

# 低床式自律搬送台車の開発

大本 絵利 井田 慎太郎  
金子 智弥 国本 勇  
(本社建築本部)

## Development of Low-Flatbed Automated Transportation Vehicle

Eri Ohmoto Shintaro Ida  
Tomoya Kaneko Isamu Kunimoto

### Abstract

In recent years, expectations for the mechanization and automation of construction have increased owing to labor shortage. Since the transportation of materials and equipment on a construction site involves simple repetitive tasks and is time consuming, mechanization offers significant labor reduction. Hence, we develop an autonomous transportation vehicle based on a low-flatbed AGV developed by us. The vehicle comprises three distinctive features that can be managed easily by workers: route determination, material searching, and elevator connection. We test the system improved by individual feature tests and integration at two construction sites. It is confirmed that the vehicle can transport materials by searching the assigned material and communicating with the elevator.

### 概要

近年、建設作業の労務不足に伴い、建設作業の機械化・自動化の期待が高まっている。特に建設現場内での資機材の搬送作業は単純繰り返し作業であり、建設工事全体の中でも多くの工数を占めるため、機械化による省力化効果大きい。そこで、筆者らはすでに開発済みの低床式AGV(Automated Guided Vehicle)をベースに、建設作業員が自ら設定して活用できることを目標に、無軌道走行機能・自律走行機能・資材探索機能・エレベーター連携機能を持つ低床式自律搬送台車を開発した。本台車について基礎実験を行ったところ、資材探索に時間が掛かるなどの課題があったため、資材認識用ARマーカーのサイズの大型化と探索手順の見直しなどの改良を行った。物流倉庫と商業施設の新築現場にて改良した自律搬送台車の実証実験を行った結果、自動搬送、空台車の回収および本設エレベーターとの連携が可能であることを確認した。

## 1. はじめに

近年、建設作業員の不足と高齢化が顕在化しており、生産性向上は急務の状況にある。建設作業の生産性向上の一案として、建設作業員が技能と熟練を必要とする作業に集中できるように、比較的単純な資機材搬送作業を自動化する方策が考えられる。自動化の方向性には、施工現場全体に及ぶ自動搬送網の構築と、建設作業員が用いる搬送機器の自動化の2つがある。前者は、比較的大規模な施工現場を想定し、自動フォークリフトや自動エレベーター等を組合せて実現する。一方後者は、中小規模の施工現場を想定し、単独で利用できる搬送装置を目指す。本論文で紹介する自律搬送台車は、後者を指向するものである。

## 2. 開発の背景と目標

筆者らは2016年に、資機材の下部に潜り込んで搬送できる完全低床式の自動搬送台車(Automated Guided Vehicle, 以下低床式AGV)を開発した<sup>1)</sup>。これは、施工

現場の床面に磁気テープを貼付して設定した軌道上を走行させるものであった。従来製造工場や自動倉庫等でAGVを利用する場合、床面に誘導線を埋め込んで軌道を構築していた。磁気テープによる方法は、誘導線よりも設定や変更が容易であったが、施工現場は工事の進捗に応じてレイアウト変更が頻繁に発生するため、磁気テープの貼替え作業が低床式AGV導入の負担になっていた。

一方で低床式AGVは、無線コントローラーで遠隔操作もできた。遠隔操作の場合、万が一荷崩れが発生しても作業員の巻き込まれる危険性が低いなどのメリットもある。低床式AGVの概要をPhoto 1に、仕様をTable 1に示す。低床式AGVの特徴は次の通りである。

- 1) 資機材の下部に潜り込んで搬送するため、カウンターウェイトが不要で、フォークリフトなどに比べて建物の床面への荷重負担が少ない。
- 2) 走行機構にメカナムホイールを採用し、横行やその場における回転が可能で、狭隘な作業場所でも容易に資機材を搬送できる。
- 3) 高さが160mmと低床であり、ハンドパレット(最低高さ80mm, 最高高さ200mm)と併用できる。

- 4) 資機材を積載したまま工事用エレベーター(以下、ELV)に乗降できるため、資機材の搬入場所から施工場所まで一貫して搬送できる。

この低床式 AGV をベースとして軌道の設定方法を見直し、自律搬送台車を開発することにした。本論文ではその開発概要と実証実験について述べる。

低床式 AGV の特徴を生かしつつ、施工現場で建設作業者が容易に利用できる自律搬送台車の実現を目指す。開発イメージを Fig. 1 に、自律搬送のフローを以下に示す。なお、自律搬送台車のオペレーター(以下オペレーター)は、エレベーターのオペレーターが兼任できる。

- 1) ストックヤードフロアでは荷積作業者が空台車に資材をセットし、指定のストックヤードに配置する。
- 2) 自律搬送台車はオペレーターの指示により、目的の資材のを見つけ、積載、ELV の乗降後、搬送先フロアへ資材を搬送する。
- 3) 搬送先フロアでは、内装工事の作業者が搬送された資材を使用して技能作業を実施し、空になった台車を集積場へ戻す。
- 4) 自律搬送台車は、荷下ろし後、空台車の有無を確認し、あれば積載、ELV の乗降後、ストックヤードフロアへ戻る。

この一連の作業を資材がなくなるまで繰り返す自律搬送台車を開発することを目標とした。これにより、搬送に関わる作業者を4分の1に削減できると期待できる。

### 3. 開発内容

#### 3.1 専用パレット

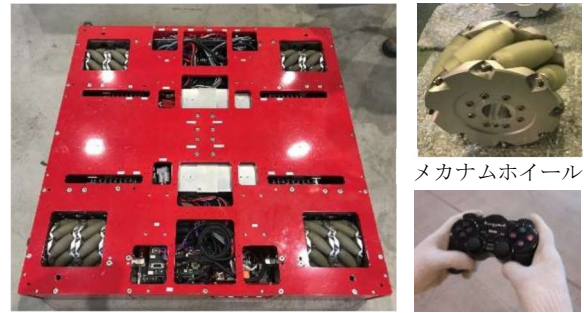
資材の探索を実現するため、Photo 2 に示す脚部の形状を統一した専用パレットを開発した。専用パレットは、自律搬送台車が進入可能な方向を色で認識するため、前面と背面を黄緑色に、進入できない側面を青色に彩色した。さらに、専用パレットを識別するために、脚部の前面と側面にそれぞれ異なる AR(Augmented Reality)マーカーを貼付した。これは2次元コードで ID を読み取ると同時に、画像処理で搬送台車の相対位置を検出できる。

#### 3.2 センサーユニットの追加

Photo 3 にセンサーユニットを付加した低床式 AGV を



Photo 2 専用パレット  
Specialized Pallet



低床式AGV 無線コントローラー

Photo 1 ベースとした低床式AGV  
Low-Flatbed AGV

Table 1 低床式AGVの仕様  
Specification of Low-Flatbed AGV

全幅	1000mm
奥行	1000mm
高さ	160mm(ジャッキアップ時: 210mm)
本体重量	300kg
積載荷重	700kg
最高速度	35m/min

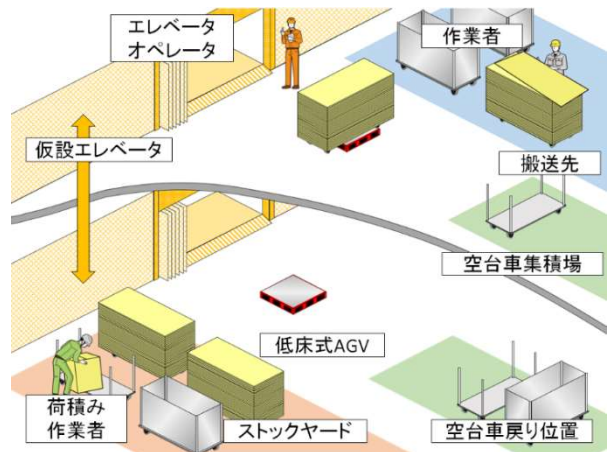


Fig. 1 低床式自律搬送台車の利用イメージ  
Low-Flatbed Automated Transportation Vehicle



Photo 3 センサーユニットを追加したAGV  
Low-Flatbed AGV with Sensor Unit

示す。前面部分にセンサーユニット(幅 1000mm×奥行き 300 mm)を追加し、2 次元 LiDAR(Light Detection and Ranging)・カメラ①・カメラ②・ボックス PC を設置した。LiDAR は、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) による自己位置検出、障害物検知、専用パレットの下部に潜り込む際の相対位置検出に利用する。カメラ①は画像認識によって専用パレットを検出するために利用し、使用しないときは本体に格納される。カメラ②は専用パレットの足に貼付した AR マーカーの認識を行う。そして、ボックス PC はこれらの LiDAR とカメラから得た情報を処理し、自動運転を命令する。

### 3.3 無軌道走行機能

施工現場のレイアウト変更に対応する、誘導線や磁気テープに代わる搬送経路設定方法として、Fig. 2 のような環境マップを用いる方法を採用した。環境マップは、自律搬送台車を遠隔操作で走行させ、LiDAR のセンサー情報を用いて作成する。これにより、環境マップと LiDAR の情報を照合することで、自己位置を算出し無軌道走行を実現する。

### 3.4 自律走行機能

資材のストックヤードと搬送先の領域を指定し、その間の搬送経路を自動計算する。環境マップ上で最短となる経路を自動で探索する。AR マーカーには資材のサイズ情報が登録されており、資材サイズが大きい場合は、環境マップの水色の領域を厚く設定し、走行可能な範囲が変化する。LiDAR は自己位置算出と同時に障害物検知を行い、障害物を検知した場合、迂回路を生成して、再び搬送先までの最短経路を探索する。

### 3.5 資材探索機能

一般の AGV では、搬送する資材を設定された軌道上に配置するが、本自律搬送台車は無軌道であるため資材の位置を正確に規定できない。そこで、所定の範囲内から資材を探索する機能を開発した。自律搬送台車は、環境マップ上のストックヤードに移動すると、カメラ①を立て、その場で回転して専用パレットを探索する。専用パレットを発見すると接近し、カメラ②を利用して AR マーカーを照合し、目的のパレットであるか確認する。その後、LiDAR を利用してパレットの下部へ潜り込む。

### 3.6 空パレット・空台車の回収機能

搬送先の近傍に空パレット・空台車の集積場所を、ストックヤードの近傍にその戻り位置をそれぞれ設け、資材搬送の帰りにそれらを積載して戻るようにした。これらの認識・積載と自律走行は資材搬送時と同様である。

### 3.7 ELV 連携機能

施工現場の資材搬送では、ストックヤードと搬送先の階が異なる場合、主に工事用 ELV を用いるが、それを撤

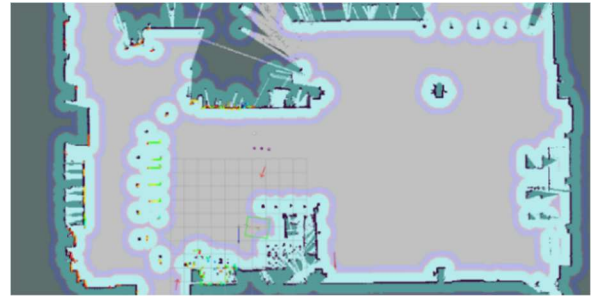


Fig. 2 環境マップ  
Mapping Using LiDAR

Table 2 実験施設の概要

Facility for Primary Experiment	
建築物用途	物流倉庫
使用階数	1F(搬送元) 3F(搬送先)
使用ELV (大型ELV)	幅4500×奥行き2000, 耐荷重 3000kg

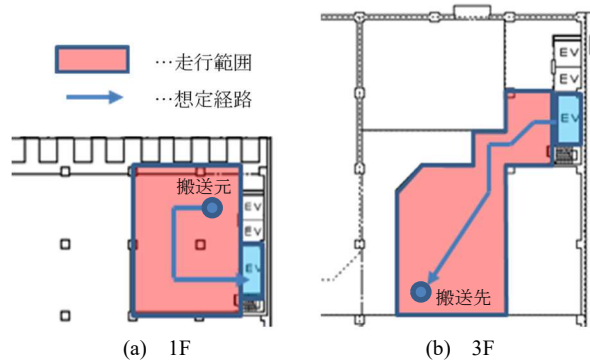


Fig. 3 実験配置図

Layout for Primary Experiment

去する工事の終盤には、本設ELVを資材搬送用に仮設利用する場合がある。一般に本設ELVは工事用ELVよりも間口が狭く、自律搬送台車の乗降には高精度の制御が求められる。そこで、専用パレットの下に潜り込む際と同様に、LiDARによってELV開口を認識し、ELV中央を検出して進入・停止するように制御する。

また、ELVのオペレーターが自律搬送台車と通信するためのアプリケーションを組込んだオペレーター端末を開発した。本端末は、自律搬送台車がELVへの乗車を待機していることをオペレーターに伝達する。オペレーターは、ELVへの乗車、降車および降車後の走行再開のタイミングを自律搬送台車に指示するため本端末を用いる。

## 4. 基礎実験

### 4.1 実験目的

大型ELVを有する物流倉庫にて低床式自律搬送台車の基礎実験を行った。施設の建物概要をTable 2に示す。本実験の目的は、3章で開発した低床式自律搬送台車が異なるフロア間において、資材を以下の手順で自律搬送できることを確認する。

- 1) 1F の搬送元にて資材を積載する(Fig. 3 (a))
- 2) ELV に乗車して 3F へ移動する
- 3) 3F の搬送先にて資材を荷下ろしする(Fig. 3 (b))

#### 4.2 実験概要

事前に1Fおよび、3Fの環境マップを作成し、以下のフローを繰り返し、資材搬送を実施した。なお、オペレーターの指示にはすべてオペレーター端末を用いる。

- 1) 1F ホームポジションにて待機
- 2) オペレーターが資材と搬送先を指定
- 3) 運転開始
- 4) 搬送資材の探索および積載
- 5) ELV 前へ移動
- 6) ELV 到着後、オペレーターが乗車を指示
- 7) 搬送階到着後、オペレーターが降車を指示
- 8) 目的地へ搬送、荷下ろし
- 9) ELV に乗込み 1F へ戻る

以上のフローで自律搬送実験(Photo 4)を行い、以下の動作を検証した。

- (1) 専用パレットの探索と積載 カメラで専用パレットの色と AR マーカーを認識し、専用パレットを識別し、潜り込んで積載できた。
- (2) ELV への乗込み 自律搬送台車とオペレーター端末と Wi-Fi 通信のために、オペレーターが携帯型の Wi-Fi ルーターを所持した。自律搬送台車はオペレーター端末による指示に従って ELV に乗降できた。
- (3) 環境マップの切替え ELV での昇降に合わせて、環境マップを 1F と 3F で切替えた。複数階のマップを切替えてきた。
- (4) 搬送先までの自律走行 ELV を降りた後、3F での自己位置推定を実施し、目的地まで自律走行し、所定の場所へ荷下ろしした。その後、ELV に乗込み 1F に戻った。

#### 4.3 実験結果

3 台の専用パレットについて、前節の(1)から(4)を連続して実施できることを確認した。また、この結果、資材探索機能について課題を得た<sup>3)</sup>。それらの課題を以下に示す。

- (a) 専用パレット認識の精度 カメラの映像を画像処理する際、光環境によって色相や彩度に変化し、専用パレットを正しく認識できない場合があった。
- (b) 専用パレット認識の探索時間 AR マーカーを読取るには 2m 以内まで近寄る必要があり、目的の専用パレットを見つける時間が掛かる場合があった。

### 5. 実証実験に向けた開発

基礎実験の課題解決と建設現場への適用を考慮し、次の改良と追加開発を行った。



Photo 4 基礎実験の状況  
Primary Experiment



Photo 5 鋼製台車  
Steel Cart



Photo 6 ARマーカーの設置  
Placement of AR Maker

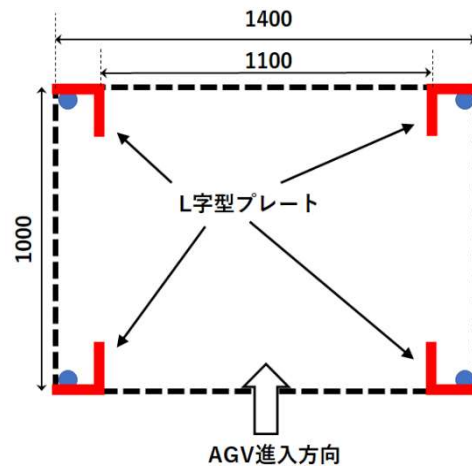


Fig. 4 鋼製台車の脚部  
Shapes around Wheels of Steel Cart

#### 5.1 ARマーカーの拡大

色情報で専用パレットを認識し、近付いてからARマーカーを識別するのではなく、ARマーカーのサイズを400×400(mm)に拡大し、映像からARマーカーそのものを探索するように変更した。さらに、ARマーカーを読取ると、識別と同時にカメラの相対位置(距離と角度)が計算できる。この改良により、AGVが資材を積載する際の進入方向を計算可能とした。

#### 5.2 鋼製台車の開発

専用パレットに代え、Photo 5に示す鋼製台車を開発した。自律搬送台車はLiDARで相対位置を検出しながら台車の下部へ進入する。そこで、台車の脚部には、Fig.4に示すように四隅のキャスターの内側をL字形に覆うよう

にプレートを取付けた。台車の上部はLiDARに探知されないため、形状に制限はない。Photo 5に示すようなかご台車でも、平台車でも使用できる。ARマーカは、台車の正面中央に取り付けければ良い。また、直角に折り曲げたプレート状のARマーカを作成した。ARマーカを貼付した面と垂直な面にマグネットを貼付したことで空の平台車へ設置できる他、Photo 6に示すように、上下を逆にして資材の上に置けるようにした。

## 6. 物流倉庫新築工事での実証実験

### 6.1 実験目的

本実験の目的は、実施工現場における次の機能の確認である。

- 1) 無軌道走行機能の効果
- 2) ARマーカのサイズ拡大の効果
- 3) 鋼製台車の有効性
- 4) 大空間での自己位置認識の精度
- 5) 空台車回収機能の効果

実証実験を行った工事現場の建物用途は物流倉庫で、車路が完成しているため、内装工事段階には各階のトラック寄せまでトラックで資材を搬送できる。従来方法では、そこから、フォークリフトやハンドパレットなどにより、各々の使用場所まで運搬される。工事用ELVは作業員昇降専用の小型のものであったため、実験には使用しなかった。自律搬送台車は、乾式耐火被覆材をトラック寄せから施工場所まで搬送する作業に適用した。

### 6.2 実験概要

実験の配置図をFig. 5に示す。正方形断面の柱がX, Yの両方向に11mおきに等間隔に並んだ大空間で、自己位置と向きを検出に不利な状況である。図右上がストックヤード、左側が搬送先で、この間の距離は約60mである。搬送先の付近には空台車の集積場所を2ヶ所設け、ストックヤードの付近に空台車の戻り位置を設けた。自律搬送台車は個々の鋼製台車に取り付けられたARマーカと登録情報を照合し、搬送先の情報を取得する。実験フローを以下に示す。

- 1) スtockヤードから目的の資材を探索し積載
- 2) 搬送先まで搬送
- 3) 集積場所に空台車があれば積載
- 4) 空台車を戻り位置まで搬送

以上を6台の台車で繰り返した。6往復の内、3回は空台車の回収を行い、それにかかる時間を計測した。

### 6.3 実験結果

実験の状況をPhoto 7に、実験結果を以下に示す。

- 1) 無軌道走行を可能としたことで、従来半日程度を要していた磁気テープ施工等の事前準備が20分程度で環境マップを作製するのみで自律搬送台車の運用が可能となった。

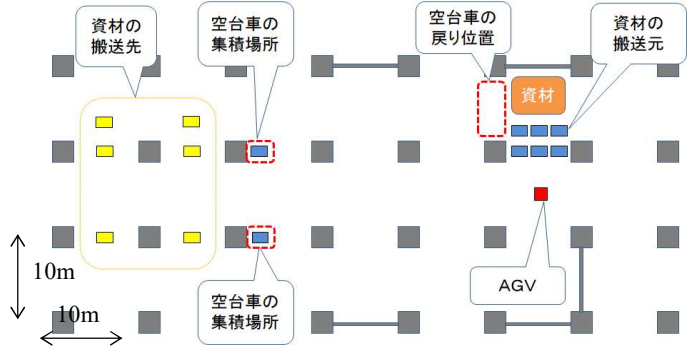


Fig. 5 物流倉庫新築現場の実験配置図  
Layout for Experiment in Construction Site  
of Logistics Warehouse



Photo 7 物流倉庫新築現場の実験状況  
Experiment in Construction Site of Logistics Warehouse

- 2) サイズを拡大したARマーカを使用したことで、従来よりも離れた場所から、カメラ①のみで鋼製台車を認識できた。
- 3) 下部の形状を統一した専用鋼製台車を使用することで、自律搬送台車はLiDARを用いて真下に進入して積載できた。
- 3) 自己位置と向きを検出に不利な状況であったが、自己位置を連続的に確認することで、誤検出することなく搬送先まで経路生成し走行できた。
- 4) 鋼製台車6台を連続して搬送し、空台車を回収することができた。6台の台車の搬送と空台車2台の回収に合計で57分を要した。このうち、ストックヤードでの資材探索と空台車の探索には60~90秒を要した。

## 7. 商業施設新築工事での実証実験

### 7.1 実験目的

前章の実験目的に加え、ELV連携機能を本設ELVに適用することを目的として、商業施設新築工事において、実証実験を実施した。内装工事では、本設のELVに養生を施し、仮設利用で資材を揚重した。

### 7.2 実験概要

実験の配置図をFig. 6に示す。1階をストックヤードと

して、3階の搬送先まで搬送した。使用したELV の寸法をTable 5に示す。実験フローを以下に示す。

- 1) スtockヤードから目的の資材を探索し積載
  - 2) ELVで3階へ移動し、搬送先まで搬送
  - 3) 集積場所に空台車があれば積載
  - 4) ELVで1階へ移動し、空台車を戻り位置まで搬送
- このフローを3台の台車で繰り返した。3往復の内、1回は空台車の回収を行った。

ELV は、オペレーターが手動で運転した。オペレーターはオペレーター端末とWi-Fiルーターを所持し、通信にて自律搬送台車にELVへの乗降許可を与えた。

### 7.3 実験結果

実験の状況をPhoto 8に、得られた結果を以下に示す。

- 1) 鋼製台車の幅は1,400mm で、ELV 開口幅に対して左右の余裕はそれぞれ150mmであった。LiDARでELV奥の入隅を検知しELV 開口の中央へ進入する制御によって、問題なく乗降できた。
- 2) オペレーター端末は本設ELVへの乗降でも問題なく機能した。ただし、自律搬送台車との通信は、Wi-Fiルーターの通信範囲のみであるため、自律搬送台車が異なる階にいるELVを呼ぶことはできなかった。
- 3) 3台の台車の搬送には、ELV の昇降時間を除いて、合計で34.5 分を要した。Stockヤードでの資材と空台車の探索時間は、6章と同程度であった。

## 8. おわりに

資材搬送の省力化を目的として、低床式AGVをベースに、建設作業者が利用できる自律搬送台車を開発した。

- 1) 自己位置認識にLiDARを用いることで、搬送経路の設計が容易になり、施工現場のレイアウト変更に対応できる。
- 2) LiDARで作成する環境マップに資材サイズを反映させることで、資材サイズに応じた搬送経路を自動設計できる。
- 3) 資材識別用に400mm角のARマーカーを用いることで、自律搬送台車が所定の範囲内から目的の資材を探索できる。そのため、搬送計画の設計が容易になる。
- 4) ELVオペレーターはWi-Fiルーターを所持するだけで、オペレーター端末から自律搬送台車に乗降等の指示を与えられる。
- 5) 搬送計画に空台車の集積場所と戻り位置を設定することで空台車を回収し、帰り時間を活用できる。

### 謝辞

本研究は三井不動産㈱と共同研究として実施した。関係各位に感謝の意を表す。

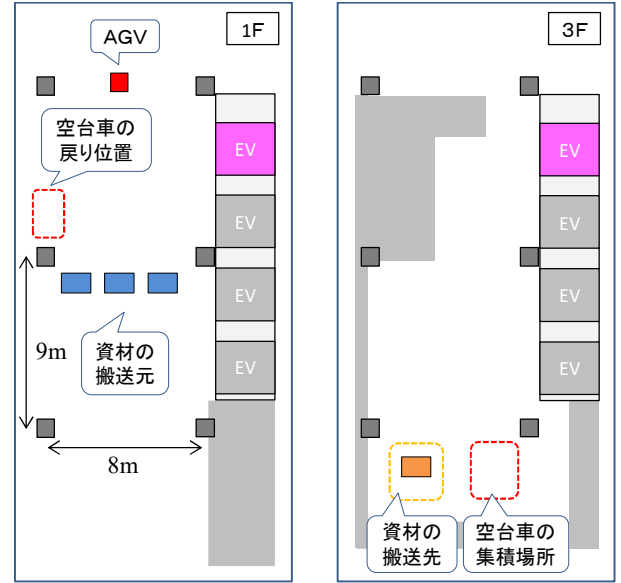


Fig. 6 商業施設新築現場の実験配置図  
Layout for Experiment in Construction Site of Shopping Center

Table 3 商業施設新築現場のELV寸法

Dimensions of Elevator in Construction Site	
かご幅	2,300mm
かご奥行き	2,635mm
開口幅	1,700mm



Photo 8 実験状況  
Experiment in Construction Site of Shopping Center

### 参考文献

- 1) 大本絵利, 他: 低床式 AGV の開発, 大林組技術研究所報, No. 80, 2016.12
- 2) 井田慎太郎, 他: 低床式 AGV を用いた自動搬送システムの開発 その1)・その2), 日本建築学会大会梗概集, 2019.9
- 3) 井田慎太郎, 他: 低床式 AGV を用いた自動搬送システムの開発 その3)・その4), 日本建築学会大会梗概集, 2020.9