

応募区分：研究型論文

無線 LAN アクセスポイントにおける送信ビームフォーミング

Cisco ClientLink の性能の実験的検討

- より信頼性の向上した無線 LAN の実現を目指して -

松戸 孝(まつど たかし)
ネットワークシステムズ株式会社 経営企画本部
第1 応用技術部 スイッチワイヤレスチーム

■ 要約

シスコシステムズ社製無線 LAN アクセスポイント (AP) CAP3602E に実装された送信ビームフォーミングである Cisco ClientLink2.0 による下り回線の通信品質の改善性能を一般的な事務所のフロア環境において実験的に検討した結果、11a と 11n の無線端末への下り回線における通信品質 (受信電力や伝送速度等) は ClientLink2.0 あり送信の場合が同なし送信の場合より明確に改善されること、及び、その改善効果は送信アンテナ数が増加するに伴いより顕著になることを確認できた。11a の無線端末への下り回線における TCP スループットも ClientLink2.0 あり送信の場合が同なし送信の場合 (シスコシステムズ社製 AP、及び、他社製 AP) より明確に改善されることを確認できた。Cisco ClientLink は無線端末に特別な仕組みを不要とする手軽さと通信品質の改善効果を明確に持つので、あらゆる無線 LAN の利活用の場面でより信頼性の向上した無線 LAN の実現に貢献できる。

目次

1. まえがき.....	4
2. 送信アンテナ数の違いによる ClientLink2.0 (CAP3602E に実装) の実験的性能比較.....	5
2.1. 実験目的.....	5
2.2. 実験方法.....	6
2.2.1. 実験システムの構成.....	6
2.2.2. 無線端末系の台車の工夫.....	7
2.2.3. ClientLink2.0 のあり (ON) となし (OFF) を切り替える方法.....	8
2.2.4. 実験場所の環境.....	8
2.2.5. Linktest コマンドによる測定結果の中で着目した下り回線の通信品質.....	9
2.3. 実験結果.....	9
2.3.1. 11a の無線端末での ClientLink2.0 による通信品質の改善状況.....	9
2.3.2. 11n の無線端末での ClientLink2.0 による通信品質の改善状況.....	12
2.4. 考察.....	14
3. ClientLink2.0 (CAP3602E に実装) によるスループット改善の実験的検討.....	14
3.1. 実験目的.....	14
3.2. 実験方法.....	14
3.2.1. 実験システムの構成.....	14
3.2.2. 実験で利用した他社製 AP (送信ビームフォーミング機能は、なし)	16
3.2.3. 実験場所の環境.....	16
3.3. 実験結果.....	16
3.4. 考察.....	17
4. ClientLink の性能の良さをもっと広めるための提案.....	18
5. むすび.....	19
6. 謝辞.....	19
7. 参考文献.....	19

1. まえがき

日本国内企業における無線 LAN の導入率は 2012 年の調査結果で 53.4% (440 社中) であり、従業員数 1001 名以上の大企業では 60.3% (146 社中) が導入済みである[1]。免許不要の無線局として誰でも自由に使える無線 LAN を企業ネットワークで利用することは、特別視することではなく、ごく普通のことになりつつある。同調査結果では 228 社で導入済みの子局、即ち、無線 LAN クライアント端末 (以下、無線端末と記載する) の種類も公表しており、「導入済み」の 1 位は「ノート PC (15 インチ以上)」で 80.3%、2 位は「モバイル PC (15 インチ未満)」で 62.7%、3 位は「メディアタブレット (iPad など)」で 32.5%、以下、デスクトップ PC、スマートフォン (iPhone など)、プリンタと続き、導入率は 10% 以下ではあるが、複合機、PDA、ネットワークカメラ、デジカメ、及びゲーム機器も存在している。そして、これら多様な種類の無線端末が実装する無線 LAN 規約は、2012 年時点の最新の IEEE802.11n 規約 (以下 11n と記載する) の他に IEEE802.11a (以下 11a と記載する) や IEEE802.11g (以下 11g と記載する) 等の以前の規約も多く存在していると考えられる。

無線端末の種類多様性は、無線端末の送受信性能の良し悪しの多様性へ発展することが通常である。従って、より信頼性の向上した無線 LAN を実現するために企業ネットワークにおける無線 LAN アクセスポイント (以下 AP と記載する) には、多様な種類の無線端末の送受信性能の違いに極力柔軟に対応して、良好な通信品質を確保する能力が求められる。

多様な種類の無線端末の「送信」性能の違いについて AP 側で柔軟に対応する方法、即ち、無線端末から AP への「上り」回線における良好な通信品質確保の方法の 1 つは、AP における最大比合成 (Maximal Ratio Combining: MRC) ダイバーシチ受信である。MRC ダイバーシチ受信は、複数の受信アンテナを用いる際に、各受信アンテナで受信した電波の振幅と位相の両方を調整して合成するとき最大 SNR (Signal to Noise Ratio: 受信電力対雑音電力の比) となるように合成出力を得る方法である[2], [3]。

一方、多様な種類の無線端末の「受信」性能の違いについて AP 側で柔軟に対応する方法、即ち、AP から無線端末への「下り」回線における良好な通信品質確保の方法の 1 つは、AP における送信ビームフォーミングである。送信ビームフォーミングは、受信局 (無線端末) における信号の品質 (例えば、SNR など) を最大化するために、送信局 (AP) が送受信局間の伝送路の状況 (CSI: Channel State Information) に応じて、複数のアンテナから送信する信号に前処理を行う技術である[4], [5]。

無線 LAN における送信ビームフォーミングは 11n のオプションとして規定されたが、複雑な信号処理を送信局 (AP) と受信局 (無線端末) において行う必要があり、各メーカーでの現実的な実装が困難だったと推測され、確実に利用できる状態の市販製品として登場していない。

2014 年 1 月に 11n よりさらに高速伝送を可能とした IEEE802.11ac 規約 (以下 11ac と記載する) の策定が完了した。11ac のオプションでは 11n と同様に送信ビームフォーミングを規定しているが、11n のそれよりも簡素化された[6]。これに伴い、各メーカーは、SU-MIMO (Single User-Multiple Input Multiple Output) における送信ビームフォーミングを 11ac の Wave1 (第 1 世代) に実装し販売開始した。但し、この 11ac オプションでの送信ビームフォーミングが有効になるのは、当然であるが、11ac オプション

(送信ビームフォーミング)に対応した AP と無線端末が 11ac として動作する場合だけである。11ac オプションでの送信ビームフォーミングは Explicit feedback (クローズド・ループ) の方式なので、まずは、AP (送信局) が無線端末 (受信局) へ伝送路の状況 (CSI) の推定 (Sounding) 用フレームを送信し、下り回線の送受信局間の CSI を無線端末 (受信局) で把握した後、その把握した CSI を無線端末が AP へ知らせる (feedback) ことにより、AP は無線端末へ送信ビームフォーミングする動作となる。従って、AP と無線端末間の特別な連携をする Explicit feedback (クローズド・ループ) の方式を理解できない 11a と 5GHz 帯での 11n として動作する無線端末には、また、11g と 2.4GHz 帯での 11n として動作する無線端末には、11ac オプションでの送信ビームフォーミングは機能しない。

一方、11ac オプションでの送信ビームフォーミングを実装すると共に、無線端末に特別な仕組み(ハードウェアとソフトウェア)を不要としながらも、11a、11g、11n、及び 11ac の無線端末に対して Implicit feedback (オープン・ループ) 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink (以下 ClientLink と記載する) と呼ばれる技術を実装した AP が既に多くの法人向けの無線 LAN として導入されている[7], [8], [9]。2009 年に ClientLink を実装した AP 製品が初登場したが、ClientLink はシスコシステムズ社の独自技術であり詳細は非公開である。しかしながら、公開資料によると[7], [8]、無線端末 (送信局) から AP (受信局) への上り回線での通常のデータ通信時 (OFDM 変調方式を利用) において AP (受信局) の MRC ダイバーシチ受信が動作するときに取得できる情報によって送受信局間の伝送路の状況 (CSI) を把握した後、同一周波数の通信であることによる通信路の対称性をその CSI へ適用して、下り回線、即ち、AP (送信局) から無線端末 (受信局) 方向への送信ビームフォーミングを実現していると概ね理解できる。従って、ClientLink は、AP と無線端末間の 11a、11g、11n、及び 11ac の通常の通信過程の中で、自然な形でオープン・ループの Implicit feedback 相当方式の送信ビームフォーミングを実現していると理解できる。それゆえ、ClientLink は、無線端末に特別な仕組み (ハードウェアとソフトウェア) は不要となることも理解できる。

筆者は、ClientLink を理解するための基礎的な検討を進めて来たが[10]、本論文では、より信頼性の向上した無線 LAN の実現を目指して、シスコシステムズ社製無線 LAN アクセスポイント CAP3602E に実装された送信ビームフォーミングである ClientLink2.0 による下り回線の通信品質の改善性能を一般的な事務所のフロア環境において実験的に検討して、その特徴を明らかにし、考察する。なお、CAP3602E は 11n 対応の AP であるが、その対応時点の Version として、ClientLink2.0 を実装していると表現される。第 2 章では、送信アンテナ数の違いによる ClientLink2.0 (CAP3602E に実装) を実験的に性能比較して、その特徴を明らかにし、考察する。第 3 章では、ClientLink2.0 (CAP3602E に実装) によるスループット改善を実験的に検討して、その特徴を明らかにする。また、他社製 AP (送信ビームフォーミング機能は、なし) を用いた実験も実施し、その結果とも比較し、考察する。

2. 送信アンテナ数の違いによる ClientLink2.0 (CAP3602E に実装) の実験的性能比較

2.1. 実験目的

シスコシステムズ社製の無線 LAN 製品の AP に実装された ClientLink2.0 は、AP から 11a または 11n

表 1. 実験での測定諸元

通信部 AP、無線 端末共通	送受信中心周波数	5,200MHz
	チャンネル番号	40
	伝送帯域幅	20MHz
	実験で利用したIEEE規約	IEEE802.11a、及び、 IEEE802.11n (最大空間多重 は2ストリーム)
通信部 (AP) (Cisco CAP3602E)	送信電力 (最小のレベル5設定時。ClientLink2.0 あり・なしで共通。アンテナ数4、3、または 2)	4dBm(4)、2.7dBm(3)、1dBm(2)
	DTPC(無線端末の送信電力をAPから動的制御 する機能)	OFF
	アンテナ	Cisco ANT2524DW-R Dual-band ダイポール
	アンテナ数 (最大)	4
	アンテナ利得 (5GHz帯)	4dBi
	アンテナ水平面内指向性 (5GHz帯)	無指向性
	アンテナ垂直面内半値角 (5GHz帯)	39度
	偏波 (床面に対して)	垂直
	アンテナ間隔(コネクタAとBの中心間、及び コネクタCとDの中心間)	約2.86波長
	アンテナ間隔(コネクタBとCの中心間、及び コネクタAとDの中心間)	約1.91波長
	アンテナコネクタ中心の床面からの高さ	1.55m
	無線端末との接続制限と無線区間の暗号化	WPA2-PSK(63文字)
	RogueAP検知機能	OFF
	CleanAir(干渉波等検知・対処機能)	OFF
通信部 (無線端 末)	ノート型PC型番名	Dell Latitude D430
	ノート型PCのOS	WindowsXP SP3
	11a用PC内蔵無線LANモジュール型番名	Intel PRO/Wireless 3945ABG Network Connection
	CCX対応状況 (11a用PC内蔵無線LANモジュール)	CCX Version4 対応
	送信電力 (11a用PC内蔵無線LANモジュール)	0dBm
	PC液晶画面の傾斜角度 (床面に垂直から奥側 への傾斜)	20度
	PC液晶画面の最上端部の床面からの高さ	0.94m
	11n用USB接続型無線LANアダプタ	I-O DATA WHG-AGDN/US
	CCX対応状況 (11n用USB接続型無線LANアダ プタ)	CCX Version4 及び5対応
	送信電力 (11n用USB接続型無線LANアダ プタ)	4.7dBm
	11n用USB接続型無線LANアダプタの最上端部 の床面からの高さ	0.89m
	Linktestコマンド送信の距離間隔	約5.17波長
	Linktestコマンドの設定値	フレームサイズ:700、フレ ーム送信回数/コマンド:10
	Linktestコマンド送信制御ソフトウェア	自作 (EXCEL-VBA)
制御部 (Cisco CT2504)	機能Mode	Local mode (無線LAN通信モード)
	ソフトウェアVersion	7.6.100.0
設定、情 報表示部	ノート型PC型番名	Panasonic CF-R5
	ノート型PCのOS	WindowsXP SP3

1回、制御部によって通信部 (AP) から通信部 (無線端末) 宛てへ送信されるように自作のソフトウェア (マイクロソフト社製の表計算ソフトウェア EXCEL の VBA) で制御している。Linktest コマンドは約 5.17 波長 (約 0.2985m) 毎に送信され、この一定距離間隔で連続的に下り回線の通信品質が

あげられている。なお、第 1 章で述べたように ClientLink は、無線端末に特別な仕組み (ハードウェアとソフトウェア) は不要であるので、無線端末の CCX 対応・非対応には無関係で動作する。

2.2.2. 無線端末系の台車の工夫

無線端末系の通信部 (無線端末) は、台車の上に載せて人がゆっくりと移動させており、項目 2.2.4. で後述する測定経路にて、通信部 (AP) からの下り回線の通信品質 (受信電力、伝送速度等) を測定記録する。

図 2 に示すように、通信部 (無線端末) には、台車の車輪の 1 回転ごとに 1 回の Linktest コマンドが通信部 (AP) から通信部 (無線端末) 宛てへ送信されるように工夫している。車輪に磁石を 1 個設置し、車輪の回転により磁石が車輪回転検知部のリードスイッチを通過するときと同スイッチを ON する。その ON を通信部 (無線端末) のノート型 PC のマウスの右クリック信号として取り出す。通信部 (無線端末) は実験で使用する電波の無線 LAN 経由で、AP 系の制御部の無線 LAN コントローラに telnet 接続させており、マウスの右クリック信号が ON される毎に Linktest コマンドが

測定記録される。時間間隔的には、人が台車をゆっくり移動させることに伴うゆらぎはあるが、概ね3秒毎であった。

上述の工夫において試行錯誤の結果、反応良く確実に Linktest の結果を連続記録するために、本実験では、Linktest は、送信フレームサイズを 700 (単位は不明) に、1 回のコマンドあたりのフレーム送信回数を 10 に設定した。また、制御部の無線 LAN コントローラと通信部 (AP) には Linktest の実時間処理を最優先することを期待するので、本章の実験においては、他の実時間処理の機能 (RogueAP 検知と CleanAir (干渉波等検知・対処)) を念のため、動作させない OFF に変更設定した。

2.2.3. ClientLink2.0 のあり (ON) となし (OFF) を切り替える方法

ClientLink は、2009 年に登場した当初は、制御部の無線 LAN コントローラでその機能を管理者があり (ON) となし (OFF) を切り替えることが可能であった。しかしながら、Version が ClientLink2.0 へ進化したときから常時あり (ON) となり、管理者があり (ON) となし (OFF) を切り替えることが不可能となった。当然に、シスコシステムズ社が一般公開する無線 LAN コントローラの操作手順書等にも、あり (ON) となし (OFF) を切り替える方法の記載はない。

本実験では米国のシスコシステムズ本社がパートナー向けに 2011 年に開催した WEB 形式セミナーを受講した際に紹介された方法を採用して ClientLink2.0 のあり (ON) となし (OFF) を切り替えて実験した [13]。方法の概要は、CAP3602E のコンソールポートを経由して特別なコマンドを使って、ClientLink2.0 のあり (ON) となし (OFF) を切り替え設定する方法である。この方法によって ClientLink2.0 による

下り回線における通信品質 (受信電力、伝送速度等) の改善状況を、客観的に一目瞭然に確認できる。

2.2.4. 実験場所の環境

図 3 に、本実験場所の環境をフロアの平面概要図として示す。本実験場所は、一般的な事務所のフロア環境と理解できる。通信部 (AP) の固定位置は図 3 の AP である。台車の上に載せて人がゆっくりと移動させる通信部 (無線端末) の測定経路は図 3 の P1 から P12 の合計 12 経路であり、その中で通信部 (AP) と通信部 (無線端末) 間の見通しを確保できている測定経路は P1 と P6 から P9 の合計 5 経路である。測定経路はフロアの概ね全面をカバーするように設定し

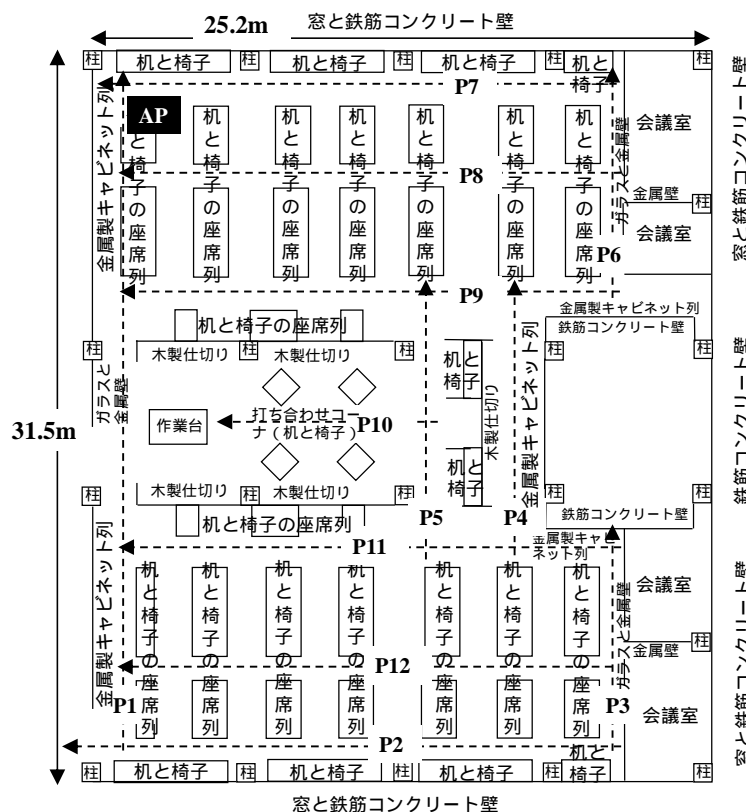


図 3. 実験場所の環境 (フロアの平面概要図)

ている。なお、図3に破線で示された各測定経路は、破線の矢印なし側が出発位置であり、同矢印あり側が到着位置である。本実験は休日に実施しているが、休日出社の人々が最大で約20名(平日の約9分の1の人数)、着席状態で存在する場合もあった。壁面の状況は図3のとおりであるが、事務所内の天井と床面間の距離は2.51mであり、天井の材質は石膏ボードである。床面にはカーペットが敷かれている。実験で使用した5GHz帯無線LANのチャンネル番号40(中心周波数5,200MHz)には干渉波は存在していない。

2.2.5. Linktest コマンドによる測定結果の中で着目した下り回線の通信品質

Linktest コマンドによる測定結果の中の下り回線における、通信部(無線端末)での受信電力、通信部(無線端末)への伝送速度、及び、通信部(無線端末)への再送信回数に着目することにより、下り回線における通信品質を把握した。

- (1)下り回線における通信部(無線端末)での受信電力は、通信部(AP)から送信された10フレームの受信電力の平均値である。通信品質の改善には、受信電力がより大きいことが望まれる。
- (2)下り回線における通信部(無線端末)への伝送速度は、通信部(AP)から送信された10フレームの無線区間における伝送速度の頻度が最大の伝送速度である。もしも伝送速度の頻度が同じ場合には、より低速な伝送速度を採用してデータ解析を進める。通信品質の改善には、伝送速度がより速いことが望まれる。なお、20MHz幅伝送である本実験の11n場合、Guard Interval = 400nsの場合のMCS(Modulation and Coding Scheme) Index に対応する伝送速度であると想定して、議論を進める。
- (3)下り回線における通信部(無線端末)への再送信回数は、確実にフレームが通信部(無線端末)で受信完了するまでに、通信部(AP)から通信部(無線端末)へフレームが再送信された回数である。通信品質の改善には、再送信回数がより少ないことが望まれる。

2.3. 実験結果

2.3.1. 11aの無線端末でのClientLink2.0による通信品質の改善状況

(1)下り回線における通信部(11aの無線端末)での受信電力

図4は、図3に示した測定経路P1における通信部(11aの無線端末)での受信電力の距離特性である。通信部(AP)の送信アンテナ数は4本であり、ClientLink2.0なし送信の場合が点線で、同あり送信の場合が実線で示されている。測定経路P1の概ね全般においてClientLink2.0による通信部(11aの無線端末)での受信電力の改善が見られている。

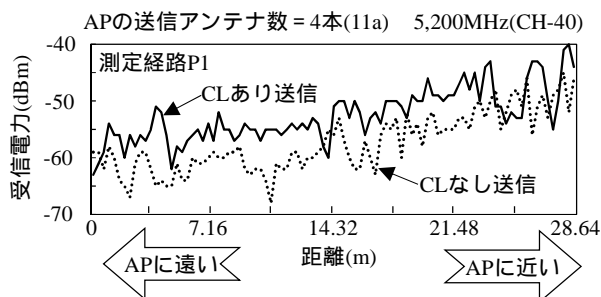


図4. 測定経路P1における通信部(11aの無線端末)での受信電力の距離特性、ClientLink2.0なし送信(点線)と同あり送信(実線)の場合の比較

図5は、図3に示した測定経路P1からP12までの合計12の測定経路における通信部(AP)の送信アンテナ数が4本の場合の通信部(11aの無線端末)での受信電力の頻度分布である。図5の縦軸は各受信電力の値での受信回数である。なお、総受信回数はClientLink2.0なし送信の場合(点線)も、同あり送信(実線)の場合も、655である。ClientLink2.0なし送信の場合よりも、同あり送信の場合のほうが受信電力が大きい受

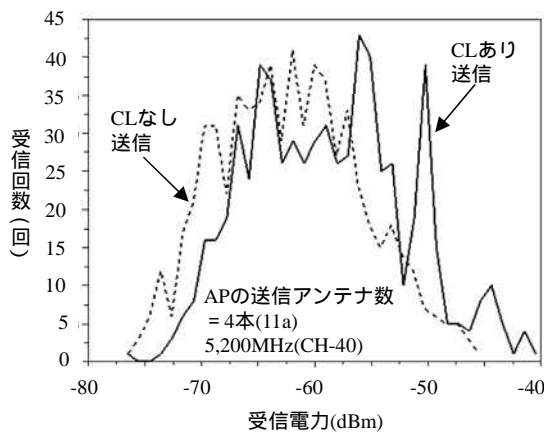


図5. 測定経路P1 からP12 までの合計12 経路における通信部(11aの無線端末)での受信電力の頻度分布、ClientLink2.0 なし送信(点線)と同あり送信(実線)の場合の比較

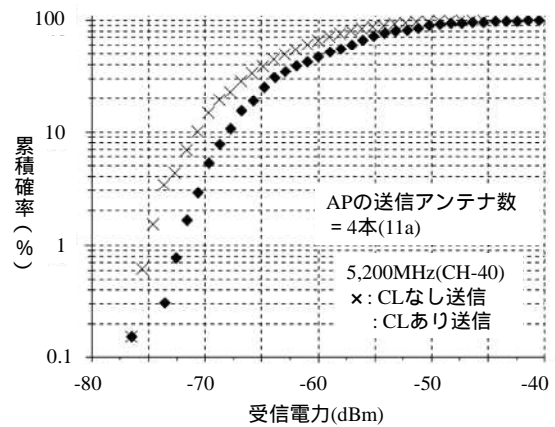


図6. 測定経路P1 からP12 までの合計12 経路における通信部(11aの無線端末)での受信電力の累積確率分布、APの送信アンテナ数4本の場合におけるCL(ClientLink2.0)あり送信となし送信の場合の比較

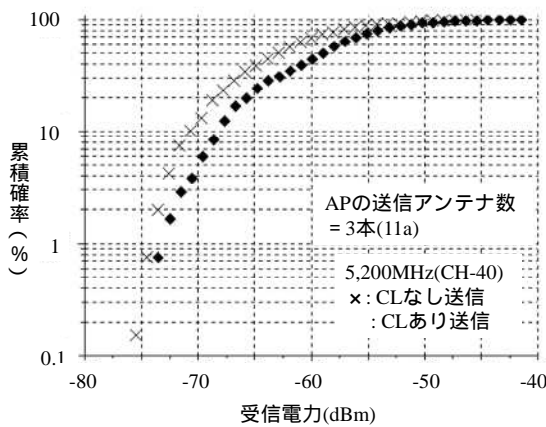


図7. 測定経路P1 からP12 までの合計12 経路における通信部(11aの無線端末)での受信電力の累積確率分布、APの送信アンテナ数3本の場合におけるCL(ClientLink2.0)あり送信となし送信の場合の比較

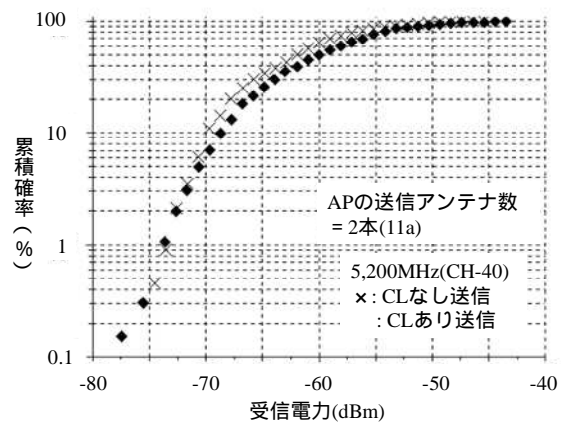


図8. 測定経路P1 からP12 までの合計12 経路における通信部(11aの無線端末)での受信電力の累積確率分布、APの送信アンテナ数2本の場合におけるCL(ClientLink2.0)あり送信となし送信の場合の比較

信回数が多い傾向があり、合計12の測定経路の概ね全般においてClientLink2.0による通信部(11aの無線端末)での受信電力の改善が見られている。

図6には、図5の測定データを受信電力の累積確率分布として示した。図5の受信回数を受信電力の小さい側から累積していき、その累積値を総受信回数(本実験では655)で割り算して百分率で表現したものが図6である。例えば累積確率1%の受信電力は、ClientLink2.0なし送信の場合よりも、同あり送信の場合のほうが約3dB大きいことがわかる。

図6と同様に、通信部(11aの無線端末)での受信電力の累積確率分布について、通信部(AP)の

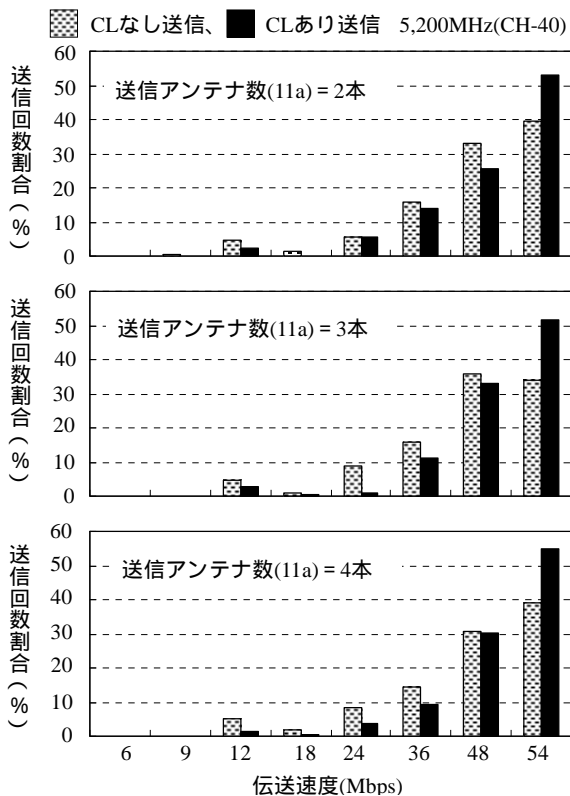


図9. 測定経路P1 からP12 までの合計12 経路における通信部(11aの無線端末)への伝送速度の頻度分布、APの送信アンテナ数2本、3本、及び、4本の場合におけるCL(ClientLink2.0)あり送信ととなし送信の場合の比較

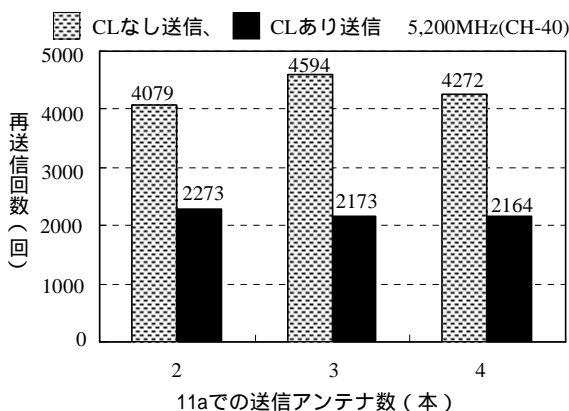


図10. 測定経路P1 からP12 までの合計12 経路における通信部(11aの無線端末)への再送信回数、APの送信アンテナ数2本、3本、及び、4本の場合におけるCL(ClientLink2.0)あり送信ととなし送信の場合の比較

送信アンテナ数が3本の場合(総受信回数は657)を図7に、同2本の場合(総受信回数は657)を図8に示す。図7からは、例えば累積確率1%の受信電力は、ClientLink2.0なし送信の場合よりも、同あり送信の場合のほうが約1dB大きいことがわかる。図8からは、累積確率が約3%以下、即ち受信電力が約-72dBm以下の状況では、ClientLink2.0なし送信の場合と同あり送信の場合で、累積確率分布が同じ傾向になっていることがわかる。

(2)下り回線における通信部(11aの無線端末)への伝送速度

図9は、図3に示した測定経路P1からP12までの合計12の測定経路での下り回線における通信部(11aの無線端末)への無線区間における伝送速度の頻度分布である。各送信アンテナ数の場合での総データ数は、項目2.3.1.(1)で述べた図6、図7、及び図8における総受信回数に等しい。

すべての送信アンテナ数の場合において、ClientLink2.0なし送信の場合より、同あり送信の場合のほうが11aの最高伝送速度54Mbpsの送信回数割合は増加しており、送信アンテナ数2本の場合では約1.3倍に、同3本の場合では約1.5倍に、及び、同4本の場合では約1.4倍に、各増加している。

またClientLink2.0あり送信の場合に11aの最高伝送速度54Mbpsの送信回数が占める割合は、送信アンテナ数2本の場合では約53%、同3本の場合では約52%、及び、同4本の場合では約55%である。

(3)下り回線における通信部(11aの無線端末)への再送信回数

図10は、図3に示した測定経路P1からP12までの合計12の測定経路での下り回線における通信部(11aの無線端末)への再送信回数である。すべての送信アンテナ数

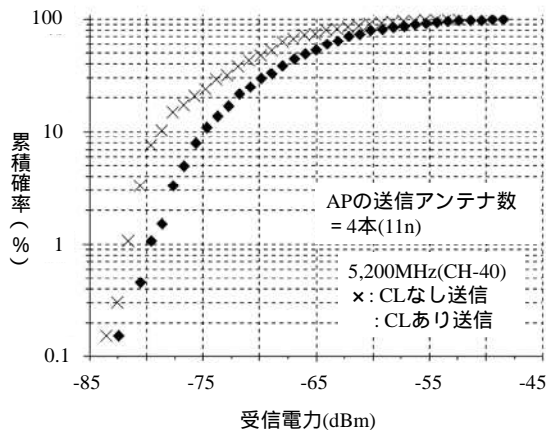


図 11. 測定経路 P1 から P12 までの合計 12 経路における通信部 (11n の無線端末) での受信電力の累積確率分布、AP の送信アンテナ数 4 本の場合における CL (ClientLink2.0) あり送信と同なし送信の場合の比較

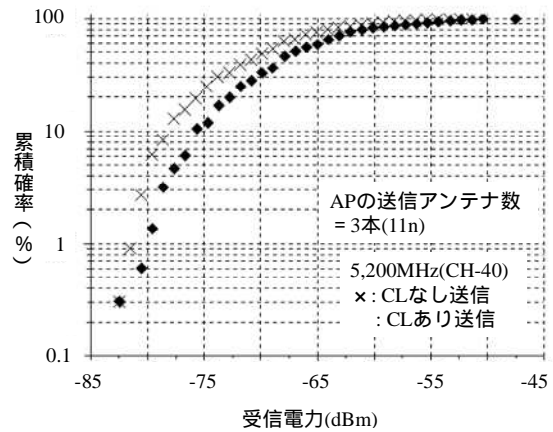


図 12. 測定経路 P1 から P12 までの合計 12 経路における通信部 (11n の無線端末) での受信電力の累積確率分布、AP の送信アンテナ数 3 本の場合における CL (ClientLink2.0) あり送信と同なし送信の場合の比較

の場合において、ClientLink2.0 なし送信の場合より、同あり送信の場合のほうが通信部 (11a の無線端末) への再送信回数が減少しており、送信アンテナ数 2 本の場合では約 0.6 倍に、同 3 本の場合では約 0.5 倍に、及び、同 4 本の場合でも約 0.5 倍に各減少している。

2.3.2. 11n の無線端末での ClientLink2.0 による通信品質の改善状況

(1) 下り回線における通信部 (11n の無線端末) での受信電力

通信部 (11n の無線端末) での受信電力の累積確率分布について、通信部 (AP) の送信アンテナ数が 4 本の場合 (総受信回数は 658) を図 11 に、同 3 本の場合 (同回数は 660) を図 12 に、及び、同 2 本の場合 (同回数は 658) を図 13 に示す。

例えば累積確率 1% の受信電力は、ClientLink2.0 なし送信の場合よりも同あり送信の場合のほうが、図 11 では約 2dB 大きく、図 12 と図 13 では約 1dB 大きいことがわかる。

(2) 下り回線における通信部 (11n の無線端末) への伝送速度

図 14 は、図 3 に示した測定経路 P1 から P12 までの合計 12 の測定経路での下り回線における通信部 (11n の無線端末) への無線区間における伝送速度の頻度分布である。各送信アンテナ数の場合での総データ数は、項目 2.3.2.(1) で述べた図 11、図 12、及び図 13 における総受信回数に等しい。送信アンテナ数 4 本の場合では伝送速度が 115.6Mbps (MCS Index13) 以上において、また同 3 本の場合では

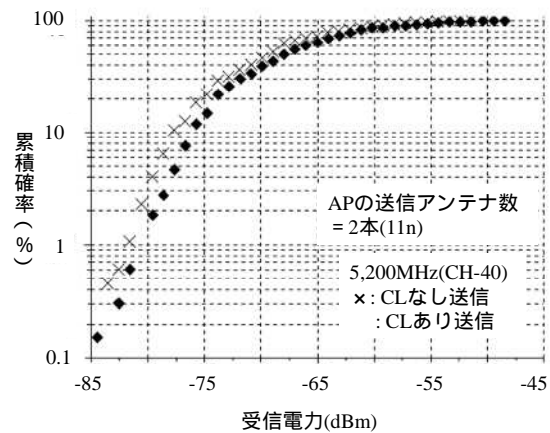


図 13. 測定経路 P1 から P12 までの合計 12 経路における通信部 (11n の無線端末) での受信電力の累積確率分布、AP の送信アンテナ数 2 本の場合における CL (ClientLink2.0) あり送信と同なし送信の場合の比較

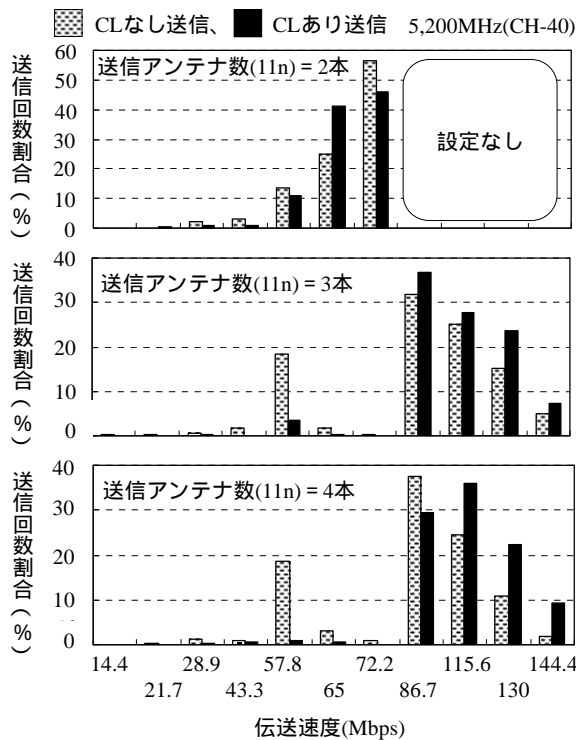


図 14. 測定経路 P1 から P12 までの合計 12 経路における通信部 (11n の無線端末) への伝送速度の頻度分布、AP の送信アンテナ数 2 本、3 本、及び、4 本の場合における CL (ClientLink2.0) あり送信と同一なし送信の場合の比較

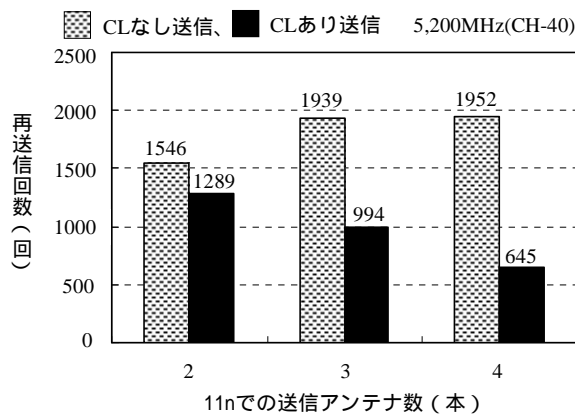


図 15. 測定経路 P1 から P12 までの合計 12 経路における通信部 (11n の無線端末) への再送信回数、AP の送信アンテナ数 2 本、3 本、及び、4 本の場合における CL (ClientLink2.0) あり送信と同一なし送信の場合の比較

伝送速度が 86.7Mbps (MCS Index12) 以上において、ClientLink2.0 なし送信の場合より、同あり送信の場合のほうが各伝送速度の送信回数割合が増加している。その増加は、例えば、最高伝送速度 144.4Mbps (MCS Index15) において、送信アンテナ数 4 本の場合では約 5 倍、及び、同 3 本の場合では約 1.5 倍である。また ClientLink2.0 あり送信の場合に最高伝送速度 144.4Mbps (MCS Index15) の送信回数が占める割合は、送信アンテナ数 4 本の場合では約 9%、及び、同 3 本の場合では約 7% である。

送信アンテナ数が 2 本の設定時は、制御部 CT2504 が表示するメッセージに従い、11n の伝送速度は、MCS Index0 から 7 までを有効、及び、MCS Index8 から 15 までを無効設定の状況である。伝送速度が 65Mbps (MCS Index6) においては、ClientLink2.0 なし送信の場合より、同あり送信の場合のほうが伝送速度の送信回数割合が約 1.7 倍大きい。一方、最高伝送速度 72.2Mbps (MCS Index7) においては、ClientLink2.0 なし送信の場合より、同あり送信の場合のほうが伝送速度の送信回数割合が約 0.8 倍に減少している。但し、ClientLink2.0 あり送信の場合、最高伝送速度 72.2Mbps (MCS Index7) の送信回数割合は、伝送速度が 65Mbps (MCS Index6) のそれより、約 1.1 倍大きくなっている。

(3) 下り回線における通信部 (11n の無線端末) への再送信回数

図 15 は、図 3 に示した測定経路 P1 から P12 までの合計 12 の測定経路での下り回線における通信部 (11n の無線端末) への再送信回数である。すべての送信アンテナ数において、ClientLink2.0 なし送信の場合より、同あり送信の場合のほうが通信部 (11n の無線端末) への再送信回数が減少しており、送信アンテ

ナ数2本では約0.8倍に、同3本では約0.5倍に、及び、同4本では約0.3倍に各減少している。

2.4. 考察

2.3節の実験結果から、通信部（AP）での ClientLink2.0 あり送信の場合には、通信部（無線端末）での受信電力がより増加すること、同端末への伝送速度がより高速化すること、及び、同端末への再送信回数がより減少することを 11a と 11n（本実験では、最大空間多重数は2ストリーム）において明確に確認できるので、ClientLink2.0 は下り回線の通信品質（受信電力、伝送速度、再送信回数）を改善する性能を持つと評価できる。また、その改善効果は、通信部（AP）の送信アンテナ数が増加するに伴い、より顕著になると評価できる。図9と図14から明らかなように、下り回線における最高伝送速度とそれに続く複数の高い伝送速度の範囲内で ClientLink2.0 による改善効果がより顕著である傾向は、無線 LAN を利活用する立場からは多いに歓迎されると考えられる。

通信部（AP）の送信アンテナ数が増加するに伴い、ClientLink2.0 による下り回線における通信部（無線端末）での受信電力がより改善されることは 11a と 11n（本実験では、最大空間多重数は2ストリーム）において同様に確認できる。なお、通信部（AP）の送信アンテナ数が2本の場合の通信部（11aの無線端末）での受信電力の累積確率分布を示した図8で、累積確率が約3%以下、即ち受信電力が約-72dBm以下の状況では、ClientLink2.0 なし送信の場合と同あり送信の場合で累積確率分布が同じ傾向になっていた。一方、同じ送信アンテナ数が2本の場合の通信部（11nの無線端末）での受信電力の累積確率分布を示した図13では、ClientLink2.0 なし送信の場合より同あり送信の場合のほうが受信電力は改善している。これらの違いは、無線端末の受信性能の違い、即ち、図8の通信部（11aの無線端末）は選択ダイバーシチ受信であり、図13の通信部（11nの無線端末）はMRCダイバーシチ受信であることによる違いの効果であろうと推測する[3]。

3. ClientLink2.0（CAP3602Eに実装）によるスループット改善の実験的検討

3.1. 実験目的

第2章の実験結果によって確認できた ClientLink2.0 による下り回線における通信品質の改善効果が、下り回線のスループット改善として現れるか否かを確認する。具体的には、シスコシステムズ社製の無線 LAN の 11n 対応 AP 製品の CAP3602E に実装された ClientLink2.0 で、送信アンテナ数が4本のときに、11aの無線端末への下り回線のスループットを測定する。また、他社製 AP（送信ビームフォーミング機能は、なし）を用いた実験も実施し、その結果とも比較する。

3.2. 実験方法

3.2.1. 実験システムの構成

図16に実験システムの構成を示す。AP系の「設定、情報表示、通信（有線端末）部」と無線端末系の「通信部（無線端末）」との間で、制御部と通信部（AP）を経由して iperf（スループット測定ソフトウェア）を利用した下り回線における TCP での3秒間毎のスループット測定を連続に実施する。AP系の「設定、情報表示、通信（有線端末）部」が iperf のクライアント側として動作し、無線端末系の「通信部（無線端末）」が iperf のサーバ側として動作する。ClientLink2.0 を「あり」と「なし」

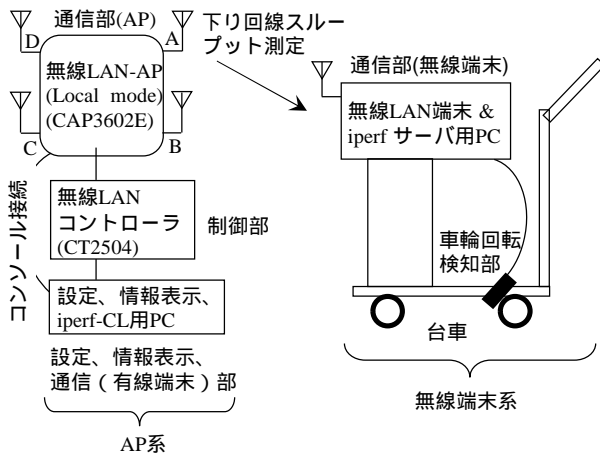


図 16. 実験システムの構成

表 2. 表 1 から変更した実験での測定諸元

通信部AP、無線端末共通	実験で利用したIEEE規約	IEEE802.11a
通信部(AP) (Cisco CAP3602E)	送信電力 (最小のレベル5設定時、ClientLink2.0あり・なしで共通、アンテナ数4)	4dBm
	送信電力 (最大のレベル1設定時、ClientLink2.0あり、アンテナ数4)	10dBm
	送信電力 (最大のレベル1設定時、ClientLink2.0なし、アンテナ数4)	16dBm
	RogueAP検知機能	ON
	CleanAir (干渉波等検知・対処機能)	ON
通信部 (無線端末)	送信電力 (11a用PC内蔵無線LANモジュール)	0dBm (最小設定時)、15dBm (最大設定時)
	時刻記録の距離間隔	約 5.17波長
	時刻記録の制御ソフトウェア	自作 (EXCEL-VBA)
	受信電力等簡易測定ソフトウェア	インテルPROset/Wireless ソフトウェア 11.1.0.0
制御部 (Cisco CT2504)	ソフトウェア Version	7.6.110.0
設定・情報表示、通信 (有線端末) 部	ノート型PC型番名	IBM ThinkPad T61
	ノート型PCのOS	Windows7 Enterprise 64bit SP1
通信部 (TCP スループット測定ソフトウェア iperf)	ソフトウェア Version	2.0.5.1
	サーバー側設定コマンド	iperf -s -w 512K -i 3
	クライアント側設定コマンド	iperf -c IPアドレス -w 512K -i 3 -t 400

を得るために利用した。これら 2 つのソフトウェアを組み合わせることで、各測定経路において第 1 番目と最後の各位置の間で測定された 3 秒間毎のスループット連続記録を取り出してデータ解析した。

本実験では、AP 系の制御部の無線 LAN コントローラと通信部 (AP) での実時間処理の機能 (RogueAP 検知と CleanAir (干渉波等検知・対処)) は動作させる ON に変更設定した。

第 2 章の実験は一区切りついた状態なので、第 3 章の本実験では、実験実施時に入手できた最新 Version のソフトウェアを制御部の無線 LAN コントローラに適用させた。

で切り替える方法は、項目 2.2.3.に記載したとおりである。

本実験での測定諸元は、表 1 において変更のある部分を表 2 に示す。無線端末系の通信部 (無線端末) は、急遽の移転対応があり同じ実験環境における実験実施の期間が制限されたので、止むを得ず 1 種類の選択として 11a による実験 (5GHz 帯無線 LAN のチャンネル番号 40 (中心周波数 5,200MHz) の電波を利用) を選択した。その理由は、11n、そして 11ac の時代において、より低速な 11a の無線端末のスループットが ClientLink2.0 によって、ど

のくらい改善されるかを知っておけば、11a、11n、及び 11ac の多様な種類の無線端末が混在する環境を検討する上で貴重な知見になるからである。

通信部 (AP) と通信部 (無線端末) の送信電力は、最大設定と最小設定の 2 つの場合で実験をした。

本実験でも無線端末系の通信部 (無線端末) は、台車の上に乗せて人がゆっくりと移動させているが、図 2 に示した制御ソフトウェアは、台車の車輪の 1 回転ごとの時刻を記録するために利用した。また、Linktest コマンドによる測定ほどの時間分解能はないが、無線端末での受信電力等を簡易測定 (3 秒間毎の測定) するソフトウェアも参考情報

表3. 制御部と通信部 (AP) を他社製品に変更した場合の
表1と表2から変更した実験での測定諸元

通信部AP、無線端末共通	実験で利用したIEEE規約	IEEE802.11a
通信部 (AP) (11n対応他社製品)	Cisco ClientLink2.0相当の送信ビームフォーミング機能	なし
	EIRP (低減設定時)	8dBm
	EIRP (最大設定時)	16dBm
	アンテナ	外付け棒状タイプ
	アンテナ数	3
	アンテナ利得 (5GHz帯)	5.8dBi
	アンテナ水平面内指向性 (5GHz帯)	無指向性
	アンテナ垂直面内半値角 (5GHz帯)	25度
	偏波 (床面に対して)	垂直
	アンテナ間隔 (コネクタ1個目と2個目の中心間、及びコネクタ2個目と3個目の中心間)	約0.45波長
	シスコシステムズ社製のRogueAP検知と類似と宣伝ある機能	ON
	シスコシステムズ社製のCleanAirと類似と宣伝ある機能	OFF (初期値のまま。シスコシステムズ社製と異なり、通信中はOFF (停止) が前提)
制御部 (他社製品)	機能Mode	シスコシステムズ社製のLocal mode (無線LAN通信モード) 相当
	ソフトウェアVersion	実験実施時に入手できた最新Version

3.2.2. 実験で利用した他社製 AP (送信ビームフォーミング機能は、なし)

図16における制御部と通信部 (AP) を他社製品に変更した場合の測定諸元は、表1と表2において変更のある部分を表3に示す。11n対応の他社製 AP には、11a や 11g の無線端末までサポートしている ClientLink2.0 相当の送信ビームフォーミング機能は、ない。また、他社製 AP の送受信アンテナ数は3本であるが、11n 対応 AP として他社のフラグシップモデルであるので、CAP3602E (11n 対応 AP のシスコシステムズ社のフラグシップモデル、送受信アンテナ数は4本) と性能比較することは興味深く、有益である。

なお、他社製 AP の場合、CAP3602E とは異なり、送信電力ではなく EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power: 等価等方輻射電力) を制御部から設定する方法と理解できた。単位を dB (デシベル) とした場合、EIRP は、AP からアンテナに供給される送信電力 (dBm) と与えられた方向におけるアンテナの絶対利得 (dBi) の和である。表2に示された送信電力と表1に示されたアンテナ利得から計算した CAP3602E の EIRP を参考にして、他社製の通信部 (AP) の EIRP は、8dBm (CAP3602E の最小送信電力設定時に対応) または、設定可能な最大値の 16dBm (CAP3602E の最大送信電力設定時に対応) を設定した。他社製の制御部も実験実施時に入手できた最新 Version のソフトウェアを適用させた。

3.2.3. 実験場所の環境

実験場所の環境は項目 2.2.4. に記載のとおりであるが、実験実施に際して制約があり、測定経路は図3の P5、P8、P10、及び P11 を除く合計 8 経路である。第2章の実験時より、測定経路が4つ減少したが、合計 8 経路によってもフロアの概ね全面をカバーしている。その中で通信部 (AP) と通信部 (無線端末) 間の見通しを確保できている測定経路は、P1、P6、P7、及び、P9 の合計 4 経路である。

3.3. 実験結果

図17に、図3の P5、P8、P10、及び P11 を除く合計 8 経路で測定された、11a での下り回線の 3 秒間毎測定スループットの発生回数割合を、横軸のスループット値毎に、3 種類の測定結果を棒状に並べて示す。通信部 (AP) の CAP3602E の送信電力が最小設定 (EIRP では 8dBm) の状態において、ClientLink2.0 なし送信の場合を点表示 (CL なし送信) で、同あり送信の場合を黒表示 (CL あり送信) で示している。さらに、通信部 (AP) が他社製 (EIRP では 8dBm) の場合も、斜線表示 (CL 機能なし) で示している。なお、3 つの各種類とも総データ数は同じ 379 である。

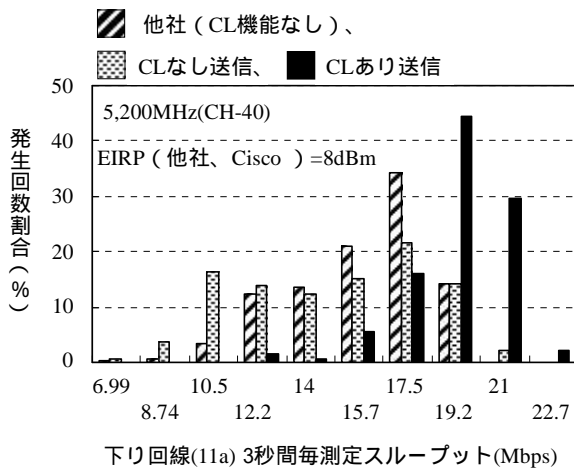


図 17. 合計 8 つの測定経路における TCP での下り回線(11a) 3 秒間毎測定スループットの発生回数割合、EIRP が 8dBm の場合における Cisco CAP3602E の CL (ClientLink2.0) あり送信と同なし送信、及び、他社製 AP (CL 機能なし) の場合の比較

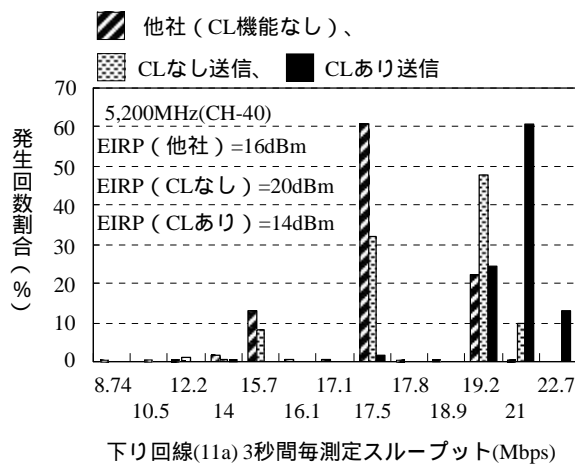


図 18. 合計 8 つの測定経路における TCP での下り回線(11a) 3 秒間毎測定スループットの発生回数割合、EIRP が最大の場合における Cisco CAP3602E の CL (ClientLink2.0) あり送信と同なし送信、及び、他社製 AP (CL 機能なし) の場合の比較

プットを改善する効果が明確にあると評価できる。
 図 17 において、各スループットの発生回数割合をスループットの大きい側から累積すると、CAP3602E で ClientLink2.0 あり送信の場合は、スループットが 17.5Mbps 以上で約 92%の発生回数割合となり、これは、図 3 の 8 つの測定経路の約 92%をスループットが 17.5Mbps 以上でカバーしている

CAP3602E で ClientLink2.0 あり送信の場合は、同なし送信や他社製 AP の場合よりも、スループットの大きい発生回数割合が多い傾向がある。スループットの平均値は、CAP3602E で ClientLink2.0 なし送信の場合は 14.8Mbps、他社製 AP の場合は 15.9Mbps、及び、同あり送信の場合は 19.2Mbps (=同なし送信の場合の約 1.30 倍、また、他社製 AP の場合の約 1.21 倍の改善)となった。

図 18 には、通信部 (AP) の CAP3602E の送信電力、及び、通信部(他社製 AP)の EIRP の両方が最大設定の状態における、図 3 の P5、P8、P10、及び P11 を除く合計 8 経路で測定された、11a での下り回線の 3 秒間毎測定スループットの発生回数割合を、図 17 と同様に横軸のスループット値毎に、3 種類の測定結果を棒状に並べて示す。なお、3 つの各種類とも総データ数は同じ 385 である。

CAP3602E で ClientLink2.0 あり送信の場合は、同なし送信や他社製 AP の場合よりも、スループットの大きい発生回数割合が多い傾向がある。スループットの平均値は、CAP3602E で ClientLink2.0 なし送信の場合は 18.4Mbps、他社製 AP の場合は 17.6Mbps、及び、同あり送信の場合は 20.7Mbps (=同なし送信の場合の約 1.13 倍、また、他社製 AP の場合の約 1.18 倍の改善)となった。

3.4. 考察

3.3 節の実験結果から、AP における ClientLink2.0 あり送信は、同なし送信 (シスコシステムズ社製 AP、及び、他社製 AP) に比べて、11a における下り回線のスループット

ことを意味する。一方、同なし送信の場合は、スループットが 17.5Mbps 以上によるカバーは図 3 の 8 つの測定経路の約 38%にとどまり、また、他社製 AP の場合は、約 49%にとどまっている。

ここで図 17 の場合において、通信部（11a の無線端末）での下り回線の受信電力の中央値は、CAP3602E で ClientLink2.0 あり送信の場合は-63dBm、同なし送信の場合は-64dBm、及び、他社製 AP の場合は-59dBm であった。他社製 AP の送信による受信電力の中央値は、CAP3602E の同値より 4dB または 5dB 大きい状況であるが、他社製 AP で送信の場合のスループットの平均値は、CAP3602E で ClientLink2.0 あり送信の場合のそれより小さい（約 0.83 倍 = 15.9Mbps/19.2Mbps）。

なお、CAP3602E と他社製 AP が同じ EIRP になるように配慮したが、受信電力の中央値は上記のように最大 5dB も異なっていた。この理由は不明である。

図 18 において、各スループットの発生回数割合をスループットの大きい側から累積すると、CAP3602E で ClientLink2.0 あり送信の場合は、スループットが 19.2Mbps 以上で約 98%の発生回数割合となり、これは、図 3 の 8 つの測定経路の約 98%をスループットが 19.2Mbps 以上でカバーしていることを意味する。一方、同なし送信の場合は、スループットが 19.2Mbps 以上によるカバーは図 3 の 8 つの測定経路の約 58%にとどまり、また、他社製 AP の場合は、約 23%にとどまっている。

図 18 の場合におけるスループットの平均値の改善効果が、図 17 の場合のそれよりやや小さいが、その理由は、図 18 の結果は、通信部（AP）の送信電力や EIRP が最大設定時の場合なので、図 17 の通信部（AP）の送信電力や EIRP が最小設定時より、既にもともとの通信品質がそれなりに良好の状態になっていて、ClientLink2.0 による下り回線でのスループットの改善効果は、現れにくい状況になっているからと推測する。例えば、図 18 の場合、通信部（11a の無線端末）での下り回線の受信電力の中央値は、CAP3602E で ClientLink2.0 あり送信の場合は-50dBm、同なし送信の場合は-51dBm、及び、他社製 AP の場合は-51dBm であった。これらは、上述の図 17 の場合より受信電力の中央値は、CAP3602E で 13dB 大きく、他社製 AP で 8dB 大きい状況である。

4. ClientLink の性能の良さをもっと広めるための提案

第 2 章と第 3 章の実験的検討により ClientLink の性能の良さを確認することができたが、この良さをもっと広めるための提案を述べる。シスコシステムズ社による対応を期待する。

（提案 1）本論文では 11n 対応の AP 製品に実装された ClientLink2.0 を実験対象にしたが、11ac Wave1 対応の AP 製品に実装された ClientLink3.0 を有効と無効に切り替える方法も、パートナーの検証評価用限定の扱いで良いので、ぜひ情報共有してほしい。パートナー自らの検証評価を経て、自信をもって ClientLink の性能の良さをお客様へよりアピールすることが可能となろう。

（提案 2）ClientLink が常時動作している通常の無線 LAN 運用時に、AP に接続している無線端末へ Linktest コマンドを送信した場合に測定表示される下り回線の通信品質の中に、もしも ClientLink が無い場合を予想した通信品質も表示できてほしい。例えば、お客様へのデモンストレーションや導入後の毎日の運用の中で ClientLink の性能の良さをよりアピールすることが可能となろう。

5. むすび

本論文では、より信頼性の向上した無線 LAN の実現を目指して、シスコシステムズ社製無線 LAN アクセスポイント CAP3602E に実装された送信ビームフォーミングである ClientLink2.0 による下り回線の通信品質の改善性能を一般的な事務所のフロア環境において実験的に検討した。その結果、11a と 11n の無線端末への下り回線における通信品質は、ClientLink2.0 あり送信の場合が同なし送信の場合より明確に改善されること、そして、その改善効果は送信アンテナ数が増加するに伴い、より顕著になることを確認できた。また、11a の無線端末への下り回線における TCP スループットも、ClientLink2.0 あり送信の場合が、同なし送信の場合（シスコシステムズ社製 AP、及び、他社製 AP）より明確に改善されることを確認できた。

無線端末（受信局）に特別な仕組みを不要とする Implicit feedback 相当方式の送信ビームフォーミングである Cisco ClientLink は、手軽に導入できて下り回線の通信品質を明確に改善するので、無線端末の種類が多様になっている企業ネットワークばかりでなく、あらゆる無線 LAN の利活用の場面において、より信頼性の向上した無線 LAN の実現に多いに貢献すると、筆者は確信する。

6. 謝辞

参考文献[1]に記載ある貴重な調査結果情報を本論文内に引用することをご承認いただいた、リクルートマーケティングパートナーズ キーマンズネット殿に感謝する。無線 LAN 製品の様々なことで日頃よりお世話になっているシスコシステムズ合同会社の 大野奈津子様、鈴木麻倫子様、大崎秀行様、中元聡様、熊代晃久様、斉藤真秀様に感謝する。本実験実施への多大な支援と実験結果について議論を深めてくれたネットワークシステムズ株式会社経営企画本部第1 応用技術部スイッチワイヤレスチームの中野清隆、山下聖太郎、田中政満、丸田竜一、NI ソリューション開発チームの宇都宮光之、保守運用サービス本部サービスオペレーション室 第2 チームの力石靖の各社員に感謝する。最後に、本実験実施の機会を与えていただいたネットワークシステムズ株式会社の篠浦執行役員、飯田第1 応用技術部長、大高スイッチワイヤレスチームリーダーに感謝する。

7. 参考文献

- [1] リクルートマーケティングパートナーズ キーマンズネット、2013 年 02 月 12 日掲載、「IT 担当者 300 人に聞きました」より転載・無断転載禁止、<http://www.keyman.or.jp/at/30005290/>.
本論文内への引用についてはご承認いただき済み（2014 年 8 月 18 日）.
- [2] 唐沢好男、「デジタル移動通信の電波伝搬基礎」、コロナ社、2003 年 3 月 17 日、ISBN 4-339-00752-8.
- [3] 松戸孝、宇都宮光之、田中政満、中野清隆、丸田竜一、力石靖、山下聖太郎、「シスコシステムズ社製無線 LAN アクセスポイント CAP3602E の最大比合成 (Maximal Ratio Combining:MRC) ダイバーシチ受信性能の実験的検討 - より信頼性の向上した無線 LAN の実現を目指して」、第1回 シスコ テクノロジー論文コンテスト最優秀賞受賞論文、社員執筆記事、ネットワークシステムズ、
<http://www.netone.co.jp/report/press.html>,

http://www.netone.co.jp/wp-content/uploads/2012/04/matsudo_et_al1.pdf, 2013年7月12日.

受賞論文紹介、Cisco systems、

<http://www.cisco.com/web/JP/partners/ronbun/1st/index.html#2>,

http://www.cisco.com/web/JP/partners/ronbun/1st/literature/matsudo_et_al.pdf, 2013年7月12日.

[4]守倉正博、久保田周治、"改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書 第10章高速化を実現する技術"、インプレス R&D、2008年4月11日、ISBN978-4-8443-2546-8.

[5]Eldad Perahia、Robert Stacey、"Next generation wireless LANs : throughput, robustness, and reliability in 802.11n Chapter12 Transmit beamforming"、Cambridge University Press、2008、ISBN978-0-521-88584-3 hardback.

[6]Matthew S. Gast、"802.11ac: A Survival Guide Chapter 4 Beamforming in 802.11ac"、

<http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001739/ch04.html>、O'Reilly Media, Inc.、2013、ISBN978-1-4493-4314-9.

[7]Cisco systems、"Cisco ClientLink: Optimized Device Performance with 802.11n"、Cisco systems、

http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1130-ag-series/white_paper_c11-516389.html、参照 July 21, 2014.

[8] Cisco systems、"All Beamforming Solutions Are Not Equal White Paper"、

http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-722622.html、参照 July 21, 2014.

[9]Cisco systems、"Cisco Wireless ClientLink 3.0 Technology"、

http://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/at_a_glance_c45-691984.pdf、参照 July 21, 2014.

[10]松戸孝、宇都宮光之、田中政満、中野清隆、山下聖太郎、力石靖、丸田竜一、"複数のダイポールアンテナを実装した無線 LAN アクセスポイントの送信ビームフォーミングは無指向性パターンになっていることを確認するための実験的検討 - 受信局(子局)に特別な仕組みを不要とする Implicit feedback 相当方式の Cisco ClientLink の場合 -"、第586回 URSI-F(日本学術会議 電気電子工学委員会 URSI 分科会 非電離媒質伝搬・リモートセンシング小委員会)会合資料

http://ursi-f.nict.go.jp/doc/URSI_F_2014Jun26_matsudo.pdf、2014年6月26日.

[11] Cisco systems、"Cisco Wireless LAN Controller Configuration Guide, Release 7.6 Performing a Link Test"、

http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/7-6/configuration-guide/b_cg76/b_cg76_chapter_01110111.html、参照 July 21, 2014.

[12] Cisco systems、"Cisco Compatible Extensions (CCX)."

http://www.cisco.com/web/partners/pr46/pr147/partners_pgm_concept_home.html、参照 July 21, 2014.

[13] Darren Douglas、Pat Smith、Vic Nunes、"Cisco Open Mic Friday, October 2011 Technical Details AP-3600 Client Link 2.0 Beam forming"、Cisco systems、October 21, 2011.