

# 国内初\*1！空港制限区域内における 自動運転レベル4無人貨物搬送の実運用を開始 First in Japan to Start LV4 Autonomous Operation

深津 史浩\*2 佐藤 誠\*2 鈴木 元太\*2 開田 宏介\*2 藤井 浩二\*2 田島 将太\*2  
Fumihiro Fukatsu Makoto Sato Genta Suzuki Kosuke Kaida Kouji Fujii Shota Tajima

\*1 当社調べ \*2 トヨタL&Fカンパニー AR開発部

## 要旨

空港制限区域内での物流において重要な役割を担うトーイングトラクタの自動運転レベル4を達成し、特定条件下における完全無人搬送の実運用を開始した。自己位置推定および障害物検知システムの冗長化により安定運行を可能とし、フリートマネジメントシステム (FMS) による作業管理の一元化とインフラと車両の連携による高効率なオペレーションを実現した。

キーワード：トーイングトラクタ、自動運転、レベル4、冗長化、フリートマネジメントシステム (FMS)

## Abstract

We achieved Level 4 autonomous driving for towing tractors, which plays a crucial role in logistics within restricted areas of airport, and began a actual operation of fully unmanned transportation under specific conditions. Stable operation has been made possible through redundancy in self-localization and obstacle detection systems. Additionally, the centralized management of tasks via the Fleet Management System (FMS) and seamless coordination between infrastructure and vehicles have enabled highly efficient operations.

Keywords: Towing Tractor, Autonomous Driving, Level 4, Redundancy, Fleet Management System (FMS)

## 1 はじめに

昨今、生産年齢人口の減少が大きな社会問題となっているが、コロナ禍の影響も相まって、空港制限区域内におけるグランドハンドリング業務の人員不足は深刻な状況にある。当社と全日本空輸(株) (以下、ANA) は、国土交通省航空局による空港イノベーションの一環として、人員不足解消のため、また空港業務の持続的な発展に向け、2025年中のトーイングトラクタ (以下、トーイング) の自動運転レベル4 (以下、レベル4) 実運用開始を目指して取組みを進めてきた。従来の自動運転レベル3 (以下、レベル3) においては、搭乗者による常時安全監視が必要であるが、レベル4では、特定条件下においてすべての運転タスクが自動で行われる完全無人運転が可能となる (表1)。

表1 自動運転レベル [1]  
Table1 Autonomous Driving Level

システムによる監視	レベル	説明	搭乗者
システムによる監視	Level 5	完全自動運転 常にシステムがすべての運転タスクを実施	搭乗なし
システムによる監視	Level 4	特定条件下における完全自動運転 特定条件下においてシステムがすべての運転タスクを実施	搭乗なし
システムによる監視	Level 3	条件付き自動運転 システムがすべての運転タスクを実施するが、システムの介入要求に対して搭乗者が適切に対応することが必要	搭乗あり
人による監視	Level 2	特定条件下での自動運転機能 システムが前後・左右の車両制御を実施	搭乗あり
人による監視	Level 1	運転支援 システムが前後・左右いずれかの車両制御を実施	搭乗あり

人員不足解消に大きく貢献しうるレベル4の早期実現を目標として、2017年に自動運転トーイングの開発に着手、2019年より、まずは九州佐賀国際空港、中部国際空港において、レベル3での実証実験を重ねた後、国内最大規模の羽田空港へとステップアップして開発を継続した。2021年には、当社電動トーイング「3TE25」ベースに開発したレベル4対応可能な新型自動運転トーイングを導入し、実証実験、試験運用を通して課題の抽出と対策を進めた結果、2024年7月に国内初 (当社調べ) となるレベル4での試験運用を実施、さらに2025年12月には目標であったレベル4での実運用を開始するに至った (表2)。

表2 開発経緯  
Table2 Development History

自動運転レベル	'19年	'20年	'21年	'22年	'23年	'24年	'25年	'26年~
レベル3			▼九州佐賀国際空港 実証実験 ▼中部国際空港 実証実験 ▼九州佐賀国際空港 試験運用					
レベル4				▼国内最大規模 羽田空港へ ▼実証実験 ▼試験運用		▼信号機連携実証実験 ▼試験運用 (7月)	▼実運用 (12月)	

## 2 羽田空港への導入

### 2.1 走行経路および貨物搬送オペレーション

羽田空港において、トーイングは、駐機場とターミナル建屋間の旅客手荷物搬送、および駐機場と貨物エリア内にある荷下ろし場間の貨物搬送作業に用いられている。ANAとの協議の結果、今回の開発において、まずは貨物搬送作業時の拠点間往復経路の走行のみを自動化対象範囲(図1)とし、それぞれの拠点における航空機への寄付き運転、けん引台車連結などについては、従来通り人が作業を行うものとした(図2)。

なお、人による作業は残存するため、車両については、有人運転時の視認性・操作性などを損なうことなく、自動運転のための機能を付与しなければならない。



図1 走行経路および周囲環境[2]  
Fig.1 Work Environment Within the Airport



図2 オペレーション概要  
Fig.2 Overview of Operations

### 2.2 周囲環境への対応

空港内は、多数の作業者と多種多様な車両が混在し、非常に混雑しているうえ、屋外で広大な駐機場、ターミナル建屋に沿った通路、また建屋下の屋内手荷物ソーティング場(荷捌き場)など周囲環境の変化も大きい。自動運転を行うためには、自車の位置を正確に測定する自己位置推定と、自車周辺にある障害物を正確に捕捉する障害物検知の2つ

の機能がとくに重要であるが、このような環境変化の大きな条件下で、安心安全なオペレーションを遂行し、航空機の定時性を確保するためには、各機能に冗長性を持たせることが非常に重要である。

## 3 車両開発内容

### 3.1 主要機能

国土交通省からも、レベル4車両に対しては、システムの冗長性確保が必須の技術要件として求められている。

まず、自己位置推定については、変化の大きな環境下でも高い精度と信頼性を維持するため、以下に示す4種類の異なる自己位置推定装置を統合的に実装した。

- ①路面の模様特徴を解析する路面パターンマッチング(RSPM<sup>®</sup>: Road Surface Pattern Matching)
- ②衛星測位を利用するGNSS(Global Navigation Satellite System)
- ③周辺環境のレーザ測位を基盤とした3D-SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)
- ④路面に埋設された磁気マーカを検出する磁気誘導(Magnetic Marker Identification)

これらの装置を組み合わせることで、空港制限区域内において、いつでもどこでも常に2種類以上の装置から正確な位置情報を得ることを可能とし、高精度・高信頼性かつ冗長性のある自己位置推定システムを実現した。

- 一方、障害物検知についても
- ①遠距離検知用3D障害物センサ(LiDAR)
  - ②近距離検知用2D障害物センサ(レーザスキャナ)の異なる2種類の装置を各3個ずつ搭載することで監視エリアを多重化し、高い安全性を実現した(図3)。

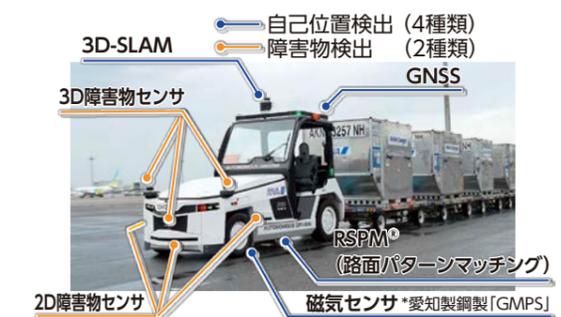


図3 自己位置推定および障害物検知システム  
Fig.3 Self-Localization and Obstacle Detection System

また、車両の運行管理に加え、駐機場や貨物エリアへの行先指示、現場スタッフの作業項目などの情報を一元化する「Fleet Management System(以下、FMS)」を新たに開発、空港側のシステムや信号機などのインフラとも連携し、高効率なオペレーションを実現した。さらには、より高い安全性を実現するため、遠隔監視機能も搭載しており、異常時に迅速に周囲の状況を把握し、周辺の作業員へ通知することも可能とした。

### 3.2 冗長性確保

#### 1) 自己位置推定システムの冗長化

屋外の開けた場所においてはGNSSから高精度な位置情報を取得することができるが、ターミナル下などの屋内はもとより、屋外であっても巨大な金属物である飛行機の機体や建物の近傍、もしくは搭乗ブリッジ下を通過する際などは、取得困難である。これとは逆に、3D-SLAMは柱や梁などの特徴物が多く存在する屋内などの環境では有効だが、屋外の開けた場所では精度確保が困難である。従って、システム冗長化のためには、屋内外シームレスに精度確保が可能な新たな技術の確立が不可欠であった。この課題を解決するため、米国Southwest Research Institute(SwRI)の技術をライセンス利用して新たに開発・導入したのが「RSPM<sup>®</sup>」である(表3)。

表3 自己位置推定方式  
Table3 Self-Position Estimation Method

方式	GNSS	3D-SLAM	RSPM <sup>®</sup>	磁気誘導
イメージ	衛星 アンテナ	3D-LIDAR 点群地図	約60cm 積雪、光沢路面NG	磁気マーカ 磁気センサ
条件	屋外の開けた場所	周辺特徴物があること	積雪、光沢路面NG	埋設工事必要
駐機場	○	△	○	(○)
建屋付近	△	○	○	(○)
屋内	×	○	○	(○)

位置推定可否...○:可、(○):磁気マーカがあれば可、△:不安定、×:不可

RSPM<sup>®</sup> は、カメラで路面のテクスチャや特徴点を検出し、高精度な位置推定を行う技術である。磁気マーカの設置が難しい場所や広大な空間でも一貫した性能を発揮し、屋内外シームレスに適応可能な柔軟性を備えている(図4)。

さらに、RSPM<sup>®</sup> が苦手な視覚的特徴を捉えにくい路面状態(例:積雪や光沢路面)で性能が制約されるケースも想定し、愛知製鋼(株)製の磁気センサも搭載、埋設された磁気マーカを検知し、走行することも可能とした。

以上4種類の異なる技術を統合したシステムを構築、動作環境に応じて各技術の特性を最適に活用するとともに、それぞれが相互に補完し合うことで、高精度・高信頼性かつ冗長性のある自己位置推定システムを実現した。

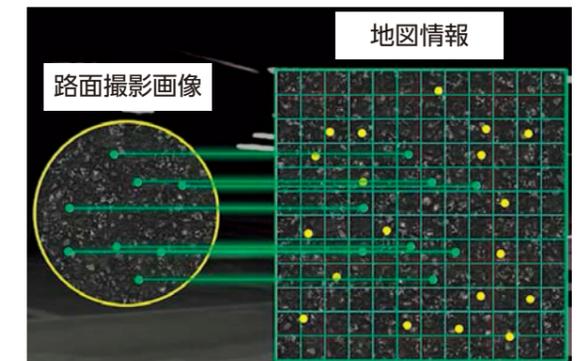


図4 RSPM<sup>®</sup> マッチングイメージ  
Fig.4 Matching Image of RSPM<sup>®</sup>

#### 2) 障害物検知システムの冗長化

トーイングトラクタの安全機能の信頼性を向上させるため、検知システムの冗長化と検知範囲の最適化を行った。近距離検知用の2D障害物センサ、遠距離検知用の3D障害物センサをそれぞれ車両の前方と左右に配置し、多方向からの情報の同時収集を可能とした(図5)。

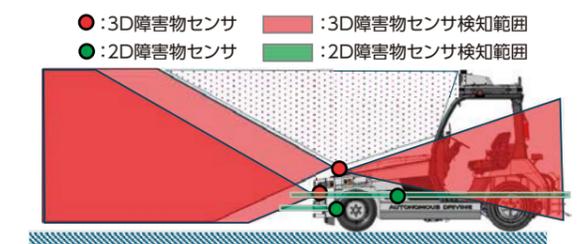


図5 障害物センサの検知範囲  
Fig.5 Detection Range of Obstacle Sensor

前方検知範囲については、走行速度、経路形状、けん引台車幅などに応じて可変な検知範囲を自動生成することで、多様な運用環境に対応するとともに、検知範囲内に構造物などによる死角が生じる場合には、死角の延長線上に仮想障害物を設定、車両を減速制御し、潜在的なリスクを想定した安全走行を行うことができるようにした(図6)。

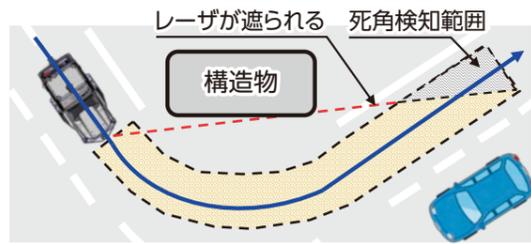


図6 死角検知範囲への仮想障害物設定  
Fig.6 Virtual Obstacle Configuration for Blind Spot Range

また、路面に対する各レーザ反射点の高さについて推定路面に基づいた分析・対策を行い、路面のうねりや車両の揺れに影響されない安定した環境認識を可能としたことで、遠方の物体や点群密度の低い小さな物体でさえも障害物として高精度に検知可能なシステムを実現した(図7)。

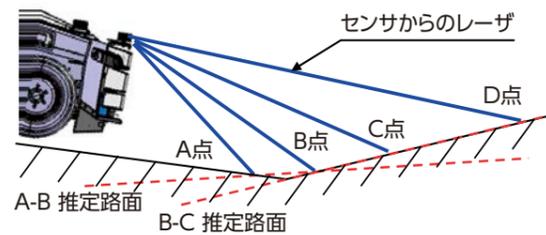


図7 路面位置の推定方法  
Fig.7 Road Surface Position Estimation Method

### 3.3 デジタル技術の活用

#### 1) デジタルツイン技術を活用した検証

羽田空港における実証実験においては、空港の稼働を止めることなく安全かつ速やかに実施しなければならず、評価期間・条件ともに大きな制約があり、十分な検証を行うことが難しいという問題があった。そこで、デジタルツイン技術を導入し、実環境における評価を補完し、網羅的な検証を行うための基盤を構築した(図8)。



図8 デジタルツイン(左:実環境, 右:仮想環境)  
Fig.8 Digital Twin (Left: Real Environment, Right: Virtual Environment)

3DCGを用いて周囲空間と機台に搭載されているセンサの情報を仮想環境内に再現し、さまざまな評価シナリオにおいて自動運転に必要な基本機能「認知・判断・制御」の評価、および多様な運用条件下での機能検証を可能とした。

また、国土交通省3D都市モデル「PLATEAU」<sup>[3]</sup>を活用し、飛行機やけん引車両などの空港特有の

物体を追加配置することで広大な実証エリアを仮想環境内に高精度に再現した(図9)。

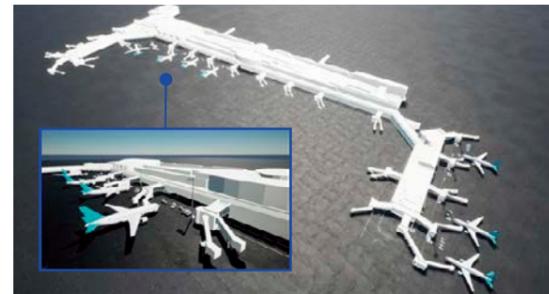


図9 羽田空港3Dモデル[3]  
Fig.9 Haneda Airport 3D Model

この仮想環境内で、他車両の往来・動作も含めたシミュレーションを行うことで、実運用を想定した障害物検知と自動運転制御ロジックの検証を行った(図10)。

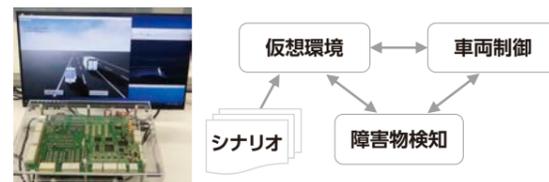


図10 仮想環境を用いた検証基盤構成  
Fig.10 Validation Platform Configuration Using a Virtual Environment



図11 車線変更シナリオ  
Fig.11 Lane Change Scenario

他車両の往来がある状況での車線変更、交差点進入といった、安全面での懸念から実環境での評価が難しいシナリオについても、適切な障害物検知範囲の設計と検知結果に基づく車両制御ロジック検証を行うことができた(図11)。

以上のように、デジタル技術を活用することで実環境における物理試験の制約にとらわれず、正確、迅速かつ柔軟な検証が行えるようになったことから、不具合や設計上の課題の早期発見・対策が可能となり、システム全体の信頼性を大きく向上させることができた。

### 3.4 機能的意匠とエルゴノミクス

#### 1) レイアウトコンセプト

センサの動作要件と美的要素を調和させた機能的意匠の実現と、ベース車両のエルゴノミクスを維持することで、自動運転と有人運転の両立を狙った(図12)。



図12 センサ・コントローラ搭載位置と前後方視野、居住スペース  
Fig.12 Position of Sensor and Controller, Fr/Rr Visibility, Living Space

#### 2) 車両FR部

前方の障害物センサは、背の低い障害物も検知させるため、フレームよりも高い位置に配置できない。

そこで、FRデザインカバー内にセンサ搭載スペースを設けた。さらに、センサ検知範囲を考慮した意匠面とすることで、車両とセンサの一体感を醸成した(図13)。

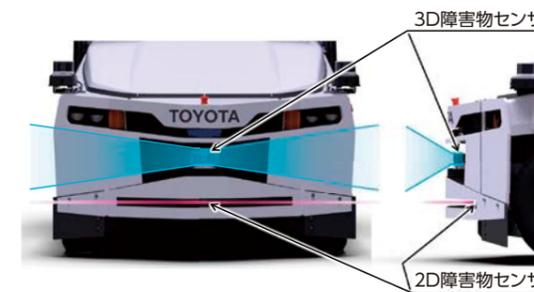


図13 障害物センサの検知範囲  
Fig.13 Detection Range of Obstacle Sensor

障害物センサの検知範囲内にまとまった水が落下すると、水を障害物としてセンサが誤認識し、意図しない車両停止や減速を発生させてしまう。

そこで、意匠面に影響しないセンサ背面に水の流路を構成し水の落下による誤検知を防いだ(図14)。

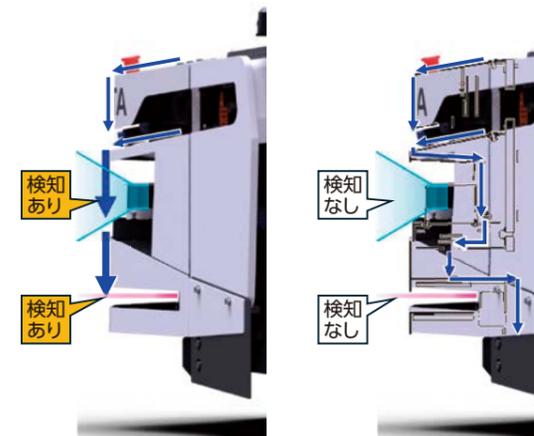


図14 成行きの流れ(左)と本機台の流れ(右)  
Fig.14 Flow Path of w/o (LH) and w/ (RH) Measurement

#### 3) 車両ルーフ部

4種類の自己位置推定装置にはセンサだけでなく、コントローラ類も必要となる。搭載スペースを確保できるルーフ上にコントローラ類を配置した。

さらに、ルーフ上には自己位置推定装置の一つである3D-SLAM用3D-LiDARを搭載している。そのセンサ検知範囲に入らないよう、厚みのあるコントローラ類はルーフ中央に集中配置した(図15)。

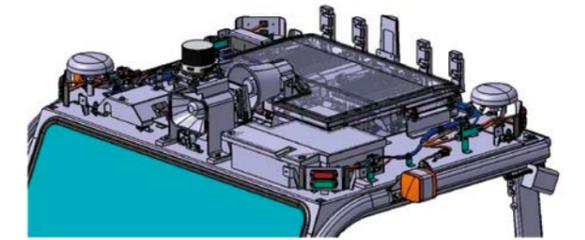


図15 ルーフ上機器搭載状態  
Fig.15 Condition of Loaded Equipment on the Roof

同時に、意匠カバー上面を傾斜のある断面にすることで、ルーフ上をコンパクトに見せ、多くの部品が高所に配置されることによる不安定な印象を回避した(図16)。

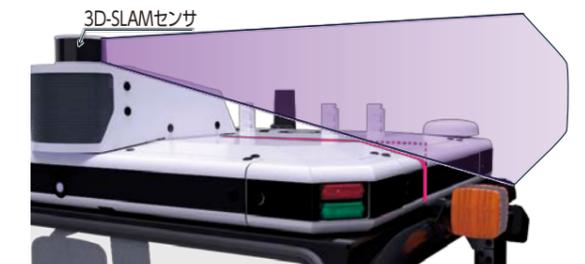


図16 3D-SLAM用センサ検知範囲とルーフカバー断面形状  
Fig.16 Detection Range of 3D-SLAM Sensor and Cross Section Shape of Roof Designed Cover

一方で、本車両は有人運転も想定しており、後方視野、とくにトローリングで頻繁に行うけん引台車連結作業時の視野範囲は重要である。そこで、周辺部品搭載に必要なスペースを精査し、自動運転コントローラを低位置に搭載した(図17)。

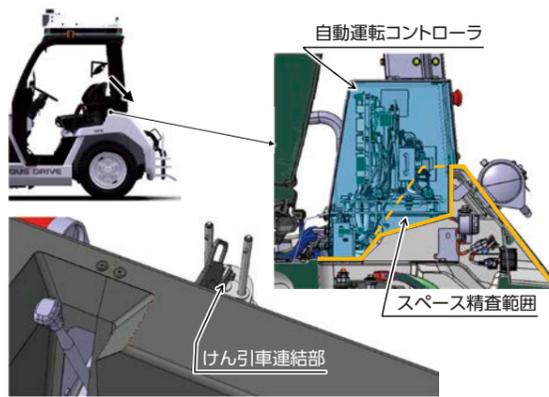


図17 けん引車連結部の視認性と自動運転コントローラ搭載状態  
Fig.17 Visibility of Dolly Connection Part and Condition of Automation Controller

## 4 FMS(Fleet Manegimnt System)開発内容

### 4.1 インフラ連携した運行管理

グラウンドハンドリングの現場は、何十年も積み重ねられてきた多能工化された現場のため、現状オペレーションのサービスレベルを維持しつつ、自動化を推進する必要があった。

全体オペレーションのなかで、搬送を一部自動化に置き換えた有人/自動の混在運用をもとに、現場が徐々に自動化に移行しやすく、かつ他空港への容易な横展開が可能な空港向け標準FMS（運行管理システム）を、当社子会社のT-Hive（T-Hive, B. V.）やTIIS（当社ITソリューションズ）とも連携し開発を進め、実用化した（図18）。

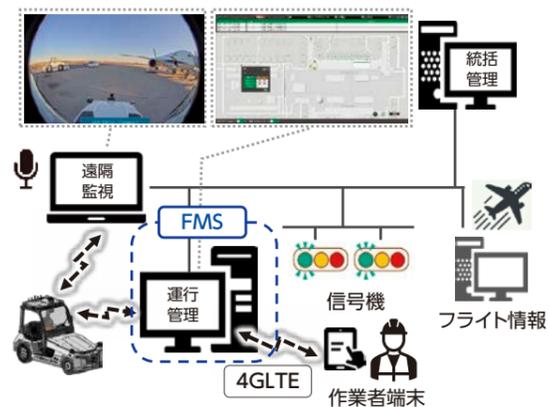


図18 FMSシステム構成図  
Fig.18 FMS System Configuration Diagram

### 4.2 信号機との連携

信号機システムは、地上車両の移動を安全かつ円滑に監視、制御するために使用される重要なインフラである。

交差点通行に際して、自動運転車両、有人運転車

両が混在走行するなか、信号機と連動することで自動運転車両が交差点へ進入する際には他進行方向からの車両は停止する制御を行い、運用効率と安全性を向上させた（図19）。

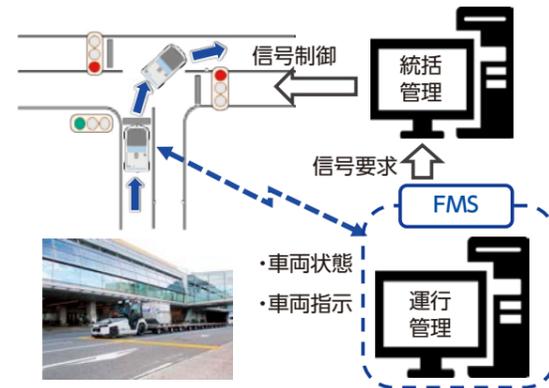


図19 信号機とFMS連携  
Fig.19 Integration of Traffic Signals and FMS

### 4.3 情報セキュリティ対応

本システムは、航空機運航情報、貨物情報、運用システムなど社内外ネットワークと接続されているため、空港運営の安全性・信頼性を脅かす不正アクセス、データ漏洩、サービス妨害などのインシデントは絶対に防止せねばならない。

図4に示した通り、当社・顧客ネットワークは閉域網部にあり脆弱性リスクは低いが、外部接続可能なインターネット部はリスクが高い（図20）。

このようなリスクを排除するため、第三者機関による脆弱性診断を行い、対策を講じることで、不正アクセス、情報漏洩といったインシデントを防止する堅牢なセキュリティシステムを構築した。

今後も継続的なセキュリティ強化や、最先端技術の導入により、FMS運用の安全性と持続可能性を追求していく。

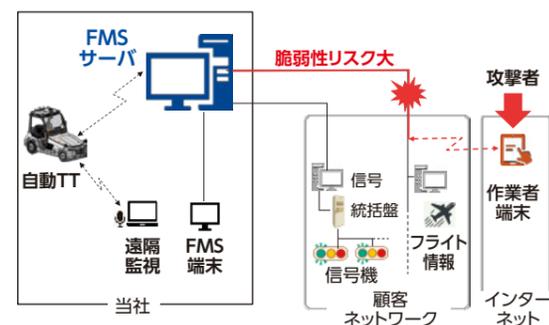


図20 情報セキュリティネットワーク  
Fig.20 Information Security Network

## 5 まとめ

自動運転トローイングは、2017年の開発着手以来、国土交通省やANAなどの協力により各空港での実証実験・試験運用を重ねた結果、目標であった羽田空港でのレベル4実運用を2025年12月に開始するに至った。グラウンドハンドリング作業の人員不足解消に大きく貢献するものとして、空港業界からの注目・期待は大きく、国内外から早期導入を期待する声を多数頂戴している。また、今後は空港のみならず、工場や港湾などでの構内搬送作業も対象として、FMSやデータ活用も含めたパッケージでのソリューションとして顧客価値向上・提供範囲拡大を目指し、引き続き開発を進めていく。

### 参考文献

- [1] 国土交通省資料「自動運転のレベル分けについて」より抜粋して加筆
- [2] Map data © 2025 Google
- [3] 国土交通省 PLATEAUウェブサイト  
(<https://www.mlit.go.jp/plateau/>),  
「国土交通省3D都市モデル PLATEAU」を加工して作成

### 開発者の思い

2025年12月、国内最大規模となる羽田空港で、レベル4自動運転トローイングの実運用がついに開始されました。最初に羽田空港での運用が決まった際、その過密な環境から「この空港での自動運転は絶対無理だ」と感じたほどの困難がありました。しかし、国土交通省航空局やANAなどの皆様と運用ルールを一つひとつ議論し、何度も協議を重ねた結果、2025年の実運用開始という大きな目標を達成することができました。運用開始の瞬間を迎えた時には、本当に胸が熱くなる思いでした。また、初めての製品や活動に対し、高浜工場の各部門が協力を惜しまず、一丸となって取り組んでくださったことも大きな助けとなりました。このチームの結束なくして今回の成果は得られませんでした。心から感謝いたします。

今まさに物流業界は変革の時を迎えています。単に製品を売るだけでなくソリューションを提供する、「モノ売りからコト売り」へと進化していく流れが加速しています。今回の開発が、その先駆けとなり、未来へ続く自動化の大きな礎となるよう、私たちはこれからも技術開発に挑んでいきます。

### 著者紹介

