

バス専用道路の維持を考慮した BRTの運営費用に関する研究

高橋 洋一¹・中村 文彦²・早野 公敏³・田中 伸治⁴・有吉 亮⁵

¹学生会員 横浜国立大学 大学院都市イノベーション学府 (〒240-8501横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail:takahashi-youichi-hz@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学理事・副学長 (〒240-8501横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)
E-mail:f-naka@ynu.ac.jp

³正会員 横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院
E-mail:hayano@ynu.ac.jp

⁴正会員 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院
E-mail:stanaka@ynu.ac.jp

⁵正会員 横浜国立大学産学連携研究員 大学院都市イノベーション研究院
E-mail:ariyoshi-ryo-np@ynu.jp

安価な導入・運行費用で大量需要に応える公共交通として BRT の導入が進んでいる。しかし、高容量のバスを高頻度に運行するとバス専用道路が激しく損傷し、維持費用が急増する恐れがある。そこで、本研究ではバス専用道路の維持費用を考慮して BRT の費用を分析する。

まず、舗装の損傷要因として舗装材料の耐久性とバス車両の通行負荷を整理した。次に、耐久性と施工費用の異なる舗装材料を配置したバス専用道路を仮定し、道路維持費用をバス車両の乗車定員毎に推計した。

その結果、一定の輸送量の下、定員 250 人の 3 連節バスで輸送した場合の通行負荷は定員 80 人のバスの 7 倍だが道路維持費用は 1.7 倍となった。結果に対して、補修費用は道路維持費用に大きな影響を与えないこと、乗車率 100% で輸送した場合の推計から実際はより多くの費用がかかると考察した。

Key Words : BRT, bus exclusive way, pavement maintenance cost, passing capacity, pavement material

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

環境や渋滞問題に対して公共交通整備が進んでいる。そのような中で、安価な導入・運行費用で大量輸送を実現できる BRT の導入が進んでいる。しかし、輸送力増強のために高容量のバスを高頻度に運行するとバス専用道路が激しく損傷し、維持費用の急増が懸念される。

そこで、バス専用道路の維持費用も含めた BRT の運営費用を明らかにする必要がある。また、道路維持も含めて安価な BRT 計画立案により、輸送条件の変化に対応可能な領域を広げることが期待される。

本研究では以下を明らかにすることを目的とする。

- ①バス専用道路の維持費用を明らかにする。
- ②交通需要変動による維持費用の変動を明らかにする。
- ③最小の運営費用で最大の輸送力を実現可能な運営計画を提案し、新規路線への交通機関の導入と既存交通機関の転換における BRT の輸送可能領域を示す。

(2) 研究方法

本研究では、まず既存事例であるクリチバ市(ブラジル)のバス専用道路の維持費用を明らかにする。

次に、BRT の導入が進む途上国や多くの都市への適用に向けて、道路の損傷軽減が想定される複数シナリオの道路維持費用を推計する。さらに、ピーク需要率や乗車率の変動によって増加する道路維持費用を明らかにする。

現時点では、既存事例の維持費用をヒアリングより取得中のため、本稿では日本の舗装基準を用いて仮想のバス専用道路の維持費用を推計した結果を示す。

(3) 既存研究の整理と本研究の位置づけ

交通機関の導入に際して代替交通機関の整備費用が議論に上る。GAOの報告書¹⁾では、BRTの資本・運行費用はLRTより安価であるという結果が示されている。

矢部ら²⁾はBRTが代替交通機関に比べて安価な運行費用で実現可能な輸送力を明らかにしている。その結果、乗車定員80人のバスで高需要に応える場合、人件費が上昇し地下鉄等よりも運行費用が高くなるため、3連節バス運行による人件費の抑制を提案している。実際に、ボゴタ市(コロンビア)では2連節バスの運行でピーク時輸送量45,000人を実現している。しかし、1時間に300本という高頻度運行によって損傷が激化し、片方向2車線(快速便と各停便それぞれの専用車線が並列配置)のうち1車線は通行禁止となっている。以上より、バス専用道路の維持費用と運行費用の関係性に着目してBRTの運営費用を検証する必要がある。しかし、BRTの運営費用削減は、バス運行事業者と道路管理者が同一の場合に実現可能性が高いと考えられる。なぜなら、運行事業者は運行費用、道路管理者は道路維持費用の削減が好ましいからである。主体が同一の場合、主体内で両者のトレードオフ関係に着目して運営費用が安価な計画を立案すればよい。しかし、異なる場合、運行事業者は収益性向上の方法として高容量バスの運行を採ると、道路管理者の負担が重くなる可能性が高い。そこで、主体間関係にも注意を払う必要がある。

交通インフラの維持費用に関する研究として、Timら³⁾が貨物自動車の荷重増加によって生じる道路損耗費用を推計している。また、インフラ維持管理という社会的要請に対して舗装のLCCに関する研究が多数なされている。しかし、これらの研究は舗装に関するものであり運行費用や輸送量等の「公共輸送」の観点も含めたインフラ維持費用の研究はなされていない。

以上の整理を踏まえ、本研究では運行費用と道路維持費用の関係性に着目し、安価なBRT運営計画を立案する。そして、交通機関の新規導入や既存交通機関の転換に対応可能なBRTの輸送可能領域を示す。

2. バス専用道路の損傷状況把握

2014年9月にクリチバ市のバス専用道路の損傷状況を観測した。結果、以下のことが明らかになった。

- ① 走行部に多数のひび割れや陥没が存在していた。
- ② 停車部では特に損傷が激しい。
- ③ バスは損傷箇所手前で減速や避行運転をしていた。

3. 舗装の損傷要因整理

舗装の損傷要因として以下2点に着目し、整理した。

- ① 舗装材料の建設費用と耐久性
舗装材料はアスファルトとコンクリートに大別される。アスファルトは表-1に示すように新設費用は安いも

の耐久性が低い。補修頻度が増加し維持費用が増加する。さらに、アスファルトは粘性が高く、重量荷重の長期滞在によって凹みが戻らないため、停車部には適さないと考えられる。一方で、コンクリートは建設費用は高いが耐久性はアスファルトの2倍のため、長期の供用ではアスファルトより安価であることが予想される。²⁾

表-1 舗装施工単価

舗装材料	新設工 (円/㎡)	補修工 (円/㎡)	打換工 (円/㎡)
アスファルト	6,349	1,384	9,895
コンクリート	8,092	1,042	12,925

出典⁴⁾:平成25年度公共土木工事積算基準

② 車両の通行負荷

舗装の施工費用は舗装の厚さに比例する。

国土交通省の定める「舗装の構造に関する技術基準(以下、日本の舗装基準)」では、舗装の厚さは「49KN(5t)の荷重(以下、標準輪荷重)を持つタイヤ1輪が通過した回数」に比例、地盤の強さに反比例して計算される。⁵⁾

次に、通行荷重が舗装に与える負荷は、「通過する輪荷重と標準輪荷重の比の4乗に比例して指数関数的に増加する(4乗則)」に従うとされ、世界各国の舗装設計に適用されている。⁶⁾

そこで、1日1万人をバスで輸送する際にかかる通行荷重を乗車定員毎に以下の手順で試算した。試算に用いた車両の輪荷重を表-2、試算結果を表-3に示す。

表-2 乗車定員毎の車両の輪荷重

定員 (人)	定員 重量(t)	車両 重量(t)	総重量 (t)	輪荷重(t)			
				前輪1	前輪2	後輪1	後輪2
80	4.8	9.9	14.7	3.04	-	-	4.33
130	7.8	28.0	35.8	4.75	6.30	-	7.05
160	9.6	30.0	39.6	5.35	7.60	-	6.85
250	15	40.5	55.5	5.63	7.88	7.13	7.13

まず、車両のみの輪荷重と60kgの乗客が定員乗車した時の輪荷重を1輪ごとに合計した。各輪の値は表-2の「輪荷重」に示される。次に、各車両1回通行時の負荷を4乗則に則って合計した。定員80人のバスの通行負荷の計算例を以下の式(1)に示す。

$$\left(\frac{3.04}{5}\right)^4 + \left(\frac{4.33}{5}\right)^4 = 0.70 \quad \text{式(1)}$$

左式の1項目は「前輪1の通行負荷」、2項目は「後輪2の通行負荷」を表している。定員80人のバスの車軸は2軸である。したがって、舗装のある地点を前輪1が通行

したときの負荷と後輪 2 の通行負荷の合計が 1 台通過分として右式に算出される. 各車両の値は表-3 の「(輪荷重/標準輪荷重)⁴」に示され, 「標準輪荷重を持つ自動車」が通過した回数」で換算している.

表-3 の「運行本数」は全便が定員乗車した状態の 1 日あたりの運行本数を示している. したがって, 「(輪荷重/標準輪荷重)⁴」に「運行本数」を乗じた値が 1 日の通行負荷である「累計 49KN 換算輪数」となる.

その結果, 1 日 1 万人輸送する場合, 定員 250 人のバスで輸送する際の通行負荷は定員 80 人のバスで輸送する際の 7 倍以上であることが分かった.

以上の整理より, 舗装材料の施工費用及び耐久性, 乗車定員毎の通行負荷によって道路維持費用に差異があると推測し, シナリオ分析を用いて明らかにする.

表-3 乗車定員毎の車両通行負荷

定員 (人)	(輪荷重/標準輪荷重) ⁴	運行本数	累計49KN換算輪数
80	0.70	125	31,823
130	7.29	77	204,611
160	10.17	63	232,037
250	16.00	40	233,632

4. 道路維持費用試算手順

(1) 舗装厚さの設計

日本の舗装基準より舗装厚さを式(2)を用いて計算した

$$Ta = \frac{3.84N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \quad (2)$$

Ta : 舗装厚さ(cm),

N : 疲労破壊輪数^{**}

CBR : 路床の設計 CBR^{***}

^{**}舗装基準規定より寿命内の累積 49KN 換算輪数で計算

^{***}地盤の強度を定量化した値

(2) 道路維持費用の計算

「平成 25 年度公共土木工事積算基準」³⁾を用いて舗装厚さに新設・打ち換え単価を乗じた.

補修費用は, 補修時の損傷度合いを次節で示すシナリオ全種で一定とし, 道路面積に補修単価を乗じた.

(3) 道路舗装のライフサイクルの設定

道路舗装のライフサイクルは, 新たに舗装を打設する「新設」, 損傷が生じた時に修繕する「補修」, 寿命を満

たした時に既存舗装を破壊して舗装を新設する「打ち換え」で構成される.

補修頻度は, 谷口ら⁶⁾の「累積 49KN 換算輪数とアスファルト舗装の路面損傷度の関係式」に国土交通省が補修判断の目安とする損傷度を当てはめ, 累積 49KN 換算輪数が「810 万輪」に達する度に補修するとした. コンクリートの補修頻度はアスファルトの半分とした. 打ち換え頻度は, 日本の舗装基準で規定されている「アスファルトの寿命を 10 年, コンクリートを 20 年」とした.

5. 道路条件およびシナリオ設定

本研究では, 異なる乗車定員(80, 130, 160, 250 人)のバス運行時の通行負荷と舗装材料の耐久性・施工費用を組み合わせたシナリオを設定した.

(1) 専用道路の条件

バス専用道路を走行部と停車部から構成され, 延長距離 10km 前後とした. 内訳として表-4 に示すように, バス停の全長はバス車両の全長と同等とし, バス停の数を 20 個, バス停間距離 500m, 片方向の道路幅員を 3m とした.

表-4 バス専用道路の仮定条件

専用道路仕様	定員毎のバス車両全長(m)			
	80人	130人	160人	250人
バス停長(m)	12	19	19	27
延長距離(m)	9,740	9,880	9,880	10,040
走行部全長(m)	9,500			
停車部全長(m)	240	380	380	540

(2) シナリオ設定

現地調査から乗降時のバスの長時間滞在によって停車部の損傷が激しいことが推測された.

したがって, バスの走行特性を考慮して走行部と停車部に耐久性と施工費用の異なる舗装材料を配置したシナリオを表-5 のように 4 つ設定した.

表-5 設定シナリオ

シナリオ	走行部	停車部
1	アスファルト	
2	アスファルト(停車部のみ樹脂コーティング)	
3	アスファルト	コンクリート
4	コンクリート	

以下に, 各シナリオの概要を説明する.

①シナリオ 1 :

走行部と停車部共にアスファルトを配置したシナリオ。運行期間が短期間で輸送量が少ない条件では維持費用は全シナリオで最小と推測される。

②シナリオ 2 :

走行部と停車部共にアスファルトだが、停車部のアスファルト上に樹脂をコーティングすることで耐久性を強化したシナリオ。シナリオ 1 よりも補修費用が比較的軽減すると推測される。

③シナリオ 3 :

停車部にコンクリートを配置したシナリオ。アスファルトよりも耐久性が倍増するためシナリオ 2 よりも補修費用が軽減すると推測される。

④シナリオ 4 :

走行部と停車部共にコンクリートを配置したシナリオ。運行期間が長期間で輸送量が多い条件では、維持費用は全シナリオで最小と推測される。

6. 推計結果

図-1 にシナリオ 1 の専用道路で 1 日 50 万人輸送した時の往復方向の道路維持費用を試算した結果を示す。

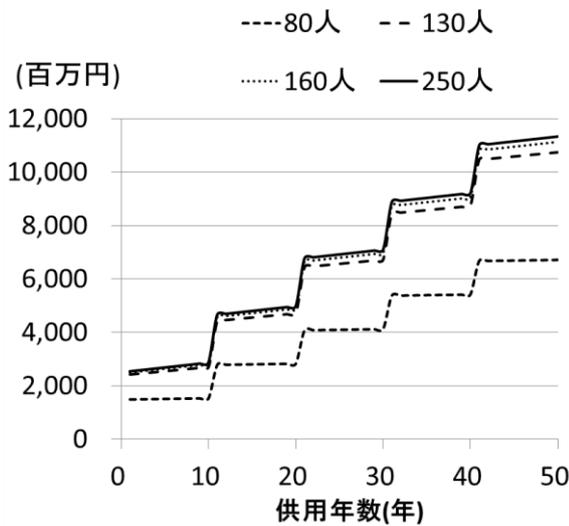


図-1 シナリオ 1 の道路維持費用

その結果、定員増加につれて道路維持費用が定員 80 人での輸送に比べて 1.6~1.7 倍増加することが分かった。

また、図-1 に示すように、打ち換え費用が維持費用増加の大半を占めることに対して、補修費用の増加が乏しいことも分かった。これは、1 回の補修費用が打ち換え費用に対して微小であり、補修頻度が 7 倍に増加しても総維持費用に影響を及ぼさなかったためと見られる。しかし、今回は乗車率 100% のバスで輸送した場合で推計したため、実際はより多くの維持費用がかかると考えられる。

7. 今後の予定

本稿では、日本での適用を想定して道路維持費用を推計した。今後は、運行費用との比較も含めてシナリオ間で評価を行い、各シナリオが安価に実現できる輸送量と運行期間を提案する。

謝辞：舗装の知識習得や費用試算にあたり、(株)大林道路の光谷様、梶様より多大なるご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) GAO : MASS TRANSIT Bus Rapid Transit Shows Promise, US General Accounting Office, Washington DC, 2001
- 2) 矢部努, 中村文彦, 大蔵泉: 専用走行空間を活用したバス輸送に関する基礎的研究 土木計画学研究・論文集 vol.21, No.3, pp667-676, 2004
- 3) Tim C. Martin, Thorolf R. Thoresen : Estimation of the marginal cost of road wear as a basis for charging freight vehicles Research in Transportation Economics, Volume49, June 2015, pp55-64
- 4) 国土交通省 : 平成 25 年度土木工事積算基準
- 5) <別添> 舗装の構造に関する技術基準.
- 6) 舗装工学ライブラリー7 舗装工学の基礎 : 土木学会 舗装工学委員会 舗装教育委員会

(2015. 7. 31 受付)

The analysis on the cost of BRT by considering the maintenance of bus exclusive way

Youichi TAKAHASHI, Fumihiko NAKAMURA, Kimitoshi HAYANO, Shinji TANAKA, and Ryo ARIYOSHI