

卒業製作 2002 年度 (平成 14 年度)

Mobile IPv6 混在ネットワークにおける
経路最適化に関する研究

指導教員

慶應義塾大学 環境情報学部

村井 純

徳田 英幸

楠本 博之

中村 修

南 政樹

慶應義塾大学 環境情報学部

渡里 雅史

watari@sfc.wide.ad.jp

卒業論文要旨 2002 年度 (平成 14 年度)

Mobile IPv6 混在ネットワークにおける経路最適化に関する研究

論文要旨

Mobile IPv6 は、次世代インターネット環境における移動体通信支援技術として、IETF において標準化が進められている。Mobile IPv6 を用いることで、異なるネットワーク間を移動しても移動透過性や着信可能性が保証されるため、Mobile IPv6 は、携帯電話や PDA、また自動車などの多くの移動体に搭載されることが想定される。

今後は、Mobile IPv6 の普及に伴い、インターネットは Mobile IPv6 の機能を持つノードと持たないノードが混在するネットワークとなる。本研究の目的は、これらのノード間の通信経路が非効率となる問題を解決することである。

通信相手が Mobile IPv6 の機能を持たない場合は、二者間の通信が非効率な通信経路となり、遅延をもたらす。携帯電話のような、リアルタイムに音声や映像を扱う通信では致命的な問題となる。インターネットに接続する計算機の中には、Mobile IPv6 を必要としない計算機や、Mobile IPv6 の機能を搭載できない制限のある計算機が数多く存在するため、大半の通信は非効率な通信経路となる。

本研究では、この非効率な通信経路問題を解決するために、Mobile IPv6 の機能を代理ノードが管理する Binding 支援システムモデルを提案し、モデルに従ったシステムの設計、実装を行った。本システムは、Mobile IPv6 の機能を持たないノードの代理として、Mobile IPv6 の Binding 機能を管理し、経路の最適化を行った。実験環境を用いて本システムを評価した結果、本システムの有効性を示すことができた。

本研究により、Mobile IPv6 混在ネットワークにおける経路の最適化が実現された。また、本システムは、既存のノードや Mobile IPv6 の仕様に変更を加えることなく実現した。これにより、Mobile IPv6 の普及を促進できる。

キーワード

1, インターネット 2, IPv6 3, 移動体通信 4, 経路最適化 5, Mobile IPv6

慶應義塾大学 環境情報学部
渡里 雅史

Route Optimization between Mobile IPv6 Node and Non Mobile IPv6 Node

Summary

This study aims at solving inefficient routing caused in communications between Mobile IPv6 capable nodes and Mobile IPv6 non-capable nodes.

Mobile IPv6 is currently specified by the IETF, with the purpose to support mobility in IPv6 Internet. Mobile IPv6 allows mobile nodes to move from one link to another without changing the mobile node's identifier, home address, providing transparency of its movement to higher layer protocols and applications. Mobile IPv6 is expected to be used widely in the IPv6 Internet, and is not limited to cellular phones, PDA's, and vehicles.

However, the problem with Mobile IPv6 is that route optimization requires the correspondent node to be Mobile IPv6 capable. Otherwise, packets sent between the communicating nodes will follow an inefficient route, causing delay in packets. Considering that fact that not all nodes will be Mobile IPv6 capable, most of the traffic will end up in an inefficient route, which will pose crucial problems for real-time applications.

To solve this problem, we propose a model to support the Binding mechanism defined in Mobile IPv6 for nodes that are not Mobile IPv6 capable. Based on the proposed model, we design and implement a Binding Proxy Agent which allows route optimization between Mobile IPv6 capable nodes and Mobile IPv6 non-capable nodes.

From this research, we were able to realize route optimization between Mobile IPv6 capable nodes and Mobile IPv6 non-capable nodes without any extensions to the existing nodes and to Mobile IPv6 specifications. From our evaluation, the effectiveness of the system is proved over inefficient routing.

Keywords :

1, Internet 2, IPv6 3, Mobile Computing 4, Route Optimization 5, Mobile IPv6

Faculty of Environmental Information, Keio University
Masafumi Watari

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	Mobile IPv6 の問題点と解決アプローチ	3
2.1	想定される移動計算機環境	3
2.2	Mobile IPv6	4
2.2.1	Mobile IPv6 の概要と仕組み	5
2.2.2	Mobile IPv6 における経路最適化	6
2.2.3	Mobile IPv6 非対応ノード間の通信	6
2.3	Mobile IPv6 混在ネットワークにおける問題点	8
2.3.1	非効率な通信経路	8
2.3.2	Binding に起因するボトルネック	9
2.4	解決へのアプローチ	10
2.4.1	非効率な通信経路問題の解決へのアプローチ	10
2.4.2	Binding に起因するボトルネック問題の解決へのアプローチ	11
2.4.3	要求事項のまとめ	11
第3章	関連研究	12
3.1	Mobile IP Border Gateway	12
3.1.1	Mobile IP Border Gateway の概要	12
3.1.2	Mobile IP Border Gateway の仕組み	13
3.1.3	要求事項の解決の有無	13
3.2	Optimized Route Cache Management Protocol for Network Mobility	14
3.2.1	ORC の概要	14
3.2.2	ORC の仕組み	15
3.2.3	要求事項の解決の有無	16
3.3	Mobile IPv6 VPN using Gateway Home Agent (Mobile IPv6 VPN)	16
3.3.1	Mobile IPv6 VPN の概要	16
3.3.2	Mobile IPv6 VPN の仕組み	16
3.3.3	要求事項の解決の有無	17
3.4	関連研究のまとめ	18

第 4 章	Mobile IPv6 混在ネットワークにおける Binding 支援システムモデル	19
4.1	Binding 管理に関する考察	19
4.2	Binding 支援システムモデルの提案	20
第 5 章	Binding Proxy Agent 設計	22
5.1	Binding Proxy Agent の機能	22
5.2	Binding Proxy Agent 設計概要	23
5.3	Binding Proxy Agent おける通信の流れ	24
5.3.1	Binding 確立までの通信の流れ	24
5.3.2	Binding 確立後の通信の流れ	25
第 6 章	Binding Proxy Agent 実装	27
6.1	実装環境	27
6.2	実装概要	27
6.2.1	CN から MN 宛の処理の実装	27
6.2.2	MN から CN 宛の処理の実装	28
6.2.3	Path MTU の通知	30
6.2.4	Binding Cache の参照	31
6.2.5	IPsec の処理	32
6.3	Binding Proxy Agent 制御機構	32
第 7 章	評価	33
7.1	定性的評価	33
7.1.1	実験環境	33
7.1.2	実験結果	34
7.2	定量的評価	37
7.2.1	実験環境	37
7.2.2	実験結果	38
7.2.3	Binding の処理に関する考察	41
第 8 章	結論	42
8.1	まとめ	42
8.2	今後の課題	42
付 録 A		47
A.1	Mobile IPv6 Return Routability	47

目 次

2.1	Mobile IPv6 の仕組み	5
2.2	Mobile IPv6 における経路の最適化	6
2.3	非効率な通信経路: Triangle Routing	7
2.4	非効率な通信経路: Bi-directional Tunneling	8
2.5	Binding に起因するボトルネック	9
3.1	Mobile IP Border Gateway の仕組み	13
3.2	ORC の仕組み	15
3.3	Mobile IPv6 VPN の仕組み	17
4.1	BPA のネットワーク的な位置	20
4.2	Binding 支援システムモデル	21
5.1	Binding Proxy Agent 設計概要	23
5.2	Binding 確立までの通信の流れ	25
5.3	Binding 確立後の通信の流れ	26
6.1	実装: CN から MN 宛てパケットの処理の流れ	28
6.2	実装: MN から CN 宛てパケットの処理の流れ	29
6.3	Path MTU の通知	30
6.4	Binding Cache の参照	31
7.1	定性的評価の実験環境	33
7.2	基本動作確認	35
7.3	MN の移動に伴う ping6 出力結果の例	35
7.4	MN から CN への traceroute6 出力結果	36
7.5	定量的評価の実験環境	38
7.6	RTT による処理コストの比較	39
A.1	Mobile IPv6 Return Routability の仕組み	47

表 目 次

2.1	要求事項のまとめ	11
3.1	関連研究と要求事項の関係	18
5.1	Mobile IPv6 CN と BPA の機能比較	22
7.1	定性的評価の各 PC の構成	34
7.2	実験環境におけるノード間の RTT(msec)	34
7.3	MN と CN 間の RTT	36
7.4	要求事項の解決	37
7.5	定量的評価の各 PC の構成	38
7.6	Pentium Counter を用いた処理コスト	40
7.7	スループットの測定	40

第1章 序論

本章では，本研究の背景と目的について述べる．また，本論文の構成について述べる．

1.1 本研究の背景

計算機の可搬性の向上により，ユーザは，気軽に計算機を持ち歩くようになり，時と場所を選ばずこれらの計算機を利用するに至った．また，無線通信技術の向上およびインターネットへの無線接続環境の整備によって，ユーザは，移動先の様々な場所において，インターネットへの接続が可能となった．Internet Protocol version 6(IPv6)[18]の登場は，PCに限らず，携帯電話や Personal Digital Assistant(PDA)，自動車やその自動車が持つ個々のセンサなど，身近にある様々な移動体をインターネットに繋げることを可能にした．ユーザと共に移動する携帯電話や自動車などの移動体は，様々な場所でインターネットに接続されるようになった．

一方で，既存のインターネットアーキテクチャでは，このような移動体をインターネットに接続しようとする時，移動に伴う通信の遮断，IP アドレスの変化に起因して通信相手が特定できなくなる等の問題が生じる．そこで，これらの問題を解決するために，現在 Mobile IPv6 [8] や Location Independent Networking for IPv6(LIN6) [9] など，移動体通信支援技術が提案されている．中でも Mobile IPv6 は，インターネットの様々な技術に関係する標準化を行っている Internet Engineering Task Force(IETF)[10]において標準化が進められており，多くの注目を集めている．

Mobile IPv6 は仕様がほぼ確定し，間もなく標準化されるため，今後は携帯電話をはじめ，多くの移動体計算機に組み込まれることが想定される．しかし，Mobile IPv6 はその仕様上，通信相手が Mobile IPv6 に対応していない場合では，二者間の通信は非効率な通信経路となってしまう．非効率な通信経路は，通信に遅延をもたらすだけでなく，ネットワーク資源を浪費する．特に，通信に遅延をもたらす問題は，音声を扱う電話等のアプリケーションでは大きな問題となる．これらの問題は，Mobile IPv6 の普及にも密接に関わってくる．

この問題は，すべての計算機に Mobile IPv6 を搭載することで解決できる．しかし，既存のインターネットには，数多くの計算機が接続されているため，これらすべてに対して Mobile IPv6 を実装するのは非現実的である．例えば，Low Cost Network Appliances(LCNA) [19] のように限られた機能しか持てない計算機も存在し，これらの計算機には，新たな機能を追加することができない．また，アクセスの多いサーバなどでは，Mobile IPv6 の機能を持つことが負荷となるため，Mobile IPv6 を利用しな

いことが考えられる。

1.2 本研究の目的

Mobile IPv6 の普及に伴い，今後のインターネットは，Mobile IPv6 の機能を持つノード (Mobile IPv6 ノード) と持たないノード (Mobile IPv6 非対応ノード) が混在したネットワークとなる。

本研究では，このような Mobile IPv6 混在ネットワークにおいて，Mobile IPv6 ノードと Mobile IPv6 非対応ノードの通信に生じるパケットの遅延を低下させるために，二者間の通信経路の最適化を行うことを目的とする。

そのために，まず問題点を整理し，本研究への要求事項を整理する。そして，要求事項をすべて満たしたシステムモデルを提案し，システムの設計，実装，および評価を行う。

Mobile IPv6 に対応していないノードでも，本システムによって最適化された経路での通信が可能となる。

1.3 本論文の構成

本論文は，次のように構成されている。第 2 章で，本研究で想定する移動体計算機環境について述べた後，Mobile IPv6 の概要および Mobile IPv6 混在ネットワークにおける問題点について述べる。さらに，それらの問題点を解決するために，本研究への要求事項について考察する。第 3 章では，関連研究について紹介する。また，それぞれの技術と本研究への要求事項との関係について考察する。第 4 章では，本研究に求められる要求事項を満たしたシステムモデルを提案する。第 5 章では，提案したモデルに従い，本システムの設計について述べる。第 6 章では，本システムの実装について述べる。第 7 章では，本システムの定性的評価および定量的評価について述べる。最後に，第 8 章において，本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第2章 Mobile IPv6 の問題点と解決 アプローチ

本章では、Mobile IPv6 混在ネットワークで生じる問題点の考察を行う。まず、本研究において想定する移動体計算機環境について述べる。次に、Mobile IPv6 の概要を述べ、既存のインターネットにおいて Mobile IPv6 を用いた場合に生じる問題点について述べる。最後に、これらの問題点を解決するために、本研究への要求事項の考察を行う。

2.1 想定される移動計算機環境

第4世代移動通信システム [1] では、IPv6 を通信基盤として利用することを想定している。また、インターネット自動車プロジェクト [3] や InternetITS プロジェクト [4] 等の自動車とインターネットを接続するプロジェクトにおいても、IPv6 を基盤とした通信環境を想定し、自動車と社会との接続を目指している。IPv6 を用いることで、身の回りにある様々な機器はインターネットに接続されると考えられる。

そうした世界では、ホットスポット [5] の普及により、街中の様々な場所で無線 LAN によるインターネット接続が可能となる。ユーザは、IEEE 802.11b [2] などの無線インターフェースを搭載した計算機を持つことで、移動先のカフェやホテル、また、駅や空港など様々な場所で、高速な無線通信によってインターネットを利用することが可能となる。

また、携帯電話を始め、PDA や自動車などの移動体には、Mobile IPv6 のプロトコルスタックが組み込まれる。これらの移動体は、Mobile IPv6 によって、異なるネットワーク間を移動しても移動透過性や着信可能性が保証される。これにより、ユーザは、移動後に限らず、移動中も配信サーバからデータを受信し、手元の端末で高画質な映像を鑑賞することが可能となる。

一方で、移動を必要としない固定の計算機や、Mobile IPv6 のプロトコルスタックを新たに持てない計算機が存在するため、今後のインターネットは、Mobile IPv6 ノードと Mobile IPv6 非対応ノードが混在したネットワークとなる。特に、IPv4 [6] から IPv6 の移行に見られるように、すべてのノードが Mobile IPv6 に対応するまでには、多くの時間を必要とする。

2.2 Mobile IPv6

Mobile IPv6 は, IETF の IP Routing for Wireless/Mobile Hosts ワーキンググループにおいて, 標準化が進められている. Mobile IPv6 は, 既に標準化された Mobile IPv4 [7] をベースに作られているプロトコルであり, Mobile IPv4 で挙げられた問題点などを考慮して設計されている. なお, Mobile IPv6 に関する仕様は, Internet-Draft として公開されている. 平成 15 年 1 月現在の Internet-Draft は, draft-ietf-mobileip-ipv6-19.txt である. 本論文では, draft-ietf-mobileip-ipv6-18.txt を前提とする.

本研究では, Mobile IPv6 を前提としているため, まずその仕組みについて述べる. また, Mobile IPv6 の用語を以下に説明する.

Mobile IPv6 の用語

- Mobile Node(MN)
移動体ノード. リンク間を移動するノード.
- Correspondent Node(CN)
MN と通信するすべてのノード.
- Care-of Address(CoA)
MN が移動先のリンクで取得する IP アドレス.
- Home Agent(HA)
MN の移動を支援するルータ.
- Home Link (ホームリンク)
HA が接続されたリンク.
- Home Address
MN がホームリンクで取得する IP アドレス.
- Foreign Link (フォーリンリンク)
MN の移動先のリンク.
- Binding
MN の Home Address と CoA の対応付け. MN と通信するすべてのノードは, Binding 情報を Binding Cache として管理する. また Binding 情報を更新するメッセージを Binding Update, 更新に成功したことを通知するメッセージを Binding Acknowledgement(Binding Ack), 更新に失敗したことを通知するメッセージを Binding Error としている.
- Return Routability
MN が Home Address および CoA で到達可能であることを確認するための処理. 不正な Binding Update による DoS [15] 攻撃から通信が妨害されるのを防御する.

2.2.1 Mobile IPv6 の概要と仕組み

Mobile IPv6 の概要

Mobile IPv6 では、HA によって MN の移動透過性が保証される。通常 MN は、必ず一つの HA に登録を行い、そのホームリンクのプレフィックスを元に Home Address が割り当てられる。MN は、この Home Address によって常に一意に識別される。

MN がホームリンクに接続している時は、通常のインターネットの経路制御に従ってデータを受信する。フォーリンリンクに接続している時は、データは HA を経由して MN の CoA に配送される。これにより、MN は実際に接続するリンクとは関係なく、常に一意の IP アドレス、すなわち Home Address で到達できる。

Mobile IPv6 の仕組み

HA では、MN の Home Address と CoA の対応付けを行っている。Mobile IPv6 では、これを Binding と呼ぶ。MN は、HA に対して定期的に CoA を通知する。HA は、常に最新の Binding 情報を管理し、Home Address 宛てのパケットを MN の CoA に配送する。この Binding の処理の流れを図 2.1 に示す。

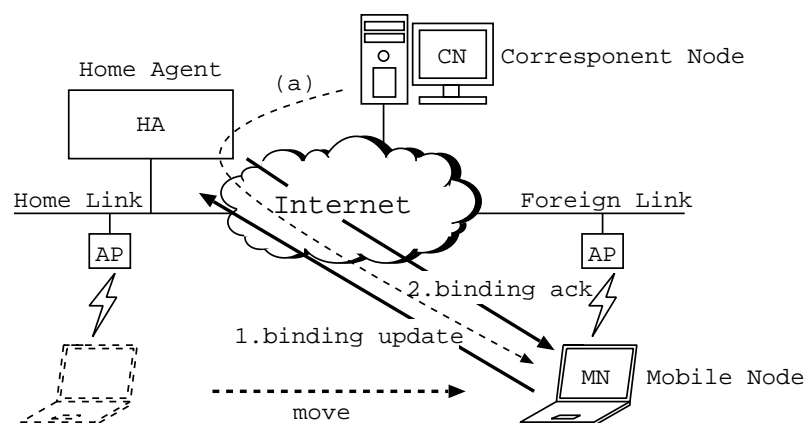


図 2.1: Mobile IPv6 の仕組み

MN は異なるリンクに移動すると、新しい CoA を通知するために Binding Update を HA に送信する (図 2.1 中の 1)。HA では、通知された Binding Update に含まれる Home Address に一致する Binding Cache を更新する。MN は HA から Binding Ack を受信することで、Binding の更新に成功したことを確認する (図 2.1 中の 2)。HA は、その後 Home Address 宛てのパケットを MN の CoA に配送する (図 2.1 中の a)。

CN から MN の Home Address 宛てのパケットは、まず通常の経路制御に従ってホームリンクまで転送される。HA では、このパケットを傍受し、IP in IP Tunneling [16] を使って MN の CoA に配送する。このようにして、MN の移動透過性は、HA によって保証される。

2.2.2 Mobile IPv6 における経路最適化

Mobile IPv6 の仕様には、MN と CN 間の通信経路を最適化する機構が含まれている。これは、MN がフォーリンリンクに接続している際に HA を介した通信を避けるためである。図 2.1 に示すように Home Address 宛てのパケットは、HA によって MN の CoA に配送されるため、各ノードのネットワーク的な位置によっては非効率な通信経路となる。例えば、MN と CN が同じネットワークに接続し、HA が離れたネットワークに接続する場合は、二者間の通信は、同一のネットワークに接続しているにも関わらず、HA を経由した通信経路となる。また、MN や CN の数に応じて、HA には集中的な負荷がかかる。

Mobile IPv6 では、CN に Binding Cache を持たせることで経路の最適化を実現している。MN は CN に対して定期的に CoA を通知することで、CN は常に最新の Binding を保持している。これによって、CN はパケットの宛先を Home Address ではなく CoA で指定できるため、HA を介さない通信が可能となる。この一連の流れを図 2.2 に示す。

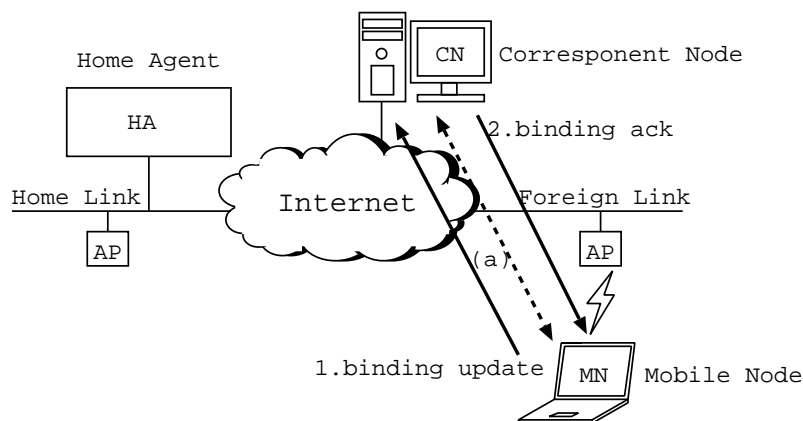


図 2.2: Mobile IPv6 における経路の最適化

MN は、新しい CoA を通知するために Binding Update を CN に送信する (図 2.2 中の 1)。CN では、通知された Binding Update に含まれる Home Address に一致する Binding Cache を作成または更新する。MN は、CN から Binding Ack を受信する (図 2.2 中の 2) ことで、Binding の更新に成功したことを確認する。CN では、その後 MN 宛のパケットを Home Address ではなく CoA に送信する (図 2.2 中の a)。

2.2.3 Mobile IPv6 非対応ノード間の通信

Mobile IPv6 の仕様には、CN が Mobile IPv6 に対応していない場合でも MN と通信できる仕組みが含まれている。CN が Mobile IPv6 に対応していない場合は、二者間の通信経路は、Triangle Routing や Bi-directional Tunneling と呼ばれる経路をとる。MN は、これらの通信経路を用いて CN と通信できるが、HA を経由するため必ずし

も最適ではない．ここでは，それぞれの通信経路の特徴と CN が持つ機能について説明する．

Triangle Routing

Triangle Routing の概要を図 2.3 に示す．Triangle Routing は，CN が IPv6 Destination Option の Home Address Destination Option の受信処理機能のみを持つノードである場合に発生する．

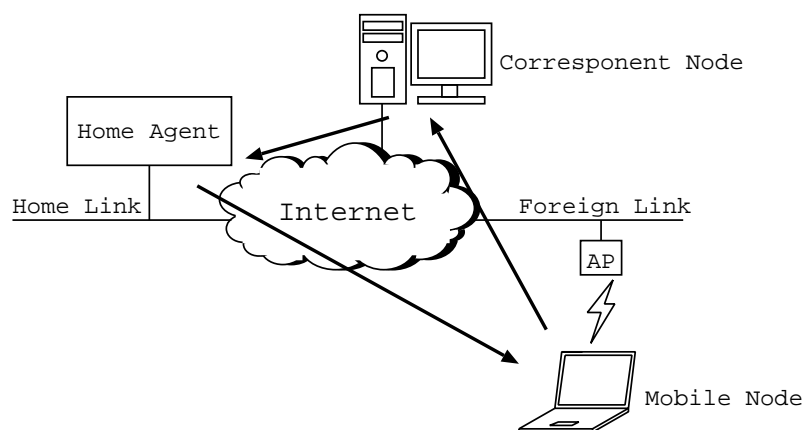


図 2.3: 非効率な通信経路: Triangle Routing

Triangle Routing は，CN から MN 宛てのパケットが HA を経由した通信経路となる．MN は，CN 宛てのパケットに IPv6 Destination Option の Home Address Destination Option を IPv6 Header に付加する．このオプションに格納されるアドレスは，MN の Home Address，送信元アドレスは，CoA である．CN は，Home Address Destination Option を受信すると，Home Address と送信元アドレスをネットワーク層で入れ換えてから処理を行う．CN では，常に Home Address で処理を行うため，MN の移動に関係なく通信できる．CN からのパケットは，宛先が Home Address であるため，HA によって傍受され，MN の CoA に配送される．

Bi-directional Tunneling

Bi-directional Tunneling の概要を図 2.4 に示す．Bi-directional Tunneling は，CN が Mobile IPv6 に全く対応していないノードである場合に発生する．

Bi-directional Tunneling は，MN と CN 間の通信が，常に HA を経由した通信経路となる．MN は，CN 宛てのパケットに IPv6 Header を付加して IP in IP [17] パケットを生成する．先頭の IPv6 Header の送信元アドレスは CoA，宛先アドレスは HA の IP アドレスである．続く IPv6 Header の送信元アドレスは Home Address，宛先アドレスは CN の IP アドレスである．HA では，このパケットを受信すると先頭の IP ア

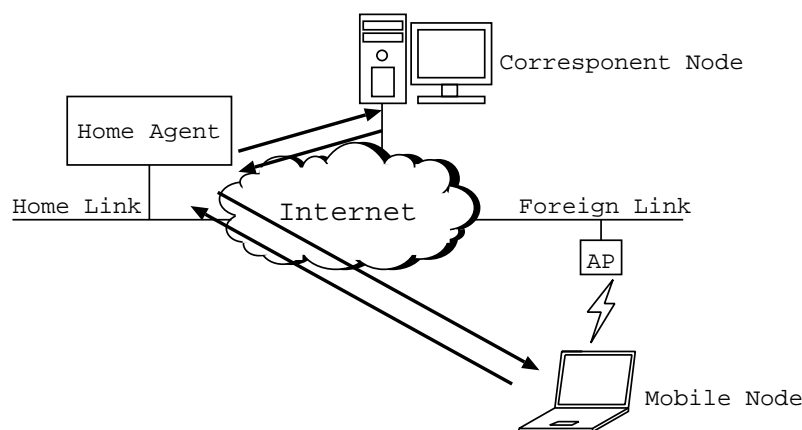


図 2.4: 非効率な通信経路: Bi-directional Tunneling

ドレスを取り除き，CN に配送する．CN では，これを通常の IPv6 パケットとして処理する．CN からのパケットは，宛先が Home Address であるため，HA によって傍受され，MN の CoA に配送される．

2.3 Mobile IPv6 混在ネットワークにおける問題点

Mobile IPv6 では，各ノードに対して，Binding の処理をはじめ，Mobile IPv6 において定義されたオプションヘッダの処理など，いくつかの新しい機能を必要とする．本節では，Mobile IPv6 混在ネットワークにおいて，これらの要件がもたらす問題点について述べる．

2.3.1 非効率な通信経路

Mobile IPv6 における経路の最適化は，通信相手に新たな機能を必要とするため，通信相手側が Mobile IPv6 の機能を持たないノードである場合は，経路の最適化は行えない．そのため，Mobile IPv6 の機能を持たない CN と MN 間の通信経路は，HA を経由した Triangle Routing または Bi-directional Tunneling と呼ばれる非効率な通信経路をとる．これらは，冗長な通信経路となるため，二者間の通信に不必要な遅延をもたらすばかりか，ネットワーク資源を浪費する原因ともなる．

通信の遅延は，アプリケーションによっては大きな問題となる．Mobile IPv6 を搭載した IP 携帯電話を例にとると，Mobile IPv6 を搭載することで，移動透過性や着信可能性が保証されるが，通話相手側が Mobile IPv6 を持たない場合では，冗長な通信経路に起因して音声データに遅延が生じ，電話としての機能を果たせなくなる恐れがある．

また，最適化されない通信経路では，MN と CN 間のデータがすべて HA を経由するため，MN および CN の数に応じて HA には集中的な負荷がかかる．

2.3.2 Binding に起因するボトルネック

第 2.2.2 項で述べたように，Mobile IPv6 において経路の最適化を実現するためには，通信相手ノードにも Binding 機能が必要となる．しかし，Binding 機能は，通信相手ノードに対して Return Routability の処理を始め，Binding 情報の参照や更新など，新たな処理を必要とする．そのため，これらの処理に CPU の資源を使えないノードでは，Binding 機能を持つこと自体が大きな負荷となる．

図 2.5 に，Binding 処理がボトルネックとなる問題の例を示す．図中の Mobile IPv6 Server は，Mobile IPv6 の機能を持つサーバであり，Binding に関わる処理を行う．

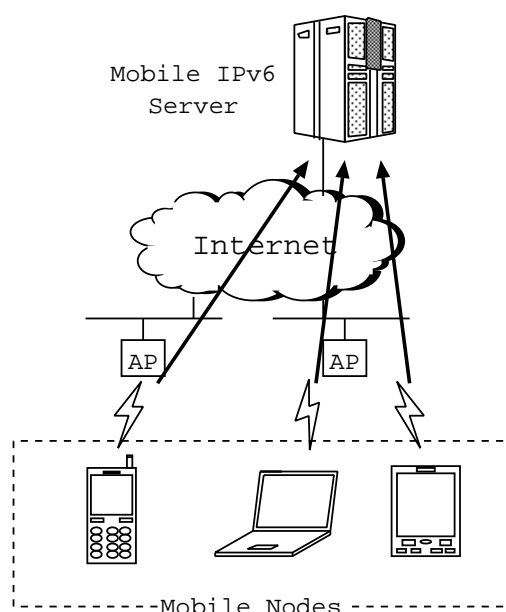


図 2.5: Binding に起因するボトルネック

図 2.5 に示すように，Mobile IPv6 Server に対して，一度に多くの移動体ノードがアクセスした場合を想定する．各ノードが Mobile IPv6 Server と最適化された経路での通信を行う場合は，Mobile IPv6 Server で移動体ノードの台数分の Binding を管理する必要がある．そのため，Mobile IPv6 Server ではサービスを提供する処理に加え，Binding の処理が必要となるため，移動体ノードの台数によってはこの Binding の処理が大きな負荷となる．

移動体による集中的なアクセスが想定されるサーバは，Mobile IPv6 に対応しないことが考えられるため，サーバとの通信は，経路の最適化を行えず，前述した非効率な通信経路の問題に陥る．サーバ側が Mobile IPv6 に対応できない問題は，前述した IP 携帯電話と同様に，アプリケーションによっては大きな問題となる．

例えば，ユーザが PDA を用いて，移動中にコンテンツ配信サーバから音声や映像を受信する場合は，サーバ側が Mobile IPv6 に対応していないことに起因してデータに遅延が生じ，映像が乱れる．これは，サービスを提供する側としては，サービス

の品質に関わる問題となる。

2.4 解決へのアプローチ

本節では、第 2.3 節で述べた問題点を解決するアプローチとして、本研究への要求事項の考察を行う。

2.4.1 非効率な通信経路問題の解決へのアプローチ

非効率な通信経路は、パケットに遅延を与え、ネットワーク資源を浪費する。また、CN や MN の台数に応じて、HA に対しては集中的な負荷を与える。さらに、この非効率な通信経路に起因して、HA が Single Point of Failure となる。これは、二者間の通信は必ず HA を経由するため、HA やホームリンクに障害が生じた場合は、二者間の通信環境に関係なく通信は継続できなくなる。以上のような問題から、Mobile IPv6 混在ネットワークにおける経路の最適化は必要不可欠である。

また、Mobile IPv6 混在ネットワークにおいて非効率な通信経路となる原因は、通信相手に Mobile IPv6 の Binding 機能がないことが挙げられる。この問題は、通信相手側に Binding 機能を持たせることで解決できるが、第 2.1 節で示すように、通信相手側には LCNA など新たに機能を持たないノードが存在するため、このアプローチだけでは解決には至らない。そのため、通信相手側には Binding 機能に限らず、新たな機能を追加できない。そこで、経路の最適化は、通信相手に新たな機能を追加することなく実現する必要がある。

一方で、将来、Mobile IPv6 が標準化されることによって実現する移動体計算機環境に対して、第 2.3.1 項で挙げた問題点は、今後の Mobile IPv6 の普及に影響を与えることが想定される。例えば、今後 Mobile IPv6 の仕様に準拠した携帯電話が製品化されても、通信相手側が Binding 機能を持たない固定電話である場合は、音声や映像に遅延が生じるため、携帯電話は電話としての機能を果たさないことが考えられる。かし、この問題を解決する際に携帯電話に新たな機能を追加したり、その移動を支援する HA に新たな機能を追加するのでは、早期解決にならない。すなわち、Mobile IPv6 の仕様に変更が必要となるアプローチでは Mobile IPv6 の普及を促すには至らない。そのため、本研究では、Mobile IPv6 の仕様には変更を加えないアプローチが必要となる。

以下に、非効率な通信経路問題を解決する要求事項をまとめる。

- 移動体ノードと通信相手ノード間の通信経路の最適化を行うこと
- 通信相手ノードには新たな機能を必要としないこと
- Mobile IPv6 の仕様には変更を加えないこと

2.4.2 Binding に起因するボトルネック問題の解決へのアプローチ

アクセスの多いサーバでは，Mobile IPv6 の Binding 機能を持つことがそのサーバに対して大きな負荷となる．しかし，通信経路の最適化を実現するためには，Mobile IPv6 の Binding 機能は必要不可欠となる．そこで，本研究では，アクセスの多いサーバなどで，Binding がボトルネックとなる問題に対して，そのボトルネックを解消する必要がある．ここで，本研究における「ボトルネックの解消」とは，アクセスの多いサーバにおいて，Binding に関わる処理をサーバから分離することとする．一般に，機能を分離できるような構造にすることで，ボトルネックを制御可能にしたり，その機能の並列処理を可能にするとされている．例えば，ボトルネックとなる機能をサーバから分離し，その機能を専門に処理する計算機を並列に設置可能にすることで，ボトルネックを解消できる．これにより，サーバが通常のサービスの提供にかかる負荷に加え，Mobile IPv6 の 処理にかかる負荷によって本来のサービスを提供できなくなる問題を解消する．

以下に，Binding に起因するボトルネックとなる問題を解決する要求事項をまとめる．

- ボトルネックを解消すること

2.4.3 要求事項のまとめ

非効率な通信経路は，様々な問題に起因するため，Mobile IPv6 混在ネットワークにおける経路の最適化は必要であることが分かった．経路の最適化を実現するためには，Mobile IPv6 の Binding 機能は必要不可欠であるが，LCNA などが存在するため，通信相手ノードには Binding 機能に限らず，新たな機能を追加できないことが分かった．また，Binding 関わる処理は，アクセスの多いサーバにおいて負荷となるため，Binding 処理をサーバから分離する必要がある．一方で，Mobile IPv6 の普及を促進させるためには，Mobile IPv6 の仕様に変更があってはならないことが分かった．

本研究への要求事項を表 2.1 にまとめる．

表 2.1: 要求事項のまとめ

問題点	要求事項
パケットの遅延	移動体ノードと通信相手ノード間の経路の最適化
ネットワーク資源の浪費	
HA に対する集中的な負荷	
HA の Single Point of Failure	
LCNA ノードなどの存在	通信相手ノードには新たな機能を追加しない
Mobile IPv6 の普及	Mobile IPv6 の仕様に変更を加えない
Binding に起因するボトルネック	ボトルネックを解消する

本研究では，これらの要求事項を満たすモデルを提案する．2.3 節で述べた問題は，Mobile IPv6 を利用する上で必ず生じる問題であるため，解決する必要がある．

第3章 関連研究

本章では，第2章で述べた問題を解決するためのアプローチとして，経路の最適化に関する研究の考察および Mobile IPv6 を用いた通信支援技術の考察を行う．経路の最適化に関する研究として「Mobile IP Border Gateway」[12] および「Optimized Route Cache Management Protocol for Network Mobility」[14] を紹介する．また，Mobile IPv6 を用いた通信支援技術として「Mobile IPv6 VPN using Gateway Home Agent」[13] を紹介する．「Mobile IP Border Gateway」および「Mobile IPv6 VPN using Gateway Home Agent」は，現在 IETF において議論されており，Internet-Draft として公開されている．その後，第2.4.3項で挙げた要求事項をもとに，これらの考察を行う．

3.1 Mobile IP Border Gateway

Mobile IP Border Gateway は，Mobile IPv6 混在ネットワークにおいて，非効率な通信経路となる問題の解決を目指している．そのモデルは，代理ノードが Binding を管理し，本研究に求められるボトルネック問題の解決に深く関係する．

3.1.1 Mobile IP Border Gateway の概要

Mobile IP Border Gateway は，Mobile IP 混在ネットワークにおいて，CN と MN 間の通信経路の最適化を行う．Mobile IP Border Gateway では，CN に新たな機能を必要とせず，既存の Mobile IPv6 を拡張することで通信経路の最適化を実現している．

Mobile IP Border Gateway では，Mobile Border Gateway(MBG) と呼ばれるルータを各 ISP のネットワークとインターネットとの境界に設置する．MBG は，ISP 内に存在するすべての HA を把握していることを前提とし，各 HA から MN の Home Address を取得する．ルータは，取得した情報をもとに Binding Cache を作成し，すべての MN の Home Address を格納する．その後 MBG では，宛先アドレスが Binding Cache に一致するパケットを監視し，一致する場合は，パケットを MN の CoA に配送する．MN の CoA が Binding Cache にない場合は，HA に問い合わせを行い，MN の最新の CoA を取得する．

3.1.2 Mobile IP Border Gateway の仕組み

Mobile IP Border Gateway では，Mobile IPv6 に限らず，すでに標準化されている Mobile IPv4 も考慮している．本研究では，IPv6 を前提としているため，ここでは Mobile IPv6 の場合について述べる．図 3.1 に，Mobile IP Border Gateway の仕組みを示す．

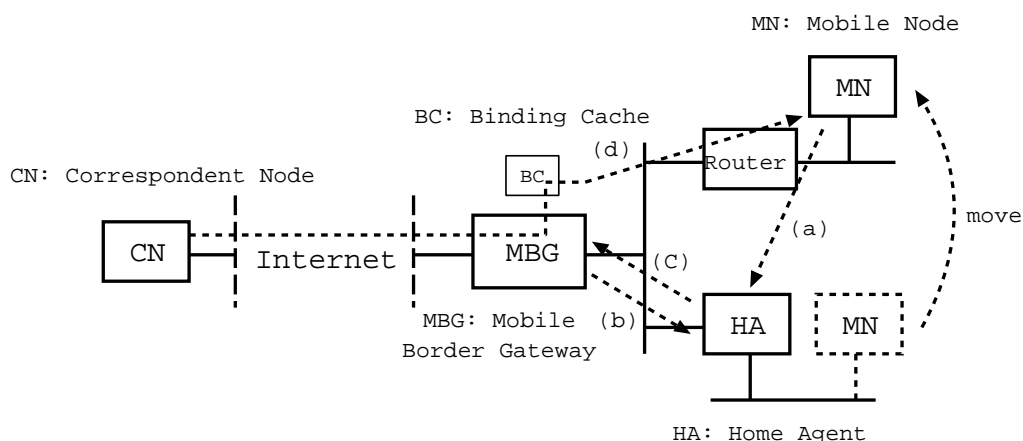


図 3.1: Mobile IP Border Gateway の仕組み

MN は，移動先ネットワークで取得した CoA を HA に通知するために，HA に対して Binding Update を送信する (図中の a)．MBG は，MN の CoA を取得するために，HA に対して Binding Request を送信する (図中の b)．HA は，Binding Request に対して Binding Update を送信する (図中の c)．MBG は，Binding Update を受信することで MN の Home Address と CoA の Binding を Binding Cache として管理する．

その後 MBG では，パケットを転送する前に Binding Cache を参照し，パケットの宛先アドレスに一致する Binding を検索する．パケットの宛先アドレスが Binding Cache に一致しない場合は，通常の経路制御メカニズムに従ってパケットを転送する．Binding Cache に一致する場合は，MN の CoA に転送する (図中の d)．

3.1.3 要求事項の解決の有無

Mobile IP Border Gateway では，CN に新たな機能を追加することなく，CN と MN 間における通信経路の最適化を実現している．そのため，LCNA ノードなどの新たな機能を持ってないノードにおいても，経路の最適化を実現できる．また，CN の Binding は，MBG が代理で管理しているため，アクセスの多いサーバにおいて Binding がボトルネックとなる問題を解決できる．

しかし，Mobile IP Border Gateway では，HA に対して新たな機能を必要とする．例えば，MBG は ISP 内のすべての MN を把握する必要があるため，HA から MN の情報を取得できるように HA を拡張する必要がある．また，MBG はすべての HA

を予め把握していることを前提とするなどの制約もある。さらに、Mobile IP Border Gateway では、MBG を ISP とインターネットの境界に設置することを想定しているため、MBG を経由しない、ISP 内の MN と CN の通信に対して、経路を最適化できない。

3.2 Optimized Route Cache Management Protocol for Network Mobility

Mobile IPv6 は、ホストの移動を支援する技術であるのに対して、Optimized Route Cache Management Protocol for Network Mobility(ORC) は、ネットワークの移動を支援する技術である。ネットワークの移動は、現在 IETF の NEMO[11] ワーキンググループにおいて議論されている。NEMO では、Mobile IPv6 と似たようなメカニズムの利用が検討されている。そこで、ホストではなく、ネットワークの移動と経路の最適化について考察するために、移動するネットワークと経路の最適化を実現する技術として、Optimized Route Cache Management Protocol for Network Mobility(ORC) を紹介する。

3.2.1 ORC の概要

ORC では、移動するネットワーク内のノードとインターネット側のノードとの通信経路の最適化を実現している。ネットワークの移動は、Mobile Router と呼ばれるルータによって支援される。また、Mobile Router は、Home ORC(H-ORC) によって移動透過性が保証される。通常 Mobile Router は、一つの H-ORC に登録を行い、その H-ORC によって Mobile Prefix が割り当てられる。移動するネットワークは、この Mobile Prefix によって識別される。

ORC では、Mobile Router が移動先ネットワークにおいて取得する IP アドレスを Mobile Router Care-of Address (MR-CoA) とする。Mobile Router は、H-ORC に対して定期的に自分の MR-CoA を通知する。H-ORC では、この MR-CoA と Mobile Prefix を Binding として管理する。これにより、H-ORC では Mobile Prefix 宛のデータを Mobile Router の移動先の MR-CoA に転送が可能となり、ネットワーク内のノードは、Mobile Router の接続するリンクに関係なく常にデータを受信できる。

ORC における経路の最適化は、Binding Route(BR) によって実現している。BR とは、Mobile Router の Mobile Prefix と MR-CoA の Binding 情報であり、各 IGP ネットワークなどのゲートウェイルータがこの BR を管理する。ORC では、このルータを ORC Router と呼ぶ。ORC Router が最新の BR を常に管理することで、Mobile Prefix 宛のデータは、H-ORC を経由することなく直接 Mobile Router に転送できる。これにより、移動するネットワークとの通信経路の最適化を実現している。

3.2.2 ORC の仕組み

図 3.2 に、ORC の仕組みを示す。ここでは、Mobile Network がホームリンクから外部リンクに移動している場合を想定する。

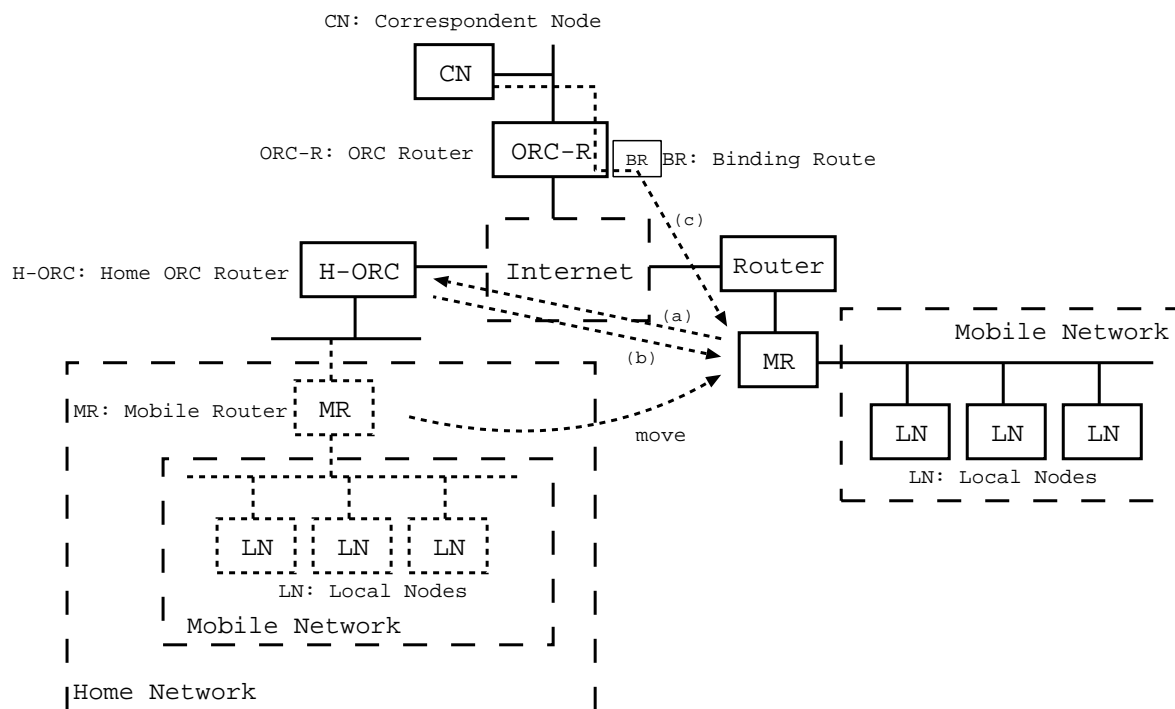


図 3.2: ORC の仕組み

Mobile Router は、移動先ネットワークで取得した MR-CoA を H-ORC に通知するために、H-ORC に対して Binding Update を送信する (図 3.2 中の a)。H-ORC では、通知された Binding Update に含まれる Mobile Prefix に一致する BR を更新する。Mobile Router は、H-ORC から Binding Update に対する Binding Ack を受信することで、Binding の更新に成功したことを確認する (図 3.2 中の b)。

その後 Mobile Prefix 宛のパケットは、H-ORC によって傍受され、IP in IP tunneling を用いて Mobile Router の MR-CoA に配送される。これにより、移動するネットワークは、Mobile Router の接続するリンクに関係なく、パケットを受信できる。

また、CN と H-ORC の間に ORC Router が存在する場合は、ORC Router によって移動するネットワークと CN 間の通信経路は最適化される。Mobile Router は、各 ORC Router に対しても H-ORC と同様に、Binding Update を送信する。これにより、各 ORC Router は、Mobile Router の BR を管理できる。その後、Mobile Prefix 宛のパケットは、ORC Router によって傍受され、IP in IP tunneling を用いて Mobile Router の MR-CoA に配送される (図 3.2 中の c)。

3.2.3 要求事項の解決の有無

ORC では、CN には新たな機能を追加することなく、移動するネットワークと CN 間の経路最適化を実現している。Binding は、ORC Router が代理で管理することで経路の最適化を行っている。また、ネットワークの移動は、Mobile Router が Local Node の代理として Binding を管理することで実現している。

ORC における、Binding を代理ノードが管理するモデルは、Binding がボトルネックとなる問題解決の参考になる。しかし、ORC は Mobile IPv6 とは異なるプロトコルであるため、第 2.4.3 項で挙げた要求事項を満たさず、本研究には適さない。

3.3 Mobile IPv6 VPN using Gateway Home Agent (Mobile IPv6 VPN)

Mobile IPv6 VPN では、ゲートウェイルータが Binding を管理することで、外部リンクに接続する移動体ノードと内部ネットワークに接続するノードとの通信を可能にしている。Mobile IPv6 VPN で扱うモデルは、内部ネットワークを代表して Binding を管理しており、本研究と深く関係する。

3.3.1 Mobile IPv6 VPN の概要

Mobile IPv6 VPN using Gateway Home Agent(Mobile IPv6 VPN) は、VPN [23] と Mobile IPv6 の共存を実現している。通常、Mobile IPv6 を利用して外部ネットワークから VPN にアクセスすると、移動体ノードの CoA が移動するたびに変わるため、VPN のゲートウェイルータとの認証に問題が生じる。

そこで、Mobile IPv6 VPN では、この問題を解決するために、VPN のゲートウェイルータに Mobile IPv6 の HA の機能を追加している。Mobile IPv6 VPN では、これを Gateway Home Agent(GHA) と呼ぶ。

GHA は、Mobile IPv6 の Binding 機能を持つため、移動体ノードの CoA と Home Address を Binding Cache として管理できる。従って、移動体ノードが異なるネットワークに移動した場合は、トンネルのエンドポイントを移動先の CoA に切替えることで、移動後も認証が可能となる。これを実現するために、Mobile IPv6 VPN におけるアーキテクチャには、階層的 HA を採用している。外部ネットワークに接続する移動体ノードからの Binding Update は、まず GHA によって認証され、その後 HA によって再び認証される。

3.3.2 Mobile IPv6 VPN の仕組み

図 3.3 に、Mobile IPv6 VPN の仕組みを示す。

図 3.3 では、GHA の内部ネットワークに Home Agent があることを想定する。MN

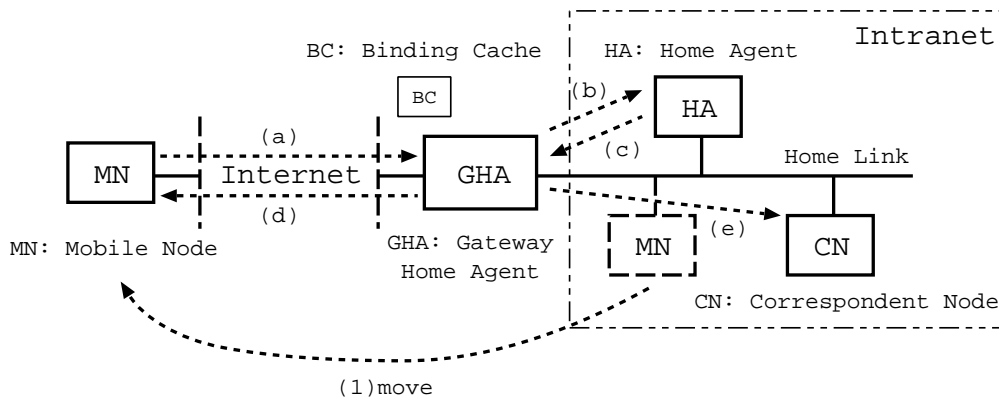


図 3.3: Mobile IPv6 VPN の仕組み

の内部ネットワーク内での移動は、通常の Mobile IPv6 のメカニズムに従って処理される。

MN は、内部ネットワークから外部ネットワークに移動する (図 3.3 中の 1) と、移動先ネットワークで取得した CoA を HA に通知するために、GHA に対して Binding Update を送信する (図 3.3 中の a)。GHA では、MN から Binding Update を受信すると、パケットの送信元アドレスを MN の CoA から GHA の IP アドレスに変更した後、HA に対して Binding Update を送信する (b)。HA では、この Binding Update を受信すると、MN の新しい CoA を GHA の IP アドレスとして Binding Cache を更新する。更新に成功すると、HA は Binding Ack を送信する (図 3.3 中の c)。GHA では、Binding Ack を受信することで Binding Update に成功したことを確認する。GHA は、Binding Cache を作成した後、MN に対して Binding Ack を送信する (図 3.3 中の d)。

Mobile IPv6 VPN では、MN と CN 間における通信経路の最適化も視野に入れている。MN は、外部ネットワークから内部ネットワークの CN と通信経路の最適化を行う場合は、まず GHA に対して Binding Update を送信する。GHA では、受信したパケットの送信元アドレスを GHA の IP アドレスに書き換えた後、CN に対して Binding Update を送信する。CN は、この Binding Update を受信すると、MN の Home Address に対応する CoA を GHA の IP アドレスとして Binding Cache を更新する。これによって、その後 CN から MN 宛のパケットは、HA を経由するのではなく、GHA によって MN に配送されるため、経路の最適化が可能となる。

3.3.3 要求事項の解決の有無

Mobile IPv6 VPN では、GHA が Binding 機能を持つことで、MN が外部ネットワークに接続する場合においても内部ネットワークのノードとの通信を実現している。Mobile IPv6 VPN で扱う Binding は、MN の移動後の CoA と HA との関係を管理するために使われるため、経路最適化のための Binding とは異なるが、代理ノードが Binding を管理するモデルは、Binding に起因するボトルネック問題の解決に有効で

ある。

しかし，Mobile IPv6 VPN では，内部ネットワークのノードとの通信を実現するためには，MN および HA の両方に変更を加える必要があるため，Mobile IPv6 を拡張することになる。また，Mobile IP VPN では，MN と CN 間の経路最適化も視野に入れているが，実現するには CN に Binding 機能を必要とする。そのため，本研究が目的とする経路の最適化は実現できない。

3.4 関連研究のまとめ

Mobile IP Border Gateway は，CN に新たな機能を必要とすることなく，代理ノードが Binding を管理することで経路の最適化を行っていた。しかし，各ノードのネットワーク的な位置によっては経路の最適化を行えず，また，HA を拡張する必要があった。ORC は，CN に新たな機能を必要とすることなく，代理ノードが Binding を管理することで，MR と CN 間の通信経路を最適化していた。しかし，Mobile IPv6 とは異なるプロトコルを前提としているため，問題点の解決には至らなかった。Mobile IPv6 VPN は，代理ノードが Binding を管理するモデルを扱っていたが，経路の最適化には，CN や HA を拡張する必要があった。

表 3.1 に，本研究への要求事項とこれらの技術との関係を示す。

表 3.1: 関連研究と要求事項の関係

	A	B	C	D
Mobile IP Border Gateway	¹		×	
ORC			N/A ²	
Mobile IPv6 VPN		×	×	

- A. MN(もしくは MR) と CN 間における通信経路の最適化
- B. CN には新たな機能を必要としない
- C. MN や HA には新たな機能を必要としない
- D. ボトルネックの解消

表 3.1 に示すように，Binding を代理ノードが管理するモデルは，すべての技術において共通して見られた。このモデルは，Binding がボトルネックとなる問題を解決するために，有効であった。また，すべてのモデルにおいて，Binding はゲートウェイとなるノードが管理していた。

本節で述べたように，本研究への要求事項をすべて満たした技術は存在しない。そこで，本研究では，これらの要求事項をすべて満たしたモデルを提案し，2.4 節で挙げた問題点を解決する。

¹すべての通信を最適化できない

²比較対象外

第4章 Mobile IPv6 混在ネットワークにおける Binding 支援システムモデル

本章では，第 2.4 節で挙げた要求事項をすべて満たしたシステムモデルを提案する．まず，Mobile IPv6 混在ネットワークに適した Binding 管理に関する考察を行う．その後，考察の結果をもとに，Binding 支援システムモデルについて述べる．

4.1 Binding 管理に関する考察

Mobile IPv6 の Binding 機能は，Mobile IPv6 混在ネットワークにおいて，経路の最適化を実現するためには必要不可欠である．そこで，第 2.4 節で述べたように，新たに Mobile IPv6 の機能を持たないノードや，Binding 機能を持つことがさらなる負荷となってしまうノードが存在することを踏まえ，本研究では，Binding 機能を代理ノードが管理するモデルを採用する．

本研究では，Binding を代理で管理するノードを Binding Proxy Agent(BPA) とする．経路の最適化は，BPA を機能させることで実現する．

Mobile IPv6 混在ネットワークにおいて BPA が通信相手ノードの代理として Binding を管理し，経路の最適化を行うためには，通信相手ノードから移動体ノード宛のパケットは BPA を経由する必要がある．すなわち，BPA のネットワーク的な位置は，移動体ノードと通信相手ノードの間に位置する必要がある．ここで，BPA を設置する位置は，図 4.1 に示すように，大きく 3 つの場合に分けることができる．

- (1) BPA が移動体ノード寄りに位置する場合
- (2) BPA が移動体ノードと通信相手ノードの中間地に位置する場合
- (3) BPA が通信相手ノード寄りに位置する場合

(1) の場合では，BPA を移動体ノードが移動するすべてのリンクに設置する必要がある．しかし，移動体ノードが移動し得るリンクは限定できないため，結果，すべてのリンクに設置する必要があるが，これは非現実的である．また，このモデルでは，移動体ノードが (1) の下に接続する場合にのみ Binding の管理が行えるため，移動体ノードが異なるリンクに移動すると，BPA は意味をなさなくなる．

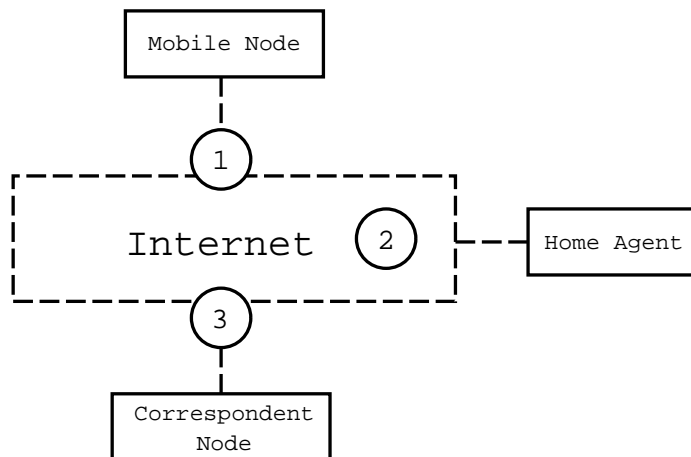


図 4.1: BPA のネットワーク的な位置

また，BPA が (2) にある場合は，BPA を経由するパケットにしか経路の最適化を実現できない．また，このモデルでは，BPA を経由する前に HA を経由している可能性がある．そのため，MN 宛のパケットは，BPA において経路の最適化を行えないため，(2) に設置するのは有効でない．

(3) の場合では，移動体ノードが異なるリンクに移動しても経路を最適化できる．また，このモデルでは，HA を経由する前に必ず BPA を経由しているため，HA を先に介する問題を解決できる．また，BPA において代理で Binding を管理するためには，Mobile IPv6 の Return Routability(付録 A.1) 処理を代理で行う必要があり，Home Test Init(HoTI) メッセージおよび Care-of Test Init(CoTI) メッセージをそれぞれ傍受するためには，BPA が通信相手ノード寄りに位置するモデルが最も適することから，本研究では，BPA が通信相手ノード寄りに位置するモデル (3) を採用する．

また，第 3 章で挙げた関連研究においても共通して見られたように，本研究においても，BPA は通信相手が所属するネットワークのゲートウェイルータとする．これにより，BPA は，BPA のリンクに所属するすべてのノードを把握して管理できる．すなわち，BPA は，Binding 機能を持たないノードにのみその機能を提供するため，BPA の Binding 処理を必要最小限に抑えることができる．また，MN と通信する CN が存在する場合にのみ Binding Cache を作成するため，すべての MN を把握する必要はなく，Binding Cache を必要最小限のエントリに抑えることができる．

4.2 Binding 支援システムモデルの提案

第 4.1 節で述べたモデルに従い，図 4.2 に，Mobile IPv6 混在ネットワークに適した Binding 支援システムモデルを示す．BPA は，通信相手ノードの代理として Binding を管理する．BPA は必要に応じて，通信相手ノードからのパケットを移動体ノードの移動先ネットワークに配送できる．これによって，Binding 機能を持たないノードで

も，移動体ノードと最適化された経路での通信が可能となる．

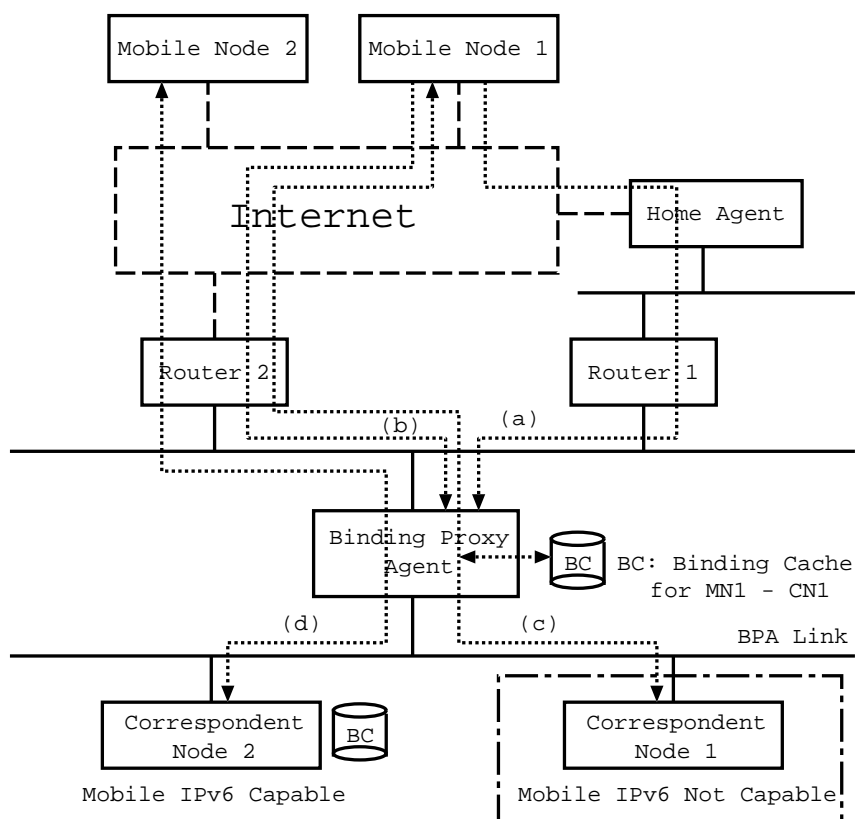


図 4.2: Binding 支援システムモデル

BPA は，BPA Link のデフォルトルータである．これにより，BPA は，前述した HoTI メッセージ (図 4.2 中の a) および CoTI メッセージ (図 4.2 中の b) の両方を傍受し，処理できる．すなわち，BPA において CN の代理として Binding を管理できる．また，BPA では，BPA Link 内のすべての CN を管理し，ノード毎のニーズに応じて Binding 機能を提供する．図 4.2 では，BPA は，MN1 と通信する CN1 に対しては Binding 機能を提供するが (図 4.2 中の c)，MN2 と通信する CN2 に対しては，CN2 が Binding 機能を持つため，提供しない (図 4.2 中の d)．これによって，BPA は Binding Cache を必要最小限に抑えることができる．

また，BPA は，MN と通信しない CN に対しては，通常の IPv6 ルータとしての処理を行う．

第5章 Binding Proxy Agent 設計

本章では、第4章で述べたモデルに従い、BPA の設計について述べる。

5.1 Binding Proxy Agent の機能

Binding Proxy Agent(BPA) は、通信相手ノードに対して Mobile IPv6 の Binding 機能を提供する。これにより、通信相手ノードは移動体ノードと最適化された経路での通信が可能となる。BPA において Binding 機能を提供するためには、通信相手ノードの代理として BPA が Binding を管理する必要がある。BPA が Binding を管理することで、通信相手ノードのパケットを移動体ノードの移動先ネットワークに直接配送できる。

Mobile IPv6 の仕様に変更を加えることなく、これらを実現するためには、BPA は移動体ノードから見て透過的な存在である必要がある。移動体ノードから見て、その通信処理の流れは、通常の Mobile IPv6 の通信相手ノードと同等でなければならない。すなわち、BPA における基本的な機能は、Mobile IPv6 の通信相手ノードと大きく変わらない。

そこで本節では、BPA を設計するために、まず Mobile IPv6 の通信相手ノードにおける通信処理の流れに着目し、その流れを元に BPA における処理を検討する。通常の Mobile IPv6 の通信相手ノードの処理と BPA の処理の比較を表 5.1 に示す。

表 5.1: Mobile IPv6 CN と BPA の機能比較

	Mobile IPv6 CN	BPA
HoTI, CoTI メッセージの処理	メッセージの受信	メッセージの検知
HoT, CoT メッセージの処理	メッセージの送信	メッセージの代理送信
Binding Update メッセージの処理	メッセージの受信	メッセージの検知
Binding Cache の処理	キャッシュの作成	キャッシュの代理作成
Routing Header の処理	送信時に付加	転送時に付加
宛先オプションヘッダの処理	受信時に排除	転送時に排除

表 5.1 に示すように、Mobile IPv6 CN と BPA の基本的な違いは、BPA では複数のメッセージの検知および代理応答、Binding Cache の代理作成および転送時のヘッダの処理である。

5.2 Binding Proxy Agent 設計概要

図 5.1 に BPA の設計概要を示す。図中の各 IF は通信インターフェースである。BPA はルータであるため、複数の通信インターフェースを持つ。実線の長方形は各機能を表している。円筒はデータベースである。

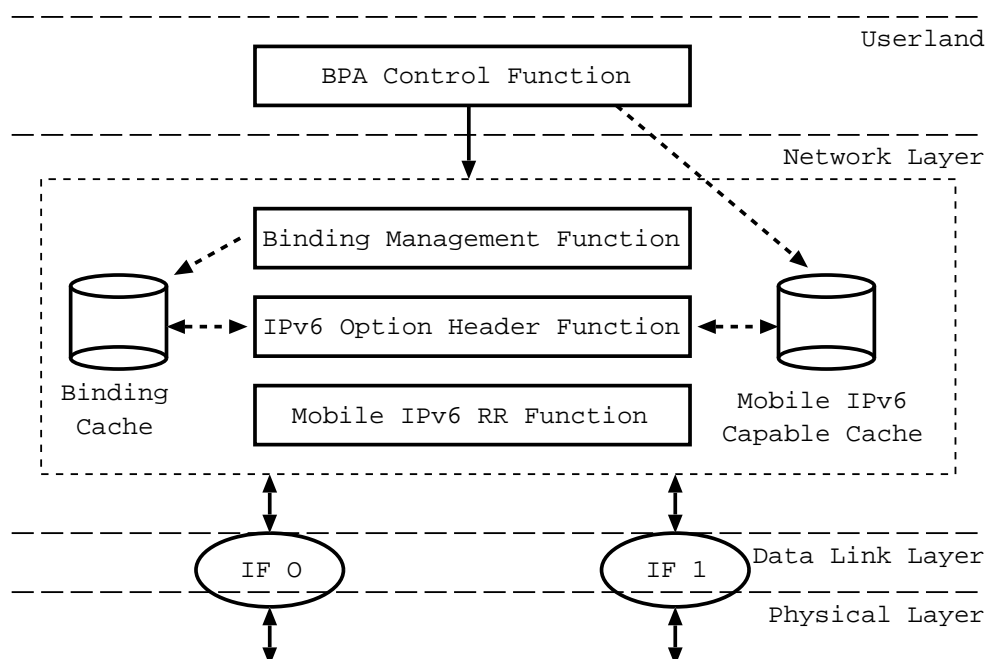


図 5.1: Binding Proxy Agent 設計概要

BPA では、Binding Cache および Mobile IPv6 Capable Cache の 2 種類のデータベースを扱う。Binding Cache は、CN と MN の Binding を管理するためのデータベースである。Binding 情報には、CN の IP アドレス、MN の Home Address および CoA 等が含まれる。Mobile IPv6 Capable Cache は、Mobile IPv6 の Binding 機能を持つ CN と持たない CN を区別して管理するためのデータベースである。BPA は、Binding 機能を持つ CN に対しては通常のルータとしての処理を行なう。

BPA の主な機能は、Binding の管理を行う Binding Management Function、IPv6 のオプションヘッダの処理を行う IPv6 Option Header Function、Return Routability の処理を行う Mobile IPv6 の Return Routability (RR) Function である。これらは、ネットワーク層において処理される。また、ユーザランドには、BPA を制御する機能として、BPA Control Function がある。これらの機能について、以下に説明する。

- Binding Management Function

Mobile IPv6 の Binding に関わる処理を行なう。必要に応じて Binding Cache の作成、更新、削除を行なう。BPA では、MN と通信する CN をペアで管理する必要があるため、Binding 情報には CN の IP アドレスも含まれる。

- IPv6 Option Header Function
Mobile IPv6 で新たに定義された IPv6 のオプションヘッダの処理を行なう。これらは、Mobility Header、IPv6 Routing Header Type 2、と IPv6 Destination Option Header の Home Address Destination Option である。Mobile IPv6 では、MN と CN の間で Binding が確立した後の通信には、IPv6 Routing Header Type 2 または Home Address Destination Option がヘッダに含まれる。BPA では、必要に応じて Binding Cache を参照し、転送時にこれらのヘッダの付加または排除する。また、必要に応じて Mobile IPv6 Capable Cache を参照する。
- Mobile IPv6 Return Routability Function
Mobile IPv6 の Return Routability に関わる処理を行う。MN と Binding を確立するために必要となる。BPA では、Return Routability で新たに IPv6 拡張ヘッダとして定義された Mobility Header の処理を行う。HoTI メッセージ、CoTI メッセージに対して HoT メッセージおよび CoT メッセージを送信する。
- BPA Control Function
BPA の制御を行なう。BPA Control Function において、BPA が Binding 機能を提供するインターフェースを指定する。

5.3 Binding Proxy Agent おける通信の流れ

本節では、BPA における処理の流れについて述べる。MN との Binding が確立するまでの流れと、Binding が確立された後の流れに分けて説明する。

5.3.1 Binding 確立までの通信の流れ

図 5.2 に、MN と Binding を確立するまでの流れを示す。図中の縦の点線は、パケットの宛先が CN であるが、BPA において傍受している状態を示す。また、図中の横の点線は、MN と HA 間の通信において IP in IP tunneling をしている状態を示す。通信の流れは、次の通りである。

1. MN は HA 経由でパケットを受信する。
2. MN は CN と通信経路の最適化を行うため、Return Routability 処理を開始する。HoTI および CoTI を送信する。
3. BPA は、HoTI または CoTI を検知し、これをトリガーに MN と通信する CN の存在を知る。そこで BPA は、HoTI および CoTI を傍受し、CN の代理として HoT と CoT を送信する。HoT および CoT の送信元アドレスは CN の IP アドレスである。
4. MN は CN に対して Binding Update を送信する。

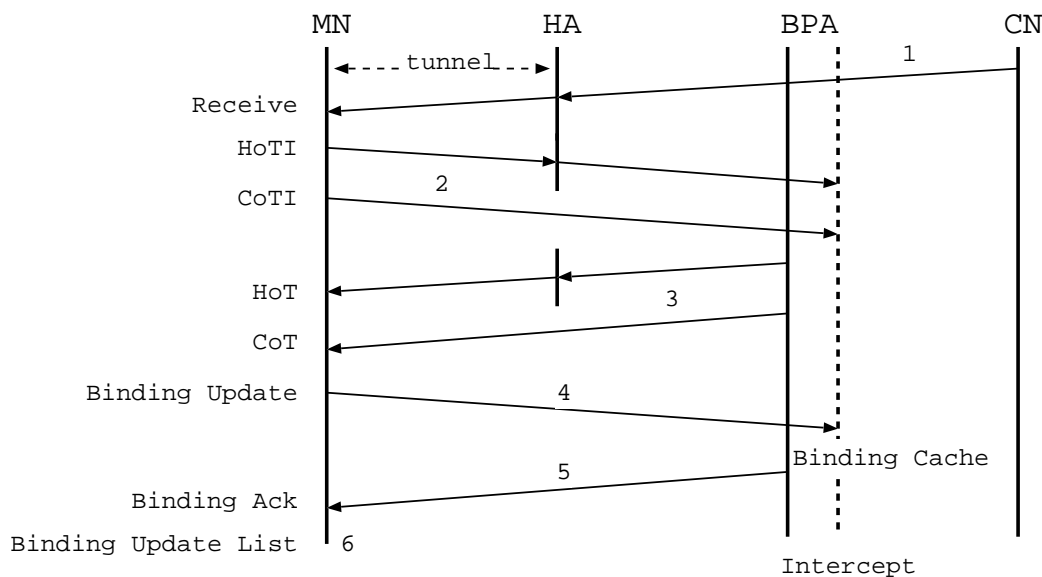


図 5.2: Binding 確立までの通信の流れ

5. BPA は、Binding Update を傍受する。
6. BPA は、Binding Cache を作成し、Binding Ack を送信する。Binding Ack の送信元アドレスは CN の IP アドレスである。
7. MN は、Binding Update List に CN の IP アドレスを追加する。

5.3.2 Binding 確立後の通信の流れ

図 5.3 に、MN と Binding を確立した後の通信の流れを示す。Binding が確立した後では、BPA は Mobile IPv6 で新たに定義されたオプションヘッダの処理を行なう。図中に、BPA において処理される前後のパケットフォーマットを、MN 宛を A 枠、CN 宛を B 枠に示す。

まず、CN から MN 宛てのパケットにおける BPA の処理について説明する。BPA は、宛先アドレスおよび送信元アドレスが Binding Cache に一致するパケットを MN の移動先ネットワークに配送する。CN から送信された IPv6 パケットは、宛先アドレスが MN の Home Address、送信元アドレスが CN の IP アドレスである。BPA は、Binding Cache を元に宛先アドレスを MN の CoA に変更し、24 byte の IPv6 Routing Header Type 2 を IPv6 Header の後に挿入する。IPv6 Routing Header には MN の Home Address が格納される。また、IPv6 Header の Next Header は IPv6 Routing Header となり、元の Next Header が IPv6 Routing Header の Next Header となる。

MN では、IPv6 Routing Header の Home Address が自分のアドレスに一致し、かつ、送信元アドレスが Binding Update List に一致するため、このパケットを通常の Mobile IPv6 パケットとして処理する。

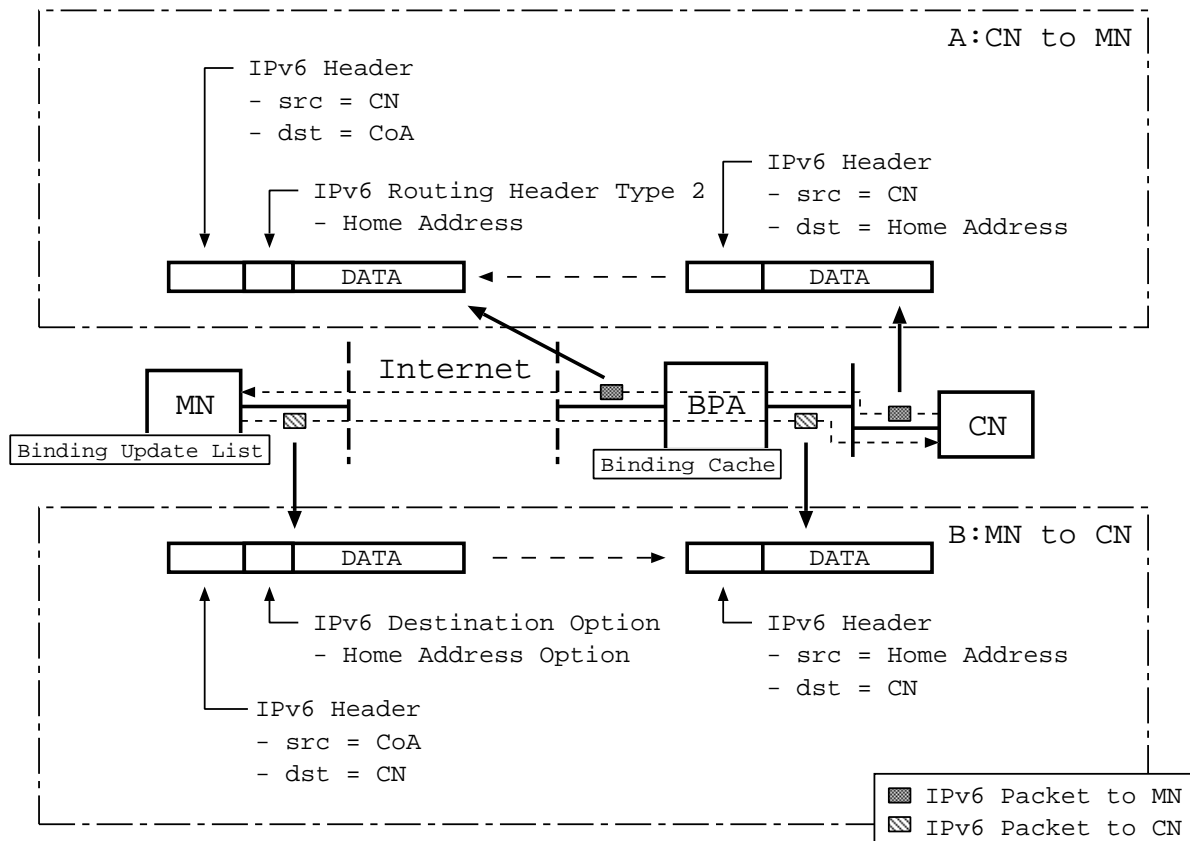


図 5.3: Binding 確立後の通信の流れ

続いて、MN から CN 宛ての packets における BPA の処理について説明する。BPA は、IPv6 Destination Option Header の Home Address Destination Option が IPv6 Header に含まれた packets のうち、宛先アドレスおよび Home Address が Binding Cache に一致する packets の処理を行う。MN から送信された IPv6 packets は、宛先アドレスが CN の IP アドレス、送信元アドレスが CoA、そして Home Address が格納された 24 byte の IPv6 Home Address Destination Option が含まれる。BPA では、各 IP アドレスが Binding Cache に一致することを確認したのち、この IPv6 Home Address Destination Option を packets から取り除き、送信元アドレスを MN の Home Address に書き換える。IPv6 Header の Next Header は、IPv6 Home Address Destination Option の Next Header となる。CN では、送信元アドレスが MN の Home Address であるため、この packets を通常の IPv6 packets として処理する。

第6章 Binding Proxy Agent 実装

本章では、Binding Proxy Agent の実装について述べる。

6.1 実装環境

BPA は、FreeBSD 4.6-RELEASE[25] 上に KAME プロジェクト [24] の IPv6 スタックを拡張することで実装した。利用した KAME プロジェクトの IPv6 スタックは、平成 14 年 9 月 23 日付けで公開されているスナップを用いた。スナップは、kame-20020923-freebsd46-snap である。

6.2 実装概要

BPA では、IPv6 のオプションヘッダを用いて大半の処理が行われる。またそれらの処理は、BPA においてパケットを転送する際に行われる。そのため、実装は、IPv6 スタックの転送処理が行われる機構を拡張して行った。具体的には、カーネル内の `ip6_forward` 関数を拡張した。

すべてのパケットは、BPA 制御機構において、入力インターフェースの確認が行われる。BPA では、BPA IF 側から入力されたパケットを CN から MN 宛として処理を行い、その逆を MN から CN 宛として処理を行う。なお、BPA 制御機構については、第 6.3 節で述べる。

6.2.1 CN から MN 宛の処理の実装

図 6.1 に、MN 宛てパケットの処理を行う実装概要図を示す。図中の実線は、各機能において処理を必要とする状態を示す。図中の点線は、各機能において処理を必要としない状態を示す。図は、下は物理層から上はネットワーク層までを表す。また、ここでは、CN が接続する側のインターフェースを BPA IF とする。

図中の各機能を次に挙げる。

- `check_capability` 機能
CN が Mobile IPv6 の機能を持つかを確認する。BPA IF 側において Mobile IPv6 で定義されているヘッダを含むパケットを検知した場合は、その CN を Mobile IPv6 Capable Cache に追加する。

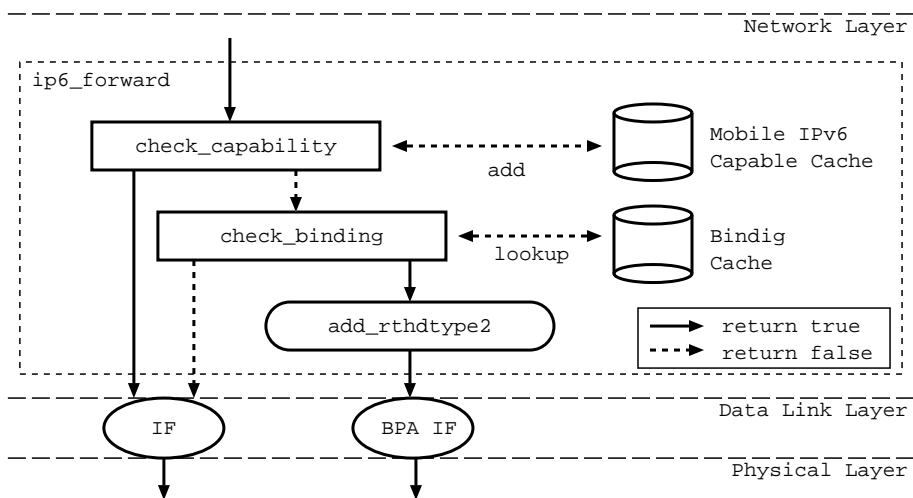


図 6.1: 実装: CN から MN 宛てパケットの処理の流れ

- check_binding 機能
パケットを BPA において処理する必要があるかを確認する．Binding Cache を参照して，パケットの送信元アドレスと宛先アドレスが一致するかを確認する．
- add_rthdtype2 処理部
パケットに IPv6 Routing Header Type 2 を IPv6 Header の後に挿入する．

BPA では，Binding の機能を持たない CN に対してのみ Binding 機能を提供するため，Binding 機能を持つ CN には，通常の IPv6 ルータとしての処理を行う．そこで，まずはじめに，check_capability 機能において CN の Binding 機能の有無の確認を行う．CN が Binding 機能を持つ場合は，Mobile IPv6 Capable Cache に追加し，そのままパケットを転送する．

CN が Binding 機能を持たない場合は，BPA において Binding 機能を提供すべきパケットであるかの確認を行う．そこで，まず check_binding 機能において Binding Cache を参照する．パケットが Binding Cache に一致する場合は，add_rthdtype2 処理部において IPv6 Routing Header Type 2 をパケットに付加して MN に転送する．Binding Cache に一致しない場合は，そのままパケットを転送する．

6.2.2 MN から CN 宛の処理の実装

図 6.2 に，CN 宛てパケットの処理を行う実装概要図を示す．図中の実線および点線は，前小節と同様である．また，CN が接続する側のインターフェースを BPA IF とする．

図中の各機能を次に挙げる．なお，check_binding 機能は，第 6.2.1 項と同様であるため省略する．

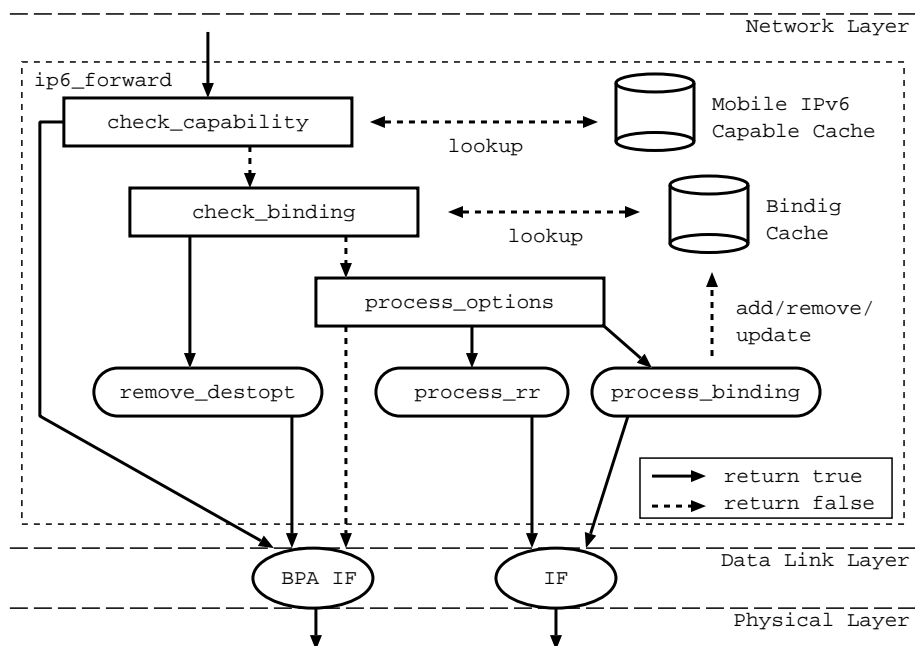


図 6.2: 実装: MN から CN 宛てパケットの処理の流れ

- `check_capability` 機能
パケットの宛先が Binding 機能を持つ CN 宛であることを確認する。CN の IP アドレスを元に Mobile IPv6 Capable Cache を参照する。
- `process_options` 機能
Mobile IPv6 で定義されている IPv6 オプションヘッダの処理を行う。これらは、Mobility Header および IPv6 Home Address Destination Option Header である。
- `remove_destopt` 処理部
パケットから IPv6 Home Address Destination Option Header を取り除く。これにより、このオプションの処理機能を持たないノードは、パケットを処理できる。
- `process_rr` 処理部
Mobile IPv6 の Return Routability の処理を行う。これらの処理はすべて CN の代理として行うため、送信元アドレスは CN の IP アドレスである。
- `process_binding` 処理部
Mobile IPv6 の Binding に関わる処理を行う。必要に応じて Binding の作成、更新、削除を行う。

MN から CN 宛のパケットでは、CN から MN 宛のパケットの処理と同様に、まず `check_capability` 機能において、パケットの宛先の CN が Binding 機能を持つかの確認を行う。確認は、Mobile IPv6 Capable Cache を参照して行う。パケットの宛先が

Mobile IPv6 Capable Cache に一致する場合は，CN は Binding 機能を有するため，そのままパケットを転送する．

Mobile IPv6 Capable Cache に一致しない場合は，BPA において Binding 機能を提供すべきパケットであるかの確認を行う．そこで，まず check_binding 機能において Binding Cache を参照する．パケットが Binding Cache に一致する場合は，remove_destopt 処理部において，パケットから IPv6 Home Address Destination Option Header を取り除いて，CN に転送する．

Binding Cache に一致しない場合は，process_options 機能において IPv6 オプションヘッダの処理を行う．IPv6 パケットの Next Header が Mobility Header である場合は，process_rr 処理部において Mobile IPv6 の Return Routability の処理を行う．BPA は，HoTI に対しては HoT，また CoTI に対しては CoT をそれぞれ CN の代理として送信する．IPv6 パケットの Next Header が IPv6 Destination Option Header の Home Address Option である場合は，process_binding 処理部において Binding の処理を行う．BPA は，Binding Update メッセージに対して，CN の代理として Binding Ack を送信する．IPv6 パケットの Next Header がどちらでもない場合は，そのまま転送する．

6.2.3 Path MTU の通知

BPA において IPv6 Routing Header Type 2 をパケットに付加するためには，Path MTU[20] を制限する必要がある．これは，BPA において IPv6 Routing Header Type 2 を付加することによって，リンクの MTU を超えてしまう場合が考えられるからである．そこで，IPv6 Routing Header Type 2 は，24 byte あるため，BPA における MTU は，Ethernet の MTU である 1500 byte から 24 byte 引いた値とした．図 6.3 にこの拡張を示す．

```
if (m->m_pkthdr.len > BPA_MMTU) {
    u_long mtu = BPA_MMTU;

    if(mcopy) {
        icmp6_error(mcopy, ICMP6_PACKET_TOO_BIG, 0, mtu);
    }
    m_freem(m);
    return;
} else {
    error = bpa_add_rthdr(&m, mbc);
    if (error < 0) {
        m_freem(m);
        return;
    }
}
```

図 6.3: Path MTU の通知

実装は，add_rthdrtype2 処理部において，転送時にパケット長が BPA_MMTU(1476

byte) を超えている場合は, `bpa_add_rthdr` 関数で IPv6 Routing Header を付加する際に MTU を超えてしまうため, ヘッダを付加する前に ICMPv6 Packet Too Big[21] エラーを返す処理を加えた.

6.2.4 Binding Cache の参照

Mobile IPv6 における Binding は, MN の Home Address と CoA の対応付けであることは, 第 2.2.1 項で述べた. MN は, 通常一つの Home Address で識別されるため, MN の CoA は, Home Address を元を取得できる.

BPA では, CN の代理として Binding を管理するため, Binding 情報には, MN の Home Address と CoA に加え, CN の IP アドレスが必要となる. CN の IP アドレスを管理することで, CN と通信する MN の Binding が可能となる. そこで, BPA で扱う Binding 情報には, CN の IP アドレスが含まれる. 図 6.4 に, Binding の参照を処理する関数を示す.

```
struct mip6_bc *
mip6_bc_list_find_withphaddrdst(mbc_list, haddr, dstaddr)
    struct mip6_bc_list *mbc_list;
    struct sockaddr_in6 *haddr;
    struct sockaddr_in6 *dstaddr;
{
    struct mip6_bc *mbc;
    int id = MIP6_BC_HASH_ID(&haddr->sin6_addr);

    for (mbc = mip6_bc_hash[id]; mbc; mbc = LIST_NEXT(mbc, mbc_entry)) {
        /* Binding Cache を参照 */
        if (MIP6_BC_HASH_ID(&mbc->mbc_phaddr.sin6_addr) != id)
            return NULL;
        if (SA6_ARE_ADDR_EQUAL(&mbc->mbc_phaddr, haddr)) {
            /* Home Address が一致する場合 */
            if (SA6_ARE_ADDR_EQUAL(&mbc->mbc_addr, dstaddr))
                /* CN の IP Address が一致する場合 */
                break;
        }
    }
    return (mbc);
}
```

図 6.4: Binding Cache の参照

Binding 情報の参照には, KAME プロジェクトの Binding 機能を拡張した. 図 6.4 中の `MIP6_BC_HASH_ID` は, ハッシュ値を求めるハッシュ関数であり, ハッシュ値は, このハッシュ関数を用いて, Home Address を鍵に求めた. `mip6_bc_hash` は, ハッシュテーブルであり, 得られたハッシュ値をもとに Binding Cache のエントリを参照する.

`mbc` は, Binding Cache の各エントリの構造体であり, `SA6_ARE_ADDR_EQUAL`

関数によって Home Address および CoA が一致するエントリが返り値とされる。

6.2.5 IPsec の処理

BPA では、`add_rthdrtype2` 処理部において、IPv6 Header の宛先アドレスの書き換えや、`remove_destopt` 処理部では、送信元アドレスの書き換えを行っている。従って、IPsec されたパケットは、BPA においてヘッダ情報の書き換えは行えない。そのため、BPA では、IPsec された通信には、Binding の機能を提供せず、パケットはそのまま転送する。

6.3 Binding Proxy Agent 制御機構

BPA 制御機構は、BPA を制御するための機構である。BPA 制御機構は管理者が行うため、実装には `ioctl` を用いた。現在制御できる処理は以下の通りである。

1. Binding Proxy Agent 起動，停止
2. BPA IF の指定

設計で述べたとおり、BPA では、入力インターフェースが BPA IF に一致した場合、Binding の参照などを行うため、CN が接続する側のインターフェースを把握する必要がある。BPF IF の指定は、インターフェース名を指定する。また、今後必要に応じて制御コマンドを追加する。

第7章 評価

本章では，本システムの定性的評価および定量的評価について述べる．

7.1 定性的評価

本システムの設計の正当性を検証するために，BPA の動作確認を行った．設計したシステムが Mobile IPv6 および CN に新たな機構を必要とすることなく，CN の代理で Binding を管理し，経路を最適化できることを示す．

7.1.1 実験環境

実験は，測定に影響がないように，図 7.1 に示すようなインターネットとの接続を持たないプライベートな IPv6 ネットワークを構築して行った．

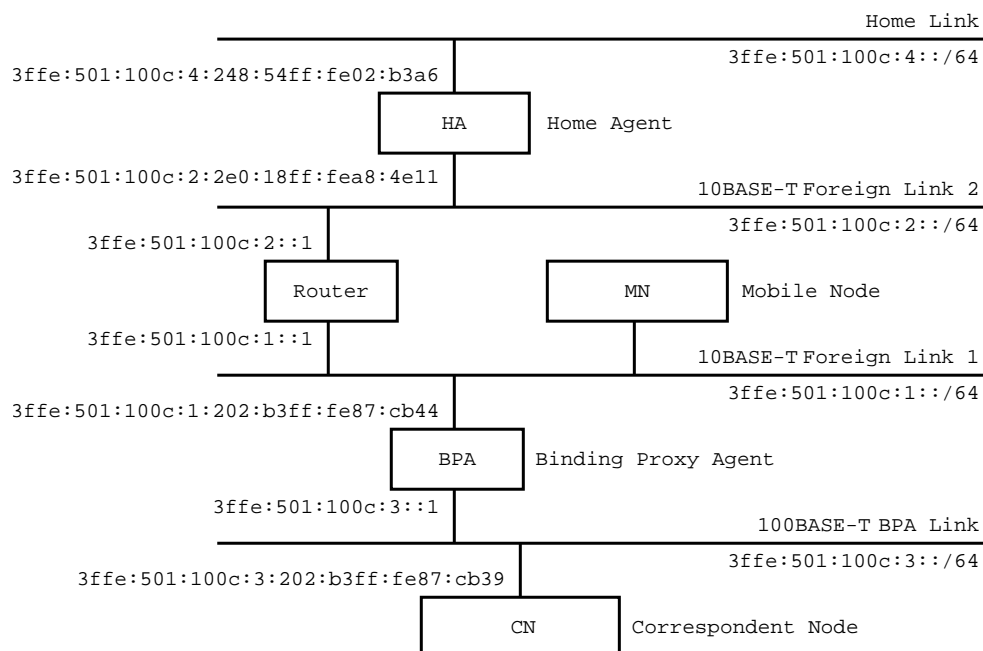


図 7.1: 定性的評価の実験環境

Router は，Foreign Link 1 および Foreign Link 2 における default router であり，そ

それぞれのリンクに対して経路広告を行っている。また、Router における Home Link および BPA Link への経路は、それぞれ static 設定である。MN および HA は、KAME プロジェクトの実装を用いた。また、BPA Link は 100BASE-T、BPA Link 以外のリンクは 10BASE-T である。なお、BPA Link のみ 100BASE-T であるが、測定には影響を与えないため、無視できるとした。各 PC の構成を表 7.1 にまとめた。

表 7.1: 定性的評価の各 PC の構成

	CPU	メモリ	OS
MN	PentiumII 300MHz	96M	FreeBSD 4.6-RELEASE
HA	PentiumII 400MHz	144M	NetBSD 1.5.2-RELEASE
Router	PentiumIII 700MHz	256M	FreeBSD 4.6-RELEASE
BPA	Pentium4 1.6GHz	256M	FreeBSD 4.6-RELEASE
CN	Pentium4 1.6GHz	256M	FreeBSD 4.6-RELEASE

また、各ノード間の RTT を表 7.2 に示す。RTT は、ping6 プログラムを用いて 56 byte のパケットを 1 秒おきに測定した。値は、30 回行った平均をミリ秒で表す。

表 7.2: 実験環境におけるノード間の RTT(msec)

送信 \ 受信	MN	CN	Router	HA	BPA
MN	-	0.744	0.500	0.769	0.539
CN	0.695	-	0.417	0.697	0.241
Router	0.462	0.441	-	0.380	0.352
HA	0.770	0.734	0.388	-	0.637
BPA	0.514	0.214	0.340	0.616	-

7.1.2 実験結果

本研究では、定性的評価として、第 2.4.3 項に挙げた要求事項を満たしているかの確認を行う。本研究に求められる要求事項を以下に挙げる。

1. MN と CN 間の経路の最適化
2. CN には新たな機能を追加しない
3. Mobile IPv6 の仕様に変更を加えない
4. ボトルネックを解消する

なお、本項では、(1) を経路最適化の確認、(2)(3)(4) を基本動作の確認とし、それぞれの評価を行う。まず初めに、基本動作の確認を行う。

基本動作の確認

図 7.1 に示した実験環境を用いて、CN から MN の Home Address に対して ping6 プログラムを用いて 56 byte の ICMPv6 Echo Request の送信を行った。その結果、BPA において MN からの HoTI および CoTI に対する HoT および CoT の代理送信、Binding Update に対する Binding Ack の代理送信および Binding Cache の代理作成の動作確認ができた。また MN の Binding Update List に CN のエントリが追加されていることを確認した。また、MN ではその後も継続して ICMPv6 Echo Reply を確認できた。これらの結果から、BPA における CN の Proxy としての機能および Retrun Routability の機能が動作していることを確認できた。図 7.2 に、この時の BPA におけるカーネルメッセージを示す。

```
Jan 17 04:04:01 eternity /kernel: BPA interface set
Jan 17 04:04:01 eternity /kernel: Enable BPA
Jan 17 04:04:16 eternity /kernel: [BPA] CoTI Detected. Sending CoT for
Jan 17 04:04:16 eternity /kernel: 3ffe:0501:100c:0003:0202:b3ff:fe87:cb39
Jan 17 04:04:16 eternity /kernel: [BPA] HoTI Detected. Sending HoT for
Jan 17 04:04:16 eternity /kernel: 3ffe:0501:100c:0003:0202:b3ff:fe87:cb39
Jan 17 04:04:16 eternity /kernel: [BPA] RR Authentication Success
Jan 17 04:04:16 eternity /kernel: BPA Support Enabled for 3ffe:0501:100c:0003:0202:b3ff:fe87:cb39
```

図 7.2: 基本動作確認

次に、ping6 プログラムを継続しながら、MN を Foreign Link 1 から Foreign Link 2 移動させた。その結果、BPA において MN からの Binding Update に対する Binding Cache の更新の動作確認ができた。また、MN ではその後も継続して ICMPv6 Echo Reply を確認できた(図 7.3)。これらの結果から、BPA における Binding 管理機構および適切なヘッダの排除・付加機能が動作していることを確認できた。

```
% ping6 cn
PING6(56=40+8+8 bytes) 3ffe:501:100c:4:210:4bff:feef:5b47 --> 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=0 hlim=61 time=1.229 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=1 hlim=61 time=1.266 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=2 hlim=61 time=1.172 ms
-- snip --
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=18 hlim=61 time=1.069 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=19 hlim=61 time=1.025 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=20 hlim=61 time=1.163 ms
MN の移動
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=28 hlim=61 time=1.078 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=29 hlim=61 time=1.077 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=30 hlim=61 time=1.05 ms
-- snip --
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=96 hlim=61 time=1.038 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=97 hlim=61 time=1.07 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=98 hlim=61 time=1.218 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39, icmp_seq=99 hlim=61 time=1.061 ms
```

図 7.3: MN の移動に伴う ping6 出力結果の例

経路最適化の確認

CN と MN 間の通信経路が最適化されていることを確認するために、図 7.1 において、BPA の機能を有効にした場合と、BPA の機能を無効にした場合に分けて以下の実験を行った。

- RTT を測定するために、MN から CN に対して ping6 を実行
- 経路を確認するために、MN から CN に対して traceroute6 を実行

BPA の機能を無効にした場合、BPA は通常の IPv6 ルータとしての処理を行うため、HA を経由した通信経路となる。なお、実験は、ping6 プログラムおよび traceroute6 プログラムを用いて行った。それぞれの結果を、表 7.3 と図 7.4 にまとめた。図中の結果は、BPA の機能を有効にした場合と無効にした場合の順で表す。また、ping6 は 56 byte パケットを 1 秒おきに 1000 回送信した結果を表す。

表 7.3: MN と CN 間の RTT

	Min	Avg	Max
BPA の機能を有効にした場合	0.880 msec	0.997 msec	1.258 msec
BPA の機能を無効にした場合	1.512 msec	1.620 msec	1.805 msec

```
% traceroute6 cn
traceroute6 to cn (3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39) from
3ffe:501:100c:4:250:4ff:feb7:a01a, 30 hops max, 12 byte packets
 1 3ffe:501:100c:1::1 (Router) 0.76 ms 0.626 ms 0.61 ms
 2 3ffe:501:100c:1:202:b3ff:fe87:cb44 (BPA) 0.808 ms 0.731 ms 0.729 ms
 3 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39 (CN) 1.117 ms 1.069 ms 1.056 ms

% traceroute6 cn
traceroute6 to cn (3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39) from
3ffe:501:100c:4:250:4ff:feb7:a01a, 30 hops max, 12 byte packets
 1 3ffe:501:100c:4:248:54ff:fe02:b3a6 (HA) 1.351 ms 1.102 ms 1.101 ms
 2 3ffe:501:100c:2::1 (Router) 1.888 ms 1.405 ms 1.402 ms
 3 3ffe:501:100c:1:202:b3ff:fe87:cb44 (BPA) 2.114 ms 1.172 ms 1.15 ms
 4 3ffe:501:100c:3:202:b3ff:fe87:cb39 (CN) 2.17 ms 1.083 ms 1.06 ms
```

図 7.4: MN から CN への traceroute6 出力結果

表 7.3 に示すように、BPA の機能を有効にした場合では、RTT の平均は 0.997 ms だった。BPA の機能を無効にした場合では、RTT の平均は 1.620 ms だった。また、図 7.4 に示すように、BPA の機能を有効にした場合では、MN と CN 間の通信経路は、3 ホップだった。BPA の機能を無効にした場合では、MN と CN 間の通信経路は、4 ホップだった。また、後者の場合では HA を経由した通信経路であった。これらの結果から、MN と CN 間の通信経路の最適化が行えていることが確認できた。

以上の結果から，Mobile IPv6 および CN に新たな機構を必要とすることなく，CN の代理で Binding を管理し，経路の最適化を実現できた．これにより，本システムは，表 7.4 に示す要求事項をすべて満たしていることを確認できた．

表 7.4: 要求事項の解決

要求事項	解決の有無
MN と CN 間の経路の最適化	
CN には新たな機能を追加しない	
ボトルネックの解消	
Mobile IPv6 の仕様に変更を加えない	

7.2 定量的評価

本システムでは，Binding の代理管理や，必要に応じてパケット転送時に IPv6 オプションヘッダの付加や取り外しなどの処理を行っている．また，BPA では，カーネル内の ip6_forward 関数を拡張している．そのため，パケット転送時には，通常のルータよりも多くの処理を行っている．そこで，BPA の有効性を検証するために，この処理コストを測定した．また，その結果をもとに本システムを評価した．

同時に第 5 章で述べたように，BPA における処理の流れは，Mobile IPv6 の CN と同等である．そこで，Mobile IPv6 の Binding を，中継ノードである BPA が代理で管理する場合と，エンドノードである CN が管理する場合をそれぞれ比較し，BPA の実用性を検証する．

7.2.1 実験環境

実験環境は，定性的評価と同じネットワークを用いて行った．実験は，BPA で Binding を管理する場合と Mobile IPv6 の CN が管理する場合を比較するために，Binding は，図 7.5 に示す場所においてそれぞれ管理する場合に分けて行った．図中の左側は，Binding を BPA が管理する場合を示し，右側は，Binding を CN が管理する場合を示す．図中の左右の計算機は，同一のものである．また，MN および CN は，KAME プロジェクトの実装を用いた．各リンクは，Fast Ethernet で構成されている．

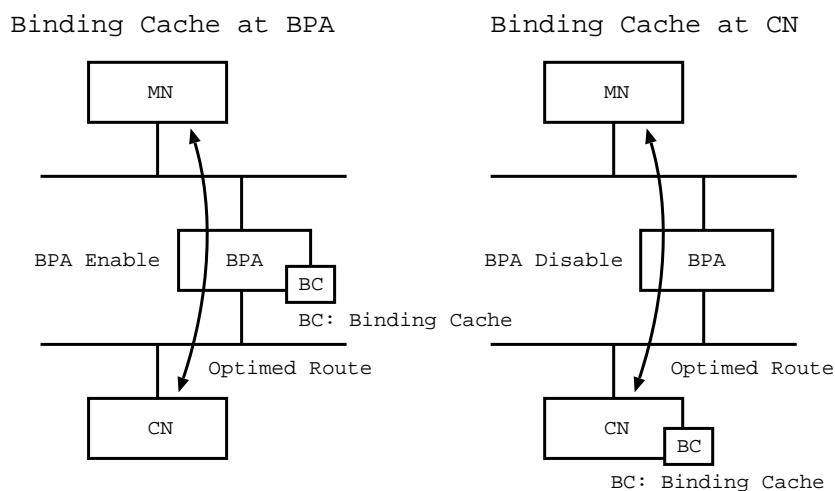


図 7.5: 定量的評価の実験環境

また，各 PC の構成を表 7.5 にまとめた．

表 7.5: 定量的評価の各 PC の構成

	CPU	メモリ	OS
MN	PentiumII 300MHz	96M	FreeBSD 4.6-RELEASE
BPA	Pentium4 1.6GHz	256M	FreeBSD 4.6-RELEASE
CN	Pentium4 1.6GHz	256M	FreeBSD 4.6-RELEASE

7.2.2 実験結果

図 7.1 に示した実験環境を用いて，BPA と通常の Mobile IPv6 CN でかかる Mobile IPv6 の処理コストを比較するために，まず，MN と CN 間の RTT を測定した．次に，BPA においてパケット転送時に行う処理が RTT に与える影響を検証するために，IPv6 Routing Header の付加にかかる処理コストおよび IPv6 Destination Option Header の取り外しにかかる処理コストを，それぞれ Pentium Counter を使って測定した．最後に，BPA における拡張がパケット転送時に通常のトラフィックに与える影響を計測するために，それぞれのスループットを測定した．

処理コストの比較

図 7.5 に示したように，まず，BPA に Binding がある状態で，MN から CN に対して ICMPv6 Echo Request を 1 秒おきに 100 回送信した．実験は，56 byte で測定した後，パケットサイズを 100 byte ずつ増加させ，最大 2456 byte で測定した．なお，パケットが fragment された場合の影響を計測するために，パケットサイズが 1257 byte

の場合も行った。これは、KAME の実装では、MN の hif インターフェースの MTU が 1280 byte であるため、BPA において 24 byte の IPv6 Routing Header を付加すると、1257 byte で fragment される。また、2456 byte は fragment された 2 つの packets が最大の packet サイズとなる。同様の実験を CN に Binding がある状態と BPA と CN の両方に Binding がない状態で行った。

図 7.6 に、MN 側で測定したそれぞれの結果を示す。図中の横軸は、送信した ICMPv6 Echo Request の packet サイズを byte で示し、縦軸は、その RTT をミリ秒で示す。また、RTT は 100 回行った平均を表す。

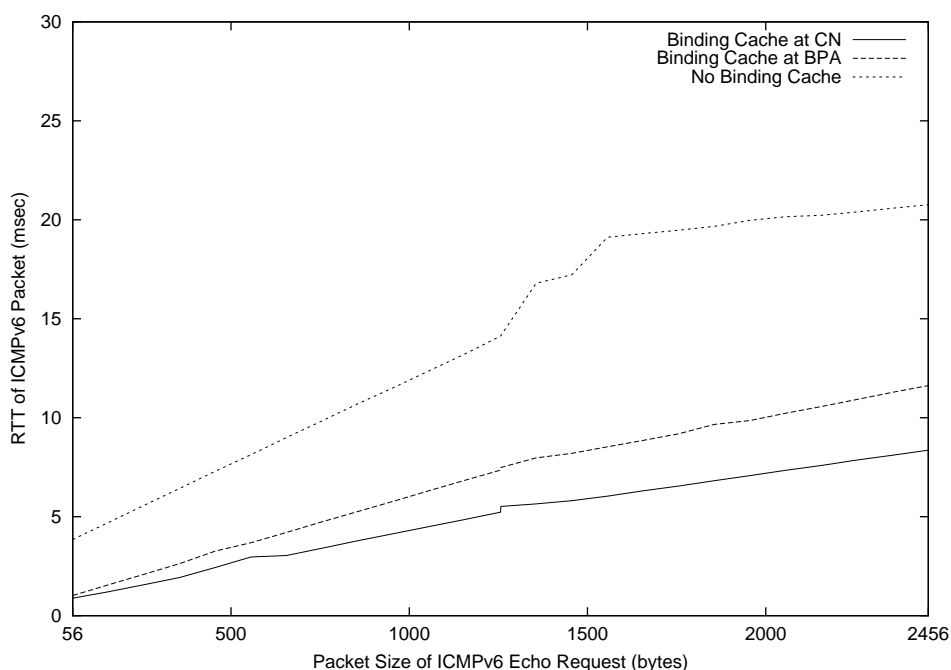


図 7.6: RTT による処理コストの比較

測定結果から分かるように、BPA において Binding を管理し、経路を最適化する場合では、経路の最低化を行わない場合よりも RTT を軽減できていることが分かった。一方で、Mobile IPv6 の機能を持つ CN がエンドノードで Binding を管理し、経路を最適化する場合では、BPA の方がオーバーヘッドが大きいことが確認できた。

Pentium Counter を用いたコスト評価

BPA における処理コストを分析するために、BPA において packet 転送時に行う IPv6 Routing Header の付加にかかる処理コストと IPv6 Destination Option Header の取り外しにかかる処理コストをそれぞれ Pentium Counter を用いて計測した。実験は、MN から CN に対して ICMPv6 Echo Request を 1 秒おきに 100 回送信し、BPA において計測した。また、送信した packet は 56 byte と 1256 byte の場合で行った。結果を表 7.6 にまとめた。値は 100 回行った平均をミリ秒で表す。

表 7.6: Pentium Counter を用いた処理コスト

	56 byte	1256 byte
IPv6 Routing Header Type 2 の付加	0.109 msec	0.290 msec
IPv6 Destination Option Header の取り外し	0.131 msec	0.128 msec

表 7.6 から分かるように，Pentium Counter を用いたそれぞれの処理コストは，56 byte の場合が 0.240 msec，1256 byte の場合が 0.418 msec と，非効率な通信経路に比べると無視できる程度に抑えられている．BPA では，24 Byte の IPv6 Routing Header Type 2 を付加することによってパケット長が 207 byte を超える場合は，カーネル内で新たに mbuf cluster を割り当てる必要がある．従って，パケット長に応じて，mbuf cluster にコピーする長さが変わるため，1256 byte では 56 byte よりも 0.181 msec 多く処理コストがかかっている．

しかし，実験結果から，BPA で Binding を代理で持つ場合のオーバーヘッドは，通常の CN の RTT を比較して，平均で 1.929 ms に抑えられていることが分かった．さらに，BPA を用いて経路の最適化を行う場合は，経路の最適化を行わない場合よりも有効であることが分かった．特に，今回の実験は，最小ホップ数の実験環境を用いて行ったため，各ノードのネットワーク的な位置によってホップ数が上がるほど，BPA 用いた方が有効であることが確認できた．

通常のトラフィックに対する影響

本システムは，カーネル内の ip6_forward 関数を拡張しているため，パケット転送時には，通常のルータよりも多くの処理を行っている．そこで，本システムで行った拡張が通常のトラフィックに与える影響を計測するために，拡張する前と後でそれぞれのスループットを測定した．測定には，iperf [26] と netperf [27] の測定ツールを用いた．実験は，図 7.1 において，サーバを CN，クライアントを Router し，BPA には Binding が 1 個ある状態でそれぞれ 60 秒間測定して行った．実験結果を表 7.7 にまとめた．値は，それぞれ 10 回行った平均を Mbps で表す．

表 7.7: スループットの測定

	iperf	netperf
拡張する前	76.397 Mbps	76.277 Mbps
拡張した後	76.419 Mbps	76.219 Mbps

実験結果から分かるように，本システムにおいて行った拡張は，通常のトラフィックに対して，ほぼ影響を与えていないことが分かった．しかし，本実験では，Binding Cache のエントリを 1 個で行ったため，エントリが増加するとスループットに影響を与える可能性がある．この問題については，第 7.2.3 項で述べる．

7.2.3 Binding の処理に関する考察

本実験では、BPA における Binding Cache のエントリ数は、1 個であった。しかし、管理するエントリの個数によって、Binding Cache を参照する際に、より多くのコストが必要である。特に、アクセスの多いサーバの手前に本システムを設置する場合は、多くの Binding を管理する必要があることが予想される。そこで、Binding Cache のエントリの増加が、本システムに与える影響について考察する。

本システムでは、IPv6 オプションヘッダを付加する場合や取り外す際に Binding Cache の参照を行っている。これらの処理は、エンドノードの CN が Binding を管理する場合でも必ず行う処理であるため、Binding を扱う上では、避けることのできない処理コストである。しかし、Binding の参照は、アルゴリズムに依存するため、改良の余地はある。特に、本システムにおける Binding の参照は、第 6.2.4 項に示すようなアルゴリズムを用いているため、ハッシュ値を Home Address だけでなく、CoA も用いることで、ハッシュ値の衝突頻度を軽減し、処理コストを抑えられると考える。

しかし、本システムにおいて IPv6 オプションヘッダを付加する場合は、パケットの宛先が MN であるかを確認するために、パケット毎に Binding Cache を参照する必要がある。そのため、Binding Cache のエントリが増加すると、通常のトラフィックに対して、Binding を参照する分だけのコストが生じてしまう。従って、Binding の参照にかかるコストを抑えることは、本システムを評価するために重要な鍵となる。そのため、今後は Binding Cache を構成しているハッシュ関数の性能について検討する。

第8章 結論

8.1 まとめ

本研究により，Mobile IPv6 のプロトコルスタックを持つノードと持たないノード間の通信において，経路の最適化を実現することができた．経路の最適化は，Mobile IPv6 のプロトコルスタックを持たないノードに対して，Mobile IPv6 の Binding 機能を代理で管理することで実現した．本システムは，Mobile IPv6 の仕様および既存のノードに対して，新たな機能の追加や変更を必要することなく構築できた．

本研究により，Mobile IPv6 混在ネットワークにおける非効率な通信経路の問題が解決された．また，サーバなどで Mobile IPv6 の Binding 機能がボトルネックとなる問題に対して，Binding 機能を代理で管理できる機構を提供できた．これにより，Mobile IPv6 への移行期の問題が解決され，Mobile IPv6 の普及を促進できる．

8.2 今後の課題

今後の課題として，規模性，実用性，セキュリティの対応，負荷分散などが挙げられる．

本システムの規模性として，ネットワークシミュレーターを用いたシミュレーションを行い，本システムを評価する．実際に，多くの数の MN を使った評価はできないため，Mobile IPv6 混在ネットワークを仮想的に構築し，本システムの規模性を検証する．

また，第 7.2.3 項で述べたように，Binding Cache の参照にかかるコストは，本システムの規模性を大きく左右する．Binding Cache の参照は，アルゴリズムに依存するため，今後は，ハッシュ値およびハッシュ関数を改良し，検索コストを最小限に抑える必要がある．

本システムの実用性として，本システムを実インターネットに設置し，運用を行う．Internet ITS プロジェクトの大規模な実証実験において本システムを用いることで，システムの問題点を追求し，改良を行う．

本システムにおけるセキュリティ対策として，今後は，BPA と CN 間の認証，BPA と MN 間の認証も検討しなければならない．特に，悪いユーザが BPA Link に接続し，BPA に対して不正な Binding を多く登録した場合，BPA の性能に影響してくるため，検討する必要がある．

また，本システムを同一のリンクに複数設置することで Binding 管理の負荷分散が

実現できる．これにより，本システムにおける Binding の処理がボトルネックとなる問題を解決できる．そこで，今後は複数の BPA が協調して動作するために必要な枠組を考察し，検討する．

謝辞

本論文の作成にあたり，御指導いただきました慶應義塾大学環境情報学部教授 村井純博士，並びに同学部教授 徳田英幸博士，同学部助教授 楠本博之博士，同学部助教授 中村修博士，同学部専任講師 南政樹氏に感謝致します．

絶えず御指導と御助言を頂きました慶應義塾大学院政策・メディア研究科講師 植原啓介氏，同大学院政策・メディア研究科博士課程 湧川隆次氏，同大学院政策・メディア研究科修士課程 三屋光史朗氏に深く感謝致します．

本研究を進めていく上で御支援下さった慶應義塾大学 SFC 研究所訪問研究員 渡辺恭人氏，同研究所訪問研究員 Thierry Ernst 氏，株式会社東芝 研究開発センター 土井裕介氏，日本エリクソン株式会社 杉本信太氏，株式会社三菱総合研究所 佐藤雅明氏，慶應義塾大学院政策・メディア研究科修士課程 若山史郎氏，日野哲志氏に感謝致します．

本論文の作成にあたり，御協力して下さった慶應義塾大学環境情報学部 成瀬大亮氏，松谷 宏樹氏，同大学総合政策学部 高橋宏明氏，並びに慶應義塾大学 徳田・村井・楠本・中村・南合同研究室の皆様，特に NACM 研究グループの皆様には感謝の念を表します．

参考文献

- [1] '新世代移動通信システムの将来展望 - 新世代モバイル委員会報告概要-', 総務省新世代モバイル委員会, June 25, 2002.
- [2] I. Supplement, t IEEE, and S. Edition. Ieee standard 802.11b-1999 (supplement to ansi/ieee standard 802.11, 1999 edition), 1999.
- [3] T. Ernst, K. Uehara. *Connecting Automobiles to the Internet*, Proceeding of ITST2002, November 2002.
- [4] 'Internet ITS プロジェクト'. <http://www.internetits.org/>, January 2003.
- [5] 'ホットスポット' <http://www.hotspot.ne.jp/>, January 2003 .
- [6] J. Postel. *Internet Protocol*, September 1981. RFC 791.
- [7] C. Perkins. *IP Mobility Support*, October 1996. RFC 2002.
- [8] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko. *Mobility Support in IPv6*, October 2002. Work in Progress, draft-ietf-mobileip-ipv6-19.txt.
- [9] M. Kunishi, M. Ishiyama, K. Uehara, H. Esaki, F. Teraoka. *LIN6: A New Approach to Mobility Support in IPv6*, Proceedings of the Third International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, November 2000.
- [10] 'Internet Engineering Task Fource'. <http://www.ietf.org/>, January 2003.
- [11] 'NEMO - Network Mobility Working Group'. <http://www.ietf.org/html.charters/nemo-charter.html>, January 2003.
- [12] S. Mizuno, H. Ohnishi, Y. Takagi. *Mobile IP Border Gateway*, Oct 2002. Work in Progress, draft-ohnishi-mobileip-mbg-01.txt.
- [13] H. Ohnishi, K. Suzuki, Y. Takagi. *Mobile IPv6 using Gateway Home Agent*, Oct 2002. Work in Progress, draft-ohnishi-mobileip-v6vpngateway-01.txt.
- [14] R. Wakikawa, S. Koshiha, K. Uehara, J. Murai. *Optimized Route Cache Protocol for Network Mobility*, 10th International Conference on Telecommunications, ICT 2003.
- [15] R. Needham. *Denial of Service: An Example*, Communications of the ACM volume 37, November 1994.
- [16] W. Simpon. *IP in IP Tunneling*, October 1995. RFC 1853.
- [17] C. Perkins. *IP Encapsulation within IP*, October 1996. RFC 2003.

- [18] S. Deering, R. Hinden. *Internet Protocol, Version 6 (IPv6)*, December 1998. RFC 2460.
- [19] S. Sakane, A. Inoue, M. Ishiyama, H. Esaki. *Host Requirements of IPv6 for Low Cost Network Appliances*, June 2002. Work in Progress, draft-okabe-ipv6-lcna-minreq-02.txt.
- [20] B. Gleeson, et al. *Path MTU Discovery for IP version 6*, August 1996. RFC 1981.
- [21] A. Conta, S. Deering. *Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification*, December 1998. RFC 2463.
- [22] B. Black, V. Gill, J. Abley. *IPv6 Site-Multihoming Requirements*, May 2002. Work in Progress, draft-ietf-multi6-multihoming-requirements-03.txt
- [23] B. Gleeson, et al. *A Framework for IP Based Virtual Private Networks*, February 2000. RFC 2764.
- [24] 'KAME Project'. <http://www.kame.net/>, January 2003.
- [25] 'The FreeBSD Project'. <http://www.freebsd.org/>, January 2003.
- [26] 'Iperf - The TCP/UDP Bandwidth Measurement Tool'. <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>, January 2003.
- [27] 'The Public Netperf Homepage'. <http://www.netperf.org/>, January 2003.

付 録 A

A.1 Mobile IPv6 Return Routability

Mobile IPv6 では , Mobile Node(MN) は , Correspondent Node(CN) や Home Agent(HA) に対して Binding Update を送信することで , 移動先の Care-of Address(CoA) を通知している . Binding Update を受信したノードは , Binding Cache を更新し , その後は通知された CoA に対して通信を再開する . すなわち , Mobile IPv6 における Binding Update は , 重要な役割を果たしている .

そこで , 悪意あるユーザによる不正な Binding Update から守るために , Mobile IPv6 では , Return Routability 機能が定義されている . Return Routability とは , Binding Update に含まれる Home Address および CoA が同一の MN の IP アドレスであることを保証するための機能である . 図 A.1 に , Return Routability の仕組みを説明する .

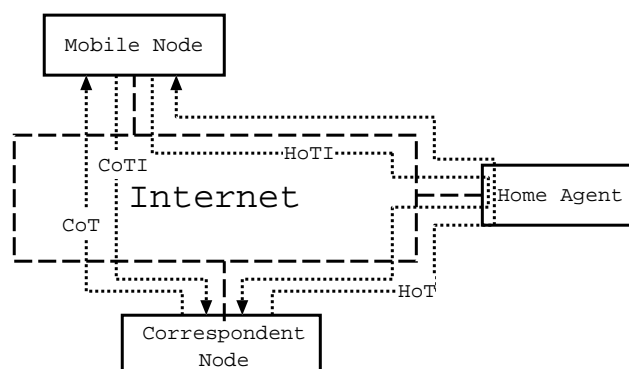


図 A.1: Mobile IPv6 Return Routability の仕組み

MN は , 異なるリンクに移動すると , まず , Home Test Init (HoTI) メッセージおよび Care-of Test Init (CoTI) メッセージ をそれぞれ送信する . HoTI の送信元アドレスは , Home Address であり , HA まで tunneling され , CN に配送される . CoTI の送信元アドレスは CoA であり , 通常の経路制御に従って CN に配送される .

CN は , HoTI および CoTI を受信するとそれぞれのメッセージに対して HoT および CoT メッセージを送信する . これらのメッセージには , 一意の鍵が CN によって添付される . MN では , CN から HoT および CoT メッセージを受信し , HoT および CoT それぞれの鍵を取得する .

MN は , Binding Update 送信時に HoT および CoT で取得した鍵をそれぞれ添付して送信する . CN は , Binding Update を受信すると , Binding Cache を更新する前

に、添付された 2 つ鍵の確認を行う。受信したそれぞれの鍵が HoT および CoT メッセージ送信時に添付した鍵に一致することで、MN は Home Address および CoA で到達できることが認証される。