

# シミュレーションを利用したLRT導入効果の定量的評価手法について (第1報) LRT京都導入プロジェクト

交通システム研究領域

水間 毅 佐藤 安弘

## 1. はじめに

環境負荷の増大、少子高齢化社会の進展と言った社会現象を受けて、近年、都市交通システムへのモータリシフトの議論が盛んになってきている。その解決策の一つとして、ヨーロッパでは路面電車の一形態であるLRV(Light Rail Vehicle)が都市の装置として導入され、トランジットモール、パークアンドライド等都市計画と結びついてLRT(Light Rail Transit)システムとして発展している。日本でも、「人に優しく環境に優しい」路面電車が見直しの気運はあるものの、現状ではLRVの導入に留まっている程度で、LRTシステムとして発展する状況にあるとは言い難い。これは、事業者の採算性の問題の他に、路面電車区間を改良するにしても新たに建設するにしても、飽和状態にある自動車交通との関係をどう整理・解決するかの方策が確定していないためである。「LRVを導入しても、事故が増加し、渋滞が分散しては何にもならない。」という疑問に対する明確な回答がないことがLRT化の大きな障害となっていると思われる。

そこで、交通安全環境研究所では、実地図上にLRVの路線を設定し、自動車交通と並行して、交通信号機で走行し、渋滞長、エネルギー消費量を計算可能なシミュレーションの開発を行ってきたが、2004年度から、経済産業省からの交付金を原資として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして、「LRV(次世代路面電車)導入による運輸部門の総合的省エネルギー対策技術の研究開発」を実施している。これは、京都市にLRVを導入することを想定して、LRVが走行した場合の自動車交通流の変化をシ

ミュレーションにより解析し、トータルのエネルギー量、二酸化炭素排出量等がどのように変化するかを計算して、LRV導入の効果を示そうとするものである。

本稿では、本プロジェクトに至る社会的状況、本プロジェクトの概要を示し、製作中のシミュレータによるLRV導入効果の一例を示すこととする。

## 2. エネルギー・環境問題と交通システム

### 2.1. エネルギーと地球環境の悪化<sup>(1)</sup>

図1に、1990年の日本における、各分野のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量を100とした場合の1998年の推移を示す。

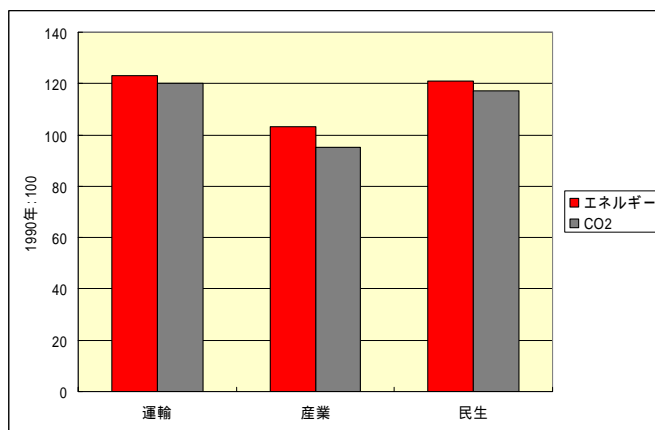


図1 各分野におけるエネルギー、CO<sub>2</sub>の変化

エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量とも産業部門が横ばいであるのに対し、運輸、民生部門が増加していることがわかり、また現在でもその傾向が続いている。従って、運輸部門のエネルギー消費量を削減することが地球環境にも大きな貢献を果たすことがわかる。

また、図2に各交通システムにおけるエネルギー消費原単位を、図3に1人・1kmを輸送する際に排出される二酸化炭素排出量を示すが、自動車の値が大きいことがわかる。従って、この自動車からの量をどのように減少させるかが運輸部門の省エネルギー、環境負荷低減に係っているとんでも過言ではない。

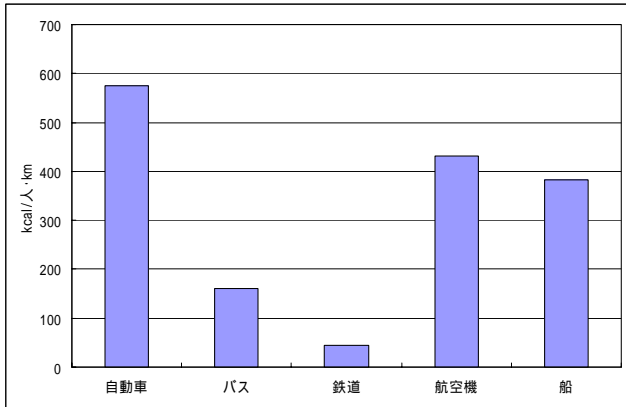


図2 各交通システムのエネルギー消費原単位

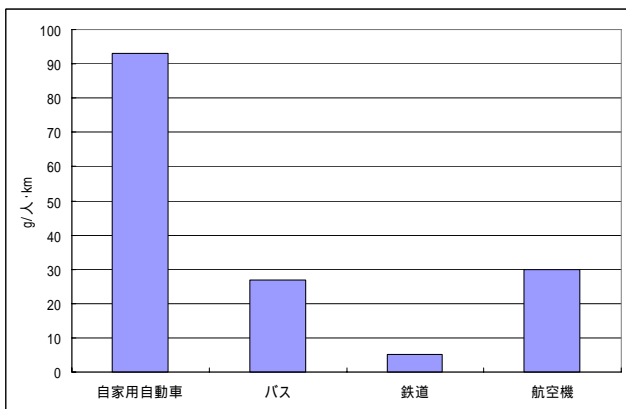


図3 各交通システムのCO<sub>2</sub>排出量(g/km・人)

## 2.2. 交通システム最適化による効果

以上の状況を考慮すると、日本において、省エネルギー、地球環境負荷低減を図るためには、運輸部門、特に自動車利用の抑制と言うことが大きなテーマとなることがわかる。それを実現するために、様々な方策、研究がなされているが、ここでは、技術的な検討例について述べる。

**2.2.1. モーダルシフトによる効果** これは、自動車から他の交通システムへの転換を図ることにより、結果として、エネルギー消費、環境負荷を低減させる試みである。都市交通においては、自動車を鉄道に転換させることの効果が大きい、その一例として、パークアンドライドによる自動車からLRVへの転換が挙げられる。これは、主にヨーロッパで普及、

発展している。日本においては、地方交通では、自動車から公共輸送であるバスへの利用が、都市交通では、公共輸送の充実化が叫ばれているが、なかなか推進されてないのが現状である。こうした状況の中で、路面電車の活性化が見直され、熊本、広島 of 既存路面電車に低床式のLRVが導入され、京都ではLRV導入の検討が実施される等一部では、モーダルシフトへの動きが始まっていると言える。

**2.2.2. 交通システムの発展による効果<sup>(2)</sup>** 自動車から鉄道への転換が容易でない場合には、自動車そのものの技術発展により、エネルギー消費低減、二酸化炭素排出量削減を実現する方策がある。燃料電池車、電気自動車、ハイブリッド車の普及による効果が挙げられるが、まだその普及率は高くない。また、こうした自動車についても、1km走行当たりのエネルギーは鉄道に比して大きく(図4参照)、普及率が増大しないと効果は見込めない。

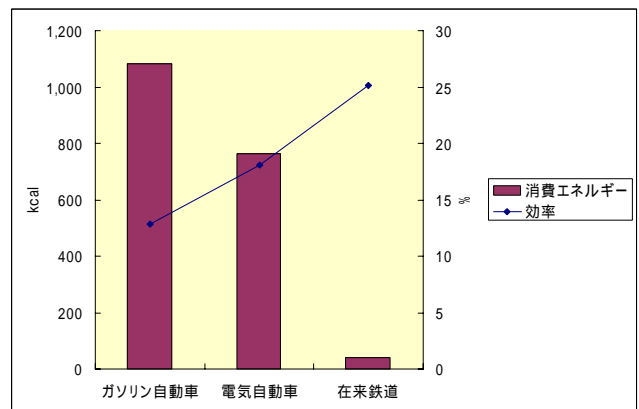


図4 各交通システムの効率、エネルギー比較

一方、自動車やバスのようなドアツードアに近い交通と鉄道の大量輸送に近いシステムの両方を実現可能なシステム(バイモーダルシステム)の開発も盛んになってきている(表1参照)が、こうしたシステムの普及が利用者の利便性だけでなく、エネルギー、

表1 日本で実用、開発中のバイモーダルシステム

	ガイドウェイバス	DMV	IMTS	ゴムタイヤトラム
実用・開発例	実用(名古屋)	開発(JR北海道)	一部実用(愛知万博)	開発(堺・実験線)
システム	バス+新交通	バス+鉄道	バス+新交通	バス+LRV
外国	実用	開発	実用	一部実用

環境問題への解決の一助となる。そして、ここでも LRV を利用したバイモダルシステム（ゴムタイヤトラムとバス）の検討が望まれ、ヨーロッパでは一部実用化されている（写真1参照）。



写真1 ナンシーのTVR（バイモダル可能）

### 3. LRV 導入による省エネルギー、環境負荷低減効果の算定

前章において、鉄道のような軌道系交通システムの発展、導入がエネルギー、環境問題に効果的であることが示されたが、その中で、都市内交通では、LRT システムの導入が有効な解である。従って、本章では、交通研が開発したシミュレータによる LRV 導入の定量的評価を、京都市を例として実施した例を示す。

#### 3.1. 日本における LRV 導入動向

LRV を 100%低床で、高性能な路面電車であると定義すると、日本では、表2のように導入が進んでいる。

表2 日本における LRV 導入状況

事業者	愛称	運行開始年	車体の特徴	特徴
熊本市交通局	9700形	1997年8月	2車体連接2台車	日本初の超低床式車両、全長18.5m(ドイツ製)
広島電鉄	グリーンムーバー	1999年6月	5車体連接3台車、フローティング車体	全長30.5m(ドイツ)
	グリーンムーバーMAX	2005年3月	5車体連接3台車、フローティング車体	全長30m、初の国産100%低床車両
鹿児島市交通局	ユートラム	2002年1月	3車体連接2台車	初の国産超低床式車両
伊予鉄道	2100形	2002年3月	1車体(2軸ボギー)台車	単車・狭軌の超低床式車両
土佐電気鉄道	ハートラム	2002年4月	3車体連接3台車、車輪径660mm+610mm	全長17.5m
岡山電気軌道	MOMO	2002年7月	2車体連接2台車	狭軌で世界初の2車体2台車(ドイツ)
万葉線	MLRV1000形	2004年1月	2車体連接2台車	第3セクターによる運営(ドイツ)
長崎電気軌道	3000形	2004年3月	3車体連接2台車	台車上部の床高さ480mm
富山ライトレール		2006年4月(予定)	2車体連接2台車	日本初のLRV+鉄道路線(ドイツ)

最初は、ドイツ製の車両を輸入して、日本独自の技術改良を施して導入（熊本、広島）したが、近年では、日本独自の技術で LRV を製作し、2005年3月には、国

産で初の 100%低床式車両（グリーンムーバーMAX）が導入された。

しかし、これらの例は、既存の路面電車事業者が在来の車両の更新として導入したもので、新たに路面電車路線を引いて導入した例はない。富山ライトレールは 2006 年中に営業開始予定であるが、これは JR 西日本・富山港線が富山駅改良工事に伴い廃止されるのを機に、富山駅周辺の一部を路面電車化して、郊外部は鉄道として走行するシステムに変更するものであり、ここに LRV を導入する予定となっている。

#### 3.2. シミュレーションによる導入評価<sup>③</sup>

日本では、LRV は既存の路線への導入から進められているが、交通研では、新たに LRV 路線を導入する地域に、自動車交通への影響を計算可能なシミュレーションを実施して、その導入効果を定量的に示す研究を行っている。また、このシミュレーションでは、各種施策（パークアンドライド等）による影響も計算可能であるので、LRT 化に対する評価も実施可能である。

##### 3.2.1. シミュレータの特徴

本シミュレータの特徴は、導入する LRV の車両性能を模擬するだけでなく、道路上に敷設することを想定して、地図上に路線を設定して、道路交通（自動車、バス）の走行と並行して、また交通信号機に従って模擬走行することが可能な点にある。そして、走行に伴う消費エネルギー量、二酸化炭素排出量を車両性能、走行に基づき計算可能である。さらに、トランジットモール、パークアンドライドを実施した場合の自動車交通流の変化等も模擬可能で、その際の、消費エネルギー量、二酸化炭素排出量の変化も計算可能である。従って、本シミュレータにより、LRV 導入による自動車交通への影響（渋滞、走行時間）が計算可能であるとともに、エネルギー、環境負荷の変化も定量的に示すことが可能となる。

表3に、本シミュレータの特徴を示す。

表3 本シミュレータの特徴

LRV 走行機能	LRV の性能、制限速度を設定し、交通信号に従い走行可能である。
自動車走行機能	前の車両に追従して、交通信号機に従い走行可能である。
バス走行機能	停留所ごとに人の乗降を考慮した走行が可能である。



エネルギー計算機能	LRT、バス、自動車の走行に伴うエネルギー量の計算が可能である。
二酸化炭素排出量計算機能	LRT、バス、自動車の走行に伴う二酸化炭素排出量の計算とともにその分布も計算可能である。
渋滞長計算機能	LRV 導入後に、自動車の渋滞長がどのように変化したかを計算可能である。
移動時間計算機能	LRV、バス、自動車利用者の、任意の地点間の走行時間を計算可能である。
LRT 化効果計算機能	優先信号、パークアンドライド、トランジットモール等の各種施策実施における、エネルギー、環境、移動時間の変化を計算可能である。

### (1)自動車走行モデル

図5に、自動車の走行モデルを示し、式(1)、(2)に走行制御式を示す。自車の前方に車両がいる場合、5秒後に追いつかない場合は式(1)を適用し、追いつく場合は追従式(2)による制御で走行を行うモデルとした。

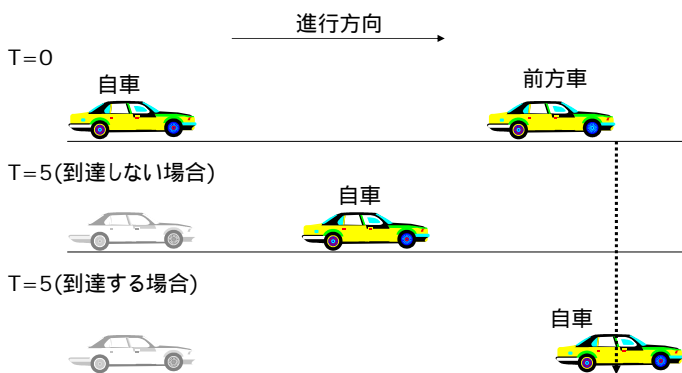


図5 車両走行モデル

$$V_t = V_{t-ts} + \alpha_{mas} \times t_s / 1000 \quad \dots\dots(1)$$

$$\alpha = \lambda \frac{V_{i+1}^m(t)}{\{X_i(t-\tau) - X_{i+1}(t-\tau)\}^l} (V_i(t-\tau) - V_{i+1}(t-\tau)) \quad \dots\dots(2)$$

ただし、

$V_t$ : 時刻 $t$ の速度(m/s)  $t_s$ : サンプル時間(ms)  
 $V_{t-ts}$ :  $t_s$ 秒前の速度(m/s)  $max$ : 最大加速度(m/s<sup>2</sup>)  
 $\alpha$ : 加減速度(m/s<sup>2</sup>)  $i$ : 1台前方の車両  $i+1$ : 自車  $t$ : 現在時刻(s)  
 $V$ : 速度(m/s)  $X$ : 位置(m)  $\lambda$ : 定数  $l, m$ : 速度-密度曲線の特性を表す係数  $\tau$ : タイムステップ(s)

### (2)二酸化炭素排出量・濃度計算モデル

また、二酸化炭素排出量については、LRV は走行に伴う電力消費量を求め、電力 - 二酸化炭素排出量換算

係数を掛けて求め、車両(自動車、バス)については、図6に示すような、速度 - 燃費曲線を基に計算された燃料消費量と、燃料 - 二酸化炭素排出量換算係数から求めている。

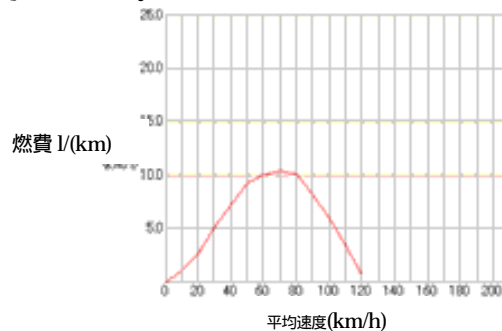


図6 速度 - 燃費曲線例 (自家用車)

そして、車両を小型車、大型車、バスの3つに分類し、シミュレーション計算時間毎に車両1台1台について、二酸化炭素排出量を計算し、各メッシュ毎に濃度を表示している(図7参照)。

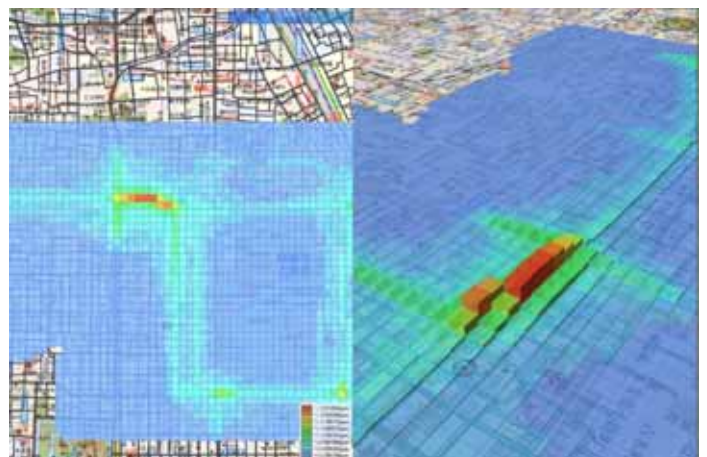


図7 二酸化炭素濃度表示例

### (3)エネルギー計算モデル

LRV は車両の性能曲線、制限速度、曲線通過速度を与え、交通信号機に従いながら走行する際に得られる力行電力、回生電力を全線走行にわたって計算し、消費エネルギー量として求める。自動車は図6の速度 - 燃費曲線より求めるが、これらは、走行平均速度による燃費量を求めながら最終的にはトータルの消費エネルギー量を計算する。

図8に、シミュレーション実施中の画面表示例を示す。図上部には、道路とLRV路線図が示され、道路は、自動車(小型、大型)とバスが、軌道はLRVが、信号に従って走行するが、走行中のデータは画面下部に、

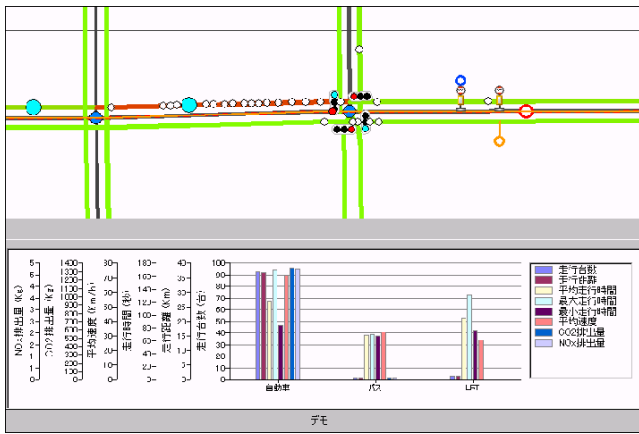


図8 シミュレーション実施画面表示例

走行台数、平均速度、二酸化炭素排出量、エネルギーがリアルタイムに計算され、示される。

**3.2.2. シミュレータによる計算** 京都市の今出川通に単線の LRV 路線を導入した場合の、自動車交通流の変化、消費エネルギー量の変化、二酸化炭素排出量の変化等を計算し、その導入効果を示す。

図9に設定した路線の概要を示す。

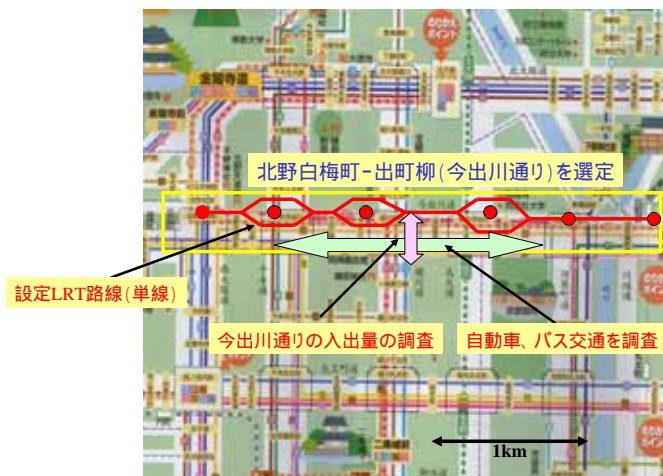


図9 想定した LRV 導入路線

今出川通は片側2車線道路が基本で、幅員が狭いため、LRVは単線として、交差点前後の停留所で行き違う制御を行うこととした。

(1) 道路交通流シミュレータの精度の検証

まず、今出川通の交通流調査を実施し、各主要交差点における自動車交通の量、実際の渋滞長を把握した。そして、各交差点における自動車の量をシミュレータに入力して、渋滞長を再現できるかで、シミュレーションの精度の検証を行った。

図10にその結果を示すが、各交差点における渋滞

長はほぼよい一致を見たと言え、局所的に異なっている部分は、駐車車両の影響等シミュレーションに反映されていない条件のためであることが確認された。

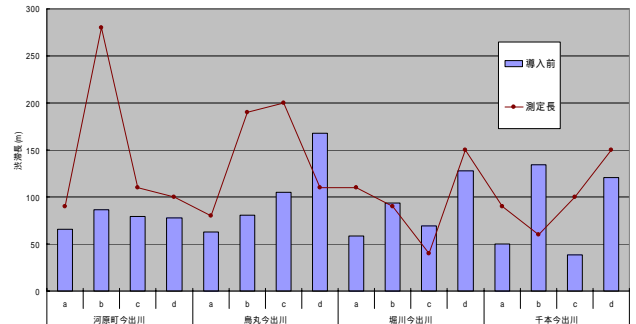


図10 渋滞長の実測とシミュレーション結果比較

(2) LRV 導入後の交差点における渋滞長変化

図11に今出川通に LRV を導入した後の、各ケース（自動車量が変化無し、LRVへ転換、並行バス路線廃止）における渋滞長の変化を示し、図12に導入前の渋滞長との比を計算した結果を示す。

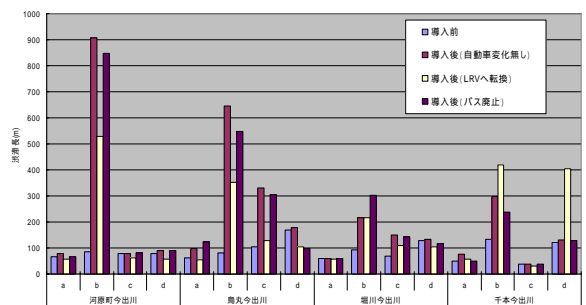


図11 LRV 導入後の各ケースにおける渋滞長変化

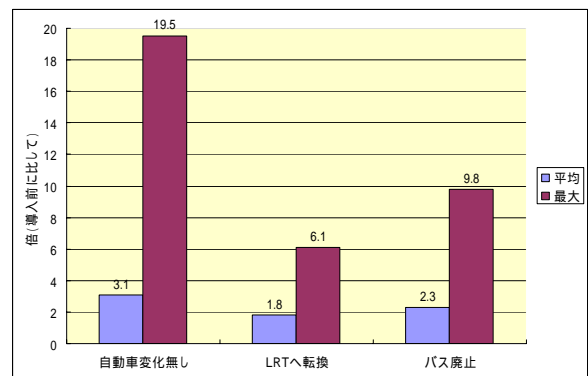


図12 LRV 導入後の渋滞長の伸びの最大、平均

この計算によると、今出川通に単線 LRV を導入すると、自動車交通が変化しないと渋滞長は最大で約 20 倍、平均でも 3 倍に拡大するが、最大の渋滞長は、LRV 路線と直交する道路で見られた。また、自動車利用者が LRV の定員分転換する、並行するバス路線を廃止す

る、という仮定を設けると、平均の渋滞長は約2倍に低減されるものの、最大渋滞長は、自動車からのLRVへの転換があったとしても約6倍に拡大されることから、道路交通流への影響は大きいことが確認されたと言える。

(3)LRV 導入後の各交通システムの平均速度変化

図13にLRV導入後における各交通システムの平均速度の変化(今出川通を走行する車両)を示す。

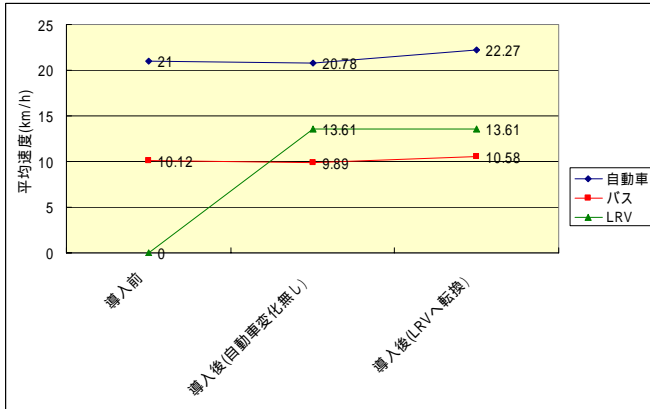


図13 LRV 導入後の表定速度の変化

これによると、LRVは約13km/hの表定速度となっているが、これは、単線で行き違いがあるため低下したものである。また、LRV路線と並行する自動車、バスの表定速度はそれほど低下していないが、これは、自動車の相当量が他のルートに迂回したため、図11,12の計算結果からもわかるとおり、他のルートの表定速度は大幅に低下している。

(4)LRV 導入後の二酸化炭素排出量の変化

図14に、LRV導入後の各ケースにおける二酸化炭素排出量の変化を示す。

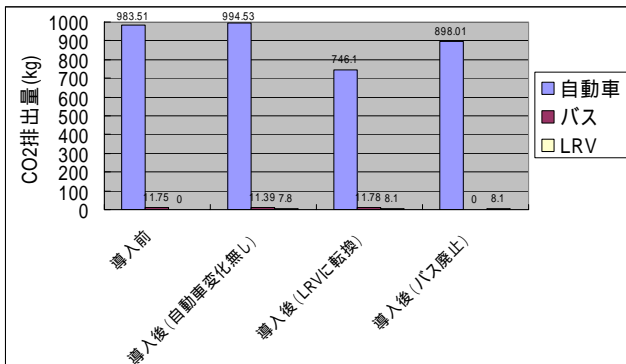


図14 LRV 導入後の二酸化炭素排出量変化

また、LRVを導入した後の、一年間の二酸化炭素の排出削減量を計算した結果を表4に示すが、自動車の

利用者がLRVに転換すると仮定すると、年間で約1,700tの二酸化炭素削減が可能となり、LRV導入が環境に優しいことが実証されたと言える。

表4 LRV 導入後の年間想定二酸化炭素削減量

	自動車利用 変化無し	LRVへ転換	バス廃止
削減量(t)	+134	-1,674	-651

3.2.3.シミュレータによる評価 以上、今出川通に単線のLRVを設定した場合の、移動時間の変化、二酸化炭素排出量の変化等を、実信号系統、測定した車両台数をベースにシミュレートし、定量的にその効果を示した。その結果、LRVの表定速度は約15km/h近くは確保でき、年間、1,700tの二酸化炭素削減量が期待されることが確認された。しかし、一方で、単に、LRVを走行させるだけでは、自動車からの転移を見込んだとしても、渋滞長は最小でも6倍に拡大することが示され、道路交通への影響が大きいことが確認された。従って、こうした区間にはパークアンドライド等による効果等もシミュレートする必要がある。

4.おわりに

以上、エネルギー、地球環境問題に対する交通システム側からの解決策の一つとして、LRVの導入が挙げられることをデータにより示し、その導入効果を定量的に示すためのシミュレータとその計算例について示した。効果は、従来の自動車交通に対する影響を中心に渋滞長の変化や表定速度、二酸化炭素排出量の変化を計算して示した。その結果、移動時間、環境に対しては十分な効果が得られたものの、渋滞長で表される道路交通に対しては、課題が残ることが示された。2005年9月に京都市が、「新しい公共交通システム調査報告書」を示し、京都へLRVを導入するための環境作りに乗り出しているが、ここでも、道路交通への影響が導入に際しての課題であることが示されている。今後は、本シミュレータにより、パークアンドライド等様々な政策を実施した場合のLRV導入効果を計算し、より、具体性のある、LRV導入への指針を提言していきたい。

参考文献

- (1)資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」
- (2)電気学会技術報告 第597号「交通とエネルギー」
- (3)工藤他 2005 電気学会 産業応用部門大会 Y-19