

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*

A Study on the Traffic Signal Strategy in City Traffic Consideration of Streetcar *

松本 修一** 熊谷 靖彦*** 川嶋 弘尚****

By Shuichi MATSUMOTO **・Yasuhiko KUMAGAI*** Hironao KAWASHIMA****

1. はじめに

様々な交通機関の混在する今日の社会において、都市交通における交通渋滞、およびそれに伴う環境問題の影響は大きい。その緩和策として自動車を対象としたTDM (Transportation Demand Management) が、近年わが国でも注目されるようになってきた。

このような社会状況のなか過度な自動車依存による弊害が問題視され、バス、地下鉄、路面電車など都市内公共交通機関の荷う役割が見直されてきている。公共交通機関は、自動車交通に比べると環境負荷の少なく、輸送能力の高い交通機関であると言われている。¹⁾その中で路面電車は、路上の空間を占有するため限られた都市内の道路交通容量に制約を加え、自動車交通に大きな影響を与えている。また自動車の交通混雑により路面電車の定時性の確保が困難であるという問題がある。このような背景から現在では公共交通と自動車交通を融合させた交通施策が必要とされている。

公共交通と自動車交通を融合させた交通施策としてはPTPSなどバスを対象としたものが主流であり、路面電車に対する施策は余り行われていない。更には路面電車の表定速度は年々減少している。またこの結果として路面電車が時間通り電停にこないという問題も生じている。このような点から路面電車に対する速度低下を防ぐ交通施策が必要とされている。そこで本研究では、路面電車に対する施策として路面電車優先信号方式の導入を提案し、それによる路

*キーワード：L R T、都市環境評価、信号制御方式

**学生会員，工修，慶應義塾大学大学院理工学研究科

***正会員，学博，高知工科大学総合研究所（高知県香美郡土佐山田町宮の口）

****正会員，工博，慶應義塾大学理工学部管理工学科

（神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1，TE

L:045-563-1141，FAX045-566-1617）

面電車および自動車の交通流，排出ガス量の変化について検討し，その効果を比較する。

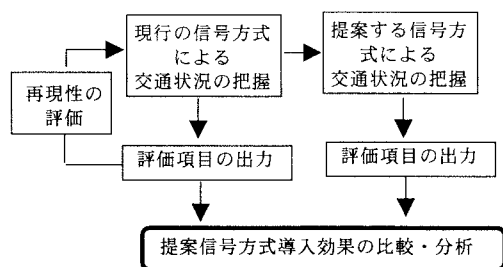
2. 既往研究のレビュー

都市交通において路面電車やL R Tを考慮した既往研究としては、大きく3つに分かれる。1つめはL R T導入時の交通状況の変化をケーススタディーとして研究したもので、ミクロ交通シミュレーションモデルVISITOKを用いたL R T (Light Rail Transit) 導入計画における導入効果の推定および自動車交通への影響の評価を行った森津らの研究²⁾，L R T導入時，整備時のL C A (Life Cycle Assessment) を適応した環境評価，便益分析などを行った中川らの研究^{3)~5)}などがある。2つめとしては，L R Tを導入する場合（またはした場合）の意識調査としてS P調査を用いた森本らの研究⁶⁾，ヒアリング調査を行った田尻の研究⁷⁾，中野らの研究⁸⁾などがある。最後に電車優先信号の評価に関する研究である。水間ら⁹⁾はスルーバンドマッチング法の有用性を示唆した。また路面電車優先信号方式の導入実態を考察したもの¹⁰⁾などがある。

本研究は，ミクロシミュレータを用いた路面電車優先信号導入効果を提案・評価するものであり，3番目の研究にあたるが，自動車，路面電車などの現地での実データを詳細に用いた点，路面電車優先信号方式を検討する際に実務面でも有用な研究である。

3. 本研究の概要

本研究では路面電車の定時性および速達性確保の観点から，広島市紙屋町交差点において路面電車を優先した信号方式を提案する。また現行の信号方式と提案する信号方式での自動車の旅行時間，停止回数，路面電車の定時性，速達性などの改善効果を比較する。これらの研究フローを図1として示す。



図－１ 本研究のフロー

４．モデルの概要

(１) 路面電車の走行モデル

既往の研究では、路面電車を１種類の車種として扱ったものが多い。しかし広島における路面電車は１両編成の電車（以下単車と記す）、２～３両編成の電車（以下連接車と記す）、ＬＲＴであるグリーンムーバ（以下ＧＭと記す）の３種類が走行している。これら路面電車の車両長の違いによる交差点で右左折を行う際の直進自動車の滞留、信号や電停での運行障害が発生している。本研究ではそれらの違いを考慮した路面電車の車両モデルを作成する。表１として、路面電車の車両モデルとして設定した路面電車の車両長、最大速度、最大加速度、最大減速度の諸元をまとめる。

表－１ 路面電車の諸元

	車両長(m)	速度(km/h)	加速度および減速度(km/s ²)
単車	12～13	35～40	2.5
連接車	25～27	40	3
G M	30	40	3.5

(２) 路面電車の乗降モデル

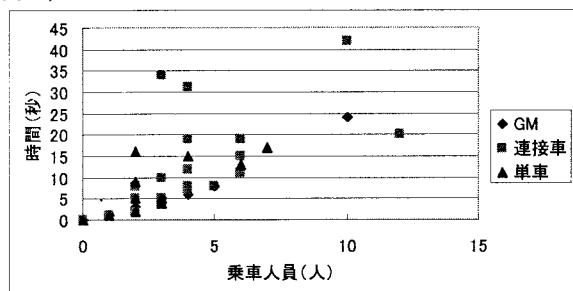
路面電車は、電停に到着すると乗車客を乗車させ、目的地の電停に到着すると降車させる。このために電停で停止する時間は乗降客によって大きく異なる。またこの時間は路面電車の車種によっても大きく異なることが考えられる。この停止時間を調査し、乗降時間と乗降客数、車種に関する違いを算出した。調査は平成１５年１０月３０日～１１月１日にかけて広島電鉄本線の胡町電停および八丁堀電停において７時～１１時の間乗降口に対しビデオで撮影する

方法を用いた。ここで単車、連接車はいずれも乗降口にステップがあるが、ＧＭはノンステップ車両である。また乗降口の幅は単車、連接車は０.８５～１.２ｍ、ＧＭは１.３ｍである。これら乗降客と乗降時間の関係を図２、３に示す。これから式１、２のような線形回帰式を求める。

$$T_{on} = \alpha N_{on} + \beta \quad (1)$$

$$T_{off} = \alpha' N_{off} + \beta' \quad (2)$$

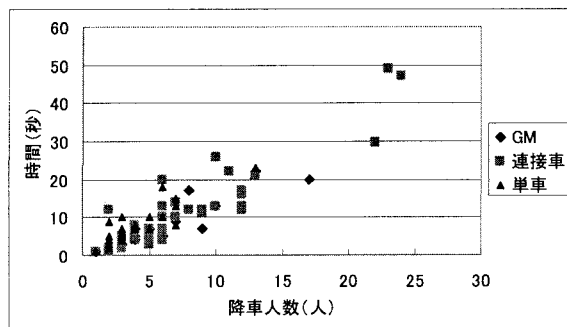
ここに α 、 β 、 α' 、 β' はパラメータ、 T_{on} は乗車時間、 T_{off} は降車時間、 N_{on} は乗車人数、 N_{off} は降車人数と定義する。これらの車種別パラメータおよびその際の重相関係数、優位水準９５％でのＦ値を表２、３にまとめる。



図－２ 乗車人数と乗車時間の関係

表－２ パラメータの推定結果

	α	β	重相関係数	F 値
単車	2.04	0	0.94	0.12
連接車	2.83	0.03	0.59	0.07
G M	2.51	0	0.75	0.19



図－３ 降車人数と降車時間の関係

表－3 パラメータの推定結果

	α'	β'	重相関係数	F 値
単車	1.83	0.2	0.82	0.24
連接車	1.32	0	0.84	0.26
GM	1.63	0	0.81	0.44

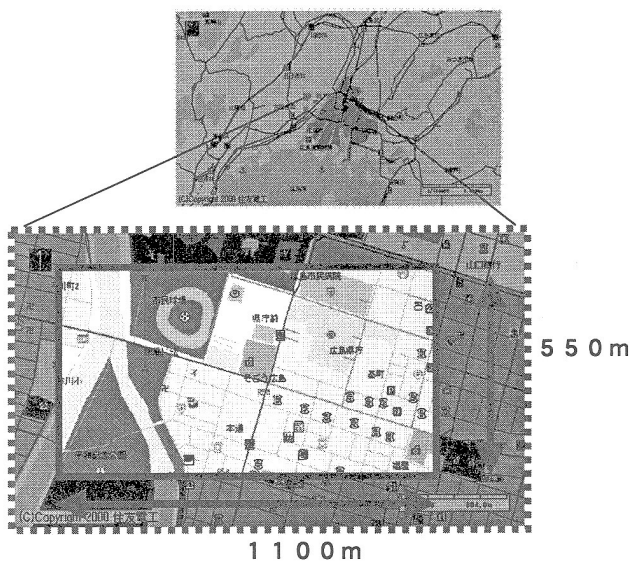
表2において、連接車乗車時のモデルの重相関係数が他の車両と比べて小さい値を示した。この原因としては車両の編成数にばらつきがあることが考えられるが、最も乗車人数と乗車時間の関係に影響する要因は車内混雑状況である。本調査場所における連接車の運行時間は多くの乗客を輸送するため、主にラッシュ時間帯にあたる。ラッシュ時における連接車両の車内が込んでいるため少ない人数で乗車時間が長くなる車両が発生した。その結果乗車時間にばらつきが生じ重相関係数が低くなった。

(3) シミュレーションモデルと使用データ

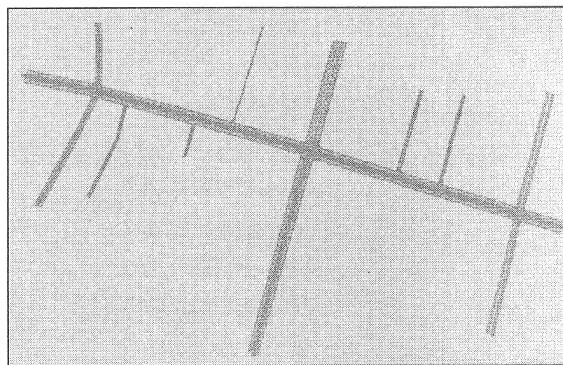
本研究では、ドイツPTV社の交通ミクロシミュレータVISSIM¹¹⁾を用いて、シミュレーション実験を行った。VISSIMでは、車両の発進挙動や前車への追従挙動などのミクロな挙動を、WIDEMANNの交通心理状況を考慮したモデル¹²⁾を用いている。次に車両に関しては1台づつ車両長、幅、加速度等を設定できる。また自動車以外にも人や電車などの車両長、速度などを設定することが可能である。更に交通感応制御プログラムVAPを利用することによって、複雑な信号制御も比較的簡単に構築することができる。以上のことから、VISSIMは本研究に適した交通シミュレータだと言える。¹³⁾また路面電車に関しては、表1にある車両とし、道路中央の専用軌道を通行するように設定した。

また本研究では、広島市内の路面電車軌道の中で最も自動車交通量が多く、信号での路面電車の待ち時間が最も多い区間である図4を対象とした。この研究対象において図5のネットワークを作成した。ネットワークはリンク102本、ノード34個、セントロイド12個で構成される。この地域の平成15年11月19日9時～11時における42箇所の車両感知器データをもとにセントロイドから流入交通量を5分毎に、ネットワーク上の8つの交差点で

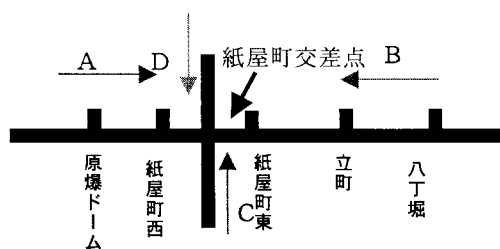
の分岐率を5分毎に設定した。また流入交通量の観測点を7箇所設定した。次に信号周期、オフセット、スプリットなどの信号制御ロジックは実際に同時刻、同場所における信号制御データを用いた系統だった信号制御である。また路面電車の走行ルート、時刻表は路面電車運営主体の資料をもとに作成した。路面電車通過時刻および路面電車の車種は現地において実測したデータを用いた。図6として紙屋町周辺の電停配置および旅行時間の検討方向を示す。各電停における乗客の乗降人数は対象路線の約40%の車両において実測した9時～12時台の乗降客調査データ¹⁴⁾を用いた。



図－4 対象地域



図－5 作成ネットワーク



図－6 電停の配置および旅行時間検討方向

次に自動車の排出量算出に関しては東京都環境保全局が作成した NO_x および CO_2 の推計式を用いた。¹⁵⁾ 本研究では大型車、小型車の区別なく全車両のトリップごとの旅行速度を追従モデルを用いて算出し、その平均値を車種ごとに時間単位で集計した。次に各時間帯での平均旅行速度の結果からネットワーク内での排出ガス量の評価を行った。^{16), 17)}

5. 再現性の評価

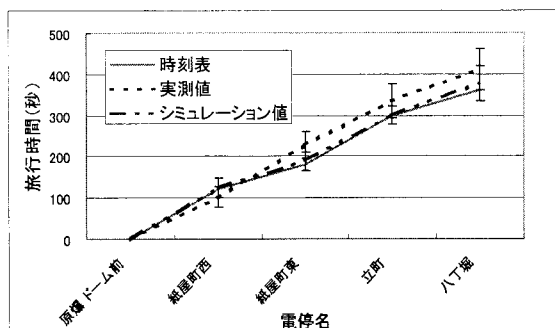
本研究では実際の交通状況との再現性の評価のために、路面電車の旅行時間および電停への到着時刻、自動車の断面交通量を比較する。なお本研究では違法駐車車両や停止中のタクシーに関しては考慮していない。

(1) 路面電車の旅行時間

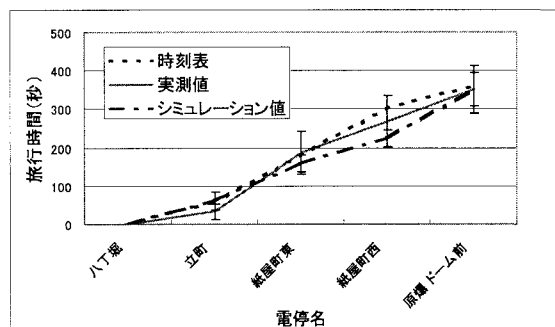
原爆ドームー八丁堀間のシミュレーション上での10時台における各電停の原爆ドーム前電停を起点とした上りおよび八丁堀電停を起点とした下りの路面電車の平均旅行時間と実際の時刻表から算出される所要時間、および実測にて得た平成16年1月23日の路面電車の旅行時間を比較する。

この結果を図7, 8として示す。なおピーク時での路面電車優先信号の導入に関して検討したが、本研究地域ではピーク時の路面電車の運行間隔が1分以下であり、優先信号の導入によって南北の車両の通行が非常に困難であったため、オフピーク時の10時台とした。

シミュレーション上での上りの路面電車の平均旅行時間は378秒、実測値は411秒となり、上りのシミュレーション値は実測値より8.05%短い結果



図－7 上りの旅行時間



図－8 下りの旅行時間

となった。またこの区間での路面電車の時刻表からの算出される所要時間は360秒である。

一方下りではシミュレーション上での路面電車の平均旅行時間は350秒、実測値は351秒となった。この区間での路面電車の時刻表からの算出される所要時間は360秒であり、下りの実測の旅行時間は時刻表から算出される所要時間より9秒短い結果となった。これらから原爆ドーム前電停から八丁堀電停間での旅行時間に関しては実際の路面電車とほぼ同様の結果となったことが分かる。

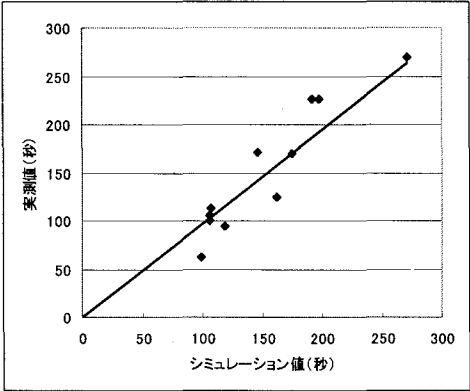
次に紙屋町東および西電停の上り、下りにおける各路面電車が到着した時間を実測値とシミュレーションで再現したシミュレーション値とで比較した。この到着時間の差を表4としてまとめる。

表－4 到着時間の差 (単位: 秒)

	紙屋町交差点西電停		紙屋町交差点東電停	
	上り	下り	上り	下り
平均	19.28	15.87	19.12	20.93
標準偏差	19.38	14.03	16.12	20.54
最大誤差	37.30	30.70	37.20	58.50
最少誤差	5.40	5.80	1.50	0.10

この結果、実測値とシミュレーション値との誤差

の平均はおおよそ20秒以内におさまった。これら到着時間のシミュレーション値を横軸に、実測値を縦軸にプロットした結果を図9として示す。

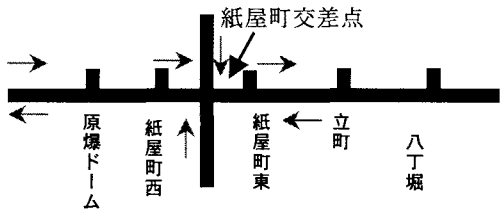


図－9 到着時間の比較

この回帰式は、 $y = 0.97x$ （重相関係数0.83、 t 値8.49）となった。これらの結果から本研究での路面電車の挙動は高い精度で再現できたと言える。

(2) 自動車の断面交通量

自動車交通量の評価は、渋滞長や旅行時間計測が出来なかったため、図10の7箇所における5分間交通量の感知器交通量データと再現交通量の相関係数、平均誤差率によって評価した。この結果各断面での相関係数の平均が0.87、平均誤差率6.9%となった。これは同時刻の交通状況を再現するのに十分な結果であると言える。

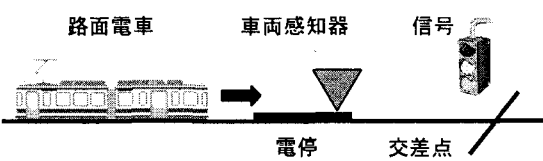


図－10 自動車断面交通量の比較場所

6. 信号方式導入効果の比較

(1) 提案信号方式

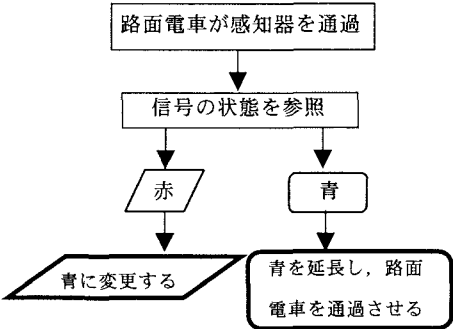
本節では、提案する信号方式のアルゴリズムについて説明する。まず路面電車と信号および車両感知器の位置関係を図11として示す。



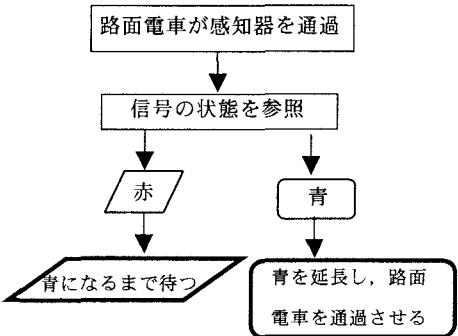
図－11 信号と感知器の位置関係

図11にあるように、路面電車進行方向が交差点に向う電停上に車両感知器を設ける。路面電車が電停を発車し感知器を通過する際に交差点にある信号の状態に応じて信号の現示を変更するという設定とした。

次に提案信号方式として、「路面電車優先信号方式」（以下優先信号方式と記す）および「路面電車準優先信号方式」（以下準優先信号方式と記す）の2種類の方法について図12、13に示す。ここではA、B、Cの各方向から路面電車が流入するが路面電車の速達性を重視するために、信号提示の優先順位を路面電車の通行台数が多い順にA、B、Cとした。



図－12 路面電車優先信号方式



図－13 路面電車準優先信号方式

(2) 計算結果

1節にて説明した信号方式にてシミュレーションを行った結果と5章でのシミュレーション結果を比

較し、その効果を路面電車の速達性、定時性と自動車の旅行時間などの変化で比較する。

(a) 旅行時間の評価

図6で定義した方向別での自動車と路面電車の旅行時間を比較した結果を表5として示す。

表－5 旅行時間の比較

車種	路面電車		自動車			
	A	B	A	B	C	D
現行(秒)	412.47	350.53	737.82	1088.97	274.37	129.45
準優先信号	21.28%	7.80%	41.19%	6.99%	-8.43%	-52.89%
優先信号	54.20%	40.12%	62.13%	25.06%	-94.30%	-193.55%

表5から路面電車の旅行時間は準優先信号方式および優先信号方式においてともに改善されることが分かる。このことから本研究で提案した信号方式は路面電車の速達性の確保に有効な方式であることが分かる。さらにA方向、B方向では青時間長が長くなるため自動車の旅行時間も改善される。一方でC方向、D方向は赤時間長が長くなるため自動車の通行に支障をきたし、交通混雑を引き起こすことが分かる。

ここで信号方式の変更による紙屋町交差点での自動車の待ち時間などの変化に着目し、これらの信号方式の自動車への影響を評価する。表6として図6で定義した各方向での自動車の遅れ時間の変化を、表7としてネットワーク全体における自動車の現行での平均遅れ時間、停止時間、停止回数を示しそれぞれの信号方式における改善率をまとめた。

表－6 方向別遅れ時間の変化

方向	自動車			
	A	B	C	D
準優先信号	35.10%	9.67%	-10.21%	-41.92%
優先信号	54.36%	21.32%	-83.21%	-174.38%

表－7 遅れ時間の比較

自動車	遅れ時間	停止時間	停止回数
現行(秒)	252	177.8	5.2
準優先信号	13.49%	16.37%	7.88%
優先信号	-25.75%	-28.36%	-17.50%

表6から優先信号方式、準優先信号方式において

A方向で遅れ時間の改善が、D方向で遅れ時間の悪化が顕著であることが分かる。また表7から準優先信号方式においては、遅れ時間、停止時間、停止回数がすべて改善されており、準優先信号方式における自動車の混雑はネットワーク全体として考えると改善されることが分かる。反対に優先信号方式では、

遅れ時間、停止時間、停止回数がすべて悪化しており、自動車の混雑を悪化させることが分かる。以上のことから、準優先信号方式が路面電車および自動車の交通状況を改善する信号方式である。

(b) 定時性の評価

広島における路面電車の問題として速達性のほかに定時性の確保がある。道路に余裕のない都心での路面電車の定時性確保のためには、電停等での時間待ちが出来ないため、信号のサイクル長やオフセットなどの影響に大きく依存してくる。現状の信号方式と提案した信号方式のそれぞれにおいて時刻表と比較してどの程度時間通りに電停に到着したかを評価するために式3を用いる。この指標を八丁堀交差点から紙屋町西電停下りにおいて用い、路面電車到着時間の定時性の評価を行った。

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - T_i'|}{n} \quad (3)$$

ここに八丁堀電停から紙屋町西電停における路面電車*i*の時刻上での標準旅行時間を T_i 、シミュレーション上での同一区間の旅行時間を T_i' とする。こ

の結果と標準旅行時間とのずれ時間である

$|T_i - T_i'|$ の最大値および最小値を表8にまとめ、

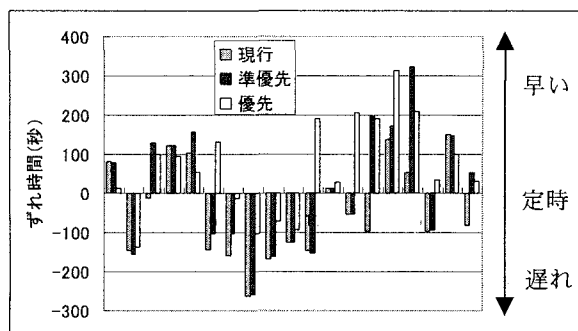
図14としてずれ時間の例をあげる。

表－8 紙屋町西電停でのずれ時間(単位:秒)

	現行	準優先	優先
ΔT	108.13	132.96	101.35
最大	330.2	322.6	312.1
最小	12.3	12.7	3.5

この結果 ΔT が最小となる信号方式は優先信号方

式であり、現行の信号方式と比較しても改善されることが分かる。



図－1 4 紙屋町西電停における到着ずれ時間の例

(c) 環境負荷の評価

作成したネットワーク内での現行の信号方式と比較した NO_x および CO_2 の総排出量の変化を表9に示す。

表－9 NO_x 、 CO_2 排出量の比較

	CO_2 改善率	NO_x 改善率
準優先信号	12.26%	5.71%
優先信号	-10.26%	-8.43%

表9にあるように準優先信号方式では、現行の信号方式より環境に優しい信号方式であると考えられる。

(d) まとめ

これらの結果から、交通負荷に関しては準優先信号方式では現行の信号方式より路面電車、自動車共にネットワーク全体での交通負荷は改善される。また路面電車の速達性の向上も見込まれる。一方で優先信号方式では路面電車にとっては非常に有効な信号方式であり速達性および定時性は向上するが、南北方向の自動車交通に与える影響が大きく、ネットワーク全体で考えると混雑が悪化することが分かった。

本研究においては路面電車に対し有効な信号方式としては優先信号方式である。一方で準優先信号方式は一部の自動車交通に支障がでるが、自動車の交通負荷、環境負荷および路面電車の運行状況において優れた信号方式と言える。これらを総合して該当地域においては、路面電車の運行状況の改善が見込

まれ、更には自動車の交通負荷、環境負荷に優れている準優先信号方式を用いることが有効であると考えられる。

7. おわりに

国内の信号制御の研究は自動車交通に主眼を置き渋滞緩和を目的としたものが主流である。しかし海外では都市内にLRTが走る都市も多い。また国内でも広島市、高知市など市内に路面電車が走る都市も複数存在する。これらの都市における交通施策として路面電車を含めた信号方式に関する研究もこれからは必要である。

本研究では、広島市内の紙屋町交差点およびその周辺域を対象に路面電車優先の信号制御方法を考案し、交通シミュレータを用いた計算機実験を行いその有効性を示した。今後はさらに自動車交通を犠牲にしない有効な路面電車優先信号方式のアルゴリズムの考案や、感知器の設置位置の検討などを行う必要がある。またネットワークを広げ複数交差点での更に系統だった信号制御について評価できるよう発展させていきたい。最後に自動車交通と路面電車交通のトレードオフの関係を論理的に考察して行くことが必要である。

謝辞

最後に本研究を行うに際し、広島県警、広島電鉄、路面電車を考える会の方々に資料の提供、ご助言等多大な協力を得ました。また東京大学桑原教授、東京都立大学大口助教授、名古屋大学加藤助教授、慶應高校坪田教諭、広島電鉄中尾氏をはじめ、多くの方から貴重な意見を頂戴しました。ここに、あらためて感謝の意を表します。

参考文献

- 1)運輸省：「平成12年度運輸白書」，2000.
- 2)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ツールの開発」，土木計画学研究・論文集，Vol.18，No.4，pp.763-772，2001.
- 3)中川大，松中亮治，芦澤宗治，青山吉隆：「都市

- 交通シミュレーションを用いたパッケージ施策の便益に関する研究」, 都市計画学会学術研究論文集, No36, pp. 583-588, 2001.
- 4) 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L R T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.
- 5) 伊藤雅, 中川大, 西尾健司「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を用いたL R T導入効果の定量的検討」, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第4部, Vol. 54, pp. 272-273, 1999.
- 6) 青柳篤, 森本章倫, 古池弘隆: 「SP調査を用いたL R T需要予測に関する研究」, 第31回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集CD-ROM, 2003.
- 7) 田尻要: 「市民意識に基づいたL R T導入に関する基礎的検討 前橋市を事例に」, アーバンインフラ・テクノロジー推進委員会会議技術発表会論文集, Vol. 13, pp. 111-116, 2002.
- 8) 太田智, 中野雅弘, 大島秀樹: 「都市交通としてのL R V導入に関する利用者意識の一考察」, 土木計画学研究・講演集, Vol. 26 Pt2, 2002.
- 9) 奥村幾正, 渡辺俊勝, 水間毅: 「L R T用信号システムの交通流からのシミュレーションによる評価」, 電気学会資料 交通・電気鉄道研究会, Vol. TER-00, pp. 27-32, 2000.
- 10) 水間毅, 加藤忠彦, 佐藤安弘, 白土義男: 「電車優先信号方式の実態と今後の方向」, 電気学会資料 交通・電気鉄道研究会, Vol. TER-00, pp. 28-34, 2000.
- 11) VISSIMホームページ: http://www.english.ptv.de/cgi-bin/traffic/traf_vissim.pl
- 12) PTV AG: 「VISSIM Traffic flow Simulation Technical Description」, 2001.
- 13) NGAN V: 「A Comprehensive Strategy for Transit Signal Priority」, Inst Transp Eng, Vol. 73, No. 11, pp. 28-32, 2003.
- 14) 広島電鉄電車カンパニー企画チーム: 「乗降客実態調査」, 2000.
- 15) 東京都環境保全局: 「都内自動車走行量及び自動車排出ガス量算出調査報告書」, 1997.
- 16) 熊谷 英治, 森 俊介: 「首都圏広域ネットワークにおける動的制御最適化モデルの構築と環境影響評価」, エネルギーシステム・経済環境コンファレンス講演集, 2001.
- 17) 藤井聡, 菊地輝, 北村隆一: 「マイクロシミュレーションによるCO₂削減に向けた交通施策の検討: 京都市の事例」, 交通工学, Vol. 35, No. 4, pp. 11-18, 2000.

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

松本 修一・熊谷 靖彦・川嶋 弘尚

本研究では路面電車の交通状況の改善およびそれに伴う自動車の交通状況の変化に関して、路面電車優先信号方式を提案した。その結果計算機実験において路面電車の速達性、定時性、それに伴う自動車交通の変化、環境負荷の観点から評価を行った。その結果研究対象ネットワーク全体として路面電車および自動車の交通状況、それに伴う環境負荷の軽減される信号方式の可能性が示唆される。

A Study on the Traffic Signal Strategy in City Traffic Consideration of Streetcar

Shuichi MATSUMOTO, Yasuhiko KUMAGAI, Hironao KAWASHIMA

In this study, the streetcar priority signaling strategies are considered in conjunction with improvements of the traffic situation of streetcars, and the traffic situation of vehicles related to the movement of the streetcars. In the computer experience, various strategies are evaluated in terms of environmental load by considering the speed and the punctuality of streetcars, and the road traffic situation influenced by the movement of streetcars. As a result, this paper shows the possibility of the traffic signal strategy which mitigates the situations of streetcar and surrounding vehicles such that the environmental load is minimized.
