

17. 青森空港の積雪による LLZ のコース偏位

機上等技術領域 ※横山 尚志、朝倉 道弘、田嶋 裕久
青森大学 中田 和一

1. はじめに

青森空港では 2007 年 3 月から CAT (Category) III の共用が開始された。そのため、2005 年秋に滑走路を 2500m から 3000m に、LLZ アンテナを 1 周波から 2 周波方式に、電波高度計用地には FFM (Far Field Monitor) が整備された。また、素子 LPDA (Log Periodic Dipole Array) に付着する着雪・着氷除去のための台座(キャットウオーク)が整備された。しかし、青森空港は、わが国で最も積雪量の多い空港である。2006 年の冬期、FFM に予想もしなかったコース偏位が観測された。そこで、コース偏位の改善を目的として、LLZ アンテナ前方反射面を 10m 幅の帯状に除雪をしたところ、LLZ アンテナから 50m 付近が最も改善効果が著しいことが確認された。本現象は冬季の空港の運用にとって由々しい事態が生じる可能性がある。そこで、2006 年から 2008 年に東京航空局からの調査研究が当所に委託され、原因究明と冬季の CAT III 実施に関する積雪調査を行った。本稿は研究成果の一部である。

本稿は、2. で LLZ アンテナ反射面の積雪縦断・横断勾配の反射波解析法、3. で誘電率の測定値を用いたコース偏位の計算結果と FFM 測定値の比較、4. でコース偏位の発生要因を検討する。

2. 積雪時の反射波の解析

2.1 LLZ アンテナ方式

図 1 に示す LLZ アンテナは 2 周波 24 素子横型空中線である。2 周波方式は Dir (ディレクショナル) 系と CI (クリアランス) 系のパターンを放射する。Dir 系キャリアのビーム幅は±2.5 度になり周辺構造物からの影響を低減することができる。また、CI 系はオフコース方向の輻射

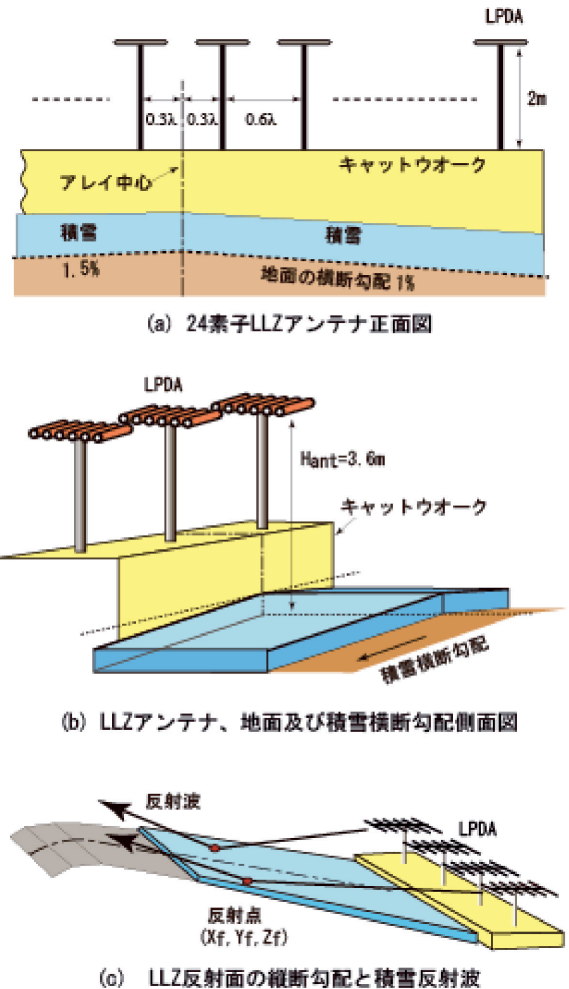


図 1 LLZアンテナと前方積雪反射面

を極力抑圧し、かつ、擬似コースの生じないパターンを形成する。アンテナ素子として相互結合の少ない LPDA を使い、アンテナ高は地面から $H_{ant}=3.6m$ 、キャットウオークの高さは 1.6m である。

2.2 LLZ 反射面の地面構造と積雪形状

図 1(a)、図 1(b)に示す地面の横断勾配は $A_H=1.0\%, 1.5\%$ で若干の左右非対称を示す。図 1(b)に LLZ アンテナ前方の積雪状況とキャットウ

オークの配置図を示す。コース偏位は、積雪面で反射する反射波とキャットウオーク先端エッジの回折波の積雪面からの反射波によって生じることが予想される。また、LLZ アンテナより800m までの縦断勾配は $A_s=0.5\%$ である。雪が積もる反射面は LLZ アンテナから約 180m まで、その先は滑走路に入る。

2.3 積雪面の反射波解析法

一定の縦断・横断勾配が付いている積雪面に投影される LLZ アンテナのイメージ (X_{im}, Y_{im}, Z_{im}) を求めると、

$$(X_{im}, Y_{im}, Z_{im}) = \left(R_0 \sin \phi_a \cos \phi_{gr}, Y_{at} \pm R_0 \sin \phi_{gr} \cos \phi_{gr}, (2 \cdot Z_{hor} + 2 \cdot D_{sw} - h_{ant}) + R_0 (\sin^2 \phi_a + \sin^2 \phi_{gr}) \right) \quad (1)$$

$$R_0 = 2 \cdot (h_{ant} - D_{sw} - Z_{hor})$$

になる。ここで、 ϕ_a は縦断勾配の地面の角度、 ϕ_{gr} は横断勾配の地面の角度、 R_0 は LLZ アンテナから素子イメージの距離、 Y_{at} はアレーの中心から LPDA までの間隔、 Z_{hor} は横断勾配による上下変化、 D_{sw} は反射面の積雪深、 h_{ant} は LLZ アンテナの地面高である。

次に、積雪面上の反射点の座標 (X_{rf}, Z_{rf}) を求めると、

$$(X_{rf}, Z_{rf}) = \left(\frac{A_{v2} X_{im} - Z_{im} + D_{sw}}{A_{v2} - A_a}, A_a \cdot X_{rf} + D_{sw} \right) \quad (2)$$

$$\theta_m = \tan^{-1} A_{v2}$$

になる。ここで、 A_{v2} は反射点方向の俯角であり、 θ_{in} は雪面に対する電波のグレイジング角を示す。水平偏波に対する一層積雪面の反射係数 Γ は伝送線理論を用いて^{[1], [2]}、

$$Z_{gd} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_g - \sin^2 \phi_m^2}}$$

$$Z_{s1} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{s1} - \sin^2 \phi_m^2}} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{j2\pi D_{sw} \sqrt{\epsilon_{s1} - \sin^2 \phi_m^2}}{\lambda}$$

$$\phi_m = \frac{\pi}{2} - (\tan^{-1} A_{v2} + \tan^{-1} A_a)$$

$$Z_1 = \frac{Z_{s1} (Z_{gd} + Z_{s1} \cdot \tanh \gamma)}{(Z_{s1} + Z_{gd} \cdot \tanh \gamma)}$$

$$\Gamma = \frac{Z_1 \cos \phi_m - Z_0}{Z_1 \cos \phi_m + Z_0}$$

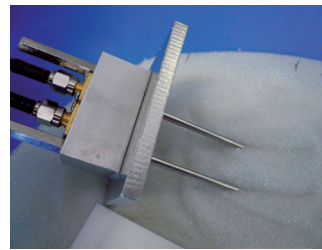
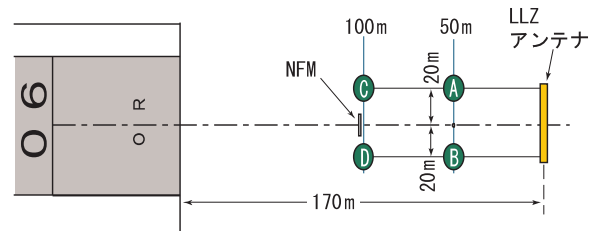


図2(a) 透過型電磁共振センサ



(b) LLZ アンテナ前方の誘電率測定点

月/日	F/I 及び FFM	雪質調査内容																													
2/19	F/I (3回目) FFM-DDM=+3 ~ 4 μA NFM RF ≒ 80% 深夜：圧雪	<table border="1"> <tr> <th>測定点</th> <th>高さ</th> <th>誘電率 (ε)</th> </tr> <tr> <td rowspan="6">A (16:00 ~ 測定)</td> <td>111cm</td> <td>ε=1.16-j0.002</td> </tr> <tr> <td>106</td> <td>ε=1.25-j0.006</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>ε=1.46-j0.005</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>ε=1.6-j0.002</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>ε=1.9-j0.003</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>ε=1.9-j0.003</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">B</td> <td>118cm</td> <td>ε=1.19-j0.004</td> </tr> <tr> <td>115</td> <td>ε=1.36-j0.002</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>ε=1.45-j0.003</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>ε=1.56-j0.003</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>ε=1.6-j0.001</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>ε=1.87-j0.002</td> </tr> </table>	測定点	高さ	誘電率 (ε)	A (16:00 ~ 測定)	111cm	ε=1.16-j0.002	106	ε=1.25-j0.006	100	ε=1.46-j0.005	75	ε=1.6-j0.002	50	ε=1.9-j0.003	40	ε=1.9-j0.003	B	118cm	ε=1.19-j0.004	115	ε=1.36-j0.002	100	ε=1.45-j0.003	75	ε=1.56-j0.003	50	ε=1.6-j0.001	25	ε=1.87-j0.002
測定点	高さ	誘電率 (ε)																													
A (16:00 ~ 測定)	111cm	ε=1.16-j0.002																													
	106	ε=1.25-j0.006																													
	100	ε=1.46-j0.005																													
	75	ε=1.6-j0.002																													
	50	ε=1.9-j0.003																													
	40	ε=1.9-j0.003																													
B	118cm	ε=1.19-j0.004																													
	115	ε=1.36-j0.002																													
	100	ε=1.45-j0.003																													
	75	ε=1.56-j0.003																													
	50	ε=1.6-j0.001																													
	25	ε=1.87-j0.002																													
2/20	F/I (4回目) FFM-DDM=+2 μA NFM RF ≒ 70%	<table border="1"> <tr> <th>測定点</th> <th>高さ</th> <th>誘電率 (ε)</th> </tr> <tr> <td rowspan="3">A (15:00 ~ 測定)</td> <td>80cm</td> <td>ε=1.99-j0.008</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>ε=1.94-j0.005</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>ε=2.0-j0.013</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">B</td> <td>80cm</td> <td>ε=2.01-j0.014</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>ε=1.99-j0.006</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>ε=2.08-j0.017</td> </tr> </table>	測定点	高さ	誘電率 (ε)	A (15:00 ~ 測定)	80cm	ε=1.99-j0.008	60	ε=1.94-j0.005	40	ε=2.0-j0.013	B	80cm	ε=2.01-j0.014	60	ε=1.99-j0.006	40	ε=2.08-j0.017												
測定点	高さ	誘電率 (ε)																													
A (15:00 ~ 測定)	80cm	ε=1.99-j0.008																													
	60	ε=1.94-j0.005																													
	40	ε=2.0-j0.013																													
B	80cm	ε=2.01-j0.014																													
	60	ε=1.99-j0.006																													
	40	ε=2.08-j0.017																													
2/26	F/I (5回目) : 中止 FFM-DDM=-0.5 ~ -1.5 μA NFM RF=41%	<table border="1"> <tr> <th>測定点</th> <th>高さ</th> <th>誘電率 (ε)</th> </tr> <tr> <td rowspan="5">A (85cm)</td> <td>75</td> <td>ε=1.37-j0.009</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>ε=2.8-j0.04</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>ε=3.2-j0.067</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>ε=2.62-j0.065</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>ε=2.07-j0.01</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">B (90cm)</td> <td>85</td> <td>ε=1.27-j0.009</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>ε=1.41-j0.011</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>ε=2.23-j0.016</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>ε=3.05-j0.049</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>ε=2.9-j0.061</td> </tr> </table>	測定点	高さ	誘電率 (ε)	A (85cm)	75	ε=1.37-j0.009	60	ε=2.8-j0.04	50	ε=3.2-j0.067	40	ε=2.62-j0.065	25	ε=2.07-j0.01	B (90cm)	85	ε=1.27-j0.009	75	ε=1.41-j0.011	60	ε=2.23-j0.016	50	ε=3.05-j0.049	40	ε=2.9-j0.061				
測定点	高さ	誘電率 (ε)																													
A (85cm)	75	ε=1.37-j0.009																													
	60	ε=2.8-j0.04																													
	50	ε=3.2-j0.067																													
	40	ε=2.62-j0.065																													
	25	ε=2.07-j0.01																													
B (90cm)	85	ε=1.27-j0.009																													
	75	ε=1.41-j0.011																													
	60	ε=2.23-j0.016																													
	50	ε=3.05-j0.049																													
	40	ε=2.9-j0.061																													

(c) 誘電率測定結果、F/I と FFM 指示値

図2 青森空港の LLZ 前方域雪質調査結果の一例

で表される。ここで、 ϵ_g と ϵ_{s1} はそれぞれ地面と積雪の誘電率、 ϕ_{in} は入射角、 D_{sw} は積雪深である。 Z_{gd} 、 Z_{s1} 、 Z_0 は地面、積雪層、自由空間の特性インピーダンス、 γ は雪中の伝播定数、 Z_1

は自由空間から積雪表面を見た入力インピーダンスである。雪面からの反射波 E_{ref} は、

$$E_{ref} = \frac{f(\theta, \phi) \cdot \Gamma \cdot \varepsilon^{-j2\pi r_i / \lambda}}{r_i} \quad (4)$$

$$r_i = \sqrt{(X_{shp} - X_{im})^2 + (Y_{shp} - Y_{im})^2 + (H_{shp} - Z_{im})^2}$$

で求められる。ここで、 $f(\theta, \phi)$ は LPDA の指向性、 $(X_{shp}, Y_{shp}, Z_{shp})$ は受信点の座標、 r_i は受信点までの経路長である。

3. 積雪実験結果

3.1 積雪誘電率の測定装置

青森大学との共同研究によって透過型電磁共振センサを用いた積雪誘電率測定装置を開発した^[3]。図2(a)に示すセンサの2本の平行プローブを雪面に刺し込むと、透過共振特性が変化する。誘電率の実数部は共振周波数の変化、虚数部は共振帯域幅の変化から与えられる。本装置の特徴はベクトルネットワークアナライザのような絶対校正が不要となり、小型軽量化が容易なのでフィールド測定に適している^[4]。

図2(b)に LLZ アンテナ反射面の積雪測定点、図2(c)に測定した積雪の断面構造と誘電率の測定結果を示す。

3.2 解析結果と測定値との互換性

2月19日の FFM 指示値は、2日前まで $DDM \leq \pm 1 \mu A$ と安定していたが、 $DDM = 3 \sim 4 \mu A$ に変化した。積雪断面の誘電率は図2(c)に示すように2層目の誘電率が左右で異なっている。図3に誘電率の実測値を用いて解析したコース偏位を示す。LLZ アンテナから2NMの位置にある FFM のコース偏位は $DDM = 3.5 \mu A$ になり、FFM の指示値と一致する。

2月20日は、前夜、湿地ブルトーザを用いて圧雪したので、積雪深が $D_{sw} = 120 \text{cm}$ から 80cm に圧縮された。しかし、コース偏位は、前日と同様、FFM で $DDM = 2 \mu A$ 、F/I (Flight Inspection) では $DDM = 3 \mu A$ になった。誘電率の実測値を用いて解析すると、コース偏位は $DDM = 2.8 \mu A$ になり、FFM と F/I の指示値はよく一致する。圧雪したにも拘らずコース偏位が19日と同様なのは、湿地ブルトーザによる圧雪で、積雪断面の最上層と2層目の層厚が左右非対称

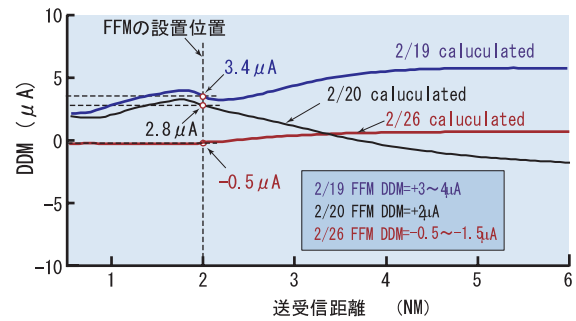
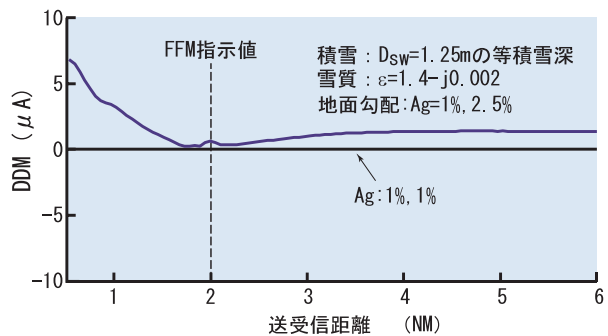
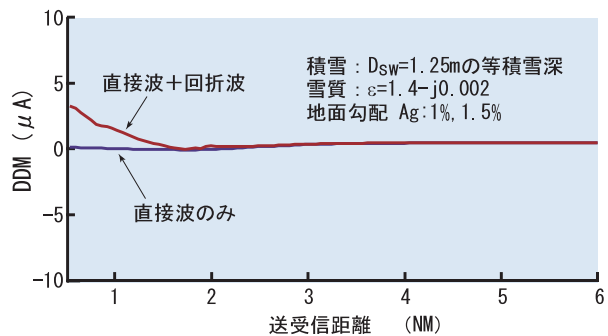


図3 地上積雪データを用いたコース誤差模擬計算結果



(a) 地面勾配が対称、非対称のコース偏位



(b) キャットウオーク模擬シミュレーション

図4 発生要因検討のためのシミュレーション

に変化したためである。

2月26日の積雪は、前日のみぞれ混じりの雪によって中層 ($D_{sw} = 40 \text{cm} \sim 60 \text{cm}$) の誘電率が増加し、かつ、層厚が左右で上下に異なっているためである。このため、FFM の指示値は一側の $-1.5 \leq DDM < -0.5 \mu A$ に変化する。解析結果は $DDM = -0.5 \mu A$ になり、FFM の指示値とよく一致する。

4. コース偏位発生要因の検討

4.1 横断勾配とキャットウオークの影響

図4(a)は、積雪が1層構造で、積雪深一定の

$D_{sw}=0.8m$ とし、地面の横断勾配を左右対称 $A_{gr}=1\%,1\%$ の場合と非対称の $A_{gr}=1.5\%,1\%$ にしたときのコース偏位の計算結果を示す。地面勾配が左右非対称になるとコース偏位が発生する。

図4(b)にキャットウオークの先端エッジによる回折波を考慮したときの計算結果を示す。キャットウオークの影響は2NMまで生じるが、遠方ではキャットウオークの影響は無視できる。

4.2 積雪形状によるコース偏位

図5に3種類の積雪形状モデルにおけるコース偏位を示す。積雪断面を1層構造とする。図(a)の積雪深一定の状態は、降雪初期に発生することが多い。これに対して、1月・2月に入ると豪雪になり重機圧雪をするので、積雪の断面構造が一定勾配か、左右非対称になる。

図(b)は、地面の横断勾配を左右対称（1%）、積雪深一定 ($D_{sw}=1.0m$) モデルとし、雪質を変化したときのコース偏位を示す。その場合、コース偏位は殆ど発生しない。

図(c)は、地面の横断勾配を対称、積雪形状を一定勾配モデル ($D_{sw}=-0.005 \cdot Y_{at}+0.8m$) とし、

その雪質を変化したときのコース偏位である。FFM 付近ではコース偏位が $DDM=0.5\sim 1.0\mu A$ に減少するが、遠方ではコース偏位が $DDM=-2\sim +3\mu A$ に増加する。

図(d)は、地面の横断勾配を対称、積雪形状を左右非対称モデル ($D_{sw}=0.003 \cdot Y_{at}+0.6m$ と

$D_{sw}=-0.02 \cdot Y_{at}+0.6m$) とし、その雪質を変化したときのコース偏位を示す。この場合、図(d)に示すように進入コースの上下偏位が2倍に増加するが、これは片方の積雪勾配を2%にしたためである。これを通常の1%にすると、図(c)と同等の上下偏位に減少する。

4.3 降雨模擬の解析

図6(a)に降雨模擬の積雪断面構造モデルを示す。降雨によって上層の厚さ D_{sw2} と雪質が左右非対称になった場合とし、LLZ アンテナより右側積雪の上層厚を $D_{sw}=0.4$ 、雪質を $\epsilon=1.5-j0.002$ とする。これに対して左側の上層厚を $D_{sw}=0.6$ 、

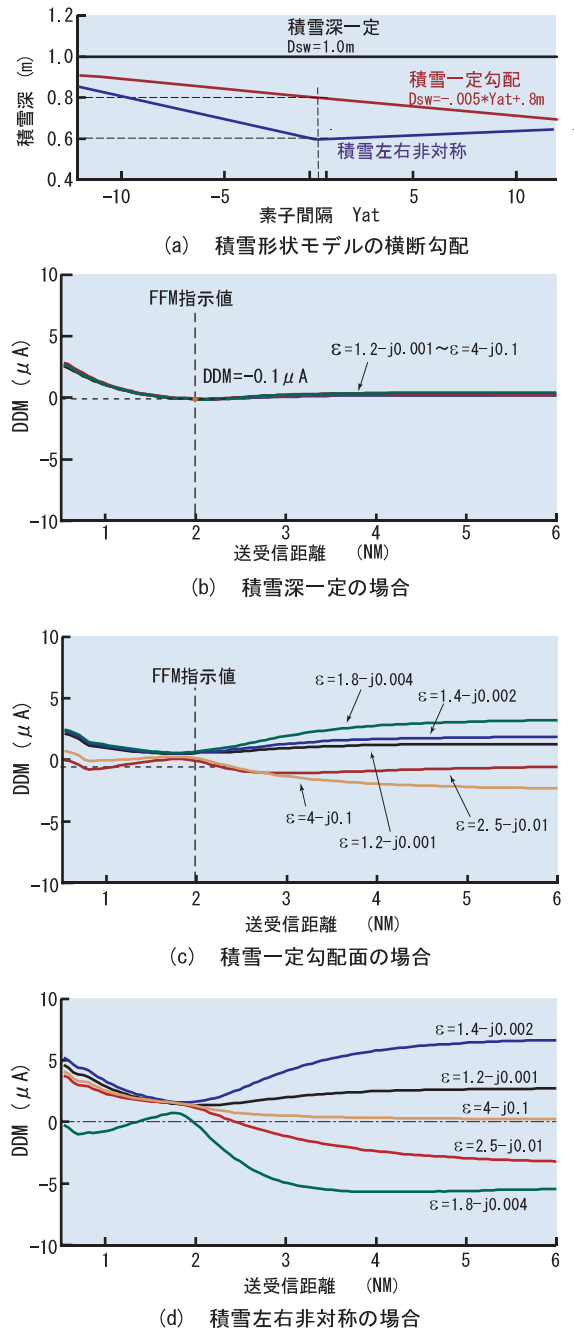


図5 三種類の積雪形状モデルを用いたときのコース偏位

雪質を $\epsilon=1.4-j0.002$ または $\epsilon=1.6-j0.002$ とする。また、下層の積雪深を $D_{sw}=0.3,0.4,0.5m$ とし、その雪質を圧雪または新雪状態として下層の雪質によるコース偏位を解析する。解析結果を図6(b)と(c)に示す。

図6(b)は、下層を圧雪状態とし、降雨による積雪含水量の増加により上層が左右非対称にな

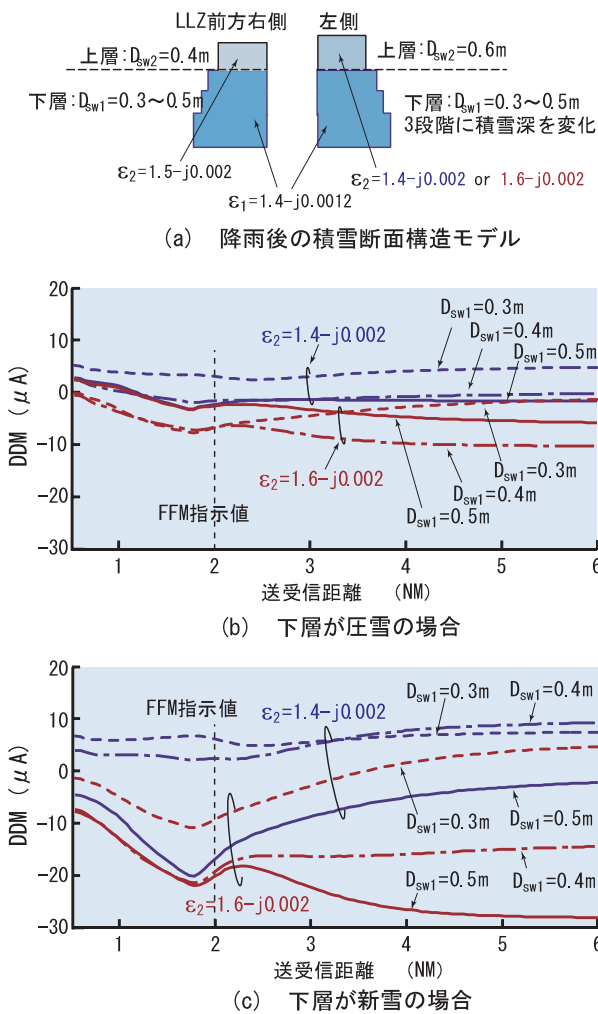


図6 降雨模擬シミュレーション結果

ったときのコース偏位を示す。FFM 地点のコース偏位は $DDM = -6 \sim +3 \mu A$ であるが、6NM 付近では $DDM = -11 \sim +5 \mu A$ に増加する。

図 6 (c) は、下層を新雪状態とし、降雨による積雪含水量の増加により上層が左右非対称になったときのコース偏位を示す。FFM 地点のコース偏位が $-21 \leq DDM < +6 \mu A$ に、6NM 付近では $-28 \leq DDM < +9 \mu A$ になる。下層を新雪状態にすると、図 6 (b) の圧雪に比べてコース偏位が約 3 倍に増加する。

2008 年冬季の積雪実験では、積雪を圧雪状態にした結果、コース偏位を図 6 (b) に相当する $-5 \mu A < DDM \leq 5 \mu A$ に抑制することができた。また、2007 年 2 月には、降雨後に $DDM = 10 \mu A$ の著しいコース偏位が発生したが、その雪質は新雪状態であり、図 6 (c) の解析結果と良く一致する。

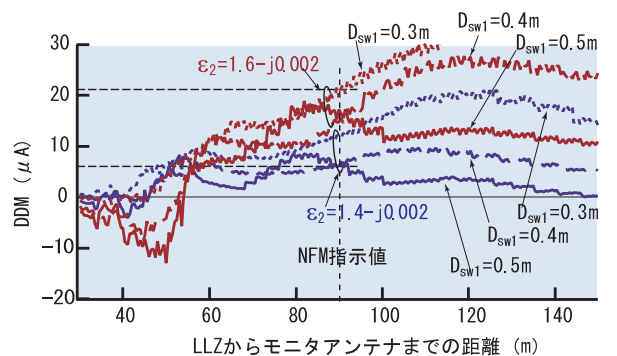
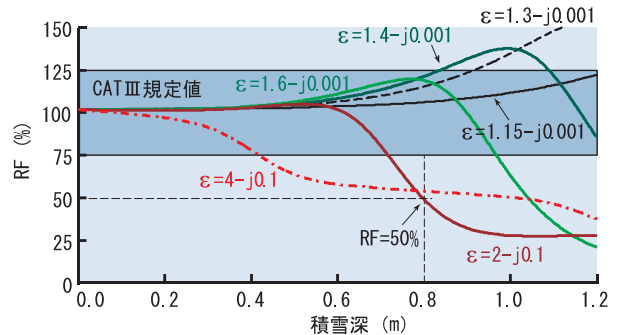
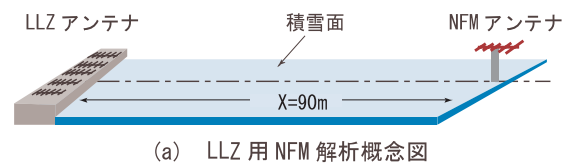


図7 積雪時の LLZ NFM 特性

4.4 圧雪時の NFM 特性の劣化

NFM (Near Field Monitor) は、図 7(a) に示すように LLZ アンテナ前方の 90m に設置して進入コースを監視するフィールドモニタである。LLZ アンテナの開口面が 18.8m あるので、LPDA の 24 素子から NFM までの経路が距離差を生じて遠方特性と異なるモニタ特性を生じる。そこで、青森空港では、昨年の後半から NFM をシステムの制御に絡めないメンテナンスモニタとして運用しているが、降雪期の 2008 年 2 月 15 日頃から RF (電界強度) が次第に減少傾向を示し、図 2(c) の 2 月 26 日には $RF = 41\%$ にまで低下した。下層の積雪深は図 2(c) より $D_{sw} = 0 \sim 0.6m$ 、雪質は $\epsilon = 2.07 - j0.01 \sim \epsilon = 3.2 - j0.067$ の範囲に分布する。

そこで、積雪による RF の変化について、層

構造を一層とし、積雪深を変化して解析を行った。図7(b)は積雪深を一定、その雪質を左右対称とし、積雪深 D_{sw} を変化したときのRFの変化を示す。雪質を圧雪状態の $\epsilon \geq 1.6 - j0.001$ にすると、積雪深の増加に伴ってRFが減少する傾向が現われる。図2(c)に示す2月26日のRFの変化は、図7(b)に示す雪質 $\epsilon = 2 - j0.001$ 、積雪深 $D_{sw} = 0.8m$ のRF=50%の状態と良く一致する。このような、積雪深の増加に伴うRFの低下は、モニタアンテナの支柱($h=1.784m$)が雪に埋まってモニタアンテナの垂直面パターンが上を向き、LLZの受信電界が減少するため、積雪の密度の増加によってその傾向が著しくなる。

図7(c)のDDM特性はNFMの降雨模擬で、図6(a)の積雪断面構造モデルをNFMに適用した場合である。モニタの受信点が $X=90m$ の地点では、進入コースの上下偏位が雪質によって $7 \leq DDM < 21\mu A$ に変化する。また、距離に対する進入コースの変動もFFMと比べて著しい。

5. まとめ

- イ) 反射波解析法と積雪誘電率の実測値を併用することによって、コース偏位の予測精度が著しく向上する。また、コース偏位の発生要因は、LLZアンテナ前方の左右の積雪面の断面構造が非対称になり、LLZ前方積雪面の左右の反射波が異なるためである。
- ロ) そのようなコース偏位を抑制するには、反射面の雪質を圧雪状態に管理することが不可欠である。しかし、圧雪状態にするとNFMのRFが低下して規定値を逸脱する場合がある。これはNFMとFFMが積雪面の雪質に関して相反する性質を持つためである。青森空港以外のFFMが整備されていないCAT I空港にあつては、ITG MON (Integral Monitor) が進入コースの積雪変化を監視できないことから、NFMの代わりに、可能であれば、簡易FFM等の導入を検討することが望ましい。
- ハ) なお、反射面の積雪を圧雪にすることは降雨後の積雪含水量増加に伴うコース偏位の減少に有効であるが、CAT IIIでは、厳しいコースアライメント ($DDM \leq \pm 4\mu A$) が適用される。2008年の積雪実験では、圧雪

状態に管理した結果、2月12日に $DDM < -5\mu A$ になる規定値の逸脱が1回確認された。このような、積雪時のコースアライメントの逸脱防止法として、我われは反射波遮蔽構造体を用いるコース偏位抑制法を提案する。この方式は除雪回数を最小化できるので、費用対効果の点でも優れている。

謝辞

本研究の実施にあたり、終始、ご協力を頂いた東京航空局の担当各位に感謝します。

文献

- (1) 橋本修、電波吸収体入門、森北出版、1997、pp.26-41
- (2) 鈴木道也、雪氷電波・光工学、昭晃堂1987
- (3) 中田他、“プローブセンサーアレーを用いたUHF帯積雪誘電率プロファイル測定”，電子情報通信学会論文誌，2004/6 Vol.J87-B No.6, pp.865-873
- (4) 横山他、“ILS グライドパス反射面の積雪によるパス特性の変化” 第45回飛行機シンポジウム、2007.10.10