

SA46T:IPv4 アドレス枯渇後の IPv6 移行と IPv4 継続利用を両立するカプセル化技術

松平 直樹
富士通株式会社

APNIC など RIR に於ける IPv4 アドレス枯渇が現実となり、事業者の保有する IPv4 アドレス枯渇も時間の問題となった。IPv4 アドレス枯渇後は、IPv6 only な状況が自然発生する。このような IPv4 アドレス枯渇後の状況を踏まえた SA46T と呼ぶカプセル化技術を提案する。SA46T の本質は以下の 2 点である。(1) IPv4 アドレスのロケータとアイデンティファイアの関係そのまま IPv6 アドレス空間にマッピングすることにより、従来のカプセル化技術の課題であった設定数が膨大になる問題を解決した。(2) IPv6 アドレスのロケータ部に、IPv4 ネットワークの識別子を追加することにより、約 4.3 億個の IPv4 ネットワークを IPv6 バックボーンネットワークに多重化可能とした。実装の開発と、LAN 環境及び広域環境での実証実験を通じ、SA46T が実際に動作し、運用出来ることを証明した。さらに、独立に開発された実装間で相互接続可能であることも証明した。SA46T はシンプルな技術であり、十分実用可能であることを示した。SA46T により、IPv6 移行と IPv4 継続利用を両立できる。特に、IPv4-IPv6 変換技術と相性の悪い IPv4 アプリケーションの継続利用に貢献できる可能性が高そうである。

SA46T: Encapsulation Technology which enable both transition to IPv6 and IPv4 continuous use

Naoki Matsuhira
Fujitsu Limited

Exhaustion of IPv4 addresses at RIRs such as APNIC became real, exhaustion of IPv4 addresses at provider will become real soon. After the exhaustion of IPv4 addresses, IPv6 only situation will be a natural thing. Based on such situation of IPv4 addresses exhaustion, encapsulation technology called SA46T is proposed. Following two points are the essences of SA46T. (1) By mapping the locator and identifier relationship of IPv4 address directory to the IPv6 address space, then solves the issue of number of configurations of existing encapsulation technology. (2) By adding the identifier of IPv4 network to locator part of IPv6 address, multiplexing is enabled approximately 430 million IPv4 networks to a single IPv6 backbone network. Through developing an implementation of SA46T, and operation as field demonstration both LAN and WAN environment, SA46T is proved to actually work and operate. And also, SA46T is proved that have interoperability between the implementations which are developed independently. SA46T is a simple technology, and shown that actually use. SA46T enable both transition to IPv6 and continuous use of IPv4. In particular, can contribute for continuous use of IPv4 applications which are unfriendly with IPv4-IPv6 translation technology.

1 はじめに

IPv4 アドレスの枯渇以後の状況を踏まえた移行技術として、SA46T と呼ぶ技術を提案する。SA46T は、IPv6 移行と IPv4 継続利用を両立するカプセル化技術である。本論では、まず、IPv4 アドレス枯渇による環境変化を述べた後、SA46T 技術について述べる。さらに、SA46T の実装と実証実験、相互接続試験についても述べる。最後に、本技術を評価する。

2 IPv4 アドレス枯渇後の移行技術の課題

2.1 IPv6 及び移行技術と IPv4 アドレス枯渇

IPv4 アドレス枯渇が IETF(The Internet Engineering Task Force) で予測されたのは 1992 年である。この問題の抜本解として IPv6 が検討され、1996 年に第一段階の標準化 (Proposed Standard) が完了、RFC1883[1] として発行された。

IPv6 の標準化と並行して、IPv4 から IPv6 への移行技術についても検討が進められ、RFC1933[2]として発行された。これら移行技術は、(1) Dual Stack (IPv4/IPv6 双方に対応)、(2) カプセル化、(3) IPv4-IPv6 変換技術(トランスレータ)の3つに分類されている。

IETF での精力的な検討と、盛んな実装開発が行われ、2001年にはマルチベンダ環境でのネットワーク構築が可能 [3] となったが、IPv6 の普及は順調とは言えず、ついに 2011 年 2 月に IANA(Internet Assigned Numbers Authority) で、2011 年 4 月に APNIC(Asia Pacific Network Information Centre) で、そして 2012 年 9 月には RIPE NCC(Reseaux IP Europeens Network Coordination Centre) で IPv4 アドレスが枯渇した。事業者の保有する IPv4 アドレスが枯渇するのは時間の問題とみられる。

2.2 IPv4 アドレス枯渇が移行技術に与える影響

IPv4 アドレスの枯渇後には、IPv6 only なノードが自然発生する。これは、Dual Stack の構成を取れない場合が生じること、従って、IPv6 only の状況を前提としなければならない状況に変化したことを意味する。この状況変化により、これからは、カプセル化及び IPv4-IPv6 変換技術の重要性が相対的に高まることとなる。

具体的には、ルータもしくはネットワークが IPv6 only となる場合、IPv4 を中継するには、IPv4 over IPv6 のカプセル化技術が必須になる。一方、ホストが IPv6 only となる場合、IPv4 ホストとの通信を行う際には、IPv4-IPv6 変換技術が必須になる。

本論は、このうち、IPv4 over IPv6 技術を対象にする。

2.3 既存のカプセル化の問題点

IPv4 over IPv6 の既存技術は、RFC2473[4] で記載されている、Generic Packet Tunneling in IPv6 である。また、カプセル化として古くから使われている技術は、RFC1853[5] で記載されている、IP in IP Tunneling である。

一般にカプセル化には、主に 2 つの問題がある。ひとつは、再帰的なカプセル化が起こりうるなど、

管理が難しいこと、もうひとつは、設定数が多いことである。具体的に、 N 個の拠点をフルメッシュで接続するための設定数は、 $N(N-1) = N^2 - N$ となり、設定数がべき乗で増加する。

これらの理由により、既存のカプセル化技術は、スケーラビリティを有しているとは言い難いと言えよう。大規模に適用するのは容易でなく、部分的もしくは暫定的に使う技術として位置づけざるをえない。しかも、新たに拠点を追加する際に、既存の拠点での設定追加も必要になる。これは運用上、致命的な問題と言え、既存のカプセル化技術に依存することは難しいと考えられる。

なお、RFC2473 では、Tunnel Encapsulation Limit Option が設けられ、カプセル化段数を制限できる。

3 SA46T 技術

SA46T(Stateless Automatic IPv4 over IPv6 Encapsulation / Decapsulation Technology) は、上記したカプセル化の問題点を抜本的に解決した、全く新しい発想によるカプセル化技術である。以下、その技術について述べる。

3.1 SA46T の導入位置と処理対象

3.1.1 ネットワーク構成

一般に、ネットワークは、バックボーンネットワークと複数のスタブネットワークが接続された形態とモデル化できる。

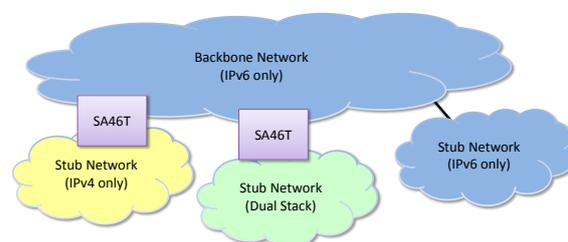


図 1: ネットワーク構成

図 1 は、SA46T の導入位置を示すためのネットワーク図である。スタブネットワークは IPv4 only、Dual、IPv6 only の 3 種に分類できる。

SA46TはバックボーンネットワークとIPv4ホストが存在するスタブネットワークの境界に導入する。スタブネットワークがIPv6 onlyであるなら、SA46Tの導入は必要ない。SA46Tにより、IPv4パケットがIPv6にカプセル化されるため、バックボーンネットワークをIPv6 only化できる。

なお、エッジにSA46Tを導入するという導入ポリシーにより、再帰的トンネルの発生を回避できる。SA46Tの使い方を判り易くする効果もある。RFC2473のTunnel Encapsulation Limit Option相当の機能も不要となるので、Tunnel MTUをこのオプション分短くせずに済む効果もある。

3.1.2 SA46Tが処理対象とする範囲

表1は、エンドホスト間で、IPv4/IPv6どちらのプロトコルスタックが用いられるかを示したものである。IPv4とIPv6双方が利用可能な場合はIPv6が用いられる。

表1: 使用されるプロトコルスタック

	IPv6 only	Dual Stack	IPv4 only
IPv6 only	IPv6	IPv6	-
Dual Stack	IPv6	IPv6	IPv4
IPv4 only	-	IPv4	IPv4

SA46Tが機能提供するのは、IPv4 onlyホストとIPv4 onlyホスト間の通信、またはIPv4 onlyホストとDual Stackホスト間の通信で、表1に於いて使用されるプロトコルスタックがIPv4と記載される範囲である。IPv6と記載される通信にSA46Tは関与しない。

IPv4 onlyホストとIPv6 onlyホスト間は、このままでは通信できない。このようなケースは、NAT-PT[6]やNAT-64[7]等の、IPv4-IPv6プロトコル変換技術を用いれば良い。SA46Tは運用に於ける創意工夫を重視し、必要に応じ、自由に組み合わせ可能とすることを重視している。SA46TはこれらIPv4-IPv6プロトコル変換技術と機能的に直交しており、自由に組み合わせ可能である。

3.2 SA46T プロトコル

3.2.1 カプセル化

SA46Tは、IPv4 over IPv6技術であり、IPv4パケットをIPv6でカプセル化することは一般のカプセル化技術と違いは無い。

3.2.2 IPアドレスの解決/生成

カプセル化の際、Outer headerのIPアドレスの解決もしくは生成が必要となる。Outer headerのIPv6アドレスを、SA46Tアドレスと呼ぶ。SA46Tのアドレスの形式を図2に示す。

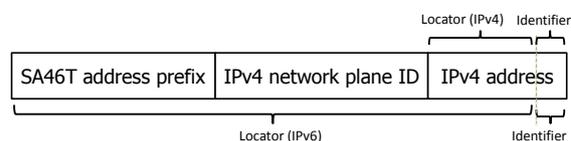


図2: SA46T アドレス

SA46Tアドレスは、SA46T prefix、IPv4 network plane ID、IPv4アドレスから構成される。

SA46T prefix

SA46Tアドレスのprefix

IPv4 network plane ID

IPv4ネットワークの識別子

IPv4 address

Inner headerのIPv4アドレス

3.3 SA46Tのアーキテクチャ

SA46Tのアーキテクチャの本質は、アドレッシングとルーティングにあり、そのポイントは以下の2点である。

1. IPv4アドレスをロケータとアイデンティファイアの関係を維持したままIPv6アドレス空間にマッピング
2. IPv4 network plane IDのロケータ部への埋め込みによる複数IPv4ネットワークのIPv6ネットワークへの多重化

3.3.1 マッピングとルーティング

IP アドレスは、ロケータとアイデンティファイアから構成され、ロケータ部を経路として広告する。インタフェースは、ロケータとアイデンティファイア全体で識別される。この構造は IPv4 でも IPv6 でも変わらない。IP の基本的なアーキテクチャである。

SA46T は、IPv4 アドレスのロケータとアイデンティファイアの境界を、そのまま維持して IPv6 空間にマッピングする。IPv4 サブネットのアイデンティファイアが n bit のとき、ロケータが $32 - n$ bit となる。これを、SA46T ではロケータを $128 - n$ bit、アイデンティファイアを n bit として IPv6 空間にマッピングする。

経路は、IPv4 では、 $32 - n$ bit 長の prefix になるが、IPv6 では、 $128 - n$ bit 長の prefix となる。IP アドレス長は異なるが、その意味するところは同じである。

経路数は、Dual stack で運用する場合と同一になる。Dual stack 環境では、IPv6 の経路数と IPv4 の経路数の合計が総経路数になる。SA46T 環境では、IPv6 の経路数に加え、IPv4 の経路を SA46T のマッピングルールに則って変換された IPv6 の経路数が総経路数となる。従って、総経路数は変わらない。

3.3.2 IPv4 network plane ID

IPv4 では、グローバルユニークでないプライベートアドレスが定義されている。これを、IPv6 空間にて、グローバルユニークにするために付与する情報が、IPv4 network plane ID である。

IPv4 network plane ID が 32bit の場合で、約 4.3 億個の IPv4 ネットワークを多重化できる。事実上、上限を意識する必要がなくなると言えるであろう。

3.4 設定について

SA46T の設定に必要な情報は、SA46T address prefix の値、IPv4 network plane ID の値、そして、prefix 長の 3 つで、通常、1 行で記述する。

つまり、SA46T address prefix + IPv4 network plane ID/prefix length である。

SA46T 配下の IPv4 サブネットあたり 1 行なので、 N 個の IPv4 サブネットを有するネットワーク全体で、 N 個の設定が必要なだけである。

新たに IPv4 サブネットを接続する際に必要な設定は、新規に追加するインタフェースを有する SA46T にのみ 1 行の設定が必要になるだけである。既存の SA46T への設定変更は一切必要ない。

このように、あくまで、新たに接続するスタブネットワークに対する設定のみでよく、スケーラビリティを有する技術と言える。

3.5 SA46T と従来のカプセル化技術との違い

従来のカプセル化技術は、インタフェースとインタフェースを結ぶもので、仮想的なリンクを生成する技術である。点と点を結ぶ、従って、始点と終点の設定をそれぞれ行う必要が生じるので、 N^2 もの設定数を必要とする。新規追加に際しても、それぞれ相手方の点の情報が必要になるので、既存の点に於いても設定が必要となる。

一方、SA46T は、あくまで、IPv4 アドレスをロケータとアイデンティファイアの構造を維持したまま IPv6 アドレス空間にマッピングした技術であり、仮想的なリンクを生成する技術ではない。マッピングルールは一意であり変換は直ちに可能となる。あとはマッピングした経路情報をルーティングプロトコルにより伝搬させることによりルーティング可能とする。SA46T に於ける設定情報は、実は、自身のサブネット情報そのものであり、それをルーティングプロトコルで伝えるのである。

IPv4 network plane ID により、IPv4 アドレスが同じであっても、異なるネットワークプレフィックスとして表現させることができる。あるスタブネットワークに接続される SA46T に於いて、IPv4 network plane ID がある値を設定するということは、同じ値が設定されている面に、そのスタブネットワークを参加させるということを意味する。IPv4 network plane ID は、IPv4 サブネットが属するグループの番号であり、顧客番号もしくは配線番号と読んでも差し支えない。同一の値を設定すれば済むので判り易く、間違えにくい。

以上から、SA46T は全く新しい発想によるカプセル化技術であると言えよう。

4 SA46T の特徴

以下に、SA46T の特徴を示す。

(1) Stateless

状態を持たないため、状態管理対象の上限など、数の制限が無く、かつ、状態不一致がないので信頼性も高い。

(2) IPv6 only による運用コストの削減が可能

プロトコルスタックを複数運用するより、シングルスタックのみの方が、運用コストは低い。IPv4 アドレスが枯渇した今日、選択肢となるのは IPv6 のみである。

(3) 少ない設定数で済む (N^2 でなく N)

既に述べたように、設定数が少ないのでスタブネットワークの数が多い大規模ネットワークにも導入しやすい。拠点数が増大すればするほど、その効果は大きい。

(4) 拠点追加に際し既設拠点の設定変更が不要

既に述べた通り、新たに拠点を追加する場合、その拠点での設定のみで十分であり、既設拠点の設定変更は必要ない。

(5) 特別なプロトコルを必要としない

スタブネットワーク、バックボーンネットワーク双方に於いて、OSPF(Open Shortest Path First) や IS-IS、BGP(Border Gateway Protocol) など、既存のルーティングプロトコルを拡張・変更することなしに、そのまま利用できる。

(6) 任意の Layer2 技術上で動作 (有線、無線)

Layer3 の技術であり、Ethernet や IEEE802.11 の無線 LAN でも動作する。

(7) 数億の IPv4 ネットワークの多重化が可能

plane ID により、IPv4 ネットワークの多重化が可能となる。plane ID に 32bit 割り当てた場合で、4.3 億の多重化が可能となる。

(8) IPv4 の運用を容易に停止可能

スタブネットワークに IPv4 ホストが無くなれば、SA46T の使命は完了する。この際、SA46T のみを取り除くだけで良い。

(9) マルチリンク構成による冗長構成が可能

スタブネットワークとバックボーンネットワークを複数の SA46T を経由して接続出来る。この際の SA46T の設定は全く同じものとなる。どちらのリンクが用いられるかは、ルーティングプロトコルが決める。ECMP(Equal Cost Multi Path) などによる負荷分散も可能である。なお、従来のカプセル化技術では冗長構成を取るのとは不可能である。

(10) 既存ネットワークへの導入も容易

DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol) などのブロードキャストトラフィックの収容が無ければ¹、既存ネットワークを変更せず、SA46T を追加するのみで、バックボーンネットワークの IPv6 only 化が可能となる。

(11) トラブルシューティングの容易さ

SA46T でカプセル化された IPv6 パケットの IPv6 アドレスを見れば、そこに IPv4 アドレスがそのまま格納されているので、判り易く、トラブルシューティングしやすい。

5 SA46T 技術の標準化提案と実証

本技術を通じ、広くインターネットコミュニティに貢献すべく、IETF に標準化提案を行っている。

IETF での標準化の条件に、(1) 実装の存在、(2) 独立した実装間で相互接続できること、がある [8]。IETF での提案の反応を踏まえ、これら条件を満たすための、実装の開発や実証実験等を進めている。

5.1 標準化提案

IETF に、これまでに、基本仕様 [9]、SA46T グローバルアドレス [10]、適用の対象 [11]、提案の動機 [12]、マルチキャスト対応 [13] の合計 5 件の Internet Draft を提出している。

¹スタブネットワーク内に DHCP Relay agent があるか、あるいは DHCP server があれば問題無い。

5.2 実装の開発

SA46T 技術が実装可能であることの証明と方式評価を目的に実装を開発した。

図 3 は、その実装構成を示したものである。本開発では、SA46T のカプセル化の機能を疑似ネットワークインタフェースとしてカーネル空間内に実装するアーキテクチャとした。ルーティングテーブルには、カプセル化すべき宛先 IPv4 アドレスの経路に一致した場合、カプセル化を行う疑似ネットワークインタフェースに経路選択されるようなエントリを設定する。また、デカプセル化すべき宛先 IPv6 アドレスの経路に一致した場合、デカプセル化を行う疑似ネットワークインタフェースに経路選択されるようなエントリを設定する。

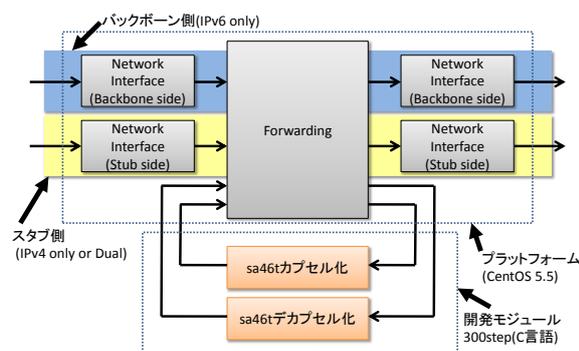


図 3: SA46T の実装構成

IPv4 パケットをカプセル化する SA46T に於いては、スタブネットワークから受信した IPv4 パケットは、まずカプセル化を行う疑似ネットワークインタフェースにルーティングされ、SA46T アドレスが設定された IPv6 パケットに変換され、その IPv6 パケットが再度ルーティングされてバックボーンネットワーク側にルーティングされる。一方、対向側の SA46T に於いては、バックボーンネットワーク側から受信した SA46T アドレスが設定された IPv6 パケットは、まずデカプセル化を行う疑似ネットワークインタフェースにルーティングされ IPv4 パケットが取り出される。この IPv4 パケットが再度ルーティングされ、スタブネットワーク側にルーティングされる。従って、カプセル化またはデカプセル化されるパケットは、SA46T 内部に於いて、それぞれ、2 度ルーティングされることになる。

スタブネットワークが Dual stack の場合は、IPv6

のルーティングエントリを、通常通り記載すれば良い。この場合、IPv6 パケットは、カプセル化またはデカプセル化を行う疑似ネットワークインタフェースにルーティングされることはない。

約 1ヶ月で実装が完成し、その規模は C 言語で 300 ステップとコンパクトなものとなった。富士通 FMV-BIBLO LOOX M/G30(Atom N450 1.66GHz、1GB メモリ、Fast Ethernet) に USB Fast Ethernet ドングルを用い 2 Ethernet 化したハードウェアに、CentOS5.5(Kernel 2.6.34) を搭載した環境で、90Mbps 以上の性能を確認した。

5.3 実証実験

SA46T 方式及び上記実装の実績獲得を目的に、3 ステップの実証実験を行った。最初は LAN 環境で確認を行い、次に、広域網での実証実験を行った。最後は、Plane を用いた、同一の IPv4 アドレスを用いた実証実験を行った。以下に、これら実証実験について述べる。

5.3.1 LAN 環境での実証実験

最初の実証実験の場として 2010 年 9 月に開催された WIDE 合宿にて実験を行った。

本実験で用いたハードウェアは、実装開発を行ったプラットフォームと同じもので、富士通 FMV-BIBLO LOOX M/G30(Atom N450 1.66GHz、1GB メモリ、Fast Ethernet) に USB Fast Ethernet ドングルを用い 2 Ethernet 化したハードウェアに、CentOS5.5(Kernel 2.6.34) を搭載したものである。

図 4 は、この実証実験の構成と WAN 側のトラフィックを示したものである。トラフィックグラフは、プラス側がインターネットから合宿ネットワークへのトラフィック、マイナス側がその逆の合宿ネットワーク側からインターネット側のトラフィックを示している。

合宿ネットワーク全体に展開し、インターネット向けの上流 1 台と、ユーザ収容で 3 台の、合計 4 台の SA46T 搭載 PC を利用し、全ての合宿参加者が無線 LAN 経由で SA46T を介して通信する環境を構築した。DHCP を用いて IPv4 アドレス割り当てを行い、参加者は SA46T を全く意識せずに利用した。

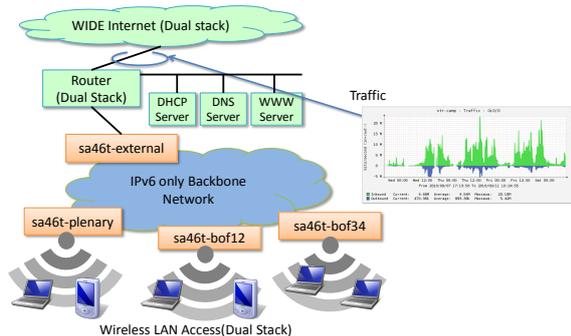


図 4: WIDE 合宿での SA46T 実証実験構成

4.5 日間の実験で、191 人が参加し、275 台のクライアントが接続し、約 2.3 億個の IPv4 パケットをカプセル化した。

5.3.2 広域網環境での実証実験

JGN2plus は、独立行政法人 情報通信研究機構 (NICT) の研究成果を実証するためのテストベッド基盤である。広域網での実績を得るため、2011 年 2 月に、JGN2plus 上で実験を行った。図 5 は、この実証実験の構成と、トラフィックを示したものである。

SA46T は、ハイビジョン映像、3D 映像及びデータの配信に用いられ、大量のトラフィックを長期に渡って運ぶ実験となった。また、はじめて OSPFv3 (Open Shortest Path Fast version 3) によるルーティングを用い、さらに、BGP4+ (Border Gateway Protocol 4 Plus) を用いて、所有者が異なるネットワーク間での SA46T 利用を実証した。

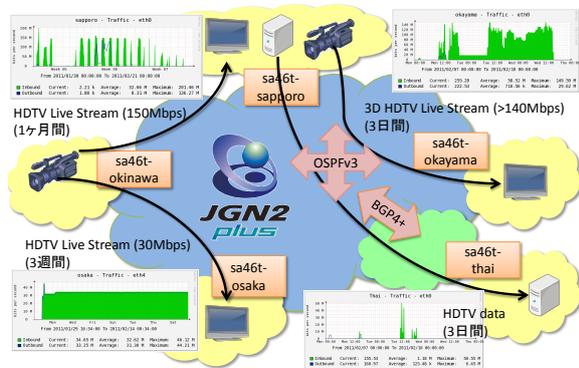


図 5: NICT JGN2plus での実証実験

Cisco UCS B5500 (Intel Xeon E5650 2.67GHz 6core 4socket、32GB メモリ、10GbE × 2) に CentOS5.5 (Kernel 2.6.34) を搭載した環境で、800Mbps 以上の性能を確認した。これは、測定に用いた IA サーバの通信性能限界値である。

映像配信は 3 種、そしてデータ転送が 1 種行われた。映像配信では、(1) 沖縄から札幌に、約 150Mbps の HDTV Live Stream が 1ヶ月間にわたり配信、(2) 沖縄から大阪に、約 30Mbps の HDTV Live Stream が連続 3 週間配信、(3) 札幌から岡山に、最大 140Mbps の 3D HDTV Live Stream が 3 日間配信された。データ転送では、HDTV 映像のデータが札幌からタイ国に転送された。

5.3.3 Plane 機能の実証実験

2011 年 6 月開催の Interop Tokyo にて、SA46T の plane を用いた実験を行った。Interop ShowNet を中心に、(1) インターネットへのアクセス、(2) データセンター、(3) 映像伝送、の 3 つの適用分野を示すことを意識した実証実験兼デモンストレーションで、後者 2 つの plane で、意識的に同一のプライベートアドレスを利用した²。

この実証実験で、同一の IPv4 アドレスが、干渉することなく使用可能であることが実証された。

5.4 相互接続試験

上記実装はカーネル空間で実装したものであるが、これとは独立にアプリケーション空間での実装を開発した。これに加え、慶應義塾大学による実装 [16] が行われたことから、独立した実装が 3 種類存在することとなった。これらによる相互接続試験を、2012 年 3 月の WIDE 研究会にて実施した。

相互接続試験の結果は、フラグメント関連処理のサポート範囲の差が現れる結果となった [17]。フラグメント処理以外については、相互接続は成功した、なお、実用上は特に大きな問題は無かった。

²このデモにより、SA46T は、Best of Show Award のデモンストレーション部門に於いてグランプリを受賞した [14, 15]。

6 評価

ここでは、実装開発、実証実験、相互接続試験で得られた結果から、SA46T 技術の評価を行う。

6.1 実装可能であることの証明

SA46T の実装は現在 3 種あるが、それぞれ独立に実装されたものである。これは、SA46T が実装可能であることの証明であり、なおかつ、IETF に提出している Internet Draft を見て実装が可能な証明でもある。後者は、Internet Draft の品質が十分であることを示していると言えよう。これは、IETF 標準の、Proposed Standard レベルの品質を達成しているものと評価できる。

6.2 設定数に関する評価

本論では、既存のカプセル化技術では、設定数がべき乗で増加することを問題点であると指摘した。設定は、SA46T の実装モジュールを追加し、SA46T の疑似インタフェースを起動し、そこに SA46T アドレスの設定を行うものとなっている。

以下に、その設定例を示す。

```
insmod sa46t.ko
ifconfig sa46t0 up
ifconfig sa46t0 add 2001:3e8:0:2646:0:1:a00:100/120
```

この例は、IPv4 スタブネットワークが、10.0.1.0/24 で、SA46T プレフィックスが 2001:3e8:0:2646/64、IPv4 network plane ID が 1 の場合のものである。

これは、バックボーンネットワークに接続されている他の SA46T の台数に依存しない設定であり、設定数が少なく済むことが、机上ではなく、実際の実証実験等を通じて証明されたと言える。

6.3 相互接続性可能であることの証明

3 種ある SA46T の実装で相互接続を行ったが、実装によりフラグメンテーションのサポート範囲が異なり、その違いが試験結果として現れたが、フラグメンテーションが問題にならない範囲では、特に問題なく、相互接続が出来た。

これは、カプセル化処理そのものについては問題無く、この範囲に於いて、IETF 標準の Draft Standard レベルの品質を、ほぼ達成しているものと言えそうである。より相互接続制を高めるためにも、フラグメンテーションのサポートに関する記述を追加する予定である。

6.4 技術のシンプルさについて

評価目的の実装ではあるが、C 言語で 300 ステップで、それが、実証実験を通じて安定に動作し、なおかつ、遜色無い性能も達成できたことは、それだけ技術がシンプルであるからと言えよう。

7 まとめ

IPv4 アドレス枯渇による環境変化を述べ、この環境変化を踏まえた、IPv6 移行と IPv4 継続利用を両立する技術として SA46T を提案した。IPv6 移行を進めながら、IPv4 を IPv6 で巻き取っていくことにも利用可能であり、あるいは、IPv4 アドレス再利用を進める手段としても利用可能である。特に後者の実現に於いても、IPv6 が必要であることから、IPv6 移行に寄与するものと考えている。

SA46T によるソリューションは、NAT など IPv4-IPv6 変換技術との組み合わせも可能だが、用いられない構成も可能となる。例えば VPN (Virtual Private Network) などの、IPv4-IPv6 変換技術と相性の悪い IPv4 アプリケーションの継続利用に、特に貢献できる可能性が高そうである。

SA46T はシンプルな技術であり、十分実利用可能であることを示した。様々なネットワークへの適用可能性があると考えている。広く、インターネットの健全な発展に寄与すべく、今後も標準化、実用化、そして普及に向け、取り組んでいく所存である。

謝辞

IETF への標準化提案を勧めてくださった慶應義塾大学の加藤朗教授に感謝します。また、JGN2plus での実証実験にお誘いくださった、情報通信研究機構／倉敷芸術科学大学の小林和真教授に感謝します。WIDE 合宿での実験でご支援くださった慶應

義塾大学の中村修教授及び NetPC の皆様、Interop Tokyo ShowNet NOC チームの皆様にご感謝します。最後に、SA46T の実装を開発してくださった、慶應義塾大学 (当時) の中村遼氏にご感謝します。

参考文献

- [1] S. Deering, R. Hinden *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification* RFC1883, December 1995
- [2] R. Gilligan, E. Nordmark *Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers* RFC1933, April 1996
- [3] 松平直樹監修 「IPv6 ネットワーク実践構築技法」 オーム社, 2001
- [4] A. Conta, S. Deering *Generic Packet Tunneling in IPv6 Specification* RFC2473, December 1998
- [5] W. Sumpson *IP in IP Tunneling* RFC1853 October 1995
- [6] G. Tsirtsis, P. Srisuresh *Network Address Translation - Protocol Translation (NAT-PT)* RFC2766, February 2000
- [7] M. Bagnulo, P. Matthews, I. van Beijnum *Stateful NAT64: Network Address and Protocol Translation from IPv6 clients to IPv4 Servers* RFC6146, April 2011
- [8] S. Bradner *The Internet Standard Process - Revision 3* RFC2016 October 1996
- [9] N. Matsuhira *Stateless Automatic IPv4 over IPv6 Encapsulation / Decapsulation Technology: Specification* draft-matsuhira-sa46t-spec-05.txt Internet-Draft July, 2012
- [10] N. Matsuhira *Stateless Automatic IPv4 over IPv6 Encapsulation / Decapsulation Technology: Global SA46T Address Format* draft-matsuhira-sa46t-gaddr-05.txt Internet-Draft July, 2012
- [11] N. Matsuhira *Applicability of Stateless Automatic IPv4 over IPv6 Encapsulation / Decapsulation Technology (SA46T)* draft-matsuhira-sa46t-applicability-04.txt Internet Draft July, 2012
- [12] N. Matsuhira *Motivation for developing Stateless Automatic IPv4 over IPv6 Encapsulation / Decapsulation Technology (SA46T)* draft-matsuhira-sa46t-motivation-02.txt Internet Draft July, 2012
- [13] N. Matsuhira *SA46T Multicast Support* draft-matsuhira-sa46t-mcast-01.txt Internet Draft March, 2012
- [14] *Interop Tokyo 2011* 出展報告 NICT NEWS, 2011 年 6 月号, No.405
<http://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/1106/03.html>
- [15] *Interop Tokyo 2011* の「Best of Show Award」にてグランプリを受賞 <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2011/06/9-1.html>
- [16] <https://github.com/upa/sa46t/>
- [17] 『「IPv6 時代の IPv4 を考える」～第二章～』 JANOG30 <http://www.janog.gr.jp/meeting/janog30/program/v64.html>