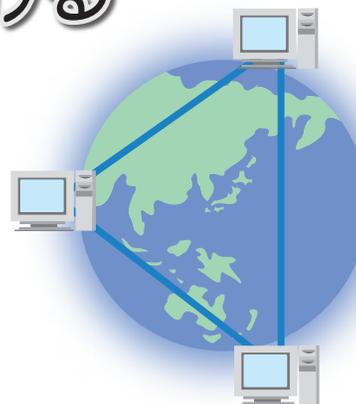


3

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

(株) インターネットイニシアティブ
keiichi@iijlab.net

湧川 隆次

慶應義塾大学環境情報学部
ryuji@sfc.wide.ad.jp

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。

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、移動ルータとともに移動できる。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。

MIPv6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

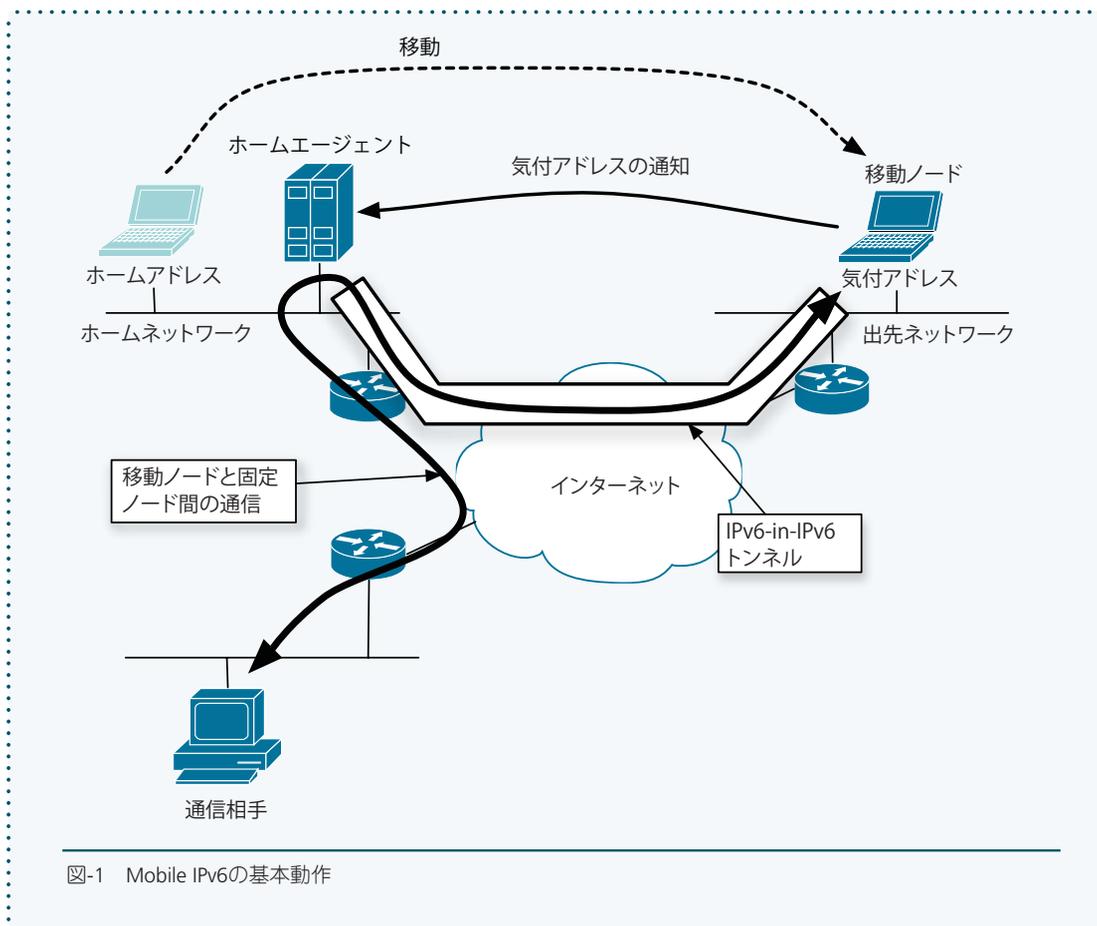


図-1 Mobile IPv6の基本動作

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。

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、いったん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。

- 複数インタフェースの選択問題
- ホームエージェントの耐障害性
- 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。

◆複数の経路の活用

MIP6 では、ホームエージェントに登録できる気付アドレスは1つだけである。移動ノードが複数のインタフェース(たとえば無線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

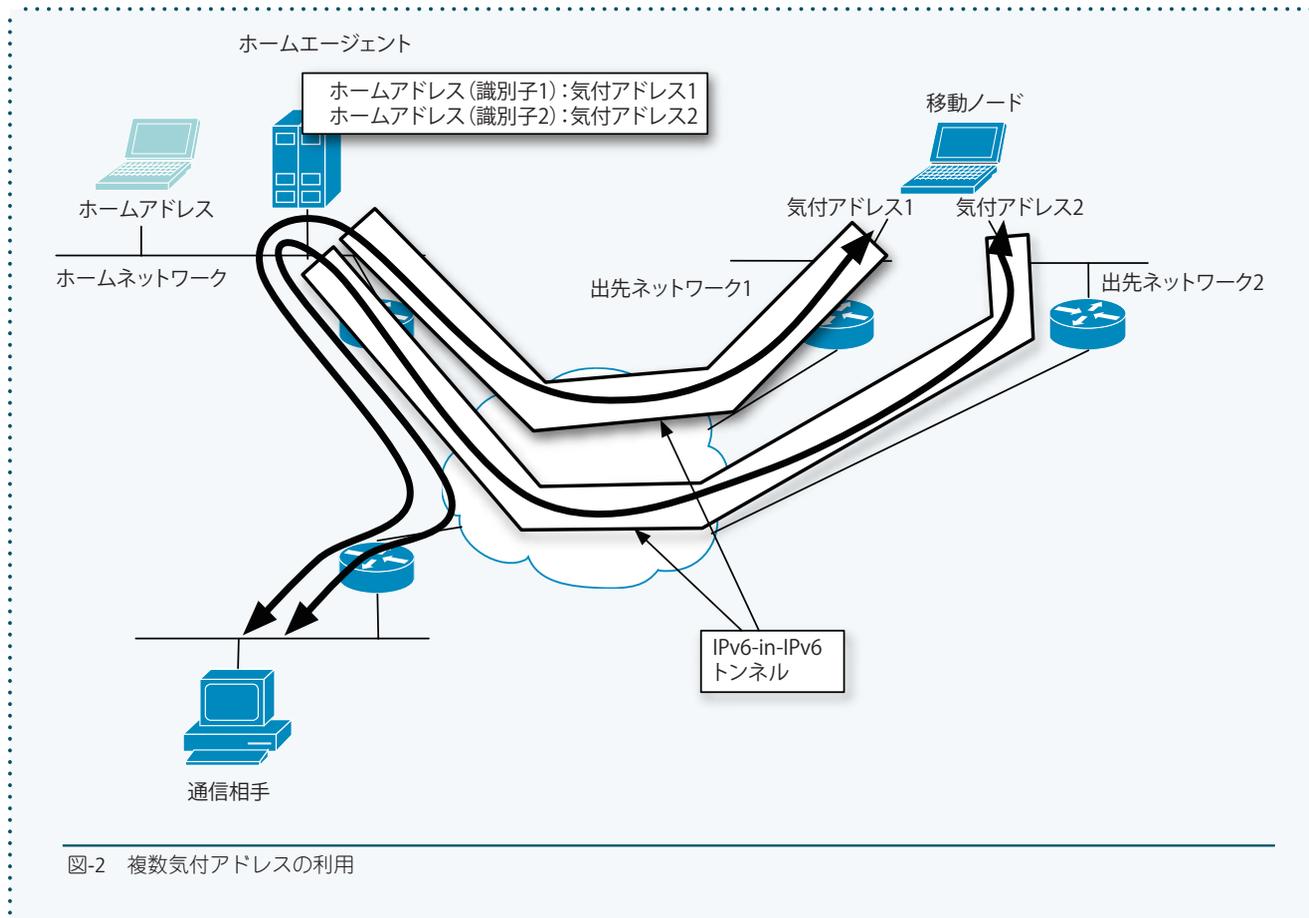


図-2 複数気付アドレスの利用

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。たとえば、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。

◆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間で定期的に制御信号を交換しなければならない。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は変わりはない。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

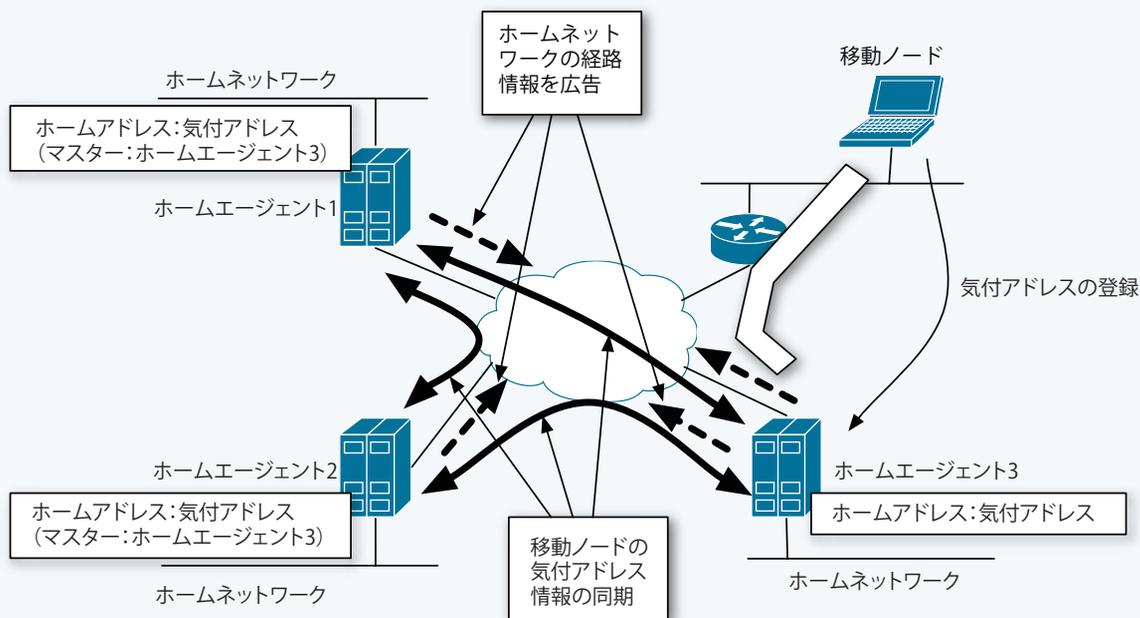


図-3 ホームエージェントの多重化

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、移動ノード宛でのパケットは、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。

移動ノード宛でのパケットは、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

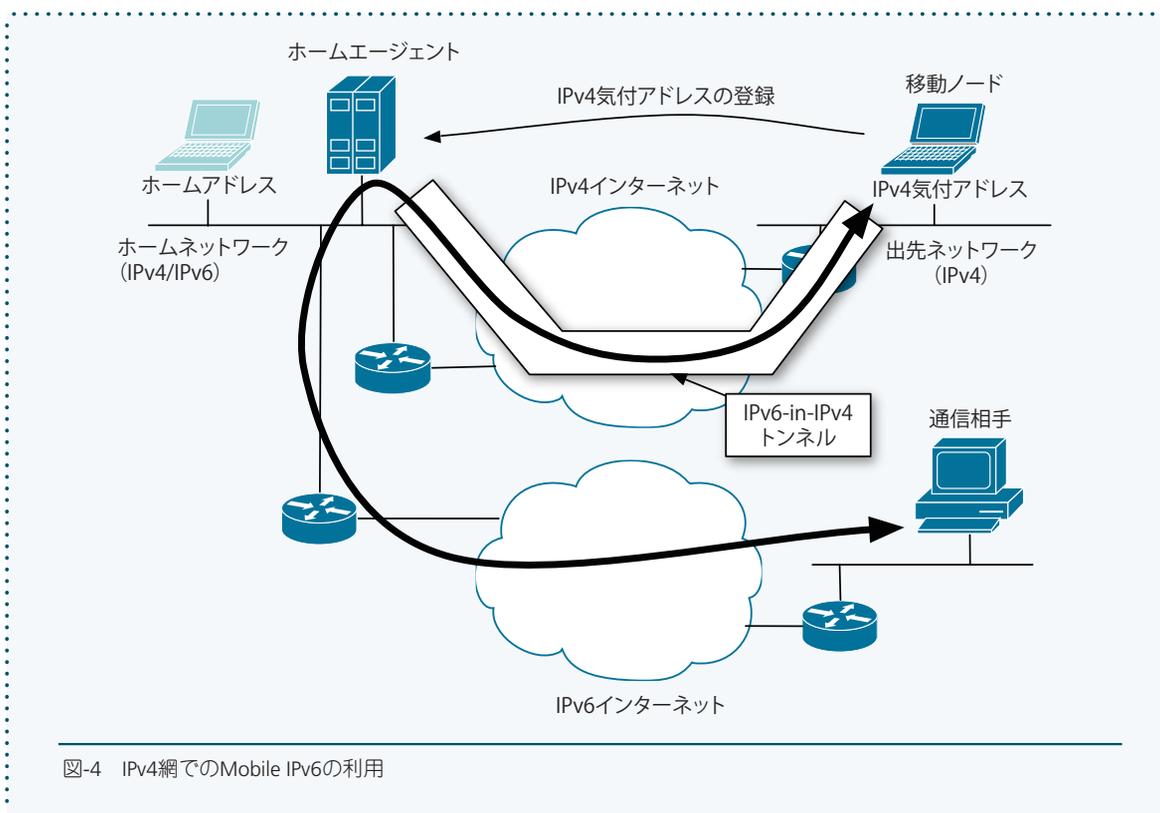
エージェントは、同期された情報から、移動ノードが本来登録しているホームエージェントが誰かを検索し、そのホームエージェントにパケットを転送する。後は通常のMIPv6の動作に従い、ホームエージェントから移動ノードに対してIPv6-in-IPv6トンネルを用いてパケットが転送される。

◆ IPv4 Traversal 技術

MIPv6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得ない。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MIPv6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がある。MIPv6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、MIPv6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2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2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に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、2重トンネルの問題が解決されていることが分かる。

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、Traversal技術と同時に検討していく。

◆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 RC2⁷⁾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 Handovers for Mobile IPv6 (FMIP6)⁹⁾の開発にも注力しており、Nautilus6プロジ

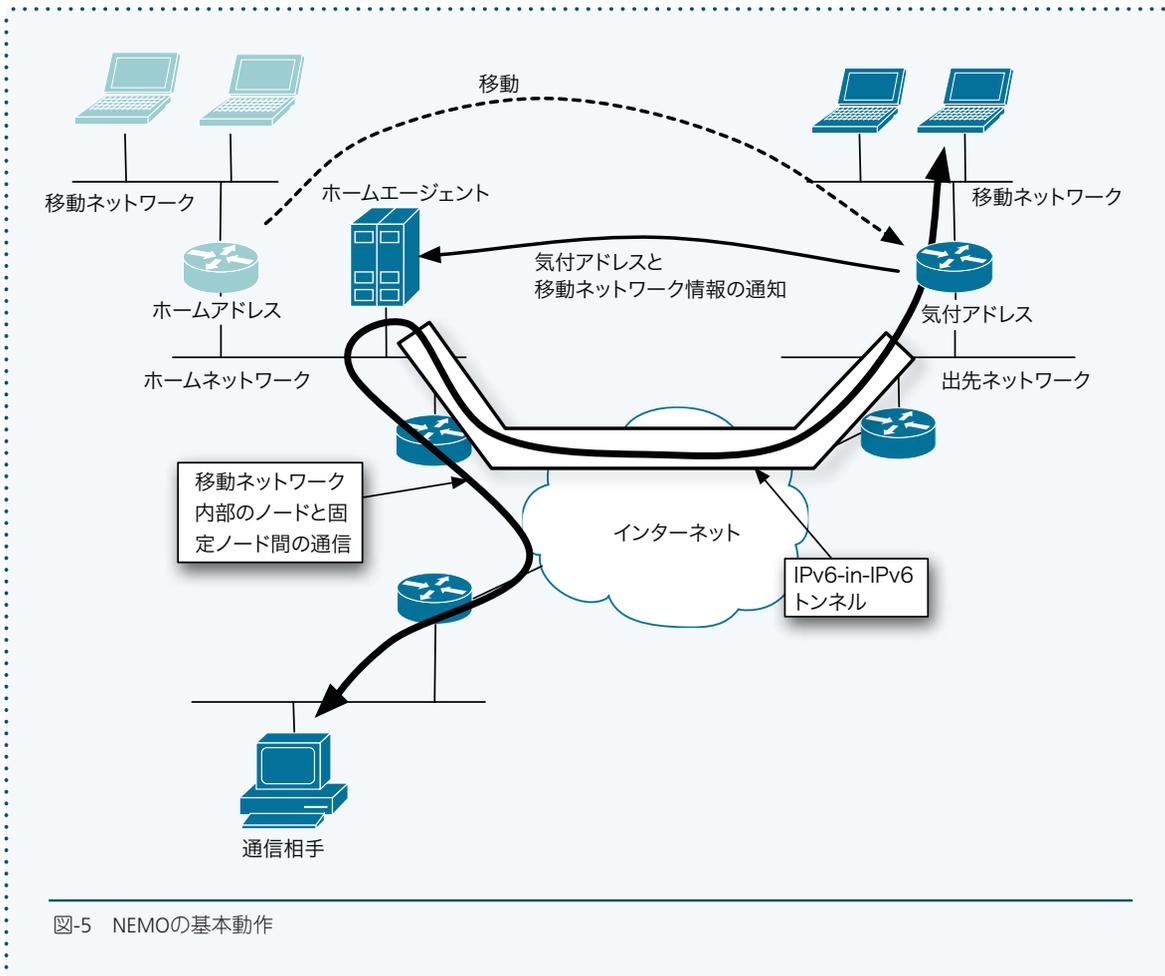


図-5 NEMOの基本動作

エクトから FMIP6 の実装である TARZAN スタックが公開される予定である。

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、多数のノードを收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適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。

◆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 1 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 1 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前章で解説した、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、同じ技術がそのまま NEMO にも適用で

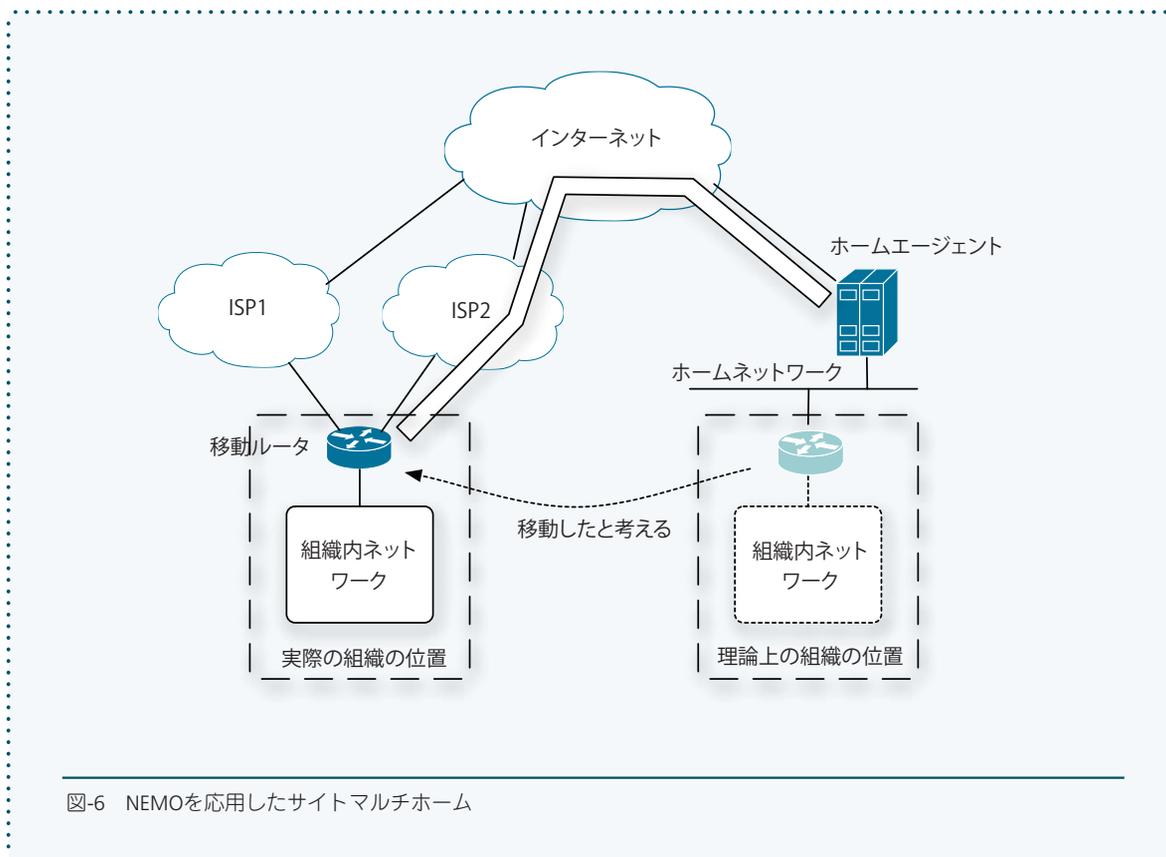


図-6 NEMOを応用したサイトマルチホーム

きる。

また、MIPv6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1点障害問題も同様に発生することを意味する。これらの問題についても、前章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、IPv4 Traversal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。

◆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 Linux¹¹⁾を開発中である。

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、いく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きている。

たとえば、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。

◆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)~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使い分けられている。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、MANET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すべてを1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、フラッディ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の仕様策定にもかかわっている。

◆ 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(Metropolitan Area Network)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。

この仕組みを、“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きた。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きた。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さまざまな情報の取得および設定を行う。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。

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MIP6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) Wakikawa, R., Ernst, T. and Nagami, K.: Multiple Care-of Addresses Registration, Technical Report draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa, IETF(2004).
- 2) Wakikawa, R., Thubert, P. and Devarapalli, V.: Inter Home Agents Protocol Specification, Technical Report draft-wakikawa-mip6-nemo-haha-spec, IETF(2004).
- 3) Wakikawa, R., Devarapalli, V. and Williams, C. E.: IPv4 Care-of Address Registration, Technical Report draft-wakikawa-nemo-v4tunnel, IETF(2005).
- 4) WIDE Project: KAME Project, <http://www.kame.net/>
- 5) WIDE Project: Shisa Mobility Protocol Stack, <http://www.mobileip.jp/>
- 6) WIDE Project: USAGI Project, <http://www.linux-ipv6.org/>
- 7) Go-core Project: MIPL Mobile IPv6, <http://www.mobile-ipv6.org/>
- 8) WIDE Project: Nautilus6 Project, <http://www.nautilus6.org/>
- 9) Koodli, R. (Ed.): Fast Handovers for Mobile IPv6, Technical Report draft-ietf-mipshop-fast-mip6, IETF(2004).
- 10) Nagami, K., Ogashiwa, N., Wakikawa, R., Esaki, H. and Ohnishi, H.: Multi-homing for Small Scale Fixed Network Using Mobile IP and NEMO, Technical Report draft-nagami-mip6-nemo-multihome-fixed-network, IETF(2005).
- 11) Go-core Project: NEPL:NEMO Platform for Linux, <http://www.mobile-ipv6.org/>
- 12) Perkins, C. E., Belding-Royer, E. M. and Das, S. R.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, Technical Report RFC3561, IETF(2003).
- 13) Johnson, D. B., Maltz, D. A. and Hu, Y.-C.: The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR), Technical Report draft-ietf-manet-dsr, IETF(2004).
- 14) Ogier, R. G., Templin, F. L. and Lewis, M. G.: Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF), Technical Report RFC3684, IETF(2004).
- 15) Clausen, T. H. and Jacquet, P.: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), Technical Report RFC3626, IETF(2003).
- 16) Wakikawa, R., Tuominen, A. J. and Clausen, T. H.: IPv6 Support on Mobile Ad-hoc Network, Technical Report draft-wakikawa-manet-ipv6-support, IETF(2005).
- 17) WIDE Project: Internet CAR Working Group, <http://www.wide.ad.jp/project/wg/iCAR-j.html>

(平成17年6月28日受付)