

# 都市交通空間における公共交通のパフォーマンスおよび 自動車交通との相互作用に関する基礎的考察\*

## A Basic Study on Performance of Public Transportation in Urban Transit Space and on its Interaction with Car Traffic\*

波床正敏 \*\*・塚本直幸 \*\*\*

Masatoshi HATOKO \*\*, Naoyuki TSUKAMOTO \*\*\*

### 1. 研究の背景と目的

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、転換が進まないばかりか、公共交通の衰退が今なお進行している。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。

定量的な側面から計画を行う場合では、私的交通の主体となる自動車交通に関する分析については様々なツールが利用可能で、その分析体系は大規模かつ精緻である。いっぽう公共交通には、間欠運行、混雑の不快さ、乗継ぎ、輸送量と運行便数の関係、パズルのような運行計画等々、特有の課題がある。だが、公共交通についての分析は、これら特徴を簡略化あるいは無視して取扱われることも多く、比較的簡素で体系だてられていない。

例えば、自動車交通ではQ-V曲線等を用いて、交通需要に対する交通空間が提供する輸送サービス水準の分析が可能である。しかし、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。今後、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、高まると思われる。

本研究では、最初に、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発揮するかについて基本的な概念を整理する。次に、この基本的な概念に基づき、自動車交通と公共交通との両方が整備され、

2地点間を移動する際に両者いずれかを選択可能な場合、総合的に都市交通空間がどのようなパフォーマンスを示す可能性があるかについて、基礎的考察を行う。

### 2. 公共交通のサービス水準に関する既往の研究

公共交通需要と提供されるサービス水準との関係については、以前より家田・赤松らの研究<sup>1)</sup>や屋井・岩倉らの研究<sup>2)</sup>において鉄道輸送需要と混雑の関係に着目した研究が行われている。比較的近年の研究では、岩倉・渡辺らの研究<sup>3)</sup>において需要が列車運行速度そのものに影響を与えるとの視点から、大都市圏の通勤鉄道についてリンクコスト関数の開発を試みている。だが、これら研究は大都市圏における大量型鉄道を意識したものであり、自動車交通との競合にさらされているような路面公共交通や地方都市の郊外鉄道線等の基本的かつ一般的傾向を示しているわけではない。

交通需要と費用という視点では、輸送需要に応じた平均費用や限界費用の変化について、交通経済の基礎知識として数多くの書籍で解説されている。しかし、交通機関の運賃や費用負担者に関する議論には不可欠であるものの、交通機関の利便性に関する特徴を考慮して取扱っているわけではないので、これだけで都市交通空間はどうかあるべきかを論じることは難しい。

公共交通と自動車交通とを同時に取扱った研究は、近年の計算機の発達に伴い、シミュレーション技法によるものが増えてきている。中川・伊藤らの研究<sup>4)</sup>では公共交通とその乗客の行動を表現する部分を自動車交通シミュレーションに組入れることにより、両者の間で所要時間や容量の相互関係を取扱うことができるようになっており、バス増便策やトランジットモール設置策などの効果分析が行われている。また、森津・木村らの研究<sup>5)</sup>ではLRTが道路上に導入された場合について、LRTと自動車との間の相互作用をマイクロ交通シミュレーションにより分析するとともに視覚化し、交通計画への住民参加支援ツールとして利用することも考慮されている。さらに鈴木・坂本らの研究<sup>6)</sup>や松本・熊谷らの研究<sup>7)</sup>では、公共交通優先策の影響についてシミュレーション分析が行われている。しかし、シミュレーション技法は代替案評

\*キーワード：公共交通計画, 道路計画, 交通計画評価, 公共事業評価法

\*\*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

価には非常に有効な手法だが、基本的な施策の方向性を打出す段階に用いるのは難しい。

以上のように、公共交通については交通需要に対する基本的な空間パフォーマンスを示す理論体系は明確でなく、自動車交通と同じ視点で議論できる状況にない。

### 3. 本研究の位置づけ

本研究は、大きく分けて2つの部分から構成されている。前半は基本的な施策の方向性を打出す段階などにおいて自動車交通と公共交通を同一の視点から分析できるようにするための基本的な考え方の構築、後半はそれを利用した自動車交通と公共交通の相互関係の基礎的分析である。

前半については、主として公共交通の輸送需要と運行頻度の関係に着目し、運行頻度を実質的な移動速度相当の値に換算する方法により交通需要と移動速度の関係を表現し、自動車交通と同一の視点から分析できるようにした。本研究では基本的な考え方を明らかにすることが主たる目的であり、詳細な水準値の算出を目的としていないので、輸送需要に対する輸送力の調整方法などにおいていくつかの仮定を置いている。

後半については、前半で明らかになった自動車交通と公共交通それぞれの特徴が相互に影響を及ぼす場合の影響の基本的傾向を明らかにすることを目的とした。したがって、自動車交通と公共交通それぞれの輸送需要と運行頻度の関係の基本的傾向が大きく変わらない範囲で簡略化を行って考察を行っており、比較的現実的な値を用いて考察をおこなったものの、決して数値的として高精度な分析結果の導出を意図していない。

### 4. 輸送需要と利便性の関係における基本的性質

#### (1) 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大きくなる傾向にある。さらに、極めて需要が大きい区間では文献3)で指摘があるように、運行速度の低下や、ダンゴ運転、停留所付近での渋滞等によりサービス水準が低下する。

さて、公共交通を都市鉄道に限って述べると、首都圏の通勤路線では混雑率180%、関西では150%を目標として輸送改善が行われている<sup>8)</sup>。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ようになる。

図1は都市圏鉄道混雑区間の状況を示しており、横軸はピーク1時間あたりの輸送量、縦軸は運行本数である。データごとに編成定員、混雑率等が異なっているが、輸送量が小さい区間では運行本数が少なく、輸送量が大きくなると運行本数が多くなるという基本的な特徴がある。

#### (2) 輸送需要とパフォーマンスの関係

例えば、表1に示した関西の都市鉄道では、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1時間あたり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。厳密には、この区間の1駅(鳴野)を通過する快速運転や運転間隔の不揃いがあり、後述する期待所要時間を計算すると12.6分となるが、大差はない。以上より、待ち時間込みの所要時間12.9分を用いて輸送のサービス水準として速度相当の値を求めると、31.7km/hとなる。

さて、この混雑率と編成定員を維持したまま、輸送需要を増減させてみよう。図2は、輸送需要に対応する列車運行間隔および速度換算したサービス水準を表す指標を示したものである。この速度換算のサービス水準指標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っている。それ以上は緩やかに上昇し、表定速

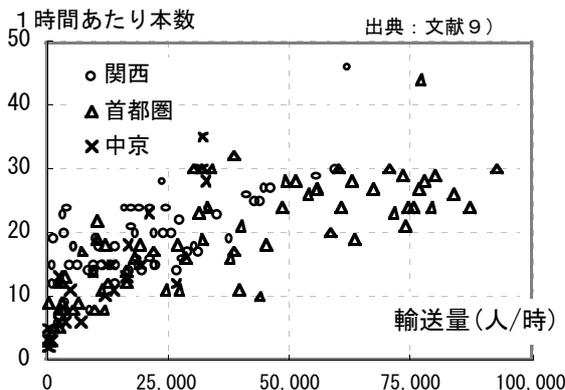


図1 鉄道輸送量と運行頻度(1997年ピーク時)

表1 試算の基本条件

区間	JR学研都市線・JR東西線(放出→北新地)
区間長	6.8km
所要時間 <sup>10)</sup>	11分(各駅停車)
表定速度	37.1km/h
編成定員 <sup>11)</sup>	1,089人(7両編成)
ピーク時輸送人員(7:30-8:30)	23,560人(2002年) <sup>12)</sup> (鳴野→京橋)
ピーク時輸送定員	17,424人(16本 <sup>10)</sup> )(2002年10月)

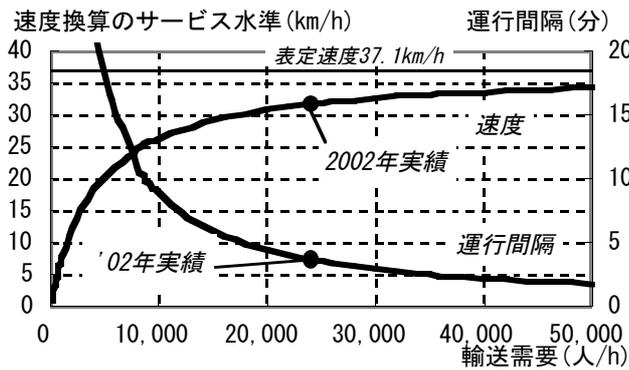


図2 輸送需要と運行間隔・速度の関係

度に漸近する。

実際には、輸送需要が小さい場合は、編成定員を減じる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、輸送量が大きい場合は、増結や高い混雑率の許容により、運行本数を抑えることもある。さらに輸送需要が多い場合は、前述のように速度低下を来す。

## 5. 公共交通の輸送需要とパフォーマンス

### (1) パフォーマンスの表し方

交通空間の輸送サービス水準を表す方法としては、速度、所要時間、費用、快適さなど種々の観点があるが、本研究では都市交通空間の輸送サービス水準という交通基盤としての能力を考察しようとしていること、自動車交通と公共交通を同じ視点で分析しようとしていることなどから、速度相当の次元の指標を用いて表現する。

### (2) 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  $V_{sc}$  が重要であるが、これは観測区間長  $L_b$  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)  $T_{sc}$  を用いて次のように表せる。

$$V_{sc} = L_b / T_{sc} \quad [1]$$

公共交通では、さらに運行頻度を考慮する必要がある。これまで運行頻度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 (文献 13)14) では「平均積み上げ所要時間」がある。同指標を用いれば、待ち時間や乗換時の接続の良否を考慮した速度相当の指標を定義できる。これを、本研究では期待サービス速度  $V_{ex}$  と定義し、都市交通空間の輸送サービス水準指標として用いる。図2の縦軸も期待サービス速度である。  $V_{ex}$  は観測区間を移動するのに要する期待所要時間  $T_{ex}$  を用いて次のように表せる。

$$V_{ex} = L_b / T_{ex} \quad [2]$$

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>13) 14)</sup>では、乗車時間だけでなく、待ち時間等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。さらに、都市交通のように比較的運行頻度の高い場合は、出発分布が一様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>15)</sup>もある。

### (3) 輸送需要と運行便数

公共交通では輸送需要にあわせて便数や編成定員などの調整が行われる。時間あたり運行本数  $N_r$  を時間あたり輸送需要  $P_r$ 、混雑率  $\alpha$ 、編成定員  $C_t$  で表すと次のようになる。

$$N_r = \frac{P_r}{\alpha C_t} \quad [3]$$

### (4) 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なる。したがって、出発時刻の分布を一様とすると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、特に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。この場合においては期待所要時間  $T_{ex}$  は時間あたり運行本数  $N_r$  と計画所要時間  $T_{sc}$  を用いて次式で表せる。

$$T_{ex} = \frac{1}{2N_r} + T_{sc} \quad [4]$$

### (5) 期待所要時間と期待サービス速度

[2][3][4] より、まとめると以下のようになる。

$$V_{ex} = \frac{2P_r L_b}{2P_r T_{sc} + \alpha C_t} \quad [5]$$

[5] は対象区間の期待所要時間を算出後に速度へ換算し



図3 期待所要時間の考え方

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、[6]のように、まず各時刻における待ち時間  $t$  と  $T_{sc}$  の合計で  $L_{ob}$  を除して速度相当の値を計算し、これを時刻に沿って積分した後、運行間隔である時間幅  $1/N_{tr}$  で除して時間平均値を計算する方法もある。

$$V_{ex}' = \frac{1}{1/N_{tr}} \int_0^{1/N_{tr}} \frac{L_{ob}}{T_{sc} + t} dt \quad [6]$$

実際にこの方法で  $L_{ob}=10\text{km}$ 、 $N_{tr}=6$ 本/時、 $T_{sc}=0.5$ 時間の条件で計算を行うと、[5]では  $V_{ex}=17.1\text{km/h}$ だが、[6]では  $V_{ex}'=17.2\text{km/h}$ となった。だが、その差は小さく、[5]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[5]の方法を用いる。

## 6. 計算諸量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、[5]式を構成する諸量が  $P_{tr}$  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、表2のように諸量を設定した。

表2 基本ケースの諸量

区間	京阪電鉄京津線・京都市交通局東西線 (浜大津→京都市役所前)
区間長	$L_{ob}=11.4\text{km}$
計画所要時間	$T_{sc}=0.367$ 時間(22分) <sup>16)</sup>
表定速度	$V_{sc}=31.1\text{km/h}$
混雑率	$\alpha=1.17$ (御陵→蹴上, 2002年) <sup>12)</sup>
編成定員	$C_{tr}=386$ 人(4両編成) <sup>17)</sup>

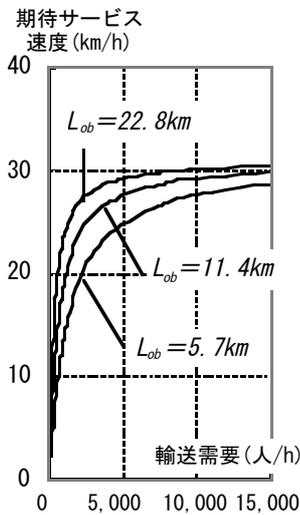


図4 観測距離  $L_{ob}$  の影響

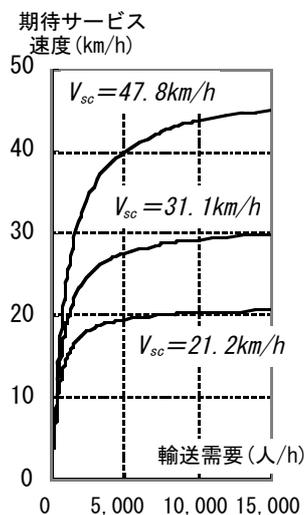


図5 表定速度  $V_{sc}$  の影響

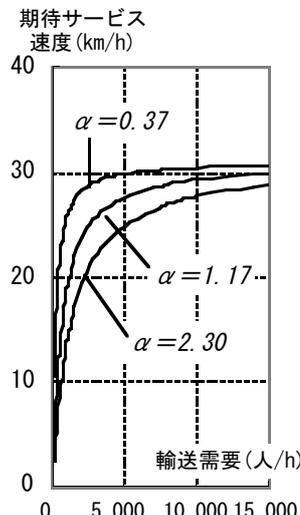


図6 混雑率  $\alpha$  の影響

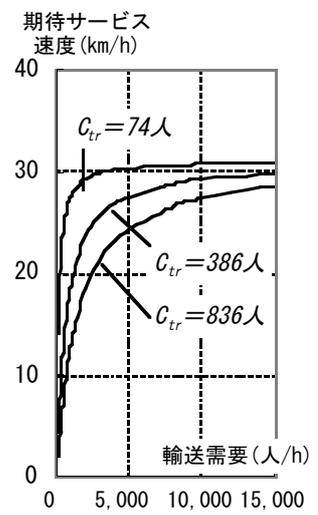


図7 編成定員  $C_{tr}$  の影響

### (2) 観測区間長の影響

図4では基本ケースのほか、観測区間長だけを基本ケースの倍の  $L_{ob}=22.8\text{km}$  とした場合 ( $T_{sc}=0.733$  時間)、半分の  $L_{ob}=5.7\text{km}$  とした場合 ( $T_{sc}=0.183$  時間) の3ケースについて試算した。  $L_{ob}=5.7\text{km}$  の場合は  $T_{sc}$  も小さく、相対的に運行頻度の影響が大きい。このため、同じ輸送需要に対する  $V_{ex}$  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。

### (3) 計画所要時間(表定速度)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。基本は  $V_{sc}=31.1\text{km/h}$  だが、さらに大阪府下の路面電車である阪堺電気軌道なみの  $V_{sc}=21.2\text{km/h}$ 、鉄道線に乗入れているカールスルーエ(独)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  $V_{ex}$  付近に達するが、 $V_{sc}$  が大きい場合は輸送量が大きくなっても緩やかに  $V_{ex}$  が上昇し続ける。

### (4) 混雑率の影響

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  $V_{ex}$  は大きくなるが、輸送需要が大きくなると、その差は縮まる傾向にある。

### (5) 編成定員の影響

図7では基本ケースのほか、車両を岡山電気軌道の低床式LRVなみの  $C_{tr}=74$  人とした場合、京都市営地下鉄丸鳥線(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  $V_{ex}$  は大きくなるが、輸送需要が大きくなると、そ

の差は縮まる傾向にある。

## 7. 公共交通と自動車交通との相互作用の分析方法

### (1) 自動車交通の輸送需要とパフォーマンス

道路上の自動車交通における公共交通の期待サービス速度に相当する指標は、自動車が任意の時刻に出発できることを考慮すると、走行速度(平均速度)そのものである。また、道路上の自動車交通の輸送需要と走行速度との関係はQ-V曲線である。Q-V曲線が輸送需要と速度の関係であることについて、自由流領域に関しては特段の異論は無いと思われるが、渋滞流領域については若干の説明を要すると思われる。

渋滞現象は輸送需要と実際に供給できる道路交通容量の乖離によって生じることは確かである。だが、桑原<sup>18)</sup>も指摘するように、その乖離は渋滞出現時の最初の短時間に限って生じるに過ぎない。すなわち、突発的な事故渋滞のような状況を除き、日々発生する恒常的な道路渋滞は、例えば毎朝、道路容量をわずかに上回ることによって出現する。ひとたび渋滞が発生してしまえば、渋滞を承知で出発する利用者だけが実際の自動車交通需要である。それ以外は出発時間帯を変更するか他の交通機関を利用しており、当該時間帯の自動車交通需要ではない。したがって、渋滞流領域においてもQ-V曲線が自動車交通についての輸送需要と速度の関係の実態を示すと考えて差し支えない。

### (2) 比較可能性について

自動車交通のQ-V曲線については種々の形が提案されているが、本研究は基本的な特徴に関する分析が目的であるので、代表的かつ簡単な2次曲線形状(K-V曲線が線形であると仮定したもの)を用いた。具体的には大阪都市圏の環状道路である国道170号(大阪外環状線)の片側2車線区間の計14地点におけるピーク時交通量と速度のデータ(平日・休日)<sup>19)</sup>をもとに、最小自乗法により1車線あたり[7]のように決めた(Qは乗用車に換算した台数)。

$$Q = -1.7051 V^2 + 87.126 V \quad [7]$$

$$[V_{\text{MAX}} \doteq 51.1 \text{ (km/h)}, Q_{\text{MAX}} \doteq 1113 \text{ (台/h)}]$$

ところで、交通量Qは自動車の台数で表現されているので、図2や図4-図7とは直接比較できない。そこで、自動車がすべて乗用車であるとして、年間旅客自動車走行キロおよび年間旅客自動車輸送人キロ<sup>20)</sup>をもとに算出し、1台あたり1.43人乗車しているとする。これより、自動車台数Qの代わりに輸送需要Nを使えば、次のようになる。

$$N = -2.4375 V^2 + 124.55 V \quad [8]$$

$$[V_{\text{MAX}} \doteq 51.1 \text{ (km/h)}, N_{\text{MAX}} \doteq 1591 \text{ (人/h)}]$$

以上のような準備を行い、道路上の自動車交通につい

期待サービス速度(km/h)

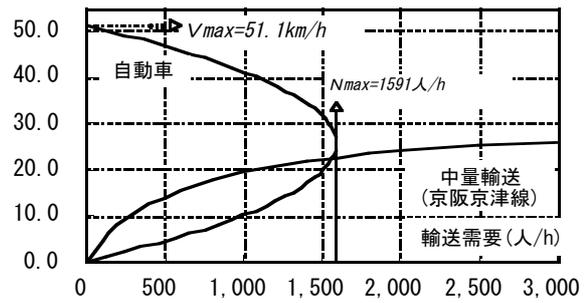


図8 輸送需要と期待サービス速度

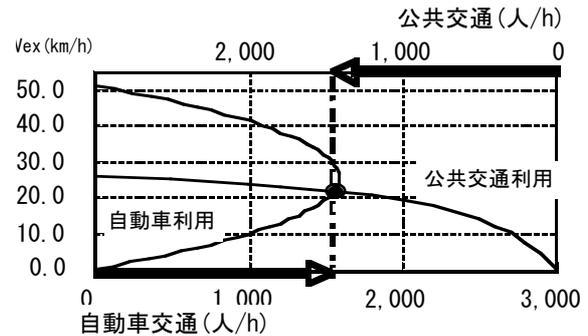


図9 一定需要を分け合う場合の考え方

ての輸送需要と速度の関係を表す曲線を作成した。また、特徴を比較するため、図4-図7で基本ケースとして取り扱った公共交通(京阪京津線)に関する曲線も同一平面上に示した。

図8では、道路上の自動車交通が自由走行領域の場合は、輸送需要の増加にともなって期待サービス速度が低下するのに対し、公共交通では期待サービス速度が増加するという特徴が示されている。

### (3) 相互作用の分析方法

ここでは、一定需要を自動車交通と公共交通で分け合う場合について説明する。なお、公共交通は専用通路が確保されるなどして、並行する自動車交通の量や速度の影響を直接受けないものとする。したがって、以下の考察では、同一区間の輸送であっても、必ずしも自動車交通と公共交通が同一路面上を走行している必然性はない。つまり、公共交通とは地下鉄やモノレールのような形態で運行されるようなものであっても考察内容は変化しない。考察は、すべて長期的・静的かつ決定論的な分析であり、短期的・動的・リアルタイムの変化を扱ったものでもなく確率論的観点からの分析でもない。公共交通が輸送需要にあわせて輸送力調整を行う方法は複数あるが、特に都市交通を意識し、便数の調整によるものとする。すなわち、サービス水準を調整する際の混雑率および1便あたりの定員は一定とする。公共交通については特定の路線についての具体的な計算を目指しているわけではないが、なるべく現実的な値を用いて考察をおこなった。

例えば、毎時3,000人の需要を1車線の道路と中量輸送

(表2) で分担する場合を用いて、本研究における分析の考え方や主な仮定条件などについて説明すると、次のようになる。

図9のように図幅を3,000人/hとし、自動車交通需要を左側から右向きに、公共交通需要を右側から左向きにとり、それぞれ輸送需要と期待サービス速度の関係を表す曲線を描く。このとき、両曲線の交点で期待サービス速度が等しくなる。機関選択の基準が期待サービス速度だけであるとすると、この点で総需要を分け合う。図9では交点が渋滞流領域にあるが、このような場合についても、7. (1) に述べたように、基本的には問題ないと考えられる。

なお、以上の説明以外にも本考察において仮定している条件を整理すると、以下の各点となる。

- ①自動車交通と公共交通は同じ起終点を仮定している
- ②期待サービス速度が大きい交通機関を選択すること(つまり、①の条件下では期待所要時間が小さい方を選択すること)を仮定している
- ③機関選択は決定論的に行われ、少しでも優位な機関を確実に選択すると仮定している
- ④特定の交通機関に固執する利用者はいない
- ⑤運賃や快適性についても選択の基準としては考慮していない
- ⑥考察対象の交通はすべて旅客とし、貨物輸送は考慮しない
- ⑦公共交通における輸送需要に対するサービス水準の変更は、混雑率一定の条件のもとで運行頻度の調整により実施される

## 8. 予想される相互作用について

### (1) 考察の条件について

考察は、公共交通のサービス水準が変化する場合、自動車の交通容量が変化する場合、総需要が変化する場合の3つに大別して行い、表3に示した計6ケースについて考察した。また、それぞれ具体的にどのような状況下

で発生する可能性があるかについても考えられる例を説明した。詳細な仮定については、7. (3) で説明した条件を用いた。

### (2) 公共交通のサービス水準が変化する場合

#### a) 公共交通の水準向上で渋滞解消

図10に示すように、片方向1車線の道路、およびこれとは別に、並行する自動車交通の量や速度の影響を受けない表定速度が小さい公共交通A(例えば自動車の進入が許されていない専用軌道を持つ旧式の路面電車など)とで輸送分担されていたとする。この公共交通Aをより表定速度が大きな公共交通B(例えば加減速度の高いLRVの導入や道路平面を使わない地下鉄・モノレールの導入など)に置き換えた場合、公共交通のサービスレベルが上昇し、図10上の交点が渋滞流領域から自由流領域に移動し、渋滞解消の可能性がある。ただし、公共交通の利用者数はさほど変化しない可能性がある。

#### b) 小規模な水準向上で渋滞解消せず乗客減少

前項と同じく、片方向1車線の道路、およびこれに並行する自動車交通の量や速度の影響を受けない公共交通Cとで輸送分担されていたとする。例えば車両の高性能化による加減速性能の向上や停留所での停車時間の短縮などで、表定速度が向上し、公共交通Dのように変化した場合、図11に示すように、図上の交点は移動する。だが、a)に比べて公共交通のサービス水準の向上が小さいと、依然として自動車交通の渋滞が解消しない可能性がある。幾分、自動車交通の速度が上昇するとともに自動車利用者数が増加する可能性があり、逆に公共交通は輸送改善されているにもかかわらず利用者数が減少する可

表3 相互作用の考察を行ったケース

(2) 公共交通のサービス水準が変化	a) 大きく向上 [図10]	b) 小規模な向上 [図11]
(3) 自動車交通の交通容量が変化	a) 車線増設 [図12]	b) 車線削減 [図13]
(4) 総需要が変化	a) 総需要増大 [図14]	b) 総需要縮小 [図15]

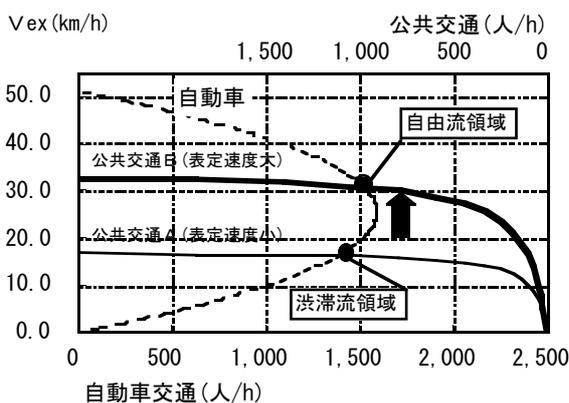


図10 公共交通の水準向上で渋滞解消

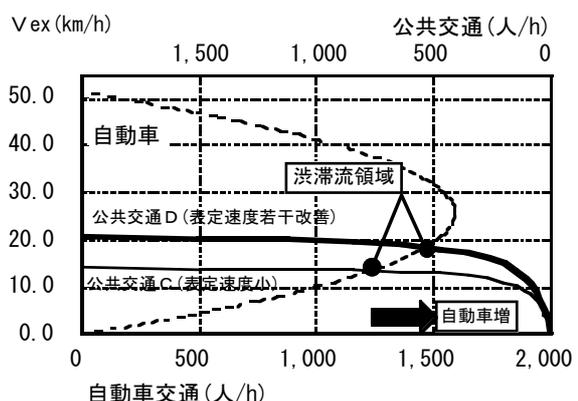


図11 公共交通の小規模な水準向上で乗客減

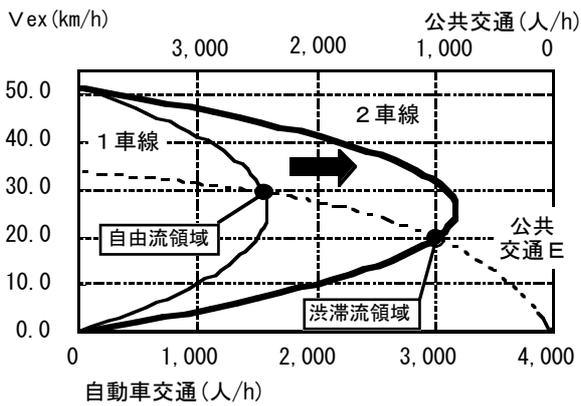


図 12 車線増設で渋滞発生

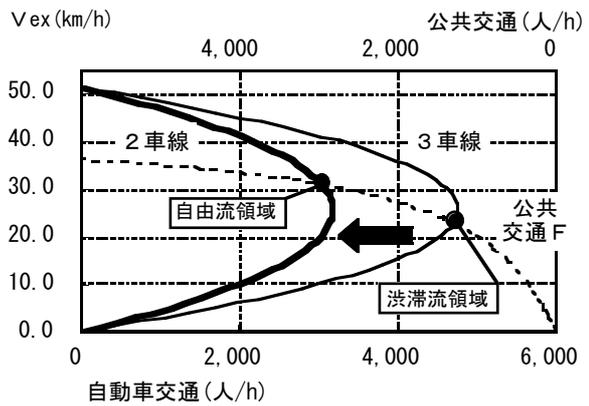


図 13 車線削減と良質な公共交通で渋滞解消

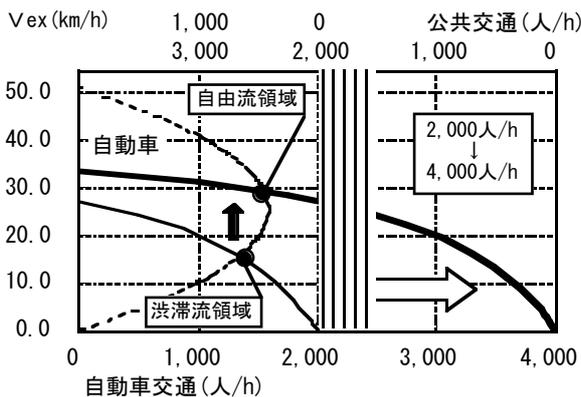


図 14 総需要増でも車線増設不要+渋滞解消

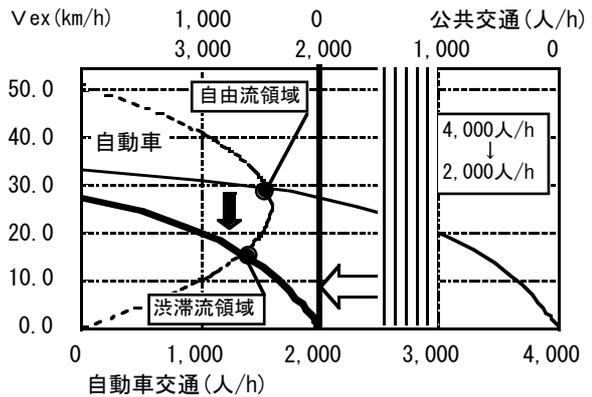


図 15 総需要減で渋滞発生

可能性がある。

### (3) 自動車交通の交通容量が変化する場合

#### a) 車線増設で渋滞発生

図 12 に示すように、当初、片方向 1 車線の道路、およびこれに並行する公共交通 E (複線電化された支線クラスの都市鉄道程度の水準を想定) とで輸送分担されていたとする。道路の車線を増設し、片方向 2 車線にした場合、図 12 上の交点が自由流領域から渋滞流領域に移動し、公共交通の利用者数が減少して便数の減少を招き、サービスレベルが低下する。同時に、道路の交通容量の増大をはかったにもかかわらず、渋滞が新たに発生する可能性がある。なお、当初の段階で既に道路渋滞が発生していた場合、渋滞がさらに悪化する可能性がある。道路の交通容量増大策としては、車線増設のほかにも、線形改良・交差点改良・相乗り促進・ETC などのボトルネック解消策なども考えられ、同様の結果になる可能性がある。

#### b) 車線削減で渋滞解消

図 13 に示すように、当初、片方向 3 車線の道路とこれに並行する公共交通 F (複線電化された支線クラスの都市鉄道程度の水準を想定) とで輸送分担されていたとする。道路を 1 車線削減して 2 車線にした場合、図 13 上の交点が渋滞流領域から自由流領域に移動し、公共交通の利用者が増加するとともに便数を増便することになり、サービスレベルが向上する。同時に、車線削減にもかかわらず

ず、渋滞解消の可能性がある。

### (4) 総需要が変化する場合

#### a) 総需要が増加するときは道路整備不要

図 14 の真ん中から左側に示すように、当初、総輸送需要が毎時 2,000 人であり、片方向 1 車線の道路とこれに並行する公共交通 G (電化された支線クラスの都市鉄道程度の水準を想定) とで輸送分担されていたとする。例えば大規模な開発行為などにより、総輸送需要が毎時 4,000 人まで増加したとする。このとき、公共交通に関する輸送需要と期待サービス速度の関係を表す曲線は図の右端から描かれるようになり、図 14 上の交点が渋滞流領域から自由流領域に移動する。公共交通は利用者が増加し、増便されてサービスレベルが向上する。同時に、総需要が増大しているにもかかわらず、特段の道路整備を行わなくても、渋滞が解消する可能性がある。

#### b) 総需要が減少すると渋滞発生

図 15 の全幅で示すように、当初、総輸送需要が毎時 4,000 人であり、片方向 1 車線の道路とこれに並行する公共交通 H (電化された支線クラスの都市鉄道程度の水準を想定) とで輸送分担されていたとする。人口減少などにより、総輸送需要が毎時 2,000 人まで減少したとする。このとき、公共交通に関する輸送需要と期待サービス速度の関係を表す曲線は図の真ん中から描かれるようになり、図 15 上の交点が自由流領域から渋滞流領域に移動する。

公共交通は利用者が減少し、減便されてサービスレベルが低下する。同時に、総需要が減少しているにもかかわらず、新たに渋滞が発生する可能性がある。

## 9. 考察における仮定の影響と適用の限界について

### (1) トリップの起終点の単純化の仮定

上の考察では自動車交通と公共交通が同じ起終点であると想定しているが、現実には個々の利用者によって異なっている。また、現実の交通ネットワークは単に2地点間を結ぶだけではない。したがって、本考察に限ったことではないが、通常の交通量配分と同じく、現実の交通ネットワークにおける精度の高い交通量などを計算する際は、シミュレーション技法などが必要である。

### (2) 自動車交通と公共交通の独立の仮定

本考察では、自動車交通と公共交通との基本的な相互作用の分析を目的としているため、相互作用は交通需要の量と移動速度だけを介して影響を及ぼしあうように想定されている。しかし、例えば既存の道路の一部車線をLRTの走行空間に転用するようなケースでは、自動車車両がLRTの軌道を物理的に横切ったり、LRTの優先信号の影響が自動車交通に及んだり、あるいは専用通路が確保できない場合では自動車交通の渋滞の影響を大きく受けることも考えられる。本考察では、それら応用的内容については対象としていないが、文献21)あるいはそれをさらに発展させた研究も必要であると考えられる。

### (3) 特定交通機関に固執しないという仮定

本考察では、特に自動車交通において交通はすべて旅客であると仮定しており、貨物輸送は考慮されていない。だが現実には、いくら速くて便数が多くとも、貨物輸送はバスや路面電車には転換し得ない。同様に、種々の理由(例えば、自動車の運転ができない等)により特定の交通機関に固執する利用者が存在しているが、本考察では、すべての利用者が一定の基準のもとに機関選択すると仮定している。

これについては、例えば図9において、自動車交通、公共交通ともに各500人/hの固定利用者が存在したとすると、図16のようにこれら計1,000人/hを除いた図の中央部付近の2,000人/hだけについて分析を行うことが可能である。

### (4) 機関選択の基準が速度であるという仮定

本考察では、すべての利用者が期待サービス速度、すなわち2地点間の所要時間の小さい方を選択すると仮定している。現実には、移動に要する料金(運賃や燃料費な

ど)あるいは快適性等も選択の基準となりうるが、これら要因は、一定のパラメタを介して時間に変換することが可能であり、2地点間を結ぶという条件下では、時間はさらに速度に変換可能である。

### (5) 料金(あるいは快適性)の考慮方法について

例えば料金が大きくなった場合、時間価値などのパラメタを介して所要時間が増大したのと同等に扱うことができる。公共交通に関しては、需要量に依らず料金(あるいは快適性)が固定の場合は、計画所要時間 $T_{\text{計}}$ を大きくした場合と同等であり、図5で表定速度 $V_{\text{表}}$ を下げたケースと同様の影響となる。

なお、公共交通については、例えば図8のどの輸送需要量の状態においても同じ混雑率としているので、混雑による快適さ(不快さ)は輸送需要量によらず一定である。

運賃は固定料金のほかに、限界費用や平均費用を反映させた料金設定の方法も考えられる。本考察では、自動車交通との激しい競争にさらされているような公共交通を取り扱おうとしているが、このような公共交通では輸送量はさほど大きくはなく、例えば高密度な市街地で複雑な線工事を行うようなインフラのコストが費用が上昇し始めるような領域ではない。つまり、限界費用や平均費用は逡減している範囲ではないかと考えられる。

もし、そのような範囲において運賃がこれらの費用を反映させた設定方法であるとする、運賃を時間に換算すれば、輸送需要が少ない場合は大きめに換算され、輸送需要が多くなるにつれて小さめに換算される。

したがって、これを速度相当に換算したとしても、輸送需要が増えると一定値に漸近してゆくという公共交通に関するグラフの基本形状は変わらない。ただし、長期的な限界費用や平均費用が上昇し始めるほど輸送需要が大きく、これを反映した運賃体系となっている場合には、この限りではない。

自動車交通については、例えば費用を一定額として試算してみた図17(燃料費等の料金300円、時間価値2,000円/時で計算)のように、特に自由走行時での影響が大きく、期待サービス速度に換算した値を下げる傾向に作用するが、釣り鐘型の基本形状は変わらない。

以上より、一定の条件下では、料金や快適さなどを考慮した場合についても、本考察の結果が大きく変化することはないと考えられる。

### (6) 決定論的行動の仮定

本考察では、利用者は均質で、機関選択は決定論的に行われ、少しでも優位な機関を確実に選択すると仮定しているが、現実の利用者は均質ではなく、個々の価値観に基づいて行動している。したがって高精度な数値計算を要求されるような局面ではシミュレーションなどの技

法に依らざるを得ない。

また、実際には機関選択も決定論的に行われているわけではない。したがって、長期的には図9のように自動車交通の曲線と公共交通の曲線との交点で輸送需要を分け合うことになると思われるが、現実にはそれに至る過渡的な状況がかなり長期間にわたって継続する可能性がある。つまり、事実上、静的な分析結果と現実の状況とに乖離が生じ続ける可能性がある。

#### (7) 需要に対する供給量決定の仮定について

本考察では、公共交通における輸送需要に対するサービス水準の変更は、混雑率一定の条件のもとで運行頻度の調整により実施されることとしている。だが、現実には、様々な方法によりサービス水準の変更が実施されている。

例えば同一の鉄軌道線であっても、早朝深夜や昼間の閑散時間帯のような輸送需要が小さい時間帯では、比較的小さな混雑率を許容して輸送需要の割に運行頻度を大きくとって運行されている。また、単線鉄道などの場合は輸送需要の増減に対して柔軟な増減便ができないことが多く、列車編成の調節により対応するケースが多い。また、わが国ではあまり例がないと思われるが、極端なケースとしては、交通需要とは無関係に公共交通を運行する方法も存在している<sup>22)</sup>。

さらに、事業者が完全に営利事業として公共交通を運営している場合には、便の運行頻度の調節基準が事業者の利益の最大化であるケースも考えられる。だが、このような場合でも、需要がゼロなら頻度ゼロ、需要が多いほど頻度が大きくなる傾向にあると考えられ、図2や図8とは若干曲線形状が異なっても、基本的な傾向は維持されると考えられる。

#### (8) 他の選択肢の無視

現実の行動としては、自動車か公共交通かという二者択一ではなく、例えば、公共交通の利便性が低く、しかも自動車交通も渋滞している場合は、移動そのものを取りやめる場合もある。逆に双方とも利便性が高ければ、需要が喚起される場合もあり、利便性の水準が総需要量そのものに影響を与える場合も考えられるが、本考察では考慮外となっている。

#### (9) 公共交通の運行状態について

公共交通の需要が極めて大きい場合、バス交通などではいわゆるダンゴ運転状態になり実質的な運行頻度が低下して期待サービス速度が低下することがある。鉄道の場合でも列車の間隔が詰まってくると、一種の渋滞現象が発生し、列車の走行速度そのものが低下するようになる。本考察では、これらについては考慮していないが、

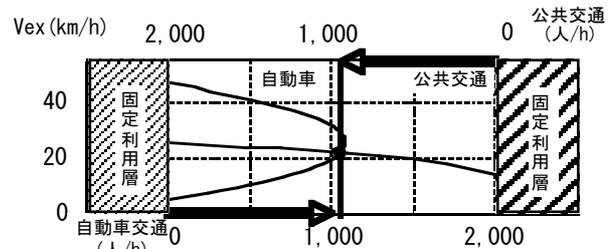


図16 自動車交通・公共交通ともに固定客有

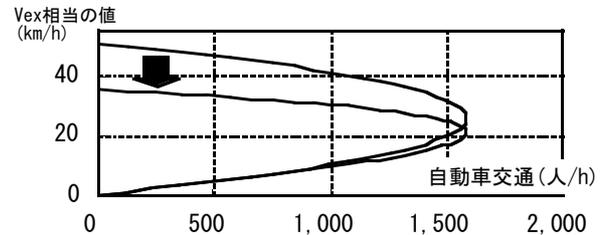


図17 料金等を換算して考慮した場合

想定する公共交通の種類と公共交通に対する需要量によっては、上記現象を検討する必要があると考えられる。

## 10. 結論

本研究では、公共交通の輸送量と運行頻度の関係に着目し、公共交通が都市交通空間において発揮するパフォーマンスについて基本概念を整理し、運行頻度を考慮した速度相当のサービス水準指標として期待サービス速度を定義した。この指標は輸送需要の増加にともない増大し、表定速度を漸近線とする形状であった。道路上の自動車交通は平均速度が期待サービス速度に相当するが、基本的に輸送需要は台数で表現されるので、一定条件の下に輸送需要を人単位に変換し、公共交通と比較可能とした。

次に、この基本的な概念に基づき、自動車交通と公共交通との両方が整備される場合、総合的に都市交通空間がどのようなパフォーマンスを示す可能性があるかについて、基礎的考察を行った。その結果、公共交通の小規模な水準向上では道路渋滞が解消しないばかりか、乗客の減少を招く可能性すらあること、道路の車線を増設すると新たに渋滞が発生する可能性があること、総需要が減少すると新たに渋滞が発生する可能性があることなどを示した。

これら考察は、9. で述べたように、いくつかの課題を残しているものの、自動車交通との競合にさらされているような路面公共交通や地方都市の郊外鉄道線等に関する今後の都市交通整備の政策立案の参考になるのではないかと考える。

なお、本研究はいくつかの仮定に基づく基礎的考察であり、これらが実際に生じているかについては、今後、実データに基づく詳しい調査が必要と考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 家田仁, 赤松隆, 高木淳, 畠中秀人: 「利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益」 土木計画学研究・論文集, Vol. 6, pp. 177-184, 1988
- 2) 屋井鉄雄, 岩倉成志, 伊藤誠: 「鉄道ネットワークの需要と余剰の推定方法について」 土木計画学研究・論文集, Vol. 11, pp. 81-88, 1993
- 3) 岩倉成志, 渡辺将一郎, 土居厚司: 「都市鉄道の時刻別需要予測のためのリンクコスト関数の開発-小田急小田原線を対象に-」 土木計画学研究・論文集, Vol. 17, pp. 709-714, 2000
- 4) 中川大, 伊藤雅, 小出泰弘: 「公共交通と自動車交通を統合した都市交通シミュレーションシステムの構築」 土木情報システム論文集, Vol. 7, pp. 97-104, 1998
- 5) 森津秀夫, 木村文彦, 大江洋史, 飯田祐三, 野寺寿雄, 高木真志, 森山敏夫: 「LRT導入に伴う交通計画再検討支援ツールの開発」 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, pp. 763-771, 2001
- 6) 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・論文集, Vol. 18, pp. 869-876, 2001
- 7) 松本修一, 熊谷靖彦, 川嶋弘尚: 「路面電車を考慮した都市交通における信号方式に関する研究」 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, pp. 677-685, 2004
- 8) 運輸政策審議会答申: 「中長期的な鉄道整備の基本方針及び鉄道整備の円滑化方策について」, 2000年8月
- 9) 国土交通省鉄道局監修: 「平成11年度版都市交通年報」
- 10) ブリーズワン制作: 「JR線デジタル時刻表調べ太郎2002年秋号」(交通新聞社発行の時刻表データに基づく)
- 11) ネコ・パブリッシング: 「JR全車両ハンドブック2002」 pp. 532-534
- 12) 国土交通省鉄道局監修: 「数字で見る鉄道2003」 p. 30
- 13) 天野光三, 中川大, 加藤義彦, 波床正敏: 「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, No9, pp. 69-76, 1991
- 14) 中川大, 波床正敏, 伊藤雅, 西澤洋行: 「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
- 15) 飯田祐三, 岩辺路由, 菊池輝, 北村隆一, 佐々木邦明, 白水靖郎, 中川大, 波床正敏, 藤井聡, 森川高行, 山本俊行: 「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, Vol. 17, pp. 841-848, 2000
- 16) ジョルダン: 「乗換案内時刻表対応版2002年10月版」
- 17) 鉄道ジャーナル社: 「鉄道ジャーナル No. 365」 pp. 91-93, 1997年3月
- 18) 桑原雅夫: 「渋滞現象と需要解析」 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, No. 1, pp. 1-9, 2004
- 19) 国土交通省道路局編: 「平成11年度道路交通センサス全国道路交通情勢調査 一般交通量調査 CD-ROM」 交通工学研究会刊
- 20) 国土交通省総合政策局情報管理部編: 「平成14年度交通経済統計要覧」, pp. 60-63, 運輸政策研究機構刊
- 21) 波床正敏, 塚本直幸, 林邦佳: 「公共交通における利用者数と利便性の基本的関係の考察-バス交通存在下における空間の輸送能力について-」 土木計画学研究・講演集, Vol. 29, No. 45, 2004
- 22) 服部圭郎: 「人間都市クリチバ環境・交通・福祉・土地利用を統合したまちづくり」 pp. 128-129, 学芸出版社, 2004

---

### 都市交通空間における公共交通のパフォーマンスおよび自動車交通との相互作用に関する基礎的考察

波床正敏、塚本直幸

本研究では、公共交通の輸送需要と運行頻度の関係に着目し、速度相当のパフォーマンス指標として期待サービス速度を定義した。この指標は輸送需要の増加にともない増大し、表定速度を漸近線とする。自動車交通についても輸送需要を人単位に換算し、公共交通と比較可能とした。

次に、自動車交通と公共交通との両方が整備される場合、総合的に都市交通空間がどのようなパフォーマンスを示す可能性があるかについて考察した。その結果、公共交通の小規模な水準向上では道路渋滞が解消しないばかりか、乗客減少の可能性すらあること、車線増設で渋滞が発生する可能性があること、総需要減少で渋滞が発生する可能性があることなどがわかった。

---

### A Basic Study on Performance of Public Transportation in Urban Transit Space and on its Interaction with Car Traffic

Masatoshi HATOKO, Naoyuki TSUKAMOTO

We paid attention to the relationship between transportation demand for public transport and its frequency, and defined Expected Service Speed as performance index. When demand grows it gets closer to Scheduled Speed. Using unit conversion from car to person, we made the similar relationship of car traffic to be compared with the public transportation.

After that, we examined the interaction between these transportations in urban transit space and found possibilities as followings: Small improvement of public transport cannot cancel traffic jam and cannot increase its passengers in number. Additional lane or decrease in total demand causes outbreak of traffic jam.

---