

2. VHFデジタルリンク(VDL)モード2の通信評価実験

航空システム部

※松下 征二 北折 潤 加藤 敏 津田 良雄*

*早稲田大学

1. はじめに

VHF デジタルリンク (VDL) は、現行 ACARS 方式 VHF データリンク・システムに代わる次世代の空地通信システムとして、国際民間航空機関 (ICAO) の航空移動通信パネル (AMCP) において検討が行なわれ、現在迄にモード2からモード4までの3種類の方式が SARPs (国際標準及び勧告方式) として承認されている。

VDL モード2は、ビット指向型のデータ通信システムで、現行 ACARS に比べ、高い伝送性能 (伝送速度、誤り訂正能力) を有し、将来、航空通信ネットワーク (ATN) 環境におけるサブネットワークの一つとしての運用が可能である。また、現在、ATN への移行に向けた暫定措置として、VDL モード2上での ACARS 通信 (AOA:ACARS Over A VLC) の利用が開始されつつある。

当研究所では、平成7年度より SARPs に準拠した VDL モード2実験システムを開発し、これまで通信性能の基礎的な評価⁽¹⁾⁽²⁾を行ってきた。本文では、実験用航空機 (B-99) を用いて、電波伝搬特性及びデータ伝送特性 (サブネットワーク層) の評価、さらにハンドオフ特性の評価を行ったので報告する。

2. 実験システムの構成

図1に VDL モード2実験システムの構成を、表1に主要諸元を示す。本システムは機上通信局 (機上局) 1局、地上通信局 (地上局) 2局、地上センター局 (センター局) 1局によって構成される。

本実験においては、機上局を B-99 に搭載し、地上局を調布本所及び岩沼分室に設置した (以下、調布本所に設置した地上局を調布局、岩沼分室に設置した地上局を岩沼局と呼ぶ)。センター局は岩沼分室に設置し、岩沼局とは LAN 回線 (10Mbps) で、調布局とは ISDN 回線 (64Kbps) で接続した。全局で通信データと GPS 時刻を記録し、機上局では GPS 測位位置の記録も行った。

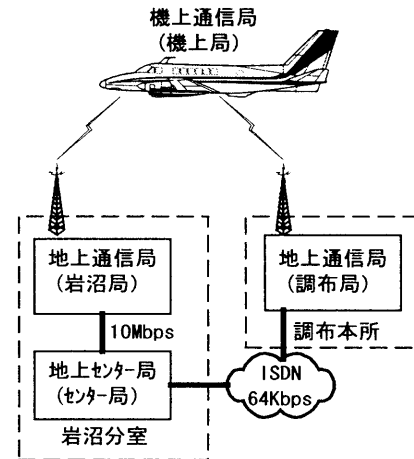


図1 VDL モード2 実験システム構成

表1 VDL モード2 実験システム主要諸元

周波数	136.900MHz
出力	15W
変調方式	D8PSK
変調速度(伝送速度)	10.5kbaud(31.5kbps)
アクセス方式	p-persistentCSMA

3. 電波伝搬特性の評価

3.1 概要

本評価では、運用の際に必要な伝搬特性を把握するために、陸上及び洋上空域での飛行実験、飛行場における滑走路及び誘導路上の走行実験を行った。

飛行中の航空機と地上局間の通信は、通常地上局のアンテナが山頂など見通しの良い場所に設置されるため、山岳や地球の湾曲によって伝搬路が遮蔽されるまで、概ね見通し内通信である。

SARPs では、機上局の受信感度は、 $20 \mu V/m$ 以上の電界強度で、前方向誤り訂正 (FEC) 後のビット誤り率 (BER) が 10^{-4} を満足することと規定され、地上局の送信電力は、覆域内の電界強度が $75 \mu V/m$ 以上を満足する電力であることと規定されている (ただし、覆域内は自由空間伝搬路として規定)。従って実際の覆域端は、電界強度が $20 \mu V/m$ 付近から $75 \mu V/m$ 迄の範囲に存在すると考え

られる。本評価では FEC 後 BER が 10^{-4} 以下を満足する空域を覆域と見なし、特に覆域端周辺空域の伝搬特性について重点的に調査を行った。また、地上局アンテナ直上（オーバーサイト）、飛行場内（滑走路、誘導路、エプロン）において、ビット誤り、メッセージ誤りの発生状況の調査を行った。

3. 2 評価方法

本評価は、機上局受信機として BER 計測用に開発した VDL 評価用受信機を用いて実施した。

岩沼局より一定間隔で送信した固定長のデータを機上局で受信し、受信レベル、位相誤差、BER（FEC 前後）、メッセージ誤り率（MER）を測定した。

受信レベルは受信機入力端における受信レベルを、位相誤差は検波時の位相偏差を、それぞれシンボル単位で記録した。BER を算出するために、予め送受信側で同一の固定データを持ち、受信側では、受け取ったデータとビットを比較することによってバースト単位のビット誤りを記録した。

送信データフォーマットは、VDL モード 2 で定められたフォーマット及びエラー訂正用のリードソロモン（255,249）符号を使用した。また、本評価においては、ユーザーデータ部分の全メッセージ長は 238byte であり、このうち先頭 9byte 及び終端 3byte のデータは毎回変化するアドレスデータ（ADD）とフレームチェック用データ（FCS）、また、6byte はエラー訂正データ（FEC）として使用されるため、BER の算出可能な固定データは 220byte となる。データ構成を図 2 に示す。

TR	ADD (9)	DATA (220)	FCS (3)	FEC (6)
----	------------	---------------	------------	------------

図 2 データ構成

固定データ送信レートは 4Hz、送信はアップリンクのみ実施し、機上局のアンテナは、地上走行試験を除き、機体下面のアンテナを使用した。なお、飛行実験においては、アナログ無線通信の干渉を軽減するため、VDL

評価用受信機にクリスタルフィルタ(4dBロス)を挿入した。

本評価に関連する諸元（物理層）を表 2 に、飛行したコースを表 3 に示す。

表 2 諸元（物理層）

ケーブルロス(dB)	地上:1.75 機上:上面 1.2, 下面 1.0
アンテナ	単一型(V) 地上 $\lambda/2$, 機上 $\lambda/4$
アンテナ利得	送信:2.15dBi, 受信:0dBi
地上局アンテナ高(m)	海拔高:54 地上高:21
機上局アンテナ高(m)	地上高:上面 3.0, 下面 1.2
受信感度	-103dBm (BER (FEC 前) = 10^{-4})

表 3 飛行コース

飛行コース・高度(feet)	
飛行 1	仙台⇄R100 10,000
飛行 2	仙台⇄三沢 往路 15,000、復路 10,000
飛行 3	仙台⇄大宮 18,000
飛行 4	オーバーサイト 9,000・6,000・3,000

3. 3 結果

3. 3. 1 飛行実験

飛行実験の航跡と電波の見通しの範囲を図 3 に示す。

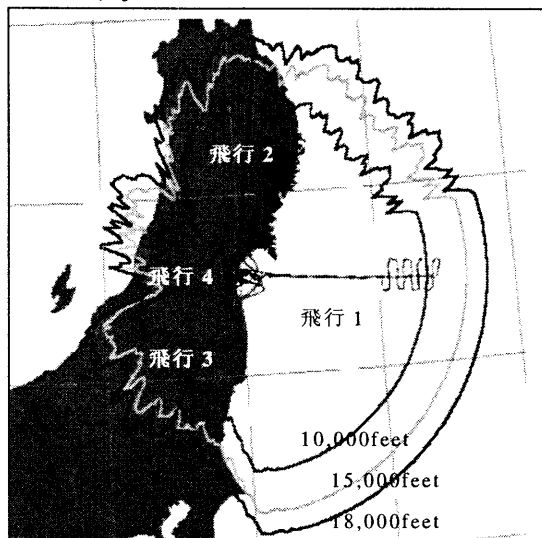


図 3 航跡と電波の見通し

仙台空港から 100 度方向（磁方位）の洋上を、高度 10,000feet で飛行した時（飛行 1 往路）の実験結果を図 4 に示す。横軸に岩沼局からの斜距離、縦軸にバースト内平均受信レベル、BER（FEC 前後）を示す。BER は 10NM の区間毎にデータを平均化した。40～60NM 区間の受信レベルの急激な落ち込みは、

アナログ無線通信による干渉の影響である。図より BER (FEC 後) が 10^{-4} を満足する距離は 100~110NM 区間までであることがわかる。これは、高度 10,000feet における電波の見通し距離 133.6NM の 82.3% (110NM) に相当する。飛行 2、3 において、陸上における飛行実験を行った。伝搬路が山岳等によって遮蔽されるため、電波の見通しは飛行 1 の場合より狭くなる。山岳による遮蔽の電波の見通し距離は、飛行 2 の往路 (15,000 feet) が 144NM、復路 (10,000feet) が 118 NM、飛行 3 が 123NM であると計算されるが、実験の結果、飛行 2 の往路が 120NM (83%)、復路が 100NM (84.7%)、飛行 3 が 120NM (96%) であった。飛行 2 は比較的低い丘陵による遮蔽であったため、飛行 1 と同様の結果となったものと考えられ、飛行 3 については、比較的急峻な山頂による遮蔽のため、電波の見通し限界付近までの通信が可能となったものと考えられる。

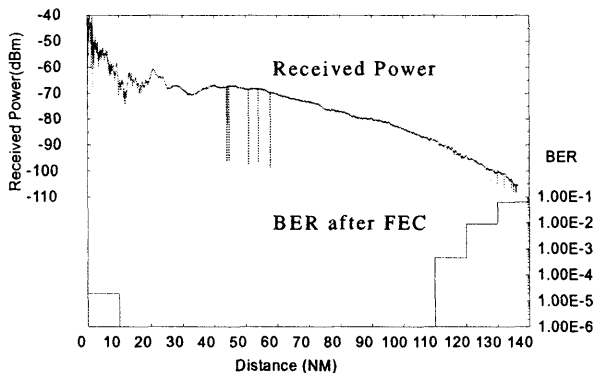


図4 受信電力及び BER 特性
仙台→R100 (10,000feet)

飛行 1・復路において、5NM 間隔のジグザグ飛行を行い、覆域端周辺の BER を測定した。図 5 に示すとおり BER (FEC 後) が 10^{-4} 以下となる受信レベルは -90dBm ($31 \mu V/m$) 以上であることがわかった。この電界強度は、ICAO SARPs における機上局の受信感度の規定 ($20 \mu V/m$) を若干上回る値である。原因はフェージングや翼による遮蔽が考えられるが、SARPs の地上局送信電力の規定 (覆域内で $75 \mu V/m$ 以上 (自由空間

値)) を考慮すると、十分な値であり運用上問題はないと考えられる。

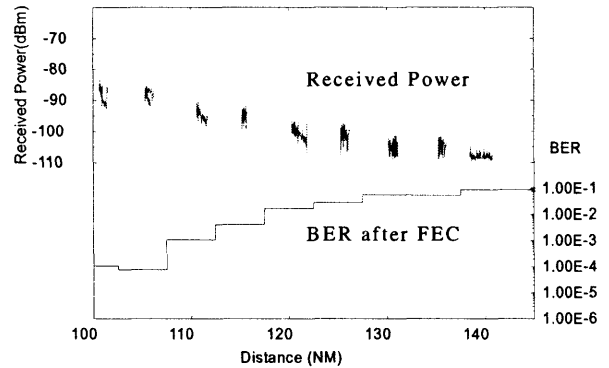


図5 ジグザグ飛行による BER 特性
R100→仙台 (10,000feet)

飛行 4 でアンテナ直上 (オーバーサイト) 付近の飛行を行った。アンテナ直上付近では、送受信アンテナの垂直方向の指向性により、パターンロスが発生する恐れがある。岩沼局の上空 (飛行 4) においてメッセージ誤り (FEC 後ビット誤り) を測定した。

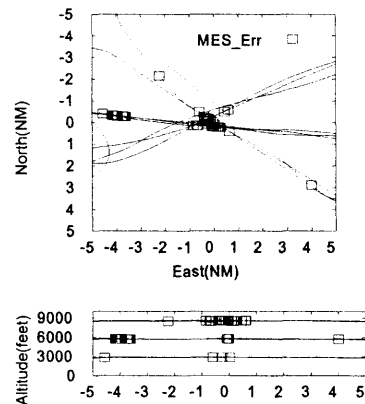


図6 オーバーサイト

図 6 に結果を示す。上側の図は水平面から見た航跡を表す。軸の目盛りは距離 (NM) を示し、中心が岩沼局である。下側の図は垂直方向の航跡を表し、横軸は東西方向の距離 (NM)、縦軸は高度 (feet) を示す。高度 9,000feet におけるメッセージ誤りが半径 1NM の範囲 (仰角およそ 56 度以上) で多発していることがわかる。なお、高度 6,000feet の東側 4NM 付近のメッセージ誤りは、地面反射によるレベルの低下により発生したと考

えられる。

3. 3. 2 地上走行実験

仙台空港において、滑走路及び誘導路上の走行実験を行った。1周毎に使用する機上局アンテナの位置を切り換え、ビット誤りの発生状況を測定した。図7に機体上面アンテナ使用時、図8に機体下面アンテナ使用時の結果を示す。機体下面アンテナ使用時にメッセージ誤りが多発している。機体上面アンテナ使用時にもビット誤りは発生しているが、FECによる訂正が可能であった。

- × ビット誤り
- メッセージ誤り
- 岩沼局

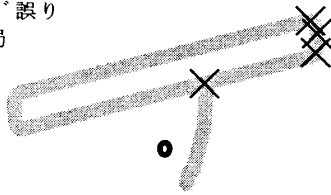


図7 機体上面アンテナ使用時

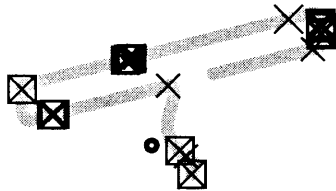


図8 機体下面アンテナ使用時

4. データ伝送特性（サブネットワーク層）の評価

4. 1 概要

VDLモード2サブネットワーク層は、OSI参照モデルの第3層（ネットワーク層）の最下位に位置する。サブネットワーク層プロトコルは、サブネットワーク・アクセス・プロトコル（SNAcP）と呼ばれ、割り込み（INTERRUPT）と受信不可（RNR）を除くISO8208に準拠したパケット・レベル・プロトコルである。SNAcPは、コネクション型の空地パケット転送サービスを提供し、(1)コネクションの確立と開放、(2)パケット分割と再組み立て、(3)誤り回復制御、(4)コネクション・フロー制御、(5)コネクション・ハン

ドオフ、の機能を有する。

本評価では、飛行実験により、実空間におけるVDLモード2サブネットワーク層の伝送特性を評価した。

4. 2 評価方法

VDLモード2実験システムは、サブネットワーク層に対し、任意長のデータを任意の間隔で発生させるシナリオ機能を有している。

本評価では、212, 412, 612, 812, 1012byteのデータを順に発生させ通信を行った。データの発生間隔は2秒とした。また、地上局情報フレーム（GSIF）の送信間隔は100秒とした。

観測データとしては、各局において通過時刻、再送回数、エラーの有無等を記録した。また、フレーム単位で受信レベル、位相誤差、ビットエラー、再送回数を記録した。これらのデータを実験終了後に解析し評価を行った。

本評価における飛行コースは、仙台⇄大宮間の航空路とし、仙台空港より30NM以遠では高度18000feetのレベル飛行を行った。これは、3.の伝搬特性の評価で飛行した飛行3のコースと同じである。本飛行では5.のハンドオフ特性の評価も同時に行い、合計7往復飛行した。

表4にサブネットワーク層における基本設定を示す。

表4 サブネットワーク層基本設定

パケットサイズ	1024byte
送信ウィンドウサイズ	7パケット
確認ウィンドウサイズ	4パケット

4. 3 結果

図9は、データ長対伝送遅延時間（アップリンク）のグラフである。今回使用した全てのデータ長において、伝送遅延時間（95%値）は2秒以内であったが、最大値は20秒近くであった。

図10はアップリンクにおける受信レベルと平均遅延時間を示したものである。受信レベルは、機上局の受信機入力レベルである。受信したデータ毎に受信レベルを記録し、5dB間隔でデータの遅延時間を集計し、平均を算出した。図から受信レベルが-90dBmを下回ると遅延が増加することがわかる。

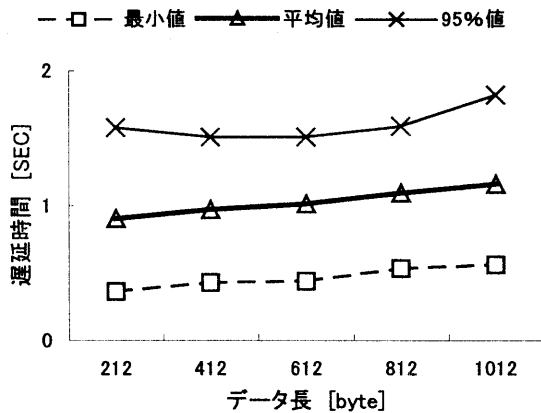


図9 データ長対伝送遅延時間 (アップリンク)

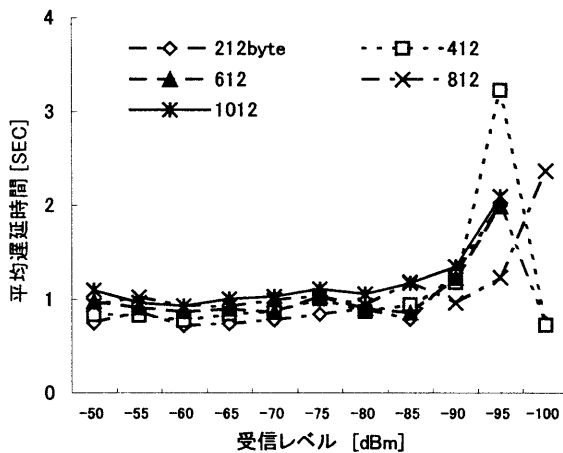


図10 受信レベル対平均遅延時間 (アップリンク)

5. ハンドオフ特性の評価

5.1 概要

航空機が異なる覆域間を跨って飛行する場合や、山岳等による伝搬路の遮蔽によって、空地間のリンクの維持が困難な場合、VDLモード2の機上及び地上通信局は、現在のリンクを切断して新たな通信局とリンクの確立を行うために、ハンドオフを実施する。

機上局が、ハンドオフを実施する条件は、(1)現行リンクのVHF信号品質が劣悪で、別の地上局の信号品質がかなり良好である場合 (SQP ハンドオフ)、(2)現行の地上局に対して送信されたあるフレームの試行回数が規定数を超過した場合、(3)現行リンクに対して、最後に受信してから一定以上の時間が経

過した場合、(4)チャンネルがビジー状態となった場合、である。

機上局は、地上局とのリンクが確立すると、リンクを確立した地上局及び、受信可能な他の地上局について、VHF受信信号品質を監視する。ハンドオフ実施時、機上局は、リンク可能な品質をもった地上局の中から、次にリンクを確立する地上局を選択する。VHF信号品質は、信号品質パラメータ (SQP) として1~15の値に正規化され、0~3が劣悪 (poor)、4~12が適当 (adequate)、13~15が良好 (excellent) である。正規化の方法についての具体的な規定はないが、BER、SNR、タイミング・ジッタ、受信信号レベル、群遅延等に基づいた正規化が考えられる。

本評価では、ハンドオフの方法として最も汎用的と考えられる上記(1)のSQPハンドオフの検証を行った。

5.2 評価方法

本評価は、4. 伝送特性の評価と同時に行った。

VDLモード2実験システムは、受信レベル及び位相誤差を用いたSQPの正規化が可能であるが、今回は受信レベルによる標準化を行った。正規化の基準をまとめたものが、表5のSQPテーブルである。

表5 SQP テーブル

SQP	受信レベル(dBm)
0	-94 未満
1	-94 以上-92 未満
2	-92 以上-90 未満
3	-90 以上-89 未満
4	-89 以上-88 未満
5	-88 以上-87 未満
6	-87 以上-86 未満
7	-86 以上-85 未満
8	-85 以上-84 未満
9	-84 以上-83 未満
10	-83 以上-82 未満
11	-82 以上-81 未満
12	-81 以上-80 未満
13	-80 以上-75 未満
14	-75 以上-70 未満
15	-70 以上

SQP テーブルは、上述の評価結果を参考に、受信レベルが-90dBm程度でハンドオフを実施するよう作成した。SQPは、地上局からの受信レベルとSQPテーブルにより、受信フレーム単位で決定される。ハンドオフ

実施の判定は、地上局信号の SQP に基づいて行うが、受信フレーム毎に判定を行うと、短区間における受信レベルの変動によってハンドオフが頻発する恐れがある。従って本システムでは、さらにスライディングウィンドウ方式による処理を行った。本方式は、地上通信局から受信した信号毎に SQP を決定し、一定期間遡った複数の SQP のうち規定値以上（以下）の SQP の個数によって地上局信号の優劣を判断する方式である。機上局は、この結果に基づいてハンドオフ実施の判定を行う。

本検証では、最新 5 個の SQP のうち、規定値 13 (3) 以上（以下）の値が 3 個以上の場合、地上局は良好（劣悪）であると判断するよう設定した。

5. 3 結果

図 11 に岩沼局からの斜距離と受信レベル及び、区間毎の平均遅延時間を示す。平均遅延時間は岩沼局からの斜距離を 5NM 毎に区切り算出した。図より 110NM 付近で岩沼局から調布局へハンドオフが実施され、遅延は生じていないことがわかる。

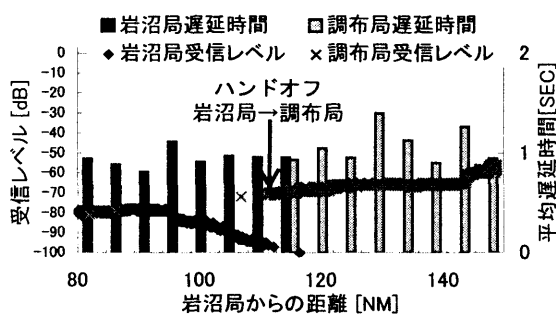


図 11 仙台→大宮(18000feet)

解析の結果、機上局がハンドオフのコマンドを調布局へ送出してからリンクが確立するまでに要した時間は 2.3 秒であった。また、岩沼局の SQP がハンドオフの条件を満たした後、2分 21 秒遅れて調布局が条件を満たし、ハンドオフが実施されたことがわかった。ハンドオフ直前の岩沼局の受信レベルは-95dBm であった。本検証では、ハンドオフ先の地上局の信号は 100 秒に 1 回だけ送出される GSIF しかない。実際の運用においては、他

の航空機と地上局間の通信も SQP 決定の対象となるため、さらに早い段階でハンドオフが実施されると考えられる。

6. まとめ

実験用航空機を使用して VDL モード 2 の総合評価試験を行った。実空間において、電波伝搬特性及びデータ伝送特性の結果を得た。

電波伝搬特性の評価において、FEC 後 BER が 10^{-4} 以下を満足する受信機入力レベルは -90dBm ($31 \mu V/m$) 以上であり、覆域端までの距離は電波の見通しの 82% 以上であった。また、アンテナ直上付近では、メッセージ誤りが多発することが確認された。安定した通信を行なうためには、従来の対空無線用アンテナと同様に、航空路直下には設置しないことが望ましいと考えられる。

地上走行実験では、機体下面のアンテナは地面からの反射や翼による伝搬路の遮断により、上面のアンテナよりメッセージ誤りが多発することがわかった。

データ伝送特性の評価では、比較的伝送負荷の少ない条件において、伝送遅延 (95% 値) は 2 秒以内、最大値は 20 秒以内であった。なお、本飛行実験に引き続いて、より伝送負荷が大きい条件での伝送遅延に関する室内実験を行っている。

ハンドオフ特性の評価では、SQP ハンドオフの検証を行った。ハンドオフは正常に実施され、ハンドオフに要した時間は 2.3 秒であった。

参考文献

- (1) 中島、菅沼、上野、大森：“VHF デジタルリンク実験システムの試作”，運輸省電子航法研究所第 29 回研究発表会, 平成 9 年 6 月
- (2) 中島、藤森、上野、菅沼、大森：“VHF デジタルリンクによる通信評価実験”，運輸省電子航法研究所第 31 回研究発表会, 平成 11 年 6 月