

# GBAS（地上型補強システム）入門

## （その3）警報動作と安全性要求

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

本連載では、これまで GPS の測位原理にはじまり、DGPS の原理、その応用としての GBAS の測位、GBAS のサブシステム、VHF データ伝送を紹介した。今回は GBAS で最も技術的に難しく、長年研究テーマとされてきた警報動作と安全性要求を扱う。精密進入の安全性要求はエンルート、ターミナル、垂直ガイダンス付き進入（APV）に比較して最も厳しく、GBAS には ILS と同等の安全性が要求される。

### 2. インテグリティ要求

GBAS の目的は GPS などコア衛星システムで不足するシステムの性能を補強することである。これは、航法システム誤差を低減するという目的（精度要求）にとどまらず、故障・異常時にタイムリーに警報を発出する機能（インテグリティ要求）にも及ぶ。GPS では衛星が故障してから、ヘルスフラグによってその情報がユーザに伝わるまで数分～数時間かかると言われる。GBAS は、この時間のかかる警報動作を補強し、CAT-I の場合は ICAO SARPs にあるように警報を 6 秒以内に確実に発出しなければならない。この確実さの度合いは、**インテグリティ（完全性）**と呼ばれ、同 SARPs で 1 アプローチ（per any one approach）あたり  $1-2 \times 10^{-7}$  (=0.9999998) と規定される。異常による影響が発生してから機上装置が警報を発出するまでの時間を表す 6 秒は TTA（Time-to-alert）と呼ばれ、GBAS 地上装置には 3 秒、機上装置に 3 秒が割り当てられている。

従って、GBAS 地上装置は、異常状態の発生を検知して（インテグリティモニタ）、3 秒以内に異常衛星を補強情報から排除する機能を持つ。警報は GBAS 機上装置側が計算・出力する**保護レベル**にもとづいて機上システムが判断する。インテグリティリスクとして要求される  $2 \times 10^{-7}$  は、ICAO が過去 30 年間の事故統計を根拠に導出した値であり、最終進入と着陸の目標安全度（Target level of safety）を  $1 \times 10^{-8}$  として、これをインテグリティへ割り当てた要求値である[3.1]。

信頼性要求には、この他**コンティニュイティ（連続性）**と**アベイラビリティ（有効性）**がある。コンティニュイティは、進入中の航空機にサービスを連続して与えるための指標である。これは誤警報を頻繁に出さないようにするという意味である。CAT-I のコンティニュイティは、15 秒間で  $1-8 \times 10^{-6}$  と規定される。地上装置のモニタは、インテグリティ要求を満足するため異常を早く検知したいが、コンティニュイティ要求により誤警報はある一定値以下にしなければならない。これはシステム設計においてトレードオフの関係となり、故障・異常を検知するモニタに高い能力が必要となる。また、そもそも故障・異常の頻度を低くすることが必要である。

これに対して、アベイラビリティは、警報（誤警報を含む）による中断なしにサービスを行う時間の割合であり、99～99.999% と幅を持って規定される。これはアベイラビリティが効率性を意味しており、航空機の発着頻度など様々なコストを考慮して規定すべき指標だからであ

る。

### 3. 警報動作

ILS はアンテナ前方の建物や地形からのマルチパスによりコースやパス特性が乱れる場合があるが、地上移動する航空機がマルチパス源となる場合を除いて、時間的に変動しない。これに対して衛星航法では GPS 衛星が運動するため、測位誤差が衛星配置によって変化する。例えば、受信衛星数が少なかったり、全天に均等に配置されない場合 (DOP が増加するとき) ユーザ (航空機側) の測位誤差は増加する。

また、GBAS 地上装置は放送型であるため、ユーザがどの衛星を使って測位しているかを把握できない。そこで測位誤差が増大した場合に警報を发出する方法として、**保護レベル**が採用された (SBAS も基本的に同様の方式である)。保護レベルはユーザが計算する指標で進入コースに垂直方向の VPL と横方向の LPL がある。LPL は、滑走路への進入方向に直交する方向の保護レベルであり SBAS の保護レベルが水平方向の最悪値に対応するのとは異なる。図 1 に示すように、保護レベルは地上装置が放送するインテグリティ情報 (衛星毎のレンジ誤差の  $\sigma$  値)、衛星配置を示す S 行列、機上のパラメータから計算される。図では VPL だけを示したが LPL も同様に計算される。GBAS では 4 式の基準局受信機の観測値に異常がない場合の H0 仮定と 4 式のうち 3 式が正常に GPS 衛星を観測している H1 仮定を考え、それぞれの場合について保護レベルを計算する。

保護レベルの詳細な計算式[1.9~11]は省略するが機上では  $VPL_{H0}$  と  $VPL_{H1}$  の両方を常に計算して大きい方を VPL とする。保護レベルは、測位誤差の推定値である信頼性限界を計算しており、平たく言えば測位誤差のほぼ最大値を推定していることになる。GBAS の垂直誤差は、実験結果から固定点で 58 cm (95%値) であり、VPL は概ね 1~3 m を中心に分布することが分かっている [3.2]。VPL は衛星の配置によって異なるため時間

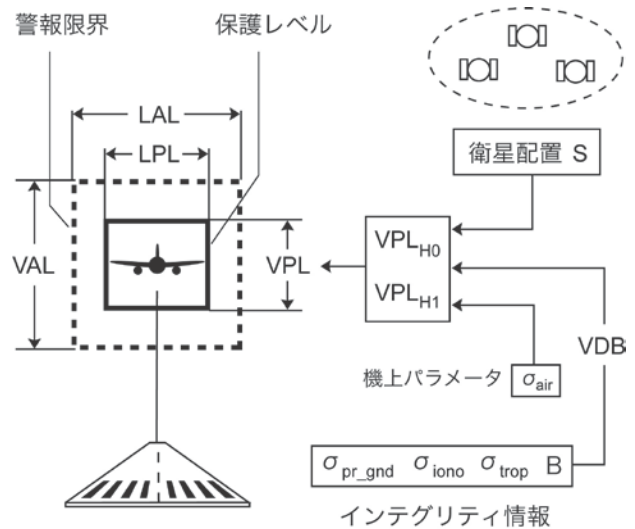


図 1 : 保護レベルの計算原理

的に変化する。また地上から送信するインテグリティ情報は、補正値の誤差のある種の標準偏差であるため、補正値の質が悪ければ保護レベルが大きく計算される。

機上では、この保護レベルを**警報限界** (アラートリミット) と比較して、この値を超えたときに警報とする。警報限界は、垂直方向の VAL と横方向の LAL があり、CAT-I で 200 ft 以下は VAL=10 m、それ以上は線形に増加して 1,340 ft で 43.35 m まで緩和される。一方、LAL は滑走路末端から 873 m までは LAL=40 m、それ以遠は線形に増加して 7,500 m で 69.15 m となる。

### 4. インテグリティモニタ

ILS の警報動作はシンプルで分かり易い。これは ILS のインテグリティが原則として地上送信機のハードウェア故障に依存することによる。このため、ILS では地上装置の送信信号をモニタし、両送信機のパス角などに異常があれば送信を停止する。機上では送信信号が受信できなければ警報とする。

ところが GBAS でインテグリティ上問題となる事象のうち比較的頻度が高いのは GPS 衛星の故障や不具合である。GPS 衛星には原子時計が搭載されており過去に何度も寿命を迎えている。この寿命末期に原子時計の不具合が発生した事

例など衛星の故障が報告されている[3.3]。これまで報告された GPS 衛星の故障・不具合のうち GBAS のインテグリティに影響を与えるのは、(1)GPS 信号の電力低下、(2)コード・搬送波ダイバージェンスの増加、(3)擬似距離の加速度過剰、(4)放送暦異常、(5)信号歪み（19 番衛星問題が起源となった[3.4]）である。また、(6)電離層遅延量の異常勾配が機上受信機内のキャリアスミージング処理で増大し脅威となることが分かっている。

インテグリティモニタは、これらの異常を検知して、対応した補強情報を生成するソフトウェア処理である。米国の LAAS における処理の概念的な流れを図 2 に示す。基準局の GPS 受信機が出力する各衛星のデータ（擬似距離、搬送波位相、C/N0、エフェメリスなど）はモデムなどを介して計算処理部に伝送される。例えば、計算処理部の加速度過剰モニタは、各衛星の各受信機の搬送波位相データから一定のアルゴリズムにより加速度に相当するモニタすべき値（検定統計量）を計算する。モニタは、数日～数週間分の過去のデータから検定統計量の統計分布を求め、あらかじめ異常とするしきい値を決めておく。

その上で、リアルタイムに計算された検定統計量がしきい値を越えた場合にフラグを立てる。このフラグは統括モニタ（Executive Monitor）に入力され、ある衛星が 2 台以上の受信機でフラグを立てられた場合など一定の基準で衛星の異常と判断する。モニタ処理は実際には補正値の生成処理と密接に関連しており、これらは一体のソフトウェアとして動作する[3.5, 3.6]。また、電離層遅延量の異常勾配に関しては GBAS 地上装置では検出できない場合があることから、ジオメトリスクリーニングと呼ばれる処理により、異常勾配があった場合にインテグリティ破綻を招く可能性のある衛星を使用させないようにする[3.7]。最近、磁気低緯度（日本列島の南方）に発生するプラズマバブルが大きな勾配を作るため、GBAS への脅威として考慮する必要性がある

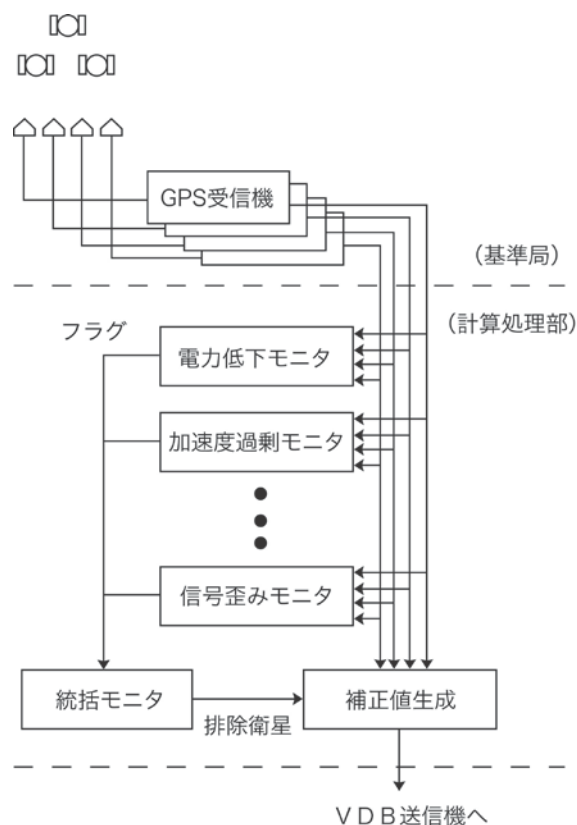


図2: インテグリティモニタの流れ

ことが分かっており、その影響について研究を進めている[3.8]。

## 5. 安全性評価

さて、GBAS 地上装置は異常な衛星信号をモニタによって排除する仕組みを備えるが、ICAO が規定する 1 アプローチあたり  $1-2 \times 10^{-7}$  のインテグリティは保証されているだろうか？このリスクである  $2 \times 10^{-7}$  を換算するとアプローチ五百万回に 1 回の割合となる（ただし、本来インテグリティ要求は全てのどのアプローチでも  $1-2 \times 10^{-7}$  を満たす必要がある）。これを実験データのみで実証するのは、不可能である。

この安全性要求の証明に必要なのは、(1) 理論、(2) 計算機シミュレーション、(3) 実験データ、の三つである。理論のみでは現実を見損なうかもしれないし、計算機シミュレーションは特定の試験シナリオしか扱わない。しかし、実験データは理論を支持する。理論は有限な実験データ

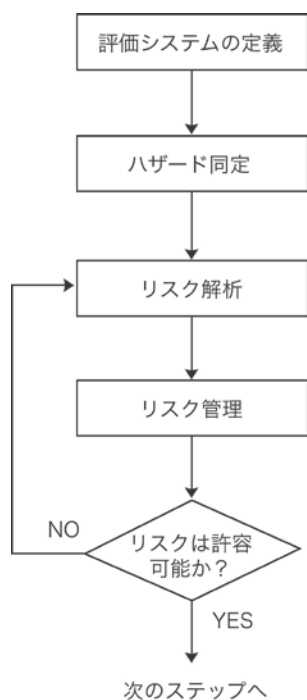


図3：安全性解析の流れ

を拡張する。計算機シミュレーションは、実装の正当性を確認できる。したがって、これらは相互に弱点を補完し、根拠の正当性を高める。各モニタに割り当てられた**未検出確率**（異常を検知できない確率）は、最悪ケースを模擬した計算機シミュレーション（**ワーストケース解析**）により評価され、理論的な正当性が証明される。またある程度長期に実環境で**安定性試験**を実施して予想外の誤入力などによって**HMI**（Hazardous misleading information）が発生していないことを確認する必要がある。HMI（Hazardous misleading information）とは、ユーザに偽の情報を与え、測位誤差が保護レベルを超える危険な現象を招くことである。

安全性要求を論理的に根拠を持って証明するために必要なのは、**安全性評価**と呼ばれる一連の手順であり、リスクを体系的に扱って安全性要求を定量的に評価する。図3に一般的な安全性評価の概念を示す。ハザード同定とは、脅威（スレッドまたはハザードと呼ぶ：インテグリティを破綻させる可能性を持つ現象）を関係者のブレインストーミングなどで網羅的に洗い出し、脅威の頻度やリスク（脅威が持つ危険の大

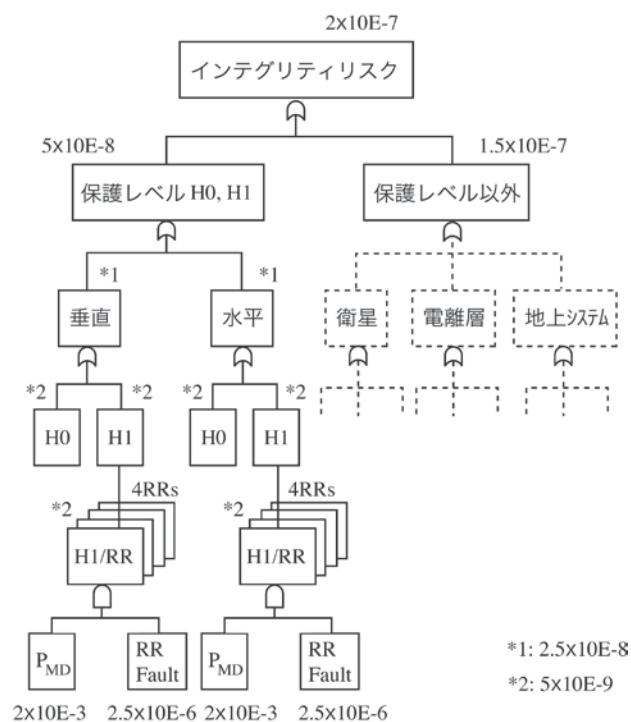


図4：故障木解析による樹形図の最上位部の例

きさ）を推定する。リスク解析とは、故障木解析（FTA：Fault Tree Analysis）により脅威を体系的に樹形図にして問題の原因を明らかにし、発生確率を評価する。リスク管理は、算定したリスクが許容可能かどうか判定し、不可能な場合はリスクを低減する措置を行う。このプロセスはリスクが目標値まで低減されるまで何回も繰り返される。この手順は新しいものでなく、従来から航空機や機上電子機器の安全性設計などで使われており、最近ではATMの安全管理にも取り入れられている[3.9, 3.10]。安全性評価では各段階で結果を文書化する必要がある。

GBASの安全性評価の中心は、システムの安全性設計プロセスである。地上装置の故障である内部要因の他、GPS衛星や電離層など外部要因を含み安全性設計が行われた例は、航空無線システムとしてはSBASだけであり、GBASの設計手法は確立していなかった。そこで電子航法研究所では特に日本に特化した電離層現象を含め、安全性評価の研究を行っている。この過程では安全性評価プロセスを実施しながらプロトタイプ

ブを設計・製造しており、2009年度末には研究用の初号機が完成する予定である。ただし、プロトタイプは、その目的から必要のない冗長系を持たず、実用機に必要なソフトウェアの開発プロセスに関する DO178B 規格は適用しない。

GBAS の安全性設計において、指揮者の様な役割を果たすのはリスク解析で実施される FTA であり、樹形図でリスクを配分し、重大な脅威に対してはモニタを配置してリスクを低減する。外部要因であり不確定性が高い電離層異常勾配の発生確率（過去の事例分析）については、外部の電離層専門家と共同で評価を行った。

図 4 に FTA による樹形図の最上位部分の一例を示す。 $2 \times 10^{-7}$  のインテグリティリスクを配分し、脅威がないとき (Fault free) に H0 と H1 の保護レベルがリスクとなる場合とそれ以外を 1:3 の割合とする (SARPs にも記載)。右側の保護レベル以外のリスクをどの様に配分し、モニタにどの程度リスクを割り当てるかは設計チームが決定する。配分の仕方は一通りではないが、目標リスクに到達するまで、リスクは正当な根拠によって低減され、目標に達しない場合は再配分とリスク低減が繰り返される。

## 6. おわりに

GBAS の分かり易い入門的な内容の解説をとのご依頼にお応えしようとして書き始めた本稿であるが、内容的に分かり易かったかどうかは甚だ自信がない。特に (その 1) は数式など極力使わないように心がけたつもりだが、MSAS などの衛星業務に関わった方以外は気楽に読める内容とは言い難い。(その 1) が難解と感じた方には、ハードウェアを扱った (その 2) から読むことをお勧めしたい。当初連載の内容を考えたとき、どちらを先にすべきか逡巡したことを思い出す。そのとき、Safety-of-life に関わるシステムを扱う技術者の方に原理原則なしの表層的な内容を解説してはと思考、今回の形とした。入門とは名ばかりと思われる方がいらっしゃればお詫び申

し上げたい。もしご質問があればご遠慮なくご連絡頂きたい。

最後に私のミスが多い初稿を丁寧に読んで頂き、貴重なご指摘を頂いた電子航法研究所の坂井丈泰氏と上島一彦氏にお礼申し上げ本連載を終わる。

## 参考文献

- [3.1] ICAO, “Application of new technology systems to approach, landing and departure”, GNSSP 1<sup>st</sup> meeting, WP37, Oct. 1994.
- [3.2] 福島荘之介, 齊藤真二, 吉原貴之, 藤井直樹, “GBAS インテグリティの検討 —長期データの収集と解析—”, 第 6 回電子航法研究所研究発表会, 2006 年 6 月.
- [3.3] 福島荘之介, “GPS 衛星の故障・不具合による異常信号”, GPS/GNSS シンポジウム 2007, チュートリアル, pp.259-265, 2007 年 11 月.
- [3.4] 福島荘之介, “「No.19 プロブレム」と呼ばれる GPS 衛星の故障”, 航空無線, No. 27, 春号, 航空無線システム協会発行, 2001 年 3 月.
- [3.5] 福島荘之介, “GBAS 信号の異常と地上型補強システム (GBAS) の観測値品質モニタの検討”, 第 7 回電子航法研究所研究発表会, 2007 年 6 月.
- [3.6] 福島荘之介, “地上型補強システム (GBAS) のエグゼクティブ・モニタの検討”, 第 8 回電子航法研究所研究発表会, 2008 年 6 月.
- [3.7] 吉原貴之他, “日本における電離層モニタ方式に関する検討”, 第 9 回電子航法研究所研究発表会, 2009 年 6 月.
- [3.8] 齋藤享他, “GBAS のための磁気低緯度電離層モデル”, 第 9 回電子航法研究所研究発表会, 2009 年 6 月.
- [3.9] EUROCONTROL Experimental Centre, “ECC Project Safety Handbook for Project Leaders and Project Teams”, 2007 (on Web).
- [3.10] ICAO, “Safety Management Manual (SMM)”, Doc 9859 AN/460, 2006.