

「ICT を活用した次世代 ITS の確立」のうち
「インフラレーダーシステム技術の開発」

平成 29 年度 研究開発成果報告書

平成 30 年 3 月

パナソニック株式会社

目次

1.	はじめに	3
2.	研究開発目標	3
3.	研究成果要約	4
4.	研究成果	10
4.1.	レーダー間干渉低減技術の開発	10
4.1.1.	取り組み概要	10
4.1.2.	車載レーダーとの干渉実験	10
4.2.	耐環境性能補償技術の開発	46
4.2.1.	取り組み概要	46
4.2.2.	積雪寒冷地等での性能実証	46
4.3.	路車協調技術の開発	75
4.3.1.	取り組み概要	75
4.3.2.	自動走行支援情報生成の実証実験	75
4.3.3.	路車協調実証向け実験システム構築	96
5.	研究発表等の成果	123
6.	アウトカム目標に向けた取り組み	124

1. はじめに

本研究開発は、「ICT を活用した次世代 ITS の確立」基本計画のアウトカム目標達成を目指し、研究開発課題の一つである「インフラレーダーシステム技術の開発」に取り組む。目標とする交通事故死者数 2500 人以下／年の達成に向けて、交差点等の様々な交通環境や気象・環境条件下で信頼性高く対象物検知・識別を行うことが可能なインフラレーダーシステムを実現して、交通事故死者数削減に寄与することを目的とする。

日本では、交通事故による死亡者が、年間 4,117 名（平成 27 年）であり、事故の半数近くが交差点およびその周辺で発生している。特に、複雑な交差点の環境下では死角が避けられないため、事故を防止するのがより困難となっている。実効性が高く、効率的な研究開発を推進していくためには、この図に示すような優先的に解決すべき衝突事故の様態を定めることで、開発技術の実証実験を加速できると考える。

2. 研究開発目標

本研究開発は、官民連携で検討されている実用シーンとその性能要求に応えるだけでなく、悪天候時の検出性能劣化やデータ処理時間の制約等の実使用条件においてシステムが機能する範囲を明確にしていくことを基軸とし、以下のように取り組む。

ヒトや自転車といった小さな対象物を検知可能な 79GHz 帯高分解能レーダーを路側設置センサーに用いて、路車協調型の安全運転支援システムとして実用化するため、検出信頼性、耐干渉性および耐環境性に優れたミリ波センシング技術及び安全運転支援に資するための路車連携システム技術を開発する。ミリ波センシング技術としては、主に歩行者に対するレーダー検出の信頼性を向上させる「レーダー検出信頼性向上技術の開発」、交差点内に車載レーダーとインフラレーダーが混在する条件でこれらのレーダーシステムを共存させる「システム間干渉低減技術の開発」及びインフラレーダーを多様な実環境下で適切に動作させる「耐環境性能補償技術の開発」に取り組む。加えて、路車連携システム技術の開発としては、インフラレーダーで収集した情報を自動車に提供するための「路車協調技術の開発」に取り組む。

これまで、平成 26 年度から平成 28 年度の 3 年間は、交差点などの路側設置センサーとして小型な 79GHz 帯ミリ波レーダー実証装置を開発。歩行者等の確実な検知を実証していくだけでなく、車載レーダーが存在する条件でのシステム共存や様々な天候、温度の条件でのレーダー動作について検証を実施してきた。

平成 29 年度以降は、利用シーンとして高速道路環境を想定した車載レーダーに対する耐干渉性能の実証およびレーダー筐体等への着融雪に対するフィールド風雪条件での検証を実施すると共に、路側設置された 79GHz 帯レーダーを制御して、レーダーセンサーが検知した対象物の位置や速度などの情報を周囲の車両等へ伝送するインフラレーダーシステム実証装置を開発する。これにより、協調型の自動走行支援サービス提供に向けたインフラレーダーシステム技術の全体検証を実施していく。

3. 研究成果要約

イ) レーダー間干渉低減技術の開発

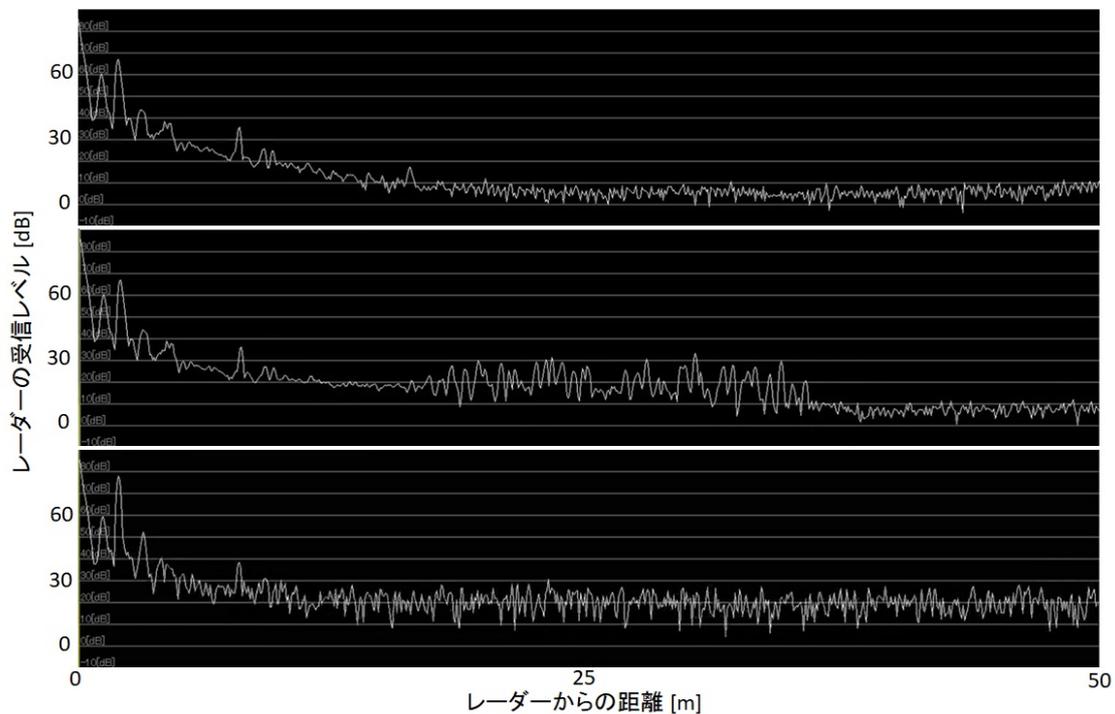
・車載レーダーとの干渉実験

年次目標は、高速道路の走行条件において、路側と車両のレーダー間で発生する干渉影響を明確化する。また、車載レーダーとして一般的な方式のデバイスを用いて、汎用性のある耐干渉性能の評価を実施することであり、本取り組みの達成状況は以下の通りである。

高速道路におけるインフラレーダーの利用シーンとして、合流部における主に本線側の車両情報を取得することが想定される。そのため、高速道路の合流部を模擬できるテストコース環境での車両走行試験を実施し、路側と車載のミリ波レーダー間で発生する相互干渉の影響を把握した。具体的には、平成29年9月にツインリンク茂木南コースにおいて干渉伝搬実験を実施した。特に、走行車両の位置や速度だけでなく、車間距離も測定できるように複数台のレーダーを路側に設定した条件で、レーダー間干渉の発生状況を実測して確認することができた。

また、車載レーダーとして一般的な仕様のミリ波レーダーモジュールを導入して、レーダー間干渉実験を実施することで耐干渉性能を評価した。具体的には、被干渉側のインフラレーダーとして符号化パルス方式を、対する車載レーダーとして高速チャープ方式を使用するシナリオを選択し、運用周波数帯が重複しアンテナビームも対向する厳しい条件で干渉発生時の受信特性を解析した（図3.1参照）。車載レーダーからの干渉信号が、インフラレーダーでは入射方向に対するノイズフロアを変動させる現象が観測されたが、実使用時の離隔距離では影響の無いレベルであることを確認することができた。さらに、ビーム正対時の干渉影響に配慮して、レーダーモジュールから放射パターンを拡大するアンテナ設計を実施した。特に、電磁界解析シミュレーション環境を導入した上で、79GHz帯ミリ波の解析モデルについて実測との比較によりその妥当性を検証した。

以上のように、車載レーダーとして想定される仕様のミリ波レーダーを用いた干渉実験が実施されたことで、より実用的な条件での耐干渉性能を検証することができた。



上段：干渉無し、中段：符号化パルスが与干渉、下段：高速チャープが与干渉
 図 3.1 干渉発生時のレーダー受信特性（距離 2m 条件の距離プロファイル測定例）

ウ) 耐環境性能補償技術の開発

・積雪寒冷地等での性能実証

年次目標は、高速道路の逆走検知等への応用展開を目指して、ミリ波レーダーの耐候性がシステムの要件と整合する積雪寒冷地等のフィールドにおいて技術実証実験を実施することであり、本取り組みの達成状況は以下の通りである。

路側設置レーダーの利用シーンとして高速道路の逆走検知等を想定し、高速道路会社への技術提案を推進しつつ、主に積雪寒冷地でのフィールド検証を実施することができた。具体的には、平成 29 年 10 月に、首都圏中央連絡自動車道において、79GHz 帯レーダーを路側に設置し、通過車両の検知精度を検証した。この試験期間においては、台風の影響による激しい降雨時や濃霧発生時等を含む気象条件の変動があり、実環境においてミリ波レーダーの耐候性を確認することができた（図 3.2 参照）。

また、平成 29 年 12 月下旬から 2 月上旬にかけて、山形自動車道における検知精度の検証を実施した。この試験期間の天候には、吹雪の発生時、乾雪や湿雪といった異なる降雪条件が含まれており、実際の風雪環境においてレーダー筐体やターゲット地物の着融雪に対する耐性を定量的に把握することができた（図 3.3 参照）。

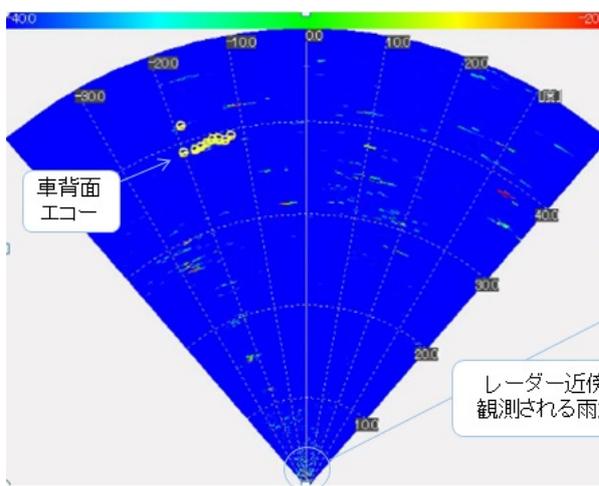
以上のように、路側レーダーとしての具体的な利用シーンを定めつつ、実フィールドにおいて耐環境性能を検証することができた。



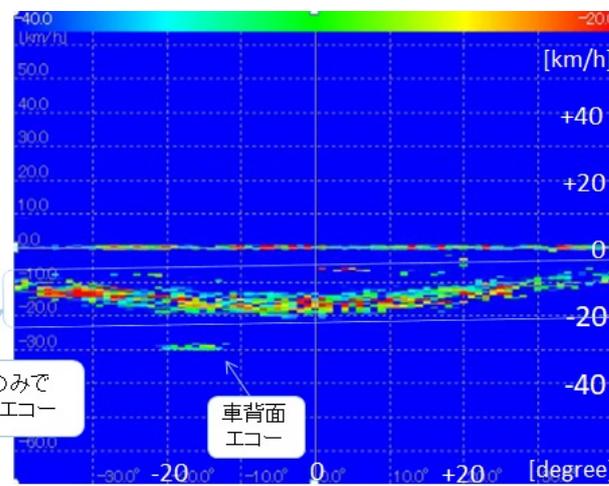
(a) 路側設置カメラ映像(晴天時)



(b) 同左(夜間の台風による暴風雨時)



(c) 右上撮影時のレーダーエコー測定例



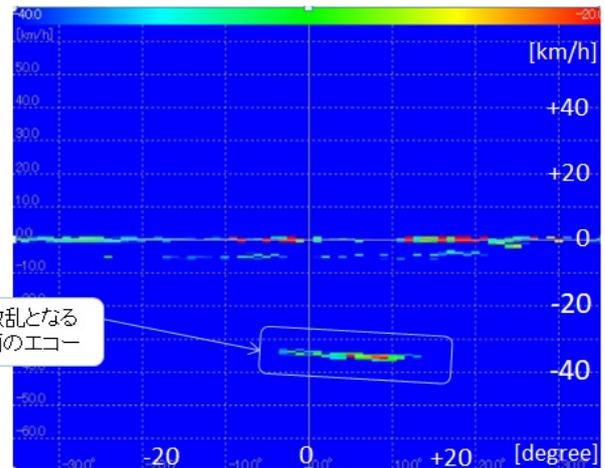
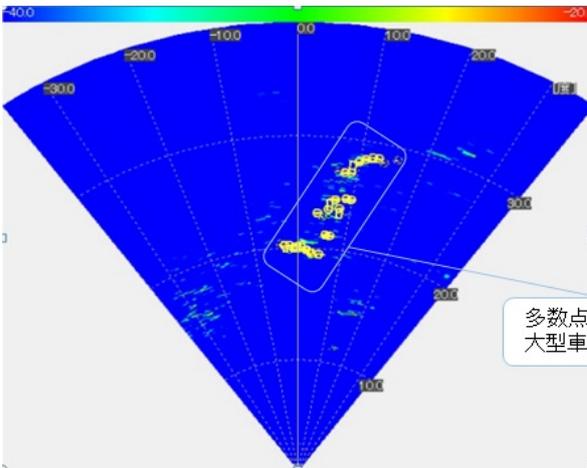
(d) 右上撮影時のドップラー特性解析例

図 3.2 一般地における路側設置型 79GHz レーダーのフィールド検証



(a) 山形道の路側設置写真

(b) 降雪時通過車両のカメラ映像



多数点散乱となる
大型車両のエコー

(c) 右上撮影時のレーダーエコー測定例

(d) 右上撮影時のドップラー特性解析例

図 3.3 積雪寒冷地における路側設置型 79GHz レーダーのフィールド検証

エ) 路車協調技術の開発

・自動走行支援情報生成の実証実験

年次目標は、路側レーダーの検知領域に対して測定データの信頼性を向上させるアルゴリズムを開発し、その有効性を実証する。また、進入車両や横断歩行者の位置、速度をリアルタイムにモニタリングする機能及び交通量に係わる車両の台数等を一定時間毎にロギングする機能を開発することであり、本取り組みの達成状況は以下の通りである。

前述のフィールド検証を通じて、普通車から大型車、特に様々なサイズ・形状をした業務用車両に対して、数千台を超える実測データを取得することができている。このデータベースを用いることで、特に大型車がマルチパス等の影響により複数車両に分離して測定されるといった過検知を回避するようにした高精度な検知アルゴリズムの開発及びその性能評価を実施した。具体的には、単路における通過車両数が4千台を超えた1日分のデータに対して、99%以上の検知率を達成した（表1参照）。くわえて、レーダーを路側センサーとして設置した際の地図座標に基づき、検知された車両や歩行者の位置、速度をリアルタイムにモニタリングできるアプリケーションソフトウェアを設計、実装した。

また、平成28年度に開発した車種判別アルゴリズムを結合するようにして、車両の台数や四輪車や二輪車といった車種等を時系列のデータとして記録できるソフトウェアを開発した上で、その機能検証を完了した。

以上のように、高精度な検知性能を実現する79GHzレーダーのソフトウェア技術の確立を目指した開発により、自動走行支援の具体的なアプリケーションを訴求していくことが可能となった。

表 3.1 単路通過車両に対する79GHzレーダー検知性能の評価結果

目視計測	79GHzレーダー計測		
24時間通過車両数: 4,171台	正カウント: 4,169台	過カウント: 13台	未カウント: 2台
2分以上通過無: 計4時間27分	誤報時間: 0秒		

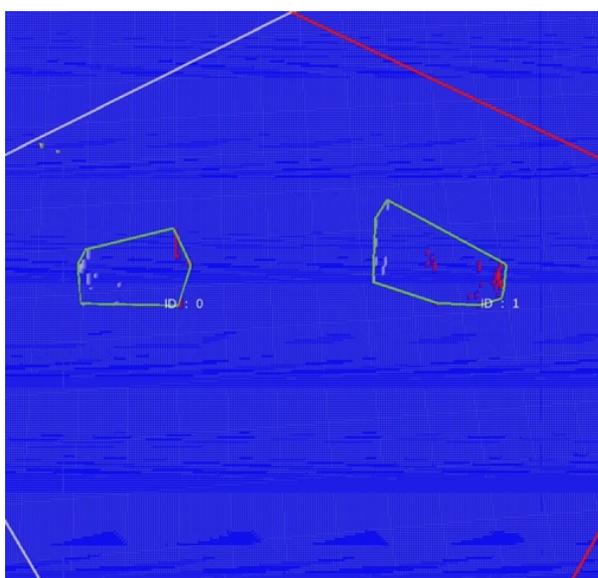
・路車協調実証向け実験システム構築

年次目標は、79GHz帯レーダー等の検知データを統合するセンサー統合・制御装置及び周囲の車両等へ情報メッセージを送信する無線通信機を含む、路側設置用の実験システムを構築することであり、本取り組みの達成状況は以下の通りである。

交差点等におけるシステムレベルのフィールド検証を目指して、複数の路側センサーが生成する検知データを統合するセンサー統合・制御装置の試作開発を実施した。特に、走行車両の前後方向に設置された2台の79GHz帯レーダーによる測定データを、汎用的なグリッドレベルで統合化した上でクラスタリングすることで走行車両の車長を測定できる機能を実現した（図3.4参照）。

次に、交差点を模擬した試験路環境において、複数のインフラレーダー間に対し60GHz帯ミリ波通信を用いて無線接続するようにした実験システムを構築して、クリッドレベルデータによる複数レーダーの統合技術に関するリアルタイム動作の検証を完了した。

以上のように、複数の79GHz帯レーダーと検知データを統合する制御装置から成る路側システムについて、レーダーの小型化だけでなくミリ波通信技術も活用することにより設置性に優れたシステム構成として具現化することができた。



(a) 前方測定セル(赤)及び後方測定セル(白)



(b) 前方レーダー視点のカメラ映像

図 3.4 前後方向 2 台のレーダーによる統合クラスタリングの機能検証

4. 研究成果

4.1. レーダー間干渉低減技術の開発

4.1.1. 取り組み概要

車載ミリ波レーダーの主要な利用環境として高速道路を想定し、テストコースでの車両走行伝搬実験により路側と車載のレーダー間で発生する相互干渉の影響を把握する。また、車載レーダーとして一般的な仕様のミリ波レーダーモジュールを導入してレーダー間干渉実験を実施することで耐干渉性能を評価する。

4.1.2. 車載レーダーとの干渉実験

4.1.2.1 高速道路合流部を想定したテストコース伝搬実験

はじめに、テストコースでの車両走行伝搬実験に対する事前検討として実施した、伝搬実験で使用する79GHz帯レーダー間の干渉特性に関するモデル化について説明する。

図4.1.2.1-1は本基礎実験の実施環境に関して示した図である。それぞれのレーダーは正面方向（最も感度の高い方向）をもう一方のレーダーに向けて設置し、図のようにレーダー間の距離は10mとした。また、干渉発生時の受信信号特性を正確にモデル化するため、干渉条件としては最も厳しい場合をリファレンスとした。つまり、各々のレーダーを動作させるパラメータは等しくなるように設定しており、中心周波数は同一の79GHz、送信波形や送信周期等も同一の値を用いた。尚、レーダー方式としては符号化パルス方式を採用している。

- ・79GHzレーダー同士の対向試験
- ・同一中心周波数（79GHz）動作

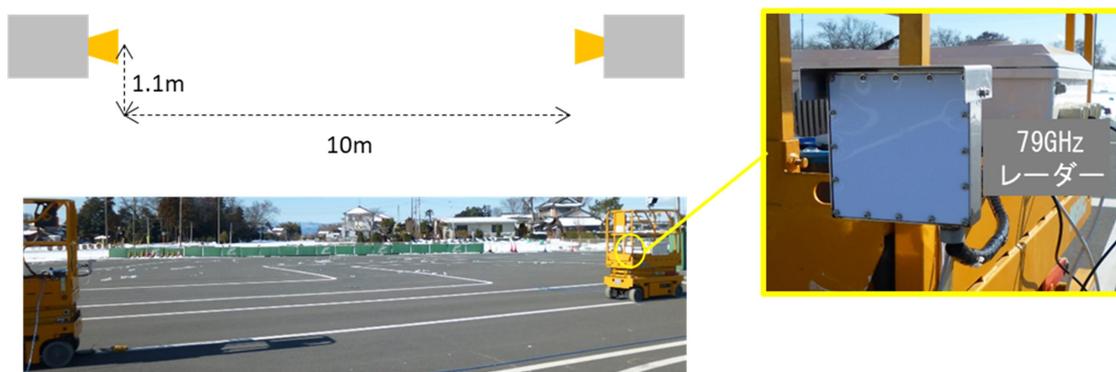


図 4.1.2.1-1 79GHz レーダー同士の基礎実験環境

図 4.1.2.1-2 にパルスレーダー間の干渉基礎実験結果を示す。図はレーダー反射強度を 2 次元マップ上に図示したものであり、それぞれ異なるタイミングのスナップショットを表している。色の変化で表した反射強度の値は、信号の SNR (Signal to Noise Ratio) を示しており、今回は+10dB を検出感度点に設定した。

被干渉レーダーから 10m 離れて設置された与干渉レーダー設置車両の反射に加えて、白枠で図示の通り、与干渉側レーダーから出力されたパルスにより生じる干渉影響が確認できる。2 台のレーダーの符号系列等の動作パラメータは同一の値に設定しており、干渉影響はプロファイルの距離方向にランダムにおおよそパルス長に相当する区間で発生する。

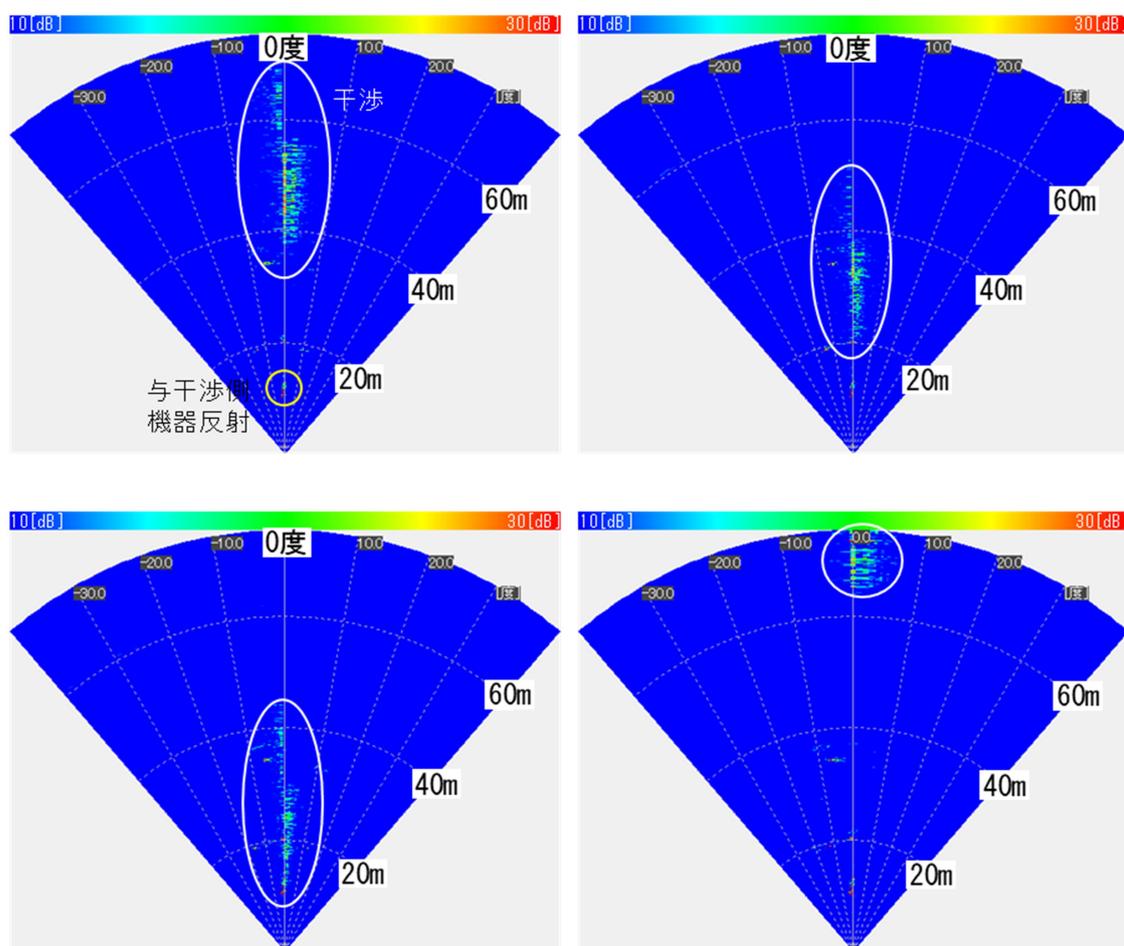


図 4.1.2.1-2 干渉発生の様子 (異なる 4 タイミングのスナップショット)

図 4.1.2.1-3 に干渉レベルの時間変動を示す。図 4.1.2.1-3 は特定距離のセルレベル変動を示したもので、左グラフが干渉源の無い場合、右グラフが干渉源の存在する場合を示している。図に示す通り干渉源が存在する場合、干渉は感度点を超えて発生するがその干渉強度は一定ではなく変動することが分かる。

図 4.1.2.1-4 に干渉発生時の干渉強度分布を示す。図の通り干渉信号の強度は感度点である+10dB を超えて分布する。データ解析の結果から、本分布の 95%累積値は +28.8dB であった。

このような本基礎実験の結果を干渉強度分布のリファレンスモデルとして、以降で説明するテストコースでの車両走行伝搬実験で得られたデータの解析において用いることにした。

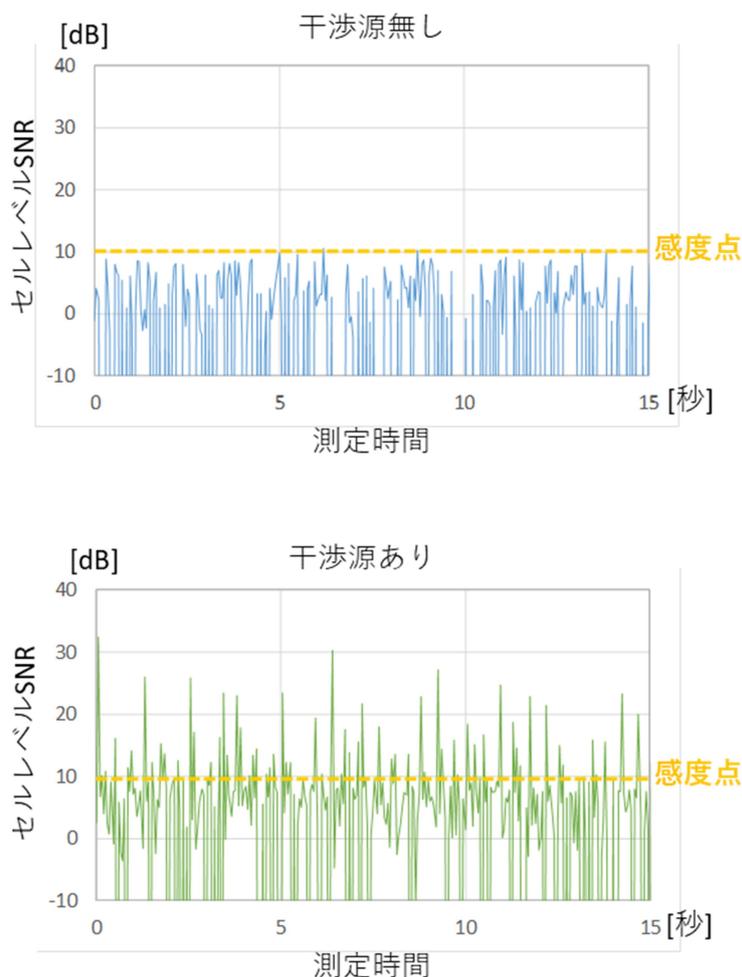


図 4.1.2.1-3 基礎実験環境における干渉発生時の時間変化 (セルレベル変動値)

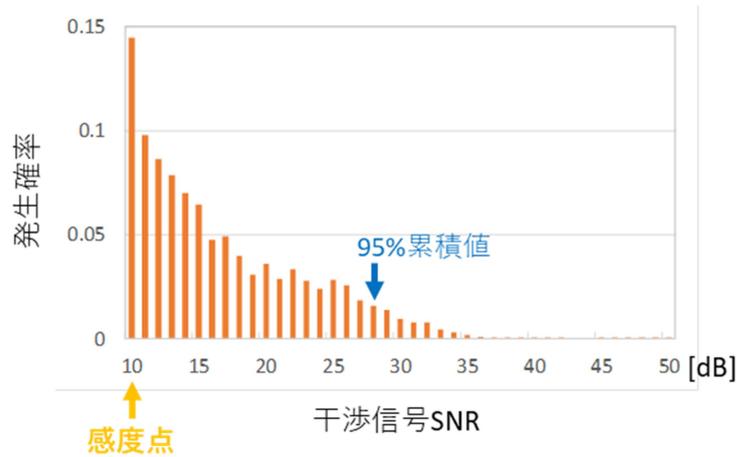


図 4.1.2.1-4 基礎実験環境における干渉発生時の強度分布

以下では、路側と車載のレーダー間で発生する相互干渉の影響を定量的に把握するために、テストコースで実施した車両走行伝搬実験について述べる。

車載ミリ波レーダーの主要な利用環境として高速道路を想定し、テストコースにおいて高速道路の合流部をレイアウトして干渉実験を実施した。図 4.1.2.1-5 に本テストコースの設置設計を示す。また、図 4.1.2.1-6 に実験時のテストコース全景を示す。

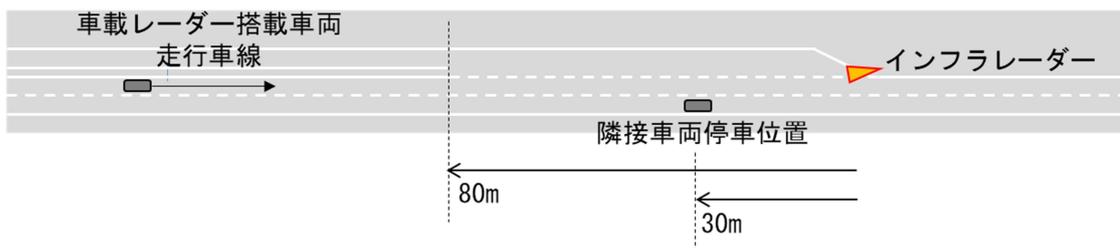


図 4.1.2.1-5 高速道路合流部を想定したテストコース設置設計



図 4.1.2.1-6 高速道路合流部を想定したテストコースの全景

図 4.1.2.1-7 には車両に設置した 79GHz レーダーの取り付け状態を示す。車両の前側方に、インフラレーダーと同様な符号化パルス方式のレーダーを仮設置した。

インフラレーダーと車載レーダー間の干渉実験シナリオとしては、車載レーダーを水平に設置した場合にくわえて、上方（インフラレーダー設置方向）に向けて俯角を設定したパターンを実施した。これは、通常の使用条件である水平設置との比較検証のために、敢えて干渉が生じやすい環境設定を行ったものである。さらに、車載レーダーを搭載した車両が走行する車線の隣接車線に大型トラックを停車させる実験パターンもくわえた。こちらは隣接車両が無い場合と比較して、隣接車両が存在することで干渉波の伝搬ルートが複数になることを想定したものである。



図 4.1.2.1-7 隣接車両停車位置に車両が停車した実験シナリオの様子及び
車両へ車載レーダーを取り付けた状態の外観

図 4.1.2.1-8 には、インフラレーダー及び車載レーダーに使用した 79GHz レーダーの垂直方向アンテナパターンを示している。指向性利得の 3dB 半値幅は約 10° であり、垂直方向角度 $\pm 10^{\circ}$ を超えると最大値と比較して利得が 20dB 程度下がる。

図 4.1.2.1-8 で示したアンテナパターンとインフラレーダーの設置パラメータを元に推定したエコー受信 SNR を、図 4.1.2.1-9 に示す。この図の通り、インフラレーダーとしては、40m 先の歩行者を検出できるよう回線設計しており、車両の場合 75m 程度の遠方距離から検出可能である。

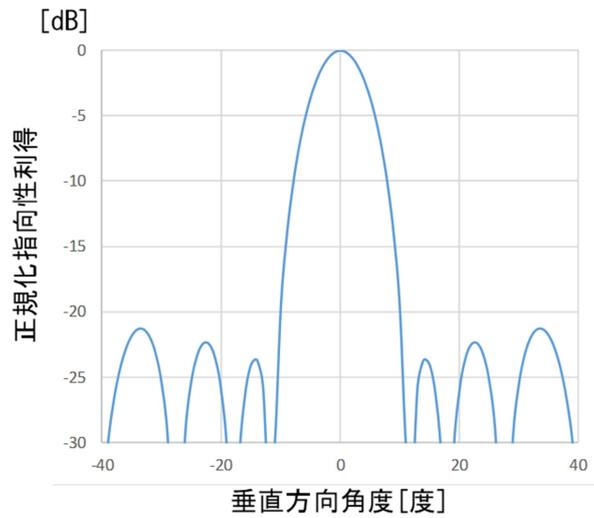


図 4.1.2.1-8 インフラレーダー及び車載レーダーに使用した 79GHz レーダーのアンテナパターン (シミュレーションデータ)

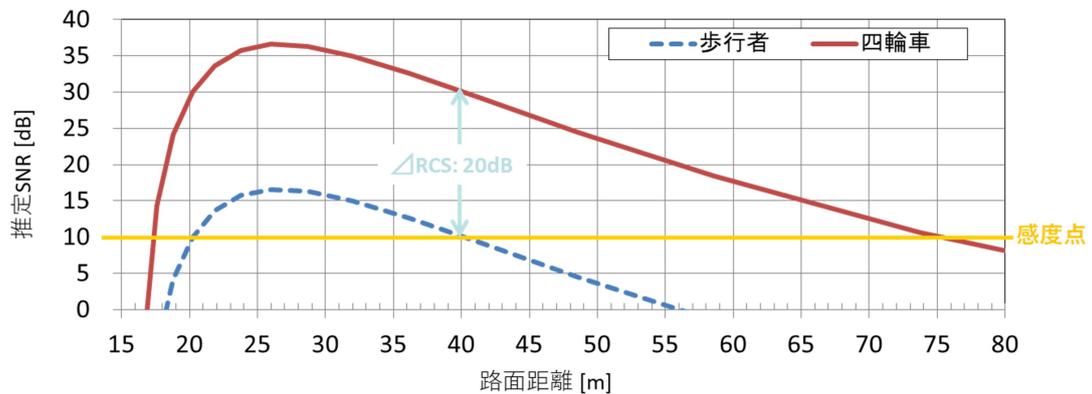
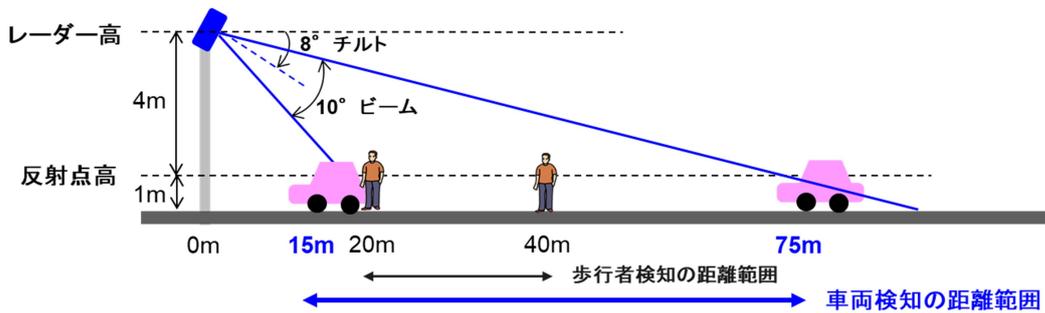


図 4.1.2.1-9 使用したインフラレーダーによる推定 SNR (回線設計値)

表 4.1.2.1-1 にインフラレーダーと車載レーダー間の干渉伝搬実験シナリオを示す。また、図 4.1.2.1-10 から図 4.1.2.1-13 に、各シナリオにおける実験結果を示す。

表 4.1.2.1-1 インフラレーダーと車載レーダー間の干渉伝搬実験シナリオ

実験シナリオの概要		
インフラレーダー路側設置車線に対して車載レーダー搭載車両を通過させ、干渉発生有無の確認と干渉レベルの解析を実施		
	車載レーダーの設置俯角	隣接車両の有無
シナリオ 1	0° (水平設置)	無し
シナリオ 2	8° (上方設置)	無し
シナリオ 3	0° (水平設置)	有り
シナリオ 4	8° (上方設置)	有り

図 4.1.2.1-10 に車載レーダーの俯角を水平としたシナリオ 1 の場合のインフラレーダーの反射レベル分布を示す。グラフはインフラレーダーと車両の距離 Δr が 70m、60m、50m、40m、30m、20m 時のスナップショットである。図 4.1.2.1-10 に示すように車載レーダーの俯角が 0°であるシナリオ 1 の場合、インフラレーダー側の反射レベル分布上に干渉影響は確認されないことが分かる。

次に、図 4.1.2.1-11 に車載レーダーの俯角を 8°上向きにして走行したシナリオ 2 の場合のインフラレーダー反射レベル分布を示す。図に白枠で示した通り、車両からの反射とは異なる干渉影響による感度値を超えた反射レベル分布が見られる。前述したレーダー間の距離 10m における基礎実験結果と同様、干渉影響は距離方向に延びて分布し、またフレーム毎にランダムな距離区間に発生する。

また、これらの車載レーダー俯角を水平または上向き 8°にしたのと同様の実験を、車載レーダー搭載車両が走行する車線の隣接車線に大型トラックを停車させたパターンで実施した。前述した通り、敢えて干渉が生じやすい環境設定を行ったパターンであり、隣接車両が存在することで干渉波の伝搬ルートが複数になることを想定している。

隣接車両が存在する場合として、図 4.1.2.1-12 に車載レーダーの俯角が水平の場合のシナリオ 3 について、図 4.1.2.1-13 に車載レーダーの俯角が上向き 8°の場合のシナリオ 4 について、各々インフラレーダーの反射レベル分布図を示す。シナリオ 3 の図 4.1.2.1-12 においては、隣接車両と車載レーダー搭載車両からの反射のみの分布しか確認できないが、シナリオ 4 の図 4.1.2.1-13 場合、シナリオ 2 と同様に干渉影響による反射が距離方向に延びて分布し、発生する距離区間は基礎実験及びシナリオ 2 の結果と同様に一定ではない。

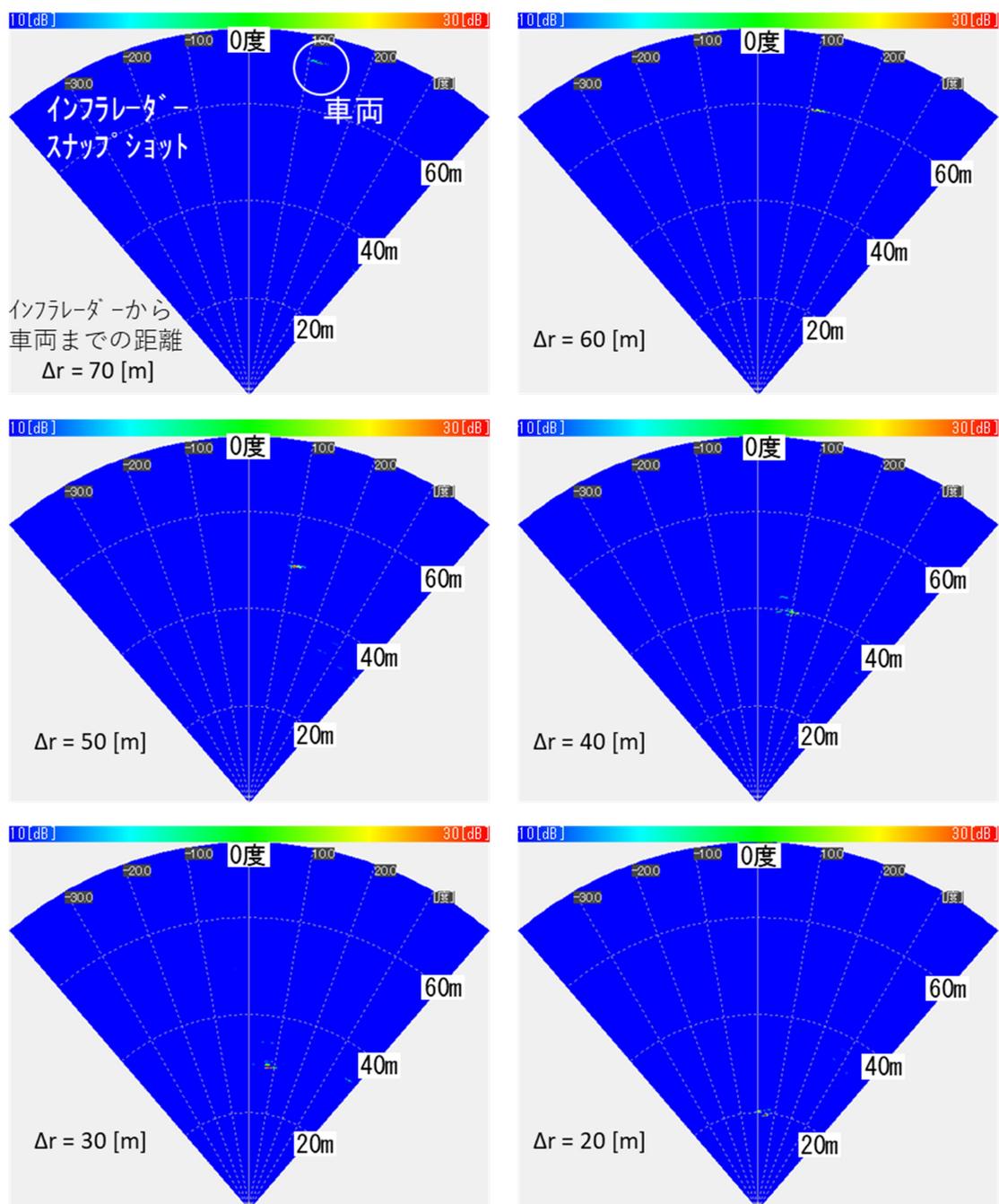


図 4.1.2.1-10 シナリオ 1 インフラレーダー反射レベル分布

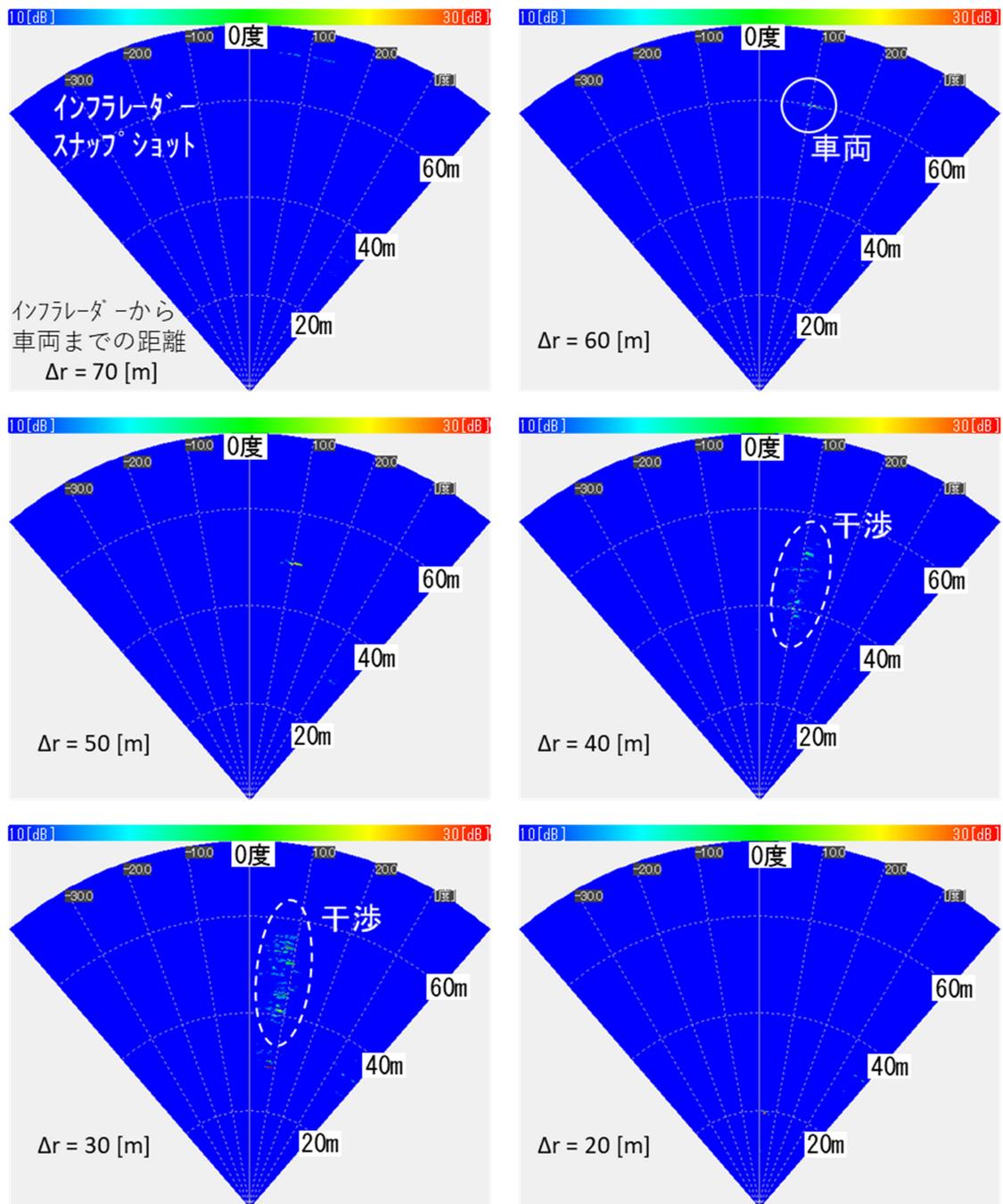


図 4.1.2.1-11 シナリオ 2 インフラレーダー反射レベル分布

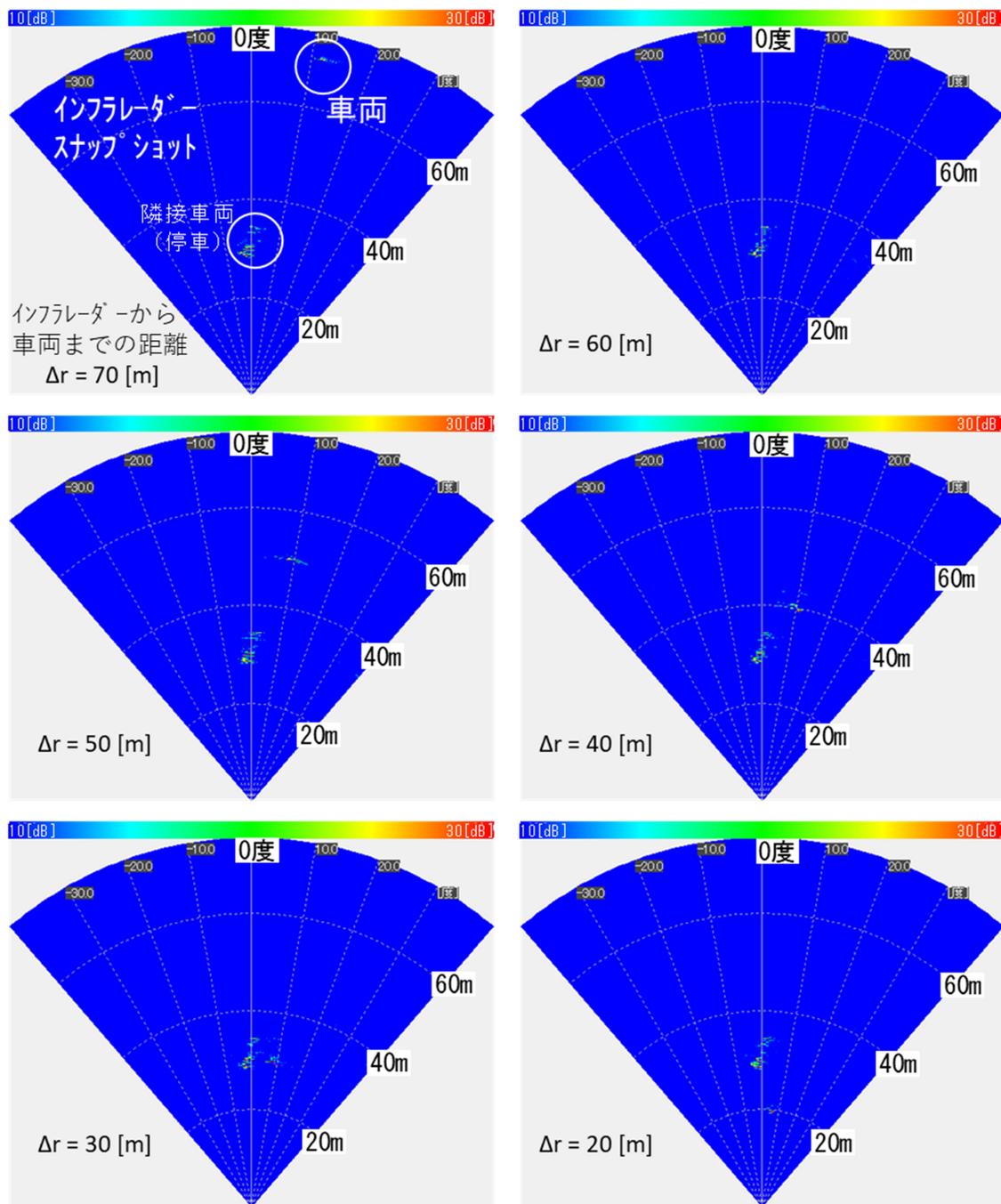


図 4.1.2.1-12 シナリオ 3 インフラレーダー反射レベル分布

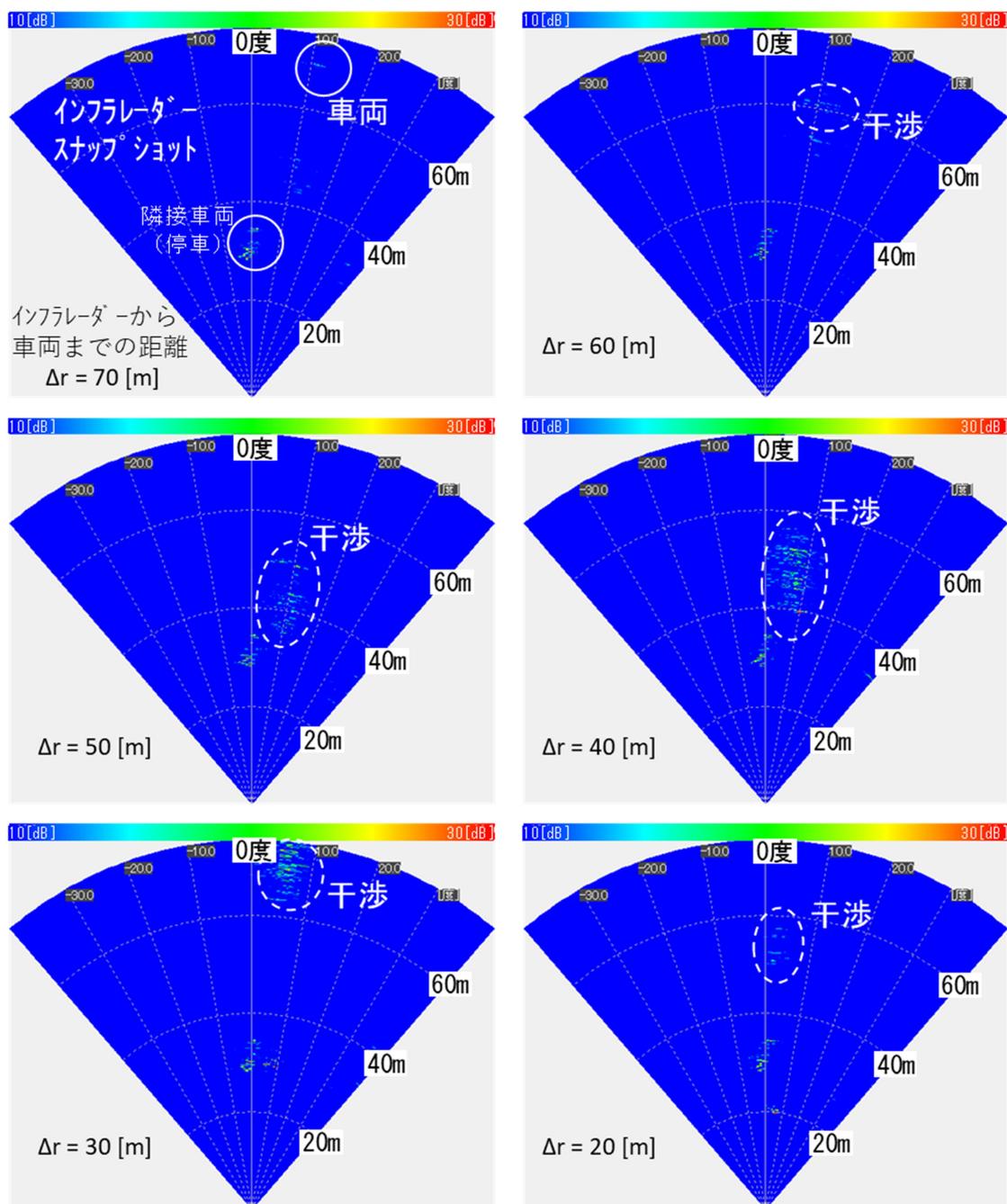


図 4.1.2.1-13 シナリオ 4 インフラレーダー反射レベル分布

次に、シナリオ 4 でインフラレーダーの反射レベル分布に発生した干渉影響を定量的に解析した。まず、シナリオ 4 の実験時に生じた干渉波の受信レベル分布を図 4.1.2.1-14 に示す。この図は、車載レーダー搭載車両がインフラレーダー設置点との距離 $\Delta r=80\text{m}$ の遠方から移動し 10m の近傍に接近するまで、全てフレームを対象にして測定した干渉波のレベル分布である。ここで、図 4.1.2.1-14 で示した干渉波の受信レベル分布は、車載レーダー搭載車両とインフラレーダー設置点との距離範囲別に示した図 4.1.2.1-15 から図 4.1.2.1-21 のデータを集計した結果である。さらに、データ解析結果として、車載レーダー搭載車両とインフラレーダー設置点との各々の距離範囲における干渉波レベル分布の 95% 値を、表 4.1.2.1-2 に示す。

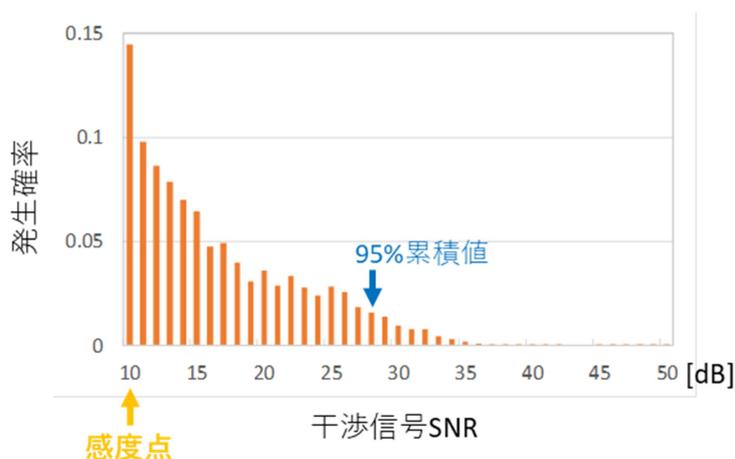


図 4.1.2.1-14 車載レーダーを干渉源とした干渉波の受信レベル分布
(インフラレーダーと車両間距離：10m～80m 全体の集計)

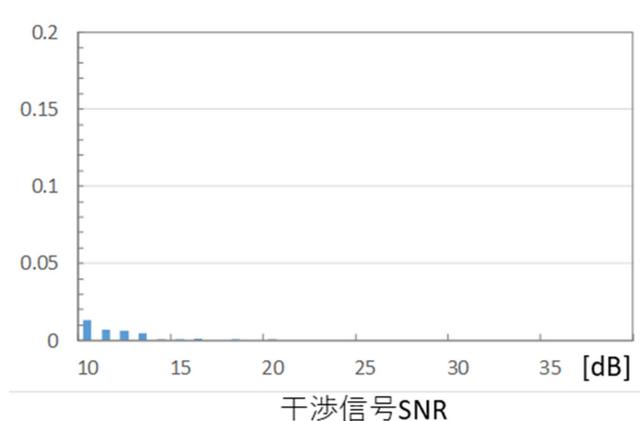


図 4.1.2.1-15 干渉波レベル分布 (インフラレーダーと車両間距離：10m～20m)

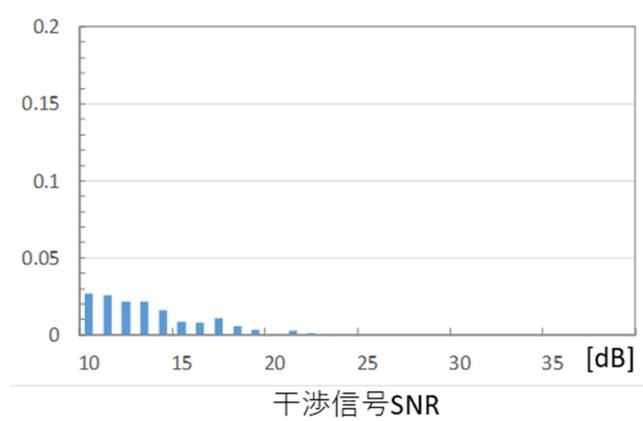


図 4.1.2.1-16 干渉波レベル分布 (インフラレーダーと車両間距離 : 20m~30m)

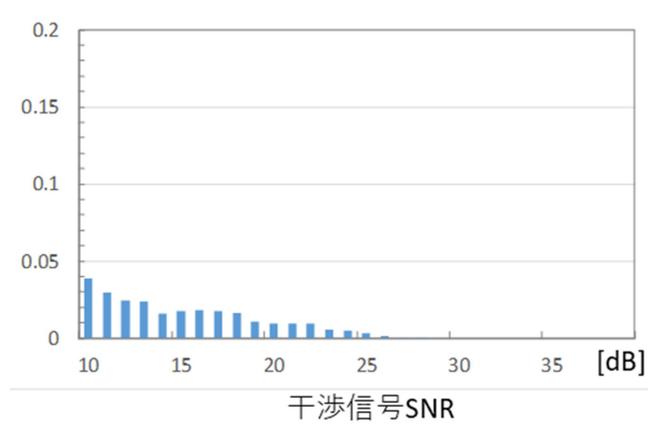


図 4.1.2.1-17 干渉波レベル分布 (インフラレーダーと車両間距離 : 30m~40m)

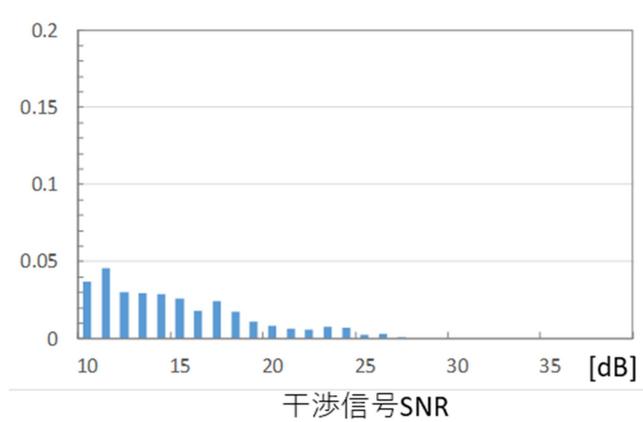


図 4.1.2.1-18 干渉波レベル分布 (インフラレーダーと車両間距離 : 40m~50m)

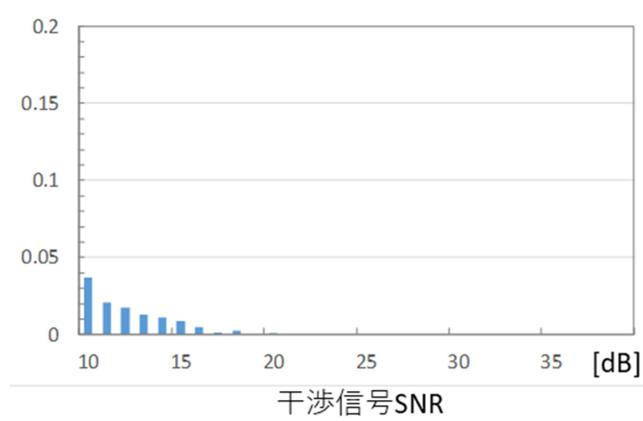


図 4.1.2.1-19 干渉波レベル分布 (インフラレーダーと車両間距離 : 50m~60m)

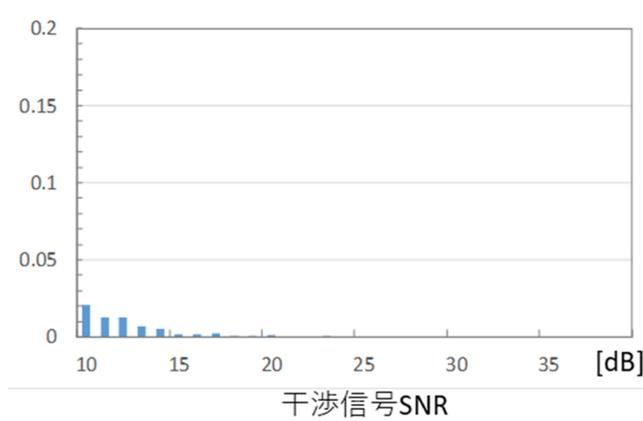


図 4.1.2.1-20 干渉波レベル分布 (インフラレーダーと車両間距離 : 60m~70m)

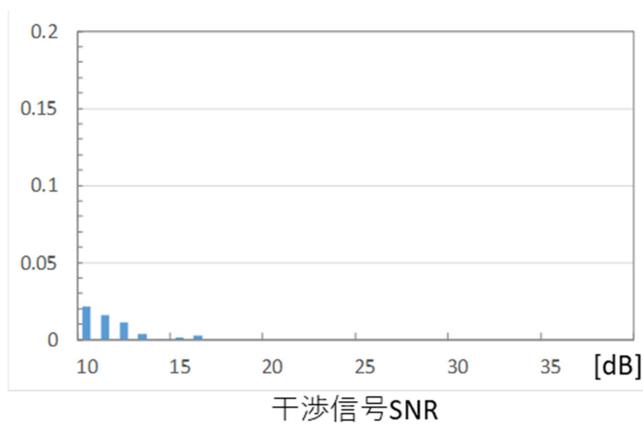


図 4.1.2.1-21 干渉波レベル分布 (インフラレーダーと車両間距離 : 70m~80m)

表 4.1.2.1-2 干渉波レベル代表値 (シナリオ 4 における干渉レベル分布)

“インフラ”と”車載”間の距離 [m]	10～20	20～30	30～40	40～50	50～60	60～70	70～80
干渉波レベル分布の95%値 [dB]	15.7	18.4	22.6	22.7	15.7	16.9	14.8

ここで、前述した基礎実験結果を元に、図 4.1.2.1-22 で示す伝搬条件を決める設置パラメータと図 4.1.2.1-8 で示したアンテナパターンを用いて推定した干渉信号レベルの SNR 値を、図 4.1.2.1-23 に示す。図 4.1.2.1-23 の横軸はインフラレーダーと車載レーダー搭載車両の距離であり、車載レーダーの俯角が水平の場合と上向き 8° の場合の算出値をプロットしている。

くわえて、実測値として表 4.1.2.1-2 の干渉波レベルの 95%値も重ねて示してある。図 4.1.2.1-23 の推定値 ($\alpha=0^\circ$) より、車載レーダーを水平設置した場合には、インフラレーダーの感度点を超えるような干渉は車両位置に寄らず発生しないことが分かる。これは車両走行による伝搬実験のシナリオ 1 及びシナリオ 3 の結果と同様であり、実測値からも裏付けられた。また、上向き 8°設定の場合には、干渉信号 SNR が感度点を超えることが推定されるが、伝搬実験のシナリオ 2 及びシナリオ 4 においても同様の結果として感度点を超える干渉が確認された。

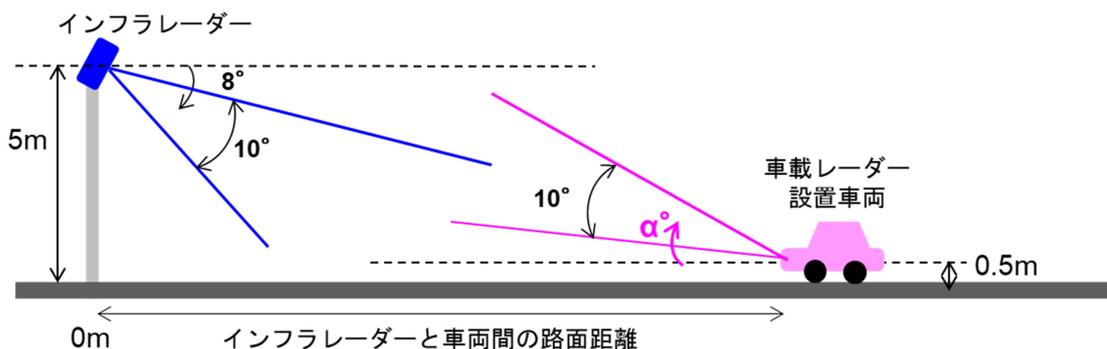


図 4.1.2.1-22 インフラレーダーと車載レーダー間の伝搬条件 (設置パラメータ)

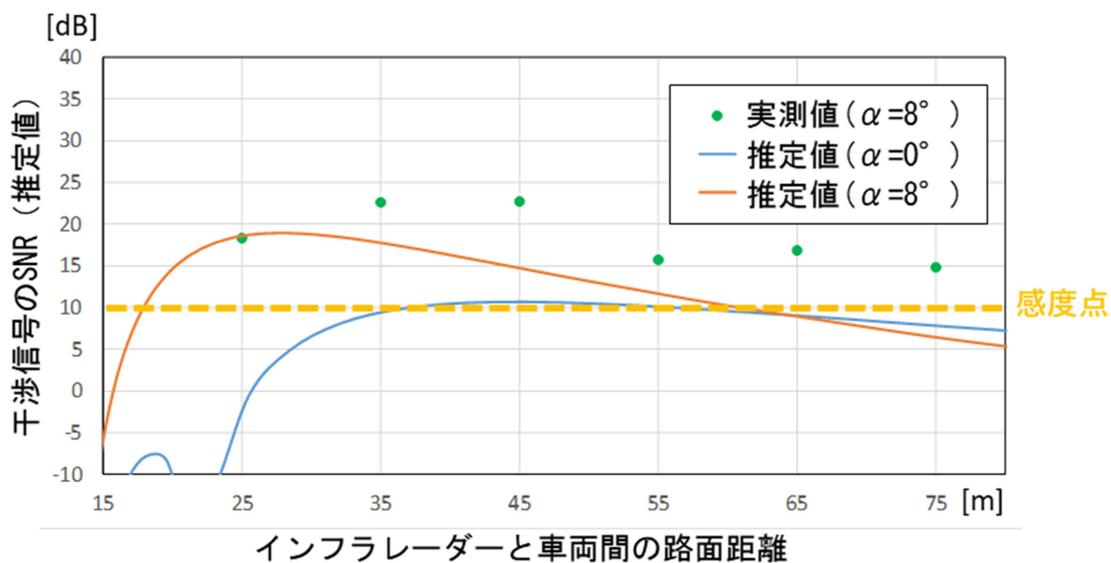


図 4.1.2.1-23 干渉信号 SNR (推定値) と実測値の比較

さらに、干渉レベルとインフラレーダーと車載レーダー間距離との関係において、一定距離までは干渉レベルが増加し、さらに距離が離れるにつれて干渉レベルが低下する傾向についても実験での実測値と推定値は、ほぼ同様の傾向と言える。また、実測値は推定値に比べて高い値となったが、この要因については、隣接車両が存在することで干渉波の伝搬パスが増加していることの影響等が考えられる。

以上の考察より、基礎実験結果を元に推定した干渉信号の SNR 値は、おおむね正しい値を表していることが確認できた。つまり、車載レーダーをインフラレーダー方向である上方に向けて設置した上で、さらにインフラレーダーと車載レーダーが全く同じパラメータで動作させるという意図的な条件の下では、互いの位置関係や送受信タイミングに依存した干渉が発生することになる。

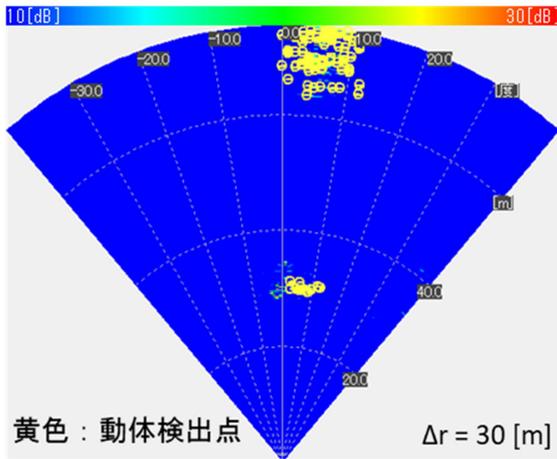
一方で、実際には、レーダー同士の干渉影響により生じるセルレベルのドップラー速度は様々な速度成分を持ち、またフレーム毎にその値が大きく変化する。そのため、物体反射の候補セルを抽出する前段のフィルタ処理で比較的容易に除去することが可能である。

図 4.1.2.1-24 は、そうした除去処理の実施前後を表した図である。図の(a)、(b)共に左側のグラフが反射レベル分布の図で、右側のグラフが縦軸にドップラー速度、横軸に方位を取ってプロットしたグラフであり、左右グラフともに同じタイミングのグラフである。図に黄色で示した点は反射レベルが感度点以上の物体候補セルのうちドップラー速度の絶対値が一定値以上のセルである。この物体候補セルに対してさらに後段処理でクラスタリングやトラッキング処理による物体検出処理を実施するが、図の(a)に示すようにフィルタ処理しない場合、干渉で生じた不要な物体候補セルが抽出される。

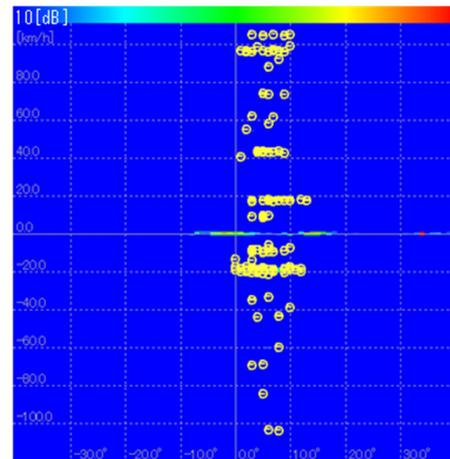
このような干渉で生じる物体候補セルを除去するための手段として、例えば各物体候補セルが前フレームでも存在したか否かを確認するようなフィルタ処理を行うという手段が考えられる。

具体的には現フレームの物体候補セルと、前フレームで抽出された物体候補セルのドップラー速度情報と距離情報から予測した物体候補セルとを比較し、距離と速度の近傍に存在する現フレームの物体候補セルのみ抽出する処理である。本処理を実施して車両からの反射による物体候補セルのみ抽出した図が (b) の図である。図 4.1.2.1-25 も同様のフィルタ処理実施前後の物体候補セルの違いを示した図である。このように稀に生じる干渉に対しては、適切なフィルタ処理を行うことで後段の物体検出処理に影響を及ぼさないようにすることが可能である。

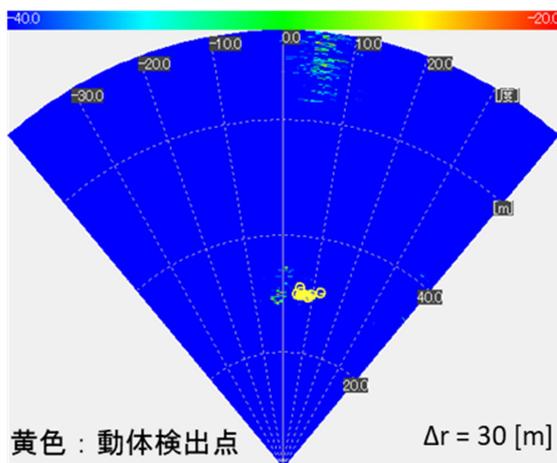
(a) 検出点追従処理無



(横軸：方位、縦軸：ドップラー速度)



(b) 検出点追従処理有



(横軸：方位、縦軸：ドップラー速度)

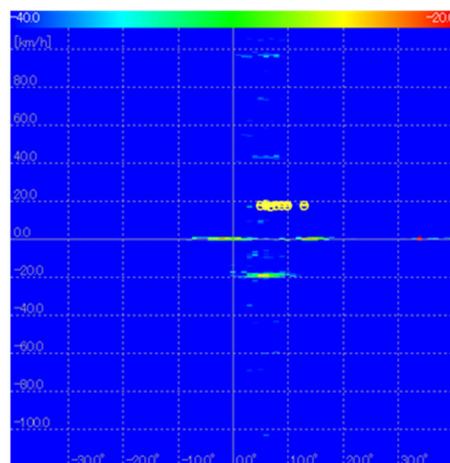
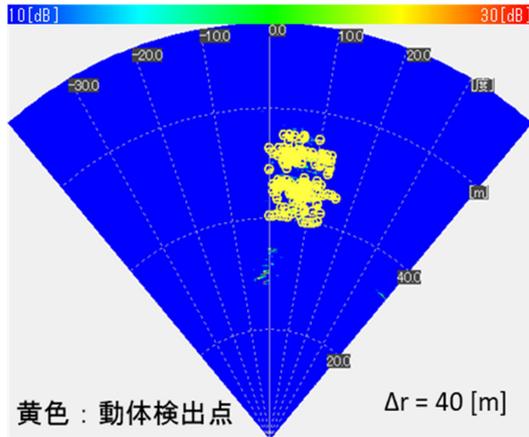
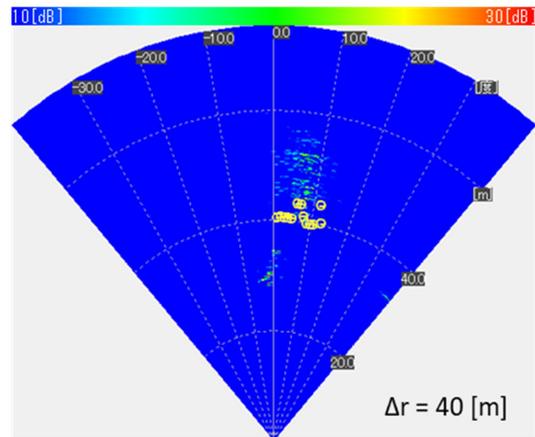


図 4.1.2.1-24 干渉で生じる物体候補セルを除去する処理前(a)と処理後(b)の比較

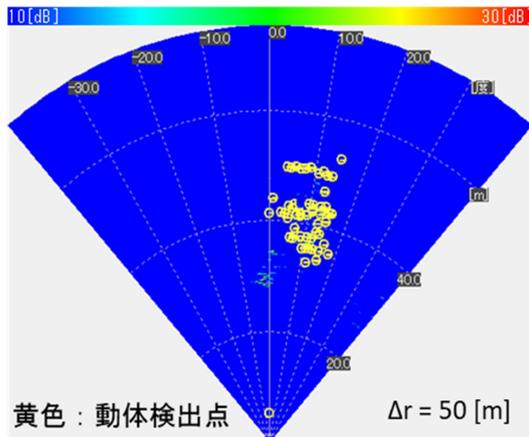
(a) 検出点追従処理無



(b) 検出点追従処理有



(a) 検出点追従処理無



(b) 検出点追従処理有

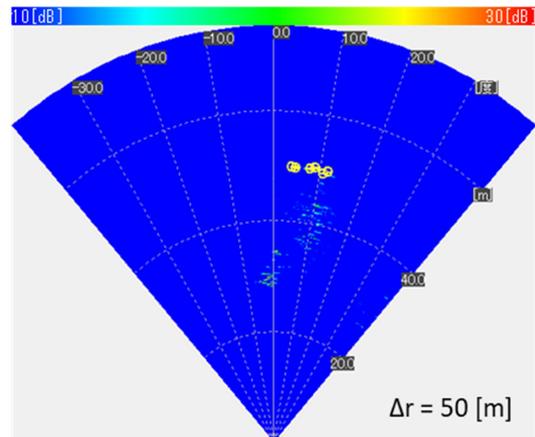


図 4.1.2.1-25 干渉で生じる物体候補セルを除去する処理前(左)と処理後(右)の比較

4.1.2.2 符号化パルスに対する高速チャープの与干渉実験

本節では、車載レーダーとして一般的な仕様のミリ波レーダーモジュールを導入してレーダー間干渉実験を行うことでインフラレーダーの耐干渉性能を評価した結果について述べる。

まず、導入した一般的な仕様のミリ波レーダーモジュールについて述べる。図 4.1.2.2-1 は導入したミリ波レーダーモジュールの外観である。図の右は半導体メーカーから提供されている評価基板である。本基板をベースにデータインタフェースの基板や電源供給部品とともに図左側に示した筐体へ格納し技術基準適合証明を取得した。

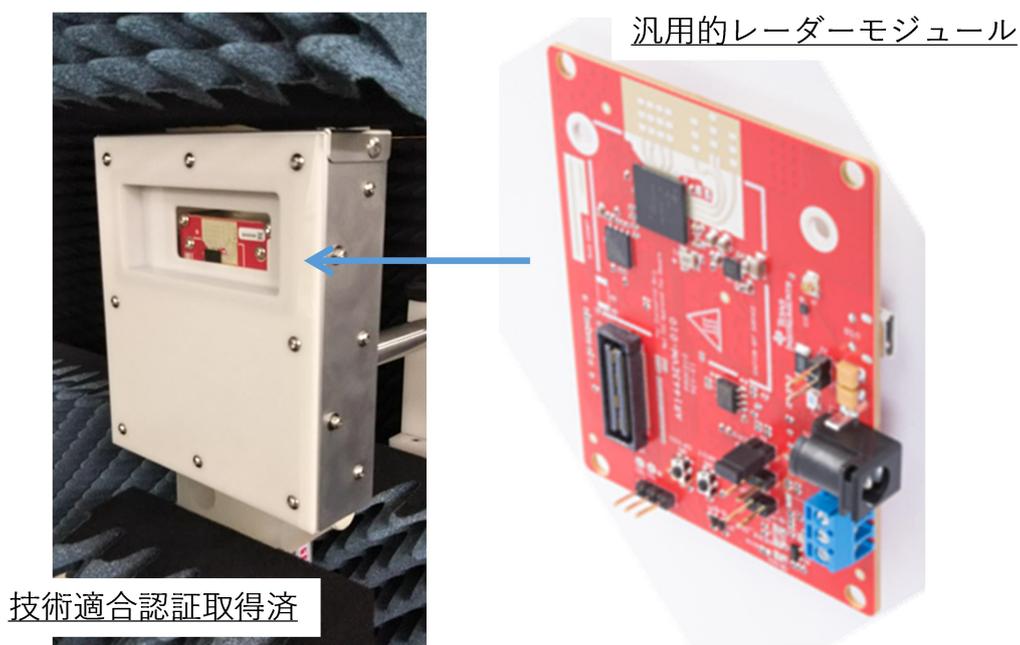


図 4.1.2.2-1 導入したミリ波レーダーモジュールの外観

図 4.1.2.2-2 に、導入したミリ波レーダーモジュールの垂直方向のアンテナパターンを示す。図に示すように、垂直方向に比較的広い指向性となっており、アンテナパターンの 3dB 半値幅としては約 20°である。

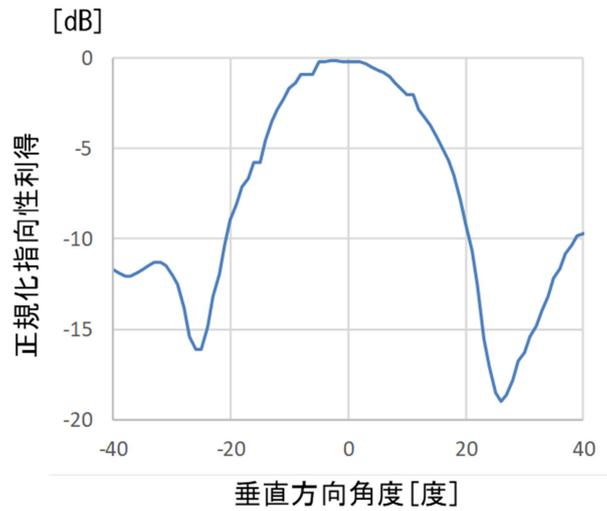


図 4.1.2.2-2 高速チャープ方式レーダーモジュールのアンテナパターン

はじめに、インフラレーダーへの適応を想定して開発した符号化パルス方式のレーダーに対する今回導入したミリ波レーダーモジュールによる干渉波の受信信号特性を把握するために、至近距離でリファレンスデータを取得した。実験室内の測定環境を図 4.1.2.2-3 に示す。

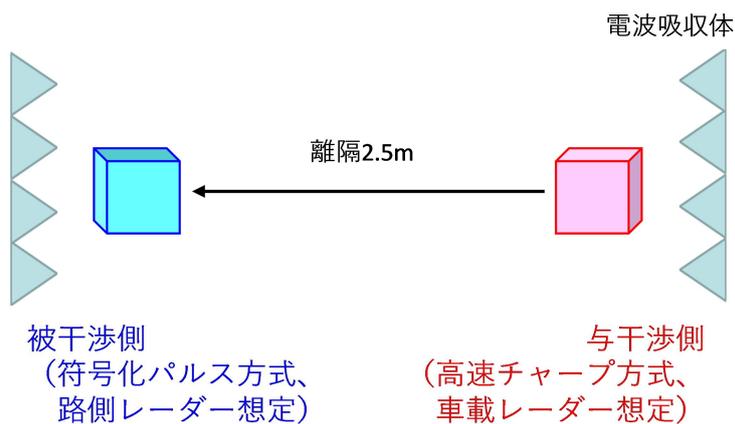


図 4.1.2.2-3 実験室内の干渉信号測定系

図 4.1.2.2-3 の環境にて左右のレーダーからミリ波帯信号を送出した際の、被干渉側の符号化パルス方式レーダーの遅延プロファイルを図 4.1.2.2-4 に示す。図 4.1.2.2-4 (a)で示した、与干渉レーダーが存在しない場合の遅延プロファイルと比較し、(b)の与干渉側レーダーが符号化パルスの場合はノイズフロアがスパイク上に上昇する。また、与干渉側レーダーが高速チャープ方式の場合、その遅延プロファイルは図の(c)に示すように(a)と比べてノイズフロアが一律に上昇する。

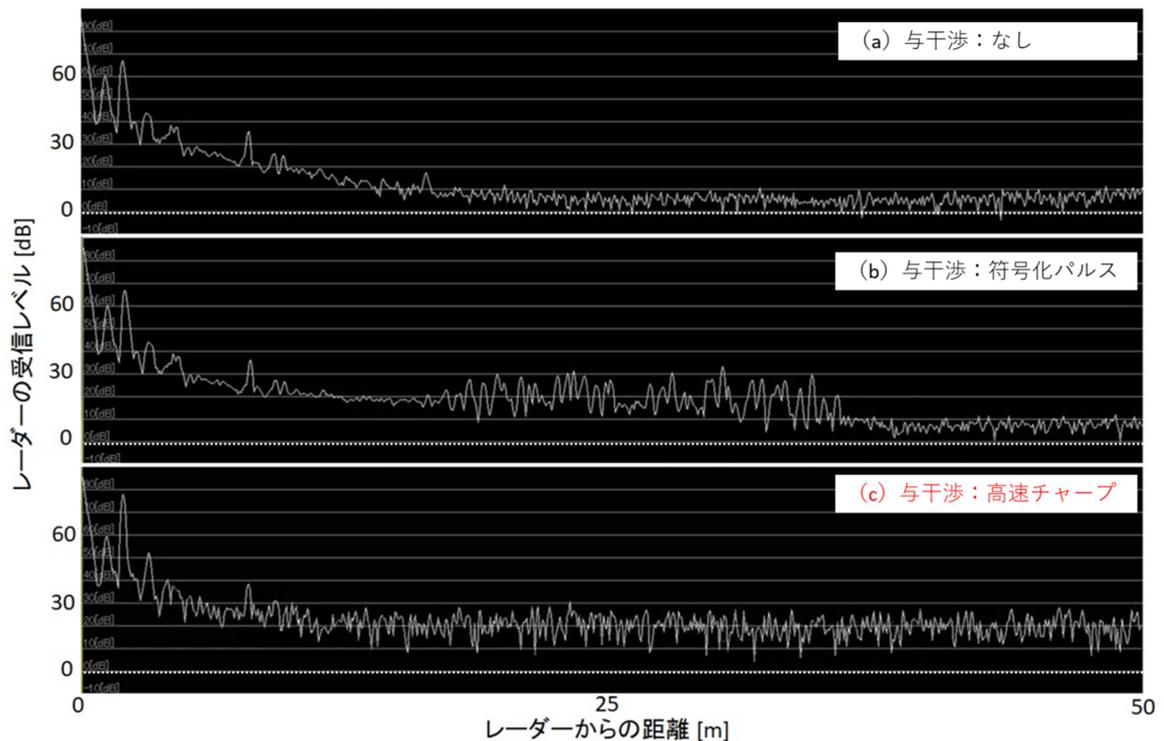


図 4.1.2.2-4 レーダー方式に対する干渉波の受信信号特性の比較

次に、図 4.1.2.2-5 は与干渉側が高速チャープ方式レーダーの場合の、被干渉側レーダーのノイズフロア上昇値を縦軸に、経過時間を横軸に取った時間的な干渉波レベルの変動を示している。図の青線は与干渉、被干渉レーダーともに中心周波数が等しい場合で、赤線は異なる場合である。

図 4.1.2.2-5 に示すように数秒間かけてゆっくりと干渉によるノイズフロア上昇値が変動した。この原因は、与干渉側レーダーと被干渉側レーダーのフレームタイミングのずれが徐々に生じていることに起因すると考えられる。実験の際、互いのレーダーのフレーム周期設定値は一致させたが、デバイス間で同期を取っていないため基準クロック周波数の差異から徐々にフレームタイミングのずれが生じる。そのため与干渉レーダーの信号送信タイミングと被干渉レーダーの受信信号処理タイミングは徐々に変化し、それに合わせて干渉レベルも変化する結果となった。

くわえて、互いの中心周波数を占有帯域幅の 2/3 程度シフトした場合には、干渉レベルのピーク時において約 5dB の差異が生じた。これは、中心周波数が一致している場合と中心周波数をシフトした場合とで、レーダー間で重なる周波数帯域が 1/3 程度に減少することが主要因である。

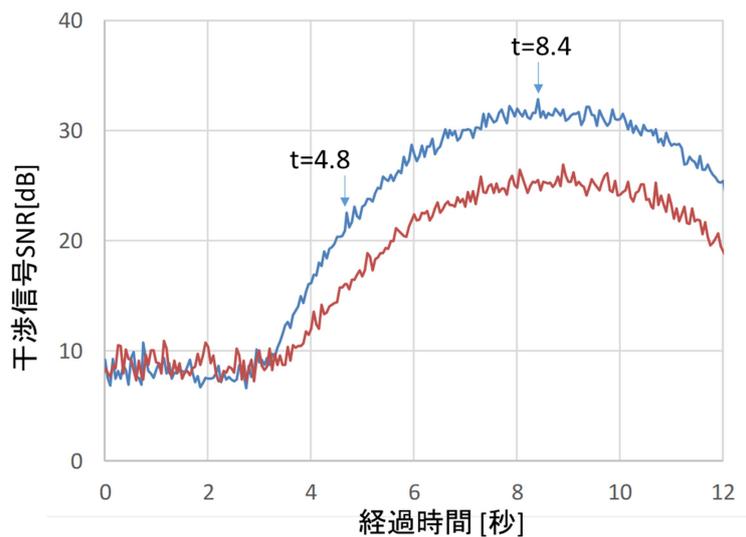


図 4.1.2.2-5 高速チャープ方式を与干渉とした場合の干渉レベルの時間変化

また、図 4.1.2.2-6、および図 4.1.2.2-7 には、中心周波数が同一の条件及び周波数をシフトした条件の場合のそれぞれについて、干渉レベル分布を面的に示している。図のように、干渉波によるフロアレベルの上昇は距離方向に一律であり、また干渉の帯が生じる方向は与干渉レーダーが設置された方向を示している。尚、これらの図における t=4.8 と t=8.4 の各条件は、干渉レベルの経過時間に対する変化を示した図 4.1.2.2-5 の中に示したそれぞれのタイミングにおけるスナップショットの比較であることを示している。

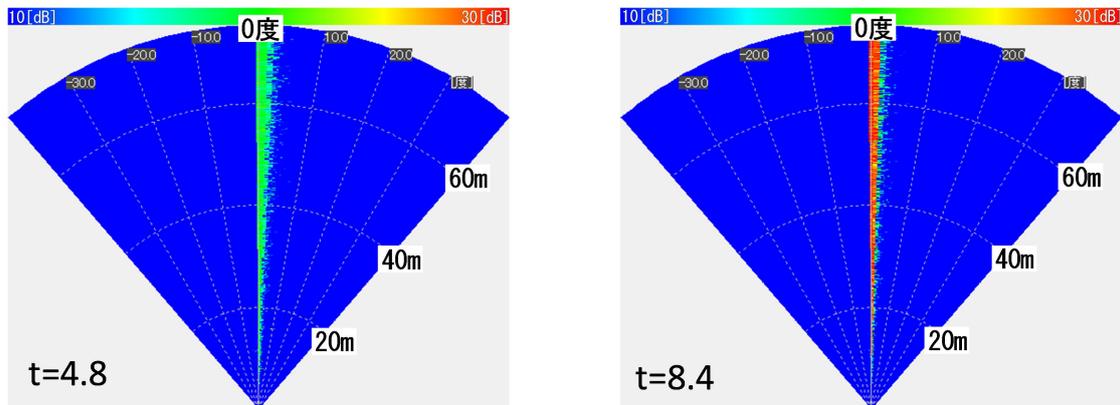


図 4.1.2.2-6 中心周波数が同一条件の高速チャープ与干渉時の測定データ

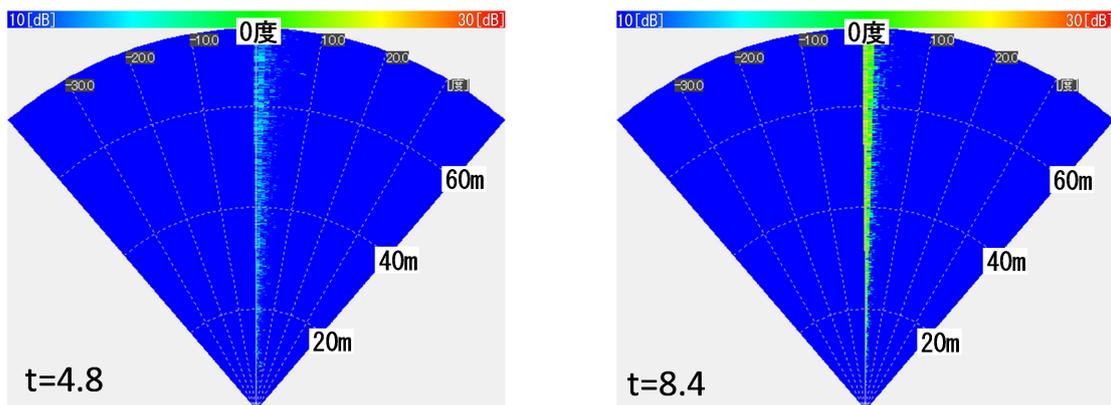


図 4.1.2.2-7 周波数シフトした条件の高速チャープ与干渉時の測定データ

ここまでに述べた符号化パルス方式のインフラレーダーと、車載レーダーを模した高速チャープ方式のレーダーで実施した基礎実験結果を基にして、実際のインフラレーダー設置環境で高速チャープ方式の車載レーダー搭載車両が通過する場合、どのようなレベルの干渉が生じるかを推定した。

インフラレーダーと車載レーダー間の空間伝搬条件を決める設置パラメータについては、図 4.1.2.2-8 に示すとおりである。尚、基礎実験からは、互いのレーダー正面方向で計測した干渉レベルの最大値を抽出してリファレンスとしている。

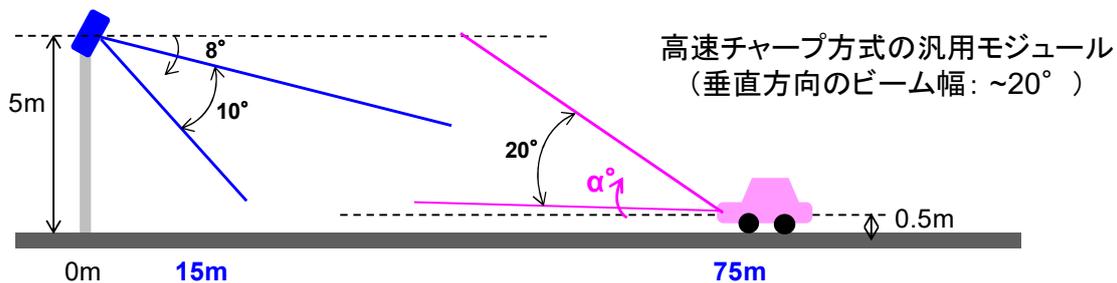


図 4.1.2.2-8 干渉信号 SNR (推定値) を算出する際の空間伝搬条件

図 4.1.2.2-9 に示すように、車載レーダーの設定角度が水平時 ($\alpha=0^\circ$) の場合、さらには意図的な干渉条件である車載レーダーの設置角度がインフラレーダーに向けた角度 ($\alpha=8^\circ$) の場合のいずれも感度点を超えるような干渉は発生しないという結果が得られた。

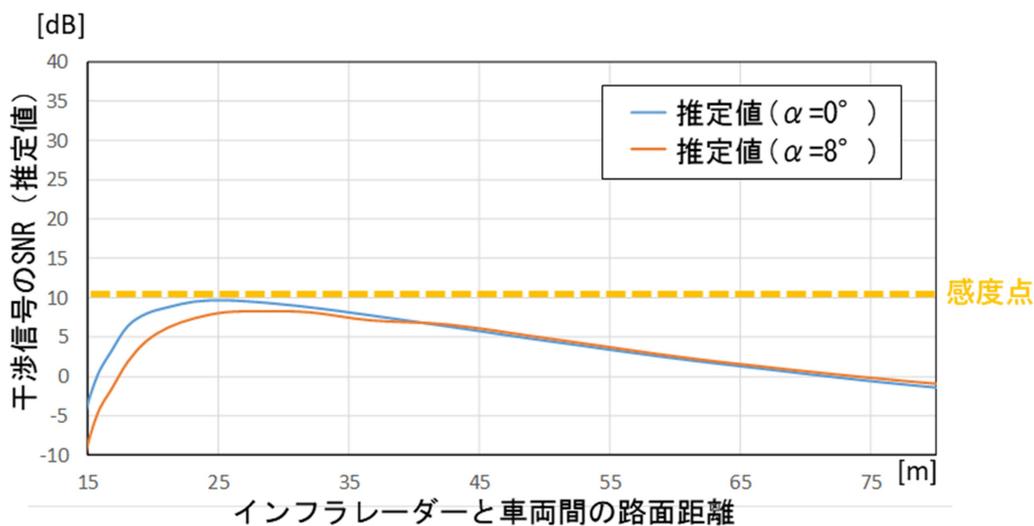


図 4.1.2.2-9 車載レーダーが高速チャージ方式とした場合の干渉信号 SNR 推定

4.1.2.3 放射パターン拡大のためのアンテナ電磁界解析

本節では、ミリ波レーダー間のビーム正対時に最も干渉影響が大きくなる点を鑑み、レーダーモジュールから放射パターンを広げて干渉影響を緩和することを想定したミリ波アンテナ設計技術について述べる。特に、電磁界解析シミュレーション環境を導入した上で、79GHz帯ミリ波の解析モデルについて実測との比較によりその妥当性を検証した。

(1) レーダーモジュールアンテナに関する技術的背景

レーダーモジュールは様々な環境に設置されるため、干渉影響を考慮し、設置環境における必要十分な検知エリアを実現することが求められる。検知エリアに最も寄与する性能の1つはアンテナ放射パターンである。しかしながら、79GHz帯ミリ波においては給電線の損失を低減するためアンテナと送受信無線回路部は同一基板上に構成されることが一般的である。よって、必要な検知エリアに応じて異なるアンテナ放射パターンとするためには基板を複数種類用意する必要があり、実現が難しい。そこで本研究では、レーダーモジュール内の基板上に設けられたアンテナとは別に、アンテナ開口径を制御する部品を設けることで簡易に放射パターンを拡大する手法について検討した(図 4.1.2.3-1 参照)。アンテナ開口径はアレイアンテナ放射パターンにおいてメインビームの半値幅を決定づけるパラメータであり、アンテナ開口径を狭くすることでビーム半値幅を拡大、広くすることでビーム半値幅を縮小することが可能である。

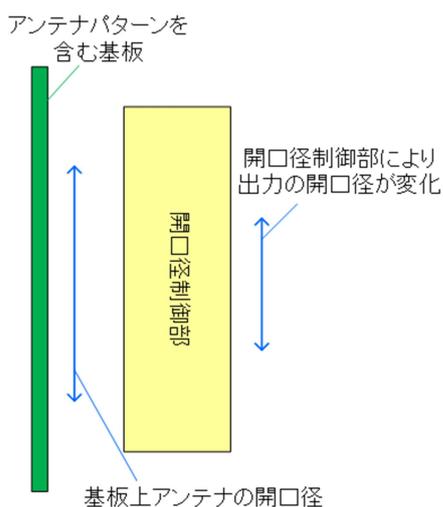


図 4.1.2.3-1 開口径制御部による放射パターン拡大の概要

開口径を制御する代表的な手法としては誘電体レンズがあるが、一般的にアレイアンテナから放射される平面波の開口径を可変するためには誘電体レンズが必要となるが、誘電体損失を鑑みると誘電率 2 程度の材質が用いられる。このため、十分な屈折率を得るために誘電体の厚みが増し、厚み方向に 10 波長を超えるような大きさが必要となる(図 4.1.2.3-2 参照)。そこで、より簡易な構造、もしくは薄型化が可能な放射パターン可変手法を目指し、検討を実施することとした。

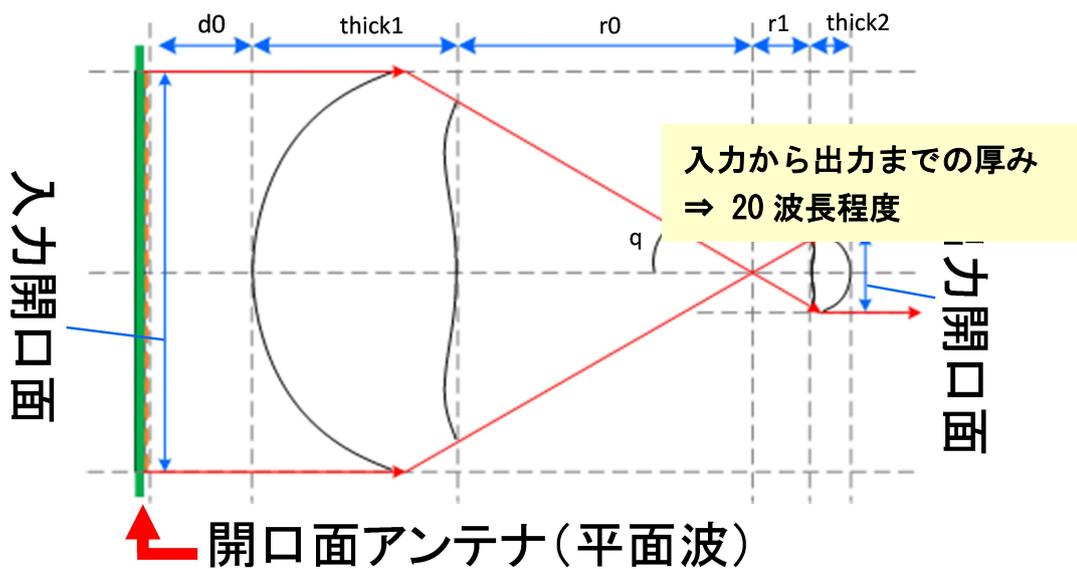


図 4.1.2.3-2 誘電体レンズによる開口径制御手法の例

(2) 79GHz 帯における電磁界シミュレーション検討

誘電体レンズより薄型化が可能な手法として、金属板スリットでアレイアンテナ開口部の一部を遮蔽することでアンテナ開口径を狭くし、放射パターンを広げる手法についてシミュレーション検討を行った。

図 4.1.2.3-3 に本研究で検討した基本構成を示す。送受信アンテナ部にそれぞれ同じ幅の金属板スリットを配置している。これにより、図 4.1.2.3-4 のようにメインビームの半値幅が広がっていることを確認できた。

また、スリット幅を変化させた場合の半値幅を、送信アンテナについて図 4.1.2.3-5、受信アンテナについて図 4.1.2.3-6 に示す。スリット幅に応じて、放射パターンを広げたい Elevation の半値幅が変化している様子が確認できる。

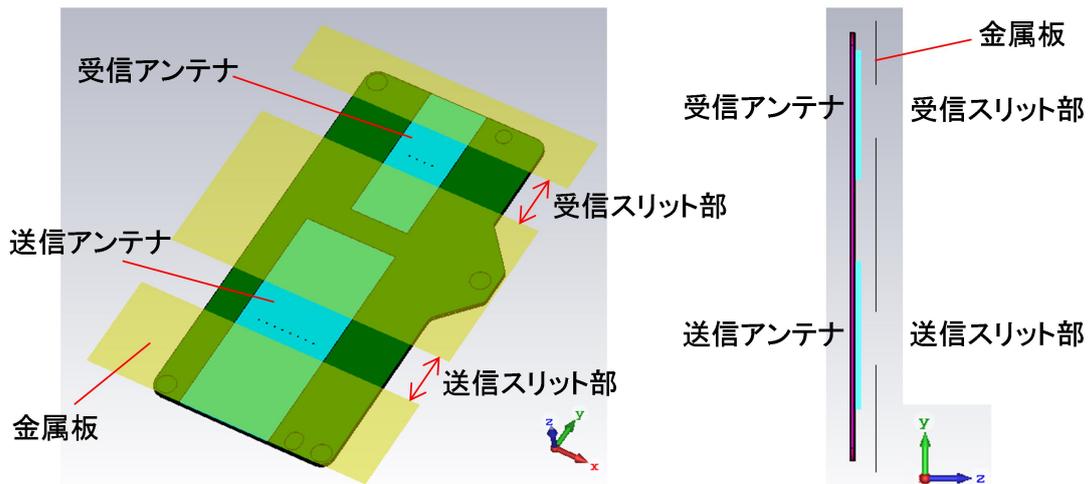


図 4.1.2.3-3 金属板スリットの基本構成

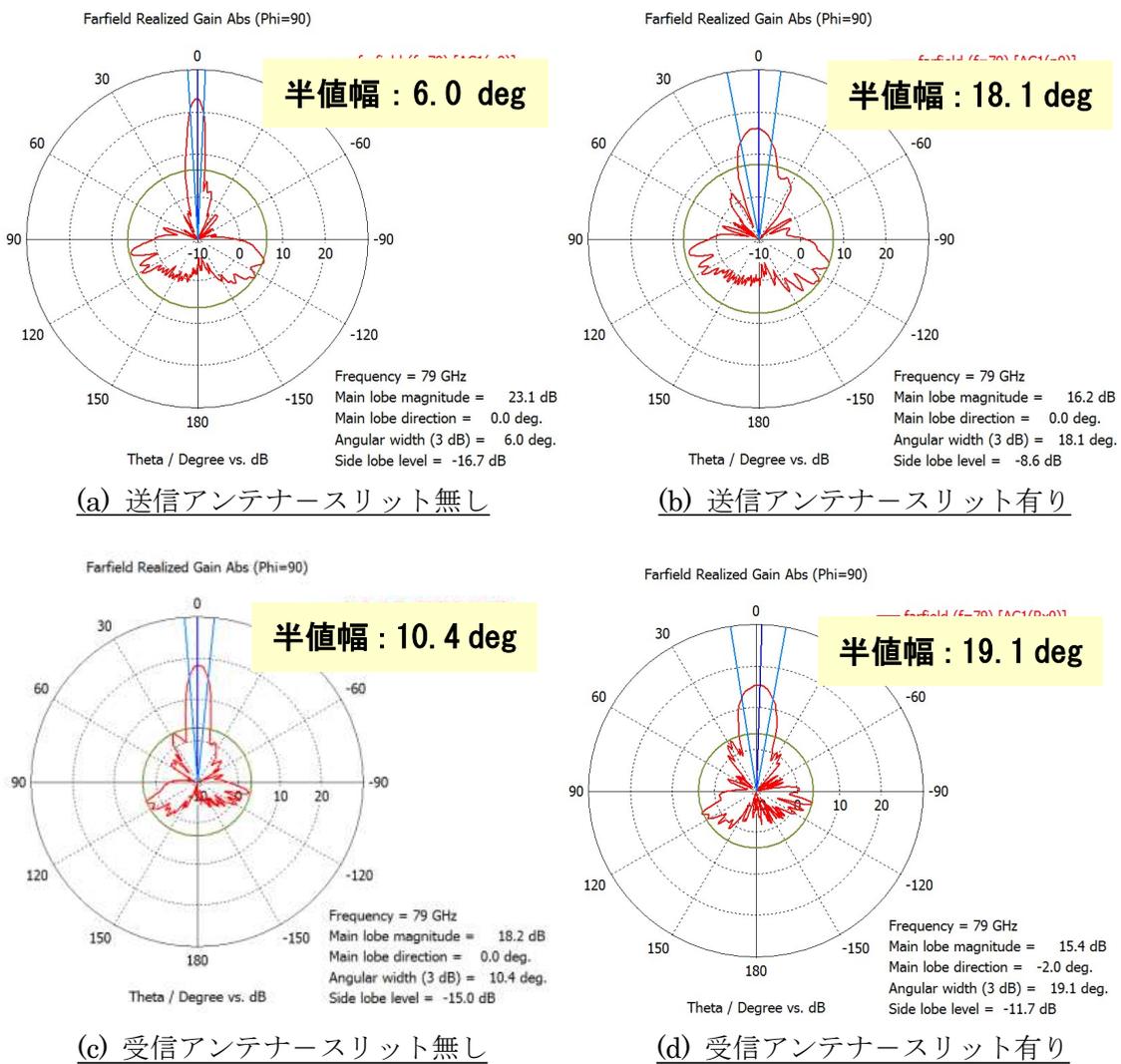


図 4.1.2.3-4 メインビームの半値幅比較—スリット幅 11mm (79GHz)

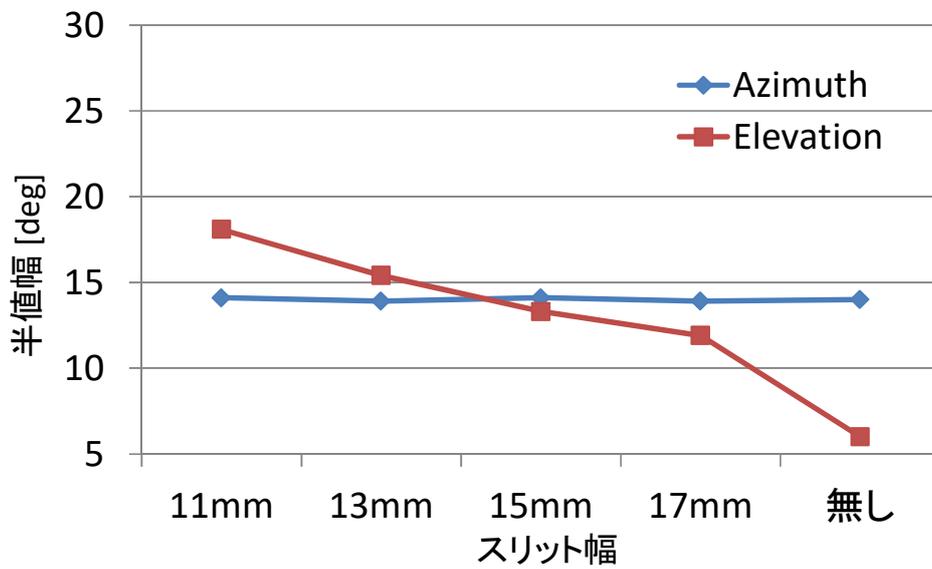


図 4.1.2.3-5 スリット幅と半値幅比較 (送信アンテナ)

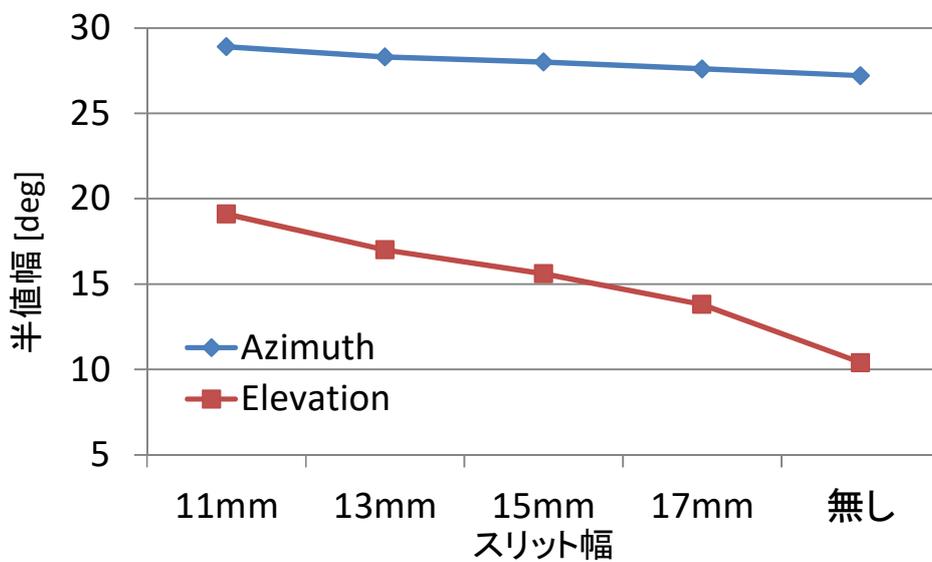


図 4.1.2.3-6 スリット幅と半値幅比較 (受信アンテナ)

以上より、金属板スリットによってメインビーム幅を広げることが可能であることが確認できた。次に、試作にて実証を行うために、レドーム影響とスリットの製作ばらつき影響について追加でシミュレーション検討を行った。

図 4.1.2.3-7 にレドームの影響を示す。例として送信アンテナの性能変化を示している。スリットによって実現される半値幅やサイドローブ形状に変化が見られるが、放射パターンを広げるという効果はレドームがある場合においても同様に得られている。また、図 4.1.2.3-8 にスリットの取り付け位置による性能変化、図 4.1.2.3-9 にスリットの幅が変動した場合の、送信アンテナの性能変化を示す。スリット貼り付け位置が Y 軸方向に 2mm ずれるとビーム形状は若干変化するが、ビーム半値幅についてはほぼ変わらないことから、実験に支障は無いと判断した。スリット幅についても±0.4mm でほぼ変化が無いことから、実験に支障は無いと判断した。

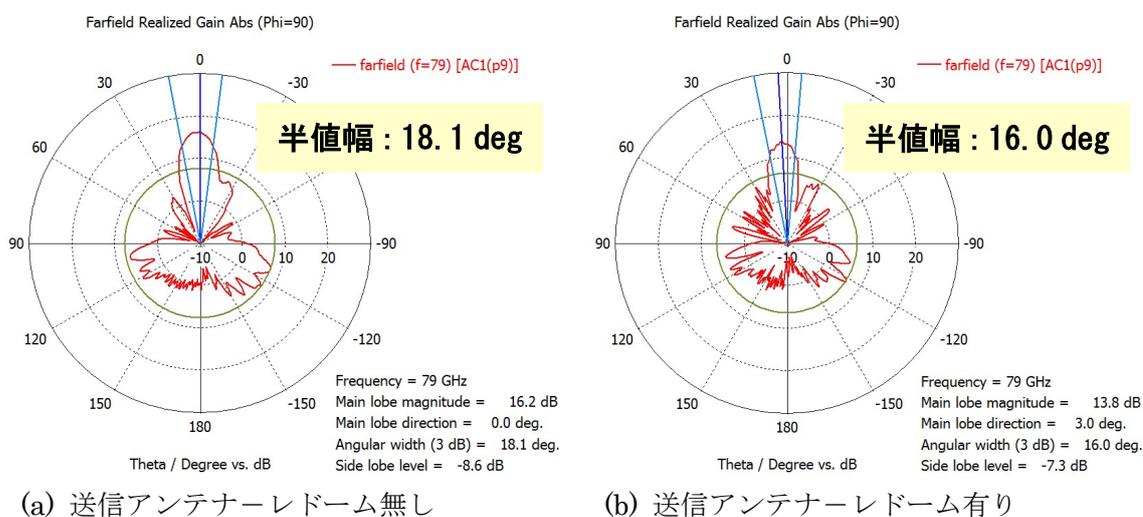


図 4.1.2.3-7 レドームの影響—スリット幅 11mm

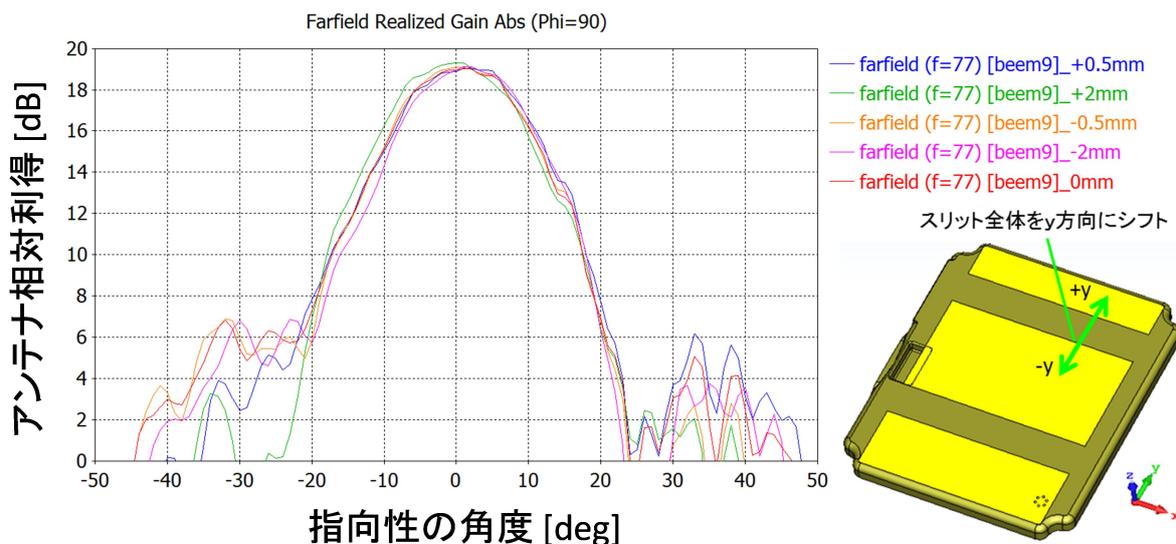


図 4.1.2.3-8 スリット取り付け位置による性能変化

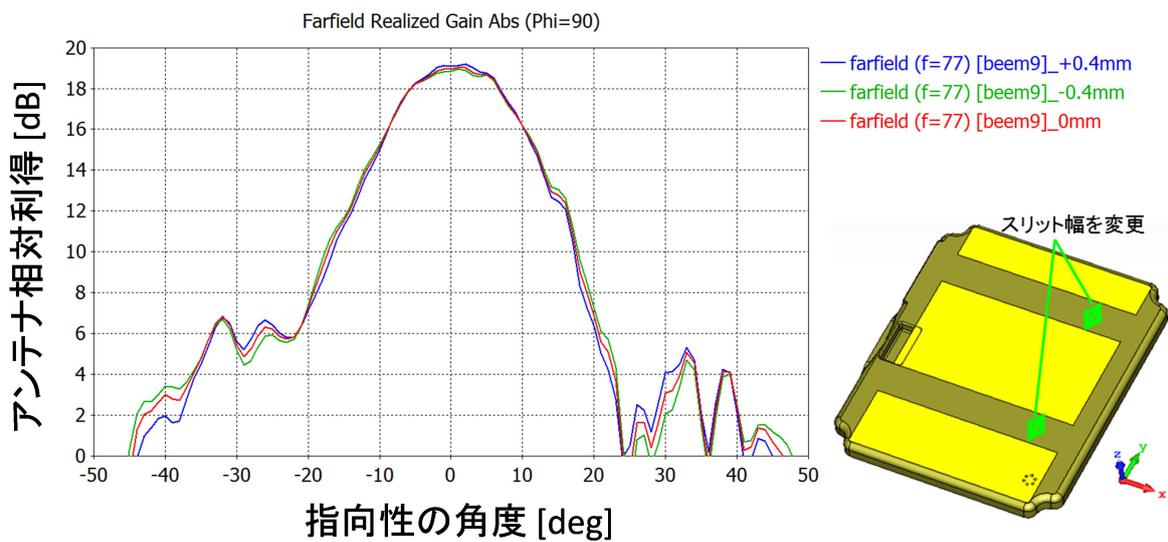


図 4.1.2.3-9 スリット幅変動による性能変化

(3) 金属板スリットによる放射パターン拡大の性能実証

上記シミュレーション計算結果を元に、試作にて性能実証を行った。図 4.1.2.3-10 に金属板スリットを装着したレーダーモジュールの写真を示す。図 4.1.2.3-11 は実験系の概略図を、図 4.1.2.3-12 は実際の実験風景を示している。電波暗室内の回転台に設置したレーダーモジュールから約 3.5m 離れた位置にコーナリフレクタを設置しており、レーダーモジュール送信アンテナから送信したパルス波をコーナリフレクタで反射し、レーダーモジュール受信アンテナで受信している。この受信アンテナで観測される遅延プロファイルから受信レベルを読み取り、レーダーモジュールを回転させることで放射パターンを取得した。

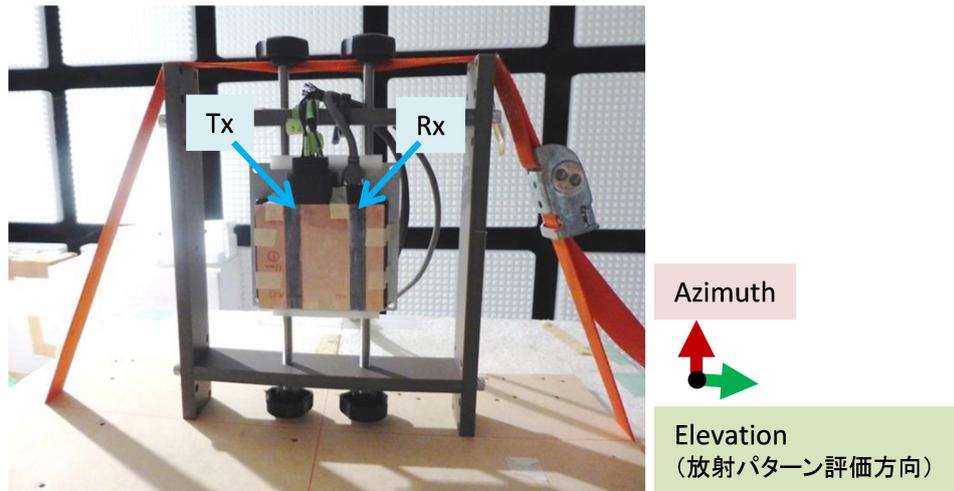


図 4.1.2.3-10 金属板スリットを装着したレーダーモジュール

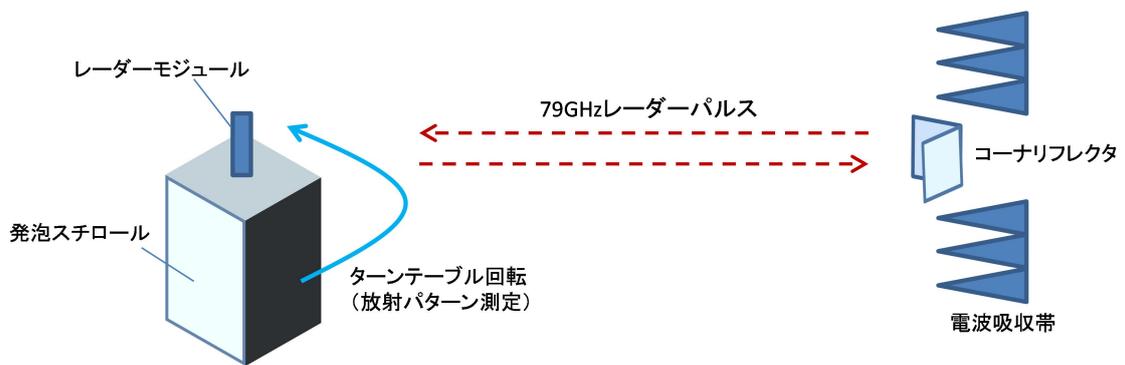
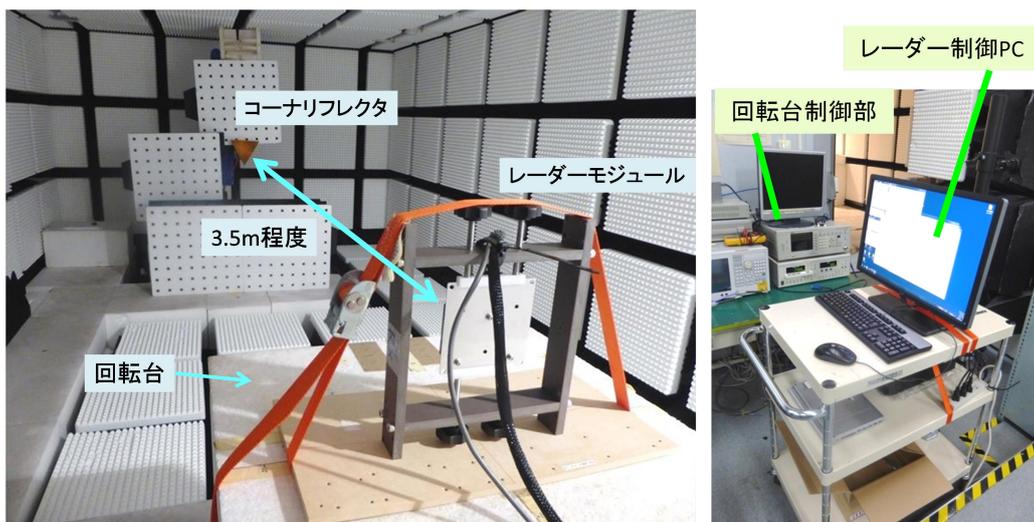


図 4.1.2.3-11 実験系概略図



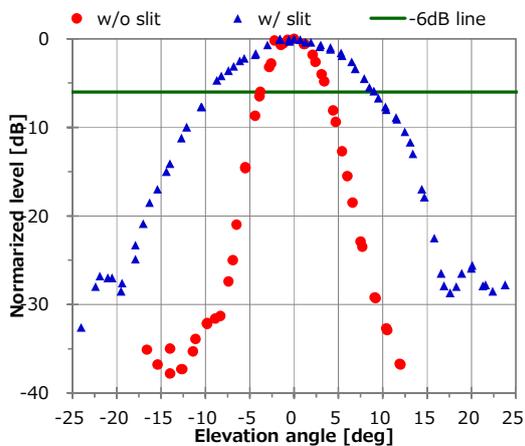
(a) 電波暗室内

(b) 制御部

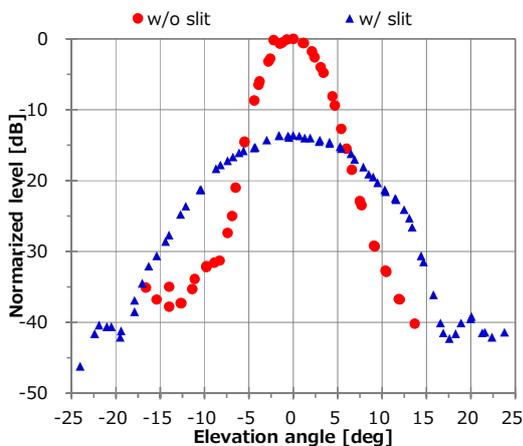
図 4.1.2.3-12 実際の実験風景写真

図 4.1.2.3-13 に放射パターンの測定結果を示す。横軸が **Elevation** 方向の角度を示しており、凡例の赤が金属板スリット無し、青が金属板スリット有りの特性を示している。図 4.1.2.3-13 (a)が金属板スリット有り無しそれぞれのピークレベルで正規化したグラフであり、**-6dB** に引かれたラインが半値幅を示している（送受信アンテナが **3dB** ずつ、合計 **6dB** 減衰した状態）。金属板スリットによって半値幅が約 **7.6deg** から **19.0deg** に広がっており、放射パターンの拡大を実現できていることがわかる。また、(b)が金属板スリット無しのピークレベルで正規化したグラフとなっている。放射パターンを拡大したため、ピークレベルとしては **10dB** 以上低下していることがわかる。ここで、図 4.1.2.3-13 の結果に同条件で正規化したシミュレーション結果を重畳したグラフを図 4.1.2.3-14 に示す。図 4.1.2.3-14(a)によると半値幅の拡大については測定結果とシミュレーションは良く一致していると言えるが、(b)によるとピークレベルについては約 **6dB** の差分があり、スリット装着時のピークレベルがシミュレーションよりも測定結果が低い。これについて、以下の通り追加検証を行っている。

ここまで述べたスリットの測定結果は、スリット幅の装着ばらつきを低減するためにポリエステル系のフィルムを用いてスリットを固定しており、このフィルムの影響を追加で検証した。図 4.1.2.3-15 にスリットとフィルムの位置関係についての模式図を示す。スリットの開口部を含むスリットの両面全体にフィルムが密着していることがわかる。表 4.1.2.3-1 にスリット装着時のピーク利得の差分を測定した結果を示しており、**A** がシミュレーション結果、**B** がフィルムで固定したスリット装着時で、ここまでグラフで示した測定結果と同一のデータである。これに対して **C** がフィルムを使わずにスリットを装着した結果であり、ピーク減衰量がフィルム有りと比較して **4dB** 近く低減していることがわかる。これにより、シミュレーションとの差分は **3.5dB** 程度となる。現時点で確認できたシミュレーションとの差分要素は以上であり、最終的に実測において、スリットによりピーク利得が **11dB** 減衰するが、半値幅を約 **7.6deg** から **19.0deg** へと拡大できることが実証された。

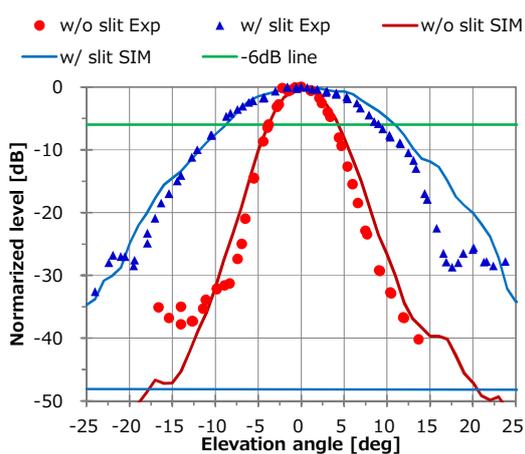


(a) 各凡例のピークレベルで正規化

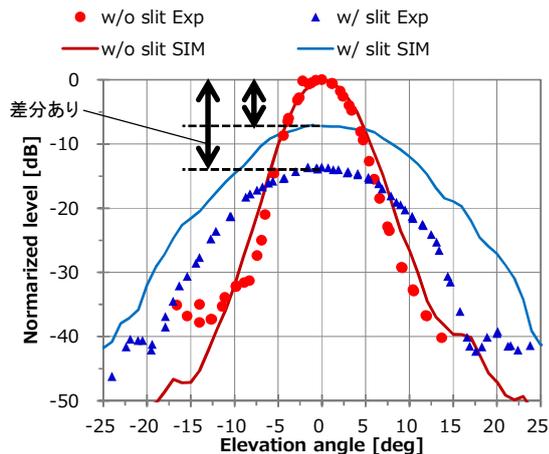


(b) スリット無しの場合のピークレベルで正規化

図 4.1.2.3-13 スリットによる放射パターンの変化



(a) 各凡例のピークレベルで正規化



(b) スリット無しの場合のピークレベルで正規化

図 4.1.2.3-14 シミュレーション比較結果

表 4.1.2.3-1 測定結果とシミュレーションの差分についての追加検証結果

項目	測定内容	スリット	フィルム	ピーク差分
A	(シミュレーション)金属板スリットの減衰	無し→有り	無し	▲ 7.2 dB
B	(測定結果)金属板スリット+フィルムの減衰	無し→有り	有り	▲ 14.8 dB
C	(測定結果)金属板スリットの減衰	無し→有り	無し	▲ 11.0 dB

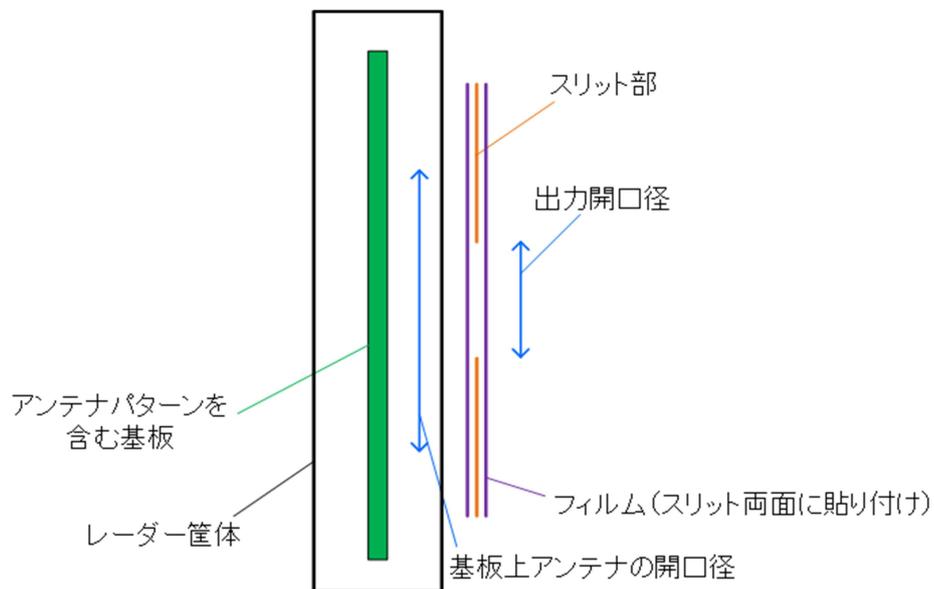


図 4.1.2.3-15 金属板スリットとフィルムの位置関係 (模式図)

以上のように、レーダーモジュールに金属板スリットを装着することによって放射パターンの拡大が可能であるということが、シミュレーション及び実験によって確認できた。スリットを装着する本手法であれば、レーダーモジュールの大きさを大きく変えずに放射パターンを拡大することができるため、誘電体レンズよりもサイズ面で優位性があると考えられる。

4.2. 耐環境性能補償技術の開発

4.2.1. 取り組み概要

路側設置レーダーの利用シーンとして高速道路の逆走検知等を想定し、高速道路会社への技術提案を推進しつつ、主に積雪寒冷地でのフィールド実験を実施する。これにより、実際の風雪環境において、レーダー筐体やターゲット地物の着融雪に対する耐性を把握する。

4.2.2. 積雪寒冷地等での性能実証

4.2.2.1 激しい降雨時等の実道環境における性能実証

平成28年度までは、激しい降雨時等の環境が再現可能な試験設備（国立研究開発法人 防災科学技術研究所の大型降雨実験施設）を用いて降雨量をパラメータとした降雨伝搬実験（図4.2.2.1-1(a)）を進めてきたが、今年度は実用化を見据え、実フィールドでの降雨時における性能実証を進める。

まずは初期検討として、弊社構内に設置したインフラレーダーで降雨時に合わせて測定を行う。図4.2.2.1-2に示すように、建物に挟まれた相互通行の2車線に対してレーダーの検知エリアを定め、車両や歩行者を検知する。尚、インフラレーダーの筐体（図4.2.2.1-2の左上図）は、前述の降雨伝搬実験で得られた知見、さらに降雨と同様、これまでに進めてきた降雪伝搬実験（図4.2.2.1-1(b)）のデータも踏まえて、降雨時及び降雪時の様々な環境に対して検知性能等の影響を軽減する構造としている。

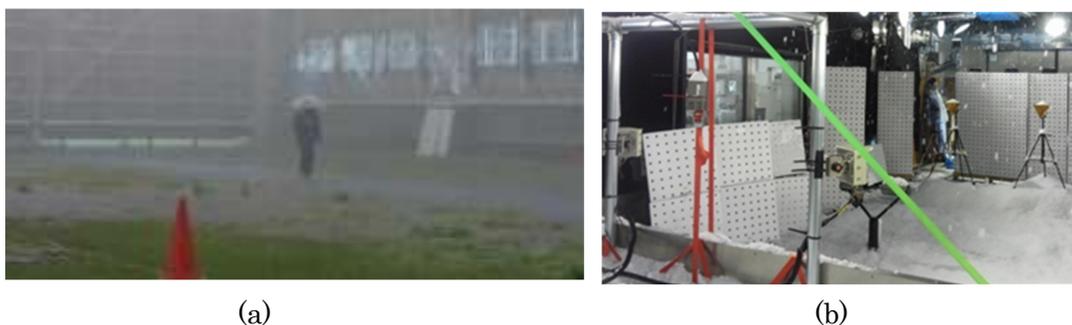


図 4.2.2.1-1 降雨・降雪伝搬実験

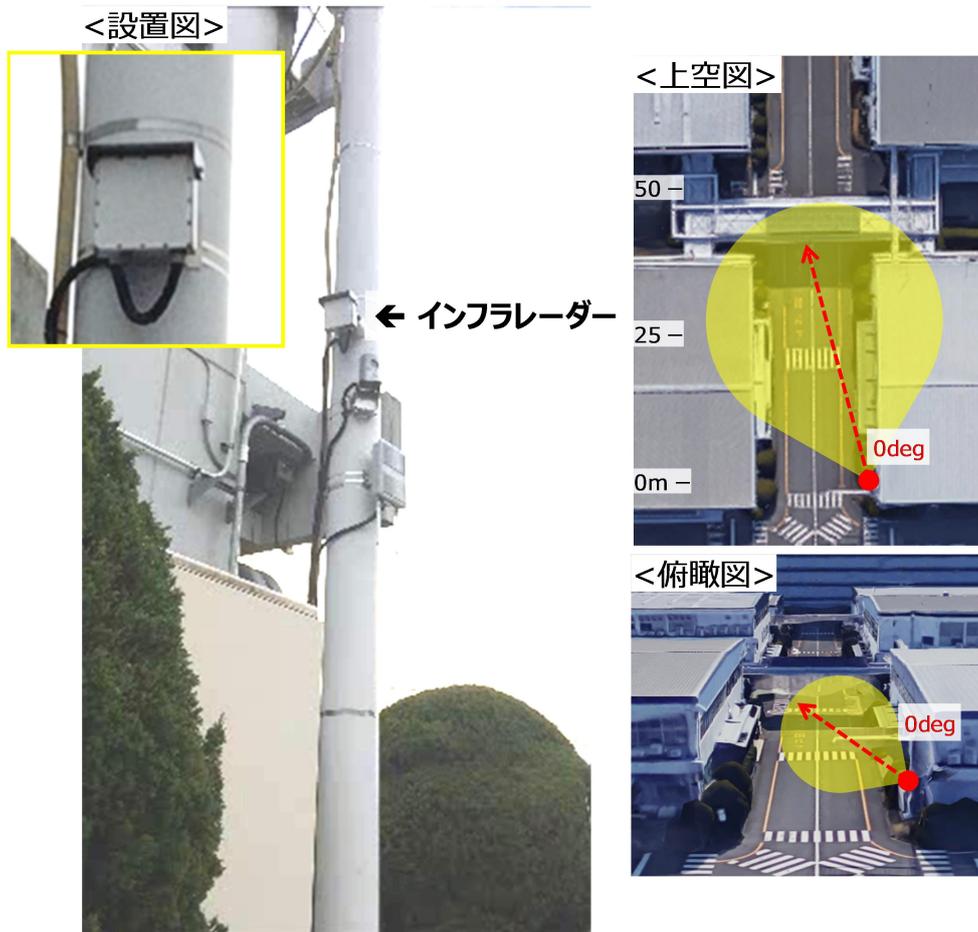
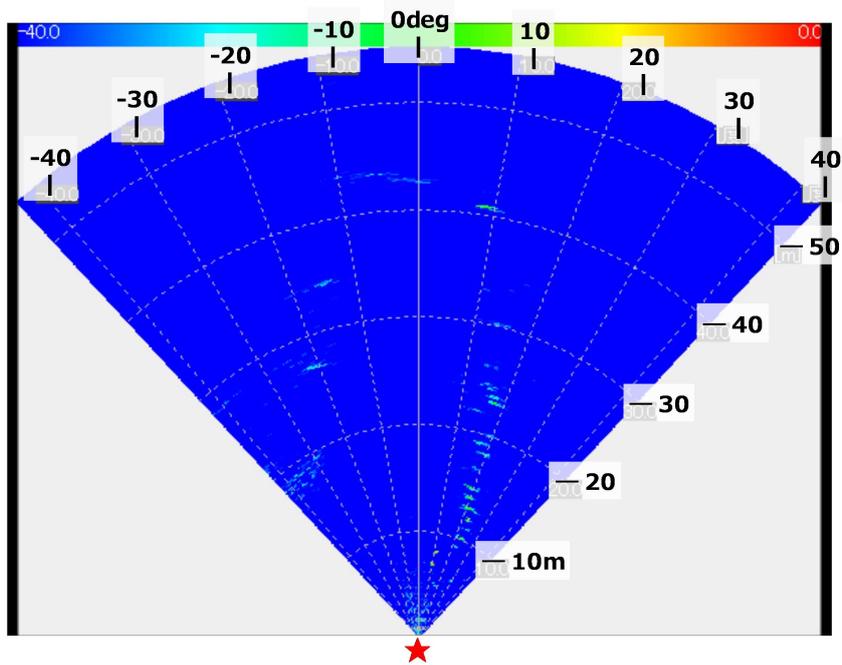
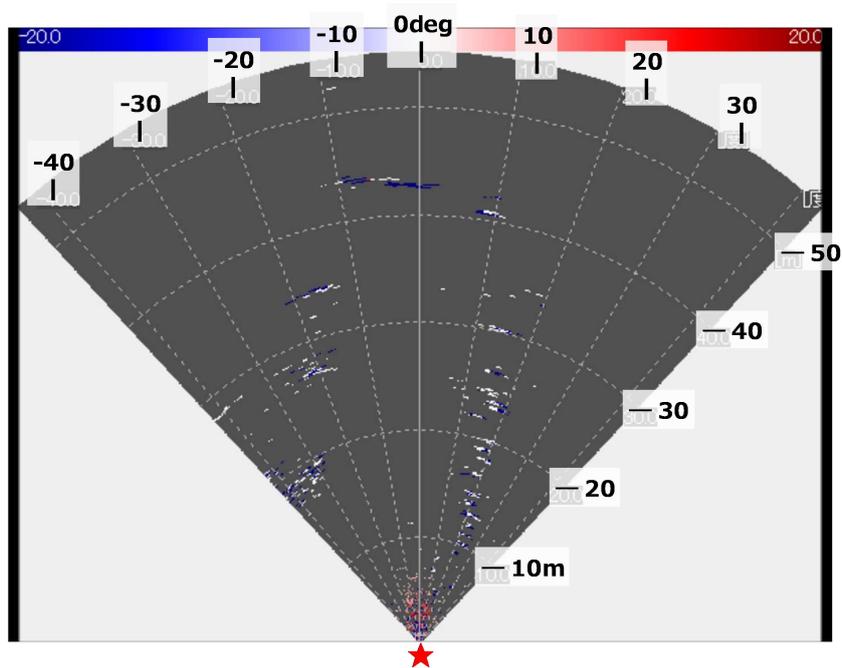


図 4.2.2.1-2 初期検討の諸元

図 4.2.2.1-3 は、降雨時の電力(a)、及びドップラー速度(b)のレーダープロファイルを示す。尚、降雨条件は、近隣の観測所データ（気象庁横浜観測所）によると降雨量 8mm/h である。レーダーの設置位置（星印）に対する距離及び角度のレーダープロファイルであるが、45m 付近に車両の反射及びドップラー周波数シフトに基づく速度が検出されている一方、概ね 10m 以内のレーダー近傍にも検出が確認できる。後者のレーダー近傍については、晴天時に検出されないことから、降雨による空間上の雨滴散乱であることが分かる。また、本現象は前述の降雨伝搬実験で確認しており、データの相関性をもって、実際の降雨時が再現できていたことも分かる。



(a)



(b)

図 4.2.2.1-3 降雨時のレーダープロファイル

そこで、空間上の雨滴散乱をさらに解析するため、降雨伝搬実験のデータから検討する。図 4.2.2.1-4 は、インフラレーダーとターゲットの標準リフレクタを距離 10m で対向設置し、降雨量をパラメータとして伝搬特性を解析する。パラメータは 20 ~ 250mm/h として、その内、20mm/h の場合の結果を図 4.2.2.1-5 に示す。概ね 10m にターゲットの大きな反射が確認できるが、レーダーの近傍から距離が離れるにつれて減衰する、空間上の雨滴散乱の反射も分布する。後者の反射は距離依存性が確認できるため、ここでは以下の区間に分け、発生確率、並びに累積確率で整理した反射レベル特性を図 4.2.2.1-6~10 に示す。

- ・ 区間①：ターゲット距離 0.5~2m
- ・ 区間②：ターゲット距離 2~4m
- ・ 区間③：ターゲット距離 4~6m
- ・ 区間④：ターゲット距離 6~8m
- ・ 区間⑤：ターゲット距離 8~9m

レーダーの近傍区間（例えば区間①）では、全体的な反射レベルが高いが、分布が分散傾向にある一方、遠方区間（例えば区間⑤）では、反対に低く、集中傾向にあることが分かる。同様に、20mm/h 以外のパラメータでも反射レベル特性を整理した上で、各区間において累積確率分布 95%の反射レベルで再整理した反射レベル特性を図 4.2.2.1-11 に示す。近年のゲリラ豪雨相当の激しい降雨量 250mm/h までを示しているが、降雨量が増加するに伴い、空間上の雨滴散乱の反射レベルもやや増加するが、相対的な区間の傾向としてはほぼ同様である。

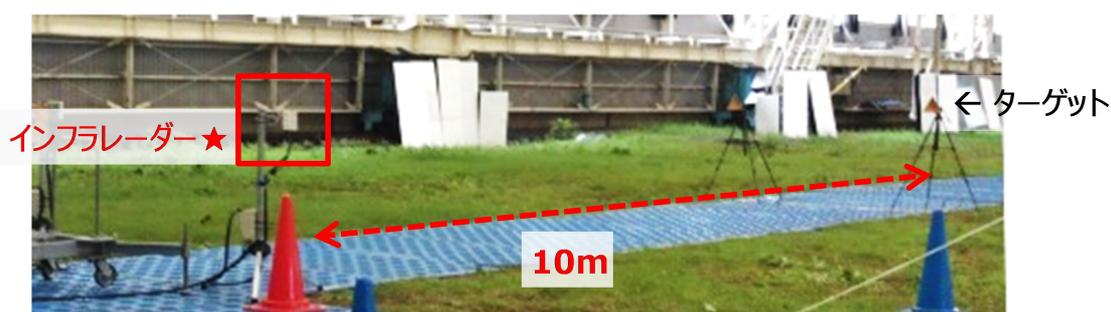


図 4.2.2.1-4 降雨伝搬実験の諸元

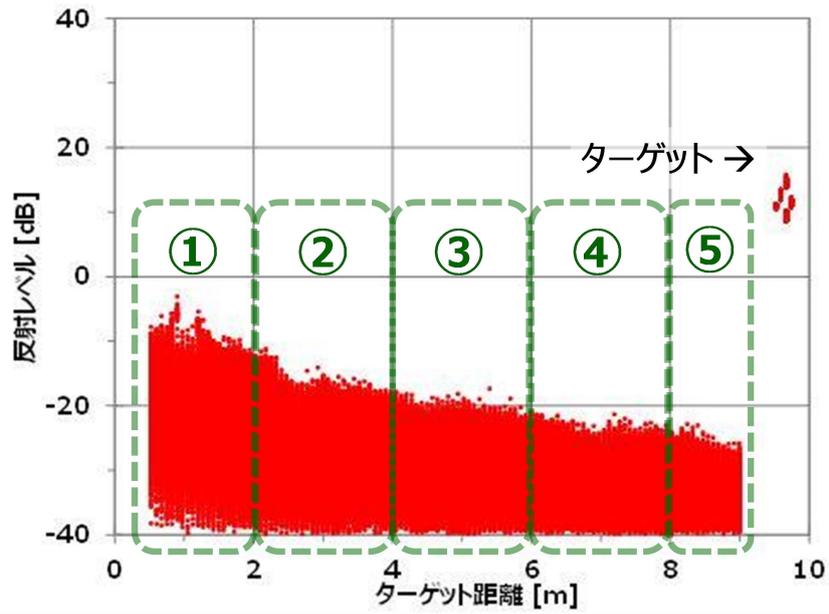


図 4.2.2.1-5 標準リフレクタに対するレーダー検出性能

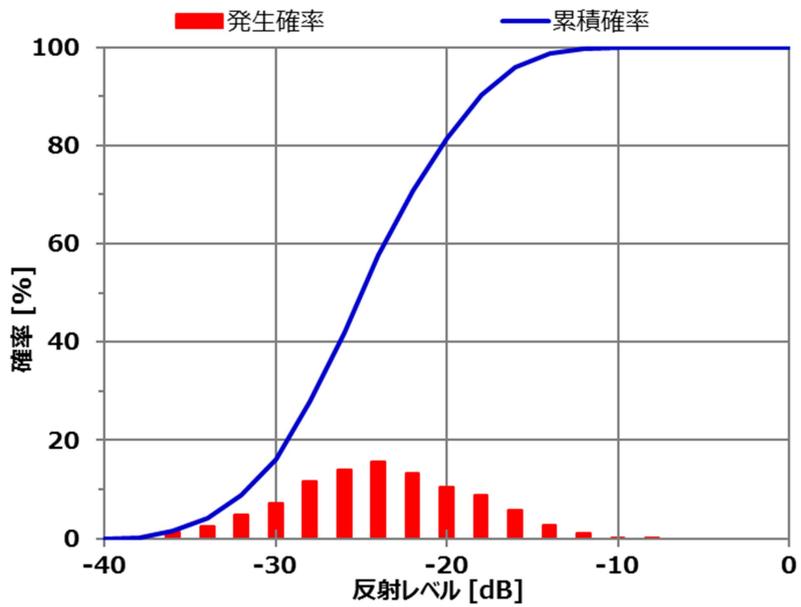


図 4.2.2.1-6 区間①の反射レベル特性

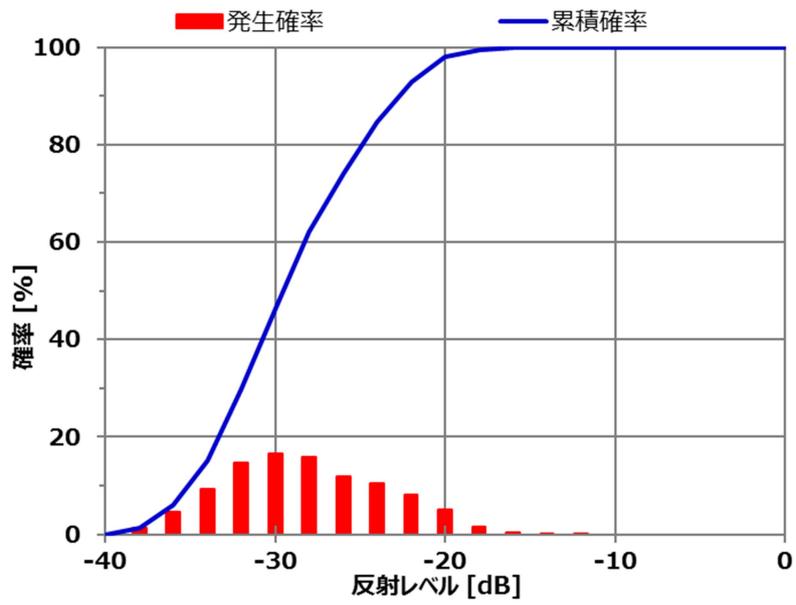


図 4.2.2.1-7 区間②の反射レベル特性

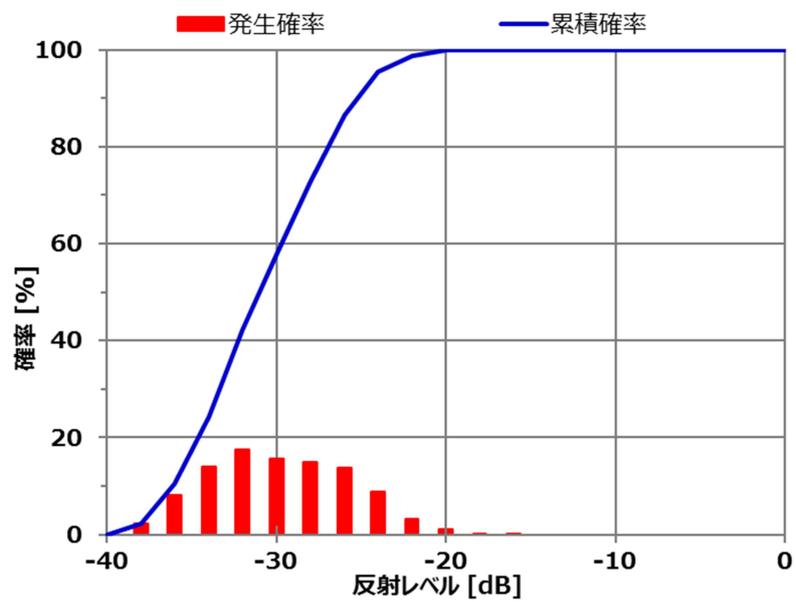


図 4.2.2.1-8 区間③の反射レベル特性

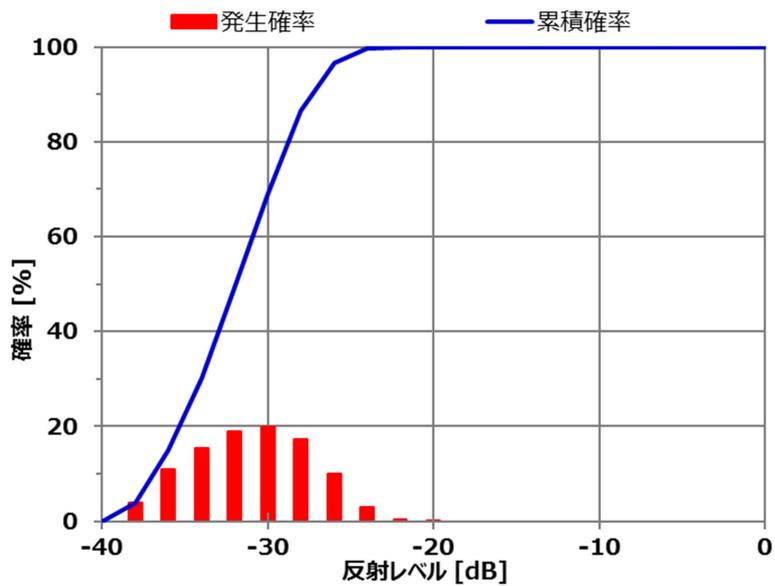


図 4.2.2.1-9 区間④の反射レベル特性

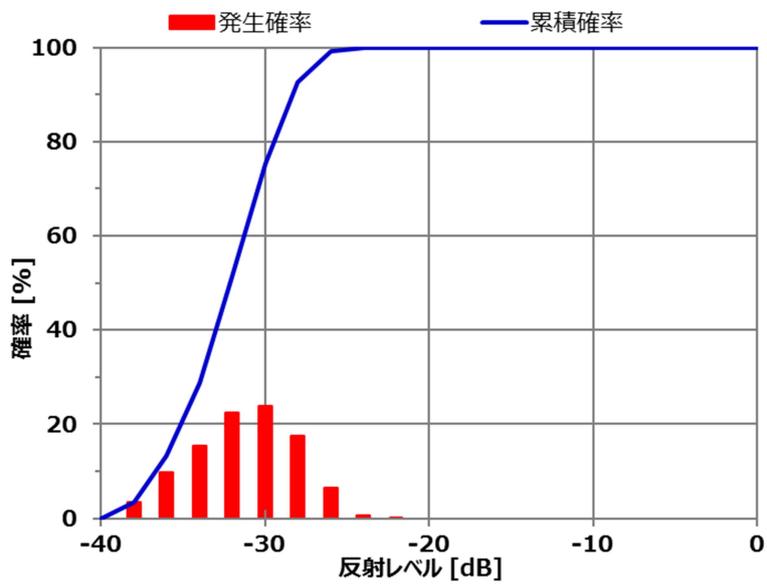


図 4.2.2.1-10 区間⑤の反射レベル特性

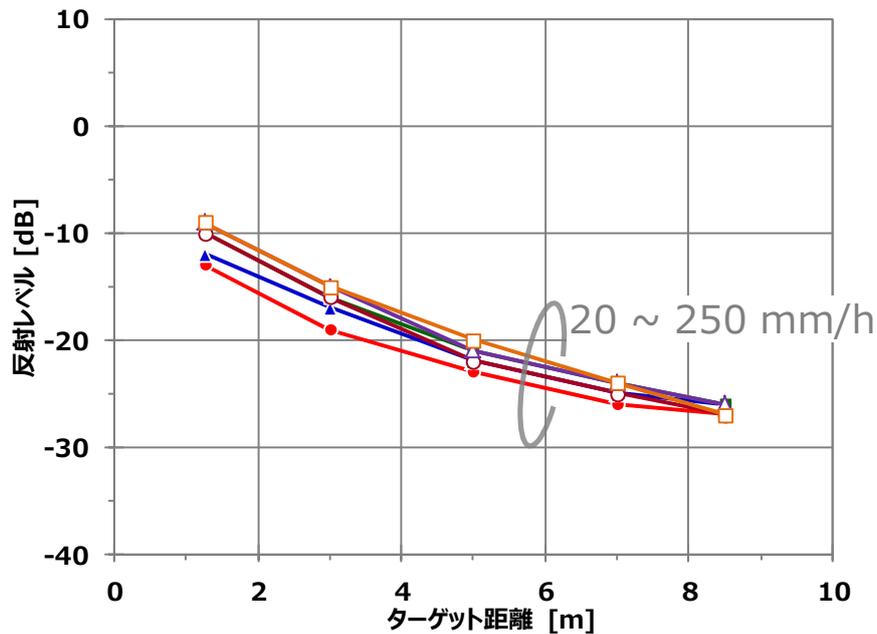


図 4.2.2.1-11 降雨量に対する反射レベル特性

検知対象ではない、空間上の雨滴散乱を抑制するため、図 4.2.2.1-11 のデータをもとに検出閾値を検討する。図 4.2.2.1-12 は、図 4.2.2.1-11 の各区間の反射レベル値を抽出し、検出閾値 T_1 の式(a)の値を重ねている。尚、基準距離 R_0 および基準距離の検出閾値 T_0 は交差点内の歩行者検知を想定した値としている。補正值 β に応じて、雨滴散乱の反射レベルに対する検出閾値の相対関係が変化するため、その関係を雨滴散乱の検出率で再整理した、検出特性を図 4.2.2.1-13 に示す。

$$T_1 = T_0 + 20\log\left(\frac{R_0}{R_1}\right) + \beta \quad (a)$$

- ・ R_0 : 基準距離 [m] (= 40)
- ・ R_1 : ターゲット距離 [m]
- ・ T_0 : 基準距離の検出閾値 [dB] (= -40)
- ・ β : 補正值 [dB]

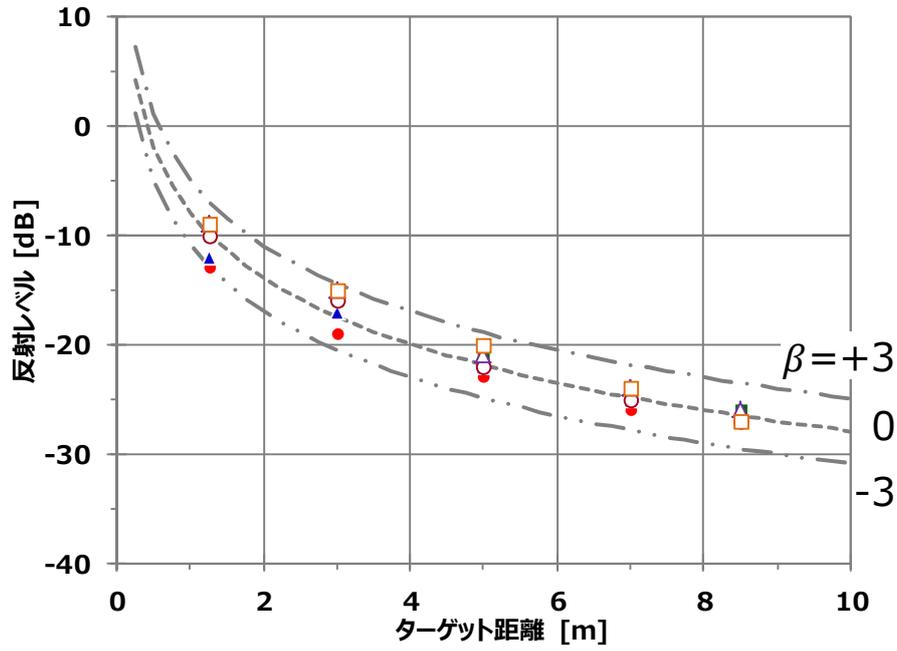


図 4.2.2.1-12 検出閾値

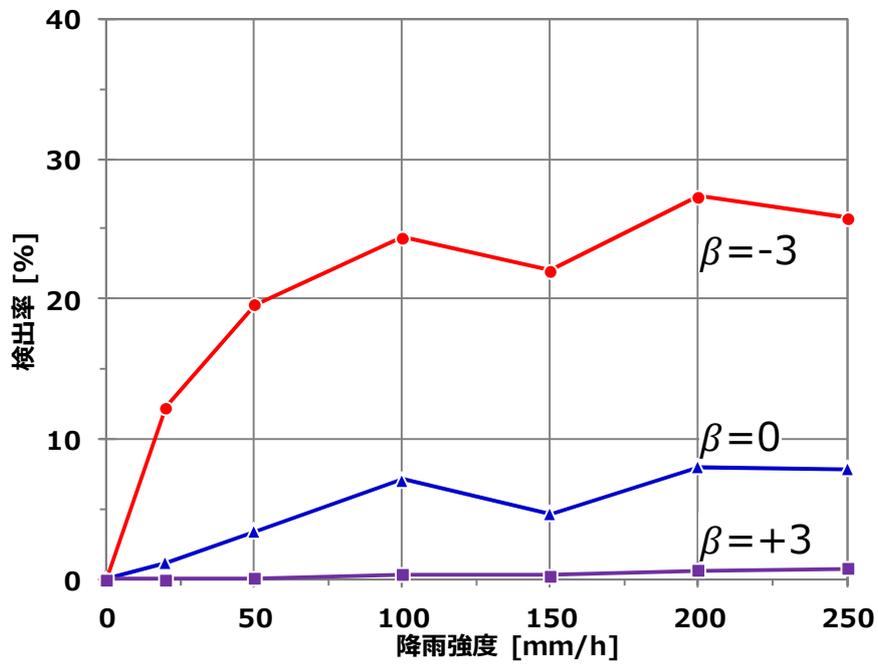


図 4.2.2.1-13 検出閾値に対する雨滴散乱の検出特性

ここで、補正值 β を大きくすることで空間上の雨滴散乱を抑制する効果が確認でき、例えば β を+3 dB とすれば降雨量 50mm/h で降雨時の誤検出率を 0.1%以下となる。ただし、検知対象のターゲットと、検知非対象の雨滴散乱の誤検出は相反関係にあるため、適切に設定する必要がある。降雨伝搬実験の一部データから、検出閾値なし (図 4.2.2.1-14 (a)) の場合と、検出閾値ありで補正值 β が 0dB (図 4.2.2.1-14 (b)) の場合を比較すると、枠の表示部分が物体検知を意味しているが、0dB としてもターゲットを確実に検知し、且つ雨滴散乱による誤検知が抑制できていることが分かる。

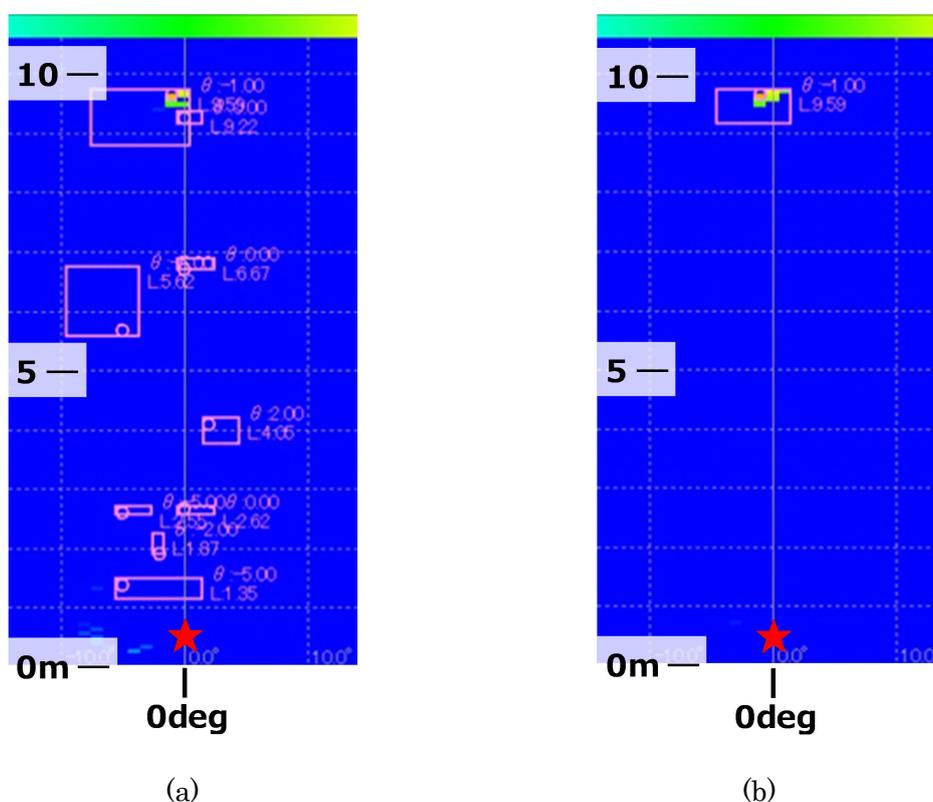
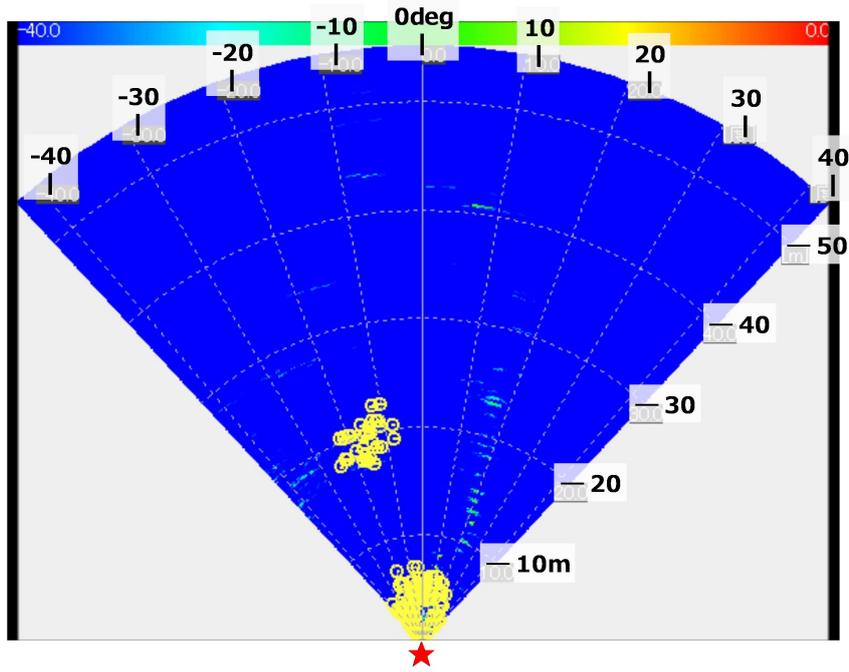
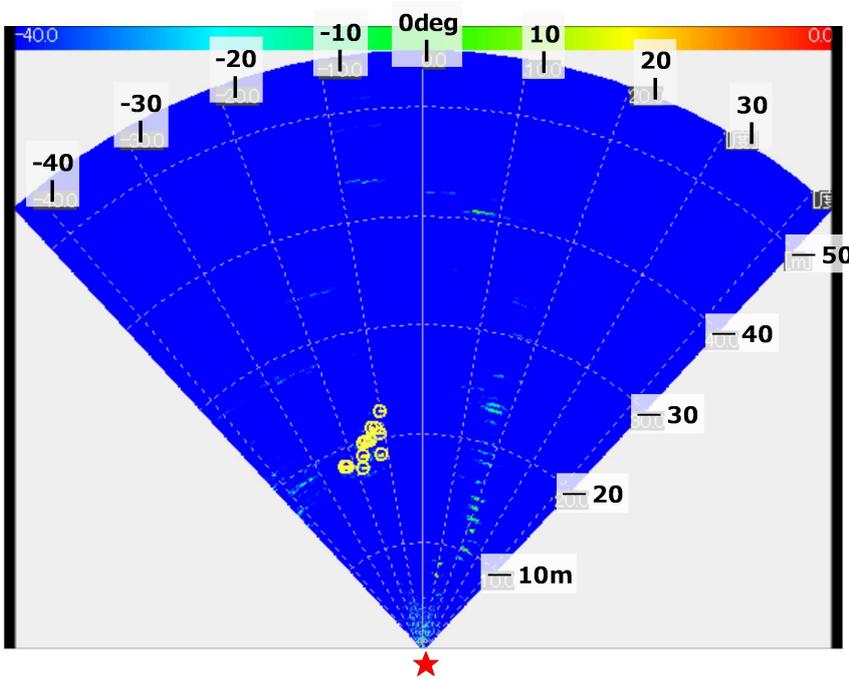


図 4.2.2.1-14 雨滴散乱の抑制効果

これらの内容を踏まえ、構内環境で実施した降雨時の物体検知性能の評価結果を図 4.2.2.1-15,16 に示す。尚、検知対象のターゲットは図 4.2.2.1-15 が車両、図 4.2.2.1-16 が歩行者である。また、黄色丸の表示部分が物体検知を意味しており、実フィールドにおいて、両結果の検出閾値なし(a)は、レーダーの近傍に雨滴散乱による誤検知が発生しているが、検出閾値あり(b) (補正值 β を 0dB) は、ターゲットを確実に検知し、且つ雨滴散乱による誤検知が抑制できていることが確認できる。

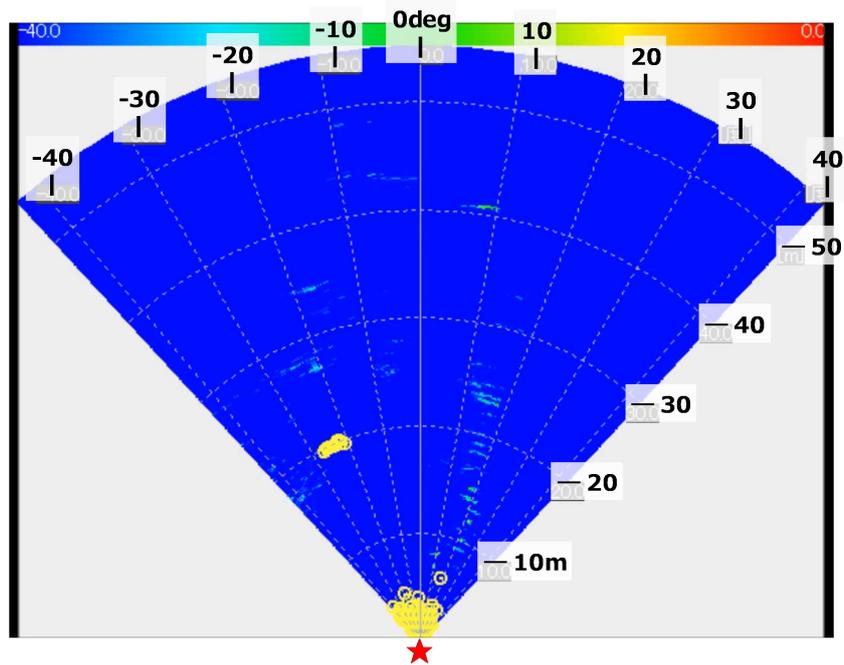


(a)

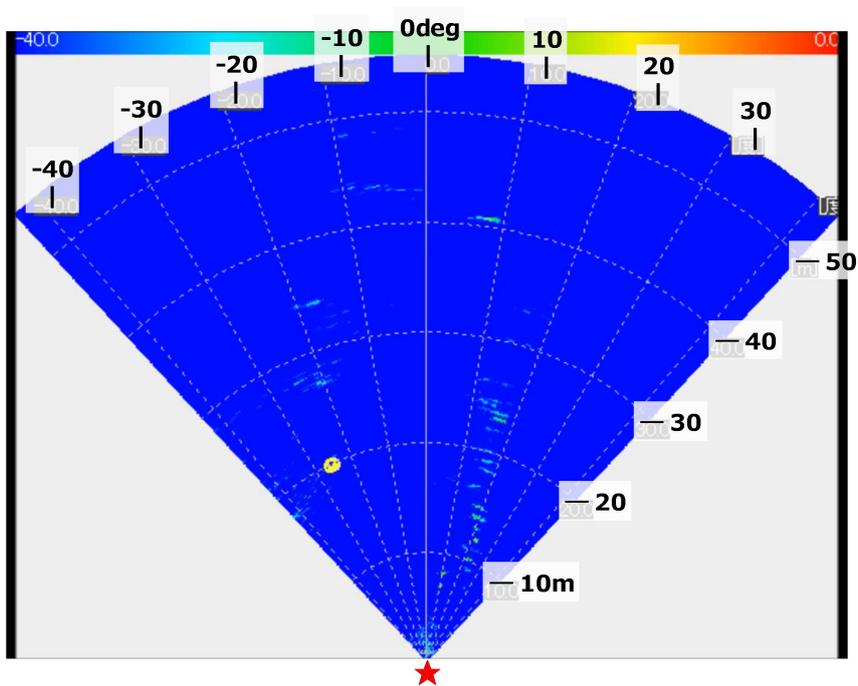


(b)

図 4.2.2.1-15 降雨時の車両検知 (初期検討)



(a)



(b)

図 4.2.2.1-16 降雨時の歩行者検知（初期検出）

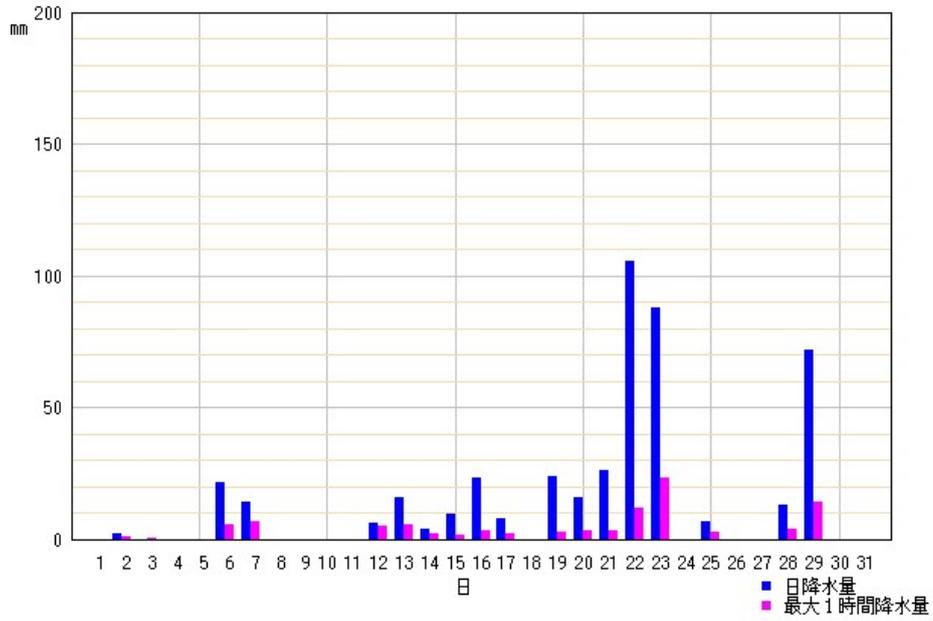
上記の初期検討を受け、高速道路の逆走検知等への応用展開を想定して、東日本高速道路株式会社管轄のフィールドにおいて実証実験を推進した。具体的には、激しい降雨発生を含む「一般地」と、吹雪発生を含む「積雪寒冷地」の気象条件の異なる環境地域の路線として、前者の一般地が首都圏中央連絡自動車道、後者の積雪寒冷地が山形自動車道の各々で、パーキングエリア（PA）への進入路等で実施された。

はじめに、激しい降雨時等の実道環境として、一般地の性能実証について報告する。一般地の実験では、本線から PA へ流入する 1 車線の走行路に対して、路側に設置したインフラレーダーで流入車両を逆走車両に見立てて性能評価する内容であり、平成 29 年 10 月上旬～11 月上旬の概ね 1 ヶ月で実施された（図 4.2.2.1-18）。

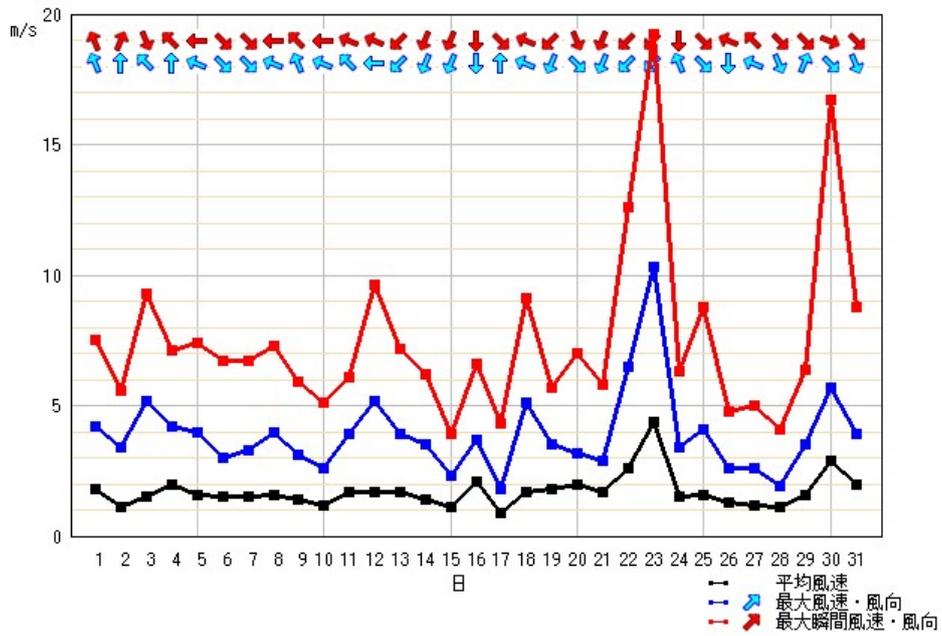
レーダーは高さ 5m に設置して、走行路の下り方向、すなわち流入車両の後方からレーダーエコーを観測し、物体検知アルゴリズムを介して車両検知の性能評価を行う。また、レーダー上部のカメラ（高さ 5.5m）は、レーダー性能を評価するためのデータ照合用として設置する。尚、降雨条件として、近隣の観測所データ（気象庁久喜観測所・平成 29 年 10 月の月間）を図 4.2.2.1-19 に示す。実験期間内には、晴れ、雨以外にも、台風を伴う暴風雨（2 日間程度）、濃霧が発生している。



図 4.2.2.1-18 一般地・実証実験の諸元



(a)



(b)

図 4.2.2.1-19 一般地・気象データ(平成 29 年 10 月)

実験期間内で観測した流入車両の写真を図 4.2.2.1-20 に示す。一般的な普通車 (A-1~3)、二輪車 (A-4)、バス (A-5) に加え、路線の沿線には多数の物流拠点が立地している関係で小型から大型の物流車両 (B-1~5)、さらに工事機材の混載車両 (C-1)、大型牽引車両 (C-2, 3)、タンクローリー車両 (C-4)、カーキャリアー車両 (C-5) 等、これまでの試験では対象としていなかった車両であり、実道環境での様々な車両・車種に対して性能実証を行う。また、図 4.2.2.1-20 は、30 分単位に集計した車両台数(a)、および 1 週間分の時系列台数分布(b)を示す。1 日あたりの平均流入台数は 3139 台であり、昼間帯の車両台数が定常的に多く分布しているが、前述の通り、物流車両も流入するため、夜間帯にも分布している点が特徴である。

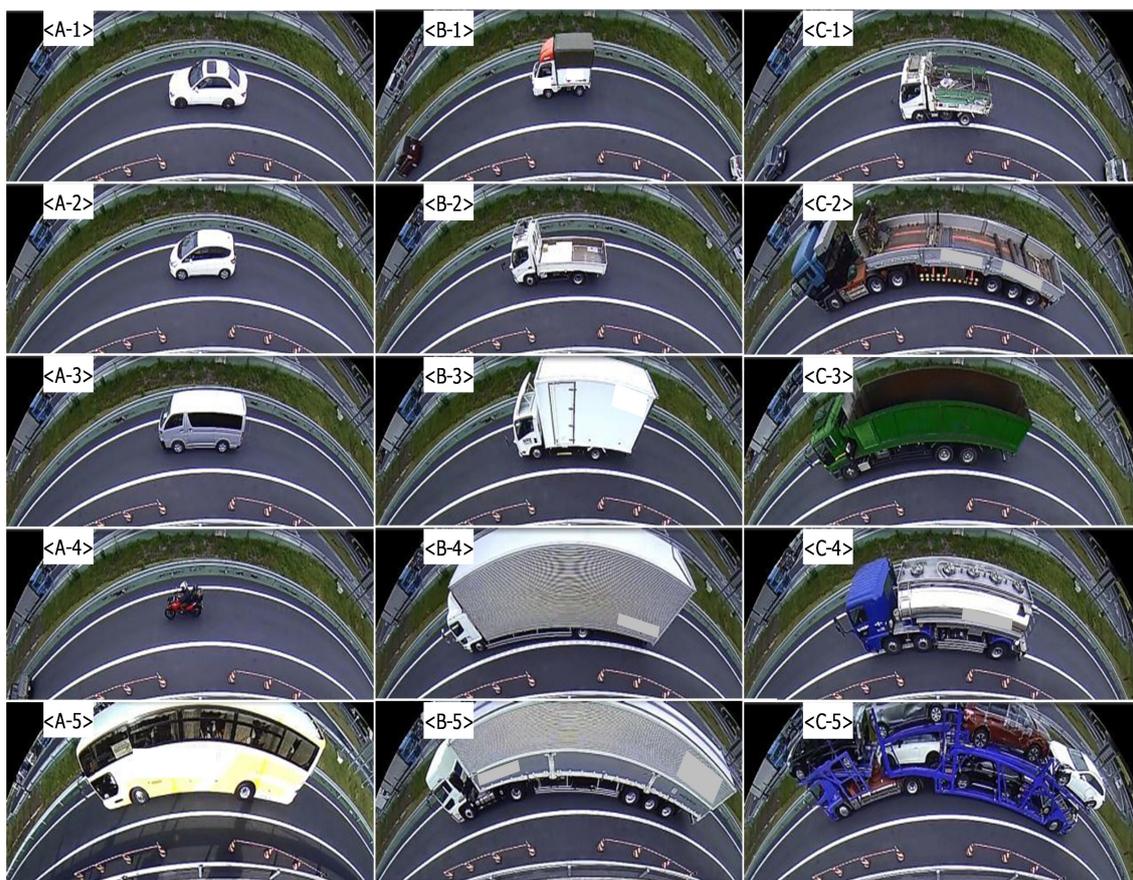
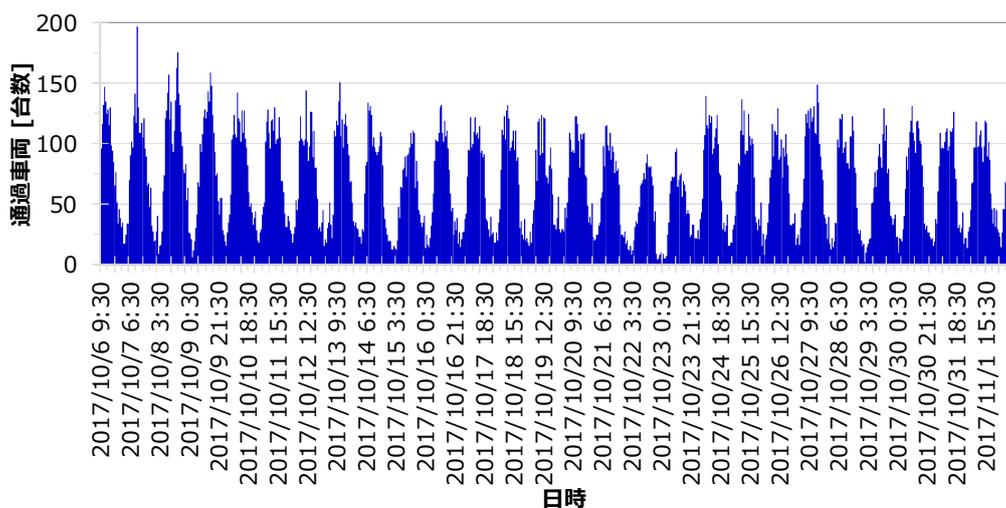
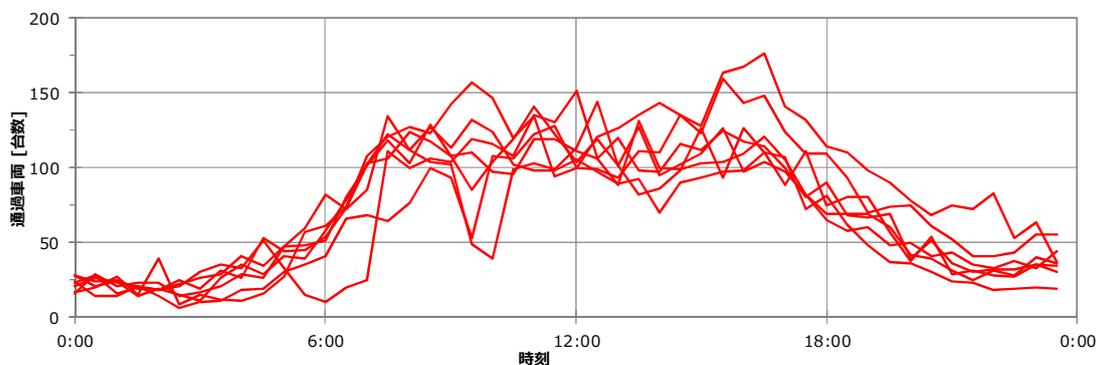


図 4.2.2.1-20 一般地・流入車両の種類



(a)



(b)

図 4.2.2.1-20 一般地・流入車両の台数

降雨時の実道環境評価として、実験期間中、降雨量 3mm/h 程度の降雨環境下(夕刻)における検知性能を図 4.2.2.1-21, 22 に示す。図 4.2.2.1-22 は、図 4.2.2.1-21 の写真の通り、流入車両がレーダーの検知範囲を通過する同時刻で取得した電力及びドップラープロファイルを示す。降雨時においても、電力プロファイル(図 4.2.2.1-22 (a))より、レーダーの設置位置(星印)から検知範囲の 25m 付近で車両を検知(黄色丸)しており、併せてドップラープロファイル(図 4.2.2.1-22 (b))から、該当車両の速度は約 40km/h であることが分かる。尚、後者のドップラープロファイルが、負の速度(-40km/h)を示しているが、これはレーダーから離れる方向に移動しているためである。降雨時においても車両の検知できているが、レーダー近傍には雨滴散乱による反射が電力プロファイル上にわずかながら観測されており、またドップラープロファイルに落下する雨滴速度が確認できる。しかしながら、前述の検出閾値等による雨滴散乱の抑制策を適用することで、降雨時においても、誤検知を抑え、物体検知性能を確保することができる。

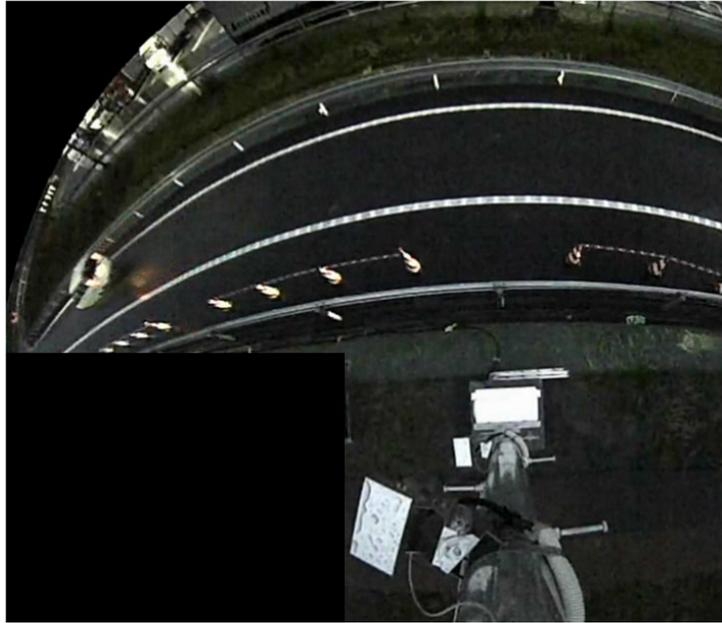
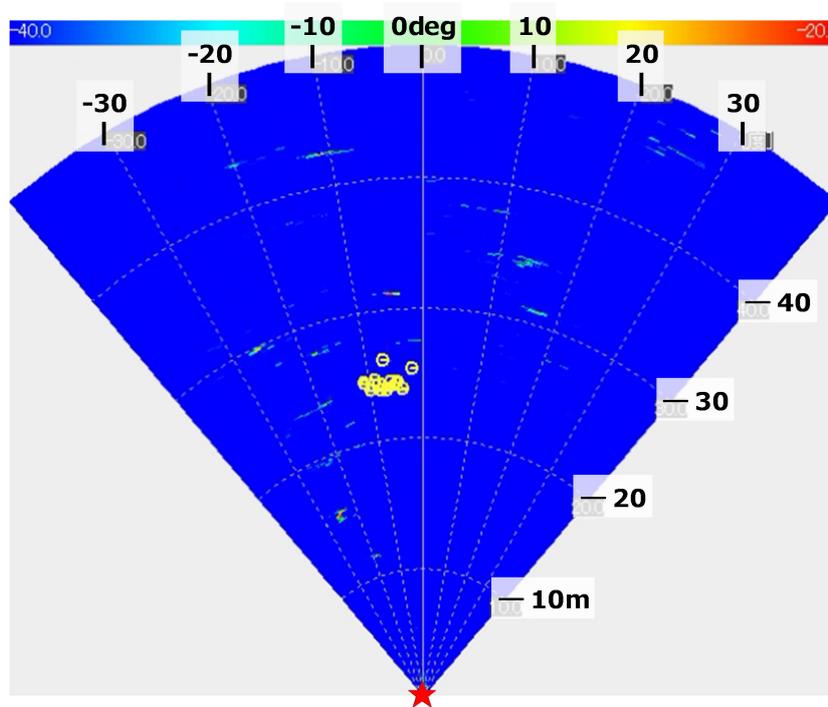
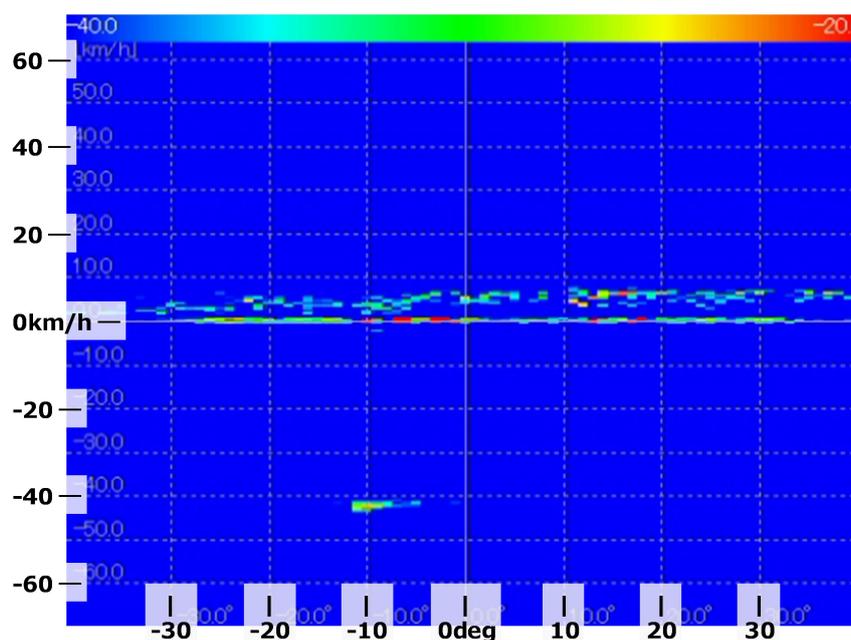


図 4.2.2.1-21 一般地・降雨時の検知対象車両



(a)



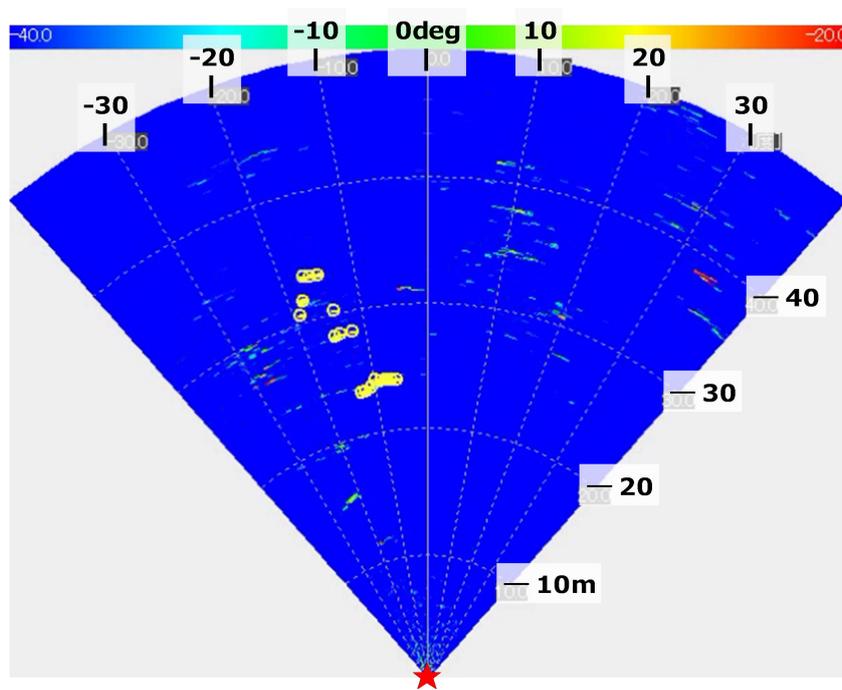
(b)

図 4.2.2.1-22 一般地・降雨時の検知性能

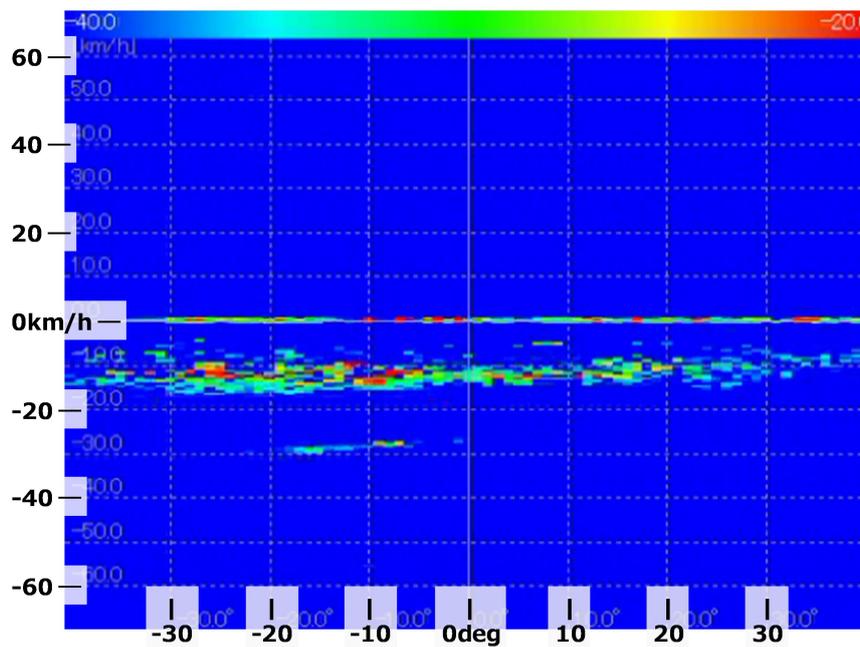
さらに激しい降雨条件として、実験期間の中、台風通過に伴う暴風雨（平均の降雨量は 20mm/h 程度）の降雨環境下における検知性能を図 4.2.2.1-23,24 に示す。前述と同様、図 4.2.2.1-24 は、図 4.2.2.1-23 の写真の通り、流入車両がレーダーの検知範囲を通過する同時刻で取得した電力及びドップラープロファイルを示す。激しい降雨時においても、電力プロファイル（図 4.2.2.1-22 (a)）より、レーダーの設置位置（星印）から検知範囲の 30m 付近で車両を検知（黄色丸）しており、併せてドップラープロファイル（図 4.2.2.1-22 (b)）から、該当車両の速度は約 30km/h であることが分かる。尚、前者の電力プロファイルが、30m 前後に広がった検知を示しているが、これは大型車両で車両前方から後方にかけて多数の反射を観測しているためである。激しい降雨においても車両の検知できているが、前述の降雨量 3mm/h 程度の降雨環境下とは異なり、レーダー近傍には雨滴散乱による反射が電力プロファイル上に観測されている。また、ドップラープロファイル上にも落下する雨滴速度と相関があると考えられる現象が確認できる。しかし、前述の検出閾値等による雨滴散乱の抑制策を適用することで、激しい降雨時においても、誤検知を抑え、物体検知性能を確保できることが分かる。



図 4.2.2.1-23 一般地・暴風雨時の検知対象車両



(a)



(b)

図 4.2.2.1-24 一般地・暴風雨時の検知性能

図 4.2.2.1-23,24 の暴風時を含む、8 時間の集計データを表 4.2.2.1-1 に示す。8 時間の内、5 時間は降雨量 10mm/h 以上の暴風雨が断続的に続き、カメラによる映像から通過した車両総数は 411 台であるが、レーダーの検知率 100%、未検知率 0%の結果を得た。

くわえて、8 時間の内、2 分以上車両が通過しなかった総時間 5 時間 57 分に対する誤検知が無しという結果も得た。したがって、激しい降雨時においても、雨滴による影響を抑え、物体検知性能を確保できることを、実道環境の性能評価を通じて実証した。

表 4.2.2.1-1 一般地・暴風雨時の検知性能結果

環境	通過車両 [台]	検知率 [%]	未検知率 [%]	誤検知
暴風雨	411	100	0	無し

4.2.2.2. 吹雪発生時等の寒冷地環境における性能実証

吹雪発生時等の実道環境として、ここでは積雪寒冷地の性能実証について報告する。積雪寒冷地の実験では、PAに隣接した1車線の走行路に対して、路側に設置したインフラレーダーで流入車両を逆走車両に見立てて性能評価する内容であり、平成29年12月下旬～平成30年2月中旬の概ね1.5ヵ月で実施された(図4.2.2.2-1)。一般地の実験同様、レーダーは高さ5mに設置して、走行路の下り方向、すなわち流入車両の後方からレーダーエコーを観測し、物体検知アルゴリズムを介して車両検知の性能評価を行う。また、レーダー上部のカメラ(高さ5.5m)は、レーダー性能を評価するためのデータ照合用として設置する。尚、降雪条件として、近隣の観測所データ(気象庁山形観測所・平成30年1月及び2月の月間)を図4.2.2.2-2,3に示す。実験期間内には、晴れ、雪以外にも、大雪、吹雪(2日間程度)、濃霧の環境が発生している。

図4.2.2.2-4の写真は、降雪直後に撮影したが、走行路には多くの積雪があり、レーダーやカメラ等の実験機器にも着雪が確認できる。しかしながら、レーダーの照射面に当たる前面板(白色部分)には着雪しておらず、前述の通り、降雨時および降雪時の様々な環境に対して検知性能等の影響を軽減する構造、特に風雪による吹き溜まりや滑落特性等を考慮した部分の効果について実証することができた。

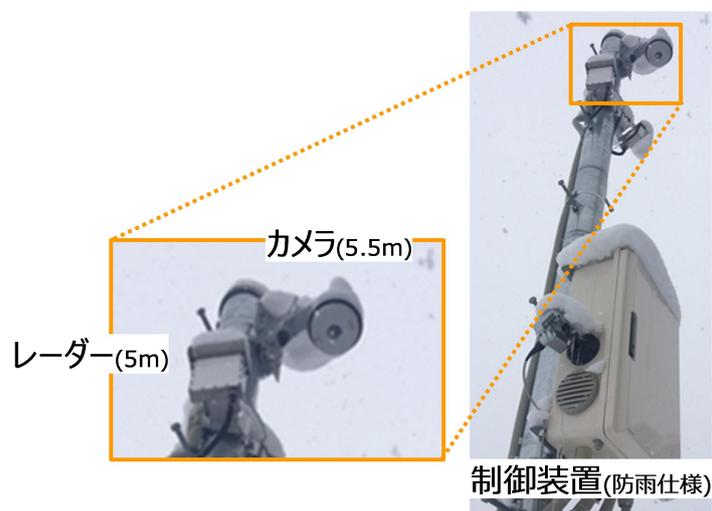
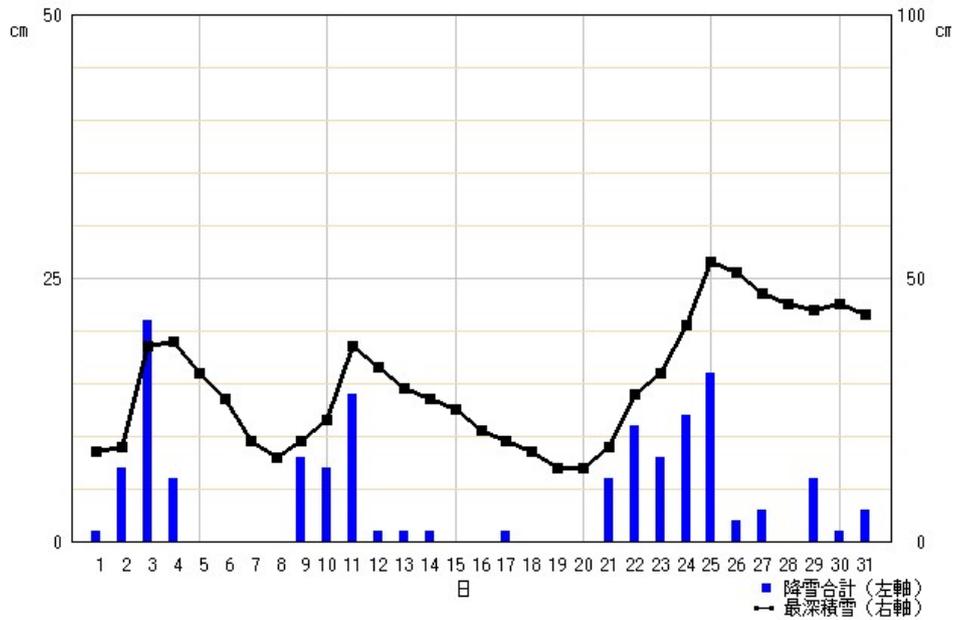
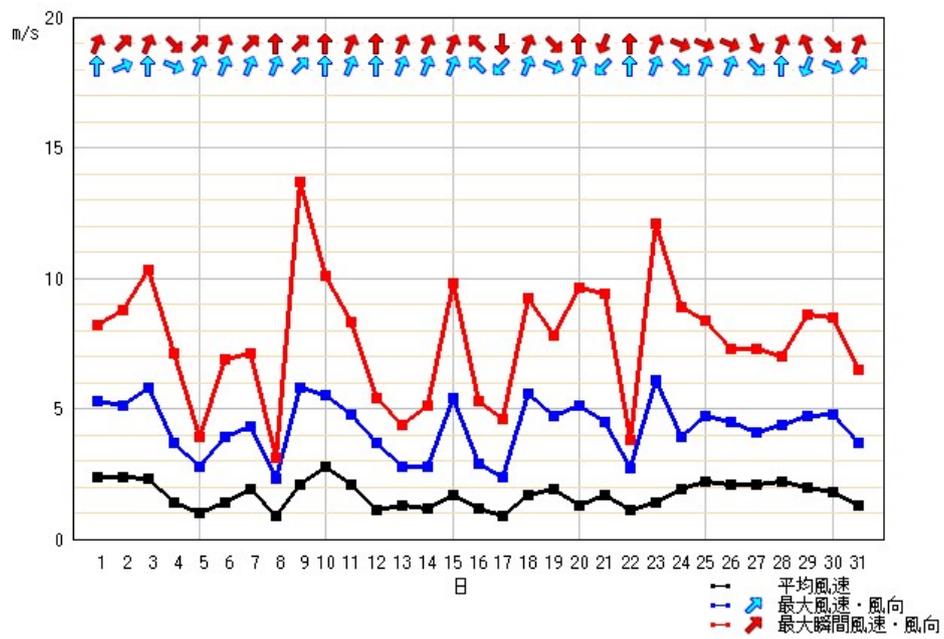


図 4.2.2.2-1 積雪寒冷地・実証実験の諸元

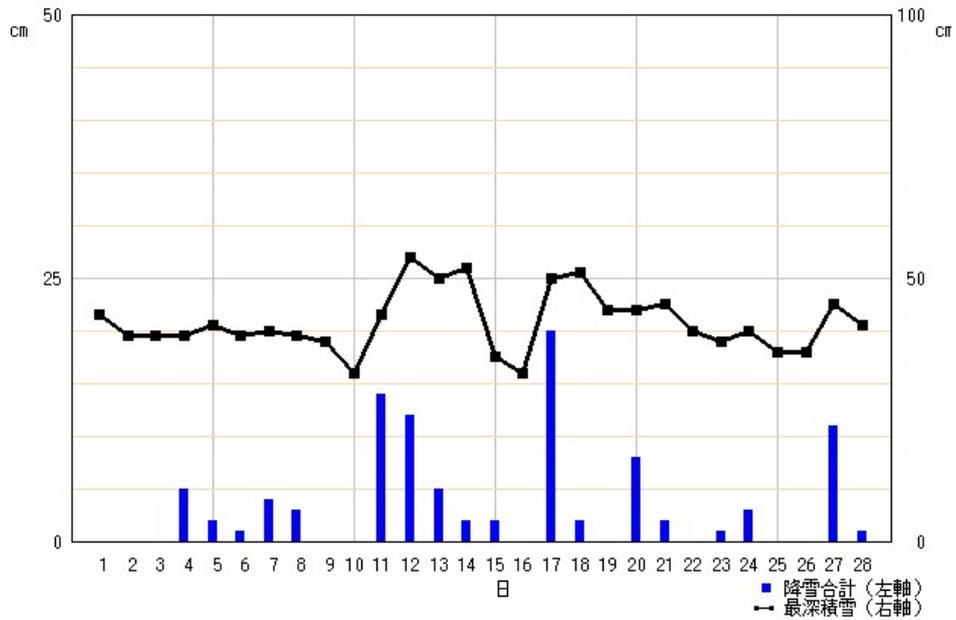


(a)

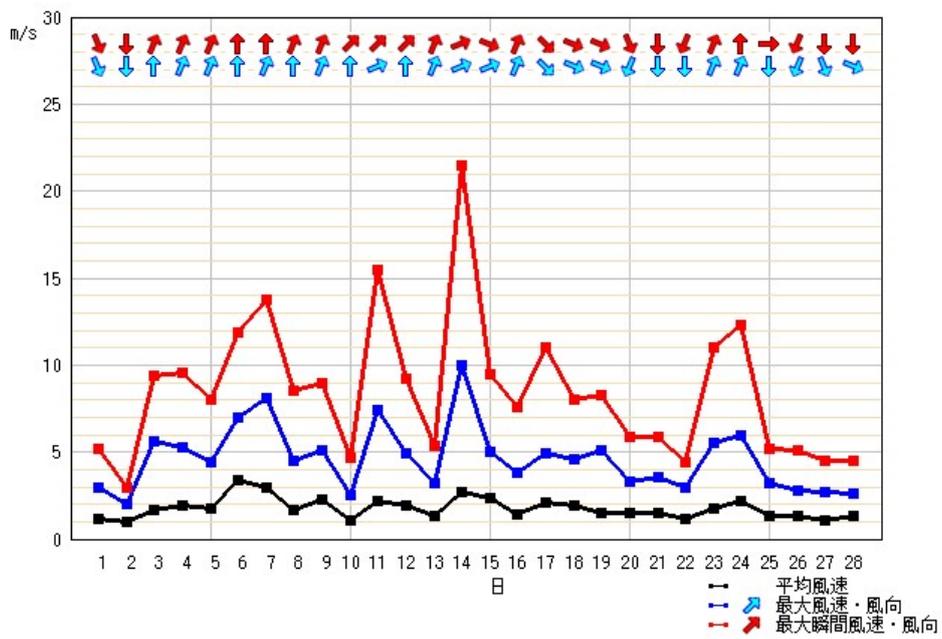


(b)

図 4.2.2.2-2 積雪寒冷地・気象データ (平成 30 年 1 月)



(a)



(b)

図 4.2.2.2-3 積雪寒冷地・気象データ (平成 30 年 2 月)



(a)

(b)

(b)

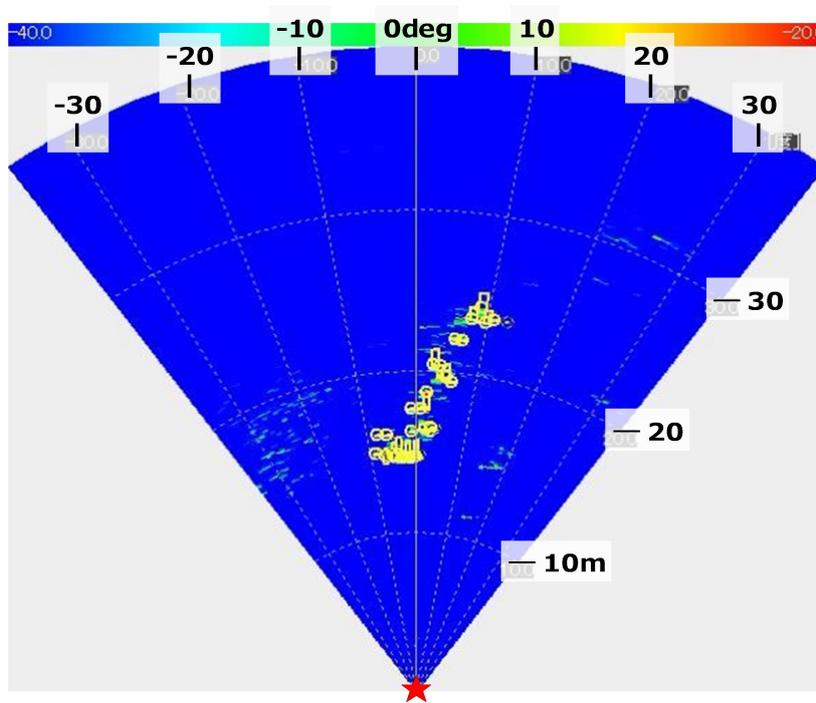
図 4.2.2.2-4 積雪寒冷地・降雪直後の着雪状況

降雪時の実道環境評価として、実験期間の中、吹雪時の降雪環境下における検知性能を図 4.2.2.2-5,6 に示す。図 4.2.2.2-6 は、図 4.2.2.2-5 の写真の通り、流入車両がレーダーの検知範囲を通過する同時刻で取得した電力、およびドップラープロファイルを示す。降雪時においても、電力プロファイル（図 4.2.2.2-6 (a)）より、レーダーの設置位置（星印）から検知範囲の 20m 付近で車両を検知（黄色丸）しており、併せてドップラープロファイル（図 4.2.2.2-6 (b)）から、該当車両の速度は約 35km/h であることが分かる。尚、前者の電力プロファイルが、20m 前後に広がった検知を示しているが、これは大型車両で車両前方から後方にかけて多数の反射を観測しているためである。また、後者のドップラープロファイルが、負の速度（-35km/h）を示しているが、これはレーダーから離れる方向に移動しているためである。降雪時においても車両の検知できているが、レーダー近傍には雪氷散乱による反射が電力プロファイルに極わずかながら観測されており、ドップラープロファイル上には落下する雪氷速度と相関があると考えられる現象が確認できる。

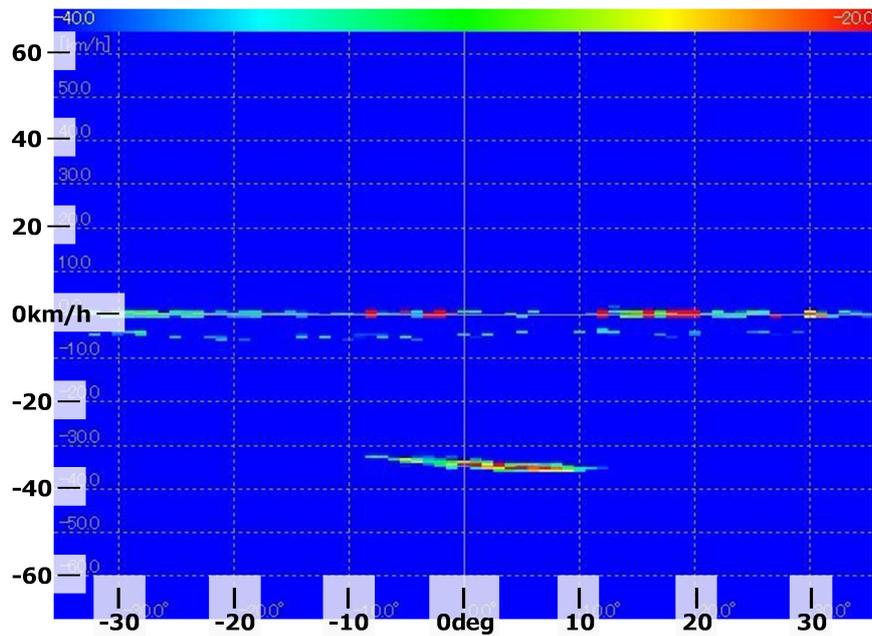
また、前述の降雪伝搬実験のデータから、本実験の場所は標高が高く、樹枝状結晶に近い乾雪であることが推測される。降雨時の雨滴散乱に比べ、降雪時の雪氷散乱は反射が小さいことは、降雪伝搬実験と同様、本実験でも実証された。くわえて、前述の降雨時と共通の検出閾値等による抑制策を適用することで、降雪時の誤検知が抑えられることも確認することができた。



図 4.2.2.2-5 積雪寒冷地・降雪時の検知対象車両 1



(a)



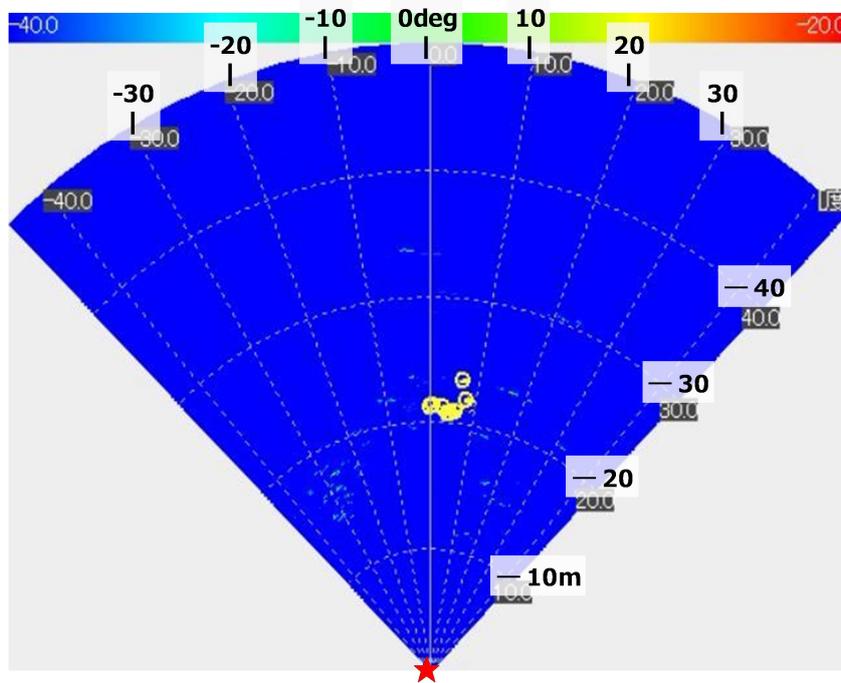
(b)

図 4.2.2.2-6 積雪寒冷地・降雪時の検知性能 1

図 4.2.2.2-7, 8 は、前述とは別日の吹雪時（降雨量換算 0.5mm/10min 程度）の降雪環境下における検知性能で、図 4.2.2.2-7 は普通車の場合、図 4.2.2.2-8 は大型車の場合で、流入車両がレーダーの検知範囲を通過する同時刻で取得した電力プロファイルを示す。本結果においても、降雪時の影響を受けず、物体検知性能を確保できることが分かる。



(a)

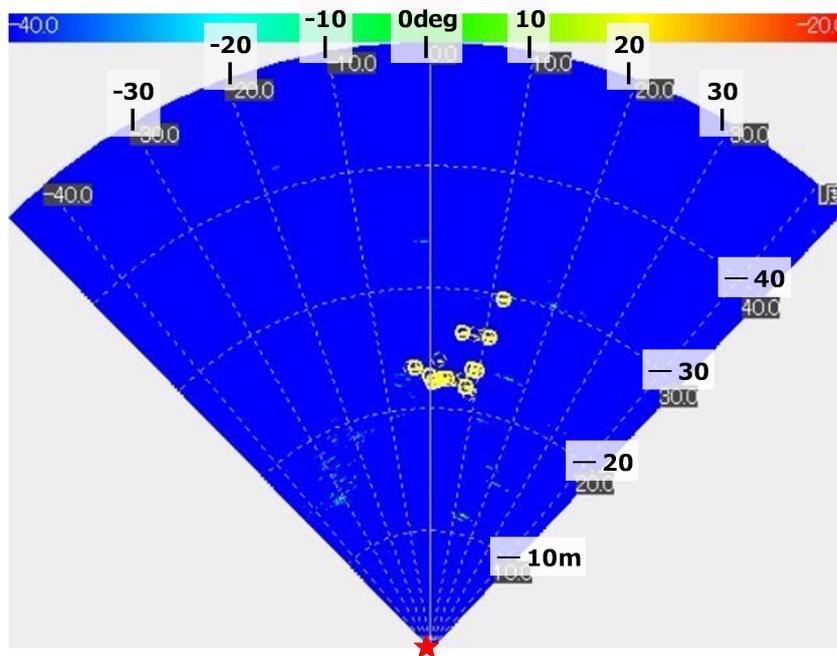


(b)

図 4.2.2.2-7 積雪寒冷地・降雪時の検知性能 2



(a)



(b)

図 4.2.2.2-7 積雪寒冷地・降雪時の検知性能 3

降雪時を含む、24時間の集計データを表 4.2.2.2-1 に示す。24 時間の内、最大 4 時間の降雪が断続的に続き、カメラによる映像から通過した車両総数は 3223 台であるが、レーダーの検知率 100%、未検知率 0%の結果を得た。

くわえて、24 時間の内、2 分以上車両が通過しなかった総時間 6 時間 56 分に対する誤検知が無しという結果も得た。したがって、降雨と同様、降雪においても、雪氷による影響を抑え、物体検知性能を確保できることを、実道環境の性能評価を通じて実証した。

表 4.2.2.2-1 積雪寒冷地・降雪含む条件の検知性能結果

環境	通過車両 [台]	検知率 [%]	未検知率 [%]	誤検知
降雪	3223	100	0	無し

4.3. 路車協調技術の開発

4.3.1. 取り組み概要

・自動走行支援情報生成の実証実験

誤検知発生の低減等によりデータの信頼性を向上させる高精度検知アルゴリズムの開発及びその性能評価を実施する。加えて、交差点または分合流点に 79GHz 帯レーダーを路側センサーとして設置し、レーダーが検出する車両や歩行者の位置、速度をリアルタイムに更新しつつダイナミックマップ等へ出力するメッセージのモニタリング機能を実装する。さらに、車両の台数や四輪車や二輪車といった車種等を時系列のデータとして記録するソフトウェアを開発してその機能検証を実施する。

・路車協調実証向け実験システム構築

交差点等におけるシステムレベルのフィールド検証を目指して、複数の路側センサーが生成する検知データを統合するセンサー統合・制御装置及び周囲の車両等へ情報メッセージを伝送する無線通信機で構成されるインフラレーダーシステムの試作開発を実施する。また、79GHz 帯レーダーを含む複数のセンサーをセンサー統合・制御装置に接続して統合処理による物標情報レベルでの実験評価を実施し、リアルタイム動作の検証を完了する。

4.3.2. 自動走行支援情報生成の実証実験

高分解能ミリ波レーダーの検知アルゴリズムでは、ミリ波レーダーデバイスで測定されたデータから物体検出を行い、検出物体の位置、何台の物体が存在するかを正確に判別するクラスタリング処理技術と、クラスタリングにより判別された物体がどのような経路で移動したかを追跡するためのトラッキング処理技術が重要となる。

センサーシステムとしての検知精度を左右するこれらレーダーのソフトウェア技術について、その有用性を確認するため、検出した物体したがトラッキング処理で追跡され特定の領域を通過した際に、車両の台数を計測する車両カウントシステムを開発して、フィールド試験により性能評価を実施した。

本節では、開発した車両台数カウントシステムにおける検知アルゴリズム等の説明とフィールドでの評価結果について報告する。

はじめに、車両カウントシステムの処理フローを図 4.3.2-1 に示す。はじめに各処理ブロックの概略を簡単に述べて、それ以降で各部のアルゴリズムを詳細に説明する。

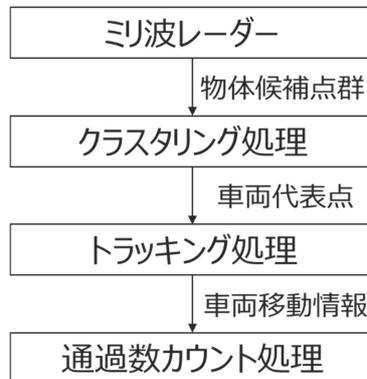


図 4.3.2-1 車両カウントシステムの処理フロー

ミリ波レーダーから取得したデータは、ノイズリダクション等のあらかじめ設定されたパラメータによるフィルタリング処理を実施した後、以下の図 4.3.2-2 に示すように、物体候補点群（セルレベルのデータ）として出力される。

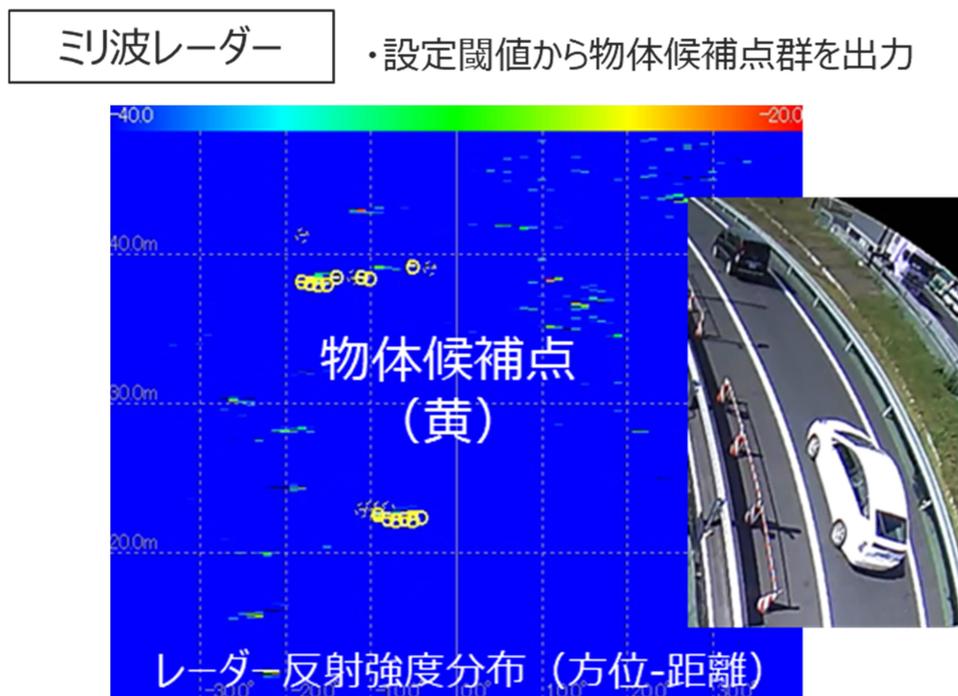


図 4.3.2-2 ミリ波レーダーからの出力例

次に、候補点群の特徴を分析し、類似の反射点を集合化するクラスタリング処理を施す。(図 4.3.2-3 参照) インフラレーダーが検知対象とするバイクから大型車(全長 16m 程度まで)を 1 台と判別するように工夫されたクラスタリング処理の結果から車両の代表点を求め、その後はトラッキング処理を実行する。

トラッキング処理では、1 フレーム前の代表点情報(位置・速度)から移動先を予測し、現フレームにてクラスタリングされ検出された代表点情報とのマッチングを実施して、物体の追跡可否の判定を実施する。追跡対象の物体について、過去数フレーム分の代表点情報から移動軌跡を生成する。

最後に実施する通過数カウント処理では、車両通過の判定位置を Nm 間隔($N>0$ 、 $L1$ と $L2$ の間隔)に複数区間を予め設定しておく。設定された複数区間において、車両の通過軌跡が確認された場合に台数のカウントアップを行うようにする。

クラスタリング処理

- ・同一車両をクラスタリング
- ・車両代表点を抽出

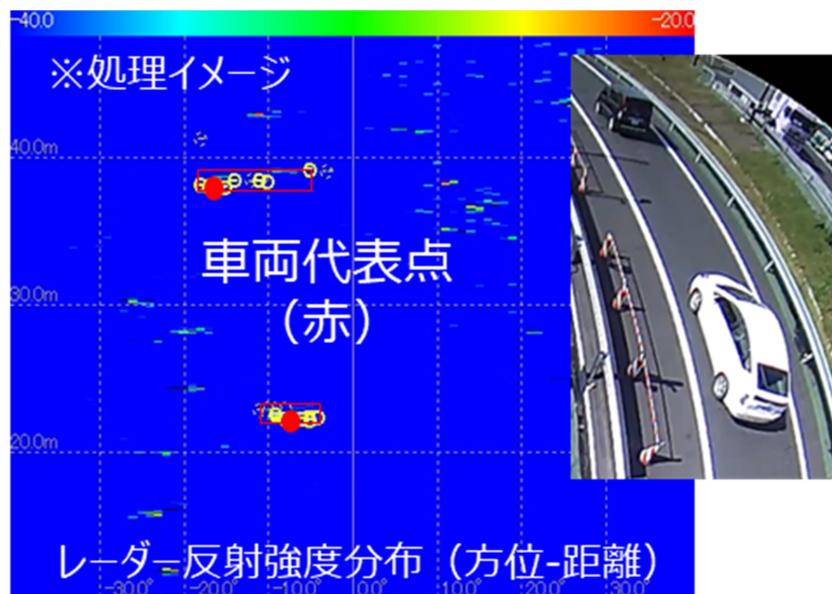


図 4.3.2-3 クラスタリング処理のデータ例

4.3.2.1 高分解能レーダーの検知アルゴリズム開発

以降ではまず、クラスタリング処理技術に関して説明する。図 4.3.2.1-1 は、ミリ波レーダーから取得した物体候補点群から、開発したクラスタリング処理を施すことによって得られた、クラスタリング結果と車両代表点の算出結果例である。実際、ミリ波レーダーからの出力される物体候補点群としては、様々な反射点の分布が得られる。

ここで、図 4.3.2.1-1 の例①と例②のように酷似した分布から正確に何台の車両が存在するのか、例③のようにマルチパスの影響を受けやすい大型車の正しい物体の形状を導き、正しく車両代表点を求めることが必要となる。

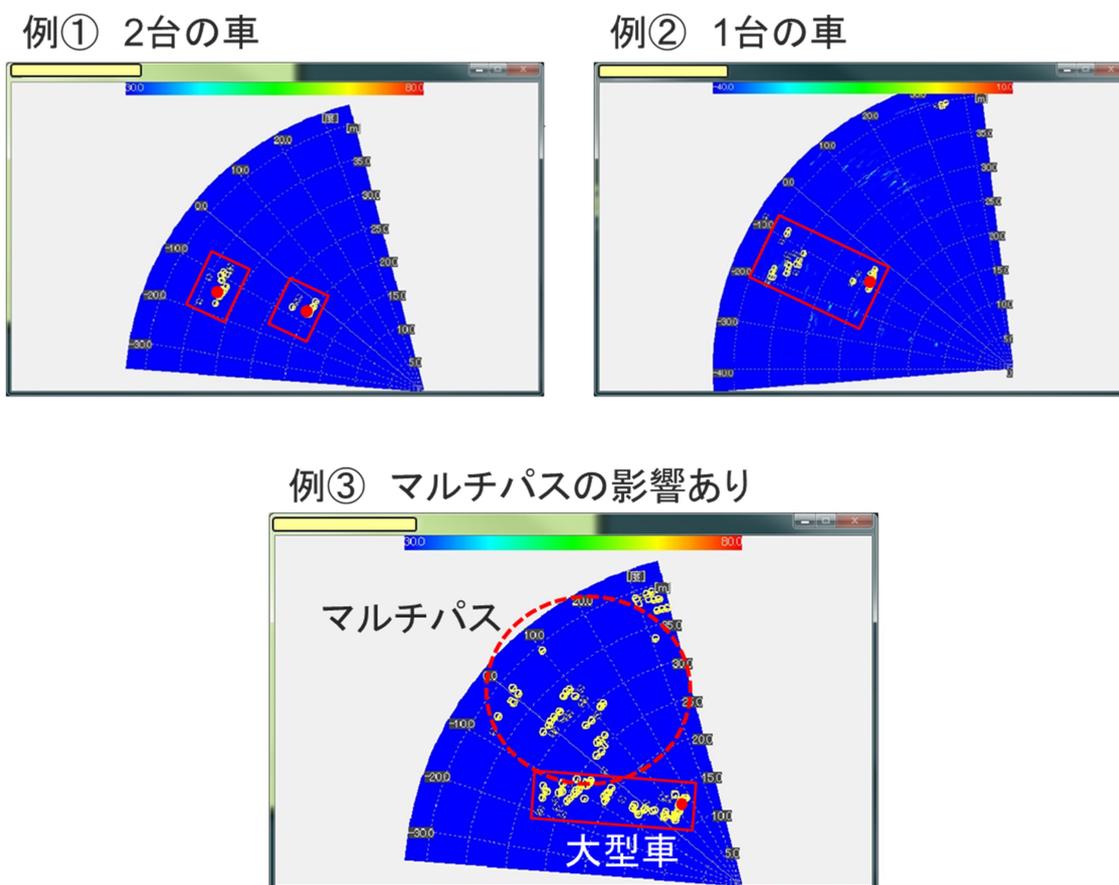


図 4.3.2.1-1 クラスタリング処理例
(赤の□がクラスタリング結果、赤●が車両代表点)

クラスタリング処理部では、以下の図 4.3.2.1-2 に示すような処理フローで、各内部処理ブロックのアルゴリズム開発を行った。

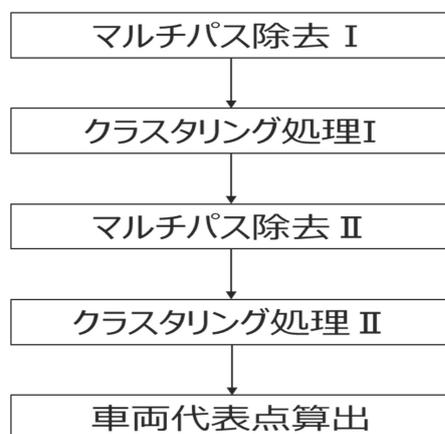


図 4.3.2.1-2 クラスタリング処理フロー

以下では、各処理ブロックのアルゴリズムに関して順に説明する。

・マルチパス除去 I

レーダーを設置した周囲環境車両形状によっては、対象車両と周囲壁面間で複数回反射することで、同一方位に、反射回数 (N) × 距離、反射回数 (N) × 速度のレーダー反射波が発生する場合があります、特に大型車でその傾向は顕著になる。

図 4.3.2.1-3 には、レーダー周囲に壁面があるような環境において、大型車が走行した場合の分布を示す。このように、壁面と大型車間での複数回反射 (反射回数 N) によって、ほぼ N 倍の距離と速度のマルチパスが観測された。この規則に当てはまる反射波に対し、マルチパスとして除去するフィルタを実装した。

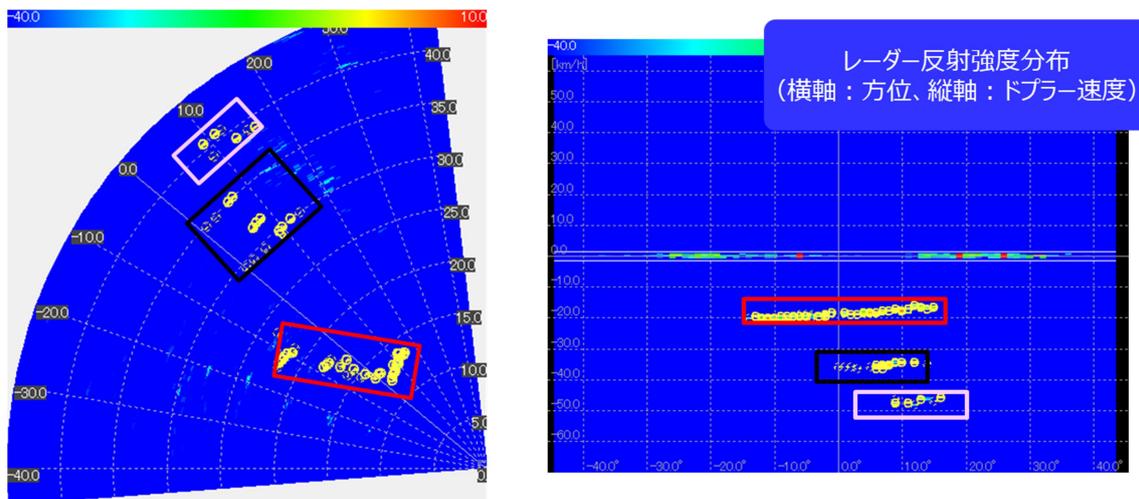


図 4.3.2.1-3 マルチパス発生例 1 の実測データ

・クラスタリング処理 I

クラスタリングは、物体候補点群から類似した反射点を集合化し、物体を検出する処理である。図 4.3.2.1-4 のように 3 台の車が走行している場合は、3 台と検出し、図中の赤枠のように物体候補点を集合化して 1 つの物体として判別する。

レーダーから得られる物体候補点は、レーダーの設置状況（レーダー設置高等）によって物体からの反射波の見え方が異なる。図 4.3.2.1-5 に大型車のレーダーで見え始める距離位置からの反射波特性の違い例を示した。レーダーで見え始める距離では、大型車の前面部分と背面部分に分離されて観測される場合があり、車長により異なるが 1 台の車でも 10m 程度離れて観測されることもある。（図中①を参照）5m 程度移動した地点では、側面部分の反射も確認されるようになる。さらに、見え始める距離位置から 15m 程度経過するとトラックの背面部分のみ反射となる。このように 1 台の車の距離によって観測される反射波特性が異なりため、これを考慮したアルゴリズム設計を行う必要がある。

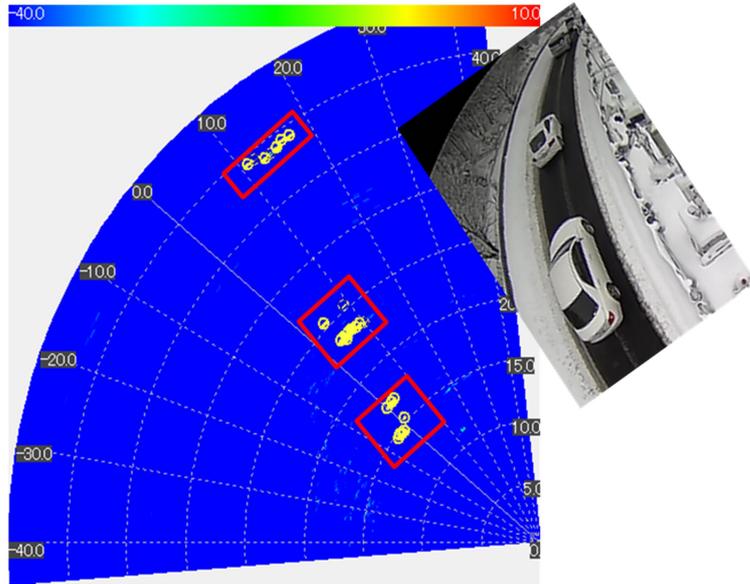


図 4.3.2.1-4 クラスタリング例

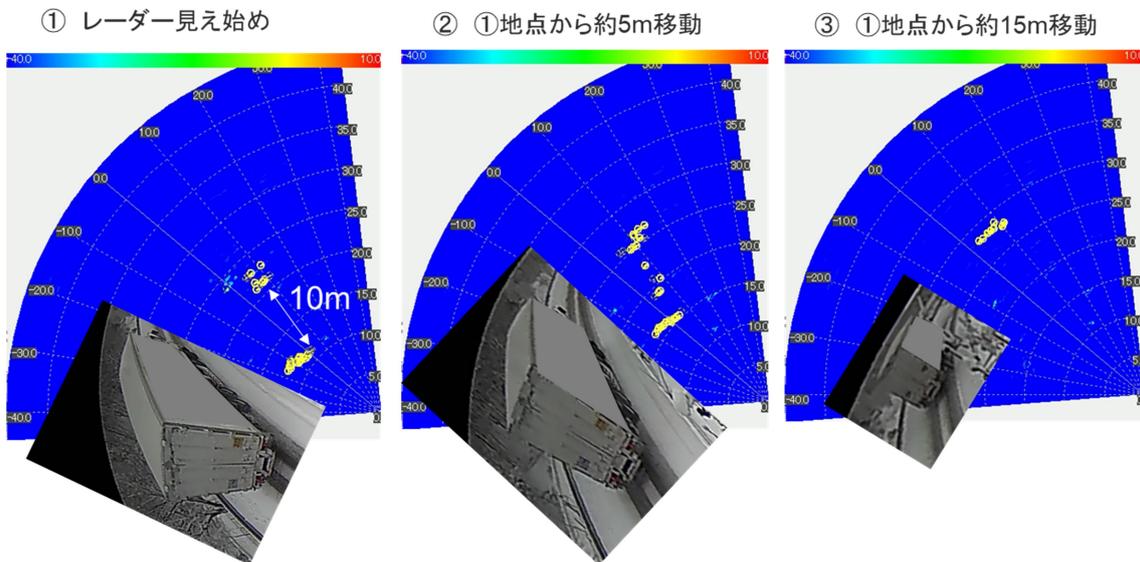


図 4.3.2.1-5 レーダーからの距離位置に対する反射波特性の差異

図 4.3.2.1-6 は、図 4.3.2.1-5 の図中②と同じ距離位置で、近接する車両 2 台の車両の反射波例を示している。5m程度の近接を観測する場合があるが、図 4.3.2.1-5 の図中①のタイミングとは異なるので、2 台の車であることの判別が可能である。

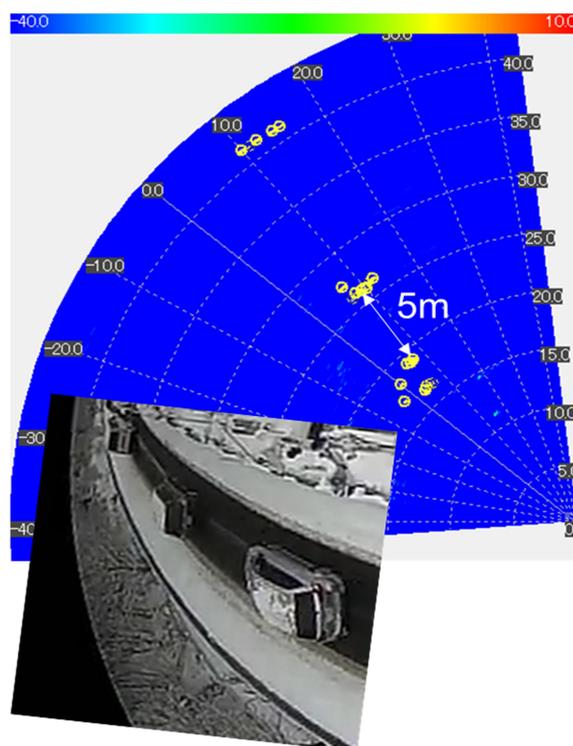


図 4.3.2.1-6 近接する車両の反射波データ例

このように、物体の距離によるレーダーの見え方を考慮することで、実車両に対するクラスタリングが可能となる考えられる。そこで、以下の方法でクラスタリング I の処理を実施するようにした。

図 4.3.2.1-7 において、黄色の丸印が反射点（物体候補点）、赤や青や緑やピンクの矩形は検出範囲を示す。まず物体候補点から速度の+、-で反射点を分別し、それぞれ同じ方向の速度間で以下の比較を行う。

検出開始点 A を基点に距離や方位からあらかじめ定めた検出範囲内（赤い□の範囲）にある反射点を検索、検索範囲内に反射点が見つかったら次の反射点を検索する（青→緑→ピンクの順）。反射点が検出されなくなったら、1 台の物体と判断しクラスタリング（図の破線で囲った部分）する。検出範囲は、距離と方位によって可変であり、トラックが複数台とクラスタリングしないこと、2 台の移動体の近接のパターンの距離や角度の規則性を実証実験で取得したデータベースを元に最適化し、矩形のサイズを決定した。

ただし、この方法では、バイクとのすり抜け等、物体が角度方向に近接すると同一物としてクラスタリングされるので、速度、方位、距離等詳細な分析を後述するクラスタリング II で行い分離することで回避する。

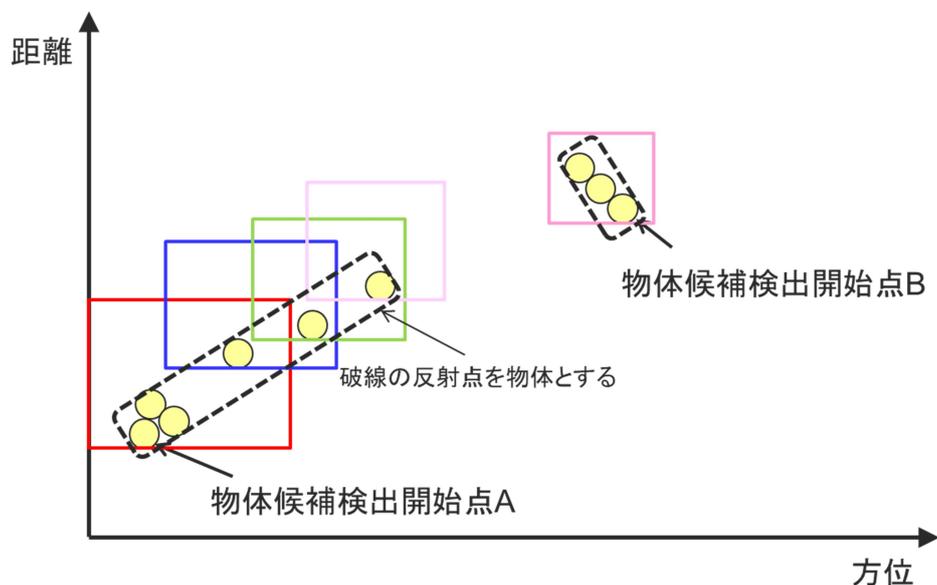


図 4.3.2.1-7 クラスタリング I の考え方

・ マルチパス除去 II 処理

マルチパスには、ガードレール間に挟まれた場所を車が通過する場合や、バイクのすり抜け等、物体からの正反射に加え、側面のガードレールや停止車両を經由したマルチパスの反射波により、物体形状や車両位置把握に誤差を生じる。対策を施さない場合、正しくクラスタリングが実施されず、物体が広がる事により停止車両等が移動していると誤検出してしまう場合や、ガードレール方向に物体があると検出した場合、検出から除外される場合がある。

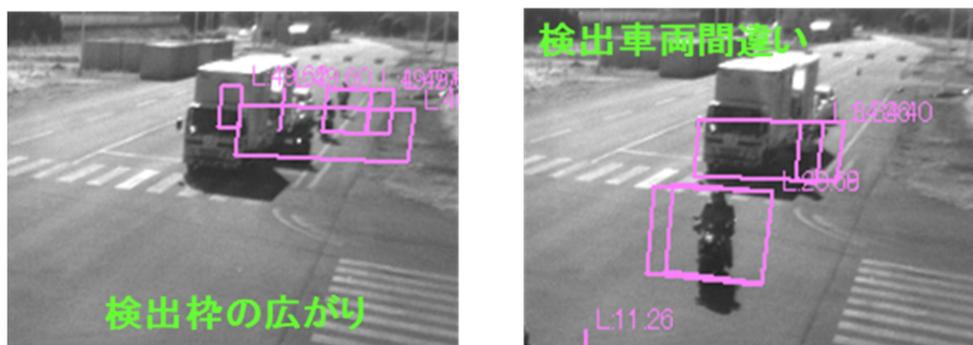


図 4.3.2.1-8 マルチパス対策を施さない場合の検出枠の広がり

具体的には、図 4.3.2.1-8 及び図 4.3.2.1-9 に示すように、2 輪車の単独走行では観測されない反射波の広がりがあることが分かる。また、これまでの各種実験から、直接反射波に比してマルチパスの反射波強度が低いことも分かっている。

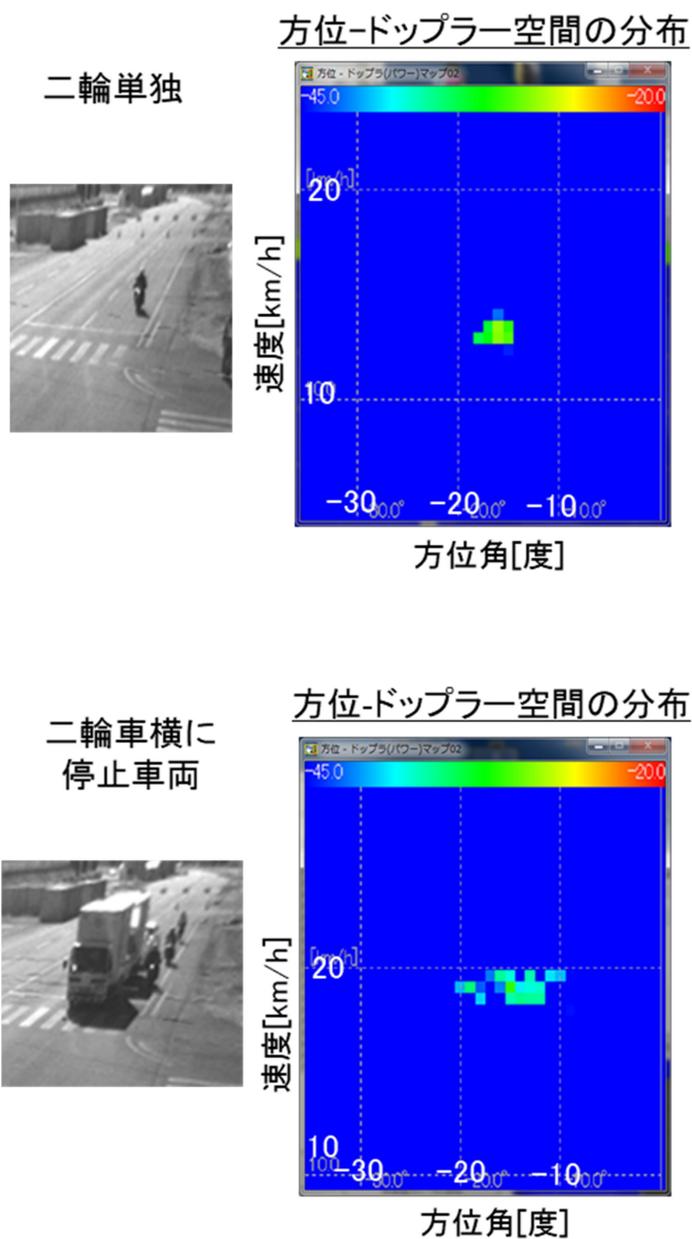


図 4.3.2.1-9 マルチパスによる反射波の広がり

検出枠内の物体候補セルの
反射レベルヒストグラム

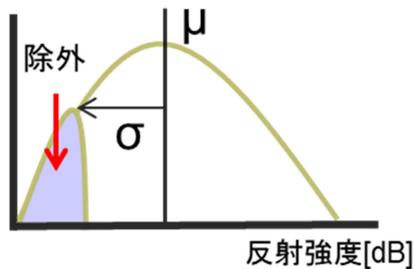
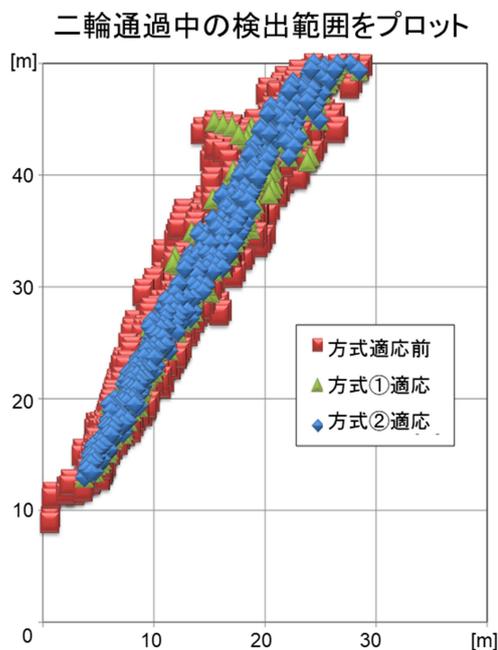


図 4.3.2.1-10 マルチパス除去方式のイメージ

これらの特性を利用して、図 4.3.2.1-10 のように、反射レベル分布からマルチパスを除外するフィルタを適用する（方式①）。また、物体からの正反射と異なり、このマルチパスは周囲環境に依存するため、継続的に反射が確認されることが少ない、この特性も加味し、反射波の継続性の少ない反射波も除外対象とする機能を方式①に追加した方式②を適用することで、より正確にマルチパスを除去できる。

■ 方式適応の効果



方式②適応後の二輪車検出枠

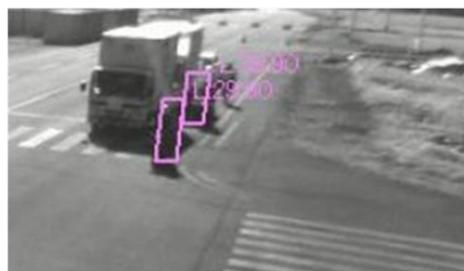


図 4.3.2.1-11 方式比較のための物体検出実験結果

図 4.3.21-11 には、方式①と方式②を適用した場合についてその効果を比較して示している。図の通り、グラフの赤い部分がマルチパスであり、物体形状以上の広がりがあり、処理適用後の青い部分で適切な物体形状が抽出できている。尚、図中の右側は、処理適用後の物体検出の様子を示したものであり、処理適用前の図 4.3.2.1-9 から改善されていることが分かる。

・クラスタリングⅡ

クラスタリングⅠにも説明したように、バイクとのすり抜け等、物体角度方向に近接すると同一物としてクラスタリングされるので、距離、速度や方位等の詳細な分析をクラスタリングⅡで行い分離することで回避する。

速度や方位等の分析をする上で、特に考慮すべき事項について、図 4.3.2.1-12 を用いて説明する。例えば、ホイールベース 7m の車両で、レーダーから前輪までの距離が 15m 位置では、ドップラー速度の差異として $V_{d1}/V_{d2} = 1.5$ 倍程度の開きがある。くわえて、設置時のレーダーと車両・車線の位置関係、バイクのすり抜けの場合等を考慮した設計を行う必要がある。前者の距離、速度や方位の関係については、各種実験を元にパラメータの最適化を実施し、距離、方位、速度の 3 次元データベースとして実装した。このデータベースを元に、クラスタリングⅠの反射点内に何台の車両が存在するかの分析を実施して最終形状を導いた。

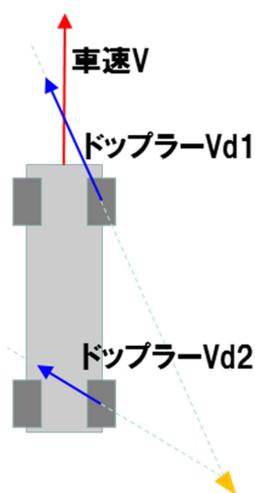


図 4.3.2.1-12 同一車両のドップラー速度に関する分析

尚、クラスタリングの結果を元にして、車両の位置を特定することになるが、通常はレーダーから最も近い距離の反射点に含まれる要素を代表値とする。

次に説明するトラッキングは、車両の通過軌跡情報を生成するための技術である。車両の通過数カウント機能実現を目的とした場合、トラッキング処理は途切れることのない車両通過軌跡を生成することが方式設計の指針となる。その方式設計では特に、予測位置の算出処理、検出点が得られない場合の補完処理、検出点がマッチング範囲内に複数存在する場合の選択手法が主なポイントである。その内、予測位置の算出について下記に説明する。

図 4.3.2.1-13 に予測位置の算出方法のイメージを示す。この図において、時刻 t の車両位置を $x[t]$ 、車両速度を $v[t]$ 、時刻 t の予測位置を $x'[t]$ とする。 $x'[t]$ は時刻 $t-1$ の車両位置から、式 $x'[t] = x[t-1] + v[t-1] \cdot \Delta t$ により求める。ただし、速度ベクトル $v[t-1]$ については、ドップラー速度値と、 $t-1$ までの複数の軌跡情報を使用して算出している。

具体的には、 $t-1$ におけるドップラー速度 $vd[t-1]$ を、 $t-1$ までの検出点群から得た近似直線に逆射影させた速度ベクトルを $v[t-1]$ とした。ミリ波レーダーは方位方向の分解能が相対的に低いため、複数の過去の検出点から移動方向情報を生成することで方位方向の誤差影響を小さくし、それに対してより高い分解能が得られるドップラー速度値を合わせることでより正確な予測位置を求める。求められた予測位置 $x'[t]$ から一定の半径 r 以内に存在する検出点をその車両のものとしてマッチングさせ時刻 t の位置 $x[t]$ とする。

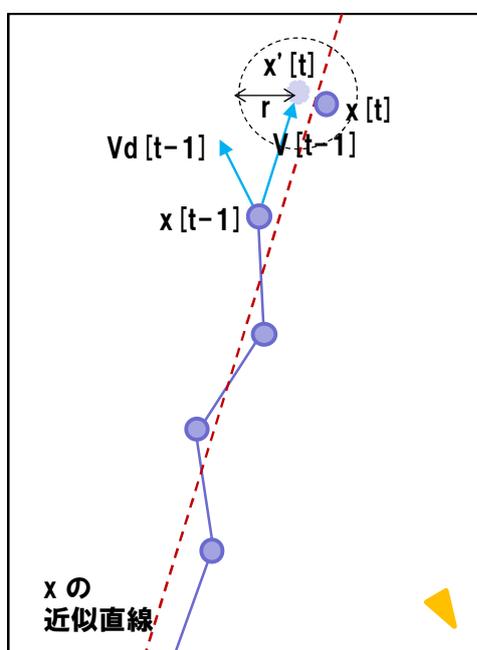


図 4.3.2.1-13 トラッキング処理のイメージ

通過数カウント処理は、トラッキングによる算出された軌跡情報を入力とする。図 4.3.2.1-14 にそのイメージを示す。検出対象領域内にあらかじめカウントラインを定義し、フレーム間においてカウントラインを通過した軌跡数を算出しその値をカウントライン上の通過数とする。また通過向きも合わせて記録し、カウントラインに対して順走方向、逆走方向別に通過数をカウントする。

また、車両の軌跡情報は、車両の種別や走行状況により軌跡の起点から終点の位置が異なるため、正確な車両通過数を生成するためには広域で軌跡と通過数を判断する必要がある。そのため、図 4.3.2.1-15 に示すようにカウントラインを複数設けカウント領域を定義し、そのカウント領域で生成される車両軌跡に対して車両通過を判定する。通過数のカウント値は、一定期間毎に複数のカウントラインにおける判定回数を集計することで生成される。

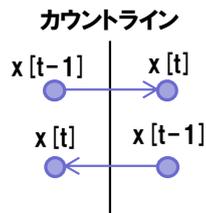


図 4.3.2.1-14 通過数カウント処理のイメージ



図 4.3.2.1-15 カウント対象領域およびカウントライン

4.3.2.2 検証アプリケーション実装及びフィールド実験

前述した車両の通過数をカウントするシステム性能を検証するために、車両の流量をリアルタイムに確認できるアプリケーションソフトウェアを作成した。車両の通過方向を含めて解析可能なそのアプリケーションの実行画面例を図 4.3.2.2-1 に示す。本画面上では、リアルタイムで車両の位置と通過軌跡等が確認可能である。また、過去にさかのぼって車両の通過流量をグラフ化する機能も備えている。

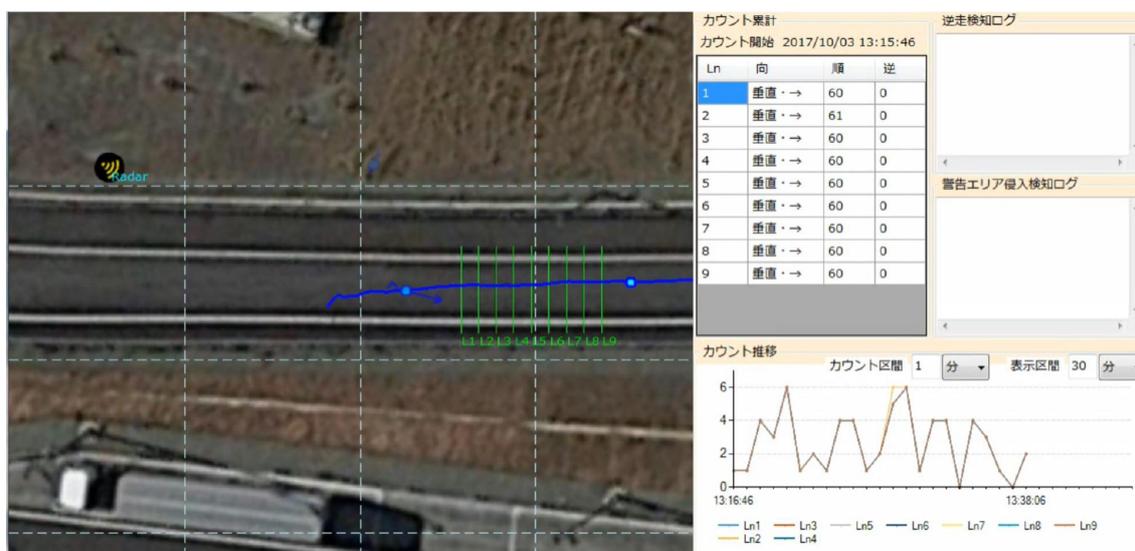


図 4.3.2.2-1 車両流量のカウントシステム画面例

(1) 一般地フィールドでの精度評価

前述した一般地のフィールド実験環境において、ミリ波レーダーは図 4.3.2.2-2 のような位置や角度の設定で路側に設置した。

車両カウントの精度評価は、データ取得期間中最も車両通過数が最大となった日と、台風、大雨等の気象条件を選定して実施した。評価方法としては、同時に取得したカメラの画像から通過車両を目視カウントし、開発した車両カウントシステムの出力結果との一対一比較するようにした。

定量的な評価データとしては、まず図 4.3.2.2-3 に通過台数が最も多かった日として、晴天条件の連続 24 時間データに対する解析結果を示す。

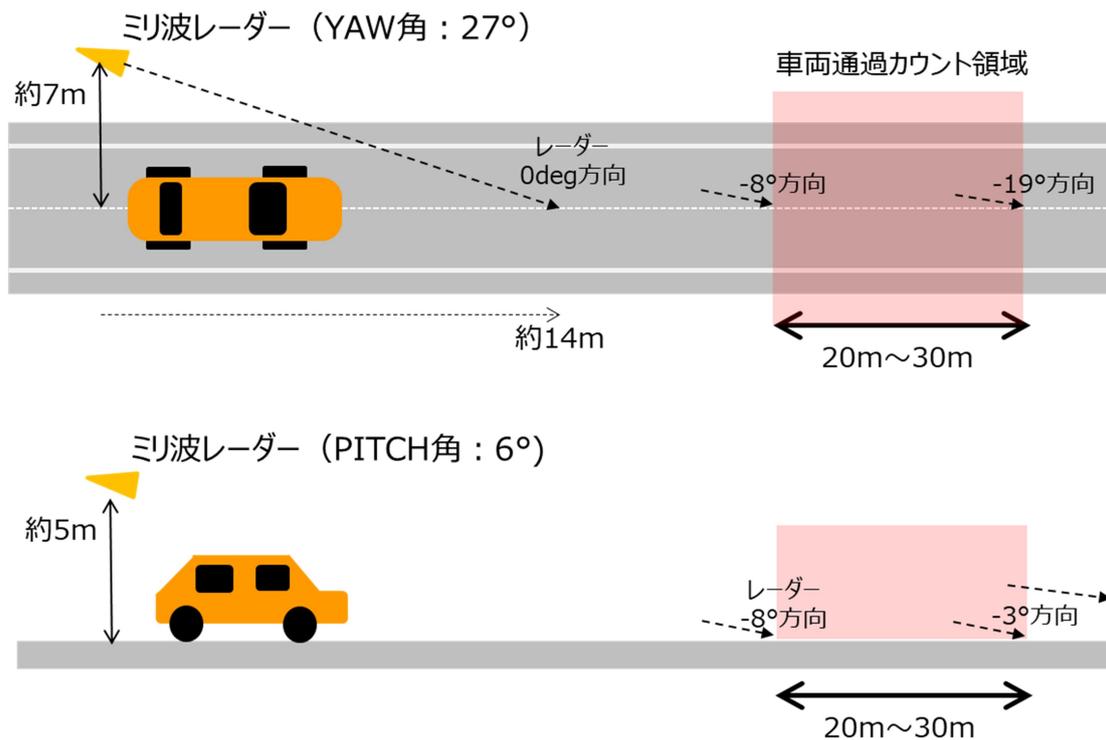
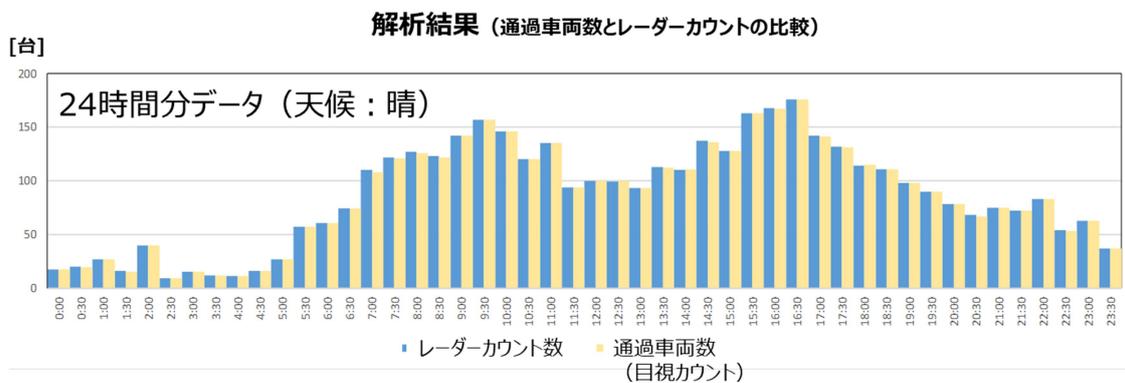


図 4.3.2.2-2 ミリ波レーダーの路側設置条件

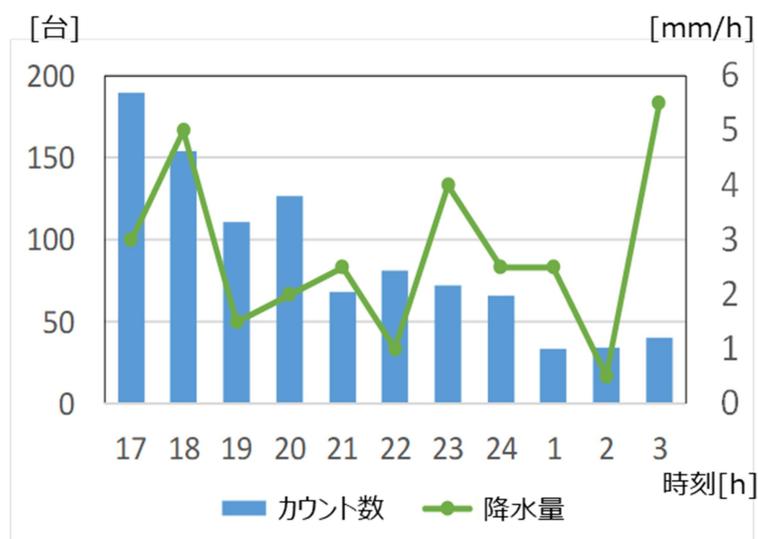


目視計測	79GHzレーダー計測	
24時間通過車両数: 4,171台	車両カウント: 4,182台 ※大型車の過カウント: 13台	未カウント: 2台 ※下図を参照
2分以上通過無: 計4時間27分	誤報時間: 0秒	

図 4.3.2.2-3 晴天 24 時間の評価結果

また、図 4.3.2.2-4 には連続した降雨条件であった雨天 11 時間分の評価結果を示しており、図 4.3.2.2-5 には台風が通過して暴風雨となり、特定時刻の平均降雨強度が 20mm/h を超えるような条件における計 8 時間分の評価結果を示す。

■ 雨天時



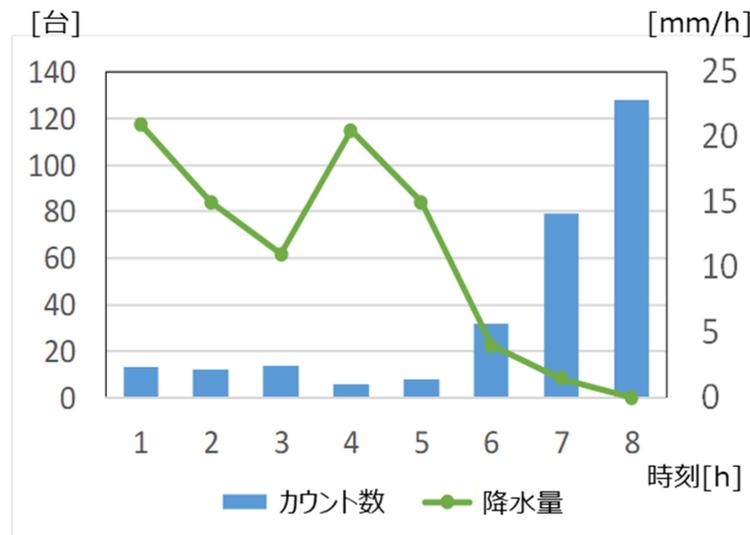
(a) 各測定時刻における通過カウント数と降水量

目視計測	79GHzレーダー計測	
11時間通過車両数: 974台	車両カウント: 973台 ※大型車の過カウント: 1台	未カウント: 1台
2分以上通過無: 計3時間41分	誤報時間: 0秒	

(b) 降雨条件におけるレーダーカウント精度解析

図 4.3.2.2-4 雨天 11 時間の評価結果

■ 台風の暴風雨中



(a) 各測定時刻における通過カウント数と降水量

目視計測	79GHzレーダー計測	
8時間通過車両数: 411台	車両カウント: 411台 ※大型車の過カウント: 2台	未カウント: 0台
2分以上通過無: 計5時間57分	誤報時間: 0秒	

(b) 降雨条件におけるレーダーカウント精度解析

図 4.3.2.2-5 暴風雨 8 時間の評価結果

以上の結果から分かるように、開発したミリ波レーダーによる車両カウントシステムは、99.6%以上の車両カウント精度を達成できている。(図 4.3.2.2-3 参照)

また、長時間の雨天や台風のような暴風雨においても、晴天時と変わらない実効性能であることも確認することができた。(図 4.3.2.2-4 及び図 4.3.2.2-5 参照)

尚、1台の大型車を2台とカウントしてしまう場合、2m以内の車間距離で走行する2台の車両を1台と見なしてしまう場合が散見された。

(2) 積雪寒冷地フィールドでの精度評価

前述した積雪寒冷地のフィールド実験環境においては、ミリ波レーダーを図 4.3.2.2-6 のような設定で路側に設置した。精度評価は、降雪時として、大雪、吹みぞれや吹雪といった気象条件の時間帯を選定して実施している。定量的な評価結果については、図 4.3.2.2-7 に降雪中の時間帯を含む連続 24 時間のデータを示している。また、図 4.3.2.2-8 の上図には大雪となった日の同じく 24 時間分のデータを示しており、図 4.3.2.2-8 の下図にはみぞれや吹雪の時間帯を含むレーダー検知精度の評価結果について示している。

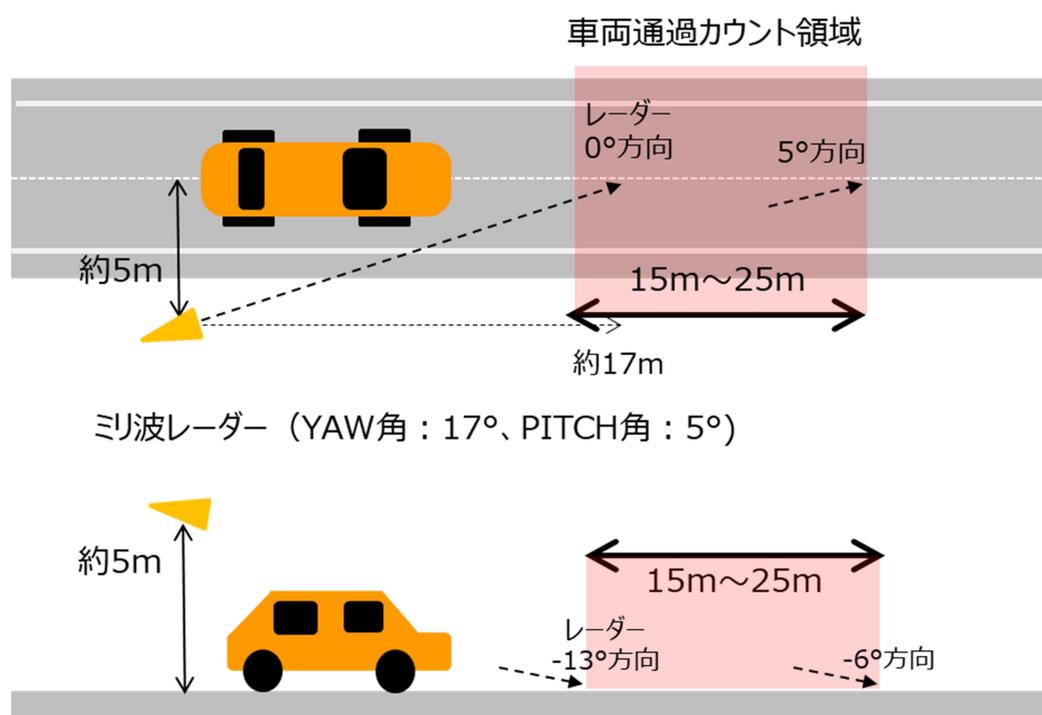
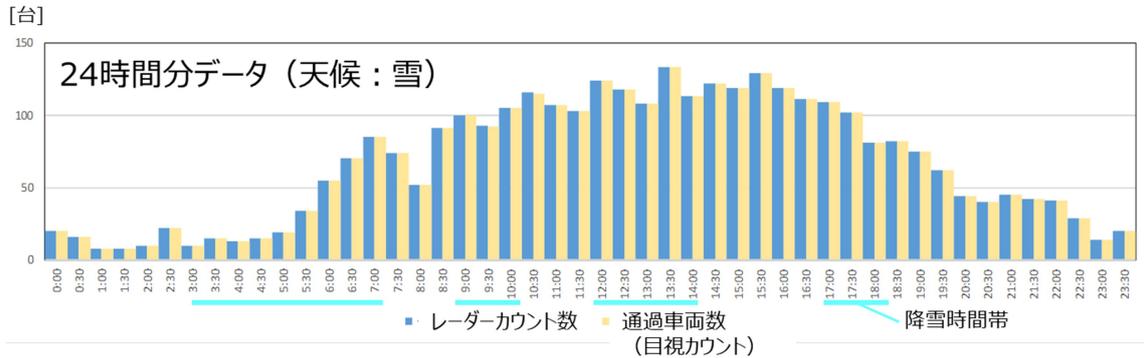


図 4.3.2.2-6 ミリ波レーダーの路側設置条件

図 4.3.2.2-7 及び図 4.3.2.2-8 の各評価結果が示すように、開発した車両カウントシステムは、積雪寒冷地の環境においても 99.8%以上という高い車両カウント精度を達成できている。

解析結果 (通過車両数とレーダーカウントの比較)



目視計測	79GHzレーダー計測	
24時間通過車両数: 3,221台	車両カウント: 3,223台 ※大型車の過カウント:2台	未カウント: 0台
2分以上通過無: 計6時間56分	誤報時間: 0秒	

図 4.3.2.2-7 降雪含む 24 時間の評価結果

気象条件: 大雪 (積雪量21cm/日)

目視計測	79GHzレーダー計測	
24時間通過車両数: 4,598台	車両カウント: 4,598台 ※大型車の過カウント:1台	未カウント: 1台
2分以上通過無: 計5時間0分	誤報時間: 0秒	

気象条件: みぞれ/吹雪 (積雪量8cm/日、最大風速13.7m)

目視計測	79GHzレーダー計測	
24時間通過車両数: 2,930台	車両カウント: 2,930台 ※大型車の過カウント:4台	未カウント: 0台
2分以上通過無: 計6時間10分	誤報時間: 0秒	

図 4.3.2.2-8 大雪・吹雪等含む各 24 時間の評価結果

尚、一般地フィールドでの結果と同様に、大型車両を2台と過カウントしてしまう場合や、2m以内の車間距離で走行する2台の車両を1台としてカウントしてしまい結果的に未カウントとなる場合が、合わせて約0.2%の割合として散見された。

このような誤カウントの発生は、大型車両の過検知抑圧が近接車両の分離性能とのトレードオフになることに起因している。つまり、トラックの過検知（過カウント）を抑えるようにパラメータを調整すると、近接する複数車両の未検知が発生し易くなる。

実際には、インフラレーダーを利用するアプリケーションに依って求められる性能要件が異なるため、必要に応じてパラメータを最適化することで対処できるものと考えている。

4.3.3. 路車協調実証向け実験システム構築

4.3.3.1 路側センサーのデータ統合実験システム

本システムでは、交差点等への設置を想定し、ターゲットの検知データを出力する79GHz帯レーダーセンサー等と、主に障害物に関する物標情報を出力するセンサー統合・制御装置で構成する。具体的なシステムイメージを図4.3.3.1-1に示す。交差点内に進入する車両等（図4.3.3.1-1(a)）において、交差点に設置されたインフラレーダーが走査し（図4.3.3.1-1(b)）、検知した車両の位置と速度等の情報を、センサー統合・制御装置を設置した交差点の対角に向けて無線伝送を行う（図4.3.3.1-1(c)）。その対角側も同様に設置されたインフラレーダーが走査し（図4.3.3.1-1(d)）、検知した両情報をセンサー統合・制御装置で物標情報レベルの統合処理をリアルタイムに実施する。

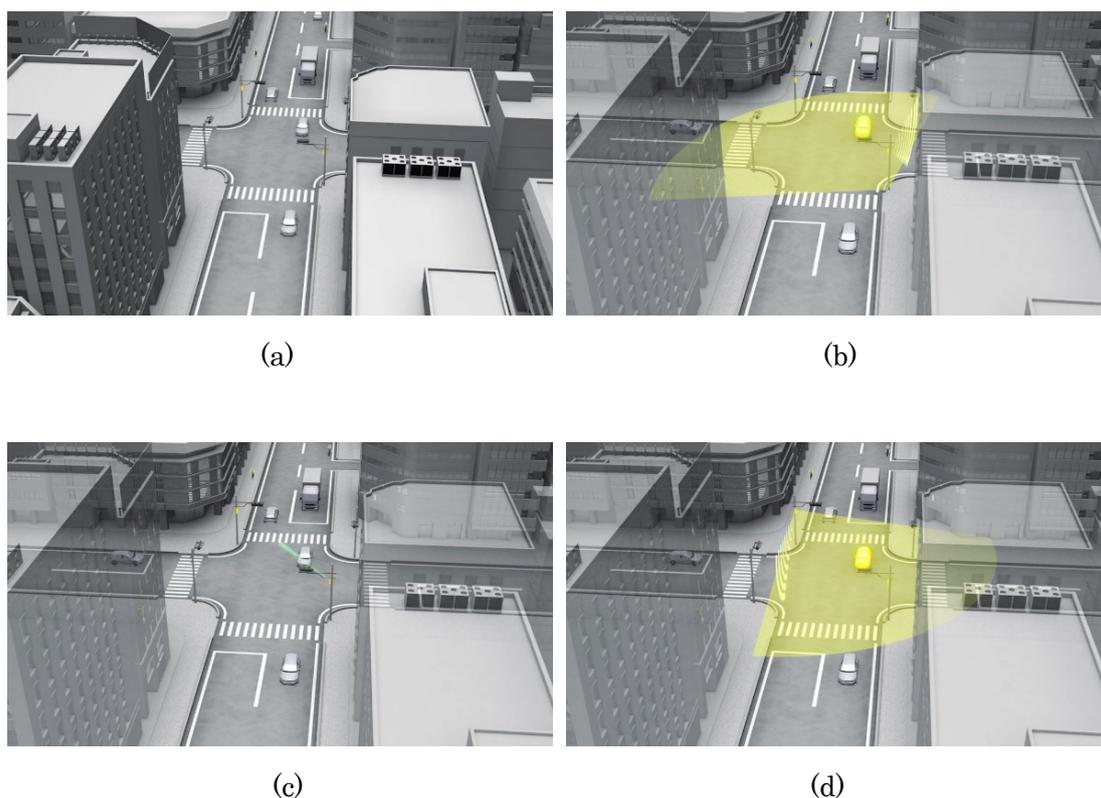


図 4.3.3.1-1 路側センサーデータ統合システムのイメージ

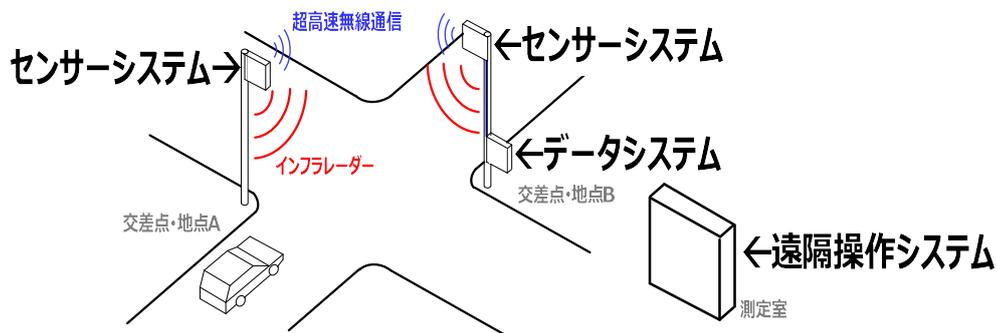


図 4.3.3.1-2 データ統合実験システムの全体構成

図 4.3.3.1-1 のシステムイメージに基づいて構築した、路車協調実証向けデータ統合実験システムの全体構成を図 4.3.3.1-2 に示す。本システムは、交差点に設置された 79GHz 帯インフラレーダーによる検知データ、並びに検証用カメラによる撮影データを、離れた地点へ同時、かつリアルタイムに無線伝送する「センサーシステム」、センサーシステムの大規模なリアルタイムデータを集約・統合する「データシステム」、そして各システム内の処理状態や機器制御等を遠隔にて実施する「遠隔監視システム」のシステムで構成する。さらに各システムの配下は、下記に示すように、複数の装置で構成する（図 4.3.3.1-3）。

- センサーシステム : 79GHz 帯インフラレーダーの検知、制御を行う「センサー装置」、インフラレーダーの検知処理と併せて存在する検知対象物を撮影、記録を行う「映像撮影装置」、そして検知データ、撮影データを超高速無線モジュールにて無線伝送を行う「無線伝送装置」で構成
- データシステム : 離れた地点のセンサーシステム（図 4.3.3.1-2 の地点 A）のデータと、隣接するセンサーシステム（地点 B）のデータを、センサーフュージョンを目的にデータ集約を行う「データシステム」で構成
- 遠隔操作システム : 交差点に分散配置された各システム内の処理状態や制御等を、離れた地点に待機する測定者が上記無線伝送装置とは異なる無線を用いて集中監視・制御を行う「遠隔操作装置」で構成

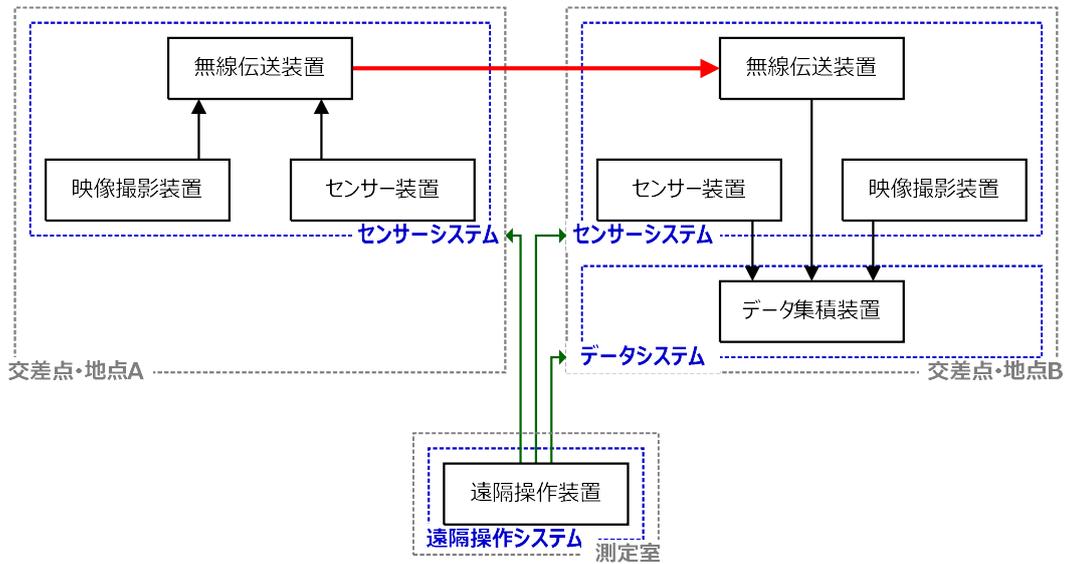


図 4.3.3.1-3 データ統合実験システムの機能構成

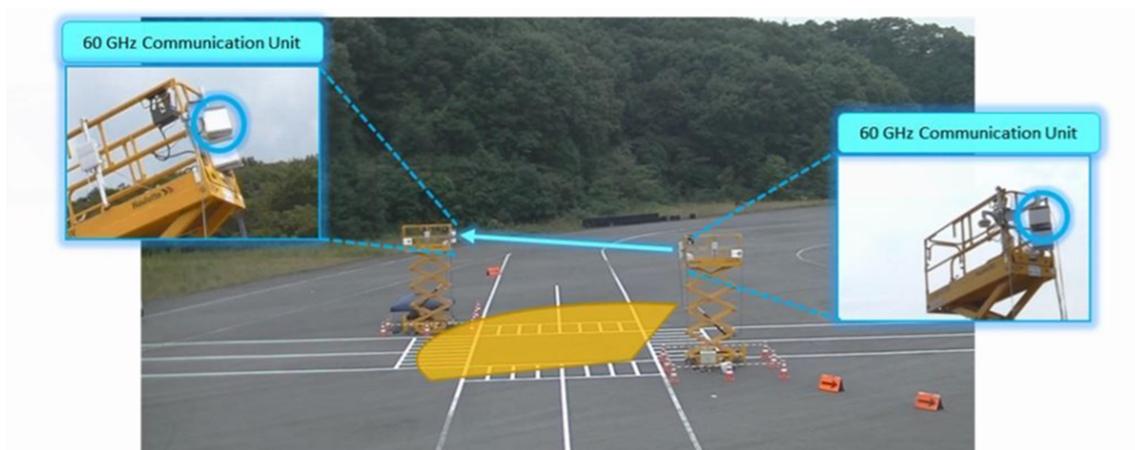
尚、センサーシステムの無線伝送装置において、無線方式は高速・大容量通信が可能な 60GHz 帯ミリ波通信 (WiGig) を利用する。また、図 4.3.3.1-4 の写真は、本実験システムの一部であるが、屋外環境下での実証実験を想定し、屋外の幅広い温度範囲や降雨・降雪等の気象状況、さらに様々な外乱に対しても破損等しない、耐熱性、防水性、耐久性を有した格納筐体を採用する。



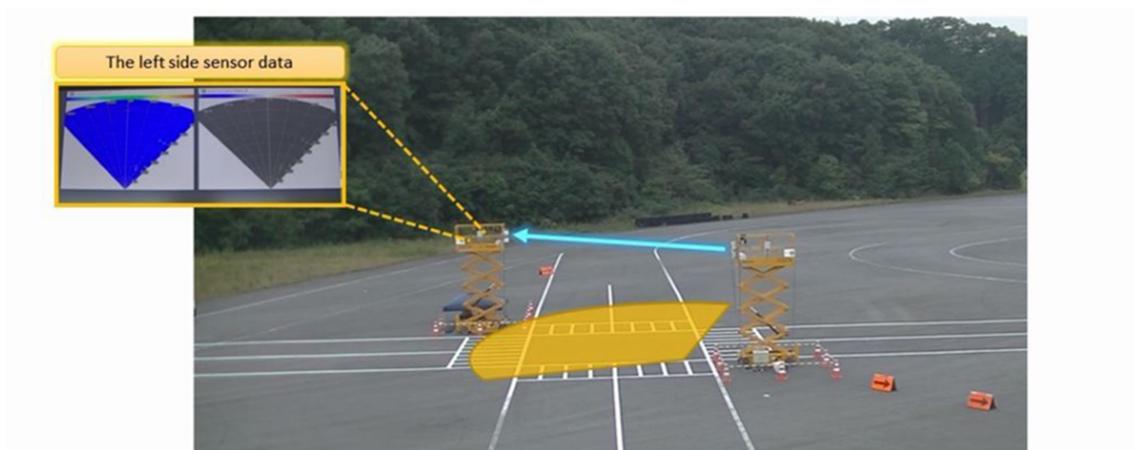
図 4.3.3.1-4 データ統合実験システムの外観

本実験システムを用いて、模擬交差点の環境下における機能検証のための車両走行実験を実施した。本実験の実施する試験設備としては、株式会社モビリティランド所有のツインリンクもてぎ自動車走行用コースを利用した

図 4.3.3.1-5 に示すように、コース上に車線幅 4m の 2 車線が交差する 2x2 交差点を模擬作成して、信号機の支柱相当のリフターでセンサー装置（インフラレーダー）、並びに無線伝送装置の各無線ユニットを取り付ける。高さ 5m のインフラレーダーで交差点内を走査し、検知した車両の位置と速度等の情報が対向設置する無線伝送装置へ向けて無線送信される（図 4.3.3.1-5 (a)）。無線受信側もインフラレーダーで交差点内を走査し、両データをリフター配下に設置したセンサー統合・制御装置で物標情報レベルの統合処理をリアルタイムに実施する（図 4.3.3-5 (b)）。



(a)



(b)

図 4.3.3.1-5 複数レーダーデータ統合の実験イメージ

図 4.3.3.1-6 の写真は、複数の縦列走行車両が交差点を通過時のリアルタイム処理されたデータ（左上の扇形グラフ）のスナップショットである。青色背景が電力プロフィール、灰色背景がドップラープロフィールであり、交差点内の通過車両に対して対角配置のインフラレーダーがリアルタイムに検知処理を実行する（黄色丸）。また、図 4.3.3.1-7 は、送信側にあたるレーダー（青色枠）が検知したデータを、対角側で表示したレーダーの電力およびドップラーのレーダープロフィールを示す。該当レーダーの検知範囲内に通過する車両 A,B,C に対する検知データをリアルタイムに伝送する。以上のように、複数の 79GHz 帯インフラレーダー間を 60GHz 帯ミリ波通信によりデータリンクを張る構成で、後述する複数レーダーデータ統合処理技術の実証に向けたデータ統合実験システムとしての機能検証を完了した。

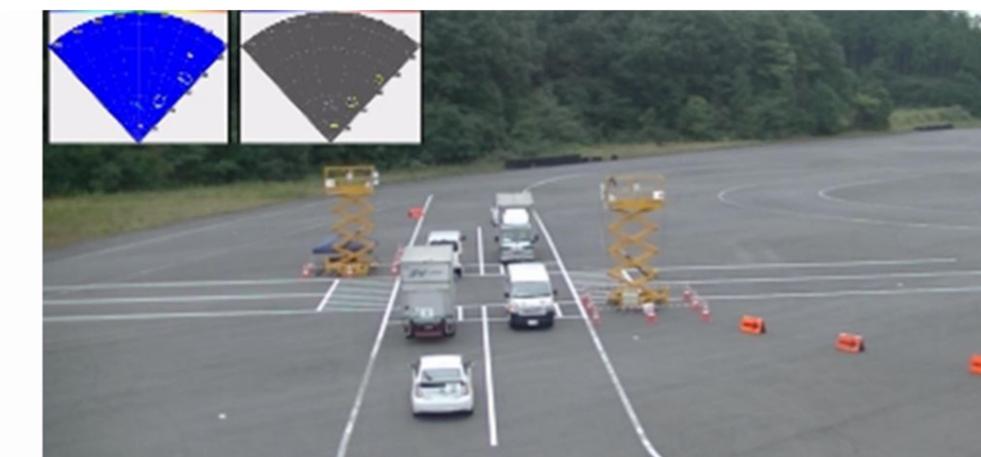


図 4.3.3.1-6 縦列走行車両通過時のスナップショットデータ例

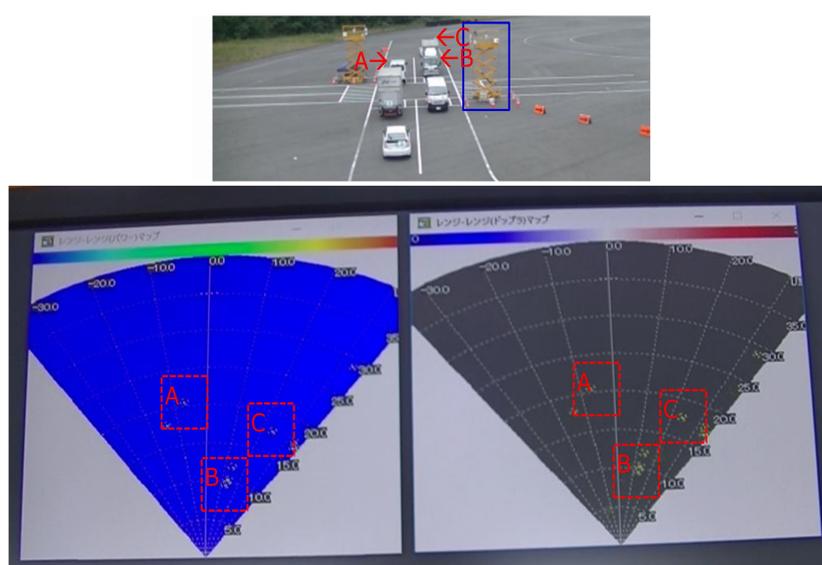


図 4.3.3.1-7 対角レーダーからの伝送データ

4.3.3.2 複数レーダーデータの統合処理技術開発

(1) ミリ波レーダーデータに対する多層グリッドマップ生成

自動走行で活用するダイナミックマップを実現するためには、道路空間に点在するセンサーの取得情報を統一した仕組みで管理して、リアルタイムに更新していく必要がある。

ここで、各種センサーの測定データを共有することが必要となるが、それを困難にする原因の1つとして、データの座標系及び特徴属性がある。例えば、ミリ波レーダーが出力する生の測定データがレーダー位置を原点とした極座標系における反射電力値やドップラー周波数シフトに基づく速度値を表すため、レーダー周辺における車両、歩行者、およびその他センサーとの間でこれらの情報を簡単に共有できない。つまり、ミリ波レーダーの生データは、周辺環境をモデリングする情報としては共通性に欠けている。もう1つの原因はデータ量であり、特に生データの容量が大きいため、転送に必要な通信帯域および処理に必要な計算時間が大きい。ダイナミックマップを生成する際に、データに含まれる情報の種別だけでなくデータの容量についてもトレードオフとして考慮する必要がある。

つまり、センサーデータを共有し易くするためには、データの抽象化と表現の統一化が必要である。そのための周辺環境モデルとしては、占有グリッドマップ (Occupancy Grid Map (OGM)) が広く利用されている。図 4.3.3.2-1 にグリッドマップとレーダー作用範囲の関係を示す。

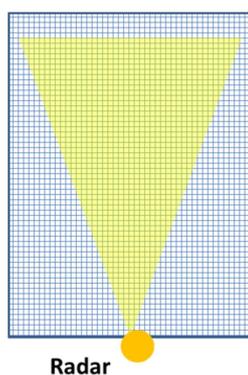


図 4.3.3.2-1 グリッドマップとレーダー作用範囲の関係

図 4.3.3.2-1 に示すように、レーダーの作用範囲（黄色部分）の2次元空間をグリッド状に分割し、各グリッドにおける物体の占有確率を時系列に求める。グリッドマップを構成するグリッドセルについて形状を限定する必要はないが、通常正方形で構成する。

グリッドセルのサイズを小さく設定すると、グリッドマップ全体のデータ量がグリッドセル数に比例し大きくなる。ただし、実際には対象物体が占有しているグリッドセルの情報のみを更新すればよいので、占有する割合が数百分の1となるとデータ量も大きく減少する。また、グリッドセルの位置や形状はレーダー設置条件と無関係に設定するため、グリッドセルの情報を周辺車両、歩行者、およびその他センサーとの間で共有しやすい。

グリッドセルの値に関しても特に制限がない。つまり、レーダー測定値の反射電力やドップラー速度をグリッドセル値にすることも可能である。ただし、周辺環境モデルとして利用するためには、グリッドセル値でより抽象的な環境特性を表す必要がある。OGMでは、セル値が物体存在の尤度を示す占有確率を表す。具体的には、1→occupied state、0→free state、0.5→unknown、のようにセル値が1に近づくほど物体存在の可能性が高く、0に近づくほどフリースペースの可能性が高くなる。物体存在の状況を判定できない場合、例えばレーダー作用範囲外のセルといった場合には、セル値を0.5に設定する。

また、グリッドセルに複数の値を持っている場合は、多層グリッドマップを生成し利用できる。図4.3.3.2-2に多層グリッドマップのイメージを示す。ここでは、物体の移動特性を検証するため、3層のOGMを生成する。具体的に、移動物体を対象とするDynamic Grid Map (DGM)、静止物体を対象とするStatic Grid Map (SGM)、一時停止物体を対象とするPause Grid Map (PGM)を生成する。

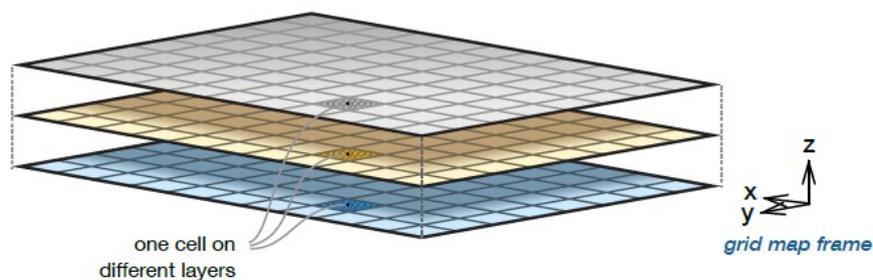


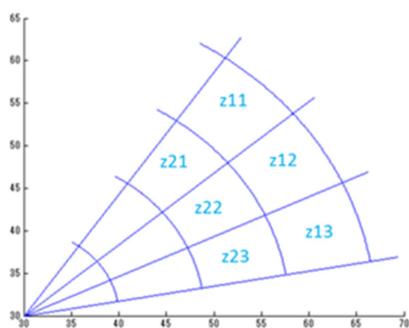
図 4.3.3.2-2 多層グリッドマップのイメージ

レーダーが測定するデータのセルは、レーダー位置を原点とした極座標系における扇型の形状となる。つまり、正方形のグリッドマップセルの値を生成するためには、座標変換を行う必要がある。以下では、セル座標の変換方法について具体的に説明する。

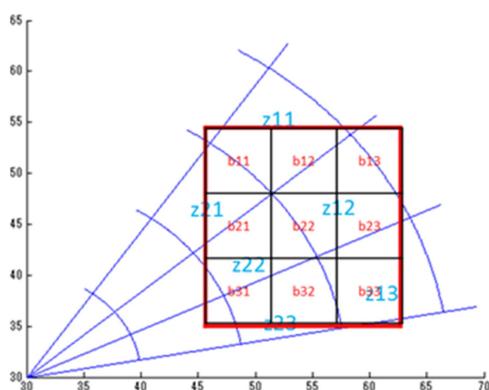
図 4.3.3.2-3 (a) に1つのグリッドマップセル ($m_{x,y}$ で表記) を示し、このグリッドマップセルを更に9つのサブセル $b_{11} \sim b_{33}$ に分割する。図 (b) に $m_{x,y}$ に関連するレーダー測定セル $z_{11} \sim z_{23}$ を示している。図 (c) にグリッドマップセル $m_{x,y}$ とレーダー測定セルの相対位置関係を示す。



(a) グリッドマップセル $m_{x,y}$ のサブセル分割



(b) 関連するレーダー測定セル



(c) 相対位置関係

図 4.3.3.2-3 レーダー測定セルからダイナミックマップセルへの座標変換方法

グリッドマップセル $m_{x,y}$ の値 (b で表記) を求める際には、はじめに各サブセルの値を求める。サブセルの値は、サブセルの中心位置が所在する関連レーダー測定セルの値とする。例えば、図 4.3.3.2-3 に示す場合には、各サブセルの値は下記のようになり、 z_{ij} は関連するレーダー測定セルの値を表す。次に、全サブセル $b_{11} \sim b_{33}$ の平均値を求め、グリッドマップセル $m_{x,y}$ の値とする。

$$b_{11}=z_{11}, \quad b_{12}=z_{11}, \quad b_{13}=z_{12},$$

$$b_{21}=z_{22}, \quad b_{22}=z_{12}, \quad b_{23}=z_{12},$$

$$b_{31}=z_{23}, \quad b_{32}=z_{23}, \quad b_{33}=z_{13}$$

$$b = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{i,j}$$

ただし、上記演算の結果として得られるセル値は、反射電力またはドップラー速度を表しており、OGM を生成するためは、上記セル値に基づき占有確率を求める。

Dynamic Grid Map (DGM) は、移動物体を対象とするグリッドマップである。

移動物体の検出処理が、ミリ波レーダー内部の信号処理に委ねられるとした場合、レーダー側で移動物体に対応するレーダー測定セルを抽出して、反射電力値とドップラー速度値を出力する。そして、前述した座標変換処理によって、移動物体に対応するグリッドマップセルの値を確定した上で、反射電力とドップラー速度の情報を利用して DGM における物体存在の尤度を示す占有確率を算出する。物体存在占有確率の具体的な算出手順を、以下に示す。

はじめに、グリッドマップセルの反射電力値が指定する閾値以上であるかを条件として、物体が存在するか否かを判定する。ここで、反射電力値の指定閾値 1 は、実測データ等により決定される。

次に、物体が存在すると判定された場合は、ドップラー速度に関する現在の測定値 (v で表記) を用いて、以下の各式により占有確率を算出する。ここで、 $p_d(v)$ は v に対応する物体存在の占有確率、 α_v は変動係数、 V_0 は速度中間値である。 α_v と V_0 は、指定する速度閾値 V_1 と V_2 ($V_2 > V_1$)、および V_1 と V_2 それぞれに対応する指定占有確率 P_{d1} と P_{d2} ($P_{d2} > P_{d1}$) を用いて算出する。パラメータ V_1 と V_2 、及び P_{d1} と P_{d2} の最適値は実測データ等に基づいて調整する。

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad \alpha_v = 2 \times \ln\left(\frac{P_{d2}}{P_{d1}}\right) \times \frac{1}{V_2 - V_1}, \quad p_d(v) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha_v(v - V_0)}}$$

Static Grid Map (SGM) は、静止物体を対象とするグリッドマップである。例えば、周辺環境に存在する背景物体として建造物等も静止物体に含まれる。

静止物体の検出処理は、ミリ波レーダー内部の信号処理に委ねられるとした場合、レーダー側で静止物体に対応するレーダー測定セルを抽出して、反射電力値とドップラー速度値を出力する。そして、前述した座標変換処理によって、静止物体に対応するグリッドマップセルの値を確定した上で、反射電力とドップラー速度の情報を利用して SGM おける物体存在の尤度を示す占有確率を算出する。物体存在占有確率の具体的な算出手順を、以下に示す。

はじめに、グリッドマップセルの反射電力値が指定する閾値以上であり、且つドップラー速度値が指定する閾値以下を条件として、物体が存在するか否かを判定する。ここで、反射電力値の指定閾値 2 及びドップラー速度値の指定閾値 3 は、実測データ等により決定される。

次に、静止物体が存在する場合、反射電力に関する現在の測定値 (p で表記) に基づいて、以下の各式により占有確率を算出する。ここで、 $p_a(p)$ は p に依存する物体存在の尤度、 α_p は変動係数、 P_0 は反射電力中間値である。 α_p と P_0 は、指定反射電力閾値 P_1 と P_2 ($P_2 > P_1$)、および P_1 と P_2 それぞれに対応する指定尤度 P_{a1} と P_{a2} ($P_{a2} > P_{a1}$) を用いて算出する。パラメータ P_1 と P_2 、及び P_{a1} と P_{a2} の最適値は実測データ等に基づいて調整する。

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2}, \quad \alpha_p = 2 \times \ln\left(\frac{P_{a2}}{P_{a1}}\right) \times \frac{1}{P_2 - P_1}, \quad p_a(p) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha_p(p - P_0)}}$$

さらに、上記算出した尤度を再帰フィルタ (Binary Bayes Filter) に代入し、物体存在の占有確率を時系列に更新していく。具体的な計算式を以下に示す。

ここで、 $p(m_{x,y}|z_t)$ はグリッドマップセル $m_{x,y}$ の t 時刻の事後確率を表し、 z_t は t 時刻の測定値を表す。 $l_{x,y}^t$ は時刻 1~ t までの統合占有確率 $p(m_{x,y}|z_{1:t})$ の log-odds 表示方式で、 $l_{x,y}^{t-1}$ は時刻 1~ $t-1$ までの統合占有確率であり、 $t=0$ 時刻の $l_{x,y}^0$ を 0 とする。

$$p(m_{x,y}|z_t) = p_a, \quad l_{x,y}^t = \log \left[\frac{p(m_{x,y}|z_t)}{1 - p(m_{x,y}|z_t)} \right] + l_{x,y}^{t-1}$$

この $l_{x,y}^t$ を用いて、物体存在占有確率を下記数式で算出する。ここで、 $p^t(m_{x,y})$ はグリッドマップセル $m_{x,y}$ における現時刻 t の占有確率である。

$$p^t(m_{x,y}) = \frac{\exp(l_{x,y}^t)}{1 + \exp(l_{x,y}^t)}$$

Pause Grid Map (PGM) は、一時停止物体を対象とするグリッドマップである。例えば、交差点における信号待ち車両等が一時停止物体に含まれる。

PGMにおける物体存在占有確率は、前述した DGM 及び SGM に基づいて、算出する。一時停止物体が存在するか否かの判定は、以下に示す条件 1 と条件 2 が同時に成立した場合とする。尚、PGM の占有確率は、対応する SGM の占有確率を設定する。

条件1 - SGM に対する背景差分判定:

SGM において、現時刻 t 、および指定時間間隔 T 以前時刻 $t-T$ の物体存在占有確率に対し、下記式が満たされた場合は条件1が成立する。ただし、 $p^t(m_{x,y})$ は、SGM における占有確率であり、指定閾値4は実測データ等により決定される。

$$p^t(m_{x,y}) - p^{t-T}(m_{x,y}) > \text{指定閾値4}$$

条件2 - DGM に対する移動から停止状態への遷移判定:

DGM において、現時刻 t 、および指定時間間隔 T 以前時刻 $t-T$ の物体存在占有確率に対し、下記式が満たされた場合は条件2が成立する。ただし、 $p_d^x(m_{x,y})$ は、DGM における占有確率であり、 $\text{Max}()$ と $\text{Min}()$ は指定時間間隔内の最大値と最小値を表す。指定閾値5は実測データ等により決定される。

$$\text{Max}_{t-T \leq x \leq t}(p_d^x(m_{x,y})) - \text{Min}_{t-T \leq x \leq t}(p_d^x(m_{x,y})) > \text{指定閾値5}$$

(2) グリッドマップ上の統合クラスタリングと追従処理

クラスタリングの手法としては、汎用的な DB (Density Based) -SCAN 手法の適用を検討する。DB-SCAN 手法のイメージを図 4.3.3.2-5 に示す。DB-SCAN は、データベースまたは観測データの点集合に対し、分布密度に基づきクラスタに属する点を探索しクラスタを形成する。クラスタを形成する際に、主に2つのパラメータを指定する必要がある。

1つは近傍の大きさを決める半径 (ϵ で表記) であり、もう1つは上記近傍に属する最少近傍点数を指定する近傍点数閾値 (minPts で表記) である。 ϵ はクラスタを形成する際に近傍点か否かの判定に利用する。 minPts は近傍内のデータ密度が十分かどうかの判定に利用する。また、クラスタに属する点を探索する際に、各点を **core point**、**border point**、および **outlier point** のいずれかに分類する。

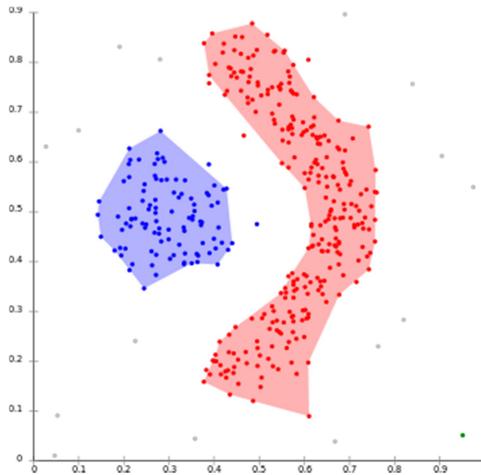


図 4.3.3.2-5 DBSCAN 手法のイメージ

下記の図 4.3.3.2-6 を用いて、DB-SCAN における基本的なクラスタ属性の判定処理プロセスについて説明する。この図は、 $\text{minPts} = 4$ とした場合の例であり、A 点およびその他の赤い点が **core point** となる。これら **core point** では、自らを中心点とした半径 ϵ の円が囲んでいる領域に少なくとも 4 つの点が含まれている。これらの点は互いに到達可能であり、単一のクラスタを形成できるとものとする。B 点および C 点は **core point** ではないが、A 点から他の **core point** を介して到達可能であり、それゆえこのクラスタに属す **border point** となる。尚、N 点は、**core point** ではなく密度到達可能な点でもないので **outlier point** となる。

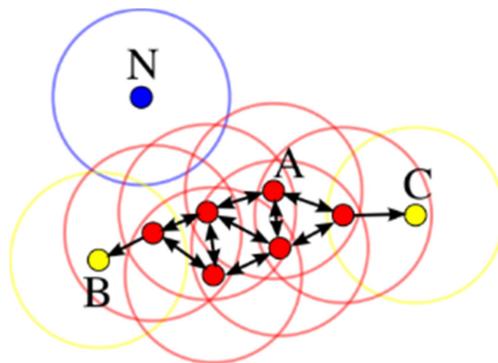


図 4.3.3.2-6 DBSCAN におけるクラスタ属性判定

以降では、統一化されたグリッドマップを用いて、複数レーダーの情報統合について検討した内容を説明している。

グリッドマップセルの位置や形状が各レーダーの設置条件と無関係なため、グリッドマップにおける統合処理は、共通のグリッドマップセルレベルで実行できるようになる。

図 4.3.3.2-7 に示すように、グリッドマップは各レーダーの作用範囲（黄色と青色の部分）の 2 次元空間をグリッド状に分割し、各グリッドセルにおける物体の占有確率を時系列に求める。レーダーの作用範囲に重なる部分が存在するため、対応グリッドマップセルの値を算出する際に、両方のレーダー測定値をフュージョンして確定する。

単独レーダーの場合と同様に、複数レーダーに対しても、DGM、SGM、PGM の 3 層グリッドマップを生成する。

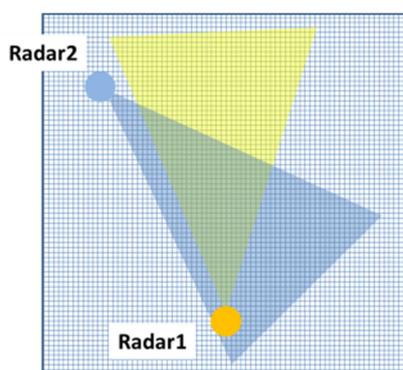


図 4.3.3.2-7 グリッドマップと複数レーダーの作用範囲

複数レーダー間の時間同期を確立するため、各レーダーのシステム時間（信号処理ソフトを実装した PC 時刻）は GPS 時刻に同期させる。次に、各レーダーの信号処理時間のばらつきに対し、1つのレーダーをマスターとして、そのレーダーのデータ更新タイミングをフュージョン処理のトリガーとする。マスター以外のレーダーに対しては、バッファに保存された最新データを利用する。

図 4.3.3.2-8 に時間同期処理のシーケンス図を示す。Radar 1 がマスターであり、フュージョン処理は Radar 1 のデータ更新タイミングに合わされる。Radar 2 は、測定データを指定バッファに保存、更新するが、フュージョン処理の実行時には、指定バッファから直近のデータを取り出して利用する。

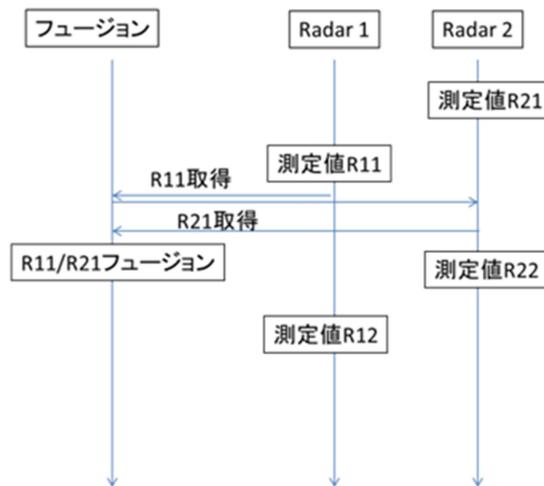


図 4.3.3.2-8 レーダー間の時間同期

OGM のセル値が確率を表すように統一化されているため、セルレベルの統合は簡単に実現できる。DGM、SGM、PGM のいずれに対しても、下記式で統合後のセル値を算出する。ここで、 $p_1(m_{x,y})$ と $p_2(m_{x,y})$ はセル $m_{x,y}$ に対しレーダー1 とレーダー2 それぞれの占有確率であり、 $p_f(m_{x,y})$ は統合後の占有確率である。

$$p_f(m_{x,y}) = \max(p_1(m_{x,y}), p_2(m_{x,y}))$$

次に、統合後の占有確率に対して、前述した DB-SCAN を適用する。つまり、両方のレーダーデータが存在する中で、フュージョン処理とクラスタリング処理を同時に実行し、統合後のクラスタリング処理結果に従って物体の枠を確定する。

さらに、クラスタリングにより確定された物体に対して、追従処理を実行する。追従される物体には、存在が継続していることを示す ID を付与する。ID 管理のイメージを図 4.3.3.2-9 に示す。起動時はキューに 0~511 の ID を昇順に格納し、追従できたクラスタリング物体に対して、順番に ID を付与していく。追従が途切れたら、該当する ID を解放して、キューに戻す。起動時に格納した ID を全て付与した後は、解放された順に ID を付与する。

追従処理におけるアソシエーションは、移動物体のクラスタと一時停止物体のクラスタの両方を対象とする。前フレームと現フレームのクラスタとの間のユークリッド距離が指定する閾値以下で、且つ最も距離が近いクラスタをペアリングする。ここで、距離の算出に使用するクラスタの座標は、クラスタに属する移動物体存在確率がゼロでないセル集合の中点とする。アソシエーションのイメージを図 4.3.3.2-10 に示す。

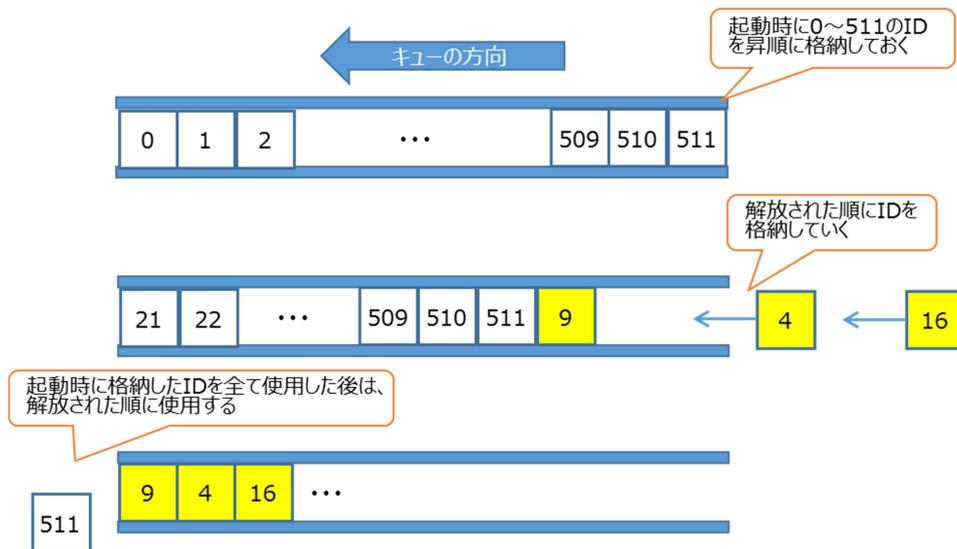


図 4.3.3.2-9 追従処理における ID 管理のイメージ

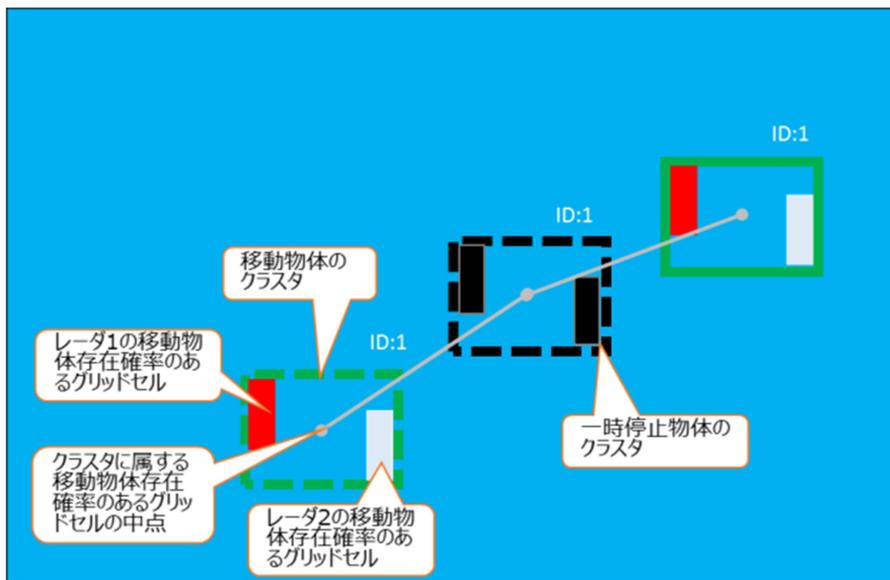


図 4.3.3.2-10 追従処理におけるアソシエーションのイメージ

(3) 複数レーダーデータの統合グリッドマップ検証実験

本節では、複数レーダーデータの統合グリッドマップ生成に関する検証実験の結果を報告する。

79GHz レーダー及び関連のレーダー信号処理ソフトに対して、新規開発したグリッドマップ生成ソフトを追加する形で、実験システムへ実装している。特定のレーダーに限定しないため、レーダー信号処理ソフトとグリッドマップ生成ソフトの間に汎用的な UDP 通信機能を入れ込みフレキシブルな構成を採用した。図 4.3.3.2-11 に実験システムの処理フローを示す。

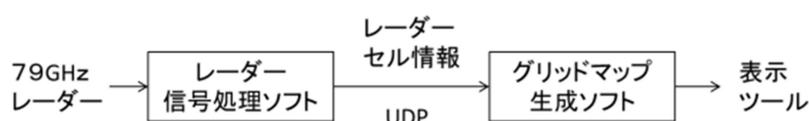


図 4.3.3.2-11 実験システムの処理フロー

レーダー信号処理ソフトは、全てのレーダー測定セルに対して反射電力値とドップラー速度値を取得する。動作モードの設定によって、レーダー信号処理ソフトはレーダー測定セルに対するフィルタリングを実行する場合もある。ここで、フィルタリングというのは、物体が存在しないと判定できるセルを後段への伝送する対象から外すような処理となる。

レーダー信号処理ソフトとグリッドマップ生成ソフトの間では UDP 通信を利用して、レーダー測定セルの関連情報が転送される。

グリッドマップ生成ソフトは、座標変換、Dynamic Grid Map 生成、Static Grid Map 生成、Pause Grid Map 生成を実施する。

図 4.3.3.2-12 には、実証実験に撮影したデータ表示画面の一例を示す。グリッドマップ生成ソフトは、複数レーダーのデータを統合するフュージョンにも対応している。複数レーダーから UDP 通信経由でレーダーセルの情報を受信し、それぞれのレーダーに対する座標変換を行い、共通のグリッドマップを生成する。グリッドマップのセルに対してフュージョン処理とクラスタリング処理を同時に実行する。

図 4.3.3.2-13 には、複数レーダーの統合クラスタリングに関する検証実験でのレーダーの設置状況を示す。本実験環境では、Radar1 と Radar2 を交差点の対角方向に設置し、交差点を通過する車両または交差点を横断する歩行者を対象とした技術検証を行った。

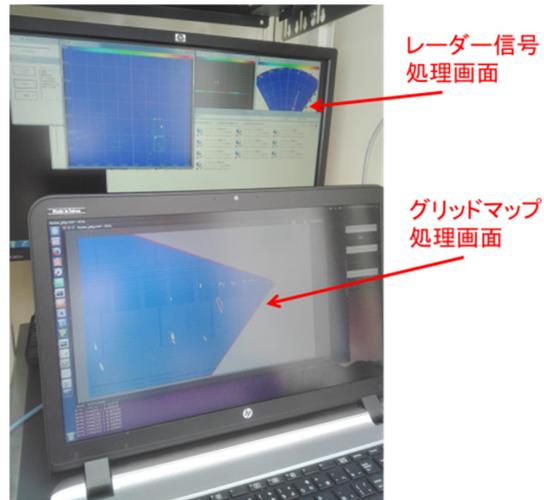


図 4.3.3.2-12 実験システムの表示画面



図 4.3.3.2-13 統合クラスタリング実験時のレーダー設置状況

・実験 1- 単独車両

基本シナリオとして、1 台の車両（セダン）が単独で交差点を通過する場合のグリッドマップ生成について検証する。

図 4.3.3.2-14 に地上設置のカメラ映像、図 4.3.3.2-15 に Radar1 の測定値のみから生成したグリッドマップ、図 4.3.3.2-16 に Radar2 の測定値のみから生成したグリッドマップ、図 4.3.3.2-17 に Radar1 と Radar2 のフュージョンから生成したグリッドマップをそれぞれ示す。

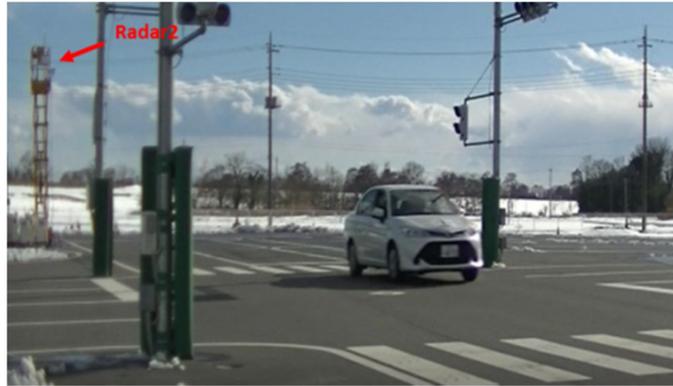
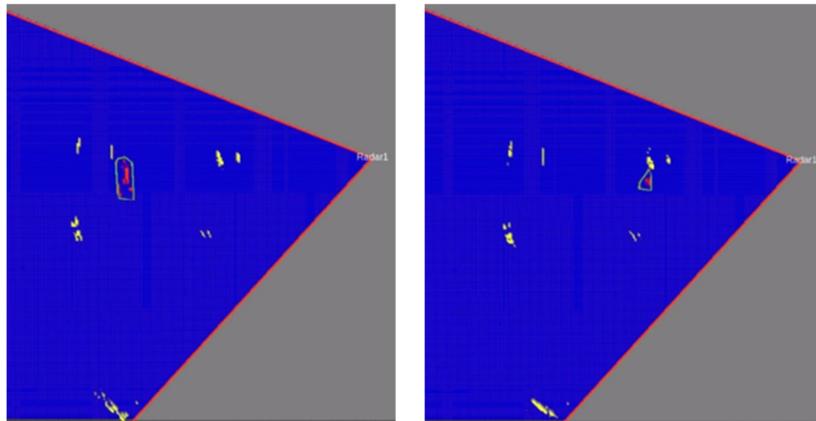


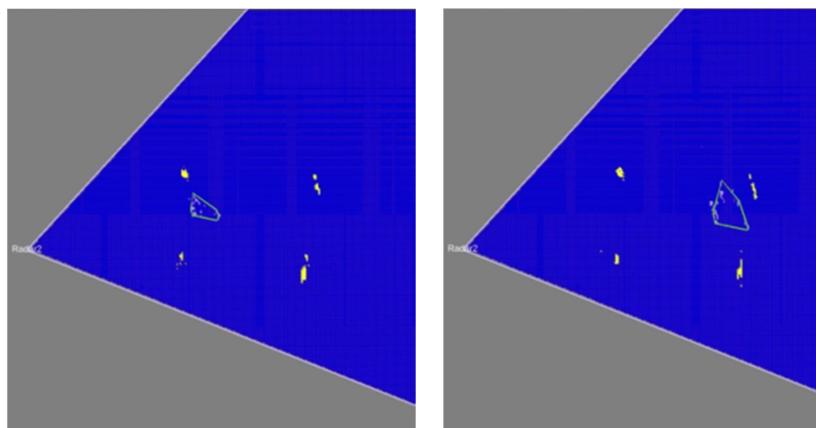
図 4.3.3.2-14 実験 1 の地上設置カメラ映像



(a) 交差点に入る時

(b) 交差点を出る時

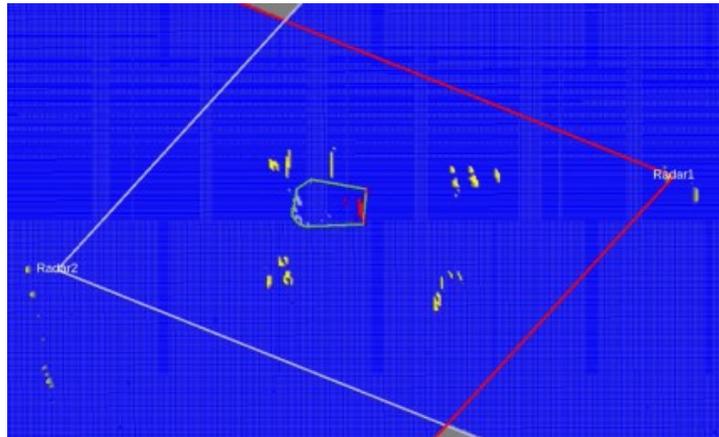
図 4.3.3.2-15 実験 1 の Radar1 グリッドマップ



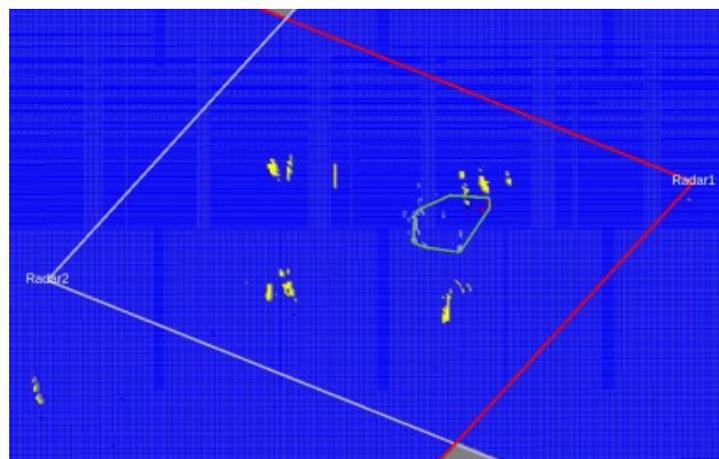
(a) 交差点に入る時

(b) 交差点を出る時

図 4.3.3.2-16 実験 1 の Radar2 グリッドマップ



(a) 交差点に入る時



(b) 交差点を出る時

図 4.3.3.2-17 実験 1 のフュージョングリッドマップ

上記各図において、Radar1 と Radar2 の DGM セルをそれぞれ赤色と白色、SGM セルを黄色、クラスタの枠を緑色で示している。Radar1 が車両の前方側、Radar2 が車両の後方側しか見えないため、Radar1 または Radar2 の単独グリッドマップに対するクラスタリングの結果は物体の大きさを正確に反映できない。また、レーダーの角度分解能の影響で、レーダーに近い時はサイズが小さく、レーダーに遠い時はサイズが大きくなる傾向がある。これと比較して、フュージョングリッドマップの結果は物体の前後両方を見ているため物体サイズを正確に反映する。例えば、交差点に入る時と出る時のクラスタのサイズが概ね一致している。

・実験 2 - 縦走車両

2 台の車両（セダンとバン）が縦列して交差点を通過する場合のグリッドマップ生成について検証する。ここでは、車間距離を 5m 程度まで詰めた走行条件とした。

図 4.3.3.2-18 に地上設置のカメラ映像、図 4.3.3.2-19 に Radar1 の測定値のみから生成したグリッドマップ、図 4.3.3.2-20 に Radar2 の測定値のみから生成したグリッドマップ、図 4.3.3.2-21 に Radar1 と Radar2 のフュージョンから生成したグリッドマップをそれぞれ示す。



図 4.3.3.2-18 実験 2 の地上設置カメラ映像

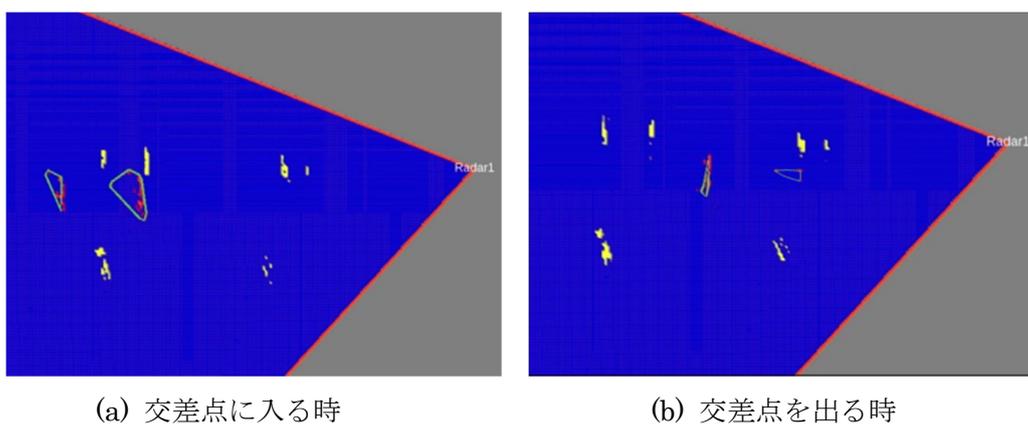
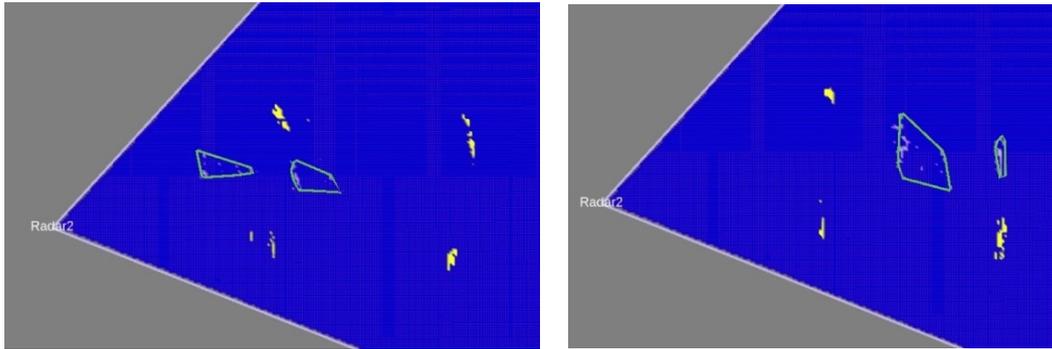


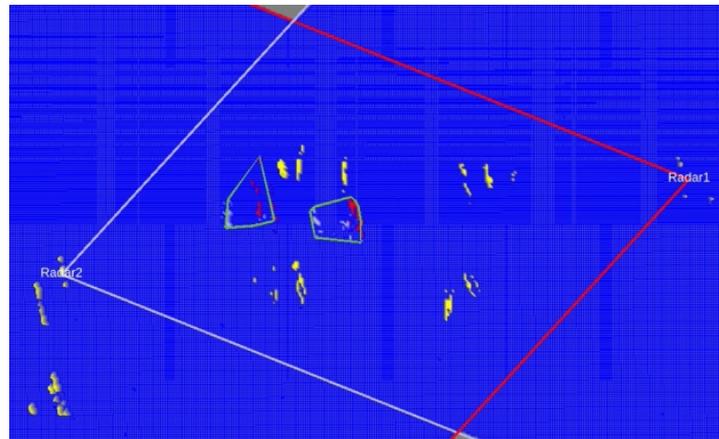
図 4.3.3.2-19 実験 2 の Radar1 グリッドマップ



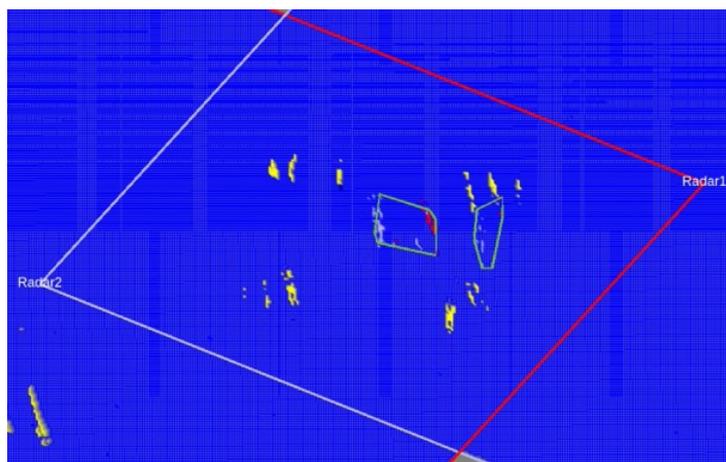
(a) 交差点に入る時

(b) 交差点を出る時

図 4.3.3.2-20 実験 2 の Radar2 グリッドマップ



(a) 交差点に入る時



(b) 交差点を出る時

図 4.3.3.2-21 実験 2 のフュージョングリッドマップ

Radar1 または Radar2 単独のグリッドマップにおいて、クラスタが物体の大きさを正確に反映していないため、車間距離の算出が困難になっている。これに対して、フュージョングリッドマップにおけるクラスタは相対的に安定しているため、車間距離のばらつきも小さい。

しかしながら、フュージョングリッドマップの図からも分かるように、クラスタの形状や大きさは時系変動している。そのため、物体の大きさ及び輪郭をより正確に把握するため、時系列フレーム間の統合も必要となってくる。例えば、物体の輪郭に対する追従処理の導入が考えられる。

また、クラスタリングに関しても、下記の図 4.3.3.2-22 に示すような失敗例が発生している。これに対しては、例えば、レーダー方向の制限を与えて、左側の白セルと右側の赤セルはクラスタリングするが、左側の赤セルと右側の白セルはクラスタリングしないようなルールを導入によって回避できると考えられる。

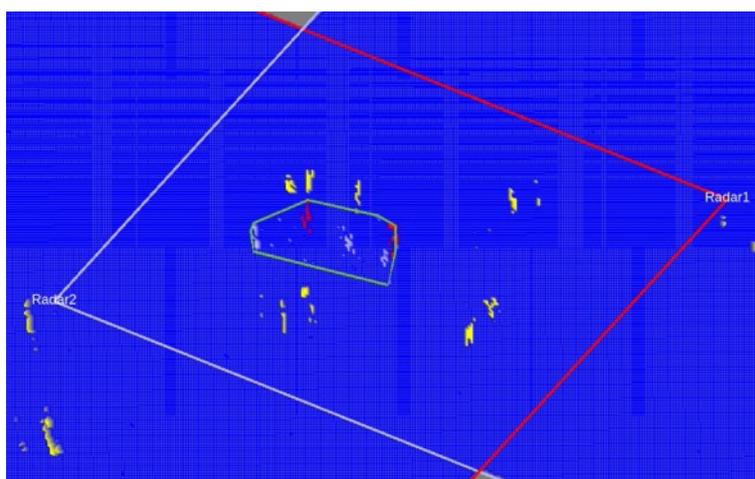


図 4.3.3.2-22 クラスタリング失敗のデータ例

・実験 3 - 横断歩行者

交差点の 4 つの横断歩道をそれぞれ 1 人が歩く場合のグリッドマップ生成について検証する。尚、各歩行者は横断歩道を渡る前に一時停止を行った。

図 4.3.3.2-23 に地上設置のカメラ映像、図 4.3.3.2-24 に歩行中の場合のフュージョングリッドマップ、図 4.3.3.2-25 に一時停止の場合のフュージョングリッドマップをそれぞれ示しており、図 4.3.3.2-25 では一時停止セルを黒色で示している。



図 4.3.3.2-23 実験 3 の地上設置カメラ映像

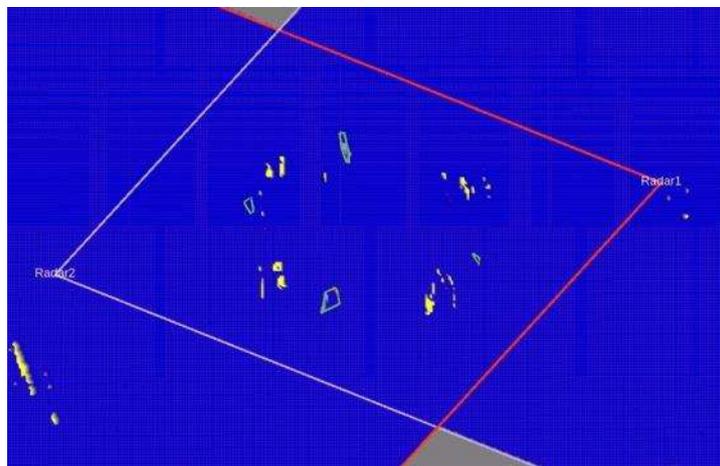


図 4.3.3.2-24 実験 3 のグリッドマップ (歩行中)

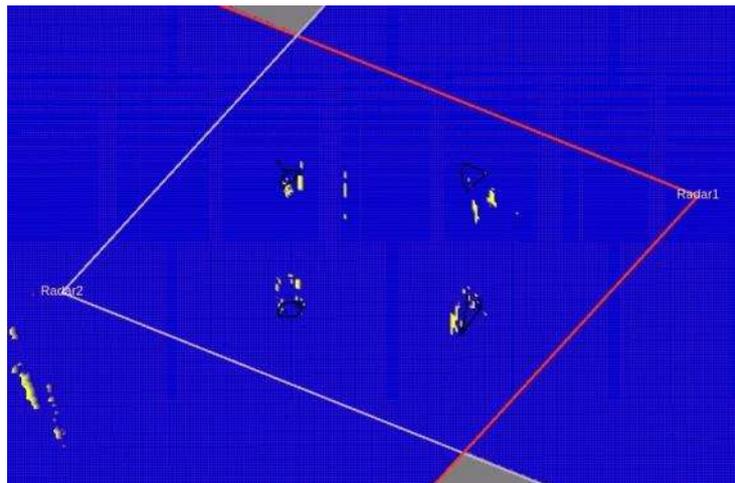


図 4.3.3.2-25 実験 3 のグリッドマップ (一時停止)

各図から分かるように、レーダー反射の状態に依存して、歩行者の大きさや形状が変動しているように観測される。実際には、歩行者に対するレーダー測定データはフレーム単位では未検出となるケースもあるが、ソフトウェアの追従処理によって継続的に歩行者位置を特定できるようになる。このような追従処理は、一時停止している場合にも有効である。

さらに、今回の複数レーダーデータを統合する処理によっては、未検出フレームが補完されて検知率が向上されるだけでなく、測位精度の改善も期待できる。

・実験4 - 右折車両

車両が交差点を右折する場合のグリッドマップ生成について検証する。ただし、対向車線の右折車両、対向車線の直行車両、対向車線の直行自転車を含め、4台による複合的な走行パターンを対象とした。

図 4.3.3.2-26 に地上設置カメラの映像、図 4.3.3.2-27 に時刻1のグリッドマップ、図 4.3.3.2-28 に時刻2のグリッドマップ、図 4.3.3.2-29 に時刻3のグリッドマップを示しており、時間の流れとしては、時刻1→時刻2→時刻3の順番となっている。ここで、図 4.3.3.2-29 (b)を除いたその他の図においては、SGM が生成する Static セルの情報は省いた形の表示としている。



図 4.3.3.2-26 実験4の地上設置カメラ映像

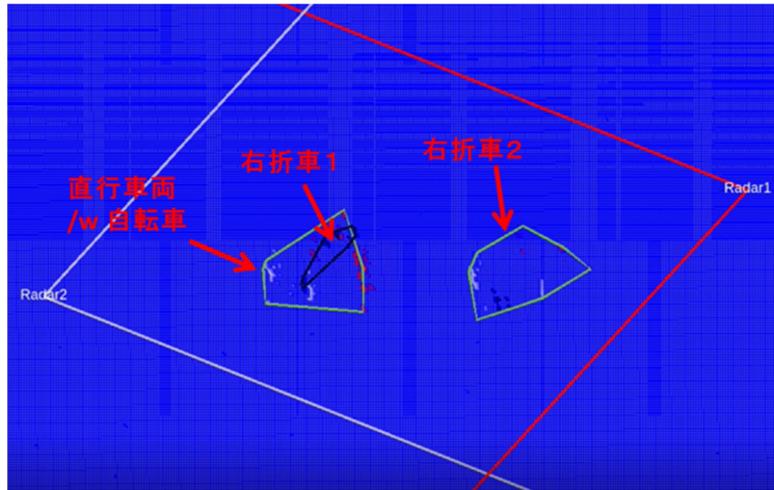


図 4.3.3.2-27 実験4のグリッドマップ (時刻1)

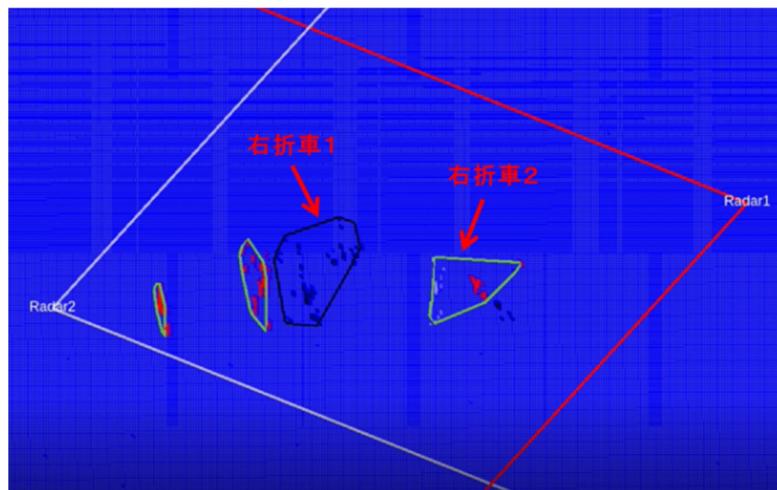
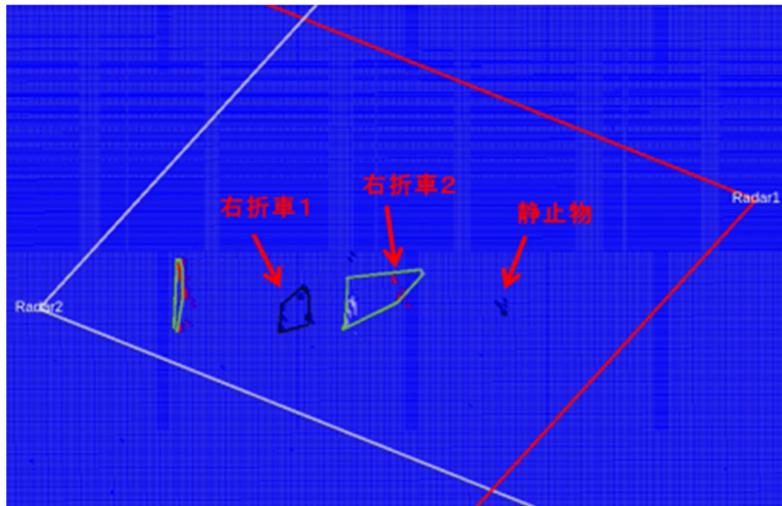


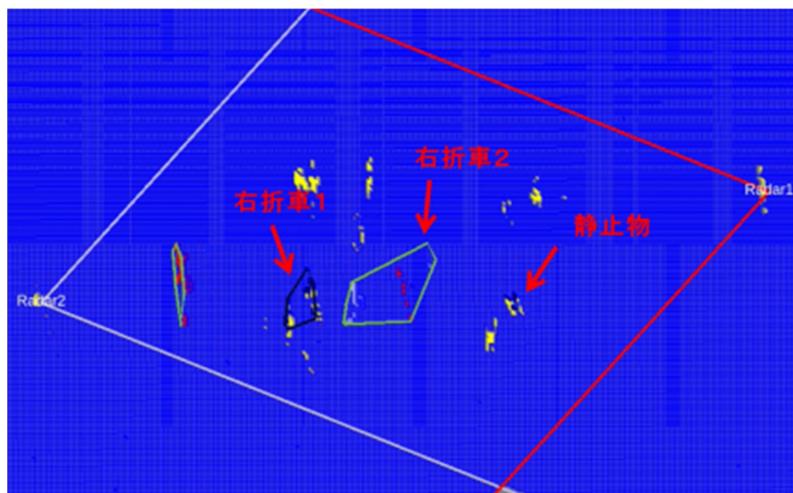
図 4.3.3.2-28 実験4のグリッドマップ (時刻2)

これらの図において、右折車両1に対しては、時刻1から時刻3まで一時停止物体（黒色枠）として認識されている。しかし、各時刻のクラスタ結果を見れば輪郭が大きく変動している。この傾向は移動物体として認識された右折車2と比べるとより顕著である。右折車2はほとんど停止せず右折するため、グリッドマップ上では移動物体（緑色枠）として認識されている。

また、時刻1には直進する車両とそれに並走する自転車がグリッドマップ上で分離できなかったが、その後の時刻2にはそれぞれが分離して検出されている。



(a) Static セル表示あり



(b) Static セル表示あり

図 4.3.3.2-29 実験4のグリッドマップ (時刻3)

さらには、図 4.3.3.2-29 (a)と(b)を比較すると、Static グリッドセル (黄色) の一部が Pause グリッドセル (黒色) に認識されている。つまり、静止物体に対してもレーダー反射波の分布が時間的に変動しているかのように測定される場合があり、結果としてグリッドマップレベルのデータにもその影響が反映されている。

以上、本節の内容をまとめると、グリッドマップ生成より複数レーダーデータを統一的に扱うことを目指したソフトウェア技術を開発設計、及び試験環境における実証を推進した。

具体的には、交差点を通過する車両や歩行者の特性を考慮した、移動物体用 DGM、静止物体用 SGM、そして一時停止物体用 PGM の 3 種類のグリッドマップ生成に関する模擬環境試験を実施すると共に、生成した各グリッドマップをプラットフォームとして複数レーダーのデータ統合を実現するフュージョン処理やクラスタリング処理に関する技術的な検証を行った。

移動物体を対象とする DGM に関しては、単独レーダーの場合と比較して、複数レーダーデータをフュージョン統合することでグリッドマップ上に物体の形状をより正確に反映できることを確認した。

一方、静止物体を対象とする SGM では、周辺環境の構造物等をグリッドマップ上に反映することを目指しているため、静止物体に対応するセルの位置を一定期間の複数フレームを用いて確定等の方法で、より安定化できるものと考えている。

また、一時停止物体を対象とする PGM に関しては、特に、交差点における右折車両、及び信号待ちの歩行者の状態を抽出できるかについて検証した。移動中から一時停止への遷移も考慮した追従処理によって、移動の履歴を概ね把握できることは確認したが、現状では一時停止物体をレーダー反射強度に基づいて存在判定しているためばらつきが大きい。SGM の安定化と同様にして、複数フレームに渡るレーダー測定データを利用するといった時間軸上の処理を改良していくことが必要と考えている。

5. 研究発表等の成果

平成 29 年度の主な研究成果指標としては、論文等の外部発表 7 件を実施した。

表 5-1 論文発表等

No.	タイトル	発表先	発表日
1	インフラレーダーシステム技術の開発	WTP 2017	平成 29 年 5 月 24 日
2	ICT を活用した次世代 ITS の研究開発	ITS Japan コミュニティプラザ	平成 29 年 6 月 21 日
3	次世代 ITS における 79GHz レーダー 技術	月刊「画像ラボ」	平成 29 年 9 月 1 日
4	Evolution of Millimeter-wave Multi-Antenna Systems in the IoT Era	電子情報通信学会 英文論文誌	平成 29 年 10 月 1 日
5	A study of infrastructure radar technologies using 79GHz band on V2I application for merging support at highway junction	第 24 回 ITS 世界会議	平成 29 年 10 月 30 日
6	Connected Vehicles - Infrastructure Radar System	SIP-adus Workshop 2017	平成 29 年 11 月 14 日
7	インフラレーダーシステム技術の開発	一般公開講演会「情報通 信が支える次世代の ITS」 (ポスター)	平成 30 年 3 月 23 日

6. アウトカム目標に向けた取り組み

・標準化活動／普及啓発活動

コスト競争力を確保するため、将来の海外展開も見据えた小型で汎用性の高いミリ波レーダーの性能仕様を策定しつつ、警察庁をはじめ高速道路会社等の公共インフラを整備する関係機関への訴求活動を継続的に推進している。特に、一般道の交差点支援に向けた実用化の取り組みとしては、公道実験に向けた候補地選定を加速しており、平成 30 年 4 月から実道に設置してデータ取得を開始する予定である。

また、国交省及び東日本高速道路株式会社等が主管する高速道路の逆走車対策技術に関するフィールド検証試験の公募に対して提案を行い、逆走車を検知する路側センサーの候補技術の一つとして採択された。今年度の具体的な進捗としては、積雪寒冷地を含む複数の高速道路 PA に 79GHz 帯レーダーを設定し、各々1 か月以上の期間をかけて、激しい雨や雪といった悪天候を含む条件での検知精度評価を推進している。

・実用化の取り組み

ITU-R の標準化活動に参画し、ドイツ等と連携しつつ、79GHz 帯レーダーが ITS 用途として広く普及促進されるように技術基準策定を推進している。平成 29 年度は、ITU-R に対する日本寄書において、協調型運転支援技術としてのミリ波レーダー交差点応用に関する提案を実施し、ITU-R SG5 WP5A の審議にも日本団として参加対応を行った。

また、平成 29 年 6 月に開催された ITS Japan コミュニティプラザにおいて、ミリ波帯の新しい技術動向としての講演を行う等、引き続き普及啓発活動に取り組んでいる。特に、平成 29 年 10 月に開催された第 24 回 ITS 世界会議モンテリオールでは、自動走行の実現に向けた 79GHz 帯レーダーを含むミリ波技術の活用について業界関係者へ訴求するためのブース展示を実施した。同時に、パナソニックのホームページより本研究開発成果の一環として発信している。