

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／
自動運転（システムとサービスの拡張）／

BRT（Bus Rapid Transit）への自動運転による 正着制御技術等の導入に向けた調査

報告書

2021年12月



一般財団法人
計量計画研究所
THE INSTITUTE OF BEHAVIORAL SCIENCES

- バスのバス停への正着は、バス車両とバス停の隙間と段差を小さくすることで、車いす利用者、高齢者、ベビーカー利用者等もスムーズに乗降可能なバリアフリー化の一要素として重要性が認識されている。
- 欧州諸国などでは、専用の縁石を用いた手動正着を導入する事例もみられるが、日本への導入に際しては、タイヤの摩耗や停止時のタイヤと縁石による接触による揺れ等が懸念されている。
- 一方で、正着制御技術は近年開発が進められている次世代都市交通システムの一要素として位置付けられており、自動運転技術として導入が期待されている。
- 正着制御技術にはいくつかの方式があり、それぞれ開発が進められているが、本調査では、海外で導入実績がある「誘導線をカメラで読み取る方式（以下、誘導線方式）」について、導入に向けた検討を行った。

1. 検討概要 (2) 検討目的

○現時点で以下の課題が残されており、誘導線式正着制御システムのBRT等への社会実装に関する採否が未決定である。

- ① 誘導線の耐久性、メンテナンス頻度や手法が不明
- ② 天候（降雨、降雪）や夜間におけるシステムのロバスト性が未確認
- ③ システムの社会的効果の検討が未整理
- ④ 誘導線の施工・管理主体（道路管理者・事業者）が未調整
- ⑤ システム異常発生時の対応、責任の所在が不明確
- ⑥ 導入の採否が未決定のため、公道のバス停区間への誘導線設置可否に関する関係者調整が未実施

○本調査では、2020年10月より開始された東京BRTの1次プレ運行の期間中に実証実験を実施し、①～③の課題を検証することで、今後④～⑥の課題解決への道筋をつけることを目的とする。

■ 東京BRT運行ルート（1次プレ運行）



10月1日より、
虎ノ門ヒルズ
～晴海BRTターミナル
間を運行中

晴海BRTターミナルで
正着制御が可能な
誘導線とバス停を設置

(1) 誘導線式正着制御の技術的課題検証

① システム使用条件の明確化

- ・ 夜間、雨天、降雪時などにおけるシステム使用条件（照度、雨量、降雪）の関係を把握

② 誘導線耐久性確認

- ・ 誘導線の塗装の状況とシステムの誘導線の認識状況を把握し、誘導線の劣化状況や既存の調査結果等を踏まえ、メンテナンス頻度を整理

(2) 誘導線式正着制御技術の社会的効果の検証

① 正着によるバリアフリー化効果の検証

- ・ 利用者へのアンケート調査や運転者へのヒアリングにより具体的な効果を把握

② 正着による乗降時の時間短縮効果

- ・ 正着による時間短縮等の個別効果（1人1人で得られる効果）と、路線全体の効果を把握

③ 乗降時・降車時の転倒防止効果検証

- ・ 乗降時の利用者のつまずき状況を正着有無別に把握し、乗降時の転倒防止効果を把握

④ 停車・発進時の転倒防止効果検証

- ・ バスの停車・発進時の車両の揺れ（横方向の加速度）と乗客への影響を正着有無別に把握し、停車・発進時の転倒防止効果を把握

- 緊急事態宣言の発出等により、昨年度はモニターに対するアンケート調査等、一部の調査が実施できなかった。
- そのため、本年度は、以下の青字の項目について検証を行った。

■検討状況

分類	検証項目	検証状況
(1)技術的 課題検証	①システム使用条件の 明確化	○夕方、降雪のシステム使用条件を検証（昨年度） ○降雨時のシステム使用条件を検証（本年度）
	②誘導線耐久性確認	○グランシャルシートを用い、誘導線の劣化時のカメラの認識状況を確認（昨年度） ○設置後の誘導線の劣化状況を把握（昨年度～本年度） → 本年度、劣化状況を時期をずらして2回確認、メンテナンス頻度を推定
(2)社会的 効果検証	①正着による バリアフリー化 効果の検証	○モニター149名（昨年度31名、本年度118名）にアンケート調査を実施 ○運転手にヒアリング調査を実施（昨年度1名、本年度3名）
	②正着による乗降時の 時間短縮効果	○停車パターン※別に、モニター31名の属性別乗降時間を計測（昨年度） ○属性別利用者数を調査し、停車パターン別の時間差を確認（本年度）
	③乗降時・降車時の 転倒防止効果検証	○乗降時の状況をカメラで観測し、停車パターン別に乗降別転倒有無、転倒リスクを計測（本年度）
	④停車・発車時の 転倒防止効果検証	○走行時の車内をカメラで観測し、停車パターン別に停車・発車時の転倒有無、転倒リスクを計測（本年度）

※停車パターンとは、自動正着、手動正着、通常の停車の3パターン

2. 検討状況 (2) 検証の実施場所

- 2020年11月17日～22日の6日間と2021年10月22日～24日の3日間、晴海BRTターミナルで実証実験を行った。
- 晴海BRTターミナルは、メインバス（乗車客用）、サブバス（降車客用）の2つのバスバースが設置されており、今回の実証実験ではサブバスを使用した。
- サブバスは乗降部の嵩上げがされていないため、乗降台を設置し、実証実験を行った。

■ 東京BRTの路線図と実証実験場所



■ 使用車両 (トヨタ : SORA)



■ 乗降台



■概要

- 誘導線式正着制御では、バス車両に搭載したカメラが路面の誘導線を読み取り、カメラの情報に基づき誘導線に沿って自動操舵され、バス停への正着が行われる。
- 外的な要因でカメラの読み取り精度は変化するため、本格導入に向けて、夜間（夕方）、雨天・荒天時、降雪時の様々な条件下における正着制御システムの誘導線の認識可能な使用条件を明確化する。

【検証項目1】

- ・夕方・夜間の正着の可否

【検証項目2】

- ・雨天・荒天時の正着の可否条件

【検証項目3】

- ・降雪時の正着の可否条件

■誘導線式正着制御の考え方



■ 検証1: 夜間

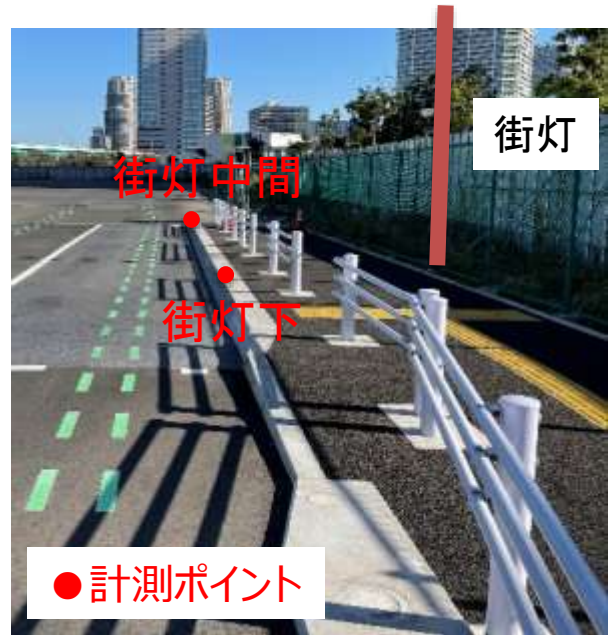
- 日の入時刻前から、照度を計測しながら正着制御を繰り返し実施し、カメラが誘導線を認識しなくなる照度の閾値を確認した。
- 概ね**日の入後15分、照度30luxでカメラが認識**しなくなった。

検証項目	計測項目	実施概要
【検証①】 夕方・夜間	①正着用カメラの認識有無 ②照度 ③路面の乾湿状況	・日の入時刻前から正着制御を繰り返し実施 (2分間隔程度) ・正着制御した際の条件を照度計・目視で確認 →4日間実施

■ 計測結果の概要

	日の入時刻	照度 (lux) (照明下)	計測時刻	照度 (lux)		計測時刻	照度 (lux)	
				誘導線認識			誘導線認識せず	
				照明下	照明中間		照明下	照明中間
11/18	16:33	495	16:47	108	68	16:50	80	41
11/19	16:33	534	16:49	76	35	16:51	78	19
11/20	16:32	315	16:46	90	47	16:48	72	32
11/21	16:32	480	16:48	66	34	16:51	59	26

※路面は何れも乾燥



■ 検証2: 雨天時

- 雨天時に、雨量と照度を計測しながら正着制御を繰り返し実施し、カメラが誘導線を認識しなくなる雨量・照度を確認した。
- 当日は朝から1mm/h未満の降雨が断続的に降り、路面が湿～冠水の状況であったが、日中は正常に正着制御が作動した。
- ただし、日の入り前に照度が落ち始めると、晴天時よりも早く誘導線を認識しなくなった。

検証項目	計測項目	実施概要
【検証②】 雨天時	①正着用カメラの認識有無 ②雨量 ③照度	・雨天時に正着制御を繰り返し実施 ・正着制御しない場合の雨量・日照などを雨量計・照度計を使って確認。道路の湿潤（乾・湿・冠水）も確認

■ 実験時の降雨状況



■ 照度の計測地点



計測地点
照明下部

計測地点
照明間の中

■ 設置した雨量計



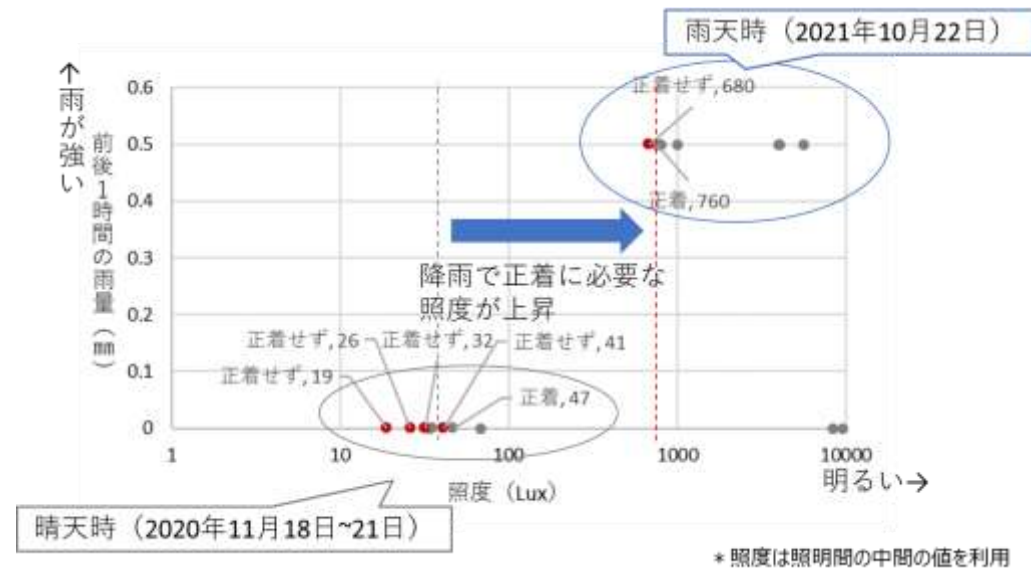
(1) 技術的課題の検証 ①システム使用条件の明確化

- 正着しなかった時刻の前後1時間の雨量は0.5mm (0.25mm/h)、照度は680luxであった。
- 晴天時に実施した夜間調査の照度 (30lux) と比較すると、雨天時は照度の閾値が30luxから680luxに上昇しており、**雨天時は誘導線認識に必要な照度が上昇**ことが明らかになった。
- これは、アスファルトが濡れて光を反射しやすくなり、路面と誘導線のコントラストの差が少なくなるため、照度が高い状況でも認識しづらくなったと考えられる。

■雨天時のシステム使用条件の計測結果

id	路面状況	時刻	正着の有無	照度(lux)		前後1h雨量(mm)
				照明下部	照明中間	
1	湿	10:31	正着	4080	4080	0.5
2	湿	10:34	正着	5600	5600	0.5
3	湿	11:24	正着	6550	8390	0
4	湿	13:30	正着	7700	9600	0
5	湿	15:28	正着	4000	4000	0.5
6	湿	16:32	正着	780	780	0.5
7	湿	16:14	正着	1000	1000	0.5
8	湿	16:24	正着	760	760	0.5
9	湿	16:29	正着	800	800	0.5
10	湿	16:40	正着せず	680	680	0.5

■雨天時調査と夜間調査 (晴天時) の照度の違い



■ 検証3: 降雪時

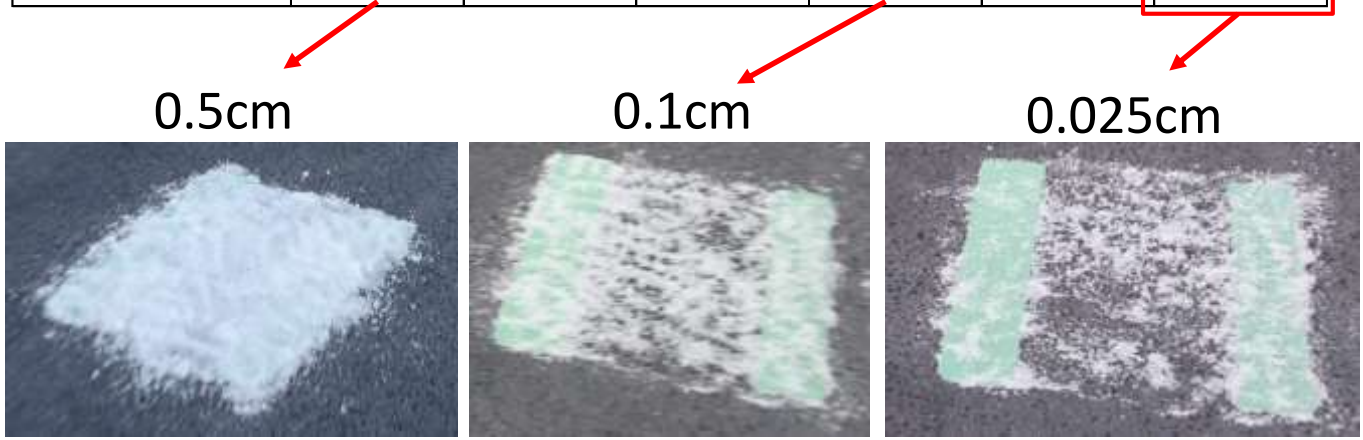
- 誘導線上にスノーパウダーをまいて正着用カメラの誘導線認識有無を確認した。
- 降雪深0.025cmでも、誘導線の読み取り精度は大きく低下（5回中読み取り2回）した。
- 少量でも降雪が発生した場合はシステムは認識しないことが確認された。

検証項目	計測項目	実施概要
【検証③】 降雪時	①正着用カメラの認識有無 ②照度 ③降雪状況	・プレ運転期間前の1日で検証を実施 ・スノーパウダーにより降雪状態を段階的に再現し、読み取り状況を検証

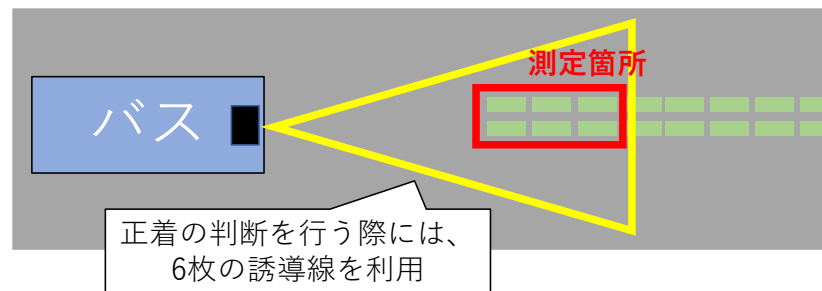
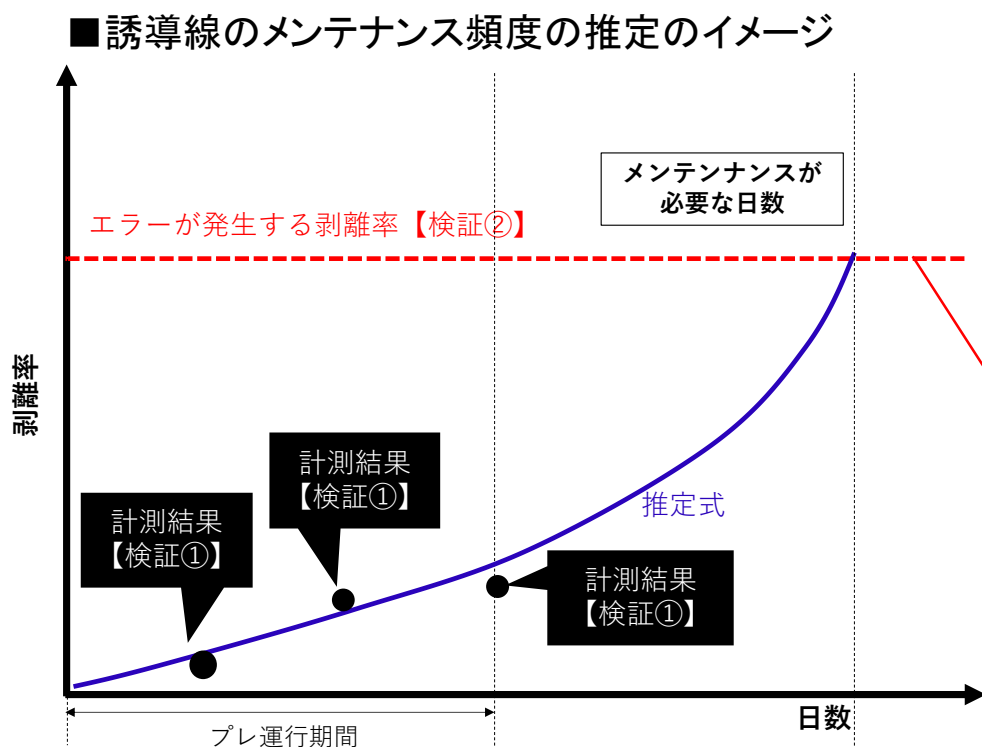
■ 降雪深

降雪深	0.5cm	0.3cm	0.2cm	0.1cm	0.05cm	0.025cm
読取り回数 (計測5回中)	0	0	0	0	0	2

計量カップでパウダーの量を計測し、所定の範囲にまくことで、平均的な降雪深を把握



- 誘導線の劣化の推移を計測し、経年劣化の状況（塗装の剥離率等）を踏まえ、誘導線のメンテナンス頻度を推定する。
- 誘導線のメンテナンス頻度の推定にあたっては、以下の2点の検証を実施する。
 - 【検証項目1】プレ運行期間中に誘導線劣化状況（剥離率）を計測
 - 【検証項目2】エラーが発生する誘導線劣化状況（剥離率）を計測



劣化した誘導線を模したグランシャルシートを誘導線上に貼ってカメラによる読み取りテストを実施し、エラーが発生する剥離率を閾値として確認

実際の劣化(剥離率11.3%)



劣化再現(剥離率40.0%)



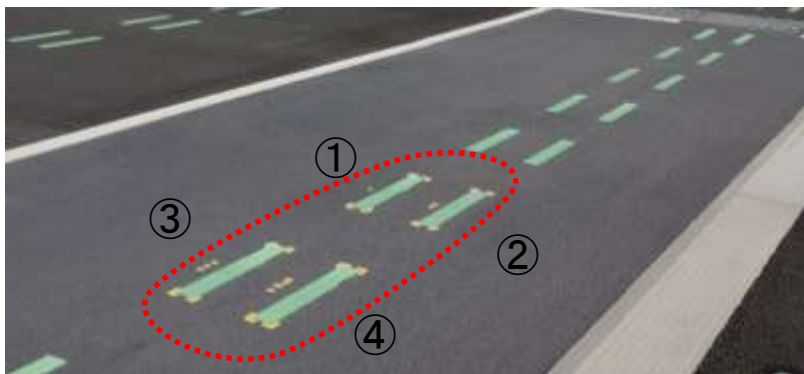
■ 検証項目 1

- 3時点で劣化状態を計測。それぞれ4か所を撮影した。
- ばらつきはあるものの、すべての誘導線の剥離率は時間経過で上昇した。

■ 検証項目 2

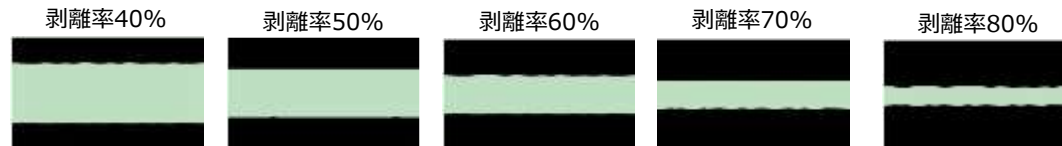
- エラーが発生する誘導線の劣化状況の閾値を検証した。
- 劣化状況はグランシャルシートを用いて再現した。具体的には、誘導線と同色のグランシャルシートの端を黒色とし、黒色の面積によって剥離率40～80%の状態を再現した（下図参照）。
- このグランシャルシートを誘導線上に貼り付け、実際の誘導線の一部が剥離した状況を再現し、カメラの認識有無を確認した。
- 剥離率が50%を超えるとカメラが誘導線を認識しなくなった。

■ 検証項目1の結果



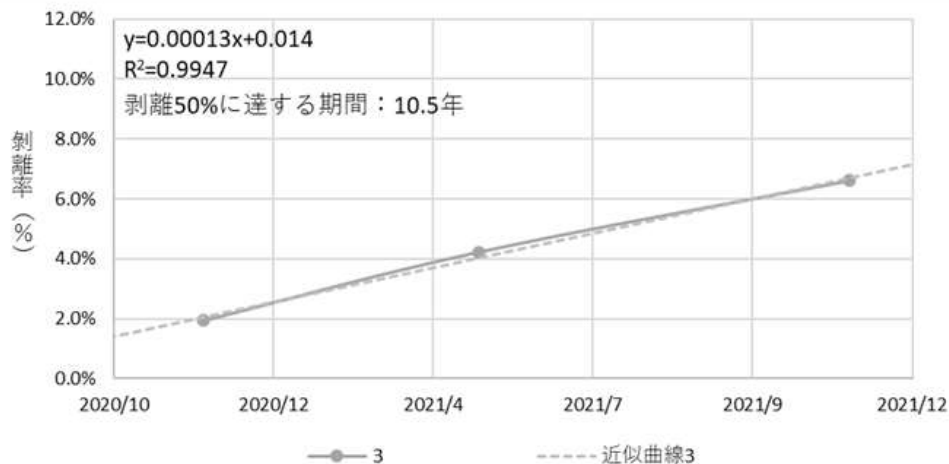
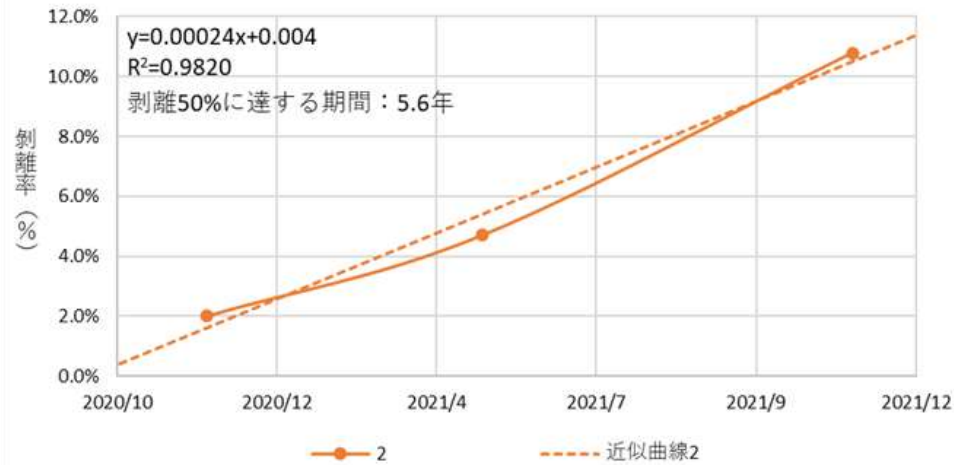
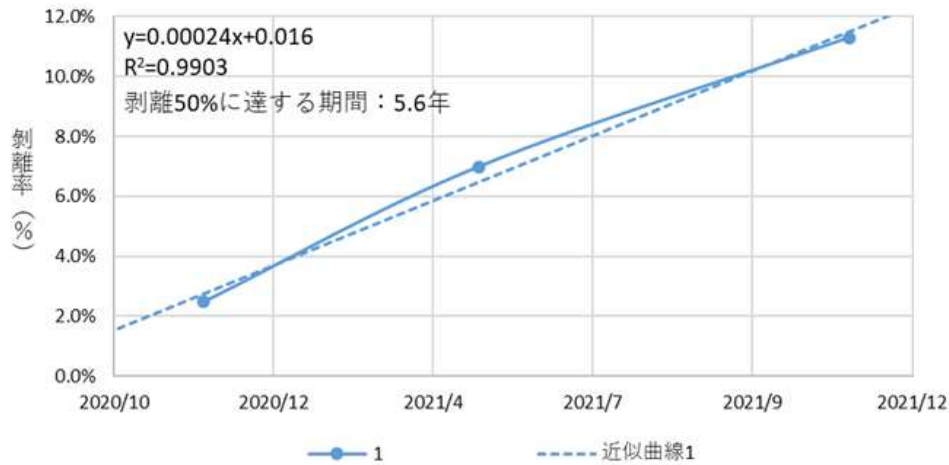
No.	2020年11月	2021年4月	2021年10月
1	2.5%	7.0%	11.3%
2	2.0%	4.7%	10.8%
3	1.9%	4.2%	6.6%
4	2.6%	5.0%	7.5%

■ 検証項目2の結果



		計測1回目	計測2回目	計測3回目
剥離率40%の グランシャルシート (横欠け)	照度(lx)	7,500	7,100	7,000
	路面の乾湿	乾	乾	乾
	正着の有無	有	有	有
剥離率50%の グランシャルシート (横欠け)	照度(lx)	7,200	7,000	7,000
	路面の乾湿	乾	乾	乾
	正着の有無	有	有	有
剥離率60%の グランシャルシート (横欠け)	照度(lx)	7,800	7,800	7,600
	路面の乾湿	乾	乾	乾
	正着の有無	無	無	無

- 検証項目1で把握した劣化状況の推移から剥離率と経過年数の回帰式を試算し、回帰式に基づき、剥離率が50%に達する年数の推計を行った。
- その結果、誘導線は最短で約5年、最長で約10年で剥離率50%に達することが明らかとなった。
- 本検証の対象である晴海ターミナルよりも誘導線上を通過する車両が多くなる可能性が高い公道上のバス停では、上記の結果より劣化速度が早くなることが予想される。



誘導線の劣化曲線 (誘導線別近似)

y: 剥離率、x: 日数

(2) 社会的効果の検証 ①正着によるバリアフリー化効果の検証

- BRTの利用者や運転手を対象に、アンケート調査やヒアリング調査を行い、利用者や運転手の目線からみた正着によるバリアフリー化効果を調査し検証した。
- 具体的には、数日間、BRTのバスを貸し切り、募集したモニターに乗車体験をしてもらい、正着による効果に関するアンケート調査を実施した。あわせて、実験期間中にBRTの運転に協力いただいた運転手に対するヒアリング調査を実施した。
- モニター数は、2021年度の実験では118名、2020年度の実験では31名(計149名)であった。

■ 調査内容

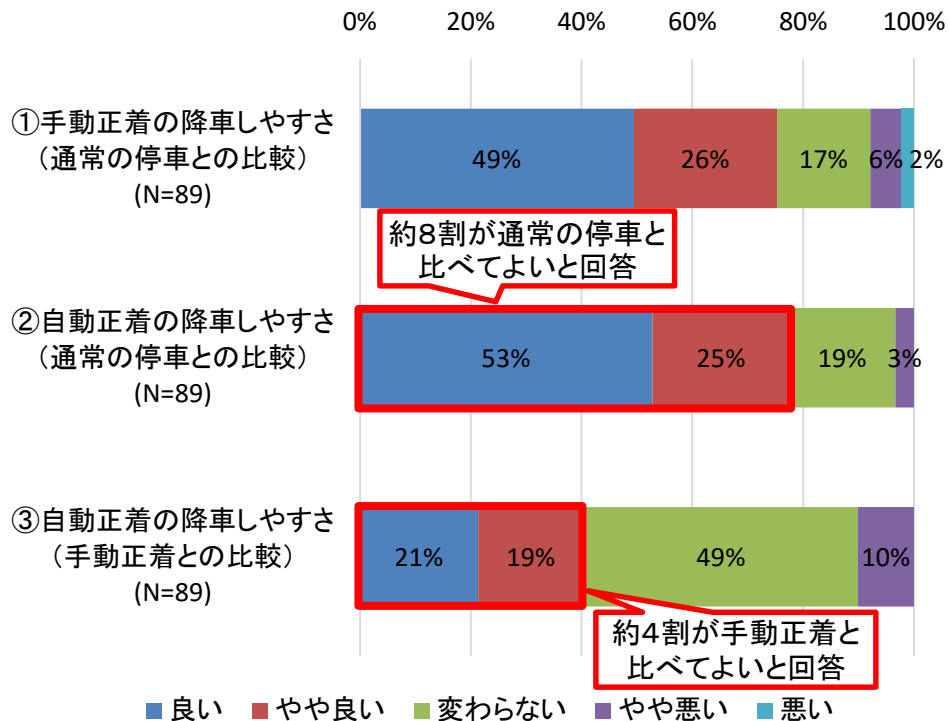
区分	方法	対象・サンプル	主な調査項目
利用者アンケート調査	<ul style="list-style-type: none"> モニターを募集し、BRTの乗車体験後に、アンケート調査を実施 乗車体験では、通常の停車、自動正着、手動正着の3つの停車パターンの体験を実施 	149名 <内訳> 2021年度実施調査:118名 (車いす12名、ベビーカー5名、一般101名) 2020年度実施調査:31人 (車いす5名、ベビーカー6名、一般20名)	【個人属性】 性別、年齢、職業、バス利用頻度等 【バリアフリー化効果について】 停車時の横揺れ バス停での乗降しやすさ 【利用・導入意向等】 自動正着の利用・導入意向・理由、要望
運転手ヒアリング調査	<ul style="list-style-type: none"> 利用者アンケート調査実施時に協力いただいたバス運転手を対象に実施 	正着制御を搭載したバスの運転経験がある運転手:4名	【個人属性】 性別、年齢、運転手歴 【正着制御の効果・有効性について】 運転手の負担・手間、安心感 停車時の隙間・横揺れ等 【利用・導入意向等】 自動正着の利用・導入意向・理由、要望

※調査期間：2021年度…2021年10月22日(金)～10月24日(日)、2020年度…2020年11月19日(木)～11月22日(日)

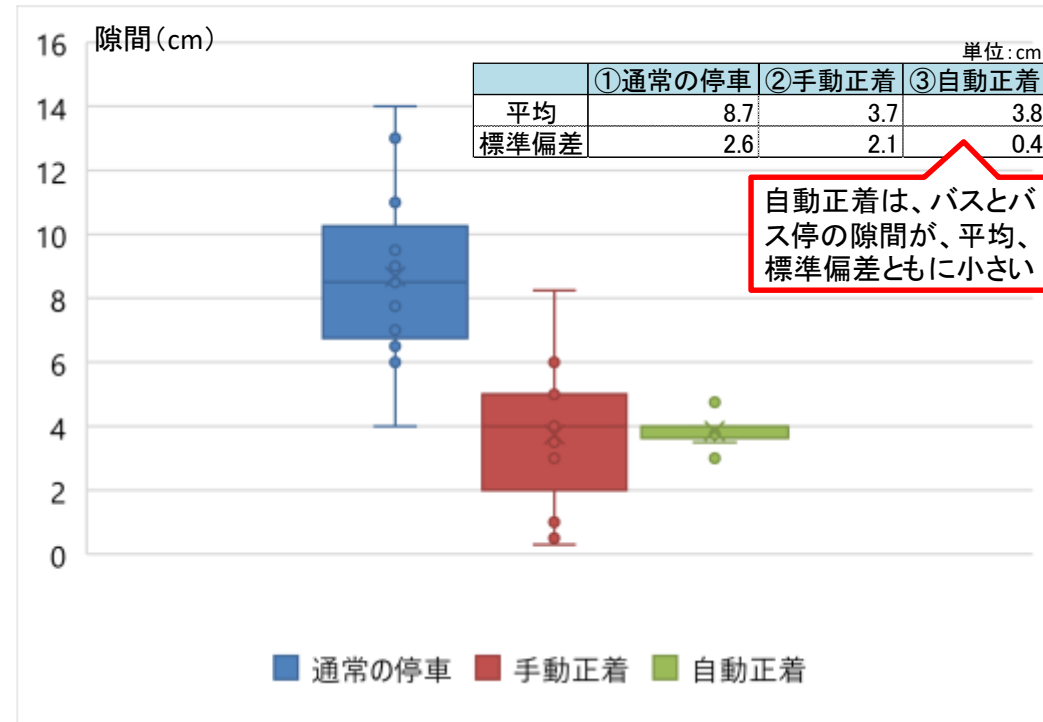
- 自動正着は、通常の停車、手動正着と比べて、バス停でのバスとの隙間が小さくなるために降車しやすいとの回答が多い。
- 自動正着は、通常の停車、手動正着と比べて、バスとバス停の隙間が小さく、かつ、運転手の経験や技量等に拠らず隙間が安定している。そのため、降車しやすいとの評価に繋がったと考えられる。

■バス利用者の停車パターン別の評価結果

<バス停での降車しやすさの評価>



<停車パターン別のバスとバス停の隙間の計測結果>



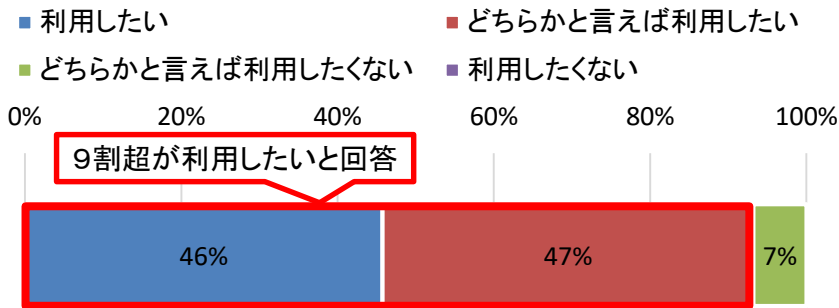
注1. 同一条件下での実験結果を示すため、2021年度の実験で取得したサンプルの調査結果に限定して表示。
 注2. バスとバス停の隙間は、各実験回における降車に利用したバスの中扉での計測結果を表示。

- 自動正着が可能なバスを利用したいとの回答が9割を超えている。その理由として、バスとバス停の隙間や段差が小さく、乗降しやすいことを挙げる回答が多い。以上の結果は、自動正着のバリアフリー効果が高いことを示している。
- 一方、自動正着は、誘導線への進入時や誘導線上での走行中に生じる横揺れのため、停車時の横揺れについては通常の停車、手動正着と比較して低い評価となっている。この点への対応は今後の課題※である。

※ 誘導線進入時の横揺れは運転手の自動運転への習熟、誘導線のS字カーブ通過時の横揺れは中央車線よりの完全専用レーンの導入によるS字の曲率緩和が有効である。

■ バス利用者の自動正着の利用意向

<利用意向>



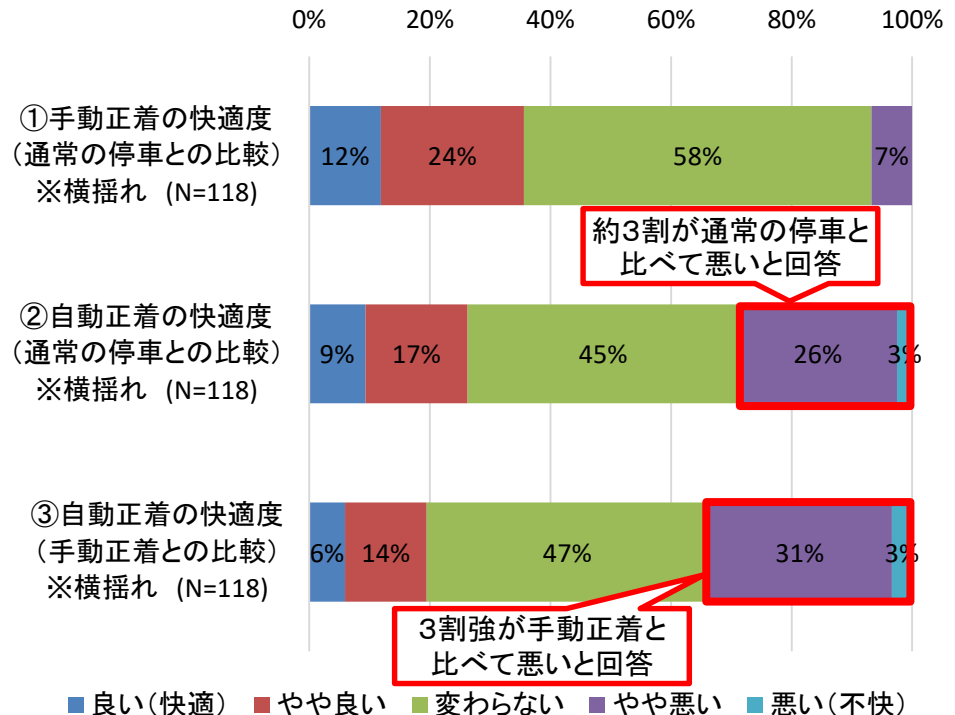
<利用したい理由>

利用したい理由	人数	構成比
①バス停への停車時に横揺れが小さく快適だから	18	16.4%
②バスとバス停の隙間が小さく乗降しやすいから	75	68.2%
③バスとバス停との段差が小さく乗降しやすいから	69	62.7%
④大きな手荷物があるときに乗降しやすいから	44	40.0%
⑤ベビーカーを利用しているため乗降しやすいから	20	18.2%
⑥車いすや歩行補助具(杖など)を利用しているため乗降しやすいから	19	17.3%
⑦その他	25	22.7%

バスとバス停の隙間・段差が小さいという理由から、自動正着を利用したいとの回答が多い

■ バス利用者の停車パターン別の評価結果

<停車時の横揺れの評価>



- バス運転手に対するヒアリング調査からは、自動正着によるメリット・効果として、バスとバス停の隙間が小さくなることによる「乗降時の利用者の安全性向上」の効果のほか、車いす利用者が乗降する際のスロープの出し入れ等の「業務負担軽減」の効果が指摘された。
- 一方、「バスが誘導線を進入する際に発生する横揺れ」や、「バス停での路上駐停車対策の必要性」等が、自動正着の導入に向けての課題・留意点として挙げられている。

■バス運転手の自動正着に対する主な意見

	意見内容
自動正着による メリット・効果	<ul style="list-style-type: none">・バスとバス停の隙間が小さくなるため、利用者が安全に乗降できる・車いす利用者について、乗降の際に、スロープを出すなどの手間が省略できる・車いすは、前輪のロック止めが必要になるものの、乗り降りは便利になる・慣れるまでに一定の時間を要するが、回数をこなせば、慣れて来ると思う・技術が向上して、横揺れがなくなれば、導入しても問題ないと思われる
自動正着の 課題・留意点	<ul style="list-style-type: none">・バスが誘導線を読み取る時に発生する横揺れが気になる・誘導線への進入時に横揺れが発生・誘導線への進入時にいろんな角度から入っても正着できるとよい・バスの動きが若干カクカクしているような気がする・一部のバス停では路上駐車が多いため、本格導入する際には駐車対策が必要・バス停に路上駐車があると機能しない・通常の停車の方が気楽に停車できる・慣れるまでには少し時間がかかる

- 東京BRTへの誘導線式正着制御技術の導入による時間短縮効果を推計した。
- 時間短縮効果の推計のため、以下の2つの実験・調査を実施した。

①乗降時間調査(モニター調査)

1)自動正着(誘導線方式)、2)手動正着(バリアレス縁石)、3)通常の停車の3パターンの停車方法で、乗降時間を計測

②利用者数調査

東京BRTの実運行中のバス1台の車内にビデオカメラを設置し、乗降者を撮影。ビデオ映像からバス利用者数と属性(年齢階層、車いす・ベビーカー利用有無)を調査

■時間短縮効果の推計方法のイメージ



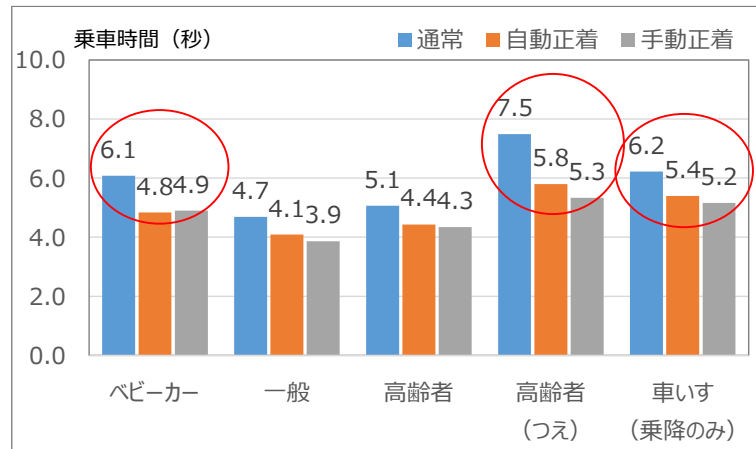
■調査内容

	調査方法	実施時期
①乗降時間調査	・モニター※を募集し、自動正着、手動正着、通常の停車の3つの停車パターンで、それぞれ、バスの乗降体験を実施 ・乗降時に、乗車・降車にかかる所要時間を計測 ※モニターは計31名 (車いす5名、ベビーカー6名、一般20名(うち高齢者10名))	2020年11月19日(木)～22日(日)
②利用者数調査	・実運行中の東京BRTのバス1台の車内にビデオカメラを設置し、バス乗降者を撮影。映像を目視で確認し、属性別※の利用者数をカウント ※属性: 年齢階層、車いす利用有無、ベビーカー利用有無	2021年11月25日(木)～12月2日(木)

- 自動正着と手動正着に乗降時間の大きな差はみられないが、通常の停車と比べると、特に、ベビーカー利用者、杖を使った高齢者、車いす利用者の差が大きい。
- 車いす利用者は、運転手によるスロープ設置、ベルトで車いすを固定する時間等も含めると、15～20秒の差がある。

■乗降時間調査の結果

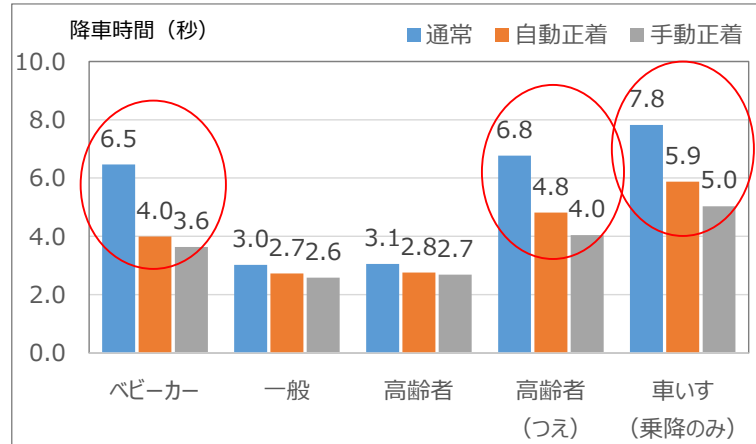
<乗車時間>



■正着状況 (平均値)

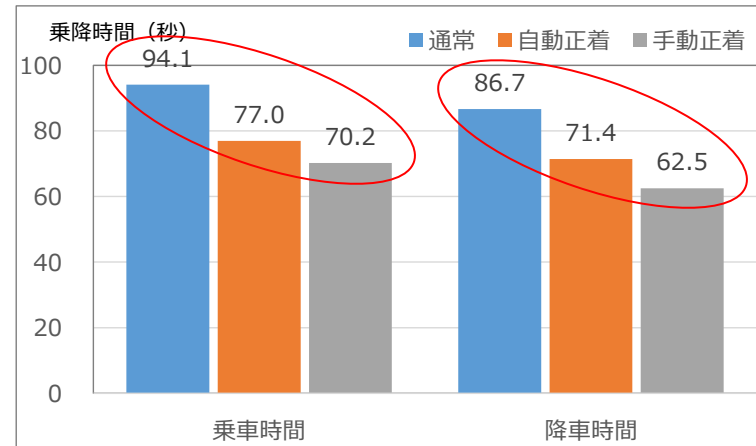
通常 : 25.0cm
 自動正着 : 5.3cm
 手動正着 : 1.3cm

<降車時間>



■車いす利用者の乗降時間

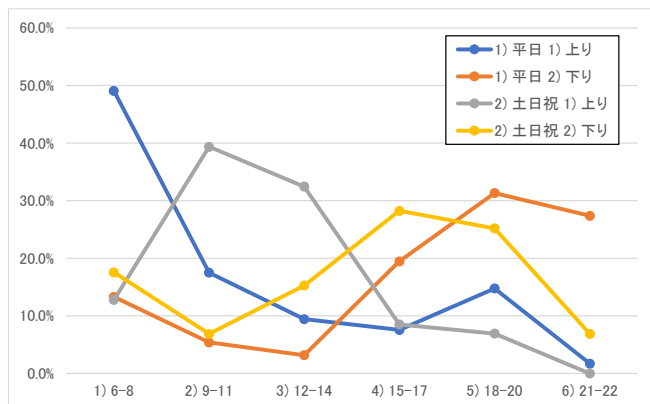
※運転手の作業時間を含む



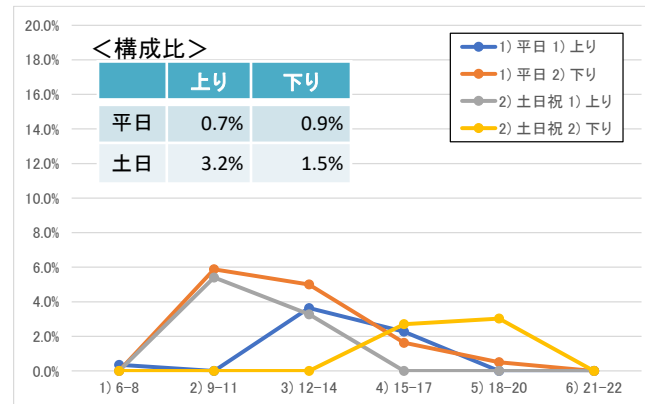
- 2021年11月25日(木)～12月2日(木)の8日間に、東京BRTのバス1台の車内にビデオカメラを設置しバス乗降者を撮影して、映像から個人属性別(車いす利用有無、ベビーカー利用有無、年齢階層)の利用者数をカウントした。調査結果から利用者の個人属性構成比等を算出したものが以下の図である。
- 車いす利用者は調査期間中に1名しかいなかった。ベビーカー利用者を1日でみると平日は上り・下りとも1%未満、休日は上り3.2%、下り1.5%となっている。高齢者(70代以上)は平日・休日とも上り・下りで2%前後となっている。

■利用者数調査の結果

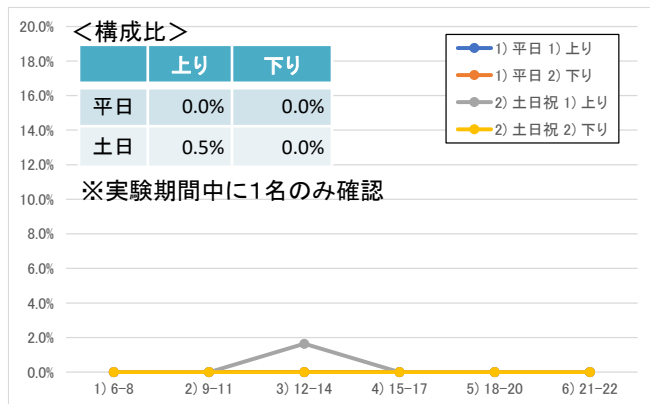
<利用者の時間帯構成比>



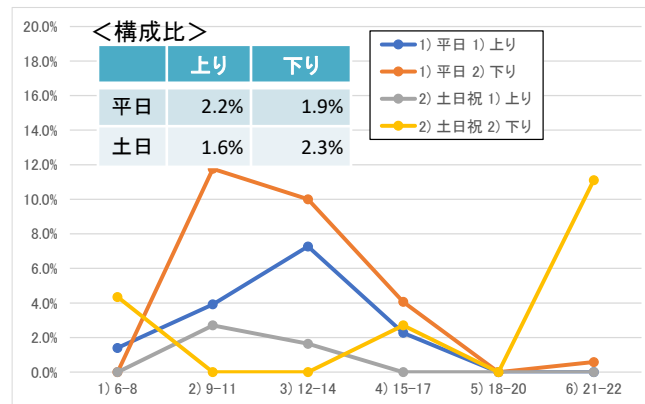
<利用者に占めるベビーカー利用者の割合>



<利用者に占める車いす利用者の割合>

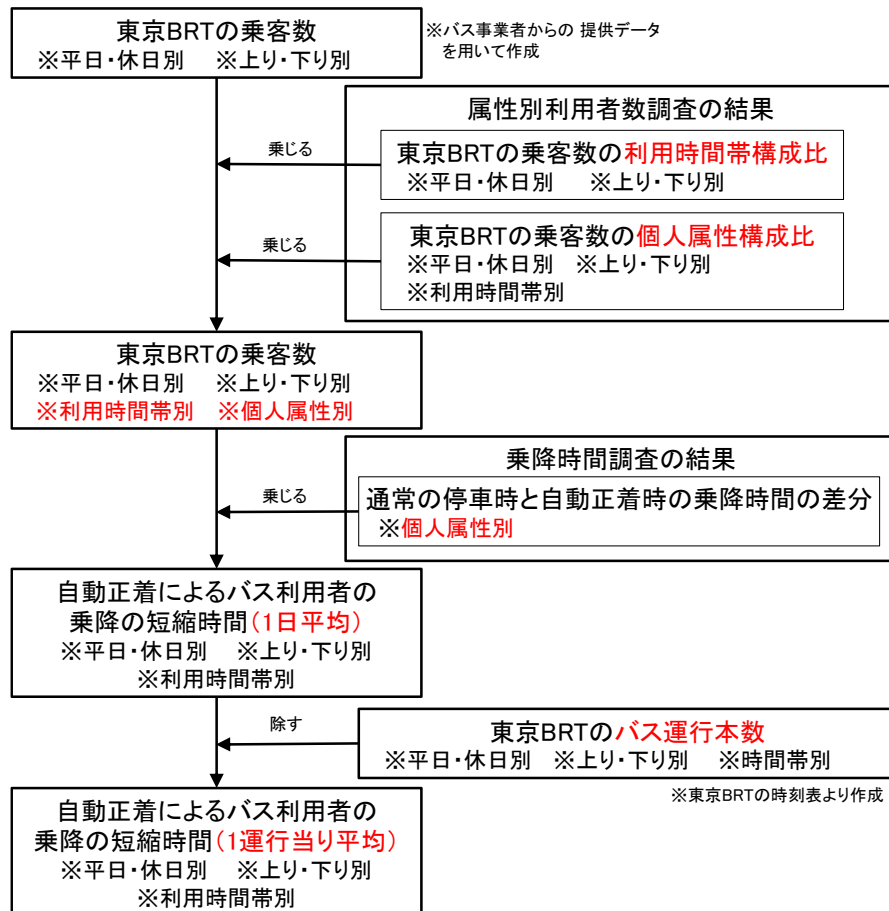


<利用者に占める高齢者(70代以上)の割合>



○東京BRTのすべてのバス停で自動正着が導入された場合を想定し、乗降時間の短縮効果を推計した。
○バス事業者から入手したデータをもとに算出した東京BRTの1日の乗客数に、利用者数調査で把握した利用者の属性構成比を乗じて、属性別乗客数を求めた。この属性別乗客数に、乗降時間調査で把握した属性別の短縮時間を乗じて、1日当り、1運行当りの時間短縮効果の推計を行った。 ※推計フローは以下の図に示すとおり。

■ 時間短縮効果の推計方法



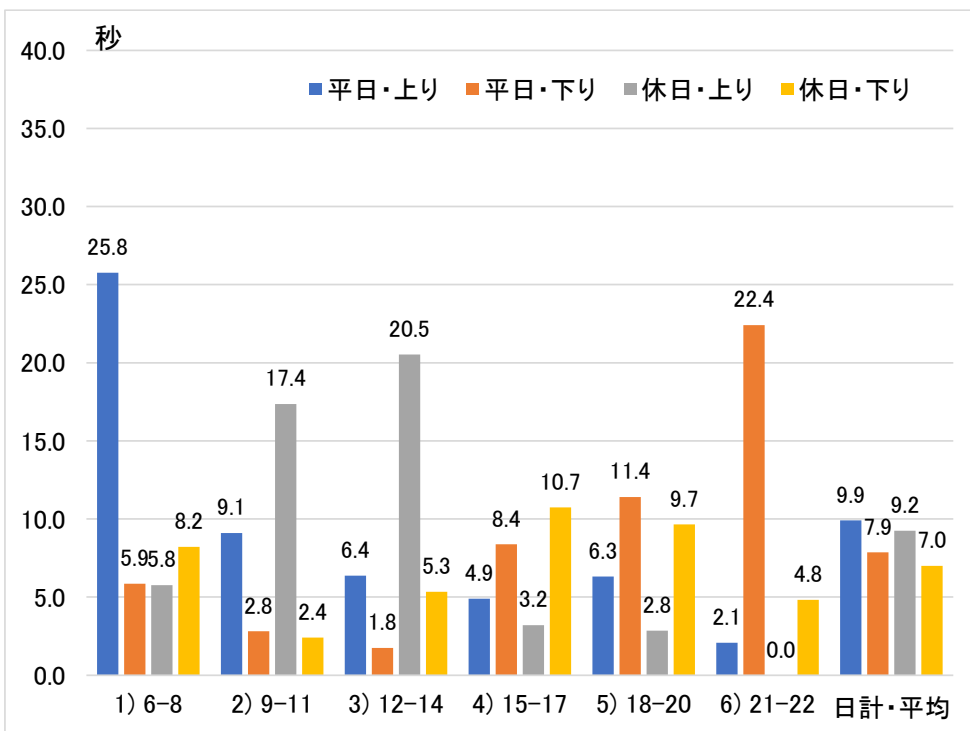
■ 推計の前提条件

- ①東京BRTのすべてのバス停で自動正着が導入される場合を想定
- ②東京BRTの利用者の総数は、バス事業者の提供データをもとに、2021年11月25日(木)～28日(日)の平休別の平均的な利用者数を想定
- ③利用者数に占める車いす利用者、ベビーカー利用者、高齢者(70代以上)の割合は、利用者数調査の結果を適用
- ④東京BRTの時間帯別の便数、各便の所要時間は、2021年11月現在の時刻表をもとに設定

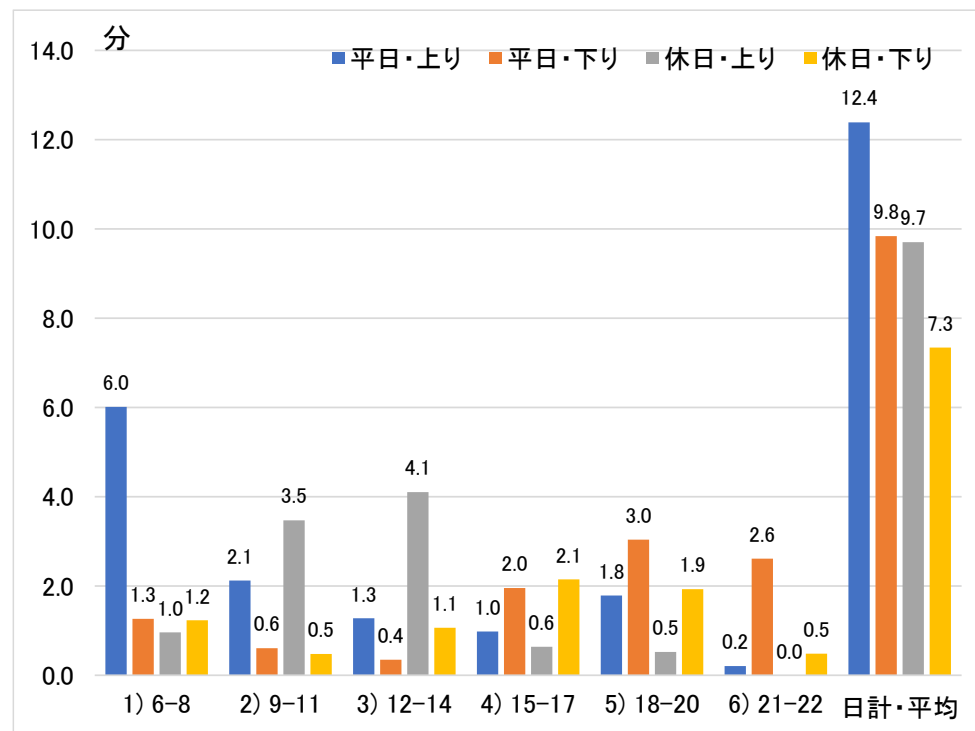
- 時間短縮効果は下図のとおりである。1運行当りでは、平日早朝・上り方面で短縮効果が最も大きく25.8秒、次いで、平日夜間・下り方面の22.4秒となっている。
- 1日当りでは、平日・上り方面で12.4分の時間短縮効果となった。

■時間短縮効果の推計結果

< 1 運行当り >



< 1 日当り・全運行計 >



○前述の時間短縮効果の算定ケースを基本ケース(0)とした上で、東京BRTの利用者数が増加するケース(1-1～1-3)、車いす・ベビーカー利用者数の割合が増加するケース(2)、東京BRTの利用者数が増加し、車いす・ベビーカー利用者数の割合が増加するケース(3-1～3-3)を想定し、時間短縮効果の感度分析を行った。

■時間短縮効果の感度分析ケース

推計ケース		乗客数の想定				
		全利用者数	車いす利用者数	ベビーカー利用者数	高齢者利用者数	その他一般利用者数
0	基本ケース	現況	現況	現況	現況	現況
1-1	全利用者数が増加 (ただし、利用者属性割合は固定)	すべての時間帯で1.5倍増加	すべての時間帯で1.5倍増加	すべての時間帯で1.5倍増加	すべての時間帯で1.5倍増加	すべての時間帯で1.5倍増加
1-2		すべての時間帯で2倍増加	すべての時間帯で2倍増加	すべての時間帯で2倍増加	すべての時間帯で2倍増加	すべての時間帯で2倍増加
1-3		すべての時間帯で2.5倍増加	すべての時間帯で2.5倍増加	すべての時間帯で2.5倍増加	すべての時間帯で2.5倍増加	すべての時間帯で2.5倍増加
2	車いす・ベビーカー利用者数の割合が増加	現況 ※ケース0と同じ	全利用者数に占める車いす利用者数の割合が、全国総人口に占める肢体不自由の障害者数の割合(1.4%)と等しくなると想定	全利用者数に占めるベビーカー利用者数の割合が、全国総人口に占める乳幼児数(0～3歳人口)の割合(2.8%)と等しくなると想定	現況 ※ケース0と同じ	車いす利用者数、ベビーカー利用者数のケース0からの増加分だけ減少
3-1	全利用者数が増加 +車いす・ベビーカー利用者数の割合が増加	すべての時間帯で1.5倍増加 ※ケース1-1と同じ	全利用者数に占める車いす利用者数の割合が、全国総人口に占める肢体不自由の障害者数の割合(1.4%)と等しくなると想定 ※1	全利用者数に占めるベビーカー利用者数の割合が、全国総人口に占める乳幼児数(0～3歳人口)の割合(2.8%)と等しくなると想定 ※2	すべての時間帯で1.5倍増加 ※ケース1-1と同じ	車いす利用者数、ベビーカー利用者数のケース1-1からの増加分だけ減少
3-2		すべての時間帯で2倍増加 ※ケース1-2と同じ	〃	〃	すべての時間帯で2倍増加 ※ケース1-2と同じ	車いす利用者数、ベビーカー利用者数のケース1-2からの増加分だけ減少
3-3		すべての時間帯で2.5倍増加 ※ケース1-3と同じ	〃	〃	すべての時間帯で2.5倍増加 ※ケース1-3と同じ	車いす利用者数、ベビーカー利用者数のケース1-3からの増加分だけ減少

※1: 肢体不自由の障害者数は、身体障害児・者等実態調査(2006;厚生労働省)に基づき、1,810千人、全国総人口は、人口推計(2006;総務省)に基づき、127,901千人。前者を後者で割ると1.4%と算出される。
 ※2: 国勢調査(2020;総務省)に基づき、0～3歳人口を総人口で除して算出。

○ケース1-1～1-3では、利用者数の増加に比例して時間短縮効果が基本ケース0の1.5倍、2.0倍、2.5倍と増加し、1-3の平日・上り方面では1日当り31.0分の時間短縮効果となった。

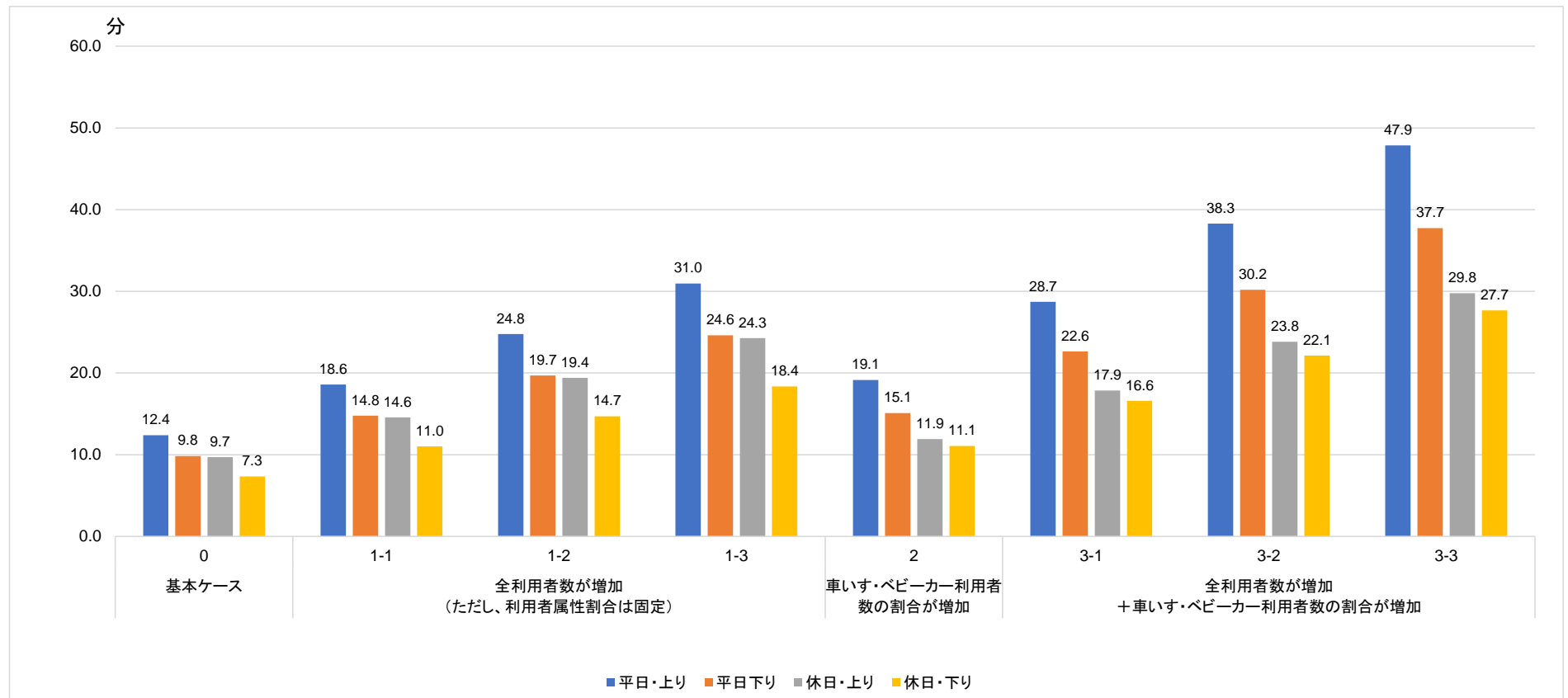
○ケース2では、時間短縮効果が基本ケース0の1.2～1.6倍増加し、平日・上り方面では1日当り19.1分の時間短縮効果となった。

○ケース3-1～3-3では、時間短縮効果がケース2と比べて1.5倍、2.0倍、2.5倍と増加し、3-3の平日・上り方面では1日当り47.9分の時間短縮効果となった。

※ ただし、ケース1-2～1-3、3-1～3-3では、一部の時間帯・便に定員オーバーや車いすやベビーカーの設置スペースの不足が生じるため、便数の増加や設置スペースの拡大等の措置が必要である。

■ 時間短縮効果の感度分析結果

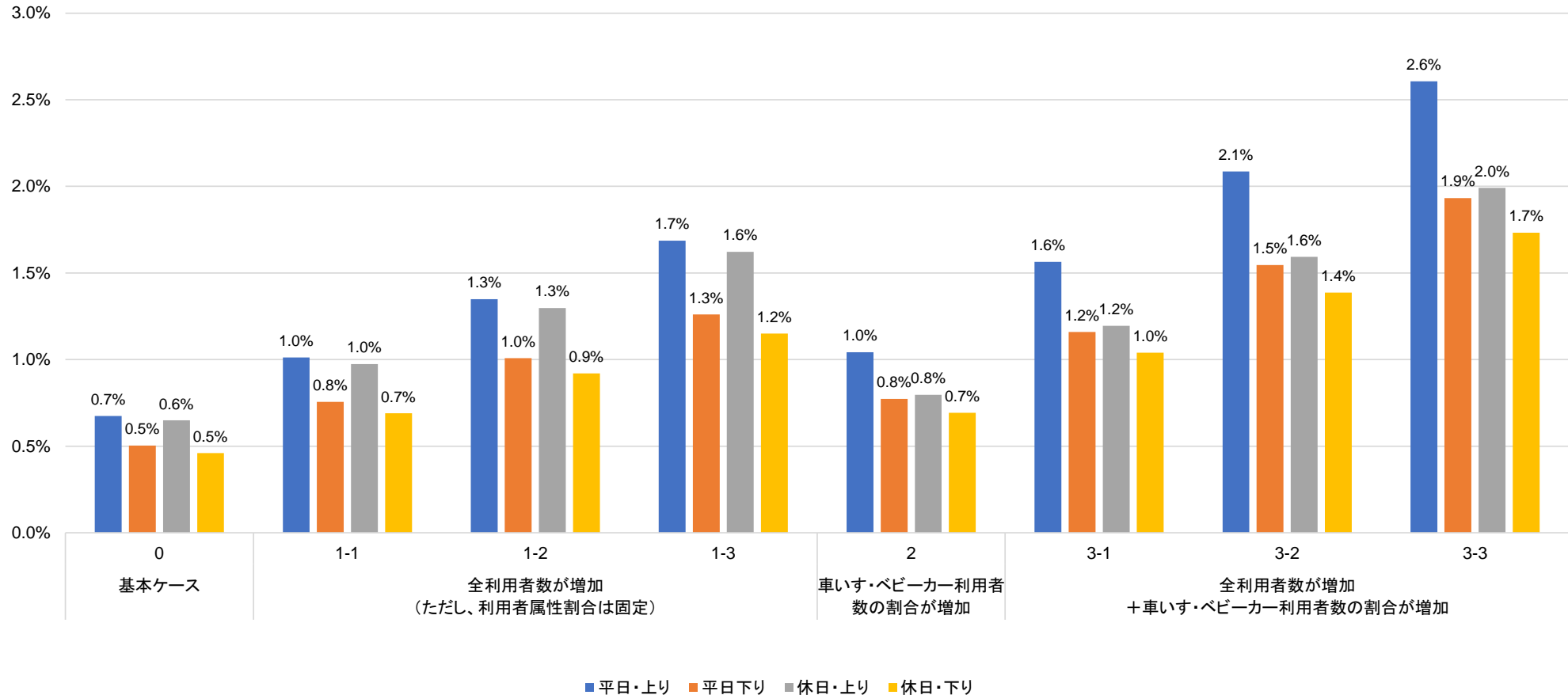
< 1日当りの時間短縮効果 >



○自動正着の導入による乗降時間の短縮を割合で示すと、平日・上り方面では、ケース1-1～1-3でバス走行時間の1.0%～1.7%の短縮、ケース2で1.0%の短縮、ケース3-1～3-3で1.6%～2.6%の短縮となった。

■ 時間短縮効果の感度分析結果

<運行時間に対する短縮時間の比>



- 通常の停車、手動正着、自動正着の停車パターン毎に、バスのステップとプラットフォームの段差によるモニターの転倒・つまづき状況を記録し、正着制御使用時の乗車時・降車時の転倒防止効果を検証した。
- 調査中、乗降時の転倒・つまづきは観測されなかった。
- 手動正着・自動正着では、車いすでもスロープを出さずに乗降できる一方、プラットフォームと乗降口の隙間に車いすの前輪が引っかかることがあった。

■調査の概要

通常停車・手動正着・自動正着それぞれにおいて、モニターの乗降の様子を調査。転倒・つまづきの有無や、転倒リスクの有無を記録した。プラットフォームは手動正着・自動正着でのみ使用した。

■通常停車の場合



車椅子はスロープ板使用
(段差・隙間なし)
車椅子以外はスロープ板なし
(段差・隙間あり)

■手動正着・自動正着の場合



全員プラットフォーム使用
(段差なし)
(隙間は場合により存在)

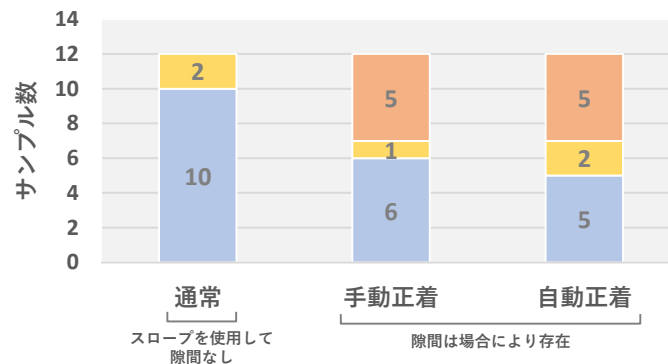
■乗降時の転倒・つまづきの有無

乗降時に転倒する人及びつまづく人は観測されなかった。

■ベビーカー利用者の乗車時・降車時の転倒リスクの有無

通常停車のように段差がある場合、ベビーカー利用者はベビーカーを持ち上げて乗降していたが、持ち上げたベビーカーが乗降口に引っかかる等の支障は観測されなかった。

■車いす利用者の中扉における乗車時・降車時の転倒リスクの有無



■引っかかりあり

➔ 観察の結果、隙間の上をゆっくり通過すると車いすの前輪が引っかかることを確認

■前輪の持ち上げあり

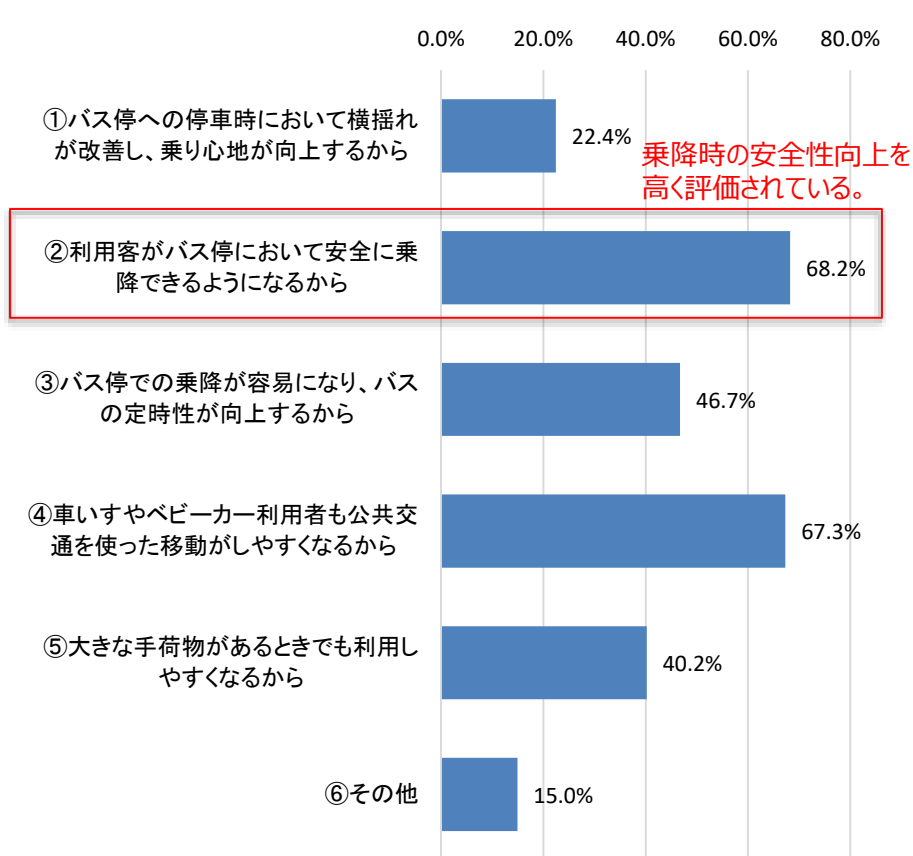
➔ 観察の結果、車いすに慣れた利用者は前輪を持ち上げて引っかかりを回避することを確認

■支障なし

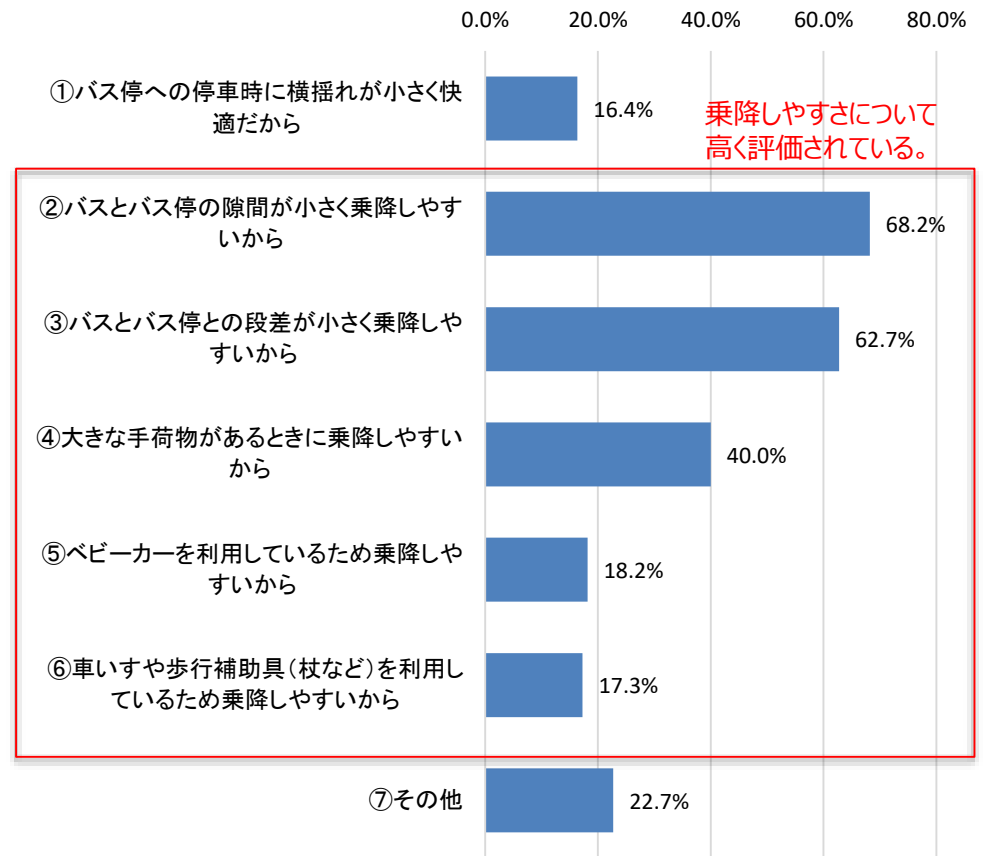
➔ 観察の結果、隙間が十分に狭い場合や隙間の通過速度が十分に速い場合は前輪を持ち上げなくても引っかからないことを確認

○モニター調査のアンケート結果をみると、隙間や段差が解消する自動正着は乗降時の安全性が向上する、と考える人が7割と多く、乗降時の安全性向上が高く評価されていた。

■ 自動正着が可能なバスが普及して欲しい理由



■ 自動正着が可能なバスを利用したい理由



(2) 社会的効果の検証 ④ 停車・発進時の転倒防止効果検証

- 通常の停車、手動正着、自動正着の停車パターン毎に、バスの停車時における操舵や加減速に伴う車体の揺れを計測し、停車・発進時の転倒防止効果を検証した。
- 左右加速度は、自動正着が最も大きい結果となった。その要因としては、誘導線読み取り開始時の自動操舵と、誘導線を短く設定したために急になったS字カーブの曲率の二つが考えられる。

■ 調査の概要

○ 加速度の記録

スマートフォンを用いて誘導線上走行時の加速度を記録

○ 被験者の転倒有無記録

車内に被験者を立たせて、転倒するか観察

○ 被験者の転倒リスク記録

車内に立たせた被験者が転倒しそうになったかアンケート調査

※いずれも2021/10/23・24の2日間、モニター調査の後に実施
 ※2021/10/24のみ、実験の合間にテスト走行を繰り返し、自動正着の運転を習熟した。

■ 停車パターン別の最大左右加速度



10/23の左右最大加速度

運転手の自動運転への習熟【なし】

※今回の調査は閉鎖空間において丁寧な運転で実施しているため、停車・発進時の横揺れは通常運行時を再現できていない可能性がある。



■ 自動正着の左右加速度が大きくなる要因



要因① 誘導線読み取り開始時の自動操舵

誘導線読み取り開始時に誘導線が車体中心から離れている時には、比較的急な自動操舵が生じる。
 ➡車体中心に誘導線が来るよう習熟することで、左右加速度を抑えられる可能性がある。

要因② 誘導線を短く設定したために急になったS字カーブの曲率

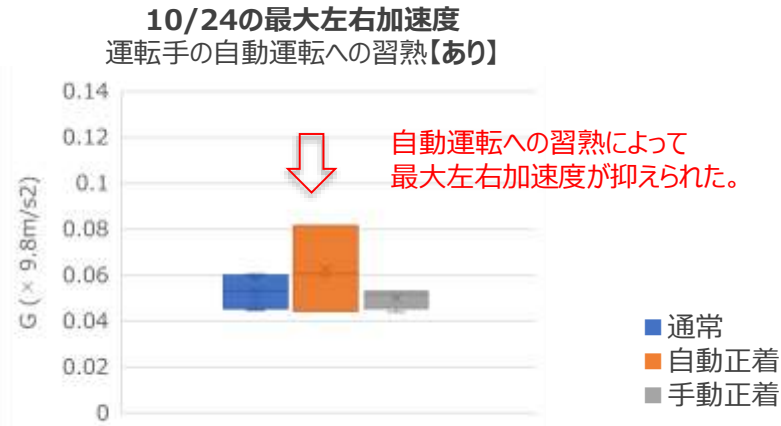
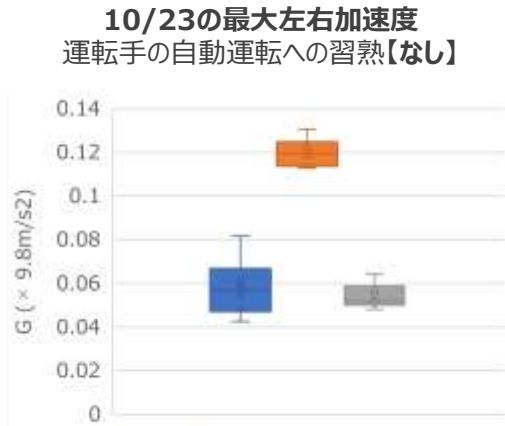
誘導線は法定線との干渉が許されず、多くのバス停に設置するには誘導線を極力短くする必要があり、今回の誘導線の設置にあたってこの考えを踏襲した結果、曲率が急になった。
 ➡中央車線寄りの完全専用レーンを採用することで法定線との干渉を回避することが有効である。

(2) 社会的効果の検証 ④ 停車・発進時の転倒防止効果検証

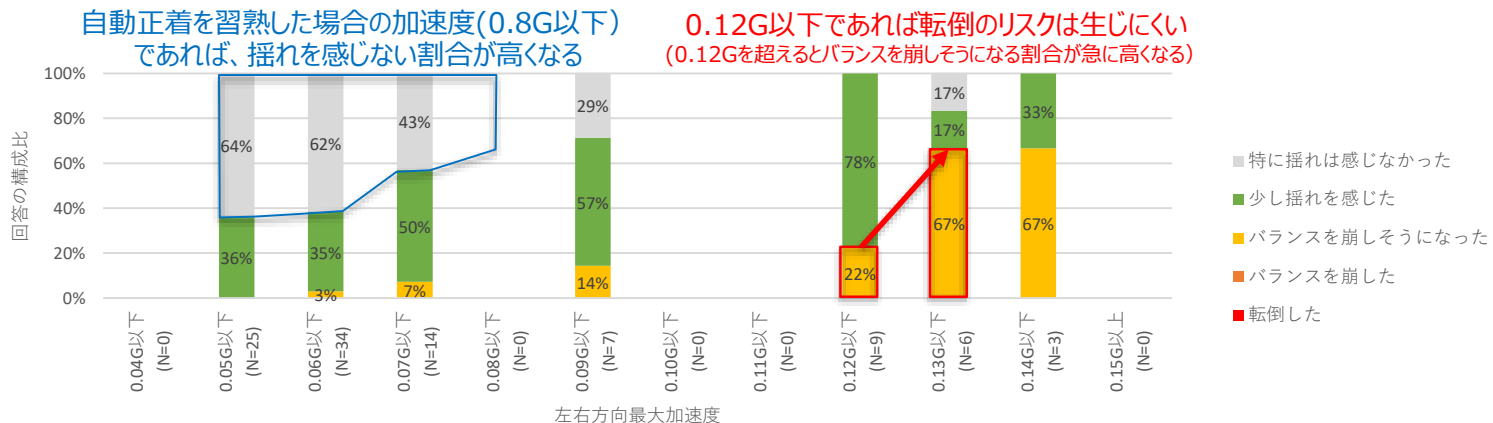
- 運転手が自動正着を習熟※することによって、自動正着における左右加速度は、他の停車パターンと同程度まで抑えられる結果となった。
- 運転手が自動正着を習熟した場合の左右加速度であれば、車内で立っている人についても、転倒リスクは生じにくいことが明らかとなった。

■ 運転手の自動運転の習熟の有無別の最大左右加速度

※ ただし、事業者からは、運転士は誘導線を車両中央に合わせるよりもミラーを見ながら車両左端を縁石に近づける方がやりやすいため、同じ時間を費やすなら、自動正着よりも手動正着を習熟した方が効果は高いとの指摘もある



■ 最大左右加速度と転倒リスクの関係



システム使用条件の明確化

- 誘導線を認識する夜間の照度条件は30lux以上であること、路面にうっすらと降雪している場合は誘導線を認識しないことを確認した。
- 降雨時は誘導線を認識しない照度が680luxとなり、降雨時は晴天時と比べて誘導線の認識に必要な照度が上昇することが明らかとなった。
- 照度不足への対応として、照明を設置することで使用可能時間を延ばすことが考えられる。

誘導線耐久性確認

- 塗装の剥離率とカメラの認識性能を確認したところ、剥離率が60%となると正着制御が行われないため、剥離率50%を越えた時点でメンテナンスが必要であることを確認した。
- 3時点で誘導線4箇所劣化状況を確認したところ、時間経過とともに剥離率は増加した。このデータから誘導線劣化のペースを線形近似し、剥離率が50%を越える時点を推計したところ、最短で約5年、最長で約10年で剥離率が50%に達することが明らかとなった。
- ただし、誘導線上を通過する車両が多くなる公道のバス停では上記より劣化速度が早くなる可能性があり、専用レーンの設置が望まれる。

正着によるバリアフリー化効果の検証

- アンケート調査の結果、自動正着は通常の停車と比較して、バスとバス停間の隙間や段差が少ないために降車しやすいと回答した被験者が7割を越えた。一方、手動正着は、隙間の平均値は自動正着と比べて大差ないが、運転手の技術によって隙間の分散が大きくなるため、隙間が大きく開いたときの評価が悪かった。
- 自動正着バスを今後「利用したい」もしくは「どちらかと言えば利用したい」と回答した人の割合は9割を超えた。理由として「バスとバス停の隙間が小さく乗降しやすいから」や「バスとバス停の段差が小さく乗降しやすいから」を挙げる人が6割を超え、自動正着はバリアフリー効果が高いことが明らかとなった。

正着による乗降時の時間短縮効果

- 自動正着の乗降時間を通常の停車と比較すると、ベビーカー利用者で3.7秒、車いす利用者で32.4秒、高齢者・一般の乗客で0.9秒、乗降時間が短縮した。
- 東京BRTの利用者属性は、ベビーカー利用者は平日は上り・下りとも1%以下、休日で上り3.2%、下り1.5%、車いす利用者は休日の昼間に1人であった。
- 現在の東京BRT路線のすべてのバス停で自動正着が行われた場合、1運行当り最大25.8秒、1日当り最大12.4分の時間短縮効果が確認された（総走行時間に対する短縮時間の比は0.7%）。
- 現在の東京BRTは本格運行ではなく、コロナ禍でもあるため利用者数は多くない。しかし、将来においては、利用者が現状よりも増加する可能性が高く、また、車いす利用者やベビーカー利用者の割合も増加する可能性がある。そのため、これらを想定した感度分析を行った。利用者数が現状の2.5倍に増加し、車いす利用者・ベビーカー利用者の割合が総人口に占める車いす利用者・ベビーカー利用者の割合まで高まると、1日当りでは最大47.9分の時間短縮効果となった（総走行時間に対する短縮時間の比は2.6%）。

4. まとめ

乗車時・降車時の転倒防止効果検証

- 通常の停車、手動正着、自動正着のいずれにおいても乗降時に転倒・つまずく人は皆無であった。

<転倒リスク：車いす利用者>

- 通常の停車ではバスとバス停間の隙間が大きいため、車いす利用者は自力で乗降できず、乗降するためにはスロープ板の使用が必要である。これにより、乗降時の隙間はなくなるが乗降時間は長くなる。
- 通常の停車でスロープ板を使用した場合と比較して、自動正着・手動正着はバスとバス停の間にわずかな隙間が生じるため、車いすで隙間をゆっくりと通過する際に前輪が隙間に引っかかることがあった。
- ただし、車いすに慣れた利用者は乗降時に前輪を上げて走行するため引っかからないこと、隙間が狭く通過速度が十分に速ければ前輪が引っかからないことなどから、転倒リスクが低いことも確認した。

<転倒リスク：車いす利用者以外>

- 自動正着は通常の停車と比較して隙間や段差が解消するため、「自動正着が乗降時の安全性を向上させる」と回答した人が7割と多く、自動正着により乗降時の転倒防止効果が高まることが確認された。

停車・発進時の転倒防止効果検証

- 左右方向の最大加速度は、自動正着が通常の停車や手動正着と比較して大きな値となったが、いずれも転倒する人は皆無であった。
- 自動正着は誘導線進入時と誘導線のS字カーブを通過する際に横揺れが生じるが、運転手の自動正着に対する習熟度を高めることや、誘導線を長く設定してS字カーブの曲率を緩和することで改善が可能である。
- 誘導線は法定線との干渉が許されず、多くのバス停に設置するには誘導線を極力短く設定する必要がある。今回の誘導線の設置にあたっては、この考えを踏襲して誘導線を短く設定したため、S字カーブの曲率は急である。今後、誘導線の曲率の緩和のため、専用レーンの設置などを検討する必要がある。

検証項目以外の課題

(1) 事故発生時の責任について

- 誘導線式正着制御はLevel2の運転支援システムのため、事故発生時（前後、左右方向の加減速による車内転倒事故を含む）は運転手の責任となり、事業者としては採用のハードルが高い。
- 少なくとも車内転倒事故に関しては、事業者、運転手が「立席時は転倒防止のため吊革等につかまること」の注意喚起を十分行うことにより、転倒者の自己責任とすることなどの検討も必要である。

(2) 誘導線の整備主体について

- 誘導線の整備主体を誰とするかについては、現状、明確化されておらず、事業者に誘導線の整備を求めると採用のハードルは高くなる。
- したがって、誘導線を道路構造物の一部として道路管理者が整備すべきことを明確化することが望ましい。

(3) 専用レーンの設置について

- BRTとしての速達性・定時性確保のためには、諸外国のBRTに多くみられる中央車線寄りの完全専用レーンが好ましい。
- このことにより、正着制御に使用する誘導線の耐久性向上、誘導線の設置が可能なバス停の増加、誘導線の曲率の緩和による横方向加速度の低下が期待される。

本報告書は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が管理法人を務め、内閣府が実施した「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／自動運転（システムとサービスの拡張）」(NEDO管理番号：JPNP18012)の成果をまとめたものです。