

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^{†1} 鈴木 秀和^{†1,†2} 渡邊 晃^{†1}

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 IP ネットワークでは、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 混在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,^{†1} HIDEKAZU SUZUKI^{†1,†2}
and AKIRA WATANABE^{†1}

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 ネットワークにおける移動通信では致命的な課題がある。それは、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ものである。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¹⁾。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)²⁾ 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を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章で既存技術とその課題を述べる。3章で 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章で提案方式の原理と各移動パターンの動作を述べ、5章と6章で評価とまとめを述べる。

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

^{†1} 名城大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Meijo University

^{†2} 日本学術振興会特別研究員 PD

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

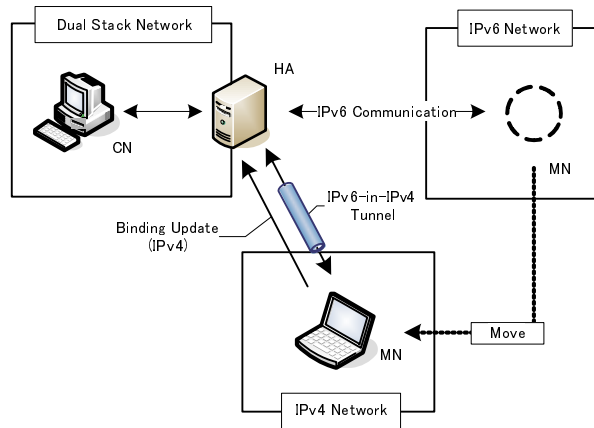


図 1 DSMIPv6
Fig. 1 DSMIPv6.

IPv6³⁾(以後 DSMIPv6) がある。DSMIPv6 は Mobile IPv4⁴⁾ と Mobile IPv6⁵⁾ 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) 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-IPv4 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。

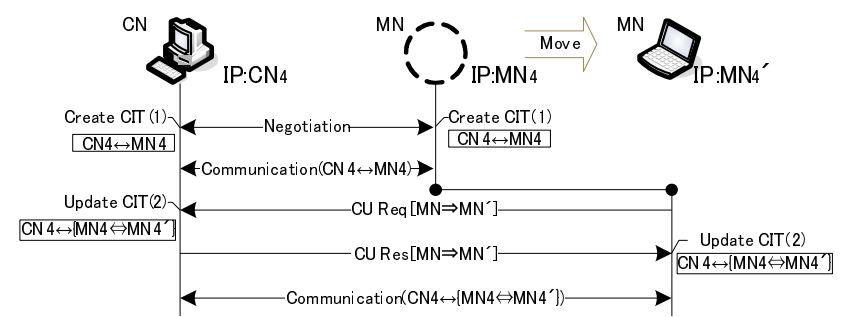


図 2 Mobile PPC の動作
Fig. 2 Sequence of Mobile PPC.

- S_4 ; 端末 X の IPv4 アドレス
- D_6 ; 端末 Y の IPv6 アドレス
- $S \Rightarrow D$; 端末の移動によるアドレス変化
- $D \rightarrow S, D \leftarrow S$; 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。この鍵は移動時に交換する移動通知パケットの正当性を保証するために使用する。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 IPv6 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)⁶⁾ 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。トンネルに分類される技術としては、Teredo (Tunneling IPv6 over UDP through NATs)⁷⁾ がある。この技術は IPv4 ネットワーク環境においても、IPv6 接続を可能にする。

以下に本提案と関連の大きい Teredo について説明する。図 3 に Teredo の動作と各機器の役割を示す。IPv4 ネットワークの NAT 配下に存在する Teredo Client、Teredo のサービスを管理するためにデュアルスタックネットワークに設置する Teredo サーバが必要である。また、IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークの境界に設置される Teredo リレー・ルータが複数存在する。まず、Teredo クライアントは Teredo サーバとネゴシエーションを行い、Teredo アドレスを生成する。アドレスの構成内容は、Teredo 専用のプレフィックス、Teredo サーバの IPv4 アドレス、NAT にマッピングされた IPv4 グローバルアドレス

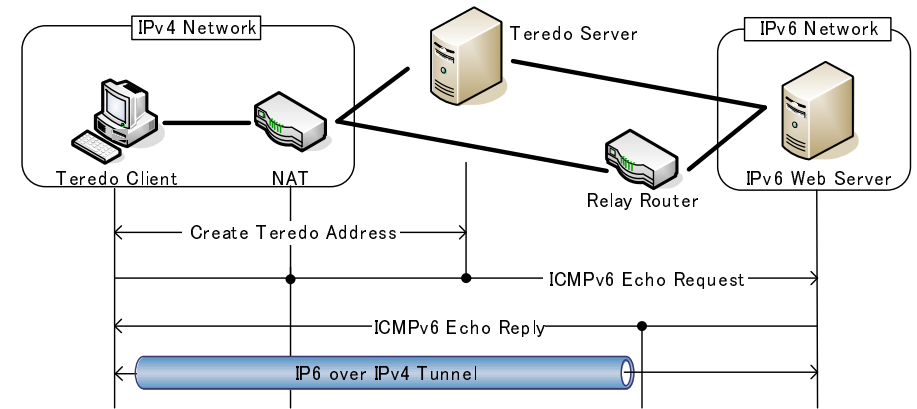


図 3 Teredo のシステム概要

Fig. 3 System constitution of the Teredo.

とポート番号から IPv6 アドレスが構成される。次に、パケットのカプセル化処理を行う Teredo リレー・ルータを決定する。Teredo クライアントから通信相手に ICMPv6 エコー要求を送り、往復経路は一番近い Teredo リレー・ルータを選択して送信される。この ICMPv6 エコー応答には、経由した Teredo リレー・ルータの IPv4 アドレスが含まれる。以後、の通信では Teredo クライアントと Teredo リレー・ルータ間を IPv6 over IPv4 トンネリングすることで IPv6 端末への通信を実現する。Teredo は NAT が存在する環境でも利用可能である。

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る。混在環境における移動パターンは 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 でトンネルシステムを用いた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

図 4 に本稿で想定する移動パターンを示す。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る考えられる。今後、構築するネットワークや小規模

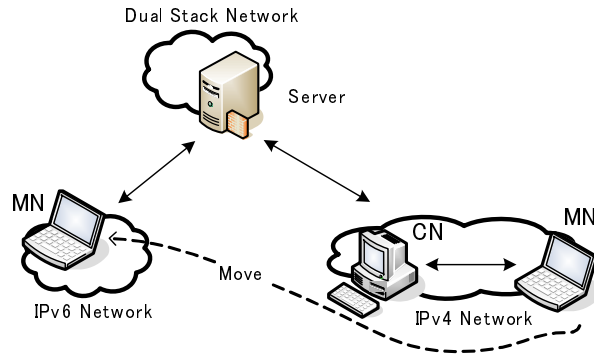


図 4 混在環境における移動パターン
Fig. 4 Mobility pattern in Coexistence Environment.

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 だけをサポートする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形態が多くなると予想される。

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、IPv4/IPv6 混在環境において通信を確立するためのトンネルシステムと Mobile PPC を用いた提案方式について述べる。端末はデュアルスタックで Mobile PPC を実装していることが前提で、デュアルスタックネットワークに専用のトンネルサーバを設置する。以下、4.2.1 でトンネルシステムの概要について、4.2.2 で混在環境における Mobile PPC の通信について述べる。

4.2.1 トンネルシステム

本提案で導入するトンネルシステムは Teredo のシステムを参考に構築した。Teredo の特徴としては、IPv4 によるカプセルリングにより、IPv4 と IPv6 の差異を吸収する。さらに、UDP によりカプセルリングを行っているため、NAT が介在した場合においても、IPv6 通信

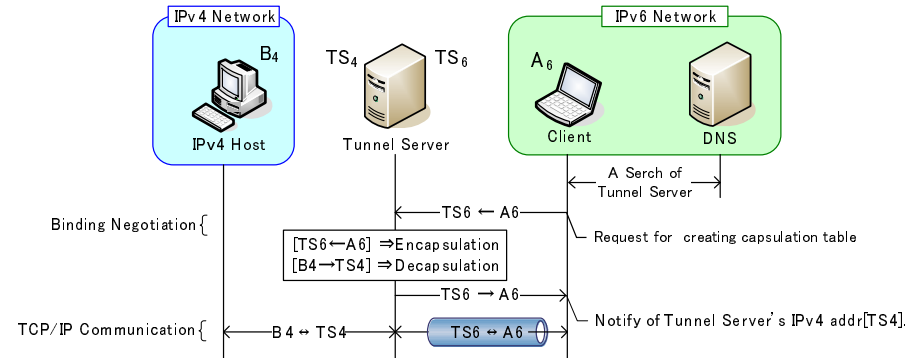


図 5 トンネルシステムの概要
Fig. 5 Overview of the Tunnel System.

が可能である点である。この二つの利点を残しつつ、混在環境における経路確保のみを目的としたシステムである。Teredo と大きく異なる点は、IPv6 over IPv4 でカプセルリングするだけではなく、逆の IPv4 over IPv6 カプセルリングを可能にした点である。IPv4/IPv6 混在環境において、一方のカプセルリングだけでは想定する移動パターンに対応しきれないと判断したためである。

図 5 に、トンネルシステムの概要を示す。IPv6 ネットワークに存在するクライアント端末から IPv4 ネットワークに存在する端末へトンネル通信を行う場合を示している。初めにトンネルサーバの名前で DNS に問い合わせを行う。この時、通信開始端末が IPv6 端末であるため、AAAA レコードで問い合わせをしてトンネルサーバの IPv6 アドレス {TS6} を取得する。次に、トンネルサーバに対してネゴシエーションを行う。このネゴシエーションでは、カプセル処理を行うためのテーブル生成の要求とトンネルサーバの IPv4 アドレスの取得を行う。IPv6 端末は IPv4 端末 {B4} と通信することをトンネルサーバへ通知し、それを受け取ったトンネルサーバはトンネルテーブルを生成し、トンネルサーバの IPv4 アドレス {TS4} を通知する。このネゴシエーションの後、トンネルサーバと IPv6 端末にはトンネルテーブルが生成され、図 5 のような IPv6 over IPv4 トンネル通信を行う。

4.2.2 トンネルシステムを用いた Mobile PPC

提案方式における Mobile PPC では以下のような拡張機能が必要である。

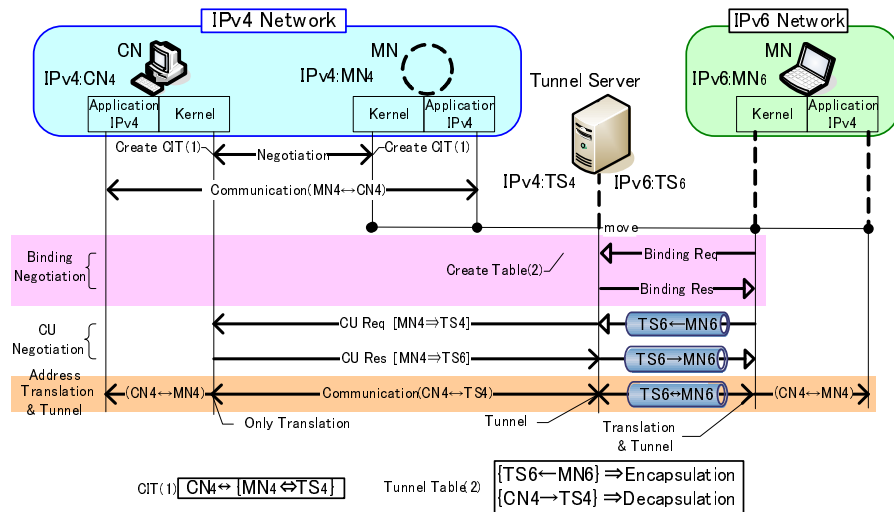


図 6 トンネルシステムを用いた Mobile PPC のシーケンス
Fig. 6 Sequence of Mobile PPC with Tunnel system.

(1) IPv4-IPv6 相互カプセル機能

IPv4 を IPv6 で、IPv6 を IPv4 でカプセル化する機能。この相互カプセル化により、IPv4 と IPv6 の差異を吸収する。

(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を生成し、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 トンネルと、IPv4 トンネルの両方を実現する。

(3) バイ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 とトンネルサーバの間で情報共有が必要となる。この処理をバイ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。

本提案システム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

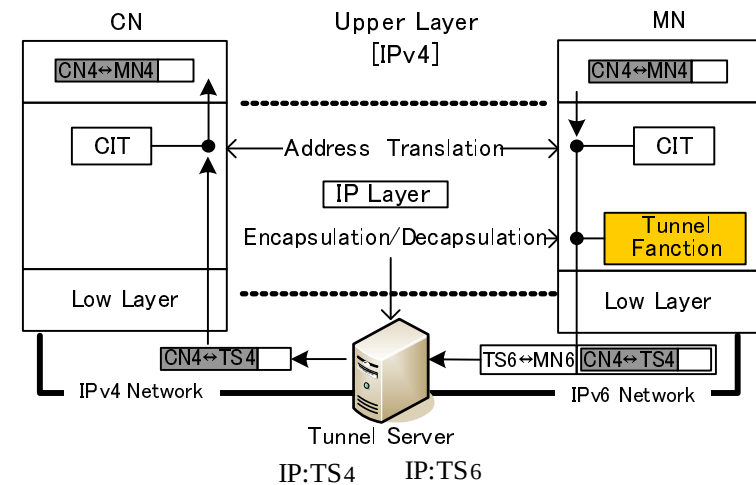


図 7 提案方式におけるパケットフロー
Fig. 7 Packet flow of the proposal system.

ネルサーバが必要で、IPv4 と IPv6 アドレス {TS4、TS6} 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 に係るアドレス変換は行わない。移動による IP アドレス変化の隠蔽を Mobile PPC の機能で実現し、IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークの経路の確立をトンネルシステムで実現することで、二つの機能を明確に分けて考えることができる。

図 6 にトンネルシステムを用いた 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 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、MN はルータ広告 (RA) を受信する。RA の受信により、IPv6 ネットワークへの移動を検知すると同時に IPv6 アドレスの生成をする。次に、MN とトンネルサーバ間でバイ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。バインディングネゴシエーションにより、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。トンネルサーバと MN 間では IPv4 通信ができないため、IPv6 トンネルを形成することで通信を可能とする。トンネル形成のためのテーブルとして受信パケットが IPv6 パケット {MN6 → TS6} であればデカプセル化を行い、IPv4 パケット {CN4 →

TS_4 }であればカプセル化を行うテーブルを作成する．このようにして MN と CN 間のトンネリングを用いた通信経路を確立することができる．次に，形成した通信経路を用いて 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．既存の Mobile PPC と違う点は，移動後のアドレスとして MN ではくトンネルサーバの 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．

$$CIT: \quad CN_4 \leftrightarrow MN_4 \leftrightarrow TS_4 \quad (2)$$

CN は CU Request の受信後，CU Response を MN に送信することで，CIT を (2) と同様に更新する．

図 7 に 2 つのネゴシエーション完了後の通信におけるパケットの流れを示す．移動後の通信では，MN とトンネルサーバ間ではトンネル転送を行い，MN と CN のエンド端末では 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

表 1 に，DSMIPv6 と提案方式の比較評価を行った．

表 1 DSMIPv6 と提案方式

	DSMIPv6	提案方式
ネイティブでの P2P 通信	△	○
冗長経路	△	△
特殊な装置	△	△
ヘッダオーバーヘッド	△	△
処理負荷	×	△

IPv4, IPv6 どちらかのネットワークで通信した場合，MIP では必ず HA を介さなければならない．Mobile PPC では，IPv4/IPv6 どちらのネイティブネットワークでも P2P 通信が可能である．

冗長経路，特殊な装置，ヘッダオーバーヘッドの三項目では，両方式においても混在環境では，同様の条件である．両方式ともデュアルスタックネットワークにサーバを設置し，トンネリングを行っているため，冗長経路，パケットのヘッダオーバーヘッドが発生する．

DSMIPv6 の処理不可は，IPv6 ネットワークにおける通信以外，ほとんど場合において

パケットのカプセルリングを行こなう．

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．今後は提案システムをを実装し、有用性の確認と性能評価をしていく．

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).

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

名城大学大学院 理工学研究科
寺澤圭史 鈴木秀和 渡邊晃

研究背景

▶ 移動通信形態の増加

- ネットワーク環境の整備
- モバイル端末の増加
- 無線技術の発達

▶ 移動透過性の実現

- 端末が移動すると、IPアドレスが変化してしまうため通信が維持できない

エンド-エンドで移動透過性を実現する通信プロトコル
Mobile PPC(Mobile Peer to Peer Communication)

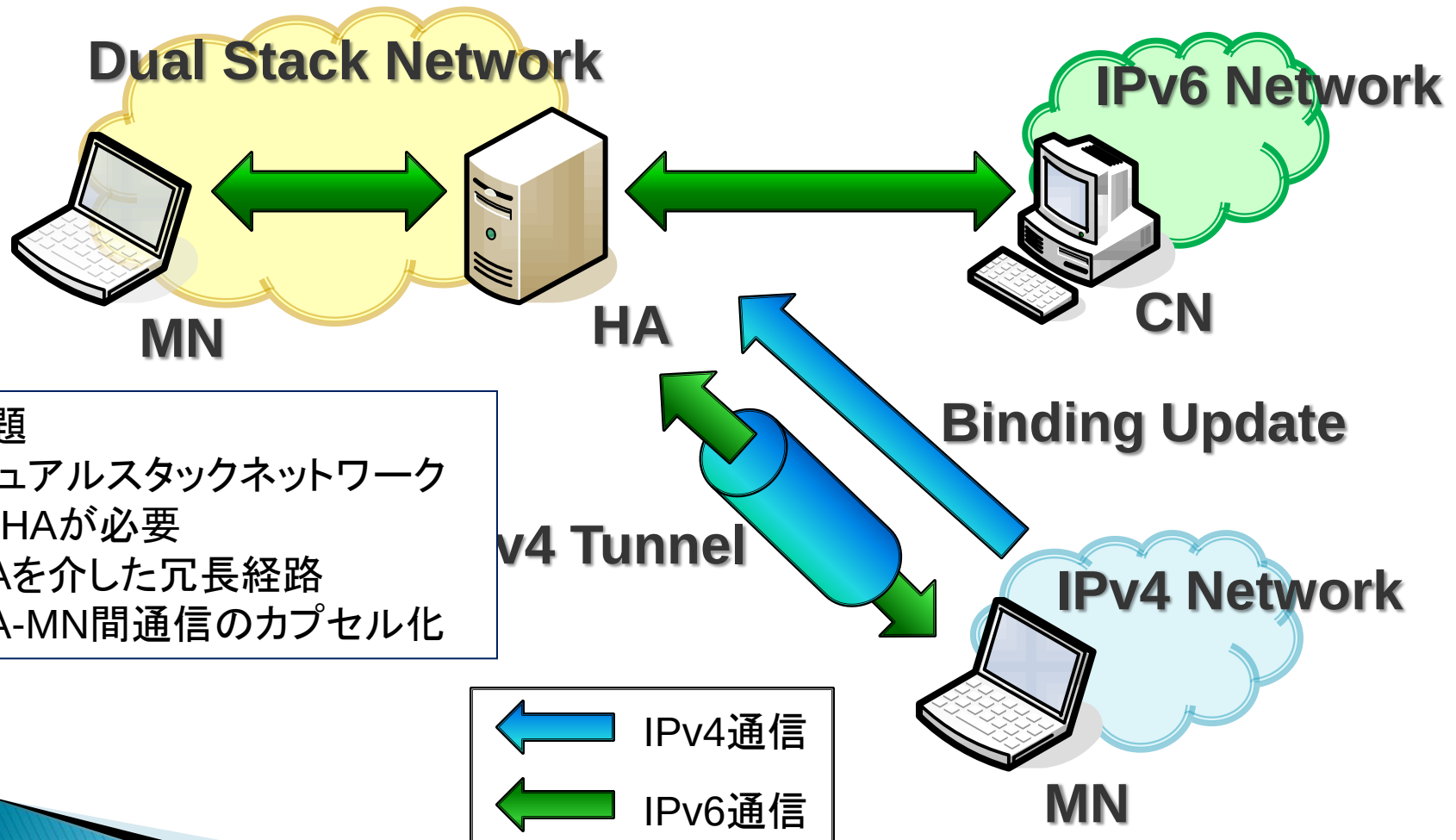
IPv6環境への移行

- ▶ IPv4からIPv6への移行
 - IPv4アドレスの枯渇
- ▶ IPv6移行における問題
 - IPv4のみ対応のアプリケーション
 - IPv4 / IPv6混在ネットワーク

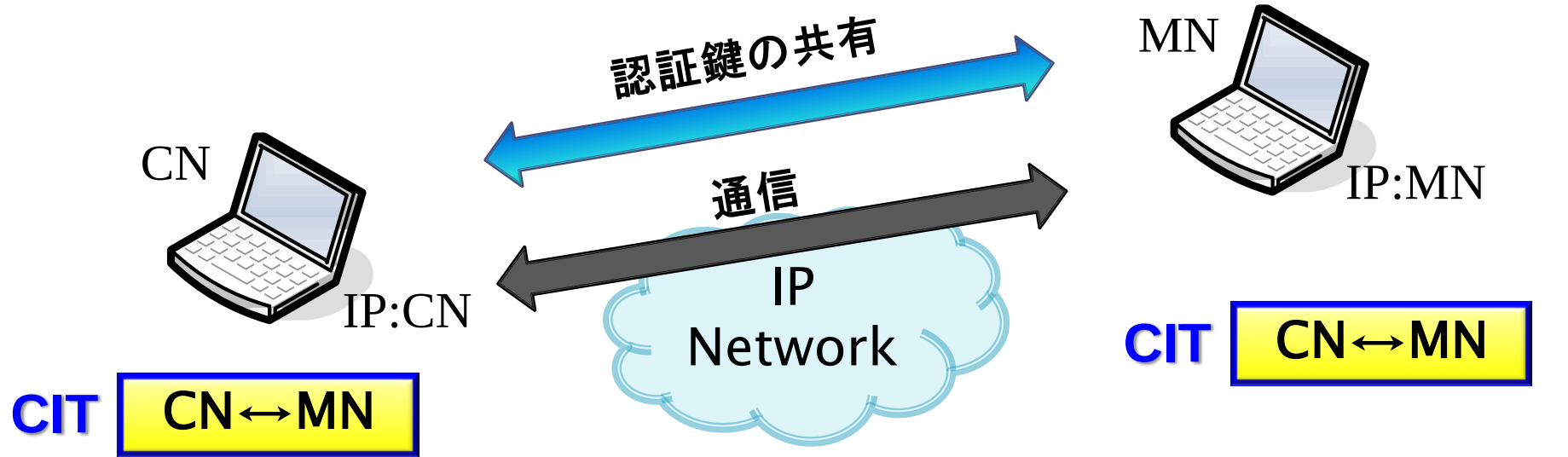


IPv4/IPv6混在環境において移動透過性を実現

Dual Stack Mobile IPv6



Mobile PPCの概要



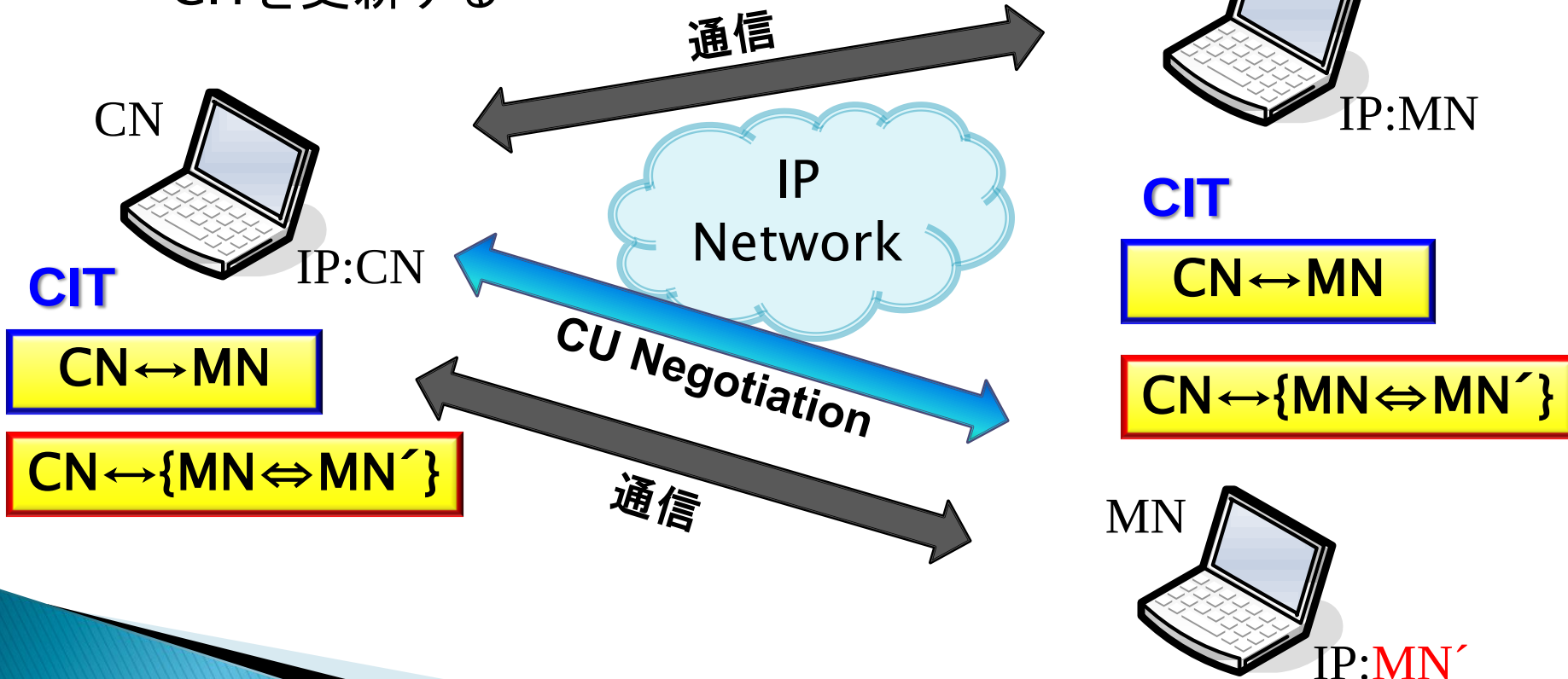
↔: 通信
⇔: アドレス変換

- ▶ 通信開始のネゴシーション
 - 通信相手と認証鍵の共有を行う
- ▶ CIT (Connection ID Table)
 - 移動前後のコネクション情報を保持するテーブル

Mobile PPCの概要

▶ CU Negotiation (CIT Update)

- IPアドレスが変化したとき, 移動後のIPアドレスを通知して CITを更新する



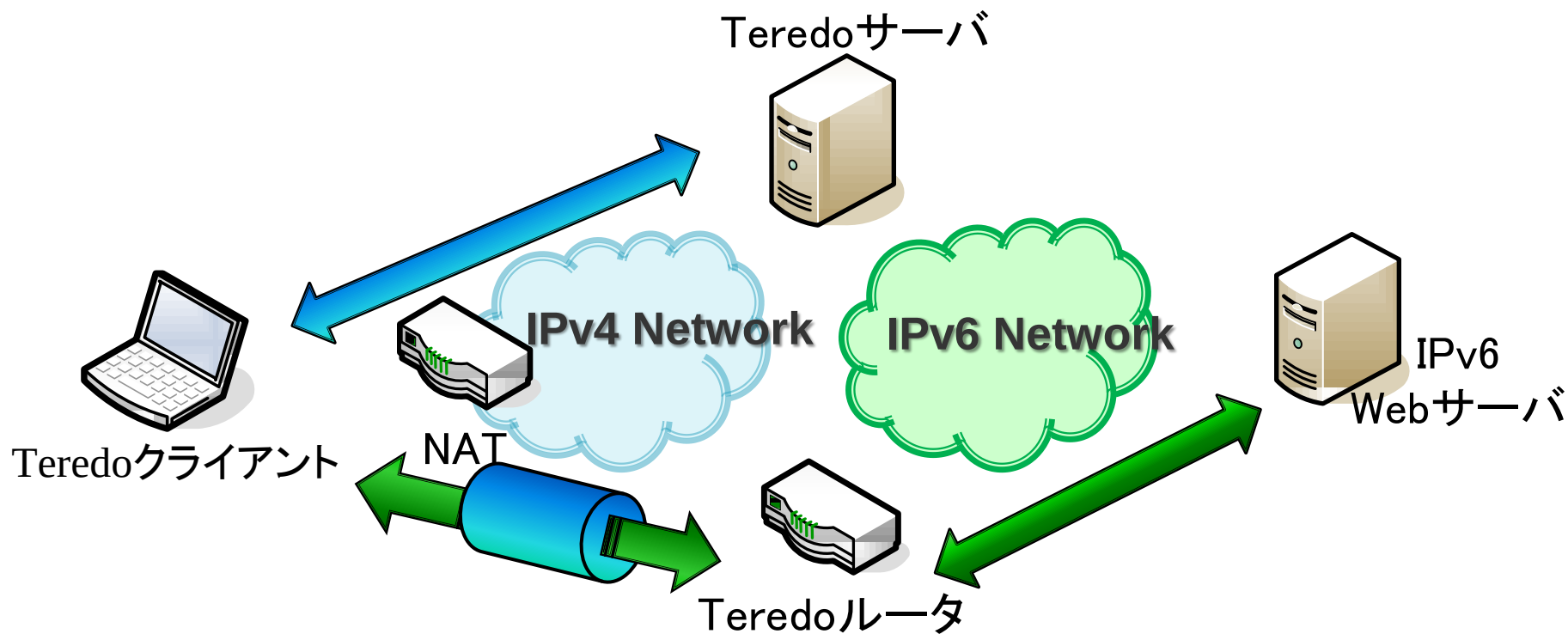
Mobile PPCの拡張

- ▶ Mobile PPCの特徴
 - MPPCとMPPCv6は、同様の原理で実現可能
 - 異なるのはアドレス体系のみ
- ▶ アドレス体系の差異
 - MPPCとMPPCv6には、仕様にほとんど変更がない
 - アドレス体系の差異を吸収するだけでよい

トンネルシステムを導入することで差異を吸収

Teredo

- ▶ Teredoサーバとのネゴシエーション
- ▶ クライアントとルータ間をトンネル通信



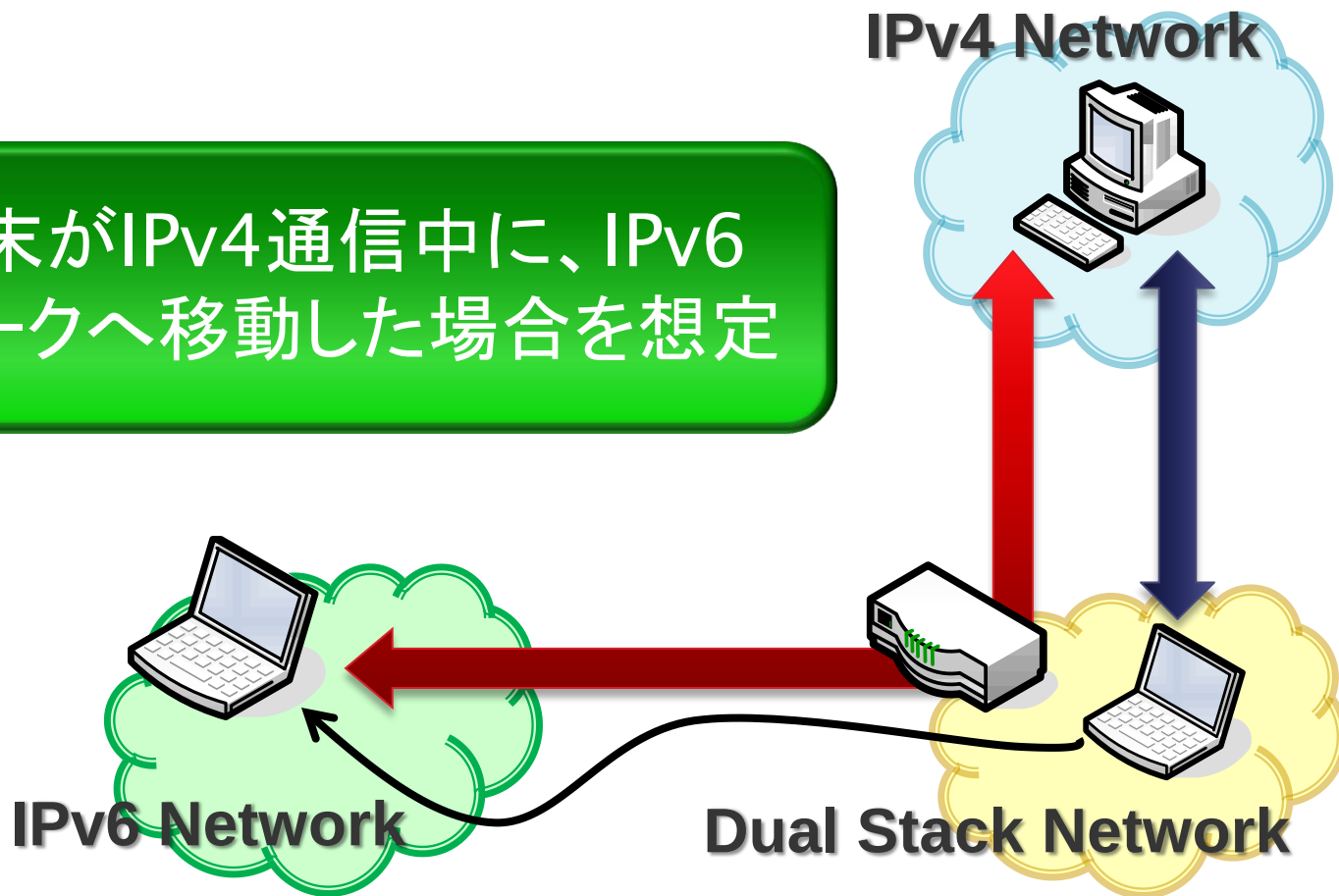
※Teredo:Tunneling IPv6 over UDP through
Network address Translations

提案方式

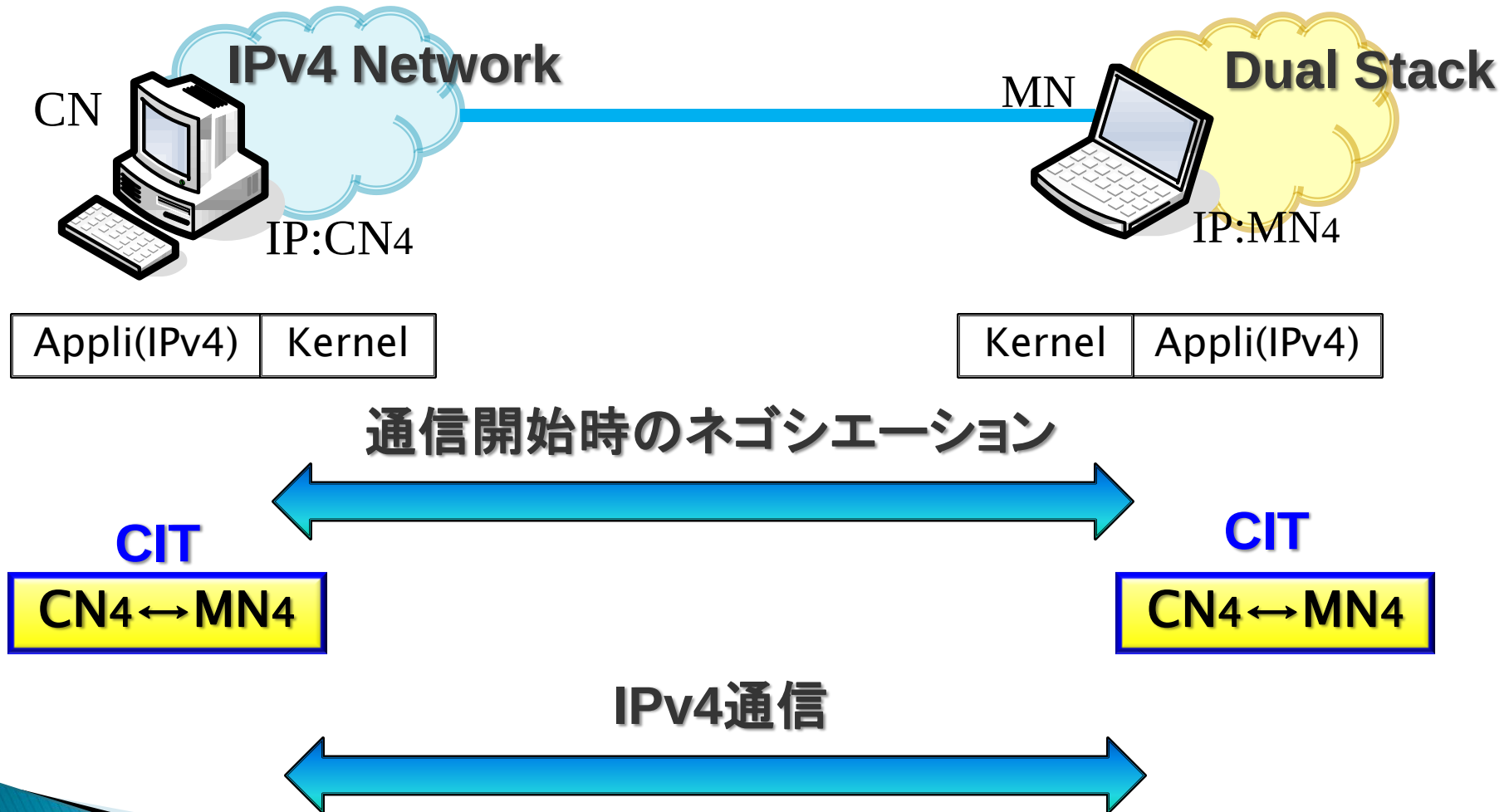
- ▶ トンネル型Mobile PPC
 1. トンネル機能の追加
 2. Mobile PPC対応トンネルサーバの設置
 3. バインディングネゴシエーション

移動パターンの定義

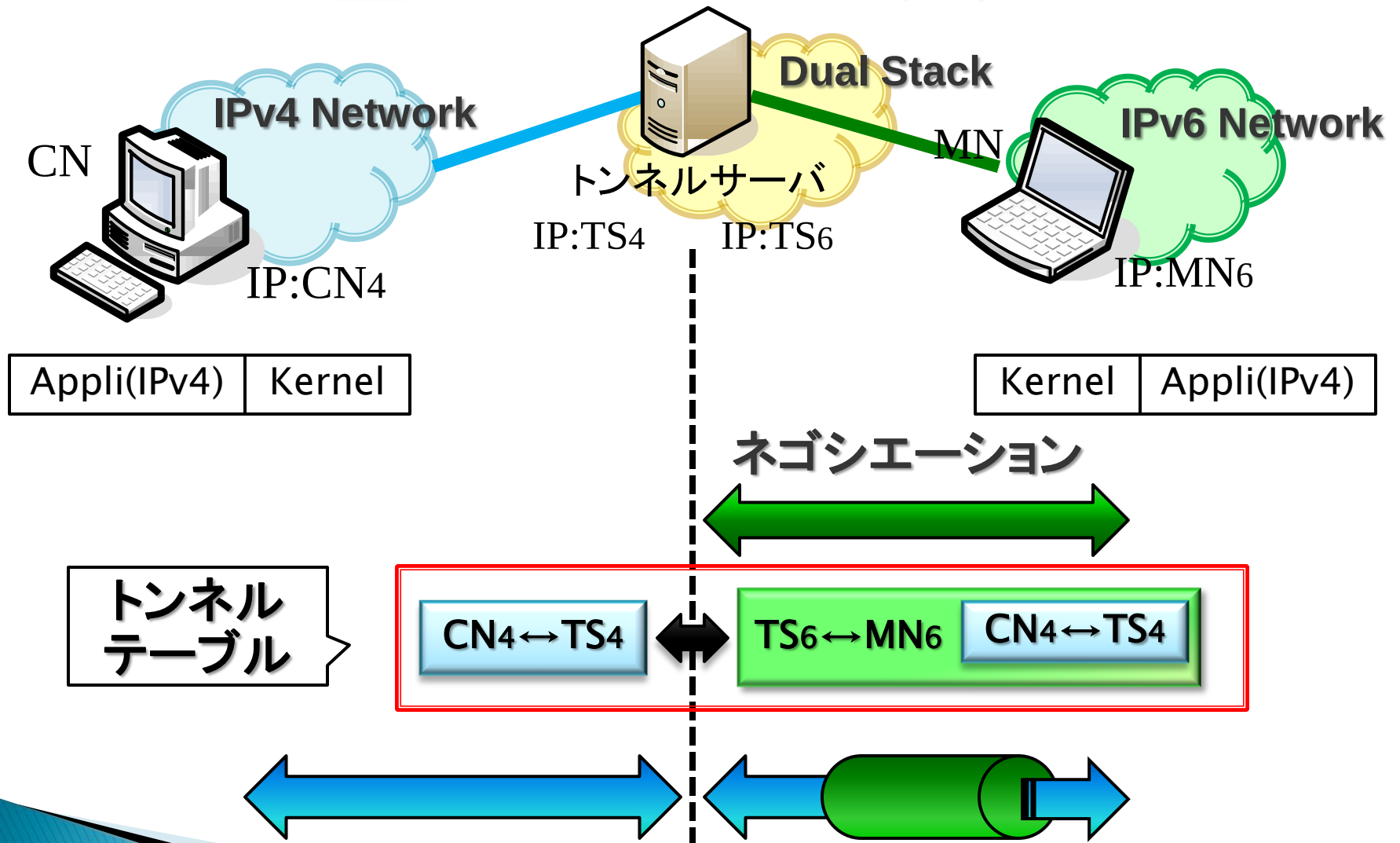
移動端末がIPv4通信中に、IPv6ネットワークへ移動した場合を想定



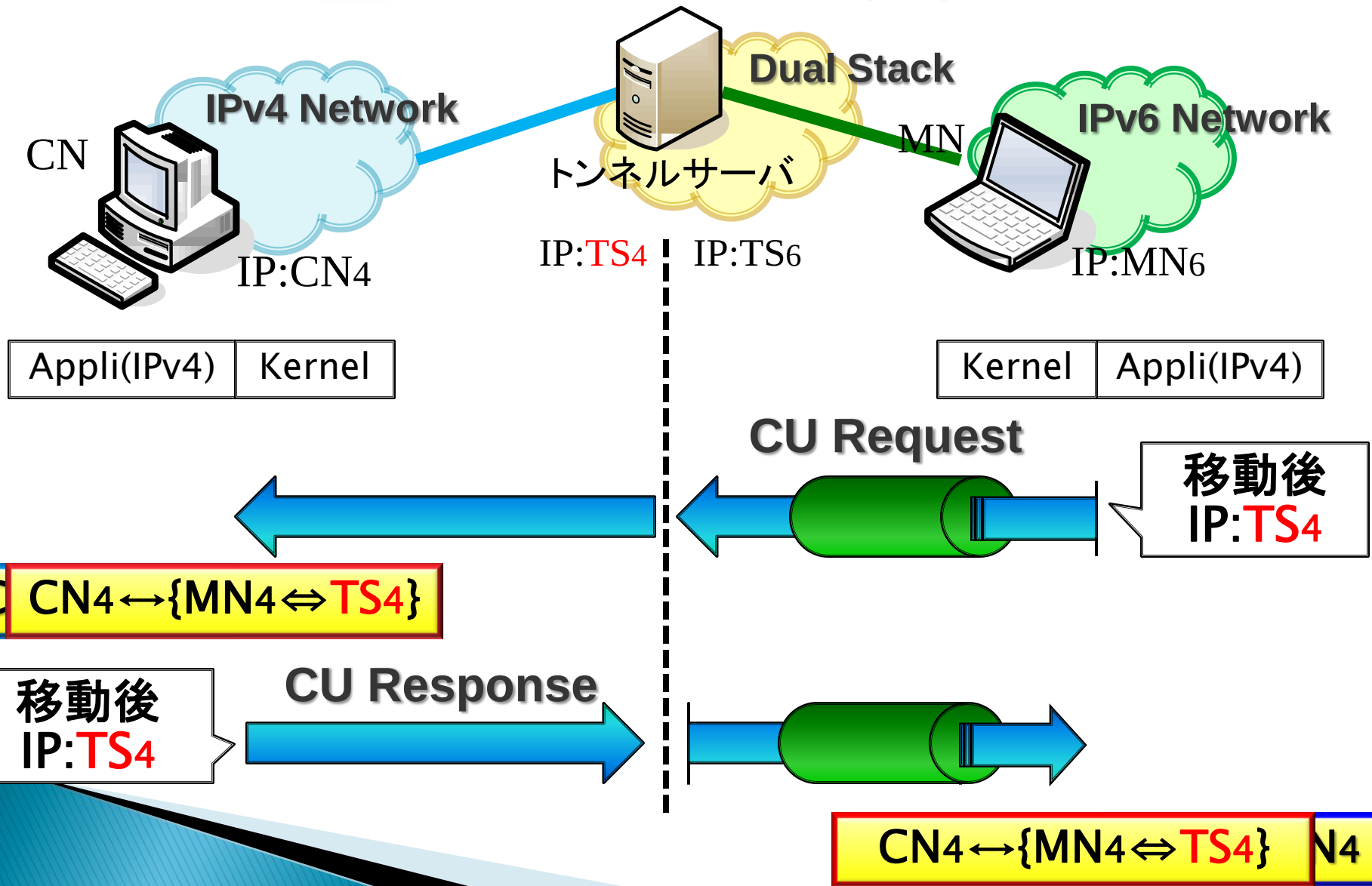
トンネル型Mobile PPC



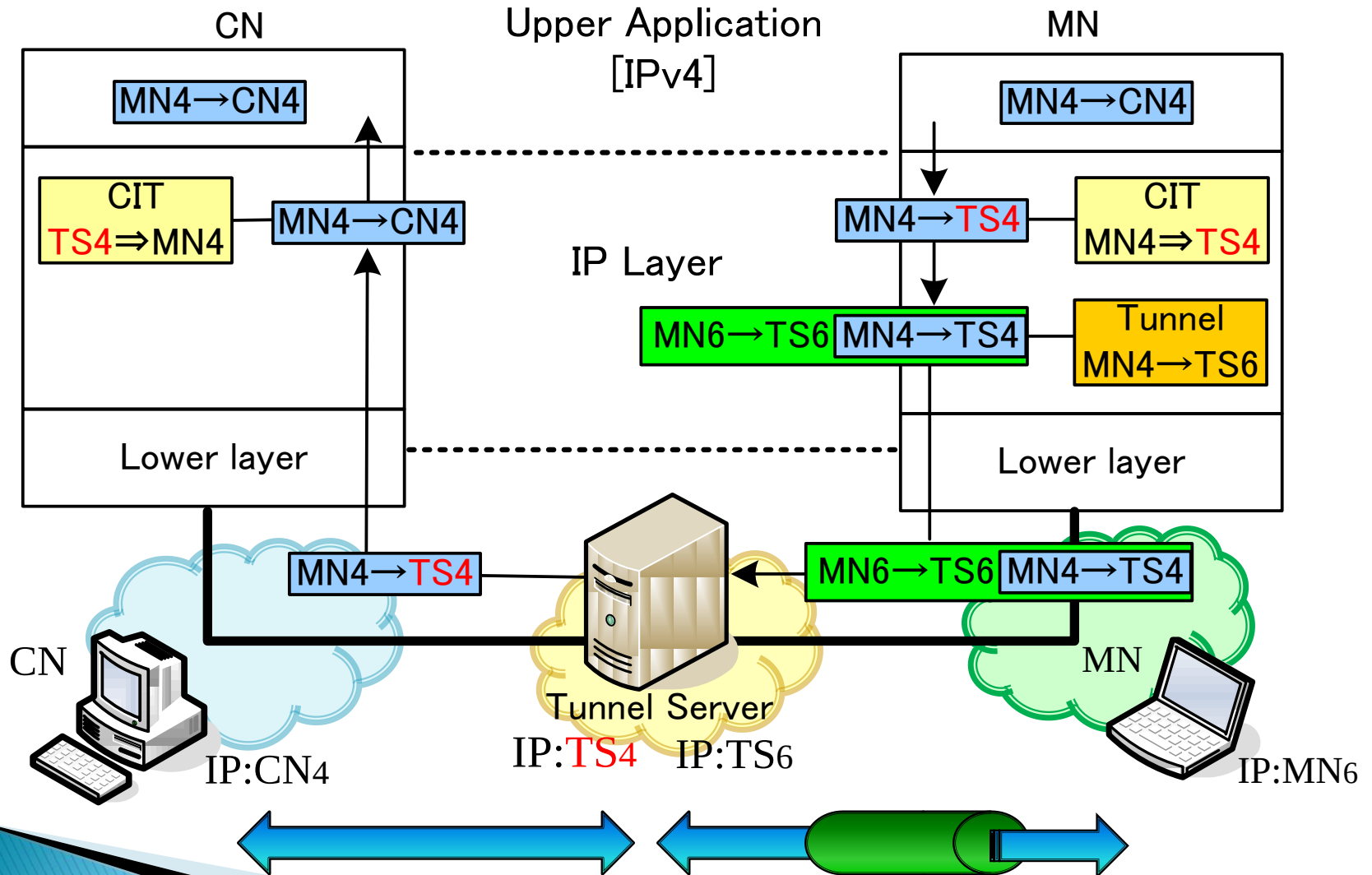
トンネル型Mobile PPC(2)



トンネル型Mobile PPC(3)

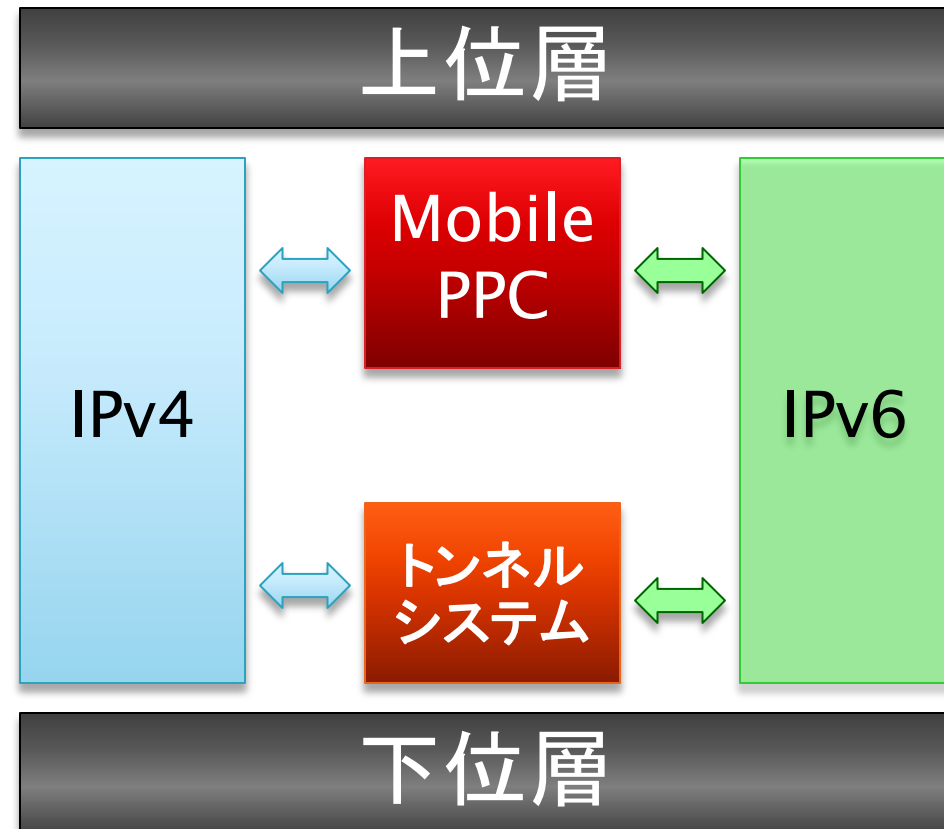


トンネル型Mobile PPC(3)



実装

- ▶ Mobile PPCの実装
 - OS: FreeBSD 7.0
 - 動作確認と性能評価を終えている
- ▶ Mobile PPCv6の実装
 - Mobile PPCと同一モジュールに実装
 - 今後、動作確認と評価を行う
- ▶ トンネルシステム
 - Mobile PPCとは別モジュールで実装する予定



まとめ

▶ まとめ

- IPv6移行期における、IPv4/IPv6混在ネットワーク環境においてMobile PPCを用いた移動透過性を実現する提案
- トンネル型Mobile PPC

▶ 今後の予定

- IPv6の実験環境を整え、Mobile PPCv6の動作確認
- トンネルシステムのより詳細な検討
- 提案方式の評価・測定