

25. ILS グライドパス反射面の積雪によるパス特性の変化

機上等技術領域 ※横山 尚志、朝倉 道弘、田嶋 裕久

1. はじめに

青森空港は、わが国で降雪量の最も大きい空港である。当該空港を CATⅢ化するには、現行除雪基準が積雪深 $D_{sw} \leq 10\text{cm}$ であるので、除雪に追われて CATⅢの運用は到底おぼつかなくなり、 $D_{sw} \leq 30\text{cm}$ に除雪基準を緩和することが必要になる。しかし、除雪基準を緩和すれば、当然のことながら、ILS の電波の質の劣化が懸念される。

このような相矛盾する要件を解消するため、電子航法研究所は、除雪基準に係る積雪調査を行った。その結果、青森空港の GP 反射面の積雪は、外気温や降雨により雪質は乾雪・湿雪に変わったり、豪雪時には重機による圧雪が実施され、積雪断面は多層構造になる。本稿では青森空港固有の積雪状態を考慮して除雪基準緩和のための GP の解析をする。まず、2.で積雪実験の結果を、3.で積雪の基本反射特性、4.で青森空港の積雪状態を考慮したパス特性の変化について述べる。

2. 積雪実験

GP の飛行進入方式を図 1 に示す。飛行検査ではパス角 $\theta=3$ 度で降下し、3NM~6NM の受信機出力の平均 DDM より、積雪によるパス角の誤差を求めている。地上の GP 反射面の積雪状態は積雪深の代表値しか測定していない。我々は積雪の表面形状、層構造および誘電率を 30m 間隔で測定した。

2.1 GP 反射面の積雪構造変化

直接波と反射波によって GP のパスが形成される。一定の角度で進入するため反射点は進入機までの距離によらずほぼ一定になる。そこで、反射点の積雪深、層構造及び雪質を入念に測定した。青森空港の降雪期の積雪変化は、まず、11月から12月の降雪初期では自然積雪になる。1月以降は豪雪になるので、現行 CAT I の除雪基準 (30cm 以下) を越えないように湿地ブルドーザによる重機圧雪・除雪が実施される。その

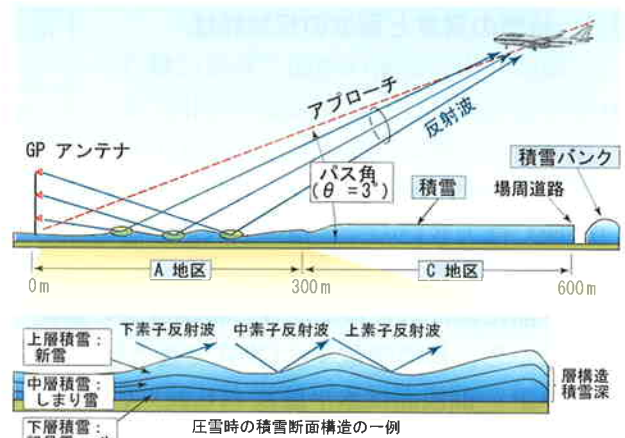


図1 GP 反射面積雪の層構造と進入方式

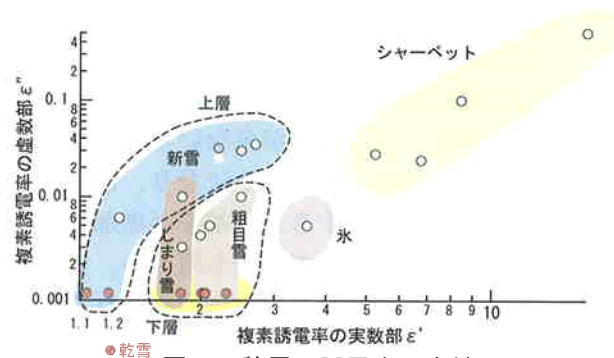


図2 積雪の誘電率測定結果

結果、吹き溜りに類似する凹凸が反射面に生じ、2層、3層の断面構造を生じる。最下層は硬い圧雪、中層はしまり雪又はざらめ雪、表層は新雪になる。

2.2 積雪の誘電率

GP 反射面の積雪の雪質は誘電率測定装置によって測定する。誘電率測定装置は青森大学との共同研究で開発した。測定原理は屋外測定と較正が容易な共振型センサを用いている⁽¹⁾。測定結果を図 2 に示す。気温の低いときの雪は乾雪になるが、日照や降雨後には湿雪になり誘電率が急増する。また、GP 反射面の地面は粘土質であるため排水が悪く、3月以降や降雨により下層の雪質は水を多量に含んだ氷 (シャーベット) になる。気温の低いときの下層・中層の粗目雪としまり雪は赤○の誘電率になる。

3. 積雪の基本特性

図1に示すGP反射面が雪のない理想平面であれば、GPアンテナの素子間隔によりパス角が3度になるが、積雪状態によって誤差を生じる。

3.1 積雪の雪質と電波の反射特性

一般に、雪の結晶は地面で外気に曝されると氷の粒になる。外気温の変化により積雪内部の構造は変化し、雪も沈下して密度を増す。積雪の結晶に対してGPの波長(0.9m)は大きいので、積雪面は均一な媒体として解析できる。

境界面におけるEおよびHの接線成分の連続性などから、複素誘電率 ϵ は次式で表される⁽²⁾。なお、GPの偏波面は水平偏波(TE波)である。

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j\frac{\sigma_s}{\omega} \quad (1)$$

ϵ' は ϵ の実数部、 ϵ'' は ϵ の虚数部、 σ_s は導電率、 f は周波数で330MHz、 λ は波長である。

表1に示す新雪、しまり雪は気温の低いときの誘電率である。水分含有が少ないと表より損失角が $\tan\delta \ll 1$ 、屈折率が $n \approx 1$ になり、電波は新雪内に直線的に透過する。誘電率が増加すると積雪の屈折率が増加して損失も増える。表より積雪は導電率の低い損失誘電体で表されることが示される。

図3(a)に積雪面の反射係数を示す。湿地の反射係数は、入射角を青の範囲とすると図より $|\Gamma| \approx 0.9$ 、透過係数は $|T| \approx |1 - |\Gamma|| = 0.1$ になる。

新雪の場合、 $|\Gamma| \approx 0.55 \sim 0.7$ 、 $|T| \approx 0.45 \sim 0.3$ で、積雪内透過成分が著しく増加する。

3.2 地面に堆積した積雪の反射特性

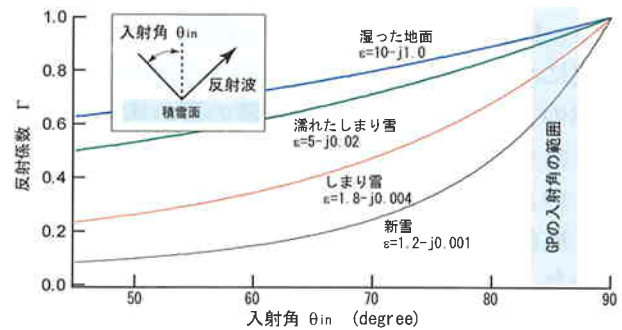
図3(b)は、 D_{sw} の厚さのしまり雪と新雪が地面に堆積した場合で、TE波の入射角を θ_{in} とすると反射係数 Γ は分布定数理論より、

$$\Gamma = \frac{Z_1 \cos\theta_m - Z_0}{Z_1 \cos\theta_m + Z_0} \quad (2)$$

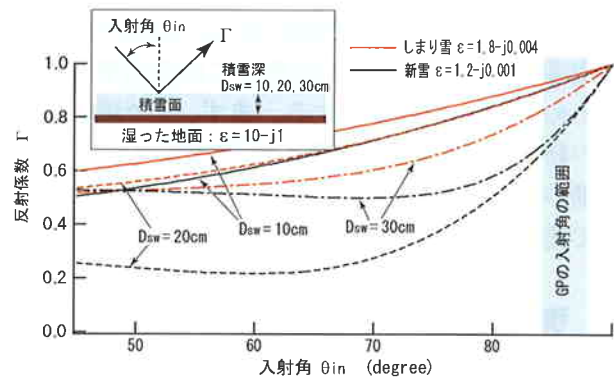
になる。ここで、 Z_1 は積雪の入力インピーダンス、 Z_0 は空気の特徴インピーダンスである。多層構造の場合も同様に最下層の入力インピーダンスから漸化式を用いて表層の入力インピーダ

表1 積雪の雪質と物理的性質

雪質	複素誘電率 $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$	導電率 $\sigma_{s2} = \epsilon''\omega$	損失角 $\tan \delta_{s2} = \epsilon''/\epsilon'$	屈折率 n
新雪	1.2-j0.001	2.07×10^6	0.0008	1.1
しまり雪	1.8-j0.004	8.3×10^6	0.0022	1.34
湿ったしまり雪	5-j0.2	414×10^6	0.04	2.24
湿地	10-j1.0	2072×10^6	0.1	3.17



(a) 地面がない場合の反射係数



(b) 地面がある場合の反射係数

図3 積雪及び地面の反射・透過係数

ンスを算出し、2式により Γ を求める。

図(b)に示すしまり雪(赤線)と新雪(黒線)の Γ は、地面の効果によって、図(a)の湿った地面相当の Γ に変化する。また、新雪の厚さを $D_{sw}=20\text{cm}$ 、 30cm にすると、 Γ の変化が著しくなる。これは積雪内多重反射成分の再放出成分の影響である。

4. 青森空港固有の積雪による影響

4.1 自然積雪の場合

図4(a)に積雪深 D_{sw} による反射係数 Γ の変化を示す。図に示すように雪質と D_{sw} により Γ の上下変化が相違する。密度の小さいしまり雪や新雪になると、 Γ の減少が著しい。

図(b)は積雪による3NM遠方のDDMの変化を示す。機上のGPの指示値はDDM (Deference of Depth of Modulation; μA) で表示され、 $0\mu A$ が3度に相当、 $21\mu A = 0.1$ 度の関係になる。図の積雪変動は、図(a)の反射係数と良い相関を示す。図のしまり雪 ($\epsilon = 1.8 - j0.004$) の場合、積雪深 $D_{sw} = 0.27m$ においてCATIIIのパス角の規定値上限を逸脱する。このため、 $D_{sw} < 0.27m$ で反射面の除雪をする必要がある。このような逸脱は、積雪変動が一定勾配の直線と重畳して変化するため、規定値の+側での余裕が少ない。図の鎖線はOhio大学の飛行実験における積雪時のパス角の平均勾配であって⁽³⁾、図に示す湿った地面のときの積雪変動(勾配 $0.091^\circ / ft$ の直線)と良く一致する。

4.2 自然積雪に降雨があった場合

図5は(a)に示す自然積雪に降雨があったときの上層誘電率の変化とDDMの変化を示す。積雪の誘電率は、青森大学との共同研究で開発した6段スタックセンサアレー⁽¹⁾を自然積雪内に挿して測定した。スタックセンサの間隔を5cm、降雨後の上層積雪の誘電率の日変化を示す。最上段センサの ϵ_6' は1.6から単調減少するが、2段目、3段目のセンサでは降雨の沈降による誘電率の増加が生じる。図(c)は自然積雪の全積雪深が $D_{sw} = 28cm, 42cm$ のときのDDMの計算結果を示す。降雨量は比較的少ない場合であるが、パス誤差は規定値を十分に満足している。

4.3 重機圧雪(等積雪深)の場合

図4(b)では圧雪(しまり雪)の $D_{sw} = 0.27m$ のときに規定値の上限を逸脱した。このため、重機圧雪時には $D_{sw1} + D_{sw2} < 25cm$ を除雪の基本条件とする必要がある。

そこで、積雪面が平坦な等積雪とし、下層の誘電率の変化を横軸に取り、上層の新雪を $D_{sw3} = 10cm, 15cm, 20cm$ としてDDMの変化を計算する。その結果を図6(a)に示す。圧雪を $D_{sw1} + D_{sw2} = 20cm$ 、新雪を $D_{sw3} = 10 \sim 20cm$ 、中層をしまり雪の $\epsilon_2' = 1.6, 1.8$ とすると、図7に示すように $-12\mu A \leq DDM < 13\mu A$ になり、全積雪深40cmにおいても規定値を十分に満足する。

4.4 重機圧雪(不等積雪深)の場合

本項は、 $D_{sw1} + D_{sw2} < 25cm$ を除雪の基本条件とし、かつ、積雪面に凹凸のある不等積雪とす

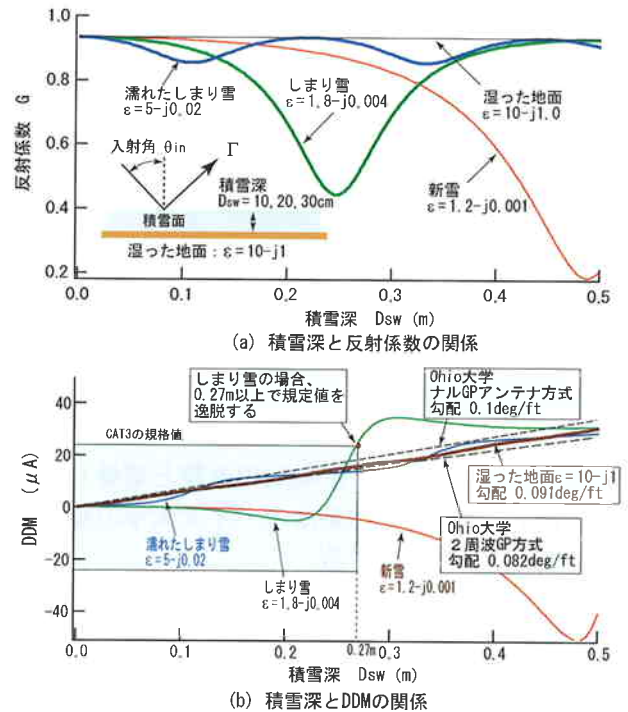


図4 大地に一層の雪が堆積しているときの反射特性とDDM特性

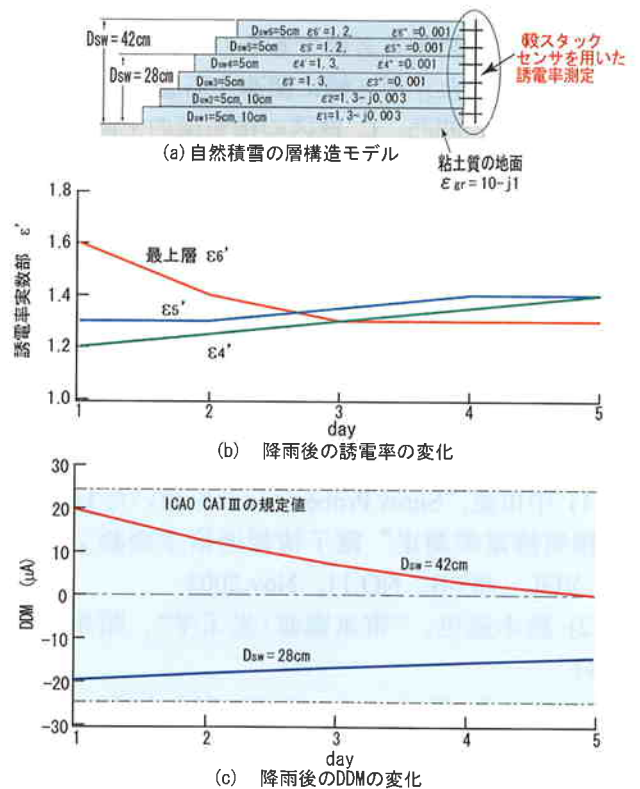


図5 自然積雪に降雨があったときのDDMの変化

る。図6(b)はGPアンテナの中素子反射点の積雪深が $D_{sw1} + D_{sw2} = 25cm$ の場合、図(c)はGPアンテナの上素子反射点の積雪深が $D_{sw1} + D_{sw2} = 25cm$ 、 $D_{sw3} = 5, 10cm$ の場合である。

図(b)と図(c)に示すように中素子反射点が隆起した不等積雪の場合にのみ、DDM が規定値の上限側に変動する傾向を示す。DDM の変化範囲は $4\mu\text{A} \leq \text{DDM} < 22\mu\text{A}$ になり、図7に示すように規定値を十分に満足する。

5. まとめ

青森空港独自の GP 反射面の積雪形状は、重機圧雪による多層構造であり、かつ、吹きだまりに類似する凹凸を生じる積雪面である。DDM の積雪変動は積雪深と誘電率による反射特性の変化によるもので、一定勾配の直線と重畳して変化する。その解析結果はオハイオ大学の飛行検査結果とよく一致する。

また、除雪基準については、圧雪後積雪深の除雪基本条件を $D_{sw1} + D_{sw2} < 25\text{cm}$ とする。その結果、全積雪深が 35cm までは CATⅢ の規定値を満足し、現行除雪基準の大幅な緩和が可能となる。

降雨時のパス誤差については、積雪誘電率の測定を更に継続する必要があるため、今後の課題とする。また、パス幅に関連する要件としては、積雪面の凹凸、C 地区の積雪深の上限、A 地区と C 地区の隣接部ののり面の影響等が挙げられるが、これについても今後の発表課題とする。

謝辞

本研究の実施において、終始、ご協力をいただいた航空局管制保安部管制技術課及び青森空港出張所の担当各位に感謝の意を表します。

文献

- (1) 中田他, “Snow Probe センサを用いた UHF 帯積雪誘電率測定” 電子情報通信学会論文誌 B, VOL. J85-B, NO.11, Nov,2002
- (2) 鈴木道也, ”雪氷電波・光工学”, 昭晃堂 1787
- (3) Avionics Engineering Center Ohio University, “SNOW REPORTS ” 1965-1991, VOLUME # II (Continued)

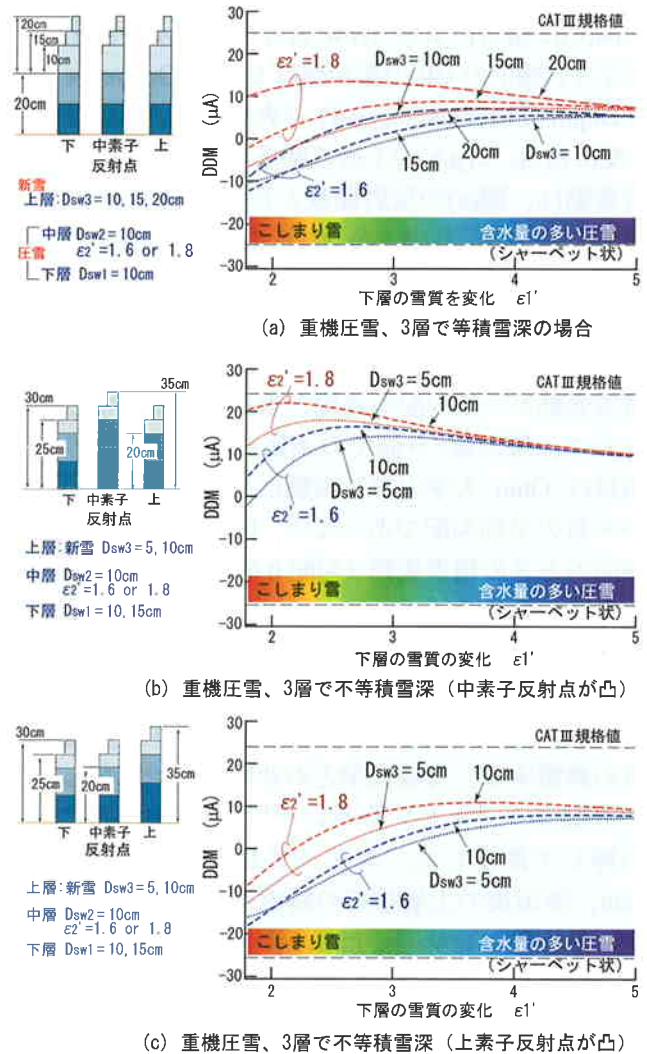


図6 機械圧雪除雪後の3層の積雪断面構造の時のDDM特性

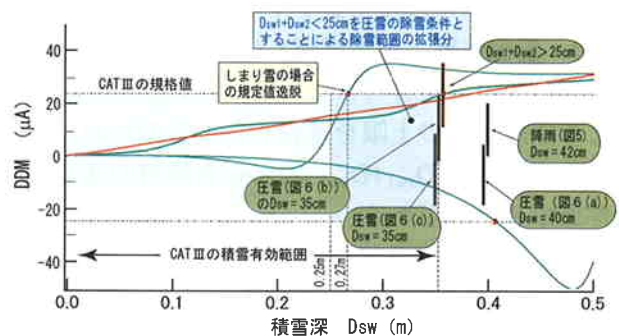


図7 青森空港積雪時のCATⅢ除雪範囲