

## 移動通信用レイヤ 2 転送ネットワーク

亀田 卓 金沢 学志 駒場 大輔  
金 成権 中瀬 博之 坪内 和夫

東北大学 電気通信研究所  
〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1  
E-mail: kameda@riec.tohoku.ac.jp

**あらまし** 本研究では、移動通信 IP (internet protocol) ネットワークにおいて、端末移動時にスループット劣化のないハンドオーバを実現するレイヤ 2 転送ネットワークを提案した。端末移動時にスループットが劣化する問題の解決法として、TCP (transmission control protocol) ウィンドウ・サイズ適応制御と 2 受信系を用いた通信回線時差切り替え制御について提案した。IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11b 規格無線 LAN (local area network) を用いた TCP スループット実測評価を行った。TCP ウィンドウ・サイズ適応制御では、基地局・端末間距離に応じて TCP ウィンドウ・サイズを適応制御することにより、移動に伴い通信回線が切り替わってもスループット劣化を最小限に抑えられることを実測評価によって明らかにした。2 受信系を用いた通信回線時差切り替え制御では、TCP 通信中もスループットを劣化させることなく高頻度のハンドオーバが実現可能であることを示した。以上の結果から、今回提案した 2 解決法を用いたレイヤ 2 転送ネットワークを用いることで、音声通話などのストリーム通信でも瞬断なく通信回線を切り替えることができる移動通信 IP ネットワークが実現可能であることを示した。

**キーワード** 移動通信, IP ネットワーク, レイヤ 2 転送, ハンドオーバ, スループット

## Layer 2 Forwarding Network for Mobile Communication

Suguru KAMEDA, Gakushi KANAZAWA, Daisuke KOMABA, Seong-Kweon KIM,  
Hiroyuki NAKASE, and Kazuo TSUBOUCHI

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University  
Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan  
E-mail: kameda@riec.tohoku.ac.jp

**Abstract** We have proposed a wireless internet protocol (IP) network for high-data-rate mobile Internet access using layer-2-forwarding technology. In this paper, for seamless mobility and frequent handover, we propose following two handover methods, (1) flow control method using transmission control protocol (TCP) window-size control and (2) dual receiver switching method. We evaluated TCP throughput performance of the methods with Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11b modems. Using the TCP window-size control method, packet flow was controlled without buffered packets of base stations. From the experimental results of the dual receiver switching method, degradation of TCP throughput was negligibly small. The proposed network has a potential for being used to the high-data-rate and seamless mobility mobile Internet access.

**Key words** mobile communication, IP network, layer 2 forwarding, handover, throughput

### 1. ま え が き

携帯電話の爆発的な普及などに見られるように、移動体通信への要望はますます高まっている。セルラ方式の携帯電話を用

いたインターネットアクセスサービスも普及し、電子メールや WWW (world wide web) 閲覧などが可能となっている。しかし、携帯電話の通信速度は IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000) 規格 [1], [2] の通信方式を用いても、

現状ではパケット交換の下り回線で最大 384 kbit/s であり、より高速・広帯域化が望まれる。

一方、ここ数年ホットスポットサービス [3] が注目されている。このサービスは主に IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11b 規格 [4] の無線 LAN (local area network) アクセスポイントを駅構内や飲食店などに設置し、プロバイダ契約などを行っている利用者が所有する端末から公衆インターネットアクセスを実現するものである。通信速度は IEEE 802.11b 規格でも 11 Mbit/s、現在最も高速である IEEE 802.11a 規格 [5] では 54 Mbit/s を実現している。

さらにインターネット回線を利用した音声通話 (インターネット電話) である IP (internet protocol) 電話を移動体通信に適用した IP 携帯電話も開発されている [6]~[8]。音声通話の IP に伴い、現状では回線交換であるセルラ方式携帯電話も含めた移動体通信方式の IP 化が今後進み、携帯電話とホットスポットサービスのネットワークが融合すると考えられる。

一般に移動体通信方式では、移動に伴う回線切り替えが重要な課題の一つである。回線切り替えにも大きく二つの状況が考えられ、他の事業者やネットワークへの大規模な移動 (ローミング) と隣接する基地局への小規模な移動 (ハンドオーバ) がある。前者は Mobile IP [9] などで実現されている。本研究では、主に後者のハンドオーバを考える。

ハンドオーバにおいては、特に音声通話などのストリーム通信で瞬断なく通信回線を切り替えることが必要となってくる。我々は、IP 化されたネットワークでも上位レイヤ通信の切断なくハンドオーバを行うことができる、レイヤ 2 転送ネットワークを提案している [10]~[12]。

本研究では、端末移動時にスループット (実効速度) の劣化のないハンドオーバを実現することを目標とする。まず、レイヤ 2 転送によるネットワーク化について述べ、端末移動時における大幅なスループットの劣化を指摘する。次にその解決法として、TCP (transmission control protocol) ウィンドウ・サイズ適応制御と 2 受信系を用いた通信回線時差切り替え制御について提案する。さらに、IEEE 802.11b 規格無線 LAN を用いた実測評価を行い、2 制御法の有効性を示す。

## 2. レイヤ 2 転送ネットワーク

ハンドオーバを考えた場合、移動への対応に IP 層でのルーティング方式を用いると、移動の発生に伴って IP アドレスが変更される。IP アドレスが変更されると TCP など上位層のコネクションも切断されてしまう。そこで、我々が提案しているレイヤ 2 転送ネットワークでは、上位層のコネクションを維持したままの移動を可能にするため、MAC (media access control) アドレスを用いたレイヤ 2 (データリンク層) での経路制御を行う。

レイヤ 2 転送ネットワークの概念図を図 1 に示す。レイヤ 2 転送ネットワークは、レイヤ 2 スイッチ機能を持つ基地局 (BS) 同士が有線もしくは比較的高速・広帯域な無線回線で 1 対 1 接続されており、ツリー構造を形成している。端末 (MT) は各基地局と比較的低速・狭帯域な無線回線で接続され、ネッ

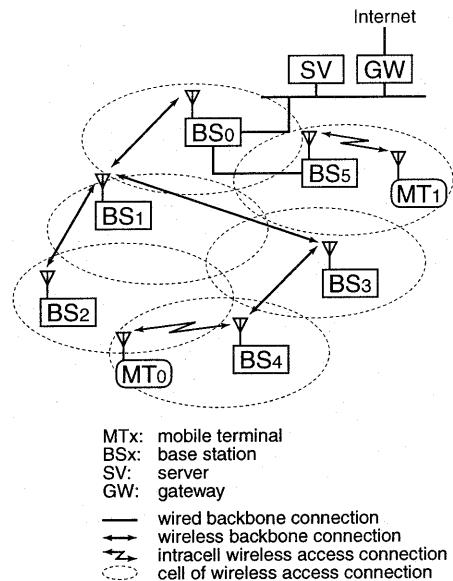


図 1 レイヤ 2 転送ネットワーク概念図

トワーク内の他の端末やサーバ (SV) との通信や、ゲートウェイ (GW) を経由して外部サーバなどの通信を可能とする。パケット転送は、通常のレイヤ 2 スイッチ機能と同様に、各基地局がパケットの宛て先 MAC アドレスを判断し、所有するアドレステーブルに従って転送される。

レイヤ 2 転送ネットワークは以下の特徴を有する。

- (1) レイヤ 2 転送ネットワーク全体が一つの IP ネットワークであり、ハンドオーバ時に IP アドレスの変更はない。よって、上位層の接続を維持したままの端末移動を可能とする。
- (2) レイヤ 2 で動作するため、上位レイヤに依存しない。よって、IPv6 (IP version 6) など新しい上位プロトコルにも容易に対応可能である。また、レイヤ 2 スイッチ機能を用いているため、最小限の実装変更で実現できる。

- (3) 送信パケットそのものに位置登録情報をもたせているため、位置情報のパケット量を削減可能である。また、位置情報が各基地局のアドレステーブルに分散されており、位置問い合わせ要求が存在しない。

ハンドオーバをターゲットとした類似研究としては、Cellular IP [13] や HAWAII [14] が挙げられる。提案方式はこれらの他方式と比較して、FreeBSD (Berkeley Software Distribution) などに付属のブリッジ機能に若干の変更を加えるだけで簡単に実装できる。さらに位置情報が集中していないため障害に強い特徴がある。

我々はこれまで、パケット到達の確実性向上のために移動通知機能を提案し、実測評価を行っている [10], [11]。端末が移動した直後に端末側からパケットの送信がない場合、各基地局のアドレステーブルが正しい経路情報を持たず、パケットの不通過状態が生じる。この解決のために、端末から移動前に接続していた基地局へ、移動を通知するパケットを送信することで、各

基地局のアドレステーブルが更新する機能を付加した。これにより、移動環境でもパケット到達の確実性が向上した。

### 3. スループット劣化のないハンドオーバーの実現

#### 3.1 スループット劣化要因

ハンドオーバー時におけるパケットの流れの概念図を図2に示す。サーバ(SV)から端末(MT)へパケットが流れている状態を示しており、図2(a)が端末移動前、図2(b)が端末移動直後を示している。

TCPで用いられているスライディング・ウィンドウ・プロトコルを用いた場合、定常的な通信状態では図2(a)に示すように、受信側である端末が通知するTCPウィンドウ・サイズに従って、サーバから大量のパケットが一度に流れ込む。しかし、端末側回線が低速な場合や経路上に輻輳がある場合などは、これらのパケットが端末に到着する前に回線が切り替わる場合が起こりうる。その結果、図2(b)のように移動前に端末が接続していた基地局BS0にパケットがバッファされてしまう。この状態では、各基地局のアドレステーブルが正しい状態に書き換わっても、TCPの再転送タイムアウト時間が経過するまで、未到達パケットの再転送が起こらない。以上より、端末が移動するとスループットが劣化する。なお、本検討ではTCPのみを検討するが、UDP(user datagram protocol)でもパケットが端末に到着する前に回線が切り替わることが起こり、パケットロスが発生すると考えられる。

以上を解決する方法としては、以下の3方式の解決法が考えられる。

(1) 移動前の基地局BS0へのバッファを防ぐため、ネットワークに流れるパケット量を最適化する。

(2) 移動前の基地局BS0へバッファされているパケットを端末がすべて受信した後に回線を切り替える。

(3) 移動前の基地局BS0へバッファされているパケットを、端末が移動後に接続した新しい基地局BS1経由で端末へ転送する。

このうち解決法(3)は他の2解決法に比べ、転送する際にネットワークに負荷がかかる点、転送の分だけ伝送遅延が大きくなる点から、音声通話などのストリーム通信へは適さないと考え、今回は検討を行わないこととした。以下では解決法(1)および(2)について検討を行った。

#### 3.2 解決法(1): TCPウィンドウ・サイズ適応制御

本解決法では、移動前の基地局にバッファされるパケット量を抑えるため、ネットワークに流れるパケット量を制御する。

スライディング・ウィンドウ・プロトコルでは、受信側が送信側へTCPウィンドウ・サイズを通知することで、ネットワークに流れるパケット量が決まる。よって、受信側がTCPウィンドウ・サイズを自由に変更できれば、ネットワークに流れるパケット量を自由に増減可能である。通常、TCPウィンドウ・サイズの増加に伴い、通信効率が向上し、スループットは一定値まで上昇する。

そこで、通常時はTCPウィンドウ・サイズを大きくとり、端末が通信可能範囲(セル)の端付近に移動し、現在接続してい

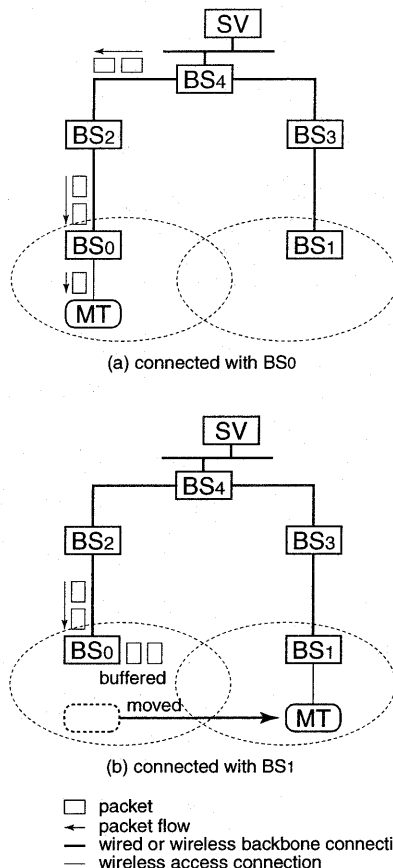


図2 ハンドオーバー時におけるパケットの流れの概念図

る基地局からの受信電力が小さくなったら、TCPウィンドウ・サイズを小さくすることで移動に備える。TCPウィンドウ・サイズが小さいため、移動時において移動前の基地局にバッファされるパケット量を最小限に抑えることが可能となる。この結果、移動に伴うスループットの大幅な低下を避けながら、効率的な通信を行うことが可能となる。

この方法は、端末が送信するTCPウィンドウ・サイズを、無線区間の受信電力によって決定するだけで実現でき、先に提案した3解決法の中で最も簡単に実現可能である。さらに、サーバや外部ネットワークなどの送信側は変更の必要がない特徴もある。

TCPウィンドウ・サイズ適応制御の実測特性を評価した。本評価では、ネットワークに流れるパケット量を制御した時に、移動に伴うスループットの大幅な劣化を防ぐことができる点を確認することを目的としている。

実測環境を図3に示す。サーバ(SV)、ブリッジ(BR)、端末(MT)はそれぞれFreeBSD4.4-Releaseを搭載したパソコンである。ブリッジはレイヤ2スイッチの機能をFreeBSD付属のブリッジ機能で実現している。基地局(AP)にも本来レイヤ2スイッチ機能を搭載すべきであるが、この実験では、市販の

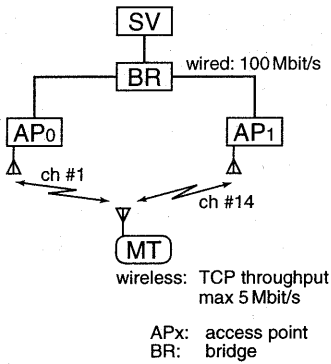


図3 TCP ウィンドウ・サイズ適応制御の実測系

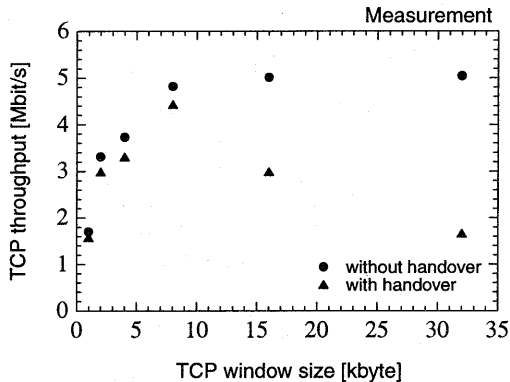


図4 TCP ウィンドウ・サイズ適応制御の実測特性

IEEE 802.11b アクセスポイント (メルコ社製 WLA-L11G) を用いた。サーバからアクセスポイントまでは有線 100base-TX で接続し、アクセスポイントと端末間は IEEE 802.11b 規格、通信速度 11Mbit/s で接続している。無線区間のスループットは約 5 Mbit/s である。また、無線区間の使用チャンネルは、1 および 14 チャンネルである。

実験では 8 Mbyte のデータをサーバから送信し、その受信時間を FreeBSD 付属のネットワークスループット測定ツールである nttcp を用いて測定した。サーバから端末へ TCP のコネクションを確立しパケットを送信する。回線切り替えがある場合とない場合でそれぞれ TCP ウィンドウ・サイズを変え、TCP スループットを比較する。回線切り替えありの場合の切り替え頻度は 10 秒に 1 回とした。回線切り替えの際は端末をアクセスポイントへ近づけ、使用チャンネル変更とブリッジのアドレステーブル変更のための移動通知パケット送信をソフトウェアで自動的に行った。また、移動局の移動に伴う無線伝搬路の影響は考慮していない。

評価結果を図 4 に示す。横軸が TCP ウィンドウ・サイズ、縦軸が TCP スループットである。●印が回線切り替えなしの場合、▲印は回線切り替えありの場合である。

回線切り替えの有無を TCP ウィンドウ・サイズ 32 kbyte で比較すると、回線交換が行われない場合、スループットは最大

値 5.04 Mbit/s であるが、この状態で回線を切り替えると、スループットは 1.64 Mbit/s まで劣化する。これに対し、TCP ウィンドウ・サイズ 8 kbyte で比較すると、回線切り替えが行われた場合でも 4.41 Mbit/s と大きな劣化なく高スループットを維持できることが分かる。

### 3.3 解決法 (2): 2 受信系の時差切り替え制御

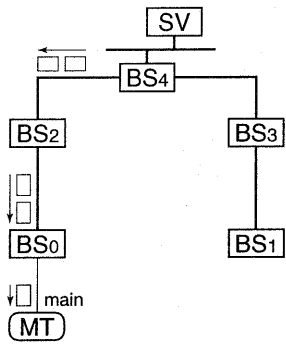
端末が移動後も移動前の基地局との接続を残しておくことができれば、端末は移動前の基地局にバッファされるパケットを受信できるので、スループットの劣化なく通信可能である。この方式を実現するためには、端末は 2 系統の受信回路を備える必要がある。以下、2 受信系の時差切り替え制御機能を図 5 を用いて説明する。2 系統のうち一方をメインインターフェース、他方をサブインターフェースと呼ぶこととする。メインインターフェースは送信機能も持つ。

図 5(a) は移動前などの通常時の通信状態を示している。通常、メインインターフェースのみ動作させ、サブインターフェースは休止状態しておく。パケットは送信側のサーバ (SV) からレイヤ 2 転送機能を有する基地局 (BS) を経由して端末 (MT) まで到達している。図 5(b) は端末が移動し、メインのインターフェースが基地局の切り替えをした直後の通信状態を示している。ここではサブインターフェースが動作し、移動前の基地局 BS0 からバッファされているパケットを受信している。また、既に受信したパケットに対する ACK (acknowledgement) はメインインターフェース経由で送信される。これにより、各基地局のアドレステーブルが移動後の経路情報に書き換えられる。図 5(c) は図 5(b) の状態から一定時間後、端末の移動が完了した後の通信状態を示している。移動後の経路情報に従って、基地局 BS1 経由でパケットが端末に到達している。

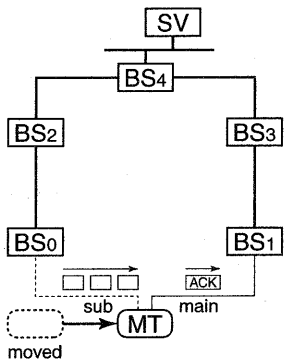
この方法は、端末・基地局ともに若干の変更が必要となり、物理的な受信器数も増加するがパケットロスや伝搬遅延なく通信することが可能である。さらに、サーバや外部ネットワークなど、送信側は変更の必要がない。

2 受信系の時差切り替え制御機能の実測特性を評価した。この評価では、移動前と移動後両方の基地局と同時に接続することによって、TCP 通信中に移動が発生しても通信速度の低下を根本的に抑えることができる点を確認することを目的としている。

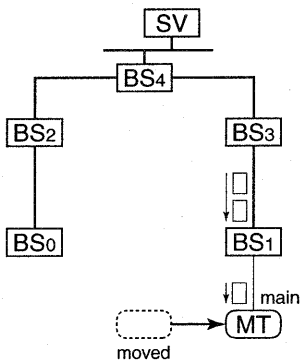
実測環境を図 6 に示す。端末 (MT) で 2 受信系を既存の無線 LAN カードなどを用いてこの方式を実現するために、2 枚の IEEE 802.11b 規格 NIC (network interface card) を利用した。そのうちメインインターフェースのみ IP アドレスを与えた。よって、パケットはすべてメインインターフェース宛としてサーバから送信される。この場合、通常サブインターフェースやそのデバイスドライバは受信パケットを他アドレス宛のものとして破棄してしまうが、今回の実測評価では、サブインターフェースでメインインターフェース宛でのパケットを受信する必要がある。そこで、サブインターフェースをプロミスカス (無差別) モードとし、受信パケットをそのまま上位層に送ることができるようにすることで、この問題を回避した。ハンドオーバー頻度に関わらず、メインインターフェースとサブ



(a) main NIC: connected with BS1  
sub NIC: suspended



(b) main NIC: connected with BS1  
sub NIC: connected with BS0



(c) main NIC: connected with BS1  
sub NIC: suspended

図 5 2 受信系の時差切り替え制御機能

インターフェースは、それぞれのインターフェースの回線切り替え時以外は異なる基地局に接続している状態にした。また、基地局にも FreeBSD4.4Release を搭載したパソコンを用い、ブリッジと同様の機能を実現した。基地局と端末間は IEEE 802.11b 規格、通信速度 11Mbit/s で接続しているが、ファームウェアの制限のため、無線区間のスループットは約 1 Mbit/s

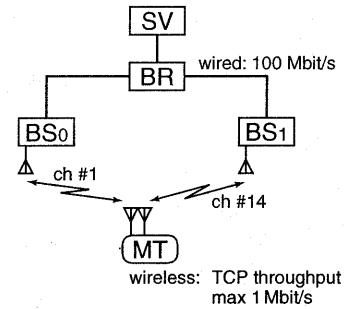


図 6 2 受信系の時差切り替え制御の実測系

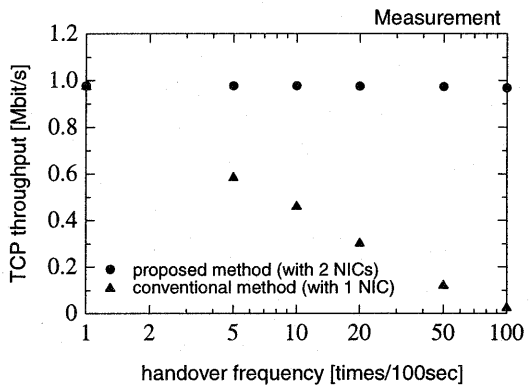


図 7 2 受信系の時差切り替え制御の実測特性

である。TCP ウィンドウ・サイズは 16 kbyte で固定とした。これ以外の条件は 3.2 項の実測環境と同一である。

実測では、回線切り替えの頻度を変え、NIC 1 枚の場合と 2 枚の場合の TCP スループットを比較した。端末は基地局 BS0 及び基地局 BS1 両方からの電波を受信可能な位置に配置し、回線切り替えと移動通知パケット送信をソフトウェアで自動的に行った。

評価結果を図 7 に示す。横軸は回線切り替え頻度、縦軸が TCP スループットである。▲印が従来方式の NIC 1 枚利用の場合、●印が提案方式の NIC 2 枚利用の場合である。従来方式では回線切り替え頻度が増加するに伴い、スループットが大きく劣化しているのに対して、提案方式では 1 秒に 1 回の高頻度切り替え時にもスループットがほとんど劣化していないことが分かる。

#### 4. む す び

本研究では、移动通信 IP (internet protocol) ネットワークにおいて、端末移動時にスループット劣化のないハンドオーバを実現することを目標とした。まず、レイヤ 2 転送によるネットワーク化について提案し、端末移動時における大幅なスループット劣化を指摘した。次にこの解決法として、TCP (transmission control protocol) ウィンドウ・サイズ適応制御と 2 受信系を用いた通信回線時差切り替え制御について提案

し、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11b 規格無線 LAN (local area network) を用いた実測評価を行った。TCP ウィンドウ・サイズ適応制御では、セル内における端末位置に応じて TCP ウィンドウ・サイズを適応制御することにより、移動に伴い通信回線が切り替わってもスループット劣化を最小限に抑えられることを実測評価によって明らかにした。2 受信系を用いた通信回線時差切り替え制御では、TCP 通信中もスループットを劣化させることなく高頻度のハンドオーバーが実現可能であることを示した。以上の結果から、今回提案の 2 解決法を適用したレイヤ 2 転送ネットワークを用いることで、音声通話などのストリーム通信でも瞬断なく通信回線を切り替えることができる移動通信 IP ネットワークを実現可能であることを示した。

## 謝 辞

本研究の一部は「文部科学省平成 14 年科学技術試験研究 RR2002 (次世代モバイルインターネット端末の開発)」により行われた。

## 文 献

- [1] IMT-2000 DS-CDMA System 標準規格, ARIB STD-T63, 社団法人 電波産業会, 2000.
- [2] IMT-2000 MC-CDMA System 標準規格, ARIB STD-T64, 社団法人 電波産業会, 2000.
- [3] 東日本旅客鉄道 (株)・日本テレコム (株)  
「無線による、駅でのインターネット接続実験」,  
[www.jreast.co.jp/musenlan/](http://www.jreast.co.jp/musenlan/).
- [4] IEEE802.11b, "Higher-speed physical layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band," 1999.
- [5] IEEE802.11a, "High speed physical layer (PHY) in the 5 GHz band," 1999.
- [6] アイビートーク (株)「モバイル IP talk」,  
[www.ipstalk.net/mobile.htm](http://www.ipstalk.net/mobile.htm).
- [7] 三菱電機 (株)「IP 携帯電話」,  
[www.MitsubishiElectric.co.jp/news/2002/0925-b.htm](http://www.MitsubishiElectric.co.jp/news/2002/0925-b.htm)
- [8] Cisco Systems, Inc., "Cisco Wireless IP Phone 7920,"  
[newsroom.cisco.com/d11s/prod.042803.html](http://newsroom.cisco.com/d11s/prod.042803.html).
- [9] C. Perkins, "IP mobility support," RFC 2002, Oct. 1996.
- [10] 鈴木 聡, 亀田 卓, 上田真司, 金沢学志, 中瀬博之, 坪内和夫,  
「レイヤ 2 転送による移動体通信ネットワークの構成法」, 2001  
信学総大, B-6-61, March 2001.
- [11] 金沢学志, 鈴木 聡, 亀田 卓, 上田真司, 中瀬博之, 坪内和夫,  
「ワイヤレスネットワークに適したレイヤ 2 転送」 インターネット  
コンファレンス 2001, pp.67-75, Nov. 2001.
- [12] 金沢学志, 駒場大輔, 亀田 卓, 中瀬博之, 坪内 和夫, 「レイヤ 2  
転送ネットワークにおけるデータフロー制御」, 2003 信学総大,  
B-6-126, March 2003.
- [13] A.T. Campbell, J. Gomez, S. Kim, A.G. Valkó, C.-Y. Wan,  
and Z.R. Turányi, "Design, Implementation, and evaluation  
of Cellular IP," IEEE Personal Commun., vol.7, no.4,  
pp.42-49, Aug. 2000.
- [14] R. Ramjee, T. La Porta, S. Thuel, K. Varadhan,  
and S. Wang, "HAWAII: A domain-based approach for  
supporting mobility in wire-area wireless networks," Proc.  
IEEE Int. Conf. Network Protocols (ICNP'99), Toronto,  
Canada, Oct. 1999.