp
IPv4 /usr/bin/ftp
```

結果

表.1 でみるように比較的 IPv6 の方が 10Mbyte,100Mbyte 両方とも平均転送速度が速いという結果が出た。そして、IPv6 の場合 100Mbyte のファイルを転送した時は転送速度が比較的一定しているが、10Mbyte のファイルを転送した時は標準偏差が比較的大きい。

表.1

	10Mbyte		100Mbyte	
	IPv4	IPv6	IPv4	IPv6
平均速度	602.49 KB/s	708.00 KB/s	508.31 KB/s	520.19 KB/s
分散	2175	16091	1975	1059
標準偏差	46.64	126.85	44.44	32.54

考察

IPv6 のヘッダ長は 320 ビットに増えたにもかかわらず、IPv4 より平均転送速度が早いという実験結果が出た。それは、IPv6 ヘッダはフィールドが減ったためメモリに格納すべき情報は少ないし、オプションがないため無駄な処理が減るということを推測できる。

4.3 6Bone への接続

4.3.1 6Bone とは？

IETF の IPv6 開発作業から生まれた実験ネ

² FTP によるファイル転送を行なった。使用したコマンドはそれぞれ、IPv6.. /usr/local/v6/bin/ftp, IPv4.. /usr/bin/ftp である。

ットワークで、既存のインターネットと並行的に運用している。1999年12月現在42ヶ国が参加している。日本の6Boneは6Bone-JPである。本外部接続実験ではIMASYを通じて6Bone-JPへ接続する。

4.3.2 IPv6 ネットワーク構成

本実験ではルーター台とホスト2台で小規模ネットワークを構成し、6Bone-JPへの接続を試みる。ネットワーク構成図は図.7のようである。

4.3.3 DNS の設定

本実験では KAME がサポートしている BIND8 を実装し、DNS の設定を行う。IPv6 での DNS の運用は、ほとんど IPv4 での運用とあまり変わりがない。128bit の IPv6 address をサポートするために正引き用に新しいリソースレコードが一つ加えられ、逆引き用に使用されるサブドメインが規定されたのみである。DNS の IPv6 用リソースレコードは AAAA である。PTR レコードは、IPv6 アドレスを逆順に 4bits 毎に . で区切って、最後は IP6.INT で終る（設定例は参考資料を参照）。

本実験で割り当てられた IPv6 のアドレス空間は 3ffe:505:2016::/48 である。トンネリングには以下の様に gifconfig コマンドを使う。
 #gifconfig gif? 始点の IPv4 アドレス 終点の IPv4 アドレス
 # ifconfig gif? inet6 始点の IPv6 アドレス 終点の IPv6 アドレス prefixlen

5. 移行のシナリオ

学校ネットワークが IPv6 へ移行する時期は IPv6 の仕様が Fix されたのちルーターなどのネットワーク機器やプロバイダ等が IPv6 に対応した段階であろう。前述のように IPv6 への移行と言っても、IPv4 のネットワークを一気に無くして完全に IPv6 ネットワークに移行するわけではない。従って、学校ネットワークにおいても IPv4 との共存期間は数年間に及ぶと予想される。その方法には本稿で

示した KAME や Toolnet6 のようなフリーの IPv4/IPv6 デュアルスタックの実装による方法と Hitachi 社の NR60 のような IPv4/IPv6 アドレス変換機能付専用ルータを購入する方法などがあるが、その選択はコストパフォーマンスなどを考慮して学校ネットワークの運用団体が決めることになるろう。

6. おわりに

IPv6 は、実験レベルから APNIC が 1999 年 8 月から APNIC 会員に対して sTLA の割り振りを行っているように実用的な利用が始まっている。しかし、IPv6 をサポートしているルーターなどの機器や OS が何社から出ているがまだ高価である。そして、AAAA のレコードの代わりにまた A6 レコードが現在提案されているように IPv6 の仕様や KAME の仕様も完全に確定されたわけではない。Windows などの OS やルーターなどの機器が IPv6 を標準でサポートされないと IPv6 への移行のスピードは遅くなる。そのため、学校ネットワーク組織の管理者が IPv6 への移行においてのコストなどを考えた時、IPv6 の仕様が確定し、OS へのサポートが確立される時期などを考慮し、IPv6 への移行の時期を選択する必要がある。IPv6 は単なる IPv4 を改良したのではなく、IPv6 から生まれる経済効果はもちろん新しい学校教育環境を創造する基盤になるに違いない。

参考 URL

- Implementing IPv6 by Mark A.Miller
1999 SHOEISHA
- <http://www.6bone.net>
- <http://www.v6.sfc.wide.ad.jp>
- <http://www.kame.net/>
- <http://www.ipv6.org>
- <http://www.6bone.ne.kr>
- <http://hitachi.co.jp/Prod/comp/network/prxv6-j.htm>
- <http://www.apnic.net/drafts/ipv6/ipv6-policy-280599.html>
- <http://www.ietf.org/rfc.html>

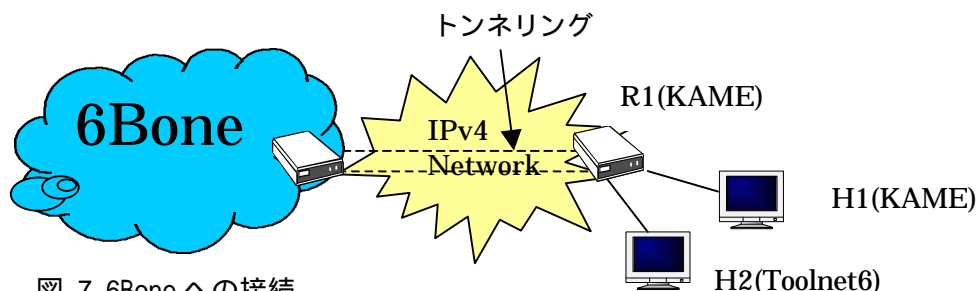


図.7 6Bone への接続