

1. VDL モード 3 の音声・データ通信性能評価実験

航空システム部

※中谷 泰欣 北折 潤 加藤 敏 塩地 誠* 津田 良雄**

*管制システム部

**早稲田大学大学院

1. はじめに

航空管制用の次世代対空無線システムとして国際民間航空機関 (ICAO) が標準及び勧告方式 (SARPs)^[1] を定めている VHF デジタルリンク (VDL) モード 3 (VDL3) は、現行のアナログ対空無線の代替として我が国及び米国においてその導入が検討されている。

当所では、平成 12 年度から 16 年度までの 5 カ年計画で VDL3 実験システムの研究を進めており、これまで、電波干渉実験^{[2][3][4]}、データ及び音声通信性能評価^{[5][6]}、並びに飛行実験を実施してきた。本稿では、データ及び音声通信の基礎評価及び飛行実験の結果について報告する。

2. VDL3 の概要

VDL3 は時分割多重通信 (TDMA) の技術を利用し、1 つの周波数 (25kHz 帯域幅) に音声またはデータを最大 4 チャンネルまで収容することができる。

VDL3 音声通信の特徴は、①パイロットが送信中でも管制官が割り込み可能であり、スタックマイクロフォンが発生しても管制官の通信はブロックされない②パイロットの連続送信時間が 35 秒間に制限される③管制移管による通信先の変更 (次チャンネルへの切換) を自動処理することができる④音声送信中の送話者情報を把握できる——等である。また、データ通信の特徴は、①4 種類のデータ優先順位に基づく伝送制御②予約割当方式による迅速かつ確実な伝送③強力な誤り訂正符号による伝送データの保証——などであり、現行の DSB-AM VHF 対空無線及び ACARS データ通信に比べ、格段に優れた機能を有している。

図 1 は、VDL3 を 2V2D (音声 2ch 及びデータ 2ch) のモードで運用した場合の概念図を示す。現行のアナログ通信では、管制セクター毎に個別の周波数が割り当てられ、かつ、ACARS 等のデータ通信用の周波数が別途必要であるが、VDL3 では 1 つの周波数で、2 つの管制セクターの音声及びデータ通信を同時に行うことができる。図 1 の例では、VDL3 が送受信する周波数は 120.1MHz であるが、両管制セクターの通信を区別するため、便宜上ユーザーグループ A には 120.101 を、グループ B には 120.102 というチャンネル

名を割り当てる。1 つのユーザーグループに収容可能なユーザー数 (航空機数) は最大 60 までである。

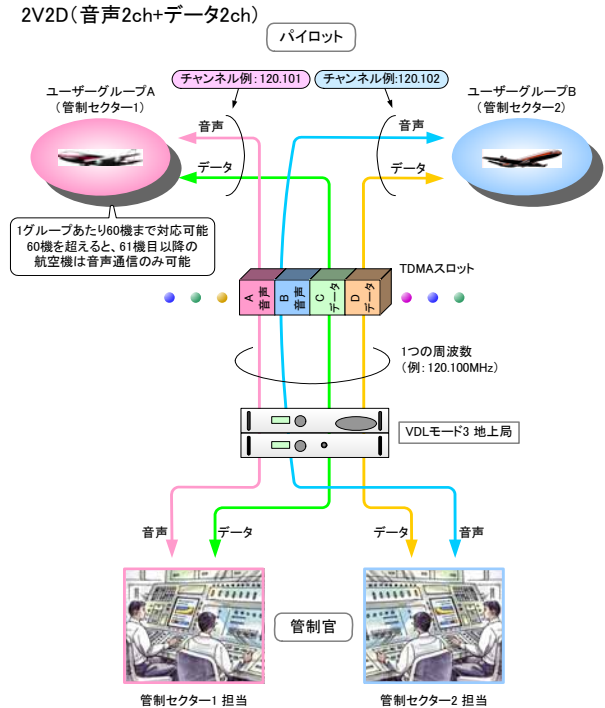


図 1 VDL3 運用概念図(2V2D の場合)

3. VDL3 実験システム

当所が開発した VDL3 実験システムは、地上局及び機上局装置各 2 式並びに地上センター局 1 式から成る。図 2 にその構成を示す。

地上局及び機上局装置は、それぞれ同一機能の 5 つのユニットで構成され、パラメータ設定でどちらとしても動作させることができる。両者の違いは防振台の有無だけである。これにより、1 地上局と 3 機上局の通信実験も可能としている。

また、実験目的として、①リンクモニター機能②受信状況をリアルタイムにグラフ表示する機能③詳細な通信ログを収集・保存する機能④データ通信のシナリオを設定し実行する機能⑤飛行中の航空機の位置を地図上に表示する機能——などを付加している。

実験システムの主な仕様を表 1 に示す。

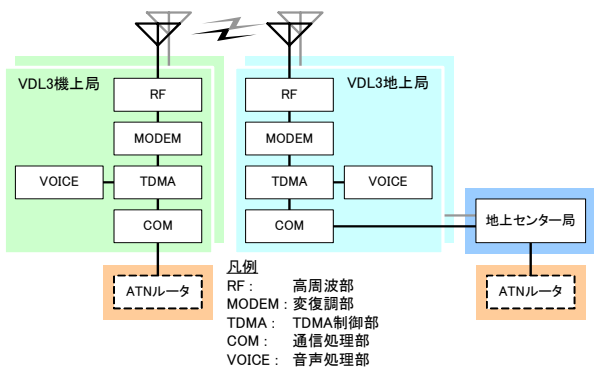


図 2 実験システム構成

表 1 実験システム仕様

項目	仕様
基本機能	ICAO SARP 及び VDL3 Manual (Doc9805) 準拠
送信出力	15 W (42dBm)
送受信周波数	118~136.975 MHz (25 kHz 間隔・室内実験時) 136.900 及び 136.925 MHz (飛行実験時)
システムコンフィグレーション	2V2D 及び 3V1D
最小受信感度	-103.2 dBm (誤り訂正前 BER=10 ⁻³ 時の実測値)

4. データ通信性能基礎評価(室内実験)

VDL3 のデータ通信性能に関する基礎評価を室内実験で実施した。評価項目は、①受信レベル対ビットエラーレート(BER)②BER 対伝送遅延③BER 対スループット④データ優先度別伝送遅延——である。以下、②及び④について結果を説明する。なお、VDL3 で定義する BER はすべて誤り訂正前の値である。

4.1 BER 対伝送遅延

ケーブル接続した VDL3 地上局及び機上局の双方から繰り返しデータ送信を行い、可変減衰器で受信入力レベルを段階的に変化させ、BER 対伝送遅延時間を測定した。地上局からは 15seg¹のデータを送達確認(ACK)なしで送信し、機上局からは 1seg または 15seg のデータを ACK ありで繰り返し送信した。このときの通信負荷率は 94% 以上であった。

実験構成及びパラメータを図 3 に、測定結果を図 4 に示す。図 4 のグラフの緑の線は 15seg のデータ送信の場合の、赤の線は 1seg データ送信の場合の BER に対する伝送遅延時間を示す。BER が 1x10⁻³ よりも良好な状態の伝送遅延時間(累積 95% 値)は、15seg で約 3.7 秒、1seg の場合は約 2 秒でほぼ一定しているが、

¹ 1seg(segment)はTDMA スロット 1 個分の長さのデータ (62byte) を示す。15seg は 62byte × 15 個で 930byte である。

BER が悪化していくとある点から急激に伝送遅延時間が増大した。これは BER の悪化に伴い、受信データの誤りが訂正不能となり再送を繰り返すことに起因し、データ長が長い 15seg の場合が 1seg に比べてより大きな影響を受けている。

図 5 は伝送遅延時間の定義を示す。本稿で言う伝送遅延時間は、①送信データ要求から④データ受信までの時間とし、ACK の伝送に要する時間④-⑤を含まない。

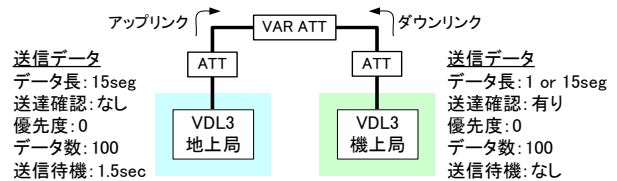


図 3 BER 特性 実験構成

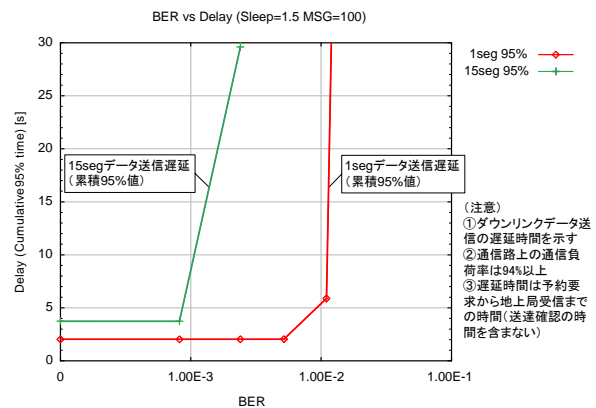


図 4 BER 対伝送遅延 グラフ

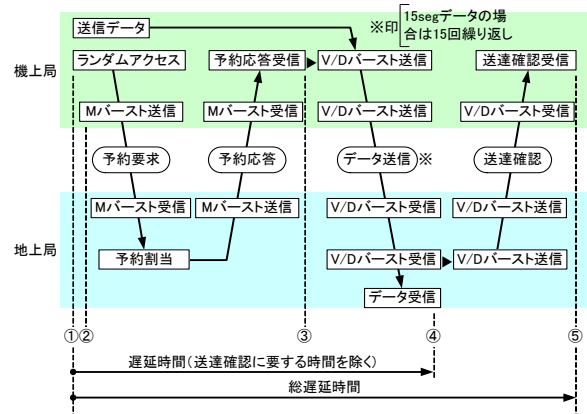


図 5 ダウンリンク伝送遅延の定義

4.2 データ優先度別伝送遅延

次に 3 種類の優先度を割り当てたデータを混在させ

て繰り返し送信した場合の、それぞれの優先度別伝送遅延時間を測定した。実験構成は図6のとおり1地上局と3機上局をケーブル接続し、機上局毎にそれぞれ異なるデータ優先度を設定した。また、比較のため全機上局が同一優先度(低)の場合の測定も行った。

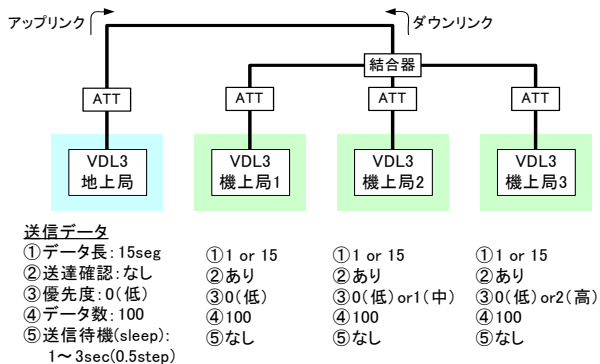


図6 優先度別伝送遅延 実験構成

4.2.1 負荷率対伝送遅延

図7は、1segデータをダウンリンク通信した場合の負荷率毎のデータ優先度別遅延時間を示す。低優先度データの伝送遅延は、負荷率の上昇に伴って増大しているが、中及び高優先度データの伝送遅延は一定している。低優先度データのみ伝送遅延が増大しているのは、負荷率を制御するための地上局からのアップリンクデータの優先度(低)と同じ優先度のダウンリンクデータのみが、アップリンクデータと競合し影響を受けたためと考えられる。

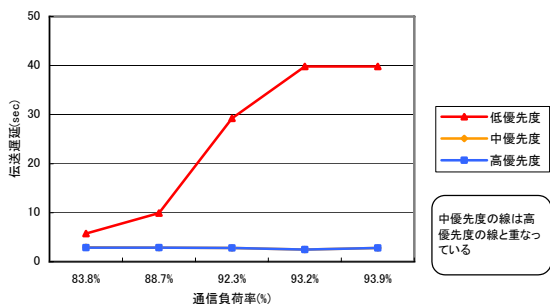


図7 負荷率対伝送遅延 グラフ

4.2.2 伝送区間別伝送遅延

同じく 1segデータをダウンリンク通信した場合に要する伝送遅延時間について、伝送区間別に解析したところ図8に示すグラフが得られた。各棒グラフは3種類の実験シナリオごとに機上局1、2、3の順に遅延時間を示

している。シナリオ6の負荷率は93.2%、シナリオ10は83.8%であった。

いずれの結果も「②-③予約割当」の部分のみが大きく変化しており、ダウンリンク通信の伝送遅延はほぼTDMAスロットの予約割当に要する時間で決まることが分った。

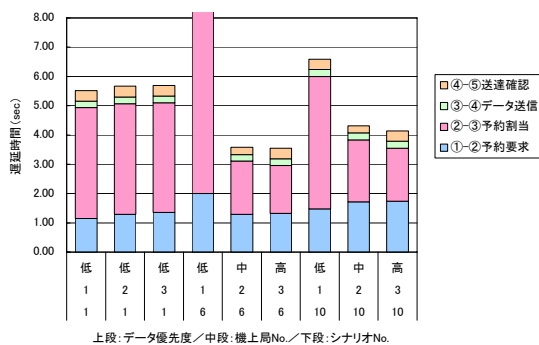


図8 伝送区間別伝送遅延 グラフ

5. 音声通信性能基礎評価(室内実験)

室内実験にて VDL3 音声通信性能に関する基礎評価を行った。評価項目は、①ボコーダ(vocoder)²処理時間②システム(end to end)遅延時間③電波干渉時の受信音声④音声品質客観的評価——である。以下、②及び④について評価方法及び結果を述べる。

5.1 システム遅延時間

送信アナログ音声は VDL3 送信機でデジタル信号に変換され、それが VDL3 受信機でアナログ音声に復号され出力されるまでの時間(システム遅延時間)を測定した。VDL3 の音声通信におけるシステム遅延時間の基準値は、ICAO VDL3 マニュアル¹⁷で 250ms 以内であることと定められている。

図9に測定結果を示す。結果は208msであり基準を十分満足するものであった。

5.2 音声品質(PESQ)評価

音声品質を客観的に評価し MOS³値に近似した品質スコアを得ることができる PESQ⁴ツールを使用して VDL3 の音声品質を評価した。伝送区間はエラーフリーの状態から BER=4.4%までの9種類とし、スコアを比較するため、DSB-AM アナログ対空無線機及び

² voice coder の略であり、アナログ音声を圧縮デジタル符号に変換し、またはデジタル符号をアナログ音声に復元する。

³ Mean Opinion Score 主観的評価を統計処理し平均評点を得る

⁴ Perceptual Evaluation of Speech Quality: 音声品質の知覚的評価用アルゴリズム (ITU-T Recommendation P.862)

携帯電話についても評価した。評価に使用した音声は、PESQ ツールに標準で用意されているアメリカ人による英語及び日本人による日本語の各 3 種類、並びに当所が作成した男女管制官によるサンプル音声(管制用語)とした。

VDL3をオンライン評価した際の実験構成は図10のとおりであり、PESQ ツールは VoIP の音声品質評価に使用されている Agilent 社の VQT J1981A を用いた。

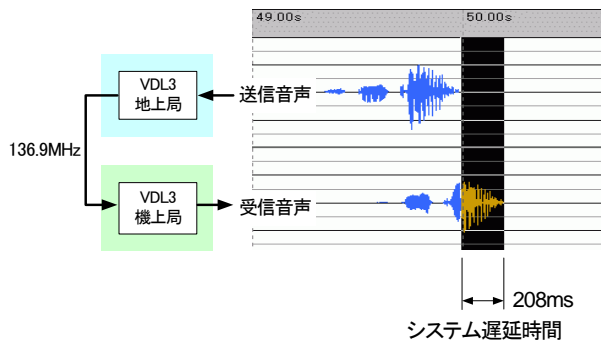


図 9 システム遅延時間 測定結果

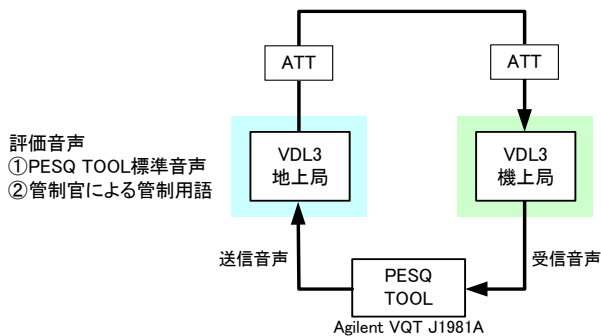


図 10 音声品質評価 実験構成

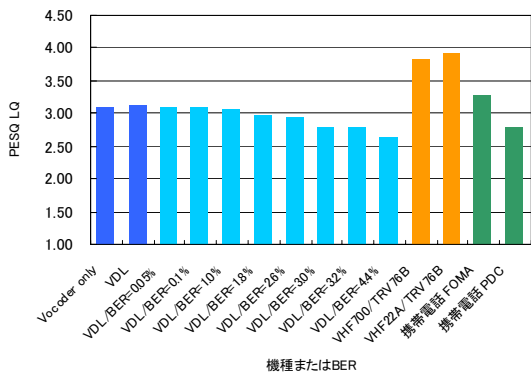


図 11 音声品質評価(PESQ LQ) スコア

PESQ ツール標準音声による評価結果を図11に示す。

VDL3 の PESQ LQ (Listening Quality)⁵スコアは3.12であり、現行のアナログ対空無線機には劣るものの、第2世代の PDC 方式の携帯電話よりは若干良い結果であった。なお、MOS 評価の品質スコアでは、3 はまあ良い(Fair)、4 は良い(Good)と定義されている。

6. 飛行実験

VDL3 の実際の運用環境である飛行中の航空機と地上局間のデータ及び音声通信を評価するため、当所の実験用航空機に VDL3 機上局を搭載し飛行実験を行った。図12は VDL3 機上局の搭載状況を示す。



図 12 VDL3 機上局搭載状況

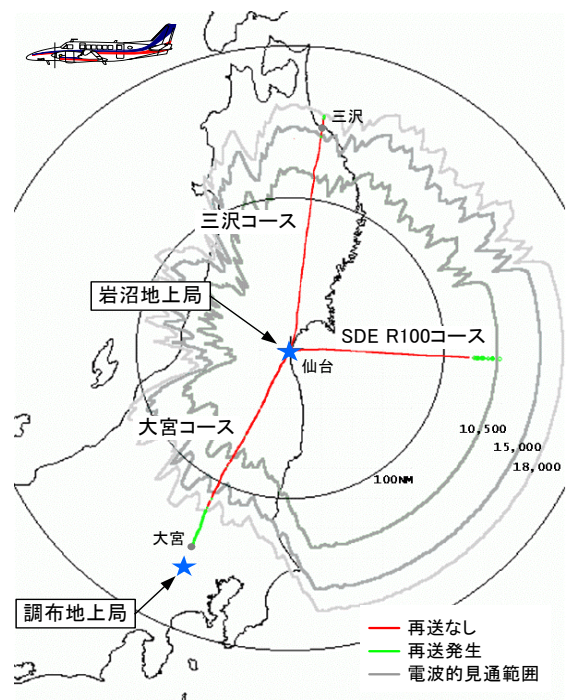


図 13 飛行経路

⁵ より MOS 値に近いスコアを得るため PESQ のスコア(x)を次式により補正した値。x>1.7 のとき

$$PESQ LQ = -0.157268x^3 + 1.386609x^2 - 2.504699x + 2.023345$$

VDL3 地上局は、当所岩沼分室及び調布本所に設置し、図 13 に示す仙台空港を中心とした 3 本の経路を飛行した。飛行高度は、大宮コース FL180、三沢コース FL150、SDE R100 コース 10,500feet とした。飛行実験では、①受信レベル②BER③位相誤差④伝送遅延⑤音声品質——の 5 項目について評価を行った。

6.1 受信レベル

図 14 は大宮コースにおける受信レベル特性を示す。緑色の線はアウトバウンド飛行の場合、赤色の線はインバウンド飛行時の受信レベルを示し、紫色及び青色の点はそれぞれのフレームエラーの発生を表している。いずれの場合も受信レベルが -100dBm 以下、岩沼地上局から 120NM 以遠でフレームエラーが多発しているが、これは計算上の電波の見通し距離(123NM)とほぼ一致している。

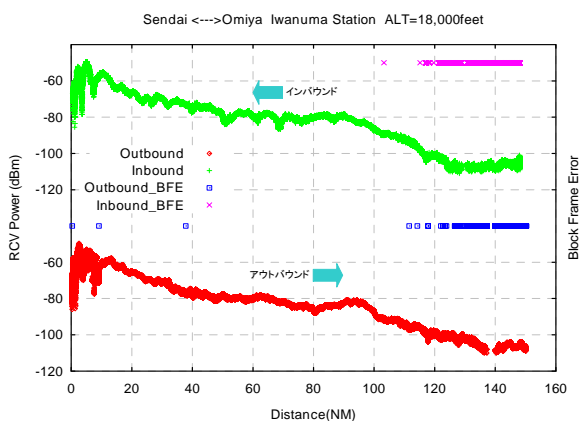


図 14 岩沼局受信レベル特性(仙台—大宮間)

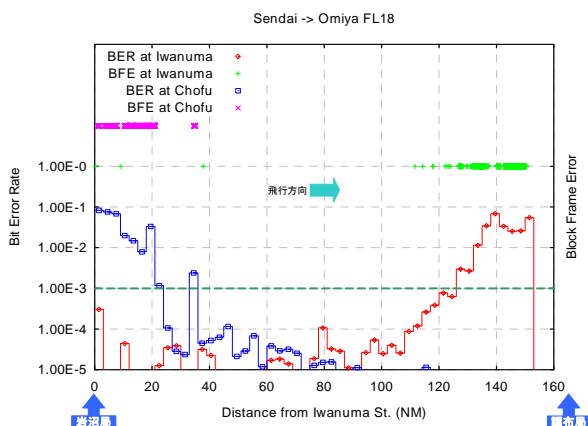


図 15 BER 特性(仙台—大宮間)

6.2 BER 特性

図 15 は大宮コースの岩沼局及び調布局との通信における BER 特性を示す。赤色の線が岩沼局、青色の

線が調布局の BER 特性であり、それぞれ 3NM 毎の区間平均を表している。岩沼局から 24~126NM の範囲では両者の BER が 1×10^{-3} 以下であり、どちらの局との通信も可能である。なお 35NM 付近の調布局の BER の悪化は、空中線の放射パターンによって生じたナルによる受信レベルの落ち込みが原因と考えられる。

6.3 伝送遅延

図 16 は、岩沼地上局及び機上局の双方から 1seg データを繰り返し送信した場合の、三沢コースにおける伝送遅延の距離別グラフである。それぞれ平均値及び累積 95% 値を示している。

アップリンク、ダウンリンクとも 140NM 付近までは概ね一定の伝送遅延を維持しており、アップリンクの場合で 0.38 秒、ダウンリンクの場合で 1.23 秒(いずれも 95% 累積値・負荷率 53%)であった。伝送遅延が一定している区間では、データ受信が 1 回目で成功し再送が発生していない。なお、このコースの計算上の電波の見通し距離は 144NM であり、これとほぼ同等のデータ通信覆域を有していることが確認できた。

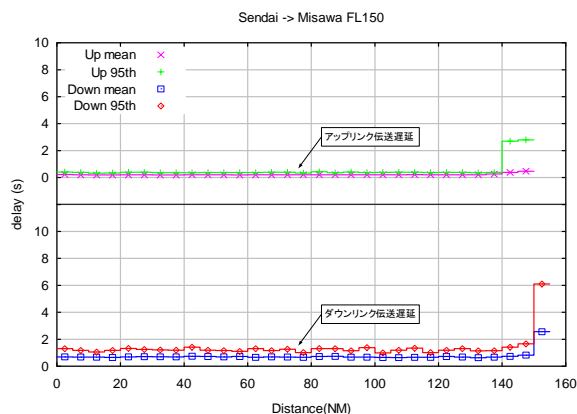


図 16 伝送遅延(仙台—三沢間)

6.4 音声品質

35 秒間を 1 フレームとする男女管制官による管制用語のサンプル音声を、VDL3 によりアップリンクまたはダウンリンク伝送し、受信した音声品質を PESQ ツールで評価した。図 17 は、三沢コースをアウトバウンド飛行した際に、機上局で受信したアップリンク音声をフレーム毎に評価した PESQ LQ スコアを示す。評価は岩沼地上局から 100NM 以遠で行った。図に示す区間の PESQ LQ スコアは、若干の変動はあるものの、その平均は 3.30 と高いスコアが得られた。また、受信レベルの低下による BER の悪化のためデータ受信が不可能

になった(図17 Frame Error x部分)あとも、音声受信はできており、ボコーダの高い誤り訂正能力を確認できた。なお、飛行実験で評価した音声品質スコアは、PESQツール標準のサンプル音声を使用していないため、MOS値としては取り扱うことはできない。

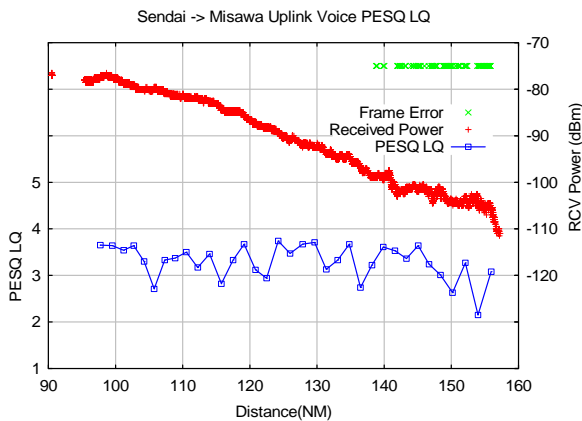


図 17 アップリンク音声品質スコア(仙台-三沢間)

7. VDL モード 2 との比較

当所では平成 7 年度から 13 年度にかけて VDL モード 2 の研究を実施し、VDL2 実験システムの開発及び評価⁸⁾を行っているため、このとき得られた VDL2 のデータ通信性能の評価結果と VDL3 の結果とを比較してみる。但し、同一条件のもとで実験を行っているわけではないため、当該比較は類似する実験結果を対比させたものである。

7.1 伝送遅延時間

VDL2 の伝送遅延時間は、402byte のデータを通信負荷率 10% の環境でダウンリンク伝送した場合、4 秒弱 (95% 累積値)、負荷率が 20% では 6 秒程度の遅延であった。一方、VDL3 は 930byte のデータを 94% の高負荷率の環境下でダウンリンク伝送した場合でも、その遅延時間は約 3.7 秒(同)であった。

これは、両者のアクセス方式の違いに起因する。VDL2 の CSMA によるアクセス方式は、他の通信が既に行われていると、一定時間待ったあと、再度、送信手続きに入るため、通信負荷率がある程度以上になると、急激に伝送遅延が大きくなりスループットが低下する。これに比べ、VDL3 の TDMA による予約割当方式では、高負荷率の状態でも極端な遅延時間の増加にはつながらない。また、VDL3 にはデータの優先度別送信制御機能も有しているため、100% に近い通信負荷率であっても、高優先度のデータは確実な伝送が保

証される。

7.2 有効覆域

VDL2 の飛行実験においても、VDL3 と同様のコースを同一高度で飛行し有効覆域の評価を行っているため、三沢コースにおける両データを比較してみた。

電波の見通し距離 144NM に対して、SARPs に規定する特定誤り率⁶⁾を満足する VDL2 の有効覆域は 120NM、VDL3 は 138NM であった。VDL3 の覆域が 15% ほど広い結果となっているが、BER の算出単位が VDL2 は 10NM、VDL3 は 3NM と異なるため、有効覆域としてはほぼ同等と考えられる。但し、VDL3 の誤り訂正能力は VDL2 よりも高い⁷⁾ため、伝送路が同じ BER 環境にある場合には、VDL3 の方が覆域は広い。

8. まとめ

以上、当所が開発した VDL3 実験システムを使用したデータ通信性能及び音声通信性能の基礎評価、並びに飛行実験による通信性能評価等の結果について報告した。得られた結果はいずれも ICAO SARPs の規定を満足するものであった。また、簡単ではあるが VDL2 の評価結果との比較を行い、VDL3 の優位性を確認することができた。

今年度は VDL3 の研究の最終年度として、実験システムの一部性能向上、ATN 接続実験、FAA 開発システムとのインターオペラビリティ評価、飛行実験を含む VDL3 総合評価、さらに管制官による VDL3 評価等を計画している。

参考文献

- ^[1] ICAO, ANNEX 10, VOLUME III COMMUNICATION SYSTEMS, PART I, CHAPTER 6, 2001.
- ^[2] 北折他, “VDL モード 3 の電波干渉実験”, 第 3 回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.5-8, 2003.
- ^[3] J.Kitaori, “VDL Mode 3 to DSB-AM Interference Test”, ICAO AMCP WGB/12, 2002.
- ^[4] Y.Nakatani, J.Kitaori, “Impacts of Radio Interference on VDL Mode 3”, ICAO AMCP WGB/14, 2003.
- ^[5] S.Kato, “Development and Evaluation of VDL Mode 3 System in Japan”, ICAO ACP WGM/8, 2003
- ^[6] 北折他, “VHF デジタルリンクモード 3 システムの基礎実験”, 電子航法研究所報告, No.108, 2004.
- ^[7] ICAO, DOC 9805, Manual on VHF Digital Link (VDL) Mode 3, 2002
- ^[8] 加藤他, “VHF デジタルリンクの研究”, 要望研究報告, 2002.

⁶⁾ VDL2 は誤り訂正後の BER が 1×10^{-4} 、VDL3 は誤り訂正前 BER が 1×10^{-3} と規定されている。両者はほぼ同等。

⁷⁾ VDL2 はリードソロモン・RS (255,249) 符号により最大 3byte まで、VDL3 は同(72,62)により 5byte まで誤り訂正可能。