



日本ネットワークイネイブラー株式会社 [監修]
小川晃通・久保田聡 [共著]

徹底解説 v6プラス



A Detailed Guide to the v6plus

by

Akimichi Ogawa and Satoshi Kubota

©Akimichi Ogawa and Satoshi Kubota 2020

本書は「著作権法」によって権利が保護されている著作物です。
「v6 プラス」は、日本ネットワークイネイブラー株式会社の登録商標です。本書では一部を除き「v6 プラス」を鍵括弧などを付けず本文に直接表記しています。
その他、本書中の会社名や製品名は該当する各社の商標または登録商標です。

はじめに

「v6 プラス」は、NTT フレッツ網を利用するユーザが、IPv6 とともに、IPv6 IPoE を経由して IPv4 インターネットとの通信ができるサービスです。IPv6 IPoE を経由することで、IPv4 PPPoE を経由せずに IPv4 インターネットとの通信を行うため、ユーザのパケットが通る経路が変わります。この経路の違いが通信品質に大きな影響を与える場合もあります。

本書はもともと、v6 プラスの技術的側面を解説する書籍として、JPNE のニーズを受けて企画がスタートしたものです。企画段階で目指したのは、対象読者として v6 プラス導入を検討している方々、v6 プラスの技術に興味がある方々、ISP 関係者の方々を想定し、インターネットの仕組みからボトムアップに v6 プラスの全体像を解説していくような内容でした。しかし、文章を書き進めるにつれ、「何ができるのか?」「どうしてそうなっているのか?」「どうしてそのようなサービス設計になったのか?」という部分こそが、こうした対象読者の方々にとって大事なのではないかと考え始めました。その結果、技術的な背景の説明に焦点を当てることこそが誤読による誤解を避ける手助けとなるはずであり、またすでに誤解してしまっている方々の誤解を解くきっかけとなるだろうという結論に至りました。

本書ではまず、v6 プラスがどのようなサービスであり、何ができるのか、あるいは何ができなのかを説明します。そのうえで後半では、それらに対する「なぜ」の部分を技術的視点で読み解けるように、背景知識を説明していく構成としています。

v6 プラスはフレッツ網という環境に特化したサービスです。高度な技術的課題をユーザ向けのサービスとするために、基礎技術の積み重ねへと落とし込んで実現されています。ネットワーク、インターネット、TCP/IP という視点で考えたとき、v6 プラスは応用の応用ぐらゐのレベル感の話題だといえます。したがって、その内容を読み解くためのハードルは決して低くはありません。それでもサービスの使い方に留まらない書籍、サービスの設計思想が垣間見えるような書籍になることを目指しました。その試みが成功していることを祈ります。

小川晃通

2020年1月

[書籍版では空白のページです]

本書に寄せて

v6 プラスとは、IPv6 上で IPv4 サービスへの接続性 (IPv4 over IPv6) を提供する、JPNE による商用サービスの名称です。この名前は世間的な認知を得るようになりましたが、その結果として、IPv4 over IPv6 全体を指す名称と勘違いされてしまう場面も見聞きするようになりました。IPv4 over IPv6 には複数の実現技術があり、それぞれに長所短所があり、国内においても複数の方式が採用されていることから、それらがひとくくりに「v6 プラス」と称されることは、今後の発展に向けての動向を見誤ることにつながりかねません。

本書は、v6 プラスについての技術的な解説を行う唯一無二の書籍です。その内容は、著者の一人である小川晃通氏の既刊書と同じく、わかりやすさを心がけつつ、技術的正確性を犠牲にしないという立場を貫いたものとなりました。本書が日本のインターネットの健全な発展に寄与するものとなることを期待します。

日本ネットワークイネイブラー株式会社 代表取締役社長

石田慶樹

2020 年 1 月

[書籍版では空白のページです]

目次

はじめに	iii
本書に寄せて	v
第1章 v6 プラスとは	1
1.1 v6 プラスの背景	1
1.2 v6 プラスの全体像	5
1.3 本章のまとめ	10
第2章 IPv4 とIPv6	13
2.1 IPv4 アドレス在庫枯渇問題	13
2.2 IPv6 アドレスの基礎	15
2.3 インターネットはIPv4 とIPv6 のデュアルスタック	16
2.4 キャッシュDNSサーバとCDNによる通信効率の低下	21
第3章 フレッツ網からのIPv6 インターネット接続 (IPv6 IPoE)	25
3.1 IPv6 IPoE方式とIPv6 PPPoE方式がある背景	25
3.2 IPv6 IPoE方式とIPv6 PPPoE方式の違い	31
3.3 IPv6 PPPoE方式の詳細	31
3.4 IPv6 IPoE方式の詳細	33
第4章 MAP-EによるIPv4 インターネット接続	37
4.1 IPトンネル	37
4.2 MAP概要	39
4.3 PSID	40
4.4 MAPドメインで使うIPv6アドレス	41
4.5 MAPルール	43

4.6	MAPにおけるIPv4 NAT	44
第5章	IPv4 NAT	47
5.1	一般のNATの背景と仕組み	48
5.2	NAT機器に要求される挙動	62
5.3	大規模なNAT（CGN）とその課題	69
第6章	v6プラス詳解	77
6.1	通信までの一般的シーケンス	77
6.2	ひかり電話の有無で変わるIPv6ネットワーク構成	79
6.3	固定IPv4アドレスサービスでの通信までの一般的シーケンス	83
第7章	エンドユーザ側の必要条件と設定	85
7.1	v6プラスの利用条件	85
7.2	v6プラスIPv4設定ソフトウェア	88
第8章	FAQとトラブルシューティング	91
8.1	v6プラスへの申し込み	91
8.2	v6プラスがつかない?	92
8.3	アプリケーションの通信ができない?	95
8.4	ユーザ側の機器に問題はないか	96
8.5	問題の切り分けと確認	97
第9章	DS-LiteとA+P	99
9.1	DS-Lite	99
9.2	A+P	101
索引		105

v6 プラスとは

本章の目的は、v6 プラスの全体像が見渡せるような地図を作ることです。v6 プラスは、インターネットや国内のネットワーク環境の複雑な背景を前提として誕生したサービスであることから、その概要を知るだけでもさまざまな要素の理解が必要です。詳細な説明については個別の章で後から解説することとし、本章ではv6 プラスをめぐる全体像を示すことにします。

1.1 v6 プラスの背景

v6 プラスの「v6」は、IPv6（インターネットプロトコルバージョン6）の「v6」です。v6 プラスがどのようなサービスであるかを知るには、まず「IPv6 とは何であるか」を説明しなければなりません。

1.1.1 IPv4 と IPv6

どのようなデータをどのような方法で送受信するかについての取り決めのことを、**プロトコル**（protocol）と呼びます。特にインターネットでの通信を実現するためのデータ形式や手順などを取り決めたものが、インターネットプロトコル、すなわち IP（Internet Protocol）です。

現在のインターネットでは、IPv4 と IPv6 という、2 種類の異なる方式の IP が利用されています。言い換えると、現在の世界には、IPv4 を使って構築されている **IPv4 インターネット**と、IPv6 を使って構築されている **IPv6 インターネット**という、互いに異なる方式の2種類のインターネットが存在しています。

世界中で使われている現在のインターネットは、IPv4 を利用して普及しました。IPv4 では、通信の相手やネットワークの範囲を特定するための識別子（IP アドレス）

の総数が、およそ43億（ 2^{32} ）個と規定されています。この総数は、現在のインターネットを利用する端末の数に比べると少なすぎます。そこで、アドレスの総数を 2^{128} 個に増やし、それをユーザに効率的に割り当てるような方式として、IPv6が開発されました。

IPv6は、IPv4に比べてアドレスの総数が多いだけでなく、さまざまな点でIPv4と異なります。そのため、従来のIPv4との間には直接的な互換性がありません。IPv4とIPv6は、似て非なる独立した別々のプロトコルなのです。従来のIPv4インターネットでアドレスだけをIPv6のそれに置き換えればそのままIPv6を利用できる、というわけにはいきません。IPv6に対応するインターネットを新たに整備し、それと従来のインターネットをうまく共存させる仕組みが必要になります。

結果として、IPv4インターネットとIPv6インターネットが共存しているのが現在のインターネットの状況というわけです。個々のプロトコルの理解に加えて、これらIPv4インターネットとIPv6インターネットの共存にかかわる仕組みの理解は、v6プラスに限らず現在のインターネットをめぐる環境を理解するうえでは欠かせないものになっています。

NOTE

IPv6とIPv4については、「第2章 IPv4とIPv6」で改めて詳しく説明します。

1.1.2 フレッツ網とVNE

日本においては、ある特別な事情によって、さらに複雑な状況が生まれています。それは、インターネット接続の入り口として多くのユーザが利用しているNTT東西^{†1}のフレッツ網です。フレッツ網は、歴史的経緯により、いくつかの通信方式が混在したネットワークです。2019年現在、一般ユーザが新規申し込みを行って提供されるサービスは、NTT東西がIPv6を使って構築した通信網であるNTT NGN（次世代ネットワーク、Next Generation Network）によるものです。

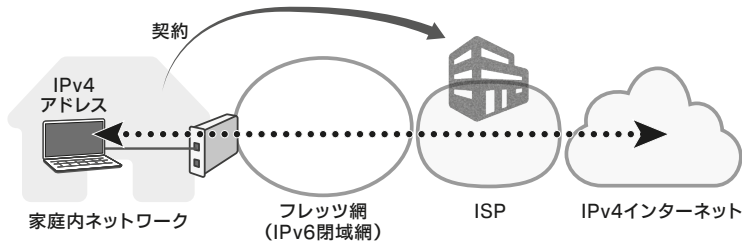
NTT NGNは、IPv6インターネットとは切り離された巨大なIPv6ネットワーク（IPv6閉域網）です。同じIPv6を利用しながら、フレッツ網がIPv6インターネットと切り離された閉域網になっている背景には、NTT法という法律の存在があります。NTT法による制限により、NTT東西はユーザに対して直接インターネット接続サービスを提供できないので、フレッツ網はIPv6インターネットとは直接やり取りがで

^{†1} 本書では、東日本電信電話株式会社のことを「NTT東日本」、西日本電信電話株式会社のことを「NTT西日本」と表記しています。また、両者を合わせて「NTT東西」と表記することがあります。

きないような設計になっているのです。

では、NTT 東西と接続してフレッツ網のサービスに加入しているユーザは、どのようにしてインターネットへの接続を実現しているのでしょうか。

従来の IPv4 インターネットへの接続については、ユーザが ISP 事業者と契約し、ISP 事業者を通じてインターネットへと接続しています。その際には、一般に「PPPoE」という技術を使い、間のフレッツ網をトンネリングして IPv4 による通信を実現しています（図 1.1）。

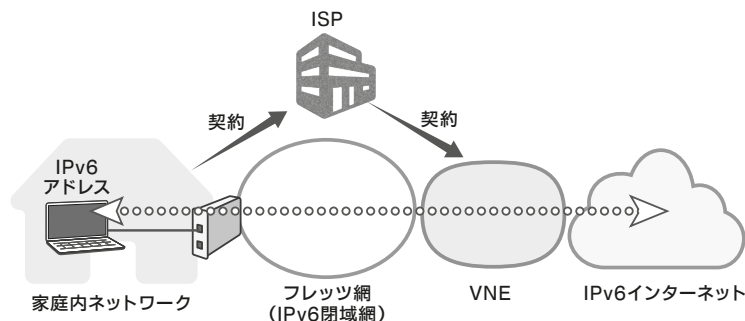


▶ 図 1.1 フレッツ網を通じた IPv4 インターネット接続

IPv6 インターネットとの接続サービスについては、フレッツ網でどのように提供すべきかについて、2008 年ごろから日本国内で議論されました。NTT 東西の次世代ネットワーク（後のフレッツ・ネクスト）を利用した商用サービスに関する活用業務の認可申請が 2007 年に行われ、意見募集等のプロセスを経て翌年認可されたことが背景としてあります。日本国内で非常に大きなシェアがある NTT 東西の回線において、IPv6 インターネット接続サービスがどのような方式で提供されるのかは、日本の IPv6 インターネットの形を左右するテーマでした。そのため、NTT NGN における IPv6 インターネット接続サービスをどのように提供すべきかの議論が白熱しました。

当時、さまざまな案が検討されましたが、従来の IPv4 インターネットへの接続方式と類似した方式である「IPv6 PPPoE」を含め 4 つの案にまで絞られました。そのうちのひとつとして、従来とは異なる「IPv6 IPoE」という方式もありました。最終的に認可されたのは、IPv6 PPPoE と IPv6 IPoE という 2 つの方式です。

IPv6 IPoE には、IPv6 PPPoE と違い、ISP 事業者が IPv6 による通信データを直接扱わないという特徴があります。NTT 東西と契約して IPv6 IPoE によるインターネット接続を提供するのは、VNE（Virtual Network Enabler）と呼ばれる事業者です。ISP 事業者は、VNE から IPv6 IPoE インターネット接続サービスの卸提供を受けて、自社のユーザに対してこれを自社のサービスとして提供します（図 1.2）。



▶ 図 1.2 フレッツ網でIPv6 IPoE サービスを提供するVNE

■ JPNEの生い立ち

2008年時点では、技術的な制限によりIPv6 IPoE方式を利用可能な事業者数は3者に限定されていました^{†2}。当時、候補となった事業者から3者を選ぶ方法としてNTT東西が提案し総務省も認めたものが、「卸サービスとして利用するISPのFTTHサービスのエンドユーザの総数を比較し、上位3者を選択する」という方法でした。

2009年12月のIPv6 IPoE方式のサービス開始時点に、NTT東西からVNEとして選定された3者は、BBIX株式会社、インターネットマルチフィード株式会社、日本インターネットエクスチェンジ株式会社（以後JPIX）でした。BBIXはソフトバンク、インターネットマルチフィードはNTT、JPIXはKDDIの系列会社であり、日本国内の大手3キャリアで3つの枠を分け合っていた格好です。

その後、2010年2月にKDDIとJPIXは「ブロードバンドアクセスエクスチェンジ企画株式会社」を設立しました。そして2010年8月、ISP4社の出資により、事業会社として「日本ネットワークイネイプラー株式会社」（JPNE）を発足し、JPIXからVNE事業に関する契約と、VNE事業のために取得したIPv6アドレスなどを継承しました。これが現在のJPNEの姿です。

JPNEが、IPv6 IPoEサービスをISPに卸提供開始したのが、発足から約11ヶ月後の2011年7月です^{†3}。

^{†2} 2008年段階ではIPv6 IPoE方式を利用可能な事業者数は3でしたが、その後は最大で16の事業者まで増やせるような方向で検討が進められました。現在ではVNEの数も当初の3者から増えています。

^{†3} <http://www.jpne.co.jp/2011/07/26/242/>

NOTE

フレッツ網とVNEについては、「第3章 フレッツ網からのIPv6インターネット接続 (IPv6 IPoE)」で改めて詳しく説明します。

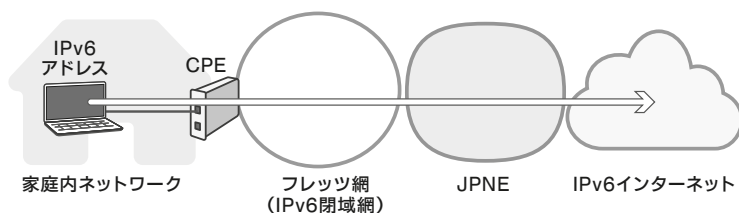
1.2 v6 プラスの全体像

前節では、IPv4 アドレスの枯渇とIPv6の開発、フレッツ網というIPv6閉域網、さらにその上でIPv6 IPoEによりIPv6インターネット接続を提供するVNEについて簡単に説明してきました。これでようやく本書の主題であるv6プラスが何のためのサービスであるかを説明できます。

まずは、**v6プラス**という名前の由来を説明します。v6プラスは、IPv6にプラスしてIPv4も使えるという意図の名称です。IPv6をプラスで使えるという意図であると誤解されがちなのですが、逆なのです。

すなわちv6プラスは、VNEである**日本ネットワークイネイブラー株式会社 (JPNE)**が提供する、IPv6 IPoEによるインターネット接続サービスにプラスして、IPv4インターネットへの接続サービスも使えるというサービスです。IPv6 IPoEでのサービスを提供するVNEであるJPNEという企業が設立され、IPv6 IPoEサービスが提供され続けるなかで、v6プラスというサービスが後から生まれたという歴史的経緯が垣間見えるネーミングでもあります。

では、v6プラスを利用したときにユーザのトラフィックがどうなるのかをひとつずつ見ていきましょう。まずはIPv6トラフィックです (図1.3)。



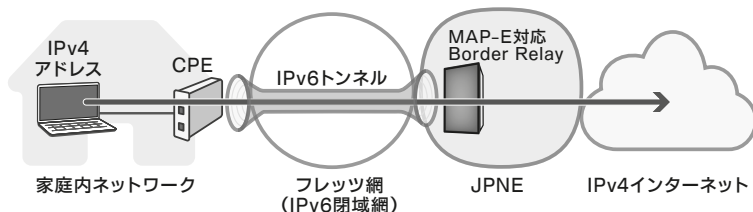
▶ 図1.3 v6プラスでのIPv6インターネット接続

v6プラスでのIPv6サービスは、JPNEをVNEとした通常のIPv6 IPoEです。フレッツ網を通じてユーザトラフィックがJPNEへと転送され、JPNEを通じてIPv6インターネット

ネットと接続します。しかし、実はこれだけではv6 プラスの機能の半分も説明できていません。v6 プラスは、IPv4 インターネットへの接続性をプラスするというサービスなのですから。

1.2.1 IPv6 トンネルによる IPv4 インターネット接続サービス

フレッツ光ネクストなど、フレッツ網を利用したサービスを契約しているエンドユーザの宅内には、ホームゲートウェイなどのCPE (Customer Premises Equipment) が設置されています。v6 プラスでは、図 1.4 のように、すでに家庭内ネットワークなどに設置されている CPE と JPNE のネットワークに設置された BR (Border Relay) と呼ばれる装置との間で IPv6 トンネルを構築し、JPNE を通じて家庭内の IPv4 ネットワークを IPv4 インターネットへと接続します。



▶ 図 1.4 v6 プラスによる IPv6 トンネル

v6 プラスで IPv4 パケットを運ぶ IPv6 トンネルには、MAP-E という方式が採用されています。

NOTE

MAP-E については、「第4章 MAP-E による IPv4 インターネット接続」で詳しく説明します。

MAP-E の特徴のひとつとして、複数の CPE で同一の IPv4 アドレスを共有することが挙げられます。これにより ISP では効率よく IPv4 アドレスを利用できます（図 1.5）。

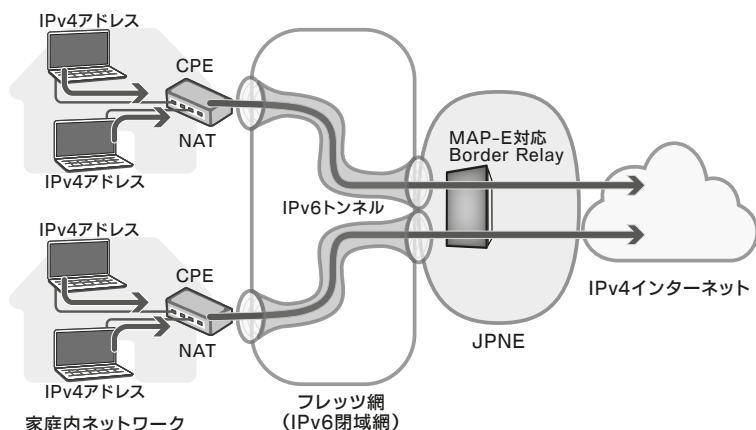
CPE 間での IPv4 アドレスの共有に使われているのは、IPv4 アドレスを変換する NAT (Network Address Translation) の技術です。NAT そのものは新しい技術ではなく、1990 年代から通常の家内ネットワークなどでも広く使われてきました。

MAP-E における NAT は、複数の契約にわたって 1 つの IPv4 アドレスを共有すると

いう違いはありますが、通常の家で利用されてきた IPv4 NAT と根本的な技術は同じです。MAP-E の特徴を理解するうえでは IPv4 NAT に関連する技術の理解も必要になります。

NOTE

NAT そのものについては、「第 5 章 IPv4 NAT」で詳しく解説します。



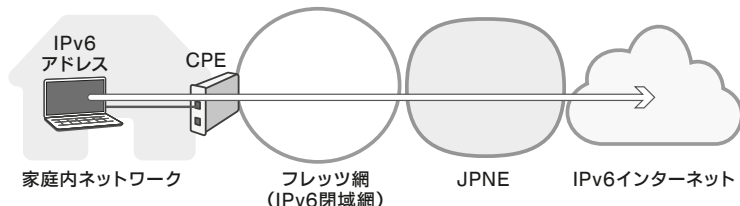
▶ 図 1.5 v6 プラスにおける IPv4 NAT

MAP-E で NAT が利用されているからか、「v6 プラスを利用すると対戦ゲームに悪影響がある」という意見も耳にします。しかし、同様の問題は通常の家で用 NAT でも発生する場合もあるため、v6 プラスで利用される MAP-E だけが原因で発生するわけではありません。

なお v6 プラスには、MAP-E による IPv4 アドレス共有サービスのほかに、通常の IP トンネルによってユーザに対して固定 IPv4 アドレスを割り当てるサービスもあります。どちらも v6 プラスという名称ですが、その実現技術は異なり、固定 IPv4 アドレスサービスのほうでは 1、8、16、32、64 個の固定 IPv4 アドレスを占有できます。固定 IPv4 アドレスでの v6 プラスについては 6.3 節で説明します。

1.2.2 v6 プラス利用時のIPv6トラフィック

v6 プラスを利用するISPのユーザは、JPNEをVNEとしたIPv6 IPoEサービスを利用することになります。そのため、ユーザのIPv6 パケットはフレッツ網を通じてVNEであるJPNEへと転送され、そのままIPv6 インターネットとの通信が実現します（図1.6）。



▶ 図1.6 v6 プラスでのIPv6 インターネット接続（再掲）

この場合、ユーザの家庭内で利用されるIPv6 アドレスは、JPNEに割り振りされたグローバルIPv6 アドレスのプレフィックスから割り当てられます。したがって、ユーザがIPv6を利用してIPv6 インターネットと通信するとき、ユーザの家庭内も含めてすべてがグローバルIPv6 アドレスによるIPv6 インターネットに含まれます。ユーザの家庭内もグローバルIPv6 アドレスによるIPv6 インターネットの一部になるのです。（JPNEはBGPによってIPv6 インターネットとつながっているため、JPNEもIPv6 インターネットの一部であるともいえます。）

NOTE

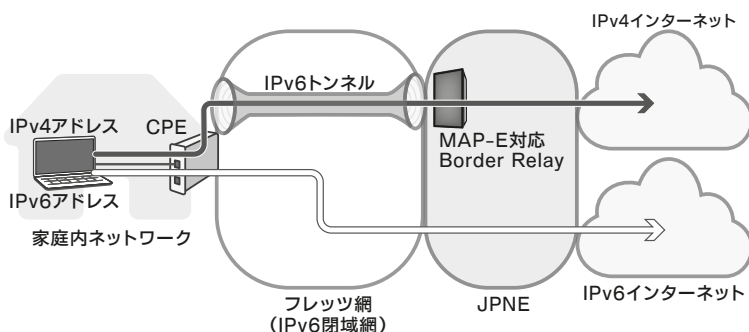
JPNEはB2B企業なので、消費者に対して直接インターネット接続サービスを提供しているわけではありません。ただし、JPNEでは、ISPがv6 プラスという名称を利用して一般消費者（エンドユーザ）に対して販売することを許可しています。このため、個々のISPが提供するサービスに、メニューとしてv6 プラスという名称が掲載されることがあります。エンドユーザから見ると、JPNEが提供するサービスをそのISPが提供しているような形になります。

そして、このような事業形態が、v6 プラスという名称に多少のわかりにくさを生らせている要因かもしれません。v6 プラスという名称は、IPv6 IPoEにプラスしてIPv4 インターネットへの接続性を提供しているという意味ですが、IPv6 IPoEとIPv4 サービスの両方を含めて「v6 プラス」なのか、それともIPv6 IPoEに対するオプションサービス

として「v6 プラス」が存在しているのか、エンドユーザに対してサービスを販売している ISP によって、そのサービスメニューの見え方に多少の違いがあります。JPNEをはじめとする VNE は、エンドユーザにとっては黒子のような存在といえます。VNE に関しては、フレッツ網に関連する解説を行っている第 3 章で解説します。

1.2.3 v6 プラスで IPv6 と IPv4 の両方を VNE 経由に

v6 プラスのポイントは、フレッツ網を利用したサービスからのインターネット接続で IPv4 のための経路を別に用意することなく、IPv6 パケットが運ばれる経路で IPv4 パケットも運ばれる点です。図 1.7 のように、IPv4 パケットは IPv6 トンネルを通じて JPNE へと運ばれ、IPv4 と IPv6 の両方が JPNE を通じてインターネットへと運ばれるようになります。



▶ 図 1.7 v6 プラスを利用する場合

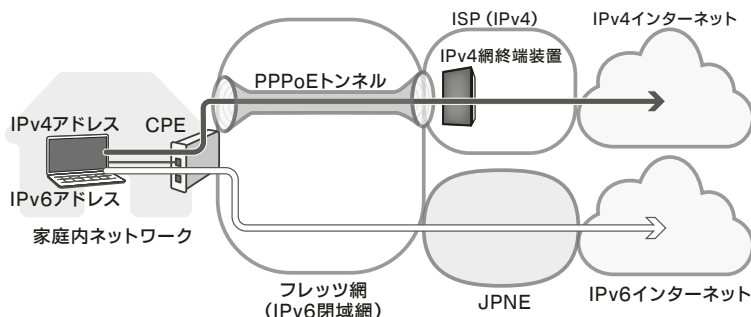
次の 1.2.4 項で触れるように、v6 プラスが使われていない状態では、IPv6 パケットと IPv4 パケットがまったく異なる経路を通じてそれぞれインターネットへと運ばれることになります。JPNE という同じ組織を通じて IPv4 インターネットと IPv6 インターネットに接続できることから、両者の経路が異なる場合に発生する CDN などに関連した性能低下を回避できる可能性があります（2.4 節を参照）。

1.2.4 v6 プラスを利用しない場合の IPv4 トラフィック

フレッツ網で直接 IPv4 インターネットに接続するためのサービスとしては、IPv4 PPPoE を利用する以外の方法はありません。

ここまでの説明を注意深く読んだ読者のなかには、これを聞いて、「あれ、v6 プラスではフレッツ網でIPv4 インターネットへの接続が提供されるのではないか」と思った方もいるでしょう。v6 プラスは、フレッツ網で直接IPv4 インターネット接続を提供するサービスではなく、あくまでもフレッツ網でのIPv6 インターネット接続サービスを通じてIPv4 インターネットとの通信を行うサービスなのです。

IPv4 の PPPoE で IPv4 インターネット接続サービスを利用しつつ、IPv6 IPoE による IPv6 インターネット接続サービスを利用する場合の典型的なトラフィックを図 1.8 に示します。IPv6 は VNE (JPNE) を通じて、IPv4 は ISP を通じてインターネットと通信します。



▶ 図 1.8 IPv4 PPPoE と IPv6 IPoE を同時に利用する場合 (v6 プラスを利用しない場合)

v6 プラスを利用する場合には、IPv4 インターネットとの接続に IPv4 PPPoE を使う必要がなくなります。そのため、IPv4 PPPoE に関連する原因で途中のネットワークにおける通信性能が出ない場合などに、IPv4 での通信性能が向上する可能性があります。

1.3 本章のまとめ

本章では v6 プラスの概要を紹介しました。きちんと定義を与えていない技術用語もいくつか使いましたが、それらは次章以降で順番に解説していきます。

本章で見たように、v6 プラスを説明するには、「IPv6 とは何か」、「MAP-E によるネットワークのトンネルとは」、「IPv4 NAT とは」といった個別の技術的な疑問に答えると同時に、「なぜフレッツ網に限定される話なのか」といった日本のインターネッ

ト環境の歴史にまでさかのぼる知見が必要になります。v6 プラスというサービスは、TCP/IP というインターネットの仕組みの基礎から見ると、応用のさらにまた応用のようなレベル感の内容だといえるかもしれません。

v6 プラスは、IPv6 をめぐる日本のネットワーク事情から生まれたサービスであることからわかるように、そもそもの動機からして理解に必要な前提知識が多いサービスです。たとえば、IPv6 ネットワーク上で IPv4 インターネットとの接続を実現するために IPv4 パケットをトンネルさせている理由、さらに、そのための技術として MAP-E が採用された理由を知るためには、IPv4 アドレスとポート番号を変換する NAT の技術に対する深い理解まで求められます。次章以降では、こうした一つひとつの「なぜ」を紐解いていきながら、さらに深く v6 プラスを紹介していきます。

[書籍版では空白のページです]

第2章

IPv4とIPv6

v6 プラスを知るうえでまず必要なのは、IPv4とIPv6の現状に対する正しい認識です。よく知られているように、IPv6は「IPv4アドレス在庫枯渇問題」を背景に開発されたプロトコルです。そこで本章では、まずこのIPv4アドレス在庫枯渇問題が何であったのかを説明します。そのうえでIPv4とIPv6の違いと、現在のインターネットで両者がどのように使われているのかを説明します。

なお、v6 プラスの設計の背景には、日本の多くの家庭などでインターネット接続の入り口として利用されているフレッツ網というIPv6ネットワークの事情も大きく関与しています。フレッツ網をめぐる事情については、章を改めて、次章以降で順次説明していきます。

2.1 IPv4アドレス在庫枯渇問題

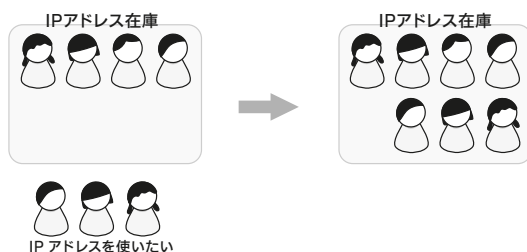
インターネットでは、**IPアドレス**で示される宛先へとパケットが届けられます。すべてのパケットのヘッダには、そのパケットが送り届けられる「**宛先IPアドレス**」と、そのパケットを送信した「**送信元IPアドレス**」が記載されています。

そのIPアドレスが足りなくなってしまったのが**IPv4アドレス在庫枯渇問題**です。これはすでに現実には起きている問題であり、2011年には、インターネットの誕生からずっと使われているIPv4アドレスの中央在庫は枯渇しています。

IPv4アドレスの在庫が枯渇すると何が起こるのでしょうか。ものすごく単純に言えば、IPv4によるインターネットがこれ以上は拡大しにくくなります。

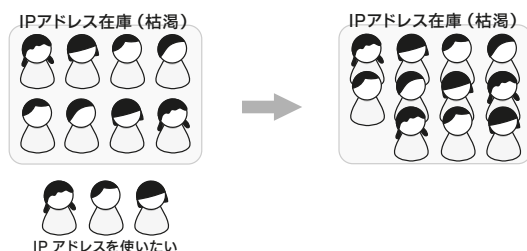
図2.1を見てください。かつてのインターネットでは、新規にインターネットに参加したい人や法人がいた場合、そのたびに新しいIPv4アドレスを割り当てていました。参加者が増えるぶんだけ新しくIPv4アドレスの割り当てが可能だったの

です。これが「IPv4アドレスの在庫がある」状態です。IPv4インターネットは、IPv4アドレスの在庫という資源に制約されることなく、どんどん拡大できました。



▶ 図2.1 IPv4アドレス在庫枯渇前の状態

ところがIPv4アドレスの在庫が枯渇すると、新しく参加したい人が現れても、限られたIPv4アドレスの範囲内で対処しなければなりません。限られたアドレス空間に、次々と新しい参加者を詰め込んでいく状態です。こうなると、図2.2のように、参加者あたりで利用できるIPv4アドレス数が減ってしまいます。IPv4アドレス在庫枯渇によって発生する状態は、この「詰め込み度合い」の上昇です。



▶ 図2.2 IPv4アドレス在庫枯渇後の状態

この問題への暫定的な対策として従来からインターネットで広く採用されているのは、**プライベートIPアドレス**と**NAT**による「詰め込み度合い」の上昇の制御です。実際、現在のインターネットでは、家庭内や企業などの多くでプライベートIPアドレスとNATが利用されています。さらに、ISPなどのサービス事業者のネットワークで大規模なNATが利用されることもあります。NATに関しては、第5章でやや詳しく説明します。

一方、IPv4アドレス在庫枯渇問題に対する根本的な解決策としては、新しいIPアド

レス空間を持ったインターネットを作る必要があるとも考えられました。

2.2 IPv6 アドレスの基礎

多くの人々が「インターネット」として知っている世界規模の巨大ネットワークは、インターネットプロトコルのバージョン4、すなわちIPv4で作られました。IPv4で使われるIPv4アドレスは、インターネットで必要とされる数を満たすには十分でなく、そのうちIPv4アドレスが足りなくなることは予想されていました。その対策として開発されたのが、インターネットプロトコルのバージョン6、すなわちIPv6です。

IPv6が最初にRFC 1883として標準化されたのは1995年のことです。その後もさまざまな更新が加えられながら、現在でも標準化の作業は続けられています。本書執筆時点でのIPv6そのものに対する仕様はRFC 8200にまとめられています。

1995年に最初の標準化が行われたものの、IPv6は2011年ごろまではあまり普及しませんでした。それでも2011年にIPv4アドレスの中央在庫が枯渇してから、少しずつIPv6の普及には弾みがついています。

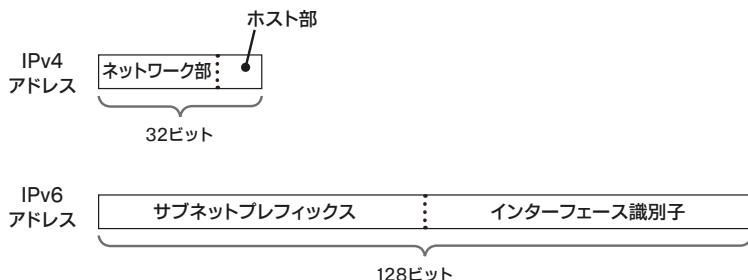
2.2.1 IPv4 アドレスとの違い

IPv6の最大の特徴は、IPv4よりもアドレスのビット数が大きく、表現できるアドレスの数が圧倒的に多いことです。IPv4アドレスの長さは32ビット、IPv6アドレスの長さはその4倍の128ビットなので、表現できるアドレスの個数はIPv4の2の96乗倍になります。

IPv4アドレスとIPv6アドレスの違いは、ビット数が増えたことによるアドレスの総数の違いだけではありません。IPアドレスは、ネットワークを示す部分とインターフェースを示す部分とに分けて使われますが、この区分もIPv4とIPv6とは異なります。両者の違いを図2.3に示します。

IPv4アドレスは「ネットワーク部」と「ホスト部」で構成されます。一方、IPv6アドレスは、「サブネットプレフィックス」と「インターフェース識別子」(IID, Interface Identifier)で構成されます。一見すると名称の違いだけのようにも思えますが、この名称にIPv4とIPv6の大きな違いが示されています。

IPv4アドレスは、1989年に発行されたRFC 1122に「Network-numberおよびHost-numberで構成される」と記述されていることからわかるように、機器である「ホスト」そのものを示しています。「パケットの転送を行うルータは別として、末端のノードは基本的に1つだけしかネットワークインターフェースを持たないので、そこで必要なIPv4アドレスも1つだけ」という前提が垣間見えます。



▶ 図 2.3 IPv4 と IPv6 での IP アドレス構成要素の違い

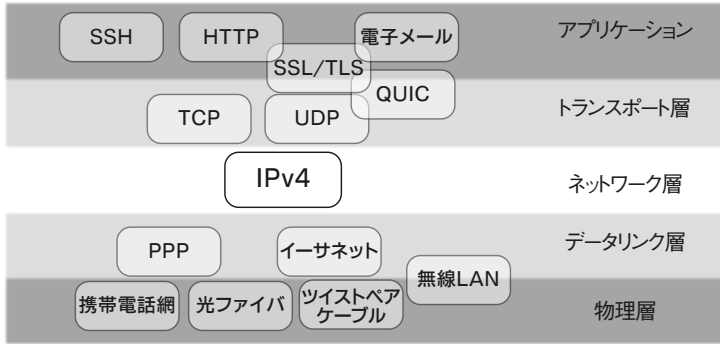
一方、IPv6 では、1つのネットワークインターフェースに複数の IPv6 アドレスが付く場合が最初から想定されています。IPv6 アドレスのインターフェース識別子は、文字どおり、ホストではなく「インターフェース」を識別するもののなのです。「IPv6 アドレスはあくまでもネットワークインターフェースを識別するものであり、必ずしもホストのような機器を識別するものではない」という前提が垣間見えます。

実際、IPv6 では、同じ1つのネットワークインターフェースに対して、「サブネットプレフィックスは異なるがインターフェース識別子は同じ」という IPv6 アドレスを複数設定できます。

2.3 インターネットはIPv4とIPv6のデュアルスタック

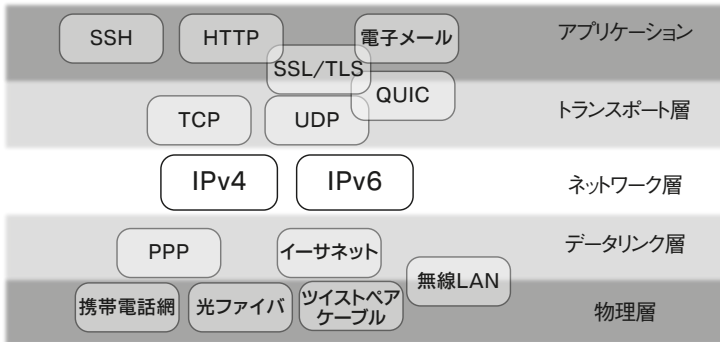
IPv6 は、IPv4 アドレス枯渇問題の根本的な解決策ではありますが、直接的な解決策としては設計されておらず、IPv4 とは互換性がないプロトコルとして開発されました。互換性がないので、「インターネットのためのプロトコル」という視点で見ると、IPv4 と IPv6 とではまったく別々のネットワークになります。今後しばらくは、それぞれ互換性がないプロトコルを利用する「IPv4 インターネット」と「IPv6 インターネット」という2種類のインターネットが、利用者から見れば1つのインターネットとして同時に運用されている状態が続くことになります。

ある特定のプロトコルを扱うためのソフトウェアの実装を**プロトコルスタック**と呼びます。インターネットが IPv4 だけで実現していたときのプロトコルスタックは、図 2.4 のような階層構造として表現できます。ほとんどの層には複数のプロトコルが存在していますが、ネットワーク層だけは IPv4 という単一のプロトコルである点に注目してください。



▶ 図 2.4 IPv4 のみの場合のプロトコルスタック

しかし、IPv4 よりアドレス空間が広い IPv6 が利用されるようになった現在では、図 2.5 のように、ネットワーク層に IPv4 と IPv6 の両方が存在している状態です。



▶ 図 2.5 IPv4 と IPv6 の両方が存在する場合

IPv4 と IPv6 は互換性のない別々のネットワーク層プロトコルなので、プロトコルスタックとしても別々です。このようにまったく異なる2つのプロトコルスタックが使える状態を**デュアルスタック**と呼びます。

かつては IPv4 という単一のプロトコルが前提であったネットワーク層に、IPv4 と IPv6 が並行して存在する現在のインターネットは、デュアルスタック環境になっています。インターネットがこのようなデュアルスタック環境であることを意識しなければならない場面は、サーバやネットワークの管理者、通信が関連するプログラムを書くプログラマだけでなく、一般のインターネット利用者にとっても増えていくと考え

られます。

NOTE

本書で解説するv6プラスは、このようなデュアルスタック環境のインターネットをNTT東西のフレッツ網を利用しているユーザに提供するための仕組みのひとつだといえるでしょう。フレッツ網に契約しているユーザの家庭内ネットワークなどから、IPv6 IPoE方式とMAP-Eを通じてIPv6インターネットとIPv4インターネットの両方への接続性を提供するサービスが、v6プラスというわけです。

2.3.1 IPv6とIPv4の2つのインターネットを1つに見せるDNS

IPv4は、その誕生時点から世界中に普及した現在に至るまでインターネットで使われてきたプロトコルです。一方のIPv6は、これから普及していくプロトコルです。これら2種類のプロトコルが同時に運用されている状態で、「1つのインターネット」を実現するために重要になるのが、**名前解決**です。

ネットワーク層がIPv4とIPv6のデュアルスタックになっても、ネットワークを利用する側の視点で見れば、「インターネットは1つ」でなければ困ります。IPv4とIPv6を並行して利用できる現在の状況は、ネットワーク層プロトコルで見れば2つの別のプロトコルによって実現される2つのインターネットだが、インターネットとしてはあくまでも1つという、非常にややこしい状況にあるといえるでしょう。

現在のインターネットでは、この「2つであるが1つ」という状態を仮想的に実現するために、DNS (Domain Name System) を利用しています。DNSは、インターネットでの通信に必要な、「通信相手のIPアドレスを名前から得る」ための名前解決に利用されている仕組みです。現在のインターネットは、2つの異なるインターネットプロトコルで「1つのインターネット」を実現するために、名前空間をあえて共有しています。そして、そのためにDNSでIPv4とIPv6の両方に対応する名前を扱っているのです。

DNSでは、ドメイン名という名前からIPアドレスを解決するために、レコードと呼ばれる仕組みを利用しています。レコードは、IPv4アドレス用とIPv6アドレス用とを別々に設定できます。たとえば、「**www.example.com**」という1つの名前に対し、IPv4とIPv6の両方のIPアドレスを登録できるようになっています。IPv4アドレス用はAレコード、IPv6アドレス用はAAAAレコード（「クアッド・エー」）と呼びます。

なぜ、1つの名前に対して2つのIPアドレスを登録できることが重要なのでしょうか？ Webにおける通信を例に考えてみましょう。「**http://www.example.com/**」

という URL を持つサーバと通信をするときにユーザがアクセスしたいのは、通信が IPv4 によるか、それとも IPv6 によるかにかかわらず、「www.example.com」が指し示す Web ページです。仮に IPv4 と IPv6 とで名前空間がまったく異なるとしたら、IPv4 で「example.com」というドメイン名を登録している組織と、IPv6 で「example.com」というドメイン名を登録している組織が別々である可能性もあります。もしそうになっていたら、IPv4 で通信する場合と IPv6 で通信する場合とで、同じ「<http://www.example.com>」という URL でアクセスできる Web ページも別物になってしまいます。それではユーザが混乱してしまうでしょう。DNS が使う名前空間のための「Root」（根っこ）は、「1 つ」であることが重要なのです（RFC 2826）。IPv4 インターネットと IPv6 インターネットがまったく異なるネットワークであるのは、あくまで通信プロトコル上の話であり、名前空間を含めたいわゆる「インターネット」としては「1 つ」でなければならないのです。

2.3.2 IPv6 か IPv4 かを選ぶのはユーザ側

IPv4 だけを利用する場合には IPv4 アドレスに対する名前解決が行われ、IPv6 だけを利用する場合には IPv6 アドレスだけの名前解決が行われます。IPv4 と IPv6 の両方の利用を試みる場合には、IPv4 と IPv6 の両方に対する名前解決が行われます。

ここで重要になるのが、「IPv4 と IPv6 のどちらを使って通信するかを誰がどのように判断するか」です。結論から言うと、この判断をするのはユーザです。ただし、厳密にはユーザが利用しているパソコンやスマートフォンなど端末機器の OS や個々のソフトウェアが判断しており、ユーザ自身は気づかない場合がほとんどです。いずれにしても、Web サーバなどではなく、ユーザ側で IPv4 と IPv6 のどちらを使うのかを判断しているということが、ここでは大きなポイントです。

一般的に、IPv4 と IPv6 の両方の問い合わせを DNS に対してひとつの問い合わせとして同時に行うことはできません。そのためユーザは、名前に関して IPv4 と IPv6 の問い合わせを別々に行う必要があります。別々の問い合わせを行うということは、ユーザ側が明示的に IPv4 と IPv6 の両方について名前解決をしたいと DNS サーバに問い合わせるということです。

DNS サーバは、個々の問い合わせにそれぞれ回答するだけです。DNS サーバが「あなたは IPv4 を使いなさい」とか「あなたは IPv6 を使いなさい」などという指示を出すことはありません。

IPv4 と IPv6 の両方で運用されている Web サーバへの接続を例に考えてみましょう。サーバ側は、たとえ IPv4 と IPv6 の両方で TCP ソケットを使って接続されるのを待つ

ていたとしても、ユーザ側がIPv6で接続してくれなければIPv6で通信できません。

たとえば、「www.example.com」というドメイン名のWebサイトが、IPv4とIPv6の両方で運用されていたとします。このWebサーバに対して、ユーザがWebブラウザで接続する場合には、まずDNSで「www.example.com」の名前解決を試みる必要があります。その際には、IPv4のAレコードとIPv6のAAAAレコードの両方に対して名前解決を試みます。もし両方ともに結果が返ってきた場合、IPv4で接続するのか、それともIPv6で接続するのかを判断するのは、Webブラウザです。接続にIPv4を使うのか、それともIPv6を使うのかを判断するのは、個々のアプリケーションの仕事だからです。

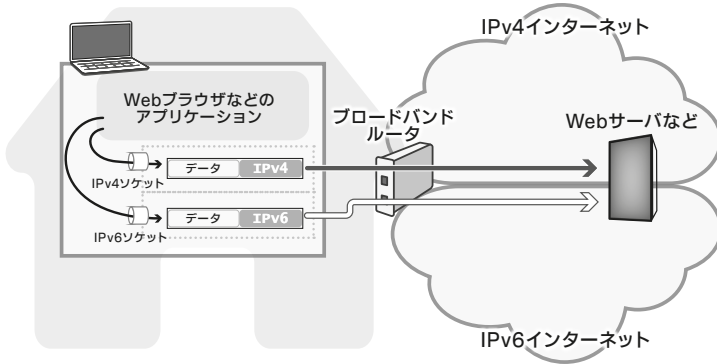
他の環境がすべて同じであったとしても、IPv4とIPv6のどちらを使うべきかがアプリケーションによって異なる可能性もあります。アプリケーションプログラムは、IPv4を使うのか、それともIPv6を使うのかを判断するコードを、アプリケーションごとに書く必要があります。

かつてはIPv6で運用されているサーバがほとんどなかったので、IPv4とIPv6のどちらで通信するかをアプリケーションプログラムが考える必要は事実上ありませんでした。TCPで通信するならば、IPv4アドレスを名前解決で得たのちにTCPで接続するだけだったのです。しかし、本書執筆時点（2019年12月）では、IPv4を使うのか、それともIPv6を使うのかを判断するアプリケーションプログラムを書くことが強く推奨されるようになっています。

とはいえ、IPv4とIPv6のそれぞれでTCPの接続が成功するかどうかは、実際に接続を試みないとわかりません。そのため、図2.6のように、IPv4とIPv6の両方を同時に接続してしまい、先に成功したほうの接続を使うという方法もあります。

NOTE

IPv6がさらに普及し、IPv4の利用が少なくなれば、今度はIPv6だけで接続すればよくなるので、再びIPv4とIPv6のどちらのプロトコルを使うのかを判断する必要がなくなるかもしれません。そのころには本節のような説明も不要になり、「昔はIPv4というものもありました」という軽い紹介だけで済むでしょう。もちろんそのころには、IPv4インターネットとの接続性を提供するv6プラスのようなサービスも不要になっているはずです。



▶ 図 2.6 IPv4 と IPv6 の両方で接続を試みる

2.4 キャッシュ DNS サーバと CDN による通信効率の低下

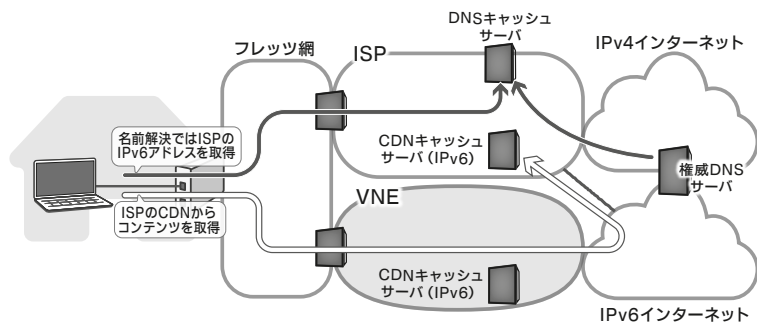
本章の最後に、IPv6 インターネット接続と IPv4 インターネット接続がまったく異なる組織を経由する状況が、通信効率の低下を招く可能性について言及しておきます。これは、Web トラフィックなどの負荷分散を目的として利用される CDN（Content Delivery Network）で、キャッシュ DNS サーバの IP アドレスが利用される場合に起こりうる問題です。この問題は、IPv6 インターネット接続と IPv4 インターネット接続を同じ組織のネットワーク経由で提供する v6 プラスを利用することで回避できる可能性があるという点に注目してください。

まず、この問題が発生している状況を図 2.7 に示します。DNS 問い合わせを行ったキャッシュ DNS サーバに応じて、DNS 権威サーバが回答する IP アドレスを変更することにより、CDN を実現しているような環境です。

図 2.7 では、IPv6 インターネット接続は VNE によって提供され、IPv4 インターネット接続は ISP によって提供されています。ユーザが利用しているパソコンでは、IPv4 を利用している ISP のキャッシュ DNS サーバが設定されているとします。

図 2.7 の環境で、CDN によって負荷分散されているコンテンツをユーザが取得するときの流れを見てみましょう。まず、ユーザが ISP にあるキャッシュ DNS サーバを利用して名前解決を行います。このユーザは IPv4 インターネットと IPv6 インターネットの接続性を両方とも持っているので、AAAA レコードによる問い合わせを先に行っているものとします。

また、この例ではユーザが ISP のキャッシュ DNS サーバを利用しているので、AAAA



レコードの問い合わせはIPv4での問い合わせになります。

ISPにあるキャッシュDNSサーバは、権威DNSサーバにAAAAレコードの問い合わせを行い、回答を得ます。いま、図2.7のように、ISPはIPv4とIPv6の両方を運用しており、IPv6で運用されたCDNキャッシュサーバを保持しているとします。すると、権威DNSサーバからキャッシュDNSサーバへ返答されるのは、問い合わせを行ったキャッシュDNSサーバの最寄りにあるコンテンツのアドレス、つまりCDNキャッシュサーバのアドレスです。

キャッシュDNSサーバから名前解決の結果を受け取ったユーザのパソコンでは、CDN キャッシュサーバからコンテンツを取得します。このとき、コンテンツの取得に利用されるのはIPv6 なので、ユーザはVNEを経由してCDN キャッシュサーバにあるコンテンツを取得することになります。

しかし、もし VNE にも CDN キャッシュサーバがあれば、これではユーザが遠回りをしてコンテンツを取得していることになってしまいます。このような遠回りが発生するのは、CDN による負荷分散の仕組みの一部である権威 DNS サーバが、「ユーザのパソコンは ISP 経由で接続している」と認識しているために発生しています。

ユーザがVNEにあるCDNキャッシュサーバからIPv6でコンテンツを取得するには、VNEのキャッシュDNSサーバを利用すればいいのですが、今度は逆にIPv4によるCDNキャッシュサーバからのコンテンツ取得が遠回りになってしまう可能性があります。

IPv4のAレコードを取得するときと、IPv6のAAAAレコードを取得するときで、利用するキャッシュDNSサーバを切り替えられればよいのですが、そのような使い分けが行われることは稀です。

このようなCDNの問題は、IPv4インターネットとIPv6インターネットのデュアルスタック環境における相性問題ともいえるでしょう。v6 プラスを利用することで、IPv6 IPoE による IPv6 インターネットへのトラフィックと、v6 プラスを経由する IPv4 トラフィックが両方とも JPNE を通じてインターネットとつながります。そのため、このような問題を回避できます。

既存のCDNの構築手法が、ある意味で力技なので、IPv6の技術的な欠陥というよりは、既存の運用では十分に効率化が難しい問題であるという解釈も可能です。

[書籍版では空白のページです]

フレッツ網からのIPv6インターネット 接続（IPv6 IPoE）

本章では、v6 プラスの背景となるフレッツ網における IPv6 インターネット 接続サービスについて解説します。

現在、フレッツ網における IPv6 インターネット との通信サービスの実現手段には、次の2種類の方式があります。

- **IPv6 IPoE 方式**（ネイティブ方式）
- **IPv6 PPPoE 方式**（トンネル方式）

IPv6 IPoE 方式は、ネイティブ方式という別名が示すように、純粹にイーサネット上でIPv6を伝送するものです。わざわざ「IPoE」と呼ばれているのは、もう一つの方式である IPv6 PPPoE 方式との対比で命名されたことによります。基本的にはイーサネット上で通常のIPv6のフレームをやり取りしますが、フレッツ網に対処するために日本独自の部分があります。

それに対して、IPv6 PPPoE 方式は、Point-to-Point リンクをイーサネット上でエミュレートするために考案された技術です。イーサネット上でエンドユーザの認証を伴う回線収容を実現する技術として、IPv4 インターネット 接続サービスで広く利用されてきました。IPv6 インターネット 接続をこれと同じ方式で実現するのが IPv6 PPPoE 方式だといえます。

3.1 IPv6 IPoE方式とIPv6 PPPoE方式がある背景

まず、IPv6 IPoE 方式と IPv6 PPPoE 方式の2つがフレッツ網における IPv6 インターネット 接続で利用されている背景を改めて説明しましょう。

そもそもフレッツ（FLET'S）というのは、NTT 東日本とNTT 西日本（NTT 東西）が

提供するデータ通信サービスの名称です。このデータ通信サービスの基盤となるネットワークが、「フレッツ網」や「NTT NGN」(Next Generation Network、次世代ネットワークの意味)などと呼ばれています。

1.1 節でも簡単に触れましたが、フレッツ網はインターネットとは切り離された「閉域網」です。「日本電信電話株式会社等に関する法律」、通称NTT法による制限で、NTT東西はインターネット接続サービスを直接提供することが許されていません。そのため、利用者に対するインターネット接続サービスはISPにより提供されています。

閉域網ではありますが、フレッツ網では全体のIPv6ネットワーク化が進められており、そこではグローバルユニキャストIPv6アドレスが利用されます。たとえばNTT東西が展開する「フレッツ光」の回線を契約すると、利用者にはこの閉域網からグローバルIPv6アドレスが割り振られます。

このように現在のフレッツ網が成立しているのは、NTT法による制限と、NTT東西によるネットワーク設計上の判断による結果です。しかし、この閉域網で使われているグローバルユニキャストIPv6アドレスが、いわゆる「NTT NGN IPv6 マルチプレフィックス問題」を発生してしまうという懸念がありました。これはIPv6がそもそも抱えている技術的な課題だといえます。

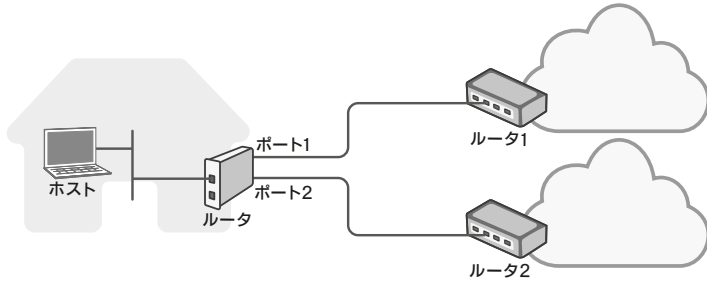
この懸念を解消する方法が、2011年にサービスが開始されたIPv6 PPPoE方式とIPv6 IPoE方式でした。逆にいうと「NTT NGN IPv6 マルチプレフィックス問題」とは、IPv6 IPoE方式やIPv6 PPPoE方式といった解決策がなければフレッツ網で発生してしまう可能性があったNTT NGN固有の現象だといえます。すでに解決されているので問題ではないのですが、これらの方式が考案された背景を知るという意味では重要なので、何が懸念されていたのかを少し掘り下げて説明します。

3.1.1 通信できないIPv6環境の例

NTT NGN IPv6 マルチプレフィックス問題は、フレッツ網に限らず、IPv6 をマルチホームな環境で利用するネットワークで起きうる問題です。そこで、まず一般論として、マルチホーム環境におけるIPv6 マルチプレフィックス問題とは何かを説明します。

図3.1では、ホストが接続された1台のルータが2つの上流ネットワークと接続しています。この状況では、2つの上流ネットワークから、それぞれのネットワークプレフィックスがルータに対して広告されます。

実は、IPv6では1つのネットワークインターフェースに対して複数のIPv6アドレ



▶ 図 3.1 IPv6 マルチプレフィックス問題が発生する状況

スを設定できます。そのため、図 3.1 のようにネットワークプレフィックスが 2 つ広告される状況では、ホストに対しても 2 つのグローバル IPv6 アドレスが設定される可能性があります。これが IPv6 環境で一般に発生しうる「IPv6 マルチプレフィックス」という状況です。

IPv6 マルチプレフィックスの状態であっても、個々の通信では単一の IPv6 アドレスが利用されるので、通信そのものに支障はありません。ただし、IPv6 マルチプレフィックスの状態にあるホストは、何らかの方法で通信に利用する IPv6 アドレスを複数の中から選択する必要があります。その選択によって通信結果が異なる場合や、悪影響が生じる場合もあります。

3.1.2 アドレス選択による悪影響

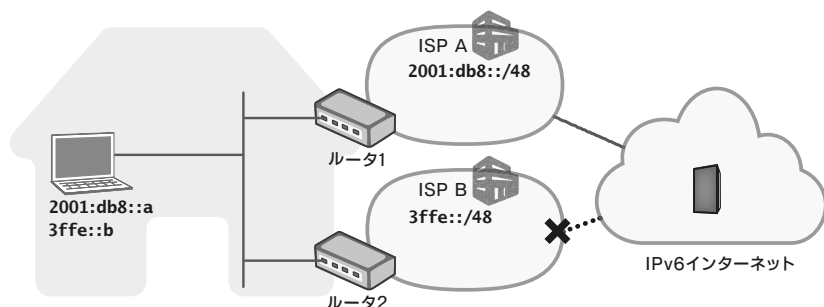
IPv6 マルチプレフィックス環境でアドレス選択により生じる悪影響について、図 3.2 のような状況で説明します。

この例では、家庭内ネットワークが ISP A と ISP B の両方につながっています。この家庭内には、ISP A とつながったルータと、ISP B とつながったルータの 2 つのルータがあるとします。両方のルータは同じネットワークセグメントに接続しています。

家庭内には、ネットワークインターフェースが 1 つだけあるパソコンが設置されています。そのパソコンのネットワークインターフェースには、次の 2 つのグローバル IPv6 アドレスが設定されます。

- ISP A からの IPv6 アドレス 2001:db8::a
- ISP B からの IPv6 アドレス 3ffe::b

いま、何らかの理由で ISP B における IPv6 インターネットの接続性に一時的な障害



▶ 図 3.2 IPv6 アドレス選択が悪影響を与える例 1

が発生したとしましょう。図 3.2 の状況で家庭内のパソコンがIPv6 インターネットとの通信を成功させるには、次の3つの点が満たされている必要があります。

- 適切な Next Hop を選択してパケットを送信できること

ISP B でIPv6 インターネットとの通信障害が発生している状態で、ISP B につながっているルータに向けてパケットを送信しても、パケットはIPv6 インターネットへと到達できません。

- 適切な送信元IPv6 アドレスを利用してパケットを送信できること

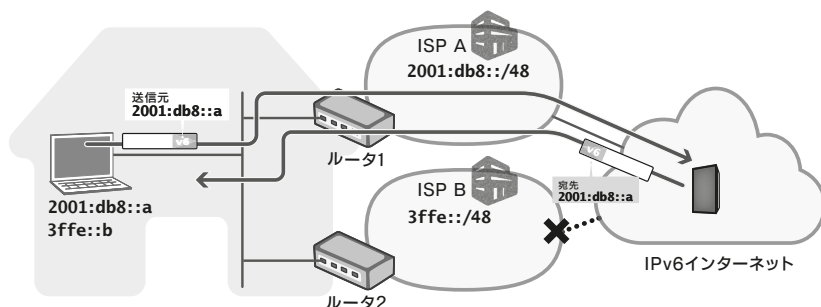
ユーザが送信するIPv6 パケットの送信元IPv6 アドレスがISP B からのIPv6 アドレスであった場合、IPv6 インターネットから戻ってくるIPv6 パケットがISP B に向けて送信されてしまいます。しかし、ISP B はIPv6 インターネットとの通信障害によって通信が失敗する状態にあります。そのため、ユーザが送信するパケットの送信元IPv6 アドレスがISP B のものの場合、通信が失敗してしまいます。

- 適切なキャッシュDNS サーバを選択できること

これは、キャッシュDNS サーバの選択によって宛先IPv6 アドレスが変わる可能性があるためです。通信相手がDNS を利用した負荷分散を行っている場合に、ユーザが選択するキャッシュDNS サーバによって通信相手が変わる可能性があります。

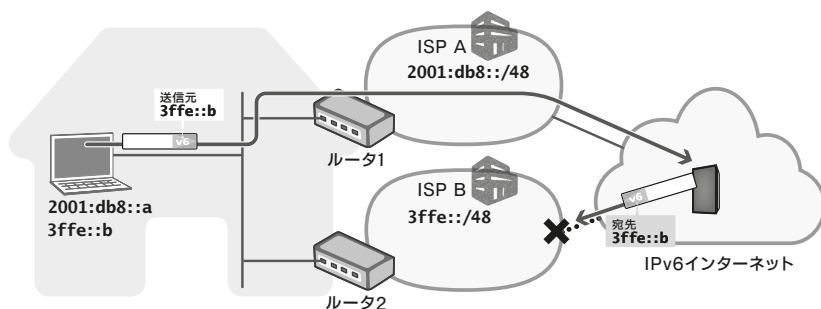
ポイントは、送信元IPv6 アドレスの選択と経路の選択が互いに独立している点です。

ISP A 経由での通信を成功させるには、図 3.3 のように、家庭内にあるパソコンが送信元IPv6 アドレスとしてISP A からの2001:db8::a を選択したうえで、ISP A とつながっているルータをNext Hop として選択する必要があります。



▶ 図 3.3 IPv6 アドレス選択が悪影響を与える例2

図 3.4 のように、家庭内にあるパソコンが送信元 IPv6 アドレスとして ISP B からの `3ffe::b` を選択し、ISP A とつながっているルータ経由で IPv6 インターネット上にあるサーバとの通信を試みる場合には、家庭内のパソコンからサーバまでのパケットは到達するものの、サーバから家庭までのパケットは到達せず、通信が成立しません。



▶ 図 3.4 IPv6 アドレス選択が悪影響を与える例3

図 3.4 のような環境では、Next Hop の選択によってはまったく通信ができません。家庭内のパソコンが Next Hop としてルータ B を選択した場合、送信元 IPv6 アドレスの選択にかかわらず、すべての通信が失敗してしまいます。

ここまで、何らかの理由で ISP B における IPv6 インターネットの接続性に一時的な障害が発生したという想定で説明していますが、正常な運用時に類似する問題が発生する場合があります。これは、上流ネットワークが下流ネットワークとして認識しているネットワークプレフィックスではない、別の IPv6 アドレスを送信元 IPv6 アド

レスとするパケットが、上流ネットワーク宛に送信されてしまうためです。ユーザが選択する送信元IPv6アドレスが適切でないとき、ユーザにとっての上流ネットワークとなるISPにとっては、ISPが管理しておらず存在しないはずのネットワークプレフィックスからのパケットが届いているように見えてしまいます。

2000年に発行されたRFC 2827 (BCP 38) では、各自が管理するネットワークで偽装されたパケットを出してDDoS攻撃などの発信源になることでDDoS攻撃に加担してしまうことを防ぐため、RPF (Reverse Path Forwarding) という手法が提案されています。これは、各パケットの送信元へのユニキャストの経路を参照しつつ、「そのパケットがその方向からくることが正しいかどうか」を確認するというものです。ISPでBCP 38が実施されている環境では、送信元IPv6アドレスと経由するネットワークが一致していない場合にパケットが破棄されてしまう可能性があります。

3.1.3 フレッツ網におけるIPマルチプレフィックス問題

ユーザがISPと契約し、IPv6閉域網であるフレッツ網を介してIPv6インターネットへ接続する場合には、IPv6マルチプレフィックスと似た状況が発生します。仮にフレッツ網でIPv6マルチプレフィックス問題が発生するとしたら、フレッツ網からのIPv6アドレスと、ISPからのIPv6アドレスの2つが、同時にユーザの機器に設定される場合です。この問題を発生させずにフレッツ網からIPv6インターネットへ接続する方法として考案されたのが、IPv6 IPoE方式とIPv6 PPPoE方式です。

IPv6 PPPoE方式とIPv6 IPoE方式では、IPv6インターネットへの接続時に、フレッツ網からのIPv6アドレスが利用者のネットワーク内には割り当てされないようにします。フレッツ網内で提供されるサービスの通信と、IPv6インターネット接続の通信の両方を、グローバルIPv6アドレスが1つだけの状態で実現する仕組みです。ユーザが利用するホストに対しては複数のプレフィックスを提供せず、シングルプレフィックスにすることで、問題を根本的に回避する手法といえます。

さらに、閉域網であるということは、フレッツ網内部にあるサービスとの通信は正常にできても、常にIPv6インターネットとは通信できない状態です。これはつまり、フレッツ網を介したIPv6インターネットへの接続では、図3.4に近い状況が発生するということです。ユーザの機器において「フレッツ網内部との通信では宛先と送信元をフレッツ網からのIPv6アドレスにし、IPv6インターネットとの通信では他方のIPv6アドレスを送信元にする」という選択が自動的にできれば何も問題になりませんが、それにはユーザの機器での設定や特別なソフトウェアのインストールが必要になります。そうした要求をせずに自動的な切り替えをすることが困難であったという要

因もありました。

3.2 IPv6 IPoE方式とIPv6 PPPoE方式の違い

NTT 東西で提供されている IPv6 IPoE 方式と IPv6 PPPoE 方式の詳細について説明する前に、両者の違いを整理しておきます（表 3.1）。

表 3.1: NTT 東西で提供されている IPv6 PPPoE と IPv6 IPoE の相違点

項目	IPv6 PPPoE 方式	IPv6 IPoE 方式
ユーザの IPv6 アドレス	ISP の IPv6 アドレス	VNE から NTT に預けられた IPv6 アドレス
ユーザの追加機器	IPv6 トンネルアダプタ	特になし
インターネット接続	ISP 経由	VNE 経由
PPPoE	IPv4 と IPv6 で別々の PPPoE セッションが必要	IPv6 用の PPPoE は不要
その他の特徴	トンネルアダプタ内で NAT66 を実施	NGN 内で送信元 IPv6 アドレスをもとにした Policy Based ルーティングを実施

表 3.1 から読み取れるように、IPv6 IPoE 方式においてインターネット接続サービスを提供する事業者は、ISP ではなく VNE（Virtual Network Enabler）と呼ばれます。IPv6 でも、IPv4 のときと同じく、インターネット接続のためにユーザが契約するのは ISP です。しかし、IPv6 IPoE 方式の場合には ISP が VNE と契約し、実際の通信はその VNE を通じて行われることになります。VNE については後ほど 3.4 節で改めて解説します。なお、v6 プラスを提供する JPNE も、ISP ではなく VNE です。

ISP がユーザに対して IPv6 インターネット接続サービスを提供するときに、どちらの方式を採用するかは、ISP ごとの判断となります。ユーザは、ISP の対応状況を見ながら IPv6 PPPoE 方式と IPv6 IPoE 方式のどちらを利用するかを判断し、ISP のサービスに申し込むことになります。IPv4 用の ISP と IPv6 用の ISP を別々に利用することも、技術的には可能です。

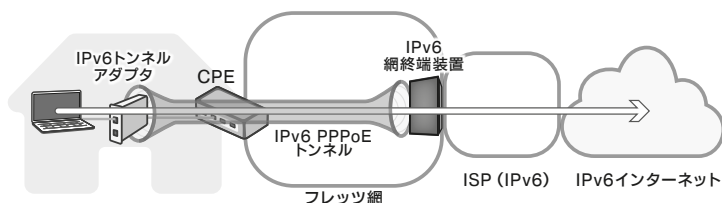
3.3 IPv6 PPPoE方式の詳細

IPv6 PPPoE 方式は、フレッツ網で IPv4 インターネット接続サービスを使う場合と同様に、PPPoE を利用して IPv6 インターネット接続を提供する方式です。「トンネル

方式」という別名があるとおり、IPv6 PPPoE方式では、ユーザの家庭内にあるIPv6トンネルアダプタからフレッツ網内にあるIPv6終端装置までトンネルが張られます。

3.3.1 IPv6インターネットへの接続

IPv6 PPPoE方式では、ISPとの接続や認証にPPP (Point-to-Point Protocol) を利用します。IPv6終端装置はISPのネットワークと接続されており、認証に成功すればISPを経由してIPv6インターネットとの通信が可能になります (図3.5)。

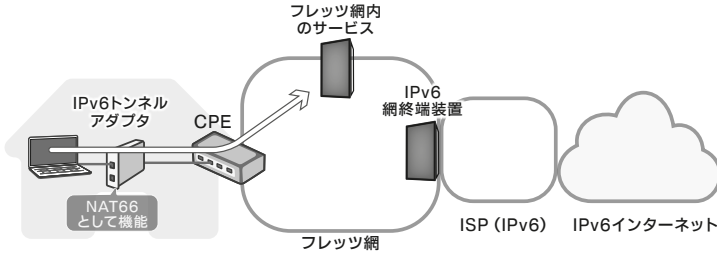


▶ 図3.5 IPv6 PPPoE

IPv6 PPPoE方式でユーザが利用するIPv6アドレスは、ISPに割り振られたIPv6アドレスです。ISPからは、IPv6トンネルアダプタに接続しているユーザの家庭内ネットワークに対し、IPv6のネットワークプレフィックスが割り当てられます。このISPから割り当てられるネットワークプレフィックスのみが、ユーザの家庭内ネットワークで利用されます。

3.3.2 フレッツ網内のサービスへの接続

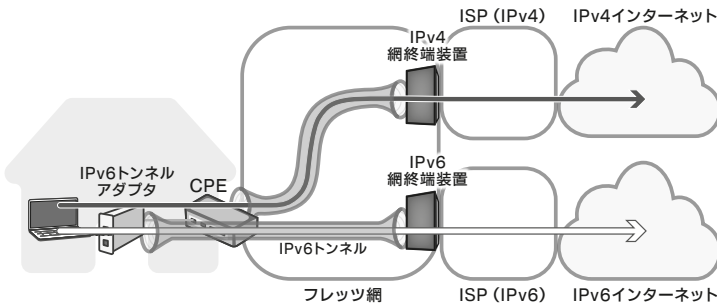
IPv6 PPPoE方式でユーザに割り当てられたIPv6アドレスは、そのままではフレッツ網内宛のIPv6による通信には利用できません。そこで、フレッツ網内で提供されるサービスとの通信には、IPv6アドレスを別のIPv6アドレスへと変換するNAT66が利用されます。トラフィックの宛先がフレッツ網内の場合には、IPv6トンネルアダプタで、送信元IPv6アドレスをフレッツ網のIPv6ネットワークプレフィックスに変換してから転送するのです (図3.6)。このようにIPv6 PPPoE方式では、NAT66を利用することで、フレッツ網内宛の通信とIPv6インターネット宛の通信が両方とも可能になっています。



▶ 図 3.6 IPv6 PPPoEのトンネルアダプタで行われるNAT66

3.3.3 IPv4 インターネットへの接続

一般のユーザは、IPv6 インターネットだけではなく、IPv4 インターネットもよく利用します。その場合には、IPv6 PPPoEに加えて、IPv4 PPPoE も利用することになります。具体的には、図 3.7 のように、IPv4 PPPoE の接続はホームゲートウェイが担当し、IPv6 PPPoE は IPv6 トンネルアダプタが担当するという構成になります。なお、これは必ずしも別々の機器が必要という意味ではなく、IPv4 PPPoE と IPv6 トンネルアダプタの両方の機能が搭載されたホームゲートウェイが使われる場合もあります。



▶ 図 3.7 IPv6 PPPoE と IPv4 PPPoE が両方使われる場合

3.4 IPv6 IPoE方式の詳細

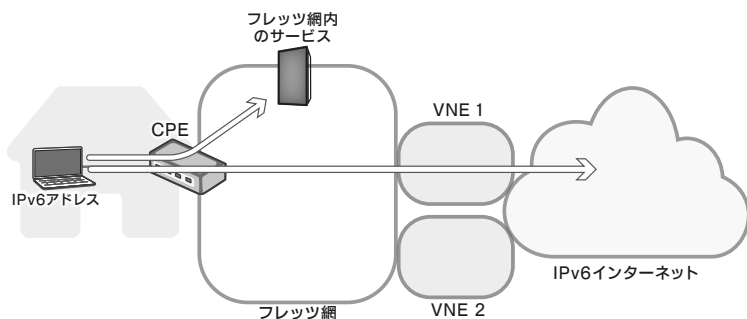
IPv6 IPoE 方式では、VNE 事業者が NTT 東西と契約し、他の ISP に代わってフレッツ網を介した IPv6 インターネット接続サービスを提供します (図 3.8)。ISP は、VNE と契約して VNE の顧客となることで、ユーザに対して IPv6 インターネット接続サービ

スを提供します。v6 プラスも、VNEのひとつであるJPNEによって提供される、IPv6 IPoE方式のIPv6インターネット接続サービスです。

VNEは、フレッツ網とインターネットの相互接続を行うために、自社でIPv6ネットワークを運用します。パケットを処理するのはVNEなので、IPv6 IPoE方式ではISPが通信データを直接扱いません。ISPの役割はパケットを処理することではなく、ユーザのアカウントや課金を管理することに特化されます。

NOTE

ISPから見ると、IPv6 IPoE方式での接続形態はローミングサービスに似ています。フレッツ網からのIPv6インターネット接続を、VNEがISPに対しローミングサービスとして提供するというわけです。



▶ 図 3.8 IPv6 IPoEとVNE

3.4.1 IPv6インターネットへの接続

IPv6 IPoE方式では、ユーザからIPv6インターネット宛のパケットが、VNEとの相互接続地点に設置されたゲートウェイルータまでフレッツ網内を転送されます。このとき、「送信元IPv6アドレスをもとにしたPolicy Basedルーティング」という、少し特殊な転送方式が使われます。通常のIPv6ユニキャストパケットは、IPv6ヘッダに記載された宛先IPv6アドレスに応じて転送されるのですが、「送信元IPv6アドレスをもとにしたPolicy Basedルーティング」では、送信元IPv6アドレスも考慮してルーティングが行われるのです。

このような仕組みになっているのは、どのVNEを経由してIPv6インターネットへ

と転送するかを、各ユーザのIPv6アドレスに応じて決定する必要があるからです。VNEとの相互接続地点にあるゲートウェイルータでは、各パケットの送信元アドレスを見て、そのパケットを適切なVNEへと転送します。

IPv6 IPoE方式でユーザに割り当てられるのはVNEのIPv6アドレスです。もう少し詳しく言うと、ユーザがISPと契約して「IPv6 IPoE方式によるインターネット接続サービス」に申し込んだ場合、そのユーザには「VNEからNTTに預けられたIPv6アドレス」が割り当てられます。IPv6 PPPoE方式ではISPのIPv6アドレスプレフィックスがユーザに割り当てられるので、この点は両方式の大きな違いのひとつです。

なお、IPv6 IPoE方式には、ユーザが利用可能なVNEは1社だけという制約があります。ユーザは、ひとつの回線契約で同時に複数のVNEと契約することができません。これは、ユーザに対して割り当てられるIPv6アドレスプレフィックスが、VNEのIPv6アドレスであるためです。

3.4.2 フレッツ網内のサービスへの接続

IPv6 インターネットとの通信でなくフレッツ網内のサービスとのIPv6による通信では、ユーザから送信されるIPv6パケットの宛先IPv6アドレスがフレッツ網内のもになっています。そのようなIPv6パケットは、フレッツ網内のサーバへと、そのまま転送されます。フレッツ網内との通信でNAT66が必要なIPv6 PPPoE方式と比べると、仕組みも比較的シンプルです。

IPv6 IPoE方式には、NTT東西側の設定だけで実現できるという特徴があります。そのため、IPv6 PPPoE方式では必要になるIPv6トンネルアダプタのような追加機器が必要ありません。

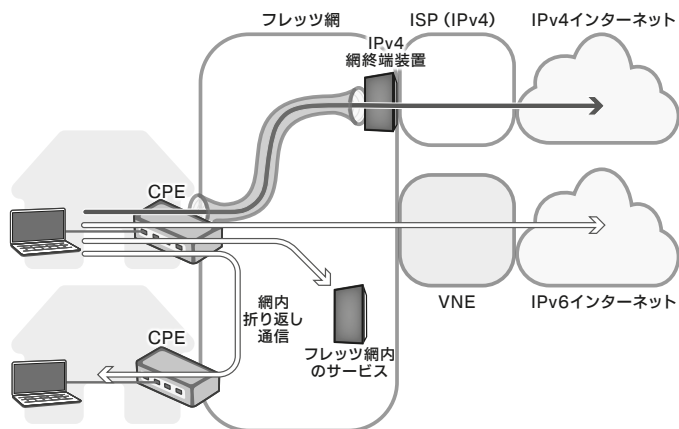
3.4.3 網内折り返し

IPv6 IPoE方式には、フレッツ網における**網内折り返し**が利用できるという利点があります。網内折り返しは、VNEを経由せず、フレッツ網内で通信が可能になるという機能です（ただしNTT東西をまたがるような通信に関しては、VNEを経由して折り返されます）。

網内折り返しは、インターネット接続に関するサービスではないので、ISPとの契約で提供される機能ではありません。網内折り返しを利用したいユーザは、ISPとの契約とは独立に、NTT東西と「フレッツ・v6 オプション」に契約する必要があります。

3.4.4 IPv4 PPPoEを利用したIPv4インターネットへの接続

IPv6 IPoE方式は、IPv6 インターネットを利用するためのサービスなので、IPv4 インターネット接続サービスには別途契約が必要です。従来のPPPoE方式でのIPv4 インターネット接続サービスを提供しているISPと契約した場合、家庭内ネットワークからインターネットへの接続は図3.9のような構成になります。



▶ 図 3.9 IPv6 IPoE方式とIPv4 PPPoE方式を併用した構成

図3.9の構成では、各家庭内のホームゲートウェイを経由して、IPv4インターネットへの接続サービスとIPv6インターネットへの接続サービスの両方が提供されます。IPv4インターネットへのパケットは、ホームゲートウェイからIPv4 網終端装置までフレッツ網内をトンネルで転送され、そこからISPを経由して運ばれます。

3.4.5 IPv4 over IPv6を利用したIPv4インターネットへの接続

v6 プラスでは、IPv6 IPoE方式によるIPv6インターネット接続に加えて、IPv4 インターネット接続サービスも提供されています。このIPv4インターネット接続サービスでは、IPv4 PPPoEを利用するのではなく、IPv6 IPoEの上を経由するIPv4 over IPv6 トンネルが利用されています。IPv4 PPPoEを使わずにIPv4インターネット接続ができることは、v6 プラスの非常に大きなポイントです。

v6 プラスにおけるIPv4 over IPv6 トンネルは、MAP-Eと呼ばれる技術です。MAP-Eについては第4章で詳しく説明します。

MAP-EによるIPv4インターネット接続

v6 プラスでは、IPv4 パケットをIPv6 パケットでカプセル化してIPv4 インターネットへと配送するための技術として、MAP-Eが採用されています。本章では、このMAP-Eの基本的な仕組みを説明します。

MAP-Eの「MAP」は、Mapping of Address and Portの略称です。「アドレスとポートのマッピング」という名前が示すとおり、IPv4 アドレスとポート番号をIPv6 アドレスにマッピングするのがMAPの大きな特長です。

NOTE

アドレスとポートのマッピングによりIPv4 パケットをIPv6 ネットワークを通じてやり取りする技術としては、MAP-Eが採用しているカプセル化による方法のほか、パケットの変換によるMAP-Tという方法もあります。MAP-EはRFC 7597で、MAP-TはRFC 7599で、それぞれ規定されています。v6 プラスはMAP-Eを採用しているので、本書では主にMAP-Eを中心に解説しますが、MAP-EとMAP-Tの共通部分について説明するときは「MAP」と表記します。

4.1 IPトンネル

MAP-Eは、IP パケットの中に別のIP パケットをカプセル化してそのまま運ぶという技術です。このような技術は一般に**IP トンネル**と呼ばれます。

カプセル化されたパケットにとって、IP トンネルはまさに「トンネル」のような存在であり、通り抜けた先のネットワークまでそのまま届きます。MAP-Eでは、IPv6 ネットワーク内に掘られたIPv6 トンネルを通じて配送されるので、このようなIP トンネルは**IPv4 over IPv6**と呼ばれています。

IPトンネルは、v6 プラスでMAP-Eにより実現されているIPv6トンネルだけでなく、さまざまなところで利用されている技術です。トンネルとカプセル化されるIPのバージョンの組み合わせにより、以下の4種類のIPトンネルが考えられます。

- IPv4 パケットをIPv6 パケットでカプセル化 (IPv4 over IPv6)
- IPv4 パケットをIPv4 パケットでカプセル化 (IPv4 over IPv4)
- IPv6 パケットをIPv6 パケットでカプセル化 (IPv6 over IPv6)
- IPv6 パケットをIPv4 パケットでカプセル化 (IPv6 over IPv4)

MAP-Eは、このうちの「IPv4 パケットをIPv6 パケットでカプセル化」に相当します。カプセル化されたIPv4 パケットが、IPv6 ネットワーク内に掘られたIPv6 トンネルを通じて配送されます。

NOTE

IPv4 パケットをIPv6 ネットワークでやり取りする方法としては、カプセル化のほかにパケットの変換による手法もあります。

「IPv4 パケットをIPv4 パケットでカプセル化」する技術や「IPv6 パケットをIPv6 パケットでカプセル化」する技術は、IPv4 ネットワークやIPv6 ネットワークでVPN (Virtual Private Network) を実現するためなどに利用されることがあります。

「IPv6 パケットをIPv4 パケットでカプセル化」する技術は、IPv6 インターネットとの直接の接続性がないネットワークを、IPv4 ネットワーク経由でIPv6 インターネットと接続するためなどに利用されます。

4.1.1 IPv4 over IPv6 としてのMAP-E

IPv4 over IPv6 が利用される主な動機として、IPv6 とIPv4 の両方を同時に運用するデュアルスタックネットワークを可能な限り減らし、ネットワークの運用コストを削減するという側面があります。ネットワークの基幹部分をIPv6 のみで構成し、IPv4 については最小限の運用コストに抑えようという動機です。

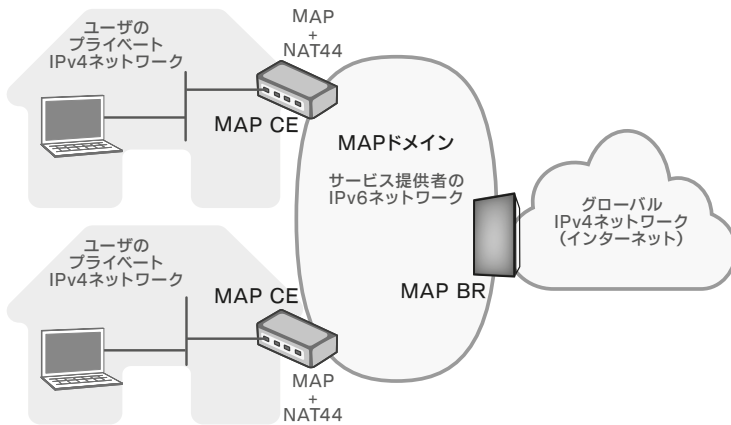
このIPv4 over IPv6 をフレッツ網におけるIPv6 IPoEと組み合わせて、IPv6 ネットワークを通じてIPv4 インターネットとの接続性を実現しようというのが、v6 プラスが採用しているMAP-Eです。なお、フレッツ網でVNEを経由してIPv4 インターネットへの接続性を実現する手法としては、MAP-Eのほかに第9章で説明するDS-Liteという技術もあります。

他のIPv4 over IPv6の手法と比べたMAP-Eの特長として、複数のユーザで1つのIPv4アドレスを共有する大規模なIPv4 NAT環境を、CGNではない形で実現できるというものもあります。これによりIPv4インターネット接続サービスを提供する事業者がIPv4アドレスを効率的に利用できます。

さらに、IPv4とIPv6の間での変換が軽量であることもMAP-Eの特長です。CGNでは複数ユーザの大規模な状態管理が必要になりますが、MAP-Eでは状態管理をユーザ側に設置されている機器へと分散できます。

4.2 MAP概要

MAP (MAP-EおよびMAP-T) は、IPv6のみで構成されたバックボーンネットワークに接続するユーザに対し、グローバルIPv6アドレスとプライベートIPv4アドレスによるネットワークを提供するための手法です。図4.1に、MAPが利用される環境の全体構成を示します。



▶ 図4.1 MAPの概要

MAPを利用してIPv4パケットをやり取りするIPv6ネットワークのことを、**MAP ドメイン**と呼びます。

MAPドメインでユーザ側に設置される装置を**MAP CE** (Customer Edge) と呼びます。一般に家庭内ネットワークなどに設置されるCPE (ホームゲートウェイやレジデンシャルゲートウェイとも呼ばれる機器) が、MAP CEとして機能することになり

ます。

一方、サービス提供者側に設置される装置を**MAP BR (Border Relay)**と呼びます。MAP BRは、グローバルIPv4アドレスを宛先とするパケットをMAPドメインから転送するために利用されます。

IPv6アドレス宛のパケットについては、カプセル化や変換はせずに、そのまま通信します。ネイティブにIPv6インターネットと接続している形です。IPv6パケットがそのままISPなどのネットワークへと転送されます。

IPv4インターネットへの接続については、IPv4 over IPv6トンネルを経由して通信します。その際には、プライベートIPv4アドレスとグローバルIPv4アドレスの変換も必要です。そのためCPEでは、IPv4パケットとIPv6パケットのカプセル化や変換というMAPそのものの機能に加えて、NATルータとしての機能も提供します。このMAPにおけるNATルータの機能は、IPv4アドレスとIPv4アドレスの変換を行うという意味で、**NAT44**と呼ばれることもあります。

MAP CEは、ユーザからのIPv4パケットの宛先を確認し、それがMAPドメイン外のIPv4アドレスであれば、MAP BRのIPv6アドレスを宛先としてIPv6ネットワークで送信します。このとき、MAP-Eの場合にはIPv4パケットをIPv6パケットでカプセル化し、MAP-Tの場合にはIPv4ヘッダをIPv6ヘッダに変換して送信します。

MAPによるIPv4パケットの送信では、トランスポート層プロトコルが使えるポート番号の範囲がMAP CEごとに決められています。これにより、複数のMAP CEで単一のグローバルIPv4アドレスを共有できるようになっています。この方法でIPv4アドレスとポート番号の範囲によりMAP CEを特定する仕組みは、IPv6アドレスのマッピングでもうまく利用されており、MAPドメインで利用するIPv6アドレスから自動的に計算できるような工夫が施されています。ユーザ側のMAP CEで通信のステートを管理できることから、サービス提供者側の装置ではステートレスな運用が可能です。

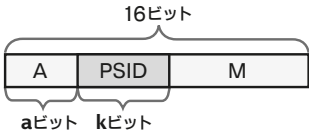
4.3 PSID

各MAP CEが利用するポート番号群は、CEごとに割り当てられたPSID (Port-Set Identifiers) と呼ばれる識別子からアルゴリズムで決定されます。PSIDからポート番号をマッピングするアルゴリズムは、GMA (Generalized Modulus Algorithm) と呼ばれ、RFC 7597のAppendix Bで紹介されています。

PSIDは、16ビットのポート番号の一部に対するマスク値として運用されます。あるMAP CEが扱えるポート番号は、このPSIDをその一部として含むようなものです。

連続したポート番号でも飛び飛びのポート番号でも表現可能です。MAP CEは基本的に同じPSIDを使い続けるので、事実上、PSIDがMAP CEに割り当てられたポート番号を示すことになります。

図4.2に、16ビットのポート番号にkビットのPSIDが含まれている状態を示します。各MAP CEが利用できるポート番号は、PSIDの部分を固定値とし、AおよびMの部分を任意の値とするようなものになります。ただし、IANAによってシステムポートとして割り当てられている番号を利用してしまわないように、Aの値は0より大きくする必要があります（Aの長さaが0でない場合）。



▶ 図 4.2 MAP-EおよびMAP-Tの概要

説明だけだとわかりにくいので、例を見てみましょう。たとえば、aが4、kが8、PSIDが0xfeという割り当てを受けたMAP CEが使えるポート番号のセットを考えます。Aが0となるポート番号は使えないので、このMAP CEが使えるポート番号は表4.1に示す範囲です。

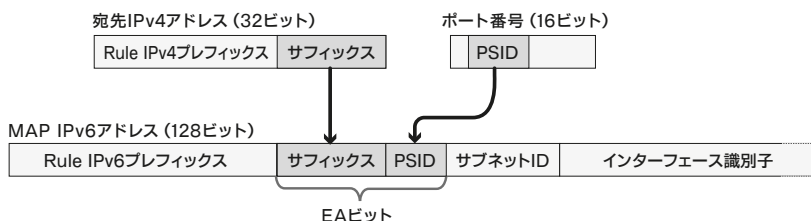
表 4.1: aが4、kが8、PSIDが0xfeの場合の利用可能なポート番号のセット

セット番号	ポート番号の最小値 (括弧内は10進表記)	ポート番号の最大値 (括弧内は10進表記)
ポートセット1	0x1fe0 (8160)	0x1fef (8175)
ポートセット2	0x2fe0 (12256)	0x2fef (12271)
...	...	...
ポートセット14	0xfe0 (61408)	0xfef (61423)
ポートセット15	0xffe0 (65504)	0xffef (65519)

4.4 MAPドメインで使うIPv6アドレス

MAPドメインで使われるMAP CEのIPv6アドレスは、PSID、MAPドメインに共通の情報（Rule IPv6プレフィックス）、それに宛先のIPv4ネットワークを示すRule

IPv4プレフィックスから、図4.3のように決まります。

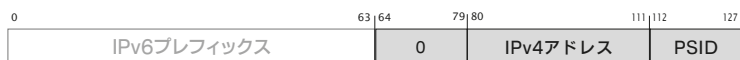


▶ 図4.3 IPv4アドレスとポート番号はEAビットとしてIPv6アドレスに埋め込まれる

MAP CEのIPv4アドレスとポート番号の情報が埋め込まれている部分は、「EAビット」と呼ばれます。

「サブネットID」は、IPv6プレフィックスが64ビット未満の場合に使われるフィールドです。

「インターフェース識別子」については、MAP-Eが定義されているRFC 7597では図4.4のように生成方法が定義されています。



※IPv4アドレスがプレフィックスの場合には左詰めでゼロによりパディング、PSIDが16ビット未満の場合は右詰めでゼロによりパディングされる。
IPv6プレフィックスが64ビットを超える場合は上位の0が上書きされる。

▶ 図4.4 MAPで利用されるインターフェース識別子

このMAPドメインに共通の情報から生成されるIPv6アドレスから、MAP CEやMAP BRのIPv4アドレスとポート番号の情報が取り出せます。

例を使って説明しましょう。あるMAP CEで、EAビットの長さ、Rule IPv4プレフィックスおよびRule IPv6プレフィックスが、それぞれ以下のように設定されていたとします。

- EAビットの長さ：16ビット
- Rule IPv6プレフィックス：2001:db8:0000::/40
- Rule IPv4プレフィックス：192.0.2.0/24

また、このMAP CEに割り当てられたIPv6アドレスのプレフィックスは2001:db8:0012:3400::/56だったとします。

Rule IPv4プレフィックスの長さが24ビットなので、図4.3のサフィックスの部分の

長さは8ビットと決まります。IPv6のプレフィックス `2001:db8:0012:3400::/56` のサフィックス（先頭の40ビットに続く8ビット）の部分は十進表記で18なので、IPv4アドレスは`192.0.2.18`です。

さらに、このCEではEAビットの長さが16ビットとされているので、サフィックスの8ビットを除くとPSIDの長さが8ビットに決まります。IPv6のプレフィックス `2001:db8:0012:3400::/56` のサフィックスに続く8ビットの部分は十進表記で34なので、PSIDは34とわかり、ここからGMAによりポート番号群が計算できます。

NOTE

この節で解説しているインターフェース識別子は、MAP-EのRFCであるRFC 7597に書いてある内容です。v6 プラスでは、RFCになる前の提案文書であるInternet Draft (draft-ietf-softwire-map) に記載されているインターフェース識別子を採用しています。そのため、v6 プラスのMAPで利用されるIPv6アドレスでのインターフェース識別子は、この節で解説されているものとは異なるという点にご注意ください。v6 プラスが採用しているInternet Draftのバージョンは非公開であるため、本書ではv6 プラスで利用しているインターフェース識別子の具体的なフォーマットを割愛しています。

4.5 MAPルール

MAPドメイン内でMAP CEやMAP BRが使う共通の情報は、**MAPルール**と呼ばれる情報として伝えられます。MAPルールには、Rule IPv6 プレフィックス、Rule IPv4 プレフィックス、EAビットの長さが含まれ、どのような場面で使われるかに応じて3つの種類が規定されています。

- Basic Mapping Rule (RFC 7597)

MAP CEの設定にとって必須のMAPルールで、4.4節の方法でIPv6アドレスからIPv4アドレスとポート番号を導出するのに使われるルールです。

- Forwarding Mapping Rule (RFC 7597)

MAP CE同士の直接接続で使われるMAPルールです。

- Default Mapping Rule (RFC 7599)

IPv4パケットに該当するForwarding Mapping Ruleが存在しない場合に選択されるMAPルールです。外部との接続性を提供するMAP BRのIPv6アドレスが設定されます。

v6 プラスでは、下記のような用途に応じて、3種類すべてが利用されています。

- Basic Mapping Rule : MAPドメインの中で自分の所属するルールセットとの通信
- Forwarding Mapping Rule : MAPドメインの中で自分の所属するルールセット以外との通信
- Default Mapping Rule : その他のIPv4通信

MAPでは、MAP CEおよびMAP BR自身でポートのマッピングに使うMAPルールやPSIDを何らかの方法で取得し、設定する必要があります。MAP CEに対して各種の設定情報を伝えるための標準的な仕組みとしては、IETFのsoftwireワーキンググループにて標準化されたRFC 7598に、MAP用のDHCPv6オプションがあります^{†1}。ただし、v6プラスではDHCPv6オプションによるMAPルールの配布は行われていません（6.1節を参照）。

4.6 MAPにおけるIPv4 NAT

MAPの特長として、IPv4インターネット接続サービス提供にあたって必要となるグローバルIPv4アドレスを節約できるという点が挙げられます。

グローバルIPv4アドレスの節約については、従来、ISPのネットワークなどで大規模NAT（CGN、Carrier Grade NAT）を導入するという手法が知られています。CGNによるNATでは、「ユーザによるプライベートIPv4アドレスでのネットワーク」、「ISPでのCGN配下のIPv4ネットワーク」、「IPv4インターネット」という3種類のIPv4ネットワーク間で変換を行うことから、**NAT444**と呼ばれます。

これに対し、図4.1における「**NAT44**」は、MAP CEに割り当てられたポート番号の範囲内でIPv4アドレス同士の変換を実行するNATの機能を示しています。NAT44では、NAT444と異なり、ユーザがIPv4インターネットと通信するまでにNATを2段階由する必要がありません。

MAP-Eが他の手法に比べて運用コストが低い背景には、サービス提供者側をステートレスにできるという点だけでなく、このように2段NATを回避できるという側面もあります。

IPv4 NATについては、CGN全般の課題を含め、第5章で詳しく説明します。

^{†1} RFC 7598は、MAPだけではなく、IPv6ネットワークを通じてIPv4を提供するための一般的なDHCPv6オプションを定義するものです。

4.6.1 NAT44機能の無効化

MAP-Eでポート番号によるIPv4アドレス共有機能を使わず、NAT44としての機能を無効化することもできます。その場合、DS-LiteのAFTRと互換性があるプロトコルになります。実際、NAT44としての機能を無効化したMAP CEで、MAP BRとしてDS-Lite AFTRのIPv6アドレスを設定すると、DS-Lite AFTRを通じてIPv4インターネットとの通信が行えます。v6プラスには「1つのIPv4アドレス割当プラン」という固定IPサービスもあり、このサービスではMAP CEのNAT44としての機能を無効化することができるCPEもあります。

[書籍版では空白のページです]

IPv4 NAT

NAT (Network Address Translation) は、IP パケットが持つ IP アドレスを、別の IP アドレスに変換する技術です。

よく知られているのは、家庭内ネットワークなどのプライベート IPv4 アドレスとグローバル IPv4 アドレスの変換に利用されている NAT でしょう。一般に家庭内ネットワークでは複数台の機器から同時にインターネットに接続できますが、ISP などがユーザに割り当てる IPv4 アドレスは通常は 1 つだけです。この 1 つの IPv4 アドレスを使って、複数の機器から IPv4 インターネットに接続するために、IPv4 NAT が利用されています。

ユーザに IPv4 インターネットへの接続サービスを提供する v6 プラスでも、途中経路上の機器では IPv4 NAT が利用されています。そのため、v6 プラスについて理解するうえでは、一般的な家庭内ネットワークなどにおける IPv4 NAT の仕組みを知ると同時に、その制約についてもよく認識する必要があります。

さらに、v6 プラスの技術を正しく理解するうえでは、CGN (Carrier Grade NAT) と呼ばれる大規模 NAT に関連した課題にも目を向ける必要があります。CGN は、IPv4 アドレス在庫枯渇問題に関連して、サービス提供者側でグローバル IPv4 アドレスを節約するために導入されることが増えている技術です。CGN の導入により、複数の契約者間で 1 つの IPv4 アドレスを共有できますが、同時にさまざまな課題を引き起こすことも知られています。

一方、v6 プラスでは、MAP-E を採用していることで、CGN を導入することなく複数の契約者間で 1 つの IPv4 アドレスを共有できます。MAP-E の採用という技術的選択の意味を知るために、本章では CGN の概要と課題についても概説します。

NOTE

NATに関する最初の仕様は、1994年5月に発行されたRFC 1631です。RFC 1631で説明されているNATは、IPアドレスだけを変換する技術でした。

これから本章で説明するように、現在のNATでは、TCPとUDPのポート番号を考慮することで、単一のIPアドレスを複数のユーザが同時に利用できるようになっています。これを特にNAPT（Network Address Port Translation）と呼び、IPアドレスだけを変換するNATとは区別する場合もよくあります。実際、2001年に発行されたRFC 3022では、RFC 1631で定義されていたNATを「Basic NAT」、Basic NATとNAPTを合わせて「Traditional NAT」と表現しています。

ただし、昨今ではNAPTのことを含んでNATと表現することが多く、最近のRFCでもNATという表現でNAPTを含んでいることが多々あります。そのため、本書でもNATといったら基本的にNAPTを含むものとしします。

なお、1999年に発行されたRFC 2663では、NATに関連する用語の定義が紹介されています。

5.1 一般のNATの背景と仕組み

まずは、家庭内ネットワークなどで使われる一般のNATとプライベートIPv4アドレスについて、その背景と仕組みを簡単に振り返ります。

両者は密接に関係がある仕組みであり、IPv4アドレス在庫枯渇問題に対する短期的な解決策もしくは緩和策として、現在のIPv4インターネットでは広く利用されています。v6プラスが提供するIPv4インターネット接続サービスにおいても、ユーザ側のネットワーク環境の重要な構成要素になっています。

5.1.1 家庭内ネットワークにおいてNATが普及するまで

NATは、インターネットが作られた当初は存在していなかった技術です。NATという技術が誕生し、広く利用されるようになっていったのは、インターネットが一般家庭などにまで急速に普及し始めた1990年代以降のことでした。

NATの普及を支えたのは「ISPから提供される1つのグローバルIPv4アドレスを利用して、プライベートなネットワーク内で複数の機器をインターネットに接続する」という用途です。その状況を説明するために、日本における商用インターネット接続サービスの黎明期までさかのぼってみましょう。

日本で一般向けの商用インターネット接続サービスが開始されたのは、1990年代前半のことです。まだ一般家庭にインターネット専用の回線が敷設されていることは

稀だったので、主に電話線を利用したダイヤルアップ接続によりインターネットに接続していました。モデムと呼ばれる機器をコンピュータに接続し、それを通じてアクセスポイントまで電話をかけ、そこからインターネットに接続するという方式です。1つの電話回線で同時にインターネットにつなげるパソコンは1台だけですが、一家に1台パソコンがあれば最先端だった時代です。いまのように、パソコンもテレビもスマホも、あるいは家電までもがインターネットにつながる環境ではなかったので、複数の機器をインターネットに接続する必要は通常はありませんでした。

しかし、インターネットの普及につれて、パソコン自体の普及も進みました。さらに、従量課金の電話回線だけでなく、ISDNやADSLといったインターネットへの常時接続サービスも登場してきました。その結果、家庭内で複数台のパソコンを同時にインターネットに接続したいという要求も増えるようになりました。

通常、IPv4インターネットに接続したいユーザは、ISPと契約してIPv4アドレスを割り当ててもらいます。このとき、一般的なISPのサービスでは、ユーザに対してサブネット単位でIPv4アドレスが割り当てられるわけではありません。ISPに割り振られているIPv4アドレスのブロックから、「単一のIPv4アドレス」がユーザに対して割り当てられます。

つまり、特別な契約をしない限り、ISPがユーザに提供するIPv4アドレスは1つだけです。IPv4アドレスが1つだけなので、ユーザがインターネットにつなげられる機器は同時に1つだけに制限されます。IPv4インターネット側からは、そのIPv4アドレスを持つ1台の機器が接続されているように見えます。

このような環境で、複数の機器をインターネットに接続するために登場したのが**NAT ルータ**です。個々の機器には「プライベートIPv4アドレス」を設定し、それをNATルータによって「ISPから割り当てられた単一のグローバルIPv4アドレス」に変換することで、複数の機器をインターネットと通信可能にします。本来ならば1台しかつなげないところを、NATルータが仲介することによって、複数の機器が同時に通信できるようにするわけです。NATルータによってIPv4アドレスという限られた資源を複数の機器で共有している点がポイントです。

NOTE

家庭用の簡易なNATルータは、「SOHOルータ」や「ブロードバンドルータ」、あるいは無線LANのアクセスポイントとしても機能する「無線LANルータ」という名前で販売されています。

5.1.2 プライベートIPv4アドレスの登場

NAT ルータを利用する際、インターネットに直接接続されていない閉じた環境では、プライベートIPv4アドレスが利用されます。プライベートIPv4アドレスは、家庭内ネットワークのほか、マンションで共用回線を使う場合のマンション内LAN、会社内で使うLAN、スマホなどでのテザリングでも利用されます。

いまでは当たり前のように閉じた環境で使われているプライベートIPv4アドレスですが、NATと同様、インターネットが誕生した当初は存在していませんでした。プライベートIPv4アドレスがIANAに予約されたことを示すRFC 1597は、1994年3月に発行されたものであり、途中で追加された仕様であることがわかります。

なお、RFC 1597が発行された1994年3月は、NATに関する最初の仕様であるRFC 1631が発行された1994年5月とわずか2ヶ月しか違いません。この2ヶ月というのは、RFCとして発行されるまでのさまざまな議論や準備に伴う差にすぎず、両者は事実上同時に成立した仕組みです。実際、IETFでは、NATとプライベートIPv4アドレスの両方について同時に議論されていました。

プライベートIPv4アドレスが登場する以前も、インターネットと直接接続しない閉じた環境でTCP/IPを使う通信システムは存在していました。そのようなシステムでは、通信手段としてTCP/IPを利用する以上、それぞれの通信機器に対して何らかのIPアドレスを割り当てる必要があります。当時は、そのような閉じた環境であっても、世界で一意的IPv4アドレスが利用されていました。

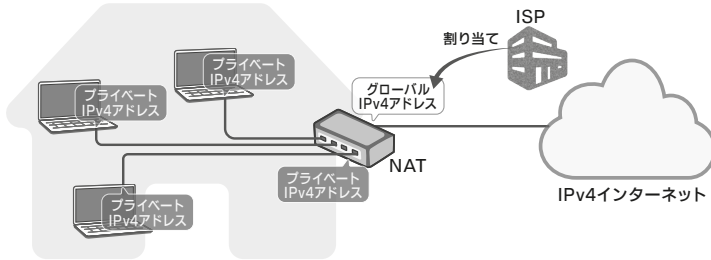
しかし、インターネットと通信するわけではない閉じた環境における通信であれば、その組織内においてのみ一意性が保たれるIPv4アドレスを使えば十分です。インターネットと接続しない閉じた環境のために、世界で一意的IPv4アドレスが消費されていけば、いつかIPv4アドレスが足りなくなってしまうます。そこで「閉じた環境であれば自由に使ってよいIPv4アドレスブロック」として生まれたのがプライベートIPv4アドレスです。

言い換えると、プライベートIPv4アドレスは、1994年ごろに考えられたIPv4アドレス在庫枯渇対策とも考えられます。IANAにおいてIPv4アドレスの中央在庫が実際に枯渇したのは2011年のことですが、もしプライベートIPv4アドレスという概念が存在しなかったなら、IPv4アドレス在庫の枯渇はもっと早かったことでしょう。

5.1.3 一般的なNATの仕組み

家庭用のNATルータでは、インターネット側のことを指して「WAN」(Wide Area Network)、家庭内ネットワーク側のことを指して「LAN」(Local Area Network)と

表現されていることがよくあります。以降の説明でも、この WAN および LAN という表現を使います。



▶ 図 5.1 グローバル IPv4 アドレス空間とプライベート IPv4 アドレス空間の境界で運用される NAT

図 5.1 のような環境で家庭内のパソコンからインターネットに接続するときはプライベート IPv4 アドレスが使われます。プライベート IPv4 アドレスはあくまでも閉じたネットワークで利用されることを前提としたアドレスであり、インターネットで扱ってはなりません。実際、プライベート IPv4 アドレスが送信元や宛先になっているパケットは、インターネットでの転送が禁止されています。

そこで LAN 側の送信元プライベート IPv4 アドレスは、NAT ルータによりグローバル IPv4 アドレスへと変換されます。NAT ルータには、「パケットに記載されている IPv4 アドレスやポート番号をどのように変換するか」が設定されており、それに従って IPv4 パケットの情報が変換されます。

たとえば、LAN 側にあるユーザの手もとの機器から、NAT ルータを介して、インターネットにある Web サーバに接続するとします。このとき、ユーザの手もとの機器に設定されている IPv4 アドレスはプライベート IP アドレスなので、送信される IP パケットの情報は以下のようにになっています。

- 送信元 IPv4 アドレス：プライベート IP アドレス
- 宛先 IPv4 アドレス：Web サーバのグローバル IP アドレス

NAT ルータを経由してインターネットに送信される IP パケットでは、これらの情報のうち送信元 IPv4 アドレスが変換され、次のようになっています。

- 送信元 IPv4 アドレス：NAT ルータの WAN 側 IPv4 アドレス（ISP から割り当てら

れたもの)

- 宛先IPv4アドレス：WebサーバのグローバルIPアドレス（変化しない）

NAT ルータによる変換の結果、「LAN側での送信元IPv4アドレス」と「NAT ルータを経由したWAN側での送信元IPv4アドレス」の組み合わせなど、LAN側とWAN側のそれぞれのパケットの対応関係を表す情報が決まります。この組み合わせ情報は**NAT binding**と呼ばれ、NAT ルータはその個々のエントリを**NAT テーブル**に保持されます。

NOTE

NAT binding は、RFC 3424、RFC 4787、RFC 5780などで使われている用語で、「結合する」、「組み合わせる」、「束ねて縛る」などの意味を持った“bind”という英単語に由来した表現です。「どのような対応づけが行われているのか」という文脈では、**NAT mapping**と表現されることもあります。

NAT ルータの実装に依存しますが、多くの場合は以下の9種類の情報がNAT テーブルに保持されます。

- プロトコル（TCP、UDP、ICMP など）
- LAN側での送信元IPアドレス
- LAN側での送信元ポート番号
- LAN側での宛先IPアドレス
- LAN側での宛先ポート番号
- WAN側での送信元IPアドレス
- WAN側での送信元ポート番号
- WAN側での宛先IPアドレス
- WAN側での宛先ポート番号

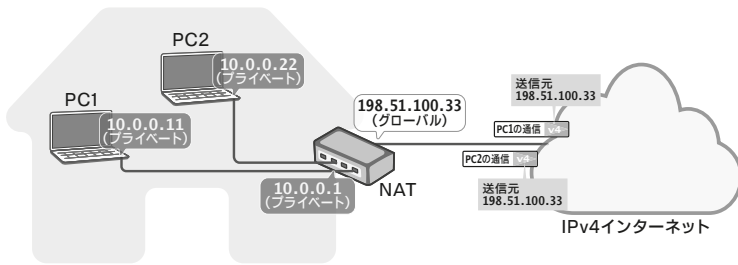
これらの情報は、プロトコル以外を「LAN側から見た送信元」、「LAN側から見た宛先」、「WAN側から見た送信元」、「WAN側から見た宛先」とまとめて考えて、**5 タプル**と表現されることもあります。それぞれNAT ルータの実装などでは「内部ローカル」、「内部グローバル」、「外部ローカル」、「外部グローバル」と呼ばれることもあります。

■ LAN側からWAN側に接続するには

NAT ルータを経由してインターネットへと転送されたIPv4 パケットは、通常の

IPv4 パケットと何も変わりません。つまり、インターネットを流れている IPv4 パケットが NAT ルータを経由したものであるかそうではないのか、IPv4 パケットを見ただけでは判別できないのです。言い換えると、「インターネットで通信している相手との間に NAT があるかどうか」を判別しにくいということでもあります。

たとえば図 5.2 のように、同じ NAT ルータを利用する 2 人のユーザが、2 台の PC から同時に、インターネット上のある Web サーバと通信する場合を考えてみましょう。NAT ルータを経由した IP パケットの送信元 IPv4 アドレスは、PC1 と PC2 の両方の IP パケットともに、NAT ルータの WAN 側に設定された IPv4 アドレスに変換されます。



▶ 図 5.2 NAT ルータの例

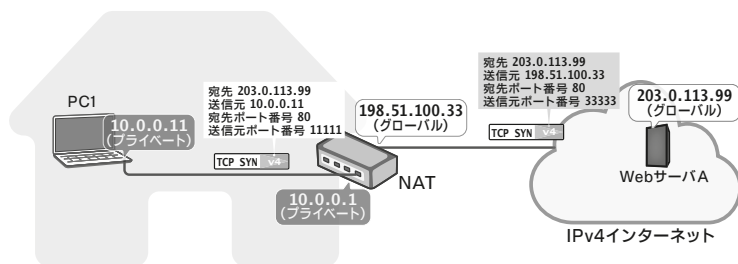
Web サーバに到達した PC1 と PC2 の IPv4 パケットは、同じ送信元 IPv4 アドレスを持つパケットになっているので、Web サーバにとっては「同じ IPv4 アドレスからの通信」に見えてしまいます。このように、NAT ルータが介在する現在の一般的なインターネット通信では、実際に通信をしている相手が複数台あったとしても、インターネット側からは 1 つに見えてしまうのです。

今度は、図 5.2 で NAT ルータが行っている作業をもう少し詳しく見るために、図 5.3 のような状況を考えてみましょう。

NAT ルータの LAN 側ネットワークは 10.0.0.0/24 というプライベート IPv4 アドレス空間です。それぞれの機器には次のようなプライベート IPv4 アドレスが設定されています。

- NAT ルータの LAN 側インターフェースの IPv4 アドレス：10.0.0.1 (PC1 のデフォルトゲートウェイになる)
- PC1 の IPv4 アドレス：10.0.0.11

一方、NAT ルータの WAN 側インターフェースには、ISP から割り当てられたグロー



▶ 図 5.3 NAT ルータの例

バル IPv4 アドレスが設定されています。

- NAT ルータの WAN 側インターフェースの IPv4 アドレス：198.51.100.33

このような環境で、PC1 からインターネット上にある 203.0.113.99 というグローバル IPv4 アドレスを持つ Web サーバ A への通信を考えます。Web サーバ A では TCP の 80 番ポートで Web サーバを立ち上げています。

PC1 から最初に送信されるのは、Web サーバ A の TCP 80 番ポートに接続するための TCP SYN パケットです。この TCP SYN パケットの送信元ポート番号は 11111 番になっているものとしましょう。まとめると、この TCP SYN パケットには次のような情報が設定されています。

- 宛先 IPv4 アドレス：203.0.113.99
- 送信元 IPv4 アドレス：10.0.0.11
- 宛先ポート番号：80
- 送信元ポート番号：11111

PC1 から Web サーバ A に対する TCP SYN パケットは、デフォルトゲートウェイである NAT ルータの LAN 側インターフェースへと送信されます。この TCP SYN パケットを受け取った NAT ルータは、TCP SYN パケットの送信元 IPv4 アドレスを 10.0.0.11 から 198.51.100.33 へと変更します。さらに、TCP SYN パケットの送信元 TCP ポート番号も変更します。ここでは 11111 から 33333 に変更したとしましょう。

- 送信元 IPv4 アドレス：10.0.0.11 → 198.51.100.33
- 送信元ポート番号：11111 → 33333

そして、これらの変更前と変更後の情報の組み合わせを、NAT ルータ内の NAT テーブルへと記録しておきます。NAT テーブルには表 5.1 のようなエントリが記録されることになります。

表 5.1: NAT テーブルのエントリ 1

プロトコル	TCP
LAN 側での宛先 IPv4 アドレスとポート	203.0.113.99:80
LAN 側での送信元 IPv4 アドレスとポート	10.0.0.11:11111
WAN 側での宛先 IPv4 アドレスとポート	203.0.113.99:80
WAN 側での送信元 IPv4 アドレスとポート	198.51.100.33:33333

NOTE

ここでは送信元 IPv4 アドレスと送信元ポート番号の変更について説明していますが、これは「IP パケットのヘッダでそれぞれに該当するフィールドを変更する」という意味では必ずしもありません。IP ヘッダと TCP ヘッダには、パケットに含まれるデータが途中で破損していないことを確認するために、パケットのデータをもとに計算されるチェックサムという値のためのフィールドがあります。NAT ルータではパケットを書き換えるので、このチェックサムを再計算したうえで、そのフィールドの値も変更する必要があります。NAT ルータで変更が必要になるのは、IP ヘッダにある IPv4 アドレスと TCP ヘッダにあるポート番号のフィールドだけではないのです。

NAT ルータで変換された TCP SYN パケットは、NAT ルータの WAN 側ネットワークインターフェースの IPv4 アドレスを送信元とするパケットとして、Web サーバ A に到着します。Web サーバ A では、TCP SYN パケットの接続を許可するために、TCP SYN+ACK パケットを返信します。この TCP SYN+ACK パケットは、送信元 IPv4 アドレスが 203.0.113.99 で、宛先 TCP ポート番号は 33333 になっています。

NAT ルータは、WAN 側ネットワークインターフェースからパケットを受け取ると、NAT テーブルを確認します。NAT テーブルには上記のようなエントリがあるので、203.0.113.99 からの宛先 TCP ポート番号 33333 のパケットは、PC1 へのパケットに変換して LAN 側へと転送します。結果、LAN 側にいる PC1 は特に何も気にすることなく Web サーバ A と通信できます。

では、このとき PC2 も Web サーバ A との通信を開始するとどうなるでしょうか。NAT ルータの挙動をわかりやすくするために、PC2 から Web サーバ A への送信元

TCP ポート番号も **11111** になっているとします。

PC2 から Web サーバ A に向けた TCP SYN パケットが NAT ルータに到着すると、NAT ルータは TCP SYN パケットの送信元 IPv4 アドレスを **10.0.0.22** から **198.51.100.33** へ変更します。このとき、送信元 TCP ポート番号についても **11111** から別の値に変更するのですが、ここでは **33334** へ変更したものとしましょう。PC1 からの通信のときとは、WAN 側に対する送信元ポート番号が異なっていることに注目してください。

- 送信元 IPv4 アドレス：10.0.0.11→198.51.100.33
- 送信元ポート番号：11111→33334

この変更についても、パケット情報の変更の記録が NAT テーブルに作成されます (表 5.2)。

表 5.2: NAT テーブルのエントリ 2

プロトコル	TCP
LAN 側での宛先 IPv4 アドレスとポート	10.0.0.22:80
LAN 側での送信元 IPv4 アドレスとポート	10.0.0.1:11111
WAN 側での宛先 IPv4 アドレスとポート	203.0.113.99:80
WAN 側での送信元 IPv4 アドレスとポート	198.51.100.33:33334

WAN 側での送信元ポート番号が PC1 からのものとは異なるので、Web サーバ A から返信されてくる TCP SYN+ACK パケットの宛先 TCP ポート番号も異なります。それを受け取った NAT ルータでは、NAT テーブルを参照することで、このパケットを LAN 側に転送する際には PC2 宛のものに変換すればいいとわかります。

NAT ルータでは、このような仕組みにより、グローバル IPv4 アドレスで運用されているインターネット側から NAT ルータに到達したパケットをプライベートネットワーク内の適切な機器へと転送処理します。IP アドレスとポート番号の変換を同時に行うことで 1 つの IPv4 アドレスを複数台で有効に利用できるようにする仕組みが NAT というわけです。

最後に、視点を変えてインターネット側から LAN 側との通信を考えてみましょう。上記で説明した、同じ NAT ルータを利用する 2 台の PC からの Web サーバ A への通信は、Web サーバ A からはどのように見えるのでしょうか。

言われてみれば当たり前の話だと思いますが、Web サーバ A 側からは、1 つのグ

ローカル IPv4 アドレス **203.0.113.99** から 2 つの TCP のセッションが張られているようにしか見えません。つまり、インターネットの側にあるサーバからの視点で見ると、PC1 と PC2 という別々の機器からの通信には見えません。1 つの IPv4 アドレスを複数台で使えるようにする NAT ルータの存在は、実際にどの端末がインターネットに接続しているかをわかりにくくする存在だといえるのです。

NOTE

TCP/IP では、送信元アドレスとポート、宛先アドレスとポート、およびプロトコルの 5 種類の情報で決まる 1 つの通信をフローと呼びます。NAT ルータでは「同じフローに属するパケットが同じフローとして扱われる」ようにパケットが変換されているともいえます。

■ NAT テーブルからの削除

NAT ルータでは、LAN 側からの通信で生成した NAT テーブルのエントリをいつまでも保持するわけではありません。NAT ルータは物理的な機器であり、記録などに使える資源は有限です。通信がまったく行われていないセッションに割かれている資源は、いつか解放する必要があります。NAT テーブルでエントリを継続する期間は**生存期間**や **lifetime** と呼ばれます。lifetime をどのように設定するかは、NAT ルータの性能にも影響する重要な要素であり、NAT ルータの実装や設計に依存します。

一見すると、通信セッションが完了したタイミングでエントリを削除すればよさそうに思えるかもしれませんが、しかし、たとえば Web ブラウジング中にいきなりパソコンの通信ケーブルを抜いてしまい、さらにパソコンの電源を落とした状況を考えましょう。Web サーバと通信している最中のパソコンは、Web サーバに対して「TCP 接続を終了する」という連絡ができないまま電源を落とされてしまっています。このように、インターネットでは通信セッションが突然途切れることもあるので、「確実にセッションが切れた」判断ができないことが少なくないのが現状です。

この場合、Web サーバ側にはパソコン側で起きた変化を知る術がないので、通信相手が復帰した場合に備えて TCP 接続の状態を一定時間維持します。つまり TCP では、いったん接続が成立すると、相手が突然音信不通になっても一定の期間は TCP 接続状態が維持されるのです。

Web サーバでは、その一定時間が経過すれば TCP 接続の状態を破棄できます。しかし、途中経路には NAT ルータもあります。NAT ルータには、Web サーバにおいて TCP 接続の状態が破棄された瞬間を知ることはできません。NAT ルータがある環境

では、LAN側のパソコンとWAN側のWebサーバのどちらか片方、もしくは両方が明示的にTCP接続を終了せずにTCPセッションが消えてしまったような場合、NATルータのNATテーブルに使われることがないゴミが残ってしまうのです。

そのためNATルータでは、NATテーブルに含まれている利用されていないTCP通信を削除するタイミングを自身で決める必要があります。「このTCP通信は破棄された」と判断するタイミングがlifetimeというわけです。

5.1.4 TCP以外のプロトコルの扱い

ここまではTCP通信を例に一般的なNATについて説明してきましたが、NATはTCP以外のプロトコルにも対応しています。ただし、IPv4パケットの送信元IPv4アドレスとポート番号、宛先IPv4アドレスとポート番号をそれぞれ別のものに変換するという単純な処理だけでは実装できません。

まずUDPについては、TCP同様にポート番号があるので、UDPのポート番号をもとにNATテーブルにエントリを追加することで基本的な動作は実現できます。ただしUDPには、TCPにおけるSYN、FIN、RSTのような「通信の開始や終了を明示するパケット」が存在しません。そのためTCPのように接続の開始や維持が明示的でなく、その点でNATでの扱いが難しくなります。NATルータの実装では、「LAN側から通信が発生したときのUDPパケットのポート番号を参考にしてNATテーブルのエントリを追加しつつ、該当するエントリが一定時間使われなければタイムアウトする」といった処理が施されています^{†1}。

ICMPも、UDPと同様に、通信の開始と終了を把握するのが困難なプロトコルです。そのうえ、ICMPにはTCPやUDPにおけるポート番号のような通信のフローを明確にする識別子が存在しないので、NATでの扱いはさらに難しくなります。NATルータの実装では、ICMPパケットのタイプフィールドや中に含まれているメッセージの内容に応じ、ICMPパケットが変換されています。ICMPパケットが運んでいるデータ部分にIPv4アドレスが記述されている場合には、その情報も適切に変更する必要があります。

さらにNATにおける扱いが困難なプロトコルとして、ファイル転送で利用されるFTP（File Transfer Protocol）や、IP電話などで使われるSIP（Session Initiation Protocol）があります。FTPやSIPでは、TCPセッションが確立した後、そのTCPセッションを通じてIPv4アドレスの情報をやり取りします。同時に張られた複数のセッ

^{†1} タイムアウト処理自体はTCPのエントリに対しても実装が必要です。前述のように、TCPにおいてもFINやRSTなどが送信されずに接続が終了する状況が考えられるからです。

ションを識別して既存セッション中で新規セッションの情報を伝えるために、ペイロード中にIPv4アドレスやポート番号を情報して含むことがあります。そのため NAT ルータでは、FTPやSIPのIPv4パケットを変換する場合、IPヘッダだけではなくTCPパケットのデータ部分に含まれるメッセージの中身も変換する必要があります。TCPパケットの中身を含めて変換する機能は、もはや単なる NAT ではなく、ALG (Application Level Gateway) と呼ばれています。

■ ALG

SIPやFTPは、ペイロードにIPアドレスに関する情報を含みます。そのようなパケットでNATルータが介在し、IPヘッダやトランスポート層のヘッダを変更しただけだと、通信が成立しなくなる可能性があります。ペイロードにIPアドレスなどの情報を含む通信では、NATルータにおいてペイロードの中身も含めた変換が必要なのです。

この問題を解決するため、各プロトコルの中身を理解しつつ通信に利用されるパケットの変換を行う機器を、ALG (Application Level Gateway) と呼びます。NAT を考えるうえでは、いわゆる NAT だけではなく、ALG の存在も忘れないことが重要です。

なお、ALG は万能ではありません。たとえば、IPsecを利用して通信が暗号化されている場合には、変換が必要なIPアドレスなどの情報がパケットの暗号化された部分に含まれている可能性があります。途中経路にあるNATルータは、ALGとしての機能を持っていたとしても、その通信の内容を復号できなければパケットを適切に変換できません。

5.1.5 いわゆる「NAT越え」

NATルータの内側にあるネットワークは、プライベートIPv4アドレスで運用されています。インターネットからは分離されたネットワークですが、内側からインターネットへの通信が開始された時点でNATテーブルのエントリが作成され、それによってインターネットから内側への通信が可能になる場合もあります。インターネット側からNATの内側に向けた通信は、NAT機器の実装に依存しますが、一般には著しく制限されています。

インターネット側からNATの内側への通信を可能にする場合には、内側にいる通信相手をどのように指定すればよいかを、インターネット側のサーバなどが知る必要があります。そのような手法はUNSAF (UNilateral Self-Address Fixing) と呼ばれ

ており、UNSAFが満たすべき要件についてはRFC 3424で定義しています^{†2}。

NATの外側から内側に対する通信のための手法としては、STUNやTURNといったものがあります。STUNやTURNは、P2P的な接続を利用している対戦ゲームや、音声およびビデオ通話のアプリケーションなどで使われています。

NATルータが特定のポート番号へのパケットをインターネットから受け取ったときに、そのパケットをNATの内側の指定した機器へと転送するという手法もあります。こうした方法は「ポート開放」と呼ばれることもあります。そのようなNATルータの挙動については、UPnP IGD (Universal Plug and Play Internet Gateway Device) というプロトコルで規定されています。手動で転送設定が可能なNAT機器もあります。

5.1.6 通常のNATとv6プラスのNATの違い

本節では、プライベートIPv4アドレスとグローバルIPv4アドレスを変換するという、一般的なNATルータの動作を簡単に説明しました。最後に、v6プラスにおけるNATと一般的なNATの違いを整理しておきます。

v6プラスでは、フレッツ網でIPv6 IPoEを利用し、JPNEとIPv4 over IPv6 トンネルを張ることで、プライベートIPv4アドレス空間からIPv4インターネットへと接続できます。その際、NATに対してグローバルIPv4アドレスを割り当てているのはJPNEになります。すなわち、WAN側のグローバルIPv4アドレスとして設定されるのは、JPNEに割り振られたグローバルIPv4アドレスです。

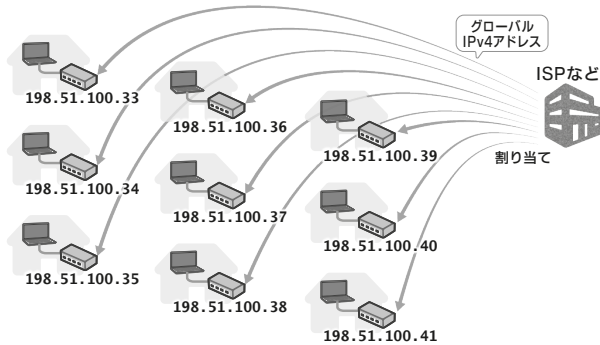
v6プラスにおけるNATは、第4章で説明したMAP-Eによるものであり、通常のNATとは異なる部分があります。通常のNATでは、図5.4のように、1つの回線契約に対して1つのグローバルIPv4アドレスが割り当てられます。

一方、v6プラスが利用しているMAP-Eでは、図5.5のように複数の回線契約ごとに1つのグローバルIPv4アドレスが割り当てられます。そして、この1つのグローバルIPv4アドレスを複数の回線契約で共有するために、それぞれTCPやUDPにおけるポート番号の範囲が割り振られるようになっています。

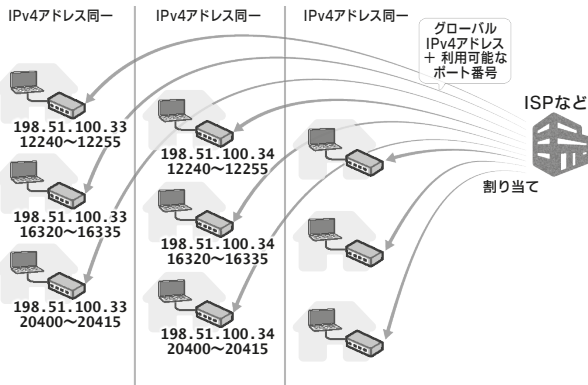
v6プラスでも、NATを行うのはユーザ側に設置されているNATルータです。ただし、NATルータからIPv4インターネットへと送信されるパケットのTCPやUDPのポート番号は、一般的なNATの場合とは異なり、JPNEによって割り振られた範囲内になっている必要があります。

v6プラスでは、NATルータが自分自身に割り当てられたグローバルIPv4アドレ

^{†2} RFC 3424はIABによるInformationalなRFCです。



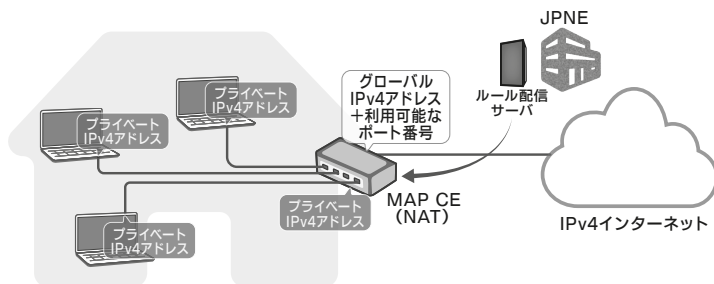
▶ 図 5.4 通常の NAT



▶ 図 5.5 v6 プラスでの NAT

スとポート番号の範囲を知るのに、MAP-Eに必要な情報を配信するための**ルール配信サーバ**を利用しています。NAT ルータは、JPNEのネットワークで運用されているルール配信サーバから必要な情報を取得し、指定されたポート番号の範囲での NAT が可能になります（図 5.6）。

このように v6 プラスで利用される NAT ルータでは、通常の NAT ルータとしての機能だけでなく、MAP-Eのルール配信サーバから割り当てられる範囲のポート番号のみを利用した NAT を実行できる必要があります。これには、「v6 プラス対応 NAT ルータ」を利用するか、「既存の NTT ホームゲートウェイに対して JPNE ソフトウェアをインストールする」という 2 通りの方法があります。



▶ 図 5.6 v6 プラスでの NAT

MAP-E の仕組みについては第 4 章を参照してください。また、MAP-E を活用した v6 プラスのサービスの詳細については、第 6 章で説明します。

5.2 NAT 機器に要求される挙動

前節では多くの NAT の動作を「NAT ルータの実装に依存する」として説明しました。このことからわかるように、NAT には明確な仕様が決められているわけではありません。

とはいえ、NAT 機器に要求される挙動については、RFC 4787 と RFC 5382 でまとめられています。あくまでも大まかな要求事項であり、NAT という仕組みを詳細に定義しているわけではありませんが、NAT 越えに影響を与える仕様なども紹介されています。

- RFC 4787 “Network Address Translation (NAT) Behavioral Requirements for Unicast UDP”

ユニキャスト UDP における NAT 機器の挙動とそれに対する要求がまとめられています。

- RFC 5382 “NAT Behavioral Requirements for TCP”

RFC 4787 に書かれている内容を前提として、TCP における NAT 機器の挙動とそれに対する要求がまとめられています。

NAT 機器の挙動を論じるにあたり、RFC 4787 と RFC 5382 では、「マッピング」と「フィルタリング」という 2 つの側面に分けて考えられています。

- NAT 内部で使われる IPv4 アドレスおよびポートと、外部で使われる IPv4 アドレ

スおよびポートの対応（マッピング）には、どういう基準が必要か

- NAT 内部への転送を許可（フィルタリング）するには、外部からのパケットの何を判断基準とすべきか

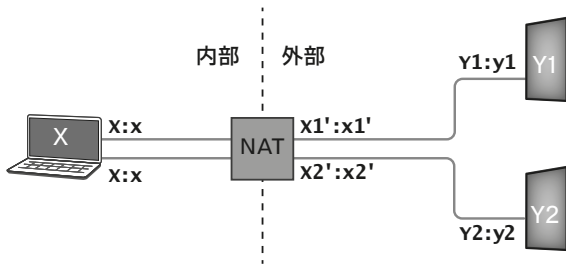
たとえば、家庭内ネットワークから IPv4 インターネット宛のパケットに含まれる情報を NAT ルータでどのように変換するかは、マッピングに依存します。一方で、外部から内部への通信の許可や拒否をどう考えるかは、フィルタリングの方法に依存します。マッピングとフィルタリングはまったく別の動作なので、どのようなフィルタリング方法を採用するかがマッピングの手法に依存することはありません。

いわゆる NAT 越えを考えると、越えるべき NAT 機器がどのようなマッピング手法とフィルタリング手法を採用しているかが重要になります。それにより NAT 越えを行う際に利用可能なアプローチが推測可能となるからです。

5.2.1 NAT 機器におけるマッピングの動作の種類

プライベート IPv4 アドレス空間から送信されるパケットは、NAT 機器により、グローバル IPv4 アドレス空間用のパケットへと書き換えられます。NAT 内部のノードから外部のノードへの通信が開始されると、NAT 機器では、パケットの送信元 IPv4 アドレスとポート番号を変換して送り出します。

いま、図 5.7 のような状況で、NAT 内部のノード X から NAT 外部のノード Y1 およびノード Y2 への通信を考えます。



▶ 図 5.7 内部ノードから外部ノードへの2つの通信

図 5.7 では、ノードの IPv4 アドレスを大文字で、ポート番号を小文字で表しています。ノード X からノード Y1 に送信されるパケットの送信元は X:x、宛先は Y1:y1 です。NAT 機器により、送信元は X1':x1' に変換されます。

ここで、同じノード X からノード Y2 へ通信を開始したとします。そのパケットの送

信元は $X:x$ 、宛先は $Y2:y2$ です。NAT機器では、やはり送信元を $X2':x2'$ に変換しますが、このとき同じノード X からの通信として、 $Y1$ への通信のときと同じ $X1':x1'$ を $X2':x2'$ として使うべきでしょうか。それとも、宛先が別であれば送信元のマッピングも別にして、 $X1':x1'$ とは異なる $X2':x2'$ を使うべきでしょうか。

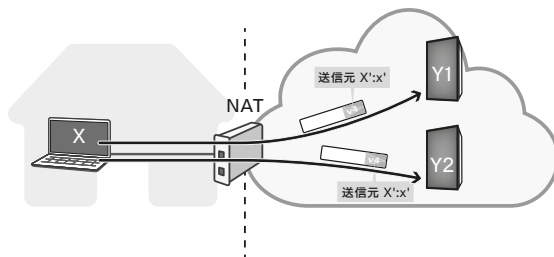
RFC 4787では、この問題について、EIM、ADM、APDMという3種類の動作が示されています。

- EIM (Endpoint-Independent Mapping、エンドポイント非依存マッピング)

$X:x$ が同じであれば、宛先が $Y1:y1$ か $Y2:y2$ によらず、 $X1':x1'$ と $X2':x2'$ として同じ値を使います。つまり、NAT内部のIPv4アドレスとポート番号の組を、インターネット側にあるノードのIPv4アドレスとポート番号によらず同じものに変換するという動作です。

たとえばNAT内部から、グローバルIPv4アドレス192.0.2.1を持つインターネット側のノードと、UDPで通信したとします。このとき、NAT機器によって変換されたインターネット側での送信元ポート番号が30000であったとしましょう。さらに同じノードから、別のグローバルIPアドレス203.0.113.2に対する通信が行われたときも、192.0.2.1に対する通信のときと同じ30000というポート番号を再利用するのがEIMです。文字どおり、インターネット側のエンドポイントには依存せず、マッピングを再利用します。

EIMの概要を図5.8に示します。



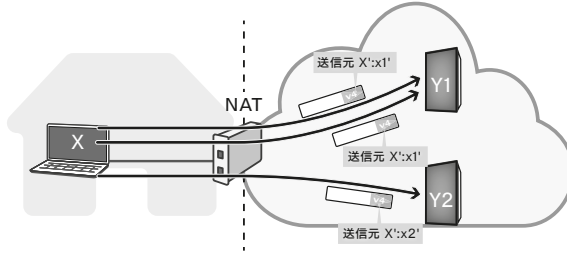
▶ 図 5.8 EIM (エンドポイント非依存マッピング)

- ADM (Address-Dependent Mapping、アドレス依存マッピング)

同じ内部ノードから、同じグローバルIPv4アドレスを持つインターネット側のノードへの通信では、マッピングを再利用します。異なるグローバルIPv4アドレ

スを持つノード宛の通信は、同じ NAT 内部のノードからの通信であっても、異なるマッピングとします。

ADM の概要を図 5.9 に示します。

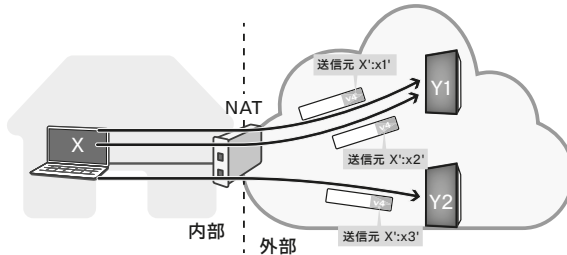


▶ 図 5.9 ADM (アドレス依存マッピング)

- APDM (Address and Port-Dependent Mapping、アドレスとポート依存マッピング)

ADMに加えて、さらにインターネット側ノードのポート番号が同じ場合にのみマッピングを再利用します。

APDMの概要を図 5.10 に示します。



▶ 図 5.10 APDM (アドレスとポート依存マッピング)

RFC 4787 と RFC 5382 では、NAT 機器が満たすべき必須の要件として、EIM によるマッピングを挙げています。EIM により、UNSAF のプロセスが実行できるようになるからです。v6 プラスにおける NAT でも、v6 プラス対応メーカーの実装に依存しますが、EIM を実装することが推奨されています。

5.2.2 NAT機器におけるフィルタリングの動作の種類

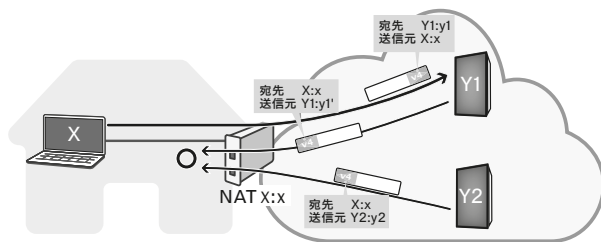
NAT内部のノードX (X:x) から、外部のノードY (Y:y) への通信が新たに開始されると、NAT機器ではX:xとY:yの対応が決まります。このとき、送信元をY:yとするパケットを外部から受け取ったNAT機器は、それを内部に転送すべきでしょうか。それともフィルタリングすべきでしょうか。

RFC 4787では、フィルタリングの動作についても3種類の基準を示しています。

- EIF (Endpoint-Independent Filtering、エンドポイント非依存フィルタリング)

送信元によらず、内部ノードX:xを宛先としないパケットのみが破棄されます。つまり、内部ノードX:xから任意のグローバルIPv4アドレスへの通信があれば、NAT内部へとパケットが転送される穴がNAT機器に構築されます。

EIFの概要を図5.11に示します。

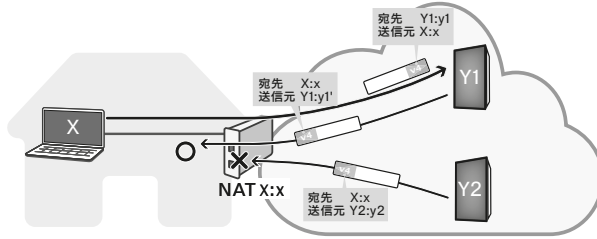


▶ 図 5.11 EIF (エンドポイント非依存フィルタリング)

- ADF (Address-Dependent Filtering、アドレス依存フィルタリング)

内部ノードX:xを宛先としないパケットは破棄されます。それに加えて、内部からの送信先になったことがある外部のIPv4アドレスを送信元とする返信パケットのみをNAT内部へと転送します。つまり、NAT内部からグローバルIPv4アドレスに対してパケットが送信されたことがあれば、そのグローバルIPv4アドレスからNAT内部へのパケットを通過させるという動作です。

ADFの概要を図5.12に示します。

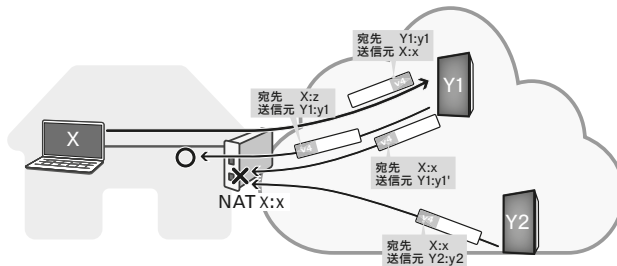


▶ 図 5.12 ADF (アドレス依存フィルタリング)

- APDF (Address and Port-Dependent Filtering、アドレスとポート依存フィルタリング)

ADFに加えて、インターネット側からのパケットの送信元のポート番号についてもフィルタリングの対象にします。つまり、APDFが採用されているNATでは、内部からの送信先になったことがある外部のIPv4アドレスとポートを送信元とする返信パケットのみをNAT内部へと転送します。

APDFの概要を図5.13に示します。



▶ 図 5.13 APDF (アドレス依存フィルタリング)

注意が必要なのは、マッピングとフィルタリングは異なる概念である点です。つまり、マッピングの動作がEIMであるかADMであるか、あるいはAPDMであるかは、フィルタリングの動作に影響しません。NAT機器の挙動は、マッピングの挙動とフィルタリングの挙動の組み合わせとして捉えられます。たとえば、マッピングの挙動はEIMである一方で、フィルタリングの挙動はAPDFという実装も考えられます^{†3}。

^{†3}すでに廃止されたRFC 3489において定義されていたPort Restricted Coneがまさにそれです。

RFC 4787では、通信の透過性が重要である場合にはEIFによるフィルタリングを推奨しています。UNSAFでは、外部からの通信がNAT機器を越えられるようにするために、通信に使うべきアドレスとポート番号を測定します。NAT機器を通してリアルタイムメディアやオンラインゲームなどのP2P的な接続を利用できるようにすることが考慮された要件だといえるでしょう。

v6 プラスにおけるNATでは、フィルタリングはv6 プラス対応メーカーの実装に依存します。

5.2.3 NAT機器が満たすべき要件

NAT機器に対する要求仕様の詳細については、本節で説明したアドレスとポートのマッピングおよびフィルタリングに関する挙動をはじめ、さまざまなNATの挙動に対する考慮が必要になります。RFC 4787ではNATの挙動を次のように分類しています。

- アドレスとポートのマッピング
- ポート割り当て
- ポートパリティ（ポート番号の偶奇）
- ポートの連続性
- マッピングの更新
- 外部IPアドレス空間と内部IPアドレス空間の競合に関する挙動
- フィルタリング
- ヘアピニング（NAT機器を通じたエンドノード同士の通信）
- ALG
- 決定論的な性質
- ICMP Destination Unreachableの挙動
- フラグメンテーションに関する挙動

そのうえでRFC 4787では、NATに対する14の要求事項を規定しています。たとえば、ヘアピニングに対応することが必須とされていたり、RTPとRTCPがそれぞれ偶数と奇数のポート番号を利用する仕様を考慮してポートパリティの維持が推奨されたりしています。

■ NATはファイアウォールではない

NAT機器では、内部から外部への通信に応じて、動的にフィルタが追加されます。これはSFI（Stateful Filter Implementation）と呼ばれ、簡易なセキュリティのため

の手法としてとらえられることがあります。「NATが使われないIPv6はIPv4よりも攻撃を受けやすい」と考えられることさえあります。

そうした考え方に対し、RFC 4864では、NAT機器が実現する簡易なセキュリティ機能は「ないよりマシ程度（‘better than nothing’ level of protection）」でしかないと反論しています。NAT機器によるSFIは、セキュリティを実現する目的で設計されているのではなく、あくまでもNATを実現するためのものです。RFC 4864によれば、SFIはファイアウォールでも実現可能であり、IPv4においてNATのセキュリティ上の貢献だと信じられている機能はIPv6においてもSFIで実現できるとされています。

5.3 大規模な NAT (CGN) とその課題

IPv4アドレス在庫枯渇問題が発生する数年前ごろから、グローバルIPv4アドレスの利用数を圧縮するために、CGN（Carrier Grade NAT）と呼ばれる大規模なNATの利用に注目が集まるようになりました。CGNは、その名のとおり、通信事業者などのネットワークで大規模に運用される形態のNATです。本書を執筆している2019年末の時点では、ISP、CATV網、スマホ向けIPv4インターネット接続などの環境においてCGNが使われることがあります。

第4章で説明したように、v6プラスではIPv4インターネット接続にMAP-Eを採用しており、これにより大規模NATの機能も実現されています。そのため、CGNそのものを導入しなくても、必要なグローバルIPv4アドレスの利用数を圧縮して節約できています。

とはいえ、IPv4アドレス在庫枯渇問題に伴って発生しがちな一般的な課題については、v6プラスでも似た問題への対処が必要になるでしょう。MAP-Eで実現しているNATについて理解するという意味でも、CGNに関連する議論を背景として押さえておくとv6プラスへの理解が深まるでしょう。

そこで本書では、v6プラスにおけるNATの解説を補足するために、ISPで導入されることがあるCGNについて紹介します。

5.3.1 CGNと一般のNATの違い

CGNの仕組みは、基本的には家庭内ネットワークなどで利用される一般のNATと同じです。ただし、導入の目的と利用環境（1つのIPv4アドレスを利用する契約の数）がCGNと一般のNATとでは大きく異なります。

■ 導入目的の違い

一般のNATには、「ISPから割り当てられる1つのIPv4アドレスで複数の機器をインターネットにつなぐ」という目的があります。通常、ユーザがISPと契約すると、その契約回線に対して動的にグローバルIPv4アドレスが割り当てられます。この1つのグローバルIPv4アドレスで、プライベートIPv4アドレス空間に接続した複数の機器からインターネットを利用するのが一般のNATの導入目的です。

それに対し、CGNの導入目的は、グローバルIPv4アドレスの利用数を節約することにあります。具体的には、1つの回線契約ごとに1つのグローバルIPv4アドレスを割り当てるのではなく、1つのグローバルIPv4アドレスを複数の回線契約で共有することを目指します。1つの回線契約ごとに1つのグローバルIPv4アドレスを割り当てると、回線契約数と同じ数だけのグローバルIPv4アドレスが必要になりますが、複数の回線契約を集約することで、より少ないグローバルIPv4アドレスでのインターネット接続サービスを多くのユーザに提供できるようになります。

■ 利用環境の違い

CGNは、グローバルIPv4アドレスとプライベートIPv4アドレスを変換するNAT機器の場所も、一般のNATとは異なります。

一般的なNATでは、回線契約を行っているユーザ側が運用するNAT機器によりアドレス変換を行います。それに対し、CGNでは、ISPのような通信事業者の構内でNAT機器を運用し、その1つの機器に多くの契約者が集約されます。

一般的なNAT機器が扱うグローバルIPv4アドレスは、1つのプライベートネットワークごとに1つだけです。一方、CGNでは、単一のNAT機器が複数のグローバルIPv4アドレスを利用します。CGNでは扱っているプライベートネットワークの規模が大きいのので、1つのプライベートネットワークに対して複数のグローバルIPv4アドレスを使うことになるからです。

なぜ、プライベートネットワークの規模が大きくなると、複数のグローバルIPv4アドレスが必要になるのでしょうか。実は、NAT機器には同時に扱える通信セッション数に論理的な上限があり、その上限では大規模なネットワークにおける接続サービスに支障が生じるのです。

ここで、NAT機器では「同じフローに属するパケットが同じフローとして扱われる」ようにパケットを変換するということを思い出してください。すでに説明したように、フローは、送信元アドレスとポート、宛先アドレスとポート、およびプロトコルの5種類の情報で決まります。このフローを一意に識別できる数が、NATにおける同時通信セッション数の論理的な上限になります。

TCP の 80 番ポートを利用する Web 通信で考えてみましょう。TCP ヘッダのポート番号フィールドは 16 ビットなので、ポートとして利用できる値は 65536（もしくは、16 ビットがすべて 0 の場合とすべて 1 の場合を除いた 65534）個です。したがって、グローバル IPv4 アドレスが 1 つであれば、一意に識別できるフローは 65536 が上限になります。ある特定のグローバル IPv4 アドレスに対して NAT が扱える通信セッションの数は、NAT で利用されるグローバル IPv4 アドレスの数によって論理的に制限されてしまうということです。このように論理的な同時接続数の上限が存在するので、大規模なプライベートネットワーク向けの CGN では、複数のグローバル IPv4 アドレスを利用する必要があります。

さらに、ユーザごとに同時に通信が可能なセッション数に上限を設定できる機能が CGN に要求される場合もあります。複数のグローバル IPv4 アドレスを多数のユーザで共有して使うことが前提なので、たとえば単一のユーザが大量の TCP セッションを確立してしまうと、他のユーザが使える論理的な TCP セッション数が減ってしまうからです。論理的なセッション数の上限だけではなく、CGN の物理的なメモリ量などの物理的な制約もあるので、セッション数の上限についても複数ユーザが条件を共有しなければなりません。

5.3.2 CGN が抱える課題

IPv4 アドレス在庫が枯渇すると、ISP はこれまでのように「必要になったら新しい IPv4 アドレスを申請して割り振りを受ける」ことができなくなります。これは、IPv4 アドレスの総量がこれ以上増えなくなるということであり、ISP はそれまで割り振りを受けた IPv4 アドレスを節約しながら使い続けなければなりません。その節約の手段として CGN が活用されることが増えていますが、CGN には単純にユーザに対してグローバル IPv4 アドレスを配布する従来型のインターネット接続サービスと比較すると、さまざまな課題もあります。

v6 プラスは CGN とは直接関係しないので、ここで挙げる課題は v6 プラスが抱える問題というわけではありません。ただし、CGN に限らず大規模 NAT で一般的に課題となりうる問題については、v6 プラスで採用されている MAP-E でも類似した問題が発生する可能性があります。

■ サーバのアクセスログに関する対応

IPv4 でのインターネット接続サービスの裏側で、ISP などが CGN を利用することが増えると、すでに家庭内ネットワークに設置されている NAT と合わせて、経路全体で 2 段階の NAT が関与する環境が増えます。これに伴い、Web サービスなどを提供し

ている側にも対応を迫られる課題があります。多くのユーザが同じIPv4アドレスにまとめられてしまうので、Webサーバ側でプログラムを書いたりサーバを管理したりする側の視点から見ると、ユーザとして見える相手のIPv4アドレスのパリエーションが劇的に減ることになるからです。

具体的な対応としては、サーバ側でアクセスログに記載する項目でTCP送信元ポート番号を追加する必要が生じます。ISPなどがCGNを導入すると、そのCGN通過後のグローバルIPv4アドレスは複数の契約者によって利用されているものとみなせます。そのため、IPv4アドレスをアクセスログに残すだけでは、実際に通信を行った契約回線を特定できません。契約回線を特定するためには、IPv4アドレスとTCPポート番号の両方が必要になるのです。

RFC 6302では、インターネットに接続されたサーバでは以下の項目をログとして保存することを推奨しています。

- 送信元ポート番号
- タイムスタンプ
- トランスポートプロトコル（たとえばUDPやTCP）
- アプリケーションが複数のポート番号を利用する場合には、宛先ポート番号も

ISPなどでCGNが使われるようになる前は、TCPやUDPのポート番号をWebサーバなどのアクセスログに記載することは稀でした。CGNの普及に伴い、現在ではWebサーバなどのアクセスログにポート番号を記録することが求められるようになりつつあります。日本では、平成27年（2015年）12月9日にプロバイダ責任制限法（「特定電気通信役務提供者の損害賠償責任の制限及び発信者情報の開示に関する法律」）の第4条第1項「発信者情報を定める省令」の一部を改正する省令が公布され、開示の対象となる発信者情報にポート番号が追加されました^{†4}。

なお、サーバのアクセスログについては、NAT機器での時刻情報とサーバログでの時刻情報をどのように同期すればよいかという課題もあります。

サーバのアクセスログに関する大規模NATの課題は、v6 プラスでIPv4 アドレス共有を実現しているMAP-Eにおいても同様に対処が必要になります。

^{†4} 「特定電気通信役務提供者の損害賠償責任の制限及び発信者情報の開示に関する法律第四条第一項の発信者情報を定める省令」：

https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=414M60000008057

■ P2P的な通信への対応

対戦型のオンラインゲームや通話アプリケーションなど、ユーザ同士が直接通信するタイプの P2P (Peer-to-Peer) 通信は、一般に NAT の存在により阻害される可能性があります。CGN では、NAT が家庭だけではなく ISP などのネットワークでも行われることになるので、P2P 的な通信がさらに困難になります。

たとえば、多くの SOHO ルータで実装されている UPnP IGD による NAT 越えは、CGN 環境下では利用できません。UPnP は、その名のとおりに、ネットワークに接続された機器を「プラグアンドプレイ」するための標準です。マルチキャストで対応機器を発見し、発見した対応機器に対して SOAP を使って情報取得や制御を行います。IGD は、UPnP でインターネットに接続されたゲートウェイを制御するための機能です。

UPnP IGD は、主にユーザセグメントでの利用を想定された仕様です。実際、UPnP で利用されるマルチキャストアドレスは 239.255.255.250 であり、家庭内にある NAT ルータを越えるようなマルチキャストルーティングは考慮されていません。主に同一セグメント内での利用が想定されており、CGN が存在するような環境は想定されていないのです。

ただし、いわゆる NAT 越えには UPnP 以外にもさまざまな手法があります (そもそもセキュリティ上の理由によって UPnP 機能がデフォルトでは無効の機器も増えています)。たとえば、WebRTC などで利用される STUN も、そうした NAT 越えのための手法のひとつです。CGN が存在する環境での P2P 的な通信は、そうした他の手法を使って対応していくことになるでしょう。

■ 通信セッションの生存時間

CGN が存在する環境では、TCP や UDP などの通信セッションの生存期間をどれくらいにするかという課題もあります。通信がまったく発生していないセッションに割かれている資源をいつ解放するかによって、単一の NAT 機器で収容できるユーザ数も変わってきます。

インターネットにおける通信セッションは、突然途切れることもあるので、「確実にセッションが切れた」と判断できないことも多くあります。たとえば、Web サイトの閲覧中にいきなりパソコンの通信ケーブルを抜けば、その瞬間の TCP 接続は途切れてしまいます。

しかし、Web サーバ側にはインターネットの向こう側にいるパソコンの状態はわからないので、通信相手が復帰した場合に備えて、その際の TCP 接続の状態が一定時間は維持されます。一定時間が経過すれば Web サーバにおける TCP 接続の状態も破棄

されますが、途中経路に存在する CGN 機器には、Web サーバにおいて TCP 接続の状態が破棄された瞬間はわかりません。

そのため、何らかの期間を設定することで「通信が破棄された」ことを自分で判断しなければなりません。この期間が短いと、通信は継続しているにもかかわらずパケットが一定時間送信されなかったことで CGN における状態が破棄されてしまい、通信が切断されてしまうという問題が発生する可能性が高まります。その一方で、この期間が長いと利用可能なポート番号が枯渇してしまい、新しい通信セッションが確立できなくなるといった問題が発生する可能性が高まります。

■ ジオロケーション

IPv4 アドレスは、あまり正確な手法とは言い難いものの、通信相手が物理的に存在している地域の推定に使われることがあります。CGN は複数のユーザを1つのグローバル IPv4 アドレスに集約するので、CGN によって集約される範囲によっては、従来よりも IPv4 アドレスによる物理的な位置情報の推定誤差が大きくなる可能性があります。

■ ブラックリスト

ネットへの悪質な書き込みや、迷惑メール送信行為に対するブラックリストとして、IPv4 アドレスが利用されることがあります。CGN が存在する環境では、複数のユーザが同時に同じグローバル IPv4 アドレスを利用するので、ブラックリストにそのうちの一部の IPv4 アドレスが登録されてしまうと無実のユーザまでもが影響を受ける可能性があります。

■ 運用コストの増大

CGN では、複数の契約を1つの IPv4 アドレスに集約するために、多くの契約ユーザについて NAT による変換作業を大規模に実行する必要があります。これに伴う運用コストは、CGN の大きな欠点とされています。

集約された IPv4 アドレスに個々の契約ユーザをどのように振り分けるかは、実装に依存します。その手法のひとつとして、TCP や UDP のポート番号をユーザに応じて区分するというものがあります。この手法では、TCP と UDP のポート番号をユーザ単位で割り当てることにより、IPv4 パケットに含まれる IPv4 アドレスとトランスポート層のポート番号の組から自動的にユーザを判別します。これにより CGN での処理が効率化できるという特徴があります。

v6 プラスで採用されている MAP-E も、ポート番号を利用した IPv4 アドレスの共有手法だといえます。ただし、v6 プラスで採用されている MAP-E では、NAT を行うの

はユーザ側にある CPE です。各 CPE は、各契約ユーザが利用可能な IPv4 アドレスとポート番号を把握しているので、自律分散的に CGN に類似した IPv4 アドレス共有ができます。ポート番号を契約ユーザに割り当てることによって、中央にあるルータがステートレスに運用できることから、負荷分散が可能になっているのです。このため、MAP-E は CGN と比べて運用者の負荷が低く、低コストで実現しやすい方式だといえます。

■ プロトコルに関する課題

ICMP には、TCP や UDP のようなポート番号の概念がないので、NAT による変換を行う際にフローの一意性を確保するために特別な対応が必要です。特に、MTU が小さすぎてパケットが転送できず、かつフラグメンテーションができない場合に送信される ICMP Message Too Big メッセージを CGN 機器で転送できないと、Path MTU Discovery を利用しているアプリケーションが正しく動作せずに通信ができなくなる可能性があります。NAT における ICMP の扱いについては RFC 5508 で議論されています。なお、ICMP の扱いは NAT64 などの IPv4/IPv6 トランスレータでも課題とされています。

フラグメンテーションも CGN における課題のひとつです。IPv4 パケットがフラグメント化されるとき、TCP や UDP などのトランスポートプロトコルヘッダは、分割されたパケットのうち最初のパケットにのみ含まれます。分割されたパケットのうち 2 つめ以降にはトランスポートプロトコルのヘッダが含まれないため、CGN において特別な処理が必要となります。

自宅にサーバを設置し、外部からアクセス可能にする手法のひとつとして、ダイナミック DNS が利用されることがあります。ISP によって CGN が運用されるようになると、ダイナミック DNS を利用した外部からのアクセスを実現するのが困難になります。

RFC 6269 には、NAT などの IP アドレス共有技術全般における課題がまとめられています。例として CGN、DS-Lite、NAT64、A+P などが登場しますが、個々の技術についての課題というよりは、大規模に IP アドレスを共有することに伴う課題が全般的に議論されています。

RFC 7021 には、2013 年時点での CGN による通信への影響に対する調査結果がまとめられています。

[書籍版では空白のページです]

v6 プラス詳解

第3章でフレッツ網とIPv6 IPoEについて、第4章でMAP-Eについて、それぞれ紹介しました。この章では、それらを利用したv6 プラスについて、さらに詳しく解説します。

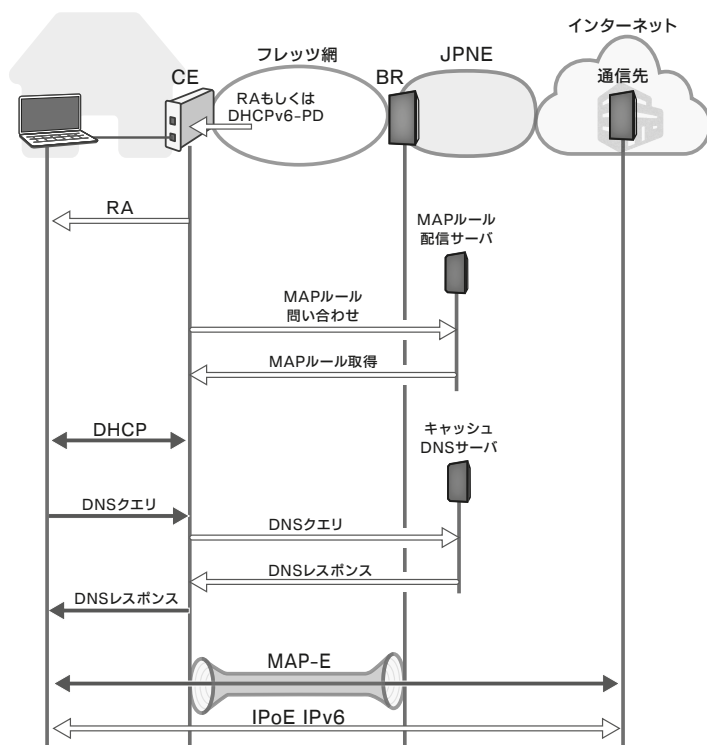
6.1 通信までの一般的シーケンス

ユーザがCPEを起動してからv6 プラスが利用できるまでのシーケンスを図6.1に示します。

まず、MAP CEとして稼働するCPEに対して、フレッツ網からIPv6 アドレスが割り当てられます。ひかり電話を利用している場合はDHCPv6-PD (DHCPv6-Prefix Delegation)、利用していない場合にはRA (Router Advertisement、ルータ広告) によるIPv6 アドレス割り当てが行われます。

RAは、IPv6の基本的な仕組みのひとつです。Router Advertisement の Advertisement は、「広告」という意味を持つ英単語です。Router Advertisement メッセージは、ルータの存在をサブネット内に広告すると同時に、ルータと通信する際に必要となる各種情報を伝える役割があります。

DHCPv6-PDは、ブロードバンドルータなどのCPEに対してIPv6 アドレスプレフィックスを割り当てる用途に使われます。IPv4ではISPと契約を行っているユーザに対して1つのIPv4 アドレスを割り当てる方式が一般的ですが、IP アドレス空間が大きいIPv6では単一のIPv6 アドレスではなくIPv6 プレフィックスごとユーザに割り当てる運用もあります。



▶ 図 6.1 v6 プラスでの通信開始までの一般的シーケンス

NOTE

本書では、RAおよびDHCPv6-PDに関する詳細は割愛します。これらIPv6そのものに関する詳しい情報は、本書の著者の一人である小川晃通による『プロフェッショナルIPv6』（ラムダノート、2018年）を参照してください。

ひかり電話の有無によって、IPv6 アドレス割り当てがRA によるか、それとも DHCPv6-PD によるかが変わるということは、ユーザが利用するネットワークの構成が変わるということでもあります。ひかり電話の有無による構成の違いについては 6.2 節で解説します。

MAP CE として稼働する CPE は、MAP BR に関する情報を MAP ルール配信サーバに問い合わせます。MAP ルール配信サーバから MAP BR の情報を得た MAP CE は、MAP BR への IPv6 トンネルを張ります。この IPv6 トンネルを通過して、ユーザからの IPv4

パケットがIPv4インターネットへと運ばれます。

NOTE

MAP ルールの配信は、RFC 7598 では DHCPv6 による方法が規定されています。v6 プラスで DHCPv6 による MAP ルールの配信が採用されていない理由としては、DHCPv6 サーバが NTT 東西によるものである一方で MAP-E が JPNE によるものであることが挙げられます。

MAP CE は、家庭内ネットワークにおいて、IPv4 の DHCP サーバとしての役割も果たします。ユーザが利用するパソコンなどの機器に対しては、MAP CE の DHCP サーバからプライベート IPv4 アドレスがリースされます。

MAP CE は、IPv4 の DNS プロキシとしても機能します。これは、家庭内ネットワークの機器からの IPv4 での DNS 問い合わせを、IPv6 で JPNE のキャッシュ DNS サーバへと中継する機能です。この IPv6 でのキャッシュ DNS サーバの IPv6 アドレスは、フレッツ網から DHCPv6 で提供されます。

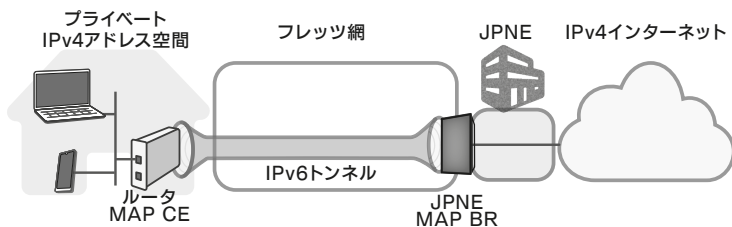
6.2 ひかり電話の有無で変わるIPv6ネットワーク構成

フレッツ網では、ひかり電話を利用しているかどうかで、ユーザ側の IPv6 ネットワーク構成が変わります。

- ひかり電話を利用している場合には、ユーザに対し、フレッツ網からの DHCPv6-PD によって /56 の IPv6 プレフィックスが割り当てられる
- ひかり電話を利用していない場合には、ユーザに対し、/64 の IPv6 プレフィックスが RA で送られてくる

このような違いがあることから、v6 プラスでも、ひかり電話を利用しているかどうかで IPv6 の視点でのネットワーク構成が変わります。

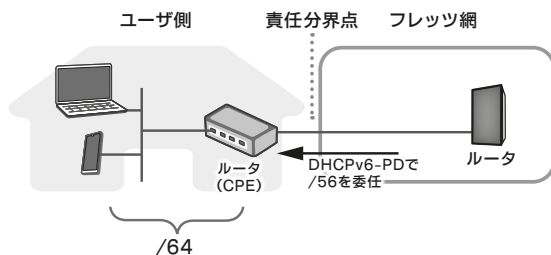
なお、IPv4 の視点では、ひかり電話契約の有無によらず、IPv4 ネットワークについては MAP CE をデフォルトルートとする構成になります (図 6.2)。



▶ 図 6.2 IPv4 視点でのv6 プラス

6.2.1 ひかり電話の契約がある場合

ひかり電話の契約がある場合には、NTT 東西が提供するホームゲートウェイ、もしくは他のルータ製品により、DHCPv6-PD によってIPv6 プレフィックスの委任を受けます（図 6.3）。



▶ 図 6.3 ひかり電話ありの構成（IPv6 視点）

MAP-E については、NTT 東西のホームゲートウェイで行う方法と、その他のルータ製品で行う方法があります。このとき、ホームゲートウェイもしくはルータは、ユーザに対して IPv6 を提供するルータとなります。

この場合、プライベート IPv4 アドレスによる IPv4 ネットワークについては、このルータが MAP CE として稼働することでユーザに提供されます。

■ NTT 東西のホームゲートウェイでv6 プラスを利用する場合

ひかり電話の契約があり、NTT 東西のひかり電話ルーターまたはホームゲートウェイを利用する場合には、MAP-E の機能を提供する JPNE のソフトウェアをホームゲートウェイにインストールする必要があります。ホームゲートウェイを利用する形で v6 プラスの利用を申し込むと自動的にインストールされるので、エンドユーザ側で

の作業は不要です。

NOTE

ひかり電話契約がなくても、ホームゲートウェイをレンタルできる場合があります。

JPNE のソフトウェアは、NTT 東西による「フレッツ・ジョイント」というサービスによって配布されています。フレッツ・ジョイントは、事業者がホームゲートウェイに対してフレッツ網からソフトウェアを配信できるようにするサービスです^{†1}。JPNE が NTT 東西とフレッツ・ジョイントの契約を行っており、これを通じて JPNE のソフトウェアがユーザのホームゲートウェイにインストールできるようになっています。

ホームゲートウェイに JPNE のソフトウェアがインストールされると、自動的に MAP-E が設定されます。v6 プラス開通前にホームゲートウェイで IPv4 PPPoE による IPv4 インターネット接続を利用していた場合、JPNE のソフトウェアのインストールによる v6 プラス開通と同時に自動的に IPv4 PPPoE が無効化され、MAP-E による v6 プラスに切り替わります。

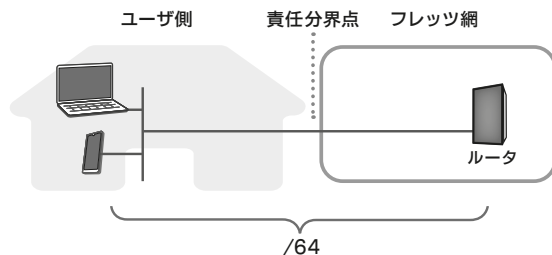
■ 他のルータで v6 プラスを利用する場合

NTT 東西のホームゲートウェイでなくても、フレッツ網からの DHCPv6-PD を処理できる IPv6 のルータで、MAP CE として動作できる機器であれば、v6 プラスを利用できます。ルータの機種によっては、ひかり電話の設定が可能なものもあります。

6.2.2 ひかり電話の契約がない場合

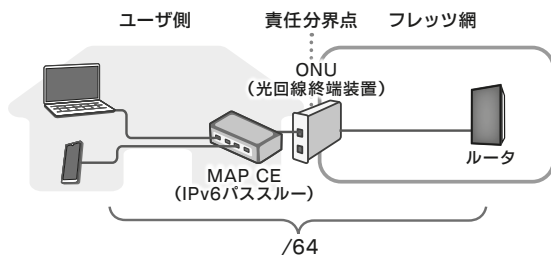
ひかり電話の契約がない場合には、フレッツ網から /64 の RA が送られてきます。その RA が示すフレッツ網内のルータをデフォルトルートとして設定する必要があります。ひかり電話の契約がある場合と違って、ユーザが設定するデフォルトルートがユーザ宅内になく、フレッツ網にある形になります（図 6.4）。

^{†1} フレッツ・ジョイントについて詳しくは NTT 東日本による FAQ ページ (<http://faq.flets.com/category/show/759>) などを参照してください。



▶ 図6.4 ひかり電話なしの構成（IPv6視点）

ひかり電話の契約がない場合、フレッツ網からRAが提供される/64のセグメントにおいて、ルータはIPv6パススルーを行います。そのため、ユーザが利用するパソコンなどの機器から見ると、そのルータはL3の構成上は透明な存在になります（図6.5）。



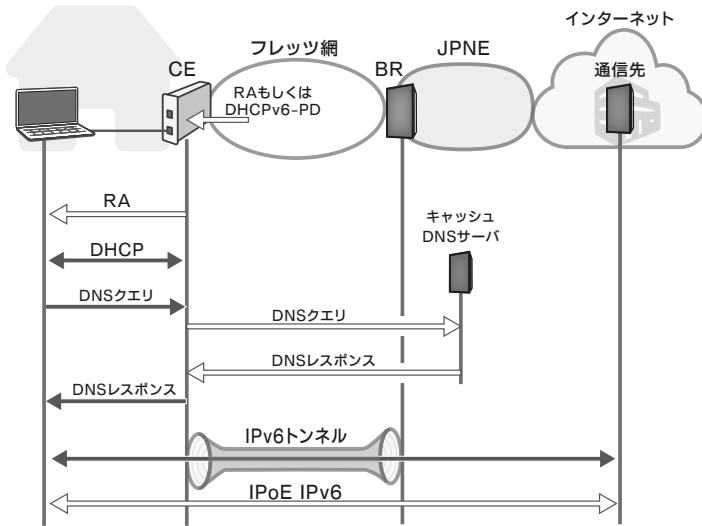
▶ 図6.5 ひかり電話なしの構成（一部L1視点）

この場合、このルータが/64セグメントにおいてMAP CEとして稼働し、MAP-EのためのIPv6トンネルを構成します。そのIPv6トンネルをIPv4インターネット接続のアップリンクとして、プライベートIPv4アドレスによるIPv4ネットワークがユーザに提供されます。

6.3 固定IPv4アドレスサービスでの通信までの一般的シーケンス

v6 プラスには固定IPv4アドレスのサービスもあります。この場合には、IPv4 over IPv6 トンネルとしてMAP-Eを利用しないので、マップルール配信サーバへの問い合わせが発生しません。IPv4によるDNS問い合わせがIPv6でJPNEのキャッシュDNSサーバへと転送される点は、MAP-Eを利用するv6 プラスの場合と同様です。

図 6.6 に固定IPv4アドレスの場合のv6 プラスの接続シーケンスを示します。



▶ 図 6.6 v6 プラスでの通信開始までの一般的シーケンス（固定IPv4アドレス）

[書籍版では空白のページです]

エンドユーザ側の必要条件と設定

この章では、v6 プラスを利用するためにエンドユーザ側で必要な契約や機器の条件と、v6 プラスの利用をISP と契約したエンドユーザ側でのv6 プラスの設定について解説します。

7.1 v6 プラスの利用条件

v6 プラスを利用するために必要なものは、「IPv6 IPoE 方式に対応したフレッツ網の回線契約」、「v6 プラス対応機器」、「フレッツ・v6 オプション」です。

7.1.1 IPv6 IPoE 方式に対応したフレッツ網の回線契約

2019年9月現在でIPv6 IPoE 方式に対応しているのはフレッツ光ネクスト、フレッツ光ライト、フレッツ光ライトプラスです。NTT 東西のホームゲートウェイを利用するかどうかで、必要な回線契約の条件が少し変わります。

- ホームゲートウェイを利用する場合

フレッツ光ネクストギガスマートを除くサービスの場合には、ひかり電話契約すると提供されるひかり電話ルーターやホームゲートウェイのレンタル契約が必要です。ただし、「ひかり電話タイプ1」および「ひかり電話オフィスタイプ」ではv6 プラスは利用できません。

なお、旧Bフレッツ回線（NTT 東日本の「お客さまID」が「COP」から始まる回線）で、2014年9月以前にひかり電話を契約している場合には、ホームゲートウェイによるv6 プラスが提供できないひかり電話のタイプ1である可能性もあります。現

在利用しているひかり電話のタイプを確認するには、NTT 東日本もしくは光コラボレーション事業者への問い合わせが必要です。

- **ホームゲートウェイではなくブロードバンドルータを利用する場合**

IPv6 IPoE 方式対応のサービスへの契約が必要です。ひかり電話の契約は必須ではありません。

7.1.2 v6 プラス対応機器

v6 プラスの利用には、NTT 東西によるホームゲートウェイか、v6 プラスに対応したホームゲートウェイまたはブロードバンドルータが必要です。

■ v6 プラス対応機器一覧

2019年12月現在、v6 プラスに対応しているホームゲートウェイ、ブロードバンドルータの一覧を表 7.1 に示します。

表 7.1: v6 プラス対応機器

メーカー	機種
NTT 東西	RT-S300 シリーズ、PR-S300 シリーズ
	RV-S340 シリーズ、RT-400 シリーズ
	PR-400 シリーズ、RV-440 シリーズ
	RT-500 シリーズ、PR-500 シリーズ
	RS-500 シリーズ (NTT 東日本のみ)
	PR-600 シリーズ、RX-600 シリーズ
バッファロー	WRM-D2133HP、WTR-M2133HP
	WXR-2533DHP2、WXR-2533DHP
	WXR-1900DHP3 (Ver.2.55 以降)
	WXR-1901DHP3 (Ver.2.55 以降)
	WXR-1900DHP2 (Ver.2.53 以降)
	WXR-1900DHP (Ver.2.43 以降)
	WXR-1750DHP(Ver.2.52 以降)
	WXR-1750DHP2 (Ver.2.52 以降)
	WXR-1751DHP2 (Ver.2.52 以降)
	WSR-2533DHP2 シリーズ (Ver.1.1 以降)
	WSR-1166DHP4 シリーズ
	WSR-1166DHPL シリーズ

メーカー	機種
アイ・オー・データ機器	WN-AX1167GR (Ver.3.20以降) WN-AX1167GR/V6 (Ver.3.20以降) WN-AX1167GR2、WN-AX2033GR WN-AX2033GR2、WN-SX300FR WN-SX300GR
NTT ドコモ	ドコモ光ルーター 01 (ファームウェアバージョン 1.2.1 以降)
NEC プラットフォームズ	Aterm WG2600HS、Aterm WG2600HP3 Aterm WG1900HP2、Aterm WG1800HP4 Aterm WG1200HS3、Aterm WG1200HP3
エレコム	WRC-1750GSV、WRC-1167GST2 WRC-1750GST2、WRC-1900GST2 WRC-2533GST2、WRC-2533GS2-B WRC-2533GS2-W、WRC-1167GS2-B WRC-X3000GS、WMC-M1267GST2-W WMC-DLGST2-W
センチュリー・システムズ	FutureNet NXR-G240 FutureNet NXR-G240/L FutureNet NXR-G240/L-CA FutureNet NXR-G260 FutureNet NXR-G260/L FutureNet NXR-530 FutureNet NXR-650
ヤマハ	RTX830、RTX1210 NVR510、NVR700W
NEC	UNIVERGE IX シリーズ
TP-Link	ArcherA10、ArcherA2600
Synology	RT2600ac、MR2200ac
アライドテレシス	AR4050S/AR3050S AR2050V、AR1050V

■ v6 プラス未対応のホームゲートウェイ

ホームゲートウェイには、v6 プラス対応ホームゲートウェイと、未対応ホームゲートウェイがあります。NTT 西日本エリアではすべてのホームゲートウェイがv6 プラス対応ホームゲートウェイですが、東日本エリアでは未対応ホームゲートウェイの可能性もあります。

v6 プラス対応ホームゲートウェイへの交換には、NTT 東日本の 116 窓口に申し込むという方法があります。光コラボレーション提供事業者と回線を契約している場合には、契約している光コラボレーション事業者に変更を申し込んでください。

7.1.3 フレッツ・v6 オプション

フレッツ・v6 オプションはIPv6 IPoE 方式の提供に必要です。フレッツ・v6 オプションへの申し込みが行われていない場合には、IPv6 IPoE を契約できません。このフレッツ・v6 オプションはIPv6 IPoE 契約と同時に申し込みできます。

IPv6 IPoE 方式の契約中にフレッツ・v6 オプションを解約すると、IPv6 IPoE 方式でのIPv6 インターネット接続が利用できなくなります。IPv6 IPoE が利用できなくなるため、IPv6 インターネット接続のIPv4 オプションである v6 プラスも利用できなくなります。

7.2 v6 プラスIPv4 設定ソフトウェア

ホームゲートウェイでの v6 プラス IPv4 設定ソフトウェアの設定方法を解説します。JPNE ソフトウェアとそのインストール方法については 6.2.1 項も参照してください。

7.2.1 設定画面へのアクセス方法

JPNE ソフトウェアが配信済みのホームゲートウェイ配下のネットワークで、<http://ntt.setup:8888/t/> または <http://192.168.1.1:8888/t/> にアクセスすると、JPNE ソフトウェアによる「v6 プラス IPv4 設定ソフトウェア」を利用できます。

「配信済事業者ソフトウェア一覧」の画面には、図 7.1 のように、IPv4 設定画面へ遷移するためのアイコンが表示されます。この画面から「IPv4 設定」のアイコンを選択することで、JPNE ソフトウェアを利用できます。

なお、図 7.1 に示した画面イメージには「IPv4 設定」のアイコンのみが表示されていますが、実際はエンドユーザが ISP と契約して配信済みの各種サービスのアイコン



▶ 図 7.1 ntt.setup の画面

がすべて表示されます。表示されるサービスはソートされているので、実際には図 7.1 と同じ位置に「IPv4 設定」のアイコンが表示されているとは限りません。

「IPv4 設定」をクリックすると、次の図 7.2 のような画面が表示されます。



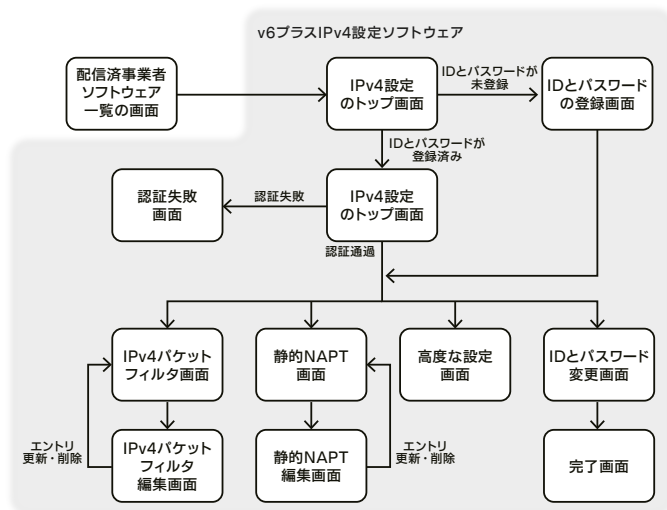
▶ 図 7.2 JPNE ソフトウェアトップページ

7.2.2 トップ画面からのページ遷移

「IPv4 設定」のトップ画面はフレームで構成されており、左側にメニュー、右側に設定内容が表示されます。トップページでは、割り当てられた IPv4 アドレスと利用可能なポート番号が右側に表示されています。また、IPv4 通信が有効か無効かも表示されます。

このトップページでは各種設定への遷移のみが可能であり、設定できる項目はありません。

JPNE ソフトウェアの画面遷移を図 7.3 に示します。



▶ 図 7.3 画面遷移図

FAQとトラブルシューティング

ここまで、v6 プラスの背景となる日本のネットワークをめぐる状況と、v6 プラスを支える標準化技術について、一通り解説してきました。この章では、前章までに説明した知識を総動員し、v6 プラスに対してよくある問い合わせや、エンドユーザが遭遇する可能性が高いトラブルなどを紹介します。ユーザが遭遇しうるトラブルには、v6 プラスとは直接関係がないにもかかわらず、v6 プラスに起因する問題だとして誤解されることが多いものも含まれます。

8.1 v6 プラスへの申し込み

JPNE は B2B の事業者であり、ユーザが直接 JPNE との契約することはできません。どの ISP と契約して v6 プラスを開通させたいか、エンドユーザが判断する必要があります。

ISP はエンドユーザの申し込み手続きや課金などの処理を行います。どの ISP を経由して v6 プラスに申し込んでも、IPv6 IPoE 方式の仕組み上、ユーザの IPv6 パケットが JPNE を経由することは変わりませんが、申し込みの方法などが異なる場合があります。

8.1.1 ISP から「v6 プラスに対応していない」と言われた

フレッツ網において IPv6 IPoE 方式による IPv6 インターネット接続サービスを提供している VNE は JPNE だけではありません。VNE によっては、MAP-E や DS-Lite などの国際的に標準化されている技術を採用して、v6 プラスとは違う形で IPv4 over IPv6 のサービスが提供されていることもあります。

ただし、v6 プラスは JPNE によるサービスであり、登録商標でもあるので、JPNE で

はないVNEと契約しているISPで「v6 プラス」が提供されることはありません。ISPがv6 プラスのサービスを提供するには、そのISPがJPNEと契約をしている必要があります。

8.1.2 v6 プラスの申し込み方法がISPによって異なる

JPNEでは、v6 プラスという登録商標を、ISPが提供するサービス名として利用することを許可しています。そのため、VNEとしてJPNEを採用しているISPのサービスで「v6 プラス」という名称が使われることもあります。

しかし、それぞれのISPが提供するv6 プラスのサービスへの申し込み方法はISPごとに異なります。たとえば、IPv6 IPoE方式によるIPv6インターネット接続サービスへの申し込みと同時でなければv6 プラスに申し込めない場合や、逆に別々に申し込みが必要な場合もあります。新規に光ファイバーの契約を申し込んだときに自動的にv6 プラスが付いている場合もあれば、そうでない場合もあります。ホームゲートウェイでの利用とその他の対応機器での申し込み方法が違うISPもあります。そうした詳細については各ISPへの問い合わせが必要です。

8.2 v6 プラスがつながらない？

各章で説明したように、v6 プラスはさまざまな要素技術によって構成されているサービスです。何らかの問題が発生したときには、その解決のために、関連箇所の切り分けが重要になります。

ここでは、そうした問題の切り分けに役立つように、v6 プラスに関連して生じることが多い誤解や問題をまとめます。

8.2.1 実はv6 プラスに申し込んでいない

v6 プラスはJPNEが提供するサービスです。しかし、エンドユーザがJPNEと直接契約するわけではありません。エンドユーザがv6 プラスを利用するには、JPNEと契約しているISPへ申し込む必要があります。こうした事情がよく把握できていないと、「v6 プラスを利用したサービスに申し込んでいないのでv6 プラスが利用できていなかった」という状況に陥ることもあります。

たとえば、ISPが提供する「IPv6 IPoE方式によるIPv6インターネット接続サービス」に申し込んでいても、その基本プランにIPv4インターネット接続などの「v6 プラスのサービス」が付属していない場合があります。ISPによっては、IPv6 IPoE方式によるIPv6インターネット接続サービスへの申し込みとは別に、オプションでv6 プ

ラスの申し込みが必要になることもあるので注意が必要です。

また、v6 プラスはすべての VNE 事業者が提供しているサービスではないので、IPv6 IPoE 方式による IPv6 インターネット接続を提供している ISP であっても v6 プラスは利用できない場合があります。JPNE ではない VNE 事業者が提供する IPv6 IPoE 方式では v6 プラスを利用できません。

8.2.2 v6 プラス開通までのタイムラグ

v6 プラスは、JPNE が NTT 東西のフレッツ網の上で提供するサービスです。エンドユーザから v6 プラスへの申し込みを受けた ISP は、JPNE へとオーダーを出し、そのオーダーを受けた JPNE は、さらに NTT 東西へとオーダーを出します。IPv6 IPoE 方式での IPv6 インターネット接続はもちろん、エンドユーザが v6 プラスのサービスを利用可能になるのは、NTT 東西が設定を行い、エンドユーザに対して JPNE の IPv6 アドレスプレフィックスが割り当てられてからです。

そのため、ユーザが v6 プラスに申し込んでから実際にサービスを利用できるようになるまでは、どうしてもタイムラグがあります。「申し込んだけど使えない」という状況は、v6 プラス開通までのタイムラグである可能性もあります。

8.2.3 対応端末ではないルータだった

v6 プラスによる IPv4 インターネット接続では、ホームゲートウェイやブロードバンドルータが MAP-E の CE として動作する必要があります。この機能に対応していないルータでは v6 プラスが利用できません。v6 プラスに対応可能なルータであることを確認したうえで利用してください (7.1.2 項を参照)。

8.2.4 IPv4 設定が無効になっている

v6 プラスは、IPv6 IPoE 方式による IPv6 インターネット接続に加えて、IPv4 インターネット接続を利用するためのサービスです。しかし、IPv4 インターネットとの通信には、パソコンやスマホなどの末端の機器や CPE において IPv4 の設定が有効になっている必要があります。これらの機器で IPv4 が無効になっていたことで v6 プラスでの通信ができないという状況も比較よく発生しているようです。

8.2.5 サーバ側で IPv4 アドレスがブラックリストに登録されている

v6 プラスで利用している IPv4 アドレスが Web サービスなどでブラックリストに登録されてしまい、MAP CE にその IPv4 アドレスが割り当てられたエンドユーザがその

Web サイトと通信できなくなる場合があります。その IPv4 アドレスが Web サイト側のブラックリストで解除されない限り、その Web サイトとは通信できません。通常、ブラックリストの解除には、何らかの方法で相手組織への連絡が必要になります。

8.2.6 IPv4 PPPoE を利用している

パソコンやスマホなどの末端の機器でデフォルトルートに設定されている CPE が、IPv4 インターネット接続を IPv4 PPPoE で行っている場合に、v6 プラスを利用できていない状況が発生します。v6 プラスを利用するには、VNE として JPNE を選択して IPv6 IPoE 方式による IPv6 インターネット接続を行うと同時に、IPv4 インターネットとの接続でも v6 プラスを利用する設定にする必要があります。技術的には IPv6 IPoE 方式での IPv6 インターネット接続と IPv4 PPPoE による IPv4 インターネット接続を同時に利用可能なので注意が必要です。

8.2.7 ポートが枯渇した

MAP-E における IPv4 アドレスの共有は、ユーザが利用可能なポート番号を制限することで実現しています。そのため、その制限を超えるポート番号を利用すると、ポートが枯渇してしまいます。

誤解されがちな点として、ポートの枯渇が発生するのは、「同一宛先 IPv4 アドレスかつ同一宛先ポートに対して多数の通信を行った場合のみ」です。MAP-E において IPv4 NAT で変換される通信セッションは、5 タプルと呼ばれる 5 つの要素（通信プロトコル、宛先 IPv4 アドレス、送信元 IPv4 アドレス、宛先ポート、送信元ポート）によって識別されます。送信元ポート以外の 4 つの要素がすべて同じ状態で、送信元ポートの差異によってしか識別できない通信が極端に多くなってしまった状態が、MAP-E における「ポートの枯渇」です。

ポートの枯渇が発生する可能性としてもっとも考えられるのは、「IPv4 インターネット側の単一の IPv4 アドレスを宛先 IPv4 アドレスとして、TCP もしくは UDP によるセッションが多数の同時に張られる」という状況です。たとえば、単一の Web サイトに対して同時に極端に多くの接続が発生するような場合があります。

また、Google Public DNS のようなパブリックの DNS を使って多数の名前解決が発生するといった状況でも、同時に多くのポート番号が消費されることが推測できます。

JPNE によると、これまで実際にポートの枯渇が発生したという観測情報は非常に少ないものの、まったく発生していないわけでもないようです（2019 年 12 月時点）。

8.3 アプリケーションの通信ができない？

v6 プラスでは、TCP、UDP、ICMP以外のプロトコルを利用するアプリケーションサービスは利用できません。たとえば、SCTPやPPTPは利用できません。さらに、アプリケーションの通信内容に含まれるIPアドレスなどの情報を利用するSIPやFTPでは、NAT機器においてALGが実装されている必要があります。

ユーザ側でのアプリケーションサーバの公開にも制限があります。MAP CEに割り当てられたポート番号以外でのサーバ公開は、MAP-Eの仕組み上、不可能です。

MAP-EではグローバルIPv4アドレスを複数の契約者で共有する点にも注意が必要です。そのような環境で利用できないアプリケーションもありえます。

8.3.1 UPnP IGDによるNAT越え

MAP-Eはユーザ側の機器でNATを行うので、技術的にはUPnP IGDを利用することが可能です。ただし、v6 プラスに対応したすべてのルータでUPnP IGDに対応しているわけではありません。UPnP IGDによるNAT越えが可能であるかどうかは、利用するルータの機種に依存します。

UPnP IGDでは、外部に対してどのポート番号を解放するのかを、ユーザ側が指定します。そのため、MAP-Eにおいて割り当てられたポート番号が何であるかを知る必要があります。多くのv6 プラス対応ルータには、MAP-Eによって割り当てられたポート番号を確認する機能があるので、その機能を利用すればUPnP IGDで指定するポート番号がわかります。

UPnP IGDはセキュリティ上の問題を発生させることもあります。多くのルータでは初期設定で無効になっているので、利用するには注意してください。

8.3.2 オンラインゲームとv6 プラス

インターネットを介して対戦相手との通信を行うオンラインゲームでは、P2P的な通信が必要な場合があります。通信サービスにおいてオンラインゲームへの接続性を特に重視するユーザにとって、v6 プラスはどのようなサービスなのでしょうか。

v6 プラスで採用しているMAP-Eでは、ユーザ側にあるCPE機器でIPv4 NATを行います。その際、従来のNATルータと違って、利用できる送信元ポート番号の数が制限されます。そのため、特定の送信元ポート番号が要求されるような場合には、P2P的な通信で問題が発生する可能性もありえます。

ただし、多くのオンラインゲームは、ユーザ側に対して特定の送信元ポート番号を要求しません。実際、v6 プラスが原因で通信ができないという状況が発生している

オンラインゲームは多くないと考えられます。

参考までに、2018年11月のGame Watchの記事^{†1†2}によると、以下のゲームについてはv6プラスを利用したユーザ環境で問題なくプレイできることが検証されています。

- スプラトゥーン2
- マリオカート8デラックス
- マリオテニス エース
- スーパー マリオパーティ
- ファンタシースターオンライン2 クラウド
- Minecraft
- フォートナイト バトルロイヤル
- DARK SOULS REMASTERED

8.4 ユーザ側の機器に問題はないか

v6プラスとは関係なく、ユーザ側の機器の問題で通信ができていなかったり、速度が低下したりしていることも考えられます。本章で挙げた要因で問題が解決しない場合には、たとえば以下のような状況が発生していないか確認してください。

- ルータのセキュリティ設定によってゲームの通信が遮断されていた
- ルータのファームウェアに不具合があった
- 電波干渉などによる無線LAN環境の悪化により速度が出ていない状況だった
- UTPケーブルの品質が低かった
- パソコンなどのネットワークインターフェースに不具合があった
- パソコンなどでMTUの値が小さく設定されていた

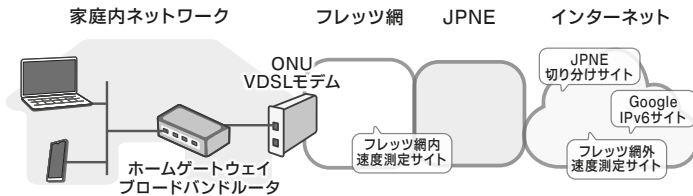
これらを確認するほかに、不具合が発生した場合に機器の初期化やパソコンの設定のデフォルト化などを試すという方法もあります。

^{†1} 「【特別企画】JPNEの高速回線サービス「v6プラス」でのPS4オンラインプレイを検証」, Game Watch, 2018年11月9日 : <https://game.watch.impress.co.jp/docs/news/1151113.html>

^{†2} 「【特別企画】「v6プラス」でのNintendo Switchオンラインプレイを検証」, Game Watch, 2018年11月20日 : <https://game.watch.impress.co.jp/docs/news/1152691.html>

8.5 問題の切り分けと確認

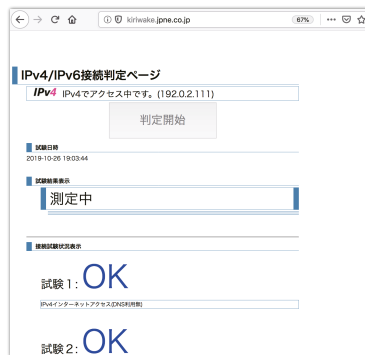
問題が発生する可能性がある箇所をユーザ側から順番に見ていくと、ユーザが利用しているパソコンやスマホなどの機器、ホームゲートウェイもしくはブロードバンドルータ、ONUもしくはVDSLモデム、フレッツ網、JPNE、インターネットになります（図8.1）。



▶ 図 8.1 問題発生箇所の切り分け

何らかの通信障害発生が疑われる場合、これらのうちどの部分で問題が発生しているかを切り分けられるように、「JPNE切り分けサイト」（図8.2）が利用できます。JPNE切り分けサイトでは、IPv4やIPv6の接続、あるいはフレッツ網からの接続に問題がないかをチェックできます。

- JPNE切り分けサイト：<https://kiriwake.jpne.co.jp/>



▶ 図 8.2 JPNE切り分けサイト

なお、以下の状況では、JPNE切り分けサイトによるチェックが失敗する可能性が

あるので注意が必要です。

- Google Chrome のライトモード (Google の Proxy 経由) が ON
- Cloudflare WARP などの VPN が設定されていた

上記状況では、JPNE 切り分けサイトとの接続がプロキシ経由になります。このとき、HTTP などによって JPNE 切り分けサイトと直接接続するのはプロキシです。そのため、JPNE 切り分けサイトのチェックで、v6 プラスを利用していないと判定されてしまいます。

JPNE 切り分けサイト以外にも、問題発生の原因を切り分けるために使える Web サイトがいくつかあります。たとえば、Google が IPv6 でのみ提供している `ipv6.google.com` は IPv4 ではアクセスできないので、`ipv6.google.com` が正しく表示できるかどうかで IPv6 インターネットとの通信が正しく行えているのかどうかを確認できます。

- Google の IPv6 専用ページ : <https://ipv6.google.com/>

また、「フレッツ速度測定サイト」により、ユーザ側のパソコン、ホームゲートウェイもしくはブロードバンドルータ、フレッツ網を通じた通信の正常性などの確認が可能です。

- フレッツ速度測定サイト : <http://www.speed-visualizer.jp/>

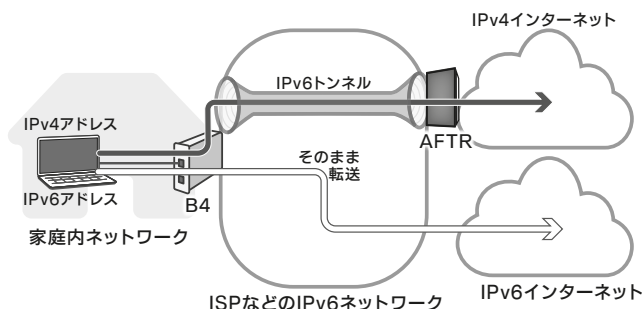
DS-LiteとA+P

v6 プラスにおける IPv6 over IPv4 では、第4章で説明した MAP-E が採用されています。IPv6 over IPv4 のための一般的な技術としては、MAP のほかに、RFC 6333 で規定されている **DS-Lite** という仕組みもあります。v6 プラスは MAP-E を採用しているため DS-Lite は v6 プラスの要素技術ではありませんが、DS-Lite による IPv4 over IPv6 サービスを提供している VNE もあります。ここでは MAP との違いに焦点を当てて DS-Lite の概要を紹介します。

9.1 DS-Lite

DS-Lite という名称は “Dual-Stack Lite” を省略したもので、「IPv6 と IPv4 のデュアルスタックを軽量に実現できる技術」という意図が込められています。MAP と同様に、基幹ネットワークを IPv6 のみで構築しつつ、ユーザに対しては IPv4 と IPv6 の両方が使えるデュアルスタックネットワークを提供できる仕組みです。IPv6 はそのままの状態でも IPv6 インターネットとの通信できる点も MAP と同じです。

DS-Lite の概要を図 9.1 に示します。DS-Lite では、**B4** および **AFTR** と呼ばれるルータの間に張られた IPv6 トンネルで、ユーザが利用するプライベート IPv4 アドレス空間からの IPv4 パケットを転送します。B4 と AFTR の間は IPv6 のみで構成できるので、ユーザに対して IPv4 インターネット接続サービスを提供しつつ、バックボーンネットワークは IPv6 のみで構成できます。



▶ 図 9.1 DS-Lite の概要

NOTE

B4は「ビフォー」と読み、AFTRは「アフター」と読みます。それぞれ“Basic Bridging BroadBand”および“Address Family Transition Router”を表すとされていますが、「ユーザ側を「前方」とみなし、そこから「後方」のルータへのIPv6トンネルをパケットが通過する」という意味のほうが先にあったようです（こうした後づけの略字はIETFでの標準化ではよく見かけます）。

B4では、IPv4パケットをIPv6パケットの中にカプセル化します。AFTRでは、受け取ったIPv6パケットからIPv4パケットを取り出したうえでIPv4インターネットへとパケットを転送します。その際、AFTRでは、IPv4 NATによるアドレス変換も行います。つまりDS-Liteでは、NAT機能がユーザ側ではなくISP側にあります。これはMAPとDS-Liteの大きな違いのひとつです。

NAT機能の位置は異なりますが、DS-Liteでも、MAPと同様にISPのネットワークで大規模NATを導入することによる2段NATは避けられます。ただし、DS-LiteのAFTRにはCGN機器に類似する機能が必要になるので、DS-LiteのAFTRとMAP-EのBRとで後者のほうがシンプルな処理で済みます。

DS-Liteでは、B4が何らかの方法でAFTRのIPv6アドレスを知る必要があります。B4に対してAFTRの名前を手動で設定してAFTRのIPv6アドレスを得ることも可能ですが、AFTRの名前をDHCPv6で得るための仕組みもあり、RFC 6334として標準化されています。

9.1.1 lw4o6

DS-Liteの名称の“Lite”には「軽い」という意味合いがありますが、実際はAFTRの部分は「重い」仕組みです。そこで、AFTRにおけるNAT処理をB4側で行うように変更した「軽量版DS-Lite」と呼べる仕組みも考案されています。これが**lw4o6** (Lightweight 4over6) と呼ばれる規格で、RFC 7596として定義されています。

lw4o6では、RFC 7596対応のDS-LiteにおけるB4とAFTRのことを、それぞれ**lwB4**および**lwAFTR**と呼んでいます。lw4o6では、lwB4がIPv4 NATを担います。そのため、IPv4 NATに必要なグローバルIPv4アドレスとポート番号のセットをlwB4が知っている必要があります。lwB4では、この情報をSoftwire46 (RFC 7598) のDHCPv6 オプションとして受け取ることにしています。

9.2 A+P

DS-Liteと同時期に、**A+P** (Address plus Port) と呼ばれるプロトコルも議論されていました。DS-LiteとA+Pには似た部分があり、Internet Draftとして議論されていたときには両者を統合するという案もありました。しかし、最終的にDS-LiteはStandard TrackのRFC 6333になり、A+PのほうはExperimentalなRFC 6346になりました。

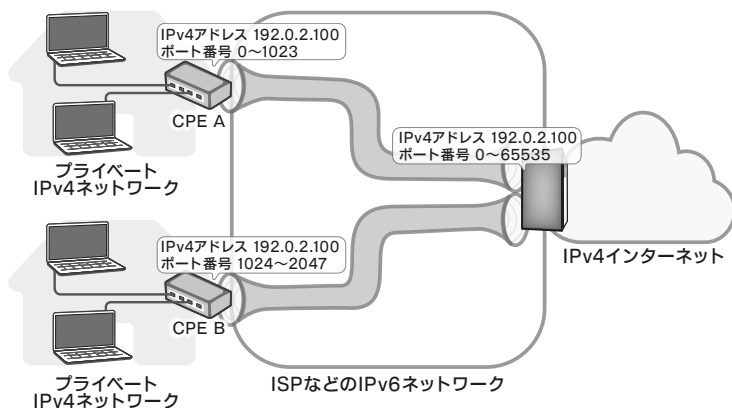
A+Pは、名前のとおり、IPアドレスとポート番号を活用した仕組みです。MAP-EもIPアドレスとポート番号を活用する仕組みでしたが、実はA+PはMAP-Eのもとになった仕組みともいえます。そのため、DS-LiteとA+Pの考え方の違いを知ることは、DS-LiteとMAP-Eの考え方の違いを知るうえでも参考になります。

A+Pでは、IPv4アドレスとTCPもしくはUDPのポート番号のセットを利用することでIPv4アドレスを共有します。具体的には、複数のCPEが同じIPv4アドレスを利用しつつ、割り振られたポート番号のみを利用します。

CPEからのIPv4パケットは、**PRR** (Port-Range Router) と呼ばれるルータまでトンネルを通して転送されます。IPv4インターネット側からのパケットは、PRRがポート番号に応じて適切なCPEとつながるトンネルへと転送します。

図9.2では、PRRが**192.0.2.100**というグローバルIPv4アドレスを利用しています。CPE AとCPE Bも、PRRと同じ**192.0.2.100**というIPv4アドレスを利用しますが、CPE Aが利用するポート番号が**0～1023**、CPE Bが利用するポート番号が**1024～2037**という違いがあります。

各CPEは、PRRへとパケットを送信する前に、必要に応じてNATやポート番号を変換します。



▶ 図9.2 A+Pの構成例

このとき各CPEは、割り当てられたポート番号の範囲内であれば、NATによる変換をせずにパケットを転送することも可能です。たとえば、192.0.2.100というIPv4アドレスを家庭内のPCが利用していて、送信元ポート番号をCPEに割り当てられたものの範囲内に限定できるのであれば、CPEでNATによる変換をせずに通信が可能です。

9.2.1 DS-Lite との違い

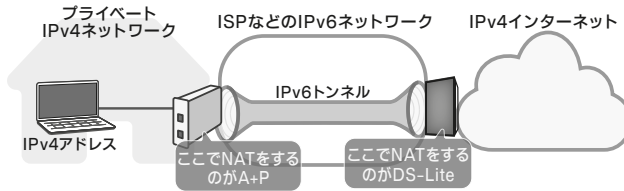
技術的には似た面もありますが、A+PとDS-Liteとでは、提案のモチベーションが大きく異なります。DS-Liteのモチベーションは、デュアルスタック運用のコスト削減でした。これに対し、A+Pのモチベーションは、CGNの問題を解消することにあります。A+PのRFCでは、CGNの問題として、UPnPが使えない、多くのユーザの通信ステートをCGNで保持しなければならない、単一障害点になりうるといった点が具体的に挙げられています。

DS-LiteとA+Pでは、提案の方針にも大きな違いがあります。DS-Liteでは具体的な技術が述べられているのに対し、A+Pでは考え方が中心に述べられています。

たとえば、DS-LiteではB4とAFTRの間のトンネルをIPv6で構築します。一方、A+Pでは、L2延伸を含む「何らかの方法」とあるだけです。A+Pで必要となるシグナリングプロトコルも、詳細がRFCに示されているわけではなく、可能性がある手法がいくつか列挙されているだけです。

DS-LiteとA+Pでは、NATによる変換が発生する場所も異なります。図9.3のよう

に、DS-LiteがIPv4ネットワークの手前でNATを行うのに対して、A+PはMAPと同様にCPE側でNATを行います。さらに、A+PではNATを使わないことも可能です。



▶ 図 9.3 DS-Lite と A+P の違い

ステートレスであることも A+P の大きな特長です。A+P では、グローバル IPv4 アドレスとポート番号を NAT で利用することで、ステートを保持せずに自動的な変換が可能になっています（ただし、ICMP やフラグメントされた IP パケットについては、通常の NAT と同様にステートフルな変換が必要です）。

[書籍版では空白のページです]

索引

記号・数字

4つの案.....	3
5タプル.....	52

A

A+P.....	101
AAAA レコード.....	18
ADF.....	66
ADM.....	64
ADSL.....	49
AFTR.....	99
ALG.....	59
APDF.....	67
APDM.....	65

B

B4.....	99
Basic NAT.....	48
BBIX 株式会社.....	4
Border Relay.....	40
BR.....	6, 40
B フレッツ.....	85

C

CDN.....	21
CE.....	39
CGN.....	44, 69
A+P.....	102
運用コスト.....	74
課題.....	71
通信への影響.....	75
CPE.....	6, 39, 77

D

DHCPv6-PD.....	77
DHCP サーバ.....	79
DNS.....	18

DNS プロキシ.....	79
DS-Lite.....	45, 99

E

EA ビット.....	42
EIF.....	66
EIM.....	64

F

FLET' S.....	25
FTP.....	
NAT.....	58
通信できない.....	95

G

GMA.....	40
----------	----

I

IID.....	15
IP.....	1
IPv4.....	1
IPv4 NAT.....	47
IPv4 over IPv6.....	36, 37
DS-Lite.....	99
IPv4 PPPoE.....	3, 33
IPv4 アドレス.....	15
ISP からの割り当て.....	49
IPv4 アドレス在庫枯渇問題.....	13, 50
IPv4 インターネット接続.....	
PPPoE.....	33, 36
v6 プラス.....	36
トラブル.....	93
IPv4 と IPv6 のどちらで接続するか.....	19
IPv6.....	2, 15
IPv6 IPoE 方式.....	3, 33
IPv6 PPPoE 方式との違い.....	31
接続.....	34
必要な理由.....	25

IPv6 PPPoE 方式.....	31
接続.....	32
フレッツ網内宛.....	32
IPv6 アドレス	
IPv4 アドレスとの違い.....	15
IPv6 PPPoE 方式.....	32
Policy Based ルーティング.....	35
v6 プラス.....	8, 77
IPv6 トンネルアダプタ.....	32
IPv6 パススルー.....	82
IPv6 閉域網.....	2, 30
IPv6 マルチプレフィックス問題.....	26
フレッツ網.....	30
IP アドレス.....	13
IP トンネル.....	37
ISDN.....	49
ISP	
IPv4 インターネット接続.....	49
IPv6 IPoE 方式での役割.....	33
v6 プラス.....	92

J

JPIX.....	4
JPNE	
B2B.....	8
生い立ち.....	4
ソフトウェア.....	81
JPNE 切り分けサイト.....	97
JPNE ソフトウェア.....	88

L

LAN.....	50
lifetime (NAT テーブル).....	57
lw4o6.....	101
lwAFTR.....	101
lwB4.....	101

M

MAP-E.....	6, 37
CGN との違い.....	74
ポート番号.....	94
ホームゲートウェイの設定.....	81
MAP-T.....	37
MAP BR.....	40
MAP CE.....	39, 77

MAP ドメイン.....	39
MAP ルール.....	43
配信.....	79

N

NAPT.....	48
NAT.....	6, 14, 47
FTP.....	58
P2P.....	60
RFC.....	48
SIP.....	58
UDP.....	58
機器への要求事項.....	62
仕組み.....	50
接続例.....	52
歴史.....	48
NAT binding.....	52
NAT mapping.....	52
NAT44.....	40
MAP-E で無効化.....	45
NAT444.....	44
NAT64.....	75
NAT66.....	32
NAT 機器	
セッション数の上限.....	70
NAT 越え.....	59, 63
CGN.....	73
できない.....	95
NAT テーブル.....	52
NAT ルータ.....	49
v6 プラス.....	60
動作例.....	52
NTT NGN.....	2
NTT NGN IPv6 マルチプレフィックス問題.....	26
NTT 東西.....	2, 25
NTT 法.....	26

P

P2P	
CGN.....	73
NAT.....	60, 68
v6 プラス.....	95
Policy Based ルーティング.....	34
Port Restricted Cone.....	67

PPP.....	32
PPPoE.....	31
PPTP.....	95
PRR.....	101
PSID.....	40

R

RA.....	77
RPF.....	30
Rule IPv4 プレフィックス.....	41
Rule IPv6 プレフィックス.....	41

S

SCTP.....	95
SFI.....	68
SIP	
NAT.....	58
通信できない.....	95
Softwire46.....	101
SOHO ルータ.....	49
STUN.....	60, 73

T

Traditional NAT.....	48
TURN.....	60

U

UDP	
NAT.....	58
UNSAF.....	59, 68
UPnP IGD.....	60, 95
CGN.....	73

V

v6 プラス	
IPv4 インターネット接続.....	6
IPv6 アドレス.....	8
IPv6 インターネット接続.....	5
ISP.....	8
MAP-E.....	38
NAT.....	60
NAT 機器の要件.....	65
概要.....	1
接続シーケンス.....	77
全体像.....	9

デュアルスタック.....	18
名前の由来.....	5
申し込み.....	91
利用しない場合.....	10
利用条件.....	85
v6 プラス IPv4 設定ソフトウェア.....	88
v6 プラス対応 NAT ルータ.....	61
VNE.....	3, 31, 34
VPN.....	38

W

WAN.....	50
----------	----

ア

アクセスログ.....	72
アドレス依存フィルタリング.....	66
アドレス依存マッピング.....	64
アドレスとポート依存フィルタリング.....	67
アドレスとポート依存マッピング.....	65

イ

インターネットプロトコル.....	1
インターネットマルチフィード株式会社.....	4
インターフェース識別子.....	15

エ

エンドポイント非依存フィルタリング.....	66
エンドポイント非依存マッピング.....	64

オ

オンラインゲーム.....	95
---------------	----

カ

カプセル化.....	37, 100
------------	---------

キ

キャッシュ DNS サーバ.....	21, 79
--------------------	--------

ケ

ゲートウェイルータ.....	34
ゲーム.....	95

コ

固定 IPv4 アドレス (v6 プラス).....	7
接続シーケンス.....	83

サ

サブネットプレフィックス.....15

シ

ジオロケーション.....74

商用インターネット接続サービス.....48

セ

生存期間

CGN.....73

NAT テーブル.....57

セキュリティ (NAT)68

ソ

速度測定サイト.....98

タ

ダイヤルアップ接続.....49

大規模NAT.....44, 69

タイムラグ.....93

テ

デュアルスタック.....17

ト

トラブルシューティング.....91, 97

トンネル.....37

トンネルアダプタ.....32

トンネル方式.....25

ナ

名前解決.....18

ニ

日本インターネットエクスチェンジ株式会社
.....4

日本電信電話株式会社等に関する法律.....26

日本ネットワークイネイブラー株式会社.....4

ネ

ネイティブ方式.....25

ヒ

ひかり電話

IPv6 ネットワーク構成の違い.....79

フ

フィルタリング (NAT 機器)62, 66

プライベート IPv4 アドレス.....47

歴史.....50

プライベート IP アドレス.....14

フレッツ.....25

フレッツ・v6 オプション.....35, 88

フレッツ・ネクスト.....3

フレッツ網.....2, 26

IPv4 トラフィック.....9

フレッツ速度測定サイト.....98

フレッツ網内宛通信

IPv6 IPoE.....35

IPv6 PPPoE.....32

フロー.....57

ブロードバンドアクセスエクスチェンジ企画
株式会社.....4

ブロードバンドルータ.....49

v6 プラス対応.....86

未対応.....93

プロトコル.....1

プロトコルスタック.....16

プロバイダ責任制限法.....72

ホ

ポート番号

CGN.....74

lw4o6.....101

MAP-E.....40

NAT.....48

アクセスログ.....72

上限.....94

ホームゲートウェイ.....33, 39, 61, 80, 85, 88

未対応.....93

マ

マッピング (NAT 機器)62

マルチホーム.....26

ム

無線 LAN ルータ.....49

モ

網内折り返し.....35

モデム49

リ

利用条件.....85

ル

ルール配信サーバ.....61, 78

レ

レコード (DNS)18

レジデンシャルゲートウェイ39

ロ

ローミングサービス34

[書籍版では空白のページです]

■ 監修者紹介

日本ネットワークイネイブラー株式会社

2010年8月に設立。IPv6インターネットの普及／発展を支援し、日本のインターネット・インフラをより快適に、より便利に、そしてより簡単にするため、ISP事業者向けのインフラ構築・運用支援を目的として発足した。ISPへのローミングを主な事業とする。

英文名称：Japan Network Enabler Corporation (JPNE)

■ 著者紹介

小川晃通（おがわ あきみち）

慶應義塾大学にて博士（政策・メディア）取得。プログラミング、テクニカルライティング、コンサルティング、DTP、セミナーや講演なども手がける。著書に『プロフェッショナルIPv6』（ラムダノート）、『インターネットのカタチ』『マスタリングTCP/IP OpenFlow編』（オーム社）、『アカマイ 知られざるインターネットの巨人』（KADOKAWAメディアファクトリー）、『ポートとソケットがわかればインターネットがわかる』（技術評論社）など。

久保田聡（くぼた さとし）

日本ネットワークイネイブラー株式会社技術部所属。通信キャリア、ISPでバックボーン運用、セキュリティ企画・運用を経て、2011年よりKDDI株式会社からJPNEへ出向。JPNEではv6プラスをはじめとするサービスの技術企画、構築を担当。

技術書出版社の立ち上げに際して

コンピュータとネットワーク技術の普及は情報の流通を変え、出版社の役割にも再定義が求められています。誰もが技術情報を執筆して公開できる時代、自らが技術の当事者として技術書出版を問い直したいとの思いから、株式会社時雨堂をはじめとする数多くの技術者の方々の支援をうけてラムダノート株式会社を立ち上げました。当社の一冊一冊が、技術者の糧となれば幸いです。

鹿野桂一郎

徹底解説 v6 プラス

Printed in Japan / ISBN 978-4-908686-08-5

2020年 1月22日 第1版第1刷発行

本書の発行にあたって協力を頂いた皆様
日本ネットワークイネイブラー株式会社様か
ら本書の制作費を支援いただきました

監修 日本ネットワークイネイブラー株式会社
著者 小川晃通・久保田聡
発行者 鹿野桂一郎
編集 高尾智絵
制作 鹿野桂一郎
装丁 轟木亜紀子（トップスタジオ）
印刷 平河工業社
製本 平河工業社

発行 ラムダノート株式会社
lambdanote.com
東京都荒川区西日暮里2-22-1
連絡先 info@lambdanote.com