

積雪による GP パス空間誤差特性

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, 富田 博史, 石川 和敏

1. はじめに

降雪地にある空港では、GP 反射面の積雪によりグライドパス (GP) の空間的な誤差 (以下、空間誤差と呼ぶ) が増加する。しかし、積雪時の GP パスの監視法は飛行検査以外に見当たらず、GP アンテナの前方にある計器着陸システム (ILS) 付属のモニタでも積雪による GP パスの変化を観測することができない。青森空港は、わが国で積雪量が最も多い空港であるが、就効率の改善のために CAT 化が進められている。CAT になると、従来の地上物標に依存する運航に代わって著しく低視程時の運航が達成される。このため、地上システムに高い信頼性が要求される。しかし、冬季の積雪により GP パスが規定値を逸脱するような事象が発生すれば、ILS のシステムインテグリティが低下するので、GP パスの空間誤差監視システムの開発と CAT の除雪基準の緩和が要望されている。

従来の GP パスの空間誤差の計算方法は、積雪の誘電率測定が容易でないため、積雪深のみ用いて計算していたので、実験結果との相関が低かった。当研究所では、青森大学との共同研究で簡易的な積雪誘電率測定装置を開発しており、GP 反射面の積雪誘電率とその形状より GP パス空間誤差を予測する監視法を研究している。その予測精度を確認するため、平成 14 年度から 2 ヶ年にわたって、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との共同研究による実験用航空機 MuPAL- α を用いた積雪時の飛行実験を行った(1),(2)。

本稿では、冬季の地上実験、飛行実験の概要、実

験結果および積雪による GP パスの空間誤差について報告する。

2. GP 反射面の積雪と飛行実験

図 1 に青森空港の GP アンテナ前方の地面構造と飛行実験の概念図を示す。GP アンテナ前方の特徴は、滑走路から横断勾配 1.5% の GP 反射面と約 720m 程前方に高さ 6m の丘がある点である。

2.1 GP 反射面の積雪の層構造と雪質

降雪期には、GP 反射面の積雪が地表面から 20cm を越えると、重機による圧雪・除雪が行われる。除雪は深夜行われ、GP 反射面には積雪深計が 5 本立っている。重機では小回りがきかないため、除雪後には GP アンテナ 3 素子の反射点付近で積雪深 15cm ~ 35cm 程度の相違が生じる。以下、これを残留積雪と呼ぶ。また、飛行実験は、2 年間に 4 回行ったが、積雪状態は全て異なっていた。

図 2 に GP 反射面の積雪状態を示す。地上実験は、積雪縦断面の層状特性と雪質を、まず、目視と触手で観測し、次に積雪構造の複素誘電率を測定した。

(a)第 1 回目：15 年 1 月、積雪の縦断面は図 2(a)の 3 層構造、中層と下層の雪質は機械圧雪の含水量の少ない硬雪(しまり雪)であり、表 1 に図 2(e)に示す GP アンテナ反射点付近の残留積雪深を示す。

(b)第 2 回目：15 年 2 月、積雪の縦断面は図(b)の 2 層構造、下層の雪質は機械圧雪の硬雪(ざら目雪)でやや含水量が多い。積雪は気温上昇で融雪して残留がなくなり、その後の降雪による積雪であるため平坦であった。

(c)第 3 回目：16 年 2 月 3 日、積雪の縦断面は図(c)の 2 層構造、上層と下層の雪質は機械圧雪による硬雪(ざら目雪)で含水量が少ない。残

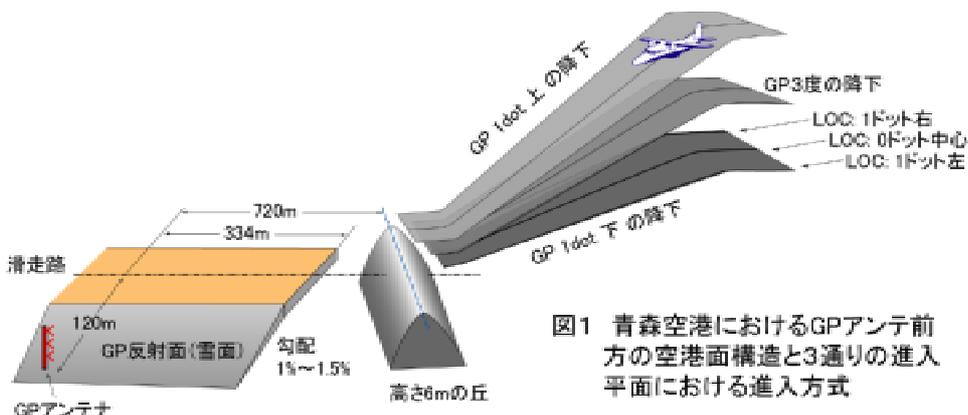


図1 青森空港におけるGPアンテナ前方の空港面構造と3通りの進入平面における進入方式

表1 残留積雪状況

年月日	H _{low}	H _{mid}	H _{upr}
15/1	15cm	30cm	10cm
16/2/3	30cm	30cm	20cm
16/2/19	11cm	30cm	19cm

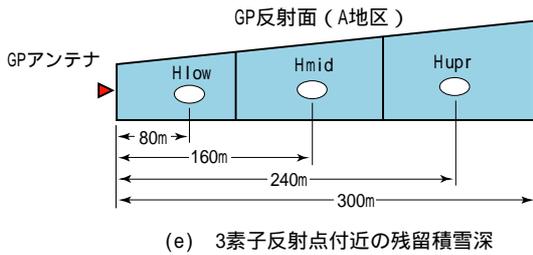
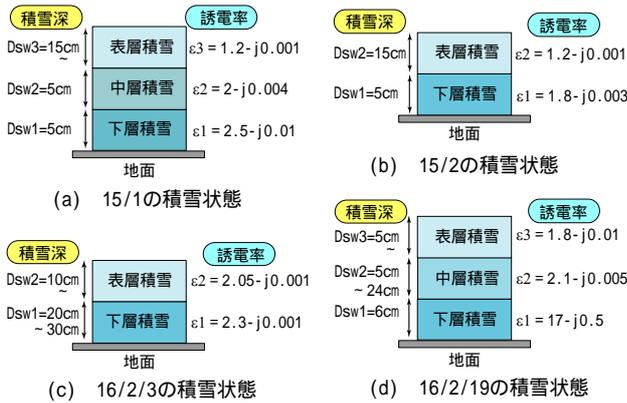


図2 積雪断面特性とGP反射点付近の残留積雪

留積雪を表1に示す。

(d) 第4回目：16年2月19日，積雪の縦断面は図(d)の3層構造，中層の雪質は含水量の多い硬雪（しまり雪），下層の雪質は数日前の降雨の沈降でシャープット状になり誘電率が著しく増加した．残留積雪を表1に示す。

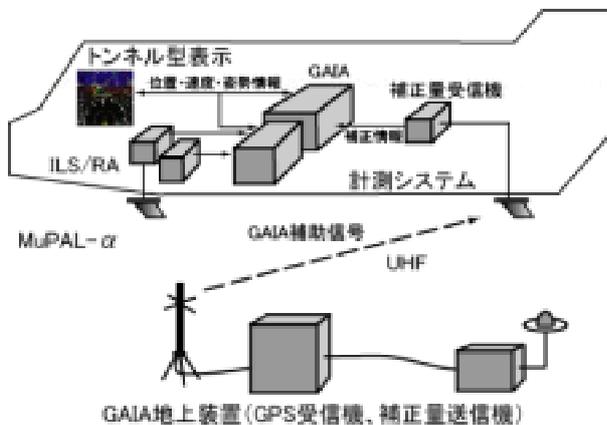


図3 飛行評価システム

2.2 飛行実験

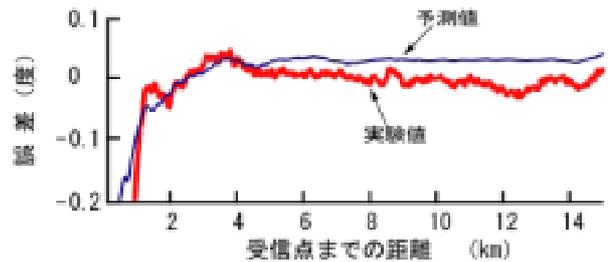
図3にMuPAL- α （ドローン機）の飛行評価システムを示す．GPS補強型の慣性航法システム(GPS Aided Inertial-navigation Avionics, 略称GAIA)を搭載しており，地上からアップリンクするGPS補正信号により自機位置を誤差1m以下の精度で測位することができる．

進入コースは，図1に示すILS指示値の上下1ドット（ ± 0.36 度）と左右1ドット（ ± 1.25 度）方向に設定しておき，実験機は進入コースをトンネル型経路表示機能を用いて正確に進入し，ILS受信機出力と搬送波位相を利用したDGPSによる機体の測位データを収集した．ILS受信機出力から航空機のパス離脱分を減算することによりパス誤差を求める．これをGPパスストラクチャーと呼んでいる．

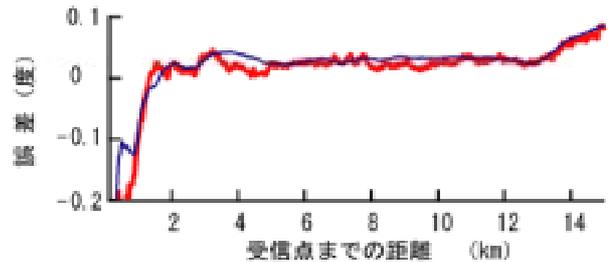
3. 飛行実験結果

図4に平成15年1月の積雪状態で図1の進入コースを飛行したときの実験結果を示す．

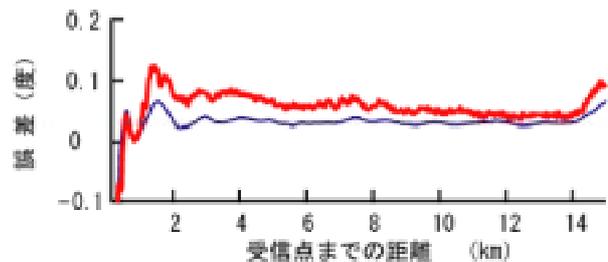
3.1 実験結果の再現性



(a) 3度-右側進入



(b) 3度-ノミナル進入



(c) 3度-左側進入

図4 15年1月の積雪における飛行実験と予測計算によるGPパスストラクチャー

図4に示す実験結果には、上下の微細な変動が生じている。これはプロペラ変調や航空機の姿勢変化によるものである。また、同一進入コースの実験データより、GPパストラクチャーのずれを求めると、積雪・無積雪時を問わず、 ± 0.02 度以下となり、取得データの再現性は良好であることが確認された。

3.2 進入平面の傾き

左右1ドット (± 1.25 度)の仮想進入コースは、左側、中心、右側進入コースの順番でGPパスが低下する。このような進入平面が傾く現象は、無積雪時、積雪時を問わず発生している。

3.3 積雪によるGPパスの上下偏移

表2は、飛行実験結果よりGPのパスの変化を纏めたものである。15年1月と16年2月19日の実験結果を無積雪時と比較すると、GPパスが全体に約0.02度上昇する。これに対して、15年2と16年2月3日では、GPパスが約0.03度低下する。このようにGP反射面の積雪によってGPパスに上下偏移を生じる場合がある。

4. 多層構造の積雪による影響の検討

4.1 予測計算方法

GPアンテナの座標系はGPアンテナ基部を原点とする直交座標である。予測計算では、GP反射面を1.5%勾配の平面と仮定し、送受信点をその平面に座標変換して反射波を計算する。パス形成に寄与する反射点は、図2(e)に示すようにGPアンテナから約80m、160mおよび240mになり、その周辺の積雪は中層、下層に表1の残留積雪が、表層は新雪の堆積層とする。積雪面を3層断面構造の積雪モデルで近似し、多層積雪面の反射波は分布定数理論より導出される計算式を用いる。なお、図2に示す積雪深と誘電率等は、測定データの平均値である。図4の予測計算では、実験機の

表2 積雪時の飛行実験結果

年月日	積雪状態	左側進入	ノミナル進入	右側進入
14/10	無積雪時	0.02° ~ 0.15°	0 ~ 0.02°	0°
15/1	図2(a)参照	0.04° ~ 0.1°	0.025°	0°
15/2	図2(b)参照	-0.02 ~ 0.05°	-0.01 ~ -0.03°	-0.05°
16/2/3	図2(c)参照	0.03 ~ -0.03°	-0.01 ~ -0.02°	-0.06°
16/2/19	図2(d)参照	-0.02 ~ 0.05°	0.02 ~ 0.04°	0 ~ 0.02°

位置データをプログラムに入力してILS受信機出力を求め、パス離脱量の補正によりパストラクチャーを計算している。

4.2 地面構造の影響

地上実験の結果、反射面には ± 10 cmの地面のラフネス(凹凸)が生じている。そこで、図5は地面を ± 10 cm盛り土したときのGPパスの偏移を示す。地面の複素誘電率を $\epsilon=20-j1.0$ とし、地面を20cm上昇させると、GPの平均パスが0.08度+側に偏移する。これにより図4の実験値とのGPパスのずれは、局所的な地面構造の凹凸による影響と考えられる。

また、図6では、図4の実験経路と異なる3度の幾何学的な進入コースとし、積雪状態を図2(a)、前方の丘をGTD(幾何光学回折理論)を用いて解析した。その結果、全域に丘による緩やかなパスバンドが生じており、図4の進入平面の傾きは(± 1.25 度の進入コースで)0.05度であったが、計算結果では0.07度となり、パストラクチャーの対称性も概ね良好であることが確認された。

4.3 積雪によるGPパスの上下偏移

地上実験の結果、GP反射面では積雪深の変化が ± 10 cm、誘電率の変化が20%程あることが確認された。そこで、図7は、反射面の場所による積雪状態の相違を考慮して、図2の(c)と(d)の積雪の表層積雪

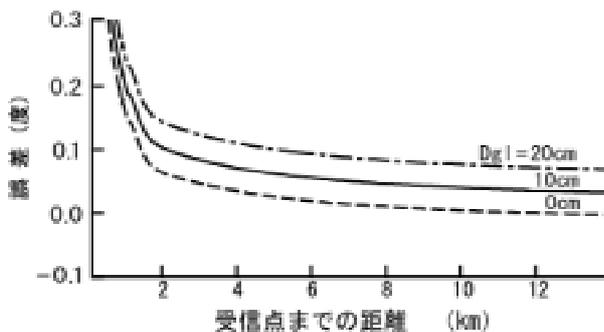


図5 地面の上昇によるGPパスの偏移

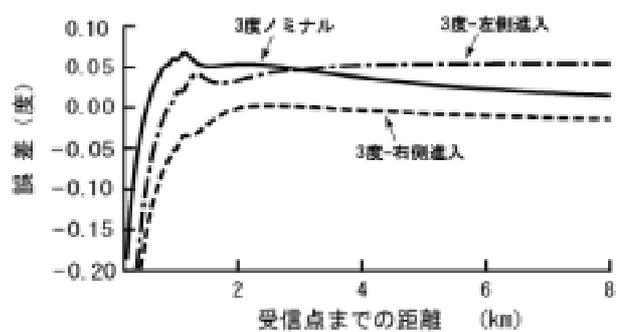


図6 15年1月の積雪時のGPパストラクチャー

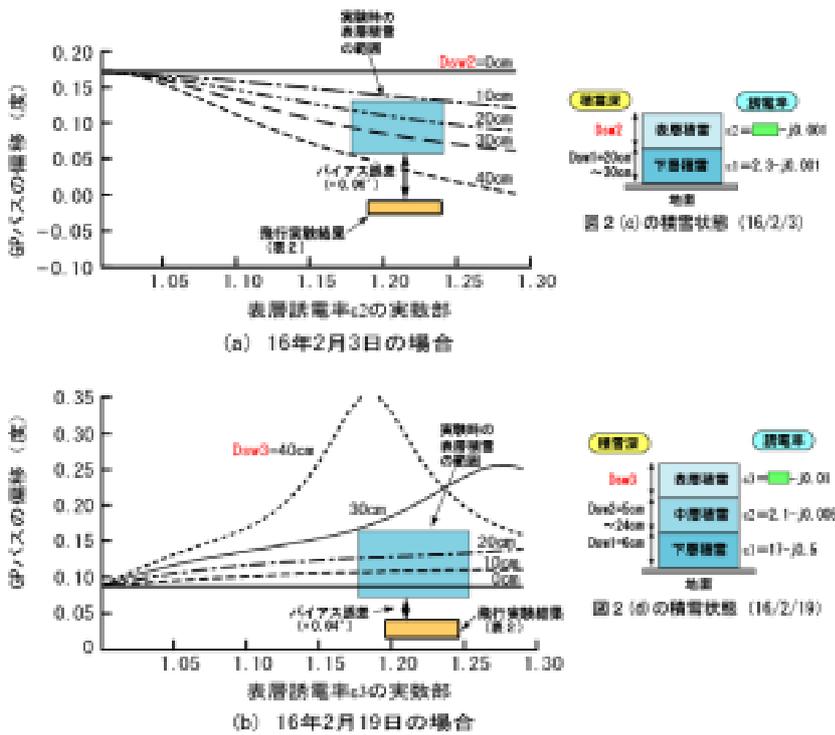


図7 残留上の表層の積雪深と雪質を変化させたときのGPパスの偏移特性 (距離=5Km)

深を0 ~ 40cm, 表層の雪質を $1.0 < \epsilon'$ 1.3 に変化させて5km 遠方の GP パスの偏移を計算したものである。図の青の範囲は表層積雪の場所によるばらつきを示す。

その結果, 表層の積雪深が20cm ~ 30cm 変化しても GP パスの偏移が少なくなり, 表2と類似の上下偏移をすることが示される。しかし, 図の(a)では, 表2と比べて + 0.06 度の, 図の(b)では + 0.04 度のバイアス誤差が生じる。このバイアス誤差の発生要因は, 積雪断面の近似が3層モデルの粗い近似であり, 特に, 誘電率の大きくなる下層積雪のモデル化が重要である。

5. まとめ

GP 反射面の積雪構造測定, 積雪時の飛行実験結果および多層構造の積雪を模擬した GP パスの空間誤差について報告した。その結果, 次のことが明らかになった。

- (1) 同一進入コースの飛行実験データにより, GP パスの偏移は, 積雪・無積雪時を問わず, ± 0.02 度以下になることが確認された。
- (2) GP の反射面の横断勾配を考慮した解析結果と飛行実験結果により, ILS の立体的な進入空間が全体的に右下がりに変形する。しかし, 解析結果には局所的に

0.05 度のずれが生じていることが明らかになった。

(3) 積雪時の飛行実験の結果, GP パスが上下に偏移することが確認された。そこで, 積雪面を3層構造にモデル化して, 表層の積雪の測定誤差と融雪を考慮した解析を行った。その結果, GP パスの上下偏移は飛行実験結果と類似する傾向を示しているが, 全体に + 0.05 度のバイアス誤差を生じることが確認された。このバイアス誤差は積雪断面を3層構造モデルの粗い近似をしたためと考えられる。

今後は, GP 反射面の積雪に内挿する誘電率測定装置の共振型センサを開発すると共に, GP 反射面の測量データを用いて解析し, GP パスの予測精度の向上を図りたい。

謝辞

本研究にご協力を頂いた航空局、東京航空局および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) 横山：“地面構造による GP パスの空間誤差特性”, 第41回飛行機シンポジウム, 3E4, 2003.10
- (2) 富田：“積雪時の青森空港 ILS 誤差計測飛行実験”, 第41回飛行機シンポジウム, 3E3, 2003.10

付録 誘電率測定装置

プローブセンサ・アレー方式の積雪誘電率測定方法を青森大学と共同研究で開発している。共振型センサを縦型10cm間隔のアレー構造とし, これを積雪面に内挿し, 層状構造の積雪の雪質変化を測定する。本方式の特徴は, ネットワークアナライザの初期校正のための除雪が不要であることで, 長期間の積雪の測定に適している。