ネットワーク単位の移動性を提供するモバイルルータのための経路制御方式の提案

磯村 学[†] 吉原貴仁[†] 堀内浩規[†]

携帯通信端末の普及やITS（Intelligent Transport Systems）技術の進展により，今後は，車両，航空機，および船舶などの乗り物に持ち込まれた端末（モバイルノード）が継続して通信できる環境の提供が重要となる．この際，モバイルノードがあらかじめ備える通信インタフェースを使用して外部と直接通信を行うよりも，乗り物とともに移動する移動ネットワークを乗り物内部に構築し，それを介して外部と通信を行うことができれば，乗り物が備える通信インタフェースを利用することで，無線状態，消費電力，課金などの観点から有利な場合が想定される．このためには，乗り物の移動の結果，移動ネットワークの接続する外部のネットワークが変わっても，移動ネットワークに接続したノードが通信を継続できるネットワーク単位の移動性を実現する必要がある．そこで，IETF（Internet Engineering Task Force）のNEMO（NEtwork MObility）ワーキンググループでは，Mobile IPに基づいたモバイルルータの標準化を進めている．しかしながら，モバイルルータを用いた移動ネットワークに接続するモバイルノードでは，外部のノードとの通信において，モバイルルータとモバイルノードの2つのホームエージェントを経由する冗長な通信経路ならびに多重トンネルによるオーバヘッドが発生し，ネットワークの利用効率の向上が困難となる問題点がある．そこでこの問題点の解決の一環として，本論文ではIPv4を対象に，移動ネットワークに接続するモバイルノードの通信経路ならびに多重トンネルのオーバヘッドを削減し，ネットワークの利用効率の向上を図るモバイルルータのための経路制御方式を新たに提案する．また，提案方式を実証するためのシステムを実装し，移動ネットワーク上のモバイルノードにおけるTCPのスループット向上ならびにメッセージ遅延短縮の観点から評価を行い，その有効性を示す．さらに，提案方式のIPv6への適用についても検討する．

Proposal of Routing Method for Mobile Router that Provides Mobility of an Entire Network

Manabu Isomura,[†] Kiyohito Yoshihara[†] and Hiroki Horiuchi[†]

By the wide spread of personal communication equipments and the progress of ITS (Intelligent Transport Systems) technology, it becomes important to provide seamless communication environment for Mobile Nodes that are carried into a vehicle, such as car, aircraft, and ship. In this case, it has advantages for the Mobile Nodes that communicate with external network from viewpoints of radio condition, power consumption, and charge, if they can connect to the mobile network that is constructed in the moving vehicle and utilize the communication media that are equipped with it, rather than using the communication media of own. For this purpose, NEMO (NEtwork MObility) working group in IETF (Internet Engineering Task Force) is standardizing Mobile Router based on Mobile IP technology to provide the mobility of an entire network. However, when Mobile Nodes connect to the mobile network using the Mobile Router, it causes redundant route and multiple tunneling to communicate external nodes, because all packets should be routed to both home agents of the Mobile Router and the Mobile Node. As a result, it makes difficult to utilize network resources efficiently. Thus, in this paper, we propose a new routing method for Mobile Router in IPv4 to suppress the redundant route and the multiple tunneling. In addition, we implement a system based on our proposal and perform evaluations to show the effectiveness. The results show performance improvements at the Mobile Node in the Mobile Network from the viewpoint of the TCP throughput and message delay. We also discuss the applicability of our proposal to IPv6.

1. はじめに

企業および個人の活動範囲のグローバル化，携帯通信端末の普及，ITS（Intelligent Transport Systems）をはじめとする新たな技術の進展により，今後は，車

† KDDI研究所
KDDI R&D Laboratories

両，航空機，および船舶などの乗り物に持ち込まれたモバイルノード（以下，MN: Mobile Node と呼ぶ）が継続して通信できる環境の提供が重要となる．この際，MN があらかじめ備える通信インタフェースを使用して外部のノードと直接通信を行うよりも，乗り物とともに移動する移動ネットワーク（以下，MNW: Mobile Network と呼ぶ）を乗り物内部に構築し，MNW を介して外部のノードと通信を行うことができれば，乗り物が備える通信インタフェースを利用することで，無線状態，消費電力，課金などの観点から有利な場合が想定される．このためには，乗り物の移動の結果，MNW の接続する外部のネットワークが変わっても，MNW に接続したノードが通信を継続できるネットワーク単位の移動性を実現する必要があり，IETF（Internet Engineering Task Force）の NEMO（NEtwork MObility）ワーキンググループでは，Mobile IP [1),2)] に基づいたモバイルルータ（以下，MR: Mobile Router と呼ぶ）の標準化を進めている[3)]．MR は MNW と外部のネットワークとの接続を行うルータであり，MR の接続する外部のネットワークが変わっても，MNW に接続したノードは通信を継続することができる．

しかしながら，MN が MNW に接続して外部のノードと通信を行う場合，MR と MN の 2 つのホームエージェント（以下，HA: Home Agent と呼ぶ）を経由する冗長な通信経路ならびに多重トンネルによるオーバヘッドが発生するため，ネットワークの利用効率の向上が困難となる問題点がある[4)]．そこでこの問題点の解決の一環として，本論文では，MNW に接続する MN における冗長な通信経路ならびに多重トンネルのオーバヘッドを削減し，ネットワークの利用効率の向上を図る MR のための経路制御方式を新たに提案する．本提案方式は，(1) MR が MNW に接続する MN の HA に対して MR の気付アドレス（以下，CoA: Care of Address と呼ぶ）を通知することで，MR の HA を経由する冗長な通信経路を削減する経路削減方式，(2) MN の HA において，MN のホームアドレス（以下，HoA: Home Address と呼ぶ）宛てのパケットを MR の CoA へ直接トンネルすることで，多重トンネルを削減するトンネル削減方式から成る．

NEMO ワーキンググループでは IPv6 を対象に MR の検討を進めている．しかしながら，ネットワークのみならず，携帯通信端末やアプリケーションを含め，IPv4 から IPv6 へすべてがただちに置換されるとは考えにくく，IPv4 と IPv6 とが混在する状況がしばらくは続くものと考えられる．そこで本論文では，このような状況を背景に，すでに広く利用可能な IPv4 を対象とする．IPv4 を対象とした Mobile IPv4 では，Mobile IPv6 とは異なり，CoA の与え方に外部エージェント（以下，FA: Foreign Agent と呼ぶ）を使用する方法と，使用しない方法がある．また，MR と MN はそれぞれ CoA を持つため，結果として，CoA の与え方に 4 通りの組合せが存在する．本論文では，経路削減方式とトンネル削減方式のそれぞれに対し，可能な組合せすべての場合を網羅的に検討し，MR のための経路制御方式を体系的に提案する．さらに，提案方式を実証するためのシステムを実装し，MNW に接続した MN における TCP のスループットやメッセージ遅延の観点から評価を行い，提案方式の有効性を示す．また，提案方式の IPv6 への適用について検討し，NEMO ワーキンググループで検討されている方式[5),6)] との比較を行う．

以下，2 章では Mobile IP とモバイルルータの概要ならびにモバイルルータのための経路制御の必要性について述べる．3 章ではモバイルルータのための経路制御方式を提案し，4 章でその実装概要，5 章で性能評価について述べる．また，6 章で提案方式の IPv6 への適用について述べ，最後に，7 章でまとめる．

2. Mobile IP とモバイルルータの概要，モバイルルータのための経路制御の必要性

2.1 Mobile IP の概要

IETF では，MN がネットワークを移動しても継続的に通信可能なノード単位の移動性を実現するため，Mobile IP の標準化を行っている．**図 1** に Mobile IP を用いた通信の概略を示す．MN は本来所属するホームリンクにホームアドレス MN-HoA を用いて接続する．MN がホームリンクに接続する場合，通信相手のノード（以下，CN: Correspondent Node と呼ぶ）とは，通常の IP 通信を行う．

MN がホームリンク以外の外部リンクに移動する場合，MN は外部リンクに接続する外部エージェント FA-MN が定期的に送信するエージェント広告メッ

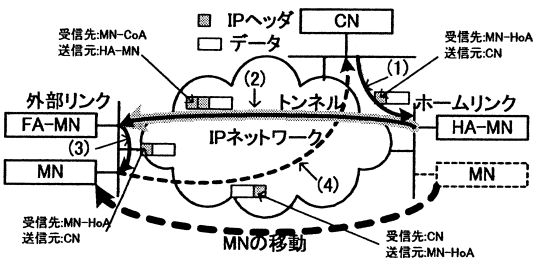

図 1 Mobile IP を用いた通信の概略
Fig. 1 Overview of mobile IP.

セージから気付アドレス MN-CoA を取得する．なお，この MN-CoA は FA-MN の通信インタフェースが持つアドレスである．次いで，MN はホームリンクに接続するホームエージェント HA-MN に FA-MN を経由して登録要求メッセージを送り，MN-HoA ならびに MN-CoA を登録する．この後，MN と CN の通信は以下のように行われる．

CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットは MN のホームリンクに到達する（図 1 (1)）．HA-MN は MN-HoA 宛てのパケットを捕捉し，文献 7)〜9) のいずれかの方法を用いて MN-CoA へトンネルする（図 1 (2)）．MN-CoA 宛てのパケットは FA-MN に到達し，FA-MN はトンネルを解除して，内部の MN-HoA 宛てのパケットを MN へ転送する（図 1 (3)）．また，MN が CN へ送信するパケットは直接 CN へ到達する（図 1 (4)）．

2.1.1 共存気付アドレス

Mobile IP では，FA の代わりに MN 自身がトンネルの処理を行う共存気付アドレスも規定している．共存気付アドレスでは，DHCP（Dynamic Host Configuration Protocol）[10] や PPP（Point to Point Protocol）[11] における IPCP（Internet Protocol Control Protocol）[12] などで MN の通信インタフェースに割り当てられるアドレスが MN-CoA となる．これにより，FA が設置されていない，たとえば，既存のネットワークにおいても Mobile IP が利用可能となる．なお，共存気付アドレスに対し，2.1 節で先述したように，FA を用いる場合を FA 気付アドレスと呼ぶ．

2.1.2 経路最適化

2.1 節で示したように，CN から外部リンクに接続する MN への通信では，HA-MN を経由する冗長な通信経路が発生する．この通信経路を排除するため，IETF では経路最適化[13] を検討している．経路最適化では，HA-MN が CN の送信した MN-HoA 宛てのパケットを捕捉した際，HA-MN は CN が MN-CoA を知らないものと判断し，CN に対して MN-CoA を通知する．MN-CoA を通知された CN は，MN-HoA 宛てのパケットを直接 MN-CoA へトンネルする．これにより，CN は HA-MN を経由しない最適な通信経路で MN と通信できる．

2.1.3 逆方向トンネル

ISP（Internet Service Provider）のアクセスルータなどでは，送信元アドレスの詐称を防ぐため，ルータの通信インタフェースにつながっていないネットワークのアドレスを送信元アドレスに持つパケットは破棄するフィルタ[14] を設定する場合が多い．一方，外部リンクに接続した MN が送信する CN 宛てのパケットの送信元アドレスは MN-HoA であり，外部リンクのネットワークのアドレスとは異なるため，このフィルタにより破棄される可能性がある．そこで，IETF では MN の送信した CN 宛てのパケットを，MN が FA 気付アドレスを用いる場合には FA-MN が，MN が共存気付アドレスを用いる場合には MN 自身が，受信先アドレス HA-MN，送信元アドレス MN-CoA のパケットで HA-MN へトンネルする逆方向トンネル[15] を定めている．

2.2 モバイルルータ

MR は MNW と外部リンクの接続を行うルータで，MR が外部リンクに移動しても，MNW に接続するすべてのノードが継続的に通信可能なネットワーク単位の移動性を実現する．MR は，2.1 節の MN と同様に，外部リンクに移動した際，移動先の外部エージェント FA-MR から気付アドレス MR-CoA を取得する．次いで，MR はホームエージェント HA-MR に登録要求メッセージを送信し，ホームアドレス MR-HoA と MR-CoA を登録する．そして，HA-MR が MR-HoA 宛てのパケットを MR-CoA へトンネルすることで，MR が外部リンクに移動しても通信を継続することが可能となる．さらに，HA-MR が MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレス宛てのパケットも MR-CoA へトンネルすることで，MR が外部リンクに移動しても，MNW に接続する端末は通信を継続することが可能となる．

次に，文献 1) で示されている，MR ならびに MNW に接続する MN がともに FA 気付アドレスを用いる場合の CN と MN の通信手順を**図 2**，**図 3** を用いて説明する．なお，MR は FA-MN として動作し，MR-HoA を MN-CoA として MN に広報する．CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットは，MN のホームリンクに到達する（図 2 (1)）．HA-MN は MN-HoA 宛てのパケットを，MN-CoA へトンネルする（図 2 (2)，図 3 (1)）．MN-CoA は MR-HoA と等しいため，MN-CoA 宛てのパケットは MR のホームリンクに到達する（図 2 (3)）．HA-MR は MN-CoA 宛てのパケットを，MR-CoA へトンネルする（図 2 (4)，図 3 (2)）．MR-CoA は FA-MR のアドレスであるため，MR-CoA 宛てのパケットは FA-MR に到達する（図 2 (5)）．FA-MR は受信した MR-CoA 宛てのパケットのトンネルを解除し，内部の MN-CoA（=MR-HoA）宛てのパケットを MR に転送する（図 2 (6)，図 3 (3)）．MR は受信した MN-CoA 宛てのパケットのトンネルを解除し，内部の MN-HoA 宛てのパケットを MN に転送する（図 2 (7)，図 3 (4)）．

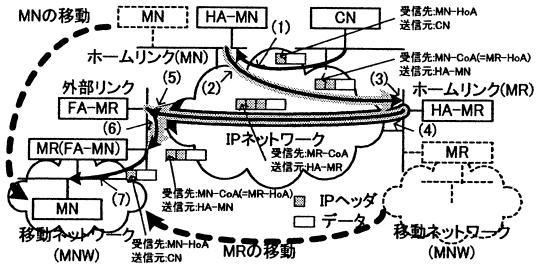

図 2 モバイルノードが移動ネットワークに接続した場合の通信（従来方式）

Fig. 2 Communication of mobile node in mobile network (conventional method).

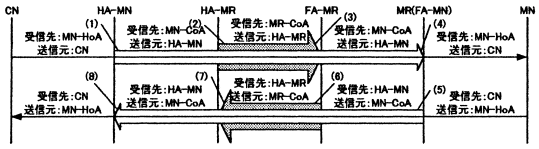

図 3 従来方式：MR と MN がともに FA 気付アドレスを用いる場合

Fig. 3 Conventional method: MR and MN use FA CoA.

一方，MN から CN への通信では，MN，MR が逆方向トンネルを実施する場合は，上記と逆の通信経路をたどる（図 3 (5)，(6)，(7)，(8)）．また，MN，MR が逆方向トンネルを実施しない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

2.3 モバイルルータのための経路制御の必要性

2.2 節に示したように，移動の結果，MNW の接続する外部リンクが変わっても，MR を介することにより，MNW に接続した MN は CN と継続的に通信を行うことが可能となるが，以下のような課題がある．

(1) HA-MN と HA-MR の 2 つの HA を経由する冗長な通信経路（図 2 (1)〜(5)）が発生する．

(2) HA-MN でトンネル（図 3 (1)）されたパケットが，再度 HA-MR においてトンネル（図 3 (2)）される多重トンネルが発生し，MR を用いない場合に比べてオーバヘッドが大きくなる．

このためネットワークの利用効率の向上が困難となり，MN と CN 間との通信性能の低下が懸念される．そこで，(1) の冗長な通信経路を削減する経路削減方式と，(2) の多重トンネルを削減するトンネル削減方式から成るモバイルルータのための経路制御方式を提案する．

3. モバイルルータのための経路制御方式の提案

まず 3.1 節で経路制御方式を，次いで 3.2 節でトンネル削減方式を提案する．また，3.3 節，3.4 節では，本提案方式で新たに定義する MNW アドレスプレフィックスオプションならび MR 転送登録メッセージについてそれぞれ説明する．

3.1 経路削減方式

MNW に接続した MN と CN の通信における冗長な通信経路を解決するため，2.1.2 項で述べた経路最適化を適用する方法が考えられる．しかしながら，CN となるすべてのノードに経路最適化を実装することが必要となるため，実環境への導入という観点から現実的でない．また，経路最適化は MN と CN の間で直接ネゴシエーションを行わないため，2.1.3 項の逆方向トンネルを開設できない問題がある．

そこで提案方式では，MR が MNW に接続した MN の HA-MN に対して，MR-HoA，MR-CoA，MNW のアドレスプレフィックスの登録を行う MR 転送登録メッセージを新たに追加する（**図 4** (1)）．以下に MR 転送登録メッセージの送信方法について示す．

- 従来の登録要求メッセージと同じく，MR が FA 気付アドレスを利用する場合には，まず MR が MR 転送登録メッセージを FA-MR 宛てに送信し，次いで FA-MR がその MR 転送登録メッセージを HA-MR 宛てに送信する．また，MR が共存気付アドレスを利用する場合には，MR は直接 HA-MN 宛てに MR 転送登録メッセージを送信する．
- MR がまだ登録を行っていない HA-MN に属する MN が MNW に接続した場合ならびに前回送信した MR 転送登録メッセージの有効時間が経過する前に送信する．
- MR が他の外部リンクに移動して新しい MR-CoA を取得した場合には，MNW に接続するすべての MN の HA-MN に送信する．

MR 転送登録メッセージを受信した HA-MN は，MR-HoA ならびに MNW のアドレスプレフィックス宛てのパケットを MR-CoA にトンネルする経路を作成する（経路 1）．ここで，MN-CoA は MN が FA 気付アドレスを使用する場合には MR-HoA，共存気付アドレスを使用する場合には MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレスとなる．したがって，HA-MN は MN-CoA 宛てのパケットを，HA-MR を経由せずに MR へトンネルできる（図 4 (3)）．

また，MR が MR 転送登録メッセージを送信するためには，MNW に接続する MN の MN-HoA ならびに HA-MN のアドレスを取得する必要がある．そこで，MN が FA 気付アドレスを使用する場合には，

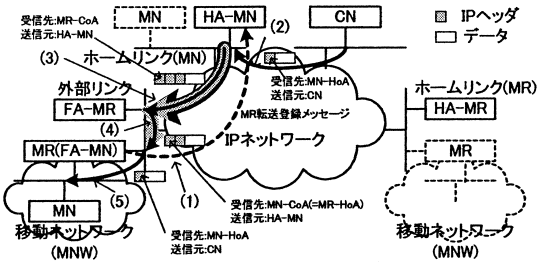

図 4 経路削減方式
Fig. 4 Route suppression.

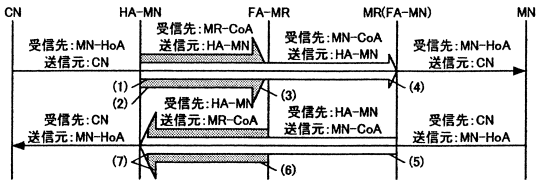

図 5 経路削減方式：MR と MN がともに FA 気付アドレスを用いる場合
Fig. 5 Route suppression: MR and MN use FA CoA.

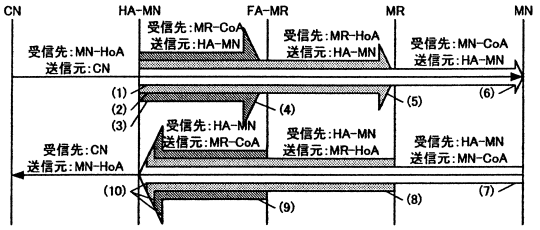

図 6 経路削減方式：MR が FA 気付アドレス，MN が共存気付アドレスを用いる場合
Fig. 6 Route suppression: MR uses FA CoA, MN uses co-located CoA.

MR（FA-MN）が MN の登録要求メッセージを中継する際に，MN-HoA ならびに HA-MN のアドレスを取得する．一方，MN が共存気付アドレスを使用する場合，MN は登録要求メッセージを直接 HA-MN に送信するため，MR は MNW の通信インタフェースにおいて MN の登録要求メッセージをキャプチャし，MN-HoA ならびに HA-MN のアドレスを取得する．

本方式では，MN と CN の通信経路を完全に最適化することはできないが，CN に対する追加の実装が不要であるため，経路最適化に比べ容易に実環境に導入することができる．また，MR と HA-MN で MR 転送登録メッセージを交わすため，経路最適化では開設できなかった MR と HA-MN の間での逆方向トンネルが開設可能である．なお，MR と HA-MR の逆方向トンネルについては，従来どおり MR が HA-MR に登録要求メッセージを送信することで開設が可能である．

以下，MR と MN のそれぞれが用いる気付アドレスに応じて場合を分け，各場合の経路削減方式を詳細に示す．なお，外部リンクに接続する MR は，HA-MR に登録要求メッセージを，HA-MN に MR 転送登録メッセージをそれぞれ送信しており，MNW に接続する MN も HA-MN に登録要求メッセージを送信しているものとする．

3.1.1 MR と MN がともに FA 気付アドレスを用いる場合

図 4，**図 5** に MN と CN の通信手順を示す．CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットは，MN のホームリンクに到達する（図 4 (2)）．MR が送信する MR 転送登録メッセージを受信した HA-MN は，MN-HoA 宛てのパケットを MN-CoA へトンネルするとともに（図 5 (1)），MN-CoA が MR-HoA に等しいことから 3.1 節の経路 1 を適用し，さらに MR-CoA へトンネルする（図 5 (2)）．MR-CoA は FA-MR のアドレスであるため，MR-CoA へトンネルされたパケットは FA-MR に到達する（図 4 (3)）．FA-MR は MR-CoA 宛てのパケットのトンネルを解除し（図 5 (3)），内部の MN-CoA 宛てのパケットを MR に転送する（図 4 (4)）．MR は受信した MN-CoA 宛てのパケットのトンネルを解除し（図 5 (4)），内部の MN-HoA 宛てのパケットを MN に転送する（図 4 (5)）．

一方，MN が送信する CN 宛てのパケットは，逆方向トンネルを用いる場合，MR で HA-MN にトンネルされ（図 5 (5)），さらに FA-MR で HA-MN にトンネルされる（図 5 (6)）．HA-MN はこれら 2 つのトンネルを解除し（図 5 (7)），内部の CN 宛てのパケットを CN へ転送する．逆方向トンネルを用いない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

3.1.2 MR が FA 気付アドレス，MN が共存気付アドレスを用いる場合

図 6 に MN と CN の通信手順を示す．HA-MN は CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットを MN-CoA へトンネルする（図 6 (1)）．ここで，MN-CoA は MNW のアドレスプレフィックスを持つアドレスであり，かつ MR が FA 気付アドレスを使用するため，HA-MN は MN-CoA 宛てのパケットを MR-HoA へトンネルし（図 6 (2)），さらに 3.1 節の経路 1 を適用して MR-CoA へトンネルする（図 6 (3)）．FA-MR は MR-CoA 宛てのパケットを受信し，内部の MR-HoA 宛てのパケットを MR に転送する（図 6 (4)）．次いで，MR は MR-HoA 宛てのパケットを受信し，内部の MN-CoA 宛てのパケットを MN に転送する

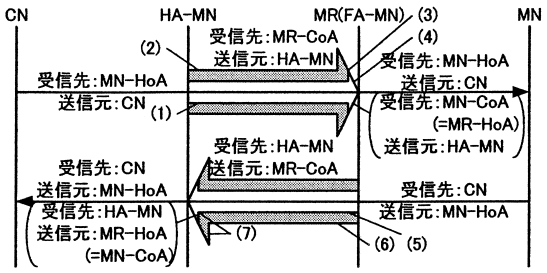

図 7 経路削減方式：MR が共存気付アドレス，MN が FA 気付アドレスを用いる場合

Fig. 7 Route suppression: MR uses co-located CoA, MN uses FA CoA.

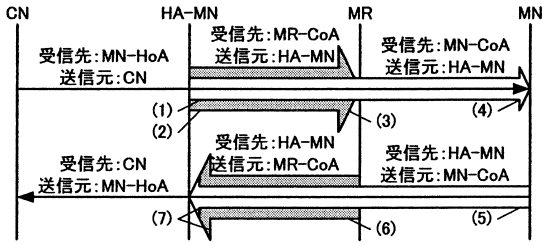

図 8 経路削減方式：MR と MN がともに共存気付アドレスを用いる場合

Fig. 8 Route suppression: MR and MN use co-located CoA.

(図 6 (5))．最後に，MN は MN-CoA 宛てのパケットを受信し，内部の MN-HoA 宛てのパケットを受け取る（図 6 (6))．

MN が送信する CN 宛てのパケットは，逆方向トンネルを用いる場合，MN で HA-MN へトンネルされる（図 6 (7))．そのパケットは，MR で HA-MN へトンネルされ（図 6 (8))，さらに FA-MR で HA-MN へトンネルされる（図 6 (9))．HA-MN は，これら 3 つのトンネルを解除し（図 6 (10))，内部の CN 宛てのパケットを CN へ転送する．逆方向トンネルを用いない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

3.1.3 MR が共存気付アドレス，MN が FA 気付アドレスを用いる場合

図 7 に MN と CN の通信手順を示す．HA-MN は CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットを MN-CoA へトンネルする（図 7 (1))．また，MN-CoA は MR-HoA と等しいことから，さらに HA-MN は 3.1 節の経路 1 を適用し，MN-CoA 宛てのパケットを MR-CoA へトンネルする（図 7 (2))．MR は MR-CoA へトンネルされたパケットを受信し，内部の MN-CoA 宛てのパケット取り出す（図 7 (3))．MN-CoA が MR-HoA に等しいことから，さらに MR は内部の MN-HoA 宛てのパケット取り出し（図 7 (4))，MN に転送する．

MN が送信する CN 宛てのパケットは，逆方向トンネルを用いる場合，MR において，まず送信元アドレスが MR-HoA（=MN-CoA)，受信先アドレスが HA-MN のパケットでトンネルされ（図 7 (5))，さらに送信元アドレスが MR-CoA，受信先アドレスが HA-MN のパケットでトンネルされる（図 7 (6))．HA-MN はこれら 2 つのトンネルを解除し（図 7 (7))，内部の CN 宛てのパケットを CN に転送する．逆方向トンネルを用いない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

3.1.4 MR と MN がともに共存気付アドレスを用いる場合

図 8 に MN と CN の通信手順を示す．HA-MN は CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットを MN-CoA へトンネルする（図 8 (1))．ここで，MN-CoA は MNW のアドレスプレフィックスを持つアドレスであり，かつ MR が共存気付アドレスを使用することから，さらに HA-MN は 3.1 節の経路 1 を適用し，MN-CoA 宛てのパケットを MR-CoA へトンネルする（図 8 (2))．MR は MR-CoA へトンネルされたパケットを受信し，内部の MN-CoA 宛てのパケットを取り出し，MN に転送する（図 8 (3))．MN は MN-CoA 宛てのパケットを受信し，内部の MN-HoA 宛てのパケットを受け取る（図 8 (4))．

MN が送信する CN 宛てのパケットは，逆方向トンネルを用いる場合，MN で HA-MN へトンネルされ（図 8 (5))，さらに MR で HA-MN へトンネルされる（図 8 (6))．HA-MN はこれら 2 つのトンネルを解除し（図 8 (7))，内部の CN 宛てのパケットを転送する．逆方向トンネルを用いない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

3.2 トンネル削減方式

表 1 に示すように，3.1 節の経路削減方式を用いた場合でも，MN と CN の通信において多重トンネルが発生する．この多重トンネルを削減する方式を以下に提案する．

MR が FA 気付アドレスを利用する場合，MR は FA-MR を経由して HA-MN に送信する MR 転送登録メッセージに，FA 気付アドレスを使用して MNW に接続しかつその HA-MN に属するすべての MN の MN-HoA のリストを新たに付加する．この MR 転送登録メッセージの送信は，3.1 節で述べた場合に加え，FA 気付アドレスを使用する MN が MNW に接続または離脱し，上記のリストに変更が生じた場合に行われる．

表 1 トンネルのエンドポイント（経路削減方式）
Table 1 Endpoint of tunnel (route suppression).

CoA の種類		トンネルのエンドポイント		
MR	MN	1 番目	2 番目	3 番目
FA-CoA	FA-CoA	MR-CoA	MN-CoA*	なし
FA-CoA	Co-CoA	MR-CoA	MR-HoA*	MN-CoA
Co-CoA	FA-CoA	MR-CoA	MN-CoA*	なし
Co-CoA	Co-CoA	MR-CoA	MN-CoA	なし

*トンネル削減方式において削減対象となるトンネル

表 2 トンネルのエンドポイント（トンネル削減方式）
Table 2 Endpoint of tunnel (tunnel suppression).

CoA の種類		トンネルのエンドポイント		
MR	MN	1 番目	2 番目	3 番目
FA-CoA	FA-CoA	MR-CoA	なし	なし
FA-CoA	Co-CoA	MR-CoA	MN-CoA	なし
Co-CoA	FA-CoA	MR-CoA	なし	なし
Co-CoA	Co-CoA	MR-CoA	MN-CoA	なし

FA-MR は MR 転送登録メッセージを中継する際，上記の MN-HoA のリストならびに MNW のアドレスプレフィックスを参照し，リストに該当する MN-HoA ならびに MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレス宛てのパケットを MR-HoA へ転送する経路を生成する（経路 2）．これにより，MN が FA 気付アドレスを用いる場合，HA-MN が MN-CoA（=MR-HoA）へのトンネル（図 5 (1)）を削減しても，FA-MR は MN-HoA 宛てのパケットを MR-HoA へ転送できる．同様に，MN が共存気付アドレスを用いる場合，HA-MN が MR-HoA へのトンネル（図 6 (2)）を削減しても，MN-CoA が MNW のアドレスプレフィックスに含まれることから，FA-MR は MN-CoA 宛てのパケットを MR-HoA へ転送できる．

また，MR が共存気付アドレス，MN が FA 気付アドレスを用いる場合，HA-MN が MN-CoA（=MR-HoA）へのトンネル（図 7 (1)）を削減しても，MR は FA-MN であることから，MN-HoA 宛てのパケットの MN へ転送することが可能である（2.1 節参照）．一方，MR ならびに MN がともに共存気付アドレスを用いる場合，MR，MN はそれぞれ MR-CoA ならびに MN-CoA へトンネルされたパケットを受信する必要があるため，削減可能なトンネルはない．したがって，本方式を適用することで**表 2** のようにトンネルが削減される．

以下，MR と MN のそれぞれが用いる気付アドレスに応じて場合を分け，各場合のトンネル削減方式を詳細に示す．なお，すでに外部リンクに接続する MR は，HA-MR に登録要求メッセージを，HA-MN に MR 転送登録メッセージをそれぞれ送信しており，MNW に接続する MN も HA-MN に登録要求メッセージを送信しているものとする．

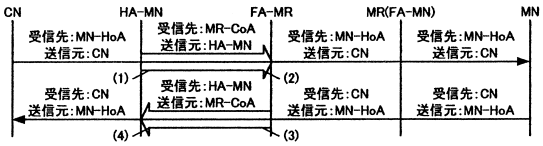

図 9 トンネル削減方式：MR と MN がともに FA 気付アドレスを用いる場合
Fig. 9 Tunnel suppression: MR and MN use FA CoA.

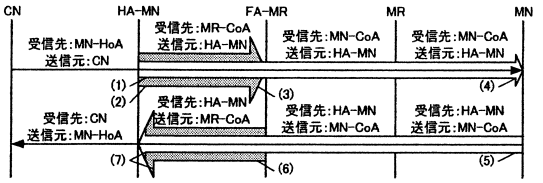

図 10 トンネル削減方式：MR が FA 気付アドレス，MN が共存気付アドレスを用いる場合
Fig. 10 Tunnel suppression: MR uses FA CoA, MN uses co-located CoA.

3.2.1 MR と MN がともに FA 気付アドレスを用いる場合

図 9 に MN と CN の通信手順を示す．HA-MN は CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットを MR-CoA へトンネルする（図 9 (1)）．FA-MR は MR-CoA 宛てのパケットを受信すると，内部の MN-HoA 宛てのパケットに 3.2 節の経路 2 を適用し，MR-HoA に転送する（図 9 (2)）．次いで，MR は MN-HoA 宛てのパケットを MN に転送する．

MN が送信する CN 宛てのパケットは，逆方向トンネルを用いる場合，FA-MR で HA-MN にトンネルされる（図 9 (3)）．HA-MN はこのトンネルを解除し（図 9 (4)），内部の CN 宛てのパケットを CN へ転送する．逆方向トンネルを用いない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

3.2.2 MR が FA 気付アドレス，MN が共存気付アドレスを用いる場合

図 10 に MN と CN の通信手順を示す．HA-MN は CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットを MN-CoA へトンネルし（図 10 (1)），さらに MR-CoA へトンネルする（図 10 (2)）．FA-MR は MR-CoA 宛てのパケットを受信すると，内部の MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレスである MN-CoA 宛てのパケットに 3.2 節の経路 2 を適用し，MR-HoA に転送する（図 10 (3)）．次いで，MR は MN-CoA 宛てのパケットを MN に転送する．最後に，MN は MN-CoA 宛てのパケットを受信し，内部の MN-HoA 宛てのパ

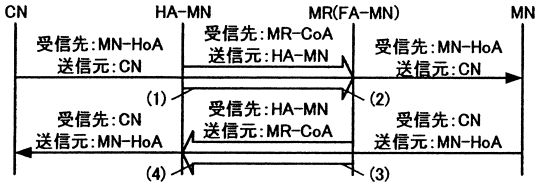

図 11 トンネル削減方式：MR が共存気付アドレス，MN が FA 気付アドレスを用いる場合
Fig. 11 Tunnel suppression: MR uses co-located CoA, MN uses FA CoA.

ケットを受け取る（図 10 (4)）．

MN が送信する CN 宛てのパケットは，逆方向トンネルを用いる場合，MN で HA-MN へトンネルされ（図 10 (5)），さらに FA-MR で HA-MN へトンネルされる（図 10 (6)）．HA-MN はこれら 2 つのトンネルを解除し（図 10 (7)），内部の CN 宛てのパケットを CN へ転送する．逆方向トンネルを用いない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

3.2.3 MR が共存気付アドレス，MN が FA 気付アドレスを用いる場合

図 11 に MN と CN の通信手順を示す．HA-MN は CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットを MR-CoA へトンネルする（図 11 (1)）．MR は MR-CoA 宛てのパケットを受信し，内部の MN-HoA 宛てのパケットを取り出して（図 11 (2)），MN に転送する．

MN が送信する CN 宛てのパケットは，逆方向トンネルを用いる場合，MR で HA-MN にトンネルされる（図 11 (3)）．HA-MN はこのトンネルを解除し（図 11 (4)），内部の CN 宛てのパケットを CN に転送する．逆方向トンネルを用いない場合，MN が送信するパケットはそのまま CN へ到達する．

3.2.4 MR と MN がともに共存気付アドレスを用いる場合

3.2 節で述べたとおり，削減可能なトンネルが存在しないため，3.1.4 項と同じ通信手順で MN と CN の通信を行う．

3.3 MNW アドレスプレフィックスオプション

従来の Mobile IP では，MR は HA-MR に対して MR-HoA と MR-CoA のみを登録する．したがって，2.2 節で述べたように，HA-MR が MR-HoA 宛てのパケットだけでなく，MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレス宛てのパケットを MR-CoA へトンネルするためには，HA-MR が MNW のアドレスプレフィックスを知る必要がある．このため，以下の方法が考えられている．

(1) 運用者が HA-MR に MNW のアドレスプレフィックスを登録する．

(2) MR においてルーティングプロトコルを動作させ，HA-MR が MR からの経路情報を取得することで MNW のアドレスプレフィックスを検出する[16]．

(3) MR が Mobile IP の登録要求メッセージに MNW のアドレスプレフィックスを含めて HA-MR に送信する[17]．

(1)，(2) の方法は，Mobile IP の登録要求メッセージに変更を施す必要はない．しかしながら，(1) は MNW に構成変更が発生した場合，HA-MR の設定を変更する必要がある．また，(2) は，外部リンクに接続している MR と HA-MR の間でルーティングプロトコルのメッセージを定期的に交換するため，ネットワークに負荷が増大する．

そこで本方式では，(3) の方式を採用し，登録要求メッセージに MNW アドレスプレフィックスオプションを新たに追加することで，MR が HA-MR に対して MNW のアドレスプレフィックスを通知する（**図 12** の網掛け部分）．MNW アドレスプレフィックスオプションを含む登録要求メッセージを MR から受信した HA-MR は，MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレス宛てのパケットを MR-CoA へトンネルする．

この登録要求メッセージは，従来の Mobile IP [1] と同じく，MR が外部リンクに接続した場合ならびに前回送信した登録要求メッセージの有効時間が切れる前などに MR から HA-MR へ送信される．

登録要求メッセージの送信元アドレスならびに受信先アドレスは，MR が FA 気付アドレスを用いる場合それぞれ MR-HoA，FA-MR となり，MR が共存気付アドレスを用いる場合にはそれぞれ MR-CoA，HA-MR

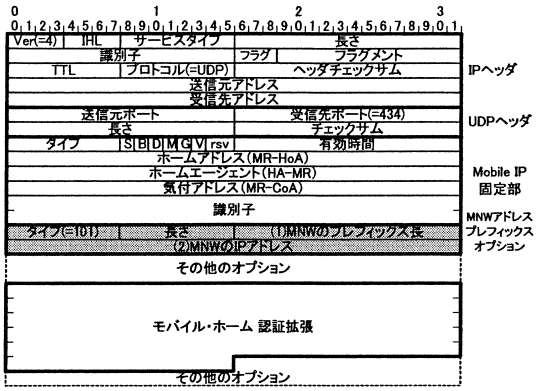

図 12 登録要求メッセージのフォーマット
Fig. 12 Format of registration request message.

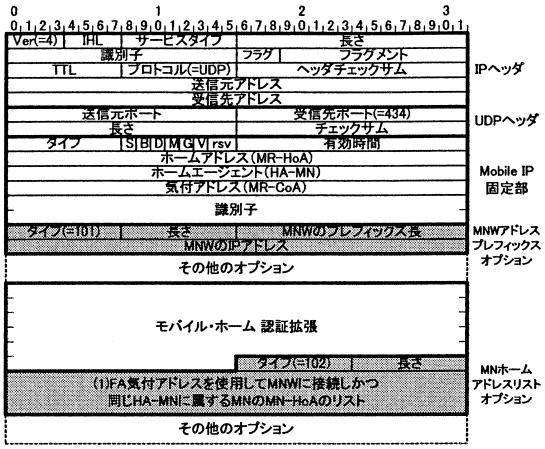

図 13 MR 転送登録メッセージのフォーマット
Fig. 13 Format of mobile router forwarding registration message.

となる．また，Mobile IP 固定部で入力されるホームエージェントは HA-MR となる．MNW アドレスプレフィックスオプションには，MNW のプレフィックス長（図 12 (1)）と MNW の IP アドレス（図 12 (2)）が入力される．

3.4 MR 転送登録メッセージ

MR 転送登録メッセージのフォーマットは Mobile IP の登録要求メッセージを基にし，3.1 節で述べたように，HA-MN に対して MR-HoA，MR-CoA を通知するとともに，3.3 節の MNW アドレスプレフィックスオプションを付加することで（**図 13** の上の網掛け部分），MNW のアドレスプレフィックスも通知する．また，3.1 節で述べたように，MR が FA 気付アドレスを用いる場合，MR 転送登録メッセージは FA-MR を中継して HA-MN に送信するため，その送信元アドレスならびに受信先アドレスは MR-HoA，FA-MR となる．MR が共存気付アドレスを用いる場合，その送信元アドレスならびに受信先アドレスはそれぞれ MR-CoA，HA-MN となり，直接 HA-MN に送信される．また，Mobile IP 固定部に入力されるホームエージェントは HA-MN となる．

さらに，3.2 節で述べたように，トンネル削減方式を適用する場合において，MR が FA 気付アドレスを利用する際には，FA 気付アドレスを使用して MNW に接続しかつ同じ HA-MN に属する MN の MN-HoA のリストを FA-MR に対して通知する．このため，MR 転送登録メッセージに MN ホームアドレスリストオプションを新たに追加する（図 13 の下の網掛け部分）．MN ホームアドレスリストオプションには，上記の MN-HoA のリストが入力される（図 13 (1)）．

4. 実装概要

提案方式を実証するためのシステムを，4.1 節に示す方針に従って実装した．

4.1 実装方針

提案方式を Dynamics HUT Mobile IP [18] を利用して，Redhat Linux 7.1（Linux カーネル 2.4.2）上に実装した．Dynamics HUT Mobile IP は，カーネルに特別なパッチを必要とせず，ユーザ空間のデーモンプロセスからカーネル本来のネットワーキング機能を利用して Mobile IPv4 の機能を実現している．デーモンプロセスは，MN の機能を実現する mnd，HA-MN の機能を実現する had，FA-MN の機能を実現する fad から構成される．以下に実装方針を述べる．

(1) 提案方式に基づいて実装した．
(2) HA-MR ならびに HA-MN は，had を改造して実装した（4.2 節で詳述）．
(3) MR はそれ自体が MN の機能を持つとともに，MNW に接続する MN に対して FA-MN の機能を提供するため，mnd ならびに fad を改造して実装した（4.3 節，4.4 節で詳述）．
(4) FA-MR は fad を改造して実装した（4.5 節で詳述）．
(5) MN は MNW を持たない MR として扱えるため，MR に改造した mnd を利用した．

4.2 ホームエージェントの実装

3.3 節で述べたように，HA-MR が MR から登録要求メッセージを受信した場合，MNW アドレスプレフィックスオプションに入力された MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレス宛てのパケットを MR-CoA へトンネルする経路を作成するように had を改造した．

また，3.1 節で述べたように，HA-MN が MR から MR 転送登録メッセージを受信した場合，MR-HoA ならびに MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレス宛てのパケットを，MR-CoA へトンネルする経路（3.1 節の経路 1）を作成するように had を改造した．

4.3 モバイルルータの実装

以下に，MR を実装するために mnd に施した変更点を述べる．

- 3.3 節で述べた登録要求メッセージの MNW アドレスプレフィックスオプションを新たに追加実装した．
- 3.4 節で述べた MR 転送登録メッセージを新たに追加実装した．

- MR が FA の存在するネットワークに接続するため，FA 気付アドレスを利用可能とした．
- 2.1.1 項で述べたように，共存気付アドレスの利用を可能とすることで，MR が既存の携帯電話や PHS など，FA の存在しないネットワークにも接続可能とした．
- 入力フィルタの存在するネットワークでも通信可能とするため，逆方向トンネルを実装した．
- MR が外部リンクとの接続に利用する通信インタフェース（たとえば，無線 LAN，携帯電話，PHS など）を複数持つ場合，それらの通信インタフェースを切り替えて通信可能とするため，任意の通信インタフェースから取得した MR-CoA を HA-MR に登録するように改造した．これにより，単一の通信インタフェースにおけるアドレスの変化だけでなく，複数の通信インタフェースを切り替えることによるアドレスの変化に対しても，MNW にネットワーク単位の移動性を提供可能とした．

また，各通信インタフェースの通信エリア，通信帯域，通信コストなどを比較して，通信に利用する通信インタフェースを自動的に選択し，mnd にその通信インタフェースに切り替えるよう通知するソフトウェアを新たに MR に実装した．

4.4 経路削減方式の実装

3.1 節で述べたように，MR が MNW に接続する MN の MN-HoA ならびに HA-MN のアドレスを取得するため，以下の実装を行った．

- MN が FA 気付アドレスを使用する場合のため，FA-MN（MR）が MN の HA-MN に対する登録要求メッセージを中継する際に，上記のアドレスを取得するように fad を改造した．
- MN が共存気付アドレスを使用する場合のため，MR の MNW 側の通信インタフェースにおいて libpcap ライブラリ[19] を用いたパケットキャプチャを行い，キャプチャした MN の登録要求メッセージから上記のアドレスを取得するソフトウェアを新たに MR に実装した．

4.5 トンネル削減方式の実装

3.2 節で述べた経路 2 を生成するため，FA-MR として使用する fad に以下の改造を行った．

- FA-MR が MR の送信した MR 転送登録メッセージを HA-MR に中継する際，MNW アドレスプレフィックスオプションを参照し，MNW のアドレスプレフィックスに含まれるアドレス宛てのパケットを MR-HoA へ転送する経路を生成するように改造した．
- MR 転送登録メッセージに MN ホームアドレスリストオプションが付加されている場合，それに含まれるすべての MN-HoA 宛てのパケットを MR-HoA へ転送する経路を作成するように改造した．

5. 性能評価

5.1 性能評価環境

提案方式の有効性を示すため，**図 14** に示す性能評価環境を用意した．HA-MR，HA-MN，MN，MR には PC（Pentium III 800 MHz，128 MByte）を使用し，これらの PC とルータならびにレイヤ 2 スイッチを Ethernet（10Base T，半二重モード）で接続した．本環境において，(A) 提案方式を適用しない，(B) 経路削減方式のみ実施，(C) 経路削減方式およびトンネル削減方式を実施の各場合について，Netperf[20] を使用して MN と CN 間の TCP のスループットとメッセージ遅延を測定した．スループットは CN から MN へ連続的にメッセージを送信した場合の単位時間あたりの送信量を示す．また，メッセージ遅延は CN と MN 間でメッセージを交互に送受信し，CN が MN へメッセージを送信してから，MN でメッセージが折り返され，CN でメッセージが受信されるまでの時間の平均値を示す．各測定における 1 回の測定時間は 180[s] で，同じの測定を 3 回行い，その平均値を求めた．

また，各測定においてメッセージサイズを 10, 50, 100, 200, 500, 1000, MSS（Maximum Segment Size），MSS+1，2,500，5,000，10,000[byte] と変化させた．なお，(A) ならびに (B) の MSS は，IP ヘッダが 3 つ付加されるため，1,408[byte]（$= 1,500$（MTU（Maximum Transmission Unit））-20（IP ヘッダ）$\times 3 - 32$（TCP ヘッダ））となる．また，(C) の MSS は，1,428[byte]（$= 1,500$（MTU）-20（IP

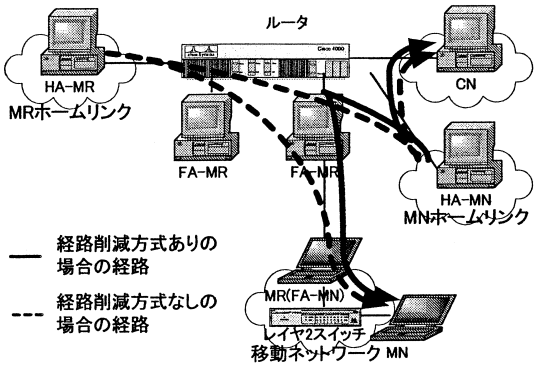

図 14 性能評価環境
Fig. 14 Performance evaluation environment.

ヘッダ）×2−32（TCP ヘッダ））となる．TCP ヘッダ（20[byte]）にはタイムスタンプオプション（10[byte]）と SACK（Selective Acknowledgement）オプション（2[byte]）が付加されている．トンネル方式として IP in IP カプセル化[7] を使用した．

5.2 性能評価結果

本来，MR と MN のそれぞれが用いる気付アドレスのすべての組合せについての測定結果を示すべきであるが，結果にほとんど差が生じなかったため，ここでは MR ならびに MN がともに FA 気付アドレスを用いた場合の結果についてのみ示す．

測定結果を**図 15**，**図 16** に示す．図 15 は各測定におけるスループットとメッセージサイズの関係を示す．経路削減方式により，HA-MR を経由する通信経路が削減されるため，MN と CN の間の伝送遅延が短縮し，同じ時間でより多くのパケットを送信できるようになる．このため，本測定では（B）は（A）に比べてスループットが向上しており，特にメッセージサイズが 2,500，5,000，10,000[byte] の場合，(A) に対して平均 13%向上した．

さらに，(C) ではトンネル削減方式により，HA-MN において MN-CoA へのトンネルが削減されるため，1 パケットあたり IP ヘッダのサイズ 20[byte] が余分にメッセージとして送信できる．したがって，(C) は（B）よりも少ないパケット数で，同じサイズのメッセージが送信できる．このため，本測定では（C）は（B）よりもさらにスループットが向上しており，特にメッセージサイズが 2,500，5,000，10,000[byte] の場合，(A) に対して平均 17%向上した．

また，各方式においてメッセージサイズが MSS + 1[byte] となった場合，メッセージが TCP によって複数のセグメントに分割され，データ部が 1[byte] のパケットが発生するため，スループットがいったん低下している．

図 16 は各測定におけるメッセージ遅延とメッセージサイズの関係を示す．(B) と (C) はともに HA-MR を経由する通信経路が削減されるため，測定を行ったすべてのメッセージサイズにおいて，(A) に比べ平均 25%程度メッセージ遅延が短縮されている．一方，本環境は Ethernet を用いた比較的広帯域かつ低遅延なネットワークであるため，(B) と (C) で大きな変化は生じていない．

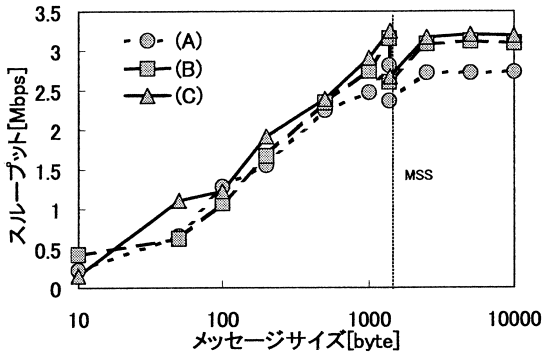

図 15 スループット
Fig. 15 Throughput.

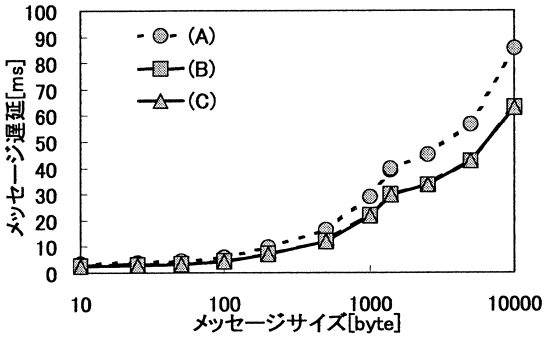

図 16 メッセージ遅延
Fig. 16 Message delay.

5.3 考　　察

5.2 節より，本測定環境のような比較的広帯域かつ低遅延のネットワークにおいても，提案方式を適用することにより，ネットワークの利用効率が向上し，CN と MNW に接続する MN の TCP のスループットならびにメッセージ遅延の性能が向上することが示された．まず，経路削減方式を適用することで，提案方式を適用しない場合に比べ，スループットとメッセージ遅延の性能が向上した．実際の環境では HA-MN と HA-MR の通信経路が本測定環境よりも大きくなる場合が想定され，経路削減方式によって削減される通信経路が大きくなることから，その効果もより高くなると考えられる．また，トンネル削減方式を適用することで，経路削減方式のみを適用した場合に比べ，TCP のスループットがより向上した．一方，本測定環境において，トンネル削減方式のメッセージ遅延に対する改善効果が低かったが，HA-MN と MR の間に低速なリンクが存在する場合，IP ヘッダを伝送するのに必要な時間が増大するため，IP ヘッダを削減することよるメッセージ遅延の改善効果がより高くなると考えられる．また，MR において携帯電話のようなパケット単位で課金される通信インタフェースを使用する場合，削減されたトンネルの分だけヘッダが短くなることで，結果的にパケットの数が減少するため，経済的にも効果がある．

次に，本方式のスケーラビリティについて考察する．MN が MNW に接続した場合，従来の Mobile IP と同様，HA-MN に登録要求メッセージを送信する．また，MR が外部リンクに接続した場合，MN と同様に HA-MR へ登録要求メッセージを送信するのに加え，MNW に接続するすべての MN の HA-MN に対して MR 転送登録メッセージを送信する．このように本方式では，MR 転送登録メッセージを追加しているため，従来方式に比べ，MR や MN の移動時におけるオーバヘッドが大きくなる．特に，MNW に多くの MN が接続する場合や MR が頻繁に移動する場合，送信される MR 転送登録メッセージの数が増大するため，通常のトラヒックのみならず登録要求メッセージならび MR 転送登録メッセージ自体の送受信にも悪影響を与え，移動や通信が円滑に行えないという問題が懸念される．そこで，送信される MR 転送登録メッセージの数を軽減するため，以下の方法が考えられる．

- MN で使用されるアプリケーションによっては，たとえば WEB ページの閲覧など，遅延や通信帯域に対して要求条件が比較的低く，必ずしも冗長経路やトンネルの削減を必要としない場合が想定される．そこで，このような MN は MR に対して MR 転送登録メッセージの送信を行わないよう通知する．
- MR の外部リンクの通信帯域と，発生する MR 転送登録メッセージのトラヒック量を比較し，通信帯域が不足する場合には，MR 転送登録メッセージの送信を抑制する．

また，トンネル削減方式において，FA 気付アドレスを用いる MN が MNW へ接続または離脱した場合，3.2 節で述べたように，MR は MR 転送登録メッセージの MN ホームアドレスリストオプションを用いて変更された MN-HoA のリストを FA-MR に通知するが，現在の実装では MN-HoA のリストを変更分だけでなく，変更されていない部分も含めて通知している．したがって，この MN-HoA のリストの通知にオーバヘッドが生じるという問題がある．特に，MNW に多くの MN が接続し，MN-HoA のリストが増大した場合，このオーバヘッドによる通信性能の劣化が懸念される．このため，MR が MN-HoA のリストの差分だけを FA-MR に通知することで，オーバヘッドを軽減する方法が考えられる．また，MNW に多くの MN が接続する場合を考慮し，MN-HoA のリストに含まれるアドレス数自体を削減するため，上述したように MN で使用されるアプリケーションの要求条件などからトンネル削減方式を必要とする MN のみリストに含める方法も有効と考えられる．

なお，別の実験において MR を頻繁に移動させたが，本性能評価環境では MN が 1 つであったため，MR 転送登録メッセージのトラヒックによる影響はほとんど見られなかった．一方，より多くの MN が MNW に接続する場合の影響については，シミュレーションなどを通じた評価が必要と考える．

6. 提案方式の IPv6 への適用

6.1 提案方式を IPv6 に適用した場合の通信

本章では，提案方式を IPv6 に適用することを検討する．Mobile IPv6 では FA が存在せず，共存気付アドレスのみを想定しているため，提案方式における MR ならびに MN がともに共存気付アドレスを利用する場合が適用可能性の議論の基本となる．したがって，提案方式を IPv6 に適用した場合，経路削減方式ならびにトンネル削減方式における CN と MNW に接続する MN の通信は，それぞれ 3.1.4 項ならびに 3.2.4 項で示した手順と同じになる．以下に，提案方式を IPv6 に適用するために必要な Mobile IPv6 の変更点を示す．

- MR が HA-MR に MR-HoA，MR-CoA を登録するために送信する BU（Binding Update）メッセージに，MNW のアドレスプレフィックスを通知するためのオプションを追加する．
- 上記のオプションを追加した BU メッセージを，MR が HA-MN に MR-HoA，MR-CoA，MNW のアドレスプレフィックスを通知する MR 転送登録メッセージとして使用する．なお，FA が存在しないため，FA-MR に MNW に接続する MN の MN-HoA を通知する MN ホームアドレスオプションは不要となる．

MNW に接続する MN は HA-MN に対して BU メッセージを送信し，MN-HoA ならびに MN-CoA を登録する．また，MR は外部リンクに接続すると，BU メッセージを HA-MR に送信するとともに，MR 転送登録メッセージを HA-MN に送信する．これ以降の MN と CN の通信手順は以下のとおりとなる．

- 経路削減方式の場合，HA-MN は CN が送信する MN-HoA 宛てのパケットを MN-CoA へトンネルする（**図 17** (1)）．さらに，HA-MN は 3.1 節の経路 1 を適用し，MN-CoA 宛てのパケットを MR-CoA へトンネルする（図 17 (2)）．MR は MR-CoA へトンネルされたパケットを受信し，内部の MN-CoA 宛てのパケットを取り出し，MN に転送する（図 17 (3)）．MN は MN-CoA 宛てのパ

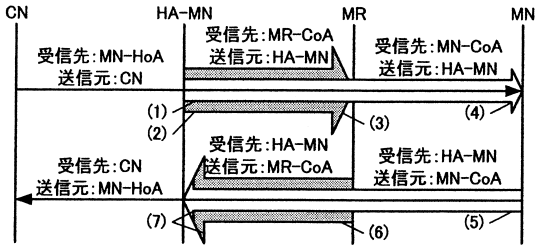

図 17 提案方式の IPv6 への適用
Fig. 17 Adaptation of proposed method to IPv6.

ケットを受信し，内部の MN-HoA 宛てのパケットを受け取る（図 17 (4)）．また，MN が送信する CN 宛てのパケットは，MN で HA-MN へトンネルされ（図 17 (5)），さらに MR で HA-MN へトンネルされる（図 17 (6)）．HA-MN はこれら 2 つのトンネルを解除し（図 17 (7)），内部の CN 宛てのパケットを転送する．

- トンネル削減方式の場合，3.2 節ならびに 3.2.4 項で述べたとおり，この気付アドレスの組合せでは削減可能なトンネルが存在しないため，上記と同じ通信を行う．

6.2 Mobile IPv6 の経路最適化の問題点

Mobile IPv6[2] では，以下に示す CN と MN 間の通信経路を最適化する方法が定められている．

- 外部リンクに接続した MN は BU メッセージを CN に送信し，MN-HoA ならびに MN-CoA の登録を行う．
- BU メッセージを受信した CN から MN-HoA に送信されるパケットの受信先アドレスは MN-CoA，送信元アドレスは CN となり，さらに MN-HoA が入力されたタイプ 2 の経路制御ヘッダを付加する．このパケットは，最適な経路で MN（MN-CoA）に到達し，受信先アドレスと経路制御ヘッダのアドレスが入れ替えられ，最終的な受信先アドレスが MN-HoA となる．
- BU メッセージを送信した MN から CN に送信されるパケットの受信先アドレスは CN，送信元アドレスは MN-CoA となり，さらに MN-HoA が入力されたホームアドレスオプション（以下，HAO: Home Address Option と呼ぶ）を付加する．このパケットは最適な経路で CN に到達し，HAO に入力された MN-HoA から送信されたパケットとして扱われる．

一方，1 章で述べたように，IETF において IPv6 に対応した MR の標準化が進められているが，上述の Mobile IPv6 の経路最適化の方法を適用しても，以下の理由により CN と MNW に接続する MN の通信経路を最適化できないことが問題となっている．

(1) CN から MN へ送信されるパケットが，最適な経路で MNW に接続する MN へ到達するには，MN-CoA だけでなく，MR-CoA を経由する必要がある．しかしながら，Mobile IPv6 で定義しているタイプ 2 の経路制御ヘッダは，1 つのアドレスしか入力できないことになっている．

(2) MN から CN へ送信されるパケットは，最適な経路で CN に到達する．しかしながら，そのパケットの送信元アドレスである MN-CoA は MNW のアドレスプレフィックスに含まれており，MR の接続する外部リンクのネットワークのアドレスとは異なるため，2.1.3 項で述べたとおり，このようなパケットは外部リンクへ送出するべきでない．

このため，次に示す RRH（Reverse Routing Header）方式[5] や ARO（Access Router Option）方式[6] などが提案されている．

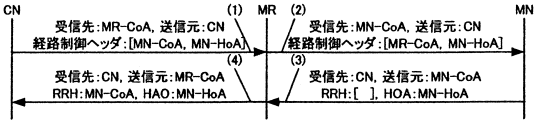

図 18 Reverse Routing Header 方式
Fig. 18 Reverse Routing Header.

6.3 Reverse Routing Header 方式

RRH 方式を用いた CN と MNW に接続する MN の通信手順を示す（**図 18** 参照）．

CN から MN に送信するパケットは，受信先アドレスが MR-CoA，送信元アドレスが CN となり，さらに複数のアドレスが入力可能なように拡張された経路制御ヘッダ（MN-CoA と MN-HoA が入力される）を付加する．この MR-CoA 宛てのパケットは，最適な経路で MR に到達する（図 18 (1)）．MR はパケットの受信先アドレスの MR-CoA と経路制御ヘッダの MN-CoA を入れ替え，MN-CoA へ転送する（図 18 (2)）．MN は MN-CoA 宛てのパケットを受信すると，受信先アドレスの MN-CoA と経路制御ヘッダの MN-HoA を入れ替え，MN-HoA 宛てのパケットとして受信する．また，MN から CN に送信するパケットは，受信先アドレスが CN，送信元アドレスが MN-CoA となり，さらに MN-HoA が入力された HAO と値が何も入力されていない RRH を付加する（図 18 (3)）．このパケットは MR において送信元アドレスの MN-CoA を MR-CoA に変換され，RRH に MN-CoA が入力される．次いで，このパケットは最適な経路で CN に到達

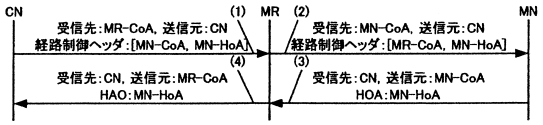

図 19 Access Router Opition 方式
Fig. 19 Access Router Option.

し，HAO に入力された MN-HoA から送信されたパケットとして扱われる（図 18 (4)）．なお，CN は送信元アドレスと RRH に含まれるアドレスから，MN-CoA と MR-CoA を知ることができるため，MR ならびに MN は BU メッセージを CN に送信する必要がない．

6.4 Access Router Option 方式

RRH 方式では，CN が MR において送信元アドレスの変換が行われていることを認識できないため，送信元アドレスの詐称に対する脆弱性があり，セキュリティに問題がある．そこで，ARO 方式では，新たに MR-HoA を入力した ARO（Access Router Option）を MN から CN への BU メッセージに付加し，CN に対して MN が接続している MNW の MR の MR-HoA を通知する．また，MR からは CN に対して MR-HoA，MR-CoA を通知する BU メッセージを送信する．CN はこれらの BU メッセージの MR-HoA が等しいことから，MR においてパケットの送信元アドレスが変換されていることを認識できる．以下に，ARO 方式を用いた CN と MNW に接続する MN の通信手順を示す（**図 19** 参照）．

CN から MN に送信するパケットは，6.3 節と同様の方法で，最適な経路で MN に到達する（図 19 (1)，(2)）．また，MN から CN に送信するパケットは，受信先アドレスが CN，送信元アドレスが MN-CoA であり，MN-HoA が入力された HAO が付加される（図 19 (3)）．このパケットは，MR において送信元アドレスの MN-CoA を MR-CoA に変換され，最適な経路で CN に到達し，HAO に入力された MN-HoA から送信されたパケットとして扱われる（図 19 (4)）．

6.5 提案方式との比較

提案方式の RRH 方式ならびに ARO 方式に対する長所を以下に示す．

- RRH 方式ならびに ARO 方式では，新たに RRH や ARO を追加しているため，MR，MN，CN，HA-MR，HA-MN の改造が必要となる．一方，提案方式は MR 転送登録メッセージの追加のみであるため，改造の範囲を MR と HA-MN に限定できる．
- BU メッセージや MR 転送登録メッセージなどの制御メッセージのトラヒック量について，RRH 方式の場合には従来の MR から HA-MR ならびに MN から HA-MN への BU メッセージだけでよいが，上述したように RRH はセキュリティに問題がある．ARO 方式の場合には，従来の MN から HA-MR ならびに MN から HA-MN への BU メッセージの送信に加え，MR から CN ならびに MN から CN への BU メッセージの送信が必要となる．一方，提案方式は MR から HA-MN への MR 転送登録メッセージが加わるのみであるため，ARO 方式を用いた場合に比べ，制御メッセージのトラヒック量を抑えられる．

また，提案方式の RRH 方式ならびに ARO 方式に対する短所を以下に示す．

- 提案方式では 2 つのトンネルを用いて CN と MN のパケットを転送しているため，ヘッダとして 80[byte]（= 40（IPv6 ヘッダ）×2）が付加される．したがって，パケットに経路制御ヘッダ（= 40[byte]（IPv6 アドレスを 2 つ入力した場合）），RRH（= 24[byte]（IPv6 アドレスを 1 つ入力した場合）），HAO（= 18[byte]）などが付加されるだけの RRH 方式や ARO 方式に比べ，パケットの転送におけるオーバヘッドが高くなる．
- 提案方式では CN と MN の間のパケットが HA-MN を経由するため，RRH 方式や ARO 方式と異なり，経路を完全に最適にすることはできない．

7. おわりに

本論文では，IETF が標準化を進めるモバイルルータを，IPv4 のネットワークで利活用することを想定し，そのための経路制御方式を新たに提案した．さらに，提案方式の実装と性能評価を行った．

モバイルルータは乗り物内部に構築される移動ネットワークに配置され，外部リンクとの接続を行うルータである．移動の結果，移動ネットワークが接続する外部リンクが変わっても，モバイルルータを介することにより，移動ネットワークに接続したノードは外部の通信相手のノードと継続的に通信できる．しかしながら，移動ネットワークに接続したモバイルノードでは，外部のノードとの通信において，モバイルルータとモバイルノードの 2 つのホームエージェントを経由する冗長な通信経路ならびに多重トンネルによるオーバヘッドが発生し，ネットワークの利用効率の向上が困難となる問題点があった．

そこでまず，上記問題点の解決の一環として，冗長な通信経路を削減する経路削減方式と，多重トンネル

を削減するトンネル削減方式からなるモバイルルータのための経路制御方式を提案した.(1) 経路削減方式では，モバイルルータが移動ネットワークに接続するモバイルノードのホームエージェントに対してモバイルルータの気付アドレスを通知することで，モバイルルータのホームエージェントを経由する冗長な通信経路を削減する.(2) トンネル削減方式では，モバイルノードのホームエージェントにおいて，モバイルノードのホームアドレス宛てのパケットをモバイルルータの気付アドレスへ直接トンネルすることで，多重トンネルを削減する．IPv4 のネットワークでの利活用を目的とする場合，気付アドレスが 2 種類あり，MR と MN のそれぞれに気付アドレスを与える必要があるため，結果として，4 通りの組合せが存在する．ここでは経路削減方式とトンネル削減方式のそれぞれに対し，可能な組合せすべての場合を網羅的に検討し，体系的に示した．

次いで，提案方式に基づいたシステムの実装を行い，その概要を述べるとともに，移動ネットワークに接続するモバイルノードにおける TCP のスループットとメッセージ遅延の観点から性能評価を行った．評価の結果，提案方式を用いることにより，ネットワークの利用効率が向上し，モバイルノードにおける TCP のスループットとメッセージ遅延の性能が向上することを確認した．また，提案方式の IPv6 への適用について検討し，NEMO ワーキンググループで検討されている他の方式に比べ，改造の範囲が狭く，制御メッセージのトラヒック量が抑えられることことを示した．

今後，実装したモバイルルータを車両などに適用し，携帯電話，PHS，無線 LAN などの各種通信インタフェースを利用した性能評価，シミュレーションによるスケーラビリティの検証，IPv6 に対応したモバイルルータの移動ネットワークに接続するモバイルノードの通信について検討を行っていく予定である．

謝辞 最後に，日頃ご指導いただく（株）KDDI 研究所浅見徹所長，和田執行役員に感謝する．また，本研究は通信・放送機構（TAO）平成 13 年度委託研究「ITS 高機能接続技術の研究開発」にて実施した．

参 考 文 献

1) Perkins, C., et al.: IP Mobility Support for IPv4, IETF RFC 3220 (2002).
2) Johnson, D., et al.: Mobility Support in IPv6, IETF draft-ietf-mobileip-ipv6-21 (2003).
3) Ernst, T., et al.: Network Mobility Support Goals and Requirements, IETF draft-ietf-nemo-requirements-01 (2003.5). http://www.nal.motlabs.com/nemo/
4) 磯村 学ほか：ネットワークの移動性を実現するモバイルルータとそのための経路制御方式の提案, 信学技報，Vol.102, No.60, IN2002-10 (2002).
5) Thubert, P., et al.: IPv6 Reverse Routing Header and its application to Mobile Networks, draft-thubert-nemo-reverse-routing-header-01 (2003.5). http://www.nal.motlabs.com/nemo/
6) Ng, C.W. et al.: Securing Nested Tunnels Optimization with Access Router Option, draft-ng-nemo-access-router-option-00 (2003.5). http://www.nal.motlabs.com/nemo/
7) Perkins, C., et al.: IP Encapsulation within IP, IETF RFC 2003 (1996).
8) Perkins, C., et al.: Minimal Encapsulation within IP, IETF RFC 2004 (1996).
9) Hanks, S., et al.: Generic Routing Encapsulation (GRE), IETF RFC 1701 (1994).
10) Droms, R., et al.: Dynamic Host Configuration Protocol, IETF RFC2131
11) Simpson, W., et al.: The Point-to-Point Protocol (PPP), IETF RFC1661 (1994).
12) McGregor, G., et al.: The PPP Internet Protocol Control Protocol (IPCP), IETF RFC 1332 (1992).
13) Perkins, C., et al.: Route Optimization in Mobile IP, IETF draft-ietf-mobileip-optim-11 (2001).
14) Ferguson, P., et al.: Network Ingress Filtering: Defeating Denial of Service Attacks which employ IP Source Address Spoofing, IETF RFC 2267 (1998).
15) Montenegro, G.: Reverse Tunneling for Mobile IP, revised, IETF RFC 3024 (2001).
16) 岡島一郎ほか：移動するネットワークをサポートするための Mobile IPv6 の拡張，信学技報, IN2001-15 (2001).
17) Ernst, T., et al.: Mobile Networks Support in Mobile IPv6, draft-ernst-mobileip-v6-network-03 (2003.5). http://www.nal.motlabs.com/nemo/
18) Dynamics HUT Mobile IP (2003.5). http://www.cs.hut.fi/Research/Dynamics/index.html
19) The Packet Capture library (2003.5). http://ee.lbl.gov/
20) Netperf (2003.5). http://www.netperf.org

(平成 15 年 5 月 27 日受付)
(平成 15 年 12 月 2 日採録)

磯村　学

昭和 47 年生．平成 7 年名古屋工業大学電気情報工学科卒業．平成 9 年名古屋工業大学大学院工学研究科電気情報工学専攻修士課程修了．同年，日本高速通信（株）（現 KDDI（株））入社．現在，KDDI 研究所ユビキタスネットワークグループ所属．この間，ネットワーク管理，ネットワークプロトコル，モバイルネットワーキング，ITS（高度道路交通システム）の研究開発に従事．電子情報通信学会平成 14 年度学術奨励賞を受賞．電子情報通信学会会員．

吉原　貴仁（正会員）

昭和 45 年生．平成 5 年東京工業大学工学部情報工学科卒業．平成 7 年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了．同年，国際電信電話（株）（現 KDDI（株））入社．現在，KDDI 研究所ユビキタスネットワークグループ所属．この間，ネットワーク管理，ネットワークアルゴリズム，分散処理の研究開発に従事．情報処理学会平成 9 年度全国大会優秀賞，電子情報通信学会平成 13 年度学術奨励賞を各受賞．電子情報通信学会会員．

堀内　浩規（正会員）

昭和 35 年生．昭和 58 年名古屋大学工学部電気工学科卒業．昭和 60 年名古屋大学大学院情報工学専攻修士課程修了．同年，国際電信電話（株）（現 KDDI（株））入社．現在，（株）KDDI 研究所ユビキタスネットワークグループリーダ．工学博士．この間，ネットワークアーキテクチャ，通信プロトコルの形式記述，ネットワーク管理，分散処理，ITS（高度道路交通システム）の研究開発に従事．電子情報通信学会平成 4 年度学術奨励賞，情報処理学会平成 8 年度ならびに平成 12 年度全国大会優秀賞を各受賞．電子情報通信学会会員．