

# 無線稠密環境における指向性アンテナと壁材の減衰を利用する5.8GHz帯無線LANシステムの検討

沢田 健介<sup>1,a)</sup> 森 信一郎<sup>1,†1</sup>

**概要：**多数の無線LAN端末が同時に利用される無線稠密環境に対応可能な無線アクセス技術が望まれている。多数の無線LAN端末を同時に利用するためには同一空間内で利用可能な無線アクセスポイントの数を増やして高密度化する必要があるが、無線アクセスポイントの高密度化には限界があった。無線LANはCSMA/CAを採用しているため同一の物理チャネルを使用する無線アクセスポイントを一定距離以内に近づけることができないからである。そこで指向性アンテナと壁材の吸収減衰特性を利用することで同一の物理チャネルを使用する無線アクセスポイントの設置間隔を短くすることで無線アクセスポイントの高密度化を実現する手法を検討した。実験の結果、現実的な大きさの指向性アンテナと壁材を使用することで従来の約2倍の高密度化が実現できることがわかった。

**キーワード：**Wi-Fi 稠密環境, 高指向性アンテナ, CSMA/CA

## A study on 5.8GHz Wi-Fi system using beam antennas and attenuation of walls in high density wireless environment

SAWADA KENSUKE<sup>1,a)</sup> MORI SHINICHIRO<sup>1,†1</sup>

**Abstract:** Wireless access technology which can correspond to a high density Wi-Fi environment is needed. In the high density Wi-Fi environment, a lot of Wi-Fi terminals are used at the same time. There was a limitation in the densification of the Wi-Fi access point. Although it was necessary to increase the number of Wi-Fi access points that were able to be used in the same space to use a lot of Wi-Fi terminals at the same time and to make it to high density. Because the Wi-Fi access point that uses the same physical channel cannot be brought close to the constant distance or less due to the CSMA/CA. Therefore, in this paper, the technique for achieving the densification of the Wi-Fi access point by shortening the installation interval of the Wi-Fi access point that used the same physical channel by using the absorption damping characteristic of the directional antenna and the wall material was examined. The experimental result shows that the directional antenna and the wall material of a realistic size can achieve the densification about twice of previous method.

**Keywords:** High density Wi-Fi environment, High-gain beam antenna, CSMA/CA

### 1. まえがき

無線LANは実験用途や有線LANの敷設が困難な場所におけるネットワーク接続手段として登場した。その後IEEE802.11として標準化が進みWi-Fiと称されるようになった。そしてその利便性と汎用性の高さからモバイルネットワーク接続手段として普及し、現在ではスマートフォン

<sup>1</sup> 富士通研究所, 神奈川県川崎市  
Fujitsu Laboratories, LTD., Kawasaki, Kanagawa 211-8588, Japan

<sup>†1</sup> 現在, 千葉工業大学, 千葉県習志野市  
Presently with Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

<sup>a)</sup> sawaken@jp.fujitsu.com

ンやノート PC などのモバイルデバイスにとって不可欠な通信インフラに成長した。しかしその結果、人が多く集まる場所に多数の Wi-Fi 通信モジュールを搭載した端末が集中し、Wi-Fi 通信が混雑する Wi-Fi 稠密環境と呼ばれる環境が発生するようになった。我が国で 2.4GHz 帯 Wi-Fi のために用意されている帯域幅は 100MHz(20MHz×14ch) と有限であり、隣接物理チャネルとのガードバンドを十分に取るとうとした場合の実効的な物理チャネル数は 4 である。一方で 5GHz 帯の Wi-Fi では隣接物理チャネルとのガードバンドが十分に取られた合計 19 の物理チャネルが用意されているが、19 チャネルのうち 15 チャネルは航空・気象レーダと帯域を共用していることから屋外での利用に制限がある。そのため、5GHz 帯においても 2.4GHz と同様に常に利用可能な物理チャネル数は 4 である。建物内では同一チャネルのカバレッジが重ならないように Wi-Fi のアクセスポイント (以下、AP) が配置されるが、チャネル数に前述した制限があるため、多数の端末が集まる Wi-Fi 稠密環境では、端末が AP に接続しにくくなったり通信速度が低下するなどの現象が発生する。こうした問題が発生する原因には CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) の仕組みが大きく作用している。CSMA/CA は、少なくとも IEEE802.11ac 以前の Wi-Fi で採用されており、AP が他局の搬送波を感知した際に自局の送信信号と他局の送信信号が衝突しないように自局の送信タイミングをランダムに制御する。そのため複数の AP が同一のチャネルを使用している場合に CSMA/CA が作動し、その結果、端末が AP に接続しにくくなったり通信速度が低下するなどの現象が発生する。

以上述べたような Wi-Fi 稠密環境は、多くの生徒・学生・教員が端末を同時に使用する学校などの教育現場、すなわち文教環境で発生することが知られている。加えて、教育現場では教材のダウンロードなどのため、高いネットワーク負荷が発生する。すなわち文教環境は、Wi-Fi 稠密環境が発生しやすい環境であるといえる。

そこで本稿では、主に文教環境のような Wi-Fi 稠密環境に適したシステムを構築するための手法を検討し、その性能を実験結果により示す。

## 2. 関連研究

Wi-Fi 稠密環境に対処するための対策方針を大別すると、周波数領域の高効率化と、空間領域の高効率化が挙げられる。前節で述べたように、Wi-Fi の帯域および物理チャネルの周波数は既に決まっているため、周波数領域で高効率化を実現するためには変調方式・多重アクセス方式の高効率化や、DCA(Dynamic Channel Assignment) などによるチャネル割当の最適化が必要になると考えられる。一方で、空間領域の高効率化では、マイクロセル化や指向性アンテナを使うなど物理的に空間を最適化する手法によって

実現できることから、比較的改善の余地が大きい方針と考えられる。そこで本節では、以下に空間領域の高効率化を実現する関連研究を示す。

### 2.1 CCA 閾値制御による方法

石原らによれば、Wi-Fi 電波の混雑状況を検出するために使用される CCA(Carrier Channel Assessment) の閾値を約 20dB 引き上げることで周波数利用効率を最大 9.9 倍向上させることが可能である [1]。この結果は CCA 閾値を制御することで Wi-Fi 稠密環境において同時送信数を増加させることが可能で [2]、この方式が Wi-Fi 稠密環境における接続性とスループットを向上させることに寄与することを意味している [1]。

### 2.2 マイクロセル化による方法

古川らによれば、送信電力を下げ AP 間距離を短くすることでセルラシステムでいうマイクロセル化する手法の有効性が示されている [3]。更に高指向性アンテナを使用することで空間を仮想的に分離し、単位面積あたりの AP 数を増やすことが可能であることが示されている。この方式によれば同一物理チャネルの繰り返し使用距離を短くすることが出来るため、石原らの方式と同様に同一の空間内における Wi-Fi の同時送信数を増加させることが可能で、やはり Wi-Fi 稠密環境における接続性とスループットを向上させることに寄与することを意味している。

更にシスコによれば、高指向性アンテナを使用し、そのアンテナの設置角度や設置場所を最適化することで文教環境において Wi-Fi 稠密環境に対応する手法が示されている [4]。

しかし、以上示したマイクロセル化による手法ではその効果の定量評価結果が不明で、更に屋内の教室で隣室からの漏れ電波の影響が存在する場合に、どれだけの繰り返し距離を得られるかについての具体的なデータが無かった。

## 3. 従来方式

### 3.1 従来方式の基本性能

はじめに従来方式の基本性能を知るために、文教環境を想定した環境に既存の Wi-Fi 製品を適用した場合の性能を調査した。測定系を図 1 に、測定系の諸元を表 1 にそれぞれ示す。

測定結果を図 2 と表 2 にそれぞれ示す。本稿ではこの結果を既存製品のリファレンスとする。

### 3.2 文教環境における従来の高密度無線 LAN 環境

次に、文教環境において実施実績がある従来手法について説明する。従来手法の諸元を表 3 に、基本構成を図 3 に、実際に使用したデモシステムの構成を図 4 に、チャネル割当を図 5 に、それぞれ示す。使用した 3 台の無線 AP は第

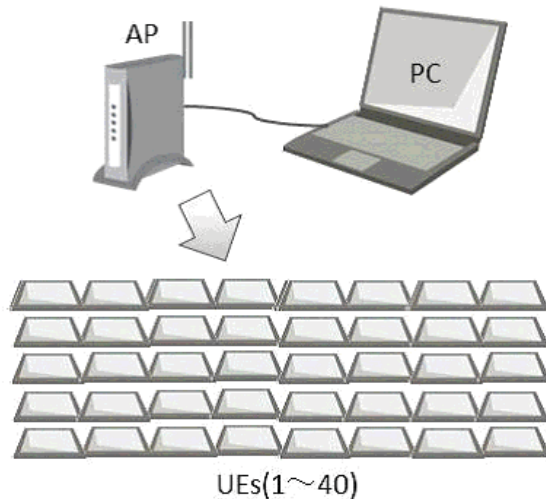


図 1 既存 Wi-Fi 製品の性能評価測定系

表 1 既存 Wi-Fi 製品の性能評価測定系の諸元

項目	値
無線 AP	AP-A(A 社製) AP-B(B 社製) AP-C(C 社製)
無線部仕様	IEEE802.11n
使用バンド	W52
チャンネルボンディング	なし
ユーザ端末	Fujitsu F-02F
測定ツール	Iperf

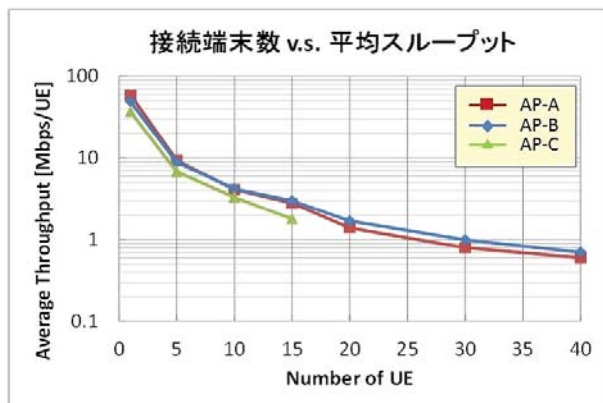


図 2 既存 Wi-Fi 製品の性能評価結果 (接続端末数 v.s. 平均スループット)

表 2 既存 Wi-Fi 製品の性能評価結果 (接続端末数 v.s. 平均スループット)

端末数	AP-A	AP-B	AP-C
1	58.8	48.7	36.7
5	9.4	8.9	6.8
10	4.1	4.2	3.3
15	2.8	3.0	1.8
20	1.4	1.7	接続不可能
30	0.8	1.0	接続不可能
40	0.6	0.7	接続不可能

3.2 節で示したものと同一である。

表 3 測定系の諸元

項目	値
無線 AP	AP-A, AP-B, AP-C
無線アクセス仕様	IEEE802.11n
使用バンド	5.2GHz 帯 (W52)
チャンネルボンディング	なし
無線 LAN 端末	F-02F (Fujitsu)
スループット測定ツール	Iperf

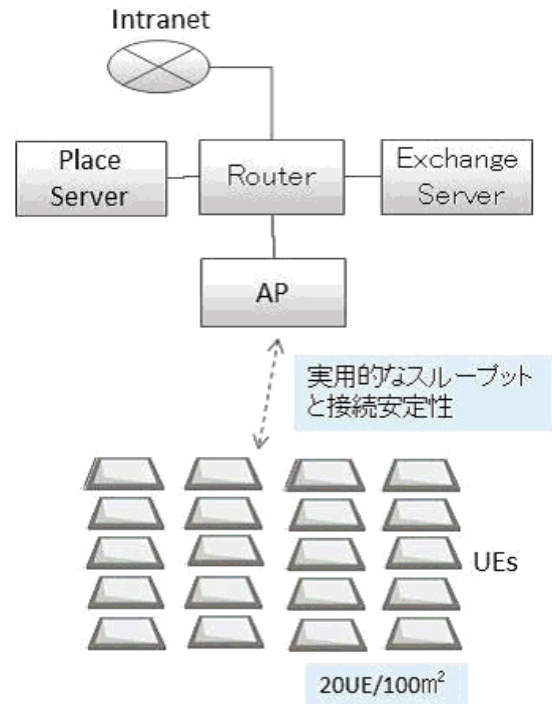


図 3 文教ソリューション向け基盤システムの基本構成

図 4 に示した系を使用して実際の文教環境で動作確認試験を行ったところ、QoS 上の問題は認められず、システムの正常動作が確認された。しかし、図 4 に示した従来技術では図 5 に示したように同一の教室内で 2 つの異なる AP を使い異なるチャンネルを必要としていた。これでは複数の教室で同様の系を構築した場合に近隣の教室からの漏洩電波の影響を受け、チャンネルが足りなくなってしまう恐れがある。そのため、図 3 に示した系のように、同一の部屋で出来るだけ同じチャンネルを使えることが望まれていた。

#### 4. 提案手法

提案方式では指向性アンテナと壁材の吸収減衰を利用することで隣接する空間 (部屋) 間の空間アイソレーションを高め、隣接する空間 (部屋) への漏れ電波のレベルを下げることで同一チャンネルの繰り返し距離の短縮を実現する。同一チャンネルの繰り返し距離が短くなると多くのユーザ端末が利用可能になる。

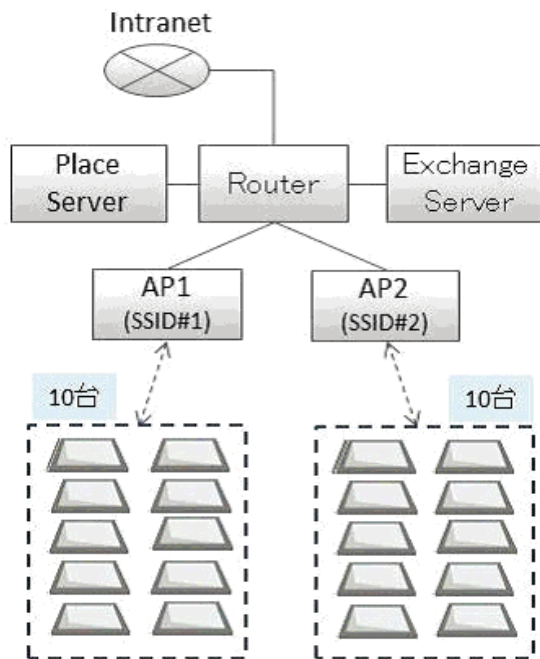


図 4 文教ソリューション向け基盤デモシステムの構成

BAND	W52				W53				W56											
	ch	36	40	44	48	52	56	60	64	100	104	108	112	116	120	124	128	132	136	140
大学	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎								x	x	x			
AP1									○					○						○
AP2										○	○			○	x	x	x			○

◎ 固定割当(既存局)  
○ DCA割当  
x 従来未対応

図 5 文教ソリューション向け基盤デモシステムのチャンネル割当

システム構築のために使用する機器は 2016 年 2 月現在、日本国内で入手と使用が可能な機器を想定し、電波関連法令および周囲の他システムの電波の利用状況についても 2016 年 2 月現在の情報を前提とした。従い、将来、より優れた性能を持つ機器や仕様が登場した場合や、法令や電波利用環境に大きな変化があった場合は、本稿の内容を改定する必要がある。

#### 4.1 目標性能

前節で示したように、従来技術は面積が約  $100m^2$  の教室において 2 つの物理チャンネルを使用して 20 台の端末が使用可能、即ち、 $20UE/100m^2 \cdot 2ch$  の端末密度に対応できる能力があった。この従来技術による性能を少なくとも 2 倍、即ち、 $20UE/100m^2 \cdot 1ch$  の能力を持つことを提案手法の目標性能とする。

#### 4.2 提案方式の原理

提案方式の原理は前述したように、隣接する空間同士の空間アイソレーションを高く取ることで隣接する空間を異なる空間として分離活用することで周波数利用効率を向上させる。具体的には、図 6 に示すように、指向性アンテナ

と部屋を区切る壁材の電波吸収減衰特性を利用して、隣接する部屋に漏洩する Wi-Fi 電波を低減する。

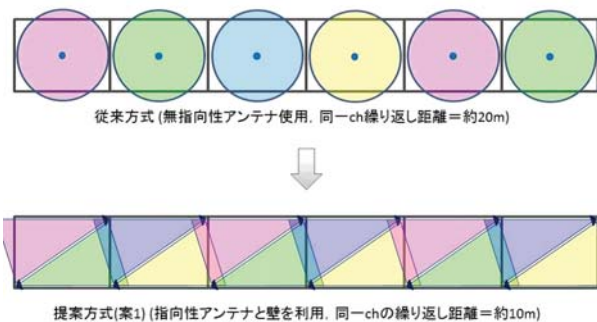


図 6 指向性アンテナと壁材を利用する提案方式

隣接する部屋に漏洩する Wi-Fi 電波を低減することで同一チャンネルを使用した際に CSMA/CA が効いてしまう距離を短くすることが可能になるため、同一チャンネルの繰り返し距離を短くすることができる。同一チャンネルの繰り返し距離を短くすることができれば、図 6 に示したように 1 部屋あたりで使用できる AP の数が 2 倍になるため目標性能を満足することが出来ると考えられる。

### 5. 動作検証

本節では実際の教室を想定した環境で実施した提案手法の動作検証実験の結果を示す。

#### 5.1 予備実験

CSMA/CA が作動し、その影響が存在するかどうかを調査するためにはエアパケットキャプチャなどの手法により行うのが一般的である。しかし本検討では簡易的に CSMA/CA が作動しているかどうかを調査するために平均スループットを使用する。隣接する空間に他局 (AP および UE) が存在しない環境下で測定した平均スループットは理想的に最高性能のスループットが得られるからである。理想的な環境で得た最高性能のスループットをリファレンスとして、近隣セルで同一チャンネルの局 (AP) を使用した場合にスループットが劣化した場合、隣接セルで利用している無線 LAN 電波の影響により CSMA/CA が作動したと考えられる。そのため、スループットを監視することで CSMA/CA が作動したことを検出する手法を本検討では採用した。

はじめに理想的に最高性能のスループットを確認するための予備実験を行った。予備実験系を図 7 に、予備実験系の諸元を表 4 に、予備実験結果を図 8 に、それぞれ示す。

図 8 の結果から、今回構築した AP と UE の組合せにおいて、最大スループットは約 27Mbps であることがわかった。また、そのときの RSSI は -72dBm 以上であった。

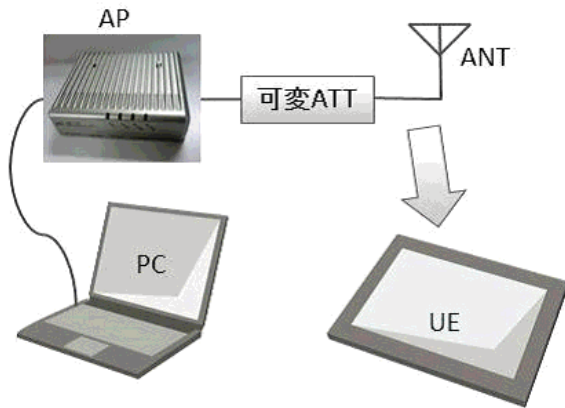


図 7 予備実験系

表 4 予備実験系の諸元

項目	値	備考
AP	JRL-710AL3	日本無線製
アンテナ	モノポールアンテナ	利得 2.14dBi
送信電力	+8dBm	Full
無線仕様	IEEE802.11a	44ch
ユーザ端末	F-03G	富士通製, Android 4.4
可変アッテネータ	8494B+8495B	HP 製, 0~121dB
PC	S904/H	富士通製, Windows 8
測定ソフト	Iperf	

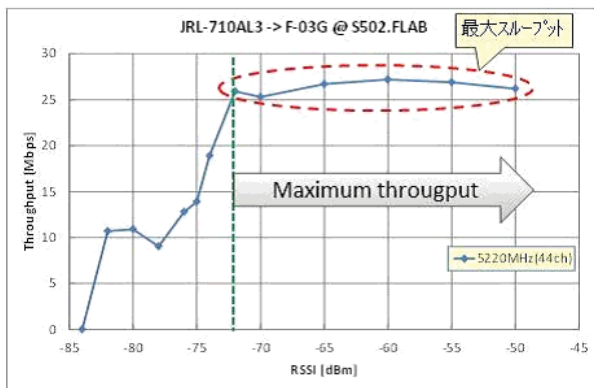


図 8 予備実験結果

## 5.2 検証実験系

検証実験系の平面図を図 9 に、諸元を表 5 にそれぞれ示す。図 9 に示した環境では隣接する 3 部屋が使われており、それぞれの部屋を区切る壁は可動であり、設置・撤去が自在にできる。本検証実験では壁材による吸収減衰による効果を確認するため、このような可動壁を利用可能な部屋を実験に使用した。

図 9 に示した可動壁を移動している際の様子を図 10 に、壁厚を図 11 に、可動壁を撤去した状態の実験系の様子図 12 に、それぞれ示す。壁厚は壁の位置に依らず均一で、壁材における 5GHz 帯無線 LAN 電波の吸収損 (透過減衰損) は約 15dB であった。

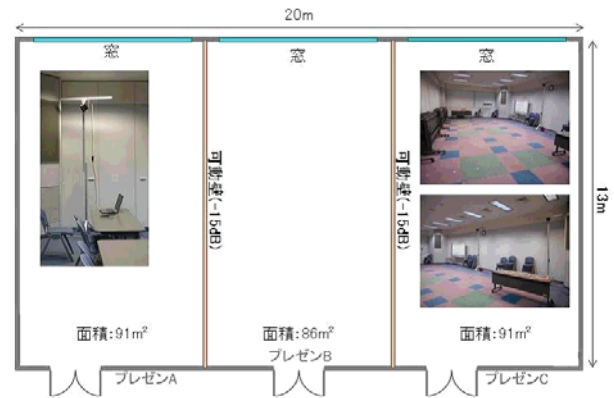


図 9 検証実験系の平面図

表 5 検証実験系の諸元

項目	値
場所	富士通 R&D センター会議室 (100m <sup>2</sup> )
評価方法	Iperf によるスループット測定
評価回数	7 回
端末密度	20UE/100m <sup>2</sup>



図 10 検証実験系の可動壁

表 6 に検証実験 1 (CSMA/CA の非作動距離の測定) の実験諸元を示す。図 13 と図 14 には指向性アンテナの外観図と内部の様子をそれぞれ示す。

検証実験は 2 種類行った。1 つ目の検証実験は CSMA/CA が作動しない距離を調べる実験で、測定系を図 15 に示す。

2 つ目の検証実験は、CSMA/CA が作動しない条件を満たすときに、実際に得られるスループットを調べる実験で、測定系を図 16 に示す。図 15 と図 16 はどちらも同一の実験場所の平面図を示している。壁のアスペクト比が両図で

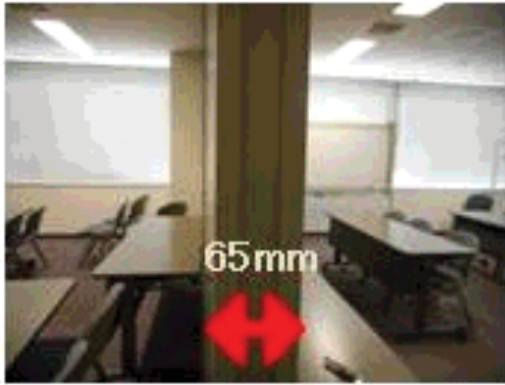


図 11 検証実験系の壁厚

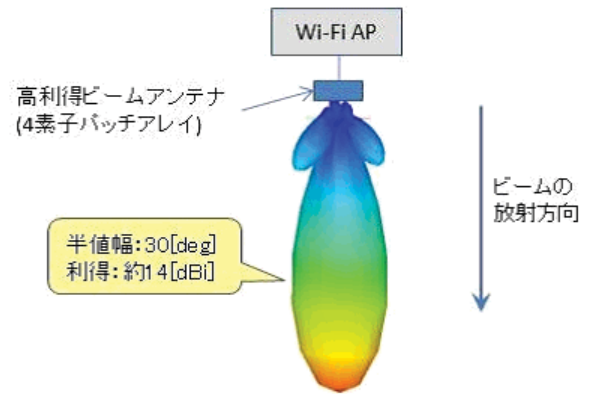


図 14 指向性アンテナの放射パターン



図 12 評価実験環境 (壁を取り払った状態)

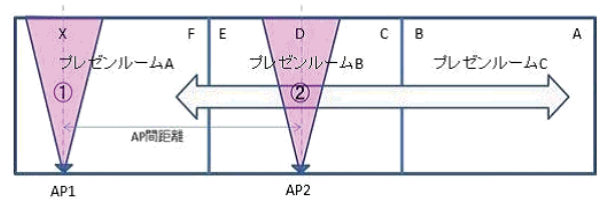


図 15 検証実験 1(CSMA/CA の非作動距離の測定) の測定系

表 6 検証実験 1(CSMA/CA の非作動距離の測定) の実験諸元

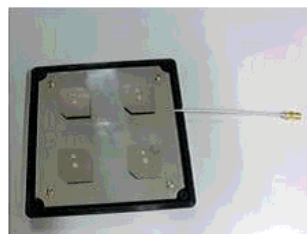
項目	値	備考
AP	JRL-710AL3	日本無線製
アンテナ	4 素子パッチアレイ/ モノポールアンテナ	利得 14.0dBi/2.14dBi
送信電力	+2dBm/+8dBm	EIRP 最大値
無線仕様	IEEE802.11a	44ch
壁	有/無	
壁の減衰量	15dB	1 枚当たり



図 16 検証実験 2(20UE 接続時のスループット測定) の測定系



4パッチアンテナ+AP  
(12cm×12cm×4cm)



4パッチアンテナ内部  
(12cm×12cm×2cm)

図 13 指向性アンテナ

異なっているのは端末配置を表現する上での都合である。

### 5.3 検証実験結果

本節では検証実験の結果を示す。図 17 は評価実験 2(スループット測定実験)の様子である。

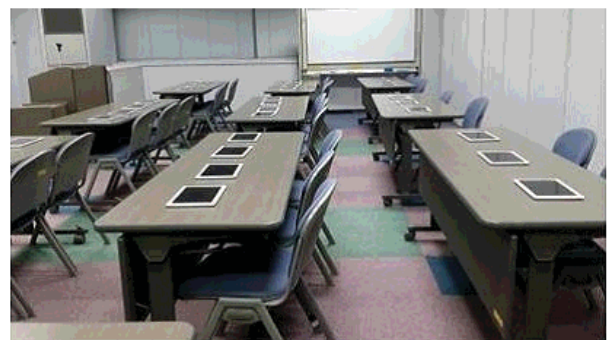


図 17 評価実験の様子 (スループット測定実験)

検証実験 1 の結果を図 18 と図 19 に、検証実験 2 の結果を図 20 にそれぞれ示す。

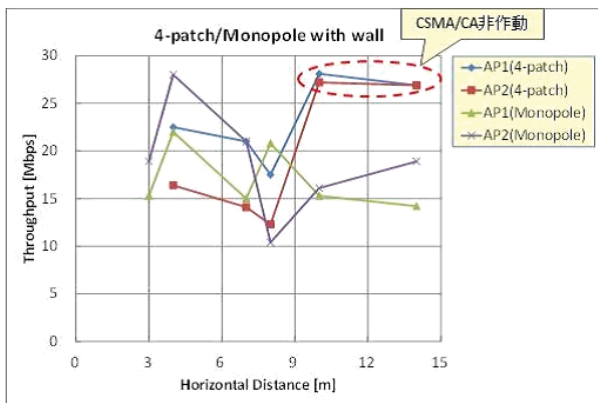


図 18 検証実験 1(CSMA/CA の非作動距離の測定, 壁有) の測定結果

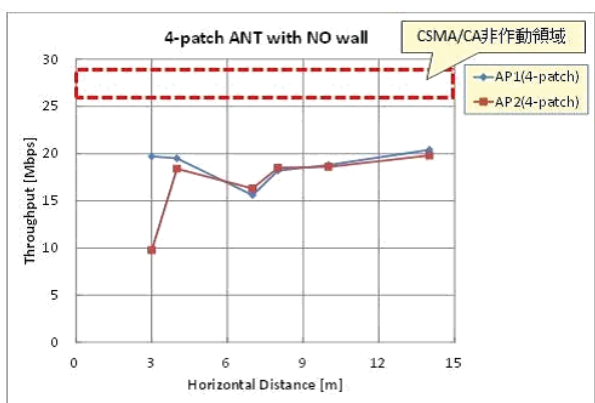


図 19 検証実験 1(CSMA/CA の非作動距離の測定, 壁無) の測定結果

図 18 と図 19 から、壁が存在しない場合および壁が 1 枚しか存在しない場合には CSMA/CA が動作してしまうが、壁が 2 枚以上存在する場合、即ち 9 メートル以上離れた場合には CSMA/CA が作動していないことがわかった。図 18 ではモノポールアンテナを使用した場合の結果をオーバープロットしているが、モノポールアンテナを使用した場合にはやはり CSMA/CA が作動していることがわかった。以上から、透過減衰量が 15dB 程度の壁が 2 枚以上存在し、且つ、利得 14dBi 程度の指向性アンテナを平行方向に向けて使用することで、CSMA/CA を作動出来ないレベルにまで送信電力を減衰させることが可能であることがわかった。

図 20 に、上記実験結果が得られた環境下で 20UE/100m<sup>2</sup> の端末密度におけるスループットを測定した結果を示す。図 20 からわかるように、1 端末のときに最大が得られ、以降、端末数の増加に伴ってスループットが正常に減少していることがわかる。

## 6. まとめ

本稿では、学校の教室など大勢の人が集まる文教環境で、多数のユーザ端末を同時に使用することが可能な Wi-Fi シ

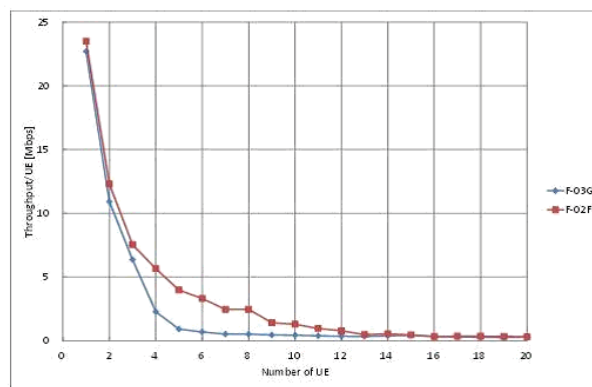


図 20 検証実験 2(20UE 接続時のスループット測定) の測定結果

ステムを構築するための手法として、指向性アンテナと壁材の吸収減衰を利用することで隣接する空間 (部屋) 間の空間アイソレーションを高くする方式を提案し、その効果を実験結果による具体的な数値データで示した。使用した指向性アンテナは 12cm×12cm の 4 素子平面パッチアレイアンテナで、最大利得は 14dBi である。また、壁材の吸収減衰損が約 15dB であるときに AP 間で CSMA/CA が作動する距離を短くすることができ、20UE/100m<sup>2</sup>・1ch の端末密度を実現できることを検証実験結果により示した。

## 参考文献

- [1] 石原浩一, 鷹取泰司, 中平俊朗, 浅井裕介, 井上保彦, 溝口匡人, “IEEE 802.11ax 無線 LAN 稠密環境における複数局同時送信技術,” IEICE, 2014 年秋ソ大, B-5-102, 2014 年 9 月
- [2] K. Ishihara, IEEE802.11-13/1395r2.
- [3] 古川裕康, “高密度環境における CISCO 無線デザインケーススタディ,” Cisco Connect Japan 2014, 2014 年 11 月
- [4] Jim Florwick, Jim Whiteaker, Alan Cuellar Amrod and Jake Woodhams, “高等教育機関向け高密度無線 LAN デザインガイド,” Cisco, 2011 年 11 月