

軌道系交通の導入評価のための 都市交通シミュレータ

工藤 希¹・佐藤 安弘²・水間 毅³

¹非会員 交通安全環境研究所 交通システム研究領域 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)
E-mail:n-kudo@ntsel.go.jp

²会員 交通安全環境研究所 交通システム研究領域 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)
E-mail:ya-sato@ntsel.go.jp

³非会員 交通安全環境研究所 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)
E-mail:mizuma@ntsel.go.jp

低炭素社会に向けて、交通部門においては、自動車からのモーダルシフトが不可欠である。しかし、他の交通機関を排除するのではなく、他交通機関とのベストミックスを探る事が重要である。そこで我々は、LRT (Light Rail Transit)等の軌道系公共交通及び自動車交通を模擬し、モーダルシフトの効果を定量的に評価可能なシミュレータを開発した。このシミュレータは、各種公共交通システム及び自動車交通を同時に走行させ、走行時のエネルギー消費量や二酸化炭素排出量の算出が可能である。さらに、パークアンドライドやトランジットモールといった政策を考慮することができる。これを用い、軌道系交通を導入した場合の効果を算出した例を示す。

Key Words: Traffic flow simulator, Transportation planning, LRT

1. はじめに

二酸化炭素などの温室効果ガスが増加しており、これを減らすのは急務である。各産業分野において、取組がなされているが、交通分野においては、自動車から公共交通へのモーダルシフトが有効であると考えられる。

本論文では、モーダルシフト促進のために、その効果を定量的に評価可能な、交通流シミュレータを開発したのでその概要について述べ、本ツールを用いて、LRTの導入評価を行った例を示す。

2. 背景

(1) 温室効果ガスの削減目標

世界中の問題として、二酸化炭素などの温室効果ガスが増加しており、削減は急務である。京都議定書では、2008年から2012年までの期間中に、先進国全体の温室効果ガスの合計排出量を1990年に比べて6%の削減目標がある。

日本の2009年度までの温室効果ガス排出量は図1の通りである。2009年度の温室効果ガスの総排出量は、12億900万トンで、京都議定書の規定による基準年の総排出量と比べると、4.1%削減された。対して、運輸部門全体は、2009年度のCO₂排出量は5.8%増である。特に、

運輸分野（旅客部門）の温室効果ガス排出量を図2に示

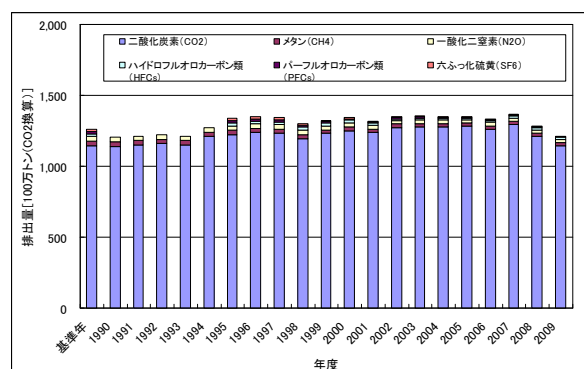


図1 日本の温室効果ガス排出量

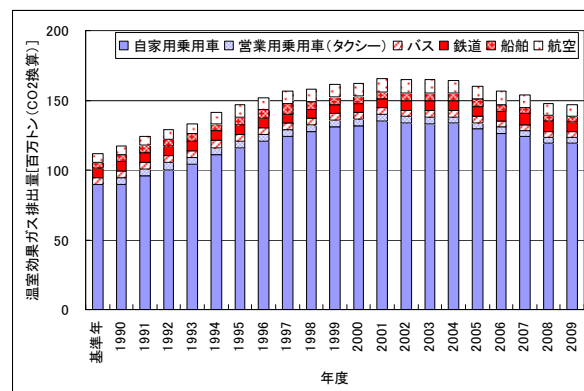


図2 日本の温室効果ガス排出量（旅客輸送のみ）

す¹⁾。旅客部門に特化して見ると、全体として約 31%の増となっており、その約 88%を自動車占めている。もちろん、自動車分野においても、燃費の改善や、ハイブリッド自動車、ITS、ETC の導入など様々な取組がされており、一定の成果は出ているとされているが、運輸部門全体からするとその効果は限定的といわざるを得ない。そもそも、自動車は輸送単位あたりの排出量は 165g-CO₂/人キロとなっており、公共交通であるバス 48g-CO₂/人キロ、鉄道 18g-CO₂/人キロ²⁾よりも多いため、CO₂排出量を減らすという目的のためには、自動車の利用を減らす、すなわち自動車から公共交通へのモーダルシフトが有効であると考ええる。

ただし、高齢化社会を迎えるにあたりドアツードアで目的地まで輸送できるメリットは重要になってくると考えられるし、地方においては、公共交通の輸送密度が低いために、自動車の方がむしろ輸送単位あたりの CO₂排出量が少ないという実態もある。

そのため、地方の都市部などある程度の需要が見込める地域においては、その需要に見合った公共交通システムを導入し、過疎地域においては自動車主体とするなどの、より細やかな計画が必要となってくる。

(2) LRT (Light Rail Transit)

自動車からのモーダルシフト先となる公共交通として、鉄道やバスなど様々な交通システムが考えられるが、その中でも注目されているのが LRT である。LRT とは、併用軌道を用いたバリアフリーな都市交通システムを軸としたまちづくりにより都市景観や環境等を向上させるもので、ストラスブル (フランス)、ボルドー (フランス)、カールスルーエ (ドイツ) など、ヨーロッパを中心に導入が進んでいる。

鉄道とバスの中間程度の輸送力を持ち、必要に応じて専用軌道を取り入れることによって速達性と定時性を向上できることから、地方都市中心市街地のほか郊外部に至る都市圏内の輸送等に適していると考えられる。

しかしながら、日本国内においては、道路と併用する



図3 富山ライトレール

公共交通に関する風当たりが強い。路面電車は、1920年代に建設が進み、都市の重要な交通手段として機能していたが、1960年代の高度成長時代に自動車の所有率が増加すると、モータリゼーションの流れに押され路面電車は渋滞の元凶だとされ、1970年代末にかけて各地で廃止されたからである。そのため、各地で導入の検討がされているものの、過去に一度廃止したものであること、飽和している道路交通への影響が懸念されるとして、再度導入が難しい現状がある。LRT の導入の事例としては、2006年開業した富山ライトレール(図3)、2009年に富山地铁における一部区間の LRT 化があげられるにすぎない。

3. 都市交通シミュレータ

以上のように、温室効果ガスの排出量削減の観点から、公共交通システムへのモーダルシフトは急務であるが、効果のある公共交通システムの構築には、既存の自動車交通との協調が重要であり、その地域毎の特性を考慮する必要がある。また、一定の需要が見込める地域においては、鉄道などに比べると安価に構築できる LRT 等の公共交通システムが有効であると考えられる。

そこで我々は、地域の特性を考慮した公共交通システ

表1 都市交通シミュレータの概要

	機能	設定するパラメータ
道路	交差点をノードとするネットワークを構成	シミュレーション対象領域
信号	信号に従った自動車交通の再現	サイクル長 オフセット 青矢現示にも対応
自動車	1台ずつルートを想定して走行 前方を走る自動車の速度に応じた走行 同方向多車線にも対応 旅行時間・燃費・環境負荷等の計算	発生点から消滅点までの交通OD表 車間距離 車線数 大型・小型車に分けてパラメータを設定
他交通	LRTと同時走行 バスの同時走行	路線及び車両パラメータ 路線、時刻表、バス停

項目	値
ノード1ID	12545
ノード2ID	12543
リンク長(m)	81
規制速度	40km/h
車線数	2車線
道路幅員	5.5m~13m
自動車通行不可	FALSE
使用禁止	FALSE
一方通行	FALSE
高速道路	FALSE
有料道路	FALSE
道路幅員 3m 未...	FALSE

図4 道路リンクのパラメータ例

ム導入を検討するため、交通シミュレータにより、その地域毎の評価を行うことが重要と考え、地図情報をベースとする「都市交通シミュレータ」を開発してきた。

(1) 都市交通シミュレータの概要

開発した都市交通シミュレータの概要を表1に示す。自動車に関しては信号をノード、道路をリンクとするネットワーク上を、あらかじめ目的地を持った自動車が一台ずつ信号の現示に従って、予め定められた加減速度で走行し、走行速度からエネルギー消費量や二酸化炭素排出量を算出できる。これに加え、公共交通であるバスも、バス路線を定義することで、同様に走行すると共に、バス停ごとに乗降人数に応じた時間、停車し、自動車交通と衝突することなく、自動車と同じレーンを走行が可能である。

(2) 道路ネットワーク

地図データには市販の住宅地図と地形の勾配を認識する為に国土地理院の 50m メッシュ情報（もしくは、5m メッシュ情報）、道路ネットワーク地図データ(DRM)をあわせたものを用いた。

リンクごとに、両端ノード ID、リンク長、規制速度、車線数、道路幅員のデータ、走行不可、使用禁止、一方通行、高速道路、有料道路等を設定することができる(図4)。

(3) 信号機

信号機については、ネットワーク上の任意のノードに設定することができる(図5)。一交差点にある複数の信号機のサイクル及びオフセット、PTPS等を設定する他、近くの交差点と連動した制御も行うことができる。

(4) LRT 走行システム

LRT等の公共交通システムについては、路線、車両、信号のパラメータを入力する。上記道路ネットワーク上に、電停の位置及びルートを定義するとともに、車線の占有量を定義する。また、車両性能(加減速度、最高速度等)やPTPS(Public Transportation Priority System)も個別に定義することにより、LRTの走行車両LRV(Light Rail Vehicle)は始発電停の時刻表に従い発生し、定義された車両性能と、信号現示等の周辺状況に応じて走行する。その際、駅に乗り降りする乗客の人数をOD表として与えることで、乗降人数に応じた駅停車時間を加味して走行する。

なお、本機能の車両は鉄軌道系のLRVに限らず、ゴムタイヤ車両等を用いることで、専用軌道のBRT(Bus Rapid Transit)としての計算も可能である。

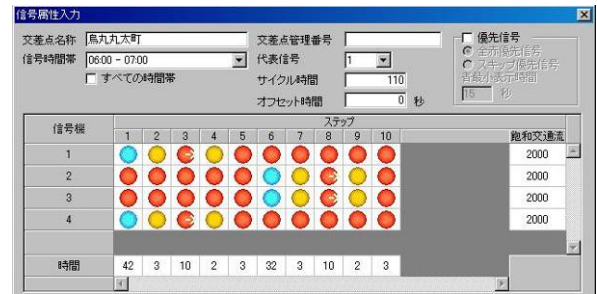


図5 信号現示

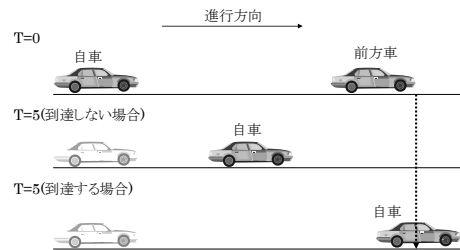


図6 追従条件

(5) 自動車走行システム

自動車については、LRT等の公共交通システムと異なり、車両の発生点、消滅点(目的地)に対し、複数のルートが考えられる。そのため、地図ネットワーク上を1台ずつが目的地を持ち、前方の車両や信号に影響されながら走行する。そのためには、シミュレーションを開始した直後の1台目の車両以外は、前方を走行する自動車に追従するような走行パターンが必要である。

a) 1台目に発生する車両

各セントロイドノードの1台目の自動車については、他の自動車の影響は受けないので、初期速度は式(1)とした。以降は走っている道路前方の信号に従って走行するものとする。

$$V_1 = V_{lim} \times k \quad (1)$$

V_1 :初期速度(m/s)

V_{lim} :リンク属性項目の規制速度(m/s)

k :規制速度への対応係数

ここで、規制速度への対応係数 k とは、自動車の速度を補正するもので、規制速度を超えて走行する現状の自動車交通に即して補正係数として使用するものである。

b) 追従式の適応条件

前方に自動車が行っている場合、前方の自動車との相対速度で走行した場合、5秒以内(設定可)に自車が前方車の位置に到達する場合、追従式を適用する(図6)³⁾。

c) 追従式を適用しない場合の走行
 前述の条件に従い、前方車の影響なく走行できる場合の走行式は式(2)とした。車両は車両属性に従った最大加速度値で加速する。

$$V_t = V_{t-ts} + \alpha_{mas} \times t_s / 1000 \quad (2)$$

Vt:時刻 t の速度(m/s)
 ts:サンプリング時間(ms)
 Vt-ts:ts 秒前の速度(m/s)
 αmax:最大加速度(m/s²)

d) 追従式を適用する場合の走行
 前方車の影響を受ける場合、式(3)を利用して算出した加減速度で加減速を行う。

$$\alpha = \lambda \frac{V_{i+1}^m(t)}{\{X_i(t-\tau) - X_{i+1}(t-\tau)\}^l} (V_i(t-\tau) - V_{i+1}(t-\tau)) \quad (3)$$

α:加減速度(m/s²)
 i:l 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)
 λ:定数
 l,m:速度-密度曲線の特性を表す係数
 τ:タイムステップ(s)

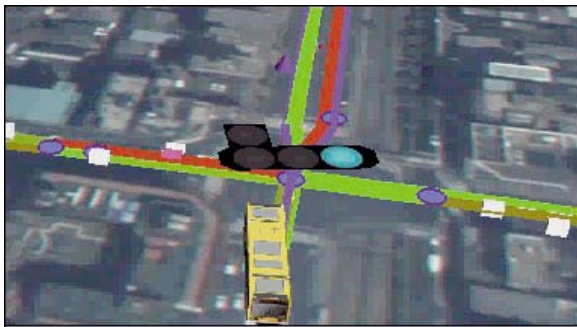


図7 シミュレーション画面例

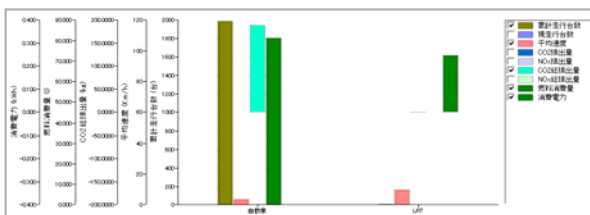


図8 シミュレーション結果の集計画面例

ここで、定数λは運転者の前方車からの刺激に反応する強さを表す。

e)車両の停車

車両は、前方信号が赤の場合、設定した最大減速度で減速を行う(式(4))。赤信号での停車の場合、現在走行中の位置から、停車位置で停車するのに「減速すれば停車できる」の判定を行った場合に減速を開始することとした。

$$V_t = V_{t-ts} + \beta_{mas} \times t_s / 1000 \quad (4)$$

Vt:時刻 t の速度(m/s)
 ts:サンプリング時間(ms)
 Vt-ts:ts 秒前の速度(m/s)
 βmax:最大減速度(m/s²)

(6) バス走行システム

バスは、上記ネットワーク上に、信号データの他に、バス停及びバスの乗降人数を考慮した走行を行う。道路上での走行パターンは自動車と同じアルゴリズムを用いる。バス停については、LRT と同様に、バス停ごとの固定停車時間と乗降 OD 表に従った平均乗降時間を足したものをを用いる。

(7) 結果の出力

結果には、交通システム別の走行台数、総走行距離、平均走行時間、最大・最小走行時間、平均速度、CO₂、NO_x の排出量を算出する。また、シミュレーション結果をアニメーション表示することができ(図7)、その時間軸に従って、その時刻に走っている車両だけの走行台数、平均速度、CO₂、NO_x の排出量をグラフ表示することができる(図8)。

4. 都市交通シミュレータの計算例

(1)京都市でのケーススタディ

都市交通シミュレータの計算例として、京都市をモデルにシミュレーションを行った。シミュレーション範囲を図9に、条件を表2に示す。

南は京都駅、西は嵐山までをシミュレーション範囲として、LRT 路線を4路線(図中オレンジの線)導入する場合を検討した。路線の設定には、京都市の路線案⁴⁾、LRV 車両は、広島電鉄グリーンムーバーを参考とした。

バス、鉄道は主要路線の路線、時刻表のデータをもとに、対象エリア内で発生、走行、消滅する。ただし、LRT やバスが人の乗降により遅れを生じる場合には、時刻表ではなく周囲の状況や性能に応じて走行させることとした。

シミュレーションは、もっとも道路交通が混雑するピ



図9 シミュレーション範囲

表2 シミュレーション条件

路線	4路線（今出川線（出町柳－北野白梅町）、堀川線（出町柳－京都駅、北野白梅町－京都駅）、河原町線（京都駅－京都市役所前）、四条線（祇園－四条大宮））
交通OD	交通センサスを元に予測したデータ（京都大学 中川研究室の研究データによる ⁹⁾ ）
交通信号	LRTに対してはPTPSを適用
計算時間	2h（ラッシュ時間帯を想定）

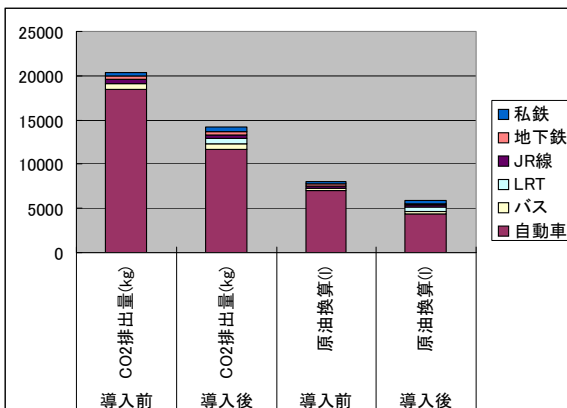


図10 シミュレーション結果

ーク時間帯 2 時間について行い、CO₂排出量、エネルギー消費量を算出した。その結果を図 10 に示す。本試算で用いた 4 路線を導入し、それまで自動車で移動していた人が LRT で移動することにより、自動車の総台数が減少した結果、自動車の総走行距離（1 台ごとの走行距離を年間分積算したもの）が約 9700 万 km/年から約 5800 万 km/年となった。そのため、年間約 2 万トンの CO₂を削減できるという計算結果が得られた。

(2) 沖縄県でのケーススタディ

a) 沖縄について

沖縄本島は、日本の中でも特に自動車の依存度が高く、その依存度は首都圏と同等レベルである⁹⁾。これは、人口集積地域に軌道系交通機関の導入がなかったために、

過度の自動車依存社会が生まれたためと考えられる。また、走行できる道路は限られており、県道は慢性的に渋滞している。渋滞下にあつては、路線バスへの乗り換え意向も低く、モーダルシフトが進む可能性は低い現状がある。このような状況の中で、車社会への限界と、高齢化による運転スキルへの不安から、公共交通への期待が高まりつつある。

b) 軌道系交通の提案

そこで、このような地理的状況下において、新しく軌道系交通を敷設することを検討する。県道沿いに主要な公共交通施設・商業施設等がすでにあることから、既存の道路空間を有効利用することとする。

都市内（那覇市内）に関していえば、県内の主要施設が集中し、観光地でもあることから慢性的に人が多くにぎわっているため、路面電車のような低速で電停間の距離を近くし、高頻度に運行することが望ましい。しかし、少し郊外に出ると、県道を多くの自動車が走行しており、路面電車のような低速な車両では、自動車交通との旅行時間に違いがありすぎ、利用者にとって便利なシステムとはならない。

そこで、都市内は路面電車のように走行し、郊外に出るといわゆる鉄道と同じように走行させるシステムであれば、自動車と同等の速達性を確保した上で自動車よりも定時性を上げることができると考える。

c) シミュレーションの実施

以上をふまえ、シミュレータを用いてケーススタディ



図11 シミュレーション範囲

表3 シミュレーション条件

路線	旭橋－宜野湾市
交通OD	交通センサスを利用
交通信号	LRTに対してはPTPSを適用
計算時間	1h（ラッシュ時間帯を想定）

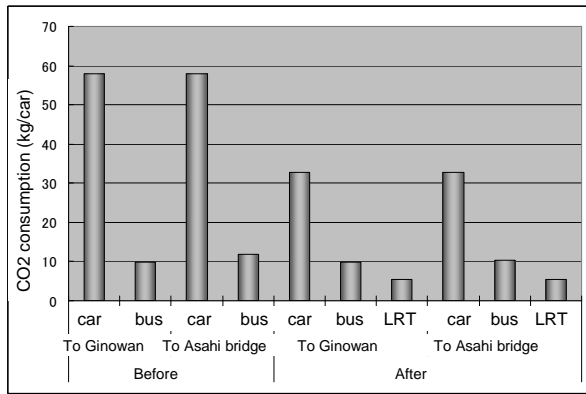


図 12 シミュレーション結果 (二酸化炭素排出量)

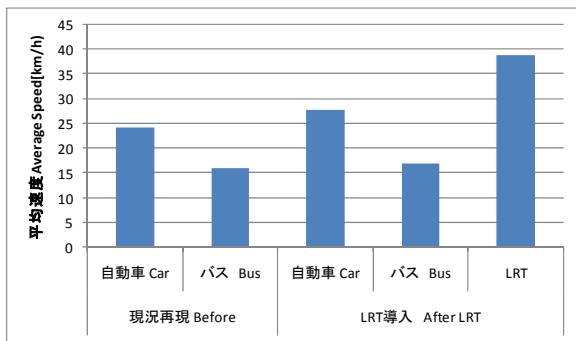


図 13 シミュレーション結果(平均速度)

を行った。ケーススタディの範囲を図 11 に示す。那覇市内のモノレールの駅との結節を考え、モノレールの旭橋駅から、片側 3 車線以上の広い道路の中心部分に軌道を敷く。那覇市内は路面電車として、電停間隔を 500m 以下とし、郊外は 2~3km とする。またシミュレーション条件を表 3 に示す。

シミュレーション結果を図 12,13 に示す。図 12 は、現状と LRT を導入した場合の、1 時間のシミュレーションでの CO₂ 排出量である。1 時間に同じ人数のトリップがある場合、自動車に比べ、そもそも CO₂ 排出量が少なく、かつ定員の多い公共交通に多くの人に乗った結果、全体の CO₂ 排出量が少なくなることがわかる。

また、図 13 では、平均速度を比較した。現状では、自動車もバスも 20km/h 前後の速度であった。しかし今回、郊外では高速 (70km/h 程度) 走行をする LRT を導入することで、LRT は平均速度が約 35km/h となっただけでなく、乗り換えによる自動車走行台数の減少により、道路交通の渋滞も減少したために平均速度が向上する結果となった。

従って、既存の自動車交通に路面電車を導入すると、却って渋滞が伸びるという懸念に対しては、LRT 化さ

せることにより、各交通機関とも平均速度が大きくなるのが定量的に示すことができた。ただし、LRT 導入により、自動車から LRT に転換する割合については、今後とも精査をする必要がある。現在は、AHP により、地域特性を考慮した計算を行っている。

5. おわりに

低炭素社会に向けて、交通分野の取り組みとして、自動車から公共交通システムへのモーダルシフトは不可欠である。自動車の CO₂ 排出量の割合は大きいものの、輸送量の見込めない地域によっては、既存の公共交通システムを導入すると、逆に CO₂ 負荷が大きくなる可能性もある。そのような中、交通システムは、バス、LRT、鉄道など様々な選択肢があり、その地域によって合ったものを導入することが望ましい。

そこで我々は、都市交通シミュレータを開発し、LRT に限らずあらゆる都市交通システム、パークアンドライド、優先信号等の施策を模擬できる環境を整えた。

今回検討した都市では、都市内は路面電車として、郊外を鉄道として走行する LRT システムを提案し、シミュレーションを実施した結果、導入により、現在の自動車交通を阻害することなく、利用者の速達性、定時性ともに向上する可能性があることが示された。

今後は、本ツールのさらなる精度向上を目指すと共に、これを用いて他の交通システムや他の地域についても積極的に公共交通導入の提案していく他、都市計画や、建設費等を合わせて検討することで、より現実的なモーダルシフト案を提案していきたい。

参考文献

- 1) 温室効果ガスインベントリオフィス, "日本の温室効果ガス排出量データ (1990~2009 年度) 確定値", (2011), Greenhouse Gas Inventory Office of Japan: "The GHGsEmissions Data of Japan(FY 1990-2009)",(2011) <http://www-jio.nies.go.jp>
- 2) 運輸部門における二酸化炭素排出量, 国土交通省 http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- 3) 飯田恭敬他,交通工学,1992
- 4) 京都市, 新しい公共交通システム調査報告書 <http://www.city.kyoto.jp/tokei/trafficpolicy/lrt/index.html>
- 5) NEDO 成果報告書, "L R V (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", (2007)
- 6) 渋滞損失 3D マップ, 国土交通省 HP <http://www.mlit.go.jp>