

「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 27 年度 研究開発成果報告書

平成 28 年 3 月

パナソニックシステムネットワークス株式会社

目次

1. はじめに	p. 3
2. 研究開発目標	p. 4
3. 研究開発体制	p. 7
4. 研究成果の要約	p. 8
4.1. 年次目標	p. 8
4.2. 成果概要	p. 10
5. 研究成果	p. 19
5.1. 技術課題ア)レーダー検出信頼性向上技術の開発	p. 19
5.1.1. 取り組み内容	p. 19
5.1.2. ア)- ① 識別信号処理技術の開発	p. 19
5.2. 技術課題イ)レーダー間干渉低減技術の開発	p. 89
5.2.1. 取り組み内容	p. 89
5.2.2. イ)- ① 耐干渉性能の実証実験	p. 89
5.3. 技術課題ウ)耐環境性能補償技術の開発	p. 139
5.3.1. 取り組み内容	p. 139
5.3.2. ウ)- ① 耐環境性能の実証実験	p. 139
5.3.3. ウ)- ② 検出性能補償技術の開発	p. 177
6. 研究発表などの成果	p. 194
7. アウトカム目標に向けた取り組み	p. 196
7.1. 標準化活動	p. 196
7.2. 実用化の取り組み	p. 198
7.3. 研究開発運営委員会	p. 199

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。

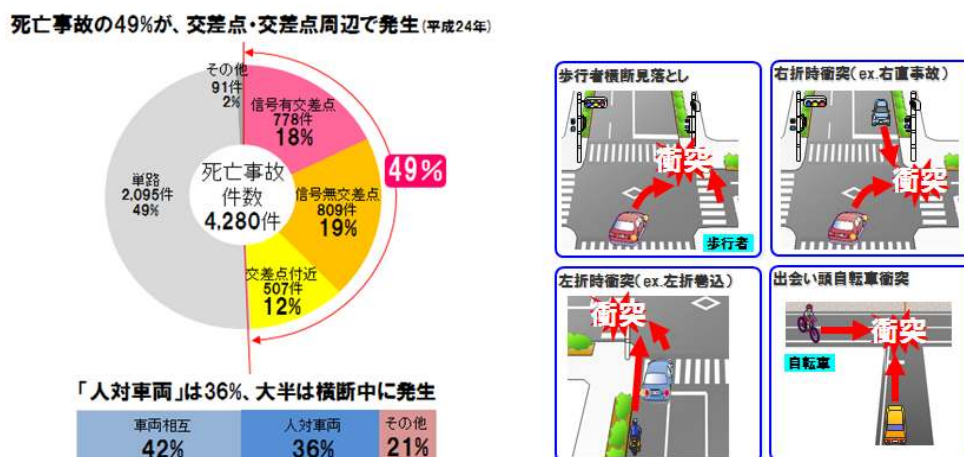


図 1-1 日本における死亡事故の発生状況および事故様態の例

図 1-1 に示すように、日本では、交通事故による死亡者が、年間 4,280 名(平成 24 年)であり、事故の半数近くが交差点およびその周辺で発生している。特に、複雑な交差点の環境下では死角が避けられないため、事故を防止するのがより困難となっている。実効性が高く、効率的な研究開発を推進していくためには、この図に示すような優先的に解決すべき衝突事故の様態を定めることで、開発技術の実証実験を加速できると考える。

2. 研究開発目標

本研究開発は、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出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出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)レーダー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

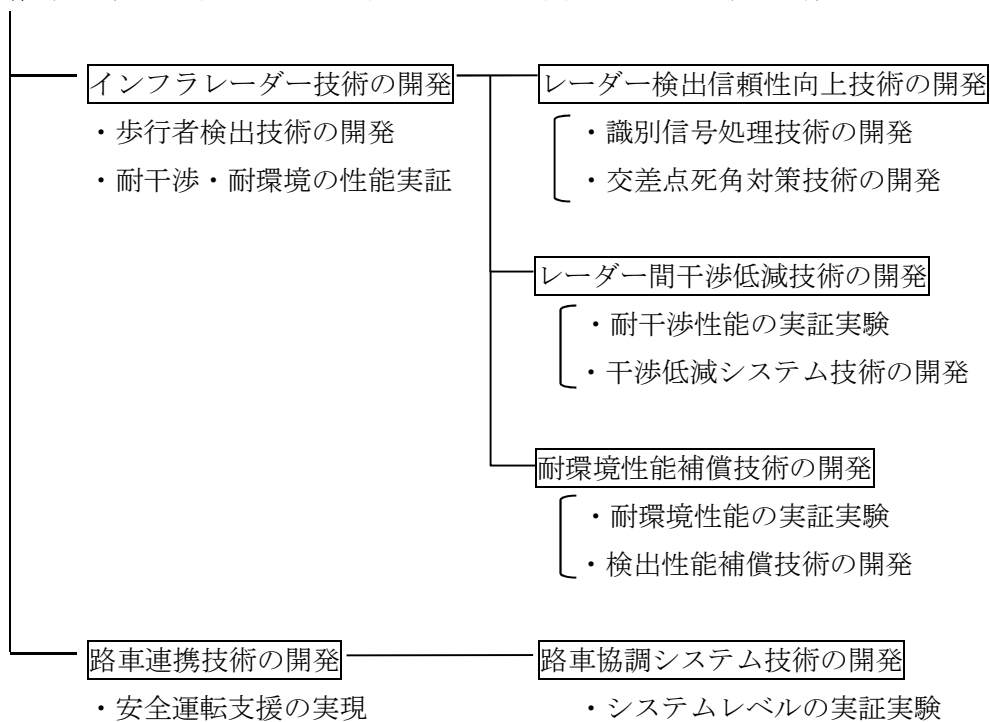
基本計画の到達目標を達成するためには、インフラレーダーによるセンサーの検知情報に基づき、衝突を回避するために運転者等に通知すべき情報を生成する技術を開発して、路車間通信機能を具備したインフラレーダーシステムとして、フィールドで検証することが求められる。この要求に対し、79GHz帯高分解能レーダーを路側のセンサーとして活用したインフラレーダーシステムとして、主に交差点環境における安全運転支援を実現するための機能をシステムレベルで検証するものである。具体的には、交差点エリアにおける対象物の検知情報を出力する路側設置の79GHz帯レーダーセンサーと複数の路側レーダーセンサーが生成する検知情報を統合して、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をだけでなく、統計的なデータ分析に基づく危険予測等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。

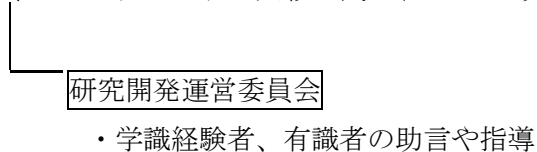
3. 研究開発体制

成果目標：インフラレーダーシステムの実現

研究責任者：中川 洋一(パナソニックシステムネットワークス株式会社)



ビジネスプロデューサ：大杉 武士(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 27 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

・識別信号処理技術の開発

歩行者識別アルゴリズムの実証：

ドップラー周波数に加えて角度領域におけるプロファイルデータの解析を行った上で、79GHz 帯レーダー装置を用いたリアルタイムのアルゴリズム性能評価を実施し、歩行者と車両の識別機能について実証する。

(理由)平成 26 年度に実施したドップラー周波数解析に加えて、角度領域の解析パラメータを最適化する手法を確立し、歩行者を車両等と識別するアルゴリズム開発を完了する。

反射信号クラスタリングのためのパラメータ抽出：

車種判別機能の実現を目指し、実車両に対して、反射信号のクラスタリングを行うためのパラメータを抽出するとともに79GHz帯レーダーとしての散乱特性等を把握する。

(理由)高分解能な79GHz帯レーダーは、一つの車両が複数の反射信号として観測されるため、車種判別アルゴリズムの開発としては、実車両に対するデータ取得および判別のためのパラメータ抽出に取り組む。

イ)レーダー間干渉低減技術の開発

・耐干渉性能の実証実験

干渉検知方法の検討および伝搬実験環境の構築：

実伝搬環境における79GHz帯レーダー信号の干渉検知方法を検討するため、瞬時的な現象を捉えて記録するための実験環境を構築して、再現性が確保された試験環境で実験データを取得する。

(理由)実伝搬環境では、極稀にしか観測されないミリ波レーダー間の干渉を検知して記録するために、レーダー方式に基づく干渉検知方法の確立を目指したインフラレーダーと車載レーダー間の干渉実験環境構築に取り組む。

ウ)耐環境性能補償技術の開発

・耐環境性能の実証実験

降雨試験設備における伝搬データの追加取得およびその解析：

実験解析により、雨粒の粒径が 79GHz 帯の波長 4mm と同程度となるような非常に強い降雨時の伝搬特性を明確にする。

(理由)平成 26 年度のデータ解析結果を踏まえて、降雨条件を変えながらの実験が可能な大型の専用試験設備を利用した追加データの取得を行う。

降雪条件の基礎データ取得および屋外環境における背景クラッタ特性の把握：

雪氷試験場や屋外実環境において、降雪時の 79GHz 帯の伝搬特性に関する実験データを取得し、背景クラッタ抑圧のためのアルゴリズム等へ反映する。

(理由)降雪時における基礎データ取得、および降雨時における背景クラッタデータ取得は、悪天候時の歩行者検出に関するレーダー検出性能を把握するために重要であるため、79GHz 帯レーダーを用いた実測を行う。

・検出性能補償技術の開発

背景クラッタ抑圧のアルゴリズム開発：

インフラレーダーの反射信号に含まれる背景ノイズへの対策として、一定の時間周期に基づいて背景クラッタに対する推定パラメータを更新するようにしたアルゴリズムを開発する。

(理由)79GHz 帯レーダー装置が出力するデータを、複数の更新周期に渡ってメモリに保存してフィルタリング等を行う統計的な処理についてその実効性能を把握するために、実使用条件を考慮したアルゴリズム開発に取り組む。

4.2. 成果概要

研究開発目標に対する個々の技術開発および実証実験の取り組みは順調であり、実施計画通りに年次目標を達成できた。なお、実用化の取り組みや標準化活動も順調であり、また研究開発運営委員会(今年度第1回を9/17に開催)において研究成果目標等を承認いただいた上で、計画通りに実施した。年次目標に対する達成の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

歩行者識別アルゴリズムの実証：

歩行者と車両の識別アルゴリズムを開発するために、ドップラー周波数に加えて方位の角度領域におけるプロファイルデータの解析を実施している。まずは、平成26年度の実証実験で取得した実対象物の測定データを用いて、識別の前処理として必須となる対象物の領域判定方法について検討した(図4.2-1参照)。

空間分解能の高い79GHz帯パルスレーダー装置で取得されるレーダープロファイルには、歩行者や四輪車からの多数のエコーが存在する。特に、方位の角度領域では、歩行者と比較すると四輪車からのエコーは広がり、且つ疎らになる場合もあることが確認されている。このような測定データを用いて、空間的に近接する複数のエコーを同一の対象物とするクラスタリング処理を実行すると、特に四輪車は複数の捕捉領域で構成される階層的なクラスタとして観測される傾向にあることが明確になってきた。そこで、この物理特性を歩行者と四輪車の識別に活かすことを目指し、近接するエコーからなる捕捉領域間の距離等を同一対象物と判定するためのパラメータに用いる方法を考案した。このような領域判定処理を、部分的なエコーのドップラー周波数特性が類似することがある歩行者と四輪車の識別を行うための前処理として実行することで、識別性能を改善できる見通しを得た。

さらに、歩行者と四輪車や他対象物の識別方法としては、機械学習の一つであるSVM(Support Vector Machine)の導入検討を実施した。SVMでは、識別対象の測定データ等から得られる特徴量を、多次元のベクトル空間として定義する。ここでは、79GHz帯ミリ波レーダーによる歩行者や四輪車のエコープロファイルには、ドップラー周波数や方位角度の広がり幅等を特徴ベクトルに選択した。これらの方法により、オフラインの性能評価結果として、横断歩道上の歩行者検出データに対する正識別率95%以上を確認した(図4.2-2参照)。

以上のような識別アルゴリズムの事前検討を踏まえて、屋外環境における伝搬実験を推進しており、79GHz帯レーダー装置を用いたリアルタイムのアルゴリズム性能評価も並行して実施した。なお、本伝搬実験では、送受信アダプティブアンテナ方式が実装されている79GHz帯パルスレーダー装置を使用している。ここで、レーダー装置が実現する性能は、40m先で横方向の距離分解能1.5m以下を可能とする方位角度精度2度以下である。

また、年次目標の達成を目指し、識別アルゴリズムの性能を定量評価していくために、歩行者と四輪車が近接する条件等において、ドップラー周波数と方位角度の領域におけるエコープロファイルのデータベース作成を推進している。このデータベースを解析することで、角度領域のパラメータ等を最適化し、その上で歩行者、四輪車の識別機能について実験検証を行った(後述「平成27年度レーダーセンシング技術の実証実験」参照)。

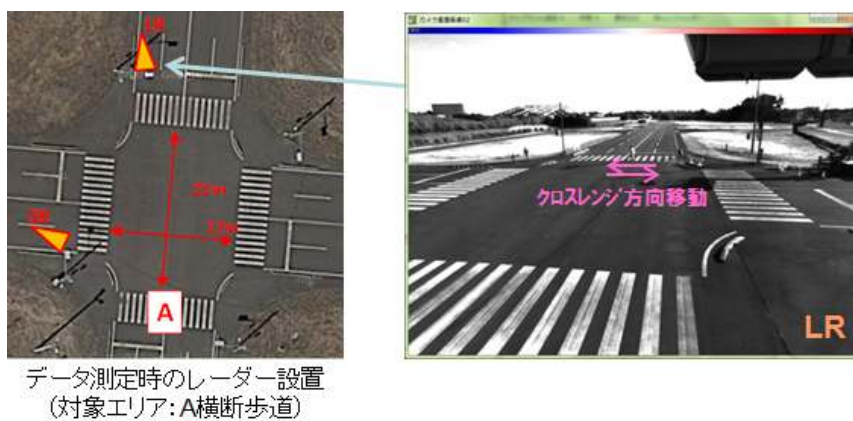
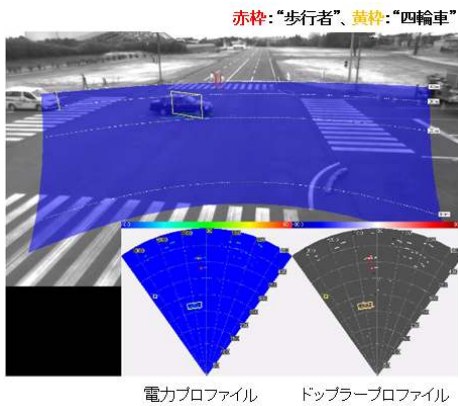


図 4.2-1 79GHz帯レーダー装置を路側設置した実証実験

クロスレンジ方向歩行時の評価結果(レーダー位置:LR)



評価シナリオ	レーダー高 [m]	正識率率 [%]	
		歩行者	四輪車
歩行者:左右から1名ずつ横断歩道往復(低速度) 車両:なし	5	99.3	-
歩行者:左右から1名ずつ横断歩道往復(中速度) 車両:なし	5	99.5	-
歩行者:左右から1名ずつ横断歩道往復(中速度) 車両:直進2台(検出領域左から右へ)	5	100.0	98.7
歩行者:左右から1名ずつ横断歩道往復(中速度) 車両:右左折2台(検出領域左右から)	5	97.8	86.3
歩行者:左右から1名ずつ横断歩道往復(中速度) 車両:直進2台(検出領域左から右へ)	2.5	98.9	99.6
歩行者:左右から1名ずつ横断歩道往復(中速度) 車両:右左折2台(検出領域左右から)	2.5	95.9	92.4
平均値		98.6	94.3

図 4.2-2 歩行者・四輪車の識別アルゴリズム性能評価結果

反射信号クラスタリングのためのパラメータ抽出：

歩行者と四輪車の識別機能を開発した上で、その次の開発ステップとしては、普通車と二輪車さらには大型車との判別を実現していくことになる。この車種判別機能を開発していくためには、多数のエコーが観測される実車両に対して、車体や車輪というような構成要素を考慮したエコークラスタリングの処理を検討する必要がある。特に、捕捉領域の特性や階層化クラスタのサイズ等によって、車種の判別を可能とするためには、エコーの強度や空間的な広がりを決める 79GHz 帯ミリ波の散乱特性に対する知見が必須となる。

そこで、平成 27 年度は、実車両で生じる多数のエコーをクラスタリングするための判定パラメータを抽出するとともに、79GHz 帯レーダーとしての散乱特性を把握するため、実験とシミュレーションによる詳細な解析を実施した。

具体的には、実際の車両に対する 79GHz 帯レーダーの伝搬実験を実施することで、エコー強度に係わる散乱断面積や車両の構成要素に対する方位角度の広がりといったクラスタリング処理に必須のパラメータを抽出することに取組んだ。その上で、四輪車や二輪車等の形状を実測し、79GHz 帯ミリ波の特性に基づいた対象車両の形状についてのモデリングを実施した(図 4.2-3 参照)。これにより、計算機を用いた伝搬シミュレーションによるエコーの解析が可能となり、車両に対するレーダー照射の方向等を変えながらエコーの強度や空間的な広がりといった散乱特性が効率的に推定できている。

なお、この伝搬シミュレーション環境によって、屋外伝搬実験を実施する際の事前知識が得られるようになり、エコーのクラスタリング処理に対する性能予測のみならず干渉波の発生予測等にも活用できることから、インフラレーダーシステム開発の新たな基盤を構築することができた。

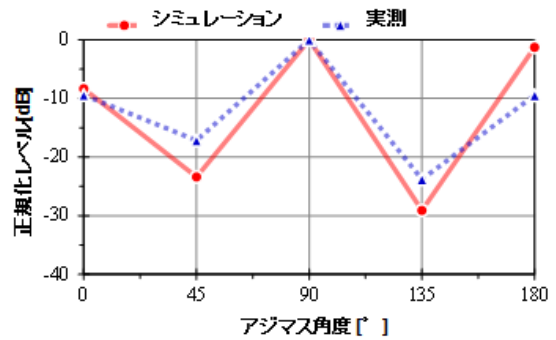


図 4.2-3. 車両エコーの実測(左)、伝搬シミュレーションによる解析結果(右)

イ) レーダー間干渉低減技術の開発

・ 耐干渉性能の実証実験

干渉検知方法の検討および伝搬実験環境の構築：

79GHz 帯ミリ波レーダー間の相互干渉は、動作周波数や測定時間および伝搬空間上のアンテナビーム方向が、全て一致した場合に発生する。そこで、動作周波数や測定時間、アンテナビーム方向をパラメータとして、最も厳しい干渉発生時を含む諸条件の実験データを得るために、屋内試験設備における干渉実験を実施した。ここでは、レーダー送信波の伝搬経路を変化させる可能性がある反射体として実車両を用いた実験を実施し、車体からの反射波が干渉源となるような条件でのデータ取得も実施した(図 4.2-4 参照)。



図 4.2-4 実車両を用いた干渉実験(左)、車体反射による干渉伝搬経路の実測例(右)

この干渉実験で取得した実測データを用いて、計算機シミュレーションにより、瞬時的な現象となる干渉発生を検知方法を検討した上で、屋外環境において 79GHz 帯レーダーで観測される干渉発生検知するための装置導入を完了した。なお、符号化パルス方式を用いた 79GHz 帯レーダー間の干渉信号は、例えばレーダー装置間が

フレーム同期もしくは非同期で動作しているかに依って、レーダープロファイル上で観測される信号特性が異なってくる。そのため、実機を用いた測定データに基づいてシミュレーションを実施することは、より実用性の高い干渉検知方法を開発するために有効である。

実際、インフラレーダー間の干渉は、交差点への設置時に動作させる周波数やタイミング等を調整できるため、運用上は相互干渉を回避できる可能性が高い。また、交差点を監視するインフラレーダーシステムにおいて、使用する周波数帯域幅を最適化することができれば、車載レーダー等の他システムとの干渉を本質的に低減することも可能になる。

そこで、インフラレーダー間の耐干渉性能を実証するためには、交差点の路側設置レーダーに対して、79GHz 帯ミリ波の反射体となる車両が交差点内に存在するような実環境では、伝搬空間上の干渉発生条件を明確にしていくことが必要となる。また、インフラレーダーと車載レーダー間の干渉発生条件としては、アンテナビーム方向が一致する場合にくわえて、路面等の反射によって等価的にアンテナビームが広がった 79GHz 帯ミリ波の伝搬特性に依存する条件も想定される。

そこで、H27 年度は、実伝搬環境における 79GHz 帯レーダー信号の干渉検知方法を確立するために、交差点を模擬したテストコースを使用して、地上高数メートルのレーダー設置や車両走行時の条件、ならびに道路上に車載レーダー想定干渉源を設置した条件における伝搬実験を実施した(図 4.2-5)。

この伝搬実験に向けた準備として、符号化パルス方式のインフラレーダーが車載レーダー等から放射されたレーダー信号を受信した場合の干渉発生を検知しながら統計的なデータとしても記録できる、つまりオンライン再生と自動データ記録のためのソフトウェアを作成している。



図 4.2-5 車載レーダー想定との干渉実験(左)、路側レーダー間の干渉実験(右)

ウ)耐環境性能補償技術の開発

・耐環境性能の実証実験

降雨試験設備における伝搬データの追加取得およびその解析：

79GHz帯の波長4mmと同程度の粒径を含む強い降雨条件で79GHz帯レーダーの伝搬特性を把握するための実験解析を行うために、平成27年8月17日から20日の間で、大型降雨実験施設における降雨時の伝搬実験を実施した。ここでは、インフラレーダーシステムの検知エリアを踏まえ、距離40m以上の範囲で模擬降雨を発生でき、且つ粒径4mm程度の雨滴を含んだ降雨条件を安定して再現可能な防災科学技術研究所所有の大型降雨実験施設を使用した。

主に、実環境では再現が困難な強度50mm/h以上という非常に激しい降雨の条件下で、降雨強度[mm/h]と距離減衰量[dB/km]との関係を定量化するための測定を実施した(図4.2-6参照)。ここで得られた関係式から、79GHz帯レーダーの回線マージン検討を実測データによっても裏付けることができた。なお、79GHz帯レーダーによるデータ測定と並行させて、降雨環境のログデータとする雨粒の粒径と落下速度の測定も実施している。

また、歩行者や四輪車といった実際の検知対象物に対するエコー強度について、降雨強度をパラメータとしてその変動特性を実測データより明確にした。例えば、四輪車では非常に激しい雨によって生じる車体上の流水が、79GHz帯レーダーが測定する瞬時的なエコー強度を変動させる要因となることを確認している。



図 4.2-6 大型実験施設でのデータ取得環境(左)、降雨強度と距離減衰量の関係(右)

降雪条件の基礎データ取得および屋外環境における背景クラッタ特性の把握：

降雪時の79GHz帯の伝搬特性に関する実験データを取得して背景クラッタ抑圧のためのアルゴリズム等へ反映していくために、平成27年11月24日から27日の間で、雪氷試験施設における降雪時の伝搬実験を実施した。ここでは、空間伝搬特性

を把握するために降雪範囲で距離を 3m 以上確保でき、且つ基礎データを取得するために代表的な雪の形状である樹枝状と氷球が発生可能な防災科学技術研究所所有の降雪実験施設(新庄雪氷環境実験所)を使用した。これにより、樹枝状形状が自然雪に近いことから実環境を再現した降雪条件で、79GHz 帯の伝搬特性に関する基礎データを取得できた。

特に、背景クラッタとなる路肩等が、積雪した状態の反射特性を把握するため、積雪の厚みに対する 79GHz 帯の伝搬減衰量について基礎的なデータを取得している(図 4.2-7 参照)。この積雪に依存する伝搬損失を実測した結果から、降雪時には背景クラッタからのエコーが相対的に減少する傾向を定量的に把握できただけでなく、積雪した対象物の検知についてもその可能性が示された。さらに、79GHz 帯パルスレーダー装置と三次元レーザーレーダー装置を用いて、同じ降雪条件での特性比較も実施しており、レーザーレーダーは雪粒を捉えて感応するが、79GHz 帯レーダーでは雪粒のエコーがほとんど観測されないという結果が得られた。定性的ではあるが、降雪環境における歩行者や車両の検知性能としては、ミリ波がレーザーよりもロバストであることが確認されている。

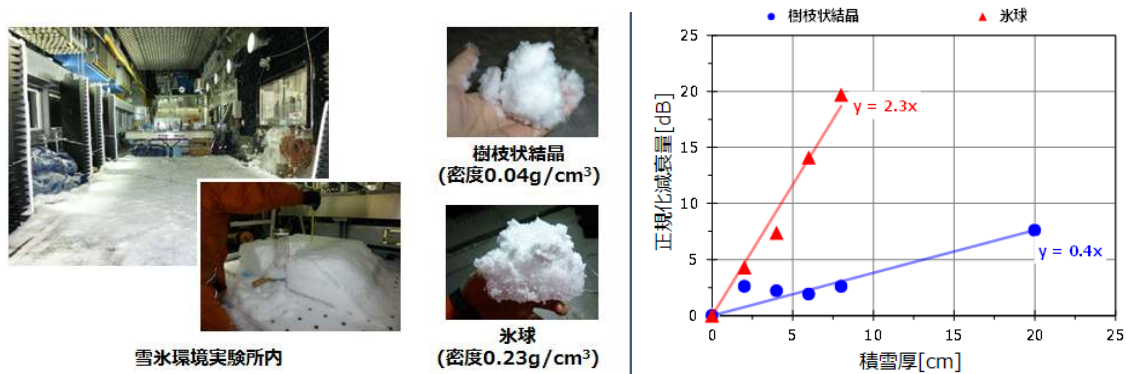


図 4.2-7 降雪実験施設でのデータ取得環境(右)、積雪の厚みと伝搬減衰量の関係(左)

・検出性能補償技術の開発

背景クラッタ抑圧のアルゴリズム開発：

平成 27 年度は、79GHz 帯インフラレーダーのエコーに含まれる背景ノイズへの対策として、実環境で生じる背景クラッタを抑圧するために、その統計量等に基づいた信号処理アルゴリズムの開発を推進している。特に、一定の時間をかけて変化する天候を環境条件として、降雨の背景ノイズ対策について先行的に取り組んできた。

前述した大型降雨試験施設における伝搬実験を通じて、50mm/h 以上の非常に激しい降雨時には、空間の雨粒が 79GHz 帯レーダーにとって背景クラッタとなり、検

知性能に影響を与えることが明確になった(図 4.2-8 参照)。これは、共にエコーの強度が比較的小さく且つドップラー周波数のシフト量も小さい歩行者と雨粒の判別が困難な場合が観測されるためである。つまり、エコー強度やドップラー周波数特性に基づいて、静止背景を除去するような一般的な手法では対応できない環境条件の存在が明らかになった。

そこで、雨粒からのエコーに対するレーダープロファイルについて詳細な解析を進めた結果、歩行者と雨粒のエコーにはドップラー周波数の統計的な特性において差異があることが分かってきた。このような新たな知見に基づき、非常に強い降雨時に検知性能を改善することを目指して、雨粒エコーを背景クラッタとして抑圧する信号処理アルゴリズムを考案、特許出願を行った。

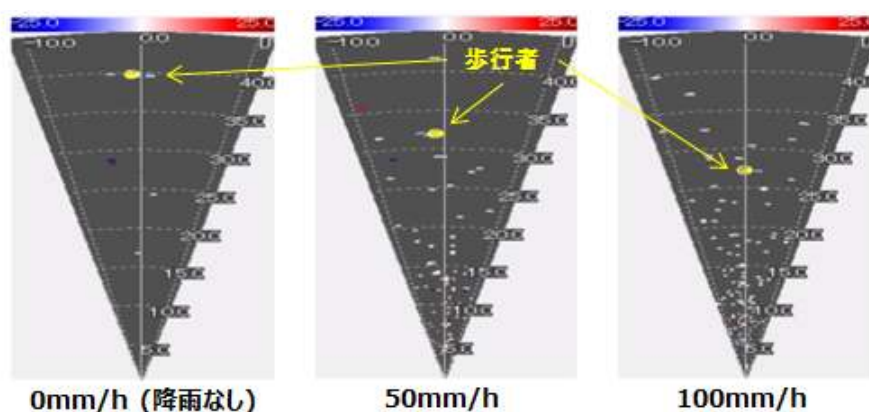


図 4.2-8 降雨強度 50mm/h 超における歩行者検出結果と雨粒エコー画像

平成 27 年度レーダーセンシング技術の実証実験

主に技術課題ア)およびイ)において開発した技術を、交差点環境において実証するために、2016年2月15日から19日の間、日本自動車研究所(JARI)所有の模擬市街路テストコースを使用して、屋外伝搬実験を実施した。

特に、機械学習を導入した歩行者識別アルゴリズムに対する実用性の高い性能評価を行うために、歩行者と四輪車が近接する条件や複数歩行者が横断する条件等における実測データを取得している(図 4.2-9 参照)。

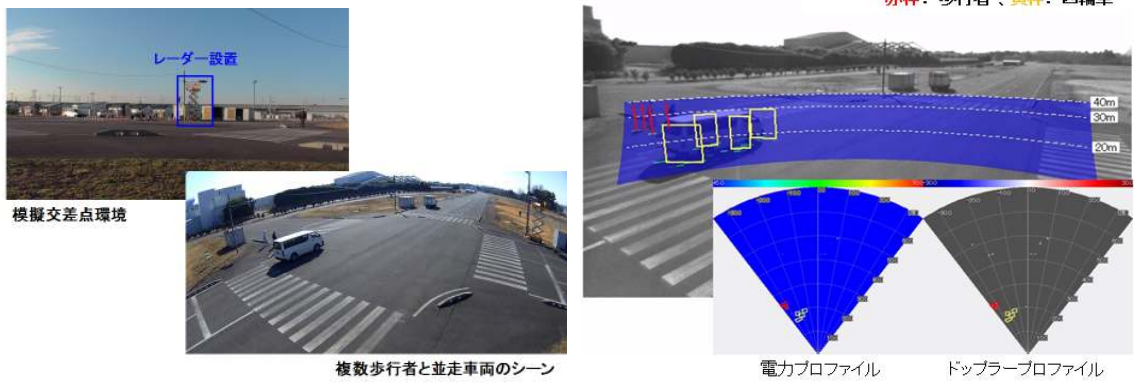


図 4.2-9 模擬市街路における実証実験(左)、複数歩行者と並走車両の識別結果例(右)

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

レーダー測定値から対象物体の種類を識別することはインフラレーダーにとって重要な機能の 1 つである。特に、道路の主な利用者である歩行者や車両などの存在を検出し、更に検出した対象の種類を正確に識別することは道路の安全利用および道路交通の効率化の先決条件である。本課題においては、次の 3 点について取り組み内容を説明する。

- ・歩行者識別アルゴリズムの開発

レーダー装置からの出力信号を用いて検出された対象物体が歩行者なのか車両なのかを識別するアルゴリズムを開発した。アルゴリズム内容について説明する。

- ・歩行者識別アルゴリズムの性能検証

このレーダー装置を用いて、歩行者と車両が近接する条件で、角度とドップラー周波数の 2 次元プロファイルを実験データベースとして取得する。このデータベースを詳細に解析、およびリアルタイムの評価を実施することで、歩行者と車両を識別に用いる角度パラメータの最適化を行う。

- ・反射信号クラスタリングのためのパラメータ抽出

実車両に対する 79GHz 帯レーダーの伝搬実験を実施して、車種の判別に必要となるパラメータを抽出した。また、レーザーレーダーを用いた実車両の形状モデリングを行った上で、実験結果と伝搬シミュレーションによる解析結果と対比することで 79GHz 帯レーダーの散乱特性等を把握する。

5.1.2. ア) ① 識別信号処理技術の開発

5.1.2.1. 歩行者識別アルゴリズムの開発

従来のレーダーでは距離や角度の測定分解能が大きく、数十メートル以上離れた歩行者を検出することが困難であった。しかし、79GHz 帯レーダーでは距離と角度の測定分解能が大幅に改善され、一人一人の歩行者を個別的に検出することが可能となった。但し、歩行者を対象物体として検出できても、検出した対象物体が歩行者なのか車両なのかを識別できなければ、道路状況を正確に把握できない。そのため、歩行者を識別できるアルゴリズムの開発が必要である。

現在、レーダーによる歩行者識別の研究では、実用的な手法を早期に確立するため、実測データによる検討も出始めている。本開発においては、従来研究された手法の課題を明確化し、開発したレーダーの実測データに基づいて、それを解決する独自の手法を提案する。

5.1.2.1.1. 識別器の構成

開発した歩行者識別アルゴリズムのブロック構成図を図 5.1.2.1.1-1 に示す。

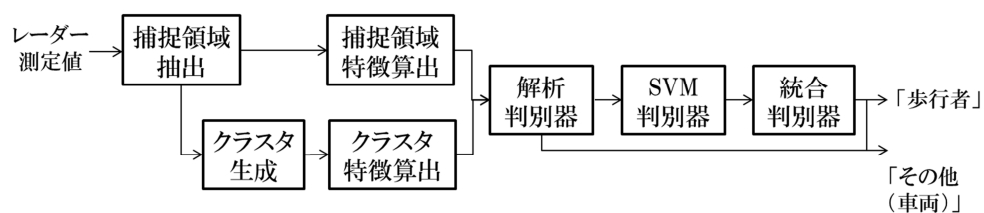
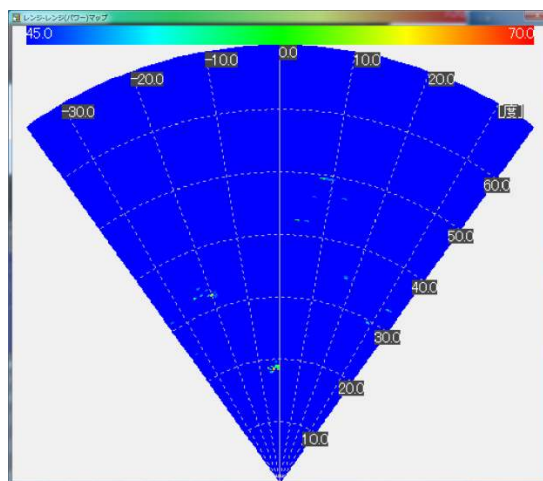
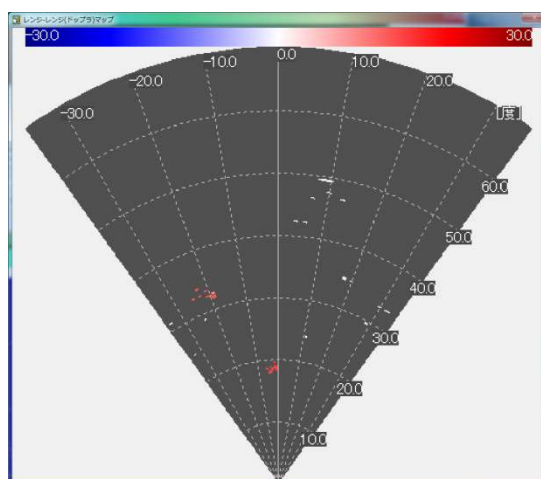


図 5.1.2.1.1-1 歩行者識別アルゴリズムの構成

図 5.1.2.1.1-1 において、識別アルゴリズムの入力データとして、レーダー測定値の反射電力プロファイルとドップラープロファイルを利用する。図 5.1.2.1.1-2 に入力データの一例を示す。図 5.1.2.1.1-3 に当該入力データの対応カメラ画像を示す。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.1.2.1.1-2 入力データの一例

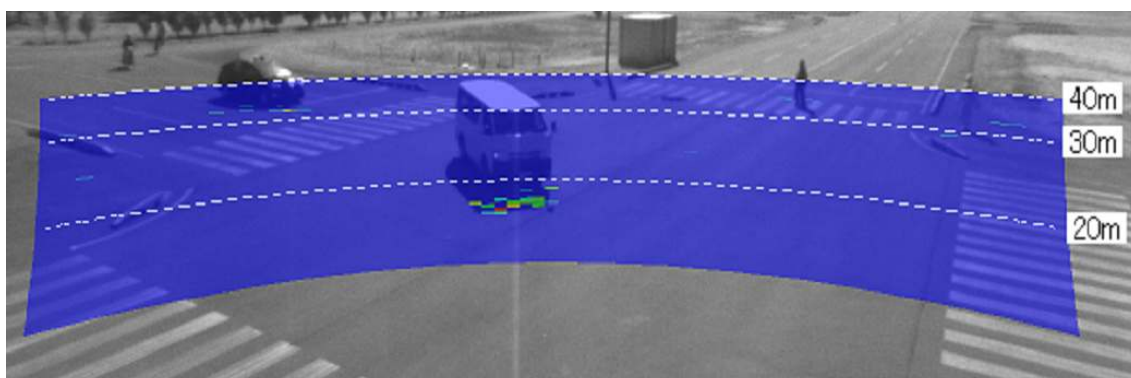


図 5.1.2.1.1-3 入力データの対応カメラ画像

識別アルゴリズムの出力としては、反射電力プロファイルまたはドップラープロファイルにおいて、対象物体(歩行者または車両)の位置と領域範囲を確定し、対象物体が歩行者であるか否かの識別結果を出力する。

開発した識別アルゴリズムは、レーダー測定値から異なる種類の特徴を算出し、更に複数種類の判別器を連動させ、歩行者の識別を行う。以下、識別アルゴリズムの各構成ブロックについて節に分けて処理内容を詳細に説明する。

5.1.2.1.2. 捕捉領域抽出

反射電力プロファイル及びドップラープロファイルは、距離と方位をそれぞれ分割し形成した空間セルにおける反射エコーの強度及びドップラー速度の測定値を示している。1つの空間セルを1つの画素と見なせば、反射電力プロファイル及びドップラープロファイルを画像として取り扱うことができる。

レーダーの捕捉領域を抽出するため、2つの画像処理手法を活用する。1つは画像における局所極大値の抽出、もう1つは局所極大値をシードとした局所領域の形成である。レーダーの反射電力プロファイル及びドップラープロファイルに対し、形成した上記局所領域を捕捉領域と称する。

具体例として、前記図 5.1.2.1.1-2 の反射電力プロファイルとドップラープロファイルに対する捕捉領域抽出結果を図 5.1.2.1.2-1 に示す。図 5.1.2.1.2-1 の抽出結果に対応する対象物体のカメラ画像を図 5.1.2.1.2-2 に示す。

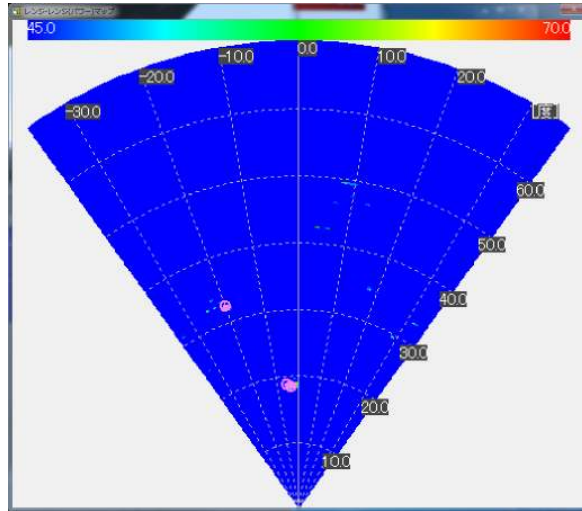
図 5.1.2.1.2-1(a)は反射電力プロファイルに対する捕捉領域の抽出結果である。ピンク色の○は局所極大値を示す。図からも分かるように、車両 V1 と V2 からの反射電力を局所極大値として検出されている。歩行者 P1 と P2 からの反射電力もプロファイルから確認できるが、設定された閾値より小さいため捕捉領域としては抽出されていない。

一方、図 5.1.2.1.2-1(b)はドップラープロファイルに対する捕捉領域の抽出結果である。黄色○は局所極大値を示す。図からも分かるように、車両 V1 と V2、そして歩行者 P1 と P2 から1つまたは複数の局所極大値が抽出されている。

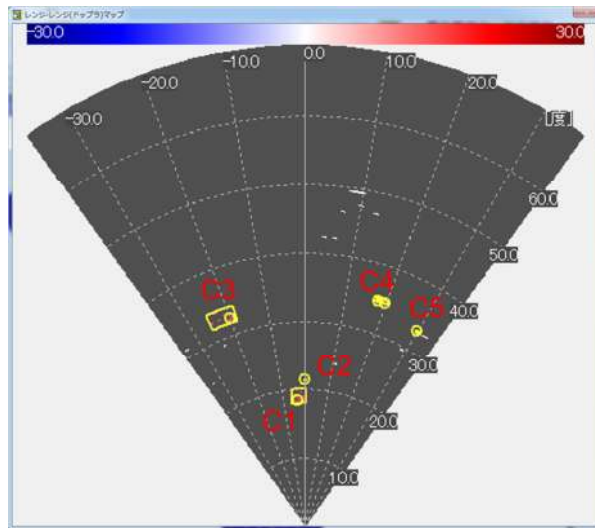
一般的に、反射電力プロファイルは静止物体の検出と識別に利用する。ドップラープロファイルは動物体の検出と識別に利用する。但し、反射電力プロファイルとドップラープロファイルの検出結果を適宜に結合し、静止物体と動物体を同時に識別することも可能である。

記述を簡単にするため、以降ではドップラープロファイルの利用を中心に説明する。

図 5.1.2.1.2-1(b)のドップラープロファイルにおいて、5つの捕捉領域、つまり、C1~C5が抽出されている。C1とC2は車両V1に対応する。C1(黄色矩形)は局所極大値領域(黄色○)をシードとして周辺の高輝度セル(ドップラ速度の絶対値が閾値以上のセル)を加えて形成されている。C1とC2のセルが繋がっていないため、別々の捕捉領域となっている。C3は車両V2に対応する。C3も局所極大値をシードとして周辺の高輝度セルを加えて形成されている。C4は繋がっている2つの局所極大値領域で形成されている。C5は1つの局所極大値領域で形成されている。



(a) 反射電力プロファイルによる捕捉領域抽出結果



(b) ドップラープロファイルによる捕捉領域抽出結果

図 5.1.2.1.2-1 捕捉領域抽出結果

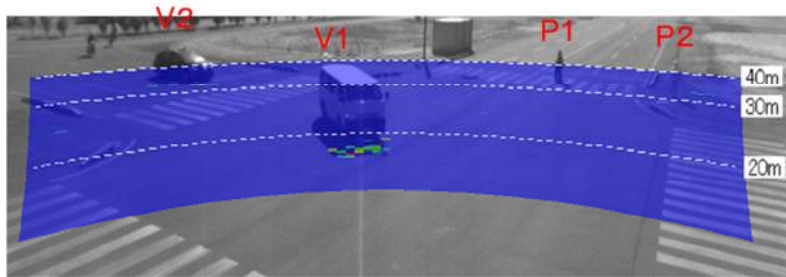


図 5.1.2.1.2-2 捕捉領域の対応対象物体

5.1.2.1.3. 捕捉領域特徴算出

抽出した各捕捉領域に対し、複数の属性値を算出し捕捉領域の特徴量として利用する。開発した識別アルゴリズムでは、捕捉領域から 9 次元の特徴量を抽出している。その特徴量を構成する属性を表 5.1.2.1.3-1 に示す。

表 5.1.2.1.3-1 捕捉領域の特徴量

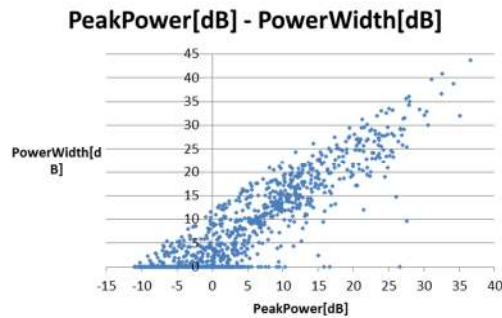
属性	属性値
反射電力ピーク	捕捉領域に属するセルに対し、反射電力の最大値。 但し、距離の影響を抑圧するため、距離による補正を行う。
反射電力幅	捕捉領域に属するセルに対し、反射電力の最大値と最小値との差。
方位幅	捕捉領域の左端方位と右端方位の角度差。
弦幅	方位幅に対応する弦の長さ。捕捉領域の中心距離と方位幅より下式で算出する： $\text{弦幅} = \text{中心距離} * 2 * \tan(\text{方位幅} / 2)$
距離幅	捕捉領域に属するセルに対し、最大距離と最小距離との差。
ドップラー平均	捕捉領域に属するセルに対し、ドップラー速度値の平均値。
ドップラー幅	捕捉領域に属するセルに対し、ドップラー速度の最大値と最小値との差。
セル数	捕捉領域に属するセルの数。
捕捉領域面積	捕捉領域に属するセルの面積の和。

5.1.2.1.4. クラスタ生成

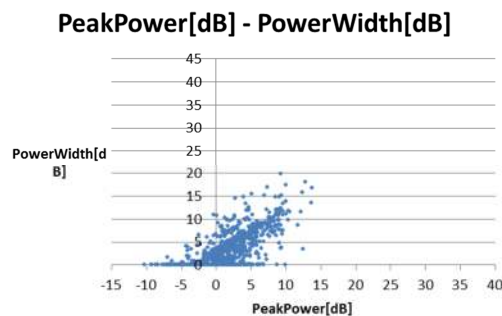
図 5.1.2.1.2-1 に示したように、1つの対象物体(例えば四輪車両)から複数の捕捉領域が測定されることがある。その原因は、対象物体の各部位に対し反射状況が異なるからである。物体からの反射の強さは反射部位の材質、形状、レーダーとの相対方向、更に部位の局部運動状況に依存するため、1つの物体から複数の異なる捕捉領域を取得することになる。

従来の研究では、同一物体からの複数捕捉領域の共通特性に基づいて物体識別を行った。共通特性としては、例えば、反射電力平均値やドップラー平均値が利用された。つまり、従来手法では識別の前提条件として、車両に対応する捕捉領域の反射電力平均値やドップラー平均値は歩行者のそれよりも大きく、歩行者との区別に利用できることを仮定した。

しかし、インフラレーダーの場合は、車両に対応する捕捉領域と歩行者に対応する捕捉領域を簡単に区別できない。これを説明するため、図 5.1.2.1.4-1～図 5.1.2.1.4-3 でいくつかの実測データの分布図を示す。

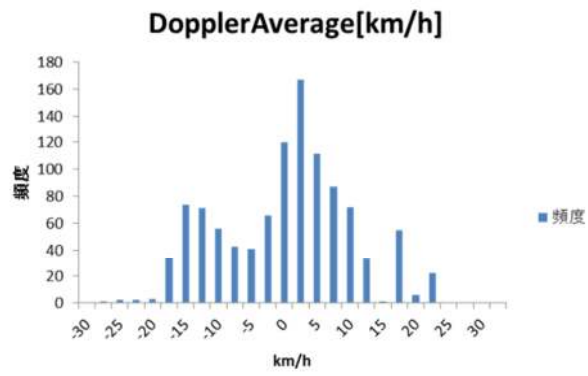


(a) 四輪車

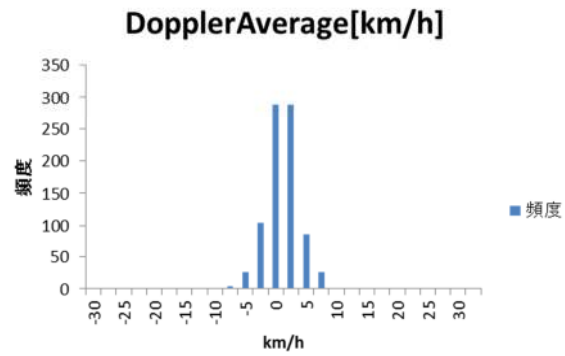


(b) 歩行者

図 5.1.2.1.4-1 反射電力ピーク～反射電力幅分布図

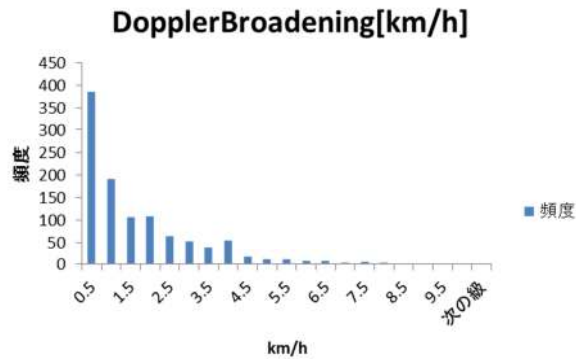


(a) 四輪車

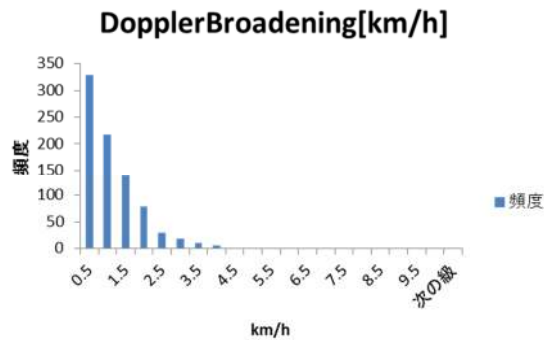


(b) 歩行者

図 5.1.2.1.4-2 ドップラー平均値分布



(a) 四輪車



(b) 歩行者

図 5.1.2.1.4-3 ドップラー幅分布

四輪車捕捉領域と歩行者捕捉領域の分布特徴に対し、図 5.1.2.1.4-1 では反射電力ピーク～反射電力幅分布を、図 5.1.2.1.4-2 ではドップラー平均値分布を、図 5.1.2.1.4-3 ではドップラー幅分布をそれぞれ示した。明らかに、上記何れの分布でも四輪車と歩行者の対応値の範囲が多く重なっている。つまり、捕捉領域の上記属性を利用して四輪車と歩行者を区別することは困難である。

図 5.1.2.1.4-1～図 5.1.2.1.4-3 に示した分布は、交差点を検出対象エリアとした場合に特に顕著になる。なぜなら、交差点を移動する四輪車両は幅広い移動方向と移動速度を有するために、特定部位からの反射が歩行者からの反射と似た反射特性を有する確率が高くなるからである。

上記分布からも分かるように、捕捉領域の特徴量のみで歩行者と車両を精度よく識別できないので、異なる種類の特徴量を利用する必要がある。開発したアルゴリズムでは、隣接する複数の捕捉領域をクラスタリングし、クラスタの属性を特徴量に加え、識別を実現する。

捕捉領域をクラスタリングする基本手法を図 5.1.2.1.4-4 に示す。図 5.1.2.1.4-4 は、ドップラープロファイル及び 2 つの捕捉領域 C1 と C2 を示す。以下、C1 を例としてクラスタの生成方法を説明する。まず、C1 中心点の方位及び距離に基づいて指定閾値よりも近い範囲内で隣接捕捉領域を探索する。そして、C1 中心点と探索した隣接捕捉領域の中心点とを連結し、連結線を軸として 1 つの連結矩形を形成する。現状、連結矩形の幅は固定値(連結線から両側各 1m)としている。最後に、形成した矩形の大きさ及び矩形に属する空間セルの反射電力値とドップラー速度値の分布範囲に基づいて、2 つの捕捉領域を結合するか否かを判定する。許容できる反射電力値とドップラー速度値の分布範囲は C1 と C2 における最大値及び最小値に基づいて設定する。捕捉領域を結合すると判定した場合は、捕捉領域のクラスタを生成する。結合できる捕捉領域の数を制限しないので、3 つ以上の捕捉領域を 1 つのクラスタを生成することも可能である。

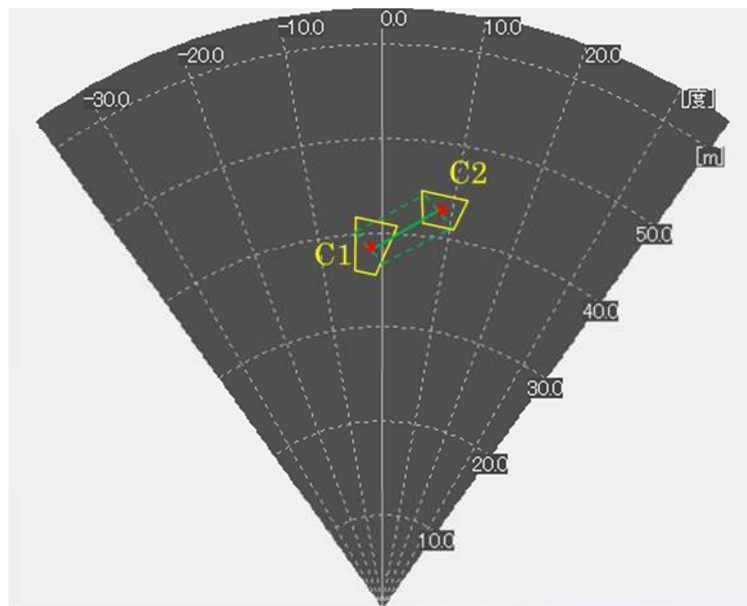


図 5.1.2.1.4-4 捕捉領域のクラスタリング

従来の研究と違い、ここでのクラスタリングは同一物体に属する捕捉領域を 1 つのクラスタにすることに限らない。異なる物体、例えば、車両及び車両の近傍にいる歩行者の捕捉領域を 1 つのクラスタに結合することも有り得る。

図 5.1.2.1.4-5 に同一車両に属する捕捉領域を 1 つのクラスタに結合した例を示す。図において、黄色枠は捕捉領域を示し、水色枠はクラスタを示す。

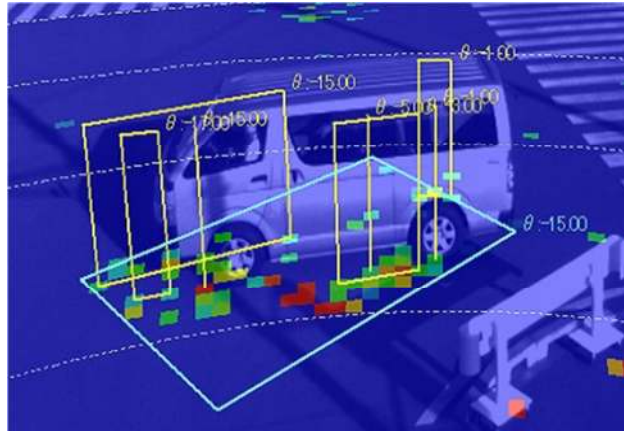


図 5.1.2.1.4-5 同一車両の捕捉領域のクラスタリング

図 5.1.2.1.4-6 に車両及び車両の近傍にいる歩行者に属する捕捉領域を 1 つのクラスタに結合した例を示す。クラスタに歩行者が存在するかどうかの判定は、後述の SVM 判別器(5.1.2.1.7)及び統合判別器(5.1.2.1.8)を利用して行う。

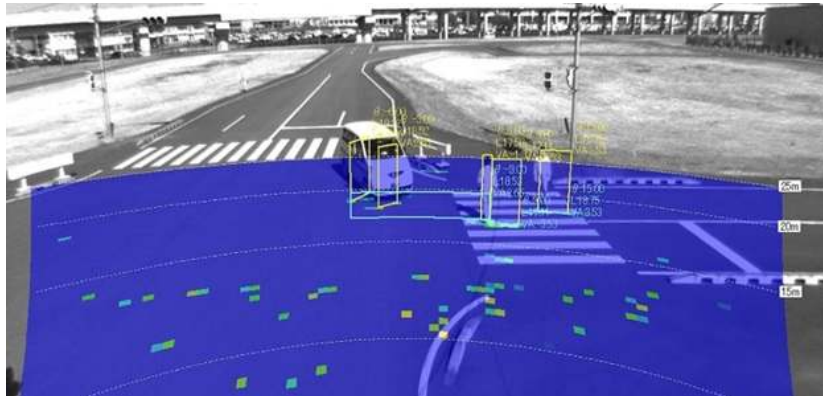


図 5.1.2.1.4-6 車両及び近傍にいる歩行者の捕捉領域のクラスタリング

5.1.2.1.5. クラスタ特徴算出

クラスタが生成された後、クラスタに属する各捕捉領域に対し、クラスタ関連の属性値を複数算出し捕捉領域のクラスタ特徴量として利用する。開発した識別アルゴリズムでは、捕捉領域のクラスタ特徴量として 8 次元の特徴量を抽出している。その特徴量を構成する属性を表 5.1.2.1.5-1 に示す。

表 5.1.2.1.5-1 捕捉領域のクラスタ特徴量

属性名	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。 ※左側領域がない場合、値を 0 とする。
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。 ※左側領域がない場合、値を 0 とする。
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。 ※右側領域がない場合、値を 0 とする。
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。 ※右側領域がない場合、値を 0 とする。
方位比率	捕捉領域の方位幅とクラスタの方位幅との比率。
中心方位差	捕捉領域の中心方位とクラスタの中心方位との角度差。 ※正負値を有する。

5.1.2.1.6. 解析判別器

歩行者に対して、特徴量として利用した各属性には特定の属性値分布が存在する。図 5.1.2.1.4-1(b)～図 5.1.2.1.4-3(b)はその一例である。逆に言えば、属性値が上述分布範囲内に入っていない特徴量は歩行者でないことを意味する。解析判別器は、属性値分布に基づいて、明らかに歩行者でない属性値を有する測定値に対して歩行者の候補から排除する。

実用的な解析判別器を実現するために、大量の実測データ及び高度な属性値分布解析が必要である。しかしながら、現状では実測データが不足しており、信頼性の高い属性値分布をもとにした解析判別器を実現することが出来ない。したがって、今回開発したアルゴリズムでは、閾値による最低限の解析判別を行う。具体的には、開発したアルゴリズムでは、図 5.1.2.1.4-1～図 5.1.2.1.4-3 に示したような実測デ

ータに基づいて、特定属性値に対して閾値を設定し、解析判別器を実現した。

表 5.1.2.1.6-1 に利用した属性及びその対応閾値を示す。

表 5.1.2.1.6-1 解析判別器で利用した属性と対応閾値

属性	閾値
反射電力ピーク値	>30dB
反射電力幅	>30dB
方位幅	>10 度
弦幅	>5m
距離幅	>2.5m
ドップラー速度幅	>8km/h
捕捉領域面積	>2m ²

解析判別器を利用することによって、飛び離れた測定値を後記の SVM 判別器の適用範囲から排除できるので、SVM 判別器の判別性能を向上させる。

5.1.2.1.7. SVM 判別器

SVM(サポートベクトルマシン)判別器は有効な機械学習手法として、パターン認識の分野で広く利用されている。

レーダー測定値に関しても、人間の直感にない形であるうえ、物体識別に有効の顕著な特徴量が乏しいため、SVM のような機械学習手法が不可欠と考える。

SVM 識別器の実現には学習フェーズが必要である。学習フェーズにおいて、歩行者の対応データと歩行者でない「その他」の対応データを学習用データとして事前に準備する。そして、準備した学習データを SVM の所定手法で処理し SVM 判別器を作成する。

SVM 判別器の作成方法を図 5.1.2.1.7-1 のブロック図に示す。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前記各節で説明した方法のまま実現する。正解タグ付けは準備した全ての学習データに対して、対応捕捉領域特徴およびクラスタ特徴をマニュアル的に「歩行者」か「その他」かに分類する。そして、分類した学習データを SVM の所定手法で処理し SVM 判別器を生成する。

SVM 判別器にも複数の種類があるが、開発したアルゴリズムでは、広く利用されている放射基底関数(radial basis function)ベースの SVM 判別器を作成する。

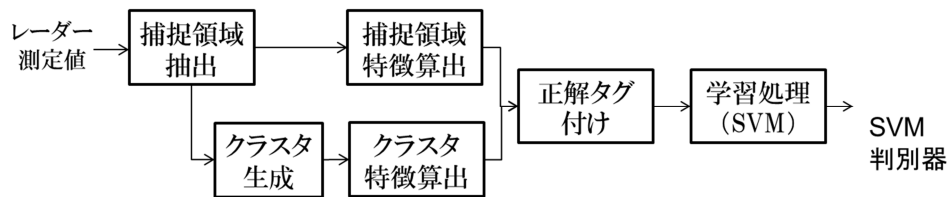


図 5.1.2.1.7-1 SVM 判別器の作成

SVM 判別器で利用する特徴量は、特に次元数に制限が無い。前節までに説明したように、歩行者識別に利用する特徴量は捕捉領域特徴量(9次元)とクラスタ特徴量(8次元)がある。そのため、SVM 判別器では、捕捉領域特徴量とクラスタ特徴量の合計である 17次元の特徴量を利用する。つまり、レーダープロファイルより抽出した対象物体に対し、17次元の特徴量を生成した SVM 判別器に入力すれば、SVM 判別器から「歩行者」か「その他」かの判別結果を出力されることになる。

5.1.2.1.8. 統合判別器

解析判別器と SVM 判別器を利用すれば、各捕捉領域に対して「歩行者」か「その他」かの判別を得られる。しかし、上記判別結果には認識としてまだ不十分または不合理な結果も存在する。統合判別器はこのような結果を更に修正する。

統合判別器は捕捉領域、及び捕捉領域の所属するクラスタの情報に基づいて実現する。以下複数の具体例を持って説明する。

図 5.1.2.1.8-1 に示したのは誤認識のない例である。図において、赤い枠は歩行者を示し、黄色い枠は車両を示す。水色の枠はクラスタを示す。この例では同一車両から複数の捕捉領域が抽出され、何れも車両のものと識別された。しかし、上記複数の捕捉領域が同じクラスタに結合されたので、同一の車両として認識されるべきである。統合識別器は同一クラスタに属する車両の捕捉領域を統合し、同じ車両のものと認識する。但し、歩行者に対しては、同じクラスタに属しても、別々の歩行者に対応する可能性もあるので、現段階では統合していない。

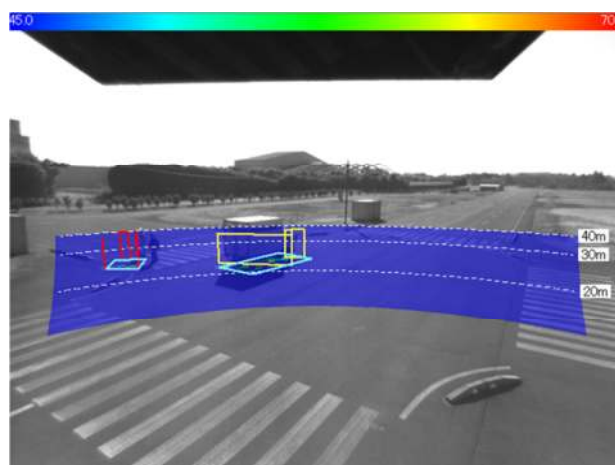
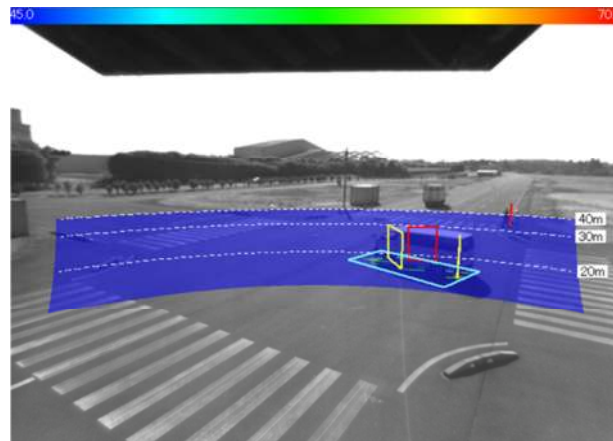
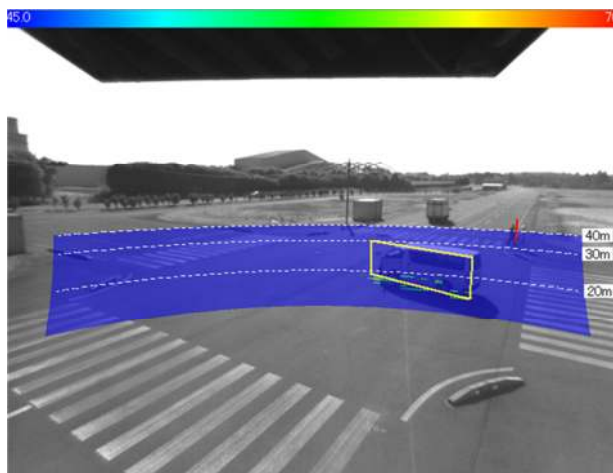


図 5.1.2.1.8-1 車両に属する捕捉領域の統合

図 5.1.2.1.8-2 に誤識別された捕捉領域のある例を示す。車両に属する 1 つの捕捉領域が歩行者と誤識別された。しかし、誤識別された捕捉領域はクラスタの中心部に位置し、クラスタに車両と識別された捕捉領域が複数ある。この場合、統合判別器はまず車両の存在を確定する。そして、車両の位置(つまり、クラスタの位置)と歩行者の位置(つまり、誤識別された捕捉領域の位置)から、歩行者捕捉領域が誤りと判断し、訂正する。更に、訂正後の結果に基づいて、同一車両と識別する。



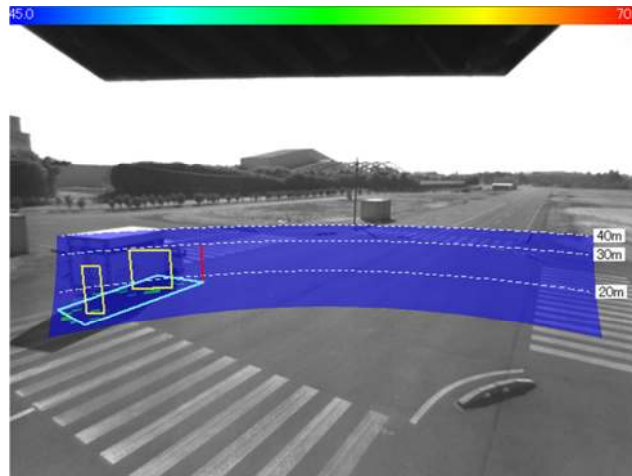
(a) クラスタと誤識別された捕捉領域



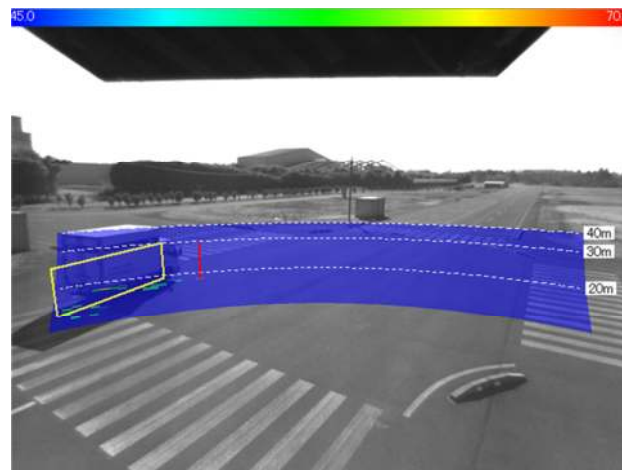
(b) 中心部捕捉領域を訂正

図 5.1.2.1.8-2 誤識別捕捉領域がクラスタ中心部に位置する例

図 5.1.2.1.8-3 にも誤識別された捕捉領域のある例を示す。車両に属する 1 つの捕捉領域が歩行者と誤識別された。しかし、誤識別された捕捉領域はクラスタの辺縁部に位置し、クラスタに車両と識別された捕捉領域が複数ある。この場合、統合判別器は車両の存在を確定するが、車両の位置(つまり、クラスタの位置)と歩行者の位置(つまり、誤識別された捕捉領域の位置)から歩行者捕捉領域が誤りと判断できない。なぜなら、車両の近傍にいる歩行者をより慎重に識別しなければならないので、簡単に訂正すべきでない。そのため、統合判別器ではこの場合の歩行者捕捉領域は訂正しない(今後、複数時刻の測定データを利用して識別を検証等、他の手段で対応する)。



(a) クラスタと誤識別された捕捉領域



(b) 辺縁部捕捉領域を訂正しない

図 5.1.2.1.8-3 誤識別捕捉領域が辺縁部に位置する例

5.1.2.2. 歩行者識別アルゴリズムの性能検証

5.1.2.2.1. 検証内容

開発した歩行者識別アルゴリズムの性能を評価するため、複数回にわたり日本自動車研究所(JARI)所有の模擬市街路西コース等において実験データを取得した。実験データを取得する際に利用した測定条件を表 5.1.2.2-1 にまとめた。

表 5.1.2.2-1 実験データの取得条件

レーダー種類	ロングレンジ(LR)：主に 20m～40m の距離を測定対象とする ショートレンジ(SR)：主に 5m～20m の距離を測定対象とする
レーダー設置高	5m、2.5m、7m
交差点種類	4 車線同士の交差点(x44) 4 車線と 2 車線の交差点(x42)
対象物体	歩行者：1 人～4 人(押し自転車含む) 車両：最大 5 車種(トラック、バン、乗用車、バイク、走行自転車)
対象エリア	歩行者：交差点内横断歩道 車両：対象横断歩道の通過前～通過後
歩行者移動方式	速度：足踏み～高速度 複数人の並び方：順番、並走、擦れ違い
車両移動方式	速度：10km～40km、歩行者優先の場合は一時停車有り 通過ルート：交差点内 4 つの横断歩道のうちの 2 つを順番に通過する 全部で 10 パターン ※2 つの横断歩道を通過するパターンは全部で 12 パターンあるが、 そのうち 2 パターンはレーダーの対象エリアを通過しないため除外

以下、説明を簡単にするため、対象エリアの横断歩道を図 5.1.2.2.1-1 のように表記する。つまり、レーダーの設置位置を視点として、横断歩道を画面に置ける位置で表記する。

また、車両移動方式についてもレーダーの設置位置を視点とした画面に基づいて記述する。例えば、図 5.1.2.2.1-2 に示したシーンについて、左折する白い四輪車両の移動方式を「左→後」と表記し、右折する黒い四輪車両の移動方式を「右→後」と記述する。また、図示していないが、遠方から直進でレーダーに近づく車両の移動方式を「後→前」と記述する。

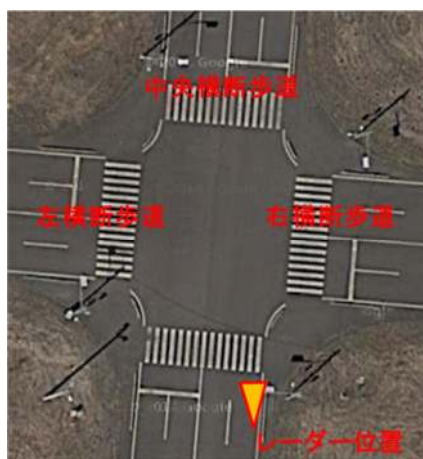


図 5.1.2.2.1-1 対象横断歩道の表記

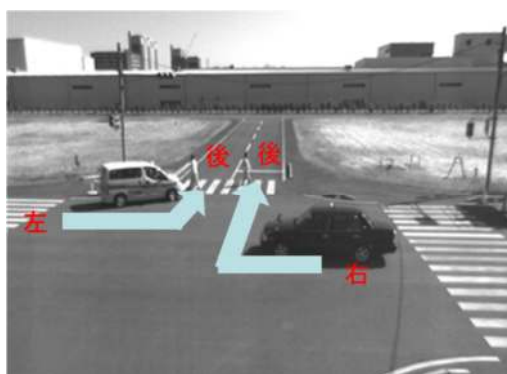


図 5.1.2.2.1-2 車両移動方式の表記(白車：左→後、黒車：右→後)

異なる取得条件で取得した実験データセットに対し、以下 9 種類の検証を行った。
各検証の詳細を以下各節で順番に説明する。

- ◇ 検証 1 : LR レーダー/x44 基本識別性能
- ◇ 検証 2 : LR レーダー/x42 基本識別性能
- ◇ 検証 3 : LR レーダー/x44・x42 混合基本識別性能
- ◇ 検証 4 : SR レーダー/x44 基本識別性能
- ◇ 検証 5 : SR レーダー/x42 基本識別性能
- ◇ 検証 6 : SR レーダー/x44・x42 混合基本識別性能
- ◇ 検証 7 : 静止歩行者基本識別性能
- ◇ 検証 8 : LR レーダー総合識別性能
- ◇ 検証 9 : SR レーダー総合識別性能

上記において、基本識別性能と表記した検証では、学習用データと検証用データとして同じ実験環境で取得したデータセットを利用する(但し、対象物体の数または移動方式が異なる場合がある)。総合識別性能と表記した検証では、学習用データと検証用データとして異なる実験環境で取得したデータセットを利用する。

5.1.2.2.2. 検証 1 : LR レーダー/x44 基本識別性能

検証 1 におけるレーダーと対象横断歩道の位置関係を図 5.1.2.2.2-1 に示す。図 5.1.2.2.2-1 において、LR はレーダー設置位置、A は対象横断歩道を示す。

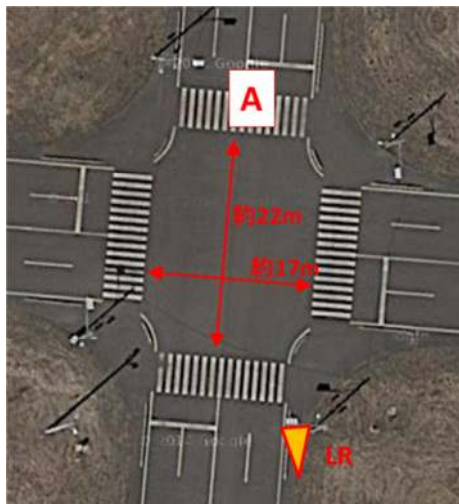


図 5.1.2.2.2-1 レーダーと対象横断歩道の位置関係

検証 1 では LR レーダーの基本的な識別性能を検証するため、学習用データと検証用データを同じ実験環境(但し、レーダー設置高の変動あり)で取得したデータセットを利用した。但し、学習用データは歩行者と四輪車両が単独で移動するパターンのデータセットを利用し、検証用データは異なる移動パターンの複合データセットを利用した。検証 1 で利用した実験データの詳細を表 5.1.2.2.2-1 に示す。

表 5.1.2.2.2-1 検証1用実験データの詳細

学習用データ	交差点種類	4車線同士の交差点(x44)
	レーダー種類	ロングレンジ(LR)
	レーダー設置高	5m
	歩行者	人数：1人 移動方式：中央横断歩道、左右移動、低速度／高速度
	四輪車両	車種：2車種(乗用車、バン) 移動方式：直進2パターン(前→後、左→右)
検証用データ	交差点種類	(学習データ同)
	レーダー種類	(学習データ同)
	レーダー設置高	5m、2.5m
	歩行者	人数：2人 移動方式：中央横断歩道、左右から1名ずつ擦れ違い
	四輪車両	車種：(学習データ同) 移動方式：直進と右左折3パターン(左→右、左→後、右→後)

学習用データとして、歩行者 715 サンプル、四輪車両 533 サンプルを取得した。
学習用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.2-2 に示す。



(a) 歩行者単独(レーダー設置高 5m)



(b) 車両単独(レーダー設置高 5m)

図 5.1.2.2.2-2 学習用データの取得シーン

検証用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.2-3 に示す。



(a) レーダー設置高 5m



(b) レーダー設置高 2.5m

図 5.1.2.2.2-3 検証用データの取得シーン

検証 1 の検証結果を表 5.1.2.2.2-2 に示す。

表 5.1.2.2.2-2 検証 1(LR/x44)の検証結果

検証用データのパターン	検証 データ 数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：横断歩道にて足踏み(移動なし) 車両：なし レーダー設置高：5m	503	503/503	—
歩行者：左右から 1 名ずつ横断歩道往復(低速度) 車両：なし レーダー設置高：5m	448	445/448	—
歩行者：左右から 1 名ずつ横断歩道往復(かばん保有) 車両：なし レーダー設置高：5m	655	652/655	—
歩行者：左右から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台直進(左→右) レーダー設置高：5m	691	229/229	456/462
歩行者：左右から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台右左折(左→後、右→後) レーダー設置高：5m	1046	480/491	479/555
歩行者：左右から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台直進(左→右) レーダー設置高：2.5m	841	351/355	484/486
歩行者：左右から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台右左折(左→後、右→後) レーダー設置高：2.5m	1054	441/460	549/594
	平均	98.8%	94.3%

検証 1 の結果から、LR レーダー/x44 交差点の設置条件の場合、対象エリア横断歩道を一人で歩く歩行者に対して開発したアルゴリズムが高い識別率(平均 98.8%)を有することを確認できた。また、学習用データとしてレーダー設置高 5m のデータのみを利用したが、2.5m の検証用データに対しても 5m と同等の識別率を得られた。

5.1.2.2.3. 検証 2 : LR レーダー/x42 基本識別性能

検証 2 におけるレーダーと対象横断歩道の位置関係を図 5.1.2.2.3-1 に示す。図 5.1.2.2.3-1 において、LR はレーダー設置位置、A は対象横断歩道を示す。

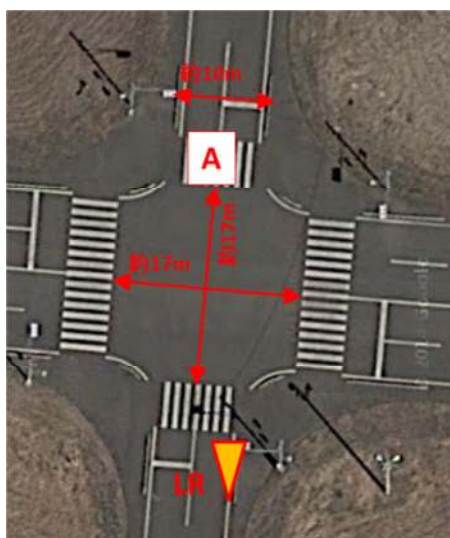


図 5.1.2.2.3-1 レーダーと対象横断歩道の位置関係

検証 2 では LR レーダーの基本的な識別性能を検証するため、学習用データと検証用データを同じ実験環境(但し、レーダー設置高の変動あり)で取得したデータセットを利用した。但し、学習用データと検証用データは異なるデータセットを利用した。検証 2 で利用した実験データの詳細を表 5.1.2.2.3-1 に示す。

表 5.1.2.2.3-1 検証 2 用実験データの詳細

学習用データ	交差点種類	4 車線と 2 車線の交差点(x42)
	レーダー種類	ロングレンジ(LR)
	レーダー設置高	5m
	歩行者	人数：2 人 移動方式：中央横断歩道、左右から 1 名ずつ擦れ違い
	四輪車両	車種：2 車種(乗用車、バン) 移動方式：直進と右左折 3 パターン(左→右、左→後、右→後)
検証用データ	交差点種類	(学習データ同)
	レーダー種類	(学習データ同)
	レーダー設置高	5m、7m、2.5m
	歩行者	人数：2 人 移動方式：中央横断歩道、左右から 1 名ずつ擦れ違い
	四輪車両	車種：3 車種(乗用車、バン 2 台) 移動方式：直進と右左折 3 パターン(左→右、左→後、右→後)、1 台は横断歩道の手前に停車状態

学習用データとして、歩行者 1055 サンプル、四輪車両 768 サンプルを取得した。学習用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.3-2 に示す。



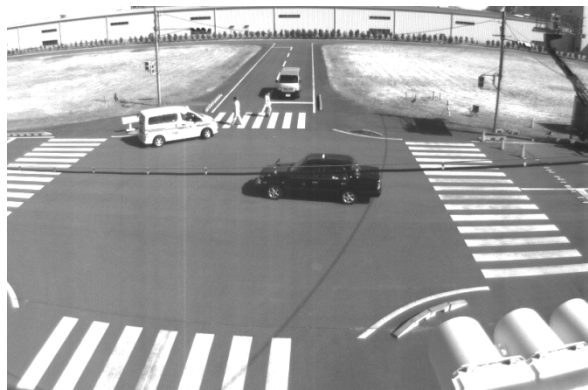
(a) 車両直進(レーダー設置高 5m)



(b) 車両右左折(レーダー設置高 5m)

図 5.1.2.2.3-2 学習用データの取得シーン

検証用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.3-3 に示す。



(a) レーダー設置高 7m



(b) レーダー設置高 2.5m

図 5.1.2.2.3-3 検証用データの取得シーン

検証 2 の検証結果を表 5.1.2.2.3-2 に示す。

表 5.1.2.2.3-2 検証 2(LR/x42)の検証結果

検証用データのパターン	検証 データ数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(左→右)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	912	597/597	297/315
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	1421	839/861	493/560
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(左→右)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	843	532/532	284/311
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	1246	733/757	403/489
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(左→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	991	679/685	186/306
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	1739	996/1029	620/710
	平均	98.4%	84.0%

検証 2 の結果から、LR レーダー/x42 交差点の設置条件の場合、対象エリア横断歩道を歩く一人の歩行者に対して開発したアルゴリズムが高い識別率(平均 98.4%)を有することを確認できた。また、学習用データとしてレーダー設置高 5m のデータのみを利用したが、7m と 2.5m の検証用データに対しても 5m とほぼ同等の識別率を得られた。但し、四輪車両に対して、車種と移動方式によって、歩行者と誤認識された捕捉領域の数が検証 1(x44 交差点)と比較すると多く見られた。

5.1.2.2.4. 検証3：LR レーダー/x44・x42 混合基本識別性能

検証3では前記検証1と検証2で利用した学習用データを混合し、新しい学習用データとする。また、検証用データも検証1と検証2で利用した検証用データを利用する。

検証3の目的は、開発したアルゴリズム、特にそのうちのSVM判別器のロバスト性を検証することである。SVM判別器の識別性能が学習用データに依存するため、通常、バラエティの少ないデータセットに対して高い識別性能を有する。その反面、判別器の適用範囲が狭くなりロバスト性が悪くなる。開発したアルゴリズムの将来の実運用を考えると、交差点毎に独自のSVM判別器を実装することも可能だが、開発コストや維持工数が増大する。そのため、より汎用性のあるSVM判別器、例えば、異なるレーダー設置高や異なる種類の交差点に適用可能なSVM判別器、が望ましい。

学習用データとして、歩行者1770サンプル、四輪車両1301サンプルを取得した。検証3の検証結果を表5.1.2.2.4-1に示す。

表 5.1.2.2.4-1 検証3(LR/x44・x42 混合)の検証結果

検証用データのパターン	検証データ数	歩行者識別率	車両識別率
以下 x44 交差点			
歩行者：横断歩道にて足踏み(移動なし) 車両：なし レーダー設置高：5m	503	503/503	-
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復(低速度) 車両：なし レーダー設置高：5m	448	444/448	-
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(左→右) レーダー設置高：5m	691	229/229	455/462
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後) レーダー設置高：5m	1178	481/491	486/687

歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(左→右) レーダー設置高：2.5m	841	355/355	476/486
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後) レーダー設置高：2.5m	1054	451/460	437/594
以下 x42 交差点			
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(左→右)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	912	593/597	299/315
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	1421	819/861	502/560
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両2台直進(左→右)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	843	530/532	286/311
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	1246	714/757	428/489
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(左→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	991	632/685	192/306
歩行者：左右から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(左→後、右→後)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	1739	941/1029	636/710
	平均	97.3%	85.7%

検証 3 の結果から、LR レーダー/x44・x42 混合の場合、対象エリア横断歩道を歩く一人の歩行者に対して開発したアルゴリズムが高い識別率(平均 97.3%)を有することを確認できた。x44 交差点または x42 交差点単独の場合と比べると、識別率が少し低くなったが、大きな違いは見られなかった。また、学習用データとしてレーダー設置高 5m のデータのみを利用したが、7m と 2.5m の検証用データに対しても 5m とほぼ同等の識別率を得られた。結論として、LR レーダーに対して、異なる交差点種類及び異なるレーダー設置高に適用できる汎用的な SVM 判別器の開発は可能と考える。

5.1.2.2.5. 検証 4 : SR レーダー/x44 基本識別性能

検証 4 におけるレーダーと対象横断歩道の位置関係を図 5.1.2.2.5-1 に示す。図 5.1.2.2.5-1 において、SR はレーダー設置位置、A は対象横断歩道を示す。

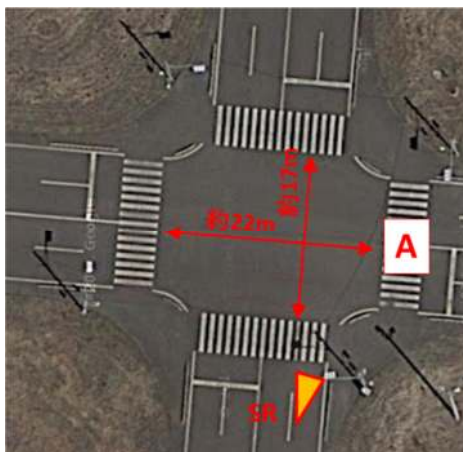


図 5.1.2.2.5-1 レーダーと対象横断歩道の位置関係

検証 4 では SR レーダーの基本的な識別性能を検証するため、学習用データと検証用データを同じ実験環境(但し、レーダー設置高の変動あり)で取得したデータセットを利用した。但し、学習用データは歩行者と四輪車両が単独で移動するパターンのデータセットを利用し、検証用データは異なる移動パターンの複合データセットを利用した。検証 4 で利用した実験データの詳細を表 5.1.2.2.5-1 に示す。

表 5.1.2.2.5-1 検証 4(SR/x44)用実験データの詳細

学習用データ	交差点種類	4車線同士の交差点(x44)
	レーダー種類	ショートレンジ(SR)
	レーダー設置高	①5mのみ、②5m、2.5m
	歩行者	人数：1人 移動方式：右横断歩道、前後移動、低速度／高速度
	四輪車両	車種：2車種(乗用車、バン) 移動方式：直進2パターン(右→左、後→前)
検証用データ	交差点種類	(学習データ同)
	レーダー種類	(学習データ同)
	レーダー設置高	5m、2.5m
	歩行者	人数：2人 移動方式：右横断歩道、前後から1名ずつ擦れ違い
	四輪車両	車種：(学習データ同) 移動方式：直進と右左折3パターン(前→右、後→前、後→右)

学習用データとして、歩行者 361 サンプル、四輪車両 337 サンプルを取得した。
学習用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.5-2 に示す。



(a) 歩行者単独(レーダー設置高 5m)



(b) 車両単独(レーダー設置高 5m)

図 5.1.2.2.5-2 学習用データの取得シーン

検証用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.5-3 に示す。



(a) レーダー設置高 5m



(b) レーダー設置高 2.5m

図 5.1.2.2.5-3 検証用データの取得シーン

検証 4 の検証結果を表 5.1.2.2.5-2 と表 5.1.2.2.5-3 に示す。表 5.1.2.2.5-2 は 5m のみの学習データを利用する場合の結果であり、表 5.1.2.2.5-3 は 5m と 2.5m の学習データを利用する場合の結果である。

表 5.1.2.2.5-2 検証 4(SR/x44)の検証結果①

検証用データのパターン	検証 データ数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：右横断歩道を1人で歩く 車両：なし レーダー設置高：5m	221	218/221	—
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前) レーダー設置高：5m	629	240/258	365/371
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右) レーダー設置高：5m	649	257/264	238/385
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	873	216/315	554/558
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	703	214/298	300/405
	平均	82.6%	83.3%

表 5.1.2.2.5-3 検証 4(SR/x44)の検証結果②

検証用データのパターン	検証 データ数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：右横断歩道を1人で歩く 車両：なし レーダー設置高：5m	221	210/221	—
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前) レーダー設置高：5m	629	244/258	367/371

歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右) レーダー設置高：5m	649	250/264	201/385
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	583	192/209	370/374
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	455	182/195	211/260
	平均	93.9%	82.8%

検証4の検証結果1から、SRレーダー/x44交差点の設置条件の場合、対象エリア横断歩道を一人で歩く歩行者に対して平均で82.6%の識別率を確認できた。但し、検証データをレーダー設置高で分けてみると、5mの場合は識別率が96.3%で、2.5mの場合は識別率が70.1%である。つまり、検証4において、レーダー設置高5mのみの学習用データに基づいたSVM判別器は2.5mの検証データへの適用性が低かった。そのため、2.5mのデータの一部を学習用データに追加し、再度検証結果2を取得した。検証結果2から、歩行者に対し平均で93.9%の識別率を確認できた。結論として、SRレーダー/x44交差点の設置条件の場合、異なるレーダー設置高によって測定データの特徴量に違いが見られたが、学習データとして異なるレーダー設置高のデータを利用すれば、統一的なSVM判別器を生成することは可能である。

5.1.2.2.6. 検証5：SRレーダー/x42基本識別性能

検証5におけるレーダーと対象横断歩道の位置関係を図5.1.2.2.6-1に示す。図5.1.2.2.6-1において、SRはレーダー設置位置、Aは対象横断歩道を示す。

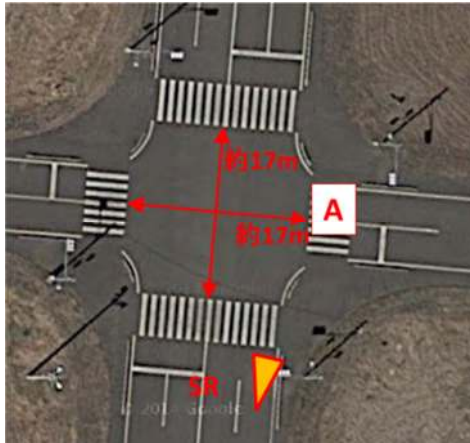


図 5.1.2.2.6-1 レーダーと対象横断歩道の位置関係

検証 5 では SR レーダーの基本的な識別性能を検証するため、学習用データと検証用データを同じ実験環境(但し、レーダー設置高の変動あり)で取得したデータセットを利用した。但し、学習用データと検証用データは異なるデータセットを利用した。検証 5 で利用した実験データの詳細を表 5.1.2.2.6-1 に示す。

表 5.1.2.2.6-1 検証 5(SR/x42)用実験データの詳細

学習用データ	交差点種類	4 車線と 2 車線の交差点(x42)
	レーダー種類	ショートレンジ(SR)
	レーダー設置高	①5m のみ、②5m、2.5m
	歩行者	人数：2 人 移動方式：右横断歩道、前後から 1 名ずつ擦れ違い
四輪車両	車種：2 車種(乗用車、バン) 移動方式：直進と右左折 3 パターン(前→右、後→前、後→右)	
検証用データ	交差点種類	(学習データ同)
	レーダー種類	(学習データ同)
	レーダー設置高	5m、2.5m、7m
	歩行者	人数：2 人 移動方式：右横断歩道、前後から 1 名ずつ擦れ違い
	四輪車両	車種：3 台(乗用車、バン 2 台) 移動方式：直進と右左折 3 パターン(前→右、後→前、後→右)、1 台は横断歩道手前に停車

学習用データとして、歩行者 1029 サンプル、四輪車両 1152 サンプルを取得した。
学習用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.6-2 に示す。



(a) 車両直進(レーダー設置高 5m)



(b) 車両右左折(レーダー設置高 5m)

図 5.1.2.2.6-2 学習用データの取得シーン

検証用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.6-3 に示す。



(a) レーダー設置高 7m



(b) レーダー設置高 2.5m

図 5.1.2.2.6-3 検証用データの取得シーン

検証 5 の検証結果を表 5.1.2.2.6-2 と表 5.1.2.2.6-3 に示す。表 5.1.2.2.6-2 は 5m のみの学習データを利用する場合の結果であり、表 5.1.2.2.6-3 は 5m と 2.5m の学習データを利用する場合の結果である。

表 5.1.2.2.6-2 検証 5(SR/x42)の検証結果①

検証用データのパターン	検証データ数	歩行者識別率	車両識別率
歩行者：前後から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台直進(後→前)、1 台停車状態 レーダー設置高：5m	891	408/425	459/466
歩行者：前後から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台右左折(前→右、後→右)、1 台停車状態 レーダー設置高：5m	984	460/493	396/491
歩行者：前後から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台直進(後→前)、1 台停車状態 レーダー設置高：7m	664	303/322	342/342
歩行者：前後から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台右左折(前→右、後→右)、1 台停車状態 レーダー設置高：7m	846	363/390	363/456
歩行者：前後から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台直進(後→前)、1 台停車状態 レーダー設置高：2.5m	1097	411/503	594/594

歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	1092	483/575	467/517
	平均	90.3%	91.5%

表 5.1.2.2.6-3 検証 5(SR/x42)の検証結果②

検証用データのパターン	検証 データ数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	891	416/425	460/466
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	984	465/493	375/491
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	664	309/322	342/342
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	846	369/390	342/456
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	731	302/326	405/405
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	747	356/383	332/364
	平均	94.7%	90.2%

検証 5 の結果から、SR レーダー/x42 交差点の設置条件の場合、対象エリア横断歩道を一人で歩く歩行者に対し平均で 90.3%の識別率を確認できた。但し、検証データをレーダー設置高で分けてみると、5m の場合は識別率が 94.6%で、7m の場合は識別率が 93.5%で、2.5m の場合は識別率が 82.8%である。つまり、検証 4 において、レーダー設置高 5m のみの学習用データに基づいた SVM 判別器は 7m の検証データへの適用性を確認できたが、2.5m の検証データへの適用性が低かった。2.5m に対応するため、学習用データに違う設置高のデータを追加する必要がある。

そこで、2.5m のデータの一部を学習用データに追加し、再度の検証結果 2 を取得した。検証結果 2 から、歩行者に対し平均で 94.7%の識別率を確認できた。結論として、SR レーダー/x42 交差点の設置条件の場合、異なるレーダー設置高によって測定データの特徴量に違いが見られたが、学習データとして異なるレーダー設置高のデータを利用すれば、統一的な SVM 判別器を生成することは可能である。

5.1.2.2.7. 検証 6 : SR レーダー/x44・x42 混合基本識別性能

検証 6 では前記検証 4(2.5m データ追加後)と検証 5(2.5m データ追加後)の学習用データを混合し、新しい学習用データとする。また、検証用データも検証 4 と検証 5 で利用した検証用データを利用する。

検証 6 は、検証 3 同様、開発したアルゴリズム、特にその中の SVM 判別器のロバスト性を検証することが目的である。

学習用データとして、歩行者 1968 サンプル、四輪車両 1988 サンプルを取得した。

検証 6 の検証結果を表 5.1.2.2.7-1 に示す。

表 5.1.2.2.7-1 検証 6(SR/x44・x42 混合)の検証結果

検証用データのパターン	検証データ数	歩行者識別率	車両識別率
以下 x44 交差点			
歩行者：右横断歩道を 1 人で歩く 車両：なし レーダー設置高：5m	221	202/221	—
歩行者：前後から 1 名ずつ横断歩道往復 車両：2 台直進(後→前) レーダー設置高：5m	629	241/258	365/371

歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右) レーダー設置高：5m	649	240/264	217/385
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	583	176/209	370/374
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	455	158/195	220/260
以下 x42 交差点			
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	891	416/425	447/466
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：5m	984	480/493	364/491
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	664	316/322	340/342
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：7m	846	364/390	351/456
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台直進(後→前)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	731	304/326	400/405
歩行者：前後から1名ずつ横断歩道往復 車両：2台右左折(前→右、後→右)、1台停車状態 レーダー設置高：2.5m	747	355/383	332/364
	平均	92.5%	87.4%

検証 6 の結果から、SR レーダー/x44・x42 混合の場合、対象エリア横断歩道を歩く一人の歩行者に対して開発したアルゴリズムが平均識別率 92.5%を有することを確認できた。x44 交差点または x42 交差点単独の場合と比べると、大きな変動は見られていない。但し、学習用データとしてレーダー設置高 5m のデータのみでは 2.5m の検証用データへの適用性が低いため、2.5m のデータも一部学習データに追加している。結論として、SR レーダーに対し、異なる交差点種類に適用できる汎用的な SVM 判別器の開発は可能と考えるが、低いレーダー設置高のデータを学習用データに追加する必要がある。

5.1.2.2.8. 検証 7：静止歩行者基本識別機能

検証 7 では静止状態の歩行者に対する識別性能を検証する。検証 7 で利用した実験データの詳細を表 5.1.2.2.8-1 に示す。

表 5.1.2.2.8-1 検証 7(静止歩行者)用実験データの詳細

学習用データ	交差点種類	4 車線同士の交差点(x44) 4 車線と 2 車線の交差点(x42)
	レーダー種類	ロングレンジ(LR)
	レーダー設置高	5m
	歩行者	人数：1 人～5 人、押し自転車 移動方式：中央横断歩道／右横断歩道、 低速度／高速度
	四輪車両	無し
	その他対象物	ノイズデータ、道路上ある縁石ブロックと ガードレール
検証用データ	交差点種類	4 車線同士の交差点(x44)
	レーダー種類	ロングレンジ(LR)
	レーダー設置高	5m
	歩行者	人数：2 人 移動方式：中央横断歩道、停止状態
	四輪車両	無し

学習用データとして、歩行者 1212 サンプル、その他 1000 サンプルを取得した。

検証用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.8-1 に示す。



図 5.1.2.2.8-1 検証用データの取得シーン

検証 7 の検証結果を表 5.1.2.2.8-2 に示す。

表 5.1.2.2.8-2 検証 7(静止歩行者)の検証結果

検証用データのパターン	検証 データ数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：中央横断歩道で 2 人が停止状態 車両：なし	6137	6111/6137	—

検証 7 の結果より、静止歩行者とその他静止物(ガードレール、縁石ブロック)を高精度で識別できることを確認できた。但し、検証用データのパターンはまだ少ないので、今後、パターンを増やして更なる検証が必要と考える。

5.1.2.2.9. 検証 8 : LR レーダー総合識別性能

検証 8 では、開発したアルゴリズムを総合的に評価するため、学習用データと検証用データとして異なる実験環境で取得したデータセットを利用する。検証 8 で利用した実験データの詳細を表 5.1.2.2.9-1 に示す。

表 5.1.2.2.9-1 検証 8(LR)用実験データの詳細

学習用データ	DATA_201503 ^{※1}	交差点種類	4車線同士の交差点(x44) 4車線と2車線の交差点(x42)
		レーダー種類	ロングレンジ(LR)
		レーダー設置高	5m、2.5m
		歩行者	人数：1人 移動方式：中央横断歩道、低速度と高速度
		車両	車種：2車種(乗用車、バン) 移動方式：直進と右左折4パターン(前→後、左→右、左→後、右→後)
学習用データ	DATA_201601 ^{※2}	交差点種類	4車線同士の交差点 ※駐車場を利用し、4車線同士の交差点を模擬
		レーダー種類	ロングレンジ(LR)
		レーダー設置高	5m
		歩行者	人数：1～3人 移動方式：中央横断歩道、左横断歩道、複数人で歩く場合は順番、並走、擦れ違い
		車両	車種：2種類(乗用車、トラック) 移動方式：直進と右左折10パターン(前→後、前→左、後→前、後→左、後→右、左→前、左→後、左→右、右→後、右→左) 歩行者優先の場合一時停止有り
検証用データ	DATA_201602 ^{※3}	交差点種類	4車線同士の交差点
		レーダー種類	ロングレンジ(LR)
		レーダー設置高	5m
		歩行者	人数：1人～4人 移動方式：中央横断歩道、左横断歩道、複数人で歩く場合は順番、並走、擦れ違い、押し自転車含む
		車両	車種：5車種(乗用車、バン、トラック、バイク、走行自転車) 移動方式：直進と右左折10パターン(前→後、前→左、後→前、後→左、後→右、左→前、左→後、左→右、右→後、右→左) 歩行者優先の場合一時停止有り

- ※1：2015年3月2日～6日、JARI 模擬市街路西コースにて取得
- ※2：2016年1月18日～22日、東京サマーランド駐車場にて取得
- ※3：2016年2月15日～19日、JARI 模擬市街路西コースにて取得

学習用データとして、歩行者 6044 サンプル、車両 5752 サンプルを取得した。また、学習用データ DATA_201503 データセットの対応シーンは検証 1 と検証 2 から参照できる。学習用データ DATA_201601 データセットの対応シーンの一例を図 5.1.2.2.9-1 に示す。



(a) 中央横断歩道



(b) 左横断歩道

図 5.1.2.2.9-1 学習用データ DATA_201601 の取得シーン

検証用データ DATA_201602 データセットの対応シーンの一例を図 5.1.2.2.9-2 に示す。



(a) 中央横断歩道



(b) 左横断歩道

図 5.1.2.2.9-2 検証用データの取得シーン

検証 8 の検証結果を表 5.1.2.2.9-2 に示す。

表 5.1.2.2.9-2 検証 8(LR/x44)の検証結果

検証用データのパターン	検証 データ数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：左横断歩道、2人前後移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：5車種、3パターン(前→後、前→左、前→右)	776	273/282	474/494

歩行者：左横断歩道、2人前後移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：5車種、3パターン(後→前、後→左、後→右)	1365	486/502	760/863
歩行者：左横断歩道、2人前後移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：5車種、3パターン(後→前、後→左、後→右)	2737	1401/1576	917/1161
歩行者：左横断歩道、3人前後移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：3車種、4パターン(前→後、前→右、後→前、後→左)	566	245/259	256/307
歩行者：左横断歩道、2人+押し自転車前後移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：5車種、6パターン(前→後、前→左、前→右、後→前、後→左、後→右)	1580	827/906	573/674
歩行者：画面中央横断、2人左右移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：5車種、2パターン(右→後、右→左)	527	106/106	366/421
歩行者：画面中央横断、2人左右移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：5車種、3パターン(左→右、左→後、左→前)	1766	707/715	856/1051
歩行者：画面中央横断、2人左右移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：5車種、3パターン(左→前、左→後、左→右)	723	143/143	408/580
歩行者：画面中央横断、4人左右移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：3車種、3パターン(左→前、左→後、左→右)	3116	1926/1949	906/1167
歩行者：画面中央横断、2人+押し自転車(順番、並走、擦れ違い) 車両：4車種、5パターン(左→前、左→後、左→右、右→後、右→左)	926	442/447	387/479
	平均	96.5%	82.8%

検証 8 の結果から、LR レーダーに対し、開発したアルゴリズムが歩行者の平均識別率 96.5%を有することを確認できた。検証用データに学習データに直接に反映されていないシーンも含まれているので、識別器が一定のロバスト性を有することも確認できた。但し、四輪車両の識別率が 82.8%(捕捉領域ベース)で改善が必要である。また、複数人の場合に対して必ずしも一人一人を独立に識別できたわけではない。一人一人を独立して識別する可能性を含め、実用的な評価および識別方法の改善を今後更に取り組む予定である。

5.1.2.2.10. 検証 9 : SR レーダー総合識別性能

検証 9 では、開発したアルゴリズムを SR レーダーに適用する場合の性能を総合的に評価する。そのため、学習用データと検証用データとして異なる実験環境で取得したデータセットを利用する。検証 9 で利用した実験データの詳細を表 5.1.2.2.10-1 に示す。

表 5.1.2.2.10-1 検証 9(SR)用実験データの詳細

学 習 用 デ ー タ	DATA_201503 ^{*1}	交差点種類	4 車線同士の交差点(x44) 4 車線と 2 車線の交差点(x42)
		レーダー種類	ショートレンジ(SR)
		レーダー設置高	5m、2.5m、7m(車両のみ)
		歩行者	人数：1~2 人 移動方式：2 人の場合、右横断歩道を前後から 1 人ずつ擦れ違い
		車両	車種：2 車種(乗用車、バン) 移動方式：直進と右左折 4 パターン(前→右、 後→前、後→右、右→左)
	DATA_201601 ^{*2}	交差点種類	4 車線同士の交差点(x44) ※駐車場において 4 車線同士の交差点を模擬
		レーダー種類	ショートレンジ(SR)
		レーダー設置高	5m
		歩行者	人数：1~3 人 移動方式：右横断歩道と中央横断歩道を 複数人が前後から順番、並走、擦れ違い
		車両	車種：2 種類(乗用車、トラック)

	DATA_201601 ^{※2}		移動方式：直進と右左折 10 パターン(前→後、前→左、後→前、後→左、後→右、左→前、左→後、左→右、右→後、右→左)、歩行者優先の場合一時停止有り
検証用データ	DATA_201602 ^{※3}	交差点種類	4車線同士の交差点(x44)
		レーダー種類	ショートレンジ(SR)
		レーダー設置高	5m
		歩行者	人数：1人～4人 移動方式：右横断歩道を複数人が前後から順番、並走、擦れ違い
		車両	車種：5車種(乗用車、バン、トラック、バイク、走行自転車) 移動方式：直進と右左折 10 パターン(前→後、前→左、後→前、後→左、後→右、左→前、左→後、左→右、右→後、右→左)、歩行者優先の場合一時停止有り

※1：2015年3月2日～6日、JARI 模擬市街路西コースにて取得

※2：2016年1月18日～22日、東京サマーランド駐車場にて取得

※3：2016年2月15日～19日、JARI 模擬市街路西コースにて取得

学習用データとして、歩行者 6847 サンプル、四輪車両 6548 サンプルを取得した。
学習用データ数の構成を表 5.1.2.2.10-2 に示す。

表 5.1.2.2.10-2 学習用データ数の構成

歩行者	DATA_201503	x44	5m	1046
			2.5	315
		x42	5m	1029
			2.5m	1376
	DATA_201601	x44	5m	3081
車両	DATA_201503	x44	5m	722
			5m	1320
		x42	2.5m	922
			7m	456
	DATA_201601	x44	5m	3128

学習用データ DATA_201503 の取得シーンは検証 4 と検証 5 を参照できる。

学習用データ DATA_201601 の取得シーンの一例を図 5.1.2.2.10-1 に示す。



図 5.1.2.2.10-1 学習データの取得シーン

検証用データの取得シーンの一例を図 5.1.2.2.10-3 に示す。



(a) 4人歩行者



(b) 押し自転車

図 5.1.2.2.10-3 検証用データの取得シーン

検証 9 の検証結果を表 5.1.2.2.10-3 に示す。

表 5.1.2.2.10-3 検証 9(SR)の検証結果

検証用データのパターン	検証 データ数	歩行者 識別率	車両 識別率
歩行者：右横断歩道、2 人前後移動(順番、並走、 擦れ違い) 車両：5 車種、3 パターン(後→前、後→左、後→右)	1192	624/657	434/535
歩行者：右横断歩道、4 人前後移動(順番、並走、 擦れ違い) 車両：5 車種、3 パターン(後→前、後→左、後→右)	2651	1948/2074	472/577
歩行者：右横断歩道と中央横断歩道、3 人が一時停止 車両に近接移動(順番、並走、擦れ違い) 車両：3 車種、1 パターン(後→右)	1478	785/890	494/588
歩行者：右横断歩道、2 人前後移動(順番、並走、 擦れ違い) 車両：5 車種、2 パターン(前→後、前→右)	1149	867/913	195/236
歩行者：右横断歩道、2 人前後移動(順番、並走、 擦れ違い) 車両：5 車種、3 パターン(後→前、後→左、後→右)	1446	937/964	405/482
歩行者：右横断歩道、2 人+押し自転車 車両：4 車種、5 パターン(後→前、後→左、後→右、 前→後、前→右)	2113	1495/1686	368/427
	平均	92.9%	83.3%

検証 8 の結果から、SR レーダーに対し、開発したアルゴリズムが歩行者の平均識別率 92.9%を有することを確認できた。検証用データに学習データに直接に反映されていないシーンも含まれているので、識別器が一定のロバスト性を有することも確認できた。但し、四輪車両の識別率が 83.3%(捕捉領域ベース)で改善が必要である。また、複数人の場合に対して必ずしも一人一人を独立に識別できたわけではない。一人一人を独立して識別する可能性を含め、実用的な評価および識別方法の改善を今後更に取り組む予定である。

5.1.2.2.11. 検証結果のまとめ

前記各検証の検証結果から見れば、開発した歩行者識別アルゴリズムは、交差点内の横断歩道を通常の状態に移動する歩行者に対し、概ね高い識別率を達した。

LR レーダーの識別性能については、識別対象エリアの中央横断歩道と左横断歩道を歩く歩行者に対して、平均で 95%以上の識別率を実現できた。異なる交差点種類(x44 か x42)、または異なるレーダー設置高(5m、7m、2.5m)の測定データに対して、識別用特微量に大きな変動が見られていないことから統一的な識別器を作成し利用することは可能と考える。

SR レーダーの識別性能については、識別対象エリアの右横断歩道を歩く歩行者に対して、概ね 90%以上の識別率を実現できた。但し、SR レーダーの場合は、異なる交差点種類(x44 か x42)、または異なるレーダー設置高(5m、7m、2.5m)の測定データに対して、識別用特微量の変動が大きいと見られたため、SVM 判別器を作成する際に異なる種類のデータを学習用データに入れる必要がある。特に、レーダー設置高が低い場合に対して、対応学習用データの取得が重要である。学習データとして、異なる交差点種類及び異なるレーダー設置高のデータを十分に取得できれば、統一的な識別器を作成し利用することは可能と考える。

異なる交差点種類に対しては、歩行者や車両の移動範囲とレーダーとの相対位置が変わるため、識別率も多少変動する。但し、検証結果から見れば、歩行者識別率の変動が小さくないが、車両識別率の変動が比較的大きい。原因の1つとしては、レーダーにとって、異なる種類の交差点を移動する車両の位置と速度の変動幅が広いからと考えられる。そのため、異なる種類の交差点に対して、識別器を作成する際に、各種類の交差点における車両の移動ルートから車両の位置と速度データをより多く学習データとして取得する必要がある。

前記各検証では歩行者と四輪車両との区別に焦点を当てた。レーダー測定データから見れば、捕捉領域のみの特微量を利用して区別を実現するのは困難であるため、クラスタの特微量も利用した。しかし検証結果からみれば、車両の部位を歩行者に誤認識されるケースはまだ十分に排除できていない。そのため、車両の識別率も比較的にならなっている。誤認識は特に車両が右左折する時に発生している。上記誤認識を減らすため、通常、車両の存在を確定できた場合に車両の至近距離にある捕捉領域を車両の一部として判別し車両と統合しても問題ないが、車両近傍にいる歩行者の識別を最優先したいので、現在のアルゴリズムではあえて車両の誤認識のままとして残っている。今後、異常系も含み、車両と至近距離にいる歩行者の測定データを取得し、学習データとして利用する必要がある。また、時系列の追従処理なども追加し、識別性能の改善を行う必要がある。

今までの検証では、主に正常系の歩行者を対象に識別アルゴリズムの性能を評価した。今後、異常系の歩行者、例えば、横断歩道以外のエリアや異常動き、による評価も必要である。また、車両に関しては、四輪車両以外に自転車やバイクなども各々に識別できる車両判別アルゴリズムの開発も必要である。

5.1.2.3. 反射信号クラスタリングのためのパラメータ抽出

本節では、複数の反射信号で構成されるクラスタの空間的なサイズから対象物の車種判別を可能とするために、レイトレース法を用いた伝搬シミュレーション解析を行う。電波伝搬の分野におけるレイトレース法(Ray Trace method)とは、送信点(送信アンテナ)から放射される電波をレイ(Ray)とみなし、車両を含む周辺構造物(散乱体)との反射、透過、回折といった相互作用を経て、受信点(受信アンテナ)に到達するレイを幾何学的にトレース(Trace)することにより、電波伝搬をシミュレートする技術である[1]。本解析では、レイラウンチング法に表面回折やクリーピング波を加味し、飛行機や車等の大規模散乱体を対象にした電磁界解析シミュレータ・XGtd (Remcom 社) [2] を使用する。なお、レイラウンチング法とは、レイトレース法の解法の種類であり、送信点から多数のレイを出射させて解析する方法である。

車両等が混在する交差点を想定した伝搬シミュレーション解析では、散乱体となる車両のモデル化が必要となる。一般的に、レイトレース法におけるモデルは、対象となる散乱体のモデリング精度で、シミュレーションの計算精度に影響することが知られている。そこで本解析では、昨年度の簡易的なモデルによる全体解析から、実在する車両を形状モデリングした高精度なモデルを作成して計算精度の高いシミュレーション環境の構築、および交差点内の 79GHz 帯レーダーに対する伝搬特性の詳細解析を進める。

A) モデル化

表 5.1.2.3-1 にシミュレーション用車両モデルの対象車種(形式)を示す。いずれも日本国内において代表的な車両から選定した。

表 5.1.2.3-1 対象車種

形式	車両	車体寸法[mm]
四輪車 セダン型	プリウス(トヨタ自動車)	4460 x 1745 x 1490
四輪車 バン型	ハイエース(トヨタ自動車)	4695 x 1695 x 1980
四輪車トラック型	ダイナ(トヨタ自動車)	4915 x 1890 x 2950
二輪車 バイク	スーパーカブ 50(本田技研工業)	1915 x 700 x 1050

形状モデリング方法としては、車体ボディ等、車両の形状をレーザーレーダーで計測し、その点群データを合成することで車両モデルを作成する。本計測では、全方位レーザーライダーイメージングユニット・HDL-32e (Velodyne 社) [3] を使用する

る。これは、多点レーザー送受信センサーにより、全方位を高速でスキャンし、リアルタイム三次元イメージが生成可能なユニットである。

四輪車セダン型の実車両に対する計測風景を図 5.1.2.3-1 に示す。計測方法としては、リフター機能付き台車にレーザーレーダーを固定して、停車した車両周辺を位置や高さを変えながら測定する。

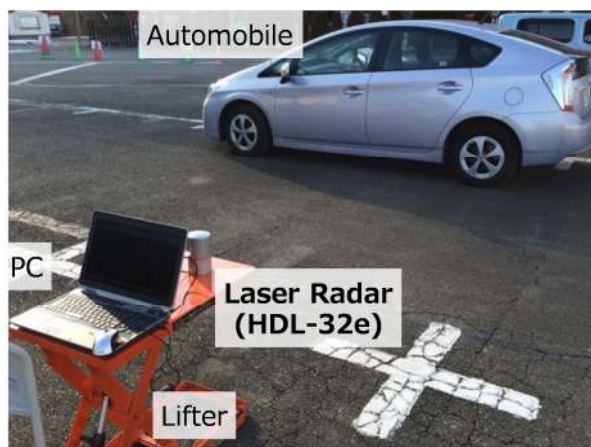


図 5.1.2.3-1 レーザーレーダーによる計測風景

図 5.1.2.3-2 は車両周辺の計測結果の内、側面に一部を示す。なお、表示色は反射レベルが高い順に、黄色、緑色、青色で示している。図 5.1.2.3-2 (a)はレーザーレーダーの計測位置を側面の中心線上とした場合であり、車両の全体形状を捉えていることが分かる。しかしながら、窓のガラスや前輪、後輪のタイヤハウス等、形状モデリングする上で十分なデータが得られていない。そこで、データが得られなかった内、タイヤハウスに注力し、前輪の中心線上とした場合の計測結果を 5.1.2.3-2 (b) に示す。このタイヤハウスは、車両全体の中で窪んだ形状の部分であり、車両に対する 79GHz 帯レーダーの散乱解析(伝搬解析)の際に反射器的な作用を及ぼすポイントであると考えられる。そのため、タイヤハウスを含む窪んだ形状を精度よく計測することが必要である。5.1.2.3-2 (b)より、タイヤ周辺の車体ボディやタイヤホイールは反射レベルが高く、各形状に沿って十分なデータが得られるが、この場合においてもタイヤハウスの計測は困難である。以上から、レーザーレーダーにより、車両の形状を高速、かつ効率的に計測できる点には優位性があるが、特に窪んだ部分の計測精度については課題が残った。

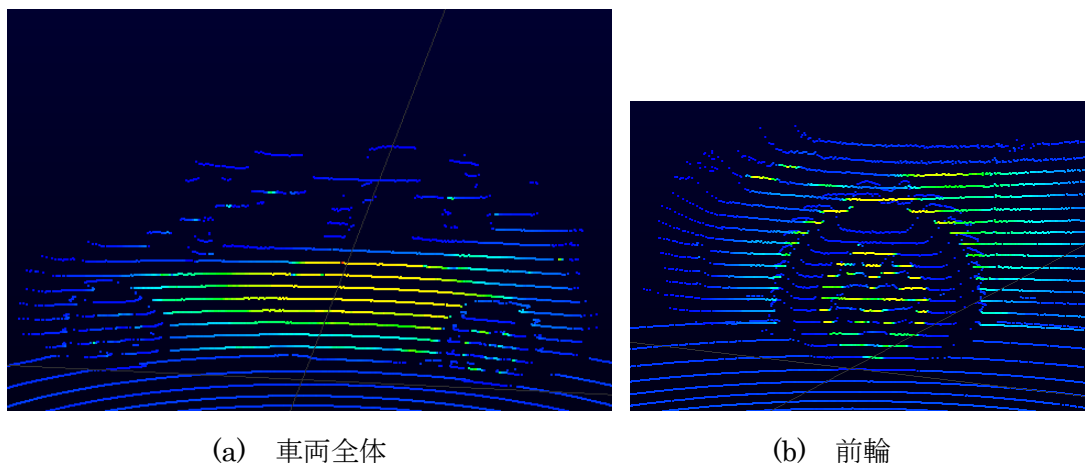


図 5.1.2.3-2 レーザーレーダーによる計測結果

そのため、新たな形状モデリング方法として、車両の部位毎に形状、採寸をしながら車両の形状データを収集することで車両モデル作成する。図 5.1.2.3-3 に具体的なスキームを示しており、形状モデリングでは、①計測・調査、②図面化、③モデル化の工程に分け、以下のように作業内容を定義する。

- ① 車両の詳細な形状、寸法、素材等の計測および調査
- ② 三次元 CAD による図面データ作成
- ③ 全体形状やメッシュ数の最適化、部品毎の分類と材質定数の設定等のモデル処理



図 5.1.2.3-3 形状モデリングのスキーム

図 5.1.2.3-4 に四輪車セダン型の実車両に対する計測・調査の風景を示す(工程①)。車両周辺の計測風景の内、前方の一部であるが、ナンバー、エンブレム、フロントグリルを手作業による採寸と併せて、素材についても確認(例えばエンブレムは樹脂)する。

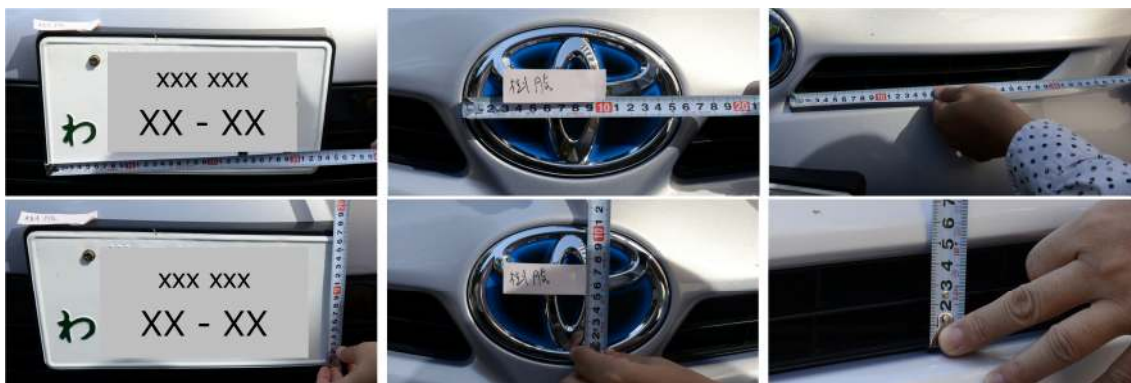
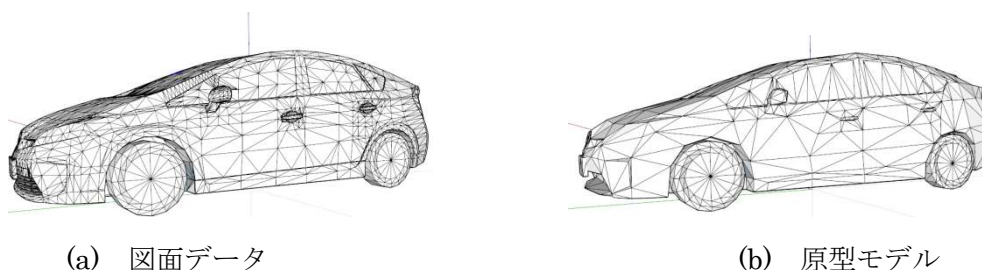


図 5.1.2.3-4 手作業による計測・調査風景

図 5.1.2.3-5~8 は、図面化した車両モデル(工程①)、および一部モデル化した車両モデル(工程②)を示す。工程①の図面データの作成では、基本単位を三角形メッシュとすることで、曲面等の複雑な車両形状を高精度に形状モデリングしている(図 5.1.2.3-5~8(a))。なお、各車両モデルの総メッシュ数は 10000 メッシュ程度である。10000 メッシュの車両モデルは高精度に形状モデリングされているが、シミュレーションの計算量や時間等を鑑みて、メッシュを削減しながら最適化することが必要である(メッシュ調整)。図 5.1.2.3-5~8(b)は、メッシュ調整後の車両モデルを示す(原型モデルと称す)。原型モデルの総メッシュ数は、総メッシュ数に対する計算精度を確認しながら、1000 メッシュ程度に削減している。概ね 1/10 に削減しているが、図面データ(5.1.2.3-5~8(a))と原型モデル(5.1.2.3-5~8(b))を比べると、車両の形状的な特徴は概ね捉えられている。



(a) 図面データ

(b) 原型モデル

図 5.1.2.3-5 四輪車セダン型の原型モデル

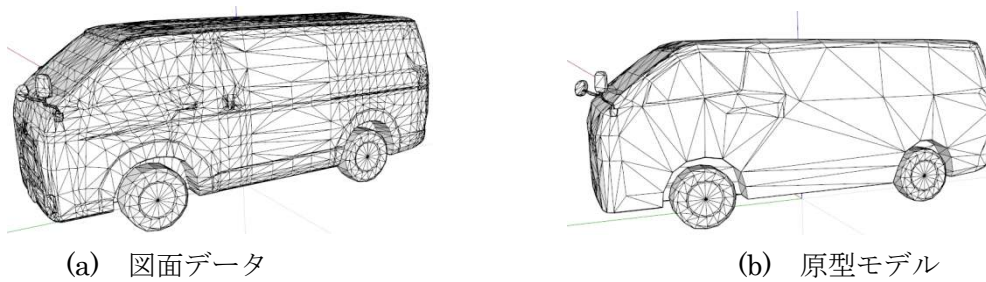


図 5.1.2.3-6 四輪車バン型の原型モデル

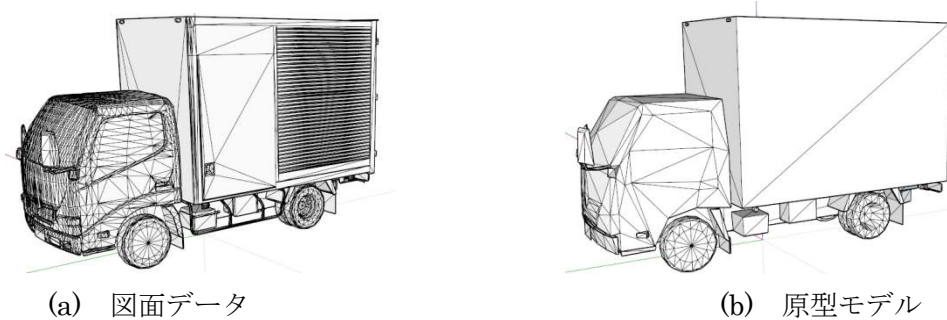


図 5.1.2.3-7 四輪車トラック型の原型モデル

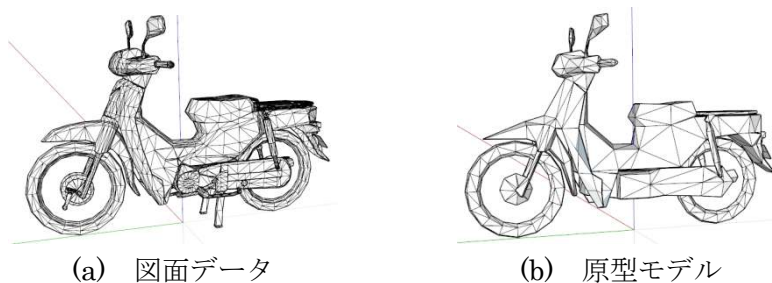


図 5.1.2.3-8 二輪車二輪車バイクの原型モデル

続いて原型モデルに対して部品設定を行う(工程③)。図 5.1.2.3-9 は、四輪車セダン型の原型モデルに対して部品設定後の車両モデルを示す。部品設定では、工程①の調査情報から、メッシュのみで構成された原型モデルの該当部分をグループ化して部品と定義した後、誘電率等の素材定数を設定する。例えば、フロントガラスの場合、その領域にあたる個々のメッシュを1つのグループメッシュと設定、部品として分離した後、ガラスの誘電率等の定数を設定して、車両モデルではガラス系と区分する。ただし、実車両は多岐にわたる部品や素材で構成されているため、膨大な区分が必要となるが、本モデルでは以下の4分類に定義する。

- ・ 金属系(■灰色)：
車体ボディ、車体下部、ホイール、ナンバープレート、ドアノブ、ワイパー
- ・ 樹脂系(■茶色)：
ヘッドライト、ブレーキランプ、バンパー、エンブレム、フロント吸気口、ドアミラー、窓枠、タイヤハウス
- ・ ゴム系(■黒色)：
タイヤ
- ・ ガラス系(■水色)：
ガラス、ドアミラー

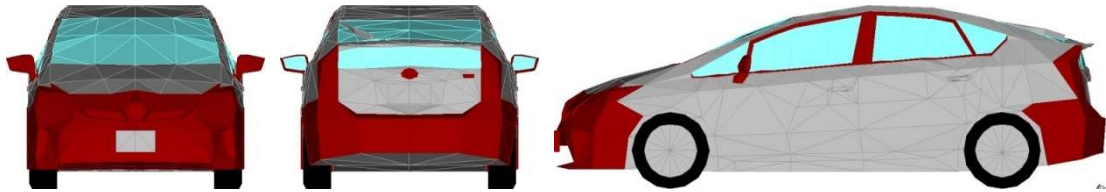


図 5.1.2.3-9 四輪車セダン型の部品設定

図 5.1.2.3-10～13 はメッシュ調整済、部品設定済のシミュレーション用モデルを示す(車両モデルと称す)。いずれの車両モデルも実在する車両を高精度にモデル化できていることが分かる。

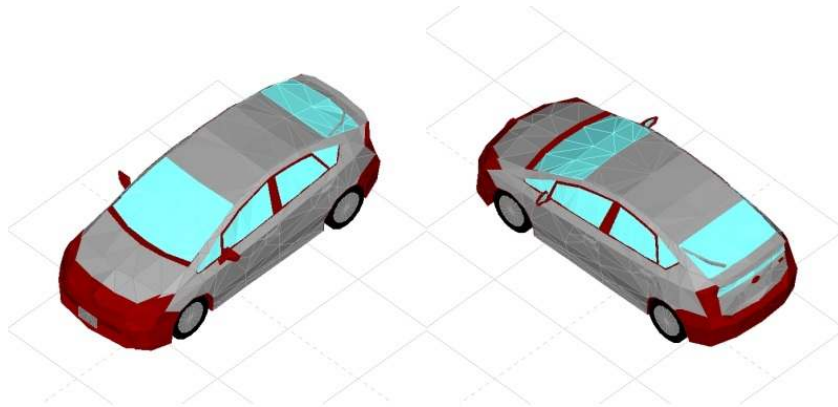


図 5.1.2.3-10 四輪車セダン型の車両モデル

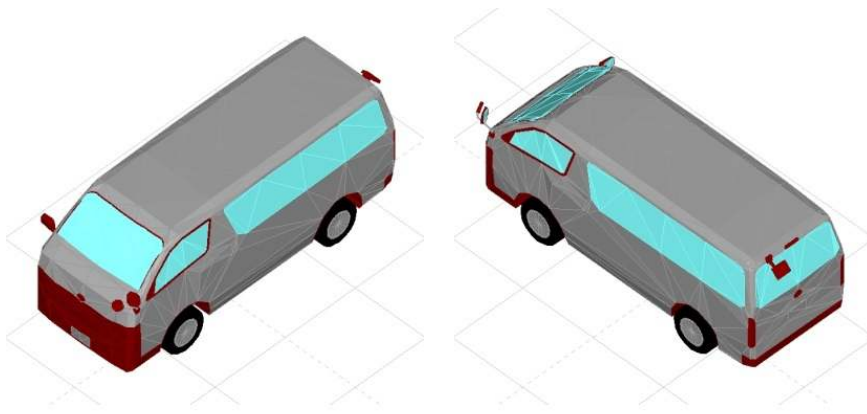


図 5.1.2.3-11 四輪車バン型の車両モデル

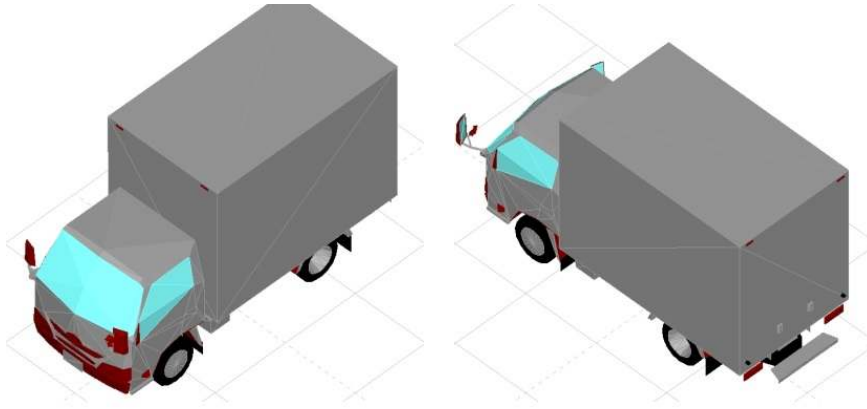


図 5.1.2.3-12 四輪車トラック型の車両モデル



図 5.1.2.3-13 二輪車二輪車バイクの車両モデル

B) 伝搬シミュレーション解析

車両モデルに対する 79GHz 帯レーダーの基礎的な伝搬特性として、自由空間上に置かれた車両モデル単体の伝搬シミュレーション解析を行う(工程④)。図 5.1.2.3-15 は四輪車セダン型の車両モデルにおいて、車両角度に対するシミュレーション結果を示す。なお、シミュレーション諸元を表 5.1.2.3-2、車両角度の定義を図 5.1.2.3-14 示す。

表 5.1.2.3-2 シミュレーション諸元

周波数	79GHz
アンテナ-車両間距離	10m
アンテナ高	1m
アンテナ仰角	0 度
出射角度	0.1 度
最大反射数	4
最大回折数	14

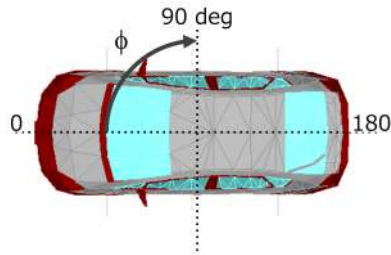
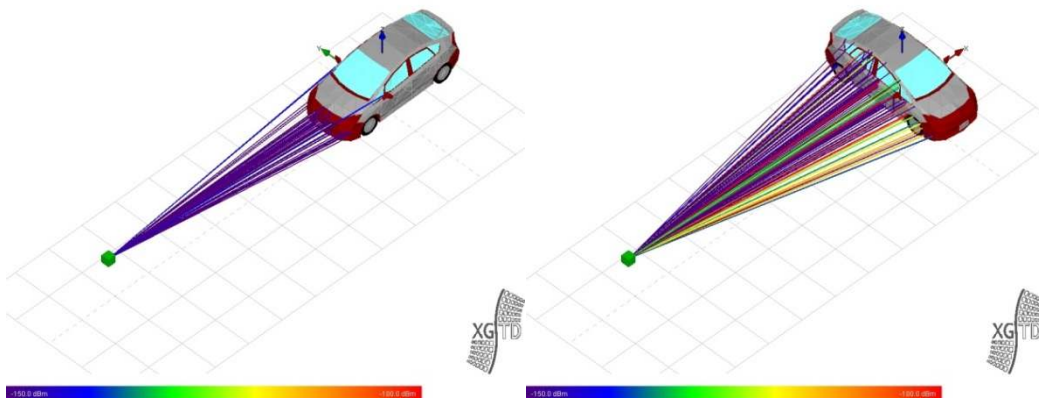


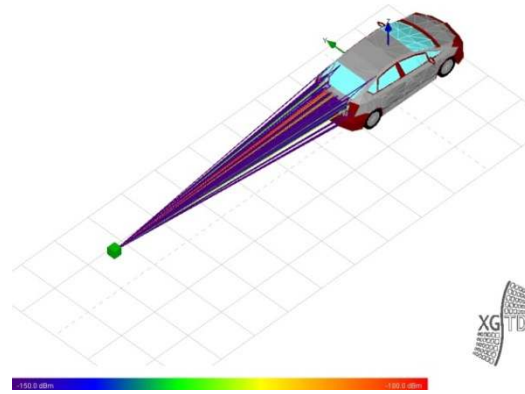
図 5.1.2.3-14 車両角度の定義

図 5.1.2.3-15 では、アンテナから送信した電波が、車両に対して様々な反射や回折を経て、アンテナに受信されるまでの全ての伝搬経路(伝搬軌跡)を示している。これにより、79GHz 帯レーダーの各車両に対する反射点や回折点、伝搬的な振る舞いを捉えることができる。なお、緑色点がアンテナであり、送信点、受信点は 79GHz 帯レーダーシステムに合わせて同位置にしている。また、伝搬軌跡の表示色は受信レベルを 50dB の強度範囲(受信レベルが高い順に赤色、緑色、青色)で示している。車両角度が正面・0 度(図 5.1.2.3-15(a))の場合、ナンバープレートの反射波が支配的であり、一部、ドアミラーの反射波も確認できる。側面・90 度(図 5.1.2.3-15(b))の場合、車体ボディによる反射波だけでなく、前輪、後輪のタイヤ付近からも確認でき、反射波の広がりが広い。そして、背面・180 度(図 5.1.2.3-15(c))の場合、ナンバープレート周辺に反射波が集中している。背面のナンバープレート周辺は、車体ボディ(金属系)と同化しているため、バンパー(樹脂系)で構成されている正面と比べると強い反射波が受信される。



(a) 正面

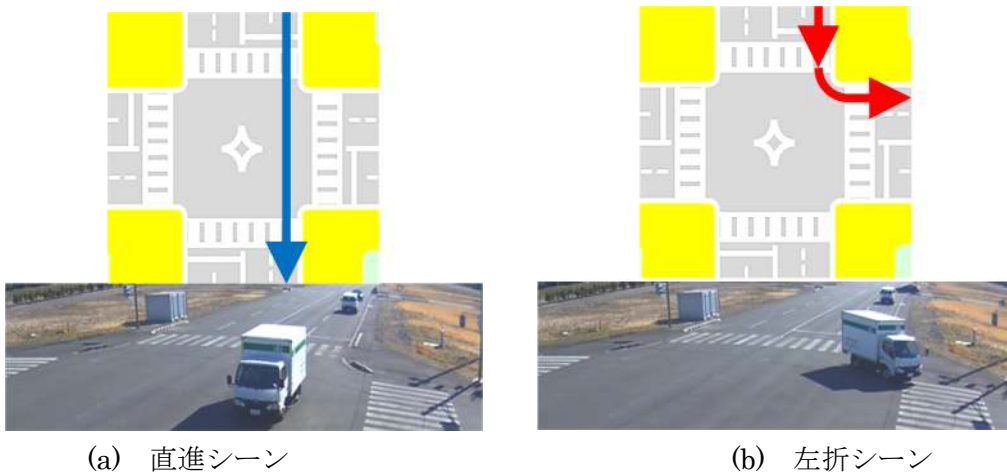
(b) 横面



(c) 背面

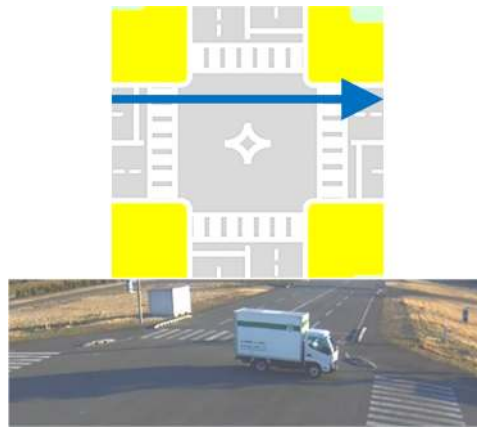
図 5.1.2.3-15 四輪車セダン型の車両角度に対する伝搬特性

続いて、交差点へ進入する車両を想定した伝搬シミュレーション解析を行う。具体的には、図 5.1.2.3-16 に示すように、直進、左折、横断シーン相当の車両角度 0、45、90 度に対してシミュレーションする。なお、シミュレーション諸元は、車両に対する基礎検討として、路面なし、アンテナ高 1m 等、表 5.1.2.3-2 と同条件である。直進シーン・0 度を図 5.1.2.3-17~20、左折シーン・45 度を図 5.1.2.3-21~24、横断シーン・90 度を図 5.1.2.3-25~28 に示すが、それぞれ車両モデルに対して俯瞰図(左図)と上方図(右図)の 2 種類とする。



(a) 直進シーン

(b) 左折シーン



(c) 横断シーン

図 5.1.2.3-16 想定シーン

直進シーン(図 5.1.2.3-17~20)の場合、二輪車二輪車バイク以外、ナンバープレートの反射波が支配的であるが、特に四輪車バン型とトラック型は、車両の前方が平面的な車体ボディ(金属系)で構成されているため、セダン型に比べて反射レベルが大きい。一方、二輪車バイクは、前方の車体ボディ(樹脂系)の反射波が確認できるが、面積が小さいために反射波の広がりが狭く、また樹脂系であるために他の車両と比べて反射レベルが小さい。左折シーン(図 5.1.2.3-21~24)の場合、各車両の前方から側面にかけて反射波が確認でき、直進シーンと比べてその広がりが広い。そして、横断シーン(図 5.1.2.3-25~28)の場合、車体ボディの側面全体からの反射波が主となるため、他のシーンと比べて反射レベルが大きい。また、前輪、後輪のタイヤ付近からの反射波も確認でき、特に四輪車トラック型は、後輪のタイヤホイールが窪んだ形状のため、反射レベルが大きい。以上のように、レイトレース法による伝搬シミュレーション解析から、各条件に応じて車両の特徴的な伝搬特性を確認できる。

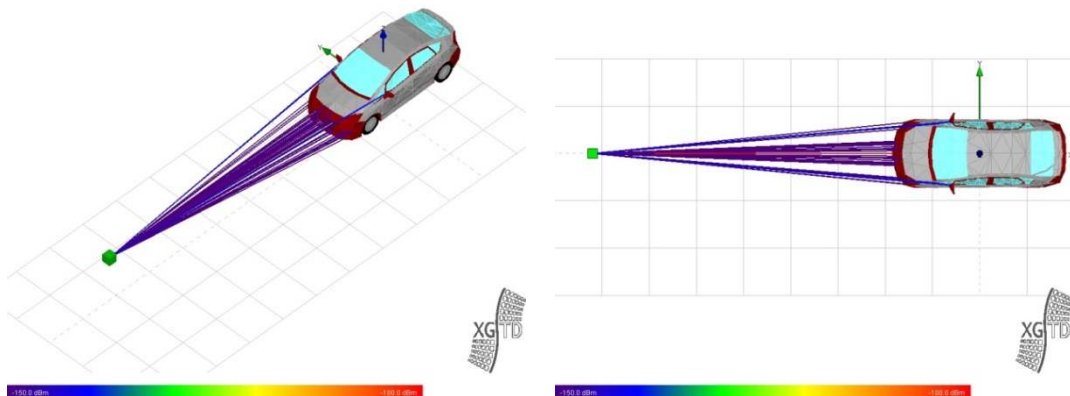


図 5.1.2.3-17 四輪車セダン型の伝搬特性(直進シーン)

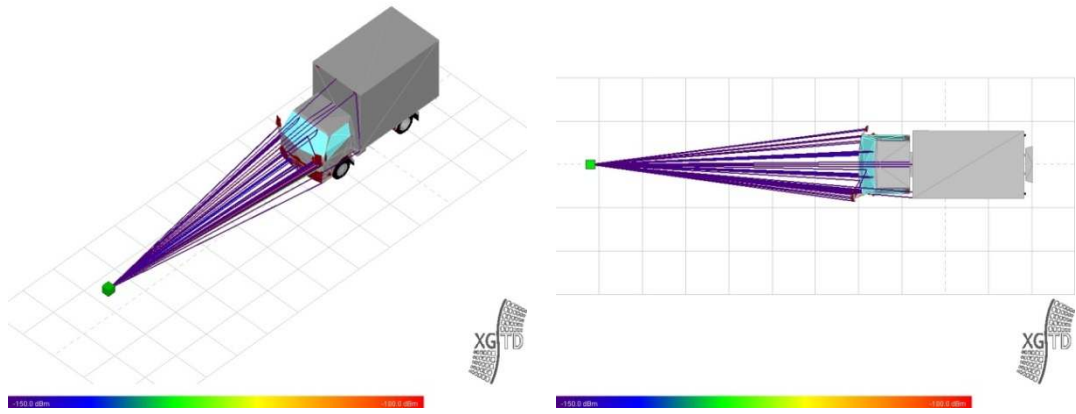


図 5.1.2.3-18 四輪車トラック型の伝搬特性(直進シーン)

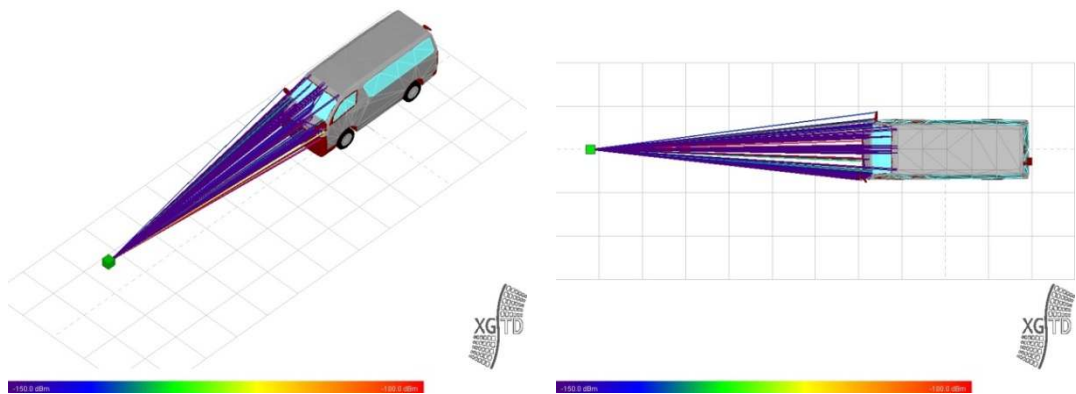


図 5.1.2.3-19 四輪車バン型の伝搬特性(直進シーン)

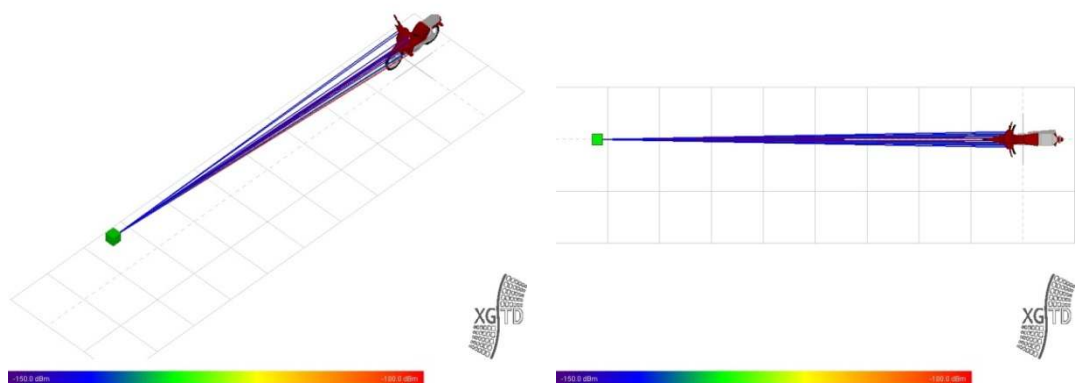


図 5.1.2.3-20 二輪車バイクの伝搬特性(直進シーン)

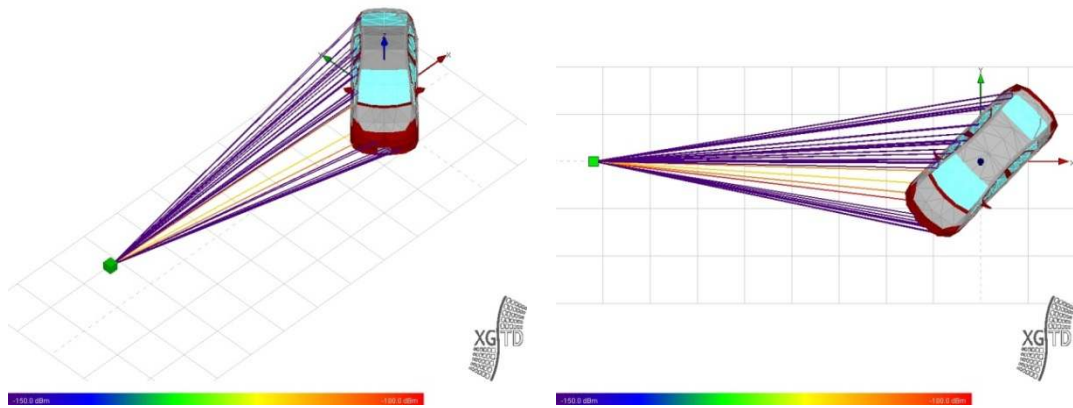


図 5.1.2.3-21 四輪車セダン型の伝搬特性(左折シーン)

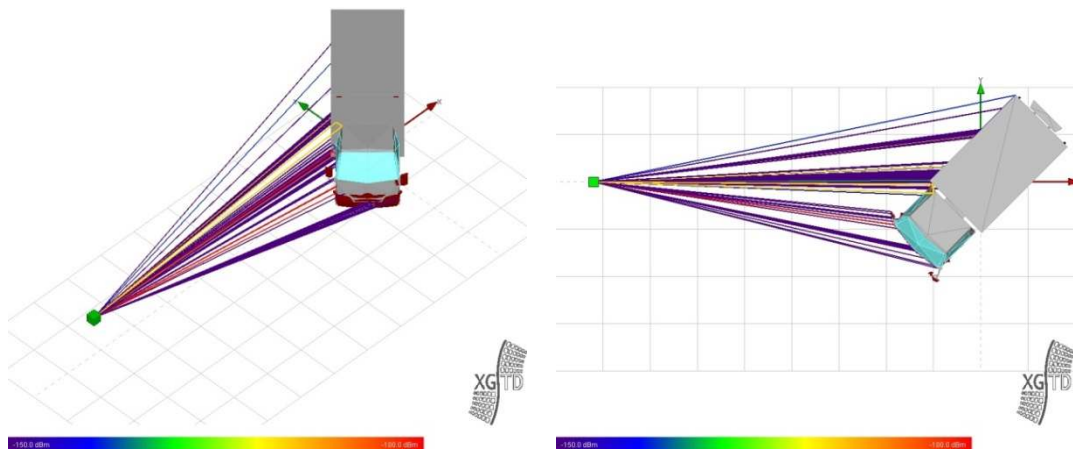


図 5.1.2.3-22 四輪車トラック型の伝搬特性(左折シーン)

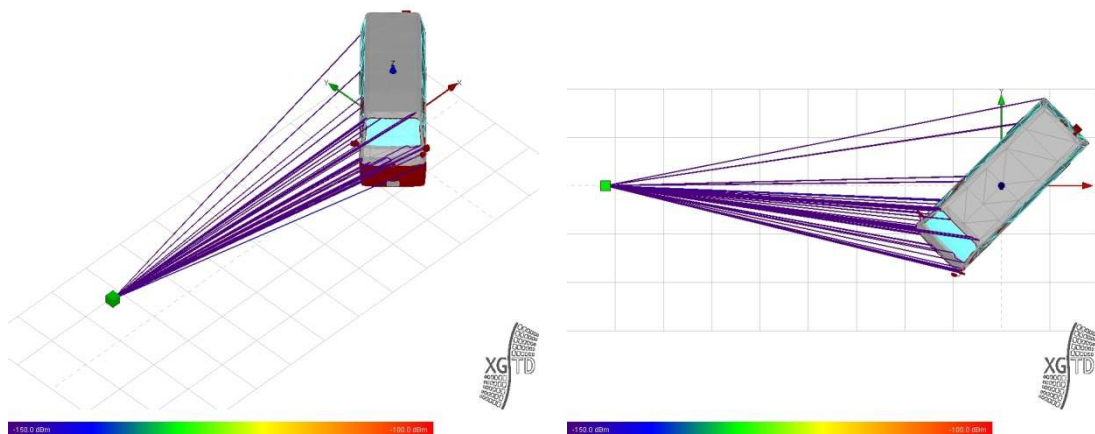


図 5.1.2.3-23 四輪車バン型の伝搬特性(左折シーン)

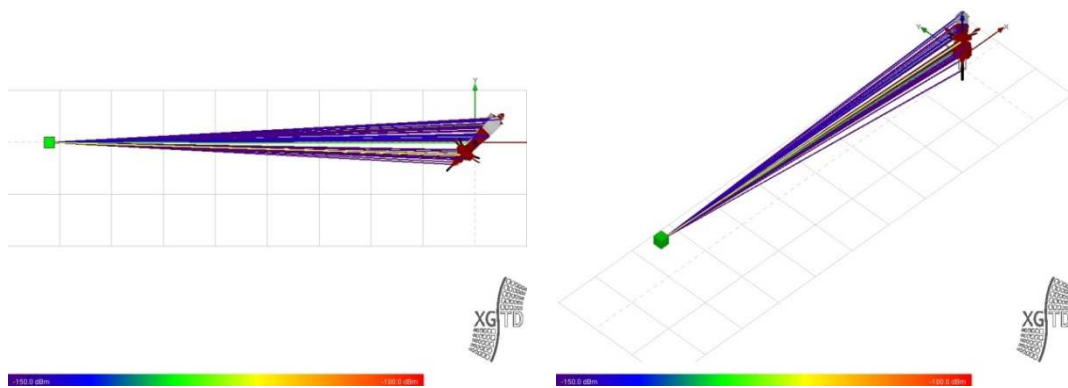


図 5.1.2.3-24 二輪車バイクの伝搬特性(左折シーン)

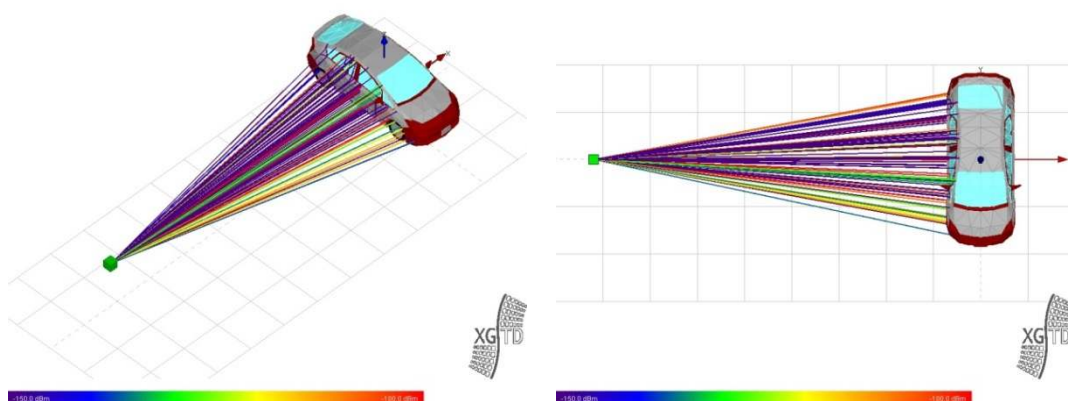


図 5.1.2.3-25 四輪車セダン型の伝搬特性(横断シーン)

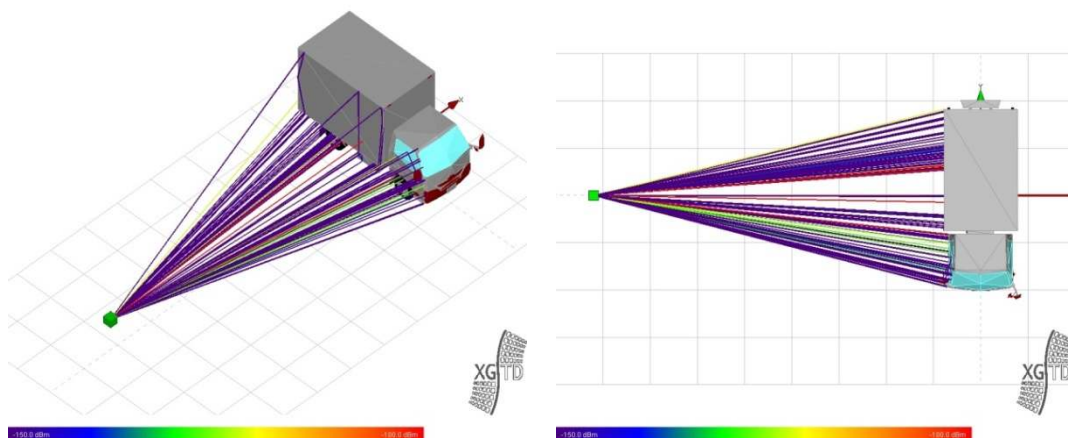


図 5.1.2.3-26 四輪車トラック型の伝搬特性(横断シーン)

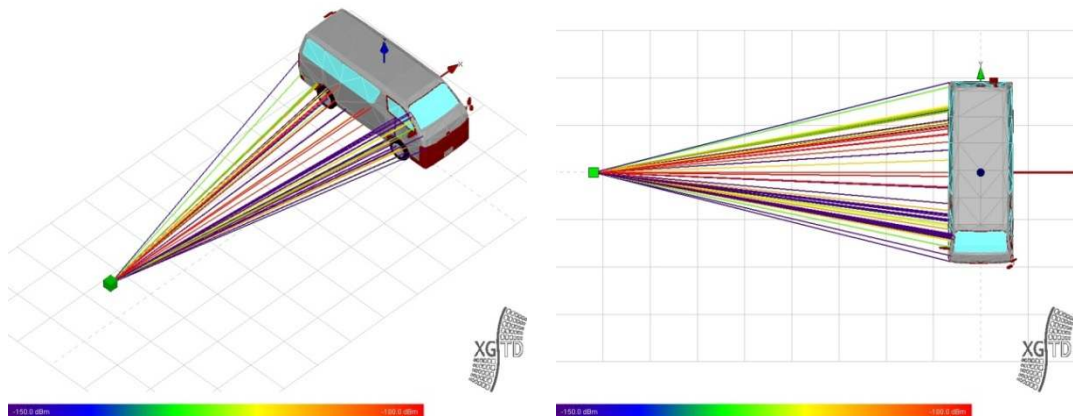


図 5.1.2.3-27 四輪車バン型の伝搬特性(横断シーン)

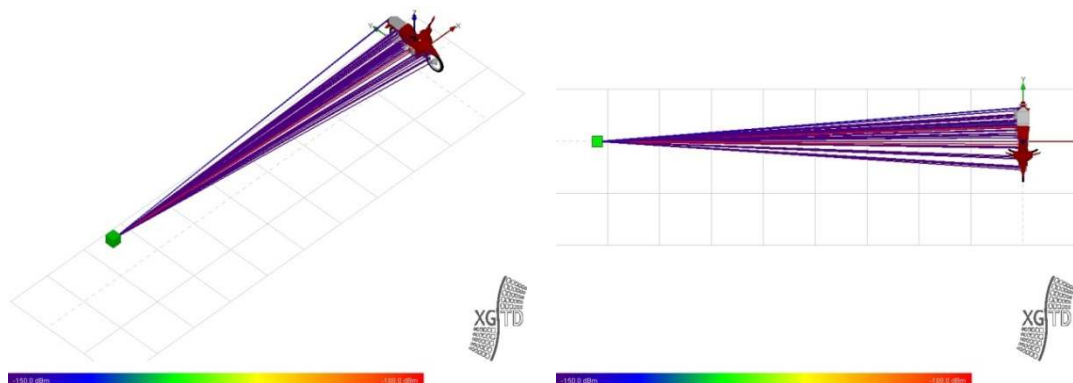


図 5.1.2.3-28 二輪車バイクの伝搬特性(横断シーン)

これまでシミュレーション結果による解析を進めてきたが、同一条件下で実車両の測定結果と比較を行うことで、車両モデルによるシミュレーション結果を検証する。まず、測定について、四輪車セダン型の実車両に対する測定の風景を図 5.1.2.3-29 に示す。大型電波暗室内の回転台に車両を載せ(右側)、車両角度を変えながら 79GHz 帯レーダーシステム(左側)で反射レベルを測定する。なお、アンテナと車両間の地面(金属)には電波吸収体を設置しており、測定諸元を表 5.1.2.3-3 に示す。

表 5.1.2.3-3 測定諸元

周波数	79GHz
アンテナ-車両間距離	12m

アンテナ高	1.2m
アンテナ仰角	0度
測定角度(車両角度)	0, 45, 90, 135, 180度

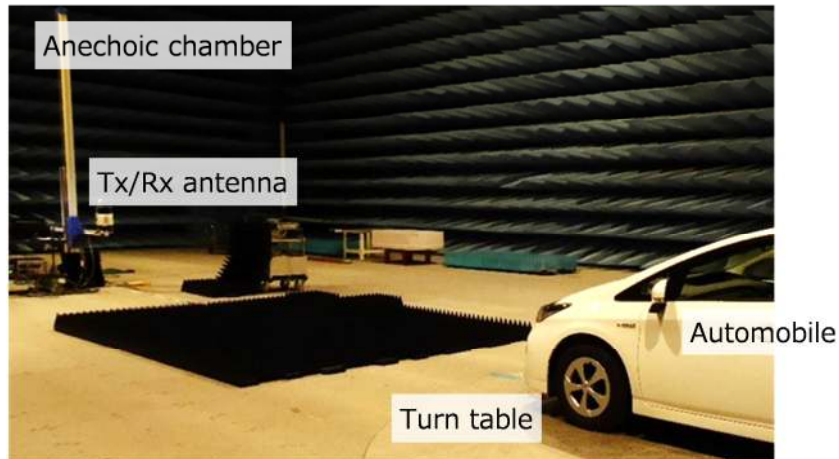


図 5.1.2.3-29 実車両の測定風景

一方、シミュレーションについて、測定条件と合わせ、車両モデルの下に回転台周辺の地面相当の金属板モデルを追加する。なお、シミュレーション諸元を表 5.1.2.3-3 に示すが、これまでの諸元とはアンテナ-車両間距離とアンテナ高が異なる。

表 5.1.2.3-3 シミュレーション諸元(測定比較)

周波数	79GHz
アンテナ-車両間距離	12m
アンテナ高	1.2m
アンテナ仰角	0度
出射角度	0.1度
最大反射数	4
最大回折数	14

正面・0度の場合のシミュレーション結果を図 5.1.2.3-30 に示す。例えば図

5.1.2.3-15(a)と比べると、金属板モデルを追加したことで、車両の前方による反射波の一部が、地面を介して受信点へ到達する伝搬経路を確認できる。

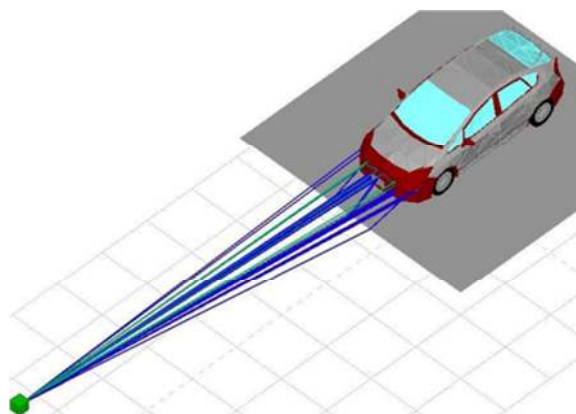


図 5.1.2.3-30 四輪車セダン型の伝搬特性(測定比較)

実車両の測定結果と車両モデルによるシミュレーション結果から、車両角度に対する反射レベルを図 5.1.2.3-31 に示す。なお、縦軸は正規化した反射レベルを示す。側面・90度を最大値として、45度、135度の減少、および正面・0度、背面・180度の増加する傾向は両結果でよく一致している。また、反射レベルの差は10dB以内であり、計算精度の高いシミュレーション結果が得られていることから、作成した車両モデルによる伝搬シミュレーション解析の有効性を確認した。

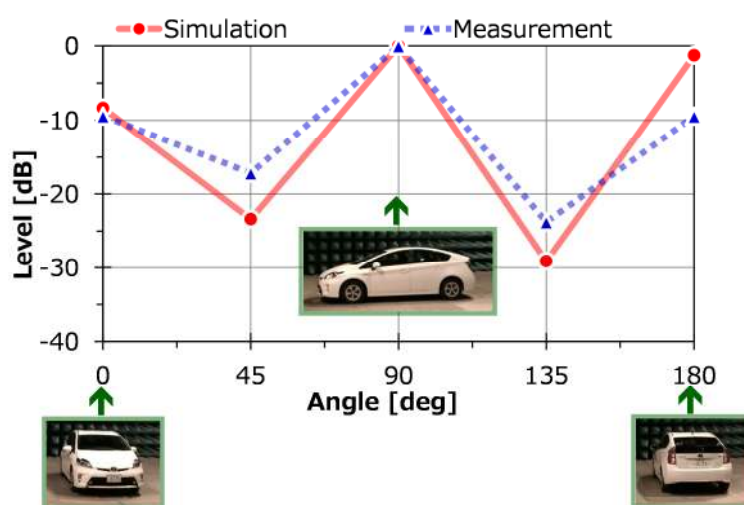


図 5.1.2.3-31 シミュレーション結果と測定結果の比較検証

本節では、複数の反射信号で構成されるクラスタの空間的なサイズから対象物の車種判別を可能とするために、レイトレース法を用いた伝搬シミュレーション解析として、以下の事項を確認した。

- ・ 代表的な四輪車、および二輪車の実車両から形状モデリングを行い、シミュレーション用車両モデルを作成
- ・ 車両モデル(単体)において、車両角度や異なる車両モデルに対する基本特性を確認
- ・ 実車両の測定結果と、同車両モデルのシミュレーション結果の比較により、伝搬シミュレーション解析の有効性を確認

今後は、交差点内に複数の車両を配置した、実シーンに近い条件下での伝搬解析や、複数のレーダーを設置した場合のレーダー間干渉に対する詳細解析等、本節で得た車両モデル、並びに伝搬シミュレーション解析技術を活用することで、79GHz帯レーダーの詳細な伝搬特性を解析する予定である。

参考文献

- [1] 今井哲朗：“レイトレーシング法による移動伝搬シミュレーション” 信学論(B), Vol.J92-B No.9 pp.1333-1347, 2009.
- [2] Remcom 社ホームページ <http://www.remcom.com>
- [3] Velodyne 社ホームページ <http://velodynelidar.com>

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

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て動作させるためには、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した。

本章では、まず、干渉発生条件や干渉影響を把握するために実施した、屋内試験設備における干渉実験について述べる。次に、この実験で得られた知見などを元に作成した干渉検知ソフトウェアについて述べる。最後に、実運用時の空間上の干渉発生条件を明確にするために実施した、模擬交差点における実伝搬環境下での干渉実験について述べる。

5.2.2. イ) - ① 耐干渉性能の実証実験

5.2.2.1. 屋内試験設備における干渉基礎実験

79GHz帯ミリ波レーダー間の相互干渉は、動作周波数や測定時間および伝搬空間上のアンテナビーム方向が、全て一致した場合に発生する。このようなミリ波レーダー間の干渉を低減する方法としては、偏波（交差偏波識別度）等の利用だけでなく、79GHz帯の広い周波数帯域幅を利用した周波数の制御が効果的だと考えられている[1]。ここでは、インフラレーダーの実運用時における干渉低減方法の導入を想定しつつ、以下に述べるような干渉実験を実施したのでその結果を報告する。

はじめに、動作周波数や測定時間、アンテナビーム方向をパラメータとして、最も厳しい干渉発生時を含む諸条件の実験データを得るために、屋内試験設備における干渉実験を実施した。くわえて、レーダー送信波の伝搬経路を変化させる可能性がある反射体として実車両を用いた実験を実施し、車体からの反射波が干渉源となるような条件等でのデータ取得も実施している（図 4.2-4 参照）。

(1) 実験環境

干渉基礎実験を実施した実験環境に関して、図 5.2.2.1-1 及び図 5.2.2.1-2 に示す。

本実では、実車両の持込みが可能であり、電波環境として再現性が確保されている EMC 試験用の大型設備を使用した[2]。図 5.2.2.1-1 は実験環境内部を撮影した画像である。また図 5.2.2.1-2 には平面図を示している。実験環境内部の有効内寸は 29m(D)×21m(W)×9m(H)であり、直線距離 10m 以上の距離を確保可能。また、大型(直径 6m)のターンテーブルを有しており、車両を一定速度で回転することが出来る。

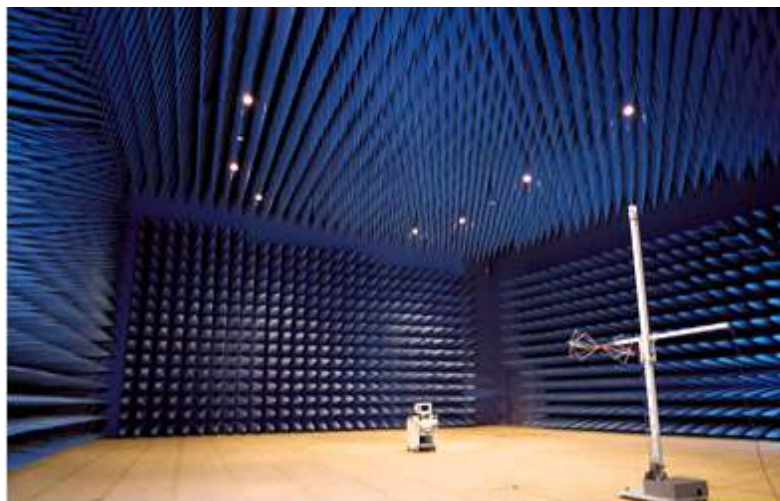


図 5.2.2.1-1 干渉実験を実施した屋内試験設備の外観

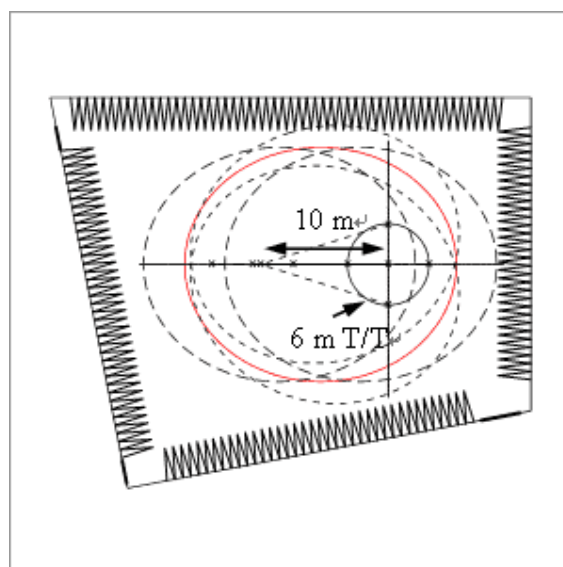


図 5.2.2.1-2 干渉実験を実施した屋内試験設備の平面図

(2) 実験内容

干渉基礎実験は、レーダー装置を 2 システム用意して、それぞれ与干渉レーダー装置、被干渉レーダー装置と定義し、種々のパラメータでレーダーを動作させ被干渉レーダー装置のレーダーデータを取得した。2 つのレーダーシステムの設置は、直接対向する配置や、レーダーターゲットを間において 90 度角度をつけて配置させる形を採った。

まず、レーダー装置について述べる。図 5.2.2.1-3、及び図 5.2.2.1-4 に干渉基礎実験に使用したレーダー装置を示す。レーダー装置は、レーダーモジュール(RF部)と、レーダー間干渉検知試験装置(ベースバンド部)、及びそれらを制御するためのパソコン(制御部)とから構成される。

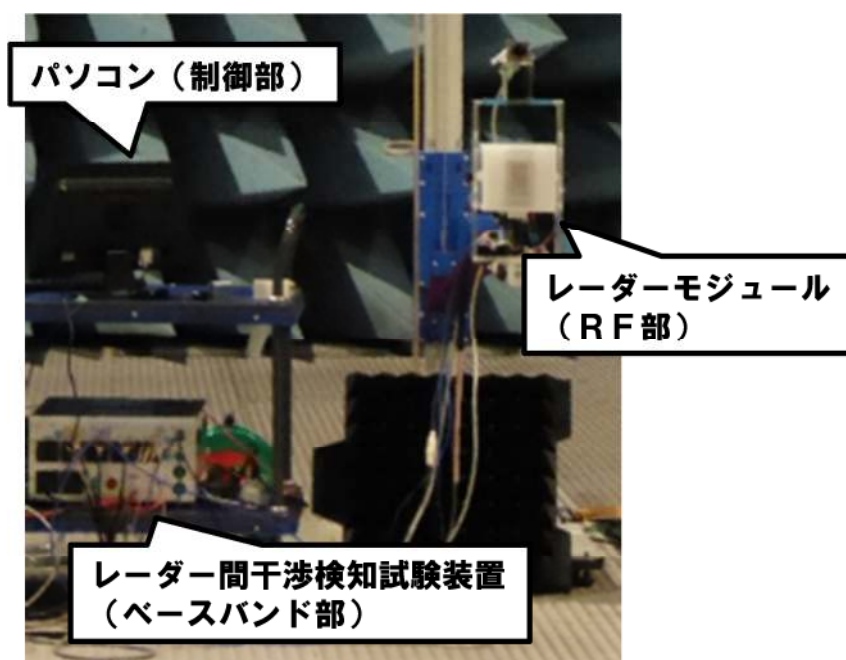


図 5.2.2.1-3 干渉基礎実験に使用したレーダー装置

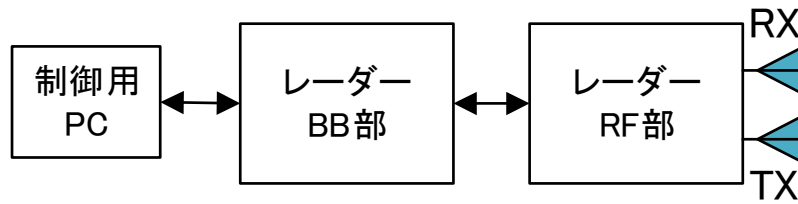


図 5.2.2.1-4 干渉基礎実験に使用したレーダー装置の構成図
(与干渉レーダー装置/被干渉レーダー装置共に同一)

図 5.2.2.1-5 にレーダーモジュールの外観を示す。また、表 5.2.2.1-1 にレーダーモジュールの仕様を示す。レーダーモジュールは表に示すように 78GHz、79GHz、および 80GHz の 3つの搬送周波数で動作する符号化パルスレーダーである。本基礎実験においては、78GHz と 79GHz で動作させデータを取得した。



図 5.2.2.1-5 レーダーモジュールの外観

表 5.2.2.1-1 レーダーモジュールの仕様

周波数	78 GHz、79 GHz、80 GHz
出力	10 mW
ビーム幅	仰角方向 10 度
レーダー方式	符号化パルス圧縮方式

図 5.2.2.1-6 にレーダー間干渉検知試験装置の外観を示す。レーダー間干渉検知試験装置は、他のレーダー間干渉検知試験装置と同期して動作できるよう、内部クロックの共有、及び、パルス送信開始タイミングの共有(フレーム同期と呼ぶ)ができるよう設計した。

図 5.2.2.1-7 には、レーダー間干渉検知試験装置のブロック図を示す。レーダー間干渉検知試験装置内部の同期制御対応ベースバンド基板からは、先述の内部クロック共有のためのインタフェースを有し、これにより他のレーダー間干渉検知試験装置と同期動作が可能となる。

複数のレーダーシステムを同期動作させる場合は、図 5.2.2.1-8 に示すように、レーダー間干渉検知試験装置を同軸ケーブルで接続し、同期信号を送受できるようにする。この同期動作により、干渉源となるレーダーシステムのパルス送信タイミングが被干渉レーダー装置側のパルス送信タイミングと同期できるため、被干渉レーダー装置のデータには干渉源の干渉波が、距離方向に固定され観測でき、再現性をもった干渉解析が可能となる。同期動作の概要を図 9 に示す。但し、本実験においては、レーダーモジュールの搬送波の源信号は異なる。そのためレーダー間干渉検知試験装置の同期動作時においても、被干渉レーダー装置側から送信されたパルス波形と与干渉レーダー装置側から送信されたパルス波形が異なり、別装置から受信した干渉信号と自装置の送信信号との間の相関値に明確なピークは得られず、時間方向に広がる。



図 5.2.2.1-6 レーダー間干渉検知試験装置の外観

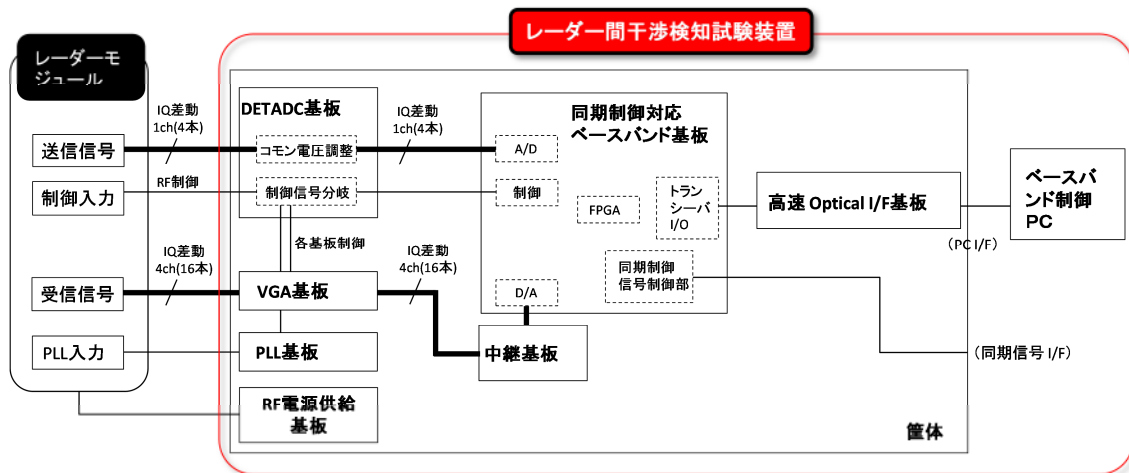


図 5.2.2.1-7 レーダー間干渉検知試験装置のブロック図

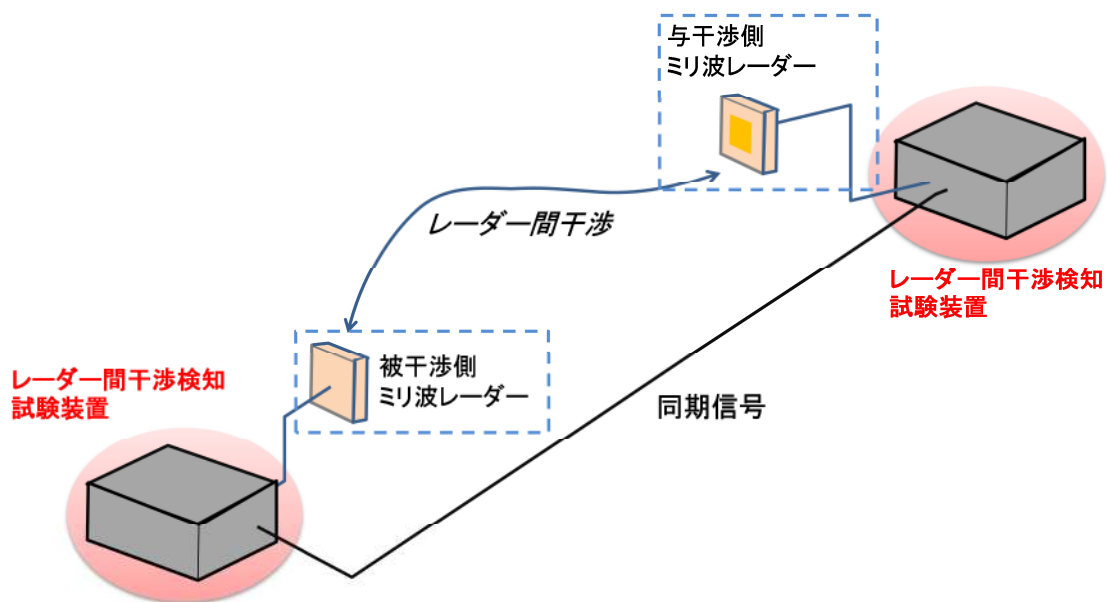


図 5.2.2.1-8 レーダー間干渉検知試験装置による同期動作時の構成概要

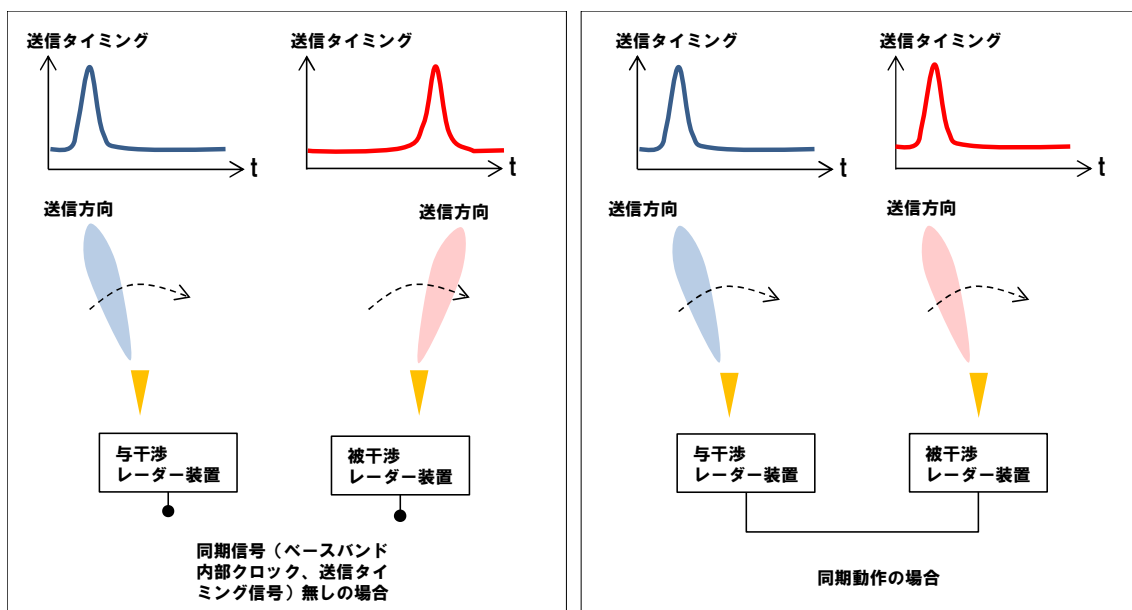


図 5.2.2.1-9 レーダー間干渉検知試験装置による同期動作の説明

次に実験時の装置とターゲットの位置関係に関して述べる。被干渉レーダー装置で、与干渉レーダー装置から発射された送信波を干渉波として受信するため、表 5.2.2.1-2 に示すように各装置を対向に設置、または、反射ターゲットを中心に 90 度角度を付けて設置する条件で実験を実施した。また、反射ターゲットは、車両と、人体程度の反射断面積を有する球体リフレクタとし、車両は回転台の上に設置して水平に回転させながら測定を実施した。

また、図 5.2.2.1-9 に示すように、被干渉レーダー装置、及び与干渉レーダー装置は床から 1.0m の高さに水平に設置した。この理由は、前述のようにレーダーモジュールの垂直方向アンテナ半値幅が 10 度であり、1.0m の高さに水平設置した場合、おおよそ 12m 程度までの範囲内では床面の反射影響は少ないと判断した結果による。

また、表 3 に実験パラメータを示す。パラメータは、与干渉レーダー装置と、被干渉レーダー装置それぞれの搬送周波数、及び装置間の同期(すなわち送信フレームタイミングの同期)を行うかどうかの 2 種類で、それぞれ表に示す条件番号を付与した。

表 5.2.2.1-2 干渉基礎実験におけるレーダー装置とターゲットの位置関係

<p><対向設置></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ターゲット無し ・レーダー間距離 12m 		
<p><90度設置①車両></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ターゲット 車両(セダン型) ・ターゲット距離 (被干渉間)12m (与干渉間)8.5m 		
<p><90度設置②球体></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ターゲット 球体リフレクタ (-10dBsm) ・ターゲット距離 (被干渉間)12m (与干渉間)8.5m 		

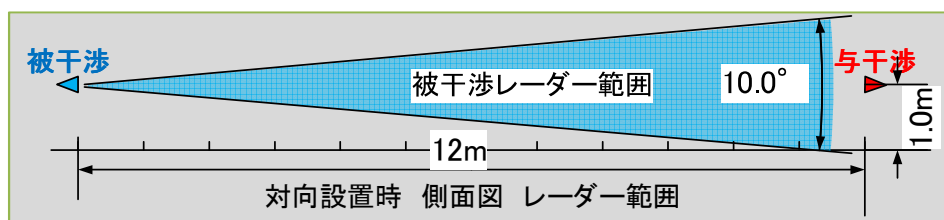


図 5.2.2.1-10 レーダー装置の床からの設置高

表 5.2.2.1-3 干渉基礎実験のパラメータ

	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
搬送周波数 (与干渉/被干渉)	-78 GHz (与干渉源無し)	78 GHz / 78GHz	78 GHz/78 GHz	79 GHz/78 GHz
フレーム タイミング (装置間の同期)	-	同期	非同期	同期

(3) 実験結果

実験結果について、まず、装置同士を対向設置した条件について述べ、次に、ターゲットとして車両を設置した条件、最後に球体リフレクタを設置した条件について順に示す。

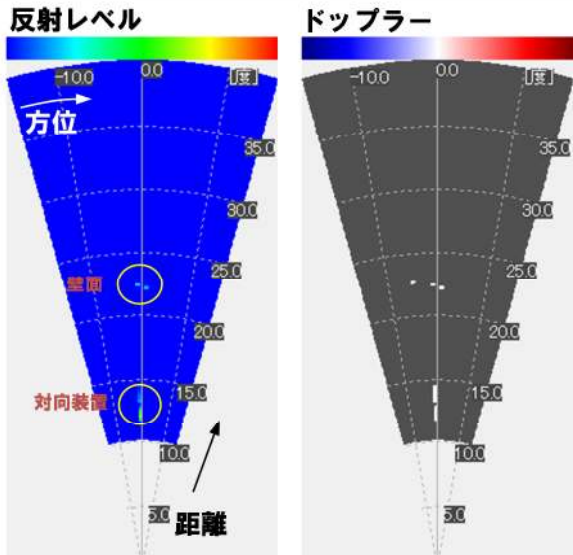
<対向設置>

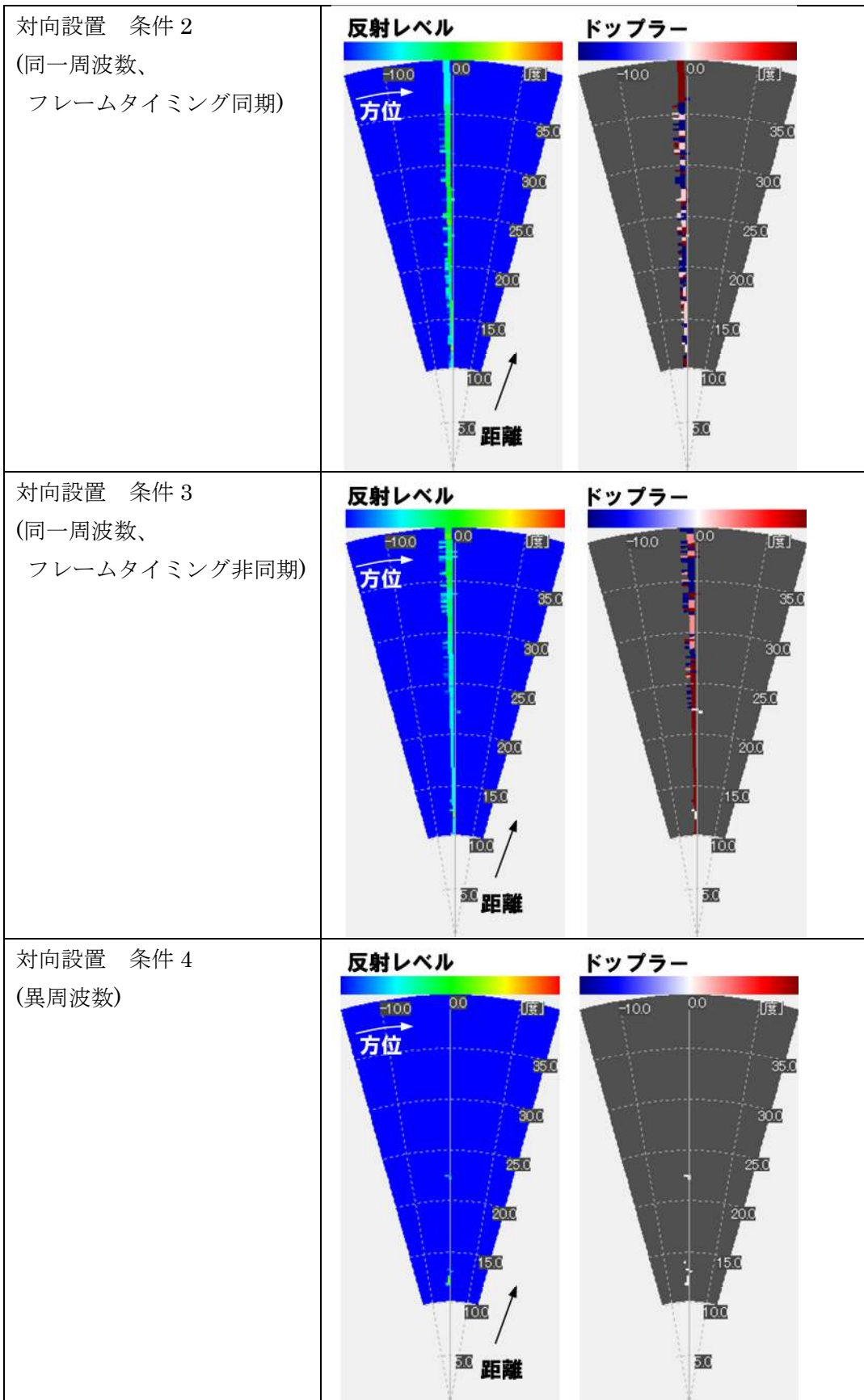
表 5.2.2.1-4 に与干渉レーダー装置と被干渉レーダー装置を対向設置した場合の、被干渉レーダー装置のレーダープロファイルのスナップショットを示す。図に示したように、レーダー設置位置をゼロ位置として距離、方位それぞれの反射レベルとドップラー速度のプロファイルを示している。12m 付近の反射が与干渉レーダー装置からの反射であり、23m 近辺が測定環境の壁からの反射である。

与干渉レーダー装置の動作が無い場合(条件 1)と、与干渉・被干渉レーダー装置それぞれの周波数が異なる場合(条件 4)のプロファイルはほぼ一致しており、与干渉・被干渉レーダー装置それぞれの周波数が異なる場合は、干渉が生じていないことが確認できる。また、同一周波数で与干渉レーダー装置を動作させた場合(条件 2、3)は、干渉が無い場合と比較し与干渉方位のノイズフロアが上昇していることが分かる。このノイズフロア上昇は、与干渉レーダー装置から発信される搬送波のリークによるものと考えられる。

次に、図 5.2.2.1-11 から図 5.2.2.1-14 にかけて、記録開始から 50 サンプル分の遅延プロファイルを横軸に距離、縦軸にサンプル数として並べてプロットした図を示す。これらのプロファイルは表 5.2.2.1-4 の反射レベルプロファイルの 0 度方向のプロファイルに相当する。図 5.2.2.1-11 の、「与干渉レーダー装置からの発信無し」の条件 1 と、図 5.2.2.1-12 の「同一周波数 フレーム同期」の条件 2 を比較すると、条件 2 では、全サンプルにわたってノイズフロアの上昇と、約 10m から 37m 付近にかけて固定的に干渉影響が生じていることが分かる。これと比較し、図 5.2.2.1-13 の「同一周波数 フレーム非同期」の条件 3 の場合は、ノイズフロアの上昇は同様に全サンプルにわたって確認されるが、干渉源からの送信パルス信号による干渉の位置は固定されないことが確認できる。本結果により装置間の同期動作が想定通りに機能していることが確認できたと考える。

表 5.2.2.1-4 対向設置条件での干渉基礎実験結果

実験条件	レーダープロファイル(反射レベル/ドップラー)のスナップショット
対向設置 条件 1 (与干渉源無し)	



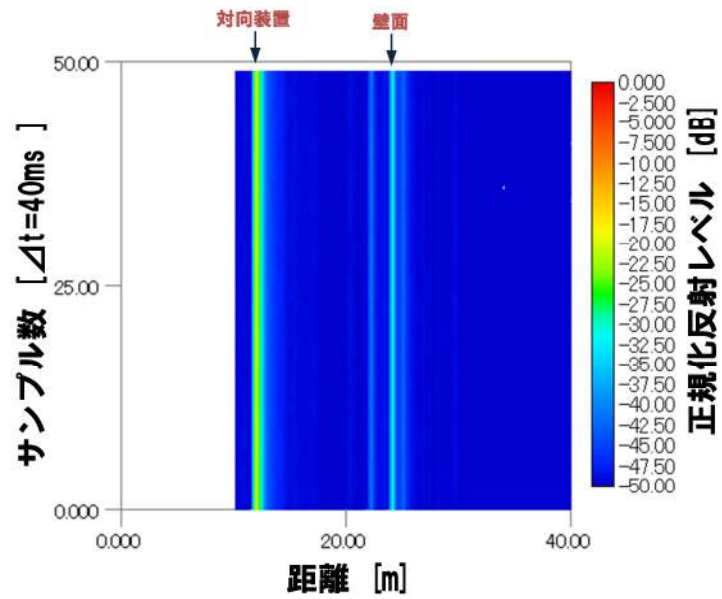


図 5.2.2.1-11 対向設置 条件 1(与干渉源無し)の
遅延プロファイル時間変化(記録開始から 50 サンプル)

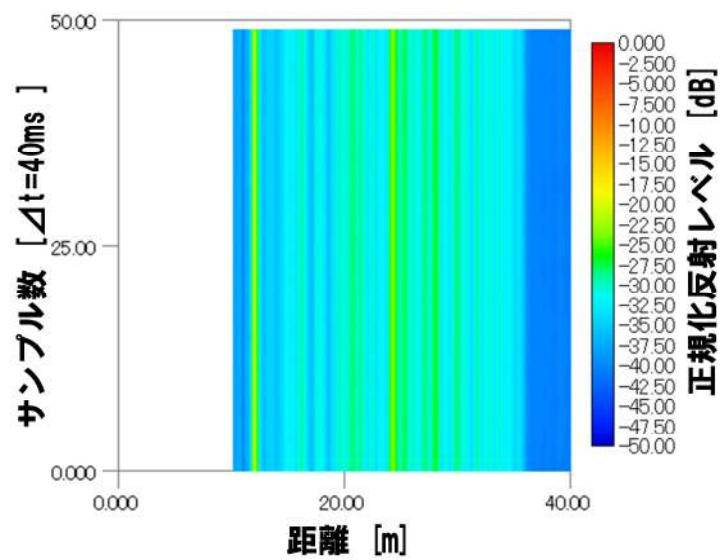


図 5.2.2.1-12 対向設置 条件 2(同一周波数、フレームタイミング同期)の
遅延プロファイル時間変化(記録開始から 50 サンプル)

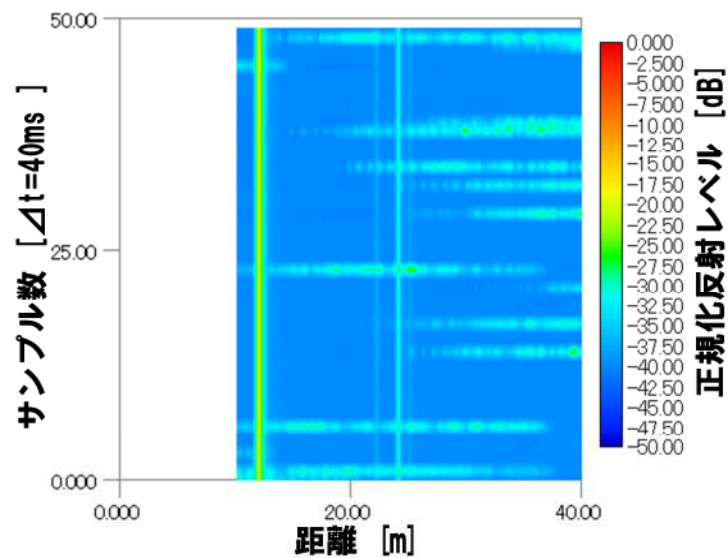


図 5.2.2.1-13 対向設置 条件 3(同一周波数、フレームタイミング非同期)の
遅延プロファイル時間変化(記録開始から 50 サンプル)

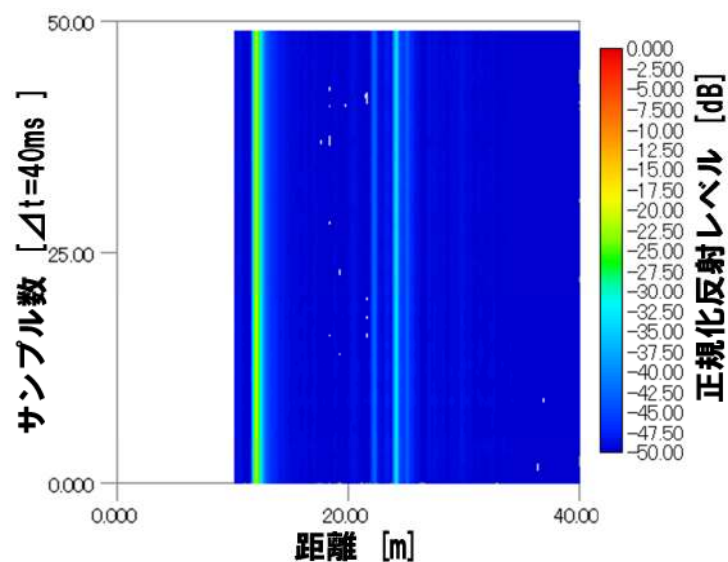


図 5.2.2.1-14 対向設置 条件 4(異周波数)の
遅延プロファイル時間変化(記録開始から 50 サンプル)

<90度設置①車両>

次に、表 5.2.2.1-2 に示したように被干渉レーダー装置と与干渉レーダー装置を、ターゲットとする車両をはさんで 90° 角度を付けて設置した場合の結果について説明する。前述の通り、測定中、車両はターンテーブルで水平方向に秒速 1 度程度で回転させた。図 5.2.2.1-15 に、与干渉源が無い条件 1 の場合の遅延プロファイル時間変化を示す。図のア)で示したサンプル数 t=200 前後で、車両はレーダーに対して正面を向く。また、図のイ)のサンプル数前後で、車両左側面がレーダーに正対している状態になる。そして、図のウ)のサンプルで車両の後方、図のエ)のサンプルで車両の右側面がレーダーに正対する状態となる。車両とレーダー装置との距離は 12m 程度であり、該当する距離においてレーダー反射レベルのピークが確認できる。また、ターンテーブルの回転中心を、車両の中心に設定したため、車両の長さが長い正面・背面方向にレーダーが正対した場合と、短い側面方向がレーダーに正対した場合とでは、レーダーと車両との距離が異なり、レーダー反射レベルのピーク距離の変化にその様子が確認できる。

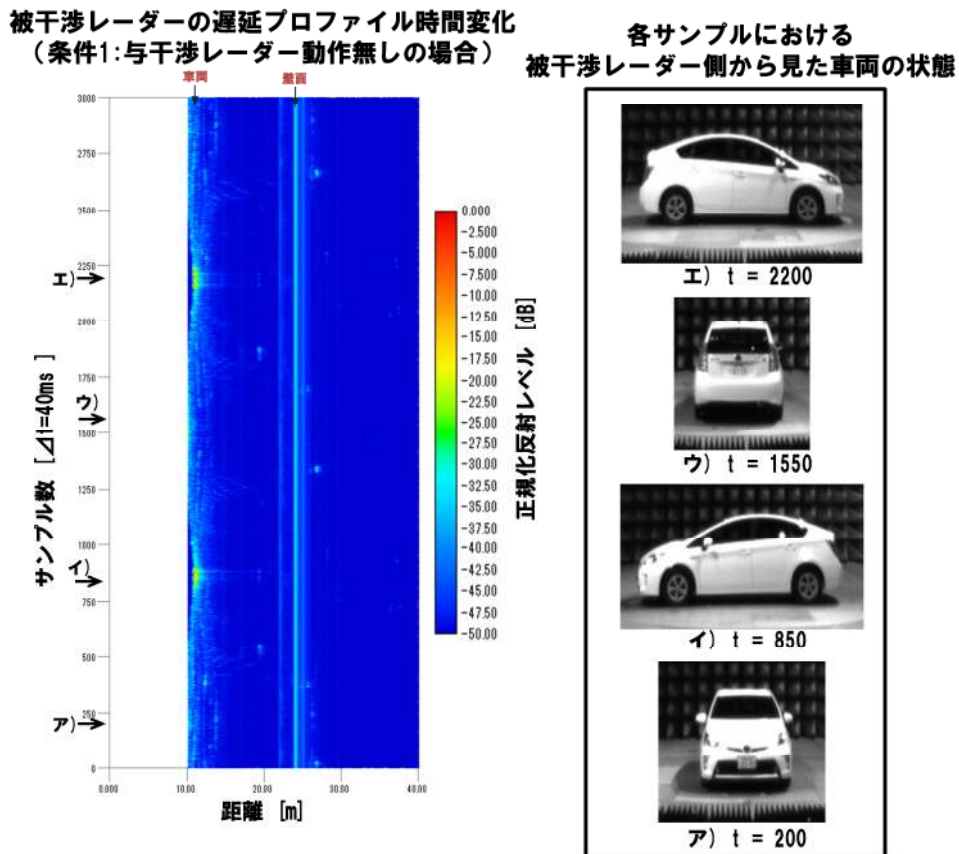


図 5.2.2.1-15 90度設置 条件1(与干渉源無し)の遅延プロファイル時間変化(記録開始から 3000 サンプル)

次に、図 5.2.2.1-16 に、与干渉レーダー装置と被干渉レーダー装置が同周波数で同期させて動作させた条件である条件 2 の場合の遅延プロファイルの時間変化を示す。与干渉源が無い図 5.2.2.1-15 の場合と比較すると、図のア)およびイ)のサンプルタイミングにて、与干渉源が無い場合と異なる反射レベルのプロファイルが確認できる。このサンプルにおける車両の状態を図 5.2.2.1-16 の右側に示す。図から分かるように、これらの干渉が生じたタイミングにおいては、ターゲットとなる車両は、側面が、被干渉レーダー装置、及び与干渉レーダー装置に対してそれぞれ約 45 度回転した状態であり、与干渉レーダー装置からの送信波が車両側面に反射して被干渉レーダー装置に受信されるパスが生成される。したがって、図 5.2.2.1-16 に見られる、与干渉源が無い場合と異なる反射レベルは、与干渉レーダー装置から送信されるものによることが考えられる。

図 5.2.2.1-17 には、 $t=520$ サンプルにおける距離、方位の反射レベルとドップラープロファイルの計算結果を示す。図のように、本実験における与干渉レーダー装置による干渉波の影響波は電力プロファイルのみではなく、ドップラープロファイルにも影響を及ぼす。

**被干渉レーダーの遅延プロファイル時間変化
(条件2:同周波数・BB同期の場合)**

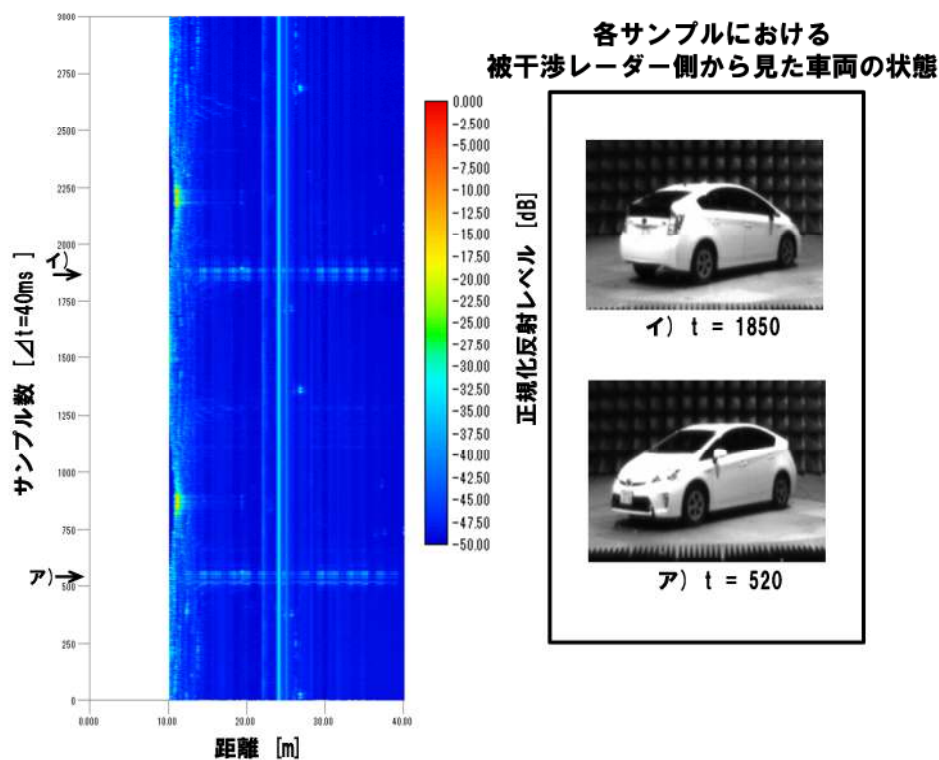


図 5.2.2.1-16 90 度設置 条件 2(同一周波数、同期動作)の遅延プロファイル時間変化(記録開始から 3000 サンプル)

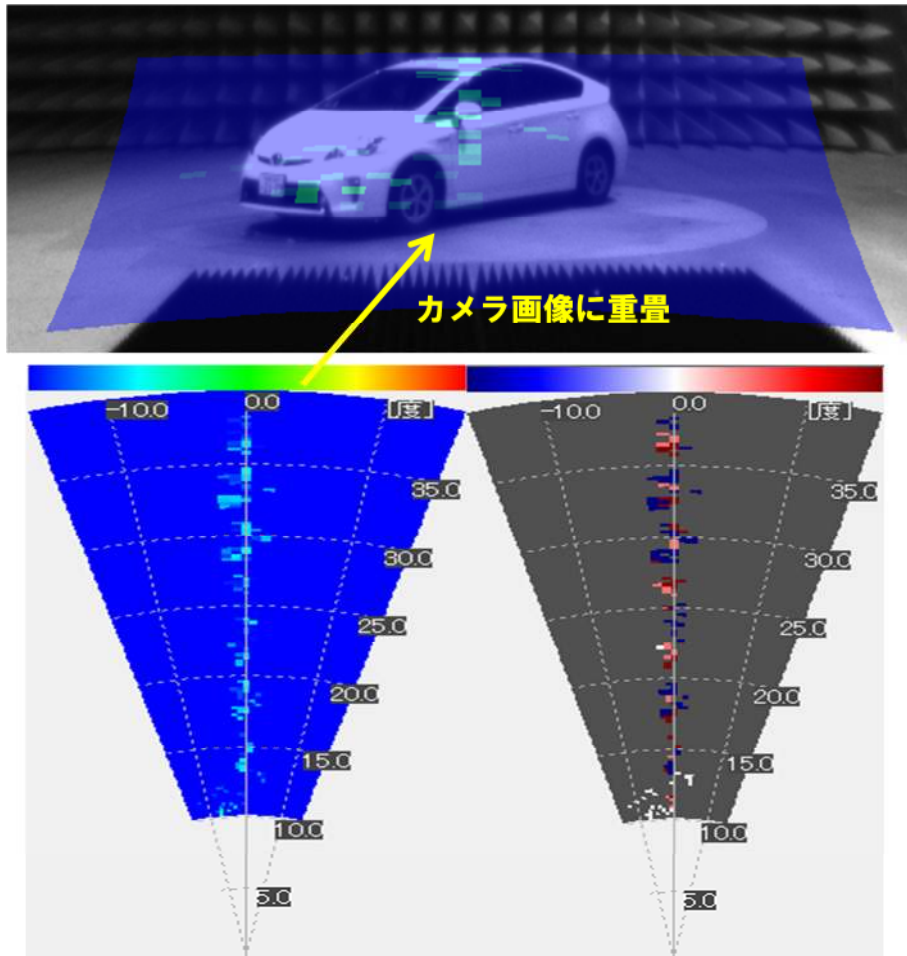


図 5.2.2.1-17 干渉が生じた際(t=520)の反射レベルと
ドップラープロファイルへの影響(90度設置①車両 条件2の場合)

続いて、干渉が生じた $t=520$ 前後のサンプル、100 サンプル($t=500$ から 600)を抽出してより詳しく解析した。

図 5.2.2.1-18 および図 5.2.2.1-19 に、干渉が生じた $t=520$ 前後のサンプルに関して、干渉レベルが明確に分かるように、条件 2 および 3 の場合の遅延プロファイル時間変化と、与干渉が無い条件 1 の場合の遅延プロファイルレベルの差を示している。図 5.2.2.1-18 に示すとおり、同一周波数 フレーム同期の場合は、干渉のレベルが高い瞬間も確認できるが、互いの装置のパルス送信タイミングを制御できているため、その位置は安定して固定されている。また、図 5.2.2.1-19 に示すとおり、同一周波数 フレーム非同期の場合は干渉影響が発生する距離が変動するため、ある程度の時間で平均化して評価すると干渉影響を比較的小さくすることが出来ると考えられる。

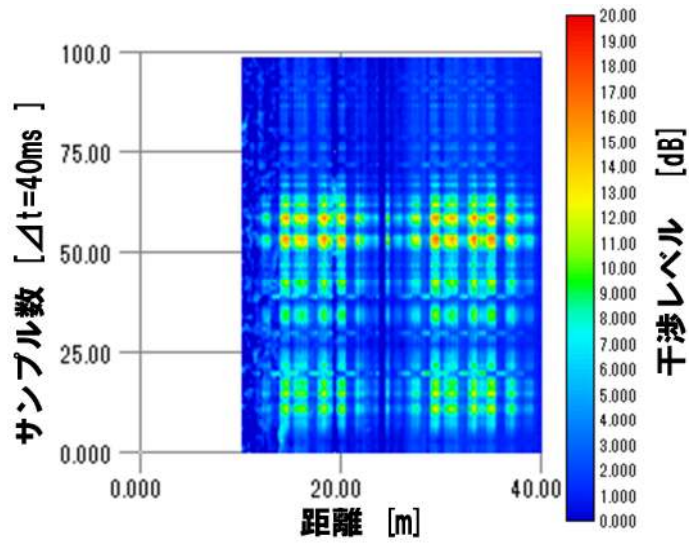


図 5.2.2.1-18 90 度設置①車両 条件 2(同一周波数、フレームタイミング同期)の
干渉レベル(条件 1(与干渉源無し)の場合との差分)

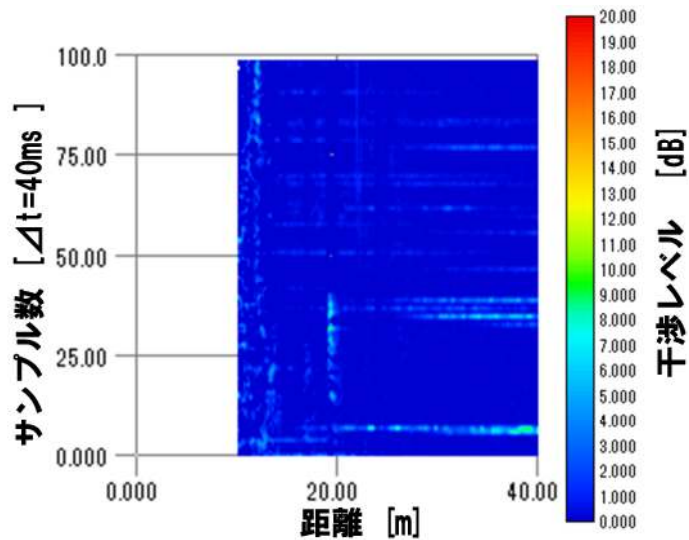


図 5.2.2.1-19 90 度設置①車両 条件 3(同一周波数、フレームタイミング非同期)の
干渉レベル(条件 1(与干渉源無し)の場合との差分)

<90 度設置②球状 R>

次に、表 5.2.2.1-2 に示したように被干渉レーダー装置と与干渉レーダー装置を、ターゲットとする球体リフレクタをはさんで 90° 角度を付けて設置した場合の結果について説明する。球体リフレクタの反射断面積は-10dBsm であり、人体程度の反射断面積である。

図 5.2.2.1-20 から図 5.2.2.1-23 にかけて、遅延プロファイルの時間変化を示す。いずれの条件においても、干渉影響は確認されないことが、これらの図から分かる。

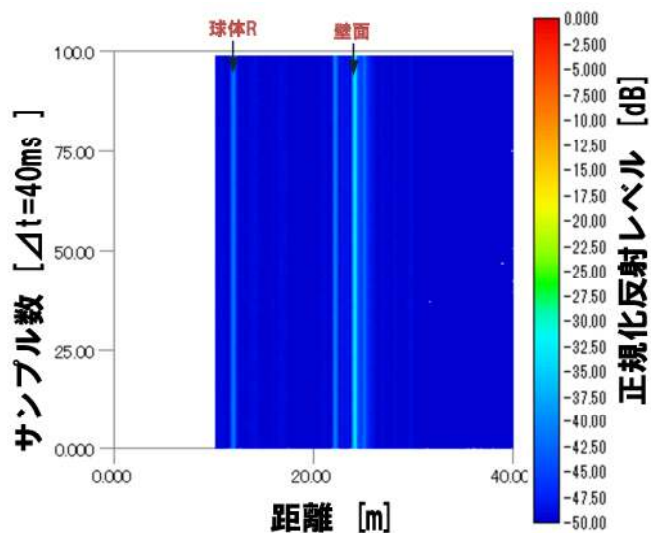


図 5.2.2.1-20 90 度設置②球体 条件 1(与干渉源無し)の遅延プロファイル時間変化(開始から 100 サンプル)

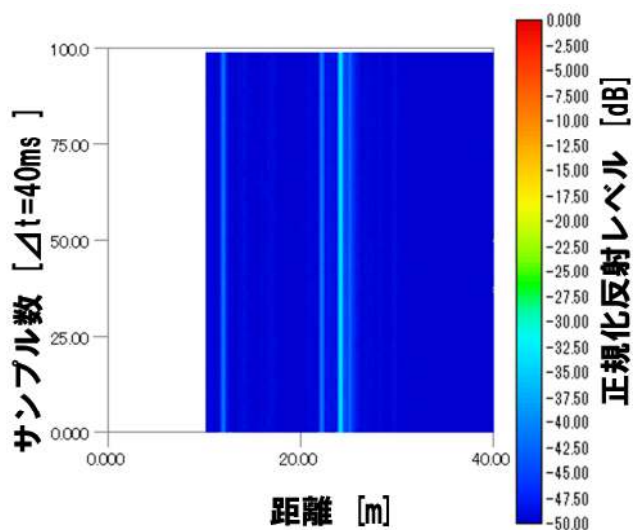


図 5.2.2.1-21 90 度設置②球体 条件 2(同一周波数、フレームタイミング同期)の遅延プロファイル時間変化(開始から 100 サンプル)

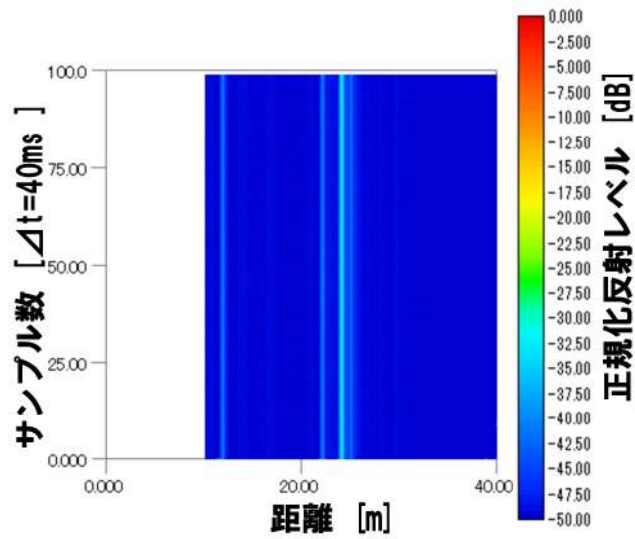


図 5.2.2.1-22 90 度設置②球体 条件 3(同一周波数、フレームタイミング非同期)の
遅延プロファイル時間変化(開始から 100 サンプル)

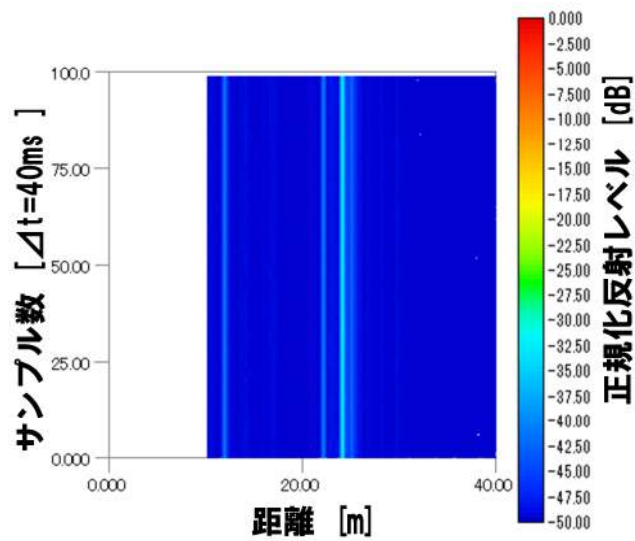


図 5.2.2.1-23 90 度設置②球体 条件 4(異周波数)の
遅延プロファイル時間変化(開始から 100 サンプル)

(4) 干渉基礎実験のまとめと考察

本節で述べたとおり、屋内実験施設を用いて、与干渉・被干渉レーダー装置の信号条件、及び、配置関係を変えながら干渉基礎実験を行った。

レーダー装置の設定条件においては、装置の同期動作・非同期動作を比較し、同期動作させた場合は想定どおり、与干渉レーダー装置による被干渉レーダー装置に対する干渉影響を、距離方向に固定して安定的に観測することが出来た。また、レーダー送信波の伝搬経路を変化させる可能性がある反射体として実車両を用いた実験を実施し、車体からの反射波が干渉源となるような条件でも実測データを取得することが出来た。

干渉発生結果について表 5.2.2.1-5 にまとめて示す。また、表 5.2.2.1-6 にレーダーエコープロファイルの干渉発生影響についてまとめて示す。

表 5.2.2.1-5 干渉発生結果一覧

設置	条件		干渉発生
対向設置	条件 1	与干渉源無し	無し
	条件 2	同一周波数、フレーム同期	有り
	条件 3	同一周波数、フレーム非同期	有り
	条件 4	異周波数	無し
90 度設置①車両	条件 1	与干渉源無し	無し
	条件 2	同一周波数、フレーム同期	有り
	条件 3	同一周波数、フレーム非同期	有り
	条件 4	異周波数	無し
90 度設置②球体 リフレクタ	条件 1	与干渉源無し	無し
	条件 2	同一周波数、フレーム同期	無し
	条件 3	同一周波数、フレーム非同期	無し
	条件 4	異周波数	無し

表 5.2.2.1-6 レーダーエコープロファイルの干渉発生影響

影響対象	内容	詳細	例
遅延プロファイルに対する影響	ノイズフロア上昇	<ul style="list-style-type: none"> ・同一周波数の連続する干渉を受けるとノイズフロアが上昇する 	
	スパイク状ノイズ発生	<ul style="list-style-type: none"> ・同一周波数のパルス変調波の干渉を受けるとスパイクノイズが発生する ・フレームタイミング同期では発生箇所が固定。非同期では発生箇所が変動する 	
電力/ドップラープロファイルに対する影響	帯状ノイズ発生	<ul style="list-style-type: none"> ・同一周波数の連続する干渉を受けると全レンジに帯状ノイズが発生する 	
	強電力・強ドップラー発生	<ul style="list-style-type: none"> ・同一周波数のパルス波が入射されると強電力、強ドップラー部が発生する ・フレームタイミングが非同期の場合、レンジ方向に前後を繰り返す 	

5.2.2.2. レーダー間干渉検知ソフトウェアの開発

(1) 概要

79GHz 帯レーダー間の干渉検知方法の検討および伝搬実験環境の構築に必要な瞬時的な干渉発生を検知する機能と干渉発生時の観測データを自動的に記録する機能を備える干渉検知用のソフトウェア開発を実施した。

(2) 機能一覧

各種実験条件(レーダー方式、レーダー設定パラメータ、レーダー設置方式、屋内/屋外、など)下における 79GHz 帯レーダー間の干渉現象の発生を検知し、干渉発生時のレーダー観測データを自動的に記録するため、PC 上で動作するソフトウェアを作成する。

この干渉検知用ソフトウェアを用いることにより、79GHz 帯レーダー間信号干渉という瞬時的な現象を捉えて記録するための実験環境を構築し、再現性が確保された試験環境でレーダー干渉の発生条件と現象を明確化することが可能になる。干渉検知用ソフトウェアは、試作開発した 79GHz 帯レーダー装置において動作させる下記機能 A～機能 E の 5 機能を具備する。

各機能の概要を表 5.2.2.-1 に示す。

表 5.2.2.2-1 機能概要

	機能名称	概要
機能 A (遅延プロファイル利用)	ノイズフロア 検出	遅延プロファイルのノイズレベルに対し、干渉無し状況下の分布をリファレンスとし、変動状況を取得する。取得した変動が大きい場合、干渉発生と判定をする。
	スパイクノイズ 検出	遅延プロファイルのレベルに対し、時間軸における変動の状況を取得する。変動の特徴(平均周波数、平均振幅、及び持続時間)に基づき、干渉発生と判定をする。
機能 B (電力プロファイル利用)	距離軸帯状検出	全距離または一定距離範囲に対し、強い受信電力の帯状の有無を検出する。帯状電力を検出した場合、干渉発生と判定をする。
	強電力領域検出	方位～距離電力プロファイルマップに対し、強い受信電力領域を検出する。検出した領域が大きい場合、干渉発生と判定をする。

機能 C (ドップラー プロファイル 利用)	距離軸帯状検出	全距離または一定距離範囲に対し、強いドップラー値の帯状の有無を検出する。帯状ドップラー値を検出した場合、干渉発生と判定をする。
	強ドップラー値 領域検出	方位～距離ドップラープロファイルマップに対し、強い受信ドップラー領域を検出する。検出した領域が大きい場合、干渉発生と判定をする。
機能 D (データ保存)	自動データ記録	指定データフォーマットに従い、79GHz 帯レーダーの測定データ及び付随データを自動的に記録する。
機能 E (データ再生)	オフライン再生	記録したレーダーデータに対し、遅延プロファイル、方位～距離電力プロファイル、方位～距離ドップラープロファイルでの再現を確保する。記録した付随データの再生を確保する。

(3) 機能詳細

ここでは、機能 A、B、C の検出機能について詳細を述べる。

機能 A は遅延プロファイルから干渉検知する手段であり、機能 B および機能 C は、距離と方位のプロファイルから干渉検知する手段である。検出処理周期は、受信データの取得処理中に一定間隔フレームで動作し、機能 B、C の検出処理周期もこれと同様である。また、オフライン時の検出処理時は、毎フレームで動作可能である。

(3)-1. 機能 A (遅延プロファイル利用)

■ノイズフロア検出機能

前節で述べたとおり、与干渉レーダー装置と被干渉レーダー装置を対向設置した場合における条件 1(与干渉無し)に対して、与干渉レーダー装置を動作させた場合(条件 2、3)ではノイズフロアの上昇が見られる。本機能は下記の処理でこのノイズフロアの上昇に対して検出を行う。

(a) ノイズフロア算出処理

(現フレームの遅延プロファイルよりノイズフロアを算出)

遅延プロファイルから、レーダー距離測定の有効範囲外で取得される各サンプル値(真値)の単純加算平均でノイズフロア算出を行う。

(b) 平均化処理

現フレームのノイズフロア値と過去フレームから算出されたノイズフロア値を用いて平均値が算出される。平均ノイズフロア値は下式を用いて算出を行う。

$$\text{平均ノイズフロア値} = \lambda \times \text{過去平均ノイズフロア値} + (1 - \lambda) \times \text{現ノイズフロア値}$$

ただし、 λ は忘却係数とする。

(c) 干渉検出処理

平均ノイズフロア値と現フレームのノイズフロア値の差分を算出し、判定用閾値 $Th_{pf1}[\text{dB}]$ を超えた場合に干渉発生と判定する。

■スパイクノイズ検出処理機能

例えば、前節で述べた、与干渉レーダー装置と被干渉レーダー装置を対向設置した場合における条件 1(与干渉無し)に対して、与干渉レーダー装置を動作させた場合(条件 2、3)では、一定範囲の盛り上がり部と一定周期の周期変動を伴ったノイズ(スパイクノイズ)が発生する。このスパイク状のノイズに対して検出処理を行う。

図 5.2.2.2-1 に遅延プロファイルの処理結果の一例を示す。

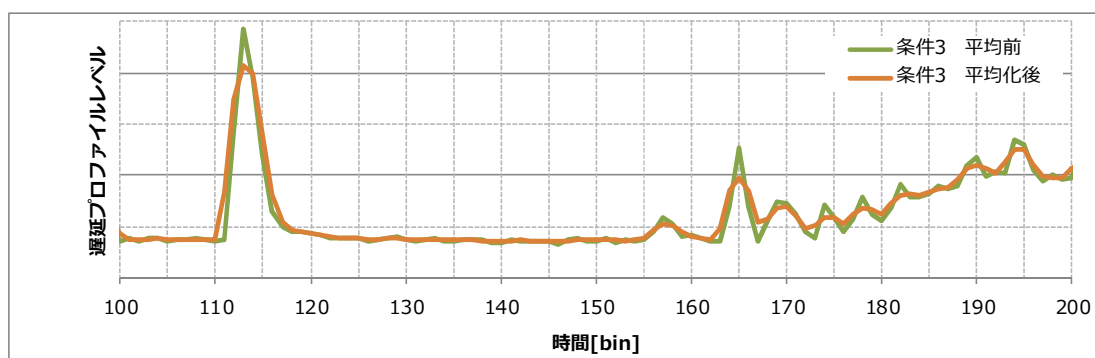


図 5.2.2.2-1 平均化前後の比較例

図 5.2.2.2-1 の平均化前と平均化後の差分と判定結果の一例を図 5.2.2.2-2 示す。

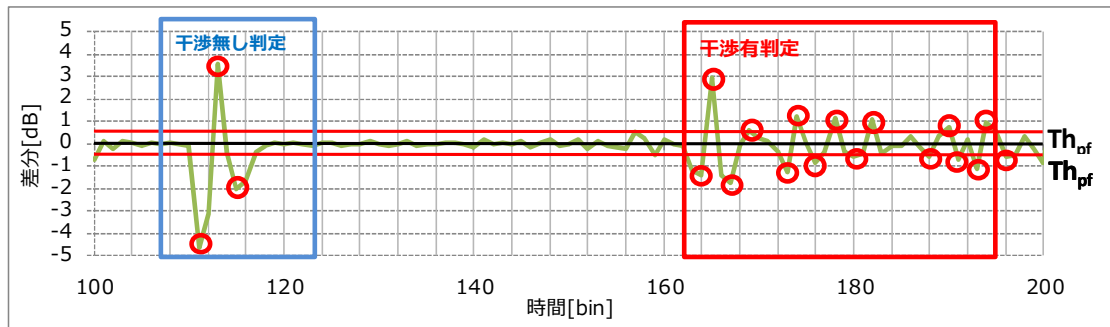


図 5.2.2.2-2 平均化前後の差分と判定結果の一例

図 5.2.2.2-2 のグラフ内の丸枠は足切りレベル Th_{pf2} を超える各ピークを示している。各ピークが 0 レベルを交差する累積回数が判定用閾値 Th_{pf3} [回数] を超えた際に干渉発生と判定する。ただし、一定時間範囲に足切りレベルを超えるピークが発生しない場合は累積回数をリセットする。

以下に各処理について数式にて説明を行う。

(a) 加重移動平均 (現フレームの遅延プロファイルに対する平均化処理)

平均化処理は下式にて実施する。

$$pf_{ave}(d) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n \times pf(d - (\text{int}(N_{pf} \div 2) - n))$$

ただし、 $pf(d)$ は任意ブランチの遅延プロファイルとする。d はレンジ単位(最小時間単位)[bin]とする。 pf_{ave} は平均化後の pf (真値)を示す。

たとえば、 $N_{pf}=5$ のとき

$$pf_{ave}(d) = w_0 \times p(d-2) + w_1 \times p(d-1) + w_2 \times p(d) + w_3 \times p(d+1) + w_4 \times p(d+2)$$

なお、端部は平均処理の対象から除外する。

(b) 差分計算 (平均化した遅延プロファイルとの差分算出)

平均化処理は各レンジ単位にて実施する。

$$diff(d) = pf(d) - pf_{ave}(d)$$

ただし、 $diff(d)$ は、平均前プロファイルと平均化後プロファイルの差分を示す。

(c) 0 レベル交差カウント

$diff(d)$ の振動ピークが足切りレベル Th_{pf2} [dB] を超えた場合、0 レベルを交差する数をカウントする。

また、足切りレベルを超えたピークタイミングから一定の時間 $CR_{pf}[\text{bin}]$ を超えた場合はカウンターをリセットする。

(d) 干渉検出処理

カウンター値が、 $Th_{pf3}[\text{回数}]$ を超えた場合に干渉発生と判定する。

(3)-2. 機能 B (電力プロファイル利用)

図 5.2.2.2-3 に示す電力プロファイルは、屋内試験設備にて与干渉と被干渉レーダーを対向設置における任意タイミングのデータである。干渉は、全距離方向に帯状に発生する場合や一定範囲距離領域に強電力を伴った形で発生が確認された。この干渉を検知するための処理を以下に示す。

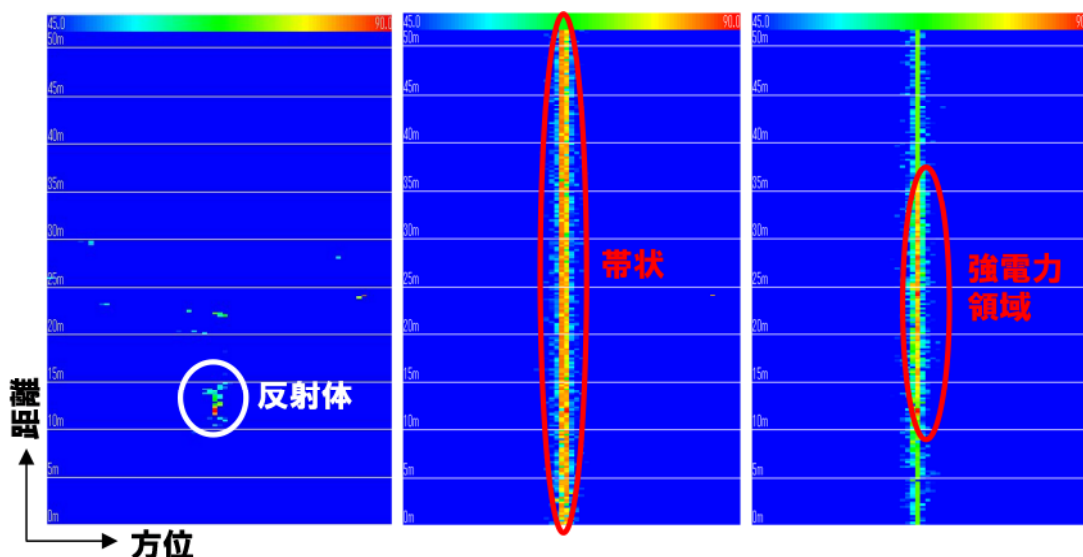


図 5.2.2.2-3 対向設置時の電力プロファイルの一例
(左：干渉無し、中：帯状ノイズ発生時、右：電力領域発生時)

■ 距離軸帯状検出

全距離方向に生じる帯状干渉検出処理を示す。

1. 電力プロファイルのデータを縦軸(距離軸)における合計値(絶対値)を方位毎に算出する。
2. 合計値が 2 回連続で閾値 Th_{pwb} を超えていれば、干渉発生と判定する。

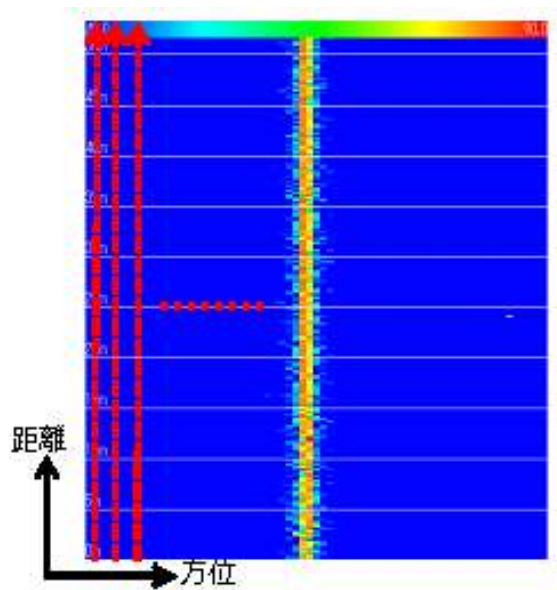


図 5.2.2.2-4 電力プロファイル帯状検出処理の説明補足図

■強電力領域検出

強電力領域検出処理を示す。

1. 移動窓(M_{pwt} 方位 \times N_{pwt} 距離)でプロファイルをスキャンする。
2. 移動窓内の各電力値が閾値 Th_{pwt} を超えた割合が閾値 Th_{pwp} 以上であれば干渉発生と判定する。

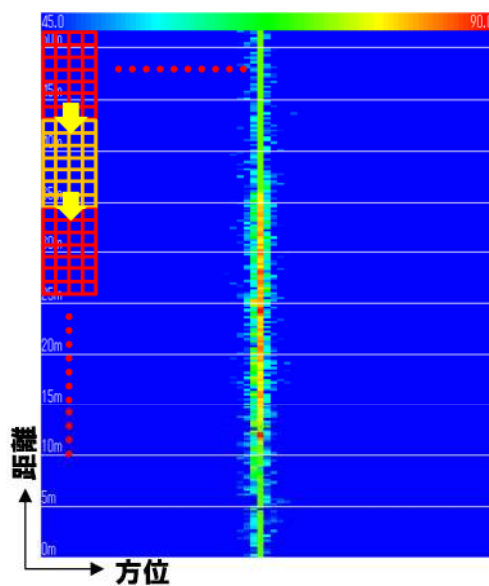


図 5.2.2.2-5 電力プロファイル強電力領域検出処理の説明補足図

(3)-3. 機能 C (ドップラープロファイル利用)

図 5.2.2.2-6 に示すドップラープロファイルは、屋内試験設備にて与干渉と被干渉レーダーを対向設置における任意タイミングのデータである。干渉は、全距離方向に帯状に発生する場合や一定範囲距離領域に強ドップラーを伴った形で発生が確認された。この干渉を検知するための処理を以下に示す。なお、機能 C に関しては、機能 B と同様の処理に従って干渉検出を行う。

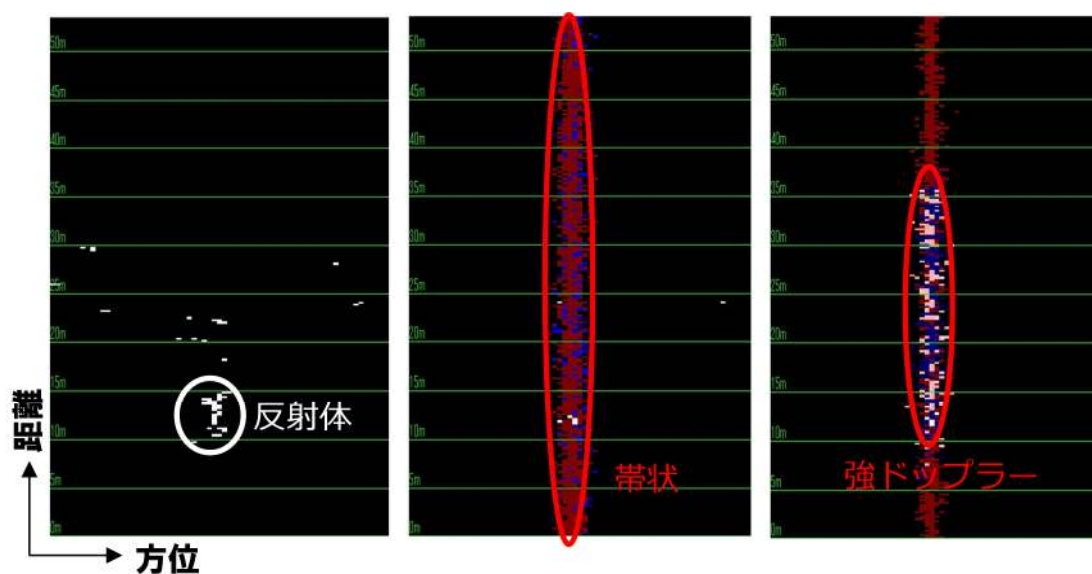


図 5.2.2.2-6 対向設置時のドップラープロファイルの一例
(左：干渉無し、中：帯状ノイズ発生時、右：電力領域発生時)

■ 距離軸帯状検出

全距離方向に生じる帯状干渉検出処理を示す。

1. ドップラープロファイルのデータを縦軸(距離軸)における合計値(絶対値)を方位毎に算出する。
2. 合計値が 2 回連続で閾値 $Th_{d_{pb}}$ を超えていれば、干渉発生と判定する。

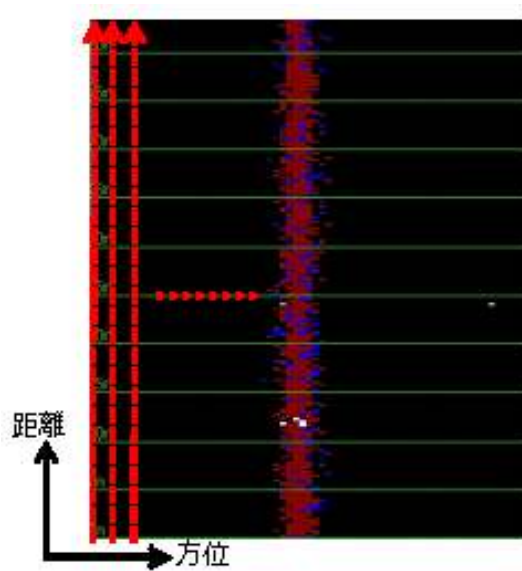


図 5.2.2.2-7 ドップラープロファイル帯状検出処理の説明補足図

■ 強ドップラー値領域検出

強電力領域検出処理を示す。

1. 移動窓(M_{dpt} 方位 \times N_{dpt} 距離)でプロファイルをスキャンする。
2. 移動窓内の各電力値が閾値 Th_{dpt} を超えた割合が閾値 Th_{dpp} 以上であれば干渉発生と判定する。

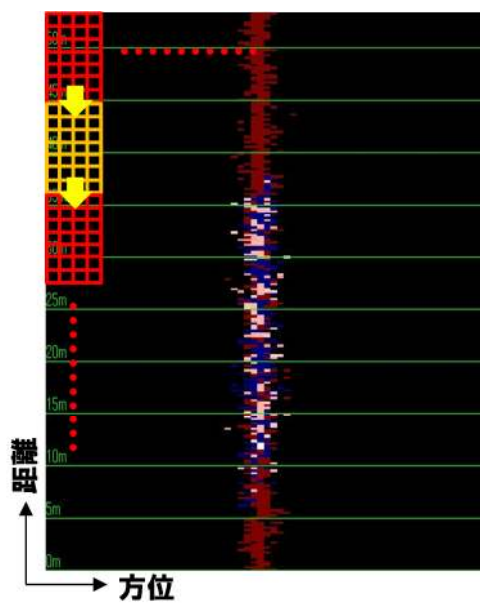


図 5.2.2.2-8 ドップラープロファイル強ドップラー領域検出処理の説明補足図

■パラメータ設定

各パラメータの設定を表 5.2.2.2-2 に示す。

表 5.2.2.2-2 検出用パラメータ

	機能	記号	最小設定 単位	設定範囲
機能 A (遅延プロファイル利用)	ノイズフロア検出	Pb	1[bin]	0~50
		λ	0.01	0.00~1.00
		Th _{pf1}	0.1[dB]	0.1~30.0
	スパイクノイズ検出	N _{pf}	1[bin]	1,3,5,7,9
		W _{pf} [N]	0.01	0.00~1.00
		Th _{pf2}	0.5[dB]	0.1~20.0
		CR _{pf}	1[bin]	1~PF 最大値
	Th _{pf3}	1[回]	0~200	
機能 B (電力プロファイル利用)	距離軸帯状検出	Th _{pwb}	1[bin]	0~レンジ 最大値
	強電力領域検出	M _{pwt}	1[deg]	レーダー方位範囲内
		N _{pwt}	1[bin]	0~レンジ 最大値
		Th _{pwt}	1[dB]	任意
	Th _{pwp}	0.1[%]	0~100	
機能 C (ドップラープロファイル利用)	距離軸帯状検出	Th _{dpb}	1[bin]	0~レンジ 最大値
	強ドップラー値領域 検出	M _{dpt}	1[deg]	レーダー方位範囲内
		N _{dpt}	1[bin]	0~レンジ 最大値
		Th _{dpt}	1[dB]	任意
	Th _{dpp}	0.1[%]	0~100	

5.2.2.3. 模擬交差点における実伝搬環境下での干渉実験

(1) 実験日程および場所

日程：2016年2月15日から19日の期間

場所：日本自動車研究所(JARI)所有の模擬市街路西コース
(茨城県つくば市莉間 2530)



図 5.2.2.3-1 模擬市街路西コース内交差点の様子

(2) 実験内容

「インフラレーダーシステム技術の開発」の(ア)レーダー検出信頼性向上技術の開発および(イ)レーダー間干渉低減技術の開発を行うにあたり、インフラレーダーの設置高さや俯角、または、車両の種別や歩行者(球体リフレクタ利用)との位置関係を変えながら行う伝搬実験を実施した。本実験では、交差点の高所設置レーダーや反射体となる走行車両が在るような実伝搬環境で、特に空間上の干渉発生条件を明確化することを目的とし、下記を実施した。

アンテナ設置高を 1.5、2.5、5m での耐干渉性能を検証

- ①：車載レーダー想定時の耐干渉性能検証
- ②：インフラレーダー間の耐干渉性能検証

(3) 実験システムの構成

実験システム構成を図 5.2.2.3-2 に示す。

① 車載レーダー想定時の耐干渉性能検証時

模擬交差点に被干渉となるインフラレーダーシステム(遠方用 LR レーダー)の設置高を変えて設置し、与干渉として車載レーダー想定装置を台車上に設置し走行実験を行った。

② インフラレーダー間の耐干渉性能検証

与干渉としてインフラレーダーシステム(近傍用 SR レーダー)を設置、反射体となる車両の走行実験を行った。

なお、それぞれのデータはプロフィール記憶処理部に蓄える構成とした。

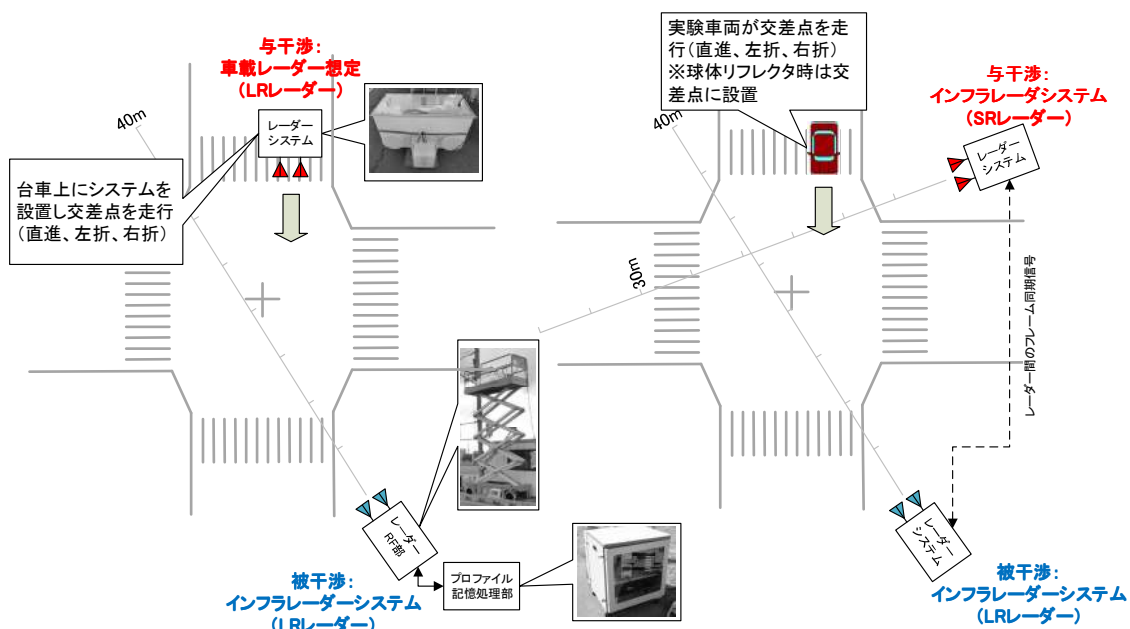


図 5.2.2.3-2 実験システムの構成

(左: ①車載レーダー想定、右: ②路側レーダー2台設置)

(4) 実験機材

表 5.2.2.3-1 に実験機材一覧を示す。

表 5.2.2.3-1 実験機材一覧

機材	用途	個数	補足
インフラレーダーシステム	与干渉/ 被干渉	3式	<p style="text-align: right;">RX</p> <p style="text-align: center;">制御用 レーダー レーダー PC BB部 RF部</p> <p style="text-align: right;">TX</p> <p>図：インフラレーダーシステムの構成</p>  <p>図：装置写真(左：BB部、右：アンテナ、RF部)</p>
アンテナ 高所設置 用リフター	設置	2式	<p>自走式 7.9m</p> 
プロファイル記録 処理部	データ 保存	1式	<p>下記に詳述する。</p> 
車両	反射体	4台	

		<p>トラック(2トン標準)</p>  <p>バン</p>  <p>セダン(ノッチバックセダン)</p>  <p>原動機付自転車</p>
--	--	---

プロフィール記憶処理部について説明する。図 5.2.2.3-3 に示すようにプロフィール記憶処理部は 79GHz 帯パルスレーダー装置ベースバンド部 2 台と、雨雪データ取得部と接続し、連続的にレーダープロフィール、及び雨雪データ取得部からの屋外環境データを取得する。また、図 5.2.2.3-4 にプロフィール記憶処理部で連続してレーダープロフィールを記録するための処理概要を図示する。レーダープロフィールのデータ量は毎秒約 200Mbyte であるため、制御部と記録部間の転送速度は約 200Mbyte/秒以上必要である。また、1 日のレーダープロフィールデータ量は約 17.2TByte であり、図 5.2.2.3-4 の運用を連続して続けるためには、記録部装置 1 台に対して 17.2TByte 以上の保存容量が必要となる。

上記仕様を満たすプロファイル記憶処理部を表 5.2.2.3-1、及び図 5.2.2.3-5 の構成で実現した。このプロファイル記憶処理部を使用して、模擬交差点における実伝搬環境下で連続的にプロファイルデータを取得した。図 5.2.2.3-6 にプロファイル記憶処理部の外観と実験時の様子を示す。

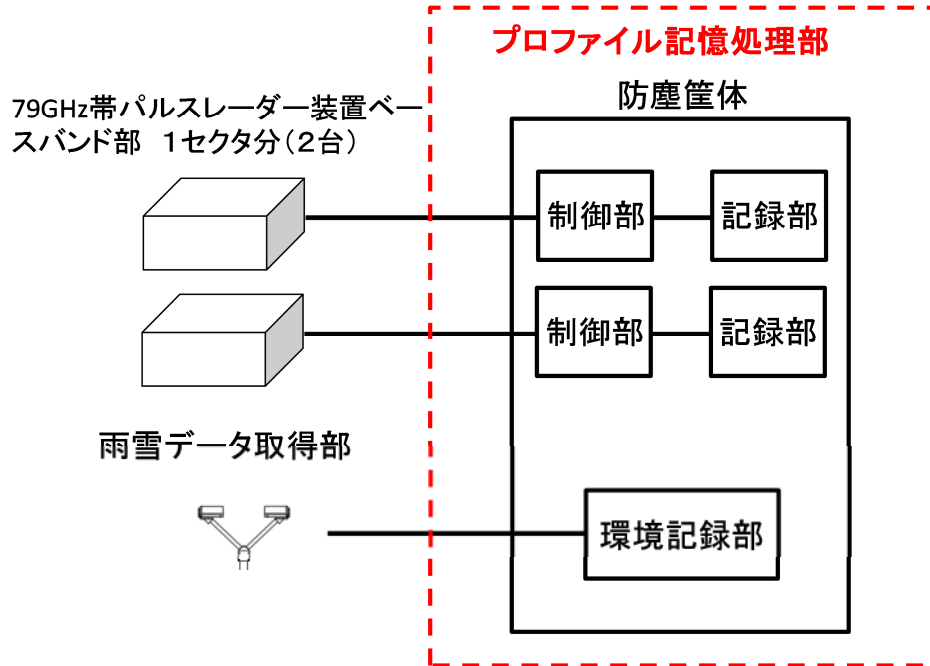


図 5.2.2.3-3 プロファイル記憶処理部の構成概要

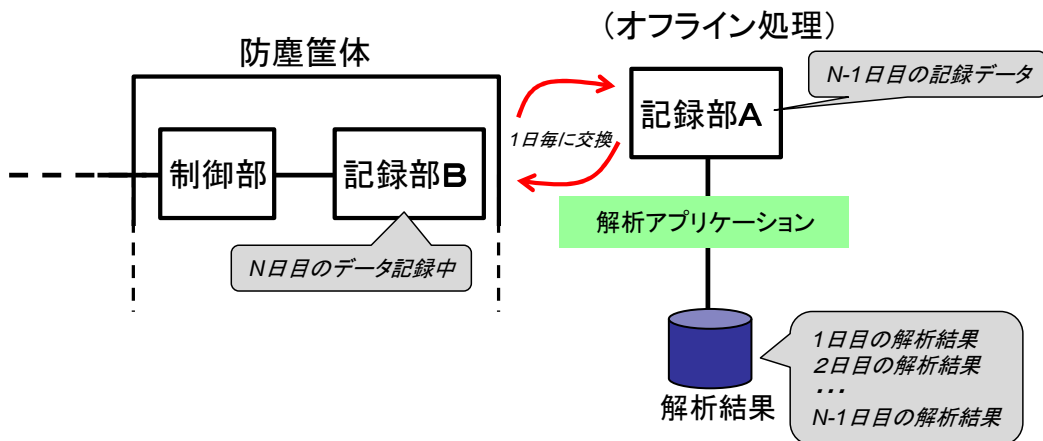


図 5.2.2.3-4 プロファイル記憶処理部の連続データ蓄積処理

表 5.2.2.3-1 プロファイル記憶処理部の機器諸元

項目	メーカー	型番	備考
防塵筐体	エス・ディ・エス(株)	L48F665	本体 幅650mm×奥行き550mm×高さ650mm
		L1B-TB65	天井板
		L1B-CS05	キャスター&アジャスターユニット
		L1T-0065	固定棚
		L1D-BH66	熱交換器ユニット
制御部 PC	日本 Shuttle 株式会社	R6 9700 WS	win 7 pro 64bit / Core i7-4790S / DDR3 8GB×4 / intel SSD 480GB / mSATA, / DVD SuperMulti / ELSA Quadro K600 / 300W電源 / ケンジントンロックケーブル
記録部	Areca	ARC-5028T2	RAIDO BOX
	Western_Digital	WD3000FYYZ	3TB(6台)
環境記録部 PC	日本 Shuttle 株式会社	DS5700U	Win7 pro 64bit / Core i7 5500U / DDR3L 8GB / 2.5" HDD 1TB /
無線LANルータ	IO_data	WN-G300GR	

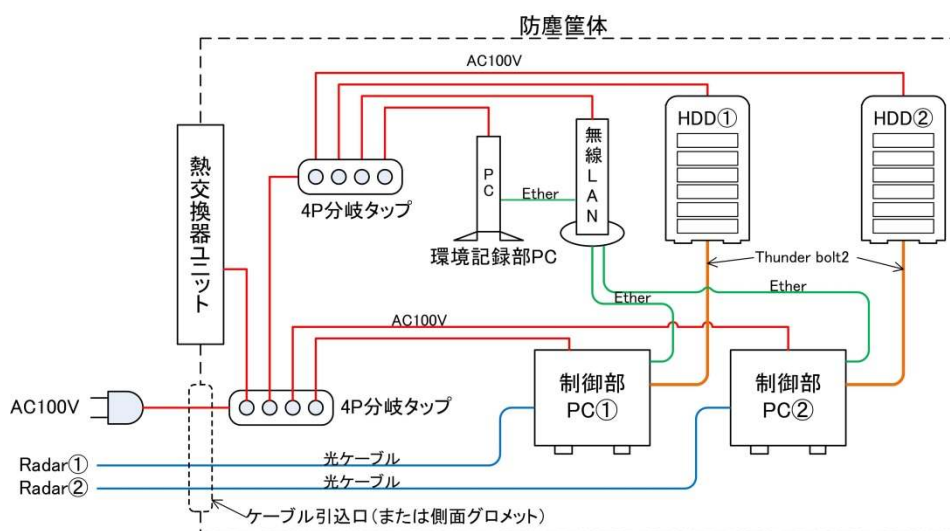


図 5.2.2.3-5 プロファイル記憶処理部の機器構成



(a) プロファイル記憶処理部外観



(b) プロファイル記憶処理部を使用した
模擬交差点での実験状況

図 5.2.2.3-6 プロファイル記憶処理部の外観と実験時の様子

(5) 試験条件

表 5.2.2.3-2 は、試験時における各レーダーシステムの設置高と俯角を示している。検知範囲については、人体相当である反射断面積・10dBsm を仮定した場合の範囲を示す。

表 5.2.2.3-2 レーダー設置高と俯角

種別	名称	設置高(m)	俯角(度)	検知範囲(m) ※人体-10dBsm 仮定
被干渉	インフラレーダー (LR レーダー)	1.5	0	~40
		2.5	3.6	16~43
		5.0	8.9	20~40
与干渉	車載レーダー想定	0.3	0	~40
	インフラレーダー (SR レーダー)	1.5	0	~40
		2.5	7.1	4~30
		5.0	16.4	7~27

図 5.2.2.3-7 に、実験走行時の設置パターンと走行パターンについて示す。走行速度は、約 10km/h となるように走行し、車両間が一定距離を離れる状態にした上で、トラック、バン、セダン、バイクの順で走行を実施した。また、車載レーダー想定 の台車に関しては、約 3km/h で走行を行った。

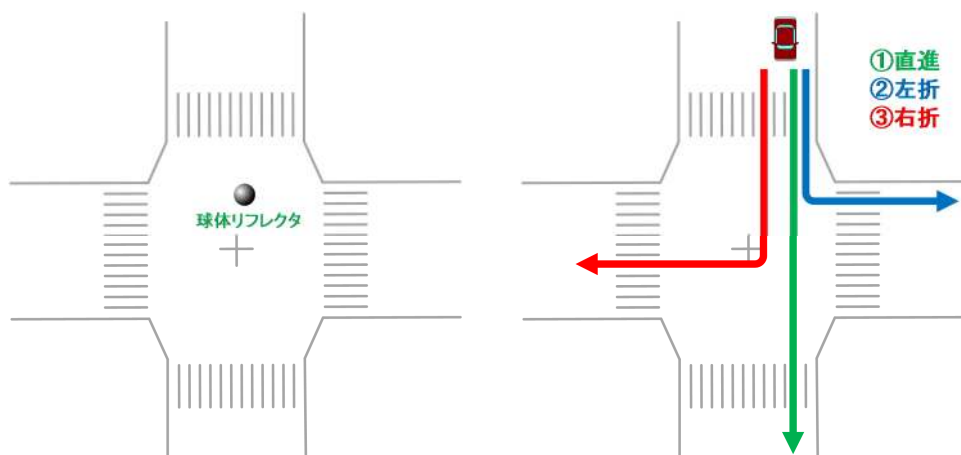


図 5.2.2.3-7 設置、走行パターン

図 5.2.2.3-8 は、車載レーダーと路側レーダーの水平面のカバレッジを示す。

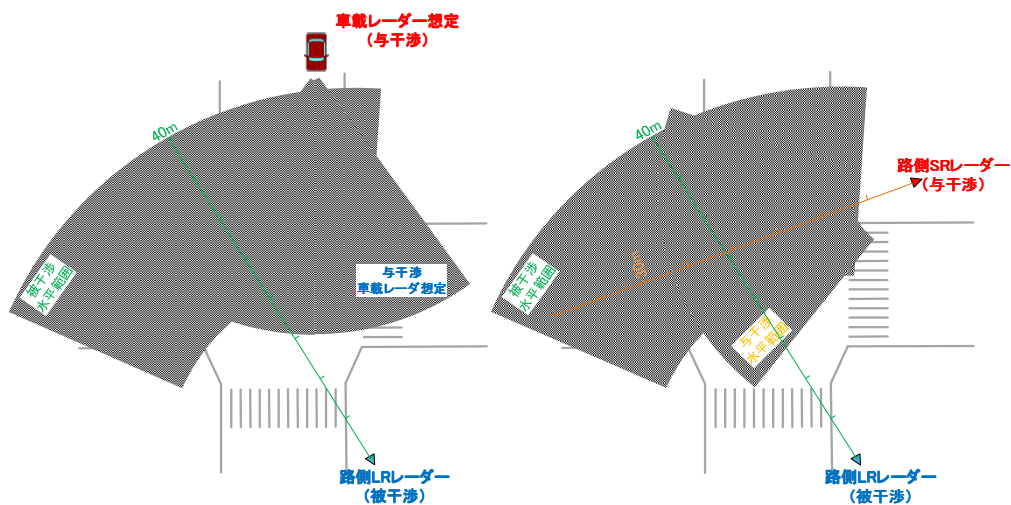


図 5.2.2.3-8 レーダーのカバレッジ

(左：車載レーダー想定時、右：路側レーダー5mに2台設置)

図 5.2.2.3-9 は、車載レーダー想定装置の半値角を 8 度とした場合における垂直方向のレーダー照射範囲を示す。また、被干渉レーダーシステムの設置高を変えた際に半値角の照射範囲となる距離を示している。設置高が 5m/2.5m/1.5m では、それぞれ 67m/32m/17m となる。今回の実験で用いた模擬交差点では 5m 設置時には半値角の範囲から外れることとなる。

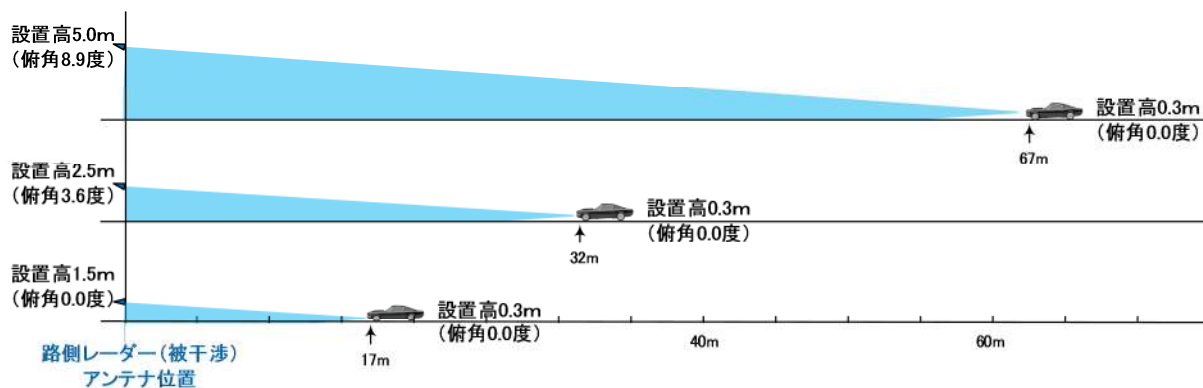


図 5.2.2.3-9 車載レーダー想定装置と路側レーダー装置の設置高の関係

表 5.2.2.3-3 に、干渉実験における与干渉、被干渉のレーダーのパラメータを示す。なお、屋内干渉実験においても同様の条件にて実施している。ただし、車載レーダー想定装置に関しては、同期信号の引き込みが困難なため条件 3 のみで実験を行った。

表 5.2.2.3-3 干渉実験のパラメータ

	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
搬送周波数 (与干渉/被干渉)	-/78 GHz (与干渉源無し)	78 GHz / 78GHz	78 GHz/78 GHz	79 GHz/78 GHz
フレーム タイミング (装置間の同期)	-	同期	非同期	同期

(6) 実験の様子



図 5.2.2.3-10 実験模様 1

(左: 車載レーダー想定との干渉実験、右: 路側レーダー間の干渉実験)



図 5.2.2.3-11 実験模様 2

(左: 車載レーダー想定との干渉実験、右: 路側レーダー間の干渉実験)

(7) 事前実験について

車両走行実験前に車両静止状態で交差点内に配置し、屋内環境と同様の干渉が発生することの確認を行った。確認条件は、条件 2 と条件 3 を確認した。(条件 2 : 周波数を同一、フレームタイミング同期、条件 3 : 周波数同一、フレームタイミング非同期)

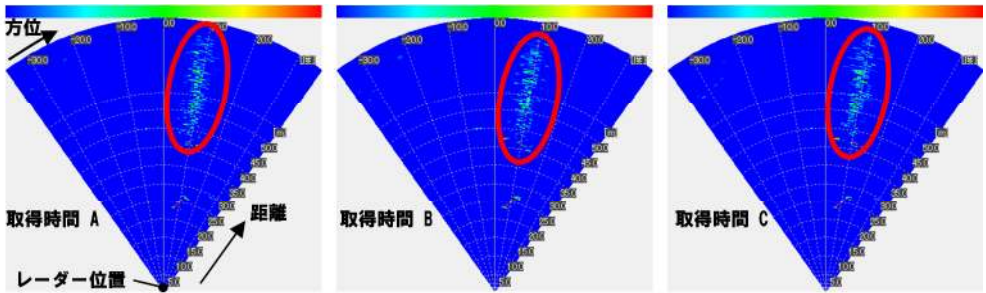
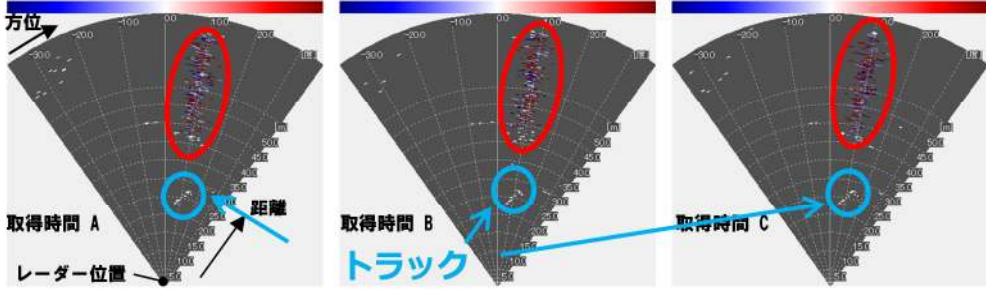
図 5.2.2.3-12 には、実験時の車両静止位置を示し、表 5.2.2.3-4 には非連続時間で取得したスナップショットを示す。(ただし、電力プロファイル、および、ドップラープロファイルの組合せは同一時間におけるスナップショットである。)

屋内実験でも確認された干渉(強電力、強ドップラーの現象)が発生していることが分かる。条件 2 と 3 の結果差分(フレームタイミングの同期・非同期条件の差分)については、干渉発生タイミングが固定される・されないという、屋内実験と同様となることが確認された。



図 5.2.2.3-12 予備実験時の車両静止位置

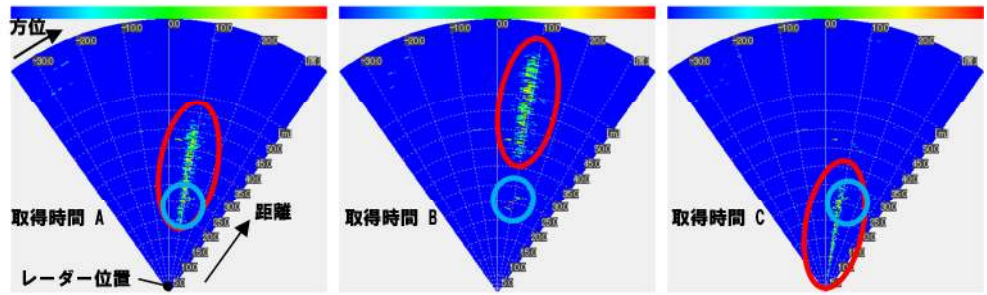
表 5.2.2.3-4 路側レーダー間の耐干渉準備実験
(交差点内にトラックを静止、車両速度 0km/h)

実験 パターン	被干渉 設置高	実験データ (電力プロファイル、ドップラープロファイル)
事前 確認 1	1.5	<p>取得条件：与干渉と被干渉の周波数同一、フレームタイミング同期 取得時間は非連続の異なる時間 A、B、C</p>  <p>電力プロファイル(左から観測時間 A、B、C)</p>  <p>ドップラープロファイル(左から観測時間 A、B、C)</p>

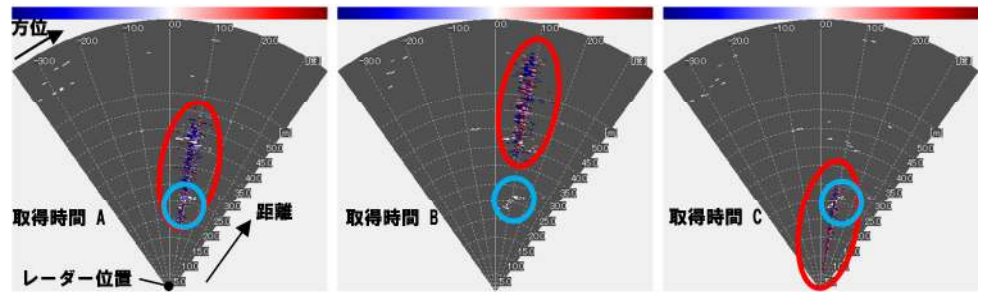
事前
確認 2

1.5

取得条件：与干渉と被干渉の周波数同一、フレームタイミング非同期
取得時間は非連続の異なる時間 A、B、C



電力プロファイル(左から観測時間 A、B、C)



ドップラープロファイル(左から観測時間 A、B、C)

(8) 実験パターン一覧

アンテナ設置高を 1.5、2.5、5m(実運用を想定)での耐干渉性能を検証した。表 5.2.2.3-5 と表 5.2.2.3-6 に実験パターンについて示す。各実験パターンにておいて、レーダーシステムの装置設定を条件 1,2,3,4 に従って実験を行った。

表 5.2.2.3-5 ①車載レーダー想定時の耐干渉性能実験パターン

実験パターン 名称	被干渉 設置高	与干渉	
	設置高	設置高	走行パターン
IVS-1	1.5	0.3	直進
IVS-2	2.5		
IVS-3	5		
IVL-1	1.5		左折
IVL-2	2.5		
IVL-3	5		
IVR-1	1.5		右折
IVR-2	2.5		
IVR-3	5		

表 5.2.2.3-6 ②路側レーダー間の耐干渉性能実験パターン

実験パターン 名称	被干渉	与干渉	反射体	
	設置高	設置高	対象	走行パターン
EB-1	1.5	1.5	球体 リフレクタ	NA
EB-2	2.5	2.5		NA
EB-3	5	5		NA
EVS-1	1.5	1.5	車両	直進
EVS-2	2.5	2.5		
EVS-3	5	5		
EVL-1	1.5	1.5		左折
EVL-2	2.5	2.5		
EVL-3	5	5		
EVR-1	1.5	1.5		右折
EVR-2	2.5	2.5		
EVR-3	5	5		

(9) 実験結果

上述の実験内容に基づいた結果に関して述べる。実験結果は、干渉が発生した条件を中心にスナップショットでの結果を示す。

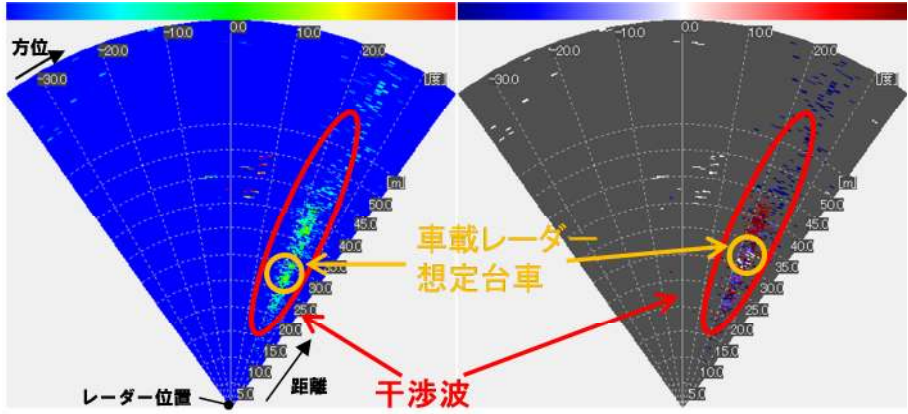
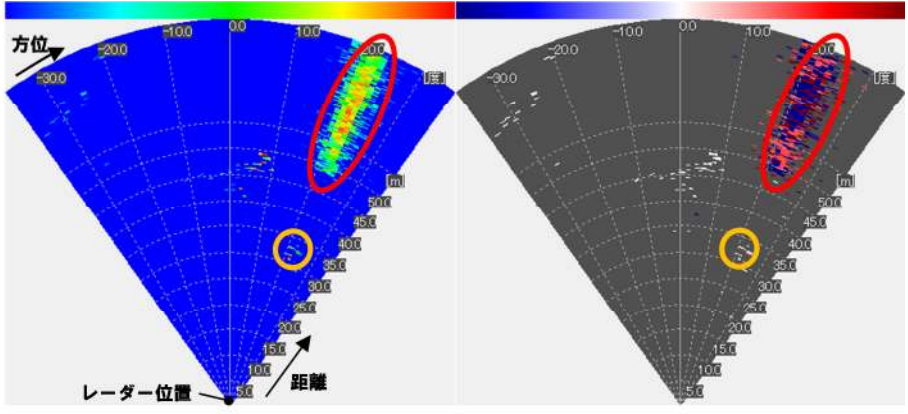
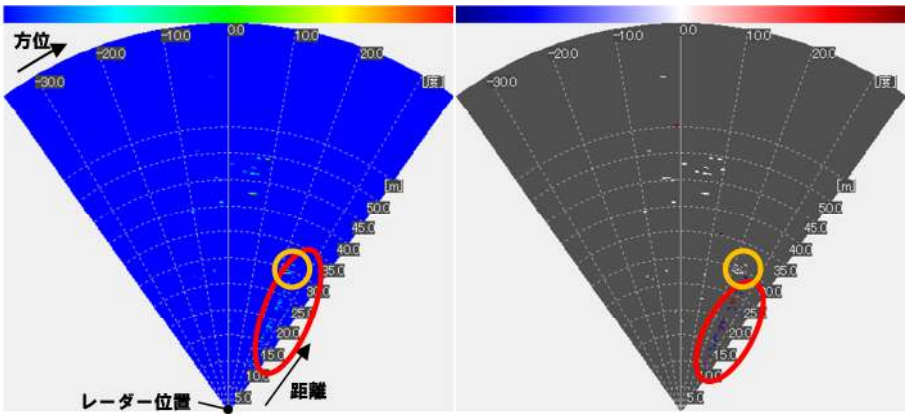
① 車載レーダー想定時の耐干渉性能実験

図 5.2.2.3-13 には台車を直線方向走行させた場合の路側レーダーからの距離 30m 地点における様子である。表 5.2.2.3-7 には、30m 付近にて観測される干渉発生時のレーダープロファイルのスナップショットを設置高毎に示した。実験パターンの名称は、表 5.2.2.3-5 で示した通りである。レーダー設置高 1.5、2.5m では、干渉が高頻度に発生する事を確認した。一方、5m 設置高にした場合には干渉発生の頻度が下がることを確認した。



図 5.2.2.3-13 車載レーダー想定時の耐干渉性能実験

表 5.2.2.3-7 車載レーダー想定時の実験結果(距離 30m 地点)

実験パターン	被干渉設置高	レーダープロファイル結果 条件 3(搬送周波数同一、フレームタイミング非同期)
IVS-1	1.5	
IVS-2	2.5	
IVS-3	5	
IVL-1	1.5	IVS-1 と同様に、高頻度の干渉発生を確認。
IVL-2	2.5	IVS-2 と同様に、高頻度の干渉発生を確認。
IVL-3	5	IVS-3 と同様に、低頻度の干渉発生を確認。
IVR-1	1.5	IVS-1 と同様に、高頻度の干渉発生を確認。
IVR-2	2.5	IVS-2 と同様に、高頻度の干渉発生を確認。
IVR-3	5	IVS-3 と同様に、低頻度の干渉発生を確認。

② 路側レーダー間の耐干渉性能実験

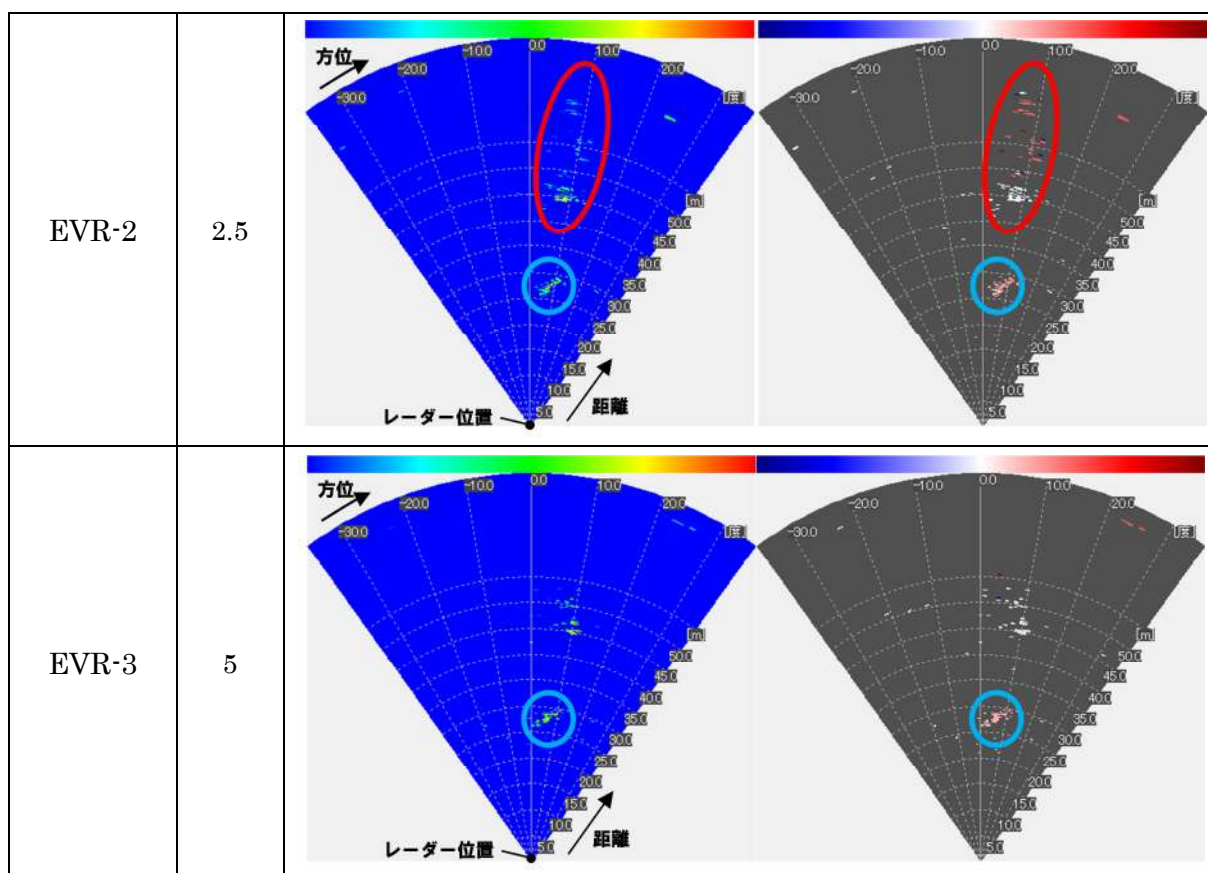
図 5.2.2.3-8 に示すように、交差点内に車両が存在する場合の、路側レーダー同士の耐干渉性能実験の結果を、表 5.2.2.3-8 に示す。実験パターンの名称は、表 5.2.2.3-6 で示した通りである。表に示したとおり、交差点中央に球体リフレクタを設置した場合、また車両が直進/左折する場合は、路側レーダー間の干渉は観測されなかった。一方、車両が右折するパターンでは、右折途中、瞬時的に、表に示したような干渉発生が確認された。また、その場合の干渉の強さは、レーダー設置高が高いほど小さくなっていることが確認できる。



図 5.2.2.3-14 路側レーダー間の耐干渉性能実験(トラック右折時)

表 5.2.2.3-8 路側レーダー間の耐干渉性能実験(車両速度 10km/h)

実験パターン	被干渉設置高	電力プロファイルとドップラープロファイル 条件 2(搬送周波数同一、フレームタイミング同期)
EB-1~3 EVS-1~3 EVL-1~3	-	このパターンに関しては、干渉は観測されなかった。
EVR-1	1.5	トラックが交差点右折途中において、干渉発生を確認した。



(10) 実験結果のまとめと考察

表 5.2.2.3-9、表 5.2.2.3-10 に実験パターンと条件における干渉発生の有無に関して、整理を行った。ただし、干渉発生フレーム数は、レーダープロフィールを目視確認の上でカウントしている。

表 5.2.2.3-9 にまとめた車載レーダー想定時の耐干渉性能実験では、屋内実験対向設置条件と同様に、路側レーダーが低設置、かつ、俯角が小さく干渉波が直接入射するような条件では、干渉が高頻度に発生することが確認された。一方、実運用を想定した設置高 5m では、干渉発生頻度が大きく抑えられることが確認された。

表 5.2.2.3-10 にまとめた路側レーダー間の耐干渉性能実験では、屋内実験 90 度設置条件にて車両側面で生じる干渉現象と同様に交差点内で車両が右折するシーンで僅かなフレーム数ではあるが干渉が発生することが確認された。しかしながら、この場合でも設置高を 5m にした場合、発生頻度は低下することが確認された。

表 5.2.2.3-9 車載レーダー想定実験のまとめ

実験パターン	被干渉設置高 [m]	与干渉設置高 [m]	走行パターン	総フレーム数(※)	干渉発生フレーム数
IVS-1	1.5	0.3	直進	364	142
IVS-2	2.5			328	80
IVS-3	5.0			328	22
IVL-1	1.5		左折	264	136
IVL-2	2.5			268	66
IVL-3	5.0			230	20
IVR-1	1.5		右折	273	85
IVR-2	2.5			303	148
IVR-3	5.0			312	21

※車載レーダー想定台車があらかじめ決められたルートを通行する間に取得したフレーム数

表 5.2.2.3-10 路側レーダー間の耐干渉性能実験のまとめ

実験パターン	被干渉設置高 [m]	与干渉設置高 [m]	反射体	総フレーム数(※)	干渉発生フレーム数
EB-1	1.5	1.5	球体リフレクタ(静止物体)	41	0
EB-2	2.5	2.5		54	0
EB-3	5.0	5.0		52	0
EVS-1	1.5	1.5	直進	222	0
EVS-2	2.5	2.5		204	0
EVS-3	5.0	5.0		203	0
EVL-1	1.5	1.5	左折	177	0
EVL-2	2.5	2.5		194	0
EVL-3	5.0	5.0		176	0
EVR-1	1.5	1.5	右折	202	5
EVR-2	2.5	2.5		174	4
EVR-3	5.0	5.0		185	1

※車両の場合、総フレーム数はあらかじめ決められたルート(直進、左折、右折)を通過する間に取得したフレーム数、

以上の交差点を模擬した屋外実験環境における耐干渉性能実験結果を通じて、インフラレーダー同士、またインフラレーダーと車載レーダー間の干渉条件として、与干渉装置の送信アンテナビーム方向と被干渉装置の受信アンテナビーム方向との一致、また、交差点内車両等の反射面による異なるレーダー間での伝搬路の形成が比較的重要な条件であることが確認された。したがって、インフラレーダーの高さや向きになどの設置設計を考慮することで、干渉の頻度を下げることが可能であると考えられる。さらに、今回の実車両走行実験により、後者の条件に伴う干渉の発生は、非常に少ない頻度であることが確認できた。今後の課題としては、より定量的な耐干渉性能を評価することであり、インフラレーダーの用途を踏まえた環境での長時間の測定が必要であると考えられる。

5.2.2.4. 干渉検知ソフトウェアの機能検証

開発した干渉検知ソフトウェアを用いた検知方法の実験検証について述べる。

表 5.2.2.4-1 に、干渉検知方法の検証結果を示す。ここで、干渉検知率は、検出性能と誤検出耐性が共に評価できるよう、下式で算出した。

$$\text{干渉検知率} = \frac{(\text{干渉発生時の検出数}) + (\text{干渉未発生時の未検出数})}{\text{総サンプル数}}$$

評価対象のデータとしては干渉発生が確認された屋内実験の車両、および、屋外走行時の右折シーンにて評価を行っている。結果としては、各機能とも干渉検知率として約 90%を超えていることが分かる。

表 5.2.2.4-1 干渉検知方法の検証結果(干渉検知率)

設置	条件		サンプル	干渉検知率					
				機能A		機能B		機能C	
				ノイズフロア	スパイクノイズ	帯状	強電力	帯状	強ドップラー
90度設置 ①車両	条件1	干渉無し (与干渉停止)	3076	100.0%	100.0%	99.8%	98.1%	100.0%	99.4%
	条件2	同一周波数、 フレーム同期	3085	100.0%	97.0%	94.2%	91.6%	92.2%	92.7%
	条件3	同一周波数、 フレーム非同期	3085	97.1%	97.7%	98.2%	96.2%	98.3%	97.6%
	条件4	異周波	3024	100.0%	100.0%	99.7%	98.3%	100.0%	99.4%
EVR-1	条件2	同一周波数、 フレーム同期	391	100.0%	100.0%	99.2%	96.7%	99.5%	96.4%
EVR-2	条件2	同一周波数、 フレーム同期	357	100.0%	100.0%	100.0%	98.6%	100.0%	97.2%
EVR-3	条件2	同一周波数、 フレーム同期	380	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	98.7%

参考文献

- [1] 情報通信審議会 情報通信技術分科会 移動通信システム委員会 報告
http://www.soumu.go.jp/main_content/000158391.pdf
- [2] EMC 試験設備 <http://panasonic.co.jp/avc/psnet/service/emc/index.html>

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

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、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実施して79GHz帯レーダーの実効性能を検証した。

また、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んだ。

本章においては、上記2点について報告する。

5.3.2. ウ)-① 耐環境性能の実証実験

交差点の設置環境で起こりうる、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、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。本節では、79GHz帯レーダーの耐環境性能検証の目的で、降雨量や降雪量を一定に保つ試験設備を利用して、降雨や降雪環境下の伝搬特性、および歩行者等のターゲットに対する検出性能を検証する。

(1) 降雨実験

A) 実験諸元

降雨実験の試験設備は、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。本設備は、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[1]。大型降雨実験施設の写真および仕様を図5.3.2-1、表5.3.2-1に示す。



図 5.3.2-1 大型降雨実験施設[1]

表 5.3.2-1 設備仕様[1]

降雨強度	15 ~ 300 mm/h
雨滴粒径	0.1 ~ 6 mm 程度
降雨範囲	最大 44m x 72m
降雨ノズル	総数 2176 個
ノズル設置高	地面から 16m

降雨制御(散水装置)については、図 5.3.2-2 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 4 種類の降雨ノズル(噴射径の小さい順に第 1, 2, 3, 4 系統と称す)から散水する。各系統に応じて降雨量の制御範囲が異なり、組み合わせることで所定量の降雨が再現できる。本実験では、降雨量 30mm/h から 250mm/h までの各条件に対して、表 5.3.2-2 に示す使用系統により降水環境を作り出す。

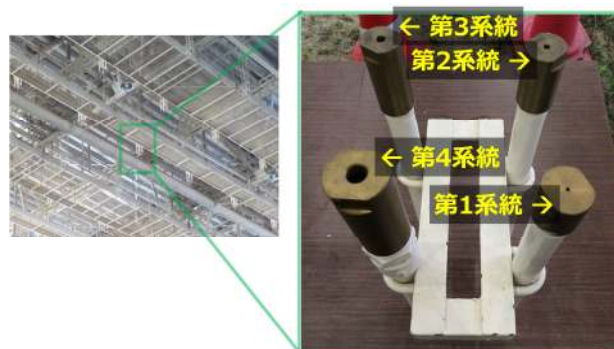


図 5.3.2-2 降雨ノズル

表 5.3.2-2 使用系統

散水系統	降雨量範囲(仕様)	使用系統(実験時)
第1系統	15 ~ 45 mm/h	30mm/h
第2系統	40 ~ 200 mm/h	50, 70, 100, 150 mm/h
第3系統	180 ~ 260 mm/h	200, 250 mm/h
第4系統	255 ~ 300 mm/h	—

図 5.3.2-3 は、施設内の全体配置図を示す。本実験では、降雨範囲を施設内の半分にあたる 72 x 22m で実施する。実験対象のターゲットは、図 5.3.2-4 に示すように、79GHz 帯レーダーシステムの送信方向線上に設置し、ターゲット距離は最大 60m とする。降雨実験では、79GHz 帯レーダーシステムと併せて、雨滴粒径等の降雨特性が測定可能な、ディストロメータ・Parsivel² (OTT 社) [2] を使用する(図 5.3.2-5)。なお、電波吸収体は施設内の金属壁等による不要な反射を抑制するために使用し、実験諸元を表 5.3.2-3 に示す。

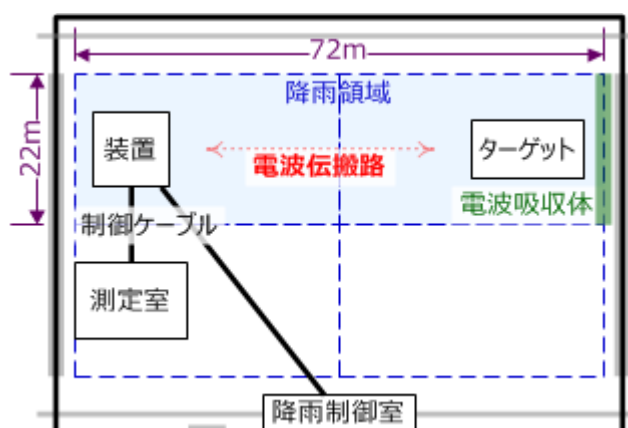


図 5.3.2-3 全体配置図(降雨実験)



図 5.3.2-4 実験風景(降雨実験)



図 5.3.2-5 実験装置(降雨実験)

表 5.3.2-3 実験諸元(降雨実験)

周波数	79GHz
降雨制御	30, 50, 70, 100, 150, 200, 250 mm/h
ターゲット	標準リフレクタ、歩行者、車両
ターゲット距離	10, 20, 40, 60 m
アンテナ高	1m
アンテナ仰角	0度

B) 標準リフレクタに対する 79GHz 帯レーダー検出性能

降雨環境下の標準リフレクタ(コーナーリフレクタ)に対する 79GHz 帯レーダーの基礎的な検出性能として、ターゲット距離 10m の場合の降雨量 50、100mm/h に対

する遅延プロファイルを図 5.3.2-7 に示す。なお、実験風景を図 5.3.2-6 に示しており、また図 5.3.2-7 の縦軸は、降雨なし(0mm/h)を基準としたときの正規化した反射レベルを示す。図 5.3.2-8 はディストロメータで同時測定した降雨量 50、100mm/h の降雨特性を示す。図 5.3.2-8 より、雨滴粒径(直径)と雨滴の落下する速度の各データは、経験式である Gunn-Kinzer Line [3] 上に分布し、降雨環境が再現できており、合わせて 79GHz 帯の波長 4mm と同程度の雨滴粒径が観測される。図 5.3.2-7 より、79GHz 帯の波長程度の雨滴が存在する降雨環境下においても、標準リフレクタの反射が所定の 10m を十分検出できている。ただし、降雨量の増加につれて検出レベル(10m の反射レベル)が減少する反面、ノイズレベル(10m を除く反射レベル)が全体的に増加している。



図 5.3.2-6 標準リフレクタの実験風景(降雨実験)

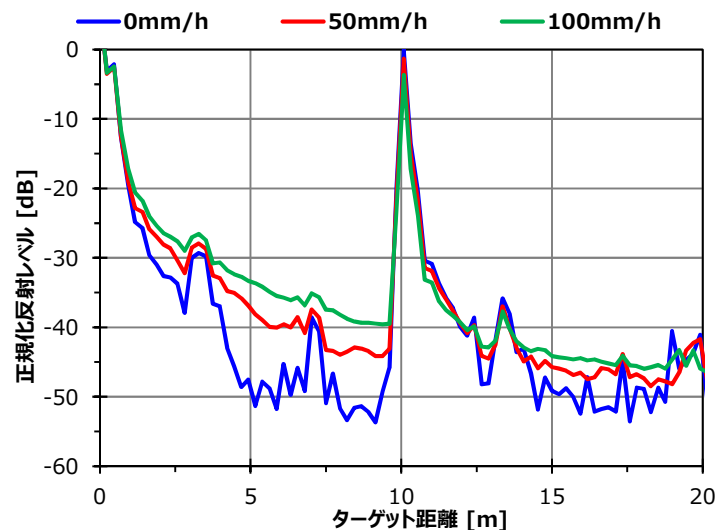
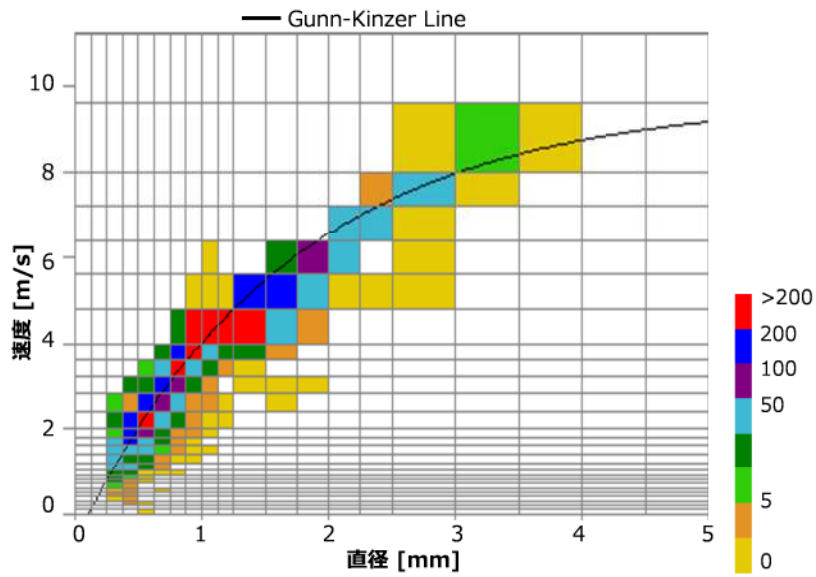
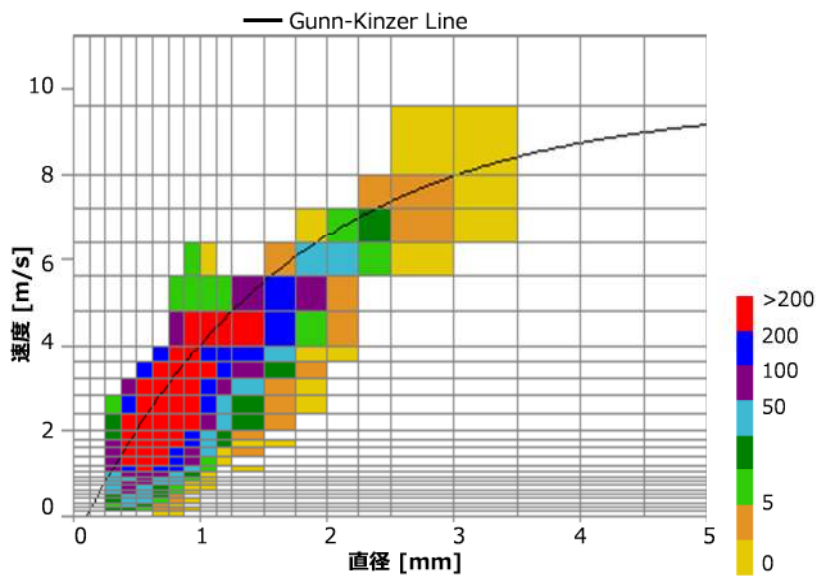


図 5.3.2-7 標準リフレクタに対する遅延プロファイル(降雨実験)



(a) 50mm/h

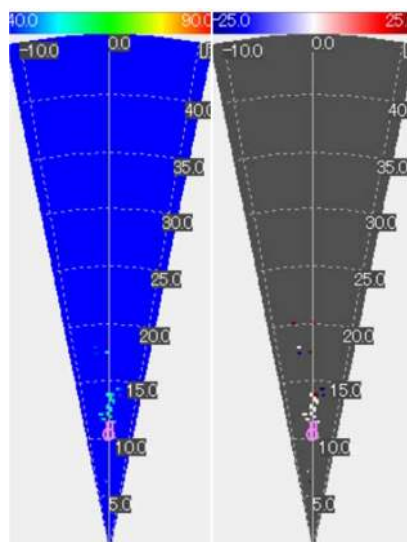


(b) 100mm/h

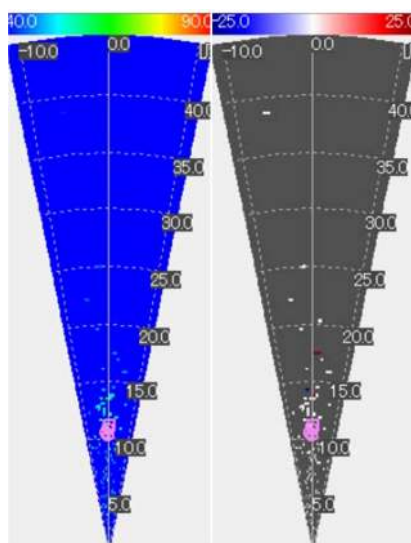
図 5.3.2-8 降雨特性

図 5.3.2-9 は、同条件(図 5.3.2-7)の電力プロファイル(青色背面)とドップラープロファイル(黒色背面)を示す。赤色丸印は標準リフレクタの検出結果を示すが、所定の 10m を十分検出できている。降雨量の増加につれて、細かな反射点(電力プロファイルでは水色点、ドップラープロファイルでは白色点)が現れており、雨滴散乱によるクラッタが発生していると考えられる。そのため、図 5.3.2-7 のノイズレベルの増加

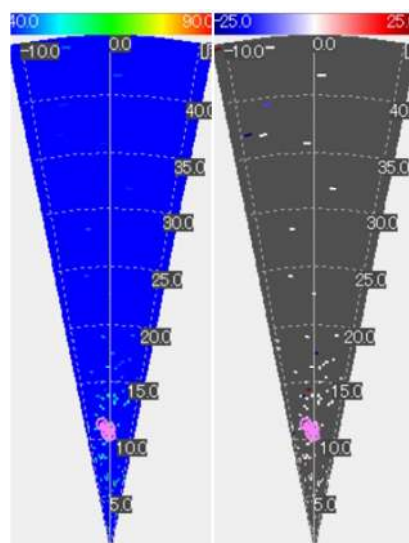
は、このクラッタによる影響と予想される。



(a) 降雨なし・0mm/h



(b) 降雨あり・50mm/h



(c) 降雨あり・100mm/h

図 5.3.2-9 標準リフレクタに対する電力、ドップラープロファイル(降雨実験)

さらに条件を追加して、ターゲット距離 10m と 40m、降雨量 50mm/h から 250mm/h までに対する反射減衰特性を図 5.3.2-10 に示す。なお、縦軸は、各ターゲット距離において、降雨なし(0mm/h)を基準としたときの反射レベルの差分量を示す。参考として、図 5.3.2-11 は各降雨量に対する定点観測、および降雨内観測の風景を

示すが、降雨量 100mm/h においても相当な降雨で視界が悪くなり、150mm/h を越えると日常的には稀にみる降雨であることが分かる。図 5.3.2-10 より、降雨量 100mm/h 以下の場合、ターゲット距離 10m で 5dB 以下、40m で 10dB 以下であり、降雨量と反射減衰量の相関性が確認できる。

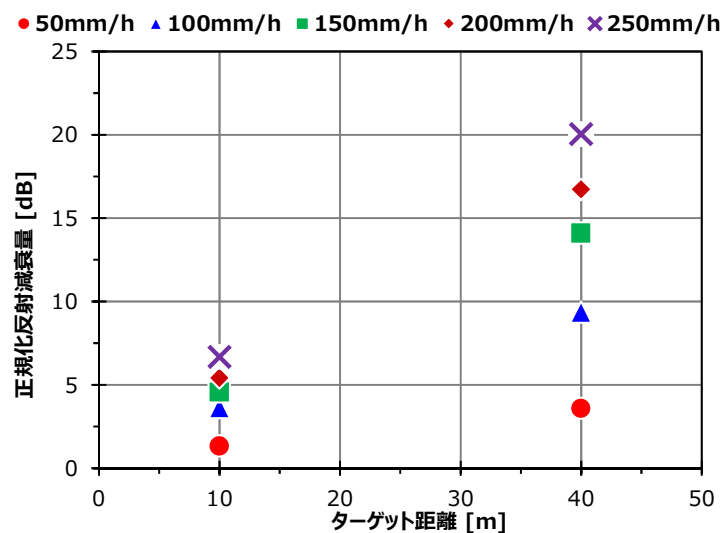


図 5.3.2-10 標準リフレクタに対する反射減衰特性(降雨実験)



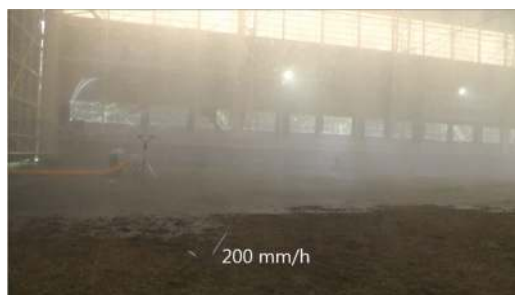
(a) 50mm/h



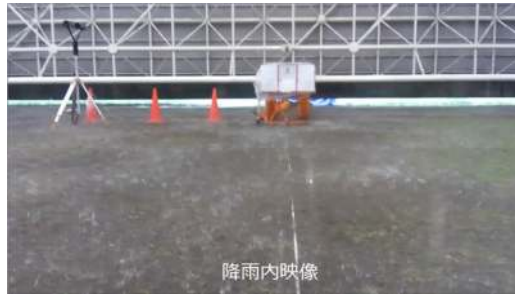
(b) 100mm/h



(c) 150mm/h



(d) 200mm/h



(e) 降雨内

図 5.3.2-11 降雨風景

図 5.3.2-12 は、図 5.3.2-10 のターゲット距離 10m の場合の降雨量に対する反射減衰分布(確率密度関数)を示す。反射減衰分布の広がり、降雨量 50mm/h の場合、1dB 未満で狭いが、250mm/h の場合、1dB 以上で広がり、降雨量の増加につれて分散が大きくなることが分かる。

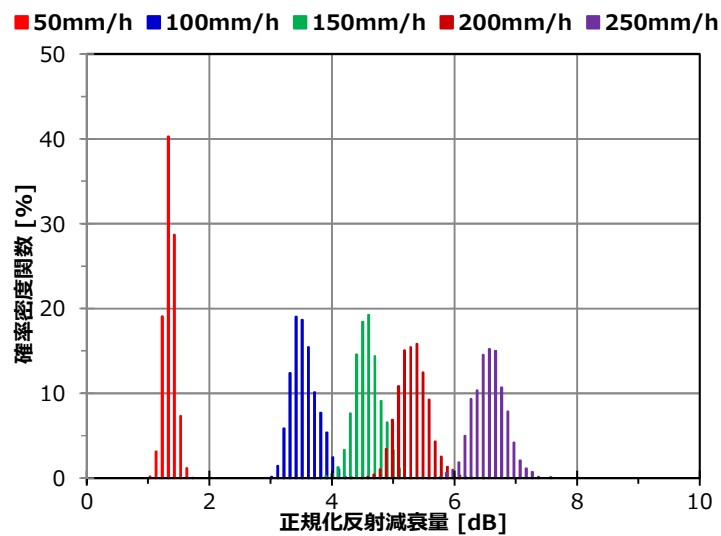


図 5.3.2-12 標準リフレクタに対する反射減衰分布(降雨実験)

そこで、図 5.3.2-10 の反射減衰特性を基に、降雨量に対する降雨減衰特性を図 5.3.2-13 に示す。緑色線は、各データから線形近似しており、定数 1.2 とする比例関数で表すことができる。従って、本実験より、降雨環境下における 79GHz 帯レーダーの距離減衰を以下のように定式化(降雨減衰式と称す)する。

$$\text{距離減衰量 [dB/km]} = 1.2 [(\text{dB/km}) / (\text{mm/h})] \times \text{降雨強度 [mm/h]}$$

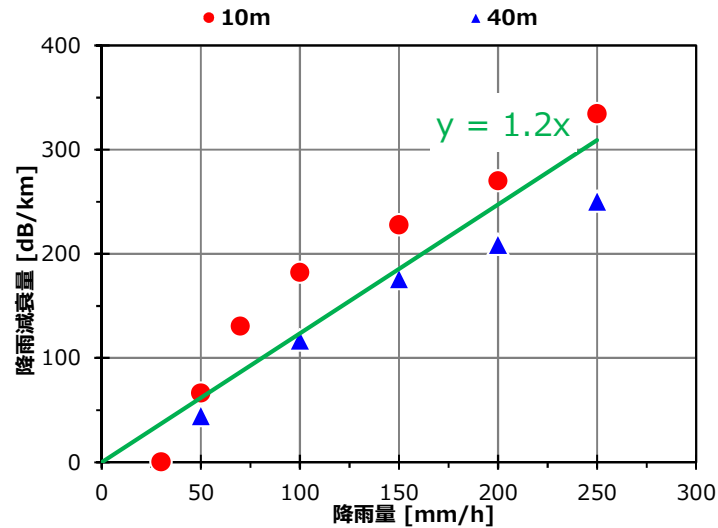


図 5.3.2-13 降雨減衰特性(降雨実験)

C) 歩行者に対する 79GHz 帯レーダー検出性能

降雨環境下の歩行者に対する 79GHz 帯レーダーの検出性能として、降雨量 50、100mm/h に対する電力プロファイル(青色背面)とドップラープロファイル(黒色背面)を図 5.3.2-16~20 に示す。なお、実験風景を図 5.3.2-15 に示しており、歩行者はビニール製合羽を着用の上、ビニール傘をさしてターゲット距離 10m から 40m まで連続的に歩行する。降雨量の条件について、図 5.3.2-14 は過去の気象データから東京地区(東京管区気象台)の降雨統計をに示す[4]。縦軸は、各年における日降雨量の階級別日数を発生確率で示しており、実データでは降雨量 50mm/h(緑色実線)を越える日数が 5%(橙色破線)以下である。従って、歩行者、および車両に対する降雨実験では、50mm/h(平均 3%程度)に加え、100mm/h(平均 1%程度)の 2 条件で進める。

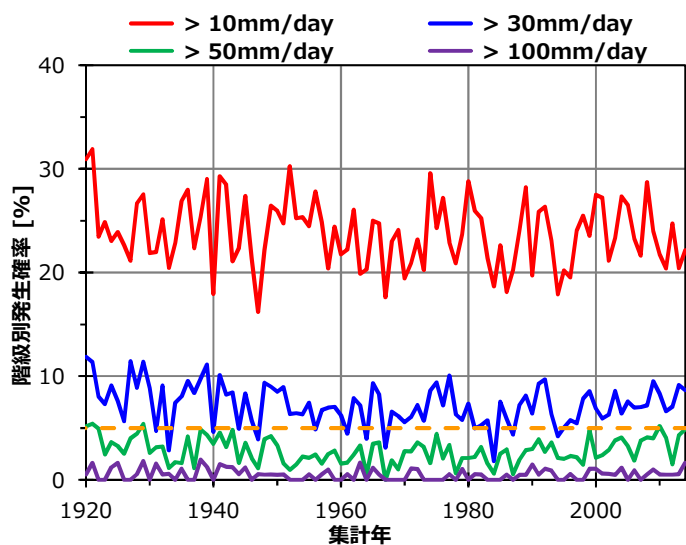
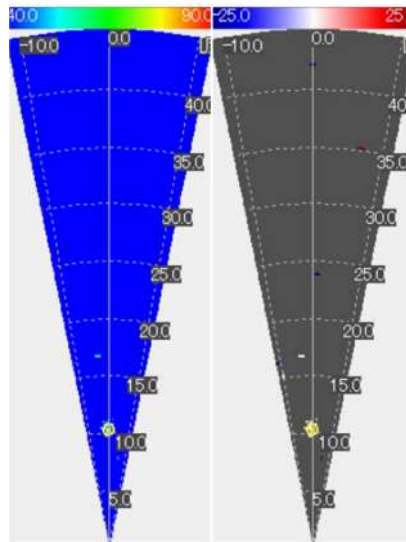


図 5.3.2-14 降雨統計[4]

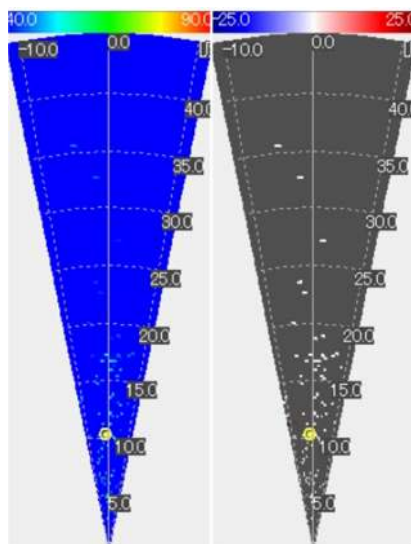
図 5.3.2-16～20 は、ターゲット距離に応じてプロファイルを切り出しており、10m を図 5.3.2-16、20m を図 5.3.2-17、25m を図 5.3.2-18、30m を図 5.3.2-19、40m を図 5.3.2-20 に示す。黄色丸印は歩行者の検出結果を示すが、降雨なし(0mm/h)の場合、所定の 10m(図 5.3.2-16(a))から 40m(図 5.3.2-20(a))まで十分検出できている。しかし、降雨量 50mm/h の場合は 30m(図 5.3.2-19(b))まで、100mm/h の場合は 25m(図 5.3.2-18(c))までが検出の限界であることが分かる。



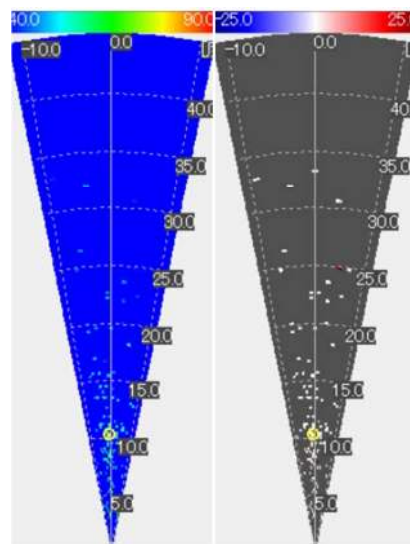
図 5.3.2-15 歩行者の実験風景(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h

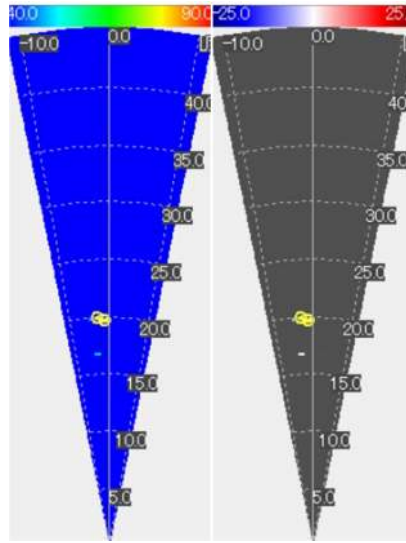


(b) 降雨あり・50mm/h

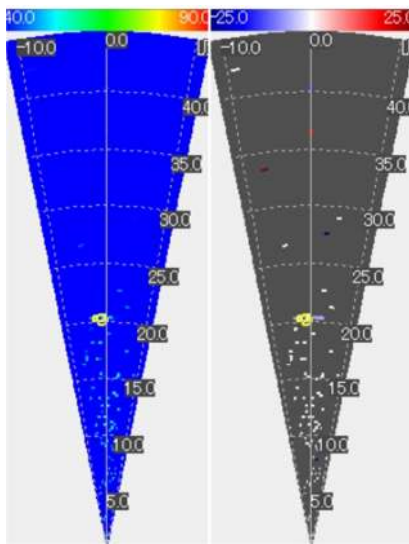


(c) 降雨あり・100mm/h

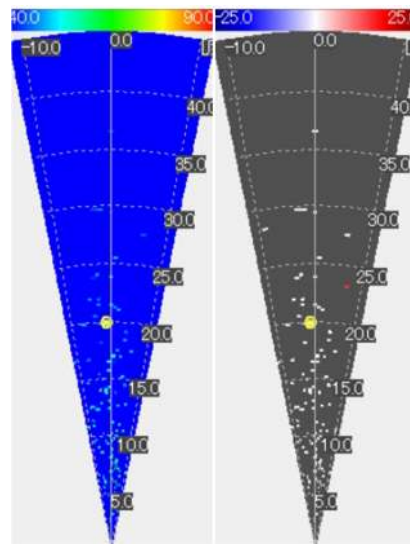
図 5.3.2-16 歩行者に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 10m(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h

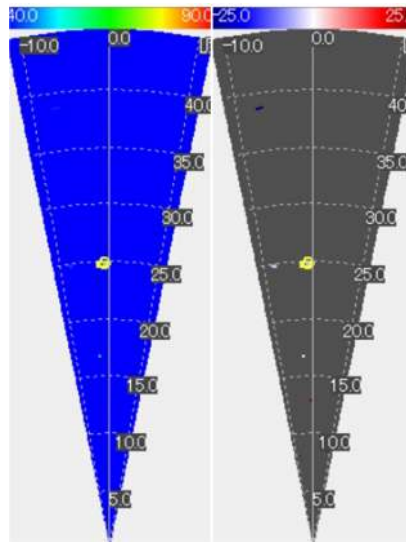


(b) 降雨あり・50mm/h

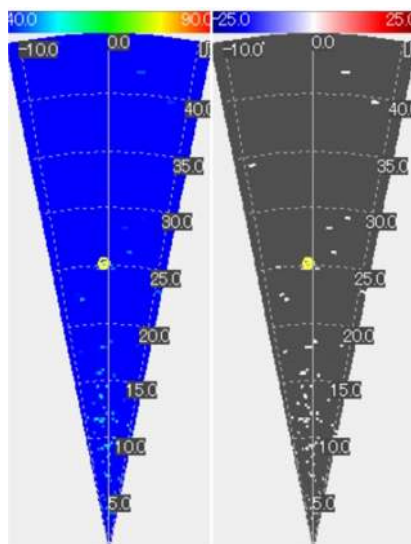


(c) 降雨あり・100mm/h

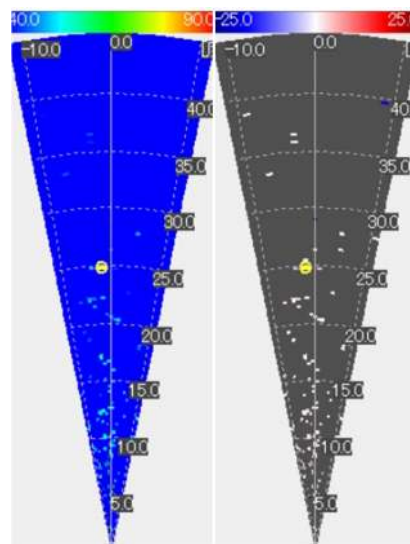
図 5.3.2-17 歩行者に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 20m(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h

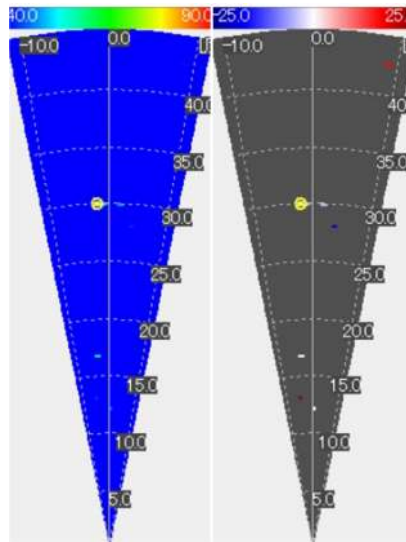


(b) 降雨あり・50mm/h

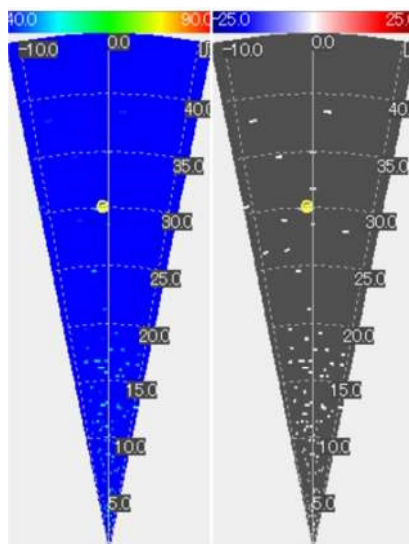


(c) 降雨あり・100mm/h

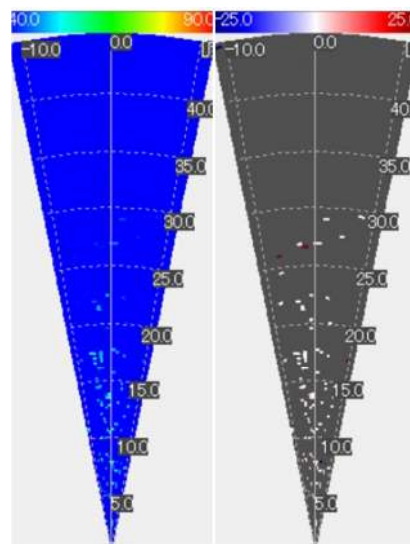
図 5.3.2-18 歩行者に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 25m(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h

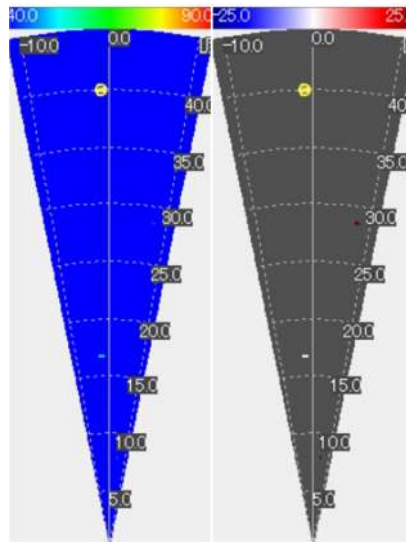


(b) 降雨あり・50mm/h

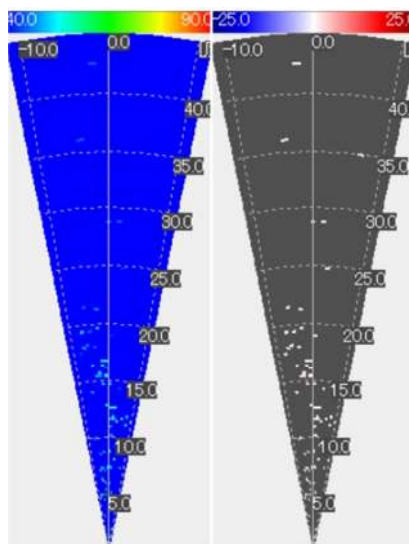


(c) 降雨あり・100mm/h

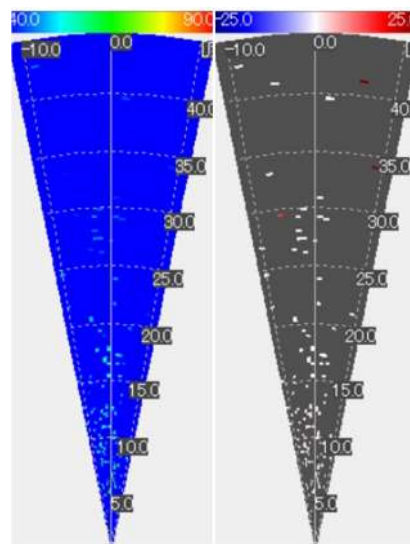
図 5.3.2-19 歩行者に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 30m(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h



(b) 降雨あり・50mm/h



(c) 降雨あり・100mm/h

図 5.3.2-20 歩行者に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 40m(降雨実験)

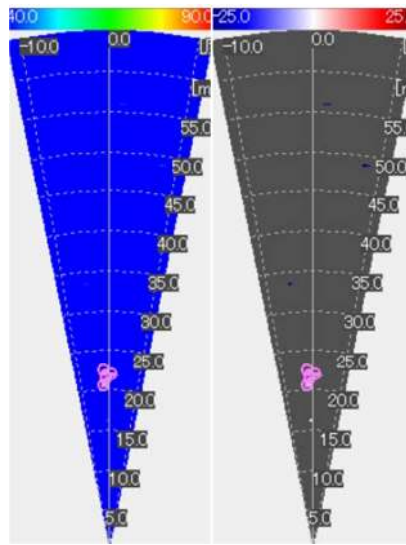
D) 車両に対する 79GHz 帯レーダー検出性能

歩行者と同様、降雨環境下の車両(四輪車セダン型)に対する 79GHz 帯レーダーの検出性能として、降雨量 50、100mm/h に対する電力プロファイル(青色背面)とドップラープロファイル(黒色背面)を図 5.3.2-22~24 に示す。なお、実験風景を図 5.3.2-21 に示しており、車両はターゲット距離 20、40、60m に停車(正面)する。ターゲット

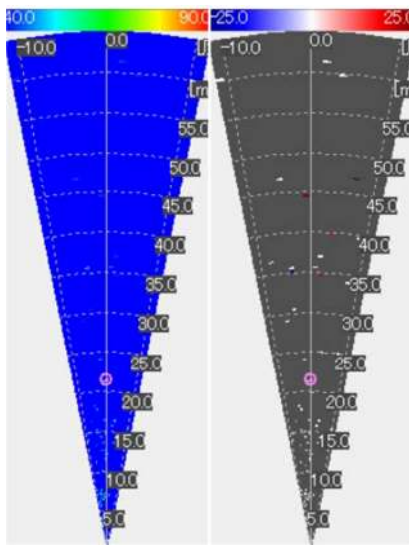
距離 20m を図 5.3.2-22、40m を図 5.3.2-23、60m を図 5.3.2-24 に示す。赤色丸印は車両の検出結果を示すが、車両の場合、歩行者と比べて反射レベルが大きいため、100mm/h の場合でも 60m(図 5.3.2-24(c))まで検出できている。



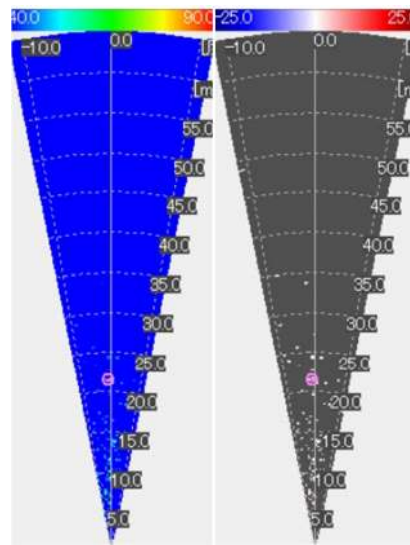
図 5.3.2-21 車両の実験風景(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h

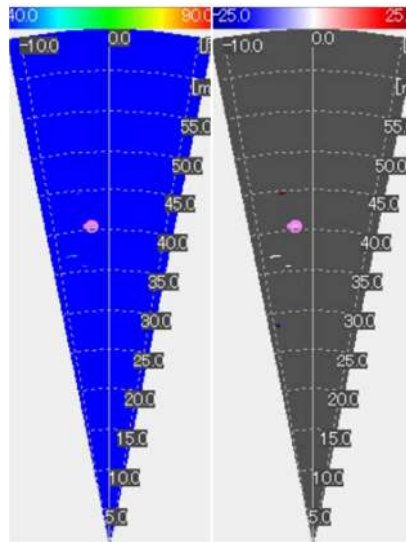


(b) 降雨あり・50mm/h

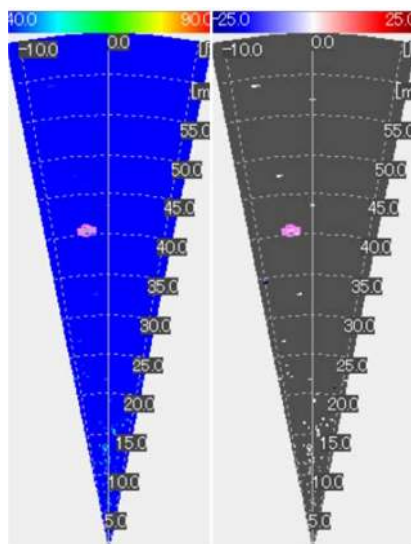


(c) 降雨あり・100mm/h

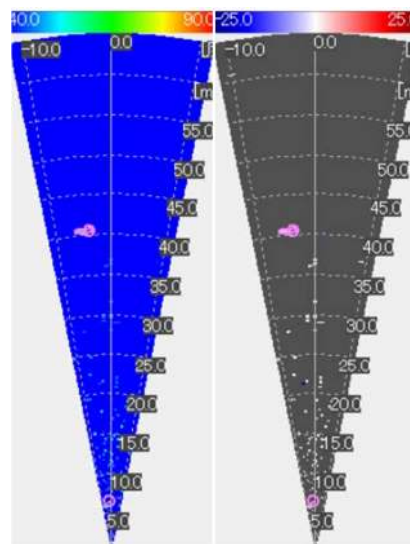
図 5.3.2-22 車両に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 20m(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h

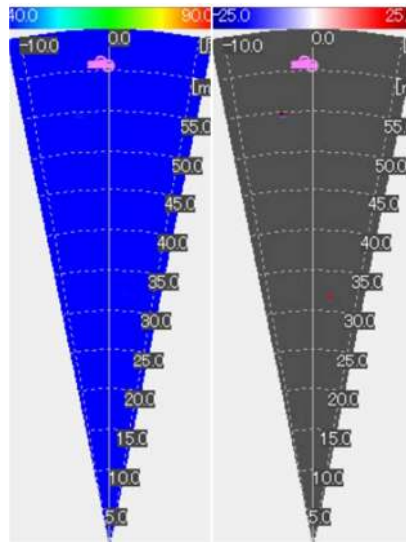


(b) 降雨あり・50mm/h

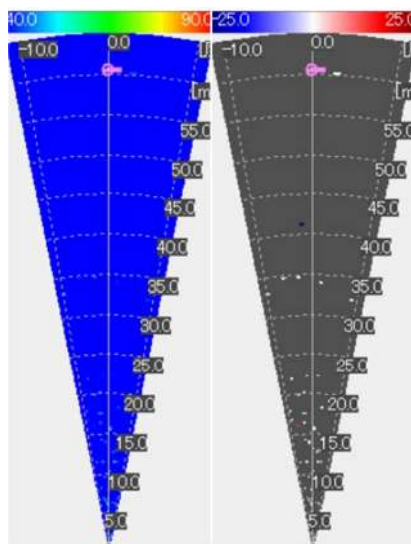


(c) 降雨あり・100mm/h

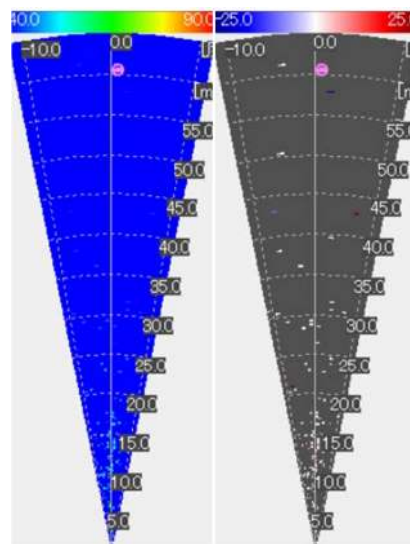
図 5.3.2-23 車両に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 40m(降雨実験)



(a) 降雨なし・0mm/h



(b) 降雨あり・50mm/h



(c) 降雨あり・100mm/h

図 5.3.2-24 車両に対する電力、ドップラープロファイル・ターゲット距離 60m(降雨実験)

E) 降雨時の回線設計

降雨実験では、79GHz 帯レーダーの耐環境性能検証の目的として、降雨量を一定に保つ試験設備で降雨環境下の伝搬特性、および歩行者等のターゲットに対する検出性能の検証を行い、以下の事項を確認した。

- ・ 自然の降雨状態が再現可能な 大型降雨実験施設 を用いて、降雨量 30mm/h から 250mm/h の非常に強い降雨条件下での基礎伝搬特性、および歩行者等のターゲットに対するレーダー検出データを取得
- ・ 79GHz 帯の降雨減衰特性、およびその関係式(降雨減衰式)を導出

$$\text{距離減衰量 [dB/km]} = 1.2 [(\text{dB/km}) / (\text{mm/h})] \times \text{降雨強度 [mm/h]}$$
- ・ 降雨量 50mm/h の条件下において、歩行者および車両のレーダーでは概ね 30m 程度 まで検出可能

そこで、本実験で得られた降雨減衰式を用いて、降雨強度に対する 79GHz 帯レーダーシステムの回線マージン検討を行う。検討の前提条件を、降雨なし、ターゲット距離 40m、回線マージンとなる SNR +10dB(現行性能の基準)として算出した、降雨量に対する回線マージンを図 5.3.2-25 に示す。なお、ターゲット距離は 40m 以外に 32m、27m を追加している。

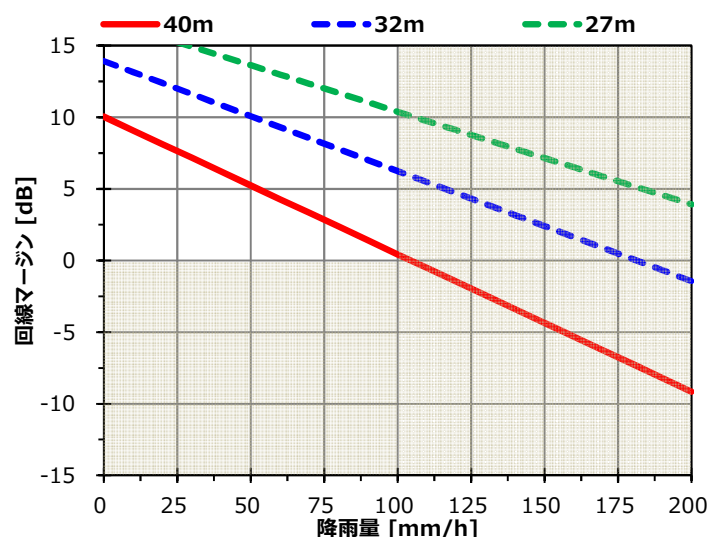


図 5.3.2-25 降雨環境下の回線マージン

続いて、図 5.3.2-26 は、図 5.3.2-25 から降雨量 100mm/h 以下、SNR が 0dB 以上を切り出した上で、検知率 > 95%、誤検知率 < 10% を満たす、回線マージン SNR > +8dB を目標値として仮設定した指標を追記して示す。図 5.3.2-26 より、交差点を想定したターゲット距離 40m とした場合、現行の 79GHz 帯レーダーシステムは、降雨量 20mm/h に対応する回線マージンを確保していることが分かる。また、本節の歩行者に対する 79GHz 帯レーダーの検出性能結果では、降雨量 50mm/h の場合、ターゲット距離 30m(図 5.3.2-19(b))までが検出の限界であることを実験的に確認し

たが、図 5.3.2-26 より、回線マージンの目標値を 32m で満たすことから、概ね一致する。降雨量 100mm/h についても同様に一致することから、図 5.3.2-26 の回線設計は妥当であることが分かった。従って、降雨量 50mm/h の降雨環境下において、目標値を満たすためには、+3dB の感度改善が必要であり、今後の検討課題とする。

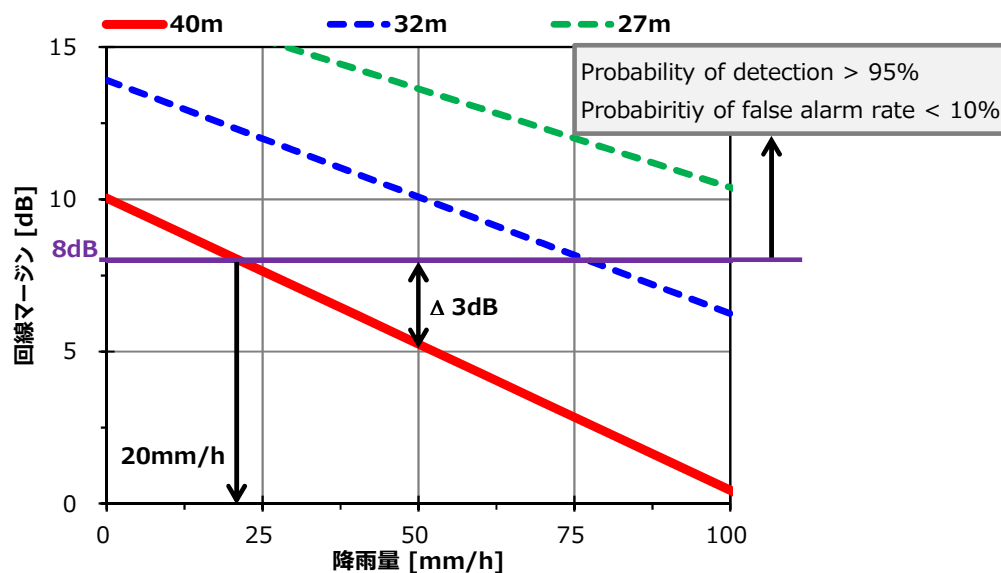


図 5.3.2-26 降雨環境下の回線設計

(2) 降雪実験

A) 実験諸元

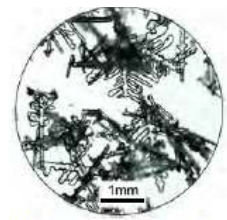
降雪実験の試験設備は、降雨実験と同様、国立研究開発法人 防災科学技術研究所が保有する雪氷防災実験棟(山形県新庄市)を利用する。本設備は、雪氷圏に起こる様々な現象を実験室レベルで再現できる世界最大規模の施設であり、天然に近い結晶形の雪を降らせる装置や風洞装置などを備えた大型低温室において、雪氷に関する基礎研究や、雪氷災害の発生機構とその対策に関する研究が行われている[1]。雪氷防災実験棟の大型低温室の写真および仕様を図 5.3.2-27、表 5.3.2-4 に示す。雪の結晶形は様々な種類が存在するが、本設備では図 5.3.2-28 に示すように、天然雪に近い樹枝状結晶と、氷球の 2 種類が生成可能であり、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、当研究所のみで天然雪に近い降雪環境が再現できる。



図 5.3.2-27 雪氷防災実験棟の大型低温室[1]

表 5.3.2-4 設備仕様[1]

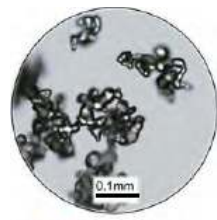
結晶形	①樹枝状結晶、②球形モデル
降雪強度(水換算)	①0 ~ 1 mm/h、②0 ~ 5 mm/h
結晶粒径	①0.5 ~ 5 mm、②約 0.025mm
設定温度	①-10 度、②-2 度
降雪範囲	3 x 5 m



樹枝状結晶 Dendrites



(a) 樹枝状結晶



氷球 Ice particles



(b) 氷球

図 5.3.2-28 雪の結晶形[1]

降雪制御については、図 5.3.2-29 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、自然落下することで降雪が再現できる。降雪装置 A は樹枝状結晶、降雪装置 B は氷球の生成装置であり、降雪条件に応じて装置毎、入れ替える仕組みである。なお、本実験では、降雨装置、日射装置、風洞装置は使用しない。参考として、図 5.3.2-30 は降雪制御中の降雪装置、および 15 時間経過後の積雪(実験テーブル上)の風景を示す。

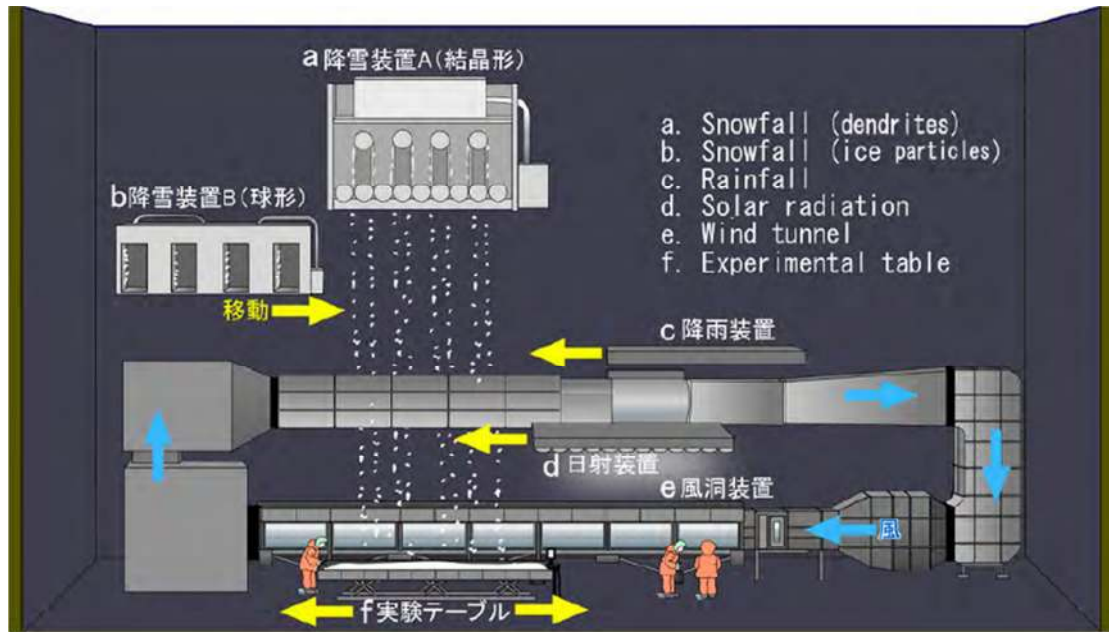


図 5.3.2-29 降雪装置[1]



(a) 降雪装置



(b) 積雪

図 5.3.2-30 降雪風景

図 5.3.2-31 は、施設内の全体配置図を示す。本実験では、降雪範囲内の 5 x 3m で実施する。

実験対象のターゲットは、図 5.3.2-32 に示すように、79GHz 帯レーダーシステムの送信方向線上に設置し、ターゲット距離は 5m とする。降雪実験では、降雨実験と同様、79GHz 帯レーダーシステムと併せて、雪の結晶粒径等の降雪特性が測定可能な、ディストロメータ・Parsivel² (OTT 社) [2] を使用する。また、併せて、同環境下でターゲットに対するレーザーレーダーの検出性能を比較するために、全方位レーザーライダーイメージングユニット・HDL-32e (Velodyne 社) [3] も使用する(図 5.3.2-33)。なお、電波吸収体は、降雨実験と同様、施設内の金属壁等による不要な反射を抑制するために使用し、実験諸元を表 5.3.2-5 に示す。

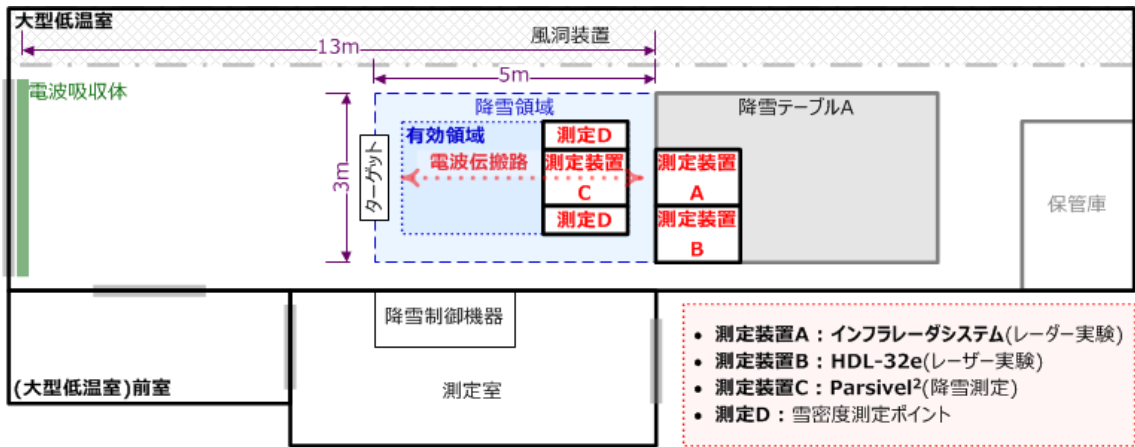


図 5.3.2-31 全体配置図(降雪実験)



図 5.3.2-32 実験風景(降雪実験)



図 5.3.2-33 実験装置(降雪実験)

表 5.3.2-5 実験諸元(降雪実験)

周波数	79GHz
降雪制御 A (樹枝状結晶)	0.2, 0.6, 1 mm/h ※降雪強度の順で弱、中、強
降雪制御 B (氷球)	1, 3, 5 mm/h ※降雪強度の順で弱、中、強
ターゲット	標準リフレクタ、歩行者、鉄板
ターゲット距離	5 m
アンテナ高	1.1m
アンテナ仰角	0 度

B) 標準リフレクタに対する 79GHz 帯レーダー検出性能

降雪環境下の標準リフレクタ(コーナーリフレクタ)に対する 79GHz 帯レーダーの基礎的な検出性能として、樹枝状結晶(1mm/h)および氷球(5mm/h)の降雪に対する遅延プロファイルを図 5.3.2-35 に示す。なお、実験風景を図 5.3.2-34 に示しており、また図 5.3.2-35 の縦軸は、降雪なし(0mm/h)を基準としたときの正規化した反射レベルを示す。図 5.3.2-36 はディストロメータで同時測定した樹枝状結晶 1mm/h、および氷球 5mm/h の降雪特性を示す。図 5.3.2-36 より、雪の結晶粒径(直径)と雪の落下する速度の各データは、経験式である Gunn-Kinzer Line [3] 上に分布せず、下側に分布している。Gunn-Kinzer Line は、降雨に対する経験式であるため、降雪実験では経験式上に分布せず、降雪は落下の様子が目視可能であり、下側に分布する(他文献でも同様な分布を確認)。樹枝状結晶の場合、結晶が絡み合い、79GHz 帯の波長 4mm と同程度の雪の結晶粒径が観測される。図 5.3.2-35 より、79GHz 帯の波長程

度の雪の結晶が存在する降雪環境下においても、標準リフレクタの反射が所定の 5m を十分検出できている。

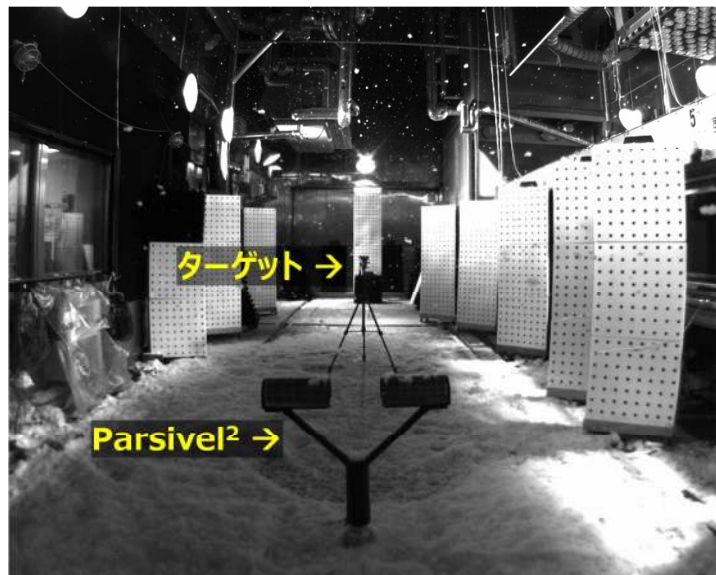
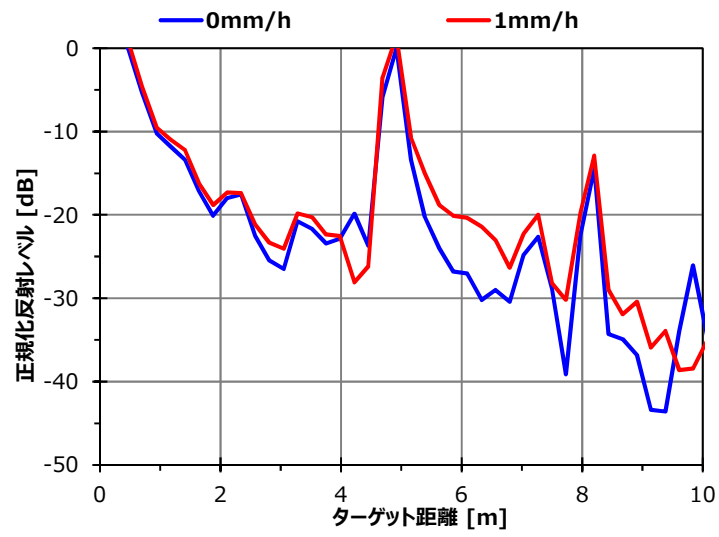
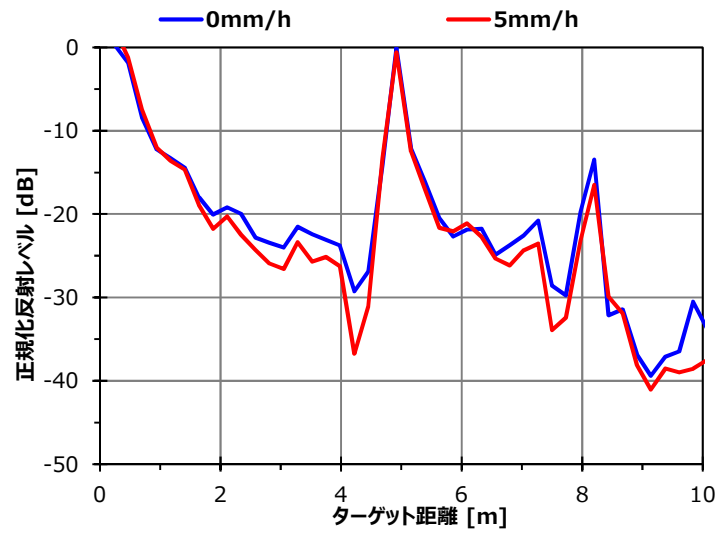


図 5.3.2-34 標準リフレクタの実験風景(降雪実験)

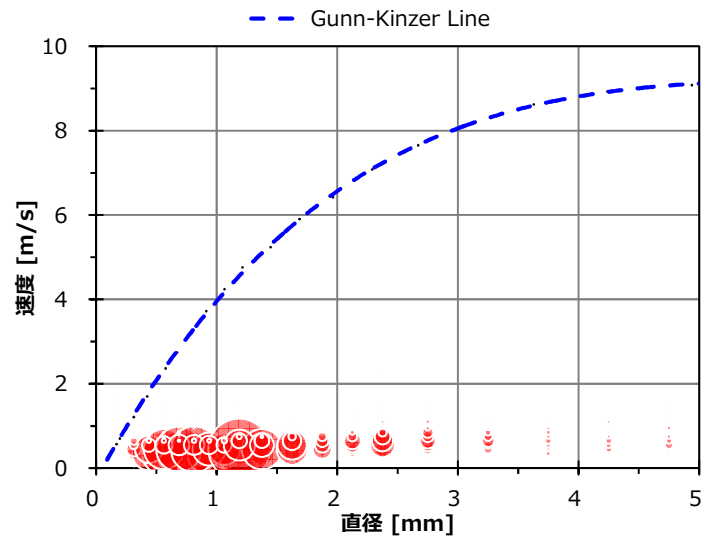


(a) 樹枝状結晶・1mm/h

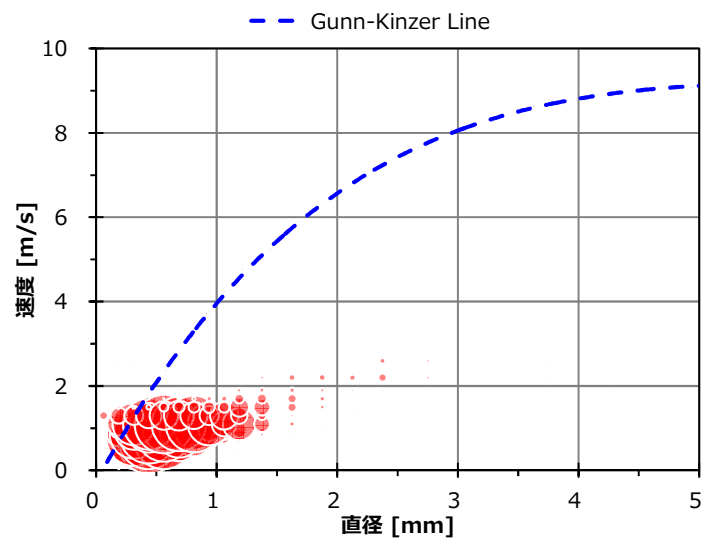


(b) 氷球・5mm/h

図 5.3.2-35 標準リフレクタに対する遅延プロファイル(降雪実験)



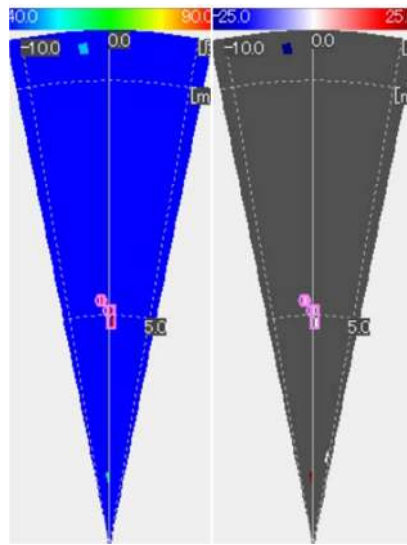
(a) 樹枝状結晶・1mm/h



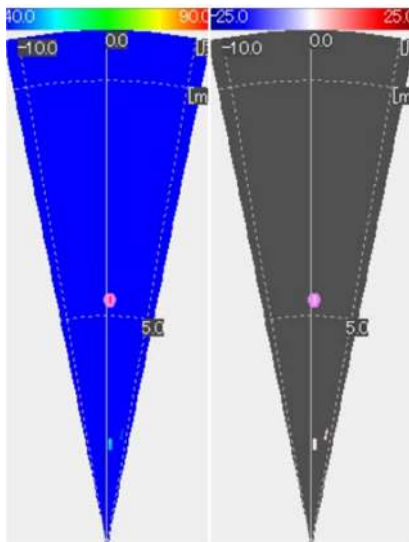
(b) 氷球・5mm/h

図 5.3.2-36 降雪特性

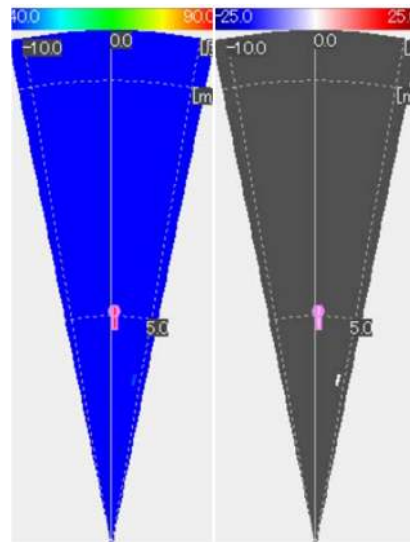
図 5.3.2-37 は、同条件(図 5.3.2-35)の電力プロファイル(青色背面)とドップラープロファイル(黒色背面)を示す。赤色丸印は標準リフレクタの検出結果を示すが、所定の 5m を十分検出できている。降雨では、雨滴散乱によるクラッタが発生していたが、降雪については発生しておらず、降雪環境下ではほぼ影響ないことが分かる。



(a) 降雪なし・0mm/h



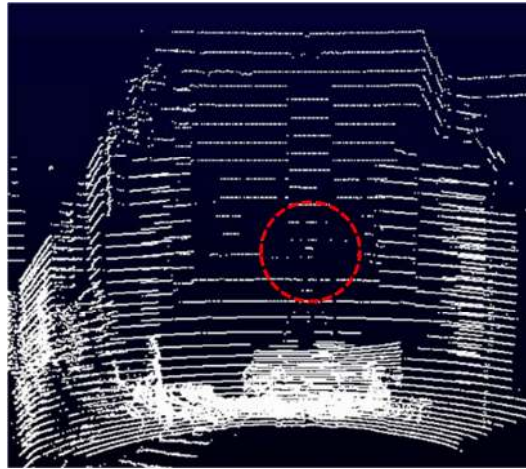
(b) 樹枝状結晶・1mm/h



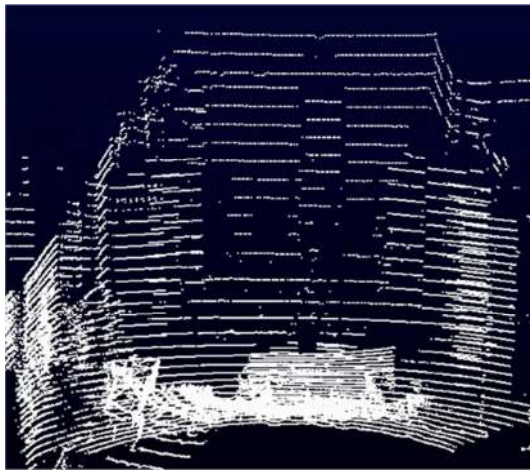
(c) 氷球・5mm/h

図 5.3.2-37 標準リフレクタに対する電力、ドップラープロファイル(降雪実験)

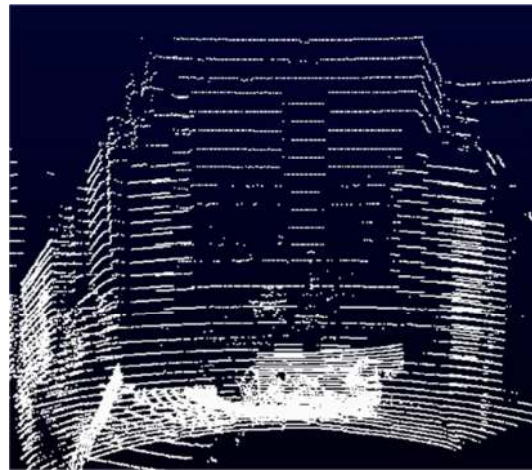
79GHz 帯レーダーの比較として、レーザーレーダーによる同条件(図 5.3.2-35)の検出結果を図 5.3.2-38 に示す。なお、レーザーレーダーユニットは、図 5.3.2-32 に示すように、79GHz 帯レーダーのアンテナに隣接設置しており、ターゲット距離等の条件は同じである。図 5.3.2-38 より、降雪なしの場合、赤色丸に標準リフレクタが検出されているが、降雪により動的なノイズが全体に現れ、79GHz 帯レーダーの優位性を確認できた。



(a) 降雪なし・0mm/h



(b) 樹枝状結晶・1mm/h



(c) 氷球・5mm/h

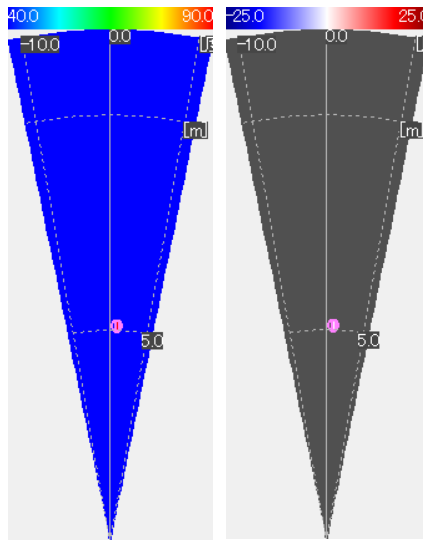
図 5.3.2-38 標準リフレクタに対するレーザーレーダーの測定結果(降雪実験)

C) 歩行者に対する 79GHz 帯レーダー検出性能

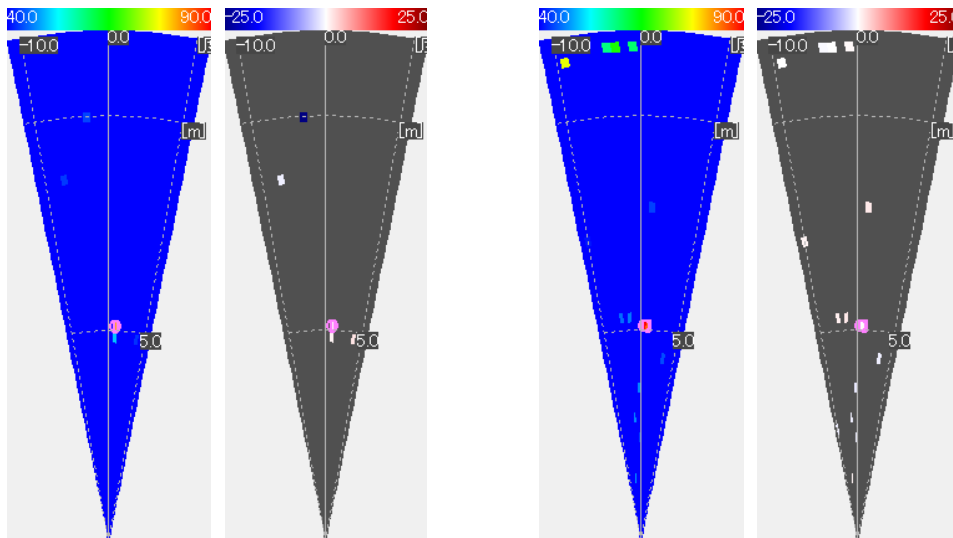
降雪環境下の歩行者に対する 79GHz 帯レーダーの検出性能として、樹枝状結晶(1mm/h)および氷球(5mm/h)の降雪に対する電力プロファイル(青色背面)とドップラープロファイル(黒色背面)を図 5.3.2-40 に示す。なお、歩行者はビニール製合羽を着用の上、ターゲット距離 5m で直立する(図 5.3.2-39)。参考として、図 5.3.2-41 は各降雪条件に対する定点観測の風景を示すが、特に樹枝状結晶は、結晶が絡み合い、氷球に比べて大きな粒径が確認できる。図 5.3.2-40 より、カメラでは降雪が確認できる条件においても、雪の結晶形に関わらず、所定の 5m は十分検出できている。



図 5.3.2-39 歩行者(降雪実験)



(a) 降雪なし・0mm/h



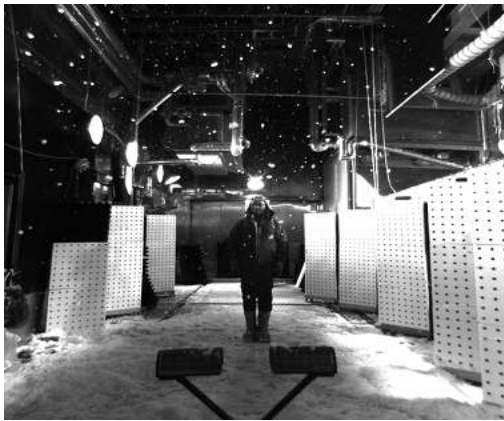
(b) 樹枝状結晶・1mm/h

(c) 氷球・5mm/h

図 5.3.2-40 歩行者に対する電力、ドップラープロファイル(降雪実験)



(a) 降雪なし・0mm/h



(b) 樹枝状結晶・1mm/h



(c) 氷球・5mm/h

図 5.3.2-41 歩行者の実験風景(降雪実験)

D) 積雪厚に対する 79GHz 帯レーダー検出性能

連続的な降雪により、車両等のターゲットに積雪、着雪を想定して、着雪厚に対する 79GHz 帯レーダーの検出性能を検証する。具体的には、車両の車体ボディ相当の鉄板を用いるが、これまでの標準リフレクタや歩行者の実験のように、垂直に置いた鉄板に着雪させることは困難である。そこで、図 5.3.2-42 に示すように、着雪を積雪に置き換え、積雪厚で代用する。これにより、鉄板への均一な積雪、および定量的な厚みに対する解析が可能である。実験方法としては、79GHz 帯レーダーシステムのアンテナを脚立上部に鉛直設置する。そして、電波吸収体の上に鉄板を置き、ふるい等で均一に降雪させながら所定の積雪厚にする(図 5.3.2-43)。なお、ターゲット距離は 2m とする。

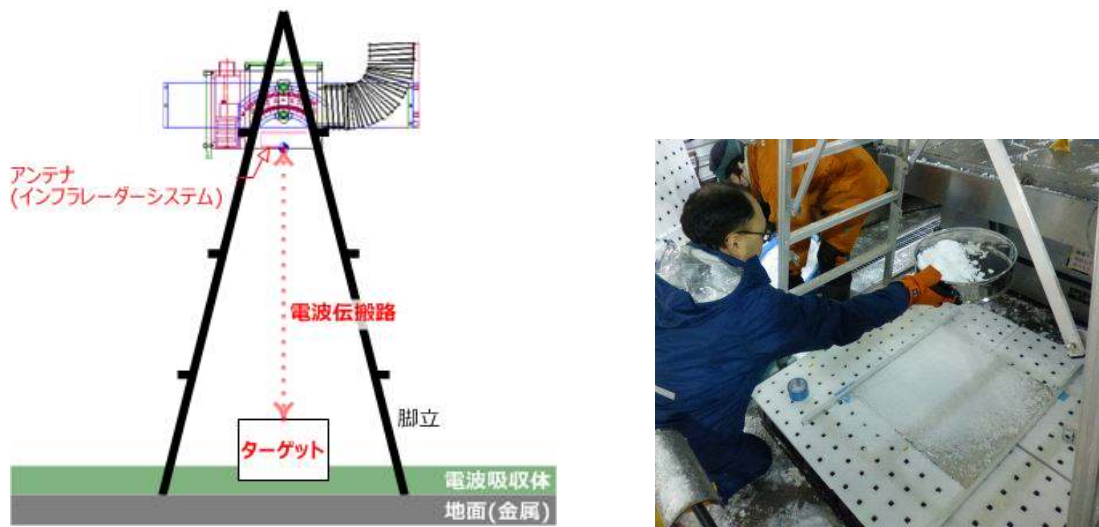


図 5.3.2-42 積雪厚の実験方法(降雪実験)



(a) 樹枝状結晶



(b) 氷球

図 5.3.2-43 積雪厚の実験風景(降雪実験)

図 5.3.2-44 は、積雪厚に対する反射減衰特性を示す。積雪厚の増加につれて、雪の結晶間で反射減衰量が異なる。各データから線形近似をすると、樹枝状結晶の青色線が定数 0.4、氷球の赤色線が定数 2.3 の比例関数で表すことができ、氷球は自然雪に近い樹枝状結晶に比べて反射減衰量が多いことが分かる。そこで、実験後に各結晶形の雪密度を測定したところ、樹枝状結晶は 0.04g/cm^3 、氷球は 0.23g/cm^3 であり、反射減衰の各定数と相関性があることが分かる(図 5.3.2-45)。

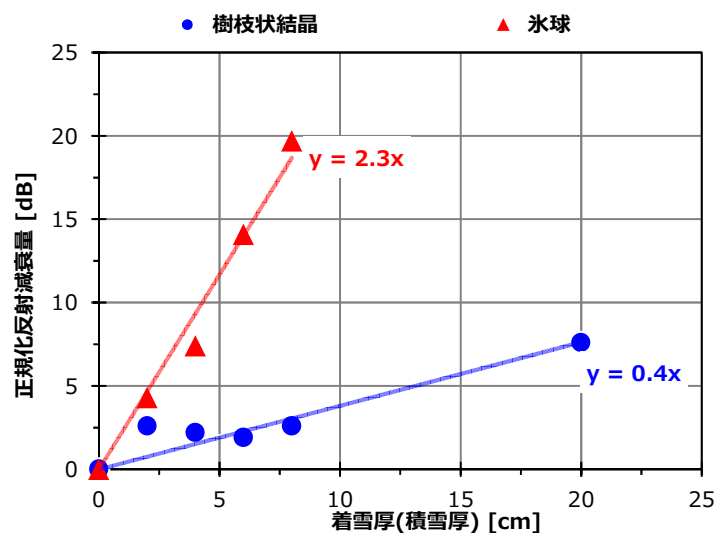


図 5.3.2-44 積雪厚に対する反射減衰特性(降雪実験)



図 5.3.2-45 雪密度の測定風景(降雪実験)

降雪実験では、79GHz 帯レーダーの耐環境性能検証の目的として、降雪量を一定に保つ試験設備で降雪環境下の伝搬特性、および歩行者等のターゲットに対する検出性能の検証を行い、以下の事項を確認した。

- ・ 自然の降雪状態が再現可能な雪氷防災実験棟を用いて、空間上の降雪時、並びにターゲット着雪時(積雪にて代用)の条件下での基礎伝搬特性、および歩行者等のターゲットに対するレーダー検出データを取得
- ・ 自然界に近い「樹枝状結晶」と「氷球」の異なる雪形状において、強い降雪時の条件下におけるターゲットのレーダーの検出性能は降雪なしに対してほぼ差異なし(同条件下において、レーザーの検出性能は、降雪の雪粒子がランダムに検出)
- ・ ターゲットの着雪では、雪密度と反射減衰量に相関性あり

今後は、公道実験を見据え、あらゆる気象条件として複雑な降雨、降雪条件に対する検出性能検証、79GHz帯インフラレーダーシステムのアンテナへの降雨、着雪の影響等を解析する予定である。

5.3.3. ウ)- 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

一般的に、レーダー方程式を下式のように表示できる。

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

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 : 目標とレーダーとの距離

受信信号エネルギーS と距離 R との関係が

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

であるため、ベース距離 R_0 、及びベース距離 R_0 における受信信号エネルギー(ベース受信信号エネルギーと言う)が S_0 であると仮定すれば、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。

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

しかし、受信エネルギーに対し、通常、複雑かつ高度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の値は必ずしも距離 R の 4 乗に反比例に限らない。一般的に、反射電力と距離 R との関係を下式で表示できる。

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

P_0 : ベース距離における反射電力、つまり、ベース反射電力

P_1 : 距離 R_1 における反射電力

α : 0~1 間の係数

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て減衰したりする。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はずである。

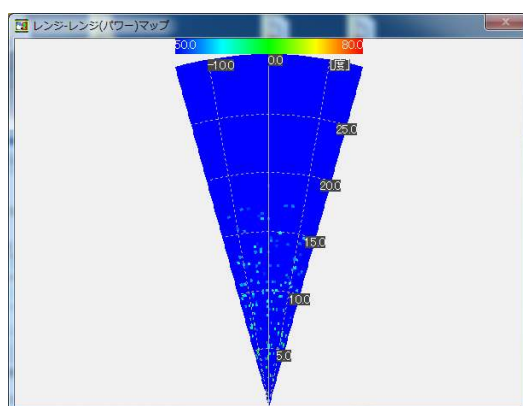
インフラレーダーに対して、降雨や降雪時の雨滴や雪粒が測定範囲内では一様であると仮定できるので、降雨や降雪に起因するクラッタの影響は距離が近ければ近い程強くなる。上述クラッタの影響を抑圧するため、レーダーの反射電力に基づき対象物体を検出する際に、反射電力の閾値を距離に合わせて適応的に設定することが有効である。つまり、ある空間セルを対象物体の一部として抽出する際に、セルの反射電力が下式で算出した閾値 T_1 よりも大きくなければならない。

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

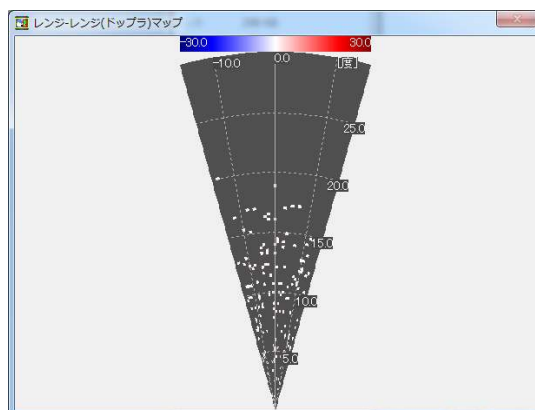
但し、 R_0 はベース距離、 T_0 はベース距離の対応閾値、つまりベース閾値である。 R_1 はセルの距離、 T_1 はセルを対象物体として検出する際に利用する閾値である。 α は 0~1 間の係数である。

5.3.3.2 背景クラッタ抑圧方式の検証

図 5.3.3.2-1 に降雨時の反射電力プロファイル及びドップラープロファイルを示す。図において、レーダーの測定範囲(扇形)を直角座標系で示し、レーダー位置を扇形の原点で示した。扇形における測定点を方位角と距離で決められ、測定点における反射電力値及びドップラー速度値をそれぞれのヒートマップの輝度で表示する。以降、特に説明しないが、プロファイルの図は同一の座標系を利用する。これらのプロファイルは降雨施設でのレーダー測定データより算出された。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.3.3.2-1 降雨時のレーダープロファイル

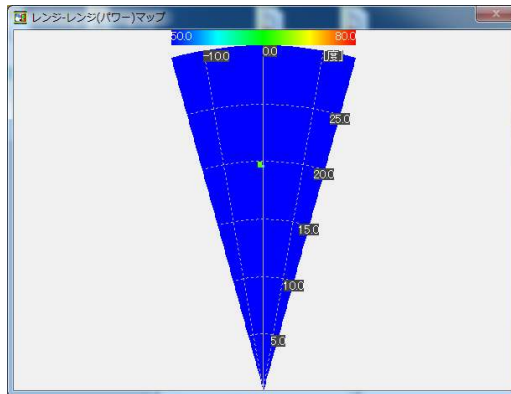
これらのプロファイルにおいて、雨滴による反射、つまり、クラッタが多く見られている。クラッタを抑圧し本当の対象物体を検出するため、5.3.3.1 節で説明した反射電力閾値 T1 を適宜に設定する必要がある。以降の検証では、表 5.3.3.2-1 に示したパラメータを利用する。

表 5.3.3.2-1 反射電力閾値設定用パラメータ

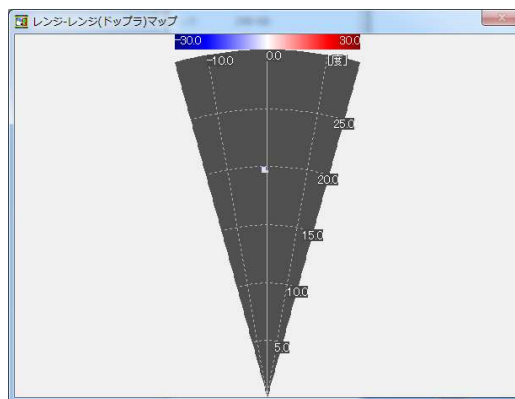
ベース距離	40m
ベース閾値	50dB
α	0
	0.25
	0.5

5.3.3.2.1. 検証 1 : 降雨なし

図 5.3.3.2.1-1 に降雨なしの場合の反射電力プロファイルとドップラープロファイルの一例を示す。方位角 0 度、距離 20m 辺りに 1 人の歩行者がいる。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.3.3.2.1-1 降雨なし時のレーダープロファイル

図 5.3.3.2.1-2～図 5.3.3.2.1-4 に $\alpha=0$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $\alpha=0.5$ 時の対象物体検出結果(黄色矩形)を示す。何れの α 設定でも誤検出がなく、歩行者を正確に検出できている。

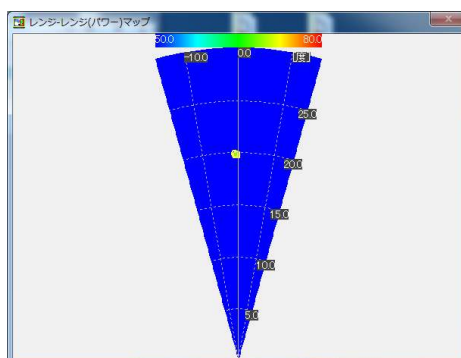


図 5.3.3.2.1-2 $\alpha=0$ 時の検出結果

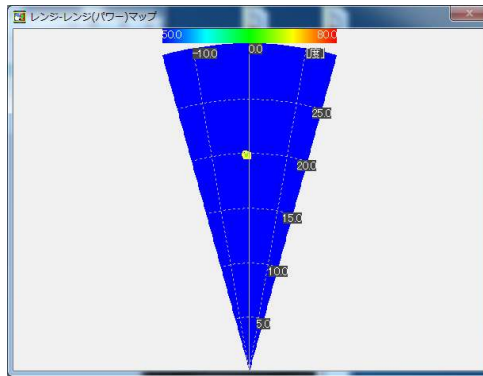


図 5.3.3.2.1-3 $\alpha=0.25$ 時の検出結果

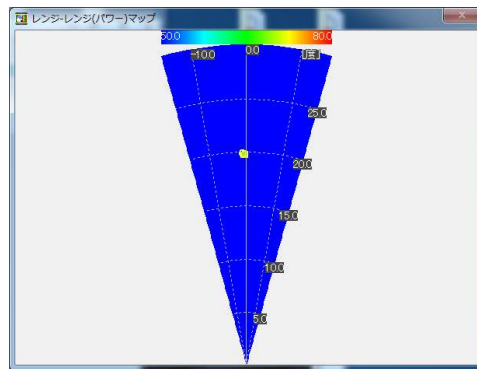
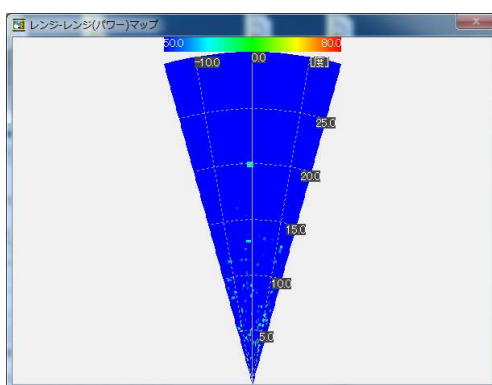


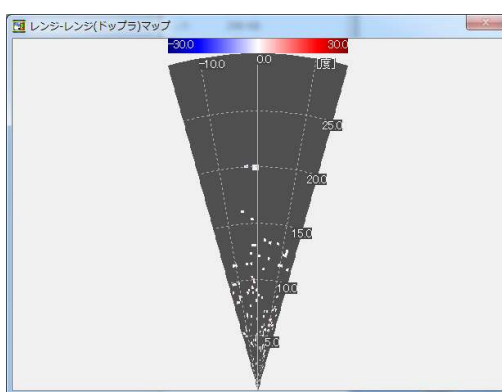
図 5.3.3.2.1-4 $\alpha=0.5$ 時の検出結果

5.3.3.2.2. 検証 2：降雨強度 50mm/h

図 5.3.3.2.2-1 に降雨強度 50mm/h 時の反射電力プロファイルとドップラープロファイルの一例を示す。方位角 0 度、距離 20m 辺りに 1 人の歩行者がいる。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.3.3.2.2-1 降雨強度 50mm/h 時のレーダープロファイル

図 5.3.3.2.2-2～図 5.3.3.2.2-4 に $\alpha=0$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $\alpha=0.5$ 時の対象物体検出結果(黄色矩形)を示す。

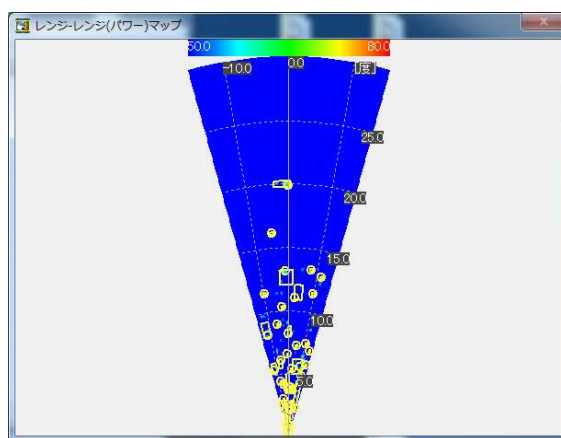


図 5.3.3.2.2-2 $\alpha=0$ 時の検出結果

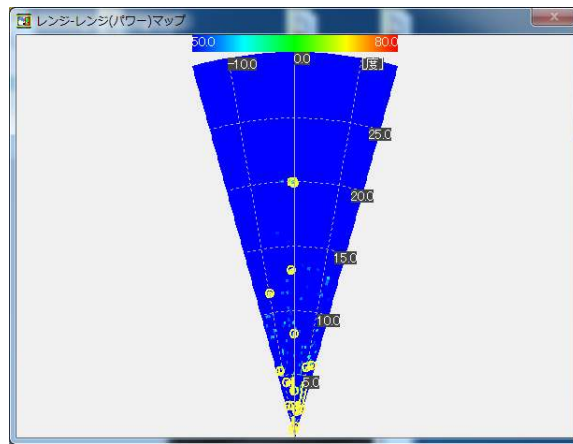


図 5.3.3.2.2-3 $\alpha=0.25$ 時の検出結果

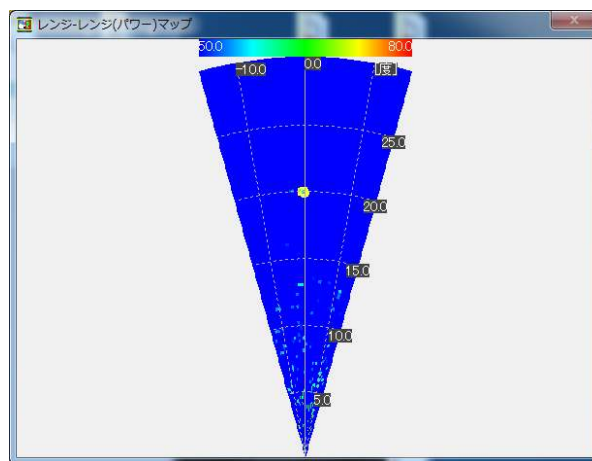
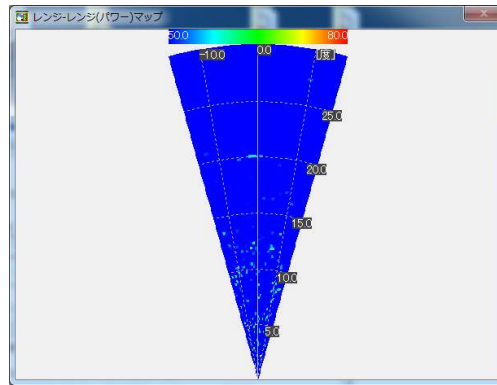


図 5.3.3.2.2-4 $\alpha=0.5$ 時の検出結果

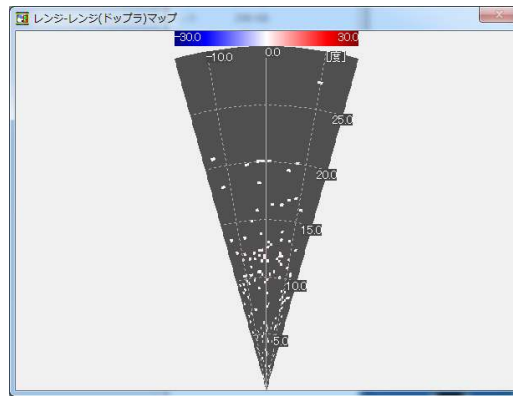
小さい α 値の時に雨滴による誤検出が多いが、 α 値が大きくなりにつれて誤検出の数は少なくなる。上記例の場合、 $\alpha=0.5$ の時に誤検出なく、歩行者を正確に検出できている。

5.3.3.2.3. 検証 3 : 降雨強度 100mm/h

図 5.3.3.2.3-1 に降雨強度 100mm/h 時の反射電力プロファイルとドップラープロファイルの一例を示す。方位角 0 度、距離 20m 辺りに 1 人の歩行者がいる。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.3.3.2.3-1 降雨強度 100mm/h 時のレーダープロファイル

図 5.3.3.2.3-2～図 5.3.3.2.3-4 に $\alpha=0$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $\alpha=0.5$ 時の対象物体検出結果(黄色矩形)を示す。

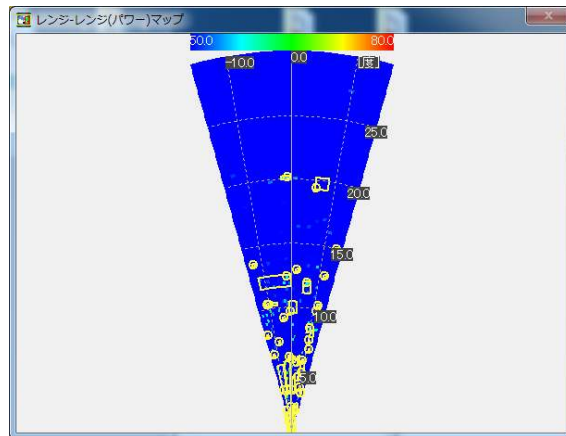


図 5.3.3.2.3-2 $\alpha=0$ 時の検出結果

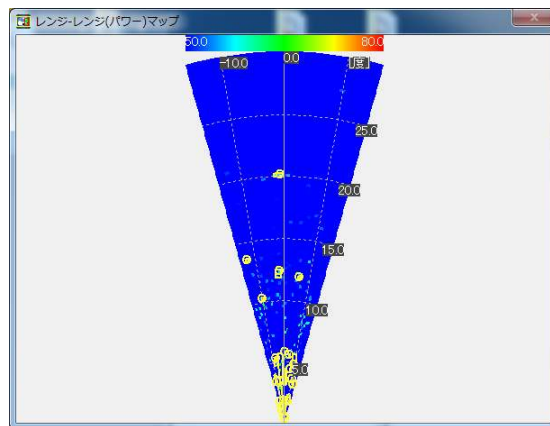


図 5.3.3.2.3-3 $\alpha=0.25$ 時の検出結果

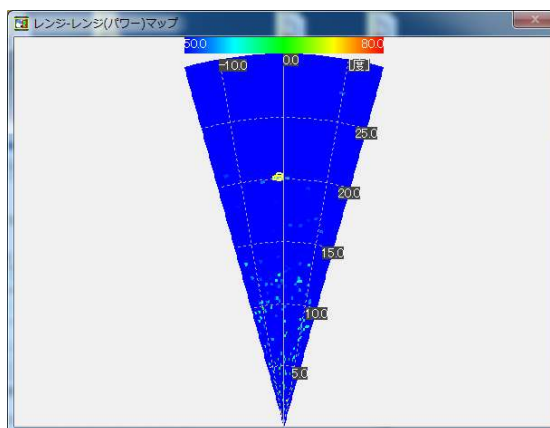
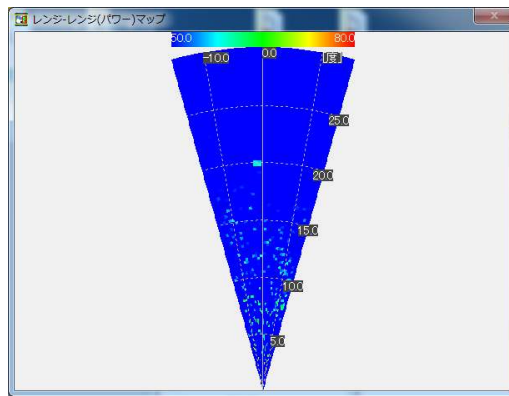


図 5.3.3.2.3-4 $\alpha=0.5$ 時の検出結果

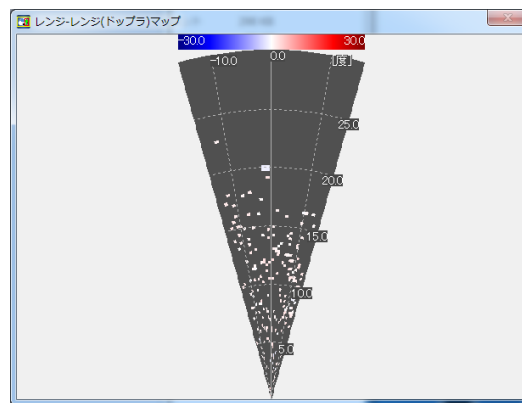
小さい α 値の時に雨滴による誤検出が多いが、 α 値が大きくなりにつれて誤検出の数は少なくなる。上記例の場合、 $\alpha=0.5$ の時に誤検出なく、歩行者を正確に検出できている。

5.3.3.2.4. 検証4：降雨強度 150mm/h

図 5.3.3.2.4-1 に降雨強度 150mm/h 時の反射電力プロフィールとドップラープロフィールの一例を示す。方位角 0 度、距離 20m 辺りに 1 人の歩行者がいる。



(a) 反射電力プロフィール



(b) ドップラープロフィール

図 5.3.3.2.4-1 降雨強度 150mm/h 時のレーダープロフィール

図 5.3.3.2.4-2～図 5.3.3.2.4-4 に $\alpha=0$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $\alpha=0.5$ 時の対象物体検出結果(黄色矩形)を示す。

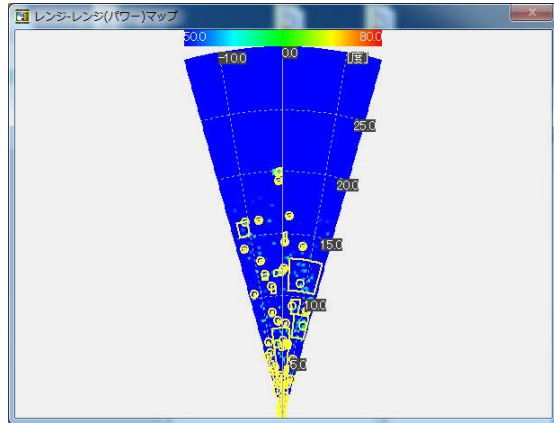


図 5.3.3.2.4-2 $\alpha=0$ 時の検出結果

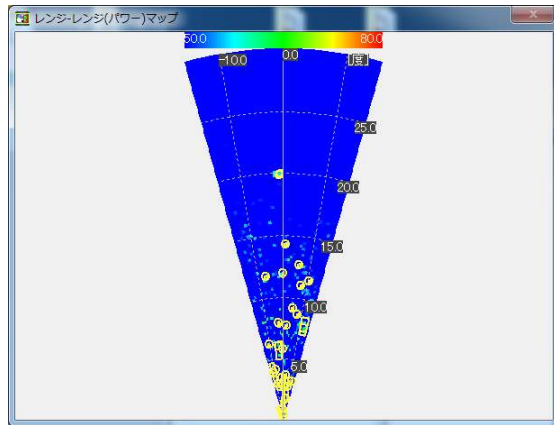


図 5.3.3.2.4-3 $\alpha=0.25$ 時の検出結果

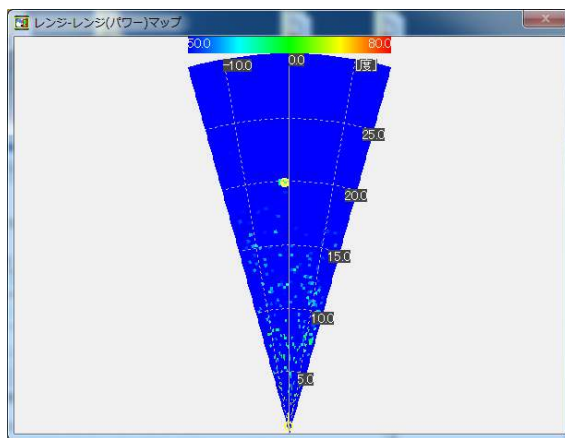
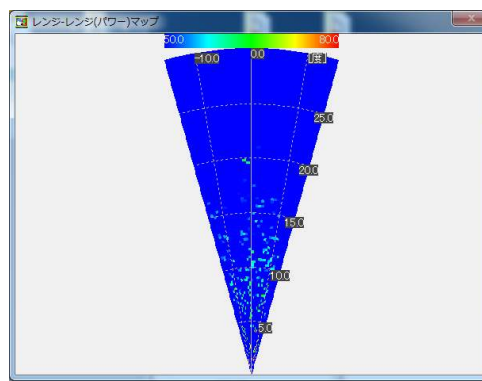


図 5.3.3.2.4-4 $\alpha=0.5$ 時の検出結果

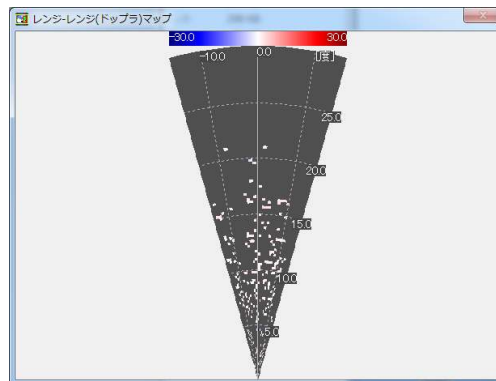
小さい α 値の時に雨滴による誤検出が多いが、 α 値が大きくなりにつれて誤検出の数は少なくなる。上記例の場合、 $\alpha=0.5$ の時に至近距離以外に誤検出なく、歩行者を正確に検出できている。

5.3.3.2.5. 検証5：降雨強度 200mm/h

図 5.3.3.2.5-1 に降雨強度 200mm/h 時の反射電力プロファイルとドップラープロファイルの一例を示す。方位角 0 度、距離 20m 辺りに 1 人の歩行者がいる。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.3.3.2.5-1 降雨強度 200mm/h 時のレーダープロファイル

図 5.3.3.2.5-2～図 5.3.3.2.5-4 に $\alpha=0$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $\alpha=0.5$ 時の対象物体検出結果(黄色矩形)を示す。

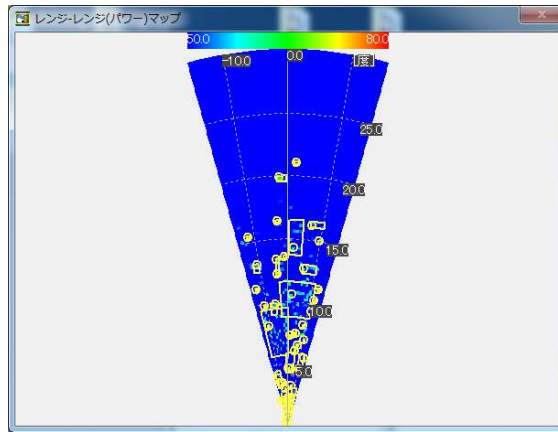


図 5.3.3.2.5-2 $\alpha=0$ 時の検出結果

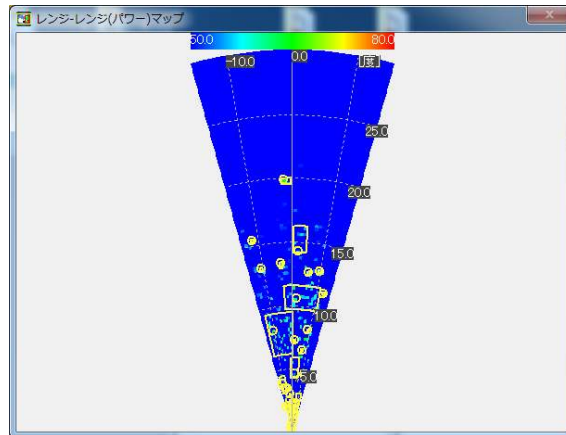


図 5.3.3.2.5-3 $\alpha=0.25$ 時の検出結果

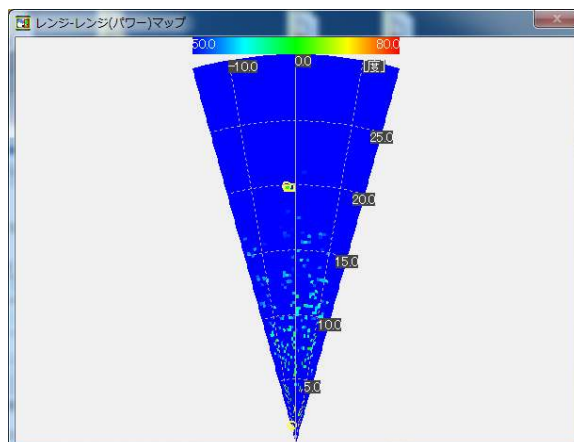
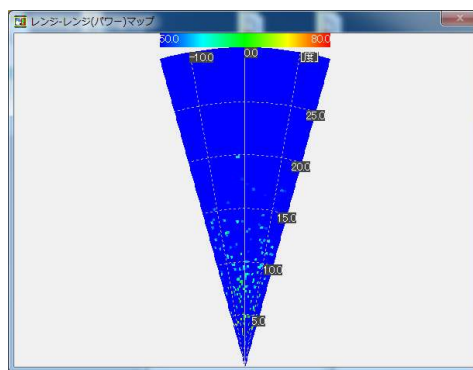


図 5.3.3.2.5-4 $\alpha=0.5$ 時の検出結果

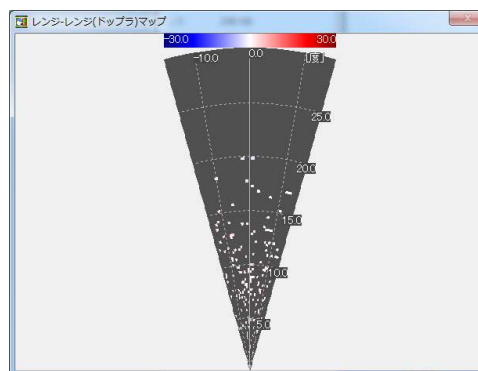
小さい α 値の時に雨滴による誤検出が多いが、 α 値が大きくなりにつれて誤検出の数は少なくなる。上記例の場合、 $\alpha=0.5$ の時に至近距離以外に誤検出なく、歩行者を正確に検出できている。

5.3.3.2.6. 検証 6 : 降雨強度 250mm/h

図 5.3.3.2.6-1 に降雨強度 250mm/h 時の反射電力プロファイルとドップラープロファイルの一例を示す。方位角 0 度、距離 20m 辺りに 1 人の歩行者がいる。



(a) 反射電力プロファイル



(b) ドップラープロファイル

図 5.3.3.2.6-1 降雨強度 250mm/h 時のレーダープロファイル

図 5.3.3.2.6-2～図 5.3.3.2.6-4 に $\alpha=0$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $\alpha=0.5$ 時の対象物体検出結果(黄色矩形)を示す。

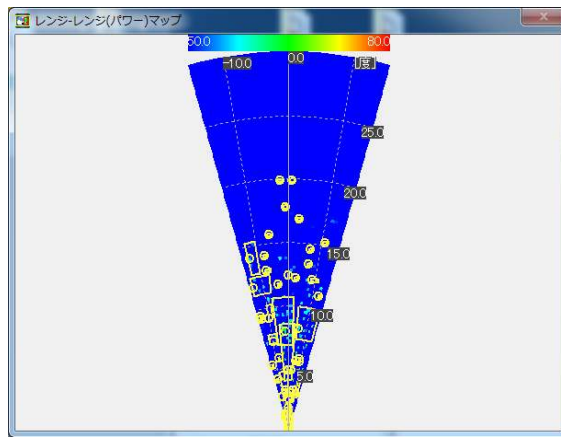


図 5.3.3.2.6-2 $\alpha=0$ 時の検出結果

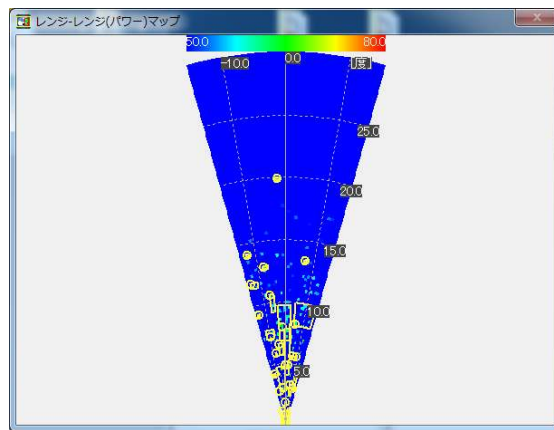


図 5.3.3.2.6-3 $\alpha=0.25$ 時の検出結果

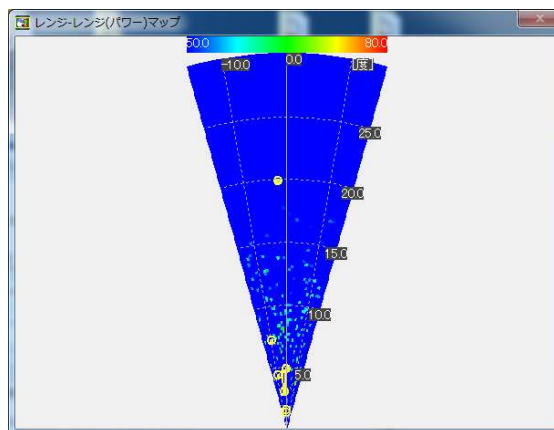


図 5.3.3.2.6-4 $\alpha=0.5$ 時の検出結果

小さい α 値の時に雨滴による誤検出が多いが、 α 値が大きくなりにつれて誤検出の数は少なくなる。上記例の場合、 $\alpha=0.5$ の時に10m以下の近距離に誤検出があるが、10m以上では誤検出なく歩行者を正確に検出できている。

5.3.3.2.7. 検証結果のまとめ

クラッタ抑圧方式として、距離に依存する反射電力の減衰パターンに基づき、対象物体検出用の閾値を適応的に設定する方式を検証した。降雨なし含め、6種類の降雨強度に対する検証結果より、提案方式の有効性を確認できた。更に、1つの参考データとして、前記検証結果における誤検出の程度を定量的示す。表5.3.3.2.7-1では雨滴による誤検出の数を示し、表5.3.3.2.7-2では誤検出の空間密度を示す。誤検出の空間密度は誤検出範囲の空間セル総数を測定範囲の空間セル総数で除算した値をパーセンテージで算出した。また、測定範囲が方位 ± 15 度、距離0~20mで、測定範囲の空間セル総数が2666である。表5.3.3.2.7-1と表5.3.3.2.7-1の結果は何れも前記各節で示した図(フレーム)を含めた前後10フレームにおける平均値を示す。

表において、縦方向は降雨強度、横方向は α の値を示す。

表 5.3.3.2.7-1 雨滴による誤検出の平均数(個/フレーム)

	0	0.25	0.5
降雨なし	0.3	0.1	0
50mm/h	42	15.6	0
100mm/h	53.7	27	0
150mm/h	50.6	28.7	0.2
200mm/h	62	37.4	1.5
250mm/h	59.2	35.2	5.9

表 5.3.3.2.7-2 雨滴による誤検出の平均空間密度(%)

	0	0.25	0.5
降雨なし	0.03	0.01	0.00
50mm/h	3.59	1.18	0.00
100mm/h	4.19	1.97	0.00
150mm/h	4.84	2.50	0.01
200mm/h	5.27	2.94	0.07
250mm/h	5.29	3.22	0.29

20m 前後にいる歩行者に対して、距離の 2 乗に反比例($\alpha=0.5$)するように閾値を設定すれば、誤検出なく歩行者検出が可能である。但し、降雨強度が強くなると、誤検出の確率と発生数と発生確率が増加する。また、レーダーからの距離が近いほど誤検出の可能性が高まる傾向となっている。

但し、 α を大きくすることによって、反射電力の減衰が激しくなり、遠距離での歩行者検出も難しくなる。そのため、実用的なパラメータを取得するために、最大距離が制限された降雨施設のみでなく、実環境での測定データ取得も必要である。

参考文献

- [1] 防災科学技術研究所ホームページ <http://www.bosai.go.jp/>
- [2] OTT 社ホームページ <http://www.ott.com/>
- [3] Gunn, R. and G. D. Kinzer, The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, J. Mefeor., 6, 243-248, 1949.
- [4] 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/>

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 件および誌上発表 4 件、口頭発表 6 件、報道発表 1 件を実施して、平成 27 年度の年次目標を超える実績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 目標	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)	6 件 (1 件)	4 件 (3 件)	2 件 (1 件)	1 件 (0 件)	14 件 (5 件)
査読付き誌上 発表論文数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 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)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	6 件 (1 件)
口頭発表数	2 件 (0 件)	5 件 (1 件)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)	13 件 (1 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 誌上発表

No.	タイトル	発表先	発表者 (筆頭)	発表日
1	安心安全社会の実現に向けた 79GHz ミリ波レーダー技術	パナソニック技報	安木 慎	平成 27 年 5 月 15 日
2	インフラレーダーシステム 技術の開発	ITU ジャーナル	中川 洋一	平成 27 年 7 月 1 日

3	Infrastructure Radar System as Next-Generation ITS Utilizing ICT	New Breeze 2015 Summer	中川 洋一	平成 27 年 7 月 22 日
4	特集 自動運転 ICT を活用した次世代 ITS の開発	自動車技術	中川 洋一	平成 27 年 12 月 1 日

表 6-3 口頭発表

No.	タイトル	発表先	発表者 (筆頭)	発表日
1	インフラレーダーシステム技術の開発	ワイヤレステクノロジーパーク 2015	中川 洋一	平成 27 年 5 月 22 日
2	インフラレーダーシステム技術の開発	電波利用促進セミナー「情報通信技術が支える次世代 ITS」	中川 洋一	平成 27 年 7 月 15 日
3	Pedestrian Detection Using 79GHz Radar Sensors with Watershed Algorithms	第 22 回 ITS 世界会議	劉 偉傑	平成 27 年 10 月 5 日
4	79GHz Infrastructure Radar for Cooperative Intersection Safety	展示会 第 22 回 ITS 世界会議	安木 慎	平成 27 年 10 月 5 日 ~10 日
5	インフラレーダーシステム	展示会 Panasonic Wonder Japan Solutions	中川 洋一	平成 28 年 2 月 5 日 ~10 日
6	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 28 年 2 月 25 日

7. アウトカム目標に向けた取り組み

7.1. 標準化活動

<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。

特にアプリケーション開発では、高速道路会社が推進するスマート IC (Inter Change) へのセンサー応用検討に先行的に取り組む。また、導入が進む監視カメラと組み合わせ、様々なシーンにおける交通流計測、侵入者検知などより汎用性の高い機能を実現していく検討にも着手する。

<進捗・成果>

産官のみならず産産の連携推進として、自動車メーカーとの連携を強化していくために、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 内における連絡調整会議に参加し、実用化の加速に向けた課題に取り組んでいる。その結果として、協調型の自動走行システムへのより効果の高いアプローチが検討されるようになり、高速道路の分合流点や一般道の交差点に進入する車両や歩行者、自転車の位置や速度を高精度に測定して動的情報のデータとしてリアルタイムに更新する路側機として、インフラレーダーの役割がより明確になりつつある。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など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。

また、平成 28 年度以降に計画しているインフラレーダーセンサーとしての公道実証実験に向けた準備として、新規の小型試作ユニットである 79GHz 帯広視野角レーダー試作装置を導入する予定であり、テストコース等の環境において事前検証を開始している。(図 7.1-1 参照)

この 79GHz 帯レーダーは、符号化パルス方式と送受信にアダプティブアレイアンテナを採用したミリ波レーダーであり、車両近傍に在る歩行者を分離して検出することができる。研究試作である広視野角レーダーユニットは、複数のミリ波デバイスと信号処理部で構成され、10cm 以下の距離精度で、120° 超の視野角と 100m に至る範囲の走査を実現している。(図 7.1-2 参照)



図 7.1-1 テストコースにおける信号機支柱への仮設置状況

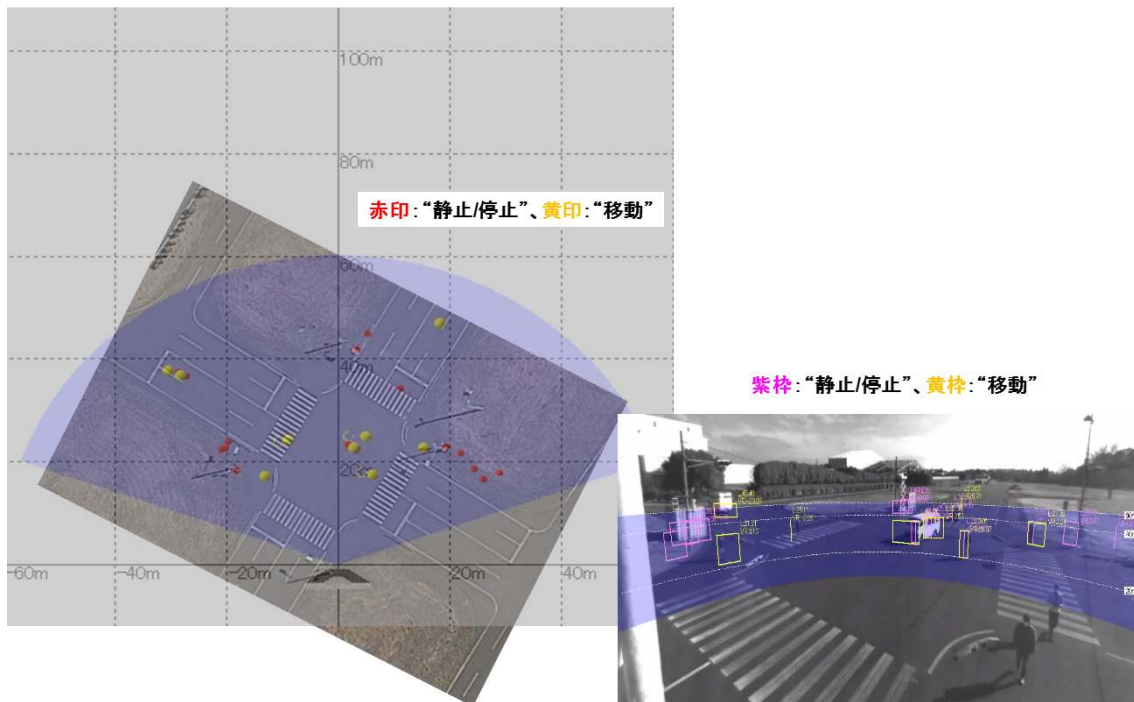


図 7.1-2 交差点俯瞰した 79GHz 帯広視野角レーダーの走査データ例

7.2. 標準化活動／普及啓発活動

<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。

当面2015年11月開催予定のWRC-15までは、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する。以降は、本研究開発成果等に基づき、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、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の結論に基づいた、79GHz帯高分解能レーダーのARIB標準規格等の改定を支援する。

<進捗・成果>

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計画通りに推進している。平成26年度までは、79GHz帯周波数分配に係るWRC-15議題の検討として、ITU-R SG5 WP5B会合へ継続的に参画してきた。平成27年度は、2015年11月に開催されたWRC-15において、79GHz帯の500MHz幅(77.5-78GHz)が、自動車レーダーを含む地上用途の短距離レーダーに限定する条件で、無線評定業務に一次分配されることが決定した。

また、2015年10月に開催された第22回ITS世界会議ボルドーにおいて、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すると同時に、パナソニックのホームページより本研究開発成果の一環として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7.2-3参照)

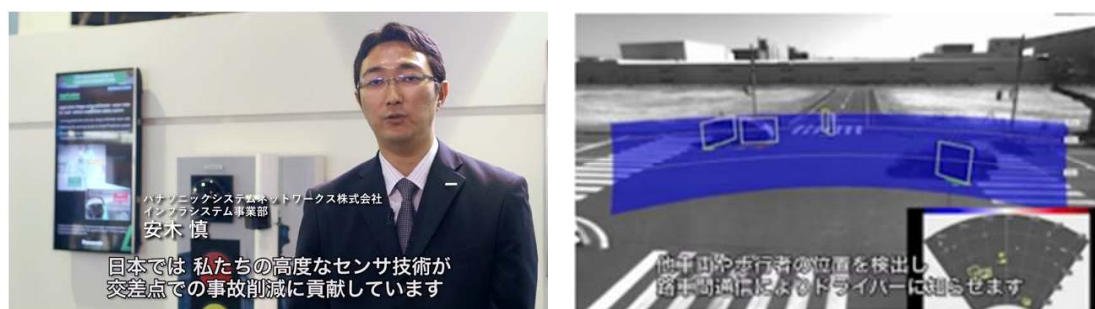


図 7.2-1 ITS 世界会議ボルドーにおける研究開発成果の発信

(<http://news.panasonic.com/jp/topics/2015/44337.html>)

7.3. 研究開発運営委員会

<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 27 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 28 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。

<進捗・成果>

平成 26 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理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 27 年度の第 1 回運営委員会を 9/17 に、第 2 回を 12/24 に、第 3 回は 3/4 に各々開催した。

本運営委員会は、激しい降雨時等の実使用条件においてシステムの性能限界に関する産学官の共通認識を得るための有効な取り組みとなっている。さらに、機械学習アルゴリズムの適用限界に関する知見も適宜共有されており、実フィールドにおけるシステム検証の重要性についても合意形成が進められている。