

## IPv4/IPv6 混在環境で移動透過性を可能にする Mobile PPC の実現

寺澤 圭史<sup>†1</sup> 鈴木 秀和<sup>†1,†2</sup> 渡邊 晃<sup>†1</sup>

モバイルコンピューティング環境では、多くのモバイル端末がインターネットに接続しており、移動しながらでも通信を継続したいという要求が高まっている。しかし、現在の TCP/IP では、端末が移動すると IP アドレスが変化して、通信が継続できないという問題がある。そのような課題を解決する機能を移動透過性と呼ぶ。我々はエンド端末だけで移動透過性を実現するプロトコルとして Mobile PPC (Mobile Peer-to-Peer Communication) を提案している。Mobile PPC は現在 IPv4 で実証されているが、IPv6 においても同様の機能を実現できる。また、近年では IPv6 がようやく普及し始めており、当分の間 IPv4/IPv6 混在環境が続くと予想される。そこで IPv4/IPv6 環境において移動透過性を実現できる Mobile PPC の拡張について検討した。

### Study of Mobile PPC which Realizes Mobility in IPv4/IPv6 Coexistence Environment

KEIJI TERAZAWA,<sup>†1</sup> HIDEKAZU SUZUKI<sup>†1,†2</sup>  
and AKIRA WATANABE<sup>†1</sup>

On the mobile computing environment where countless mobile nodes are connected to the Internet for communications, it is strongly demanded that communication is maintained even when mobile nodes change their locations. However, in TCP/IP, IP addresses change along with the movement of nodes, and communications inevitably broken. To solve this problem, we have been studying a new technology called Mobile Peer-to-Peer Communication (Mobile PPC) that can achieve "Mobility" only with end nodes. Then, in recent years, IPv6 is beginning to spread, and it is expected for a while that the environment where IPv4 and IPv6 are mixed continues. Extension of Mobile PPC which realizes a Mobility in such environment is studied in this paper.

### 1. はじめに

モバイル端末や公衆無線環境の普及に伴い、移動しながら通信を行いたいという要求が高まっている。しかし、IP ネットワークでは、通信中にネットワークを移動すると IP アドレスが変化するため、通信が継続できないという課題がある。この課題を解決するための機能を移動透過性と呼び、様々な方式が検討されている<sup>1)</sup>。一方、IPv4 グローバルアドレスの枯渇により IPv6 が今後必須になると言われている。しかし、IPv6 は IPv4 との互換性がないため、一挙に移行することは困難で、当分の間 IPv4/IPv6 混在ネットワーク環境が続くと予想されている。そこで、IPv4/IPv6 混在ネットワーク環境においても、移動透過性を実現できることが望ましい。我々は、エンドエンドで移動透過性を実現する通信プロトコルとして Mobile PPC (Mobile Peer to Peer Communication)<sup>2)</sup> を提案している。Mobile PPC は、現在 IPv4 での実装・評価を終え、その有効性が証明されているが、IPv6 にもそのままの原理が適応可能である。本稿では、Mobile PPC の特徴を活かしたまま、IPv4/IPv6 混在ネットワークにおいても移動透過性を実現する方式の検討を行った。今後のネットワーク環境は、IPv4 のみをサポートしている IPv4 ネットワーク、IPv6 のみをサポートしている IPv6 ネットワーク、IPv4/IPv6 両方をサポートしているデュアルスタックネットワークの3つのネットワークが混在することとなる。本提案では、Mobile PPC と IPv4/IPv6 互換技術を用いることにより、IPv4、IPv6、デュアルスタックネットワーク間で端末が移動した場合でも、上位アプリケーションに対してはアドレス体系の変化とアドレスの変化を隠蔽して、通信を維持することができる方法について検討した。以降、2. で既存技術とその課題を述べる。3. で Mobile PPC 概要と提案方式で必要となる IPv4/IPv6 互換技術を説明する。4. で提案方式の原理と各移動パターンの動作を述べ、5. でまとめる。

### 2. 既存技術

IPv4/IPv6 混在環境において移動透過性を実現する既存技術として Dual Stack Mobile IPv6<sup>3)</sup>(以後 DSMIPv6)がある。DSMIPv6 は Mobile IPv4<sup>4)</sup> と Mobile IPv6<sup>5)</sup> を統合したものである。DSMIPv6 のシステム構成を図 1 に示す。ホームエージェント(以下 HA)

<sup>†1</sup> 名城大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Meijo University

<sup>†2</sup> 日本学術振興会特別研究員 PD

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

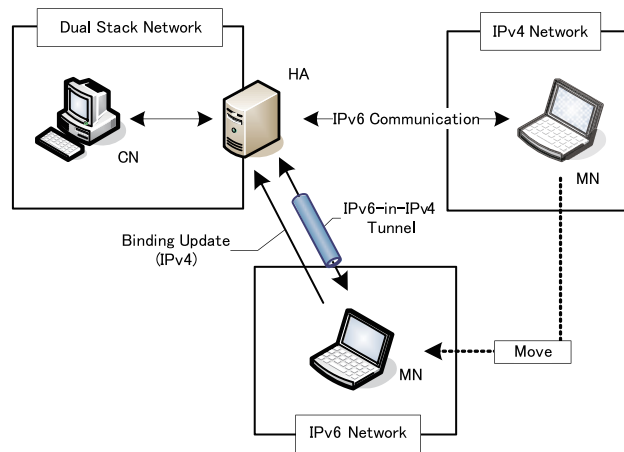


図 1 DSMIPv6  
 Fig. 1 DSMIPv6.

はデュアルスタックネットワークに設置され、端末の移動管理機能を備えている。図 1 では移動ノード（以下 MN）は IPv6 ネットワークに、通信相手ノード（以下 CN）はデュアルスタックネットワークに存在し、IPv6 で通信を行っている。MN が CN と通信中に IPv4 ネットワークに移動した場合、MN はバインディングアップデートを HA に対して実行する。バインディングアップデートには移動前の IPv6 アドレスと移動後の IPv4 アドレスが含まれており、HA に移動後のアドレスを登録する。以後、デュアルスタックネットワークに置かれた HA を介して HA-MN 間に IPv6-in-IP4 トンネルを形成することにより、通信を継続する。DSMIPv6 による通信は冗長経路となったり、ヘッダオーバーヘッドが発生するなどの課題がある。Mobile IPv6 では冗長経路を解決するために経路最適化という機能が存在したが、DSMIPv6 では必ず HA を介さなければならない。

### 3. Mobile PPC と IPv4/IPv6 互換技術

#### 3.1 Mobile PPC の概要

本稿で用いる記号を以下のように定義する。

- $S_4$ ; 端末 X の IPv4 アドレス
- $D_i$ ; 端末 Y の IPv6 アドレス

- $D \rightarrow S, D \leftarrow S$ ; S から D への通信
- $S \leftrightarrow D$ ; S と D 間の通信
- $S \Leftrightarrow D$ ; S から D, または D から S へのアドレス変換

Mobile PPC は、エンド端末だけで移動透過性を実現する通信プロトコルである。通信開始時における通信相手の IP アドレスの解決には DDNS (Dynamic Domain Name System) を使用する。両エンド端末は IP 層に CIT (Connection ID Table) と呼ぶアドレス変換テーブルを保持している。通信中に MN が移動して IP アドレスが変化した場合、移動後の情報をエンド端末間で直接通知しあい、CIT を更新する。その後、CIT に従って全ての通信パケットのアドレス変換を行うことにより、上位ソフトウェアに対して IP アドレスの変化を隠蔽し、移動透過性を実現できる。図 2 に Mobile PPC のシーケンスを示す。通信開始に先立ち、Diffie-Hellman (以下 DH) 鍵交換を用いて認証鍵を共有する。ネゴシエーションにより生成されるテーブルを NIT (Node Information Table) と呼ぶ。NIT には、相手の IP アドレス、認証鍵が記録される。MN 側の NIT には CN の IP アドレス  $\{CN_4\}$  が、CN 側の NIT には MN の IPv4 アドレス  $\{MN_4\}$  が記録される。MN が CN との通信中に移動して、IP アドレスが変化すると、CU (CIT UPDATE) Negotiation を開始する。MN は、移動後の IP アドレス  $\{MN_4'\}$  を通知するために CU Request を CN に送信する。CN は CU Request の内容を認証後、自らの CIT を

$$CIT: CN_4 \leftrightarrow \{MN_4 \leftrightarrow MN_4'\} \quad (1)$$

のように更新する。次に、CN は MN に対して CU Response を送信する。MN は CU Response を認証後、(1) と同様に自らの CIT を更新する。以後は、更新された CIT の (1) の内容に従って、全ての通信パケットのアドレス変換を行うことにより、通信を継続することができる。Mobile PPC は IPv4 スタックへの実装と評価を完了しており、その有用性が証明されている。IPv6 スタックにも同様の考え方で適用可能であることがわかっている。しかし、MN が IPv4 と IPv6 ネットワーク間をまたいで移動した場合については、現状のままでは通信を継続することができない。

#### 3.2 IPv4/IPv6 互換技術

IPv4 を基盤としたネットワークに IPv6 を普及させる方式として、デュアルスタック、トランスレータ、トンネルの 3 つの技術が挙げられる。デュアルスタックとは、ネットワーク機器や端末が IPv4/IPv6 両者の機能を保持し、状況に応じてどちらかを選択するものであ

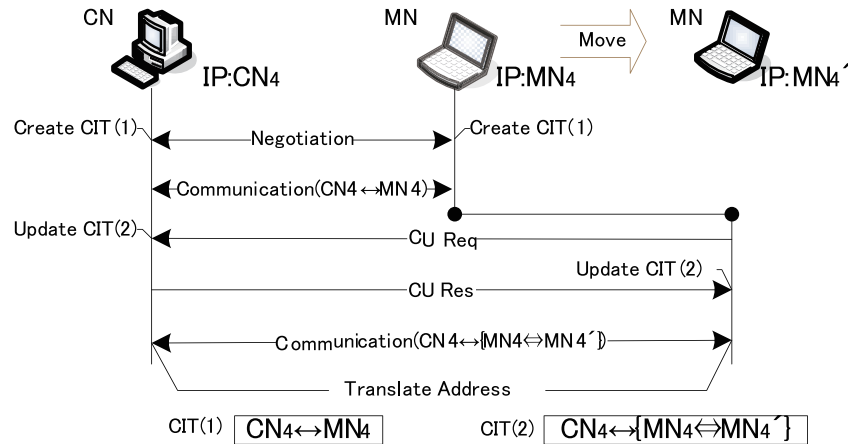


図 2 Mobile PPC の動作  
Fig. 2 Sequence of Mobile PPC.

る．本提案における Mobile PPC の端末はデュアルスタックであることを前提とする．トランスレータに分類される技術として NAT-PT (Network Address Translation - Protocol Translation)<sup>6)</sup> がある．NAT-PT とは、IPv4 のみをサポートした IPv4 ネットワークと IPv6 のみをサポートした IPv6 ネットワークの境界に置かれる装置である．NAT-PT は、パケットの IP ヘッダを IPv4/IPv6 相互にヘッダフォーマット変換を行うことにより IPv4 と IPv6 の通信を実現する．

図 3 に IPv6 ネットワークに存在する端末から IPv4 ネットワークに存在する端末へ通信を開始する場合の動作を示す．IPv6 端末から IPv4 端末に通信を開始するとき、IPv4 側への DNS ルックアップを行う．この時、NAT-PT は DNS ルックアップを監視・変換すると、同時にマッピングテーブルを生成する．IPv6 側のインターフェースには、IPv4 端末の IPv4 アドレスに、NAT-PT のプレフィックスをつないで IPv4 端末宛での IPv6 アドレスを生成する．IPv4 側のインターフェースには、予めプールしてある IPv4 アドレスの中から一つを選択する．アドレスのマッピングを終えると、以後の通信では、IP ヘッダのフォーマット変換とアドレスの変換を行うことにより、IPv4 と IPv6 間の通信を実現する．

トンネルに分類される技術としては、Teredo (Tunneling IPv6 over UDP through NATs)<sup>7)</sup> がある．この技術は IPv4 ネットワーク環境においても、IPv6 接続を可能にす

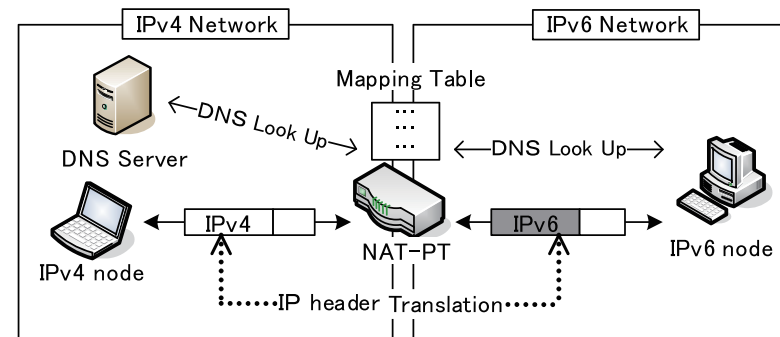


図 3 移動パターン 2 の場合の通信シケンス  
Fig. 3 System constitution of the NAT-PT.

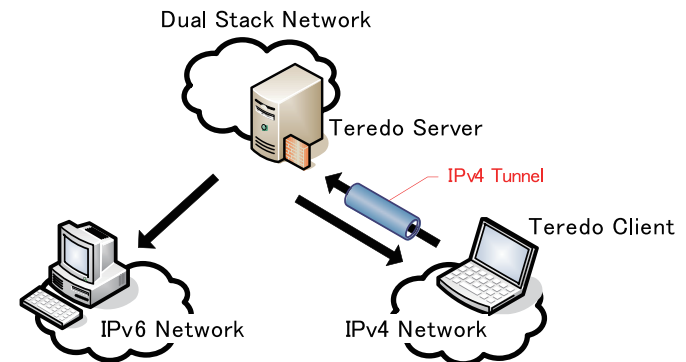


図 4 移動パターン 2 の場合の通信シケンス  
Fig. 4 System constitution of the Teredo.

る．図 4 に Teredo の動作と各機器の役割を示す．Teredo クライアントは Teredo サーバから Teredo アドレス (IPv6 アドレス) を取得し、UDP/IPv4 を用いた IPv6 トンネル接続を実現にする．Teredo サーバは IPv4 グローバルアドレスおよび IPv6 グローバルアドレスを持ち、Teredo クライアントに対して Teredo アドレスの付与など IPv6 の接続性を提供する．また、TeredoNAT が存在する環境でも利用可能である利点がある．

#### 4. 提案方式

以下に IPv4/IPv6 混在環境における移動透過性の実現方法を述べていく。混在環境における移動パターンは何種類か考えられるが、本稿における移動パターンを以下のように定義する。既存の移動透過性を実現する技術の多くが IPv6 ネットワークを主体として考案されているが、我々が提案している Mobile PPC は現在の IPv4 ネットワークに主体をおいている。そこで、想定するネットワーク環境は IPv4 から IPv6 への移行初期に焦点をおく。以下、3.1 で移動パターン、3.2 で 2 種類の提案方式について述べる。

##### 4.1 混在環境における移動パターン

IPv4 から IPv6 への移行期に存在するネットワークは、IPv4 のみに対応した IPv4 ネットワーク、IPv6 のみに対応した IPv6 ネットワーク、および IPv4/IPv6 両者対応したデュアルスタックネットワークの 3 種類である。現在、インターネット上の Web サーバやネットワーク機器、端末は IPv4 にしか対応しておらず、IPv4 ネットワークは当分の間残ってしまうと考えられる。今後、構築するネットワークや小規模プロバイダには IPv6 アドレスしか割り当てられない可能性があるため、必然的に IPv6 ネットワークも存在すると考えられる。上位プロバイダ、root DNS サーバ、大手プロバイダに関しては既に IPv4/IPv6 の両者をサポートしている。従って、今後はデュアルスタックネットワークに IPv4 ネットワークや IPv6 ネットワークが個別に接続される。

このような想定から、以後の議論では IPv4 ネットワークに存在する CN とデュアルスタックネットワークに存在する MN が IPv4 で通信を開始し、MN が IPv6 ネットワークに移動するパターンを考える。

##### 4.2 提案方式の概要

本節では、トランスレータ技術とトンネル技術それぞれの互換技術を用いた 2 つの方式について比較・検討を行う。端末はデュアルスタックで Mobile PPC を実装しており、デュアルスタックネットワークに専用の端末を設置することとする。トランスレータ型では既存の NAT-PT、トンネル型ではトンネルサーバとなる。どちらの方式でも移動後の通信は専用の端末を経由する。以下、4.2.1 でトランスレータ型 Mobile PPC について、4.2.2 でトンネル型 Mobile PPC について述べる。

###### 4.2.1 トランスレータ型 Mobile PPC

初めに、トランスレータ型における Mobile PPC の拡張機能は以下の通りである。

###### (1) IPv4/v6 トランスレータ機能

本章で想定する移動通信では、IPv4 で通信が開始され、その後 IPv4 が使えない IPv6 ネットワークに移動する。この時、端末の上位レイヤでは IPv4 の通信として認識しているが、ネットワーク上は IPv6 でしか通信できない。そのため、IP 層において IPv4 パケットと IPv6 パケットのフォーマットを変換する機能を追加する。

###### (2) マッピングアドレスの追加

通常の通信では、エンド端末間で直接実行されるため、相手端末だけを意識すればよい。しかし、トランスレータ型 Mobile PPC では NAT-PT を介して通信を行うため、NAT-PT の外側のアドレスを通信相手のアドレスをマッピングアドレスとして認識する必要がある。

###### (3) マッピングネゴシエーション

Mobile PPC では移動に伴うアドレス変化を CU ネゴシエーションにより直接相手端末へ通知するしてアドレス変換テーブルを生成する。しかし、トランスレータ型 Mobile PPC では、NAT-PT の導入によりマッピングアドレスの通知処理が必要となる。そのため、両エンド端末から見て NAT-PT の外側アドレスをお互いに通知するマッピングネゴシエーションを追加する。

図 5 にトランスレータ型 Mobile PPC の動作シーケンスを示す。CN は IPv4 アドレス  $\{CN_4\}$ 、MN は IPv4 アドレス  $\{MN_4\}$  を保持している。CN と MN は通信開始時のネゴシエーションによりアドレスの通知と認証鍵の共有を行う。MN には CN の IPv4  $\{CN_4\}$  が、CN には MN の IPv4 アドレス  $\{MN_4\}$  が NIT へ記録される。MN が IPv4 ネットワークから IPv6 ネットワークへ移動すると、NAT-PT からのルータ広告 RA を受信する。RA 内のプレフィックスと CN の IPv4 アドレスより NAT-PT の IPv6 アドレス  $\{NP_6\}$  を生成する。次に、MN は NAT-PT の IPv4 アドレスを取得するために、NAT-PT を介して CN と MN 間で Binding Negotiation を開始する。Binding Request に NAT-PT の IPv6 アドレス  $\{NP_6\}$  に乗せて NAT-PT に送信する。それを受け取った NAT-PT はプールしてある IPv4 アドレスの一つを割り当て、NAT-PT の IPv6 アドレス  $\{NP_6\}$  から CN の IPv4 アドレス  $\{CN_4\}$  を取り出し、マッピングテーブルを生成する。また、マッピングテーブルを生成後、IP ヘッダフォーマットを変換して CN に Binding Request を転送する。Binding Request を受け取った CN は、Binding Request の送信元アドレス  $\{NP_4\}$  をデータ部分に乗せて Binding Response を返す。Binding Response を受け取った MN は、CU Negotiation を開始する。CU Request により移動後に変化した IPv4 アドレス  $\{$

$MN_4 \Rightarrow NP_4$  } を CN に通知する．CU Request を受け取った CN は，内容を認証後，

$$CIT: CN_4 \Leftrightarrow \{MN_4 \leftrightarrow NP_4\} \quad (2)$$

のように自らの CIT を更新する．次に，CN は CU Response により移動後のアドレス変化  $\{MN_4 \Rightarrow NP_6\}$  を MN に送信する，それを受け取った MN は，CU Response の内容を認証後，

$$CIT: \{CN_4 \Leftrightarrow NP_6\} \Leftrightarrow \{MN_4 \Leftrightarrow NP_6\} \quad (3)$$

のように CIT を更新する．以後，MN と CN の通信は，NAT-PT 宛てにパケットを送信することで，IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワーク間の通信が実現される．CN 側では，移動後と移動前では IP ヘッダのフォーマットが同じであるが，MN のアドレス変換では IP ヘッダのフォーマットが異なる．即ち，CN では IPv4 アドレス変換のみが行われ，MN ではパケット受信時には IPv6  $\{NP_6 \leftrightarrow MN_6\}$  から IPv4  $\{CN_4 \leftrightarrow MN_4\}$  へ変換，送信時には IPv4  $\{CN_4 \leftrightarrow MN_4\}$  から IPv6  $\{NP_6 \leftrightarrow MN_6\}$  へ変換を行う．以上のような原理で，IPv4 と IPv6 ネットワークを跨った移動通信においても移動透過性を実現することができる．

また，MN が IPv6 ネットワークで通信を開始し，通信中に IPv4 ネットワークに移動する逆のパターンについてもほぼ同様の原理で通信を継続することができる．

#### 4.2.2 トンネル型 Mobile PPC

トンネル型 Mobile PPC では以下のような拡張機能が必要である．

##### (1) IPv4-IPv6 カプセル機能

トランスレータ型とは異なり，IPv4 と IPv6 の差異をカプセル化を行うことで吸収する．

##### (2) Mobile PPC 対応トンネルサーバ

トンネル型 Mobile PPC では，移動端末がトンネルを形成するために中継するサーバが必要となる．基本的な機能は端末から要求された情報を元にテーブルの生成し，送受信パケットのカプセル化とデカプセル化処理を行う．また，この装置は IPv6 トンネルだけでなく，IPv4 トンネルも形成可能である．

##### (3) バンディングネゴシエーション

MN が移動してトンネルを形成するために，MN からトンネルサーバに対して情報共有が必要となる．この処理をバンディングネゴシエーションと呼び，IP アドレスやポート番号の内容が含まれる．

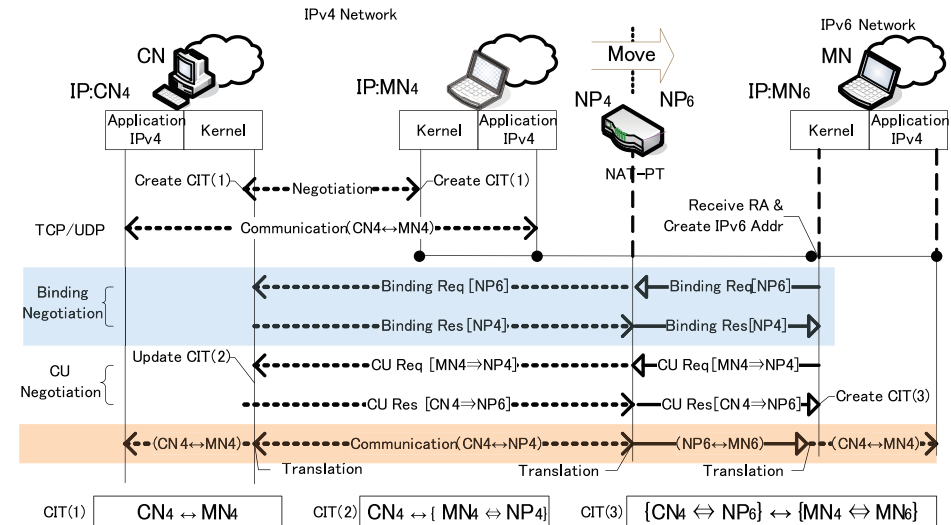


図 5 トランスレータ型 Mobile PPC のシーケンス  
Fig. 5 Sequence of Mobile PPPC type Tunnel.

トンネル型 Mobile PPC ではデュアルスタックネットワーク上には Mobile PPC 対応のトンネルサーバが必要で，IPv4 と IPv6 アドレス  $\{TS_4, TS_6\}$  を保持している．本方式におけるトンネルサーバの導入は，IPv4 と IPv6 の互換性を確保するためであり，Mobile PPC におけるアドレス変換は行わない．図 6 にトンネル型 Mobile PPC の動作とシーケンスを示す．端末が保持する IP アドレスや通信開始時のネゴシエーションは前述したトランスレータ型 Mobile PPC と同様である．MN が IPv4 ネットワークから IPv6 ネットワークへ移動すると，ルータ広告 RA を受信する．このとき，受信する RA は NAT-PT からではなく，一般の IPv6 ルータからである．RA の受信により，IPv6 アドレスの生成をすると同時に IPv6 ネットワークへの移動を検知する．次に，MN とトンネルサーバ間でバンディングネゴシエーション、MN と CN 間で CU ネゴシエーションを実行する．探索方法に関しては，DNS やエニーキャストを用いる方法などがある．バンディングネゴシエーションでは，MN とトンネルサーバ間で IPv4-in-IPv6 トンネルを張るためのテーブルを生成する．Tunnel Server と MN 間では IPv4 通信が不可能であるため，IPv6 トンネルを形成することで通信が可能となる．トンネル形成のためのテーブルとして受信パケットが

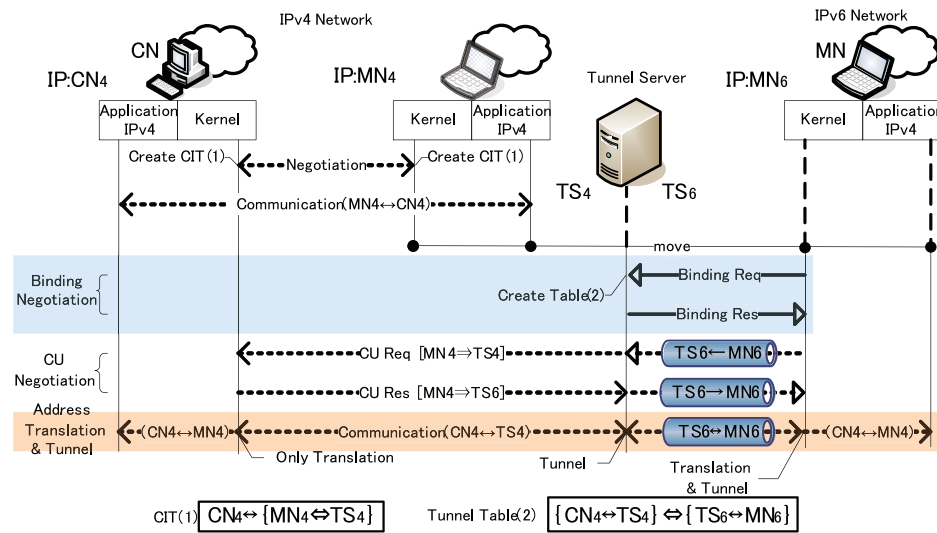


図 6 トンネル型 Mobile PPC のシーケンス  
Fig. 6 Sequence of Mobile PPC type Tunnel.

IPv6 パケット {  $MN_6 \rightarrow TS_6$  } であればデカプセル化を行い、IPv4 パケット {  $CN_4 \rightarrow TS_4$  } であればカプセル化を行うテーブルを作成する。このようなシステムにより MN と CN 間の通信経路を確立することができる。次に、MN と CN 間で CU ネゴシエーションを上記の通信経路を用いて実行する。通常の Mobile PPC と違う点は、移動後のアドレスとして MN ではトンネルサーバの IPv4 アドレスを通知することである。そのため、MN は CU Request を用いてアドレス変化 {  $MN_4 \Rightarrow TS_4$  } を CN に通知する。CU Request を受信した CN は CIT を以下のように更新する。

$$CIT : CN_4 \leftrightarrow MN_4 \leftrightarrow TS_4 \quad (4)$$

CN は CU Request の受信後、CU Response を MN に送信することで、CIT を (4) と同様に更新する。2 つのネゴシエーション完了後、MN とトンネルサーバ間ではトンネル転送を行い、MN と CN 間では CIT に従ってアドレス変換を行うことで移動透過性を実現することが可能となる。

## 5. 評価

本稿では、2 種類の IPv4/IPv6 混在環境における Mobile PPC の実現方法を検討した。

## 6. まとめ

本稿では、IPv4/IPv6 混在環境における移動透過性を Mobile PPC を用いて実現する方法について提案した。提案方式は今後変化していくネットワーク環境においても柔軟に対応可能な移動透過性通信を実現できる。今後は本システムを実装し、有用性を確認する。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費 20・1069）の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 寺岡文男：インターネットにおけるノード移動透過性プロトコル，電子情報通信学会論文誌 (D-I)，Vol.J87-D1, No.3, pp.308-328 (2004).
- 2) 竹内元規，鈴木秀和，渡邊 晃：エンドエンドで移動透過性を実現する Mobile PPC の提案と実装，情報処理学会論文誌，Vol.47, No.12, pp.3244-3257 (2006).
- 3) Soliman, H.: Mobile IPv6 support for dual stack Hosts and Routers (DSMIPv6), Internet-draft, IETF (2007). <http://tools.ietf.org/id/draft-ietf-mip6-nemo-v4traversal-06.txt>.
- 4) Perkins, C.: IP Mobility Support for IPv4, RFC 3220, IETF (2002).
- 5) Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, RFC 3775, IETF (2004).
- 6) Srisuresh, P.: Network Address Translation - Protocol Translation (NAT-PT), RFC 2766, IETF (2000).
- 7) Huitema, C.: Teredo: Tunneling IPv6 over UDP through Network Address Translations (NATs), RFC 4380, IETF (2006).