

WDS を用いた無線 LAN 通信における TCP 帯域と ネットワークトポロジの関係

Relationship between network topology and TCP bandwidth on WDS networks

久保田真一郎[†] 下園 幸一[†] 宝崎洋一郎^{††} 升屋 正人[†]

Shin-Ichiro KUBOTA[†], Koichi SHIMOZONO[†], Youichiro HOZAKI^{††}, Masato MASUYA[†]

[†]{kubota,simozono,masatom}@cc.kagoshima-u.ac.jp, ^{††}hozaki@biocomputing.cc

[†] 鹿児島大学 学術情報基盤センター

^{††} 鹿児島大学大学院 理工学研究科

[†] Computing Communications Center, Kagoshima University

^{††} Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

概要 有線 LAN によるネットワーク構築が困難な地域において無線局免許を必要としない IEEE802.11b または IEEE802.11g に準拠した無線 LAN 技術は有効である。特にアクセスポイント間の無線通信を可能にする WDS(Wireless Distribution System) 技術により、広域にわたる無線ネットワークを構築できる。この技術を用いてわれわれは鹿児島県十島村にある平島においてすべての住民世帯を覆う島内 LAN を構築した。また、主要箇所において iperf コマンドを用いた TCP 帯域測定を行った。本研究では、ネットワークトポロジとアクセスポイント間の TCP 帯域の関係について詳しく調べ、その結果をもとに平島での測定結果を評価した。

キーワード WDS, 無線 LAN, ネットワークトポロジ

1. はじめに

近年、無線 LAN 機器が身近なものとなり、常時接続環境をもつ家庭では家庭内 LAN の構築に無線 LAN 技術をしばしば用いるようになってきた。また、有線 LAN によるネットワーク整備が困難な地域においては屋外設置型の無線 LAN 機器を利用し、地域イントラネットを整備することも多い。このように無線局免許を必要としない IEEE802.11b/g に準拠した無線 LAN 技術は様々な場面で有用である。無線 LAN 技術の中でも WDS(Wireless Distribution System) 技術 [1] は各アクセスポイント間で無線 LAN 通信を可能とする技術であり、屋外で用いた場合には広域にわたって無線ネットワークを展開することができるという利点がある。

条件不利地域における地域内 LAN 構築の手段とし

て無線 LAN 技術が有用であることを示すため、われわれは外海離島である鹿児島県十島村平島において無線 LAN 技術を用いて島内 LAN を構築している。ここでは、WDS 技術を利用することですべての住民世帯をカバーし、集落内の屋外で無線 LAN 通信が可能であることを確認した。また、主要箇所において TCP 帯域^(注1) の測定を行っている [2], [3]。

無線ネットワークの TCP 帯域には、通信を行うアクセスポイント間の距離や障害物の有無が影響する。この TCP 帯域に影響を与える距離や障害物などの要因をここでは環境要因と呼ぶことにする。一方、平島内主要箇所での TCP 帯域測定結果より WDS 技術を用いた無線ネットワークにおいては、アクセスポ

(注1)：ここでの TCP 帯域とは測定を行うネットワークバス上の TCP 通信に関する最小容量のことを指しており、本文中に表れる「TCP 帯域」についても、ことわりがない限りその意味で用いている。

イントをノードとするトポロジと TCP 帯域との間に強い相関があることが明らかになった。この TCP 帯域に影響を与えるネットワークトポロジをここでは構造要因と呼ぶことにする。環境要因のうち障害物に関わるものは、建物の建築や樹木の伐採などによっても変化するため不確定であるが、構造要因はネットワークトポロジのグラフにより決定できるため、その影響を確定することができる。このため構造要因を定量的に分析することができれば、環境要因との切り分けを確実に行うことができ、無線ネットワーク構築に際しての指針とすることができる。

われわれは、アクセスポイント間の TCP 帯域に対してネットワークトポロジ、すなわち、構造要因がどのように影響するのかを調べるため、いくつかのモデルを構築して WDS を用いた無線 LAN 通信における TCP 帯域とネットワークトポロジとの関係を評価した。この結果を用いることで、WDS 通信区間の TCP 帯域の変化に対して環境要因または構造要因のいずれが影響しているかを明らかにすることができる。本方法の有用性を示すため、平島に構築した島内 LAN における TCP 帯域測定結果の解析を行い、構造要因の影響と環境要因の影響をそれぞれ明らかにした。

文献 [4], [5] のように WDS により無線通信を行う複数のアクセスポイントの配置や通信に関する研究報告は行われているが、WDS により無線ネットワークを構築し、ネットワークトポロジの影響を調べた研究はこれまでになく、本研究は WDS を用いたネットワーク基盤構築に有用であり、他に類のない研究である。

2. WDS による無線 LAN 通信とその TCP 帯域

一般に無線 LAN アクセスポイントはバックボーンとなる有線インフラに接続して利用されるが、WDS 機能を用いて構築するネットワークはそのノードが無線 LAN アクセスポイントであり、ノード間の通信が無線 LAN 通信となる。WDS による無線 LAN 通信はそのフレームに送信機アドレス (TA), 送信元アドレス (SA), 受信機アドレス (RA), 宛先アドレス (DA) を含み、レイヤ 2 での制御を行う通信である (図 1)。

このため、図 2 のようにループで構成されるネッ

トワークにおいては、ネットワークに接続された機器からブロードキャストの送信が発生するとブロードキャストフレームが大量に送信されることになり、通信に障害が発生する。これは一般にブロードキャストストームと呼ばれる現象であるが、有線 LAN によるレイヤ 2 ネットワークと同様、WDS による無線 LAN ネットワークでも発生する。

ブロードキャストストームを回避するため、WDS による無線ネットワークの構築に際してはアクセスポイントから送信された無線 LAN パケットが同じアクセスポイントに戻らないよう、ネットワークトポロジを考えなければならない。この条件を満たすネットワークトポロジは無線 LAN アクセスポイントを数珠つなぎに接続するカスケード接続タイプ (図 3 左) と、一つの無線 LAN アクセスポイントに複数のアクセスポイントが接続するスター型接続タイプ (図 3 右), およびカスケード接続タイプとスター型接続タイプを組み合わせたもののみとなる。

そこで、カスケード接続タイプとスター型接続タ



図 1 WDS による無線 LAN 通信フレーム概略図

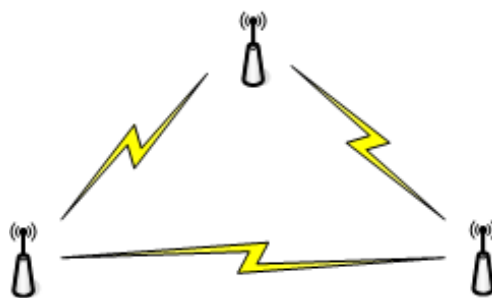


図 2 WDS 通信による 3 つのノードから構成されるループを含むネットワーク経路

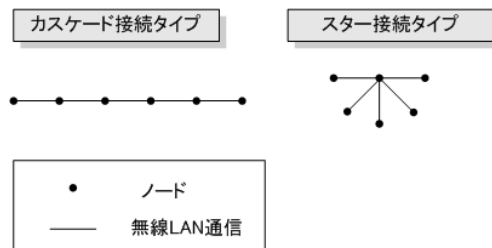


図 3 カスケード接続タイプ (左) とスター接続タイプ (右)

IP、それぞれについて接続するアクセスポイントの数と TCP 帯域の関係の理論式を提案するとともに、実際にアクセスポイントを配置して TCP 帯域の測定を行い、式が正しいことを検証することにした。カスケード接続タイプとスター型接続タイプを組み合わせたネットワークポロジにおける TCP 帯域については、双方の特性から考察した結果を後述する。

測定には表 2 のアクセスポイント、TCP 帯域測定用 PC(表 3) およびスイッチングハブ(表 4) を用いた。平島における TCP 帯域の実測結果と比較できるように、アクセスポイントは平島に設置したものと同一の機種を用い、TCP 帯域測定には iperf コマンドを用いた。iperf コマンドはサーバクライアント型で TCP 帯域の測定を行うため、その測定に 2 台の PC が必要となる。iperf コマンドを実行するとクライアント PC からサーバ PC ヘデータが TCP を使って転送され、1 秒間で転送されたデータ量をもとにその TCP 帯域が表示される。なお、WDS による無線ネットワークであるため、すべてのアクセスポイントは同一の ESSID を用い、通信するチャンネルも同じにして測定を行った。アクセスポイント間の距離を 1 メートル、2 メートル、4 メートルとしたときの iperf による TCP 帯域の測定結果の分散(表 1)より、2 メートルのときに TCP 帯域測定値のばらつきが少なく、通信が安定している。以下の実験ではアクセスポイント間の距離を 2 メートルとした。

表 1 2つのアクセスポイント間距離に対する iperf による TCP 帯域測定結果の分散

	1メートル	2メートル	4メートル
分散	4.792316	0.070516	0.113084

2.1 カスケード接続タイプ



図 4 カスケード接続タイプ：ホップ数が2のときの実験概略図

IEEE802.11b/g においては、同じ無線チャンネルを用いる通信の衝突を防ぐため、通信が同時に行われないよう CSMA/CA プロトコルにより送信が制御されている。WDS においてはすべてのアクセスポイ

表 2 モデルおよび平島で用いたアクセスポイント

メーカー・型番	Buffalo・WLA2-G54C
規格	IEEE802.11g/IEEE802.11b 準拠 ARIB STD-T66
伝送方式	直接拡散型スペクトラム拡散 (DS-SS 方式)、 直交波周波数分割多重変調 (OFDM 方式)、単信(半二重)
周波数範囲	2,412~2,472MHz(13ch)
データ転送速度	6 / 9 / 12 / 18 / 24 / 36 / 48 / 54Mbps(IEEE802.11g) 1 / 2 / 5.5 / 11Mbps (IEEE802.11b)
無線 LAN 高速化技術	フレームバースト対応
アンテナ	ダイバシティ方式(内蔵)
リピータ機能(WDS)	対応

表 3 モデルおよび平島で用いた TCP 帯域測定用 PC

メーカー・型番	パソコン工房・M55V
OS	Microsoft Windows XP Professional SP2
CPU	Intel Pentium M 740 1.73GHz
L2 キャッシュ	2MB
チップセット	VIA PN800
FSB/メモリバス	533 MHz/ 200 MHz
メモリ	512MB (うち 64MB をビデオメモリとして利用)
ハードディスク	40 GB(Ultra ATA 100, 5400rpm)
LAN	10/100BASE-TX FastEthernet

ントが同じ無線チャンネルを用いるため、ある無線 LAN 区間が通信を行っている時には他の無線 LAN 区間の通信は行われないことになる。また、同じ無線 LAN 区間内に複数の系統^(注2)の通信が存在する場合も、一方が通信を行っている時には他方の通信は行われない。このため、各区間毎の TCP 帯域の合計は 1 区間に 1 系統の通信だけが存在した場合の TCP 帯域(以下、最大 TCP 帯域と呼ぶ)と等しくなる。

まずは、1 系統の通信のみが行われている場合に、この考え方が正しいかどうかを評価する。図 4 のようにネットワークの始点と終点のアクセスポイントに測定用 PC を有線 LAN で接続し、その間に中継するアクセスポイントを 1 台から 5 台まで配置し、カ

(注2)：ここで「系統」とはルートノードとエンドノードを結ぶネットワークパス上での通信路をさしてあり、そのネットワークポロジとは無関係に定義される。また、本文中の「1 系統」、「2 系統」はそれぞれ「1つの系統」、「2つの系統」のように系統の数を表し、「系統 1」、「系統 2」は「1 番目の系統」、「2 番目の系統」とそれぞれの系統の呼称を表している。

表 4 モデルで用いたスイッチングハブ

メーカー・型番	ブラネックス・FX-05IS
アクセス方式	CSMA/CD
対応規格	IEEE802.3 10Base-T、 IEEE802.3u 100Base-TX
フローコントロール	全二重時 IEEE802.3x、 半二重時バックプレッシャー
スイッチング方式	ストア&フォワード
内部バス速度	1Gbps
通信速度	100Mbps (100BASE-TX)、 10Mbps (10BASE-T)
MAC アドレス	1000
対応メディア	UTP/STP ケーブル 100Mbps：カテゴリ 5 以上 10Mbps：カテゴリ 3 以上
ポート数	10/100BASE-TX × 5 (全ポート Autonegotiation・ AutoMDI/MDI-X 対応)

スケード接続タイプのネットワークモデルを構築した。構築した各モデルに対して iperf コマンドを用いて両端での TCP 帯域の測定を行った。測定では TCP window size を 16kByte とし、送信時間は 100 秒に設定した。

ホップ数に対する TCP 帯域の測定結果を表 5 に、 x 軸をホップ数、 y 軸を TCP 帯域の平均値としてプロットした結果を図 5 に示す。図 5 の曲線は、 $y = 26.371x^{-1}$ 、その相関係数は 0.999879 となった。解析手法については付録に示した。用いた機器で実現できる無線 LAN 区間の最大 TCP 帯域は 26.371 Mbps であり、カスケード接続数が増えるに従って、2分の1、3分の1、4分の1となっている。各区間の TCP 帯域の合計は最大 TCP 帯域に等しいと言える。

次に、複数の系統の無線 LAN 通信が行われている場合を評価するため、2系統の通信が存在する図 6

表 5 カスケード接続タイプのときの TCP 帯域測定結果とそのホップ数

ホップ数	B_{hop} (Mbps)
1	26.18
2	13.43
3	8.94
4	6.57
5	5.30
6	4.49

ただし、 B_{hop} : iperf によって測定された TCP 帯域の平均

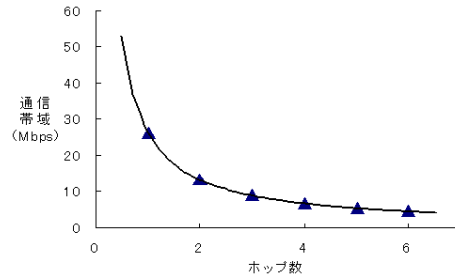


図 5 ホップ数と TCP 帯域の相関

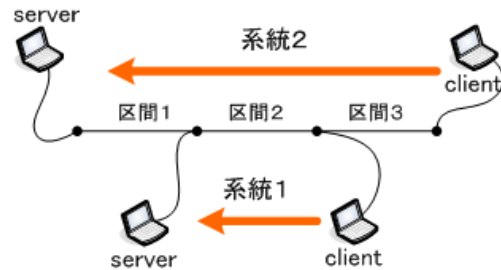


図 6 2系統の通信がある場合のグラフ

の条件で測定した。図 6 において矢印の向きは測定時にデータが転送される向きを表している。実験では各系統が同時に無線 LAN 通信する。TCP 帯域を測定する系統以外の系統の通信を iperf コマンドにより発生させた。TCP window size は 16kByte、送信時間は測定の 100 秒より長く 200 秒に設定した。系統 1 の測定手順について以下に示す。

- (1) 系統 2 において iperf コマンドを実行 (トラフィックの発生)
- (2) トラフィック発生後、30 秒ほどして、系統 1 の TCP 帯域測定を開始

(3) TCP 帯域測定終了後、トラフィックを停止
実験は系統 1 と系統 2 に対してそれぞれ行った。この場合、区間 1 には 1 系統、区間 2 には 2 系統、区間 3 には 1 系統の通信が存在することになる。各系統には優先度は設定されていないため、WDS で構成されるネットワーク内において、全体の TCP 帯域が均等に 2 つの系統に割り当てられる。区間 2 のみの系統 1 に 2 分の 1、区間 1、2、3 の系統 2 に 2 分の 1 の TCP 帯域が割り当てられることになる。このため、系統 1 の理論的な TCP 帯域は最大 TCP 帯域の 2 分の 1 ($1/2 \times 1/1$)、系統 2 の理論的な TCP 帯域は最大 TCP 帯域の 6 分の 1 ($1/2 \times 1/3$) となる。実際に測定したところ、系統 1 は 13.21Mbps、系統

2は5.28Mbpsとなった。各区間のTCP帯域の合計は最大TCP帯域に等しいと言える。

2.2 スター接続タイプ

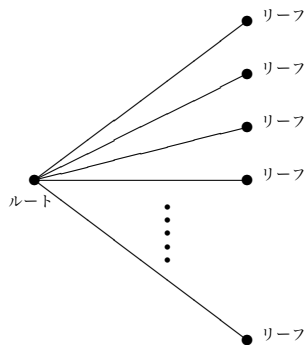


図7 リーフアクセスポイントの数が M のスター接続タイプ

スター型接続タイプの場合、図7のように木構造の根となるアクセスポイント（ルートアクセスポイントと呼ぶ）に対して、木構造の葉となるアクセスポイント（リーフアクセスポイントと呼ぶ）が複数台接続される。各リーフアクセスポイントはすべてルートアクセスポイントとのみWDSにより無線LAN接続を行う。このとき、ルートアクセスポイントとリーフアクセスポイントの内の1台とのTCP帯域は、他のリーフアクセスポイントとルートアクセスポイントの間に通信が行われているかどうかで異なる。これは各区間のTCP帯域の合計が最大TCP帯域に等しくなるためである。

ルートアクセスポイントに複数のリーフアクセスポイントが接続しているものの、注目するリーフアクセスポイントとルートアクセスポイント間以外に通信が行われていない場合は、これら2台のアクセスポイントのみが接続している場合とTCP帯域が等しいはずである。まずは、このことを検証した。

TCP帯域測定のためにルートアクセスポイントに有線LANで測定用PCを接続し、他方の測定用PCはリーフアクセスポイントの一つに有線LANで接続する。リーフアクセスポイントの数が3つのときの実験の概略図を図8に示す。リーフアクセスポイントの数を変えて、カスケード接続タイプのときと同様にiperfコマンドによりTCP帯域測定を行った。その結果を表6に示す。その結果、TCP帯域とリーフアクセスポイントの数の間に相関は見られず、カ

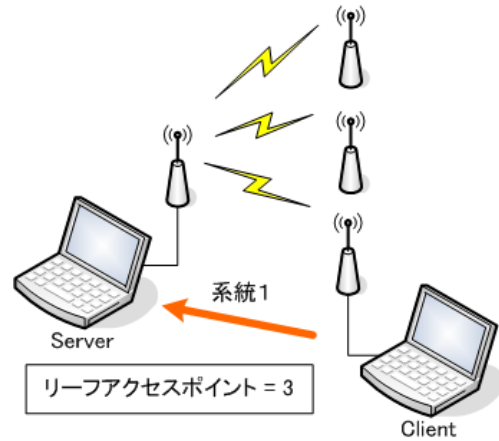


図8 スター接続タイプ：リーフアクセスポイントの数が3のときの実験概略図

スケード接続タイプにおけるホップ数 $N = 1$ の場合、すなわち、2台のアクセスポイントのみが接続している場合のTCP帯域とほぼ等しい値が常に得られた。このことから、他のリーフアクセスポイントからの通信がない場合は、その存在を無視しても構わないと言ってよい。

これをカスケード接続の場合に当てはめて考えると、通信が発生する区間以外にカスケード接続している無線LANアクセスポイントが存在していても、無視できることになる。

表6 リーフアクセスポイントの数とTCP帯域

リーフアクセスポイントの数	B_{AVE} (Mbps)
1	26.2
2	25.4
3	25.1
4	23.0
5	24.8
6	25.3

B_{AVE} : iperf によって測定されたTCP帯域の平均

次に、すべてのリーフアクセスポイントからルートアクセスポイント向けの通信がある場合のTCP帯域を考える。リーフアクセスポイントの数が系統の数と一致し、すべての系統が1区間の通信であることから、各区間のTCP帯域は最大TCP帯域をリーフアクセスポイントの数で除した値となる。

このことを確認するため、すべての系統で通信を行い、TCP帯域の測定を行った。TCP帯域を測定する系統以外の系統の通信をiperfコマンドにより発生させた。TCP window sizeは16kByte、送信時間

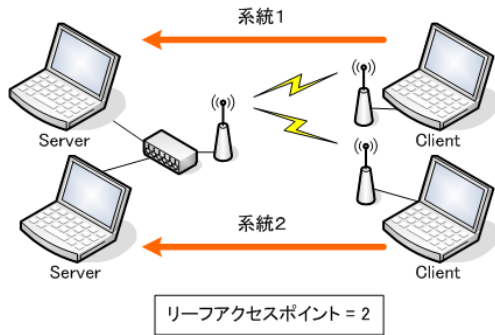


図9 他の通信がある場合のスター接続タイプ：リーフアクセスポイントの数が2のときの実験概略図

表7 他の通信がある場合のリーフアクセスポイントの数とTCP帯域

リーフアクセスポイントの数	B_{star} (Mbps)
1	26.18
2	14.38
3	9.25

B_{star} : iperf によって測定された TCP 帯域の平均

は測定の100秒より長く200秒に設定した。これは、測定開始よりも前に通信を発生させ、その環境下でのTCP帯域測定を行うためである。

リーフアクセスポイントが2つの場合の概略図を図9に示す。アクセスポイントの有線LANの接続ポートは1つであったため、ルートアクセスポイントと複数のリーフアクセスポイントの間でiperfによる通信を行うためにルートアクセスポイントにスイッチングハブを接続し、スイッチングハブに測定用PCおよび通信発生用PCを有線LANで接続する。他方の測定用PCおよび通信発生用PCはリーフアクセスポイントにそれぞれ有線LANで接続する。リーフアクセスポイントの数が1, 2, 3の場合のTCP帯域の測定結果を表7に示す。通信を行っているリーフアクセスポイントの数が増えるに従って、2分の1, 3分の1となっている。このことから各区間のTCP帯域の合計は最大TCP帯域に等しいと言える。

以上のことより、WDSにより無線LAN接続したアクセスポイント間のTCP帯域は、一区間あたりの最大TCP帯域を、通信を行っている系統の数ならびに区間の数で除した値となることが明らかとなった。これはカスケード型接続タイプ、スター型接続タイプ、いずれの場合にも適用でき、カスケード型接続タイプとスター型接続タイプを組み合わせたネットワークポロジにおいても適用できる。

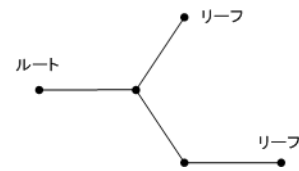


図10 複合パターン1

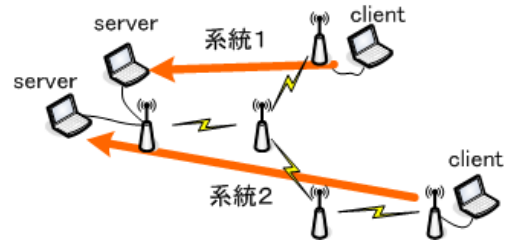


図11 複合パターン1の実験概略図

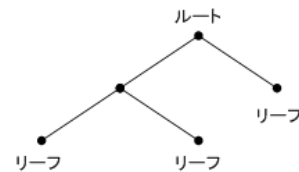


図12 複合パターン2

カスケード型接続タイプとスター型接続タイプを組み合わせたネットワークポロジにおいて、複数の系統の通信がある場合に各区間のTCP帯域の合計が最大TCP帯域に等しいことを示すため、図10のネットワークポロジで測定を行った。図11はその実験概略図であり、各々の系統の矢印の向きは測定時にデータが転送される向きを表している。

図10では2系統の通信が存在するため、各系統に最大TCP帯域の2分の1のTCP帯域が与えられる。システム1には2区間、システム2には3区間の無線LAN区間があるため、システム1のTCP帯域は最大TCP帯域の4分の1 ($1/2 \times 1/2$)、システム2のTCP帯域は最大TCP帯域の6分の1 ($1/2 \times 1/3$)のTCP帯域となるはずである。実験を各系統に対して行った。一方はシステム2において無線LAN通信を発生させ、その環境下でシステム1のTCP帯域測定を行い、他方はシステム1において無線LAN通信を発生させ、その環境下でシステム2のTCP帯域を測定した。その結果、システム1は6.92 Mbps、システム2は4.91 Mbpsと予想通りの結果となった。

また、図12のようにルートアクセスポイントに対して3つの系統に同時に通信がある場合のネット

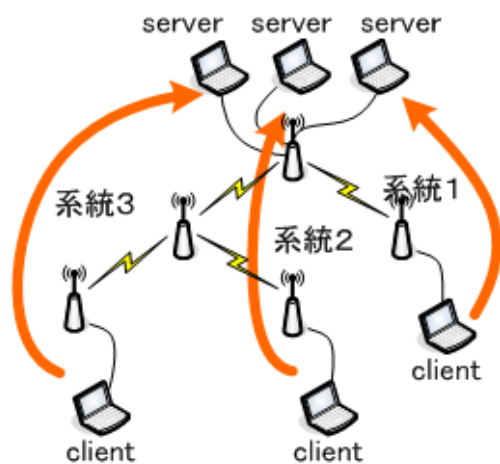


図 13 複合パターン 2 の実験概略図

ワークトポロジでも測定を行った。図 13 はその実験概略図であり、各々の系統の矢印の向きは測定時にデータが転送される向きを表している。各系統には最大 TCP 帯域の 3 分の 1 の TCP 帯域が割り当てられることになるため、無線 LAN 区間が 1 区間の系統 1 は最大 TCP 帯域の 3 分の 1 ($1/3 \times 1/1$)、無線 LAN 区間が 2 区間の系統 2 は最大 TCP 帯域の 6 分の 1 ($1/3 \times 1/2$)、無線 LAN 区間が 2 区間の系統 3 は系統 2 と同じく最大 TCP 帯域の 6 分の 1 となる。実験は系統 1 の TCP 帯域測定を行うときは系統 2、系統 3 において無線 LAN 通信を発生させ、系統 2 および系統 3 の TCP 帯域測定についても他の 2 つの系統に常に無線 LAN 通信がある環境で行った。TCP 帯域測定を行うために発生する通信と他の 2 つの系統の通信と併せて同時に 3 系統の通信が発生する。測定結果は、系統 1、系統 2、系統 3 がそれぞれ 9.92 Mbps, 4.31 Mbps, 4.85 Mbps となり、正しいことが示された。

3. 平島における島内 LAN

ネットワークの基盤整備が困難な小規模な離島や山間部などの地理的条件が不利な地域では、基幹ネットワークの整備コストに加え、その基幹から一般家庭へ引き込む際の基幹と一般家庭の間にある基地局の設備による技術的制限、都市部から遠いといったその土地の構造による整備コストが問題となる。これらの問題のために、これら地理的条件が不利な地域では、自治体や民間の通信事業者によるブロードバンド環境が整備されずにいる。しかし、このよう

な条件が不利な地域にこそ自治体の電子申請の恩恵やインターネットを利用した特産物の販売などの積極的利用が必要なはずである。このような情報過疎地域において、自治体や民間の通信事業者に頼らず住民によるネットワーク環境 (=コミュニティ・ブロードバンド) を整備するのに必要な技術を研究開発し、その利活用を行うモデルを提案することをわれわれの「コミュニティ・ブロードバンド プロジェクト」[6], [7] は目標としている。

平島では JSAT が提供している衛星インターネットサービス [8] を基幹ネットワークとしている。衛星インターネットサービスは月額 10 万円と 1 世帯で負担するには高額であるが、コミュニティ・ブロードバンドはこの基幹ネットワークを地域内の各世帯で共有することで、基幹ネットワークの回線料を分割して負担し、各世帯が都市部なみの月額使用料でブロードバンド環境を利用可能にすることを目指している。平島の島内 LAN 環境構築はブロードバンド環境を共有するためには欠かすことのできない基盤整備である。



図 14 簡易ハウジングと屋内無線 LAN 機器

一般に屋外設置型の無線 LAN 機器は高価であるために、それらを用いた地域ネットワーク網は高コストとなる。そこでわれわれは民生品の屋内無線 LAN 機器と加工が容易な素材を利用した簡易ハウジングを組み合わせ、それらを屋外に設置することでコストを削減した。この方法であれば住民によって地域ネットワーク網を構築できると考えている。われわれは鹿児島県十島村の平島において、この方法により地域ネットワーク網を構築した [2]。民生品の無線 LAN 機器として BUFFALO 社 AirStation WLA2-G54C (表 2) を採用し、塩ビ素材の水筒 (図 14) を加工して

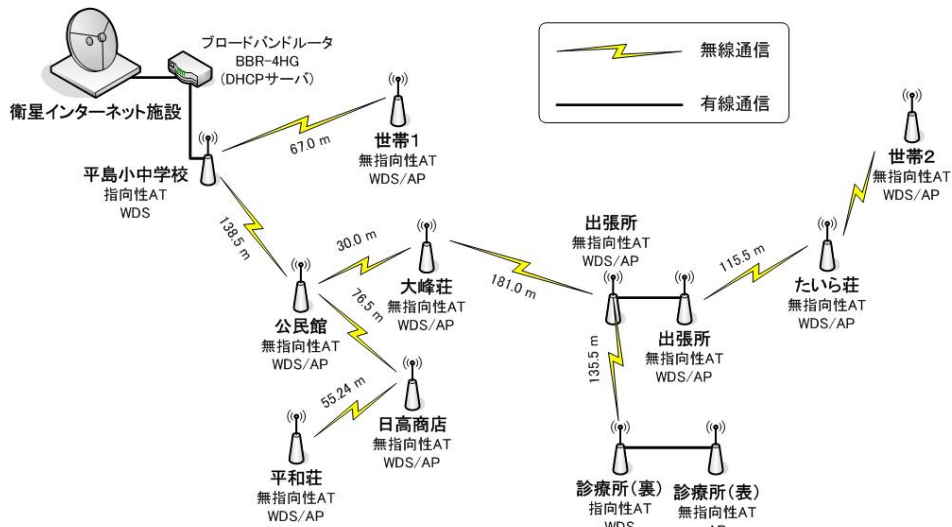


図 15 平島における島内ネットワーク網模式図

屋外設置用の簡易ハウジングとした、ネットワーク網の拠点には小中学校、公民館、出張所といった公共機関に加え、島を訪れる観光客のことを考え、民宿をその接続拠点に選んだ。また、ネットワーク網の末端部においては村営住宅や民家を接続拠点とし、島内の全世帯で通信できるよう構成した。図 15 に島内 LAN の模式図を示す。図における「指向性/無指向性 AT」は指向性または無指向性アンテナを設置したことを示し、「WDS」は WDS 機能のみを利用すること、「WDS/AP」は WDS 機能とあわせてアクセスポイントとしても利用することを示す。また、各アクセスポイント間に示す値はアクセスポイント間の距離を示す。距離の測定にはレーザー距離計 Nikon 社製「LASER 1200S」を用いた。

主要なアクセスポイントから平島小中学校に設置しているブロードバンドルータ（以下、BR）に向け、アクセスポイント付属の ping テスト機能を用いて疎通確認を行った。アクセスポイントに付属する ping

表 8 主要アクセスポイントから BR 向けの ping テスト

区 間	ホップ数	T_{reply} (ms)
世帯 1 AP→BR	1	2.16
公民館 AP→BR	1	2.33
大峰荘 AP→BR	2	3.13
日高商店 AP→BR	2	3.33
出張所 AP→BR	3	4.10
診療所裏 AP→BR	4	5.50

ただし、 T_{reply} ：応答時間の平均

表 9 主要アクセスポイントから BR 向けの iperf による TCP 帯域測定結果

区 間	ホップ数	B (Mbps)
公民館 AP→BR	1	8.87
たいら荘 AP→BR	4	4.06

ただし、 B ：iperf によって測定された TCP 帯域

表 10 主要アクセスポイントを経由して BR 向けの iperf による TCP 帯域測定結果

区 間	B (Mbps)
PC→大峰荘 AP→BR	4.91
PC→日高商店 AP→BR	1.62
PC→出張所 AP→BR	3.61
PC→たいら荘 AP→BR	3.17
PC→診療所 AP→BR	2.87

ただし、 B ：iperf によって測定された TCP 帯域

テストはデータサイズが 64 バイトで 1 度の実行により 3 回の送受信を行い、応答時間をミリ秒で表示する。表 8 に平島小中学校のアクセスポイントを基点とするホップ数および各区间における応答時間の平均を示す。

この結果からわかるようにホップ数の増加に呼応して応答時間が大きくなることがわかる。また、iperf コマンドにより TCP 帯域測定を行った結果を表 9 と表 10 に示す。これからもわかるように島内 LAN の末端部において TCP 帯域の値が小さくなっていることがわかる。この減衰の原因としては構造要因である WDS による無線 LAN 接続による影響、環境要因である通信を行うアクセスポイントの視認性による

影響，環境要因である通信を行うアクセスポイント間の距離による影響などが考えられる。

4. 考 察

鹿児島県十島村平島の島内 LAN を構築した経験とその後の TCP 帯域の測定結果から WDS による無線 LAN ネットワークにおいては TCP 帯域が減少していることが明らかとなった。その原因には距離や障害物などの環境要因とネットワークポロジによる構造要因が考えられる。無線 LAN アクセスポイントの設置に当たっては，環境要因を考慮する必要があるが，構造要因による影響との切り分けを行わないとどの程度環境要因が影響しているのか判断できない。そこで，本論文の理論を平島内 LAN に適用し，構造要因を明らかにする。

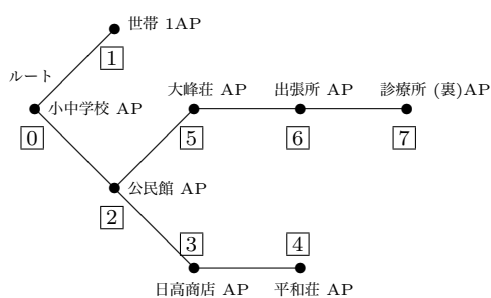


図 16 平島の島内ネットワークに対応するグラフ

まず，平島の島内ネットワークに対応する WDS による無線ネットワークのグラフを作成した (図 16)。ここでは，有線 LAN で接続している末端部を除いた単一の WDS 無線 LAN 通信区間についてのみグラフ化を行った。各ノードには便宜上番号を付した。衛星インターネット設備を設置した平島小中学校との間の理論上の TCP 帯域を求める。

各アクセスポイントに付した番号をもとに各区間の TCP 帯域を

$$B_{0n}, \quad (n = 1, \dots, 7)$$

と表す。この表記により小中学校 AP と世帯 1AP 間の TCP 帯域は B_{01} と表される。無線 LAN アクセスポイント 2 台のみからなる 1 区間の TCP 帯域を B_{max} とすると，測定区間以外で通信が行われていない場合は，

$$B_{01} = B_{max},$$

となる。他の区間について，測定区間以外の通信が

行われていない場合には，

$$B_{01} = B_{max},$$

$$B_{02} = B_{max},$$

$$B_{03} = \frac{B_{max}}{2},$$

$$B_{04} = \frac{B_{max}}{3},$$

$$B_{05} = \frac{B_{max}}{2},$$

$$B_{06} = \frac{B_{max}}{3},$$

$$B_{07} = \frac{B_{max}}{4}.$$

となる。 B_{max} にモデル測定による最大 TCP 帯域 26.18 Mbps を代入すると，

$$B_{01} = 26.18,$$

$$B_{02} = 26.18,$$

$$B_{03} = 13.09,$$

$$B_{04} = 8.73,$$

$$B_{05} = 13.09,$$

$$B_{06} = 8.73,$$

$$B_{07} = 6.55.$$

となる。各アクセスポイントに無線 LAN 接続した PC から測定する場合には，無線 LAN 区間が 1 区間追加されることになるため，

$$B_{01} = \frac{B_{max}}{2},$$

$$B_{02} = \frac{B_{max}}{2},$$

$$B_{03} = \frac{B_{max}}{3},$$

$$B_{04} = \frac{B_{max}}{4},$$

$$B_{05} = \frac{B_{max}}{3},$$

$$B_{06} = \frac{B_{max}}{4},$$

$$B_{07} = \frac{B_{max}}{5}.$$

となり， $B_{max} = 26.18$ を代入すると，

$$\begin{aligned}
B_{01} &= 13.09, \\
B_{02} &= 13.09, \\
B_{03} &= 8.73, \\
B_{04} &= 6.55, \\
B_{05} &= 8.73, \\
B_{06} &= 6.55, \\
B_{07} &= 5.24.
\end{aligned}$$

となる。平島において実測した結果を R_{0n} , ($n = 1, \dots, 7$) で表すと、

$$\begin{aligned}
R_{03} &= 1.62, \\
R_{05} &= 4.91, \\
R_{06} &= 3.61.
\end{aligned}$$

であった。他の通信が行われていない状態で無線 LAN で接続した PC より測定した値であるため、理論値はそれぞれ、8.73, 8.73, 6.55 となる。理論値に対する割合を % 表記すると、

$$\begin{aligned}
\frac{R_{03}}{B_{03}} &= 18.6\%, \\
\frac{R_{05}}{B_{05}} &= 56.2\%, \\
\frac{R_{06}}{B_{06}} &= 55.1\%.
\end{aligned}$$

と特に日高商店のアクセスポイントにおける TCP 帯域が小さい。 R_{05} および R_{06} の値をとっても、その割合は理論値に比べ 56.2% および 55.1% と環境要因の影響が大きいことを示している。日高商店 AP での TCP 帯域 B_{03} と大峰荘 AP での TCP 帯域 B_{05} はネットワーク内での場所が等価であり、理論的 TCP 帯域は同じである。ところが、実際に測定された結果 R_{03} が大きく異なることから「公民館」のアクセスポイントと「日高商店」のアクセスポイントとの通信には大きな環境要因があると考えられる。このため、この区間について、距離や障害物などの環境要因を検討する必要がある。測定した距離の値から、日高商店は大峰荘より 2 倍以上遠いことから、距離の影響が大きいことが想定される。

また、平島内に複数の系統の通信が存在する場合、各アクセスポイントから小中学校までの TCP 帯域は系統の数で除した値となる。たとえば、平島内で測定用 PC 以外に 4 台の PC が WDS により構成さ

れた無線ネットワークを経由する通信を行っているとすると、各アクセスポイントに無線 LAN で接続した測定用 PC から小中学校に向けた通信の理論的な TCP 帯域は、他の通信が存在しない場合の値を 5 で除した値、

$$\begin{aligned}
B_{01} &= 2.62, \\
B_{02} &= 2.62, \\
B_{03} &= 1.75, \\
B_{04} &= 1.31, \\
B_{05} &= 1.75, \\
B_{06} &= 1.31, \\
B_{07} &= 1.05.
\end{aligned} \tag{1}$$

となるはずである。

5. ま と め

本研究では WDS により構成された無線ネットワークを構築し、ネットワークポロジに関する TCP 帯域について詳しく調べた。これにより構造要因の影響を考えた理論値が算定でき、その理論値と実測値との比較を行い、環境要因を評価できるようになった。実際に公民館と日高商店の区間の環境要因が大きいことがわかった。また、WDS により構築された無線ネットワーク内において複数の系統の通信がルートアクセスポイント向けに存在する場合には全体の TCP 帯域が均等にそれぞれの系統に割り当てられるため、平島内に複数の系統の通信が存在する場合、各アクセスポイントから小中学校までの TCP 帯域は系統の数で除した値となる。TCP 帯域が 1Mbps 以上であることを島内ネットワークの品質評価の基準値とすると、式 (1) より、現在の島内ネットワークは 5 台以上の PC が接続して利用する場合に、その品質は保証されない。実際には環境要因のためにこれよりも値が小さくなると予想されるが、この値が島内ネットワークの品質を表す 1 つの指標となる。今後、これらの解析結果をもとにネットワーク品質が向上するよう対策を考え、その手法について研究するとともに平島の島内無線 LAN 環境のさらなる安定運用を目指す。

謝辞 本研究は平成 18 年度戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) に採択された「条件不利地

域におけるコミュニティ・ブロードバンドの整備に関する研究」の成果の一部である。コミュニティ・ブロードバンドの整備を目指し、ともにプロジェクトとして取り組む NTT 西日本-南九州、富士通鹿児島インフォネットの関係諸氏に感謝するとともに、本事業を支援いただいた関係各位に心より感謝する。

文 献

- [1] IEEE Std. 802.11-1999: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.
- [2] 久保田真一郎, 升屋正人, 簡易ハウジングによる屋外無線 LAN 環境の構築, 火の国情報シンポジウム 2007, A-7-4, 2007.03.02, 鹿児島
- [3] 久保田真一郎, 宝崎洋一郎, 升屋正人, 小規模離島における島内 LAN 構築と WDS トポロジカルモデルによる評価, 信学技報, Vol.107, No.18, pp.13-17, 2007.
- [4] 熊野英嗣, 三谷千恵, 船曳信生, 中西透, 無線 LAN の WDS におけるアクセスポイント配置アルゴリズムの提案, 信学技報, Vol.104, No.553, pp.45-50, 2005.
- [5] 田島滋人, 船曳信生, 東野輝夫, 無線 LAN の WDS における AP 間通信へのリンクスケジューリングアルゴリズムの適用, 信学技報, Vol.105, No.195, pp.53-56, 2005.
- [6] 青木謙二, 久保田真一郎, 升屋正人, コミュニティ・ブロードバンドの整備と啓蒙・啓発活動, ITRC Technical Report No.41, pp.25-28, 2006
- [7] Community Broadband Project, <http://bbzero.jp/>
- [8] JSAT, <http://www.jsat.net/>

付 録

1. データの近似関数の導出について

ここでは本文中に導出されている近似関数について説明する。実験の測定結果に対してその測定結果の近似関数を概観することは法則性の理解を助ける。今回の測定結果はポップ数またはリーフアクセスポイントの数を変数とするべき関数になると考えられる。 b, c を係数とするべき関数は

$$y = cx^b, \quad (\text{A.1})$$

で与えられる。本文中では TCP 帯域が変数 y , ホップ数あるいはリーフアクセスポイントの数が変数 x に対応する。式 (A.1) の両辺の対数をとって

$$\ln y = \ln c + b \ln x. \quad (\text{A.2})$$

これに対して $Y \equiv \ln y, X \equiv \ln x, C \equiv \ln c$ とすると

$$Y = bX + C, \quad (\text{A.3})$$

となり、線形の関数となる。式 (A.3) はべき関数の変数 x, y に対する自然対数の値 $\ln x, \ln y$ が線形に分布することを示している。すなわち、われわれの測定結果の自然対数をとった値は線形に分布すると考えられ、プロットからの誤差が最小となる近似直線が最小二乗法により導出される。

具体的にかスケード接続タイプの場合の測定結果をもとに最小二乗法により式 (A.3) に対応する式を導出すると

$$Y = -0.9923X + 3.2723,$$

となる。この式から近似関数

$$y = 26.37193x^{-0.9923},$$

が導出される。本文中では測定値をプロットし、法則性と比較するために近似曲線の係数を用い $y = 26.371x^{-1}$ の曲線を示した。この関数が測定値をいかに近似しているかを示すために測定値と関数値との相関係数を求めた。このときの相関係数は 0.999879 であり、非常によい近似となっていることを示している。

スター接続タイプの場合の測定した TCP 帯域とリーフアクセスポイントの数との関係がべき乗近似により表されるか、直線近似で表されるかについても相関係数により比較検討が可能である。測定した TCP 帯域を y , リーフアクセスポイントの数を x として、これらが線形に分布すると仮定すると最小二乗法より近似直線の関数は

$$y = -8.465x + 33.533,$$

と求まり、測定値との相関係数は 0.975093 である。つぎに近似関数がべき関数となると仮定すると、測定した TCP 帯域の自然対数の値とリーフアクセスポイントの数の自然対数の値より式 (A.3) に対応する式を導出し、

$$Y = -0.9381X + 3.2788,$$

近似曲線の関数は

$$y = 26.5439x^{-0.9381},$$

となる。この関数値と測定値との相関係数は 0.998741 であり、直線近似よりも良い近似を示している。