

2024年度

「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期／スマートモビリティプラットフォームの構築／小型PCSEL-LiDAR技術を活用した生活ゾーン・賑わいのある道路空間の実態を把握するインフラ・車載センサシステムの研究開発」

成果報告書

2025年3月

国立大学法人 金沢大学
国立大学法人 京都大学
(再委託先 北陽電機株式会社)

目次

1.	緒言	3
1.1	研究開発の背景および目的	3
1.2	実施体制および研究開発の工程表	4
1.3	研究開発目標	5
2.	3次元PCSEL-LiDARシステムの開発	8
2.1	はじめに	8
2.2	STEP1 広FOV型3次元PCSEL-LiDAR	8
2.3	STEP2 非機械式3次元PCSEL-LiDAR開発	13
3.	認識技術の開発と実証実験の実施	19
3.1	LiDARを用いた認識技術の開発	19
3.2	LiDARを用いた実証実験の実施	30
4.	社会実装に向けた取組状況	35
5.	関連成果の対外的・国際的発信と連携	38

1. 緒言

1.1 研究開発の背景および目的

近年、交通環境におけるインフラや、車両に様々なセンサを搭載して人流や交通流の把握を行う試みが多数行われている。例えば、インフラにセンサを設置することで、横断歩道等における歩行者の存在や人流監視、道路空間における車両の検知や交通流監視(OD調査など)が可能となる。また車両にセンサを設置することで、車両周辺に存在する交通参加者の存在や行動が把握できるようになるため、安全な自動運転/運転支援が実現できる。さらに近年では、経済産業省・国土交通省などが実施しているRoad to the L4プロジェクトのように、インフラと車載システムの連携によって道路交通をより安全に機能させるための試みも行われている。また、政府が推進するデジタル田園都市国家構想によれば2025年までに全国50か所、2027年までに全国100か所以上の地域での地域限定型の無人自動走行技術を活用した移動サービスの実現が政府目標として示されており、このようなインフラや車両に様々なセンサを搭載・連携させたセンシング・認識技術の開発の重要性がますます増大するものと考えられる。

現在このようなインフラ・車載センサとしては、LiDAR (Light Detection and Ranging)、ミリ波レーダ、カメラ等が用いられる。このうちカメラは、画像情報の解析によって人流や交通流を把握できる反面、映りこんだ顔などプライバシーの観点の懸念があり、特にインフラセンサとして設置した場合に課題となる。また、ミリ波レーダは他のセンサと比較すると悪環境下でのセンシング能力が高いものの、分解能の面で劣るため、人流や交通流を詳細に把握するには課題が残る。これらに比べ、LiDARを用いた場合、個人の顔の判別は困難であるためプライバシーの観点で優位性がある。またLiDARは、カメラやミリ波レーダと比べ距離分解能が高く、インフラ・車載センサとして特に有効であると考えられる。しかし、既存のLiDARでは品質の低い半導体レーザーを光源としているため、ビーム整形等に光学系が必要となり、小型化・低コスト化が難しいという課題がある。また、現状の高分解能LiDARのほとんどは海外メーカーによって開発されており、経済安全保障の観点から大きな懸念が生じている。

LiDARの小型化・低コスト化が実現されれば、道路に設置されているカーブミラーや信号機等の交通インフラへの導入が容易になるため、多数のセンサを様々な場所に設置して人流や交通流の把握を高精度に行うことが可能となる。加えて、自動車への搭載も容易となることや、国産のLiDARシステムの開発が実現すれば上記の経済安全保障の問題も解決されるため、自動車メーカーや関連するサプライヤーへの波及効果が多大となることが予想される。以上より、国産の小型・低コストLiDARシステムの開発には、大きな期待が寄せられている。

以上の背景を踏まえ、本研究開発においては、SIP第2期「光・量子を活用したSociety5.0実現化技術」等において京都大学が発展して来た高品質半導体レーザー光源であるフォトリソニック結晶レーザー(PCSEL)を用いて、インフラ・車載センサとして活用できる小型・低コスト化が可能な3次元LiDARシステムの開発を行う。また、SIP第2期「自動運転(システムとサービスの拡張)」等において金沢大学などが開発した市街地を走行可能な自動運転システムやLiDARを用いた認識技術をベースとして、京都大学において開発する小型・低コストな3次元LiDARシステムをインフラセンサ、車載センサとして活用する実証実験を実施する。これらのLiDAR開発および実証実験においては、関連する官庁・メーカー等の意見を考慮しながら仕様の検討・改良を重ね、必要に応じてグローバル研究機関との学際的な連携も行

う。以上により、最新の小型PCSEL-3次元LiDAR技術を活用したLiDARシステムを我が国独自の最先端計測技術として開発・実証を行い、モビリティ分野を躍進させるLiDARを我が国から発信するとともに、それをモビリティ各社に提供するための、エコシステムを構築して社会実装することを目的とする。

1.2 実施体制および研究開発の工程表

本研究開発における実施体制を図 1.1 に示す。本研究開発は、①3 次元 PCSEL-LiDAR システムの開発と、②LiDAR を用いた認識技術の開発と実証実験の実施によって構成される。また、これらの実証実験の計画を図 1.2 に示す。SIP 第 2 期において開発した PCSEL-LiDAR と既存の LiDAR の、インフラセンサとしての精度検証を行いながら、レベル 4 相当の自動運転に向けた開発に着手する。各項目の概要を以下に示す。

① 3 次元 PCSEL-LiDAR システムの開発

本研究開発項目①では、これまで SIP2 期で開発して来た 2 次元の PCSEL-LiDAR システム（注：面内の一方にビーム走査を行いつつ、奥行き方向の距離測定を行うもので、面内 1 方向と奥行き 1 方向を併せて 2 次元 LiDAR システムと呼ぶ）の生活ゾーン・道路空間等の実環境での評価を行い、そのフィードバックを踏まえつつ、3 次元的に実態把握を行えるように、PCSEL を搭載した 3 次元 PCSEL-LiDAR システム（注：レーザー光を 2 次元面内に走査しつつ、障害物までの距離、すなわち奥行き方向の距離を測定するシステムで、面内の 2 方向と奥行きの 1 方向を合わせて 3 次元 LiDAR システムと呼ばれる）の開発に取り組む。3 次元 PCSEL-LiDAR の開発では、インフラセンサや、車両近傍の死角となり得る視野の測距を行うために車両側面に設置する広 FOV・近距離の車載センサ等への応用を念頭において、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR システムの試作・開発を行う。また、当初計画になかった追加項目として、PCSEL の特長を活かした、パーソナルモビリティ等に活用できる小型のカード型 PCSEL-LiDAR の開発も併せて行う。さらに、将来的に小型化・低消費電力化が見込まれる非機械式 3 次元 PCSEL-LiDAR システムの試作・開発を行い、それが、典型的ベンチマークと同等以上の性能を将来的に実現可能である見通しを得ることを目指す。

② LiDAR を用いた認識技術の開発と実証実験の実施

本研究開発項目②では、研究開発項目①で開発したLiDARをインフラに設置して人流計測や交通流の計測を行うほか、LiDARを車両に搭載して交通参加者の挙動把握や自動運転を可能にするための認識アルゴリズムを開発する。具体的には、研究開発項目①で開発した広FOV型のPCSEL-LiDARをインフラセンサとして用いた実証実験を実施し、交通流を高精度に計測可能であることを確認するとともに、同センサを車両側面に設置して、車両近傍の死角となり得る視野の測距を検証する。また、インフラに搭載したセンサや車載させた複数のLiDAR等を統合的に扱う認識アルゴリズムを構築する。最終的には、複数のPCSEL-LiDARを搭載したインフラセンサや車載センサを協調させた自動運転の実証実験を実施し、レベル4相当の自動運転が可能であることを示すとともに、自動車関連メーカーやインフラ機器メーカー、関係者等に対し試乗機会を提供することを目指す。

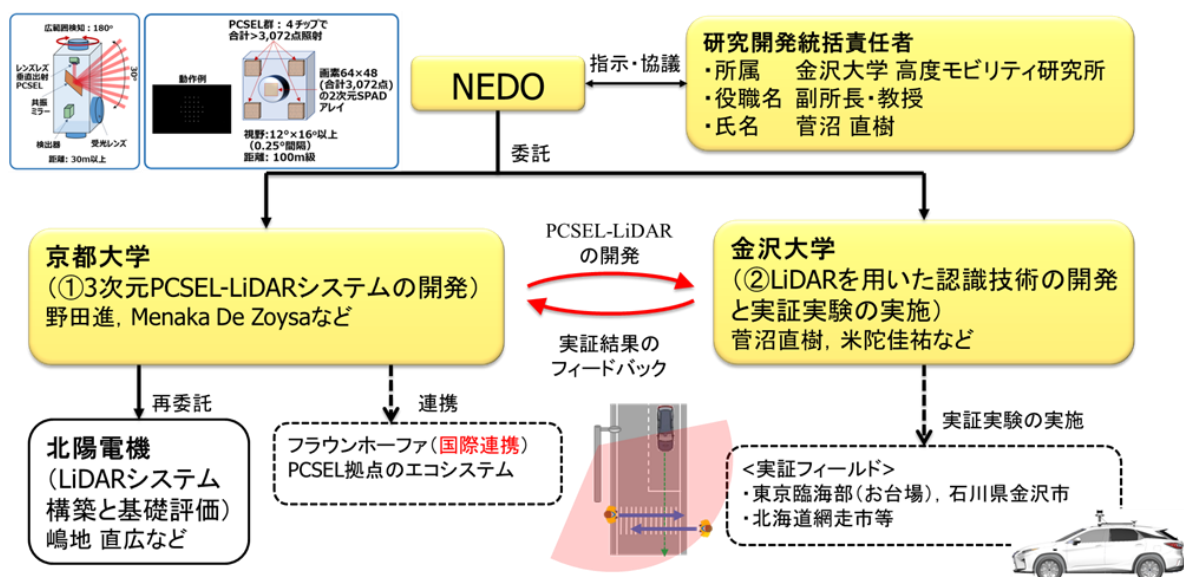


図 1.1 本研究開発における実施体制

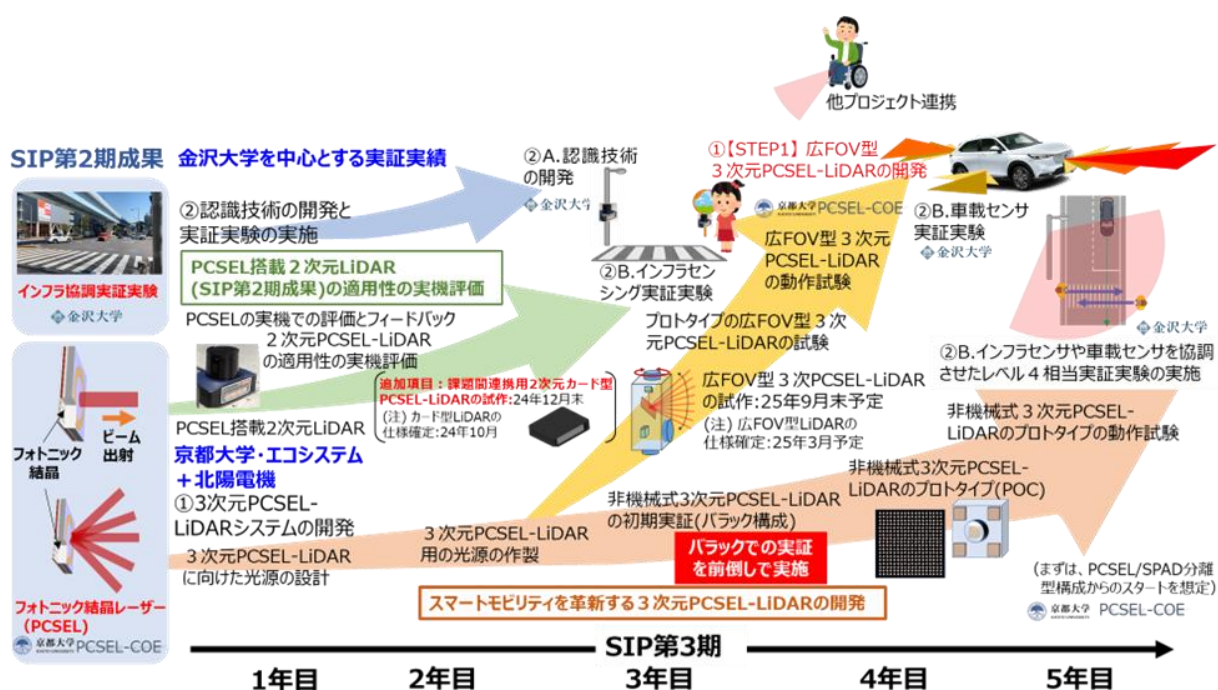


図 1.2 実証実験の計画

1.3 研究開発目標

(1) 3次元PCSEL-LiDARシステムの開発（国立大学法人 京都大学および北陽電機株式会社（再委託先））

本研究開発項目①では、これまでSIP2期で開発して来た2次元のPCSEL-LiDARの実績を踏まえつつ、3次元的に実態把握を行えるように、PCSELを搭載した小型3次元LiDARの開発に、京都大学と北陽電機が中心となって取り組む。小型3次元PCSEL-LiDARの開発では、STEP1として、インフラセンサや広FOV・近

距離の車載センサ等を念頭にいた広FOV型PCSEL-LiDARと、追加項目として、PCSELの特長を活かした小型のカード型PCSEL-LiDARの開発、STEP2として、自動運転に向けた長距離の測距の車載センサとして遠距離型の3次元PCSEL-LiDARのPOC開発を目指す。

具体的には、次の2つのステップで取り組む。STEP 1 では、研究開発項目②のインフラセンサとして活用できるように、2025年度の間評価までに、30m以上の測距、回転による180° 以上の広いFOV、0.6° 以下の分解能を有する広FOV型のPCSEL-LiDARシステムの試作を目指す。さらに、中間評価までに試作した広FOV型PCSEL-LiDARに対して、研究開発項目②の実環境で評価・フィードバックを得る。また、当初計画になかったSTEP1の追加項目として、小型のカード型PCSEL-LiDARの開発も併せて行い、2024年12月末までに試作完了。STEP2では、2027年度までの最終目標として、将来的に小型化・低消費電力化が見込まれる非機械式3次元PCSEL-LiDARシステムをPOC実証することを目指す。具体的には、100m級の測距、10°×10°以上のFOV、0.25° 以下の分解能を有する非機械式3次元PCSEL-LiDARシステムのPOC実証を行うとともに、200-300mの測距が理論的に達成可能であること、および、非機械式LiDARの複数台の設置によるFOV増大（100°×25°以上）が原理的に可能であることを示すことで、典型的ベンチマークと同等以上の性能を将来的に実現可能である見通しを得ることを目指す。また、開発するPCSEL-LiDARのコストは、典型的なベンチマークとなるLiDARシステムの7割以下になるように開発を行っていく。

【中間目標】

- ・ 30m以上の測距、回転による180° 以上の広いFOV、0.6° 以下の分解能を有する広FOV型のPCSEL-LiDARシステムの試作

【最終目標】

- ・ 100m級の測距、10°×10°以上のFOV、0.25° 以下の分解能を有する非機械式3次元PCSEL-LiDARシステムのPOC実証
- ・ 200-300mの測距が理論的に達成可能であること、および、非機械式LiDARの複数台の設置によるFOV増大（100°×25°以上）が原理的に可能であることを示す

(2) 認識技術の開発と実証実験の実施（国立大学法人 金沢大学）

A. 「LiDARを用いた認識技術の開発」

本研究開発項目では、研究開発項目①で開発したLiDARをインフラに設置して人流計測や交通流の計測を行うことや、車両に搭載した交通参加者の挙動把握や自動運転等を行うための認識アルゴリズムの開発を目的としている。LiDARのインフラセンサへの活用と、車載センサへの活用を想定した場合、計測を行う車両や歩行者の動きに加え自車の走行速度も加わるため、より遠方の認識が必要になるなど高い性能の認識が必要となる。そこでA. 「LiDARを用いた認識技術の開発」においては、車載センサへの適用を想定した目標値を設定する。例えば一般道の走行を想定すると、車速60km/hで走行する自動運転自動車が横断歩道を移動する歩行者や右折時の対向車を認識しながら、緩やかな減速度（0.1G）又は少し強めのブレーキ（0.2G）で安全に停止すると仮定すると、制動距離の観点から遠方では200m先の自動車、及び70m先の歩行者を検出することが必要である。本テーマでは上記の要件を満たす認識モデルを構築してPCSEL-LiDARの有効性を評価する。

また、広FOV向けプロトタイプLiDARが開発される2025年度までにインフラ設置を想定した屋外の仮設

型のLiDARにて評価可能な環境を開発するため、小型演算装置で認識可能な近距離向けアルゴリズムの開発を中間目標として設定する。また、遠距離向けプロトタイプLiDARが開発される2027年度では近距離から遠距離まで幅広く認識可能なアルゴリズムを車載向けに開発し、インフラ及び車載されたLiDARを連携させたアルゴリズムを構築する。

【中間目標】

- ・ 135m以内の自動車、50m以内の歩行者を小型演算装置で処理可能な認識アルゴリズムを構築

【最終目標】

- ・ 200m以内の自動車、70m以内の歩行者をリアルタイムに処理可能な認識アルゴリズムを開発。インフラに搭載したセンサや車載させた複数のLiDARを連携させて統合的に認識可能なアルゴリズムを構築

B. 「LiDARを用いた実証実験の実施」

本研究開発項目では、LiDARを用いた実証実験を行い、その結果を研究開発項目①で開発するLiDARの仕様や認識技術の課題共有へフィードバックすることで、PCSEL-LiDARの国際競争力を高めることを目的としている。B. 「LiDARを用いた実証実験の実施」では、開発したLiDARを用いた実証実験の実施と、実証実験の視察や試乗を受け入れ、開発成果を広く周知することを目標とした。

研究開発項目①は、SIP第3期の中間年度に当たる2025年度までに広FOV型PCSEL-LiDAR、最終年度に当たる2027年度までに遠距離対応型LiDARを開発する計画である。このため、中間目標として広FOV型を用いた実証実験の実施を設定した。また、最終的には遠距離型LiDARも含め複数の小型PCSEL-LiDARを連携させた自動運転の実証実験を実施し、レベル4相当の自動運転が可能であることを示すことを目標として設定した。

【中間目標】

- ・ 広FOV型の小型PCSEL-LiDARをインフラセンサとして用いた実証実験を実施し、交通流を高精度に計測可能であることを実証する。
- ・ 広FOV型の小型PCSEL-LiDARを車載センサの一部として利用する実証実験を開始する。
- ・ 自動車関連メーカー、インフラ機器メーカー、関係者等への視察機会の提供

【最終目標】

- ・ 複数の小型PCSEL-LiDARを搭載したインフラセンサや車載センサを連携させた自動運転の実証実験を実施し、レベル4相当の自動運転が可能であることを示す。
- ・ 自動車関連メーカー、インフラ機器メーカー、関係者等への試乗機会の提供

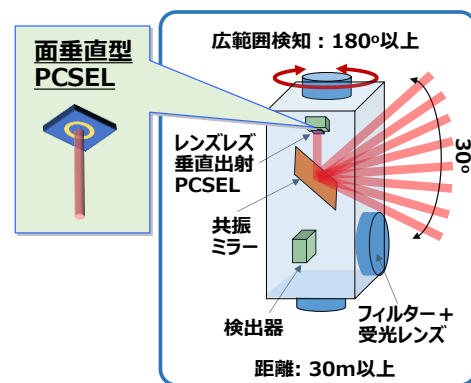
2. 3次元PCSEL-LiDARシステムの開発

2.1 はじめに

上述したように、本事業において、2つのステップ（STEP）を踏んで研究開発を進めている。STEP1では、インフラセンサや車両近傍の死角となり得る視野の測距等のための広FOV型3次元PCSEL-LiDARシステム（機械式）の開発を行う。その上で、STEP2では、多点に同時にビームを照射可能なPCSELをLiDARの光源部に用い、電子的ビーム走査を用いたオールチップ化により大幅な小型化・低消費電力化・低コスト化を可能とする、非機械式3次元PCSEL-LiDARシステムのPOC実証を目指している。2つのSTEPを踏む理由は、後者のSTEP2の非機械式（電子式）3次元PCSEL-LiDARの実現には、その開発に4～5年程度を要するため、まず、STEP1として、実用に耐えうる、PCSELを活用した機械式3次元LiDARを3年目までに開発し、インフラセンサや、車の死角となる側面の近距離測距に活用することで、様々なフィードバックを得ながら社会実装を目指すことが重要であると考えたためである。つまり、本SIPが、社会実装を重視するプログラムであるがゆえ、まず、STEP1を経て、確実な社会実装を目指す。その上で、STEP1で開発した機械式3次元PCSEL-LiDARに対するフィードバックを活用しつつ、並行して、STEP2として、小型・低消費電力・低コストな我が国発の非機械式（電子式）3次元PCSEL-LiDARのプロトタイプを、4～5年目までに完成させていく予定である。それに加え、STEP1に関する当初計画への追加項目として、パーソナルモビリティ等への活用を見据えた小型のカード型PCSEL-LiDARの開発も併せて行い、パーソナルモビリティを担うSIP包摂との連携も図る。以下に2024年度の研究成果を報告する。

2.2 STEP1 広FOV型3次元PCSEL-LiDAR

本項目では、図2.2.1に示すように、レンズフリーの垂直照射型PCSELから出射されるビームを共振ミラーで上下に走査させつつ、全体を回転させることで、広範囲で走査させ、機械式の広FOV型3次元PCSEL-LiDARを実現することを目指している。このような、レーザービームを機械的に走査するLiDARにおいては、光源から照射されるビームの広がり角により、照射点当たりの測距可能な最小のサイズが決まる。ただし、垂直方向の広がり角の狭いビーム（メインローブ）の外側に、強度の小さなビーム（サイドローブ）が同時に生じた場合には、本来測定を行う方向とは異なる方向に位置する（比較的近距離の）障害物からもサイドローブによる反射が生じるため、分解能の低下につながり、検知が必要な物体を正確に認識できなくなる可能性がある。そこで、まず、本年度は、(A)サイドローブのない、理想的なガウスビームが出射可能になるように、面垂直照射型PCSEL光源の高度化を行った。さらに、(B)PCSELの特長である狭いスペクトル幅と小さな温度依存性を活かして太陽光（背景光）の影響を大幅に抑制することの可能な、狭帯域バンドパスフィルターの設計・試作も併せて行った。さらに、(C)上述の高度化したPCSELおよび狭帯域バンドパスフィルターを導入したLiDARの仕様確定や要素技術開発も行った。それに加えて、追加項目として、(D)高度化したPCS



(追加項目: カード型PCSEL-LiDAR)

図2.2.1 : STEP1で実現を目指す広FoV型3次元PCSEL-LiDARの概要

ELおよび狭帯域バンドフィルターを導入したカード型PCSEL-LiDARの開発も並行して実施した。以下では、項目(A)～(D)について、実施内容を具体的に説明する。

(A) 面垂直照射型PCSEL光源の高度化

PCSELの照射ビーム形状が理想的なガウスビームに近くなるように、まず、フォトニック結晶共振器および電流注入分布の最適設計を行った。フォトニック結晶共振器としては、京都大学がこれまでに提案・実証して来た、フォトニック結晶の単位格子あたりに二つの孔を設けた2重格子構造を採用し、同構造の格子点形状を変化させることで、フォトニック結晶面内の光の回折の大きさを表す結合係数の調整を行った。また、注入電流分布としては、ガウス分布状の電流注入を仮定し、ガウス幅 L の調整を行った。これら設計変数について、量子アニーリングの手法を用いて、評価関数が最大となる構造の探索を行い、具体的な構造の設計を行った。上記の設計をもとに、最適構造の作製を行い、発振特性の評価を行った。作製した光源と従来光源について、測定により得られた出射ビームの強度プロファイルおよび出射ビーム形状を比較した結果を図2.2.2の左図に、電流・光出力(I-L)特性を同右図に示す。従来光源と比較して、1/10以下にサイドローブ強度が抑制出来ていることが確認され、また、10 W級の光出力が得られた。以上より、目標通り、サイドローブのない理想的なガウスビームが出射可能な面垂直照射型PCSEL光源の高度化に成功した。なお、本項目で高度化したPCSELについては、パッケージへの実装を行い、項目(D)で開発を行ったLiDARシステムへと搭載した。

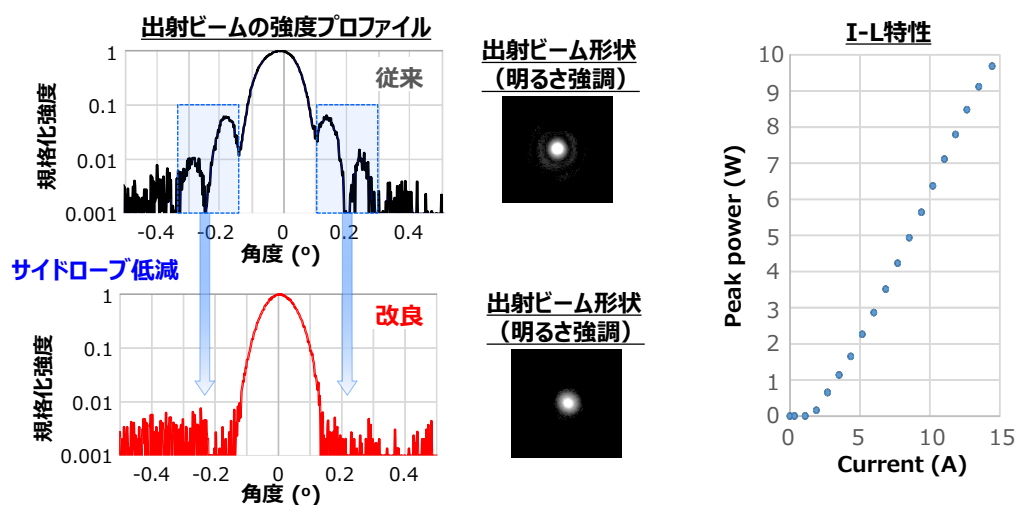


図2.2.2：理想的なガウスビーム出射が可能な垂直出射型PCSELの評価結果

(B) PCSELの特長を活かした狭帯域バンドパスフィルターの設計・作製

LiDARでは、太陽光が検出器に入り、バックグラウンド信号として検知されると、ショットノイズが増大する。そのため、レーザー光のみを効率よく通過させるバンドパスフィルターの導入が必要となる。バンドパスフィルターの帯域は、レーザーのスペクトル幅とLiDARの動作温度範囲におけるスペクトルシフト量から決定できる。図2.2.3(a)に垂直出射型PCSEL、図2.2.3(b)に従来の半導体レーザー（コヒーレント社製）の温度変化に伴うスペクトルの測定結果を示す。PCSELのスペクトル幅は測定分解能で

決まる約0.1nmである一方、従来の半導体レーザーのスペクトル幅は5nm以上と広いことが分かる。これは、フォトニック結晶レーザーが単一モードで発振するのに対し、従来の半導体レーザーは多モードで発振するためである。さらに、両者の温度依存性を比較すると、PCSELの温度依存性は0.09nm/K（屈折率の温度依存性で決まる）であるのに対し、従来の半導体レーザーの温度依存性は0.33nm/K（バンドギャップの温度依存性で決まる）と、PCSELの3.5倍以上大きい。従来の半導体レーザーはスペクトル幅が広いことに加え、温度依存性も大きいため、PCSELに比べて4倍以上の帯域幅をもつバンドパスフィルターが必要となる。そこで、PCSELを用いることで、バンドパスフィルターの帯域幅を従来の1/4程度まで狭帯域化でき、背景光を抑制して測距信号のS/N比を向上させることが可能となる。これにより、LiDARの高性能化に寄与すると考えられる。

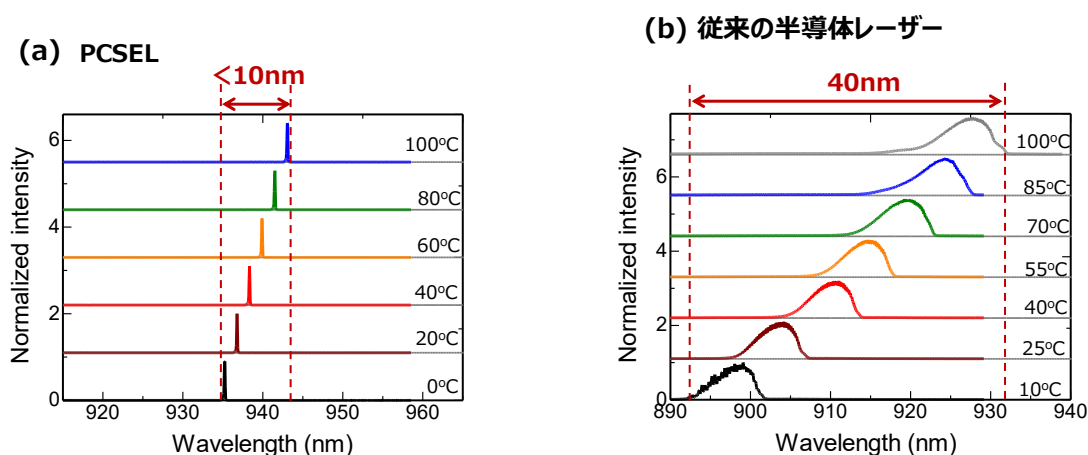


図2.2.3(a) : フォトニック結晶レーザーのスペクトルの温度依存性。(b) : コヒーレント社製の従来の半導体レーザーのスペクトルの温度依存性

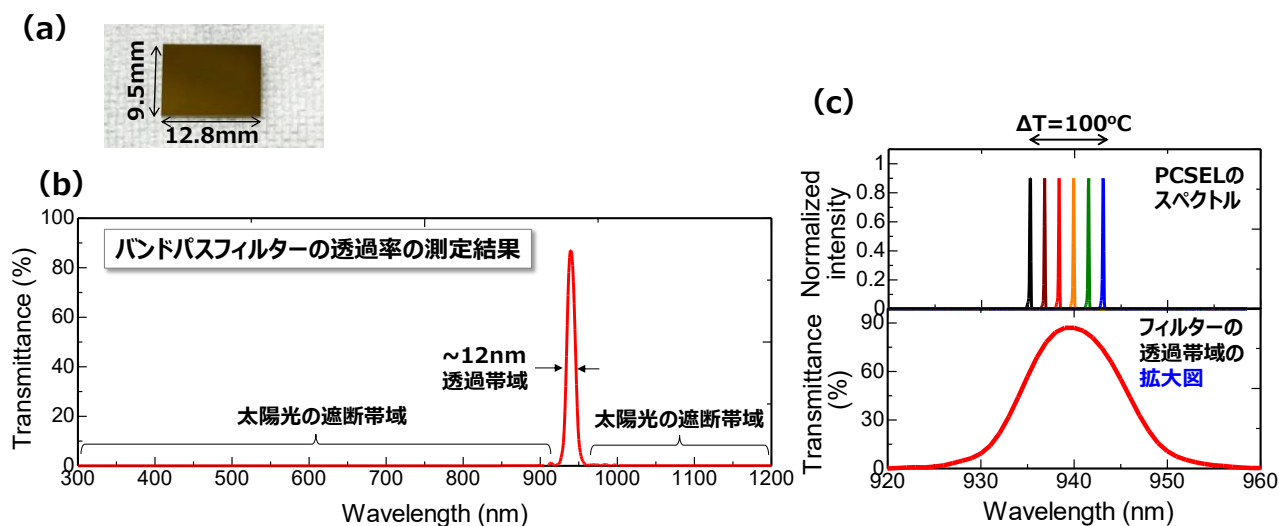


図2.2.4(a) : LiDAR（カード型）への搭載サイズ（12.8mm×9.5mm）に合わせて作製したバンドパスフィルターの写真。(b) : 紫外線から近赤外線までのバンドパスフィルターの透過率スペクトルの測定結果。(c) : バンドパスフィルターの透過帯域の拡大図および100℃の温度範囲におけるPCSELのスペクトルの測定結果。

以上の特長を踏まえ、上記のような優れた特性を有するPCSELに適したバンドパスフィルターの設計・

作製を行った。広い温度範囲（125℃以上）でPCSELのレーザーを透過できるよう、バンドパス帯域幅を約12nmに設定し、それ以外の帯域では太陽光のスペクトル成分を遮断する多層膜フィルターを設計・作製した。直近の応用として、項目(D)で詳述するカード型PCSEL-LiDARに搭載可能なサイズのフィルターを作製した(図2.2.4(a))。透過帯域の中心波長は、LiDARの動作温度を考慮したPCSELの中心波長（940nm付近）に設定している。作製したバンドパスフィルターの透過特性を測定した結果を図2.2.4(b)に示す。同図から、狙い通り940nm付近で約90%の高い透過率を示し、それ以外の紫外線から近赤外線波長帯域が遮光されていることが分かる。また、図2.2.4(c)には透過帯域付近を拡大した結果を示す。比較のため、100℃の温度変化範囲におけるPCSELのスペクトルも併記しており、バンドパスフィルターの透過帯域内に収まっていることが確認できる。本フィルターは、項目(D)で述べるカード型PCSEL-LiDARに搭載しており、さらに、今後は、STEP1の広FOV型3次元PCSEL-LiDARおよびSTEP2の非機械式LiDARでも採用していく予定である。

(C) 広FOV3次元PCSEL-LiDARの要素技術確立・仕様確定

図2.2.1に示したように、機械式の広FOV 3次元PCSEL-LiDARでは、レンズフリーの垂直照射型PCSELから出射されるビームを共振ミラーで上下に走査しつつ、全体を回転させることで広範囲を走査し、測距を行うことを目指している。

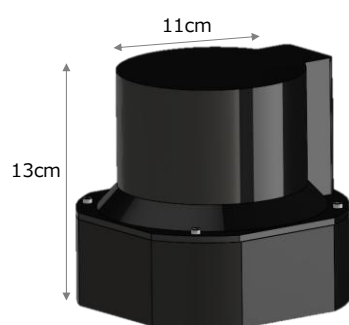


図2.2.5：STEP1の広FOV型3次元PCSEL-LiDARのCAD図

表2.2.1：STEP1の広FOV型3次元PCSEL-LiDARのスペック

項目	値
光源波長	940nm
外乱光カットフィルター	10nm（通常の1/4）
水平FOV	>180°
垂直FOV	30°
距離（反射率90%）	35m
分解（水平・垂直）	0.6°
距離精度	±5cm
フレームレート(最大)	20fps
電源電圧	24V
インターフェース	Ethernet

開発中のPCSEL-LiDARのCAD図を図2.2.5、具体的なスペックを表2.2.1に示す。本LiDARでは、レーザーは中心部分にある共振ミラー（見えていない）でPCSELによる狭いビームを上下に±15°（計30°）範囲で走査する。受光系は、受光レンズとAPDアレイにより構成によって構成している。全体を回転させることで、水平180°以上の広FOVでの検知・測距を可能にしている。本LiDARにおける、基本スペックは、図2.2.1に示している。また、本LiDARには、上述の高度化したPCSELおよび狭帯域バンドパスフィルターを搭載する予定である。今年度は、以上で述べた広FOV 3次元PCSEL-LiDARシステムの各構成要素（投光系、受光系、ミラー系、回転系、回路など）の設計および要素技術の開発を完了するとともに、表2.2.1に示す通り、LiDARシステムの基本スペックの決定を完了した。

(D) [追加項目]カード型PCSEL-LiDARの開発

以上の当初開発内容に加えて、SIPの他課題「包摂的コミュニティプラットフォームの構築」との連携のため、電動車椅子やシニアカー等のマイクロモビリティに活用可能な小型の測距センサであるカード型PCSEL-LiDARの開発を、追加項目として検討を進めた。カード型LiDARのCAD図を図2.2.6に示す。本LiDARのフットプリントは名刺サイズ以下（6cm × 8cm）、高さ2cmである。内部のレンズフリーPCSELから出射されるビームをポリゴンミラーで走査することで、垂直方向において-2°、0°、+1°の3ライン、水平方向において90°範囲の測距を可能にしている。また、角度分解能は0.125°、測距距離は10mである。さらに、太陽光の影響を抑えるため、項目(B)で述べた12nm帯域幅（従来の1/4）のバンドパスフィルターを搭載している。LiDARの具体的なスペックを表2.2.2に示す。

表2.2.2：カード型PCSEL-LiDARのスペック

仕様パラメータ	値
光源波長	940nm
外乱光カットフィルター*	通常の1/4
水平FOV	90°
垂直FOV	3ライン (-2°、0°、+1°)
角度分解	0.125°
距離（反射率90%）	10m
距離制度	±4cm
走査速度	60fps
データ量	172.8k pps
インターフェース	Ethernet 100BASE-TX
外形寸法	20x60x80mm(80mm走査窓)
電源電圧	10-30V
消費電力	2.7W以下
使用温度範囲	-10～+50℃
耐衝撃	20G X,Y,Z方向 各10回
質量	100g以下（ケーブル除く）

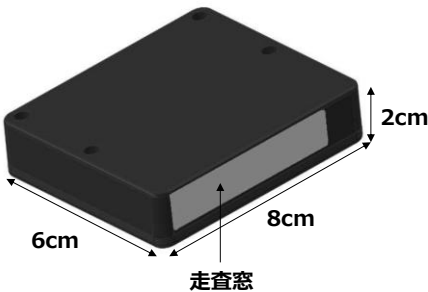


図2.2.6：カード型PCSEL-LiDARのCAD図

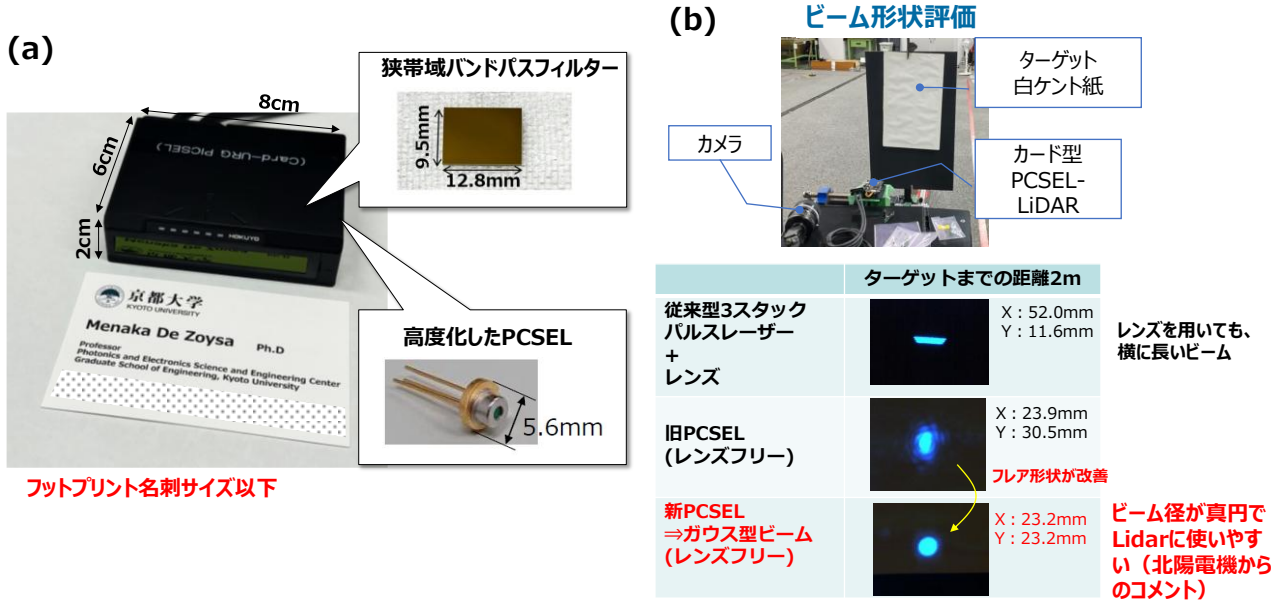


図2.2.7(a)：試作したカード型PCSEL-LiDARの写真。LiDARの中に高度化されたPCSELおよび狭帯域バンドパスフィルターを搭載している。(b):レンズ系を用いてコリメートした従来型3スタックレーザー、レンズフリーの旧PCSEL、レンズフリーの高度化した新PCSELからのビーム形状の比較・評価

試作したカード型PCSEL-LiDARの写真を図2.2.7(a)に示す。大きさの比較ができるよう、同図には名刺も配置しており、フットプリントが名刺サイズ以下であることが分かる。本LiDARには、高度化したPCSELおよび狭帯域バンドパスフィルターを搭載している。LiDARから照射されたビームを約2m離れたターゲット（白ケント紙）に照射し、ビーム形状をカメラで確認した結果を図2.2.7(b)に示す。比較のため、レンズ系でコリメートした従来型の3スタックレーザーと、高度化前のレンズフリー旧PCSELのビーム形状も併せて示している。同図から、従来のレーザーや旧PCSELと比較して、高度化したPCSELでは、より対称的な真円ビーム形状が得られていることが分かる。これは、LiDARの分解能向上に寄与するだけでなく、下記で述べるように、物体間の誤検知抑制にもつながる。

次に、開発したカード型LiDARにおけるバックグラウンド光の影響を評価した。人工太陽光源を用いてターゲットに光を照射し、狭帯域バンドパスフィルターの有無で検知信号のノイズレベルを比較した。狭帯域バンドパスフィルターの導入によりノイズレベルが大幅に低減できることを確認した。このことは、太陽光の影響下でも安定動作が可能であることを意味する。

続いて、開発したカード型PCSEL-LiDARを用いて、リアルタイム測距を実施した。図2.2.8(a)に示すように、カード型PCSEL-LiDARの前に人とスクリーンを配置した。ただし、周囲は壁に囲まれている。図2.2.12(b)に、20fpsのフレームレートのリアルタイム測距の静止画像を示す。測距画像では、原点から物体までの距離を3本のライン（上述した垂直出射角 -2° 、 0° 、 $+1^{\circ}$ に相当）で表し、色は反射強度を示している（赤：強い、青：弱い）。図2.2.8(b)より、LiDARによって人の腹部、スクリーン、周囲の壁の距離および反射強度が正しく計測できていることが確認できた。

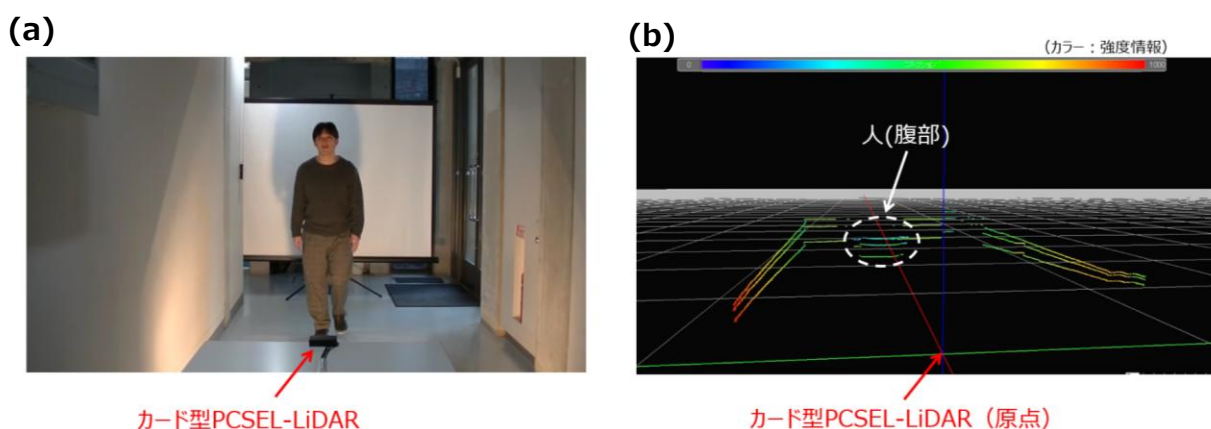


図2.2.8(a)：リアルタイムの計測のために、LiDARの前に立っている人間およびその後ろに設けたスクリーンの様子（静止画像）。
(b)：図(a)の配置の時に計測した測距画像。

2.3 STEP2 非機械式3次元PCSEL-LiDAR開発

本項目では、図2.3.1に示すように、任意の狙った方向に、多点ビームを照射可能な変調PCSEL(M-PCSEL)を複数並べて電子的に制御してビーム走査することにより、ミラーや回転機構等を取り除いた非機械式の3次元PCSEL-LiDARの開発を目指している。非機械式3次元PCSEL-LiDARの実現には、ミラーや回転機構を用いずとも様々な角度にビームを出射できる多点出射可能なM-PCSELの開発

を行いつつ、異なる角度で照射する M-PCSEL の電氣的切り替え機能を有する駆動回路の開発・実装を得て、電子スキャンの実現を目指している。また、非機械式 3 次元 PCSEL-LiDAR では、受光部に高感度で高速の応答が可能な単一光子アバランシェダイオード (SPAD) 2 次元検出器アレイを活用して、3 次元の計測を一括で行う。以下に、(A)2 次元 SPAD の入手と基礎評価、(B)オールチップ化に向けた M-PCSEL アレイの作製・評価、(C)M-PCSEL アレイチップと 2 次元 SPAD アレイを用いた非機械式・オールチップ LiDAR の初期実証について、報告する。

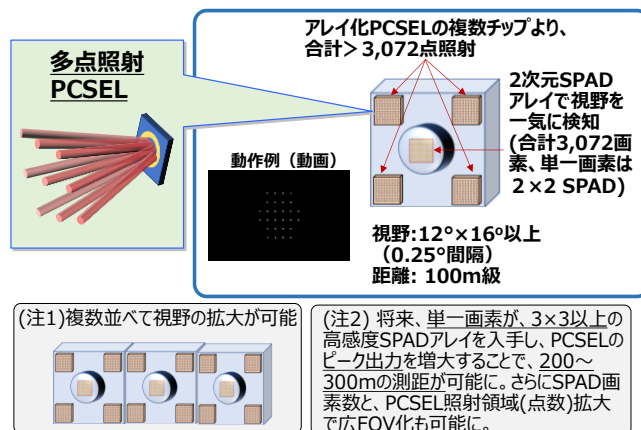


図2.3.1 : STEP 2 でPOC実証を目指す非機械式オールチップ3次元PCSEL-LiDARの概要

(A)2次元SPADの入手と基礎評価

STEP2の非機械式3次元PCSEL-LiDARのPOC実証に向けて重要な要素となる2次元SPADアレイデバイスに関して、3072画素（1画素は4つのSPADにより構成）の初期的な性能のデバイスを採用した。SPADは単一光子にも反応するため、太陽光などの背景光による影響を抑える必要がある。

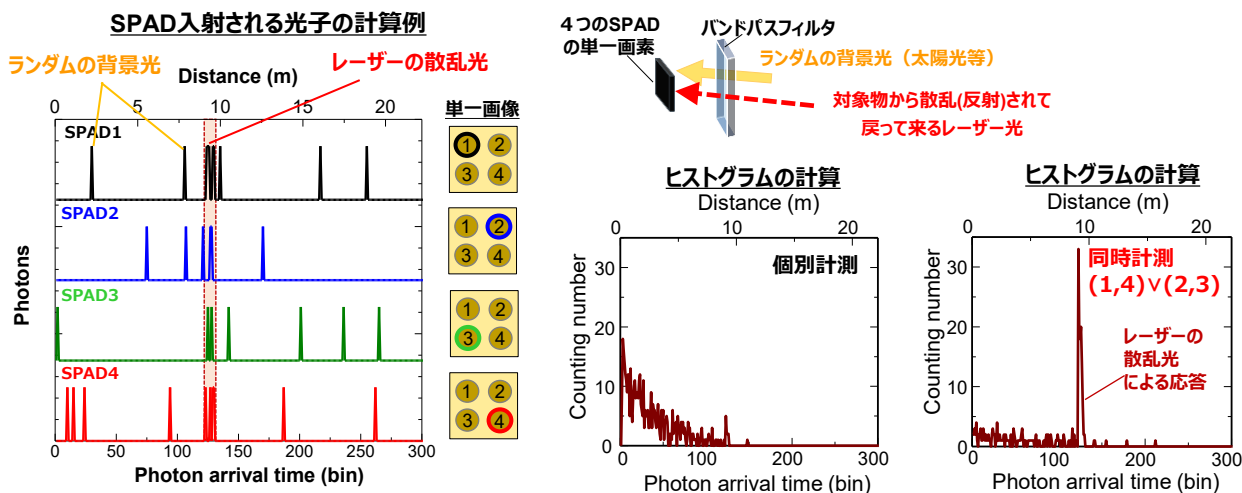


図2.3.2 : 画素内に存在する4つのSPADに入射されるランダムな背景光とレーザーの散乱光の計算例と、背景光がある状態でSPADの個別計測および同時計測時のヒストグラムの計算結果

図2.3.2の左側に示すように、背景光は時間的にランダムにSPADへ入射するのに対し、レーザー光は一定の時間幅でまとまって入射する。そこで、ランダムな背景光を除去するために、画素内に存在する複数のSPAD (例えば2個) が同時 (レーザーのパルス幅程度の時間帯域で) に反応した時のみに、計測を実施することで、ランダム性の背景光の影響を抑えつつ、対象物からのレーザー光のみを選択的に検知することが可能になる。具体的に、対象物から散乱して来るレーザー光と、ランダムな背景光が (バンドパスフィルタを通過して) SPADに入る状態で、SPADの個別計測および同時計測 (2つ) を行った場合

の光子検出の計算結果を図2.3.2の右側に示す。本計算においては、複数回計測を行い、光子が検出された回数のヒストグラムを示している。同図のヒストグラムから、個別計測ではレーザーの散乱光が到達する前に背景光でSPADが反応し、正しく測距ができていないことが分かる。一方、同時計測時は背景光の影響が抑えられ、レーザーの散乱光を正しく検知できるため、測距が可能となる。

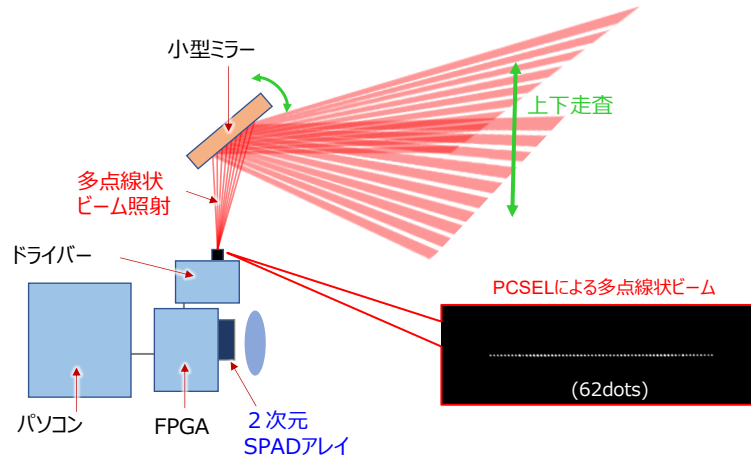


図2.3.3：基礎評価に用いたPCSELによる線状ビーム射出と小型ミラーによるビーム走査による測距系

続いて、同時計測の効果の実験的検証をも目的として、PCSELとSPADによる距離計測の基礎評価を行った。構築したLiDARシステムの概要を図2.3.3に示す。前述の通り、STEP2では、2次元多点照射可能なPCSELを用いた非機械式LiDARシステムのPOC実証を最終的に目指すが、ここでは、その前段階として、オンチップで多点線状ビーム照射が可能なPCSELを用意し、線状射出ビームを小型ミラーで上下（1次元的）に走査することで2次元の照射を実施した。なお、この構成においても、PCSELのレンズフリーという特長を活かし、小型化を実現できる。多点線状ビームの様子を図2.3.3の右下に示している。対象物に当たったレーザー光からの散乱光は、受光レンズを介して2次元SPADアレイで検知する。検知された信号はパソコンに送信し、処理を行って測距画像としてリアルタイムで表示する。

実験評価のため、図2.3.4の左側の写真のように、距離12m付近にスクリーン、10m付近にマネキン人形を設置した。また、構築したLiDARシステムは、それらの正面に設置している。同写真には、今回測定するFOVを緑の破線で示している。また、背景太陽光を模擬するため、ハロゲン光源でマネキン人形を照射した状態で測定を行っており、同図において、FOV内のマネキン人形の腹部が強く照らされている様子が確認できる。図2.3.4の中央には、各々のSPADの信号（個別計測）を基に測距を行った結果を示している。（実際にはリアルタイムでの測距を行っているが、同図には、ある時刻の静止測距画像を示している）。併せて、背景光が強く当たっている腹部と、背景光が弱い胸部の光子検出のヒストグラムも右に示している。同図より、腹部ではレーザーの散乱光が検出される前に背景光によってSPADが反応し、正しい測距ができていないことが分かる。一方、胸部では背景光の影響はあるものの、レーザーの散乱光を検知できるため、測距が可能となっている。

それに対して、画素内に存在する2つのSPADが同時に反応した時のみに計測（同時計測）を実施した結果を図2.3.5に示している。同図より、強い背景光が当たっているマネキン人形の腹部においても、正しく測距が出来ていることが見て取れる。これは、背景光が時間的にランダムにSPADに入射された結

果、背景光に対して2つのSPADが同時に反応する確率が小さいためである。以上のように、背景光の影響を抑制するために、SPADの同時計測が有効であることを実験的に示すことに成功した。

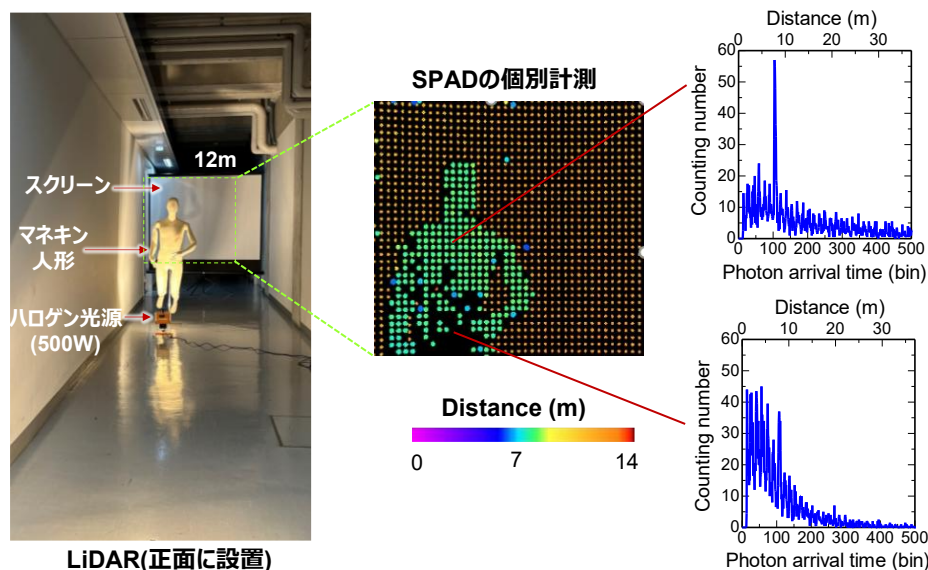


図2.3.4 : PCSELによる線状ビーム出射と小型ミラーによるビーム走査による測距評価結果。測距は、各SPADの信号（個別計測）を基にしており、背景光が強い部分については正しい測距が出来ていない。

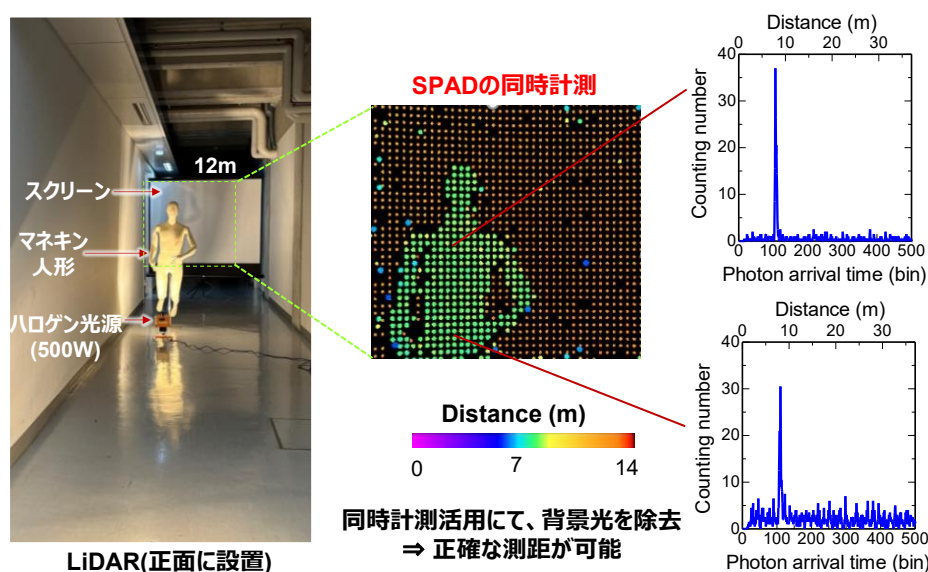


図2.3.5 : PCSELによる線状ビーム出射と小型ミラーによるビーム走査による測距評価。測距は、2つのSPADが同時に反応した場合のみ（同時計測）を基にしており、背景光が強い部分も正しい測距が出来ている。

(B) 非機械・オールチップ化に向けたM-PCSELアレイの作製・評価

項目(A)で述べた、多点線状ビームを出射可能なPCSELとSPADを組み合わせた機械式LiDARの実証結果を踏まえて、STEP2で最終的にPOC実証を目指す非機械式オールチップ型LiDARの光源部に用いる、M-PCSELアレイの作製・評価を行った。光源部としては、図2.3.6の左下図に示すように、2次元的に多点ビーム照射を可能とするM-PCSELを開発し、それらを複数並べたアレイデバイスを電子的に制御してビー

ム走査することを検討した。PCSELアレイチップの構成としては、1mm Φ 程度のPCSELを3 $\times$ 3領域に配置したアレイ構造の作製を行った。ここで、1mm Φ PCSELからの出射点数の一例として、48点程度を出射することを考えた場合、3 $\times$ 3アレイで432点が出射可能となるため、アレイチップを10個程度用いることで、想定するFOVに必要な点数（3,072点以上）の出射を得ることが可能と期待される。

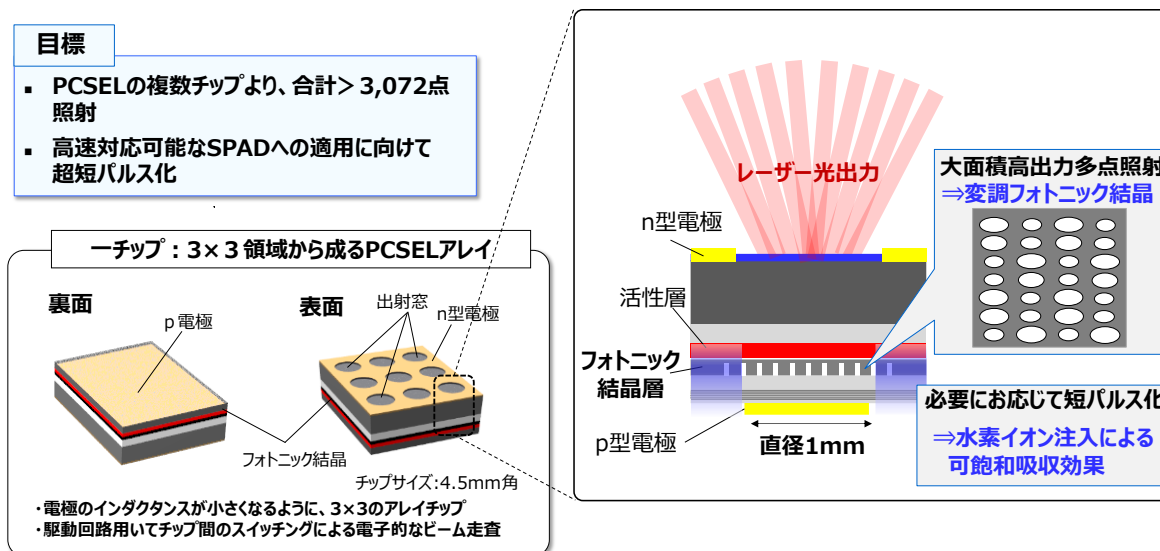


図2.3.6：オールチップ型LiDARのPOCに向けたPCSELアレイの概要

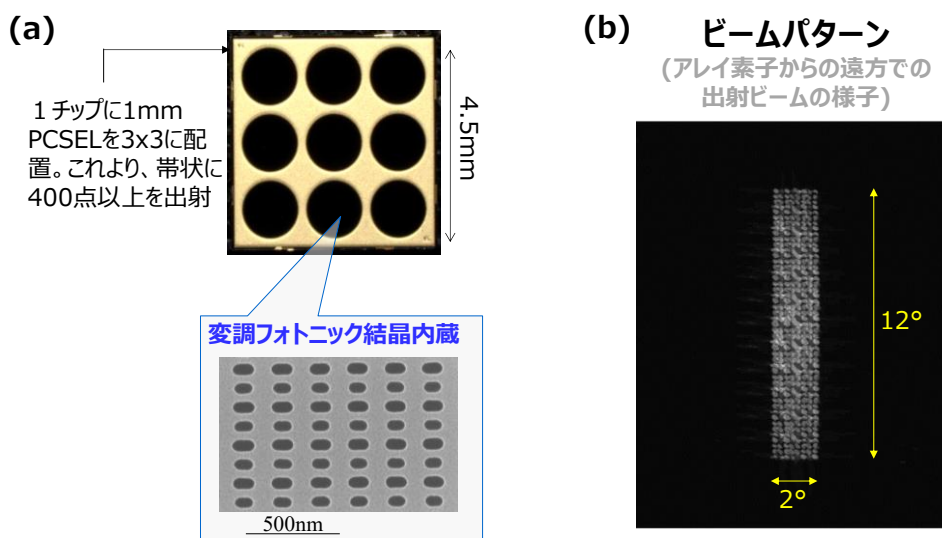


図2.3.7(a)：作製したアレイチップ（一例）の様子。(d)：チップの9領域から出射される遠方でのビームの様子

2024年度の研究開発では、単一素子から48点の出射が可能な1mm Φ M-PCSELの設計・試作、および、同素子を3 $\times$ 3個並べたアレイチップの設計・試作を行った（図2.3.7(a)）。ここで、レーザーの出射パルス幅としては、長距離の測距を可能とするために高いピークパワー（瞬間的な光強度）を実現しつつアイセーフ条件や低消費電力を満たすために、必要に応じて、図2.3.6右に書いているように、水素イオン注入による可飽和吸収効果を用いて短パルス（100ピコ秒以下）・高ピーク出力化を図ることも考えられるが、本研究では、第一段階のPOCとして、（比較的近距离で）オールチップ化の原理検証を

行うために、数ナノ秒程度のパルス電流注入による駆動を目標とした。また、今回は、 3×3 個並べたアレイチップによる照射範囲は、 $2^\circ \times 12^\circ$ とした。作製したアレイチップについて、実際に駆動回路に実装し、ナノ秒パルスで駆動させ、ビーム形状の基礎評価を行った結果を図 2.3.7(b)に示す。ここでは、アレイ内の各素子のビームパターンを測定し、重ね合わせて表示した様子を示している。同図より、狙いとする帯状のビームが得られていることが確認できた。なお、今回作製したデバイスにおける平均的な一点当たりのピークパワーは、0.2W 程度と見積もられ、(A)で述べた SPAD 素子と組み合わせると 10m 級の測距が可能と期待される。

(C)M-PCSELアレイチップと2次元SPADアレイを用いた非機械式・オールチップLiDARの初期実証

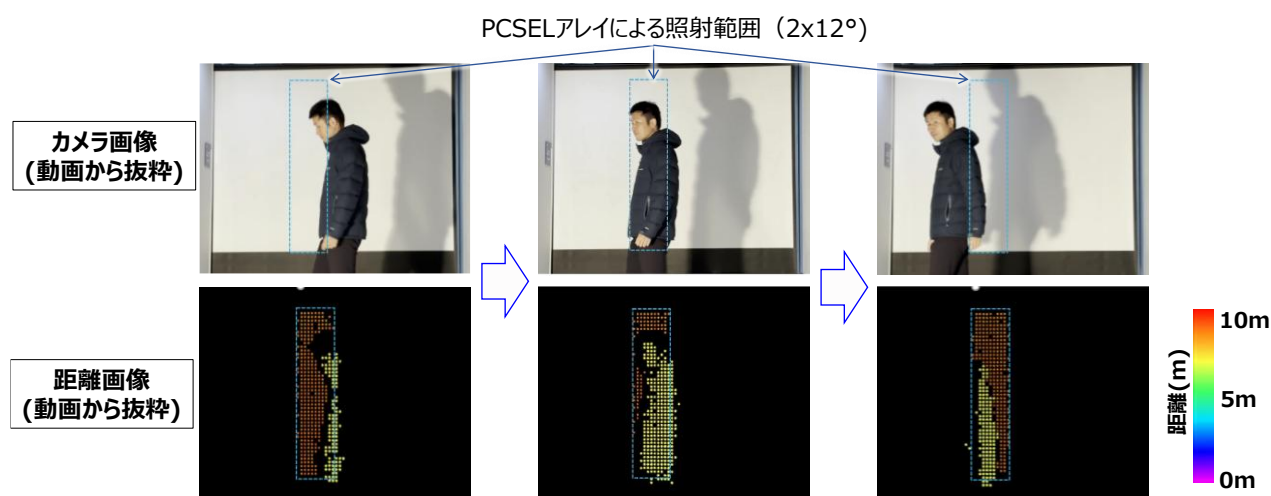


図2.3.8：POC段階の非機械PCSEL-LiDARを用いた測距例。スクリーンと人距離を計測（上：実画像、下：距離画像）。

図2.3.8に、上記のM-PCSELアレイを用いて、SPADアレイセンサと組み合わせて、非機械式・オールチップLiDARの初期評価を行った結果を示す。LiDARから10m程度離れた場所にスクリーンを配置し、そのやや前方の8m程度の位置に人を配置して、距離計測を行った。開発した $2^\circ \times 12^\circ$ 範囲を照射可能なM-PCSELを用いて、図2.3.8の青の点線で示す範囲を照らして、実験を行っている（実際にはリアルタイムでの測距を行っているが、同図には、ある時刻の静止測距画像を示している）。なお、本計測において、背景光の影響を排除するために、(A)で述べた2つのSPADの同時計測を実施している。同図の距離画像より、人までの距離も測定できることを確認した（なお、本実験では、SPADアレイセンサとM-PCSELアレイを非同軸に配置しているため、横方向にずれた位置に影が見られるが、今後、SPADセンサとM-PCSELアレイを小型化し、同軸にそろえることで、改善することが可能と考えられる）。以上より、PCSELアレイチップを用いて2次元面を照射しながら、SPADを用いて3次元測距を行うという、非機械式・オールチップ型LiDARの第一段階のPOCに成功したと言える。以上を踏まえて、次年度以降は、複数のPCSELアレイを用いて図2.3.8のように電子的ビーム走査を行い、FOV拡大および測距距離の増大を目指していく。また、SPADの高感度化を行うと共に、PCSELの高出力化（注入電流の上昇等）をも行うことで、将来的に100m級の測距への展開を行う予定である。

3. 認識技術の開発と実証実験の実施

研究開発項目①で開発したLiDARをインフラに設置して人流や交通流の計測を行うことや、車両に搭載して交通流の計測や自動運転等を行うためには、LiDARセンサの開発に加え、LiDARから得られるポイントクラウドを解析し、センサの視野内に存在する物体を検知・識別する機能や、その追跡によって物体の運動状態（移動速度等）を計測する機能が必要になる。また、世界的にLiDARの需要が高まっている中、研究開発項目①で開発するLiDARは経済安全性保障の観点からも国益に資するものとして期待される。しかし、国際競争力の獲得には、研究開発項目①で開発したLiDARを実際の実証実験を通じて得られた知見や課題をフィードバックし、性能向上に反映させるだけでなく、産業界へのプロモーションも不可欠である。

そこで本研究開発においては、A.「LiDARを用いた認識技術の開発」と、B.「LiDARを用いた実証実験の実施」の2点について研究開発を行い、小型PCSEL-LiDARの国際競争力の獲得を目指す。以下に具体的な実施内容について示す。

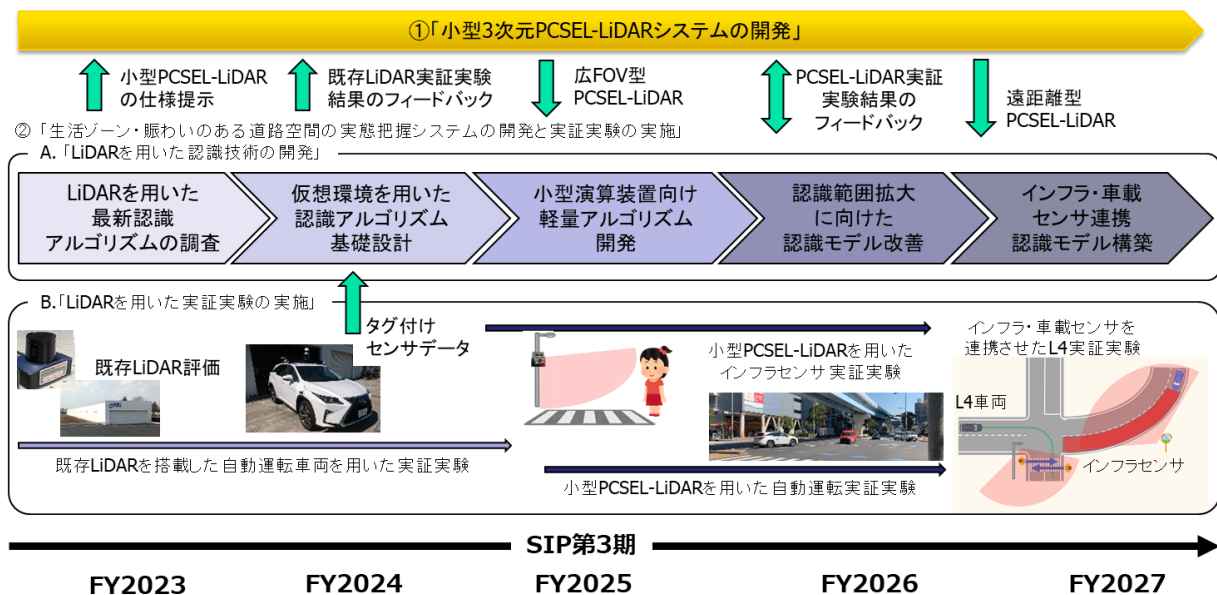


図3.1.1 研究開発項目②の概要

3.1 LiDARを用いた認識技術の開発

研究開発項目①で開発したLiDARから得られる点群を解析して、センサ視野内に存在する物体を検知・識別する機能・追跡を行うための認識技術の開発を以下の通り検討した。

研究開発項目①で開発する広FOV型3次元PCSEL-LiDARは、2025年度に開発されるセンサであるため、本事業実施期間における研究開発の当初は認識技術の構築に最終的に用いる3次元LiDARは未開発である。このためLiDARを用いた認識技術の構築に向けた基礎検討として、SIP第2期で開発した自動運転システムに搭載したLiDARを用いて認識技術の検討を行う。その結果を踏まえて、広FOV型PCSEL-LiDARを開発するにあたっての認識の観点での課題を整理して、研究開発項目①と共有する。また上記で検討したスペックに対応したLiDARが開発されるまでの間、効率的に認識技術の開発を進められるように、

LiDAR データを仮想環境上で再現可能なシミュレーション環境を構築する。そこで生成した LiDAR データをもとに、認識を行うアルゴリズムを検討する。研究開発項目①で開発される広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のプロトタイプが作製され次第、現物を用いたセンサデータ取得を行い、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のプロトタイプをもとに認識技術の評価を行う。そして、評価結果をもとに、認識技術の向上を図るとともに LiDAR の課題を研究開発項目①へフィードバックし LiDAR の能力向上を図る。具体的には 2024 年度までに以下の項目を実施した。

(1) 仮想環境上におけるインフラセンサとしての広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の評価

- (A) 仮想環境上での広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のモデル化
- (B) インフラセンサとして広 FOV 型 PCSEL-LiDAR を用いたシミュレーション
- (C) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の他 LiDAR との比較によるインフラセンサとしての優位性の評価
- (D) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR 向けに特化した認識モデルの開発
- (E) インフラセンサ向けの認識モデルの小型化の検討

(2) 車載を想定した遠距離認識技術の評価

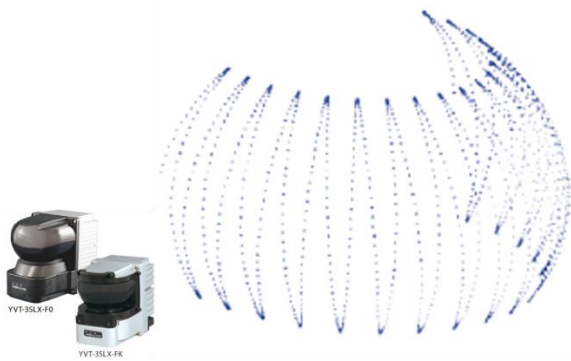
- (A) SIP 第 2 期で開発した自動運転システムに搭載した LiDAR を用いた遠距離認識技術の開発

(1) 仮想環境上におけるインフラセンサとしての広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の評価

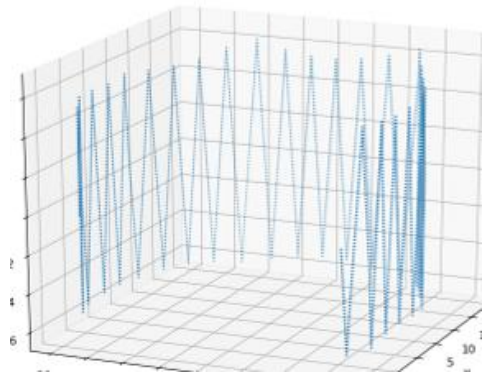
仮想環境上で広 FOV 型 PCSEL-LiDAR をモデル化し実ユースケースを想定したシミュレーションを行い、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR に特化した認識モデルの開発を行った。さらにインフラセンサとして小型装置に搭載するために開発された認識モデルの軽量化・高速化の検討を行った。

(A) 仮想環境上での広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のモデル化

認識技術の基礎検討のために、研究開発項目①で開発予定の広 FOV 型 PCSEL-LiDAR を仮想環境上でモデル化を行った。評価では、仮想環境として自動運转向けのオープンソースのシミュレータである Car Learning to Act (CARLA) [1]を使用した。CARLA は天候や道路形状、交通参加者などの様々な交通状況を仮想環境上で再現し、LiDAR 点群やカメラ画像などのセンサシミュレーションが可能な自動運转向けのシミュレータである。評価では、CARLA 上で広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のモデル化を仕様に基づき実装した。広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の仕様では水平方向に 240 度、垂直方向に 30 度の走査範囲、最大取得可能距離は 35m、1 フレームあたり最大 25,600 点を 20Hz で取得可能となっている。研究開発項目①の中間目標として最大取得可能距離 30m 以上を挙げていることから、暫定的に最大取得可能距離を 30m としてモデル化を行った。またレーザーのスキャンパターンは北陽電機株式会社（再委託先）製の YVT-35LX[2]と類似したものであり、レーザーを上下に振りながら回転するように点群を取得する。図 3.1.2 の(a)と(b)に、それぞれ YVT-35LX のスキャンパターンと、CARLA 上にモデル化した広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のスキャンパターンを示す。これらを比較すると、CARLA 上でその楔形のスキャンパターンを模倣できたことがわかる。



(a) YVT-35LX のスキャンパターン [2]



(b) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のスキャンパターン

図 3.1.2 CARLA でモデル化した広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の点群パターン

(B) インフラセンサとして広 FOV 型 PCSEL-LiDAR を用いたシミュレーション

CARLA で前項のモデル化した広 FOV 型 PCSEL-LiDAR を用いてインフラセンサとしての実環境シミュレーションを行った。

広 FOV 型 PCSEL-LiDAR は、車載センサや市街地に設置するインフラセンサとしての利用が想定される。また研究開発の目標として、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR をインフラセンサとして用いた実証実験の実施を挙げている。そこで本シミュレーションでは、筑波大学のコンソーシアムが LiDAR をインフラセンサとしての使用を検討していることを踏まえ、図 3.1.3 に示すようなつくば駅周辺のペDESTリアンデッキに広 FOV 型 PCSEL-LiDAR をインフラセンサとして街灯柱に設置し人流計測を想定したシミュレーションを行った。まず、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR を街灯柱などの高い位置への設置を想定し、図 3.1.4 のように設置する。広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の仕様では垂直 FOV が 30 度であるため、そのまま街灯柱の頂上付近に設置した場合に設置直下と遠方の LiDAR 点群を同時に得ることが困難である。一方で水平 FOV が 240 度であるため、ロール方向に 90 度回転させることで実質垂直方向の FOV が 240 度になり、設置直下と遠方の点群を得ることが可能になる。さらにより遠方の 25m 先の歩行者まで観測するために高さ 3.5m の高さにピッチ方向に 12 度下に回転させた状態で設置する。したがって、路面に対して水平方向に 30 度、垂直方向に 240 度の FOV となり、遠方や設置直下の歩行者を観測可能にした。



図 3.1.3 つくば駅周辺のペDESTリアンデッキへの広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の設置例

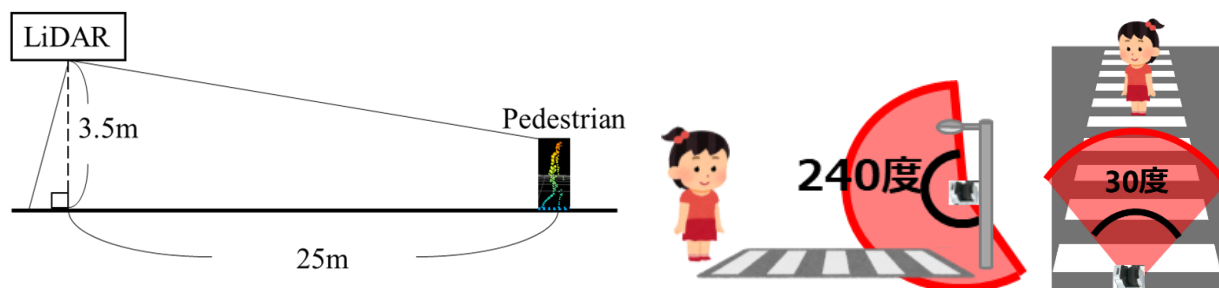


図 3.1.4 インフラセンサとして広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の設置角度例

認識モデルの開発のために大量のシミュレーションデータが必要なため、前項の条件に基づき、様々な種類の歩行者に限定した通行パターンをシミュレーションした。つくば駅周辺のペDESTリアンデッキを再現するために、CARLA で実装されている街環境を拡張した。センサデータの種を増やすために、まず、図 3.1.5 のように複数のシミュレーション地点を用意した。例えば、道脇に草木が生えているような地点や多少の傾斜が発生しているような地点を選ぶことで路面や静止障害物の種類を拡充した。また、図 3.1.6 のように通行する歩行者の密集度合いを複数用意した。具体的には、歩行者同士の距離が大きい低密集度の環境や、密接な距離感の高密集度の環境をシミュレーションし、歩行者人数の種を増やした。さらに、歩行速度に変化を持たせることで、より実環境に則した歩行者の動態を再現した。また、図 3.1.7 にシミュレーション結果として生成されたカメラ画像および LiDAR 点群データの例を示す。

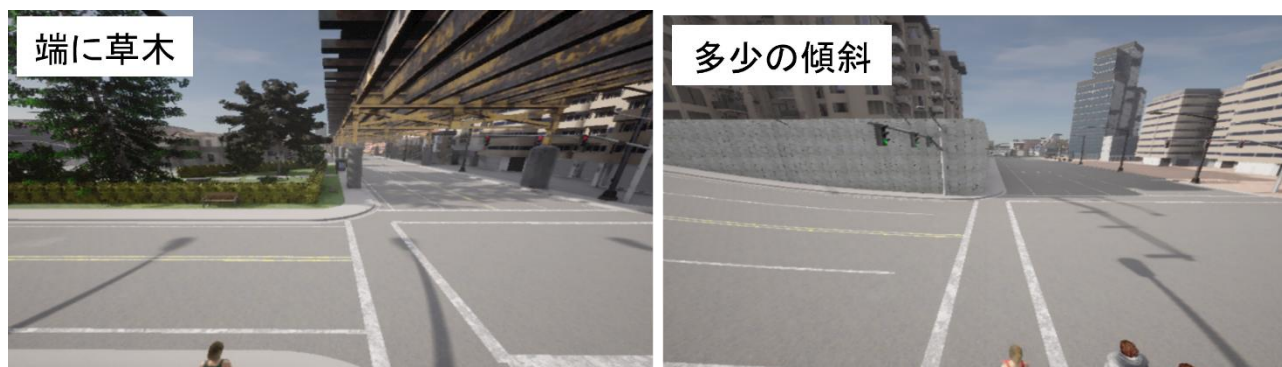


図 3.1.5 シミュレーション地点の違い例

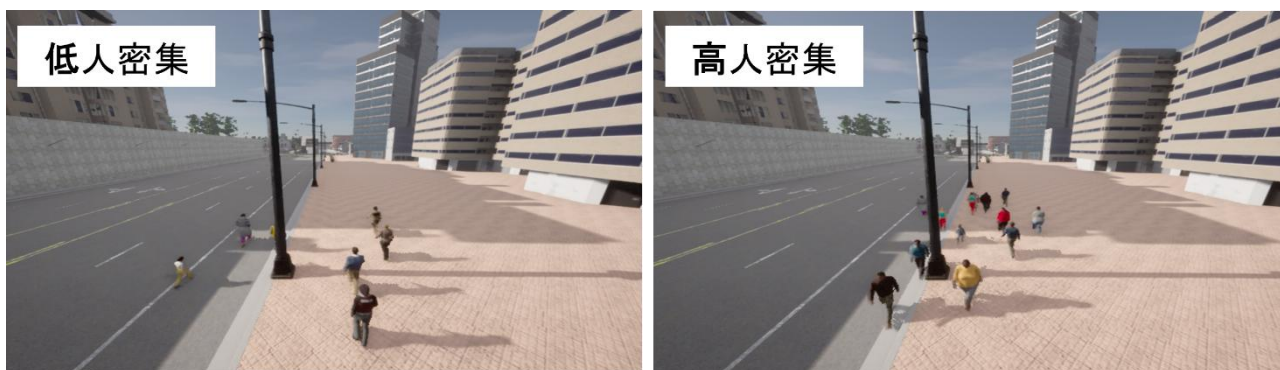


図 3.1.6 人の密集度合いの違い例

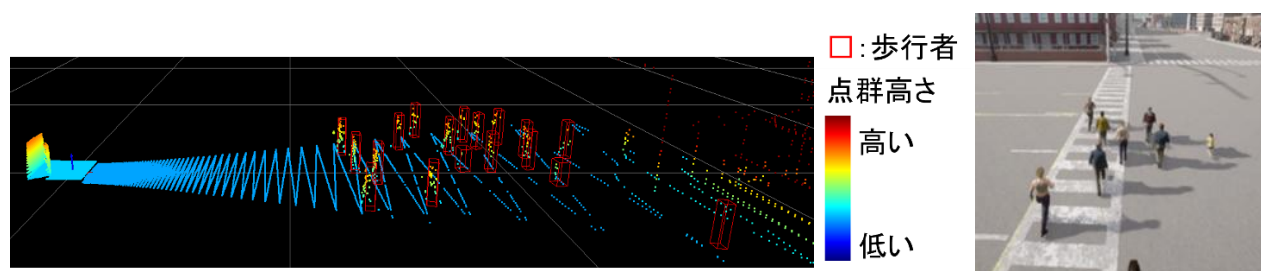
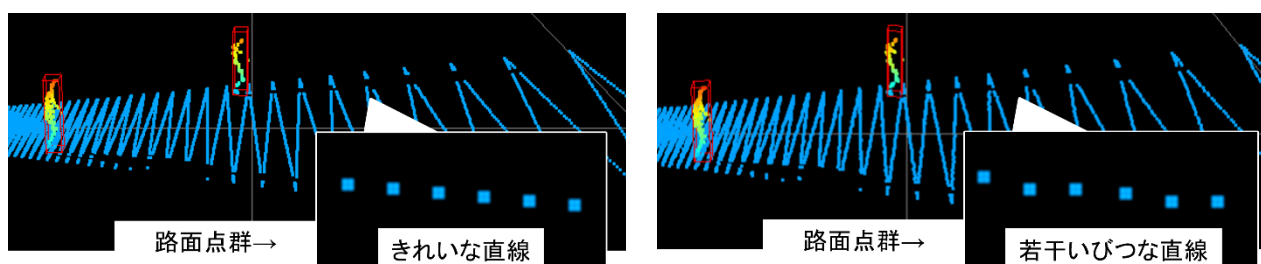


図 3.1.7 インフラセンサとしての広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のシミュレーションデータ例
右に参考としてカメラ画像データを示す

広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の実運用を考慮した場合、シミュレーションによって得られる LiDAR 点群はその走査パターンが理想的な走査定義に則っているため、実環境との乖離が懸念される。図 3.1.8 に、シミュレーション点群を示す。シミュレーション点群の走査パターンはきれいな直線を描き、実環境で得られる LiDAR 点群と乖離していることがわかる。そこで、シミュレーション点群に対し広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の仕様に基づく計測誤差を付与することで、より実環境に近い LiDAR 点群の生成を可能にした。



(a) ノイズ付与前の点群

(b) ノイズ付与後の点群

図 3.1.8 ノイズ付与前後のシミュレーション点群

(C) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の他 LiDAR との比較によるインフラセンサとしての優位性の評価

前述した広 FOV 型 PCSEL-LiDAR に加え、他社製の LiDAR を CARLA でモデル化し、前項と同様の設置条件（設置直下及び遠方の歩行者を観測するために LiDAR をロール方向に 90 度回転させて設置する）で歩

行者を観測するセンサシミュレーションを行いインフラセンサとしての優位性を評価した。

他社製の LiDAR として、ここではインフラ設置を想定して Velodyne 社(現 Ouster 社)製の VLP-16 を使用する。VLP-16 を CARLA でモデル化し、前項と同様の設置条件で歩行者を観測するシミュレーションを行った。前項と同様の設置条件のため、路面に対し垂直にレーザーが走査する。図 3.1.9 に示すように (a) の広 FOV 型 PCSEL-LiDAR はレーザーを上下に振りながら回転し点群を取得するのに対し、(b) の VLP-16 は層上のレーザーが回転することで点群を取得する。

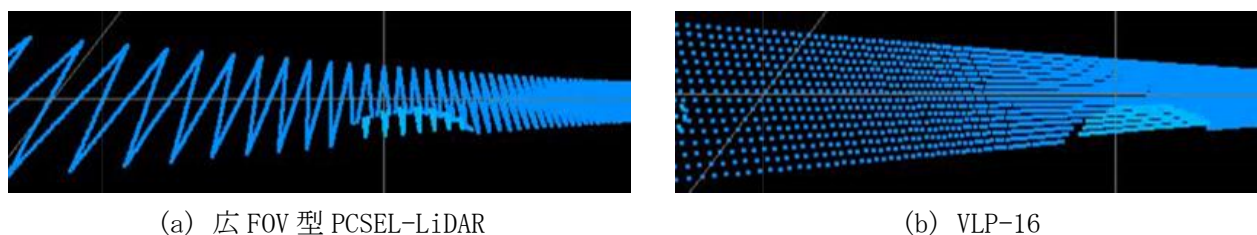
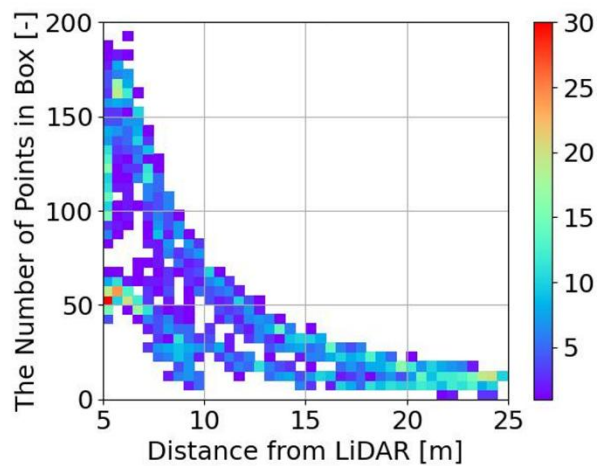
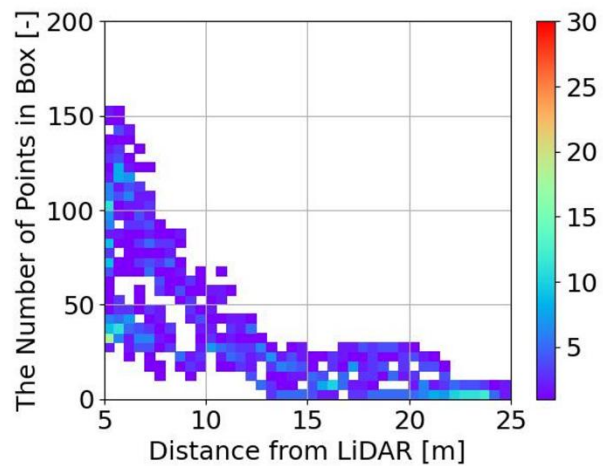


図 3.1.9 走査パターンの違いによる点群例

各 LiDAR で得られる取得可能な歩行者の点群を評価した。図 3.1.10 に LiDAR の設置位置から水平方向距離に対する歩行者点群数のヒートマップを示す。(a) の広 FOV 型 PCSEL-LiDAR は距離によらず、(b) の VLP-16 に比べ歩行者の点群を多く取得可能であることが示されている。特に、VLP-16 では 5m 付近の距離で取得可能最大点数が約 160 点である一方で、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR では約 200 点まで増加している。20 から 25m の遠方領域においても同様の傾向であり、取得可能点数が VLP-16 の方が低いことがわかる。図 3.1.11 に各 LiDAR における約 20m 先の歩行者点群例を示す。この図において、赤色の矩形は歩行者を示す領域である、(a) から、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR では 20m 遠方であっても歩行者に対して密度の高い点群を観測でき、歩行者の形状まで把握可能である。一方で、(b) に示す VLP-16 の例では、歩行者から観測される点群数が減少することがわかる。これは、VLP-16 が層状のレーザーを回転させる構造であるため、各層のレーザスキャン間に幅が生じ、その領域から点群を取得できないことに起因すると考えられる。インフラ向けに設置下と遠方の点群を得るために LiDAR をロール方向に 90 度回転させた状態で走査すると、VLP-16 の場合、図 3.1.12 のように遠距離になるほどレイヤ間の幅が増大し、歩行者ほどの幅まで増大した結果点群取得が困難になる恐れがある。結果として、想定しているインフラ向けのセンサとしては広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の方が適していると評価した。

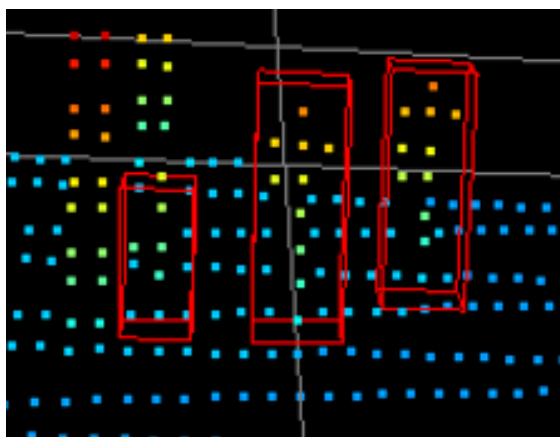


(a) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR

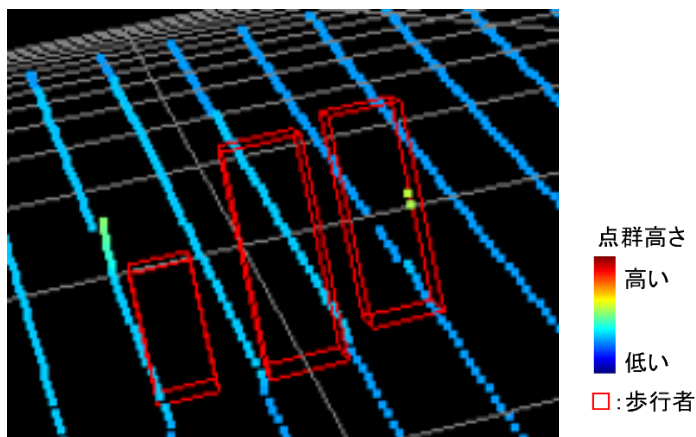


(b) VLP-16

図 3.1.10 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR・VLP-16 の設置位置からの距離に対する歩行者の点群数



(a) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR



(b) VLP-16

図 3.1.11 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR・VLP-16 の約 20m 先の歩行者点群

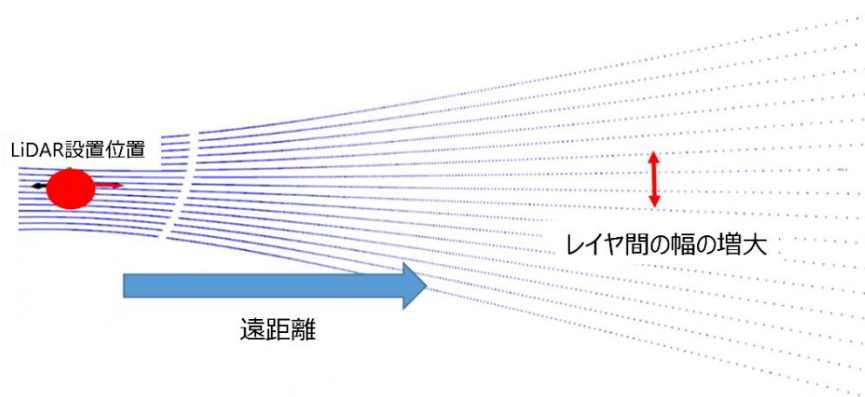


図 3.1.12 VLP-16 の垂直走査による上から見た点群パターン

(D) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR 向けに特化した認識モデルの開発

仮想環境を用いて生成した広 FOV 型 PCSEL-LiDAR のデータを用いて、認識モデルの開発を行った。

広 FOV 型 PCSEL-LiDAR をインフラセンサとして利用することも想定しているため、開発される認識モデルは軽量であることが望ましい。そこで、3 次元情報を 2 次元画像として扱うことで高速・軽量化が可能な PointPillars[3]をベースとした開発を行った。PointPillars の概要を図 3.1.13 に示す。PointPillars は、特定範囲のある一時刻に得られた点群の特徴をもとに、物体を 3 次元のボックスとして認識する深層学習モデルである。しかし、PointPillars のような LiDAR 点群を用いた認識モデルでは、詳細な形状把握が困難になる点群数が少ない物体に対する認識が課題となる。広 FOV 型 PCSEL-LiDAR は前項の図 3.1.10 の(a)で示されるように、10m 以降のほとんどの範囲で最大取得可能点数が 50 点を下回り、歩行者の点群を十分に取得できない。このため、広 FOV 型 PCSEL-LiDAR 向けの認識として PointPillars による認識は不十分であると考えられる。そこで、時系列的な点群データを活用した PointPillars ベースの認識モデルの開発を行った。図 3.1.14(a)に、ある一時刻に得られた約 20m 先で一列に並ぶ歩行者の点群を示す。同図(b)に、時系列的に連続した点群を蓄積したものを示す。時系列的に点群の蓄積を行うことで、歩行者の軌跡を捉えることができ、より明確な歩行者の特徴が得られる。この点に着目し、時系列的に連続した点群を PointPillars の処理過程において特徴量レベルで統合可能に拡張し、点群の少ない歩行者の認識を可能にした。

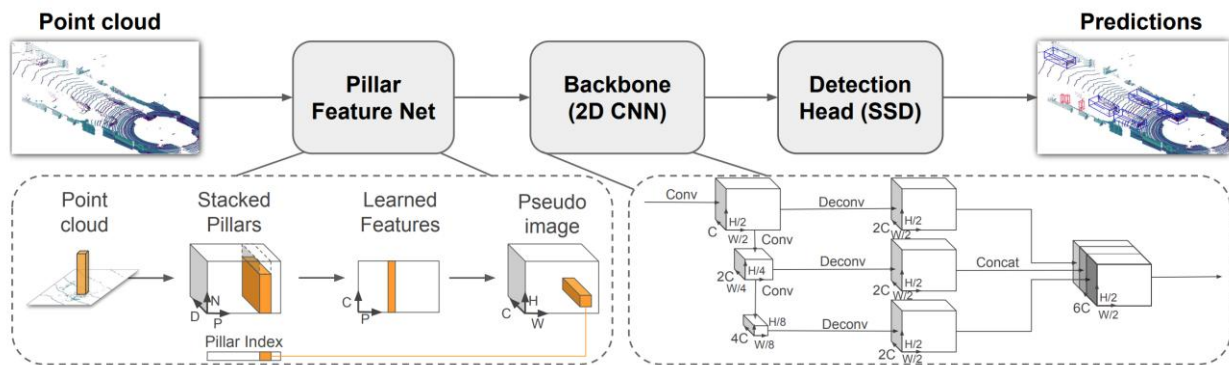


図 3.1.13 PointPillars による LiDAR 点群に対する物体認識[3]

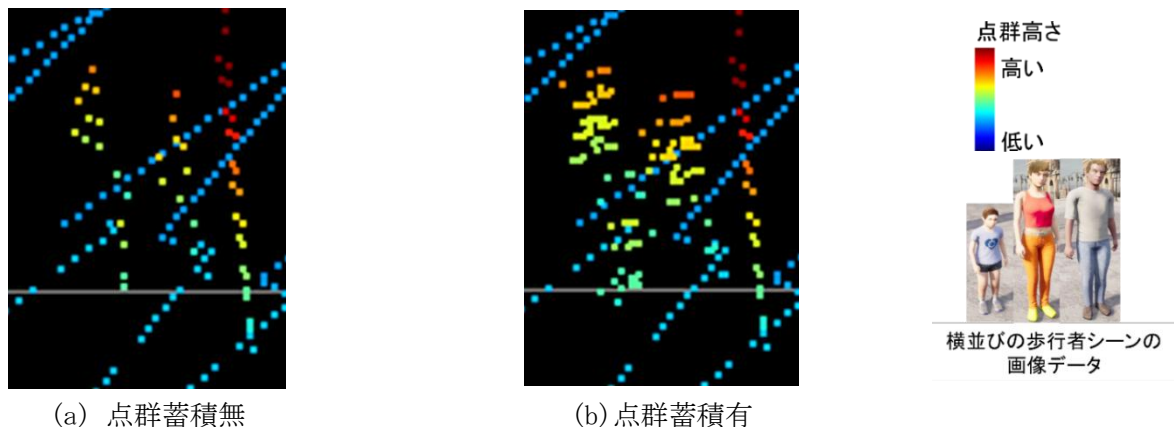


図 3.1.14 歩行者横並びシーンにおける広 FOV 型 PCSEL-LiDAR の時系列の点群蓄積の有無による違い

時系列的な点群を活用した認識モデルによる、LiDAR の設置位置からの水平距離ごとの各時刻で検出された物体の Recall を図 3.1.15 に示す。評価データには、横並びの歩行者が LiDAR に接近してくるシーンを使用した。点群の蓄積無に比べ蓄積を行うことですべての距離で Recall が増加し、蓄積による認識への効果を確認した。0-20m の範囲内では 90%以上の認識が可能であり、20-25m では約 50%と減少した。20m の範囲内では高水準での検出が可能であり、20m 以降の遠距離では認識が困難な場合が多いことを確認した。一方で、インフラセンサとして LiDAR は固定されているため路面や静止障害物の点群の差分により、ある一定の点群数を取得可能な歩行者は歩行者として識別できなくても移動物体の点群であると判断できる。そこで 5 点以上の歩行者を移動物体として判断した場合の検出率は図 3.1.16 となる。20m までのほとんどの区間で約 100%の検出が可能であるが、20-25m では検出率が 90%に落ちる。20-25m での歩行者としての識別が困難な場合があると考えられる。この認識モデルによるインフラセンサの配置可能な方法などや、さらに遠距離まで認識可能なモデル開発を行うことでインフラセンサの配置可能箇所の汎化性を高めていくことなども今後検討していく。

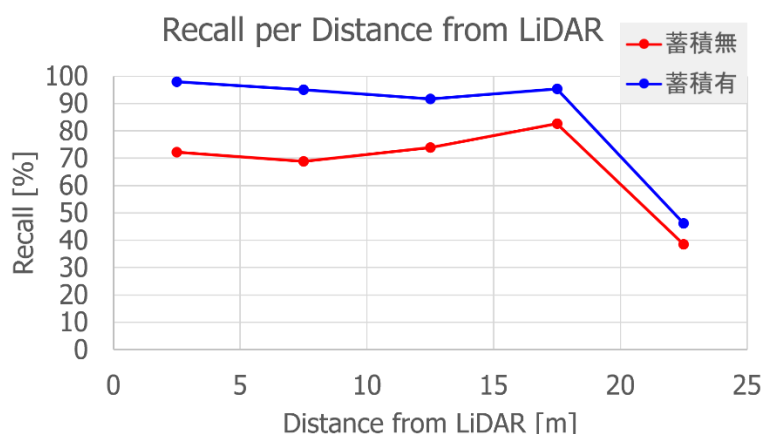


図 3.1.15 LiDAR の設置位置からの水平距離ごとの Recall

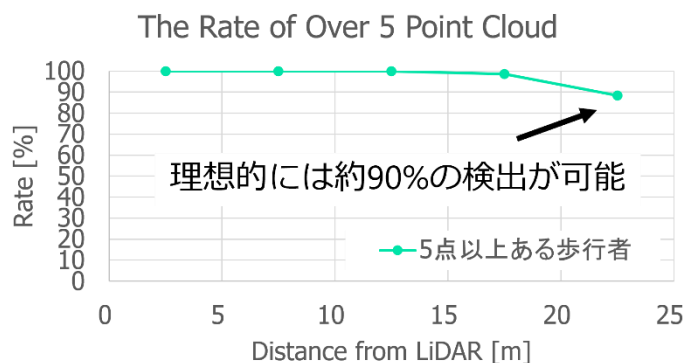


図 3.1.16 LiDAR の設置位置からの水平距離ごとの 5 点以上ある歩行者の割合

(E) インフラセンサ向けの認識モデルの小型化の検討

インフラセンサとして認識モデルを小型装置に搭載するために、認識モデルの軽量化・高速化を先行して検討した。

小型装置として図 3.1.17 に示すような Anvil (組み込み用計算機)、 Jetson Orin (小型開発キット)、 Raspberry Pi (AI チップ搭載の IoT 用デバイス) が想定される。Anvil (組み込み用計算機) の水平面積はおよそ一般的な名刺約 5 枚分の大きさであり、一方で Raspberry Pi (AI チップ搭載の IoT 用デバイス) は名刺約 1 枚分でその大きさが超小型になりインフラセンサのための小型装置としてはこれらの大きさの装置へ認識モデルの搭載が必要となる。これらの小型装置へ搭載のために、認識モデルの TensorRT 化による小型化・高速化の検討を進めている。TensorRT とは NVIDIA が開発した深層学習モデルの軽量化及び、GPU 利用の最適化による高速化を可能にするソフトウェア開発キットのことである。TensorRT 化により高速化が可能であるのは NVIDIA の GPU チップが搭載されている Anvil、 Jetson Orin である。さらなる小型装置化を行うためには Raspberry Pi (AI チップ搭載) への認識モデル搭載が必要であるが、TensorRT 化とは別に Raspberry Pi に搭載の AI チップに最適化された軽量化・高速化が必要になっている。順次各装置に応じた認識モデルの軽量化・高速化を行い、小型化を進めていく。

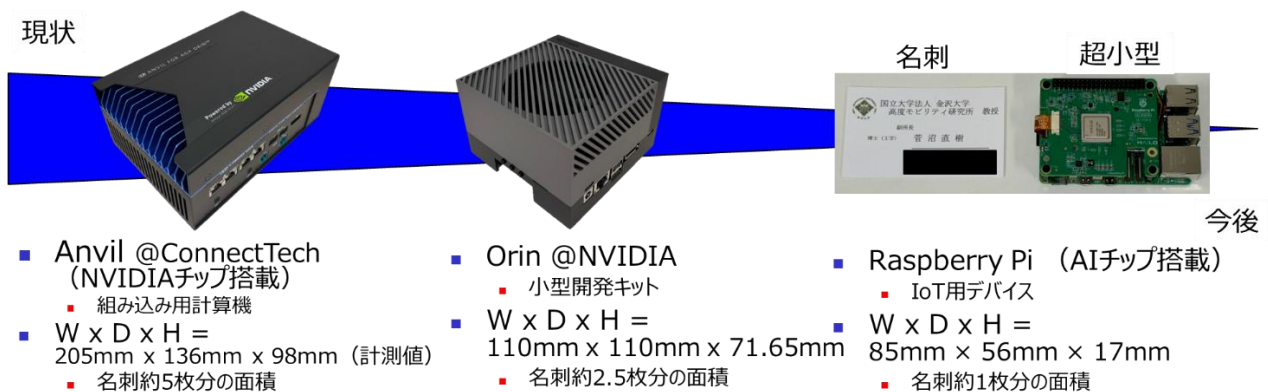


図 3.1.17 インフラセンサとして認識モデルを搭載する小型装置例

(2) 広 FOV 型 PCSEL-LiDAR を想定した遠距離認識技術の開発

2027 年度の最終達成目標として 200m 以内の自動車、70m 以内の歩行者をリアルタイムに処理可能な認識アルゴリズムの開発を挙げ、また 2025 年度の間目標として 135m 以内の自動車、50m 以内の歩行者を処理可能な認識アルゴリズムの構築を掲げている。これらの目標達成のために先行して認識モデルの開発の検討を進めた。

(A) SIP 第 2 期で開発した自動運転システムに搭載した LiDAR を用いた遠距離認識技術の開発

広 FOV 型 PCSEL-LiDAR による実証実験に向け先駆けて遠距離認識技術の開発を行うために、SIP 第 2 期で開発した自動運転システムに搭載された Velodyne 社(現 Ouster 社)製の VLS-128AP を使った遠距離認識技術の開発の検討を行った。認識モデルの開発には図 3.1.13 の深層学習による 3 次元物体認識である PointPillars をベースとした検討を進めた。

開発した認識モデルに時系列処理を加えずに単一フレームのみの評価を行った。図 3.1.18 に自車からの距離に対する Recall を示す。評価対象には隠れ度合いが低い自動車と歩行者を挙げ、それぞれ 135m 以内、50m 以内の Recall に着目した。2025 年度中間目標の 135m 以内、50m 以内の自動車・歩行者は 60% 以上の Recall を達成している。遠距離での LiDAR 点群の得にくさや歩行者などの小さい物体に対して 80% 以上の Recall を得ることは、その LiDAR 点群の潜在能力からして現状厳しい。今後さらなる改善を試みて時系列処理による認識の高精度化の検討を進める。

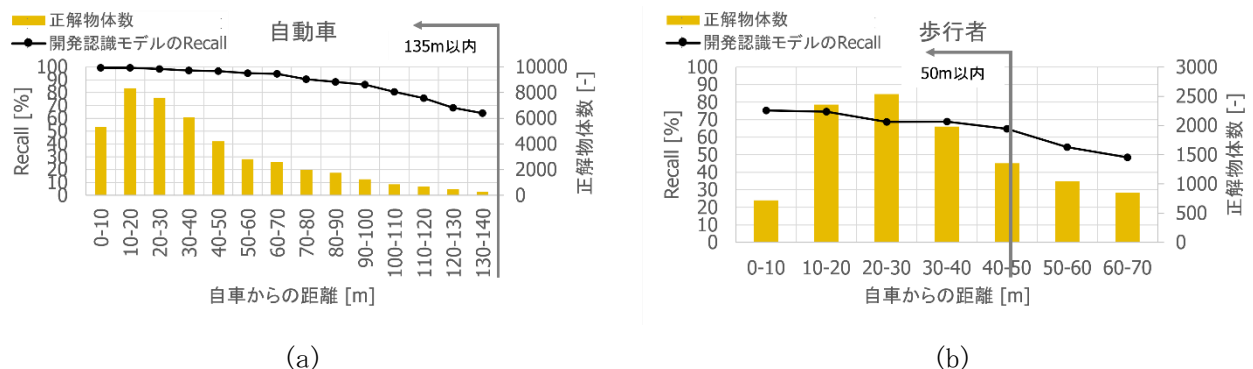


図 3.1.18 自車からの距離に対する自動車・歩行者の Recall

【参考文献】

- [1] D. Alexey, et al, CARLA: An open urban driving simulator. Conference on robot learning, 2017.
- [2] HOKUYO, YVT-35LX-F0/FK, <https://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php?serial=165>, 2025 年 2 月 18 日アクセス.
- [3] A.H.Lang, et al, PointPillars: Fast Encoder for Object Detection from Point Clouds, International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.12689-12697, 2019.

3.2 LiDAR を用いた実証実験の実施

研究開発項目①で開発する広FOV型PCSEL-LiDARの国際競争力獲得のために、実世界における実証実験を行い、そこで得られた知見や課題のフィードバックを行った。それに向けて、2024年度までに（１）既存のLiDAR及びPCSEL-LiDARの天候別の性能検証と（２）既存のLiDARの反射率別の性能検証の２項目を実施した。

（１）既存の LiDAR 及び PCSEL-LiDAR の天候別の性能検証

PCSEL-LiDAR の多様な天候環境下での検証のために、日本自動車研究所（JARI）の特異環境試験場で物体検出の実験を実施した。特異環境試験場では、日光に伴う逆光環境や降雨、霧の環境を再現できるため、実運用で考えられる様々な環境での精度検証が可能である。検証では、比較のために Velodyne 社製の LiDAR である VLS-128AP も使用する。当該 LiDAR の主な仕様を表 3.2.1 に示す。VLS-128AP を用いた検証では、検出対象に対して物体認識を適用し、様々な環境別の認識距離の変化を検証する。適用する物体認識アルゴリズムは、先述した PointPillars である。また、検出対象の物体としては図 3.2.1 に示す白色のプリウスと、黒色のコートを着用した歩行者である。PCSEL-LiDAR の検証では、日光の影響を受けるかの確認を行った。

表 3.2.1 VLS-128AP のセンサ仕様

項目	センサ仕様
検知距離	300m
解像度	水平 0.2° @10Hz、垂直約 0.11～5°
視野角	水平 360°、垂直 40°



(a) 白色プリウス



(b) 歩行者（黒コート着用）

図 3.2.1 実験の検出対象物体

表 3.2.2 に、本検証で実施した特異環境試験場における天候の詳細を示す。本検証では、通常環境に加えて逆光や降雨、霧の環境下での LiDAR による検出精度を比較した。また、それぞれの環境の写真を図 3.2.2 に示す。

表. 3.2.2 特異環境試験場における天候設定の詳細

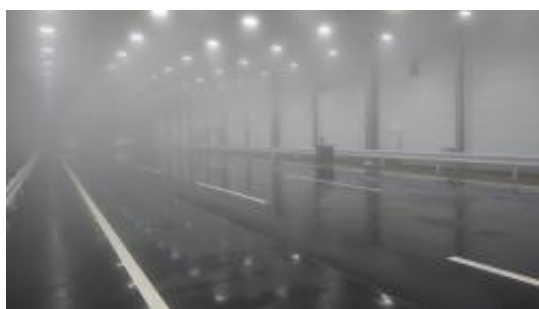
環境	仕様
通常環境	蛍光灯点灯の屋内環境
逆光	晴天時の 15、17 時に相当する太陽光を再現 照度 35、000 ルクス（15 時）、20、000 ルクス（17 時） 色温度 6、000K（昼白色）、2、000K（暖色）
降雨	降雨量 30、80mm/h
霧	視程距離 50m



(a) 逆光



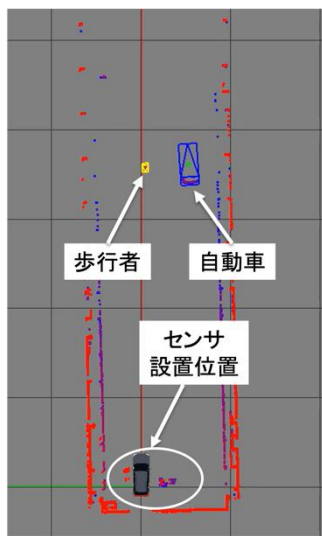
(b) 降雨



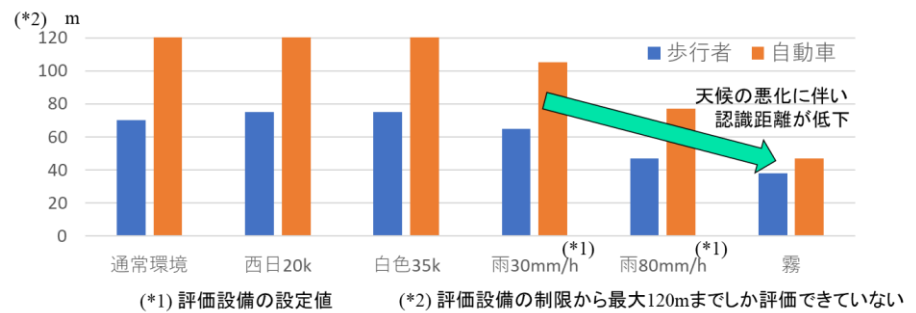
(c) 霧

図 3.2.2 特異環境試験場における各天候の様子

検出結果を図 3.2.3 に示す。図 3.2.3 の(a)は、PointPillars による検出対象物体の検出結果である。検証では、図 3.2.3 の(a)に示すように、検出対象の歩行者と自動車を横並びに並走させ、徐々にセンサから遠ざかるように前方に移動させる。PointPillars では、検出された物体は図 3.2.3 (a)のように矩形で表現される。この矩形の出力が途切れるまでの距離を認識できる限界の距離として、それぞれの環境で検証した。図 3.2.3 の(b)に、環境別の認識限界距離を示す。この図から、まず、通常環境及び逆光環境（西日 20k、白色 35k）では自動車に対しては 120m 以上、歩行者に対しては 70m 程度まで認識が可能であったことがわかる。また、これらの間で認識距離に大きな差は無く、逆光の有無の認識距離への影響は小さいこともわかる。一方で、降雨や霧の環境では、認識距離が低下することもわかった。また、PCSEL-LiDAR の検証では、結果として西日の影響は受けるものの従来の LiDAR と比較すると影響は小さく、バンドパスフィルターの狭帯域化によって西日の影響は低減可能である。



(a) 対象物体の検出例



(b) 各環境に対する認識距離

図 3.2.3 PointPillars による各天候設定における検出結果

(2) 既存の LiDAR の反射率別の性能検証

従来の LiDAR はレーザーを周囲に照射しつつ環境認識を行うため、反射率の低い物体に対する検出精度は低下しやすい。そこで、新規 LiDAR 開発に向けた基礎データ収集のため、既存 LiDAR で苦手とする反射率の低い物体に対する限界検知距離を検証した。検証対象とする LiDAR は Velodyne 社（現 Ouster 社）の VLS-128AP である。



図 3.2.4 低反射物体検出における試験場の状況

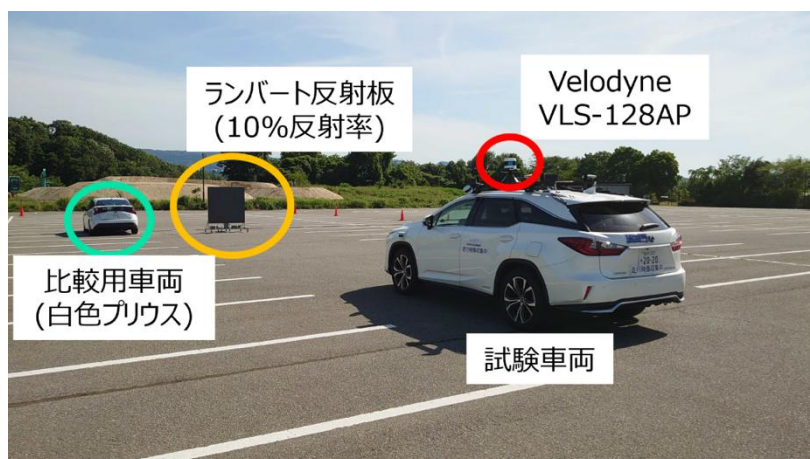


図 3.2.5 試験車両と検出対象物体

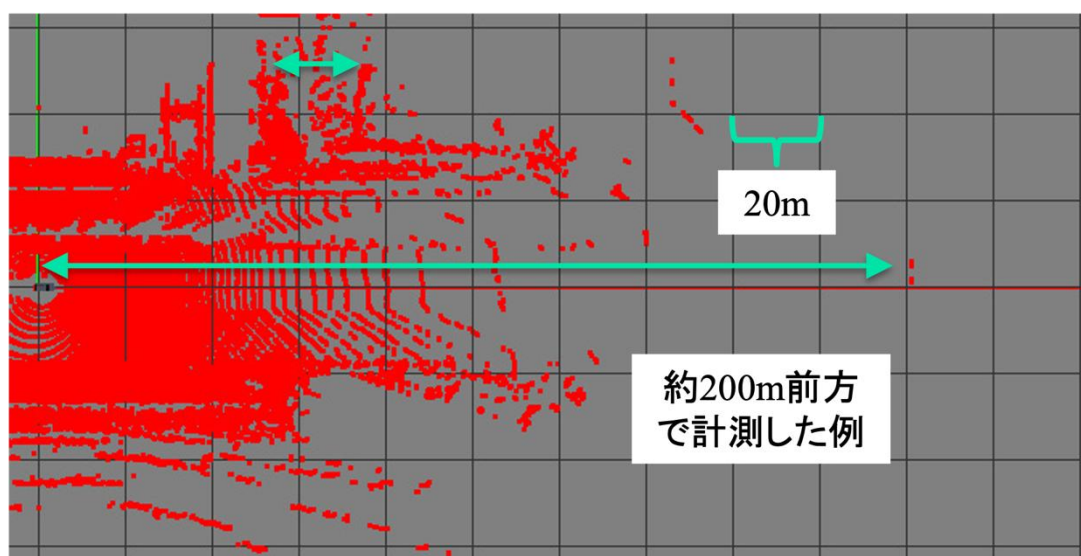


図 3.2.6 LiDAR による物体検出例

精度検証は、金沢大学構内における 250m 程度の直線区間で実施した。試験場の状況を図 3.2.4 に示す。試験では、検出対象物体を試験車両から 200m 程度離れた位置に設置し、LiDAR による観測を行う。その後、試験車両を 250m 離れた位置まで後退させ、検出可能な距離を目視で確認する。検証で使用する LiDAR は表 3.2.1 に示すように、検知距離が 300m であるため、本検証では物体から点群を十分に観測可能である。また、検証で使用する車両と検出対象の物体を図 3.2.5 に示す。検出対象の物体として、反射率 10% 程度のランバート反射板とトヨタ社製プリウスを使用する。プリウスは白色のものを使用しており、レーザーからの反射率の高いものである。検証では、これら 2 種の物体に対して LiDAR 搭載の試験車両を用いて検出を行い、反射率の点群検出への影響を評価する。また、図 3.2.6 に検出対象物体を観測した例を示す。図 3.2.6 において、LiDAR を搭載した試験車両は図左端中段に位置しており、右側を向いている状態である。図中の赤丸は LiDAR から観測された点群を示す。また、図 3.2.6 におけるグリッドの解像度は 20m 四方であり、この図の例では、車両から 10 グリッド右側から点群が観測されていることから、200m 前方に設置された障害物が LiDAR から検出できていることが分かる。

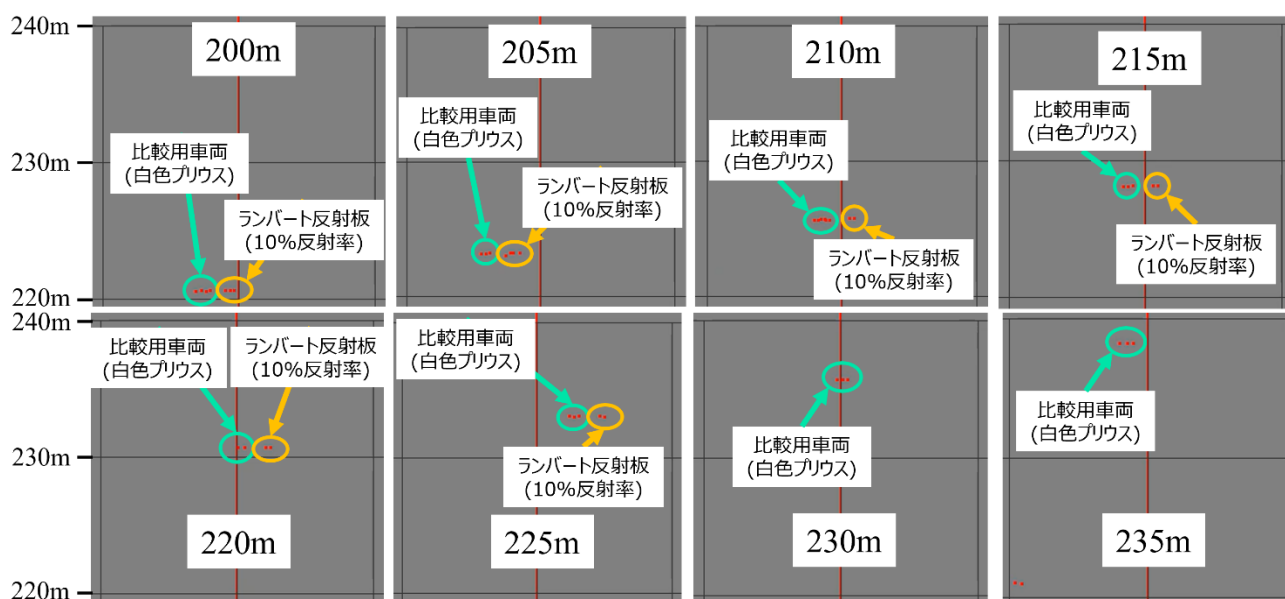


図 3.2.7 白色プリウスとランバート反射板を用いた精度検証結果

検出結果を図 3.2.7 に示す。この図は、物体との距離が 200m から 235m までの場合の検出結果を 5m 間隔で示したものであり、物体について白色のプリウスは緑枠、ランバート板は黄色枠で示す。まず、白色のプリウスに注目すると、遠方になるにつれて検出された点群数が少なくなっているものの、試験場における 250m までの全ての範囲で点群が観測された。ランバート板であっても同様の傾向が見られたものの、点群が観測されたのは 225m 程度までであった。

4. 社会実装に向けた取組状況

京都大学を中心とした「3次元PCSEL-LiDARシステムの開発」においては、PCSELを搭載したLiDARに関して、研究成果の社会的な発信を行うとともに、成果の社会実装（事業化・実用化）に向けた体制づくりを推進している。本研究開発における開発目標は、先述したように、レンズ系やその調整なしで活用でき、かつ、電氣的なビーム走査までも可能とするフォトリソニック結晶レーザー（PCSEL）技術をもとに、国産の、小型・低コストLiDARを開発することである。具体的な開発内容としては、まず、STEP 1として、主にインフラセンサ、あるいは車両の近傍の死角部のセンシングに向けた、広FOV型の3次元PCSEL-LiDARの開発を目指している。さらに、STEP 1の開発を通じて、パーソナルモビリティ応用をも意識した、薄型のカード型のPCSEL-LiDARの開発も追加項目としている。それに加え、STEP2として、将来の車載LiDARとしての普及に向けたPOCとして、非機械式・オールチップ型LiDARの構築を目指している。

研究成果の社会への発信の例として、図4.1に、STEP 1の追加項目であるカード型PCSEL-LiDARの応用に関して、SIP「包摂的コミュニティプラットフォームの構築」と連携して実証実験を行った様子を示す（2025年2月19日：多摩ニュータウン）。同実証実験においては、カード型PCSEL-LiDARを電動車いすに設置し、実フィールドにおいて測距を行いながら実験を実施した。当日、参加された方々からは、車いす自体が小型であるために、センサを実装するスペースがほとんどない中で、カード型の薄型・小型のLiDARは大変助かる、とのコメントがあった。さらに、太陽光（特に夕日）や、陰等による明暗の影響を受けにくいLiDARが非常に重要であるとの意見も寄せられた。その他、本SIP課題内の他チームからも、極めて小型であるので、是非使ってみたいとのコメントを頂いた。このように、小型モビリティ向けのセンサとしてPCSEL-LiDARの応用が広がっていくことで、モビリティ・ディバイドの無い、安心安全な社会の構築への貢献が広がっていくものと期待される。



図4.1：多摩ニュータウンでの実証実験（2025/2/19）の様子

次に、成果の社会実装の取り組みについて説明する。着実な社会実装を進めていくための体制として、これまでに整備・強化を進めてきた京都大学PCSEL拠点（PCSEL-COE）に加えて、新たに、中間組織体（橋渡し法人）『一般社団法人 京都大学フォトリソニック結晶レーザー研究所』を設立した（2024年12月2日）。本法人は、京都大学成長戦略本部の主導のもと、大学での研究開発の成果を企業等への橋渡し機能を強化する目的で設立されたものであり、ドイツのフラウンホーファーやベルギーのIMEC等を参考にしつ

つ、独自の組織として、PCSELの応用・社会実装に関する研究開発、ネットワーキング・普及活動、素子提供、装置類の貸出、技術支援・指導、人材育成などの役割を担うものである（図4.2）。（本法人について、プレス発表を行い、多くの方に関心を持っていただいている状況にある。）今後、拠点（PCSEL-COE）と中間組織体が連携しつつ、図4.3のように、ナノ構造形成・エピ成長、PCSEL製造、PCSEL応用等に関わる企業が、様々に連携可能なエコシステムをさらに発展させていくことで、多くの企業から、PCSEL-LiDAR技術の社会実装を行っていくことが可能になると期待される。

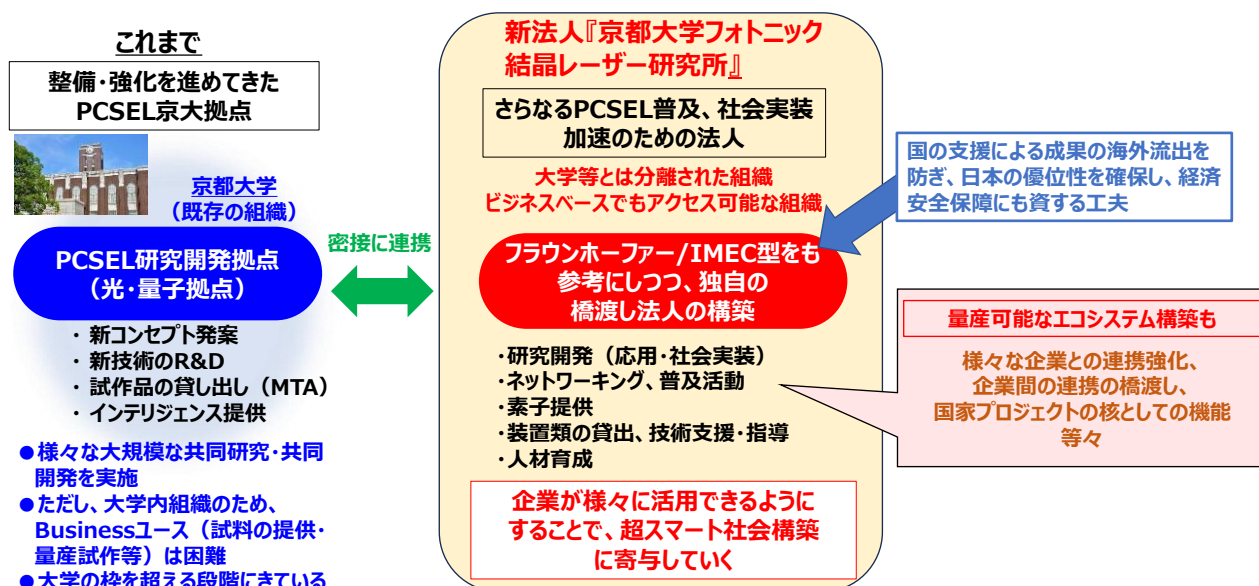


図4.2：2024年12月2日に設立した大学と企業間の橋渡しを行う『一般社団法人 京都大学フットニック結晶レーザー研究所』

量産対応可能なナノ構造形成企業、半導体結晶成長企業、デバイス作製企業、ユーザー企業、さらには海外機関等が様々に連携可能なエコシステムを構築しており、多くの企業からの社会実装が期待される体制がすでに出来ている

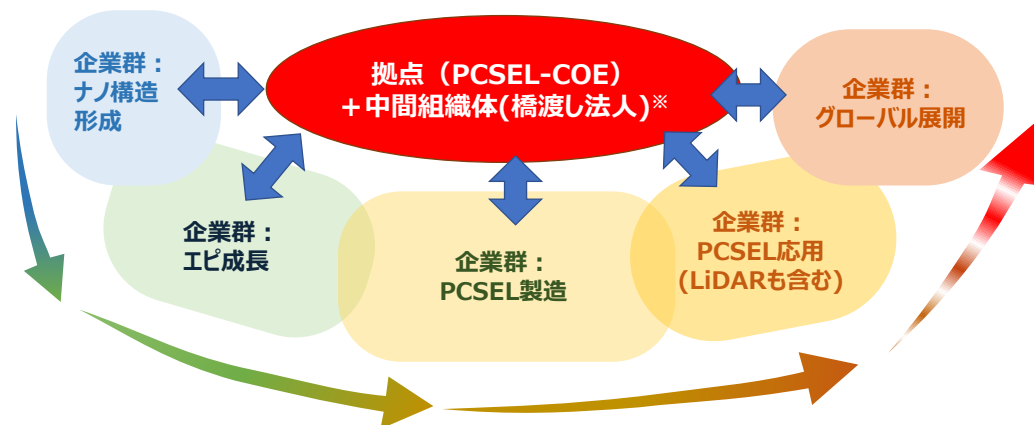


図4.3：PCSEL拠点と中間組織体を中心に多くの企業が連携するエコシステム

「認識技術の開発と実証実験の実施」における研究成果の事業化戦略としては、長年の研究成果やSIP第2期の成果をベースに、金沢大学の認定ベンチャーである株式会社ムービーズを2024年5月に設立し、自動運転技術の社会実装に向けた取り組みを既に実施している。今後、SIP第3期で開発されるLiD

ARを用いた高度な認識技術の開発についても、株式会社ムービーズと連携しながら適切な社会実装を進める方向で検討を行っている。このような取り組みにより、当初予定していた計画以上に社会実装に向けた取り組みが加速している状況となっている。

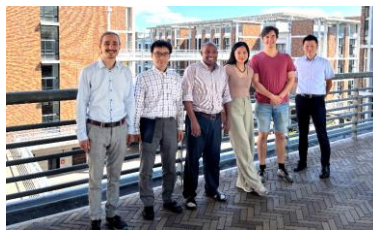
5. 関連成果の対外的・国際的発信と連携

ここでは、本事業の PCSEL-LiDAR 開発に関わる成果の対外的・国際的発信と連携について述べる。2.3 節の項目 (A) で述べたように、STEP2 の PCSEL-LiDAR 開発に必要な 2 次元 SPAD アレイをフラウンホーファーIMS 研究所との連携を強化して、入手した。フラウンホーファーIMS と京都大学では、2024 年度に 15 回以上にわたって、会議等を行い、連携を続けている状況である。オンライン会議の様子を図 5.1(a) に示しており、フラウンホーファーの京都大学の訪問の様子を図 5.1(b) に示している。また、PCSEL の量産工程に必要なナノインプリント技術に関して、オランダの企業との連携をも進めており、オランダのナノインプリント企業の CEO 等が京都大学を訪問した様子を図 5.1(c) に示している。

(a) フラウンホーファー(独)との会議の様子



(b) フラウンホーファー(独)の京都大学の訪問



(c) ナノインプリント企業(蘭)の京都大学の訪問

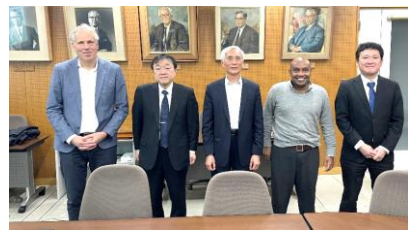


図5.1(a) : フラウンホーファー(独)との会議の様子。(b) : フラウンホーファー(独)の京都大学の訪問の様子。(c) : ナノインプリント企業(蘭)の京都大学の訪問の様子

さらに、オランダのエコシステムであるフォトンデルタと京都大学との MOU のもとで、教育・研究に関するイベント等を通じた交流をも実施した。図 5.2(a) に、2024 年 9 月に実施したオランダからの学生を交えた国際セミナー開催の様子を示している。また、図 5.2(b) には、2024 年 9 月～10 月に実施した日蘭滞在型グループワークイベントの様子を示している。

(a)

24年9月25-26日:オランダからの学生を交えた国際セミナー開催の様子



(b)

24年9月27日-10月11日:日蘭で一週間ずつ交代で滞在しながら開催したグループワークイベントの初日の京大での様子



図5.2(a) : オランダからの学生を交えた国際セミナー開催の様子。(b) : 日蘭で一週間ずつ交代で滞在しながら開催したグループワークイベントの初日の京大での様子。

上記に加え、PCSEL-LiDAR の鍵となる PCSEL に関するワークショップが 2024 年 11 月にイギリスで企

画・開催され、京都大学の代表者である野田進教授が中心になって基調講演を行った。その様子は図 5.3 に示している。ワークショップには、多くの国内外の大手半導体レーザーメーカーやユーザー企業等が参加し、PCSEL に対する関心は、世界中に高まっている状況であると言える。



図5.3 : PCSELの国際ワークショップの様子。中心に座っているのは、京都大学の研究代表者の野田進教授。

その他に、情報発信のために、国内外において、展示会等も積極的に行っている。図 5.4(a)には、フォトンクス分野で広く知られている SPIE Photonics West における展示の様子を示しており、図 5.4(b)には、OPIE での展示の様子を示している。



図5.4(a) : SPIE Photonics WEST 2024の展示会の様子。**(b)** : OPIE2024の展示会の様子。

以下に、2024 年度の成果に関わる (A) 国際学会におけるプレナリー、キーノート、招待講演、(B) 学術論文、(C) 国内のセミナー、チュートリアル講演、(D) 国内一般講演のリストを記述する。

(A) 国際学会におけるプレナリー、キーノート、招待講演

1. S. Noda, “[Invited] A new light source: Photonic-crystal surface-emitting laser (PCSEL) – On the numerous possibilities for realizing a smart society –,” The Optics and Photonics International Congress (OPIC) 2024/ BFSS, 2024 年 4 月 24 日.
2. T. Inoue, S. Noda, et al., “[Invited] Short-pulse high-power photonic-crystal surface-

emitting lasers,” The Optics and Photonics International Congress (OPIC) 2024/ ALPS, 2024 年 4 月 23 日.

3. M. Yoshida, S. Noda, et al., “[Invited] Kilowatt-class high-peak-power pulsed operation of large-area photonic-crystal surface-emitting lasers,” The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2024, 2024 年 5 月 7 日.
4. T. Inoue, S. Noda, et al., “[Invited] Temporal control of photonic-crystal surface-emitting lasers,” Compound Semiconductor Week (CSW) 2024, 2024 年 6 月 5 日.
5. S. Noda, “[Invited] Photonic-crystal surface-emitting lasers (PCSELs) for paradigm shift towards smart society (Society 5.0),” IEICE Distinguished Lecturer’s Webinar, 2024 年 6 月 25 日.
6. S. Noda, “[Tutorial] Photonic-crystal surface-emitting lasers – Tutorial,” The 29th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2024), 2024 年 7 月 3 日.
7. S. Noda, “[Invited] Ultra-large area coherent lasing action through Hermitian/non-Hermitian control in photonic crystals,” The 14th Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2024), 2024 年 7 月 17 日.
8. S. Noda, “[Invited] High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser (PCSEL),” The 16th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2024), 2024 年 8 月 9 日.
9. K. Aoki, S. Noda, et al., “[Invited] High-power CW/pulsed operations of 1.55- μm -wavelength photonic-crystal surface-emitting lasers,” IEEE 29th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2024), 2024 年 9 月 29 日–10 月 2 日.
10. S. Noda, “[Plenary] High-power, high-beam-quality, high-functionality photonic-crystal surface-emitting lasers—For paradigm shift towards realizing smart society,” Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL) 2024, 2024 年 10 月 20–24 日.
11. S. Noda, “[Keynote] Recent Progress in High-Brightness and High-Functionality Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers,” International Workshop on PCSELs 2024, 2024 年 11 月 7–8 日.
12. T. Inoue, S. Noda, “[Invited] Theoretical Analysis of Large-area Photonic-crystal Surface-emitting Lasers,” International Workshop on PCSELs 2024, 2024 年 11 月 7–8 日.
13. S. Noda, “[Tutorial] Photonic-crystal surface-emitting lasers,” The IEEE Photonics Conference (IPC) 2024, 2024 年 11 月 10–14 日.

(B) 学術論文

14. S. Noda, M. Yoshida, T. Inoue, R. Sakata, M. De Zoysa, and K. Ishizaki, “Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers”, Nature Review Electrical Engineering, vol. 1, pp. 802–814 (2024).
15. R. Sakata, K. Ishizaki, Y. Yagi, T. Inoue, R. Morita, S. Tanaka, M. De Zoysa, and S. Noda, “High-peak-power short-pulse operation of modulated PCSELs emitting structured light by

introducing saturable absorber,” Optics Express, vol. 32, pp. 45258-45265 (2024).

16. K. Albert, M. Ligges, A. Henschke, J. Ruskowski, M. De Zoysa, S. Noda and A. Grabmaier, “Performance comparison of multipixel biaxial scanning direct time-of-flight LiDAR-Systems with and without imaging optics,” to be submitted.
17. M. De Zoysa, T. Inoue, W. Kunishi, E. Miyai, K. Ishizaki, M. Yoshida and S. Noda, “Photonic crystal lasers emitting side-lobe suppressed Gaussian beams,” Under preparation.
18. M. De Zoysa, K. Ishizaki, R. Sakata, T. Inoue, Y. Yagi, M. Yoshida, K. Albert, M. Ligges, A. Henschke, J. Ruskowski and S. Noda, “Line beam scanning type photonic crystal laser and single photon avalanche diode based 3D LiDAR,” Under preparation.

(C) 国内のセミナー、チュートリアル講演

19. 野田進, “[チュートリアル] フォトニック結晶レーザー：その基礎から最新動向まで”, 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE), 2024 年 5 月 28 日.
20. 野田進, “[招待] 新たな光源技術：フォトニック結晶レーザー (PCSEL) -スマートモビリティ・スマート製造の発展に向けて-”, テクトロニクス・イノベーション・フォーラム 2024, 2024 年 7 月 11 日.
21. 野田進, “[招待] フォトニック結晶レーザーの進展”, 日本学会会議国際光デー記念シンポジウム～量子技術とレーザー科学の最前線～, 2024 年 7 月 25 日.
22. メーナカ デ ゾイサ, 野田進, “[招待] フォトニック結晶レーザーと LiDAR センシングへの応用”, 光・レーザー関西 2024 併設オープンセミナー, 2024 年 7 月 17 日.

(D) 国内一般講演

23. De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 坂田 諒一, 井上 卓也, 吉田 昌宏, 峯山 佳之, Ligges Manuel, Henschke Andre, 野田 進, “変調フォトニック結晶レーザーと単一光子アバランシェダイオードアレイを用いた 3 次元 ToF-LiDAR”, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2 会場+オンライン, 17p-A34-11, 2024 年 9 月 17 日.
24. 坂田 諒一, 石崎 賢司, 井上 卓也, 八木 雄大, 森田 遼平, 田中 聡記, De Zoysa Menaka, 野田 進, “短パルス・多点同時出射可能な 1mm Φ 変調フォトニック結晶レーザーの設計”, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2 会場+オンライン, 17p-A34-13, 2024 年 9 月 17 日.
25. 石崎 賢司, 坂田 諒一, 八木 雄大, 井上 卓也, 田中 聡記, De Zoysa Menaka, 初田 蘭子, 野田 進, “短パルス・多点同時出射可能な 1mm Φ 変調フォトニック結晶レーザーの作製”, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2 会場+オンライン, 17p-A34-14, 2024 年 9 月 17 日.
26. 十鳥 雅弘, 北村 篤史, 小泉 朋朗, 江本 溪, De Zoysa Menaka, 小川 健志, 井上 卓也, 石崎 賢司, 吉田 昌宏, 勝野 峻平, 野田 進, “GaN 系二重格子 PCSEL の格子間距離と発振特性”, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか 2 会場+オンライン, 18p-A34-12, 2024 年 9 月 18 日.
27. 小川 健志, De Zoysa Menaka, 十鳥 雅弘, 北村 篤史, 江本 溪, 小泉 朋朗, 井上 卓也, 石崎 賢

司, 野田 進, "GaN系フォトニック結晶レーザーを用いた水中3次元ToF-LiDARの開発 (IV)", 2024
年第85回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセほか2会場+オンライン, 18p-A34-13, 2024年
9月18日.