

## 概要

2004年から2005年にかけて、IPv6における移動通信機能の基本となる Mobile IPv6 と Network Mobility の仕様が相次いで RFC になった。WIDE プロジェクトは長く IP モビリティ技術の研究を続けており、前述の仕様の策定や、拡張仕様の提案などに大きく貢献している。本稿では、WIDE プロジェクトのモビリティに関する取り組みの中から、Mobile IPv6、NEMO およびアドホックネットワークを取り上げ、簡単な動作の仕組みと、我々が提案している拡張機能を紹介する。また、WIDE プロジェクトで実装、公開している IPv6 モビリティ関連ソフトウェアの現状も紹介する。

# WIDE プロジェクトにおける IPv6 モビリティ技術の研究開発

島 慶一\*      湧川 隆次†

## 原文の情報

本文書は、2005 年 8 月に情報処理 Vol.46, No.8 に掲載された内容を再編集したものである。

## 1 IPv6 におけるモビリティ技術

1990 年頃から、既存の IPv4 に代わる次世代インターネットプロトコルとしての IPv6 の仕様検討が開始された。ほぼ同時期に、IPv6 に移動通信機能を追加するための Mobile IPv6(MIPv6) の仕様も検討が開始されている。MIPv6 の仕様検討には予想以上の時間を要したものの、約 10 年に渡る議論の末、ようやく 2004 年 6 月に RFC3775 として発行された。MIPv6 は IPv6 におけるモビリティ機能の基本技術になると考えられている。基本仕様である MIPv6 が RFC になったことにより、今後は実際の製品への搭載などの動きが進み、長く待ち望まれていた IP ベースの移動通信技術の普及が始まることが期待されている。

また、近年急激な進展を遂げた移動通信技術に Network Mobility(NEMO) が挙げられる。Mobile IPv6 が IPv6 ホストの移動通信機能に着目していたのに対し、Network Mobility 技術は IPv6 ルータに移動通信機能を追加する。移動端末がネットワークを持ち歩くという、IPv6 の広大なアドレス空間を有効に活用した NEMO 技術は、将来の移動通信技術の応用範囲を広げるだろう。NEMO を用いると、移動ルータが収容しているネットワークに接続された IPv6 ノードは、特に移動通信技術を実装していなくても、移動ルータと共に移動できる。NEMO ルータがネットワークの移動を隠蔽し、内部のホストに透過的な接続環境を提供するからである。NEMO は 2005 年 1 月に RFC3963 として発行されている。

---

\*株式会社インターネットイニシアティブ

†慶應義塾大学

MIP6 や NEMO は、移動する端末が移動通信仕様を実装した上でさらに、ネットワーク上に移動端末を補助するサーバを必要とし、移動端末とサーバ間にインターネットを介した通信路が存在することが前提となっている。しかしながら、移動端末を運用する場合に、必ずしも安定した接続性を仮定することはできない。インターネット上のサーバへの接続性が得られない状況で、複数の端末が寄り集まって、お互いに通信する場合などがその典型例である。アドホックネットワーク技術は、このような状況下でそれぞれの端末同士を自律的に接続する技術であり、将来登場するであろう、通信機能を備えた車と車の通信などへの応用が期待されている。

WIDE プロジェクトは IPv6 モビリティ技術に注目しており、仕様の検討、プロトコルの実装、そして実際の運用を通じて、これらの技術の改良と普及に注力している。本稿では、IPv6 モビリティ技術の取り組みの中から、MIP6、NEMO、アドホックネットワークを取り上げ紹介する。

## 2 Mobile IPv6 技術

Mobile IPv6(MIP6) では、移動するノード (移動ノード) にホームアドレスと呼ばれる固定のアドレスを割り当てる。ホームアドレスは移動ノードが論理的に接続しているネットワーク (ホームネットワークと呼ぶ) で割り当てられるアドレスであり、移動ノードが通信する際には必ずホームアドレスを利用する。移動ノードは、自分が実際に接続しているネットワークにかかわらず、通信相手にはホームネットワークに接続しているように見せかけることで移動透過を実現している (図 1)。移動ノードに向けて送信されたパケットは、インターネットの経路情報に従ってホームネットワークに配送される。これらのパケットは、ホームネットワークに接続されたホームエージェントと呼ばれる代理サーバを経由して、移動ノードの現在位置に転送される。ホームエージェントが適切な位置にパケットを転送できるように、移動ノードは出先ネットワークで取得したアドレス (気付アドレス) を常にホームエージェントに登録しておかなければならない。また、逆に移動ノードが通信相手にパケットを送信する場合は、パケットがホームネットワークから送信されているように見せるため、一旦ホームエージェントにパケットを転送し、ホームネットワークから再送信する。

現在 MIP6 には以下のような課題が存在する。

1. 複数インターフェースの撰択問題
2. ホームエージェントの耐障害性
3. IPv6 網が利用できない場合の対策

WIDE プロジェクトでは、これらの問題を解決するための仕組みを提案している。それぞれの提案を 2.1 節、2.2 節および 2.3 節で解説する。

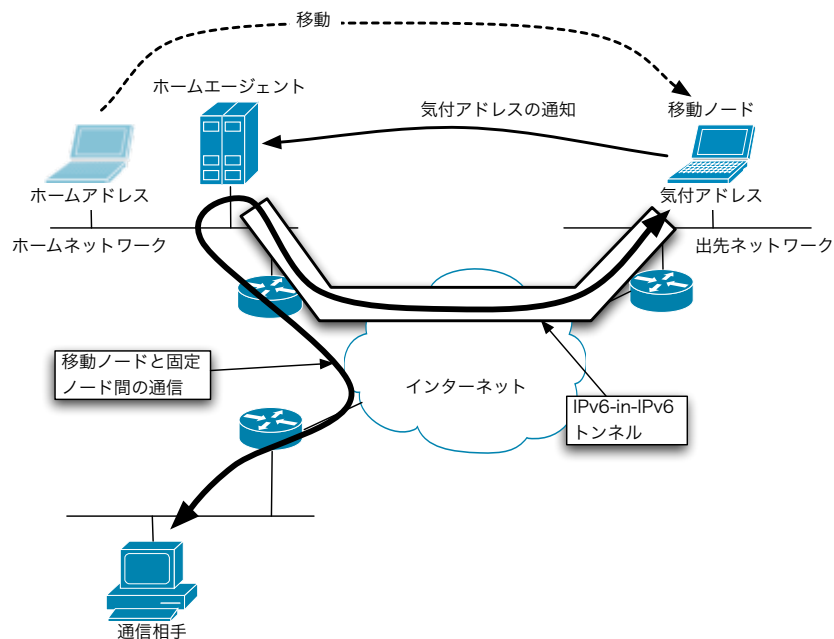


図 1: Mobile IPv6 の基本動作

## 2.1 複数の経路の活用

MIPv6 では、ホームエージェントに登録できる気付アドレスはひとつだけである。移動ノードが複数のインターフェース (例えば無線 LAN と PHS など) を持つ場合、登録できるアドレスはどちらか一方のインターフェースに割り当てられたアドレスとなり、複数の経路を有効に活用できない。この問題に対する解決案として、複数気付アドレスの同時登録の仕組み [1] を提案している。

文献 [1] の仕組みでは、移動ノードは自分が保持している気付アドレスに識別子を付加し、気付アドレスと識別子の組をホームエージェントに登録する。移動ノードは、自分が利用するすべてのネットワークインターフェースに割り当てられた気付アドレスをホームエージェントに登録できるため、状況に応じて適切な気付アドレスを選択利用できる。また、ホームエージェントが移動ノード宛てにパケットを転送する際も、状況に応じて転送先となる気付アドレスを選択することができるため、移動ノードに到達する経路を間接的に選択可能となる (図 2)。

図 2 の例では、移動ノードが 2 つの気付アドレス (気付アドレス 1 と 2) を持っている。移動ノードは、それぞれの気付アドレスに識別子 (識別子 1 と 2) を関連付け、その組をホームエージェントに登録することで、ホームエージェントとの間に複数の IPv6-in-IPv6 トンネルを構築する。移動ノードとホーム

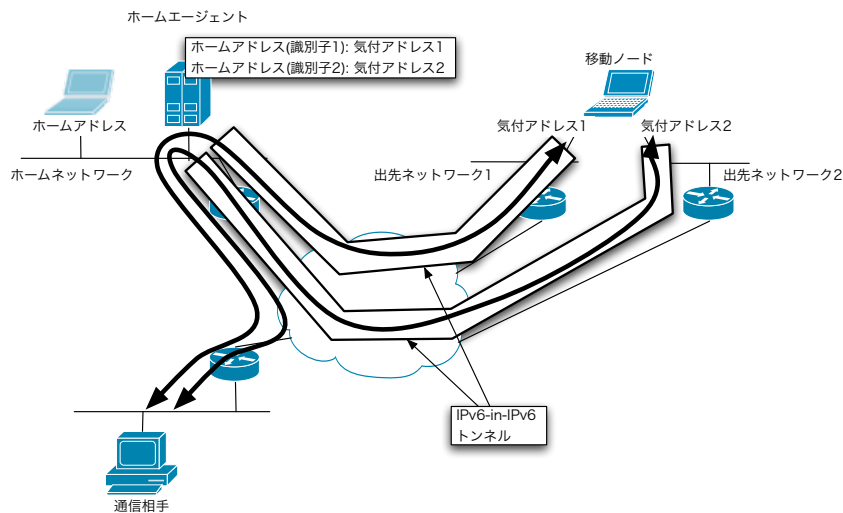


図 2: 複数気付アドレスの利用

エージェントは、事前に別途設定された運用ポリシーに従って、複数のトンネルを使い分ける。例えば、即応性の必要な情報のやりとりにはパケット往復時間の短いインターフェースを用い、大容量データのやりとりが必要な場合には帯域の広いインターフェースを用いたりできる。なお、移動ノードの通信相手は、移動ノードのホームアドレスと通信しており、移動ノードとホームエージェントの間でどのトンネルが使われているかを知る必要がないため、従来通り移動ノードと透過的に通信可能である。

## 2.2 ホームエージェントの多重化

MIPv6 では、移動ノードの位置を透過的に見せるため、すべてのパケットがホームエージェントを経由して転送される。よって、ホームエージェントに障害が発生すると移動ノードの通信が途絶してしまう。なお、RFC3775 には、ホームエージェントを介さない通信方法も定義されている。その仕組みを使うと、移動ノードと通信相手が直接パケットをやりとりすることが可能になる。この仕組みは経路最適化 (Route Optimization) と呼ばれる。しかしながら、経路最適化を利用するには、移動ノードと通信相手の間で定期的に制御信号を交換しなければならず、その信号がホームエージェント経由となるため、やはりホームエージェントの障害が問題となることに変わりはない。文献 [2] では、この問題を解決するための仕組みを提案している。

基本的な考え方は、ホームエージェントを複数設置して、障害が発生したホームエージェントのサービスを他のホームエージェントへ移動するというものである。ただし、移動ノードは 1 台のホームエージェントにしか気付アド

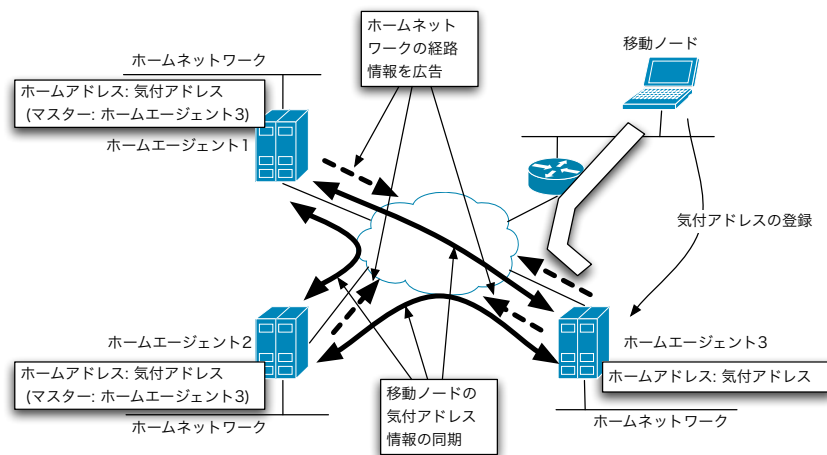


図 3: ホームエージェントの多重化

レスの情報を登録しないため、情報を受信したホームエージェントは、多重化されている他のホームエージェントと情報を交換し、すべてのホームエージェントで移動ノードの情報を同期する。それぞれのホームエージェントは、同一のホームネットワークへの経路情報をインターネットに向けて広告しており、移動ノード宛ての packets は、最も近いホームネットワークに配送され、必要に応じて適切なホームエージェントへ再送される (図 3)。

図 3 を例に簡単に動作を解説する。例では、移動ノードが自分の気付アドレスをホームエージェント 3 に登録している。他のホームエージェント (ホームエージェント 1 と 2) は、ホームエージェント間で情報をやりとりし、移動ノードの情報を同期する。

もし、ホームエージェント 3 の負荷が上昇し、移動ノードへのサービス提供が困難になると、ホームエージェント 3 は移動ノードに他のホームエージェントに再登録するように指示することができる。また、ホームエージェント 3 に障害が発生した場合、障害を検知した他のホームエージェントが、移動ノードに登録先の変更を指示することで、迅速に障害から復旧できる。

移動ノード宛ての packets は、経路情報に従って最寄りのホームエージェントに辿り着く。それぞれのホームエージェントは、同期された情報から、移動ノードが本来登録しているホームエージェントが誰かを検索し、そのホームエージェントに packets を転送する。後は通常の MIP6 の動作に従い、ホームエージェントから移動ノードに対して IPv6-in-IPv6 トンネルを用いて packets が転送される。

## 2.3 IPv4 Traversal 技術

MIP6 は IPv6 が利用できることが前提となっている。しかしながら、現在の IPv6 の普及状況を考えると、IPv6 を仮定できるネットワークは少数にすぎないと言わざるをえない。そこで、将来的に IPv6 網への移行を念頭に置きつつ、既存の IPv4 網でも MIP6 を利用可能にする技術を提供する必要性がでてきた。

IPv4 網で IPv6 を利用するための移行技術には、IPv6 パケットを IPv4 パケットでカプセル化し、擬似的に IPv6 網を構築するトンネル技術を基礎とした方式と、IPv6 アドレスを IPv4 アドレスに変換するアドレス変換技術を基礎とした方式に二分できる。MIP6 は IPv6 の拡張ヘッダなど、IPv6 のみで実現できる機能を利用しているため、前者のトンネル技術を利用する必要がある。

トンネル技術を利用する際の問題点は、トンネルを使って IPv6 網に接続しようとするノードと、IPv6 網と IPv4 網の境界に位置し、トンネルの受け口となるトンネルサーバの間の認証方法である。また、MIP6 自体も移動ノードとホームエージェントの間で IPv6-in-IPv6 トンネルを利用するため、IPv4 網を隠蔽するためのトンネルと、移動透過を実現するためのトンネルの二つを同時に利用することになり、2 つの IP ヘッダが付くことによるペイロード長の縮小も問題となる。

幸い、MIP6 ではホームエージェントの運用が前提となっており、ホームエージェントと移動ノードの間では MIP6 の制御情報を交換するための認証情報が設定されていることが前提となっている。ここに着目し、ホームエージェントにトンネルサーバの機能を含めることで、認証の問題と二重トンネルの問題を解決できると考えられる。詳細な仕組みは文献 [3] で提案している。

提案方式は、移動ノードが IPv4 網に接続したときに、気付アドレスとして IPv4 アドレスを登録できるような拡張を定義している。移動ノードが IPv4 網に接続している間、移動ノードとホームエージェントの間では、IPv6 パケットが IPv4 パケットでカプセル化 (IPv6-in-IPv4) され、やりとりされる。IPv6 網に存在するノードと IPv4 網に移動した移動ノードは、ホームエージェントを経由することで IPv6 による通信を継続できる (図 4)。図 1 の IPv6-in-IPv6 トンネルの代わりに、IPv6-in-IPv4 トンネルを使うことで、二重トンネルの問題が解決されていることがわかる。

ただ、現実の IPv4 網は図 4 で例示したような単純な構成であることは少ない。特に近年では、IPv4 アドレスの枯渇を回避するための NAT/NAPT の存在や、セキュリティを確保するためのファイアウォールの存在を無視することはできない。IPv4 Traversal 技術を推進していく上では、これらの IPv4 技術に柔軟に対応できるような仕組みを同時に提供することが普及の鍵となる。そのための仕組みも、Traversal 技術と同時に検討していく。

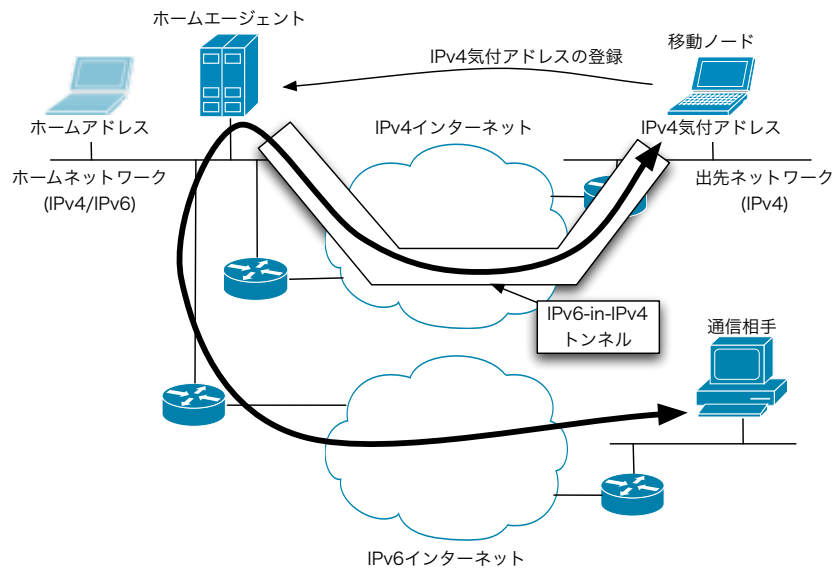


図 4: IPv4 網での Mobile IPv6 の利用

## 2.4 実装

WIDE プロジェクトでは、自らが提案した仕様を実装し、その妥当性を実証している。現在、FreeBSD/NetBSD 用の MIP6 スタックとして KAME プロジェクト [4] が配布している Shisa スタック [5] と、Linux 用の MIP6 スタックとして USAGI プロジェクト [6] と Go-core プロジェクトが開発した MIPL Mobile IPv6 2.0 RC2[7] が公開されている。

Shisa スタックは文献 [1] で提案している複数気付アドレスの登録機能も提供する。また、USAGI プロジェクトと Nautilus6 プロジェクト [8] では、MIPL に文献 [1] の拡張を追加する実装を開発中である。

文献 [2] と文献 [3] で提案している技術は未実装であるが、現在検討されている仕様がある程度確定した段階で、公開しているスタックに機能を追加する形での実装を予定している。

また、MIP6 の関連技術の実装として、IETF の MIPSHOP WG で議論されている Fast Handover for Mobile IPv6(FMIP6)[9] の開発にも注力しており、Nautilus6 プロジェクトから FMIP6 の実装である TARZAN スタックが公開される予定である。

## 3 Network Mobility 技術

Network Mobility(NEMO) の基本的な仕組みは MIP6 と同様である。事実、NEMO プロトコルは MIP6 の拡張として定義されており、プロトコル



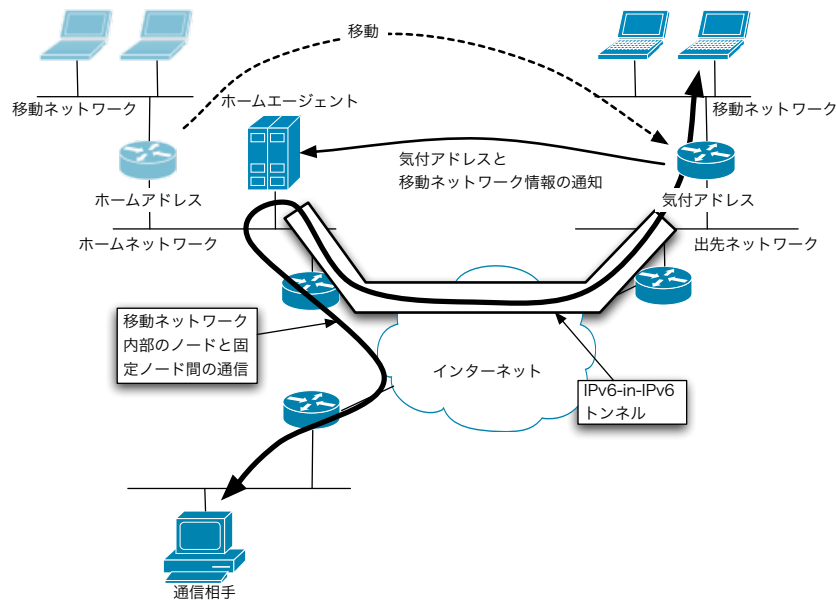


図 5: NEMO の基本動作

上の違いは、NEMO を運用することを示すフラグと、移動ネットワークの情報をやりとりするためのオプション情報が制御情報に追加されただけである。移動ルータは、気付アドレスを登録する際、移動ルータ配下に接続されている移動ネットワークの情報も登録する。移動ネットワーク内のノードが送受信するパケットは、すべて移動ノードとホームエージェント間に構築された IPv6-in-IPv6 トンネルを使ってやりとりされる。図 5 に NEMO の基本概念を示す。

NEMO の最も直感的な応用例は飛行機や車など、多数のノードを収容して移動するネットワークであるが、移動ネットワークがインターネット上の他のノードに対して透過であることを利用して、サイトマルチホームに応用することも可能だと考えられる。次節では、現在 WIDE プロジェクトで提案している NEMO を応用したサイトマルチホーム技術を紹介する。

### 3.1 サイトマルチホーム技術

NEMO を応用したサイトマルチホーム技術は文献 [10] で提案している。組織全体を移動ネットワークと捉え、組織とインターネットを結ぶルータに移動ルータを用いる。組織は複数の ISP と契約可能であり、障害発生時の冗長性を向上させることが可能である。NEMO を利用しているため、ISP との接続に障害が発生し、移動ルータの接続 ISP が変更されたとしても、組織内の

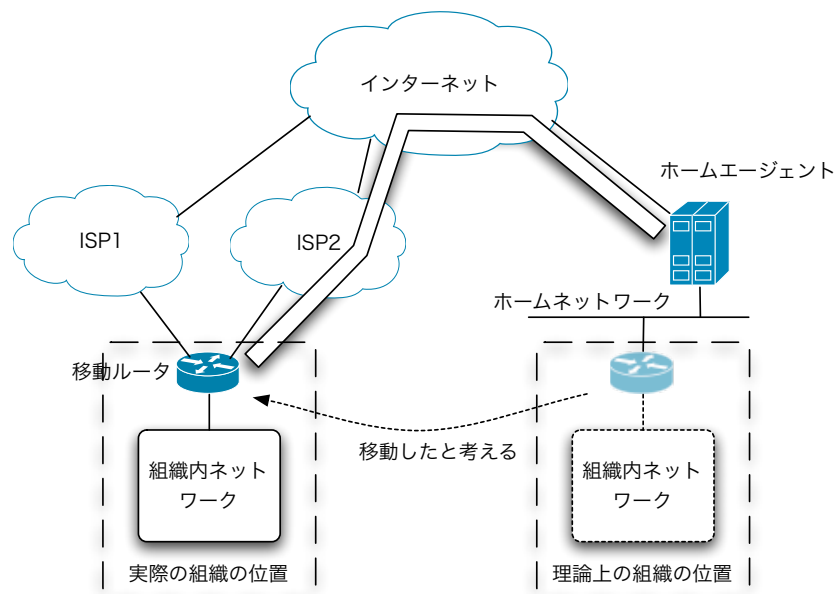


図 6: NEMO を応用したサイトマルチホーム

アドレスは変化しない．組織内のノードとインターネット上の他のノードとの通信は，移動ルータが接続 ISP を変更しても継続される (図 6) ．

図 6 の例では，移動ルータは同時にひとつの ISP しか利用しない．しかしながら，複数の ISP と契約しているにもかかわらず，同時にひとつの回線しか利用しないのは非効率である．そこで，複数の接続を有効に利用するために 2.1 節で解説した，複数気付アドレスの同時登録技術を用いることが可能である．NEMO の基本構造は MIP6 と同じなので，2.1 節の技術がそのまま NEMO にも適用できる．

また，MIP6 と同じ技術を基礎にしているということは，ホームエージェントの一点障害問題も同様に発生することを意味する．こちらの問題に関しても，2.2 節で解説した多重化技術を応用できる．さらに，IPv6 による接続性が得られないような環境下でも，2.3 節の技術を応用可能であり，耐障害性と移行の問題を解決できる．

### 3.2 実装

現在，FreeBSD/NetBSD 用の NEMO スタックとして KAME プロジェクトが配布している Shisa スタック [5] を公開している．また Go-core プロジェクトと Nautilus6 プロジェクトが Linux 用の NEMO スタック NEMO Platform for Linux[11] を開発中である．

## 4 アドホックネットワーク技術

現在 WIDE プロジェクトでは、IPv6 のためのアドホックネットワーク技術の研究開発を行っている。アドホックネットワークとは、複数の移動体計算機が無線マルチホップにより直接接続されダイナミックにネットワークを構築する技術である。

モバイルノードが地理的に集合している場合は、アドホックネットワークを構築することができる。しかし、幾つかのシナリオでは、これらのモバイルノードは、インターネット接続や Mobile IPv6 等の移動体通信プロトコルも同時に利用することが想定される。そのため、アドホックネットワークにおけるインターネット接続性の実現のための研究が幅広く行われて来ている。

例えば、モバイルノードがインターネットを介したサービスを利用している場合、アドホックネットワークを構築する利点とともに、アドホックネットワーク内でインターネットを用いたサービスの継続も必要となる。

### 4.1 IPv6 のサポート

現在 IETF の MANET Working Group で Experimental RFC として発行された経路制御プロトコル [12, 13, 14, 15] は、IPv4 を想定し策定された。経路制御プロトコルはプロトコルファミリーに非依存であるという議論はあるが、実際に実装や相互接続性の観点から IPv6 対応の仕様が不可欠である。

具体的に変更が必要なものとしては、メッセージフォーマットの変更がある。32 ビットのアドレスしか格納できず、128bit の IPv6 アドレスを利用できない。また、OLSR のようなリンクステート型プロトコルだと、経路広告するメッセージサイズがノード数に応じて増えていく。次に、利用するアドレスの種類の特定が必要である。IPv6 では、3 つのスコープが用意されており、オペレーションに応じてつかい分けしている。リンクローカルアドレスは、リンク上で有効なアドレスではあるが、MANENT におけるリンク定義が曖昧なため使いかたを定義する必要がある。MANET では、マルチホップで通信を行うため、アドホックネットワーク内全てをひとつのリンクとして扱うか否かでオペレーションが異なってくる。また、フラッドイングアドレスに関しても定義が必要である。本問題を整理した内容を、文献 [16] として IETF に投稿している。また、WIDE プロジェクトでは、OLSR の IPv6 化を行い実装している。本実装は、Internet CAR プロジェクト [17] などで、車車間通信実験などで利用している。さらに次世代 OLSRv2 の仕様策定にも関わっている。

## 4.2 Internet Gateway:インターネット接続

MANET でネットワークへ，インターネットの接続性を提供する仕組みである．インターネットゲートウェイ (IGW) と呼ばれる，インターネットとアドホックネットワークに接続性を持ったゲートウェイがインターネット接続性を提供する．IGW は固定的に MANET 内に置かれるか，IGW が携帯電話システム (3G) や 802.16e などの無線 MAN や 802.11b の無線 LAN などの無線インタフェースを使ってインターネットに接続される移動型がある．

この仕組みは，“Global Connectivity for IPv6 Manets” として，これまで IETF の MANET ワーキンググループに提案して来た．本技術は，IPv6 に特化し，ルーティングプロトコル非依存に動作することを目標として仕様策定を行って来た．本技術の機能は主に設定と管理の，2つのフェーズに分別される．設定フェーズではインターネット接続のための様々な情報の取得及び設定を行う．管理フェーズでは，通信設定に基づいてインターネットとのパケット送受信を行う．また，ゲートウェイは MANET ローカルでの通信などの余計なトラフィックやアドホックネットワークの経路をインターネットへ配布することを防ぐ必要がある．特に，アドホックネットワーク経路のインターネットへの再配布は，インターネット側の通常の経路制御に問題を起こす可能性があるために避けなくてはならない．

## 5 今後の研究の方向性

端末の処理能力が著しく向上し，広範囲かつ広帯域な無線通信技術が発展する中で，IP を用いた移動通信技術の運用が現実的になりつつある．基礎技術となる MIPv6 や NEMO の仕様が確定したことは，普及の大きな後押しとなるだろう．今後は，これらの技術をサービスとして提供可能にするための周辺技術の研究を進めていく必要がある．また，インフラストラクチャを必要としないアドホックネットワーク技術は，まだ仕様のにも，運用的にも初期段階にある．今後，広く運用経験を蓄積し，多種多様なデバイスが相互に通信し合う将来のネットワーク像の実現に向けて問題点を洗い出し，解決案を提案していく必要がある．

WIDE プロジェクトでは，今後も，基本プロトコルから応用技術まで幅広く研究し，インターネットにおける IP モビリティ技術の研究開発と普及を推進していく．

## 参考文献

- [1] Ryuji Wakikawa, Thierry Ernst, and Kenichi Nagami. Multiple care-of addresses registration. Technical Report draft-wakikawa-mobileip-

- multiplecoa, IETF, June 2004.
- [2] Ryuji Wakikawa, Pascal Thubert, and Vijay Devarapalli. Inter home agents protocol specification. Technical Report draft-wakikawa-mip6-nemo-haha-spec, IETF, October 2004.
  - [3] Ryuji Wakikawa, Vijay Devarapalli, and Carl E. Williams. Ipv4 care-of address registration. Technical Report draft-wakikawa-nemo-v4tunnel, IETF, February 2005.
  - [4] WIDE project. Kame project. Web page. <http://www.kame.net/>.
  - [5] WIDE project. Shisa mobility protocol stack. Web page. <http://www.mobileip.jp/>.
  - [6] WIDE project. Usagi project. Web page. <http://www.linux-ipv6.org/>.
  - [7] Go-core project. Mipl mobile ipv6. Web page. <http://www.mobile-ipv6.org/>.
  - [8] WIDE project. Nautilus6 project. Web page. <http://www.nautilus6.org/>.
  - [9] Koodli, R. (Editor). Fast handovers for mobile ipv6. Technical Report draft-ietf-mipshop-fast-mipv6, IETF, October 2004.
  - [10] Kenichi Nagami, Nobuo Ogashiwa, Ryuji Wakikawa, Hiroshi Esaki, and Hiroyuki Ohnishi. Multi-homing for small scale fixed network using mobile ip and nemo. Technical Report draft-nagami-mip6-nemo-multihome-fixed-network, IETF, February 2005.
  - [11] Go-core project. Nepl:nemo platform for linux. Web page. <http://www.mobile-ipv6.org/>.
  - [12] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, and Samir R. Das. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Technical Report RFC3561, IETF, July 2003.
  - [13] David B. Johnson, David A. Maltz, and Yih-Chun Hu. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (dsr). Technical Report draft-ietf-manet-dsr, IETF, July 2004.
  - [14] Richard G. Ogier, Fred L. Templin, and Mark G. Lewis. Topology dissemination based on reverse-path forwarding (tbrpf). Technical Report RFC3684, IETF, February 2004.

- [15] Thomas Heide Clausen and Philippe Jacquet. Optimized link state routing protocol (olsr). Technical Report RFC3626, IETF, October 2003.
- [16] Ryuji Wakikawa, Antti J. Tuominen, and Thomas Heide Clausen. Ipv6 support on mobile ad-hoc network. Technical Report draft-wakikawa-manet-ipv6-support, IETF, February 2005.
- [17] WIDE project. Internet car working group. Web page. <http://www.wide.ad.jp/project/wg/iCAR-j.html>.