

## 1 1. GBAS に適合した衝突危険度モデルの開発と現状

航空交通管理領域 ※森 亮太  
航法システム領域 福島 荘之介

### 1 はじめに

GBAS(Ground-Based Augmentation System)は、カテゴリーI が導入フェーズとなり、世界において導入が始まっている。今後そのペースは加速していくものと想定され、それに合わせてGBAS の特徴を最大限に生かせるような運航環境作りが求められている。GBAS による運航上の便益として期待されるものとしては、高角度進入、ディスプレイスドスレッシュホールド、曲線経路を用いた精密進入などあるが、その1つとして障害物間隔基準の緩和が挙げられている。

障害物間隔基準とは、本来飛行すべき経路(所望の経路)から、何らかの理由で逸脱があった場合でも、地上の障害物と衝突する確率が十分に低くなるように定められた地上障害物に関する基準である。GBAS による精密進入(GBAS Landing System: GLS)や従来の ILS に関する障害物間隔基準については、衝突危険度モデル(Collision Risk Model: CRM)を根拠として設定されている。一般に、GBAS の方が ILS に比べて精度の高い航法が可能であり、障害物間隔基準が緩和される可能性があるものの、障害物間隔基準は ILS と GLS とで同等に設定されており、GLS の優位さが基準に反映されていないのが現状である。

本研究所では GLS による障害物間隔基準を緩和するため、GBAS に適合した衝突危険度モデルの開発を目指しており、過去にもその検討を行っていた[1]。本稿では現状の衝突危険度モデルの紹介と、近年の動向および、現時点までの研究成果を報告する。

### 2 衝突危険度モデルとその動向

#### 2.1 ICAO 基準および関連パネル

航空機の運航基準は ICAO においては、主として PANS-OPS (Doc 8168)および PANS-ATM (Doc 4444)に記載されており、前者は、方式設計に関連する内容、後者は、航空機の管制間隔に関連する内容となっている。将来的に GBAS

による高度な運航方式を実現していくためには、これらの基準に反映させることが必要であり、これらのドキュメントの基準の改訂が研究の最終的な目的である。

本稿の主眼である障害物間隔基準の緩和については、PANS-OPS に記載がある。PANS-OPS は、ほぼ毎年のように Amendment が出されており、その内容については ICAO 計器飛行方式パネル (Instrument Flight Procedure Panel: IFPP)にて議論されており、本研究所からも当該パネルに出席している。IFPP では、個別の議題に対処するため、さらに複数のワーキンググループ(WG)に分かれており、障害物間隔基準に関しては、CRM WG にて議論されている。

最新の PANS-OPS の Part III Section 3 Chapter 6.4.9 には以下の記載がある。

*Note.— A specific GBAS implementation of the CRM is in preparation.*

GBAS 用の CRM は開発予定があるとの記載であるが、実際のところ IFPP CRM WG においてもそれについての具体的な活動は行われていない。その中で、本研究所では GBAS 用の CRM の開発を目指しており、GBAS 用の CRM の研究開発を行っている数少ない研究機関となっている。ただし、GBAS の CRM についてはまだ研究段階であり、実用化にはまだかなりの時間がかかるものと想定されている。

#### 2.2 CRM と障害物間隔基準

CRM は地上障害物との衝突確率を計算する数学モデルであり、そのモデルを実装したコンピュータプログラムは ICAO で配布されている。CRM を用いることにより、ILS/GLS の進入パラメータ(カテゴリー、滑走路長、進入角度など)と地上障害物データを入力として計算することで、地上障害物への衝突確率が出力される。1 進入あたりの目標衝突危険度は  $10^{-7}$  と設定されており、これより低い値が出力された場合には、方式の導入が可能との結論を得ることがで

きる。なお、CRM の適用範囲としては、高度 1000ft から決心高度(Decision Height)までの進入部分、および進入復行のみであり、DH から先の目視による降下・着陸については評価することができない。

CRM 自体は非常に複雑なモデルであるため、CRM を使用する際には、CRM に関する十分な知識が求められる。ICAO の CRM ソフトウェアは現在メンテナンスされていないこともあり、日本において現在 CRM は使用されていない。その代わりとなるのが、OAS (Obstacle Assessment Surface)である。OAS は、図 1 に示されるように、CRM により得られる航空機逸脱の確率分布(確率コンター)から、多少のマージンを考慮した上で得られる障害物表面であり、滑走路を中心とした 6 平面で構成される(図 2)。OAS 平面から地上障害物が一点でも突き出ている場合には、OAS による評価では、DH を引き上げる等の措置を取らなければならない。OAS は CRM を使用する場合に比べて、一般に保守的な結果が示されるため、CRM による評価ではより有利な条件で方式導入可能となるケースが存在する。

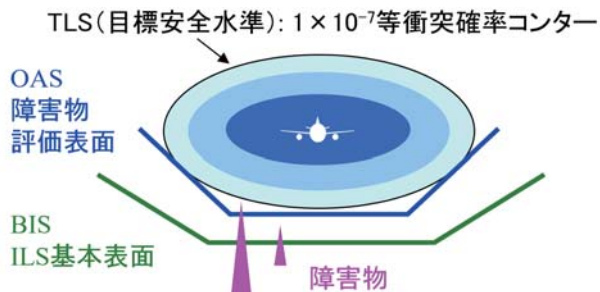


図1 CRMによる確率コンターとOASの関係  
(文献[2]より抜粋)

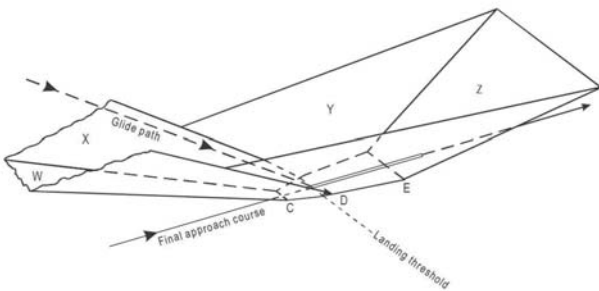


図2 OASの例  
(PANS-OPS Figure II-1-1-9より抜粋)

## 2.3 CRM 開発の経緯

現在使用されている CRM は、1970 年台に開発されたものであり、それから今日まで同じ基準が使われ続けている。CRM の開発経緯については、文献[3]に示されているが、当時の CRM 開発にあたっては、実際の飛行データを統計的に処理することにより作成されたようである。ただし、当時はデータ収集を行うこと自体が困難であったこともあり、 $10^{-7}$  の衝突危険度を算出するために、わずか千件程度のデータから推定を行っている。そのため、CRM に使用されている確率分布についてもかなり保守的に設定されているものと考えられる。

## 2.4 GBAS CRM 開発の動機

GBAS 用の CRM を開発する動機としては、ILS と GLS の航法誤差の違いが一つの大きな点となるが、それだけではない。前節に述べたように、過去の CRM 開発においては十分なデータ数を得られていなかったため、その結果が保守的になっていると想定されるが、その保守的な部分を正確に評価することで、障害物間隔基準が緩和される可能性がある。また、航空機が所望の経路から逸脱するのは、航法誤差だけではなく、飛行技術誤差(Flight Technical Error: FTE)とあって、パイロット操縦または自動操縦による経路への追従誤差も要因としてあげられる。FTE についても、現行 CRM において考慮されているものの、FTE はパイロット操縦、自動操縦、航空機の性能等によっても左右されるため、航空機の性能が上がった現代においては、FTE についても当時より縮小している可能性がある。さらには、現行 CRM は数々の設計パラメータは存在するものの、空港特有の事情については考慮することができない。もし、小型機の FTE の方が大型機の FTE よりも小さいのであれば、小型機しか就航しない空港においては、より障害物間隔基準を緩和できる可能性があるということになる。このように、新たに GBAS 用の CRM を開発することは、ILS と GLS の航法誤差の違いにとどまらず、より多くの要因を考慮することで、さらなる基準緩和につながる可能性がある。

### 3 GBAS 用 CRM の開発

#### 3.1 設計にあたっての基本方針

GBAS 用の CRM を新たに設計するにあたって方針はいくつかあり、実飛行の取得データから推定するという方法、各種性能要件から逆算する方法、シミュレーションによる手法、あるいはこれらの併用がある。現行 CRM 構築や過去の検討[1]においては、最初の 2 手法が使われたが、データ取得部分においては  $10^{-7}$  の衝突危険度の確率分布を直接得るためには単純計算で  $10^7$  件以上のデータが必要となり、非現実的である。現行 CRM 構築同様に、限られたデータのみから推定する方法では、やはり保守的に見積もらざるを得なくなり、十分な基準緩和の効果を得られない可能性がある。そこで、本研究ではシミュレーションによる評価手法を取ることにする。なお、現在 IFPP の CRM WG においても、シミュレーション評価により、Obstacle Free Zone (OFZ) と呼ばれる DH 以下の部分における障害物間隔基準の再評価を行っており、シミュレーション評価というアプローチは適切だと考えられる。

#### 3.2 CRM 構築に必要な要素

シミュレーションにより航空機の所望の経路からの逸脱量の確率分布がわかれば、それから CRM を構築することが可能であるため、いかに航空機の逸脱量を推定するかが重要である。

シミュレーションによる評価としては、パラメータを変えながら、多くの回数のシミュレーションを行うというモンテカルロシミュレーションという手法が一般的である。 $10^7$  回以上のシミュレーションも物理的に可能だと考えられるため、統計的な処理も不要あるいは簡易的に行えるという利点がある。

シミュレーションを行うためには、航空機の GLS 使用時の飛行を模擬する必要がある。そのためにはいくつかのコンポーネントが必要である。シミュレーションの流れを図 3 に示す。

まず、航空機は真の位置はわからないため、航法誤差モデルにより GLS の航法誤差が入った上での予測位置から、航空機がとるべき姿勢の目標値(コマンド)が与えられる。その目標値は、フライトディレクター(Flight Director: FD)として、コックピット上の画面に出力される。

パイロットがマニュアル操縦を行う場合には、この FD コマンドに追従するように操縦桿の操作を行い、自動操縦の場合はオートパイロットが自動で FD コマンドに追従するように操縦桿操作を行う。そして、その操縦桿の動きを元に、航空機は動作する(機体モデル部分)。実際には、風が航空機の挙動に影響を与えるため、風モデルも必要である。以下、各モデルについて、入手・構築の方法について検討を行う。

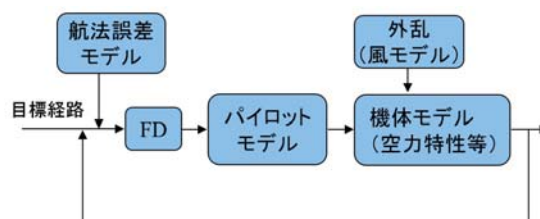


図 3 シミュレーションの流れ

#### (1) 航法誤差モデル

GLS の航法誤差モデルは、GAST C(CAT-I 相当)、GAST D(CAT-II, III 相当)ともに提案されているモデルがあり、それを使用することにより、CAT-I および CAT-II/III における航法誤差の計算が可能だと考えられる。

#### (2) 機体モデル

機体モデルについては、各航空機メーカーの所有物であり、入手が非常に難しい。研究段階で機体モデルを提供いただくのは非常に困難であるため、今回は JAXA 所有の実験用航空機(Dornier 228-202)のデータを借りて、使用することとする。将来的には、航空機メーカーから民間機の機体モデルを提供していただけるよう検討していく予定である。

#### (3) 風モデル

風モデルについては、FAA がシミュレーション評価用の風モデルを構築しており、それを使用する。

#### (4) FD

FD コマンドは、航空機内の AFDS (Auto-pilot Flight Director System)により生成されるものであり、航空機によって異なる。これに関しても公開されておらず、入手は非常に困難なため、今回は本研究所で設計を行った。パイロットによる評価を通して、違和感のないようチューニングを行った。

#### (5) パイロットモデル

パイロットモデル(自動操縦を行う場合にはオートパイロット)は、FTE に大きな影響を与える。オートパイロットを使用する場合には、その制御則を入手できればそれで十分だが、パイロット操舵による場合は、その個人差も大きく、どのようなパイロットモデルを使用するかにより、結果は大きく変わるといっても過言ではないため、本研究で開発すべき大きな要素の一つである。

まとめると、研究段階としてはパイロットモデル開発が最も重要である。他の構成要素も精査の必要があると考えられるが、当面はパイロットモデルの開発およびモンテカルロシミュレーションツールの開発に主眼を置く。

### 3.3 パイロットモデルの開発

パイロットモデルの開発は、航空業界によって長年のテーマとして研究されてきたものの、その目的としては、パイロット操作の解明といったものが多く、シミュレーションで使用することを想定したものは少ない。また、人間の操縦は人によっても異なり、また、操縦の精度のぶれが大きいのも特徴であるが、こういったパイロットによる違いを模擬できないと、リスクの過小評価につながる可能性がある。そこで、本研究では新たに、CRM 評価に適したパイロットモデルを新たに開発した。現状では、縦方向(ピッチ方向)のみのモデル化であり、横方向(ロール方向)はまだ開発中である。詳細については、文献[4][5]を参照されたい。

図4に現在開発中のパイロットモデルの操縦例を示す。比較として、図5にこのパイロットモデルの元となったパイロットの実際の操縦データを示す。航空機は、経路を修正する際に主として姿勢(縦方向だとピッチ角)を制御することにより、間接的に経路の制御を行う。黒点線がピッチ角コマンドを示しており、黒実線が実際のピッチ角を示している。図に示される通り、パイロットのコマンド追従性能は全体として概ね追従できているものの、コマンドからの誤差が発生しており、また遅れも発生している。パイロットモデルの結果は、そのような人間の特徴をよく模擬できている。また、ここでは示さないが、本研究で最も重要である、経路からの逸脱度合いについても、パイロットモデルの

出力は実際のデータとよく合致していることも確認している。今後は、横方向の拡張および、モデルのさらなる改良を行っていく予定である。

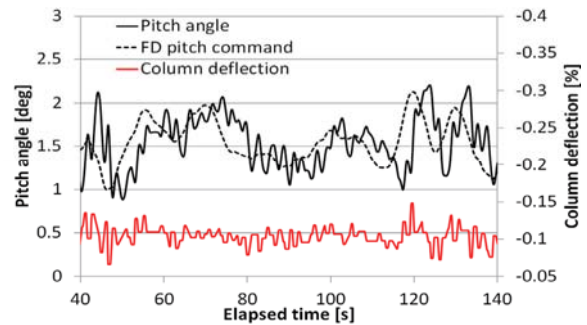


図4 パイロットモデルによる操縦例

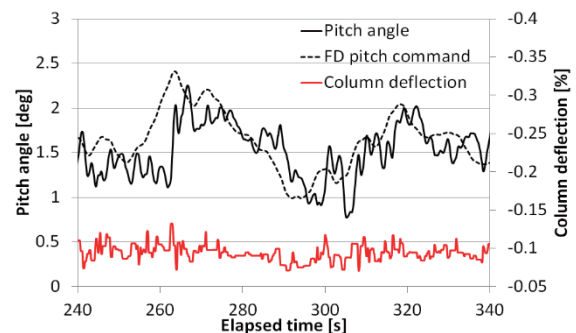


図5 モデルの元となる実際の操縦データ

## 4 まとめ

本稿では、GLS 使用時における障害物間隔基準の緩和のため、本研究所として新たに組み立てている GBAS 用の CRM 開発の現状と、その背景について説明した。まだ研究段階であり、実用化はまだかなり先ではあるがその必要性は大きく、また、本案件に取り組んでいるのが世界でも数少ない研究機関であることから、着実に今後も研究を進めていきたいと考える。

### 参考文献

- [1] 藤田他“GBAS に適した衝突危険度モデルの検討” 電子航法研究所研究発表会, 2010.
- [2] 中西”飛行方式設計入門—進入・出発方式の世界へのいざない” 鳳文書林出版販売
- [3] “Manual of the Use of the Collision Risk Model for ILS Operations,” ICAO, Doc 9274, 1980.
- [4] 森 “確率的離散的かつ周期的パイロット操舵モデルの提案,” 日本航空宇宙学会 第46期年会講演会, 2015.
- [5] R. Mori, “Development of Pilot Model with Stochastic Periodical Discrete Movement,” IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2015, pp. 1532-1538, 2015.