

27. 東京都市圏交通戦略モデルの開発と環境負荷抑制効果分析への適用

Development of Tokyo Metropolitan Transportation Strategy Model and Its Applications for Environmental Impact Reduction Analysis

原田昇*・古谷知之**・円山琢也*

Notobu HARATA, Tomoyuki FURUTANI, Takuya MARUYAMA

ABSTRACT: This study aims to (1) develop a transportation strategy model to analyze environmental impacts by transportation demand management (TDM) schemes, (2) to apply the proposed model system in Tokyo Metropolitan Area and (3) to calculate environmental impact reduction effects by land use and TDM measures. The results of scenario analysis indicate that job-house neighboring, pricing for vehicles in the core area and introduction of electric vehicles might be effective to reduce environmental impacts caused by transportation in Tokyo Metropolitan Area.

KEYWORDS: Transportation Strategy Model, Transportation Demand Management, CO2, Trip Energy Conservation, Tokyo Metropolitan Area

1 研究の背景と目的

近年、増大する自動車利用による地球温暖化ガスや地域的大気汚染物質、エネルギー消費の増加が、とりわけ大都市において深刻な問題となっている。この問題を解決するため、持続可能な交通体系の構築が、より一層重要になっている¹⁾。この目的に向けて、公共交通指向型開発のような高密・複合型の土地利用誘導や、公共交通の利便性・効率性改善による自動車から公共交通へのモーダルシフト、一人乗り乗用車利用抑制などといった政策が提案されてきた²⁾。

わが国の大都市圏を対象として、中長期的な土地利用施策が交通環境負荷改善に与える効果を分析した事例として、例えば森本他³⁾は、集計型の発生・集中、分布、分担モデルを用いて業務の都心集中や電気自動車導入等が交通エネルギー消費量抑制に有効であることを示した。北村他⁴⁾は、京阪神都市圏を対象に世帯の交通エネルギー消費量や自動車保有台数等を説明する構造方程式モデルを推定し、長距離通勤を削減するような職住近接型通勤構造への誘導が、交通エネルギー消費量抑制に有効であることを指摘した。他方、杉田他⁵⁾は、整備・維持費用を考慮した観点から、都市構造改善には慎重な立場をとっている。また交通施策効果を扱った例として、Ohta⁶⁾が東京都市圏を対象として、ロードプライシング導入によるCO2削減効果が期待される一方で、コードン周辺での一般道で逆に所要時間の増加という悪影響が予想されることを、シミュレーション分析を通じて指摘した研究などが挙げられる。

ところで、持続可能な都市交通戦略のあり方を検討する上で、複数の施策代替案を比較し、望ましい組み

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科, University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences

** 東京大学大学院工学系研究科, University of Tokyo, Graduate School of Engineering, 7-3-1, Bunkyo, Hongo, Tokyo, 113-8656

合わせを見つけ出すことが重要である。既存研究で用いられてきた手法では、都市構造改変を分析する上で、地価や世帯の住み替え流動性を十分に考慮していない。また交通需要予測に旧来の四段階推定法を用いていることによる行動論的基盤の欠如等が課題である。土地利用・交通施策の有効性を議論する上で、将来の環境負荷予測値をベースとした削減量（率）を参考にするだけではなく、環境負荷量を「最小化」する状態からの乖離度（率）を参考にすることにより、「最適な」都市の状態への「達成度」を評価することも必要であると考えられる。

本研究では、こうした背景を踏まえて、環境負荷抑制の観点から東京都市圏での土地利用・交通政策の有効性を定量的・実証的に分析・評価することを目的に、1998年東京都市圏パーソントリップ調査結果を基に、交通戦略モデルを開発し、土地利用・交通シナリオ分析に適用し、環境負荷量の抑制効果を算出した。尚、本研究では、交通エネルギー消費量、 台^{km} 、 CO_2 で環境負荷を代替できると仮定して分析を進めた。

第2章では東京都市圏交通戦略モデルの開発と推定結果を、第3章では土地利用・交通シナリオ分析の適用結果を示し、第4章に結論と今後の課題を示す。

2 東京都市圏交通戦略モデルの開発

2.1 交通戦略モデルの開発方針

中長期的な土地利用・交通政策と短期的な交通政策との分析が可能であり、特に土地利用政策の分析においては環境負荷を最小化するような「最適な」都市構造（通勤流動）の状態との比較分析が必要であるとの視点から、居住地選択モデル、職住パターン再配置モデル、トリップ目的別発生・分布・分担・配分統合モデル、及び環境負荷量推計モデルの各

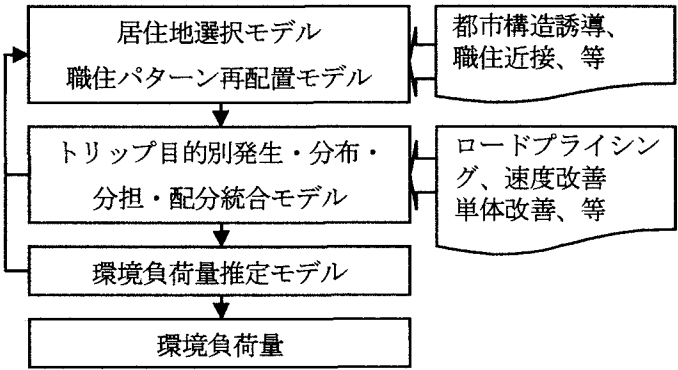


図1. 東京都市圏交通戦略モデルの分析フロー

モジュールを統合したモデルシステムを提案した（図1）。このうち、職住パターン再配置モデルは、通勤活動量分布（就業人口分布と従業員人口分布）を所与として通勤交通エネルギー消費量最小化を目的関数とした数理計画モデルであり、居住地選択モデルとトリップ目的別発生・分布・分担・配分統合モデルは確率的利用者均衡概念に基づき行動主体の効用最大化を仮定した行動モデルである。企業立地行動は、既存研究等でも十分に明らかにされていないため、本研究では企業立地量（雇用数）分布を所与と仮定した。

各サブモジュールの詳細は2.3に譲るが、各サブモジュールを適用する段階で各々の最適解を計算し、モデルシステム全体の均衡解を得るために、下位のサブモジュールのアウトプット（手段別所要時間、環境負荷量等）を上位のサブモジュールのインプットにするようなフィードバックループを持たせている。また、分析に用いたデータベースはGISとリンクされており、分析結果を容易に地図上で可視化できるようにした。本稿では、図1に示したサブモジュールのうち、既に開発済みであるものについて適用例を示す。

2.2 分析対象

本研究での分析対象としたのは、1998年東京都市圏PT調査で定義された東京都市圏であり、東京都・神奈川県・千葉県・埼玉県・茨城県の一部から構成される。トリップ目的は通勤・通学・私事・業務・帰宅の5区分とし、配分モデルのクラス階層はこれらに道路交通センサスの貨物を加えた6区分を対象とした。代表交通手段として居住地選択モデルでは鉄道・自動車・バス・二輪および徒歩の4区分を、配分モデルでは鉄道と自動車の2手段のみを考慮した。世帯あたりの通勤交通エネルギー消費量や住み替えの流動性が世帯区分に応じて異なることから、単身・男女対・男女対+子供・その他の四世帯区分を考慮した。

日本の大都市、特に三大都市圏では、既に発達した鉄道網をベースとした高密・複合型の都市が展開され

ており、鉄道による分担率やトリップ長と比較して自動車の分担率やトリップ長が小さく、都市構造の改善によるエネルギー消費削減に慎重な立場をとる研究者も少ない⁷⁾。しかし、帰宅を含めれば通勤や私事目的での自動車トリップ長(台[※])は約2倍となり、通勤自動車分担率が約30%程度である東京都市圏においても自動車依存は無視できないと考えられる(図2)。

2.3 サブモジュールの概要

(A) 居住地選択モデル⁸⁾

居住地選択モデルでは、従業人口分布を所与として、地価と通勤アクセシビリティを内生化した確率的利用者均衡モデルを開発した。世帯の居住地選択効用関数は、住宅供給量、地価、通勤アクセシビリティ等で説明される簡便な線形式を仮定している。地価推定モデルは就業人口密度、従業人口密度等を説明変数にしており、各ゾーンの従業人口数を所与とした場合、就業人口数のみが未知変数となり、これを確率的利用者均衡により均衡解として求めている。また、通勤アクセシビリティは通勤手段選択モデルの合成効用で定義され、居住地選択と通勤手段選択のネスティッド・ロジットモデルとして定式化されている点に、本モデルの特徴がある。

(B) 職住パターン再配置モデル⁸⁾

職住パターン再配置モデルは、職住近接による環境負荷量(通勤交通エネルギー消費量)抑制がどの程度達成可能であるかを分析することを目的としており、就業人口分布と従業人口分布とを所与として、通勤交通エネルギー消費量を最小化するような数理計画モデルとして定式化した。このモデルの算出結果は、通勤交通エネルギー消費量を最小化するというルールの下で職住近接が達成できた状態であると解釈できる。

ここで、通勤交通エネルギー消費量はゾーン間の通勤者一人あたり通勤交通エネルギー消費量にゾーン間通勤者数を乗じて求めており、ゾーン間の通勤者一人あたり通勤交通エネルギー消費量は2.3(D)で求めた通勤交通エネルギー消費量を現状のゾーン間通勤者数で割った値である。職住近接などによるゾーン間通勤者数の変化に伴う、ゾーン間の通勤者一人あたり通勤交通エネルギー消費量の原単位の変化は、図1のフィードバックループにより再計算している。環境負荷量の指標として交通エネルギー消費量ではなくCO₂やNO_x等に置き換えることが可能であるが、この点は今後の課題としたい。

(C) トリップ目的別発生・分布・分担・配分統合モデル⁹⁾

ゾーン r に滞在する代表的個人が、ある時間帯 t においてトリップを行うか否か、トリップを行う場合の利用交通手段、目的地、目的地までの経路の選択行動を考えた。交通手段 m を利用して目的地ゾーン s へネットワーク上の経路 k を利用して移動する行動を図3のようなNested Logit型のツリー構造で記述できると仮定する。但し、利用者は最初に手段を選択して目的地を選ぶという仮定がなされているわけではなく、モデルの行動仮説は、あくまで手段と目的地(さらには、トリップの有無、経路)を同時に決定しているというものである。誘発交通が私事・業務目的で起こりうると思われることから、通勤・通学・帰宅に関してはトリップ発生を外生的に与え、私事・業務のみトリップ発生モデルを考えた。

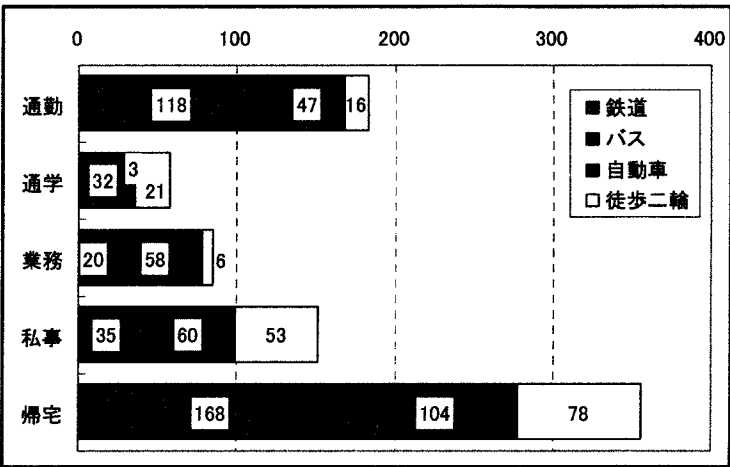


図2. 目的別手段別人km(東京都市圏、×10⁶人km)
出典:1998年東京PT調査より著者作成

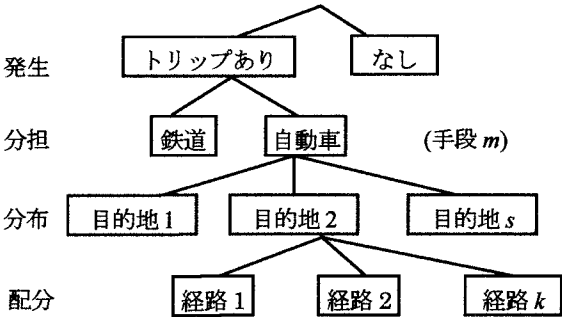


図3. Nested Logit 型の選択構造

既存研究では鉄道の混雑が考慮されていなかったが、鉄道配分モデルの均衡モデルへの改良を行った。時間帯の幅は1時間とし、発時刻毎に集計したデータを利用する。これは、鉄道の混雑現象を現実味のある形で表現するのに必要な時間幅と判断したためであるが、東京都市圏のような広域な対象地域では、この時間幅では時間帯内に目的地に到着できない残留交通の影響が大きいものとなっており、モデルの改良を含めて今後の課題とする。

(D) 環境負荷量（交通エネルギー消費量、CO₂）推計モデル

交通エネルギー消費量は、手段別トリップ長に手段別交通エネルギー消費量原単位を掛けたものの総和として求める。また CO₂ の排出は地理的な拡散を考えず、自動車走行速度に対する排出原単位を乗じて排出総量のみを計算した。

2.4 交通戦略モデルの推定

(A) 入力データと推定手順

PT 手段別目的別 OD 表は 1998 年東京 PT 調査を利用し、貨物車の OD 表は平成 6 年度道路交通センサスを利用した。地価モデルの推定には 1998 年公示地価のポイントデータ（住宅地）をゾーン毎に平均した地価と容積率、及び 1998 年建築統計年報の新設住宅着工戸数を用いた。配分モデルに用いたネットワーク要素数は表 1 に示したとおりである。交通エネルギー消費量の算出に用いた手段別エネルギー消費原単位は、日本エネルギー経済研究所（2000）の値を用いた（表 2）。尚、既存研究で用いられたエネルギー源単位を参考値として示す。但し鉄道・バス・自動車以外の手段はエネルギー消費量を無視できると考え、これらの手段の交通エネルギー消費量は 0 とした。居住地選択モデル及びトリップ目的別発生・分布・分担モデルは集計型ロジットモデルを用いて推定した。

表1. ネットワーク要素数

	ノード数	リンク数	ダミーリンク数
自動車	10,692	22,911	1,324
鉄道	2,177	4,620	3,426

表2. 交通手段別エネルギー原単位 (kcal/人 km)

出典	鉄道	自動車	バス
日本エネルギー経済研究所（2000）	50	575	160
北村他（1999） ⁴⁾	101	602	179
森本他（1996） ³⁾	47	593	136

(B) サブモジュールの推定結果

各サブモジュールのパラメータ推計結果の詳細は、筆者らの既発表文献^{8), 9), 10)}に譲り、ここではモデルの推定精度のみを簡略に述べることにする。

世帯区分別居住地選択モデルを重み付け最小二乗法により推定した結果、R²は0.89～0.98程度であり、地価モデルの R² 値も 0.98 と統計的に有意な結果が得られた。従業員数を所与として逐次平均法により就業人口数の確率的利用者均衡解を計算した結果、世帯区分別の 1998 年実績値と推計結果との原点を通る単回帰モデルの R² 値は 0.93～0.97 と統計的に有意な結果が示された。地価についても 1998 年実績値と逐次平均法による推計値との原点を通る単回帰モデルの R² 値が 0.97 となり、単純なモデル式の仮定でも統計的に推定精度が高いモデルが得られたといえる。他方、トリップ目的別発生・分布・分担・配分統合モデルについては、部分線形化法と逐次平均法による収束状況を比較した結果、部分線形化法の方が逐次平均法よりも均衡解に近い結果が得られていると判断されたため、部分線形化法により計算された値を用いることにした。実績値と推計値の単回帰式を推定した場合の相関係数と単回帰係数、及び RMSE を表 3 に示す。

表3. 発生・分布・分担・配分モデルの現状再現性指標

指標	相関係数	回帰係数	RMSE
自動車リンク交通量	0.75	0.90	14,313 (台)
鉄道リンク交通量	0.94	1.16	139,263 (人)
自動車 OD 所要時間	0.65	0.84	20.50 (分)
自動車 OD 表	0.86	0.56	1,498 (台)
鉄道 OD 表	0.88	0.84	1,326 (人)

注) 自動車リンク交通量は、都市圏内 1,498 箇所昼間 12 時間上下合計交通量(H09 年度道路交通センサス)、鉄道リンク交通量は、1,050 箇所駅間通過人員日単位上下合計値(H07 年度大都市交通センサス)、OD 所要時間は時間帯別平均値(H06 年度道路交通センサス・マスターから異常値を除いた値)、手段別 OD 表は 149 ゾーン間日合計値との比較値

各モジュールとも、モデル推定に用いたパラメータ数を絞り込んだことから簡便なモデル構造になっているが、政策分析を行う上で遜色ないモデル推定結果が得られたと思われる。

3 土地利用・交通シナリオ分析の適用事例

本章では、第2章で提案した交通戦略モデルを、交通に起因する環境負荷抑制を目的とした土地利用・交通戦略の効果分析に適用することにより、提案したモデルシステムの有効性を示すことにする。ここで取り上げた施策は、都市構造の都心高密度・コンパクト化と職住近接、都心部流入車両へのコードンプライシング、及び電気自動車の導入である。

3.1 通勤構造誘導による交通エネルギー消費量削減効果分析

都心への高密度且つコンパクト（職住近接的）な通勤構造誘導による交通エネルギー消費削減への有効性を示すため、以下の手順で分析を行った。

まず、1998年の実績値を現状ケースとした。次に、1988年からの10年間の従業人口分散トレンドが将来10年間も継続すると仮定して、将来年次（2008年）の従業人口分布を算出し、それに基づいて居住地選択モデルを適用して就業人口分布を算出したケースを将来年次ケースとした。最後に、現状ケース、将来年次ケース、及び将来年次ケースで郊外部の従業人口の10%が都心4区に集中すると仮定したケース＝都心集中ケースとした。

試算結果の一例を表4に示す。現状ケースと比較して将来年次ケースの交通エネルギー消費量が増加し、都心集中ケースは将来年次ケースよりも交通エネルギー消費量が少ないものの現状ケースより増加することが示された。次に、現状ケース、将来年次ケース、都心集中ケースの各ケースでの就業人口・従業人口分布の基で、全就業世帯、単身世帯と男女対世帯の就業人口を対象に職住パターン再配置モデルを適用した。全就業人口の約10%に相当する単身世帯と男女対世帯の就業人口の職住パターンを再配置した結果、約10%程度の通勤交通エネルギー消費量の削減効果が示された。全就業世帯の職住近接化を図るよりも、住み替え流動性の高い世帯をターゲットに職住近接を図ることにより、より効率的に交通エネルギー消費量の削減が見込まれることを示す例であると思われる。

3.2 都心部流入車両へのコードンプライシングによる自動車台*削減効果分析¹⁰⁾

東京都では、環境負荷抑制の観点から都心部流入車両に対する課金を検討しており、ドライバーの経路迂回と手段変更により道路混雑とCO₂削減効果が期待される。提案したモデルシステムでは、トリップ発生・分布・分担・配分モデルで手段分担を明示的に考慮しており、課金の結果、自動車から鉄道へのモーダルシフトによる台*削減効果を把握できるのが特徴である。

都で検討しているコードンのうち、最も地理的範囲が広い環状7号線と隅田川を結ぶコードンへの流入車両に対して一回の流入に一律700円を課金したと想定した場合、全体で約1.6%程度の自動車台*削減となった（図5）。手段分担を考慮しない既存分析手法を用いた場合の台*削減率が約0.5%程度であることから、従来の手法では台*削減率を過小評価していることが示された。

3.3 電気自動車の導入によるCO₂削減効果分析

首都圏のような広範囲の地域を対象に電気自動車の導入効果を検討する場合、長距離トリップに対して電気自動車への転換を図るのは非現実的だと考え、本研究ではトリップ長が30km以下及び50km以下の自動車が、それぞれ10%、20%、30%電気自動車に転換したと想定してCO₂を算出した。その結果、トリップ長30km以下の自動車を10%電気自動車に転換した場合でも、約5%のCO₂削減効果が示された（表5）。

表4. 通勤構造誘導シナリオ分析の結果

通勤構造	職住パターン 再配置対象世帯	再配置対象就業人口(×10 ³ 人)	通勤交通エネルギー消費量 (×10 ⁶ kcal)
現状	なし	12677.60	33474.29
	全就業人口	12677.60	19111.69
	単身+男女対世帯	2863.76	30440.04
将来	なし	-	38170.70
集中	なし	190.60	37164.46
	全就業人口	12868.20	18557.21
	単身+男女対世帯	3054.36	33268.82

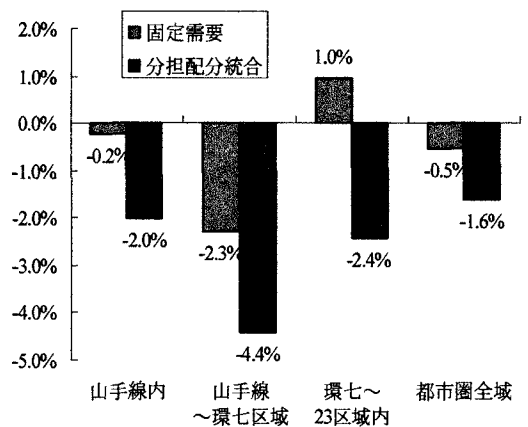


図5. ロードプライシングによる台数削減効果

表5. 電気自動車の導入効果

シナリオ	ODペアの割合		電気自動車 /全乗用車	CO2 排出量(t)	削減量(t)	削減率
	トリップ長<30km	トリップ長<50km				
現状				13136.6252		
A	10%	-	4.79%	12425.3052	-711.31999	-5.4%
B	20%	-	9.59%	11713.5175	-1423.1077	-10.8%
C	30%	-	14.38%	10998.8172	-2137.808	-16.3%
D	-	10%	6.93%	12125.2991	-1011.3261	-7.7%
E	-	20%	13.86%	11117.2194	-2019.4058	-15.4%
F	-	30%	20.79%	10103.9258	-3032.6993	-23.1%

4 結論と今後の課題

本研究では、持続可能な都市交通戦略を検討するための交通戦略モデルを開発し、東京都市圏に適用した。提案したモデルを、職住近接及び雇用の都心集中政策やロードプライシング、電気自動車の導入といった政策シナリオに適用し、これらの施策による環境負荷抑制効果を、定量的且つ実証的に示せた。

長期的な都市構造改変の効果を検討する上で、環境負荷のみならず、高齢者のモビリティ維持にも着目する必要がある。また、交通需要予測の精緻化に向けて、時間帯の相互干渉の考慮や出発時刻選択の内生化などを検討すべきである。更に、通勤トリップのみならず、全目的トリップおよび貨物車を含めた、環境負荷最小化を目的関数とした最適化モデルの開発も可能である。今後、これらの点を課題としたい。

謝辞：本研究は、東京大学・MIT・ETH・Charmers University の共同研究プロジェクトである Alliance for Global Sustainability (AGS) の Tokyo Green-House-Gas Half Project (THP) の一部として行われたものである。研究を進める上で、東京大学太田勝敏教授及び THP メンバーの方々から、貴重なご助言とご協力を頂いた。また東京都市圏交通計画協議会より平成 10 年度東京都市圏 PT 調査の使用許可を得た。ここに謝意を表します。

参考文献：

- 1) 太田勝敏 (2001) 持続可能な都市交通に向けて、運輸と経済, 第 61 巻, 第 1 号, pp.24-32.
- 2) 山中英生, 小谷通泰, 新田保次 (2000) まちづくりのための交通戦略, 学芸出版社.
- 3) 森本章倫, 小美野智紀, 品川純一, 森田哲夫 (1996) 東京都市圏における PT データを用いた輸送エネルギー推計と都市構造に関する実証的研究, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.361-368.
- 4) 北村隆一, 山本俊行, 神尾亮 (1999) 高密度都市圏での交通エネルギー消費削減に向けた土地利用政策の有効性, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp.171-180.
- 5) 杉田浩, 関野達也, 谷下雅義, 鹿島茂 (2000) 交通エネルギー消費量、交通費用、都市整備・維持費用からの都心居住と郊外居住の比較分析, 第 35 回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.247-252.
- 6) Ohta, K. (2001) The Road Pricing Proposal for Tokyo, ITS World Congress, CD-ROM.
- 7) 松岡譲, 森田恒幸, 有村俊秀：都市構造及び支配地と地球温暖化, 環境研究, No.86, pp.51-65, 1992.
- 8) Furutani, T., N. Harata and K. Ohta (2002) A Study on Commuting Trip Energy Consumption Reduction by Job-Housing Reallocation in Tokyo Metropolitan Area, The Proceedings of International Symposium on City Planning (in printing).
- 9) 円山琢也, 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏 (2002) 大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用, 土木計画学研究・論文集, 投稿中.
- 10) Maruyama, T., Y. Muromachi, N. Harata and K. Ohta (2001) The combined modal split/assignment model in the Tokyo Metropolitan Area, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 4, No. 2, pp.293-304.