

専用走行空間を活用したバス輸送の適用可能性に関する基礎的研究*

Feasibility study on bus transit system utilizes the exclusive busway*

矢部努**・中村文彦***・大蔵泉****

By Tsutomu YABE**, Fumihiko NAKAMURA*** and Izumi OKURA****

1. はじめに

都市交通における公共交通輸送の重要性が高まりつつあるが、これまでバス輸送の重要性についてはそれほど深く認識されていない。例えば、軌道系交通機関の導入を検討している都市においては、新交通システムやモノレール、LRT等を導入した場合の比較検討は行われているものの、代替案として専用走行空間を活用したバス輸送システムに着目した例はあまりない。

既存の研究¹⁾によれば、時間・方向あたりのバスの最大輸送力は、中量輸送システムと遜色ない程度まで高められるとされている。また、近年アメリカでは、バス専用道路を伴って高度化されたバス輸送（BRT：Bus Rapid Transit）が注目され、国家的戦略のもとでの検討がなされており、中量輸送システムに匹敵する輸送力を低コストで実現している。我が国においても、これまで軌道系交通機関へのニーズがありながら、空間的・財政的な問題から軌道系交通の整備が困難であった都市圏において、その代替案としてバス輸送システムの適用可能性を検討する意義は大きい。

また、2002年2月から実施された乗合バス事業の規制緩和を受けて、これまでのようにバス事業者が自治体の関与なしに独自に運営するスタイルが標準ではなくなり、バス事業者と自治体、あるいは市民との協働作業としてのバス輸送計画が求められる時代に転換しつつある。道路管理者としての自治体は、バス輸送のためのインフラ整備に関しての工学的な技術論、及び新規に都市交通システムを導入する際の政策判断の客観性を明確にする必要性が高まっている。

そこで本研究は、バス輸送計画におけるインフラ整備とその運用方法に着目し、専用走行空間を活用したバス輸送システムの輸送能力評価に関する論点を整理すること、専用走行空間におけるバス運用方法と処理能力の関係を評価すること、輸送能力とコストの関係を踏まえた比較分析によりバス輸送の適用領域についての考察を行うこと、以上3点を目的とし、以下の手順で分析を進めた。

まず、バス専用走行空間に関する既存の研究成果と先進事例について整理し、バス専用道路の輸送能力に関する評価分析の視点、及び代替軌道系交通機関との比較を行う際の論点を整理する。次に、専用走行空間でのバス運用代替案と評価指標を設定し、シミュレーション計算により処理能力との関係を考察する。なお本研究では、これまでバス優先方策の評価において適用実績があり、汎用性が高いと考えられるtiss-NET^{2,3)}をシミュレーションモデルとして用いた。さらに、バス輸送の運用代替案及び代替軌道系交通機関の輸送能力とコストの関係を考慮した上で、空間的な前提条件等を揃えた比較分析に基づき、専用走行空間を活用したバス輸送が相対的に有利となる領域について考察する。

2. 既存の研究成果と導入事例、及び論点の整理

(1) バス専用走行空間の活用事例整理

バス専用走行空間は、路面標示により一般車走行車線と区分されるバス専用レーンと、縁石等により物理的にバス以外の車両の通行が制限されるバス専用道路に分類できる。前者の例として、わが国でもバス専用レーンが設定されている都市が多数あり、ピーク時間帯規制等による運用がなされている。ただし、一般車の走行車線と物理的に分離されていないため、バスの運行頻度が低い場合や一般車の交通量が多いピーク時（渋滞時）には、バスレーンを遵守しない車両により、バス専用レーンが機能しないことが多い⁴⁾。

バス専用道路は、特に北南米の各都市で特徴的な活用事例が多く見られる。この代表例については既存の研究成果^{5) 6) 7)}によっても整理されており、いずれも都市計画上の位置づけが明確になされている。これらの事例における空間確保の方法や運用上の工夫点など、いくつかの

*キーワード：公共交通計画、バス専用道路

**正員、修(工)、横浜国立大学大学院環境情報研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

TEL&FAX: 045-339-4031 E-mail:yabe@cvg.ynu.ac.jp)

***正員、工博、横浜国立大学大学院環境情報研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

TEL&FAX: 045-339-4033 E-mail:nakamura@cvg.ynu.ac.jp)

****フェロー、工博、横浜国立大学大学院工学研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

TEL&FAX: 045-339-4032 E-mail:okura@cvg.ynu.ac.jp)

表1 代表的なバス専用道路の活用事例

都市名 (共用年)	バス専用道路 総延長	空間確保策	運用の工夫に関する視点と具体例		
			路線計画	施設整備の工夫	車両／運行システム
シアトル (1991)	2km	地下トンネル	・土地利用計画との整合 ・TODの適用	・LRT への転用を想定した専用地下トンネル	・ハイブリッド連節バス ・トンネル内は電気走行
オタワ (1983)	31km	貨物鉄道廃線の 転用	・都心部から放射4方向への 幹線－支線網の整備と TODの適用	・沿線開発にあわせた段階的 な整備 ・乗り継ぎターミナル	・高規格な走行路と停留所間 隔により、平均速度 50km/h 以上の高速輸送を実現
ピッツバーグ (1977)	35km		・空港と都心部の接続等	・LRT との共用走行路	－
マイアミ (1997)	14km		・起点で通勤鉄道に接続	・広幅員の専用走行路	・交差点での優先信号
クリチバ (1974)	75km	土地区画整理	・放射型の都市軸、及び 土地利用計画との整合	・大量輸送のための停留所と 乗り継ぎターミナルの整備	・高容量の3連節バス、 車外運賃収受 ・交差点での優先信号
ポルトアレグレ (1977)	15km	道路新設時等	・幹線と支線の統合により乗 り換えが不要	・6 台同時停車可能な停留所 ・嵩上げ島式停留所	・バスコンボイ運行による高 容量輸送
北九州 (1991)	3.3km	鉄道廃線敷 の転用	(都市交通計画上の 位置づけは特になし)	・旧電停を停留所として活用	・オフピークでも 10 分間隔 で運行
岡崎 (1964)	2.2km			・旧単線軌道のため、すれ違 いポイントで相互通行	・朝ピーク時は約 5 分間隔で 運行
富山 (1980)	2.3km			・一般車両の進入を防止する ため、遮断機を活用	・朝ピークのみ平幹線道路 の渋滞を避け、片方向運行

※総延長は専用道路複数区間の合計

視点から整理すると、表1のようにまとめることができる。一方、わが国のバス専用道路については、バスターミナルなどを除けば、鉄道廃線敷をバス専用道路に転用した例が数箇所存在するが、都市交通計画において明確に位置づけられている例はない。また、名古屋の基幹バスは、物理的に一般車走行車線と分離されていない点で、バス専用道路という定義には当てはまらない。

海外の事例では、バス定時性や信頼性の向上に加え、バスによる大量輸送を意図して導入される場合も多い。例えば、ブラジルのクリチバでは、放射型の都市軸を高密度化した都市構造と土地利用計画を整合させ、バス専用道路を高容量の3連節バス（全長25m、定員270名）により運用することで、1時間あたり1方向14,000人以上の輸送力を実現している^{8) 9)}。ただし停留所間隔は400mのため表定速度は20km/hとなっており、高速輸送よりはむしろ大量輸送をコンセプトとしている。

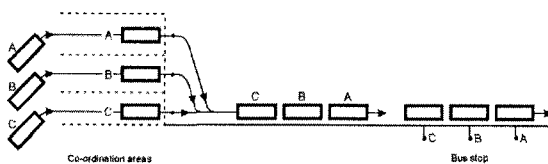
また、同じくブラジルのポルトアレグレでは、都心部

から郊外方向に向かうバスを方向別に3つのグループ（A－B－C）に分け、予め最大6台のバス隊列を形成させている。これは、図1のようにバス専用道路起点にて信号制御により走行順序を整理することで、中間の停留所から乗車する利用者が、自分の乗りたいバスが隊列の中のどのあたりに停車するか分からない、といった混乱を防ぐための工夫であり、このシステムは Bus Ordering と呼ばれている。この運用方式では、ある程度の表定速度（19km/h）を保ちつつ1時間あたり1方向最大360台の高頻度バス輸送が可能であり、バス定員を85名とすれば、3万人h以上の輸送力を達成することが可能となる。

このように、専用走行空間でのバスの運用方法を工夫することで、中量輸送機関と同等以上の輸送力を確保することが可能である。したがって、バス輸送に関するインフラ整備が定時性向上に寄与する度合いや、他の交通機関との比較を行う上で、運用上の工夫等の各種条件下での輸送能力を評価することが重要となる。

（2）ガイドウェイバスの活用事例整理

縁石や側方ガイド壁により、物理的にバスの専用走行空間を確保した特殊な例として、ガイドウェイバスが挙げられる。ガイドウェイバスは、1980年にエッセンで試行的に導入され、その後アデレードでは、郊外居住地と都心部を結ぶ全長12kmにわたるガイドウェイバス専用

図1 Bus Ordering概念図¹⁰⁾

道路により大規模に運用されている。わが国においても、名古屋市内で導入がなされている。

一方、イギリスの各都市では、ボトルネックとなる交差点の渋滞長に相当する数百 m において、物理的にバス車両のみが走行可能なガイドウェイを設置している。また、優先信号を組み合わせることで、結果的に一般車両をバスが追い抜くことによりバスの定時性を高め、一般車両への影響を最小にしている⁹⁾。

以上の例は、車両側方に案内車輪をつけたバスが、ガイドウェイを走る方式で運行されているが、近年では、各種技術を導入した新しいガイドウェイシステムが実用化されており、それらの事例に関して動機づけとタイプにより、表2のように整理できる。

これらのシステムは、軌道系機関に比べ安価な整備コストとバスに対する悪いイメージの脱却に主眼を置いているが、軌道系交通機関との比較を行う際には、その輸送力と運営費用との関係からも評価を行う必要がある。

表2 ガイドウェイバス導入都市の分類

導入タイプ 動機づけ	試行的 (技術検証)	短～中區間型	長區間型 (延長 5km 以上)
新交通バス システム	・エッセン ・淡路島	—	・アデレード ・名古屋
LRTの代替 として	—	・ラスベガス	・ナンシー、カーン ・アイントフォーベン ・トリエステ
バス優先策 として	—	・マンハイム ・リーズ ・イプスウィッチ ・ブラッドフォード	—

(3) バス専用道路の処理能力に関する研究事例

バス専用道路の処理能力に関する既存研究は、中村¹⁾により整理されている(表3)。この中では、①指針等に示される数値、②実績値としての数値、③分析により算定された数値についてそれぞれ整理されている。

ただし、これらの輸送力は、算定のための詳細な算定根拠が示されていないものや、特殊な条件下(停留所のない2車線の高速道路、高度な信号制御、途上国での実績)における実績値であることに注意を要する。また海外では、バス専用道路の処理能力に関してのいくつかの条件設定と評価指標を整理した上で、シミュレーションを用いた評価により、HCM(Highway Capacity Manual)¹¹⁾の設定値との比較を実施した例がある^{12),13)}。

ところで、高頻度で高容量のバス輸送を行うためには、高度な運行制御や停車施設、乗務員の確保が必要条件となる。これまで、輸送力とコストの関係に着目し、バスと他の交通機関との比較分析を行った研究事例はあるが、

その際、交通機関の輸送能力値は一定としており、本研究のように運用方法の違いにより輸送能力のパラメータを変動させて評価した例はない。

表3 バス輸送能力の例¹⁾

分類	輸送力	前提条件等
①指針等	6,000～ 12,000	80人定員×75～150台/h (算定根拠の詳細は不明)
②実測値	32,560	停留所のない2車線バスレーン
	29,000	専用道路上を隊列走行(途上国)
③分析値	53,000	高速道上専用レーンで停留所なし
	30,600	バスコンボイ、運賃車外払等

※輸送力の単位はいずれも、人/時間/方向

(4) BRTに関する研究事例

BRT(Bus Rapid Transit)は、バス高速輸送の略で、「バス車両をベースとして、バス専用道路等の運用により軌道系交通と比較しても遜色のない機能を有し、かつ柔軟性を兼ね備えた都市交通システム」と位置づけることができる¹⁴⁾。現在北米を中心とした数都市で導入が進んでおり、特に米国では国家的戦略のもとで、いくつかの州の交通省とMPO(Metropolitan Planning Organization, 都市圏計画機構)により、BRT導入促進に向けたプログラムが実施されている。GAO(米国会計検査院)が公表した調査報告書¹⁵⁾では、BRTとLRTの両方を運営している6事業者のデータを比較した結果、運営コスト面ではBRTがLRTよりも相当な優位性があることを示している。

BRTの目的は、大きく2点考えられており¹⁶⁾、ここでは、車両等の工夫、施設整備の工夫、運用方法の工夫の3つの視点に分類し整理した(表4)。目的の1点目は「移動時間の短縮」である。これは単にバス輸送を高速化するだけでなく、従来のバス輸送で生じていた様々な遅れ時間について、様々な手法を組み合わせることにより、できる限り減少させようという考え方である。具体的には、停留所における乗降時間やバスの乗り換え時間の短縮、あるいはバス専用道路や信号制御等の優先施策によりバスの定時性を向上させることなどがこれにあたる。

もう1点は「利用しやすいシステム」である。この中には移動時間の短縮による利便性の向上も含まれているが、その他、所要時間情報提供等のソフト面や、停留所やバス車両のユニバーサルデザイン等も改良点の1つである。また、マクロ的には土地利用施策としての都市交通軸としての考え方も含まれている。

(5) バスの輸送能力算定に関する論点と分析課題

専用走行空間を活用したバス輸送の評価に際しては、

表4 BRTの目的と工夫例

分類 目的	車両等の工夫	施設整備の工夫	運用方法／システムの工夫
移動時間の短縮	○運賃収受方法の改善 ○車両低床化、及び停留所との段差解消等による乗降時間短縮	○バス専用道路、HOV レーンの整備による速度の向上	○高頻度サービスの提供 ○停留所間隔の遠距離化 ○バス優先信号制御
利用しやすいシステム	○斬新な車両のデザイン ○車両のユニバーサルデザイン ○バス車両の大容量化	○特徴的な停留所のデザイン ○停留所のユニバーサルデザイン	○所要時間・待ち時間等の情報提供 ○路線の分かりやすさの向上 ○土地利用施策との整合

他の交通システムとの比較を行う上で、その輸送能力算定の理論的・実証的な検証が必要となる。

公共交通機関の輸送能力を決定する要因としては、①空間的な制約、②輸送にかかる費用、③法的な制約などの制度面、④運用方法などの技術的側面、の4つに大きく分類できる。例えば、利用可能な空間と費用が無限であれば、バスの各種技術を活用することで鉄道等の軌道系交通機関と同等の輸送力を実現可能である。ただし、その場合には鉄道並みの大規模な停留所施設や乗り継ぎターミナルが必要であり、運行に必要な乗務員も増加するため人件費の負担が非常に大きくなることを考慮しなければならない。また、空間的な制約が発生する場合にも、技術面での工夫が必要となる。ここでの技術とは、バスの必要走行空間を低減させる車両技術や、停留所での停車時間を減少させる工夫が考えられる¹⁷⁾。また技術革新は、開発費用として輸送コストに反映されるとともに、現行の法制度との関連を検討する必要がある。

本研究では、各要因の相互関係を明らかにするための手法として、技術的・工学的な側面から輸送力に着目したミクロ的なアプローチと、各制約条件間のトレードオフに着目したマクロ的なアプローチを整合させた分析方法を提案する。具体的には、まずバスの輸送力を決定する技術的要因として、車両性能、車両運用方法、運行制御に関する各種技術（信号制御や隊列走行等）などを考慮した上で、シミュレーションにより、単位時間当たりの輸送力や旅行速度等についてミクロ的に評価する。一方、輸送力評価に関わる技術的側面以外の要因の相互関係を明らかにするため、それらのトレードオフについてマクロ的に評価する。例えば、ある輸送需要が与えられた際に、バス輸送で処理するために必要なシステム構成やサービスレベルと費用との関係や、同じ条件を軌道系交通システムで達成するために要する費用や空間的な制約条件との関係を整理することが考えられる。これらのことを踏まえ、交通システム比較分析の際のマクロ的視点と仮説等を表5に整理し、相互の関係を図2に示した。

第3章、第4章では、その一部の項目について簡単な前

提条件下での試算結果をもとに考察を行い、今後の展開について論じる。

表5 比較分析に関するマクロ的な視点の整理

記号	比較分析の視点	考え方、仮説等
a	必要とする空間	・各種補助制度や現行法制度との関連性の検討が必要
b	用地費以外の建設費 (第4章で試算)	・軌道系交通システムに比べ、バスは安価
c	運営費 (第4章で試算)	・高頻度輸送の際は、乗務員数の関係からバスが相対的に不利
d	沿線への環境負荷	・軌道系交通システムに比べバスは影響大であるが、技術次第で改善の余地あり
e	運行頻度と表定速度 (バス輸送に関して第3章で試算)	・停留所における処理能力と停留所間隔に依存 ・保安様態によるが、軌道系に比べてバスは高頻度運行が可能
f	適用法規と補助制度	・インフラ整備の法制度上の位置づけを明確にする必要
g	幹線支線接続の利便性	・直通運転が可能のためバスが有利
h	沿線土地利用形態	・停留所間隔次第で、拠点開発か線状開発の形態をとる
i	段階的整備の柔軟性	・沿線開発動向や需要の不確実性に対してはバスが有利

※網掛けは、第3章以降で試算を行った項目

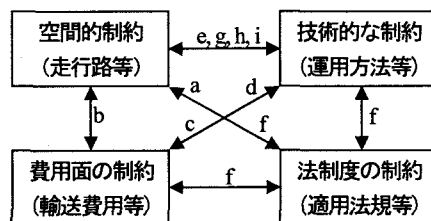


図2 マクロ的な視点の相互関係

3. 専用走行空間におけるバス運用方法と処理能力の評価

本章では、前章で整理した先行事例や分析の視点に基づき、バス専用道路での停車方式の代替案を設定した上で、簡単な前提条件下でのシミュレーション計算を行う。算定結果の評価に関しては、バスの輸送力と表定速度の関係等、処理能力に関する評価指標を設定し、専用道路を活用したバス輸送の処理能力について考察を行う。

(1) 交通システムの輸送力に関する定義

交通システムの輸送力は、一般的に、ある条件下で路線上の任意の地点を1時間に通過することができる最大の編成数（バスの場合は車両数）として定義される¹⁸⁾。路線上の任意の地点を通過する車両の数である運行頻度は、当該時間帯の路線の運行間隔の逆数であり、路線の運行頻度は、路線上の各断面において運行間隔が最短となる地点により規定される。一般に、利用者の乗降のために停車する駅（停留所）で達成される運行間隔は、路線上の任意の地点よりも必ず大きくなるため、交通システムの輸送力は、停車時間の最も長い駅（最大の乗降客を処理する停留所）の輸送力により支配される。

通常、バスの運行間隔は、車両の加減速度や停留所の停車時間、及び信号交差点での遅れ時間を考慮する形で算定を行う。また、一般車両が混在する都市部の道路上でのバス輸送においては、上記の要因のほか、連続する信号交差点や路上駐車車両の影響を考慮する必要がある。ただし、本研究で評価の対象とするバス専用道路は、バス輸送の高速性と定時性を高めるために一般車両の進入を物理的に排除するとともに、一般道と交差する場合には立体的に分離するか、平面信号交差点を設置する場合においても、その大半はPTPS（公共車両優先システム）によりバスに優先的に通行権を与えるというコンセプトに基づいている。したがって、専用走行空間上のバス輸送に関しては、停留所での停車時間、及び信号交差点での待ち時間の影響を考慮することで、概ねバスの輸送力を評価できると判断した。

ところで、簡略化された計算では、停留所での停車時間は平均的な値で議論されるが、停留所における乗降客の発生は様ではなく、各車両の停留所停車時間にはばらつきが発生する。このためバスを高頻度運行する際には、この停車時間の分散により停留所での待ち行列が発生することがあり、いわゆる団子運転の一要因となる。したがって、このような状態を再現するためには、停留所停車時間の変動、及び信号交差点における優先信号制御の有無、を考慮したシミュレーションによる輸送力の評価が有用となる。

(2) 前提条件の設定

ここでは、以上のことを考慮したシミュレーションの実施に先立ち、いくつかの前提条件を整理する。

バス専用道路の処理能力の分析に関しては、実際の走行実績データを用いた例¹²⁾や、仮想的なコリドーを設定した上で計算を行った例¹³⁾がある。わが国では、計画的にバス専用道路を整備し運用された例が少なく、実際の運行データの入手が困難であるため、本研究では、後者の手法と同様、仮想的な条件下で計算を行う。

前節で示したように、本研究で評価の対象とするバス専用道路は、緊急車両以外の一般車両の進入がなく、一般道と交差する平面信号交差点の設置は最小限に留められていること、専用道路においては信号交差点が連続的には配置されないこと、及び大半の信号交差点はPTPSによりバスの優先制御が行われていることを前提とする。

ここで、本研究で評価の対象とするネットワークとして、図3に示すような単一の信号交差点を含むコリドー（片側1車線のバス専用区間2km）を設定する。この区間においては、一般車の進入はなくバスのみが走行可能とし、規制速度は50km/hに設定する。また、停留所は500m間隔に4つ設置し、バス車両は全ての停留所に停車をすることとする。なお、表定速度の評価は対象区間においてのみ行うこととし、起終点でのバスの折り返し時間については考慮しない。

専用走行空間におけるバスの輸送力の評価に際しては、厳密には比較的長い区間での、連続する信号交差点の影響を考慮すべきであるが、サービスに影響を与える要因の多くは停留所での停車時間とその分散と信号交差点での優先制御の有無に集約されること、及び、本研究は、専用走行空間を活用したバス輸送の適用可能性を評価するための基礎的な考察を目的としていることから、シミュレーションの前提条件設定の妥当性は確保されていると考える。

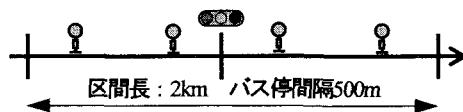


図3 シミュレーション計算に用いるコリドー

(3) バス停車方法に関する運用方法代替案の設定

バス高頻度運行区間における運用方法の考え方としては、バスの輸送力を高める停留所設計の工夫、バスのサービスレベル（表定速度）を維持する工夫、が考えられる。ここでは、通常の運用方法（各停留所に順番に1台ずつ停車）の他、高容量の3連節バス（全長25m、定員270名）による運用、各停留所において複数の車両が同時に停車・乗降可能なバスベイを設置する方式、停留所でのバス同士の追い越しを認める方式、信号制御により予めバスの隊列を形成させる方式、の4点に着目した。

本研究では、それらの組み合わせの中から、分析で適用する運用方法代替案を表6のように分類し、計算を行う。

表6 バス運用方法代替案の分類

運用方法 (設定ケース)	バスの 追越し	バスベイ数 (同時停車台数)	備考
1 通常運行方式	不可	1台	
2 高容量バス輸送 (3連節バス)	不可	1台	全長25mの 車両で運用
3 複数バスベイ &同時停車可能	可能	最大2台	
4 隊列運行方式	不可	最大3～6台	最大6台の 隊列走行

(4) 計算に関わる変動要因と評価指標の整理

バス輸送能力は先に指摘したとおり、車両の加減速度や停留所の停車時間、及び信号交差点での遅れ時間等に依存する。本研究では、各運用方法でのバス輸送力の限界を把握するために、先にバスの運行頻度を与えた上で、停留所の停車時間や信号の影響を考慮し、シミュレーションにより評価対象区間の平均旅行速度やロスタイムを算出する。

(a) 変動要因の設定

シミュレーション上での変動要因（計算条件）の設定方法を表7に示す。

①バスの運行頻度

バスの運行頻度（1方向1時間あたりの運行本数）については与件とし、60～360台/h・方向の範囲で合計6パターンを設定する。

②停留所停車時間

本分析は、ピーク時の輸送力を想定していることから、各路線の1時間帯の需要は大きく変動しないと仮定した。したがって停留所停車時間については、全車両・全停留所共通とし、表7に示す平均値を設定した上で分散を一律0.1に設定する。

③信号青時間比（g/C）

表7 変動要因の設定

変動要因	単位	設定値
バス運行頻度	台/方向・h	60, 90, 120, 150, 180, 360 の計6パターン
各停留所 平均停車時間	秒/停留所	10, 20, 30, 40, 50, 60 の計6パターン (分散は一律0.1に設定)
信号青時間比 g/C	—	1.0, 0.5の計2パターン

※信号青時間比は現示の有効青時間gとサイクル長Cの比をとる

中間信号交差点の従方向青時間比については、1.0, 0.5の2パターンとする。青時間比1.0とは、一般には信号サイクル長に対して従方向青時間が100%割り当てられていることを示すが、ここでは、優先信号制御により信号交差点でのロスタイムが全く発生しないケースとして、青時間比1.0のケースで代替することとする。

(b) 評価指標の検討

バス専用道路でバスを運用の関連する主体について、バス利用者、及びバス事業者（バス運転士）のほか、一般道と平面交差する場合には、信号交差点での一般車への影響を考慮する必要がある。

バス利用者については、利便性に関する指標として、停留所の待ち時間、バス乗車時間が挙げられるが、ここではピーク時の高頻度輸送を想定しているため、前者は考慮しない。また、後者については平均的なサービス指標である表定速度を用いて評価する。

バス事業者については、事業効率性を示す指標としての表定速度、及び高密度運行に起因して発生する停留所や信号交差点での先行バスの発車待ち時間（ロスタイム）を評価する。

交差道路を走行する一般車に関しては、信号交差点での優先信号制御により負の影響を受けるが、流入交通量や交通容量を考慮する必要があるため、ここでは簡単のため省略する。

その他、沿道への影響に関しては、騒音や排気ガス、振動等の問題が考えられる。これは、バス車両の動力システムに起因するところが大きく、バス運行頻度の増加に伴ってその影響は比例するが、ここでは、定性的な評価にとどめる。なお将来的には、前章で整理した技術革新等による低公害型の車両運用により、これらの影響は軽減可能であると考えられる。

以上より、本分析で考慮する各関連主体と評価指標、及び評価の視点を表8に整理した。

表8 本分析で用いた評価指標の整理

関連主体	評価指標	評価の視点
バス利用者	バス表定速度	・バス運用方法代替案、及び各変動要因による利便性への影響を評価
バス事業者 (バス運転士)	ロスタイム	・事業者の運営効率性、サービスに関する指標として評価 ・停留所での先行バスの発車待ち時間、及び信号交差点での停車時間を評価

(5) バス運用方法別の処理能力の算定と考察

以上の各種条件設定にもとづき、各代替案について tiss-NET を適用し、評価指標の算定した結果を示す。

(a) 通常運行方式 [g/C=0.5 に設定]

通常運行方式での算定結果を図4に示す。平均停車時間 30 秒でみると、輸送力 60 台/h のときは表定速度 20km/h を維持可能であるが、それ以上の頻度で運行を行うと、停留所での前方バス発車待ちによるロスタイムが発生するため表定速度が低下する。特に、120 台/h となると、平均停車時間 30 秒を越えると、停留所でのロスタイムが急激に増加することが分かる。

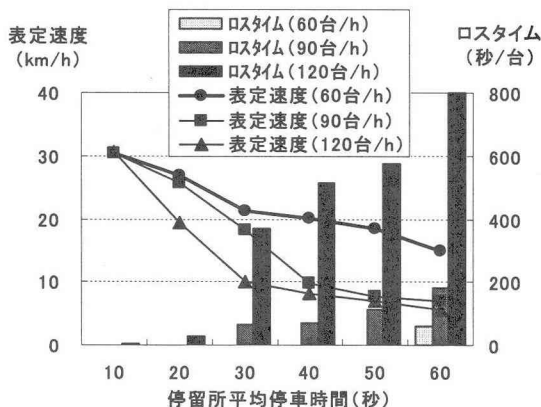


図4 CASE1：通常運行方式での計算結果

(b) 高容量バス車両による運行方式 [g/C=0.5 に設定]

高容量 (3 連節) バスは、バスの運行頻度を変更せずに旅客輸送力を高める方式である。図5に、3 連節バスを 60 台/h で運行した場合と CASE1 との比較結果を示した。同じ運行頻度の場合、3 連節バスは全長が通常車両の 2 倍のため表定速度はやや低下するが、通常車両の 3 倍程度の旅客輸送力を確保できる。逆に、3 連節バスと同等の旅客輸送力を通常車両で確保するためには、2 倍以上の運行頻度が必要となり、表定速度が大きく低下することが分かる。

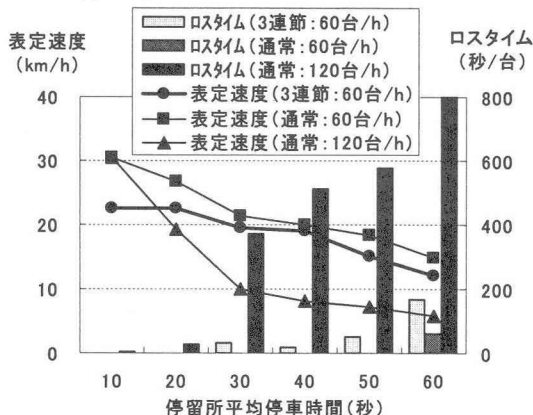


図5 CASE2：高容量バス運行方式とCASE1の比較

(c) 同時停車が可能な複数バスベイでの運用 [g/C=0.5 に設定]

図6に示すとおり、各停留所に同時停車が可能な複数のバスベイを設置することで、120 台/h 以上の高頻度バス輸送でも、停留所平均停車時間が 30 秒程度であれば、表定速度 20km/h を維持することが可能である。ただしこの分析上では、バス個別の停車時間の分散をあまり大きく設定しておらず、実際には停留所での乗降客が発生しない場合 (停車時間=0 秒) の影響を考慮する必要がある。また、これまでの研究成果では、停留所でのバスベイ数の増加がバス処理能力に比例しないことが示されており¹¹⁾、実際の計画上ではこのことに注意を要する。

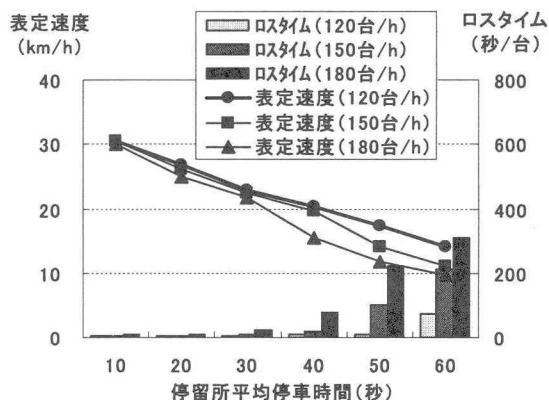


図6 CASE3：複数バスベイ方式での計算結果

(d) 隊列運行方式による運用

ここでは、バス輸送の限界値を試算するため、先に示したポルトアレグレ (ブラジル) の Bus Ordering の例にない、隊列走行方式で 1 時間あたり 360 台の高頻度輸送を再現した。この結果、バス優先信号による制御を前提とした場合 (g/C=1.0) 停留所停車時間が 40 秒程度までであれば、表定速度 20km/h を維持できることが分かる。

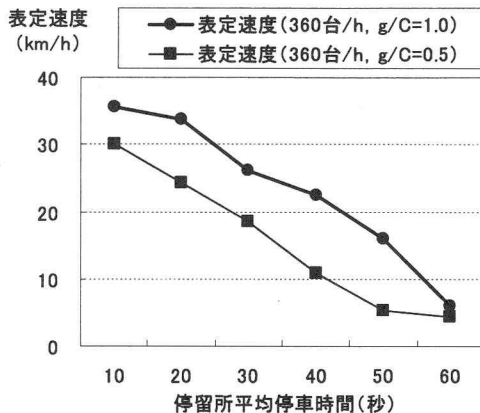


図7 CASE4：隊列運行方式での計算結果

※信号による 6 台隊列制御、車両輸送力は 360 台/h

った。優先信号制御を行わない場合 ($g/C=0.5$) は、停留所停車時間が 30 秒程度までであれば、優先信号制御を行う場合に比べて 2~3 割程度速度が低下するものの、隊列走行制御を行うことで、非常に高頻度のバス輸送を大きな速度低下なしで適用可能であることが示唆された。

ただし、このような運行方式には少なくとも 6 台が同時に停車可能な停留所を整備することが必要であり、路線ごと（車両ごと）の停車時間に大きな分散が生じれば、速度低下への影響が大きいことに留意する必要がある。

(6) 算定結果のまとめ

本章では、バス専用道路における運用代替案と計算条件を設定した上で、バス輸送頻度と表定速度、ロスタイムの関係についてシミュレーションによる算定を行った。

この結果、例として停留所停車時間 30 秒、信号青時間比 $g/C=0.5$ のときの各ケースの表定速度を示すと、表 9 のように整理できる。仮に、表定速度 20km/h 程度を輸送サービス水準の目安とすれば、通常の運行方式 (CASE1) では、輸送頻度が 90 台/方向・h を越えると同水準を維持できないが、複数のバスペイでの同時停車 (CASE3) による運行を行うことで、180 台/方向・h の輸送が同水準で可能となる。また旅客輸送力で見れば、高容量バス (CASE2) は通常のバス車両の約 3 倍の定員であるため、60 台/方向・h で、通常バス車両 180 台に相当する旅客輸送力を同水準（表定速度約 20km/h）で実現可能となる。なお、隊列走行による運用 (CASE4) で 360 台/方向・h の高頻度輸送を行った場合、サービス水準は低下するものの (18.5km/h)、旅客輸送力に換算して 28,800 人h の輸送力が実現可能であり、この処理能力値がバス輸送の限界値を示していると考えられる。

バス輸送において高頻度運行を実現するためには、複数の車両が同時に停車可能な停留所等のハード整備費用や、運転士の増加による運営コストを考慮する必要がある。したがって、バス輸送システムと他の交通機関との比較分析を行う上では、輸送力とコストの関係から適用領域を明らかにすることが重要となる。

表 9 各ケースの表定速度の比較

（停留所停車時間=30 秒、信号青時間比=0.5 の時：km/h）

輸送頻度 (台/方向・h)	CASE1 (通常)	CASE2 (高容量)	CASE3 (同時停車)	CASE4 (隊列走行)
60	21.4	20.1	-	-
90	18.1	-	-	-
120	10.1	-	22.8	-
150	-	-	22.4	-
180	-	-	21.8	-
360	-	-	-	18.5

※CASE2 は 3 連節バス（定員 270 名）を使用しているため、旅客輸送力は通常バスの約 3 倍となる（CASE2 以外のバス車両の定員は 80 名）。

4. バス輸送の適用領域の分析—輸送力とコストの関係

前章では、簡便な形ではあるが、専用走行空間でのバスの停車方式や停留所の運用方法を工夫することで、比較的高いサービス水準を維持しながら高頻度バス輸送を実現できることを示した。次に、高頻度バス輸送を行う場合に要するコストと輸送力の関係を踏まえて、代替交通機関との比較分析を行うことで、バス輸送の適用領域を示す。

(1) 分析の考え方

これまで海外においては、詳細な項目に基づく公共交通輸送の費用モデルに関する研究¹⁹⁾がいくつか行われている。ここでは、簡単な前提条件を設定した上で、空間的な条件を固定し、輸送能力とシステムコストの関係を算出する。

実際の都市において具体的に交通システム導入計画の代替案を検討する段階では、計画条件とシステム特性を踏まえ、必要空間とその用地費を考慮する必要がある。ただし本研究は、専用走行空間を活用したバス輸送の適用可能性評価の基礎的研究の段階という位置づけであるため、整備に必要な用地は予め確保されていると仮定し、各交通システムのコストを横並びで比較することとした。本分析においては、イニシャルコストにおける用地費は考慮しないこととするが、各交通システムにより、走行路や駅スペース等の必要空間は異なるため、用地費を考慮した場合は輸送力とコストの関係に影響を与えることが予想される。したがって、実用的な場面を想定したより精緻な分析については、今後の課題であることを予め付記しておく。

(2) 前提条件

分析の前提条件は以下の通り設定した。

- ・路線延長10km、駅間1km (11駅) の路線を仮定。
- ・制度上、全ての交通システムの整備が可能とする。
- ・沿線には一様の需要分布を仮定し、全て最寄り駅から終点までの乗車を仮定 (many to one)。
- ・終点駅の直前区間を最大輸送ポイントとする。
- ・インフラ及びシステム部（走行路や駅構造物、架線設備、バス以外の車両等を含む）の減価償却を50年、バス車両の減価償却を5年とし、1年あたりのコストを算出（社会的割引率は4%とする）。

(3) 代替交通システムの設定

代替交通システムの諸元は表10、及び表11のように設定した。なお、各交通システムの諸元は、既存統計資料等をもとに平均的な値を用いており、相対的な関係を議論する上では、妥当な設定であると言える。

表10 代替交通システムの諸元設定

代替システム	諸元	1編成の車両数	車両定員	表定速度 [与件]	概算建設費 [車両費含]	
	単位	(両/編成)	(人/両)	(km/h)	(億円/km)	(億円/両)
地下鉄		5	150	32		275
新交通		3	100	27		115
モノレール		4	75	30		105
LRT		2連結	150	25		50
バス専用道	通常バス	1	80	20	10	20*
	3連節バス	1	270			50*
	隊列運行	6	80			20*

*バスについては、車両費を別途設定（単位：百万円/台）

※概算建設費は、出典20)の数値の中間値を適用。

表11 代替交通システム運営コスト

結元	単位	地下鉄	新交通	モノレール	LRT
線路保存	円/車 km	56.0	30.3	45.1	40.0
電路保存	円/車 km	39.3	35.5	66.2	23.2
車両保存	円/車 km	39.8	61.3	36.0	60.0
運転	千円/人	353	283	381	126
運輸(駅当り)	千円	64,043	38,166	19,112	3,472
動力費	円/車 km	35.10	19.30	57.04	39.00
一般管理	千円/人	11,688	11,800	8,533	2,752

※運営コストについては、出典21)より平均値を算出し整理。

※LRTは路面電車事業者19社の平均。

※バスについては、1998年全国平均走行km当たり原価435.7円を適用した。3連節バスに関しては、維持管理費が通常バスの2倍程度であるため(出典：クリチバ市ヒアリング)、走行原価のうち維持管理経費を上乗せし、550円/走行kmと設定した。

(4) 分析結果と考察

分析結果を図8に示す。計算の結果、ピーク時需要1万人h程度であれば、バスの隊列運行が他の交通システムと比較して相対的に有利となっているが、この場合は、

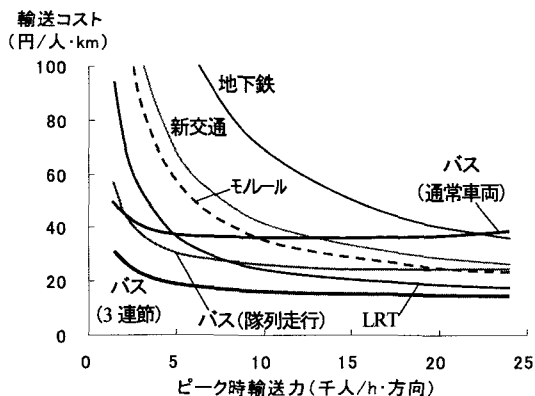


図8 ピーク時需要と運営コストの関係

6台が同時に停車できる停留所施設の整備が必要となる。同システムにより2万人h以上を輸送しようとする、乗務員が増加し人件費が上がるために、新交通システム等に対する費用面での優位性は失われる。ただし、技術開発（例えば、無人運転隊列走行）により人件費の上昇を抑制できる可能性がある。なお、270人定員の3連節バスが導入可能な制度があれば、費用面では有利という結果になっている。

また、本分析の条件下では、平面走行空間という点でバス輸送に最も近い代替交通システムと考えられるLRTは、他の軌道系交通システムよりも安価であり、1時間当たり5,000人以上の輸送需要がある領域では、3連節バスを除くバス輸送よりもコスト面で有利となっている。ただし、実用上はバス専用道路、及びLRTは走行空間として平面空間を確保しなければならず、実際の計画段階において用地取得費の影響を考慮した場合には、この関係が変化することも考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、バス輸送に関わるインフラ整備と運用方法に着目し、専用走行空間を活用したバス輸送の適用可能性を評価するため、バス専用道路の処理能力に関する評価分析の視点、及び代替交通システムとの比較を行う際の論点を整理した。その上で、専用走行空間におけるバス運用方法と処理能力の評価を行った。さらに、簡便な設定ではあるが、バス輸送の適用領域（特にコスト面において、バス輸送が他の交通システムに比べ相対的に有利となる領域）についての分析を行った。この結果、

- ①専用走行空間でのバスの停車方式や停留所の運用方法を工夫することで、サービスレベルを大きく落とさずに、ある程度高頻度のバス輸送が可能であること
- ②これまで、バスではサービスが難しいとされてきた領域（輸送力1万人h程度）でも、運用上の工夫することで、コスト面で相対的に有利な領域があることの2点を示した。ただし、単純な前提条件による計算となっているため、他の評価指標の算定を含め、設定条件を精査しつつ分析を継続していく必要がある。

今後は、わが国でバス専用道路を適用する際の現行法制度等による制約条件や、所要時間や乗り換え有無などの利用者利便性の視点についても考慮することで、専用道路空間を活用したバス輸送の適用可能性とその限界を明らかにすることが課題となる。

謝辞

本研究は（財）国土技術研究センターの助成による新道路研究会の成果の一部である。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村文彦：幹線バスの輸送能力に関する一考察，土木計画学研究・講演集 No.17, pp.925-928, 1995
- 2) 鈴木尚樹，坂本邦宏，久保田尚：tiss-NETを用いたバス優先策総合評価システムの開発，土木計画学研究・講演集 No.22(1), pp.503-506, 1999
- 3) 鈴木尚樹，坂本邦宏，久保田尚：バス優先策の高度化に対応した総合評価システムの開発，土木計画学研究・講演集 No.23(2), pp.407-410, 2000
- 4) 須々木淳：バスレーンにおける一般車の遵守度がバス運行に与える影響に関する研究，横浜国立大学卒業論文，2001
- 5) 中村文彦：都市バス輸送におけるインフラ整備に関する研究課題と考察，土木計画学研究・講演集 No.26, CD-ROM, no.246, 2002
- 6) 中村文彦：都市圏交通システムにおける高速バスシステムの可能性，高速道路と自動車，第45巻，第10号，pp.11-15, 2002
- 7) 秀島栄三，赤松俊哉，山本幸司：都市バスシステムのための諸技術に関する一考察—ブラジルと日本の事例の比較による，土木計画学研究・講演集 No.24, CD-ROM, no.358, 2001
- 8) 服部圭郎：人間都市クリチバ，学芸出版社，2004
- 9) URBS, Curitiba : <http://www.curitiba.pr.gov.br>, 2004
- 10) Meirelles, A. : A Review of Bus Priority Systems in Brazil: from Bus Lanes to Busway Transit, Smart Urban Transport Conference, 17-20 October, Brisbane Australia, 2000
- 11) TRB : Highway Capacity Manual. Special Report 209, Washington D.C., 2000
- 12) Zargari, S.A. and Khan, A.K. : A Simulation of the Bus Transitway, Journal of Advanced Transportation, vol.32, No.2, pp.152-174, 1998
- 13) Fernandez, R. and Planzer, R. : On the capacity of bus transit systems, Transport Reviews, Vol.22 No.3, pp.267-293, 2002
- 14) IEA : Bus Systems For The Future: Achieving Sustainable Transport Worldwide, IEA Publications, 2002
- 15) GAO : MASS TRANSIT Bus Rapid Transit Shows Promise, US General Accounting Office, Washington DC, 2001
- 16) FTA : Bus Rapid Transit Demonstration Projects, US DOT, <http://www.fta.dot.gov/brt/projects/index.html>, 2002
- 17) 大城温，大蔵泉，中村文彦：バス停留所におけるバス乗降特性とバス交通容量への影響，第17回交通工学研究発表会論文集，pp.233-236, 1997
- 18) Vuchic, V.R. : Urban Public Transportation Systems and Technology, New Jersey. Prentice-Hall Inc., 1981
- 19) 例えば，Allport, R.J. : The Costing of Bus, Light Rail Transit and Metro Public Transport Systems, Traffic Engineering + Control 22, pp.633-639, 1981
- 20) 都市交通研究会：これからの都市交通—環境を考えた魅力ある都市づくり，山海堂，2002
- 21) 平成11年度鉄道統計年報，国土交通省鉄道局

専用走行空間を活用したバス輸送の適用可能性に関する基礎的研究*

矢部努**・中村文彦***・大蔵泉****

本研究では、公共交通機関としてのバス輸送の役割に着目して、インフラ整備の視点からバス専用走行空間を活用した交通システムの適用可能性評価のための基礎データ、及び課題を整理した。また、バス専用道路の処理能力に関する評価分析の視点、及び代替交通システムとの比較を行う際の論点を整理した上で、バス専用道路の処理能力の算定を行った。この結果、バスの停車方式や停留所での運用の工夫により、サービスレベルを大きく落とさずに、ある程度高頻度のバス輸送が可能であること、バス輸送がコスト面で相対的に有利な領域があることを示した。

Feasibility study on bus transit system utilizes the exclusive busway*

By Tsutomu YABE**, Fumihiko NAKAMURA*** and Izumi OKURA****

This study aims to examine the applicability of bus-based transit system which utilizes the exclusive busway. In this study, the authors evaluate the substantial capacity of exclusive busway quantitatively with various inputs, such as service characteristics and reduction of dwelling time at bus stops by changing boarding and alighting system and by improving bus stop design. This paper conclude that the high frequency bus service can be provided by the designed operation at the bus stop, and that the bus-based transit system which utilizes the exclusive busway became feasible with by the cost less than the existing line haul system.
