

# 7 インターネットプロトコル (IPv6) 検証・評価システム

岡部 宣夫\*・星野 浩志\*\*・田中 貴志\*\*\*

インターネット発展の歴史は技術的困難とその克服の歴史であった。しかし、社会基盤となった今日のインターネットでは、今までの試行錯誤は許されない。これからのインターネットを支える基盤技術であるIPv6は、導入時から高い品質を求められる。我々はIPv6の検証技術を開発し、それをフリーで公開することで、IPv6の品質向上に寄与している。本稿では、(1)我々が開発したIPv6検証システムの説明、(2)我々が遭遇した仕様と現実のギャップ、(3)テスト活動の実績について述べる。

## はじめに

IPv6は、社会基盤となったインターネットの要求から生まれ、IETFで標準化が進められている。現在までに、基本的なコア部分の技術仕様が整い、学術研究組織ならびにインターネット関連の企業により、IPv6システムの研究開発が進められている。現在、主要なホスト/ルータベンダの実装が出揃い、国内外ISPも、商用接続サービスを始めた。

我々は、IPv6システムの普及を推進するために、1998年にIPv6システムの検証・評価ソフトウェア体系を技術開発するプロジェクト<sup>1)</sup>を発足させた。本稿では、開発した検証評価システム、遭遇した仕様と現実のギャップ、テスト活動の実績について述べる。

## 目的

本プロジェクトにおいては、IPv6の最新の技術および機能を、系統的・総合的に検証・評価することのできる、検証・評価技術の技術開発および実証実験を行うことを目的とした。また、その技術開発成果を迅速にフリーで公開することにより、IPv6システムの研究開発を活発化することをねらいとした。

\* 横河電機 (株) Nobuo\_Okabe@yokogawa.co.jp  
\*\* 横河電機 (株) Hiroshi\_Hoshino@yokogawa.co.jp  
\*\*\* 横河電機 (株) Takashi\_Tanaka@yokogawa.co.jp

すなわち、インターネット産業における標準化および研究開発活動においては、各組織ごとに仕様の解釈や実装に差異があり、または、異機種同士の相互接続性に関するさまざまな課題が発生することが一般的である。これらの課題を解決し、次世代インターネット関連産業を発展させるために、世界中の組織が研究開発するネットワーク機器のIPv6への仕様適合性の検証・評価をでき得る限り自動化し、効率よく実行可能とする技術開発を行った。

また、検証ソフトウェアの技術開発にあたり、IPv6プロトコルスタック開発を実施するKAMEプロジェクト<sup>2)</sup>と協調し、本技術開発で得られた結果や問題点の解決策を、KAMEプロジェクトにフィードバックすることで、KAMEプロジェクトが開発するIPv6ソフトウェア体系を、世界標準として完成させることにも寄与することとした。

## 仕様適合性検証

文献<sup>3)</sup>で述べているように、仕様適合性検査とは、あるシステムが特定の仕様を満たした実装を行っていることを厳密に検査することである。

IPv6の仕様を決めているのは、IETFのIPNG分科会である。ここから、2000年10月24日現在、26のRFC、14のInternet Draftが出ています。他の分科会が出すものも含めると、さらに多く、仕様は多岐にわたっている。

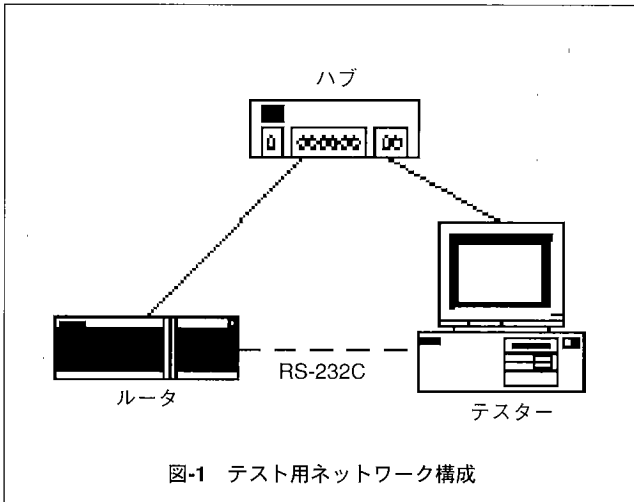


図-1 テスト用ネットワーク構成

本プロジェクトでは、それらのうち、次のIPv6に関する仕様適合性の検査システムを開発した。

- (1) 基本仕様
- (2) アドレス体系
- (3) ICMPv6
- (4) Path MTU探索
- (5) 近隣探索
- (6) アドレス自動設定
- (7) IPv6/IPv4トンネル
- (8) IPsec AH/ESP

本検査システムは、任意のIPv6パケットを任意のタイミングで送出し、検査対象の反応を観察し、分析し、記録して、検査対象が仕様に適合しているかの仕様適合性を判定する。

## 仕様適合性検証システム

### ■要求

IPv6の仕様適合性を検査するために、次のようなことを考慮して開発を行った。

仕様には、さまざまなネットワークポロジでの動作が記述されている。それらにあわせて、テスト用のネットワーク構成を変更していたのでは、効率よく自動でテストを実施することはできない。そこで図-1の構成ですべてのテストが実施できるようにした。また、対象として、ホストとルータともに検査できる必要がある。物理層は、最も需要が多い、イーサネットをターゲットとした。

一方、RFCでは、あらゆる実装の可能性を残すため、仕様の解釈に幅を持たせてある。このため、仕様の解釈は実装により異なる可能性があり、検査アルゴリズムが多くの状況に柔軟に対応できねばならない。

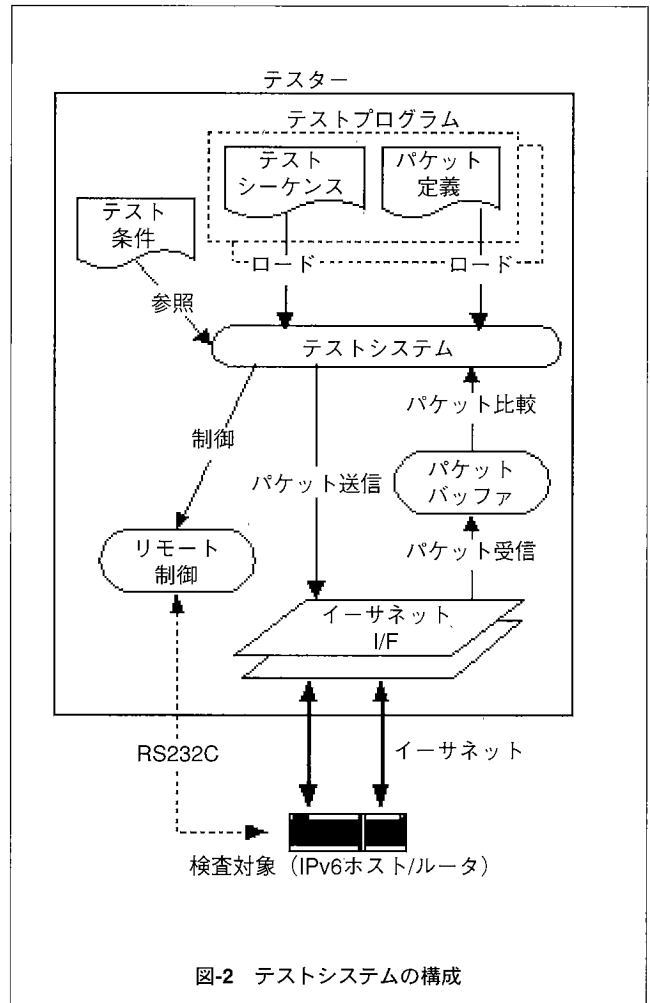


図-2 テストシステムの構成

また、検査結果は、合格、不合格のみではなく、そこに至るまでに、どのようなパケットがやりとりされたのかなど問題点の特定に役立つ情報も同時に記録する必要がある。

### ■システム構成

本テストシステムは、図-2の構成とした。

本テストシステムは、PC (FreeBSD) 上で動作する。入出力パケットは、独自言語で定義し、それらをどのような順序で送信し、また、どのようなパケットが送り返されることを期待するかを検査アルゴリズムを、Perlで記述する。

やりとりされるパケットのうち、テスターから出力するパケットは、その内容がほぼ一意に決定できる。一方、ターゲットから送り返されるパケットは、たとえば、ソースアドレスの選択方法が異なるなど、複数のケースが想定される。これらに対応するため、期待値の定義には、ORの指定や、検査が必要のない項目を無視する機能を持たせた。

また検査対象の機器は、設定方法や内容がそれぞれ異なる。そこで、多くの機器が持っているシリアルポート (RS232C) を経由して、機器固有の操作を自動

分類	テスト数	テスト時間
基本仕様	52	9分
アドレス体系	7	4分
ICMPv6	17	8分
Path MTU検索	5	26分
近隣検索	59	2時間43分
アドレス自動設定	58	1時間4分
IPv6/IPv4トンネル	6	5分
IPsec AH/ESP	48	43分
堅牢性	5	48分
合計	257	6時間10分

表-1 ホスト用テストプログラム群

的に行うようにした。これにより設定を変えなければできないテストも、人間の介入なしに実施できるようになった。

これらの機能を利用し、テストスクリプトを記述する。そして、その実行結果は、テスト中にやりとりされたパケットをデコードしたもの、テストの可否などととも、HTMLで出力されるようにした。

## テストプログラム

テストを作成するにあたり、IPv6の基本的な仕様を規定しているRFCを洗い出した。これらIPv6の機能は、ホスト固有の機能、ルータ固有の機能、ホスト／ルータ共通の機能に分類できるので、ホスト用機能とルータ用機能に再分類した。この再分類された機能を検証するためのテストプログラムを作成した。

テストプログラムは、ホスト用テストプログラム群(表-1)とルータ用テストプログラム群(表-2)からなり、両カテゴリとも、200以上のテスト数で、5時間以上のテスト時間を要する。

## テスト作成を通じての経験

RFCに基づいて仕様適合性テストの実現を試みると、次の問題に直面した。

- (1) RFCで規定されたすべてを検査することができない。
- (2) RFCで規定されていない挙動をどのように解釈するか。

本章では、遭遇した問題のいくつかを例として上

分類	テスト数	テスト時間
基本仕様	61	11分
アドレス体系	7	4分
ICMPv6	22	9分
Path MTU検索	4	24分
近隣検索	44	1時間43分
アドレス自動設定	30	1時間6分
IPv6/IPv4トンネル	9	5分
IPsec AH/ESP	50	47分
堅牢性	5	48分
合計	232	5時間17分

表-2 ルータ用テストプログラム群

げる。あらかじめ断るが、本章をもってIPv6の仕様の不備だというつもりはない。さまざまな制約により、仕様と実装とテストは、1対1に対応しないことを示すことが意図である。

### ■挙動の定義と観測手段

RFC2406<sup>4)</sup>の2.4節は、暗号化パケット(IP Encapsulating Security Payload)のパディングフィールドの条件を規定している。受信ノードに対しては、受信した暗号化パケットのパディングフィールドが規定に従っているかを調べるべき(should inspect)だと要求している。しかし、不正を検出した場合の挙動が規定されていないので、不正パディング検出機構が組み込まれているか否かを、観測する挙動から判断する基準が存在しない。

### ■仕様範囲外の影響

RFC2461<sup>5)</sup>が規定する近隣探索<sup>☆1</sup>は、単一のネットワークインタフェースを持つホストのみを対象としている。すなわち、RFC2461は接続するネットワーク上にルータの存在を検知できない場合、すべてのアドレスを自分と同一ネットワーク上に存在すると仮定することを要求している。

しかし、多くの実装では、複数のネットワークインタフェースを持っているので、インタフェースを特定するという実装に依存した機能が必要となる。挙動が実装依存の機能と深くかかわっているため、本仕様に関する試験が失敗しても必ずしも仕様を満た

☆1 IPv6の近隣探索とは、IPv4のARP機能を包含し、より広範囲の機能を提供している。つまり、(1)近隣要請／近隣通知パケットによるデータリンク層アドレスの解決、(2)ルータ要請／ルータ通知パケットによる同一リンク上のルータの検出、(3)リダイレクトパケットによる動的経路生成処理からなる。

また、アドレス自動設定機能は、近隣要請／近隣通知パケットを利用し、同一リンク上のアドレス重複検出を行う。

していないと断定することは難しい。

### ■デフォルトルータの選択基準

RFC2461の6.3.4節では、ホストが受けたルータに関する情報の管理方法を規定している。しかし、デフォルトルータの選択基準が規定されていないので、同一ネットワーク上に複数ルータが存在する場合の挙動は実装依存となる。実際に、以下の2つの挙動を経験した。

- (1) 最初に学習したルータをデフォルトルータにする。以後新たなルータからのルータ情報を受け取っても、デフォルトルータに割り当てられたルータが無効にならない限り、デフォルトルータは変わらない。
- (2) 新たなルータからのルータ情報を受け取るたびに、そのルータがデフォルトルータになる。

ルータは、定期的に自分のルータ情報を広告する。後者の実装ではデフォルトルータが頻繁に切り替わる。それに伴って経路が変わるので使い難いが、どちらもRFC2461の仕様に適合している。使いやすい実装とは、単に仕様に忠実に作るだけでは十分ではない場合もある。

### ■トラフィッククラスとフローラベル

RFC2460<sup>6)</sup>の6章と7章では、IPv6ヘッダの2つのフィールド、フローラベルとトラフィッククラスについて規定している。本RFCは、これらのフィールドを実験目的と規定している。唯一の規定は、本フィールドを使っていないノードは、ここに0を設定することである。RFC2460の観点では、これらのフィールドがどんな値でも仕様違反とはいえない。しかし、値が0以外だった場合を検出することで、これらのフィールドを使っていないノードが0設定を忘れたことのチェックに役立った。

### ■ICMPの出力制約

RFC2463<sup>7)</sup>の2章では、ノードがICMPv6エラーメッセージを出す頻度に対して、何らかの制約を求めている。しかし、厳密な基準を規定していないので、具体的な検査をすることはできなかった。

### ■RFCで規定されない挙動について

IPv6の外部的な仕様は、基本的にはRFCに記述されている。しかし、すべての場合の動作についてRFCに記述されているわけではなく、実装依存になる部分が存在する。実装者は、RFCに記述されていない部分

まで考慮して論理的に整合した実装をする必要があるが、やはり解釈の違いや実装方法の違いによる挙動の違いが起きる可能性がある。

たとえば、規定外パケットの受領／破棄の扱いの例として、近隣通知パケットを上げる。RFC2461とRFC2462<sup>8)</sup>は近隣通知パケットの処理について規定している。しかし、これらのRFCは、本来は付かないはずのオプションが付いた近隣通知パケットを受信した場合の扱いを規定していない。RFCの規定が着目した範囲内のパケットに限られるのは、しばしば見ることができ。

テストでは、規定範囲外のパケットを受信したときに、破棄する積極的な理由がない場合、受領すべきと判断する。これは、RFC2360「受信時は寛容に、送信時は厳しくあれ」("Be liberal in what you accept, and conservative in what you send.")の考えに基づくためである。ただし、テストが失敗になったとしても、元々のRFCの規定範囲外なので、警告にとどめる。

また、規定外タイミングでの挙動の扱いの例として、アドレス設定のタイミングがある。RFC2462では、アドレスを設定する前に、アドレス重複検出(Duplicate Address Detection)プロセスを行うことを規定しており、ほとんどの実装は、アドレス重複検出プロセス終了直後にアドレスを設定する。しかし中には、1秒以上経過してからようやくアドレスを設定する実装も存在する。

アドレス重複検出の本来の目的から考えて、アドレスが重複していないと判断できれば、すぐにアドレスを設定するべきである。しかしRFCでは、設定までの時間に関する規定はない。この規定がないのは、たとえ規定してもrace conditionは避けられないという、本質的な問題があるためである。RFCで規定のしようがない部分であるといえる。IPv6ではrace conditionが起きにくくする仕組みも規定されているが、実装者も、race conditionがなるべく起きないように、注意して実装する必要がある。

### ■テスト活動の実績

1999年4月にテストツールをフリーでリリースして以来、15組織、20実装に対して延べ73回のテストを行い、テスト結果とフェイル原因の解析をIPv6実装者に提供した。

KAMEプロジェクトでは、IPv6参照コードを1998年5月からStable Releaseを2カ月ごとに出している。我々は、1999年4月から、ほぼすべてのStable Release作業に先立ってテストを走らせ、KAMEプロジェクトのリリース作業を支援した。

2度のテストイベントを主催し、国内外のIPv6実装者に対してマルチベンダ環境下でのIPv6検証の場を提供した。

(1) 1999年9月28日～10月1日

東京で行われたIETF IPNG分科会と併設でテストイベントを行い、17組織が参加した。

(2) 2000年7月15日～7月18日

INET2000と併設でテストイベントを行い、17組織が参加した。

## IETF 標準化プロセスの特徴

上述したように、RFCで規定された仕様の不整合は、IETFの標準化では不可避である。しかし、これをもってIETFの標準化プロセスが間違っていると理解してはいけない。厳密なレベルまで一貫した仕様を作成するには、多くの時間と労力を必要とする。インターネットにおける技術革新の速度は非常に早いので、時間のかかる標準化プロセスは機能しない。IETFは標準化の過程に経済原理を持ち込むこと、つまり最終的な解決は市場競争に委ねることで、標準化の精度と実効性の妥協をはかったと解釈できる。

## 参照コードとテストシステムの重要性

IETFでは、IPNGをはじめ多くの分科会がIPv6にかかわる仕様を出している。しかも、これらの内容には細かい矛盾が内包されている可能性があり、すべての研究者および開発者が包括的に理解することは難し



い。だからこそ、誰もが自由に読める参照コードが重要である。世界中のすべてのネットワークにつながるノードが正しくIPv6で通信するために、KAMEプロジェクトが公開している参照コードの意義は高い。参照コードであるための条件の1つは、仕様を正しく実装しているかを客観的に示すことである。TAHIプロジェクトが1999年から公開しているテスト結果は、KAMEプロジェクトの成果が参照コードに耐え得ることを客観的に示す役割を担っていると考える。

## 今後の課題

我々は、以下で示す活動を通して、IPv6の普及と品質向上に貢献してきた。まず、IPv6検証技術を開発し、それをフリーで公開した。次に、テストイベントを主催することで、IPv6の実装に携わる人たちに、品質向上の機会を提供した。

しかし、IPv6の普及という目標を考えると、現在のテストの課題は多々存在する。今後は、下記のテーマに着目し、テスト活動を発展させることを考えたい。

- (1) MobileIPv6など、現在のテストツールがカバーしていない仕様に対するテストを用意する必要がある。
- (2) IPv6は、コンピュータではないネットワーク機器とともに普及するだろう。このような機器にふさわしいテストを検討したい。なぜなら、現在のIPv6の仕様は、贅沢な資源（物理サイズ、CPUパワー、メモリ容量）を前提としている。

しかし、普及するであろう非コンピュータ機器の資源は、はるかに厳しい制約を受けるはずであり、すべてのIPv6仕様をテストすること自体が無意味かもしれない。

### 参考文献

- 1) <http://www.tahi.org/>
- 2) <http://www.kame.net/>
- 3) Bertine, H.V. and Elsner, W.B. et al.: Overview of Protocol Testing, Programs, Methodologies, and Standards, AT&T Techno. J., Vol.69, No.1, pp.7-16 (1990).
- 4) Kent, S. and Atkinson, R.: IP Encapsulating Security Payload, RFC2406 (1998).
- 5) Narten, T., Nordmark, E. and Simpson, W.: Neighbor Discovery for IP, RFC2461 (1998).
- 6) Deering, S. and Hinden, R.: Internet Protocol, Version 6 (IPv6), Specification, RFC2460 (1998).
- 7) Conta, A. and Deering, S.: Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6), Specification, RFC2463 (1998).
- 8) Thomson, S. and Narten, T.: IPv6 Stateless Address Autoconfiguration, RFC2462 (1998).

(平成12年11月30日受付)

