

# WIDE 合宿研究会での WiFi メッシュネットワークサービス運用 実験を通じた課題定義

島 慶一\*

坂根 昌一†

妙中 雄三‡

## 概要

2012年3月5日から8日にかけて開催された WIDE プロジェクトの合宿研究会において、Layer 2 と Layer 3 の WiFi メッシュネットワークを研究会参加者のインターネット接続用インフラとして提供した。本論文では、構築した WiFi メッシュネットワークの設定の解説と性能計測の結果を速報し、実用的な WiFi メッシュネットワーク構築のための研究課題を定義する。

## Abstract

Layer 2 and layer 3 WiFi-based mesh networks were provided as a commodity network infrastructure for participants of the WIDE 2012 Spring Camp meeting held from 5th to 8th March 2012. This document reports the summary of the network configuration information and brief performance measurement results, and proposes research and development items to realize a practical WiFi mesh network.

## 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 運用の概要

WIDE プロジェクト<sup>1</sup>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を試みた。

\*株式会社 IJ インベーションインスティテュート

†シスコシステムズ合同会社

‡東京大学

<sup>1</sup><http://www.wide.ad.jp/>

### 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。

### 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。

### 5 ネットワーク設定

#### 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。

#### 5.2 Layer 3 WiFi メッシュ

Layer 3 WiFi 無線メッシュは NTPPC コミュニケーションズ提供による OpenWRT 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)

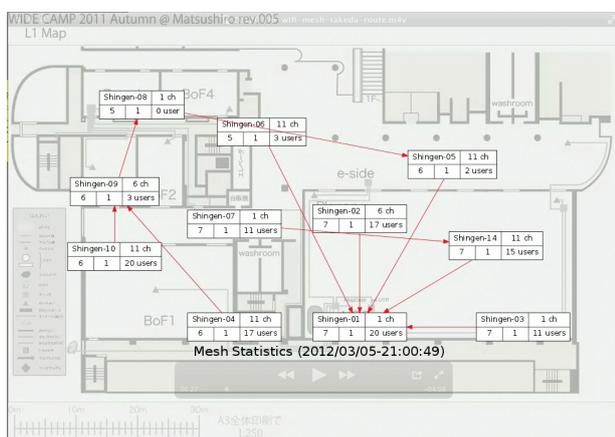


図 1: 3月5日 21:00 時点での Layer 2 メッシュネットワークトポロジ

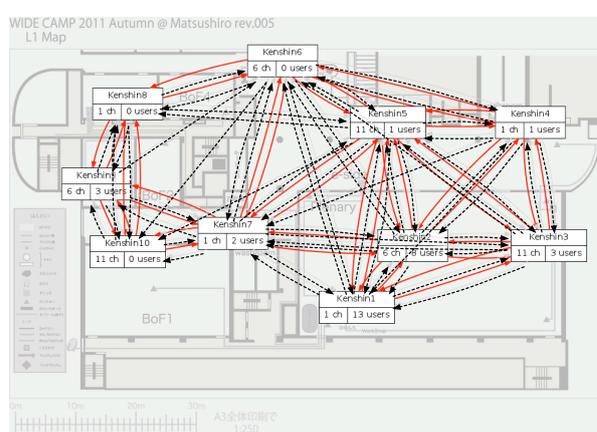


図 2: 3月6日 12:00 時点での Layer 3 メッシュネットワークトポロジ

## 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

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過して転送される。

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はないが、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。

## 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

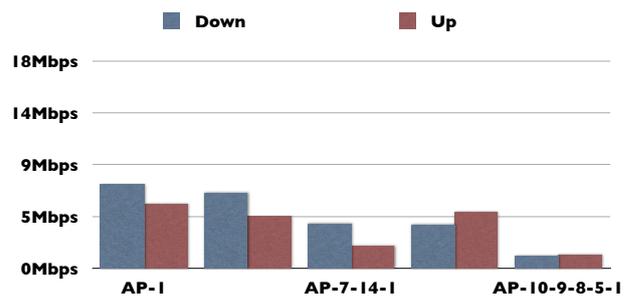


図 3: Layer 2 メッシュネットワーク帯域測定 [バックホール帯域: 20MHz] [経路: 端末 1⇔AP-1⇔メッシュ⇔AP-X⇔端末 2)

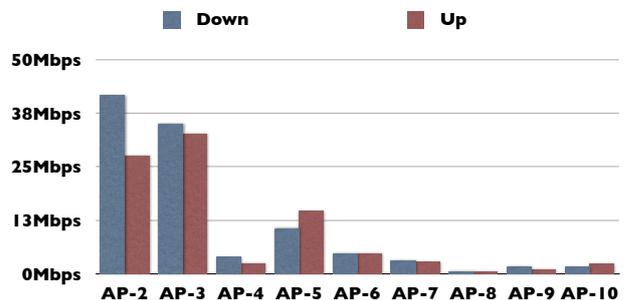


図 4: Layer 2 メッシュネットワーク帯域測定 [バックホール帯域: 40MHz] [経路: 端末 1⇔AP-1⇔メッシュ⇔AP-X⇔端末 2)

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、バックホールチャンネルの帯域を 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>

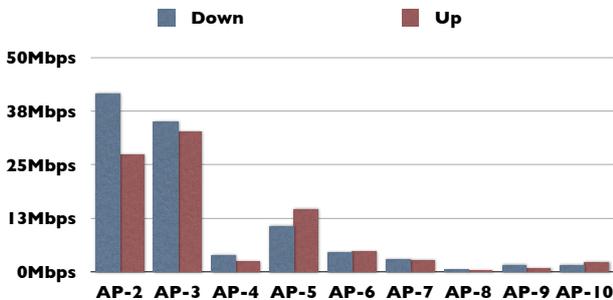


図 5: Layer 3 メッシュネットワーク帯域測定 [経路: AP-1⇔メッシュ⇔AP-X]

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。

## 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の大きさと予想され、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

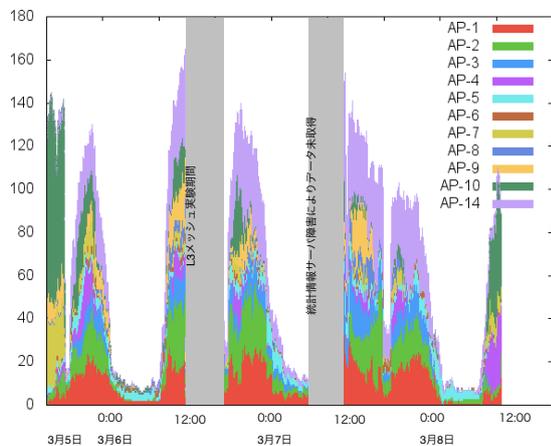


図 6: Layer 2 メッシュネットワーク収容ユーザーの推移

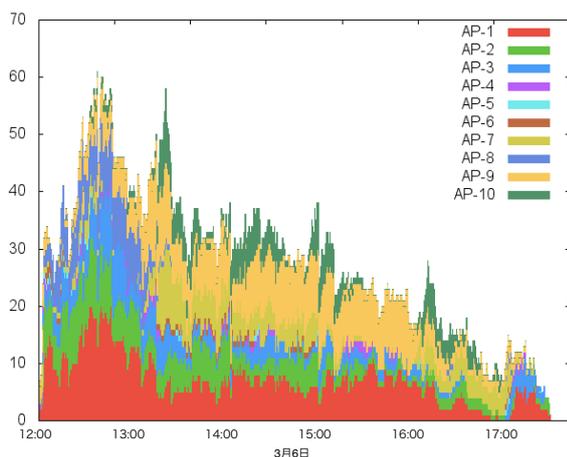


図 7: Layer 3 メッシュネットワーク収容ユーザーの推移

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られる。

- 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

## 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、8章に示した課題の研究を進めていく予定である。

## 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。

## 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, 2011 年 9 月.
- [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.

WIDE CAMP 2012 Spring @ Matsushiro rev.006  
 LOL1 Map

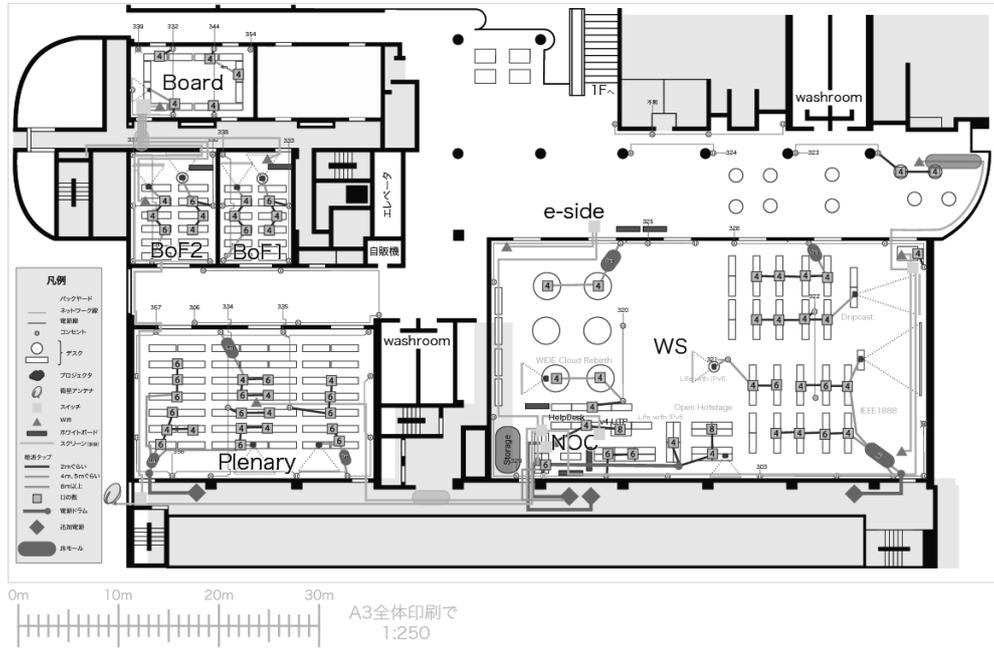


図 8: 会議室の位置関係 (会場全体の広さは 80m × 50m)

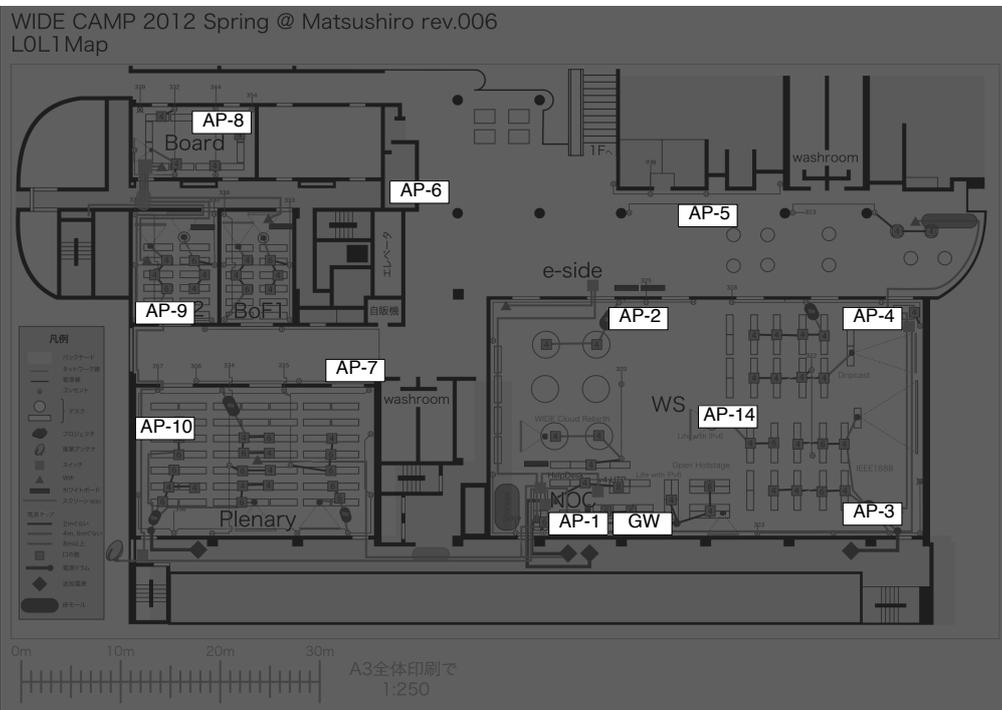


図 9: Layer 2 WiFi メッシュ構築時の初期アクセスポイント配置図

