

地方都市における実際の旅客数を考慮した LRT と路線バスの LCCO₂ の比較評価

坂口 卓司¹・田畑 智博²・後藤 尚弘³

¹学生会員 神戸大学大学院人間発達環境学研究科 学生 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区鶴甲3-11)
E-mail:121d422d@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院人間発達環境学研究科 講師 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区鶴甲3-11)
E-mail:tabata@people.kobe-u.ac.jp

³正会員 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 准教授 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail:goto@ens.tut.ac.jp

各公共交通機関のCO₂排出量を算出し比較することは、モーダルシフトの有効性を環境面から検証するうえで重要である。本研究では、地方都市T市における自動車からの交通代替手段としてLRTと路線バスを取り上げ、実際の旅客数を踏まえたLCCO₂の比較評価を試みた。システム境界は、LRTの場合は、車両製造、インフラ設備建設・管理、走行とした。路線バスの場合は、車体の製造、走行とした。

結果として、LRTの乗車定員（1運行あたり150人）でLRTとバスの車両定員を揃えた場合、LRTがバスよりCO₂排出量で有利になるには、運行本数が1日あたり上下124本（1時間あたり片道4本）を超える必要があった。しかし、車両定員を揃えずにLRT1編成と路線バス1台を比較した場合、運行本数に関わらず、路線バスが有利となった。

Key Words : light rail transit, route bus, life cycle assessment, number of passengers

1. はじめに

自動車から公共交通機関へのモーダルシフトは、低炭素社会構築のための1つの手段である。各公共交通機関のCO₂排出量を算出し比較することは、モーダルシフトの有効性を環境面から検証するうえで重要である。

「鉄道は環境にやさしい」という結果が一般に取り上げられているが、これは全国の交通機関が運行時に排出する温室効果ガスの平均値が元になっている¹⁾。また、CO₂排出量は1人1kmあたりで計算されているが、鉄道車両に定員乗車を仮定していることが多い。鉄道車両は路線バスに比べて車両定員が大きく、1人1kmあたりのCO₂排出量は小さくなる傾向がある。しかし、地方都市の鉄道路線は車両定員に満たないことが多く、定員乗車により得られた結果は過小評価に繋がる恐れがある²⁾。

そこで、本研究では、人口30万人規模の地方都市T市における自動車からの交通代替手段として、LRT (Light Rail Transit) と路線バスを対象に、実際の輸送密

度、運行本数、供用年数、車両の使用台数の観点から、CO₂排出量の比較評価を行う。LRTは、近年、日本各地で旧型の路面電車を置換する形で導入されている低床の車両の総称である。LRTは、路線バスと比較して表定速度や輸送体系などの比較が容易である。

鉄道や路線バス等の公共交通機関へのライフサイクルCO₂ (LCCO₂) に関する研究は多く実施されている^{3,4)}。しかし、運行本数の増減から公共交通機関のCO₂排出量を比較したものは殆ど見受けられない。

2. 研究手法

(1) LCAの範囲

LRTと路線バスのシステム境界を図-1に示す。LRTは、車両の製造、走行、インフラ設備建設・更新をシステム境界とする。また、路線バスは、車両の製造、走行をシステム境界と設定し、インフラ設備は除外した。その理

由について、以下に述べる。路線バスのインフラ設備は、道路やバス停である。T市における自動車走行台数に占める路線バスの割合は、駅前で約5%、市内幹線道路で1%未満であった⁹⁾。なお、路線バスはT市における自動車走行台数に占める割合が1%未満だったため、バス走行に伴うインフラ設備建設・管理に係るCO₂排出量は非常に小さいと仮定し、計算から省略した。

CO₂排出量の算出は、原単位法⁹⁾により行う。即ち、原材料・製品の重量に、原材料・製品別のCO₂排出原単位を乗じて算出する。



図-1 LCAのシステム境界

(2) 車両定員

LRTの車両定員は、150人と仮定した。これは、LRT車両の中で中規模なものに分類される。路線バスの車両定員は、大型車で定員が75人から80人程度の車両が多いので、75人と仮定した。1運行あたり輸送量の比較の際の公平さを保つため、バスは2台使用するものと仮定した。

(3) 乗車人数

T市は、現在、市内中心部において路面電車が稼働している。ここでは、T市⁷⁾の2005年における路面電車の年間乗車人数(260万人)を365日で除して、1日あたりを7,124人、1運行あたりを25人と設定した。

3. インベントリ分析

(1) 走行

a) LRT

走行距離は、T市の事例より片道5km(複線)とした。1日の運行本数は、上下合わせて、平日282本、休日277本である⁹⁾。本稿では、これを踏まえ、1日の運行本数は、上下合わせて280本と仮定した。本市の実際の平日ダイヤを解析した結果、1編成の列車が1日に充当される運行本数は上下合わせて28本であった。走行距離に換算すると、1編成あたり1日では140kmとなる。数字上では、10編成あれば運用を賄うことができるが、朝タラッシュ時のみの運用や予備車を含め、実際には15編成保有している。

LRT車両の走行による消費電力は、加藤ら⁹⁾の研究を参考に1.5[kWh/編成km]とした。これに中部電力¹⁰⁾のCO₂

排出係数(0.47[kg-CO₂/kWh])を乗じて算出した0.71[kg-CO₂/編成・km]を、LRT走行時のCO₂排出原単位とした。

b) バス

対象都市では、路線バスはLRTと並走する区間を走っていない。そこで、路線バスは、並走する区間を走ると仮定した。LRTと同様に、走行距離は片道5km、1日の運行本数は上下合わせて280本と仮定した。路線バスの保有台数は、LRTを15編成と設定したので、路線バスでは定員の観点(LRT:150人、路線バス:75人)より、2倍の30台と設定した。

バスの走行によるCO₂排出量は、国土交通省の路線バス燃費データ¹¹⁾より、大型路線バス1台あたり0.617[kg-CO₂/台km]と設定した。表-1にLRTと路線バスの主要データを示す。

表-1 LRTと路線バスの主要データ

	LRT	バス
運行距離[km]	5	5
運行本数	280	280
定員	150	150(2台)
CO ₂ 排出量[kg/km]	0.71	1.23(2台)

(2) LRTインフラ設備の製造

対象都市で稼働しているLRTの既存のインフラ設備について、資材の交換に伴い間接的に排出されるCO₂を算出する。なお、日常のメンテナンスは考慮していない。

以下に各設備の概要を記す。

a) レール

現在、日本で最も一般的なレールは、50kg Nレールであり、1mあたりの重さが50kgあるレールを意味している。レール製造に伴うCO₂排出量は、レールの重量に、MiLCAのデータベースに掲載されている「普通鋼形鋼」のCO₂排出原単位を乗じて算出した。以下、計算方法は同じであるため、計算に用いたCO₂排出原単位の項目のみ記す。

b) 枕木

枕木は、かつては木製が主流であった。現在は、都市近郊路線では、ほとんどがコンクリート製である。計算に用いた項目は、「鉄筋コンクリート」である。

c) 架線柱

地方の鉄道では、木製や鉄製(線路の廃品)などが使用されていた。近年は、コンクリート支柱が主流である。計算に用いた項目は、「鉄筋コンクリート」である。

d) バラスト

軌道は、バラスト軌道と仮定した。計算に用いた項目は、「碎石」である。

e) 架線

架線は、電車に電気を送電する設備である。銅線が用いられている。計算に用いた項目は、「電線・ケーブル」

である。

f) 電停

路面電車の駅を電停と呼ぶ。電停は500m間隔で建設すると仮定した。計算に用いた項目は、屋根部は「強化プラスチック」、基礎部は「鉄筋コンクリート」である。

g) 各資材の原単位

表-2には、インフラ設備1km建設あたりのCO₂排出原単位を記す。各資材の重量、資材の設置間隔は、聞き取り調査、カタログより割り出した。また、表-3には、各資材のベースとなった原単位を記す。

表-2 インフラ設備1km建設あたりのCO₂排出原単位

レール	273
枕木	94.5
架線柱	9.85
バラスト	6.86
架線	21
電停	5.98

単位：t-CO₂/km

表-3 資材の製造時のCO₂排出原単位

レール	普通鋼形鋼	1.35
枕木・架線柱・電停 (基礎)	鉄筋コンクリート	0.197
バラスト	砕石	0.0114
架線	電線・ケーブル	6.87
電停(屋根)	強化プラスチック	7.60

単位：kg-CO₂/kg

(3) 車両製造

a) LRT

LRTの車両製造に関するCO₂排出原単位は、MiLCAのデータベースより「鉄道用電車動力付き」を用いた。車両重量は、1編成あたり20tである。ここでは、対象都市の保有車両数をもとに15編成製造すると仮定した。

b) バス

バスの車両製造に関するCO₂排出原単位は、MiLCAのデータベースより「バス」を用いた。車両重量は、1台あたり10tである。バスの車両数は、車両定員の観点からLRTの保有車両数の2倍の30台と仮定した。

(4) 耐用年数

表-4にインフラ設備別の耐用年数を示す。インフラ設備は、法定耐用年数を参考に仮定した¹²⁾。

LRTは、一般的な鉄道車両のライフサイクルを考慮し、法定耐用年数を超えた30年とした。路線バスは、地域によってライフサイクルに差があるが、対象都市の路線バスを参考に15年と仮定した。

表-4 インフラ設備別の耐用年数一覧

	耐用年数
レール	20
枕木	20
架線柱	30
バラスト	15
架線	20
電停	30

4. 結果

(1) LRTインフラ設備

表-4の法定耐用年数の最小公倍数は60年である。これを踏まえ、設備を60年使用すると仮定したときの、年間CO₂排出量の結果を図-2に示す。排出量全体のうち69%がレールに由来している。インフラ設備でのCO₂排出量削減を考える場合、レールの長寿命化は効果がある。

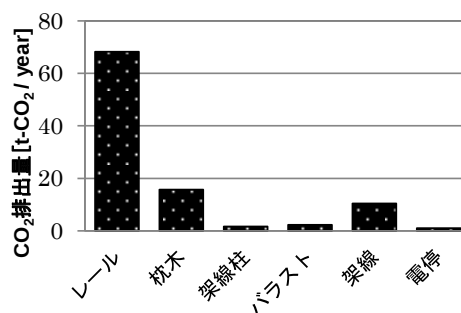


図-2 インフラ設備の年間CO₂排出量

(2) LRTとバスの年間CO₂排出量

1日の運行本数を280本としたときの条件で、インフラ設備、走行、車両製造を含めた年間のCO₂排出量を図-3に示す。LRTは、年間CO₂排出量の合計が517t-CO₂であった。車両製造が10.1%、走行段階が70.2%、インフラ設備が19.7%を占めた。路線バスは、年間CO₂排出量の合計が667t-CO₂であった。車両製造が5.5%、走行が94.5%を占めた。

車両製造にかかるCO₂排出量の算出は、原単位に保有台数を乗じ、耐用年数で除した結果、保有車両15編成で耐用年数30年のLRTと、保有車両30台で耐用年数15年の路線バスにおいて、その差が大きく縮まることとなった。

(3) 輸送密度とCO₂排出量の関係

図-4に、1日の輸送密度を変動させたときの1km走行あたりのCO₂排出量を示す。CO₂排出量は、図-3の結果を365日で除して、1日あたりに換算している。運行本数は、

式(1)のように、1日の輸送密度を1運行あたりの乗車数25人で除した値を用いている。これは、輸送密度によって、運行本数が変化することを示す。当然ながら、輸送密度が0人のとき、運行本数は0となる。

$$\text{運行本数} = \frac{\text{1日の輸送密度}}{\text{1運行あたりの輸送人数}} \quad (1)$$

輸送密度や運行本数が変動すると、実際には保有車両数も変動する。本稿では計算上、輸送密度や運行本数が変動しても保有車両数（LRT：15編成、路線バス：30台）に変化はないと仮定した。

結果より、LRTとバスのCO₂排出量の分岐点は、輸送密度が3,100人/日となった時点であり、CO₂排出量は、172kg-CO₂/kmである。T市の場合、2005年のデータでは1日に7,124人の利用がある。このことから、LRTのほうが、CO₂排出量が少ないということになる。

次に、運行本数とCO₂排出量の関係を示すグラフを図-5に示す。結果として、運行本数が増加するほど、LRTのほうが有利となる。一方で、運行本数が少ない路線では、バスのほうがCO₂排出量が少なる。LRTとバスの運行本数上のCO₂排出量の分岐点は、1日124本である。

仮に、1日に運行する時間が18時間（6時～24時）とした場合、1時間あたり4本（15分間隔）の運行本数で上下合わせて144本となる。15分間隔の場合、バスよりもLRTが有利になる。

人1人を1km運んだときの1日あたりCO₂排出量を図-6に示す。ここでは、図-4のグラフの値をそれぞれ輸送密度で除して算出した。LRTは輸送密度が2,000人未満のときは、CO₂排出量が極端に多い。輸送密度が増加するとともに、0.035kg-CO₂/人km付近で収束している。路線バスもLRTと同様の傾向であるが、LRTほど2,000人未満での排出量は多くない。輸送密度が増加するとともに0.05kg-CO₂/人km付近で収束している。

LRTの1人1kmあたりのCO₂排出量は、低輸送密度の条件では路線バスに比べて極めて大きくなった。一方で、高輸送密度では両者はさほど変わらなかった。

乗客の少ない赤字ローカル線では、バス輸送に転換するという事例といった施策が多く見られる。これは、採算性のみならず、CO₂排出量の観点からみても合理的であるといえる。

(4) 供用年数とCO₂排出量の関係

図-7は、LRTを新規に建設したとき、供用開始後何年でライフサイクルCO₂排出量をペイバックできるのかを算出したものである。インフラ設備の耐用年数の最小公倍数が60年であるので、60年間使用した場合のLRTと路線バスの比較を行う。計算簡略化のため、LRTは、初年度にインフラ設備の60年分のCO₂が発生すると仮定した。

その後、走行段階のCO₂が排出されるとした。なお、LRTの新規建設では、用地確保や道路整備などが必要であるが、本稿では割愛した。

走行条件は、LRT、バスともに1日280本の運行本数であり、これが60年間持続すると仮定した。T市の人口の増減は考慮していない。LRTとバスのCO₂排出量の分岐点は、供用開始後約24年であり、CO₂排出量は15,875t-CO₂である。即ち、24年を超えて使用する場合、LRTのほうがCO₂排出量が少なくなる。1日の運行本数が図より多ければ、分岐点は図より短い使用年数となり、運行本数が少なければ、分岐点はさらに長い使用年数となる。

(5) LRT1編成と路線バス1台使用時のCO₂排出量の関係

これまでは、LRTを1編成に対し、定員を合わせるため、バスを2台で比較した。ここでは、LRT1編成とバス1台で比較評価を行った。

結果として、運行本数とCO₂排出量の関係を図-8に示す。CO₂排出量の分岐点は存在しない。運行本数の増減に関わらず、路線バスがCO₂排出量の面で有利となる。例えば、LRTの中でも小型車に分類される75人程度の車両では、定員150人のLRTと比較して電力消費に差がなく、路線バスに対してCO₂排出量の面で大きく劣ることになる。

図-9には、このときの1人1kmあたりのグラフを示す。図-8同様に、CO₂排出量の分岐点は存在しない。対象都市の路面電車では、1運行あたりの乗車人数は25人であった。LRTと路線バスを比較評価する際、1運行あたり25人の乗車人数であれば、LRTよりも路線バスを運行させた方が、CO₂の面から有利である。

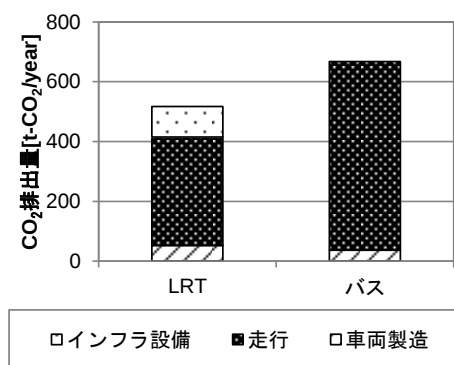


図-3 LRTとバスの年間CO₂排出量

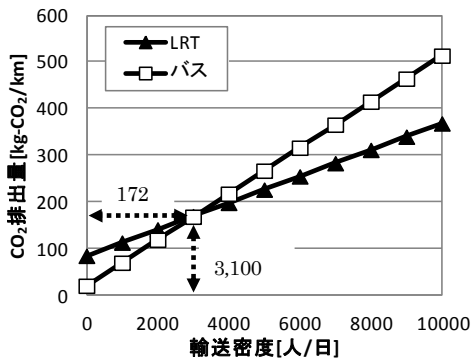


図-4 輸送密度とCO₂排出量の関係

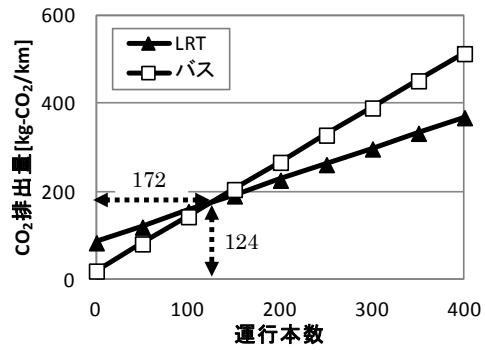


図-5 運行本数とCO₂排出量の関係

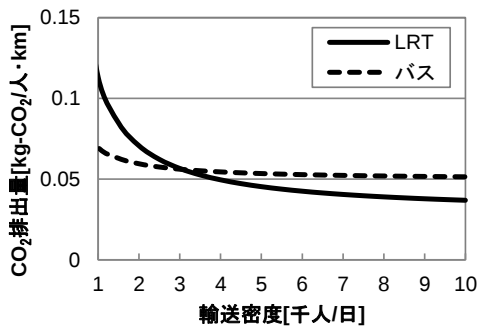


図-6 1人1kmあたりのCO₂排出量

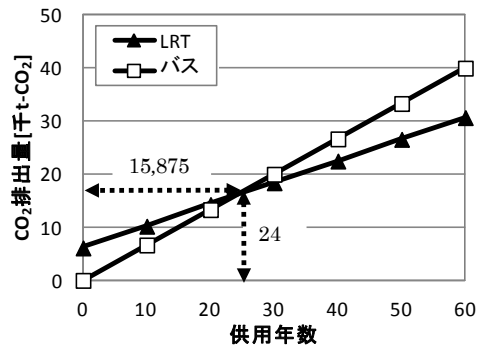


図-7 供用年数とCO₂排出量の関係

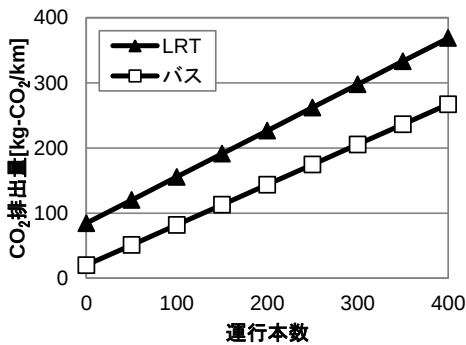


図-8 運行本数とCO₂排出量の関係

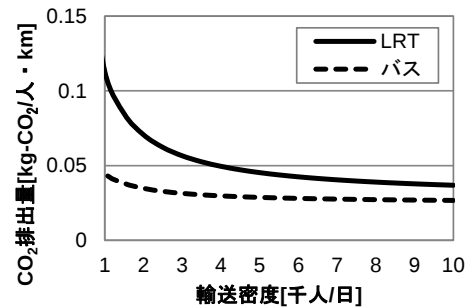


図-9 1人1kmあたりのCO₂排出量

5. まとめ

本研究では、人口 30 万人規模の T 市を対象として、LRT と路線バスの LCCO₂ の比較評価を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) LRT のインフラ設備に伴う CO₂ 排出量の約 7 割は、レール製造に由来するものであった。

- 2) 輸送密度の観点から、LRT と路線バスの 1 日あたりの CO₂ 排出量の結果が逆転する分岐点は 3,100 人である。1 日の運行本数が 124 本に相当する。
- 3) LRT の新規建設に対し、供用開始後何年でバスに比べて LRT の CO₂ 排出量を算出した。その結果、供用開始後 24 年で、LRT は路線バスより CO₂ 排出量の面で有利となった。

- 4) LRT1 編成と路線バス 1 台を比較すると、路線バスのほうが CO₂ 排出量の面で有利となった。

以上のまとめとして、LRT と路線バスで車両定員を揃えた場合、運行頻度の高い路線では、バスに比べ、LRT が有利になる傾向がみられた。反対に、運行頻度が低い場合は、バスのほうが CO₂ 排出量が大幅に少ないことが示された。このことから、一般に、鉄道は、環境に優しいといわれているが、輸送密度や運行本数を考慮した場合、必ずしもそうではないということが伺えた。特に、1 人 1km あたりの CO₂ 排出量の比較では、輸送密度が小さいときは、CO₂ 排出量に大きな差がみられた。一方で、輸送密度が大きくなると CO₂ 排出量に差がなくなることが示された。

本稿で対象とした路線バスは、ディーゼルエンジンを使用したバスを想定した。しかし、近年のハイブリッドバスの普及など自動車の燃費性能の向上を考慮すると、旅客数の少ない地方鉄道では、必ずしも環境に優しいとは言えない。したがって、こうした地方鉄道では、旅客数を増やさない限り、環境に優しいとはいえないのが現状である。一方で、鉄道車両は今後、さらなる省エネルギー化やメンテナンスフリー化が進むことも考えられる。そのため、地方鉄道では、旅客数の増加を目指すのはもちろんのこと、新技術の導入も、CO₂ 排出量削減のために有力な手段になりうる。

本研究の今後の課題として、LRT インフラ設備のシステム境界に変電設備を考慮すること、路線バスではハイブリッドバスも比較対象に入れることが挙げられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：交通関係エネルギー要覧，2007.
- 2) 鉄道の百科事典編集委員会：鉄道の百科事典，丸善出版，pp.614-615，2012.
- 3) 山口耕平，青山吉隆，中川大，松中亮治，西尾健司：ライフサイクル環境負荷を考慮した LRT 整備の評価に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.18，No.4，pp.603-610，2001.
- 4) 眞野新吾，森本涼子，柴原尚希，加藤博和，西原純：LRT 導入に伴うライフサイクル CO₂ の推計—浜松市における導入構想を対象に—，第 7 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，pp.222-223，2012.
- 5) 豊橋市：統計書平成 23 年度，URL：http://www.city.toyohashi.aichi.jp/bu_soumu/gvousei/toukei/totoukeis/h23/09.html，2012/8/3.
- 6) 社団法人産業環境管理協会：MiLCA ソフトウェア
- 7) 服部重敬：路面電車新時代，山海堂，pp.182-192，2006.
- 8) 豊橋鉄道：URL:<http://www.tovotetsu.com/>，2012/8/3.
- 9) 長田基広，渡辺由紀子，柴原尚希，加藤博和：LCA を適用した中量旅客輸送機関の環境負荷評価，土木計画学研究・論文集，Vol.23，No.2，pp.355-363，2006.
- 10) 中部電力：URL：http://www.chuden.co.jp/energy/kankyo/publication/pub_data/pubd_co2/index.html，2012/8/3.
- 11) 国土交通省：自動車燃費一覧，2011.
- 12) 減価償却資産の耐用年数等に関する省令：URL：<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S40/S40F03401000015.htm>，2012/8/3.

(2012.7.18受付)

Comparative evaluation of LCCO₂ between LRT and route bus taking into account actual number of passengers in a local city

Takushi SAKAGUCHI, Tomohiro TABATA and Naohiro GOTO

A comparative evaluation of public transportation facilities is important to investigate a valid condition of modal shift measures. In this study, light rail transit (LRT) and route bus was targeted, and lifecycle CO₂ (LCCO₂) of these public transportation facilities was compared. A lot of similar study investigates an effectiveness of the LRT with authorized number of passengers. However these results may be underestimated at local cities that actual number of passengers is quite low. In this study, the comparative evaluation of LCCO₂ based on the actual number of passengers was conducted at a local city T.

As a system boundary of the LRT, processes such as vehicle manufacture, construction and management of infrastructure equipments and operation was taken into account. And as the system boundary of the route bus, processes such as vehicle manufacture and operation was taken into account.

As a result, the LRT is advantageous comparing with the route bus if a transportation density exceeds 124 persons a day operation. However, route bus is advantageous if LRT per a unit was compared with one route bus without as much a vehicles capacity.