

ブロードキャストの伝播を最小化する 中・大規模無線 LAN ネットワーク構成の検討

入江 智和^{1,a)}

概要: 近年の無線 LAN の通信速度の向上は顕著であり、今後もさらに高速な規格の標準化が期待される。一方で、高速な無線 LAN 規格を使用しているにもかかわらず、期待した通信速度が得られないこともよくある。その原因の一つにブロードキャストの通信が挙げられる。ブロードキャストは有線 LAN でも行われているが、無線 LAN ではその特性により有線 LAN の場合よりも大きな影響を及ぼす。本稿ではこのブロードキャストの影響がより顕著と思われる中・大規模無線 LAN 環境を対象に、ブロードキャストの伝播を最小化するネットワーク構成を提案する。提案構成は AP にブリッジ型ではなくルータ型を用いるとこに特徴がある。提案構成の通信実験環境を構築し、実験結果から提案構成の実現性と有効性を確認した。

キーワード: 無線 LAN, 無線 LAN システム, ブロードキャスト抑制, ルータ型 AP

A Study of Wireless Local Area Network Structure to Minimize Spreading Broadcast Frame

IRIE TOMOKAZU^{1,a)}

Abstract: In recent year, maximum data rate of wireless LAN is being improved. We expect higher data rate methods. However, we are not able to often get throughput expected in spite of using a high data rate standard. I think one of the causes is broadcast. It is used in wired LAN even now but makes huger impact on wireless LAN characteristically than wired one. In this paper, I propose a network structure to minimize spreading broadcast frame for wireless LAN system in large or medium scale, because the system is particularly affected by it. One of the features of the network structure is to use router type APs. I have built an experimental environment, and I confirmed the feasibility and effectiveness of the network structure from the experimental results.

Keywords: Wireless LAN, Wireless LAN System, Broadcast frame control, Router type AP

1. はじめに

近年の無線 LAN の通信速度の向上は顕著である。特に IEEE802.11ac は、その対応製品の発売時点で一般への普及規格においては有線 LAN の通信速度 1Gbps すら圧倒し、高速性の有線 LAN、機動性の無線 LAN という暗黙の住み分けを打破し、むしろ有線 LAN がボトルネックに成

り得る状況を招いている。さらに高速な規格も検討されており、今後も無線 LAN の通信速度は向上していくことが期待される。

一方、無線 LAN の通信速度においては、物理的な最高速度と実効的な通信速度の乖離がしばしば話題になってきた。ユーザが測定・体感できる通信速度が規格の物理的な最高速度には全く至らないばかりか、程遠いことすら多い。その原因は通信やネットワークの専門家からすれば周知のことがほとんどだが、無線 LAN の実効的な通信速度を改善していくために注目すべき原因もある。

¹ 独立行政法人国立高等専門学校機構 鹿児島工業高等専門学校
National Institute of Technology, Kagoshima College, 1460-
1 Shinko, Hayato-Cho, Kirishima-Shi, Kagoshima 899-5193
Japan

^{a)} irie@kagoshima-ct.ac.jp

本研究が注目するのは、特にアクセスポイント（Access Point: AP）を使用するインフラストラクチャ方式におけるブロードキャスト・マルチキャストの影響である。有線 LAN と無線 LAN を中継する典型的な AP を例に考えると、ある AP の配下にある無線端末がブロードキャストフレームを送信する際、まず AP に宛てたユニキャストフレームとして送信し、AP が有線 LAN 側とその AP 配下の無線 LAN 側にそのブロードキャストフレームを転送する。この転送はブリッジの動作として必要なものであるが、配下の無線 LAN 側にも転送することに注目している。無線端末からのブロードキャストフレームは、同じ AP 配下の別の無線端末に直接送信されるのではなく、AP を介して送信される。すなわち、AP 配下では同一のブロードキャストフレームが 2 度流れることになる。しかも、AP がその配下に転送するブロードキャストフレームは、配下にある全ての無線端末が受信できるように、通常、最も遅い通信速度（Basic Rate）で送信される。最高通信速度が 54Mbps の IEEE802.11a の場合、既定の Basic Rate は 5Mbps である。つまり、最高通信速度比でおよそ 10 倍の影響があることになる。しかも、前述の通り、2 度流れることも意識する必要がある。AP と無線端末間の距離に応じて、そもそも無線端末から AP に送信される段階のフレームも Basic Rate あるいは相当に低い通信速度による可能性もあり、無線端末が送信するブロードキャストは最高通信速度比で 20 倍以上の影響もあり得ることになる。さらに、このように大きなコストをかけて AP が転送したブロードキャストフレームが、例えば有線 LAN 側の機器の IP アドレスを解決するための ARP 要求である等、その AP 配下では結果として無意味なことも多々有り得る。また、有線 LAN 側で発生したブロードキャストフレームも AP はその配下に転送するが、同様にその AP 配下では結果として無意味なこともある。それでも、ブリッジの役割を担う AP の動作としては必要である。上位の高速な規格は下方互換性を有することが多く、その場合、下位の低速な規格を包括できる。このため、今後実用化されてくる高速な規格でも Basic Rate は思いのほか低速なことも考えられる。AP によっては Basic Rate を底上げる機能を有するものもあるが、それは一般にサービスエリアの広さとトレードオフになる。一般家庭で個人的に使用する AP であれば、セキュリティを維持するためにあえてサービスエリアを狭くすることが有効なこともあるが、中・大規模な無線 LAN 環境では単に AP の必要総数増加に直結するため、現実的ではないことがある。中・大規模無線 LAN 環境の運用者は、高速な規格がその高速性をいかんなく発揮するため、ブロードキャスト・マルチキャストの影響を最小化したいと考えており、それを実現する技術や方式を待ち望んでいる。

本稿では、以上の背景に基づき、中・大規模無線 LAN

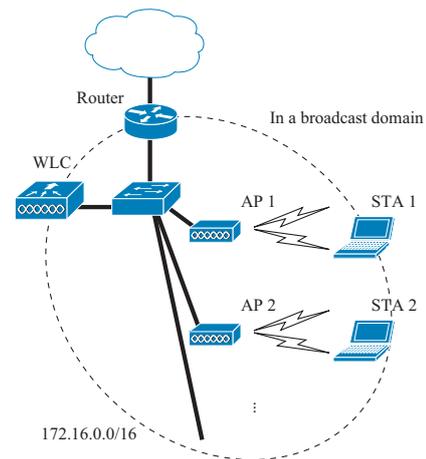


図 1 ブリッジ型 AP による典型的なネットワーク構成
Fig. 1 Typical network structure using bridge type APs.

環境においてブロードキャストの伝播を最小化するネットワーク構成を提案する。提案構成はローカルブロードキャストはルータを超えて伝播しないというシンプルな原理に基づいたものであり、AP に一般家庭用ではむしろ主流であるルータ型を活用することに特徴がある。まず、ルータ型 AP を用いることで、有線 LAN 側からのブロードキャストの流入を防止する。また、同じ AP 配下の無線端末間の直接通信を制限する機能と、無線端末にネットワーク構成を誤認させる方法を併用し、無線 LAN 側で発生するブロードキャストも最少化する。一方で、提案構成に対応するための特別な機能を無線端末に求めることは普及・展開を阻むため、無線端末は一般的な通常のを前提とする。すなわち、提案構成に対応するための特別な機能はネットワーク側で実現できることとする。提案構成により、ブロードキャストの伝播を最小化し、高速な規格がその高速性をいかんなく発揮することの助長を目指す。

2. 中・大規模な無線 LAN 環境の典型的な構成

典型的と思われる中・大規模な無線 LAN 環境のネットワーク構成を図 1 に示す。このネットワーク構成は有線 LAN と各 AP 配下の無線 LAN が一つのブロードキャストドメインで構成されており、通常はサブネットワークも同一である。すなわち、AP はブリッジとして機能する。中・大規模な無線 LAN 環境では AP が多数になる場合が多いため、多数の AP を効率的に管理するための無線 LAN システムコントローラ（Wireless LAN System Controller: WLC）を導入することが多い。WLC と AP 間は専用の VLAN に分けられ、AP を管理するための通信は通常端末とは異なるサブネットワーク内で行われることも多く、その場合、図 1 の構成では管理用の通信の影響が無線 LAN 側には及ばないようにすることも可能である。通常端末用の有線 LAN と無線 LAN を一つのブロードキャストドメインとサブネットワークで運用することで、有線端末と無

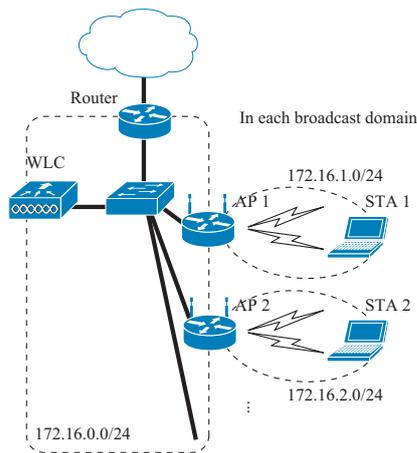


図 2 ルータ型 AP による典型的なネットワーク構成

Fig. 2 Typical network structure using router type APs.

線端末の区別を不要とし、ブロードキャストやマルチキャストによる通信を行うアプリケーションを LAN 全域で使用することも可能であり、無線端末が AP 間を移動しても同一の IP アドレスを継続使用しやすく、なによりネットワーク構成が簡単で設計と管理も容易になる等、様々なメリットがある。また、無線端末が AP 間を移動する際の処理を短縮する高速ローミング方式 [1] も標準化されており、単に AP 間の移動後も同一の IP アドレスを継続使用しやすいというだけでなく、移動に伴う切断状態を最短時間に抑制することも比較的容易であり、この点においてはリアルタイム性が重要なアプリケーションの利用にも適している。一方で、有線 LAN 側で行われるマルチキャストが無線 LAN 側に流入し、そのマルチキャストとは無関係な無線端末の通信が阻害されることもあり、結果としてリアルタイム性が重要なアプリケーションの利用に適さない状況も起こりうる。

有線 LAN 側から無線 LAN 側へのブロードキャストやマルチキャストの流入抑制を試みる場合に典型的と思われる中・大規模な無線 LAN 環境のネットワーク構成を図 2 に示す。このネットワーク構成は有線 LAN と各 AP 配下の無線 LAN それぞれを個別のブロードキャストドメインとして構成し、サブネットワークも異なる。この場合、AP はルータとして機能させる必要がある。各 AP 配下の無線 LAN でサブネットワークが異なるため、無線端末が AP 間を移動すると必然的に IP アドレスが変更され、IP アドレスの変更に対応できないアプリケーションは移動前から行っていた通信を継続できない。無線端末が移動後も移動前と同じ IP アドレスを継続使用するためには特別な対応が必要になる。そのために、AP 間を移動した際に移動前後のサブネットワークが異なる環境に対応可能なローミング方式 [2] も標準化されたが、実質的にはこの方式のみではローミング自体が実現できない上、同様の要求に対応するにはモバイル IP の方が好適と見込まれる等の理由も

あつてか、既に取り下げられている。実際にモバイル IP で代替を試みる場合、無線 LAN システムのようにネットワーク的に比較的狭い範囲で使用するにはそのメリットが活かされず、デメリットが際立つのであろう、そのような事例や実装は見受けられない。

3. 参考研究

広域イーサネット接続サービスが注目を集めた頃、イーサネットがブロードキャストを多用していることを課題として、その解決を図るノンブロードキャスト・ブリッジネットワーク (Non-broadcast Bridge Network: NBBN) [3] が提案された。NBBN ではブロードキャストそのものを無くすのではなく、ブロードキャストを伝播させないブリッジ (Non-broadcast Bridge: NBB) をブロードキャストネットワークすなわち通常のイーサネットによる LAN 間に置き、例えば片方の LAN で発生したもう片方の LAN に接続された機器への ARP 要求に対しては、NBB に接続されたプロキシサーバが応答することで LAN 間の通信を成立させ、かつ LAN 間のブロードキャストの伝播を抑制するものである。広域イーサネット接続サービスと各 LAN を、それぞれ有線 LAN と各 AP 配下の無線 LAN に置き換えてみると、NBBN のコンセプトは本研究が目指す中・大規模無線 LAN 環境においてブロードキャストの伝播を最小化するネットワーク構成を実現する一手法に成り得る。実際、最近実用化されているコントローラ型の無線 LAN システムでは、AP 配下で発生した ARP 要求を受信した AP がその情報をコントローラにのみ転送し、コントローラが解決を代行可能な場合はコントローラから ARP 要求を送信した無線端末に ARP 応答を返すように見受けられるものもあり、ブロードキャストの伝播が無線 LAN で課題になっていることと、その解決策として NBBN のコンセプトが活用されていることが伺える。このように、既に実用化されているように見受けられるものもあり、NBBN のコンセプトが有用であることに疑いない。しかしながら、ブロードキャストの内容、すなわちプロトコル毎に対応するプロキシサーバを設置する必要があることは課題である。実際、アドレス解決以外のブロードキャストやマルチキャストを抑制する機能を有した無線 LAN システムは見受けられない。

ブロードキャストにより無線 LAN の通信速度が影響を受けることは想像に易いが、実際にどの程度の影響があるのかを定量的に評価・検証した先行研究はあまり見受けられない。そんな中、文献 [4] は無線 LAN におけるマルチキャストパケットの実態とその影響を分析したのものとして興味深い。IPv6 のマルチキャストパケットに主眼を置いた文献であるが、IPv4 のマルチキャストパケットやブロードキャストパケットについても計測されている。文献では、集計されたもののうち、およそ半分がアドレス解決

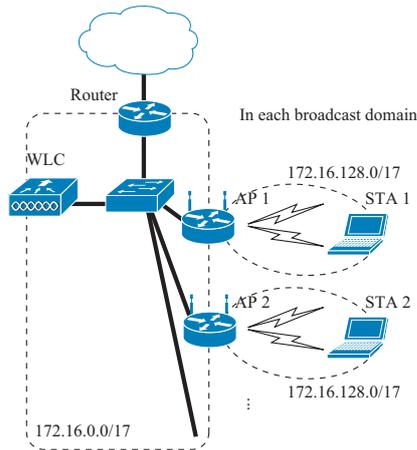


図 3 提案ネットワーク構成
Fig. 3 Proposal network structure.

のためのものであったことが報告されている。この報告からも、無線 LAN システムが NBBN のコンセプトを活かして、第一にアドレス解決のためのブロードキャストやマルチキャストの抑制を試みていることは現実解として妥当であることが伺える。なお、文献では主としてマルチキャストパケット数とその内容に注目されており、無線区間における Basic Rate での送迎の影響については触れられていない。本研究は単にパケット数から受けるイメージより大きな影響が有り得ることを懸念している。

4. 提案ネットワーク構成

本研究の目指すところは、ブロードキャストフレームの無線区間への流入を最小化することである。また、プロキシサーバやそれに準じたものを不要とし、可能な限り IP 層での対応を図る。IP 層に影響を与えるために、ネットワーク内でアプリケーションの通信は許容するが、その通信が無線区間に流入することは避けたい。

提案するネットワーク構成を図 3 に示す。提案構成はコントローラ型の無線 LAN システムの形態を採るが、AP に中・大規模なものでよく用いられるブリッジ型ではなくルータ型を用いる。ただし、一般家庭向けのルータ型 AP では必須機能である NATP (Network Address/Port Translation) は行なわない。まず、AP をルータ型にすることで、有線 LAN 側から無線 LAN 側へのブロードキャストフレームの流入を防止する。AP 配下のアドレス体系が全ての AP で同一になっていることが特徴だが、これは無線端末が AP 間を移動した際に同一の IP アドレスを使用し続けることを可能にするため、それにより AP 間を移動した際もアプリケーションが通信を継続可能なことを目指すものである。多くの無線端末では、IP 設定に DHCP を用いることが通常であるため、提案構成は DHCP 環境を前提とする。AP 配下のアドレス体系が全て同一かつ AP 間を移動した無線端末が同一の IP アドレスを使用し続け

Destination	Nexthop
172.16.0.0/17	172.16.127.253
172.16.128.0/17	172.16.255.253
0.0.0.0/0	172.16.0.1

172.16.0.1 : router' s in wired LAN
172.16.127.253 : AP' s on wired NIC
172.16.255.253 : AP' s on wireless NIC

図 4 AP の典型的なルーティングテーブル
Fig. 4 Typical routing table of an AP.

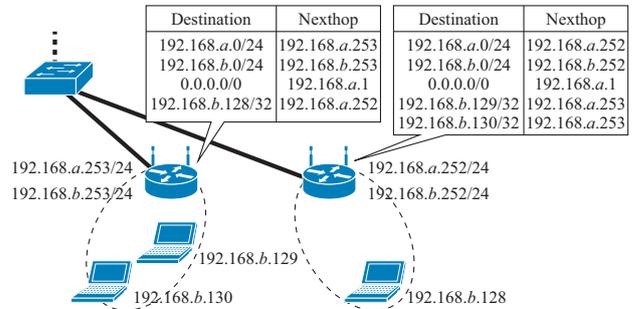


図 5 AP のルーティングテーブル例
Fig. 5 Routing table of APs example.

ることを可能にするためには、全ての AP 配下への DHCP サービスが一元的でなくてはならない。そのため、有線 LAN 側に DHCP サーバを配置し、各 AP では DHCP リレーエージェントを動作させ、AP 配下の DHCP クライアントと有線 LAN 側の DHCP サーバとの通信を中継する。これにより、DHCP サービスを一元的にし、かつ、アドレス体系が同一の複数のサブネットワーク間で無線端末の IP アドレスをユニークにできる。

提案構成では、AP 配下のアドレス体系が全ての AP で同一のため、例えば図 3 の構成においては、各 AP のルーティングテーブルも図 4 に示すようなほぼ同一のものになる。このルーティングテーブルに基づく、別の AP 配下にある無線端末にパケットを転送できない。そのため、図 5 に示すとおり、各 AP は他 AP 配下の無線端末の IP アドレスに対して、個別に他 AP をネクストホップとしたホストルートエントリを持つ必要があり、また、それが常に適切に管理されている必要がある。

提案構成では、無線端末が通信相手の IP アドレスが同じサブネットワーク内に存在すると判断しても、その IP アドレスを他 AP 配下にある無線端末が使用している場合は通信できない。これは、同じサブネットワーク内の IP アドレスと通信する場合は、まずその IP アドレスを解決することから始めるためである。解決したい IP アドレスを使用している無線端末が同じ AP 配下にないため、アドレス解決ができず、パケットの送信に至れないためである。なお、本研究ではそもそも無線区間へ流入するブロードキャストフレームを最少化したいため、AP ではいわゆるプライバシーセパレータを有効にすることを検討している。^{*1}

^{*1} 本稿執筆時点ではプライバシーセパレータ機能を任意に制御することは達成できていない。

プライバシーセパレータは AP 配下の無線端末間の通信を防止する機能で、実装は種々あり得るが、AP の無線 LAN インタフェース側のブリッジとしての動作を制限することで実現されている。プライバシーセパレータを有効にすれば、必然的に、無線端末から送信されたブロードキャストが同じ無線区間に Basic Rate で転送されることも無くなる。このように、ブロードキャストフレームの最少化に有効と思われるプライバシーセパレータであるが、無線端末間の通信を阻害してしまい、これは本研究の目指すところではない。同じサブネットワーク内の IP アドレスでありながら他 AP 配下にある無線端末へのパケット送信にせよ、プライバシーセパレータにより同じ AP 配下にありながら通信できない無線端末との通信にせよ、提案構成では AP がルータ型であるため、AP にパケットを送信すれば、その AP から転送されることになる。そこで、無線端末は自発の全てのパケットを AP に送信することを考える。それを実現するためには、無線端末が自 IP アドレス以外を宛先とするパケットを全てデフォルトルータに送信する動作を行えばよい。そのために、無線端末の IP 設定を故意に誤ったものにする。具体的には、適切な IP 設定の内、サブネットマスクを 32 ビット (255.255.255.255) にする。こうすることで、無線端末は自 IP アドレス以外の IP アドレスは全て直接通信不可と判断し、デフォルトルータにパケットを送信するようになる。無線端末にとってはデフォルトルータとも直接通信できないことになるが、そもそも IP 設定的に直接通信不可能と判断される場合でも、ICMP のリダイレクトメッセージをきっかけに同じブロードキャストドメイン内にある機器を認識し、直接通信を行うことは IP でも想定されていることである。そのためか、他の IP 設定値に因らずデフォルトルータとは直接通信可能という前提で実装されているプロトコルスタックが広く普及しているようである。このことは文献 [5] で詳細にまとめられている。マイクロソフト社の Windows と Linux とで最適な条件が異なるが、本研究ではネットワーク側の対応が容易な Windows を無線端末の OS として当面の検討を進めることにする。AP 配下の無線区間では、無線端末がデフォルトルータの IP アドレスを ARP 要求するブロードキャストを送信するが、プライバシーセパレータによりそれが AP から配下の無線区間に転送されることはなく、かつ、それを受信した AP はユニキャストで無線端末に ARP 応答を送信する。この場合、ARP 要求と ARP 応答はどちらも Basic Rate では送信されないことが期待できる。*2

ここで、提案構成では同じ AP 配下の無線端末間の通信にすら AP を経由しなくてはならないことに違和感があるかもしれない。しかし、そもそもインフラストラクチャ方式の無線 LAN では、同じ AP 配下の無線端末間の通信は

AP を経由している。元々フレームを中継していただけたものを経路制御とパケット転送をしなくてはならなくなるため、AP の負荷が増すことにはなるが、それを代償にして、無線区間に流入するブロードキャストフレームの最少化を実現する。

5. 実証実験

提案構成の実現性と有効性を確認するため、実証実験を行った。

図 3 と同等の構成を基本としたが、AP は 2 台とした。一方の AP に 2 台の無線端末を接続した状態で、1 台の無線端末をもう一方の AP 配下に移動して、その際の動作を確認する。

今回の実験では、コントローラには Ubuntu Server 16.04 LTS をセットアップした仮想マシンを、AP には Raspbian Jessie Lite をセットアップした Raspberry Pi 3 を、無線端末は固定側として iPad (iOS 10.3.3) を、移動側として Windows 8.1 機を、それぞれ使用する。実験で使用した全てのソフトウェアは OS の標準的なものであり、Ubuntu では apt で、Raspbian では apt-get で、それぞれリポジトリの追加無くインストール可能なものである。コントローラでは DHCP サーバ (ISC DHCP Server[6] 4.3.3) を動作させる。AP では DHCP リレーエージェントを動作させ、AP 機能自体は hostapd[7] v2.3 で実現する。なお、実験環境を単純化するため、上位ネットワークに接続するルータとコントローラは同一のノードを使用する。

DHCP サーバは DHCP リレーエージェントの DHCP Discover 受信側の IP アドレスに対してメッセージを送信するため、AP の無線側のインタフェースの IP アドレスが全ての AP で同一では、DHCP クライアントに DHCP サーバからのメッセージが送達しない。そのため、AP の無線側のプライマリ IP アドレスはユニキャストなものを割り当てる必要がある。今回は、AP 配下の無線 LAN 側のサブネットワークは 192.168.252.0/24 とし、2 台の AP それぞれの無線側にプライマリ IP アドレスとして 192.168.252.252 と 192.168.252.253 を割り当て、セカンダリ IP アドレスとして 192.168.252.254 を割り当てた。これにより、無線端末からはどの AP 配下でも 192.168.252.254 をデフォルトルータとして認識させ、使用させることと、DHCP サーバから DHCP リレーエージェントの的確な区別とネクストホップの明確化を実現する。このため、コントローラには各 AP の無線側のプライマリ IP アドレスについてのホストルートエントリを設定する必要があり、提案構成では初期状態としてコントローラにこのホストルートエントリが設定されていることを前提とする。

2 台の AP に設定した ESSID とその接続用のパスワードは同一である。実験においては、ローミングが起りやすいように、各 AP の無線出力は iwconfig コマンドで容易

*2 AP と無線端末間の距離や電波状況に因って、結果的に Basic Rate あるいはそれと同等の通信速度で送信される可能性はある。

に設定変更可能な最小値 1dBm にした。

提案構成では無線端末が AP 間を移動した際、コントローラと各 AP に移動した無線端末の IP アドレスに対するホストルートエントリを追加・削除することが必要になる。今回、その実現のために、ISC DHCP Server が有する on commit 設定を用いた。この設定は、DHCP サーバが、DHCP クライアントからの要求を承認した際に、追加で任意の処理を実行するためのものである。この設定と、無線端末が再接続後に必ず DHCP で IP 設定を確認することを利用し、DHCP サーバが無線端末に確認応答 (DHCP ACK) を送信する際に、コントローラにはローカルで、各 AP には SSH で接続してから、直接 route コマンドを実行してホストルートエントリを追加・削除するスクリプトを実行する。^{*3} この方法はローミングの過程において他の処理と比べて相対的に長い時間がかかるため、無線端末の頻繁な移動を考慮した場合、最適な方法ではないと考えているが、実装が格段に容易であり、実証段階としては充分な機能を有する。

この他、無線端末が同じ AP 配下にある際に、一方の無線端末からもう一方の無線端末に宛てたパケットを AP が受信した際、送信元の無線端末に対して ICMP リダイレクトメッセージを送信してしまうことがあるため、AP にはこの動作を行わないように設定しておく必要がある。^{*4}

以上のように構築した実証環境で、一方の AP 配下に固定無線端末と移動無線端末を接続し、移動無線端末側 192.168.252.128 から固定無線端末側 192.168.252.130 に ping を実行しながら、もう一方の AP 配下に移動無線端末を移動させ、その結果を確認する。このときの移動無線端末側のコマンドプロンプトの表示を図 6 に示す。全ての通信が AP を経由するため、両無線端末が同じ AP に接続中は固定無線端末の OS の IP パケットの TTL の初期値 64 より 1 少ない 63 を TTL とした応答が得られている。別の AP 配下への移動後は 2 台の AP に中継されることになるため、さらに 1 少ない 62 を TTL とした応答が得られている。同じ AP 配下に戻れば、再び 63 を TTL とした応答が得られた。これにより、意図したとおりの動作が実現できたことを確認した。なお、AP 間を移動する際は、ローミングが完了するまでの間にタイムアウトになっていることも確認できる。しかし、このタイムアウトになった間も移動無線端末の無線接続のインジケータは接続が維持された状態を表示し続けていた。

ルータ型 AP に代えて有線接続のルータを用い、無線区間を有線区間に置き換えた構成でも同様の通信実験を行った。^{*5} この場合、通信中に端末をルータ間で移動させるこ

```

Microsoft Windows [Version 6.3.9600]
(c) 2013 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\%>ping -t 192.168.252.130

192.168.252.130 に ping を送信しています 32 バイトのデータ:
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=13ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=309ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=262ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=207ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=185ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=25ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=318ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=287ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=23ms TTL=63
要求がタイムアウトしました。
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=428ms TTL=62
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=167ms TTL=62
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=532ms TTL=62
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=290ms TTL=62
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=250ms TTL=62
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=215ms TTL=62
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=176ms TTL=62
要求がタイムアウトしました。
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=115ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=142ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=209ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=163ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=328ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=283ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=256ms TTL=63
192.168.252.130 からの応答: バイト数=32 時間=220ms TTL=63

192.168.252.130 の ping 統計:
    パケット数: 送信 = 28、受信 = 24、損失 = 2 (7%の損失)、
ラウンドトリップの概要時間 (ミリ秒):
    最小 = 19ms、最大 = 532ms、平均 = 226ms

Ctrl+C
^C
C:\Users\%>
    
```

図 6 無線接続における実験結果
Fig. 6 Result of wireless connection.

と自体が本来不適切な行いであろう。提案構成の実証と同様の流れで、端末をルータ間で移動させるためには、端末からネットワーク機器に接続した LAN ケーブルを一度抜いて、別のルータ側のネットワークにその LAN ケーブルを挿し込むことになる。ルータ配下のサブネットワークは 192.168.248.0/24 とし、移動端末 192.168.248.130 から固定端末 192.168.248.128 に ping を実行しながら、その結果を確認する。そのときの移動端末側のコマンドプロンプトの表示を図 7 に示す。移動端末側での ping の送信結果について、ケーブルの抜き差し前後の動作は提案構成の実証の場合と同等だが、有線の場合は端末の LAN ケーブルを抜いた段階で即座に ping の結果が「一般エラー」となる。さらに、再接続直後にはアドレス解決が追いつかず、タイムアウトになる以前の状況として宛先ホスト到達不能になっていることも確認できる。有線の場合、接続・切断の状況が即時に明らかのため、このような結果になる。一方、無線の場合は、極短い時間だけサービスエリア外に出たままだったり、移動物の干渉により一時的に電波状況が悪化する等の環境要因があらかじめ想定されるため、接続・切断の状況を即時に明らかにせず、多少の時間的余裕を設けているものと思われる。この動作は提案構成にとって有利に働き、提案構成はその性質を逆手にとることで、IP での接続性維持の実現を図っている。

ただし、どちらの場合もネットワーク接続を管理する機能が、デフォルトルータの MAC アドレスが異なるため、別のネットワークに接続したことを認識してしまった。無

の OS は Windows 7 であり、固定端末の OS は Ubuntu である。

^{*3} Ubuntu Server 16.04 LTS では on commit 設定で任意の処理を実行するには、事前に apparmor を停止する必要があった。

^{*4} Raspbian Jessie は ICMP リダイレクトメッセージを送信する動作が既定であった。

^{*5} 機器のハードウェア構成上の都合で、この通信実験では移動端末

図 7 有線接続における実験結果
Fig. 7 Result of wired connection.

線端末側で各 AP 配下におけるネットワーク接続のプロファイルが異なると、結局は通信が継続できなくなる等の問題も起こり得るため、今後この解決策を検討する必要がある。しかし、AP は無線 LAN インタフェースの MAC アドレスを BSSID として使用するため、無線端末が AP を適切に区別するために、AP の無線 LAN インタフェースの MAC アドレスを偽装して同一のものにしても解決策としては妥当ではないと考えている。現時点では、ブリッジインタフェースを介して無線 LAN インタフェースを接続し、ブリッジインタフェースの MAC アドレスを全ての AP で同一にし、BSSID は AP 毎に異なるが、デフォルトルータの MAC アドレスのみ同一にすることができないか試行中である。

提案構成により、特に有線 LAN 側のブロードキャストが無線区間に流入することは解消できる。無線区間側をモニターモードで観測しながら、例えば Wake on LAN のためのマジックパケットを有線 LAN 側でブロードキャストしても、無線区間側でそのマジックパケットが観測されることはなかった。一方、ブリッジ型 AP 配下の無線区間では、有線 LAN 側でブロードキャストされたマジックパケットが Basic Rate で観測された。原理的に明らかではあるが、ルータ型 AP を用いることで、有線 LAN 側のブロードキャストフレームの無線区間への流入を防げることを改めて確認できた。このことから、特にブロードキャストをアドレス解決で多用する IPv4 環境において、提案構成により無線区間に流入するブロードキャストフレームを最少化できることがわかる。

6. おわりに

本稿では、中・大規模無線 LAN 環境において高速な規

格がその高速性をいかに発揮するため、ブロードキャストの伝播を最小化するネットワーク構成を提案し、提案構成の実現性と有効性を確認するための実証実験とその結果を報告した。提案構成により無線区間に流入するブロードキャストフレームが最少化できることは原理的に明らかであり、提案構成の実現性を確認することが今回最重要の課題であった。実証実験の結果より、提案構成の実現性を確認し、今回構築した実験環境から特に IPv4 環境において無線区間に流入するブロードキャストフレームを最少化できることを示し、有効性も確認した。

今後の課題として、プライバシーセパレータを有効にした状態で同様の実証実験を行うことと、AP 配下でデフォルトルータの MAC アドレスを同一にすること、トランスポート層以上での通信継続の可不可を確認すること、高速ローミング方式への対応の可不可を確認すること、マルチキャストや IPv6 環境においても同様の効果が得られるか確認することが挙げられる。

参考文献

- [1] IEEE Standard for Information technology- Local and metropolitan area networks- Specific requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: Fast Basic Service Set (BSS) Transition, *IEEE Std 802.11r-2008 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008)*, pp. 1-126 (online), DOI: 10.1109/IEEESTD.2008.4573292 (2008).
- [2] Draft IEEE Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability Via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation (Superseded by 802.11F-2003), *IEEE Std P802.11F/D6* (2003).
- [3] 平中幸雄, 田中伸久, 武田利浩, 菅原浩高, 松本慎平: ノンブロードキャスト・ブリッジネットワーク, 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 12, pp. 2752-2759 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110002768464/>) (2004).
- [4] 前田香織, 新谷隆文, 近堂 徹, 相原玲二: IPv6 無線 LAN におけるマルチキャストパケットの実態とその影響分析, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 3, pp. 989-997 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/170000130921/>) (2016).
- [5] 齊藤明紀, 梶田秀夫: ルータ上のパケットフィルタで端末間通信を処理するための DHCP サーバ構成法, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 4, pp. 1025-1034 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110002768605/>) (2005).
- [6] ISC's open source DHCP software system, Internet Systems Consortium, Inc. (online), available from (<https://www.isc.org/downloads/dhcp/>) (accessed 2017-09-08).
- [7] Malinen, J.: hostapd: IEEE 802.11 AP, IEEE 802.1X/WPA/WPA2/EAP/RADIUS Authenticator, available from (<https://w1.fi/hostapd/>) (accessed 2017-09-08).