

バスバンチング発生要因に関する調査研究

定方 希夫

1. まえがき

道路交通を構成するのは基本的には人間であるが、その利用手段は、歩行、乗用車、トラック、バス、いわゆるバイクなど多くの形態に分かれ、移動能力も時速数キロから数10キロまで広く分布している。このような都市内の交通を管理しているのはコンピュータを利用した交通管制システムで、信号機などを介して激増する交通の安全と円滑化に大きな役割を果たしている。しかし交通が次第に混雑してくると、利用者が互いに競争的(コンペティティブ)状態になるので、管理の評価関数が一義的に定まらなくなってきた。

このような交通状態の中で、他の車両と混合して、走行するバスは、大量輸送の使命を負いながらも、その運行の不規則性を利用者から強く指摘されてきた。バスの運行状態をそのまま放置すると、やがて利用者には見えなされ、経営がますます悪化することが予測される。そこで、経営者である自治体や企業は、運行情報をリアルタイムで提供したり、実態を記録するシステムを導入して、その活性化をはかる努力を開始した。

バス運行問題に関しては、外国でも研究が行なわれ、バス停での乗客の待

ち時間[1][2]、バス停の設置位置と道路構造[3]、バスの追越し運行[4]などが報告されている。

この研究は、バス事業活性化のために自治体や企業が行なっているシステムづくりに並行して、バス運行の重要なパラメータを再検討し、特に利用者から不評をかかっているバンチング(団子運行; bus-bunching)を減らすための手法について調査研究をしたものである。

2. バスバンチングの理論モデル[5]

バスは鉄道と異なり、ほとんどの路線でバンチングが発生しており、その原因も種々考えられるが、このモデルではすべての要因を走行途中での時間的な遅れに集約した。すなわち、出発の遅れ、交差点での信号待ち、混雑のための速度低下、停留所での異常停止など個々の要因に関係なく、すべてこの時間的な遅れに集約した。

図1はバスの遅れを表現したもので、(a)は出発

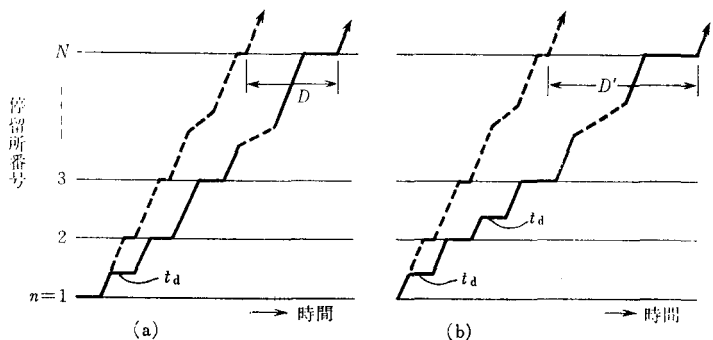


図1 バスの遅れモデル

ただかた まれお 九州東海大学 工学部

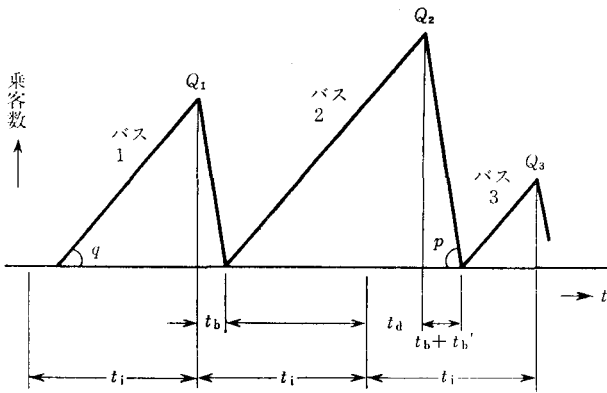


図2 停留所における乗客数

して間もなくボトルネックで1地点だけ遅れた場合を示し、(b)は各停留所の中間すべてにボトルネックがあって遅れる状態を示したものである。

図2は、間隔 t_i で出発したバスが t_a 時間遅れて停留所へ到着した場合に、停留所には正常時の乗客 (Q_1 人) より多くの乗客 (Q_2) が待っている様子を示している。なおこのモデルでは、次のような仮定をしている。

- (1) すべてのバス停への乗客の到着は一様分布で q (人/sec) の到着レートである。
- (2) 待っている乗客がバスへ乗るに要する時間 t_b は乗客数に比例し、その比例定数を p (人/sec) とおけば、 p は乗車容量 (boarding Capacity) と呼ばれる。
- (3) Q_1 人が乗車するに要する時間が t_b で、 Q_2 人のときは $t_b + t_b'$ の時間が必要となる。
- (4) バスの走行速度は一定とする。
- (5) その他の現象も確定モデルとする。

このモデルにおいて、バスが t_a 遅れて到着すると、乗客を乗せて出発するときには、 t_a より大きな遅れとなる。いま定常ダイヤからの遅れ時間を D とおけば

$$D = t_a + (t_b + t_b') - t_b \quad (1)$$

となる。 $q/p = \rho$ (飽和度と呼ぶ) とおけば

$$\rho(t_i + t_a + t_b') = (t_b + t_b')$$

となり、遅れのない時の乗車時間は $t_b = \rho t_i$ であるからこれを代入して整理すると

$$t_b + t_b' = \frac{\rho}{1-\rho} t_a + \rho t_i \quad (2)$$

となる。(2)式を(1)式に代入して

$$D = \frac{t_a}{1-\rho} \quad (3)$$

をうる。(3)式は、遅れのない通常のダイヤで走行している時に比べて、 D だけ時間遅れが増加することを示している。この式は、 ρ の値が0から1まで変化すると、遅れが大きく変動する。

(3)式のように、いちど遅れたバスは、そのまま走行して次々と停留所で客を収容してゆけど、 $(n+1)$ 番目の停留所を出発する時にはその遅れが

$$D_{n+1} = \frac{t_a}{(1-\rho)^n} \quad (4)$$

となる。

図1(b)のように停留所間にすべて t_a の遅れが存在すると、 $(n+1)$ 番目での遅れ D'_{n+1} は(5)式のようなになる。

$$D'_{n+1} = \sum_{n=1}^n \frac{t_a}{(1-\rho)^n} \quad (5)$$

このように遅れは累積されるので、 ρ が1に近づくとも極端に大きな遅れになることがわかる。

これに対して、遅れたバスに続いて直後を走行するバスは、停留所で乗せる客が少ないので早く発車し、次第に先行バスに追いついてバンチングを発生させることになる。このモデルで m 番目のバスに $(m+1)$ 番目のバスが追いつく停留所番号 n は、

$$n = 1 + \frac{\log(t_i/t_a) - \log\left\{\left(\frac{\rho}{\rho-1}\right)^m - \left(\frac{\rho}{\rho-1}\right)^{m-1}\right\}}{\log\left(\frac{1}{1-\rho}\right)} \quad (6)$$

となり、 $(\rho-1)$ は負であるから偶数番目のバスに後続車が追いつき2台ずつペアになってバンチングがおこることになる。図3は実際に観測されたバンチングの模様を示したものである。

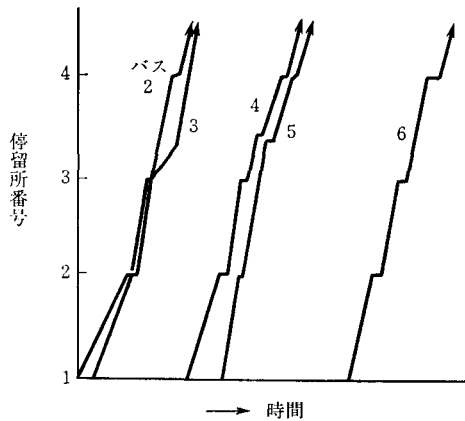


図 3 パンチング実例

3. モデルに用いたパラメータの観測値

確定モデルによってパンチング発生メカニズムの一例を解析したが、モデルに用いたパラメータの中で重要なものは、乗客の到着分布、バスへの乗車容量(p)、乗客到着レート(q)、飽和度(ρ)などがある。調査によってこれらパラメータの実測を行なったので以下に実例を示す。

(1) 乗客の到着分布

停留所におけるバス時刻表は、3分ごと、4分ごとのような間隔表示と通常の発車時刻表示の2種類である。このような時刻表のもとで7停留所において3000人の乗客の到着を観測したところ10%程度の確率誤差で次のような結果がえられた。すなわち、一般の停留所では、バス間隔2~7分では表示方法に関係なくおおむねポアソン到着である。ターミナル停留所では電車やバスの乗替えで、いわゆる伝播現象になっており、信号機のある交差点付近でもこの現象が見られた。15分程度の間隔で時刻表示の停留所でも、始発でベンチを設けた所ではポアソン到着になっていた。

(2) 乗車容量

単位時間内に乗車できる能力つまり乗車容量はバスの形式、料金支払方法、停留所施設構造、乗客の層、天候などによって大きく変動する。料金支払方法はバスに乗車する際に支払うものと、降

表 1 時間帯別乗車料金支払い方法

時間帯	定期券 %	回数券 %	現金 %	(内両替) %
朝	58	35	7	(4)
昼	12	52	36	(21)
夕刻	45	46	9	(4)

表 2 バス乗車容量観測値例

時間帯	乗車容量(p)			
	料金前払い方式		料金後払い方式	
	平均値 (人/10秒)	標準偏差 (人/10秒)	平均値 (人/10秒)	——
朝通勤時	4.15	0.85	4.8	
同上	——	——	7.5	入口両開き扉
昼間	2.6	0.9	2.9	
夕通勤時	3.8	0.7	4.0	

車の際に支払うものがあり、また料金は表1のごとく両替を含めて4種類の方法で支払っている。

表2は料金支払方法別、時間帯別の乗車容量実測値を示している。料金後払い方式のバスは主として関西、九州方面で使用されているが、この方式では入口を両開き扉にして2つのステップを設け、ほぼ2倍の乗車容量をもったものがある。朝夕の容量が高いのは、定期券、回数券の利用が90%以上あるためである。また昼間は老人や子供連れが多く、現金での支払いも多いので容量が低下している。

雨天の場合には、乗車の際雨具の始末をするので容量が77%に低下し、停留所に小さな屋根があれば85%の低下にとどまっていた。地上から乗車ステップまでの高さも容量に影響し、低床式バスは5%程度の改善がみられ、停留所プラットフォームの高さも高くなれば低床式バスと同様な効果をあげられる。

(3) 飽和度

乗客の到着レートは時間帯、停留所別で大きな変動があるのは当然であるが、飽和度の目安をたてるために観測したところ、駅前、デパート、催物会場附近などで平均値が0.56人/10secで標準偏

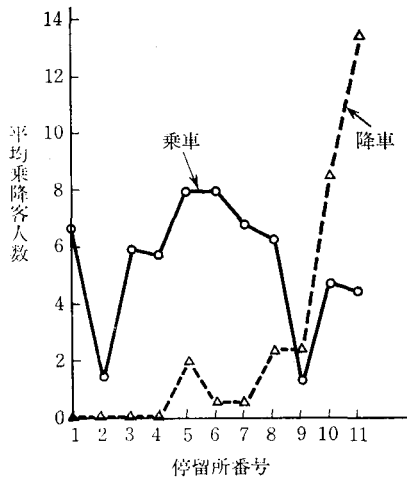


図4 停留所別乗降客推移

差0.2人/10secというような例が測定された。したがって多いときには1.2人/10sec程度の到着レートのことがあり、これを $p=3.8$ 人/10secで除した飽和度は $\rho=0.3$ というような値になる。飽和度がこのような大きな値になると、(3)式で示した停留所での遅れの増加は $D=ta/(1-\rho)=ta/(1-0.3)=1.43ta$ となり、途中の遅れ ta が43%も増幅されることとなる。

(4) 停留所別乗降客数の推移

図4はあるバス路線の上り方向について、朝の通勤時間帯に測定した停留所別乗降客数の推移を示したものである。図からわかるように、出発し

てから各停留所で順次乗客を收容してゆき、都心部の停留所で大部分が降車するというパターンになっている。このようなパターンでは、乗車容量が降車容量より大きな方式のバスが有利となる。

4. バンチングによる乗客の待ち時間

停留所へ到着した乗客はバスを待っているが、バス間隔のランダム化やバンチングの影響でダイヤ間隔より長い時間待たされることがある。

いま、バス間隔を t_i (分)、ある時間内のその平均値を \bar{t}_i 、乗客の到着レートを q 、その待ち時間を w (分)、平均待ち時間を \bar{w} とすれば、ある時間帯 $\sum t_i$ 内の平均待ち時間は(7)式のようになる。

$$\bar{w} = \frac{1/2q\sum t_i^2}{q\sum t_i} = \frac{\sum t_i^2}{2\sum t_i} \quad (7)$$

運行間隔 t_i のこの時間帯での分散は

$\text{Var}(t) = E(t_i^2) - \bar{t}_i^2$ であるから、(7)式に代入して

$$\bar{w} = \frac{1}{2}\bar{t}_i \left(1 + \frac{\text{Var}(t_i)}{\bar{t}_i^2}\right) \quad (8)$$

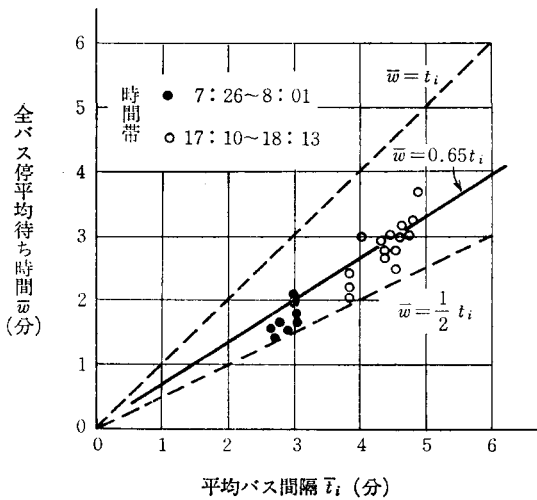
がえられ、この(8)式が平均待ち時間の一般式となる。(8)式から、バスが一定間隔なら $\text{Var}(t_i) = 0$ となり

$$\bar{w} = 1/2 \cdot \bar{t}_i \quad (9)$$

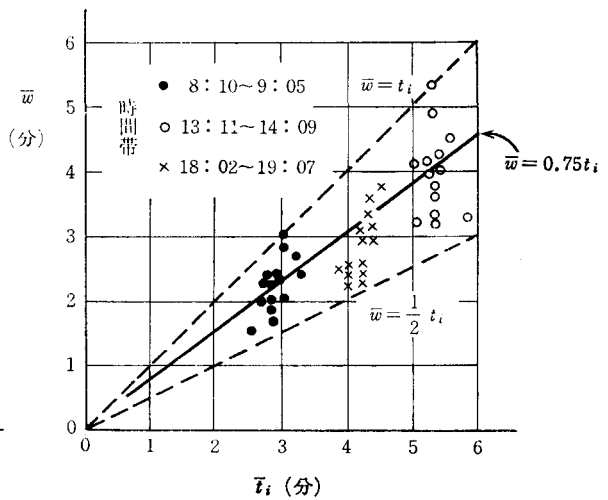
n 台がバンチングをおこすと $\text{Var}(t_i) = (n-1)\bar{t}_i^2$ となり

表3 乗客待ち時間観測データ

方 向, 時間帯 項 目	(上り)	(下り)	(下り)	(上り)	(下り)
	7:26~8:01	8:10~9:05	13:11~14:09	17:10~18:13	18:02~19:07
フローティング観測	7台	7	5	7	7
対象停留所数	16	15	15	16	15
測定したデータ数	96	90	60	96	90
平均バス間隔 (\bar{t}_i)	2.9分	2.9	5.3	4.4	4.1
バンチング台数	0台	4	2	2	4
バス間隔標準偏差 (S_i)	1.4分	2.3	3.7	2.6	2.6
全停留所乗客平均待ち時間 (\bar{w})	1.8分	2.3	4	3	2.9
同上最大待ち時間	6分	9	14	12	10
平均旅行速度	16km/H	12.5	10.2	10.1	10
定数 K ($K=\bar{w}/\bar{t}_i$)	0.62	0.8	0.75	0.68	0.7



(a) 上り方向



(b) 下り方向

図5 全バス停での乗客平均待ち時間

$$\bar{w} = 1/2 \cdot n \bar{t}_i \quad (10)$$

間隔がランダムならば $\text{Var}(t_i) = \bar{t}_i^2$ となって、

$$\bar{w} = \bar{t}_i \quad (11)$$

がえられる。Holroyd と Scraggs は乗客がランダム到着でもバス間隔が比較的大きい場合にはこの式が利用できる」と述べている。また O'Flaherty と Mangan は間隔が1分程度の小さな場合には、乗客到着レートのランダムさが影響すると報告している。

表3は都内の中心地域から外周の主要ターミナルに至る全長6.4kmのバスルートで観測した乗客待ち時間の例である[6]。この観測は連続したバスに乗車するフローティング法でえられたデータを時間帯および方向ごとに、全停留所の平均値として整理したものである。

図5は同じ観測値を使って、平均バス間隔を横軸に、全部のバス停での乗客の平均待ち時間を縦軸にプロットしたものである。プロット数は表からわかるように、上りでは各時間帯ごとに16停留所の数だけあり、下りでは各時間帯ごとに15停留所の数となっている。

この観測結果から、数kmのバス路線においても、交通密度の増加、駐停車、信号等の影響によ

ってバンチングが生じ、各停留所での乗客待ち時間が予想外に増加していることがわかった。

たとえば、朝の時間帯で平均バス間隔3分のときでも、最大待ち時間が9分となり、日中平均バス間隔5~6分の時間帯では、最大待ち時間が14分となり、最大待ち時間は平均バス間隔の3倍に達している。これはバンチングの影響によるものである。結局、全バス停での平均待ち時間は

$$\text{上り方向} \quad \bar{w} = 0.65 \bar{t}_i$$

$$\text{下り方向} \quad \bar{w} = 0.75 \bar{t}_i$$

という観測結果になった。

5. バンチングの発生要因[7]

バンチングモデルの解析において、いくつかの発生要因を理論的に予測したが、それとは別にフローティング観測で朝、昼、夕刻の各時間帯にわたって合計83台のバスを調査した結果から次のことがわかった。

(1) 発車時間間隔およびその変動係数

図6は平均発車時間間隔(要因 x_1) とバンチング台数との関係をプロットしたもののだが、間隔が大きくなるとバンチングが減少していることがわかる。しかし、相関係数は0.76という値で高いも

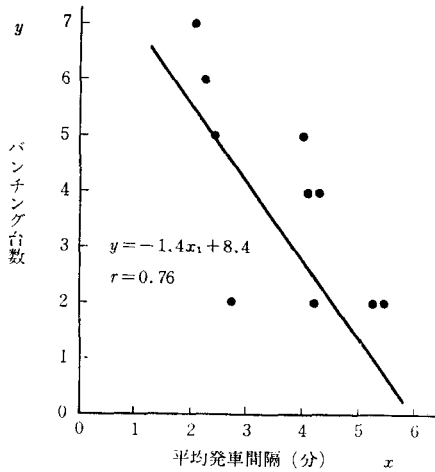


図 6 平均発車間隔時間とパンチング

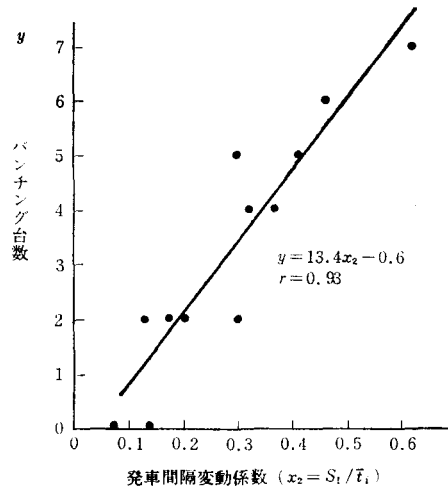


図 7 発車間隔変動係数とパンチング

のではなかった。

図 7 では発車間隔の変動係数 (要因 $x_2 \equiv S_t/\bar{t}_t$) とパンチングの関係をプロットしたが、相関係数が 0.93 でかなり高い相関を示している。

(2) 旅行速度のバラツキ

モデルで考察したように、バス停留所の中間道路では、信号や交通混雑のために遅れが生じて旅行速度にバラツキができる。図 8 はこの旅行速度のバラツキ (要因 $x_3 \equiv S_v$) とパンチングの関係を示したものである。

これは予想されたことであるが相関係数 0.94 とかなり高い相関がみられる。

(3) その他の要因

全バス停における乗客数の平均値やその標準偏差も要因として調査したが、これらは相関が低く直接要因とはならなかった。乗客数については、理論モデルでも検討したが、乗車容量との関係で計算される飽和度 (ρ) が重要な因子となり、特にバス路線の中でも出発して間もない上流側のバス停留所における飽和度が遅れの増幅作用に大きく影響することがわかった。一般に図 4 で示したごとく路線の上流地域では乗車数が多く、逆に下流地域では降車数が多くなるので、上流地域での乗

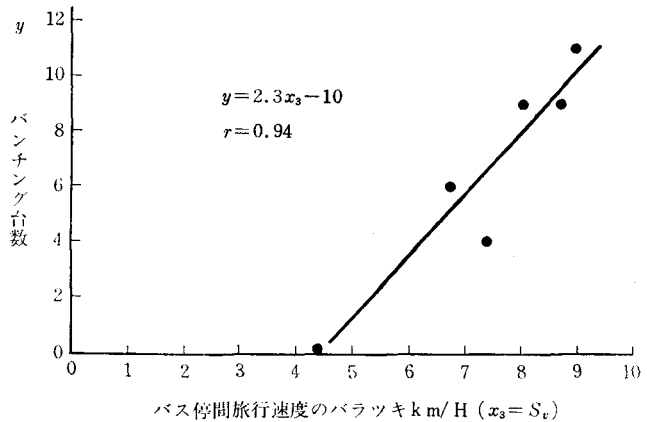


図 8 旅行速度のバラツキとパンチング

車飽和度が大きな値になる影響が大である。

停留所施設の構造や設置位置なども要因として考えられるが、前述した乗車容量への影響や遅れなどのパラメータに集約することができる。

6. むすび

本研究の目的は、冒頭で述べたごとく、道路網の中においても、バスを正確で快適な乗物とすることによって、バス経営の改善もはかるところにある。したがって、パンチングの要因を探すだけでなく、改善の方策を提案しそれを具体化しなければならない。今後各要因の改善効果を算定し順位づけを行なう必要がある。また、料金収受体系

Computer Today

● 5月号特集 / 好評発売中 定価880円

リレーショナル データベース システム

リレーショナルのすすめ	増永良文
リレーショナルDBと知識ベース	田中克己
OAに与えるリレーショナルDBの影響	M. M. Zloof
リレーショナルDBとCAD	真名垣昌夫
リレーショナルDBMSと トランザクション管理	稲見千賀子
データベースと論理	小林功武
実世界モデリングと リレーショナルDB	穂鷹良介

■ お得な年間購読のおすすめ 年間5000円(6冊)

● 7月号予告 / 6月18日発売

ワークステーション

別冊 特集 **PAD** 好評発売中
定価1200円

— 構造化プログラム開発技法 —
ソフトウェアの新パラダイム "PAD" を各方面から
詳しく検討、併せて各ツールも紹介。

数理科学

7月号予告 定価880円

特集=オートマトン構造

オートマトンの構造的理論とは 記述(遺伝子)なしの自己増殖 セル・オートマトンについて 新しいセル構造 計算機アーキテクチャ セル構造オートマトンと周期系列	西尾英之助 { 菅田・森田 岩村・三井 原尾 政輝
ハイブリッド・セル構造 オートマトン 2次元の一斉射撃問題 オートマトンネットワークにおける 構造同値関係と振舞同値関係 オートマトン系の完全性 細胞分裂・そのオートマトンモデル	{ 井森 政敏 山田 尚勇 小淵 洋一 小林孝次郎 斎藤 隆 西尾英之助 野崎 昭弘 中村 昭 他, 連載

数理科学・別冊 **知識と認知の
ソフトウェア**
定価1800円
好評発売中

サイエンス社

東京都千代田区神田須田町2-4 安部徳ビル
☎03(256)1091 振替 東京7-2387

とバス構造も乗車容量に大きく影響するので、バス路線の性格も合わせ考えて最適な方式を提案したいと考えている。

バス経営のごとき社会システムは、その良さの評価関数が単純ではないので、他にいろいろな問題が内包されていると思われるが、輸送機関として基本的な条件となる旅行速度やダイヤ運行の正確度などは、まず客から信頼される状態にすることが必要であろう。おわりに本研究に便宜を与えていただいた東京都バス、九州産交バスおよび協力をいただいた松下通信の田村克彦氏、学内関係者に感謝する次第である。

参考文献

- [1] E. M. Holroyd, D. A. Scragg; Waiting Times for Buses in Central London, *Traffic Eng. & Cont.*, July 1966
- [2] C. A. O'Flaherty, D. O. Mangan; Bus Passenger Waiting Times in Central Areas, *Traffic Eng. & Cont.*, Janu. 1970
- [3] D. S. Terry, G. J. Thomas; Farside Bus Stops Are Better, *Traffic Engineering*, March 1971
- [4] Forouzan Golshani; System Regularity and Overtaking Rules in Bus Service, *J. Opt. Res. Soc.* Vol. 34, No. 7, 1983
- [5] 定方希夫; バス優先制御の理論的解析, 交通管制 No. 3, 交通管制施設協会, 1973
- [6] 定方希夫; バス管理システム研究のための運行調査解析, OR学会秋季研究発表会予稿, 昭58
- [7] 定方希夫, 田村克彦; バス・パンチング発生要因に関する調査研究, OR学会秋季研究発表会予稿, 昭59