

要素技術に関する実証実験について

航空局 航空ネットワーク部 空港技術課
令和8年3月

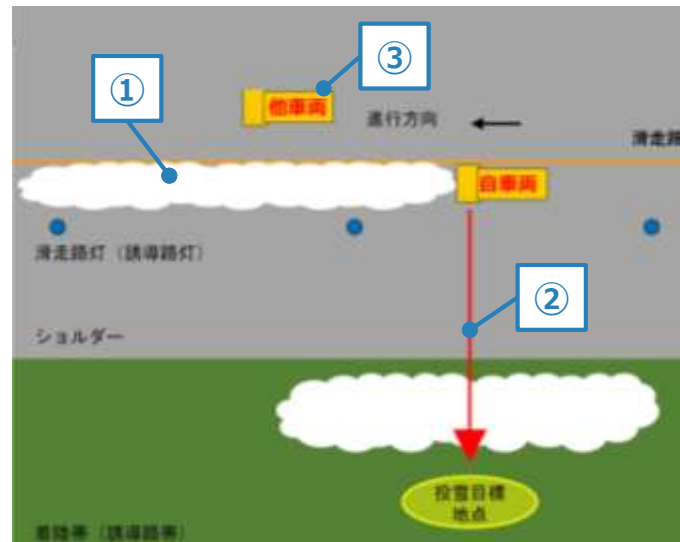
実証実験の概要

- 空港除雪は複数台での除雪作業が行われ、降雪などの過酷な環境下においても作業を実施している。
- 空港除雪車両の自動化を進めていくには、除雪対象である雪堤や投雪後の雪の状況を把握し作業を管理する必要があることから、除雪作業環境下において**周辺環境(例:障害物)**や**除雪対象物(例:雪堤高さ)**が把握できる技術が必要になる。
- 今年度は、悪天候による視界不良時でも周辺環境等が把握できる技術として期待されている「**ミリ波レーダー(4Dイメージングレーダー)**」を対象に、空港除雪環境下における検知性能を評価するため実証実験を行う。

今年度の実証実験スケジュール

項目	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
要素技術に関する 実証実験	企画・立案等	実験準備・積雪前検証・データ解析			積雪期検証・データ解析		結果整理等
				▲ 現地(3日間)	▲ 現地(3日間)		

対象車両:ロータリ除雪車(イメージ)



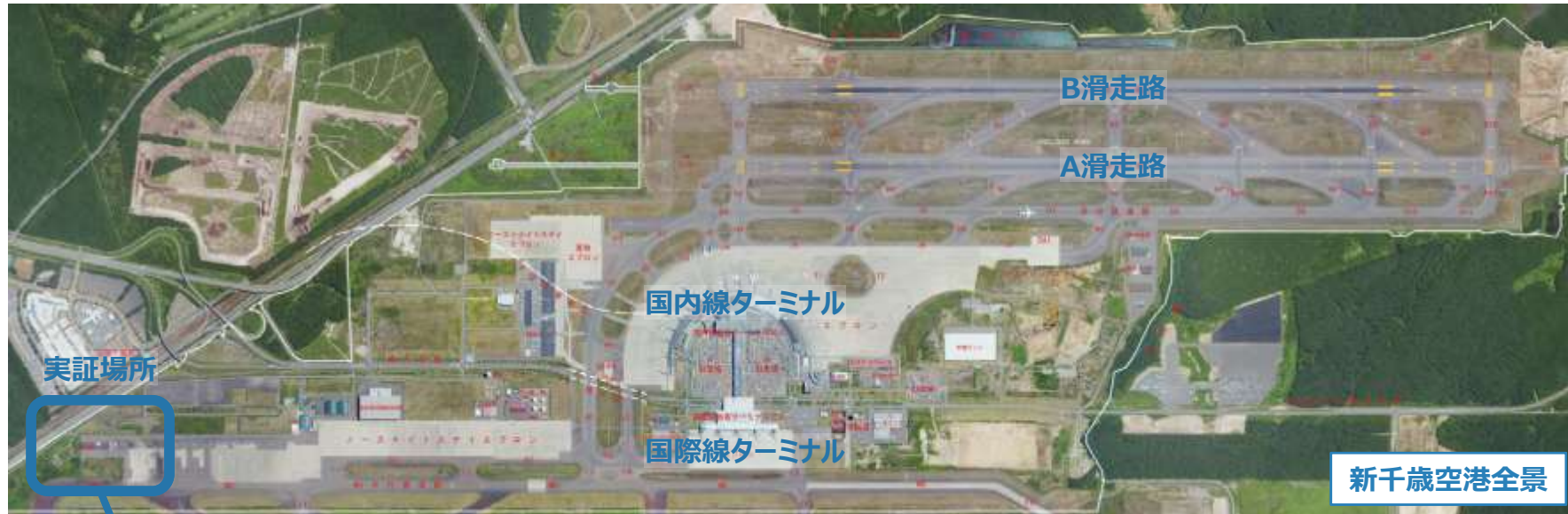
ロータリ除雪車両の自動化を進めるにあたり必要となる周辺環境検知として、ミリ波レーダーの適用可否を確認する

実証における検知対象物

- ① 雪堤
→ 除雪対象の検知
- ② 投雪
→ シュート制御への活用
- ③ 他車両
→ 障害物の検知

実証実験場所

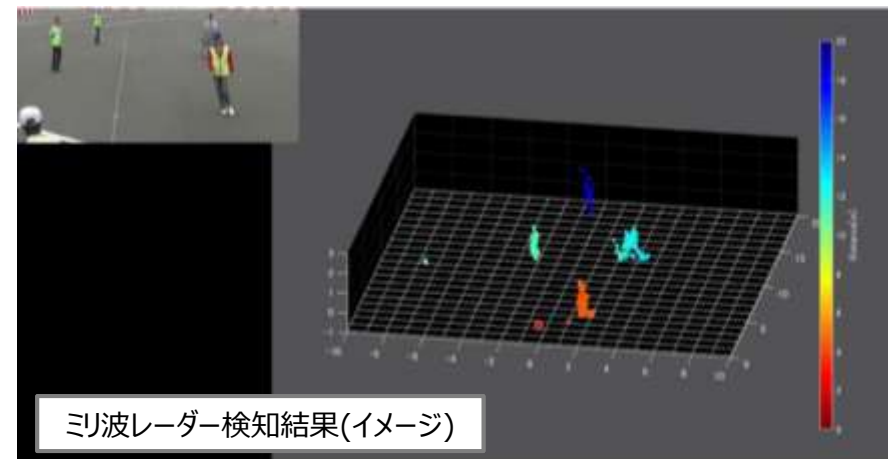
実証場所：新千歳空港 北除雪センター前



実験に使用したミリ波レーダー

ミリ波レーダー（4Dイメージングレーダー）

- ✓ ミリ波(電波)を用いた検知技術
- ✓ 自動運転で使用される光学センサ(カメラ、LiDAR)と比べ、**悪天候による視界不良時(霧・雪・雨等)でも良好な検知性能**を有する
- ✓ ターゲットの位置や相対速度に加え、**形状認識**も可能



実験に使用したミリ波レーダーの主要スペック

周波数	79GHz帯
使用帯域	1.4GHz
アンテナ数(Tx/Rx)	6/8
最大検出距離	60m
距離分解能	0.13m
視野角(水平/垂直)	130度/54度
角度分解能(水平/垂直)	6.0度/7.6度
速度分解能	0.05m/s



ロータリ除雪車(NICHIJO製)

設置位置の検証について

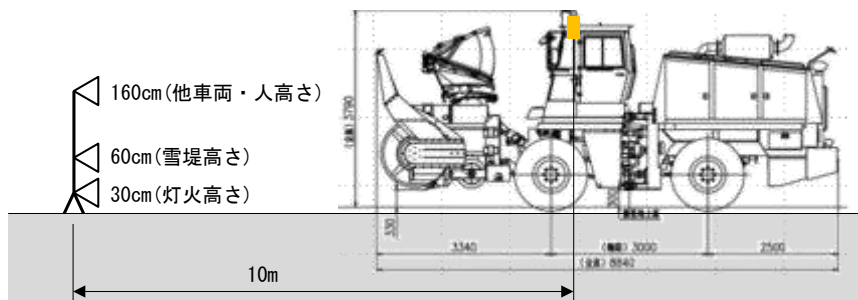
○ 車内／車外にミリ波レーダーを設置した場合における検知能力差を把握するために、フロントガラスによる電波の減衰程度を確認した。また、シュート装置の位置によるミリ波レーダーの死角発生状況を検証するために、ミリ波レーダー設置角度によるシュート装置の影響を検証した。

検証概要

検証項目	検証概要
車内位置によるフロントガラスの影響	<ul style="list-style-type: none"> 車内・車外に設置して車両前方のCR(※)を検知 フロントガラスによる電波の減衰程度を把握
設置角度によるシュート装置の影響	<ul style="list-style-type: none"> ミリ波レーダー2台を設置角度2案、シュート位置2種の計4通りで設置し、車両前方のCRを検知 シュート装置の代表的な姿勢に対してそれぞれ検知し、死角の発生状況を確認

シュートの位置とCR設置高さのイメージ

(※) CR(Corner Reflector) : ミリ波レーダーの性能を評価するための基準となるターゲット



シュート右向き



シュート左向き

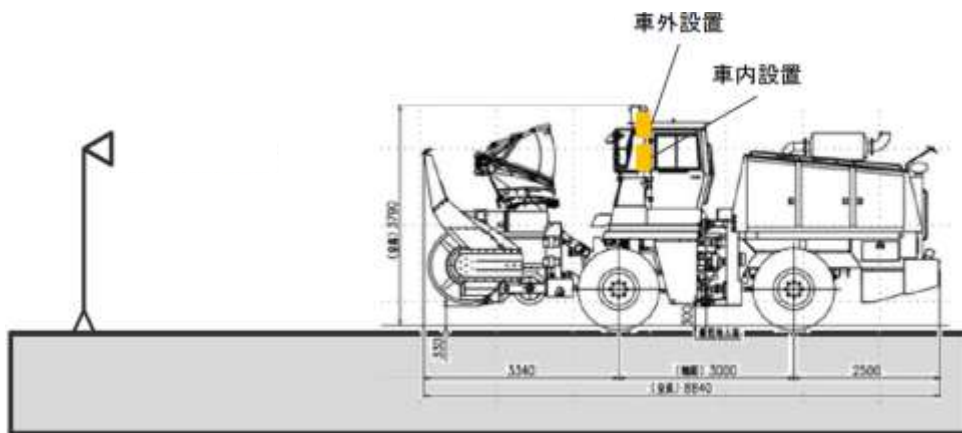


設置位置の検証(フロントガラスの影響確認)

車内設置/車外設置の比較

<実施内容>

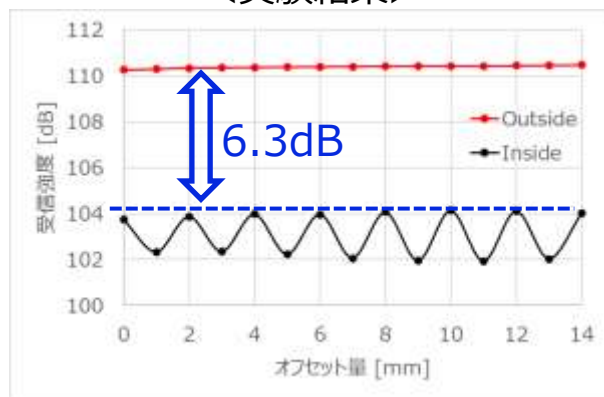
- ✓ 車内にミリ波レーダーを設置し、ターゲットの反射強度を観測
- ✓ 車外に設置したミリ波レーダーでも同様にターゲットを検出し、反射強度を比較することでフロントガラスの透過損失を算出



<ミリ波レーダー車内設置イメージ>



<実験結果>



フロントガラスの透過損失 : 6.3dB

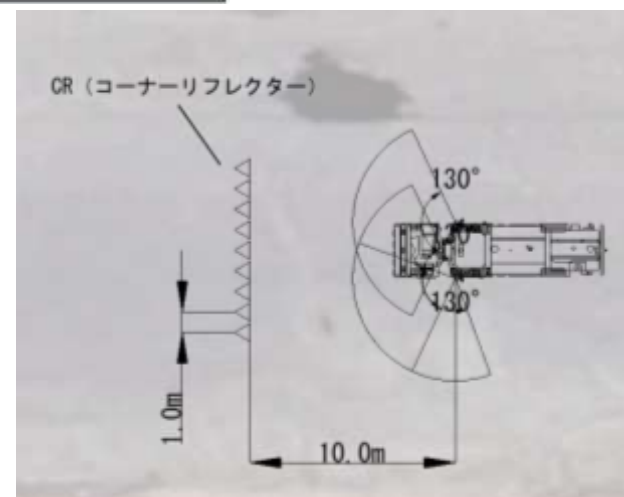
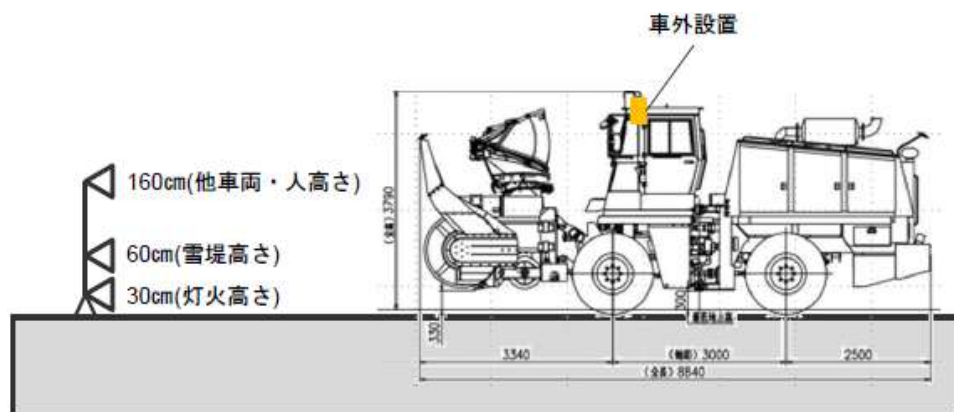
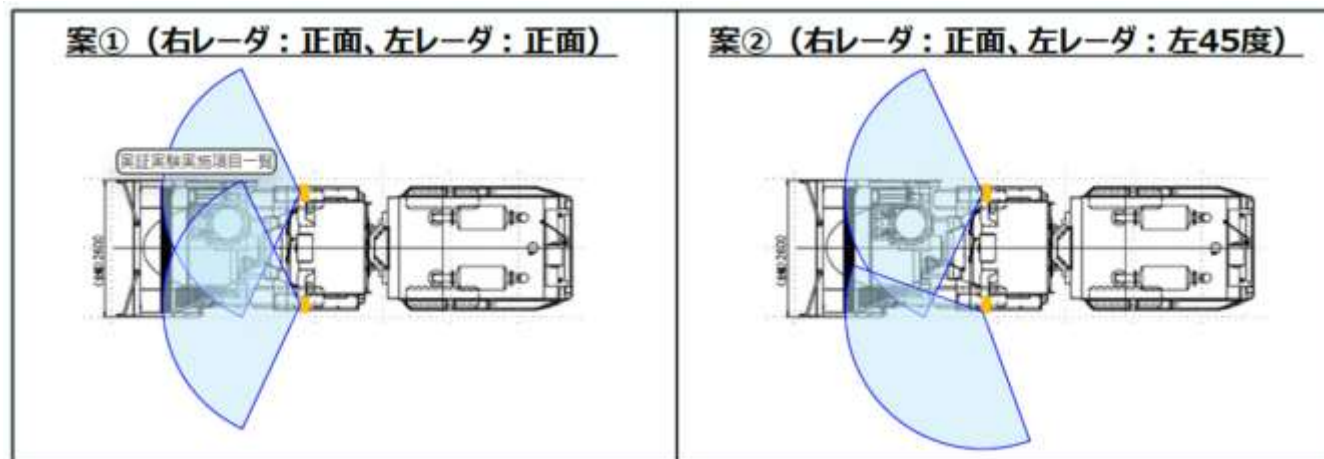
フロントガラスにより検出距離は**30%減衰**
 (ターゲットの最大検出距離が50mの場合、車内設置だと35m程度に減衰)

※ 以降の実験は、すべて車外設置で実施

設置位置の検証(設置角度によるシュート装置の影響)

<実施内容>

- ✓ シュート装置によるミリ波レーダーの検出結果への影響有無を確認するため、シュート装置の代表的な姿勢に対して、レーダー2台を下図の2案で設置して、停車中における検出性能を確認
- ✓ ミリ波レーダーの10m前方でCRを高さ30cm、60cm、160cmの3段階、横方向1m間隔で9ポイントに設置し、それぞれの位置においてCRを検出可能か確認



設置位置の検証(設置角度によるシュート装置の影響)

<実験結果一覧>

	写真	条件	左4m	左3m	左2m	左1m	正面	右1m	右2m	右3m	右4m
レーダー設置案① シュート 右向き		160cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		60cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		30cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
レーダー設置案② シュート 右向き		160cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		60cm	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		30cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
レーダー設置案① シュート 左向き		160cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		60cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		30cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
レーダー設置案② シュート 左向き		160cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		60cm	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		30cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○

- ✓ シュート向き・レーダー設置向きによらず特定の位置（右4m高さ60cm）で未検出
- ✓ 位置を少しずらせば検知は可能であり、走行中であれば問題ないレベル
- ✓ レーダー設置案②で左レーダーを斜め45度に傾けても正面方向の検出には影響なし

※ 以降の実験は、すべてレーダー設置案②で実施

検知性能の検証について

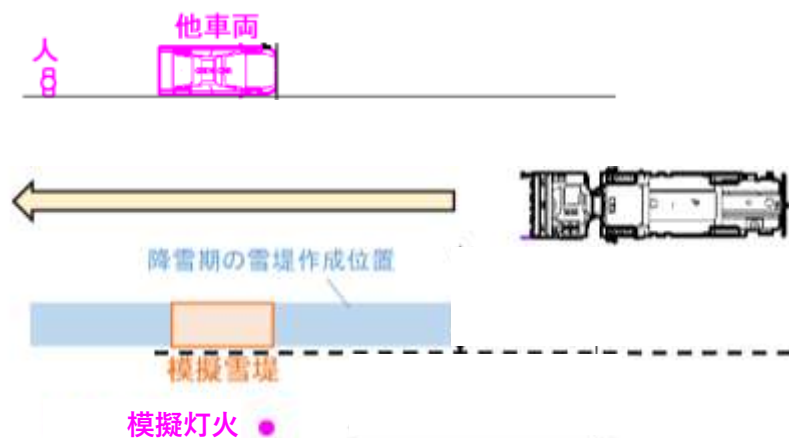
- 検知性能の検証では、除雪対象物である雪堤と、接触を回避すべき他車両、人、航空灯火に対して、走行する除雪車両からの検知可否や相対位置、形状・寸法の検知精度を検証した。
- シュート装置からの投雪軌道の検知可否を検証した。

検証概要

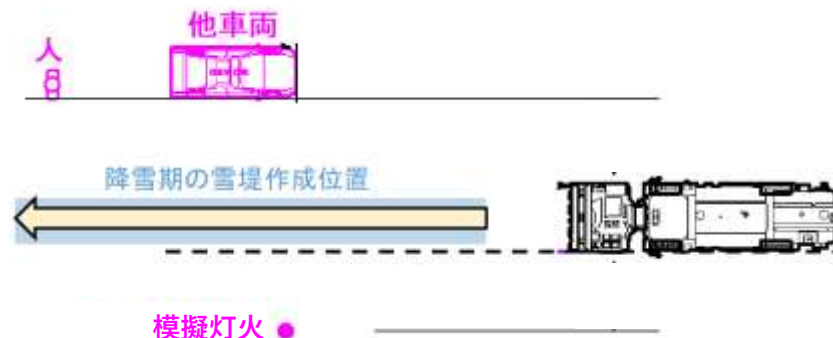
検証項目	検証概要
車両、人、航空灯火の検知	他車両、人、模擬灯火を配置し、走行中の除雪車両から相対位置、形状・寸法を検知 ● 走行速度…降雪前：15,30,40km/h、降雪期：10,15km/h
雪堤（除雪対象物）の検知	雪堤を作成し、走行中の除雪車両から相対位置、形状・寸法を検知 ● 走行速度…降雪前：15,30,40km/h、降雪期：10,15km/h
投雪軌道の検知※1	除雪車両で雪堤を除雪し、シュート装置からの投雪軌道を検知 ● 走行速度…10km/h以下

※1 降雪期のみ検証

雪堤、車両、人、模擬灯火の検知における配置例



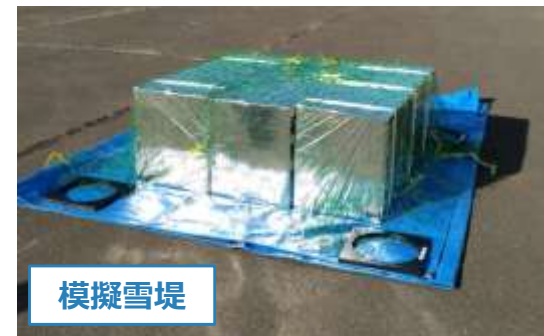
投雪軌道の検知における配置例



検知対象物について

- 検知対象物は、除雪対象物である雪堤と、接触を回避すべき他車両、人、航空灯火に対して、走行する除雪車両からの検知の可否や相対位置、形状・寸法の検知精度を検証した。
- 降雪前は、模擬雪堤（段ボールで断面形状を再現の上、レーダーが反射するようアルミシートで覆う形で作成）、航空灯火を模した模擬灯火、人、他車両を検知対象とした。

降雪前



検知対象物について

- 降雪期は実際の積雪を用いた雪堤（高さ60cm）、灯火を模した模擬灯火、人、他車両を検知対象とした。
- また、除雪車両で雪堤を除雪し、シュート装置による投雪軌道を検知した。
- 人、模擬灯火、他車両は降雪前と同位置に配置した。

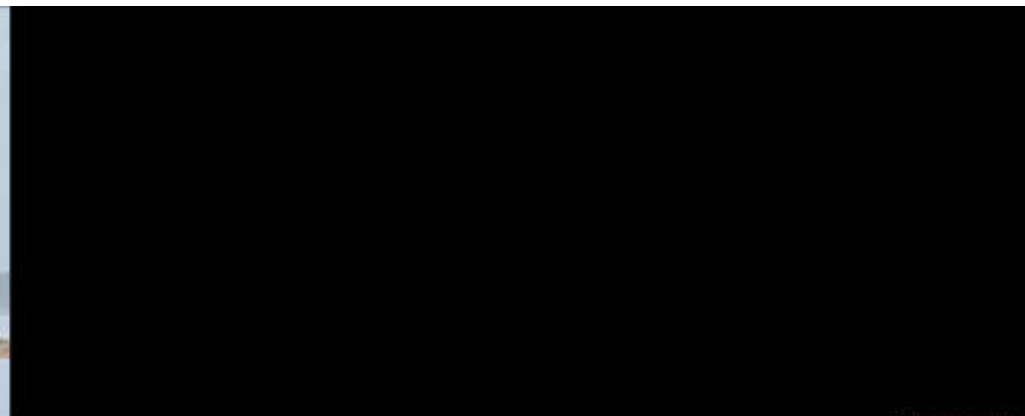
降雪期



車内カメラ



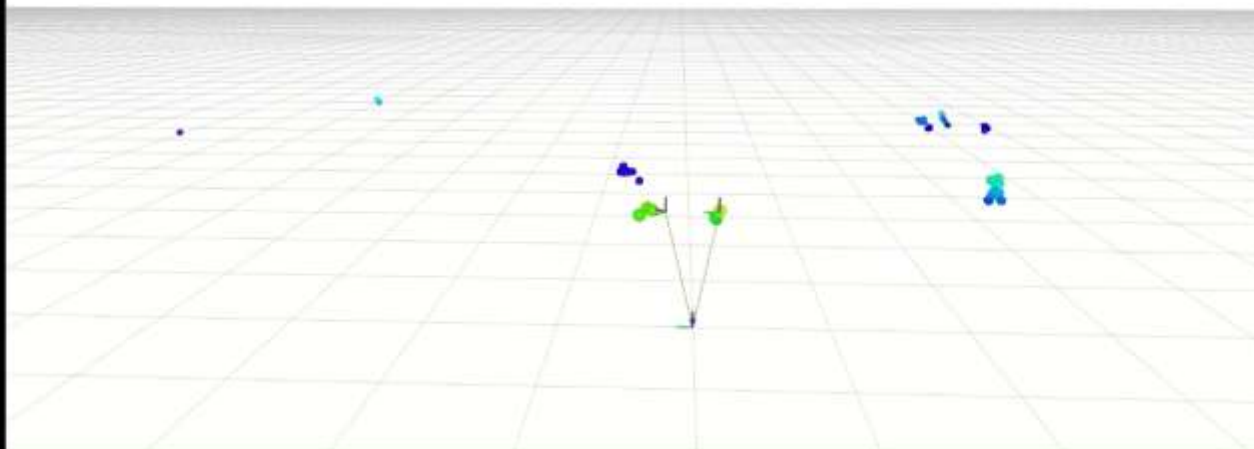
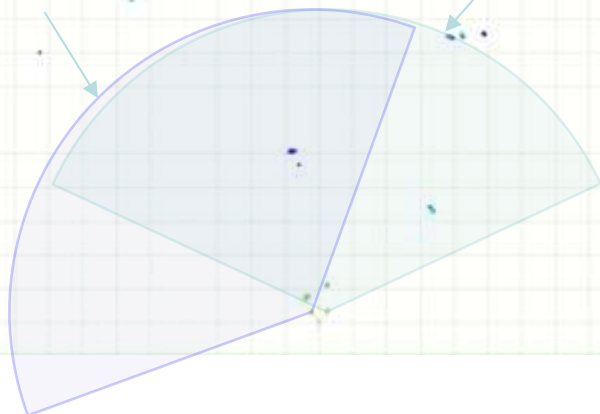
レーダー点群 (カメラ視点)



レーダー点群 (天頂図)

左レーダー視野角

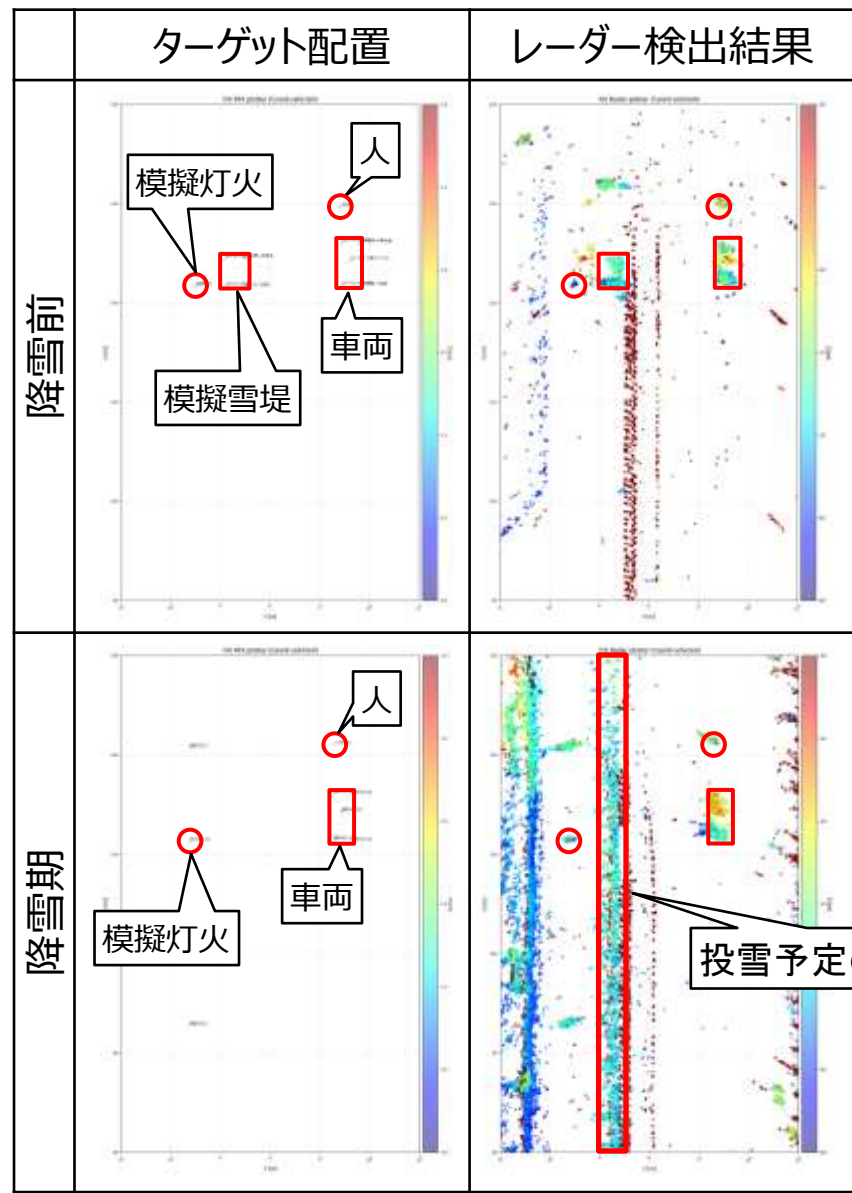
右レーダー視野角



各ターゲットの検出点群結果

走行中(※)のレーダー検出点群をグローバル座標へマッピングした結果 (15km/h走行時)

(※) 走行中：除雪車両が動き始めてから静止するまでの間



<走行中に検出した合計点群数>

	降雪前	降雪期
車両	775	1038
人	324	195
模擬雪堤	1254	-
雪堤	-	many
模擬灯火	12	46

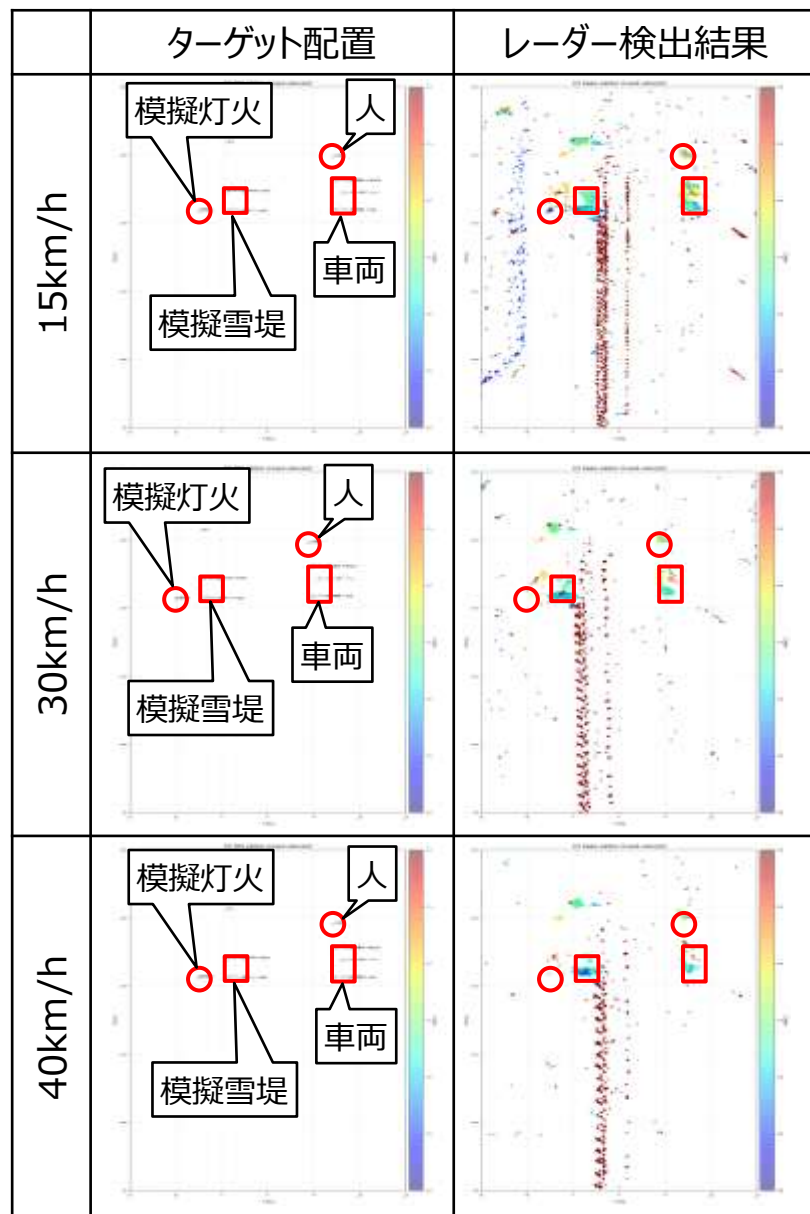
- ✓ 車両・人・模擬雪堤はレーダーで検出可能
- ✓ 降雪期における雪堤も検出可能
- ✓ 模擬灯火は、他のターゲットと比較して検出点群数が少なく、検知可否判断は困難

投雪予定の雪堤

高さを色で表示
 青：低
 赤：高

各ターゲットの検出点群結果

走行速度の違いによる検出結果の違い（降雪前）



＜走行中に検出した合計点群数＞

	15km/h	30km/h	40km/h
車両	775	292	209
人	324	123	25
模擬雪堤	1254	632	504
模擬灯火	12	3	0

- ✓ 走行速度が速くなると走行中の検出点群数が減少する傾向にある
- ✓ 今回の実証実験においては、時速40km/hで走行した際に、人を対象とした点群数が大きく減少する結果となった

高さを色で表示
 青：低
 赤：高

各ターゲットの反射強度

<実施内容>

- ✓ 各検知対象物からの反射強度に明確な差違がある場合、検知した点群の形状と反射強度に基づいて、種別判定が行える可能性がある
- ✓ 上述の実現可能性を確認するため、各検知対象物からの反射強度を計測した

<各ターゲットの反射強度[dB]@30m>

	車両(正面)	車両(斜め)	人	雪堤(正面)	模擬灯火(※)
	幅1.8m x 奥行4.5m x 高さ1.6m		高さ1.6m	幅2m x 奥行3m x 高さ0.6m	高さ0.5m
降雪前	88.8 	80.9 	76.9 	92.4(模擬) 	— 
降雪期	88.7 	78.1 	79.4 	79.1(実物) 	— 

雪堤の平均密度: 0.28 [g/cm³] ⇒ しまり雪程度

(※) 反射点が少なく推定困難

- ✓ 人は反射素材の付いた安全ベスト着用のため、通常よりも強い反射強度
- ✓ 模擬雪堤に対して実際の雪堤は10dB程度低い反射強度
- ✓ 検出角度によっては車両と雪堤の反射強度が同程度となり、形状・サイズが類似している検知対象物については、**ミリ波レーダーのみで種別判定を行うのは困難**と慮

模擬雪堤のサイズ(形状)把握

<実施内容>

- ✓ 除雪作業時の適切な走行速度や走行ルートを制御するにあたり、作業対象である雪堤の大まかな形状把握が必要
- ✓ サイズの既知な2種類の模擬雪堤で比較検証
- ✓ サイズ推定の指標として、2.5-97.5(95%)パーセンタイル幅(※1)を使用

(※1) データの一定範囲をカバーする両端のパーセンタイル値の差で、外れ値の影響を抑えてデータのばらつきや広がりを表す指標

	サイズ1			サイズ2		
	幅 [m]	奥行 [m]	高さ [m]	幅 [m]	奥行 [m]	高さ [m]
実寸	2.0	3.0	0.6	1.0	1.5	1.2
~10m	2.3 (0.3)	2.6 (0.4)	0.7 (0.1)	1.1 (0.1)	1.3 (0.2)	1.4 (0.2)
~20m	2.1 (0.1)	2.5 (0.5)	0.8 (0.2)	1.3 (0.3)	0.5 (1.0)	1.5 (0.3)
~30m	1.2 (0.8)	0.4 (2.6)	0.8 (0.2)	1.3 (0.3)	0.4 (1.1)	1.4 (0.2)

()内：実寸との誤差

- ✓ 模擬雪堤までの距離が近づくにつれて点群数が増え、推定精度は向上
- ✓ サイズ1、サイズ2共に、ミリ波レーダーの角度精度(※2)程度の誤差で幅／高さ共に検出

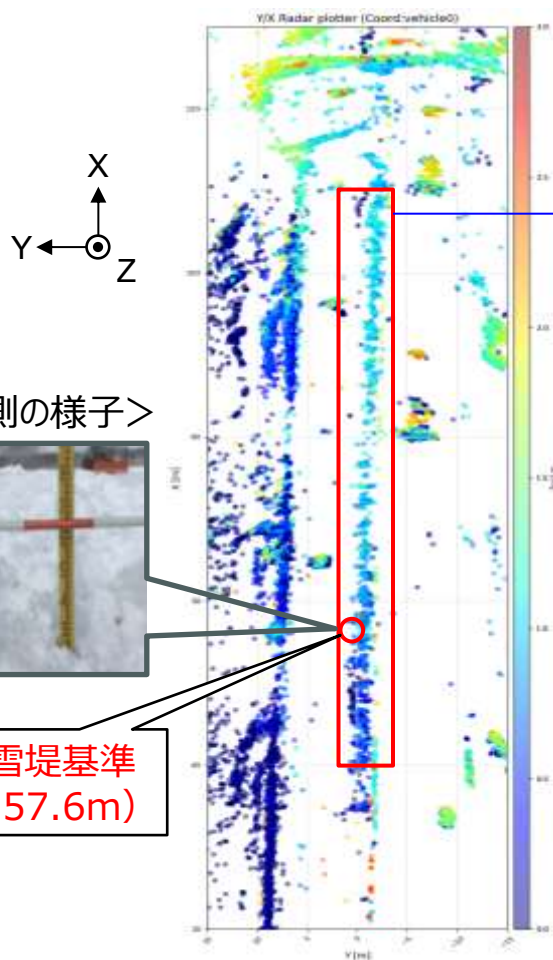
(※2) 実験に使用したミリ波レーダーの角度精度：1度以下 ⇒ 10m先での位置誤差：0.17m

※ ミリ波レーダーで、作業対象である模擬雪堤の大まかな形状把握が行えた

雪堤の高さ検出

<実施内容>

- ✓ 除雪作業時の適切な走行速度や走行ルートを制御するにあたり、投雪作業時においても作業対象である雪堤の大まかな形状把握が必要
- ✓ X軸(車両進行方向): 40~110m、Y軸(車両幅方向): -4~2m付近で検出した雪堤高さを確認

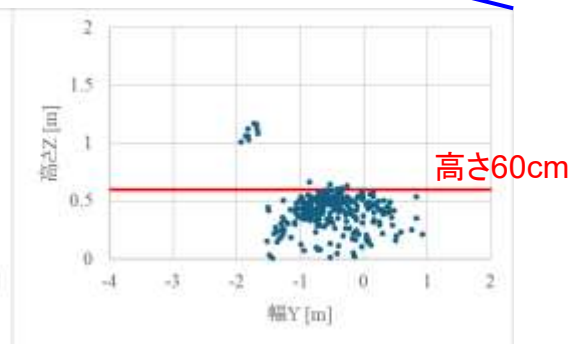
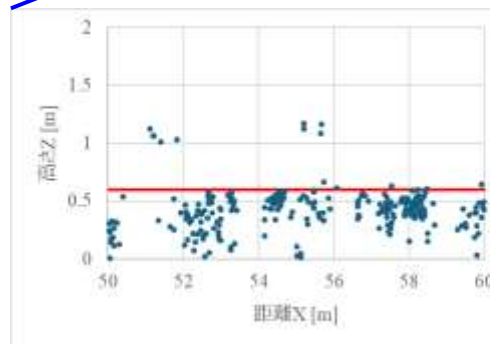
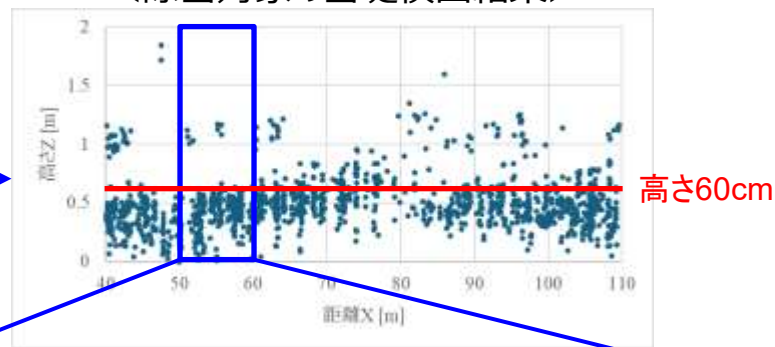


<雪堤高さ計測の様子>



雪堤基準
(57.6m)

<除雪対象の雪堤検出結果>



雪堤基準点付近(50~60m)における

- ✓ 高さZ(最大値): 63.3cm(計測値: 62.0cm)
- ✓ 幅Y(95%パーセンタイル幅): 2.2m(設計値: 2.0m)

※ ミリ波レーダーで、投雪作業時においても作業対象である雪堤の大まかな形状把握が行えた

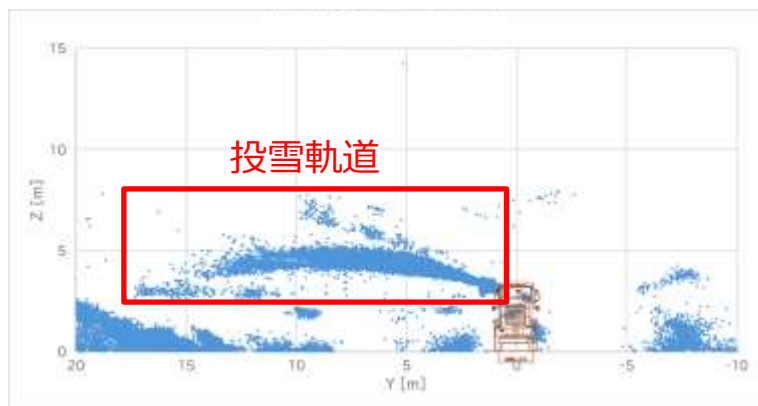
投雪軌道の検知

＜実施内容＞

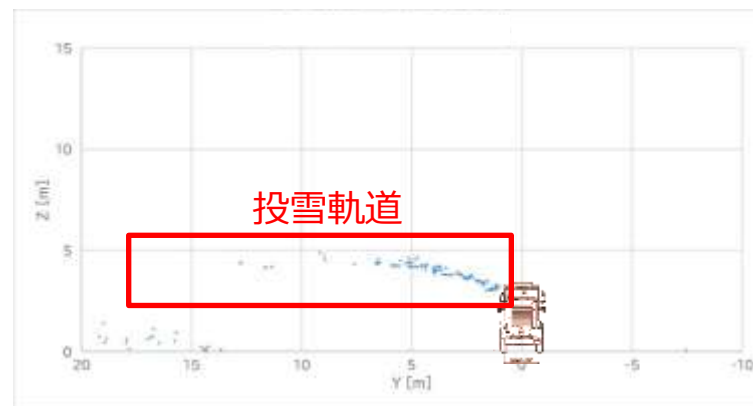
- ✓ ロータリ除雪車の投雪到達ポイントの推定（投雪場所の制御）を行うにあたり、投雪軌道の検知が必要となる
- ✓ ロータリ除雪車を走行させながら投雪した際の軌道をレーダーで検出可能かについて確認を行った

＜投雪軌道の検出結果（車両進行方向視点）＞

走行中の点群重畳



1フレームの点群出力



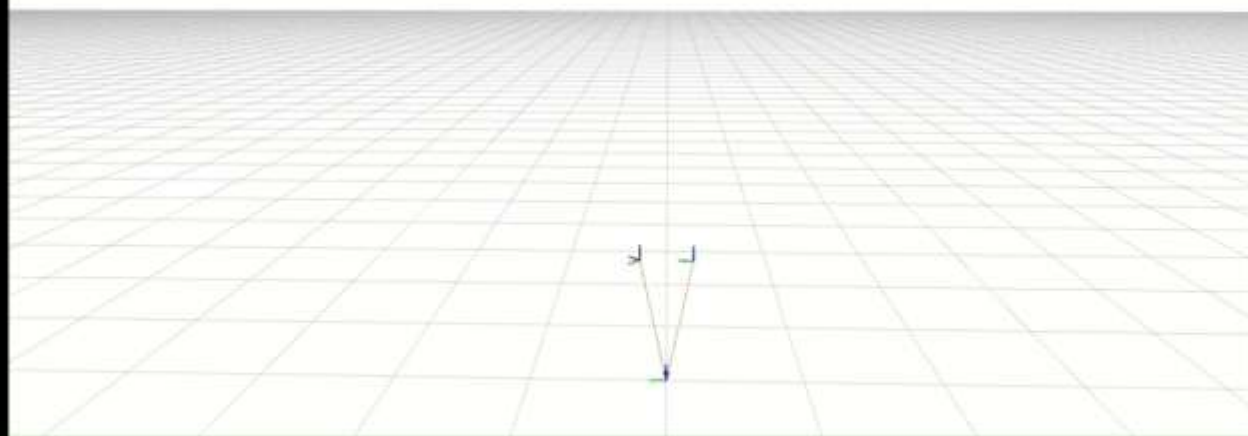
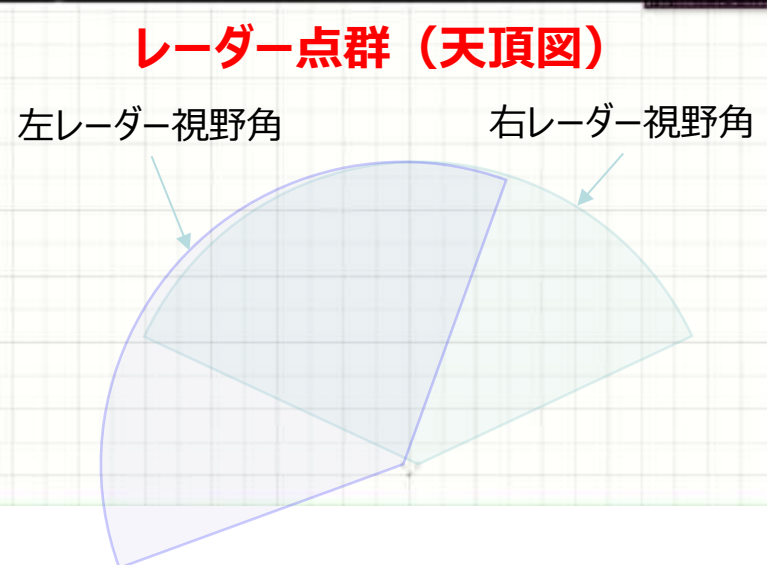
- ✓ 投雪された雪は圧縮されて高密度のため、レーダーで点群を取得することが可能であった
- ✓ 1フレーム単位でも一定数の点群が検知できた

※ ミリ波レーダーで、シュートからの投雪軌道を対象とした検知が行えた



レーダー点群 (カメラ視点)

1768458289.764843941



(課題シーン)降雪・着雪の影響

<現象>

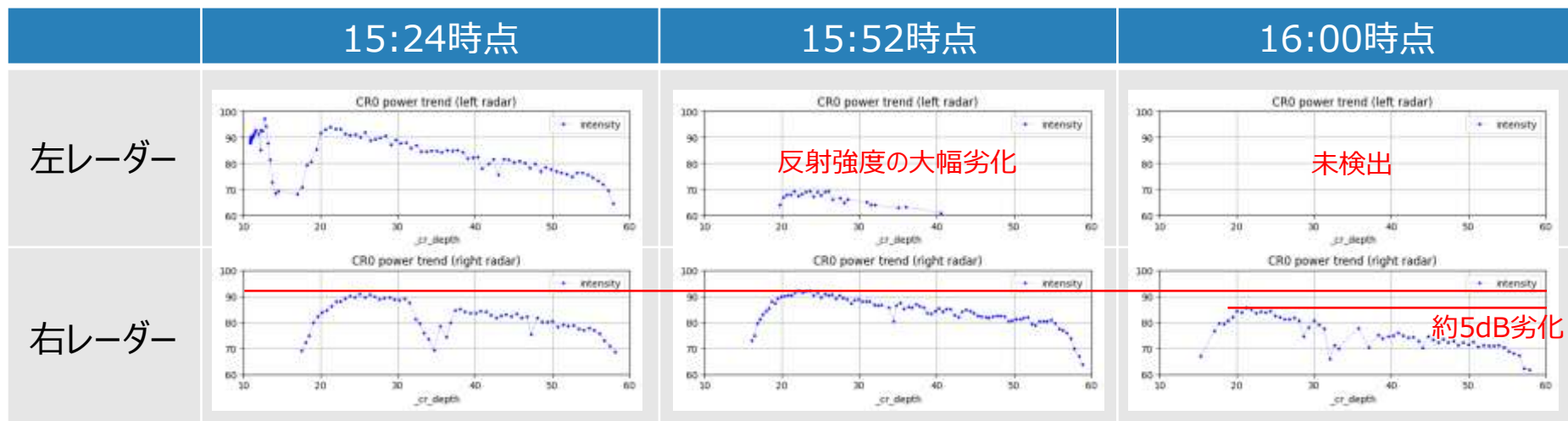
- ✓ 悪天候時 (2026/1/13) の実験において、雪堤が未検出

<状況>

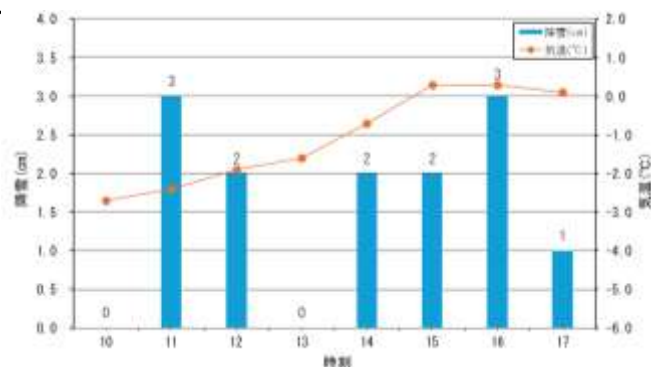
- ✓ 時間経過とともに左レーダーの反射強度、点群数が著しく劣化
- ✓ 右レーダーも反射強度が5dB程度劣化



<CR(20dBsm)の反射強度>



<当日の千歳市の天候>



<実験終了後の左レーダー写真>



※右レーダーは着雪なし

実証実験結果の評価

【除雪車両の自動化への適用性】

- レーダーを車内設置する場合、フロントガラスの影響により最大検出距離が約30%短くなる。
- レーダー2台で前方、左側方の検知が可能であり、シュート装置の向きによる影響は生じない。
- 降雪環境下においても、雪堤や人、車両の検知対象物を車両進行方向・車両幅方向ともに、検知可能であると考えられる。
- 雪堤を除雪する際の投雪軌道を定性的に把握可能である。

【課題】

- レーダーの反射強度のみから検知対象物の種別を判定することは困難
⇒ミリ波レーダーと他の検知技術を組み合わせた周辺検知手法の検討が必要
- 実証実験中の一部の時間帯において着雪による検知性能への影響が確認された
⇒車外設置の場合、ヒーター等による対策が必要(各メーカーでの開発要素)
- 模擬灯火は、レーダーの点群数が少なく、検知することは困難
⇒ガイダンスシステムを活用することで灯火位置を把握可能

実証実験を踏まえた今後の方針

- ✓ 実証実験結果より、ミリ波レーダーは雪堤、人、車両の検知対象物の位置や形状を検知可能な技術であることを確認
- ✓ 一方で、反射強度のみを用いて除雪対象物と障害物の判別を行うことが困難

検知対象物の種別判定手法の構築

今後、種別の判定が可能な検知技術について検討を行い、ミリ波レーダーとの併用等により周辺検知手法の確立を図る