

# 積雪によるGPパス空間誤差評価のための飛行実験

電子航法開発部 横山 尚志、朝倉 道弘、田嶋 裕久  
航空宇宙技術研究所 増位 和也、石川 和敏、富田 博史

## 1. はじめに

降雪地にある空港では、反射面の積雪によってグライドパス(GP)の空間誤差が増加することが知られている。しかし、積雪によるGPパス空間誤差の予測方法は見当たらず、GPアンテナの前方にある計器着陸システム(ILS)付属のモニタでは積雪によるGPパスの変化を観測することができない。また、季節風と降雪に阻まれて、積雪時の機上データを取得することも容易ではない。GP反射面の積雪は、多層構造に堆積し、その形状も吹き溜まりによって3次元に変化する性質がある。

CAT では著しく低視程時の運航が行われるが、従来の地上物標に依存する運航に代わって高い信頼性を付与した ILS システムの導入により滑走路への自動着陸が達成される。仮に、積雪によってGPパスが規定値を逸脱する事象が発生すれば、ILS のシステムインテグリティが低下した状態に陥るので、積雪時にはファーフールドモニタに相当する GP パスの空間誤差監視システムの確立が要望されている。

そのためには、GP 反射面の積雪による GP パスの空間誤差を高精度に予測することが必要である。そこで、当研究所では、GP 反射面の積雪形状と雪質変化を入力信号に用い、GP パスの空間誤差を予測する監視システムの開発を進めている。監視システムの空間誤差の予測精度を確認するには飛行実験により実証データを取得する必要がある。そこで、当研究所は独立行政法人航空宇宙技術研究所の実験用航空機 MuPAL- $\alpha$  を用いた飛行実験を青森空港で行い、ILS 進入に対する積雪の影響を評価する共同研究を実施している。

本稿は、平成 14 年 10 月の積雪前に行った飛行実験結果と、GP アンテナ前方の空港面構造をモデル化

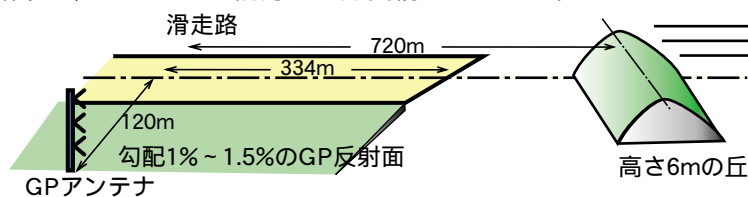


図 1 青森空港におけるGPアンテナ前方の空港面構造と3通りの進入方式

して行ったシミュレーション結果について報告する。まず、2. で飛行実験方法と MuPAL- $\alpha$  の実験システムの概要、3. で予測計算方法、飛行実験との比較による予測精度の確認および 4. で GP パス監視システムの開発状況について述べる。

## 2. 飛行実験

図1にGPアンテナ前方の地形と飛行実験における進入コース経路図を示す。今回の飛行実験は、雪が降る前にGPアンテナ前方の空港面構造によるGPパスの空間誤差を把握することと傾斜面に対するGPパス監視システムの予測精度を確認するために実施した。

### 2.1 MuPAL- $\alpha$ の実験システム

図2にMuPAL- $\alpha$ の実験システムを示す。MuPAL- $\alpha$ は、高精度GPS補強型慣性航法システム(GPS Aided Inertial-navigation Avionics、略称GAIA)と地上からアップリンクされたGPS補正信号を利用して、自機位置を1m以内の誤差で計測することができる<sup>(1)</sup>。図1にMuPAL- $\alpha$ による飛行実験の進入コースを示す。水平方はローカライザ(LOC)の進入コース中央と左右1ドットとし、GPパスは3度とする。MuPAL- $\alpha$ では、コックピットに搭載した大型液晶ディスプレイのトンネル型経路表示(図3)を用い、全てのケースにおいて幾何学的に正確な進入コースを表示している。また、データ記録システムにより、飛行中のILS、電波高度計(RA)および自機の3次元位置データを収集することができる。

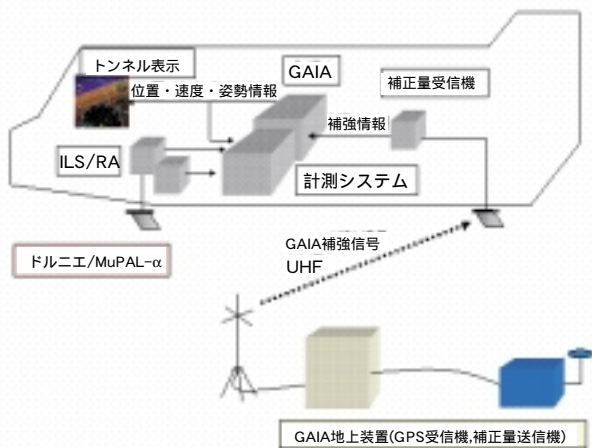


図2 飛行評価システム

### 3. 空港面構造によるGPパスシミュレーション

青森空港における GP アンテナ前方の空港面構造の特徴は、GP 反射面が滑走路から 1% から 1.5% の下がり勾配を有し、前方に高さ数 m の丘があることである。シミュレーションではそれらをモデル化して解析する。

#### 3.1 予測計算方法

GP 反射面の反射波を計算するには、一般に図4に示す直交座標系の  $x-z$  平面の変形を計算する<sup>(2)</sup>。反射面が 3次元に変形する単純な場合として、今回は  $y-z$  面が 1% の傾斜をしている場合の予測計算をする。図では反射波の解析に必要なイメージアンテナ等を示してある。1% の傾斜面に送受信アンテナの座標変換を行って反射波の変化を計算する。ここでは、 $y-z$  面との内積によりアンテナ高を計算する。

また、GP パスには前方の丘によりベンド状の空間誤差が発生する。丘はフランスパンの形状をしているので、丘の稜線を一次式にモデル化し、航空機方向の回折波の回折点を計算する。ここで、丘の回折点に至る電波の伝搬経路は直接波と地面反射波による 2 経路になる。丘から航空機に至る経路はその先にある谷の形状から谷で反射する回折成分は無視し、丘と航空機に至る経路のみ計算する。

以上により受信電界は次式によって求められる。

$$E_{s,h}^t = E_0 \left[ \frac{e^{-jks_0}}{s_0} + \Gamma \cdot \frac{e^{-jks''}}{s''} + \frac{e^{-jks'}}{s'} D_{s,h} \cdot A_d \cdot e^{-jks'} \right] \quad (1)$$

ここで、 $s_0$ 、 $s$ 、 $s'$  は直接波、反射波および回折波の伝搬経路で、 $\Gamma$ 、 $D_{s,h}$ 、 $A_d$  は反射係数、回折関数及び発散係数である。

#### 3.2 飛行実験結果とシミュレーションの対照性

図5の赤線は 3 通りの進入コースを飛行したとき



図3 液晶ディスプレイによるトンネル表示

の航空機で計測された受信機の指示値を示す。縦軸は受信機指示値(Difference of Depth of Modulation; DDM)を角度で表示している。ここで、 $0.1^\circ$  は DDM の  $21\mu A$ 、パス幅は  $\pm 0.36$  度に相当する。MuPAL- $\alpha$  は 14km で GP パスに会合した後、パスを降下する。図5(a),(b)の 4km 付近にある大きな変化は風によって航空機が偏移したものである。3通りの進入コースの誤差がほぼ  $\pm 0.2$  度以下である。1ドットずれたコースを高精度で飛行できるのは、MuPAL- $\alpha$  のトンネル型経路表示を用いた結果である。また、図5の青線は、D-GPS で取得した航空機的位置 ( $x,y,z$ ) をシミュレーション・プログラムに入力し、航空機位置における指示値を計算した場合であるが、実験結果とのずれも少なく対照性は良好である。

#### 3.3 GP パスの空間誤差の検討

図6に飛行実験とシミュレーション結果の GP パスの空間誤差を示す。上図は航空機で計測された受信機指示値と

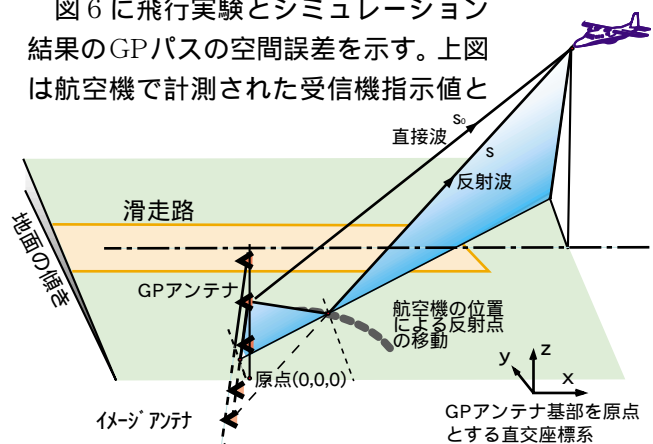


図4 地面勾配を有する反射面の反射波の解析

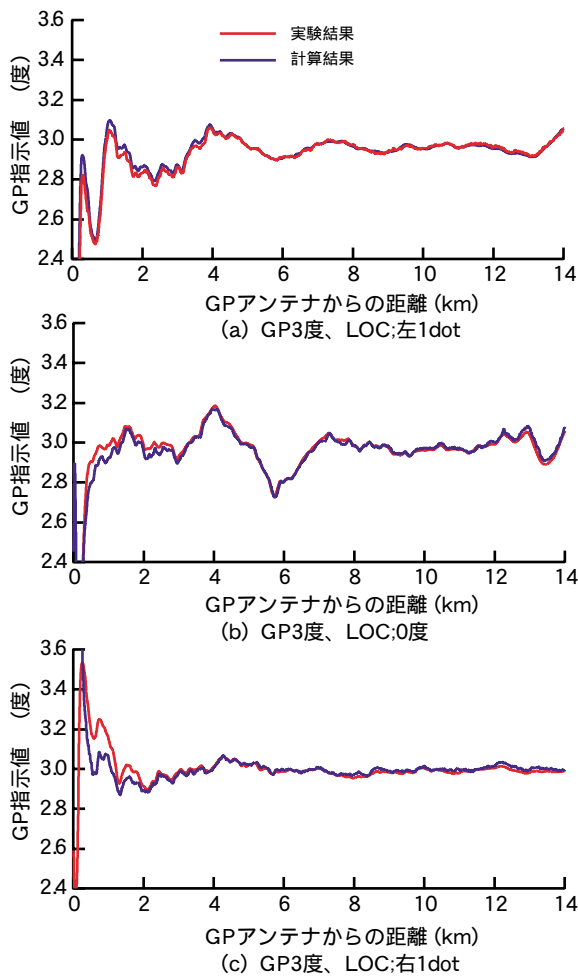


図5 飛行実験におけるGPの偏移と解析結果

D-GPSで測位した航空機位置( $x, y, z$ )との差から算出された飛行実験による空間誤差である。このような処理によって図4に示す航空機位置の変化が排除されて、図1の空港面構造による空間誤差が求められる。シミュレーションでは、航空機の位置をプログラムに入力してMuPAL- $\alpha$ と同じコースを降下したときの空港面構造のモデルによるGPパスの空間誤差を計算している。

実験結果には、全域に微細な変動が生じている。これはプロペラ変調による90Hz/150Hzの変調信号ひずみと航空機の姿勢変化による受信パターンの変化によるものである。また、図の(a)と(b)を比較すると、2kmより遠方では誤差0.03度(6 $\mu$ A)以下の精度で一致し、対照性は良好である。

次に、3通りの進入コースを飛行したときの角度誤差の相違について検討する。図7は3通りの進入コースを飛行したときの反射点の位置の変化を計算したものである。図の(a)は反射点の(x,y)方向の変化で、図の(b)は反射点の(x,z)方向の変化を示す。黄色は

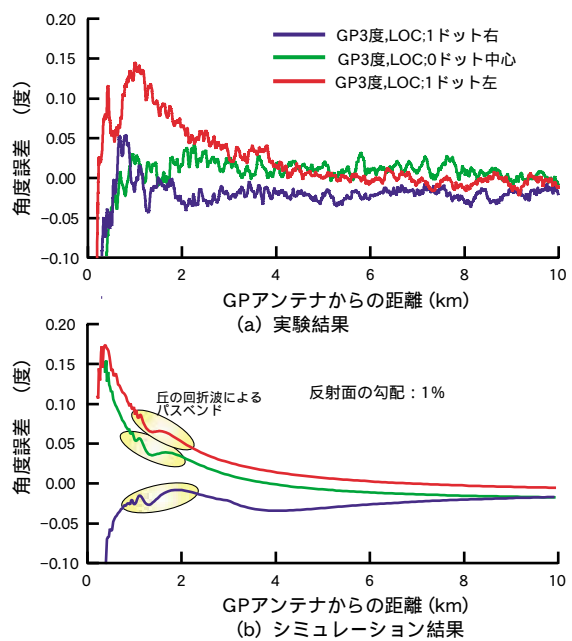


図6 実験結果とシミュレーションによるGPパス空間誤差

GPアンテナの上側素子、緑色は中間素子、青色は下側素子の場合である。各素子における3本の曲線は、3通りの進入コースを飛行したときの反射点の位置を示す。反射点の位置の変化は、航空機が2kmより遠方になると位置の変化が少なくなるが、2kmより近傍になると反射点の位置のy方向とz方向の変化が増加する。反射点の位置の変化による空間誤差の発生

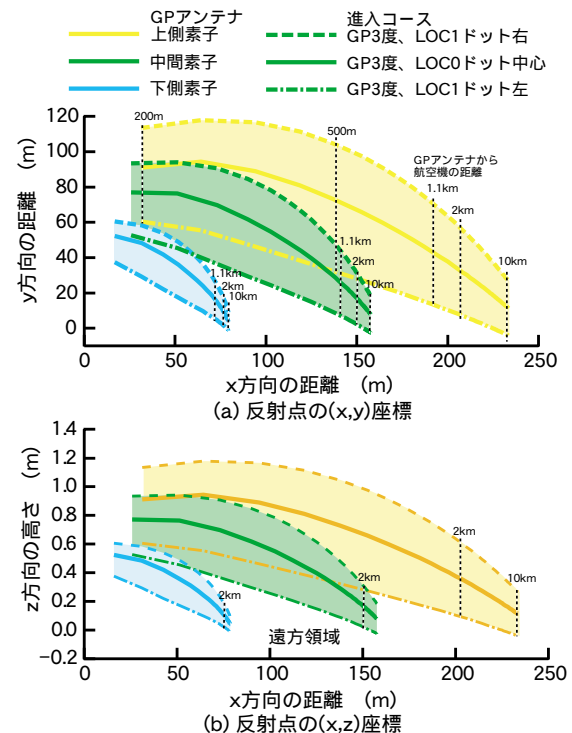


図7 進入コースの相違によるGPアンテナの反射点の変化



理由を次に示す。

反射点がz方向に変化することは、見掛け上、GPアンテナの素子間隔が変化することである。これによってサイドバンド成分のナル点の変化し、パス角のずれによる空間誤差が発生する。

近傍では、他に近接位相効果による角度誤差が相乗される。これはGPアンテナの開口面がアンテナイメージを含めると25mにもなり、送受信点の経路差が生じる現象である。

#### 4. GPパスの監視システムの進捗状況

GPパス監視システムの開発は平成14年度から3年計画で研究する。前述の飛行実験に加えて、平成14年度の飛行実験と地上実験は15年の1月～2月に2回行っている。以下、地上実験の進捗状況を述べる。

##### 4.1 積雪によるGPパス監視システム

図8にGPパス監視システムのブロック図を示す。本システムはGP反射面の積雪形状と雪質データを入力し、前方の丘による回折波も考慮してGPパスの空間誤差を算出する監視装置である。平成14年度には、積雪の誘電率測定と3Dレーザプロファイラを用いてGP反射面全体の測量を行った。

GP反射面の積雪深測定は、現在、レーザポインタにより6点の定点測量を行っている。この方法は局所的な測定で、吹き溜まりが少なければ反射面全体の積雪深を代表することができる。しかし、平成13年度の積雪実験の結果、GP反射面の積雪深は、平坦ではなく、規定の30cmを逸脱する吹き溜まりが局所的に存在することが確認された。そこで、平成14年度には、積雪形状の3D測量をレーザプロファイラを用いて行った。現在は、測量結果の精度確認を行っているところである。また、積雪の雪質測定は、10cmスタックのセンサーアレーを用いて層状に堆

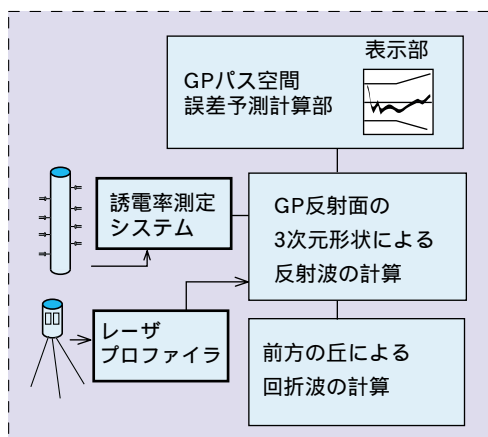


図8 GPパス空間誤差監視システム

積する積雪面の誘電率を測量し積雪面の反射係数を求める。以上の結果を基にして、平成15年度の積雪実験では、積雪の形状・雪質の計測データをGPパスの監視システムに入力して予測計算を行い、飛行実験結果との比較・検討をする予定である。

#### 5. まとめ

平成14年10月に青森空港において、MuPAL- $\alpha$ を用いた無積雪時の飛行実験を行い、シミュレーションの精度を確認するための実証データを取得した。一方、シミュレーションでは航空機の位置を予測プログラムに入力して同空港の空港面構造モデルによるGPパス空間誤差を計算した。その結果、次のことが明らかになった。

(1)今までは、進入コース以外の仮想進入コースの設定と飛行実験が不可能であり、y-z方向に傾斜する3次元の積雪形状評価のための実験データを取得することができなかったが、MuPAL- $\alpha$ の実験システムにより、仮想進入コースを $\pm 0.2$ 度以下の誤差で飛行することが可能になった。

(2)GPアンテナ前方の空港面構造を単純な傾斜面とするモデルでシミュレーションした結果、無積雪時の飛行実験結果との対照性が良好であり、シミュレーションの有効性を確認することができた。今後は、3次元の測量データを用いて、予測精度の向上を図る予定である。

(3)航空機の位置が2kmより近傍になると、反射点の位置変化によりGPパスの空間誤差が増加する。その要因は反射点のy-z方向の変化によるサイドバンド成分のナル点の変化と近接位相効果との相乗効果であることが確認された。

平成15年度にも、ILS進入に対する積雪の影響を評価する飛行実験を行い実証データの蓄積を図る予定である。地上実験では、計測した積雪の形状・雪質データをGPパス監視システムに入力してGPパスの空間誤差を予測する監視システムの実用化を進める予定である。

#### 謝辞

本研究にご協力を頂いた航空局、東京航空局青森空港出張所の関係各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- (1) 増位他：“多目的実証実験(MuPAL- $\alpha$ )の開発と運用”，日本航空宇宙学会、第34期年会講演会、2003.4.8
- (2) 横山他：“CAT ILSグライドパスの空間誤差予測に関する積雪実験”，全天候委員会、2003.2.5