

# 国内最長の海上長距離無線 LAN 通信システムにおける電波伝搬特性 Radio Propagation Characteristics of the Longest-Distance Oversea Wireless LAN System in Japan

升屋 正人\*, 青木 謙二†, 下園 幸一\*

Masato MASUYA\*, Kenji AOKI† and Koichi SHIMOZONO\*

鹿児島大学 学術情報基盤センター\*

宮崎大学 情報基盤センター†

Computing and Communications Center, Kagoshima University\*

Information Technology Center, University of Miyazaki†

無線局免許が不要な市販の IEEE802.11g 無線 LAN 装置を用いて伝送距離 47.5 km, TCP 帯域 4-8 Mbps の海上無線 LAN 通信に成功し, 無線 LAN 通信距離の日本記録を達成した. 海上長距離区間における 2.4 GHz 無線 LAN 通信システムの電波伝搬特性については十分に明らかにされていないため, この区間の伝搬特性について実測値による評価と理論的検証を行い, 受信電界強度変動の最大の要因が大気屈折率変動に伴う直接波と海面反射波の伝搬路長の差の変動であることを明らかにした.

キーワード : 2.4 GHz 帯無線 LAN, 海上伝搬, 潮位変動, K 形フェージング

We established the 47.5 kilometer IEEE802.11g wireless link between two points which was the longest distance wireless LAN system in Japan. We achieved 4-8 Mbps TCP bandwidth at the link. But there was not enough discussion of such long distance wireless link. So this study was aimed at investigating the propagation characteristics of the long-distance wireless LAN system with experimentally and theoretically. As a result, we proposed the most effective factor of receive signal strength fluctuations to be the variation of reflected wave strength associated with atmospheric refractivity fluctuations.

**Keywords** : 2.4 GHz wireless LAN, maritime propagation, tidal fluctuation, K fading

## 1. はじめに

周波数が 2,400 MHz から 2,483.5 MHz までのマイクロ波を用いる小電力データ通信システムである, IEEE802.11g に準拠した 2.4 GHz 帯無線 LAN 通信システムは, 無線局免許が不要でその用途は限定されていない. 屋内・屋外, 移動・固定, 陸上・海上・上空の別なく利用できる, 他の無線アクセスシステムに比べ安価な製品が市場に流通している. このシステムを中継系通信回線に利用することができれば, 伝送路工事が必要な光ファイバケーブルの敷設に比べ,

少ない費用・短い時間で情報通信回線を構築できる. このため, 2.4 GHz 帯無線 LAN 通信システムは, 離島や山間部など遠隔地にブロードバンド情報通信基盤を整備する方法として, また, 災害発生時の臨時の情報通信回線として最適な通信手段と考えられる.

中継系通信回線として利用するには, 伝送距離が大きくなければならない. 法規制が異なる海外では, 利得の高いアンテナと改良を加えた装置を用いることで 382 km の通信を実現した例がある<sup>1)</sup>. 一方わが国では, 無線局免許不要で利用できる無線 LAN 装置にはアンテナから放射される電波の強さ (実効輻射電力: EIRP) に制限があるほか, 改造は認められない. アンテナのみの取り替えも含め, 改造した場合は総合通信局に無線局免許を申請し, 認められなければならない. ところが, 産業・科学・医学の

\*〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-35  
1-21-35, Korimoto, Kagoshima 890-0065  
E-mail: {masatom, simozono}@cc.kagoshima-u.ac.jp  
†〒 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1  
Gakuen Kibanadai-nishi 1-1, Miyazaki 889-2192  
E-mail: aoki@cc.miyazaki-u.ac.jp

分野の様々な機器が利用している 2.4 GHz 帯では実験試験局としてしか免許されず実用化はできない。このため無線 LAN 通信システムは、数百メートル以内の室内もしくは基地局（アクセスポイント）近傍で利用することが多い。パラボラアンテナを用いるなどして長距離の伝送に対応した製品を用いた場合でも、従来は 20 km 程度までの伝送距離での利用実績しか知られていなかった。

しかし、2008年2月9日、われわれは市販の 2.4 GHz 帯無線 LAN 装置を改造することなく用いて伝送距離 47.5 km, TCP 帯域 4-8 Mbps の海上無線 LAN 通信に成功し、2.4 GHz 帯無線 LAN 通信システムによる伝送距離の日本記録を達成した<sup>2),3)</sup>。それまで 20 km を超える遠隔地に対しては、コストの高い光ファイバケーブル、もしくは免許を受けた無線局を用いるしか広帯域通信の方法がなかった。この実験の成功により、50 km 程度までの伝送距離であれば低コストで簡易に実現できる無線 LAN 通信システムを利用する道が開かれたと言える。

2008年2月の伝送実験に際しては数時間程度の接続であった。このため、長時間の接続が可能であるのか、継続的な運用に際してどのような問題があるのか、については明らかになっていなかった。また、長距離の海上区間を含む無線 LAN 通信の例はこれまで存在しておらず、伝搬特性について評価した例はない。そこで本研究では、2008年10月に改めて構築を行ったシステム<sup>4)</sup>を用い、海上長距離 2.4 GHz 帯無線 LAN 通信システムの中継系通信回線としての実用可能性の評価を行うとともに<sup>5)</sup>、測定した電波伝搬特性の解析を行い<sup>6)</sup>、通信に影響を与える要因を明らかにすることにした。

## 2. 無線 LAN 通信システムの設置

2008年10月16日、鹿児島県指宿市立山川小学校の屋上（図1）と鹿児島県三島村竹島出張所の屋上（図2）に無線 LAN 装置とパラボラアンテナをそれぞれ設置し、無線 LAN 通信システムを構築した。

GPS により測定したアンテナ設置位置の緯度、経度、高度を表1に示す。送受信点の緯度、経度に基づいて文献<sup>7)</sup>の式に基づいて2点間



図1 山川小学校屋上。樹木及び岩山の間から竹島を視認可能。



図2 竹島出張所屋上。鳥が止まりアンテナがずれることを防ぐため、結束バンドをアンテナ上部に取り付けた。

の距離を計算すると、47,470 m となる。また、GRS80 楕円体を用いて計算すると 47,475 m となる。これらのことから、達成した伝送距離を 47.5 km とした。

表1 アンテナ設置位置の緯度・経度・高度

| 場所 | 山川小学校屋上      | 竹島出張所屋上     |
|----|--------------|-------------|
| 北緯 | 31°11'52.7"  | 30°48'49.8" |
| 東経 | 130°38'12.7" | 130°25'1.9" |
| 高度 | 81 m         | 60 m        |

長距離区間の無線 LAN 装置の設置にあたり最も難しいのはパラボラアンテナの方位あわせである。近距離の場合はアンテナを相互に視認できるし、見通しが確保されていれば手鏡に太陽光を反射させて位置を伝える方法がある。しかし、47.5 km の距離では天候に恵まれない限

り、お互いを視認することができない。地図やコンパスを用いておおよその位置合わせは可能であるが、パラボラアンテナは指向性が高いため正確な位置合わせが必要である。無線 LAN 装置をアンテナに接続し、受信側の無線 LAN 装置で受信電界強度を測定しながらアンテナ方位を合わせる方法もあるが、無線 LAN ビーコンは間欠的にしか送信されないため適用が難しい。

そこで、まず電子コンパスを内蔵した GPS を用いておおよその方位を定めパラボラアンテナを設置した。次に、アマチュア無線局の免許を受けた 2.4 GHz 帯送信機をパラボラアンテナに接続して連続波を発射し、受信側パラボラアンテナに接続したスペクトラムアナライザで受信電界強度を測定しながら双方のパラボラアンテナを調整し受信電界強度が最大となる方向を定めた。使用した送信機は 2.4 GHz 帯 FM ATV 送信機（第一電波工業 TV2400-TX）および 2.4 GHz トランスバータ（マキ電機 UTV-2400BIIP）を接続した 430 MHz 帯ハンディ機（スタンダード VX-3、アイコム IC-P7）である。位置合わせは FM ATV 送信機が送信する映像信号の受信電界強度を測定することにより行い、ハンディ機からの FM 音声信号の受信電界強度は双方から電波を発射して確認を行うため補助的に用いた。離れた 2 点で送信を行うため、アマチュア無線局は山川、竹島それぞれに置いた。

パラボラアンテナの方向を確定した後に無線 LAN 装置をアンテナに接続した。使用した装置は日本無線 JRL-710AL2 である。2 台の JRL-710AL2 の接続にあたっては、1 台を無線 LAN アクセスポイント、1 台を無線 LAN クライアントとして動作させる必要があるため、山川小学校に設置の機器を無線 LAN アクセスポイント、竹島出張所に設置の機器を無線 LAN クライアントとした。パラボラアンテナはこの無線 LAN 機器との組み合わせで技術基準適合証明（工事設計認証）を受けている日本無線 NZA-666 である。受信電界強度の測定により、水平偏波のときにより高い電界強度が得られたため、水平偏波設置とした（図 1,2）。このときの半値角は垂直 6.5°、水平 9.5° である。パラボラアンテナの利得は 24 dBi、JRL-710AL2 との接続には長さ 3.5 m、減衰損失 2 dB の同

軸ケーブルを用いた。

### 3. 無線 LAN 装置の基本設定

無線 LAN 装置 JRL-710AL2 では以下の設定を行った。

**無線規格:** 相手方と規格を合わせるができる 1 対 1 の通信であるため、JRL-710AL2 で使用する無線規格は IEEE802.11b 互換モードではなく IEEE802.11g 単独のモードとした。

**チャンネル:** 両拠点において他の無線 LAN 通信が行われていないか確認したが測定されなかったため、チャンネルは 1 チャンネル（中心周波数 2,412MHz）とした。

**暗号化:** 実運用を想定し、通信の秘匿性を考慮して WPA-PSK AES による暗号化を設定した。これは JRL-710AL2 で設定可能な最高の暗号強度である。また、SSID 隠蔽機能を有効化し、任意の無線 LAN クライアントからの自動接続を拒否する設定とした。

**タイムアウト時間:** 無線パケットの応答確認のタイムアウト時間を「long」に設定した。これは長距離通信に対応させるための、JRL-710AL2 の独自機能である。

これら以外の設定は次に説明する伝送速度の設定を除き標準のままとした。

### 4. 無線 LAN 装置の伝送速度設定

一般的な IEEE802.11g 機器と同様、無線 LAN 装置 JRL-710AL2 には受信電界強度に応じて規格上の理論的な最大の伝送速度を自動的に切り替える機能がある。また、その範囲を手動で設定することもできる。伝送速度としては、1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps のいずれかが選択される。このうち、1, 2, 5.5, 11 Mbps は IEEE802.11b と互換の方式である。IEEE802.11g で規定される OFDM 変調による伝送が行われるのは 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps の伝送速度である。サブキャリアの変調方式は速度によって異なり、6, 9 Mbps では BPSK, 12, 18 Mbps では QPSK, 24, 36 Mbps では 16QAM, 48, 54 Mbps では 64QAM が規格上用いられる。サブキャリアの変調方式の違いは伝送効率の違いに等しい。しかし伝送効率

が高ければ高いほど伝送品質が低下した場合の影響が大きくなるため、ノイズが大きく伝送品質が低い環境では伝送速度を低く抑えた方が安定して通信ができることになる。

表2 伝送速度可変範囲とTCP帯域

| 可変範囲<br>(Mbps)    | 山川→竹島<br>(Mbps) | 竹島→山川<br>(Mbps) |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| 6, 12, 18         | 4.70            | 4.64            |
| 6, 12, 18, 24     | 4.85            | 5.73            |
| 6, 12, 18, 24, 36 | 5.16            | 5.94            |

最適な伝送速度を決定するため、可変範囲を6, 12, 18 Mbps, 6, 12, 18, 24 Mbps, 6, 12, 18, 24, 36 Mbpsの3通りに変え、山川小学校に設置した測定用サーバと竹島出張所に設置した測定用サーバでiperfを用いてTCPウィンドウサイズを16KBとした10秒間の測定を10回行った結果を表2に示す。サーバとして用いた機器はDELL PowerEdge T105, CPUはDual-Core Opteron 1212 (2GHz), メモリは2GB, OSはOpenBSD 4.3 (i386, シングルプロセッサカーネル)である。

最大の伝送速度を大きくすればTCP帯域も大きくなる傾向が見られるが、伝送速度の最大値を18 Mbpsから24 Mbpsに変更したときのTCP帯域の増加に比べて、最大値を24 Mbpsから36 Mbpsに変更したときのTCP帯域の増加は小さい。また、装置のStatus画面の表示では、最大伝送速度を36 Mbpsに設定した場合には送受信とも36 Mbpsで安定することは少なく、24 Mbpsまたは18 Mbpsへの頻繁な切り替えが見られた。一方、最大を24 Mbpsに設定した場合は送受信とも24 Mbpsで安定し、時折18 Mbpsへの切り替えが見られる程度であった。伝送速度が頻繁に切り替わる場合、短い時間間隔で帯域が大きく変動し通信が不安定になることが懸念されるため、最大の伝送速度を24 Mbpsに設定することとし、可変範囲を6, 12, 18, 24 Mbpsとした。OFDM変調を用いる最低伝送速度である6 Mbpsは受信電界強度低下時の通信確保のため設定した。

なお、36 Mbpsを越える伝送速度を可変範囲に設定しても36 Mbpsを越える伝送速度が

選択されることはなかった。これは、48 Mbps以上の伝送速度をJRL-710AL2が選択するために必要な受信電界強度が得られていないためと考えられる。

## 5. LAN回線としての品質評価

LAN回線としての品質を評価するため、竹島出張所に設置したサーバにsmokepingを導入した。山川小学校に設置したサーバはADSLによりインターネットに接続し、インターネット経由で竹島出張所のサーバ及び無線LAN装置にアクセスできるようにして測定を行った。

### 5.1 RTTとTCP帯域の関係

通信が安定していた日のRTT(往復遅延時間)の変化を図3に示す。RTTの平均は2.2ms, 回線稼働率は100%であった。

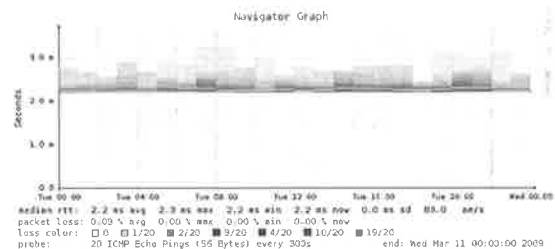


図3 2009年3月10日のRTTの変化

通信が不安定化した日のRTTの変化を図4に示す。午後から深夜にかけてパケットロスが増大し、この後回線断となった。この時は寒冷前線の接近及び通過により風雨が強く悪天候であったため、パラボラアンテナが風の影響を受けるなどして無線通信の状況が悪化したものと思われる。2.4 GHz帯の無線通信においては降雨の影響は無いことが知られており降雨の影響ではない。なお、天候の回復に伴い回線断は自然復旧した。

通信が不安定化した同じ日のFTP伝送時間の変化を図5に示す。これは1.0 MBのファイルを5分おきに5回ずつFTP伝送し、平均の秒数を記録したものである。図4のRTTの悪化と同じ時間帯でFTP伝送時間が増大しており、TCP帯域が低下していることが確認できる。

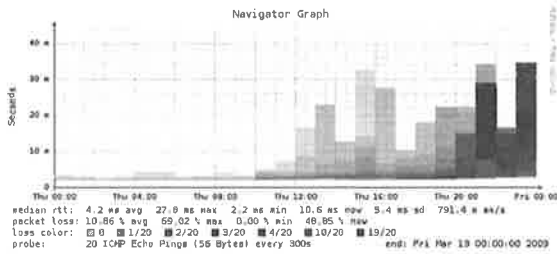


図 4 2009年3月12日のRTTの変化

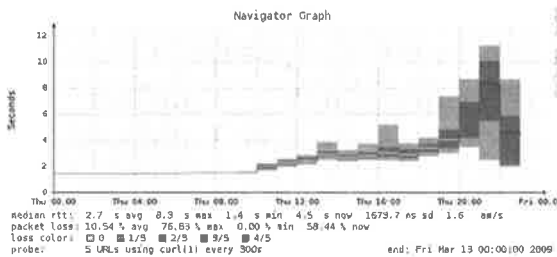


図 5 2009年3月12日のFTP伝送時間の変化

RTTの増加は通信回線そのものの不安定化を示している。RTTが大きいうことはTCPセッションのタイムアウトも多く発生しているはずであり、結果的にTCP帯域は低下することになる。

## 5.2 受信電界強度とRTT・TCP帯域の関係

受信電界強度は無線LAN装置JRL-710AL2にtelnetでログインし、状況表示コマンドを実行することで得ることができる。データ取得を自動化するためにターミナルエミュレータTeraTerm<sup>8)</sup>で1分おきにコマンドを実行するマクロを生成し実行した。

山川小学校に設置した無線LAN装置から得た受信電界強度と潮位の変動を図6に示す。潮位は海上保安庁が5分おきに公開しているデータのうち竹島-山川間に近い枕崎のものを用いた。受信電界強度の変動は1分おきに取得した60個のデータを1時間おきに箱ひげ図で示している。受信電界強度は中央値で最大4dBm低下している。

ところが、RTTの変化(図7)を見ると、受信電界強度が大きく変動している時間帯にも、RTTはほとんど変化していない。これは、伝

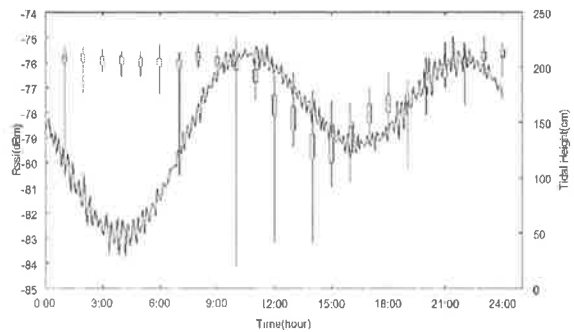


図 6 2009年11月22日の潮位の変動と受信電界強度の変動。

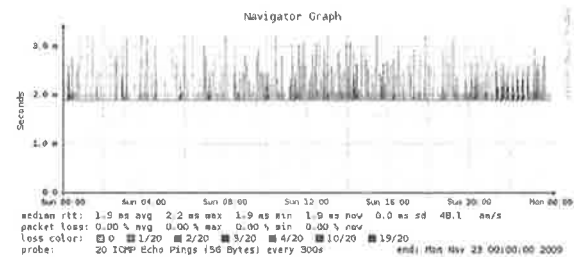


図 7 2009年11月22日のRTTの変化。

送速度可変範囲内に収まる電界強度低下であれば、伝送速度の切替が発生したとしても接続が切断されるわけではないためと考えられる。

一方、FTP伝送時間の変化(図8)を見ると、電界強度が低下している時間帯にFTP伝送時間が大きくなる、すなわち、TCP帯域が小さくなる傾向にあることがわかる。FTP伝送時間の中央値の平均は1.2秒(6.7Mbps)であるが、最大値は1.8秒(4.4Mbps)となり、TCP帯域が3分の2に低下している。これは、受信電界強度の低下に伴い、伝送速度が低速側に切り替わることでTCP帯域が小さくなったためと考えられる。

FTP伝送時間よりTCP帯域を求め、受信電

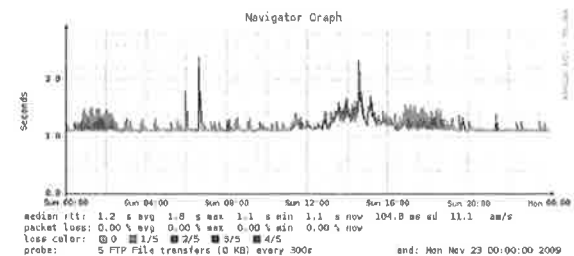


図 8 2009年11月22日のFTP伝送時間の変化

界強度と合わせてグラフ化したものが図9である。受信電界強度とTCP帯域の間に高い相関があることがわかる。

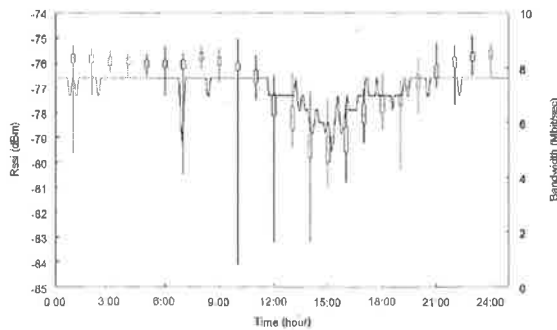


図9 2009年11月22日の受信電界強度とTCP帯域の変化

極端な電界強度の低下でない限り回線は切断されることはないものの、受信電界強度が低下するとTCP帯域も低下する傾向にある。切断やTCP帯域の低下を避け、安定した中継系通信回線とするためには、受信電界強度の低下をできるだけ避けなければならない。そのためには、受信電界強度の変動要因を知ることが不可欠である。

## 6. 受信電界強度の変動要因

本研究の無線LAN通信システムにおいては、例えば図6のように受信電界強度の変動が見られた。受信電界強度の変動は、数時間程度以内の短時間の小さな変動と、数時間から1日にわたる長時間の大きな変動の、原因が異なる二つの変動に分けて考えることができる。

### 6.1 短時間の受信電界強度変動

本研究で用いている無線LAN通信システムにおける短時間の小さな変動の要因としては、(1)無線LAN装置内部の変動、(2)他装置(コードレス電話・電子レンジ)からのノイズ、(3)風・動物(鳥)によるアンテナ方位の一時的なずれ、そして、(4)動物(鳥)・船舶による一時的なクリアランス妨害が考えられる。

無線LAN装置内部の変動(1)は装置そのものの設計や回路に起因し、近距離の無線LAN通信にも影響する変動である。使用者側で何ら

かの回避策を取るの難しいが、本研究で使用した無線LAN装置では測定結果に表れるほどの内部の変動はない。

他装置からのノイズ(2)に対しては、ノイズ源から離れた位置に設置するなどの対策がある。本研究の無線LAN通信システムは事前に周囲の環境を調査した上で設置しており、他装置からのノイズは受けていない。

アンテナの一時的なずれ(3)の対策としてはアンテナをしっかりと固定するほか、鳥がアンテナに止まらないような対策が必要である。本研究の無線LAN通信システムはアンテナ支柱をワイヤで固定し、アンテナ上部に結束バンドを取り付けることで鳥よけとした。しかし、図4のように強風によるアンテナずれが原因と思われる通信途絶が発生した。アンテナずれが発生するほどの悪天候の頻度は高くないが、電波に影響を与えず風の影響を軽減できる大型の構造物の内側にアンテナを設置するなどの対策が考えられる。

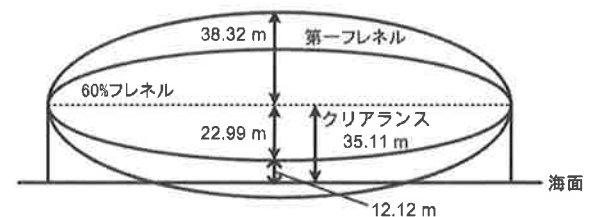


図10 クリアランス妨害の模式図。60%フレネル半径の内部に障害物が入った場合、受信電界強度が低下する可能性がある。

一時的なクリアランス妨害(4)については、本研究の無線LAN通信システムの環境では問題とはならない。表1に示す本研究の無線LAN通信システムの設置条件より、地球半径を6,370 km、等価地球半径係数を4/3として電波通路と海面との標高差(=クリアランス)を求めると36.61 mとなる。一方、第一フレネルゾーン半径は38.32 mである。潮位の変動を $\pm 1.5$  mと仮定した場合、クリアランスは35.11 mとなり、最大で第一フレネルゾーンの3.21 mが海面下に入ることになる(図10)。

しかし、電界強度の低下が発生するのは第一フレネルゾーン半径の60%以内に障害物が入った場合と言われている。本研究の場合22.99 mとなり、35.11 mより小さいため、海水による

クリアランス妨害はない。また、海面から 12.12 m までの高さの船舶は影響しない。ほとんどの漁船はこの高さ以下である。また、12.12 m は反射点における値であり、反射点以外ではより高さの高い船舶でも影響しない。大型の船舶の中には高さ 50 m を超えるものも存在するため、船舶往來の影響は無いとは言いきれないが、フレネルゾーン通過に要する時間は数秒程度の短時間であり、電界強度に与える影響は無視できると考えられる。動物（鳥）が電波経路を横切る場合もクリアランス妨害となるが、こちらも短時間であるため影響は無視できる。

これら短時間の小さな変動の要因は、回避が困難な場合もあるが通信への影響は小さい。一方、長時間の大きな変動は TCP 帯域の低下が起こるなど通信への影響が大きいため、何らかの回避策を検討しなければならない。それにはまず、長時間の大きな変動の原因を知らなければならぬ。

## 6.2 受信電界強度と潮位の関係

長時間の大きな変動の要因として考えられるものの一つが潮位の変動である。

海上は障害物がなく、電波干渉源も少ないため比較的安定した回線を構築できる。しかし、海面は平面とみなせるため反射率の高い反射点が 1 点だけ存在する状態となる。その結果、受信点において直接波と反射波が干渉しあい受信電界強度に影響を与えることがある。さらに、海上では潮位が変動するため反射点の位置が変わり、直接波と反射波の伝搬路長の差が変化するため受信電界強度が変動するフェージングが発生する。

本研究の無線 LAN 通信システムは水平偏波を用いているため反射波の位相は反転し、伝搬路長の差が 0 から 0.0625 m (2,400 MHz の波長 0.125 m の 2 分の 1) となる場合に受信電界強度低下の原因となる。

送受信点間距離を  $d$ 、送受信それぞれの等価アンテナ高（反射点における地球への接平面からのアンテナ高）を  $h'_1, h'_2$  とすると、伝搬路長の差  $\Delta r$  は、

$$\Delta r = \frac{2h'_1 h'_2}{d} \quad (1)$$

となる。等価アンテナ高  $h'_1, h'_2$  は以下の式で与えられる。

$$h'_1 = h_1 - \frac{d_1^2}{2ka}, h'_2 = h_2 - \frac{d_2^2}{2ka} \quad (2)$$

ここで、 $h_1, h_2$  は送受信点それぞれのアンテナの海拔高、 $d_1, d_2$  は送受信点それぞれから反射点までの距離、 $k$  は等価地球半径係数、 $a$  は地球半径である。

地球半径を 6,370 km、等価地球半径係数を 4/3 として反射点を求めると、山川より 26.15 km、竹島より 21.32 km の海上が反射点となる。また、等価アンテナ高は山川で 40.75 m、竹島で 33.23 m となる。これより、伝搬路長の差  $\Delta r = 0.057$  m となる。これは反射波が受信点に到達した場合、干渉により受信電界強度が低下する可能性がある値である。

山川-竹島間における潮位の変動を最大で 3 m、 $\pm 1.5$  m と仮定して、 $h'_1, h'_2$  をそれぞれ  $\pm 1.5$  m して計算すると、伝搬路長の差  $\Delta r$  は最大 0.05828 m、最小 0.04927 m となり、その変動  $\Delta \Delta r$  は 0.009 m となる。この変動は 2,400 MHz の波長 0.125 m の 1/14 の変化に過ぎない。また、ハイトパターン周期は山川で 89.28 m、竹島で 72.80 m であり、アンテナ高の  $\pm 1.5$  m の変動の影響は小さい。したがって、本研究の無線 LAN 通信システムにおいては、潮位の変動に基づく伝搬路長の差の変動による受信電界強度の変動の可能性はほとんどなく、潮位の変動は受信電界強度変動の原因ではないと考えられる。

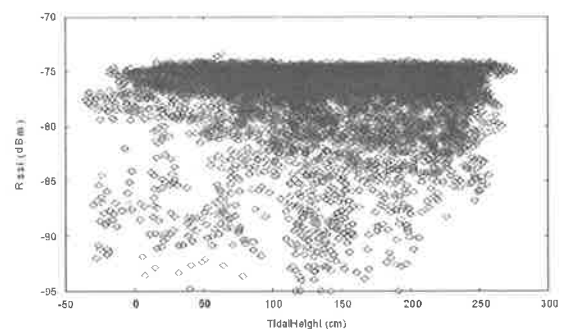


図 11 潮位と電界強度

竹島側での受信電界強度測定データをすべてプロットした図 11 から潮位と電界強度の間に相関は見られない。

一日の竹島側の受信電界強度の変動と潮位の変動を図12に示す。図11と同様、図12からも、潮位と受信電界強度の間に相関は見られない。

図6では、潮位の変動が1日に2周期であるのに対し、受信電界強度の変動は1日に1周期であるように見え、変動の周期が一致しない。また、図12では受信電界強度がほとんど変動していない。一ヶ月間を平均化した1日の受信電界強度の変動(図13)を見ると、長期間にわたる1日周期の周期性はないが、1日を周期とする変動がある日とない日が存在していると考えられる。

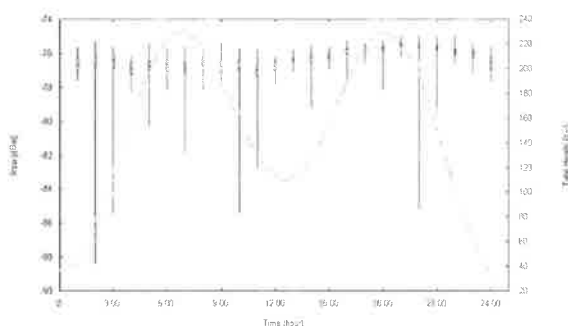


図12 潮位の変動と竹島側受信電界強度の変動(2010年11月15日)。受信電界強度の変動は1分おきに取得した60個のデータを1時間おきに箱ひげ図で示した。受信電界強度はほとんど変動していない。

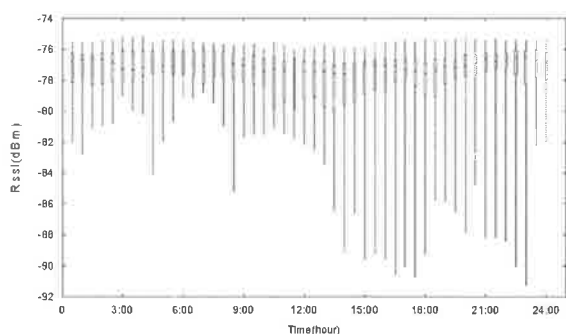


図13 竹島側受信電界強度の変動(2010年10月)。30分おきに箱ひげ図で示した。午後最小値が小さくなる傾向が見られるが、これは午後天候が不良であった日が存在したためである。

### 6.3 受信電界強度と気象の関係

6.2節で述べたように、受信電界強度の変動には潮位の変動の影響はない。しかし、図6を見ると明らかに比較的長時間の受信電界強度低下が観測されており、TCP帯域も低下している。こうした受信電界強度の変動は発生する日と発生しない日があり明確な規則が見られない。しかし日によって異なることから、要因として最も可能性が高いのは気象の影響である。具体的には、気温、湿度、風、降雨などの条件が考えられる。

降雨については、降雨減衰が小さい2.4 GHz帯を用いた通信であることから、受信電界強度の変動には無関係である。風については、一定の方向で長時間継続して風が吹くことはないため、比較的長時間の受信電界強度低下の原因とはなり得ない。台風などの強風時には、パラボラアンテナが大きく揺れることにより5.1節や6.1節で述べたように、風が短時間の回線途絶の要因となる可能性はあるが、風が止めば影響は消失するため長時間の受信電界強度変動には影響しない。

一方、気温と湿度が変化すると、大気屈折率が変化する。このため、気温と湿度の気象条件は、電波伝搬に影響を与える可能性があると考えられる。

### 6.4 受信電界強度と大気屈折率の関係

大気は温度により屈折率が異なり、温度の異なる大気の層が接することで大気ダクトが生じる。発生時には屈折率が異なる大気の層が接する面で電波が反射するため、反射波が干渉波となりフェージングが発生することになる。しかし、本研究の電波伝搬区間の高度は100 m以下と低く、半値角の小さいパラボラアンテナを用いた見通し通信であるため、高度500 m以上で多く発生する大気ダクトの影響があったとは考えにくい。また、受信電界強度の変動が見られる日は昼に低下していることが多く、夜間や日の出ごろに多く発生すると言われている大気ダクト発生頻度は観測結果とは一致しない。これらのことから、本研究で観測された受信電界強度の変動は大気ダクトによるものである可能性は低いと考える。



大気屈折率の変動が電波伝搬に影響を与えるもう一つの現象が直接波と海面反射波の伝搬路長の差の変動である。大気屈折率は垂直方向に変化する分布をしているため、大気中では電波は直進するのではなく地面の方向に曲げられて伝搬する。曲がり方は屈折率分布により異なるので屈折率分布が変動すれば曲がり方も変動する。直接波と反射波の経路が変動すると伝搬路長の差も変動する。これにより直接波に対する反射波による干渉の程度が変動し受信電界強度が変動することになる。

等価地球半径係数  $4/3$  は大気が理想的な屈折率分布をしていると仮定した場合の値である。大気屈折率の変動した場合には等価地球半径係数が変動する。等価地球半径係数が変わると反射点の位置と等価アンテナ高が変わるため、伝搬路長の差に影響する。等価地球半径係数が  $1.2$  から  $1.6$  まで変動したと仮定すると、伝搬路長の差は  $0.046$  m から  $0.075$  m まで変動し、その変動幅は  $0.029$  m となる。これは  $2,400$  MHz の波長  $0.125$  m の  $2$  分の  $1$  ( $0.0625$  m) のおよそ半分であるため、等価地球半径係数の変動は受信電界強度の変動の要因となり得る。電波経路における大気屈折率の測定が困難であることから等価地球半径係数の変動範囲を正確に知ることはできないが、冬季は  $1.3$ – $1.35$ 、夏季には  $1.6$ – $1.7$  を中心に分布することが知られており<sup>9)</sup>、本研究で想定した  $1.2$  から  $1.6$  の変動は十分にあり得る値である。また、等価地球半径係数に対する受信電界強度変化曲線である  $k$  パターンのピッチは  $1.629$  であり、 $0.4$  の変動は  $k$  パターンピッチのおよそ  $4$  分の  $1$  と十分に大きい。したがって、本研究の無線 LAN 通信システムにおいては、大気屈折率の変動に伴う直接波と海面反射波の伝搬路長の差の変動が受信電界強度変動の原因であると考えられる。

大気屈折率の変動による受信電界強度の変動が発生していると推定される日の竹島における受信電界強度と気温のデータを図 14 に示す。

気温の上昇に伴い受信電界強度が低下し下降に伴い上昇している。この日の天候は移動性高気圧の影響により晴れであった。平均風速は  $0.3$  m/s から  $4.8$  m/s と木の葉が動く程度、最大瞬間風速でも  $7.2$  m/s でありさほど強くなく、大気は大きく攪拌されてはいないと考えられる。また、アンテナの揺れに伴う受信電界強度変動

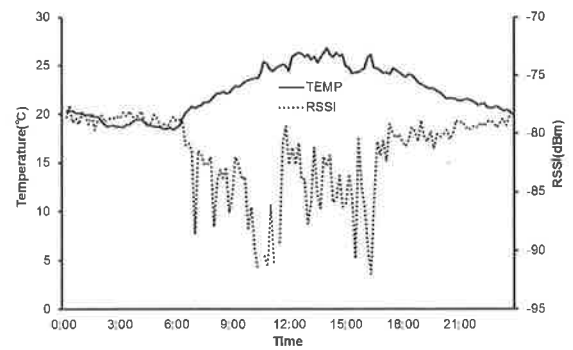


図 14 2010 年 6 月 8 日の気温と受信電界強度の変動。

が発生するほどの強風ではなく、その影響は無い。気温の変化により大気屈折率が変化し、伝搬路長の差が変動して、受信側アンテナに到達する直接波に対する海面反射波の干渉が大きくなったものと考えられる。

### 6.5 受信電界強度変動幅の季節変動

受信電界強度が大きく変動する日は、明確ではないものの、夏季に多く冬季に少ない傾向があった。これは、反射波による干渉の影響が夏季と冬季で異なるためと考えられる。夏季は気温差が大きく大気屈折率の変動が大きい。また、台風が襲来した場合を除き海は比較的穏やかで海面反射が発生しやすい。このため、夏季には受信電界強度が大きく変動する日が多いと考えられる。

一方、冬季は気温の変化が小さく大気屈折率の変動も小さい。また強い北西季節風の影響で波が高い日が多く、海面反射が発生しにくい。このため、冬季には受信電界強度の変動が小さい日が多いと考えられる。

## 7. まとめ

鹿児島県指宿市山川と三島村竹島に市販の IEEE802.11g 規格に準拠した無線 LAN 装置を設置し、伝送距離  $47.5$  km、TCP 帯域が  $4$ – $8$  Mbps の海上無線 LAN 通信に成功し、安定した無線 LAN 通信の日本記録を達成した。当該区間における長期の通信実験により受信電界強度の数時間にわたる低下とそれに伴う TCP 帯域の減少が観測されたため、潮位との相関につ

いてモデルと実測値を検証した。その結果、受信電界強度の変動と潮位の間には相関がないことが明らかになった。

変動の要因は大気屈折率の変動に起因する可能性が高い。理論的検証の結果、大気ダクトの影響ではなく、大気屈折率の変動に伴い直接波と海面反射波の伝搬路長の差が変動することが原因であることがわかった。

変動を回避するには海面反射波の入射を遮る位置へのアンテナの設置が最も有効であるが、海面反射波の遮断が困難である場合は、垂直方向にアンテナを2式設置することによる空間ダイバーシティや、偏波面を変えたアンテナを2式設置する偏波ダイバーシティも効果があると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の委託研究及び鹿児島県三島村からの受託研究として行われた。研究の実施に協力していただいた三島村及び山川小学校の関係者の皆様、田中裕太氏、鹿児島大学大学院理工学研究科博士前期課程学生の鈴木亮介氏、東恭平氏に心より感謝の意を表したい。また、機器の設置にあたりNTT西日本鹿児島支店及び日本無線には特別の配慮をいただいている。本研究全般への協力と併せて深謝したい。

## 参考文献

- (1) Ermanno Pietrosemoli, "Setting Long Distance WiFi Records: Proofing Solutions for Rural Connectivity," *Journal of Community Informatics*, Vol. 4, No. 1, 2008.
- (2) "竹島-山川に無線 LAN 三島村と鹿大、実験成功", 南日本新聞, 2008年2月21日朝刊.
- (3) 藤田昇, "長距離通信の実験", RFワールド, No. 3, pp.79-81, 2008年9月.
- (4) 升屋正人, 青木謙二, 下園幸一, "三島村ブロードバンド調査(竹島地域)報告書", 2009年3月.

- (5) 東恭平, 鈴木亮祐, 青木謙二, 下園幸一, 升屋正人, "海上長距離無線 LAN 通信システムの構築と評価", 情報処理学会九州支部若手の会セミナー 2011 論文集, pp. 23-26, 2011年9月.
- (6) 升屋正人, 青木謙二, 下園幸一, "海上長距離無線 LAN 通信システムの伝搬特性", 電子情報通信学会技術研究報告. SR, ソフトウェア無線 111(417), 29-36, 2012年1月.
- (7) 進士昌明, 無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会, 1992.
- (8) <http://sourceforge.jp/projects/ttssh2/>
- (9) 岩見哲也, 西正博, 吉田彰顕, "瀬戸内地域における UHF 帯電波の海上伝搬特性", 信学論 (B), vol. J92-B, no. 1, pp. 224-232, 2009年1月.

(2012年03月09日原稿受付)

(2012年06月01日採録決定)

## 著者略歴



升屋 正人 1991年  
東京大学理学部卒業,  
1996年同大学院農学生  
命科学研究科博士課程  
修了, 同年4月岡崎国  
立共同研究機構分子科  
学研究所非常勤研究員,

1997年11月鹿児島大学工学部情報工学科助手,  
2000年4月総合情報処理センター助教授, 2003  
年4月学術情報基盤センター助教授, 2006年  
11月学術情報基盤センター教授. 博士(農学).

青木 謙二 2000年九州工業大学大学院情  
報工学研究科博士前期課程修了, 2002年鹿児  
島大学工学部教務職員, 2003年同大学学術情  
報基盤センター助手, 2007年同助教, 2009年  
宮崎大学情報戦略室講師, 2010年同大学情報  
基盤センター准教授. 博士(工学).

下園 幸一 1991年九州大学工学部情報工  
学科卒業, 1993年同大学院工学研究科情報工  
学専攻修了, 同年4月九州大学情報処理教育セ  
ンター助手, 1998年2月鹿児島大学法文学部  
経済情報学科講師, 2000年4月同助教授, 2007  
年7月同大学学術情報基盤センター准教授. 修  
士(工学).