

無線LANの実験Ⅳ

— 教室に於ける無線LANの実用可能性 —

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	2
2.5 第2条件の台数制限	3
3. 結果	3
3.1 実験データ	3
3.2 集計の準備	4
3.2.1 共通端末番号	4
3.2.2 共通時刻	6
3.3 FTPサーバーへのログインとダウンロード … FTP ログ	6
3.3.1 FTPサーバーへのログインの成否	7
3.3.2 ダウンロードの成否	7
3.4 DHCP ログ	8
3.4.1 IPアドレスの割当	8
3.4.2 DHCPサーバーとの交信	8
3.5 ローミング	9
3.6 経由基地局別サーバー接続数	10
3.7 基地局接続数	10
3.8 TCPDUMP	10
4. 考察	11
4.1 FTPサーバーへのログインの成否について	11
4.1.1 第1条件ログイン不可の挙動	12
4.1.2 第2条件ログイン不可の挙動	12
4.1.3 総括	12
4.2 ダウンロードができなかったケースについて	13
4.2.1 第1条件でダウンロードができなかった特徴的な挙動	13
4.2.2 第2条件でダウンロードができなかった特徴的な挙動	14
4.2.3 総括	16
4.3 ダウンロード速度	16

4.4	DHCP ログ	17
4.5	ローミング回数	18
4.6	第2条件の設定に関する検証	18
4.6.1	第2条件固有の事情	18
4.6.2	TCPDUMP 基地局別データ転送量	19
4.6.3	TCPDUMP 全体データ転送量	19
4.6.4	関与基地局とダウンロード成否	19
4.7	基地局・端末 PC 間距離	20
4.8	考察のまとめ	21
4.9	その他のノウハウ	21
4.9.1	調査票の誤記	21
4.9.2	時刻	21
4.9.3	協力者の習熟度合	22
4.9.4	協力者に対する情報付与	22
5.	結言	22
	謝辞	24
	資料公開案内	24

この報告書には、この本編の他に別冊の資料編があります。併せて御参照下さい。

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、以前より無線 LAN の応用について、実際に近い環境及び用途で、その性能評価を進めて来た。2002年には、早稲田大学理工学部の協力を得て、教室の様な比較的狭い閉鎖空間で多数の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。この結果はMBA ウェブサイトで公開した¹。

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。教室内で各座席に有線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年夏より前節の方法に沿った実験を行い得る機会を模索しながら、何度かの予備実験(ネットワーク構成の試行錯誤など)を行った。本実験は2006年11月13日(月)10時40分より12時10分まで、早稲田大学大久保キャンパス52号館203教室に於て、同学理工学部の第2時限の授業中に実施した。この授業はコンピュータ・ネットワーク工学科2年生を対象としたもので、学生には、実

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>

験を行う事、その為にノート PC の持参を要する事を事前に告知した。なお、PC を持参しない学生がいる事を考慮して、貸し出し用のノート PC も用意し、結局 79 台の端末 PC で実験を行った（一部、実験関係者が一人で二台の端末 PC を操作したケースも含む）。

実験を行った教室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。座席定員は 203 だが、3 人掛の机の両端に 1 人ずつ着席する場が多いので、約 80 名の学生が出席すると、一見三分の二程が埋まっている様に感じられる。

2.3 実験用システムの構成

表 2-1 に本実験で使用した機器と IP アドレスを示す。

図 2-1 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。

図 2-2 に本実験で使用した教室の平面図を示す。

図 2-3 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 2-2 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をなるべく少なくし、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。

表 2-3 に本実験に参加した端末 PC とそれらの位置を示す。

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、教示者（1 名）が教壇から指示を与え、協力学生が各自端末 PC を操作する方法によった。大雑把に、準備作業、第 1 条件、PC リセット及び基地局設定変更、第 2 条件の順で 1 時間半の内に予定の作業を逐えた。詳細は表 2-4 に示す通りである。教壇からの指示の補足として、協力学生には進行の概要を記した手引書を配布した。また、調査票を配布し、実験の進行に応じて所用事項を記入させた。記入事項は次の通りである。

- 氏名、学籍番号、座席位置、端末 PC 機種名、無線 LAN の形態（本体内蔵／外付け）、OS
- 第 1 条件接続先基地局： Physical Address、IP Address
- 第 1 条件第 1 試行： 所要時間、転送速度
- 第 1 条件第 2 試行： 所要時間、転送速度
- 第 1 条件第 3 試行： 所要時間、転送速度

- 第2条件接続先基地局： Physical Address、 IP Address
- 第2条件第1試行： 所要時間、転送速度
- 第2条件第2試行： 所要時間、転送速度
- 第2条件第3試行： 所要時間、転送速度

準備作業では、無線 LAN の設定や共通名称の作業ディレクトリ作成などを行った。この時、SERVER に開設した Web に入力フォームを用意し、無線 LAN 接続ができた協力学生には、Web にアクセスして、座席位置、IP アドレスなどを入力する様に指示した。これにより、授業としての出欠確認と端末 PC の正常な動作の確認が可能となる。

協力学生が端末 PC で行うのは、MS-Windows コマンドプロンプトからの FTP コマンド入力による 5MB の bmp ファイルのダウンロードである。協力学生には、ダウンロード終了時に各端末 PC の画面に表示される所要時間と転送速度を、調査票に書き取る様に指示した。ダウンロードを開始する際は、全ての協力学生が所定のコマンドを入力するのを待って、教示によって同時一斉にリターンキーを打ち込んだ。授業時間の都合で次の作業に移る必要がある場合には、ダウンロードが済んでいない協力学生には強制終了する様に指示した。これらを第1条件と第2条件各々について3試行ずつ実施した。第1条件と第2条件の間には各基地局の設定を変更する必要があるため、協力学生の端末 PC も再起動させた上で設定を変更してから第2条件の試行を開始した。

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、データ上有効な資料数が 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 があり、サーバーと端末 PC との接続状況、接続基地局、FTP ダウンロードの状況、基地局別の接続端末 PC 一覧などが得られる。後者には、協力学生

の目視と手書きだが、端末 PC の物理アドレス、第 1 条件及び第 2 条件各々の開始時の IP アドレス、ログインの成否、ダウンロードを実行した場合の所要時間と速度に加えて、ダウンロードが不調だった場合に看取された現象、などが記載されている。

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。更に、ログファイルの特性上、実験に参加した端末 PC 以外（サーバーやネットワーク機器など）の MAC アドレスや IP アドレスも混在し、煩雑の度が一層高まった。

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。その一覧を表 3-1 に示す。調査票を手掛かりとして、実験に参加した（協力学生が操作した）端末 PC を特定した。以後、各データの解析や考察に当たっては、「記録への登場有無／調査票」欄に「○」のある端末 PC を対象として、「共通端末番号／修正後」欄を用いる事とする。

なお、この特定作業を進める上で、割り振っていない筈の IP アドレスでも、正確な回答であれば参加端末 PC と認めた²。また、ログファイル及び調査票（協力学生の手書きであり、誤記の可能性は否めない）相互の齟齬について、元データの改変とならない様に注意しつつ次の補正を施した。

○共通端末番号 2

第 2 実験 IP アドレスは明かな誤記なので、下記の通り修正して集計。

192.168.157→192.168.10.157

○共通端末番号 5

当初端末番号 5 と 6 は、IP アドレスから同一の端末 PC と判断されるが、Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 6 を欠番とし、両者のデータは 5 に統合して集計。

○共通端末番号 14

当初端末番号 14 と 80 は、IP アドレスから、同一の端末 PC でありながら Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。双方の Physical Address は全くかけ離れたものだが、各々の内容（製造者）や調査票に記された端末機種から、協力学生が画面に表示された Physical Address の内イーサネット側のアドレスを書き取ったと見られる。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 80 を欠番とし、両者のデータは 14 に統合して集計。

当初 14 00:0B:5D:CF:5D:48 富士通

当初 80 00:11:F5:45:7E:9C ASKEY COMPUTER CORP.

² ログファイルには表 2-1 の CLIENT 欄に示す IP アドレス以外のアドレスも記録されている。調査票とログファイルとの照合から実験に参加した事が確かなものは参加端末 PC として扱った。

調査票の端末機種 FMV

○共通端末番号 15

当初端末番号 15 と 73 は、IP アドレスから、同一の端末 PC でありながら Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。双方の Physical Address は全くかけ離れたものだが、各々の内容（製造者）や調査票に記された端末 PC 機種から、協力学生が画面に表示された Physical Address の内イーサネット側のアドレスを書き取ったと見られる。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 73 を欠番とし、両者のデータは 15 に統合して集計。

当初 15 00:0B:97:2C:87:E1 松下

当初 73 00:0E:35:E7:A1:E3 インテル

調査票の端末機種 パナソニック

○共通端末番号 19

当初端末番号 19 と 20 は、IP アドレスから同一の端末 PC と判断されるが、Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 20 を欠番とし、両者のデータは 19 に統合して集計。

○共通端末番号 28

当初端末番号 28 と 47 は、IP アドレスから、同一の端末 PC でありながら Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 47 を欠番とし、両者のデータは 28 に統合して集計。

○共通端末番号 30

当初端末番号 30 と 31 は、IP アドレスから同一の端末 PC と判断されるが、Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 31 を欠番とし、両者のデータは 30 に統合して集計。

○共通端末番号 33

当初端末番号 33 と 110 は、IP アドレスから、同一の端末 PC でありながら Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。双方の Physical Address は全くかけ離れたものだが、各々の内容（製造者）や調査票に記された端末機種から、協力学生が画面に表示された Physical Address の内イーサネット側のアドレスを書き取ったと見られる。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 110 を欠番とし、両者のデータは 33 に統合して集計。

当初 33 00:0E:35:BE:F6:5F インテル

当初 110 00:FF:B8:CE:78:79 (不明)

調査票の端末機種 ダイナブック

○共通端末番号 77

当初端末番号 77 と 100 は、IP アドレスから、同一の端末 PC でありながら Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。双方の Physical Address は全くかけ離れたものだが、各々の内容（製造者）や調査票に記された端末機種から、協力学生が画面に表示された Physical Address の内イーサネット側のアドレスを書き取ったと見られる。既に

作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 100 を欠番とし、両者のデータは 77 に統合して集計。

当初 77 00:0E:7B:8F:7C:ED 東芝

当初 100 00:16:01:0C:71:5C Buffalo

無線機はバッファローだが、調査票では内蔵となっている。バッファローの ID で内蔵されている可能性もあるが、恐らく外付けの無線 LAN カードを使っていたものと推測される。

○共通端末番号 79

第 2 実験 IP アドレスは、DHCP ログでの IP 付与の様子などから誤記と判断されるので、下記の通り修正して集計。

192.168.10.170→192.168.10.171

○共通端末番号 82

当初端末番号 82 と 83 は、IP アドレスから同一の端末 PC と判断されるが、Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 83 を欠番とし、両者のデータは 82 に統合して集計。

○共通端末番号 105

当初端末番号 105 と 106 は、IP アドレスから同一の端末 PC と判断されるが、Physical Address の誤記により別の端末 PC と認識されていたと推測される。既に作業が進んだ段階で発見されたので、共通端末番号 106 を欠番とし、両者のデータは 105 に統合して集計。

3.2.2 共通時刻

共通端末番号の他に、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³。

共通時刻の整合・確定は、各ログの試行開始時（アクセス集中時）など特徴的な動作が起こる箇所を精査し、特徴的なレコードのタイムスタンプを相互に結び付けた。そして、最終的に TCPDUMP に記録された上り送信要求の回数変動が最も顕著に試行の開始を示しているのを、これを頼りに微調整を行った。図 3-1 は、TCPDUMP に記録された各端末 PC からサーバーへの上り送信要求の回数を 1 秒毎に集計したもので、計 6 回の試行の始期が明確になっている⁴。そして、表 3-2 の通りに時間帯を分けした。

3.3 FTP サーバーへのログインとダウンロード … FTP ログ

3 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。

4 TCPDUMP に記録される転送量（図 3-6）も似たカーブを示すが、上下両方向のあらゆるデータを含んでおり、タイミングを特定するには比較的不向きである。

3.3.1 FTP サーバーへのログインの成否

表 3-3 に FTP ログから得られたサーバー接続の様子をまとめた。

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 はいずれも 9 割以上であった。また、ログインできた端末 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ログインできなかった端末 PC は無かった（開始直後に離脱した 1 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を表 3-4 に示す。表 3-5 はその集計である。ダウンロード速度については表 3-6 にまとめた。

表中の DOWNLOAD 欄の左端は FTP ログに「DOWNLOAD」と記録されたレコードの数である。内訳として「OK DOWNLOAD」と「FAIL DOWNLOAD」があり、OK 欄に前者の件数を示した。DOWNLOAD 欄左端が 1 以上で OK 欄が空白のケースが「FAIL DOWNLOAD」であり、ダウンロードを開始したものの何らかの事情でダウンロードが最後まで行われなかった事を示す。但し、「FAIL DOWNLOAD」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レコードの内、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 2 条件第 1 試行では、「DOWNLOAD」が 52 件あったが、内 4 件は同試行とは無関係のファイルのダウンロードを試みたもので、教示に従って適正に操作を行ったケースは 48 件である。

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に「○」を付した。

転送速度欄左には FTP ログに「DOWNLOAD」と記録されたレコードに併せて記録されるダウンロード速度を示した。「OK」でも「FAIL」でも記録される。その内側の調査票欄には、調査票から得たダウンロード速度（ダウンロード完了時に端末 PC の画面に表示される転送速度を協力学生が書き取ったもの）を参考として示した。「OK DOWNLOAD」でなければ空欄となる。目視と手書きなので誤りの可能性は否めないが、ユーザー自身がダウンロードできたと感じたかを窺う事ができる。

図 3-2 は表 3-5 をグラフ化したものである。また、図 3-3 に、ダウンロード速度の分布を示している。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。
- 個々のダウンロード速度は、大半に於て FTP ログから得たものと調査票から得たものとの間に著しい齟齬は見られない。
- 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

3.4.1 IPアドレスの割当

表3-1のDHCP割当欄は、DHCP ログから得られた端末MACアドレスとIPアドレス割当の状況を示している。

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た。但し、同端末PCについてDHCPログを詳細に見ると、共通時刻1500秒台の準備作業段階まで192.168.10.173が割り当てられ、以後は一貫して192.168.10.170が割り当てられており、IPアドレスの変更はダウンロードの成否その他の実験結果には直接関わっていないと見られる。

3.4.2 DHCPサーバーとの交信

表3-7は、DHCP ログから実験作業時間帯別・端末PC別に送受信された「DHCPREQUEST」と「DHCPACK」の回数をまとめたものである。他に「DHCPDISCOVER」「DHCPPOFFER」などの

メッセージもあるが、DHCP サーバーの機能上、一度 IP アドレスが付与されれば、再接続の際にはいきなり「DHCPREQUEST」と「DHCPACK」が交換されるケースが多い。IP アドレスの取得、ひいては通信状態の把握の為に参照し得るのは「DHCPREQUEST」と「DHCPACK」である。

表を概観すると、「DHCPREQUEST」と「DHCPACK」の回数が端末 PC 毎実験作業時間帯毎に概ね釣り合っており、DHCP サーバーが順調に動作していた事が窺われる。

3.5 ローミング

ローミングについて、SYSLOG と APLOG を組み合わせて、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 3-8 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 が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。
- ▶ 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。

表 3-9 に端末 PC 別のローミング発生回数を示す。図 3-4 はその頻数分布図である。概観して以下の特徴が挙げられよう。

- ▶ 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僅かながら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、経由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」した時点又は経由基地局の 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、直前の経由基地局の 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、良くも悪しくもこの推測方法による結果として集計に加えた。

3.6 経由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いたかを推測できる様になった。図 3-5 と表 3-10 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。

図 3-5 その 1 は、共通時刻 1 秒毎の各基地局の接続端末 PC 台数の合計である。図 3-5 その 2 は、合計接続台数に対する各基地局接続台数の百分比の推移である。表 3-10 は、実験条件毎の集計である。

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 基地局接続数

3.5 の「ローミング推測の方法」に記した様に、APLOG は何らかの因果関係などを把握し得る資料とは言えない。しかし基地局と端末 PC との下位レイヤでの無線接続の様子を把握し得る。そこで、図 3-6 に各基地局に接続中の端末 PC の数を示す。ここから次の事が解る。

- 全体の傾向は図 3-5 と同じ。
- 各基地局に接続している端末 PC の合計数は常時 70 台前後である。

3.8 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。実際には、図 2-1 の SWITCH を経由する全てのパケットに関する情報 (TCP ヘッダーのみ) が PC2 (ログ取得用) に送られ、記録される。

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 (TCPDUMP のレコード) がどの基地局を経由したかも推定した。

表 3-11 は、実験参加端末 PC が受信したデータ量を試行時間帯別、端末 PC 別、推定経由基地局別に集計したものである。各基地局の転送量集計に当たり、ローミングにより同一共通時刻秒内に複数の基地局に接続したと推測される場合は、当該秒内の転送量を接続した基地局の数で等分した (当該秒内のどの時点でローミングが発生したかは不明である)。合計欄は TCPDUMP に記録されたパケットサイズの合計である (各 AP 欄の値の和ではない事に注意)。3.5 で説明した通り、ローミング発生は複数のログの組合せによって推測したものであり、集計漏れ等があり得るので、合計欄の値と AP1 欄、AP2 欄、AP3 欄の和との間には誤差がある場合もある。また、同表には、比較検討の便を図るべく、DL 欄に表 3-4 の完遂欄を書き写した。そして、ダウンロードを完遂しているケースでは概ね 5 メガバイト程度であり、ダウンロード作業に用いたファイルのサイズと符合する (FTP ログではダウンロード用ファイルのサイズは 5247234 バイトである)。

図 3-7 には 1 秒毎の合計転送量の推移を示す。

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。

これに先立ち、個々の端末 PC のあらゆる挙動を一つにまとめた総合挙動履歴テーブルを作成した。DHCP ログ、FTP ログ、TCPDUMP、3.5 で作成したローミング記録の内容を端末 PC 別に時間順に並べたものである。総合挙動履歴テーブルは資料編に特別資料 1 として掲載する。また、特に作業がうまく行かなかった場合の協力学生の実感を把握する為に、資料編に特別資料 2 として調査票備考欄の内容を掲載する。

4.1 FTP サーバーへのログインの成否について

本実験の作業課題を遂行する為には FTP サーバーへのログインが必須である。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が、逆に言えば 1 割もの学生が授業に参加できなかった事を意味する。これら FTP サーバーにログインできなかった全てのケースについて、総合挙動履歴

テーブル及び調査票備考欄と照合しながら個別に検証する。

4.1.1 第1条件ログイン不可の挙動

○端末 43

準備段階から基地局との通信が行われ、DHCPACKを受けている。第3試行までAP1とAP2の何れかのみに接続した。調査票によると、第1試行でリタイアしている。

○端末 70

第2試行からAP2のみと通信し、第3試行になってDHCPACKを受けた。調査票への記入は無い。協力学生が実験の進行に遅れた、或いは機会の不調が生じた可能性が考えられる。

4.1.2 第2条件接続ログインの挙動

○端末 7

準備段階でAP3への接続が切れたまま終わっている。調査票によると、無線LANそのものが不調であった模様である。

○端末 9

準備段階でAP2に接続、DHCPACKを受け、AP1に移動後、再度DHCPACKを受けそのまま実験終了まで接続を維持。

○端末 33

準備段階冒頭に下り方向のパケットが見られるが内容は不明。試行開始前にAP2、AP1、AP3、AP1の順に移り、実験終了まで接続を維持。DHCPサーバーとの通信は見られない。調査票によると、基地局が見つかっていない。

○端末 38

準備段階で一度だけAP2に接続し、切断して終了。調査票によると、実験とは無関係の基地局装置に接続した模様。

○端末 44

準備段階でAP1に接続し、AP2に移ってDHCPACKを受け、終了まで接続を維持した。調査票では、接続不可となっている。

○端末 68

準備段階の間に全ての基地局の間を移りながら、DHCPREQとDHCPACKを4回繰り返し、AP3を最後に切断された。調査票でも接続不可と書かれている。

4.1.3 総括

何れのケースでも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 サーバーとの通信も行っている。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二例については、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 ダウンロードができなかったケースについて

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少なからずあった。以下、該当するケースの内不可解な挙動や特徴的な挙動について、総合挙動履歴テーブル及び調査票備考欄と照合しながら検証する。具体的には、3 試行ともダウンロードができなかったケースと第 1 試行或いは第 2 試行で一度はダウンロードできたのに、その後ダウンロード不可となったケースを主に検証する。これは、第 2 試行或いは第 3 試行以後にダウンロードができているケースは、単に協力学生の作業が遅れた為と考えられるからである。

4.2.1 第 1 条件でダウンロードができなかった特徴的な挙動

○端末 41

調査票では、第 1 試行と第 2 試行が「Not connected」、第 3 試行が「connection closed by remote host」となっている。総合挙動履歴テーブルによると、準備段階で一度ログインしているが、第 1 試行の間は全く記録がなく、接続が途切れていたものと思われる。第 2 試行の間に再び FTP にログインし、第 3 試行ではダウンロードを試みたものの、時間切れとなった模様である。第 3 試行に見られる AP2→×→AP2 の動きは、無線機が AP2 に接続しようとしながら集中によって果たせなかったものではないだろうか。

○端末 46

準備段階では問題なく動作していたが、第 1 試行では上りパケットを送出した後、AP2 から AP1 に移り、通信は発生していない。第 2 試行の途中で AP2 から再度ログインし、第 3 試行では上りパケットが見られるが、AP2 から AP1 に移った後、不完全な下りパケットが見られる。調査票では第 1 試行と第 3 試行が「Connection closed by remote host」、第 2 試行が「Not conncted」である。

○端末 48

準備段階でログインしているが、試行時間中はパケットの授受が皆無である。ローミングは見られるので無線機は動作しており、FTP へのログインが切断状態になるなど、ネットワーク上の問題が発生していたものと思われる。

○端末 54

第 1 試行中と第 3 試行中に 2 回 FTP ログインが見られる。調査票では、第 1 試行と第 3 試行で「Connection closed by remote host」となっており、第 2 試行の間はパケットが見られない。主に AP2 経由で接続しており、第 3 試行の途中で 30 秒程の切断の後、他の基地局には行かずに再度接続している事から、無線機は AP2 への接続を求めているながら、混雑によって弾き出されてしまった様子が想像される。

○端末 62

第 1 試行はダウンロードを完了している。第 2 試行と第 3 試行に於て再度及び再々度 FTP ログインが見られる。第 2 試行で AP2 から AP1 に移り、第 3 試行で再び AP2 に移って一度切断状態となった後、再び AP2 に接続している。また、不完全なダウンロードが見られる。調査票では、第 2 試行と第 3 試行で「Connection closed by remote host」となっている。

○端末 63

第 1 試行では問題なくダウンロードできたが、第 2 試行で AP2 から AP1 に移り、TCPDUMP では約 5 メガバイトのダウンロードが見られるが、FTP ログに完了の記録は見られない。第 3 試行にかけて AP1 と AP2 の間でローミングしているが、上りパケットは見られず、FTP 接続が途絶えていたものと思われる。調査票は、第 2 試行で「Connection closed by remote host」、第 3 試行では「Not connected」となっている。

4.2.2 第 2 条件でダウンロードができなかった特徴的な挙動

○端末 21

AP2 に接続しようとしながらも早々に AP1 に移り、以後ローミングは無い。これは、第 2 条件の設定によるとものと思われる。第 1 試行と第 2 試行ではダウンロードを完了し、第 3 試行ではダウンロードを開始したが、完了しなかった。

○端末 34

第 2 試行で AP1 経由で FTP サーバーに接続し、ダウンロードを開始したが終了していない。第 3 試行では上り方向の送信要求パケットが見られず、FTP サーバーとの接続が断たれたものと思われる。

○端末 35

準備段階で FTP ログインした後、AP1 と AP2 の間を移りながら、第 1 試行が始まった後で AP1 経由で再度ログインしている。以後ローミングは発生していない。第 2 試行では不完全なダウンロードが見られ、TCPDUMP の通信シリアル番号が異常と言って良い程に錯綜している。調査票にも特異な記述が見られるが、その原因が複雑な通信である事を否定できないと思われる。

○端末 40

第 1 試行と第 2 試行は、AP1 と AP2 経由で問題なくダウンロードできた。第 3 試行で上り送信要求が出ているが、ダウンロード開始までに、AP1 から AP2 へのローミングを挟んで 30 秒以

上も要しており、結局時間切れで強制終了した。

○端末 43

準備段階で AP1 経由で接続した。第 1 試行でダウンロードが始まっているが終了しておらず、AP1 と AP3 の間を移動している。第 2 試行、第 3 試行でも AP1 と AP3 の間を移動しており、上り方向の送信要求パケットが見られない。交信シリアル番号 1105 は準備時間中に始まり、第 1 試行中に終了している。交信シリアル番号 1106 は第 1 試行中に始まり、実験終了後になって終了している。調査票では、第 1 試行が「Connection closed by remote host」、第 2 試行と第 3 試行で「Not connected」となっている。

○端末 50

FTP ログインを 4 回繰り返しており、上り送信要求も行っているが、下り方向のパケットは見られない。第 1 試行中は AP3、第 2 試行中は AP2 を主に経由し、第 3 試行中に AP2 から AP1 に移っている。5507 秒に見られる AP2→AP3→AP1 のローミングは、第 2 条件の設定による典型的な動作と見られる。

○端末 53

ローミングを繰り返しながら、第 2 試行で初めて AP1 から接続し、以後他へのローミングは無い。第 2 試行でダウンロードを開始したが間に合わなかった模様である。第 3 試行では上り方向の送信要求パケットが見られない。また、再度 DHCP サーバーと交信している。

○端末 57

準備段階では交信が見られるが、第 1 試行中に AP2 から AP3 に移った後、上り送信要求パケットが見られず、FTP 接続が途絶えたものと見られる。調査票では第 1 試行が「Connection closed by remote host」、第 2 試行、第 3 試行では「Not connected」となっている。

○端末 58

AP3 経由で接続し、第 1 試行はダウンロードを完了したが、その後切断した。調査票から不調であった様子が窺える。

○端末 59

第 1 試行では AP3 経由でダウンロードを完遂した。第 2 試行以降、AP2 経由で上りパケットが複数見られるが、ダウンロードは行われていない。想像の域を出ないが、上り送信要求が第 1 試行中から繰り返し送出されていることから、画面フリーズの様な状態となり、協力学生がキー操作を繰り返したとも考えられる。調査票に見られる記述は FTP サーバーから送られた手順誤りに関するメッセージと思われる。。

○端末 60

第 1 試行では AP1 経由でダウンロードを完遂したが、原因は不明ながら FTP ログと TCPDUMP の間に時間的な齟齬が見られる。第 2 試行と第 3 試行では AP2 経由となり、第 2 試行でダウンロードを開始した後、再度 FTP ログインが見られ、ダウンロードは実験終了後に不完全な形で終了している。

○端末 61

準備時間でログインした後、第 1 試行で再度ログインしている。第 2 試行以降はパケットが一切見られず、接続が途絶えたものと見られる。AP3 を経由している。

○端末 64

第1試行はAP2経由でダウンロードを完了した。第2試行でAP1に移りダウンロードが始まったが、数分以上経った実験終了後に不完全な形で終了している。協力学生は、第2試行、第3試行それぞれについて不調の様子を調査票に記している。

○端末 72

主にAP1を経由している。第1試行では不完全な交信が見られる。第2試行では問題なくダウンロードできたが、第3試行ではFTP接続が途絶えていた模様である。調査票からは苦労の様子が見られる。第2試行のダウンロードが済んだ後、想像の域を出ないが、画面フリーズの様な状態となり、協力学生がキー操作を繰り返し、FTPサーバーからエラーメッセージが送られたものと見られる。

○端末 82

準備段階で一度はログインしているが、試行開始後パケットの動きは全く見られない。むしろFTP接続不可のケースに近いと言える。試行開始後は主にAP1に接続している。

4.2.3 総括

4.2.1及び4.2.2から、ダウンロードができなかったケースについて、次の様な傾向が読み取れる。

- a) 調査票によると、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条件で挙げたケースでは、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条件で挙げた中で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条件で挙げたケースでは、AP1及びAP3に関わるものが比較的多い。
- e) 第2条件では、単なる時間切れ以外に、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。

第1試行に於て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。

- ▶ 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。
- ▶ 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／図 3-1 も参照）に始まったダウンロードを検出し、それらケースのみでダウンロード速度を集計し、表 4-1 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。

その結果、第1条件は全資料の集計（表 3-6）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。

4.4 DHCP ログ

DHCP ログは、本実験に於ては、考察に特別の関係を持つものではない。敢えて記すなら、端末 31 の異常な交信回数が際立って目立つ現象である。総合挙動履歴テーブルの該当箇所を見ると、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。

なお、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

表 3-9 について、端末 PC 別の第 1 条件で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 4-1 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。

FTP ログに OK DOWNLOAD が記録された回数とローミング発生回数との間の相関係数を求めた所、-0.38 であった。何かを判断できる値ではないが、二つの回数の上に強い相関関係があるとは考えられないので、理解し得る結果である。

AP2 に特にアクセスが集中する件について、表 4-2 と表 4-3 を作成した。前者は、AP2 に関わるローミングの前後の移動元別と移動先別に回数をまとめたものである。後者は、AP2 に関わるローミングの回数を端末 PC 別に数えたものである。

表 4-3 を見ると、端末 PC によって AP2 に関わるローミングの回数の差が大きい事に気付くが、この回数と OK DOWNLOAD の回数の相関計数を算出した所、第 1 条件で-0.16、第 2 条件で-0.35 である。混雑している AP2 に接続すればダウンロードが比較的困難である事、即ち相関係数が負になる事は容易に想像されるが、二つの回数の上に有意な相関関係があるとは言えない。また、表 4-2 からは、AP2 に最もアクセスが集中し AP1 がこれに次ぐ、と言うこれまで見て来た結果と矛盾するものではない事だけが解る。

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 の無線機は AP2 が最も良好に通信できると判断し、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4-4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。

この結果、各基地局の転送量に著しい差はなく、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4-5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条件は総合的に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。

4.6.4 関与基地局とダウンロード成否

表4-6と表4-7に、ダウンロードの為の packets が経由した基地局と OK DOWNLOAD（ダウンロードの成功）の関係を示す。

表4-6は交信の一覧にFTPログに記録されたOK DOWNLOADを書き加えたものである。交信とは総合挙動履歴テーブルの「dump-ftp 始」と「dump-ftp 終」の一組を示す。但し、制御等の為の交

信が含まれ得るので、同一試行中に同一端末が複数の交信を行っている場合があり、この一覧の個々のケースが必ずしも協力学生による実験の為のダウンロード操作を示しているわけではない事に注意が必要である（誤操作による複数回の交信もあり得る）。交信シリアル欄は、ある端末のある交信の固有記号である。通過パケット数欄を見ると、大半のケースで単一の基地局のみに記載があり、ローミングによって複数の基地局に関わる交信は希である事が解る。始終欄は、TCPDUMP に記録される当該交信の S フラグ（一連の交信の開始の印）と F フラグ（一連の交信の終了の印）の合計数である。FTP DL OK 欄は、「dump-ftp 終」と同一時刻同一端末に FTP ログに OK DOWNLOAD が記録されている場合に「○」を示した。通常は、開始時と終了時に上下方向で S フラグと F フラグが交換されるので 4（2 回×2 方向）となるが、「OK DOWNLOAD」でないケースでは始終欄の値が異なっている場合が少なく事解る。

表 4-7 は表 4-6 を集計したものである。交信欄は表 4-6 の通過パケット数欄が 1 以上のケースの基地局別の合計数である。OK DL 欄は表 4-6 のその「○」の数である。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。先に記した様に協力学生が実験の為に行ったダウンロード以外の交信も含まれ得るので、必ずしも精度の高いデータとは言えないが、一連の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」に至ったかを表 4-7 から推測する事ができる。

これら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と言うこれまでの結果から、AP1 と AP3 は条件が悪そうに見えるが、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存在する事が解る。第 1 条件では端末無線機が最良の接続先と通信を行ったので「OK DOWNLOAD」の率が高く、第 2 条件では AP2 への接続数を制限した事から条件の悪い接続先との通信を強いられたケースが増えたと言えよう。

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 4-8 と表 4-9 を作成した。

表 4-8 は各端末 PC と各基地局との距離の一覧に OK DOWNLOAD の件数、ローミング回数、基地

局別通算接続時間を書き加えたものである。

表 4-9 は表 4-8 に収録したデータの相関係数である。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い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。

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。

4.9.1 調査票の誤記

共通端末番号の設定に当たり、実験参加端末（協力学生が操作した PC）か別な装置かを識別する為に調査票を頼りにする必要があったが、意外に誤記が多く、集計に要した時間の大半がこの整合作業に費やされた。IP アドレスや MAC アドレスの書き取りに誤りが生じない様な工夫が必要である。

4.9.2 時刻

共通時刻の設定は、事前に使用する機材の時計を校正しておけば格段に容易に済んだ筈であり、反省すべき点である。

4.9.3 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。第1条件に於て試行次が進むに連れてダウンロード完遂の率が高まる現象などはその証左と言える。不慣れなコマンドプロンプトでの作業であれば納得し得る事ではある。一方、適正でないダウンロードを行ったケースもあった。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。

4.9.4 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。また、基地局設定変更作業中の間を持たせる為にも有効であったと思われる。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、最大能力を發揮す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、膨大なデータを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し直す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年夏以来、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に会議まで、何度顔を突き合わせ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。

本文から明かですが、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 －

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

