法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

仮想ホームエージェントを用いたホームエージェントの負荷分散およびネットワークトラフィックの削減

寺西, 克浩 / TERANISHI, Katsuhiro

(発行年 / Year)
2008-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2008-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(理学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

仮想ホームエージェントを用いたホームエージェントの負荷分散およびネットワークトラフィック削減

The Load Dispersion of the Home Agent and Network Traffic Reduction by Using Virtual Home Agent

寺西 克浩
Katsuhiro Teranishi
法政大学大学院　情報科学研究科　情報科学専攻
E-mail: katsuhiro.teranishi.rf@gs-cis.hosei.ac.jp

Abstract

Mobile IPv6 is a technology that a Home Agent which was installed in Home Link forwards a packet from Mobile Node to Correspondent Node even if a Mobile Node moved to the foreign network. In other words it is a technology that communicates without letting a Correspondent Node be conscious of the movement of a Mobile Node. To draw a characteristic of such a Mobile IPv6 to the maximum, all nodes should correspond to Mobile IPv6. However, it is very difficult that all mobile communication nodes let correspond to Mobile IPv6 in the real world environment where even IPv6 yet hardly infiltrates. Therefore, in this study, recognizing communication with the non-correspondent Mobile IPv6 node and suggest and realize a technique to reduce unnecessary traffic which occur by the communication. To put it concretely, detecting a position deviates from the shortest course between Mobile Node and non-Correspondent Node and operate the router installed in there as a Virtual Home Agent. This Virtual Home Agent refers to the source address and the destination address of the packet from the Mobile Node or non-Correspondent Node, and performs filtering and transfer. By this way, try for reduction of unnecessary traffic and the burden to spend on packet transfer handling of Home Agent.

Supervisor : Runhe Huang, Professor

1. 序論

昨今の目覚しいコンピュータの発達と小型化，低価格化により，学術機関や企業のみならず一般家庭，さらには個人にも広くコンピュータが普及してきた．またそれは同時に，ネットワークに接続されるコンピュータの数も急激に増加していることを意味している．今後はさらに冷蔵庫などの家電製品，車などのさまざまな移動電子機器がネットワークに接続されることになり，いつでも，どこからでも様々な情報を端末から得られるようになるだろう．ネットワークに接続される端末が増えるのに伴い，近い将来に深刻な IPv4（Internet Protocol Version 4）アドレス（$= 2^{32}$ ノード）の不足が予想される．これは日本だけの問題ではなく，アメリカ以外の国々，特に中国，インドなどをはじめとした発展途上国にとっては，この現象はより深刻なものである．そこで，1995 年に IPv4 の様々な問題点を解決する，新しいネットワークプロトコル IPv6（Internet Protocol Version 6）[1]が採択された．さらに，近年の移動体通信の普及に伴い，着信可能性と移動透過性を提供する Mobile IPv6[2][3]が採択された．しかし，この Mobile IPv6 にもいくつかの問題点がある．その 1 つが移動端末の通信相手が Mobile IPv6 に対応していない場合，必ず移動端末のホームリンクに設置されているホームエージェントを経由して通信を行わなければならないため，不必要なネットワークトラフィックとホームエージェントの負荷の増加が懸念されている．そこで本論文では，経由ルータ内に本来はホームエージェントが行っているパケットの転送機能を実装し，パケット転送機能を経由ルータに委託することで仮想ホームエージェントとして動作させる．これにより，不必要なネットワークトラフィックを削減し，ホームエージェントへの負荷を軽減する手法を提案する．また，実際にローカルな環境においてネットワークを構築し，現行の Mobile IPv6 と提案システムの比較を行い，この手法の有効性を示す．

1.1. IPv6

将来のアドレス不足などの問題が懸念されている現行のインターネットプロトコル IPv4 を元に，アドレス空間の増大，セキュリティ機能の追加，優先度に応じたデータの送信などの改良を施した次世代インターネットプロトコルとして，1995 年に IPv6 が採択された．これは RFC2460[1]で定義されている．IPv6 は単に IPv4 のアドレス不足を解消するためだけに開発されたわけではない．より簡単にインターネットを使うことができる仕組み，確実に通信できること，必要な伝送品質が保てること，通信の安全性が確保されること，どこからでもインターネットに接続したい，なんでもインターネットに接続したいなどの要求に対しても対処するために開発された[4]．つまり，ユビキタスネットワークを実現するために開発された．IPv6 を導入することで，人のみならず，様々な電子機器同士が通信を行

う環境が整うことになる．これにより，より使いやすいインターネットが実現すること以外にも，産業分野全体により大きな変化や影響をもたらすことになる．

<table>
<tr><td>バージョン（4）</td><td>トラフィッククラス（8）</td><td colspan="3">フローラベル（20）</td></tr>
<tr><td colspan="2">ペイロード長（16）</td><td colspan="2">次ヘッダ（8）</td><td>最大ホップ数（8）</td></tr>
<tr><td colspan="5">送信元アドレス（128）</td></tr>
<tr><td colspan="5">宛先アドレス（128）</td></tr>
</table>

図 1. IPv6 ヘッダの構造

1.2. メリット

以下に IPv6 を導入するメリットについて説明する[4][5].

① 3.4×10^{38} 個という膨大な IP アドレス空間をサポートしているため，アドレス枯渇を心配する必要がなくなる．そのため，どんな小型のエンドユーザ機器でも，独立したホストとして他の PC と同様に接続できるようになる．また，IP マスカレードを使用しないで済むので，全ノードがグローバルな接続性を持ち，直接接続が可能になる．これによって，P2P アプリケーション（IP 電話，インスタントメッセンジャー，ネットワークゲームなど）の利用が容易になる．

② IPv6 には，基本仕様の一部として，セキュリティ機能（IPsec）が含まれている．そのため，パケットには暗号化ペイロードと認証ヘッダの拡張ヘッダを組み込むことが可能である．暗号化ペイロードは，データの実態部分の暗号化に利用され，認証ヘッダは，データの正当性を保証するために利用される．IPsec はエンドツーエンド通信でのセキュリティを保証する技術である．IPv6 では IPv4 とは異なり，エンドツーエンド通信を利用できる環境が整備されているため，この IPsec が重宝されることになる．そのため，IPsec は IPv6 ネットワークで通信内容の保護，通信相手の確認などに使用される．

③ 新たに IPv6 の接続を持つとき，ISP の持っている IPv6 アドレスのプレフィックス部分を切り出して新たなノードに対して渡しているため，新しい IPv6 サイトが増えたとしても，バックボーンに対する広告する経路情報は増えず，基幹ルータで保持する経路表の大きさが抑えられる．そのため，ルータの負担が軽減することができる．また，IPv6 では，ホスト自身で生成する情報とルータから通知される情報に

より，ホストが自動的に IP アドレスやデフォルトルータなどの情報を設定する機能が備わっている（プラグ・アンド・プレイ）．

④ 可変長である IPv4 ヘッダと違い，IPv6 ヘッダの長さは 40 オクテットと固定長になり，非常にシンプルなフォーマットになった．そのため，各ノードでのヘッダの切り離し作業の負担が軽減された．また，次ヘッダの種類が前もってわかるため，ノードは自分にとって必要のないヘッダについては処理を省略することが可能になった．

IPv6 ヘッダ	拡張ヘッダ	拡張ヘッダ	…	拡張ヘッダ	転送データ

図 2. IPｖ6 パケット

1.3. デメリット

以下に IPv6 導入のデメリットについて説明する[4][5].

① プロトコル自体は IPv4 と似ているが，互換性がないため，IPv6 対応の新規にルータ，ソフトウェアを導入しなければならない．また，移行期間内は両方のプロトコルをサポートしていなければならない．

② 一般ユーザの IP プロトコルに対する認識度が低いため，IPv6 へ移行するメリットが見出しにくい．

③ アドレス空間が広いことと，MAC アドレスによる自動生成のため，逆引きの管理が困難である．

1.4. IPv6 に対する日本の取り組み

日本では，WIDE プロジェクトを中心に IPv6 の実装や運用を通じて標準化に貢献してきた．KAME プロジェクトでは IPv6 を処理するソフトウェア（プロトコルスタック）の開発が進められ，その成果が BSD 系の UNIX に取り込まれた．現在では，世界の標準的な IPv6 や IPsec の実装として KAME プロジェクトの実装が利用されている[4]．また日立のルータが IPv6 対応のベースになるなど，大きな成果を上げている．ネットワークインフラとしては，6bone-jp が早期に立ち上がったのを皮切りに，2000 年頃には ISP による試験サービスが続々と開始された．

2. Mobile IPv6

Mobile IPv6[2][3]は，ノードがネットワーク間を移動しても継続して通信できる技術である．Mobile IPv6 を使うと，移動しても通信中のアプリケーションを切断することなく使い続けることができる．つまり，着信可能性と移動透過性を提供している．

Mobile IPv6 は，IP 層の機能として，データリンク層とは無関係に実装されているため，無線 LAN から携帯電話や PHS などのように, データリンク層の接続形態が異なるネットワークに移動してもそのまま利王し続けることができる[4]．しかし，実際には移動端末が異なるサブネットに移動した場合には，サブネットが変わっているので，各サブネットで割り当てられるアドレスは変化する．

Mobile IPv6 は RFC3775[2]に基本仕様が，ホームエージェント，移動ノード間の制御信号の仕様が RFC3776[3]に定義されている．

2.1. ノード説明

以下に Mobile IPv6 で使用する主な 3 つのノード，移動ノード，ホームエージェント，対応ノードについて説明する[4].

2.1.1. 移動ノード

ネットワーク間を移動するノードのことを「移動ノード」と呼ぶ．移動ノードは，移動しても変わらない「ホームアドレス」と，それぞれの移動先のプレフィックス部分に合わせて自動生成される「気付アドレス」の 2 つの IPv6 アドレスを持っている．

2.1.2. ホームエージェント

移動ノードのホームアドレスのプレフィックスを持つリンクを「ホームリンク」という．ホームリンクには，移動ノードが外部ネットワークに移動してしまった場合に，代わりにパケットを受け取って転送してくれる「ホームエージェント」が存在する．移動ノードが外部ネットワークに移動すると，ホームエージェントにその旨を伝えるパケットを送信してくる．そのパケットによって，ホームエージェントは常に移動ノードの位置（IP アドレス）を把握することができる．

2.1.3. 対応ノード

移動ノードの通信相手となるノードを「対応ノード」と呼ぶ．対応ノードは Mobile IPv6 に対応していなくても構わないが，その場合移動ノードとの通信には必ずホームエージェントを中継しておこなわれる．対応ノードが Mobile IPv6 に対応している場合，経路制御ヘッダと終点オプションヘッダを使用することで，移動ノードと対応ノードは直接通信することが可能になる．

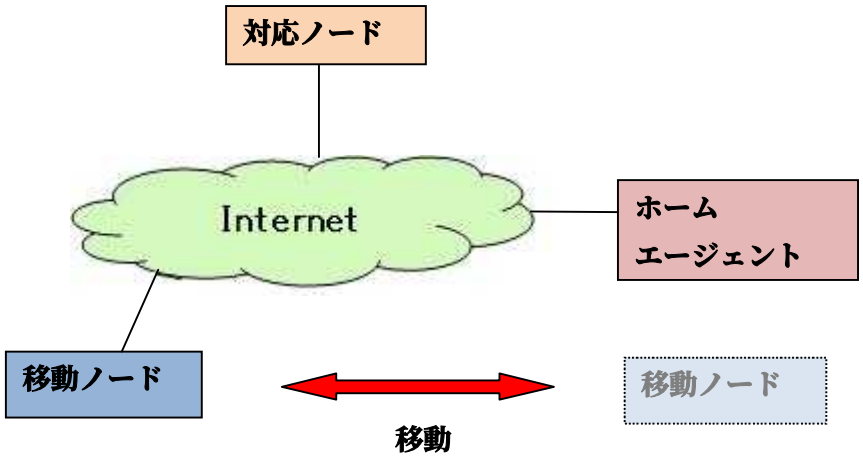


図 3. Mobile IPv6 ネットワーク

2.2. 動作概要

以下に移動ノードがホームリンク上，外部ネットワーク上から対応ノードと通信をする際の移動ノード，ホームエージェント，対応ノードの動作概要を説明する[4].

2.2.1. 移動ノードがホームリンク上から通信を行う場合

ホームリンク上の移動ノードは，通常の IPv6 ノードと同様に，ホームアドレスを使って通信を行う．ホームリンク上には移動ノードの通信を支援するホームエージェントが存在するが，この場合は特に特別な処理は行われない．

2.2.2. 移動ノードが外部ネットワーク上から通信を行う場合

移動ノードが外部ネットワークに移動すると，ホームアドレスの他に，移動先ネットワークのプレフィックス部分に合わせて気付アドレスを自動生成する．しかし，実際には移動ノードが対応ノードと通信を行う際には移動ノードのホームアドレスが使用される．移動ノードは，接続するネットワークが変わるたび，ホームリンク上にあるホームエージェントに対して新しい気付アドレスを通知する．この通知メッセージをバインディングアップデートという．バインディングアップデートを行うためには，移動ノードがホームエージェントのアドレスを保持していなければならない．そこで，Mobile IPv6 では，移動ノードがホームエージェントのアドレスを外部ネットワークから取得するための仕組みを用意している．それが動的ホームエージェント探索（Dynamic Home Agent Address Discovery）である．ホームエージェントにはエニーキャストアドレスが設定されているので，移動ノー

ドは外部ネットワークに移動すると，ホームエージェントのエニーキャストアドレス宛に動的ホームエージェント探索を送信することで，移動ノードから一番近いホームエージェントのアドレスを認識することができる．ホームエージェントを認識した後，移動ノードはホームエージェントに対してバインディングアップデートを行う．このバインディングアップデートには制限時間が設定されていて，移動ノードが外部ネットワークにいる間にその制限時間が来ると，再びホームエージェントに対してバインディングアップデートを行う．また，移動ノードからホームエージェントに送付するバインディングアップデートは IPsec で保護されていて，盗聴や詐称を防止している．IPsec を使わないと，無関係なノードが不正に気付アドレスの通知を行い，パケットを横取りしてしまうことが可能になってしまう．

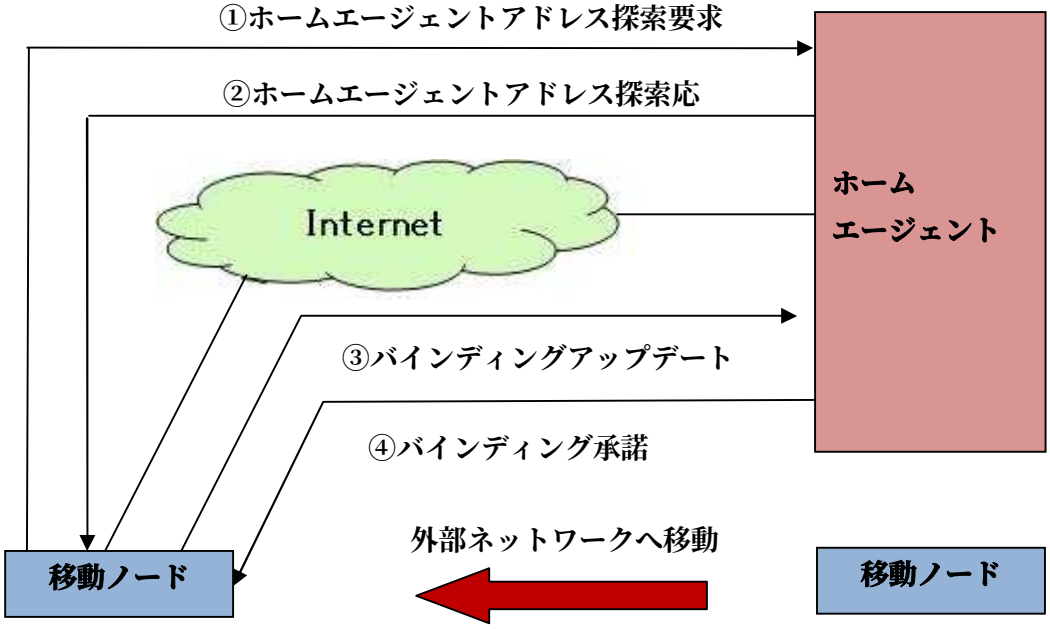


図 4．外部ネットワーク移動直後の移動ノードとホームエージェントのやり取り

バインディングアップデートが正しく受け付けられると，ホームエージェントは移動ノードのホームアドレス宛に送付されたパケットを移動ノードの気付アドレスを利用して移動ノード宛に転送してくれるようになる．逆に，移動ノードから送付するパケットもいったんホームエージェント宛に送付し，ホームエージェントを経由して実際の通信先である対応ノードに転送してもらう．

ホームエージェントへのバインディングアップデートが完了すると，次に移動ノードは対応ノードに対して，バインディングアップデートを行う．対応ノードに対して，バインディングアップデートが完了すると，移動ノードと対応ノードは特殊なヘッダを利用することで，ホームエージェントを介することなく，互いに直接通信をすることが可能になる．

2.2.3. IP-IP トンネル

ホームエージェントと移動ノード間のパケット通信は, IP-IP トンネルを使って行われる. IP-IP トンネルは, IP パケットの中に元の IP パケットを丸ごとカプセル化して送付する方式である[4]. ホームエージェントは，移動ノードのホームアドレス宛のパケットを受け取ると，新しい IPv6 パケットを作ってその中に元のパケットを丸ごとカプセル化し，移動ノードの気付アドレス宛に送付する．移動ノードは，受け取ったパケットから，移動ノードのホームアドレスを宛先とする元のパケットを取り出して処理する．

逆に，移動ノードは，本来送付したいパケット（送信元：ホームアドレス，宛先：対応ノード）を新しいヘッダ（送信元：気付アドレス，宛先：対応ノード）を用いて，丸ごとカプセル化し，ホームエージェントに送付する．ホームエージェントは，送られてきたパケットから移動ノードが本来送付したかったパケットを取り出し，対応ノードに転送する[4]．こうした方式で通信を行うことにより，移動ノードと対応ノードはホームエージェントの存在や，移動ノードの現在の位置をまったく気にせずに通信を行うことができる．

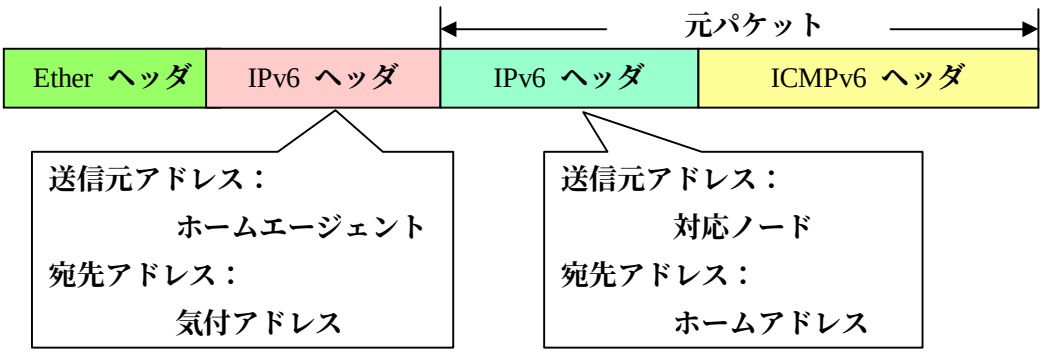


図 5. IP-IP でカプセル化された ICMPv6 ヘッダ

2.2.4. 経路最適化とリターンルータビリティ

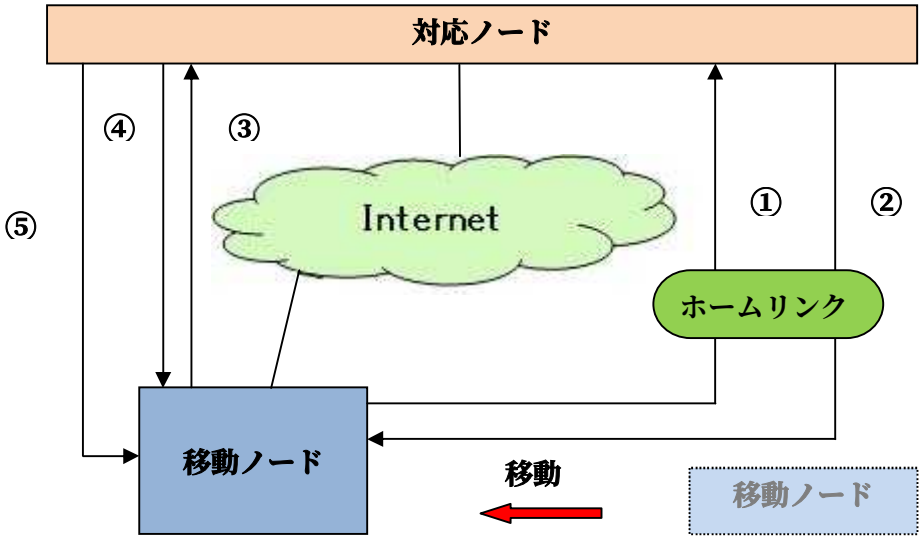
対応ノードが Mobile IPv6 に対応していない場合，必ずホームエージェントを介して通信することになる．この問題を解決するために，Mobile IPv6 では，移動ノードと対応ノードがホームエージェントを介さずに直接通信を行う経路最適化の仕組みを用意している[4]. 経路最適化を行うためには，対応ノードが Mobile IPv6 の経路最適化に対応している必要がある．経路最適化のために，移動ノードは，まず自分の気付アドレスを対応ノードに通知し，気付アドレスに直接パケットを送付してくれるように依頼する．この通知メッセージはホームアドレスへの通知と同様にバインディングアップデートという．このとき対応ノードは，移動ノードの気付アドレスが，本当にホームアドレスを持っているノードと同一ノードであるかを確認しなくてはならない．この確認を怠ると，無関係なノードに不正に

パケットを横取りされてしまう可能性がある．移動ノードのホームアドレスと気付アドレスの対応を確認するために使う手順がリターンルータビリティ(往復経路確認)である．

移動ノードからホームエージェントに送付されるバインディングアップデートは，バインディングアップデートメッセージそのものを IPsec で暗号化することにより保護する．しかし，対応ノードに送付されるバインディングアップデートは IPsec を使わず，リターンルータビリティを使用する．リターンルータビリティは移動ノードと対応ノード間で共通鍵を交換するための手続きで，バインディングアップデートメッセージ送付前に実行される．交換した共通鍵はバインディングアップデートの認証，改ざん防止に利用される．

リターンルータビリティでは，対応ノードが移動ノードの気付アドレスとホームアドレス宛にそれぞれ通信したデータを，移動ノードが両方正しく受け取っているかどうかを確認する手続きである．両方のデータを移動ノードが正しく受け取ると，受け取ったデータから共通鍵が生成される仕組みになっている．

リターンルータビリティが終了すると，移動ノードは生成した共通鍵を使って作った認証データを付加したバインディングアップデートメッセージを対応ノードに送付する．対応ノードは認証データを検証し，正しければ気付メッセージの登録を受け付け，通信を移動ノードの気付アドレスを使った直接通信に切り替える．



①ホームテスト要求（ホームリンク経由）
②ホームテスト応答（ホームリンク経由）
③気付テスト要求
④気付テスト応答
⑤バインディングアップデート

図 6. 対応ノードに対するバインディングアップデート

経路最適化された対応ノードと移動ノード間の通信では，移動ノードは気付アドレスを IPv6 アドレスの宛先または送信元として対応ノードと通信するが，そのままでは，ネットワークの移動とともに，移動ノードのアドレスが変わってしまい，上位層に別な通信とみなされてしまう．つまり，移動時に正しく通信が継続できなくなってしまう．このため，移動ノードと対応ノードは IPv6 拡張ヘッダに新たにオプションやタイプを追加し，そこにホームアドレスを入れて通信を行う．

移動ノードから対応ノード宛にパケットを送付する場合には，ホームアドレスオプションを使ってホームアドレスを対応ノードに知らせる．ホームアドレスオプションは Mobile IPv6 のために新たに定義された終点オプションヘッダのオプションである．対応ノードは移動ノードからのパケットを受け取ると，このオプションからホームアドレスを取り出し，それをパケットの送信元として処理する．

逆に，対応ノードから移動ノード宛にパケットを送信する場合には，タイプ 2 ルーティングヘッダを使う．タイプ 2 ルーティングヘッダは，Mobile IPv6 のために定義された経路オプションヘッダで，通常のルーティングヘッダと同様に，最終の宛先と IPv6 ヘッダの宛先フィールドの値が異なることを示す．対応ノードから移動ノードに送付されるパケットは，IPv6 ヘッダの宛先に気付アドレスが指定されていても，ルーティングヘッダの中で最終の宛先としてホームアドレスが指定されている．このため，移動ノードは，このパケットをホームアドレス宛のパケットとして正しく処理できる．

3. 関連技術

現在，様々な形での「移動しながら」という利用形態により適した Mobile IP の周辺技術の研究，議論が続けられている．そのいくつかを以下に紹介する．

3.1. NEMO

Mobile IP は単体のノードが移動していく方式だが，ルータがその下にノードをかかえたままネットワークごと移動していく NEMO（Network Mobility）[6]という方式も検討されている．通信相手には，移動ネットワーク内に接続しているノードが，常にホームネットワークに接続しているように見せている．NEMO を導入することで，モバイルルータのみが対応することによりネットワーク内のノードは通常の IPv6 のままで移動しても継続して通信を行うことができる．電車などの乗り物ごと移動しながら，利用するようなケースでの適用が考えられている．

3.2. 高速移動

速く移動をするためには，すばやく移動先のネットワークを切り替える必要がある．この部分に集中して議論・研究されているのが，高速ハンドオーバー技術である．高速移動技術は, 無線で接続された移動ノードを想定して AP や移動先ネットワークのルータと強調し，パケットの損失を抑えたスムーズな移動を目指している．それぞれの具体的な方法としては,

- あらかじめ次の移動先ネットワークの気付アドレスを検索しておき，スムーズはハンドオーバーを実現する方法
- 移動端末内にキャッシュ機能を持たせ，タイムスタンプを用いて時間系列でもって送信するパケットを一時的に保持する．ネットワークが切り替わる際に，送信が完了したパケットのタイムスタンプを参照し，その次のタイムスタンプを持つパケットから再送信する方法である[7]．この方法を用いることで，ネットワークが切り替わる際のパケットロスを抑えることが出来る．

3.3. 広域移動

Mobile IPv6 は，多数の移動ノードが非常に広域を移動するような場合，位置登録とトンネリングを行うホームサーバにトラフィックが集中し，ここがボトルネックとなってうまくスケールしない恐れがある．すべての対応ノードが経路最適化に対応していればホームエージェントの負荷は下がるが，すべての移動ノードの位置情報を管理する付加は依然としてホームエージェントにかかる．このため，ホームエージェントを階層化して位置登録をすばやく済まそうという方法がある[4].

3.4. ホームエージェント分散

以下に同一リンク上，外部リンク上にホームエージェントを分散させることによる，ホームエージェントの処理負荷を分散させる技術について説明する．

3.4.1. 分散ホームエージェント（同一リンク内）

ホームリンク内に複数の移動ノードが存在し，その動きを 1 台のホームエージェントで管理をする場合，大きな負荷がかかってしまう．そのような負荷を分散するために，同一リンク内に複数のホームエージェントを設置している．複数のホームエージェントには，それぞれ優先度が設定されていて，移動ノードはホームエージェント探索応答に含まれたホームエージェントリストの中から最も優先度の高いホームエージェントと通信すること

になる．一度通信が確立されたら，その移動ノードは位置に関係なく常に同じホームエージェントに対してバインディングアップデートを行う[8].

3.4.2. 分散ホームエージェント（外部リンク）

ホームリンクと外部リンクに複数のホームエージェントを設置する．移動ノードは現在の位置に近いホームエージェントと通信を行う．ホームエージェントには同一のエニーキャストアドレスが設定されている．エニーキャストアドレスとは，複数のネットワークインタフェースに対して，同じアドレスを割り当て，その中から経路的に最も近いインタフェースに対して送信する仕組みである．これは，RFC2373[9]で定義されている．移動ノードはホームエージェント探索要求をホームエージェントのエニーキャストアドレス宛に送信することから，現在の位置に最も近いホームエージェントからその要求に対する応答が返ってくる．そのホームエージェント（＝位置が近い）に中継してもらうことによって，ホームエージェントの負荷軽減とネットワークトラフィックの低下を実現している[8].

4. Mobile IPv6 の問題点

本章では，現行の Mobile IPv6 が抱える問題点について説明する．

4.1. ネットワークトラフィック増加

Mobile IPv6 は対応ノードに対して，移動ノードの移動を意識させないことが最大の特徴である．しかし，そのためにはホームリンク内に設置されたホームエージェントを介して通信をしなければならない．以下で対応ノードが Mobile IPv6 に対応している場合，対応していない場合の不必要なネットワークトラフィックが発生する状況について説明する．

4.1.1. 対応ノードが Mobile IPv6 に対応している

対応ノードが Mobile IPv6 に対応している場合，移動ノードは対応ノードに対してバインディングアップデートを行う．これが完了すると，経路制御ヘッダを用いて，移動ノードと対応ノードはホームエージェントを介することなく直接通信することができる．しかし，移動ノードが通信中にサブネットを離れてしまった場合，終点アドレスに設定されている，移動ノードのホームアドレスにそのパケットは送信される．このときにホームエージェントまでの距離が遠いと，不必要なネットワークトラフィックが発生してしまう．

4.1.2. 対応ノードが Mobile IPv6 に対応していない

対応ノードが Mobile IPv6 に対応していない場合，移動ノードと対応ノード間の通信で経路制御ヘッダと終点オプションヘッダを用いることができない．そのため，移動ノードと対応ノード間の通信はホームエージェントを介して行うことになる．移動ノードと対応ノードが距離的に近いサブネットに存在していたとしても，必ずホームエージェントを介してパケットのやり取りをしないといけないので，毎回不必要なネットワークトラフィックが発生してしまう．実環境において，未だに IPv6 すらほとんど普及していないのが現実である．すなわち，対応ノードが Mobile IPv6 に対応していることは，現時点でほとんどありえない．そのため，Mobile IPv6 において，移動ノードと Mobile IPv6 非対応対応ノードとの通信で生じる問題（ホームエージェントを必ず経由しなければならない）が最も大きな課題だと言える．

4.2. バインディングアップデート

Mobile IPv6 では，移動ノードは新しいネットワークに移動するたびに，ホームエージェントに対して，バインディングアップデートを行う．さらに，バインディングには有効時間が設定されていているため，移動にかかわらず移動ノードはホームエージェントに対して一定時間ごとにバインディングアップデートを行う．頻繁に移動するノードの場合この処理は，欠かせないが，ある程度常駐するノードにとっては不必要な処理であり，そのたびに不必要なネットワークトラフィックを発生させてしまう．また，ネットワーク的に距離が遠いとバインディングアップデートに時間がかかってしまい，バインディングアップデートに失敗する可能性もある．

4.3. 負荷集中

1 台のホームエージェントで複数の移動ノードを管理する場合，移動ノードがサブネットを移動するたびにホームエージェントに対してバインディングアップデートを要求してくることになる．さらに対応ノードが Mobile IPv6 に対応していない場合，毎回移動ノードと対応ノード間を行き来するパケットの処理をしないといけないため，ホームエージェントに負荷が集中してしまい，バインディングなどをうまく処理できなくなってしまう．

5. マイアプローチ

4 章で挙げたように，Mobile IPv6 には，様々な問題点が残されている．そこで本研究では，Mobile IPv6 に対応していないノードと通信を行う際の不必要なネットワークトラフィ

ックの増加，パケット転送にかかるホームエージェントへの負荷集中の問題に着目し，以下で仮想ホームエージェントを提案する．仮想ホームエージェントは本来ホームエージェントが行っている，移動ノードと対応ノード間のパケット転送機能を代理で行うノードである．このノードを導入することで不必要なネットワークトラフィックを軽減し，ホームエージェントの負荷分散を目標とする．

5.1. 不必要なネットワークトラフィックが発生する状況

まず初めに，移動ノードが Mobile IPv6 に対応していないノードと通信を行った場合，どのような状況で不必要なネットワークトラフィックが発生するかをそれぞれのノードの位置関係を用いて考える．移動ノード，ホームエージェント，対応ノードの 3 つのノードの並び方は3! 通りあり，逆順のものは同等なので全部で 3 通りの位置関係がある．

① 移動ノード → ホームエージェント → 対応ノードの並び順

移動ノードと対応ノードの通信経路の上にホームリンクが存在する場合，もしくは，移動ノードがホームリンク上に存在する場合は，不必要なネットワークトラフィックはほとんど発生しない．しかし，これは位置関係を「直線」上で考えた場合であり，この状況は非常に稀である．これを「平面」上で考えた場合，ホームエージェントが位置的には中間に位置していたとしても，最短経路からはずれ，不必要なネットワークトラフィックが発生する．

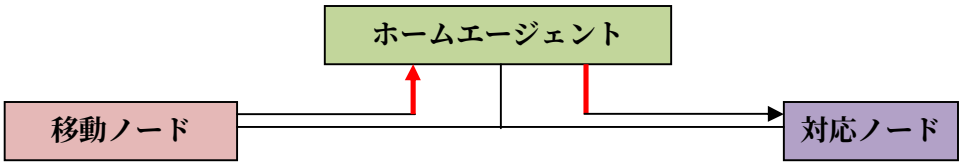


図 7．条件①のネットワーク構成例（赤い部分が不必要なネットワークトラフィック）

② 移動ノード → 対応ノード → ホームエージェントの並び順

移動ノードとホームエージェントの間に対応ノードが存在する場合，対応ノードの方が移動ノードと近い位置に存在しているのにも関わらず，一度対応ノードを超えてホームエージェントを経由して再び対応ノードにパケットを送信するため，対応ノードとホームエージェント間の往復分の不必要なネットワークトラフィックが発生する．以下の図における赤い部分が不必要なネットワークトラフィックである．

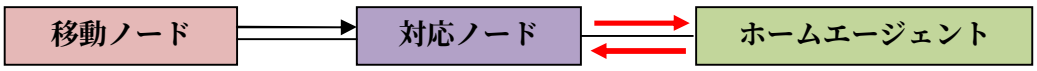


図 8．条件②のネットワーク構成例（赤い部分が不必要なネットワークトラフィック）

③ 対応ノード → 移動ノード → ホームエージェントの並び順

移動ノードから見て対応ノードとホームエージェントがそれぞれ真逆に存在する場合，パケットは一度対応ノードの方向とは逆に送信することになるので，移動ノードとホームエージェント間の往復分の不必要なネットワークトラフィックが発生する．以下の図における赤い部分が不必要なネットワークトラフィックである．

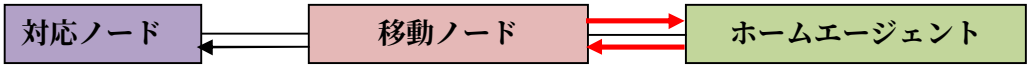


図 9．条件③のネットワーク構成例（赤い部分が不必要なネットワークトラフィック）

このように，移動ノードと Mobile IPv6 に対応していないノードとの通信において，位置的に移動ノード → ホームエージェント → 対応ノードの並びになっていて，なおかつホームリンクが最短通信経路上に存在している場合のみ不必要なネットワークトラフィックが発生しない．つまり，上記の条件以外のすべての場合に不必要なネットワークトラフィックが発生してしまうことになる．

5.2. 仮想ホームエージェント

不必要なネットワークトラフィックが発生するということは，すなわち移動ノードから対応ノードの経路上のどこかでホームエージェントを経由するために最短経路から外れているということである．最短経路を外れるとき（＝不必要なネットワークトラフィックが発生するとき），そこには必ずルータが存在する．本研究では，本来移動ノードと Mobile IPv6 に対応していないノード間の通信の際にホームエージェントが行うパケットの転送機能を分岐点ルータ上に構築する．すなわち，ルータ上にパケット転送プログラムを実装し，仮想ホームエージェントとして動作させる．このルータ内に仮想ホームエージェントを実装することによって，移動ノードと Mobile IPv6 に対応していない対応ノード間の通信で発生する，不必要なネットワークトラフィックを軽減することが期待できる．またホームエージェントの機能を分散することにより，従来のホームエージェントはパケット転送作業を必要としなくなるので，処理の負荷を軽減することが期待できる．これにより，ホームエージェントへの処理集中に伴う，バインディングアップデートの失敗なども軽減することが可能になるだろう．

また，仮想ホームエージェントを設置する位置であるが，移動ノードと対応ノード間の最短経路上に存在するのが最も望ましい．最短経路上に設置することで，パケットが最短経路を外れる前にパケットに処理を加えることで，パケットが最短経路を外れることを防止することができる．これにより，仮想ホームエージェントの効果を最大限に発揮することができる．しかし，たとえ仮想ホームエージェントの設置位置が移動ノードと対応ノー

ド間の最短経路上でなくても，パケットがホームエージェントに到達する前に存在していれば，ホームエージェントとの距離によって徐々に減少していくが，その効果を発揮することができる．

5.3. アーキテクチャ

以下に仮想ホームエージェントの動作概要について説明する．

5.3.1. アドレス取得

仮想ホームエージェントは移動ノードのホームアドレス，気付アドレス，ホームエージェント，対応ノードのアドレスを把握する必要がある．移動ノードはホームリンク上から外部リンクへ移動すると，動的ホームエージェント探索要求をホームエージェントのエニーキャストアドレス宛に送信する．その要求に対する応答が返されると，移動ノードは自身の気付アドレスを動的ホームエージェント探索応答で得たアドレスを用いて，ホームエージェント宛にバインディングアップデート要求を送信する．このバインディングアップデート要求パケット（ICMPV6 パケット，タイプ：144）の送信元アドレス，宛先アドレスから，それぞれ移動ノードの気付アドレス，ホームエージェントのアドレスを得ることができる．バインディングアップデートが完了すると，移動ノードと対応ノード間の通信が始まる．ここで，移動ノードから送信されてきたパケットに注目する．つまり，送信元が移動ノードの気付アドレス，宛先がホームエージェントに設定されていて，なおかつ IP-IP パケットになっているものである．このパケットを分析すると，2 番目の IPv6 ヘッダの送信元アドレスで移動ノードのホームアドレス，宛先アドレスで対応ノードのアドレスを得ることができる．ここまでで得た 4 つのアドレスを使用して，仮想ホームエージェントにおける経路制御を行う．

5.3.2. パケット転送

仮想ホームエージェントでは，移動ノードの気付アドレスからホームエージェント宛の IP-IP カプセル化されたパケットと対応ノードから移動ノードのホームアドレス宛のパケットに対して 5.3.1.章で入手したアドレス情報を元にパケットの転送処理を行う．

① 移動ノードから対応ノードへ送信されたパケットへの処理

外部リンク上に移動した移動ノードから対応ノードへ送信されたパケットは，はじめにホームエージェントへ送信される．これは，対応ノードに対して移動ノードの移動を意識させないという Mobile IPv6 の特徴である．例えば，移動ノードを有しているユーザが何気なく対応ノードに対してエコー要求パケットを送信すると，自動的にカーネルが

元のエコー要求パケットの先頭に宛先をホームエージェントに，送信元を移動ノードの気付アドレスに設定された IPv6 ヘッダでカプセル化することで，必ずホームエージェントを経由するようにしている．そして，ホームエージェントにおいてこのカプセルを外し，対応ノードに対して移動ノードがあたかもホームリンク上からエコー要求を送信してきたかのように見せかけている．以上の説明でもわかるように，外部リンク上にいる移動ノードから送信されるパケットは IP カプセルに包まれている．仮想ホームエージェントではこのパケットに着目する．つまり，第 1 ヘッダの送信元アドレスが移動ノードの気付アドレス，宛先アドレスがホームエージェント，第 2 ヘッダの送信元アドレスが移動ノードのホームアドレス，宛先アドレスが対応ノードに設定されたパケットである．仮想ホームエージェントでは，このパケットに対して，本来ホームエージェントが行っている，非カプセル化の処理を加える．つまり，このパケットの先頭に設定されている IPv6 ヘッダを取り外し，元のパケットを取り出し，対応ノードに転送する．

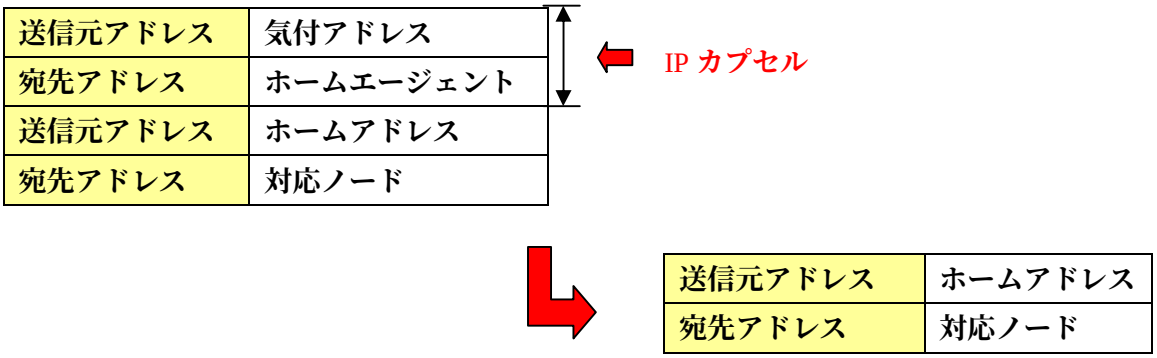


図 10．移動ノードからホームエージェントへのパケットの処理

② 対応ノードから移動ノードへ送信されたパケットへの処理

対応ノードから移動ノードへ送信されたパケットは特別な処理は加えられていない．ヘッダの宛先アドレスは移動ノードのホームアドレス，送信元アドレスは対応ノードに設定されている．移動ノードが外部リンク上にいる時は，前述したように動的ホームエージェント探索要求やバインディングアップデート要求が送信されるので，仮想ホームエージェントにおいても移動ノードの移動を感知することができる．そこで，移動ノードから動的ホームエージェント探索要求やバインディングアップデート要求がホームエージェントに対して送信されていた場合，移動ノードは外部リンク上に存在しているということなので，仮想ホームエージェントではパケットに対して，送信元がホームエージェント，宛先が気付アドレスに設定した IPv6 ヘッダを付け加える．すなわちカプセル化の処理を行い，移動ノードへ転送する．また，動的ホームエージェント探索要求などが送信されていなかった場合，移動ノードはホームリンク上に存在する可能性があるので，

この場合はパケットに対して特に処理を加えずにホームエージェントにそのまま転送する．

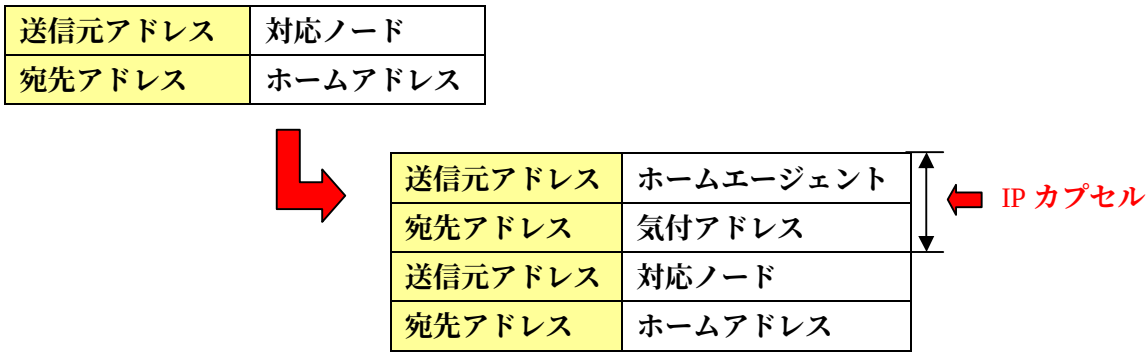


図 11．対応ノードから移動ノードへのパケットの処理

このように，仮想ホームエージェントが移動ノードからホームエージェント宛のパケット，対応ノードからホームアドレス宛のパケットを代理受信し，カプセル化，非カプセル化の処理をパケットに加えて転送する．この作業で，本来のホームエージェントは必要な情報（バインディングアップデート要求，近隣要請など）しか，受け取らなくて済むことになるのでパケット転送にかかる負担を軽減できる．

6. 実験

この章では本研究で行った実験について説明する．

Mobile IPv6 ネットワークの実装には SHISA ベースの KAME-snap[10]を使用した．

6.1. SHISA

SHISA は Mobile IPv6 のインプリメンテーションである[11]．WIDE プロジェクトは，KAME プロジェクトと InternetCAR プロジェクトで 2 つの異なった Mobile IPv6 を展開してきた．そして，2004 年春の WIDE プロジェクトで 1 つのインプリメンテーションにするために 2 つの異なった Mobile IPv6 を一体化された．SHISA は移動ノード，ホームエージェント，対応ノード，移動ルータの機能を提供している．さらにモバイルネットワークや複合的な気付アドレス登録，NEMO[6]などの拡張機能も提供している．

しかし，FreeBSD，OpenBSD への KAME からのポーティングが完了していないため，現在は SHISA ベースの KAME-snap が KAME プロジェクトから提供されている．

6.2. BPF

これは, BSD 系の UNIX でのみ利用できるデータリンクアクセスインタフェースである．通常，パケットのやり取りにはソケット API を使用する．具体的には，raw ソケットを作成し，そのオプションとして IP_HDRINCL を設定することで，パケット送信時にカーネルが IP ヘッダを付与しないようになる．しかし，IPv6 ソケット API ではソケットオプションとして IP_HDRINCL が廃止された．そのため raw ソケットを使用しても，受信パケットのキャプチャリングにのみ有効であり，送信パケットに対してカーネルが付与する IP ヘッダを抑制することができなくなってしまった．そこで BPF（BSD Packet Filter）[12]を用いる．これは，デバイスファイルを利用して読み書きを行う．BPF を使用することで，アプリケーションから raw パケットを使用することができる．BPF を利用するアプリケーションは，open システムコールを使用してデバイスファイルをオープンする. BPF を使用するときは，パケットを入出力するインタフェース名の設定を ioctl システムコールで行い，パケットの送受信は write システムコールと read システムコールを使用する[13]．BPF によってネットワークインタフェースを監視し，通過するパケットをポインタで区切りそれぞれのヘッダにアクセスしている．パケット送信もネットワークインタフェースから直接行えるので，自動的に Ether ヘッダや IP ヘッダを付与されることはないので，独自のパケットを作成することができる．これは，IPv6 と IPv4 のアドレスの違いには影響されない．

6.3. パケットフィルタ

仮想ホームエージェントの機能として，移動ノードの気付アドレスからホームエージェントに送られる IP-IP カプセル化されたパケットと対応ノードから移動ノードのホームアドレスに送られるエコー応答パケットの 2 つを制御しなくてはならない．1 つ目の案として，ルータ機能（パケットフォワーディング）を停止し，全てのパケットを監視し，ルータのネットワークインタフェースを BPF によって監視し，その宛先アドレスに応じて該当するネットワークインタフェースから送信すればよい．しかし，全てのパケットに対してこの処理を行うプログラムを作成するのは，非常に手間がかかる．今回の実装ではエコー要求／応答に対するパケットのみを制御したいので，この手間は省く．2 つ目の案として，ルータ機能をそのまま維持し，特定のパケットのみを制御する方法である．ルータ機能を維持したまま, BPF によってパケットを監視し, 該当パケットに対して処理を行右方法がある．しかしこの方法も BPF で処理をしている最中にルータ機能を持ったカーネルが本来の転送先にパケットを送信してしまい，制御することはできない．そこで 3 つ目の案として，FreeBSD のカーネル内部に組み込まれているパケットフィルタを導入する方法で実装を行う．これによってホームエージェント宛のパケットのみを制御し，その他のパケットを通常通りやり取りすることができる．

そこで，今回は IP6FW を使用し該当パケットをルータのホームエージェント側のネットワークインタフェースで止める．こうすることによってルータ内部には該当パケットが入ってくるので，移動ノード側と対応ノード側のネットワークインタフェースを BPF の監視対象として設定しておけば，ルータ内部で該当パケットを処理することができる．

6.4. 実験環境

以下に今回の実装に使用したネットワーク形態，カーネルの仕様，アドレスの設定，実装内容について示す．

6.4.1. 実験ネットワーク

以下に本実験で構築したネットワーク図を示す．

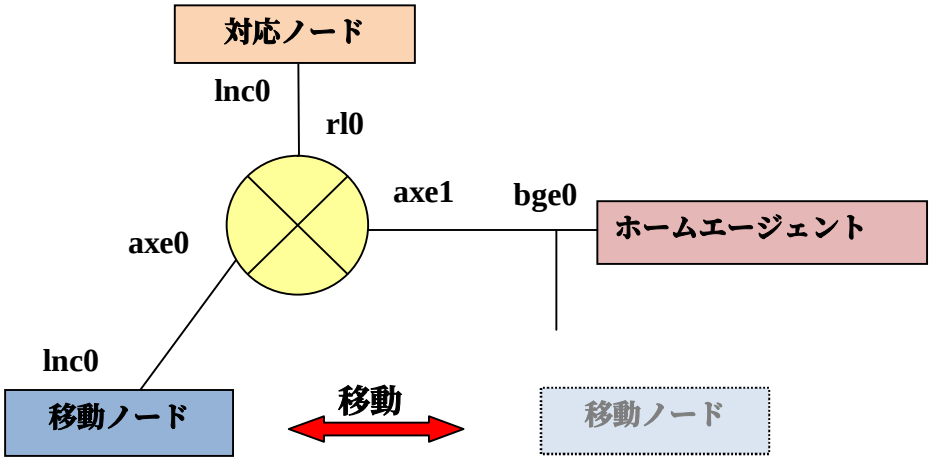


図 12. 構築ネットワーク図

6.4.2. カーネルの仕様

実験で使用した各ノードの OS およびカーネルを以下に示す[14][15].

表 1. カーネルの仕様

ノード	OS
移動ノード	FreeBSD 5.4-RELEASE + kame-20061113-freebsd54
ホームエージェント	FreeBSD 5.4-RELEASE + kame-20061113-freebsd54
対応ノード	FreeBSD 5.4-RELEASE
仮想ホームエージェント	FreeBSD 5.4-RELEASE

なお，移動ノードと対応ノードに関しては，Windows 上で VMware を使用し，仮想 OS としてそれぞれのノードを実装している．ちなみに VMware とは，Windows / Linux 上で動作する，PC / AT 互換機エミュレータである[16]．UNIX 互換 OS 上で Windows を動作させたり，その逆を行ったりすることができる．VMware が仮想的に生成するコンピュータは一般的なパソコンとほぼ同様に動作し，PC / AT 互換機で動作するほとんどの OS を稼働することができる．VMware ではコンピュータはエミュレートするが OS はエミュレートしないため，ゲスト OS は別に用意する．VMware では，ゲスト OS 用のアプリケーションソフトの制御はゲスト OS に任せているため，ホスト OS でゲスト OS 用ソフトのエミュレートを行う場合と比べて，非常に高い互換性を確保している．

6.4.3. アドレス設定

各ノードのネットワークインタフェースのアドレス設定を以下に示す[14].

移動ノードのホームリンクプレフィックスは 3ffe:1::/64 である．また，移動ノード内には仮想ネットワークインタフェースとして，mip0 が動作している．mip0 には，移動ノードのホームプレフィックスのアドレス，すなわち移動ノードのホームアドレスが設定されている．

表 2. 各ノードのインタフェース名とアドレス

ノード	インタフェース名	IP アドレス
仮想 ホームエージェント	rl0	3ffe:3::1
	axe0	3ffe:2::1
	axe1	3ffe:1::1
対応ノード	lnc0	fe80::20c:29ff:fecb:5375
ホームエージェント	bge0	3ffe:1::2 3ffe:1::fdff:ffff:ffff:fffe(エニーキャスト)
移動ノード	lnc0	fe80::20c:29ff:fe41:a9a7

6.4.4. 実装

アーキテクチャで説明したアドレス取得の処理はすでに終え，仮想ホームエージェントはホームエージェントと移動ノードの気付アドレス，ホームアドレス，対応ノードのアドレスをすでに把握しているものとする．また，転送するパケットの種類として，エコー要求／応答パケット（ICMPV6）を使用する．仮想ホームエージェントは通常ルータとして動作をしているため，ホームエージェント宛に送信されてきたパケットは全て処理を加える前に転送されてしまう．そのため，今実験で転送対象になる，移動ノードの気付アドレス

から送信される IP-IP パケットおよび，対応ノードから送信される ICMPV6 パケットの通過に対しては IP6FW を用いて遮断する．

以下にルータ内に実装したパケット分析・転送機能（仮想ホームエージェント）と，移動ノード内に実装したエコー要求パケット送信・分析機能について説明する[17].

6.4.4.1. 仮想ホームエージェント

パケットの監視には BPF を使用し，ルータを通過するパケットをネットワークインタフェースの時点で監視，分析する．監視対象ネットワークインタフェースを axe0 と rl0 に設定した．

axe0 では，移動ノードからの，

第 1 ヘッダ：送信元　→ 気付アドレス
　　：宛先　→ ホームエージェント
第 2 ヘッダ：送信元　→ ホームアドレス
　　：宛先　→ 対応ノード
第 3 ヘッダ：ICMPV6 → タイプ 128（エコー要求）

に設定されているパケットをキャプチャリングするように設定されている．

また rl0 では，

第 1 ヘッダ：送信元　→ 対応ノード
　　：宛先　→ ホームアドレス
第 2 ヘッダ：ICMPV6 → タイプ 129（エコー応答）

に設定されているパケットをキャプチャリングするように設定されている．

はじめに，axe0 において通過するパケットの情報を分析を行う．もし，上記の条件にマッチしたパケットを発見したら，このパケットの先頭ヘッダ，つまり IP カプセルを取り除く．すると，宛先アドレスが対応ノード，送信先アドレスが移動ノードのホームアドレスに設定された元の ICMPv6 パケットになるので，このパケットの先頭に Ether ヘッダを付け加えて rl0 から対応ノードへ送信する．送信されたエコー要求パケットは，対応ノードで受信され，対応ノードはその要求に対するエコー応答パケットを移動ノードのホームアドレス宛に返信してくる．

次に，rl0 において通過するパケットのアドレス情報及び ICMPv6 のタイプを参照する．もし，上記の条件にマッチしたパケットを発見したら，このパケットの先頭に送信元がホームエージェント，宛先が移動ノードの気付アドレスを設定した IP ヘッダを付け加える．すなわち，IP カプセルを作成する．このパケットの先頭に Ether ヘッダを付加し axe0 から移動ノードへ送信する．仮想ホームエージェントではこの処理をパケットが通過するたびに行う．

このようにルータに通常ホームエージェントが行っていた，パケット転送機能の部分を代理で行わせ，仮想ホームエージェントとして動作させる．

6.4.4.2. エコー要求パケット

移動ノードにおいてエコー要求／応答パケットを送受信しながら，移動ノードで扱うパケットを解析する．パケットの解析に BPF を使用し，監視対象ネットワークインタフェースを lnc0 に設定している．ICMPv6 パケットの作成については，特にパケット情報に手を加える必要はないので，パケットの送信には BPF ではなく，通常の IPv6 ソケットを使用している．通常の ping6 コマンドで送受信されるエコー要求／応答パケットとの違いは，ICMPV6 ヘッダの後ろにデータ部が付与されていないことだけである．そのため通常のパケットのペイロード長が第 1 ヘッダでは 14336，第 2 ヘッダでは 4096 であるのに対して，今回の実験で送受信されるエコー要求／応答パケットのペイロード長は第 1 ヘッダが 12288，第 2 ヘッダが 2048 となっている．実際に作成しているのは，ICMPv6 ヘッダの部分だけで，第 1 ヘッダに関しては Mobile IPv6 に対応させた kame のカーネルが，第 2 ヘッダに関しては，FreeBSD のカーネルが自動的に作成される．

7. 評価と考察

以下に移動ノードから対応ノードに対して 50 回，100 回のエコー要求を送信した際の通常の Mobile IPv6 の仕組みを利用したネットワークと，ルータ内に仮想ホームエージェントを導入したネットワークでのホームエージェントにかかるネットワークトラフィック量を測定した結果を示す．監視対象ネットワークインタフェースをホームエージェントの bge0 に設定し，全ての IPv6 パケットと ICMPv6 パケットの数とオクテット量を測定した．なお，移動ノードが外部ネットワークに移動した直後からの全てのパケットを測定するために，バインディングアップデート処理が終了する時間を考慮に入れ，移動ノードが外部ネットワークに移動した直後から約 40 秒の間をおいてから対応ノードに対してエコー要求パケットを送信した．

表 3. エコー要求 50 回でのホームエージェントで処理する総パケット数

	総パケット数	ICMP パケット数
現行 Mobile IPv6	286	175
＋仮想ホームエージェント	30	22

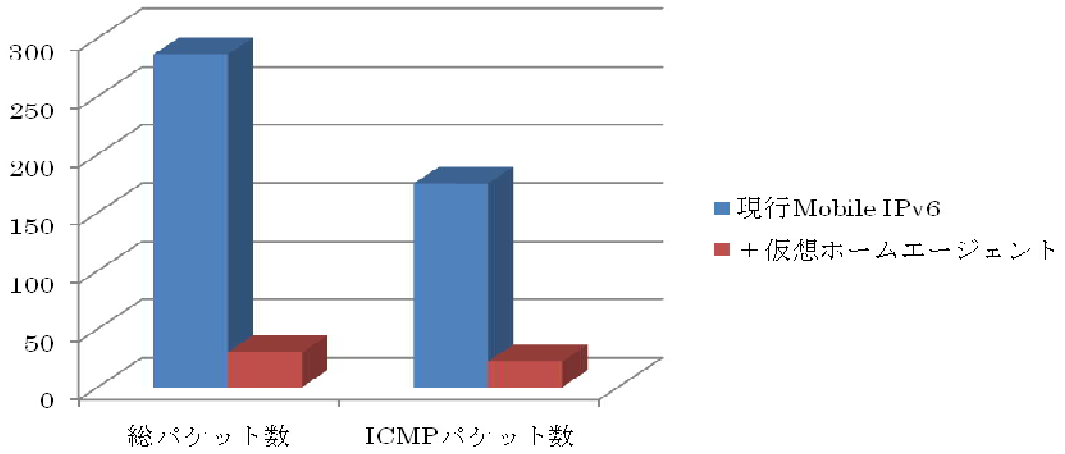


図 13. エコー要求 50 回でのホームエージェントで処理する総パケット数

表 4. エコー要求 50 回での Home Agent で処理する総オクテット量

	総オクテット	ICMP オクテット
現行 Mobile IPv6	7176	1840
＋仮想ホームエージェント	976	592

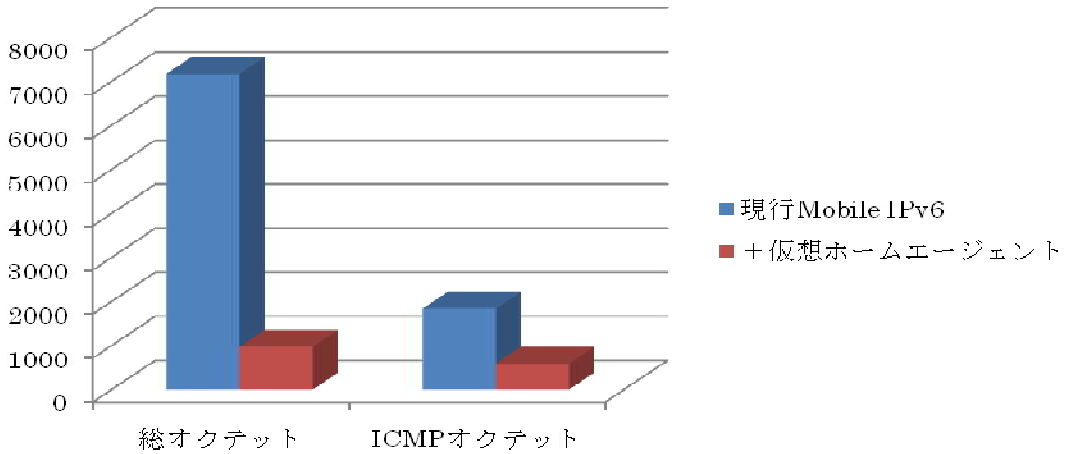


図 14. エコー要求 50 回でのホームエージェントで処理する総オクテット量

表 5. エコー要求 100 回でのホームエージェントで処理する総パケット数

	総パケット数	ICMP パケット数
現行 Mobile IPv6	551	339
＋仮想ホームエージェント	50	36

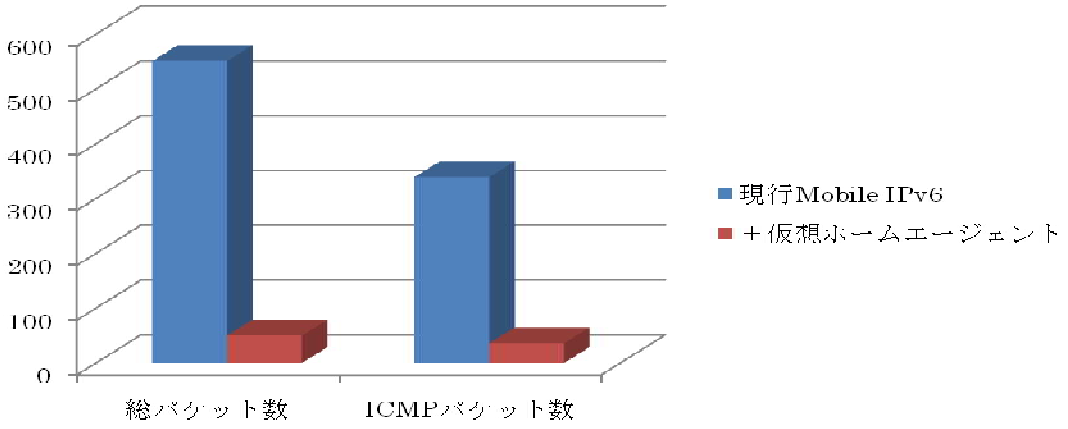


図 15. エコー要求 100 回でのホームエージェントで処理する総オクテット量

表 6. エコー要求 100 回でのホームエージェントで処理する総パケット数

	総オクテット	ICMP オクテット
現行 Mobile IPv6	13584	3408
＋仮想ホームエージェント	1656	984

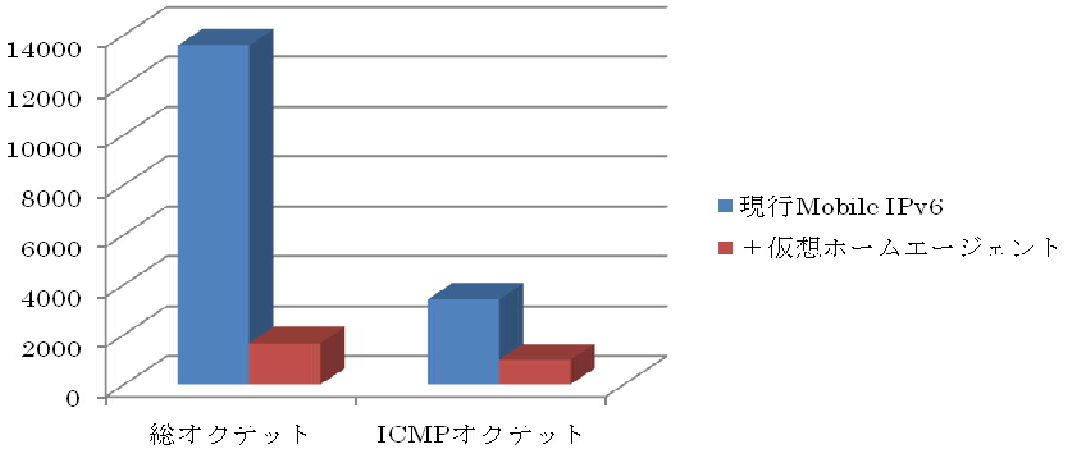


図 16. エコー要求 100 回でのホームエージェントで処理する総オクテット量

エコー要求パケット数 50 回，100 回の両結果を見ても大幅にホームエージェントで処理をするパケット量が減少していることが伺える．つまり，仮想ホームエージェントとホームエージェント間の不必要なネットワークトラフィック量を減らすことができた．この結果は，送受信パケット量が増えるにつれ，より顕著なものになっている．さらに仮想ホームエージェントとホームエージェント間の距離が離れることでも，仮想ホームエージェントの効果は発揮されるだろう．

ICMP パケットが 0 ではないのは，移動直後からパケットをカウントしているため，その後 40 秒間の間で行われる，移動ノードとホームエージェント間のバインディングアップデート処理に関するパケットやルータ広告などの必要なパケットであると考えられる．この結果から，今回の実装が Mobile IPv6 本来の機能に影響を加えることなくパケットの転送が行われていることがわかる．

以上の結果から見ても明らかなように，仮想ホームエージェントを使用することで，現行の Mobile IPv6 における，移動ノード，ホームエージェント，対応ノードに対して，仮想ホームエージェントが代理受信をしている影響を及ぼすことなく，大幅に不必要なネットワークトラフィック量を減らし，それと同時にホームエージェントでのパケット処理の負担を減らすことが可能であることを証明することができた．

仮想ホームエージェントを導入することでホームエージェントはパケット転送にかかる負担がなくなるので，より多くの移動ノードを監視対象として扱えるようになる．また，ホームエージェントは処理機能に余裕がでてくるので，頻繁に移動する移動ノードのバインディングアップデートに対しても失敗する可能性を軽減できると思われる．

8. 今後の課題

① SHISA モジュールへの組み込み，IPsec の考慮

今回の実装では，外付けのプログラムで行っている．今後はこの仮想ホームエージェントの機能を直接 SHISA のソースモジュールに組み込むことが必要である．例えば，今回のように通過パケットからアドレス情報を取得するのではなく，ホームエージェントが仮想ホームエージェントのアドレスを管理し，移動ノードとホームエージェント間のバインディングアップデート処理が終了後，更新された移動ノードのアドレスを仮想ホームエージェントに自動的に知らせるなどの機能を付け加えることで，よりスムーズな処理形態を確立することができる．また，今回は IPsec を考慮せずに実装を行っている．しかし，実環境の Mobile IPv6 では IPsec が標準仕様として設定されている．仮想ホームエージェントにおいてパケットをキャプチャリングする際に影響が出てくるだろう．そこで上記と同様に SHISA のソースモジュールに組み込み，仮想ホームエージェントの存在をそれぞれのノードに認識させ，仮想ホームエージェントに対しても鍵の交換などの処理を行うことで，IPsec の問題も回避できるのではないだろうか．

② フォロー上限の決定

IPv6 ネットワークでは，ルータは自身のアドレスのプレフィックス部分を切り出して新たなノードに対して渡しているため，新しい IPv6 サイトが増えたとしても，バックボーンに対する広告する経路情報は増えず，基幹ルータで保持する経路表の大きさが抑えられる．そのため，ルータの負担が軽減することができる．しかし，いくらルータの負荷が軽減されるからと言って，1 台の仮想ホームエージェントに対して，多くの移動ノードとホームエージェントのフォローをさせることは難しい．今回の実装では 1 台の仮想ホームエージェントで 1 組の移動ノードとホームエージェントを扱った．今後はさらに多くの移動ノードとホームエージェントの組をフォローさせ，仮想ホームエージェントの処理に対する挙動を確認する必要がある．また，それによってフォローできる組数の上限も決められるだろう．

③ すべてのヘッダへの対応

本研究では ICMPV6 のエコー要求／応答パケットについてのみ対応している転送プログラムを実装した．しかし，現実世界ではエコー要求／応答パケットのみが行き来しているわけではない．今後はその他の TCP，UDP などのヘッダにも対応させなければならない．

参考文献

[1] S.Deering, "*Internet Protocol, Version 6*", RFC 2460, Dec. 1998.

[2] D.Jphnson, C.perkins, J.Arkko, "*Mobility Support in IPv6*", RFC 3775, June. 2004.

[3] J.Arkko, V.Devarapalli, F.Dupont, "*Using IPsec to Protect Mobile IPv6 Signaling Between Mobile Nodes and Home Agents*", RFC 3776, June. 2004.

[4] IRI, ユビキタス研究所, *マスタリング TCP/IP IPv6 編*, オーム社, 2005.

[5] Wikimedia Foundation, Inc., IPv6 – Wikipedia
http://ja.wikipedia.org/wiki/IPv6a

[6] Nautilus6, Nautilus6 Project Overview
http://www.nautilus6.org/index.php

[7] 北形 元, 小出 秀和, 神山 広樹, Glenn Mansfield Keeni, 白鳥 則郎, "*MobiSNMP – A model for Remote Information Collection from Moving Entities using SNMP over MobileIPv6*", IEICE Transactions on Communications, August 2005

[8] 福田 浩章, "*Mobile IPv6 における分散ホームエージェントの実現*", 早稲田大学大学院理工学研究科 2004 年度修士論文, 2005.

[9] R.Hinden, S.Deering, "*IP Version 6 Addressing Architecture*", RFC 2373, Jul. 1998.

[10]The KAME project, The KAME project
http://www.kame.net/

[11]WIDE project, SHISA!
http://www.mobileip.jp/

[12]S.McCanne, V.Jacobson, "*The BSD Packet Filter: A New Architecture for User-level Packet Capture*", Lawrence Berkeley Laboratory One Cyclotron Road Berkeley, Dec. 1992.

[13]**村山 公保**, *TCP/IP ネットワーク実験プログラミング*, **オーム社**, 2002.

[14]Lawrence Stewart, Mai Banh, Greville Armitage, "*Implementing an IPv6 and Mobile IPv6 testbed using FreeBSD 4.9 and KAME*", CAIA Technical Report, March. 2004.

[15]FreeBSD.org, The FreeBSD Project, FreeBSD Hyper Text Man Pages,
http://www.freebsd.org/cgi/man.cgi

[16]VMware K.K., **仮想マシン**- VMware
http://www.vmware.com/jp/overview/vmachine.html

[17]**荻野 純一郎**, *IPv6 ネットワークプログラミング*, **アスキー**, 2003.