

GPSを用いたLRT・BRTの時間軸上の速度分布に関する日欧調査の結果整理

波床 正敏¹・大橋 龍一²・時實 翔平³

¹正会員 大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

E-mail: hatoko@ce.osaka-sandai.ac.jp

²非会員 株式会社ガイアート (〒162-0814 東京都新宿区新小川町8-27)

E-mail: ryu.0309@ezweb.ne.jp

³非会員 建装工業株式会社 (〒105-0003 東京都港区西新橋3-11-1)

E-mail: tokiki.0817@gmail.com

欧州のLRTやBRTは専用走行路の確保、強力な優先信号システム、長めの停留所間隔、運賃収受を簡略化した信用乗車方式の採用など、低速走行や停車の機会を減らすとともに高速運行し続ける時間を延ばし、停止した場合でも継続時間を短くする方策が行われている。このような平均速度向上策は日本の専門書や教科書で紹介されているものの、実際にどの程度であるのかについては明確ではない。日本の路面電車やバスでも同様の施策はあるが必ずしも有効に機能しているかどうかかわからない面もある。そこで実際に欧州のLRTやBRT、あるいは日本の路面電車やバスの走行速度をGPSを用いて調査し、時間軸を基準としての速度分布として整理し、これらの違いについて分析を試みるものである。

なお、GPS装置から直接得られたデータは誤差や異常値が含まれることがあるため、補正して精度向上を試みた上で分析する。

Key Words : *lrt, brt, velocity distribution, priority signal system, stop interval*

1. 研究の背景と目的

LRTが新しい都市交通として注目されるようになって40年ほどが経過したが、我が国では一部の都市で既設鉄道線を活用した路線や新規の郊外型路線としての整備が行われ始めたものの、ほとんどの都市ではインフラは旧来の路面電車線路ほぼそのまま、一部の車輛を低床LRVに置き換える程度にとどまっている。実際に乗車してみると、欧州のLRTと我が国の路面電車ではサービス水準の差は今だに大きな隔たりがあると感じられる。特にインフラへの投資や信号システムの優先度の考え方などの抜本的な変更が入れないと改善が難しい運転速度の面での差は大きいと思われる。

そこで本研究では、これまでに測定してきた日本の路面電車や欧州のLRTあるいはBRTの運転速度の調査結果を整理して、比較分析を行い、我が国の路面電車インフラの課題を明確化することを最終的な目標とする。

本研究に至る2015年度の研究¹⁾では、トランジットモールにおけるLRVの速度を計測した。GPSを使用して欧州5都市について連続的に測定した結果では、LRVは

走行距離の98%が30km/h以下、69%が20km/h以下で運転されており、平均速度も10km/h程度であった。また、定点での測定でも低速運転を確認し、LRVのトランジットモールにおける走行状況は日本の路面電車の通常の街路走行と傾向が異なることがわかった。2017年度の研究²⁾では、日本の路面電車の走行速度をGPSを使用して測定し、電車の位置と速度の関係を分析した結果、専用軌道では路面軌道に比べて走行速度が大きいこと、電停間距離が大きいほど運転速度が大きくなること、急曲線が存在すると専用軌道であっても速度が小さくなること、信号の多い区間では信号待ちの停止回数が多いことなどがわかった。さらに、2018年度の研究³⁾では、欧州の6都市の計7路線（LRTが4路線、BRTが3路線）の走行速度をGPSを用いて測定し、電車の位置と速度の関係を分析した結果、専用軌道では路面軌道に比べて走行速度が大きいこと、電停間距離が大きいほど運転速度が大きくなること、鉄道線への乗入れではかなり高速運転されていることなどがわかった。

これら一連の研究結果の整理は、基本的にはGPSの測定結果データをそのまま分析したものであったが、次の

ような研究課題があり、結果の整理が遅れている。すなわち、1秒ごとのGPSの測定結果項目の一つである「速度」を用いて位置を計算する（速度を積分する）方法で分析したため、誤差が蓄積しやすく、停止位置や減速区間の位置の確定に課題を残している。積分計算結果としての総走行距離と地図上の走行距離の相違を一定の係数をかけて調整を行った^{2),3)}が、同じ路線でも誤差の大きい区間とそうでない区間が存在しているために、あまり適切な調整方法ではなかった。また、測定そのものは同一路線に対して5往復以上実施し、それぞれについて2~3個のGPS装置を携帯して測定した（つまり、1路線につき最大30セットの測定結果がある）ものの、複数回の測定結果を重ねあわせて偶然的な誤差を除去するには軌道上の走行位置が正確であることが必要であり、丁寧な補正方法の導入が必要であった。

そこで、本研究では、LRV等が必ず一定の軌道上を走行することを前提に、GPSの測定結果を事後的に補正し、LRV等の位置をより正確にとらえることで、これまでの国内外のGPSによる路面電車、LRV、BRT等の走行データを整理して分析することを目的とする。

2. 運転速度の測定方法について

(1) GPSロガーの使用

LRV等の速度を測定する方法として、本研究では表-1のような速度計測に対応したGPSロガーを使用し、この装置を携帯して路面電車に乗車して計測対象区間を10回（5往復相当）以上実際に通過して計測する。記録は原則として1秒ごとに行われるように設定したが、GPS電波の受信状態が悪い場合（トンネルやビル陰など）は結果が記録されないため、計測間隔が開く場合がある。

これまでの研究^{2),3)}では、GPSによる速度の測定結果を元に位置を計算したので位置の誤差が蓄積しやすかった。測定対象の全区間についての計算上の路線長(Lc)と地図上の路線長(Lm)を比較し、両者が一致するように一定値(Lm/Lc)をGPSによる速度の測定結果を元に計算した値に乗じて調整した。しかし、この調整方法では両端部はともかく、途中位置での補正結果があまり正確ではなかつ

たため、正確な分析がしにくかった。そこで、本研究では次章で説明する方法で位置の補正を行う。

なお、本研究を含む一連の研究で使用したGPSロガーは週数ロールオーバー問題に対応していない機種であるが、測定時期はすべてこの問題の発生する2019年4月7日以前であるので、この件による直接の影響は無い。また、週数ロールオーバーが発生したとしても、このロガーについては時刻の記録が単純に1024週間分ずれるだけで、位置の測定結果には問題が無いことを確認している。

(2) 調査対象都市と路線

本研究で誤差補正をした上で結果整理を行う対象（国内都市）は表-2に示す8都市の計8路線である。いずれも基本は軌道法に基づく路面電車であるが、京阪電鉄の石山坂本線の対象区間は全線専用軌道である。また広島電鉄の2系統は鉄道事業法に基づく宮島線区間を含んでいる。岡山電軌、長崎電軌、豊橋鉄道には専用軌道はなく路面軌道のみである。海外の結果整理対象は表-3に示す欧州6都市の計7路線である。鉄輪式のLRTが4路線、ゴムタイヤトラムのBRTが1路線、専用通路が確保された連節バスによるBRTが2路線である。表-3にはこれら表には、計測対象区間の電停数、区間長、標準的な所要時間、路線概要についても示している。

3. マップマッチングの方法

(1) 平面直角座標への変換

GPSの測定結果は、基本的には測定地点の緯度、経度、測定時刻が記録されているものである。緯度経度は球面上の位置表記であるため、（本研究で要求される程度の位置精度の場合は、さほど大きな問題にならない可能性はあるが）そのまま平面上の座標として扱うことは不適切である。そこで、まず緯度経度の情報を平面直角座標に変換する。

本研究では、緯度経度の情報を参考文献^{4),5)}による方法で平面直角座標に変換した（変換結果が正しいかどうかについては、変換結果を参考文献^{6),7)}による方法で緯度経度の値に計算し直し、元の値と等しくなるかを確認）。緯度経度から平面直角座標に変換する際、平面座標の基準となる地点をあらかじめ決める必要がある。日本国内の場合は地方ごとに19に分割されてた平面直角座標系があり、各座標系の原点が決められている。世界的にはUTM（ユニバーサル横メルカトル）座標がよく使われており、100km四方のUTMグリッドに分割した上で、グリッドの南西角を原点とする座標で表記される。本研究の場合は異なる都市間で座標値をそのまま演算することは無いので、都市ごとに平面直角座標の原点が異なつ

表-1 GPSロガーの主要諸元

項目	内容
機器名	Holux M-241（および相当品）
最小計測間隔	1Hz
位置精度(Non DGPS)	3m以内（CEP=平均誤差半径）
速度精度(Non DGPS)	0.1m/s（約0.4km/h）
水平偏差(DGPS)	2.2m未満（95%信頼限界）
垂直偏差(DGPS)	5m未満（95%信頼限界）
最大高度	18,000m
最大速度	515m/sec（1854km/h）

表-2 測定対象都市と路線（国内）

都市名	測定対象路線	区間と電停車数(両端含)	区間長と所要時間	計測日	備考
大阪市 堺市	阪堺電軌軌道 上町線・阪堺線	天王寺駅前-浜寺駅前 29箇所	13.8km, 49分	2016/5/15, 2016/9/25, 2016/10/1	路面, 専用軌道
京都市	京福電鉄 嵐山本線	嵐山-四条大宮 13箇所	7.2km, 24分	2016/10/8	路面, 専用軌道
京都市 大津市	京阪電鉄 京津線	京阪山科-浜大津 6箇所	6.0km, 12分	2016/10/9, 2016/10/15	専用軌道, 路面
大津市	京阪電鉄 石山坂本線	浜大津-石山寺 12箇所	6.7km, 17分	2016/10/9, 2016/10/15	専用軌道のみ
岡山市	岡山電気軌道 東山線	岡山駅前-東山 10箇所	3.0km, 18分	2016/8/11, 2016/11/3	路面のみ
広島市	広島電鉄 宮島線・2号線	広島駅前-広電宮島口 40箇所	21.5km, 67分	2016/8/11, 2016/11/3, 2016/11/4	鉄道線(専用), 路面
長崎市	長崎電気軌道 1号系統	赤迫-正覚寺下 26箇所	7.3km, 37分	2016/11/4, 2016/11/5, 2016/11/6	路面のみ
豊橋市	豊橋鉄道 市内線	駅前-赤岩口 13箇所	4.8km, 21分	2016/8/16	路面のみ

表-3 測定対象都市と路線（海外）

都市名	対象路線	区間(停留所数[両端含])	区間長と所要時間	計測日	備考
Karlsruhe(独)	1号線	Oberreit Badeniaplatz - Durlach Turmberg (26)	11.5km, 37分	2017/9/1, 2017/9/11	鉄輪式LRT, 路面併用軌道, 専用 軌道, Transit Mall, 一部単線
Saarbrücken(独)	S1号線	Siedlerheim - Sarreguemines (21)	20.8km, 39分	2017/9/2 - 2017/9/3	鉄輪式LRT, 路面併用軌道, 鉄道 線乗入, 一部単線
Strasbourg(仏)	C線	Gare Centrale - Neuhof Rodolphe Reuss (17)	8.0km, 28分	2017/9/7 - 2017/9/9	鉄輪式LRT, 専用軌道, 路面併用 軌道, Transit Mall
Freiburg(独)	3号線	Innsbrucker Straße - Munzinger Straße (21)	9.2km, 31分	2017/9/9 - 2017/9/10	鉄輪式LRT, 専用軌道, 路面併用 軌道, Transit Mall
Nancy(仏)	1号線	Essey Mouzimpré - Vandoeuvre CHU Brabois (28)	10.0km, 38分	2017/9/5 - 2017/9/6	BRT(TVR[ゴムタイヤトラム]), 一 般車共用区間, Transit Mall, 専 用区間
Metz(仏)	MB線	Cité U - Maternité (21)	11.2km, 33分	2017/9/4 - 2017/9/5	BRT(3連式連節バス), Transit Mall, 一般車共用区間, 専用区 間, 一部単線運用
Strasbourg(仏)	G線	Gare Centrale - Espace Européen de l'Entreprise (12)	5.1km, 15分	2017/9/7 - 2017/9/9	BRT(2連式連節バス), 一般車共 用区間, 専用区間, 一部単線運用

いてもかまわない。そこで、原点の経度は、対象路線の最東端と最西端の midpoint の経度について分秒を度単位に丸めたもの。原点の緯度は最北端と最南端の midpoint の緯度について分秒を度単位に丸めたものとした（都市ごとに原点が異なる）。これにより、路線データが与えられると自動的に変換に使用する原点が人手を介さずに決定される。また、ルート付近に原点があるため、変換後の座標値の桁数を少なくできる。

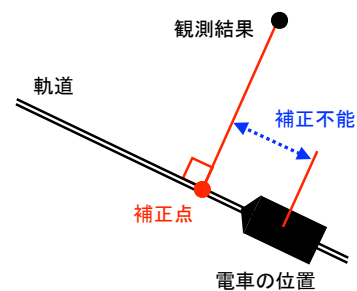


図-1 直角投影マッチングの課題

(2) 直角投影マッチングの課題

路面電車等に搭載されたGPS機器の出力結果をリアルタイムに補正する方法としては、図-1のような電車の進行経路に対して直角となる方向にGPSによる観測結果を補正する方法⁷⁾がある。この方法では進行方向に直交する方向の誤差は強制的に除去できる一方、進行方向に対する誤差の除去が原理的に困難であるという課題が存在している。特に本研究のような経路上の位置と速度の関係进行分析するような目的の場合は、この課題は克服する必要がある。

車載カーナビ機器のような場合には、加速度センサや角速度センサの情報などを追加的に用いてマップマッ

ングを行っている⁸⁾が、本研究の場合はそのような補助的情報を利用することはできないので、GPSの測定結果だけを用いて補正する必要がある。

(3) 曲線部分を利用した事後補正（第一段階）

本研究で扱うGPSデータはリアルタイムに機器から出力されるものではなく、全体の計測が終了した後のものであるため、地図上のルート形状とGPSが示す軌跡の形状を比較して補正するという方法が採用できる。図-2のようなルートの曲線部分の前後において、直線部分を L_1 （左）および L_2 （右）とすると、 L_1 、 L_2 それぞれに対して前項のような直角投影による補正量 \vec{A} および \vec{B} が計

算可能である。このとき、これらに直交する \vec{a} および \vec{b} を想定すると、この曲線付近における望ましい補正量 \vec{C} は次のようになる。

$$\vec{C} = \vec{A} + p\vec{a} = \vec{B} + q\vec{b} \quad (1)$$

$$\vec{A} \cdot \vec{a} = \vec{B} \cdot \vec{b} = 0 \quad (2)$$

また、 $\vec{A} = (a_x, a_y)$ 、 $\vec{B} = (b_x, b_y)$ とすると、(2)より、以下のようになる。ただし、 $|\vec{A}| = |\vec{a}|$ かつ $|\vec{B}| = |\vec{b}|$ である。

$$\vec{a} = (a_y, -a_x) \quad (3)$$

$$\vec{b} = (b_y, -b_x) \quad (4)$$

このとき、(1)より、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{cases} a_x + pa_y = b_x + qb_y \\ a_y - pa_x = b_y - qb_x \end{cases} \quad (5)$$

(5)の連立方程式を解くことで p および q の値が具体的に求まり、例えば p の値は次のようになる。

$$p = \frac{b_x^2 + b_y^2 - a_x b_x - a_y b_y}{a_y b_x - a_x b_y} \quad (6)$$

p や q の値を(1)に代入することで、望ましい補正量 \vec{C} を求めることができる。この補正量 \vec{C} を使ってGPSによる軌跡全体を平行移動させることで、電車等の進行方向に対する誤差の除去が可能である。

なお、地図上のルートとGPSが示す軌跡の位置関係によっては以上のような補正操作を2度繰り返した方がよりよい結果を得られる場合がある。

(4) 直角投影マッチング (第二段階)

前項の補正を行った後、最終的な補正として第(2)節で説明した直角投影マッチングを使って完全に地図上のルートにGPSデータをマッチングさせる。

(5) 曲線付近以外での補正量について

曲線付近以外、すなわち直線部分の補正量については、直線部の両端の補正量を補正対象地点における両端からの距離によって按分して補正する。

(6) 位置と速度の再計算

上述の方法による補正後GPSデータを用い、隣接す

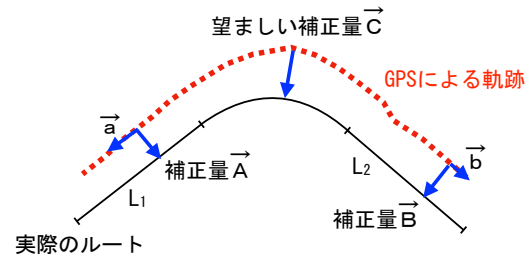


図-2 曲線部分を利用した事後補正

るGPSデータ間での経過時間と位置の変化量とから、補正後の電車等の速度や起点からの位置を求める。

4. 結果の整理

以上のような一連の補正作業をした上で、各路線の速度分布や区間ごとの運転速度などを計算する。

本原稿執筆時点では、GPSデータの補正作業中であり、補正後データに基づく各路線の速度分布や区間ごとの運転速度などについては講演発表時に示す。

参考文献

- 1) 波床正敏, 安井渉: トランジットモール区間におけるLRV走行速度の測定結果分析, 土木計画学研究講演集51, 講演番号56, CD-ROM, 2015.
- 2) 波床正敏, 伊藤雅: わが国の路面電車の走行環境と走行速度の関係性に関する調査, 土木計画学研究講演集55, 講演番号38-04, CD-ROM, 2017.
- 3) 波床正敏: LRTおよびBRTの走行環境と走行速度の関係性に関する調査, 土木計画学研究講演集57, 講演番号24-06, CD-ROM, 2018.
- 4) 国土地理院: 測量計算サイト-平面直角座標への換算-, <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/algorithm/bl2xy/bl2xy.htm>, 2019年10月3日取得.
- 5) 河瀬和重: Gauss-Krüger投影における経緯度座標及び平面直角座標相互間の座標換算についてのより簡明な計算方法, 国土地理院時報, 121, pp.109-124, 2011.
- 6) 国土地理院: 測量計算サイト-経度緯度への換算-, <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/algorithm/xy2bl/xy2bl.htm>, 2019年10月3日取得.
- 7) 谷口哲也, 高橋徹, 吉川耕司, 塚本直幸, 能勢和夫: GPSを使った堺市低床式車両位置情報通知サービスの開発, 情報処理学会第76回全国大会, 講演番号1ZB-9, 2014.
- 8) 宮下浩一, 寺田努, 吉川耕司, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションのためのマップマッチングアルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.50(1), pp.75-86, 2009.

(Received October 4, 2019)

A SUMMARY OF THE RESULTS OF JAPAN-EUROPE SURVEY ON SPEED
DISTRIBUTION ON THE TIME AXIS OF LRT AND BRT USING GPS LOGGER

Masatoshi HATOKO, Ryuichi OHASHI and Shohei TOKIZANE