

36. 視程障害時の除雪車運行支援に向けた

ミリ波レーダによる周囲探知に関する基礎検討

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○新保 貴広
(国研)土木研究所 寒地土木研究所 山口 洋士
(国研)土木研究所 寒地土木研究所 佐藤 信吾

1. はじめに

近年、積雪寒冷地では異常な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止めなどの発生が増えてきている。

このため、暴風雪による視程障害時においても安全に除雪作業が行え、道路交通の早期解放を可能とする除雪車運行支援技術の開発に対する現場ニーズは非常に高い。

除雪車運行支援技術には、自車位置を推定し車線内を走行するための車線走行支援技術と、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などを探知し、衝突事故を防ぐための周囲探知技術が必要である。

本稿では、周囲探知技術の基礎検討として、気象の影響を受けにくく、自動車の予防安全技術に使用されているミリ波レーダ(76GHz)を用いて、実際の吹雪時などに行った探知実験について報告する。

2. ミリ波レーダの周囲探知実験

ミリ波レーダは、ミリ波帯(30GHz～300GHz)の電波を用いて障害物を検出するものである。

電波を利用しているのでカメラやLiDAR※1などに比べ、気象の影響を受けにくい特徴があり、自動車の予防安全技術に使用されるなど実用化が進められているが、吹雪時の影響については明らかにされていない。

そこで、市販車用ミリ波レーダが、暴風雪による視程障害時に周囲探知技術として適用可能か検証した。

現在、ミリ波レーダに使用できる周波数帯は、24GHz帯と76GHz帯である。24GHz帯は近・中距離用、76GHz帯は長距離用として用いられる場合が多い。

実験では、除雪車が前方障害物を探知するために必要な検出距離を70m以上と想定し、長距離用の76GHz帯ミリ波レーダを使用した。

表-1に実験に使用したミリ波レーダの諸元を示す。

表-1 ミリ波レーダ諸元表

項 目	性 能
最小検出距離	< 1m
最大検出距離	> 175m (> 10dB target) > 100m (> 0dB target)
距離方向検出精度	< +/- 0.5m
同一角度、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の距離方向分離性能	< 2.5 m
水平視野角	> 20 deg
同一距離、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の水平方向角度分離性能	< 3.5 deg
垂直視野角	4.2 - 4.75 deg

2.1 車両及び人の探知実験（晴天時）

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場で行った。

ミリ波レーダは、高さと角度が調整できるように設置し、計測場所は直線方向に100m程度確保した(写真-1)。



写真-1 実験場所全景（実験①、②）

レーダの設置高と設置角度、対象物との水平検出距離を基本のパラメータとし、以下の実験を行った。

実験①：車両の検出実験

実験②：人の検出実験

2.1.1 実験①：車両の検出実験

実験①の概略図を図-1に示す。



図-1 実験①概略図

実験①は、車両を対象とし、レーダの設置高と設置角の組合せにより検出可能な水平距離を確認し、以降の実験におけるレーダの設置高、設置角の基準を定めた。

検出状況（代表例）を写真-2に、検出結果（代表例）を図-2に、実験結果を表-2に示す。

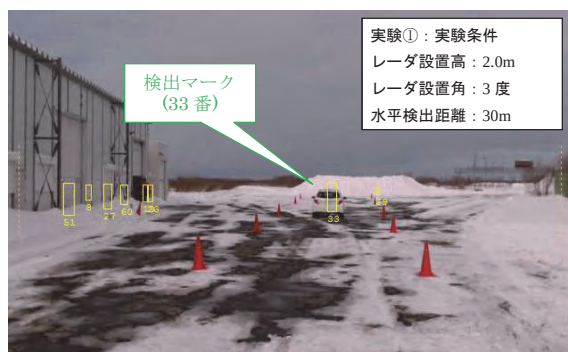


写真-2 実験① 車両検出状況（代表例）

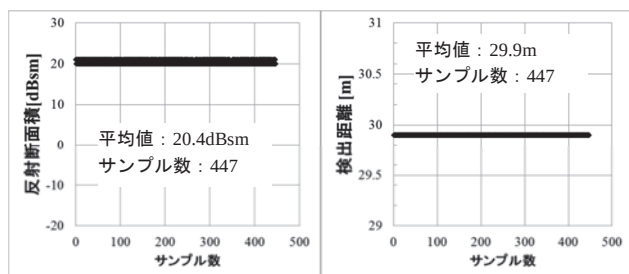


図-2 実験① 検出結果（代表例）

表-2 実験① 検出結果

設置高 Z [m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R [m]						
		10	20	30	40	50	60	70
1.0	0	○	○	○	○	○	○	○
1.0	1	○	○	○	○	○	○	○
1.5	2	○	○	○	○	○	○	○
1.5	3	○	○	○	○	○	○	○
2.0	2	△	○	○	○	○	○	○
2.0	3	○	○	○	○	○	○	○
2.5	3	□	○	○	○	○	○	○
2.5	4	○	○	○	○	○	○	□
3.0	4	×	○	○	○	○	○	○

○: 検出

△: 一部未検出 (検出データに一部欠測あり)

×: 未検出

□: 1回目は検出、2回目は未検出

図-2は、レーダ設置高 2m、設置角 3 度、水平検出距離 30m の条件において、20 秒程度計測した際の反射断面積及び検出距離を示したものである。

反射断面積とは、レーダから電波の照射を受けた対象物の電波反射強度の係数で、検出に必要とされる反射断面積の目安は-10dBsm である。反射断面積の平均値は 20.4dBsm、変動量は-0.4～0.6dBsm であった。

また、検出距離はレーダから対象物までの距離であり、検出距離の平均値は 29.9m、変動量は±0m であった。

実験の結果、レーダの設置高 3m、設置角 4 度、水平検出距離 10m の条件で、未検出であった 1 例を除き、設置高・設置角・水平検出距離の全条件において、車両を検出することができた。

実験結果を参考に、基本の実験条件をレーダの設置高 2m、設置角 3 度に定めた。

2.1.2 実験②：人の検出実験

実験②の概略図を図-3に示す。



図-3 実験②概略図

実験②は、人を検出対象とし、立ち・しゃがみ・腹ばいの状態に分けて検出の可否を確認した。

検出状況（代表例）を写真-3に、検出結果（代表例）を図-4に、実験結果を表-3に示す。

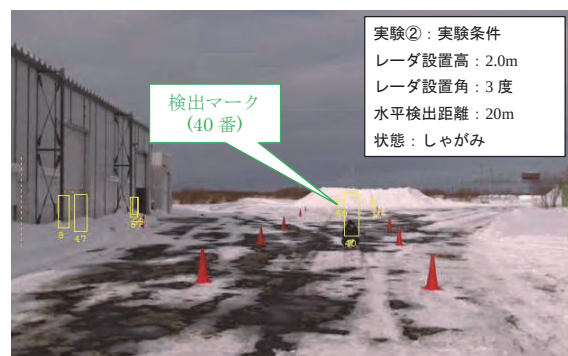


写真-3 実験② 人検出状況（代表例）

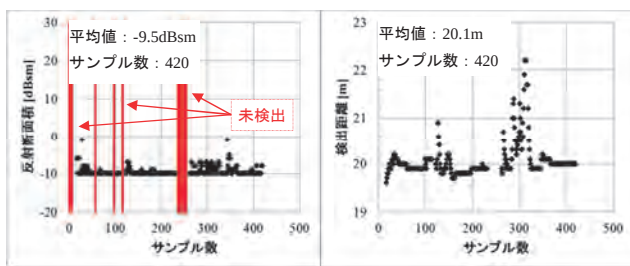


図-4 実験② 検出結果 (代表例)

表-3 実験②検出結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]									
		10		20			30			50	70
		立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち
1.0	0	○	△	×	△	△	×	△	△	×	△
2.0	3	○	×	×	△	△	-	△	△	-	△

○ : 検出
△ : 一部未検出 (検出データに一部欠測あり)
× : 未検出
- : 未実施

図-4 は、レーダ設置高 2m、設置角 3 度、水平検出距離 20m、検出対象がしゃがんだ状態において、20 秒程度計測した際の反射断面積及び検出距離を示したものである。

反射断面積の平均値は-9.5dBsm、変動量は-0.5～8.5dBsm であった。

また、検出距離の平均値は 20.1m、変動量は-0.5～2.1m であった。

実験の結果、人が立っている状態では、10m～70m 先まで検出することができたが、姿勢が揺れた場合などでは、検出データの欠測により、一部未検出となる場合があった。

また、しゃがんだ状態では、立っている状態より反射断面積が小さくなるため、さらに未検出となる場合が多く発生した。

腹ばいの状態では、全条件で検出することができなかった。

2.2 降雪時及び雪が堆積した状態の車両探知実験

降雪及び車両に堆積した雪がミリ波レーダの検出性能に与える影響を検証するため、以下の実験を行った。

実験③：晴天時の車両の検出実験

実験④：降雪時の車両の検出実験

実験⑤：降雪により車両に雪が堆積した状態の検出実験

計測場所全景を写真-4 に示す。

吹雪状況での実験を効率的かつ確実に行うため、実験場にミリ波レーダと実験車両を 45 日間存置し、監視用カメラで吹雪の発生状況を確認しながら、遠隔制御により計測を行った。

実験車両は、レーダから 30m の距離に実験車両①を、70m の距離に実験車両②を配置した。

視程距離は、ミリ波レーダから約 50m 離れた箇所に設置されている後方散乱型視程計の計測値と、実験車両の側方に 10m 間隔で設置した視程確認用スノーボールの目視観測結果を採用した。

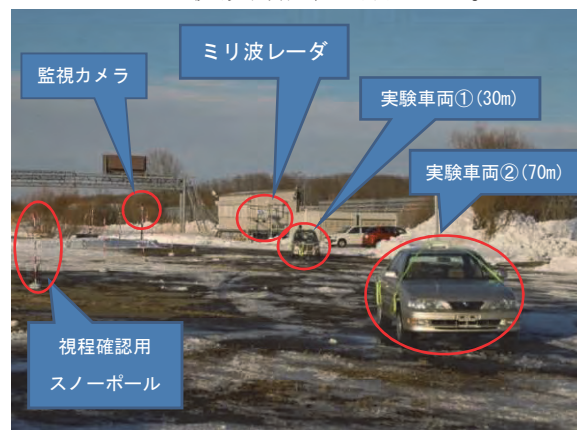


写真-4 実験場所全景 (実験③～⑤)

2.2.1 実験③：晴天時の車両の検出実験

実験③の概略図を図-5 に示す。

実験条件は、レーダ設置高を2m、設置角を3度に固定した。



図-5 実験③概略図

実験③は、計測日の 9:30、11:00、13:30、14:30、15:30、16:30 に 1 回当たり 1 分間の計測を行った。

検出状況 (代表例) を写真-5 に、検出結果 (代表例) を図-6、図-7 に示す。

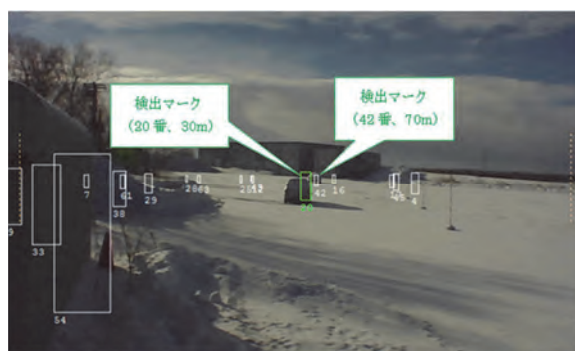


写真-5 実験③ 車両検出状況 (代表例)

図-6、図-7 は、反射断面積，検出距離，検出角度，検出率について，計測時刻毎に計測データの平均値を示したものである。

実験車両①の平均反射断面積は 6.1dBsm であり，変動量は-2.6～+2.9dBsm であった。実験車両②では 16.3dBsm，変動量は-0.3～+1.7dBsm であった。

実験車両①の平均検出距離は 29.5m，変動量は ± 0.1 m であった。実験車両②では 69.5m，変動量は ± 0.4 m であった。

検出角度は対象物をレーダの正面で検出した場合は 0 度となり，右側に検出した場合が+，左側に検出した場合が-で表される。実験車両①の平均検出角度は 0.3 度であり，変動量は-0.9～+1.4 度であった。実験車両②では 1.7 度，変動量は-0.4～+0.8 度であった。

検出率は実験車両①及び②ともに全計測時刻において 100%であった。

晴天時の計測値を基準とし，降雪時及び車両に雪が堆積した状態の計測値と比較した。

2.2.2 実験④：降雪時の車両の検出実験

実験④の概略図を図-8 に示す。

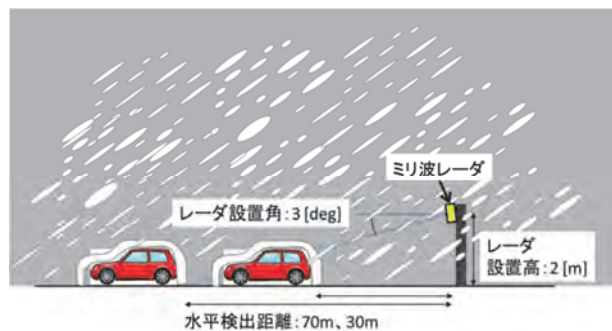


図-8 実験④概略図

実験④は，降雪に伴う視程距離の違いによる検出性能を比較するため，降雪が発生した時間帯で連続的に計測した。

最も視程距離が低下した計測日の検出状況（代表例）を写真-6 に，検出結果（代表例）を図-9，図-10 に，実験結果比較表を表-4 に示す。

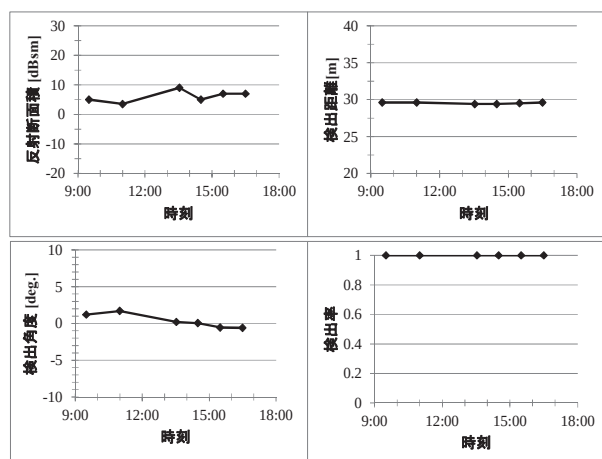


図-6 実験③検出結果（代表例）[30m，実験車両①]

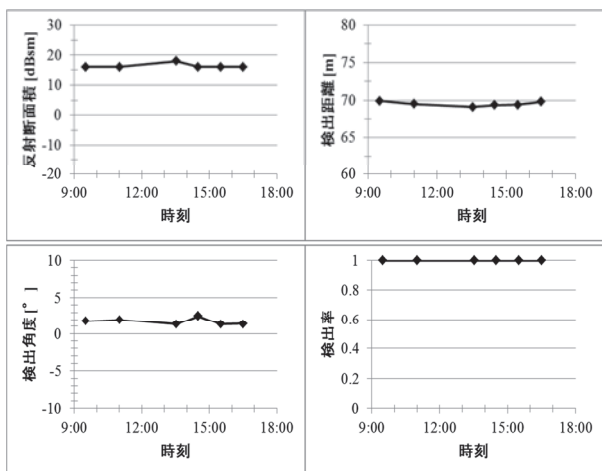


図-7 実験③検出結果（代表例）[70m，実験車両②]

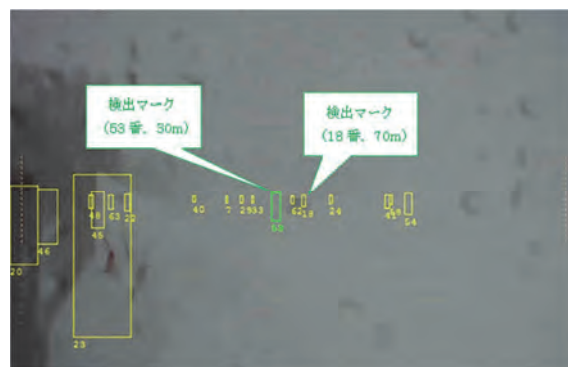


写真-6 実験④ 車両検出状況（代表例）

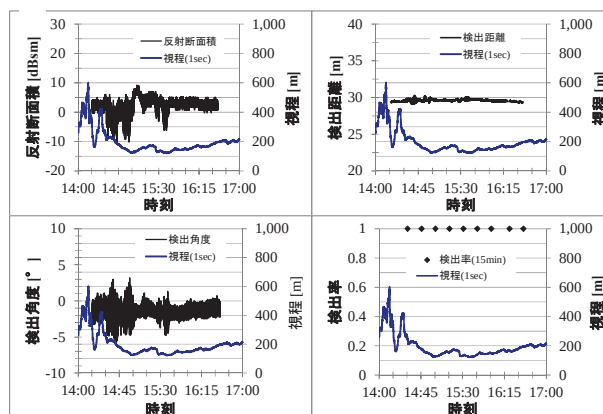


図-9 実験④検出結果（代表例）[30m，実験車両①]

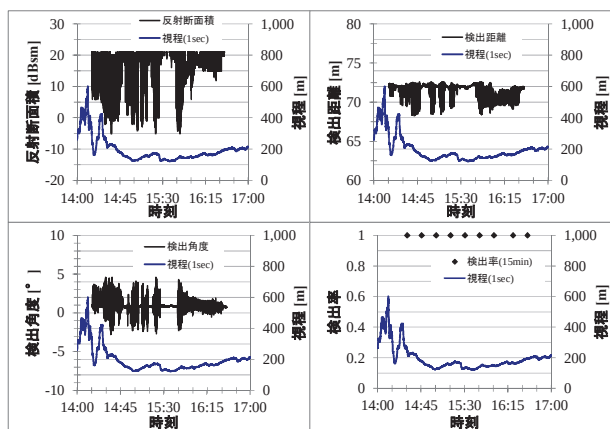


図-10 実験④検出結果(代表例) [70m, 実験車両②]

実験の結果、後方散乱型視程計の平均視程距離は173mで、最低値は写真-6と同日の15時36分の123mであった。また、同時刻の視程確認用スノーポールの目視確認による視程距離は約50mであった。

表-4 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験③：晴天時			実験④：降雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
				変動量			変動量	
30m 実験車両①	反射断面積	dBsm	6.1	3.5	9	2.7	-10	9
				-2.6 ~ 2.9			-12.7 ~ 6.3	
	検出距離	m	29.5	29.4	29.6	29.6	29.2	30.3
				-0.1 ~ 0.1			-0.4 ~ 0.5	
	検出角度	度	0.3	-0.6	1.7	-1.5	-5.6	3.2
				-0.9 ~ 1.4			-4.1 ~ 4.7	
70m 実験車両②	検出率	%	100	100		100	100	100
				0			0	
	反射断面積	dBsm	16.3	16	18	18.1	-5	21
				-0.3 ~ 1.7			-23.1 ~ 2.9	
	検出距離	m	69.5	69.1	69.9	71.6	68.3	72.6
				-0.4 ~ 0.4			-3.3 ~ 1	
70m 実験車両②	検出角度	度	1.7	1.3	2.5	0.9	-2.8	4.6
				-0.4 ~ 0.8			-3.7 ~ 3.7	
	検出率	%	100	100		100	100	100
				0			0	

実験③の計測結果と比較すると、視程距離の低下に伴い各計測項目の変動量は大きくなり、特にマイナス方向の変動量が大きくなる傾向が見られたことから、降雪の影響によりレーダの受信レベルが低下することで、計測誤差が大きくなるものと考えられる。

しかし、対象物の検出率に関しては、実験車両①、②ともに検出に必要とされるレーダの反射断面積-10dBsmを上回っており、全ての計測時刻にわたって検出率は100%であった。

このことから、76GHz帯のミリ波レーダは、目視による視程距離が50m程度の吹雪時でも70m先の車両の探知が可能なことを確認できた。

2.2.3 実験⑤：降雪により車両に雪が堆積した状態の検出実験

実験⑤の概略図を図-11に示す。



図-11 実験⑤概略図

実験⑤は、車両上に雪が堆積し、かつ晴天時において、1日6回(9:30, 11:00, 13:30, 14:30, 15:30, 16:30)、1回当たり1分間の計測を行った。

降雪により生じた車両上の積雪深は、ルーフ上に設置した雪尺を監視カメラにより目視計測した。

車両上の積雪深が最も大きかった計測日の検出状況(代表例)を写真-7に、実験車両の積雪状況を写真-8に、実験結果比較表を表-5に示す。

実験車両①のルーフ上の積雪は15cm、実験車両②の積雪は20cm、車両周辺の積雪は40cm程度であり、テールランプ付近の車両背面は露出している状態であった。



写真-7 実験⑤ 車両検出状況(代表例)



写真-8 実験車両積雪状況

表-5 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験③：晴天時			実験⑤：積雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
				変動量			変動量	
30m 実験 車両 ①	反射 断面積	dBsm	6.1	3.5	9	2.2	-6	8.5
				-2.6 ~ 2.9			-8.2 ~ 6.4	
	検出距離	m	29.5	29.4	29.6	29.7	29.3	30.1
				-0.1 ~ 0.1			-0.4 ~ 0.4	
	検出角度	度	0.3	-0.6	1.7	-0.5	-2.5	1.8
				-0.9 ~ 1.4			-2 ~ 2.3	
	検出率	%	100	100	100	100	100	100
				0			0	
70m 実験 車両 ②	反射 断面積	dBsm	16.3	16	18	15.9	8.5	21
				-0.3 ~ 1.7			-7.4 ~ 5.1	
	検出距離	m	69.5	69.1	69.9	71.3	70	72.3
				-0.4 ~ 0.4			-1.3 ~ 1	
	検出角度	度	1.7	1.3	2.5	0.9	0.2	2
				-0.4 ~ 0.8			-0.7 ~ 1	
	検出率	%	100	100	100	100	100	100
				0			0	

実験車両に雪が堆積することにより、雪が堆積していない状態より平均反射断面積は低下するものの、検出に必要とされる反射断面積-10dBsmを上回っているため、全ての計測時刻において検出率は100%であった。

3. まとめ

本稿では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などとの衝突事故を防ぐための周囲探知技術について検討した。

市販車用ミリ波レーダ(76GHz 帯)を用いて実際の吹雪時に探知実験を行い、目視による視程距離が50m程度の吹雪時でも、70m先の車両の探知が可能であることを確認した。

一方、晴天時に人を対象とした検出実験で、人がしゃがんだ状態や腹ばいの状態では、検出できない場合があった。

現在開発が進められている79GHz帯高分解能ミリ波レーダは、76GHz帯ミリ波レーダよりも距離分解能の向上が見込まれており、しゃがんだ状態や腹ばいの状態の人を検出できる可能性があることから、早期の実用化を期待したい。

今後は、ミリ波レーダの除雪車への搭載方法の検討及び走行時における探知性能の検証を行う予定である。

※1:LiDAR (Light Detection And Ranging : 光による検知及び測距技術)