

# 新世代ネットワークプロトコル IP-- の設計

藤川 賢治<sup>†</sup> 太田 昌孝<sup>††</sup>

<sup>†</sup>(独) 情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

<sup>††</sup> 東京工業大学大学院情報理工学部研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: <sup>†</sup>hudikaha@nict.go.jp, <sup>††</sup>mohta@necom830.hpcl.titech.ac.jp

**あらまし** 本稿ではまず IPv4/IPv6 双方の問題点を挙げ、それらの問題を解決すべく、クリーンスレートアプローチにより新世代ネットワークプロトコル IP-- を設計する。IP-- では IPv4、IPv6 の無駄が削ぎ落され、また Locator と ID の分離を行い、複数ソース Locator をパケットヘッダに格納できるようにしている。これにより IP-- はヘッダオーバーヘッドの増加無しに End-to-End マルチホーミングやモビリティにも容易に対応できる。

**キーワード** 新世代ネットワーク, IP--, End-to-End マルチホーミング, モビリティ, Locator/ID 分離

## Design of A New Generation Network Protocol IP--

Kenji FUJIKAWA<sup>†</sup> and Masataka OHTA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Information and Communication Technology, New Generation Network Research Center,  
4-2-1 Nukui-kita, Koganei, Tokyo, 184-8795, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,  
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

E-mail: <sup>†</sup>hudikaha@nict.go.jp, <sup>††</sup>mohta@necom830.hpcl.titech.ac.jp

**Abstract** In this paper, we first point out problems of both of IPv4 and IPv6, then in order to solve these problems, design a new generation network protocol IP-- in the clean slate approach. In IP--, surplus of IPv4/IPv6 is cut off, locator and ID are separated, and multiple source locators can be placed in a packet header. Therefore, IP-- is simply adaptable to End-to-End multihoming and mobility without packet header overhead increase.

**Key words** New Generation Network, IP--, End-to-End multihoming, mobility, Locator/ID separation

### 1. はじめに

インターネットは既に必要不可欠な社会インフラとして成長した。しかし今後も持続的にインターネットが発展していくには様々な問題点が指摘されており、クリーンスレートアプローチと呼ばれる、即ち白紙からネットワークを再設計しようという機運が高まっている [1]~[3]

我々も 2015 年に既存ネットワークに縛られない新世代ネットワークを実現することを目指し、AKARI プロジェクトを推進している [4]。

新世代ネットワークは、従来の因習に囚われずにクリーンスレートで設計するとはいえ、インターネット同様のデータグラム型のパケットの利用を否定するものではない。多数の装置が少量のデータを発生するようなユビキタス環境を考えると、データグラムの利用はむしろ必然である。

しかしながら、新世代ネットワークのパケットは既存の IP ではなく、End-to-End 原理 [5] や、KISS 原則に基き、より単純な

ものとなるべきである。本章ではそのようなプロトコルを IP-- と名付け、これについて論じる。なお本稿では一般に、現在のインターネットのプロトコル名に "--" を付けたものは、現在のインターネットのプロトコルと同様の機能を持ちつつ、より単純化されたものを示す。

以下 2 章では既存インターネットの問題点を挙げ、3 章では End-to-End マルチホーミングについて説明し、4 章では新世代ネットワークプロトコル IP-- を提案し、5 章では IP-- による End-to-End マルチホーミングの例を挙げる。

### 2. 既存インターネットの問題点

#### 2.1 IPv4 の複雑さ

IPv4 [6] は、処理能力に余力のない時代に設計されたこともあり、また、複雑さの多くは IP ヘッダに付加可能なオプションとしており、実際にオプションが使われることはほとんど無いことから、事実上かなり単純なプロトコルである。

IPv4 の複雑さの一つに、TTL の単位が秒でありネットワーク

層に時間の概念が導入されていることがあるが、実際には TTL はホップ数としてしか使われていないため、事実上問題はない。IPv6 [7] でもこの点は考慮され、TTL は時間の概念の無い Hop Count に置換えられている。むしろ、多くの経路制御プロトコルの時間の最小単位が秒であることで、障害対応に秒単位の時間がかかってしまうことの方が、問題である。

ただ、IPv4 で要求される、ルータによるフラグメンテーションは、ルータの負荷を悪戯に増やす End-to-End 原理に違反した機能である。そこで、IPng の提案の一つであった Simple IP (SIP) [8] では、途中ノードでのフラグメンテーションを禁止し、IPv6 にも受継がれている。

## 2.2 IPng の目標

IPng は、当初、32 ビットの IPv4 アドレスでは不足するとの問題意識から開発が開始された。その後、大域経路表の増大も大きな問題であることが認識されたが、IPng の提案では、あまり考慮されていない。大域経路表の増大は、ルータに大量のメモリを要求するが、これはたいした問題ではない。しかし、大域経路表の増大による経路制御の収束速度の劣化は極めて深刻な問題で、大規模障害時の経路の収束に分単位の時間を要する現状は、既に破綻しているといってもよい。

大域経路表の増加を押さえるには、徹底した階層化アドレスと、経路制御によらないマルチホーミングが必要である。しかし、階層化アドレスの徹底は、中小規模 ISP も上流 ISP からアドレス割当を受けることが政治的に受入れられ難く（アドレス割当てを議論する場合は、ISP の集合体であり、中小規模 ISP の発言力は大きい）、中小 ISP が大域経路表に独自エントリを持つという、中途半端なものにとどまっている。

しかし、中小規模 ISP に許された大域経路表中の独自エントリをマルチホームした大規模サイトに認めず複数アドレスの利用を強制するという考えに説得力はなく、大域経路表はマルチホームされたサイトの数だけ増大している。

経路制御に依らないマルチホーミングは End-to-End マルチホーミングと呼ぶ手法により可能であり、本手法については、3 章において説明する。

## 2.3 IPv6 の複雑さ

IPv6 は SIP (Simple IP) が原型であるものの、諸般の事情で非常に複雑なプロトコルと化している。

まず、IPv4 のルータでのフラグメンテーションにかわって導入された PMTUD (Path MTU Discovery) は、様々な混乱を引き起こしている。PMTUD はコネクションの経路 (PATH) の MTU を推測しようというもので、コネクションを前提とした概念であるため、コネクションレスの IP 層には適用できないからだ。無理に適用してもどこかに綻びが生じ、それを繕うためのプロトコルを積み上げても、他の綻びが生じプロトコルが無駄に複雑化した。

IPv6 では、SIP を他の提案と融合する過程の政治的配慮で、IPv4 の経験により不要であることが明らかな IP オプションが多数導入され、無駄に複雑になっている。IPv6 のモビリティで IP オプションを無理にでも活用しようとしたが、結果として IP モビリティ専用のオプションが増えるだけに終わった。

Neighbor Discovery (ND) も、IPv6 の複雑さの元凶である。IP の大きな特徴は、多種多様のデータリンク層で動作できることだが、そのためにはデータリンク層の特徴に応じて IP の載せ方を工夫した「IP over (データリンク層の名前)」というプロトコル群 (“IP over Ethernet” 等) が必要となる。ところがこのプロトコル群をデータリンク層の特徴によらず統一しようとしたのが ND である。多種多様のデータリンク層への対応を標準化するのには、矛盾であり、無理に標準化してもどこかに綻びが生じ、それを繕うためのプロトコルを積み上げても、他の綻びが生じプロトコルは無駄に複雑化した。ND は、具体的には PPP と Ethernet と大幅に誤解された広域 ATM を想定して設計された。

中でも、広域 ATM (このように機器の数が多いうデータリンク層は、インターネットの基本モデルである CATENET モデルに違反している) ではブロードキャストができないがマルチキャストはできるという誤解のもと、ブロードキャストが排除されマルチキャスト対応が要求されたのは、深刻な複雑化である。

また ND はネットワーク層に時間の概念を導入し、独自のタイムアウト値を規定したが、これは有害無益である。当初のタイムアウト値は、ハンドオーバーが頻発するデータリンクに対応するため後日修正されたが [15]、これは多種多様のデータリンク層に対応するという ND の目的の破綻の証拠である。ND は、WiFi のようにユニキャストはリアルタイムだがマルチキャストがリアルタイムではないデータリンクではうまく動作しないことも分っている。

ND では更に、ルータとホストを差別化し、一般のホストは経路表を持たないこととしている。また、IPv6 に限らず IPv4 の運用でも、幹線と末端のルータも差別化され、末端のルータは大局的経路についての情報を遮断され、デフォルトルートに集約された情報しか持たないことがほとんどである。しかし、ネットワーク途中の機器であるルータのみに情報を与え判断をさせ、とりわけネットワーク奥深くの幹線ルータにのみ情報を与えることは End-to-End 原理違反であり、ホストがどのルータを利用すべきか、あるいはホストはどのアドレスを利用すべきかといった問題にホストが対処できず、多くの混乱をもたらすプロトコルをいたずらに複雑化させている。

IPv6 では IPsec [13] 対応も義務付けられている。当初は、これで ICMP を認証できるという誤解があったようだが、実際には何の役にも立っていない。そもそも IPsec 自体、AH と ESP、Tunnel モードと Transport モードが混在し、無駄に複雑なプロトコルである。

## 3. End-to-End マルチホーミング

経路制御によらないマルチホーミングは、マルチホーム ISP やマルチホームサイトに複数のアドレスを付与する「End-to-End マルチホーミング」により可能であり、筆者らは [9]~[11] において End-to-End マルチホーミングを提案している。

IPv4 や IPv6 ではアドレスは固体識別子 (ID) と位置情報の二つを担うという二重性を持っていたが、アドレスを ID と Locator に分離することで固体識別や位置情報の多重化を効率化できる [12]。この分離は、ルータによる Locator の書換えも

可能にし、DoS 攻撃等でのソースアドレス (ソース Locator) の詐称を防ぐことができる。

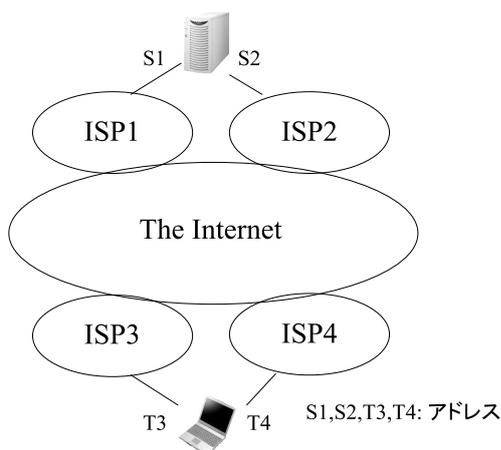


図1 End-to-End マルチホーミング

図1は End(末端)に複数アドレスを与えて、末端が経路を選択するマルチホーミングを示している。

End-to-End マルチホーミングにより、下位 ISP やユーザなどは、複数の上位 ISP が持つアドレス空間の一部を利用できるアドレス空間として移譲される。このため、アドレスの縮約が可能であり経路表を小さくできる。最上位 ISP の数を初めから設計として抑えておけば、経路表の大きさを抑えられ、末端が必要な全経路表を持ちマルチホームされた通信相手への最適経路を自信で選ぶことも非現実的では無くなる。

#### 4. IP--の設計

##### 4.1 IP--の設計指針

以上のような、IPv4の結果としての単純さと、IPngの本来の設計目標、IPv6の惨状を踏まえ、IP--の設計指針を以下のように定める：

- 十分に長いアドレス
- IP オプションの撤廃
- フラグメンテーション撤廃
- ネットワーク層はコネクションレス (時間の概念の排除)
- ネットワーク層での PMTUD の排除
- ISP レベルで階層化されたアドレス割当て
- 複数アドレスの積極的サポート
- アドレスの ID と Locator への分離
- ソース Locator の書換えを認める
- 多種多様なデータリンク層への個別対応
- リンクブロードキャストの導入
- マルチキャストの標準対応は要求しない
- IPsec--の標準対応は要求しない
- 各ホスト (ルータも含む) はデフォルトのない経路表を持つ

- モビリティへの標準対応

##### 4.2 IP--パケットフォーマット

IP--パケットは、図4.2のようなフィールドを持ち、各フィー

ペイロード長	プロトコル	HTL
ソースLocator List長	未使用	
ディスティネーションLocator		
ディスティネーションID		
ソースLocator		
ソースID		
ソースLocator List		
ペイロード		

ペイロード長:	16 ビット
プロトコル:	8 ビット
HTL:	8 ビット
ソース Locator List 長:	8 ビット
未使用:	28 ビット
ディスティネーション Locator:	64 ビット
ディスティネーション ID:	64 ビット
ソース Locator:	64 ビット
ソース ID:	64 ビット
ソース Locator List:	64 ビット×最大 15 個
ペイロード:	最大 64KB

図2 IP-- パケットフォーマット

ルドは、以下のような意味を持つ。

- ペイロード長: ペイロードのバイト単位の長さ。最小 1B、最大 65536B。
- プロトコル: ペイロードのトランスポート層 (含 ICMP--、IPsec--) プロトコル。
- HTL (Hop To Live): 残りホップ数。最小 0、最大 255。ルータを経由するたびに 1 減らされ、HTL が 0 で到着したパケットは、最終目的地以外では、それ以上フォワードされず捨てられる。
- ソース Locator 長: 追加ソース Locator の数。最小 0、最大 15。
- ディスティネーション Locator: ソースホストの Locator。途中の HA (Home Agent) で書換可能。
- ディスティネーション ID: ディスティネーションの ID
- ソース Locator: ソースホストの Locator。途中のルータで書換可能。
- ソース ID: ソースホストの ID。
- ソース Locator List: ソースの持つ全ての Locator のリスト。途中のルータで書換わらない。トランスポート層やその上位層 (以後、「トランスポート層等」という) のコネクション確立の過程で相手の Locator が確認できた後は、トランスポート層等により決まるタイムアウトやトランスポート層等による取り消しまでは、省略できる。
- ペイロード: トランスポート層ヘッダとトランスポート層ペイロード。ICMP エラーや QoS 保証のための通信の識別は、ソース ID、ディスティネーション ID、プロトコルと、トランスポート層ヘッダの最初の 32 ビットの組み合わせで、ユ

ニークに行えるものとする。

データリンクの最小 MTU は 9KB とし、フラグメンテーションは行わない。全ホストは 9KB のパケットを受取れないといけない。ソースは、通常は 9KB より大きいパケットを送出しはならないが、ディスティネーションまでの経路の MTU がパスによらず 9KB より大きくディスティネーションホストが 9KB より大きいパケットを受取れると何らかの手段でわかっている場合は、当該 MTU もしくはディスティネーションホストの受取れるサイズのどちらか小さい値までのパケットを送出してよい。

### 4.3 IP--アドレス体系

IP--アドレスは、Locator と ID を組合せたものである。各ホストは、一般に複数の ID と複数の Locator を持つ。自己の ID と同じパケットは Locator によらず、自分宛のものとして受取る。全ビットが 1 の ID はブロードキャストを示し、全ホストが受取る。

DNS--により、ID や Locator とドメイン名の相互変換を可能とする。

ID は、ドメイン名同様に全世界的にユニークで、in-addr.arpa. のような仕組みで、組織の管理構造に従って階層的に割当て（例えば、先頭 1 バイトで国、次の 2 バイトで小規模な自治体をユニークに特定し、各自治体が住民や法人の要求に応じて次の 3 バイトを順次割当てれば、要求者は 65536 個の ID を利用できる）。

ユニキャスト Locator はホストの位置するデータリンクを特定するもので（データリンク内でのホストの特定は、ID による）、その先頭 4 ビットは 0 とする。次の 12 ビットは、大域経路制御に使う。この 12 ビットの割当ては、電波帯域等と同様、公平に（国際的に、及び、人口比等で国別に割当てた後、オークションなどで競争的に？）行い、通常は大手 ISP に割当てられることとなり、割当てられたものを Tier1 と呼ぶ。先頭 4 ビットが全部 1 の Locator は、ブロードキャスト・マルチキャストに予約する。次の 12 ビットは、Tier1 内での経路制御に使い、通常は Tier1 ISP 自体が使うか、Tier1 の判断で傘下の ISP や大サイト（Tier 2）に割当てられる。一つの Tier1 が傘下に 4096 より以上の Tier 2 を持ちたい場合は、Tier 1 用アドレスを複数持つ必要がある。以下同様に、アドレス 12 ビットごとに、Tier 3、Tier 4、Tier 5 の階層が定義される。ISP は Tier 5 ではあってはならず、ISP の顧客は少なくとも 12 ビットの Locator を、サイト内部での経路制御に使える。

エニキャスト Locator は、ユニキャスト Locator を、そのまま使う。ユニキャスト同様、同一データリンク内に同じアドレスを持つエニキャストホストが二つ以上存在してはならない。

パケットを送信する場合には、自己の ID の一つをソース ID、自己の Locator の一つをソース Locator とする。ソース Locator は、経路上のルータで、実際にパケットが通過してきた経路に従って、書換えられる。

受信したパケットに返事をする場合は、追加ソース Locator の中から、経路表情報やトランスポート層等の接続（あれば）の過去の履歴に基づき、適切な Locator を選択し、ディス

ティネーション Locator とする。

### 4.4 ICMP--

ICMP--としては、

- Destination Unreachable
- Time Exceeded
- Echo & Echo Reply

をサポートする。ICMP--は、ICMP--の原因となったパケットのソース Locator に返し、ヘッダ全部とペイロードの先頭 32 バイトを含める（TCP--で、シーケンス番号を見て偽のパケットによる DoS 攻撃を防げる）。

### 4.5 MIP--

モビリティの提供は Mobile IP (MIP) [14] や MIPv6 [15] と同様に、Home Agent (HA) により行う。HA は、Correspondent Node (CN) からのパケットを Mobile Node (MN) へ中継し、MN への ICMP を MN に中継する。中継はディスティネーション Locator の書き換えだけで行え、トネリングや MIPv6 のルーティングヘッダは不要である。

MN は、トランスポート層等がコネクションレスあるいはコネクションの最初は、CN にホームアドレスの Locator を送る。これは、MIPv6 の HA オプションに相当する。MIP--は IP 層に属しコネクションレスであるため、適切なタイムアウト値が管理できないが、トランスポート層コネクション (TCP--等) は、適宜、MN のフォーリンアドレスの Locator List を交換してもよい。CN は、トランスポート層等のコネクションで MN のフォーリン Locator List を入手した場合、MA を経由せずに MN のフォーリン Locator に直接パケットを送ってもよい。

## 5. IP--による End-to-End マルチホームングの例

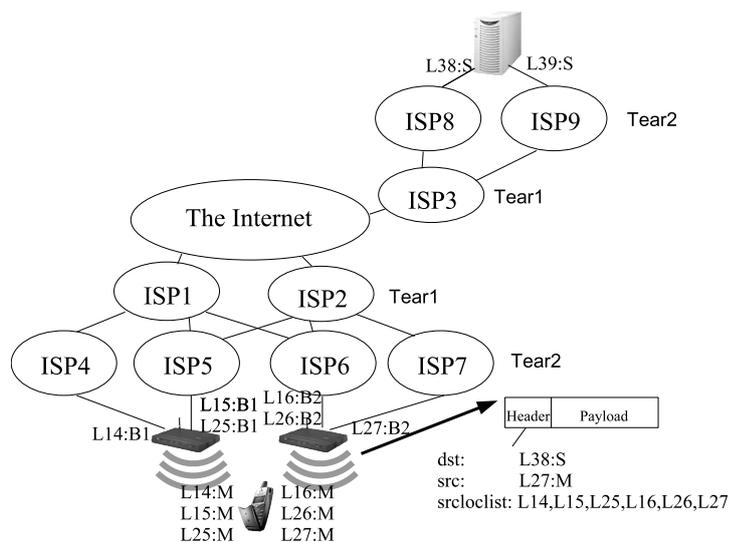


図3 ISP が複数上流 ISP にマルチホームング

図3ではISPが複数上流ISPにマルチホームしており、サーバも移動（無線）端末もマルチホームしている。その結果、サーバは2個のアドレス、移動端末は6個のアドレスを持つことになっている。移動端末は、サーバのアドレスをDNS--などの

方法で知り、その内の一つをディスティネーション Locator とディスティネーション ID (dst) に設定する。またソース Locator とソース ID (src) には自信の持つアドレスの内のどれかを設定し、ソース Locator List (srcloclist) には 6 個の Locator を格納し、パケットを送信する。

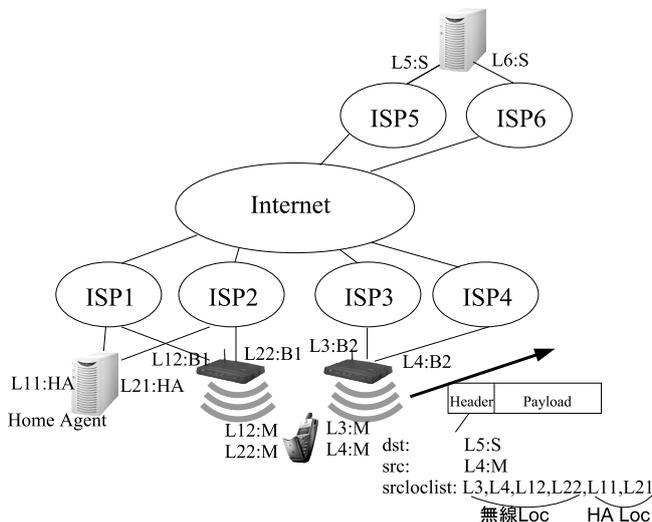


図4 IP--によるモビリティ

図4では、HAもマルチホームしており、移動端末は、基地局から受取ったLocatorとHAのLocatorをそれぞれ複数、ソースLocator Listに格納してパケットを送信することができる。

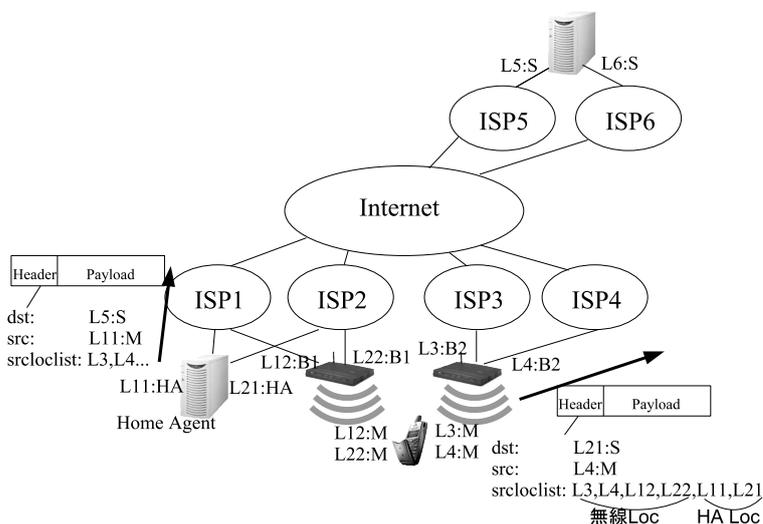


図5 HAによるパケットの書換え

IP--では前章で述べたようにMIPv4/MIPv6でいうトンネリングに相当するHAによるパケットの転送も双方向共に可能である。ただしアドレス書換えを許しているため、MIPv4/MIPv6のように転送の為にヘッダが増えることは無い。

図5は移動端末からHA経由でサーバにパケットを送信する様子を示している。図4と異なり、ディスティネーションLocatorとしてHAを指定しており、パケットはまずHAに到達する。

HAはディスティネーションIDがSで自分宛で無いことが分かる為、SからDNS--などを用いて、サーバのLocatorを調べ、L5かL6のどちらかのLocatorに転送する(図5ではL5に転送している)

本転送手法だと、移動端末がL5とL6のどちらのLocatorに送信するか、パケット内で明示する方法が無く、この点が問題だと思われるかもしれない。しかしそもそも移動端末が決定したサーバのLocatorがHAから見てより良い経路である保障は全く無い。むしろHAが常にLocatorを決定する本手法の方が通信相手もマルチホームしている場合には最適経路を選択できるため優れている。

## 6. おわりに

本稿では、IPv4, IPv6双方の問題点を挙げ、それらの問題を解決すべく、クリーンスレートアプローチにより新世代ネットワークプロトコルIP--を設計した。

IP--ではIPv4, IPv6の無駄が削ぎ落され、またLocatorとIDの分離を行い、複数ソースLocatorをパケットヘッダに格納できるようにしている。これによりヘッダオーバーヘッドの増加無しにEnd-to-Endマルチホームやモビリティにも対応できる。

今後の課題としてはIP--の実装及び評価、また光パケットスイッチ[16]への適用、既存ネットワークとの相互接続性確保の手法の検討などが挙げられる。

## 文 献

- [1] <http://www.nets-find.net/>
- [2] <http://www.geni.net/>
- [3] <http://www.future-internet.eu/>
- [4] <http://akari-project.nict.go.jp/>
- [5] J. H. Saltzer, D. P. Reed, and D. D. Clark. "End-to-End Arguments in System Design," ACM Transactions in Computer Systems 2, 4, November 1984.
- [6] J. Postel, "INTERNET PROTOCOL: DARPA INTERNET PROGRAM PROTOCOL SPECIFICATION,, RFC 791, September 1981.
- [7] S. Deering, and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification," RFC 1883, December 1995.
- [8] R. Hinden, "Simple Internet Protocol Plus White Paper," RFC 1710, October 1994.
- [9] M. Ohta "The Architecture of End to End Multihoming," draft-ohta-e2e-multihoming-05.txt, IETF Internet-Draft (expired), June 2003.
- [10] 大平健司, 緒方勝也, 松本存史, 藤川賢治, 岡部寿男, "End-to-EndマルチホームのためのIPv6アドレッシングアーキテクチャ," 情報処理学会マルチメディア・分散・協調とモバイル(DICOMO2003)シンポジウム, Jun 2003.
- [11] 藤川賢治, 真野浩, 太田昌孝, "送信者アドレス情報のみでの経路制御を行うIPv6マルチホームの提案," 信学技報, vol. 107, no. 151, IA2007-24, pp. 85-89, 2007年7月.
- [12] M. Ishiyama, M. Kunishi, K. Uehara, H. Esaki, and F. Teraoka, "LINA: A New Approach to Mobility Support in Wide Area Networks," IEICE Transactions on Communication, Vol.E84-B, No.8, pp.2076-2086, August 2001.
- [13] S. Kent, and K. Seo, "Security Architecture for the Internet Protocol," RFC 4301, December 2005.
- [14] C. Perkins, "IP Mobility Support," RFC 2002, October 1996.
- [15] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko, "Mobility Support in IPv6," RFC3775, June 2004.
- [16] 太田昌孝, "超高速光パケットスイッチのためのデバイス及び周辺技術 (Invited Talk)," 信学技報, vol. 107, no. 464, PN2007-62, pp. 141-144, 2008年1月.

