

# 都市交通における期待サービス速度の概念に関する基礎的研究\*

## A Basic Study on Expected Service Speed of Urban Transportation\*

波床 正敏\*\*・塚本直幸\*\*\*・石塚 久美\*\*\*\*

By Masatoshi HATOKO\*\*・Naoyuki TSUKAMOTO\*\*\*・Kumi ISHIZUKA\*\*\*\*

### 1. はじめに

自動車交通から公共交通への転換が望まれはじめて久しいが、転換は遅々として進まないばかりか、公共交通の衰退が今なお進行しつつさえある。この遠因として、道路に比較して、公共交通の整備効果を定量的に分析する手法の確立が不十分であることが考えられる。そのため、公共交通整備が有利であると考えられるようなケースでも、定性的、あるいは事例的にしか比較優位性を提示しえず、結果として十分な合意形成に至らないことがありうる。

例えば、自動車交通ではQV曲線等を用いて、ある交通需要に対して交通空間が提供しうる輸送サービスの水準についての分析が可能である。ところが、公共交通については、このような基本的な空間パフォーマンスを示す理論体系も明確ではなく、公共交通機関へのシフトが叫ばれているにもかかわらず、同じ土俵上で議論することが難しい。このため、既存の道路にLRTを新規導入する場合のように、限られた都市の交通空間を私的交通と公共交通の間で再配分するような課題に対しても、このような同じベースで議論することの重要性が、今後高まると思われる。

本研究では公共交通の特徴のうち、輸送量と運行便数の関係について着目し、公共交通が都市交通空間においてどのようなパフォーマンスを發揮するかを分析する方法論について、基礎的概念を整理した。

### 2. 輸送需要と利便性の関係における基本的性質

#### (1) 都市公共交通における需要と利便性の特徴

ベルトコンベアのような形態でない限り、公共交通サービスは間欠輸送にならざるを得ない。その頻度は需要がゼロなら頻度ゼロ、需要が多いほど頻度が高くなる傾向にある。

首都圏の通勤路線では混雑率180%、関西では150%

\*キーワード：期待サービス速度, 期待所要時間, 都市交通, 輸送需要

\*\* 正員, 博士 (工), 大阪産業大学 工学部 都市創造工学科  
(大阪府大東市中垣内3-1-1, Tel: 072-875-3001 (ex.3722),  
E-mail: hatoko@ce.osaka-sandai.ac.jp

\*\*\* 正員, 博士 (工), 大阪産業大学 人間環境学部 都市環境学科  
E-mail: naoyuki@due.osaka-sandai.ac.jp

\*\*\*\* 非会員

を目標として輸送改善が行われ、達成されつつある。逆に、乗客が少ない路線では、乗客に不快を与えない範囲で減車や減便などの合理化が行われている。すなわち、短期的には輸送需要の多寡は混雑率の大小に直結するものの、長期的には一定の混雑率に保たれる方向で輸送状況が変化し、輸送需要と運行頻度には一定の傾向が見られるものと考えられる。

図1は、都市交通年報掲載の都市圏鉄道混雑区間のピーク時のデータ(2001年)をもとに作成したものである。横軸はピーク1時間あたりの輸送需要、縦軸は上記データに示された区間長を列車の平均待ち時間に乗車時間を加えたもの(以後、期待サービス速度と呼ぶ)である。データごとに区間長や編成定員、混雑率等が異なり、同列に比較することはできないが、輸送量が小さい区間では期待サービス速度が小さい傾向、輸送量が大きくなると期待サービス速度も大きくなる傾向にあることがわかる。また、首都圏では輸送量が極めて大きい区間で、期待サービス速度が漸減する傾向がある。

#### (2) 需要と利便性の関係の試算

例えば、表1の示した関西圏の近郊路線では、6.8kmの区間が11分で結ばれ、表定速度は37.1km/hである。ピーク時には16本の列車が運行され、混雑率は135.2%となる。平均運行間隔は3.8分、平均待ち時間1.9分であり、平均的な待ち時間を含めた所要時間は、乗車時間11分を加えた12.9分となる(実

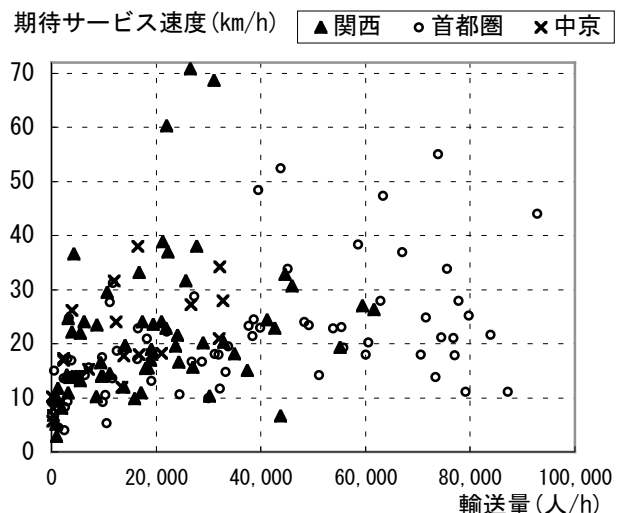


図1 鉄道輸送量と速度(2001年, ピーク時)

表1 試算の参考条件

区間	JR 学研都市線 ・ JR 東西線 放出→北新地
区間長	6.8km
走行時間	11分 (各駅停車)
表定速度	37.1km/h
編成定員	1,089人 (7両編成)
ピーク時 輸送人員 (7:30-8:30)	23,560人 (2002年) (鳴野→京橋)
ピーク時 輸送定員	17,424人 (16本) (2002年10月)

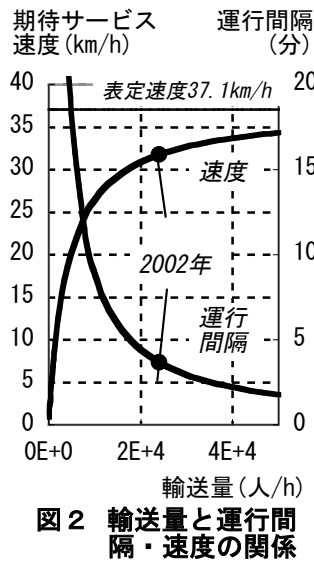


図2 輸送量と運行間隔・速度の関係

際には快速運転や運行間隔の不揃いがあり、後述する期待所要時間を求めると、12.6分となる)。したがって、待ち時間込みの速度相当の値(期待サービス速度)は  $6.8\text{km} \div 12.9\text{分} = 31.7\text{km/h}$  となる。

さて、この混雑率と編成定員を維持したまま、輸送人員を変化させてみよう。図2は、輸送人員に応じた便の運行時間間隔および期待サービス速度を示したものである。期待サービス速度のグラフは原点から始まり、輸送需要が毎時1万人程度、運行間隔15~20分程度までは輸送需要が増えると急速に大きくなる。それ以上は緩やかに上昇し、表定速度に漸近する。これは図1の傾向と一致する。

実際には輸送量が小さい場合は、編成定員を減じるとか低い混雑率を許容して運行本数を多くし、乗客の利便を確保するケースが多い。逆に、輸送量が多い場合は、増結や高い混雑率の許容で、運行本数を抑えることもある。さらに輸送量が多い場合は、運行間隔が非常に小さいため一種の渋滞現象を生じ、走行速度が低下する。大量型鉄道でなくバス便や路面電車では、需要が極端に多いとダンゴ運転が生じやすくなり、実質的な運行便数が減少する。図1でも、首都圏の一部線区ではこの傾向が見られる。

### 3. 公共交通の輸送量と速度の関係

#### (1) はじめに

本章では、公共交通における輸送量と輸送の迅速さを表す速度相当の指標との関係について、道路上の自動車交通流(以下、道路交通)の基礎理論を参考に述べる。なお、公共交通輸送の基本量の相互関係は次のようになる。

$$C_{hr} = N_{hr} C_{tr} = N_{hr} N_{rs} C_{rs} \quad [1]$$

$$P_{hr} = N_{hr} P_{tr} \quad [2]$$

$$\alpha = P_{hr} / C_{hr} \quad [3]$$

$$\left( \begin{array}{l} C_{rs}: \text{車両定員}, C_{tr}: \text{編成定員}, C_{hr}: \text{時間あたり輸送力} \\ N_{rs}: \text{編成両数}, N_{hr}: \text{時間あたり便数}, P_{tr}: \text{1便の輸送人員} \\ P_{hr}: \text{時間あたり輸送人員}, \alpha: \text{混雑率} \end{array} \right)$$

#### (2) 車両密度と便密度

道路交通では単位距離あたりに存在する自動車台数を交通密度と定義するが、公共交通でも同様の概念で単位距離あたりに存在する車両数を車両密度( $K_{rs}$ [両/Km])と定義できる。

また、車両密度( $K_{rs}$ [両/Km])を編成両数( $N_{rs}$ [両])で除すると単位距離あたりに存在する便数となり、これを便密度( $K_{tr}$ [便/Km])と定義することができる。

$$K_{tr} = K_{rs} / N_{rs} \quad [4]$$

便密度の逆数は列車等の交通便の空間的間隔を表すことになり、これを便頭間隔( $H_{tr}$ [Km/便])とする。

$$H_{tr} = 1 / K_{tr} \quad [5]$$

#### (3) 表定速度と期待サービス速度

公共交通に関する速度指標としては、最高速度のほか、加減速を考慮した平均速度、駅等での停車時間を考慮した表定速度がある。交通計画では実質的な移動能力である表定速度  $V_{sc}$ [Km/h] が重要であるが、これは観測区間長  $L_{ob}$ [Km] と途中停車や加減速を考慮した当該区間を移動するのに要する時間(以下、計画所要時間と呼ぶ)  $T_{sc}$ [h] を用いて次のように表せる。

$$V_{sc} = L_{ob} / T_{sc} \quad [6]$$

公共交通では、さらに間欠運行であることを考慮する必要がある。これまで間欠運行を考慮した速度指標は定義されていないが、駅等における待ち時間を考慮した所要時間指標として、期待所要時間(平均積み上げ所要時間)がある。この指標を用いれば、待ち時間や乗換えを要する場合における接続の良否を考慮した速度相当の指標を定義することができる。これを、本研究では期待サービス速度  $V_{ex}$ [Km/h] と定義する。 $V_{ex}$  は観測区間を移動するのに要する期待所要時間  $T_{ex}$ [h] を用いて次のように表せる。

$$V_{ex} = L_{ob} / T_{ex} \quad [7]$$

期待所要時間は都市間交通の空間的抵抗を表す指標として開発されたが、既存の研究<sup>1)2)</sup>では待ち時間を考慮した方がより精密な分析が可能であることがわかっている。一方、都市交通のような運行頻度の高い場合は、出発分布が一樣として差支えないので、平均待ち時間を考慮するのが自然である。同指標は、すでに都市交通分析への適用実績<sup>3)</sup>もある。

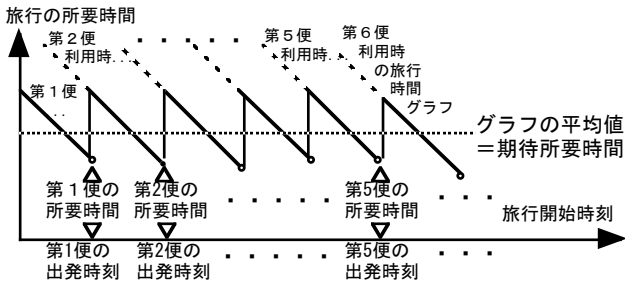


図3 期待所要時間の考え方

(4) 輸送人員と期待サービス速度の関係

a) 輸送人員と運行便数

公共交通では輸送人員にあわせて便数や編成両数などの調整が行われる。[2][3]より、 $N_{hr}$ を $P_{hr}$ 、 $\alpha$ 、 $N_{tr}$ 、 $C_{rs}$ を用いて表すと次式となる。

$$N_{hr} = \frac{P_{hr}}{\alpha N_{rs} C_{rs}} \quad [8]$$

b) 運行便数と期待所要時間

2点間の所要時間は、図3の○点のように、便ごとに求まるが、他の時刻を出発時刻とした場合は、次便までの待ち時間が加わり、図中の斜め線のようにになる。したがって、出発時刻の分布を一様とする図のノコギリ状のグラフの平均値が所要時間に相当する指標となる。これを期待所要時間と呼ぶ。

期待所要時間は各便の出発時刻をもとに算出されるが、都市交通では運行間隔をそろえた方が効率的であるので、等間隔で運行されることが多い。この場合に限り期待所要時間 $T_{ex}$ は時間あたり運行便数 $N_{hr}$ と所要時間 $T_{sc}$ を用いて次式で表せる。

$$T_{ex} = \frac{1}{2 N_{hr}} + T_{sc} \quad [9]$$

c) 期待所要時間と期待サービス速度

[7][8][9]より、まとめると以下ようになる。

$$V_{ex} = \frac{2P_{hr} L_{ob}}{2P_{hr} T_{sc} + \alpha N_{rs} C_{rs}} \quad [10]$$

[10]は対象区間の期待所要時間を算出後に速度へ換算したものだが、別の定義も考えられる。期待所要時間は出発分布一様を仮定していることから、[11]のように、まず各時刻における待ち時間と計画所要時間の合計値を用いて速度を計算し、この平均値を用いる方法もある。実際にこの方法で $L_{ob}=10\text{km}$ 、 $N_{hr}=6$ 本/時、 $T_{sc}=0.5$ 時間の条件で計算を行うと、[10]では $V_{ex}=17.1\text{km/h}$ だが、[11]では $V_{ex}'=17.2\text{km/h}$ となる。しかし、その差は小さく、[10]の方が計算が簡単で、また期待所要時間と同時に使用して分析するのに都合がよいことなどから、以後、本研究では[10]の方法を用いる。

$$V_{ex}' = \frac{1}{1/N_{hr}} \int_0^{1/N_{hr}} \frac{L_{ob}}{T_{sc} + t} dt \quad [11]$$

注)  $1/N_{hr}$ は便の運行時間間隔、 $N_{hr}$ は[8]により計算

4. 各パラメタが期待サービス速度に与える影響

(1) 基本ケース

本章では、[10]式を構成する諸量が $P_{hr}$ と $V_{ex}$ の関係に与える影響を分析する。基本ケースとして、中量輸送機関である京阪電鉄京津線(および地下鉄乗入区間)を参考に、 $L_{ob}=11.4\text{km}$ 、 $T_{sc}=0.367$ 時間、 $\alpha=1.17$ (御陵→蹴上, 2002)、 $C_{tr}=N_{rs}C_{rs}=386$ 人とした。

(2) 各パラメタ変更の影響

a) 観測区間長 $L_{ob}$ の影響

図4では基本ケースのほか、表定速度はそのままに、 $L_{ob}=22.8\text{km}$ とした場合( $T_{sc}=0.733$ 時間)、 $L_{ob}=5.7\text{km}$ とした場合( $T_{sc}=0.183$ 時間)の3ケースについて試算した。 $L_{ob}$ が小さい場合は計画所要時間も小さく、相対的に運行頻度の影響が大きい。このため、同じ輸送量に対する期待サービス速度は小さくなる。逆に $L_{ob}$ が大きいと運行頻度の影響が小さくなり、表定速度( $V_{sc}=31.1\text{km/h}$ )に漸近しやすい。

b) 所要時間 $T_{sc}$ (表定速度 $V_{sc}$ )の影響

図5は $T_{sc}$ を変化させて $V_{sc}$ を変更したものである。基本ケースでは $V_{sc}=31.1\text{km/h}$ だが、これを阪堺電気鉄道なみの $V_{sc}=21.2\text{km/h}$ 、カールスルーエ(ドイツ)のLRTなみの $V_{sc}=47.8\text{km/h}$ の3ケースについて試算した。図より、 $V_{sc}$ は期待サービス速度 $V_{ex}$ に大きな影響を与えている。 $V_{sc}$ が小さい場合は少ない輸送量で $V_{sc}$ 付近に達してしまうのに対し、 $V_{sc}$ が大きい場合は輸送量が増加しても緩やかに $V_{ex}$ が上昇し続ける。

c) 混雑率 $\alpha$ の影響

図6では基本ケースのほか、首都圏最混雑区間なみの $\alpha=2.30$ とした場合、座席定員程度が乗車している $\alpha=0.37$ とした場合の3ケースについて試算した。図より、 $\alpha$ を小さく設定した方が同じ輸送量に対する期待サービス速度は大きくなるが、輸送量が多くなると、その差は縮まる傾向にあるといえる。

d) 編成定員 $C_{tr}$ の影響

図7では基本ケースのほか、車両を岡山電気軌道のLRVなみの $C_{tr}=74$ 人とした場合、京都市交通局烏丸線(6両)なみの $C_{tr}=836$ 人とした場合の3ケースについて試算した。定員が小さい方が同じ輸送量なら期待サービス速度は大きくなるが、輸送量が多くなると、その差は縮まる傾向にあるといえる。

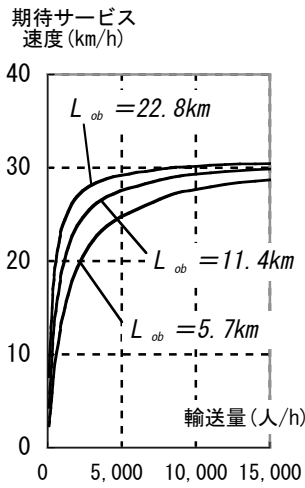


図4 観測距離 $L_{ob}$ の影響

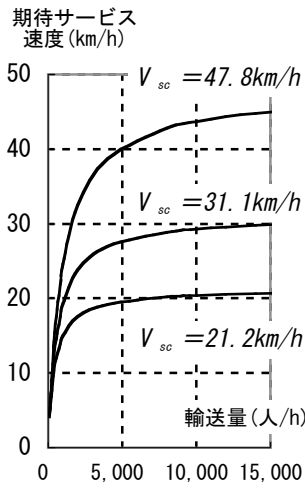


図5 表定速度 $V_{sc}$ の影響

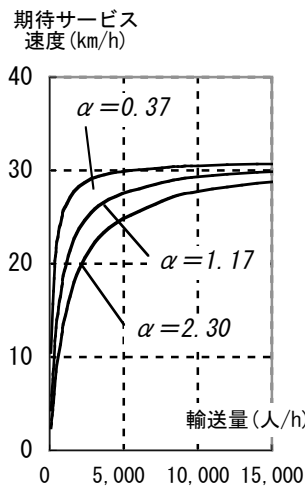


図6 混雑率 $\alpha$ の影響

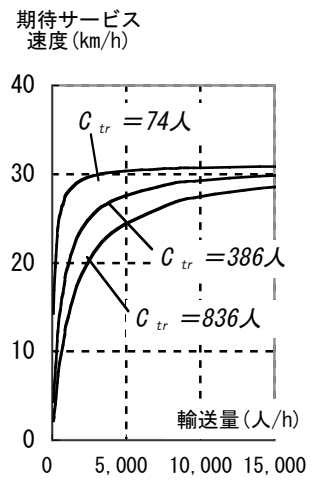


図7 編成定員 $C_{tr}$ の影響

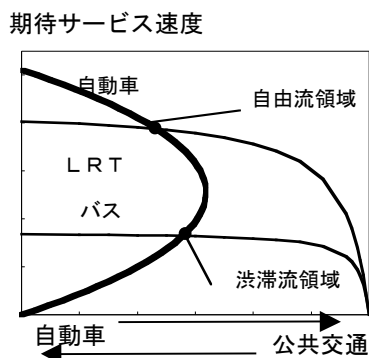


図8 公共交通の水準向上で渋滞解消の可能性

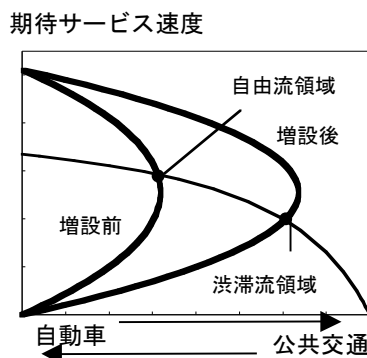


図9 道路整備で渋滞助長の可能性

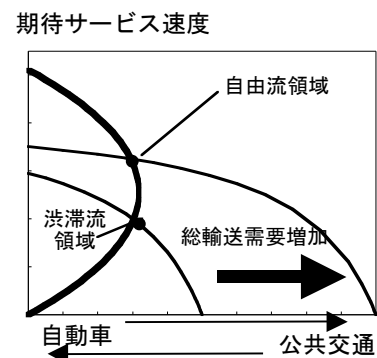


図10 総需要が増加するときは道路整備不要の可能性

## 5. まとめと今後の方向性について

### (1) 公共交通の輸送人員と速度の関係

以上の考察から、公共交通における輸送人員  $P_{hr}$  と輸送の迅速さを表す速度相当の指標 (期待サービス速度  $V_{ex}$ ) との基本的な関係は以下とおりである。

- $P_{hr}$  がゼロなら  $V_{ex}$  もゼロ
- $P_{hr}$  が増加すると  $V_{ex}$  も増加
- $V_{ex}$  の増加は徐々に鈍り、表定速度  $V_{sc}$  に漸近
- $V_{ex}$  の計算に用いる諸指標は  $V_{ex}$  に影響を与える

### (2) 交通空間における自動車交通との相互関係

自動車交通の QV 曲線は台数と速度の関係だが、1 台あたり乗車人数を用いて輸送人員と速度の関係にできる (自動車は任意の時刻に出発できるので、走行速度=期待サービス速度である)。このとき、一定の需要を公共交通と自動車輸送で分担する場合、本研究の結果を用いると、次のような可能性がある。

#### a) 公共交通の水準向上で車線増設無しでも渋滞解消

図8では、グラフの横軸方向の幅を総交通需要とし、左から右に向かって自動車の輸送人員を、逆方向に公共交通の輸送人員をとる。このとき、もし速度だけで機関選択がなされるなら、公共交通の表定

速度向上により渋滞を解消する可能性がある。

実際には、機関選択の要因は種々あるが、それらの要因を考慮したとしても、グラフの形状は図8に類似している可能性が大きいものと考えられる。

#### b) 自動車用の車線増設でかえって渋滞悪化

同様の作図法で、図9では公共交通はそのまま、自動車の車線を増設したケースである。公共交通が減便され、かえって渋滞を招く可能性がある。

#### c) 総需要が増加するときは道路整備不要

同様の作図法だが、図10は総需要が増加したケースである。適切に公共交通が増便されれば、道路はそのままでも渋滞が解消する可能性がある。逆に総需要が減った場合は、公共交通の減便により渋滞が発生する可能性がある。

### 【参考文献】

- 天野・中川・加藤・波床「都市間交通における所要時間の概念に関する基礎的研究」土木計画学研究論文集9, pp. 69-76, 1991
- 中川・波床・伊藤・西澤「国際交通における利便性指標としての積み上げ所要時間に関する研究」土木学会論文集 No. 590/IV-39, pp. 43-50, 1998
- 飯田・岩辺・菊池・北村・佐々木・白水・中川・波床・藤井・森川・山本「マイクロシミュレーションアプローチによる都市交通計画のための交通需要予測システムの提案」土木計画学研究・論文集17, pp. 841-848, 2000