

プライベートアドレスを使用するモバイルネットワーク間のローミング手順とその実装

井戸上 彰[†] 久保 健[†] 横田 英俊[†]

近年、広域セルラー網や無線 LAN など、さまざまなモバイルネットワークが構築・提供されている。これらのモバイルネットワークにおいて、移動端末の位置管理のためのキープロトコルとして Mobile IP の利用が進んでいる。Mobile IP は基本的にはグローバルアドレスを前提とした IP モビリティをサポートしているが、多数の移動端末へのアドレス割当ての必要性からプライベートアドレスのサポートに対するニーズも無視できない。さらに、無線アクセス手段の多様化にともない、ユーザが複数のモバイルネットワークに加入し、状況に応じてネットワーク間を移動する必要性も生じている。そこで本論文では、それぞれ異なる管理主体によって運営されているモバイルネットワークにおいて、移動端末に対して互いに独立なプライベートアドレスが割り当てられている場合を想定し、このような状況で移動端末のモバイルネットワーク間のローミングを実現する方式を提案する。提案方式では、各モバイルネットワーク内で Mobile IP ベースの位置管理が行われていることを前提として、GRA (Global Roaming Agent) と呼ばれる機能ノードを導入することにより、既存の Mobile IP 手順との互換性を保ったまま移動端末のローミングを実現している。提案方式の詳細手順とともに、プロトタイプシステムの実装結果についても示す。

Design and Implementation of Roaming Procedures between Mobile Networks Supporting Private Addresses

AKIRA IDOUE,[†] TAKESHI KUBO[†] and HIDETOSHI YOKOTA[†]

Recently, various mobile networks including public cellular systems and wireless local area networks have been provided for mobile Internet services, and Mobile IP has become a key protocol for location management for mobile nodes. Although Mobile IP is basically intended to support the mobility of global IP addresses, there are considerable needs for supporting private addresses for mobile nodes due to the rapid growth of mobile terminals and the lack of global addresses. In addition, for global communications, it is also required to realize mobility among several mobile networks operated by different administrative domains. In this paper, we propose an approach to support global roaming between different mobile networks where Mobile IP is used for location management of mobile nodes with private addresses. In order to realize global roaming between different mobile networks, we introduce Global Roaming Agent (GRA) for each mobile network, which can keep compatibility with standard Mobile IP procedures. This paper presents detailed roaming procedures using GRA. Implementation and performance evaluation results of our proposed method are also given.

1. はじめに

近年、第3世代携帯電話に代表される広域公衆セルラー網やホットスポット型の無線 LAN など、さまざまなモバイルネットワークが構築され、IP 通信サービスが提供されつつある。これらのモバイルネットワークにおいて、移動端末 (MN: Mobile Node) の位置管理と移動時のシームレスな通信をサポートするプロトコルとして Mobile IP¹⁾ の利用が進みつつある^{2),3)}。

Mobile IP は、基本的にはグローバルアドレスを前提とした IP アドレスのモビリティ (位置透過性) の実現を目的としている。しかし、グローバルアドレスの枯渇問題と多数の移動端末に対するアドレス割当ての必要性に加え、セキュリティや管理上の観点から通信キャリアなどのモバイルネットワークが閉じたプライベート網として構成される場合も多く、プライベートアドレスのサポートに対する要求も無視できない。さらに、無線アクセス手段の多様化にともない、プライベートアドレスを使用するモバイルネットワークが複数提供され、ユーザがこれらに同時に加入して状況に応じて使い分けることも想定される。このため、モ

[†] 株式会社 KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories, Inc.

モバイルネットワーク間の移動(ローミング)にも対応できることが望まれる。アドレス枯渇問題を解消し、シームレスな通信を実現するためには、IPv6 および Mobile IPv6⁴⁾の採用が根本的な解決になると考えられる。しかし、既存の IPv4 ベースの端末や通信インフラをすべて IPv6 に置換するためには、多くの時間とコストが必要になると考えられ、当面は IPv4 ベースの解決手段も考慮する必要がある。

そこで本論文では、異なる管理主体によって運営され、それぞれ独立なプライベートアドレスを使用している複数のモバイルネットワーク間のローミング方式を提案する^{5)~7)}。以下 2 章では、Mobile IP におけるプライベートアドレスサポートに関する関連技術とそれらに対する提案方式の位置付けを述べる。3 章では、想定するネットワーク構成と通信シナリオを示し、4 章で通信シナリオごとの詳細手順を述べる。5 章では、提案方式をプロトタイプシステムとして実装した結果と性能評価を示す。

2. 関連技術と提案方式の位置付け

Mobile IP においてプライベートアドレスをサポートする手段として、リバーストンネリング⁸⁾が存在する。IETF(Internet Engineering Task Force)の mobileip ワーキンググループでは、リバーストンネリングを用いた場合の移動端末に対するプライベートアドレスのサポートに関するシナリオとガイドラインに関する提案・議論も行われている⁹⁾。リバーストンネリングにより、ホームネットワーク上の HA(Home Agent)と外部ネットワーク上の FA(Foreign Agent)がグローバルインターネットを介して接続される場合においても、プライベートアドレスを持つ MN とホームネットワーク(プライベートアドレス網)上の通信相手(CN: Correspondent Node)との通信が可能となる。しかし、リバーストンネリングのみでは、ホームネットワーク以外の外部からの MN に対する着信はサポートできない。

一方、MN の移動先である外部ネットワークが複数のドメインにまたがる場合に適用可能な技術として Mobile IP 階層的登録(Regional Registration)¹⁰⁾が存在する。階層的登録では、GFA(Gateway Foreign Agent)が外部ネットワークのドメインごとの位置管理を提供し、HA への登録は基本的にドメイン間をまたがる移動の際のみに行えばよい。このため、位置登録にかかわるオーバーヘッドの削減やスケーラビリティの向上に有効である。しかし、階層的登録においては、MN には HA が存在するホームネット

ワークのアドレス空間からアドレスを割り当てる必要があり、本論文で対象としているような互いに独立なプライベートアドレスを使用するドメイン間の移動はサポートできない。

今後、モバイル環境においても VoIP(Voice over IP)や音声/ビデオ・ストリーミングなど、いわゆるピア・ツー・ピア型やプッシュ型の通信の実現が重要な課題となる。そこで筆者らは、リバーストンネリングと DNS(Domain Name System)手順および NAT(Network Address Translator)を組み合わせることにより、プライベートアドレスを持つ移動端末に対するグローバルインターネット上の端末からの着信を実現する方式を提案している^{11)~13)}。しかし、この方式は別のプライベートアドレス空間を持つネットワーク上の CN との通信は想定していない。

以上のような既存方式に対して、本論文の提案方式は、それぞれ独立なプライベートアドレス空間を持つ複数のモバイルネットワークの間で、MN が自由に移動(ローミング)可能とすることを目的としている。ここでは、各モバイルネットワーク内部で個別に Mobile IP ベースの位置管理が行われ、MN はこれらの複数のモバイルネットワーク(プライベート Mobile IP 網)に同時に加入している状況を想定する。このような状況において、MN が現在接続中のモバイルネットワークにかかわらず、他のモバイルネットワークやグローバルインターネット上の CN との間での発信・着信を実現するものである。

3. ネットワーク構成と通信シナリオ

3.1 ネットワーク構成

モバイルネットワーク間ローミングの対象とするネットワーク構成例を図 1 に示す。ここで、各モバ

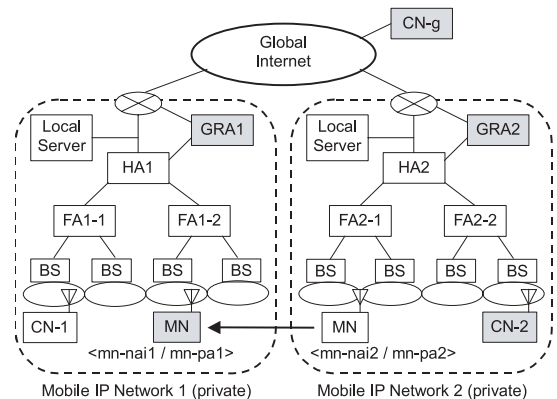


図 1 ネットワーク構成

Fig. 1 Network configuration.

イルネットワーク (Mobile IP 網) はそれぞれ異なる管理主体によって運営され、移動端末に対して互いに独立なプライベートアドレスを割り当てるものとする。各 Mobile IP 網では、それぞれ内部の HA および FA により MN の位置管理が行われている。このような状況において、図 1 に示すように、ある MN は Mobile IP 網 1 と Mobile IP 網 2 によって提供されるサービスに同時に加入しており、それぞれ異なる NAI (Network Access Identifier) (mn-nai1, mn-nai2) とプライベートアドレス (mn-pa1, mn-pa2) が割り当てられていると想定する。MN は、その現在位置や通信コスト、提供サービスなどの条件に応じて、接続先のモバイルネットワークを変更可能とする。なお、MN はモバイルネットワーク間を移動した際に、そのホームアドレス (プライベートアドレス) を変更するため、ネットワーク間ローミング時の TCP コネクションやセッションの維持はサポートしない。

3.2 通信シナリオ

図 1 に示したネットワークにおいて、下記のような通信シナリオを実現する。

(1) 他 Mobile IP 網からの着信

MN が Mobile IP 網 2 から Mobile IP 網 1 に移動した後、Mobile IP 網 2 に存在する通信相手ノード CN-2 (Mobile IP 網 2 に存在する別の移動端末に相当) から MN に対して発信する場合。この際 CN-2 は、Mobile IP 網 2 で割り当てられた MN のプライベートアドレス mn-pa2 を指定する。

(2) 他 Mobile IP 網への発信

MN が Mobile IP 網 2 から Mobile IP 網 1 に移動した後、MN から Mobile IP 網 2 に存在する通信相手ノード CN-2 に対して発信する場合。

(3) グローバルインターネットへの発信

Mobile IP 網 1 に接続中の MN から、グローバルインターネットを介してグローバルアドレスを持つ通信相手ノード CN-g 宛てに発信する場合。本シナリオはプライベート網から外部にアクセスする際に用いられる通常の NAT の場合と同様である。

(4) グローバルインターネットからの着信 (ケース A)

一般にグローバルアドレスを持つ外部の CN-g は、MN が現在いずれの Mobile IP 網に接続中であるかを認識できない。そこで CN-g は、MN が接続する可能性がある Mobile IP 網によって割り当てられた NAI のいずれか (図 1 の例では mn-nai1 または mn-nai2) を指定して着信を試みるものとする。本ケースでは、MN が Mobile IP 網 1 に接続している際に、CN-g から Mobile IP 網 1 で割り当てられた MN の NAI

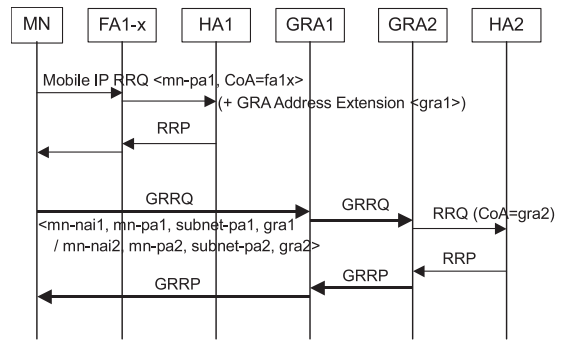


図 2 MN 登録手順

Fig. 2 MN registration procedure.

(mn-nai1) を指定して MN にアクセスする場合を想定する。

(5) グローバルインターネットからの着信 (ケース B)

前述のケース A に対して、MN が Mobile IP 網 1 に接続している際に、グローバルアドレスを持つ外部の CN-g が Mobile IP 網 2 で割り当てられた MN の NAI (mn-nai2) を指定してアクセスする場合を想定する。

3.3 グローバルローミングエージェント

3.2 節に示した通信シナリオを実現するため、各 Mobile IP 網ごとにグローバルローミングエージェント (GRA: Global Roaming Agent) を新たに導入する。GRA は、MN が現在接続中のネットワークを識別・管理し、必要に応じて、ネットワーク間でパケット転送を行う際の送信元/送信先プライベートアドレスの変換、DNS と連携した一時的なグローバルアドレスの割当て、グローバルアドレスとプライベートアドレスの変換、アドレス変換を実行するために必要なセッション情報の管理などの機能を実現する。各 GRA は、外部とのインタフェース用にグローバルアドレスを持ち、GRA どうしが連携して MN のローミングをサポートする。標準的な Mobile IP 手順との互換性を維持し、既存の HA や FA などに対する改修などの影響を最小限に抑えるため、GRA を HA や FA とは独立な機能ノードとして定義した。モバイルネットワーク間のローミングを必要としない移動端末に対しては、個々のネットワーク内部において通常の Mobile IP 手順を用いた位置管理/通信機能を提供可能である。

4. 詳細手順

本章では、3 章で示した通信シナリオのそれぞれについて GRA を用いた詳細な通信手順を示す。

4.1 登録手順

(1) Mobile IP 登録

図 1 の例において，MN が Mobile IP 網 1 に移動した直後に行う登録手順を図 2 に示す．MN は，最初に Mobile IP の RRQ (Registration Request)/RRP (Registration Reply) メッセージにより，Mobile IP 網 1 におけるホームアドレス (mn-pa1) および現在の CoA (Care-of Address : ここでは FA アドレス fa1x に相当) を HA1 に登録する．この際，RRQ に対して新たに定義する拡張パラメータとして，GRA Address Extension を付加する．本パラメータは，現在接続中のネットワークにおける GRA アドレス (図 2 の例では gra1) を含む．GRA Address Extension を受け取った HA は，MN が他 Mobile IP 網との通信を要求していることを認識し，後述するように，MN からの発信時にパケットを該当 GRA に転送するかどうかの判断に用いる．

(2) GRA 登録

Mobile IP 登録の後，MN は現在接続している Mobile IP 網 1 の GRA (GRA1) に対して，新たに定義する GRRQ (GRA Registration Request) メッセージにより登録を行う．GRRQ のパラメータとして，現在接続中の Mobile IP 網 1 および移動元である Mobile IP 網 2 において割り当てられた MN の NAI (mn-nai1, mn-nai2) とホームアドレス (mn-pa1, mn-pa2)，各ホームアドレスに対応するサブネットアドレス (subnet-pa1, subnet-pa2)，および移動先と移動元の Mobile IP 網の GRA アドレス (gra1, gra2) を含む．

GRA1 は，GRRQ を受信して処理した後，GRRQ を GRA2 に転送する．GRRQ を受信した GRA2 は，Mobile IP 網 2 の HA2 に対して，MN の CoA を GRA2 のアドレス (gra2) とした RRQ を送信し，Mobile IP 網 2 において MN 宛てに送信されたパケットをすべて GRA2 が引き取るように登録する．その後，GRA2 は GRRP (GRA Registration Reply) メッセージを GRA1 に返し，GRA1 が GRRP を MN に返すことによって登録を完了する．

4.2 他 Mobile IP 網からの着信

他 Mobile IP 網上の CN から MN に着信する場合の手順を図 3 に示す．本ケースでは，Mobile IP 網 2 に存在する CN-2 が，現在 Mobile IP 網 1 に接続中の MN に対して，Mobile IP 網 2 における MN のホームアドレス (mn-pa2) を指定してパケットを送信する．このパケットは，リバーストンネリングにより HA2 まで転送されるが，前述の登録手順により，HA2 における MN の CoA が GRA2 アドレス gra2 に設定されているため，HA2 から GRA2 に転送される．本パ

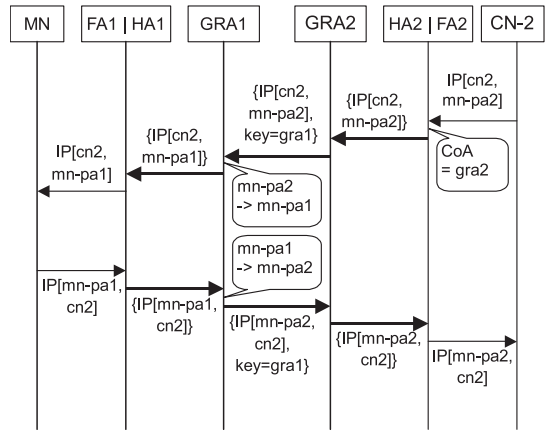


図 3 他 Mobile IP 網からの着信
Fig. 3 Incoming call from another mobile IP network.

ケットを受信した GRA2 は，先の登録手順により，現在 MN が GRA1 配下に存在することを認識しているため，パケットをさらに GRA1 に転送する．

GRA2 から MN 宛てパケットを受信した GRA1 は，その宛先アドレス mn-pa2 を Mobile IP 網 1 におけるホームアドレス mnp-pa1 に変換し (必要に応じてヘッダチェックサムの変換などを含む)，HA1 に転送する．その後，通常の Mobile IP 手順に従って，HA1 から MN までパケットが転送される．

ここで，GRA 間のパケット転送とアドレス変換処理をサポートするために，GRA 間でパケットを転送する際に GRE (Generic Routing Encapsulation) カプセル化¹⁴⁾を行い，GRE ヘッダの key フィールド¹⁵⁾に，MN のホームアドレス (プライベートアドレス) の変換を実行する GRA のアドレスを格納する．本シナリオの例の場合は，GRA1 アドレス gra1 を設定する．これにより，他の GRA からトンネリングされたパケットを受信した GRA は，その転送方向と key フィールドの値によって，ユーザパケットのアドレス変換の必要性を判断することができる．

MN が CN-2 に対する応答としてパケットを送信した場合，このパケットは HA1 までリバーストンネリングにより転送される．HA1 は，先の着信時のシーケンスにより，宛先の CN-2 が他網に存在していることを認識しているため，パケットを GRA1 に転送する．GRA1 は，GRA 間で転送されるユーザパケットの送受信アドレスに基づくセッション情報を管理しており，該当するセッション情報を検索してパケットの送信元アドレスを mn-pa1 から mn-pa2 に変換し，GRA2 に転送する．GRA2 はそのパケットを HA2 に転送し，HA2 から CN-2 まで通常の Mobile IP 手順により転

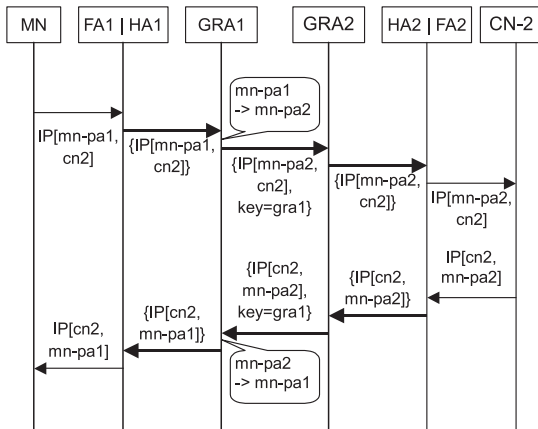


図4 他 Mobile IP 網への発信

Fig. 4 Outgoing call to another mobile IP network.

送される。

4.3 他 Mobile IP 網への発信

本ケースは、現在 Mobile IP 網 1 に接続中の MN が、Mobile IP 網 2 に存在する CN-2 に対してパケットを送信する場合に相当する(図4)。MN が送信するパケットは、HA1 までリバーストンネリングされるが、HA1 は、その宛先が HA1 の配下の網に存在する端末か、外部の端末かを判断する必要がある。しかし、各網において互いに独立なプライベートアドレスを使用しているため、宛先アドレスのサブネットアドレス(サブネットプレフィックス)が自身の管理するサブネットアドレスと一致するかどうかの比較だけでは、HA1 配下の網内の端末宛てに転送すべきかどうかを判断することができない。そこで、他網への発信を希望する MN は、Mobile IP の RRQ による登録時に、4.1 節で述べた GRA Address Extension を設定する。HA1 において、送信元の MN が GRA Address Extension を指定していた場合、宛先アドレスによらずに GRA1 に該当パケットを転送する。GRA1 は、先の GRRQ によって登録されている Mobile IP 網 2 のサブネットアドレス subnet-pa2 と宛先アドレス cn2 のマッチングにより、宛先が Mobile IP 網 2 であることを認識し、送信元アドレスを mn-pa1 から mn-pa2 に変換して GRA2 にパケットを転送する。その後 GRA2 から CN-2 には、HA2 経由で通常の Mobile IP 手順により転送される。CN-2 からの応答パケットは、HA2 から GRA2 に転送され、GRA2 からさらに GRA1 に転送される。その後、同様に GRA1 において宛先アドレスが mn-pa2 から mn-pa1 に変換され、MN まで配送される。

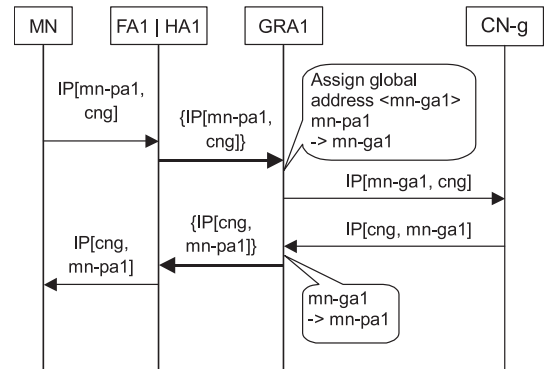


図5 グローバルインターネットへの発信

Fig. 5 Outgoing call to global Internet.

4.4 グローバルインターネットへの発信

MN からグローバルインターネット上の CN (CN-g) に対してパケットが送信された場合は、MN が現在接続中の Mobile IP 網の GRA によって外部に転送される。すなわち HA は、配下の MN が送信したパケットの宛先がグローバルアドレスの場合は、同一網上の GRA に転送することにより、MN から外部へのアクセスを実現する。図5に示すように、CN-g 宛てのパケットは HA1 から GRA1 に転送され、GRA1 は一時的なグローバルアドレス mn-ga1 を割り当てて送信元アドレスを mn-pa1 から mn-ga1 に変換し、CN-g まで送信する。CN-g からの応答パケットに関しては、GRA1 がセッション情報を参照して、宛先アドレスを mn-ga1 から mn-pa1 に変換し、HA1 経由で MN まで配信される。

4.5 グローバルインターネットからの着信

(ケース A)

本ケースでは、MN が Mobile IP 網 1 に存在する場合に、グローバルアドレスを持つ CN-g が Mobile IP 網 1 で割り当てられた MN の NAI (mn-na1) を指定した DNS Query により MN にアクセスする場合を想定する(図6)。GRA1 は DNS Query を受信すると、一時的なグローバルアドレス mn-ga1 を割り当て、mn-ga1 を含む DNS Answer を返す。CN-g が mn-ga1 を宛先とするパケットを送信すると、GRA1 がそのパケットを受信して宛先を mn-ga1 から mn-pa1 に変換し、HA1 に転送する。HA1 から MN までは通常の Mobile IP 手順により転送される。

4.6 グローバルインターネットからの着信

(ケース B)

本ケースでは、MN が Mobile IP 網 1 に存在する場合に、グローバルアドレスを持つ CN-g が Mobile IP 網 2 で割り当てられた MN の NAI (mn-na2) を指定

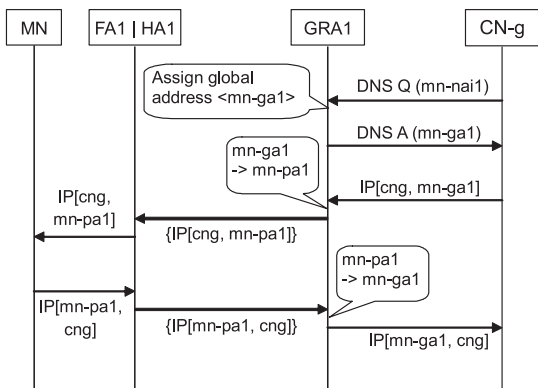


図6 グローバルインターネットからの着信(ケースA)
Fig. 6 Incoming call from global Internet (Case A).

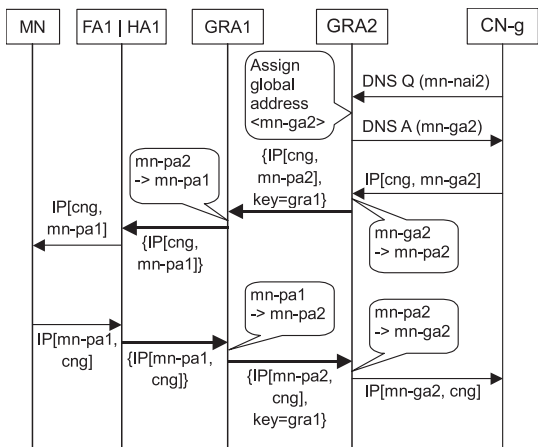


図7 グローバルインターネットからの着信(ケースB)
Fig. 7 Incoming call from global Internet (Case B).

して DNS Query を送信し、MN にアクセスする場合を想定する。この場合、図7に示すように、Mobile IP 網2の GRA2が DNS Query を受信し、一時的なグローバルアドレス mn-ga2を割り当てて DNS Answer を返す。CN-g から mn-ga2宛てに送信されたパケットは GRA2が受信し、宛先を mn-ga2から Mobile IP 網2における MN のホームアドレスである mn-pa2に変換する。GRA2は、先の登録手順により MN が現在 GRA1 配下に存在することを把握しているため、パケットをさらに GRA1 に転送する。GRA1では、MN の登録情報に基づき、宛先を mn-pa2から mn-pa1に変換して、HA1 経由でパケットを MN まで転送する。

MN から CN-g 宛ての応答パケットは、HA1 から GRA1 に渡される。GRA1は、mn-pa1と CN-g のアドレス cng に該当するセッション情報に基づいて、送信元アドレスを mn-pa1から mn-pa2に変換し、GRA2 に転送する。GRA2においても同様にセッション情

報を管理しており、送信元アドレスを mn-pa2 から mn-ga2に変換してパケットを CN-g 宛てに送信する。

以上のように、アドレス変換は、変換対象となるプライベートアドレスやグローバルアドレスを割り当てた側の GRA が実行する。これは、アドレス管理に一貫性を持たせるとともに、次に述べる GRA 間ハンドオフの実現を可能とするため、このような方針を採用している。

4.7 ライフタイムの管理と GRA 間ハンドオフ

提案方式においては、Mobile IP 登録、GRA 登録、セッション管理、および DNS キャッシュに関する4種類のライフタイムを設定・管理する必要がある。Mobile IP 登録ライフタイムは、Mobile IP 手順の RRQ / RRP メッセージによる FA および HA に対する登録ライフタイムであり、標準的な Mobile IP と同様である。GRA 登録ライフタイムは、GRRQ/GRRP メッセージによって行われる GRA に対する移動端末の登録ライフタイムである。ネットワーク間ローミングという目的から、一般に GRA 登録ライフタイムは Mobile IP 登録ライフタイムよりも大きな値を設定する。セッションライフタイムは、各 GRA において管理される移動端末の個々のセッションごとに設定され、そのセッションに該当する移動端末宛て、または移動端末発のパケットを検知すると更新(ライフタイムを延長)し、タイムアウトするとセッション情報を消去する。セッションライフタイムの初期値は、GRA 登録ライフタイムの残り時間よりも短い時間とする。また、MN に一時的なグローバルアドレスを割り当てると場合は、グローバルアドレスの有効期間は該当するセッションライフタイムと同一とする。最後に、グローバルインターネットからの着信をサポートするために、提案方式では DNS Query メッセージが つねに指定された NAI を管理する GRA に届く必要がある。そのため、DNS Answer では、途中の DNS サーバで結果がキャッシュされないように、ライフタイムを0として応答する。

以上のようなライフタイムの管理を考慮しつつ、グローバルインターネットからの着信などによって MN に一時的なグローバルアドレスが割り当てられている場合に、MN が別の Mobile IP 網に移動すること、すなわち GRA 間ハンドオフを実現することができる。GRA 間ハンドオフの例を図8に示す。最初に MN が Mobile IP 網2に存在し、グローバルインターネット上の CN-g からの着信によりグローバルアドレスを割り当てられて通信を開始する。本手順は、4.5節で示したものと同様である。その後 MN が、CN-g とのセッ

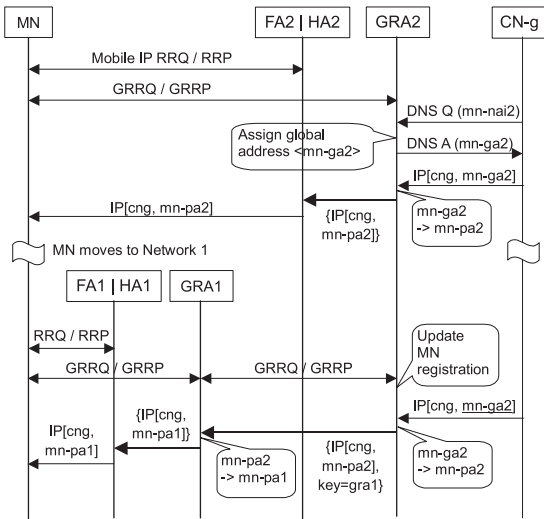


図8 グローバルアドレス使用中の GRA 間ハンドオフ
 Fig. 8 Inter-GRA handoff while global address is assigned.

ションライフタイムが有効な間に、Mobile IP 網 1 に移動したと仮定する。MN が GRA1 および GRA2 に登録を行った後、GRA2 は、セッションライフタイムすなわちグローバルアドレス mn-ga2 が有効な場合、CN-g から受信した mn-ga2 宛てのパケットの宛先を mn-pa2 に変換し、HA2 のかわりに GRA1 に転送する。GRA1 がこのパケットを受信すると、宛先アドレスを mn-pa1 に変換して、HA1 経由で MN に転送する。このように、GRA 間ハンドオフ後も CN-g は同一グローバルアドレス mn-ga2 によって MN 宛てにパケットを送信できる。

5. 実装と評価

5.1 実装概要

提案方式による Mobile IP 網間のローミング手順について、Rice 大学の Monarch プロジェクト¹⁶⁾によって開発された Mobile IP ソフトウェアをベースとしてプロトタイプシステムの実装を行った。図 9 に UNIX (FreeBSD 2.2.8) 上で実装した GRA のソフトウェア構成を示す。

GRA ソフトウェアは、grad と呼ぶデーモンプロセスと、カーネル内の関数およびデータ構造から構成される。デーモンプロセス grad は、GRRQ および GRRP メッセージを処理し、移動端末の登録エントリを管理する。また、各移動端末の登録ライフタイムやセッションライフタイムの管理も行う。さらに grad は、DNS Query を受信した際、DNS デーモンプロセスと協調して一時的なグローバルアドレスの割当て

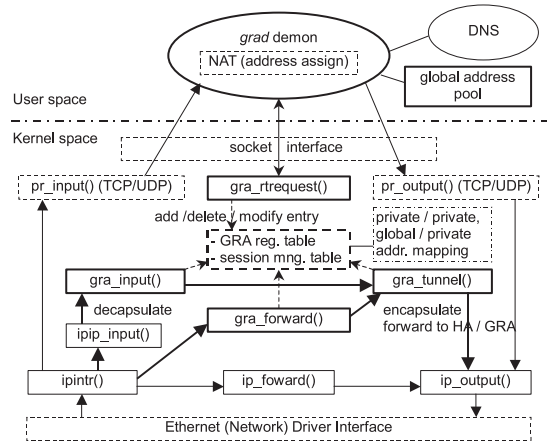


図9 GRA のソフトウェア構成
 Fig. 9 Software configuration of GRA.

を行う。一方、効率的なパケット転送をサポートするために必要なデータ構造や関数についてはカーネル空間内に実現した。カーネル内のデータとして、GRA 登録テーブル (GRA reg. table) およびセッション管理テーブル (session mng. table) を持つ。カーネル内の関数 gra_rtrequest() は、grad デーモンからの要求に応じて、GRA 登録テーブルやセッション管理テーブルの登録・更新を行う。本関数は、ソケットインタフェースを介して grad から呼ばれ、この GRA が存在する Mobile IP 網や別の Mobile IP 網で割り当てられた MN のプライベートアドレス、一時的なグローバルアドレス、および通信相手のアドレスなどの情報を登録・更新する。gra_input() は、他の GRA や HA から GRE カプセル化によって転送されたパケットを受信した際に呼ばれ、GRA 登録テーブルやセッション管理テーブルを参照して gra_tunnel() を呼び出す。gra_tunnel() は、これらのテーブルを参照しつつ、宛先または送信元のプライベートアドレス間の変換、またはグローバルアドレスとプライベートアドレスとの変換を行い、転送先の GRA や HA を決定して GRE カプセル化を行い、パケットを転送する。gra_forward() は、GRA が、グローバルインターネット上の通信相手から MN 宛てのパケットを受信した場合、すなわち MN 宛てのカプセル化されていないパケットを受信した際に呼ばれる。本関数は、GRA 登録テーブルおよびセッション管理テーブルを参照しつつ、宛先のグローバルアドレスを MN のプライベートアドレスに変換し、gra_tunnel() 関数を通してパケットを他の GRA や HA に転送する。

5.2 性能評価

実装したローミング手順、特にアドレス変換とパ

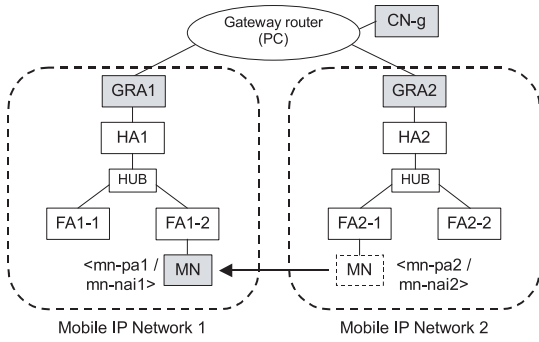


図 10 実験ネットワーク構成

Fig. 10 Experimental network configuration.

表 1 エンド・ツー・エンド性能測定結果

Table 1 End-to-end performance evaluation results.

測定項目	測定結果		
	GRA1 から MN (HA1 経由)	CN-g から MN (GRA1 経由)	CN-g から MN (GRA2 + GRA1 経由)
ping 応答時間 (msec) (最小 / 平均 / 最大)	1.207 /	2.349 /	3.596 /
	1.223 /	2.767 /	3.985 /
	1.269	3.154	4.400
ftp (put) スループット (Kbit/s)	877.4	815.2	792.8

ケット転送処理を中心とする GRA の性能評価のために、図 10 に示す実験ネットワークを構築した。GRA, HA, FA, MN, CN およびゲートウェイルータは、すべて Pentium III CPU (800 MHz), メモリ 128 Mbyte を搭載するパソコン上で実装し、すべてのノードは、10 Mbps のイーサネットリンクで接続した。性能評価として、エンド・ツー・エンドの ping 応答時間と ftp スループットを測定した。表 1 に測定結果を示す。ping 応答時間は、64 バイトの ping 要求/応答を 50 回行った際の最小/平均/最大値を示す。また、ftp スループットは、2 Mbyte のファイル転送を 10 回行った際の平均値を示す。表 1 において、CN-g から GRA1 経由の MN 宛での通信は、4.5 節で示したグローバルインターネットからの着信 (ケース A) に相当し、CN-g から GRA2 および GRA1 経由の MN 宛での通信は、4.6 節で述べたグローバルインターネットからの着信 (ケース B) の場合に相当する。前者の場合は、GRA1 が MN のために一時的なグローバルアドレスを割り当ててグローバル/プライベートアドレス変換を行い、後者の場合は、GRA2 がグローバルアドレスを割り当ててグローバル/プライベートアドレス変換を行うとともに、さらに GRA1 が MN のプライベートアドレス (ホームアドレス) 間の変換を行う。また、比較のために、GRA1 をローカルサーバと見立て、GRA1 から HA1 経由で MN 宛てに MN の Mobile IP 網 1 に

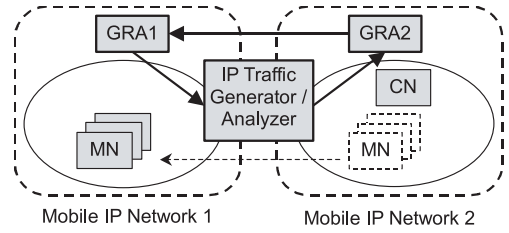


図 11 GRA 性能評価実験

Fig. 11 GRA performance evaluation experiment.

おけるプライベートアドレスを指定して通信した場合の結果も示している。グローバルインターネットからの着信 (ケース B) は、GRA1 や GRA2 によるアドレス変換のオーバーヘッドが最も大きいと予想される。しかし、ケース A の場合と比べても性能劣化はそれほど大きくなく、また、GRA1 から直接送信した場合と比較しても、応答遅延は若干大きくなるが、スループットの劣化はそれほど大きくないことが分かる。これは、GRA におけるユーザパケットの転送やアドレス変換処理をカーネル内のデータ構造とカーネル関数によって実現し、カーネル空間とユーザ空間の間の不必要なデータ転送を避けている効果によるものと考えられる。

GRA によるアドレス変換とパケット転送のスケラビリティをさらに評価するため、市販の IP トラフィック生成/性能解析ツール (IXIA 400) と 2 つの GRA を 100 Mbps のイーサネットで接続し、多数の MN が移動して通信を行っている状況を模擬した性能評価実験を行った (図 11)。実験では、複数の MN が Mobile IP 網 2 (GRA2 配下) から Mobile IP 網 1 (GRA1 配下) に移動し、Mobile IP 網 2 に存在する CN から各 MN 宛てに通信している状況 (4.2 節で示した他 Mobile IP 網からの着信の場合に相当) を想定して、トラフィック生成ツールから GRA2 にパケットを送信し、GRA1 から MN 宛てのパケットを受信した。移動中の MN 数、すなわち GRA への MN 登録エントリ数を変化させ、このうち同時に通信を行っている MN 数 (セッション数) を登録エントリ数の 20% または 50% として、256 バイトのパケットをロスなしで正常に受信できる最大トラフィックを転送スループットとした。図 12 にスループット測定結果と、それぞれの場合におけるパケットあたりの GRA の合計処理時間を示す。図 12 から、セッション数が登録エントリ数の 20% の場合、最大登録エントリ数 50,000 までほとんどスループットが劣化しておらず、処理時間も 24 μ 秒程度でほぼ一定していることが分かる。セッション数が 50% の場合は、登録エントリ数が 5,000 以上でスルー

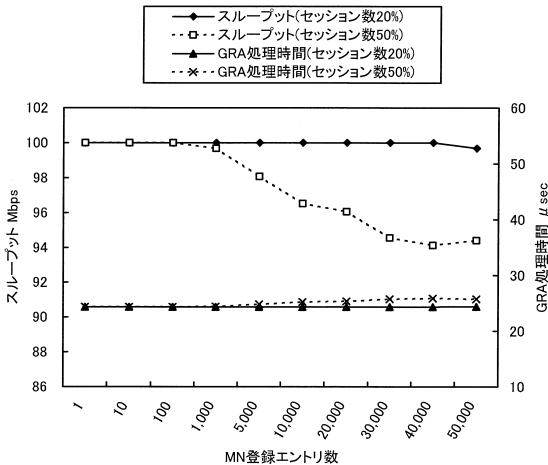


図 12 GRA 性能評価結果

Fig. 12 GRA performance evaluation results.

ットが若干低下し、処理時間も増加するが 94 Mbps 以上のスループットが得られており、性能劣化は小さいといえる。また、本実験に合わせて、イーサネット・ドライバによるパケット送受信以外のカーネル内処理時間、すなわちテーブルのハッシュ検索やアドレス変換を含む GRA のコア部分の処理時間 (図 9 に示した `gra_input()` から `ip_output()` まで) をハードウェア・クロックの読み出しにより測定した結果、登録エントリー数/セッション数によらず平均 2.5 μ 秒程度であった。全体の処理時間に対して、大部分はドライバによるパケット送受信が占めているといえる。

本実験では、GRA に使用したパソコンのカーネルメモリなどの制約から最大登録エントリー数を 50,000 としたが、最大エントリー数でも性能劣化が小さいことに加え、特定のモバイルネットワークに加入している全端末のうち 50% 以上が他モバイルネットワークに移動することは想定しにくいことから、今回実装した GRA でも数千以上の端末を持つ企業網程度の規模には十分対応可能と考えられる。ただし、より大規模な公衆セルラー網などでは、想定する端末数やトラヒック量に応じて、端末のプライベートアドレスの範囲ごとに別の GRA を導入するなどの負荷分散を図る必要があると考えられる。一方、GRA における処理オーバーヘッドの大部分はパケット送受信にかかわる部分であり、カーネル内でのグローバル/プライベートアドレス変換とプライベート/プライベートアドレス変換の処理オーバーヘッドは同程度と推測されるため、グローバルインターネット上の端末との通信においても同様なスケーラビリティを持つと考えられる。提案方式では、公衆セルラー網や企業網などのように、ネットワーク

内のローカルサーバ (メールサーバなど) や別の移動端末との通信が大部分を占める場合、すなわちプライベートアドレス間の直接変換による通信形態に主眼を置いており、グローバルアドレスを用いたトラヒックの割合は比較的小さいと想定している。しかし、利用可能なグローバルアドレス数には制限があるため、グローバルアドレスを必要とする通信需要に応じて、負荷分散を図るとともに、グローバルアドレスのライフタイムを調整し、一定時間以上パケット転送が発生せずにライフタイムが満了した場合は該当グローバルアドレスを解放し、その後同じ MN に対しても別のグローバルアドレスを割り当てることなどにより、特定の MN がグローバルアドレスを占有し続けることがないように工夫する必要があると考えられる。

6. おわりに

本論文では、異なる管理主体によって管理・運営され、それぞれ独立なプライベートアドレスを使用するモバイルネットワークを想定し、移動端末がこのような複数のモバイルネットワークに加入して、それらの間をローミング可能とする方式を提案した。移動端末のローミングを実現するうえで、移動端末に割り当てられた複数のプライベートアドレス間の変換や、一時的なグローバルアドレスとプライベートアドレスの変換、およびモバイルネットワーク間のパケット転送などをサポートするために、新たな機能ノード GRA を導入した。GRA の導入により、通常の Mobile IP 手順との互換性を維持しながら、移動端末がモバイルネットワーク間をローミングした際に、他のモバイルネットワークからの着信やグローバルインターネットからの着信を含むさまざまな通信が可能となる。また、提案方式をプロトタイプシステムとして実装した結果と性能評価についても示した。実装した GRA ソフトウェアは、カーネル内のデータ構造・関数とユーザ空間のデーモンプロセスの協調により、効率的な処理を実現しており、性能評価の結果、実用的なスケーラビリティを持つといえる。

参考文献

- 1) Perkins, C.E.: IP Mobility Support for IPv4, RFC 3344 (2002).
- 2) 3rd Generation Partnership Project 2 (3GPP2): Wireless IP Network Standard, 3GPP2 P.S001-B V.1.0.0 (2002).
- 3) 3rd Generation Partnership Project (3GPP): Combined GSM and Mobile IP Mobility Handling in UMTS IP CN, 3G TR23.923 V.3.0.0

- (2000).
- 4) Johnson, D.B., Perkins, C.E. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, Internet Draft (draft-ietf-mobileip-ipv6-21.txt, work in progress) (2003).
 - 5) 井戸上彰, 横田英俊, 長谷川亨, 加藤聰彦: 独立したプライベートアドレスを使用するモバイル IP ネットワーク間のローミング手順, 信学総会大会, B-6-111 (2002).
 - 6) 井戸上彰, 久保 健, 横田英俊, 長谷川亨, 大橋正良: 独立に管理された Mobile IP ネットワーク間のローミング手順とその実装, 情報処理学会 MBL 研究会, MBL-22-5 (2002).
 - 7) Idoue, A., Kubo, T., Yokota, H., Hasegawa, T. and Ohashi, M.: Global Roaming among Mobile IP Networks Operated by Different Administrative Domains, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2003).
 - 8) Montenegro, G.: Reverse Tunneling for Mobile IP, revised, RFC 3024 (2001).
 - 9) Chakrabarti, S., Montenegro, G. and Yokota, H.: Limited Private Address Support: An addendum to Reverse Tunneling for Mobile IP, Internet Draft (draft-chakrabarti-mobileip-privaddr-01.txt, work in progress) (2002).
 - 10) Gustafsson, E., Jonsson, A. and Perkins, C.E.: Mobile IPv4 Regional Registration, Internet Draft (draft-ietf-mobileip-reg-tunnel-07.txt, work in progress) (2002).
 - 11) Kato, T., Idoue, A. and Yokota, H.: Mobile IP Using Private Address, *Proc. IEEE Computer and Communications* (2001).
 - 12) Idoue, A., Yokota, H. and Kato, T.: Mobile IP Network Supporting Private IP Addresses utilizing Regional Registration and NAT Function, *Proc. International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)* (2001).
 - 13) Idoue, A., Yokota, H. and Kato, T.: Proposal of Hierarchical Mobile IP Supporting Private Addresses Utilizing NAT Function and Its Implementation on UNIX Operating System, *IEICE Trans. Comm.*, Vol.E84-B, No.12 (2001).
 - 14) Farinacci, D., Li, T., Hanks, S., Meyer, D. and Traina, P.: Generic Routing Encapsulation (GRE), RFC 2784 (2000).

- 15) Dommetty, G.: Key and Sequence Number Extensions to GRE, RFC 2890 (2000).
- 16) <http://www.monarch.cs.rice.edu/>

(平成 15 年 4 月 1 日受付)

(平成 15 年 9 月 5 日採録)



井戸上 彰 (正会員)

昭和 59 年神戸大学工学部電子工学科卒業。昭和 61 年同大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株) (現 KDDI) 入社。現在、(株) KDDI 研究所モバイルネットワークグループ・グループリーダー。コンピュータネットワーク、通信プロトコルの実装・試験、モバイルネットワーク等の研究に従事。平成 5 年情報処理学会大会奨励賞、平成 10 年情報処理学会大会優秀賞受賞。電子情報通信学会会員。



久保 健

平成 11 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。平成 13 年同大学院修士課程修了。同年(株) KDDI 入社。モバイルネットワークの高速化に関する研究に従事。現在、(株) KDDI 研究所モバイルネットワークグループ研究員。電子情報通信学会会員。



横田 英俊 (正会員)

平成 2 年早稲田大学理工学部電子通信工学科卒業。平成 4 年同大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株) 入社。平成 7 年～平成 8 年米国スタンフォード研究所客員研究員。現在、(株) KDDI 研究所モバイルネットワークグループ主任研究員、国際情報通信学博士。平成 10 年電子情報通信学会学術奨励賞受賞。コンピュータネットワーク、インターネット QoS、モバイルネットワークの研究に従事。電子情報通信学会会員。