

平成 27 年度
戦略的イノベーション創造プログラム
(自動走行システム) :
全天候型白線識別技術の開発及び実証

平成 28 年 3 月

(委託先)

一般財団法人 日本自動車研究所

戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）
全天候型白線識別技術の開発及び実証

目次

序章	1
1 背景と目的	1
2 実施概要	1
2.1 センサ方式から見た事業の整理	1
2.2 アプリケーションから見た事業の整理	3
3 本事業の最終目標	4
4 各実施項目の目的と平成 27 年度の主な実施内容	5
4.1 79GHz 帯 UWB ミリ波レーダ方式検討、基礎データ解析	5
4.2 79GHz 帯 UWB ミリ波レーダ設計・試作	5
4.3 リブ式高輝度白線形状と材料の検討	5
4.4 測距イメージ方式の検討	5
4.5 白線識別技術の実証	5
第 1 章 高輝度白線材料の開発	6
1.1 高反射で識別できる素材の検討	6
1.2 高輝度白線のリブ形成技術の検討	11
1.3 高輝度白線のリブ形状の最適化検討	15
1.4 白線識別用高輝度白線の性能評価	19
1.5 まとめ	28
第 2 章 測距イメージ方式白線識別技術の開発	29
2.1 投光同期 3 次元測距イメージセンサを用いたエッジ抽出技術の開発	31
2.2 白線認識アルゴリズムの開発	46
2.3 まとめ	61
第 3 章 79GHzUWB ミリ波レーダの開発	62
3.1 レーダ方式の検討	63
3.2 小型 UWB ミリ波レーダの設計、試作	76
3.3 ソフト設計	88
3.4 まとめ	101

第4章	ミリ波レーダ方式検討及び基礎データ解析	103
4.1	ミリ波レーダ基礎データ解析	103
4.2	動作原理機を用いた方式の検討	118
4.3	基本識別アルゴリズムの開発	123
4.4	まとめと今後の課題	127
第5章	車線維持制御における白線識別性能評価	129
5.1	白線識別センシング性能評価用実験システムの開発	130
5.2	白線識別センシングシステムの評価	150
5.3	車線維持制御用白線識別センシングシステムの標準化案作成	156
5.4	まとめと今後の課題	159
第6章	研究開発全体企画・管理	161
6.1	研究開発ロードマップの策定	161
6.2	開発検討会の運営	163
第7章	まとめ	166
7.1	79GHz帯UWBミリ波レーダ方式検討、基礎データ解析	166
7.2	79GHz帯UWBミリ波レーダ設計・試作	167
7.3	リブ式高輝度白線形状と材料の検討	167
7.4	測距イメージ方式の検討	168
7.5	白線識別技術の実証	168

序章

1 背景と目的

将来想定される自動運転（レベル3）では、自然環境の悪化により運転交代を要請する場合、ドライバがテークオーバーする迄、または、テークオーバーなき場合に備えたリスク低減策（例えば路肩への自動停車など）の完了迄は機能継続（縮退含）が必要である。従って、天候や照度など環境悪化にロバストな周辺環境認識技術が必要である。また、79GHz帯UWBミリ波レーダのポテンシャルを把握したいというニーズが自動車メーカーなど業界にある。

一方、既に競争領域にある自動運転（レベル1,2）では、照度変化への弱さを改善すると期待される高ダイナミクスカメラのポテンシャルを把握したいというニーズも業界にある。

そこで、本事業では79GHz帯UWBミリ波レーダが全天候型センサとして高いポテンシャルがあると考え、車線維持機能用の白線識別システムを取っ掛かりの例題として、自然環境へのロバスト性能向上が何処まで期待でき自動運転（レベル3）に活用できるかを見極める。さらに、最新の高ダイナミクスカメラを評価して、ポテンシャルを把握する。

2 実施概要

2.1 センサ方式から見た事業の整理

自動運転システムの周辺環境認識技術には、ミリ波レーダやLIDAR (LIght Detection And Ranging)、カメラなどの方式があり、方式によって基本性能及び耐自然環境性などの特性が異なる（表1-1）。

ミリ波レーダは様々な自然環境においてロバスト性が高い一方で、従来の技術では一般的に、距離分解能や方位分解能などの基本性能が他の方式に若干劣っていた。そこで、本事業ではミリ波レーダの全天候性の優位さを活かすために、これらの分解能を高めてリブ式白線と79GHz帯UWBミリ波レーダを組合わせた方式を用いる白線識別システムの設計・試作・評価を実施した。

また、カメラは方位精度・分解能が高い一方で、急激な照度変化に弱いという側面もある。これを解決する方策とし、高ダイナミックレンジカメラが候補に挙がる。そこで、本事業では、最新の高ダイナミックレンジカメラを様々な厳しい自然環境下で評価した。

表1-1 レーダ、LIDAR、カメラの特性比較

比較項目		センサ方式		
		ミリ波 レーダ	LIDAR	カメラ
基本性能	最大検知距離	◎	○	○
	距離精度・分解能	<u>△⇒○</u>	◎	×（単眼） ○（複眼）
	方位精度・分解能	<u>△⇒○</u>	○	◎
	色の識別	×	×	○
耐自然環境性	雨	○	△	△
	霧	○	△	×
	雪	○	×	×
	西日・薄暮	◎	△	×
	夜間	◎	◎	△
	照度変化	○	○	<u>×⇒○</u>

2.2 アプリケーションから見た事業の整理

本節では自動運転のレベルごとに本事業で対象とする周辺環境認識技術の位置づけを整理する。自動運転レベル1、2においては、車線維持支援装置（LKAS: Lane Keeping Assist system）や車間距離制御装置（ACC: Adaptive Cruise Control）の先行車レーン識別などの一環とし、カメラによる白線識別が実用化されている。しかし、カメラによる白線識別では、トンネル出入りや橋梁、西日などの照度急変に対する脆弱性がある。そこで本事業ではその解決策の1つとし高ダイナミックレンジカメラの評価を実施した（表1-2）。

表1-2 自動運転レベル1,2における本事業の位置づけ

適用先	センサ方式	センサ特徴 (自然環境ロバスト性)	本事業での対応
・横運動制御用	<ul style="list-style-type: none"> カメラによる白線識別 用途例 車線維持支援 (LKA) 先行車レーン識別 (ACC) 	<ul style="list-style-type: none"> 照度急変への脆弱性 (例：トンネル、橋梁、西日、薄暮) 	<ul style="list-style-type: none"> 高ダイナミックレンジカメラ <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center; font-weight: bold;">平成 27 年度 評価のみ</div>
		<ul style="list-style-type: none"> 積雪への脆弱性 	<ul style="list-style-type: none"> 対象外

次に、自動運転レベル3以上においては、白線がある場合、無い場合それぞれのシチュエーションにおいて、自動運転の横運動制御に用いる様々なセンシング技術を対象とした研究開発が進められている。

ミリ波レーダは、可視光や赤外線に比べて水や酸素による吸収量が小さい特性を有し、積雪や降雪へのロバスト性が高いポテンシャルがある。そこで、白線がある場合、横運動制御にリブ式白線と79GHz帯UWBミリ波レーダを組合わせた方式を優先的に用いることを前提としその設計、試作、評価を実施した。

なお、白線がない場合には高精度デジタル地図を用いた自己位置推定技術が必要であると考えられるが本事業では対象には含めていない。また、79GHz帯UWBミリ波レーダは横運動制御向けセンシングの他にも、ガードレールや防音壁など路上の物標を認識するアプリケーション、歩行者や障害物の検知といった用途も想定されるがこの用途も本事業では対象外としている（表1-3）。

表1-3 自動運転レベル3以上における本事業の位置づけ

適用先	センサ方式	センサ特徴 (自然環境ロバスト性)	本事業での対応
<ul style="list-style-type: none"> ・横運動制御用 	<ul style="list-style-type: none"> ・UWBミリ波レーダ +リブ式白線による 白線識別 	<ul style="list-style-type: none"> ・積雪／降雪等へのロバスト性 	<p>平成27年度例題 原理確認</p> 
	<ul style="list-style-type: none"> ・高精度デジタル地図 +自己位置推定 (デッドレコニング+ 絶対位置学習) <学習法> ・マップマッチング ・GNSS衛星測位 ・UWBミリ波レーダによ るランドマーク測位 	<p>(水成分中の減衰率が低い ・ ・ ・ミリ波レーダ特性)</p> <p>(UWB化による分解能の改善) (アクティブ・フェイズドアレイ による利得向上と広角化)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・予想される他の例題1 (平成27年度対象外)  <p>ランドマーク例</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・物標・障害物 認識用 	<ul style="list-style-type: none"> ・UWBミリ波レーダによ る路上の物標(ガード レールや防音壁など) や障害物(バイク、歩 行者など)の認識 		<ul style="list-style-type: none"> ・予想される他の例題2 (平成27年度対象外) 

3 本事業の最終目標

雨天(昼間及び夜間を含む)、逆光(夕日または朝日)、降雪や降り始めの積雪を含む自然環境下において、自動運転システムの車線維持機能を実現し得る白線識別性能を明確にすると共に、その実現方策の目処を明らかにする。

4 各実施項目の目的と平成27年度の主な実施内容

4.1 79GHz帯UWBミリ波レーダ方式検討、基礎データ解析（詳細は第4章を参照）

ミリ波レーダの動作原理や白線リブ形状などに応じた受信感度のデータなどを取得、解析し、白線識別アルゴリズムを開発することを目的とする。平成27年度は計算機シミュレーション解析や評価用ミリ波レーダ装置（動作原理機）による計測を実施、システム設計白線識別技術の開発に資する基礎データの収集、解析を実施した。

4.2 79GHz帯UWBミリ波レーダ設計・試作（詳細は第3章を参照）

リブ式白線の識別、及び他の検知対象物にも広く応用可能なミリ波レーダを検討、開発することを目的とする。平成27年度はシミュレーション及び実験結果をもとに79GHz帯UWBミリ波レーダの変調/アンテナ方式などを検討した。車両への搭載性を考慮した小型高精度ミリ波レーダの設計と試作を行い、基本性能が得られることの評価・検証を行った。

4.3 リブ式高輝度白線形状と材料の検討（詳細は第1章を参照）

ミリ波レーダで識別することを前提に、リブ式白線材料や形状に関する最適仕様を把握することを目的とする。平成27年度はリブ式白線の材料や形状を変えた場合のミリ波レーダ反射特性、及び同白線の施工容易性などを検討した。

4.4 測距イメージ方式の検討（詳細は第2章を参照）

アクティブ型センサである3D測距イメージセンサを用い、照度変化など自然環境にロバストな白線識別アルゴリズムを開発することを目的とする。平成27年度は距離データをもとに、自車からリブ式き白線や縁石までの距離を検知するアルゴリズムを改善させる。具体的には、SNRを向上する空間フィルタを施した測距イメージセンサ向けエッジ検出技術などを開発した。

4.5 白線識別技術の実証（詳細は第5章を参照）

白線識別性能と車線維持制御性能の関係を考慮し、白線識別センサの評価方法を提案する。また、最新HDRカメラの白線識別性能、耐自然環境性を見極めることを目的とする。平成27年度は実車試験により白線識別性能（分解能、検出範囲等）と車線維持制御性能の関係を定量化した。また、従来カメラが苦手とする夜間降雨時や西日などのシチュエーションで、高ダイナミクスレンジカメラの性能を評価した。

第 1 章 高輝度白線材料の開発

本事業では、悪天候時や照度が急激に変化する環境下においても正確に白線を識別でき、かつコスト面にも優れた技術を開発することを目的とする。「79GHz 帯 UWB ミリ波レーダ + リブ式高輝度白線」を用いた白線識別技術によって、車線維持支援システムの性能を向上させ、ドライバの運転負担を軽減し、車線逸脱事故の大幅な削減に貢献する。本章では、高反射で認識が可能な素材並びにリブ形状の最適化の検討、検証を行った。

1.1 高反射で識別できる素材の検討

高輝度白線材料に含有することで、ミリ波レーダにより安定的に高反射で識別される素材を検討する。

1.1.1 高輝度白線材料に含有させる素材の検討

リブ式高輝度白線材料に含有させ 79GHz 帯 UWB ミリ波レーダにより安定的かつ高反射に識別させることのできる素材を検討する。

(1) 含有させる素材の選定

平成 26 年度では電気伝導性が良い金属素材としてアルミニウム粒を検討したが、平成 27 年度では白線材料自体の誘電率向上を目的として、高誘電率材料として下記 3 点の素材を選定した。

表 1.1.1-1 誘電率向上原材料として選定した素材

素材名	誘電率	素材の状態
チタン酸バリウム	1,200	粉末
酸化亜鉛 23-K	8.15	粉末
フォルステライト	5.7~6.8	粉末

(2) 素材を配合しての高輝度白線材料の検討、設計

上記 3 点の素材を高輝度白線標示材料に配合し、材料の流動性に対する影響を確認し、流動性の低下がみられる様であれば、配合の検討を行う。

① 塗料への含有量の検討

上記表 3 種類の素材について、高輝度白線材料への含有させる素材として検討し、含有させることによる材料の流動性、施工性の確認を行った。

② 素材を高輝度白線材料へ含有させた際の影響の検討

入手した3素材はどれも粉末状であるが、高輝度白線材料の素材として含有させることで、材料の流動性や施工性に影響するものと予測された。

a 素材を含有させたことによる施工性、流動性への影響の確認試験方法

各素材の配合量を0%、5%、10%、20%とし、含有させた際の高輝度白線材料に対する流動性やリブ整形に対する影響を確認する。

各素材を含有させた白線材料を170℃で溶解し、約30cmの高さからアルミニウム板上へ流し、白線材料の盛り上がり具合を見る。流動性が良ければ、盛り上がりは低くなり、流動性が悪ければ盛り上がりは高くなる傾向になる。

b 試験結果

チタン酸バリウムを0%、5%、10%、20%含有させ、溶解し、アルミ板上に流した結果が下記の写真である。流れ出した白線材料の山の高さを観察した(図1.1.1-1)。



図 1.1.1-1 チタン酸バリウムを0、5、10、20%含有させた白線材料の流動性状況

図では分かりにくいですが、0%、5%、10%、20%では白線材料の流動性や施工性に大きな影響を与えることは無いと判断した。

ただし、チタン酸バリウムは法的に毒物及び劇物取締法によりバリウム化合物として劇物指定されており、また、消防法においても「貯蔵等の届け出を要する物質」として200kg以上の保管は届け出が義務付けられていることが判明し、白線材料への使用は難しいとの判断で検討を中止した。

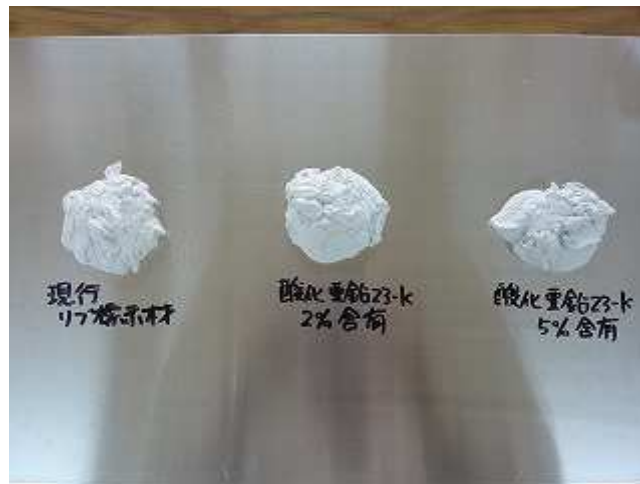


図 1.1.1-2 酸化亜鉛 23-K を 0%,2%,5%含有させた白線材料の流動性状況

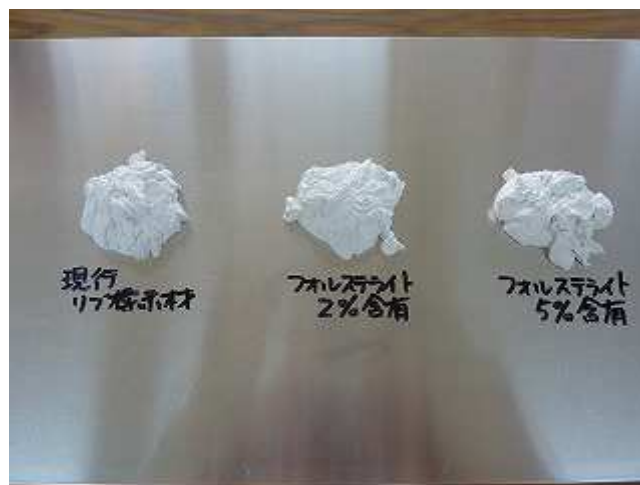


図 1.1.1-3 フォルステライトを 0%,2%,5%含有させた白線材料の流動性状況

c 酸化亜鉛 23-K、フォルステライト含有させた際の配合検討

酸化亜鉛 23-K、フォルステライトを高輝度白線材料の素材として含有した際、5%配合した時点で白線材料の流動性が全く無くなり、施工不能な状態になった。

以上の事より、通常のリブ標示材料と同等の流動性にするべく、流動調整用添加剤の配合量を検討した。

ア 流動調整用添加剤の配合検討

0~0.5%の範囲で流動調整用添加剤を追加で配合し、酸化亜鉛 23-K、フォルステライトを 2%及び 5%配合した白線材料の流動性を確認し、通常のリブ標示材と同等になる配合量を検証した。

イ 試験結果

酸化亜鉛 23-K、フォルステライトを 2%及び 5%配合した白線材料に 0~0.5%の範囲で流動調整用添加剤を追加で配合した白線材料の流動性の結果は以下の表である。

表 1.1.1-2 流動性調整用添加剤追加配合量による流動性確認

流動調整剤配合量 誘電素材	0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%
酸化亜鉛 23-K 2%	×	×	○	○	×	×
酸化亜鉛 23-K 5%	×	×	×	○	○	×
フォルステライト 2%	×	×	○	○	×	×
フォルステライト 5%	×	×	×	○	○	×

上記の表より流動性調整用添加剤追加配合量が 0.2%以下では流動性に差があり誘電素材の配合量により、施工性に影響のある流動性であった。また、0.4%以上ではリブが出来難い流動性になり、両素材の 2%と 5%の含有に対し同等の流動性になった 0.3%増量添加した白線材料で対応する事とした。

d 素材を配合しての高輝度白線材料の施工性評価

誘電率測定用試験板作製時に誘電素材を配合しての高輝度白線材料状況を確認した。基材は表面処理してあるコンパネ（木材）を使用した。リブ標示材の流動性が表 1.1.1-2 における流動性調整用添加剤による流動性確認時の配合での流動性と異なり、塗膜表面に穴が開いてしまう現象が見られた。この塗膜状態では、施工機でのリブ標示施工では塗膜が掠れたり、正常なリブ形状が出来ない恐れがある。

e 今後の検討課題

誘導性調整用添加剤を増量して試験板を作製したが、施工機で試験片を作製する場合には、更なる配合変更が必要であり、施工機での施工性を重視した流動性の配合検討は今後の課題である。



图 1.1.1-4 誘電率測定用試験板作製状況



图 1.1.1-5 塗膜表面状態

1.2 高輝度白線のリブ形成技術の検討

既存リブ式路面標示の形状においてはフラット部の厚み 2mm、リブ高さ 6mm が標準となっている。

79GHz 帯のミリ波レーダによる安定した高反射レベルを得るためにはある程度のリブ高さが要求される事から施工機による形成可能なリブ高さの検討、検証を行う。

1.2.1 リブ形成技術の検討



図 1.2.1-1 リブ式標示施工イメージ

(1) 最大リブ高さの検証

従来のリブ式高輝度路面標示のリブ形状は 2 本リブ形状が主流となっており、既存の施工機に装着されているスリッタにおいても 2 本のリブを形成する構造となっている。

(図 1.2.1-2)

リブ高さの設定については既存のスリッタにて 10mm までの開度に調整可能であるが、リブ高さを最大 15mm まで形成出来るようスリッタのリブシャッター部の部品交換、改造を行い、6mm、9mm、12mm、15mm にリブ高さを設定した時の形成されたリブ形状を検証した。

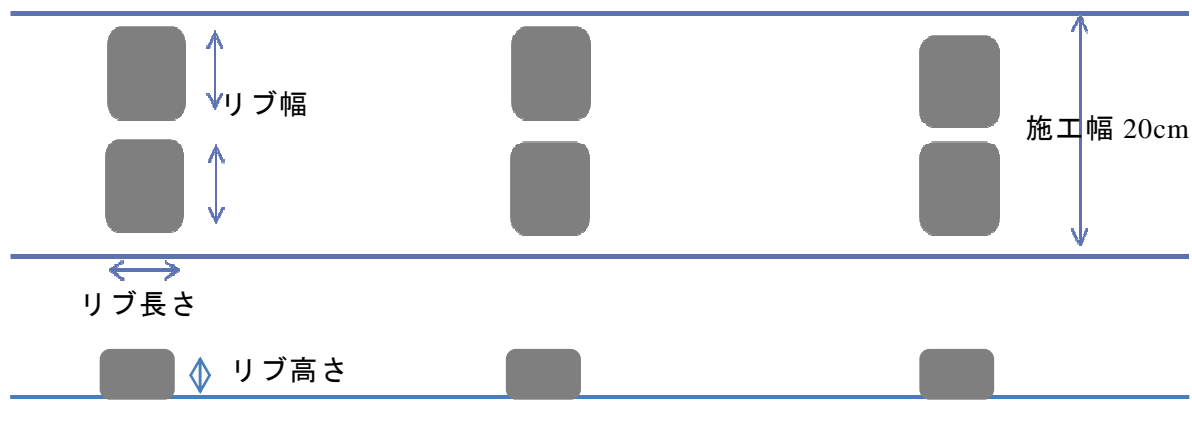


図 1.2.1-2 リブ式高輝度路面標示のリブ形状



図 1.2.1-3 リブ高さ検証時の施工状況

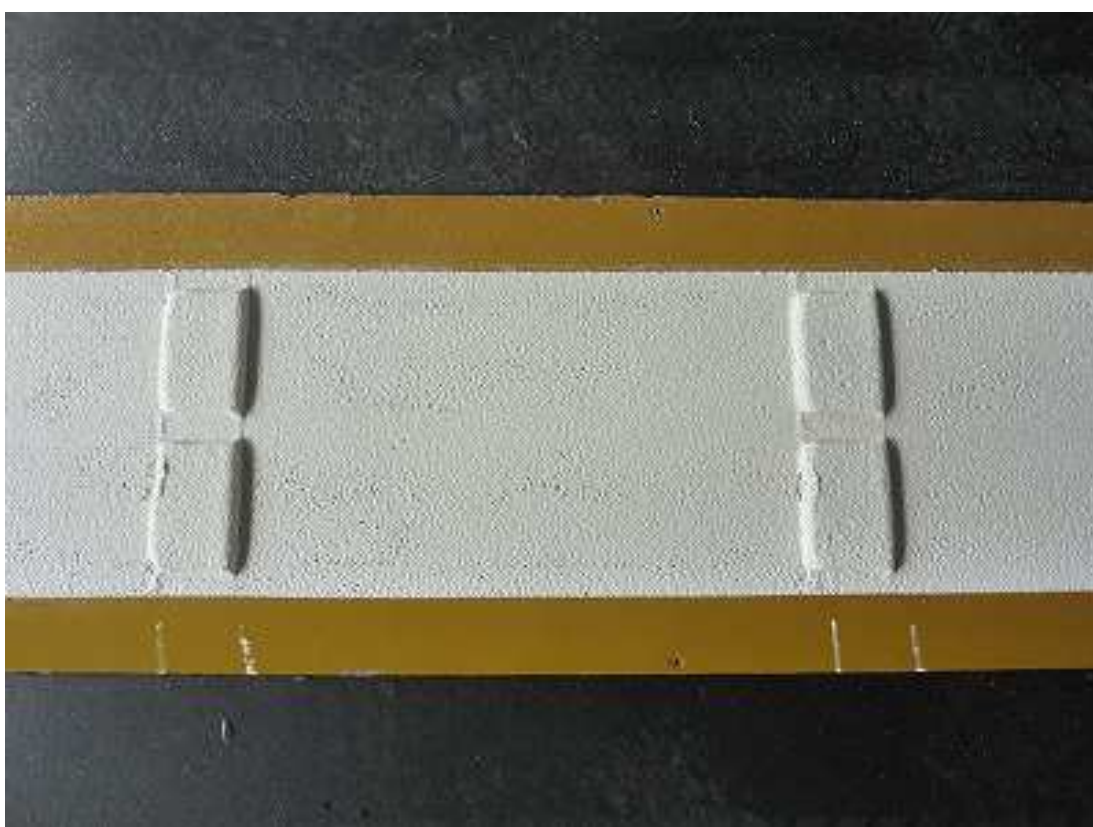


図 1.2.1-4 リブ高さ検証の試験板

(2) 各リブ高さ設定時のリブ高さ、幅、長さの計測結果

施工機に付属しているスリッタのリブ高さを6mm、9mm、12mm、15mmに設定した時の施工されたリブ標示材のリブ高さ、リブ幅、リブ長さの計測結果を下記の表 1.2.1-1 に示す。

表 1.2.1-1 各リブ高さ設定時のリブ高さ、幅、長さの計測結果（単位:mm）

設定したリブ高さ	施工時のリブ高さ	設定したリブ幅	施工時のリブ幅	設定したリブ長さ	施工時のリブ長さ
6	6.5	80	81	50	51
9	9.2		80		52
12	11.9		83		52
15	13.1		83		58

(3) 各リブ高さ設定時のリブ形状形成状況

各リブ高さ設定時のリブ形状の状況を図 1.2.1-5～図 1.2.1-8 に示す。



図 1.2.1-5 リブ高さ 6mm



図 1.2.1-6 リブ高さ 9mm



図 1.2.1-7 リブ高さ 12 mm

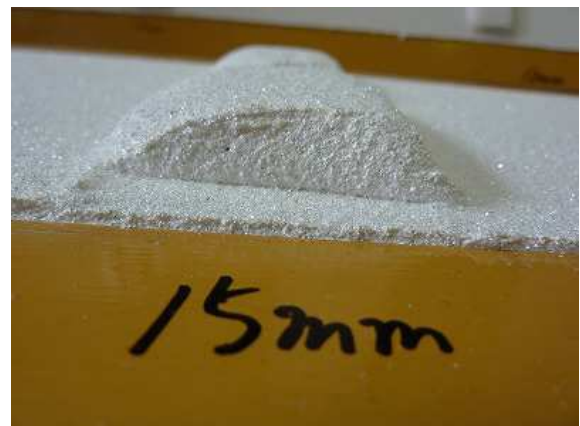


図 1.2.1-8 リブ高さ 15 mm

(4) リブ形成技術の検討まとめ

現状ではリブ高さ 6mm での施工が行われているが、施工機での最大可能リブ高さを検証した結果、リブ高さ 12 mm以上の施工では、設定値のリブ高さを下回った結果となった。これは、スリッターでリブ形成した際に、リブ標示材自体の自重でリブ高さが維持出来なかったと結果と思われる。

また、リブ高さ設定 6mm や 9mm では台形状のリブが形成されるが、リブ高さ 12mm や 15mm では半円状のリブになり、台形状のリブ形成が出来ない状態であった。

他に、リブ高さ 6mm の施工速度でリブ高さ設定 12mm や 15mm で施工すると、リブ標示材が追従できず、塗膜に穴が開くなどの不具合が見られた。

以上の事より、リブ高さの設定限界は 10mm 程度と思われる。

1.3 高輝度白線のリブ形状の最適化検討

1.3.1 ミリ波レーダ性能検証に対するリブ標示材の試験設置

ミリ波レーダの性能検証のため以下の試験走行路で試験設置した。

(1) ミリ波レーダ性能確認、検証のためのリブ式高輝度白線標示の試験設置

① 試験設置実施内容

日時：平成 27 年 7 月 24 日(金) 8:00~16:00

場所：岐阜県中津川市富士通テン(株)中津川テクノセンター テストコース 約 40m

内容：リブ式高輝度白線標示白色

施工幅 200 mm リブ間隔 400 mm リブ高さ 6 mm 施工長さ約 40m



図 1.3.1-1 リブ式高輝度白線標示設置テストコース 設置前



図 1.3.1-2 リブ式高輝度白線標示設置状況



図 1.3.1-3 リブ式高輝度白線標示設置後状況



図 1.3.1-4 リブ式高輝度白線標示拡大写真

② リブ形状増大に対するミリ波レーダの性能検証のための試験片作製

リブ形状増大に対するミリ波レーダの性能検証のための試験片作製を実施した。

a 試験片作製内容

リブ形状内容

- ア 高さ 6 mm リブ長さ 80 mm リブ間隔 400 mm アスファルトブロック 300 mm×6 枚
- イ 高さ 6 mm リブ長さ 50 mm リブ間隔 400 mm アスファルトブロック 300 mm×6 枚
(上記の他に一般的なリブ間隔 300mm の試験片も 5 枚作製)



图 1.3.1-5 試驗片作製狀況



图 1.3.1-6 試驗片作製狀況拡大

1.4 白線識別用高輝度白線の性能評価

1.4.1 リブ式高輝度白線標示材料の施工性等の評価

(1) 誘電率測定用試験板作成

誘電率計測用の試験板作製を実施した。作製した試験板を表 1.4.1-1 に示す。現在、道路に施工されている既存のリブ標示材を含め路面標示には夜間の視認性向上、維持のために塗膜表面に微細なガラスビーズを散布している。このような施工当初は、均一にガラス粒（粒径約 0.2～0.8 mm）で覆われた状態になる。一方、時間経過とともに塗膜表面の磨耗が進んだ状態では、白線材料の原材料が（石油樹脂、炭酸カルシウム粉末及び顆粒、ガラスビーズ）が露出した状態となる。

表 1.4.1-1 作製した試験板の種類、誘電材料の配合量、塗膜の表面状態の一覧表

誘電率材料種類	誘電材料の配合量	塗膜表面状態
無し（標準板）		ガラスビーズ散布あり
		塗膜表面摩耗状態
酸化亜鉛 23-K	2%	ガラスビーズ散布あり
		塗膜表面摩耗状態
	5%	ガラスビーズ散布あり
		塗膜表面摩耗状態
フォスフェライト	2%	ガラスビーズ散布あり
		塗膜表面摩耗状態
	5%	ガラスビーズ散布あり
		塗膜表面摩耗状態

誘導性調整用添加剤を増量して試験板を作製したが、施工機で試験片を作製する場合には、さらなる配合変更が必要であり、施工機での施工性を考慮した流動性調整剤の配合量検討は今後の課題である。

(2) リブ式高輝度白線標示材料の誘電率を算出するための反射特性及び透過特性の測定

表 1.4.1-1 で作製した誘電率を算出するための反射特性及び透過特性の測定する試験板を北九州市立大学内電波暗室に持込み測定を実施した。透過特性は、今後、シミュレーション解析などを行うために役立つ参考データとして取得した。

反射特性及び透過特性の測定内容は以下の通りである。

- ・測定実施日：平成 28 年 3 月 4 日(金)10：00～
- ・測定場所：北九州市立大学ひびきのキャンパス国際環境工学部内電波暗室
- ・測定内容：コンパネ上に塗布したリブ式高輝度白線標示材料の反射特性及び透過特性の測定（透過特性は今後の活用を考えて参考データとして取得）

図 1.4.1-1、図 1.4.1-2 は、電波暗室内での反射特性の測定である。

反射特性の測定状況

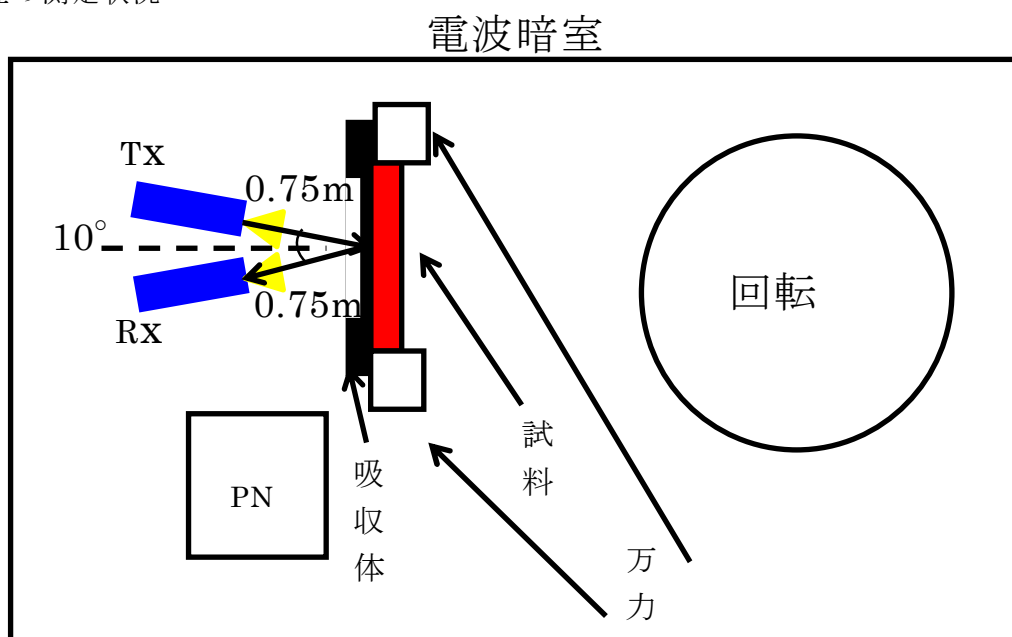


図 1.4.1-1 反射特性の実験模式図

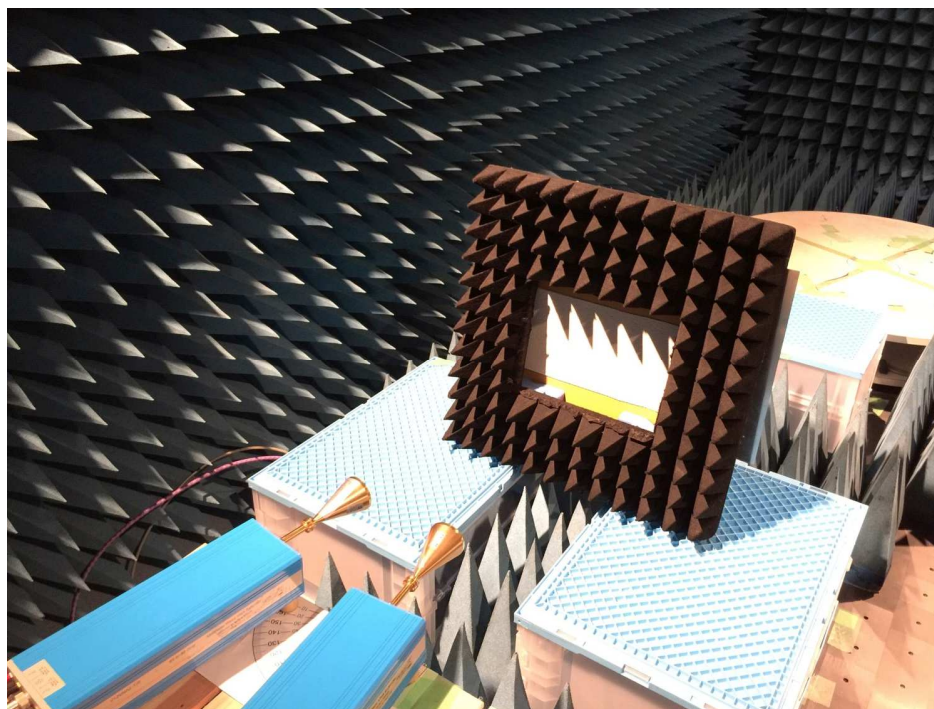


図 1.4.1-2 反射特性の測定状況

(3) リブ式高輝度白線標示材料試験板の反射特性及び透過特性の測定結果

① 反射特性（ガラスビーズ散布あり）

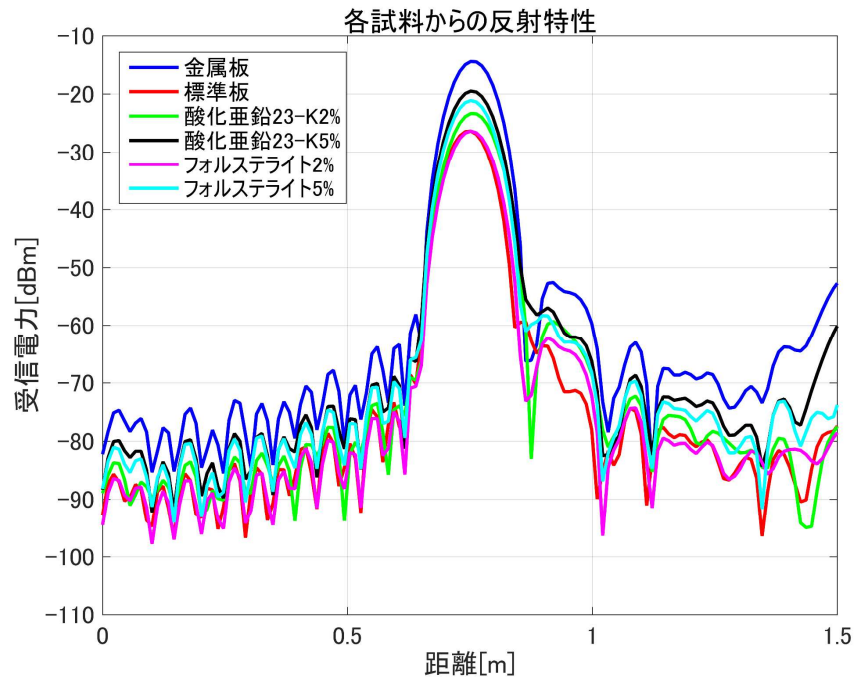


図 1.4.1-3 反射特性測定結果グラフ

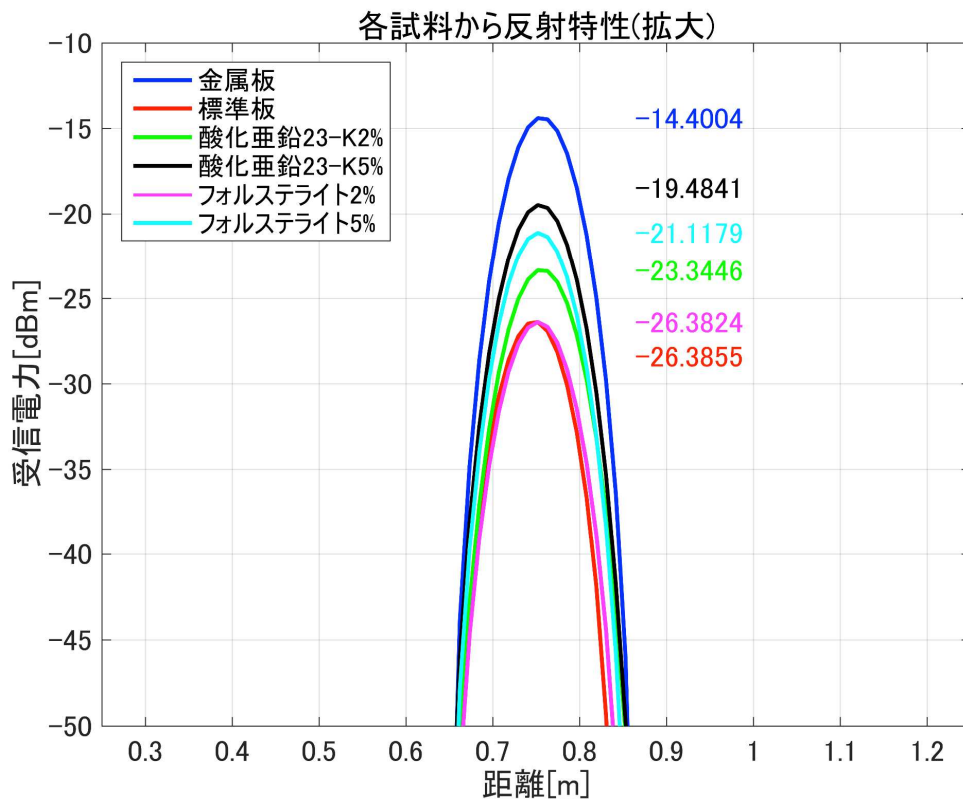


図 1.4.1-4 反射特性測定結果拡大グラフ

② 反射特性（摩耗状態）

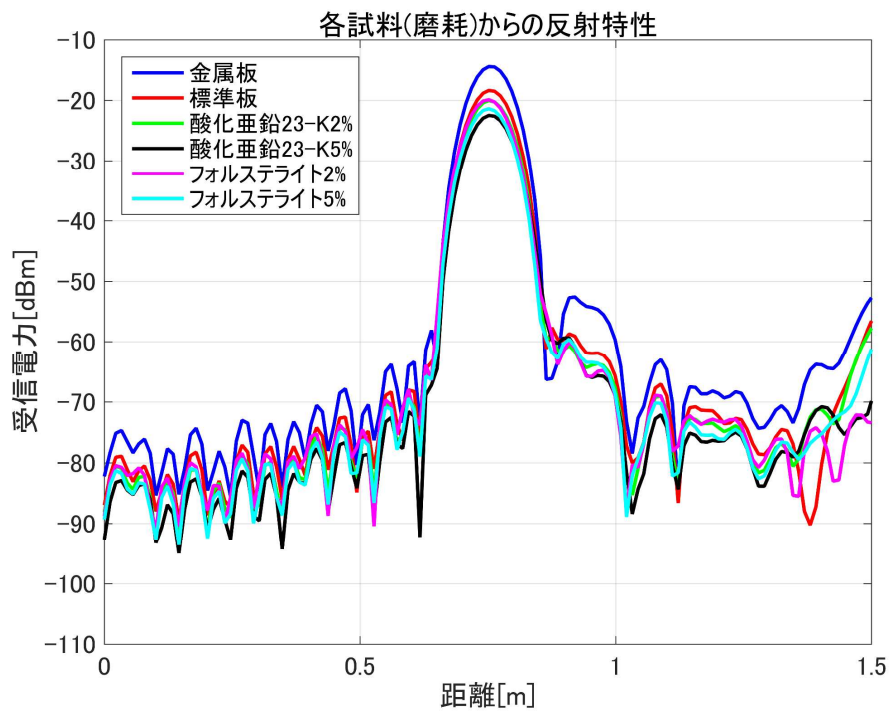


図 1.4.1-5 反射特性測定結果グラフ（摩耗状態）

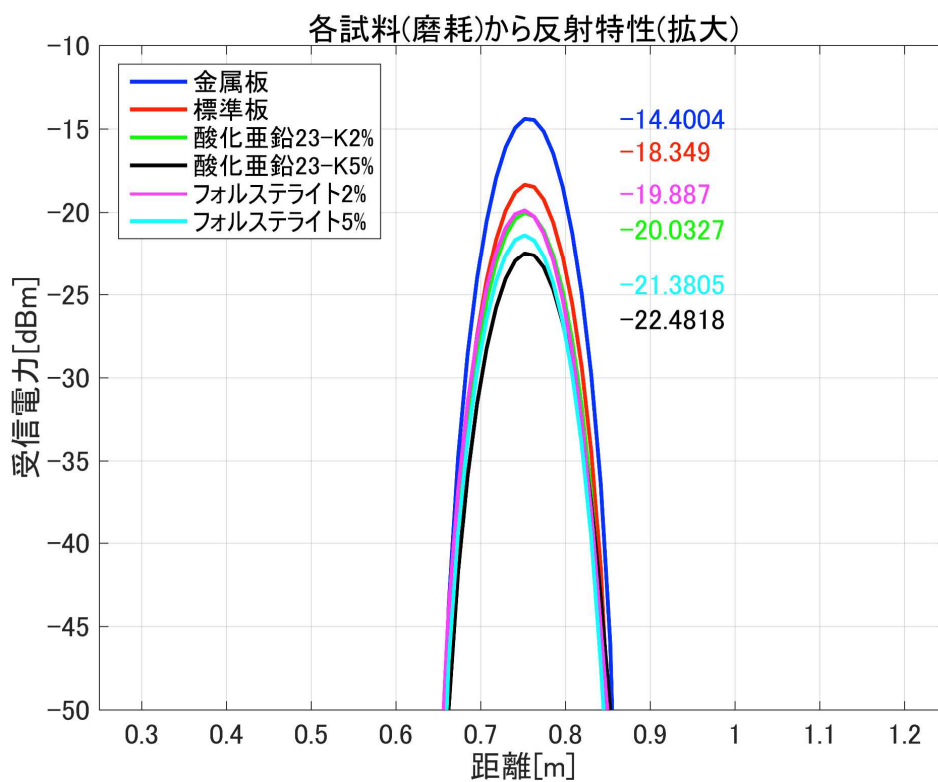


図 1.4.1-6 反射特性測定結果拡大グラフ（摩耗状態）

表 1.4.1-2 反射特性測定数値（散布ガラスビーズあり）

試料名	誘電材料配合量	受信電力(dBm)	標準板との差
標準板		-26.3855	-
酸化亜鉛 23-K	2%	-23.3446	3.0389
	5%	-19.4841	6.9037
フォルステライト	2%	-26.3824	0.0031
	5%	-21.1179	5.2676

表 1.4.1-3 反射特性測定数値（摩耗状態）

試料名	誘電材料配合量	受信電力(dBm)	標準板との差
標準板		-18.349	-
酸化亜鉛 23-K	2%	-20.0327	-1.68837
	5%	-22.4818	-4.1328
フォルステライト	2%	-19.887	-1.538
	5%	-21.3805	-3.0315

③ 透過特性の測定状況

電波暗室

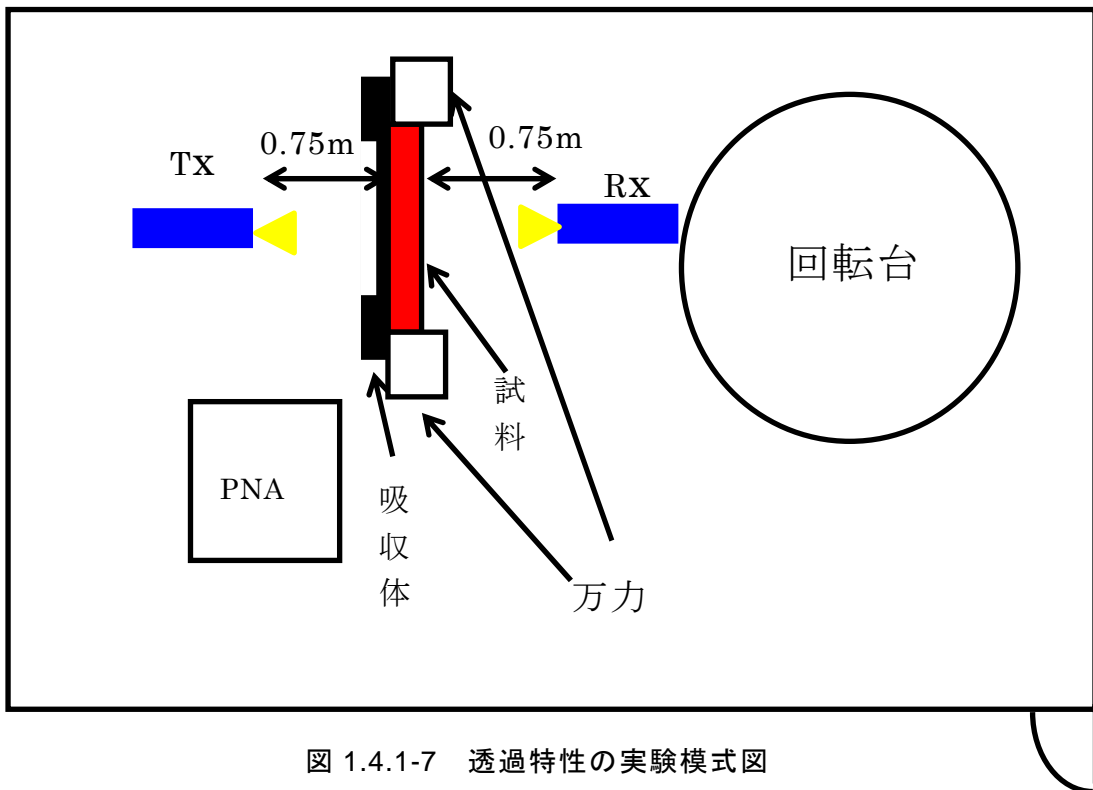


図 1.4.1-7 透過特性の実験模式図



図 1.4.1-8 透過特性の測定状況

④ 透過特性（ガラスビーズ散布あり）

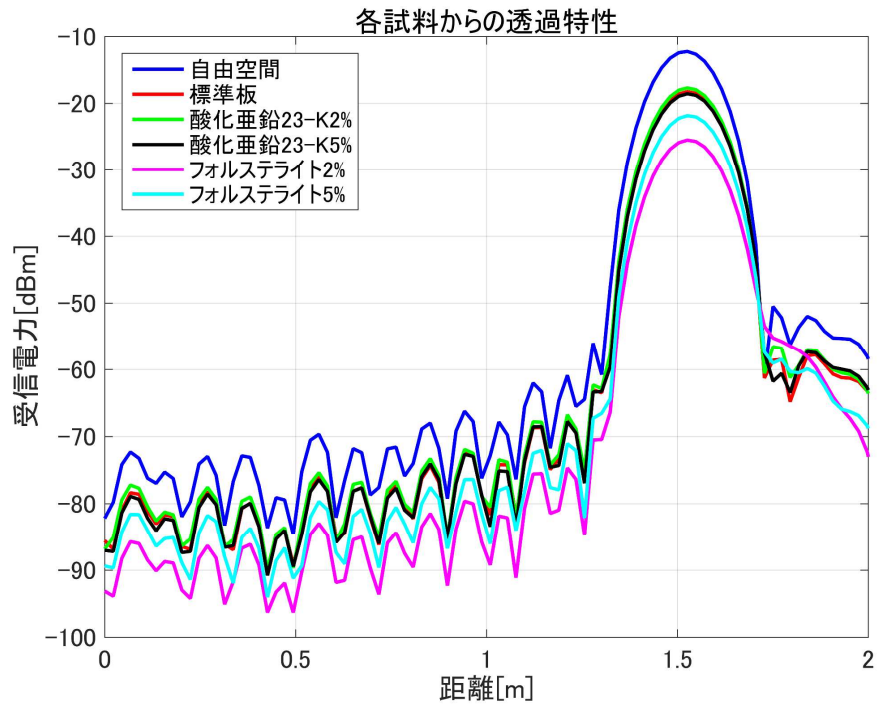


図 1.4.1-9 透過特性測定結果グラフ

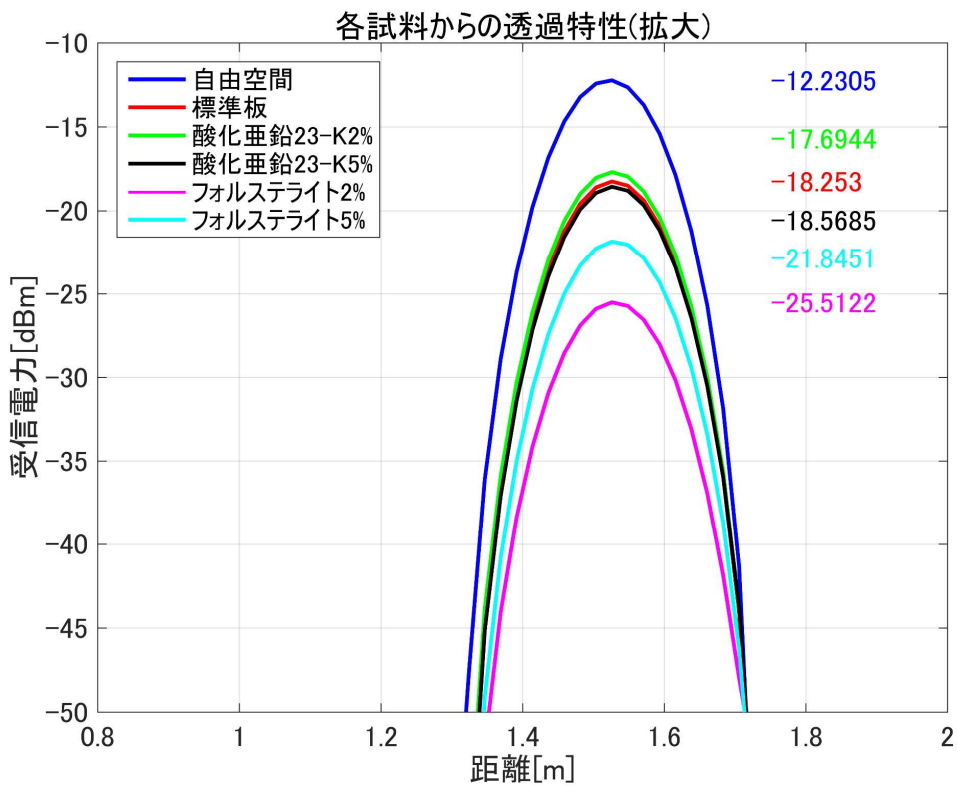


図 1.4.1-10 透過特性測定結果拡大グラフ

⑤ 透過特性（摩耗状態）

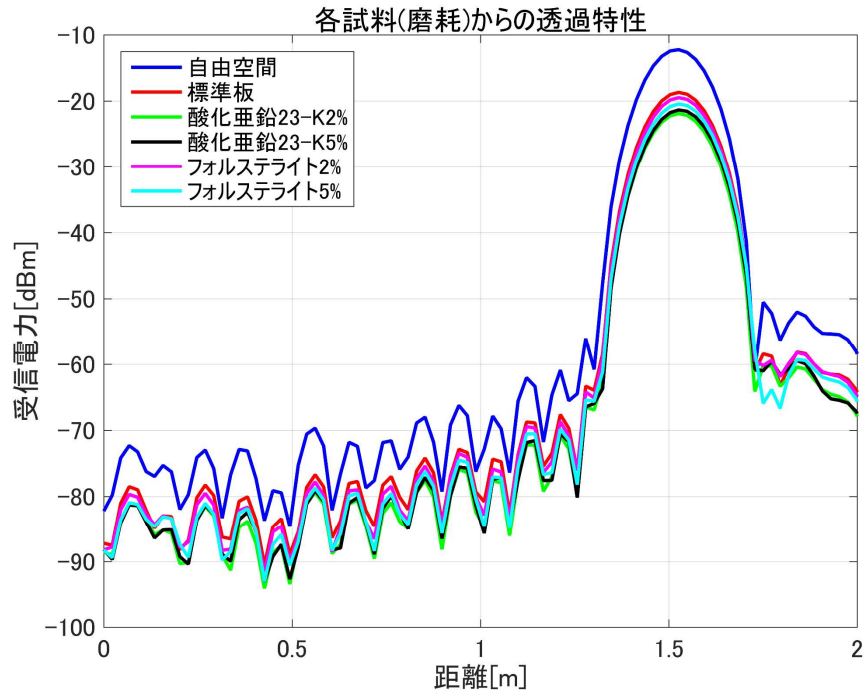


図 1.4.1-11 反射特性測定結果グラフ（摩耗状態）

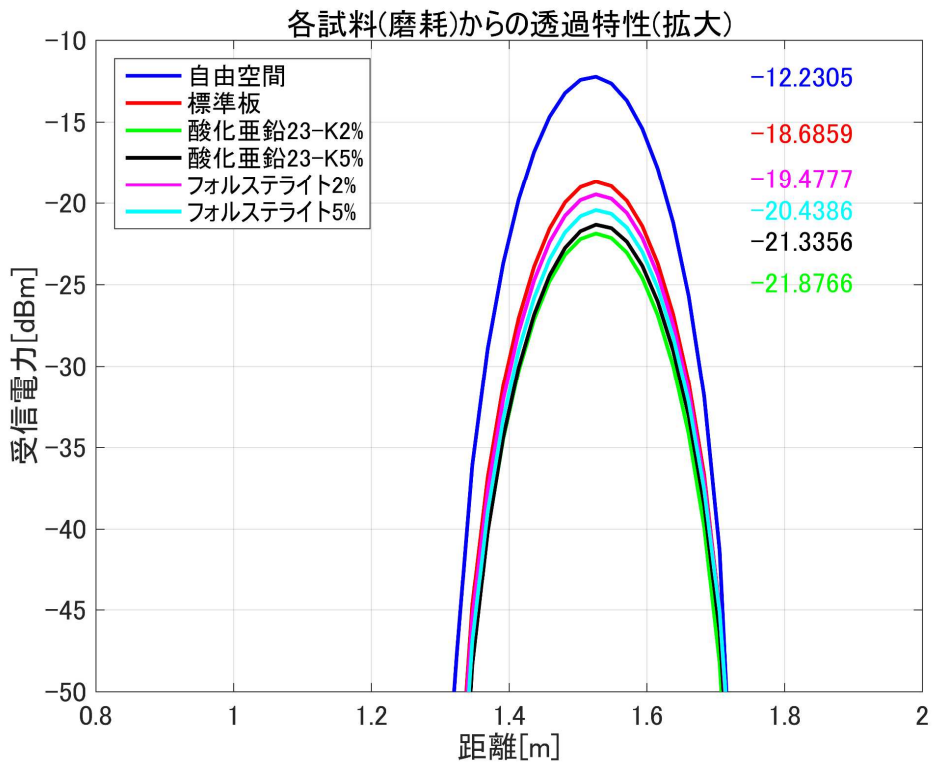


図 1.4.1-12 透過特性測定結果拡大グラフ（摩耗状態）

表 1.4.1-4 透過特性測定数値（ガラスビーズ散布あり）

試料名	誘電材料配合量	受信電力 (dBm)	標準板との差
標準板		-18.253	
酸化亜鉛 23-K	2%	-17.6944	0.5586
	5%	-18.5685	-0.3155
フォルステライト	2%	-25.8451	-7.5921
	5%	-21.8451	-3.5921

表 1.4.1-5 透過特性測定数値（摩耗状態）

試料名	誘電材料配合量	受信電力 (dBm)	標準板との差
標準板		-18.6859	
酸化亜鉛 23-K	2%	-21.8766	-3.1907
	5%	-21.3356	-2.6497
フォルステライト	2%	-19.4777	-0.7918
	5%	-20.4386	-1.7527

(4) 考察

誘電素材を配合した白線材料の試験板を北九州市立大学内電波暗室にて、反射特性を計測した結果、標準板に比べ塗膜上にガラスビーズを散布した試験板において顕著な差が見られた。誘電素材を含有しない標準板の測定数値と比較し、酸化亜鉛 23-K、2%が 3dBm、フォルステライト 2%で 0dBm の差で、殆ど標準板との差が見られなかったが、誘電素材を 5%配合した試験板については酸化亜鉛で 6.9dBm、フォルステライトで 5.3dBm の差が見られ、この差は反射特性の結果として大きな差であり、ガラスビーズを散布した試験板においては標準板との差が見られた結果と言える。

しかし、塗膜の摩耗状態を再現した試験板の反射特性の受信電力測定結果は、標準板と同等、または下回る結果となり、誘電素材の効果があるとは言えない結果であった。反射特性測定においては、ガラスビーズ散布ありと、摩耗状態の測定結果が大きく異なった点については、塗膜表面の状態に左右されたのではないかと考えるが、明確な原因は不明である。

塗膜表面に散布したガラスビーズと誘電素材の相乗効果で反射特性の数値に差が出たのであれば、実際の路面では施工後、時間が経過するに従い塗膜表面が通行車両による摩耗や、風雨、紫外線による耐候劣化する事で試験板に似た塗膜状態となるため、誘電素材の効果はリブ標示材設置後、時間の経過とともに塗膜表面が摩耗する事でミリ波レーダの性能を低下させる可能性も考えられる。

1.5 まとめ

主な結果と今後の検討課題を下記に示す。

(1) 誘電素材を配合した際の材料の流動性検討

白線材料の流動性検討では、誘電素材を配合した白線材料において、実験室内での検証と試験板作製時の流動性が大きく異なり、上記で検証した流動性調整用添加剤の配合量では実施工において施工不能になる恐れのある流動性であった。

今後、白線材料の配合を検討する際には、実験室内での白線材料の流動性の傾向を確認した上で、実施工に近いレベルでの確認が必要がある。

以上の事を踏まえて、誘電素材を配合する場合には、流動性調整用添加剤を含めた白線材料の配合検討が課題となる。

(2) ミリ波レーダに対する誘電素材の効果検証

北九州市立大学内の電波暗室にて計測した反射特性の結果において、ガラスビーズを散布した試験板においてのみ標準板との差が見られ、他の測定（磨耗状態）では、差が見られない結果となった。

以上より、誘電素材を白線材料に配合する事で明確に効果があると言い切れないと思われる。ミリ波レーダに対する誘電素材に効果の実証については、屋外のテストコース等にリブ式白線材料を設置し、塗膜表面に一様にガラスビーズが散布されている施工直後から、塗膜表面が摩耗し白線材料内部の原材料が露出するまでの長期間によって検証する必要がある。

第 2 章 測距イメージ方式白線識別技術の開発

自動車の車線維持制御向けセンシング技術として広く普及している、ステレオカメラなどの車載カメラを用いた白線画像認識技術では、照度が急激に変化する環境下では白線識別性能が大幅に低下する。そこで、これらのパッシブ型の白線識別技術に対して、アクティブ型の測距イメージセンサを用い、高積雪を除いた全天候において、また、照度の急変にも対応可能となる白線識別技術を目指し、投光式白線識別技術を開発する。さらに、測距機能を用いて縁石などの道路構造物を検出することにより、白線が消えかけているような状況での補助的な情報取得技術を開発する。

平成 26 年度では、試作した検証装置を用いて、基本性能評価や道路縁石エッジ検出性能の基礎評価を行った。

平成 27 年度は、平成 26 年度で試作した検証装置を用いて、SNR の向上及びエッジ抽出技術を開発し、外乱光の影響を含めて評価する。

2.1 節では、投光同期 3 次元測距イメージセンサの測距画像を用いたエッジ抽出技術の開発を説明する。平成 26 年度の検討の結果、白線上のリブの検出は困難であった。そこで、リブよりサイズが大きい白線近傍の道路構造物を対象として開発を行う。エッジを高確度で検出するために、空間フィルタリングによる SNR を向上、及び、測距イメージセンサを用いた距離画像におけるエッジ検出技術を開発する。開発したエッジ検出技術を用い、高積雪を除き、早朝・正午・薄暮・夜間・晴天・雨天等の様々な環境における評価実験を行い、照度や反射率等の影響を含め、性能を評価する。

2.2 節では、測距イメージセンサの距離画像ではなく、輝度差分画像を用いて、画像処理技術によって、リブ形状を有する白線及びリブ形状を有しない白線の認識アルゴリズムの開発を説明する。「測距イメージ方式の差分画像」とは、「光源信号と外乱光による信号」と「外乱光のみの信号」のデータを別々に読み出し、その差分演算により光源信号のみを抽出したデータである。これにより、SNR を低下させる外乱光を除去する。開発したエッジ検出技術を用い、高積雪を除き、早朝・正午・薄暮・夜間・晴天・雨天等の様々な環境における評価実験を行い、照度や反射率等の影響を含め、性能を評価する。

本件の車載イメージを図 2-1 に示す。測距イメージセンサはサイドミラー下部に配置され、自動車の車体横にて、上方から撮影して白線、及び、道路構造物を捉えることを想定している。サイドミラーから白線までの間で、約 1m 程度の距離を想定している。

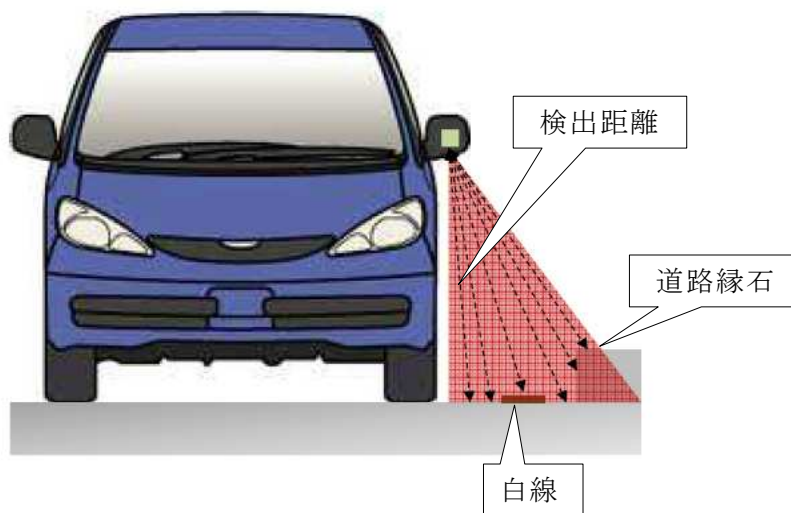


図 2-1 測距イメージセンサ取り付け概念図

2.1 投光同期 3次元測距イメージセンサを用いたエッジ抽出技術の開発

本節では、白線近傍の道路構造物を含む白線エッジを高確度で検出するために、平成 26 年度で、試作した検証装置を用い、空間フィルタリングによる SNR を向上、及び、測距イメージセンサを用いた距離画像からのエッジ検出技術を開発する。屋外にて、照度や反射率等の影響を含め、性能を評価する。

本件の測距イメージセンサは、間接 Time of Flight (TOF) 方式を用いている。図 2.1-1 に示す。

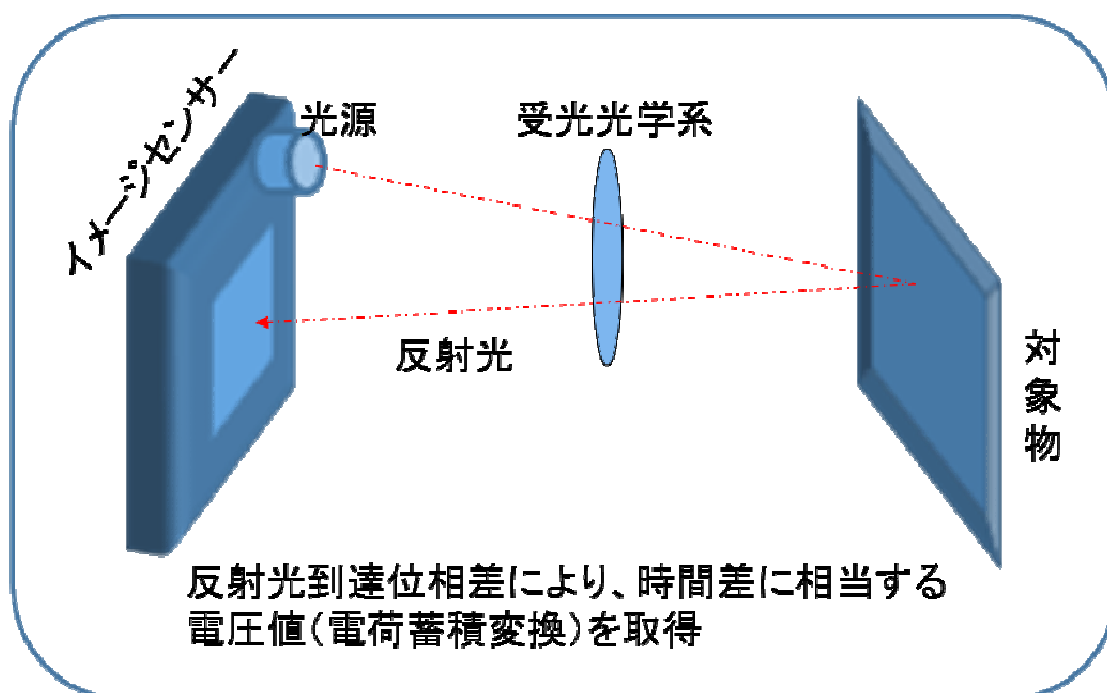


図2.1-1 測距イメージセンサの間接TOF方式

測距イメージセンサと光源は、タイミング発生回路により時刻同期を取っている。光源からの信号光は、対象物で反射され、受光光学系を通してセンサにて受光される。受光素子では、発光パルスに対する位相差 0° と 180° の反射光量を電荷として蓄積し、それを電圧に変換して出力する。つまり、発光から測距イメージセンサに到達までの時間に相当する情報を電圧値として出力する。これを用いて、対象物までの距離を算出する。

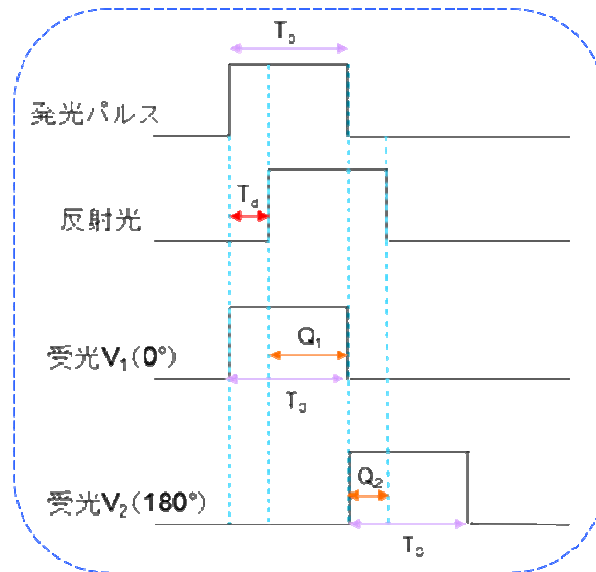


図2.1-2 間接TOF方式による距離計測の説明

図2.1-2において、 Q_1 と Q_2 は、それぞれ位相 0° と 180° の蓄積電荷を示す。この Q_1 、 Q_2 から変換された電圧値を V_1 、 V_2 、 T_0 をパルス幅、光速を c とすれば、対象物までの距離 D は、式2.2-1で算出することができる。

$$D = \frac{1}{2} \times c \times T_0 \times \frac{V_2}{V_1 + V_2} \quad (\text{式 2.1-1})$$

2.1.1 測距イメージ方式道路構造物識別技術の開発

測距イメージ方式による道路構造物識別技術では、カメラから対象物までの距離が、カメラから地面までの距離と異なるものを道路構造物と認識することを目的としている。

(1) 距離データからの道路構造物検出アルゴリズムについて

空間フィルタにより距離データのSNRを向上させ、空間微分を行い、その結果で構造物のエッジを取り出す。エッジ取得には、Hough変換を用いた。図2.1.1-1にアルゴリズムを示す。

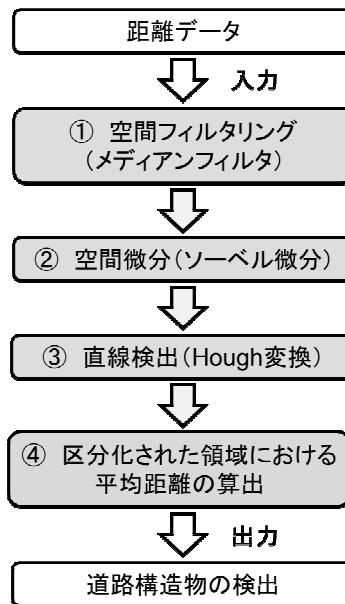


図 2.1.1-1 距離データからの道路構造物検出アルゴリズム

① 空間フィルタリング

空間フィルタとしては 3×3 の平滑化フィルタとメディアンフィルタを試した。

平滑化フィルタとは、注目している画素近傍の指定された範囲内の値の平均値を注目画素の値とするフィルタであり、メディアンフィルタとは、注目している画素近傍の指定された範囲内の値をソートし、その中央値を注目画素の値とするフィルタである。

どちらも効果があったが、メディアンフィルタにはエッジ情報を保つ性質があるため、メディアンフィルタを採用した。

② 空間微分

空間微分としては、 3×3 の水平方向の Sobel 微分を用いた。Sobel 微分では、図 2.1.1-2 のように注目画素の左右の差分値を、注目画素の値とする。

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

図 2.1.1-2 Sobel フィルタ

③ 直線検出

Sobel 微分後に微分値の大きいものをエッジ部の候補点とし、これらの点に対して Hough 変換を用いてエッジを示す直線を求めている。

Hough 変換とは、直線を検出するアルゴリズムの一種である。画像内のエッジを構成する各点について、そこを通過する無数の直線をパラメータ空間上に描画し、その描画された複数の曲線がもっとも多く通るパラメータを、求める直線のものとするアルゴリズムである。

今、 xy 座標系の直線を

$$y = a_0x + b_0 \quad (\text{式 2.1.1-1})$$

とする。この直線上の任意の点 (x_i, y_i) について (a, b) 座標系への射影を行うと、点 (a_0, b_0) を通る、 x_i を傾き、 y_i を b 切片とする直線 (式 2.1.1-2) となる。

$$b = -ax_i + y_i \quad (\text{式 2.1.1-2})$$

つまり、 (x, y) 座標系の直線上の任意の点から、 (a, b) 座標系の (a_0, b_0) を通る直線を得る。
(図 2.1.1-3)

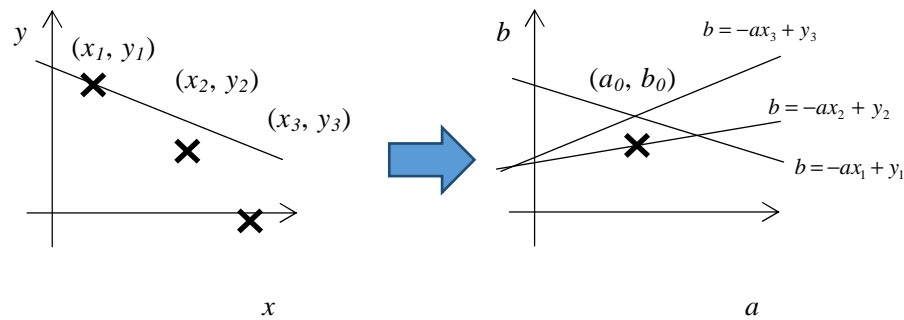


図 2.1.1-3 (x, y) 座標系から (a, b) 座標系への射影

従って、 (x, y) 座標系で最も多くの点を通過する直線を探りたい場合、 (a, b) 座標系で最も多くの直線が通過する点を求めればよいということになる。

しかし、 a と b の値は $\pm\infty$ となる可能性があって取扱いにくい。そこで、極座標を用いて直線を表し、そのパラメータを用いる。

今、原点から直線への法線ベクトルは一意に決まるため、このベクトルで直線を表すことができることになる。このベクトルのサイズを ρ 、 x 軸からの反時計回りの角度を θ とすると、

$$a = -\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (\text{式 2.1.1-3})$$

$$b = \frac{\rho}{\sin \theta} \quad (\text{式 2.1.1-4})$$

となる。これと式 2.1.1-1 から

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (\text{式 2.1.1-5})$$

が得られる。

式 2.1.1-1 の直線上の任意の点は、 (ρ, θ) 座標系では (ρ_0, θ_0) を通る曲線 (式 2.1.1-5) となる。つまり、 xy 平面上で最も多くの点を通過する直線を探りたい場合、 (ρ, θ) 座標系で最も多くの曲線が通過する点を求めればよいということになる。 θ は有界であり、画像サイズが有限であるため ρ も有界であり、取り扱いやすい。この ρ と θ を式 2.1.1-3、及び、式 2.1.1-4 に代入して、 a と b を得ることができる。

④ 区分化された領域における平均距離の算出

得られた直線によって区切られた領域のそれぞれについて、距離データの平均値を求める。

この各領域の距離データから、路面と高さが異なる構造物を認識し、車体からの距離を算出する。

(2) 測距方向

今回の実験では、標準的な自動車の走行方向と平行する縁石を対象としている。

「点」であるカメラからの距離となるため、画面の中心部と周辺部では、異なる距離が計測されることになるが、後述するが、実験において距離データの取得に問題があり、実装していない。このため、得られた距離データはカメラの視線方向の距離としてそのまま使用している。

(3) 距離算出のためのパラメータ調整

測距イメージセンサから得られるデータは V_{out1} と V_{out2} であり（間接 TOF の式 2.1-1 参照）、この値から距離を算出する。検証装置による距離は以下の式 2.1.1-6 で計算される。

$$L = a \times \frac{V_{out2} - V_{ofs}}{(V_{out1} \times SR - V_{ofs}) + (V_{out2} - V_{ofs})} \times \frac{CT}{2} - Dofs \quad (\text{式 2.1.1-6})$$

L :	Distance
a :	Slope
V_{out1}, V_{out2} :	Amplitude after Dark Difference
V_{ofs} :	Voltage offset
SR :	Sensitivity ratio
C :	Light speed
T :	Light pulse width
$Dofs$:	Distance offset

今回、距離を算出できるように、 a と $Dofs$ を調整した。（ $SR=1$, $V_{ofs}=0$ としている。）また、下記の値を用いた。

$$C = 30000 \times 10^3 [m] \quad (\text{式 2.1.1-7})$$

$$T = 30 \times 10^{-9} [s] \quad (\text{式 2.1.1-8})$$

対象物として室内の壁を用いた。壁からの距離 1m と 2m の位置にカメラを置き、 a と $Dofs$ を用いて調整した。ここで、

$$V_r = \frac{V_{out2} - V_{ofs}}{(V_{out1} \times SR - V_{ofs}) + (V_{out2} - V_{ofs})} \quad (\text{式 2.1.1-9})$$

とすると、

1m のとき

$$V_r = 0.428 \quad (\text{式 2.1.1-10})$$

2m のとき

$$V_r = 0.6348 \quad (\text{式 2.1.1-11})$$

となった。これらと式 2.1.1-6 から、

$$a = 1.07$$

(式 2.1.1-12)

$$D_{ofs} = 1.07$$

(式 2.1.1-13)

を得た。

2.1.2 屋外での評価実験と考察

(1) 照度計測器

照度測定のために、以下の照度計測器を購入した。



基本仕様 (GlacierX)

スリット幅 50 μ m

測定波長範囲 380~1000nm (赤外線・太陽光等)

測定項目 光量 (強度)

放射照度 (μ W/cm²/nm)

放射輝度 (μ W/sr/cm²/nw)

図 2.1.2-1 照度計測器

(2) 実験環境

実験は、測距イメージセンサを自動車サイドミラー付近に設置した場合を想定し、図 2.1.2-2 に示すように、1m の高さに測距イメージセンサカメラ部を設置し、装置直下に白線などの対象物を設置して行った。場所は産業技術総合研究所つくば北サイトである。

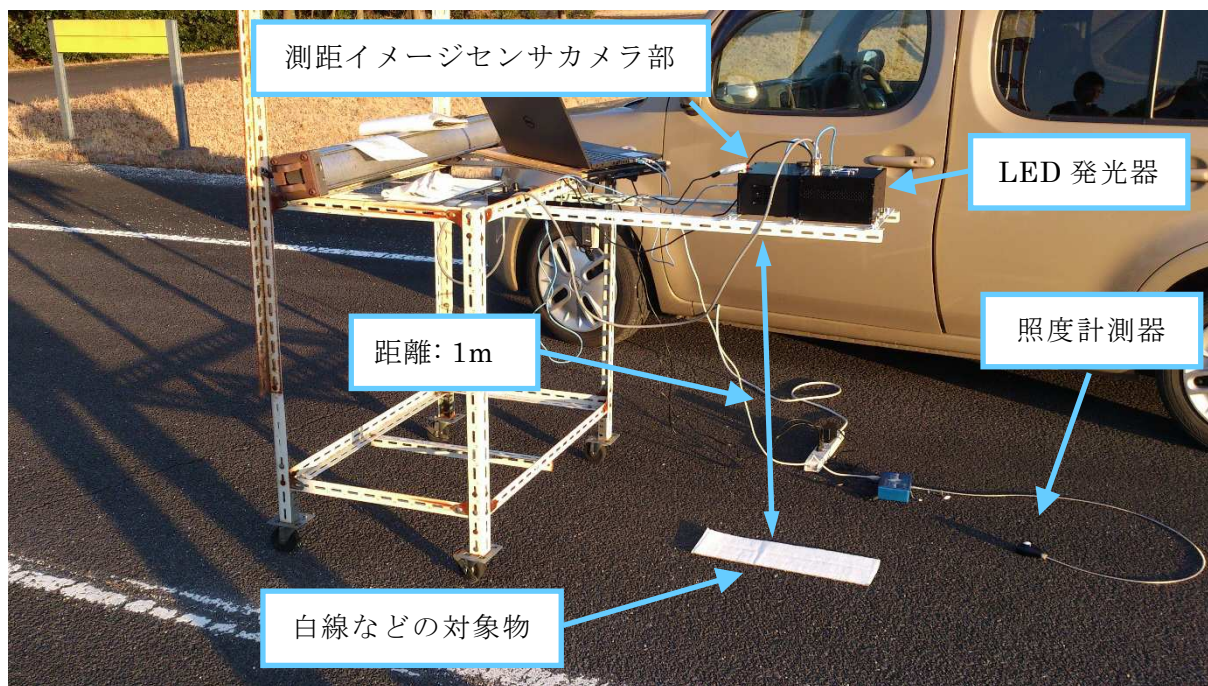


図 2.1.2-2 実験環境

(3) 実験と考察

開発したエッジ検出技術を用いて屋外において評価実験を行った。対象としては、白線とコンクリートブロックを用いた。コンクリートブロックを2つ重ね、0.2mの高さとなっている。画面下方から見た配置を、図 2.1.2-3 に示す。

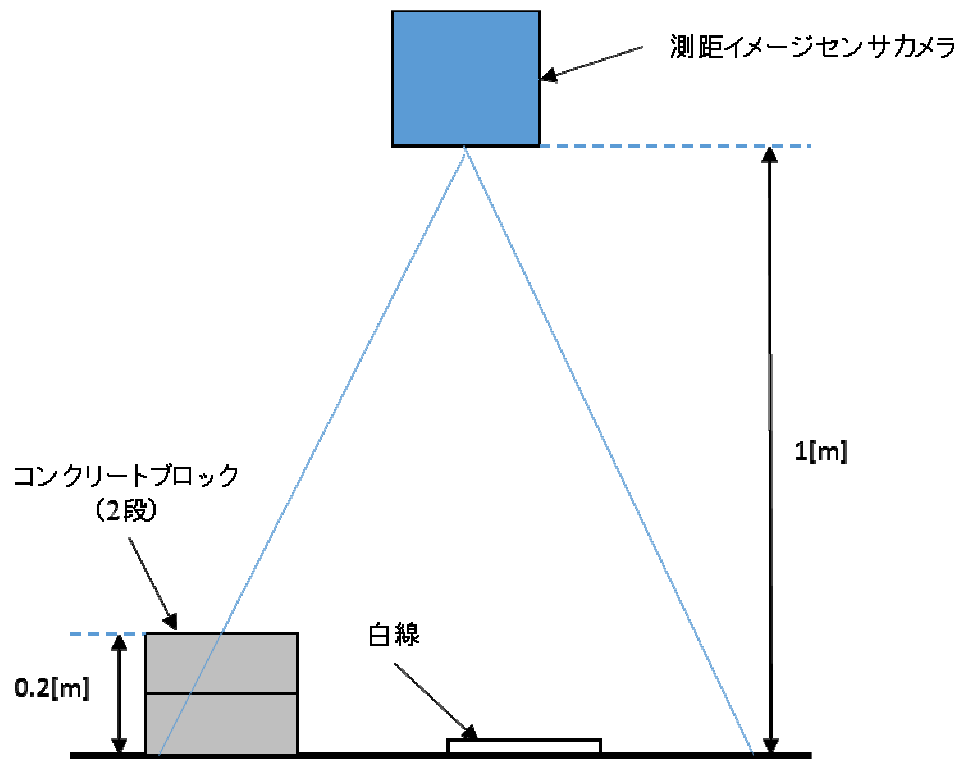
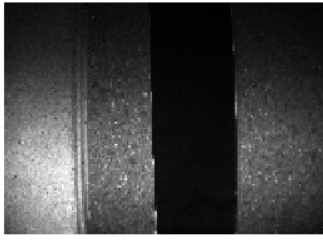
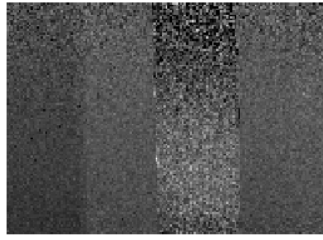


図 2.1.2-3 測距イメージセンサ画面下方から見た配置

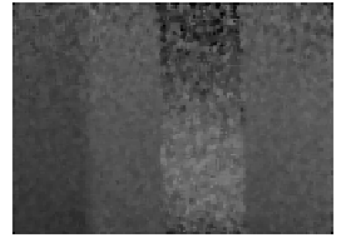
輝度差分データ



距離データ



ノイズ除去 (メディアンフィルタ)

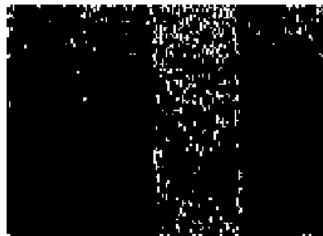


測定日時：2016.03.01 11:02

天候：晴れ

結果：検出できず

空間微分 (Sobelフィルタ)



エッジ検出 (Hough変換)

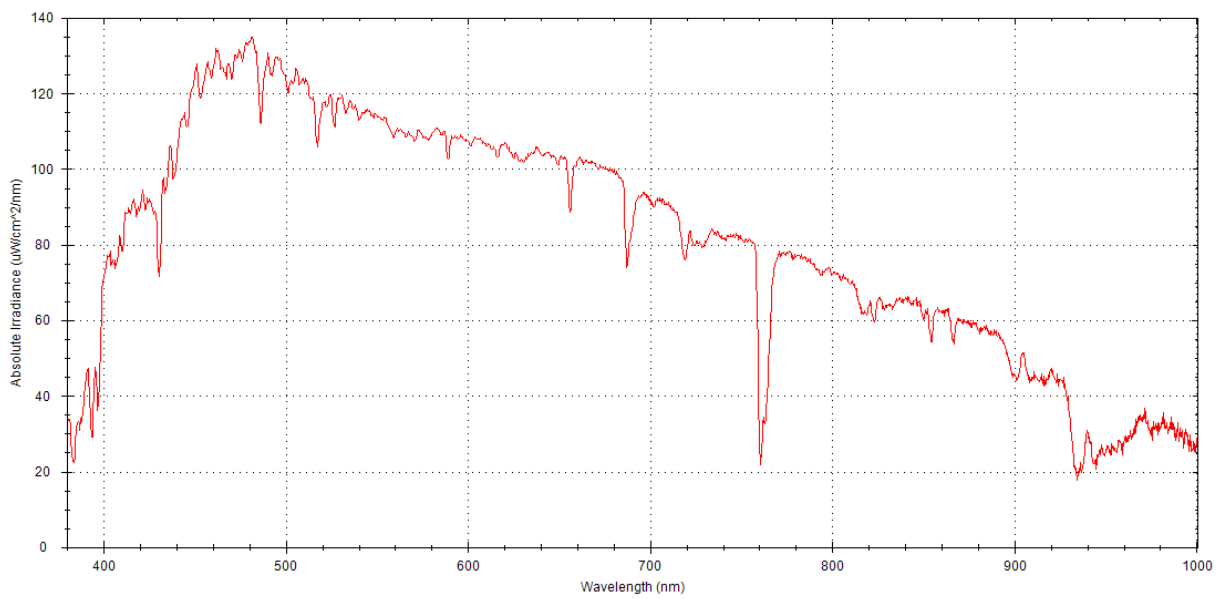
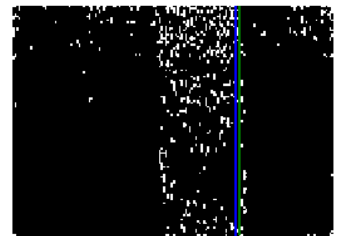
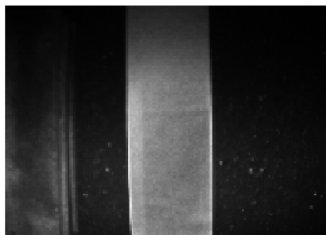
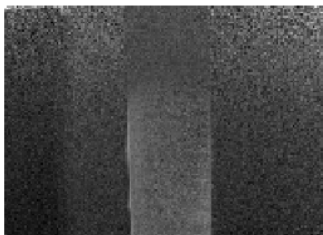


図 2.1.2-4 晴れ、昼前でのブロック検出実験結果

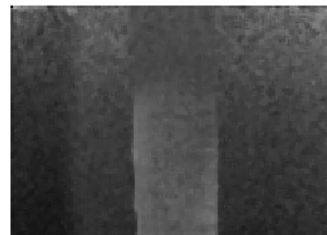
輝度差分データ



距離データ



ノイズ除去 (メディアンフィルタ)



測定日時：2016.02.23 11:15

天候：曇り時々晴れ

結果：検出できず

空間微分 (Sobelフィルタ)



エッジ検出 (Hough変換)

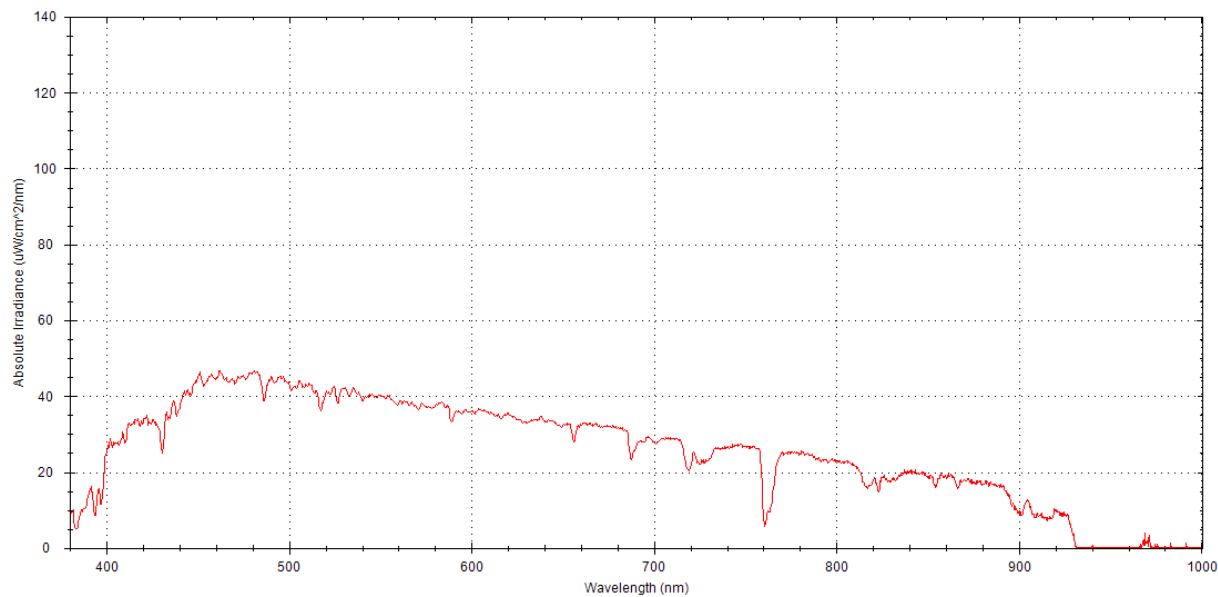
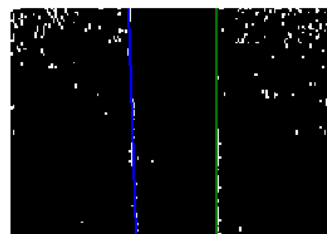
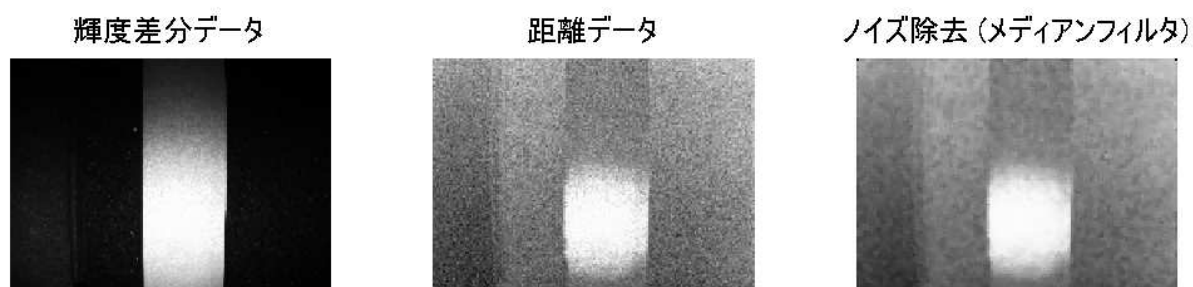


図 2.1.2-5 曇り時々晴れ、昼前でのブロック検出実験結果



測定日時：2016.03.07 17:30
 天候：雨のち晴れ
 結果：検出できず

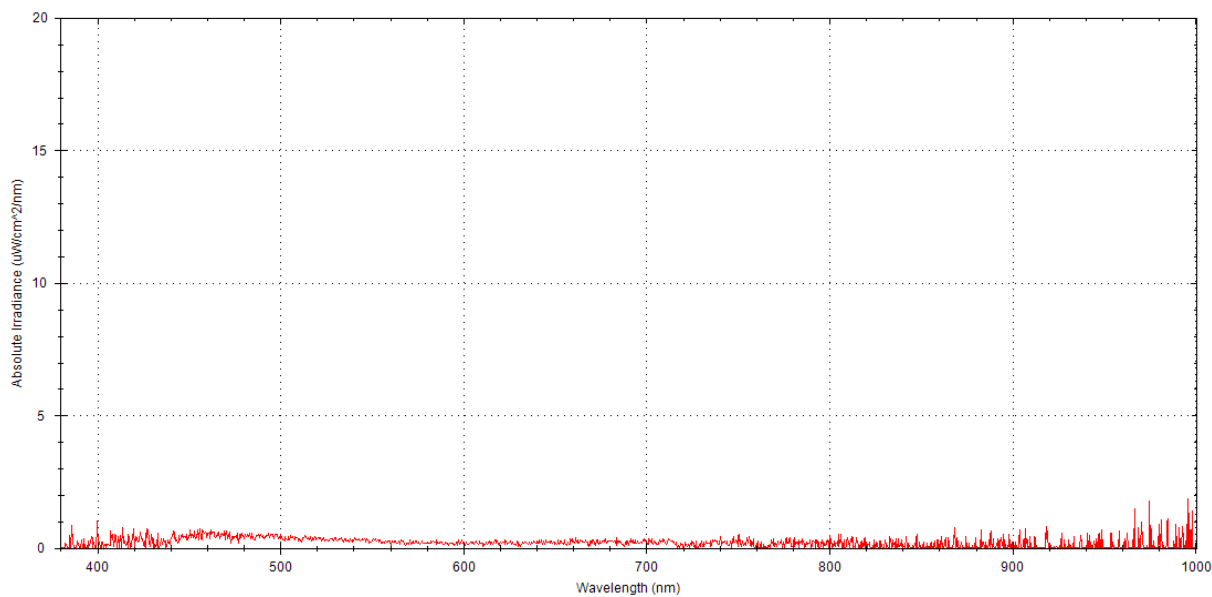
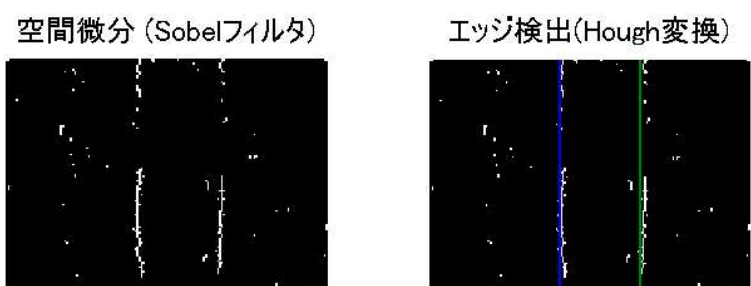


図 2.1.2-6 雨のち晴れ、夕方でのブロック検出実験結果

結果、ブロックのエッジが取れないため、データを確認した。図 2.1.2-6 の距離データを、図 2.1.2-7 に示す。

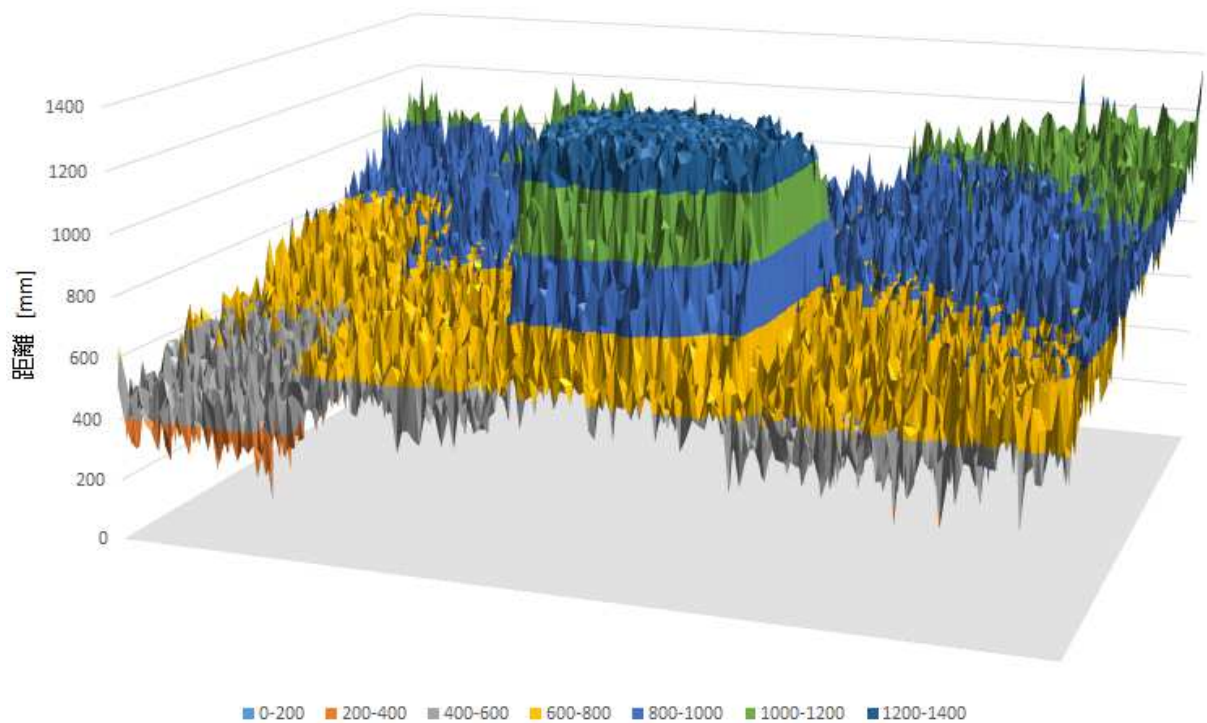


図 2.1.2-7 図 2.1.2-6 の距離データ

図 2.1.2-7 をみると、白線部分が 1,200～1,400mm、アスファルト部分が 600～800mm、ブロック部分が 400～600mm となっている。なお、照射光が当たっているのは、図の手前部分である。

アスファルトとブロックの位置が、実際よりかなり近くに検出されている。これは、差分処理によっては取り除けなかった外乱による影響の可能性がある。

今、外乱を V_n とし、

$$V_{rn} = \frac{V_{out2} + V_n}{(V_{out1} + V_n) + (V_{out2} + V_n)} \quad (\text{式 2.1.2-1})$$

とする。距離はこの値によって決まり、近いものほど小さくなる。

ブロックに対する V_{out1} と V_{out2} を仮に 25:5 とし、値を $25k$ (k は比例定数)、 $5k$ とする。白線についてはブロックより遠いため、23:7 とし、ブロックより反射率が大きいために値は 10 倍の $230k$ と $70k$ とする。このとき、外乱 V_n が V_{rn} にどのように作用するか、図 2.1.2-8 にグラフ化した。ブロックの V_{rn} を V_{rc} 、白線の V_{rn} を V_{rw} としている。

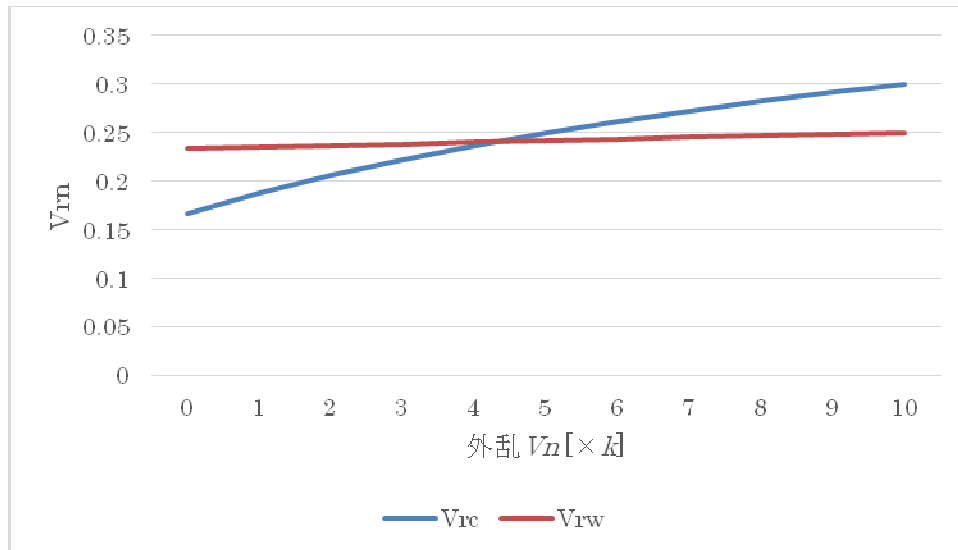


図 2.1.2-8 距離への外乱の影響

このように、信号が小さい場合、外乱の影響によっては、距離が逆転してしまうことになる。アスファルトやブロックの反射率が低いため信号が小さくなるが、白線は反射率が高いため信号が大きくなる。従って、本件もこの可能性がある。対策としては、さらに照射光量を増加させる方法が考えられる。

また、屋外にて実験中に、太陽が雲に隠れた際に、距離データが変動していた。図 2.1.2-9 に測距イメージセンサの PC 用評価ツール（浜松ホトニクス株式会社製）の画面キャプチャを示す。（縦に伸びる直線は、PC を含めた装置に起因するノイズと考えられるため、ここでは議論しない。）

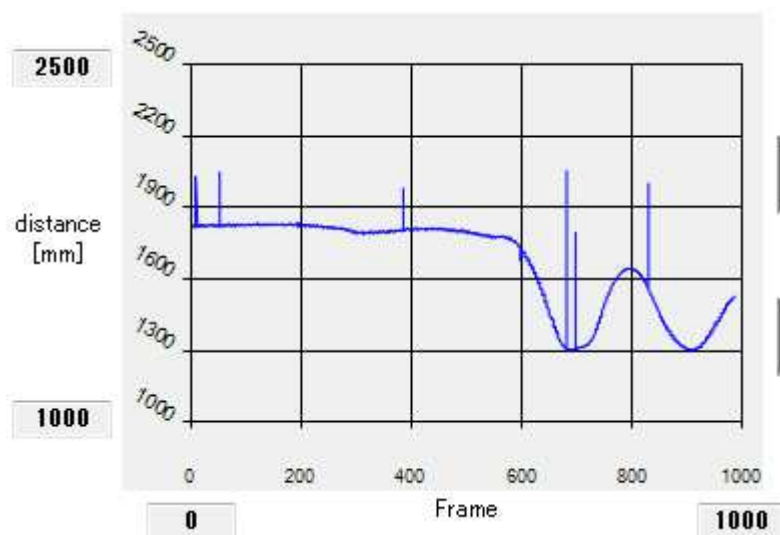


図 2.1.2-9 外乱による計測距離の変動

図 2.1.2-9 の距離は、式 2.1.1-6 において、以下のパラメータで計算されている。

$$a = 1.0 \quad (\text{式 2.1.2-2})$$

$$Dofs = 0 \quad (\text{式 2.1.2-3})$$

$$SR = 1 \quad (\text{式 2.1.2-4})$$

$$Vofs = 0 \quad (\text{式 2.1.2-5})$$

このように、外乱光の変動により距離が変動している。外乱光が除去しきれていないことが原因であると考えられる。

次に白線の位置が 1m から離れているため、再度、距離算出用パラメータを計測した。対象してコンクリートブロックと白線を用い、壁を用いた場合と同様に、太陽光による外乱が少ない室内にて、 V_r (式 2.1.1-9) を求め、距離算出用パラメータを求めた。図 2.1.2-10 に示す。

対象	LED 発光器出力	パラメータ「a」	パラメータ「Dofs」
壁	Full	1.07	1.07
	Half	0.97	1.44
ブロック	Full	1.06	0.92
	Half	0.89	1.14
白線	Full	1.02	0.95
	Half	0.97	1.46

図 2.1.2-10 距離算出用パラメータ

LED 発光器出力、対象の違いにより、結果が異なることが分かる。

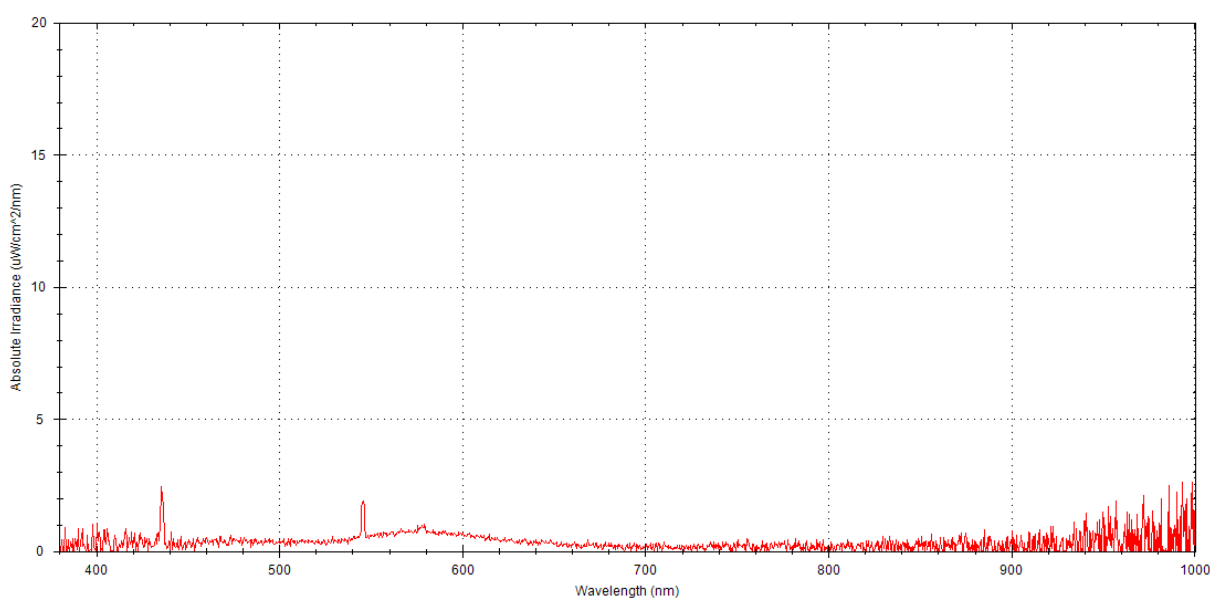


図 2.1.2-11 室内の照度 (2016.03.08 15:31)

室内での照度の一例を図 2.1.2-11 に示す。屋外に比べてかなり低くなっている。従って、このパラメータの違いが外乱光による影響とは考えにくい。また、LED 発光器出力は、同一距離で Full と Half を切り替えながら作業しており、そのたびに外乱光が変化することも考えられない。違いは、対象物の反射率と照射光量である。つまり、受光量によって変動していることになる。これについては、測距イメージセンサの受光量に対する応答性が線形ではない可能性が考えられる。

図 2.1.2-6 の距離データを、白線による距離算出用パラメータで計算しなおしても 1m にはならなかった。屋外であるために除去しきれしていない外乱光も含まれて、受光量に対する応答性からずれが生じた可能性がある。

この距離算出用パラメータ決定のための測定時に、白線では、1m 前後から、実際の距離と電圧比 V_r (式 2.1.1-9) との関係が非線形となった。図 2.1.2-12 に示す。

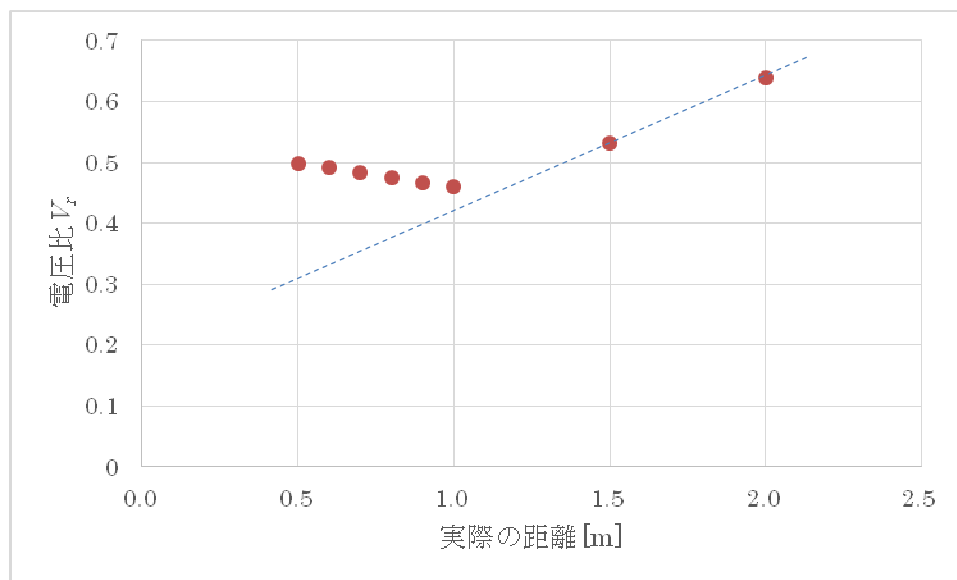


図 2.1.2-12 実際の距離と電圧比 V_r (2016.03.08)

式 2.1.1-6 と式 2.1.1-9 から、この関係は原理的に線形である。これは、測距イメージセンサでの蓄積電荷が飽和している可能性を示している。この点について、使用している測距イメージセンサでは、外部信号処理回路を用意することによって、飽和しないしきい値電圧の設定を行うことができ、飽和していない信号が得られる。今後、この対策の検討が必要である。

2.2 白線認識アルゴリズムの開発

平成 26 年度の検討では、白線のリブの検出はできなかった。そこで、本節では、測距イメージセンサの距離画像ではなく、距離情報を算出する際に用いている差分データを用いることによって外乱光の影響を取り除けることを期待し、それによるロバスト性の高い白線のエッジ抽出を行うことを目的としている。画像処理手法を用いてアルゴリズムの開発を行い、それを用いて周囲の照度が異なる環境下で白線認識できるかの実験を行い、開発したアルゴリズムの有効性の検証、差分画像を用いた外乱光除去性能の調査を行った。

アクティブ型センサはパッシブ型センサと比較し、急激な照度変化などの環境変化に対して優位性があることが考えられる。また、測距イメージセンサは、距離情報について、「光源信号と外乱光による信号」と「外乱光のみの信号」のデータの差分演算により、光源信号のみを抽出したデータを出力しており、ロバスト性を有している。この仕組みを、白線認識率の向上に活用することができるか検証する。

2.2.1 差分画像を用いた白線認識技術の開発

前項で行った 3 次元測距イメージセンサを用いたエッジ抽出技術の開発では、輝度差分データより対象との距離を求め、そのデータより構造物の検出を試みた。本項では LED を発光し、アスファルトと白線の反射強度の境界をもとに画像認識処理を行う。

(1) 測距イメージ方式の差分画像

本項では測距イメージセンサの基本性能を検証するため、購入した市販の測距イメージセンサ用評価キット 1 式を用い、検証実験を行っている。

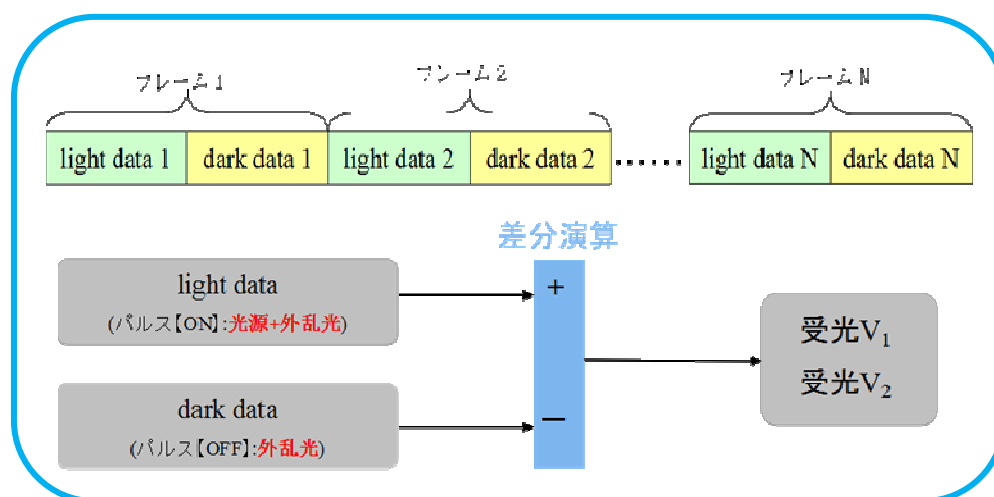


図 2.2.1-1 差分演算による外乱光の除去

図 2.2.1-1 に評価キットによる差分演算による外乱光の除去方法を示す。評価キットは 1 フレーム中に 2 枚の画像データを出力する。1 枚目は光源の投光を行った場合の信号「light data」を読み出し、2 枚目は光源の投光を行わない背景光のみの信号「dark data」を読み出

す。light data 及び dark data を差分演算することで外乱光を除去している。受光 V_1 と受光 V_2 は、それぞれ、位相 0° と位相 180° の蓄積電荷による電圧であり、この両方に対して差分演算が行われている。この V_1 、 V_2 の値を輝度値とみなしたものが差分画像であり、この 2 つの画像の平均値を用いて、白線のエッジ抽出を行う。

(2) 白線認識アルゴリズムの概要

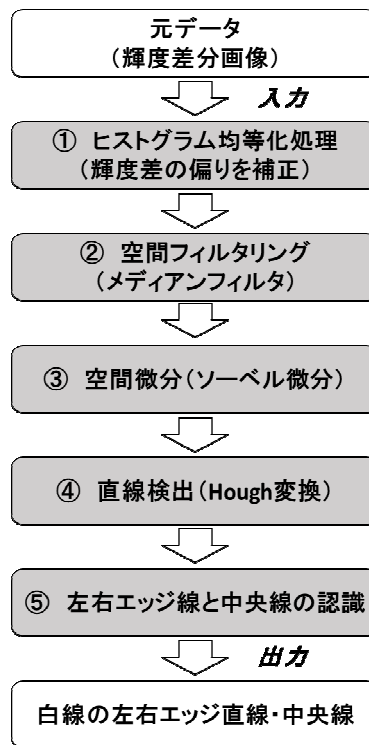


図 2.2.1-2 白線認識アルゴリズム

図 2.2.1-2 に差分画像を用いた白線認識アルゴリズムを示す。白線のエッジ検出のために、空間微分などの処理を行う。メディアンフィルタ、Sobel フィルタ処理、Hough 変換に関しては前項 2.1 で使用した処理と同じものを使用するため、下記にはヒストグラム均等化処理、左右エッジ線と中央線の認識処理のみを説明する。

① ヒストグラム均等化処理

ヒストグラム (Histogram) とは、縦軸に度数、横軸に階級を取った統計グラフの一種で、データの分布状況を視覚的に認識するため、主に統計学や画像処理などで用いられている。

画像処理においてヒストグラムは画像の輝度の分布を表すために用いられる。取得した画像データの輝度をヒストグラムでとり、これを補正することで鮮明な画像に変換することができる。

開発したアルゴリズムでは白線のエッジをより抽出しやすくするため、ヒストグラム均等化処理を行った。取得した輝度データのヒストグラムを取得し、累積度数を求める。累計度数のグラフの傾きが一定になるように変換することで、明るさの偏りの改善処理を行う。この処理をヒストグラム均等化処理 (諧調イコライゼーション処理) という。図 2.2.1-3

に処理した結果を、図 2.2.1-4 に元データと均等化処理後のヒストグラムを示す。

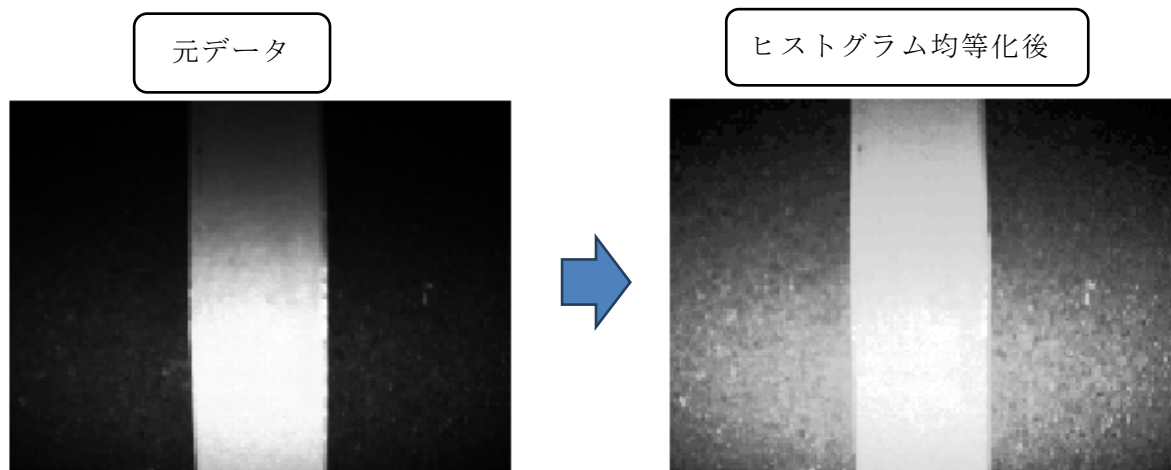


図 2.2.1-3 ヒストグラム均等化処理

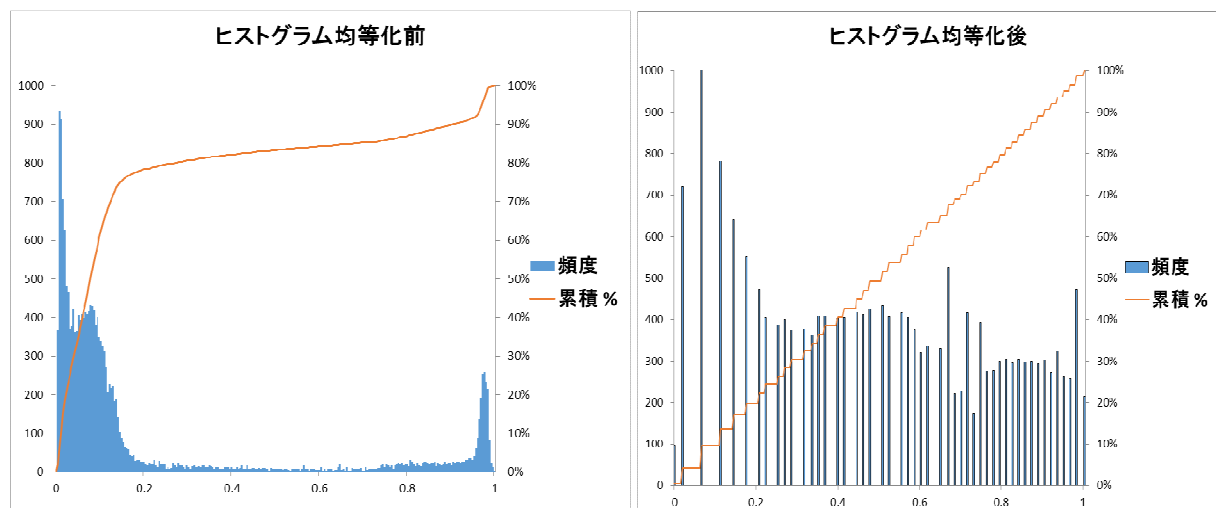


図 2.2.1-4 均等化処理前と処理後のヒストグラム

図 2.2.1-3 は処理を行う前後の輝度データを画像化したものである。図 2.2.1-4 は処理前後の輝度データをヒストグラム化したものであり、横軸は輝度であり、0~1 で正規化されている。棒グラフは画像データ中の輝度の度数、線グラフは累積度数を表している。

図 2.2.1-3 より、ヒストグラム均衡化処理後のデータでは、元データで見づらくなっていた白線上部のエッジがはっきりと見えるようになっていることが確認できる。図 2.2.1-4 より累積度数が元データに比べて一定となっていることが分かり、両端に偏っていたデータが補正され、全体に均等化されていることが確認できる。

② 空間フィルタリング

2.1.1 (1) の①を参照のこと。

③ 空間微分

2.1.1 (1) の②を参照のこと。

④ 直線検出

2.1.1 (1) の③を参照のこと。

⑤ 左右エッジ線・中央線の認識処理

検出したエッジが白線のものであるかは、式 2.2.1-1 を用いて判断する。

$$r_c = r_{sc} \times cs \quad (\text{式 2.2.1-1})$$

r_c は、検出した左右エッジ線の組み合わせの中から白線として最良な組み合わせを取得するための評価値である。値は 0.0~1.0 の範囲を取り、設定したしきい値を超えた場合に、そのエッジの組み合わせを白線の両側のエッジであると判断する。

r_{sc} は、白線候補の画面内面積と、想定される白線の画面内面積の、一致率を示す。 cs は、白線候補の両側のエッジのコサイン類似度を示す。

r_{sc} は下記の式 2.2.1-2、式 2.2.1-3、式 2.2.1-4 を用いて算出する

$$r_{sc} = 1 - \left| \frac{s_c}{s_t} - 1 \right| \quad (\text{式 2.2.1-2})$$

$$s_c = \frac{(x_u + x_l) \times h}{2} \quad (\text{式 2.2.1-3})$$

$$s_t = \frac{w_t \times h}{\cos \theta} \quad (\text{式 2.2.1-4})$$

s_c は白線候補の面積を示し、 x_u と x_l は、画面上端、及び、下端の白線部分の長さを、 h は画面の縦の長さを示す。 x_u と x_l は、白線候補の左右のエッジと画面上端、及び、下端の交点から得られる。

s_t は想定される白線の画面内面積を示し、 w_t はその長さ方向に直交する幅を、 θ は白線候補の両側エッジから等距離の直線の、画面の縦方向からの角度を示している。想定される白線の幅である w_t は、予め設定しておく。

図 2.2.1-5 に式で用いられる値の概要を示す。

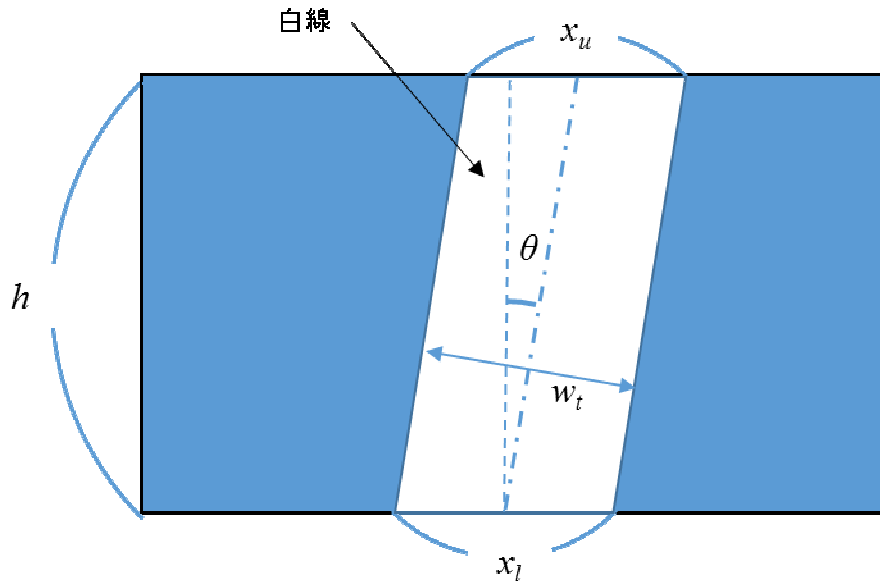


図 2.2.1-5 白線識別処理時に用いられる値の概要

コサイン類似度とは、2つのベクトルのなす角 φ の余弦 $\cos\varphi$ のことであり、ベクトルの向きの近さを類似性の指標としたものである。ベクトルの向きが一致している場合、最大値の1をとり、直交ならば0、向きが逆ならば最小値の-1をとる。2つのベクトルを u 、 v とすると、式 2.2.1-5 で求められる。

$$\cos\varphi = \frac{(u, v)}{\|u\| \times \|v\|} \quad (\text{式 2.2.1-5})$$

分子はベクトル u と v の内積、分母は各ベクトルの長さの積である。

本アルゴリズムでは、白線候補の両側の2本のエッジの、画面の上下端を始点終点とするベクトルに対して用いている。

2.2.2 照度の違いによる差分性能の調査

(1) 照度計測器

図 2.1.2-1 と同じである。

(2) 実験環境

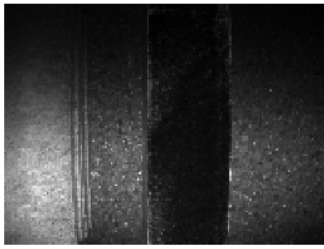
図 2.1.2-2 と同様である。

(3) 実験と考察

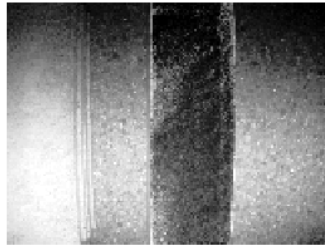
開発した白線認識技術を用いて屋外において評価実験を行った。装置と対象物の配置は、図 2.1.2-3 と同じである。

以下に、白線認識結果と照度のグラフを示す。実験結果図の「左右エッジ認識」において、緑の線が白線左側、青い線が白線右側、赤い点線が白線中央を示している。

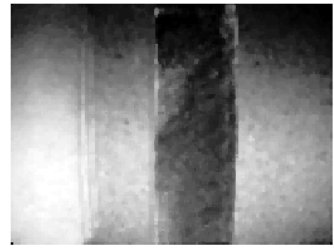
元データ



ヒストグラム均等化



ノイズ除去 (メディアンフィルタ)



測定日時：2016.02.02 08:53

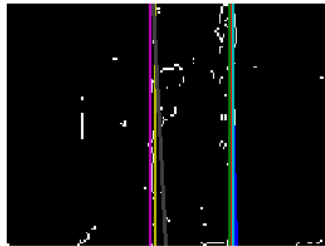
天候：晴れ

結果：認識成功

エッジ抽出 (Sobelフィルタ)



Hough変換



左右エッジ認識

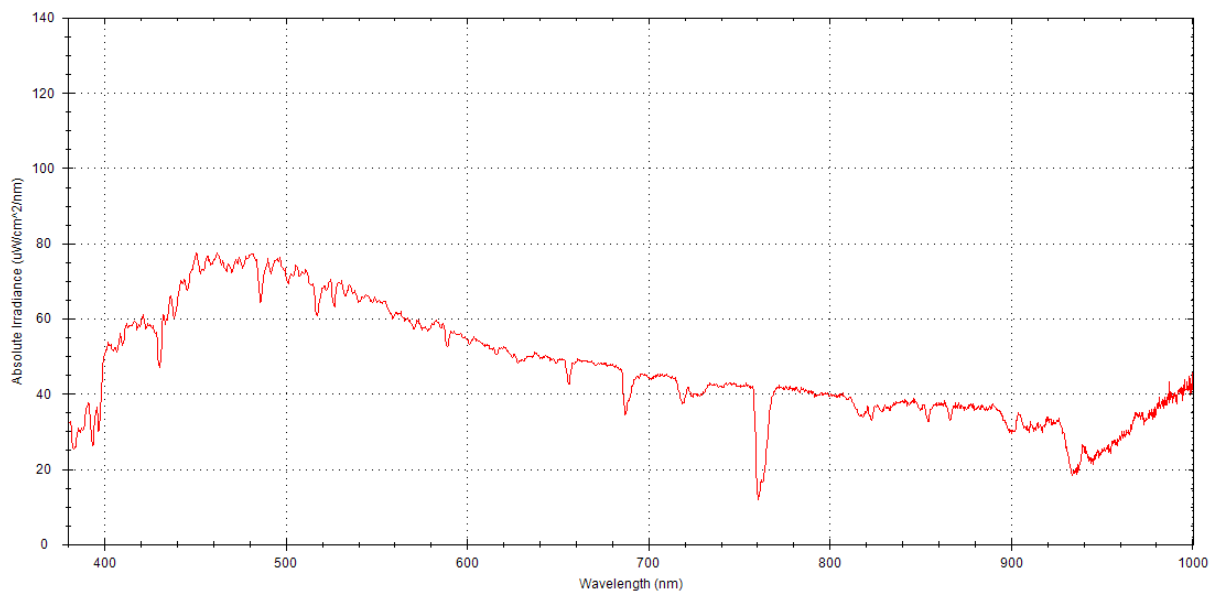
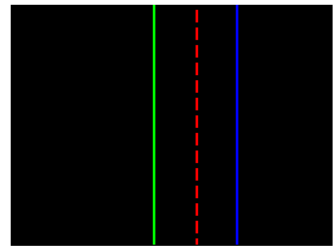
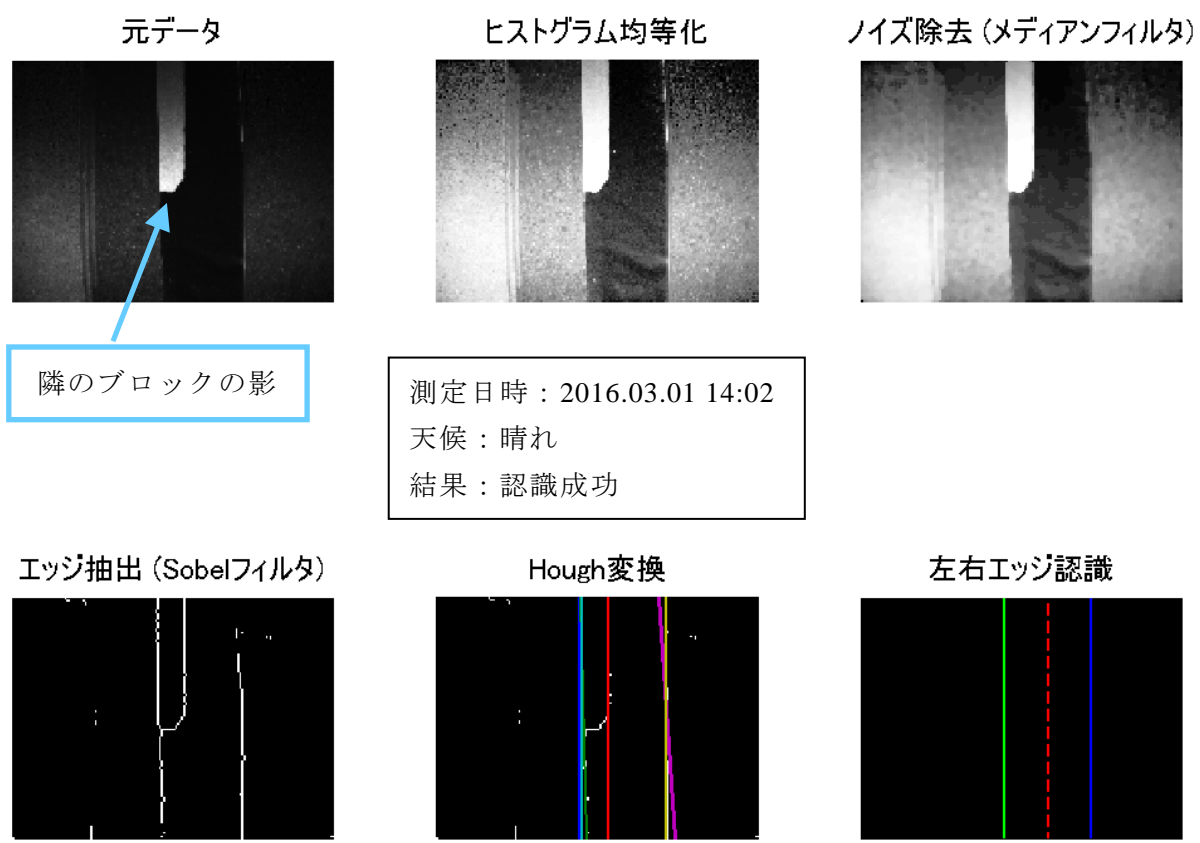


図 2.2.2-1 晴れ、朝方での白線認識結果



測定日時：2016.03.01 14:02
 天候：晴れ
 結果：認識成功

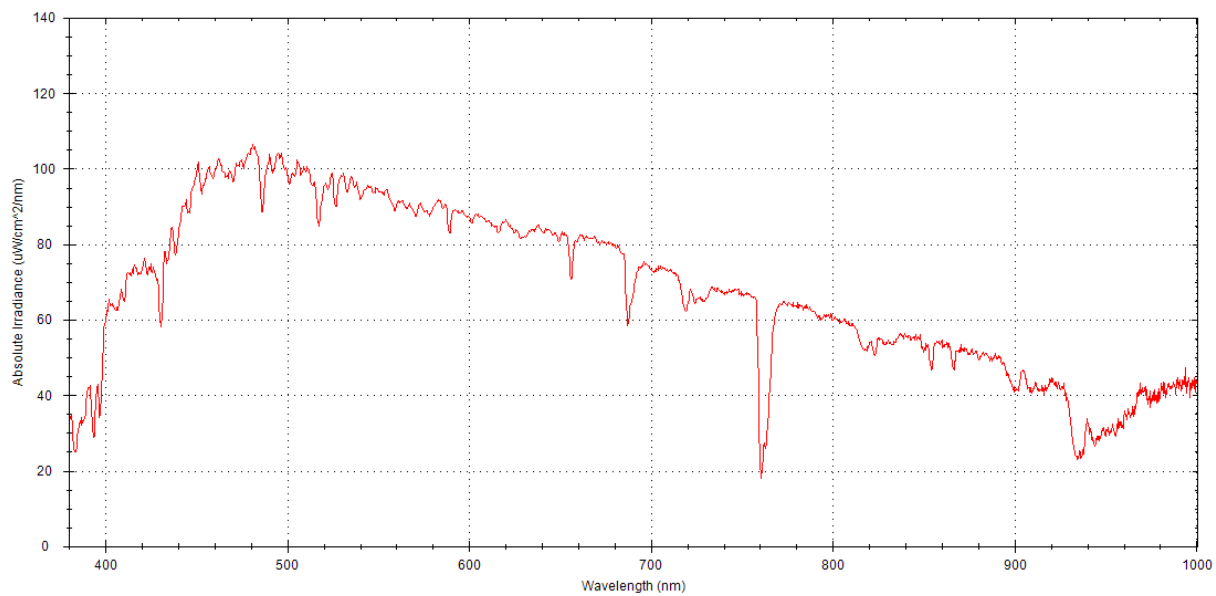
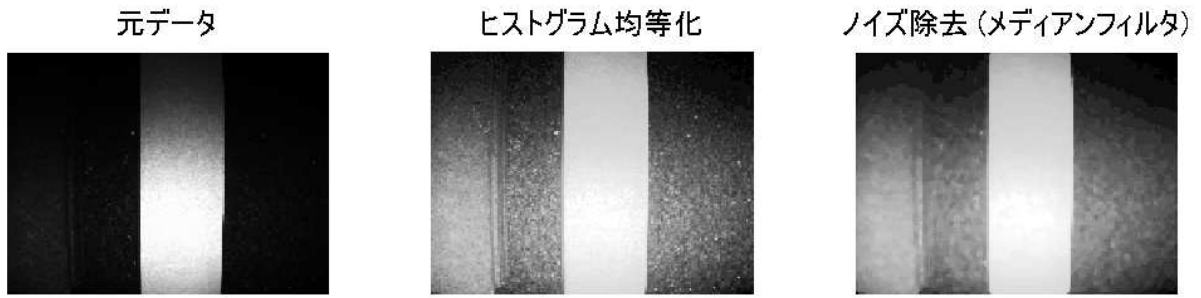


図 2.2.2-2 晴れ、昼過ぎでの白線認識結果



測定日時：2016.03.07 17:30
 天候：雨のち晴れ
 結果：認識成功

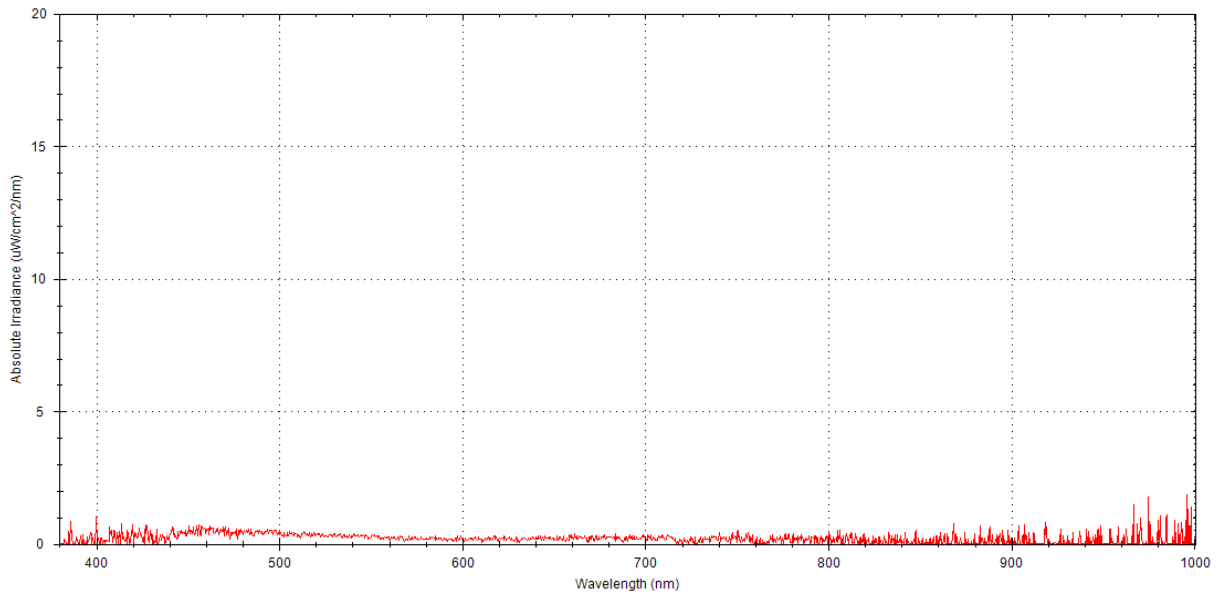
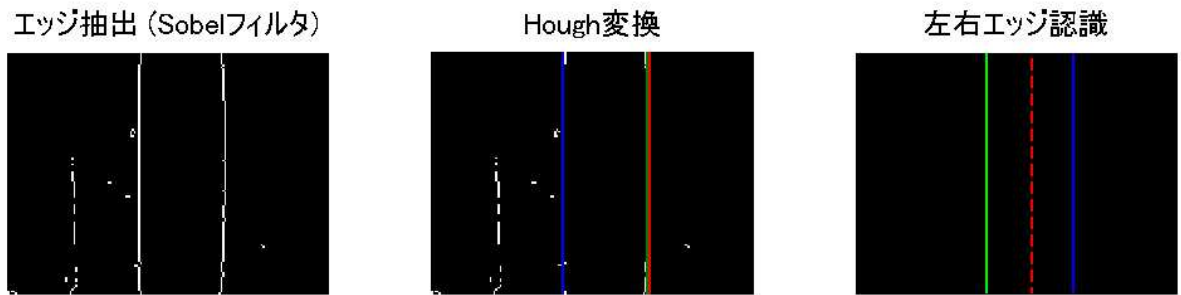


図 2.2.2-3 雨のち晴れ、夕方での白線認識結果



測定日時：2016.02.24 16:30
 天候：曇り
 結果：認識成功

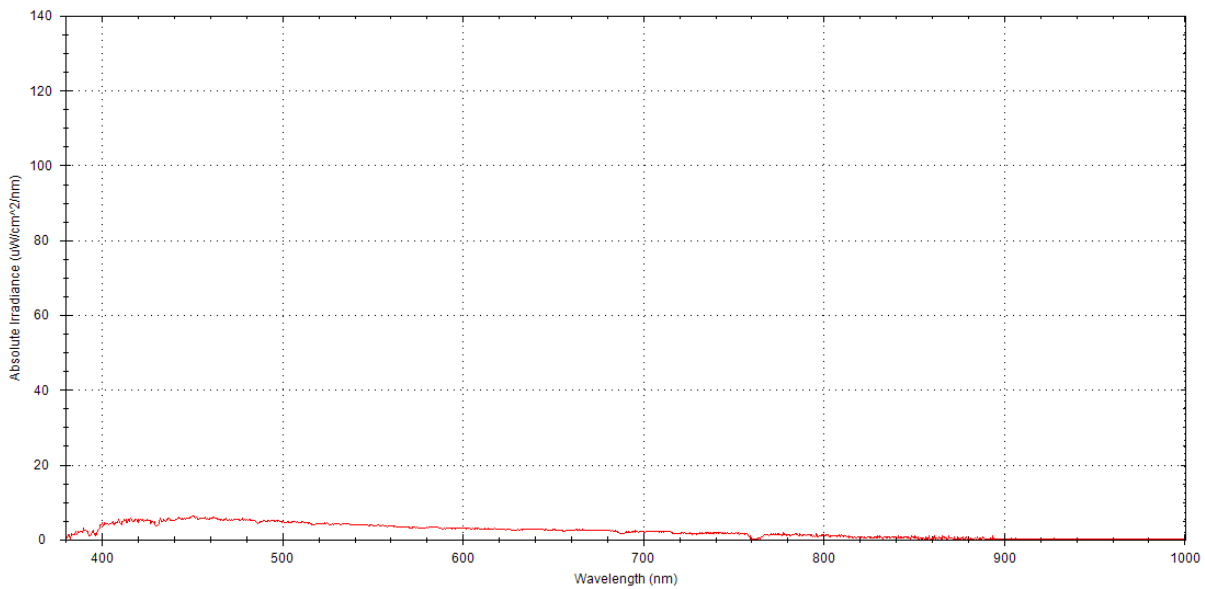
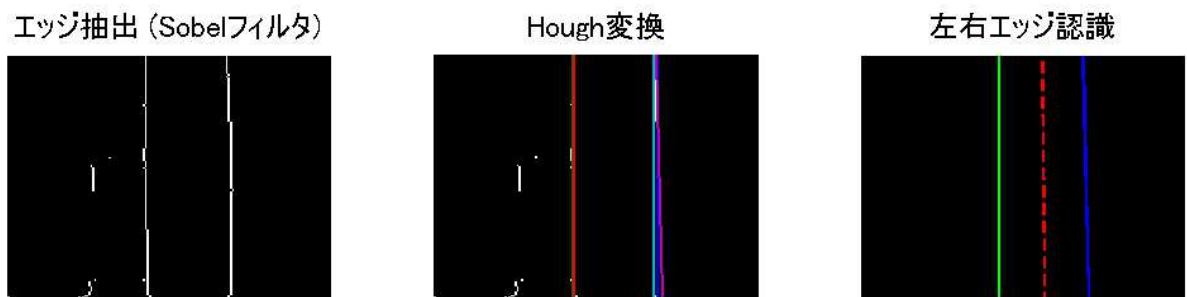
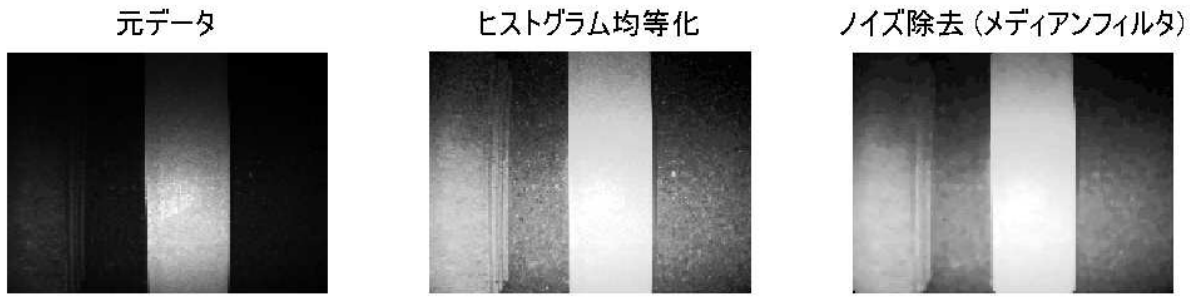


図 2.2.2-4 曇り、夕方での白線認識結果



測定日時：2016.02.29 16:30
 天候：曇り時々小雨
 結果：認識成功

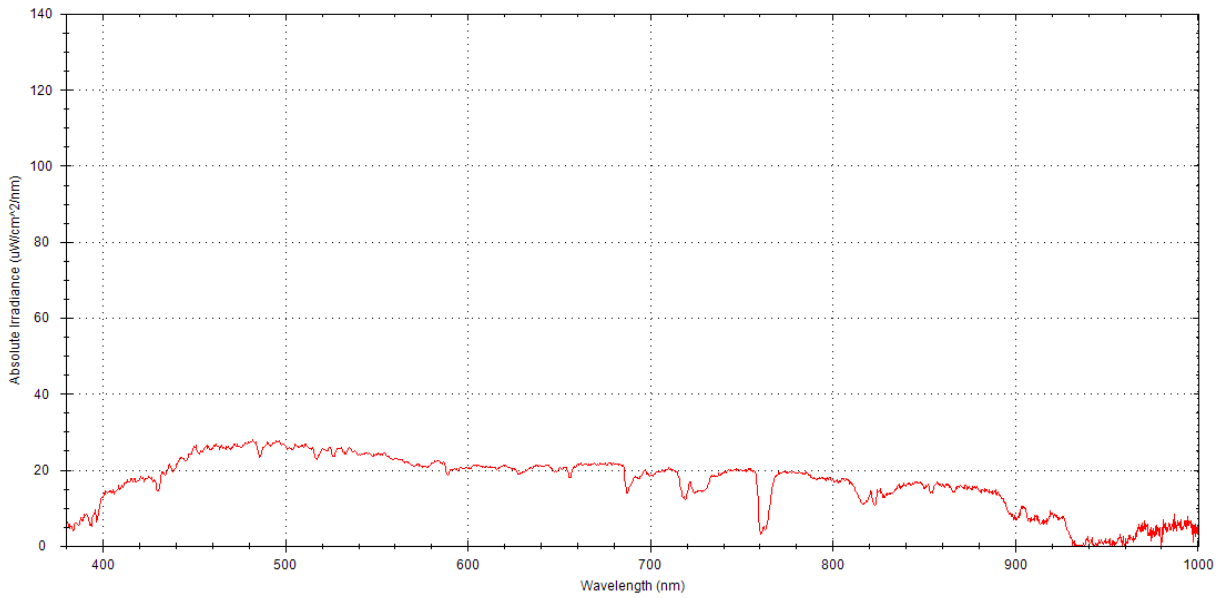
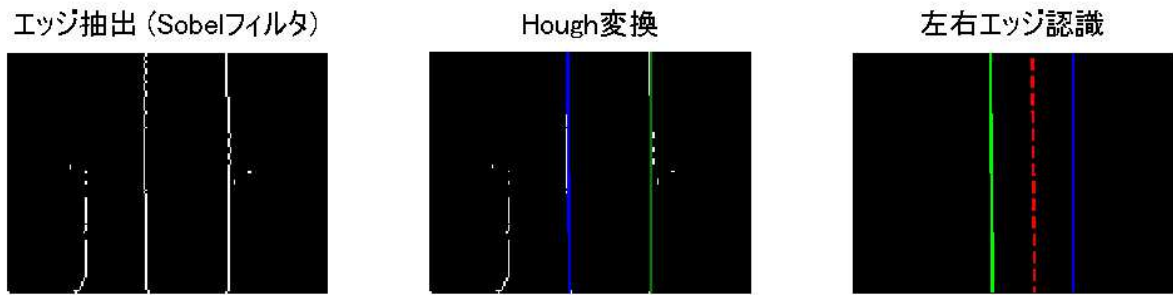
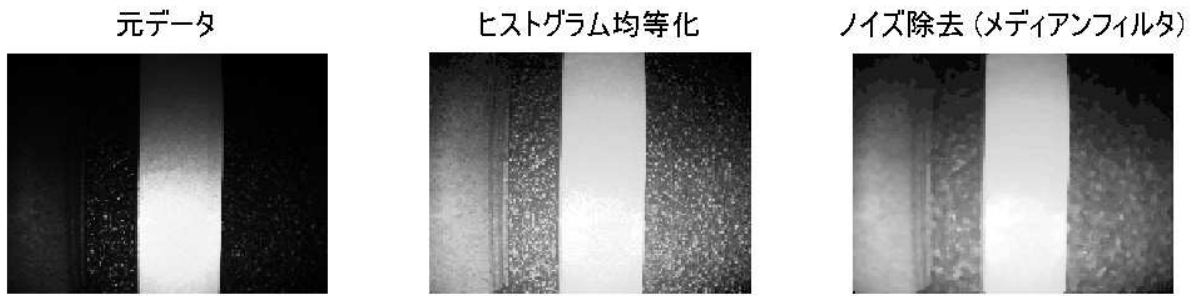


図 2.2.2-5 曇り時々小雨、夕方での白線認識結果



測定日時：2016.03.07 15:24
 天候：雨あがり
 結果：認識成功

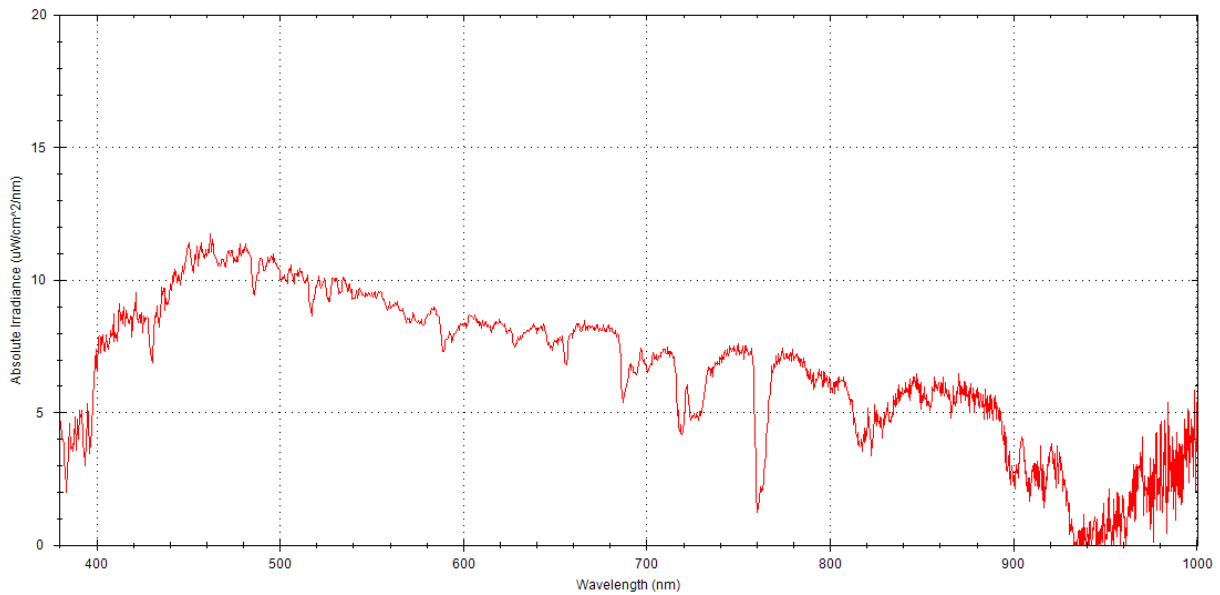
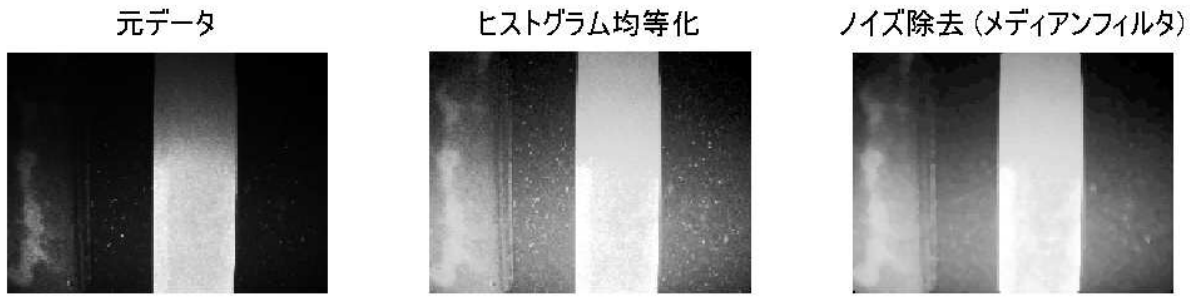


図 2.2.2-6 雨上がり、昼過ぎでの白線認識結果



測定日時：2016.03.08 08:59
 天候：霧
 結果：認識成功

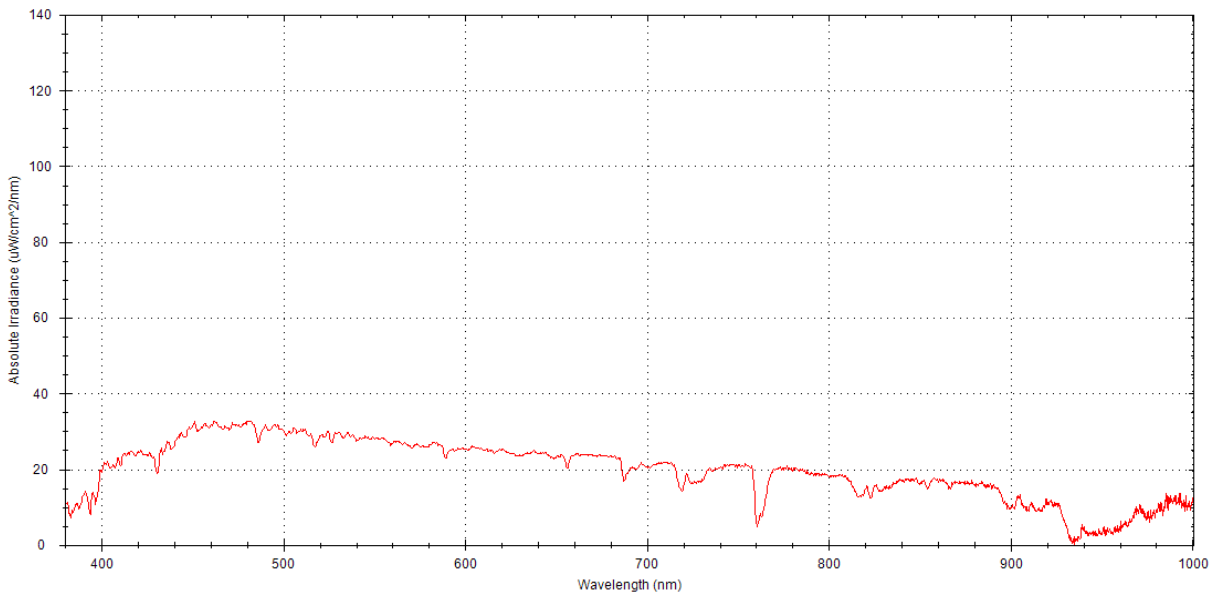
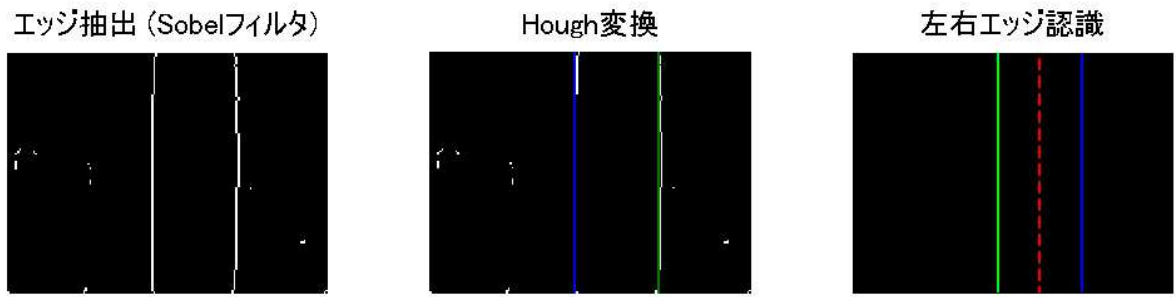


図 2.2.2-7 霧、朝方での白線認識結果

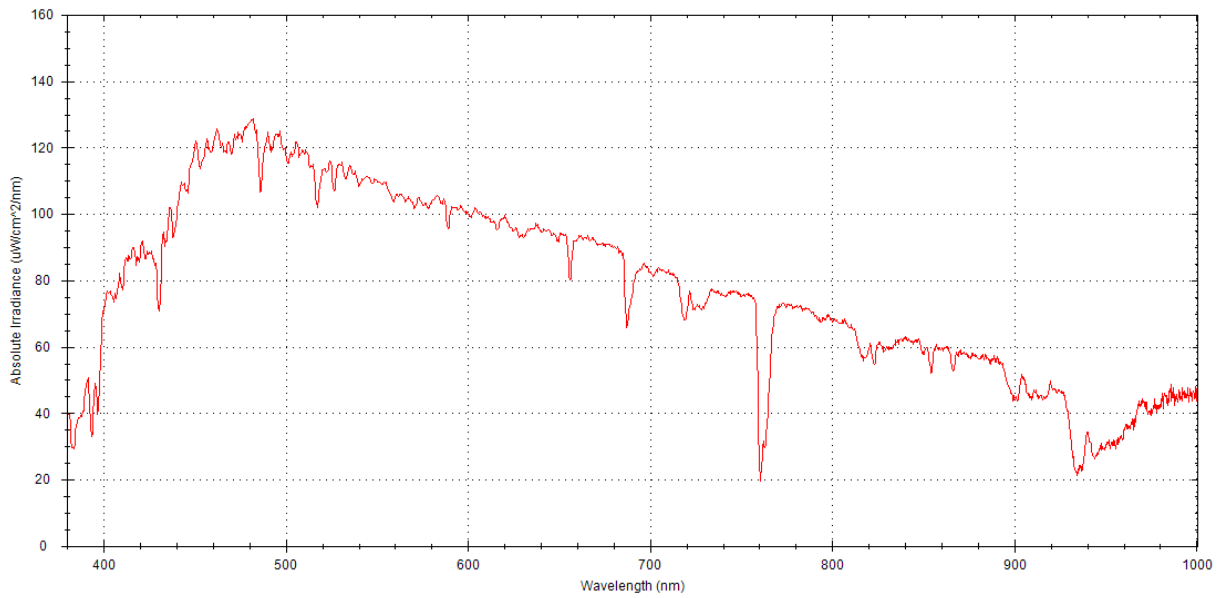
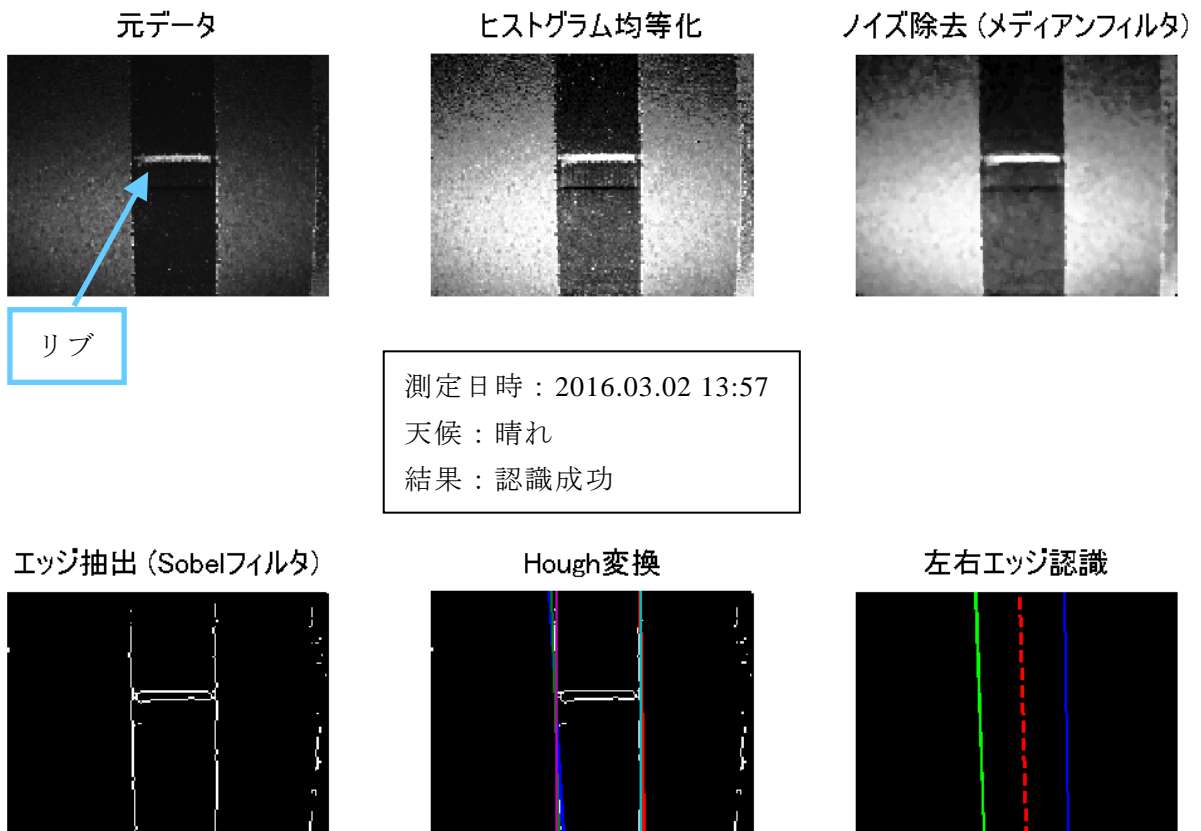


図 2.2.2-8 晴れ、昼過ぎでのリブ付き白線認識結果 (ブロック無し)

距離イメージ方式の差分画像を用いた白線識別アルゴリズムを開発し、日照条件の異なるデータを取得して、白線の位置の検出が可能であることを確認した。例えば図 2.2.2-2 ではブロックの影が白線にかかっているが、白線面積によるチェックによって白線を正しく検出している。しかし、図 2.2.2-9 のように誤認識もあった。

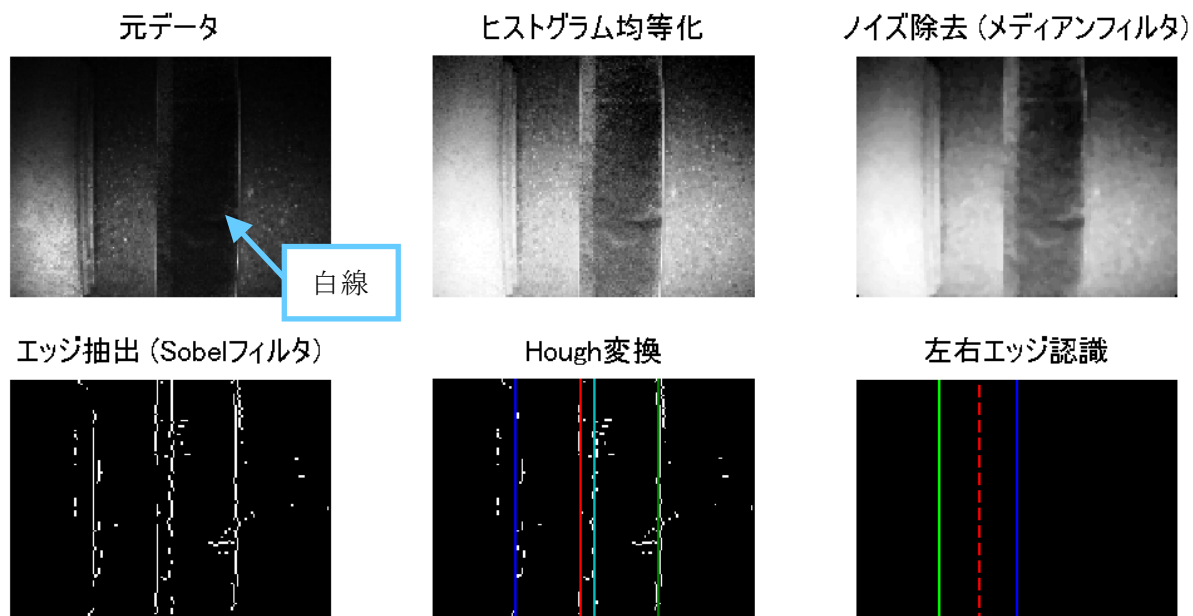


図 2.2.2-9 白線エッジの誤認識

この例では、隣に置いたブロックのエッジと白線の左側エッジの組み合わせを白線としている。これは外乱光の問題ではない。今後、複数のエッジを検出した場合の白線認識のためのアルゴリズムの改良が必要である。

今後、実験としては、照度の急変、広いダイナミックレンジを有する画像、白線と縁石以外の物体が存在する状況での実験が必要である。

2.3 まとめ

「2.1 投光同期 3次元測距イメージセンサを用いたエッジ抽出技術の開発」にて、距離情報から道路構造物のエッジを抽出する技術の開発を行った。しかし、正確な距離が得られず雲が太陽をさえぎると距離データが大きく変動することも分かった。これらは、外乱光が除去しきれていないことが原因と考えられる。

外乱光の影響を下げるために照射光量の増加対策が考えられるが、平成 26 年度に照射光量の増加対策を行った。既に、照明装置は車の側面に取り付けるには大型であり、これ以上の大型化は現実的ではない。また、光学的なバンドパスフィルタなども対策案として挙げられる。

投光同期 3次元測距イメージセンサは、間接 TOF 方式を使っており、外乱光の影響を必ず受ける。従って、抜本的な外乱除去策がないと全天候型センサとしての実現は難しいと判断する。

「2.2 白線認識アルゴリズムの開発」にて、測距イメージ方式の差分画像を用いた白線認識アルゴリズムを開発した。この技術では各種照度の環境にて、正しく白線の位置が認識された。今後の課題としては、複数のエッジを検出した場合の白線認識のためのアルゴリズムの強化、及び、照度の急変、広いダイナミックレンジを有する画像、白線と縁石以外の物体が存在する状況など、厳しい自然環境下でのポテンシャル評価が必要である。

第3章 79GHzUWBミリ波レーダの開発

本事業では、79 GHzの高分解能ミリ波レーダを用いてリブ式白線を検知することで、全天候型の白線識別システムを検討する。

ミリ波レーダは波長が長いこと電波の直進性が高く、カメラやレーザーレーダに比べて降雨や降雪等の環境変動による影響が小さい。そのため、ミリ波レーダを用いた白線検知を実現することで、降雨や降雪などの悪天候時にも自車位置推定が可能となると考えられる。

一般的に、ミリ波レーダは信号を送信し、物標に当たった反射信号を検出することで物標を認識する。しかし、白線のような平面状の物標はミリ波レーダから送信される信号が再帰せず、物標を認識することができない。そのため、これまではミリ波レーダを用いた白線検知システムは検討されていなかった。しかし、近年視認性を向上させる目的でリブ式白線と呼ばれる凹凸を有する白線が普及している。本事業ではリブ式白線上のリブを検知することで、ミリ波レーダを用いた全天候型の白線識別システムを検討する。

平成26年度は、ミリ波レーダを用いてリブ式白線の反射強度を測定し、広帯域の信号を用いることで各リブの反射を検知可能であることを明らかにした。しかし、評価に用いたリブは反射強度を高めるため、日本の幹線道路や高速道路に敷設されているリブとは形状が異なっていた。そのため、既存のリブにおける反射特性を評価する必要がある。また、各リブは非常に小さく、反射信号が小さいことが課題である。そのため、高利得化手法を検討し、リブの反射を高利得にする必要がある。さらに、平成26年度における評価では、静止状態のミリ波レーダにおける評価のみであったため、移動時の評価を実施するため車載可能な高分解能ミリ波レーダを用意する必要がある。

そこで本章では、実環境や悪天候時における既存のリブ式白線の反射特性を明らかにする。そして、ミリ波レーダを小型化する技術について言及し、車載可能な評価用レーダを用意する。さらに、リブの反射信号を高利得化する技術について述べ、ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知の実現性について言及する。

3.1 レーダ方式の検討

平成26年度は電波暗室においてリブの反射特性を評価した。その結果、方位角 $\pm 5^\circ$ 程度までであればリブの反射が再帰することが明らかとなった。しかし、評価を実施したリブの大きさは縦20 mm、横200 mm、高さ10 mmであり、日本の幹線道路、高速道路に敷設されているリブに比べるとリブ高が高く、縦の大きさが小さい。そのため、実環境において既存のリブ式白線である縦50 mm、横80 mm、高さ6 mmのリブが2個並んでいる白線の反射特性を明らかにする必要がある。

そこで本節では、リブ式白線検知に適するレーダ方式や変調方式を検討するため、実環境や悪天候時におけるリブ式白線の反射特性を評価した。

3.1.1 リブ式白線の反射特性検証

本項では、実環境において既存のリブ式白線の反射特性を明らかにするため、ミリ波レーダを用いてリブ式白線の反射強度を評価し、角度毎のレーダ反射断面積（RCS: Radar Cross-Section）を明らかにする。

(1) リブ式白線の反射特性検証における実験条件

平成27年度は、実用化につながる可能性を高めるべく、現在、既に一部の高速道路や幹線道路において採用実績のあるリブ式白線を対象に評価を実施した。評価に用いたリブ式白線を図3.1.1-1に示す。評価に用いたリブ式白線は縦50 mm、横80 mm、高さ6 mmのリブが20 mm間隔で2個並んでいる白線である。平成26年度に本事業で評価したリブは縦20 mm、横200 mm、高さ10 mmであり、今回評価したリブは縦幅が長くなり、高さが低くなっている。

図3.1.1-2にリブ式白線の反射特性検証に関する実験環境図を示す。図3.1.1-2に示すように、実験ではリブ式白線の周りを $0\sim 180^\circ$ の範囲で 5° ずつ移動させ、レーダから3.0 m先に存在するリブの反射強度を測定した。また、車両のバンパ位置にレーダを設置することを考慮して、レーダの高さを200 mm、250 mm、300 mmと変化させ、それぞれ3.0 m先のリブにビームが向くように角度を調整した。

実験条件として、レーダの変調方式はFMCW（Frequency-Modulated Continuous-Wave）方式、中心周波数は79 GHz、帯域幅は2 GHz、変調周期は5 msを用いた。実験では、10 dBsmのコーナーリフレクタの反射とリブの反射を比較することでリブのRCSを算出した。

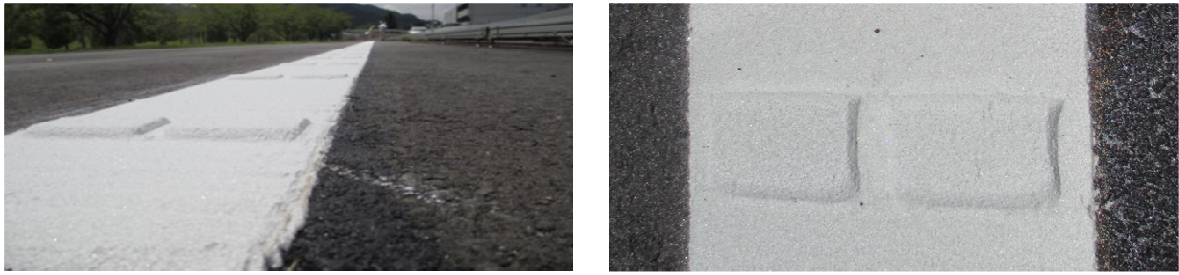


図 3.1.1-1 評価したリブ式白線

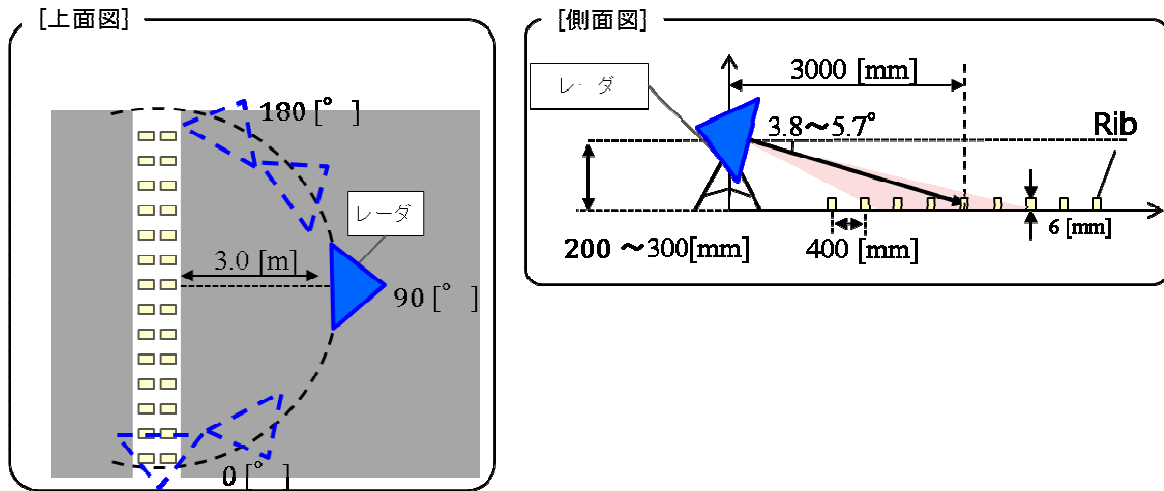


図 3.1.1-2 既存リブ式白線の反射特性検証に関する実験環境

(2) リブ式白線の反射特性検証における実験結果

図 3.1.1-3 にリブ式白線の反射特性を示す。図 3.1.1-3 の横軸は角度、縦軸は RCS を示す。また、図中の青色の実線はレーダの高さが 200 mm のときのリブの RCS、赤色の破線はレーダの高さが 250 mm のときのリブの RCS、リブの RCS はレーダの高さが 300 mm のときの反射断面積を示す。

図 3.1.1-3 より、RCS のパターンが非対称であることが確認できる。これは図 3.1.1-4 に示すように、リブ式白線の施工機の施工方向によりリブの形状が異なるためである。一般的な白線の施工は、施工機からアスファルトに白線材料を均一に薄く敷くことで白線を敷設している。これに対して、リブ式白線は塗布する白線材料の厚さを変更することで凹凸を作り出している。白線の厚みは、施工機に搭載されたシャッタの開閉幅を変更することで変更している。白線材料は形を維持するために粘度が高く、シャッタの開閉幅を広げても緩やかに白線材料が流れ出るため、緩やかに厚みが増える。そのため、薄い白線から厚い白線（リブ）を生成する過程では白線の厚みが緩やかに変化するため、リブの角度が緩やかになる。一方、シャッタ幅を狭くする場合には、流れ出る白線材料をシャッタにより塞ぎ止めるため、急激に厚みを変更することが可能となる。そのため、厚い白線から薄い白線を生成する過程では、リブの角度が急峻になる。以上の結果から、施工機の施工方向によってリブの端面の角度が変わり、リブの反射断面積が変化したと考えられる。

また、図 3.1.1-3 では、 $0\sim 40^\circ$ 程度までは反射断面積が高い事が分かる。平成 26 年度の実験結果では、信号の入射角度が $\pm 5^\circ$ を超えると急激に反射信号が減衰していた。今回評価したリブ（実際に道路に敷設されるリブ式白線と同じ仕様）で、検知可能な入射角度が変化した理由として、リブの縦の大きさが起因すると考えられる。平成 26 年度に評価したリブの縦サイズは 20 mm であるのに対し、今回評価したリブの縦サイズは 50 mm であり、また、2 個リブなので側面の数が倍である。そのため、今回評価したリブは角度が変化した場合でも照射面積が急激に低下しないため、角度が変化した場合にも強い反射が返ったと考えられる。さらに、図 3.1.1-5 に示すように既存リブの側面はわずかに湾曲している。これは白線材料が固まるまでに広がってしまうためにリブの側面が湾曲すると考えられる。図 3.1.1-5 に示すようにリブの側面の湾曲部分で信号が反射したため、斜め方向からの信号が強く返ったと考えられる。

また、今回評価したリブの $0\sim 40^\circ$ までの範囲の反射断面積は $-25\sim -20$ dBsm 程度であった。これに対して、平成 26 年度に評価したリブは $0\sim 5^\circ$ 方向までは反射断面積が -15 dBsm 程度であった。これはリブ高の大きさが起因しており、今回評価したリブは高さが約半分程度であったため、照射面積が小さくなったことにより RCS が減少したと考えられる。

以上の結果より、日本の幹線道路、高速道路で敷設されているリブを検知するためには、照射角度 $\pm 40^\circ$ の範囲において、 $-25\sim -20$ dBsm のターゲットを検知できる必要があると考えられる。

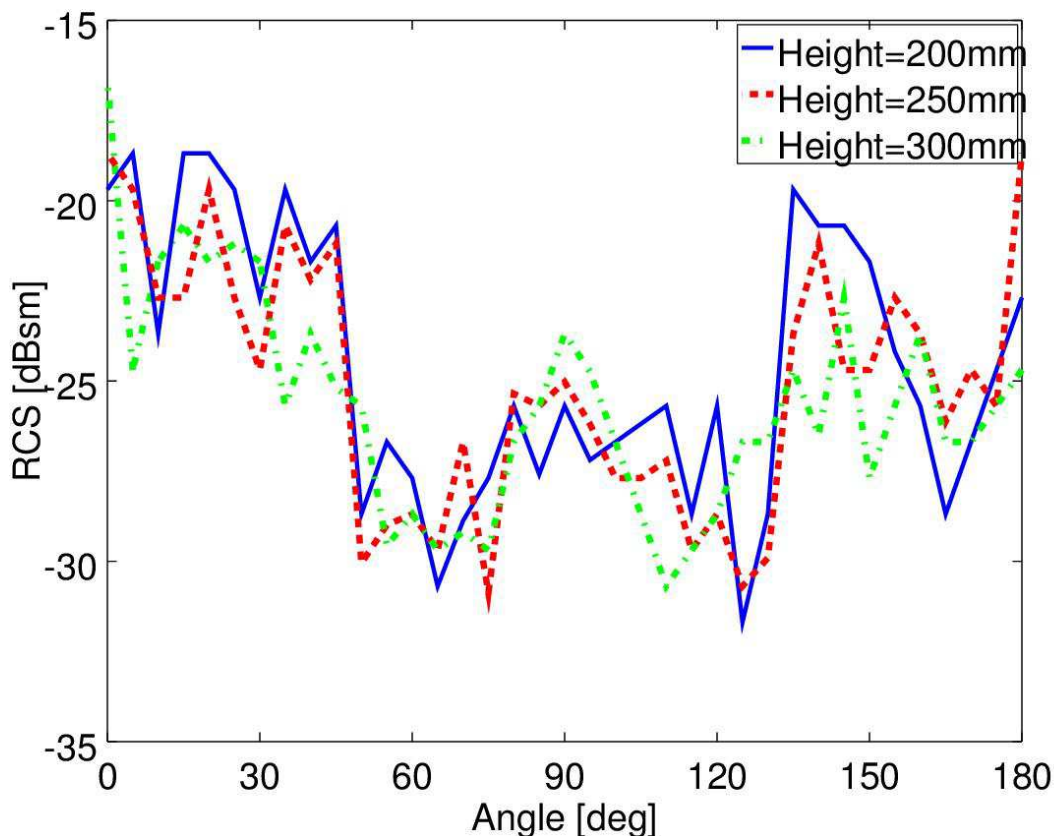


図 3.1.1-3 既存リブ式白線の RCS パターン

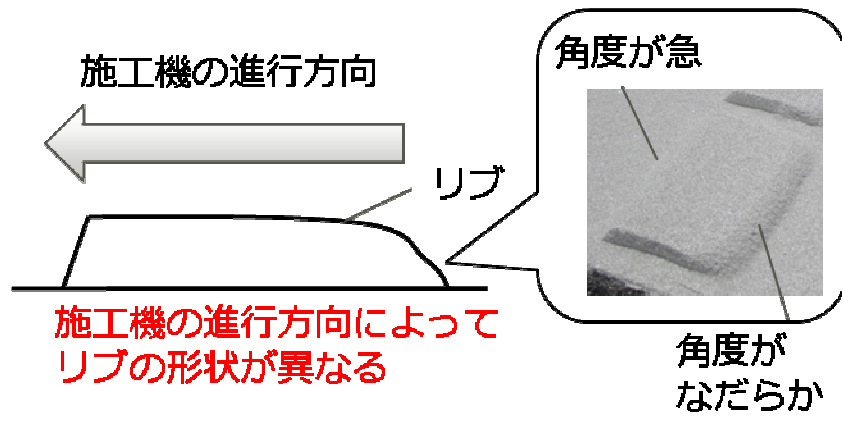


図3.1.1-4 施工機の進行方向によるリブの形状

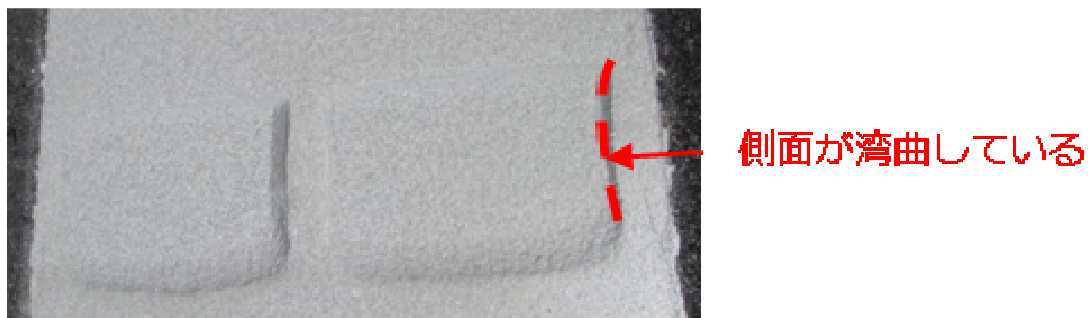


図3.1.1-5 リブの側面

3.1.2 積雪によるリブ式白線検知の影響検証

ミリ波レーダは波長が長いので直進性が高く、カメラやレーザーレーダに比べて降雨や降雪による影響が小さい。ただし、降雪に比べると積雪は雪が密集しているため、ミリ波レーダを用いた場合にも減衰が大きいと考えられる。

そこで本項では、積雪状態におけるリブ式白線の反射強度を明らかにする。まず、シミュレーションにより積雪によるミリ波帯電波の減衰量を明らかにする。そして、実環境において、積雪によるミリ波帯電波の減衰量を明らかにする。最後に、実環境の積雪状態におけるリブ式白線の反射強度を評価し、積雪状態における白線検知の実現性を言及する。

(1) シミュレーションにおける積雪の減衰量

本項では、積雪によるミリ波電波帯の減衰量を明らかにするため、シミュレーションを用いて積雪による減衰量を明らかにする。シミュレーションでは、雪の密度から損失角と透磁率を求め^[1]、信号の入射角度と雪の深さ、信号の周波数から減衰量を算出^[2]する。積雪のシミュレーションでは、雪の深さと減衰量の関係、及び信号の入射角度と減衰量の関係を明らかにする。

① 積雪評価のシミュレーション条件

積雪による減衰量を求めるシミュレーション条件として、信号の周波数は 79 GHz、積雪の密度は 0.12 g/cm^3 、 0.47 g/cm^3 、 0.72 g/cm^3 の 3 種類を設定した。密度が 0.12 g/cm^3 の雪は表層付近の新雪を想定し、密度が 0.47 g/cm^3 の雪は 1.5 m 程度の深さの雪を想定している。また、密度が 0.72 g/cm^3 の雪は圧雪された雪を想定している。

図 3.1.2-1 に積雪による減衰量を求めるシミュレーション環境を示す。シミュレーションにおいて雪の深さを変更する場合には、信号の入射角度を 0° に固定する。また、信号の入射角度を変更する場合には、雪の深さを 2.5 cm に固定して評価を実施した。

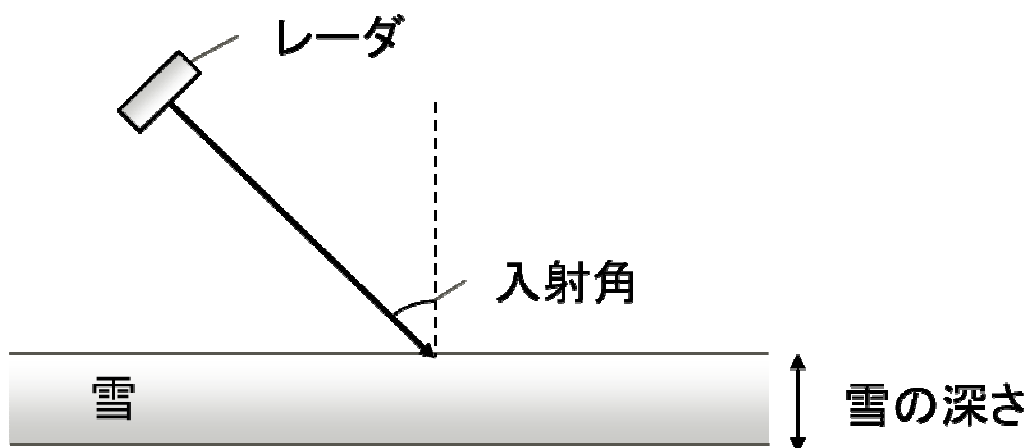


図3.1.2-1 シミュレーション環境図

② 積雪評価のシミュレーション結果

図 3.1.2-2 に雪の深さと減衰量のシミュレーション結果を示す。図 3.1.2-2 より、雪の深さが深くなるほど減衰が大きくなっている（比例的に増加する）ことが分かる。また、密度の増加に伴い減衰の傾きが増加していることが分かる。

図 3.1.2-3 に入射角度と減衰量のシミュレーション結果を示す。図 3.1.2-3 より、入射角度が 80° 付近を越えると急激に減衰が大きくなることが分かる。これは入射角度が大きくなることで信号が通過する雪中伝播距離が増えることで減衰量が増加しているためと考えられる。また、密度が大きくなるにつれて、減衰量が上がるとともに、 80° 以降での減衰の上昇が緩やかになる、つまり、減衰量が急増始める入射角が低くなることが明らかとなった。

レーダを車両のバンパ付近に搭載して前方を検知した場合、入射角は $80\sim 90^\circ$ の間となる。そのため、車載レーダにおいて積雪の影響は大きく、積雪時でもリブを検知するためには更なる高利得化手法が必要になると考えられる。

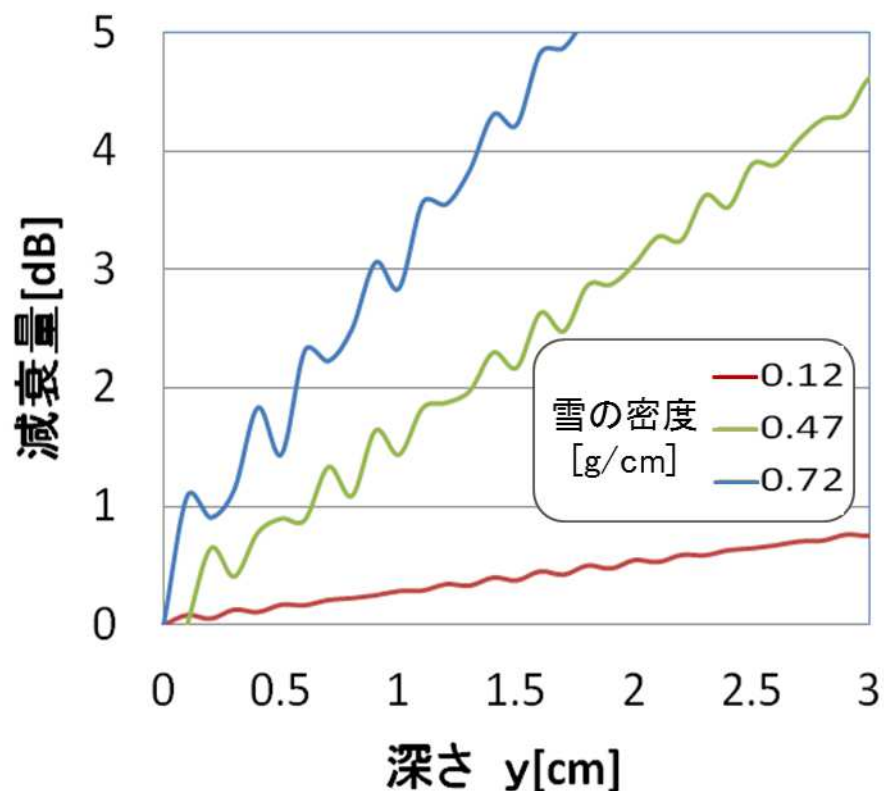


図3.1.2-2 雪の深さと減衰量の関係

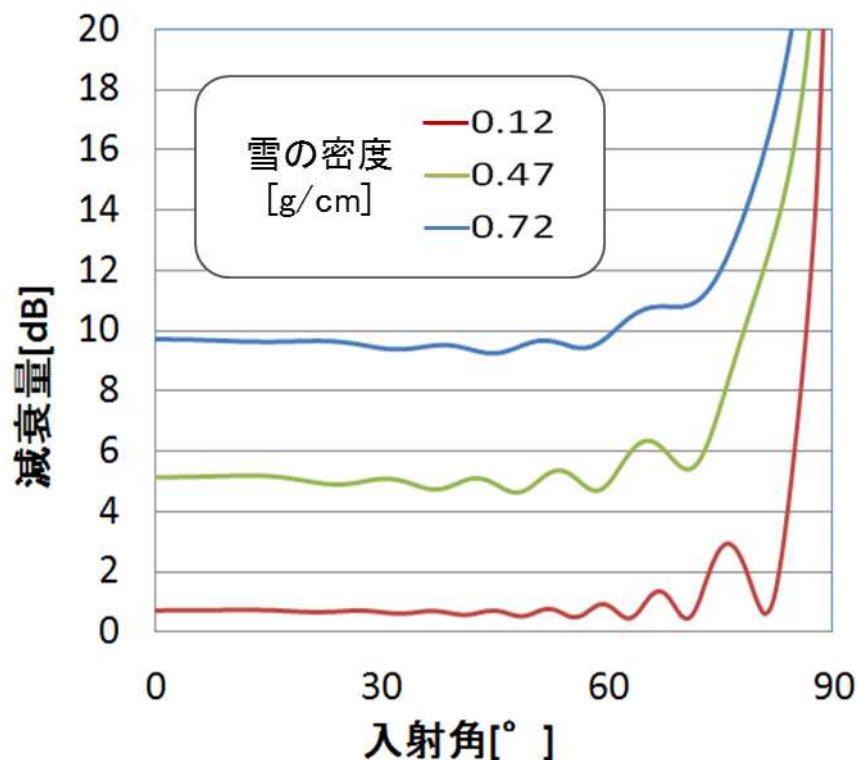


図3.1.2-3 入射角度と減衰量の関係

(2) 実環境における積雪の減衰量

実環境における積雪によるミリ波電波帯の減衰量を明らかにするため、積雪状態における金属リブの反射強度を評価する。

① 評価条件

図 3.1.2-4 に実環境における積雪評価の評価環境図を示す。図 3.1.2-4 に示すように、リブ式白線上にミリ波レーダを設置し、レーダの高さは 500 mm とした。これは、車両のバンパ付近にレーダを搭載することを想定したためである。また、俯角は 9.6 ° とし、これは 3000 mm 先の地面にビームが向く角度となるように設定した。

実験条件として、変調方式は FMCW 方式、中心周波数は 79 GHz、帯域幅は 2 GHz、変調周期は 5 ms であり、金属リブ上の積雪量を変化させて実験を行った。また、雪の密度は 0.08 g/cm³ であった。

図 3.1.2-5 に積雪がない場合の実験環境図を、図 3.1.2-6 に積雪がある場合の実験環境図を示す。各図に示すように、路面クラッタの影響を抑えるために、金属リブを電波吸収体上に配置している。

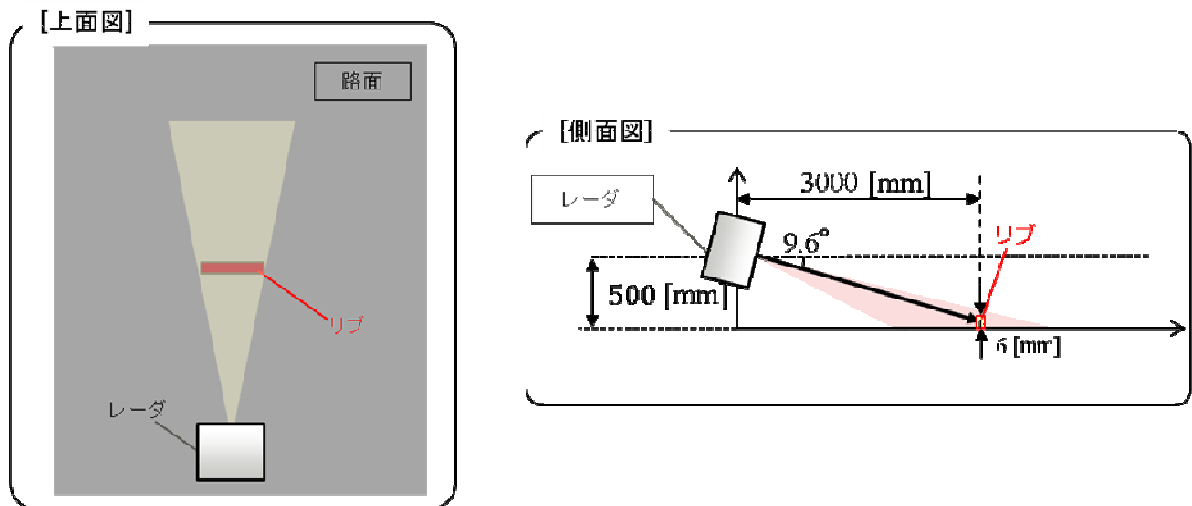


図 3.1.2-4 実環境における積雪評価の評価環境



図 3.1.2-5 積雪がない場合の実験環境



図 3.1.2-6 積雪がある場合の実験環境

② 評価結果

図 3.1.2-7 に実環境における積雪量と減衰量の関係を示す。図 3.1.2-7 に示すように、シミュレーションと同様に積雪量が増加することで減衰量が増加していることが分かる。また、積雪量が 7 cm 以降では減衰量が収束しているように思われるが、減衰量 10 dB を超えたあたりで金属リブの反射を検知できなかったためと考えられる。

シミュレーションでは、雪の密度が 0.12 g/cm^3 の場合に、雪の深さが 30 mm で減衰が約 0.8 dB であった。本実験条件で積雪量が 3 cm の場合では、積雪部分を通過する距離は 182 mm となるため、減衰量は約 4.8 dB となり、実験結果の 7.3 dB の減衰量はシミュレーションと比べると減衰が大きい。一方、積雪量が 7 cm の場合には、積雪部分を通過する距離は 425 mm となるため、減衰量は約 10.7 dB となり、実験結果の減衰量 10.5 dB と同等であった。

実環境で積雪の減衰量を測定した結果、シミュレーションと同様に積雪量が増加することで減衰量が増加することが明らかとなった。そのため、積雪時におけるリブ式白線検知では、積雪量の増加に伴い利得を向上させる必要があると考えられる。

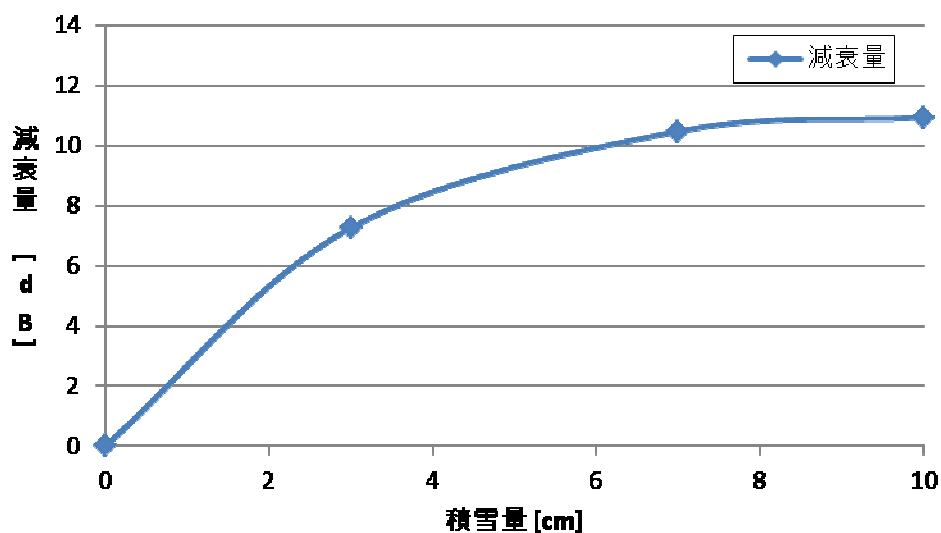


図 3.1.2-7 実環境における積雪量と減衰量の関係

(3) リブ式白線における積雪の影響検証

実際のリブ式白線における積雪の減衰量を明らかにするため、積雪状態におけるリブ式白線の反射強度を評価した。評価では、実際の白線検知を想定した環境で実施した。

① リブ式白線における積雪評価の実験条件

図 3.1.2-8 に積雪評価の実験環境図を示す。図 3.1.2-8 に示すように、リブ式白線上にミリ波レーダを設置し、レーダの高さは 300 mm とした。これは、車両のバンパ付近にレーダを搭載することを想定したためである。また、俯角は 5.7° とし、これは 3000 mm 先の地面にビームが向く角度となるように設定した。

実験条件として、変調方式は FMCW 方式、中心周波数は 79 GHz、帯域幅は 2 GHz、変調周期は 5 ms であり、測定時の積雪量は 7.5 cm であった。また、表層付近や地表付近の積雪を採取し、積雪の密度は $0.10\sim 0.25\text{ g/cm}^3$ であった。また、実験では積分回数を 20 回とし、50 回測定した結果を平均した。

実験では、積雪がある場合とない場合の反射信号強度を測定した。図 3.1.2-9 に積雪がある場合の実験環境図を、図 3.1.2-10 に積雪がない場合の実験環境図を示す。

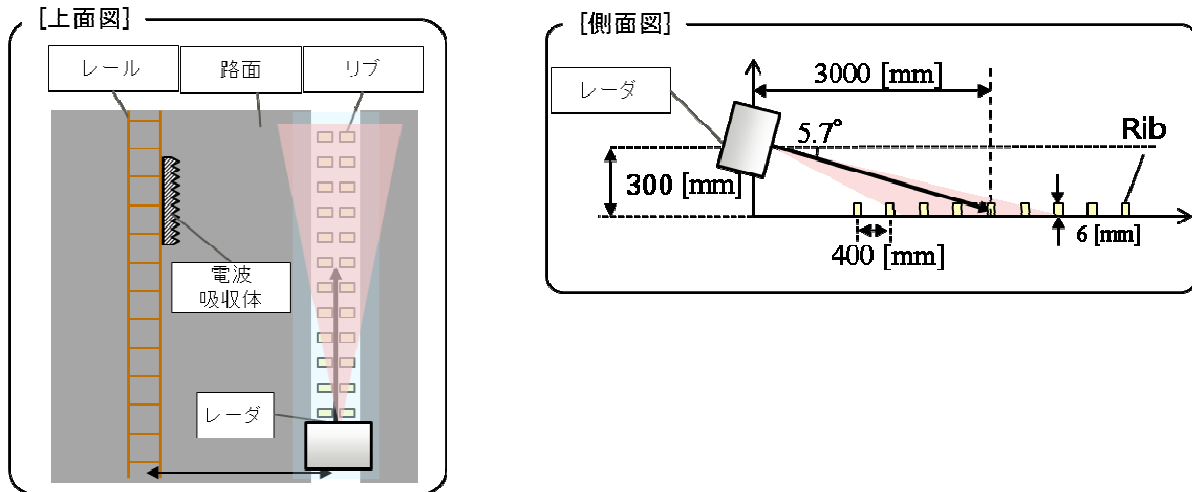


図 3.1.2-8 実機による積雪評価の実験環境



図 3.1.2-9 積雪がある場合の実験環境



図 3.1.2-10 積雪がない場合の実験環境

② リブ式白線における積雪評価の実験結果

図 3.1.2-11 に 2.7 m 付近に存在するリブの反射強度を、図 3.1.2-12 に 3.1 m 付近に存在するリブの反射強度を示す。図 3.1.2-11、図 3.1.2-12 に示すように、2.7 m 付近のリブでは積雪による減衰がほとんどないが、3.1 m 付近のリブでは積雪により 10 dB 程度の減衰が生じている。3.1 m 付近のリブに対してシミュレーションにおける減衰量を考えると、雪の密度が 0.12 g/cm^3 における積雪の減衰量は約 19.6 dB であり、積分回数 20 回により利得が約 6.5 dB 向上するため、結果として減衰量は約 13.1 dB になると考えられる。一方、2.7 m 付近のリブに対してシミュレーションにおける減衰量を考えると、雪の密度が 0.12 g/cm^3 における積雪の減衰量は約 17.1 dB であり、積分回数 20 回により利得が約 6.5 dB 向上するため、結果として減衰量は約 10.6 dB になると考えられる。実験結果と比較すると、3.1 m 付近のリブにおける減衰量は近い値であるが、2.7 m 付近のリブでは減衰が小さいと考えられる。この理由として、雪のクラッタによる影響が考えられる。雪は場所によって表面構造が異なるため、雪に対する信号の照射場所や照射角度が変わることで強め合う雪のクラッタが変化する。そのため、2.7 m 付近のリブでは雪のクラッタが反射信号に加算されて反射信号強度が増加したと考えられる。また、本実験は実環境であったため、雪が時々刻々と溶け、状態変化を起こしていた。そのため、実験結果とシミュレーションとの結果に差が生じたと考えられる。

また、図 3.1.2-13 に理論上における積分回数による利得向上の関係を示す。ここで、積分回数を n とすると、理論的には積分処理により雑音成分は $10 \log_{10}(\frac{1}{n})$ dB 抑圧される。積

雪がない場合において安定的にリブを検知するためには利得が 10 dB 程度向上されることが望ましい。そのため、積分回数を 100 回とすることで理論上利得が 10 dB 向上する。また今回の評価のように積雪による減衰が 10 dB 程度であった場合には、リブを検知するために 20 dB の利得向上が望まれる。そのため、理論上積分回数は 10,000 回必要となる。ただし、積雪の減衰以外に雪のクラッタによる影響があるため、冗長性を持たせて積分回数を設定するべきであると考えられる。また、積分回数を極度に増やすことは、車両走行時の

移動誤差の増大を招いたり、計測遅れ増加による車線維持制御の安定性悪化に繋がるので、これら制約を考慮して決める必要がある。

本項では、高利得化手法により利得を高めることで積雪時においてもリブを検知できることが明らかとなった。しかし、雪のクラッタの影響を受けるため、クラッタの影響を考慮して必要な利得を検討する必要があると考えられる。

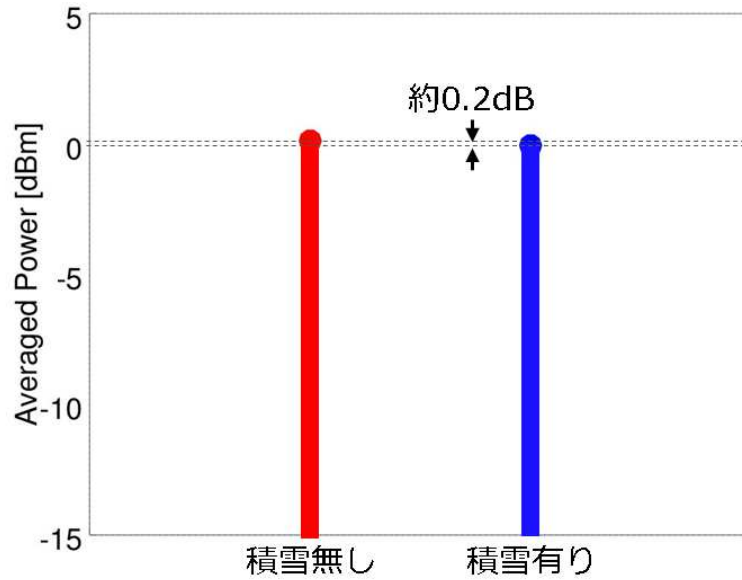


図 3.1.2-11 2.7 m 付近に存在するリブの反射強度

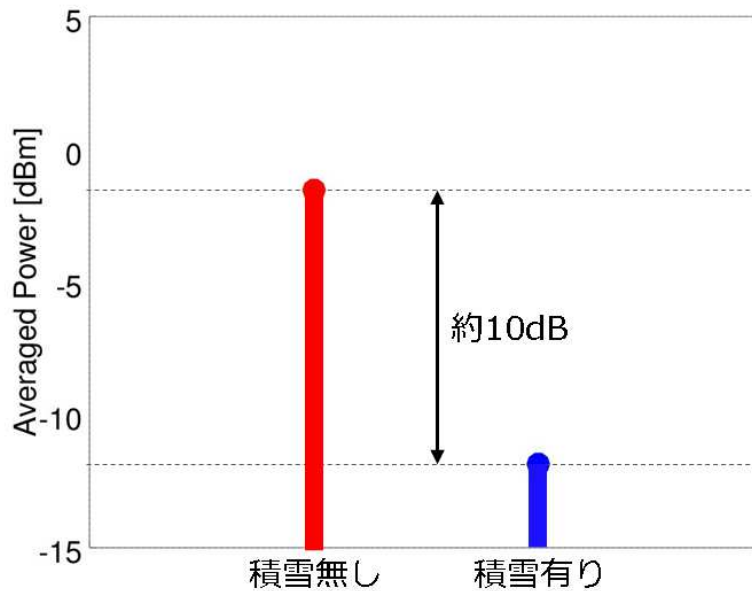


図 3.1.2-12 3.1 m 付近に存在するリブの反射強度

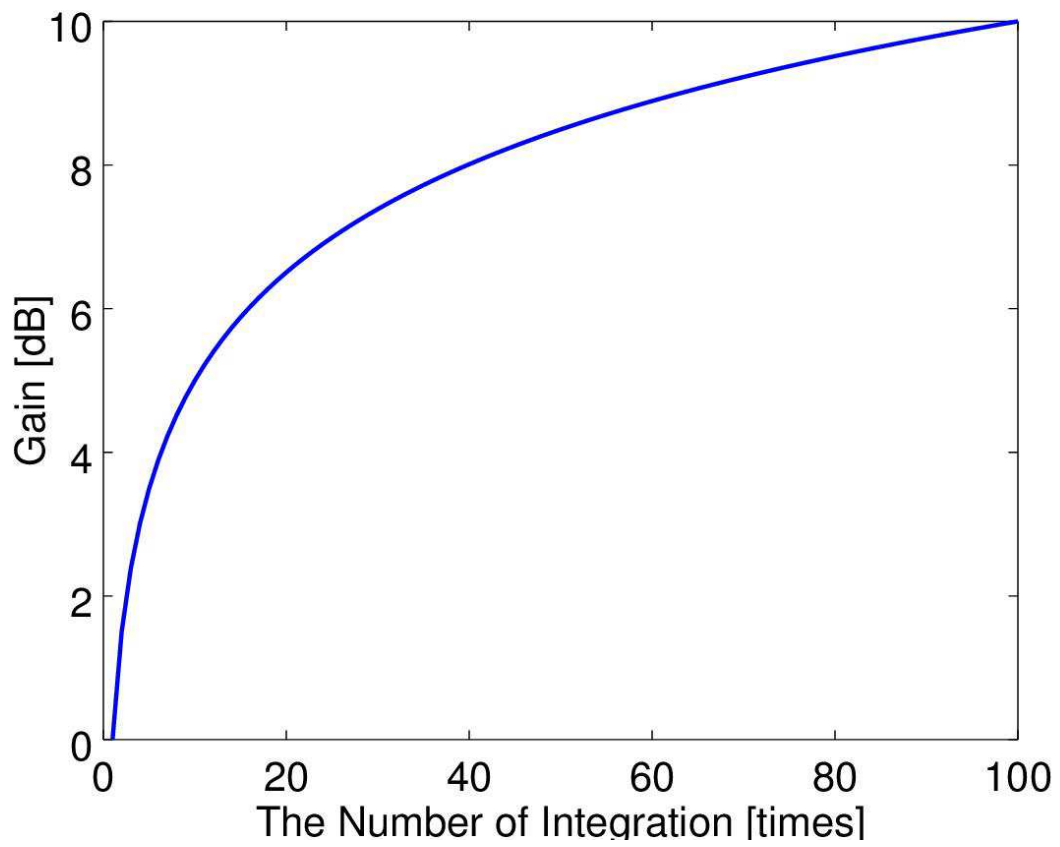


図 3.1.2-13 積分回数と利得の関係

3.2 小型 UWB ミリ波レーダの設計、試作

平成26年度は、静止状態のミリ波レーダを用いてリブ式白線評価を実施した。しかし、実用化を検討するためには移動状態における評価が必要であり、車載可能な高分解能ミリ波レーダを用意する必要がある。そこで、平成27年度は既存のミリ波レーダを改造して、車載可能な帯域幅3GHzの評価用ミリ波レーダを準備する。

また、平成26年度はレーダ小型化技術として仮想アレイ技術を抽出し、シミュレーションにより実現性を検証した。しかし、仮想アレイ技術は実際には存在しないアンテナを仮想して計算しているため、実環境では計算上の誤差が大きくなることが課題である。そこで本節では、仮想アレイ技術の角度誤差を低減する手法について検討し、実環境における仮想アレイ技術の実現性を検証する。

3.2.1 評価用ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知

図3.2.1-1に評価用ミリ波レーダの外観イメージを示す。評価用ミリ波レーダは、変調方式FMCW方式、中心周波数79.5 GHz、帯域幅3 GHz、変調周期5 msである。本項では、評価用ミリ波レーダを用いてリブ式白線を検知し、評価用ミリ波レーダの検知精度を検証する。



図3.2.1-1 評価用ミリ波レーダの外観イメージ

(1) 評価用ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知の実験条件

図3.2.1-2に評価用ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知の実験環境図を示す。図3.2.1-2に示すように、リブ式白線上に評価用ミリ波レーダを設置し、レーダの高さを車両のバンパ付近の高さである300 mmとした。また、3,000 mm先のリブにビームが向く角度となるように俯角を5.7°に設定した。

実験条件として、変調方式はFMCW方式、中心周波数は79.5 GHz、帯域幅は3 GHz、変調周期は5 msとした。また、帯域幅による変化を明らかにするため、同環境における帯域幅2 GHzのミリ波レーダとの比較を行った。

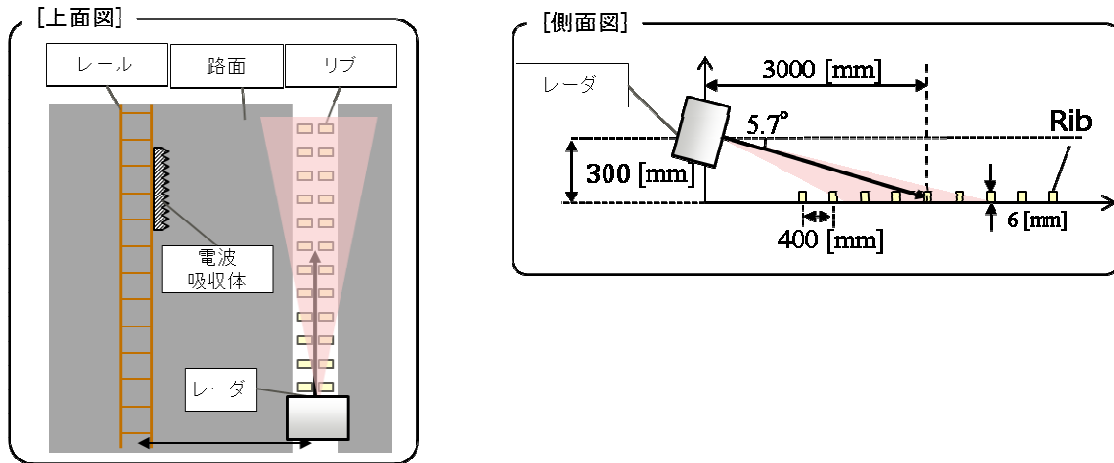


図3.2.1-2 評価用ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知評価の実験環境

(2) 評価用ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知の実験結果

図3.2.1-3にリブ式白線の検知結果を示す。ここで、図3.2.1-3の横軸はリブの距離差を表し、ターゲットとするリブ位置を0mとしたときの差分を表す。また、縦軸は相対電力を表し、それぞれの帯域幅を用いて取得したリブのピーク値を0dBとして算出している。青色の実線は帯域幅3GHz、赤色の破線は帯域幅2GHzのレーダでの結果を表す。

図3.2.1-3に示すように、帯域幅2GHzの結果に比べて、帯域幅3GHzの結果ではターゲットとするリブのピークが鋭くなり、距離分解能が向上していることが確認できる。距離分解能が向上することで高精度にリブ位置を検知可能となるため、評価用レーダは高精度にリブ位置を検知可能であることが確認できた。

本項では、評価用ミリ波レーダを用いてリブ式白線を検知し、評価用ミリ波レーダの検知精度を検証した。結果として、帯域幅3 GHzの評価用ミリ波レーダを用いることで高精度にリブ位置を検知することができ、平成27年度は車載可能な評価用の高分解能ミリ波レーダを準備した。

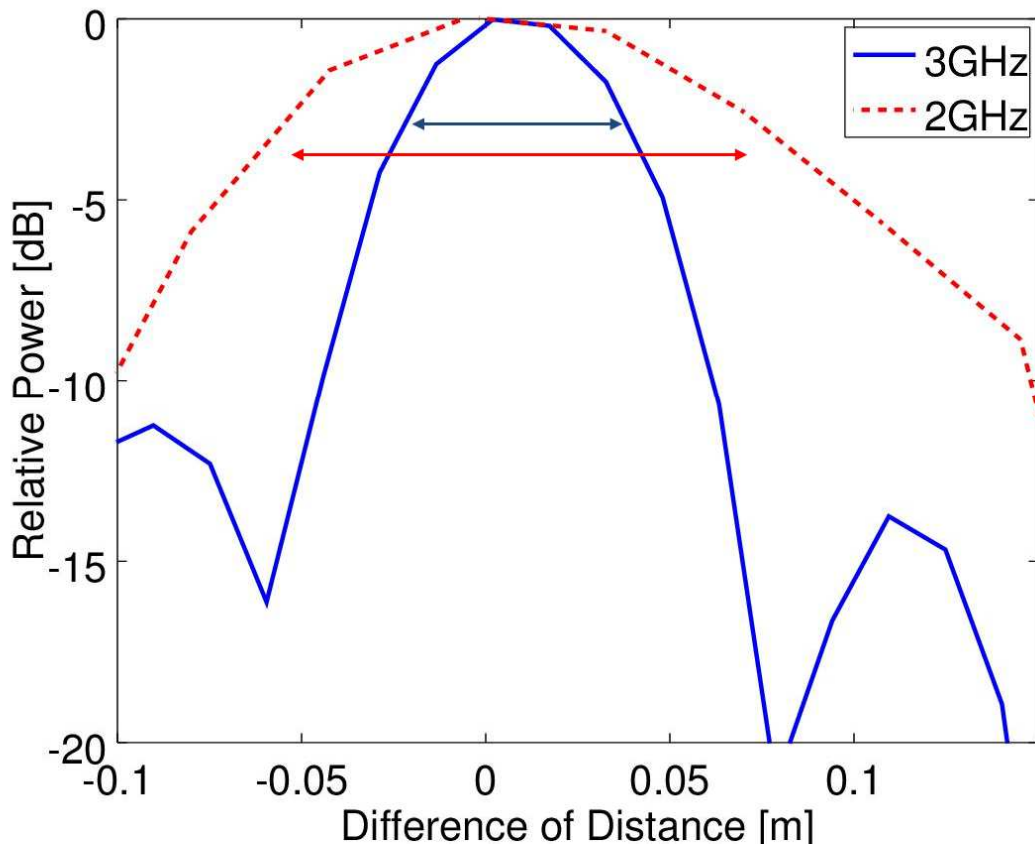


図3.2.1-3 評価用ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知評価の実験結果

3.2.2 仮想アレイ技術の実現性検証

平成 26 年度では、シミュレーションにより仮想アレイ技術の実現性を検証し、仮想アレイ技術を用いることで角度分解能を向上可能であることを確認した。しかし、仮想アレイ技術は実際には存在しないアンテナを計算により仮想的に作り出しているため、実環境では計算上の角度誤差が大きくなることが課題である。

そこで本項では、仮想アレイ技術の角度誤差低減法について述べ、実環境における仮想アレイ技術の実現性を検証する。

(1) 仮想アレイ技術の角度誤差低減法について

仮想アレイ技術の角度誤差の主要因として相関項が挙げられる。そのため、相関項を低減する方法を用いることで、角度誤差低減を図る。相関項を低減する手法を以下に示す。

① 行列累乗根法^[3]

行列累乗根法について図 3.2.2-1 に示す。行列累乗根法は受信相関行列をべき乗することで相関成分を低減させる手法である。図 3.2.2-1 に示すように、受信相関行列をべき乗することで固有値のみが変化する。そのため、最大固有値とその他の信号固有値との比が小さくなり、信号の直交性が増加することで、相対的に相関成分の影響を小さくする。

$$R_{xx} \frac{1}{Nr} = (ASA^H) \frac{1}{Nr} = \left(\sum_{i=1}^{M_r} \lambda_i e_i e_i^H \right) \frac{1}{Nr} = E \Lambda \frac{1}{Nr} E^H = E \begin{bmatrix} \lambda_1 \frac{1}{Nr} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_{M_r} \frac{1}{Nr} \end{bmatrix} E^H$$

R_{xx} : 受信相関行列 Nr : 行列累乗根の定数 A : モードベクトル行列

S : 複素振幅(波源相関行列) $[\]^H$: 複素共役転置 M_r : 素子数

λ_i : 固有値 e_i : 固有ベクトル E : 固有ベクトル行列 Λ : 固有値行列

図 3.2.2-1 行列累乗根法

② 対角要素平均化処理法^[4]

対角要素平均化処理法について図 3.2.2-2 に示す。図 3.2.2-2 に示すように、対角要素平均化処理法は受信相関行列の対角要素を平均化することで互いの位相項成分を打ち消し合うことで相関項を低減させる手法である。

$$R_{xx} = E[xx^H] = \begin{bmatrix} x_1 x_1^* & x_1 x_2^* & \cdots & x_1 x_L^* \\ x_2 x_1^* & x_2 x_2^* & \cdots & x_2 x_L^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L x_1^* & x_L x_2^* & \cdots & x_L x_L^* \end{bmatrix} \rightarrow \bar{R}_{xx} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{1,1} & \bar{x}_{1,2} & \cdots & \bar{x}_{1,L} \\ \bar{x}_{2,1} & \bar{x}_{1,1} & \cdots & \bar{x}_{1,L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{L,1} & \bar{x}_{L-1,1} & \cdots & \bar{x}_{1,1} \end{bmatrix}$$

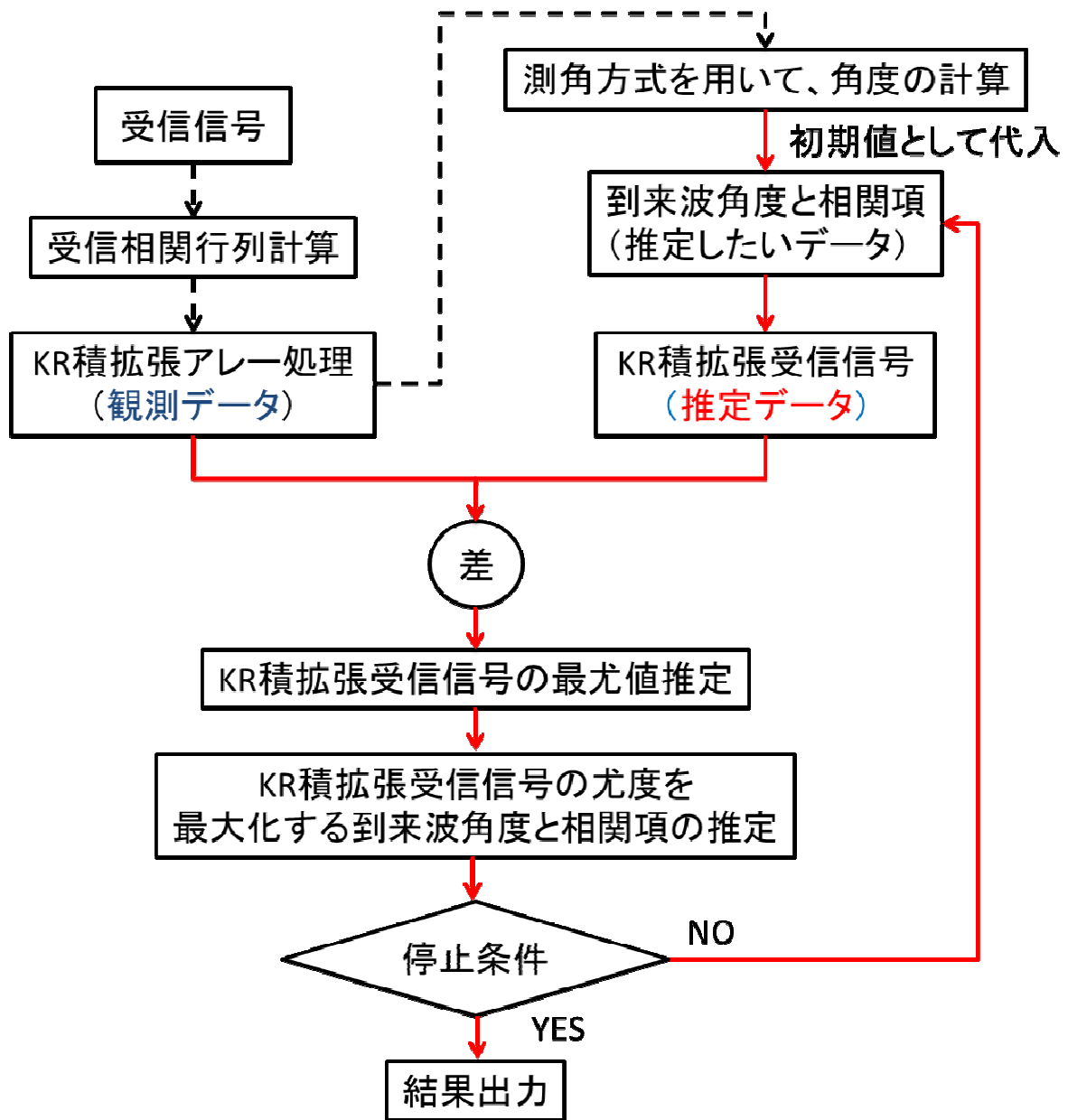
$$\bar{x}_{m,n} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^L x_i x_i^*}{L} & (m = 1, n = 1) \\ \frac{\sum_{i=m}^{L-n+1} x_i x_{i-m+1}^*}{L-n+1} & (m > n) \\ \frac{\sum_{i=n}^{L-m+1} x_{i-n+1} x_i^*}{L-m+1} & (m < n) \end{cases}$$

R_{xx} : 受信相関行列 L : アンテナ素子数
 x : 受信信号 $[\]^H$: 複素共役転置
 $[\]^*$: 複素共役 $E[\]$: アンサンブル平均

図 3.2.2-2 対角要素平均化処理法

③ 拡張 EM 法^{[5][6]}

拡張 EM (Expectation-Maximization) 法について図 3.2.2-3 に示す。図 3.2.2-3 に示すように、拡張 EM 法は推定データを用いて角度誤差を低減させる手法である。推定データは各到来波成分と相関成分を用いて算出し、観測データとの差を算出することで各到来波成分と相関項を更新する。



--- 従来KR法処理 — 拡張EM法処理

図 3.2.2-3 拡張 EM 法

(2) 仮想アレイ技術のシミュレーション条件

それぞれの角度誤差低減法の実現性を検証するため、シミュレーションを実施する。シミュレーション環境図を図 3.2.2-4 に示す。図 3.2.2-4 に示すように、2つのターゲットを想定し、ターゲットの間隔を広げる条件とターゲットの間隔を変えずターゲットを平行移動させる条件についてシミュレーションを実施した。各条件では、レーダから各ターゲットに対する角度を 0.2° ずつ変化させて角度誤差を検証した。シミュレーションでは角度推定手法として MUSIC (Multiple Signal Classification) 法を使用し、仮想アレイ技術と各角度誤差低減手法を組み合わせた場合の角度誤差について検証した。

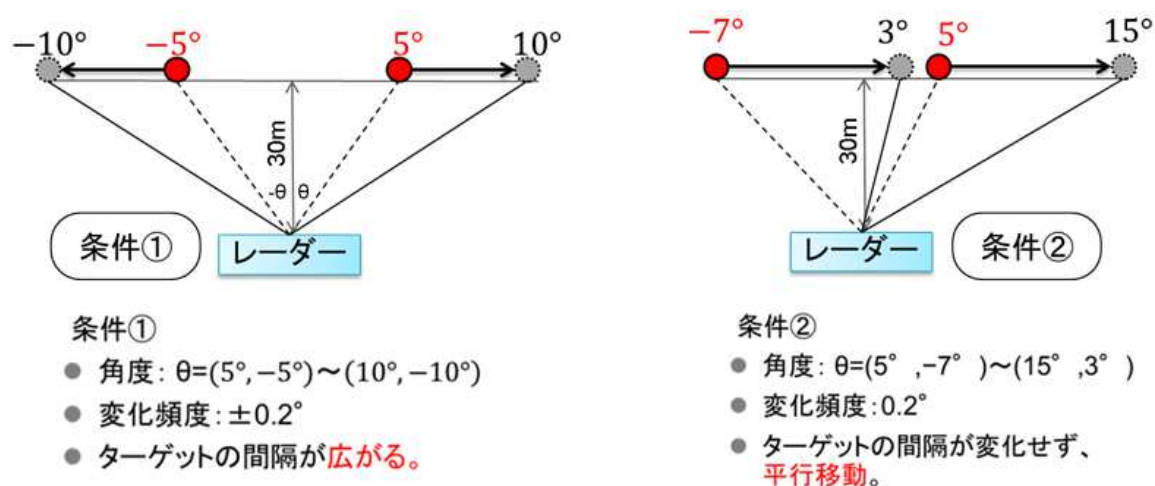


図 3.2.2-4 角度誤差低減法のシミュレーション条件

(3) 仮想アレイ技術のシミュレーション結果

仮想アレイ技術と各角度誤差低減法を組み合わせたシミュレーション結果を以下に示す。

① 行列累乗根法

ターゲットの間隔を広げる条件における行列累乗根法のシミュレーション結果を図 3.2.2-5 に、ターゲットを平行移動させた条件における行列累乗根法のシミュレーション結果を図 3.2.2-6 に示す。ここで、 N_r は行列累乗根法の定数を表し、縦軸は角度誤差、横軸はレーダからターゲットまでの角度を表し、数値が 1 上がる毎に角度が 0.2° ずつ増加する。

図 3.2.2-5 に示すように、ターゲットの間隔を広げる条件において $N_r=32$ として行列累乗根法を適用させた場合、角度誤差はほぼ 1° 以下に低減される。また、図 3.2.2-6 に示すように、ターゲットを平行移動させる条件において $N_r=32$ として行列累乗根法を適用させた場合、角度誤差はほぼ 0.5° 以下に低減されることが明らかとなった。

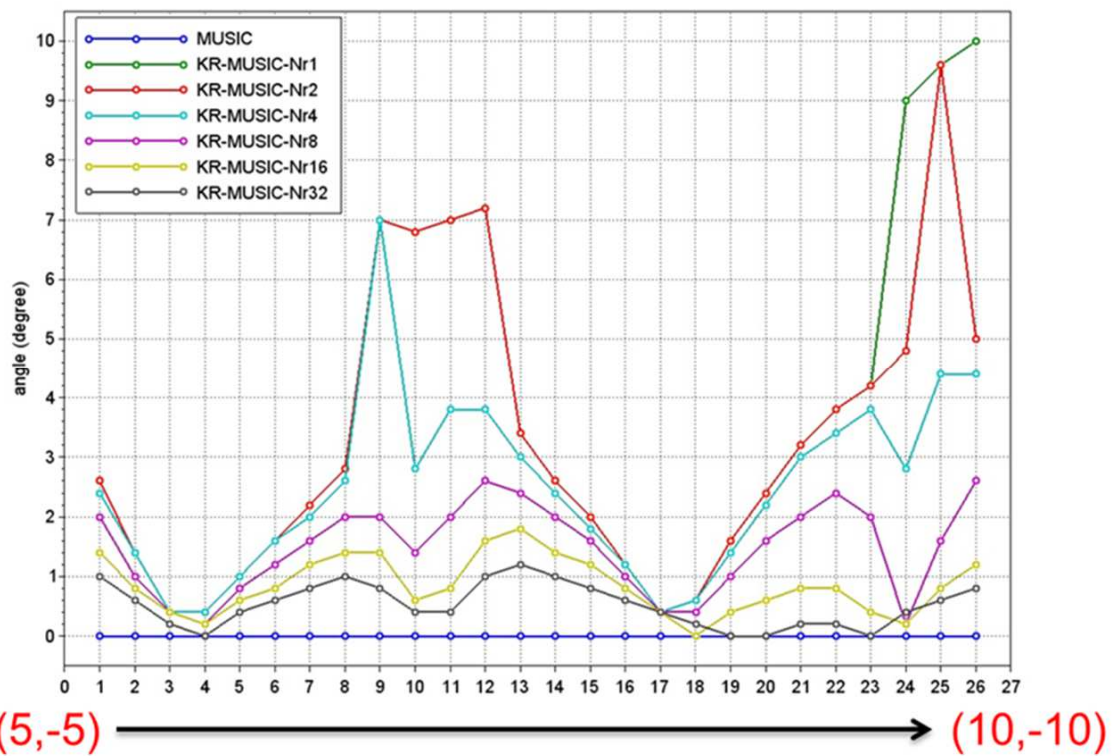


図 3.2.2-5 ターゲットの間隔を広げる条件における行列累乗根法の角度誤差

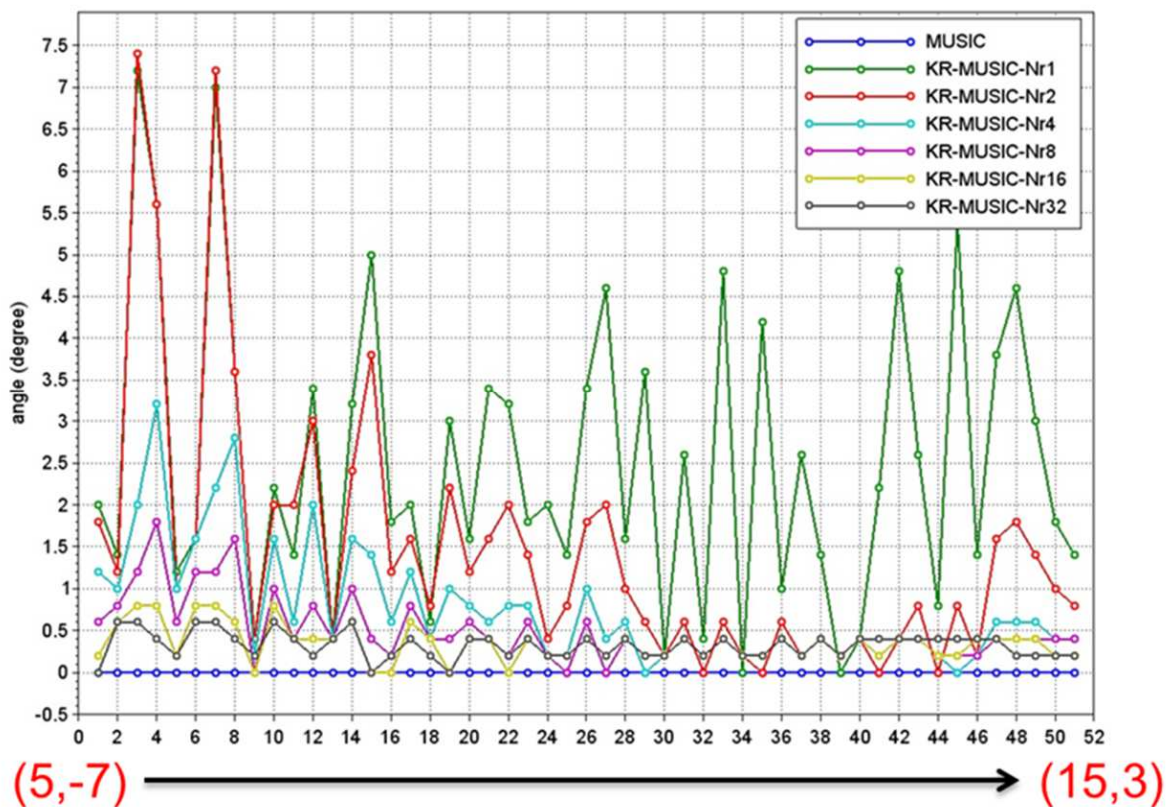


図 3.2.2-6 ターゲットを平行移動させた条件における行列累乗根法の角度誤差

② 角要素平均化法

ターゲットの間隔を広げる条件における対角要素平均化法のシミュレーション結果を図 3.2.2-7 に、ターゲットを平行移動させた条件における対角要素平均化法のシミュレーション結果を図 3.2.2-8 に示す。

図 3.2.2-7 に示すように、ターゲットの間隔を広げる条件において対角要素平均化法を適用させた場合、角度誤差は 3° 以下であるが、従来の仮想アレイ技術を用いた場合の角度誤差に比べて角度誤差が 3° 程度低減された。

また、図 3.2.2-8 に示すように、ターゲットを平行移動させる条件において対角要素平均化法を適用させた場合、ある角度において角度誤差が大きくなり、本手法が不安定であることが確認された。

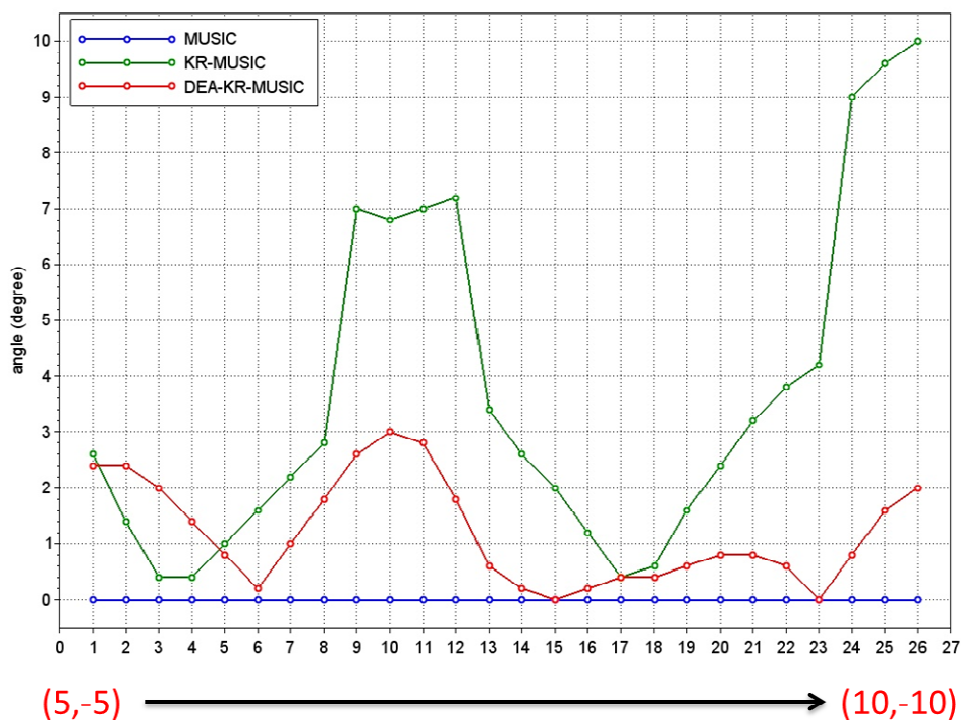


図 3.2.2-7 ターゲットの間隔を広げる条件における対角要素平均法の角度誤差

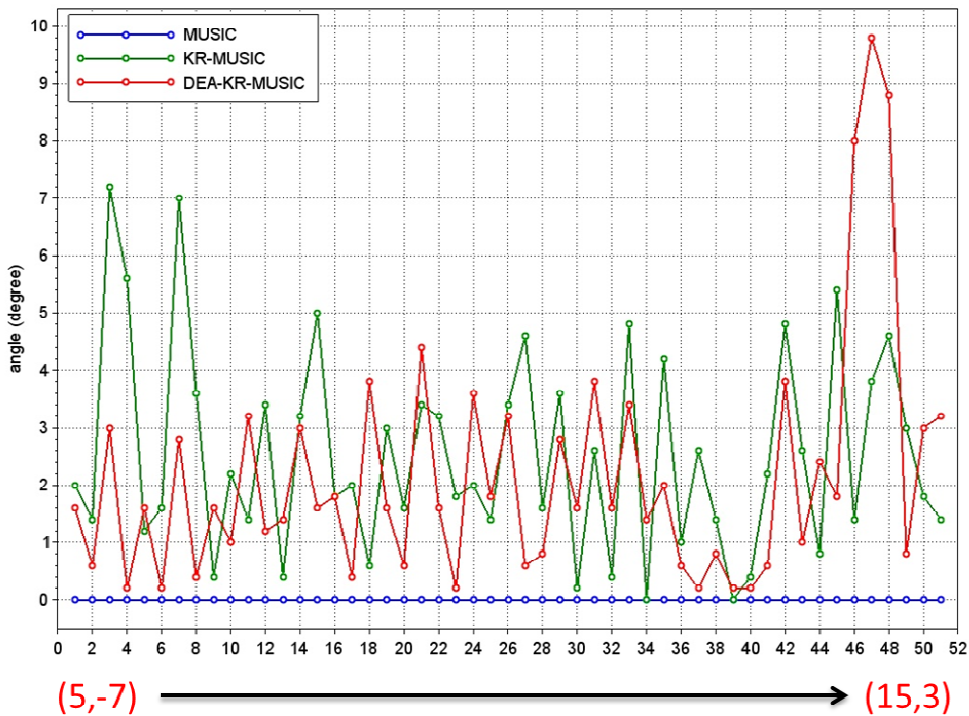


図 3.2.2-8 ターゲットを平行移動させた条件における対角要素平均法の角度誤差

③ 拡張 EM 法

ターゲットの間隔を広げる条件における拡張 EM 法のシミュレーション結果を図 3.2.2-9 に、ターゲットを平行移動させた条件における拡張 EM 法のシミュレーション結果を図 3.2.2-10 に示す。各図では、拡張 EM 法における推定範囲の分割精度を 0.001、0.01、0.1 に設定した場合の角度誤差を示す。

図 3.2.2-9 に示すように、ターゲットの間隔を広げる条件において拡張 EM 法を適用させた場合、角度誤差は約 3° 以下であることが分かる。特に拡張 EM 法における推定範囲の分割精度を 0.001 では、角度誤差が 0.5° 以下となっている。

また、図 3.2.2-10 に示すように、ターゲットを平行移動させる条件において拡張 EM 法を適用させた場合、角度誤差は 4° 以下であることが分かる。特に拡張 EM 法における推定範囲の分割精度を 0.001 では、角度誤差が 2° 以下となっている。

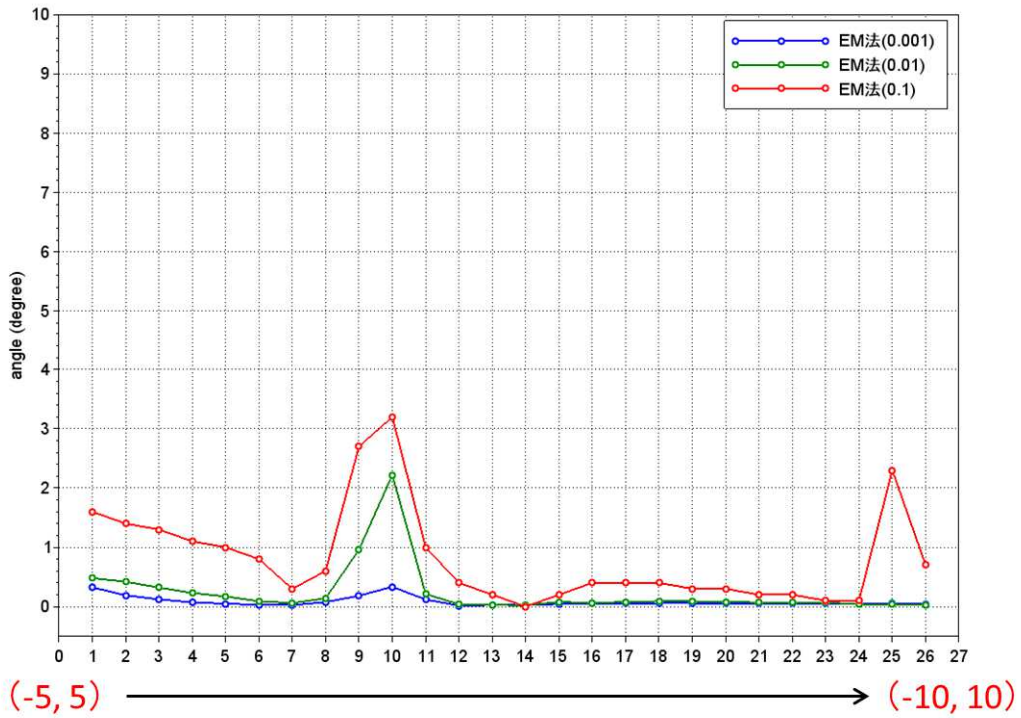


図 3.2.2-9 ターゲットの間隔を広げる条件における拡張 EM 法の角度誤差

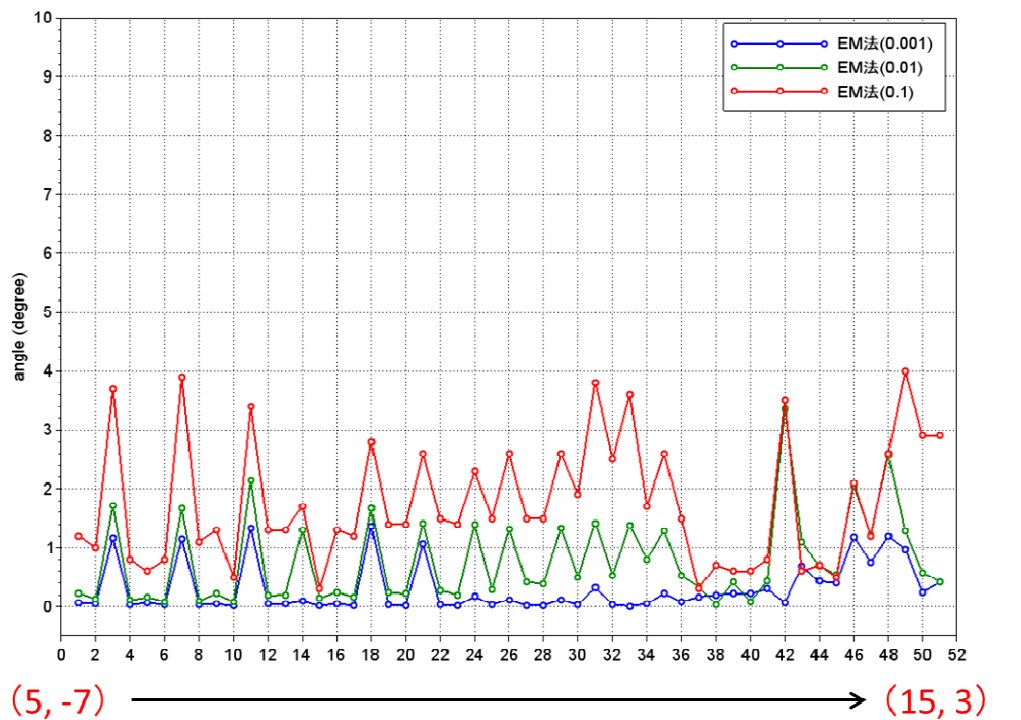


図 3.2.2-10 ターゲットを平行移動させた条件における拡張 EM 法の角度誤差

以上の結果から、ターゲットの間隔を広げる条件では拡張 EM 法、ターゲットを平行移動させる条件では行列累乗根法が最も角度誤差が少なく、リブ式白線検知に適していることが明らかとなった。しかし、拡張 EM 法は計算量が多いことが課題であり、現状では車載レーダとして実用化することは困難である。そのため、車載レーダとして実現するためには、現状よりもさらに高性能なマイコンを搭載する、或いは各手法を組み合わせることで計算量を抑える必要があると考えられる。

3.3 ソフト設計

3.3.1で述べたように、リブ式白線上のリブは非常に小さく、反射断面積が低いことが課題である。そのため、リブを検知するためにはリブの反射信号の利得を向上させる処理が必要となる。

本節では、リブの反射強度を高める高利得化手法について言及する。まず、積分処理による利得向上について述べる。そして、SAR技術による利得向上について言及する。最後に、アクティブフェイズドアレイによる利得向上について述べる。

3.3.1 積分処理の実現性検証

積分処理の実現性を検証するため、実環境におけるリブ式白線の反射信号を積分処理する。本項では、まず積分処理の概要を説明する。そして、積分処理の検証における実験条件を述べる。最後に積分処理の検証における実験結果を述べる。

(1) 積分処理の概要

積分処理とは、時系列的に複数回取得したデータを平均化する処理である。ミリ波レーダを用いた受信信号の積分処理では、受信した beat 信号を加算平均することで雑音を抑圧することが可能となる。ここで、積分回数を n とすると、理論的には積分処理により雑音成分は $10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\right)$ dB 抑圧される。

(2) 積分処理の検証における実験条件

図 3.3.1-1 に積分処理の検証における実験環境図を示す。図 3.3.1-1 に示すように 6 mm リブとレーダを配置し、反射信号強度を測定する。積分処理では、送信波 1 波ごとの beat 信号を計 10 波抽出し、平均化処理を行う。

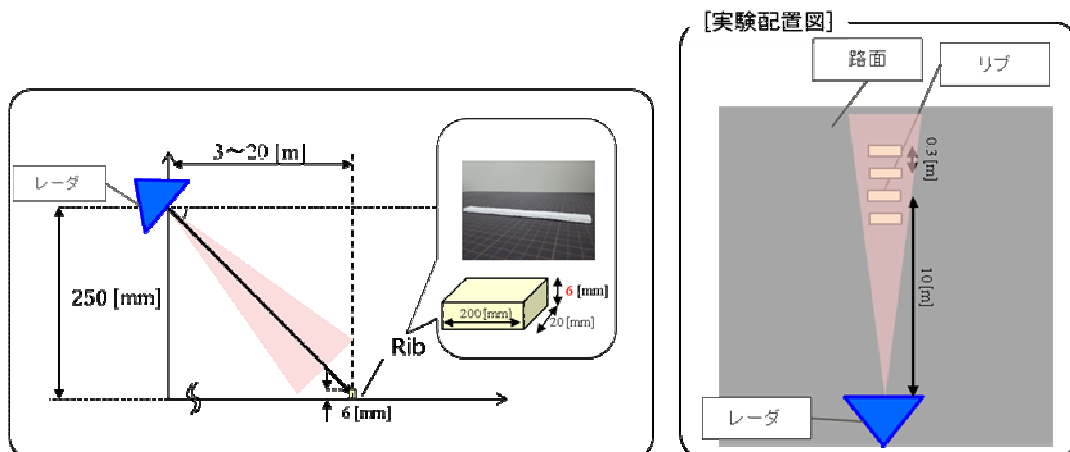


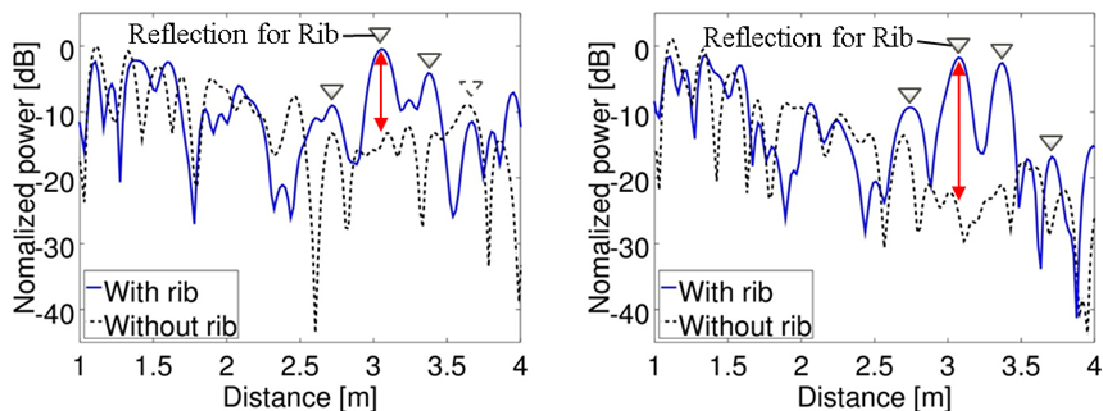
図 3.3.1-1 積分処理の検証における実験環境図

(3) 積分処理の検証における実験結果

リブとクラッタの反射強度測定結果を図 3.3.1-2 に示す。図 3.3.1-2 (a) は積分処理を行わない場合のリブと路面クラッタの反射強度を表す。ここで、図の横軸はレーダからの距離、縦軸は路面クラッタの最大値を 0dB とした場合の反射強度を表す。図 3.3.1-2 (a) より、距離 3.0m に存在するリブと路面クラッタとの反射強度の差分が約 15 dB となり、リブの反射を検出していることが確認できる。しかし、その他のリブでは路面クラッタとの反射強度の差分が小さく、リブの反射を識別することが困難である。

図 3.3.1-2 (b) に積分処理を行った場合のリブと路面クラッタの反射強度を表す。ここで、図の縦軸は積分処理を行わなかった場合の路面クラッタの最大値を 0dB とした場合の反射強度を表す。図 3.3.1-2 (b) より、積分処理を用いることで各リブと路面クラッタとの反射強度の差分がそれぞれ 2.1 dB、10.2 dB、7.0 dB、13.3 dB 向上しており、平均約 8dB 向上していることが確認できた。そのため、利得を向上させる処理を用いることで、安定的にリブ式白線を検知可能であることが明らかとなった。

しかし、積分処理は単純な加算により合成を行うため、レーダの移動による誤差の影響を直接受けることが考えられる。特に車両に搭載した場合を考えると、車両の移動により正しく合成することができず、リブの反射信号の利得を向上することができないと考えられる。また、車両では上下の振動もあり、振動による誤差も課題である。



(a) 積分処理を行わなかった場合

(b) 積分処理を行った場合

図 3.3.1-2 リブとクラッタの反射強度

3.3.2 SAR の実現性検証

前述の積分処理では、車両が移動する場合に正しく信号を合成することができず、利得を向上することができないことが課題であった。そのため、レーダの移動を考慮して合成を行う事が可能である SAR (Synthetic Aperture Radar) 技術^{[7][8]}を適用し、リブの反射信号利得を向上させる。

本項では、シミュレーションと実環境におけるリブ式白線の反射信号に SAR 技術を適用する。まず、SAR 技術の概要を説明し、そして SAR のシミュレーション実験結果について述べる。最後に、車載を想定した環境での実験結果について述べ、SAR を車載適用した場合の実現性について言及する。

(1) SAR の概要

SAR とは、レーダ移動に伴い複数回信号を送受信し、各受信信号を合成することで、方位分解能を高分解能化する技術である。一般的には航空機や衛星で適用されており、SAR 技術では仮想的にアンテナの開口長を長くするため、アジマス方向の分解能が高くなる。

(2) SAR のシミュレーション実験

SAR 技術の効果を確認するため、シミュレーションにより仮想的なターゲットを設定し、レーダを移動して移動毎の反射データを取得する。そして、SAR 処理を用いて受信信号を生成する。

① SAR のシミュレーション条件

図 3.3.2-1 に SAR のシミュレーション環境図を示す。図 3.3.2-1 に示すように、シミュレーションでは仮想的に 9 つのターゲットを設定した。ターゲットの RCS は 0 dBsm とし、レーダをアジマス方向に 2 m 移動させたときの反射信号を測定した。ここで、アジマス間隔は 1.5 mm、中心周波数は 79 GHz、帯域幅は 3 GHz、変調周期は 5 ms を用いた。

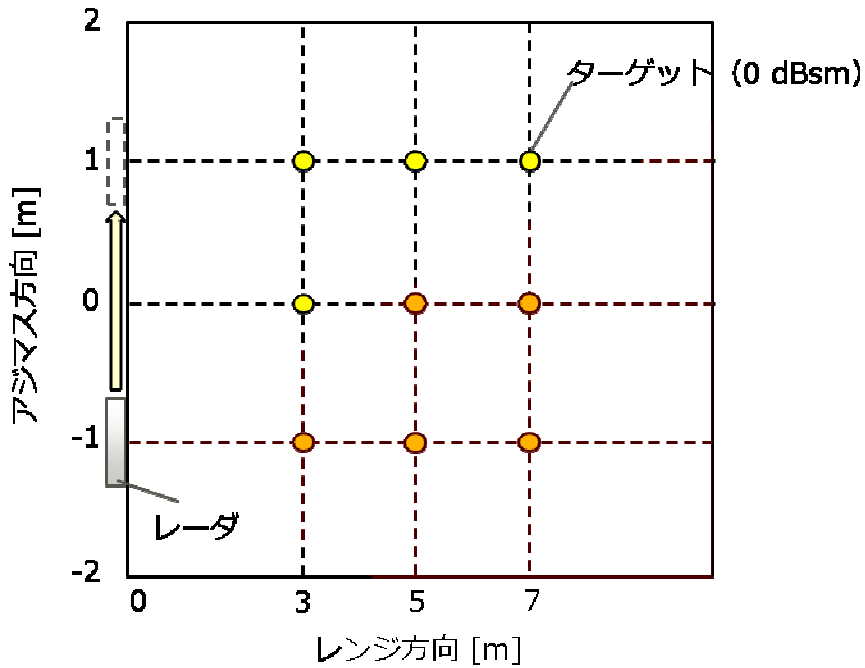


図 3.3.2-1 SAR のシミュレーション環境図

② SAR のシミュレーション結果

図 3.3.2-2 に SAR を適用しなかった場合のシミュレーション結果を示す。図 3.3.2-2 では、アンテナビーム幅が広く、方位分解能が低いため、それぞれのターゲットを分離することができない。一方、図 3.3.2-3 に SAR を適用した場合のシミュレーション結果を示す。図 3.3.2-3 より、9 つのそれぞれのターゲットを分離することが出来ており、SAR 技術によりアジマス方向に高分解能化され、レーダが移動する場合にも受信信号の合成が可能であることが明らかとなった。

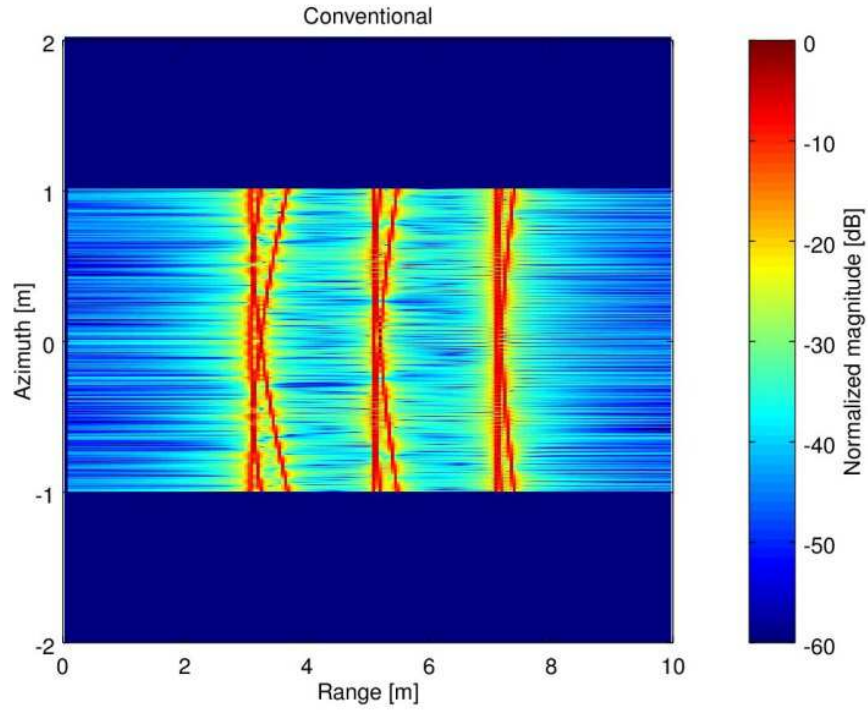


図 3.3.2-2 SAR を適用しない場合のシミュレーション結果

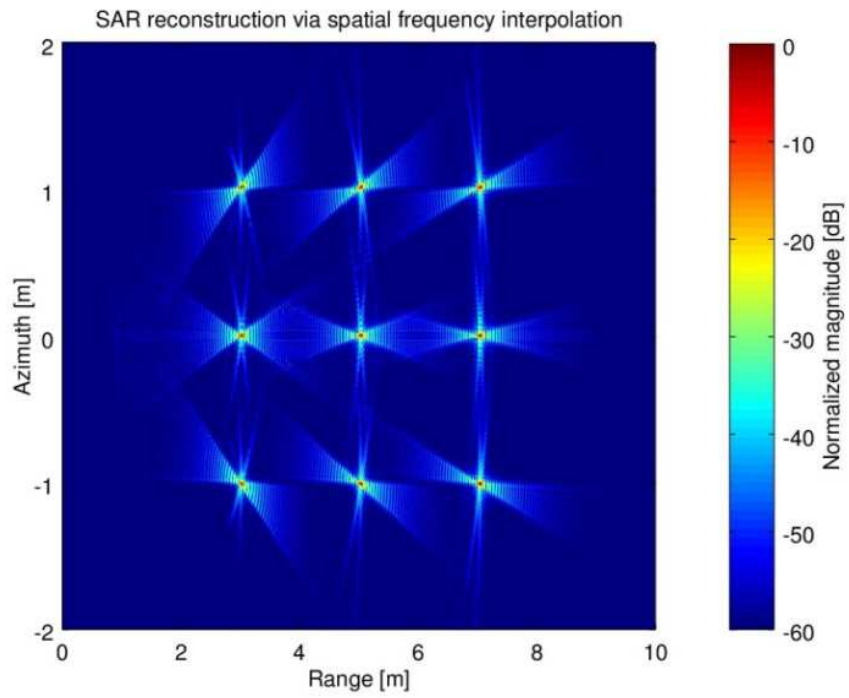


図 3.3.2-3 SAR を適用した場合のシミュレーション結果

(3) 車載 SAR の実現性検討

前述のシミュレーション結果では、SAR 技術による分解能向上効果を確認することができた。ただし、シミュレーションでは車両搭載を意識した配置ではなく、実環境のようなノイズ成分を考えていない。そこで、実環境において車両搭載を想定した環境で SAR の実現性を検証する。

① 車載 SAR の実験条件

図 3.3.2-4 に車両搭載を想定した環境における SAR の実験環境図を示す。図 3.3.2-4 に示すように、レーダの設置高さは車両のバンパ位置付近である 300 mm とした。そして、50 mm 毎にレーダを移動させ、受信信号を測定し、SAR 処理を施した。

実験条件として、変調方式は FMCW 方式、中心周波数は 79 GHz、帯域幅は 2 GHz、変調周期は 5 ms とした。

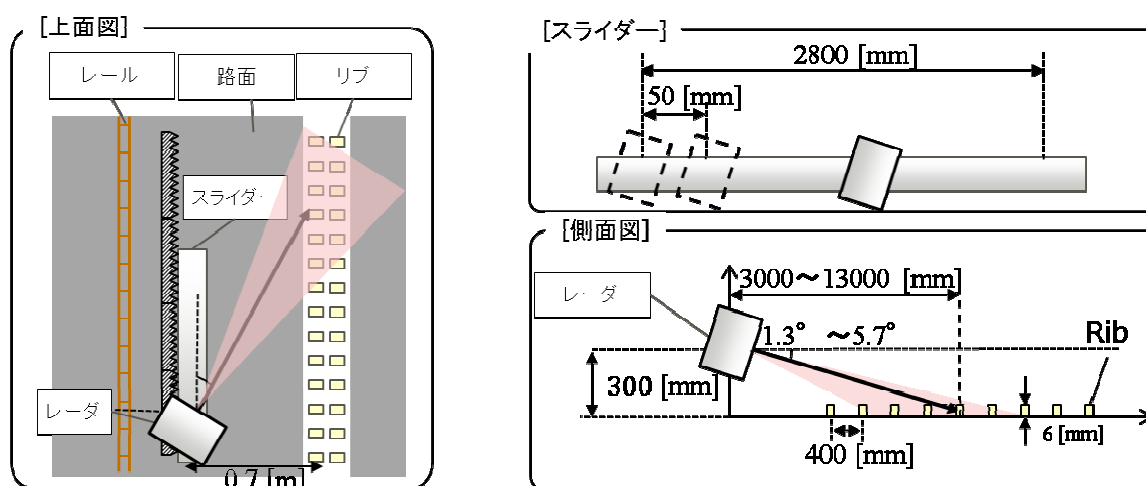


図 3.3.2-4 車載搭載想定における SAR の実験環境図

② 車載 SAR の実験結果

図 3.3.2-5 に車両搭載を想定した環境における SAR の実験結果を示す。図 3.3.2-5 はレーダが 0.2 m 移動した箇所における反射信号結果を抽出したものである。図の横軸は距離を、縦軸は SN 比を示し、青の実線は SAR 適用後の結果を、赤の破線は SAR を適用しない場合の結果を示す。図に示すように、SAR 技術を適用することで、リブ位置の利得を向上していることが分かる。そのため、SAR 技術を用いることで、車両移動が生じた場合にもリブの利得を向上させることが可能であることが明らかとなった。

しかし、今回の実験は静止状態で実施した評価に過ぎず、車速の影響は考慮していない。車速はアジマス間隔に影響を及ぼし、アジマス間隔は車速とレーダのデータ取得周期の積で求めることができる。そのため、車速が増加するにつれて、アジマス間隔が長くなる。SAR 技術における理想的なアジマス間隔は 1/4 波長以下であり、79 GHz のミリ波レーダでは約 1 mm 程度となる。アジマス間隔が長くなり理想的なアジマス間隔を超えることで、グレーティングローブが発生し、イメージング結果にエイリアシングが発生する。

図 3.3.2-6 に理論上の車速とアジマス間隔の関係を示す。図 3.3.2-6 は、レーダのデータ取得周期を 50 ms と設定した場合である。図 3.3.2-6 に示すように、車速が増加するにつれてアジマス間隔が増加しており、アジマス間隔 1 mm 以下を満たす条件は車速 0.07 km/h までとなり、一般的な車速を考えると現実的ではない。

また、図 3.3.2-7 に理論上の車速と必要なデータ取得周期の関係を示す。図 3.3.2-7 は、アジマス間隔を 1 mm と設定した場合である。図 3.3.2-7 に示すように、車速が増加するにつれて必要なデータ取得周期は短くなり、100 km/h でアジマス間隔 1 mm 以下を満たすデータ取得周期は 36 μ s 以下となる。データの取得周期を短くするためには高精度の A/D コンバータが必要となり、実現にはコストが高くなることが課題である。

図 3.3.2-8 に、リブ式白線検知を想定した実験環境図を示す。図 3.3.2-8 に示すように、幅 3 m の車線の中央に幅 1.5 m の自動車走っており、前側方にレーダを搭載している環境を想定する。レーダのビーム幅を $\pm 20^\circ$ 、最大検知距離を 20 m、レーダのデータ取得周期を 50 ms と仮定すると、理論上の車速と合成数の関係は図 3.3.2-9 となる。ここで合成数とは、ある 1 つのリブがビーム範囲内に存在する回数を表す。図 3.3.2-9 に示すように、車速が増加するに伴い、合成数が減少していることが分かる。合成回数を n とすると、理

論的には SAR により雑音成分は $10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \right)$ dB 抑圧されるため、合成回数が減少すること

で雑音抑圧性能が劣化する。

以上を踏まえ、SAR によりレーダが移動した場合にも信号を合成することは可能であるが、実際の車速を想定した場合には誤差が大きくなることが課題である。

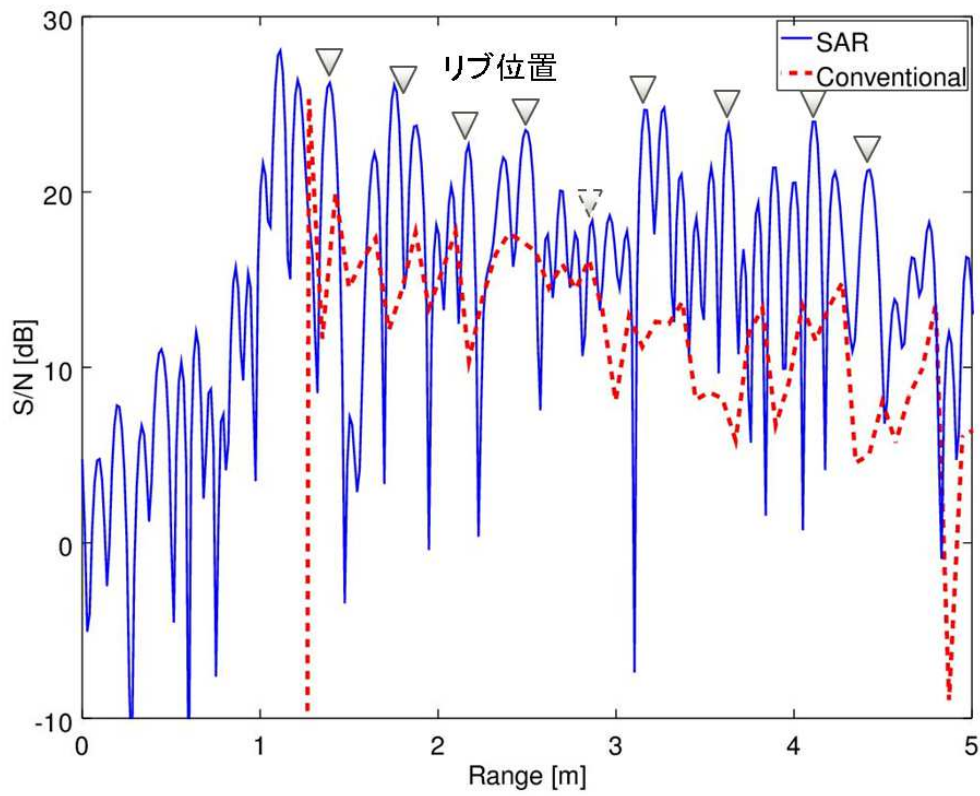


図 3.3.2-5 車載搭載想定における SAR の実験結果

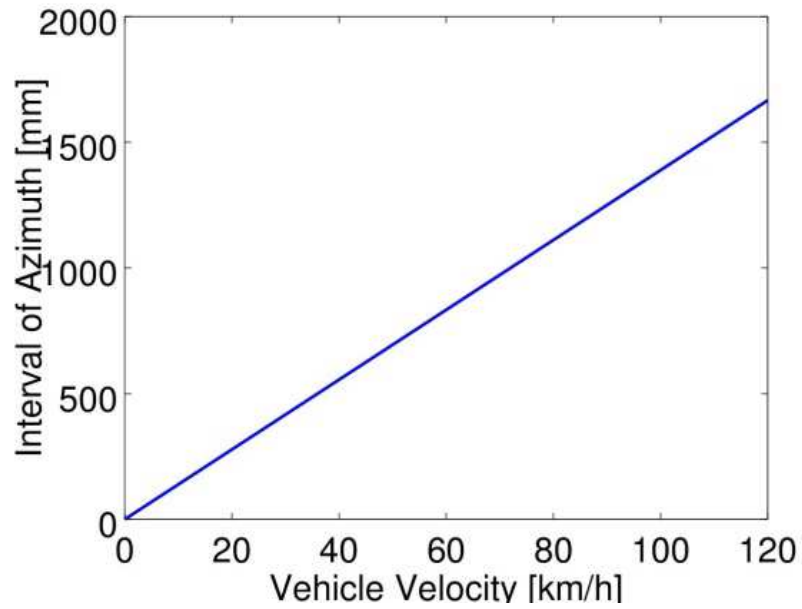


図 3.3.2-6 車速とアジマス間隔の関係

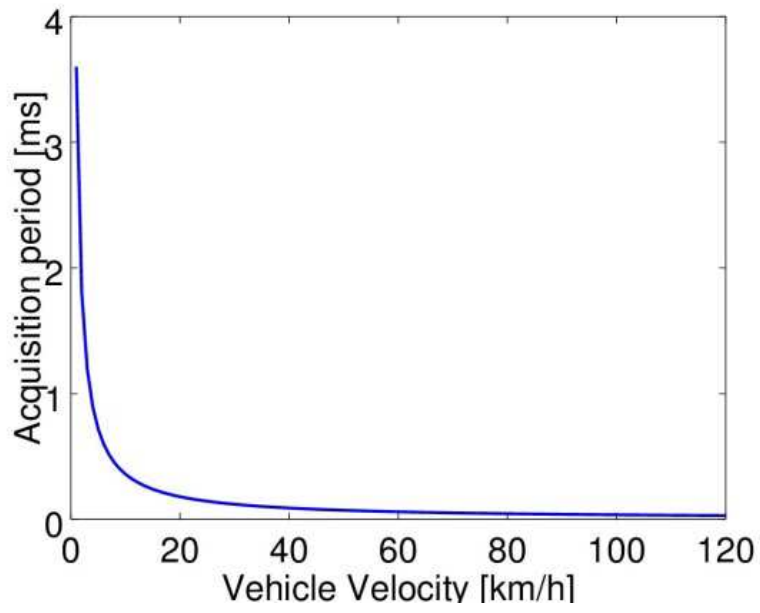


図 3.3.2-7 車速と必要なデータ取得周期の関係

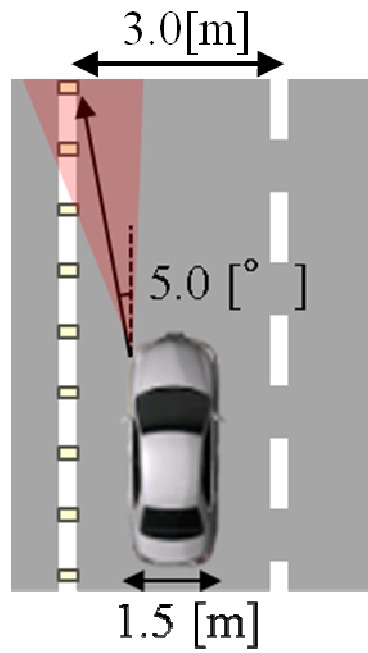


図 3.3.2-8 リブ式白線検知を想定した実験環境図

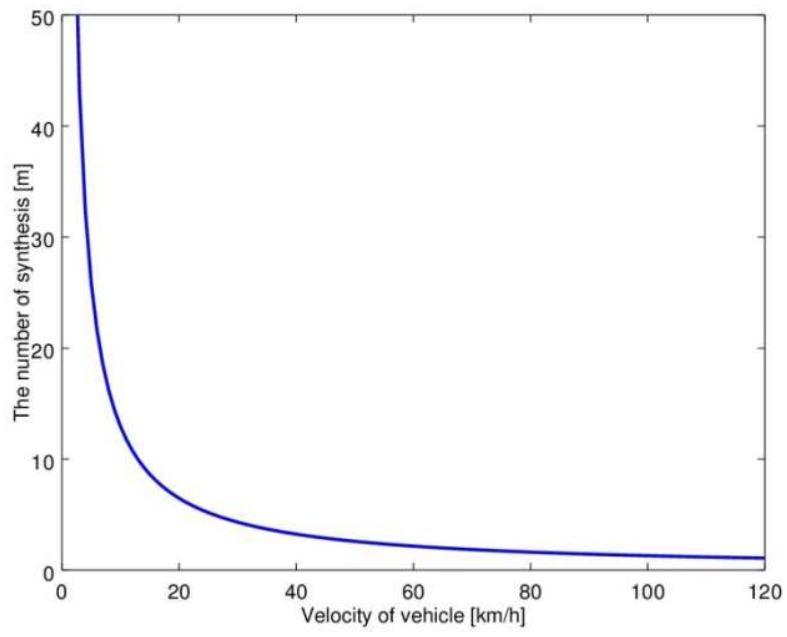


図 3.3.2-9 車速と合成数の関係

3.3.3 アクティブフェイズドアレイの実現性検証

前述の SAR 技術では、車両が高速移動した場合に誤差が大きくなる課題がある。そこで、SAR 技術の課題を解決するために、時系列的な合成を行わないアクティブフェイズドアレイ技術^{[9][10]}について検討する。本項では、シミュレーションを用いて高利得化手法であるアクティブフェイズドアレイの実現性を検証する。

(1) アクティブフェイズドアレイの概要

アクティブフェイズドアレイとは、アンテナ素子毎に位相を補正することで狭ビームを生成し、ビームを走査することで物標を検知する技術である。図 3.3.3-1 にアクティブフェイズドアレイ方式の概要図を示す。図 3.3.3-1 に示すように、アンテナ素子毎に移相器を備え、移相器により送信信号の位相を調整することで任意方向に狭ビームを生成する。アクティブフェイズドアレイ方式では、時系列的に信号を合成するわけではないため、車両の高速移動による影響が小さいと考えられる。また、送信でアクティブフェイズドアレイ方式に狭ビームを生成し、受信でアレイ処理を実施することで、更なる利得向上が望まれると考えられる。

一般的にアクティブフェイズドアレイ方式では、アンテナの開口長が広がるにつれてビームが細くなり、照射面積が狭まるため利得が向上する。また、周波数とアンテナ素子間隔の関係により、アンテナ素子間隔が広い場合にはグレーティングローブが発生する。

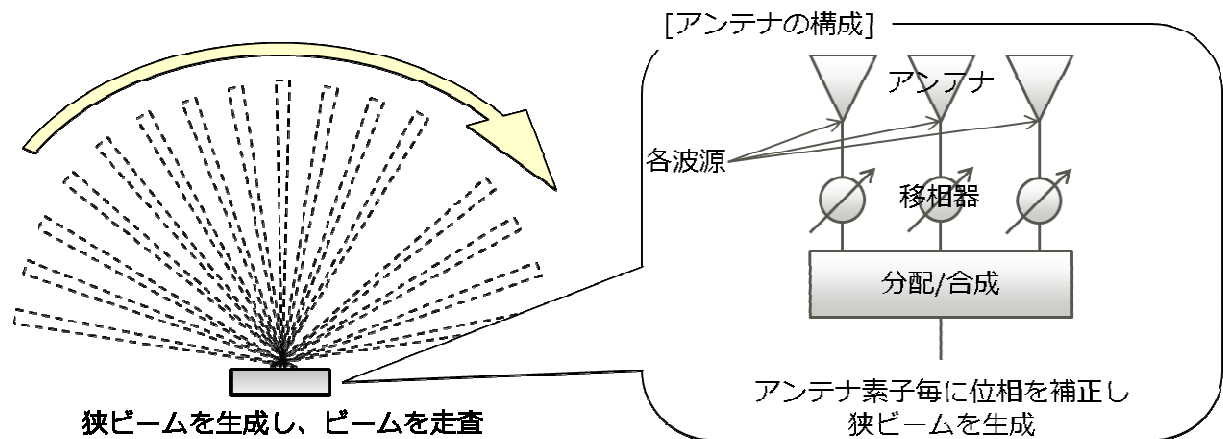


図 3.3.3-1 アクティブフェイズドアレイ方式の概要

(2) アクティブフェイズドアレイの検証におけるシミュレーション条件

アクティブフェイズドアレイ方式における利得向上、広角化の効果を確認するため、シミュレーションによりアンテナビームパターンを算出する。シミュレーションでは、送信波の周波数を 79.5 GHz とし、送信チャンネル数 N のアンテナと、2 倍のチャンネル数を持つ送信チャンネル数 $2N$ のアンテナについてビームパターンを算出する。どちらのアンテナのアンテナ間隔も等しい場合を考え、送信チャンネル数 $2N$ の場合は送信チャンネル数 N に比べてアンテナ開口長が 2 倍となる。

(3) アクティブフェイズドアレイの検証におけるシミュレーション結果

図 3.3.3-2 に送信チャンネル数 N におけるアンテナビームパターンを、図 3.3.3-3 に送信チャンネル数 $2N$ におけるアンテナビームパターンを示す。図 3.3.3-2、図 3.3.3-3 では、各アンテナ素子で出力される信号の位相が全て同相である場合である。各図より、同じアンテナ素子間隔でもアンテナ開口長が広がることで狭ビームが生成されることが分かる。送信チャンネル数 $2N$ の場合のビーム幅は送信チャンネル数 N の場合と比較して半分となり、ビーム照射面積が減ることで利得が 3 dB 向上していることが分かる。

また、図 3.3.3-4 にビームを 15° 移動させるように位相を調整した場合の送信チャンネル数 $2N$ におけるアンテナビームパターンを示す。図 3.3.3-4 に示すように、目的方向にも狭ビームを生成することができ、ビームを振らない場合に比べて約 15 dB 程度利得が向上していることが分かる。そのため、アクティブフェイズドアレイ方式では、利得向上と高利得化の効果があることが確認された。しかし、アクティブフェイズドアレイ方式ではアンテナ素子毎に移送器が必要になるため、構造が複雑化することが課題である。

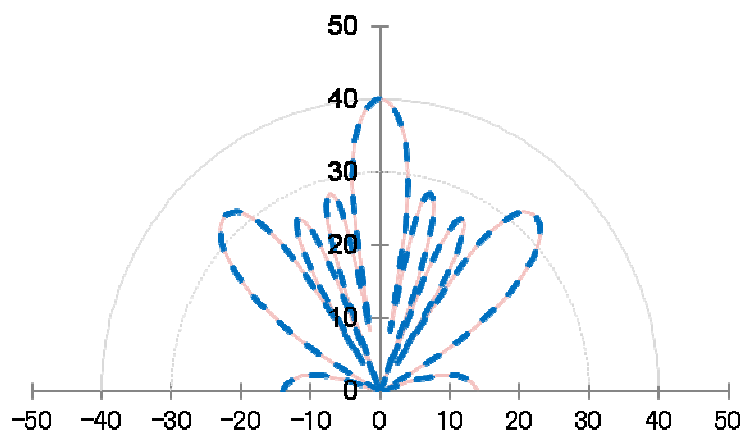


図 3.3.3-2 送信チャンネル数 N のアンテナビームパターン

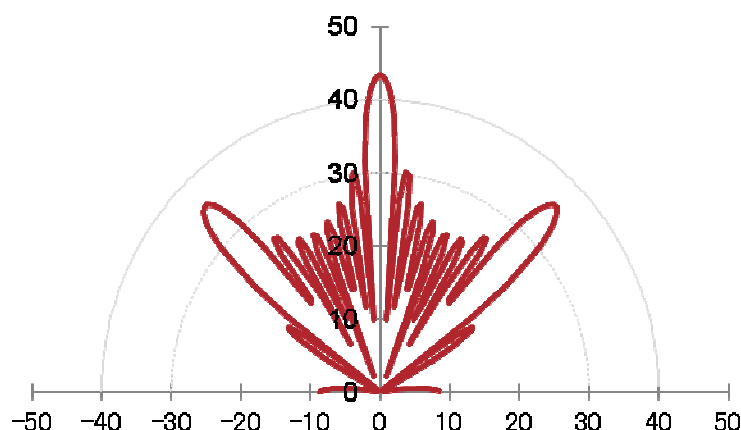


図 3.3.3-3 送信チャンネル数 $2N$ のアンテナビームパターン

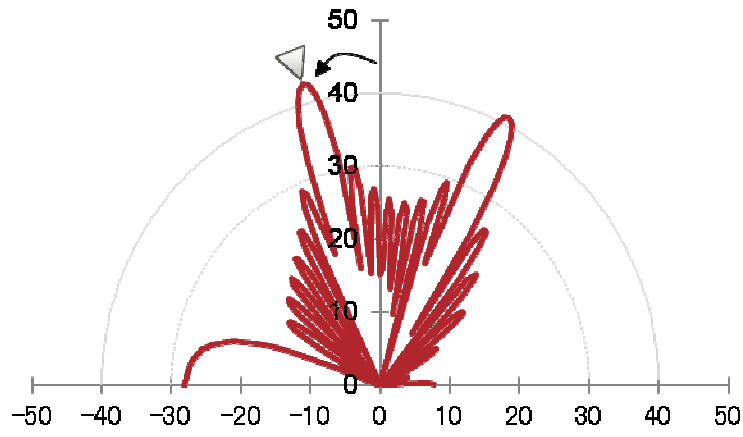


図 3.3.3-4 15°ビームを傾けた場合の送信チャンネル数 $2N$ のアンテナビームパターン

3.4 まとめ

本章では、実環境や悪天候時におけるリブ式白線の反射特性を明らかにし、日本の幹線道路、高速道路で敷設されているリブを検知するためには、照射角度 $\pm 40^\circ$ の範囲において、 $-25\sim-20$ dBsmのターゲットを検知出来る必要があることを明らかにした。また、積雪量による減衰量を明らかにし、高利得化手法を用いることで積雪時にもリブを検知できる可能性があることを明らかにした。

また、評価用の高分解能ミリ波レーダを準備し、レーダ小型化を実現する仮想アレイ技術の角度誤差低減法について検証した。結果として、評価用ミリ波レーダは高い距離分解能でリブを検知することが可能であり、角度誤差低減法については各手法を組み合わせることで計算量を減らしつつ角度誤差を低減させる必要があることを述べた。

さらに、79GHz帯UWBミリ波レーダによるリブ式白線の識別には、小さなリブからの反射波信号を高める必要があり、高利得化手法について言及した。積分処理によりリブ反射の利得を向上させることができるが、車両移動の影響を直接受けることが明らかとなった。また、SARによりレーダが移動した場合にも信号を合成することは可能であるが、実際の車速を想定した場合には誤差が大きくなることが今後の課題であることが確認された。さらに、アクティブフェイズドアレイ方式であれば狭ビームを生成して利得を向上させるため車両移動による影響は小さいが、アンテナ素子毎に移送器が必要となるため構造が複雑化することが課題であることが明らかとなった。

参考文献

- [1] 瀧本 幸男, 上瀧 實, “積雪に対するミリ波帯電波の特性”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-B-II, No. 1, pp. 71--81 (1998)
- [2] 小野 光弘, 鈴木 道也, “マイクロ波に対する雪の透過減衰量”, 雪氷, Vol.29, No. 5, pp.150--155 (1967)
- [3] 白井智士, 山口芳雄, 山田寛喜, “相関波到来時における Khatri-Rao 積拡張アレーを用いた信号パラメータ推定に関する検討”, 電子情報通信学会信学技報, Vol. 112, No. 149, pp. 23--28 (2012)
- [4] 龍川卓也, 山田寛喜, 山口芳雄, 平野圭蔵, 伊藤浩之, “海洋レーダによる二次元表層流観測における Khatri-Rao 積仮想アレーの効果について”, 電子情報通信学会信学技報, Vol. 114, No. 194, pp. 83--88 (2014)
- [5] A. P. Dempster, N. M. Laird, and D. B. Rubin, “Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm”, J. Roy. Statist. Soc. Ser. B, Vol. 39, No. 1, pp. 1--38 (1977)
- [6] 青柳岳泰, 山田寛喜, 山口芳雄, “カトリ・ラオ積拡張アレーを用いた DOA 推定誤差と改善法に関する一検討”, 電子情報通信学会信学技報, Vol. 111, No. 376, pp. 119--124 (2012)
- [7] M. Soumekh, “Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms” (1999)
- [8] S. Kent, M. Kartal, S. Deliormanli, “Image formation from raw data via new SAR processor”, Synthetic Aperture Radar, 2012. EUSAR. 9th European Conference on, pp. 458—461
- [9] B. Ku, et al., “A 77—81-GHz 16-Element Phased-Array Receiver With $\pm 50^\circ$ Beam Scanning for Advanced Automotive Radars”, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol.62, No. 11, pp.2823--2832 (2014)
- [10] P. Schmalenberg, et al., “A SiGe-Based 16-Channel Phased Array Radar System at W-Band for Automotive Applications”, Proceedings of the 10th European Radar Conference (2013)

第4章 ミリ波レーダ方式検討及び基礎データ解析

79GHz帯UWBミリ波レーダ（最大帯域幅3GHz）は全天候性に優れていることに加えて、従来の76GHz帯レーダ（最大帯域幅0.5GHz）に比べて使用可能な帯域が広いことため測距精度に優れ、レーン白線のリブなど比較的小さな物標でも検知できると期待されている^{[1][2][3]}。しかしながら、79GHz帯ミリ波レーダの霧や降雪による減衰特性や数cm程度の物標検知特性についてこれまで報告されていない。そこで本章では全天候型白線識別技術としてリブ白線からの79GHz帯ミリ波反射特性を計測し、さらに積雪時においてどこまで白線認識が可能か見極めを行う。また白線からの反射信号を効果的に受信できるレーダ方式及び検知・識別するための基本識別アルゴリズムを開発する。

平成26年度は、Bragg散乱の原理を用い、周期性のある白線リブからの小さな反射波を合成させることで利得を向上させることを検討した。その結果、Bragg散乱の原理を用いて白線を検知するためには、数百MHz（UWBの定義である帯域幅が500MHz以下）と比較的狭い帯域を設定する必要があるが、その場合には他の路上構造物からの反射波との分離・識別が困難になるということを確認した。

そこで平成27年度は、このような課題に対して、各リブから低い利得の信号を合成する認識アルゴリズムについて検討した。具体的には、リブからの反射波は小さいが周期的にレンジング方向に配列しているため、各リブからの反射波を空間処理することによって他の路上構造物と分離・識別するRake合成のアプローチを適用した。

本章では4.1でミリ波レーダ基礎データ解析を、そして4.2で動作原理機による方式の検討を行い、4.3で基本識別アルゴリズムについて概説し、4.4で本章をまとめている。

4.1 ミリ波レーダ基礎データ解析

リブ白線は、台形状の凸部とフラット部分からなるリブ式の路面標示であり、雨天時においても凸部は浸水せず視認性がよく、また車輛逸脱時には振動によりドライバに注意喚起を促す。

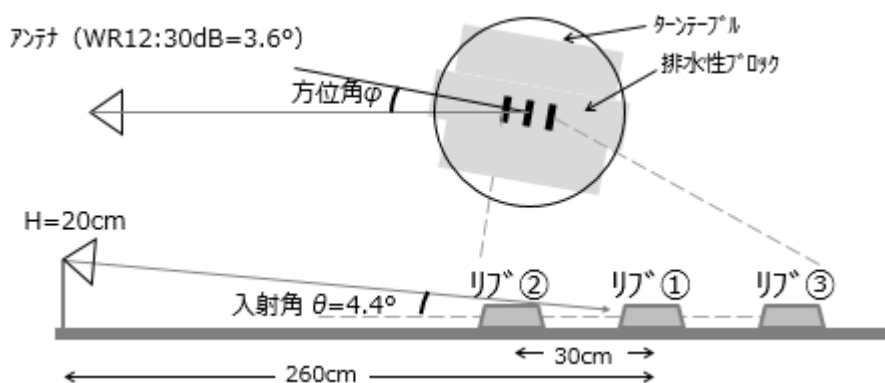
一般にリブの高さは6mmで、79GHz帯ミリ波レーダの波長の1.5倍であるためリブからの反射が期待できる（レーダ有効反射断面積RCSは大きい）。そこで79GHzミリ波レーダによるリブ白線検知の実現性を検討するために1個リブと2個リブの白線について計測を行い、その有用性について検討する。なお、計測装置の仕様を表4.1-1に、また図4.1-1に示すように電波暗室内に3列のリブを回転テーブルに設置して計測を行った。なお、計測で用いた1個リブは、道路に敷設されるリブとは形状が若干異なる擬似構造物であり、また2個リブは、道路敷設装置を使って排水ブロック上に敷設したものであり、実際のリブと同じ形状（図4.1-2）である。

なお、目的は信号S（リブ）とクラッタC（排水ブロック）からSC比を推定することであり、計測方法は以下のとおりである。

- ・電波暗室内に排水ブロックを敷設し、その受信信号を計測
- ・ブロック上にリブ（①→①②→①②③）を敷設し、各受信信号を計測

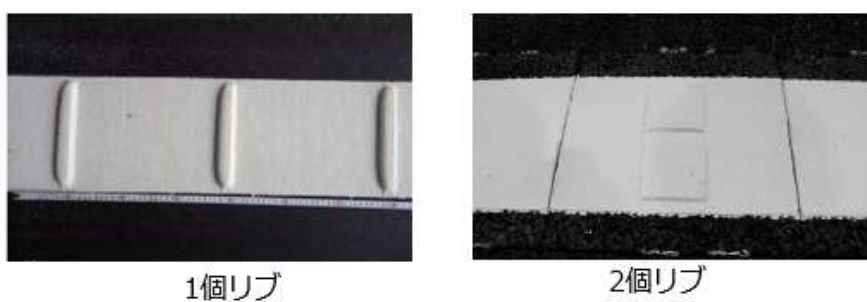
表 4.1-1 計測装置の仕様

項目	諸元
測定系	PNA(Agilent: E8363B)
中心周波数 f_c	79GHz
帯域幅 BW	3GHz
送信電力	0dBm
データ	タイムドメイン
アンテナ	指向性ホーン(20dBi)
アンテナ高 H	0.4m



- 計測 1 : 排水ブロックのみの受信信号 C
- 計測 2 : リブ列①, リブ列②, リブ列③の受信信号 S

図 4.1-1 計測方法



	長さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)
1個リブ	150	20	60
2個リブ*	80	50	60

*) 1個のリブのサイズ

図 4.1-2 計測で使した1個リブと2個リブ

4.1.1 リブ白線からの反射波特性

(1) 1個リブ白線

3列のリブ白線からの79GHz帯ミリ波反射特性について計測結果を図4.1.1-1に示す。ミリ波レーダの帯域幅が3GHzであるため距離分解能が5~10cmであるため各リブ列からの反射信号を分離識別していることが分かる。なお、10~30cmの信号は送受信アンテナ間の回り込みであり、また4m付近の大きな信号は小型電波暗室の壁からの反射波である。

なお、リブ表面はガラスビーズによりラフであるため入射信号は散乱する。このため図4.1.1-2のように同じ形状の金属（表面が滑らかで誘電率が高い）を制作し、それぞれの受信特性を比較検討したのでその結果を図4.1.1-3に示す。なお、図では一定の入射角に対するレーダ有効断面積（RCS in [dBm²]）も示している^{[1][3]}。ミリ波レーダによる受信強度を図4.1.1-4に示す。

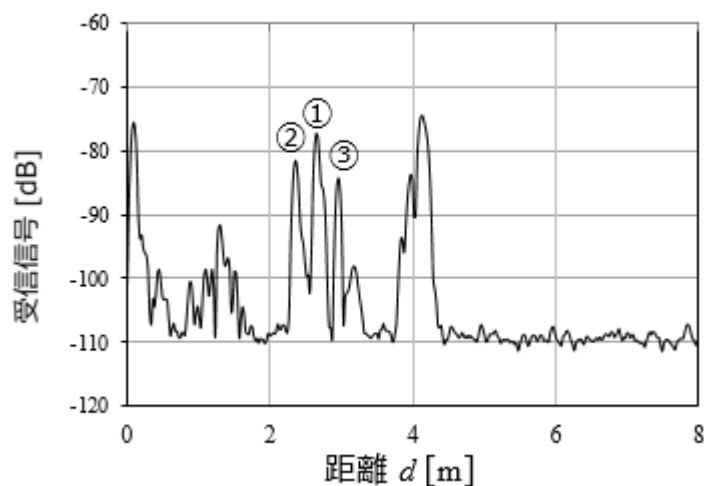


図 4.1.1-1 3列のリブ白線からの79GHz帯ミリ波受信信号特性



図 4.1.1-2 1個リブと同じ形状の金属リブ

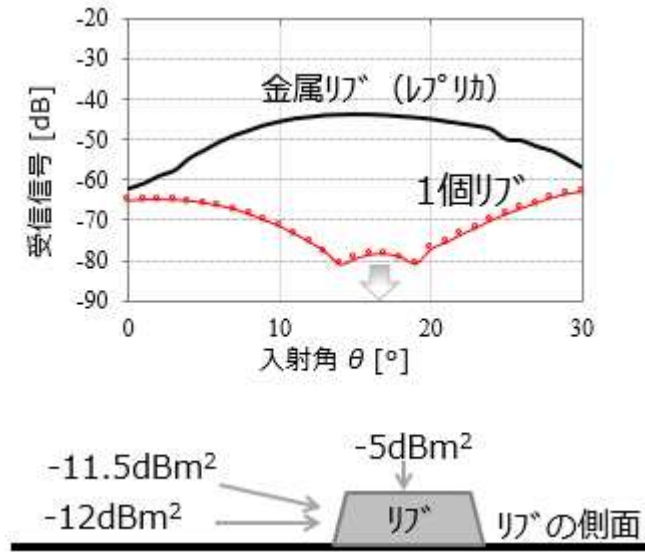


図 4.1.1-3 1 個リブ単体からの 79GHz 帯ミリ波受信信号と RCS

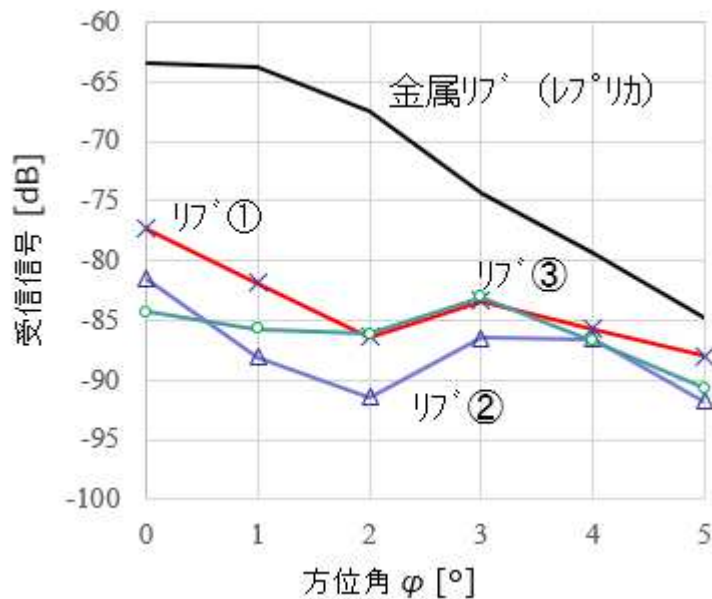


図 4.1.1-4 79GHz 帯ミリ波レーダによる受信強度

(2) 2 個リブ白線

2 個リブ白線 (図 4.1.1-5) からの 79GHz 帯ミリ波反射特性について計測結果を図 4.1.1-6 に示す。なお、リブの塗装表面は上述の 1 個リブと同じである。同図から方位角による受信電力は約 10dB 変動しており、規則性は確認できない。これは図 4.1.1-5 (右の写真) のように各リブの形状や表面ラフネス (粗さ) の個体間差に起因している。例えば、表面が金属のように滑らかであれば一定の方位角で最大になるが、波長に対してラフ (粗い) な表面に対しては角度依存性が減少する。また図 4.1.1-4 の 1 個リブと比較すると正面方向 (方

位角 $\varphi=0^\circ$) では 2~3dB 大きく、角度依存性は小さいことが分かる。これは、両方のリブの表面ラフネスは同じであるため、1 個リブと 2 個リブの形状の違いによるものと考えられる。



図 4.1.1-5 電波暗室内の 2 個リブ白線

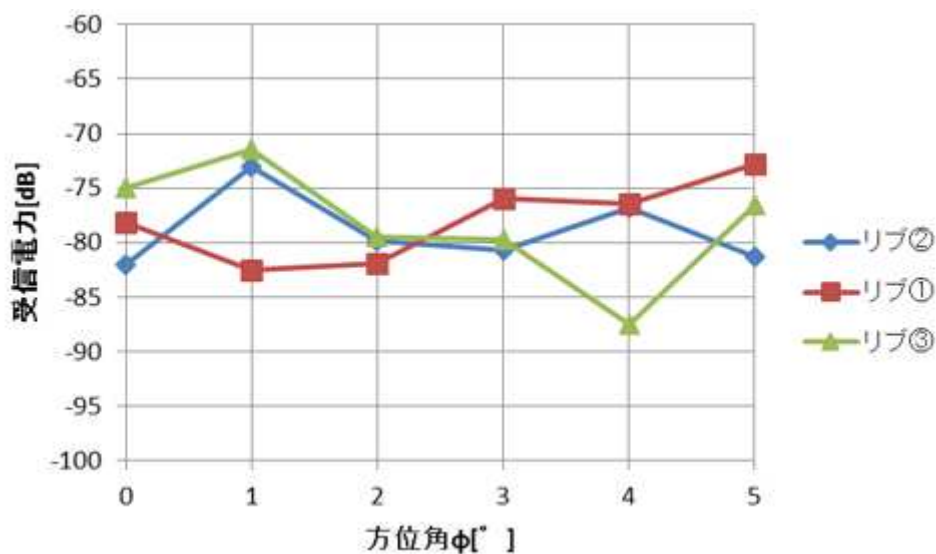


図 4.1.1-6 2 個リブからの受信信号特性

(3) リブのラフネスの影響

物標からの反射強度である RCS は表面のラフネスと物性値（誘電率）に依存する。そこでリブ表面粗さの影響について検討する。使用したリブ表面のラフネス（凹凸）は 1mm 前後で 79GHz 帯ミリ波の波長に比べて 1/5~1/3 と粗い。このため入射波は散乱する。そこでその影響を調べるために表面を金属ブラシで擦って実際のリブと比較した。その結果を図 4.1.1-7 に示す。同図から利得が数 dB 大きくなっている。これはリブ側面が滑らかになっているために散乱成分より正規反射成分が大きくなったためであると考えられる。

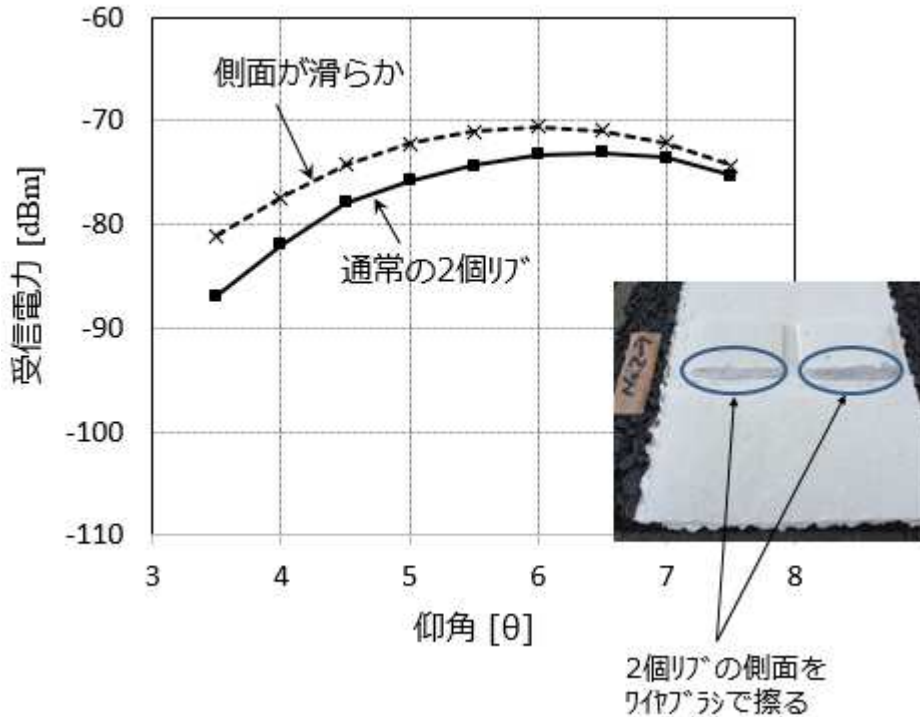


図 4.1.1-7 リブ表面粗さの影響

4.1.2 積雪時の受信特性

ミリ波レーダの優位性は霧や雨、雪（積雪、降雪）などの耐天候性にあると考えられている。これまで 79GHz 帯ミリ波帯の降雨減衰については報告されているが^[1]、霧や積雪については国内外において公開されていない。そこで本項ではリブ白線認識の課題である積雪時のリブ白線検知についても計測を行った。

(1) 計測方法、パラメータ

計測では実際の高速道路上の白線を模擬するため 5 列の 2 個リブ白線が敷設された排水ブロック（30cm×30cm×5cm）を図 4.1.2-1 のように 10×10 個並べてミリ波レーダで計測した。ここでは表 4.1-1 の計測仕様のように電波法規に従い、周波数帯域は 3GHz（77.5～80.5GHz）と設定した。

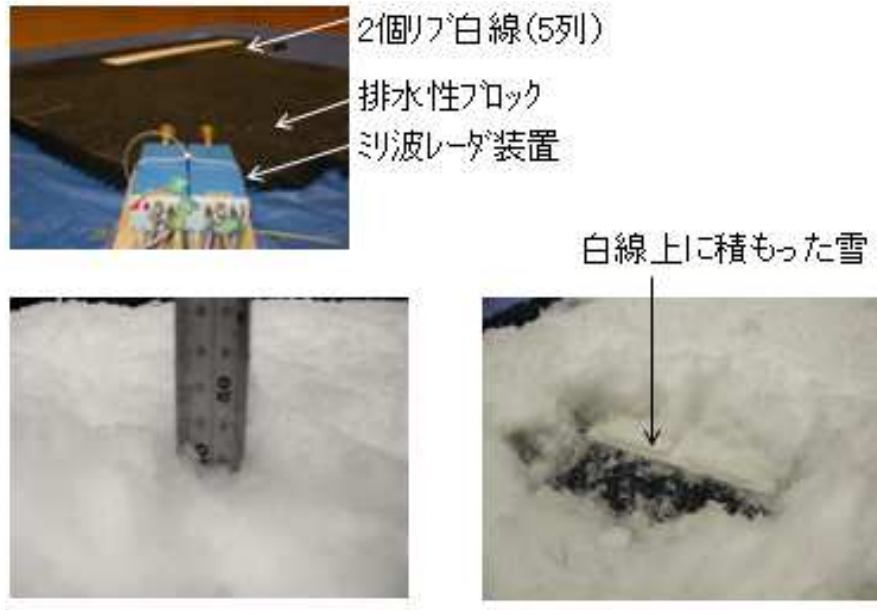


図 4.1.2-1 実験光景と積雪した排水ブロック上のリブ

(2) 積雪時の受信信号特性

積雪が 3cm、5cm の場合の反射波（電力遅延プロファイル：赤線）を図 4.1.2-2 (a) と (b) に示す。また積雪の影響を分かり易くするために積雪がない場合の受信電力（青線）も重ねている。同図から 1、4、5 番目からの反射波を視認できるが、2 と 3 番目からの反射波は積雪に拘らず小さいことが分かる。これはアンテナとリブの幾何学的配置の影響により 2 と 3 番目のリブからの反射波をほとんど受信できなかったと考えられる。また 1 番目のリブからのピーク値の位置が少しずれ、一方 4 番目の反射波は 2 つのピークが視認できる。この理由として積雪表面からのクラッタと考えられ、表面の形状（ラフネス）に大きく依存する。また降雪による減衰量は雪に含まれる水分量で決まると考えられる。なお、用いた雪の水分量は $0.3 \sim 0.4 \text{ g/m}^3$ と比較的水分量が多い雪質である。例えば、雪が降り始めた場合の雪質は 0.1 g/m^3 前後である。このため積雪に埋もれたリブからの反射信号は雪による減衰と同時に積雪クラッタの影響を受けていることが予想される。なお、降雪がない場合について 6m 付近に反射波が見られる。これは排水ブロック間の繋ぎ部分からの反射であり、降雪により信号が消えていることが分かる。

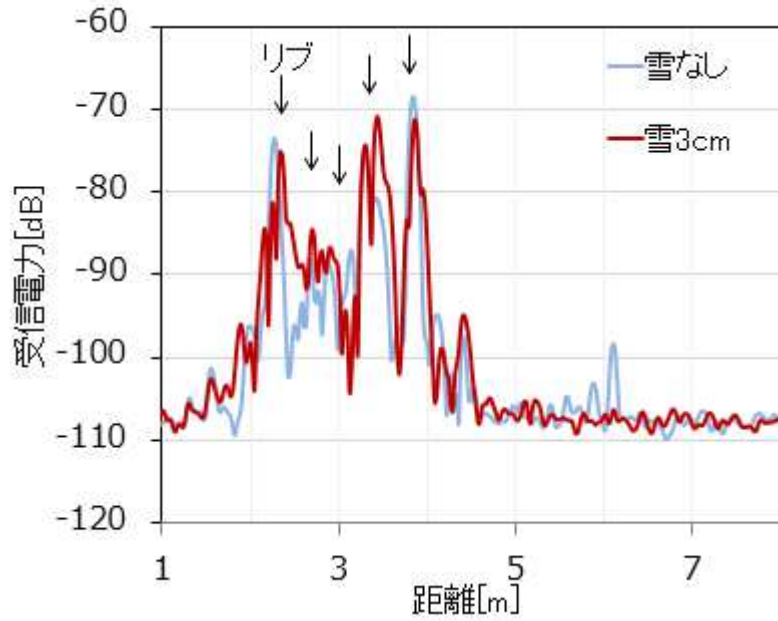


図 4.1.2-2 (a) 積雪 3cm

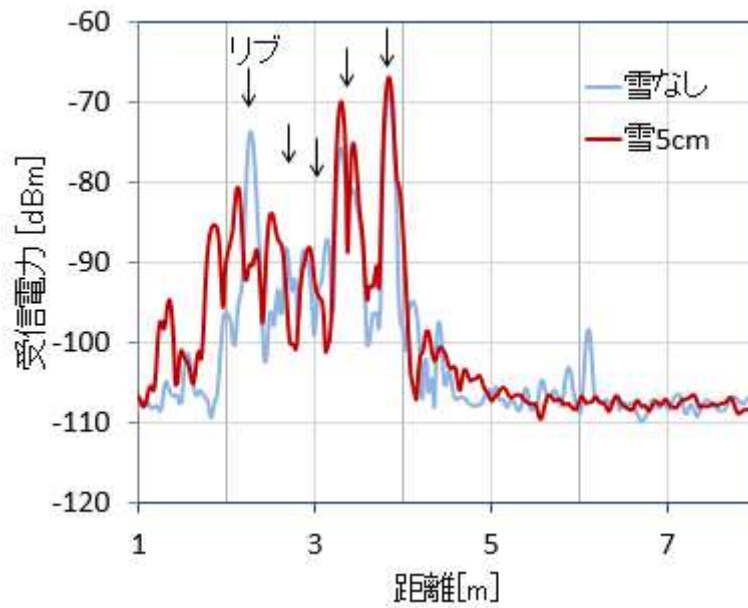


図 4.1.2-2 (b) 積雪 5cm

図 4.1.2-2 積雪時の 79GHz 帯ミリ波受信信号特性
(反射波の信号強度分布)

次に 4 と 5 番目のリブに注目にしてそれらの反射強度が積雪量（雪の厚み）と共にどのように変化するかを図 4.1.2-3 に示す。なお、積雪がない場合の結果も重ねている。

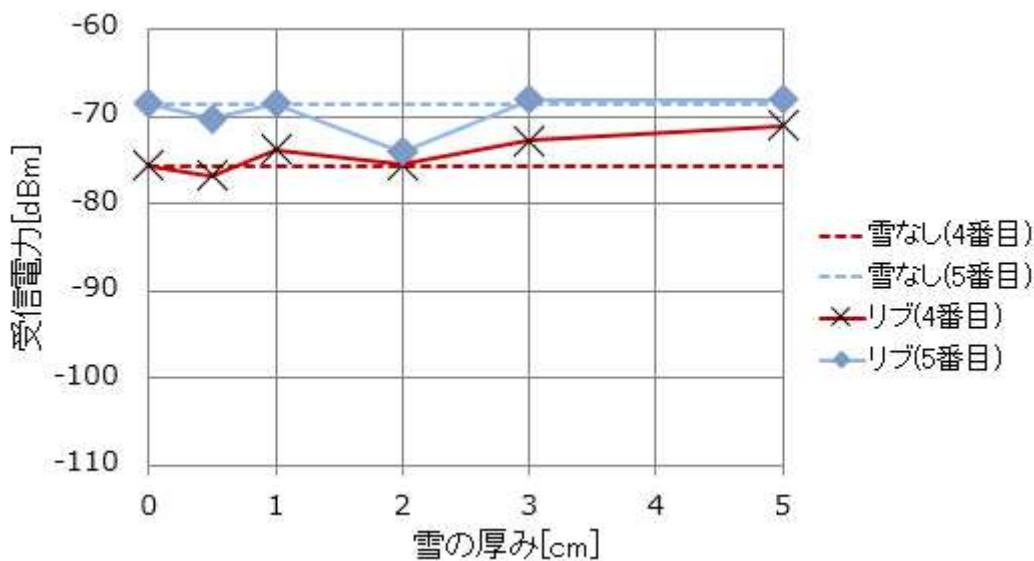


図 4.1.2-3 積雪の深さと反射波信号強度の関係 (4,5 番目のリブ)

さて積雪の影響については降雪時間と共に下部は圧雪され、雪質も変わっていく。一方、白線のある高速道路上で自動走行中に雪が積もりはじめ、システムが性能限界をむかえるシナリオを想定すると、白線検知に用いるミリ波レーダの性能限界はより高いほうが望ましい。そこで屋外で降雪機を使って雪を降らせ、受信信号が降雪時間と共にどのように推移していくのかを1個リブについて3回実施したのでその観察結果を図4.1.2-4 (a) ~ (c) に示す。なお、200秒後の積雪の深さは約3cmであった。

図 4.1.2-4 (a) では降り始めは降雪の密度が低い (パウダースノーのように水分量が少ない) ためリブからの反射波の変化が少ないが、リブが見えなくなり始めた約 100 秒後からリブからの反射波の減衰が大きくなっていることが分かる。また約 120 秒後以降ではリブからの反射波はほとんど見られないがリブ付近での信号が見られる。これは降雪による密度が増え、また積雪表面からのクラッタの影響であると考えられる。

次に 2 回目の図 4.1.2-4 (b) についても 1 回目と同じように降り始めた頃の降雪の影響は少ないが、120 秒後ではほとんど反射波は見られない。そして 150 秒後から再び大きな反射波が見られるがその場所 (距離) がリブの位置に一致しているは分かりにくい。そこで同図について 60、75、90、120、180 秒後の反射波信号強度を図 4.1.2-5 に示す。図 4.1.2-5 からリブの位置での信号は 90 秒後以降大きく減衰している。一方、図 4.1.2-4 (b) において 90 秒及び 180 秒後前後に見られる信号の位置はリブの位置と一致しておらず、積雪表面からのクラッタであることが分かる。

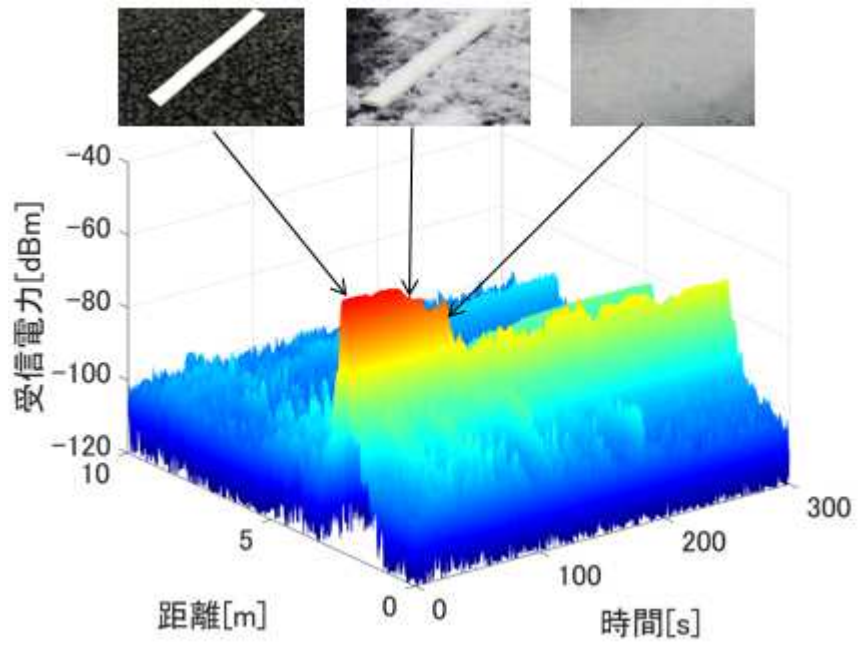


図 4.1.2-4 (a) 1 回目

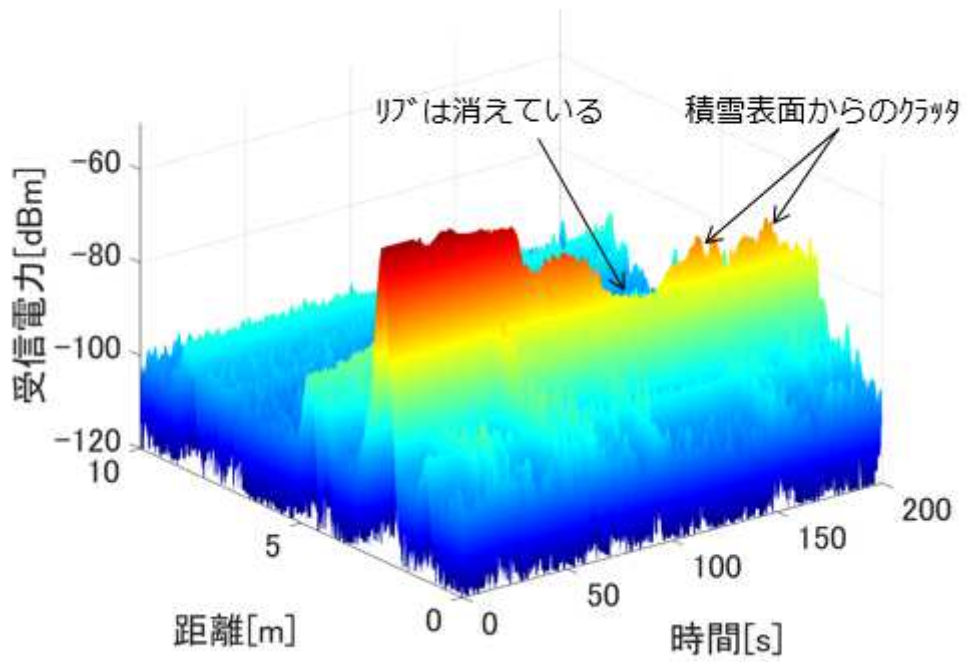


図 4.1.2-4 (b) 2 回目

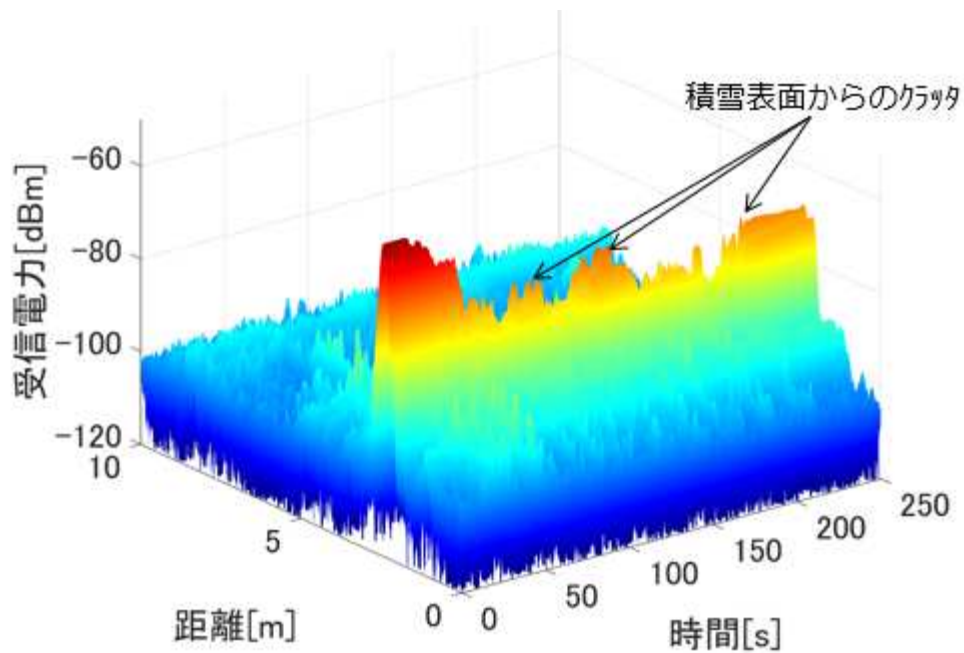


図 4.1.2-4 (c) 3 回目

図 4.1.2-4 降雪時間に対する反射信号の推移（リブ位置は約 2.5m，縦軸は信号強度）

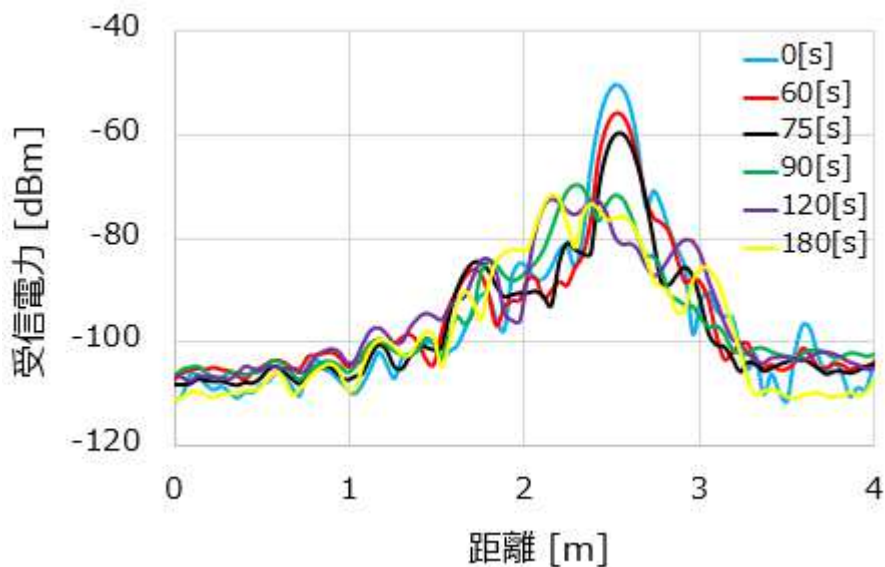


図 4.1.2-5 降雪時間に対する反射信号強度（電力遅延プロファイル）
（b）2 回目

(3) 水分が多い雪質での受信特性

積雪は時間と共に溶け始め、温度や湿度にも依存するが、含まれる水分の割合は大きく増加する。そこで図 4.1.2-6 のように小さな氷の塊になり、水分をかなり含んだ雪質の場合について計測を実施した。積雪の深さが約 0.5cm と 1cm の場合の反射波信号を図 4.1.2-7

(a) (b) に示す。同図から 4.1.2-2 と同じような傾向が見られ、減衰したリブからの反射波にスノークラッタが大きく影響していると考えられる。



図 4.1.2-6 氷の塊を含んだ雪質

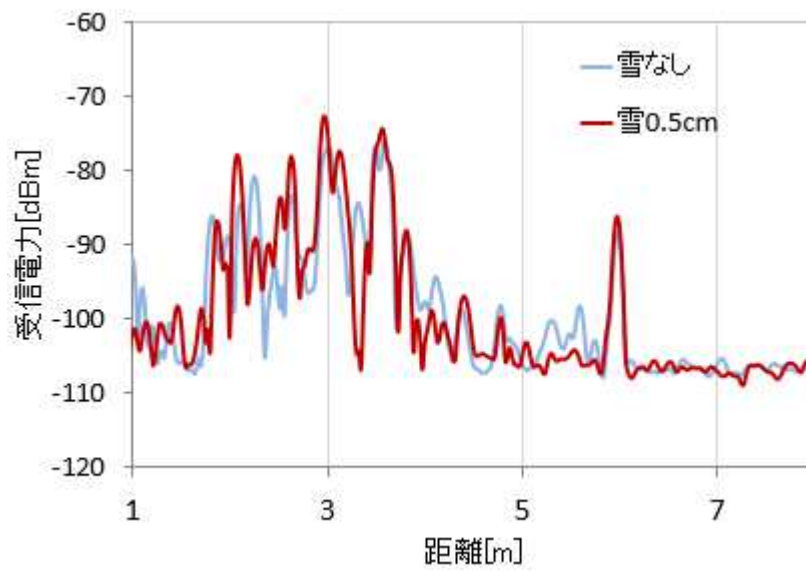


図 4.1.2-7 (a) 積雪の深さ約 0.5cm

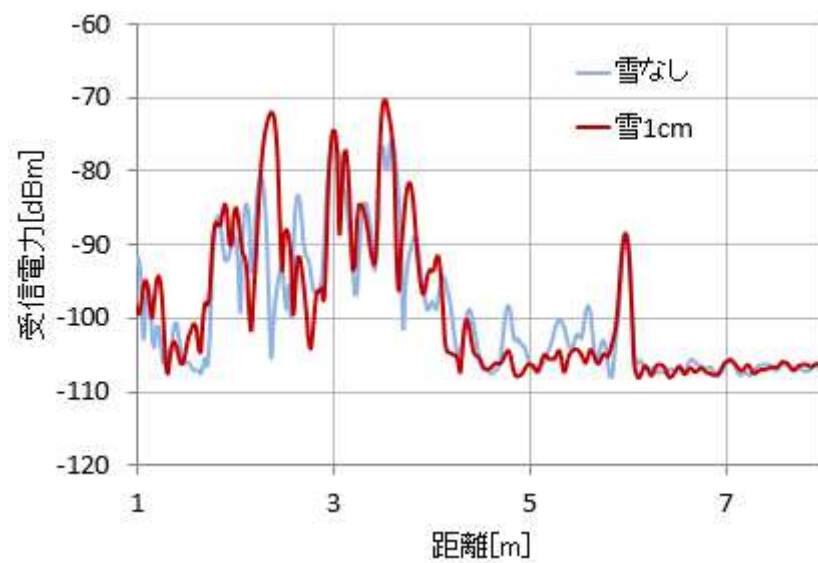


図 4.1.2-7 (b) 積雪の深さ約 1cm

図 4.1.2-7 水分が多い雪質での反射信号

(4) 雪の減衰特性

先述したように積雪に埋設したリブ白線検知については雪による減衰や積雪クラッタなどの影響を受ける。雪の減衰特性については 40GHz までは報告されているが 79GHz 帯について報告されていない。このため雪の減衰特性を定量的に調べる必要がある。そこで図 4.1.2-8 に示すように、反射や減衰がほとんどない和紙で覆った雪壁を挟んで、送信機 (Tx) と受信機 (Rx) を対向させて雪の深さに対する減衰を計測した。その減衰特性を図 4.1.2-9 に示す。なお、計測では温度や湿度にも依存するが、時間と共に溶け始め雪質が変化すると考えられる。そこで計測時の雪の水分量を確認し、その値を同図の中に示している^[4]。

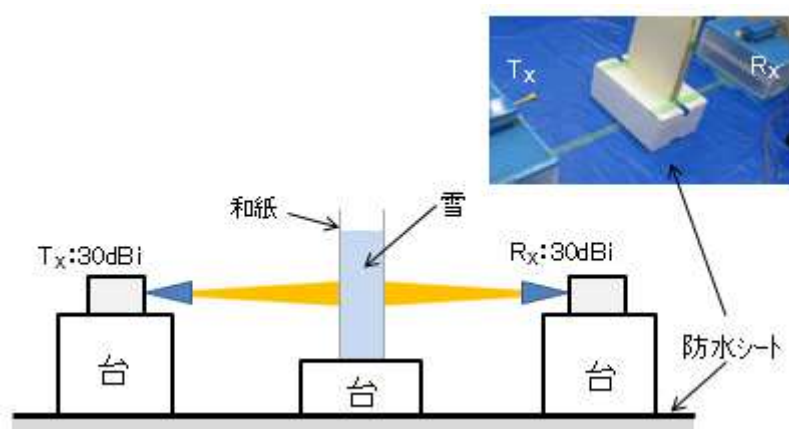


図 4.1.2-8 雪の減衰計測実験

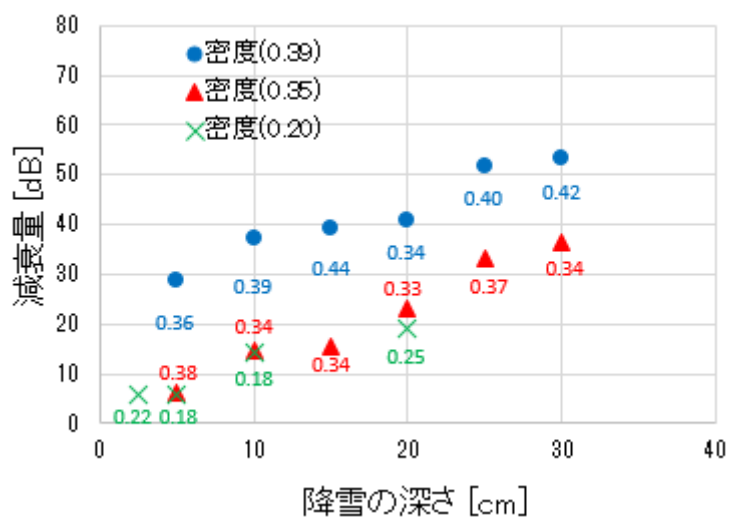


図 4.1.2-9 雪の減衰特性

(5) 霧の減衰特性 (参考)

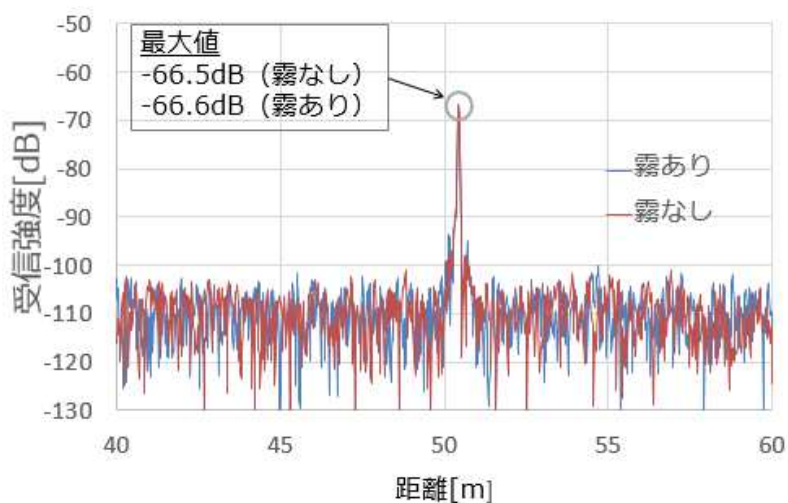
水平視界が 10~15m の濃霧時での 79GHz ミリ波の霧による影響について計測したので図 4.1.2-10 に示す。なお、水平視界は 10~15m で、計測ではレーダ装置の約 50m 前方に W 帯コーナリフレクターを置いて反射波を計測した。この計測結果から、ミリ波レーダは霧による減衰も少なく、ロバスト性が高いという事が明らかとなった。なお、10~45m についても計測を行ったが霧による影響はほとんど見られなかった。



(a) 霧がない状態 (中央上が物標であるコーナリフレクタ)



(b) 霧がある状態



(c) 50m 付近の物標に対する受信信号

図 4.1.2-10 濃霧時での 79GHz ミリ波の影響

4.1.3 路上建造物のミリ波受信特性

路上にはリブ白線だけでなく、ガードレールや橋の欄干、電柱、防音壁など周期的な形状がある構造物が多い。79GHz ミリ波の波長は約 3mm と短いため、リブだけでなく電柱やガードレールの支柱などからの反射波も期待できる。そこで本項では図 4.1.3-1 のようにガードレール、橋の欄干のミリ波反射特性を計測したので報告する。なお、計測仕様はこれまでと同じである。

図 4.1.3-1 からガードレールからの反射波にはリブ白線と同じように周期的に配列した大きな信号を視認できる。また反射波には電柱からの信号も見られる。このため周期性を利用して他の路上構造物との分離識別が期待できる。

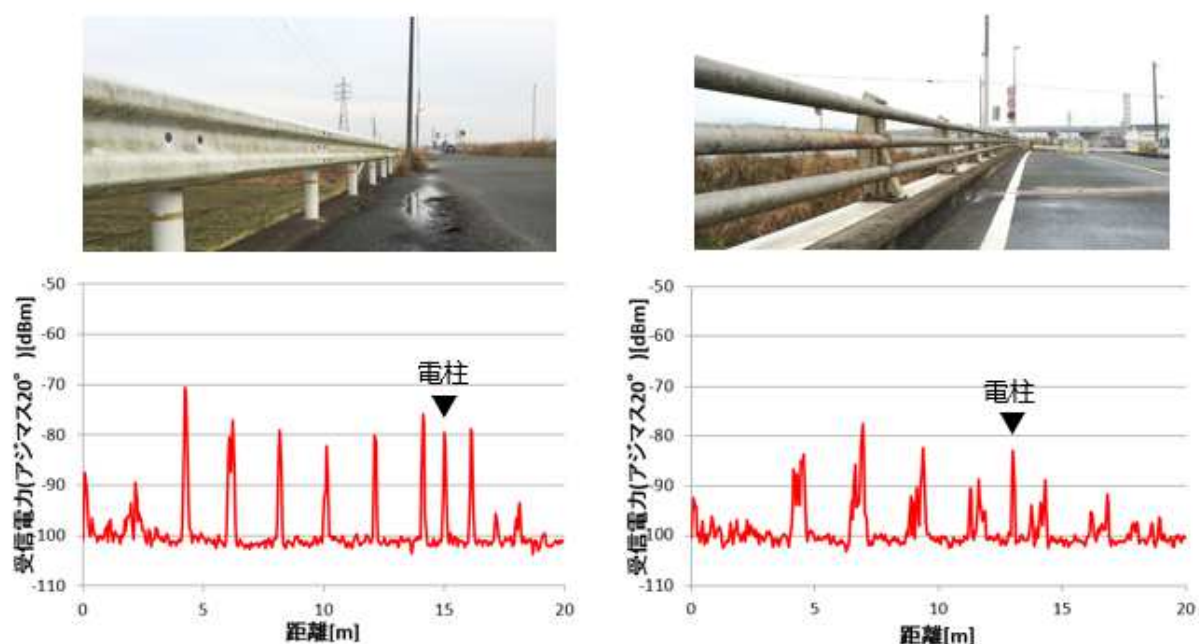


図 4.1.3-1 ガードレールと橋の欄干からの反射信号

4.2 動作原理機を用いた方式の検討

車載用 79GHz レーダは 77GHz~81GHz 帯での恒久的使用が決定しており、最大 3GHz の帯域幅を使用することができる。ここで帯域幅を ΔF とするとレーダ変調方式に拘らず、その距離分解能 Δt は $c/2\Delta F$ で表され、例えば $\Delta F=3\text{GHz}$ に対して Δt は 5cm となる。従って、白線リブや歩行者のように数 cm~数十 cm の物標を分離・識別することが可能である。しかし、その距離分解能は復調方式や信号処理に依存する。そこで本節では動作原理機を用いて、車載用 UWB レーダとして想定される FM-CW、高速チャープ（パルス圧縮）、インパルス、ステップド FM について計測し、レーダ変調方式の特徴と課題を整理した。なお、回路構成や遠近問題、測距精度、耐干渉性などの観点からレーダ方式について検討する。

4.2.1 動作原理機の原理と概要

インパルスなどを含む UWB レーダ方式を検討するために図 4.2.1-1 のような動作原理機を試作した。ここでは 12GS/s、10 ビットの DDS で超高速アナログ信号を合成し、6.5GHz と 70GHz のローカル発振器によるスーパーヘテロダインで 79GHz 帯ミリ波に変換している。一方、受信信号はベースバンド（アナログ信号）にダウンコンバートされ、12GS/s の AD 変換器でデジタル信号に変換されて信号処理される。

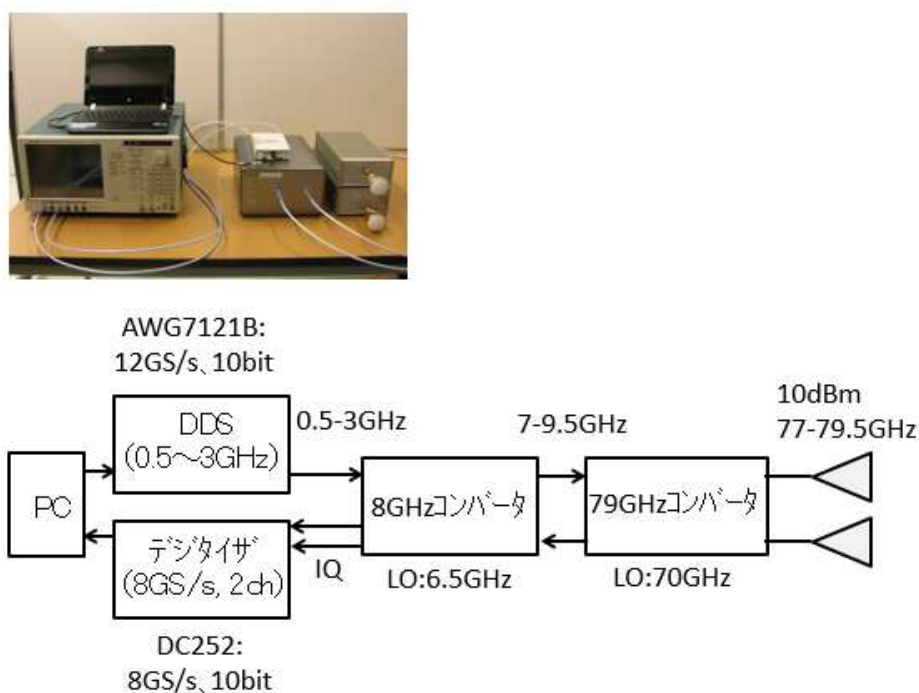


図 4.2.1-1 動作原理機の外観とブロック図

4.2.2 ミリ波レーダ方式

FM - CW、高速チャープ（パルス圧縮）、インパルス、ステップド FM について回路構成、遠近問題、測距精度、耐干渉性などの観点から特徴と課題を整理した。

(1) FM-CW 方式

図 4.2.2-1 に示すように送信信号の周波数を時間に対し *up* と *down* 交互に線形 FM 変調させて送信し、受信部では物標からの反射波と送信波を検波することにより距離 R に比例した周波数をもつビート信号（周波数 f_{up} と f_{down} ）を取り出す。このように簡単な RF 回路で物標の位置とドプラを同時に検出できるために前方監視レーダとして採用されている。一方、信号処理ではそれぞれのビート信号を FFT 解析し、ピーク検出によりビート周波数 f_{up} と f_{down} を計算する。ここで、物標に対して相対速度がある場合にはドップラ効果により周波数がシフトする。そこで、それぞれのビート周波数について代数演算処理で距離と相対速度を求める。この場合にはビート周波数の測定分解能は波形の観測時間 ΔT で決まる。従って複数物標の分離識別を行うために ΔF を大きくしても代数演算処理による測距精度とドプラ精度の改善は難しいと考えられる。また、マルチパスを含む多くの反射波に対してそれぞれを特定するためには *up* と *down* のビート周波数の集合に対して適切な組合せ処理（マッチング処理）によって反射波を特定する必要がある。このような組み合わせ処理に対して前の推定結果から予測される車両の距離に優先度を置き、方位 FFT を処理することで計算量を削減できる。

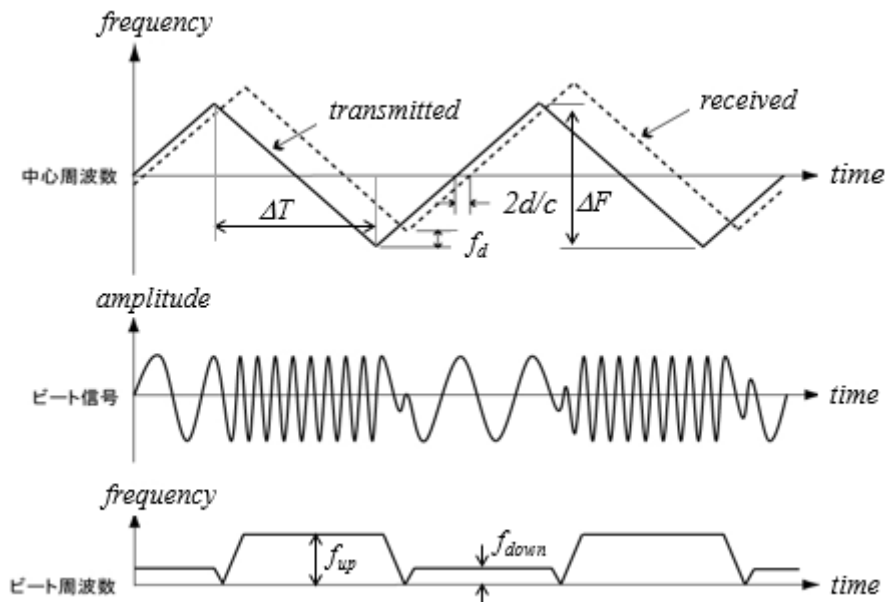


図 4.2.2-1 FM-CW 方式

(2) 高速チャープ方式 (パルス圧縮) ^[5]

高速チャープ方式では図4.2.2-2のように線形FM変調を加えた数 μs の短パルス波を送信し、受信部では距離分解能を向上させるため相関処理により直接パルス圧縮を行う。このため短パルス波の帯域幅をFMによりN倍に周波数拡散すると距離分解能は $1/N$ となる。例えば、 $\Delta F=3\text{GHz}$ のチャープ信号の分解能は約 5cm となる。またduty比を大きく設定することにより1個のアンテナを送受信で共用できる。しかし、課題としてチャープ信号をパルス圧縮するための回路構成が複雑になる。

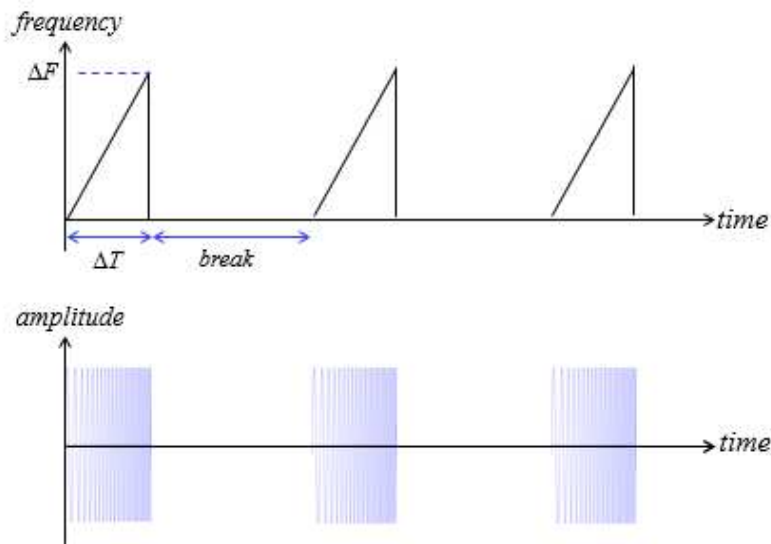


図 4.2.2-2 ファーストチャープ方式

(3) インパルス方式 (符号パルス変調)

インパルス方式またはパルス方式は図 4.2.2-3 に示すように 1msec 以下の超短パルスを数十～数百の duty 比で送信する。このため送信と受信の両方に同じアンテナを共用できる。ただし、送信波の尖頭値が高いため漏れや近傍の反射波から受信部を保護する必要がある。今後、多くの車にレーダが標準装備されると与干渉や被干渉が深刻な課題になると予想される。この場合には、各送信インパルスに固有の符号位置変調 (PPM) をかけることにより他のレーダからの干渉を時間軸上で回避することもできる (時間ホッピング)。しかし送信部の回路は簡易であるが、受信部は 1msec 以下の超短パルスを高速処理するための回路構成が複雑になる。また duty 比にもよるが尖頭値の上限 (電波法) により平均電力がかなり低下し、検知範囲も限定されると考えられる。

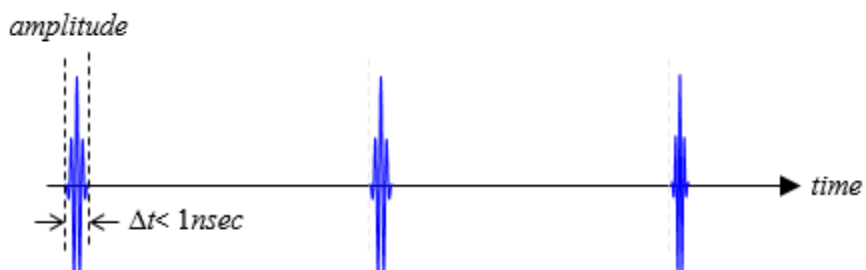


図 4.2.2-3 インパルス方式

(4) ステップド FM 方式^[6]

ステップド FM 方式は図 4.2.2-4 に示すように一定の幅で送信周波数を段階的に変化させた狭帯域パルスを間欠的に送信し、受信部では FM-CW 方式と同じように送信波と受信波を位相検波する。ここでステップ幅 Δf とステップ数 N とすると帯域幅は $\Delta F = N \times \Delta f$ になる。次に位相検波信号は AD 変換後に IDFT (逆高速フーリエ変換) によりパルス圧縮を実現している。このため回路や処理が簡易である。また与干渉や被干渉の問題に対しては、各レーダ車に固有のステップ周波数 (周波数パターン) を割り当てることによって回避することができる。このようにパルス圧縮処理は簡易であるが、課題として高価な広帯域かつ高速な局部発振器 (シンセサイザ) が必要である。

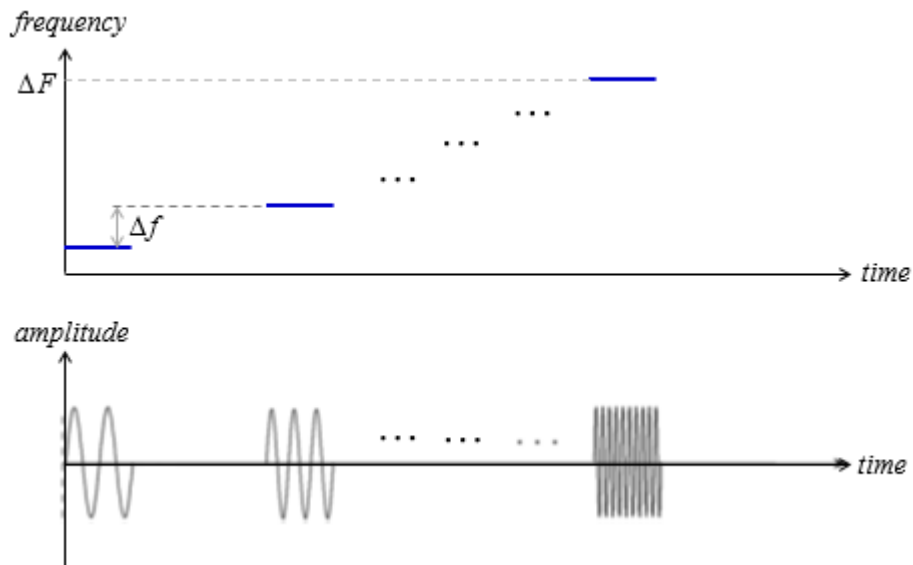


図 4.2.2-4 ステップド FM 方式

4.2.3 検討結果と考察

図 4.2.1-1 の動作原理機を用いて各レーダ方式について電波暗室内で基礎実験を行った。その検討結果を表 4.2.3-1 に示す。

今後、多くの車にレーダが標準装備されるようになると相互干渉が深刻な課題になることが予想される。現在の 77GHz 帯車載用前方監視レーダでは対向車との干渉を偏波面で対応している。しかし、前方ではなく、斜め前方など周辺監視を考えるとマルチパスの影響もあり、偏波面だけで干渉を回避することは難しく、レーダ変復調方式についても検討する必要がある。例えば、各車固有の符号を組み合わせたインパルス方式では時空間で干渉を回避することが期待できるが、尖頭電力の上限（10dBm）により平均電力が劣化する。例えば、帯域幅が 1GHz ではパルス幅は 1nsec、そして duty 比を 300 と仮定すると平均電力は 18.77dB 低下する。また 1nsec の信号を受信するためのハードウェアが複雑で高価になることが予想される。また FM-CW 方式は簡易であり、これまでの実績もあるが、マルチパス環境下では多くの反射波が受信されるためにカップリング処理による誤検出の可能性を否定できない。一方、欧州メーカーが検討している高速チャープ方式（パルス圧縮）は測距精度やインパルス方式のように平均電力の低下や遠近問題（近くの小さな物標からの反射波が後方の大きな物標からの反射波によって見えなくなる）の課題はないが、超広帯域なパルス圧縮を行うための受信部の信号処理が複雑になり、コストも高価になるだろう。一方、ステップド FM 方式は簡易な受信部でパルス圧縮を行うことができるが、送受で共用する局部発振器が高価になることが予想される。

表 4.2.3-1 各レーダ方式のベンチマーク結果

項目/方式	高速チャープ (パルス圧縮)	FM-CW	インパルス	ステップド FM
干渉問題	—	—	○	—
平均受信電力	○	○	×	○
測距精度	○	△	○	○
ハードウェア	△	○	△	△
技術課題	・ 相関処理	・ 回り込み ・ 多目標 ・ 耐干渉	・ 低受信電力 ・ 高速DSP	・ 高速シフト

(注) 太字のみ実施

4.3 基本識別アルゴリズムの開発

リブ白線からの反射波特性（周期的な反射波）を利用して他の物標との分離識別を行い、そして白線から水平離隔距離を推定することができる。なお、学内の道路にはリブ白線が敷設されていない。そこで本節では、原理確認のためガードレールからの反射信号（図4.1.2-9）を用いて基本識別アルゴリズムと水平離隔距離推定を行った。なお、79GHzミリ波レーダの帯域幅は3GHzでレーダ装置をガードレールに沿って動かし、オフラインで信号処理を行った。

4.3.1 特徴抽出とフィルタによる分離識別

信号処理フローを図4.3.1-1に示す。各路上構造物の周期性は自己相関より特徴抽出を行い、その周期性から他の路上構造物との分離識別を行う。

ガードレール、橋の欄干、ポールコーンについて図4.3.1-1の処理前後の信号を図4.3.1-2 (a)～(c)に示す。図(a)～(c)からは、物標の周期性から不要信号は除去され、パターンマッチングにより認識できることが分かる。

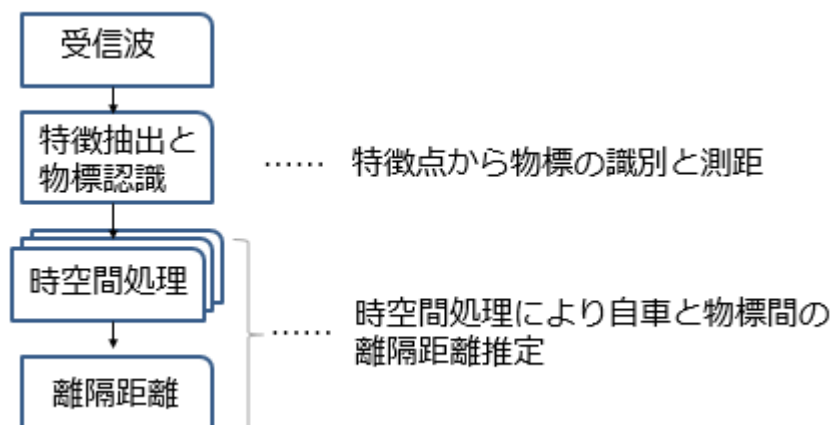


図 4.3.1-1 信号処理フロー

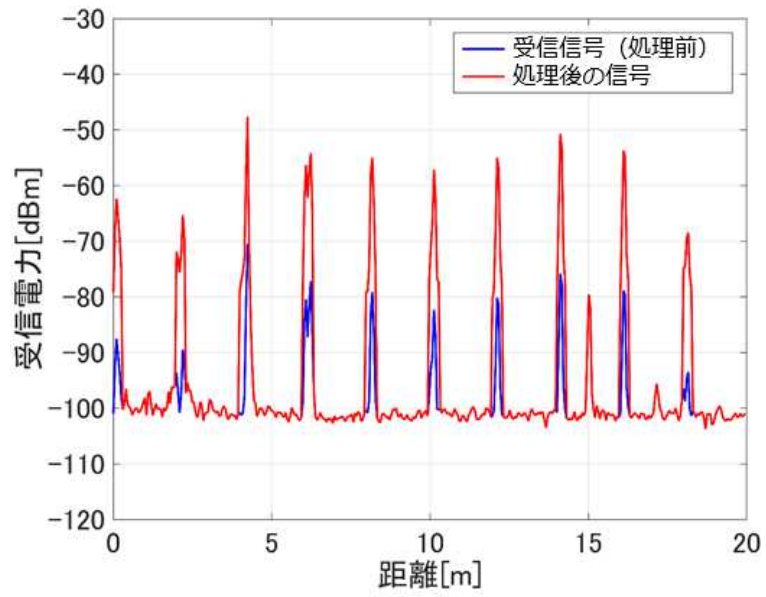


図4.3.1-2 (a) ガードレールからの受信信号

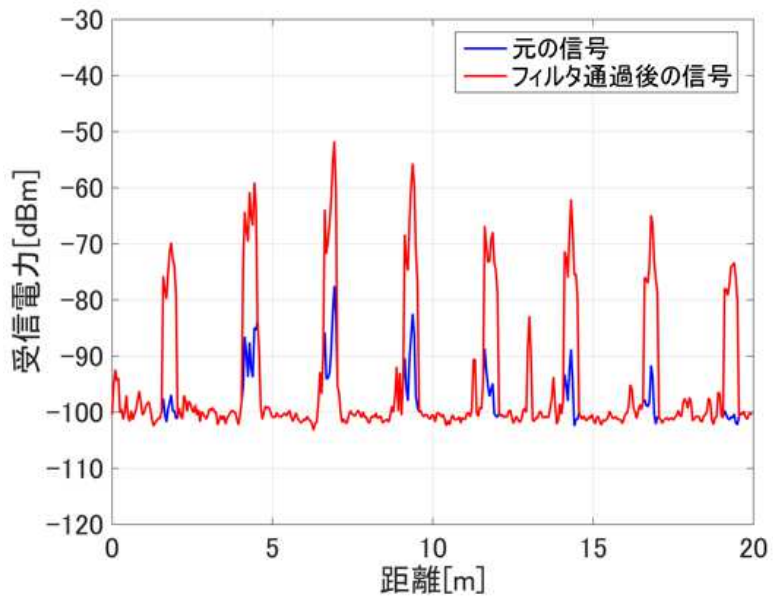


図4.3.1-2 (b) 橋の欄干からの受信信号

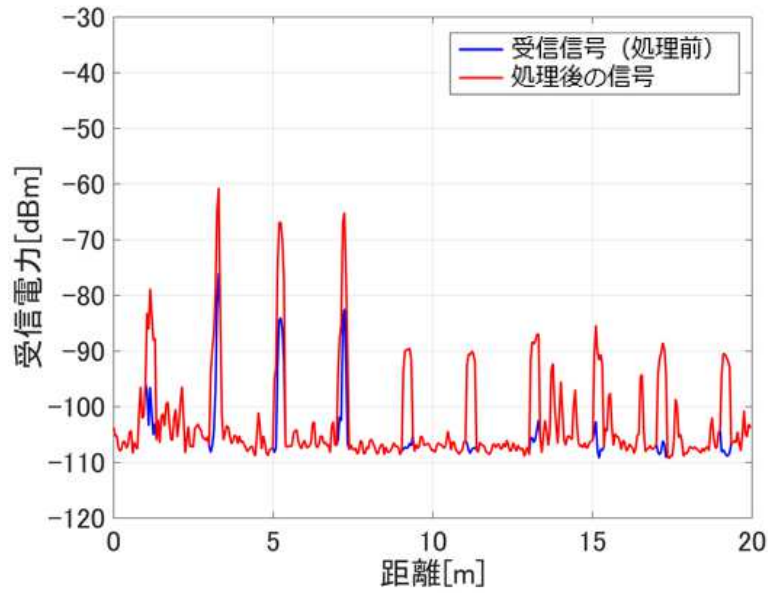


図4.3.1-2 (c) ポールコーンからの受信信号

図4.3.1-2 特徴抽出とフィルタ処理後の受信信号

4.3.2 水平離隔距離推定

本項では自転車位置推定アルゴリズムについて検討する。ここではガードレールを例に説明する。アンテナとガードレールの幾何学的位置関係から車両と路肩の距離 L を求める。

まず、路上構造物は周期性を持っているためポール間隔 y_n は以下ようになる。

$$y_1 = y_2 = \dots = y_n \quad (\text{式 4.3.2-1})$$

ここでポール間隔 y_n はデジタル地図情報から得られると仮定している。次に各ポールからの反射はフィルタを通過した後のレンジプロファイルより検出できるため、各反射波の距離を d_1, d_2, \dots, d_n とする。

次に y_i, d_i ($i=1, 2, \dots, n$) と次式のように $\theta_{12}, \theta_{23}, \dots, \theta_{n-1n}$ を求める。

$$\cos(\theta_{n-1n}) = \frac{y_{n-1}^2 + d_{n-1}^2 - d_n^2}{2 \times y_{n-1} \times d_{n-1}} \quad (n = 2, 3, \dots, n) \quad (\text{式 4.3.2-2})$$

上記より車両と路肩の距離 L は次式のように求まる。なお、レンジプロファイルには距離分解能 ΔR による誤差も考慮して、各 θ から求まる L の値の平均値より求める。

$$L_N = d_{n-1} \times \sin(180 - \theta_{n-1n}) \quad (\text{式 4.3.2-3})$$

$$L = \overline{L_1, L_2, \dots, L_N} \quad (\text{式 4.3.2-4})$$

4.3.3 推定誤差

図 4.3.3-1 に推定した離隔距離の推定誤差を示す。推定処理では前処理を行っておらず、各反射波の位置（約 5cm の誤差を持つ）から幾何学的に計算しているため誤差が数十 cm にも及ぶこともある。今後は前処理を行い、空間処理を効果的に組み合わせることによって誤差を 10cm 以下に抑えたい。

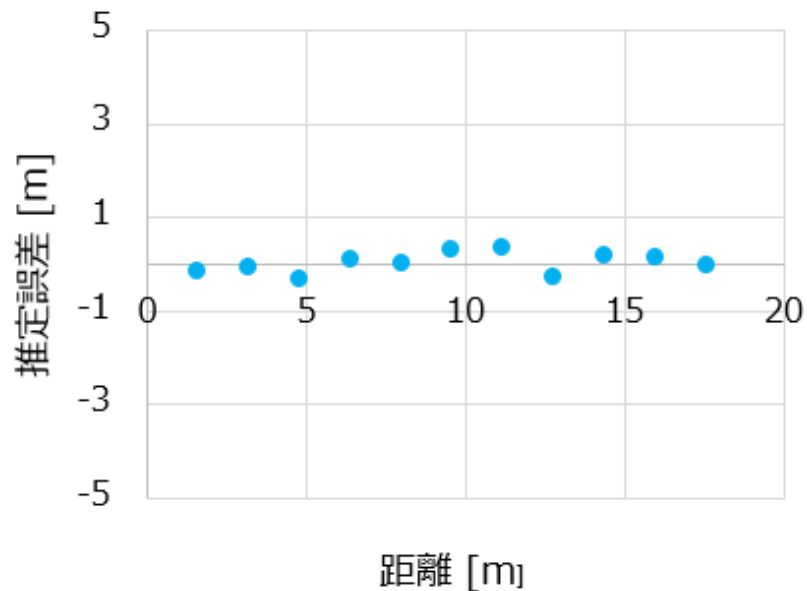


図 4.3.3-1 離隔距離の推定誤差

4.4 まとめと今後の課題

リブ白線を検知・識別し、白線からの離隔距離を推定するという課題に対して、(1) 積雪の影響、(2) レーダ変調方式の検討、(3) 他の路上構造物の中から各リブから低い利得の信号を効果的に合成する認識アルゴリズムについて検討した。

(1) 積雪の影響

リブ白線に対する 79GHz 帯 UWB ミリ波レーダの反射特性について、積雪の影響を動作原理機を使って確認した。積雪によるミリ波減衰とその表面反射（クラッタ）の両方に影響を受けており、前者だけ考慮した場合は、積雪が 5cm 以下かつ積雪密度が 0.3 以下であれば、ミリ波の減衰が約 5dB 以下であり、リブ識別が可能と思われる。しかし、積雪が深くなるにつれてリブからの反射波よりクラッタが大きくなるとリブ識別は困難になる。また、同じ積雪でも、ミリ波レーダのリブ式白線に対する方位角、仰角の設定次第で雪中での経路長（伝搬距離）が異なるためリブ識別が可能な積雪限界も変わる。今後、限界の見極めと限界を踏まえた活用法が必要である。

(2) レーダ変調方式の検討

代表的なレーダ変調方式（FM-CW 方式、パルス圧縮方式、インパルス方式、ステップド FM 方式）について、動作原理機を用いて電波暗室内で基礎実験を行った。実験結果を踏まえて、干渉問題、平均受信電力、測距精度、ハードウェア（コスト）、技術課題について比較整理を行った。各方式とも長所／短所があり、今後、リブ白線識別などアプリケーションを踏まえて方式選定の論議が必要である。

(3) リブ識別アルゴリズム

リブ白線からの反射波特性（周期的な反射波）を利用して他の物標との分離識別を行い、そして白線から水平離隔距離を推定する識別アルゴリズムを具体的に作成し、検討した。今回は、周期性を有する他の道路構造物（ガードレールなど）を代替にを使って基礎検証を行った結果、比較的良好な距離推定精度得られることを確認した。今後は、空間処理などの効果的利用により更なる距離精度の改善が期待される。

参考資料

- [1] N. Currie, C. Brown, “Principles and Applications of MILLIMETER-WAVE RADAR”, ARTECH HOUSE, Inc., 1987.
- [2] M. Skolnik, “Introduction to Radar Systems 3rd ed.”, McGraw-Hill Companies.
- [3] N. Currie, “Radar Reflectivity Measurement: Techniques & Applications”, ARTECH HOUSE, Inc., 1989.
- [4] “雪の重さを考える～豪雪のまち 新潟県十日町市から～”, (財)日本気象協会, 2012年2月9日.
- [5] J. Massen, M. Frei, W. Menzel, and U. Moller, “A 79GHz SiGe short-range radar for automotive applications”, Int. J. of Microwave and Wireless Technologies, 5(1), pp.5-14, 2013.
- [6] 梶原、山口、“ステップドFMレーダによる路面クラッタ抑圧”、信学論B, Vol.H84-B, No.18, 2001年10月.

第5章 車線維持制御における白線識別性能評価

本事業では、これまで白線識別が困難であった雨や霧、雪や西日などの状況での識別を可能とする、新たなセンシングシステムや新たな白線などの開発を目指している。想定対象としている環境状況においては、雨の状況の一つをとっても、強い雨なのか弱い雨なのか、路面には水膜ができているのかなど、様々な状態が考えられる。白線識別性能の評価を行うには、まず、環境や識別状況に対する指標が必要であり、性能を評価するための基準が必要となる。環境や識別状況に対する指標としては、天候、気温、湿度、降雨量、積雪量、視程、照度などがあげられる。また、センシングシステムの性能としては、検出処理時間、未検出時間、検出精度、分解能、検出範囲などがあげられる。さらに、今回、リブ式の白線などの利用が想定されているが、白線に対する評価としては、視認性、騒音、振動、耐久性などがあげられる。既に車線逸脱防止支援システム（LKAS：Lane Keeping Assistance System）のシステムの搭載車が市販されているが、対象としている環境や識別状況は限られており、今回想定するような厳しい環境条件は、想定する支援の動作環境からは対象外とされ、さらに指標や評価基準などが明確となっていないのが現状である。

本事業では、5年後を目処に、走行速度 100km/h の実走行にて白線識別システムの認識性能の実証評価を行うことを目指している。白線識別技術の実証には、新たな白線識別センサシステムとそれに対応した高輝度白線の試作装置や試作材料が必要である。最終的には、開発した白線識別センシングシステムを実験車に搭載するとともに、開発した白線材料にて高輝度白線を実験線に敷設し認識性能の評価を行うことを目標としている。また、センシングシステムから得られた白線位置情報を用いて車線維持制御を行う場合、白線認識性能は車線維持制御に大きく影響するため、白線認識性能と車線維持制御性能の関係を明らかにするとともに白線識別技術に関する標準化案を策定することが目標である。

平成 26 年度から開始された本事業では、平成 27 年度においても新たな白線識別センサシステムはまだ開発途上の段階であり、車載して実走行による評価をすることができない状態である。そのため、平成 27 年度においては、平成 26 年度に基礎構築と基本動作の確認を行った車線維持制御実験車の改良を行い、試験的に組み込むビジョンセンサを用いて、検出範囲や処理時間、車両速度を変化させて車線維持制御を実施し、その影響を明らかにした。また、既に市販されている車線逸脱防止支援システムなどで利用されている白線識別のためのビジョンシステムにおける性能限界を明らかにするため、白線識別の難しい環境条件での画像取得の検証を行った。ビジョンシステムとしては、今後、活用が期待されている照度変化に対応するハイダイナミックレンジカメラなども用いて比較した。さらに、平成 26 年度に引き続き、運転支援システムとしての性能基準等に関する動向の調査と、白線識別センサの性能評価手法等に関する動向の調査を行った。これらについて、以下に報告する。

5.1 白線識別センシング性能評価用実験システムの開発

平成 26 年度に試作を行った白線識別センシング性能を評価するための実験システムとしての車線維持制御実験車の改良を行った。この改良は、平成 27 年度に実走行により性能評価を実施するために試験的に組み込むビジョンセンサの処理部分を新たに設置したことなどである。これにより、車両の制御処理装置に対して、画像処理などの負荷がかからないシステム構築が施されたことになる。新たな白線識別センサが開発された場合にも、この処理部分にセンサ処理部を置き換える形で、信号を揃えることで、簡単にセンサを入れ替えた検証が可能となる。これにより、白線識別性能としての検出範囲や検出周期が、車線維持制御性能にどのように影響するかを実車による走行実験で検証した。

まず、車線維持制御実験車のシステム構成の改良について述べ、試験的に組み込むビジョンセンサの処理部分などについて説明する。また、センサ及び制御性能の違いによる影響を検証するための実車走行について述べる。さらに、白線の性能評価試験について、リップ式白線の騒音試験や摩耗による視認性への影響などの検証について述べる。

5.1.1 車線維持制御実験車について

本項では、白線識別センシング性能評価用実験システムである車線維持制御実験車について、平成 27 年度の改良点とシステム構成などについて述べる。白線識別センシングシステム単体に対する性能評価としては、車線維持制御を可能とする実験車両を用いなくても、識別の可否を計測できれば良いと考えられる。しかし、白線識別センシングシステムの主たる用途の 1 つとして、車線維持制御に用いることがあげられる。実用途を考慮した性能評価としては、車線維持制御に用いることができる白線識別能力を持っているかを判断する必要がある。すなわち、実環境での車線維持の実走行が実現できるか否かの評価が不可欠と考えられる。そこで、白線識別センシングシステムを搭載し、実走行により性能評価を実施するための車線維持制御実験車を、平成 26 年度に試作している。車線維持制御は、当然、白線識別センシングシステムが適用される車両による制御性能の違いにより、求められるセンシング能力も異なる可能性がある。そのため、適用される車両による制御性能の違いなどを模擬して評価できるようにするため、応答性や制御周期を可変とすることができ、操舵角の分解能を細かく計測と制御ができる特殊な仕様としている。また、速度に対する影響も評価する必要があり、再現性を確保するために、操舵、速度の自動制御が可能であるようにしている。平成 26 年度試作した車線維持制御実験車の外観を図 5.1.1-1 に示し、制御機能の仕様を表 5.1.1-1 に示す。



図 5.1.1-1 車線維持制御実験車の外観

表 5.1.1-1 車線維持制御実験車の制御機能の仕様

【操舵制御特性】	
制御回転速度	制御回転速度：1rps
制御分解能	操舵トルク 1,000 段階
操舵角制御	0.5 度
最大トルク	電動パワーステアリングシステムの最大トルク
オーバーライド	可
【速度制御特性】	
加減速制御範囲	フルスロットル～フルブレーキ
制御分解能	アクセルペダルストローク最大量に対して 2,000 段階，ブレーキペダルストローク最大量に対して 640 段階
ギアチェンジ	PRND
一定速度制御特性	目標速度に対して 0.3m/s(RMS)
速度制御範囲	0～30m/s (0～108km/h)
オーバーライド	可
【計測状態量】	
出力状態量	操舵角，操舵トルク，4 輪車輪速，操舵，速度のオーバーライド検知，ギア位置，ブレーキペダルストローク，アクセルペダルストローク，ブレーキランプ状態

さらに、この車線維持制御実験車には、開発する白線識別センシングシステムとの比較や検証のために、従来技術の白線検知のビジョンシステムの搭載を行っている。平成 26 年度は、ビジョンシステムとして、ZMP 製 RoboVision シリーズを搭載するなどして、動作の基礎検証を行っている。しかし、白線認識センサにおける検出範囲や検出周期を変化させて、その影響を検証する必要があるため、今回、新たに USB 2.0 カメラを使用した、簡易な車線追従制御車両を構築した改良を施している。図 5.1.1-2 に車線維持制御実験車の改良したシステム構成を示す。今回、車線の追従性を検証するにあたり、位置情報や横加速度の検出には、RTK-GPS やジャイロセンサを車載して用いた。また、図 5.1.1-3 に今回の車載した USB カメラ (LOGICOOL C930e) と図 5.1.1-4 に白線認識の例を示す。

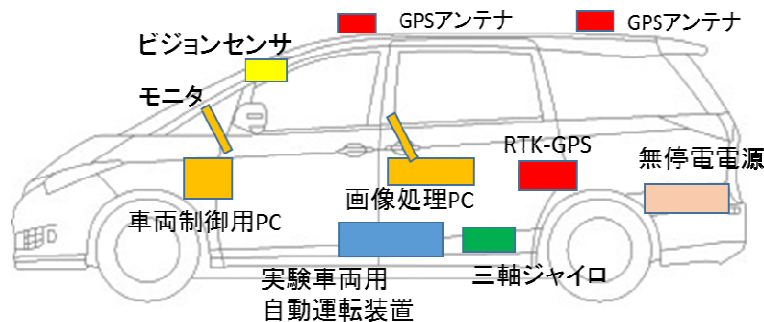


図 5.1.1-2 車線維持制御実験車のシステム構成



図 5.1.1-3 白線認識用ビジョンセンサ



図 5.1.1-4 ビジョンセンサによる白線認識例

5.1.2 センサ及び制御性能の違いによる影響と評価について

本項では、車線維持に対する白線識別センサの性能や、車両の制御性能の違いによる影響と定量化のための評価について述べる。車線維持制御アルゴリズムは、各自動車メーカーなどで白線識別センシングシステムと組み合わせて様々に開発されている。しかし、本事業では、まだ、開発される白線識別センシングシステムの検出範囲や分解能、検出周期などについては想定されているが未知である。このことから、白線識別センシングシステムからの白線の位置情報から目標とする前方の注視点（以降、目標収束点とする）を用いた、車線追従のための操舵角を算出可能な前方注視二次モデルを利用した車線追従制御アルゴリズム^[1]を用いることとした。平成 26 年度は、地点追従法^[2]を用いた制御での基礎的な検証を行っていたが、平成 27 年度は、より一般的に用いられているアルゴリズムを利用する

ことにした。まず、車線維持制御実験車に対して、車線追従制御アルゴリズムとして、目標コースの位置ズレと目標収束点によるコース追従制御の実装を行った。これは、図 5.1.2-1 に示すように、目標とするコースを設定し、車両制御の目標収束点を車間時間などで設定することにより、その時の位置ズレによる目標収束点までの角度から、目標コースに追従させるための操舵角を算出するものである。まず、白線識別のセンサの代わりに、RTK-GPS により位置認識を行い、また、地図情報により目標コースを与えることで追従性を検証した。RTK-GPS の位置精度は、 $\pm 2\text{cm}$ 以内である。目標収束点を車間時間で 1~3 秒前方に設定 (20km/h : 5.5~16.6m, 80km/h : 22.2~66.6m) した場合に安定した走行が可能であることが分かった。この時の制御周期は約 10Hz であった。通常、このような前方注視モデルを利用した車線追従制御の場合には、目標収束点までの距離を速度に応じて、可変とすることが一般的である。これは、算出される操舵角でも、速度によって移動距離が異なるため、車両の時間当たりの位置変化は大きく異なるためで、たとえば、速度が速い場合には少ない操舵量で急な方向変化となることがいえる。当然、この時の制御周期も関係してくる。制御周期が速ければ、目標収束点が近く、かつ、速度が速い場合にも、操舵制御が可能となるが、制御周期が遅い場合には、操舵が間に合わない可能性が高くなるといえる。図 5.1.2-2 に実験走行の様子を示す。パイロンで示しているコースを地図上に与え、RTK-GPS などからの位置情報を基に、自動操舵を行って走行している。

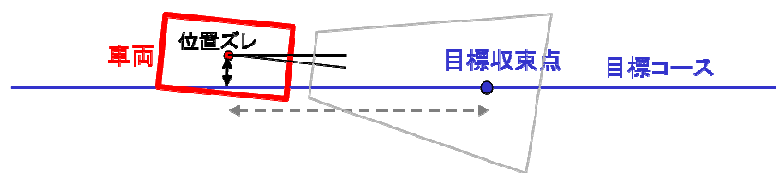


図 5.1.2-1 目標コースと目標収束点を用いたコース追従制御



図 5.1.2-2 自動経路走行の様子

この目標コースへの追従制御を、ビジョンシステムからの情報を利用するように改造した。図 5.1.2-3 にビジョンセンサによる車線追従制御の模式図を示す。白線を目標とし、車両中心分のオフセット距離を設けて、目標収束点を仮想的に置くことで、車線に追従させる制御となる。

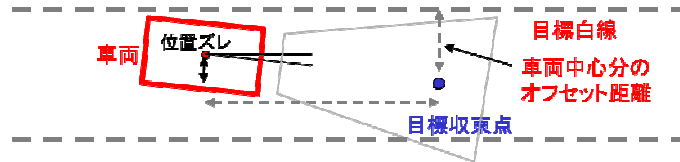


図 5.1.2-3 ビジョンセンサによる車線追従制御

操舵角の決定方法は、先に示した前方注視二次モデルを使用しており、実車を用いた走行実験では、ビジョンセンサから導く目標収束点の位置を、本事業において開発されるセンサに合わせた距離（10m）とさらに遠く（24m：約 80km/h 時の 1 秒強前）と固定したときに、車線追従制御の安定性などに変化がみられるかを検証した。前述しているように、速度が速くなると目標収束点は遠くに設定することが一般的である。しかし、本事業で開発するセンサにおける白線の識別できる距離は、10m 程度と想定されていることもあり、それらのセンサを用いた時や、また、ビジョンセンサなどにおいても環境の状態が悪く視野範囲が短くなった時を想定し、車線追従制御への影響をみるために、固定して検証を行っている。これらの検証は、産総研の北サイトにある試走路の直線路と曲線路（180R）において、車線維持制御実験車を用い車線追従性を実走行して行った。図 5.1.2-4 に車線追従の様子を示す。



図 5.1.2-4 産総研試走路での車線追従の様子（上段：直線、下段：180R 曲線）

はじめに、制御周期と追従制御の安定性の検証を行った。車速 60km/h、目標収束点を 10m 前方とし、白線認識システムの検出周期を 100msec から 250msec に変化させた。この時、車線維持制御実験車の操舵制御周期は 50msec としたため、最大制御遅延は 150msec から 300msec の場合における制御周期の違いによる追従制御への影響を検証となる。

直線追従安定性の結果を図 5.1.2-5 に示す。結果より、制御周期 300ms においては、白線からの逸脱が見られる。図における赤い点線は、直進性の参照のために後から入れたものであり、車線を示してはいない。当然のことながら、制御周期が早い方が、安定性が高いといえる。また、横加速度の結果を図 5.1.2-6 に示す。横加速度も当然ながら制御周期が

遅くなるとふらつきが大きくなり、安定性が悪くなることが分かる。数値的な解析は、制御アルゴリズムや制御周期、操舵角の時間当たりの最大変化量、車両の運動特性などに関わるため、詳しいことは本報告では示さず、傾向と限界値を示すことにする。

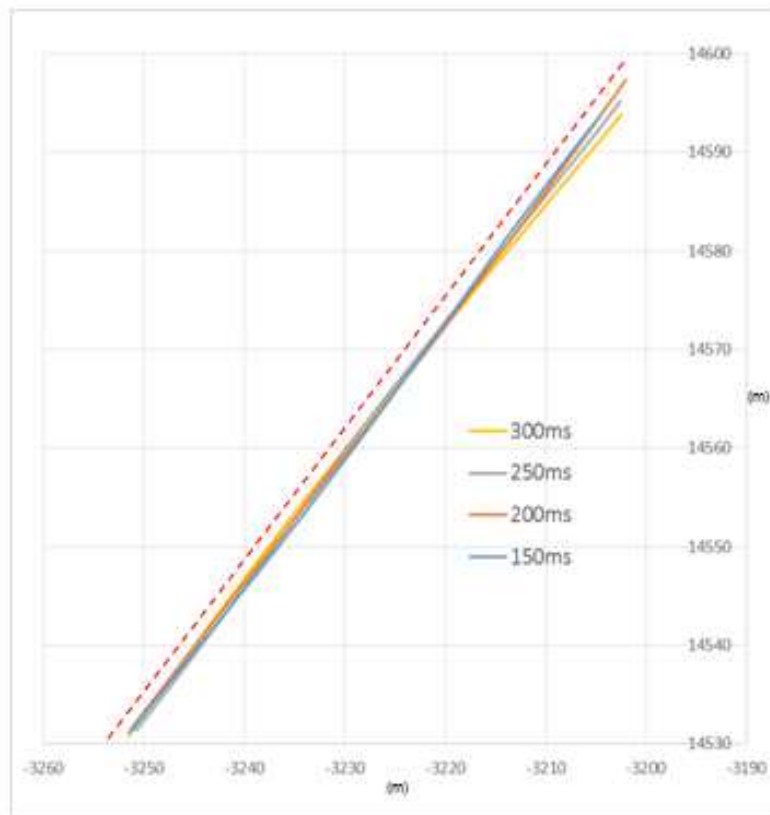


図 5.1.2-5 車速 60km/h の場合の制御周期変化に対する直線追従安定性

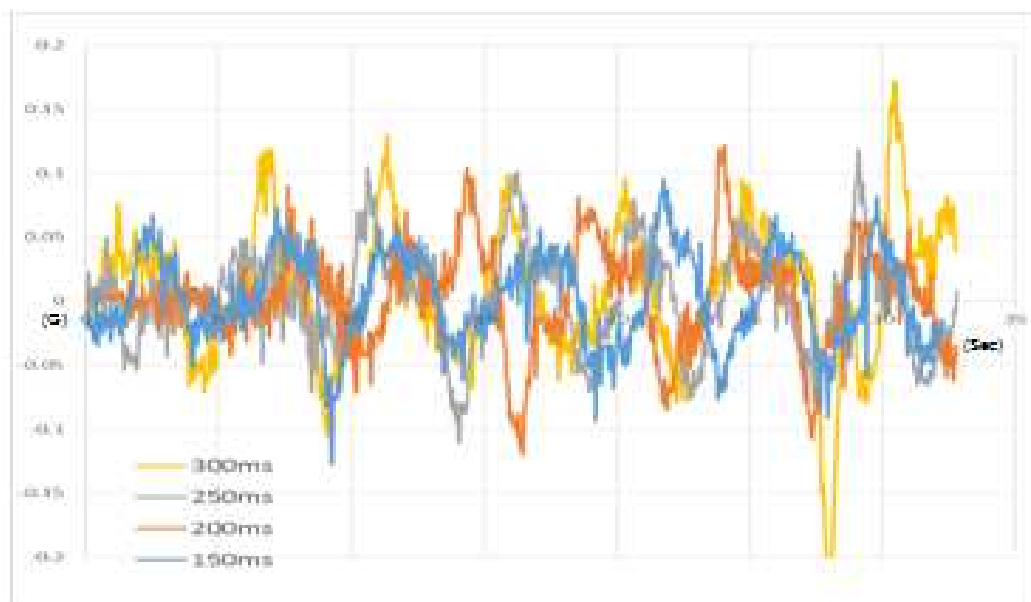


図 5.1.2-6 目標収束点 10m の場合の制御周期変化に対する横加速度

次に、目標収束点を 24m としたときの速度に対する影響も検証を行った。この時、制御周期の最大遅れは 150msec とした。直線追従安定性の結果を図 5.1.2-7 に示す。図における赤い点線も、直進性の参照のために後から入れたものであり、車線を示してはいない。結果より、車速 100km/h まで、車線追従されていることが分かる。また、この時の横加速度の結果を図 5.1.2-8 に示す。結果より、車速 100km/h では車線追従の制御は可能であるが、横加速度が大きく、ふらつきが大きくなっていることが分かる。実質一秒弱先をみた操舵制御を行っていることになるが、この制御周期では、今回の制御アルゴリズムの諸条件における限界と考えられる。また、目標収束点 10m としたときの同じ検証を行った結果では、車速 70km/h での走行が限界となった。目標収束点 10m では、約 0.5 秒先をみたが操舵制御が限界となったことになる。傾向として、速度が遅ければ、目標収束点が近くであっても車線追従の安定性は保てる可能性が高いといえる。これは高速道路などで視界が悪くなって時に、制限速度が低く抑えられることから分かる。

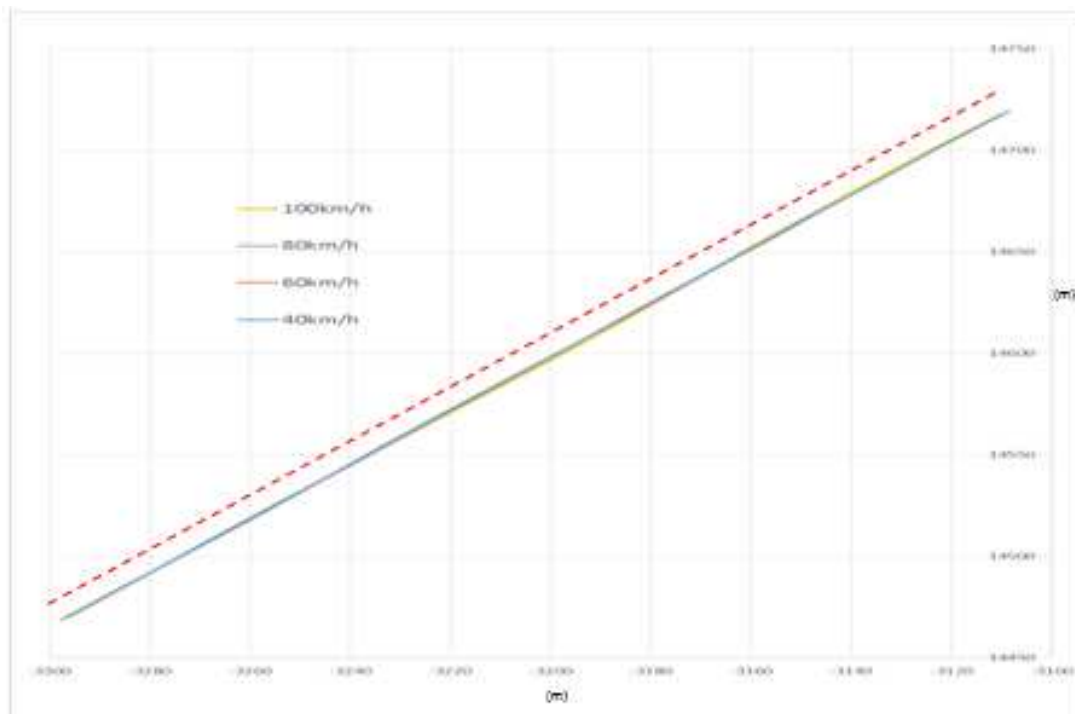


図 5.1.2-7 目標収束点 24m の場合の速度変化に対する車線追従性

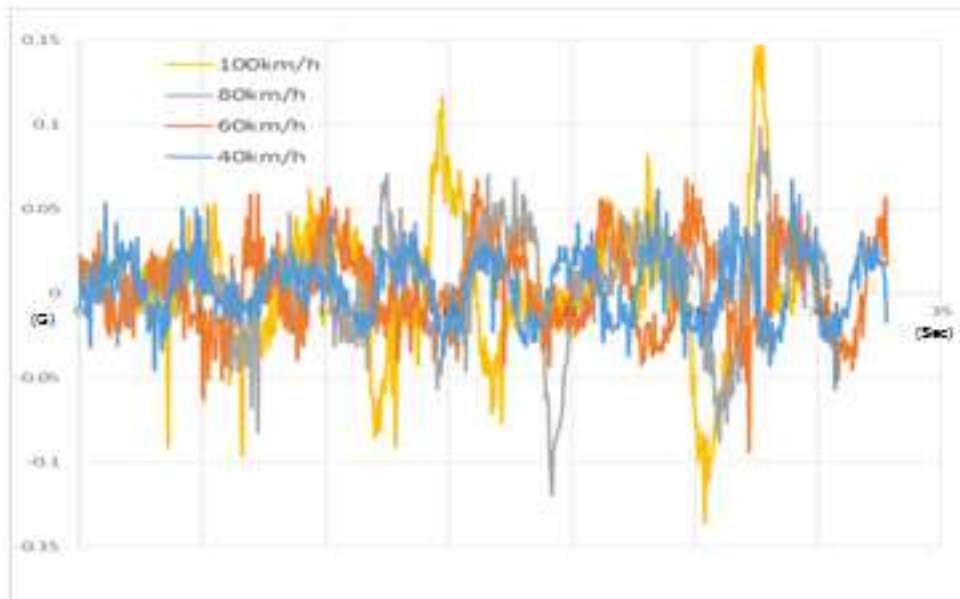


図 5.1.2-8 目標収束点 24m の場合の速度変化に対する横加速度

さらに、180R の曲線路における車線追従性の結果を図 5.1.2-9 に示す。この結果は、目標収束点は 10m、センサも含めた制御周期は 150msec、車速は 40km/h で行ったものである。図の橙色の線は、隣の車線を示しており、曲線に沿った車線追従走行が可能であることが分かる。目標収束点 10m は、かなり近い位置を目標とした制御ではあるが、制御周期 150msec において車線追従ができていることが分かる。また、この時の横加速度の結果を図 5.1.2-10 に示す。曲線路のため一定の横加速度がかかった上に制御でのふらつきが多少みられるが、安定して走行していることが分かる。

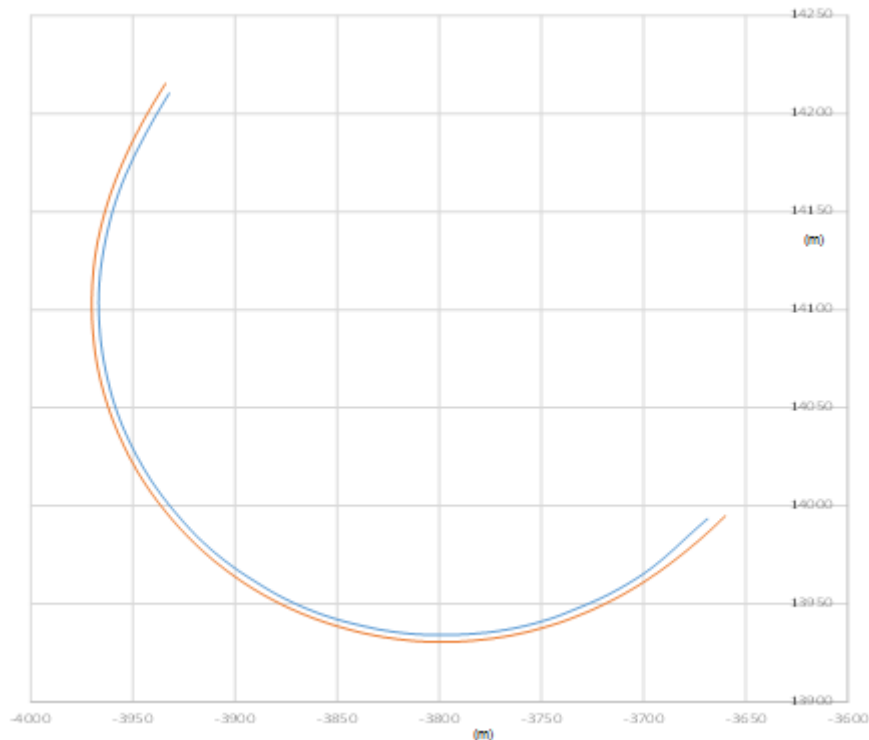


図 5.1.2-9 180R の曲線路における車線追従性(車速 40km/h、制御周期 : 150msec)

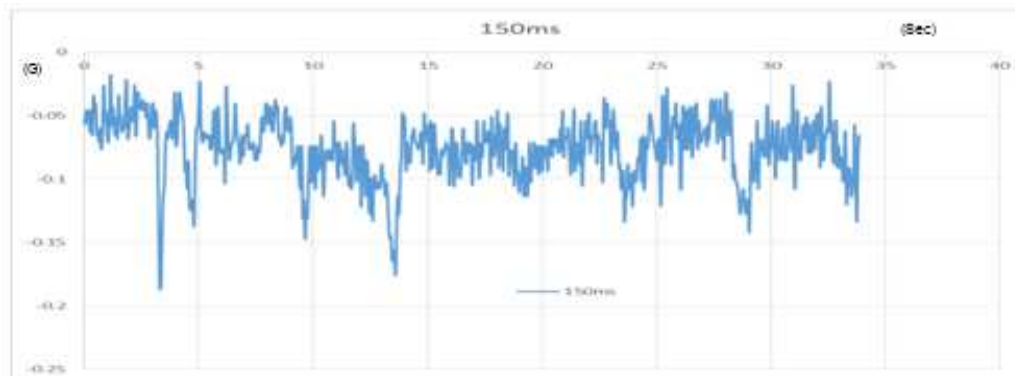


図 5.1.2-10 180R の曲線路における横加速度(車速 40km/h、制御周期 : 150msec)

以上の検証結果より、車線追従に対するセンサの検出範囲に結び付く目標収束点と、センサ検出周期、車両制御周期、車両速度の関係性に対する傾向を明らかにすることができた。もちろん、車線維持の制御方法によって、数値的な関係性は変化するが、傾向は変わらないと考えられる。白線識別センシングシステムの検出範囲が狭く、前方距離が短い場合には、検出周期及び車両制御周期が速いことが要求され、もしくは、速度を遅くした走行が要求され、これにより車線追従の安定性が保たれることが分かる。ちなみに今回の実車検証における車線追従の限界は以下であった。

[実車検証における車線追従の限界値]

- ・ 目標収束点 : 10m, 車速 : 60km/h ⇒ 制御周期限界 : 250msec
- ・ 目標収束点 : 24m, 制御周期 : 150msec ⇒ 車速限界 : 100 km /h
- ・ 目標収束点 : 10m, 制御周期 : 150msec ⇒ 車速限界 : 70 km /h

今後、より速い検出周期や車両制御周期にした場合に、どこまで検出範囲を短くできるかの検証は必要である。さらに、今回は車線維持制御として、フィードバック制御を用いているが、地図などの情報を利用することにより、フィードフォワード制御を付加することで、センサの検出範囲の狭さを補うことが可能である。これらについても検証が必要である。その他、白線識別性能のうち、未検出時間や検出精度、分解能等と車線維持制御性能の関係を明らかにする必要がある。

5.1.3 白線の性能評価試験について

リブ式白線の騒音試験やリブ無い白線を含む摩耗と視認性の影響などについて述べる。

(1) リブ式白線の騒音試験と結果

想定する新しいセンサシステムでは、リブ式白線を使用することが検討されている。そのため、平成 26 年度は、パターンの異なるリブ式白線を産総研のテストコースに塗布し、視認性や実験車両を用いた騒音測定のための簡易的な予備試験を実施している。平成 26 年度の騒音測定は、計測位置が白線の反対側にあり、走行時の車両にかぶる形であった。平成 27 年度は、白線側での計測を実施し、従来型のリブ式白線との相対的な騒音の差異を比較することでの騒音試験とした。図 5.1.3-1 にリブ式白線の塗布場所を示す。



図 5.1.3-1 リブ式白線の塗布場所（赤い直線：産総研北 4 棟前の直線部分）

平成 26 年度試験的に塗布した、図 5.1.3-2 に示す 3 パターンのリブ式白線を使用した。図 5.1.3-3 にリブ式白線の状況（高さの違い等）を示す。リブ式白線の施工精度を含めた寸法詳細図を図 5.1.3-4 に示す。

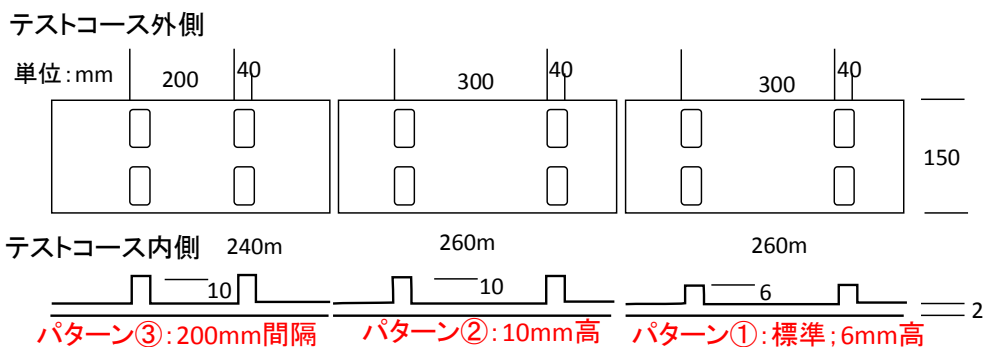


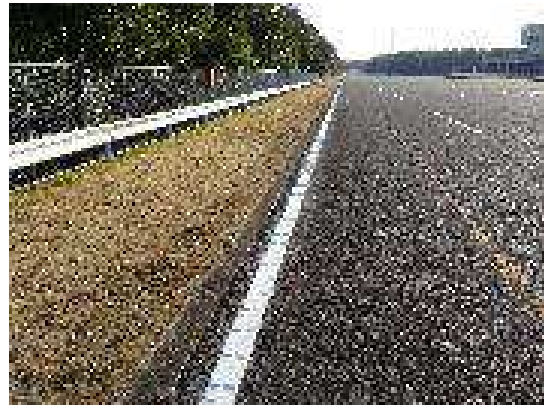
図 5.1.3-2 リブ式白線の塗布のパターンと距離等



パターン①6mm 高, 300mm 間隔

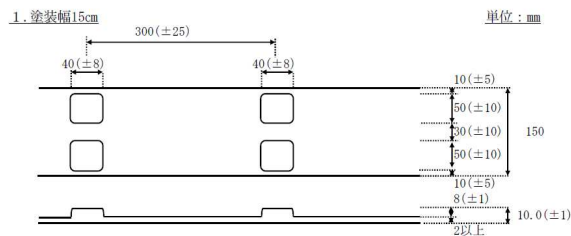


パターン②10mm 高, 300mm 間隔

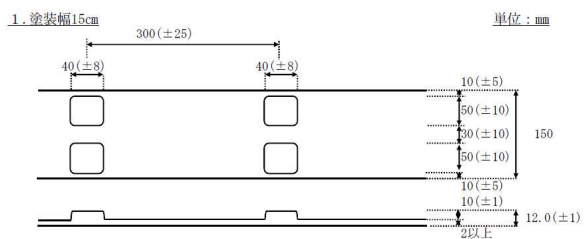


パターン③200mm 間隔, 10mm 高

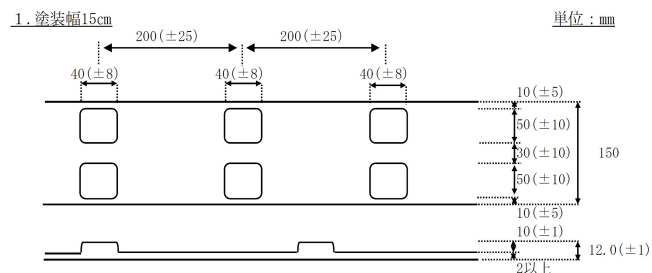
図 5.1.3-3 リブ式白線の状況（高さの違い等）



パターン①寸法詳細



パターン②寸法詳細



パターン③寸法詳細

図 5.1.3-4 リブ式白線の施工精度を含めた寸法詳細図

平成 26 年度の騒音予備試験を行った際には、計測環境の制約から車両通過時に車両が音源にかぶる位置（リブ式白線を右タイヤ踏んで走行、騒音計を左側 7m、地上高 1.5m に設置）で計測していた。その結果、車線逸脱時にリブ式白線上を走行して発生する騒音は、アスファルトを走行時とほとんど差異が見られず、主要幹線道路周辺（昼間）が 70dB を超える程度であった。

平成 27 年度は、騒音に係る環境基準の評価マニュアル II.地域評価編（道路に面する地域）等を参照し、場所の制約があるものの計測の信頼性を図り、車両が音源にかぶらない位置で計測を行った。その騒音測定の見測点は、リブ式白線から 3m、地上高 1.2m とし、騒音計（リオン NL-52）を設置した。図 5.1.3-5 に騒音計と設置状況を示す。図 5.1.3-6 にパターン③の走行時の騒音記録例を示す。



図 5.1.3-5 騒音計と設置状況

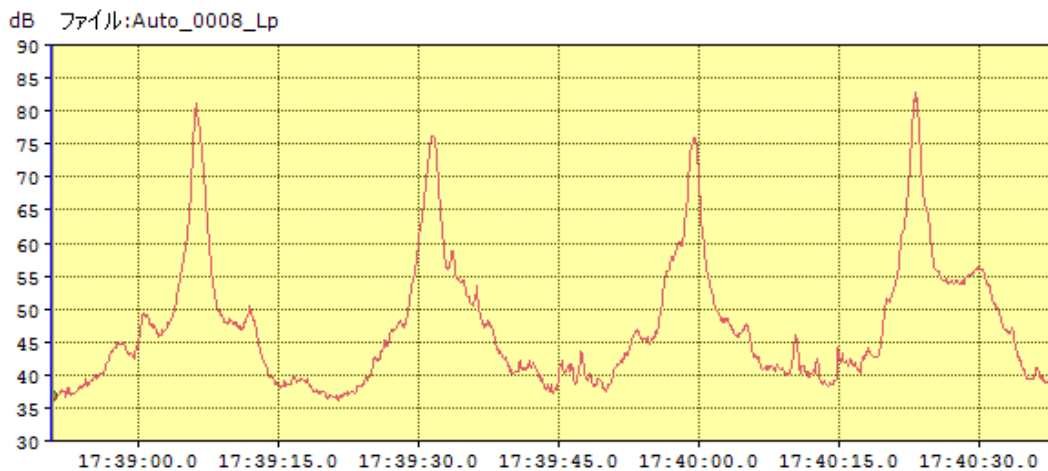


図 5.1.3-6 パターン①の走行時の騒音記録例
(リブ式白線上 50km/h と 60km/h の走行 : 計 4 回)

今回の騒音測定は、速度を 50km/h と 60km/h で 3 つのリブ式白線のパターンを走行したときの計測を行った。表 5.1.3-1 に測定結果として、リブ式白線上の走行時の等価騒音レベル (LAeq(dB)) と単発騒音暴露レベル (LAE(dB)) を示す。騒音測定の結果は、測定の差はあるものの、主要幹線道路周辺 (昼間) の等価騒音レベルが 70dB を超える程度であることから、車線逸脱時にリブ式白線上を走行して発生する騒音は、さほど大きくはないといえる。また、既に塗布実績のあるパターン①は 6mm 高のものと比較して、10mm 高のものは、若干大きくなるものの、リブ間隔が 300mm のものよりも 200mm の方が、外部での等価騒音レベルと単発騒音暴露レベル共に低く抑えられることが分かった。リブ式白線は、元々、雨天時の視認性を良くするためのものであった。しかし、車線逸脱時に、リブ式白線上を走行することで警告となる振動音がでることが、カーブではみ出しの警告になる

などの効果があり、利用される場面が多くでてきている。今回の騒音試験においては、現状の高さ 6mm を 10mm とした場合でも、さほど大きな騒音の増加ではないといえ、利用に関する許容範囲内と考えられる。

表 5.1.3-1 リブ式白線上の走行時の等価騒音レベルと単発騒音暴露レベル

	パターン①	パターン②	パターン③
等価騒音レベル (LAeq(dB))	64.0	65.2	64.4
単発騒音暴露レベル (LAE(dB))	84.3	85.5	84.7

(2) 白線の摩耗と視認性の影響の調査

リブ式白線の騒音試験やリブ無い白線を含む摩耗と視認性の影響などについて述べる。

自動走行や運転支援システムにおける認識システムに使用する様々な種類の道路白線について、車両の走行に伴う摩耗促進試験を行い、認識性能への影響検討等に資するデータを収集することを目的とした調査を行った。

産業技術総合研究所北サイトの旧衝突実験場に、路面標示材(既存 JIS K 5665 の 2 種 A、JIS K 5665 の 3 種 1 号に適合する白線、リブ白線)を塗布し、その上を大型トラックで繰り返し走行することによって白線の摩耗促進試験を行い、輝度値の変化などを検証した。白線の塗布は、大型トラック (25t 車) が 1 回の走行によって後輪 2 本で、白線 1 本が踏むように設定し、1つの評価対象の白線を 60m の長さで引き、1m の間隔をあけて、さらに別の評価対象の白線を 60m 引くことにより、片道約 120m 強の白線摩耗試験路を製作した。図 5.1.3-7 に製作した白線摩耗試験路を示す。



図 5.1.3-7 旧衝突実験場に製作した白線摩耗試験路

路面標示材料の耐久性や試験方法については、NEXCO 東日本のレーンマーク施工管理要領(平成 27 年 7 月版)を参考にした。この施工管理要領には、路面標示用塗料耐摩耗性の試験方法(試験方法 805 2010)が記載されており、判定基準について規定されている。試験方法は、回転式摩耗促進試験機を用いるもので、その運転条件は表 5.1.3-2 のようになっている。評価は、180 分後に試験片 2 枚の再帰反射輝度の測定を行い、そのうちの最小値が白 65mcd/lx・m² 以上、黄色 65mcd/lx・m² 以上のとき合格とするとなっている。再帰反射輝度の測定方法は、JIS Z 8714(再帰反射体の再帰反射性能の測定方法)によるものとされている。

表 5.1.3-2 回転式摩耗促進試験機 運転条件

使用タイヤ	乗用車用ラジアルタイヤ (145/70R 12 JIS D 4230)
タイヤ空気圧	0.3±0.05Mpa
タイヤ回転速度	10km/h
円盤速度	10km/h
タイヤ荷重	2.5KN
散水	あり (常に試験片の湿潤状態を保つ)
試験時間	3 時間
タイヤシフト	有り。試験片中心より±45mm

回転式摩耗促進試験機では、リブ式の白線については、振動を起こしてしまうために、計測が困難である。そのため、今回はこの摩耗促進試験を参考に、大型トラックを用いた実走行による摩耗促進試験として、以下の表 5.1.3-3 のような設定で行った。

表 5.1.3-3 大型トラックによる摩耗促進試験の設定

使用車両	大型トラック (25t 車 : いすゞ GIGA)
使用タイヤ	295/80R22.5
走行速度	約 15km/h (1,280 回走行後に約 25km/h に変更)
タイヤ荷重	10KN (約 1t 計算)
散水	無し (ただし、野外のため天候による)
走行回数	2,700 回以上 (回転式摩耗促進試験機での走行回数を 10,800 回と仮定。タイヤ荷重が 4 倍のため、四分の一と設定)
タイヤシフト	無し。
再帰反射輝度測定	MX-7 (レーンマーク反射輝度測定器) による 3 か所計測の平均値
カメラ計測	定点をカメラ撮影
リブ高さ計測	ノギスによる高さ計測

図 5.1.3-8 に摩耗促進試験に使用した大型トラックと白線上走行の様子を示す。また、図 5.1.3-9 にレーンマーク反射輝度測定器 (MX-7) による計測の様子を示す。さらに図 5.1.3-10 にカメラによる定点撮影の様子を示し、図 5.1.3-11 にノギスによる高さ計測の様子を示す。



図 5.1.3-8 摩耗促進試験に使用した大型トラックと白線上走行の様子



図 5.1.3-9 レーンマーク反射輝度測定器 (MX-7) による計測の様子



図 5.1.3-10 カメラによる定点撮影の様子



図 5.1.3-11 ノギスによる高さ計測の様子

表 5.1.3-4 に大型トラックによる摩耗促進試験の結果を示す。メーカーによる回転式摩耗促進試験機の結果では、JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線は、試験後の反射輝度は 3.5 割減程度の変化があったとされ、JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線（NEXCO 水性 II 型適合品）は、試験後の反射輝度は 4 割減程度の変化があったが、いずれも合格値を大きく上回ったとされている。今回の大型トラックによる摩耗促進試験では、JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線とは、試験後の反射輝度は約 2.8 割減程度の変化があり、JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線（NEXCO 水性 II 型適合品）は、試験後の反射輝度は 3.5 割減程度の変化があり、摩耗の傾向は一致している。また、リブ式白線は、試験後の反射輝度は約 3.8 割減程度の変化があり、リブの高さは約 18% 減であった。大型トラックによる摩耗促進試験の結果として、図 5.1.3-12 に反射輝度の変化のグラフ、図 5.1.3-13 にリブ高さの変化のグラフを示す。輝度変化からすれば、促進試験として走行回数が若干足りないように考えられる。また、回転式摩耗促進試験機では、タイヤシフトがあるが、走行ではこれが無いことも影響していると考えられる。さらに精査する必要はあるが、実走行による摩耗促進試験によって、白線の摩耗性能を検証することは可能と考えられる。

表 5.1.3-4 大型トラックによる摩耗促進試験の結果

		初期値	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目
走行回数		0	200	160	228	340	348	420	280	320	432	160
累計走行回数		0	200	360	588	928	1276	1696	1976	2296	2728	2888
反射輝度 :mcd / (m ² ・lx)	JIS K 5665の3種1号適合白線	542	518	542	509	486	485	447	488	497	353	392
	JIS K 5665の2種A適合白線 (NEXCO水性II型適合品)	771	681	731	650	599	567	574	567	569	558	545
	リブ式白線	433	415	439	398	363	366	332	346	357	298	267
リブ高さ:mm		4.2	4.5	4.1	4.2	4.5	4.5	4.4	4.0	4.1	3.9	3.7
天候		晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	曇り時々晴れ	晴れ	晴れ	曇り	曇りのち雨	晴れ
走行速度			約15km/h	約15km/h	約15km/h	約15km/h	約15km/h	約25km/h	約25km/h	約25km/h	約25km/h	約25km/h

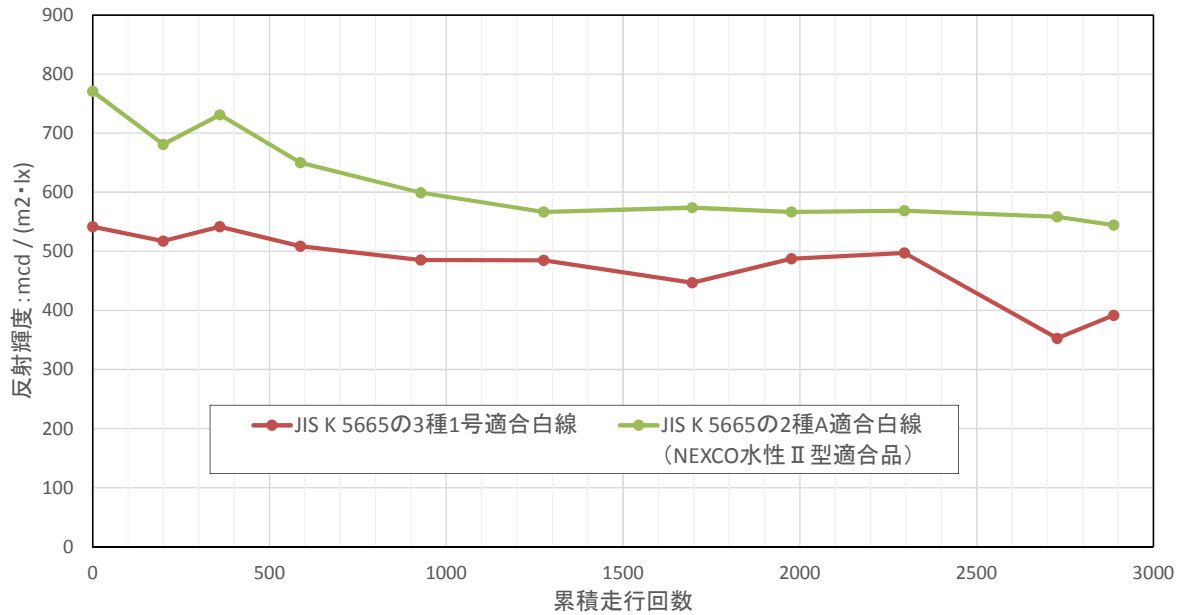


図 5.1.3-12 大型トラックによる摩耗促進試験の結果 (反射輝度の変化)

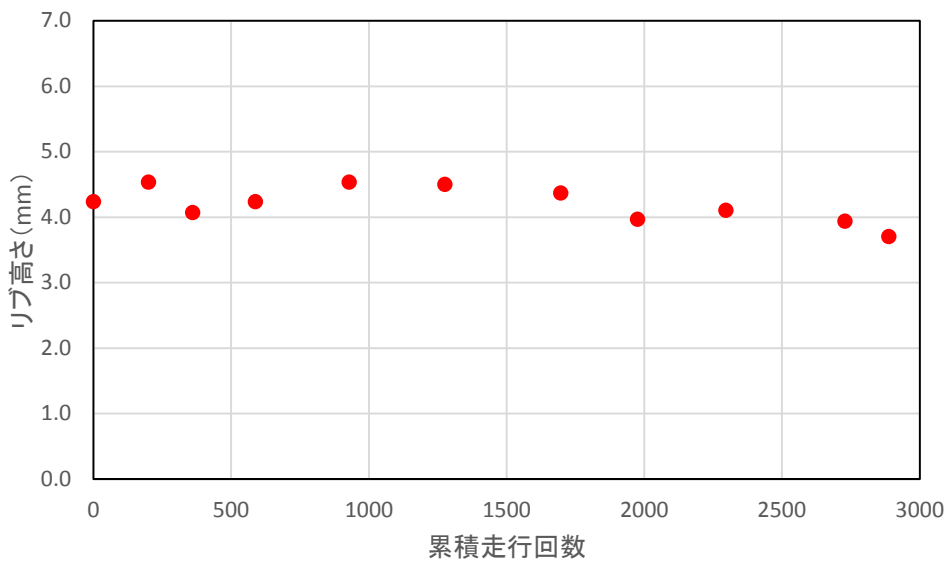


図 5.1.3-13 大型トラックによる摩耗促進試験の結果 (リブ高さの変化)

白線の摩耗が、ビジョンセンサによる認識性能に対してどの程度の影響があるかを判断するため、摩耗促進試験の前後等で画像を記録し、比較を試みた。画像は定点において撮像するようにしたが、完全に一致はしていない。また、外光や路面の湿潤などによって、画像のコントラストが変化するため、比較は難しい。今回は、特に白線とアスファルト部分を切り出した映像のヒストグラムをとり、白線の白色の成分の立ち上がりに変化がみられるかを検証した。図 5.1.3-14 の左図には、試験前のリブ白線の画像 (左 : B) JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線 (右 : A) を示し、また、右図には JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラムを示す。図 5.1.3-15 には、同様に、試験 5 日後の画像とヒストグラムを示し、図 5.1.3-16 には、試験終了時の画像とヒストグラムを示す。

ヒストグラムの結果を見て分かるように、白色部分の立ち上がりがなだらかにはなっておらず、明確にエッジとしてとらえられることが分かる。そのため、この試験時のような白線の摩耗では、ビジョンセンサによる計測に対する影響は非常に小さいと判断できる。



図 5.1.3-14 試験前のリブ白線の画像（左:B）JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線（右:A）
（右図：JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラム）



図 5.1.3-15 5 日目後のリブ白線の画像（左:B）JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線（右:A）
（右図：JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラム）



図 5.1.3-16 試験終了時のリブ白線の画像（左:B）JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線（右:A）
（右図：JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラム）

図 5.1.3-17 の左図には、試験前の JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線（左：H）を示し、また、右図には JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラムを示す。

図 5.1.3-18 には、同様に、試験 5 日後の画像とヒストグラムを示し、図 5.1.3-19 には、試験終了時の画像とヒストグラムを示す。ヒストグラムの結果を見て分かるように、白色部分の立ち上がりは、JIS K 5665 の 3 種 1 号適合白線と比較して多少なだらかに感じるが、明確にエッジとしてとらえられることが分かる。こちらの白線も、この試験時のような白線の摩耗では、ビジョンセンサによる計測に対する影響は非常に小さいと判断できる。

JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線（NEXCO 水性 II 型適合品）

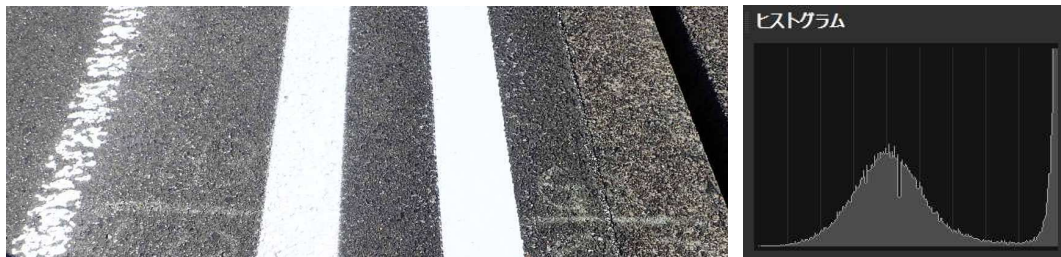


図 5.1.3-17 試験前の JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線（左：H）
（右図：JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラム）



図 5.1.3-18 5 日目後の JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線（左：H）
（右図：JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラム）

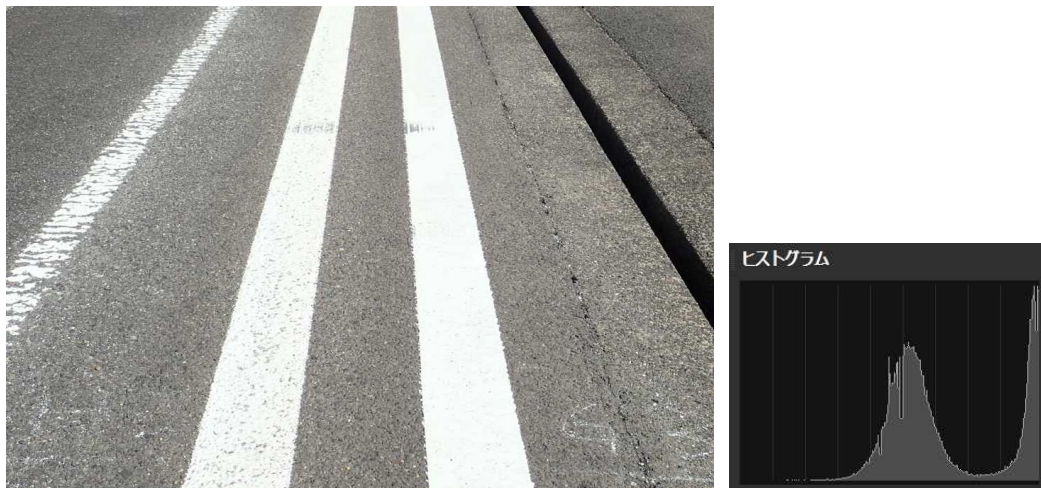


図 5.1.3-19 試験後の JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線（左：H）
（右図：JIS K 5665 の 2 種 A 適合白線とアスファルト部分の画像のヒストグラム）

5.2 白線識別センシングシステムの評価

本節では、本事業で開発するセンサ以外のビジョンセンサを用いた白線識別や環境適合性の評価指標の検討について述べる。

5.2.1 ビジョンセンサを用いた白線識別について

現在、白線認識に用いられるセンサは、ビジョンセンサが主流である。それらのビジョンセンサにも課題があり、ダイナミックレンジの狭さが1つにあげられる。ダイナミックレンジとは、カメラの撮像素子に入る光のうち、最も明るい部分と最も暗い部分の差のことである。この明度差を広くする加工技術がハイダイナミックレンジ合成（HDR）と呼ばれるものである。一般に、明るい部分の多い写真では、白飛びという現象が発生し、暗い部分が多い写真では、黒つぶれという現象が起きる。このような現象を低減するために、露光の違う映像を合成することで、ハイダイナミックレンジ合成ができる。ただし露光が異なる写真を数画面撮る必要性から、動きのある被写体を撮る取ること難しいとされてきた。しかし、ソニーでは、CMOS イメージセンサを用いて、撮影時に同一画面内で2種類の露出条件を設定、処理することで、ダイナミックレンジの広い画像を生成できるハイダイナミックレンジビデオを実現している。

今回、ソニーより IMX224 センサ、IMX290 センサ等の評価キットを提供いただき、実際に車載し、様々な環境で映像取得を行って比較検証する機会を得た。IMX224（HD）、IMX290（Full HD）は、カラーCMOS イメージセンサで、最低被写体照度 0.005lx 以下（72dB ゲイン時、IMX224 のみ）、裏面照射型構造（IMX290 のみ）、近赤外感度向上技術、高変換効率画素、新 WDR 機能などを備えたものである。このカメラの他に、オート HDR 機能をもった SONY DSC-HX60V や SONY α6000、自動露光機能の付いた Logicool HD Pro Webcam C920t などを利用し、映像比較による評価を試みた。なお、ソニーから提供されたセンサについては、厳密にはカメラの調整が必要であるが、今回は調整をしない状態で撮像の検証を行っていた。そのため、メーカーの希望もあり、性能に対する誤解を招かないように、今回の報告書においては画像の提示は控えるものとする。

まず HDR 機能の画像差を図 5.2.1-1 に示す。左が HDR 無しで、右が HDR 有りでの画像である。HDR 機能がある場合には、街灯の影響で明度差の大きなシーンにおいても、白飛びが抑えられ、道路の白線を明瞭にとらえることができていることが分かる。



図 5.2.1-1 HDR 機能の有無による画像差（左：HDR 機能無、右：HDR 機能有）

西日やトンネルの出口などでは、同じように白飛びや黒つぶれの現象が抑制されることで、路面の白線をこれまでよりもより遠くの距離まで鮮明に識別することができる画像がえられている。ソニーのセンサでは、10万ルクスの光を受けた状態でも撮像が可能とのことで、実際、2万ルクス以上の西日では、白飛びが抑えられ、全体に明るさが均一的になり、路面も遠方まで識別可能な映像が撮影できている。このように、これまでのカメラにHDRの機能が付くことにより、対応可能な状況や環境状態が拡大することがいえる。

ただし、HDR機能や自動露光機能も完全に万能ではなく、夜間の降雨時では、路面に若干の水幕ができるような場面では、白線部分の明度差が減少してしまうため、白線認識は困難となる状況があった。これは肉眼でも認識しにくい状況であり、画像処理で白線認識を強化することでの対応が必要な場面といえる。また、同じ夜間の降雨時で対向車や看板の照明が路面に反射する場合、中央線等の認識が困難となる状況があった。これは、図5.2.1-2に示すような状況である。また、図5.2.1-3に示すようにフロントガラスを通した西日も拡散光と影ではHDR機能でも限界がみられた。このような路面反射を除去するには偏光カメラなどを利用することが考えられる。



図 5.2.1-2 夜間小雨時の路面反射



図 5.2.1-3 フロントガラスを通した西日の拡散光と影

以上のように、ハイダイナミクスレンジ機能などを搭載したビジョンシステムを用いることで、これまでのカメラでは白線識別や遠方までの識別が困難であった環境条件において、白飛びや黒つぶれを抑制することができ、対応環境を拡大することができることが分かった。しかし、対応できる環境条件は広がるものの、撮像物に水幕ができ反射現象が起きるような場合は、ダイナミクスレンジの拡大で対応できる問題ではないため、ビジョン

センサでの識別が困難な状況は残るといえる。表 5.2.1-1 に白線識別における従来カメラと HDR 機能カメラの比較を示す。かなり適合環境は広がっているが、△で示すような場合もある。

表 5.2.1-1 白線識別における従来カメラと HDR 機能カメラの比較

自然環境	従来カメラ (中距離<40m)	HDR 機能カメラ (中距離<40m)
通常環境	○	○
雨	△：降雨量によって悪化 (路面水幕下は困難)	△：降雨量によって悪化 (路面水幕下は困難)
霧	△：視程距離により悪化	△：視程距離により悪化
雪	×	×
夜間	△：照度により悪化	○：照明距離に依存
西日	×	○：拡散光は△
照度変化 (トンネル出口等)	×	○：高速時は△

5.2.2 環境適合性の評価指標について

ここでは、白線識別センサの環境適合性を評価するための評価指標について述べる。本事業で開発するセンサは、全天候白線認識ということで、これまでに市販されてきているような白線認識のシステムよりも、厳しい環境条件での性能が求められている。気象や日照などの環境条件は様々であり、それらを示す指標は組み合わせとなる。適合性については、センサに依存するため、指標をどのように示すか細分化するかなどは非常に難しいと考えられる。しかし、実際の走行環境において使用されるセンサであるため、ドライバなどの利用者が、状態を想像可能であり、理解できる指標を用いることが必要となる。

平成 26 年度の報告で示したように、日本工業規格 JIS D 0804:2007 高度道路交通システム-車線逸脱警報システム-性能要件及びその試験方法において、試験方法の中に「試験環境条件」の記載があり、以下のようにになっている。

- ・試験場所は、平らで乾燥したアスファルトまたはコンクリート舗装面とする。
- ・外気温度範囲は、-20℃~+40℃とする。
- ・試験場所の車線区分線は、良好な状態でなければならない。
- ・視程は、1000m 以上とする。

試験環境条件を見ると、この規格で扱う「車線逸脱警報システム」は、路面が乾燥した状態、すなわち晴天や曇りで、車線区分線が良好な状態であり、霧などのない視程が 1,000m 以上である非常に良好な環境条件を想定していることが分かる。西日などの日射に対する記載はない。今回の想定は、全天候型であるため、この試験環境条件を明確にできることが重要である。全天候型とした場合に特に問題となる環境条件は、先の試験環境条件の 1 番目と 4 番目であり、これらを全天候としての条件に変える必要があると考えられる。他の 2 つは、そのまま当てはめられると考えられる。

- ・路面状態：JIS D 0804:2007 車線逸脱警報システムでは、「乾燥」
- ・視程距離：JIS D 0804:2007 車線逸脱警報システムでは、「1000m 以上」

路面状態は、乾燥に対して、湿潤や水幕、積雪状態などで示すことが考えられるが、さらに問題となるのは、路面の状態だけでなく、センサから路面までの空間の状態も環境条件としては必要と考えられる。これは、降雨や降雪の状態といえ、気象に関する定義を用いることが可能である。気象庁では、天気予報等で用いる用語が定義されている。関係すると思われるものとして、表 5.2.2-1 に雨、雪の量的表現に関する用語を示し、表 5.2.2-2 に雨の強さに関する用語を示す。

表 5.2.2-1 雨、雪の量的表現に関する用語

用語	区分	説明
雨量	用例	総雨量。××日の雨量。
	備考	雨量を観測(予報)した時間または時刻を明確にする。
降水量	備考	雨と雪の場合を一括して扱うときに用いる。
××時間雨量	用例	××時までの××時間雨量。
××時間降水量	用例	××時までの××時間降水量。
日雨量	用例	××日の日雨量は××ミリ(日界は0時)。
雨日数	備考	a) 音声伝達では「雨の降った日数」を用いる。
		b) 雨量の基準値を明確にして「××mm以上の雨の降った日数」のように用いる。
		c) 季節予報では、日降水量10mm以上の日数を「雨日数」としている。
雪日数	備考	a) 音声伝達では「雪の降った日数」を用いる。
		b) 降雪量の基準値を明確にして「××cm以上の雪の降った日数」のように用いる。
降雪	用例	降雪がある。降雪の深さ。
	備考	やや専門的な用語なので「雪が降る」などの説明を付ける。
降雪の深さ	備考	一定の期間内に積もった雪の深さ(cm単位)。
		期間を明記する。府県気象情報等ではアメダスの積雪深計についても積雪差の正の値の合計を「降雪の深さ」として用いる。
降雪量		降雪の深さ(cm単位)。
積雪の深さ		積もった雪の深さ(cm単位)。
積雪	備考	地表面などに堆積している雪やあられ。
		「積雪0cm」とは、露場(観測を行う場所)の地面の半ば以上を雪が覆う現象。「積雪なし」とは、露場の地面に雪が全くないか、または半ば以上を覆っていない状態。
新積雪	→	降雪の深さ。
最深積雪	用例	この冬(××年)の最深積雪は××センチ。
積雪量	備考	音声伝達でわかりにくいので使用しない。
	→	「積雪の深さ(cm単位)」を用いる。

表 5.2.2-2 雨の強さに関する用語

用語	区分	説明
暴風雨		暴風に雨を伴うもの。
	備考	「暴風」と「暴風雨」が混同される可能性がある(特に音声伝達の場合)ため、天気予報文としては用いず、風と雨について個別に強さを示す。 例えば、「××の風が非常に強く、雨も強く降る」。また、解説用語として音声で「暴風雨」を用いる場合は「暴風」と混同されないように、雨の強さを具体的に示すなどして用いる。
豪雨		著しい災害が発生した顕著な大雨現象。
	用例	「〇〇豪雨に匹敵する大雨」等著しい災害が発生し命名された大雨災害の名称か、もしくは地域的に定着している災害の通称(例:東海豪雨)の名称を引用する形で用いる。一般に発表する予報や警報、気象情報等では、「豪雨」単独では用いない。
	備考	a) 著しい災害とは、激甚災害、命名された大雨災害。 b) 既に命名された現象もしくはそれに匹敵する過去事象に対する使用に限定する。 c) 命名の目安は「浸水家屋10000棟」等。
集中豪雨		同じような場所で数時間にわたり強く降り、100mmから数百mmの雨量をもたらす雨。
	備考	積乱雲が同じ場所で次々と発生・発達を繰り返すことにより起き、重大な土砂災害や家屋浸水等の災害を引き起こす。
局地的大雨		急に強く降り、数十分の短時間に狭い範囲に数十mm程度の雨量をもたらす雨。「局地的な大雨」とも言う。
	備考	単独の積乱雲が発達することによって起き、大雨や洪水の注意報・警報が発表される気象状態でも、急な強い雨のため河川や水路等が短時間に増水する等、急激な状況変化により重大な事故を引き起こすことがある。
雨の強さ	備考	予報用語でいう「雨の強さ」は、解説表に従って決めており、地上気象観測指針でいう「降雨強度」とは必ずしも対応しない。
弱い雨		1時間雨量が3mm未満の強さの雨。
	備考	「弱い雨」は「小雨」を含む。
やや強い雨		1時間に10mm以上20mm未満の雨。
強い雨		1時間に20mm以上30mm未満の雨。
	用例	〇〇地方では5時から6時までの1時間に20mmの強い雨が降っています。
激しい雨		1時間に30mm以上50mm未満の雨。
	用例	〇〇市付近では1時間におよそ40mmの激しい雨となっています。
非常に激しい雨		1時間に50mm以上80mm未満の雨。
猛烈な雨		1時間に80mm以上の雨。
大雨		災害が発生するおそれのある雨。
小雨		数時間続いても雨量が1mmに達しないくらいの雨。
小雨がばらつく		小雨が断続的に降る状態。
雨が強くなる		「強い雨」が降るようになること。
雨が激しくなる		「激しい雨」が降るようになること。
まとまった雨(雪)		季節予報で少雨(雪)の状態が続いているときに、一時的にせよその状態が緩和されると期待されるときに用いる。
	備考	季節予報で用いる。
少雨傾向		a) 季節予報では対象期間、対象地域のかなりの部分で降水量が「少ない」状態。
	備考	b) 明らかに少ない状態の場合は「傾向」は付加しない。

雨量として1時間雨量が何mmであるか、降雪量として降雪の深さが何cmであるかなどで示すことが可能であると考えられる。路面状態に対しては積雪の場合には、積雪量として積雪の深さが何cmであるかで示すことが可能である。ただし、本事業で開発しているセンサでは雪質による影響も問題になっており、それらについては、第4章の「ミリ波レーダ方式検討及び基礎データ解析」を参照していただきたい。降雨に対しての路面状態をどのように規定するかについては、少し問題がある。これは、通常のアスファルトまたはコンクリート舗装面のみを対象とするか、透水性舗装や排水性舗装までを含むかによって変わってくるためである。そのため、通常のアスファルトまたはコンクリート舗装面を想定し、水幕の状態などを指標とすることが一般的と考えられる。しかし、試験環境条件として、これらの指標を設定した場合に、試験設備が問題となると考えられる。再現性のある環境として設備整備を行うとすれば、大規模になると考えられるためである。そのため、JIS D 0804:2007 車線逸脱警報システムのように試験方法も考える必要がある。さらに、

西日などの日射や照明などに対する環境条件が記載されていないが、全天候とした場合には、これらの条件も必要となると考えられる。西日などの指標を設定することは難しいが、たとえば、真夏の日射が10万ルクスなどとされるように、センサ面に対する照度を設定することが考えられる。

以上のことから、全天候型白線識別センサの環境適合性の評価指標としては、たとえば、以下のような環境条件の指標を設定し、試験方法を取り決めていく必要があると考える。

- ・試験場所は、平らなアスファルトまたはコンクリート舗装面とする。
- ・想定する降雨（降雪）の状態に合わせて降雨量 X_{mm} （降雪量 X_{cm} ）とする。
- ・路面状態は、想定する降雨量（積雪量）に合わせて水幕 X_{mm} （積雪 X_{cm} ）とする。
- ・視程は、想定する霧の状態に合わせて X_m とする。
- ・センサ面に対する照度 X_{lux} とする。
- ・外気温度範囲は、 -20°C ~ $+40^{\circ}\text{C}$ とする。
- ・試験場所の車線区分線は、良好な状態でなければならない。

※は、センサの想定する状態に合わせて規定するものとする。

5.3 車線維持制御用白線識別センシングシステムの標準化案作成

車線識別用白線識別センシングシステムの標準化案作成を目指して、平成 27 年度は、現在市販されている車線逸脱防止支援システム等に用いられている白線識別センサの性能と評価手法の調査を行った。また、国連機関や ISO、JIS などにおける運転支援システムのガイドラインや基準等の検討状況を調査した。

5.3.1 運転支援システムとしての性能基準等に関する動向について

ここでは、自動操舵に対する国際的な取り決めや基準などの動向について述べる。平成 26 年度の報告書にも示しているが、自動車の自動運転技術について、自動車の安全・環境に関する国際基準を策定する唯一の場は、国連自動車基準調和世界フォーラム（WP29）である。昨年 6 月 22 日～26 日に国連（スイス、ジュネーブ）で、第 166 回会合が行われた。自動運転について、WP29 の傘下に「自動運転分科会」が設置され検討が進められている。同分科会では、日本が英国とともに共同議長を務め、その議論を主導している。第 166 回会合においても、6 月 24 日に自動運転分科会が開かれ、①自動運転の定義、②道路交通安全作業部会（WP1）と WP29 の連携、③関連国際基準を検討する専門分科会へのガイダンス案などが議題となっている。

国土交通省では、これらの結果を公表^[3]しており、自動運転について以下のような進展があったとされている。

①自動運転といっても、「ドライバの運転支援技術」からいわゆる「完全自動運転」まで広範囲に渡るが、国際的な定義は存在しない。今次 WP29 では、日本が『自動運転の定義に関する検討の進め方』を提案し、その議論が開始された。

②様々な高度技術が採用されている自動運転に関しては、「道路交通安全ルール」と「車両の装置等の基準」の双方の面からの検討の必要性が生じる。今次 WP29 では、国連の道路交通安全作業部会（WP1）と WP29 が合同で議論を開始し、今後その連携をより一層深めていくことが合意された。

③関連する国際基準については、高速道路での自動操舵を可能とするための基準改正^{*1}等の検討が既に開始されている。同検討を行う専門家会議においても、日本はドイツとともに共同議長を務めその議論を主導している。今次 WP29 では、専門家会議における国際基準策定を促進するためのガイダンス案が合意された。

日本は、これら自動運転技術に関する国際的な議論を主導し、自動車安全のより一層の向上に寄与する自動運転技術の適切かつ円滑な普及促進を推進していくとされている。

（*1 現行の国際基準では、10km/h 以上で自動操舵を行うことが認められていない。）

この自動操舵に係る基準改定案の議論の中で、センサの検出範囲なども具体的に機論されてきており、今後、これらの動向については、注視していくことが必要である。

国内の動きとして平成 26 年度は、国土交通省の定める「車線維持支援装置の技術指針」における技術要件^[4]、交通安全環境研究所における車線逸脱防止支援システムの試験方法の検討^[5]、バス・トラックへの車線逸脱警報装置（LDWS）の装備義務付け（新型車：平成 29 年 11 月 1 日以降順次、継続生産車：平成 31 年 11 月 1 日以降順次）などの調査結果を報告している。

平成 27 年度は、上記の WP29 に対応した動きが活発ではあったものの、その進展の様子見の感があり、大きな動きはあまりみられなかった。ここでは、車線逸脱防止支援システムの試験が含まれる「予防安全性能アセスメント」^[6]について述べる。予防安全性能アセスメントは、国土交通省と独立行政法人自動車事故対策機構が自動車の先進安全技術について新たに評価を始めたものである。現在の予防安全アセスメントでは、衝突被害軽減ブレーキと車線逸脱防止支援システムの性能評価を行っている。衝突被害軽減ブレーキで最高 32 点満点、車線逸脱防止支援システムは最高 8 点満点で、合計 40 点満点となる。評価点は、日本の事故実態を踏まえて死亡・重傷事故を少なく出来る効果に応じて与えられている。合計点数が 2 点以上の車は先進安全車「ASV」、合計点数が 12 点以上の車は「ASV+」として認定される。車線逸脱防止支援システムの試験は、試験車を 60km/h または 70km/h で走らせ、道路の白線からはみ出したときに、警報を発するか試験し、警報を開始した速度が低い方が高い得点が与えられる。このときの環境条件は、JIS 規格の試験方法に準じている。先に述べたように、全天候型にシステムを評価するためには、環境条件を試験方法に組み込むことが必要である。今後、国際的な関連する動向に配慮して、環境条件の指標策定や評価検証方法、試験方法などの検討を進める必要がある。

5.3.2 白線識別センサの性能評価手法等に関する動向について

ここでは、欧米などにおけるメーカーや研究機関でのセンサの評価手法などの動向について簡単に述べる。平成 27 年度は、海外におけるメーカーや研究開発の動向調査として、Dagstuhl Seminar 15462 “The Mobile Revolution -- Machine Intelligence for Autonomous Vehicles”, November 10 - 13, 2015, Schloss Dagstuhl, Wadern, Germany 及び”Transportation Research Board (TRB) 95th Annual Meeting”, January 10–14, 2016, at the Walter E. Washington Convention Center, in Washington, D.C.に参加した。白線識別に用いられるセンサは、ビジョンシステムが代表的なものであるが、ビジョンシステムの開発は、車線逸脱警報システム（LDWS：レーンデパーチャーワーニングシステム、Lane Departure Warning Systems）や車線維持制御システム（LKAS：レーンキープアシストシステム）に搭載され既に市販されていることから分かるように、もはや競争領域になっている。ドイツ、米国両方で参加した研究集会でも、白線識別センサの議論は行われておらず、また、全天候型といった特殊な白線やそのための車載センサについての研究は見当たらない。白線認識に関する研究が表面に出てこない理由の一つは、車両制御の基本が GPS と地図になっている点もあると考えられる。そのため、センサの性能評価手法や基準の動きは、車線逸脱警報システム（LDWS）に対する国際規格 ISO/DIS 17361 にとどまっている。しかし、研究機関個別では評価基準（目標値を含め）を設定する動きがある。先にも検討しているが、環境条件の指標が、センサの種類、処理アルゴリズムなど多くの要素によって決定されるため、非常

に煩雑になる可能性がある。また、センサの進歩があつて、すぐに標準が陳腐化することも考えられる。さらに、運転支援システムであるために、一定の条件では動作するが、環境条件によっては動作しないこともあることを、マニュアルに明記することで、環境条件の指標が曖昧となっていると考えられる。センサの視野範囲についての参考として、2013年8月にドイツで100km余を自動運転走行したダイムラーのセンサの視野範囲を図5.3.2-1に示す。また、2015年4月に北米大陸を自動運転で横断した delphi のセンサの視野範囲を図5.3.2-2に示す。前方の認識用カメラの視野範囲は、共に100m程度となっている。

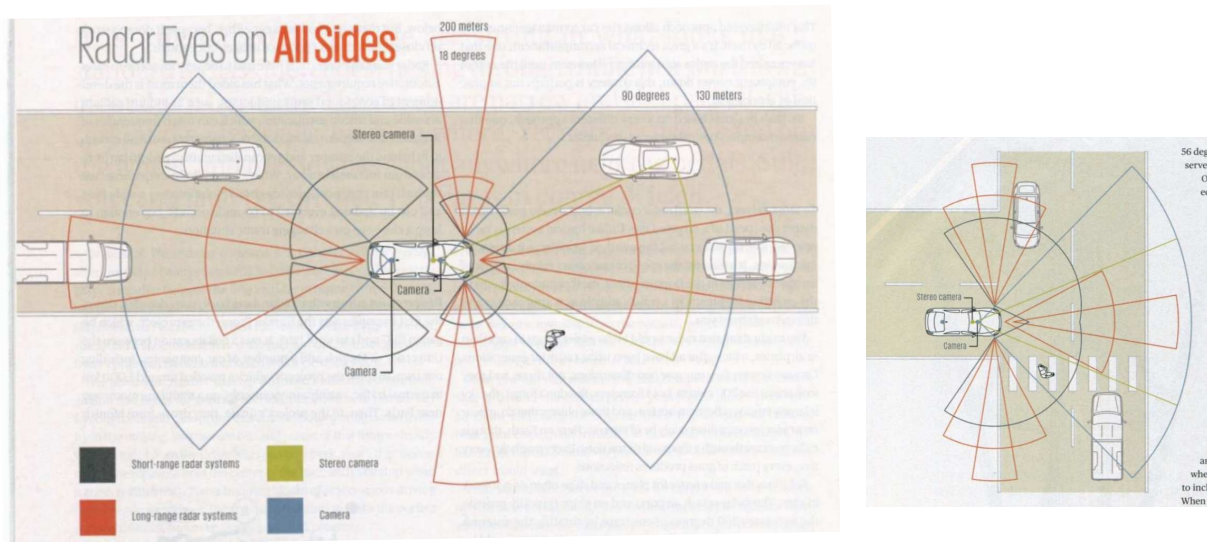


図 5.3.2-1 ダイムラーのセンサとその視野範囲^[7]

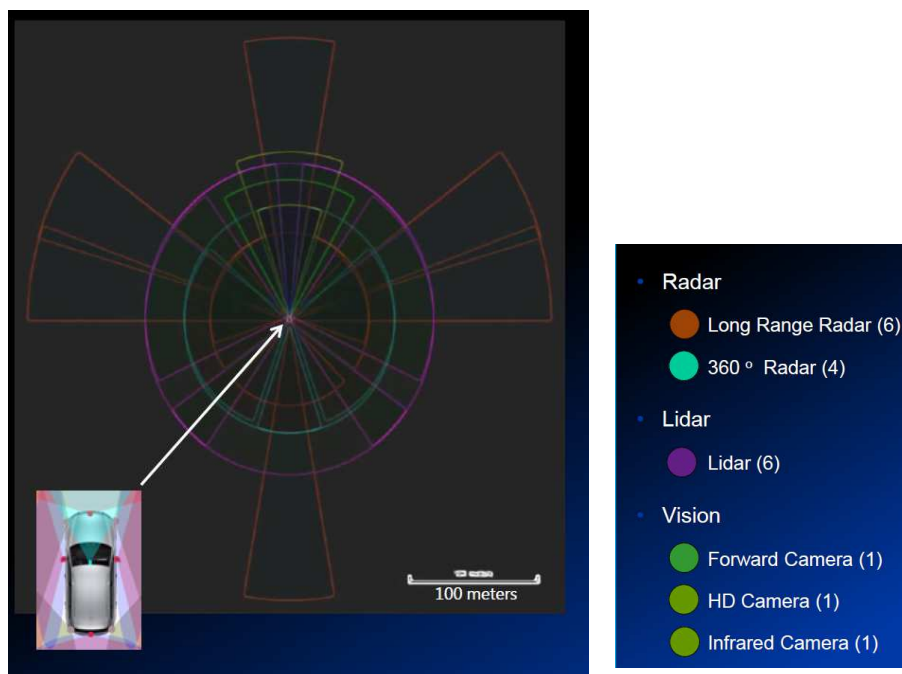


図 5.3.2-2 delphi のセンサの視野範囲^[8]

今後の自動運転システムでは、どのような環境条件では動作し、どのような環境条件では動作しないのかを明確にしないと、利用できないのではと考える。センサの性能を示す意味では、評価手法や環境条件の指標は重要であり、WP29の自動操舵に係る基準改定案などで議論されてきているように、今後、全天候型のように適用環境を拡大した白線識別センサや車線維持制御システムに対しても、自動運転システムを前提にした場合での重要性をもって検討を進める必要がある。

5.4 まとめと今後の課題

平成27年度は、平成26年度に基礎構築と基本動作の確認を行った車線維持制御実験車の改良を行い、試験的に組み込むビジョンセンサを用いて、検出範囲や処理時間、車両速度を変化させて車線維持制御を実施し、その影響を明らかにした。また、既に市販されている車線逸脱防止支援システムなどで利用されている白線識別のためのビジョンシステムにおける性能限界を明らかにするため、白線識別の難しい環境条件での画像取得の検証を行った。ビジョンシステムとしては、今後、活用が期待されている照度変化に対応するハイダイナミックレンジカメラなども用いて比較検証を行った。さらに、平成26年度に引き続き、運転支援システムとしての性能基準等に関する動向の調査と、白線識別センサの性能評価手法等に関する動向の調査を行った。

今後は、自動運転システムの機能の一部としての白線識別センシングシステムとしての要件などをさらに精査する必要がある。また、評価検証に対しては、妥当性、信頼性の向上、試験方法に対しては実現性、再現性が今後の課題である。さらに、測定方法を含めた環境状況を表す指標の策定が不可欠であり、それらに基づき、評価基準や試験方法の開発、標準化案作成などを、センサに合わせる形も含めて、今後、具体化して行っていく必要がある。

参考資料

- [1] 大前 学, 橋本尚久, 藤岡健彦, 清水浩: 駐車場を有する構内における自動車の自動運転の運動制御に関する研究、自動車技術会論文、Vol.35、No.3、pp.235-240、2004.
- [2] 加藤晋、津川完之: 自律車両におけるビジョンによる車線変更のためのラテラル制御、電気学会論文誌 D 編、Vol.120、No.5、pp.634~641、2000.
- [3] 国土交通省自動車局技術政策課: 国連自動車基準調和世界フォーラム (W P 2 9) 第 166 回会合等の結果について、<http://www.mlit.go.jp/common/001094628.pdf>、2015.
- [4] 車線逸脱防止支援システム: Wikipedia、2016.
- [5] 平成 2 5 年度国土交通省受託調査報告書、一平成 2 5 年度 車線逸脱防止システムの国際基準に関する調査一、独立行政法人交通安全環境研究所、2013.
- [6] 独立行政法人自動車事故対策機構: 予防安全性能アセスメント、http://www.nasva.go.jp/mamoru/active_safety_search/、2016.
- [7] J. Ziegler, et al.: Making Bertha Drive – An Autonomous Journey on a Historic Route, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine、Vol. 6、No. 2、pp. 8-20、2014.
- [8] Dagstuhl セミナー資料 (2015 年 11 月)、2015.

第6章 研究開発全体企画・管理

6.1 研究開発ロードマップの策定

6.1.1 全体工程表

平成28年3月現在の全体工程表を表6.1-1に示す。平成27年度は、平成26年度に基礎検討した結果をもとに、79GHzUWBミリ波レーダなど各方式センサ及び認識アルゴリズムの設計・試作・評価・解析を実施、今後取り組むべき課題を抽出、対策を検討した。

表6.1-1 全体工程表（平成28年3月現在）

実施項目	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度
(1) 79GHz UWB ミリ波レーダ方式検討 基礎データ解析	ミリ波レーダ方式の検討 ・ 実験データ解析 ・ 方式検討				
(2) 79GHz UWB ミリ波レーダ設計・試作	小型UWBミリ波レーダの開発 ・ 車載小型UWBミリ波レーダ要素技術 開発（アンテナ等）		DSPソフト開発	車載プロトタイプレーダ設計・試作 ・ 性能評価	
(3) 高輝度白線材料 の開発	リップ式白線の最適形状、材質の検討			リップ形成技術開発	性能評価・改良
(4) 測距イメージ方式 の検討	台上プロトタイプ装置開発 ・ イメージ素子基本性能調査 ・ プロトタイプ機設計・試作 ・ 認識アルゴリズム設計・評価			車載プロトタイプ装置開発 ・ 装置試作 ・ 性能評価	
(5) 白線識別技術の実証	評価用車線維持支援維持実験車開発 ・ 制御アルゴリズム製作 ・ 実験車製作 ・ 検出性能影響調査		台上 性能評価	実験線敷設 標準化案作成	実証評価

6.1.2 平成27年度工程表

平成28年3月現在の工程表を表6.1-2に示す。

表6.1-2 平成27年度工程表（平成28年3月現在）

実施項目 (実施者)	5～6月	7～9月	10～12月	1～3月
(1) 79GHz UWB ミリ波レーダ方式検討 基礎データ解析	基礎データ 検討	レーダ方式 検討	原理機による データ取得 白線認識アルゴリズム開発	原理機による 積雪基礎実験
(2) 79GHz UWB ミリ波レーダ設計・試作	FPGA/RFデバイスの設計	試作 アンテナの設計	ソフト開発 試作	試作レーダによる 基礎実験
(3) リブ付高輝度白線 形状と材料の検討	リブ形状の検討	材料の検討		性能（誘電率）評価
(4) 測距イメージ方式 の検討	1) 距離差分方式の開発、性能評価	2) 輝度差分方式の開発、性能評価		
(5) 白線識別技術の実証	1) 実験車両の改良	2) HDRカメラ評価向け システムの構築	2) HDRカメラ (複数) の評価・検証	

6.2 開発検討会の運営

本節では研究を円滑に進めるべく、産業界、学界の有識者に事業の進め方についてアドバイスを頂く開発検討会を運営した。以下、平成27年度に開催した開発検討会における議事要旨をまとめる。

6.2.1 第1回 開発検討会（平成27年7月13日開催）の議事要旨

(1) ミリ波レーダ方式の検討及び基礎データ解析

- ・角度特性も踏まえた検証を行い、最適な角度と距離のバランスを見極める必要がある。
- ・Bragg反射が強くなるリフレクタ構造が成形できるかも検討するとよい。

(2) 79GHz UWBミリ波レーダの開発

- ・角度が浅くなると距離が離れる分、より大きい出力が必要となる。検証が必要。

(3) 高輝度白線材料の開発

- ・車両が車線を跨ぐことによる磨耗・劣化の度合い等も確認できるとよい。

(4) 測距イメージセンサ方式の開発

- ・SNR向上につながる光源の周波数特性に着目した工夫についても検討してもらいたい。

(5) 白線識別技術の実証

- ・評価を実施する前提条件は明確にした上で進めてもらいたい。
- ・レーダとカメラ双方を比較した場合のそれぞれの優位性について検討できる評価方法についても検討してもらいたい。
- ・試験車両を用いた評価・検証では、高速道路の最大曲率400Rに加えて、一般道路（国道）も見据えた180Rなどについても評価してもらいたい。

(6) 全般を通じて

- ・想定していた目標値や期待値に対して、成果がどうだったのかを端的に分かりやすくまとめる必要がある。
- ・SIPの推進委員会や実用化WGにおける議論内容も踏まえて、様々な可能性を見極めつつ進める。

6.2.2 第2回 開発検討会（平成27年11月27日開催）の議事要旨

(1) 推進委員会第2回（8月3日）のご指摘とご回答（案）

- ・UWBミリ波レーダは高いポテンシャルがあると考えられており、本事業ではその取っ掛りとして、白線識別をテーマに据え検討しているといった説明がよい。
- ・説明の仕方を工夫して資料修正後、メールで改めてご意見を伺わせて頂きたい。

(2) 積雪時の白線検知実験（ミリ波反射特性計測）

- ・自車位置を認識する上では、検知対象の物標が周期性を有していた方が認識アルゴリズムによる後処理の観点でポテンシャルが高い。
- ・走行状態での受信電力のゆらぎ、ノイズの影響などは今後検討頂く必要があるのでは。自車位置認識が本来目的なので白線以外の物標を対象とした使い方の提案もご検討頂きたい。

(3) 79GHz UWBミリ波レーダ 課題と対策

- ・データ取得間隔は内部処理量（または処理能力）で決まるため、極端に短くは出来ない。従って、車速が高いと取得間隔の車両移動量（距離）は増加し、合成開口レーダに大きな影響を与えると考えられる。
- ・1/4波長で計測すると虚像なしできれいにデータ取得可能。1mm以下での取得が望ましい。50msecのデータ取得周期では合成開口レーダ方式は難しい。

(4) 白線リブ形状、材料の検討

- ・誘電率が90%などであればこれ以上上げて効果は得られないということ。
- ・ガラスビーズの粒径をミリ波に共振するパラメータに設定できる可能性あり。

(5) 測距イメージ方式の検討

- ・改めて内容について確認させて頂き、進め方を相談させて頂く。

(6) 白線センシング性能評価、標準化案検討

- ・車速に応じて目標収束点を設定。視野範囲に応じてどの車速まで対応可能か関係性を明確にする。
- ・高ダイナミックレンジカメラによる評価は現在検証中。

6.2.3 第3回 開発検討会（平成28年2月18日開催）の議事要旨

(1) 本事業の背景と目的、平成27年度 of 取組み概要、平成28年度以降の取組み方針（案）

- ・アクティブフェイズドアレイはコストが大きな課題の一つ。デジタルビームフォーミングが主流になりつつあり。原理的な性能や特性の比較なども整理してもらいたい。

(2) 79GHz UWBミリ波レーダ方式の検討、基礎データ解析

- ・積雪量が多い地方で、白線も側溝も見えない道路で、スノーポールが立っている場合検知出来る可能性あり。
- ・変調方式比較表に耐干渉性の項目も加えるべき。
- ・パルス圧縮方式はハードウェアによる処理負荷がかなり大きい。今後取組むべき研究課題の1つ。

(3) 79GHz UWBミリ波レーダの開発

- ・どういう項目で何を達成すべきかの指標を整理してもらいたい。

(4) 高輝度白線材料の開発

- ・誘電率がどれくらい変わると、反射率がどれくらい変わるのか見通しを見極めた上で検討を進めた方がよい。

(5) 測距イメージ方式の検討

- ・従来技術に対し、今回新たに工夫を加えたのであればそのポイントを説明してもらいたい。あるいは、評価のみ実施したのか。出発点をもう少し明らかにしてもらいたい。

(6) 白線識別技術の実証

- ・新たにこんな結果が分かったなどもう少し定量的な結果があれば教えてもらいたい。

(7) 全体まとめ

- ・今期計画に対して、結果がどうであったのか、平成28年度に向けての課題として全体の中のこの辺りから取組むべきでないかといった内容を整理し、報告をまとめて頂きたい。

第7章 まとめ

7.1 79GHz帯UWBミリ波レーダ方式検討、基礎データ解析（詳細は第4章を参照）

リブ白線を検知・識別し、白線からの離隔距離を推定するという課題に対して、(1) 積雪の影響、(2) レーダ変調方式の検討、(3) 他の路上構造物の中から各リブから低い利得の信号を効果的に合成する認識アルゴリズムについて検討した。

(1) 積雪の影響

リブ白線に対する 79GHz 帯 UWB ミリ波レーダの反射特性について、積雪の影響を動作原理機を使って確認した。積雪によるミリ波減衰とその表面反射（クラッタ）の両方に影響を受けており、前者だけ考慮した場合は、積雪が 5cm 以下かつ積雪密度が 0.3 以下であれば、ミリ波の減衰が約 5dB 以下であり、リブ識別が可能と思われる。しかし、積雪が深くなるにつれてリブからの反射波よりクラッタが大きくなるとリブ識別は困難になる。また、同じ積雪でも、ミリ波レーダのリブ式白線に対する方位角、仰角の設定次第で雪中での経路長（伝搬距離）が異なるためリブ識別が可能な積雪限界も変わる。今後、限界の見極めと限界を踏まえた活用法が必要である。

(2) レーダ変調方式の検討

代表的なレーダ変調方式（FM-CW 方式、パルス圧縮方式、インパルス方式、ステップド FM 方式）について、動作原理機を用いて電波暗室内で基礎実験を行った。実験結果を踏まえて、干渉問題、平均受信電力、測距精度、ハードウェア（コスト）、技術課題について比較整理を行った。各方式とも長所／短所があり、今後、リブ白線識別などアプリケーションを踏まえて方式選定の論議が必要である。

(3) リブ識別アルゴリズム

リブ白線からの反射波特性（周期的な反射波）を利用して他の物標との分離識別を行い、そして、白線から水平離隔距離を推定する識別アルゴリズムを具体的に作成し、検討した。今回は、周期性を有する他の道路構造物（ガードレールなど）を代替にを使って基礎検証を行った結果、比較的良好な距離推定精度得られることを確認した。今後は、空間処理などの効果的利用により更なる距離精度の改善が期待される。

7.2 79GHz帯UWBミリ波レーダ設計・試作（詳細は第3章を参照）

実環境や悪天候時におけるリブ式白線の反射特性を明らかにし、日本の幹線道路、高速道路で敷設されているリブを検知するためには、照射角度 $\pm 40^\circ$ の範囲において、 $-25\sim-20$ dBsm のターゲットを検知出来る必要があることを明らかにした。また、積雪量による減衰量を明らかにし、高利得化手法を用いることで積雪時にもリブを検知できる可能性があることを明らかにした。

また、評価用の高分解能ミリ波レーダを準備し、レーダ小型化を実現する仮想アレイ技術の角度誤差低減法について検証した。結果として、評価用ミリ波レーダは高い距離分解能でリブを検知することが可能であり、角度誤差低減法については各手法を組み合わせることで計算量を減らしつつ角度誤差を低減させる必要があることを述べた。

さらに、高利得化手法について言及し、積分処理によりリブ反射の利得を向上させることができるが、車両移動の影響を直接受けることが明らかとなった。また、SARによりレーダが移動した場合にも信号を合成することは可能であるが、実際の車速を想定した場合には誤差が大きくなることが今後の課題であることが確認された。さらに、アクティブフェイズドアレイ方式であれば狭ビームを生成して利得を向上させるため車両移動による影響は小さいが、アンテナ素子毎に移送器が必要となるため構造が複雑化することが課題であることが明らかとなった。

7.3 リブ式高輝度白線形状と材料の検討（詳細は第1章を参照）

(1) 誘電素材を配合した際の材料の流動性検討

白線材料の流動性検討では、誘電素材を配合した白線材料において、実験室内での検証と試験板作製時の流動性が大きく異なり、上記で検証した流動性調整用添加剤の配合量では実施工において施工不能になる恐れのある流動性であった。

今後、白線材料の配合を検討する際には、実験室内での白線材料の流動性の傾向を確認した上で、実施工に近いレベルでの確認が必要がある。

以上の事を踏まえて、誘電素材を配合する場合には、流動性調整用添加剤を含めた白線材料の配合検討が課題となる。

(2) ミリ波レーダに対する誘電素材の効果検証

北九州市立大学内の電波暗室にて計測した反射特性の結果において、ガラスビーズを散布した試験板においてのみ標準板との差が見られ、他の測定（磨耗状態）では、差が見られない結果となった。

以上より、誘電素材を白線材料に配合する事で明確に効果があると言い切れないと思われる。ミリ波レーダに対する誘電素材に効果の実証については、屋外のテストコース等にリブ式白線材料を設置し、塗膜表面に様にガラスビーズが散布されている施工直後から、塗膜表面が摩耗し白線材料内部の原材料が露出するまでの長期間によって検証する必要がある。

7.4 測距イメージ方式の検討（詳細は第2章を参照）

「2.1 投光同期3次元測距イメージセンサを用いたエッジ抽出技術の開発」にて、距離情報から道路構造物のエッジを抽出する技術の開発を行った。しかし、正確な距離が得られず雲が太陽をさえぎると距離データが大きく変動することも分かった。これらは、外乱光が除去しきれていないことが原因と考えられる。

外乱光の影響を下げるために照射光量の増加対策が考えられるが、平成26年度に照射光量の増加対策を行った。既に、照明装置は車の側面に取り付けるには大型であり、これ以上の大型化は現実的ではない。また、光学的なバンドパスフィルタなども対策案として挙げられる。

投光同期3次元測距イメージセンサは、間接TOF方式を使っており、外乱光の影響を必ず受ける。従って、抜本的な外乱除去策がないと全天候型センサとしての実現は難しいと判断する。

「2.2 白線認識アルゴリズムの開発」にて、測距イメージ方式の差分画像を用いた白線認識アルゴリズムを開発した。この技術では各種照度の環境にて、正しく白線の位置が認識された。今後の課題としては、複数のエッジを検出した場合の白線認識のためのアルゴリズムの強化、及び、照度の急変、広いダイナミックレンジを有する画像、白線と縁石以外の物体が存在する状況など、厳しい自然環境下でのポテンシャル評価が必要である。

7.5 白線識別技術の実証（詳細は第5章を参照）

平成27年度は、平成26年度に基礎構築と基本動作の確認を行った車線維持制御実験車の改良を行い、試験的に組み込むビジョンセンサを用いて、検出範囲や処理時間、車両速度を変化させて車線維持制御を実施し、その影響を明らかにした。また、既に市販されている車線逸脱防止支援システムなどで利用されている白線識別のためのビジョンシステムにおける性能限界を明らかにするため、白線識別の難しい環境条件での画像取得の検証を行った。ビジョンシステムとしては、今後、活用が期待されている照度変化に対応するハイダイナミックレンジカメラなども用いて比較検証を行った。さらに、平成26年度に引き続き、運転支援システムとしての性能基準等に関する動向の調査と、白線識別センサの性能評価手法等に関する動向の調査を行った。

今後は、自動運転システムの機能の一部としての白線識別センシングシステムとしての要件などをさらに精査する必要がある。また、評価検証に対しては、妥当性、信頼性の向上、試験方法に対しては実現性、再現性が今後の課題である。さらに、測定方法を含めた環境状況を表す指標の策定が不可欠であり、それらに基づき、評価基準や試験方法の開発、標準化案作成などを、センサに合わせる形も含めて、今後、具体化して行っていく必要がある。

— 禁無断転載 —

経済産業省委託

平成 27 年度
戦略的イノベーション創造プログラム
(自動走行システム):
全天候型白線識別技術の開発及び実証

報告書

平成 28 年 3 月

発行 一般財団法人 日本自動車研究所
東京都港区芝大門 1-1-30
日本自動車会館 12 階
TEL 03 (5733) 7925