

GBAS（地上型補強システム）入門

（その2）VHFデータ伝送

電子航法研究所 航法システム領域 福島 荘之介 (Sonosuke Fukushima)

1. はじめに

GBAS は、CAT-I から CAT-III の精密進入を目的にした衛星航法による次世代の進入着陸システムである。前回（その1）は、GPS の測位原理と DGPS の基本原理を紹介した後、GBAS の測位原理を説明した。今回（その2）は、GBAS を構成するサブシステムについて簡単に述べた後、VHF データ伝送（VHF Data Broadcast : VDB）を紹介する。VDB は、GBAS の補正データや進入パスの情報を放送する一方向のデジタル通信メディアであって、DGPS の補正值、インテグリティ情報、最終進入パスを定義するデータ（FAS : Final Approach Segment）などを送信する。また将来は、曲線進入パスを構成する TAP（Terminal Approach Path）データの送信を可能とする。

2. GBASのサブシステム

図 2.1 に GBAS の典型的なシステム構成を示す。GPS 衛星から放送される L1-C/A コードは、通常空港内（またはその付近）に設置される GBAS 地上装置の基準局（Reference Station）で受信される。基準局は、GBAS 基準局アンテナ（RA : Reference Antenna）と基準局受信機（RR : Reference Receiver）から構成される。基準局は通常 4 式が設置される（SARPs では最低 2 式）。基準局受信機の出力はモデムなどで伝送されシェルタ内の計算処理部に入力される。米国のプロトタイプは、計算処理部を DCP（Differential Correction Processor : ディファレンシャル補正計算

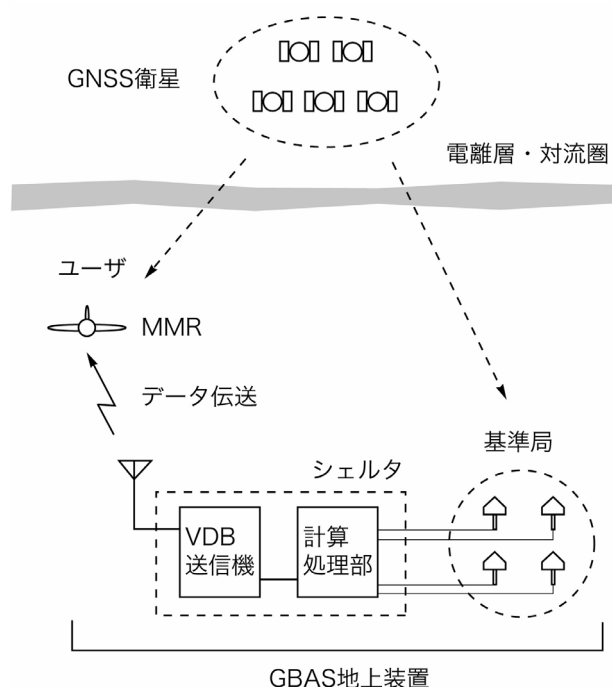


図 2.1 GBAS の基本システム構成

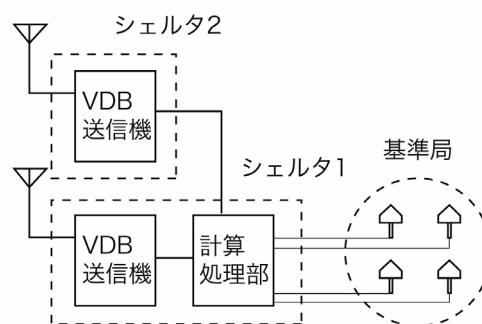


図 2.2 VDB を 2 式にする場合の構成

部)と呼ぶ。計算処理部のソフトウェアは GBAS の核心部分であり、前回 (その 1) 紹介した DGPS 補正值を生成する処理、後述するインテグリティモニタ処理などが行われる。これらの処理結果が VDB メッセージとして送信され、その内容には DGPS 補正值や最終進入パスの情報などが含まれる (その 1 の図 1.8 に示した)。計算処理部のプロセッサユニットは冗長系を持ち通常 2 式以上で構成される。VDB メッセージは、VDB 送信機で変調・増幅されてアンテナから送信される。VDB 送信機は冗長系を持ち、米国および欧州のプロタイプは VDB 送信機 2 式、VDB 受信機 2 式、計算処理部 3 式を備える。VDB 受信機を含むのは、地上装置が VDB の空間信号を復調しモニタするためである。更に、ターミナルなど構造物が滑走路間にある大空港では 1 式の VDB アンテナで全ての進入方向に必要な覆域をカバーできない場合があるかもしれない。このとき、VDB 送信アンテナを 2 式 (またはそれ以上) 利用し、送信機を別シェルタにするなどの構成が考えられる (図 2.2)。

航空機側は、VDB メッセージを受信し、DGPS 補正值や進入パス情報などを復調する。これらは機上で受信される GPS 衛星の擬似距離を補正し、DGPS 測位値からパス偏差を求める。現在、B787、A380 など次世代機に装備が発表されているのは MMR (マルチモード受信機) ユニットであり、ILS 受信機能と共に GBAS の VDB 受信、GPS 受信を含む GBAS 測位機能を備える。MMR の特徴は、測位結果から求めたパス偏差 (DDM に相当) を ILS と同じように表示し、自動操縦系である AFCS (Auto Flight Control System) に出力することである。これにより、機上側は ILS と GBAS を区別することなく機体を制御することができる。MMR には MLS 受信機能もオプションとして装備可能である。

3. VDB(VHFデータ伝送)

3.1 覆域

図 2.3 に CAT-I GBAS の最小 VDB 覆域を示す。

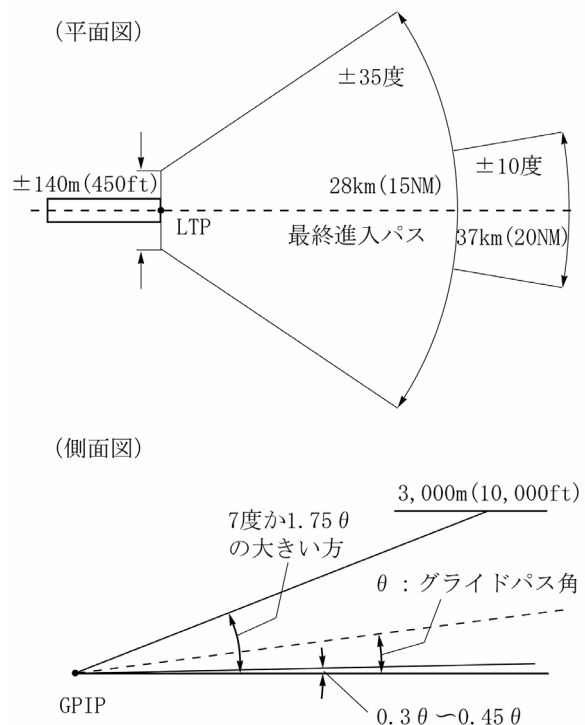


図 2.3 VDB の最小覆域

水平面覆域は、滑走路末端の両サイド 140 m を起点として 28 km までは ± 35 度、そこから 37 km までは ± 10 度とする。滑走路末端は、SARPs で LTP/FTP (Landing Threshold Point/Fictitious Threshold Point) として定義される。垂直面は、通常 3 度のグライドパス角を θ とし、上側は GPIP (グライドパス交点) から 7 度 (または 1.75θ の大きい方)、下側は 0.45θ (または 0.3θ) である。高さの下限と上限は、滑走路末端上 30 m と 3000 m (100 ft と 10,000 ft) である。また、滑走路面上では 3.7 m 以上をカバーするよう拡張することが勧告される。これらの定義は片側の進入で最小限必要な覆域であり、進入復行や逆方向からの進入、横風滑走路の進入などにも適用可能なように、通常は水平面に全方向性の送信アンテナが利用される。

3.2 周波数と送信出力

VDB は、現在の ILS/VOR の周波数帯である 108.0~117.975 MHz を利用する。割り当て可能なチ

チャンネルは 108.025～117.950 MHz である。ILS/VOR が 50 kHz 間隔であるのに対し、VDB の間隔は 25 kHz が可能であり、3.4 節に示すように時分割により 1 つの周波数を 8 スロットで利用できる[1.9]。

SARPs は水平偏波を送信する GBAS/H と楕円偏波を送信する GBAS/E を定義している。GBAS/E は、元々垂直偏波の受信アンテナしか装備できない戦闘機などを考慮して提案されたようだ。民間航空機では、水平偏波の VOR/LLZ アンテナが利用されるため、本稿では GBAS/H を扱う。GBAS/H の ERP (Effective Radiated Power: 実効輻射電力) は、覆域内で 215 μ V/m (最小電界強度) 以上、0.350 V/m (最大電界強度) 以下を満たす電力として定義される。電波伝搬などのロスを考えて計算される公称 ERP は、典型的

表 2.1 VDB リンクバジェットの典型例[1.9]

リンク要素	単位	覆域端
要求受信感度	dBm	-87
最大航空機実装ロス	dB	11
航空機アンテナの電力レベル	dBm	-72
運用マージン	dB	3
フェードマージン	dB	10
23NMでの自由空間ロス	dB	106
公称ERP (実効輻射電力)	dBm	47

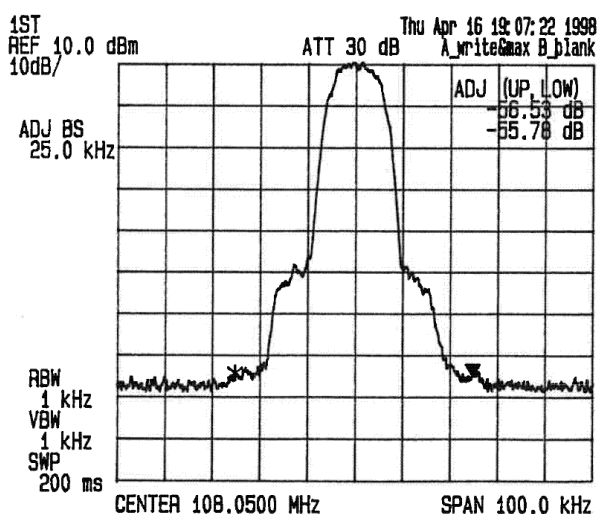


図 2.4 VDB 電力スペクトル (実験用)

なリンクバジェット(表 2.1)から 47 dBm(50 W)と計算できる。送信機出力は、ERP に送信アンテナ利得や送信機出力からアンテナまでのケーブルロスを加えて求める。

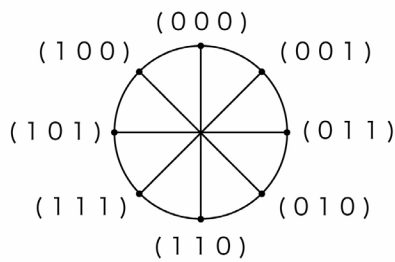
電力スペクトルは、SARPs により、第一隣接周波数 (± 25 kHz) が -40 dBc、第二隣接周波数 (± 50 kHz) が -65 dBc などと制限されている[1.9]。図 2.4 は、電子航法研究所が開発した VDB 送信機の電力スペクトルである(この頃 GNSS パネルは SARPs 案を議論しており、送信電力は 15 W とされていた)。

3.3 変調方式

VDB 送信機は、VDB メッセージを符号化、変調、電力増幅し、時分割により送信する。VDB の変調方式は D8PSK (8 相差動位相変調) が採用される。D8PSK は、8 相を使い一度に 3 bit ($2^3=8$) の '0' と '1' (シンボル) を伝送するデジタル位相変調である。図 2.5 にシンボル (3 bit) と位相シフトの対応を示す。'差動' とは、位相シフト ($0 \sim 7/4\pi$) が 1 つ前のシンボルと現シンボルの差 (3bit の XOR) であることを意味する。このときシンボルは、隣接シンボルと 1 bit しか異ならないグレイコードが利用される (例えば 2 進数で 3 と 4 の差は、011 と 100 で 3 bit、グレイコードでは 010 と 110 で 1 bit)。これは、誤って隣のシンボルを復調した場合、シンボル誤り 1 回につきビット誤りが 1bit ですむためである。VDB の変調速度は 10,500 シンボル/sec で、1 度に 3 bit 送るためデータ信号速度 (1 秒間に伝送するビット数) は 31.5 kbps となる。変調出力は、パルス成形フィルタ (コサインフィルタ) を使い、スペクトルのサイドローブを減じている。

3.4 時分割

図 2.6 に VDB の TDMA (Time Division Multiple Access) のタイミングを示す。各フレーム長は 500 ms であり、2 フレームは GPS 受信機から出力される 1 PPS 信号により UTC に同期する。1 フレームは A～H の 8 スロットで時分割される (1 ス



シンボル (3bit)			位相シフト
l_{3k-2}	l_{3k-1}	l_{3k}	$\Delta \phi_k$
0	0	0	0
0	0	1	$1/4\pi$
0	1	1	$2/4\pi$
0	1	0	$3/4\pi$
1	1	0	$4/4\pi$
1	1	1	$5/4\pi$
1	0	1	$6/4\pi$
1	0	0	$7/4\pi$

図 2.5 : D8PSK のシンボルと位相シフト

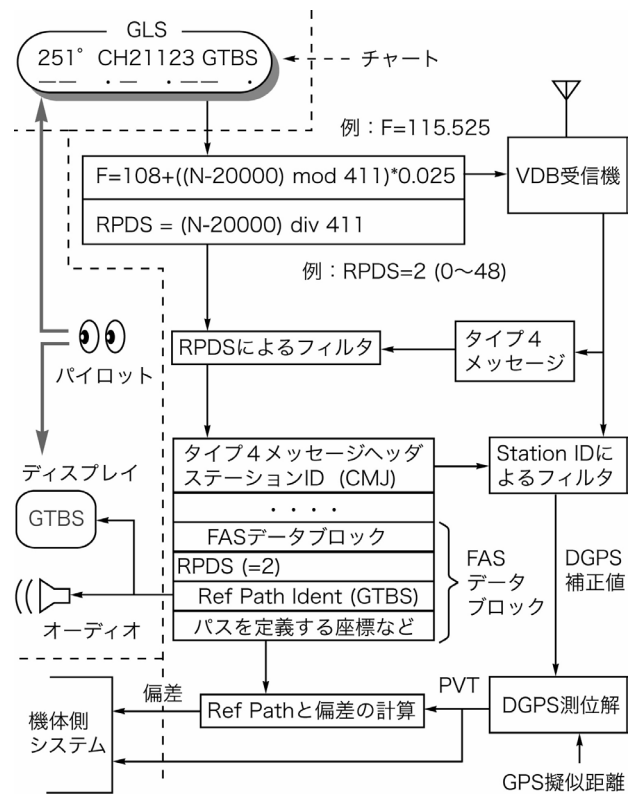
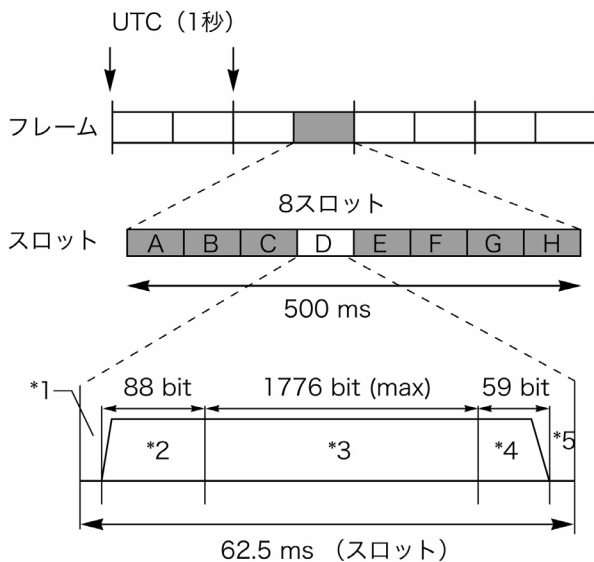


図 2.7 : 機上のチャンネル選択とアイデント[2.1]



- *1 : 95.2us
- *2 : トレーニングシーケンス
- *3 : アプリケーションデータ
- *4 : FEC, Fill Bit, Ramp down
- *5 : ガードタイム 1357.2us

図 2.6 : TDMA タイミング

ロット長は 62.5 ms)。スロット開始タイミング後 95.2 μ s で TDMA バーストが送信され、2 シンボルで 90%の電力まで増加し、次の 5 シンボルで安定する。その後、トレーニングシーケンス、アプリケーションデータ、FEC が送られる。送信後のガードタイム (*5) は 200 NM の距離の伝送が想定して設けられている。1 スロットのアプリケーションデータは最大 1776 bit に制限されており、これ以上のデータは 2 スロットを使って送られる。

3.5 メッセージの符号化

アプリケーションデータは、1 つ以上のメッセージから構成されており、メッセージの前後にはヘッダと 32bit の CRC (Cyclic Redundancy Check) が付与される。ヘッダには、図 1.8 で示したメッセージタイプとメッセージ長が含まれる。アプリケーションデータの後には、3 byte 誤り訂正可能な (255, 249) リードソロモン符号が付与される。次に、復調側でのクロック再生を補助す

るためビットスクランブルが行われる。各タイプ別メッセージの内容は、SARPs[1.9]や ICD[1.12]に詳しく記述されている。

3.6 送信アンテナ

米欧のプロトタイプで、VDB の送信アンテナは、地上高 10 m 程度の 3 段スタックが利用されている（水平偏波）。電子航法研究所では、仙台空港で GBAS の精度評価を目的とし飛行実験した際、VOR のアルフォードループアンテナを 3 段スタックして利用した。

3.7 チャンネル選択とアイデント

GBAS のチャンネル番号は、5 桁の数値（20001～39999）である。現在の ILS の周波数選択との違いは、チャンネル番号が周波数と FAS（最終進入パス）を選択することである。FAS データブロックは、タイプ 4 に含まれる RPDS（Reference Path Data Selector）をインデックスとして選択される。図 2.7 は、機上で 5 桁の数値から周波数と RPDS を計算する方法を示している。この例では、チャートに記載される 5 桁の数値‘21123’が $F=115.525$ と $RPDS=2$ に変換される。‘mod’は割ったあまり、‘div’は割り算とする。割る値として 400（全チャンネル数）でなく 411 を使うのは、チャンネルの一意性を高め操作ミスを軽減するためである。400 で割った場合、一桁違いのチャンネルは同一周波数になる場合があり、‘411’で割った場合は、2 桁以上異ならなければ同一周波数は現れない。ただし、これにより使われないチャンネル（20399～20411 など）も存在する（表 2.2）。

この例では、VDB 受信機は、115.525 MHz で同調し、復調された全てのタイプ 4 データから、 $RPDS=2$ のデータのみを選択する。この FAS データのメッセージヘッダに含まれるステーション ID (CMJ) と一致する DGPS 補正值（タイプ 1）によって、DGPS の測位計算が行われる。また、求めた解（PVT : Position Velocity Time）と FAS データブロックに含まれる座標により最終進入パ

表 2.2 : チャンネル番号と周波数、RPDS

チャンネル番号	周波数 (MHz)	RPDS
20 001	108.025	0
20 002	108.050	0
20 003	108.075	0
...	...	...
20 397	117.925	0
20 398	117.950	0
----- 未割り当て -----		
20 412	108.025	1
20 413	108.050	1
...	...	...

スからの偏差が計算される。ディスプレイには、FAS データブロックに含まれる RPI（Reference Path Identifier）（GTBS）が表示され、パイロットは目視によりチャート上の RPI と同一であることを確認する。オーディオは、モールス符号を使用する。

3.8 VDB のチャンネル割り当て

5 桁のチャンネルは RPDS により最終進入パスを選択し、TDMA のスロットと関係はない。RPDS は 0～48 なので、1 周波数に対しては最大 49 個の FAS が設定可能である。更に ICD[1.12]では最終進入パス（FAS）につなぐ複数の曲線パスである TAP も定義している。

例えば、滑走路が 1 本で両側から進入があり（FAS ブロック 2 式）、両覆域を VDB 1 式でカバーする場合、2 チャンネルが割り当てられる（1 周波数）。滑走路が 2 本（FAS ブロック 4 式）で間に建物（ターミナルビル）があるなど何らかの理由で VDB を滑走路毎に設置して両進入の覆域を VDB 1 式ずつでカバーする場合は、以下 2 通りの方法が考えられる。

- (1) 2 式の VDB を同一周波数（別の 2 スロット）として、4 チャンネルを割り当てる。
- (2) 2 式の VDB を別の周波数として 2 チャンネルずつを割り当てる。

いずれの方法も、送信データは 1 式とすることが可能である。特に (1) の方法は、周波数割り当ての面で有利となるばかりか、片側の進入覆域を 1 つの VDB でカバーできない場合、別の VDB でブラインドやナルをカバーすることを可能とする[1.9]。

4. まとめ

GBAS の構成と VDB について紹介した。VDB は、従来 50 kHz 間隔で利用されていた航法バンドを 25 kHz 間隔で利用可能な水平偏波の一方向デジタル通信である。VDB はデジタルであるため現在の着陸航法装置とは異なり、建物や先行機によって発生するマルチパスが航法誤差に直接影響することはない。またデータ誤りが発生しても CRC 符号により検出可能であり、検出ミスは極めて低い確率に抑えられる。

ICAO の GNSS パネルで VDB が提案され SARPs が議論されたのは、1998～2000 年頃（約 10 年前）であった。この頃、GBAS のデータリンクは NABS（Navigation Augmentation Broadcast System）と呼ばれ、VHF と共に C バンド、L バンドが候補とされた[2.2]。ほぼ同時期に AMC パネルでは VDL（VHF Digital Link）の SARPs が議論されている。VDB と VDL Mode 2 が同じ変調方式や変調速度を採用しており、TDMA を利用しているのは、この頃の技術を反映したものと思われる。ただし、データ長など上記以外は異なっている。

次回は、安全上航空機の進入着陸システムとして重要な GBAS の警報動作や信頼性指標について紹介する予定である。

参考文献

[2.1] Tim Murphy, “Modifications to GBAS for VDB Authentication”, ICAO NSP, CSG, WP08, July 2008.

[2.2] 福島、“キウイの国で GPS の国際会議に参加”, 航空無線, 17 号, 1998(秋期).