

6. 階段状積雪面によるGPパス幅の変化について

電子航法開発部 ※横山 尚志 朝倉 道弘 田嶋 裕久

1. はじめに

我が国の ILS は長期間 CAT-I で運用してきたが、濃霧が多発する新東京国際空港、釧路空港及び熊本空港において、CAT-Ⅲ化が実施され、これにより ILS の性能が向上し、就航率が飛躍的に改善された。降雪量の最も多い青森空港でも、高カテゴリー化が計画されており、現行 ILS の運航規制を緩和するため、積雪による進入コース予測技術の研究が期待されている。

青森空港では、フレネル反射面(A地区)より遠方にある自然積雪領域(C地区)の雪深が1mを越えることがある。そのような場合、着陸機が青森DMEで7NMに到達すると、気圧高度計の指示値を地上にレポートさせて、機体の進入角を計算し、積雪による進入コースの変化を監視している。これは、積雪による影響を予防するために策定されたものであるが、GP進入コースに対して、DMEが7NMのときの気圧高度計の指示値より求めた航空機の進入角度の誤差が大きいことが明らかになった。

これを抜本的に改善するには、GP進入コースを高精度に予測しなければならない。そこで、われわれは、積雪の誘電率と積雪面の形状を入力データとして進入コースを予測する研究を行っている。本稿では、開発中の予測計算プログラムを用いて階段状積雪面の形状とGPパス幅との関係を明らかにし、飛行検査等の実証試験により予測計算の有効性について確認する。

2. 過去に取得した積雪時の飛行検査事例

図1にGP反射面のA地区とC地区の形状を示す。

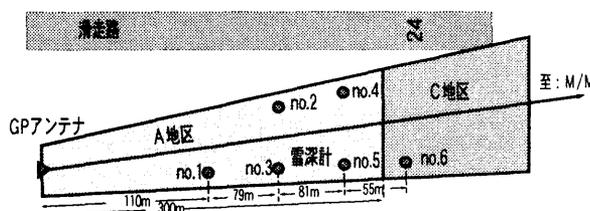


図1 青森空港のGP反射面の除雪管理区域

A地区には積雪深計が5台設置され、積雪深を30cm以下に管理している。C地区の積雪深はNo.6の雪深計で計測している。A地区とC地区の接合部は1/10勾配ののり面にしており、全体では図2に示す階段状の積雪形状になっている。表1に青森空港で過去十数年間に取得されたGPパス幅の飛行検査事例を示す。

2.1 パス角

積雪時には、雪がないときに比べて約 $10\mu A$ 側シフトしている。なお、 $20\mu A \approx 0.1$ 度に相当する。

2.2 パス幅

表1の(i)は、C地区の積雪深が1.21mとなり、飛行検査を実施したが、パス幅の変化は確認されなかった。

(j)は、C地区の積雪深が94cmで、1m以下になっているが、パス幅の広がり確認された。

(k)は、記録的な豪雪で、積雪深が1.63mになり、パス幅が規定値外に逸脱し、ILSの運用を停止した。

(m)は、運用再開のため、600mまでの反射面を除雪した結果、パス幅は規定値に復帰した。

パス幅の広がり、DDM(Difference of Depth of Modulation)の偏移感度の低下を意味するが、この現象が3度のパスの下側で生じると問題である。

3. 階段状積雪面によるGPパス幅の予測計算

3.1 二重反射波の計算方法

図3に階段状積雪面で生じる反射波の計算方法を示す。 E_{r0} はイメージ-1による反射波で、パス形成に

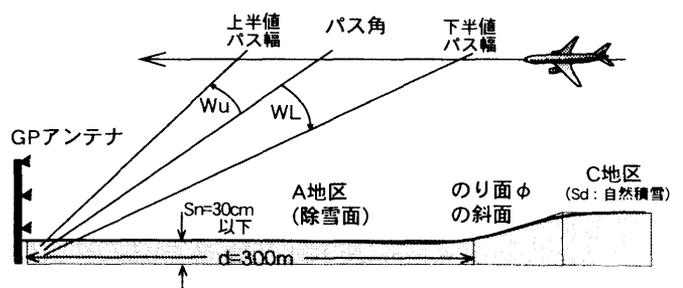


図2 GP反射面の積雪形状と飛行検査方法

表1 過去の飛行検査事例

年月日	パス角 パス幅	A地区の積雪 深	C地区の積 雪深
(i) 昭和63年2月25日	3.01° (1μA) 0.76°	13~21cm	121cm
(j) 平成10年2月3日	2.95° (6μA) 0.83°	7~15cm	94cm
(k) 平成13年2月16日	3.04° (5μA) 0.92°	20cm~36cm	163cm
(m) 平成13年2月20日	3.02° (2μA) 0.75°	10cm	32cm

返して、 m_i が最小になる斜面の点 (x_p, y_p) を算出する。この点が真の反射点になる。

3) GPのアンテナ素子から反射面の入射角を ϕ 、反射点と送受信点の距離を r とすると、二重反射波 E_{r12} は、

$$E_{r12} = E_0 \Gamma_1 \Gamma_2 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2)$$

になる。積雪面からの反射係数

寄与する反射波である。3素子GP空中線を用いると、 E_{r0} の反射点はGPアンテナから80m、160mおよび240mで発生する。二重反射波 E_{r12} は、斜面隣接区間と斜面で反射する反射波で、以下によって計算する。
1) 斜面上の反射点の導出は、まず、GPアンテナ直下のイメージ1を求める。次に、斜面上の任意の点 (x_p, y_p) から接線を引き、その直線に線対称になるようにイメージ-1の像イメージ-2を求める。イメージ2の座標を (x_i, y_i) とすると、

$$(x_i, y_i) = (2x_0 - x_{at}, 2y_0 - h_{at}) \quad (1)$$

になる。ここで、 (x_0, y_0) は、

$$x_0 = \frac{a^2 x_f + a(h_{at} - y_f) + x_{at}}{a^2 + 1}$$

$$y_0 = a(x_0 - x_f) + y_f$$

2) イメージ-2と受信点を結ぶ直線を引いて、斜面上の点 (x_p, y_p) との距離 m_i を求める。上記の処理を繰り返す。

Γ_1, Γ_2 は、

$$\Gamma = R_{01} + \frac{Ae^{-jU}}{1 - Be^{-jD}}$$

$$A = |T_{01} T_{10} R_{12}|, \quad U = \delta + \rho_{12}, \quad \delta = \frac{4\pi t\sqrt{\epsilon}}{\lambda_0 \cos\theta'}$$

$$B = |R_{12} R_{10}|, \quad D = U + \rho_{10}, \quad \epsilon_1 = \frac{\sin\theta}{\sin\theta'}$$

で求められる。ここで、Rは反射係数、Tは透過係数、tが積雪深、 θ が入射角、 θ' が透過角および ϵ_1 は積雪の誘電率である。

3.2 パス幅の計算結果

図3に示す折れ線の階段状積雪形状モデルを用いて、2200ftのレベル飛行によるDDMの変化を計算する。ここでは、階段状積雪面の形状関数を $F(d, \phi, S_{11}, S_{12})$ で定義する。括弧内の d はGPアンテナから斜面までの距離、 ϕ は斜面の傾き、 S_{11} はA地区の積雪深、 S_{12} はC地区の積雪深である。なお、表1の飛行検査事例では、形状データの d および ϕ を測定していない。

そこで、今回のシミュレーションでは、 $d=250m, 300m$ および $350m$ とし、風の吹き溜まりで斜面の勾配 ϕ が変化することを考慮して、図4の(a)では $\phi=2$ 度、(b)は $\phi=3$ 度、(c)は $\phi=4$ 度とした。なお、パス幅は $W_{td} = W_{11} + W_{12}$ である。 W_{11} は上半値パス幅、 W_{12} は下半値パス幅である。規定値では $\pm 0.12 \theta$ ($\theta=3$ 度) = ± 0.36 度、 0.36 度するとき、 $DDM = \pm 75\mu A$ になる。なお、除雪時には、A地区とC地区の接合部を湿地ブルトーザに

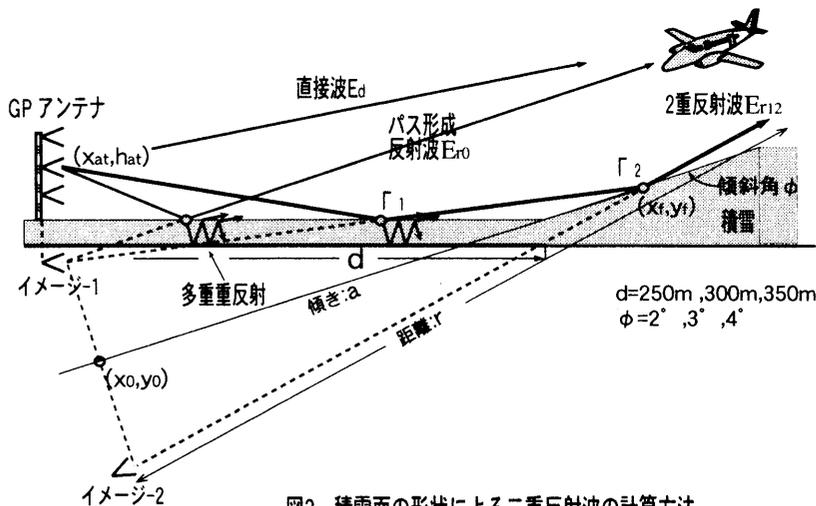


図3 積雪面の形状による二重反射波の計算方法

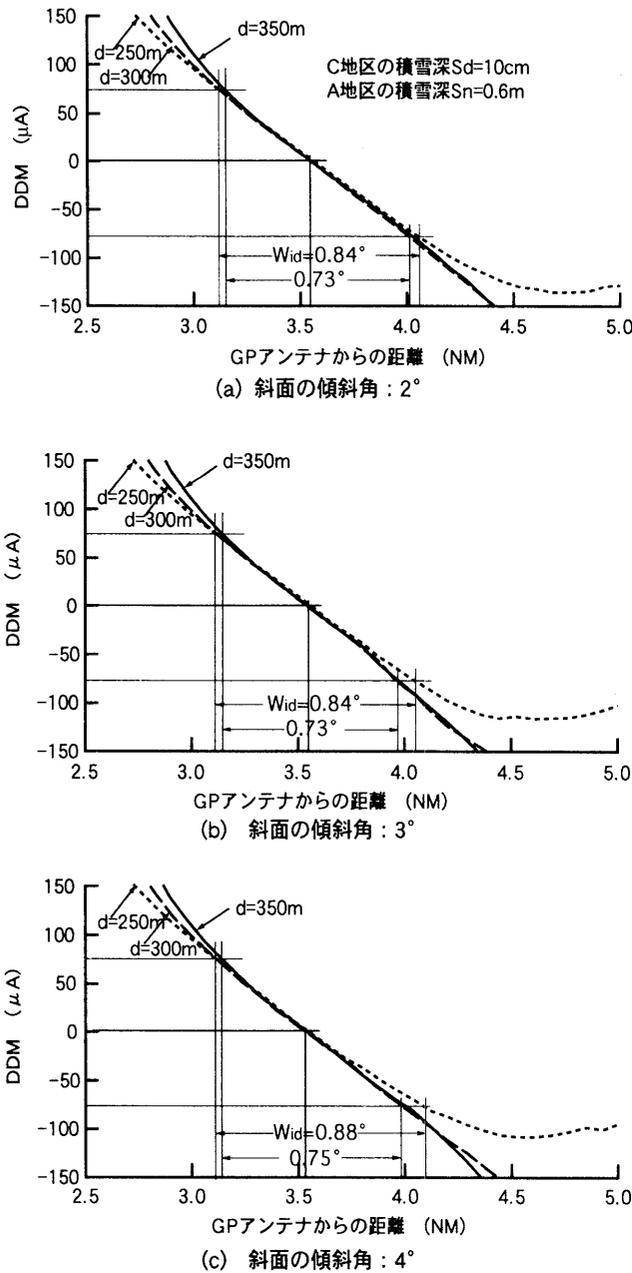


図4 階段状積雪面によるパス幅の変化

よって、1/10 勾配($\phi = 5.7$ 度)の斜面にしている。

$d=300\text{m}$ と 350m にすると、図よりDDMの直線性は良好で、パス幅が正常値($0.73 \sim 0.75$ 度)になる。しかし、 $d=250\text{m}$ にすると、DDMの直線性が下半値パス幅で劣化し、 $\phi = 2$ 度するとき $W_{id} = 0.86$ 度、 $\phi = 3$ 度するとき $W_{id} = 0.87$ 度、 $\phi = 4$ 度にしたとき $W_{id} = 0.88$ 度になり、パス幅が 0.15 度の広がりを生じる。

3.3 解析結果の検討

図5は、表1の検査結果と図4の $d=250\text{m}$ の解析結果をプロットしたものである。図の横軸は斜面の

傾き ϕ である。●は予測計算で定義した斜面の傾き、△は飛行検査結果を示す。 $\phi = 0$ 度のデータは表1の(m)の全面除雪のデータを、積雪時のデータとして、パス幅の感度低下の生じている表1の(j)と(k)を用いた。後者の斜面勾配は、表1より不明であるので、除雪時の1/10勾配であったと仮定した。図より計算値と検査結果が良く一致している。図5の鎖線はカーブフィット曲線であるが、図に示すように 0.95 度以上ではパス幅が飽和する傾向が見られる。

4. 飛行検査等による実証試験

4.1 飛行検査結果

図2の方法により、高度2200フィートのレベル飛行を3回実施した。表2に飛行検査結果であるパス幅、上下パス幅($\pm 0.12 \theta$)を示す。パス幅は $0.78 \sim 0.82$ 度に変化し、規定値に対して 0.1 度の感度の低下が生じている。

4.2 階段状積雪面の形状測定

パス幅に感度低下を生じていたので、飛行検査後、階段状積雪面の斜面隣接区間の積雪深を測定した。積雪深の測定は、積雪深計が設置されていないM/M(ミドルマーカ)に至るA地区の中心線上で行った。測定結果を図6に示す。C地区の積雪深は約57cmであるが、A地区の積雪深は 200m から 300m の間で規定値を越える逸脱が生じ、その形状は曲面状に変化しているが、図1の積雪深計の計測値と異なっている。このため、反射面の積雪の全体形状は3次元に変化していると考えられる。

4.3 実証試験の検討

図7に、パス形成領域と二重反射発生領域を示す。パス形成領域は、3素子GPアンテナによる反射点が生じる領域で、その反射波と直接波によってパスが形成される。表1の事例によると、パス角の変化は3

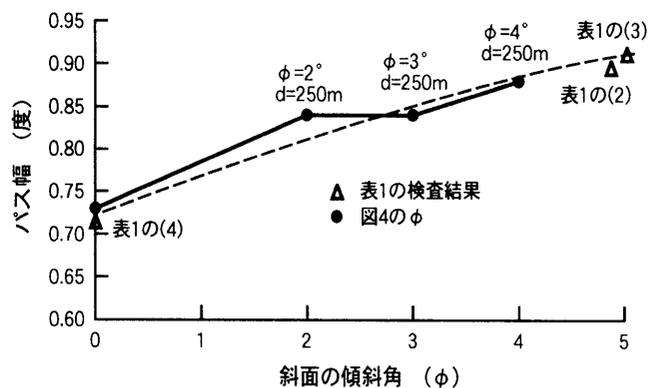


図5 飛行検査事例と解析結果の対照性

表2 飛行検査結果

飛行回数	パス幅	上側パス幅	下側パス幅
1回目	0.80°	0.38°	0.42°
2回目	0.79°	0.37°	0.42°
3回目	0.82°	0.39°	0.43°

注：normalパス幅は0.72°、飛行高度2200feet
実施時間、1/29 pm3:00~4:00

±0.5°と規定値を満足している。これはパス形成反射領域の積雪深が30cm以下に管理されているためである。しかし、図6に示すように吹き溜まりによる雪の波紋が180m付近にまで及ぶと、最上部のアンテナ素子の反射点が上下に変位し、パス角が変化する可能性がある。

一方、今年は、暖冬で、1月に殆ど降雪がなく、積雪面の除雪が行われなかった。このため図6に示す雪の波紋が、風による雪の吹き溜まりにより、200mから300mの区間に形成されたと予想される。図4で述べたパス幅の解析結果では、 $d=250m$ のときに感度低下を生じるが、図6の実証試験結果により、図7に示す斜面隣接区間の短縮が吹き溜まりにより生じることが確認され、DDMの直線性の劣化が下半値パス幅で生じることが明らかになった。

以上により、表1の(i)は、除雪後直ちに飛行検査を行った吹き溜まりが生じていないケースであったと考えられる。一方、(j)と(k)は吹き溜まりが生じていたケースと考えられる。

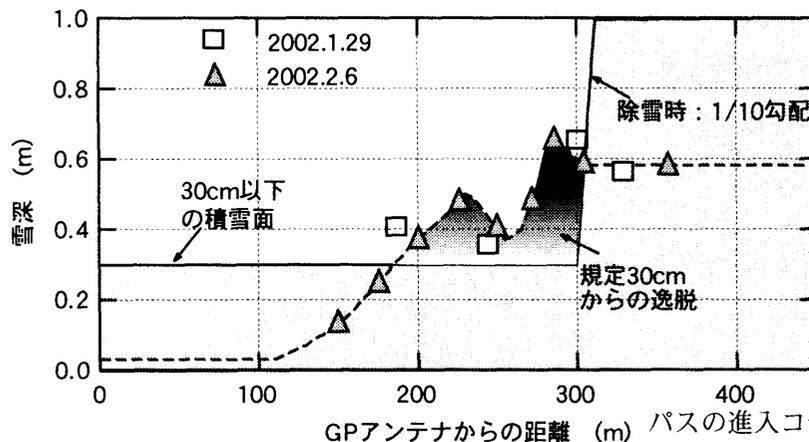


図6 GP反射面積雪形状の測定結果

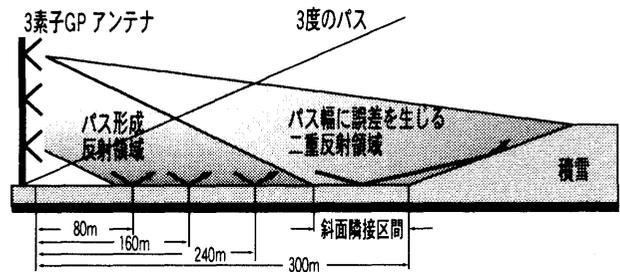


図7 積雪面における反射波の発生領域

5. まとめ

積雪による進入コースの予測計算プログラムを階段状積雪面の形状モデルに適用し、GPのパス幅を計算し、飛行検査等の実証試験によって、予測計算との対照性を確認した。その結果、次のことが明らかになった。

- 1) 階段状積雪面の形状パラメータとして、従来、考慮されていない ϕ (斜面の傾斜角)と d (斜面までの距離)を定義し、パス幅の予測計算をした。その結果、 $250m \leq d < 300m$ なる条件が満たされると、DDMの直線性を劣化させる二重反射が発生し、パス幅の感度の低下を生じる。
- 2) 飛行実験および積雪深形状測定による実証試験の結果、仮に、C地区の積雪深が1m以下でも、A地区の斜面隣接区間に雪の吹き溜まりが生じると、パス幅の感度低下を生じる。

以上により、パス幅を変化させる主たる要因は、除雪時の階段状積雪面を3次元の曲面状波紋にする吹き溜まりによって引き起こされる現象であることが分かった。しかし、GP反射面の吹き溜まりが、どのように生成されるのかどうか現在の所不明である。

このため、青森空港のCATⅢ化に際しては、GP反射面の積雪の全体形状変化の測量と、それによるパス角、パス幅の誤差解析を十分に行う必要がある。

謝辞

本研究にご協力を頂いた航空局、東京航空局、青森空港出張所および飛行検査官室の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

横山：“積雪時におけるILSガイドパスの進入コースの予測について”，第37回飛行機シンポジウム,3A5,1999.10