

「ICT を利用した次世代 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 28 年度 研究開発成果報告書

平成 29 年 3 月

パナソニック株式会社

目次

1.	はじめに	p. 3
2.	研究開発目標	p. 3
3.	研究開発体制	p. 6
4.	研究成果の要約	p. 7
4.1.	年次目標	p. 7
4.2.	成果概要	p. 9
5.	研究成果	p. 17
5.1.	技術課題ア)レーダー検出信頼性向上技術の開発	p. 17
5.1.1.	取り組み内容	p. 17
5.1.2.	ア)-① 識別信号処理技術の開発	p. 17
5.1.3.	ア)-② 交差点死角対策技術の開発	p. 61
5.2.	技術課題イ)レーダー間干渉低減技術の開発	p. 117
5.2.1.	取り組み内容	p. 117
5.2.2.	イ)-① 耐干渉性能の実証実験	p. 117
5.2.3.	イ)-② 干渉低減システム技術の開発	p. 131
5.3.	技術課題ウ)耐環境性能補償技術の開発	p. 134
5.3.1.	取り組み内容	p. 134
5.3.2.	ウ)-① 耐環境性能の実証実験	p. 134
5.3.3.	ウ)-② 検出性能補償技術の開発	p. 171
5.4.	技術課題エ)路車連携技術の開発	p. 193
5.4.1.	取り組み内容	p. 193
5.4.2.	エ)-① ダイナミックマップの実証実験	p. 193
6.	研究発表などの成果	p. 218
7.	アウトカム目標に向けた取り組み	p. 221
7.1.	実用化の取組み	p. 221
7.2.	標準化活動／普及啓発活動	p. 222
7.3.	研究開発運営委員会	p. 222

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、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、基本計画「インフラレーダーへの要求条件の検討」において明確化される交通シーンと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など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。

人や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インフラレーダー技術、および安全運転支援に資するための路車協調システム技術を開発する。インフラレーダー技術としては、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」、およ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、路車協調システム技術としては、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「路車連携技術の開発」に取り組む。

ここで、平成 26 年度から平成 28 年度の 3 年間は、インフラレーダー技術の開発に注力する。具体的には、交差点の路側設置センサーとして小型な 79GHz 帯高分解能レーダー装置を開発し、高齢者をはじめ人の確実に漏れのない検知を実証するだけでなく、複数の車載レーダーが存在する条件での周波数共用や、様々な天候、温度の条件下でのレーダー動作について実証を完了する。

また、平成 29 年度から平成 30 年度の 2 年間では、複数の 79GHz 帯高分解能レーダー装置を制御し、レーダーセンサーが検知した危険情報を周囲の自動車へ伝送するセンサー統合処理装置を開発することで、安全運転支援の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実証を完了する。

ア)レーダー検出信頼性向上技術の開発

基本計画の到達目標を達成するためには、レーダーが検出する物理情報として、距離、角度、ドップラー周波数のすべてに対して高い分解能が要求される。この要求に対し、歩行者等の識別と車種の判別、さらには複数のレーダーを用いた車両の追跡を可能とする識別信号処理技術、および交差点死角対策技術を確立するため、歩行者の分離検知に優れる符号化パルス方式、レーダー設置を容易にする小型なアンテナサイズで高い角度精度を実現できる送受信アダプティブアンテナ方式を用いた 79GHz 帯レーダーを活用する。

識別信号処理技術の開発では、この 79GHz 帯レーダーを用いた実験データの取得と、データの解析、評価を通じて、レーダープロファイルから特徴量や識別に用いるパラメータの抽出を目指したアルゴリズム開発に取り組む。

交差点死角対策技術の開発では、複数の 79GHz 帯レーダーを用いたより実用性の高いセンサー情報の取得を目指し、対象物に付与する物票情報を ID 管理するための仕様検討を進めつつ、オクルージョン発生の実験データに基づいたレーダー出力データの統合処理開発に取り組む。

イ)システム間干渉低減技術の開発

基本計画の到達目標を達成するためには、79GHz 帯のインフラレーダーが、車載レーダーとの耐干渉性能として優れているだけでなく、インフラレーダーシステムとして複数レーダー間の相互干渉を制御することが求められる。この要求に対し、伝搬実験を通じて干渉発生率を解析、評価することでインフラレーダーと車載レーダー間の耐干渉性能を実証する。さらに、インフラレーダーシステムとして交差点内で複数のレーダーを同時に動作させるために相互干渉を抑圧する干渉低減システム技術を開発する。

耐干渉性能の実証実験では、交差点環境における干渉評価シナリオの策定と統計的なデータ解析のための試験環境の構築を実施する。その上で、瞬時の干渉発生を検知するようにして取得された長時間の評価データに基づき、干渉耐性を検証する。

干渉低減システム技術の開発では、同一システム内で動作する複数レーダーモジュール間の干渉を抑圧するために、周波数や時間などを制御する符号化パルスレーダー方式を開発する。その上で、79GHz 帯レーダーモジュールを開発試作し、干渉抑圧性能を実証する。

ウ)耐環境性能補償技術の開発

基本計画の到達目標を達成するためには、降雨や降雪といった悪天候時においても、79GHz帯レーダーのハードウェアとして所要の動作を実現するだけでなく、環境変化が要因となる誤検出の発生を抑圧して、歩行者や車両を安定して検出できるようにすることが求められる。この要求に対し、79GHz帯ミリ波における伝搬実験を実施して、降雨や降雪といった天候だけでなく環境温度の変化に対する79GHz帯レーダーの実効性能を検証する。さらに、ミリ波の電波伝搬特性に影響を与えるような環境変化が生じた場合にも、79GHz帯レーダーが歩行者等を安定して検出するための検出性能補償技術を開発する。

耐環境性能の実証実験では、降雨量や降雪量を一定に保つ試験設備や実際の降雪環境における伝搬実験を通じて、路側設置のレーダーユニットを構成する、特に79GHz帯ミリ波の放射に係る部品の特性を定量化することで、インフラレーダーとしての回線設計等へフィードバックする。

検出性能補償技術の開発では、降雨や降雪によってミリ波帯の散乱特性が変化し、特に歩行者の検出性能に影響の大きいと考えられる路面等の静止背景物からの反射信号を、背景ノイズと見なして除去するためのアルゴリズム開発に取り組む。

エ)路車連携技術の開発

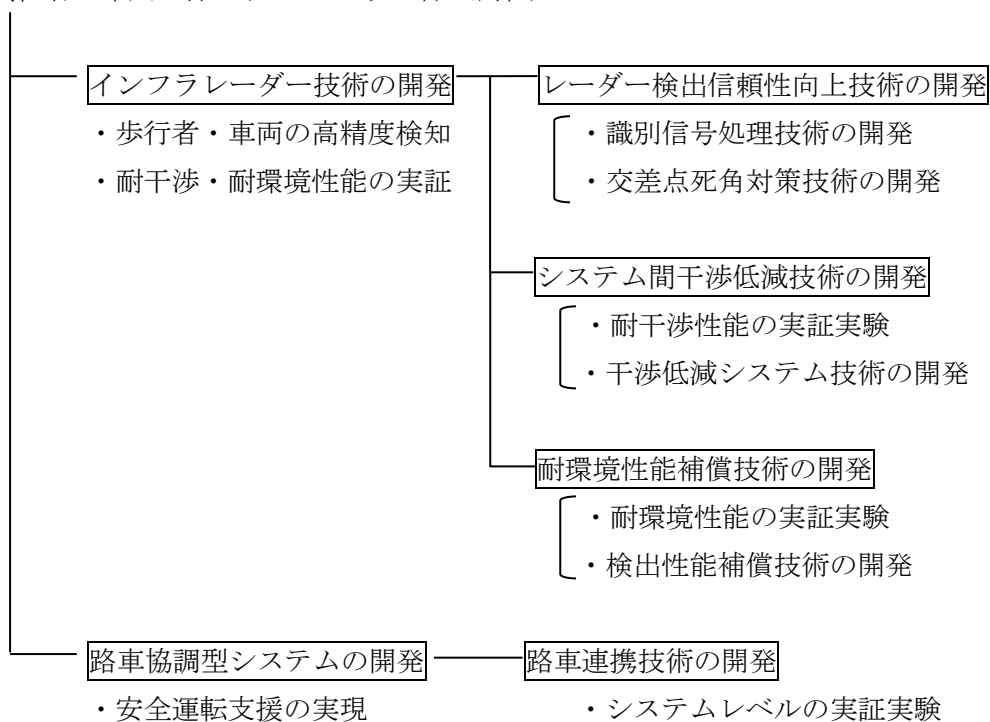
基本計画の到達目標を達成するためには、インフラレーダーによるセンサーの検知情報に基づき、衝突を回避するために運転者等に通知すべき情報を生成する技術を開発して、路車間通信機能を具備したインフラレーダーシステムとして、フィールドで検証することが求められる。この要求に対し、79GHz帯高分解能レーダーを路側のセンサーとして活用したインフラレーダーシステムとして、主に交差点環境における安全運転支援を実現するための機能をシステムレベルで検証するものである。具体的には、交差点エリアにおける対象物の検知情報を出力する路側設置の79GHz帯レーダーセンサーと複数の路側レーダーセンサーが生成する検知情報を統合して、障害物に関する物標情報として出力するセンサー統合処理装置で構成されるインフラレーダーシステムと、障害物情報を活用する車載システム等を具現化して、フィールドでの検証実験を実施する。

また、障害物の検知に加えて、より高いレベルの安全運転支援を実現するためには、リアルタイムに取得される歩行者や車両の物標情報だけでなく、統計的なデータ分析に基づく危険予測や流量計測が重要な機能となると考えられる。よって、本研究開発課題では、衝突回避のみならず危険事象の検知等の将来の技術検討に資するデータベースの構築を目指し、路車協調システム技術のフィールド実証を通じた実験データの蓄積にも取り組む。

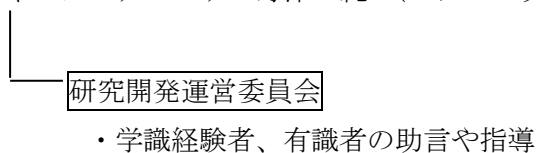
3. 研究開発体制

成果目標：路車協調型安全運転支援による交差点等の事故削減を目指すインフラレーダーシステムの実現

研究責任者：中川 洋一(パナソニック株式会社)



ビジネスプロデューサー：野津 純一(パナソニックシステムネットワークス株式会社)



4. 研究成果の要約

4.1. 年次目標

前述した最終目標に向けた全研究開発期間の取り組みに対して、平成 28 年度は以下を年次目標とする。

ア)レーダー検出信頼性向上技術の開発

①識別信号処理技術の開発

- ・車種判別アルゴリズムの実証

四輪車、二輪車などの判別率95%以上を達成し、オートバイを含む複数車両の追跡や車種の判別を行う識別信号処理技術を確立する。

(理由)同一車両からのレーダー反射信号に対するパラメータ抽出に基づき、主にドップラー周波数を複数反射点のクラスタリングに用いた車種判別アルゴリズムの開発を実施し、基本計画書にある到達目標を達成する。

②交差点死角対策技術の開発

- ・複数レーダー統合処理技術の開発

120 度以上の視野角を有する79GHz 帯レーダーを複数台設置し、各レーダーが出力する物標・測位データを統合し、交差点全域のID 管理機能を実現する交差点死角対策技術を確立する。

(理由)オクルージョン発生モデリング結果および反射信号クラスタリングのためのパラメータ抽出結果を踏まえ、複数レーダーの設置条件を具体化した上で、各レーダーセンサーの検知情報を統合して ID 管理を実現する技術開発を実施し、基本計画書にある到達目標を達成する。

- ・センサー統合処理装置設計および公道実証実験

大型車の存在によって生じる死角対策としての有効性を検証するため、交差点の設置条件下で、79GHz 帯高分解能レーダーとして信頼性の高い検出性能を実証する。

(理由)各レーダーセンサーの検知情報を統合してID管理を実現する技術開発の成果を踏まえて、インフラレーダーシステムとして処理遅延時間を考慮した全体設計を行うことで、基本計画書にある到達目標を達成する。

イ)システム間干渉低減技術の開発

①耐干渉性能の実証実験

- ・干渉評価シナリオに基づく定量的な耐干渉性能評価

交差点環境における干渉評価シナリオを策定し、交差点内に2台以上のインフラレーダー、3台以上の車載レーダーが存在する場合でもシステム共存可能であることを実証する。

(理由)交差点における車両走行条件として評価シナリオを明確化した上で、高所設置のインフラレーダーと車両搭載のレーダー間の干渉発生について実験、解析することで、79GHz帯高分解能レーダーの耐干渉性能を実証する。

②干渉低減システム技術の開発

- ・インフラレーダー干渉制御方式開発および実証実験

送信タイミングや送信周期をランダム化する時間制御及び3GHz以上の帯域幅を利用可能な79GHz帯において中心周波数を可変することを含む複数の干渉低減技術について、伝搬実験によりその有効性を見極めるとともに、79GHz帯レーダーシステムへの実装技術として確立する。

(理由)インフラレーダーと車載レーダー間の耐干渉性能に関する実証実験結果を踏まえた上で、インフラレーダーシステム内の相互干渉を抑圧するための方式開発を実施することにより、本研究開発課題に対して効率的に取り組む。

ウ)耐環境性能補償技術の開発

①耐環境性能の実証実験

- ・厳しい環境条件での統計的な検出性能の評価

レーダー検出信頼性向上技術の耐環境性能として、強い降雨時などの条件で誤検出の発生率を10%以内に抑えられることを実証する。また、モジュールの実装技術の開発を通じて、レーダー装置が摂氏-20度から+55度より広い温度範囲で動作することを実現する。

(理由)基礎データに加えて、79GHz帯レーダーの検出性能に関する実使用環境での長期間データを取得して、統計的な性能評価を実施する。また、再現性が確保された降雨や降雪の環境試験設備を用いて、開発技術の有効性を実証する。

②検出性能補償技術の開発

- ・背景クラッタ抑圧アルゴリズムのリアルタイム試験

環境条件の変化に伴う誤検出の発生を抑えつつ、検出時間100ms以下で動作する79GHz帯レーダー装置を具現化する。

(理由)総計的なパラメータの推定により歩行者の安定した検出を実現する背景クラッタ抑圧アルゴリズムの開発として、インフラレーダーの装置にアルゴリズムを実装して、リアルタイム試験を実施してその有効性を実証する。

エ)路車連携技術の開発

①ダイナミックマップ連携の実証実験

- ・データフォーマットの設計検証

ダイナミックマップ連携に向けた位置・速度の検出情報に関するデータフォーマット検討等を実施する。

(理由)79GHz 帯レーダーの特長を活かして、交差点や分合流点に進入する複数の車両や歩行者等の位置や速度を高精度に測定し、ダイナミックマップの動的情報データとしてリアルタイム更新していくための技術検討に着手する。

4.2. 成果概要

年次目標に対する各技術課題の達成状況は、以下の通りである。

ア)レーダー検出信頼性向上技術の開発

・識別信号処理技術の開発

オートバイを含む複数車両の追跡や車種の判別を行う識別信号処理技術の確立を目指した取り組みの達成状況は以下の通りである。

79GHz 帯レーダーで測定される物体からの反射波(エコー)に基づき、エコーの強度やドップラー周波数シフトを解析することで、複数のレーダーエコーが同一の対象物から得られたかを判定するクラスタリング処理の設計と実装を完了した。その上で、車両の大きさや移動速度を推定することで車種を判別する前処理と、機械学習の一つである SVM(Support Vector Machine)を使用した識別を行うアルゴリズム開発を推進した(図 4.2-1 参照)。

特に、学習に用いる実車両の測定データを追加取得するため、テストコース実験等を通じてデータベースを拡充することにした。これにより、交差点に車両が進入する利用シーンにおいて、年次目標である四輪車、二輪車の判別率 95%以上を達成することができた。

・交差点死角対策技術の開発

79GHz 帯レーダーを複数台設置し、各レーダーが出力する物標・測位データを統合し、交差点全域のID管理機能を実現する交差点死角対策技術の確立を目指した取り組みの達成状況は以下の通りである。

平成27年度までに実施したオクルージョン発生のモデリング結果等を踏まえ、各レーダーセンサーの検知情報を統合したID管理機能を検証するためのセンサー統合処理装置に関してはハードウェア試作を完了した。本装置に実装するソフトウェア試作開発としては、瞬時的な未検出に対応するためのトラッキング処理の設計と実装を進め、検知情報が同一の対象物であるかどうか判定した上でIDを付与して物標情報として管理する機能を実証することができた(図4.2-2参照)。開発技術の実証実験としては、日本自動車研究所の模擬市街路を使用した屋外伝搬実験を実施しており、実用性の高い性能評価を行うために四輪車と二輪車が並走する条件等において性能評価を完了した(図4.2-3参照)。

また、公道実証実験を効率的かつより有効な検証機会とするための予備検討として、レーダーの検知対象物からの直接エコーだけでなく誤検知の要因でもあるマルチパスの伝搬解析を実施した。具体的には、地図データベースに基づく建物モデルに交通標識等の詳細モデルを追加して、79GHz帯ミリ波レーダーの数値的かつ統計的な伝搬解析を行うシミュレーション環境を構築することで、特定の市街地環境に対してはマルチパス発生要因を明確にした。

・ 左折シナリオ／検証データ例



・ 右折シナリオ／検証データ例

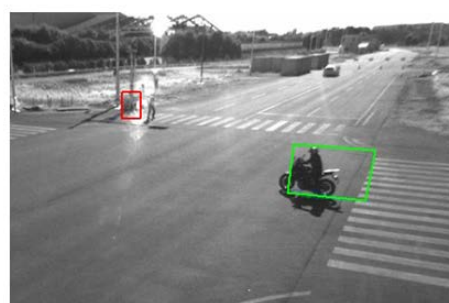
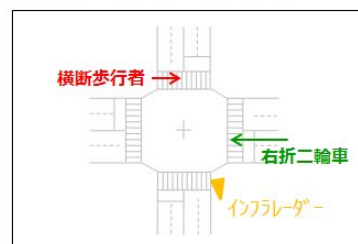
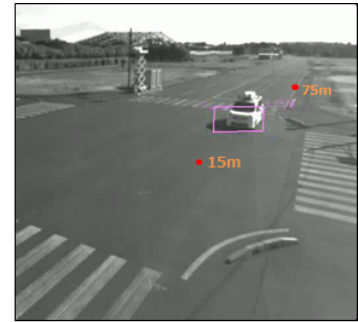


図 4.2-1 SVM を用いた四輪車・二輪車判別アルゴリズムの検証データ例
(青枠：四輪車、緑枠：二輪車、赤枠：歩行者)

四輪車両	距離区間※	サンプル数
トラック	13.7 ~ 87.1 m	総フレーム数：1005 (100.5秒)
ワゴン	12.8 ~ 83.9 m	
ミニバン	12.3 ~ 75.3 m	未検知フレーム数：1 (0.1秒)
セダン	14.9 ~ 75.4 m	

※ 検知枠の誤分離が無く同一IDが付与される区間



検証データ例 (ミニバン)

・ インフラレーダー検知範囲

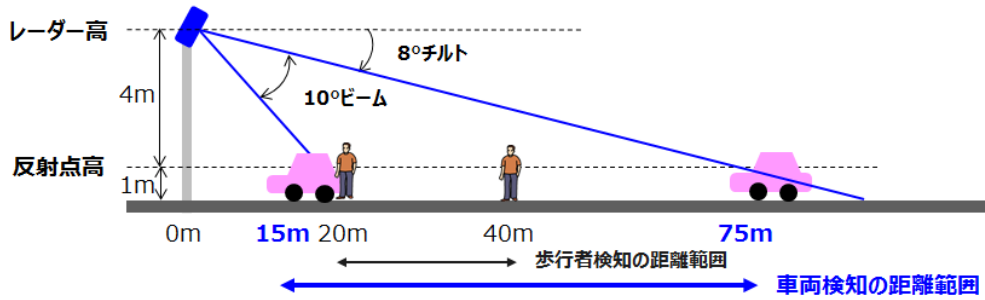


図 4.2-2 トラッキング処理を含む車両 ID 管理機能の検証結果

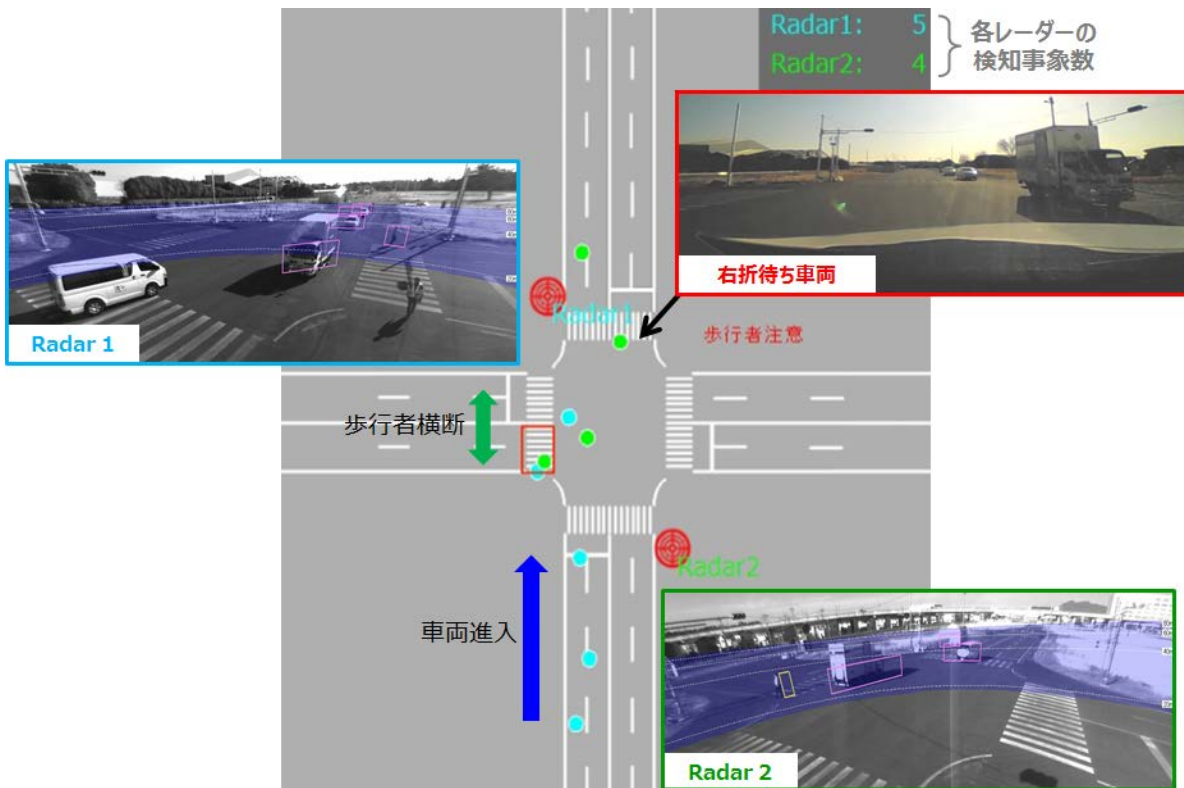


図 4.2-3 複数レーダー統合処理による交差点全域の物標管理データ例
(青丸：Radar1 検知、緑丸：Radar2 検知)

イ) システム間干渉低減技術の開発

・耐干渉性能の実証実験

交差点内に複数のインフラレーダーと車載レーダーが存在する場合におけるシステム共存の実証を目指した取り組みの達成状況は以下の通りである。

交差点における評価シナリオとして、交差点へ進入する車両の走行条件と、交差点の対角に位置する路側センサーの設置条件を定めた。その上で、走行する車両に搭載した79GHz帯レーダーと路側の高所に設置した79GHz帯レーダーの間での耐干渉性能については、模擬交差点の屋外環境における伝搬実験を通じて定量的な評価を実施することで実証できた(図4.2-4参照)。また、地物の散乱等について79GHz帯の特性を反映可能な伝搬シミュレーションソフトウェアを利用してレーダー間干渉の統計的に解析を実施した。

・干渉低減システム技術の開発

開発する干渉低減技術について伝搬実験によりその有効性を見極めて、79GHz帯レーダーシステムへの実装技術として確立することを目指した取り組みの達成状況は以下の通りである。

路側センサーとして広い監視エリアを確保するために、インフラレーダーシステム内で複数の79GHz帯レーダーモジュールを動作させることを想定した干渉回避方式の開発を推進した。具体的には、近接するレーダーモジュール間の相互干渉を抑圧するために、異なる中心周波数等に最適化するレーダー方式の開発設計を行っており、79GHz帯レーダーの試作機に実装した上で検証試験を実施してその有効性を実証することができた(図4.2-5参照)。

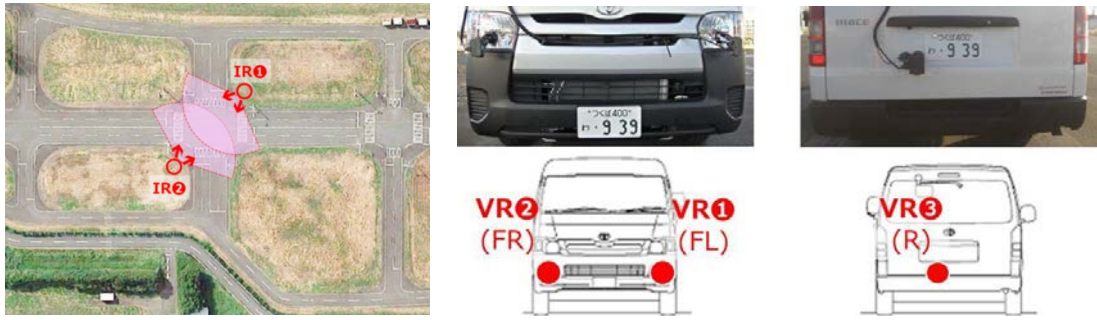


図 4.2-4 耐干渉性能実証における路側レーダー(IR)と車載レーダー(VR)の配置構成

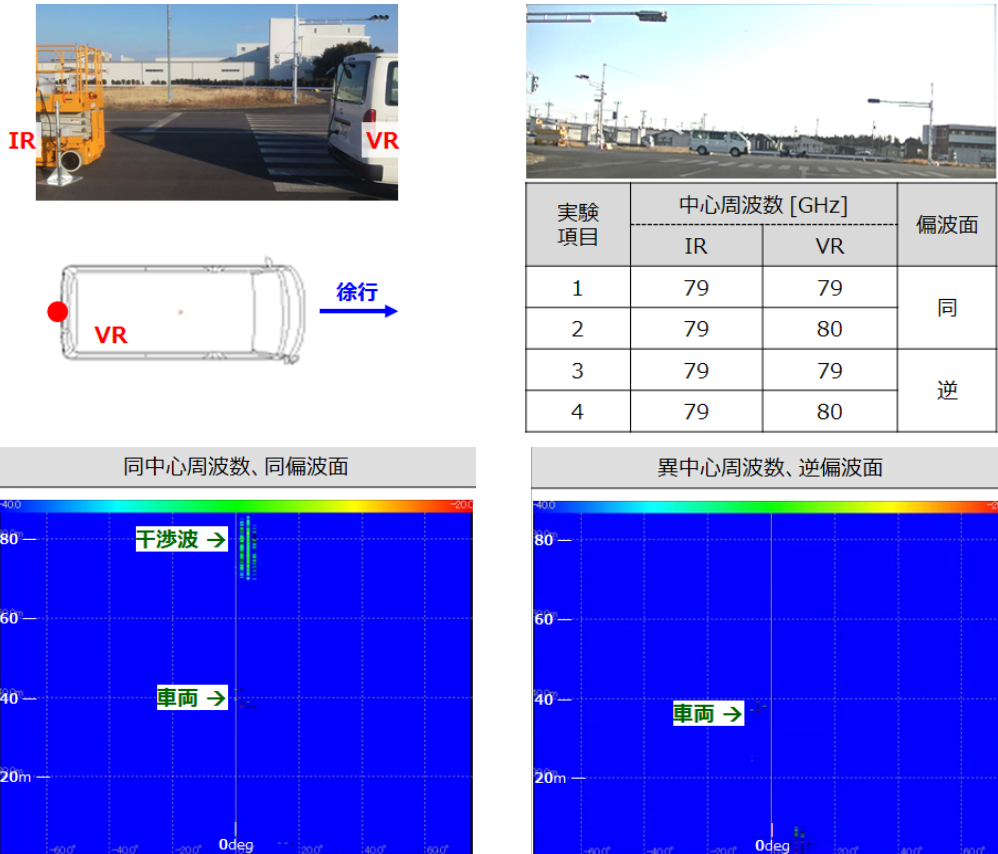


図 4.2-5 中心周波数や偏波面をパラメータとする干渉低減効果の検証用サンプル

ウ)耐環境性能補償技術の開発

・耐環境性能の実証実験

レーダー検出信頼性向上技術の耐環境性能として、強い降雨時などの条件で誤検出の発生率を10%以内に抑えられることの実証、及びモジュールの実装技術の開発を通じて、レーダー装置が摂氏-20度から+55度より広い温度範囲で動作することの実現を目指した取り組みの達成状況は以下の通りである。

屋外の実環境を想定した試験を実施して、降雨時及び降雪時の環境条件に紐付けられたレーダーのプロファイル出力を含むデータベースを構築することができた。具体的には、防災科学技術研究所の雪氷防災実験施設において降雪伝搬実験を実施した。特に、寒冷地を想定した低温環境においてレーダーの筐体表面への着雪時に生じる減衰特性を実測したことでレーダーシステムとしての回線設計の検証を完了した(図 4.2-6 参照)。また、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設において降雨伝搬実験を実施した。非常に激しい降雨条件についても再現性が確保され、且つ実使用条件である高所にレーダーを設置できる環境において、歩行者や車両の行き交う交差点を想定した 79GHz 帯レーダー検出性能の評価を完了した(図 4.2-7 参照)。これらのデータベースを用いて、統計的な検出性能の評価を実施し、歩行者を対象とした場合の誤検出率 10%以下の目標性能を満たす最大検出距離等の指標を明確化することができた。

・検出性能補償技術の開発

環境条件の変化に伴う誤検出の発生を抑えつつ、検出時間 100ms 以下で動作する 79GHz 帯レーダー装置を具現化する取り組みの達成状況は以下の通りである。

雨滴散乱に起因するレーダープロファイルの背景クラッタに関して、その特性を統計的に解析することで、背景クラッタ抑圧アルゴリズムとして最適な空間フィルタの開発、設計を推進した。開発された背景クラッタ抑圧アルゴリズムは、降雨伝搬実験等で取得されたデータを用いて性能評価を行うことが可能であり、インフラレーダーの試作装置にアルゴリズムを実装して、検出時間 100ms 以下の制約条件における歩行者の安定した検出を実証することができた。

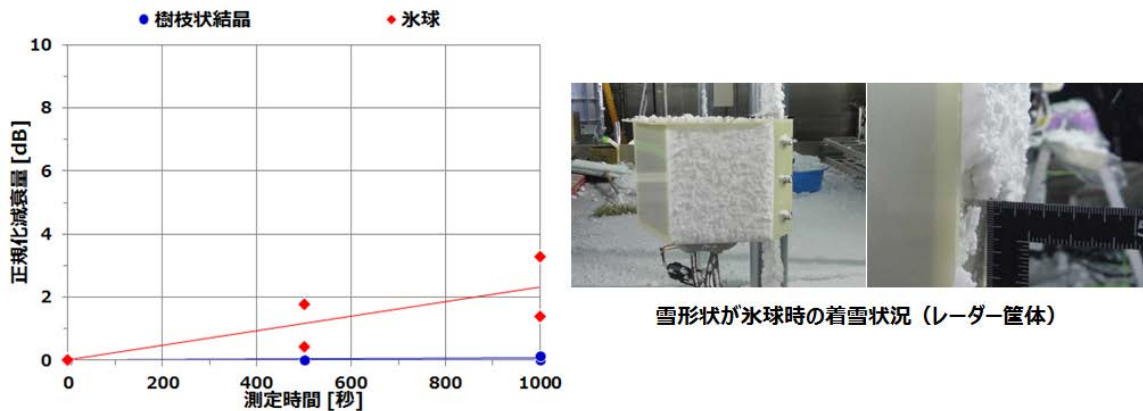


図 4.2-6 レーダー筐体表面への着雪条件で減衰特性量を実測

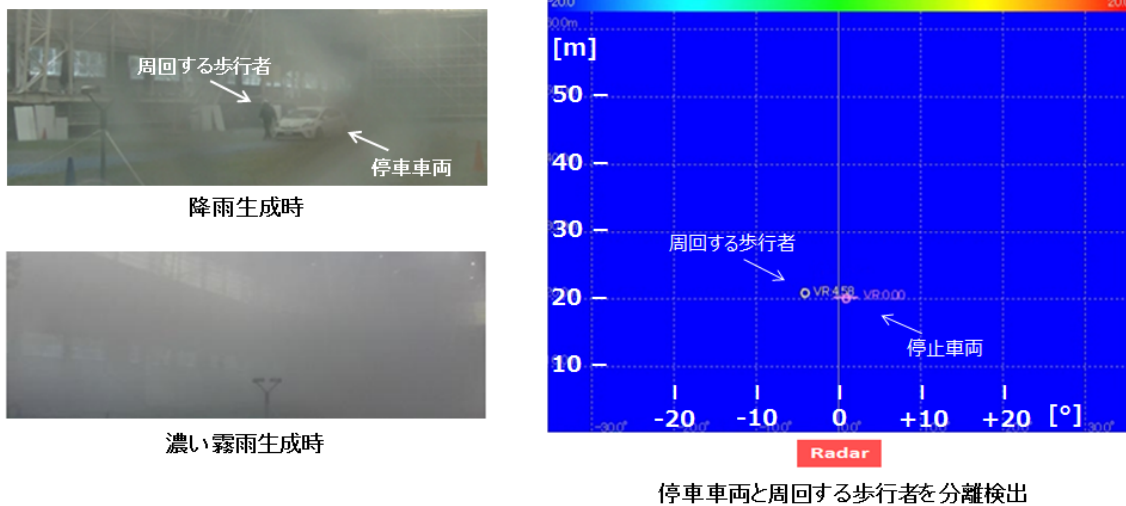


図 4.2-7 視界不良となる濃い霧雨条件で歩行者の分離性能を実証

エ) 路車連携技術の開発

・ダイナミックマップ連携の実証実験

ダイナミックマップ連携に向けた位置・速度の検出情報に関するデータフォーマット検討等に関する取り組みの達成状況は以下の通りである。

高速道路の合流支援を優先するべき実用シーンに定めた上で、合流点に進入する複数の車両の位置や速度をインフラレーダーが高精度に測定し、動的情報データとしてリアルタイムに更新していくための技術開発を実施した。はじめに、高速道路を想定したテストコースの実証実験に備えた事前検討として、レーダー取得データの解析や路側システム装置の動作検証等を目的とする路車連携の基礎実験を実施した。

次に、日本自動車研究所所有のテストコースにおいてインフラレーダーのセンシング情報を走行車両に無線伝送する路車連携技術としての実証実験を実施しており、年次目標を達成することができた(図 4.2-8、4.2-9 参照)。

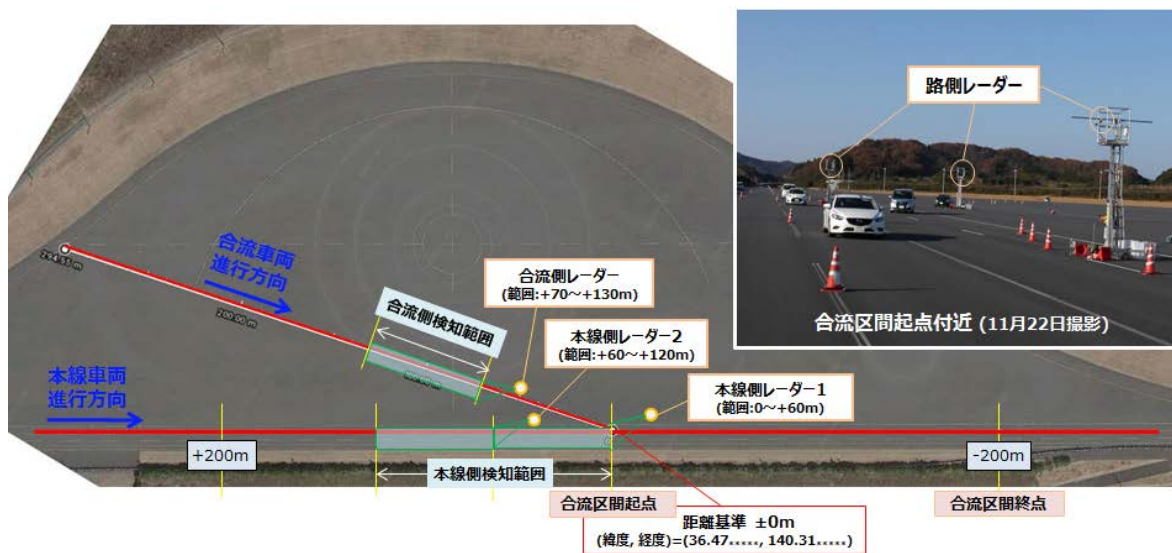


図 4.2-8 路車連携実験時のテストコースにおける路側レーダーの設置条件



図 4.2-9 車側における路側検知情報の活用例/路側レーダーの検知データ例

5. 研究成果

5.1. 技術課題ア) レーダー検出信頼性向上技術の開発

5.1.1. 取り組み内容

レーダー検出信頼性向上技術の開発においては、具体的に次の2点について取り組んだ。

1点目は、車種判別アルゴリズムの実証であり、車種を判別する対象を細分化するアルゴリズムを開発し、模擬交差点での実験を通じて開発したアルゴリズムの実証を行った。具体的には、判別対象の車両を四輪車と二輪車(バイク)に分け、歩行者とその他(主に静止物体)を加えた4クラスの対象物体用の車種判別アルゴリズムを実証したのでその結果と考察について述べる。

2点目の交差点死角対策技術の開発においては、レーダーによる歩行者や四輪車の検出性能について、典型的な事故シーンを模擬した評価環境にて実施した基礎評価のデータをもとに、車両の死角領域の考察や対策方式を検討した。

5.1.2. ア) - ① 識別信号処理技術の開発

5.1.2.1. 車種判別アルゴリズムの開発

車種判別技術は、交通流量のモニタリングや交通制御にとって重要な技術である。また、二輪車を識別する技術は、近年増加傾向の二輪車の交通事故への対応にも応用できるため、インフラレーダーの実用化に必要である。昨年度は、レーダーによる歩行者識別のアルゴリズムを開発しており、79GHzレーダーの高い測定分解能を生かし、交差点を歩く歩行者の識別を試みた。具体的には、レーダーが歩行者を対象物体として検出し、そして、歩行者とその他の物体(主に車両)とを判別した。判別方法として、サポートベクトルマシン(SVM)という機械学習手法を中心に判別器を構築しており、実証実験の結果では、交差点の横断歩道を歩く歩行者に対して高い識別率を達成することができた。

本年度は、識別対象を更に細分化し、レーダーの識別性能を検証する。具体的に、車両を更に四輪車と二輪車(バイク)に分け、4クラスの対象物体：①四輪車、②二輪車、③歩行者、④その他(主に静止物体)用のレーダー判別技術を開発する。

しかしながら、既存の歩行者識別用アルゴリズムを単純に拡張し車種判別に適用することは困難である。例えば、歩行者識別と比べると、車種判別に対し特徴量の選択は難しくなる。一般的に、歩行者のレーダー反射特性や動きパターンと車両の相応特性との違いは、車種間のそれと比較すると相対的に大きい。歩行者と車両の識別に有効な特徴は選択が容易である。また、個別特徴の値分布を見ても一般的に歩行者と車両との違いが相対的に大きい。車種判別の場合は、四輪車(特に、小型車)と二輪車のレーダー反射特性や動きパターンが似ているため、判別に有効な特徴を取得することと、複数の特徴を有効に組み合わせることが要求される。

以下各節で、四輪車と二輪車の判別を中心に、開発した車種判別器の構成及び各処理モジュールについて説明する。

5.1.2.1.1 判別器の構成

判別器のブロック構成図を図 5.1.2.1.1-1 に示す。更に、二段 SVM 判別器の構成を図 5.1.2.1.1-2 に示す。

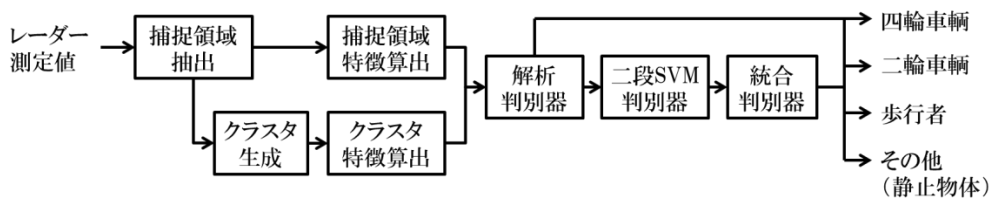


図 5.1.2.1.1-1 判別器の構成

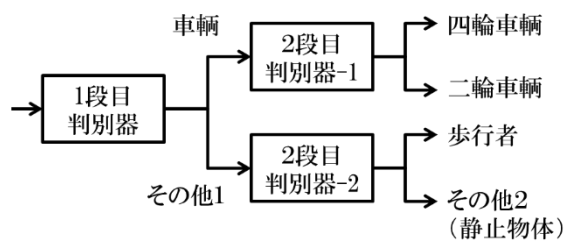


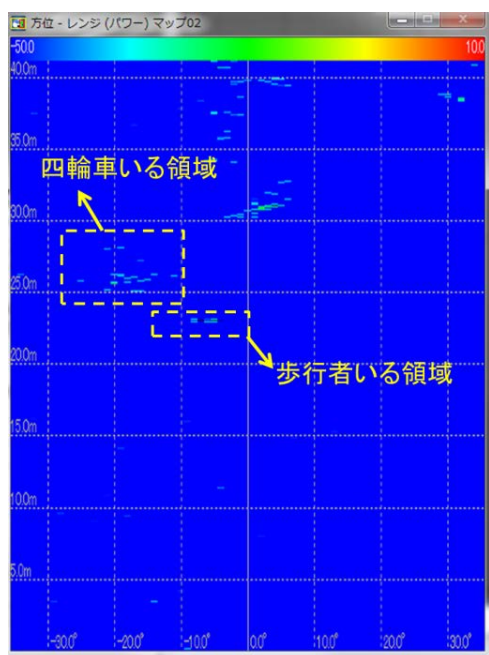
図 5.1.2.1.1-2 二段 SVM 判別器の構成

図 5.1.2.1.1-1 及び図 5.1.2.1.1-2 において、判別器の入出力データ及び各処理モジュールの概要は以下である。

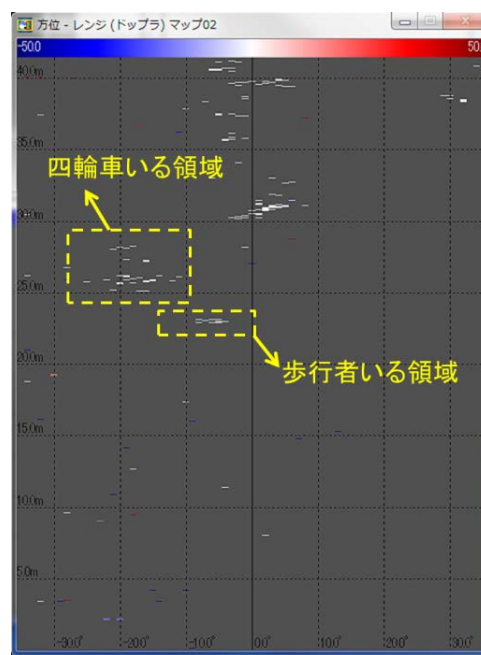
- 入力(レーダー測定値) :
レーダー信号処理の結果として生成した反射電力プロファイルとドップラープロファイル
- 捕捉領域抽出
反射電力プロファイルとドップラープロファイルにおいて、対象物体候補領域を抽出する。
- 捕捉領域特徴算出
抽出した各対象物体候補領域に対し、判別用特徴値を算出する。
- クラスタ生成
同一物体に属する近隣する対象物体候補領域を結合し、クラスタを生成する。
- クラスタ特徴算出
生成したクラスタに対し、判別用クラスタ特徴値を算出する。
- 解析判別器
算出した特徴値の一部を指定閾値と比較し、四輪車種かを判別する。
- 二段 SVM 判別器
1 段目判別器では、対象物体を「車両」か「その他 1」かに判別する。
2 段目判別器-1 では、1 段目で出力された「車両」に対し、「四輪車種」か「二輪車種」かに判別する。
2 段目判別器-2 では、1 段目で出力された「その他 1」に対し、「歩行者」か「その他 2」かに判別する。
- 統合処理器
SVM 判別器の判別結果を後処理する。クラスタ及び追従結果に基づき、判別結果を修正及び統合する。
- 出力 :
4 クラス判別結果

5.1.2.1.2 捕捉領域抽出

図 5.1.2.1.2-1 に入力データの一例を示す。(a) は反射電力プロファイルで、(b) はドップラープロファイルである。何れのプロファイルも横軸が方位、縦軸が距離を示す。また、セルの色はそれぞれ反射電力値とドップラー値を表示する。図 5.1.2.1.2-2 に上記プロファイルに対応するカメラ画像を示す。



(a) 反射電力プロフィール



(b) ドップラープロフィール

図 5.1.2.1.2-1 入力プロフィールの一例

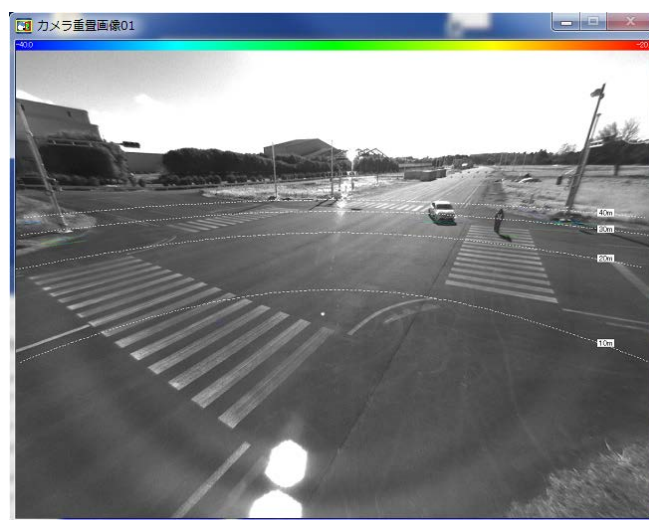
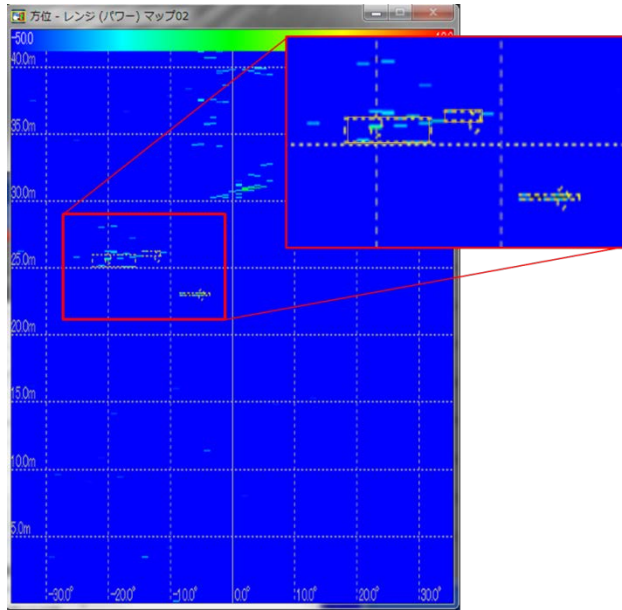
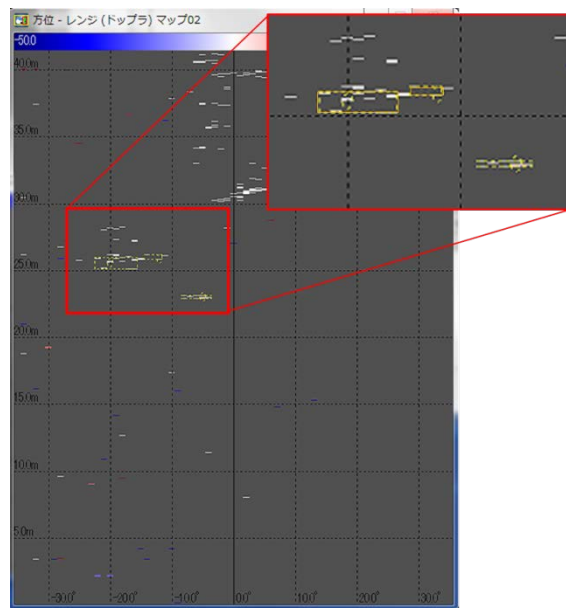


図 5.1.2.1.2-2 入力プロフィールの対応カメラ画像

入力プロフィールの反射電力値とドップラー値に対し、画像処理の手法を利用し、値の大きい領域を抽出する。抽出した領域を捕捉領域と呼ぶ。捕捉領域は物体または物体の一部に対応するため、対象物体の候補領域となる。図 5.1.2.1.2-1 の入力プロフィールに対し、反射電力値とドップラー値が指定閾値以上の領域を抽出した結果、つまり、捕捉領域を図 5.1.2.1.2-3 に示す(虚線枠)。上記捕捉領域のカメラ画像における位置を図 5.1.2.1.2-4 に示す(黄色枠)。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.1.2.1.2-3 捕捉領域抽出結果

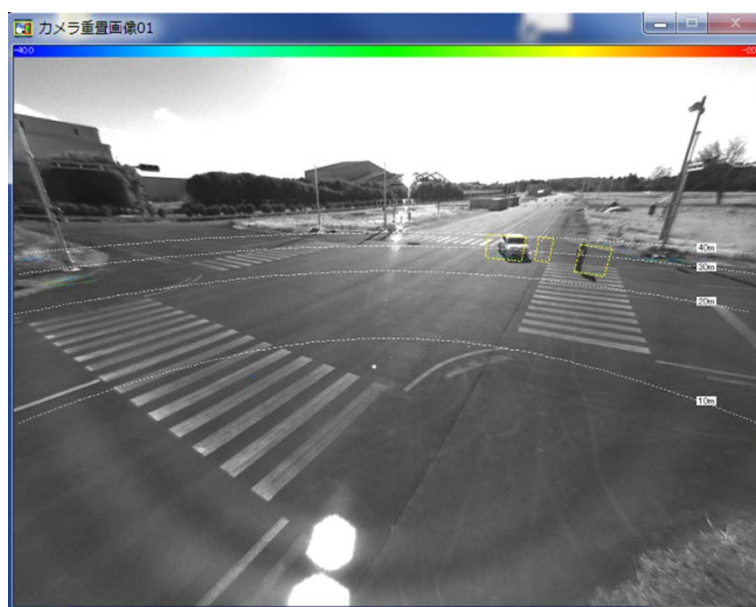


図 5.1.2.1.2-4 捕捉領域のカメラ画像位置

図からも分かるように、1つの物体(例、図 5.1.2.1.2-4 中の四輪車)から複数の捕捉領域を抽出する場合がある。特に、大型車両で側面がレーダーに向かっている場合に、複数の捕捉領域を抽出することが多い。

5.1.2.1.3 捕捉領域特徴算出

抽出した捕捉領域を対象に、判別に利用する特徴量を算出する。但し、カメラ画像と比較すると、レーダープロファイルの分解能は劣っている。そのため、画像処理でよく利用されるエッジやコントラスト特徴を利用できない。一方、レーダーが画像にないドップラー特徴を利用することができる。

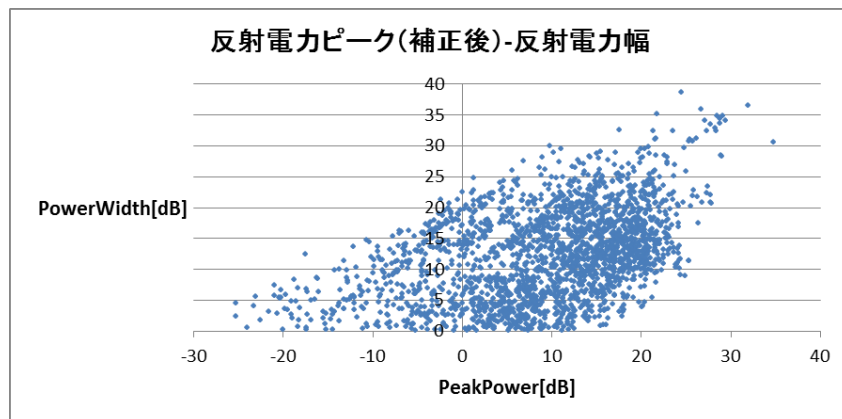
捕捉領域の特徴量は、捕捉領域の反射電力関連特徴、ドップラー関連特徴、大きさ関連特徴、更に細分化関連特徴及び統計平均値関連特徴などから構成する。表 5.1.2.1.3-1 に捕捉領域の主要特徴量をリストアップする。

表 5.1.2.1.3-1 捕捉領域の主要特徴量

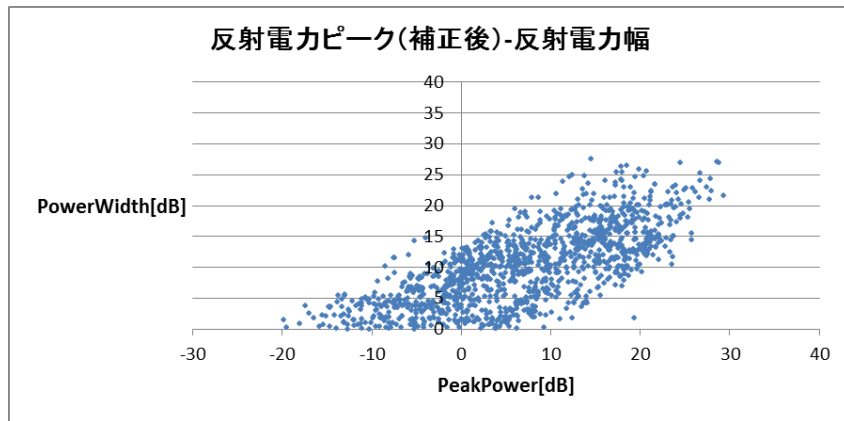
特徴属性名	特徴属性値
反射電力ピーク	捕捉領域に属するセルにおける反射電力の最大値 ※但し、距離の影響を排除するため伝搬減衰量で補正)
反射電力幅	捕捉領域に属するセルにおける反射電力の最大値と最小値との差
ドップラー平均	捕捉領域に属するセルにおけるドップラー速度の平均値

ドップラー幅	捕捉領域に属するセルにおけるドップラー速度の最大値と最小値との差
方位幅	捕捉領域の左端方位と右端方位の角度差
弦幅	方位幅に対応する弦の長さ。捕捉領域の中心距離と方位幅より次式で算出： $弦幅 = 中心距離 * 2 * \tan(方位幅 / 2)$
距離幅	捕捉領域に属するセルにおける最大距離と最小距離との差
セル数	捕捉領域に属するセルの数
セル面積和	捕捉領域に属するセルの面積の合計
電力分布密度	反射電力ピークをセル数で除算した結果
分割領域反射電力平均	捕捉領域の方位を更に細分化し3つの分割領域を生成、各分割領域における反射電力の平均値 ※「四輪車」と「二輪車」判別用
反射電力幅の統計偏差×距離幅の統計偏差	反射電力幅特徴と距離幅特徴それぞれに対し、車両全体の統計平均値との差を求め、乗算の積を利用 ※「四輪車」と「二輪車」判別用
反射電力幅の統計偏差×電力分布密度の統計偏差	反射電力幅特徴と電力分布密度特徴それぞれに対し、車両全体の統計平均値との差を求め、乗算の積を利用 ※「四輪車」と「二輪車」判別用

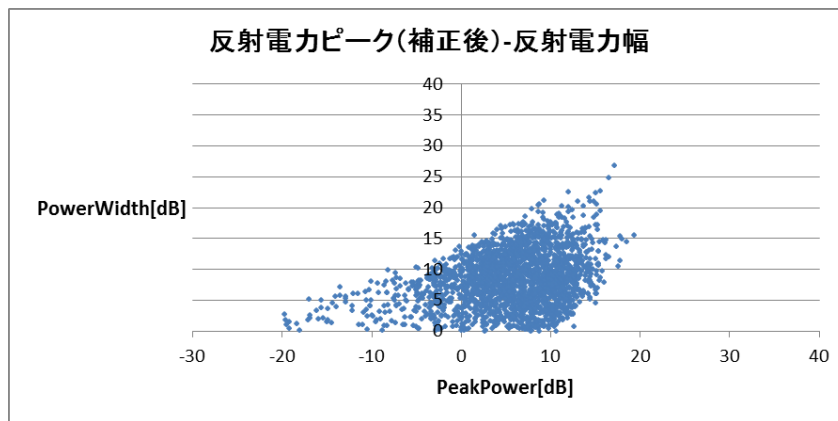
表 5.1.2.1.3-1 にリストアップした特徴量の一部に対し、測定データより求めたトラック(四輪車)、セダン(四輪車)、バイク(二輪車)、歩行者の対応特徴値分布を以下に例示する。図 5.1.2.1.3-1 には反射電力関連の反射電力ピーク～反射電力幅、図 5.1.2.1.3-2 にはドップラー関連のドップラー平均、図 5.1.2.1.3-3 には大きさ関連のセル面積和をそれぞれ示す。



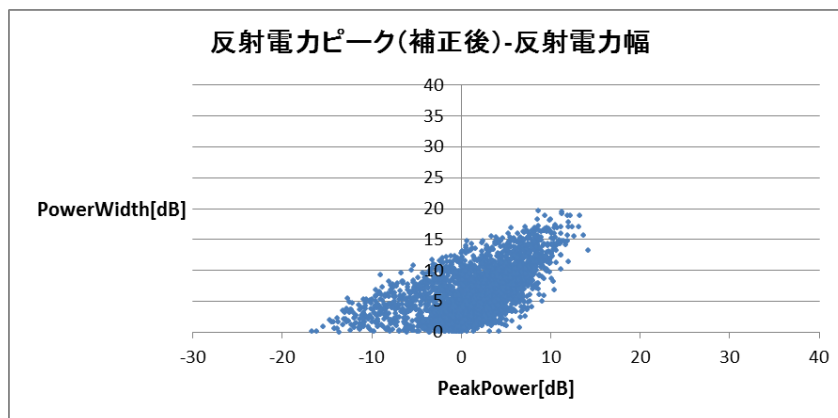
(a) トラックの特徴値分布



(b) セダンの特徴値分布

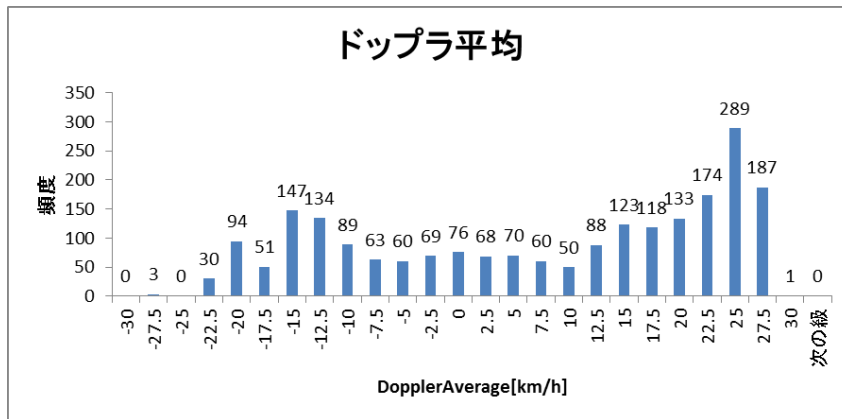


(c) バイクの特徴値分布

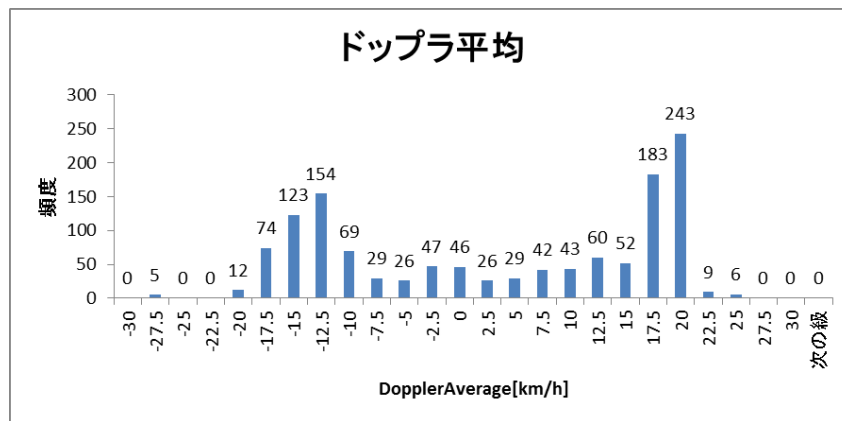


(d) 歩行者の特徴値分布

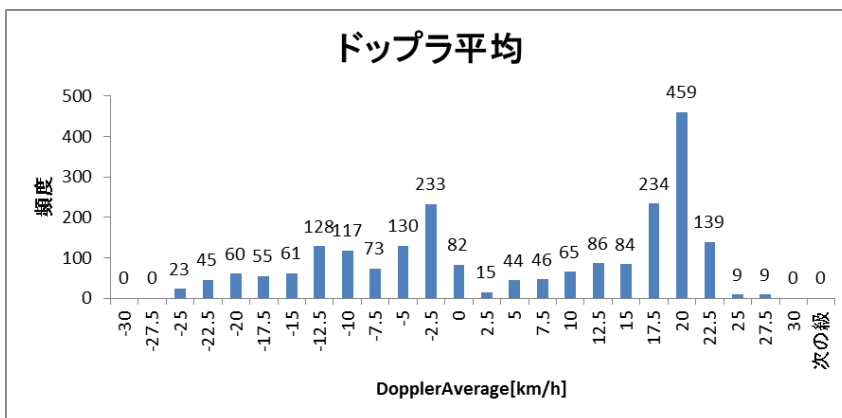
図 5.1.2.1.3-1 反射電力ピーク～反射電力幅の分布図



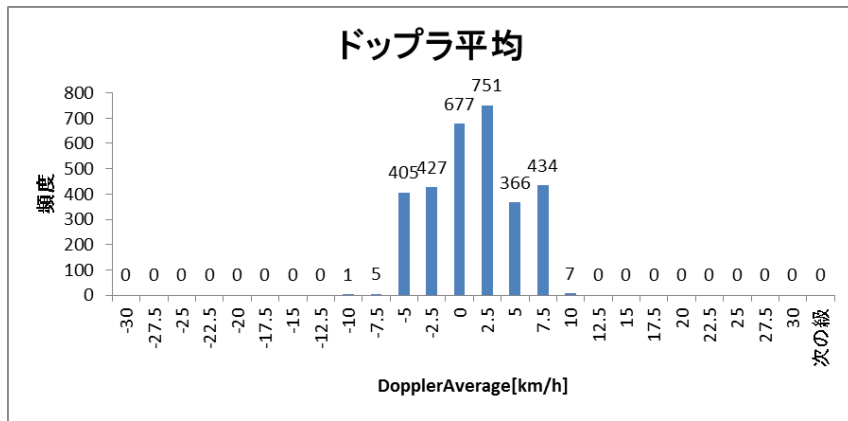
(a) トラックの特徴値分布



(b) セダンの特徴値分布

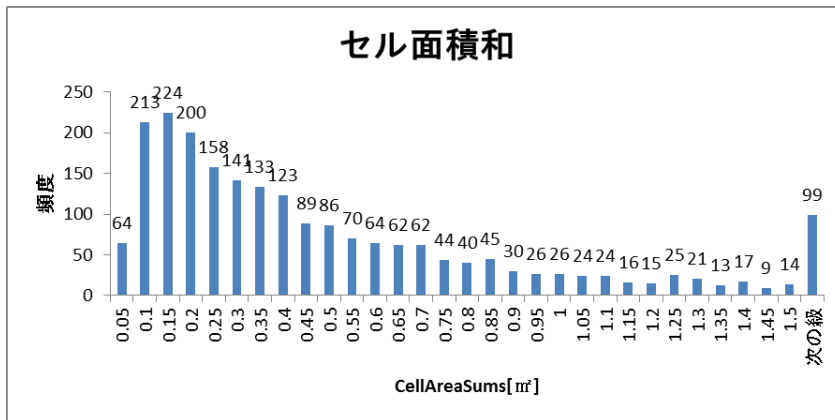


(c) バイクの特徴値分布

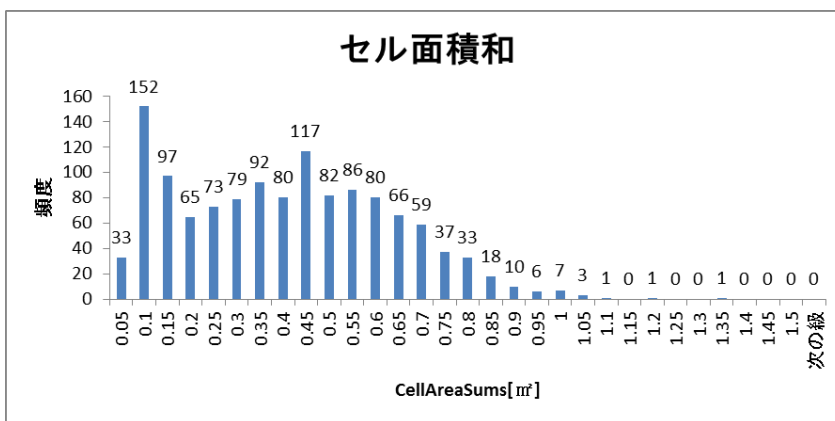


(d) 歩行者の特徴値分布

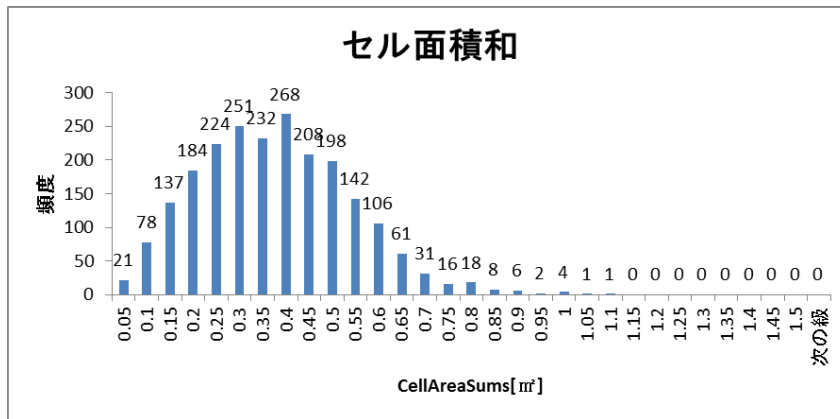
図 5.1.2.1.3-2 ドップラー平均の分布図



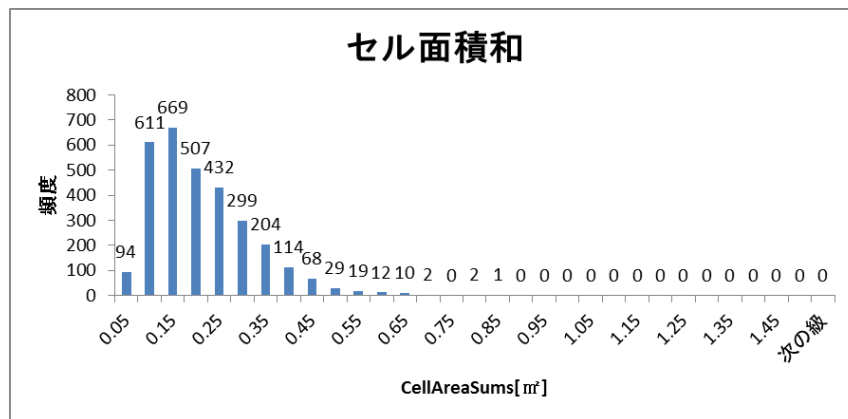
(a) トラックの特徴値分布



(b) セダンの特徴値分布



(c) バイクの特徴値分布

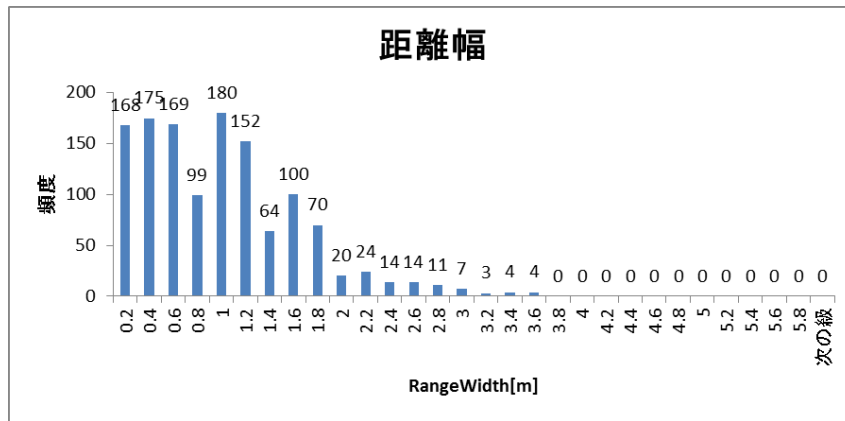


(d) 歩行者の特徴値分布

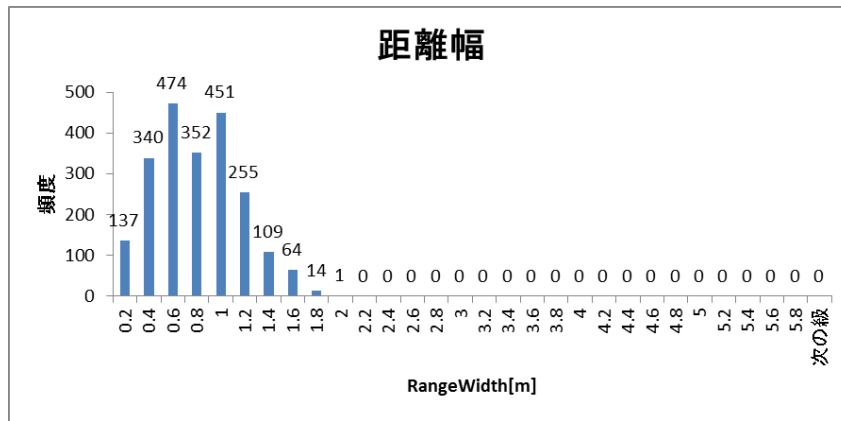
図 5.1.2.1.3-3 セル面積和の分布図

以上各図からも分かるように、何れの特徴分布においても、歩行者と車両(トラック、セダン、バイク)との違いは相対的に大きい。一方、四輪車、特にセダン、と二輪車との違いは小さい。

車種判別を精度よく実現するために、四輪車と二輪車の特徴量に対し、相違点をより強調する必要がある。そのため、セダンとバイクの特徴量分布から相違が相対的に大きい特徴を3つ選出する。実測データを分析した結果、反射電力幅、距離幅、電力分布密度を選出した。反射電力幅の分布は図 5.1.2.1.3-1 に示した。以下、図 5.1.2.1.3-4 に距離幅、図 5.1.2.1.3-5 に電力分布密度、の特徴値分布を示す。

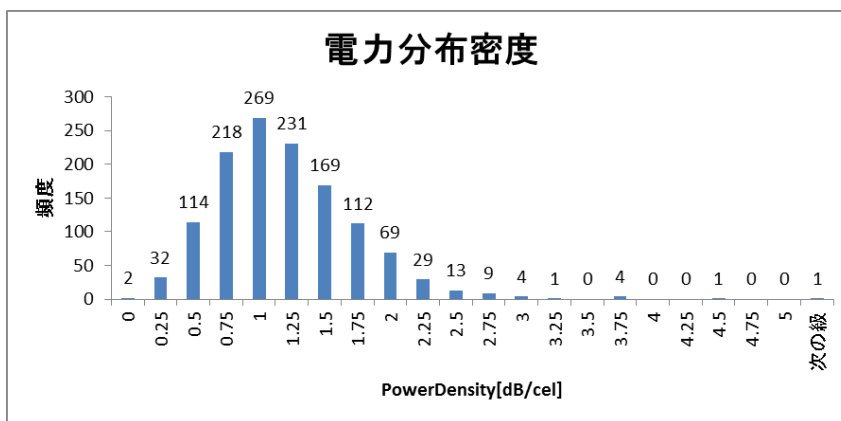


(a) セダンの特徴値分布

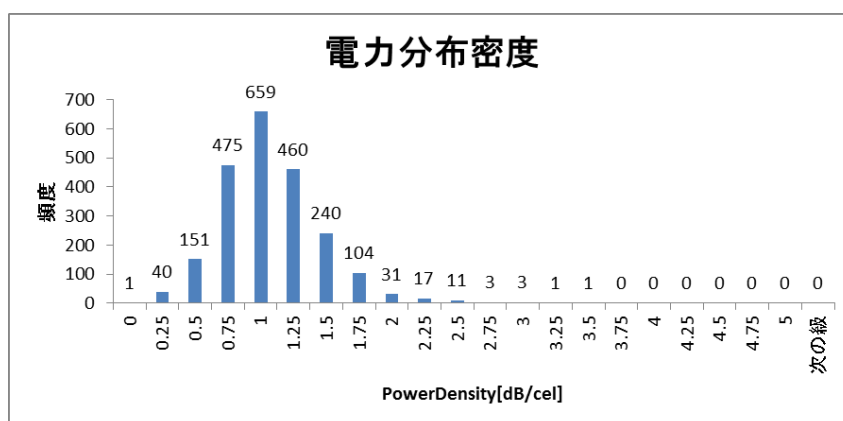


(b) バイクの特徴値分布

図 5.1.2.1.3-4 距離幅の分布図



(a) セダンの特徴値分布



(b) バイクの特徴値分布

図 5.1.2.1.3-5 電力分布密度の分布図

選出した 3 つの特徴量に対し、それぞれの特徴値を利用すること以外に、車両全体の統計平均との偏差も考慮し新しい特徴量を生成する。表 5.1.2.1.3-1 にも示したように、上記偏差が同時に起こることを反映するため、2 つの偏差を乗算しその積を特徴量として利用する。

上記統計平均との偏差以外に、四輪車と二輪車のボディ構成の違いを意識し、反射電力特徴に対し細分化する。具体的には、捕捉領域全体の値以外に、捕捉領域を方位に従い 3 つに分割し、各分割領域の反射電力平均値も特徴量として利用する。

5.1.2.1.4 クラスタ生成

同一の物体から複数の捕捉領域が抽出されることがあるため、近隣する捕捉領域をクラスタリングする必要がある。しかし、近隣する捕捉領域が実際に同一物体に属しても、必ずしも特徴量が似ているとは限らない。従来から、捕捉領域に対しクラスタリングを先に実施すべきか判別を先に実施すべきかには一般解が存在しない。そこで、本研究では、仮クラスタの概念を導入する。仮クラスタとは、判別を実施する前に近隣する捕捉領域をクラスタリングし、1 つの仮クラスタを生成する。その仮クラスタに対し特徴を抽出し、捕捉領域の判別に利用する。捕捉領域の判別結果が同じであれば、実際にクラスタを生成し同一物体と判定する。逆に、捕捉領域の判別結果が別々であれば、仮クラスタを解消する。

クラスタリングの対象範囲は捕捉領域間の距離より確定する。また、対象捕捉領域を包含した領域を仮クラスタ領域とする。図 5.1.2.1.4-1 にクラスタリングの一例を示す。図において、図 5.1.2.1.2-3 に示した捕捉領域をクラスタリングの対象とし、黄色い枠は四輪車から抽出した捕捉領域を表示し、青い枠は仮クラスタ領域を表示する。一般的に、仮クラスタは2つの捕捉領域に限らず、3つ以上の捕捉領域を包含することも可能である。

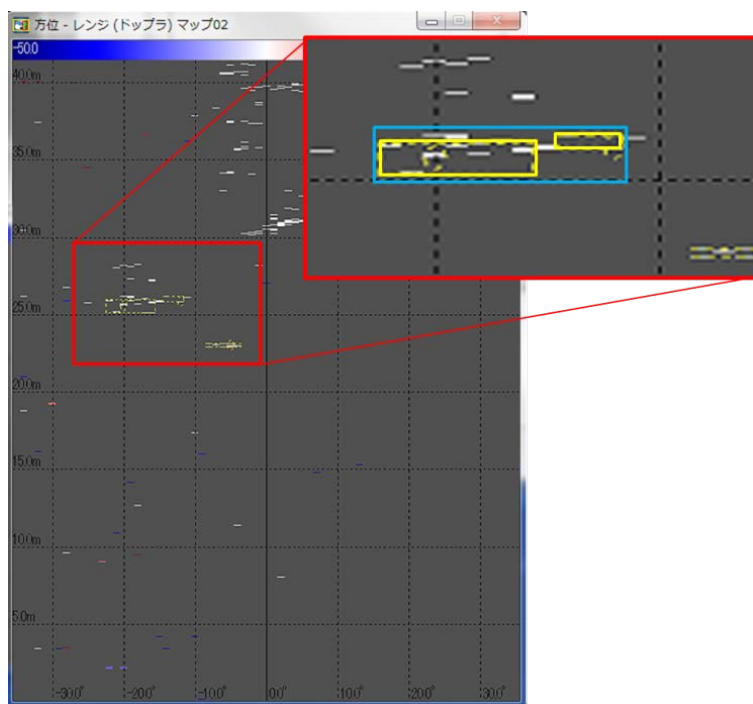


図 5.1.2.1.4-1 クラスタ生成

5.1.2.1.5 クラスタ特徴算出

仮クラスタに対する特徴量は、クラスタの分割領域関連特徴、各捕捉領域と仮クラスタとの相対位置関係の関連特徴などより構成する。表 5.1.2.1.5-1 に主なクラスタ特徴量を示す。

表 5.1.2.1.5-1 クラスタ特徴量

特徴属性名	特徴属性値
左側領域反射電力平均	クラスタにおいて、捕捉領域より左側領域に属するセルの反射電力平均値
左側領域ドップラー平均	クラスタにおいて、捕捉領域より左側領域に属するセルのドップラー速度平均値

中央領域反射電力平均	クラスタにおいて、捕捉領域の方位角範囲に属するセルの反射電力平均値 中央領域は捕捉領域及びその前後一定範囲を含む
中央領域ドップラー平均	クラスタにおいて、捕捉領域の方位角範囲に属するセルのドップラー速度平均値 中央領域は捕捉領域及びその前後一定範囲を含む
右側領域反射電力平均	クラスタにおいて、捕捉領域より右側領域に属するセルの反射電力平均値
右側領域ドップラー平均	クラスタにおいて、捕捉領域より右側領域に属するセルのドップラー速度平均値
方位比率	捕捉領域の方位幅と仮クラスタ全体の方位幅との比率
中心方位差	捕捉領域の中心方位と仮クラスタ全体の中心方位との角度差

クラスタ特徴量は捕捉領域特徴量と共に、各捕捉領域の判別に利用する。また、仮クラスタ全体に対する判別は行わない。代わりに、各捕捉領域の判別結果に基づき、最終的にクラスタの範囲を確定する。詳細は後の統合判別器の節で説明する。

5.1.2.1.6 解析判別器

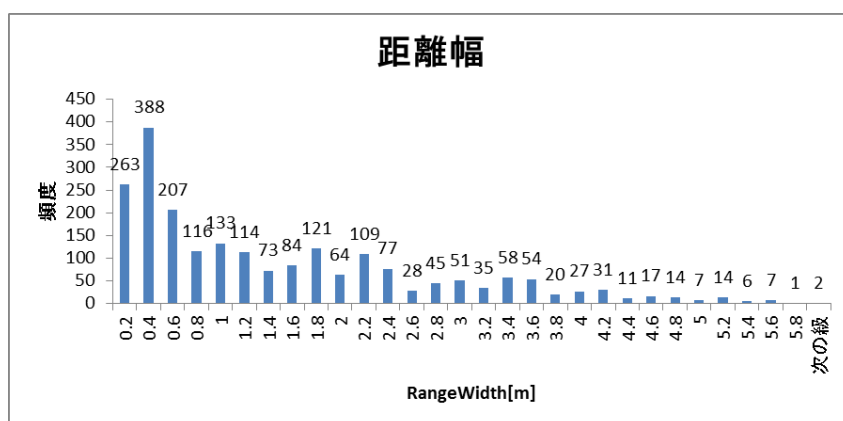
算出した特徴値において、四輪車、特にトラック、がほかの対象物体よりも値の範囲が広い。例えば、反射電力幅や距離幅においてより大きな値を有する。逆に言えば、反射電力幅や距離幅の特徴値が一定以上であれば、その捕捉領域を四輪車((トラック))に判別できる。解析判別器はこのように特定の特徴に対し、閾値を設定する。実測特徴値が閾値以上になった場合は四輪と判別する。

解析判別器を利用することによって、後に説明する SVM 判別器の適用データ範囲を狭めることができ、SVM 判別器の判別精度改善に有利である。

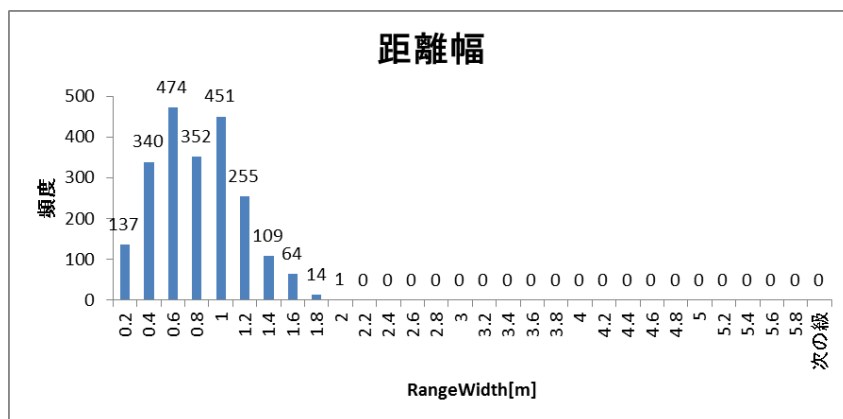
表 5.1.2.1.6-1 に示す閾値条件で解析判別器を構成する。解析判別器に利用した特徴量及び対応閾値は、実測データの特徴量分布より取得する。反射電力幅と電力分布密度の特徴量分布図は前の節で示した。ここでは、距離幅に対し、トラックとバイクの特徴量分布を図 5.1.2.1.6-1 に表示する。

表 5.1.2.1.6-1 解析判別器の閾値条件

特徴量データ名称	閾値条件
反射電力幅[dB]	≥ 25
距離幅[m]	≥ 1.9
電力分布密度	≥ 4.0



(a) トラック



(b) バイク

図 5.1.2.1.6-1 距離幅の分布

5.1.2.1.7 二段 SVM 判別器

レーダー測定値が対象物体の視覚属性(形状や色彩など)を直接に反映しないので、対象物体を判別する際に、複数の特徴量を組み合わせて利用する必要がある。また、SVM は基本的に 2 クラスを判別する手法であるため、4 クラスを判別する場合は少なくとも二段構成が必要である。二段構成方式にも複数の選択肢があるが、ここでは、1 段目で「車両」と「その他 1」とを判別し、2 段目で 1 段目の「車両」を「四輪」と「二輪」、1 段目の「その他 1」を「歩行者」と「その他 2(静止物体)」に判別する。1 段目で「車両」と「その他 1」を選んだ理由として、次の二点が挙げられる。一つ目は、2 段目の判別器を実装しなくても「車両」とその他(主に歩行者)を判別できる判別器として応用可能である。二つ目は、特徴量の分布からみても、「車両」とその他(主に歩行者)との相違が相対的に大きいため、SVM 判別器を構成する際に判別精度を確保しやすい。

二段 SVM 判別器では実質的に 3 つの SVM 判別器を構築する。各 SVM 判別器に利用される特徴量が同じであれば特徴抽出が簡単になるが、高い判別精度を確保するため、それぞれに相応しい特徴量を利用する。特に、2 段目の四輪車と二輪車の判別において、捕捉領域の細分化関連特徴と統計平均偏差関連特徴を追加し利用する。

各 SVM 判別器で異なる特徴量を利用するが、構成手順は同じである。つまり、収集した学習データを SVM の所定処理で学習し、SVM 判別器用のパラメータを確定する。図 5.1.2.1.7-1 に SVM 判別器の作成プロセス、つまり、学習プロセスを示す。図において、捕捉領域抽出、捕捉領域特徴算出、クラスタ生成、クラスタ特徴算出は図 5.1.2.1.1-1 と同様な処理を行う。正解タグ付けブロックでは、SVM 判別器毎に判別対象の学習データを生成する。例えば、1 段目の SVM 判別器の場合、「車両」データと「その他 1」（歩行者、静止物など）データをそれぞれ用意する。現在、データの選別は人力に依存している。学習処理ブロックでは、SVM の所定方式で学習データから判別器用のパラメータを生成する。

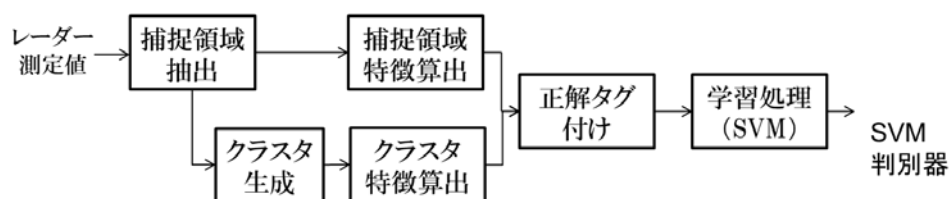


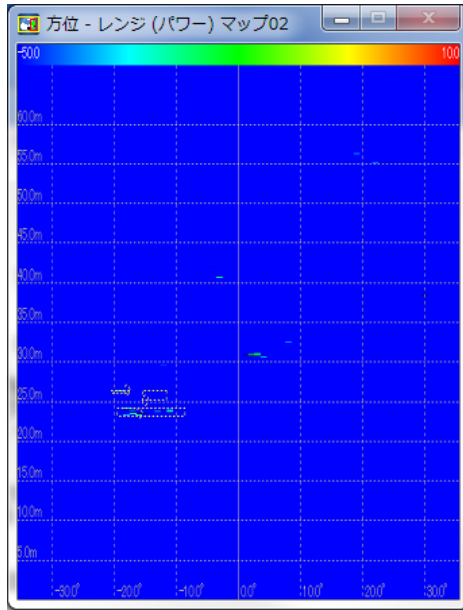
図 5.1.2.1.7-1 SVM 判別器の作成

上記 SVM 判別器の作成プロセスはオフラインで実施し、作成した SVM 判別器はオンラインで利用する。

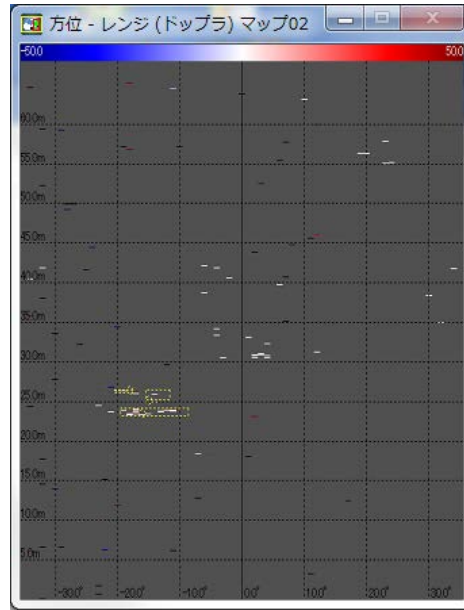
5.1.2.1.8 統合判別器

統合判別器では、SVM 判別処理の後処理として、以下の 2 つの処理を実施する。1 つは仮クラスタにおける各捕捉領域の判別結果を統合する。もう 1 つは、捕捉領域の追従結果を利用する。

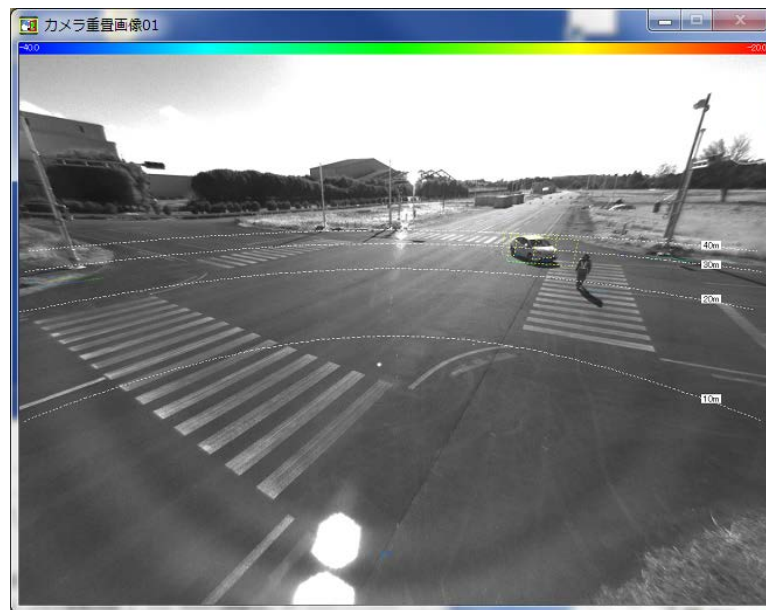
クラスタ仮クラスタにおける各捕捉領域の判別結果を統合する際に、3 つのケースがある。ケース 1 では、各捕捉領域の判別結果が同じである。この場合、仮クラスタ全体を 1 つの物体として判別する。つまり、各捕捉領域が同一物体の異なる部位に対応するであると判定し、仮クラスタ領域を物体領域となる。ケース 1 の例として、図 5.1.2.1.8-1 に統合処理前の結果、図 5.1.2.1.8-2 に統合処理後の結果を示す。図 5.1.2.1.8-1 では、各捕捉領域(黄色枠)が四輪車と判別された。図 5.1.2.1.8-2 では、各捕捉領域を統合し、1 つの物体(四輪車)(青色枠)と判別した。



(a) 反射電力

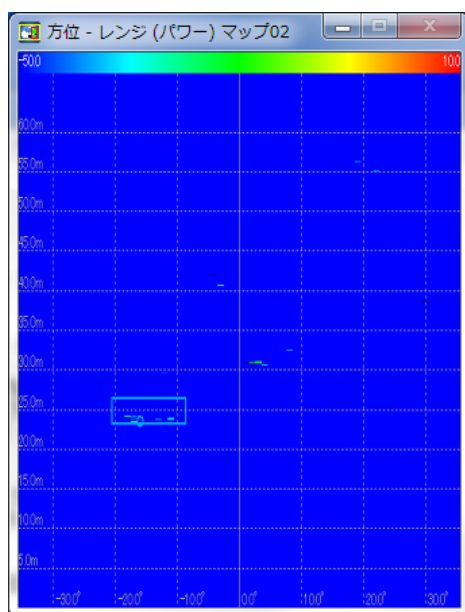


(b) ドップラー

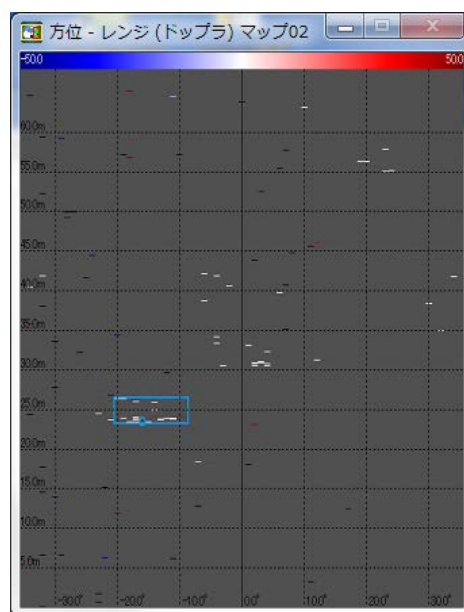


(c) カメラ画像

図 5.1.2.1.8-1 ケース 1 の統合処理前の結果



(a) 反射電力



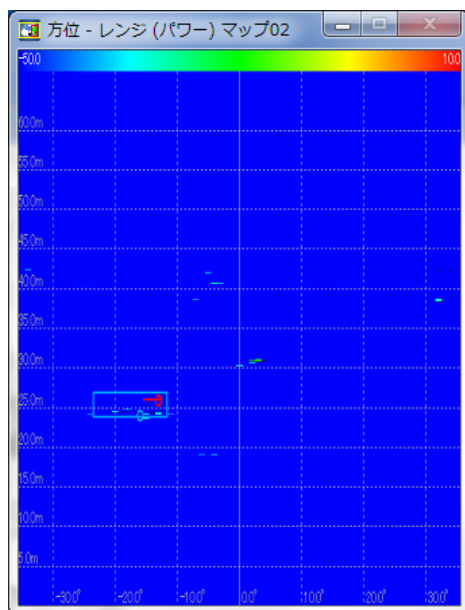
(b) ドップラー



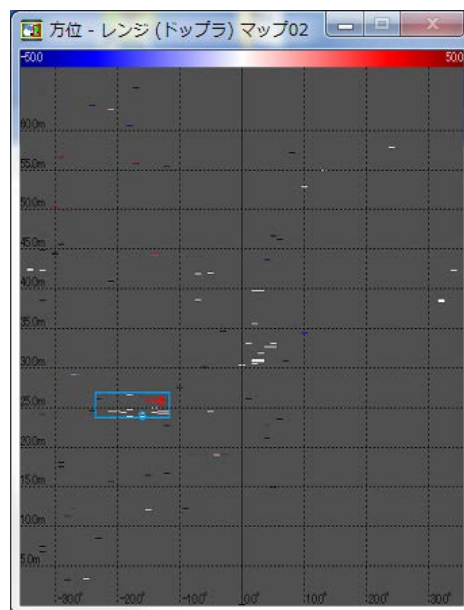
(c) カメラ画像

図 5.1.2.1.8-2 ケース 1 の統合処理後の結果

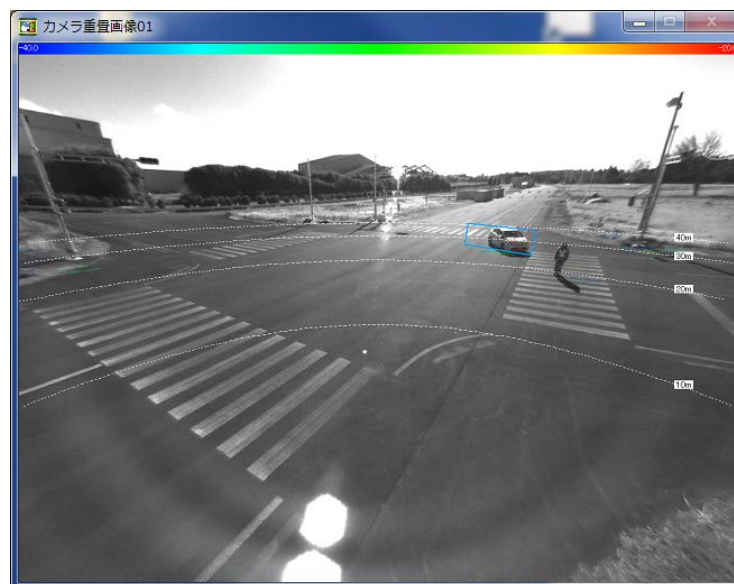
ケース 2 は、各捕捉領域の判別結果が異なる場合である。例えば、歩行者と判定された捕捉領域が四輪車の捕捉領域に包囲された場合である。図 5.1.2.1.8-3 において、歩行者(赤色枠)と判定された捕捉領域(赤色枠)が四輪車と判定された大きな捕捉領域(青色枠)のすぐ後ろにある。この場合、歩行者判別結果が誤りと認定し、それを四輪車に修正する。そして、各捕捉領域を統合し、四輪車と判別する。



(a) 反射電力



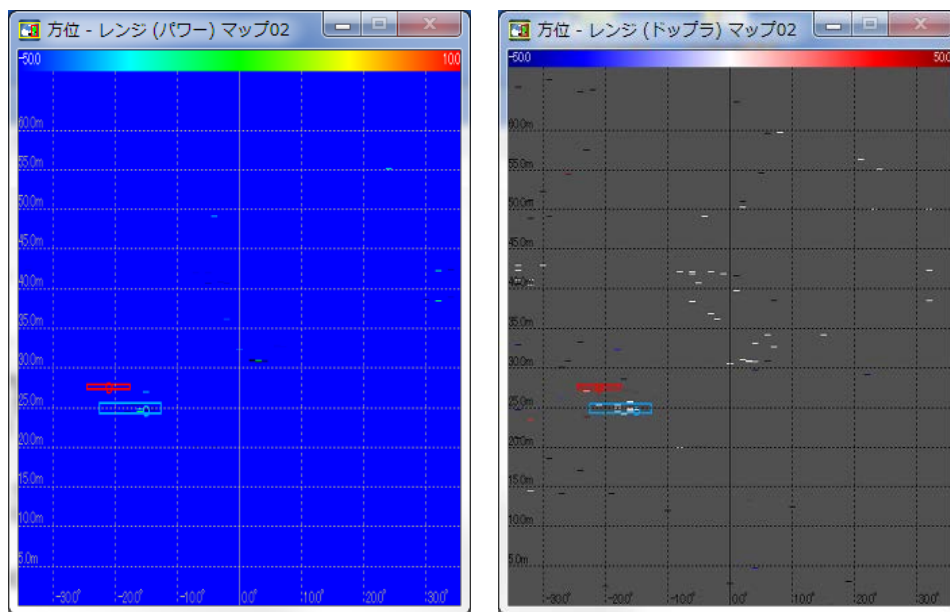
(b) ドップラー



(c) カメラ画像

図 5.1.2.1.8-3 ケース 2 の例

ケース 3 は、ケース 2 と同様で各捕捉領域の判別結果が異なる場合である。図 5.1.2.1.8-4 において、歩行者と判定された捕捉領域(赤色枠)が四輪車と判定された捕捉領域(青色枠)の後ろにあるが、離れた距離は妥当である。この場合、統合処理をせず、歩行者と四輪車の判別を維持する。実際に歩行者判別は誤りであるため、追従など他の手段で排除する必要がある。



(a) 反射電力

(b) ドップラー



(c) カメラ画像

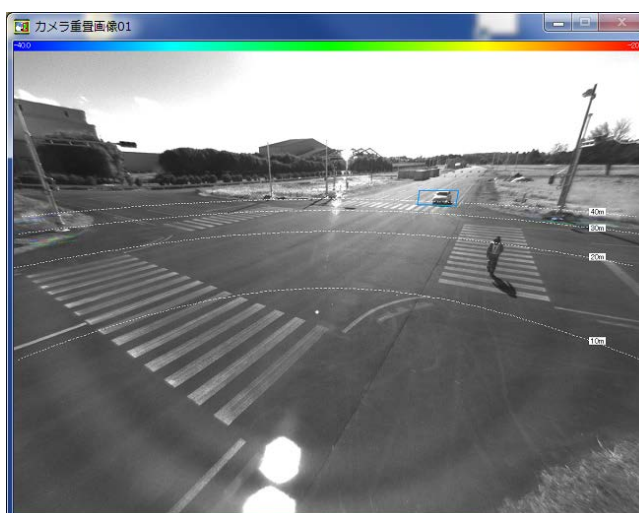
図 5.1.2.1.8-4 ケース 3 の例

統合判別器のもう 1 つの処理は、捕捉領域に対する追従結果に基づき、過去フレームの判別結果を蓄積し、現在フレームの判別で利用する。捕捉領域の追従は連続フレームにおける捕捉領域の空間変動によって対応付けを行い、同じ物体に同じ ID を付与する。現在フレームにおける捕捉領域を判別する際に、同じ ID を有する過去のフレームの結果を含め、多数決で捕捉領域の判別結果を決める。

図 5.1.2.1.8-5 に追従結果による判別結果修正の例を示す。図において、(a) と (b) は蓄積した過去のフレームを表し、何れも四輪車と判別した(青色枠)。 (c) は現在フレームを表し、捕捉領域を特徴量より二輪車と判別した(緑色枠)。しかし、追従の履歴から、二輪車の可能性が低いため、追従の対応付け結果より、判別結果を四輪車に修正する。但し、二輪車を判別した結果事実は記録に残り、次フレーム以降の判別に履歴情報として提供する。



(a) フレーム No.108



(b) フレーム No.114



(c) フレーム No.118

図 5.1.2.1.8-5 追従による統合処理

5.1.2.2 車種判別アルゴリズムの性能検証

車種判別アルゴリズムの性能を検証するため、日本自動車研究所 模擬市街路テストコースを利用し実証実験を行った。

実証実験では、4車線×4車線の交差点にインフラレーダーを設置し、車線を走行する四輪車(トラック、セダン)と二輪車(バイク)、そして横断歩道を歩く歩行者の判別実験を行った。交差点の寸法とレーダーの設置位置を図 5.1.2.2-1 に示す。レーダーの設置高度は 5m である。

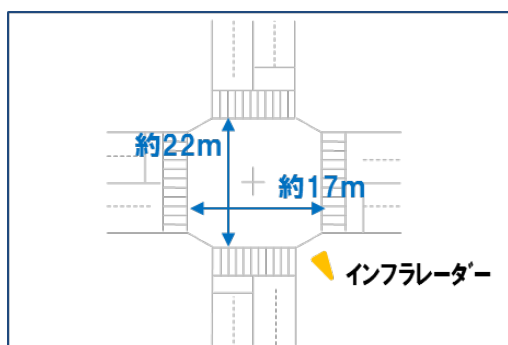


図 5.1.2.2-1 検証用交差点とレーダー設置位置

以下、記述を簡単にするため、車両の走行ルートを図 5.1.2.2-2 に基づき表記する。

つまり、レーダー視点(カメラ視点同様)で始点位置と終点位置を表記する。例えば、図に示した走行ルート①は後→右左折で、走行ルート②は右→左直進で表記する。

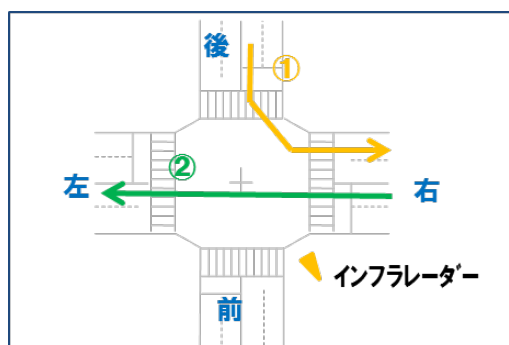


図 5.1.2.2-2 走行ルートの表記方式

走行ルートによって、以下 5 つの検証実験を行った。各検証実験の詳細は以下各節で順番に説明する。

- ◇ 検証実験 1：車両／後→前直進
- ◇ 検証実験 2：車両／右→左直進
- ◇ 検証実験 3：車両／後→右左折
- ◇ 検証実験 4：車両／後→左右折
- ◇ 検証実験 5：歩行者／横断歩道

5.1.2.2.1 検証実験 1：車両／後→前直進

対象車両は、トラック(四輪車)、セダン(四輪車)、バイク(二輪車)の 3 種類である。各対象車両の走行ルートは後→前方向での直進である。但し、同じ種類の車両が 2 台一列に並び走行する場合もある。以下、対象車両毎に検証結果を記述する。

■トラックの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.1-1 に示す。歩行者には誤判別されていないが、二輪車には誤判別されている。また、近距離の時に誤認識が相対的に多かった。原因は、車体から小さい領域を含め複数の捕捉領域が検出され、一部がバイクに誤判別され、しかも統合処理の対象になっていないからであった。今後、二輪車対象の統合処理と 1 対多の追従処理の追加が必要と思われる。

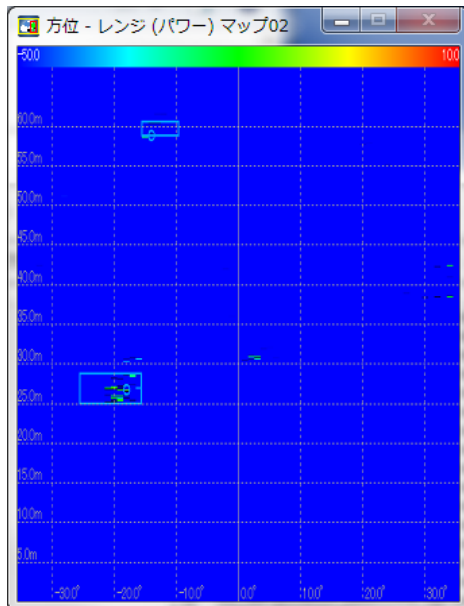
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.1-1 に示す。

表 5.1.2.2.1-1 トラックの判別結果(後→前直進)

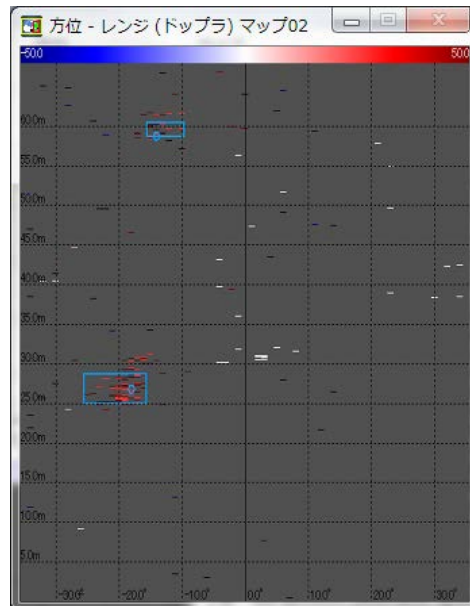
	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 1-T-1	561	94.5%	5.5%	0.0%	0.0%
テスト 1-T-2	318	97.2%	2.8%	0.0%	0.0%



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.1-1 トラックの判別実験(後→前直進)

■セダンの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.1-2 に示す。歩行者には誤判別されていないが、二輪車には誤判別されている。交差点手前や交差点内の時に誤判別が相対的に多い。原因としては、低速で走っているため、セダンとバイクとの区別に必要な特徴量が少なくなったためである。

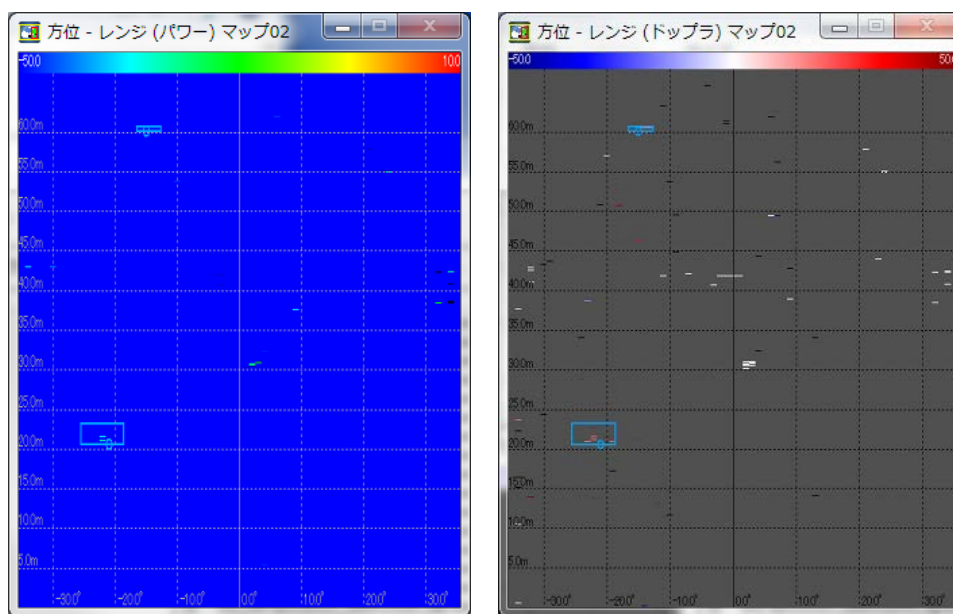
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.1-2 に示す。

表 5.1.2.2.1-2 セダンの判別結果(後→前直進)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 1-S-1	255	97.3%	2.7%	0.0%	0.0%
テスト 1-S-2	165	97.0%	3.0%	0.0%	0.0%



(a) カメラ画像



(b) 反射電力

(c) ドップラー

図 5.1.2.2.1-2 セダンの判別実験(後→前直進)

■ バイクの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.1-3 に示す。歩行者には誤判別されていないが、四輪車に誤判別されている。近距離の時に誤判別が相対的に多い。原因としては、捕捉領域が大きくなり四輪車との区別が難しくなったためである。

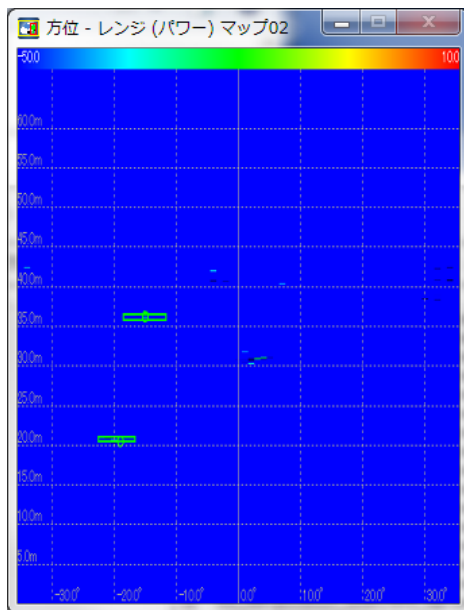
表 5.1.2.2.1-3 バイクの判別結果

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 1-B-1	165	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
テスト 1-B-2	140	4.3%	95.7%	0.0%	0.0%

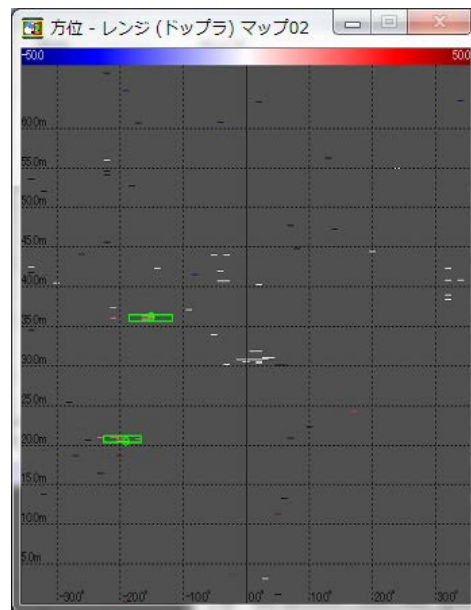
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.1-3 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.1-3 バイクの判別実験(後→前直進)

5.1.2.2.2 検証 2 : 車両 / 右→左直進

対象車両は、トラック(四輪車)、セダン(四輪車)、バイク(二輪車)の 3 種類である。各対象車両の走行ルートは右→左方向での直進である。但し、同じ種類の車両が 2 台一列に並び走行する場合もある。以下、対象車両毎に検証結果を記述する。

■トラックの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.2-1 に示す。二輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。原因としては、後→前直進の走行ルートの場合と比べると、車体の側面にレーダーが当たっているため、車体から細かい領域を含め複数の捕捉領域が抽出され、一部が歩行者或いは二輪車に誤判別されてしまい、しかも統合処理では統合の対象になっていないためである。

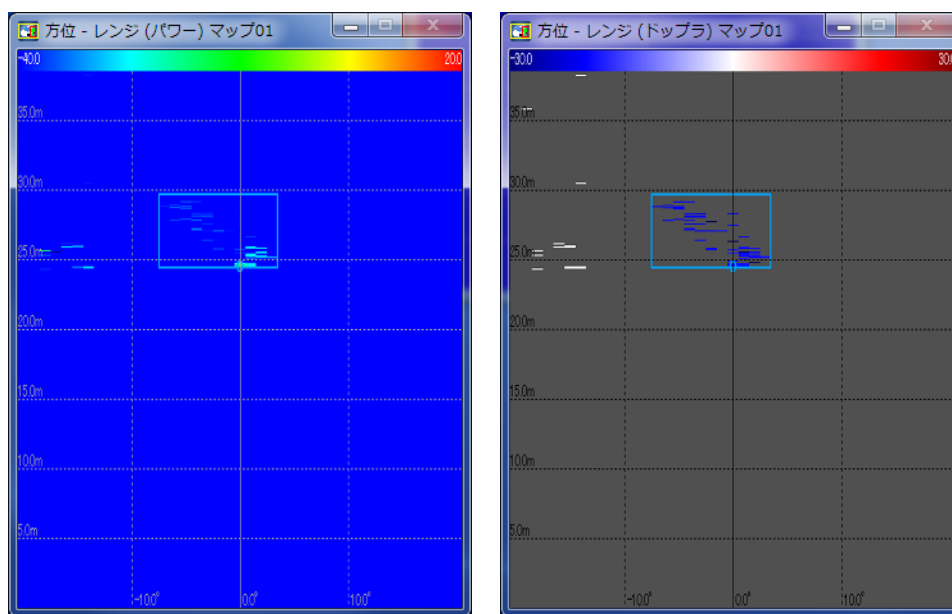
表 5.1.2.2.2-1 トラックの判別結果(右→左直進)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 2-T-1	271	93.4%	3.3%	2.2%	1.1%

また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.2-1 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力

(c) ドップラー

図 5.1.2.2.2-1 トラックの判別実験(右→左直進)

■セダンの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.2-2 に示す。二輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。原因としては、トラック同様、車体の側面にレーダーが当たっているため、車体から複数の捕捉領域が抽出され、一部が歩行者或いは二輪車に誤判別されてしまい、統合処理では統合の対象になっていないためである。

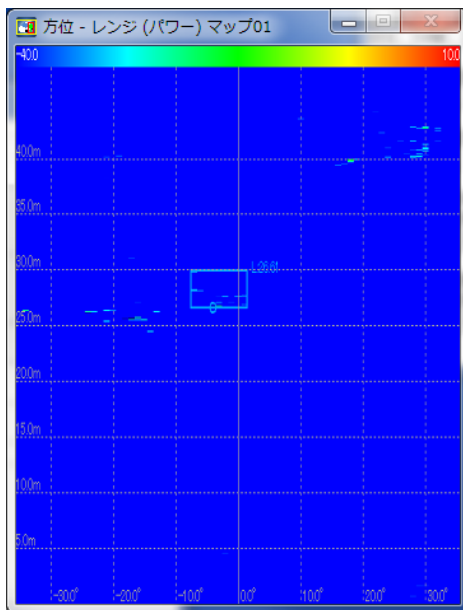
表 5.1.2.2.2-2 セダンの判別結果(右→左直進)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 2-S-1	188	95.7%	2.7%	1.6%	0.0%

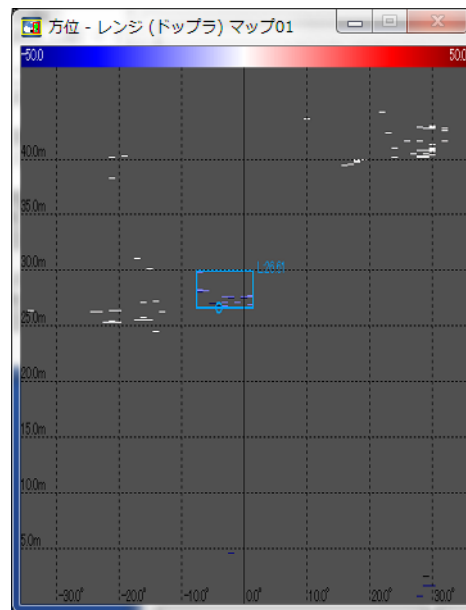
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.2-2 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.2-2 セダンの判別実験(右→左直進)

■ バイクの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.2-3 に示す。四輪車にもその他(静止物)にも誤判別されたている。原因としては、後→前直進の走行ルートと比較すると、バイクからの捕捉領域が大きくなったことと、レーダーからみたドップラー速度が小さくなったことにある。

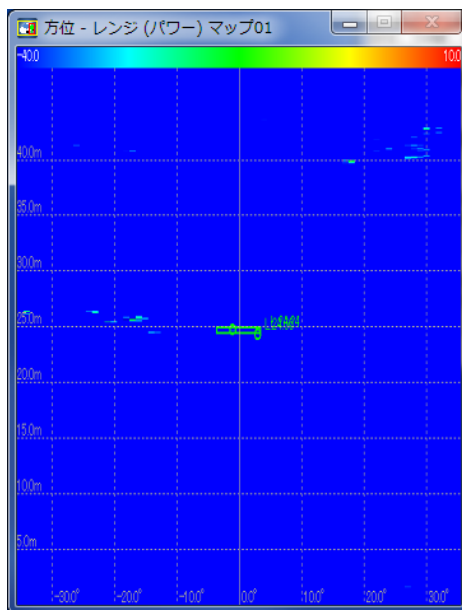
表 5.1.2.2.2-3 バイクの判別結果(右→左直進)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 2-B-1	103	1.9%	95.2%	0.0%	2.9%

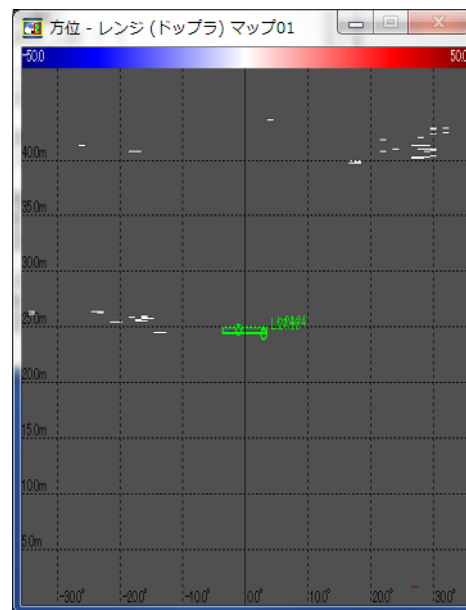
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.2-3 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.2-3 バイクの判別実験(右→左直進)

5.1.2.2.3 検証3：車両／後→右左折

対象車両は、トラック(四輪車)、セダン(四輪車)、バイク(二輪車)の3種類である。各対象車両の走行ルートは後→右方向で、直進の後に画面右へ左折する。但し、同じ種類の車両が2台一列に並び走行する場合もある。以下、対象車両毎に検証結果を記述する。

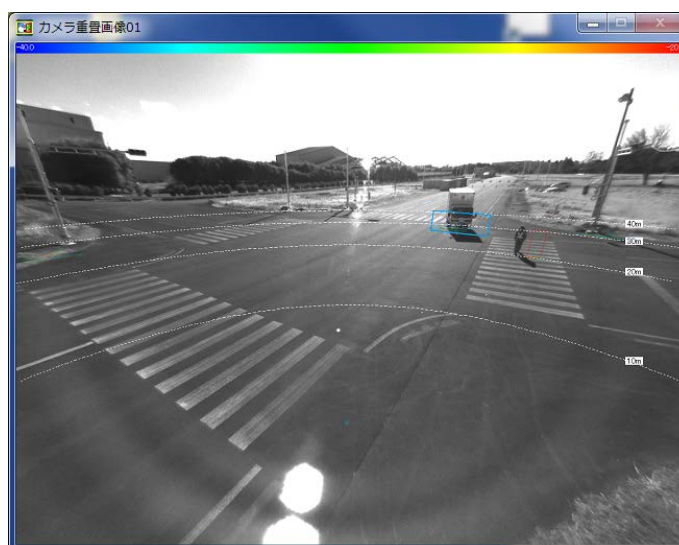
■トラックの判別結果

実験結果を表5.1.2.2.3-1に示す。二輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。直進時よりも左折時の誤判別が多い。左折する時に、車体の側面にレーダーが当たっていることと、ドップラー検出が難しいことから、誤判別されやすくなる。

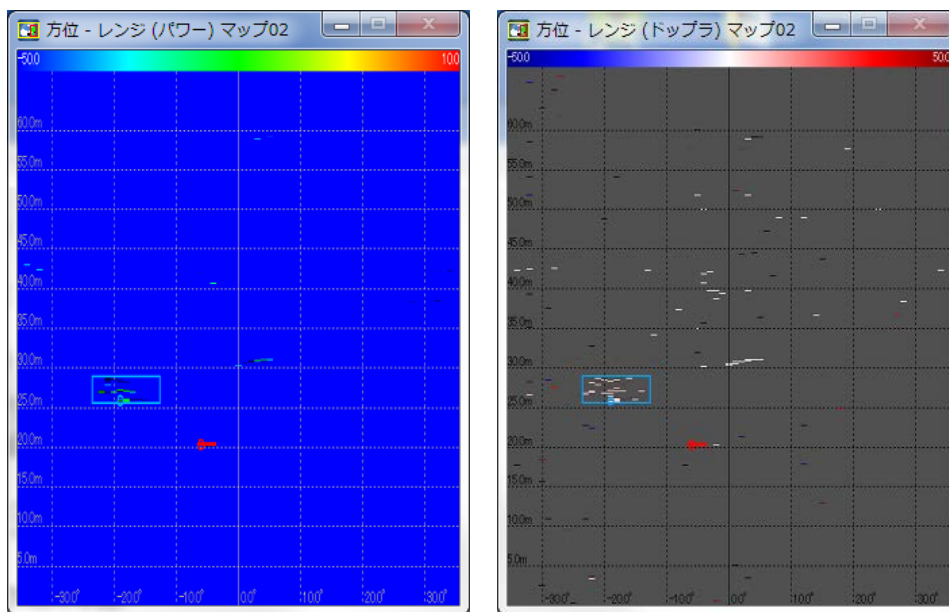
表5.1.2.2.3-1 トラックの判別結果(後→右左折)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト3-T-1	572	94.1%	2.8%	2.6%	0.5%
テスト3-T-2	464	96.1%	2.6%	1.3%	0.0%

また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図5.1.2.2.3-1に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力

(c) ドップラー

図 5.1.2.2.3-1 トラックの判別実験(後→右左折)

■セダンの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.3-2 に示す。二輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。直進時よりも左折時の誤判別が多い。左折する時に、車体の側面にレーダーが当たっていることと、ドップラー検出が難しいことから、誤判別されやすくなる。

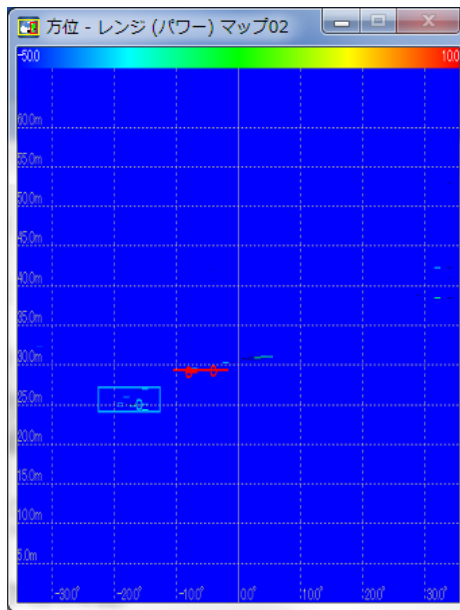
表 5.1.2.2.3-2 セダンの判別結果(後→右左折)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 3-S-1	276	92.7%	2.9%	3.3%	1.1%
テスト 3-S-2	274	97.1%	1.1%	1.8%	0.0%

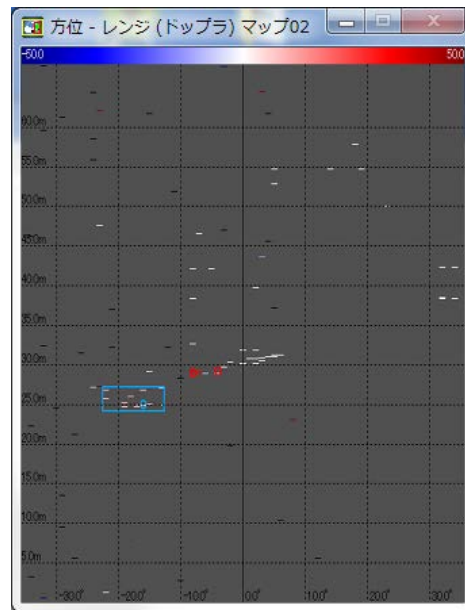
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.3-2 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.3-2 セダンの判別実験(後→右左折)

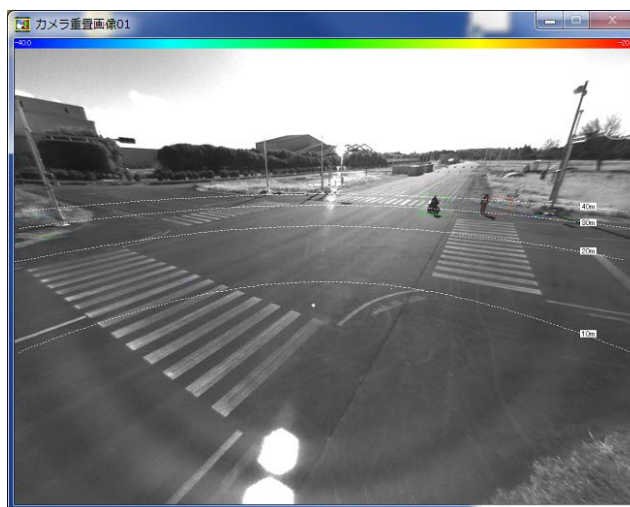
■ バイクの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.3-3 に示す。四輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。直進時よりも左折時の誤判別が多い。左折する時に、バイクの捕捉領域が大きくなり、四輪車との区別が小さくなる。更に、低速走行になりドップラー検出が難しいことから、判別に有効な特徴量が少なくなっている。上記原因により誤判別されやすくなる。

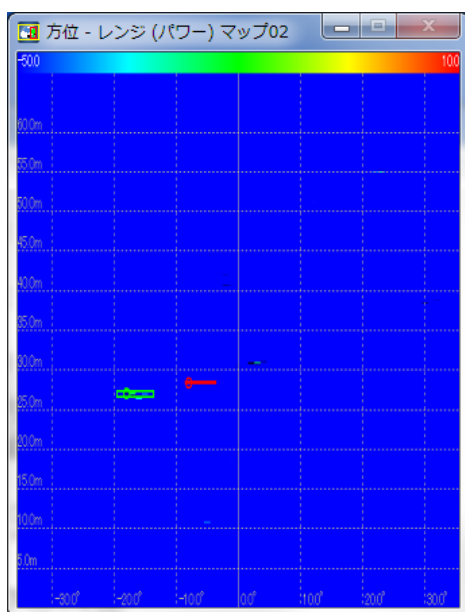
表 5.1.2.2.3 バイクの判別結果

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 3-B-1	224	3.6%	92.9%	2.2%	1.3%
テスト 3-B-2	145	9.0%	82.0%	9.0%	0.0%

また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.3-3 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.3-3 バイクの判別実験(後→右左折)

5.1.2.2.4 検証4：車両／後→左右折

対象車両は、トラック(四輪車)、セダン(四輪車)、バイク(二輪車)の3種類である。各対象車両の走行ルートは後→左方向で、直進の後に画面左へ右折する。但し、同じ種類の車両が2台一列に並び走行する場合もある。

以下、対象車両毎に検証結果を記述する。

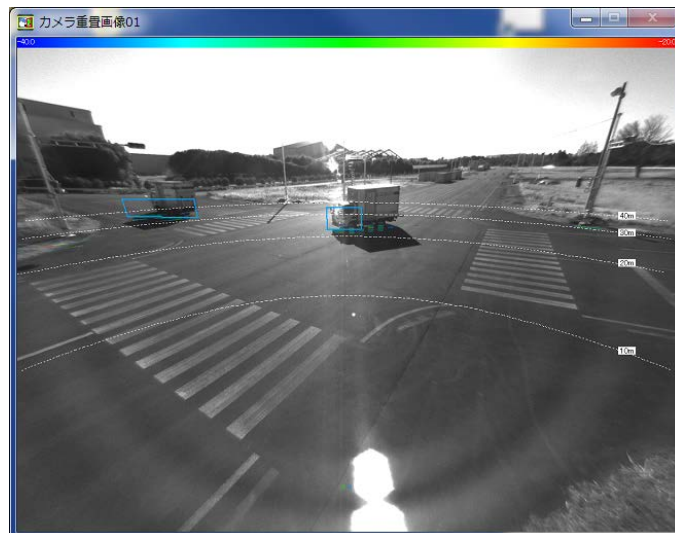
■トラックの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.4-1 に示す。二輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。直進時よりも右折時の誤判別が多い。右折する時に、車体の側面にレーダーが当たっているため捕捉領域が複数検出されることと、ドップラー速度の検出が難しいことから、誤判別されやすくなる。

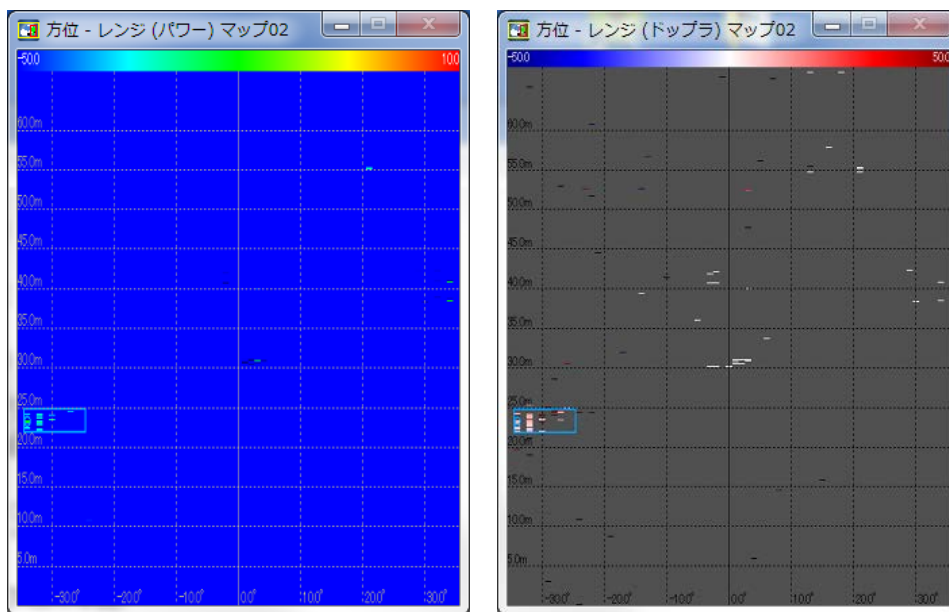
表 5.1.2.2.4-1 トラックの判別結果(後→左右折)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 4-T-1	1063	91.6%	4.9%	3.3%	0.2%

また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.4-1 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力

(c) ドップラー

図 5.1.2.2.4-1 トラックの判別実験(後→左右折)

■セダンの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.4-2 に示す。二輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。特に、二輪車に誤判別されたフレームが非常に多い。原因としては、右折時の捕捉領域反射特性とドップラー特性がバイクの特性に非常に近いためである。この問題を解決するには、検証データの追加、及び検証データ解析による特徴量の改良、更に追従の強化が必要と思われる。

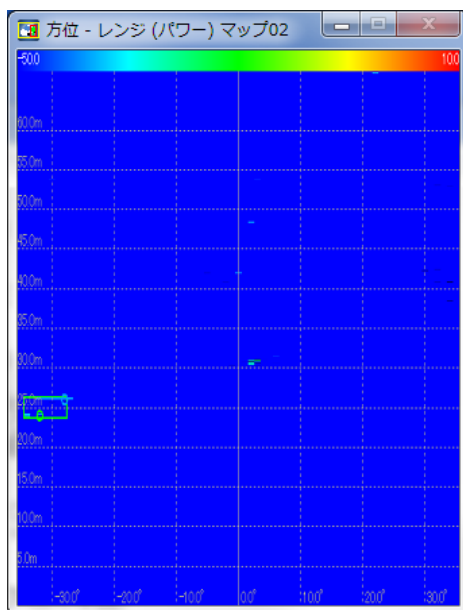
表 5.1.2.2.4-2 セダンの判別結果(後→左右折)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 4-S-1	574	81.7%	17.2%	0.9%	0.2%

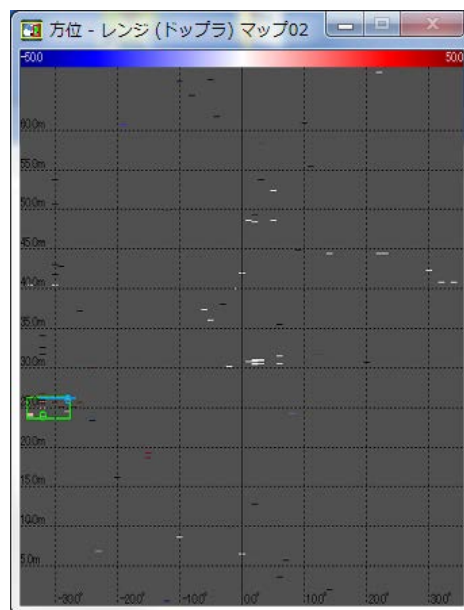
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.4-2 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.4-2 セダンの判別実験(後→左右折)

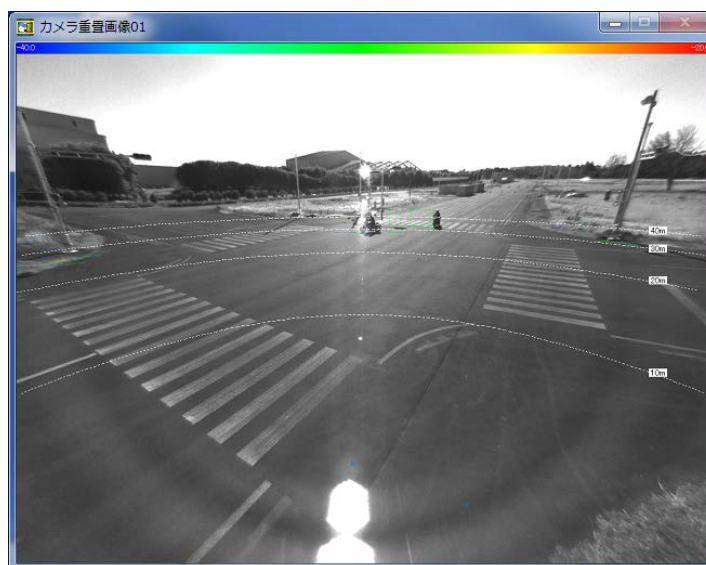
■ バイクの判別結果

実験結果を表 5.1.2.2.4-3 に示す。四輪車にも歩行者にも誤判別されたフレームがある。但し、歩行者と比べると四輪車への誤判別が相対的に多い。右折時にバイクの捕捉領域特性が四輪車に近いことと、低速と走行方向よりドップラー特性の取得も難しくなることが原因で、判別が難しくなる。

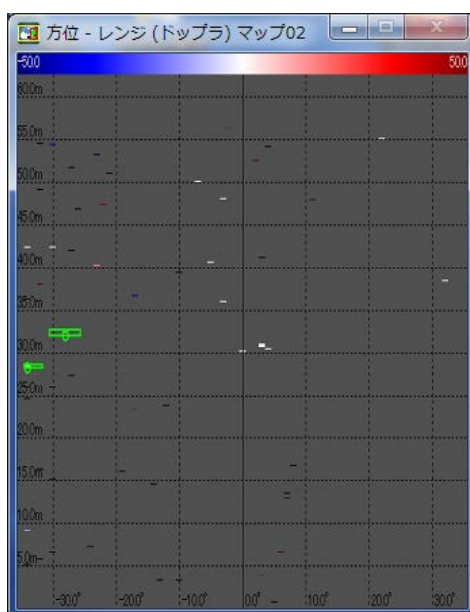
表 5.1.2.2.4-3 バイクの判別結果

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他(静止物)
テスト 4-B-1	422	5.0%	94.3%	0.7%	0.0%

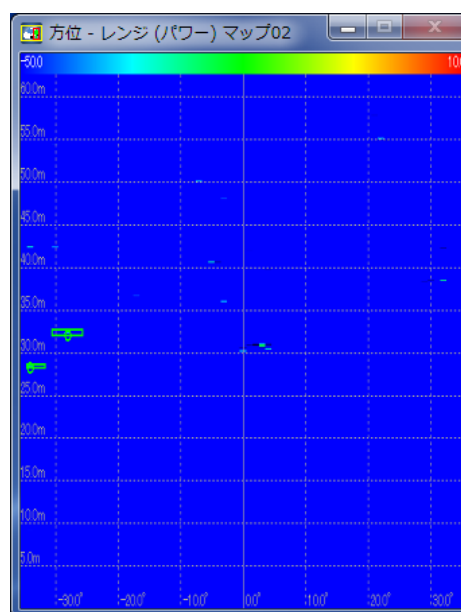
また、実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.4-3 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.4-3 バイクの判別実験(後→左右折)

5.1.2.2.5 検証5：歩行者／横断歩道

判別対象は、交差点の横断歩道を通常に歩く歩行者である。図 5.1.2.2.5-1 に示すように前後方向、左右方向両方の横断歩道を対象範囲とする。また、歩行者の人数も 1 人の場合と 2 人同時の場合を含む。歩行者は通常の歩く速度で横断歩道を往復する。

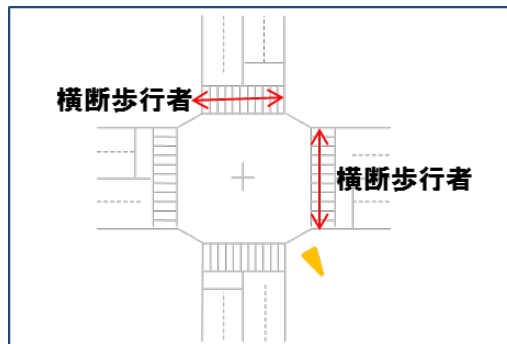


図 5.1.2.2.5-1 歩行者判別検証用横断歩道

実験結果を表 5.1.2.2.5-1 に示す。車両に誤判別されたフレームがある。歩行者のレーダー特性が場合によって、右左折時の低速車両の一部に近い。特に、複数の歩行者と一緒に歩く場合、捕捉領域が大きくなり、車両の捕捉領域との差異が小さくなる。

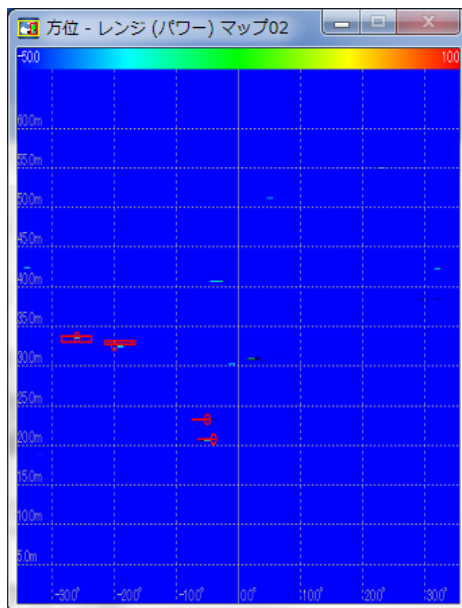
表 5.1.2.2.5-1 歩行者の判別結果(横断歩道)

	データ数	判別結果			
		四輪	二輪	歩行者	その他 2(静止物)
テスト 5-P-1	501	0.0%	0.4%	99.6%	0.0%
テスト 5-P-2	2436	1.1%	0.4%	98.4%	0.1%

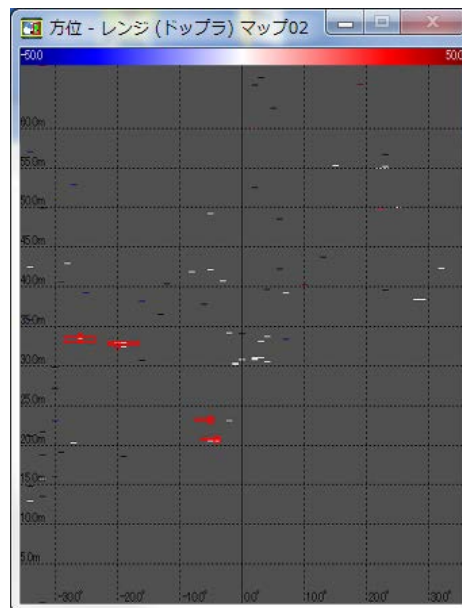
実験内容を示すカメラ画像とレーダー判別結果の例を、図 5.1.2.2.5-2 に示す。



(a) カメラ画像



(b) 反射電力



(c) ドップラー

図 5.1.2.2.5-2 歩行者の判別実験(横断歩道)

5.1.2.3 車種判別のまとめ

レーダーから検出した物体を車両か歩行者かに判別し、更に、車両を四輪車か二輪車かに判別する判別器を二段構成の SVM より実現した。

前述した各検証実験の結果をまとめると、下記の結論を導くことができる。

- 限定的走行パターンであるが、開発した車種判別アルゴリズムの有効性を確認できた。車両と歩行者との判別、そして、車両を四輪車と二輪車との判別に対し、平均で 95%以上の判別率を実現できた。つまり、SVM 判別器に対し、本開発で採用した二段構成、つまり、1 段目で車両と歩行者を判別し、2 段目で車両を四輪車と二輪車に判別する構成は有効である。
- 車両と歩行者との判別に比べると、車種間(四輪車と二輪車間)の判別にはより高度な特徴量選択が要求される。トラックのような大型四輪車に対し、複数の部位から捕捉領域を生成するため、個別部位を二輪車や歩行者に誤認識される場合がある。また、セダンのような小型四輪車に対し、バイクのレーダー特性に近い場合、バイクとの区別が相対的に難しい。そのため、捕捉領域の細かい特徴、及び統計特性関連特性の利用が必要である。
- 捕捉領域特性以外に、クラスタ特性と追従特性の利用が車種判別にとって必要不可欠である。特に左右方向を走行する場合や右左折の場合に、車両から抽出した捕捉領域の数が多くなると同時に、ドップラー特性の利用が難しくなるため、複数捕捉領域間の比較に基づくクラスタ処理、及び時間軸の対応付けに基づく追従処理が判別にとって重要な要素になる。

以上の検証結果を踏まえ、下記では今後の技術開発の方向性について論じる。

- 今回の検証実験では、走行ルートや車両間および歩車間の相対位置を限定した単純パターンを対象としたが、実際の走行シーンをベースにパターンを増やす必要がある。例えば、複数台車両の並行走行の検証が必要である。また、今回では、二輪車が四輪車に接近するパターンや歩行者が車両に接近するパターンを検証していない。レーダー性能を見極めるため、接近時の判別性能を明確にしないといけない。
- 判別性能を改善するため、今回の検証実験で判明した誤判別ケースへの対処が必要である。具体的には、交差点手前または交差点内を低速走行または停止状態への対処、車体側面にレーダーが当たっている状態への対処が必要である。上記パターンに対し、測定データの追加と共に、車両位置や位置間関係に基づくクラスタ処理、及び 1 対多のような追従処理の強化が必要である。

- 二輪車としてバイクを検証したが、自転車の検証も重要である。自転車利用者の増加に従い、自転車の交通事項が増えつつある、そのため、有効な自転車判別技術が求められている。レーダーの性能からみれば、自転車はバイクより更に判別が難しいと予想される。バイクよりも小型で低速度以外に、押し歩くケースも多いためである。今後は自転車に対し、検証データの収集と方式開発を早め実施したいと考える。

なお、今回の検証は正常系のみを対象としたが、実応用を考える場合、異常系の状態も検証する必要がある。特に、横断歩道以外の場所を移動する歩行者や交差点内に立ち止まっている歩行者に対する技術課題への対応が必要だと考える。

5.1.3. ア)② 交差点死角対策技術の開発

本項では、79GHz 帯レーダーを用いたより実用性の高いセンサー情報の取得を目指すべく実施した、レーダーによる歩行者や四輪車の検出性能に関する評価や、交差点内 ID 管理に向けての基礎評価、及び、模擬交差点にて実施した、センサー統合処理装置による典型事故シーンに対する検知性能評価について述べる。また、典型事故シーンの検知性能評価結果にて、車両の死角領域で検知性能が劣化する状態について詳細化し対策方式を検討した。

5.1.3.1. 複数レーダー統合処理技術の開発

5.1.3.1.1 瞬時的な未検出に対応した ID 管理機能の開発

図 5.1.3.1.1-1 は、インフラレーダーにより検出された歩行者の検出点を時系列にプロットしたものである。図 5.1.3.1.1-1 の(a)には、横軸に測定時間、縦軸に検出点の距離をプロットした図、(b)には横軸に測定時間、縦軸に検出点の方位をプロットした図を示している。インフラレーダーからは 100msec 周期で検出結果が出力されるが、図の矢印で示した測定時刻のフレームでは瞬時的な未検出が発生している。

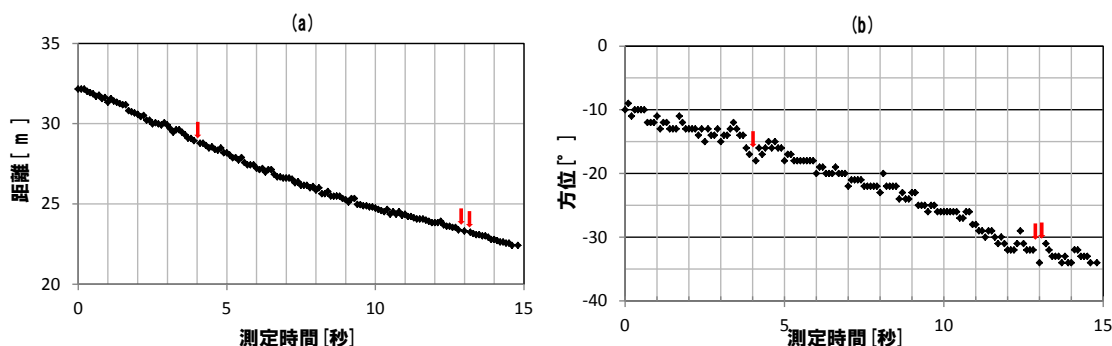


図 5.1.3.1.1-1 インフラレーダーによる歩行者検出点プロット図
(矢印は瞬時的な未検出発生フレーム)

検出処理の後段処理として、図 5.1.3.1.1-2 に示す ID 管理機能を開発し実装した。まず、最初のフレームで検出された検出物体 |t0 に対して物体 ID を付与する。また、それぞれの検出物体 |t0 に関して、次フレームでの移動先を予測して、予測物体情報 |t1 を生成する。次のフレームで検出された検出物体 |t1 と、予測物体情報 |t1 とを比較し、その比較結果が ID 継続パラメータで決められたパラメータ範囲内に収まる検出物体 |t1 については、検出物体 |t0 の ID を継続して付与する方式とした。

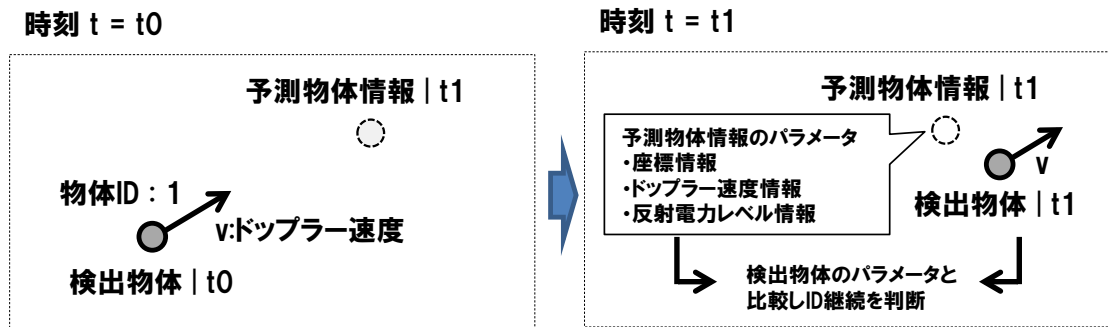


図 5.1.3.1.1-2 実装した ID 管理機能の概要説明図

前述の図 5.1.3.1.1-1 に示した歩行者の検出物体情報について、ID 管理処理を実行した結果を図 5.1.3.1.1-3 に示す。検出点の色が検出物体の ID を示している。但し ID 継続パラメータについては、表 5.1.3.1.1-1 に示したパラメータを使用した。これは、歩行者の速度、大きさを考慮して設定したパラメータである。

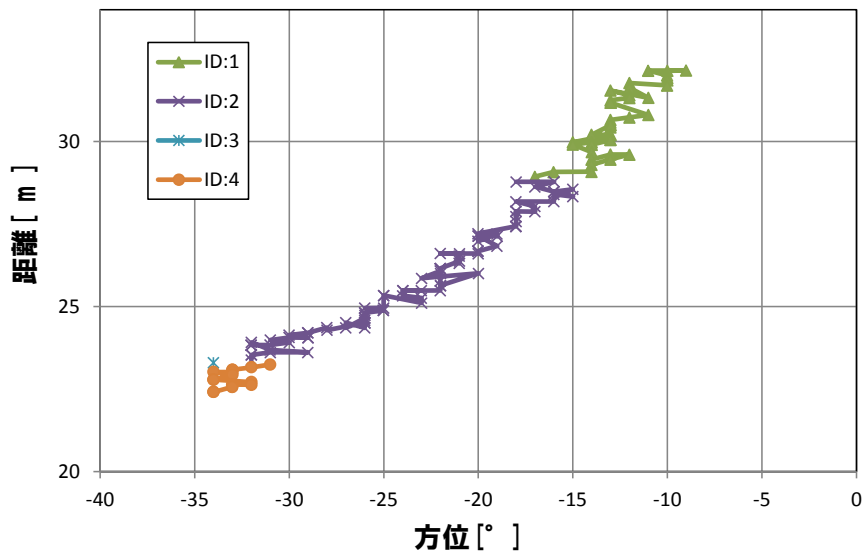


図 5.1.3.1.1-3 歩行者検出物体情報に対して ID 管理処理を実施した結果

表 5.1.3.1.1-1 捕捉領域の特徴量

方位角度差	3 度以内
距離差	1 m 以内
速度差	4 km/h 以内

図 5.1.3.1.1-3 に示すように瞬時的な未検出の部分を除いて ID が継続できていることが分かる。瞬時的な未検出が発生すると検出物体の ID が継続されない課題を解決するため、前述の ID 管理機能においては予測物体情報を求める時間を 1 フレーム先のみであったが、さらに N フレーム先の予測物体情報を求め、N フレーム先まで ID 継続対象となる検出物体情報を探索する補間処理を実装した。

図 5.1.3.1.1-4 に、1 フレームの補間処理を実施した場合の歩行者検出物体情報に対する ID 管理処理結果を示す。図示のように、検出物体情報に対して ID が継続されたことが分かる。

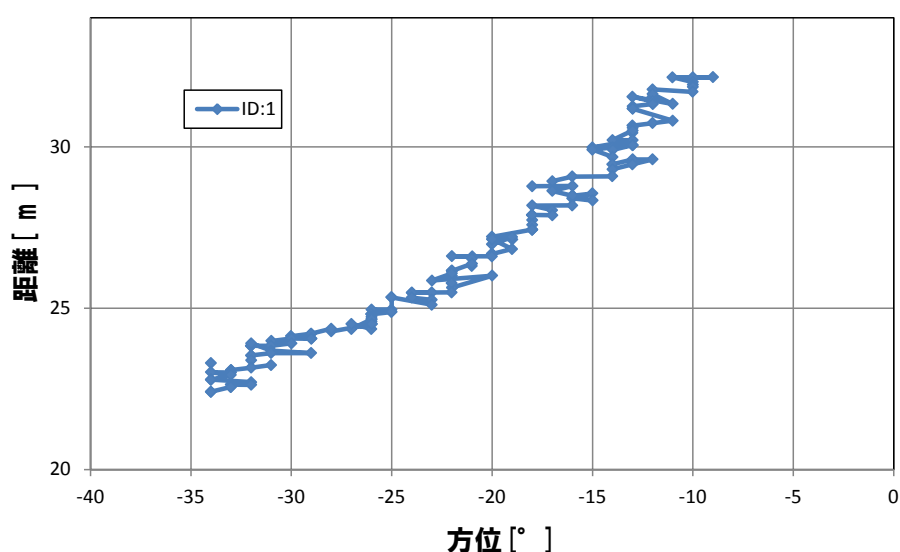


図 5.1.3.1.1-4 歩行者検出物体情報に対する ID 管理処理実施結果
(1 フレームの補間処理適応)

5.1.3.1.2 インフラレーダーによる歩行者の検出性能評価

次に、歩行者に対するインフラレーダーの基本的な検出性能について確認した。

我々はミリ波レーダーをインフラセンサとして応用するにあたり、見通しの良い信号機程度の高さに設置することを想定している。インフラレーダーによる歩行者の検出性能評価を行うために設置したインフラレーダーの設置状況を図 5.1.3.1.2-1 に示す。



図 5.1.3.1.2-1 インフラレーダーの設置状況

検出性能評価を行う歩行者の歩行領域を図 5.1.3.1.2-2 に示す。図示の黄色枠の歩行者検知性能解析対象エリアに存在する歩行者を検出するためには、レーダーからの直線距離 20m から 40m 程度までの距離に存在する歩行者を検出できるように設置する必要がある。5m 高に設置したインフラレーダーの俯角設定が、当該歩行者の検出可能距離に関わる。

図 5.1.3.1.2-3 にインフラレーダーの設置俯角を求めるために机上計算したターゲット別の反射レベルを示す。図 5.1.3.1.2-3 では、人体の反射断面積を -20dBsm 、車両の反射断面積を 0dBsm とし、試作インフラレーダーのパラメータを元に横軸の距離にターゲットが存在した場合のレーダー反射波の SN 比を示しており、インフラレーダーの俯角を 8.5 度にした場合の値である。図示のように、ノイズレベルとの比が 10dB 以上の、誤検出の少ない検出が可能な距離範囲は、人体についてはレーダーからの距離が 20m から 40m、車両については 17m から 75m 程度であることが確認できる。



図 5.1.3.1.2-2 検出性能評価を行う歩行者の歩行領域

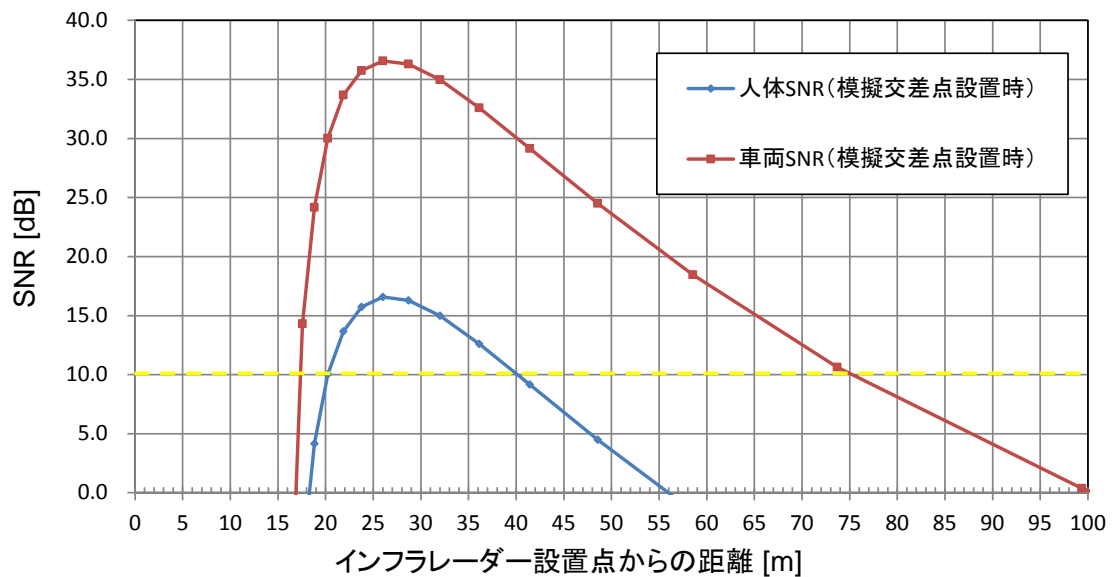


図 5.1.3.1.2-3 インフラレーダーの設置俯角を求めるために机上計算したターゲット別の反射レベル

ここで机上計算した値から、想定する人体と車両の想定検出範囲について、実際にレーダーを設置した模擬交差点の図に重ねると、図 5.1.3.1.2-4 に示すような検出範囲となる。図の人体検出想定範囲(青色)は、今回、歩行者に対する基本的な検知性能解析対象とする二つの横断歩道をカバーしていることが確認できる。また、机上計算で設定した俯角の場合、試作のインフラレーダーアンテナ半値幅を考慮したレーダーパルスが照射される距離範囲は、図 5.1.3.1.2-5 に示されるとおりであり、人体の身長を考慮すると、人体検出範囲は、よりレーダーに近い距離まで広がるであろうことが想定できる。

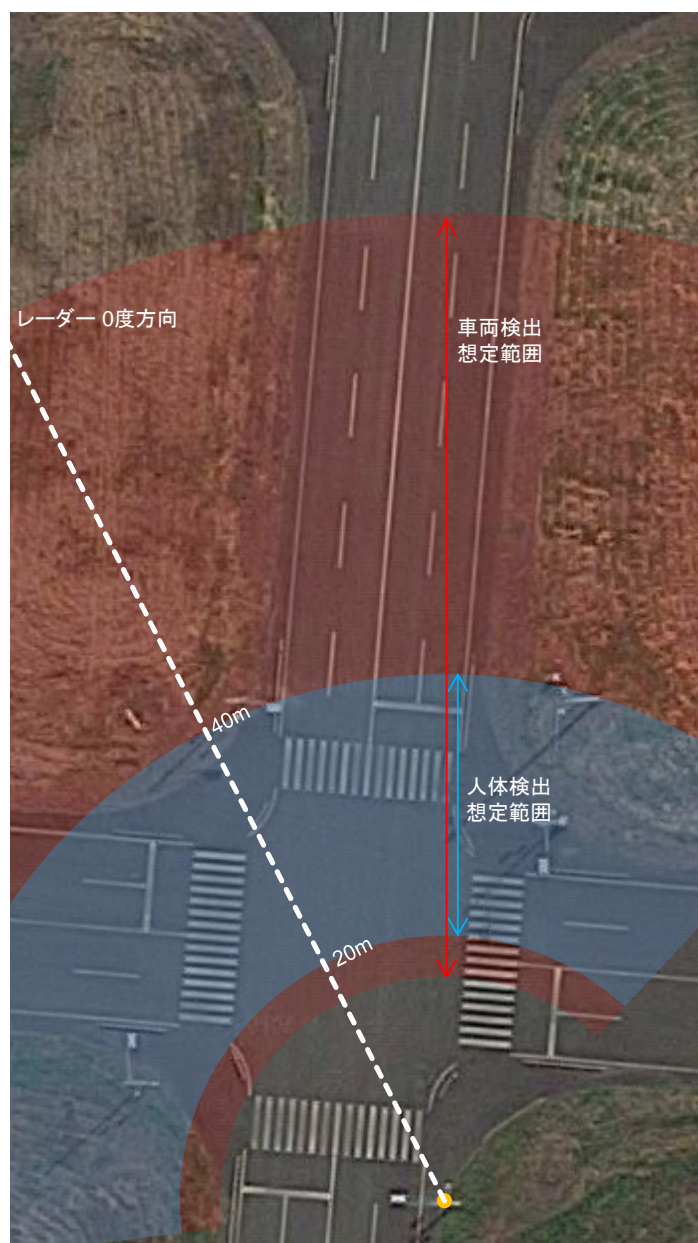


図 5.1.3.1.2-4 インフラレーダーによる検出領域の様子

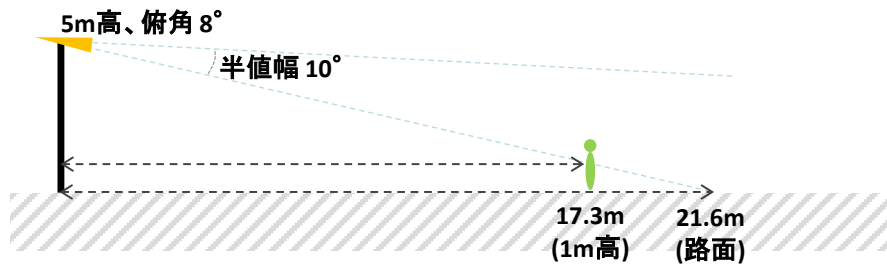


図 5.1.3.1.2-5 アンテナ半値幅を考慮したレーダーパルス照射範囲側面図

はじめに、基礎的なデータを取得するため、横断歩道 A に人体ダミー人形を設置し、反射レベルを取得した。図 5.1.3.1.2-6 に駆動型歩行者ダミーの外観を示す。本ダミーシステムは、人体に近い反射波を得られるように、足の部分が前後に駆動する仕組みになっている。



図 5.1.3.1.2-6 駆動型歩行者ダミーの外観とおおよその大きさ

図 5.1.3.1.2-7 に駆動型歩行者ダミーの反射レベル分布を示す。また、表 5.1.3.1.2-1 に駆動型歩行者ダミーの反射レベル統計値を示す。

図 5.1.3.1.2-7 において、青が子供ダミー、赤が大人ダミーの反射レベルの確率密度分布となる。Md_A は大人ダミーからの反射レベル分布の最頻値であり、Md_C は子供ダミーからの反射レベル分布の最頻値で、その差は 6 dB 程度であった。また、表 5.1.3.1.2-1 に示すように、大人ダミーと子供ダミーの反射レベル平均値の差は 3.4 dB であった。子供歩行者ダミーと大人型歩行者ダミーの身長、横幅の比を考慮するとこれらの反射レベル差は妥当な値が得られていると考えられる。

また、目標とする 95%以上の検出率を目指し、この結果から標準閾値を決定した。
 図 5.1.3.1.2-7 の赤字 Th で示した値であり、我々の試作評価システムにおいては-40 dB という比較値に該当する。

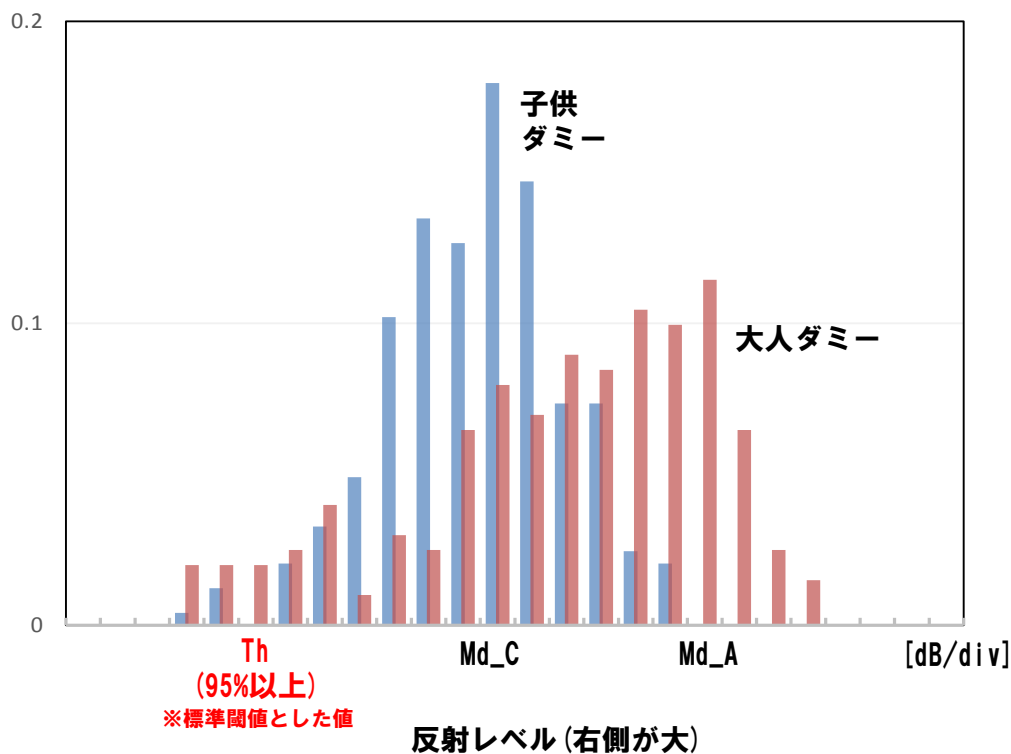


図 5.1.3.1.2-7 駆動型歩行者ダミーの反射レベル分布(確率密度)

表 5.1.3.1.2-1 駆動型歩行者ダミーの反射レベル統計値(値は試作レーダー装置の出力レベル値)

	最頻値(Md)	平均
大人型歩行者ダミー	-27 dB	-30.0 dB
子供型歩行者ダミー	-33 dB	-33.4 dB

次に実際の歩行者の反射レベルについて検証する。検証データの概要について図 5.1.3.1.2-8 に示す。

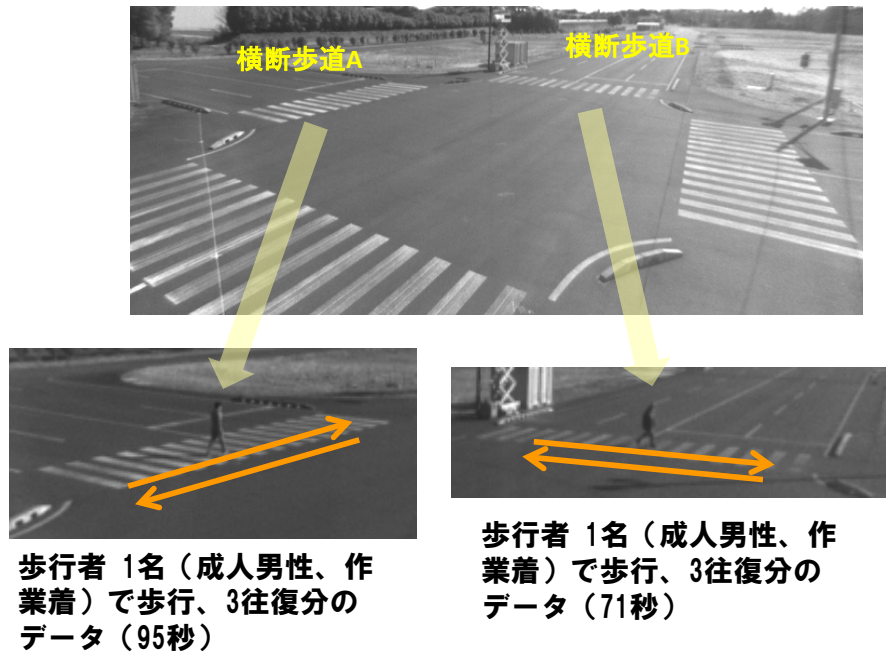


図 5.1.3.1.2-8 実際の歩行者の反射レベル検証シーン

図 5.1.3.1.2-9 に歩行者の反射電力分布を示す。青の棒グラフが各反射レベルにおける確率密度(左軸)を表しており、赤の線グラフは累積(右軸)を表す。前述の標準閾値 Th の値は図 5.1.3.1.2-9 の赤矢印で示したとおりである。ゆえに、 Md_h は、 Md_C に対して+3dB、 Md_A に対して-3dB に位置する。今回実際に歩行した歩行者の身長や横幅は、大人型歩行者ダミーより小さいため、この値も妥当であると考えられる。

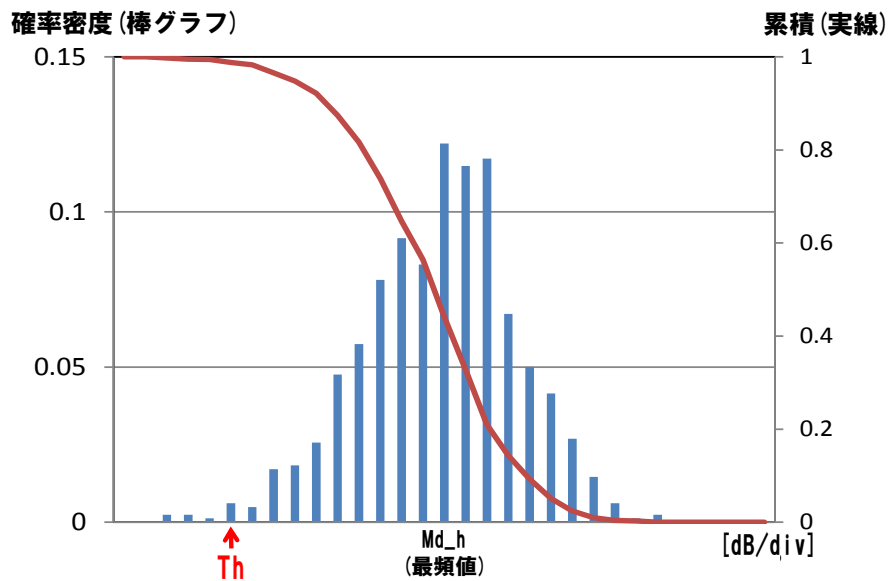


図 5.1.3.1.2-9 実際の歩行者の反射レベル検証シーン

また、実際の歩行者からのレーダー反射データを用い、標準閾値 Th について評価した。図 5.1.3.1.2-10 は、横軸に、インフラレーダーシステムに設定する検出処理パラメータの一つである検出閾値、縦軸にレーダーデータ取得時間に対する歩行者検出時間との比を表す検出率を示したグラフである。横軸に示すように、検出閾値を標準閾値 Th から変化させて検出率を算出している。また、表 5.1.3.1.2-2 には同様の手順により求めた検出率とともに誤検出率についても示す。図、また表より、設定した標準閾値 Th により、誤検知率を 0.3 % と抑えながら、目標とする歩行者検出率 95% を越える、99.8 % の値が得られることが確認できた。

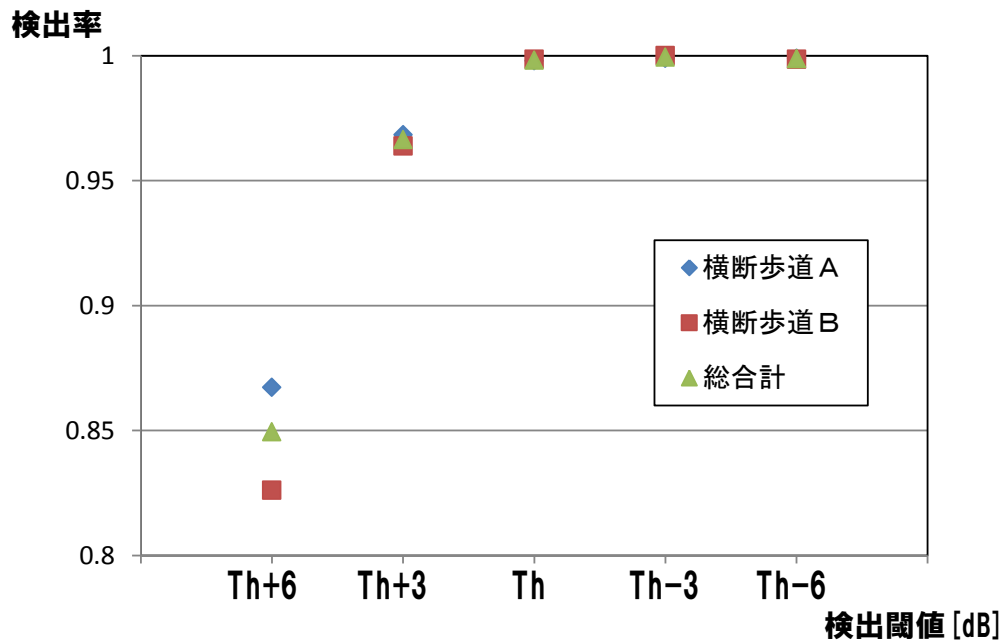


図 5.1.3.1.2-10 検出閾値を変化させた場合の検出率

表 5.1.3.1.2-2 検出閾値を変化させた場合の横断歩道別の検出率

閾値 [dB]	横断歩道 A (N = 949)	横断歩道 B (N=719)	総計 (N=1668)	誤検知率
	検出率	検出率	検出率	
Th + 6	86.7 %	82.6 %	85.0 %	0 %
Th + 3	96.8 %	96.3 %	96.6 %	0 %
Th	99.8 %	99.9 %	99.8 %	0.3 %
Th - 3	99.9 %	100 %	99.9 %	5.2 %
Th - 6	99.9 %	99.9 %	99.9 %	9.4 %

5.1.3.1.3 インフラレーダーによる四輪車両の検出性能評価

次に、インフラレーダーによる四輪車両の基本検出性能について確認した結果を述べる。

まず、インフラレーダーの設置設定については、前節の歩行者検出性能評価時と同等の設置設定であり、本節で述べるインフラレーダーによる四輪車両の検出性能は、前節で述べた歩行者に対する検出性能を同時に満たす。

四輪車両の検出性能評価に使用した評価データの概要について述べる。

図 5.1.3.1.3-1 に示すように、四輪車両はインフラレーダー正面方向に対して時計回り方向に 40° ほどの方向の車線を、インフラレーダー方向に走行する。評価データで走行する車両は、図 5.1.3.1.3-2 に示すとおりで、大型車(トラック)、ワゴン(ハイエース)、ミニバン(ノア)、乗用車(プリウス)の大きさが異なる 4 種類である。

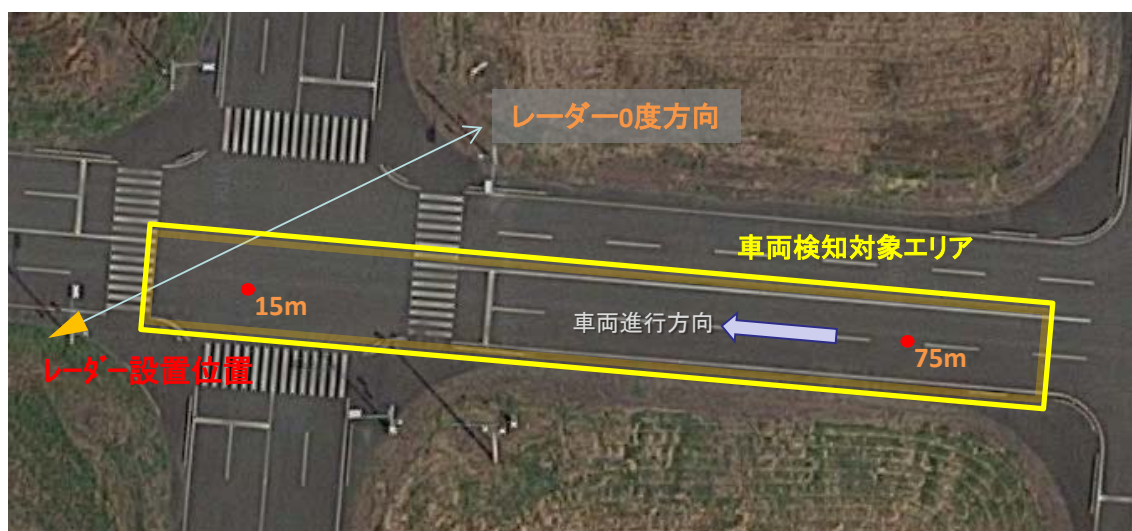


図 5.1.3.1.3-1 四輪車両の検出性能評価に使用した評価データの車両走行内容



図 5.1.3.1.3-2 四輪車両の検出性能評価に使用した車両の一覧

また、四輪車両の検出に当たっては、検出処理の中の、閾値を超えたレーダー反射点を同一の物体としてまとめるグルーピング処理におけるパラメータを、四輪車両用に調整した。これは、前述のトラッキング処理の継続性を高めるための調整である。

図 5.1.3.1.3-3 に四輪車両から得られたレーダー反射点分布の一例を示す。レーダー反射の強度を色であらわしており、濃い青色はノイズレベルで色がついた部分は閾値を超えた反射点である。本レーダー反射点をグルーピングする際に、歩行者の検出処理で使用したパラメータを使用すると、歩行者程度の大きさに合った複数の検出枠に分類され、検出枠が誤分離される。

検出枠が誤分離する例を図 5.1.3.1.3-4 に示す。図 5.1.3.1.3-4 は検出処理で得られた検出枠の方位／距離情報を元に、インフラレーダーと同位置に設置した検証用カメラの画像に検出枠を重畳して表示した図である。同一の四輪車両からのレーダー反射を基にした検出枠が複数の検出枠に誤分離されていることが分かる。本節の四輪車両の検出性能評価では、基本的な検出性能を得るため、それぞれの種類の四輪車両を近接させること無くある程度離して走行させたデータを取得しており、対象車種で最も大きいトラックの検出枠が誤分離しない程度のグルーピングパラメータを設定して評価した。

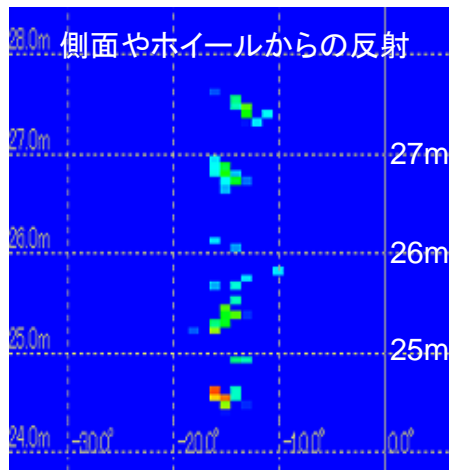


図 5.1.3.1.3-3 四輪車両から得られたレーダー反射点分布の一例



図 5.1.3.1.3-4 四輪車両の検出枠(グルーピングパラメータ最適化前)

評価の結果を表 5.1.3.1.3-1 に示す。この表で示した”正しく検知される範囲”とは、検出処理において誤分離が発生せず、またトラッキング処理において ID が継続して処理されることが確認された距離である。即ち、単一の四輪車両を単一の検出物体として連続して検出できた距離を表している。

正しく検知される範囲の例として、図 5.1.3.1.3-5 に示す。図 5.1.3.1.3-5 は、ミニバン(ノア)の検出結果から、正しく検知された範囲について軌跡として図示したものである。最も遠い検出点が、図の直交座標で(39m、65m)の点、即ちレーダーからの距離がおおよそ 75m の点となり、この近辺の検出から継続して正しく検知されることが確認された。

表 5.1.3.1.3-1 検出閾値を変化させた場合の横断歩道別の検出率

車種	正しく検知される範囲 ・検出枠の誤分離無区間 ・同一 ID 付与区間	サンプル数
大型車(トラック)	13.7 m ~ 87.1 m	総サンプルフレーム数 : 1005(100.5 秒) うち、未検出フレーム数: 1
ワゴン(ハイエース)	12.8 m ~ 83.9 m	
ミニバン(ノア)	12.3 m ~ 75.3 m	
乗用車(プリウス)	14.9 m ~ 75.4 m	

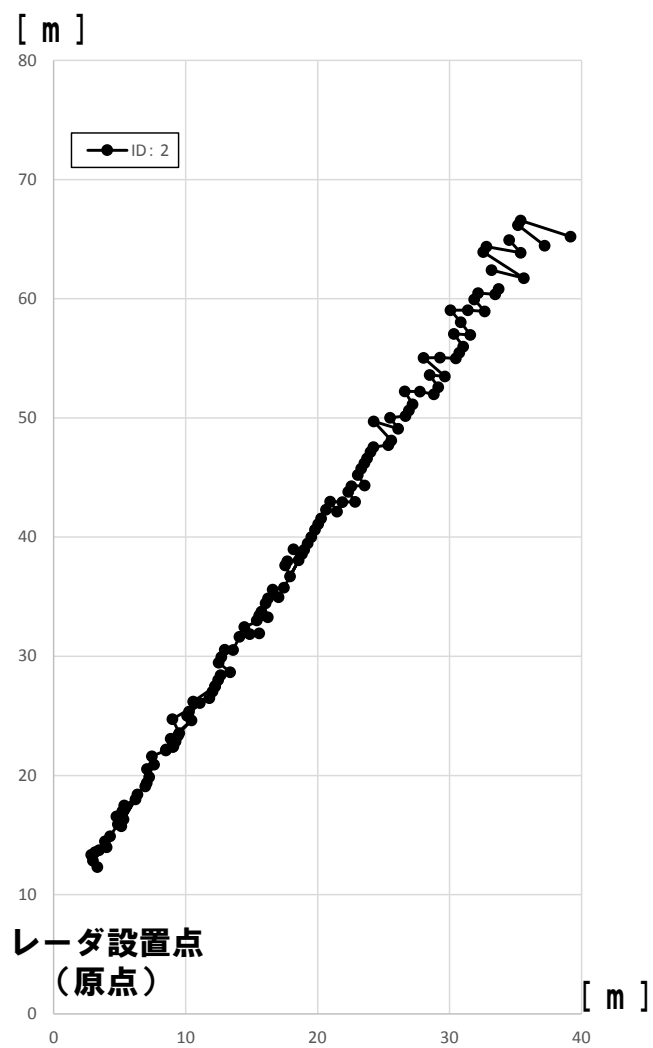


図 5.1.3.1.3-5 ミニバン(ノア)の正しく検出された範囲の検出点軌跡

5.1.3.1.4 複数レーダー統合による ID 継続検討

前節までに、横断歩道上の歩行者と、交差点に進入する四輪車両について、同一の設置パラメータで設置した単独のインフラレーダーによる検出性能の評価について述べた。それにより、単独のレーダーにおける車種別の ID 管理可能である範囲がそれぞれ定量的に示された。本節では、単独のインフラレーダーで検出し ID 付与した検出情報を複数レーダー間で統合する、ID 継続方式についての検討結果を記す。

開発した単独のインフラレーダーで検出カバーできる範囲については、前述の図 5.1.3.1.2-4 に示したとおりであり、図示のようにインフラレーダー設置箇所の近辺の横断歩道や車線については、単独のインフラレーダーでは検出領域と出来ていない。そのため、開発したインフラレーダーの検出領域として交差点全域をカバーするために、複数のレーダーを図 5.1.3.1.4-1 に示すように、交差点の対角に設置した。このように設置した場合、図のインフラレーダー1の検出範囲は青色破線からインフラレーダー2側の領域、インフラレーダー2の検出範囲は黄色破線からインフラレーダー1側の領域となり、交差点中央付近は、双方のインフラレーダーで同一のターゲットが検出されることとなる。

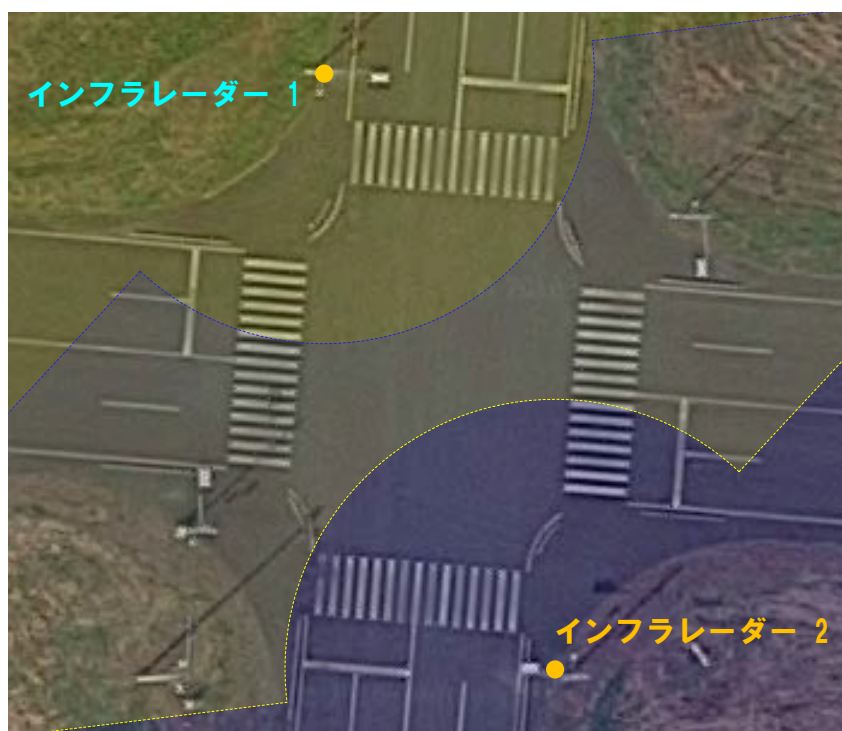


図 5.1.3.1.4-1 複数のインフラレーダーを交差点に配置した際のそれぞれの検出範囲(インフラレーダー1が青色領域、インフラレーダー2が黄色領域)

実際に、双方のインフラレーダーで同一の車両が検出されている例を図 5.1.3.1.4-2 から図 5.1.3.1.4-5 に示す。

まず、図 5.1.3.1.4-2 は、レーダー2 に比較的近い領域に大型車(トラック)が存在するフレームの検出例である。図の(b)および(c)はそれぞれ、レーダー1 とレーダー2 により得た検出枠をそれぞれのレーダーと同位置に設置したカメラの画像に重畳した画像である。また、図の(d)は、交差点に対するレーダーの設置位置と方位情報を元に、それぞれのレーダーで検出された検出点をプロットする統合マップソフトウェアで生成された検出点プロット結果の図である。各々のレーダーによって得られた同一の検出タイミングの同一のターゲット車両から得た検出結果であるが、図(d)の統合マップから、それぞれのレーダーに近い側の車両の側面の検出点がそれぞれのレーダーで得られていることが分かる。

図 5.1.3.1.4-3 は、先の図の数フレーム後の、大型車(トラック)がより交差点中央に侵入した際の検出結果である。大型車(トラック)の前面の一部がレーダー1 の検出点として出力され、また、レーダー2 の検出点は荷台側面から背面にかけての反射点から得られた検出点が出力されていると考えられる。

同様に、乗用車(プリウス)と、バイクが複数レーダーで検出された例を図 5.1.3.1.4-4 と図 5.1.3.1.4-5 に示す。大型車(トラック)の場合と同様に、それぞれのインフラレーダー設置点に近い側のターゲット車両の側面からそれぞれの検出点が得られていることが確認できる。

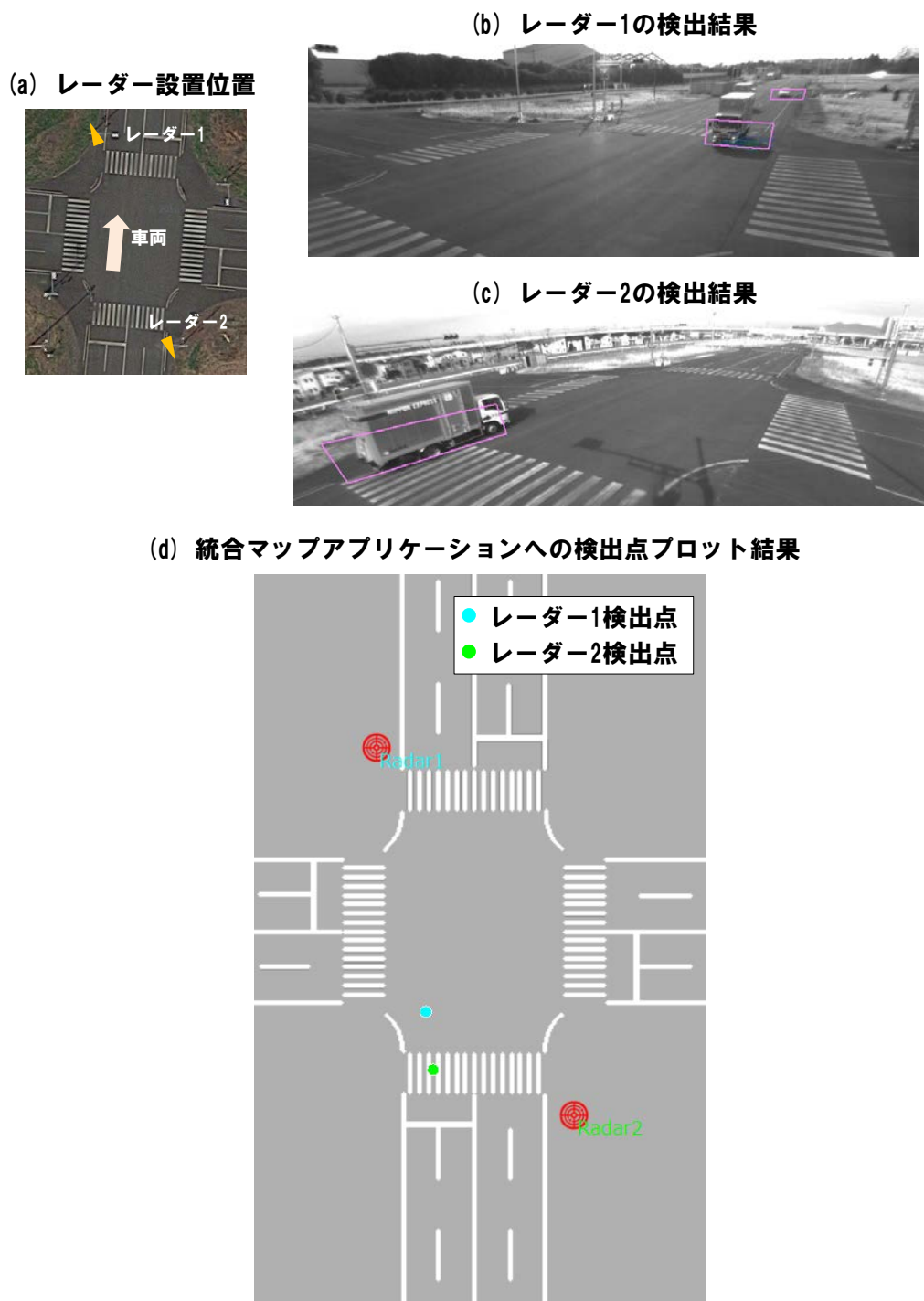


図 5.1.3.1.4-2 大型車(トラック)のインフラレーダー1とインフラレーダー2による同時検出例(インフラレーダー2に比較的近い領域)

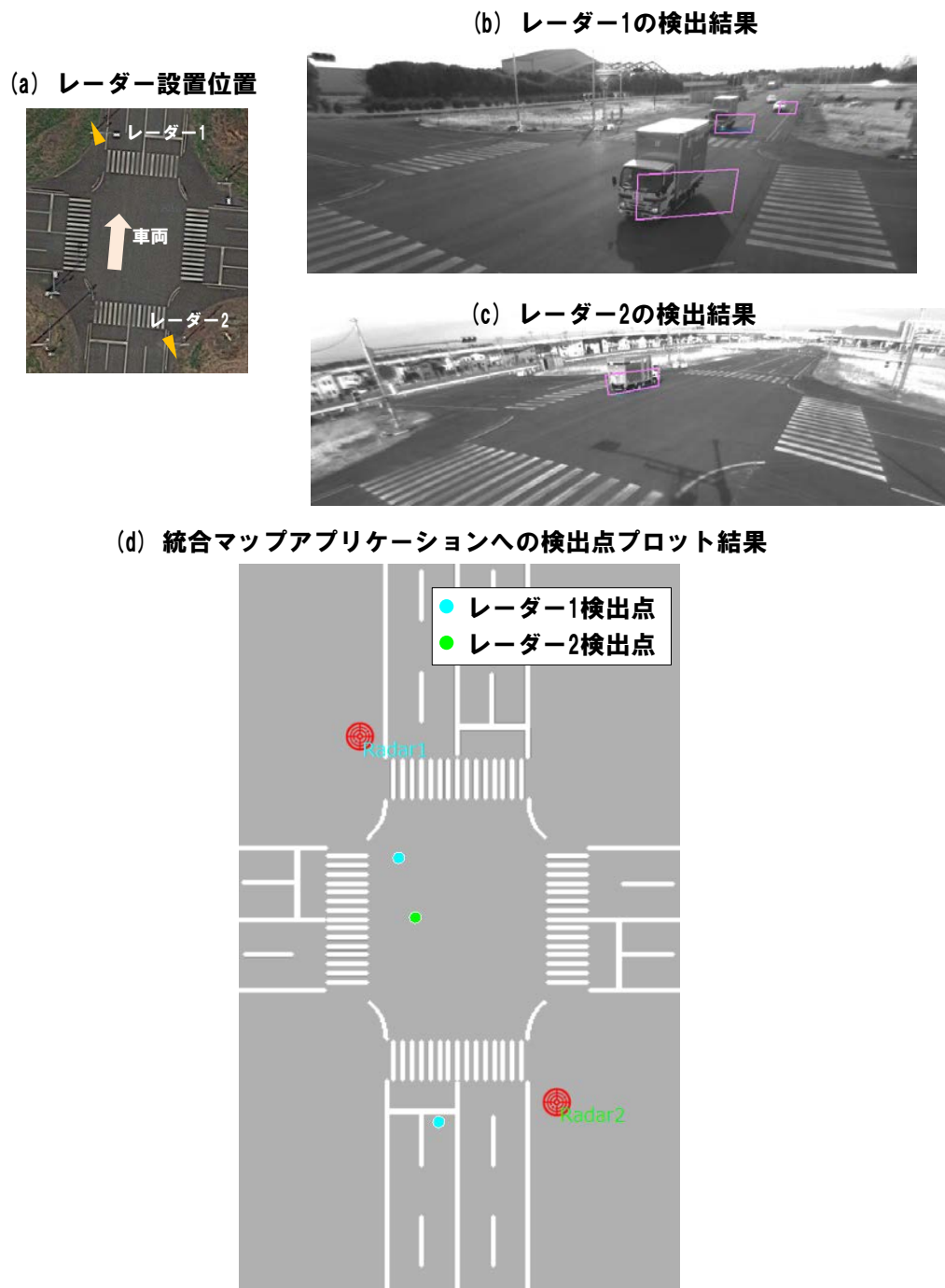


図 5.1.3.1.4-3 大型車(トラック)のインフラレーダー1とインフラレーダー2による同時検出例(交差点中央付近)

(a) レーダー1の検出結果



(b) レーダー2の検出結果



(d) 統合マップアプリケーションへの検出点プロット結果

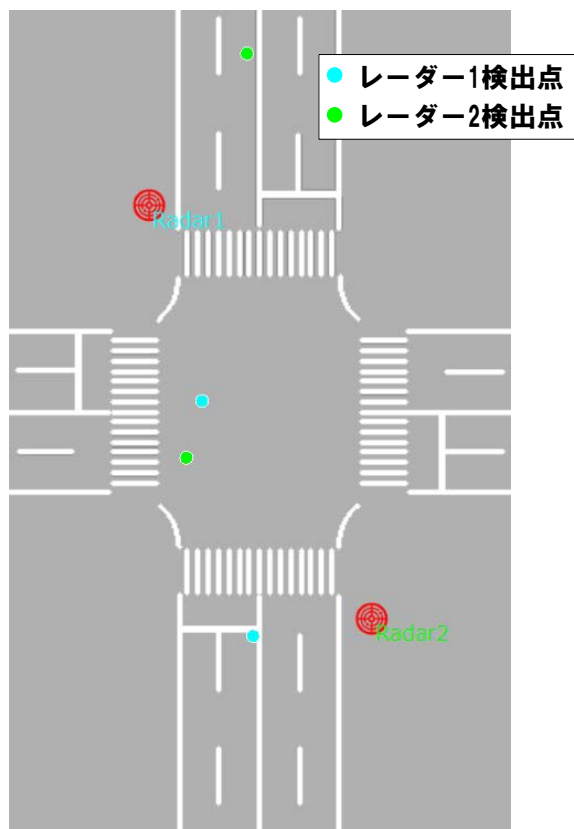
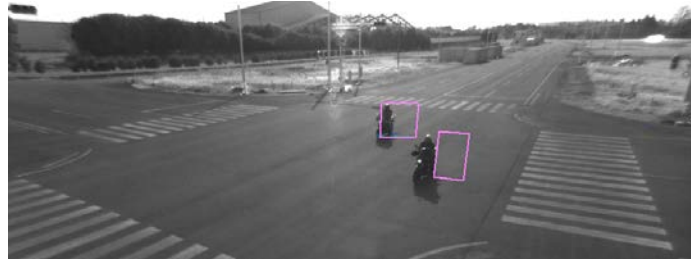


図 5.1.3.1.4-4 乗用車(プリウス)のインフラレーダー1とインフラレーダー2による同時検出例(交差点中央付近)

(a) レーダー1の検出結果



(b) レーダー2の検出結果



(d) 統合マップアプリケーションへの検出点プロット結果

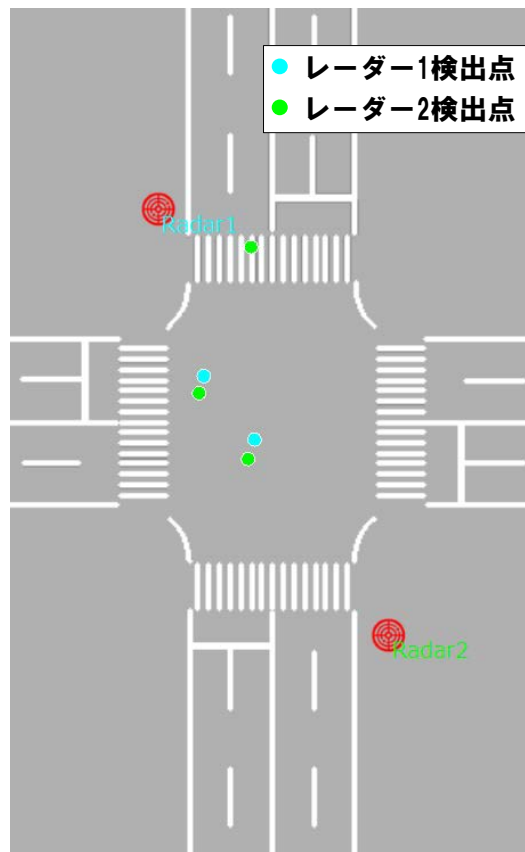


図 5.1.3.1.4-5 バイクのインフラレーダー1とインフラレーダー2による同時検出例(交差点中央付近)

これらの解析結果から、複数のレーダーから同タイミングで出力される検出結果を、同一のターゲットからの反射であると判断し、各々のレーダーシステムのトラッキング処理から付与され管理されている ID を統合するためには、レーダーの設置位置と、検出ターゲットとするオブジェクトの大きさを考慮した検出点同士の距離関係から統合有無を判断すればよいと考えた。

このような考えの下、図 5.1.3.1.4-6 と図 5.1.3.1.4-7 に示す検出点統合処理を検討し、統合処理ソフトウェアとして実装して評価した。図 5.1.3.1.4-6 は、複数のレーダーから得られる検出点同士の距離を比較し統合判断するフローチャートである。図 5.1.3.1.4-6 のフローチャートにて赤枠で示した判断処理について、補足説明のため概要を示したのが図 5.1.3.1.4-7 である。図に示すように、実装した検出点統合処理では、統合元レーダーとしてあらかじめ決められたレーダー1 の各検出点から、統合距離範囲 Δr の範囲内に存在する、統合対象レーダーレーダー2 の検出点を統合し、座標は統合前の各検出点座標の midpoint とすることとした。

ここで、本統合処理方式に従って検出点を統合処理した結果を図 5.1.3.1.4-8 から図 5.1.3.1.4-10 に示す。

図 5.1.3.1.4-8 は、一台の大型車(トラック)の検出結果であり、統合距離パラメータ Δr を 6m としている。本パラメータにより、(a)に示した統合処理前の検出点が、(b)に示したとおり統合検出点に変換されていることが分かる。また、図 5.1.3.1.4-9 は一台の乗用車(プリウス)の検出結果であり、統合距離パラメータ Δr は 5m にした場合の図である。(b)に示すとおり、統合検出点に統合されていることが確認できる。さらに、図 5.1.3.1.4-10 は二台のバイクの検出結果である。統合パラメータ Δr は 2m とした際の図である。両バイクからの検出点共に統合されていることが分かる。

次に、ターゲット車種別に、最適な統合パラメータ Δr を確認するため、複数のフレームについて調査した。車両が交差点を通過する際に、対角に設置した複数のインフラレーダーから同時に検出されたフレームを母集団として、それらの検出フレームに対し、統合処理を行い、統合検出点が得られたフレームの割合を統合検出率として求めた。図 5.1.3.1.4-11 の横軸に統合距離パラメータ Δr 、縦軸に統合処理率 [%]を車種別に示す。バイクの車長が 2m 弱、乗用車(プリウス)が 4~5m、大型車(トラック)が 5~6m であることを踏まえると、図から、統合距離パラメータ Δr がそれぞれの車両の車長程度の長さ以上に設定すると、9 割以上の統合処理率が得られることが分かった。

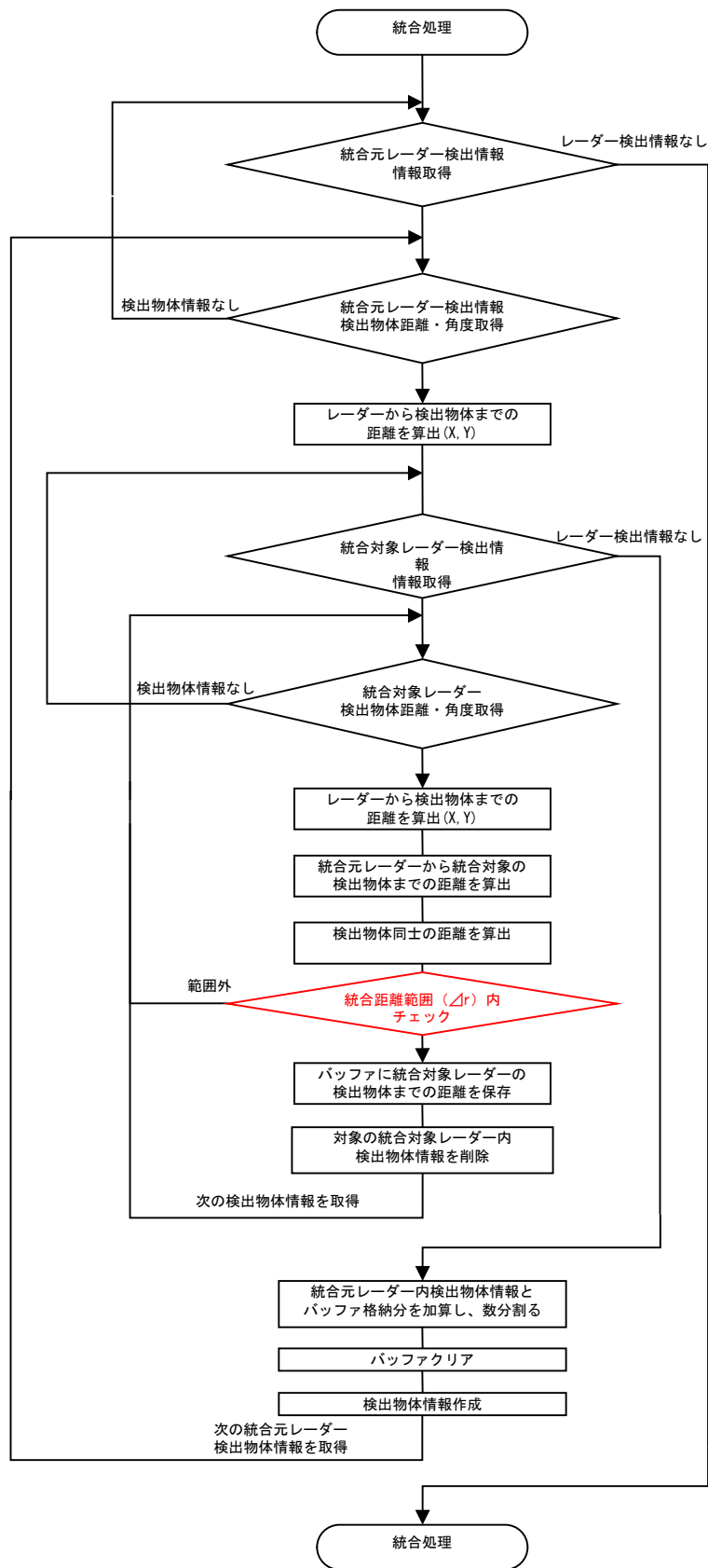


図 5.1.3.1.4-6 検出点統合処理の処理シーケンス

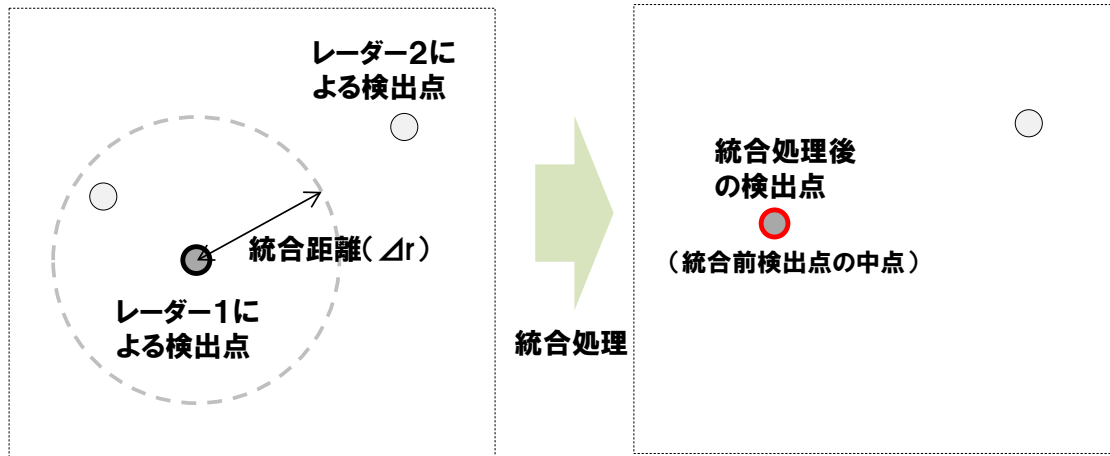


図 5.1.3.1.4-7 検出点統合処理の処理概念説明図

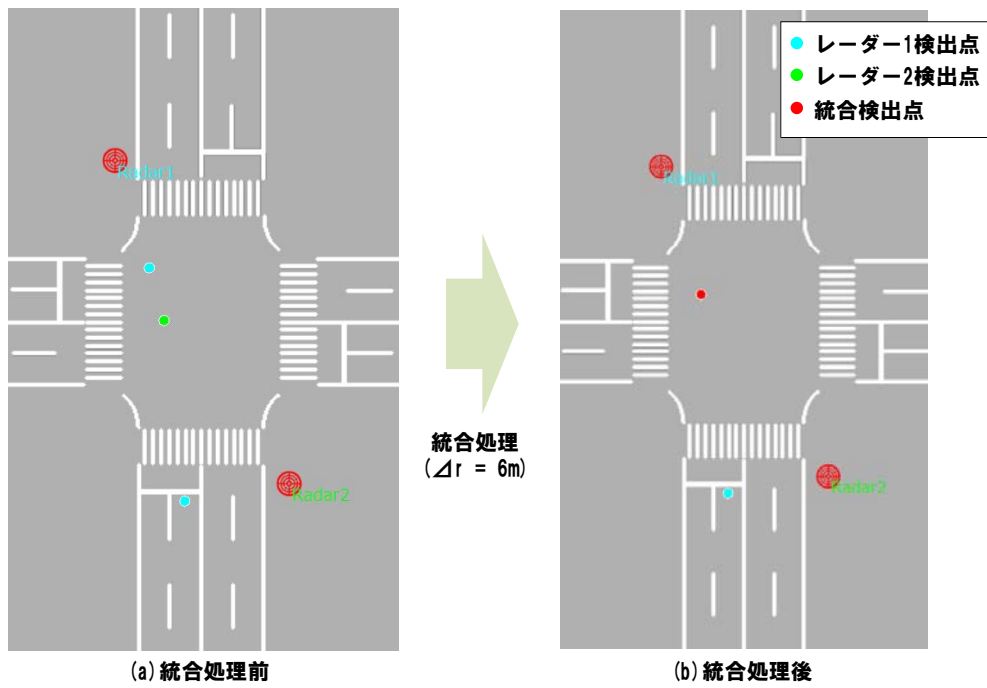


図 5.1.3.1.4-8 大型車検出時の検出点統合処理結果
(左側が検出点統合前、右側が統合処理後を表す)

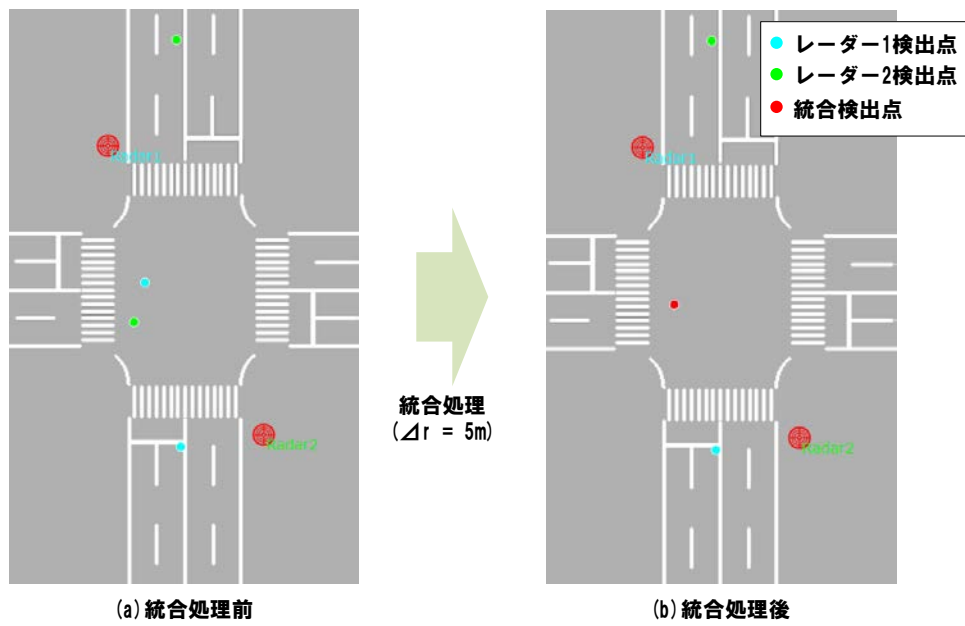


図 5.1.3.1.4-9 乗用車検出時の検出点統合処理結果
(左側が検出点統合前、右側が統合処理後を表す)

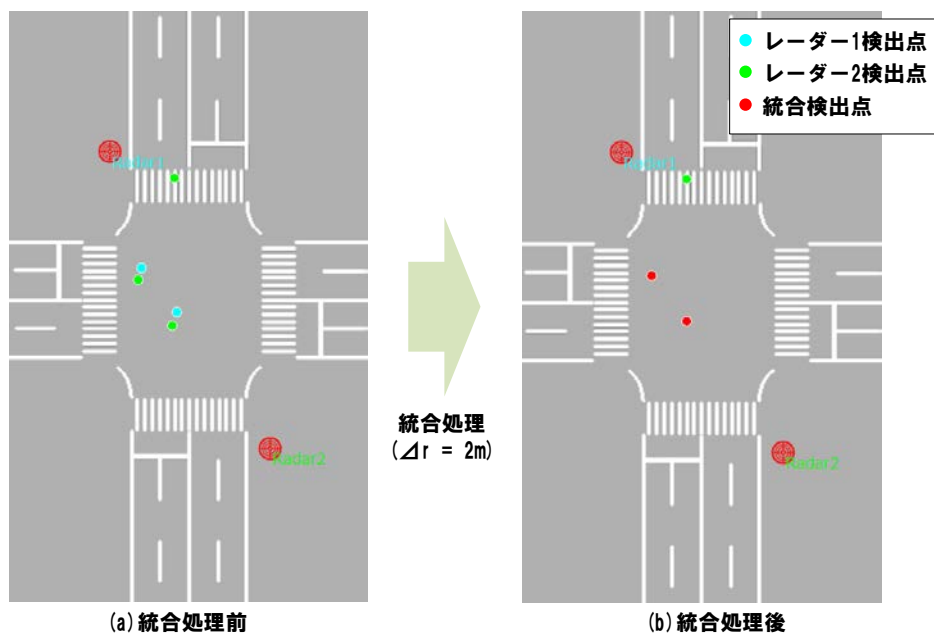


図 5.1.3.1.4-10 バイク検出時の検出点統合処理結果
(左側が検出点統合前、右側が統合処理後を表す)

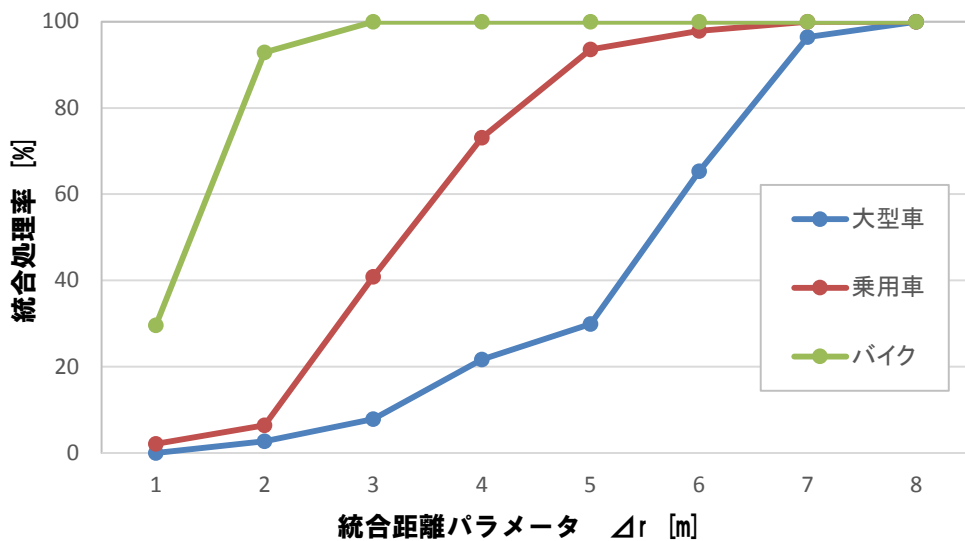


図 5.1.3.1.4-11 正しく統合できた検出フレームの割合
(両インフラレーダーで検出されたフレームを母集団とし、
統合距離パラメータを変数として評価)

5.1.3.1.5 複数レーダー統合処理技術の開発のまとめ

本節においては、瞬時的な未検出に対応した ID 管理機能の開発を行い、当方式のもと、歩行者と車両について実施した、基礎的な検出評価について述べた。本基礎検出評価の結果、歩行者(大人、単独歩行)については、目標とする 95%以上の歩行者検出率を確認し、また、走行車両に対し 15 m ~ 75 m の区間にて誤検出、誤トラッキングの無い検知性能を確認した。

また、複数レーダー統合による ID 継続方式を開発し、既存のデータで有効性評価を行った結果、開発した複数レーダー統合の統合距離パラメータの最適値が検出対象物大きさに依存することが確認できた。

5.1.3.2. センサー統合処理装置設計および公道実証実験

本節においては、公道実証実験に向け、前節で確認したインフラレーダーの基本検出性能や、複数レーダー統合処理方式の検証を踏まえて実施した、典型的な事故シーンに対するインフラレーダーの検出性能検証実験結果について述べる。

5.1.3.2.1 センサー統合処理装置設計

インフラレーダーにより交差点全域の車両や歩行者を検出するために、二つのインフラレーダーを模擬交差点の対角に配置して構成するセンサー統合処理装置を設計した。図 5.1.3.2.1-1 にセンサー統合処理装置の装置構成の概要を示す。また、表 5.1.3.2.1-1 に、本センサー統合処理装置の構成装置一覧とそれぞれの装置の機能概要を表す。

デバイス制御機は、1 台のインフラレーダーを制御すると共に、インフラレーダーから出力されるレーダー反射情報から検出情報を生成する。デバイス制御機の外観を図 5.1.3.2.1-2 に示す。設置センサーはインフラレーダーと同一筐体内に配置され、設置されたインフラレーダーの俯角や傾き、方位の情報を出力する。本設置センサーの外観と出力情報の例を図 5.1.3.2.1-3 に示す。これらの情報は統合処理機の統合処理にて利用される。統合処理機は複数のデバイス制御機から出力される検出情報をインフラレーダーの設置情報などをもとに統合し、センサー統合処理装置が設置された交差点における車両や歩行者の位置を生成する。また、統合処理装置は各デバイス制御機や検証用カメラが生成するデータの時刻を同期させる処理を行う。センサー統合処理装置全体を同期させる時刻のもととなる、統合処理機のシステム時刻は、GPS から取得した時刻を利用する。統合処理機の内部にはそのための機器である時刻補正 GPS を設置しており、図 5.1.3.2.1-4 にその機器の外観と出力を示す。

本センサー統合処理装置の統合処理装置で生成される情報を応用すれば、インフラレーダーで検出された物体が交差点上のどの領域に存在するかが推定でき、例えば、横断歩道上に限定して歩行者の存在有無を検出し、右折車に対して横断歩行者の存在を注意喚起するアプリケーションなどに繋がる。

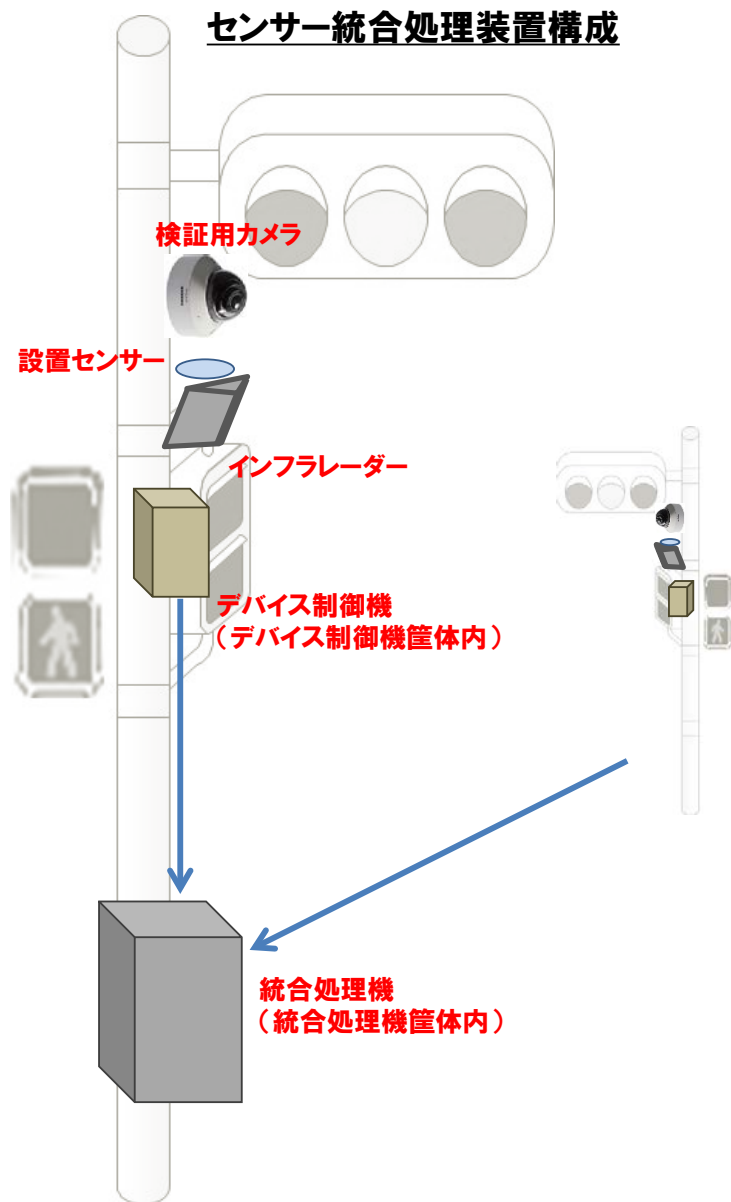


図 5.1.3.2.1-1 センサー統合処理装置の装置構成概要

表 5.1.3.2.1-1 センサー統合処理装置の構成装置一覧

構成装置	機能概要
インフラレーダー	79GHz 帯ミリ波レーダーデバイス。レーダー反射レベル分布情報を入力する。
設置センサー	インフラレーダーと同一筐体内に配置し、インフラレーダーの設置情報を入力する。
検証用カメラ	インフラレーダーと同方向領域を撮影し、検証用の映像を入力する。

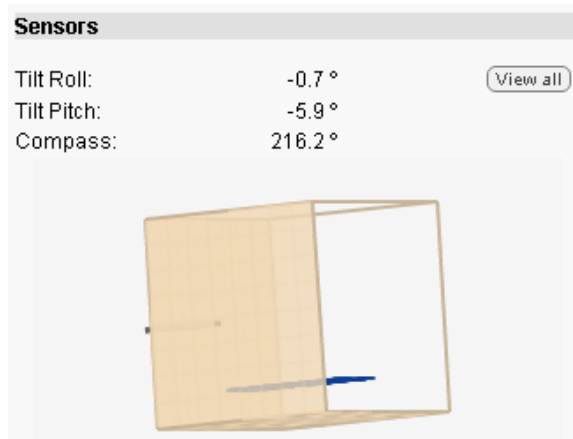
デバイス制御機	インフラレーダーを制御すると共に、インフラレーダーから出力されたレーダー反射情報をもとに検出情報を生成する。
統合処理機	各インフラレーダーのデバイス制御機から受信した検出情報を統合する。また、各デバイス制御機や検証用カメラが生成するデータの時刻を同期させる処理を行う。



図 5.1.3.2.1-2 センサー統合処理装置のデバイス制御機外観



(a) 外観

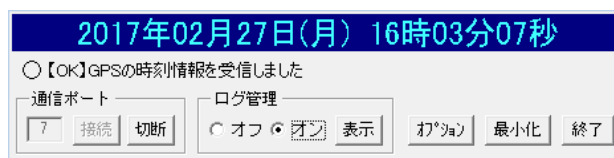


(b) 出力例

図 5.1.3.2.1-3 センサー統合処理装置の設置センサー外観(a)と出力情報例(b)



(a) 外観



(b) 出力例

図 5.1.3.2.1-4 センサー統合処理装置の時刻補正 GPS の外観(a)と出力情報例(b)

ここまでに述べたセンサー統合処理装置の、装置間の接続構成について、図 5.1.3.2.1-5 と図 5.1.3.2.1-6 に示す。図 5.1.3.2.1-5 の機器は、各インフラレーダーの設置位置近辺に配置される。また、図 5.1.3.2.1-6 の機器は、いずれかのインフラレーダーの設置位置近辺に配置するものと仮定し、遠方側のデバイス制御機とは、長距離の有線 LAN ケーブルで検出情報を取得する構成とした。

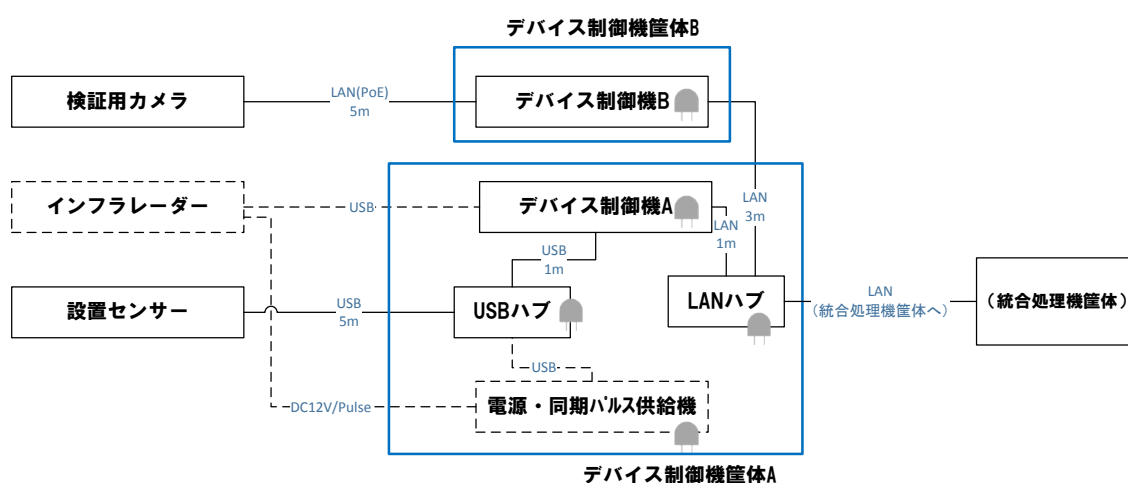


図 5.1.3.2.1-5 センサー統合処理装置の構成装置間接続図(デバイス制御機側)

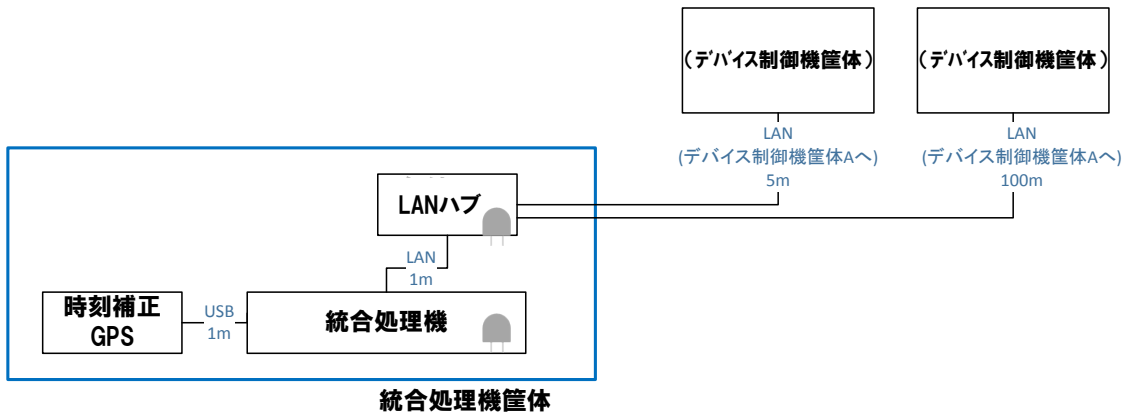


図 5.1.3.2.1-6 センサー統合処理装置の構成装置間接続図(統合処理機側)

図 5.1.3.2.1-7 および図 5.1.3.2.1-8 に、各デバイス制御機で動作させる検出アプリケーション動作画面例を示す。各デバイス制御機では本アプリケーション等を利用して検出情報を生成し統合処理機にその情報を出力する。また、統合処理機には前節で述べた統合処理を実装した。

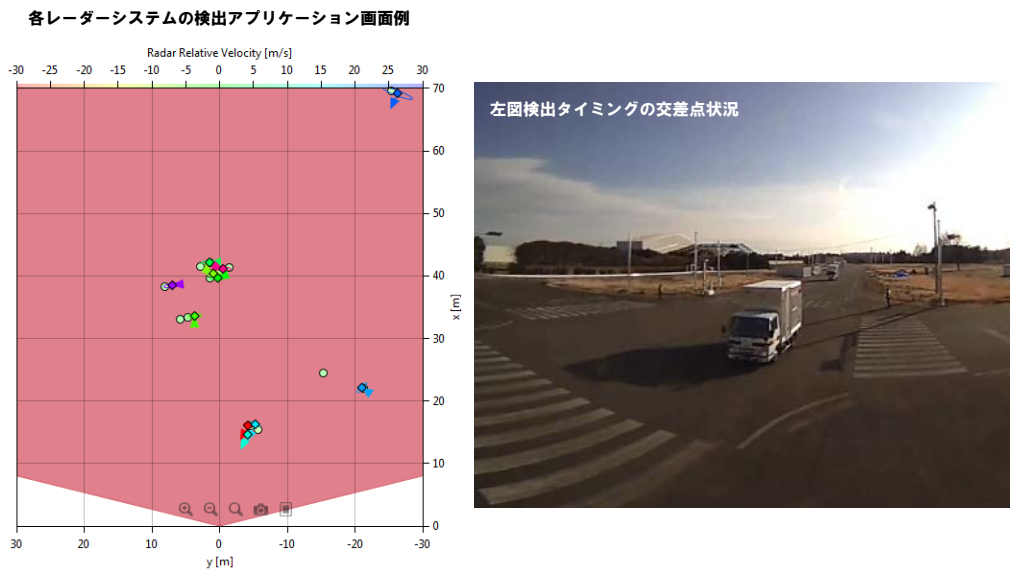


図 5.1.3.2.1-7 デバイス制御機で動作させる検出アプリケーション動作画面例-1

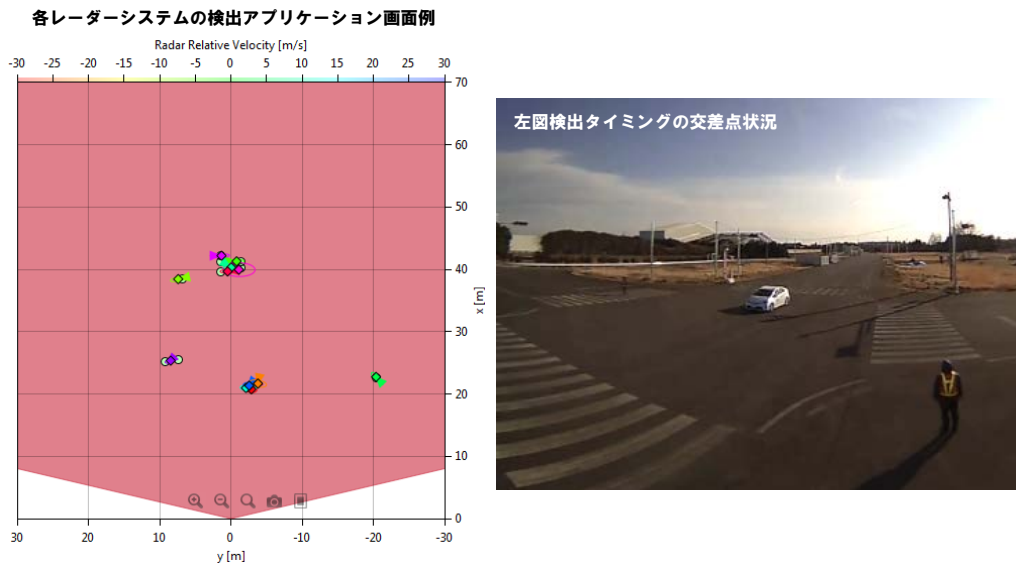


図 5.1.3.2.1-8 デバイス制御機で動作させる検出アプリケーション動作画面例-2

5.1.3.2.2 典型事故シーンに対するインフラレーダーの検出性能検証

次に、開発したセンサー統合処理装置を用い、インフラ設置センサーからのセンシングニーズが高いと考えられる、交差点での典型事故シーンについて、インフラレーダーによる検出性能を検証した。表 5.1.3.2.2-1 にピックアップした典型事故シーンと、それぞれのシーンでインフラレーダーに求められる検出機能を示す。また、図 5.1.3.2.2-1 に典型事故シーンのイメージを簡易的に描画した図を示す。

独自にピックアップしたこれらの典型事故シーンに対し、インフラレーダーに求められる検出機能について、模擬交差点を利用して定量的に検証した。

表 5.1.3.2.2-1 インフラレーダーによるセンシングニーズが高いと考えられる、交差点での典型事故シーン一覧とインフラレーダーに求められる機能

	ピックアップした典型事故シーン	インフラレーダーに求められる検出機能
①	右折車両と直進車両の衝突事故	交差点に進入する直進車両の検出
②	左折車両による二輪車巻き込み事故	車両の側面をすり抜けする二輪車の検出
③	優先道路侵入時の出会い頭衝突事故	優先道路の走行車両検出
④	右左折車両による横断歩行者の衝突事故	横断歩道上歩行者の検出

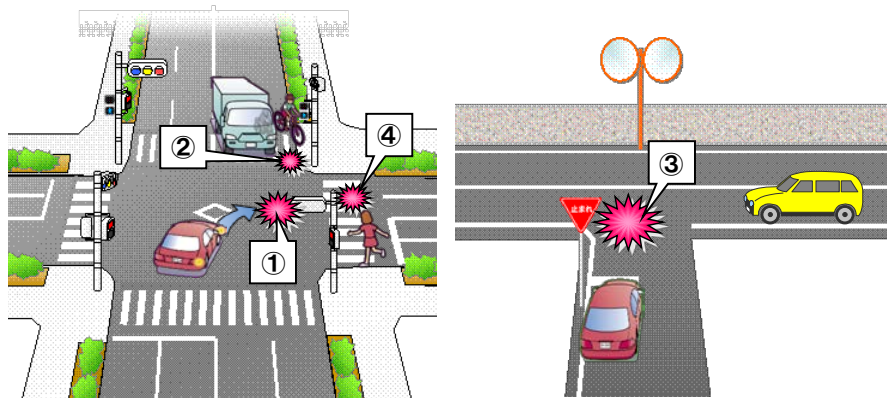


図 5.1.3.2.2-1 典型事故シーンのイメージ

① 右折車両と直進車両の衝突事故

図 5.1.3.2.2-2 に、「①右折車両と直進車両の衝突事故」シーンを模した、インフラレーダー検出性能実験のデータ取得シーン概要図を示す。また、図 5.1.3.2.2-3 にインフラレーダー設置高さから撮影した本データ取得シーンのカメラ画像を示す。

前述の表 5.1.3.2.2-1 に示したように、この事故シーンにおいて、インフラレーダーには交差点に進入する直進車両の検出が求められている。本データ取得シーンにおいて、具体的には、交差点に進入し直進する四輪／二輪車両の検出が事故防止に必要な検出対象である。本データ取得シーンにおいて検出が求められる検出対象車両について、図 5.1.3.2.2-4 に示す。



図 5.1.3.2.2-2 “①右折車両と直進車両の衝突事故”シーン検出性能検証向けの
実験データ取得シナリオ概要



図 5.1.3.2.2-3 “①右折車両と直進車両の衝突事故”シーンの
実験データ取得時の様子



(a) 乗用車
(プリウス)



(b) バイク



(c) 自転車

図 5.1.3.2.2-4 “①右折車両と直進車両の衝突事故”シーンの検出対象車両

本データ取得シーンにおけるインフラレーダーによる検出の状況を図 5.1.3.2.2-5 に示す。

本データ取得シーンの検出性能解析結果を表 5.1.3.2.2-2 に示す。表 5.1.3.2.2-2 は、レーダーからの距離範囲ごとに求めた検出率を車種別に示しており、解析対象車両が 10 回交差点を通過したデータをもとに解析した結果である。表にて検出率を記入していない距離区間(例えばバイクの 70 ～ 80 m 区間)は、検出できたフレーム数が少なく、その区間に存在した正確なフレーム数が算出できないため、検出率を計算していない区間である。

また、表 5.1.3.2.2-2 をグラフ化したものを図 5.1.3.2.2-6 に示す。乗用車は、レーダーからの距離が 60m 台、バイクは 50m 台、自転車は 40m 台の距離において、90% 近い検出率が確認できた。

図 5.1.3.2.2-7 に、乗用車の検出率と検出距離について、交差点領域からどの程度離れた位置であるか分かるように、実験データを取得した交差点の上空写真上に図示した。図に示した乗用車のサイズと比較すると、交差点中心のレーダーからの距離 20m 地点から、9 割近い検出率が確認される 60m 台地点まで、8 台から 9 台程度の車両が並ぶ程度の距離となる。本解析結果から、今回のデータ取得実験のようにインフラレーダーを設置した場合、右折待ち車両に対して、対向車線から交差点に進入する乗用車の存在を、おおよそ 5 秒程度前(乗用車の速度を 30 km/h とした場合)に通知することが可能なシステムを構築できることが確認された。



図 5.1.3.2.2-5 “①右折車両と直進車両の衝突事故”シーンの
インフラレーダー検出状況(カメラ画像との重畳図)

表 5.1.3.2.2-2 “①右折車両と直進車両の衝突事故”シーンの検出性能解析結果
(“-“の距離区間はサンプルが少ないため未算出)

距離区間	乗用車 (N=1860)	バイク (N=1126)	自転車 (N=744)
20 ~ 30 m	100 %	100 %	100 %
30 ~ 40 m	100 %	100 %	100 %
40 ~ 50 m	100 %	99 %	88 %
50 ~ 60 m	100 %	89 %	34 %
60 ~ 70 m	89 %	49 %	—
70 ~ 80 m	45 %	—	—

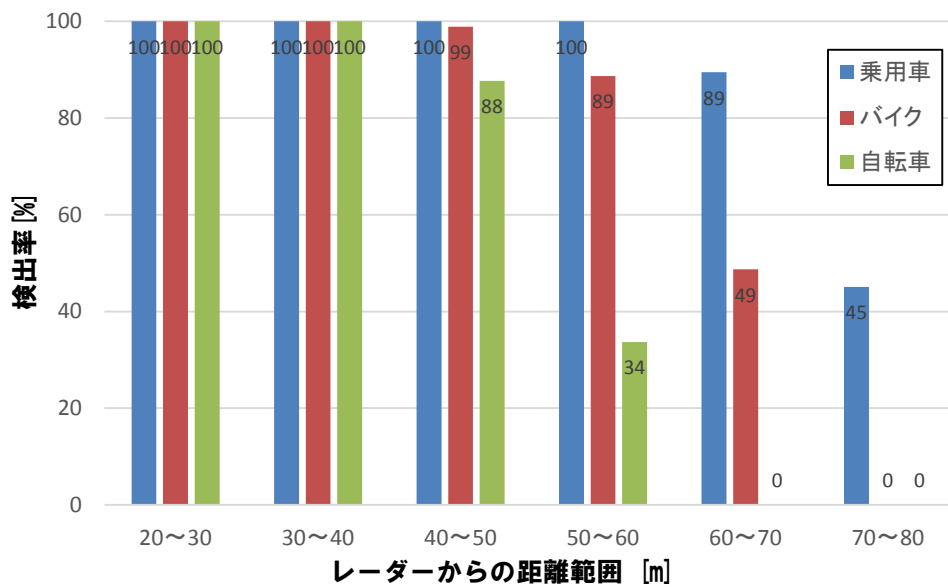


図 5.1.3.2.2-6 “①右折車両と直進車両の衝突事故”シーンの
距離／車種別の検出性能

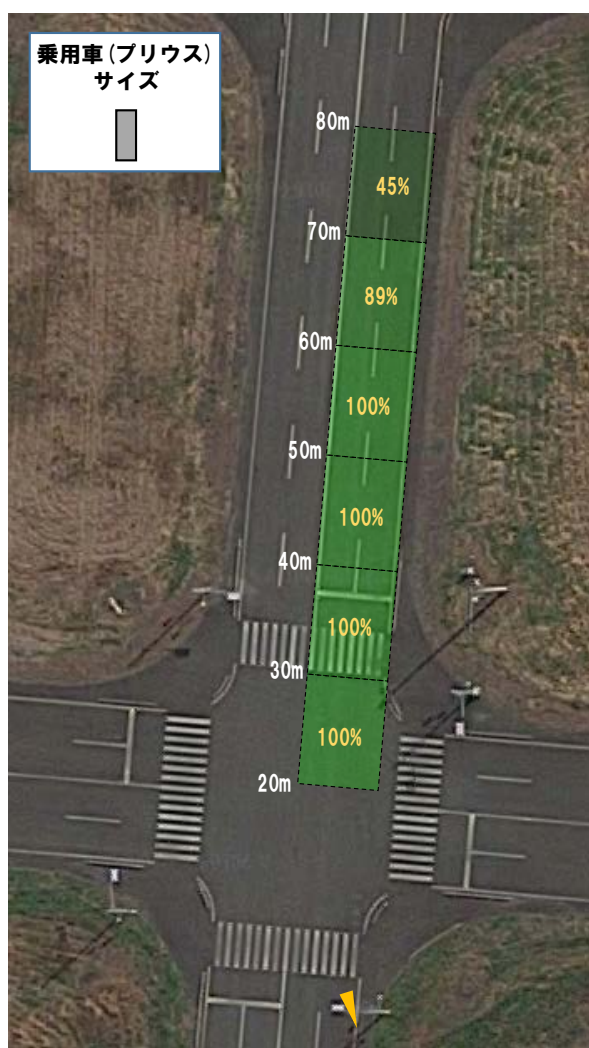


図 5.1.3.2.2-7 “①右折車両と直進車両の衝突事故”シーンについて、
インフラレーダーによる乗用車(プリウス)の検出率を投影した図

② 左折車両による二輪車巻き込み事故

図 5.1.3.2.2-8 に、「②左折車両による二輪車巻き込み事故」シーンを模した、インフラレーダー検出性能実験のデータ取得シーン概要図を示す。また、図 5.1.3.2.2-9 にインフラレーダー設置高さから撮影した本データ取得シーンのカメラ画像を示す。

前述の表 5.1.3.2.2-1 に示したように、この事故シーンにおいて、インフラレーダーは車両の側面をすり抜ける二輪車の検出が求められている。本データ取得シーンにおいて、具体的には、交差点に進入する形で停車している四輪車両の側面左側を走行する二輪車両の検出が事故防止に必要な検出対象である。本データ取得シーンにおいて検出が求められる検出対象車両について、図 5.1.3.2.2-10 に示す。

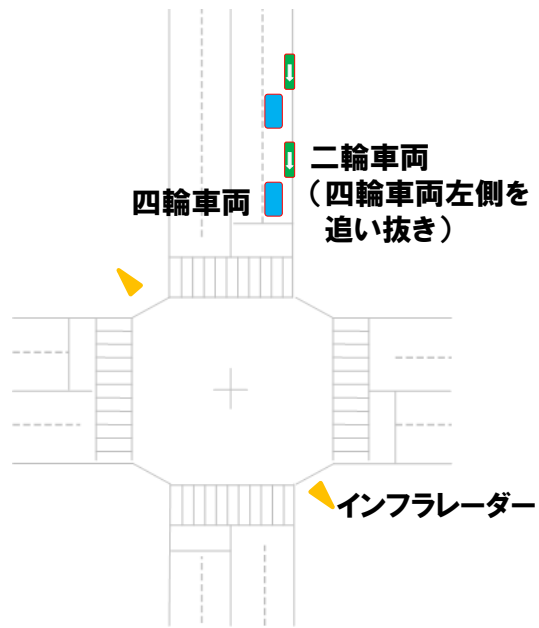


図 5.1.3.2.2-8 “②左折車両による二輪車巻き込み事故”シーン検出性能
検証向けの実験データ取得シナリオ概要



図 5.1.3.2.2-9 “②左折車両による二輪車巻き込み事故”シーンの
実験データ取得時の様子

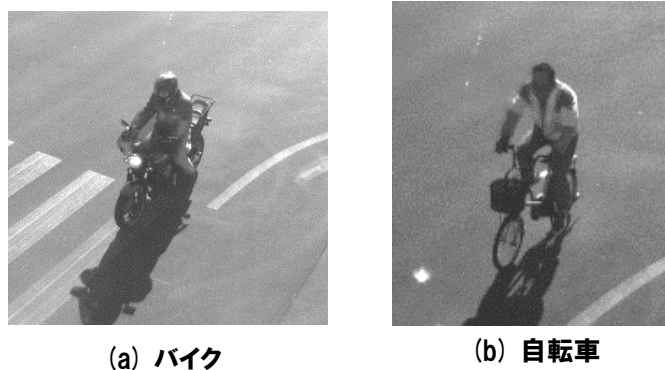


図 5.1.3.2.2-10 “②左折車両による二輪車巻き込み事故”シーンの検出対象車両

本データ取得シーンにおけるインフラレーダーによる検出の状況を図 5.1.3.2.2-11 に示す。また、本データ取得シーンの検出性能解析結果を表 5.1.3.2.2-3、表 5.1.3.2.2-4、および表 5.1.3.2.2-5 に示す。

表 5.1.3.2.2-3 は、バイクの検出結果であり、インフラレーダーを設置した交差点を 10 回通過したデータをもとにした。交差点通過時の速度は、平均するとおおよそ時速 19 km/h であった。

表 5.1.3.2.2-4 は、自転車の検出結果であり、14 回の交差点通過データをもとにした値である。交差点通過時の速度は、平均するとバイク同様、時速 19 km/h であった。

本データ取得シーンにおけるバイク、自転車の検出性能をまとめたものを表 5.1.3.2.2-5 に示す。バイクについては、インフラレーダーから 67.7 m の距離から、99 %以上の検出率で検出されることが確認できた。また、自転車については、バイクよりおおよそ 10 m 短い、インフラレーダーから 54.9 m の距離から 99%以上の検出率で検出できることが確認された。

また、インフラレーダーによるバイクと自転車の検出点をプロットしたものを図 5.1.3.2.2-12 と図 5.1.3.2.2-13 に示す。図 5.1.3.2.2-12 のバイクの検出点では、前述の通り、レーダーからの距離がおおよそ 65 m 程度からの検出を確認でき、また、図 5.1.3.2.2-13 の自転車の場合は、おおよそ 55 m 程度から検出できていることが確認できる。また、本データ取得シーンでは前述の通り、大型車を複数台停車させてその左側側面そばをバイクと自転車が通過するシーンであったが、図に示した検出点群を確認すると、大きな切れ目無く走行車線に沿って検出できていることが確認できる。

以上の解析結果から、今回のデータ取得実験同様にインフラレーダーを設置した場合、左折する車両の左側面後方から接近する二輪車両の検出がインフラレーダーにより可能であることが確認できた。

つまり、今回のデータを取得した模擬交差点(片側 2 車線同士の比較的大きな交差点)において、インフラレーダーが対向する車線の車両が左折し始める距離はおおよそインフラレーダーの 30 m 先の距離となる。その地点からさらに 35 m 後方より、インフラレーダーによるバイクの検出が可能であり、例えば、バイクの速度が 30 km/h とした場合、約 4 秒間の時間的な余裕が生じる。これは、左折車両に対してバイクの接近を通知するようなアプリケーションの実現性、有効性を高める実験解析結果である。



図 5.1.3.2.2-11 “②左折車両による二輪車巻き込み事故”シーンのインフラレーダー検出状況(カメラ画像との重畳図)

表 5.1.3.2.2-3 “②左折車両による二輪車巻き込み事故”シーンのバイクに対する検出性能検証

バイク 周回	最長検出距離 [m]	最短検出距離[m]	未検出フレーム数 / 検証対象フレーム数
1	62.3	14.4	0 / 88
2	66.6	14.2	1 / 99
3	70.1	14.0	0 / 112
4	69.0	15.1	0 / 101
5	68.7	13.7	0 / 110
6	67.8	14.6	2 / 101
7	67.2	15.7	0 / 99
8	68.6	14.0	0 / 102
9	68.9	13.0	2 / 107
10	67.9	12.3	3 / 108

表 5.1.3.2.2-4 “②左折車両による二輪車巻き込み事故”シーンの
バイクに対する検出性能検証

自転車 周回	最長検出距離 [m]	最短検出距離[m]	未検出フレーム数 / 検証対象フレーム数
1	58.3	16.7	1 / 75
2	50.7	14.1	0 / 69
3	52.4	14.0	0 / 77
4	53.7	15.4	0 / 66
5	53.0	12.8	1 / 80
6	52.5	13.9	0 / 74
7	55.2	13.7	0 / 82
8	52.5	15.0	1 / 72
9	50.7	12.8	0 / 73
10	58.3	14.3	2 / 82
11	55.2	13.5	0 / 80
12	58.1	12.6	0 / 87
13	58.8	14.2	3 / 76
14	58.8	14.2	2 / 85

表 5.1.3.2.2-5 “②左折車両による二輪車巻き込み事故”シーンに対する
インフラレーダーの検出性能まとめ

車種	検出率	検出範囲(平均)	フレーム数
バイク	99.2 %	14.1 m ~ 67.7 m	1027
自転車	99.1 %	14.1 m ~ 54.9 m	1078

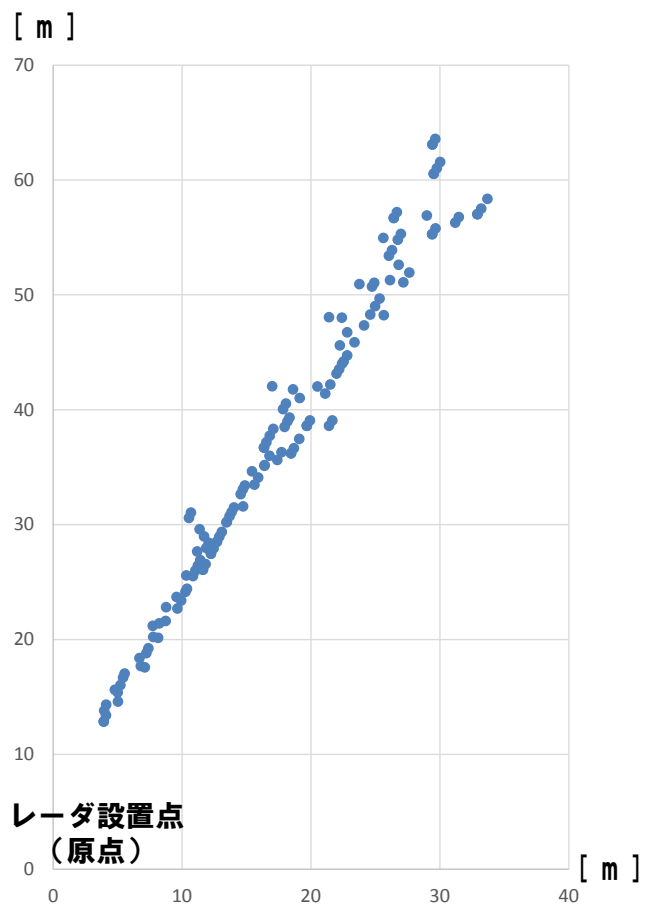


図 5.1.3.2.2-12 インフラレーダーの検出点プロット図(バイク)

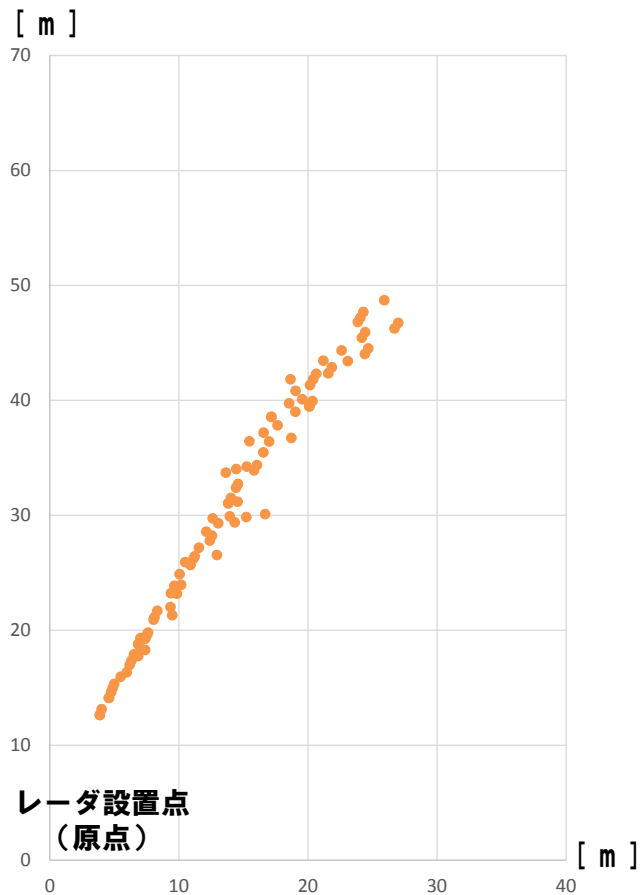


図 5.1.3.2.2-13 インフラレーダーの検出点プロット図(自転車)

③ 優先道路侵入時の出会い頭事故

図 5.1.3.2.2-14 に、「③優先道路侵入時の出会い頭事故」シーンを模した、インフラレーダー検出性能実験のデータ取得シーン概要図を示す。また、図 5.1.3.2.2-15 にインフラレーダー設置高さから撮影した本データ取得シーンのカメラ画像を示す。

前述の表 5.1.3.2.2-1 に示したように、この事故シーンにおいて、インフラレーダーは優先道路を走行する各種車両の検出が求められている。本データ取得シーンにおいて、具体的には、壁の向こう側で死角となる位置に停止している四輪車両に最も近い車線を直進して通過する四輪、及び二輪車両の検出が事故防止に必要な検出対象である。本データ取得シーンにおいて検出が求められる検出対象車両について、図 5.1.3.2.2-16 に示す。



図 5.1.3.2.2-14 “③優先道路進入時の出会い頭事故”シーン検出性能
検証向けの実験データ取得シナリオ概要



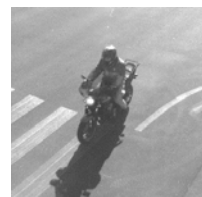
図 5.1.3.2.2-15 “③優先道路進入時の出会い頭事故”シーンの実験データ取得時の様子



(a) 大型車
(トラック)



(b) 乗用車
(プリウス)



(c) バイク

図 5.1.3.2.2-16 “③優先道路進入時の出会い頭事故”シーンの検出対象車両

本データ取得シーンにおけるインフラレーダーによる検出の状況を図 5.1.3.2.2-17 に示す。

本データ取得シーンの検出性能解析結果を表 5.1.3.2.2-6 に示す。表 5.1.3.2.2-6 は、レーダーからの距離範囲ごとに求めた検出率を車種別に示しており、解析対象車両が 10 回交差点を通過したデータをもとに解析した結果である。また、表 5.1.3.2.2-6 をグラフ化したものを図 5.1.3.2.2-18 に示す。図 5.1.3.2.2-17 のカメラ重畳画像の通り、インフラレーダー側から車両の前面と車両側面が確認できる位置関係であり、反射断面積が比較的大きい。そのため、表 5.1.3.2.2-6 と図 5.1.3.2.2-18 の検出結果に示したとおり、インフラレーダーからの距離が 70m 台まで、乗用車やバイクであっても比較的高い検出率で検出できていることがわかる。

図 5.1.3.2.2-19 に、乗用車の検出率と検出距離について、レーダー設置地点と出会い頭事故を想定した交差点領域からどの程度離れた位置であるか分かるように、実験データを取得した交差点の上空写真上に図示した。非優先道路との交差点から 60 m 程度はなれた車両が 98 % の高い検出率で検出でき、また、車両の速度もインフラレーダーによって同時に取得することが出来る。これらの実験解析結果から、今回のデータ取得実験同様にインフラレーダーを設置した場合、非優先道路側から優先道路に侵入してよいかどうか、適切な判断を行うための情報を提供できることを確認できた。



図 5.1.3.2.2-17 “③優先道路進入時の出会い頭事故”シーンの
インフラレーダー検出状況(カメラ画像との重畳図)

表 5.1.3.2.2-6 “③優先道路進入時の出会い頭事故”シーンの検出性能解析結果

距離区間	大型車 (N=871)	乗用車 (N=785)	バイク (N=601)
40 ~ 50 m	100 %	100 %	99 %
50 ~ 60 m	100 %	100 %	85 %
60 ~ 70 m	100 %	98 %	56 %
70 ~ 80 m	93 %	61 %	31 %

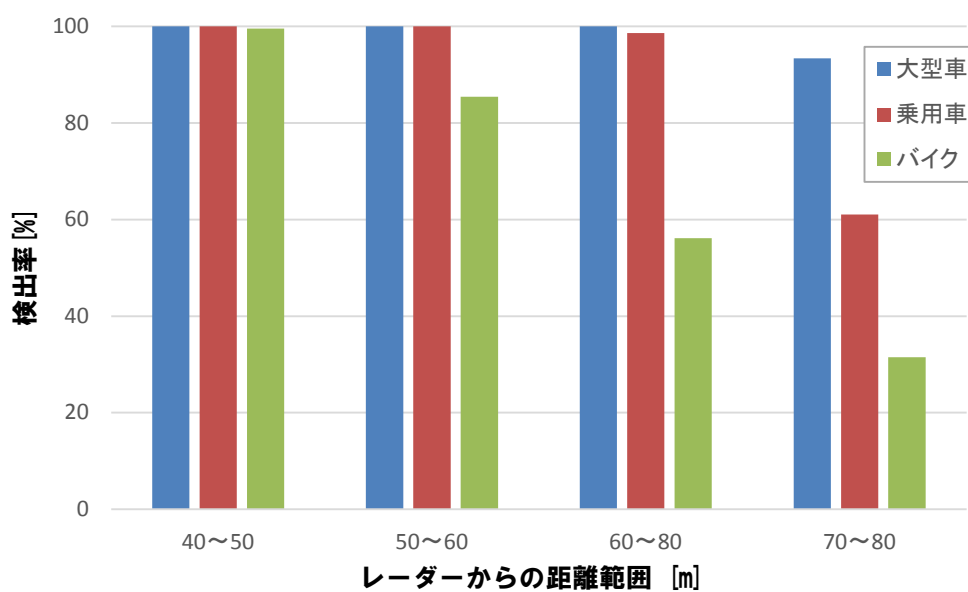


図 5.1.3.2.2-18 “③優先道路進入時の出会い頭事故”シーンの距離／車種別の検出性能

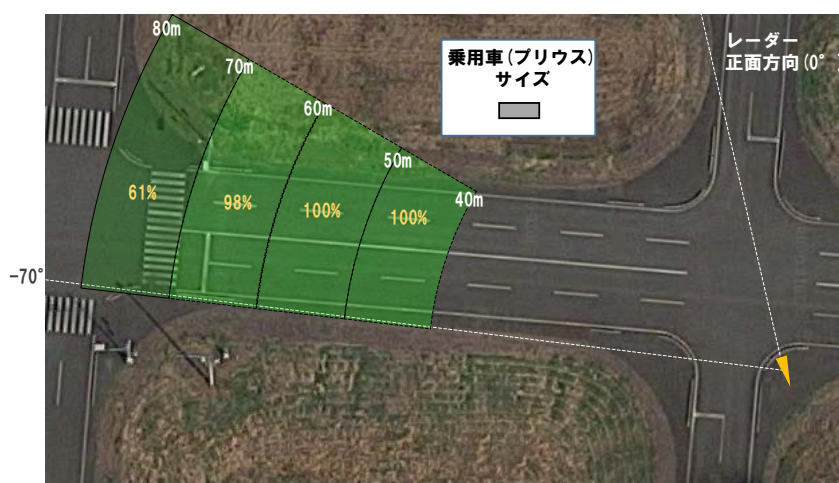


図 5.1.3.2.2-19 “③優先道路進入時の出会い頭事故”シーンについて、インフラレーダーによる乗用車(プリウス)の検出率を投影した図

④ 右左折車両による横断歩行者との衝突事故

図 5.1.3.2.2-20 に、「④右左折車両による横断歩行者との衝突事故」シーンを模した、インフラレーダー検出性能実験のデータ取得シーン概要図を示す。また、図 5.1.3.2.2-21 にインフラレーダー設置高さから撮影した本データ取得シーンのカメラ画像を示す。

前述の表 5.1.3.2.2-1 に示したように、この事故シーンにおいて、インフラレーダーは横断歩道上の歩行者の検出が求められている。本データ取得シーンにおいて、具体的には、歩行者を検出する横断歩道は、図 5.1.3.2.2-20 に示したレーダー1 の右方向側の横断歩道となる。図 5.1.3.2.2-20 に示すように、本データ取得シーンにおいてインフラレーダーの検出性能を検証する検出対象を、実際の歩行者と、歩行者ダミーを使用した。図 5.1.3.2.2-22 に、これらの検出が求められる検出対象について示す。

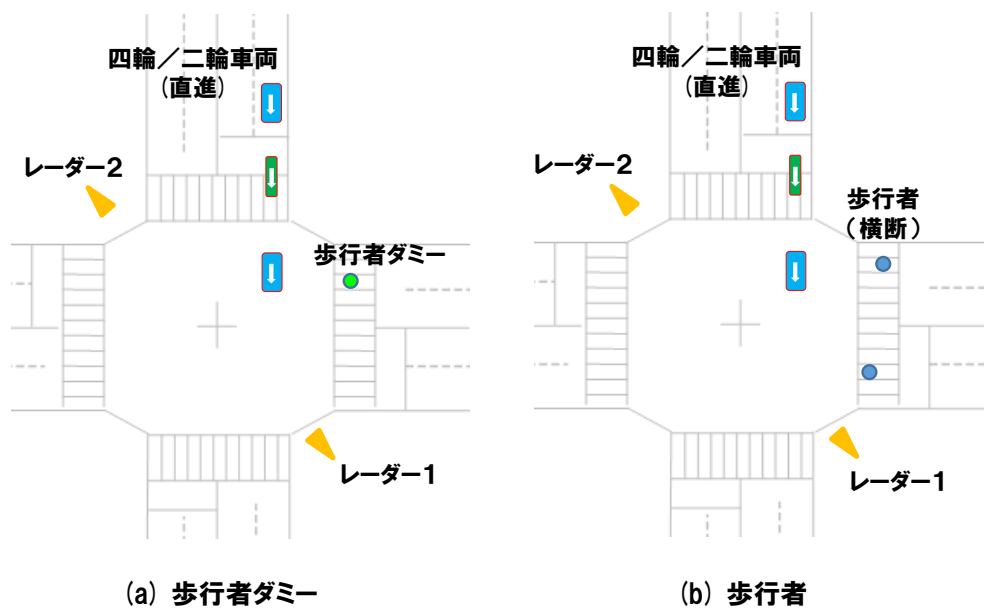


図 5.1.3.2.2-20 “④右左折車両による横断歩行者との衝突事故”シーン検出性能
検証向けの実験データ取得シナリオ概要
(a)歩行者ダミーの検出、(b)歩行者の検出)



図 5.1.3.2.2-21 “④右左折車両による横断歩行者との衝突事故”シーンの
実験データ取得時の様子(左：歩行者ダミー設置時、右：歩行者検出実験時)



(a) 歩行者ダミー

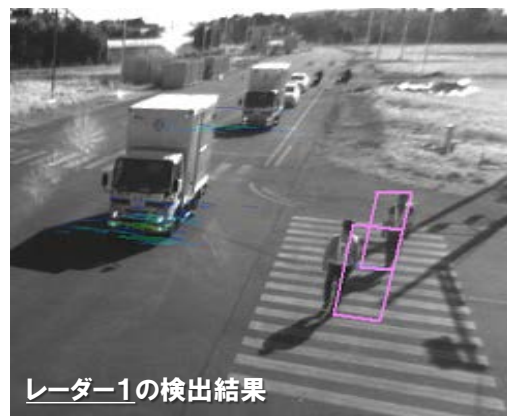


(b) 歩行者

図 5.1.3.2.2-22 “④右左折車両による横断歩行者との衝突事故”シーンの
検出対象((a)歩行者ダミー、(b)歩行者)



(a) 歩行者ダミー

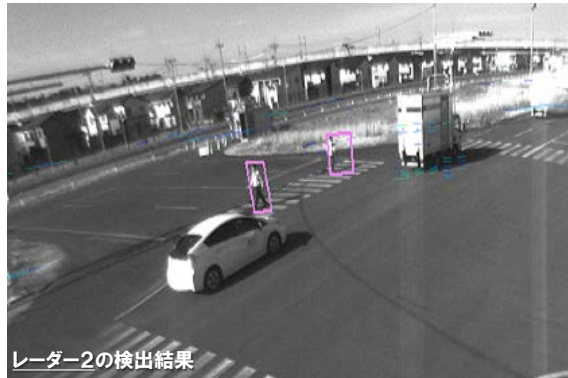


(b) 歩行者

図 5.1.3.2.2-23 “④右左折車両による横断歩行者との衝突事故”シーンの
インフラレーダー1の検出状況(カメラ画像との重畳図)



(a) 歩行者ダミー



(b) 歩行者

図 5.1.3.2.2-24 “④右左折車両による横断歩行者との衝突事故”シーンのインフラレーダー2の検出状況(カメラ画像との重畳図)



図 5.1.3.2.2-25 歩行者ダミーの設置位置とインフラレーダー1、インフラレーダー2の位置関係

図 5.1.3.2.2-23 にインフラレーダー1 の検出結果のカメラ重畳画像を、図 5.1.3.2.2-24 にインフラレーダー2 の検出結果のカメラ重畳画像をそれぞれ示す。前述の通り、レーダー設置状態とアンテナ形状の関係からインフラレーダー設置位置に近い領域についてはミリ波が到達せず、レーダー検出対象範囲から外れてしまう。そのため、移動しない歩行者ダミーに関しては、インフラレーダー1 とインフラレーダー2 両方から検出可能な領域である、図 5.1.3.2.2-25 に示す位置(インフラレーダー1 から約 26 m、インフラレーダー2 から約 25 m の位置)に設置した。また、歩行者の検出率評価に関し、インフラレーダー1 については、検出距離 15 m 以上、インフラレーダー2 については、検出距離 25 m 以上の検出結果のみに絞って評価した。

表 5.1.3.2.2-7 にインフラレーダー1 による歩行者ダミー、および横断歩行者の検出率を示す。交差点内に車両が通過中かどうかに関わらず、95 %以上の高い検出率が得られている。また、子供型歩行者ダミーの大きさと、大人型歩行者ダミー、および歩行者の大きさの違いが、若干ではあるがレーダーの検出率に現れており、今回の場合、子供型歩行者ダミーの方が 3 %程度低下する。

表 5.1.3.2.2-7 “④右左折車両による横断歩行者との衝突事故”シーンの
検出性能解析結果(インフラレーダー1)

(インフラレーダー1)	交差点内を車両が通過中	交差点内車両なし
子供型歩行者ダミー	96.8 % (N=348)	97.5 % (N=1503)
大人型歩行者ダミー	100 % (N=359)	100 % (N=1865)
横断歩行者	99.7 % (N=348)	99.4 % (N=1451)

また、表 5.1.3.2.2-8 にインフラレーダー2 による歩行者ダミー、および横断歩行者の検出率を示す。交差点内に車両が無い場合は、何れの対象物も 95 %以上の、インフラレーダー1 と同等の検出率を示した。また、交差点内を車両が通過すると、インフラレーダー2 側からは、車両によりターゲットの歩行者ダミーや歩行者が遮蔽され、そのフレームでは未検出となるため、交差点内に車両が無い場合と比較し、検出率は低下していることが分かる。また、交差点内を車両が通過する場合の子供型歩行者ダミーと大人型歩行者ダミーの検出率に違いが有る。これは、子供型歩行者ダミーの場合は、乗用車によるオクルージョンが発生したが、大人型歩行者ダミーの場合は発生しなかったことに起因すると考えられるが、この検討の妥当性について考察する。

表 5.1.3.2.2-8 “④右左折車両による横断歩行者との衝突事故”シーンの
検出性能解析結果(インフラレーダー2)

(インフラレーダー2)	交差点内を車両が通過中	交差点内車両なし
子供型歩行者ダミー	82.6 % (N=344)	98.3 % (N=1501)
大人型歩行者ダミー	88.9 % (N=353)	99.1 % (N=1467)
横断歩行者	91.4 % (N=319)	99.9 % (N=1454)

オクルージョンの原因となる車両が、交差点内を一定の速度で通過すると仮定し、図 5.1.3.2.2-26 に示すように、車長を C_w 、交差点内の通過距離を R_w と表すと、横断歩道上の任意の点が車両によってレーダーから遮蔽される時間割合は、 $C_w / (R_w + C_w)$ となる。本データ取得シーンにおいて、交差点を通過する車両は、大型車(トラック)、乗用車(プリウス)、バイクであり、表 5.1.3.2.2-7、表 5.1.3.2.2-8 の検出率を求めるにあたって、それぞれ同回数ずつ、交差点内を通過している。大型車の車長を 5.5 m、乗用車の車長を 4.5 m、横断歩道の長さを 15 m とした場合、前述のレーダーから遮蔽される時間割合 $C_w / (R_w + C_w)$ は、大型車では約 0.27、乗用車では約 0.23 となる。車両が連続、かつ同速度で交差点を通過したとすると、大型車と乗用車により遮蔽され、バイクでは遮蔽されなかった場合、横断歩道上の任意の点の”遮蔽されない”時間割合は、約 0.83 となる。また、大型車では遮蔽されるが、乗用車とバイクでは遮蔽されなかった場合について、横断歩道上の任意の点の”遮蔽されない”時間割合は、約 0.91 となる。今回のデータ取得シーンにおいては、交差点に進入する車両の速度が若干異なり、また、連続して走行できていない点で誤差が発生すると考えられるが、表 5.1.3.2.2-8 のインフラレーダー2 における、交差点内を車両が通過中の子供型歩行者ダミーの検出率 82.6 %、および大人型歩行者ダミーの検出率 88.9 % と大きな乖離は無い。従って、子供型歩行者ダミーでは乗用車によるオクルージョンが発生し、大人型歩行者ダミーでは発生しないという想定は概ね正しいと考えられる。

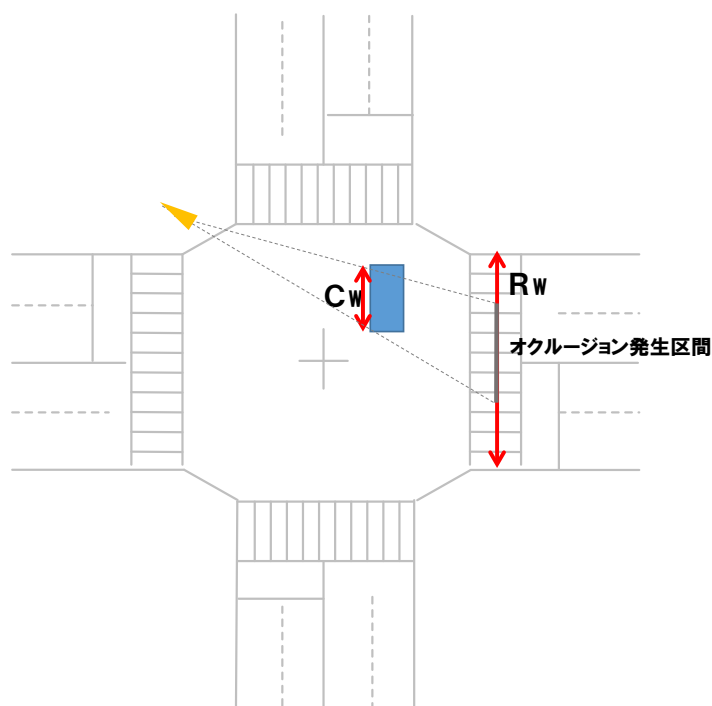
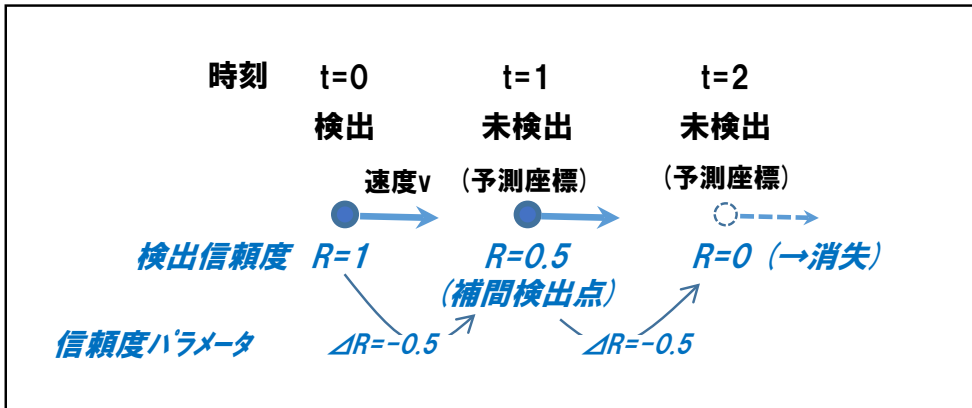


図 5.1.3.2.2-26 オクルージョンが生じる時間割合説明のための図
 (横断歩道上の任意の点が車両によってレーダーから遮蔽される時間割合は、
 $Cw / (Rw + Cw)$ となる)

このように、交差点内を通過する車両によってオクルージョンが生じ、インフラレーダー側から見て、車両の向こう側に存在する横断歩行者の検出ができない状況が発生する。このような課題に対しては、オクルージョンが発生していると推測される領域、即ち、インフラレーダーにより検出された物体枠のインフラレーダーから見た同方位方向遠方側の領域を算出し、当該領域の検出パラメータを調整して検出点の消失を防ぐ方法が考えられる。例えば、図 5.1.3.2.2-27 の上図に示すように、検出方式にて、瞬時的な未検出によるトラッキングへの影響を抑えるため、未検出であっても前フレームの情報から生成する補間検出点を維持する方式を備えている。補間検出点は決められたフレームの間、新たな検出点とマッチングできるまで存在するが、例えば図 5.1.3.2.2-27 の下図のように、オクルージョンが発生していると推測される領域に関しては、補間検出点の維持に関わるパラメータ(図では $\angle R$)を、補間検出点消失までの時間が長くなるように調整する。これにより、車両の通過等でオクルージョンが発生しても通常領域よりも長く歩行者の検出点が維持されるので、オクルージョンで未検出発生が生じやすい領域に対して検出点のトラッキング継続性を上げる効果に繋がると考えられる。

オクルージョン要因無い場合の補間検出点算出例
 (2フレーム未検出継続で検出点消失)



オクルージョン領域がある場合の補間検出点算出例
 (オクルージョン発生領域内では信頼度パラメータを調整し補間検出点消失までの時間を長く)

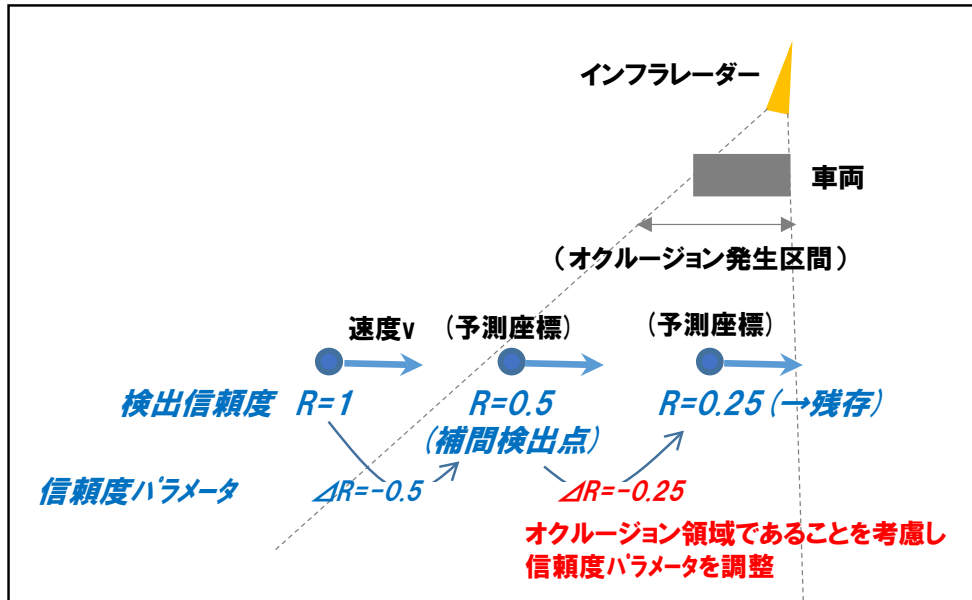


図 5.1.3.2.2-27 オクルージョンが生じた場合の検出点消失に対する対策案

5.1.3.2.3 マルチパス解析のための市街地環境モデリング

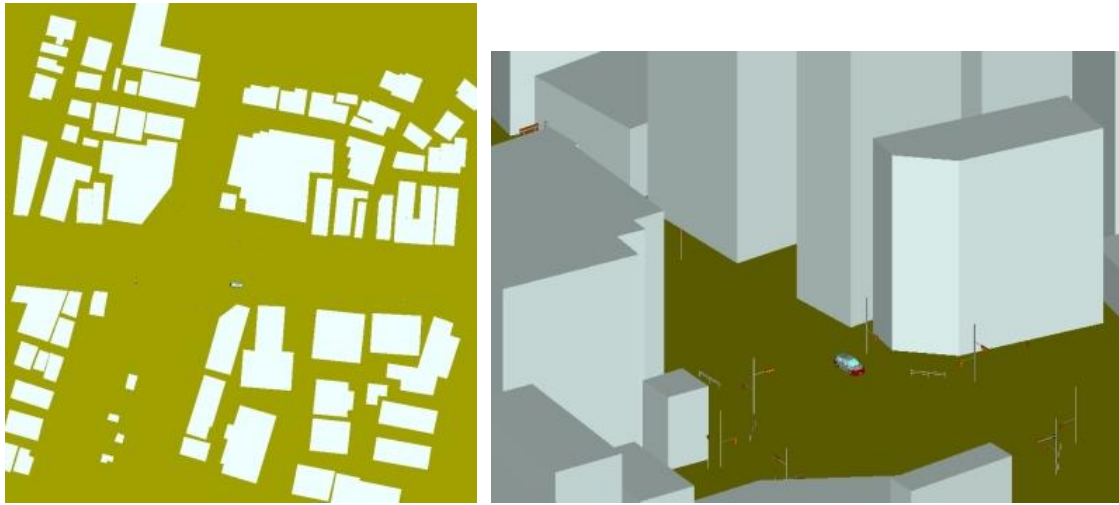
公道実証実験を見据え、実際の市街地における交差点環境を想定した場合、インフラレーダーからの送信波が周囲の建物等による不要波(マルチパス)が懸念される。マルチパスとは、所望のターゲットに対する直接的な反射エコーだけでなく、周囲の建物等を介して、間接的な反射エコーが合わさる現象である。そのため、インフラレーダーは、所望のターゲットに加え、虚像のターゲットも検出されるため、検出性能の信頼性向上にむけてマルチパス発生メカニズムを解明することが必要である。

実環境におけるマルチパスの伝搬解析を行うため、実在する建物、交通機器類、車両をモデル化したシミュレーション環境を構築する。具体的には、東京都区内の地図データベースから建物の配置、形状、高さをモデル化した「市街地モデル」、信号機や交通標識等の製品仕様からモデル化した「交通機器類モデル」、そして昨年度の「車両モデル」を用いて、レイトレース法によるマルチパス伝搬解析を行う。

マルチパス伝搬解析の一例として、市街地モデルの対象地域の上空写真を図 5.1.3.2.3-1 に示す[1]。本地域は、4車線 x 4車線の交差点を中心として、周囲にビルが林立する場所であり、交通機器類モデル、車両モデルを加えた市街地モデルを図 5.1.3.2.3-2 に示す。車両モデルは交差点の停止線付近に、またインフラレーダーは車両に対して前方の信号機柱(高さ5m)に配置したシミュレーションモデルを図 5.1.3.2.3-2 に示す。図 5.1.3.2.3-2 (a)より、交差点を中心に縦横へ広がる道路、建物の配置や形状等が精度よくモデル化できていることが分かる。



図 5.1.3.2.3-1 モデル化対象地域[1]

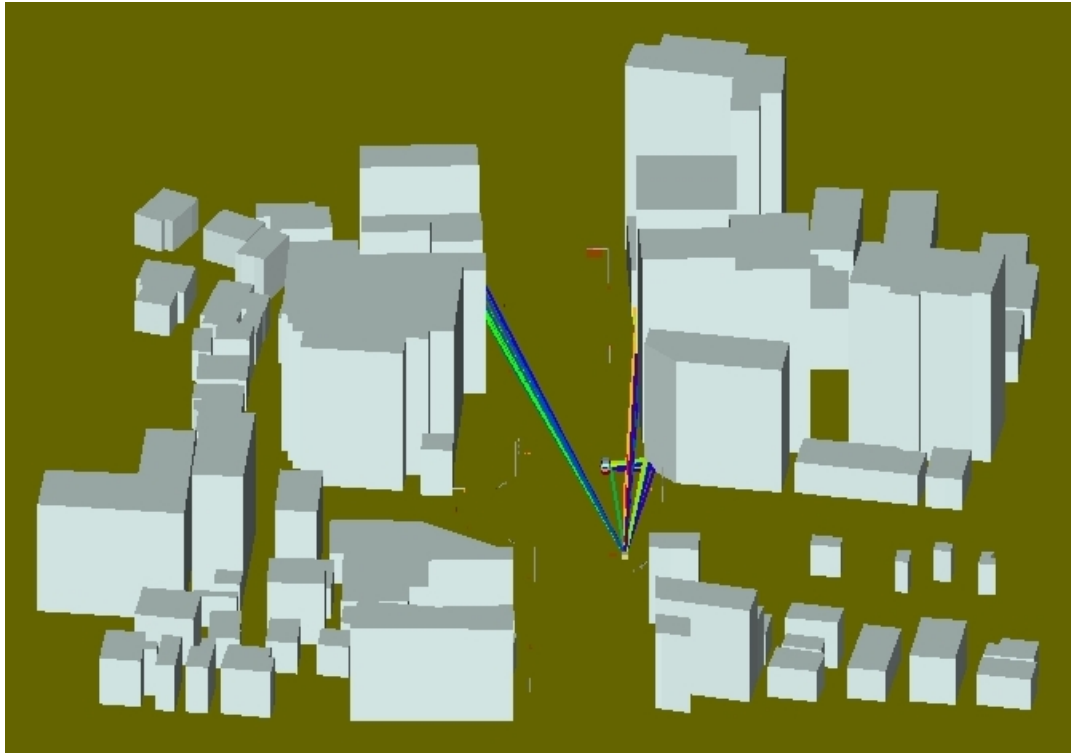


(a) 全体図

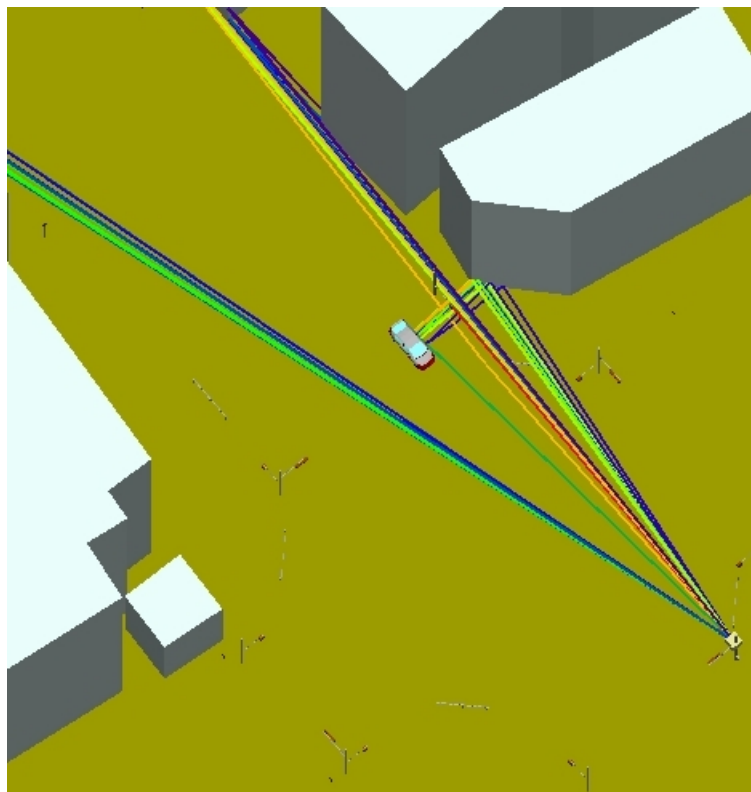
(b) 交差点拡大図

図 5.1.3.2.3-2 シミュレーションモデル

図 5.1.3.2.3-3 は、図 5.1.3.2.3-2 のシミュレーションモデルに対する伝搬解析結果の一例を示す。これは、交差点に設置したインフラレーダーからの送信波が、車両や周囲の建物等による反射や回折を経て、再びインフラレーダーへ戻る、受信波(反射エコー)の伝搬軌跡を示しており、伝搬的な振る舞いを視覚的に捉えることができる。図 5.1.3.2.3-3 (b)より、インフラレーダーには車両からの直接的な伝搬路だけでなく、車両から隣接する建物の壁面を経由する伝搬路が確認でき、シミュレーション上でマルチパスの発生を再現できた。従って、昨年度の車両単体モデルの解析から、実在する建物等を含めたモデルに拡張することで、より実際の環境を加味した、マルチパス伝搬解析の評価系が構築でき、今後、シミュレーションによる数値解析と実験検証の両面からマルチパス発生のメカニズムの解明、並びにインフラレーダーの性能向上に向けて進める予定である。



(a) 全体図



(b) 交差点拡大図 図 5.1.3.2.3-3 マルチパスを含む伝搬解析例

5.1.3.2.3 センサー統合処理装置設計および公道実証実験のまとめ

本節では、主に公道実証実験に向け設計したセンサー統合処理装置の構成を説明すると共に、当該装置によって実施した、模擬市街路における典型事故パターンの検出性能検証について述べた。インフラ設置センサーからのセンシングニーズが高いと考えられる 4 つの典型事故シーンを模して実施した実験データについて、インフラレーダーに求められる検出性能を検証し、それぞれの典型事故シーンの削減に対するインフラレーダーの有用性を示した。

【参考文献】

[1] <https://www.google.co.jp/map>

5.2. 技術課題イ) レーダー間干渉低減技術の開発

5.2.1. 取り組み内容

本章では、79GHz 帯のインフラレーダーが、車載レーダーとの耐干渉性能として優れているだけでなく、インフラレーダーシステムとして複数レーダー間の相互干渉を制御する「レーダー間干渉低減技術の開発」に取り組む。本年度の具体的な内容は、伝搬実験を通じて干渉発生率を解析、評価することでインフラレーダーと車載レーダー間の干渉性能を実証する(5.2.2 節)。また、インフラレーダーシステムとして交差点内で複数のレーダーを同時に動作させるために相互干渉を抑圧する干渉低減システム技術を開発する(5.2.3 節)。

5.2.2. イ) ① 耐干渉性能の実証実験

5.2.2.1. 干渉評価シナリオに基づく定量的な耐干渉性能評価

本節では、市街路を模擬した実験施設を用いて、交差点における高所設置のインフラレーダーと車両搭載のレーダー間の干渉評価シナリオに基づき、実験解析を実施する。具体的には、インフラレーダーが交差点内に 2 台設置、車載レーダーが車両に 3 台搭載が要件であり、交差点に車両が進入する干渉評価シナリオを策定の上、システム共存可能性を検証する。

本実験の試験設備として、一般財団法人 日本自動車研究所が保有する模擬市街路(茨城県つくば市)を利用する。模擬市街路とは、交差点、横断歩道、車線等の市街路が再現されており、危険状況の再現実験、運転支援装置の評価実験、ドライバーの運転行動に関する実験等が行われている[1]。模擬市街路の写真および仕様を図 5.2.2.1-1, 表 5.2.2.1-1 に示す。

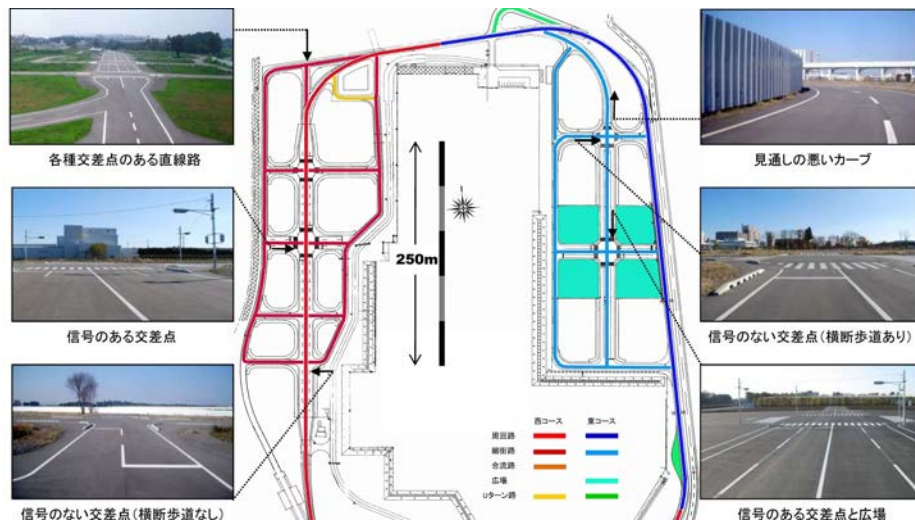


図 5.2.2.1-1 模擬市街路[1]

表 5.2.2.1-1 設備仕様[1]

走路幅	2.75 ~ 3.5 m
直線路	南北 400m (内 4 車線区間 300m)
交差点	4 車線 x 4 車線, 4 車線 x 2 車線
付帯設備	信号機, 視界調整用壁材料, 縁石ブロック等

図 5.2.2.1-2 は、79GHz 帯車載レーダーを搭載した実験車両を示す。一般的なバン型自動車に、前方の左(FL), 右(FR)に各 1 台 VR①, VR②、後方(R)の中央付近に 1 台 VR③を、全て地上高 0.85m で実装する。なお、図 5.2.2.1-2 の矢印は、車載レーダーの概略的な送信(検知)方向を模写しているが、検知範囲は矢印を中心にして±75度である。なお、車載レーダーは、周波数等を任意に設定が可能であり、評価シナリオに沿って指定する。

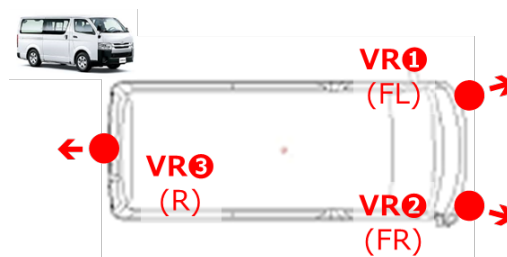




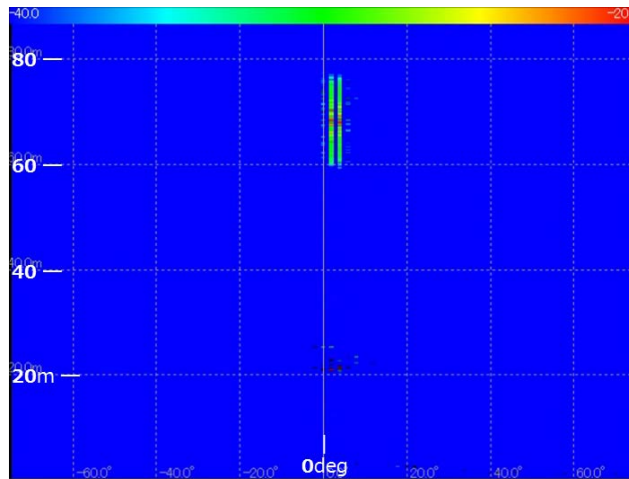
図 5.2.2.1-2 車載レーダー

まず、交差点に車両が進入する評価シナリオを実施する前に、基礎検討(以下、干渉基礎実験と称す)として、干渉発生時の検知現象を検証する。具体的には、インフラレーダーと車載レーダーの各 1 台を対向させ、実験車両をターゲット距離(レーダー間距離) 20 ~ 80 m を低速走行する。なお、意図的に干渉現象を再現させるため、両レーダーの周波数やアンテナの偏波面等、予め同一設定とする。図 5.2.2.1-3 はインフラレーダー、および車載レーダー VR③の写真を示す。

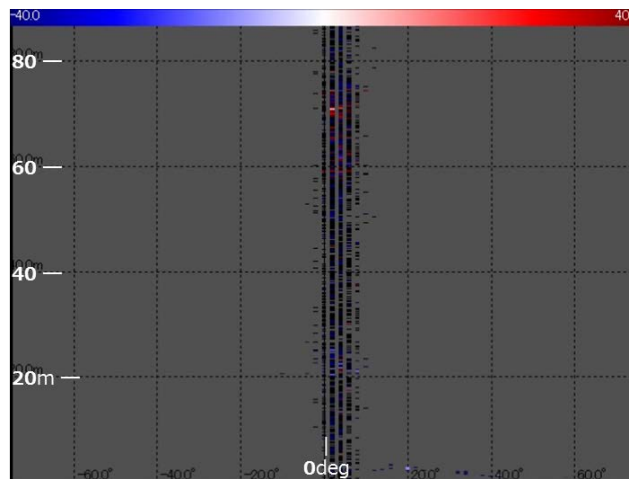


図 5.2.2.1-3 干渉基礎実験

図 5.2.2.1-4 は、干渉発生時の電力プロファイル、およびドップラープロファイルの検出例を示す。インフラレーダーは、車両の反射エコーを実際の走行位置と同じく 20m で検知しているが、加えて帯状の反射エコーも検知している。干渉波を検知した場合、プロファイルには特有な帯状の反射エコーが見られ、昨年度の実験でも同現象を確認している。



(a) 電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.2.2.1-4 干渉基礎実験(プロファイル)

図 5.2.2.1-5 は、図 5.2.2.1-4 の条件に合わせてモデル化した、レイトレース法による伝搬シミュレーション結果を示す。図 5.2.2.1-5 より、レーダー間の直接的な伝搬路と、地面を経由する伝搬路の 2 つの伝搬が干渉波として検知されることが確認できた。

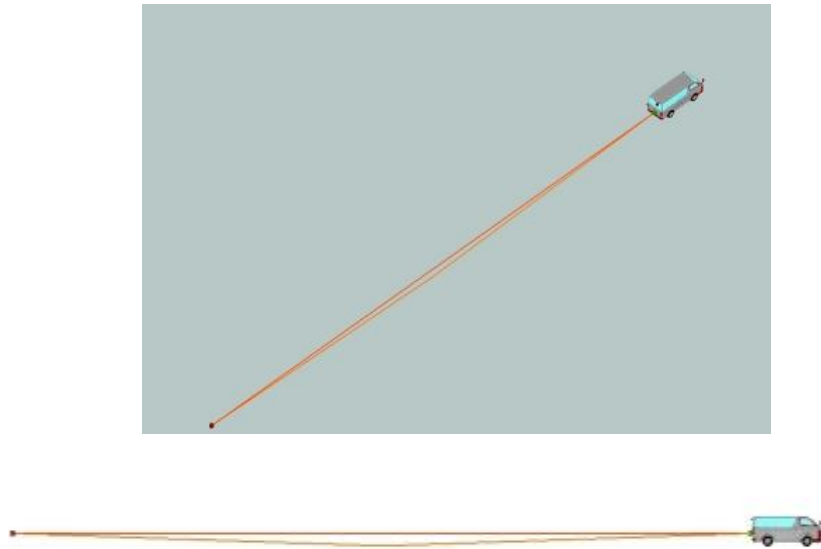
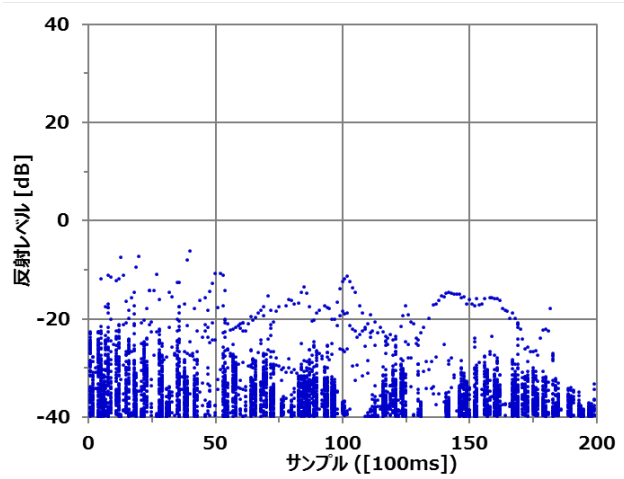
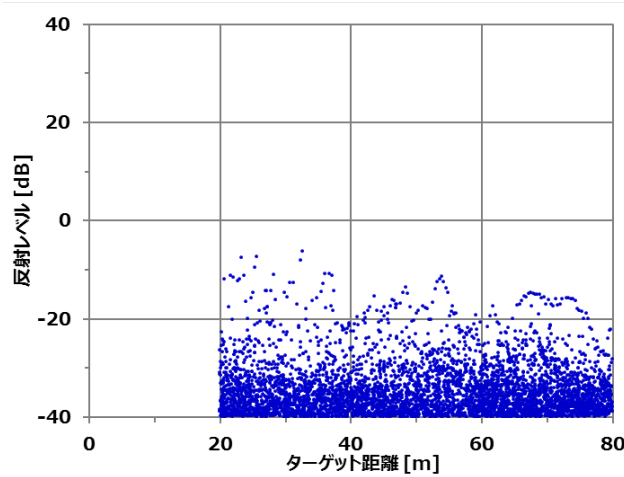


図 5.2.2.1-5 干渉基礎実験(シミュレーション)

さらに干渉波の検知を分析するため、図 5.2.2.1-4 から、測定時間(サンプル)およびターゲット距離に対する反射特性(干渉波あり)を図 5.2.2.1-6 に示す。図 5.2.2.1-7 は、比較のため、干渉波が発生しない条件で測定した反射特性(干渉波なし)を示す。なお、両特性は、長時間測定による統計的な分析のため、実験車両をターゲット距離 20 ～ 80 m の走行ルートを繰り返し測定しており、走行速度等の誤差があるため、測定値は完全同期が取れていないが、現象分析の上では問題ない。干渉波の検知として、図 5.2.2.1-6 と -7 の比較から、時系列ではランダムに帯状の分布が、またターゲット距離では低い分布の広がり特徴的であることが分かった。ただ、前者の帯状の分布が特徴として明確であり、干渉検知現象を捉えるためには、時系列の指標が有効であると考えられる。従って、帯状分布を干渉波の検知判断基準として、以降、様々な条件下の反射特性から干渉波を検証する。

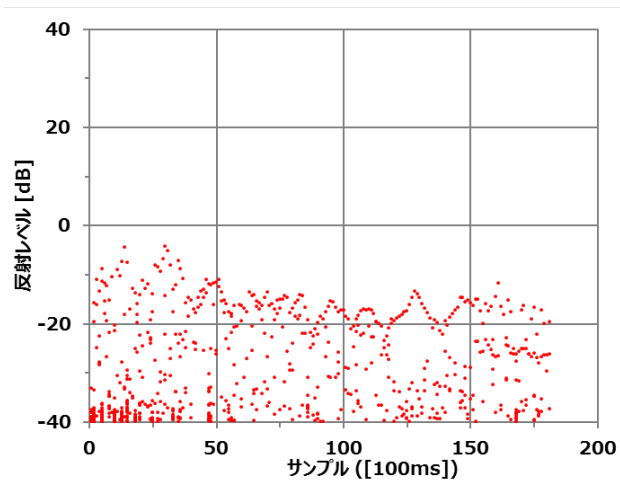


(a) 測定時間に対する反射特性

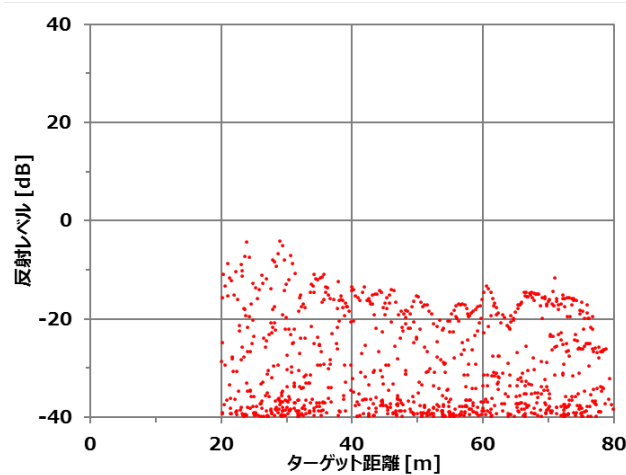


(b) ターゲット距離に対する反射特性

図 5.2.2.1-6 干渉基礎実験・干渉波あり(反射特性)



(a) 測定時間に対する反射特性



(b) ターゲット距離に対する反射特性

図 5.2.2.1-7 干渉基礎実験・干渉波なし(反射特性)

本実験では、模擬市街路の中央付近に位置する、4車線 x 4車線の交差点を評価領域として実施する。図 5.2.2.1-8 は、インフラレーダーの配置と写真を示す。インフラレーダー(IR①, IR②)は、交差点の対角位置に高さ 5m、かつ対向設置することで、交差点内、およびその周辺を検知領域に設定する。図 5.2.2.1-8 の矢印は、インフラレーダーの概略的な送信(検知)方向を模写しているが、インフラレーダーは、周波数等が任意に設定可能な 2 つのセクタを有しており、予めインフラレーダー間で干渉しないようにパラメータ設定や設置調整等を行う。なお、検知範囲は矢印を中心にして、セクタあたり ± 35 度なので、インフラレーダー自体(セクタ 1 + セクタ 2)の検知範囲は 140 度である。

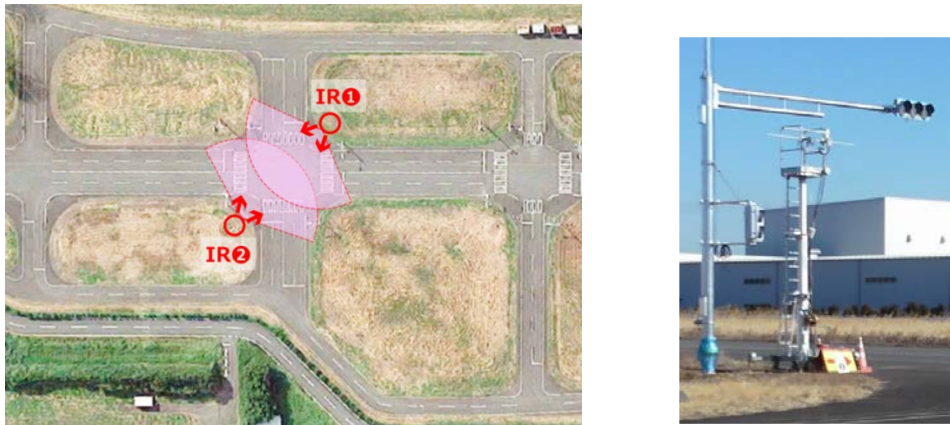
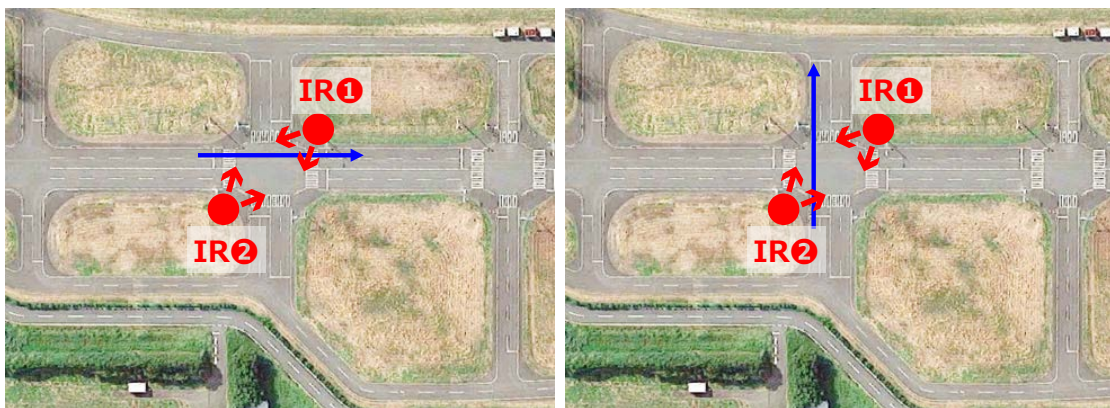


図 5.2.2.1-8 インフラレーダーの配置図

図 5.2.2.1-9 は、交差点を車両が通過する評価シナリオを示す。なお、車載レーダーの設定は図 5.2.2.1-10 に示す。実験車両側は、前方の左(FL)、右(FR)、後方(R)に車載レーダーを実装しており、インフラレーダー側の送信(検知)方向を踏まえ、互いのレーダーが対向する組み合わせから、実験車両が交差点に対して縦横に走行する「評価シナリオ A」、および左右に走行する「評価シナリオ B」の 2つのパターンとする。例えば、評価シナリオ A(図 5.2.2.1-9 (a))の場合、実験車両の走行ルート(青矢印)に対して、インフラレーダーの IR①は車載レーダーの VR① (FL)、またインフラレーダーの IR②は車載レーダーの VR② (FR)、VR③ (R)とそれぞれ対向する。ただし、本実験では、干渉基礎実験と異なり、実際のシーンに近い条件として、インフラレーダーは高さ 5m、仰角 10 度に、また車載レーダーは 0.85m、0 度(水平)に設定する。アンテナの偏波も直交関係とするため、干渉波の発生確率が低いと予想される。そのため、十分なサンプルで、交差点内の干渉波の発生現象を捉えるために、実験車両は走行ルートを繰り返し低速走行することで、干渉波を統計的に分析する。



(a) 評価シナリオ A

(b) 評価シナリオ B

図 5.2.2.1-9 評価シナリオ

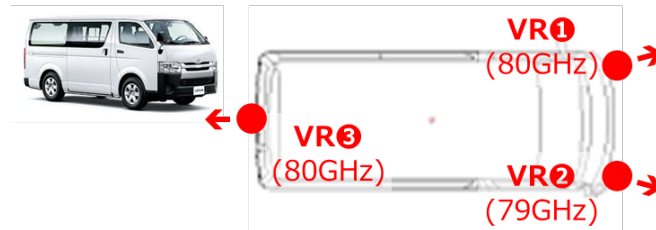
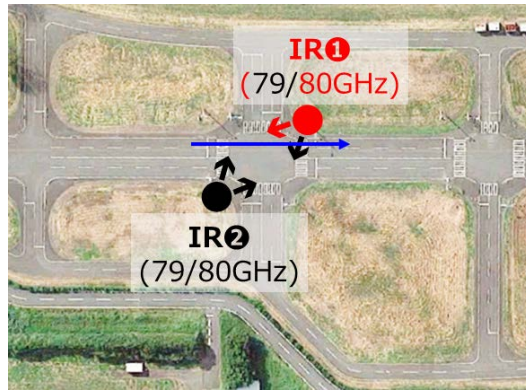


図 5.2.2.1-10 車載レーダーの設定

干渉波が発生する可能性として、評価シナリオ A では、インフラレーダーの IR① 80GHz と車載レーダーの VR① 80GHz、IR② 79GHz と VR② 79GHz、そして IR② 80GHz と VR③ 80GHz の 3 つのパターンが考えられる。まず図 5.2.2.1-10 は、インフラレーダー IR①の 80GHz のセクタ(図 5.2.2.1-10 (a)の赤矢印)の測定時間(サンプル)に対する反射特性等を示す。図 5.2.2.1-10 (c)より、反射特性として、規則的なノコギリ波を検知している。この検知を時系列で解析すると、実験車両が交差点へ向かうにつれて IR①の反射エコーが増加後、交差点内で最大となり、交差点から抜けることで減少する。実験車両は走行ルートを繰り返して測定したため、車両による反射エコーが規則的に検知された。一方で、干渉基礎実験のようなランダムな帯状分布は検知されず、IR①が車載レーダーからの干渉波を検知していないことが分かった。次に、インフラレーダー IR②の各セクタの測定時間(サンプル)に対する反射特性等を図 5.2.2.1-11, 12 に示す。同様に、車両の反射エコーによる検知を時系列で解析した上で、ランダムな帯状分布を確認した結果、いずれのセクタも車載レーダーからの干渉波を検知していないことが分かった。

続いて、評価シナリオ B では、インフラレーダーの IR① 79GHz と車載レーダーの VR② 79GHz、IR② 80GHz と VR① 80GHz、そして IR② 80GHz と VR③ 80GHz の 3 つのパターンである。図 5.2.2.1-13, -14 は、インフラレーダー IR①、および IR②の測定時間(サンプル)に対する反射特性等を示す。なお、評価シナリオ B では、前述の 3 つのパターンを含む、全てのセクタ(79, 80GHz)の反射特性を示す。評価シナリオ A と同様、車両の反射エコーによる検知を時系列で解析した上で、ランダムな帯状分布を確認した結果、いずれのセクタも車載レーダーからの干渉波を検知していないことが分かった。

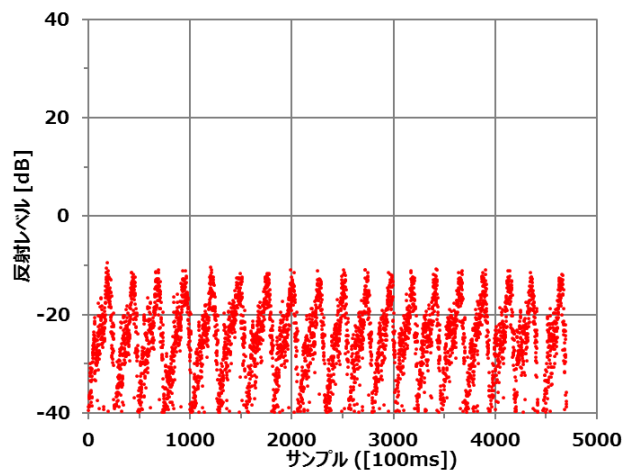
以上の結果を含め、複数のインフラレーダーが設置された交差点において、複数の車載レーダーを搭載した車両が進入するシーンを想定した実験解析の結果からは、いずれの評価シナリオにおいてもインフラレーダーと車載レーダー間の干渉に起因する誤検知の発生が確認されることはなかった。



(a) 評価シナリオ

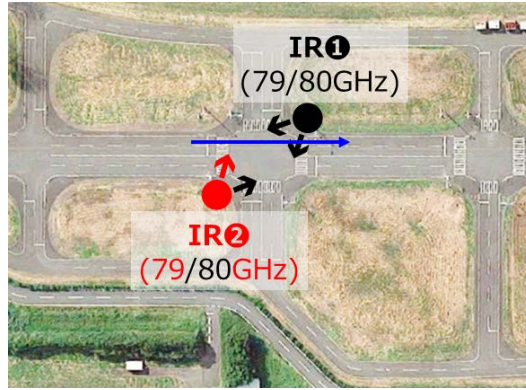


(b) 測定時の実験車両



(c) 測定時間に対する反射特性

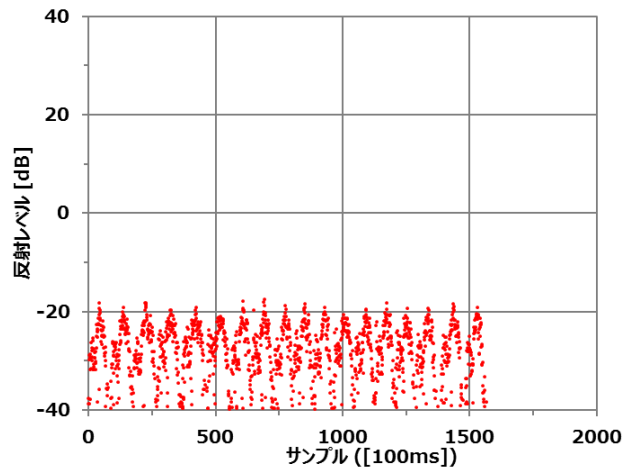
図 5.2.2.1-10 評価シナリオ A・IR① 80GHz



(a) 評価シナリオ

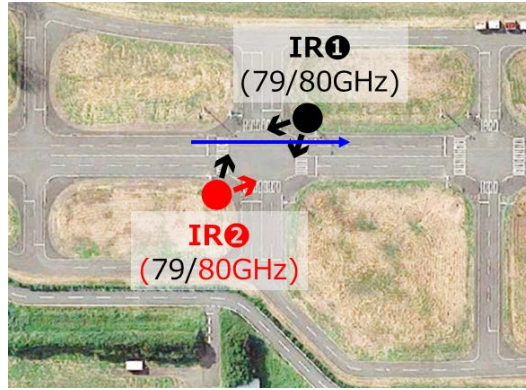


(b) 測定時の実験車両



(c) 測定時間に対する反射特性

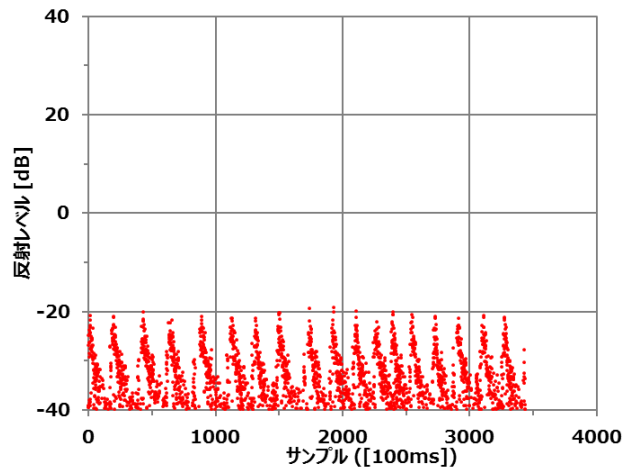
図 5.2.2.1-11 評価シナリオ A・IR② 79GHz



(a) 評価シナリオ

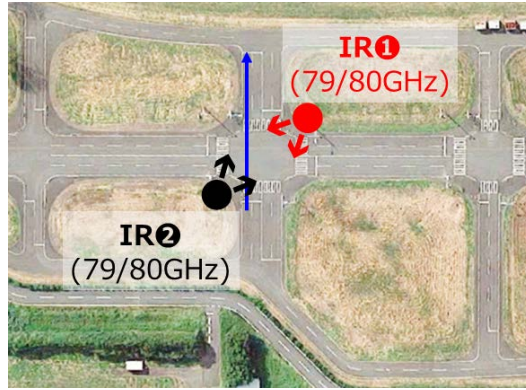


(b) 車両検出時の写真

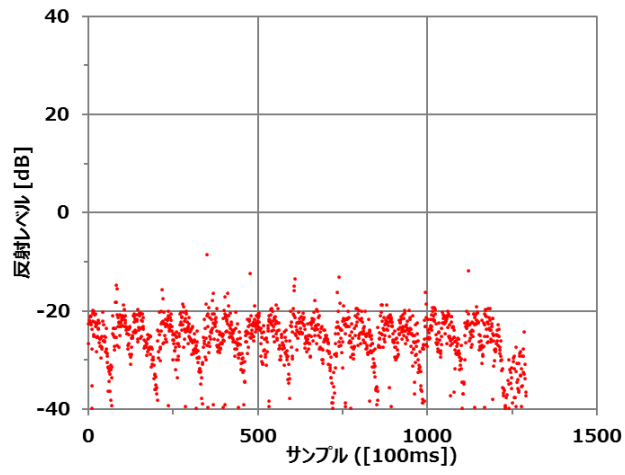


(c) 測定時間に対する反射特性

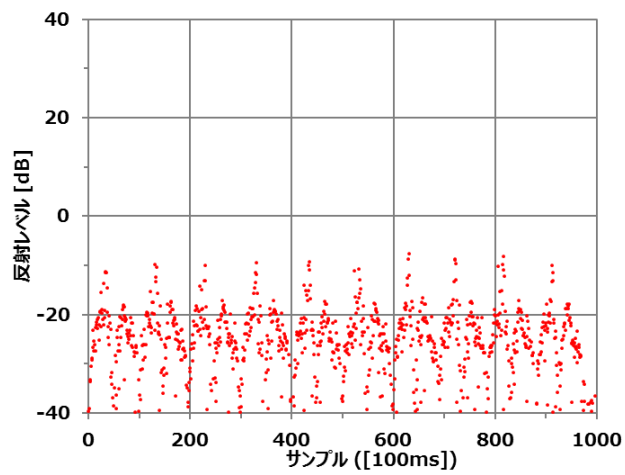
図 5.2.2.1-12 評価シナリオ A・IR② 80GHz



(a) 評価シナリオ

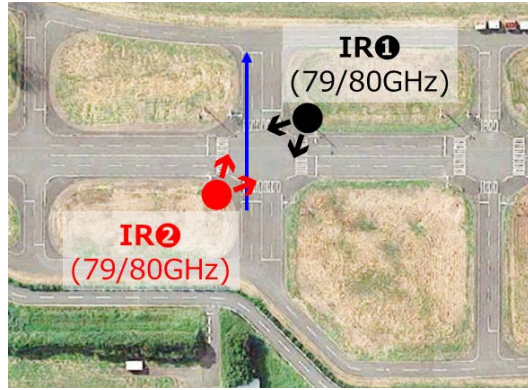


(b) 測定時間に対する反射特性・79GHz

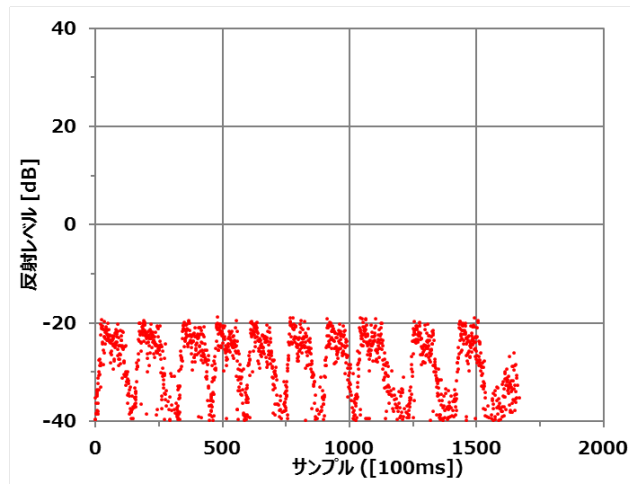


(c) 測定時間に対する反射特性・80GHz

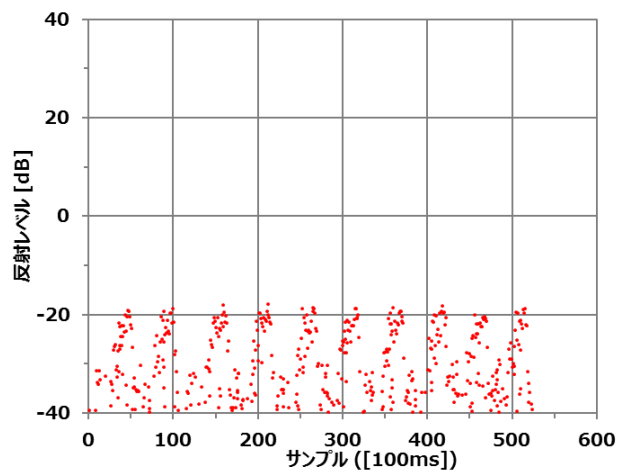
図 5.2.2.1-13 評価シナリオ B・IR①



(a) 評価シナリオ



(b) 測定時間に対する反射特性・79GHz



(c) 測定時間に対する反射特性・80GHz

図 5.2.2.1-14 評価シナリオ B・IR②

5.2.3. イ)ー② 干渉低減システム技術の開発

5.2.3.1. インフラレーダー干渉制御方式開発および実証実験

5.2.2 節の干渉評価シナリオに基づく干渉性能評価では、干渉波の発生が確認できなかった。そこで、この要因分析を通じて、干渉制御方式を検討する。

図 5.2.3.1-1 は、評価シナリオ A の内、図 5.2.2.1-10 のインフラレーダー IR① 80GHz と車載レーダー VR① 80GHz の条件に合わせてモデル化した、レイトレース法による伝搬シミュレーション結果を示す。図 5.2.3.1-1 より、レーダー間の直接的な伝搬路と、地面を経由する伝搬路の 2 つの伝搬が干渉波として検知されることが確認できた。この 2 つの伝搬路は、基礎検討のインフラレーダーと車載レーダーを対向した条件(図 5.2.2.1-5)においても同様であるが、図 5.2.3.1-1 は実際のシーンに近い条件(高さや仰角)のため、レベル的に 10dB 程度低い。しかしながら、伝搬シミュレーション(図 5.2.3.1-1)では、インフラレーダーと車載レーダーの間で伝搬路は存在しており、干渉波が検知されない要因をさらに分析する。

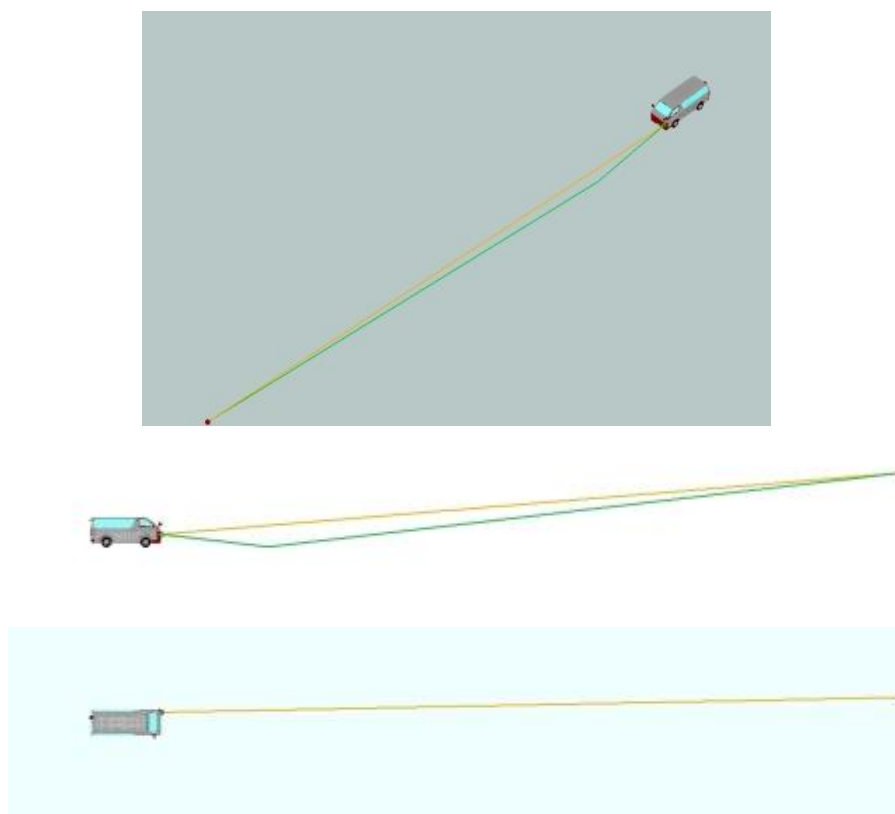


図 5.2.3.1-1 評価シナリオ A のシミュレーション結果

図 5.2.3.1-1 の伝搬シミュレーションと図 5.2.2.1-10 の実験の条件差分は、アンテナの偏波である。そこで、インフラレーダーと車載レーダーを対向した、干渉基礎実験に戻り、同周波数(80GHz)、異偏波(アンテナの偏波は直交関係)の場合の電力プロファイルを図 5.2.3.1-2 に示す。インフラレーダーとして、車両の反射エコーは実際の走行位置と同じく 20m で検知している。しかしながら、80m 付近にも帯状の反射エコーが確認できるが、図 5.2.2.1-4 の同周波数、同偏波の電力プロファイルと比較すると、干渉波(帯状の反射エコー)が抑制されている。以上から、インフラレーダーと車載レーダーの偏波の関係を異ならせる(直交関係)ことで干渉波の抑圧され、さらに互いの高さ、仰角等、設置条件が異なることで、評価シナリオ A では干渉波を検知されないことが分かった。

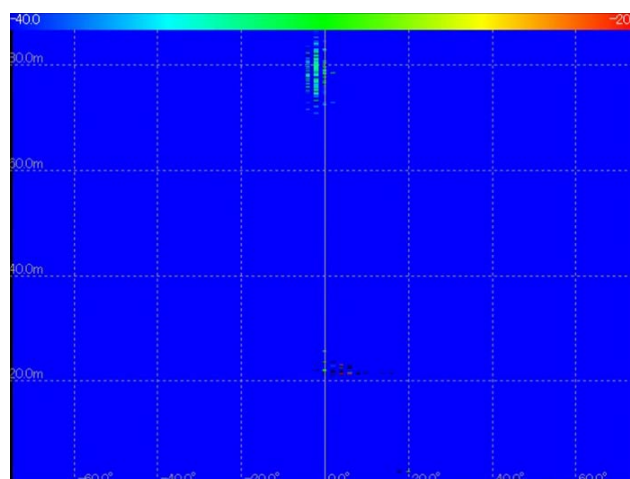


図 5.2.3.1-2 同周波数・異偏波の電力プロファイル

さらに、干渉基礎実験のインフラレーダーと車載レーダーを対向した条件において、異周波数、異偏波の場合の電力プロファイルを図 5.2.3.1-3 に示す。なお、車両の反射エコーに対して検出アルゴリズムにより、物体検出枠を追加している。図 5.2.3.1-3 より、偏波に加え、周波数を異なることで、干渉波の抑圧効果が高くなることが分かった。

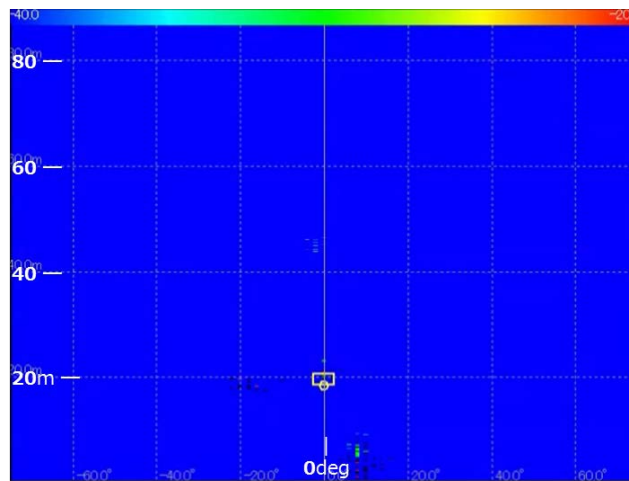


図 5.2.3.1-3 異周波数・異偏波の電力プロファイル

従って、干渉波を検知した場合の制御方式としては、本検討から、互いのアンテナの偏波と周波数を異なる条件とすることで、最も効果的な干渉波の抑制が期待できる。ただし、偏波はアンテナの設計段階で決まってしまうため、実際には 79GHz 帯の広い帯域幅を利用して周波数を変更により、干渉波を抑圧することが必要である。

【参考文献】

- [1] <http://www.jari.or.jp/>

5.3. 技術課題ウ)耐環境性能補償技術の開発

5.3.1. 取り組み内容

本章では、降雨や降雪といった悪天候時においても、79GHz帯レーダーのハードウェアとして所要の動作を実現するだけでなく、環境変化が要因となる誤検出の発生を抑圧して、歩行者や車両を安定して検出可能な「耐環境性能補償技術の開発」に取り組む。本年度の具体的な内容は、79GHz帯ミリ波における伝搬実験を実施し、降雨や降雪といった天候だけでなく環境温度の変化に対する79GHz帯レーダーの実効性能を検証する(5.3.2節)。また、ミリ波の電波伝搬特性に影響を与えるような環境変化が生じた場合にも、79GHz帯レーダーが歩行者等を安定して検出するための検出性能補償技術を開発する(5.3.3節)。

5.3.2. ウ)ー① 耐環境性能の実証実験

5.3.2.1. 厳しい環境条件での統計的な検出性能の評価

本節では、再現性が確保された環境試験設備を用いて、空間的な低温・高温条件、降雨条件、降雪条件の厳しい環境条件に対する79GHz帯伝搬実験を行い、実施計画書に記載した下記の観点で統計的な性能評価を実施する。

- ・ レーダー装置が摂氏-20度から+55度のより広い温度範囲で動作すること
- ・ 強い降雨時などの条件で誤検出の発生率を10%以内に抑えられること

5.3.2.1.1 環境温度実験

本実験の試験設備として、山梨県工業技術センターが保有する恒温恒湿室(山梨県甲府市)を利用する。恒温恒湿室とは、室内の温度・湿度を自由に制御して、評価対象物の環境試験を行うための装置であり、電子製品・部品が想定される使用環境下で問題なく動作するかの評価等が行われている[1]。恒温恒湿室の写真および仕様を図5.3.2.1-1、表5.3.2.1-1に示す。



図 5.3.2.1.1-1 恒温恒湿室[1]

表 5.3.2.1.1-1 設備仕様[1]

温度範囲	-40 ~ +80 °C
湿度範囲	10 ~ 95 %Rh
室内寸法	H 3 x W 4 x D 2 m

図 5.3.2.1.1-2 は、恒温恒湿室内に設置した 79GHz 帯レーダー装置(以下、インフラレーダーと称す)、およびターゲットの標準リフレクタの写真を示す。本実験では、室内の金属壁等による不要な反射を抑制するため、長方形の室内の角にインフラレーダーと標準リフレクタを対向設置した上で、対角線上を伝搬路(約 3.5m)として長時間測定する。また、摂氏-20 度から+55 度の温度範囲で評価するため、室内を所定の温度に設定して定常(安定)状態を確認後、測定開始する。なお、実験諸元を表 5.3.2.1.1-2 に示す。



(a) インフラレーダー



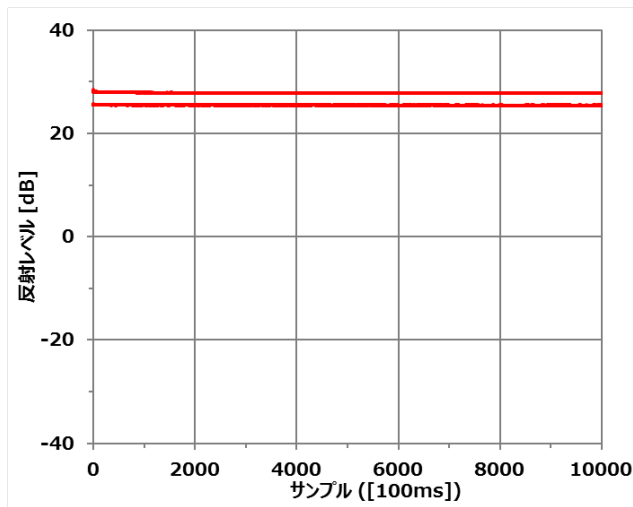
(b) 標準リフレクタ

図 5.3.2.1.1-2 環境温度実験

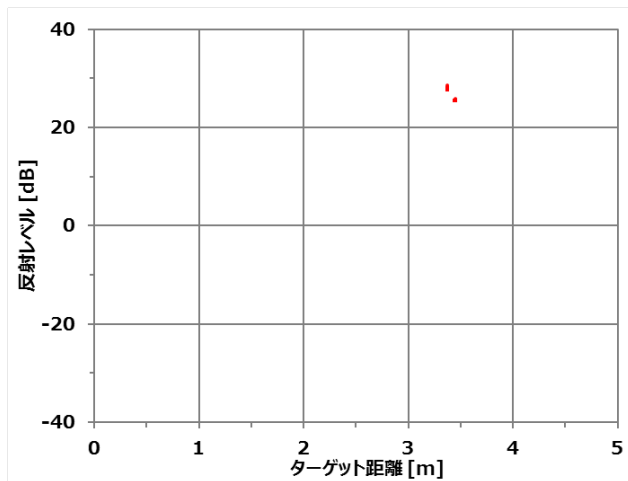
表 5.3.2.1.1-2 実験諸元

周波数	79, 80 GHz
温度制御	-20, -10, +30, +40, +50, +55 °C
湿度制御	—
ターゲット	コーナーリフレクタ
ターゲット距離	3.5m
インフラレーダー設置高	1.3m

まず常温に近い環境温度 +30 度の条件において、測定時間(サンプル)およびターゲット距離に対する反射特性を図 5.3.2.1.1-3 に示す。本実験では、統計的な性能評価のため、10000 サンプル(約 17 分)を連続測定したデータから反射特性として示しているが、標準リフレクタの固定治具等、本質ではない不要な反射エコーのデータは排除している。図 5.3.2.1.1-3(a)より、ターゲットの反射レベルは時系列で一定、かつ(b)より、ターゲット距離(約 3.5m)以外の反射は検出されていないことから、インフラレーダーが安定的に動作・検出していることが分かった。



(a) 測定時間に対する反射特性



(b) ターゲット距離に対する反射特性

図 5.3.2.1.1-3 環境温度 +30 度

同様な方法で、高温領域として環境温度 +40、 +50、 +55 度、および低温領域として環境温度 -10、 -20 度の条件において、測定時間に対する反射特性を図 5.3.2.1.1-4~6 に、および図 5.3.2.1.1-7~8 に示す。常温(環境温度 +30 度)を含む、-20 度の低温から +55 度の高温に渡る環境温度に対して、いずれもターゲットの反射レベルは時系列で一定であり、インフラレーダーが広い温度範囲で安定動作・検出することを確認できた。従って、本節の冒頭に示した 2 つの観点の内、「レーダー装置が摂氏 -20 度から +55 度のより広い温度範囲で動作すること」については、本実験による統計的な性能評価結果から達成した。

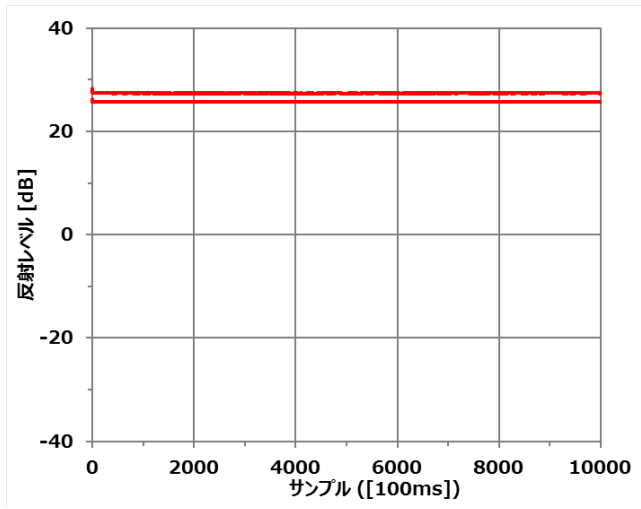


図 5.3.2.1.1-4 環境温度 +40 度

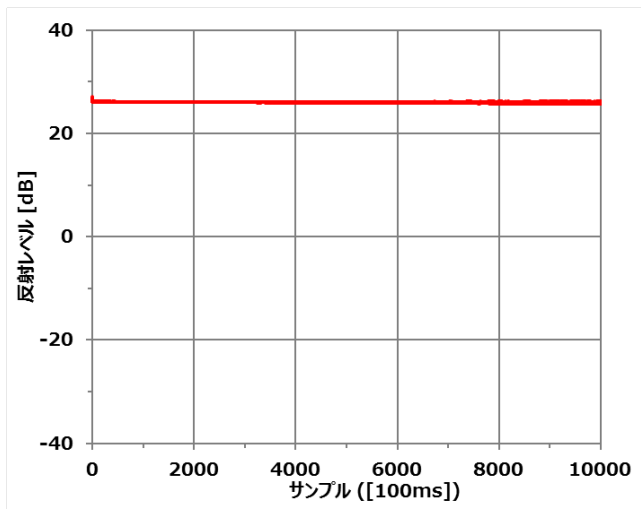


図 5.3.2.1.1-5 環境温度 +50 度

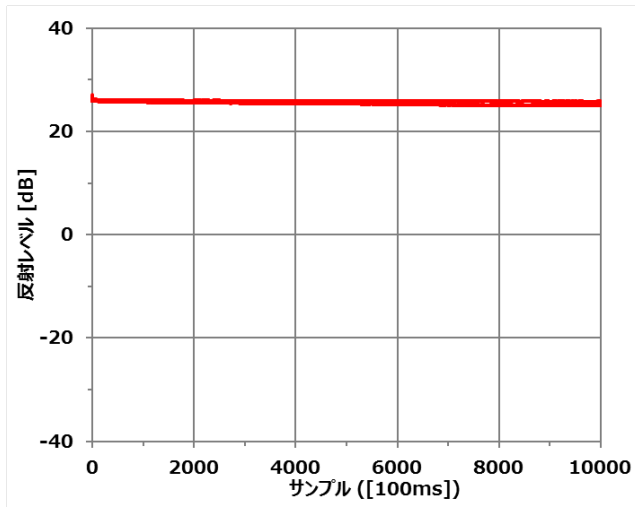


図 5.3.2.1.1-6 環境温度 +55 度

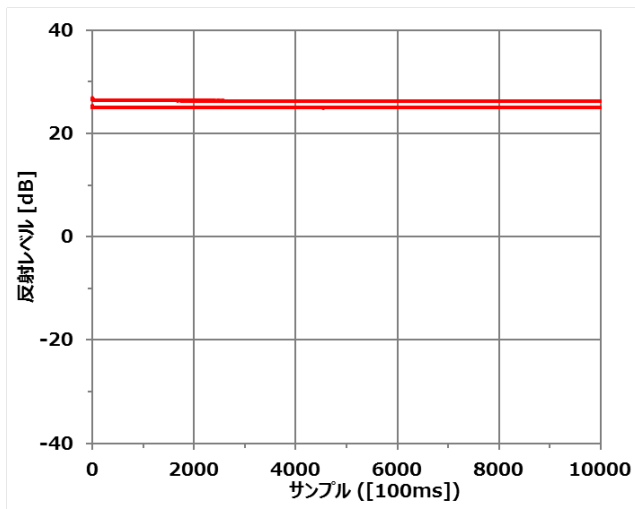


図 5.3.2.1.1-7 環境温度 -10 度

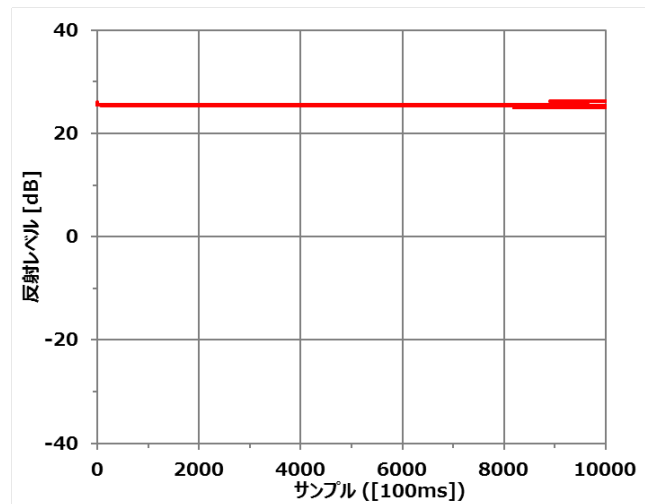


図 5.3.2.1.1-8 環境温度 -20 度

5.3.2.1.2 降雨実験

本実験の試験設備として、国立研究開発法人 防災科学技術研究所が保有する大型降雨実験施設(茨城県つくば市)を利用する。大型降雨実験施設とは、世界最大級の規模・能力を有する散水装置で雨を降らせることが可能な施設であり、がけ崩れ、土石流、土壌浸食の解明、センサー開発に関する研究等が行われている[2]。大型降雨実験施設の写真および仕様を図 5.3.2.1.2-1、表 5.3.2.1.2-1 に示す。



図 5.3.2.1.2-1 大型降雨実験施設[2]

表 5.3.2.1.2-1 設備仕様[2]

降雨強度	15 ～ 300 mm/h
雨滴粒径	0.1 ～ 6 mm 程度
施設内寸法	W 49 x L 76 x H 21 m
降雨範囲	W 44 x L 72 m
降雨ノズル数	総数 2176 個
降雨ノズル設置高	地面から 16m

降雨環境を再現する、制御方法(散水装置)については、図 5.3.2.1.2-2 に示すように、施設内の上部に設置された噴射径の異なる降雨ノズルから散水する。なお、噴射径の小さい順から第 1、 2、 3、 4 系統と称する。表 5.3.2.1.2-3 に示すように、各系統に応じて降雨強度の制御範囲が異なり、降雨ノズルを組み合わせることで所定の降雨環境が生成できる。なお、本施設の降雨特性を OTT 社のディストロメーター (Parsivel² [2])で事前検証した結果、降雨に関する経験式 Gunn-Kinzer Line [3] 上に分布しており、降雨環境が再現できていることを確認した。

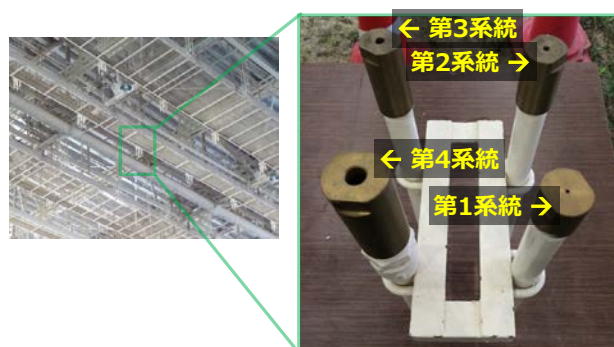
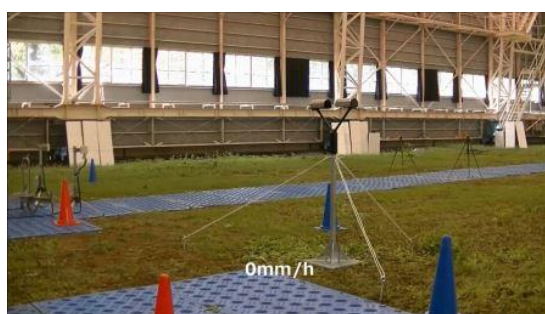


図 5.3.2.1.2-2 降雨ノズル

表 5.3.2.1.2-3 降雨量範囲[2]

散水系統	降雨強度範囲
第 1 系統	15 ～ 45 mm/h
第 2 系統	40 ～ 200 mm/h
第 3 系統	180 ～ 260 mm/h
第 4 系統	255 ～ 300 mm/h

図 5.3.2.1.2-3 は、降雨強度に対する定点撮影写真を示す。降雨強度が増すにつれて、雨滴による視界が悪くなる様子が観測される。雨の強さに関する参考資料[5]によれば、降雨強度 50mm/h を「激しい雨」、80mm/h を越える 150mm/h を「猛烈な雨」に分類され、特に 150mm/h は過去の最大時間雨量(1999 年 千葉県香取 153mm/h)に匹敵する条件である。さらに、近年、観測されるゲリラ豪雨も踏まえ、本実験では、厳しい環境条件として降雨強度 20mm/h から 250mm/h の降雨範囲で実験を行い、インフラレーダーの検出性能を評価する。



(a) 0mm/h



(b) 50mm/h



(c) 150mm/h

図 5.3.2.1.2-3 降雨強度の変化

具体的な評価内容は、以下に示す、降雨強度に対する基本性能(①)に加え、降雨環境下の様々な想定シーンに対する検出性能(②、③)の 3 項目とする。なお、実験諸元を表 5.3.2.1.2-3 に示す。

- ① 標準リフレクタに対する検出性能
- ② 交差点を想定した降雨時の車両・歩行者等に対する検出性能
- ③ 視界不良時の車両・歩行者に対する検出性能

表 5.3.2.1.2-3 実験諸元

周波数	79, 80 GHz
降雨制御	20, 50, 100, 150, 200, 250 mm/h
ターゲット	コーナーリフレクタ, 歩行者, 車両
ターゲット距離	コーナーリフレクタ : 10m 歩行者 : 20 ~ 40 m 車両 : 20 ~ 60 m
インフラレーダー設置高	コーナーリフレクタ : 1.3m 歩行者・車両 : 5 m

① 標準リフレクタに対する検出性能

本実験では、(1)の環境温度実験と同様、インフラレーダーとターゲット(標準リフレクタ)を対向設置した上で、約 10m の伝搬路として長時間測定するが、降雨環境下の条件を加えるため、施設内を所定の降雨強度に設定して定常(安定)状態を確認後、測定開始する。5.3.2.1.2-4 は、施設内に設置したインフラレーダー、および標準リフレクタの写真を示す。各降雨強度に対して 2 つの周波数(79、80GHz)を同時測定するため、インフラレーダーと標準リフレクタの対向を 2 組設置している。

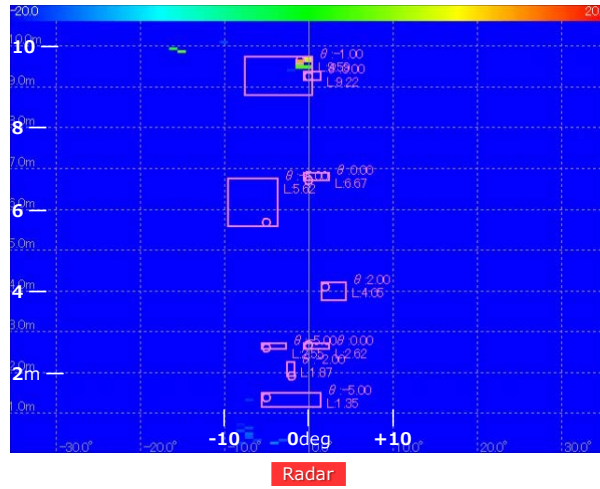


図 5.3.2.1.2-4 標準リフレクタに対する検出性能

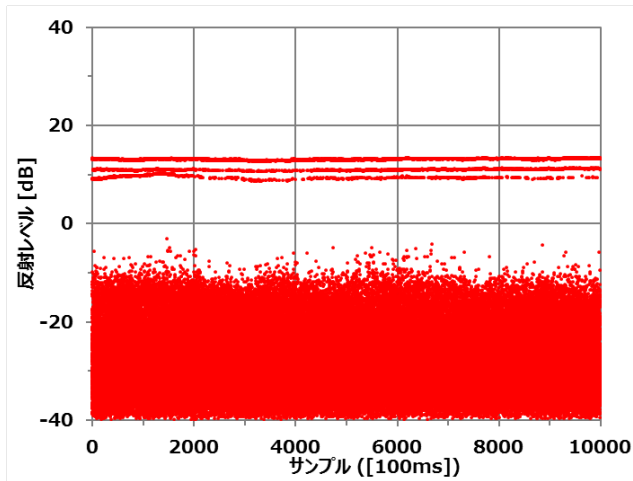
図 5.3.2.1.2-5 は、降雨強度 20mm/h の条件において、測定中の電力プロファイル例、並びに測定時間(サンプル)およびターゲット距離に対する反射特性を示す。本実験では、統計的な性能評価のため、10000 サンプル(約 17 分)を連続測定したデータから反射特性として示しているが、標準リフレクタの固定治具等、本質ではない不要な反射エコーのデータは排除している(ターゲット距離 9m 以上、かつ反射レベル -10dB 以下の部分)。5.3.2.1.2-5(a)より、降雨環境下においてターゲット(約 9.5m)が検出されるが、ターゲット以外の検出も確認した。これは、伝搬路上の雨滴散乱による反射エコーが検出されたと考えられ、特にインフラレーダーに近いほど、この現象は顕著であることが分かった。

ターゲットの検出については、図 5.3.2.1.2-5 (b)より、反射レベルが時系列で一定、かつ(c)より、ターゲット距離(約 9.5m)以外でターゲット相当の大きな反射は検出されていないことから、インフラレーダーが安定的に動作・検出していることが分かった。しかしながら、雨滴の検出についても、反射レベルが時系列でランダムに検出され、インフラレーダーからの距離に依存して分布している。そこで図 5.3.2.1.2-6 ~10 は、さらに降雨強度を上げた、50、100、150、200、250 mm/h の条件において、ターゲット距離に対する反射特性を示す。降雨強度 20mm/h と同様、インフラレーダーからの距離に依存する分布傾向は変わらないが、その全体的な反射レベルは降雨強度が上がるにつれて増加していることが分かった。以上から、雨滴散乱による影響を排除する、検出閾値の適用することが、降雨環境下のターゲットに対する検出性能を確保するためにはポイントとなる。

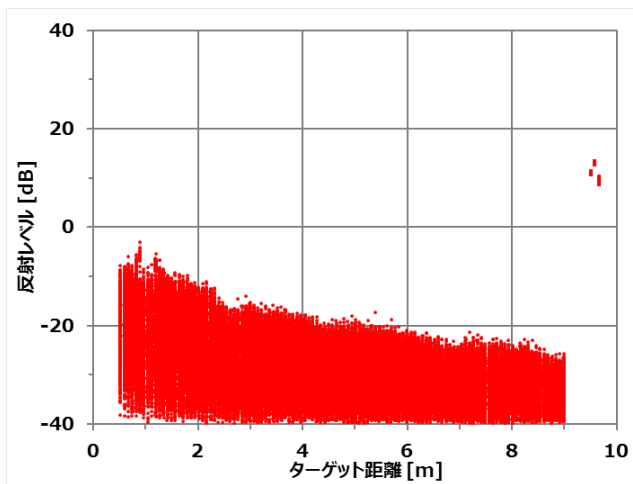
検出閾値の検討にあたり、雨滴散乱の反射エコーは距離依存性があることから、ターゲット距離を区間毎に分けて分析する。例として図 5.3.2.1.2-5 の降雨強度 20mm/h の条件を取り上げ、ターゲット距離 0.5 ~ 9 m を 5 つの区間(0.5 ~ 2、2 ~ 4、4 ~ 6、6 ~ 8、8 ~ 9 m)に分け、ターゲット以外の反射レベルに対する発生確率、および累積確率を図 5.3.2.1.2-11~15 に示す。インフラレーダーから近い場合、図 5.3.2.1.2-11 より、分布中央値は反射レベル 約-24dB であるが、遠い場合、図 5.3.2.1.2-13 より、反射レベル 約-32dB であり、距離に応じて分布中央値が推移していることが分かった。そこで、累積確率 95%の反射レベルを検出閾値(以下、検出閾値レベルと称す)の 1 つの指標とした場合、各降雨強度(20、50、100、150、200、250 mm/h)の条件において、ターゲット距離に対する検出閾値レベルを図 5.3.2.1.2-16 に示す。各降雨強度の検出閾値レベルを示しているが、降雨強度 20mm/h と同様、インフラレーダーから近い区間から遠い区間にかけて減衰する分布であり、概ね一致していることが分かった。



(a) 電力プロファイル



(b) 測定時間に対する反射特性



(c) ターゲット距離に対する反射特性

図 5.3.2.1.2-5 降雨強度 20mm/h

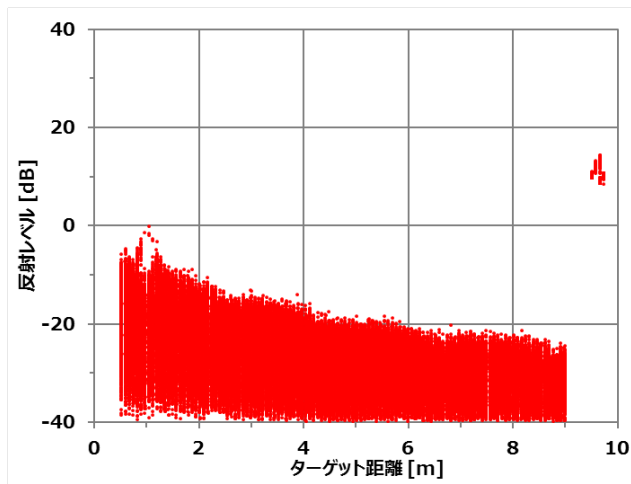


図 5.3.2.1.2-6 降雨強度 50mm/h

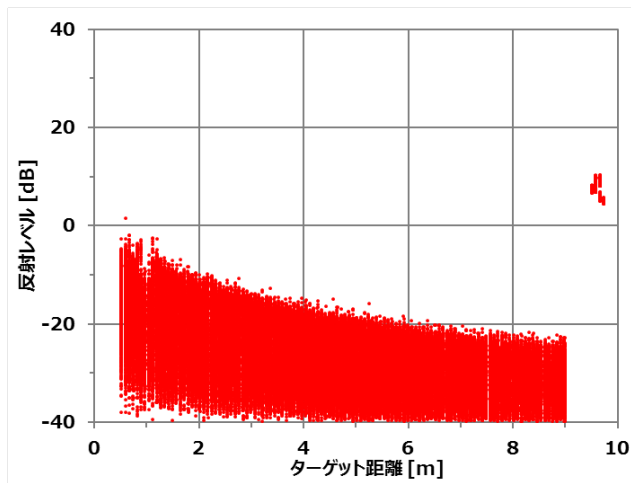


図 5.3.2.1.2-7 降雨強度 100mm/h

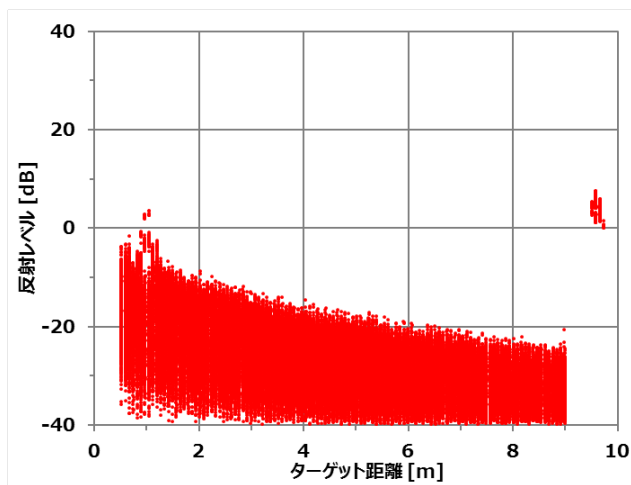


図 5.3.2.1.2-8 降雨強度 150mm/h

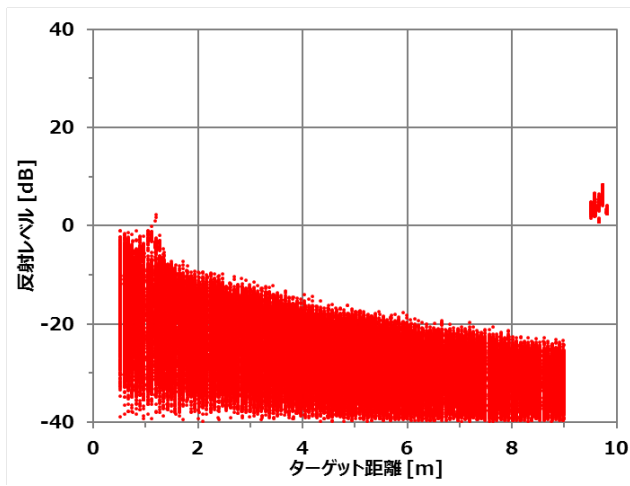


図 5.3.2.1.2-9 降雨強度 200mm/h

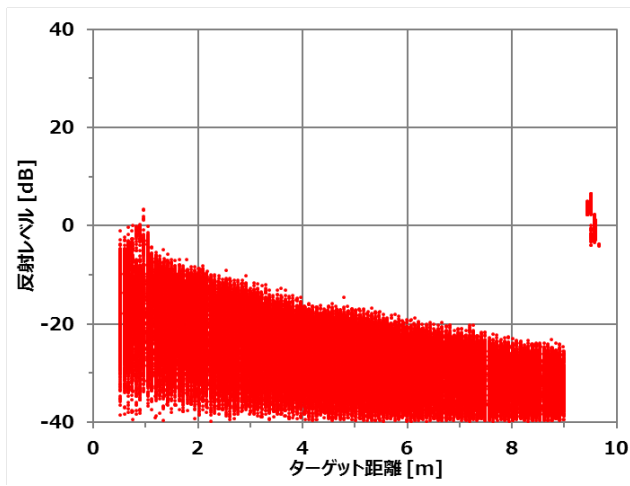


図 5.3.2.1.2-10 降雨強度 250mm/h

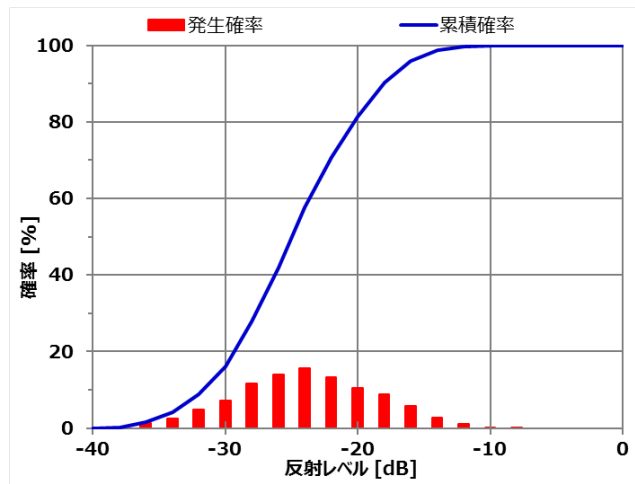


図 5.3.2.1.2-11 雨滴散乱の反射特性・区間 0.5 ~ 2 m

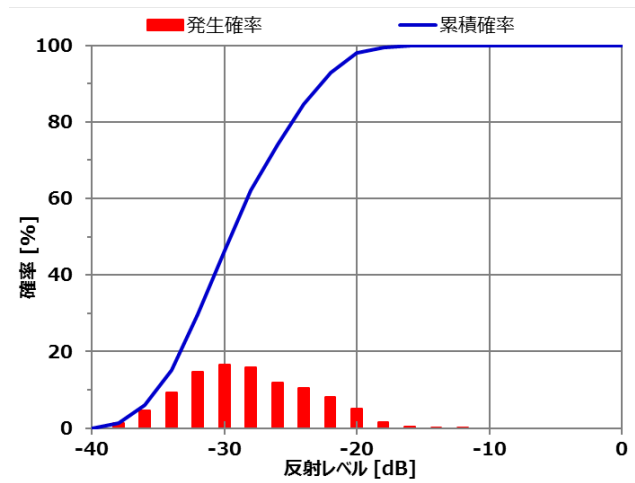


図 5.3.2.1.2-12 雨滴散乱の反射特性・区間 2 ~ 4 m

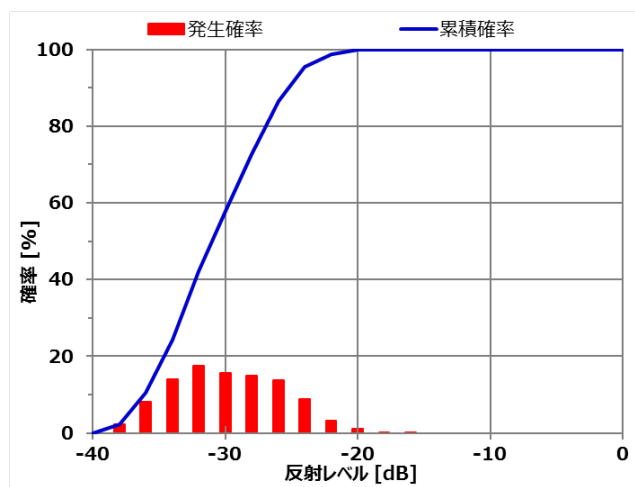


図 5.3.2.1.2-13 雨滴散乱の反射特性・区間 4 ~ 6 m

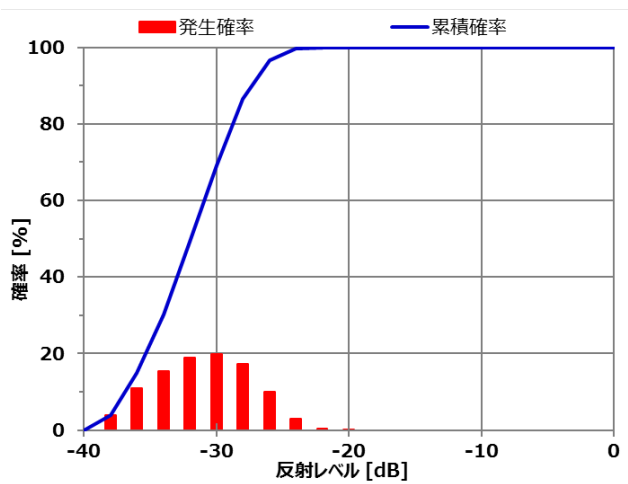


図 5.3.2.1.2-14 雨滴散乱の反射特性・区間 6 ~ 8 m

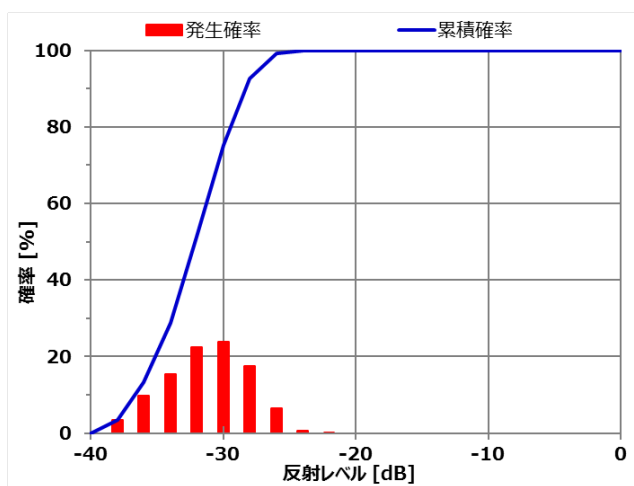


図 5.3.2.1.2-15 雨滴散乱の反射特性・区間 8 ~ 9 m

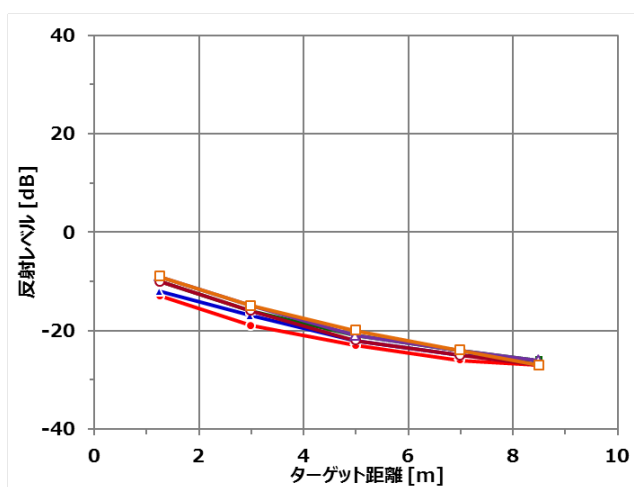


図 5.3.2.1.2-16 検出閾値レベル

図 5.3.2.1.2-16 より、検出閾値レベルの分布が概ね一致したことから、全ての降雨強度に対する検出閾値レベル関数を算出する。図 5.3.2.1.2-17 の点(●)は、図 5.3.2.1.2-16 の各降雨強度に対する検出閾値レベルをプロットしており、また破線は下記の数式(以下、検出閾値関数と称す)を示している。検出閾値関数は、インフラレーダーとして 40m 先の歩行者を検出するため、基準距離 R_0 を 40m、基準距離の検出閾値レベル T_0 を -40dB と定義している。そして、係数 α を 0、0.25、0.5、0.75 と 4 つの場合を与え、ターゲット距離 R_1 に対する検出閾値レベル T_1 の 4 本のグラフ化(破線)している。

$$T_1 = T_0 + \alpha \times 40 \times \log\left(\frac{R_0}{R_1}\right)$$

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

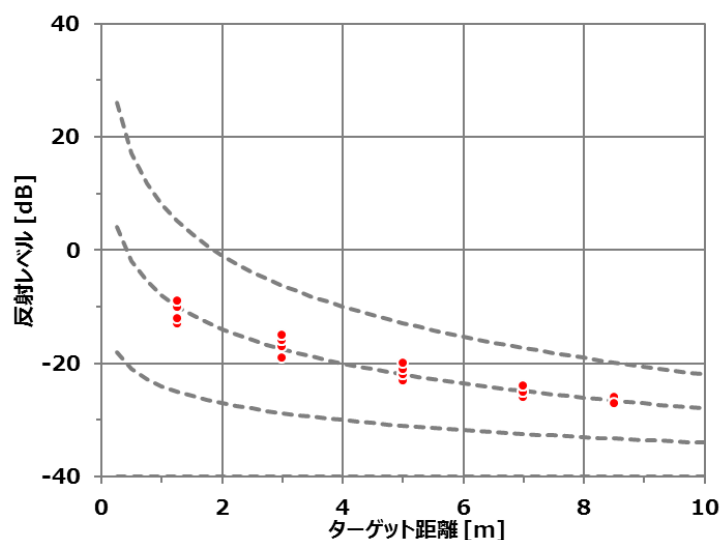


図 5.3.2.1.2-17 検出閾値関数の算出

図 5.3.2.1.2-17 より、各降雨強度に対する検出閾値レベルのプロットは、係数 $\alpha = 0.5$ とする検出閾値関数に近似させることが可能であることが分かった。

そこで、新たに算出した検出閾値を、上記の降雨環境下のターゲット距離に対する反射特性(図 5.3.2.1.2-5~10)に適用する。図 5.3.2.1.2-18 はその適用例であるが、参考として、係数 $\alpha = 0.5$ 以外の $0, 0.25, 0.75$ の検出閾値関数も実線で示す。なお、反射レベル -40dB 上の破線は係数 $\alpha = 0$ であり、 $\alpha = 0$ から反射レベルが上がるにつれて $0.25, 0.5, 0.75$ の検出閾値関数である。図 5.3.2.1.2-18 より、係数 $\alpha = 0.5$ の関数がターゲット距離に対する雨滴散乱の反射エコーの最大値に概ね沿っている。

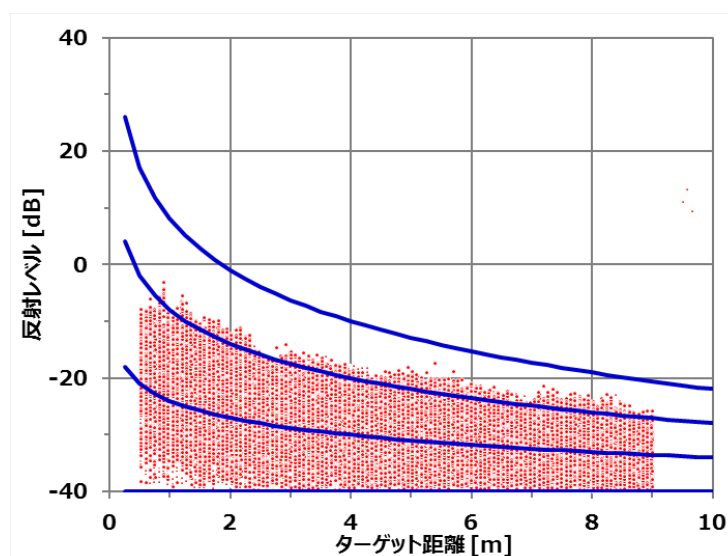


図 5.3.2.1.2-18 検出閾値関数の適用

続いて、検出閾値関数を適用した際に検出閾値レベルを越える、雨滴散乱の反射エコーの検出率を算出する。図 5.3.2.1.2-19 は、係数 α を $0, 0.25, 0.5, 0.75$ において、降雨強度に対する検出率を示す。検出閾値関数の適用($\alpha = 0.25, 0.5, 0.75$)により、雨滴散乱の反射エコーに対する抑制効果を確認できた。前述の通り、雨滴散乱の反射エコーに対して累積確率 95% の反射レベルを指標とした、係数 $\alpha = 0.5$ を適用すると、降雨強度 250mm/h の最大条件においても、雨滴の検出率を破線の 10% 以下にできることが分かった。なお、係数 $\alpha = 0.75$ を適用した場合、雨滴の検出率をさらに抑圧できるが、ターゲットに対する検出性能と両立するためには、本実験の結果から、係数 $\alpha = 0.5$ が最適値と考えられる。

参考として、図 5.3.2.1.2-20 は、図 5.3.2.1.2-5 (a)の電力プロファイル(降雨強度 20mm/h)に対して検出閾値関数(係数 $\alpha = 0.5$)を適用した場合であり、ターゲット(約 9.5m)以外の反射が検出されていないことが確認できた。従って、本節の冒頭に示した 2つの観点の内、「強い降雨時などの条件で誤検出の発生率を 10%以内に抑えられること」については、降雨環境下の本実験による統計的な性能評価結果から達成した。

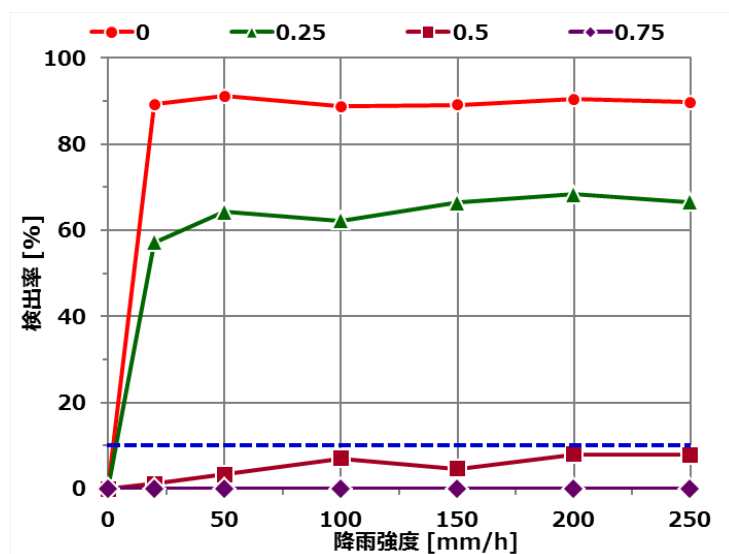


図 5.3.2.1.2-19 雨滴の検出率

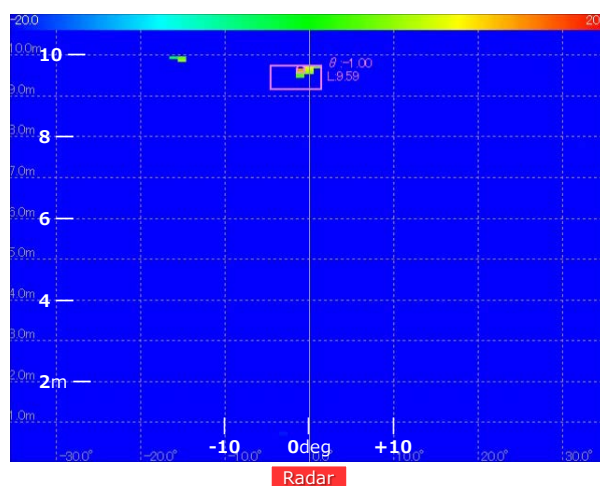
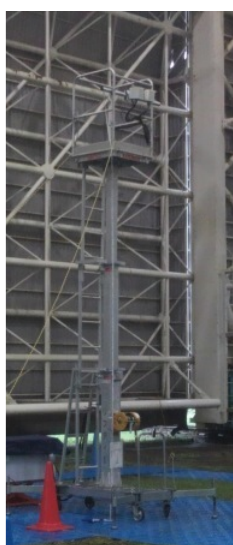


図 5.3.2.1.2-20 検出閾値関数の適用した電力プロファイル

② 交差点を想定した降雨時の車両・歩行者等に対する検出性能

本実験では、実際の環境に合わせた条件やシナリオを想定して、インフラレーダーを高所設置(高さ 5m)、および降雨環境下で交差点内へ進入する歩行者、自転車、車両の各ターゲットに対する検出性能を評価する。なお、雨滴散乱による影響を排除するため、検出閾値関数(係数 $\alpha = 0.5$)を適用する。ターゲットの歩行者と自転車はインフラレーダーに対して 20 ~ 40 m の区間を往復直線移動、また車両は 20 ~ 60 m の区間を直線移動させながら測定するが、(1)の環境温度実験と同様、降雨環境下の条件を加えるため、施設内を所定の降雨強度に設定して定常(安定)状態を確認後、測定開始する。図 5.3.2.1.2-21 は、施設内に設置したインフラレーダー、傘を保持した歩行者、および車両の写真を示す。



(a) インフラレーダー



(b) 歩行者

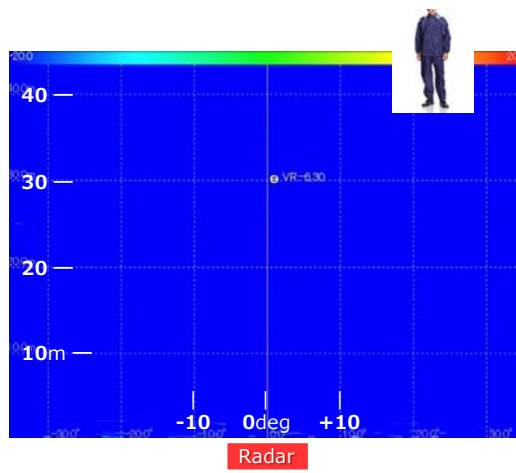


(c) 車両

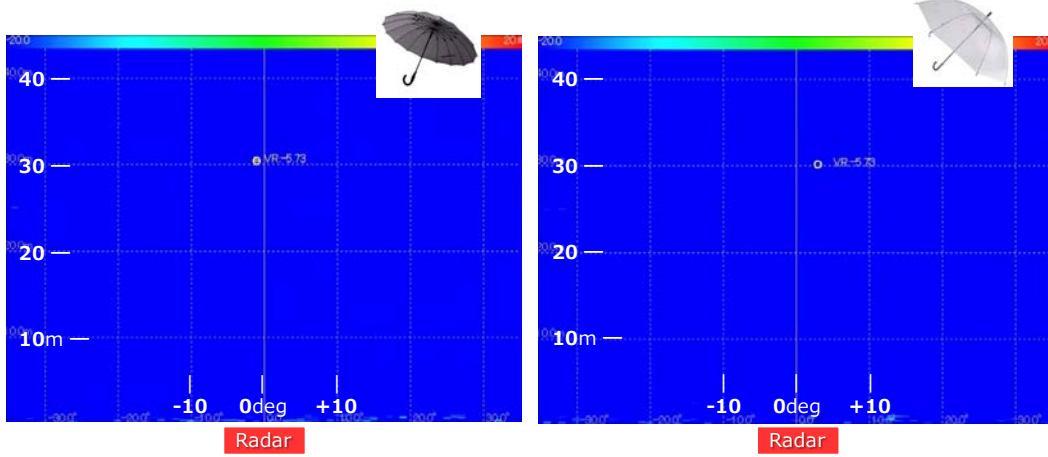
図 5.3.2.1.2-21 交差点を想定した降雨時の車両・歩行者等に対する検出性能

まず歩行者の評価では、降雨時の想定シナリオとして、傘なし(雨具のみ)と傘ありに加え、傘は親骨が多い骨数 16 本、少ない 8 本の 3 つの属性とする。これに、降雨強度 0, 20, 50, 100, 150, 200, 250mm/h の条件を組み合わせ、ターゲット距離(区間 20 ~ 40 m)に対する検出性能を評価する。図 5.3.2.1.2-22 は、降雨強度 50mm/h の条件における電力プロファイルで、ターゲット距離 30m 時の検出例を示す。歩行者の属性(傘なし、傘あり・親骨多、傘あり・親骨少)に対する検出性能については概ね差異がないことが分かった。しかしながら、降雨強度が上がるにつれて区間内における検出性能の劣化が確認され、本実験では、降雨強度 100mm/h で検出性能が不十分であることから、概ね 50mm/h 程度が歩行者に対する検出性能限界と考えられる。

続いて、自転車の評価では、一般的な自転車に傘なし(雨具のみ)の運転者(歩行者と同じ)が乗車して低速走行する。図 5.3.2.1.2-23 は、降雨強度 50mm/h の条件における電力プロファイルで、ターゲット距離 30m 時の検出例を示す。歩行者と同様、本実験では、降雨強度 100mm/h で検出性能が不十分であることから、概ね 50mm/h 程度が自転車に対する検出性能限界と考えられる。



(a) 傘なし



(b) 傘あり・親骨多

(c) 傘あり・親骨少

図 5.3.2.1.2-22 歩行者属性に対する電力プロファイル

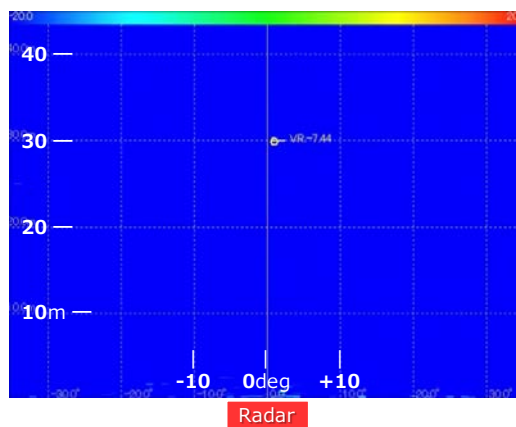
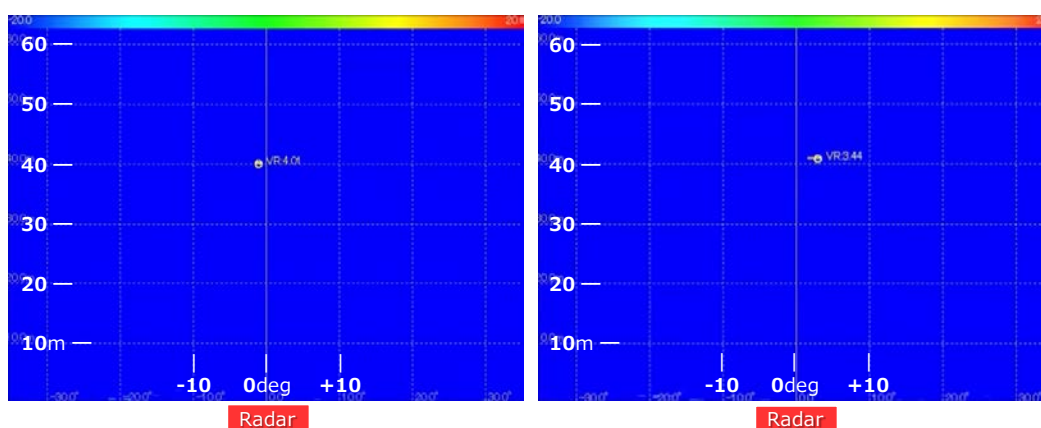


図 5.3.2.1.2-23 自転車に対する電力プロファイル

最後に、車両の評価では、一般的なセダン型自動車にて、フロントガラスのワイパーを動作させながら低速走行する。図 5.3.2.1.2-24 は、降雨強度 50, 100mm/h の条件における電力プロファイルで、ターゲット距離 40m 時の検出例を示す。歩行者や自転車に比べて、車両は金属体の車体等からの反射レベルが高いため、本実験では、降雨強度に対する検出性能限界が伸び、概ね 100mm/h 程度が検出性能限界と考えられる。



(a) 降雨強度 50mm/h

(b) 降雨強度 100mm/h

図 5.3.2.1.2-24 車両に対する電力プロファイル

以上から、降雨環境下における検出性能限界について、本実験より、歩行者および自転車の場合は概ね降雨強度 50mm/h 程度、車両の場合は概ね 100mm/h 程度であることが分かった。

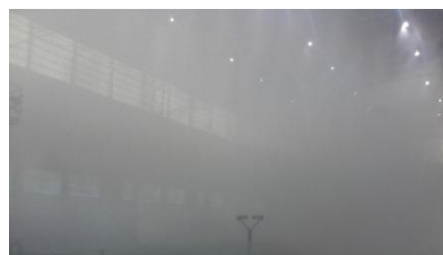
③ 視界不良時の車両・歩行者に対する検出性能

本実験では、実際の環境に合わせた条件やシナリオの想定に視界不良を加え、②の交差点を想定した降雨時の車両・歩行者等に対する検出性能と同様、インフラレーダーを高所設置(高さ 5m)、および濃い霧雨環境下で交差点内へ進入する歩行者、車両の各ターゲットに対する検出性能を評価する。なお、雨滴散乱による影響を排除するため、検出閾値関数(係数 $\alpha = 0.5$)を適用する。

ターゲットの車両はインフラレーダーに対して 20 ～ 60 m の区間を直線移動、また歩行者は 20m の停止車両周辺を歩行させながら測定するが、施設内を所定の霧雨相当に設定して定常(安定)状態を確認後、測定開始する。図 5.3.2.1.2-25 は、霧雨発生前と発生後の定点撮影した写真、並びに停止車両周辺を歩行者(霧雨発生前)の写真を示す。霧雨相当の環境を分析するため、前述のディストロメーター(Parsivel² [2])で測定した降雨特性(雨滴の直径に対する落下速度)を図 5.3.2.1.2-26 に示す。本環境は、降雨強度 20mm/h の条件に比べて、直径、速度共に小さい分布であり、施設内を微小な雨滴が広がっているため、視界不良の環境が再現できていると考えられる。



(a) 霧雨発生前



(b) 霧雨発生後



(c) 歩行者

図 5.3.2.1.2-25 視界不良時の車両・歩行者に対する検出性能

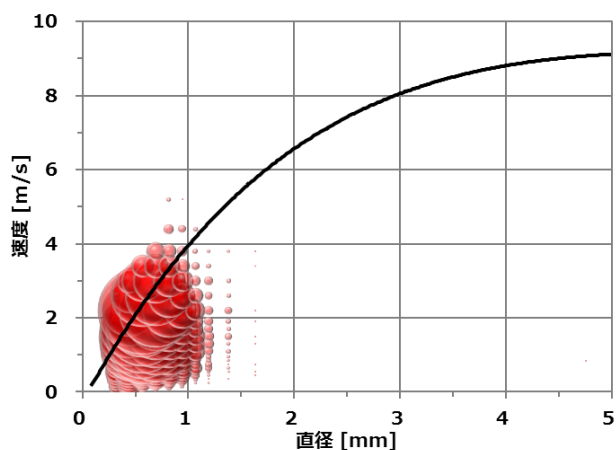


図 5.3.2.1.2-26 降雨特性

まず車両の評価では、②の交差点を想定した降雨時の車両・歩行者等に対する検出性能と同様、一般的なセダン型自動車にて、フロントガラスのワイパーを動作させながら低速走行する。図 5.3.2.1.2-27 は、霧雨相当の条件における電力プロファイルで、ターゲット距離 40m 時の検出例を示す。本実験では、カメラで車両を確認することが困難な状況下においても、インフラレーダーは区間内を十分検出でき、視界不良における優位性を確認できた。

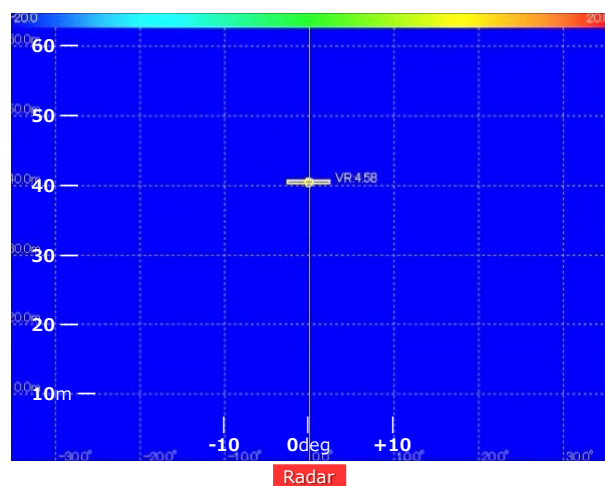


図 5.3.2.1.2-27 車両に対する電力プロファイル

次に歩行者の評価では、車両の評価と同様、霧雨相当の条件において、歩行者がターゲット距離 20m の停止車両を周回するように歩行する。図 5.3.2.1.2-28 は、その電力プロファイルで、車両後方付近時の検出例を示す。本実験では、周回中心の停止車両と歩行者が検出でき、車両の評価と同様、カメラで車両を確認することが困難な状況においても、視界不良における優位性を確認できた。

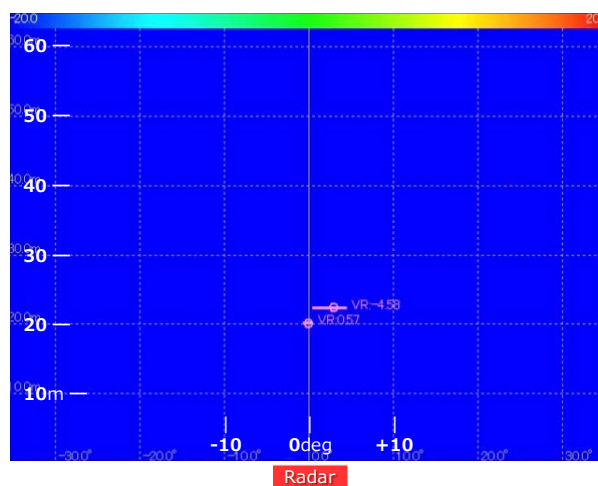


図 5.3.2.1.2-28 停止車両を周回する歩行者

以上から、濃い霧雨条件で視界不良を再現した環境下について、本実験より、インフラレーダーでは検出可能であり、カメラ等の画像認識技術に対して優位であることが分かった。

5.3.2.1.3 降雪実験

本実験の試験設備として、国立研究開発法人 防災科学技術研究所が保有する雪氷防災実験棟(山形県新庄市)を利用する。雪氷防災実験棟(施設)とは、雪氷圏に起こる様々な現象を実験室レベルで再現できる世界最大規模の施設であり、天然に近い結晶形の雪を降らせる装置や風洞装置などを備えた大型低温室において、雪氷に関する基礎研究や、雪氷災害の発生機構とその対策に関する研究が行われている[2]。雪氷防災実験棟の大型低温室の写真および仕様を図 5.3.2.1.3-1、表 5.3.2.1.3-1 に示す。雪の結晶形は様々な種類が存在するが、本設備では図 5.3.2.1.3-2 に示すように、天然雪に近い樹枝状結晶と、球形モデル(氷球)の 2 種類が生成可能であり、特に前者の樹枝状結晶については、枝分かれした高い結晶生成技術が必要で、唯一、本施設のみで天然雪に近い降雪環境が再現できる。



図 5.3.2.1.3-1 雪氷防災実験棟の大型低温室[2]

表 5.3.2.1.3-1 設備仕様[2]

結晶形	樹枝状結晶, 球形モデル(氷球)
降雪強度(水換算)	樹枝状結晶 : 0 ~ 1 mm/h 球形モデル : 0 ~ 5 mm/h
結晶粒径	樹枝状結晶 : 0.5 ~ 5 mm 球形モデル : 約 0.025mm
設定温度	樹枝状結晶 : -10℃ 球形モデル : -2℃
降雪範囲	W 5 x L 3 m



(a) 樹枝状結晶

(b) 氷球

図 5.3.2.1.3-2 雪の結晶形[2]

降雪環境を再現する、制御方法(結晶生成装置)については、図 5.3.2.1.3-3 に示すように、施設内の上部に設置された降雪装置内で結晶の生成、成長させ、自然落下させる。降雪装置 A は樹枝状結晶、降雪装置 B は球形モデル(以下、氷球を称す)の生成装置であり、降雪条件に応じて装置毎、入れ替える仕組みである。なお、降雨環境と同様、本施設の降雪環境も OTT 社のディストロメーター(Parsivel² [2])で事前検証した結果、降雪に関する文献と同等の分布をしており、降雪環境を再現していることを確認した。

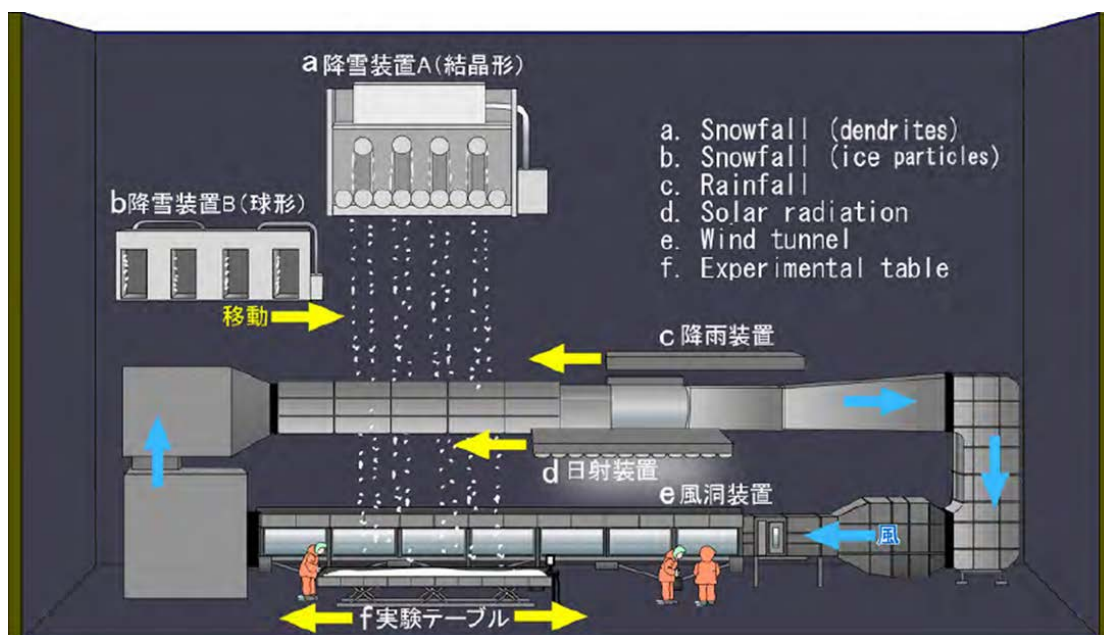
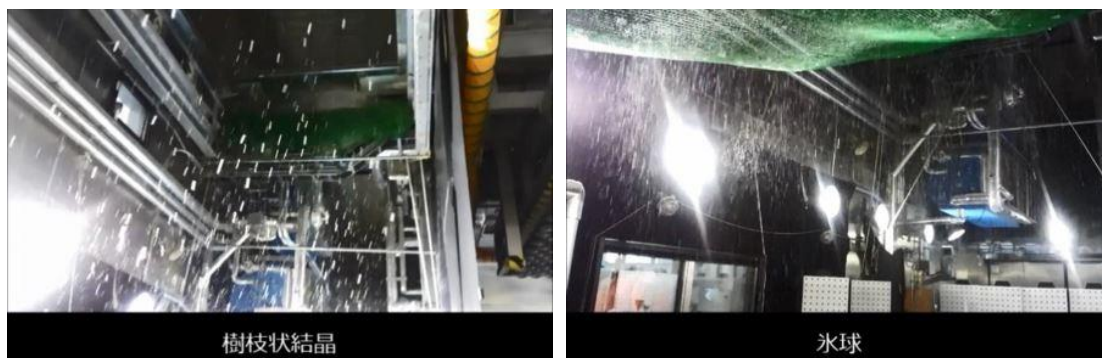


図 5.3.2.1.3-3 降雪装置[2]

図 5.3.2.1.3-4 は、樹枝状結晶、および氷球に対する定点撮影写真を示す。樹枝状結晶は綿のような塊、氷球は細かな粒の雪片として落下する様子が観測されるが、いずれも降雪強度の設定は最大である。本実験では、厳しい環境条件として樹枝状

結晶 1mm/h、氷球 5mm/h で実験を行い、インフラレーダーの検出性能を評価する。また、雪の結晶形と環境温度の関係については、一般的に樹枝状結晶がより低温領域で発生しやすいため、環境温度 -20、-10℃では樹枝状結晶、-5℃以上では氷球と設定する。



(a) 樹枝状結晶

(b) 氷球

図 5.3.2.1.3-4 結晶形の比較

具体的な評価内容は、以下に示す、降雪強度に対する基本性能(①)に加え、降雪環境下の様々な想定シーンに対する検出性能(②、③)の3項目とする。なお、実験諸元を表 5.3.2.1.3-2 に示す。

- ① 標準リフレクタに対する検出性能
- ② レーダー側の着雪に対するレーダー検出性能
- ③ ターゲット側の着雪に対するレーダー検出性能

表 5.3.2.1.3-2 実験諸元

周波数	79, 80 GHz
降雪制御	樹枝状結晶 1mm/h, 氷球 5mm/h
ターゲット	コーナーリフレクタ, 鉄板
ターゲット距離	コーナーリフレクタ : 5m 鉄板 : 1.7m
インフラレーダー設置高	コーナーリフレクタ : 1.3m

① 標準リフレクタに対する検出性能

本実験では、(1)の環境温度実験、および(2)の降雨実験(①の標準リフレクタに対する検出性能)と同様、インフラレーダーとターゲット(標準リフレクタ)を対向設置した上で、約 5m の伝搬路として長時間測定するが、降雪環境下の条件を加えるため、施設内を所定の降雪強度、かつ環境温度に設定して定常(安定)状態を確認後、測定開始する。図 5.3.2.1.3-5 は、施設内に設置したインフラレーダー、および標準リフレクタの写真を示す。各降雪強度に対して 2 つの周波数(79、80GHz)を同時測定するため、インフラレーダーと標準リフレクタの対向を 2 組設置している。

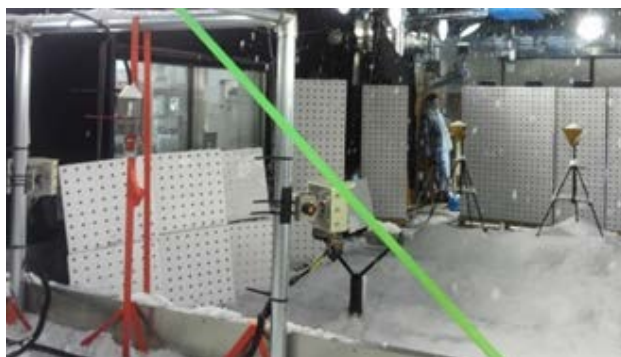
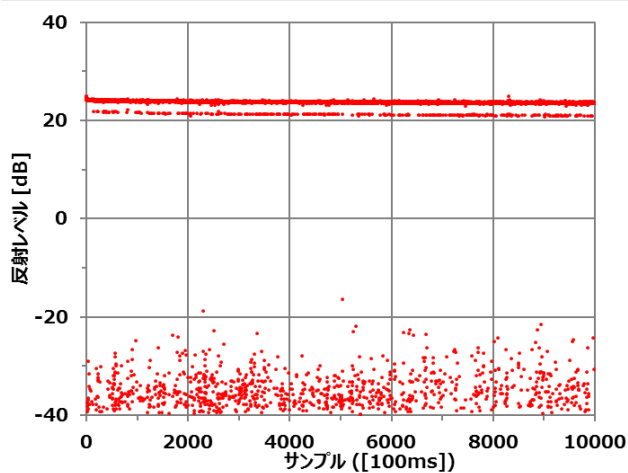


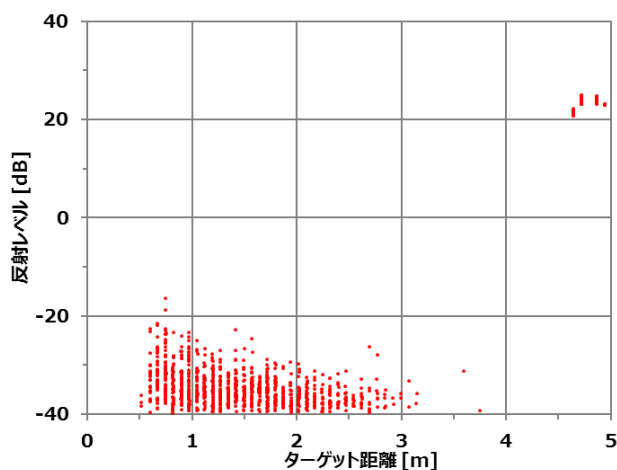
図 5.3.2.1.3-5 標準リフレクタに対する検出性能

図 5.3.2.1.3-6 は、環境温度 -20°C 、樹枝状結晶の条件において、測定時間(サンプル)およびターゲット距離に対する反射特性を示す。本実験では、統計的な性能評価のため、10000 サンプル(約 17 分)を連続測定したデータから反射特性として示しているが、標準リフレクタの固定治具等、本質ではない不要な反射エコーのデータは排除している(ターゲット距離 4m 以上、かつ反射レベル -10dB 以下の部分)。図 5.3.2.1.3-6 (a)より、降雪環境下においてターゲットの反射レベルが時系列で一定に検出され、かつ(b)より、ターゲット距離(約 4.7m)以外でターゲット相当の大きな反射は検出されていないことから、インフラレーダーが安定的に動作・検出していることが分かった。しかしながら、降雨実験と同様、ターゲット以外の雪片の検出についても、反射レベルが時系列でランダムに検出され、インフラレーダーからの距離に依存して分布している。これは、伝搬路上の雪片散乱による反射エコーが検出されたと考えられ、インフラレーダーに近いほど、検出されやすいことが分かった。

そこで図 5.3.2.1.3-7 は環境温度 -10°C 、樹枝状結晶の条件、さらに図 5.3.2.1.3-8 は環境温度 -5°C 、氷球の条件において、ターゲット距離に対する反射特性を示す。環境温度 -20°C 、樹枝状結晶と同様、インフラレーダーからの距離に依存する分布傾向は変わらないが、特に氷球については、その全体的な反射レベルは顕著に増加していることが分かった。以上から、降雨環境と同様に、雪片散乱による影響を排除する、検出閾値の適用することが、降雪環境下のターゲットに対する検出性能を確保するためにはポイントとなる。



(a) 測定時間に対する反射特性



(b) ターゲット距離に対する反射特性

図 5.3.2.1.3-6 環境温度 -20°C ・樹枝状結晶

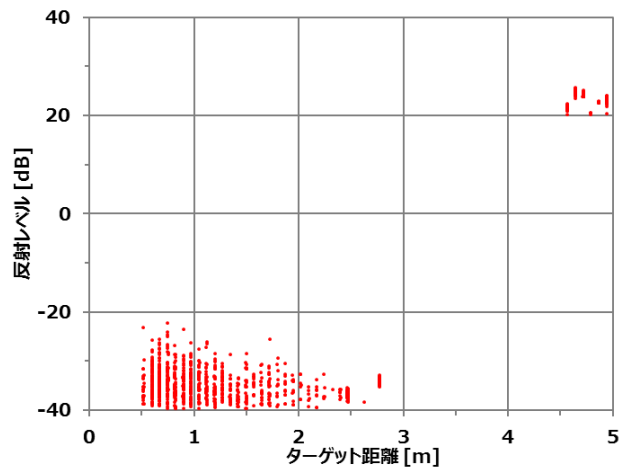
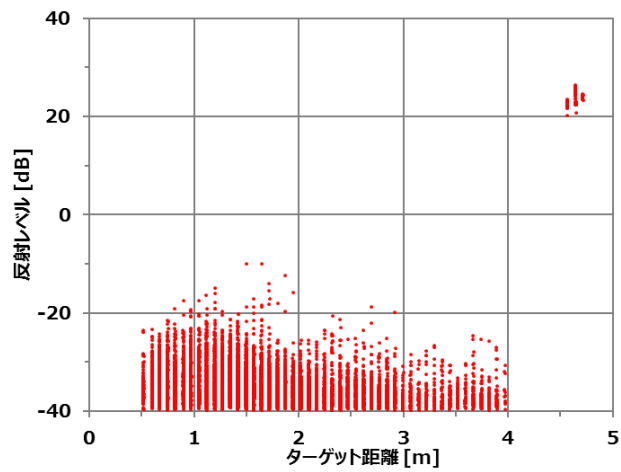


図 5.3.2.1.3-7 環境温度-10°C・樹枝状結晶



(b)

図 5.3.2.1.3-8 環境温度-5°C・氷球

検出閾値については、降雨実験で検討した、検出閾値関数を適用する。すなわち、インフラレーダーとして 40m 先の歩行者を検出するため、基準距離 R_0 を 40m、基準距離の検出閾値レベル T_0 を -40dB、係数 α を 0.5 とする、

図 5.3.2.1.3-9 はその適用例であるが、環境温度 -5°C 、氷球の条件において、係数 $\alpha = 0.5$ の検出閾値関数を実線で示す。図 5.3.2.1.3-9 より、環境温度 -5°C 、氷球の条件において、検出閾値関数の抑圧効果が期待でき、検出閾値レベルを越える雪片散乱の反射エコーは一部であることが分かった。そこで、検出閾値関数を適用した際に検出閾値レベルを越える、雪片散乱の反射エコーの検出率を算出すると、未適用(係数 $\alpha = 0$)の場合、雪片の検出率が約 50%であったが、適用(係数 $\alpha = 0.5$)の場合、約 1%であることが確認できた。また、環境温度 -20°C 、並びに -10°C 、樹枝状結晶の条件に対しても適用することで、十分な抑圧効果が得られていることが確認できた。

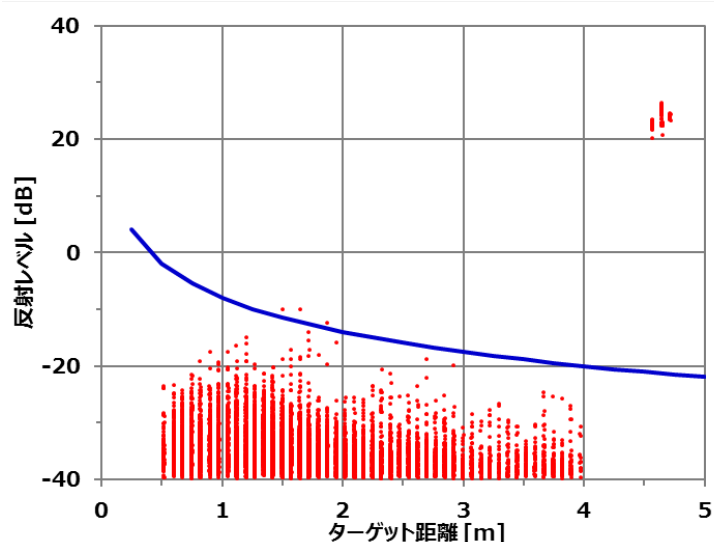


図 5.3.2.1.3-9 検出閾値関数の適用

従って、本節の冒頭に示した 2 つの観点の内、「強い降雨時などの条件で誤検出の発生率を 10%以内に抑えられること」については、係数 $\alpha = 0.5$ の検出閾値関数を適用することで、降雨、並びに降雪環境下の本実験による統計的な性能評価結果から達成した。

② レーダー側の着雪に対するレーダー検出性能

本実験では、風を含む降雪環境下のシナリオを想定して、インフラレーダー側に擬似的な風雪(約 5m/s)を与え、一定時間経過後に測定する。

図 5.3.2.1.3-10 は、擬似的な風雪を与える送風機、インフラレーダー、および標準リフレクタの写真を示す。各降雪強度に対して 2 つの周波数(79、80GHz)を同時測定するため、インフラレーダーと標準リフレクタの対向を 2 組設置している。なお、施設内は環境温度 -10°C で、連続的に樹枝状結晶、または氷球で降雪ながら、インフラレーダーと標準リフレクタ間に設置した送風機で風雪を与えるが、標準リフレクタの反射エコーを測定する際には送風機を一時退避させる。

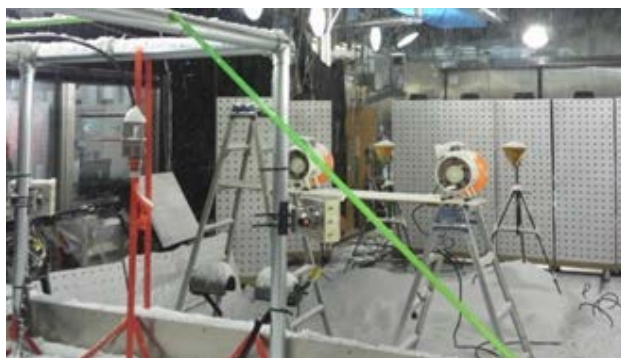
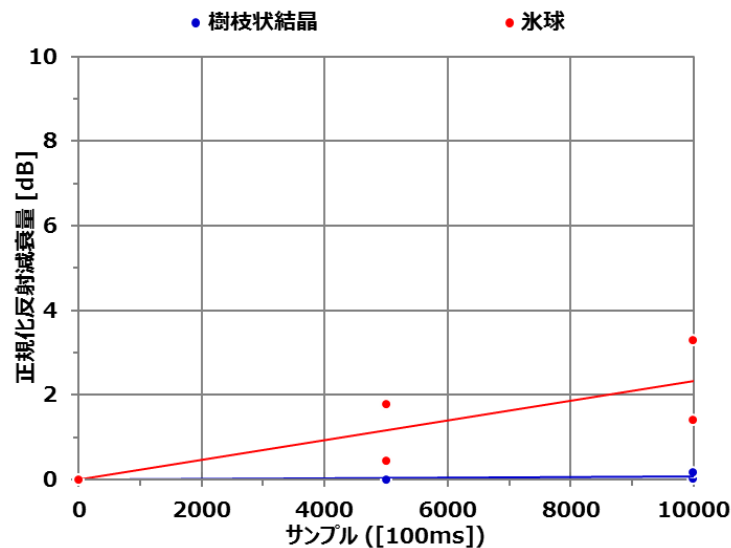


図 5.3.2.1.3-10 レーダー側の着雪に対するレーダー検出性能

図 5.3.2.1.3-11 は、環境温度 -10°C 、樹枝状結晶、および氷球の条件において、測定時間(サンプル)に対する反射特性および写真を示す。風雪速度や環境温度等、同じ条件にも関わらず、着雪の現象は雪の結晶により異なることを確認した。氷球については、インフラレーダーの筐体表面に衝突後、着雪を積み重ね、本実験では、図 5.3.2.1.3-11(a)より、10000 サンプル(約 17 分)後に約 7mm の着雪、かつ(b)より、着雪なしに対する減衰量は約 7dB であることを確認できた。以上から、特定の雪の結晶に対して着雪現象が発生して、本実験では、氷球の場合、約 7dB/17 分であることが分かった。



(a) 測定時間に対する反射特性



(b) 環境温度 -10°C ・氷球

図 5.3.2.1.3-11 インフラレーダー側の着雪特性

③ ターゲット側の着雪に対するレーダー検出性能

本実験では、連続的な降雪環境下で車両等のターゲットに積雪、着雪するシナリオを想定して、車両の車体相当の鉄板を用いて積雪量(積雪厚)を変えながら測定する。本来であれば、②のレーダー側の着雪に対するレーダー検出性能と同様、垂直面に対して擬似的な風雪を与え、着雪量(着雪厚)を変えながら測定する方法もあるが、鉄板への均質な着雪、および定量的な厚みに対する測定を目的に、着雪を積雪に置き換え、積雪厚で代用する。具体的には、インフラレーダーと鉄板の伝搬路をこれまでの水平方向から垂直方向に変更して、上部にインフラレーダー、下部に鉄板に設置する。図 5.3.2.1.3-12 は、施設内に設置した実験装置の写真を示す。鉄板には、ふるい等で均一に降雪させながら所定の積雪厚に調整する。施設内は環境温度 0°C で、事前に樹枝状結晶、および氷球を採取して、長時間、緩やかに温度上昇させながら 0°C まで上げ、各結晶の状態が維持されたサンプルを使用する。また、実際の降雪環境は、気象条件により水分量を多く含んだ雪も観測されるため、一定量の水分を含ませた湿雪を作成して、水分を含ませない乾雪の 2 つの雪で測定する。参考として、図 5.3.2.1.3-13、14 に測定で使用したサンプルの顕微鏡写真を示す。水分を含む湿雪は、図 5.3.2.1.3-13 より、樹枝状結晶については結晶が崩れ、また図 5.3.2.1.3-14 より、氷球については結晶が塊になる様子が分かった。

図 5.3.2.1.3-15 は、環境温度 0°C、樹枝状結晶、および氷球の条件において、着雪厚(積雪厚保)に対する反射特性について説明する。前述の通り、各結晶に対して乾雪、および湿雪の条件を加えており、湿雪の含水率は約 8%(遠藤式含水率計による測定値)である。

図 5.3.2.1.3-15 より、乾雪については、減衰量が概ね比例関数に近似でき、その定数は樹枝状結晶に対して氷球が約 2 倍であることが分かった。一方、湿雪については、本実験では、結晶に関わらず、着雪厚 4cm 程度以上になると減衰量が概ね一定になる傾向が分かった。これは、条件等は異なるものの、文献[6]と同様な傾向が得られており、雪の水分量(含水率)に応じて減衰特性に違いがあることが確認できた。以上から、本実験では、乾雪の場合、着雪厚と減衰量は比例関係にあり、雪の結晶によって定数が異なること、また湿雪の場合、着雪厚 4cm 程度以上になると減衰量は収束する傾向にあることが分かった。

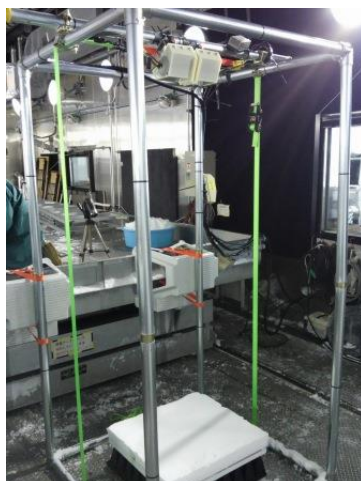
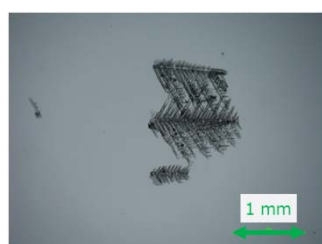


図 5.3.2.1.3-12 ターゲット側の着雪に対するレーダー検出性能

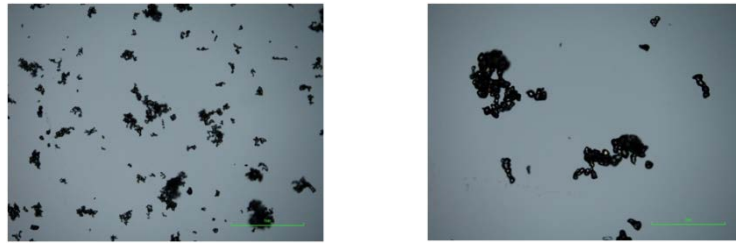


(a) 乾雪



(b) 湿雪

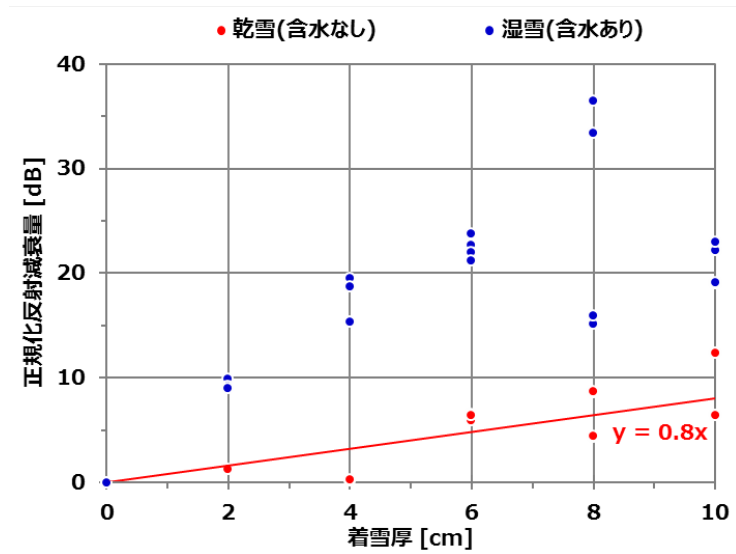
図 5.3.2.1.3-13 樹枝状結晶のサンプル



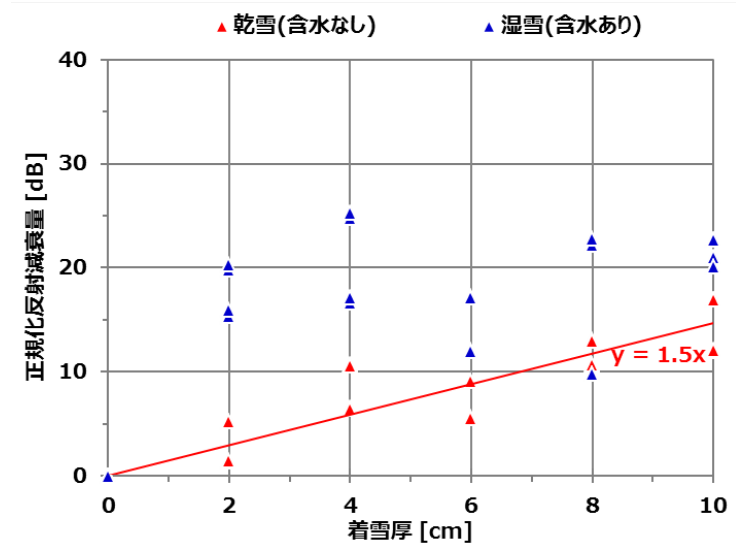
(a) 乾雪

(b) 湿雪

図 5.3.2.1.3-14 氷球のサンプル



(a) 樹枝状結晶



(b) 氷球

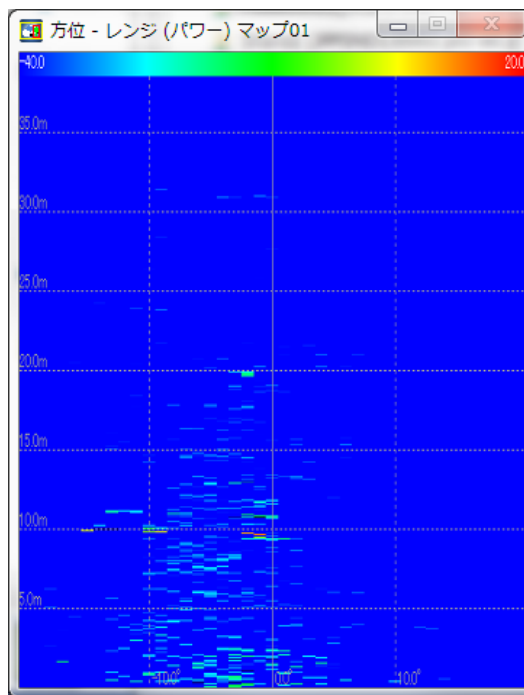
図 5.3.2.1.3-15 ターゲット側の着雪特性

5.3.3. ウ)ー② 検出性能補償技術の開発

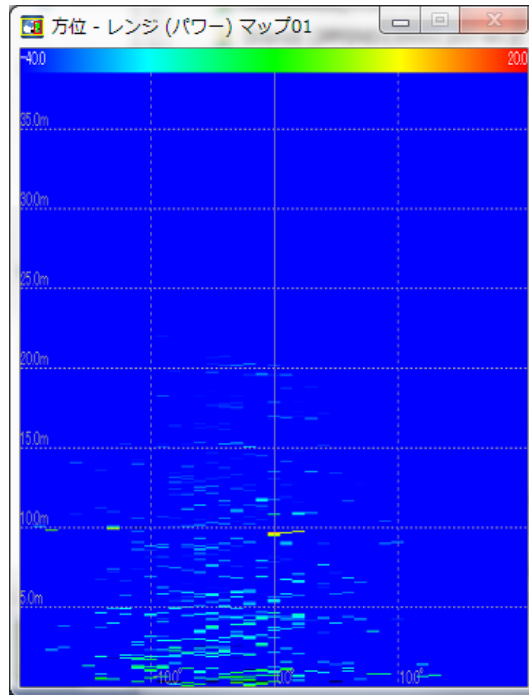
5.3.3.1 背景クラッタ抑圧方式の開発

5.3.3.1.1 基本方式の定義

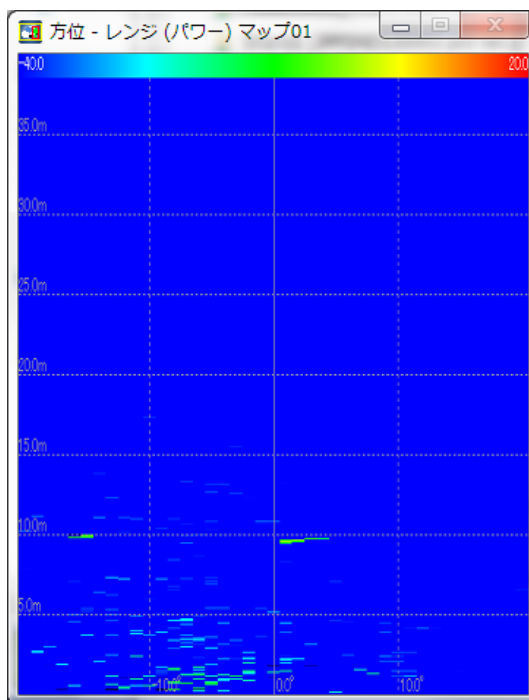
背景クラッタの抑圧処理はレーダー信号処理で得た反射電力プロファイルにおいて行う。降雨時の反射電力プロファイルの例を図 5.3.3.1.1-1 に示す。反射電力プロファイルは、横軸が方位、縦軸が距離、そしてセルの値が反射電力強度を表す。図において、(a) は降雨強度 50mm/h、(b) は 150mm/h、(c) は 250mm/h の条件で取得したプロファイルの 1 フレームを例示する。図からも分かるように、異なる降雨強度に対し、雨クラッタの表出するイメージが異なる。



(a) 降雨強度 50mm/h



(b) 降雨強度 150mm/h



(c) 降雨強度 250mm/h

図 5.3.3.1.1-1 異なる降雨強度の反射電力プロファイル

背景クラッタ抑圧の基本方式を下記レーダー方程式に基づき構築する。

$$S = \frac{PG^2T\lambda^2\sigma}{4\pi^3R^4}$$

S：レーダーの受信信号エネルギー[Wsec]

P：平均送信電力[W]

G:アンテナ利得[非 dB 形式]

λ ：送信信号の波長[m]

σ ：レーダー反射断面積[m²]

T：パルスが目標を照射する時間

R：目標とレーダー間の距離

上記レーダー方程式に依れば、受信信号エネルギーS と距離 R との関係が、

$$S \propto \frac{1}{R^4}$$

本式となるため、指定基準距離 R_0 、及び基準距離 R_0 における受信信号エネルギーを S_0 と仮定すれば、任意距離 R_1 における受信信号エネルギー S_1 を下式で算出できる。

$$S_1 = S_0 + 40 \times \log\left(\frac{R_0}{R_1}\right)$$

但し、通常、受信信号に対し複雑な信号処理を施すため、信号処理後の出力としての反射電力値は必ずしも距離 R の 4 乗に反比例とは限らない。一般的に、上記数式を下記のように修正し、反射電力と距離 R との関係を表示する。

$$P_1 = P_0 + \alpha \times 40 \times \log\left(\frac{R_0}{R_1}\right)$$

P_0 ：基準距離 R_0 における反射電力、つまり、基準反射電力[dB]

P_1 ：距離 R_1 における反射電力[dB]

α ：値が[0、 1]間の減衰係数

電波は、大気中の酸素や水蒸気などの気体により吸収されたり、霧、雲、雨、雪などにより散乱し減衰したりする。波長の短い電波ほど大気中の気体に吸収され易く、電波を送信・反射・受信する間に、電波のエネルギーはその経路にある気体やその他物質の粒子により吸収され減衰する。つまり、雨や雪などのクラッタが存在する場合、反射電力と距離との関係がクラッタのない場合と異なることになる。

インフラレーダーに対して、降雨や降雪時の雨滴や雪粒が測定範囲内で概ね一様であると仮定できるので、降雨や降雪に起因するクラッタの影響は距離が近ければ近い程強くなる。上述クラッタの影響を抑圧するため、レーダーの反射電力に基づき対象物体を検出する際に、反射電力の閾値を距離に合わせ適応的に設定することが必要である。具体的に、ある空間セルを対象物体の一部として抽出する際に、セルの反射電力が下式で算出した閾値 T_1 よりも大きくなることを要求する。

$$T_1 = T_0 + \alpha \times 40 \times \log\left(\frac{R_0}{R_1}\right)$$

但し、 R_0 は基準距離、 T_0 は基準距離における反射電力閾値、つまり基準閾値である。 R_1 は対象セルの距離、 T_1 は対象セルを物体として検出する際に必要な閾値である。 α は[0、 1]間の係数である。

5.3.3.1.2 適応型抑圧方式のエリア構成

前節の対象物を検出する際の閾値算出式において、 α を大きく設定すれば減衰効果が強くなるが、対象物体(例、歩行者)を検出できなくなる可能性も高まる。そのため、必要以上の固定値ではなく、降雨や降雪のリアルタイム的な特性に合わせ適当な α を設定することがより望ましい。

インフラレーダーに対し、降雨や降雪の特性を適応的に対処するため、レーダー作用距離によって検出範囲を図 5.3.3.1.2-1 に示したように 3 つのエリアに分ける。

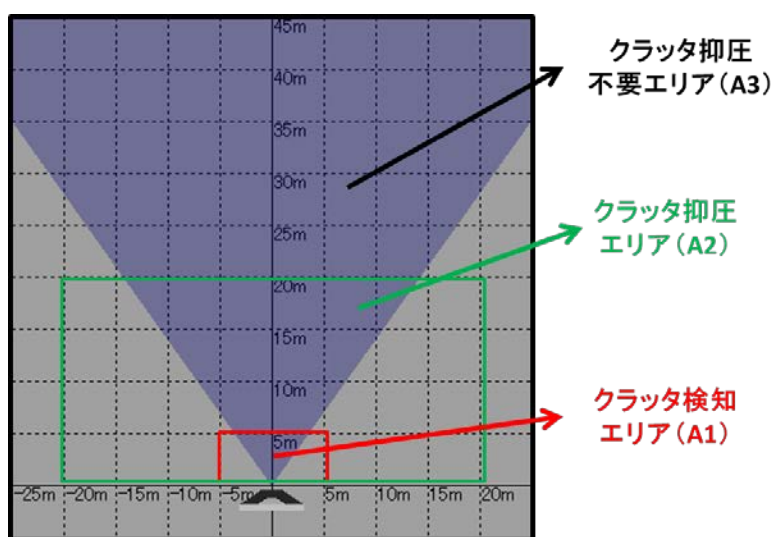


図 5.3.3.1.2-1 クラッタ対応のエリア区分

図 5.3.3.1.2-1 において、A1 はクラッタ特性検知エリア、A2 は抑圧フィルター適用エリア、A3 は抑圧フィルター不要エリアをそれぞれ表す。A1 エリアは、対象物体(例、車両や歩行者)の出現可能性がなく、逆に、雨や雪クラッタからの反射が強いエリアである。A1 エリアの大きさはレーダーの設置条件やレーダーパラメータによるが、レーダーの高所設置とした場合に、例えば距離範囲 [0m, 5m] のエリアを A1 とすることができる。A2 エリアは対象物体とクラッタが混在するエリアである。A2 エリアの大きさがレーダーの設置条件やレーダーパラメータ以外に、雨や雪の特性も考慮し決めるべきである。一例として距離範囲 [5m, 20m] を A2 とする。A3 エリアはクラッタを実際に検出できないエリアとする。つまり、A3 エリアにある雨滴や雪粒からの反射が弱く、レーダーから物体として検出できない。A3 エリアの存在を以下のように説明できる。本来、雨滴や雪粒の反射が通常の対象物体より弱く、更に遠距離からの反射が近距離の雨滴や雪粒に阻害されやすいため、雨や雪クラッタの最大検知距離は通常の対象物体より短くなる。前記図 5.3.3.1.1-1 に示した実測データの例からも A3 エリアの存在を確認できる。

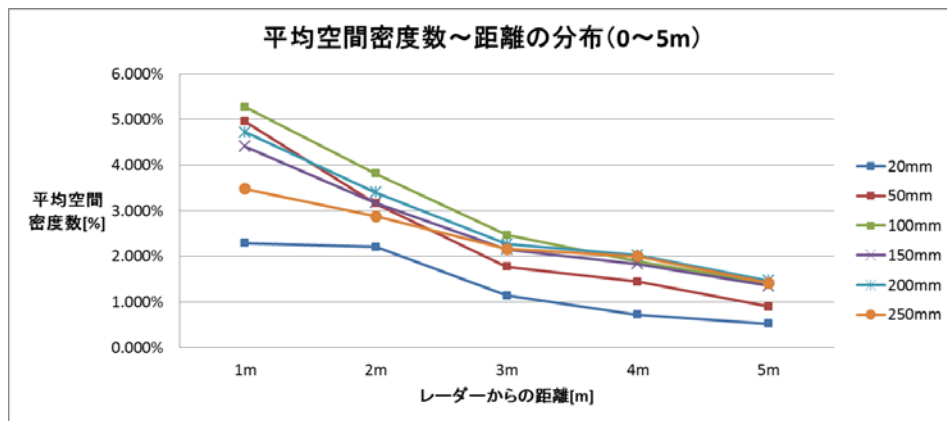
5.3.3.1.3 クラッタの平均空間密度

クラッタ抑圧を適応的に実行するため、はじめにクラッタの特性を明確にする必要がある。本節(5.3.3.1.3)から 5.3.3.1.5 節にかけて、近距離ミリ波レーダーに対するクラッタ特性に関し、実測データに基づいた値を示す。具体的には、前節で述べたエリア A1 及びエリア A2 における平均空間密度、平均反射電力、距離減衰係数についての解析結果を示す。

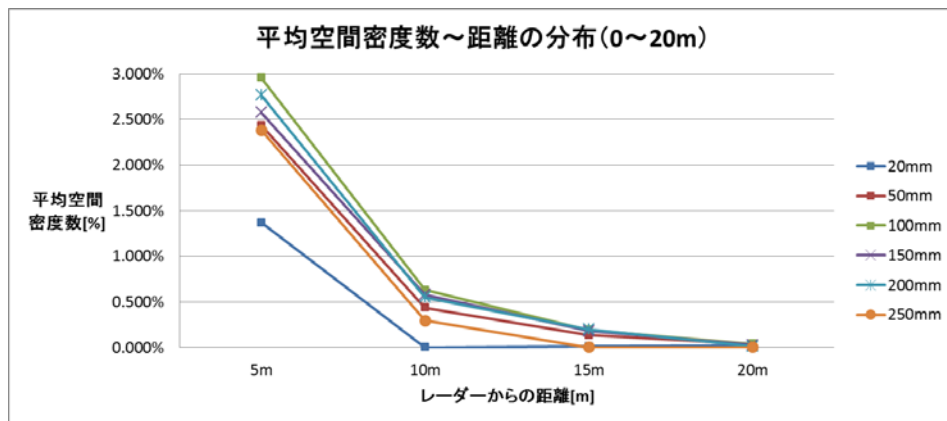
平均空間密度とは、雨滴や雪粒と思われる物体について、1 フレーム当たりの検出セル合計数を算出し、反射電力プロファイルの総セル数で除算した結果とする。反射電力プロファイルの総セル数は、方位と距離の測定範囲をそれぞれの分解能で除算した結果として算出する。平均空間密度の意味合いを単純に言うと、雨や雪のクラッタが引き起こす誤検出の頻度を傾向として反映するが、実際の物体検出では、隣接するセル間の関係等も考慮するため、一意的に誤検出率とは等しくない。

図 5.3.3.1.3-1 に実測データより算出した降雨強度ごとの平均空間密度を示す。(a) は 0~5m 範囲で 1m 刻みの結果、(b) は 0~20m 範囲で 5m 刻みの結果を示す。実測データ 2880 フレーム(288 秒)分を集計した。また、降雨強度は 20mm/h、50mm/h、100mm/h、150mm/h、200mm/h、250mm/h の 6 種類で集計した。

図からも分かるように、平均空間密度は距離の増大に伴い減少するが、減少の傾きは降雨強度によって異なる。また、近距離の区間内においても減少の傾きが異なる。そのため、距離 5m 以下の平均空間密度から 5m 以上の平均空間密度を推定することは容易ではない。



(a) 0～5mの平均空間密度



(b) 0～20mの平均空間密度

図 5.3.3.1.3-1 雨クラッタの平均空間密度

図 5.3.3.1.3-2 に雪クラッタの平均空間密度状況を例示する。距離は 0～4m 範囲で 1m 刻みである。実測データ 2880 フレーム(288 秒)分を集計した。また、降雪の種類は樹枝状結晶と氷球の 2 種類で集計した。

図からも分かるように、雨クラッタと比べると、雪クラッタの平均空間密度は大幅に低い。また、距離増大に伴い必ずしも単調に減少しない。降雪の種類(形状)から見れば、氷球が樹枝状結晶より検出されやすい。つまり、氷球が雪クラッタとしての影響が大きいと言える。

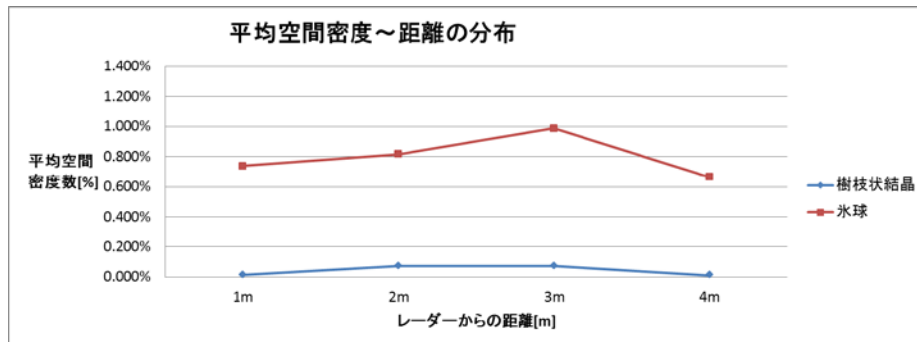


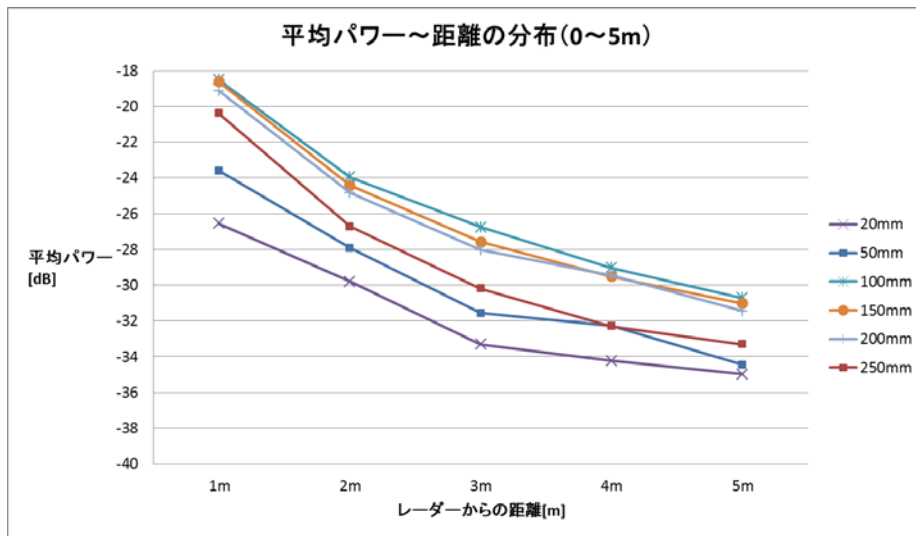
図 5.3.3.1.3-2 雪クラッタの平均空間密度

5.3.3.1.4 クラッタの平均反射電力

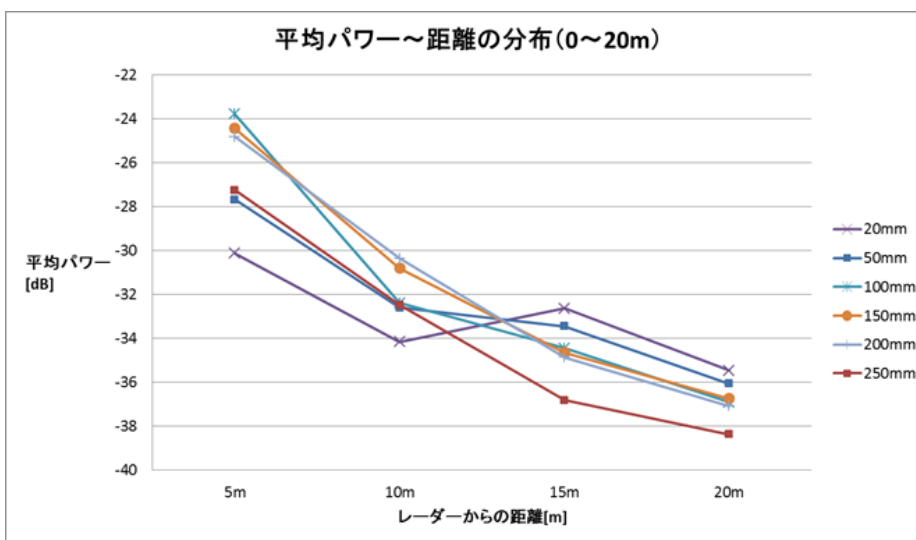
平均反射電力とは、雨滴や雪粒と思われる物体について、物体を構成する各セルの反射電力値の平均である。平均反射電力の意味合いは、雨や雪のクラッタが引き起こす誤検出の確度を反映する。つまり、平均反射電力が大きいほど、背景クラッタとして抑圧フィルターで除去することが難しくなる。

図 5.3.3.1.4-1 に実測データより算出した降雨強度ごとの平均反射電力を示す。(a) は 0～5m 範囲で 1m 刻みの結果、(b) は 0～20m 範囲で 5m 刻みの結果である。実測データ 2880 フレーム(288 秒)分を集計した。また、降雨強度は 20mm/h、50mm/h、100mm/h、150mm/h、200mm/h、250mm/h の 6 種類で集計した。

図からも分かるように、平均反射電力は距離の増大に伴い概ね減少するが、減少の傾きは降雨強度によって異なり、場合によって増加することもある。また、近距離の距離区間においても減少の傾きが異なる。そのため、距離 5m 以下の平均反射電力から 5m 以上の状態を推定することは、やはり容易ではない。



(a) 0～5mの平均反射電力



(b) 0～20mの平均反射電力

図 5.3.3.1.4-1 雨クラッタの平均反射電力

図 5.3.3.1.4-2 に雪クラッタの平均反射電力を例示する。距離は 0~4m 範囲で 1m 刻みである。実測データ 2880 フレーム(288 秒)分を集計した。また、降雪種類は樹枝状結晶と氷球の 2 種類で集計した。

図からも分かるように、降雪の種類(形状)によって、平均反射電力の値が大きく異なる。氷球は雨クラッタの平均反射電力特性に近いが、樹枝状結晶は大幅に低い値となっている。また、氷球の場合は、平均反射電力が距離の増大に伴い概ね減少するが、樹枝状結晶の場合は殆ど変化しない。

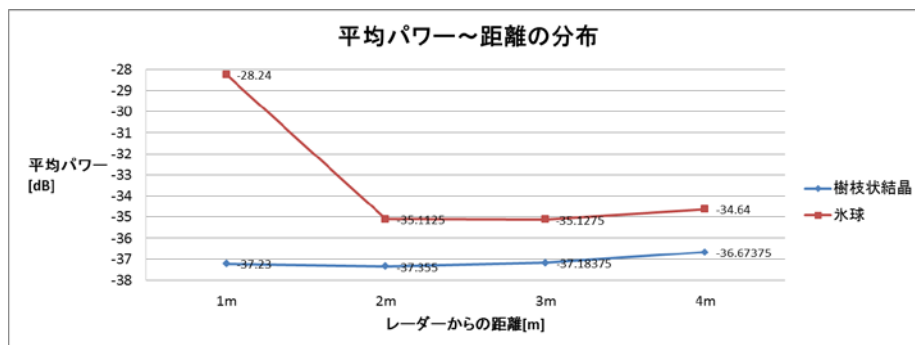


図 5.3.3.1.4-2 雪クラッタの平均反射電力

5.3.3.1.5 距離減衰係数

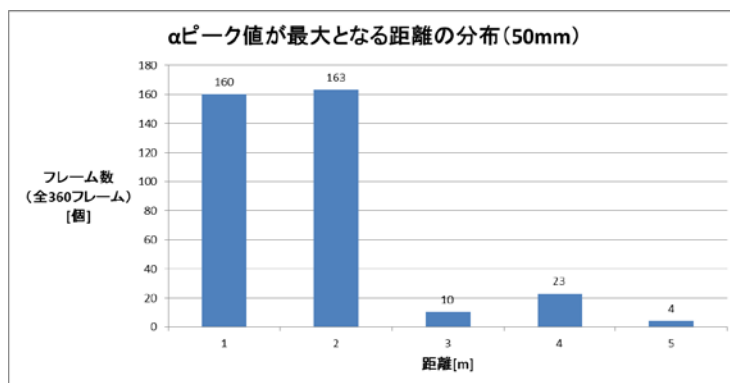
本節では、雨クラッタや雪クラッタの特性として、距離に伴う減衰方式を検証する。前の節でも説明したように、減衰係数 α は下記のように算出できる。

$$\alpha = \frac{T_1 - T_0}{40 \times \log\left(\frac{R_0}{R_1}\right)}$$

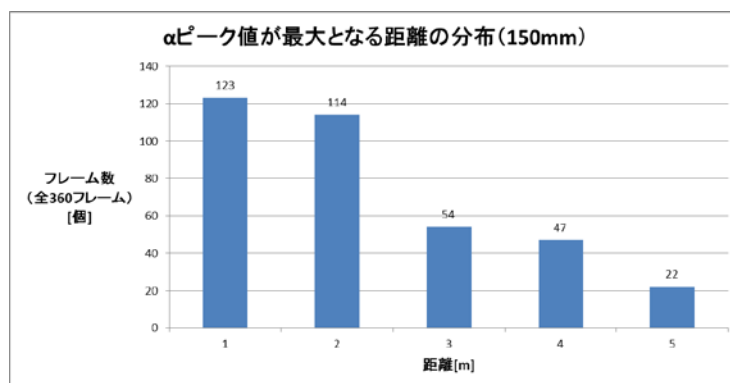
但し、 R_0 と T_0 は物体検出用基準距離と基準反射電力を示す。例えば、 $R_0=50m$ 、 $T_0=-40dB$ に設定できる。 R_1 と T_1 は減衰係数 α を算出するために選定した実測値である。減衰係数をクラッタ特性検知エリア $A1$ より求めるため、 R_1 と T_1 は $A1$ から選定する。

図 5.3.3.1.5-1 に、実測データ 360 フレーム分の集計結果を示す。図では、 $A1$ におけるクラッタ測定値より α を求めた際に、最大 α 値を取得した距離の分布状況を示す。(a) は降雨強度 50mm/h、(b) は 150mm/h、(c) は 250mm/h の結果を示す。

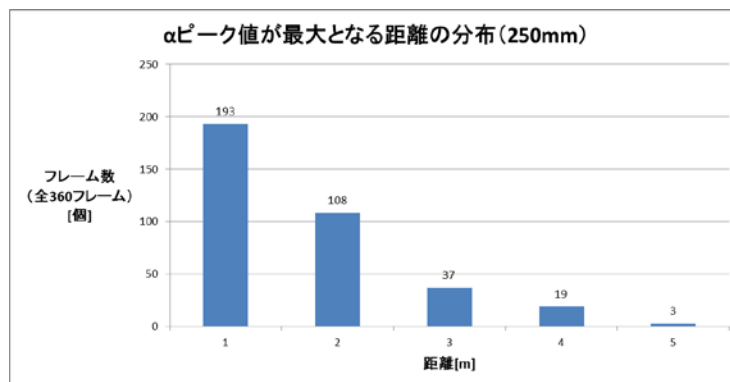
図からも分かるように、最大 α 値は必ずしも最も近い距離の雨クラッタから求められるとは限らない。逆に言うと、最大 α 値を求める際に、降雨状況によって、複数の距離で確認する必要がある。このため、 α の選択方式および対応抑圧効果を検証する必要がある。これについては、後の抑圧フィルター検証実験にて詳細を説明する。



(a) 降雨強度 50mm/h



(b) 降雨強度 150mm/h



(c) 降雨強度 250mm/h

図 5.3.3.1.5-1 αピーク値対応距離の分布

5.3.3.2 背景クラッタ抑圧方式の検証実験

ここでは、クラッタ特性検知エリア A1 における測定結果に基づき、減衰係数 α を求め、そして、抑圧フィルター適用エリア A2 に適用することを検討する。本開発では、前述した大型降雨実験施設及び雪氷防災実験棟を利用し、降雨と降雪に対するレーダー測定データをそれぞれ取得し、取得したデータを基にクラッタ抑圧方式を検証する。具体的に、減衰係数 α を別々の方法で算出し、それぞれの抑圧効果を比較する。以下各節で、下記検証実験の内容を順番に説明する。

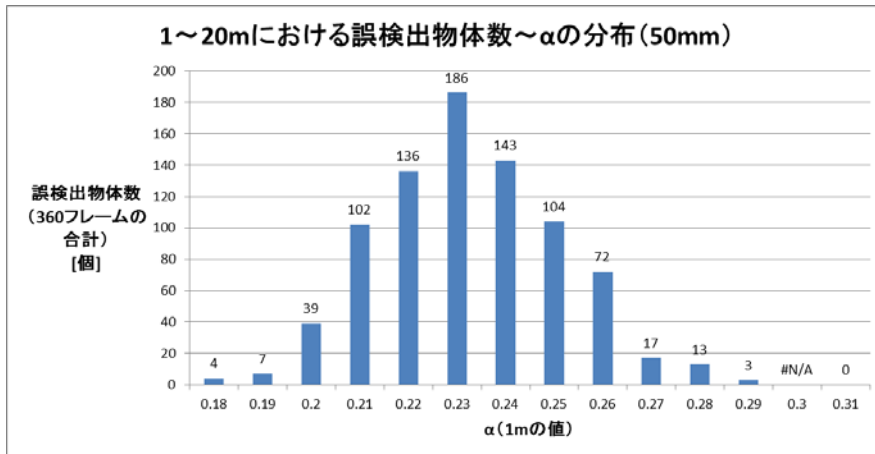
- 検証実験 1：1m 平均による減衰係数算出
- 検証実験 2：1m ピークによる減衰係数算出
- 検証実験 3：5m 平均による減衰係数算出
- 検証実験 4：5m ピークによる減衰係数算出
- 検証実験 5：5m ピーク＋偏差による減衰係数算出
- 検証実験 6：固定値減衰係数利用
- 検証実験 7：降雪用減衰係数算出

5.3.3.2.1 検証実験 1：1m 平均による減衰係数算出

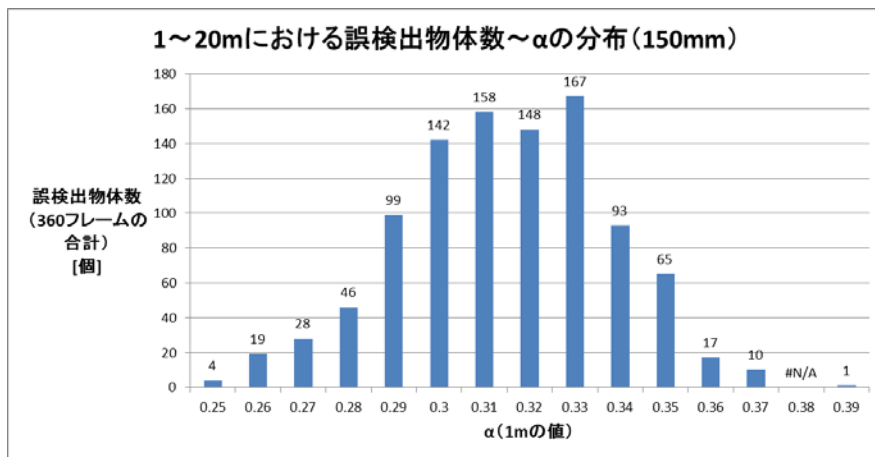
3つの降雨強度(50mm/h、150mm/h、250mm/h)に対し、クラッタ特性検知エリア A1 を 0m～1m と設定し、減衰係数 α を求める。求め方は、A1 における全ての雨クラッタより求めた α の平均値をフレーム用 α 値とする。抑圧フィルター適用エリア A2 を 1m～20m に設定し、フレーム用 α 値の抑圧効果を検証する。

図 5.3.3.2.1-1 に検証結果を示す。図において、横軸は求めたフレーム用 α 値、縦軸は抑圧出来なかった雨クラッタが引き起こした誤検出物体数を示す。フレーム数は 360 である。

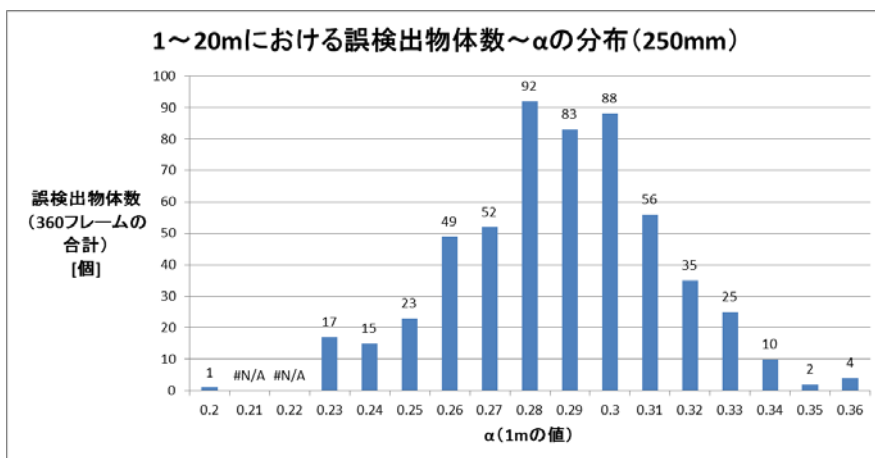
この図からも分かるように、降雨強度によって求めた α 値の範囲が多少異なるが、殆ど 0.2～0.4 の間にある。但し、抑圧の効果は不十分である。具体的に、1 フレーム当たりの誤検出数は、50mm/h の場合は 2.29 個、150mm/h の場合は 2.77 個、250mm/h の場合は 1.53 個である。



(a) 降雨強度 50mm/h



(b) 降雨強度 150mm/h



(c) 降雨強度 250mm/h

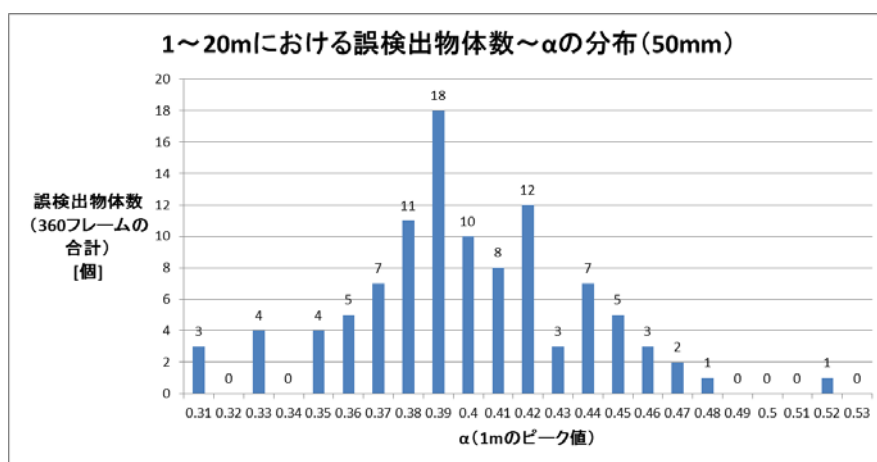
図 5.3.3.2.1-1 検証実験 1 の結果

5.3.3.2.2 検証実験 2 : 1mピークによる減衰係数算出

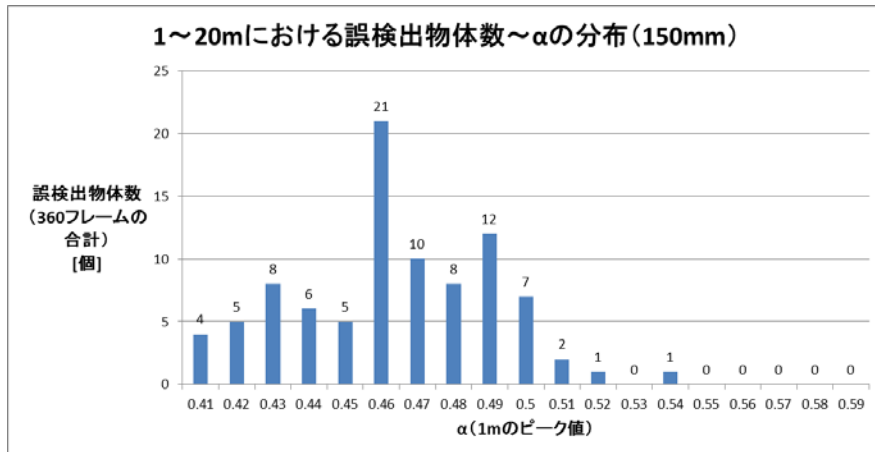
3つの降雨強度(50mm/h、150mm/h、250mm/h)に対し、クラッタ特性検知エリア A1 を 0m～1mと設定し、減衰係数 α を求める。求め方は、A1 における全ての雨クラッタより求めた α のピーク値をフレーム用 α 値とする。抑圧フィルター適用エリア A2 を 1m～20mに設定し、フレーム用 α 値の抑圧効果を検証する。

図 5.3.3.2.2-1 に検証結果を示す。図において、横軸は求めたフレーム用 α 値、縦軸は抑圧出来なかった雨クラッタが引き起こした誤検出物体数を示す。フレーム数は 360 である。

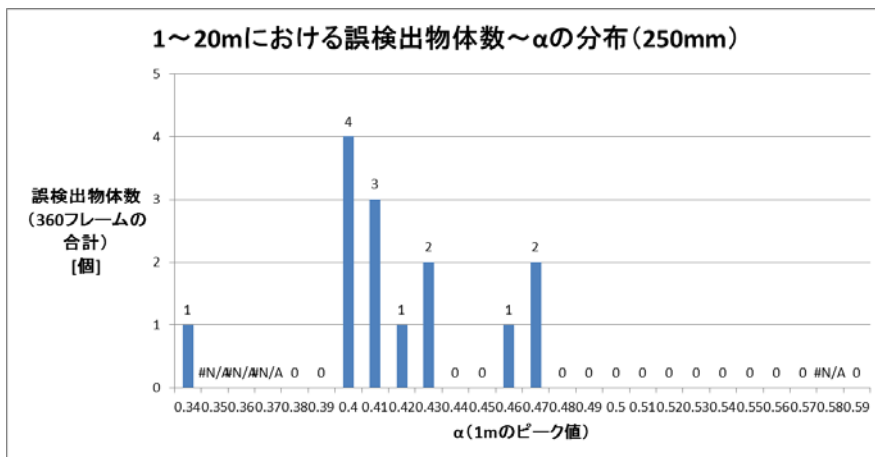
この図からも分かるように、 α 値の範囲が 0.3～0.6 の間にある。但し、降雨強度によって異なる。また、降雨強度によって抑圧の効果も異なる。例えば、50mm/h と 100mm/h の場合は、求めた α 値が相対的に小さいため、抑圧出来なかった雨クラッタの数は相対的に多い。具体的に、1フレーム当たりの誤検出数は、50mm/h の場合は 0.289 個、150mm/h の場合は 0.250 個、250mm/h の場合は 0.039 個となっている。検証実験 1 の結果と比べると、抑圧効果は 10 倍以上ある。



(a) 降雨強度 50mm/h



(b) 降雨強度 150mm/h



(c) 降雨強度 250mm/h

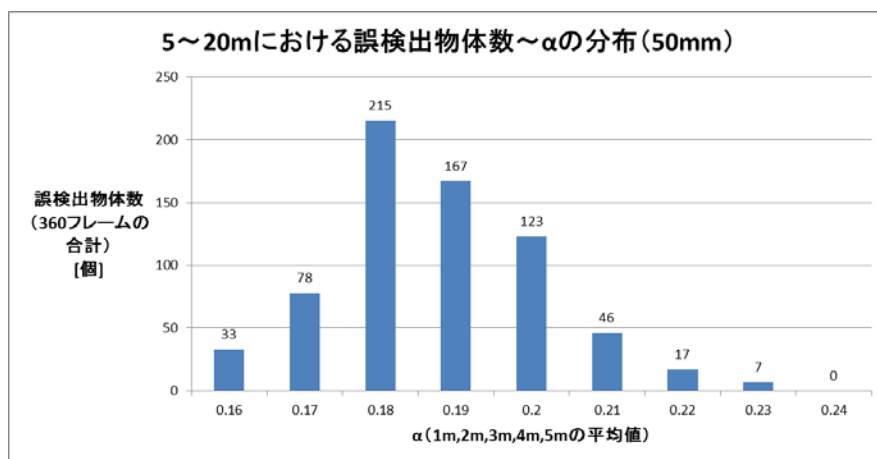
図 5.3.3.2.2-1 検証実験 2 の結果

5.3.3.2.3 検証実験 3 : 5m平均による減衰係数算出

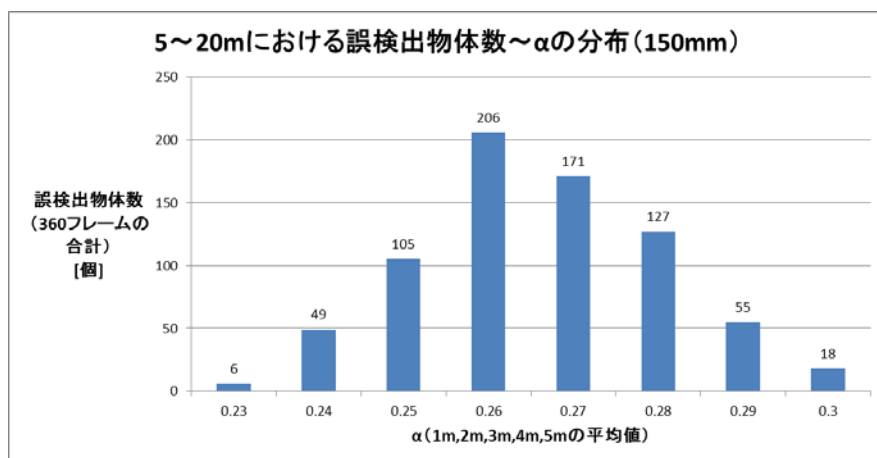
3つの降雨強度(50mm/h、150mm/h、250mm/h)に対し、クラッタ特性検知エリア A1 を 0m～5mと設定し、減衰係数 α の平均値をフレーム用 α 値とする。抑圧フィルター適用エリア A2 を 5m～20mに設定し、フレーム用 α 値の抑圧効果を検証する。

図 5.3.3.2.3-1 に検証結果を示す。図において、横軸は求めたフレーム用 α 値、縦軸は抑圧出来なかった雨クラッタが引き起こした誤検出物体数を示す。フレーム数は 360 である。

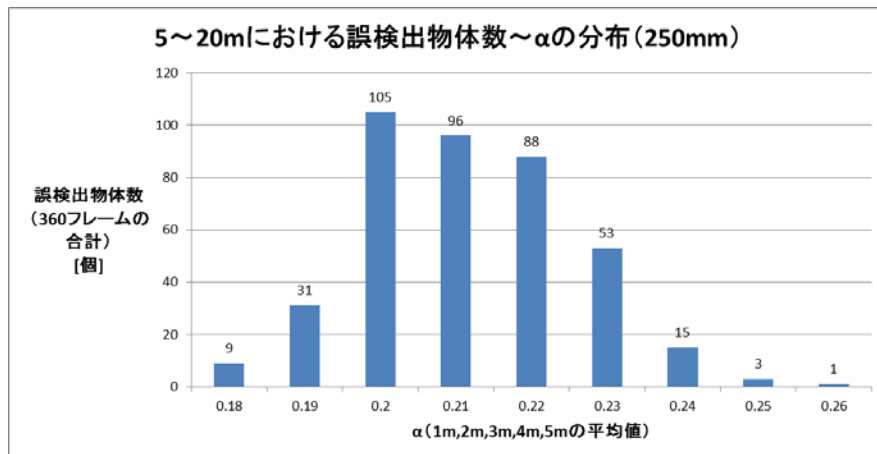
この図からも分かるように、降雨強度によって求めた α 値の範囲が多少異なるが、殆ど0.15~0.3の間にある。但し、抑圧の効果は充分ではない。1フレーム当たりの誤検出数は、50mm/hの場合は1.91個、150mm/hの場合は2.05個、250mm/hの場合は1.11個となっている。検証実験1の結果と比べると、 α 値が全般的に小さくなったが、抑圧効果は相対的によくなっている。



(a) 降雨強度 50mm/h



(b) 降雨強度 150mm/h



(c) 降雨強度 250mm/h

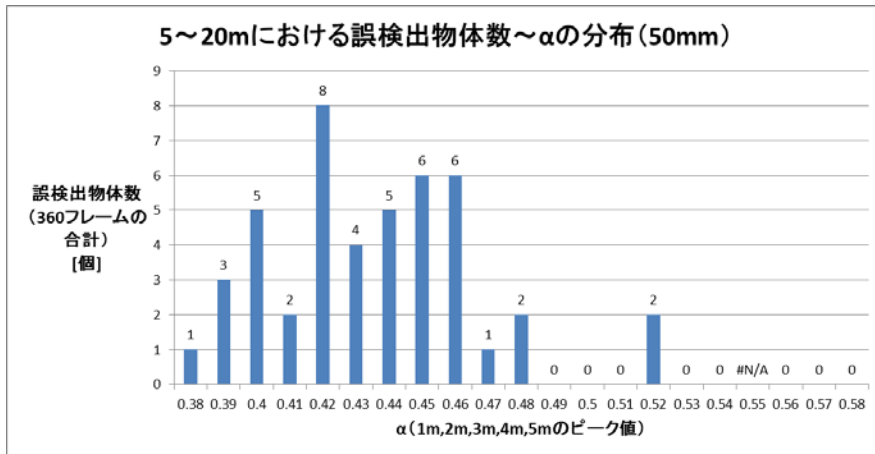
図 5.3.3.2.3-1 検証実験 3 の結果

5.3.3.2.4 検証実験 4 : 5mピークによる減衰係数算出

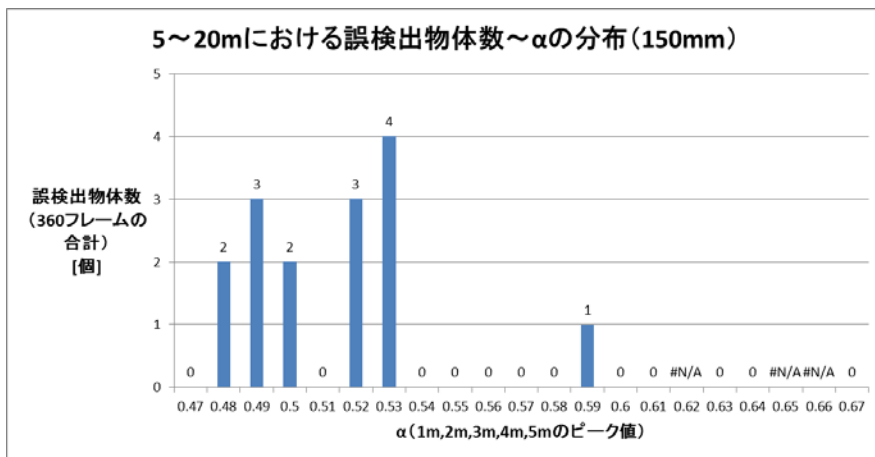
3つの降雨強度(50mm/h、150mm/h、250mm/h)に対し、クラッタ特性検知エリア A1 を 0m～5mと設定し、減衰係数 α のピーク値をフレーム用 α 値とする。抑圧フィルター適用エリア A2 を 5m～20mに設定し、フレーム用 α 値の抑圧効果を検証する。

図 5.3.3.2.4-1 に検証結果を示す。図において、横軸は求めたフレーム用 α 値、縦軸は抑圧出来なかった雨クラッタより引き起こした誤検出物体数を示す。

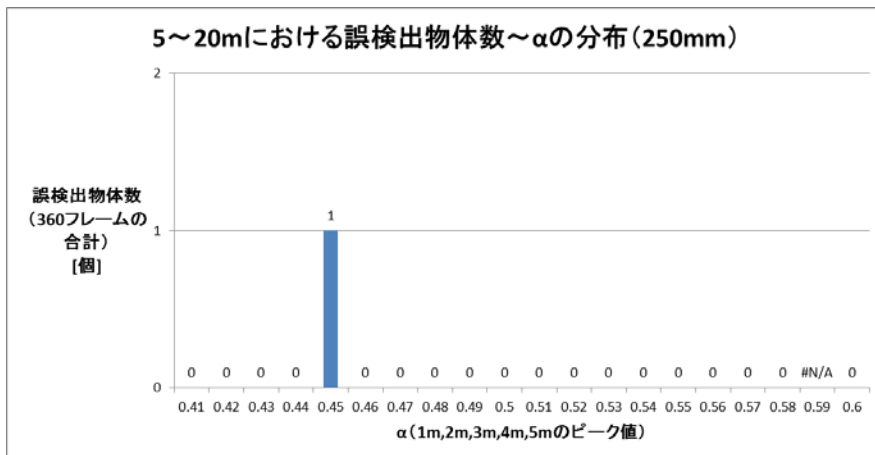
この図からも分かるように、降雨強度によって求めた α 値の範囲が異なる。値の範囲は 0.4～0.7 の間にある。また、降雨強度によって抑圧の効果も異なる。強い降雨強度ほど抑圧の効果が顕著である。この現象は以下のように説明できる。強い降雨の場合、近距離ほど雨クラッタの表現が顕著であるため、近距離の雨クラッタから求めた α 値が相対的に大きい。一方、距離の増大に伴い、強い雨ほど減衰が速いため、雨クラッタに引き起こす誤検出の可能性が小さくなる。この検証実験において、1 フレーム当たりの誤検出数は、50mm/h の場合は 0.13 個、150mm/h の場合は 0.04 個、250mm/h の場合は 0.003 個となっている。



(a) 降雨強度 50mm/h



(b) 降雨強度 150mm/h



(c) 降雨強度 250mm/h

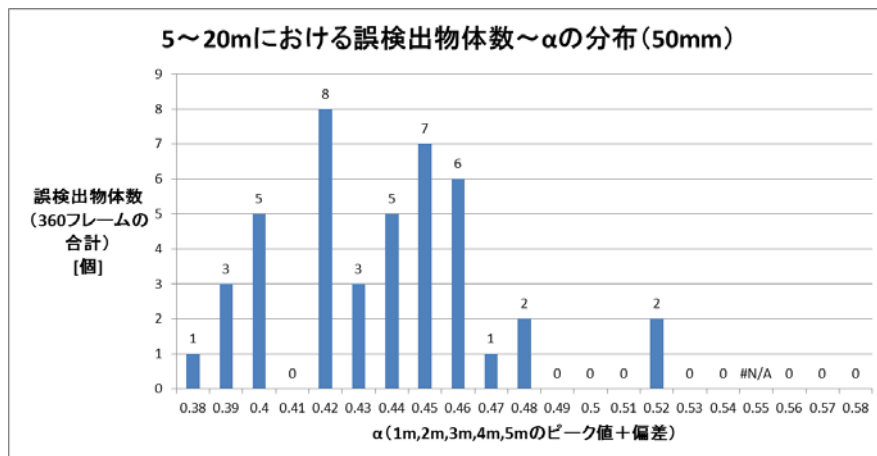
図 5.3.3.2.4 検証実験 4 の結果

5.3.3.2.5 検証実験 5 : 5mピーク+偏差による減衰係数算出

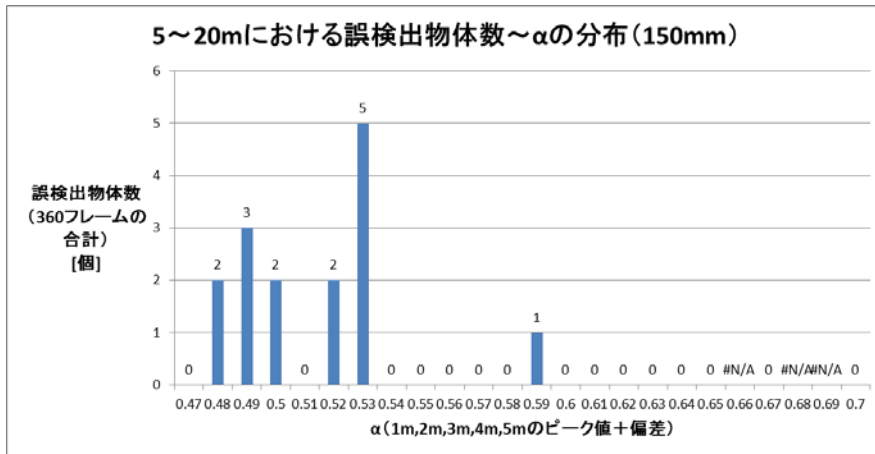
3つの降雨強度(50mm/h、150mm/h、250mm/h)に対し、クラッタ特性検知エリア A1 を 0m～5mと設定し、減衰係数 α のピーク値に平均偏差を上乗せした値をフレーム用 α 値とする。抑圧フィルター適用エリア A2 を 5m～20mに設定し、フレーム用 α 値の抑圧効果を検証する。

図 5.3.3.2.5-1 に検証結果を示す。図において、横軸は求めたフレーム用 α 値、縦軸は抑圧出来なかった雨クラッタの数より引き起こした誤検出物体数を示す。フレーム数は 360 である。

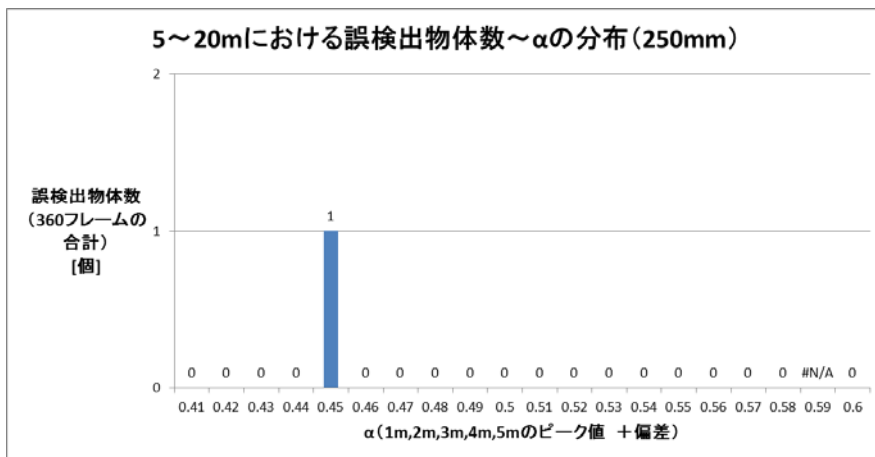
この図からも分かるように、降雨強度によって求めた α 値の範囲が異なる。 α 値の範囲は 0.4～0.7 の間にある。また、降雨強度によって抑圧の効果も多少異なる。検証実験 4 同様、強い雨強度ほど抑圧効果が顕著である。1 フレーム当たりの誤検出数は、50mm/h の場合は 0.119 個、150mm/h の場合は 0.042 個、250mm/h の場合は 0.003 個となっている。検証実験 4 と比べると、抑圧効果が若干は高まったが、雨クラッタを完全に抑圧することは出来なかった。



(a) 降雨強度 50mm/h



(b) 降雨強度 150mm/h



(c) 降雨強度 250mm/h

図 5.3.3.2.5-1 検証実験 5 の結果

5.3.3.2.6 検証実験 6 : 固定値減衰係数利用

3つの降雨強度(50mm/h、150mm/h、250mm/h)に対し、各フレームの減衰係数 α を0.5に固定し、抑圧フィルター適用エリアA2を1m～20mに設定し、抑圧効果を検証する。

図 5.3.3.2.6-1 に検証結果を示す。図において、横軸は3つの降雨強度、縦軸は抑圧出来なかったクラッタより引き起こした誤検出物体数を示す。

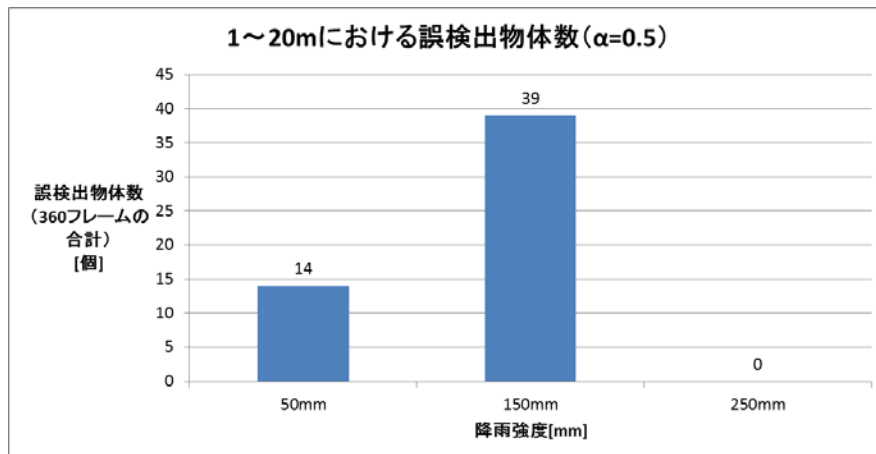


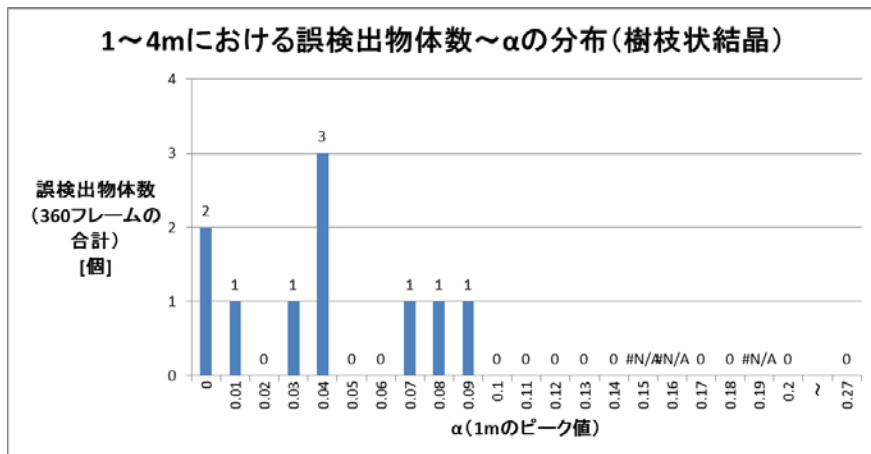
図 5.3.3.2.6-1 検証実験 6 の結果

上図から分かるように、降雨強度によって抑圧の効果が異なる。1 フレーム当たりの誤検出数は、50mm/h の場合は 0.04 個、150mm/h の場合は 0.11 個、250mm/h の場合は 0 個となっている。検証実験 4 と比べると、雨強度によって異なるが、誤検出数の平均値は大体同じである。しかし、検証実験 4 の場合、多数のフレームに対し α 値が 0.5 以下となっている。つまり、固定値 0.5 は必要以上である場合が多い。その影響として、対象物体を検出できなくなる可能性は高まる。

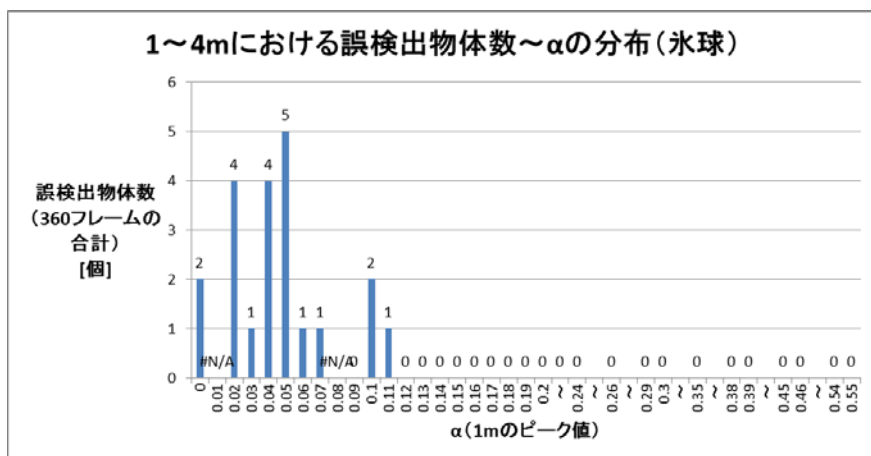
5.3.3.2.7 検証実験 7 : 雪の減衰係数

2 種類の降雪(樹枝状結晶、氷球)に対し、クラッタ特性検知エリア A1 を 0m～1m と設定し、減衰係数 α を求める。求め方は、A1 における全ての雪クラッタより求めた α のピーク値をフレーム用 α 値とする。抑圧フィルター適用エリア A2 を 1m～4 m(測定用専用降雪施設の最大距離)に設定し、フレーム用 α 値の抑圧効果を検証する。

図 5.3.3.2.7-1 に検証結果を示す。図において、横軸は求めたフレーム用 α 値、縦軸は抑圧出来なかった雪クラッタに引き起こした、つまり、誤検出物体数を示す。フレーム数は 360 である。また、1 フレーム当たりの平均クラッタ数は、樹枝状結晶の場合は 0.03 個で、氷球の場合は 0.06 個である。



(a) 雪形状：樹枝状結晶



(b) 雪形状：氷球

図 5.3.3.2.7-1 雪の検証結果

上図から分かるように、樹枝状結晶の場合は、求めた α の範囲は0～0.27である。氷球の場合は、求めた α の範囲は0～0.55である。 α が0になる場合もあるので、つまり、1m以下で雪クラッタを1つも検出できなかったことを意味する。樹枝状結晶より氷球の方がクラッタとして顕著である。

5.3.3.3 背景クラッタ抑圧方式のまとめ

試験施設内で取得した測定データに対し、雨クラッタと雪クラッタの抑圧方式を検証した。はじめに、試験施設内で取得した測定データに対し、雨クラッタと雪クラッタの基本特性を把握するため、平均空間密度、平均反射電力、距離減衰係数の特性を解析した。結果として、何れも距離の増大に伴い影響が減少するが、減少の傾きが降雨・降雪状況(降雨強度や雪形状)に依存することを確認された。

また、抑圧方式の検証結果として、降雨・降雪の状況に応じて減衰係数をリアルタイムに算出し、適応的にクラッタを抑圧する方式の有効性が確認された。つまり、最適な減衰係数を算出する際には、降雨・降雪時の距離減衰特性にくわえて、雨・雪クラッタのランダムな変更特性も考慮すべき点が改めて明確になった。

なお、開発した抑圧方式はフレーム単位で実行できるため、レーダー測定データの更新周期である 100ms 以下でのリアルタイム処理が実現可能である。

以上の検証結果を踏まえ、下記では今後の技術開発の方向性について論じる。

定量評価のためは専用施設の利用が不可欠であるが、実際の降雨・降雪環境での検証も必要である。例えば、専用施設では雨滴のサイズや分布を含む降雨パターン数が限定される。さらに、実際の降雨環境はより複雑なはずであり、例えば風によるクラッタ特性の変化や水溜りによる路面反射特性の変化も想定される。また、地域によっては降雨や降雪が、長期間で断続するような環境も存在する。そのため、降雨・降雪に対するレーダーの測定データもより長い時間の蓄積が求められる。つまり、実環境に則したデータ蓄積とその統計解析は、雨・雪クラッタの特性把握の前提であり、且つレーダー検知性能の検証にも有用である。

【参考文献】

- [1] <https://www.pref.yamanashi.jp/kougyo-gjt/>
- [2] <http://www.bosai.go.jp/>
- [3] <http://www.ott.com/>
- [4] Gunn, R. and G. D. Kinzer, The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, J. Mefeor., 6、 243-248, 1949.
- [5] <http://www.jma.go.jp/>
- [6] 中村, 岩澤, 川崎 “雪による 90GHz 帯ミリ波の減衰特性” 2016 年信学総大, B-1-191, 2016.

5.4. 技術課題エ) 路車連携技術の開発

5.4.1. 取り組み内容

本節では、インフラレーダーによる車両検知機能を応用して、高速道路合流路における、本線車列へのスムーズな合流支援機能を実現するアプリケーションをターゲットに実施した路車連携機能の検証実験について述べる。

5.4.2. エ)ー① ダイナミックマップ連携の実証実験

5.4.2.1. データフォーマットの設計検証

インフラレーダーによる車両検知機能が求められるシーンのひとつに、高速道路合流路における、本線車列へのスムーズな合流支援シーンが想定される。具体的には、高速道路のインターチェンジやパーキングから、高速道に侵入しようとする合流車両に対して、インフラレーダーにより、高速道路本線を走行する車両の存在情報を通知することで、合流路を走行中の合流車両側に合流時の注意喚起を促したり、合流のタイミング判断を助けたりすることが可能である。また、インフラレーダーからの車両検知情報の活用と共に、現在研究開発中の車車間通信機能を介することで、合流路の合流車両と本線走行中の車両とがコミュニケーションし、互いの運転手に負担の無い形で、合流路からの車両合流を実現させることも検討されている。本節では、ここで述べた高速道路本線への合流車両支援を目的とした路車連携機能の検証実験に向けて検討したインフラレーダー機能や路車間通信における独自のデータフォーマットの内容、検証実験等について述べる。

5.4.2.1.1 インフラレーダーに対する要求機能

前述の路車連携機能の検証実験に向けて、インフラレーダーに求められた要求機能について、表 5.4.2.1.1-1 に示す。表に示したように、インフラレーダーには、高速道路本線や合流路にて車両を検出し、車両の距離、車線、速度の情報の通知が求められる。

表 5.4.2.1.1-1 路車連携機能の検証実験に向けて
インフラレーダーに求められる要求機能一覧

	要求機能
1	インフラレーダーの設置情報とインフラレーダーで検出した車両の車両情報、車群情報、検出時刻情報を通信端末を通じて車両に送信する。
2	設置情報はあらかじめ個別に付与したインフラレーダーの固有 ID をもって設置情報とする。
3	車両情報には下記の情報が含まれる。 －距離(あらかじめ決められた基準から検出車両までの距離) －車線 －車速
4	車群情報に下記の情報が含まれる。 －車線別の車両密度 －車線別の車両平均速度
5	検出時刻情報は、インフラレーダーが車両を検出した時刻情報とする。

5.4.2.1.2 要求機能の実現方式

前節で説明した、路車連携機能の検証実験に向けて、インフラレーダーに求められる機能を実現するための機器構成と情報生成方式について述べる。

まず、機器構成について、図 5.4.2.1.2-1 に示す。今回の路車連携の検証実験では、インフラレーダーデバイスを高速道路本線や合流路側面に見立てた車線横に設置し、そのインフラレーダーデバイスに接続されたパソコンにより、検出処理や通信情報生成を行い、パソコンに USB 端子で接続された路車間通信端末を通じて生成した情報を外部に通信する。今回の路車連携機能の検証実験において、インフラレーダーデバイスに接続された路車間通信端末は、途中中継機器等で処理されることなく、端末独自のプロトコルを用いて、直接車側の路車間通信端末に車両検出情報をブロードに送信する。通信周波数帯は 760MHz である。



図 5.4.2.1.2-1 路車連携機能の検証実験に向けてのインフラレーダー機器構成

また、インフラレーダーとして以下の動作仕様を決め、今回の路車連携機能の検証実験を実施した。

- ・ インフラレーダーは任意のタイミングで検出情報を送出する。
(今実験の路車間通信において、インフラレーダーは車両への情報送信のみ)
- ・ インフラレーダーは検出車両が存在しない場合も検出情報を 100msec に 1 回送信する。
- ・ 1 インフラレーダーの車両検出エリアは、車線上の距離区間 60m 分の範囲とする。
(今実験では 120m 区間を 2 台のインフラレーダーでカバーした)
- ・ 車両検出対象の走行レーンは直進レーンとする。

次に、上記条件のもとで、インフラレーダーによる車両情報(車線、距離、速度)の生成方式について説明する。

まず、生成する車両情報の定義について図 5.4.2.1.2-2 を用いて説明する。

車両の距離は、図のレーダー検出車線距離に基準点からの距離を加えた情報とする。レーダー検出車線距離とは、車両の正面位置から、車道に沿って、図のインフラレーダー設置線までの距離とする。インフラレーダー設置線とは、インフラレーダー設置点から、車道に向かって垂直に交わる線とする。基準点からの距離とは、あらかじめ車道上に決められた基準点から、インフラレーダー設置線までの距離とする。また、車両の速度は、車道方向の速度とし、図のようにインフラレーダーで得られたドップラー速度より求める。車線の情報は、車両が走行する車線の情報をあらかじめ決められた ID であらわしたものとする。

これらの情報を算出するに当たって、インフラレーダー設置時に、図 5.4.2.1.2-3 に示すように、インフラレーダー側の車道の境界線にリフレクタを複数置いて、インフラレーダー側の車道境界線の座標を既知にし、また、車線の幅についても、測定することを前提とする。

次に、車線の推定方法について、図 5.4.2.1.2-4 と、図 5.4.2.1.2-5 にて説明する。今回の実験環境においては 3 車線を用いて検証したので、本説明においても 3 車線を前提として説明する。図 5.4.2.1.2-4 に示すように、検出された車両の検出点と、インフラレーダー側の車道境界線との距離を DA、インフラレーダーとは逆側の車道境界線との距離を DB、また、レーン 1、2、3 の幅をそれぞれ d1、d2、d3 とする。このとき、車線推定処理は、図 5.4.2.1.2-5 のシーケンスで説明の通り、各距離を比較することで検出点が含まれる車線の領域が求められる。

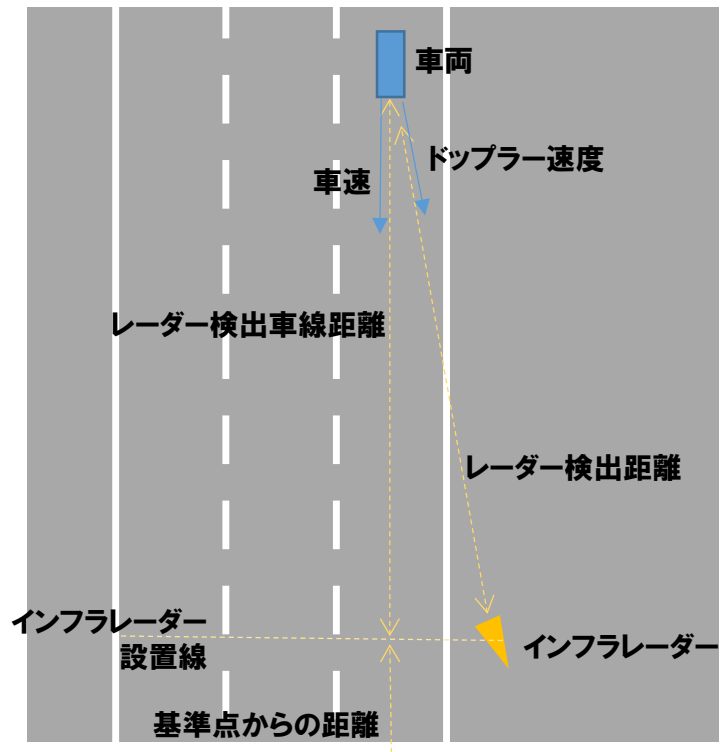


図 5.4.2.1.2-2 インフラレーダーで生成する車両情報の定義

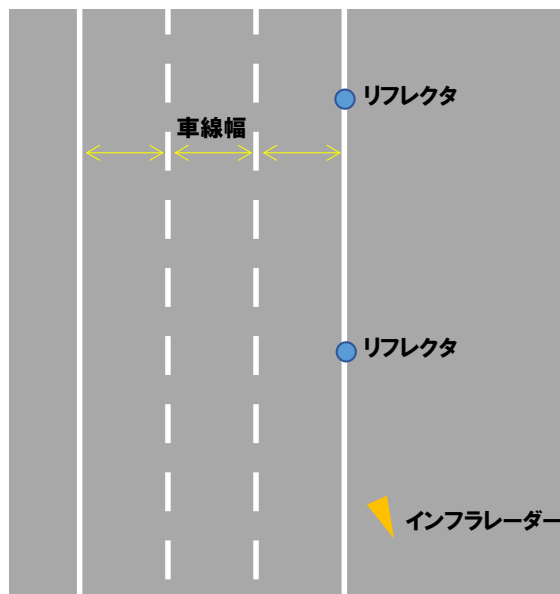


図 5.4.2.1.2-3 インフラレーダー設置時に取得する事前情報



図 5.4.2.1.2-4 路車連携機能の検証実験に向けたインフラレーダーの車線判定処理説明補足図

車線判定処理シーケンス

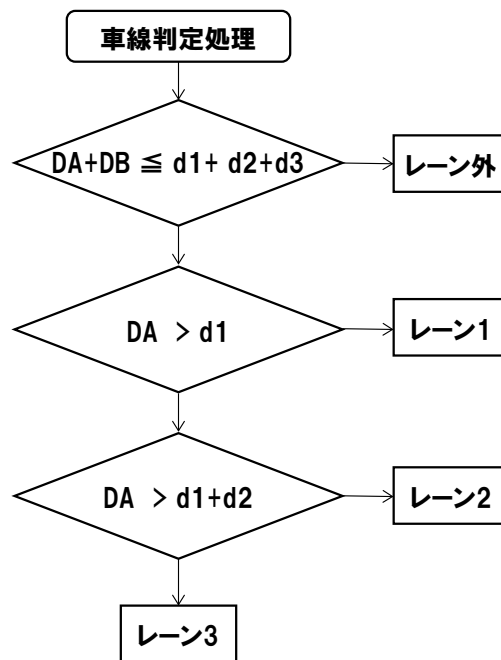


図 5.4.2.1.2-5 路車連携機能の検証実験に向けたインフラレーダーの車線判定処理シーケンス

次に、車両の距離の算出方法について説明する。図 5.4.2.1.2-6 に示すように、レーダー検出車線距離は、車線を中心を通る直線上に沿って算出する。詳細には、図示の通り、検出点を通して車道に垂直な直線と、車線を中心の直線の交点である、検出点'と、インフラレーダー設置線と車線を中心の直線の交点である、車線距離測定点との距離により算出する。算出したレーダー検出車線距離は、前述の通り、基準点との距離を加算して、車両の距離とする。

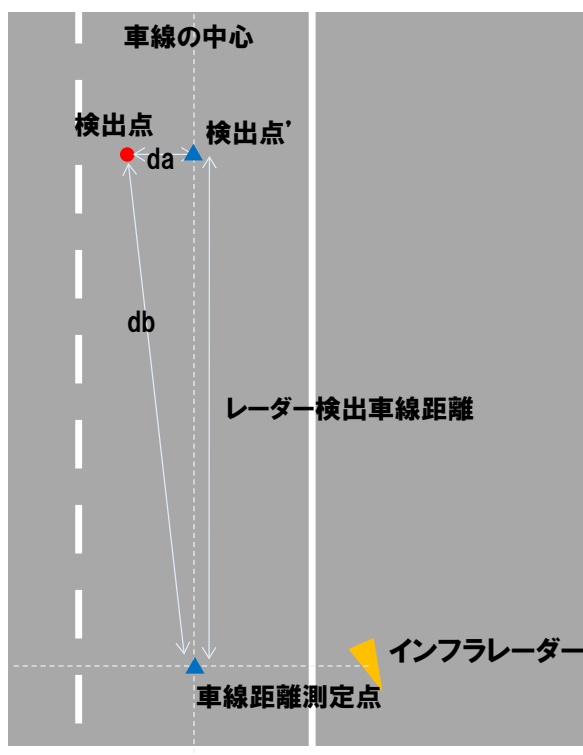


図 5.4.2.1.2-6 路車連携機能の検証実験に向けたインフラレーダーのレーダー検出車線距離説明図

次に、車両の速度の算出について説明する。図 5.4.2.1.2-7 に車両の速度算出説明の補足図を示す。車両の速度は、インフラレーダーで取得した検出点のドップラー速度を車道方向に射影した値を算出して求める。今回の実装方式では、インフラレーダーで測定した検出点距離(図の d_{vd})をそのまま活用できるように、図の d_{vl} の長さを求めて、 d_{vd} と d_{vl} の比から、ドップラー速度 vd より車両の速度 vl を算出している。

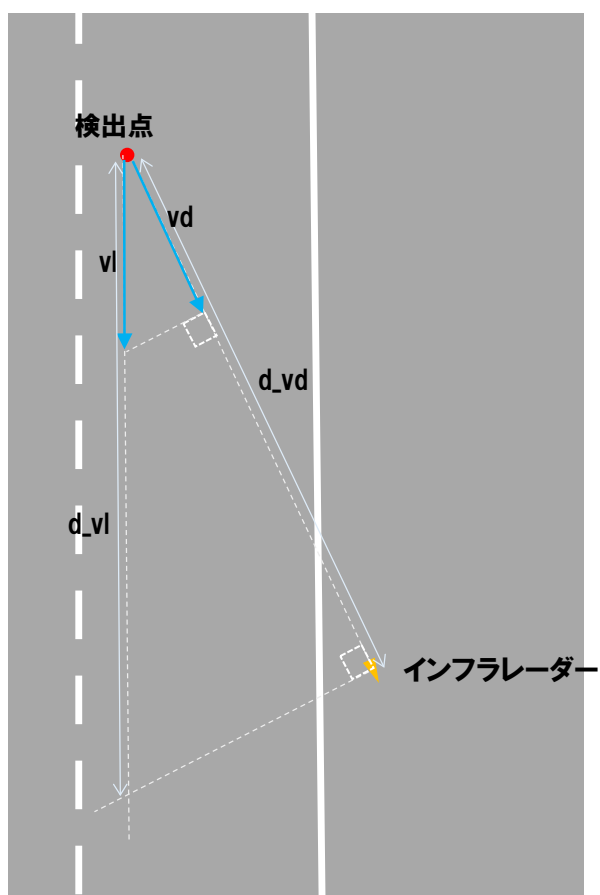


図 5.4.2.1.2-7 路車連携機能の検証実験に向けたインフラレーダーによる
車両速度算出説明補足図

また、車群情報については、上述の車両情報を用いて、設置されたインフラレーダーごとに、設置されたインフラレーダーの検出範囲内の情報として、車線別の車両密度(台数 / km)、車線別の車両平均速度(m/s)を算出する。

5.4.2.1.3 方式の基礎評価

前節で述べた車両情報の算出方式について、社内の直線路を用いて基礎評価を実施した。基礎評価の実施環境には、約 100 m の直線路が 4 車線存在し、その直線路の端の車線の、おおよそ 20 m 程度の地点にインフラレーダーを仮設置して方式評価を行った。

評価は、道路長で 70 m の走行路を決め、各車線を順に、あらかじめ決めた低速度 (20 km/h) で車両を移動させ、インフラレーダーで検出する。検出したデータから、車両情報を算出し、車線、距離、速度を求め評価した。

図 5.4.2.1.3-1(a) に車線 1 を車両が走行した際に、インフラレーダーの検出情報をもとに判定した車線情報とレーダー検出車線距離について示す。また、図 5.4.2.1.3-1 (b) にインフラレーダーによる検出状況のスナップショットを示す。図 5.4.2.1.3-1 (a) に示すように、途中、未検出フレームが発生しているが、検出されたフレームにおいて車線は正しく判定されていることが確認できる。また、図 5.4.2.1.3-1(b) に示すように、車道上の正しい距離が分かるようにあらかじめ決めた車道上の距離にコーンを立てた。インフラレーダーによる検出状況のスナップショットからコーンの側面を車両が通過するフレームを特定し、そのフレームのレーダー検出車線距離とコーンを置いた車道上の正しい距離とを比較して、レーダー検出車線距離を評価し、概ね正しい距離が算出されていることを確認した。後述の、他の車線を車両通過させた場合の評価においても同様な手段で算出距離の評価を行い、正しい距離が算出されていることを確認した。

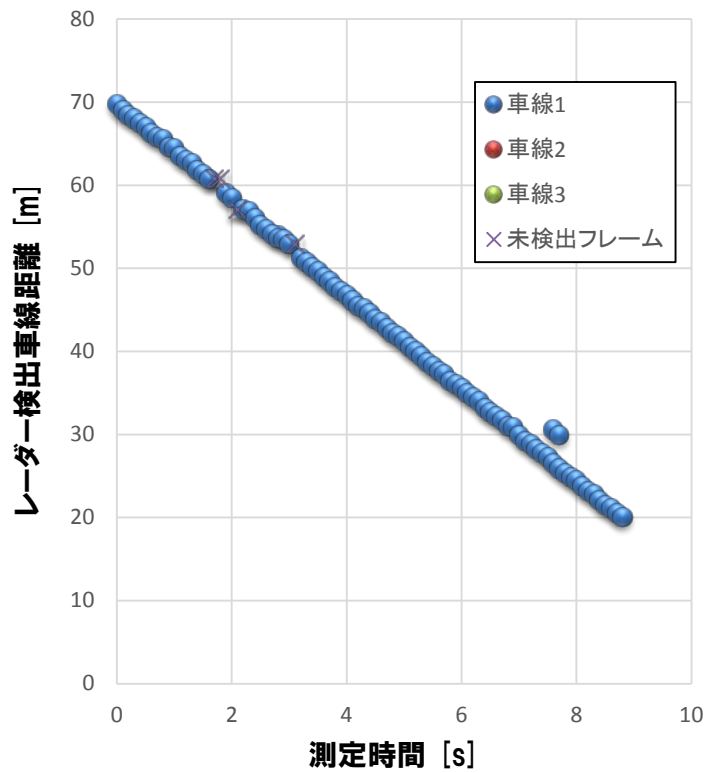
また、車線 2 を車両が走行した際のインフラレーダーの検出情報をもとに判定した車線情報とレーダー検出車線距離について、図 5.4.2.1.3-2(a) に示す。また、インフラレーダーによる検出状況のスナップショットを図 5.4.2.1.3-2 (b) に示す。レーダー検出車線距離に 60m 遠方の位置にて、若干車線の誤判定が生じているが、概ね正しく、実際に走行した車線 2 を判定できている。

さらに、インフラレーダー設置地点から遠い側の車線 3 を、車両が走行した際のインフラレーダーの検出情報をもとに判定した車線情報とレーダー検出車線距離について、図 5.4.2.1.3-3(a)に示す。また、インフラレーダーによる検出状況のスナップショットを図 5.4.2.1.3-3 (b)に示す。レーダー検出車線距離がおおよそ 30m の位置にて、インフラレーダーに近い側の車線 2 に間違っ判定しているフレームが数フレーム発生しているのが確認できる。インフラレーダーで検出した車両の検出枠の代表点を用いて車線を判定しているが、代表点が車両側面になった場合に、その側面側の車線に車線判定する場合が見受けられる。今回、車線 2 に誤判定されているフレームは、その点が原因であり、より正しい車線判定を行うためには、車線判定処理に検出点を入力する前に、検出点を車両の中心位置に補正する処理が必要と考えられる。

以上の車線判定結果の詳細を、表 5.4.2.1.3-1 から表 5.4.2.1.3-4 に示す。本判定結果は、未判定フレームを除いた検出フレーム数に対する正しく車線を判定したフレーム数と、その割合を示している。また、同フレームに複数の検出点が発生している場合は、レーダーに近い距離側の検出点の車線判定結果をもとに評価した。表 5.4.2.1.3-4 に示すとおり、全車線における車線判定結果は正判定率 95%であり、今回の路車連携機能の検証実験に向けては十分な判定率であると判断した。

また、車両の速度算出結果を図 5.4.2.1.3-4 に示す。比較する車両走行時の速度データは無いが、ドライバーにおおよそ 20 km/h の一定速度で走行するよう指示した走行時の結果であり、算出した車両の速度に大きく逸脱した値は生じておらず、路車連携機能の検証実験に向けて問題ないことが確認された。

(a) 車線判定処理結果



(b) レーダー検出概要

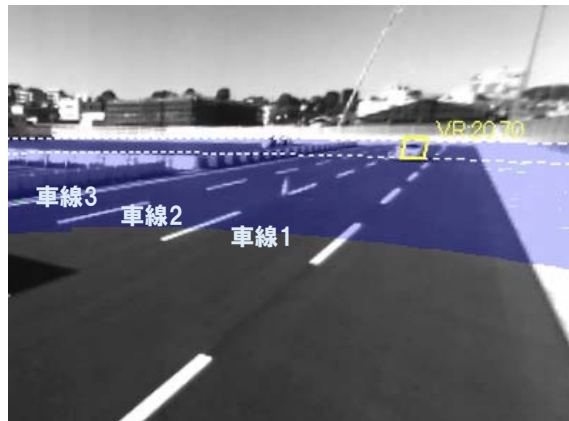


図 5.4.2.1.3-1 (a)車線 1 を走行時の車線判定結果と(b)インフラレーダーによる
検出状況スナップショット(カメラ画像との重畳)

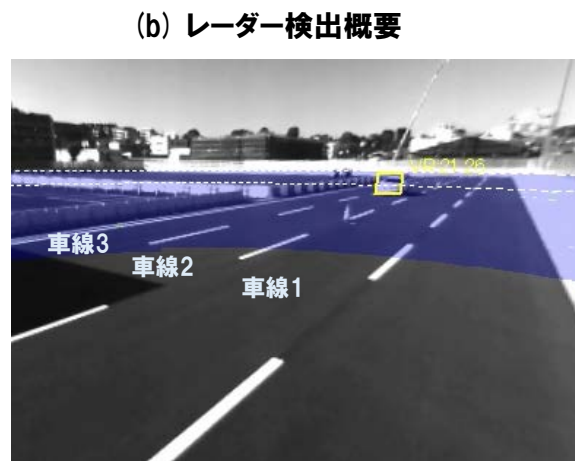
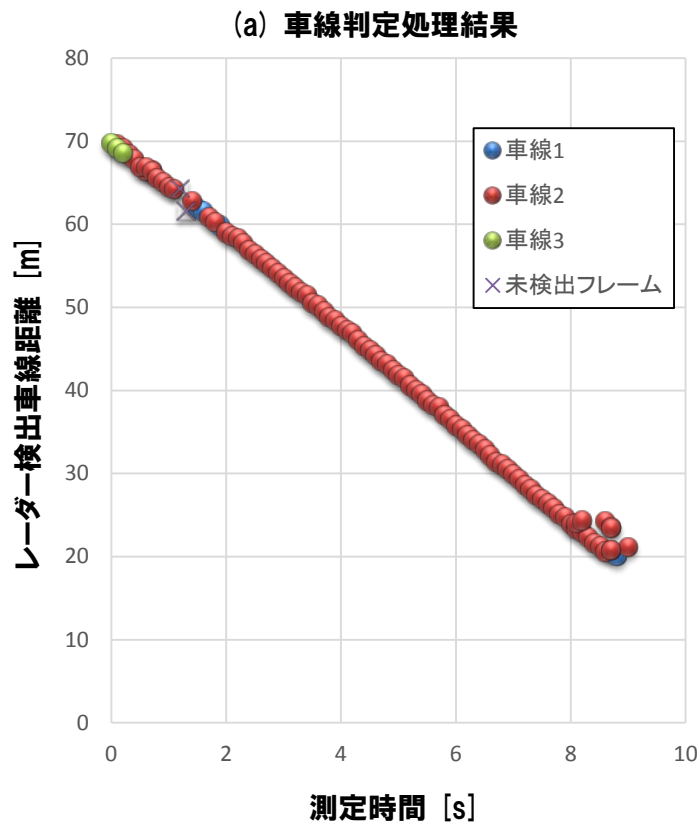
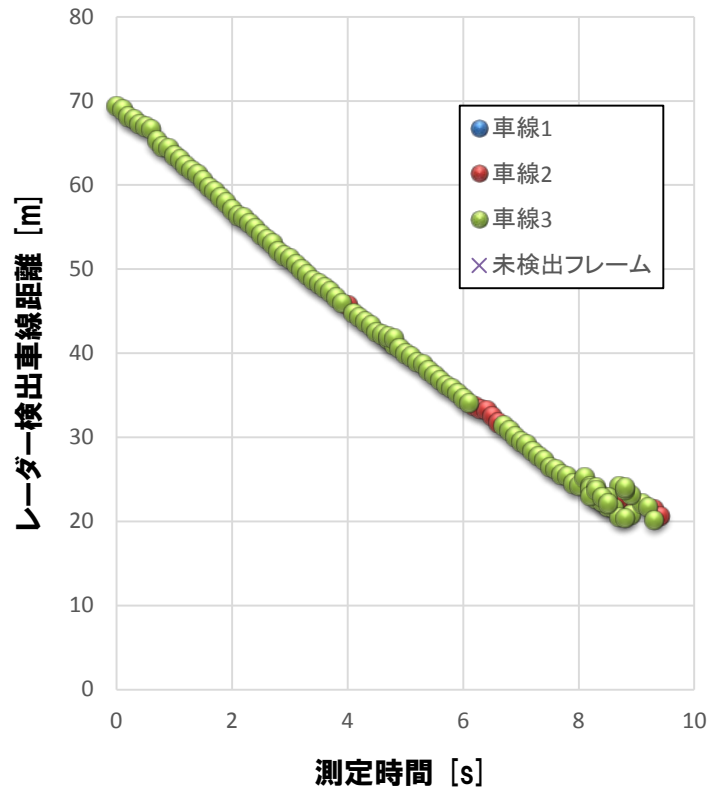


図 5.4.2.1.3-2 (a)車線 2 を走行時の車線判定結果と(b)インフラレーダーによる
検出状況スナップショット(カメラ画像との重畳)

(a) 車線判定処理結果



(b) レーダー検出概要

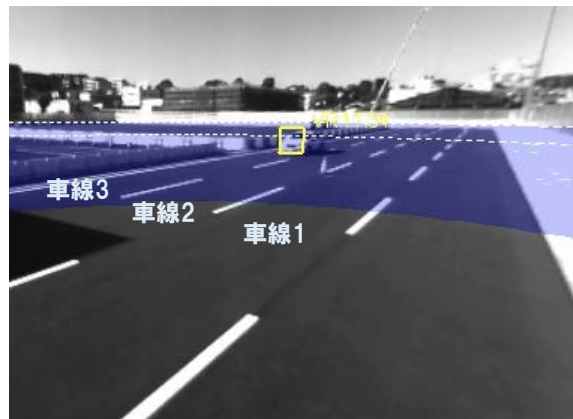


図 5.4.2.1.3-3 (a)車線 3 を走行時の車線判定結果と(b)インフラレーダーによる
検出状況スナップショット(カメラ画像との重畳)

表 5.4.2.1.3-1 車線 1 を走行時の車線判定結果

レーダー検出車 線距離[m]	20～30	30～40	40～50	50～60	60～70	合計
フレーム数	19	18	17	14	17	85
正判定数	19	18	17	14	17	85
					正判定率	100 %

表 5.4.2.1.3-2 車線 2 を走行時の車線判定結果

レーダー検出車 線距離[m]	20～30	30～40	40～50	50～60	60～70	合計
フレーム数	20	16	17	18	17	88
正判定数	19	16	17	17	13	82
					正判定率	93%

表 5.4.2.1.3-3 車線 3 を走行時の車線判定結果

レーダー検出車 線距離[m]	20～30	30～40	40～50	50～60	60～70	合計
フレーム数	24	20	18	16	16	87
正判定数	23	15	17	16	16	94
					正判定率	92 %

表 5.4.2.1.3-4 直線路における基礎実験の車線判定結果まとめ

全車線	
フレーム数	267
正判定数	254
正判定率	95 %

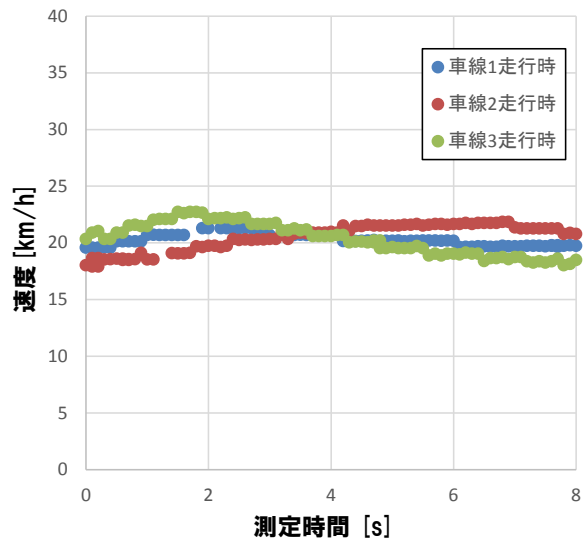


図 5.4.2.1.3-4 直線路における基礎実験の速度算出結果

5.4.2.1.4 通知データフォーマット

表 5.4.2.1.4-1 に、今回の路車連携機能の検証実験で使用した、インフラレーダーが出力する通知情報のデータフォーマットの抜粋を示す。

インフラレーダーが出力する情報には、前述の通り、時刻情報／車群情報／車両情報と、メッセージ ID などをあらかず、基本情報が格納される。

表 5.4.2.1.4-1 路車連携機能の検証実験における
インフラレーダー出力情報データ抜粋

データグループ	要素	概要
基本情報	メッセージ ID	インフラレーダーからの送出情報であることを表す。
	インフラレーダーID	設置したインフラレーダー識別番号を格納する。
時刻情報	時刻情報	ミリ波レーダーの検出時刻をミリ秒単位で格納する。
車群情報	情報数	車線ごとに定義した車群情報の情報数
	車線 ID	この車群情報の車線 ID
	平均速度	車群の平均速度
	平均密度	車群の密度
車両検知情報	情報数	検知した車両数
	車線 ID	検知車両が存在する車線 ID
	車両位置	基準位置から検知車両までの距離
	車両速度	検知車両の速度

5.4.2.1.5 路車連携機能の検証実験

路車連携機能の検証実験を実施した実験環境について、図 5.4.2.1.5-1 に示す。図 5.4.2.1.5-1 は、日本自動車研究所 城里テストコースの高速周回路の一部である。図示の通り、高速道路の本線を模擬した高速周回路の車線に対し、高速道路の合流車線を模擬した車線を設定して、本線に合流する実験コースを環境構築した。合流地点が基準地点(距離 0 m)となる。車両側の合流機能検証に必要な、走行車両の検知領域として、図に水色で色付けした距離(本線側 : 0 m から 120 m、合流側 : 70 m から 130 m)が指定され、当該領域の車両検知のため、3 台のインフラレーダーシステムを設置した。3 台それぞれのインフラレーダーシステムにおいて、前述の図 5.4.2.1.2-1 で示した機器が構成されており、それぞれのインフラレーダーシステムが独立して検出車両の車両情報を車両側に送信する。

また、求められた検出範囲を満たすインフラレーダーの設置高さ、俯角を決めるため、事前に机上検討し、設置高 4m、設置俯角 7° を基準に 3 台のインフラレーダーを設置した。机上検証で確認した車両の検出範囲をあらわした図を、図 5.4.2.1.5-2 に示す。図は、横軸に距離をとり、縦軸に、我々の試作インフラレーダーによる車両からの反射レベルの SN 比を表しており、設置高 4m、俯角 7° の場合の曲線になる。SN 比 10dB 以上の距離において安定した検出が可能であると判断しており、この机上計算の結果では、1 台のインフラレーダーシステムで、15m から約 80m までの、65m 区間において車両の検出が可能である。この想定をもとに、求められる検出範囲の開始距離から 15m 程度後方に下げてインフラレーダーを設置した。設置したインフラレーダーの様子を図 5.4.2.1.5-3 に示す。

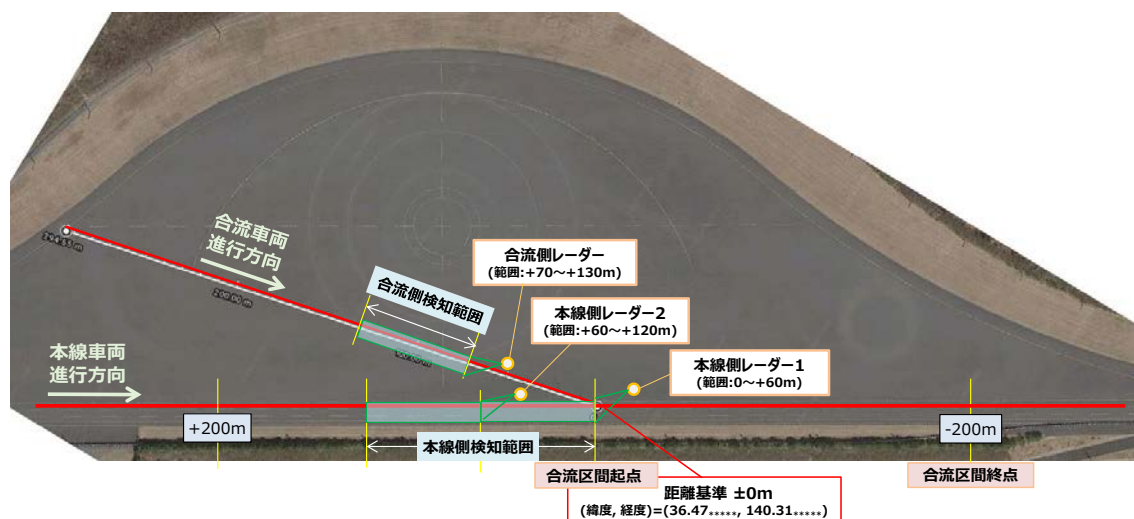


図 5.4.2.1.5-1 路車連携機能の検証実験実験環境
(日本自動車研究所城里テストコースの高速周回路の一部)

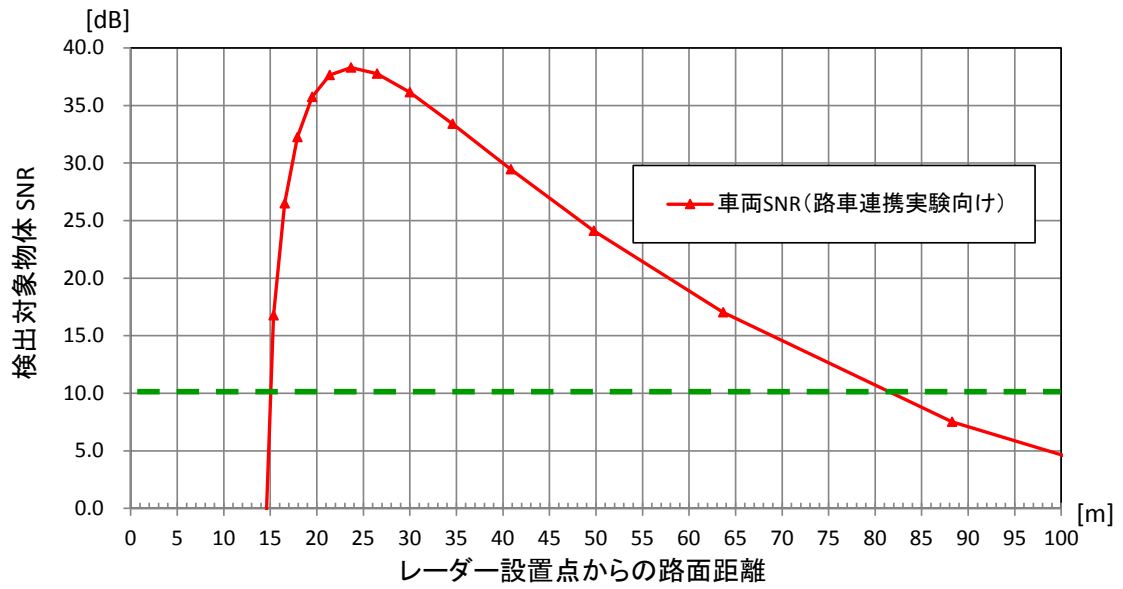


図 5.4.2.1.5-2 路車連携機能の検証実験実験環境に向けた
車両検出範囲の机上検証結果

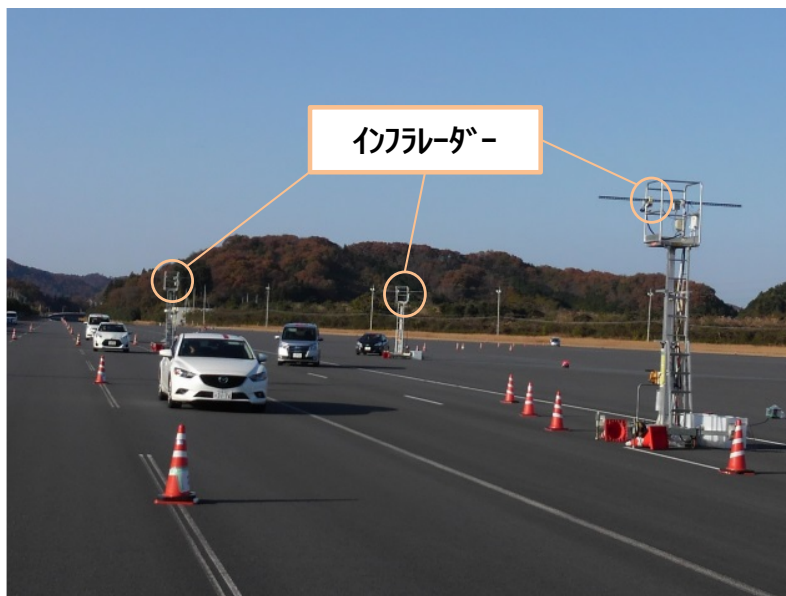


図 5.4.2.1.5-3 路車連携機能の検証実験実験にて設置した
インフラレーダーの外観

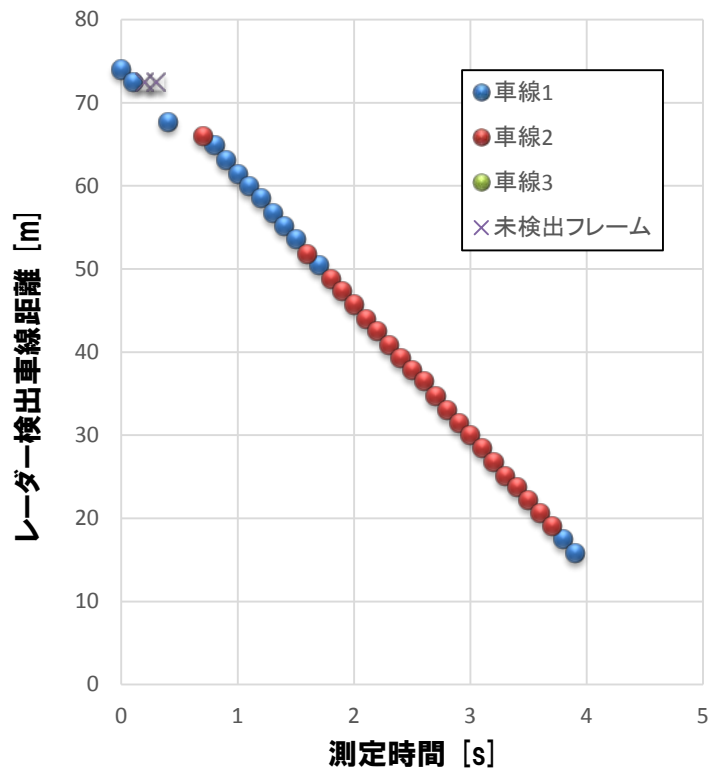
今回の路車連携機能の検証実験の環境で、実際に取得したデータについて、車線推定した結果を図 5.4.2.1.5-4 に示す。

図 5.4.2.1.5-4 は、1 台の車両の走行シーンであり、インフラレーダーによる検出対象領域区間において、途中車線 1 から車線 2 に車線変更を行っている。図の(a)に車線判定結果の時間経過を示す。また、図の(b)にインフラレーダーによる検出結果をカメラ画像に重畳したスナップショットを示す。前節の基礎評価の考察でも述べたが、車両がレーダーに近づいた際に、検出代表点が車両の側面の座標点に該当し、レーダー側の車線に誤判定されているフレームが存在するが、概ね、高速道本線の車両の走行車線を正しく判定できていると考える。

また、図 5.4.2.1.5-5 は、1 台の車両がおおよそ 120 km/h の高速でインフラレーダーの検出対象領域区間を通過した際の車線判定結果をあらわす。車両は図の(b)のインフラレーダーによる検出結果をカメラ画像に重畳したスナップショットに示すように、車線 1 を走行しインフラレーダー検出対象領域を車線変更せず通過した。図の(a)に車線判定結果の時間経過を示す。高速であっても、検出対象領域において未検出の発生無く正しく車線判定できていることが確認できる。

次に、図 5.4.2.1.5-6 は、合計 3 台の車両が同一の車線 1 を連続して通過した際の車線判定結果をあらわす。図の(a)に車線判定結果の時間経過を示し、図の(b)にインフラレーダーによる検出結果をカメラ画像に重畳したスナップショットを示す。図の(a)において、1 台目に通過する車両(時刻 0、距離 75m から時刻約 3.7、距離 15m への連続した検出点)については、想定どおりに検出結果、判定結果が出力されていることが確認できるが、2 台目に通過した車両(時刻 2.5、距離 57m から時刻 4.8、距離 23m への連続した検出点)については、検出開始距離が短い。これは 1 台目の車両によって 2 台目の車両が遮蔽されたことによる物と考えられる。具体的には、1 台目と 2 台目の車両は、概ね 20m ほどの車間距離で走行したが、1 台目が 40m、2 台目が 60m 程度の位置では、2 台目の車両のレーダー反射点(正面のフロントグリル/ナンバープレート付近)が 1 台目の車両に遮られ、レーダー反射が得られない状況である。また、3 台目の車両は 2 台目からさらに 50m ほど後方で走行したが、その場合、1 台目と同様に、距離 75m からインフラレーダーによる検出が確認できた。これらの結果から、今回の路車連携機能検証実験でのインフラレーダー設置状況においては、車間距離 50m 程度で走行している車両に関しては、インフラレーダーに要望されている距離区間の検出が可能であることが確認された。

(a) 車線判定処理結果



(b) レーダー検出概要

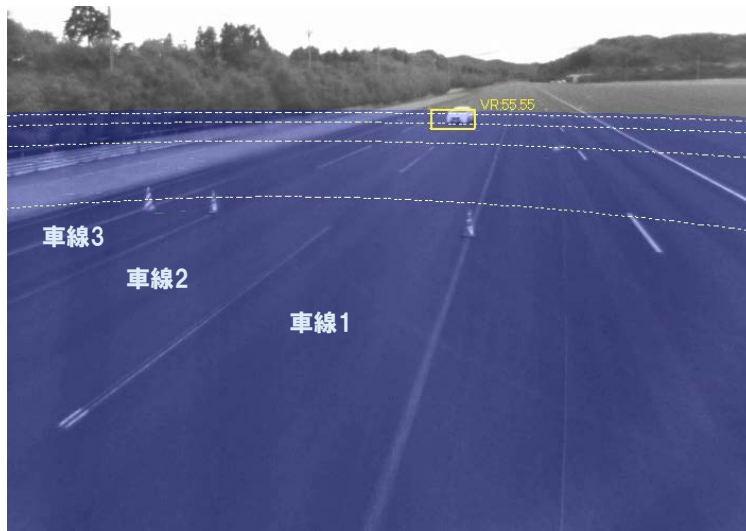
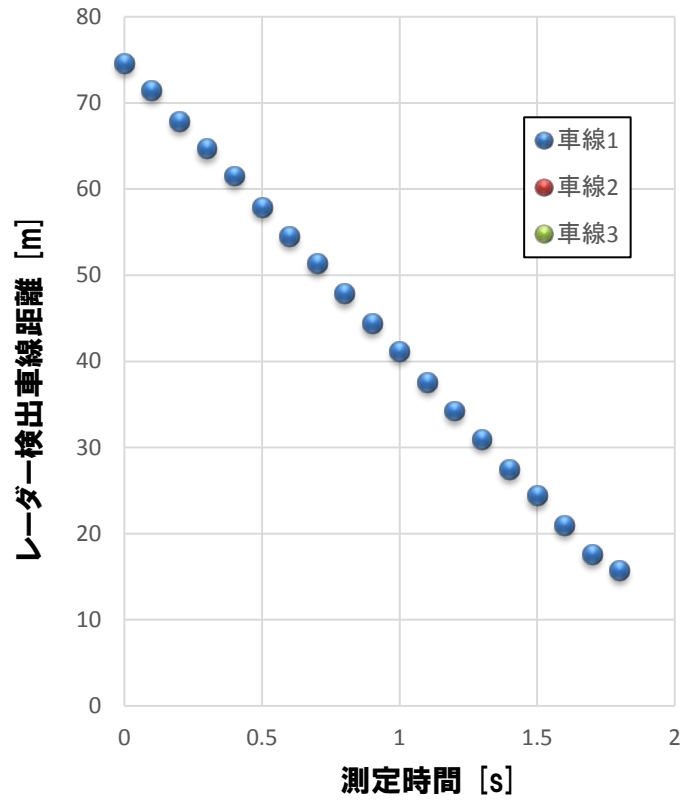


図 5.4.2.1.5-4 路車連携機能の検証実験にて取得したデータ例
(車両 1 台走行。車線 1 から車線 2 に車線変更。)

(a) 車線判定処理結果



(b) レーダー検出概要

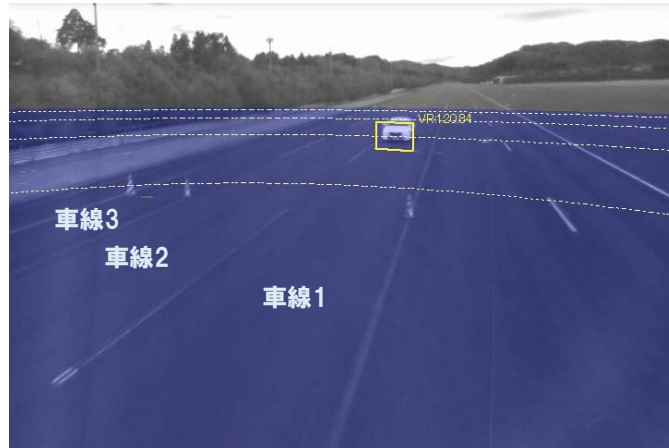
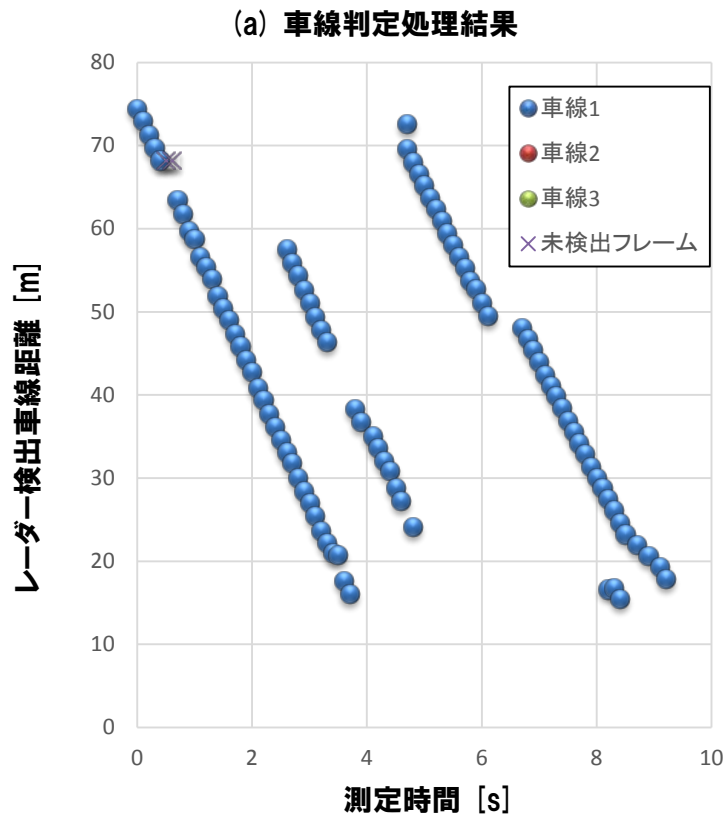


図 5.4.2.1.5-5 路車連携機能の検証実験にて取得したデータ例
(車両 1 台高速走行。車線 1 をおおよそ 120 km/h で走行)



(b) レーダー検出概要

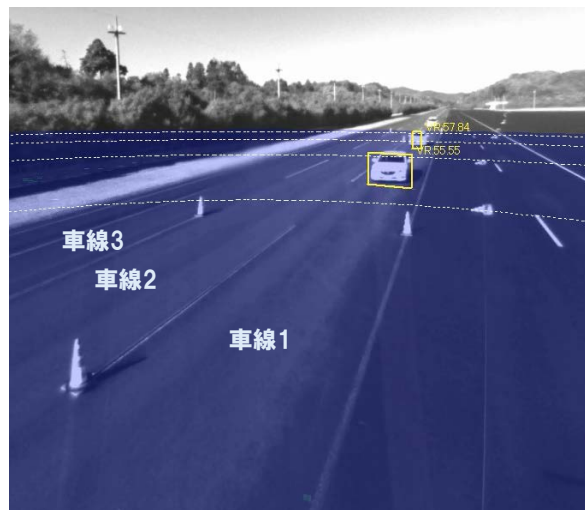
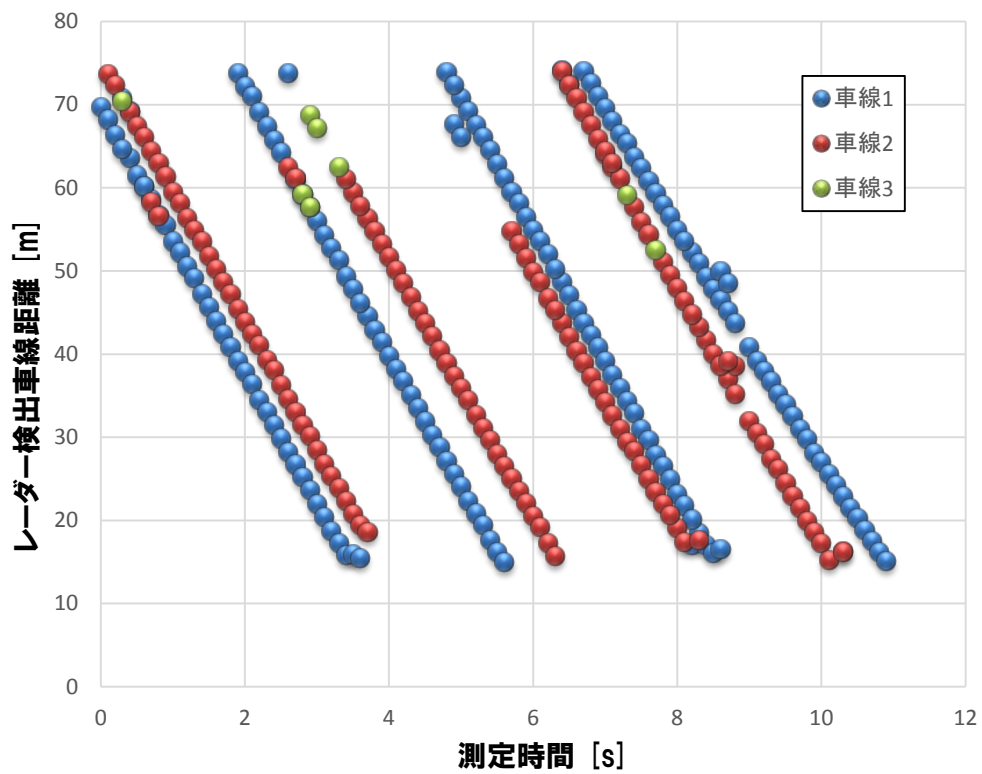


図 5.4.2.1.5-6 路車連携機能の検証実験にて取得したデータ例
(車線 1 を 3 台の車両が走行)

さらに、図 5.4.2.1.5-7 においては、2 台の車両が車線 1 と車線 2 を併走して走行したシーンについて、図の(a)に車線判定結果の時間経過を示し、図の(b)にインフラレーダーによる検出結果をカメラ画像に重畳したスナップショットを示す。2 台の車両の併走は、連続して合計 4 組走行しており、各組の前方の組との間隔はおおよそ 30m 程度の車間をあけて走行した。図(a)に示すように、各車線を走行した車両に対する車線推定の結果は、概ね正しく判定されていることが確認できる。そのうち、車線の推定結果が外側の車線(車線 1 が車線 2、車線 2 が車線 3)に誤推定されている理由は、隣接車線を併走している車両に反射して生じるマルチパスによる検出点の方位方向ずれが要因であると考えられる。また、前方車両との車間が 30m と短いため、前述と同様、遠方においては、前方走行車両によるオクルージョンのため未検出区間が発生していることが分かる。

(a) 車線判定処理結果



(b) レーダー検出概要

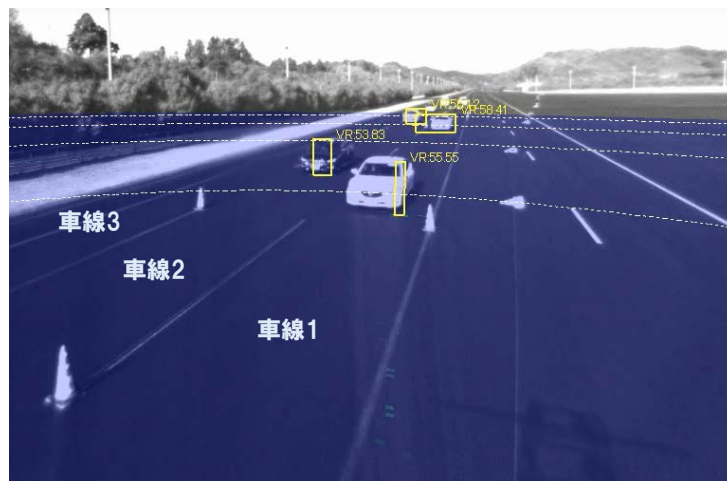


図 5.4.2.1.5-7 路車連携機能の検証実験にて取得したデータ例
(車線 1 と 2 を並列して走行)

参考として、図 5.4.2.1.5-8 に、インフラレーダーの車線推定等機能を有するアプリケーションの画面と、図 5.4.2.1.5-9 に、車両側の合流支援アプリケーションの画面を示す。図 5.4.2.1.5-8 のインフラレーダー側のアプリケーションは、前述の車両情報生成方式を実装し、車線判定結果などをリアルタイムで表示しながら、路車間通信機を通じて車両側に情報を送出手続きを有する。また、図 5.4.2.1.5-9 に示した車両側のアプリケーションは、自車の位置や走行速度と、インフラレーダーなどから取得した周辺車両の位置や走行速度などを取得し、それらの情報をもとにスムーズな合流を実現するための自車の車両の加減速を判定するアルゴリズムを有し、その判定結果をドライバーに伝える機能を備えている。

今回の路車連携機能の検証実験では、これらのアプリケーションの機能をリアルタイムで確認し、その結果、実験車両の無理の無い合流ができたことを確認した。

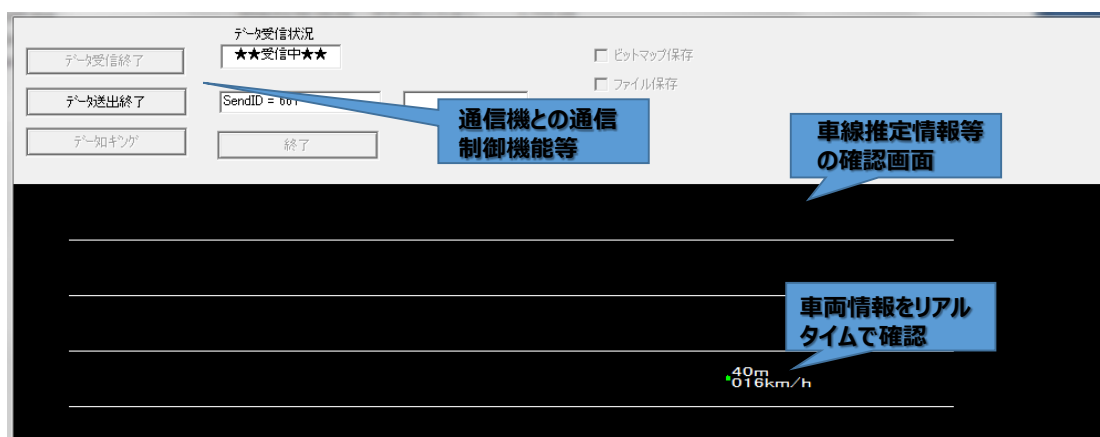


図 5.4.2.1.5-8 インフラレーダーの車線推定等機能を有するアプリケーションの画面例

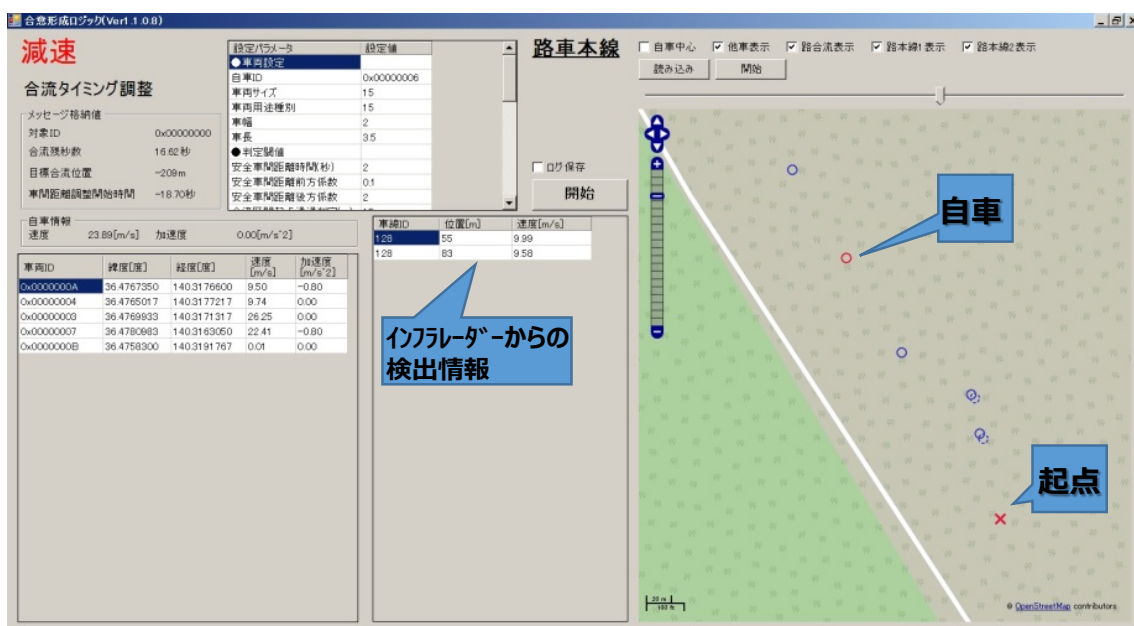


図 5.4.2.1.5-9 車両側の合流支援アプリケーションの画面例

5.4.2.1.6 データフォーマットの設計検証のまとめ

本節では、インフラレーダーによる車両検知機能を応用して、高速道路合流路における、本線車列へのスムーズな合流支援機能を実現するアプリケーションをターゲットに実施した路車連携機能の検証実験について述べた。

検証実験に向けては、インフラレーダーに求められた要求機能の実現方式の開発と、社内のテストコースにおける基礎評価を行って、事前検証し有効性を確認した。

また、日本自動車研究所 城里テストコースの高速周回路での路車連携機能の検証実験では、路車連携機能の目的である高速道路本線への合流支援の成功が確認された。さらに、インフラレーダーによる車両検知性能について、オクルージョンによる未検知や車線判定の誤り発生シーンの課題が抽出でき、今後のインフラレーダー応用機能拡大に向けての重要な知見が得られたことも大きな成果である。

6. 研究発表などの成果

研究成果指標としては、特許出願 6 件、口頭発表 12 件、報道発表 1 件(報道掲載 1 件)を達成することができた。

表 6-1 研究成果指標

年度 目標	H26 年度 実績	H27 年度 実績	H28 年度 実績	H29 年度 目標	H30 年度 目標	合計
特許取得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
特許出願数	1 件 (0 件)	7 件 (2 件)	6 件 (5 件)	2 件 (1 件)	1 件 (0 件)	17 件 (8 件)
査読付き誌上 発表論文数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (1 件)	2 件 (1 件)
査読付き口頭 発表論文数 (印刷物を含む)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	3 件 (3 件)	2 件 (1 件)	1 件 (0 件)	7 件 (5 件)
その他の誌上 発表数	0 件 (0 件)	4 件 (1 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	6 件 (1 件)
口頭発表数	2 件 (0 件)	5 件 (1 件)	9 件 (2 件)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)	20 件 (3 件)
報道発表数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	3 件 (3 件)

※ 括弧内は海外における取り組み分

表 6-2 口頭発表

No.	タイトル	発表先	発表者 (筆頭)	発表日
1	Pedestrian Recognition Using 79GHz Radars for Intersection Surveillance	第 13 回 EuRAD 2016	劉 偉傑	平成 28 年 10 月 7 日
2	Analysis of Radio Propagation for Automobile using Ray-tracing Techniques on 79GHz band	第 23 回 ITS 世界会議	林 俊光	平成 28 年 10 月 11 日
3	A Study of Pedestrian Recognition Method Using 79GHz-band Infrastructure Radar System	第 23 回 ITS 世界会議	笠原 稔弘	平成 28 年 10 月 11 日
4	ミリ波帯、テラヘルツ帯の無線 システムの動向と将来像	周波数資源開発 シンポジウム 2016	高橋 和晃	平成 28 年 7 月 15 日
5	SIP 総務省施策「ICT を活用 した次世代 ITS」の研究開発	自動車技術会 エレクトロニクス 部門委員会	中川 洋一	平成 27 年 9 月 2 日
6	インフラレーダーシステム 技術の開発	スマート IoT 推進 フォーラム合同 シンポジウム(出展)	中川 洋一	平成 28 年 9 月 27 日
7	ICT を活用した次世代 ITS の 確立「インフラレーダー システム技術の開発」	SIP シンポジウム 2016(出展)	中川 洋一	平成 28 年 10 月 4 日
8	Cooperative Intersection Safety -79GHz Infrastructure Radar-	第 23 回 ITS 世界会議 (出展)	林 俊光	平成 28 年 10 月 10 日 ~14 日
9	Infrastructure radar with V2I communication	SIP-adus Workshop 2016(出展)	中川 洋一	平成 28 年 11 月 15 日 ~17 日
10	協調型自動走行への適用を目 指す 79GHz インフラレーダー	MWE2016 ワークショップ	中川 洋一	平成 28 年 12 月 2 日

11	79GHz 帯を利用した高分解能 ミリ波レーダ技術の紹介	第 148 回電波利用 懇話会	中川 洋一	平成 29 年 3 月 3 日
12	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」	中川 洋一	平成 29 年 3 月 15 日

7. アウトカム目標に向けた取り組み

7.1. 実用化の取り組み

<年次目標>

コスト面での条件を精査していくためには、路車協調型インフラレーダーシステムの事業化と並行し、コスト競争力を確保するためのアプローチとなるレーダーセンサーの拡販を目指した取り組みが必要となる。この課題に対して、コアデバイス仕様の共通化を実現することで開発効率を高めつつ、応用展開に係わるアプリケーション開発ではレーダーシステムとしての外部仕様を早期に具体化していくことで、開発技術の利活用促進につなげていくことを目指す。

また、既に導入が進む監視カメラとの組合せによる様々なシーンでの交通流計測や侵入者検知といった汎用性の高い機能としても随時実証していくことで、道路分野はもとより、鉄道等の他の分野における事業展開を実現する。

<実施状況>

自動車メーカーをはじめ関連機関との連携活動としては、SIP 自動走行システム推進委員会傘下のシステム実用化WG及びSIP・総務省関係者自動走行研究会の場において、実用化の加速に向けた課題検討に取り組んでいる。特に、高速道路の合流支援を優先すべき実用シーンに定めたことで、自動車工業会等との議論が具体化されはじめている。特に、平成 28 年 10 月に開催された推進委員会の場では、成果報告の位置付けで 79GHz 帯レーダーの試作機を用いた実機のプレゼンテーションを行う機会も得た。

くわえて、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も継続して推進している。特に道路会社や鉄道会社に対して、耐環境性能に優れて高精度な歩行者検知を可能とする新規センサーとしての提案を強化している。また、歩行者保護の観点に加えて、高速道路における逆走検知や線路空間における異物検知といったインフラの監視や点検を支援する用途としても複数の照会を受けており、光学系の画像処理技術との組合せによる提案も行っている。

7.2. 標準化活動／普及啓発活動

<年次目標>

日本のみならず新興国等における交通事故削減に向けたインフラシステム整備を促進するため、国内外における 79GHz レーダー電波法関連の制度化に寄与していくとともに、主に海外に向けた本研究開発成果の発信と普及啓発活動を継続して推進する。

これまでは、WRC-15 に向けて、79GHz 帯(4GHz 帯域幅)のレーダー用途への国際分配を担保する活動に注力してきた。今後は、特にインフラレーダーと車載レーダーの共存を裏付ける技術情報提供や技術基準策定を推進して、インフラシステムとして国内のみならず海外における事業化の取組みを加速する。また、WRC-15 の結論に基づいて、79GHz 帯高分解能レーダーの ARIB 標準規格の改定や ITS に関連する ITU-R 会合への対応に際しては、技術的な支援活動を継続する。

<実施状況>

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 28 年度は、76-81GHz のレーダー周波数帯と隣接する固定通信との干渉検討に関する ITU-R レポートの作成に関して、日本寄書の取りまとめと国内事前審議及び ITU-R WP5C 会合審議への参加対応を行っており、本レポートは完成の見通しを得ている。

また、平成 28 年 10 月に開催された第 23 回 ITS 世界会議メルボルン及び SIP シンポジウム 2016 において、79GHz インフラレーダーの特長を業界関係者へ訴求するためのブース展示を実施した。さらに、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プレスリリースを実施して、広く一般への普及啓発活動にも取り組んでいる(図 8 参照)。

7.3. 研究開発運営委員会

<年次目標>

本研究開発の全期間を通じた効率的な推進のためには、急激な変化が見込まれる市場環境や、諸外国の動向に対応した国際競争力分析等の広範な知見・見識を有する専門化や有識者からの助言は不可欠である。よって、本研究開発では、学識経験者、有識者が参画する研究開発運営委員会を設置する。

平成 28 年度において 3 回の研究開発運営委員会を開催する。第 1 回は研究開発計画、達成目標に関して評価、助言をいただくとともに研究開発の進捗状況の共有と方向性の確認を行い、第 2 回、第 3 回は研究開発成果の妥当性および平成 29 年度以降の研究開発計画、達成目標について評価、助言いただく。

<実施状況>

平成 27 年度に引き続き、交通制御工学の専門家である東京大学生産技術研究所教授の大口敬氏を委員長として、ヒューマンインターフェースの専門家である慶應義塾大学工学部管理工学科教授の大門樹氏、およびレーダー分野の信号処理の専門家である京都大学大学院情報学研究科教授の佐藤亨氏を委員とする研究開発運営委員会を設置した。なお、平成 28 年度の第 1 回運営委員会を 8 月 24 日に開催しており、第 2 回は 12 月 14 日に第 3 回は 2 月 7 日にそれぞれ開催された。

本運営委員会は、激しい降雨時等の実使用条件におけるシステム性能限界に対して産学官の共通認識を得る有効な取り組みとなっている。また、自動走行に関連する最新の業界動向や国際標準化動向の情報交換にも活用されており、今後の活動指針に対する示唆に富んだ場となっている。