

# Wireless Internet WG 2012 年度活動報告

木本 瑞希\*

坂根 昌一†

島 慶一‡

妙中 雄三§

2013 年 1 月 7 日

## 1 はじめに

Wireless Internet ワーキンググループは、無線通信ネットワークを前提とした、より堅牢で柔軟なインターネット構成技術を研究するために 2012 年 3 月に設立された。

2012 年度の主な活動を以下に列挙する。

- WiFi メッシュネットワークの課題定義 (2 章)
- 高性能・高可用性 WiFi メッシュネットワークの運用 (3 章)
- マルチホップ無線ネットワークの性能計測 (4 章)
- IEEE802.11s メッシュネットワークの運用 (5 章)
- OpenWRT 勉強会 (6 章)
- OpenWRT ワークショップ (7 章)

以降、それぞれの活動の詳細を各章にて報告する。

## 2 WiFi メッシュネットワーク課題定義

### 2.1 背景

有線の通信設備が十分でない場所では無線通信技術の適用が有望と考えられている。会議やイベント開催時の一時ネットワークはその典型例であり、また災害時などに既存の地上通信設備が大きく損壊した場合にも有用である。しかしながら、現実には無線リンクはネットワークの一部で利用されるに留まっている。会

議ネットワークでは有線ネットワークを敷設する事が多く、唯一利用される無線リンクは、ラスト 1 ホップとなる利用者端末と WiFi アクセスポイント間であることがほとんどである。災害時には衛星通信リンクがインターネット接続回復のために活用されることが多く、そこから有線ケーブルなどを用いて利用場所まで延長し、最後の 1 ホップを WiFi で提供する形が多い [1]。

無線技術がネットワーク敷設の負担を軽減することは広く認識されているものの、その技術を実際の運用の場に導入することは少ない。これには、無線ネットワークの性能が有線と比較して劣る事、目に見えない通信媒体の管理が目で見えて確認できる有線と比較して困難であることなどが理由だと考えられる。しかしながら、今後のインターネット接続技術の多様性を考えた場合、無線リンクをラスト 1 ホップ技術としてだけでなく、末端からコアネットワークに伸びていく経路で活用するための技術の確立は重要であり、何がその障壁となっているのかを発見するためにも、運用や実験を重ねて知見を積み上げていく必要がある。

### 2.2 運用の概要

WIDE プロジェクトでは定期的に合宿形式の研究会を開催しており、150 人から 180 人程度の研究員が一カ所に集い研究開発活動を行う機会を設けている。研究会のインターネット接続は研究会の実行委員が構築しており、通常は会場ホテルまでのインターネット回線を手配した後、各会議室まで有線でネットワークを延伸した後、WiFi アクセスポイントを用いて利用者用リンクを提供する形態をとる。2012 年 3 月に実施した研究会では、インターネット回線の終端部分から先を無線メッシュネットワークにて構築し、有線ケーブルを用いないバックホールおよび利用者リンクの運用

\*慶応義塾大学

†シスコシステムズ合同会社

‡株式会社 IIJ インノベーションインスティテュート

§東京大学

を試みた。

## 2.3 利用機材

研究会では2つの異なるWiFiメッシュネットワークを運用した。ひとつはLayer 2メッシュネットワーク、もうひとつはLayer 3メッシュネットワークであった。メッシュネットワークの構築に利用した機材を表1と2に示す。

## 2.4 会場レイアウト

合宿研究会の参加人数は166名だった。会場では表3に示す5つの会議室を用い、それぞれの位置関係は付録図8に示す通りであった。

WS部屋は研究会中に開催された複数のワークショップのための場所として提供された。Plenary部屋は全員が参加する夕方のプレナリープログラムと、朝昼の分科会ミーティングに使われた。WS部屋とPlenary部屋が会期中最も人が存在していた部屋になる。BoF1とBoF2部屋は開催期間を通じて分科会のミーティングに使われた。これらの部屋には、最も混雑した場合でも最大50名程度しか収容していない。Board部屋はWIDEプロジェクトのボードメンバーのミーティングのための部屋で、最大でも20名程度しか収容しなかった。

各々の部屋は壁で仕切られており、部屋の扉はミーティング開催中は閉じられていた。ただし、WS部屋の扉は常時開放されていた。

## 2.5 ネットワーク設定

### 2.5.1 Layer 2 無線メッシュ

Layer 2無線メッシュネットワークはシスコシステムズの無線メッシュ製品を用いて構築した(表1)。WiFiのチャンネル割り当ては以下の通りであった。

バックホール 802.11a 5GHz (36ch:シングルバンド、36ch および 40ch:チャンネルボンディング使用時)

利用者 802.11gn 2.4GHz 自動割り当て (1、6、および 11ch)

付録図9に初期のアクセスポイントの配置図を示す。AP-1からAP-10、およびAP-14の、合計で11台のアクセスポイントが配置された。この中で、AP-1のみがメッシュネットワークのインターネットゲートウェイであるWireless LAN Controller (WLC) に有線接続されており、他のアクセスポイントはすべて電源供給のみで運用された。

アクセスポイントの配置は、各部屋に少なくとも1台のアクセスポイントが存在し、かつアクセスポイント間の距離が離れすぎない(目測で20m程度)を目安に配置している。

当初、付録図9に示す配置で運用を開始したが、初日のプレナリープログラムでPlenary部屋に人が集中した結果、70名を越える参加者がAP-10に接続されるという事態が発生してしまった(3月5日15:00-18:00、図6参照)。この問題を改善するため、後の運用ではAP-4をWS部屋からPlenary部屋に移動し、最終的には付録図10に示す構成で運用を継続した。有線ネットワークを用いたバックホール形成では、アクセスポイントの配置変更は困難なため、無線メッシュならではの負荷分散手法と言える。

Layer 2 WiFiメッシュを構築維持するプロトコルはAWPP (Advanced Wireless Path Protocol; シスコシステムズの独自プロトコル) が用いられている。

### 2.5.2 Layer 3 WiFi メッシュ

Layer 3 WiFi無線メッシュはNTTPCコミュニケーションズ提供によるOpenWRT[4]ベースの小型無線ルータで構築された(表2)。WiFiのチャンネル割り当ては以下の通りであった。

バックホール 802.11a 5GHz (36ch)

利用者 802.11gn 2.4GHz 静的割り当て

- 1ch: AP-1、AP-4、AP-7、AP-8
- 6ch: AP-2、AP-6、AP-9
- 11ch: AP-3、AP-5、AP-10

付録図11にアクセスポイントの位置を示す。AP-1はインターネットゲートウェイとして動作しており、有線ネットワークを介して上流ルータに接続されている。

Layer 3 WiFiメッシュネットワークの構築維持に使われたプロトコルはOLSRv2[2]である。

表 1: Layer 2 メッシュネットワーク構築に用いた機材

| 機材名                    | 役割                                    | 市場参考価格   |
|------------------------|---------------------------------------|----------|
| Cisco AIR-2125-K9      | Wireless LAN Controller               | ¥600,000 |
| Cisco AIR-1262N-Q-K9   | Wireless LAN Access Point             | ¥78,000  |
| Cisco AIR-PWRINJ4=     | Wireless LAN Access Point PoE adapter | ¥10,000  |
| Cisco WS-C3560CG-8PC-S | PoE Ethernet Switch                   | ¥90,000  |

表 2: Layer 3 メッシュネットワーク構築に用いた機材

| 機材名                                    | 役割                                           |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|
| エヌ・ティ・ティ ピー・シー コミュニケーションズ MR1200 (非売品) | Wireless LAN Access Point (カスタム OpenWRT を使用) |

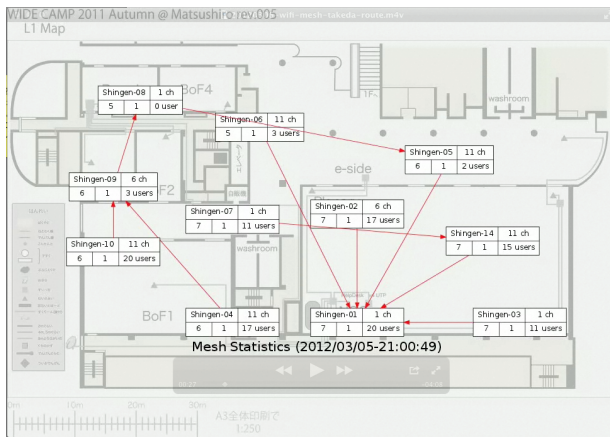


図 1: 3 月 5 日 21:00 時点での Layer 2 メッシュネットワークトポロジ

## 2.6 トポロジ構成と推移

図 1 と図 2 はそれぞれ、3 月 5 日 21:00 時点での Layer 2 メッシュネットワークと、3 月 6 日 12:00 時点での Layer 3 メッシュネットワークのトポロジ情報を図示したものである。

図 1 中の赤い矢印は Layer 2 メッシュネットワークの出口に向かってリンクを確立しているノードの関係を示す。矢印の先が上流 (インターネット側) になる。

図 2 中の赤い矢印は、Layer 3 メッシュルータの next hop 情報を示す。また灰色の矢印は、ルータの経路表に登録されていないが、近隣ノードとして認識しているノードの関係を示す。

本運用で用いた Layer 2 メッシュネットワークを構成

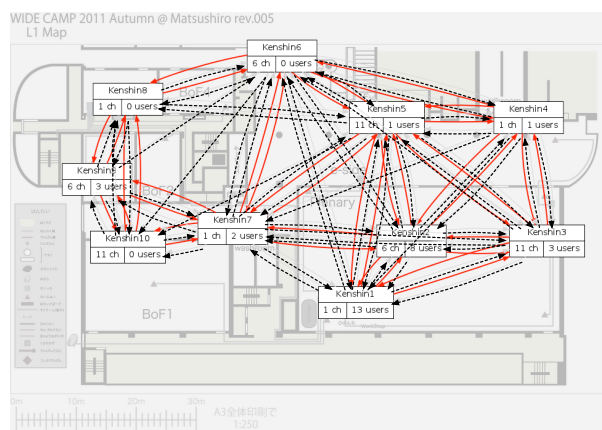


図 2: 3 月 6 日 12:00 時点での Layer 3 メッシュネットワークトポロジ

する技術では、OLSRv2 を用いた Layer 3 メッシュネットワークよりもトポロジがシンプルに構成されていたことがわかる。この理由は、AWPP を用いたメッシュネットワークの運用では、各ノードは WLC に向かうトンネルリンクを作成するようにトポロジが構成されるためである。トンネルリンクの構成には CAPWAP[3] が用いられている。

これに対して、Layer 3 メッシュネットワークはそれぞれのメッシュルータが対等な立場に立ってトポロジを構成している。それぞれのルータは、自分が管理する利用者向けサブネットの経路情報を広告する。ネットワーク内のリンク品質、最終目的アドレスまでのホップ数などから OLSRv2 の経路選択アルゴリズムに従って経路表が作成される。今回、インターネットに抜け

表 3: 会議室

| 名称            | 最大収容人数 (広さ)         |
|---------------|---------------------|
| Workshop (WS) | 200 人 (1015 $m^2$ ) |
| Plenary       | 150 人 (175 $m^2$ )  |
| BoF1          | 60 人 (100 $m^2$ 以下) |
| BoF2          | 60 人 (100 $m^2$ 以下) |
| Board         | 20 人 (100 $m^2$ 以下) |

る経路は、デフォルト経路として AP-1 より広告された。利用者端末からのトラフィックは、メッシュネットワーク内であればインターネットゲートウェイを経由することなく、そのときの最短と思われる経路を通して転送される。

Layer 2 メッシュネットワークは 3 月 5 日の 15:00 から、3 月 8 日の 12:00 まで (Layer 3 メッシュネットワークが運用された 3 月 6 日の 12:00 から 17:00 を除く) 運用された。Layer 3 メッシュネットワークは 3 月 6 日の 12:00 から 17:00 にかけて運用された。この間のトポロジの推移を示すアニメーションが表 4 に示すリンクから入手可能である。アニメーションから、今回の運用に関しては Layer 2 メッシュネットワークの方がトポロジ変化が少なく、安定しているように見える。経路の変化は、利用者のトラフィックのドロップなどに繋がるため、少ない方がよいことは間違いないが、無線の場合は周りの環境や人の動きによってリンクの品質が大きく変化するため、最適な経路の探索と安定したトポロジの構成のトレードオフが重要である。

## 2.7 帯域測定

構築した WiFi メッシュネットワーク上で、iperf ツールを用いた TCP 性能計測を実施した。図 3 と 4 は Layer 2 メッシュネットワーク上での結果を示したものである。Layer 2 メッシュネットワークでは、メッシュノード単体での計測ができなかったため、2 台の WiFi クライアント端末を用いて計測している。1 台を WLC が接続しているスイッチと同じスイッチに有線にて接続し、もう 1 台を移動させながら計測した。たとえば、3 の右端の値は、2 台目のクライアント端末を AP-10 に接続して計測した場合を示している。図中の‘UP’はメッシュネットワークの末端方面からインターネットゲートウェイに向かう方向に iperf を実行 (末端

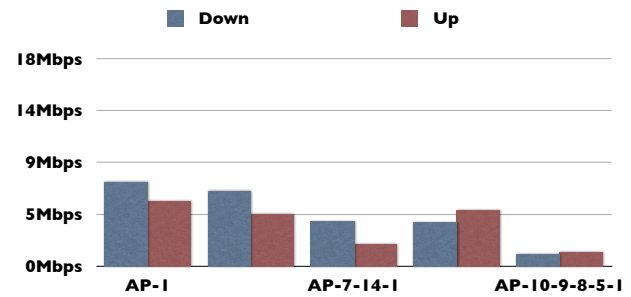


図 3: Layer 2 メッシュネットワーク帯域測定 [バックホール帯域: 20MHz] [経路: 端末 1⇔AP-1⇔メッシュ⇔AP-X⇔端末 2]

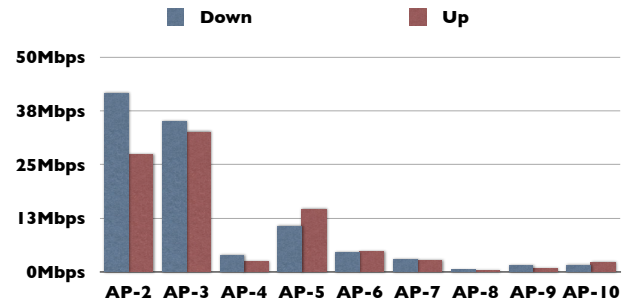


図 4: Layer 2 メッシュネットワーク帯域測定 [バックホール帯域: 40MHz] [経路: 端末 1⇔AP-1⇔メッシュ⇔AP-X⇔端末 2]

方面が iperf クライアント、ゲートウェイ方面が iperf サーバ) した場合で、‘DOWN’は逆方向を意味する。

Layer 2 メッシュネットワークの構築に利用した機材は、バックホールチャネルの帯域を 2 倍の 40MHz に設定することが可能であり、図 3 と 4 の比較から、ほぼ 2 倍の性能がでていることが確認できる。ただし、ここで計測された値は、バックホール無線が 802.11a、クライアント接続が 802.11g であることを考えると低くなっている。環境的な原因ももちろん考えられるが、後日、WLC を上位機種 (WLC5508) に変更して追試

表 4: メッシュネットワークトポロジの推移アニメーション

|         |                                                                                                                                                                                 |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Layer 2 | <a href="http://member.wide.ad.jp/~shima/publications/20120306-wifi-mesh-takeda-route.m4v">http://member.wide.ad.jp/~shima/publications/20120306-wifi-mesh-takeda-route.m4v</a> |
| Layer 3 | <a href="http://member.wide.ad.jp/~shima/publications/20120306-wifi-mesh-uesugi-route.m4v">http://member.wide.ad.jp/~shima/publications/20120306-wifi-mesh-uesugi-route.m4v</a> |

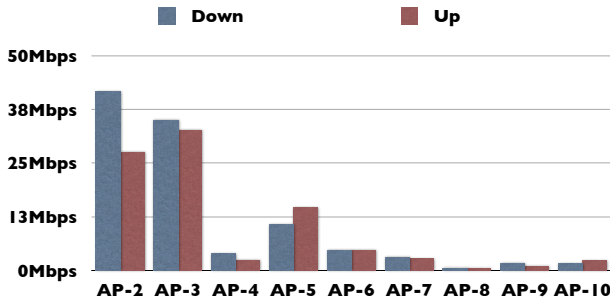


図 5: Layer 3 メッシュネットワーク帯域測定 [経路: AP-1⇔メッシュ⇔AP-X)

した時には、より高い性能が計測されたので、WLC によるトンネル通信が性能の限界に関わっていたのではないかと推測している。

また、メッシュネットワークを運用したときに見られる、ホップ数の増加に伴う性能の低下も確認できる。ただし、図 3 の AP-9-8-5-1 の例のように、例外的に想定される性能よりも高い性能がでていることもある。これは環境的な要因と考えられるが、実空間の環境の再現ができないため、何が理由だったのかは不明のままである。このような環境依存の性能を評価するためには、環境のモデル化とその参照値を研究する必要があることがわかる。

図 5 に Layer 3 メッシュネットワークの帯域測定結果を示す。Layer 3 メッシュネットワークの測定では、Layer 2 の場合と異なりクライアントノードは利用していない。メッシュルータ自体が iperf を実行しているため、Layer 2 の場合と若干環境が異なる。具体的には AP-1 と他の AP の間で iperf を実行している。図中の 'UP' はメッシュの末端で iperf クライアントを、AP-1 で iperf サーバを実行した場合の値、'DOWN' はその逆となる。図からわかる通り、Layer 2 で用いた技術と比較して、ホップ数が増えた場合の帯域の減少度合いが急激であることがわかる。

## 2.8 課題定義

現在我々は無線によるインターネット延伸を実現するための運用経験を重ね、何がそれを阻害する要因となっているのかを調査している段階である。その一環として、今回 2 種類の異なる無線メッシュネットワークを用いた会議ネットワークの運用を試みた。ひとつは Layer 2 メッシュ技術を用いたシスコシステムズの製品によるネットワークで、もうひとつは OLSRv2 を用いた Layer 3 メッシュネットワークである。

どちらの技術を用いた場合でもメッシュネットワーク自体を構築することはできたが、性能や安定性の面で差が生じた。製品として販売されている Layer 2 メッシュネットワークはトポロジの変化のアニメーションを見る限り (表 4)、Layer 3 メッシュネットワークよりも安定していた。帯域は 5 ホップのときに 1Mbps と、一般的なアクセスポイントとして運用した場合と比較すると大きく落ちている。製品の動作が公開されていないため、想像するしかないが、Layer 2 メッシュ製品の帯域が全体的に抑えられているのは、無線リンクの輻輳を回避し、常に余裕のある環境でトラフィックをさばくためではないかと考えている。実際、ホップ数が増えた場合でも、Layer 2 メッシュネットワークの方が、帯域制御などを行っていない Layer 3 メッシュネットワークを用いた場合よりも安定して利用できていた。

Layer 3 メッシュネットワークでは、ひとつのメッシュルータが収容できる利用者数の上限が小さく、20 名程度を頭に急激に安定性が落ちていく事が観測されている。これは、使用している無線チップセットの性能や、ハードウェア構成に依存している部分が大きいと予想され、安価な無線ルータを構築する際の問題点のひとつと考えられる。図 6 と図 7 にユーザー数の推移のグラフを示す。

Layer 3 メッシュネットワークでは、ホップ数を増やしたときの帯域の減衰が、Layer 2 の時と比較してより急激であることもわかった。前述の通り、これは帯域制御による性能確保が原因ではないかと考えられ

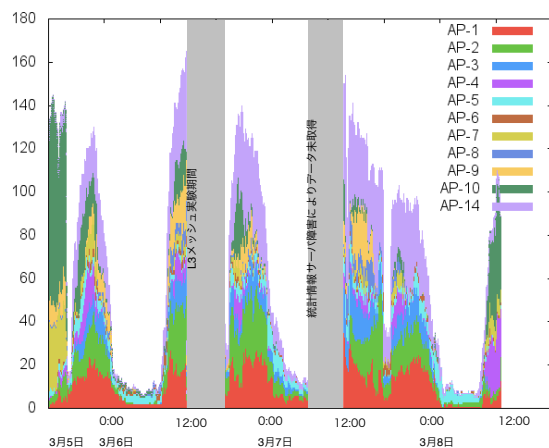


図 6: Layer 2 メッシュネットワーク収容ユーザーの推移

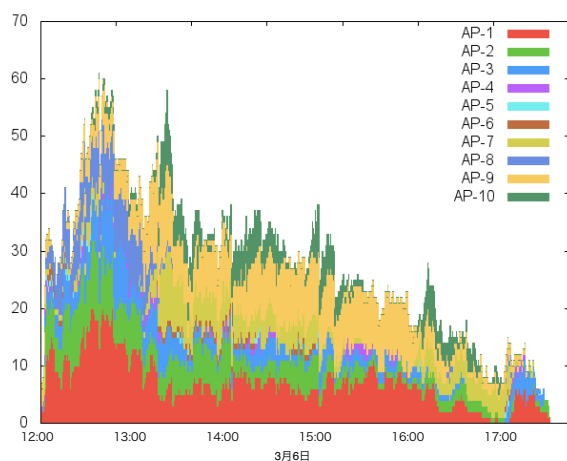


図 7: Layer 3 メッシュネットワーク収容ユーザーの推移

るため、今後帯域制御のあるなしでの比較による性能評価を行う予定である。

これらの問題を解決できない限り、無線メッシュネットワークが既存の有線延伸とアクセスポイントを置き換えることはできないと考えられる。

実験運用を通じて、以下の項目のより進んだ研究が必要であると考ええる。

- 外乱のない環境での、理想的な無線通信性能 (シングルホップ、マルチホップ) の計測による、参照性能の定義
- 無線インターフェースを有線ケーブルで接続し、アッテネータを用いて減衰を行う、理想環境での無線減衰エミュレーションにおける減衰傾向のモデル化
- 無線の外乱のモデル化と、外乱を考慮した実環境に近いエミュレーション環境の実現
- WiFi メッシュネットワークの性能評価指数の定義
- 実験の基礎となる参照 WiFi ルータ製作
- 実環境での実験によるモデルおよび評価指数の検証

## 2.9 まとめ

本論文では、無線メッシュネットワークを使った会議ネットワークサービスの運用報告と、その経験から得られた知見をもとにした今後の無線メッシュネットワークの研究開発に関する課題の定義を行った。無線ネットワーク技術は、設置のしやすさ、拡張のしやすさから、会議ネットワークや災害時の一時ネットワークの構築に有用だと考えられるが、常に変化する外界の環境による品質の揺れ、接続状態が確認しづらいことなどによる運用の難しさが、その普及と活用を阻んでいる。今後、これらの問題を解決するために、2.8 章に示した課題の研究を進めていく予定である。

## 2.10 謝辞

Layer 2 メッシュネットワーク機材の手配とその運用に関しては、シスコシステムズ合同会社の小野寺好

広様および芝川晃一様に多大な援助および助言をいただきました。また Layer 3 メッシュネットワーク機材は株式会社エヌ・ティ・ティ・ピー・シー コミュニケーションズ様にサポートしていただきました。ここに感謝いたします。

### 3 高性能・高可用性 WiFi メッシュネットワークの運用

2012 年 3 月の WIDE 合宿研究会では、製品による L2 無線メッシュと OpenWRT ベースの OLSR による L3 無線メッシュの 2 種類のバックホールを運用して、無線メッシュネットワークの特性の把握と課題の抽出を主に行った。同年 9 月の合宿研究会では、前回の経験を踏まえた無線ネットワークの安定運用と運用経験の蓄積に主点を置いた。以下に、9 月の合宿研究会における無線ネットワークについて記述する。

機器の構成を図 12 に示す。今回は AP として Cisco AP3502i(以降 AP または AIR と表す)、無線 LAN コントローラとして Cisco WLC5508(以降 WLC と表す)を使用した。前回と同様に全ての AP は WLC を使用して集中制御した。無線メッシュネットワークにはルートを 2 つ設置し、SW1 (Buffalo LSW2-GT-8NSRR) に接続した。また、SW1 は合宿ネットワーク (以降、上位と表す) に繋がる SW2 に接続した。WLC と SW1 は 1 本のイーサネットケーブルで接続した。期間中は、同じく SW1 に接続した PC から約 90 秒毎 (最小 76 秒、最大 116 秒、平均 89.77 秒) に WLC の MIB を収集した。以降のグラフや数値は、この MIB の値を使用して作成した。

WiFi アクセスポイント (AP) の配置を図 13 に示す。これらの AP はバックホールを構成するメッシュルータの役目も担う。AP の設置は研究会開始日の前日に行った。始めに各 AP 同士の見通しがよくなる様に配置を行い、例えば WS 部屋やプレナリ部屋等の参加者が比較的多く分布すると思われる箇所にはさらに AP を配置した。一通り配置を終えた後に、各 AP 間の SNR を計測しながら、おおよそ 30 の前半、悪くても 20 の後半になるように微調整を行った。また、AIR11 や AIR12 のルート 1 への代替経路として AIR11 と AIR07 間を想定していたが、見通しが悪い事や SNR が低かったため、9/4 の正午頃に AIR05 を追加した。これらの作

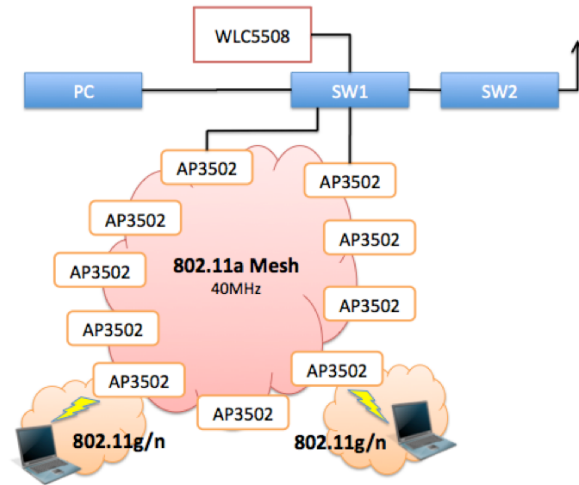


図 12: 2012 年 9 月 WIDE 合宿研究会のメッシュネットワーク機器構成

業において、有線ケーブルを敷設する作業がないことは無線メッシュの利点のひとつである。

参加者への無線アクセス方式は、802.11g/n のみで 802.11b は提供しなかった。一般的には、802.11b と 802.11g を同時に提供すると、802.11g の性能が出せずに全体としてパフォーマンスが落ちる。3 月の合宿では、802.11b しか対応していない市販のゲーム機を使用した実験が行われたが、今回はその必要がなかったため、802.11g のみの提供とした。チャネルは 1 と 6 を使用した。11 は別の実験で使用されていたので干渉を避けるためである。認証方式は、設定の敷居を下げるために、最も単純な WPA-PSK-AES のみを提供した。証明書を用いた方式の方がセキュリティのレベルは高いが、一般的に設定と接続時におけるトラブルが多くなる。今回は、メッシュの運用経験の蓄積という観点と、隔離された合宿地ということもあり、設定が最も簡単な PSK 方式を採用した。バックホールは、802.11a を使用した。チャネルに関しては、802.11s を使用した別の実験の無線アクセスに 802.11a を使用していた都合上、調整の上 36ch と 40ch を使用した。さらに、常時 channel bonding を使用した。ESSID は、表 5 に示す 5 種類の ID と 2 つの無線管理用 ID の合計 7 種類を広告した。5 つの実験用ネットワークに割り当てられた異なる VLAN に対応させて、参加者は ESSID を切り換える事で明示的に特定の実験に参加できるようにした。9/5 には、対外線の切換えのために

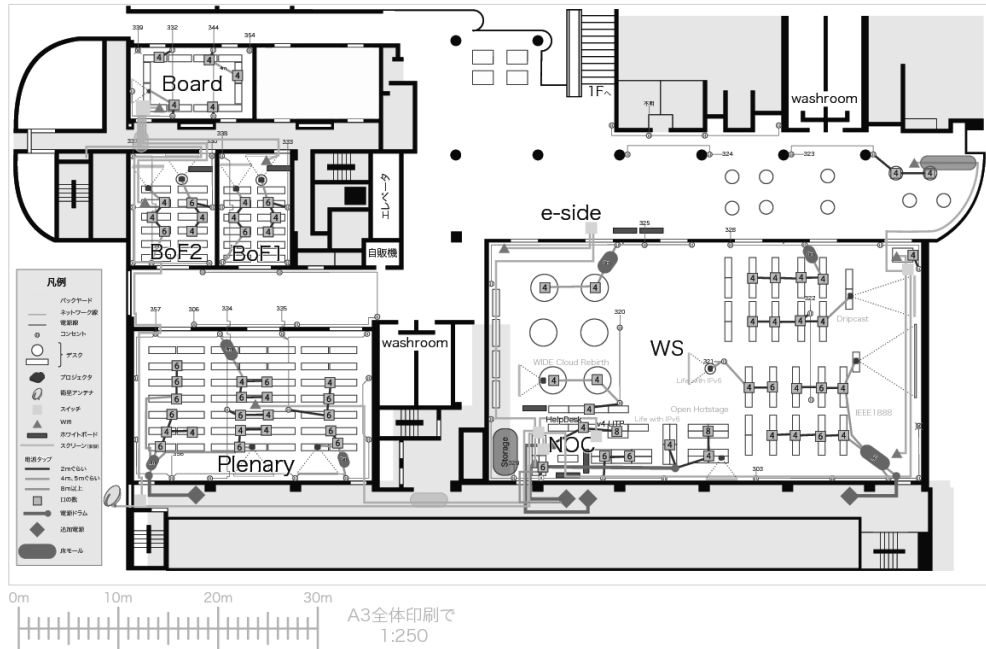


図 8: 会議室の位置関係 (会場全体の広さは  $80m \times 50m$ )

表 5: ESSID 一覧

| ESSID 名         | 目的                                 |
|-----------------|------------------------------------|
| v6only-firewall | firewall 装置が運用された IPv6 only ネットワーク |
| v6only-fallback | フォールバック実験が行われた IPv6 only ネットワーク    |
| v6only-basic    | 特別な実験を行わなかった IPv6 only ネットワーク      |
| v6only-SA46T-AT | SA46T-AT 運用実験に用いられた ネットワーク         |
| v46-olsr        | StarBED OLSR 実験に用いられた ネットワーク       |

予め計画していた VLAN と ESSID の入れ替えを行った。WLC を用いていた集中管理は、この様な変更も簡単に行える事が利点のひとつである。合宿ネットワークから参加者へは IPv4 と IPv6 の両方を提供することになっていたので、IPv4/IPv6 DHCP と IPv6 RA をパススルーさせた。Cisco WLC では IPv4 DHCP や IPv6 RA の処理に関して様々なオプションがあるが、それらの動作を考慮した運用に関しては次回以降の課題としたい。

前回、プレナリ部屋に参加者が集中した時に、プレナリ部屋から上位へのスループットが極端に落ちた。

考えられる理由として、以下の 2 点が挙げられる。

理由 1. プレナリ部屋が無線メッシュの末端だったために、ホップ数が増えてネットワーク自体のスループットが落ちた。理由 2. 2 台の AP にアソシエーションが集中して (最大で 90 アソシエーション)、1 台の許容量 (推奨値 30) を超えたため AP 自体のスループットが落ちた。

このうち理由 1 の観点から、プレナリ部屋にもルートを設置して、WS 部屋と併せて 2 つのルートを使用した。図 14 に期間中に観測された典型的なパスを示す。AIR01 と AIR02 をルートとして 2 つのパスが構築されていることが分かる。前回の合宿では、AIR11 と AIR07 間に相当する SNR は 10 台と非常に悪かったが、プレナリ部屋にルートを置いた事により SNR の悪い箇所がなくなった。

合宿期間中の WLC の MIB ifInOctets と ifOutOctets のグラフを図 15 に示す。ifInOctets と ifOutOctets に差が見られない理由は、全ての AP は CAPWAP を使用して WLC と直接データの交換を行う (ただし、メッシュ内の通信においては条件次第では最適化が行われることが以前の実験で観測されている) ために、WLC のインターフェイスには、無

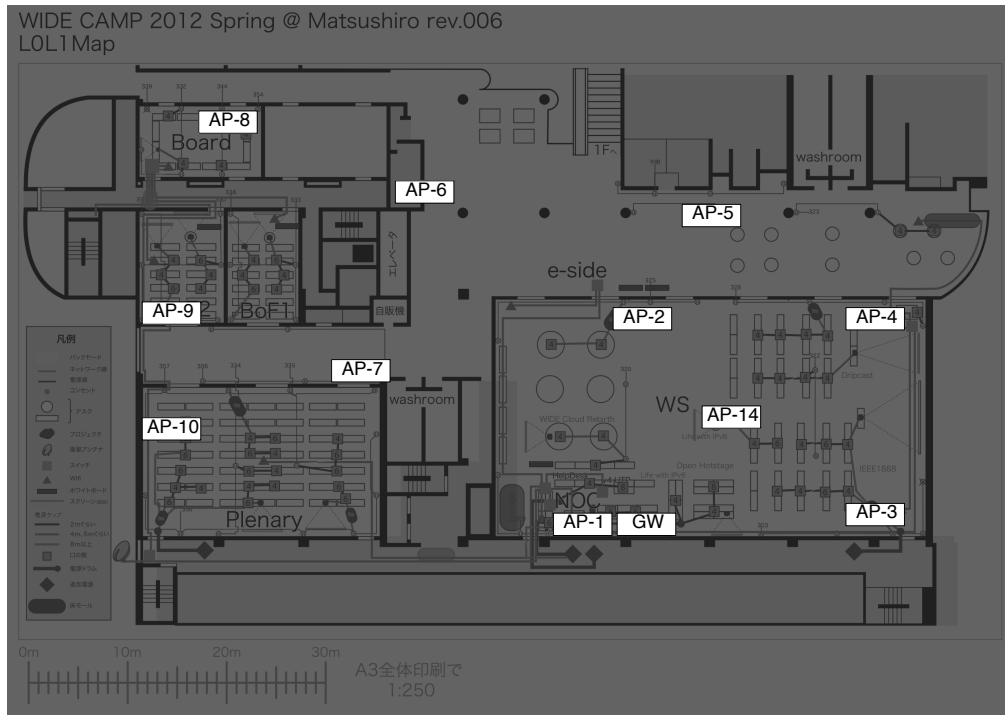


図 9: Layer 2 WiFi メッシュ構築時の初期アクセスポイント配置図

線網から上位に向かうトラフィックと、上位から無線網に向かうトラフィックの両方が通るからである。また、それらの若干の差は、無線メッシュ網からのパケットには CAPWAP ヘッダが含まれているからである。よって、ifInOctets が多い場合は、無線網から上位へのトラフィックが多い時、ifOutOctets が多い場合は、上位から無線網に入るトラフィックが多い時と判断できる。

9/4 の 16:00 からプレナリ部屋において行われた招待講演において、16:10 から 17:20 の間だけルート 2 (AIR02) を落としてルート 1 (AIR01) だけで運用した。落とした後、約 6 分でパスが切り替わった事を MIB により確認した。経路が切り替わってパスが安定した状態を図 16 に示す。AIR11 からの SNR が AIR07 では 16 であることが分かる。この部分の SNR を改善すると、ルートが 1 つの場合でもプレナリ部屋から上位へのスループットが向上する可能性があると考えられる。

図 17 は、招待講演が行われた 16:00 から 18:00 の間に WLC のインターフェイスに流れたトラフィックであるが、ルート 1 だけの時は最大 200MB に対して、ルート 2 を使用した場合は最大 560MB を記録している。これは無線網から上位へのトラフィックは、それ

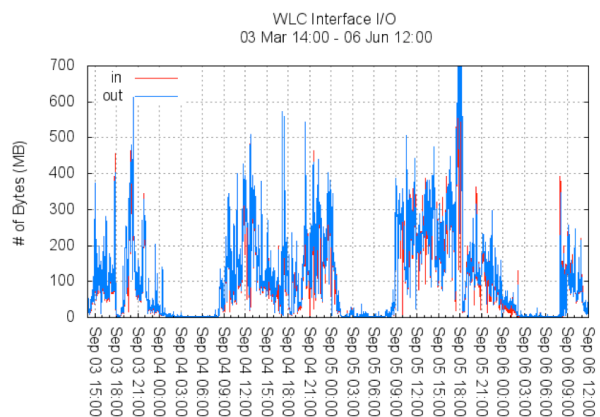


図 15: 研究会期間中に WLC を通過したパケット流量チャート

ぞれ約 100MB、約 280MB であることを意味する。なお、17:13 付近に 550MB を記録している原因は分かっていない。

表 6 と表 7 に各日のトラフィックと主なイベントを示す。これらの値は 90 秒毎の積算値であるので、約 90.53Mb/s に相当する。負荷実験で最大で 1018.47MB

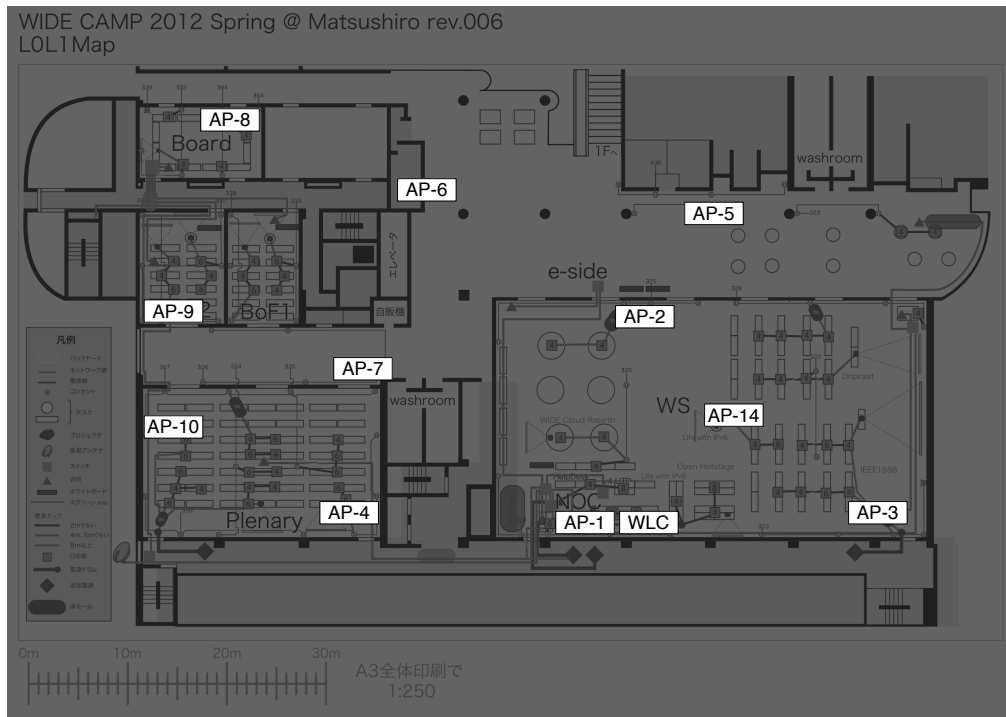


図 10: 最終的な Layer 2 WiFi メッシュアクセスポイント配置図

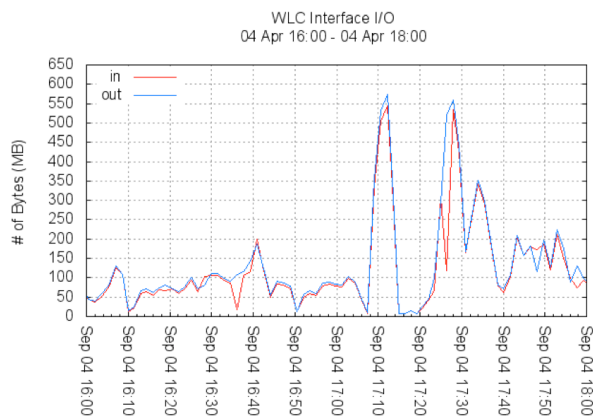


図 17: 招待講演中に WLC を通過したパケット流量チャート

が観測された。

表 8 は、各日毎の最大ユーザ数である。

9/3 のプレナリ部屋で最大接続は、20:14 頃で各 AP の状況は表 9 の通りである。

9/6 のプレナリ部屋での最大接続は、11:00 頃で、各 AP の状況は表 10 以下の通りである。

表 6: 期間中のトラフィック  
インターフェース入力量

| 日時                    | 最小   | 最大      | 中間値 (MB) |
|-----------------------|------|---------|----------|
| 9/3 14:00~9/4 5:00    | 0.98 | 593.39  | 64.38    |
| 9/4 5:00~9/5 5:00     | 0.96 | 543.80  | 98.87    |
| 9/5 5:00~9/6 5:00     | 0.58 | 1018.47 | 134.96   |
| 9/6 5:00~9/6 12:00    | 1.41 | 391.23  | 47.47    |
| (9/3 14:00~9/6 12:00) | 0.58 | 1018.47 | 97.80    |

インターフェース出力量

| 日時                    | 最小   | 最大      | 中間値 (MB) |
|-----------------------|------|---------|----------|
| 9/3 14:00~9/4 5:00    | 1.01 | 612.98  | 67.85    |
| 9/4 5:00~9/5 5:00     | 0.84 | 573.42  | 104.81   |
| 9/5 5:00~9/6 5:00     | 0.10 | 1016.19 | 138.90   |
| 9/6 5:00~9/6 12:00    | 1.44 | 346.97  | 45.58    |
| (9/3 14:00~9/6 12:00) | 0.10 | 1016.19 | 101.73   |

期間中の各 ESSID および各 AP へのアソシエーションの状況を図 18 と図 19 に示す。日中は、常時 120 から 140 のアソシエーションが観測された。このうち unknown に分類されているのは、無線網管理用の ESSID である。9/5 21:00 に unknown が増えているのは、後述の負荷実験で他の実験に影響を与えないために使用したからである。

また、表 11 は MAC アドレスの OUI の上位リスト

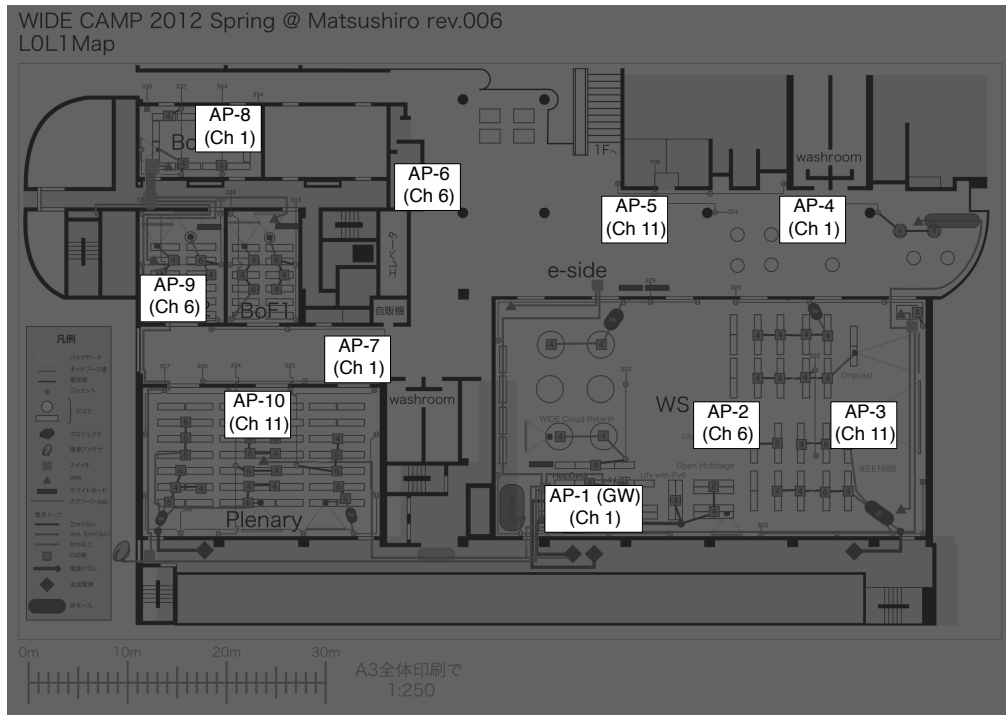


図 11: Layer 3 WiFi メッシュ構築時のアクセスポイント配置

表 7: 期間中の主なイベント

| 日時              | イベント       |
|-----------------|------------|
| 9/3 14:30~18:00 | オープニングプレナリ |
| 9/4 16:10~17:50 | 招待講演       |
| 9/5 16:10~17:30 | 屋台村        |
| 9/5 21:00~22:00 | 負荷実験       |
| 9/6 9:00~12:00  | クロージングプレナリ |

表 9: 9/3 20:14 頃の各 AP のユーザ数

| AP 名  | ユーザ数 |
|-------|------|
| AIR10 | 20   |
| AIR11 | 15   |
| AIR12 | 10   |
| AIR02 | 50   |
| 合計    | 95   |

表 8: 期間中の最大ユーザ数

| 日時                 | 最大ユーザ数 |
|--------------------|--------|
| 9/3 14:00~9/4 5:00 | 118    |
| 9/4 5:00~9/5 5:00  | 132    |
| 9/5 5:00~9/6 5:00  | 210    |
| 9/6 5:00~9/6 12:00 | 107    |

表 10: 9/6 11:00 頃の各 AP のユーザ数

| AP 名  | ユーザ数 |
|-------|------|
| AIR10 | 4    |
| AIR11 | 11   |
| AIR12 | 39   |
| AIR02 | 44   |
| 合計    | 98   |

である。実際の参加者は 133 人であり、AP にアソシエーションした MAC アドレスの最大数は 210 である。このうち Buffalo 製品が多いのは、後述の負荷実験で異なる Buffalo 用の疑似 MAC アドレスを使用して大量のアソシエーションを行ったからである。実際の Buffalo 筐体数は 30 台弱である。

上述の理由 2 を検証するために、9/5 21:20 近辺で、WS 部屋において Buffalo WZR-HP-AG300H 製 Open-WRT を使用して、約 60 ノードをアソシエーションさ

せた状態 (主に AIR03、AIR04。MIB により確認) で、AIR04 にアソシエーションさせた 2 台の PC 間で Iperf (TCP) を用いてスループットを計測してみた所、最大値 5.65(Mb/s)、最小値 1.49(Mb/s)、中間値 3.42(Mb/s) が得られた。この時 (21:25) の各 AP の状況は表 12 の通りである。

運用経験の蓄積としては、特定のベンダーの機器の MIB ではあるが、MIB を定期的に収集してタイムリー

WIDE CAMP 2011 Autumn @ Matsushiro rev.005  
L1 Map

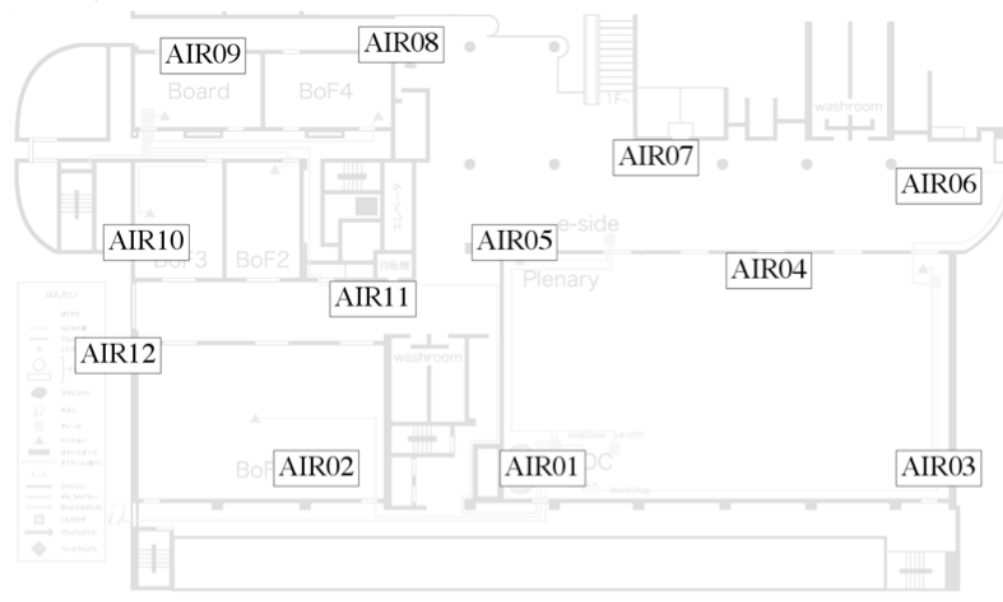


図 13: AP の配置図

表 11: 観測された MAC アドレス OUI の上位  
MAC アドレス数 | ベンダー名

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| 162 | Apple Computer                      |
| 111 | Buffalo Inc.                        |
| 43  | Intel Corp.                         |
| 9   | Murata Manufacturing                |
| 6   | Sony Ericsson Mobile Communications |
| 5   | SHARP Corporation                   |

表 12: 9/5 21:25 頃の各 AP のユーザ数

| AP 名  | ユーザ数 |
|-------|------|
| AIR01 | 32   |
| AIR03 | 31   |
| AIR04 | 68   |

に分析してグラフ化するツールを作成した。他のベンダーの機器でも似た様な MIB が使われていれば応用できるのではと考えられる。また、これも特定のベンダーの機器に特化したことかもしれないが、無線メッシュネットワークにおけるトラブルシューティングの知見も得られた。今後は、得られたデータを分析して今後の活動につなげて行きたい。

## 4 マルチホップ無線ネットワークの性能計測

無線環境は、その状態が目に見えないことから、性能の劣化が機材やプロトコルに依存したものなのか、環境に依存したものなのか判断しにくい場合がある。そこで、本ワーキンググループでは、理想的な無線環境におけるマルチホップ無線ネットワークの性能を計測し、同一の機材を実環境で利用することで原因を切り分け、今後の対策へ結びつける活動を開始した。

### 4.1 SNR の変化と実効性能の計測

今回、不安定な外界環境をできる限り遮断するため、無線アクセスポイント間を有線ケーブルで接続し、信号の減衰をアッテネータを用いて実現している。

図 20 に 2 台の Cisco Aironet 3500 無線アクセスポイント (AP01 および AP02) を直結し、その間にアッテネータを挿入した場合の SNR 値を示す。アッテネータの値が SNR に比例しており、アッテネータの大きさによって擬似的な外部環境が構築できていることがわかる。計測では、SNR の値がアクセスポイント間の

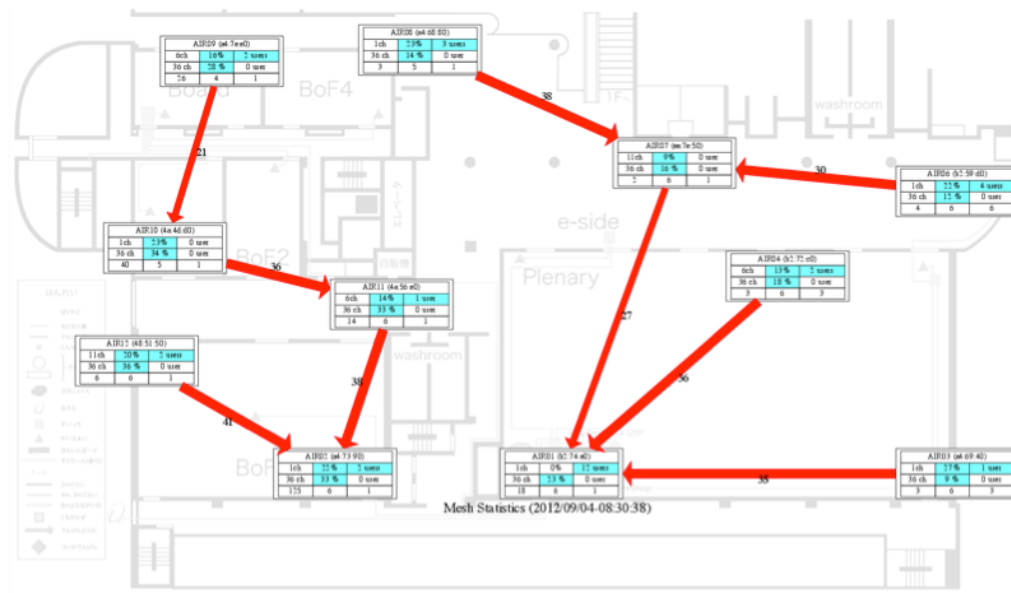


図 14: 研究会期間中に観測された典型的なパス

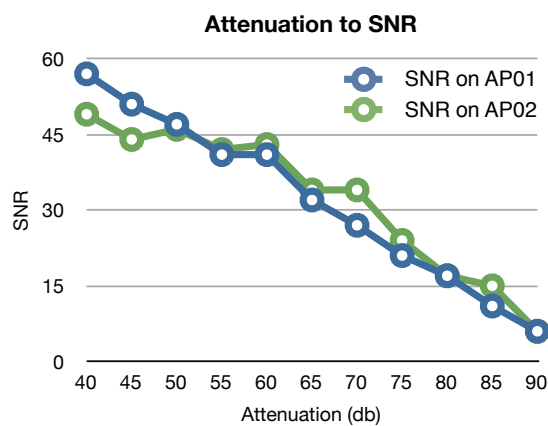


図 20: アッテネータの大きさと SNR の相関図

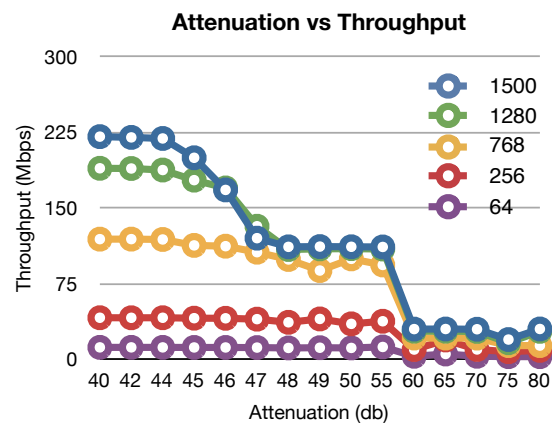


図 21: アッテネータの大きさと実効帯域

距離を近似していると過程して、パケットサイズを変更しながら実効性能を計測した。

図 21 に結果を示す。計測では、1500、1280、768、256、64 の 5 種類の異なる大きさのパケットを用いて、それぞれにおける実効帯域を計測した。通信プロトコルは IEEE802.11a、MCS (Modulation and Coding Scheme) Index は 15 に固定してある。アッテネータの増大に従って実効帯域が落ちていく様子が伺える。

今回は有線ケーブルを用いて外部影響の少ない状態で計測しているため、今後実際の現場で同じ機材を用いて実験を行う場合、現場の SNR 値、図 20、21 から、期待できる最大帯域を見積もることができる。

本ワーキンググループの目標のひとつに、無線リンクを用いた高性能マルチホップメッシュネットワークの構築が挙げられる。無線マルチホップメッシュネットワークはホップ数の増加に伴い著しい性能低下発生することがよく知られている。今回、我々は、性能低下の度合いが、どの程度外部環境あるいはメッシュプロトコルに依存した要因なのかを推測するために、有線ケーブルを用いた外部ノイズの少ない環境でのマルチホップ通信性能を計測した。

ていく。今回は、ここを固定することによって、特定のコーディング下での性能を計測している。対象とするコーディングは MCS index 15、11、9、および 8 である。

ホップ数が1、すなわち、アクセスポイント2台が直接接続できている場合は理論値の75%以上の通信速度が確保できているが、間にアクセスポイントを挿入し、ホップ数が増えていく度に、およそ半分の性能に落ちていくのが観測できる。これはAWPPがメッシュネットワークのバックホールに同じ無線チャネルを利用しているためであり、中継ノードがパケットを転送する際に干渉が発生するためであると考えられる。同様の性能劣化は、OLSRなど別のメッシュ構成プロトコルを用いた場合にも観測される。

今回、環境ノイズを排除して計測したことで、1から3ホップにおけるおおよその最大通信帯域を見積もることができた。今後、現場で実験を進めていくにあたり、今回計測した値を当面の目標値として設定することとする。

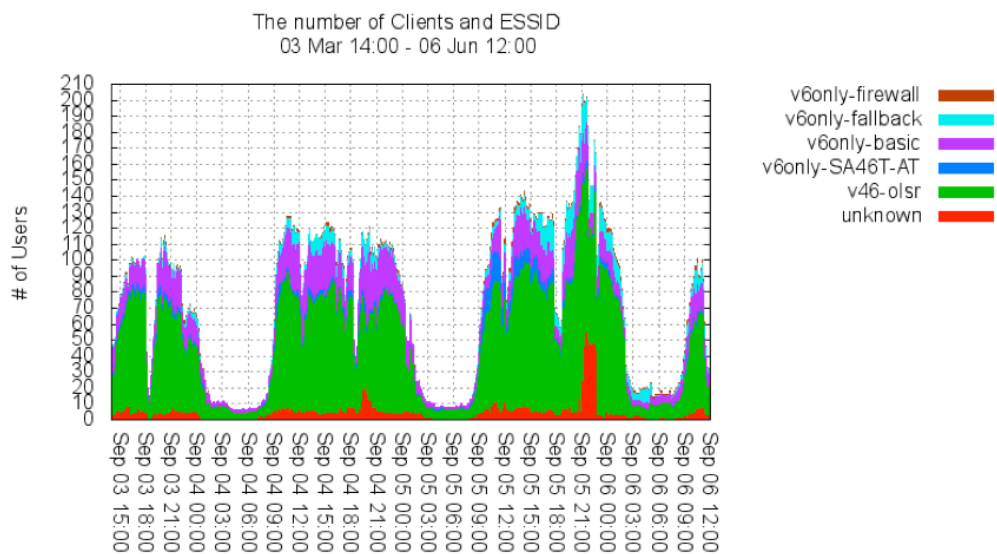


図 18: 合宿期間中の各 ESSID へのアソシエーション数

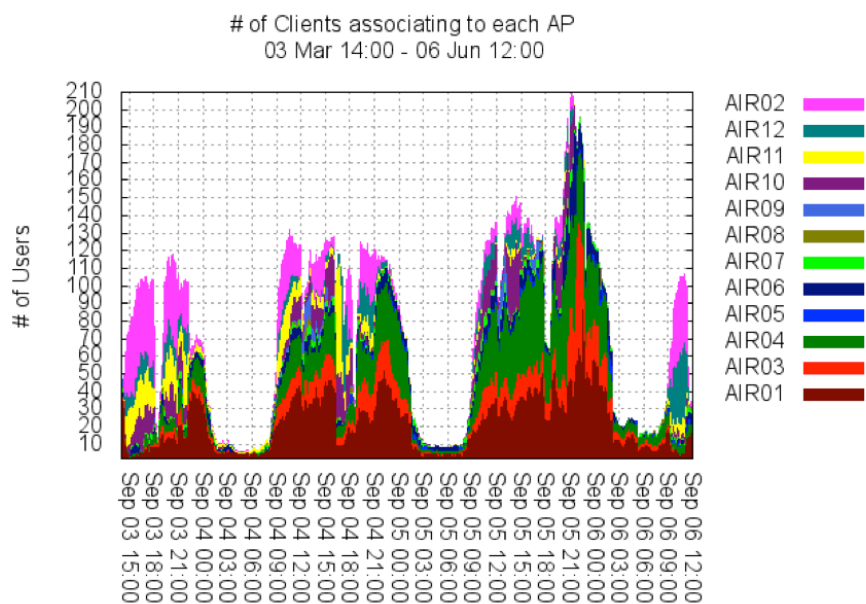
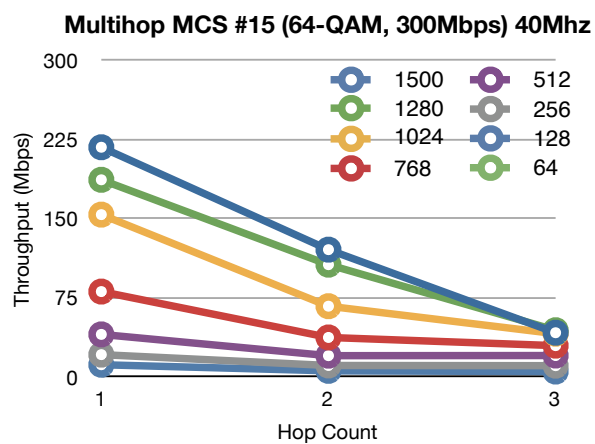
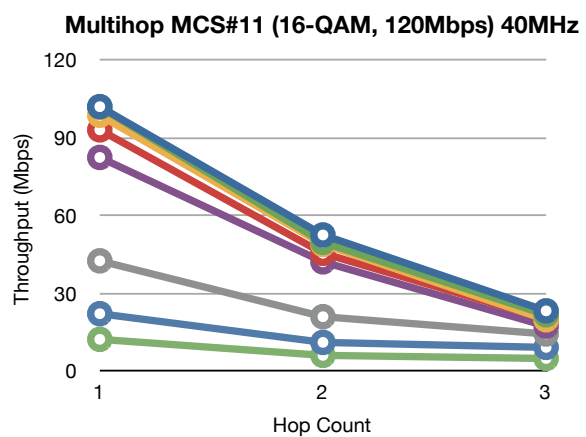


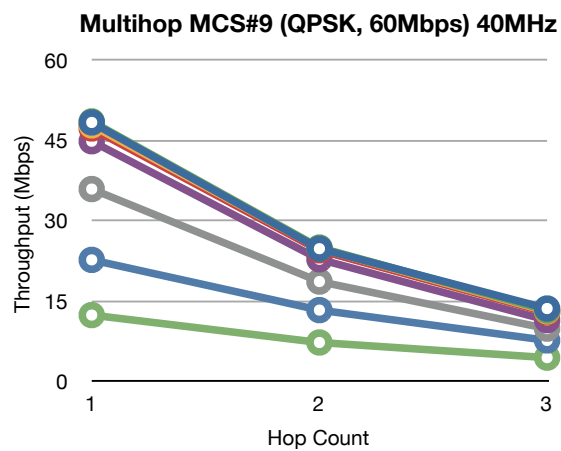
図 19: 合宿期間中の各 AP へのアソシエーション数



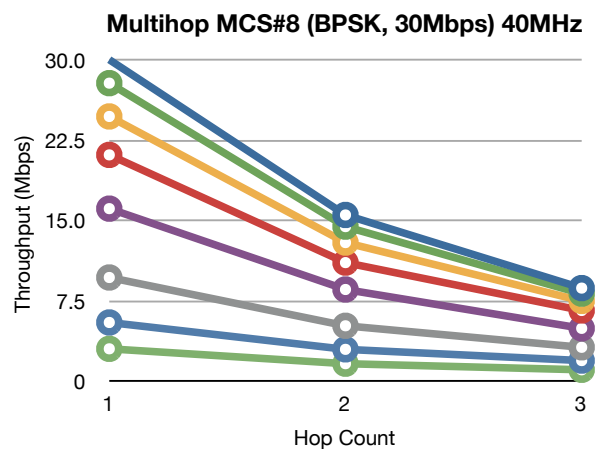
(a) MCS Index 15 (64-QAM, 300Mbps)



(b) MCS Index 11 (16-QAM, 120Mbps)



(c) MCS Index 9 (QPSK, 60Mbps)



(d) MCS Index 8 (BPSK, 30Mbps)

図 22: マルチホップでの実効帯域

## 5 IEEE802.11s メッシュネットワーク運用

2012 年 9 月の WIDE 合宿研究会では、Cisco 社の Layer 2 メッシュネットワークに加え、IEEE802.11s メッシュネットワークの運用実験も実施した。2011 年 7 月に標準化作業が完了した本仕様は、まだ十分にこなれた製品が存在しないが、比較的新しい OpenWRT では一部利用可能になっている。

合宿では、会場全体を 2 つのエリアに分割し、それぞれで異なる 802.11s メッシュネットワークを運用した。

## 6 OpenWRT 勉強会

Wireless Internet ワーキンググループでは、容易に手に入れられる研究素材として OpenWRT[4] ベースの無線ルータを活用する方向で活動している。OpenWRT は組み込み Linux に分類される Linux ディストリビューションのひとつで、数多くの家庭用ブロードバンドルータに移植されている。本ワーキンググループでは、国内で入手しやすく、かつ高性能なバッファローの WZR-300 シリーズ<sup>1</sup> を研究基盤として採用することにした。

ワーキンググループメンバーが OpenWRT の使い方、再構成方法に慣れるという目的と、グループ内で OpenWRT 関連技術の情報を共有する勉強会を開催した。

- 2012 年 6 月 14 日 (木) 9:00-17:00 @ 東京大学  
各自で購入した WZR-300 を持ち寄り、OpenWRT ファームウェアへの入れ替えおよび開発環境の整備を実施した。勉強会で得られた知見は Wireless Internet ワーキンググループの wiki ページにて WIDE メンバー向けに公開している。詳しくは <https://wi.iijlab.net/trac/wi-members/> を参照して欲しい。
- 2012 年 8 月 6 日 (月) 9:00-17:00 @ 東京大学  
前回と同様の OpenWRT ファームウェアインストールおよび開発環境の整備に加え、bonding インターフェースを用いて複数の異なる無線バンドを束ねる方法の模索、また、アクセスポイントの負荷テストのために、仮想インターフェースを用い

て多数のアソシエーションを実行するソフトウェアの開発などを実施した。

## 7 OpenWRT ワークショップ

不定期で実施した OpenWRT 勉強会に加え、9 月の合宿研究会においてワークショップを開催した。期間は、合宿研究会期間のうち 9 月 4 日、5 日の 2 日間であった。このワークショップではワーキンググループメンバーだけでなく、合宿参加者であれば誰でも参加できる形態で実施した。ワークショップの趣旨は、ワーキンググループで研究基盤と定めたバッファロー WZR-300 シリーズを持ち寄り、ワークショップ参加者全員が OpenWRT の導入手法と機能について詳しくなる事とワーキンググループと一緒に無線に取り組む仲間を増やす事であった。

ワークショップは概ね 10 名程度の参加者があり、下記の様な内容を実施した。

- OpenWRT 導入指南  
ワークショップ参加者 (のうち OpenWRT 未経験者) にたいして、OpenWRT の導入手順の説明を行い、アクセスポイントとしての動作確認までを実施した。
- OpenWRT の設定ノウハウの蓄積  
アクセスポイントへ OpenWRT をインストールすると共に、OpenWRT 独自の設定表現、有線・無線ネットワーク設定の習得とノウハウを蓄積した。
- OpenWRT 開発環境の構築  
バッファロー WZR-300 シリーズは ARM アーキテクチャで動作するため、ARM 対応の OpenWRT のビルド並びに OpenWRT 上のソフトウェアのカスタマイズに必要なクロスコンパイル環境の整備を実施した。
- OLSR ベースの無線メッシュネットワーク試作  
無線メッシュネットワーク内の端末の通信はアクセスポイント間のリンクを介してゲートウェイまでマルチホップ転送される。ゲートウェイまでの経路を決めるレイヤ 3 のルーティングプロトコルである主要な OLSR を用いて、無線メッシュネットワークの試作を行った。

<sup>1</sup><http://buffalo.jp/product/wireless-lan/ap/wzr-300hp/>

- IEEE 802.11s ベースの無線メッシュネットワークの構築・実験

レイヤ 3 の OLSR に対して、レイヤ 2 で無線メッシュネットワークを構成する IEEE802.11s が標準化されている。IEEE802.11s は OpenWRT へ組み込まれており、合宿ネットワークの一部として実験を行った。詳細は 5 節を参照されたい。

- OpenWRT のネットワークブート環境の構築

アクセスポイントへの OpenWRT インストールは手作業であるため、同一イメージを用いた実験には不向きである。そこで、10 台のアクセスポイントをネットワークブートさせる環境を構築した。

- OpenWRT の仮想インタフェースと無線クライアント機能による assoc ベンチマーク

バッファロー WZR-300 シリーズでは 11a/11g の 2 つの無線インタフェースの同時利用ができるが、ソフトウェア的にさらに仮想の無線インタフェースを増やすことができる。これを利用して、1 台のアクセスポイントに対して 20 台のクライアント端末を装った無線アソシエーションの確立を行い、合宿ネットワークの接続数ベンチマークを実施した。

## 8 まとめ

本ワーキンググループは、東日本大震災での大規模な情報網断絶を教訓とし、より柔軟かつ堅牢なインターネット構築技術を確立することを目指して設立された。2012 年度は、末端のネットワークをメッシュネットワーク化し、より広いエリアに無線ネットワークを延伸できるような環境構築技術を目指して活動した。今後、高性能、かつ安定したメッシュネットワークの構築運用技術を研究していくとともに、L2 層との連携、また上位層との連携を含む、無線の特性を活用した無線インターネットアーキテクチャの完成に向けて技術開発を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] 植原啓介, 大江将史. 震災復興インターネット. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 9, pp. 1068–1069, September 2011.
- [2] Thomas Heide Clausen, Christopher M. Dearlove, Philippe Jacquet, and Ulrich Herberg. *The Optimized Link-State Routing Protocol version 2*. IETF, March 2012. draft-ietf-manet-olsrv2-14.
- [3] Pat R. Calhoun (editor), Michael P. Montemurro (editor), and Dorothy Stanley (editor). *Control And Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP) Protocol Specification*. IETF, March 2009. RFC5415.
- [4] OpenWRT developers. OpenWRT. <http://openwrt.org/>.