

# GBAS（地上型補強システム）入門

## （その1）GBASの測位原理

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

我が国の SBAS（静止衛星型補強システム）である MSAS は 2007 年 9 月に正式運用を始め、順調に補強信号を放送している。GBAS（Ground-Based Augmentation System）は、この SBAS と一対に考案され、ほぼ同時に国際標準の検討が始まった。SBAS がエンルートから CAT-I 程度の進入着陸を想定して提案されたシステムであるのに対し、GBAS は CAT-I から CAT-III の精密進入を目的とした進入着陸システムである。また、SBAS の覆域が北米・欧州全土など大陸規模であるのに対し、GBAS の覆域は基本的に空港周辺の 20 NM である。

GBAS の研究開発は各国で進んでいるが、最も進んだ米国 LAAS（Local Area Augmentation System）のプロトタイプは現時点で運用機材に一番近い（LAAS は米国版 GBAS の名称）。このプロトタイプはオーストラリア、スペインなど GBAS を推進する国の空港に設置されており、エアラインと共同でプロジェクト方式のトライアルが始まっている。また、GBAS 機上装置（MMR：Multi-mode receiver）は既に開発されており、ボーイング社、エアバス社は B787、A380 など次世代機に装備すると発表した。ただし、GBAS 地上装置はまだ開発中のシステムでもあり、現時点で GBAS を正式運用している空港は未だない。

このためか、技術者向けに GBAS 全般を解説した教科書は見あたらない。そこで本稿では、GBAS について入門的な解説を試みたい。内容は、

GBAS の測位原理から始め、システム、警報動作とその信頼性などのテーマを扱う予定である。各国の動向については、国際会議など既に本誌で詳しい報告があるので、本稿ではあえて扱わない。

### 2. GPS測位（再入門）

GBAS はその名前のとおり、GPS などコア衛星システム（国際標準では、米国の GPS とロシアのグロナスと定義されている）を補強するシステムである。このため、GPS の測位原理を知ることが GBAS 理解の第一歩となる。GPS の測位原理については既に多くの解説[1.1~1.4]があるので、衛星関連の業務に係わっている方々など、ご存じの方も多いと思う。しかし、次章以降の説明のため、はじめに GPS 測位について基本的

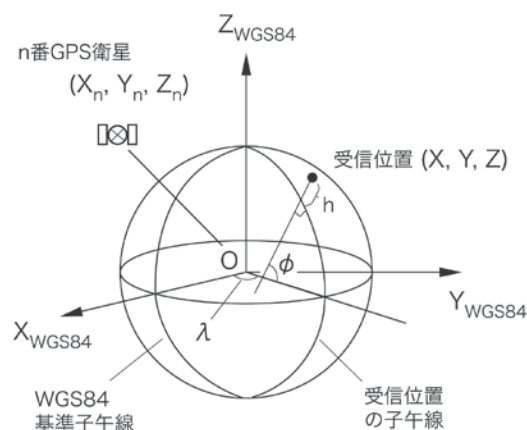


図 1.1 WGS84 座標系

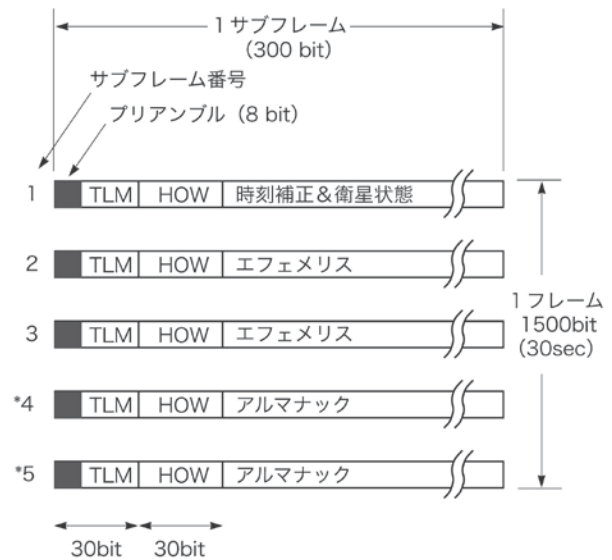
なことを紹介する。

## 2.1 WGS84 座標系

GPS の座標系は WGS84 (World Geodetic System 1984) であり、右手系直交座標である (図 1.1)。右手系とは、右手の親指、人差し指、中指の順に X、Y、Z とする座標である。WGS84 は、地球の重心を原点とし、地球の自転軸の北極方向を Z 軸とし、Z 軸に垂直にグリニッジ子午線方向を X 軸として、これらの軸と右手系で直交するように Y 軸を決める。これを地球中心・地球固定直交座標 ECEF (Earth Centered, Earth Fixed) と呼ぶ。この座標により、例えば地球表面付近にある車両、航空機、人間、宇宙にある衛星位置などは (X, Y, Z) で表現できる。例えば (-3899086.094, 3166914.545, 3917336.601) は、この座標で表したある航空機の位置である。

次に、WGS84 準拠楕円体とは地球形状に近似した回転楕円体であり、図 1.1 の Z 軸を中心に楕円を回転させた立体をいう。この楕円の長半径、扁平率などは定数として与えられている。この準拠楕円体を用いると ECEF で表した受信位置は緯度  $\phi$ 、経度  $\lambda$ 、楕円体高  $h$  で表すことができる。これを測地座標という。このとき経度  $\lambda$  は受信位置の子午線を含む面 (子午面) と基準子午線を含む面 (基準子午面) が赤道面上でなす角、緯度  $\phi$  は受信位置の子午線の接線から下ろした垂線が赤道面と交わる角である (原点を通らない)。楕円体高は回転楕円体からの高さ (接面に垂線方向) であり、平均海面レベルを基準とする高さ (標高) とは異なる。例えば ECEF 直交座標で表現した前述の航空機位置は、測地座標で ( $\phi, \lambda, h$ ) を (38.13579617, 140.91581617, 41.940) と表現できる。これが GPS 受信機でよく見かける表示である。(余談ですがこの場所は仙台空港内電子航法研究所岩沼分室のエプロン。h を除いて google map で検索すると航空写真が…。便利な時代? になりました。)

以上から、地球表面付近の GPS 受信機位置及



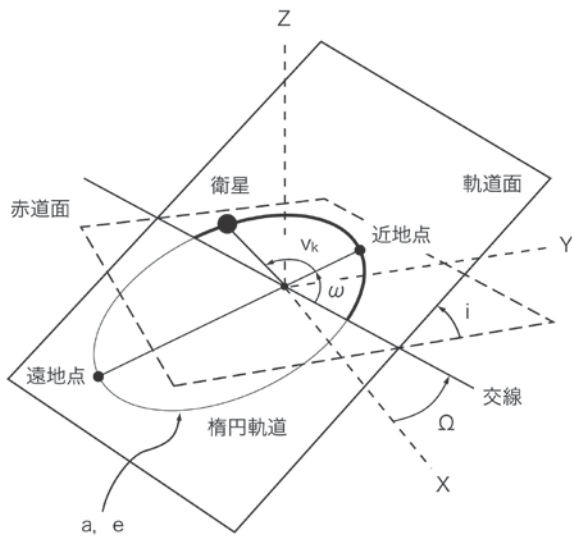
TLM : テレメトリ・ワード (最初の 8 bit は同期用プリアンブル)  
HOW : ハンドオーバー・ワード (最初の 17 bit は週初めからの時刻)  
\* : サブフレーム 4, 5 はフレーム毎に内容が変わり、25 フレーム (12.5 分) で一巡する。これをスーパーフレームと呼ぶ。

図 1.2 航法メッセージの構造

び衛星位置は WGS84 座標系によって ECEF 直交座標または測地座標で表示できる。また、これらは簡単な近似式を使い相互に変換可能である。さらに ECEF 直交座標は、ある点を原点として、天頂方向 (WGS84 準拠楕円体に接する平面に垂直) を U 軸、北方向を N 軸とし、右手系でこれらに直交する方向を E 軸 (東方向) とする ENU 座標 (地平座標とも呼ばれる) に変換できる。ENU 座標は GPS で測位した位置の水平面・垂直面を表すのに使われ、通常測位誤差はこの座標で表される。また GBAS ではこれとほぼ同様な滑走路座標が使われる (詳細は 4 章で説明)。また、ENU 座標を使うと地表のある位置からみた航空機の角度や距離が簡単に計算できるため、航空機が原点付近にいる場合によく利用される。

## 2.2 GPS 衛星が放送するメッセージ

GPS 衛星から送信される民生用信号 (C/A コード) は、50 bps の航法データを BPSK 変調し、1.023 MHz の擬似雑音 (Pseudo Random Noise :



■ 計算手順：

- (1)  $i$  (軌道傾斜角) から赤道面と軌道面の角度を決め、 $\Omega$  (昇降点赤経) から軌道面と赤道面の交線とX軸の角度を決め、軌道面を座標に固定する
- (2)  $a$  (長半径) と  $e$  (離心率) から楕円を決め、 $\omega$  (近地点引数) を近地点 (楕円の焦点から一番近い点) から交線の角度にして楕円を軌道面に固定する
- (3)  $M_0$  (元期の平均近点角) と元期  $t_0$  から時刻  $t$  における  $M_k$  (平均近点角) を計算し、ケプラー方程式から  $E_k$  を求め、 $v_k$  を求める。

図 1.3 GPS衛星の位置計算の一例

PRN) コードでスペクトラム拡散変調した信号である。PRN コードは、衛星毎に異なる。受信機は内部に全ての PRN コード (レプリカ) を有しており、衛星信号を逆拡散して航法メッセージを復調する。図 1.2 に示すように航法データは、1,500 bit を 1 フレームと呼ぶ (50 bps なので受信に 30 秒かかる)。1 フレームは 5 つのサブフレームから構成される (1 サブフレームは 300 bit、6 秒)。このうちサブフレーム 1 は各衛星の時計の補正值、ヘルスフラグ (健康状態) などである。サブフレーム 2 と 3 は軌道パラメータが主でありエフェメリス (放送暦) と呼ばれる。サブフレーム 4、5 は全衛星の概略の軌道情報 (アルマナックと呼ばれる) と電離層遅延補正係数であり、サブフレーム 1~3 とは異なり 25 フレーム (12.5 分) 受信して全情報が完結する。これら

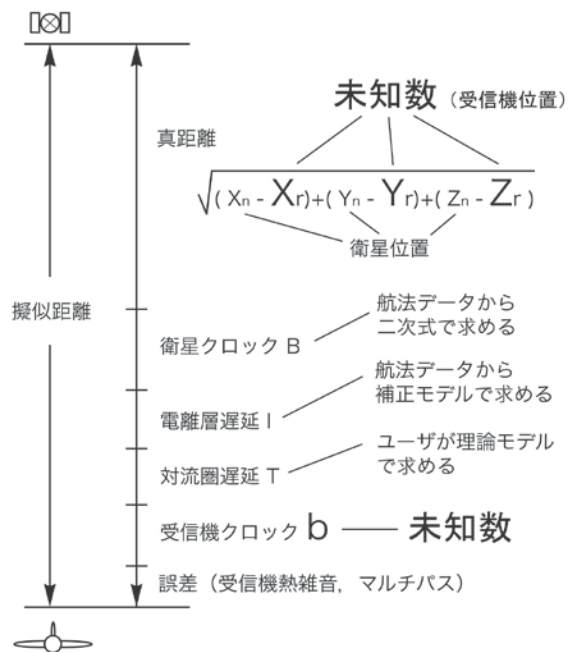


図 1.4 擬似距離に含まれる成分

GPS衛星から送信される信号はインターフェース仕様 (IS : Interface Specification, 従来の ICD) [1.5]で詳細に定義される。

エフェメリスには、ケプラーの軌道要素とその補正量などのパラメータが含まれており、図 1.3 に示す一例のように、ある時刻の衛星の ECEF 位置を幾何的に計算できる。計算手法は、同様に IS で定義される。

### 2.3 測位演算

GPS 受信機では、レプリカを時間シフトさせて受信信号との相関をとる。この相関関数は受信信号とレプリカが一致したとき鋭いピークを示す。受信機は内部クロックを使いこのシフト分などから見かけの伝搬時間を測定する。この伝搬時間に光速を乗じたものが受信機の出力する各衛星の擬似距離である。擬似距離の「擬似」のゆえんは真距離 (衛星と受信機間の距離) とは異なり、受信機クロックのバイアス、電離層遅延、対流圏遅延などを含むことによる。

図 1.4 に擬似距離に含まれる成分を示す。このうち衛星クロックのバイアスは、サブフレーム 1 に含まれる二次方程式の係数 ( $af_0, af_1, af_2$ ) から

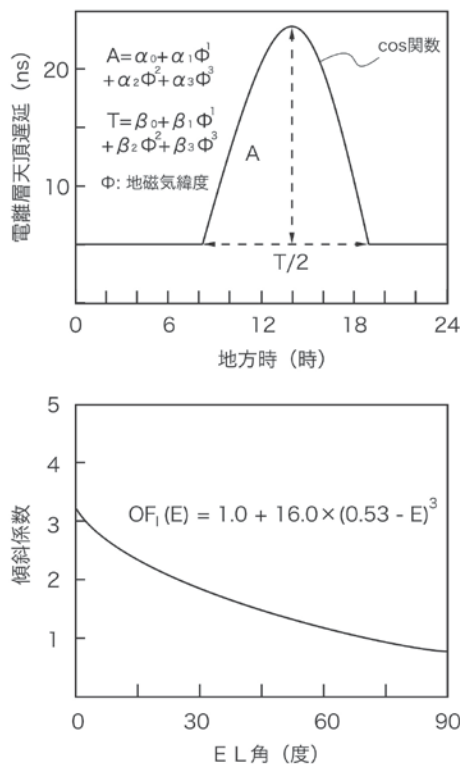


図 1.5 電離層補正モデル

求められる。電離層遅延は、サブフレーム 4 に含まれる電離層補正モデルのパラメータ ( $\alpha_i, \beta_i$ ) から求める。このモデルは地方時の昼間を  $\cos$  関数、夜間を定数とし、この振幅や周期をパラメータで与え、天頂方向の遅延を表す (図 1.5)。電離層内を電波が通るパス長は、衛星仰角に依存するため、ある地点の遅延量は天頂方向の遅延量に傾斜係数 (衛星仰角の関数) を乗じて求められる。通常天頂方向の昼間の遅延量は最大 30 m 程度であり、夜間はこの 1/5~1/10、低仰角ではこの約 3 倍となる。

対流圏遅延は、ユーザ側でホップフィールド、ザースタモイネンなど理論モデルから計算される。モデルは地上の気圧、気温、相対湿度から天頂遅延量を求める関数で、市販の受信機では典型的な気象データが仮定される。天頂方向の対流圏遅延は、約 2.3 m、低仰角では約 10 倍となる。衛星クロックと電離層遅延の求め方は、IS に記述される。

以上から、未知変数は真距離の式に含まれる受信機位置 ( $x, y, z$ ) と受信機のクロックバイアス  $b$  の 4 つとなる。従って、最低 4 衛星を受信し 4 本以上の式から連立方程式を立てれば、4 つの未知数を求めることが可能となる。実際には、擬似距離に誤差 ( $\epsilon$ ) が含まれると考え、最小二乗法で解を求める。これらは机上のパソコンでも計算可能なので、座標変換、衛星位置計算、測位演算の詳細な数式、計算プログラムについてご興味のある読者は [1.3, 1.4] を参照されたい。

### 3. ディファレンシャルGPS

前章で述べた測位手法は、単独測位と呼ばれる。単独測位の位置誤差は、2000 年 5 月までは SA (選択利用性) により 100 m オーダであった。SA 解除後発行された GPS SPS 性能標準 [1.6] では、平均的に水平面で 13 m、垂直面で 22 m (95% 値) と書かれている。また、擬似距離に含まれる平均的な誤差は、6 m 以下と見積もられた。擬似距離誤差は、衛星クロック、エフェメリス、電離層、対流圏の誤差などである。

これに対し、ディファレンシャル GPS (以降 DGPS と略す) は、基準局と呼ぶ固定位置で求めた補正値をユーザに伝送し、ユーザ側の誤差を相殺して除去し精度を向上する技術である。DGPS では、衛星クロック、エフェメリス、電離層、対流圏の誤差が基準局から数十 km~数百 km までほぼ同じであり、時間的にゆっくり変化するという原理を利用する。これは二地点の誤差が相関を持っているという意味であり、時間的にも空間的にも近いほど似た値となる。ただし、受信機の熱雑音による誤差とマルチパスによる誤差だけは相関がない。誤差は、各衛星で異なり、通常衛星仰角の低い衛星ほど誤差が大きい。

GBAS の原理となる、このような狭域 DGPS の概念を図 1.6 に示す (SBAS は広域 DGPS を原理とする)。狭域 DGPS では、基準局の位置 ( $X_b, Y_b, Z_b$ ) をあらかじめ精密に GPS 測量し、数 cm オーダで求めておく。すると、前章でエフェメ

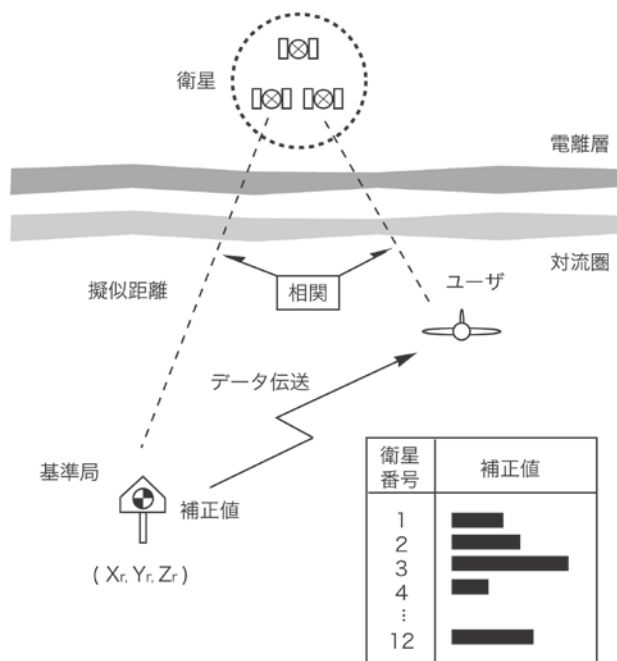


図 1.6 ディファレンシャルGPSの構成

リスから求めた各衛星位置 ( $X_n, Y_n, Z_n$ )と基準局間の距離は、二点間の距離として求めることができる(ここでは真距離と呼ぶ)。この真距離から各衛星の擬似距離を引いたものが、DGPSの各衛星の擬似距離の補正值となる(図 1.7)。この補正值はPRC(Pseudo Range Correction)と呼ばれる。次に、現時刻のPRCと1時刻前の差をとるなどしてPRCの変化率を求める。これは、RRC(Range Rate Correction)と呼ばれる。基準局は、全受信衛星分のPRCとRRCに時刻 $t_2$ (修正Zカウント)を付加し、何らかの伝送手段でユーザに伝送する。

ユーザは、時刻 $t_2$ に補正值を受けとった場合、擬似距離に補正值をプラスすれば、補正により真距離に近い値が得られる。しかし、実際には伝送のため少し遅い時刻 $t$ に補正值を受け取る。このため、伝送時間( $t-t_2$ )とPRCの変化率であるRRCを使って擬似距離を、

$$(\text{擬似距離}) + \text{PRC} + \text{RRC} \times (t - t_2)$$

と補正する。これはPRCを切片、RRCを傾きとし一次式で近似していることに相当する。ユー

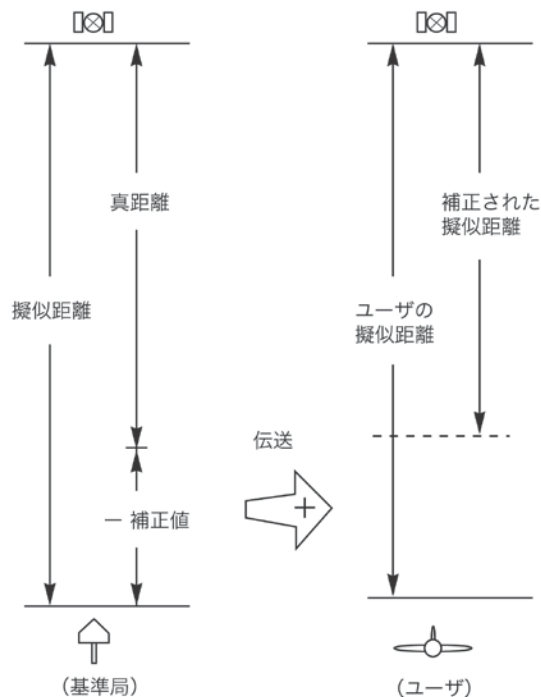


図 1.7 ディファレンシャルGPSの補正

ザ擬似距離には補正值と同様、電離層と対流圏遅延が含まれる。したがって、基本的に単独測位の様にユーザ側で電離層と対流圏遅延を補正する必要はない。ただし、山の上など高さ分については、この分だけ対流圏遅延を補正する。このとき、地表面の代表的な気象が仮定される(GBASでも同様にユーザ側で対流圏補正を使う。4章で説明)。

通常衛星クロックは、ユーザ側でも全く同じ値が計算できるため、補正值から除かれている場合が多い。これにより伝送メッセージの桁を小さくできて伝送データを圧縮できる。また受信機クロックは、この計算では補正值に含まれる。しかし、全受信衛星に共通な値であるため、ユーザ側の測位演算で時計のバイアス分となって現れ、測位結果には影響しない。RRCはSAが存在していたときは大きな値であった。しかし、SA解除後はほとんどゼロに近く一次式近似の意味はなくなりつつある。

エフェメリスは通常2時間に1回全衛星が切り

替わる。このため、伝送メッセージには、利用したエフェメリスの発行番号（IOD：Issue of Data）が付加される。ユーザは、GPS から受信したエフェメリスと補正値の IOD が同一ならば、補正に使うことができる。ユーザの GPS 受信機が新しいエフェメリスを受信した場合、基準局から新しいエフェメリスの補正値の送信を待つ必要があり、それまでの間は古いエフェメリスで補正する。基準局は、ユーザより先に新しいエフェメリスの補正値を放送すると、ユーザが利用できないため、新しいエフェメリス受信後少し遅らせて新エフェメリスの補正値に切り替え放送する必要がある（GBAS では 2~3 分）。

初期の DGPS は、船舶用途への応用が有名であり、1985 年に RTCM（Radio Technical Commission for Maritime Services：米国海上無線技術委員会）は、RTCM SC-104 を規格化した[1.7]。米国沿岸警備隊は、本フォーマットを使い中波ビーコンによる DGPS サービスを開始し、日本でも海上保安庁が全国 27 局の沿岸ビーコンから DGPS 補正情報を送信している。また、FM 多重により DGPS 補正値を本フォーマットで送信するサービスも登場し、多くのカーナビに普及したが、最近放送を終了した（1997~2008 年）。

#### 4. GBAS の測位

GBAS では、3 章で説明した狭域 DGPS を基本原理としている。このため、GBAS 地上局はあらかじめ精密に測量した基準位置と衛星のエフェメリスから求めた衛星位置から PRC と RRC を計算し、航空機に放送する。実際の GBAS 地上装置の PRC 計算で最初に行われるのは、キャリアスムージングと呼ばれる一種のフィルター処理である。この処理は、GPS 受信機が出力する搬送波位相（carrier phase）を使う。これは、L1 周波数の正弦波をカウントして測った距離に相当する。この特徴は、数 cm オーダーで正確なことだが、波長の整数倍のバイアス（整数不確定性）を持つという難点がある。しかも、このバイアスは、搬送波の瞬断（サイクルスリップ）

によりジャンプする。一方、擬似距離は搬送波に比べて精度が低い、バイアスは持たない。キャリアスムージングでは、これらを融合しバイアスのない精度の高い距離を得ることができる。この距離の精度はフィルタの時定数が長いほど高くなる。しかし、追尾開始時にフィルタに擬似距離と搬送波位相を与えたとき、精度の高い距離が出力されるまで、この時定数分の時間を要する。このため、時定数を長くすると、衛星が見えない時間帯が長くなるのと同じ効果を生じてしまう。GBAS では、この時定数を 100 秒と決めており[1.9]、機上装置にも同等の時定数を持つフィルタの採用を規定している[1.10]。

次に、GBAS 地上装置は、PRC と RRC を計算する。このとき、一般の DGPS と大きく異なるのは、基準局を 4 局使うことである（国際標準では、2 局から定義可能）。4 局を使う理由は二つあり、一つは PRC の精度向上、もう一つはインテグリティを保証するために使う情報（B 値）を作成するためである（次回以降で説明する）。PRC の精度を向上するには、4 局でそれぞれ作成した PRC を平均すればよい。ユーザ側の誤差が各基準局と同じで独立と仮定すれば、平均によるユーザ誤差の低減は約 20% である。ただし、基準局数を増やしても大きな効果は期待できず、例えば 7 局でも 25% にはならない[1.8]。

GBAS では、航空機と基準局の間には高度差が大きいため、高度差分だけの対流圏補正が重要となる。このため、擬似距離を補正するのは、

$$\text{PRC} + \text{RRC} \times (t - t_2) + (\text{対流圏補正}) + (\text{衛星クロック補正})$$

である[1.11]。また、地表面の屈折指数、スケールハイト（対流圏の実効的な高さ）が地上から送信され、補正計算に使われる。

GBAS が放送するメッセージのタイプを図 1.8 に示す[1.12]。PRC と RRC は、タイプ 1 であり 1 秒に 2 回（2 Hz）全衛星分を放送する。タイプ 2 の GBAS 関連データには、対流圏補正に使うパラメータや基準局の数などが含まれる。SBAS と異なるのは、タイプ 4 で FAS と呼ぶ最終進入コ

ースのデータを送ることで、これにより進入コースからの偏差を GBAS の出力とすることが可能となる。MMR は最終的に ILS の DDM に換算して出力する。更に、タイプ 4 には TAP (Terminal Area Path) と呼ばれる曲線セグメントを構成するデータが含まれる予定である [1.12] (SARPs [1.9]では現在未定義)。

FAS は、図 19 に示す滑走路座標で定義される。これは、1 章で説明した ENU 座標と同等であり、原点を進入側の滑走路末端に置き、滑走路中心線に沿って進入方向を X 軸、上方向を Z 軸、右手系で Y 軸 (進行方向に左手) にとる。FAS は、通常 3 度の GP 角を持つパスが TCH (Threshold Crossing Height) の高さを通るように定義される (厳密には SARPs[1.9]を参照)。

国際標準で規定される CAT-I 精密進入の (空間での) 性能要求値は、水平方向で 16.0 m、垂直方向で 4.0 ~6.0 m とされる。垂直方向の値が範囲を持つのは、国際標準を議論した際、ILS 基準の解釈が検討グループにより異なり、一つに決定するのを避けたためである (保守的に 4.0 m を主張したのは、GBAS を検討したグループであった)。95%値は、誤差の分布を書いたとき、その 95%が含まれる値であり、誤差が正規分布で平均がゼロの場合には  $2\sigma$  に等しい。CAT-II/III については、現在国際標準が精力的に検討されているところであるが、RTCA 文書[1.11]では垂直方向 2.9 m、水平方向 5.0 m が要求されている。

電子航法研究所では、2002~2004 年に GBAS の研究用テストベッドを用いて GBAS の測位精度を計測した。この結果、静止した擬似ユーザー局を使い 2004 年 4 月~9 月の 5 ヶ月間に 134 日の連続観測データから求めた誤差は、垂直方向で 0.581 m (95%値)、水平方向で 0.577 m (95%値) である。擬似ユーザー局は、基準局から約 320 m の位置に設置された。

また、航空機を使った実験では、垂直方向で 0.812 m (95%値)、水平方向で 0.574 m (95%値) であった。この値は 2002 年 7 月から 2004 年 3 月までに行われた 5 回の実験で 187 回のアプロ

タイプ	名称	放送レート (秒)	
		最小	最大
0	(予備)		
1	ディファレンシャル補正	0.5	0.5
2	GBAS 関連データ	80	4.0
3	(地上レンジング源のリザーブ)		
4	最終進入セグメント (FAS) データ	80	4.0
5	予測レンジング源アベイラビリティ	80	20
6	(予備)		
7	(ナショナル利用の予備)		
8	(テスト利用の予備)		
9-255	(予備)		

図 18 VDBメッセージタイプと放送レート

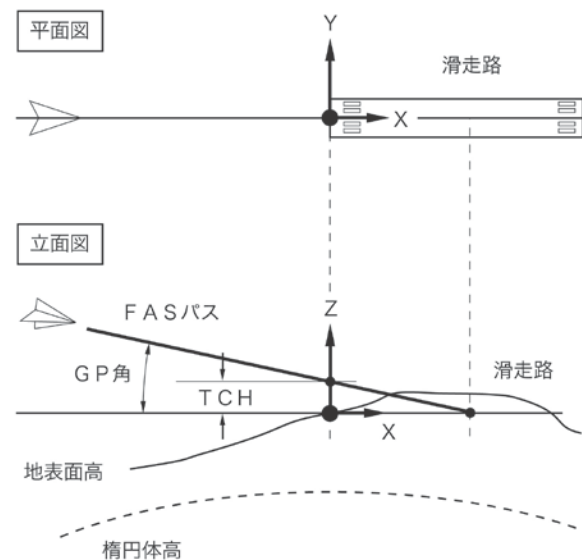


図 19 滑走路座標と FAS の定義

ーチ飛行から求められた。アプローチは何れも、仙台空港 R/W30 への約 8 NM からの進入 (レベル高度は 1,500 ft) である。飛行実験の誤差が静止状態に比べて大きいのは、測定環境の他、測定手法が異なるためである。移動する航空機位置の測位誤差を正確に計測するため、測量用の GPS 受信機を用い、後処理で基準の航空機位置

を数 cm～約 10 cm の誤差で求め、差分により GBAS 測位の誤差を求めた。

GPS の誤差は、衛星の配置から垂直誤差が水平誤差より大きいことが知られており、CAT-I の要求値は垂直が小さいため、垂直方向で評価する方が厳しい。飛行実験結果の垂直航法誤差は 1 m 以下であり、CAT-I 垂直要求値の 4 m [1.9]と CAT-II/III 垂直要求値の 2.9 m [1.11]を十分満足する性能が計測されている。

## 5. まとめ

本稿では、はじめ GPS 測位と DGPS の基本原理を述べた後、これを元に GBAS の測位原理を紹介した。既に文中で参照したが、更に厳密な理解を求める読者には、CAT-I までの国際標準 [1.9]の他、RTCA が発行する文書をお勧めしたい。これは、主に機上装置に関する MOPS [1.10]、地上装置に関する MASPS [1.11]、地上と機上のインターフェース仕様である ICD [1.12] (MASPS とセット) である。国際標準の重要性は述べるまでもないが、文書として頭から読み、地上装置を理解するには MASPS と ICD が読みやすい。

次回は、システム関連に移り、補正情報の伝送手段である VHF データ伝送 (VDB : VHF Data Broadcast) を紹介する予定である。

## 参考文献

- [1.1] P. Misra and P. Enge, 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, 日本航海学会 GPS 研究会, 2004 年.
- [1.2] 坂井丈泰, GPS 技術入門, 東京電機大学出版局, 2003 年 2 月.
- [1.3] 福島荘之介, “理解するための GPS 測位計算プログラム入門 (その 1) ~ (その 3)”, 航空無線, no.34~36, 2002 年 12 月, 2003 年 3, 6 月.
- [1.4] 坂井丈泰, GPS のための実用プログラミング, 東京電機大学出版局, 2007 年 1 月.
- [1.5] “IS-GPS-200D”, Navstar Joint Program Office, Dec. 2004.

[1.6] “Global Positioning system standard positioning service performance standard”, Assistant secretary of defense for command, control, communications, and intelligence, Oct. 2001.

[1.7] RTCM SC104, “RTCM Recommended Standards for Differential Navstar GPS Service, Version 2.0”, Jan. 1990.

[1.8] 福島荘之介, “多基準局による狭域 DGPS の測位性能評価”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vo. J84-B, No. 12, pp. 2212-2219, 2001 年 2 月.

[1.9] ICAO, “Aeronautical telecommunications Annex 10 to the convention on international civil aviation”, volume I, amendments-77, Nov. 28, 2002.

[1.10] RTCA SC-159, “Minimum operation performance standards for GPS local area augmentation system airborne equipment”, DO-253B, June 26, 2007.

[1.11] RTCA SC-159, “Minimum aviation system performance standards for the local area augmentation system (LAAS)”, DO-245A, Dec. 9, 2004.

[1.12] RTCA SC-159, “GNSS-based precision approach local area augmentation system (LAAS) signal-in-space control document (ICD)”, DO-246C, Apr. 7, 2005.