

# 無線LANの実験Ⅳ

— 教室に於ける無線LANの実用可能性 —

概要版

2008年6月

モバイルブロードバンド協会  
ハードウェア分科会  
アプリケーション分科会

## 目次

1. 緒言 .....	1
2. 実験 .....	1
2.1 方法 .....	1
2.2 実施状況 .....	1
2.3 実験用システムの構成 .....	2
2.4 実験手順 .....	3
2.5 第2条件の台数制限 .....	4
3. 結果 .....	4
3.1 実験データ .....	4
3.2 集計の準備 .....	4
3.3 FTPサーバーへのログインとダウンロード .....	5
3.4 DHCP ログ .....	6
3.5 ローミング .....	6
3.6 経路基地局別サーバー接続数 .....	8
3.7 TCPDUMP .....	9
4. 考察 .....	9
4.1 FTPサーバーへのログインの成否 .....	9
4.2 ダウンロードの成否 .....	9
4.3 ダウンロード速度 .....	10
4.4 DHCP ログ .....	11
4.5 ローミング回数 .....	12
4.6 第2条件の設定に関する検証 .....	12
4.7 基地局・端末間距離 .....	14
4.8 考察のまとめ .....	14
4.9 その他のノウハウ .....	15
5. 結言 .....	15
謝辞 .....	17
資料公開案内 .....	17

### 概要版に関する注意

この概要版は、実験結果の内、主に集計データのみを紹介しています。不明がある場合は是非正式版を御参照下さい。正式版では、より豊富な資料を掲載し、個別データや集計の要領などについても詳説しています。

# 1. 緒言

モバイルブロードバンド協会(MBA)ハードウェア分科会では、2002年、教室の様な比較的狭い閉鎖空間で多数の無線LAN端末がある場合について、伝送スループットや映像ストリーミングの実験を行った<sup>1</sup>。

この実験を更に一步進め、今回はハードウェア分科会とアプリケーション分科会合同で、多数の学生がPCと無線LANを使ったインターネット授業をうまく受ける事ができるかどうか、限界はどの辺にありそうか、もし課題があるとすれば何か、と言う様な観点から、実験の規模を拡大し、無線LANの実力を再度評価してみた。教室内で各机に有線LANを張り巡らすのには相当の費用が必要であるとされるので、無線LANが使えればメリットは大きい。

今回も早稲田大学理工学部の協力を得て、3台の基地局(アクセスポイント)と、前回の約2倍になる80台程のPC端末を使って様々な伝送実験を行った。ここにその結果を報告する。

## 2. 実験

### 2.1 方法

実験の主な目的は、授業に於て無線LANを使用した場合の性能の実地検証である事から、次の方法による事とした。

- ▶ 学生が個々にPCを持参し、授業に必要な資料を一斉にダウンロードする場面を想定する。
- ▶ 基地局は、チャンネル間干渉を考慮して3台とする。
- ▶ アクセス集中の様子を把握する為、基地局に特別な設定を行わない場合と、同時に接続できる端末の数を制限する設定を行った場合とを比較する。

### 2.2 実施状況

2006年夏より数度に渡る予備実験によってネットワーク構成などを決定した上で、下記の通り挙行した。

- ▶ 日時： 2006年11月13日(月) 10:40~12:10
- ▶ 場所： 早稲田大学大久保キャンパス 52号館 203教室  
ほぼ正方形の部屋で、座席は壁面に対して45度に設置され、一端の頂点部分に教壇がある。面積163平方メートル、座席定員203。
- ▶ 実験環境：
  - ✓ 早稲田大学理工学部コンピュータ・ネットワーク工学科2年生を対象とした授業時間中に、学生が個々にノートPCを操作した。
  - ✓ 実験に参加した端末ノートPCは79台であった。

1 「無線LANの実験 — 理想環境と閉鎖環境に於ける性能評価 —」  
公開場所：<http://www.mobile-broadband.org/j-services/material.html>

- ✓ 参加人数は座席定員の半分に満たない程であったが、三人掛の座席に一人または二人で、教室全体に分散して着席していた。
- ✓ 教室にはネットワーク設備が整っており、各座席にはLAN ジャック（本実験では使用しない）とAC コンセントが備えられている。



### 2.3 実験用システムの構成

表 1 に本実験で使用した機器と IP アドレスを示す。

図 1 に本実験で使用したネットワーク構成を示す。SERVER – SWITCH 間  
がボトルネックとならないよう、1Gbps  
の Ethernet を用いて接続する。そのほ  
かの有線接続には 100Mbps の Ethernet ケーブルを用いる。

機器	モデル	IP アドレス
SERVER	DELL DIMENSION 4500S	192.168.10.10
SWITCH	Cisco Cataryst 2948XL	192.168.10.250
AP1~3	Buffalo WAPM-HP-AMG54	192.168.10.241~243
PC1	TOSHIBA TECRA M2	192.168.10.245
PC2	NEC Lavie G RX	192.168.10.246
CLIENT		192.168.10.20~200 (DHCP)

表1 実験に使用した機器とIPアドレス

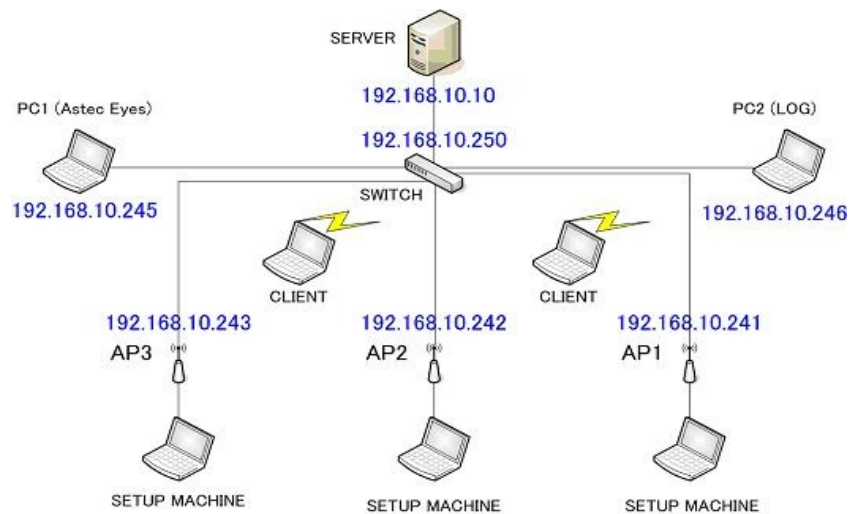


図1 ネットワーク構成

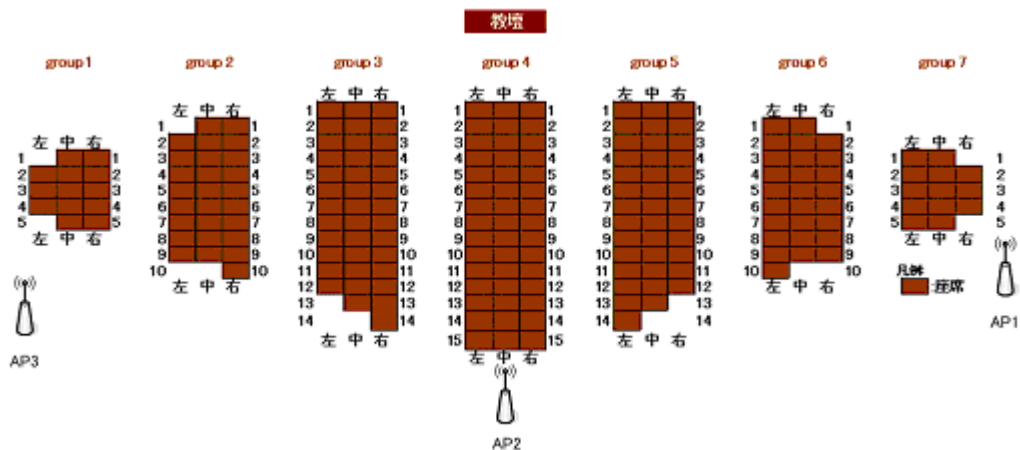


図2 機器配置及び座席番号

図2に実験で使用した機器の位置関係を示す。

本実験で使用した基地局の設定は表2の通りである。SSIDを統一したのは電波状況に応じて、端末PCがローミングできるようにするためである。チャンネルは電波干渉を避ける為、5ch離す様に設定した。電波出力は、マイクロセルの重なる部分なるべく少なくし、安定した通信を行える様にする為、基地局の仕様で設定できる最低出力を選択した。

	AP1	AP2	AP3
SSID	MBA		
チャンネル	1	6	11
セキュリティ	なし		
電波出力	25%		

表2 基地局の設定

## 2.4 実験手順

基地局に特別な設定を行わない場合を第1条件、同時に接続できる端末PCの数を制限する設定を

基本指示	担当教授概要説明、実験者（教示者）挨拶、要領説明	
準備作業	フォルダ作成 ネットワーク確認 無線LAN動作確認 接続先基地局設定 再接続確認 基本情報入力 FTP接続	共通名称の作業フォルダを作成 DHCP設定 ipconfig [enter] ipconfig /all[enter] http://192.168.10.10にアクセス 所用事項（学籍番号、氏名、着席位置等）を入力←授業出欠確認を兼ねる テスト用ファイルをダウンロード
第1実験	DL試行  3回繰り返し FTP終了	get f1*05.bmp (**は試行により適宜数字を代入) 全員揃うまで待機 指示により同時に [enter] 所要時間、転送速度をメモ
PCリセット、基地局設定変更		
第2実験	接続先再変更 DL試行  3回繰り返し FTP終了	接続先基地局を「自動」に設定。 get f2*05.bmp (**は試行により適宜数字を代入) 全員揃うまで待機 指示により同時に [enter] 所要時間、転送速度をメモ

表3 実験進行手順

行った場合を第2条件と名付け、各3試行を実施した。実験の進行は、表3に示す順で、教示者（1名）が教壇から指示を与える形によった。協力学生には進行の概要を記した手引書も配布した。また、調査票を配布し、実験の進行に応じて、端末PCの画面に表示される物理アドレス、IPアドレス、ダウンロード所要時間、転送速度、動作不調の場合の状況などを記入させた。

## 2.5 第2条件の台数制限

第1条件の進行中から、AP2に最も多くのアクセスが集まっている事が明白であった。そこで、第2条件に於ける基地局に施す設定は、AP2に対して同時に15台のみが接続できるものとした。

# 3. 結果

## 3.1 実験データ

参加した端末PCは79台であったが、開始早々に1台が故障により離脱した。しかし、実際の授業の様子を想像すれば、これもあり得る事である。よって以後の集計では、資料数が78であっても比率等を計算する場合の母数は79とする。

実験結果は、基本的にサーバー側のログによって得られる。補助的に調査票も参照した。前者には、SYSLOG、FTPLOG、APLOG、TCPDUMPがある。

## 3.2 集計の準備

### 3.2.1 共通端末番号

実験のデータはログファイル群及び調査票であるが、端末PCをMACアドレスで識別しているデータもあれば、IPアドレスで識別しているデータもあり、表記上も呼称上も煩雑である。そこで、全ての実験データの端末PC識別表記を寄せ集めて整合させ、新たに単純な形式の共通端末番号を付与した。共通端末番号は、途中欠番を含む2から111である。

### 3.2.2 共通時刻

各ログファイル間のタイムスタンプの違いも整合させる必要がある。以後の解析作業に於ては、TCPDUMPのタイムスタンプ10:35:00を第1秒とする6000秒までの通算秒数を共通時刻とする<sup>2</sup>。表4に実験進行との関係を示す。

時間帯	開始時 共通時刻	TCPDUMP	SYSLOG	FTPLOG	APLOG	時間 (秒)	
準備	1	10:35:00	11:28:35	1:59:08	10:42:21	3221	
第1条件	第1試行	3222	11:28:41	11:33:02	2:28:41	11:28:36	267
	第2試行	3489	11:33:08	11:36:43	2:33:08	11:33:03	221
	第3試行	3710	11:36:49	11:40:17	2:36:49	11:36:44	214
再起動	3924	11:40:23	11:59:41	2:40:23	11:40:18	1164	
第2条件	第1試行	5088	11:59:47	12:03:07	2:59:47	11:59:42	206
	第2試行	5294	12:03:13	12:05:48	3:03:13	12:03:08	161
	第3試行	5455	12:05:54	12:08:59	3:05:54	12:05:49	191
終了後	5646	12:09:05	12:11:44		12:09:00	355	

表4 共通時刻

2 個々の秒間（ある時刻から1秒後の時刻までの間）に対する名義付与が当初の目的であったので自然数とした。

### 3.3 FTPサーバーへのログインとダウンロード

#### 3.3.1 FTPサーバーへのログインの成否

各条件の準備段階から終了までの間に一度以上FTPサーバーにログインできた端末PCは、第1条件で76台(96.2%)、第2条件で72台(91.1%)であった。接続できた端末PCの大半は、試行開始前の準備段階までに一度以上接続できている。両条件の何れに於ても接続できなかった端末PCは無かった(リタイアの一台を除く)。

#### 3.3.2 ダウンロードの成否

実験作業の主目的であるファイルダウンロードの成否と速度を、FTPログから集計したものが表5と表6である。

表中のDOWNLOAD欄上端は、ログに「OK DOWN-LOAD」或いは「FAIL DOWN-LOAD」と記録された端末PCの台数である。内訳の「FAIL」はFTPサーバーがダウンロードが困難と判断した場合に記録されるものであり、時間切れで強制的にダウンロードを終了した場合には何も記録されていない事に注意を要する。

適正欄は、ダウンロード操作を行ったケースの内、当該試行で指定されたファイルを正しく指定しているレコードの数である。例えば、第1条件第1試行では、FTPログに記録のある45台の内、3台(45-42)は当該試行と無関係のダウンロード操作を行っていた事を示す。

完遂欄には、「OK DOWNLOAD」で、かつ適正な操作である場合、即ち所定の作業を完遂したケースの数である。

これらを概観して次の様な特徴が認められる。

- ▶ 所定の試行時間内に所定のファイルをダウンロードできた完遂の件数は、第1条件第3試行を除き、全体の5~6割であった。
- ▶ ダウンロード操作の結果が記録されたケース(「OK DOWNLOAD」と「FAIL DOWNLOAD」)は、第1条件第3試行

第1条件

FTP接続件数・比率	76	96%
------------	----	-----

	第1試行		第2試行		第3試行		全体		
DOWNLOAD	45	57%	62	79%	72	91%	179	76%	
件数・比率	OK	44	56%	61	77%	71	90%	176	74%
	FAIL	1	1%	1	1%	1	1%	3	1%
	適正	42	53%	48	61%	48	61%	138	58%
	完遂	41	52%	48	61%	68	86%	157	66%

第2条件

FTP接続件数・比率	72	91%
------------	----	-----

	第1試行		第2試行		第3試行		全体		
DOWNLOAD	52	66%	49	62%	56	71%	157	66%	
件数・比率	OK	47	60%	49	62%	52	66%	148	62%
	FAIL	5	6%	0	0%	4	5%	9	4%
	適正	48	61%	49	62%	53	67%	150	63%
	完遂	45	57%	49	62%	49	62%	143	60%

※比率は、各試行n=79、全体では237。

表5 ダウンロード成否集計

第1条件

	第1試行	第2試行	第3試行	全体
平均	193.2	189.4	87.9	148.5
標準偏差	268.5	350.1	109.3	259.1
最高値	1416.2	1805.6	864.2	1805.6

第2条件

	第1試行	第2試行	第3試行	全体
平均	89.8	83.9	100.1	91.5
標準偏差	37.1	35.1	160.7	100.1
最高値	239.5	251.9	1227.3	1227.3

表6 ダウンロード速度集計

を除き、5～6割に止まっている。FTPサーバーにログインできたもののダウンロード操作ができなかったケース、或いは時間切れで強制終了したケースが少なくない。

- ▶ ダウンロード操作の結果が記録されたケースでは、殆どがダウンロードに成功している（「FAIL DOWNLOAD」は少ない）。
- ▶ 第1条件第2試行に限っては「OK DOWNLOAD」と完遂件数に差があるが、適正でない操作が多かった為で、適正にダウンロード操作を行ったケースでは全てが完遂している。
- ▶ 第1条件と第2条件の間で、完遂件数の著しい差は見られない。
- ▶ 第1条件と第2条件の間で、ダウンロード速度のレンジには大きな違いが見られる。
- ▶ ダウンロード速度全般について、少数の特異なケースが平均値と標準偏差に影響を与えている。その様なケースでは、FTPログでは高い速度が記録されているものの、適正な操作ではなく、調査票には速度が記入されていない場合が少なくない。
- ▶ 第1条件のダウンロード速度を見ると、少数の極端に高速なケースが平均値を引っ張る現象が見られ、標準偏差が平均値より大きな値となる程である。言い換えれば、運の良い者と悪い者の差が激しい、無秩序なベストエフォートの状態が想像される。
- ▶ 第2条件のダウンロード速度を見ると、第1条件に比べて平均速度が低く、比較的一様に近く、基地局の設定により交通整理の様な効果が生じたと想像される。第3試行に限っては平均値が高くなっているが、端末85一台の異常な値（終了間際に無関係なファイルをダウンロードしており、適正な操作ではない）が原因である。

### 3.4 DHCP ログ

DHCPログは、端末MACアドレスとIPアドレス割当の状況を示している。これを眺めた所、共通端末番号92のみは、時間帯によって二つの異なるIPアドレスが割り当てられていた。但し、IPアドレスが変わったのは共通時刻1500秒台（第1条件試行開始前の準備作業段階）の一回のみであり、IPアドレスの変更はダウンロードの成否には直接関わっていないと見られる。その他の端末PCは最初から最後まで同一のIPアドレスが割り当てられていた。

### 3.5 ローミング

ローミングについて、SYSLOGとAPLOGを組み合わせ、いつどの端末PCがどの基地局を経由してサーバーに接続していたかを推測した（方法は後述）。

表7に、実験作業時間帯毎に発生したローミングの回数を示す。表中の「×」は何れの基地局にも接続していない状態である。

一見して、次の特徴が挙げられよう。

- ▶ 実験開始時の準備作業中及び第2条件前の再立ち上げ時の回数が突出しており、試行中は少ない。
- ▶ AP1及びAP2がローミングに関わるケースが多く、AP3に関わるケースは少ない。
- ▶ AP1及びAP2がローミングに関わるケースの数は、第1条件が第2条件を大きく上回っている。

パターン	第1条件					第2条件				
	準備	第1試行	第2試行	第3試行	小計	準備	第1試行	第2試行	第3試行	小計
AP1→AP2	84	14	13	13	124	36	4	1	6	47
AP1→AP3	16	3	2	1	22	24	11	6	8	49
AP1→×	7	2		1	10	22		1	39	62
AP1→小計	107	19	15	15	156	82	15	8	53	158
AP2→AP1	81	13	15	15	124	41	6	1	6	54
AP2→AP3	25	4	3	2	34	38	1	1	2	42
AP2→×	11			41	52	24			0	24
AP2→小計	117	17	18	58	210	103	7	2	8	120
AP3→AP1	23	3	5	2	33	23	10	8	13	54
AP3→AP2	19	1	3	2	25	20	3		2	25
AP3→×	4				4	10		2	1	13
AP3→小計	46	4	8	4	62	53	13	10	16	92
×→AP1	24	1	1		26	21	2		0	23
×→AP2	60		1	41	102	21		1	1	23
×→AP3	15				15	7		2	1	10
×→小計	99	1	2	41	143	49	2	3	2	56
AP1→AP1	30	5	5		40	43		1	8	52
AP2→AP2	46	5	4		55	41		1	2	44
AP3→AP3	7				7	31	5	2	5	43
同一AP小計	83	10	9	0	102	115	5	4	15	139
合計	452	51	52	118	673	402	42	27	94	565

表7 時間帯別ローミング発生回数

- 大きな差ではないが、第1条件は発生回数が多く、第2条件は少ない。

図3は端末PC別のローミング発生回数の頻数分布図である。この他、SYSLOGとAPLOGを概観して以下の傾向が読み取れる。

- 端末PC間のローミング回数のばらつきが多い。
- はらつきの幅は第1条件に於てより大きい。
- 両条件のローミング発生件数の間には相関が見られそうである。即ち、実験条件とは無関係にローミングの多い端末PCと少ない端末PCの個体差がありそうである。

#### ■ローミング推測の方法■

SYSLOGは、図2-1のPC2でSYSLOGサーバーを動作させて収集したものであり、サーバーと各端末PCとの接続、切断、経由基地局などが記録されている。APLOGは、接続中の端末PCの一覧を出力する基地局装置の機能を用い、それらの出力をPC2で収集したものである。但し、各々次の特質がある事か

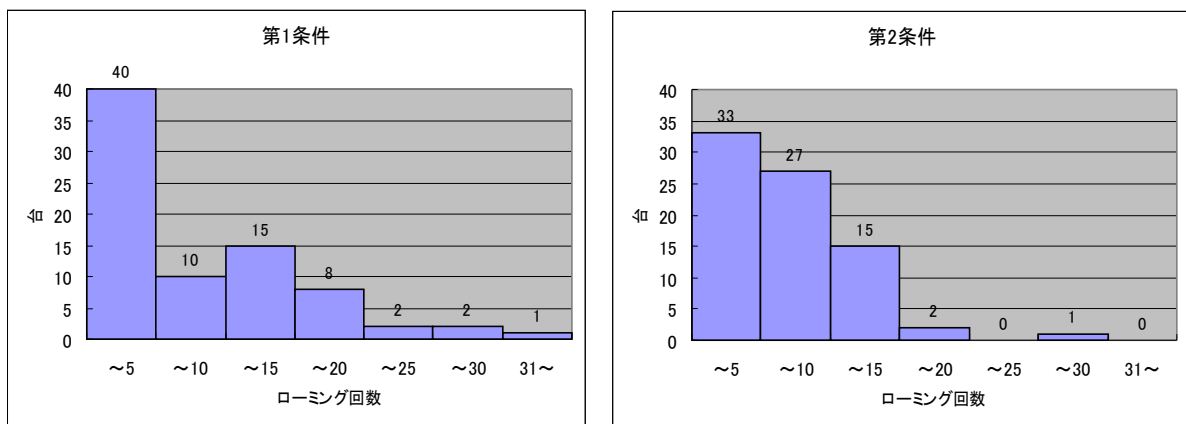


図3 ローミング回数の分布

ら、この推測によってローミングの概要を知る事はできるが、微細な部分の精度の保証はない。

**SYSLOG**： サーバーと端末PCとの間の接続、認証、切断などの動きを、経路基地局と共に記録している(Associated, DisAssociated, DeAuthentication, ReAssociated)。しかし、

「DisAssociated」が記録されないまま接続が断たれるなど場合などがあり、実態を完全に把握し得るものではない。

**APLOG**： 基地局毎に記録される接続している端末PCの一覧であり、数秒から数十秒に一度出力される。特性として、一度接続して記録された端末PCはほぼ決まって2~3分間は記録され続けるので、ある端末PCが同時に複数の基地局のAPLOGに記録される事態は珍しくはない。結局、APLOGから得られる情報は、記録されている端末PCが最近2~3分以内に一度以上は無線接続したと言う事である(当該基地局を経由してサーバーに接続したか否かは別の事)。

推測には、双方を組合せ、SYSLOGの「Associated」をサーバー接続の時と見なし、当該端末PCが他の基地局に「Associated」した時点又は経路基地局のAPLOGから消えた時点を以て切断と見なす事とした。但し、切断したPCが他の基地局経由で接続せず、直前の経路基地局のAPLOGに再び現れた時は、SYSLOGのAssociatedの有無に拘わらず、同じ基地局経由で再度接続したと見なす事とした。

なお、SYSLOG上では、同一端末PCが同一基地局に繰り返しAssociatedする現象が見られ(先述のSYSLOGの特性によるものか)、見かけ上同一基地局から同一基地局へのローミングが発生してしまう。しかし、この方法では厳密な把握は不可能であり、良くも悪くもこの推測方法による結果として集計に加えた。

### 3.6 経路基地局別サーバー接続数

3.5に記すローミング集計により、いつどの端末PCがどの基地局を経由してサーバーに接続して

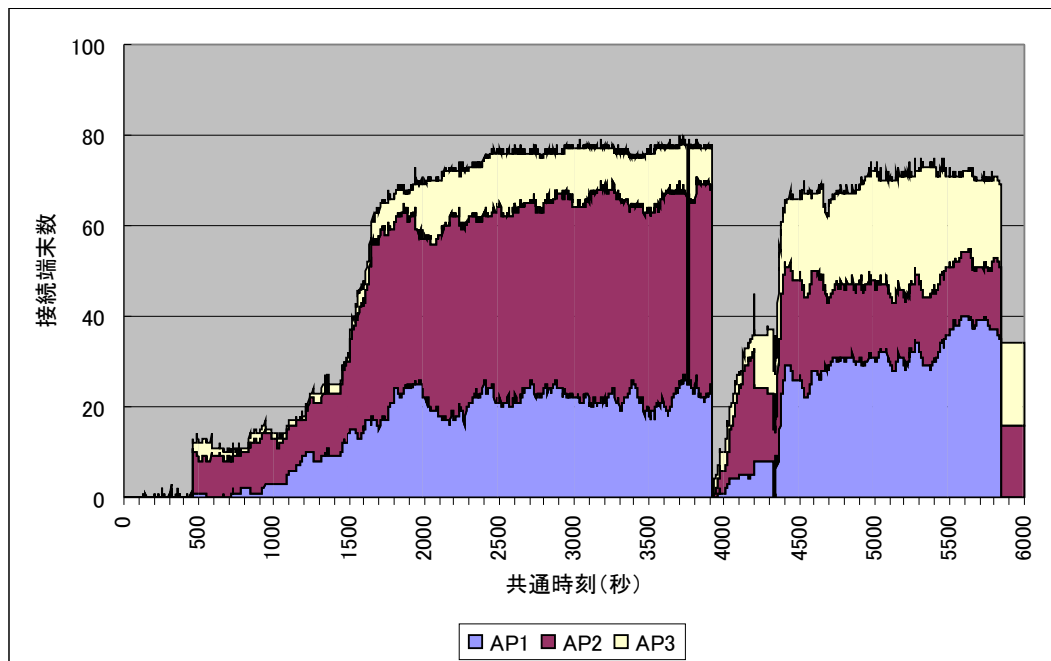


図4 経路基地局別接続端末数推移

いたかを推測できる様になった。図4と表8は、これを基地局側から見て、どの段階でどの基地局が何台の端末PCからのサーバー接続を担っていたかを集計したものである。

		AP1	AP2	AP3
第1条件	平均	22.3	43.0	10.6
	比率(n=79)	28.2%	54.4%	13.4%
	最大	27	49	14
第2条件	平均	22.0	16.1	18.1
	比率(n=79)	27.9%	20.3%	22.8%
	最大	40	27	29

表8 実験条件別基地局別接続端末数

これらから、準備段階から第1条件終了（共通時刻3900秒頃）までは、AP2の比率が圧倒的に高く、AP1がこれに次ぎ、AP3の比率がかなり低い事が解る。対して、第2条件では、3局の比率が均等に近付き、むしろAP2の比率が低くなっている事が解る。また、大きな差ではないが、第2条件中のAP1、AP2、AP3の合計接続台数は第1条件中のそれを常に下回っている事が解る。

### 3.7 TCPDUMP

TCPDUMPは、実験用ネットワーク内の全てのパケットについて、時刻、送信端末、受信端末、内容のサイズなどを記録したログファイルであり、本実験では約234万レコードが得られた。これにより、パケットの内容までは把握できないが、全てのネットワーク機器が授受する全てのパケットの情報が得られる。また、3.5で推測したローミングデータとTCPDUMPを突き合わせて、どのパケット（レコード）がどの基地局を経由したかも推定できる。これらは、次章の考察に於て使用する。

## 4. 考察

第3章で示した結果について、気付いた点や事前の予想と異なる点が幾つかあった。それらについて以下考察を試みる。

### 4.1 FTPサーバーへのログインの成否

本実験の作業課題を遂行する為にはFTPサーバーへの接続が必須である。両条件に於て9割以上の端末PCがFTPサーバーにログインした。FTPサーバーにログインできなかったケースでも、ローデータを見ると、基地局との間で電波の送受信を一度は行っており、多くのケースではDHCPサーバーとの交信も行っている。それにも拘わらず結果的にFTPサーバーにログインできなかった。

第1条件でログイン不可の2台については、機械の不調の他に、実験が始まったばかりで協力学生が作業に習熟していなかった可能性も考えられる。一方、第2条件では、ログを詳細に眺めると何れのケースも準備段階早々にFTPサーバーへのログインが不能になっており、件数もより多い。この事から、第2条件では通信そのものが比較的困難な状態になっていたと推測される。

### 4.2 ダウンロードの成否

FTPサーバーにログインできたものの、作業の主目的であるダウンロードができなかったケースが多くあった。これらについて、全試行でダウンロードができなかったケース及び一度はダウンロードができたのに以後不調になったケースを中心にローデータ群を詳細に眺めた結果、次の様な傾向が読

み取れる。

- a) 調査票備考欄によると、第1条件では「Connection closed by remote host」が多く、第2条件では「Not connected」など他の事由が増えている。「Connection closed by remote host」は、ダウンロードが遅く、時間切れで強制的に終了操作をした場合と思われる。
- b) 第1条件でダウンロードができなかったケースでは、AP2への接続を繰り返すものが少なくなく、AP2へのアクセス集中によって接続できなかったと考える事ができる。
- c) 第1条件でダウンロードができなかったケースでAP2以外の基地局に関わるケースでは、ダウンロードが不完全なまま終了している場合が多い。
- d) 第2条件でダウンロードができなかったケースでは、AP1及びAP3に関わるものが比較的多い。
- e) 第2条件でダウンロードができなかったケースでは、単なる時間切れ以外に、TCPDUMPの交信シリアル番号の錯綜などが目立つ。

第1条件ではAP2にアクセスが集中する傾向がある事は解っており、b)と整合する。a)やe)から、第1条件で見られる不調が、アクセス集中による時間切れなど、比較的単純な原因であるらしいのに対して、第2条件では端末機器にとって通信環境が比較的悪くなった事による異常動作が多いと言える。

他に、一度ダウンロードができたのに以後不調となったケースについては、端末PC側無線機のデバイスドライバーのポリシーによって、一定時間の通信の後より良好に通信できる基地局の探索を行ったものと想像される。

#### 4.3 ダウンロード速度

ダウンロード時の転送速度につき、3.3.2に示した結果に加えて、表3-5、表3-6を更に詳しく眺めると次の事が解る。

- a) 第1条件に於ては試行次が進むに連れてOK DOWNLOADが増加し、ダウンロード速度は低下している。
- b) 第2条件に於ては、試行次とOK DOWNLOADの件数との間に関係性は見られない。

これらは、実験開始後間もない第1条件では試行次が進むに連れて協力学生が習熟し、OK DOWNLOADが増え、ベストエフォートによる割り算の原理が働いたものと考えて良いのではないだろうか。

また、本実験の結果の特徴の一つとして、ダウンロード速度のばらつきの大きさがある。第1条件の方がその度合いが強かったが、第2条件にもその傾向はある。この点について、試行開始時に一斉にアクセスが始まる時を外してダウンロードを行えば、平均値に影響を及ぼす様な高速のケースが発生する事は容易に想像できる。実験者の感想としては、教示は遵守され、ダウンロード開始は一斉に始まっていたが、例外はあり得る。そこで、各試行開始時に送出される上り方向FTP送信要求パケット数が際立って多い時間帯（各試行毎に1~2秒間）に始まったダウンロードをTCPDUMPより検出し、それらケースのみでダウンロード速度を集計し、表9を作成した。同表には併せて対象となった共通時刻と対象ケースの数なども示している。

実験条件	試行次	端末台数					転送速度(KB/sec)		
		A	B	C	B/A	C/B	平均	最大	標準偏差
1	1	56	55	40	98.2%	72.7%	233.85	1595.15	344.85
	2	74	49	42	66.2%	85.7%	133.09	560.35	114.94
	3	74	74	69	100.0%	93.2%	115.01	1685.62	229.90
	全体	204	178	151	87.3%	84.8%	151.52	1685.62	248.65
2	1	62	51	44	82.3%	86.3%	90.77	147.34	26.26
	2	64	43	43	67.2%	100.0%	81.81	251.93	35.28
	3	60	48	44	80.0%	91.7%	82.35	162.59	32.35
	全体	186	142	131	76.3%	92.3%	85.00	251.93	31.76

A : 当該試行中に上り送信要求を一回以上行ったもの  
 B : 最集中時間帯に送信要求を一回以上行ったもの  
 C : Bの内OK DOWNLOADであったもの

表9 アクセス集中時にダウンロードを開始したケースの転送速度集計

その結果、第1条件は全資料の集計(表5)と似た傾向であり、データのばらつきが大きく、標準偏差が平均値を上回る程である。即ち、アクセス集中時であっても、典型的なベストエフォートの状態が現出している。一方、第2条件では、全資料の集計に比べて平均値に大差はないが、標準偏差が小さくなっている。殊に第3試行の標準偏差の違いが大きく、全資料での集計での第2条件第3試行に於ける平均値及び標準偏差の大きさは、アクセス集中時以外の閑散時間帯に行われた操作によるものと推測される。従って、3.2.2に記した、第2条件に於ける交通整理の様な効果は、アクセス集中の状況下で尚更確認された事になる。

採録基準

	第1条件		第2条件	
	共通時刻	送信要求件数	共通時刻	送信要求件数
第1試行	3221		5087	
	<b>3222</b>	<b>58</b>	<b>5088</b>	<b>53</b>
	<b>3223</b>	<b>27</b>	<b>5089</b>	<b>62</b>
	3224		5090	
第2試行	3488		5293	
	<b>3489</b>	<b>73</b>	5294	2
	<b>3490</b>	<b>19</b>	<b>5295</b>	<b>93</b>
	3491	1	5296	3
第3試行	3711		5454	
	<b>3712</b>	<b>68</b>	<b>5455</b>	<b>62</b>
	<b>3713</b>	<b>74</b>	<b>5456</b>	<b>41</b>
	3714	4	5457	3

表9 (補足)

#### 4.4 DHCP ログ

DHCP ログはこの考察に於ては特に重要な内容は持たないが、これを詳細に眺め、集計すると、IPアドレスの割当(DHCPREQとDHCPACKの交換)は、各端末PC各条件毎に大半が数回で、多くても十数回である。

ただ一台のみ、この回数が第1条件で42回、第2条件で34回に上る端末PCがあった。その挙動を詳細に調べると、ローミング等の動きがあった後概ね20秒以内にDHCPREQとDHCPACKが交換されている事が解る。この原因は不明であるが、先ず端末PC側がDHCPREQを送り、サーバー側がACKを渡すのであるから、端末PCの特性と解釈せざるを得ない。同端末は、ダウンロードを完遂したのは全6試行中3試行であり、その他に特段に不可解な点は見られず、全体の実験結果に影響を及ぼしている様子は見られない。

#### 4.5 ローミング回数

第1条件での端末別のローミング発生回数と第2条件のそれとの相関係数は0.68である。図5にグラフを示す。この値では断定はできないが、ローミング発生回数にはPC個々の特性が関係している可能性は否定できない。

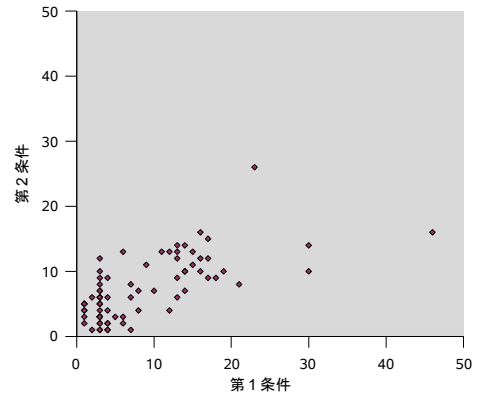


図5 各実験条件のローミング回数の相関

#### 4.6 第2条件の設定に関する検証

3.5、3.6、4.1、4.2などから次の事が確認されている。

- ▶ 第1条件ではアクセスが集中し易い基地局とそうではない基地局の差が大きい。AP2に最もアクセスが集中し、AP1、AP3の順に続く。
- ▶ 第2条件では、FTPログイン不可、ダウンロード不可が比較的多い。
- ▶ 第2条件でダウンロード不可のケースは、多くがAP1とAP3に関わっている。

当初、第2条件の設定を施す事によってアクセス集中が軽減され、より快適なダウンロードが可能になると予想したが、結果はそれに反するものだった。その原因として次の事が考えられないだろうか。

- ▶ 実験の場に於て、多くの端末PCの無線機がAP2が最も良好に通信できる相手であり、AP1、AP3は比較的劣ると判断した。第2条件では、それにも拘わらず強制的にAP1やAP3に接続を誘導した事により不調が増えた。

そして、以下の考察及び事象がこの仮説に合致する。

##### 4.6.1 第2条件固有の事情

第2条件でAP2への接続可能端末数を制限したが、第1条件の結果から、同基地局にアクセスが集中する事は解っているから、第2条件の下では、端末が下位レイヤでAP2に接続を試みながら、ログインが許されずに他の基地局を探しに行く場合が多かった事は容易に想像される。この「門前払い」のプロセスには僅かではあっても時間を要するわけであるから、それがダウンロード不可ケースの増加やダウンロード速度低下を招く一因となったと考えられる。

##### 4.6.2 TCPDUMP 基地局別データ転送量

仮説について表10を作成した。TCPDUMPとローミング推定から、各基地局の共通時刻1秒当たりの下り転送量を集計したものである。

時間帯		AP1		AP2		AP3	
		平均	最大	平均	最大	平均	最大
第1条件	準備時間帯	25,367	1,605,120	44,204	1,661,979	44,518	2,228,948
	第1試行	318,496	2,327,676	516,660	2,420,238	211,152	2,136,256
	第2試行	322,895	2,299,061	824,527	<b>2,514,265</b>	320,695	2,336,192
	第3試行	714,597	<b>2,742,956</b>	919,580	2,407,953	431,655	2,124,656
第2条件	準備時間帯	23,050	2,004,025	17,878	869,980	29,472	759,198
	第1試行	502,953	2,179,664	640,008	2,072,619	506,922	<b>2,457,252</b>
	第2試行	682,163	2,142,254	526,161	2,128,003	785,371	2,420,876
	第3試行	686,393	2,495,205	712,932	1,875,541	652,090	2,196,530

表10 基地局別共通時刻毎ダウンロード量

この結果、各基地局の値に著しい差はなく、特に優劣無く動作していたものと見られる。注目されるAP2の最大転送量はAP1を下回っており、どちらも同じ第1条件下で最大転送量が出ているから、AP2にアクセスが集中したのは確かだが余力を残しており、通信全体に支障する程のものではなかったものと思われる。そして、AP3は第2条件で最大転送量が出ている事から、第2条件では、多くの端末PCが良好な通信相手と判断しているAP2に余力があるにも拘わらず、その能力が発揮できない状態となったものと考えられる。

#### 4.6.3 TCPDUMP 全体データ転送量

4.6.2 では基地局別の転送量に注目したが、全体の転送量について表 11 を作成した。TCPDUMP に記録された全ての転送量を共通時刻の1秒単位で集計したものである。第1条件の秒間最大転送量が第2条件に比べて圧倒的に大きい事が解る。条件が変わったのは無線基地局の設定のみであるから、第2条件は良好な通信を妨げるものであった事になる。但し、平均値には大きな差が無いので、より正しく言うなら、第2条件は無線機（特に基地局）の最大限の能力発揮を抑制するものであった事になる。また、同じく平均値に大差が無い事から、この台数制限と言う条件設定について、より多くの端末台数でアクセス集中による遅滞が必ず起こる様な条件での有効性が否定されるものではない。

		時間帯	平均	最大
第1条件	準備時間帯		66,002	2,286,908
	第1試行		867,028	9,137,018
	第2試行		1,329,704	9,552,987
	第3試行		1,774,048	5,391,717
第2条件	準備時間帯		48,545	2,606,768
	第1試行		1,238,859	4,831,029
	第2試行		1,679,888	4,731,035
	第3試行		1,497,878	4,692,992

表11 TCPDUMP共通時刻毎転送量

#### 4.6.4 関与基地局とダウンロード成否

表 12 に試行中のダウンロードに関わった基地局と FTP ログに記録された OK DOWNLOAD の関係を示す。

表中の交信欄は、TCPDUMP から検出されるダウンロードの為の一連の交信を数えたものである。一つの交信の途中でローミングが発生した場合には、パケットが一つでも経由すれば当該基地局のカウントに加えた。例えば、一つの交信の途中でAP1、AP2、AP3の全てを経由したなら全基地局の交信欄に数を加えた。但し、交信途中のローミング発生は少なく、大半の交信は単一の基地局を経由している。また、更に希ではあるが、制御の為の交信（協力学生による試行の為のダウンロード操作以外のもの）も含まれ得るし、その他の何らかの事情により、同一の端末PCが同一の試行中に複数の交信を行っているケースもある。DL OK 欄は、一連の交信の終了と同一時刻、同一端末に FTP ログ

実験条件	試行	AP1			AP2			AP3		
		交信	DL OK	%	交信	DL OK	%	交信	DL OK	%
1	1	19	16	84.2%	27	26	96.3%	6	6	100.0%
	2	28	18	64.3%	52	45	86.5%	13	13	100.0%
	3	35	27	77.1%	48	43	89.6%	13	11	84.6%
	全体	82	61	74.4%	127	114	89.8%	32	30	93.8%
2	1	31	21	67.7%	18	13	72.2%	32	19	59.4%
	2	34	23	67.6%	17	12	70.6%	25	20	80.0%
	3	38	28	73.7%	16	11	68.8%	26	22	84.6%
	全体	103	72	69.9%	51	36	70.6%	83	61	73.5%

表12 各基地局に接続した端末の数とOK DOWNLOADの数

の OK DOWNLOAD が見られた場合の数である。こうした作成要領から、高い精度で実験試行の為のダウンロード操作のみを検出したデータではないが、交信がどの基地局を経由した場合にどの程度の割合で OK DOWNLOAD に至ったかを推測する資料とはなる筈である。例えば、第 1 条件第 1 試行 AP1 の欄は、同試行中に転送データの全部或いは一部分が AP1 を経由した交信が 19 あり、その内 16、84.2 パーセントが OK DOWNLOAD であった事を示している。

この表から次の事が明かと言えよう。

- 全般に第 1 条件で OK DOWNLOAD の率が高く、第 2 条件で低い。
- AP1 と AP3 では、第 1 条件では絶対数が少ない割に OK DOWNLOAD の率が高く、第 2 条件で逆になる。
- AP2 は、第 1 条件では絶対数、OK DOWNLOAD の率共に大きく、第 2 条件では両者とも低くなる。

AP2 にアクセスが集中するので、AP1 と AP3 は条件が悪いと考え勝ちだが、位置関係などの事情により AP1 或いは AP3 を最良の接続先と判断する端末無線機も当然存在する筈である。第 1 条件では、それらの自由な判断の通りに動作させたので、OK DOWNLOAD の率が高く、第 2 条件ではその逆になってしまったと言えよう。

#### 4.7 基地局端末 PC 間距離

本実験では、マイクロセルの重なる部分をなるべく少なくし、安定した通信を行える様に為す為に電波出力は最低に設定した。しかし、特定の基地局にアクセスが集中する現象が見られた。そこで、各端末 PC と基地局との距離を図面から算出した。次に基地局との距離が通信状態に影響するなら、その結果が顕れそうな、ダウンロードができた回数、ローミング回数、基地局別通算接続時間（何れも実験試行時間）との相関係数を算出し、表 13 を作成した。例えば、AP1 行の AP1 欄は、AP1 までの距離と AP1 に対する通算接続時間との相関係数がマイナス 0.44 である事を示す。これらから、基地局までの距離と通信状態に関わりそうなデータとの間には、何れも有意な相関があるとは言えない。敢えて言うなら、AP1 に近い端末 PC ほど AP1 に対する通算接続時間が長いと言う傾向がごく僅かにあり、AP3 についても同じ事が言える。一方、AP2 に対する距離と AP2 に対する通算接続時間との間に全く相関が見られない事は、多くの端末 PC が同基地局に接続しようとしたと言う他のデータと整合する。

基地局	OK DL	ROAM	通算接続時間		
			AP1	AP2	AP3
AP1	-0.20	-0.17	-0.44	0.14	0.32
AP2	0.35	-0.01	0.26	-0.22	0.14
AP3	0.15	0.16	0.40	-0.08	-0.39

OK DL: FTP ログの OK DOWN LOAD の件数  
ROAM: ローミング回数

表13 基地局・端末間距離との相関

#### 4.8 考察のまとめ

以上の考察により次の事が解った。

- FTP ログに関する考察などから、第 2 条件では通信そのものが比較的困難な状態であった。
- 時間切れ以外の事由でダウンロードができないケースでは、AP1 と AP3 に関わっている場合が多い。

- ▶ ローミング等の挙動の度に DHCPREQ を発する端末 PC が希にある（本実験では 1 台のみ）。
- ▶ 二条件間の端末 PC のローミング発生回数の相関係数は 0.68 であり、ローミング発生回数には個々の PC の特性が関与している可能性がある。
- ▶ 第 2 条件に於ける AP2 に対する設定は、端末 PC の自由なローミングを妨げ、基地局が最大能力を発揮する機会を失わせるものであったらしい。
- ▶ 本実験の環境では、基地局と端末 PC との距離は、通信状態に影響を及ぼしていない。

#### 4.9 その他のノウハウ

本実験の実施を通じて次の様な反省点及びノウハウの修得があった。

調査票の誤記： IP アドレスや MAC アドレスの書き取りに意外に誤りが多く、集計作業が進んだ後で共通端末番号を振り直し、作業をやり直すなどの混乱の原因となった。誤りが生じない様な工夫が必要である。

機器の時刻整正： 共通時刻の設定は、事前に使用する機材の時計を整正しておけば格段に済んだ筈であり、反省すべき点である。

DHCP サーバーの設定： ログには割り当てていない筈の IP アドレスが記録されていた。DHCP サーバーの機能特性や操作方法を熟知していなかった事が原因と思われる。調査票との照合によって分析に支障はなかったものの、反省すべき点である。

協力者の習熟度合： 実験者の感想として、進行に着いて来られない協力学生が少なくなかった。実験の精度を高める為には、事前の練習、より容易で誤りの発生し難い作業内容、などを検討すべきである。

協力者に対する情報付与： 教示者は協力学生に対して基地局設定の変更について口頭で説明を行った。そうする事により、協力学生の関心を引き出し、動機を高められたものと思われる。本実験の様に協力者の心理と実験結果との間に因果関係が無い事が明白な場合に限られるが、一つの有効なノウハウと言える。

## 5. 結言

本実験では、大学教室に於て無線 LAN を用いた授業を行う場面を想定し、実際に学生が操作する約 80 台の端末 PC と 3 台の無線 LAN 基地局を用意し、ローミングが可能な環境下で一斉にファイルダウンロードを行った。そして、特別な設定を行わない場合（第 1 条件）と、最もアクセスが集中する基地局に 15 台のみがアクセスできる設定を施した場合（第 2 条件）とを比較した。その結果、下記の事が解った。

- ▶ ダウンロード完遂の件数に大差は無い。
- ▶ 第 1 条件の方が第 2 条件よりも平均的なダウンロード速度が高い。
- ▶ 第 1 条件では速度のばらつきが大きく、第 2 条件では小さい。

▶ 第2条件に於ける AP2 に対する設定は、無線機の自由なローミングを妨げ、最大能力が発揮される機会を奪うものであったらしい。

▶ ローミング発生回数など、端末 PC の挙動は個々の機材の特性が関与している可能性がある。また、本実験は大学の授業の現場で行うと言う特殊な形態であり、その為のノウハウも得た。

以上の事から、この実験の意義をより確かなものとする為に、今後は次の様な展開が考えられる。

- ▶ 有線 LAN との比較。
- ▶ 単一の基地局による実験との比較。
- ▶ 複数の基地局で端末 PC の接続先を固定した実験との比較。
- ▶ 作業内容のバリエーション … 一斉ダウンロード以外の随時ダウンロード、ファイルダウンロード以外の作業（ウェブ上のフォーム入力など）。
- ▶ 基地局の設定のバリエーション
- ▶ 機材（特に基地局）の比較。

勿論、これらは差し当たり思い付くものに過ぎず、より多彩な展開が可能である。また、本実験で行った考察は、膨大なデータのある視点で捉えたに過ぎず、本実験のデータ群を別な視点で解析する事も有意義な筈である。モバイルブロードバンド協会は、引き続きこれらの実現に取り組む所存であるので、関係各位の協力を得られるならば幸いである。

## 謝辞

本実験と報告書の作成に当たり、次の皆様に多大な御協力を賜りました。ここに御名前を記して心より御礼申し上げます。

早稲田大学理工学術院 総合事務・技術センター

早稲田大学後藤研究室

協力学生各位

株式会社 バッファロー

(順不同)

## 資料公開案内

この報告書の資料編の他に、モバイルブロードバンド協会ウェブサイトにて、実験のローデータ、ローミングの様子動画ファイルなどを公開する予定です。

モバイルブロードバンド協会ウェブサイト

<http://www.mobile-broadband.org/>

#### 主要推進メンバー

(順不動・役職等は実験実施当時のもの)

後藤 滋樹 理事長／早稲田大学  
若林 則章 理事・分科会長／松下電器産業株式会社  
荒川 克憲 パイオニア株式会社  
池田 巧 松下電器産業株式会社  
山田 敏央 ルート株式会社  
早稲田大学後藤研究室

#### 報告書編集

内村 雅生 モバイルブロードバンド協会

#### 編集後記

2006夏以来、2年近くを経てようやくこの報告書が完成しました。ここまで時間がかかってしまったのは、データの膨大さが最大の理由です。推進メンバーは各々別な企業の所属でしたが、準備段階から考察や編集の為の会議まで、何度会合を持ったか数え切れない程です。最後は半ば意地で完成させたと言う感じですが、膨大なログデータとの格闘の日々が今では懐かしく感じられます。

本文にも記した通り、この報告書は膨大なデータの一つの見方を提示したに過ぎません。データの解釈方法に関する御意見や、別な視点による解析の御提案などを歓迎します。また、御協力下さった皆様に重ねて御礼申し上げます。

#### 無線 LAN の実験Ⅳ

－ 教室に於ける無線 LAN の実用可能性 －

#### 概要版

この報告書はモバイルブロードバンド協会より無償で配布致します。

モバイルブロードバンド協会はこの報告書の著作権を保有します。

2008年6月

モバイルブロードバンド協会

東京都品川区西五反田 7-21-11 第2TOCビル8階

[www.mobile-broadband.org](http://www.mobile-broadband.org)

2008/06/15 誤植修正  
2008/07/03 表4 ページ追加