

23. 都市域の交通流集中に関する数理的分析

A Numerical Analysis of Traffic Flows Concentration in an Urban Area

大津 晶*・腰塚武志**

Shou Ohtsu and Takeshi Koshizuka

In this paper, we discuss two kinds of flows which are centralized flow and uniform flow in an urban area. Centralized flow is the set of flows whose origin or destination points are on the center of the area. Uniform flow is the set of flows whose origin and destination points are distributed uniformly in the area.

Finally, we are able to estimate the ratio of centralized flow to uniform flow which indicates the degree of concentration in the urban area.

Keywords : urban traffic flows, theoretical quantity of flows, degree of concentration of flows
都市内流動量, 理論的流動量, 流動集中度

1 はじめに

都心部への過度の交通集中が社会的な問題になり、地域全体の交通量をコントロールする政策が求められている。折しも東京では自動車の都心乗り入れ規制に関する検討が始められたが、同様に主要な行政機関を郊外に移転させるなどの政策が提案されているところをみると、都市部の交通混雑問題の主要な関心の一つは都心の流動起終点としてのポテンシャルであると考えられる。

ところで都市交通を記述するモデルは、数理的な手法を用いた理論モデルと OD 調査や PT 調査などを基にしたシミュレーションモデルとに大別できる¹⁾が、前述のような政策の意志決定に際して巨視的な指針を得ようとするといくつかの問題がある。前者は一般的に交通現象の因果関係を考慮しないか、考慮してもミクロな交通流にとどまることが多い。後者については調査・分析に要するコストが比較的大きくなりがちであり、さらに多くのパラメータによりモデルが複雑になりかえって因果関係がわかりにくくなってしまふことが多い。

いずれも現実をより忠実に再現することを基本的な目的としているためであると考えられるが、本研究では精度の高い交通量推定をおこなうというよりはむしろ、いくつかの強力な仮定の下でパラメータを極力減らした流動量の地域的分布の理論モデルを構築し、このモデルを用いて都心への交通集中の構造を明確に記述することを目的とする。具体的には都市内流動量がおおよそ「都心に関係する交通流パターン」と「それ以外の交通流パターン」の2つの要素から成ると仮定し、2つの流動パ

ターンの構成比を集中の度合いを示す指標として定義する。さらに名古屋都市圏の自動車交通量分布データに対してこのモデルを適用し集中比の考察を行う。

理論的な交通流動分析は土浦駅前の1次元な街路空間を対象に行われており²⁾、流動量推定に関する信頼性についても実用的な成果を得ている。また2次元の領域を対象に流動量分布の数値計算とシミュレーションもおこなわれている³⁾。今後本論文では特に定義をしない限り、自動車交通量を含め交通流動量全般を総称して流動量と呼ぶことにする。

2 流動を表す量

まず図1のような長さ l の線分で表される1次元の都市領域 L 上の流動について考える。

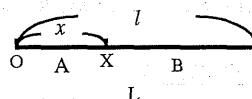


図1 1次元の都市

都市 L の上で流動の起終点が密度1で一樣に発生・集中すると仮定する。流動の単位を起終点のペアで表し、ペアごとに偏りなく流動が生じているとすると、地点 X を通過する流動量は線分上のあらゆる起終点ペアのうち、一方の点が領域 A にあり、もう一方の点が領域 B にあるものであるから、流動量 $g(x)$ は、

$$g(x) = 2x(l - x) \quad (1)$$

*正会員 筑波大学社会学部研究科 (Univ. of Tsukuba)

**正会員 筑波大学社会学系 (Univ. of Tsukuba)

となり、流動量 $g(x)$ は図 2 のように中心 $l/2$ で頂点を持つような 2 次曲線になる。

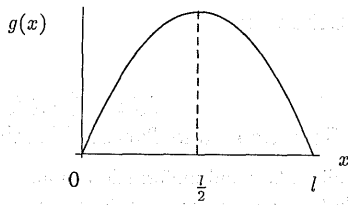


図 2 1次元の都市上の流動量分布

さて、いま我々が考えたい都市は面的にひろがっているため、図 3 のような有限な 2 次元平面の都市領域を考える。

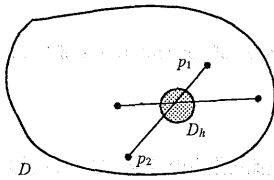


図 3 2次元の都市

1次元の場合と同様に単位流動を起点 p_1 と終点 p_2 を結ぶ直線分で表すと、流動量 $F(h)$ は D_h を通過する全ての線分の数としてつぎのように定式化される。

$$F(h) \equiv \int_{p_1 p_2 \cap D_h \neq \emptyset} dp_1 dp_2.$$

2次元平面では、式(1)に相当する関数を導くことが途端に難しくなるが、流動量の分布に注目すると周辺部に比べて中心付近で流動量が多くなることは直感的に分かる。なぜなら、任意に取り出してきた領域を横断する線分上についてのみ 1次元のときと同じように考えれば、どの直線についても中心部で流動量が最大になるからである。もちろん流動量分布の定式化は可能であり、次章でモデルを構築するときに厳密な導出を試みる。

3 都市内交通流動量分布モデル

簡単のため図 4 のような半径 R の円盤状の都市領域 D を仮定し、円の中心から h だけ離れた地点の流動量 $F(h)$ について、図 5 のように都心に関わる流動パターンとそれ以外の流動パターンとに分けてモデルを構築する。

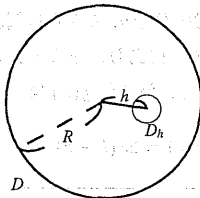


図 4 円で表される都市のモデル

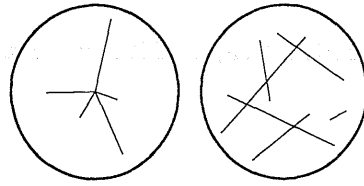


図 5 2通りの流動パターン

3.1 都心に関わる流動

まず都心に関わる流動について考える。「都心」を象徴的に円形都市の中心で示し、ここに一方の端点を持つような線分で表される流動を都心に関わる流動と仮定する。もう一方の住宅に相当するような起終点の密度について、中心からの距離 h に対して線形に増減する分布を仮定する。モデルの対称性から住宅密度 ρ は、

$$\rho(h) = Ch$$

とかけるが、紙面の都合上、住宅比率が距離 h に対して増加するような場合を考えると、半径 r の小円領域 D_h を通過する流動量 f_1 は図 6 のように表せる。 C が負の定数（住宅密度が減少する）の場合や $C = 1$ （住宅密度が一定）の場合でも同じようにモデルをつくることができる。

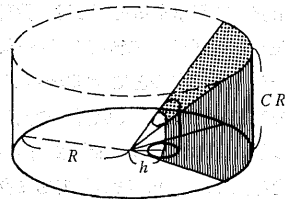


図 6 都心に関わる流動の起終点密度分布

図 6 より、

$$f_1 = \frac{2 \sin^{-1} \frac{r}{h}}{2\pi} \cdot 2 \left(\frac{2}{3} \pi R^2 C R - \frac{2}{3} \pi h^2 C h \right)$$

と表せるが、 D_h の半径が微小なとき、すなわち

$$r = \Delta r$$

のとき、

$$\sin^{-1} \frac{\Delta r}{h} = \frac{\Delta r}{h}$$

と考えてよいので、

$$f_1 = \frac{4\Delta r C}{3h} (R^3 - h^3) \quad (2)$$

と整理できる。

離心率 $k = h/R$ と流動量 f_1 の関係を図 7 に示す。

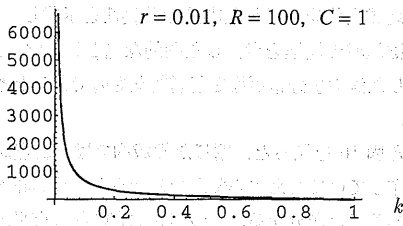


図7 中心からの距離と流動量 f_1 の分布の関係

3.2 一様な流動

前述した「それ以外」の流動は、都市内でおこなべて一様に発生し一様に集中すると仮定する。このとき図8において、地点 p_1 に発生あるいは集中する流動のうち小領域 D_h を通過するものは、もう一方の端点 p_2 が図中の斜線部にあるような線分であるから、その量は図中の斜線部の面積 S で表される。

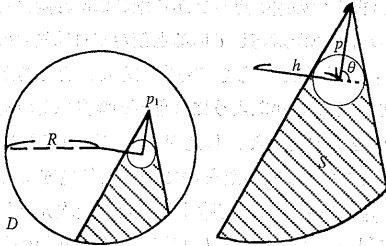


図8 小領域を通過する流動量

都市内のあらゆる点に対応するこの面積 S を足しあげたものがこの小領域を通過する総流動量 f_2 に相当することは明らかなので、 p_1 が図のように極座標系で示されるときヤコビアンに注意して f_2 は、

$$f_2 = \int_{p_1 p_2 \cap D_h \neq \emptyset} S p d p d \theta$$

のように書ける。ところが斜線部の面積 S が簡潔な関数で表現できず、また場合分けを必要とすることから小領域を通過する総流動量を計算しても簡単に表すことができない。そこで前節と同様にして r が限りなく微小な場合を考え、このとき S が図8の扇形の斜線部分の面積 S' に等しくなることを利用する。

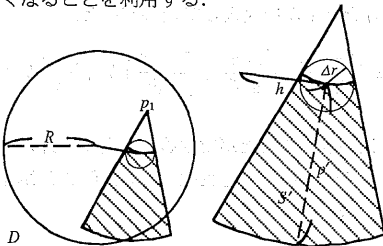


図9 小領域が微小な場合

図より S' は、

$$S' = \sin^{-1} \frac{\Delta r}{p} (p'^2 + 2pp')$$

と書けるが、 p' は、

$$p' = h \cos \theta + \sqrt{R^2 - h^2 \sin^2 \theta}$$

となることから総流動量 f_2 は、

$$f_2 = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta r}^{-h \cos \theta + \sqrt{R^2 - h^2 \sin^2 \theta}} S' p d p d \theta$$

と定式化できる。やはり Δr が微小であることから、

$$(\Delta r)^2 = 0$$

$$\sin^{-1} \frac{\Delta r}{p} = \frac{\Delta r}{p}$$

とできることから結局、

$$f_2 = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\Delta r}^{-h \cos \theta + \sqrt{R^2 - h^2 \sin^2 \theta}} \frac{\Delta r}{p} (p'^2 + 2pp') p d p d \theta = 8 \Delta r R (R^2 - h^2) E \left(\frac{h}{R} \right) \quad (3)$$

(E は第2種完全楕円積分)

のように中心からの距離のみを変数として非常に簡潔に定式化できる。離心率 k と流動量 f_2 の関係は図10のような分布になる。

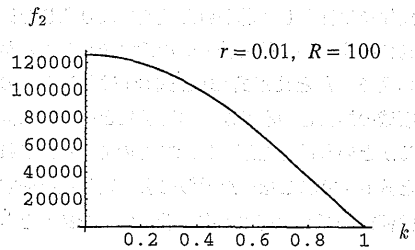


図10 流動量 f_2 の分布

さて、式(3)は小領域の半径が微小なときに理論的に厳密な結果であるが楕円積分の関数を含んでいるので、実際の分析に利用するためには程度のよい近似をしておかなければならない。

そこで第2種完全楕円積分関数 E に対して冪級数展開を施すと、

$$E \left(\frac{h}{R} \right) = \frac{\pi}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 \frac{h^2}{R^2} - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \frac{h^4}{3R^4} \dots \right)$$

のように書ける。第2項までを採用すれば、

$$f_2 \approx f_2' = 8\Delta r R(R^2 - h^2) \frac{\pi}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 \frac{h^2}{R^2} \right) \quad (4)$$

となる。図11は近似式を厳密式に重ねたものである。誤差の絶対値は図12に示すとおりであり、冪級数展開の第2項までの近似でもかなり性能がよいといえる。

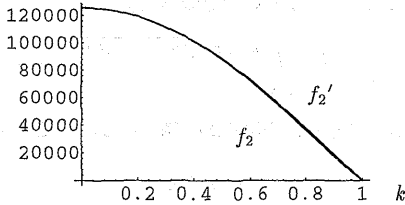


図11 厳密式と近似式の比較
 $f_2' - f_2$

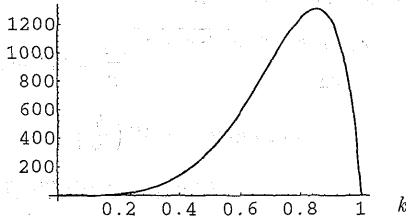


図12 誤差の分布

これまで議論してきた領域内の流動量分布は、数値計算やシミュレーションを用いても求めることができる³⁾し、より現実的な条件下での分布を知ることができるが、条件を単純化して導かれた理論により閉じた領域内の流動に関する基本的で普遍的な性質を知ることができたといえる。たとえば式(2)と式(3)はある地点の流動量が領域の規模と中心地からの距離にどのように依存しているかという関係を端的に示すものである。これらの結果と式(4)でおこなった近似による取り扱いやすい近似式は都市分析への応用上有意義な成果であると考えている。

実は式(3)と同様のものはすでに導出されている⁴⁾が、前述した微小円を利用する導出方法と近似式(4)はいずれも新しいものである。

ところで都市の本質が、単に人が多いというだけでなく異質なもののどうしの交わりにあるならば、その交わりの量を記述ないしは定式化しておくことが重要である。ところが都市や地域を解析するための客観的原単位として人口密度などの静的な状況を説明する“量”に対して都市的アクティビティに注目した動的な“量”が少ないのではないだろうか。また腰塚⁴⁾は交通手段の性能が発達し距離や時間を克服するにつれて一地点の通過交通

量がしだいに領域の規模に依存することを数理的に明示し、地域全体を考慮した議論の重要性を示唆している。筆者は領域の規模を考慮した動的な量としては、式(3)に示した流動量分布が最も基礎的なものであると考えている。

また図10を見ると、閉じた領域内では起終点が一様に分布していてさえ中心部が混み合うという興味深い性質があることが分かる。この知見は有限な都市平面が原理的に(運命的といってもよいだろう)持っている性質としてもっと広く認識されるべきである。流動量分布について起終点の分布や領域の形状に関する理論的な拡張は大津⁵⁾を参照されたい。

3.3 合成した流動量分布

さて、つぎに合成した流動量分布を求める前に前節までに導出した f_1 と f_2 の具体的な意味について説明しておく。いま1つの起終点ペアからなる単位移動にちょうど1台の自動車に対応していると仮定すれば先程の流動量 f_1, f_2 の単位はどちらも“台”になる。ところがモデルの設計から明らかのように2種類の流動はそれぞれの別の総量をもっている。したがって実際の流動が f_1 と f_2 をある比率で合成したものであると仮定するためには、 f_1, f_2 を各々の総量で除することで無次元化したパターンごとの比率(確率)に基準化しておかねばならない。そこで改めて f_1, f_2 を以下のように定義し直す。

$$f_1 = \frac{1}{2\frac{3}{2}\pi R^2 C R} \cdot \frac{4\Delta r C}{3h} (R^3 - h^3) \\ = \frac{\Delta r}{\pi h} \left(1 - \frac{h^3}{R^3} \right) \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{1}{(\pi R^2)^2} \cdot 8\Delta r R (R^2 - h^2) \frac{\pi}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 \frac{h^2}{R^2} \right) \\ = \frac{4\Delta r}{\pi R} \cdot \left(1 - \frac{h^2}{4R^2} \right) \cdot \left(1 - \frac{h^2}{R^2} \right) \quad (6)$$

以上から合成した流動量 $F(h)$ を次のように定義する。

$$F(h) = \alpha f_1 + \beta f_2$$

式(5)と式(6)を代入して変形すると、

$$F(h) = \frac{\Delta r \beta}{\pi R^5} h^4 - \left(\frac{\Delta r \alpha}{\pi R^3} + \frac{5\Delta r \beta}{\pi R^3} \right) h^2 + \frac{\Delta r \alpha}{\pi} h^{-1} + \frac{4\Delta r \beta}{\pi R} \quad (7)$$

のように書き直すことができる。現実の観測データから式(7)の係数を推定できれば、 α, β さらに R も推定することができる。

4 道路交通量データの特性について

これまで作ってきたモデルは均質な連続平面を仮定し

ているが、現実の道路ネットワークは離散的に存在している。また観測地点ごとに周辺の道路環境が観測データに影響していることを考慮しなければならない。つまり、モデル上は中心から同じ距離だけ離れた地点は同じ交通量になっているが、その他の条件が同じであれば当然周囲に道路が少ない観測地点の方が交通量が多くなる。さらに道路の量に加えてその方向やカテゴリーも同じように考慮すればより現実に近いモデルができると予想される。しかし冒頭にも述べたとおりこの分析の目的は、なるべくパラメータの少ない簡潔なモデルを提案することなので、今回は道路が離散ではあっても都市内に均質に在るものと仮定した。これらの点については今後の課題にしたい。

5 名古屋都市圏交通量分析

現実観測された交通量データを3章で作った流動量分布のモデルを当てはめて重回帰分析をおこなう。対象とする地域として、およそ独立した都市圏として名古屋都市圏(図13)を選び、平成2年と平成6年の2時点の交通量調査データ⁶⁾を用いた。調査はともに9月下旬から10月上旬の間の平日に行われたもので、両時点での同一の調査地点のうち174地点において観測された12時間自動車類交通量(午前7時から午後7時)を用いた。ただし国道23号線については通過交通に特化する傾向がみられたので対象データから除外してある。中心からの距離は、各調査地点と名古屋市役所(都心代表点)の直線距離を地図上で計測した。



図13 名古屋都心部

分析の結果得られた係数 α , β , R と $\gamma = \alpha/\beta$, また決定係数を表1にまとめる。(ただし $r = 5(m)$)

表1 名古屋都市圏交通量データによる計算結果

	R	α	β	γ	決定係数
平成2年	16798	8.0×10^6	6.9×10^7	0.12	0.26
平成6年	17472	6.4×10^6	7.4×10^7	0.09	0.24

図14は回帰式と実際の自動車交通量を比較したものである。

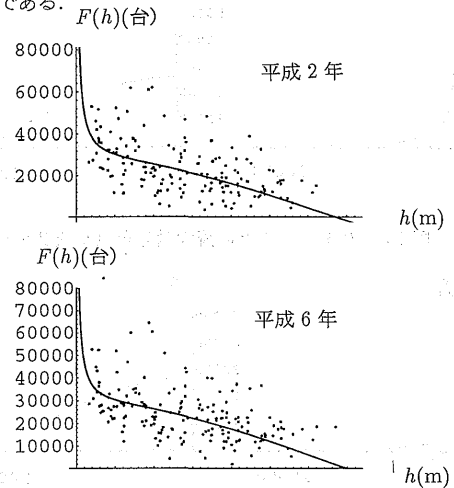


図14 回帰式と交通量データ

5.1 都心流動集中度についての考察

推定された α と β の比率 $\gamma = \alpha/\beta$ が意味するところはいったい何であろうか。もし交通量がここまでのモデルで仮定したように中心に関わるものとそうでないものに分けられるならば、都市内交通における交通流動集中度合いと解釈することができよう。そこで分析結果より都心流動集中度 γ と、都市領域の大きさを示すモデルの半径 R について考察を加えるが、度々繰り返すようにここで焦点を当てるのは総合的にみた集中の構造であり絶対的な交通量ではない。

γ は平成2年で0.12、平成6年で0.09となっており、都市部全体では平成2年から平成6年にかけて集中度が下がっているといえる。これは直感にはそぐわない結果のように思われるが、これは一様なパターンの増加が交通総量の増加に大きく影響したことを示す結果である。

また、都市領域の規模を表すモデルの半径 R の変化をみると平成2年で16798m、平成6年で17472mとなっていることから都市圏も広がる傾向にある。

ただしいずれの結果も決定係数が0.25前後のときのものであり、ここでは結論として断定することはできない。

5.2 流動パターン構成比率についての考察

重回帰分析の結果得られた回帰式が、平成6年と平成6年の名古屋都市圏の流動量分布を端的に説明するものだと考えると、これらを用いて任意の地点の流動量に占める2種類の流動パターンの構成比を知ることができる。図15、図16に総流動量とパターンごとの分布を示し、図17、図18にそれらの構成比を示す。

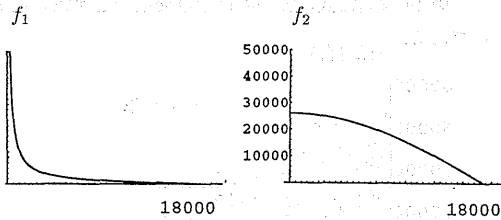


図 15 パターンごとの流動量分布 (平成 2 年)

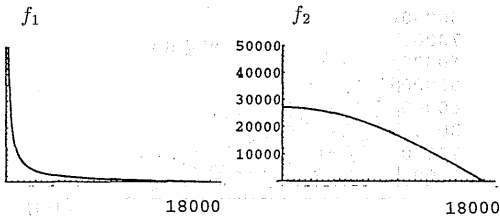


図 16 パターンごとの流動量分布 (平成 6 年)

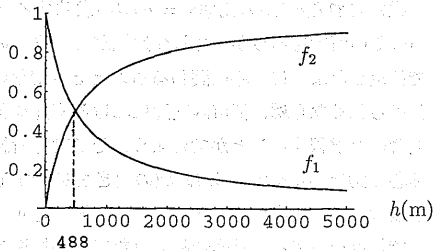


図 17 流動パターンの構成比 (平成 2 年)

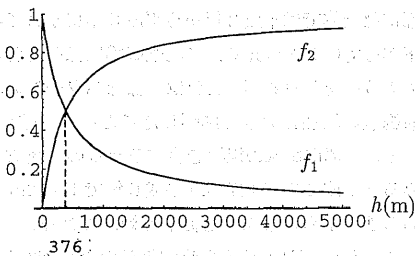


図 18 流動パターンの構成比 (平成 6 年)

ここで示した総流動に占める 2 つの流動パターンの内訳から、都心からある距離だけ離れた地点で観測される交通量のうち、平均的にどの程度が都心に関係したものか、あるいは都心を通過するだけのものか見当を付けることができる。これは最初に指摘した都心交通流入規制をおよそどのぐらいの範囲で実施するのが効果的なのか、あるいは環状路線をどの位置に建設するのがよいかを考えるとときの目安になるとと思われる。

6 おわりに

本稿では都心交通集中を議論する際の理論的基礎の構築を目的とし、都市と流動を単純化したモデルによって理論的な知見を得ることができた。式 (6) で示した 2 つの流動パターンで構成される流動量分布モデルによって、都市部の交通流集中の構造をある程度説明できた。またその過程で導かれた式 (3) と (4) が示す流動量分布は都市的アクティビティの量的指標として広く応用できると考えている。

今後の課題として、まず簡潔な理論化のために、2 つの流動パターンの起終点分布を都心に関わる流動は中心からの距離に比例しその他の流動は領域内に一様に分布すると仮定したが、モデルを実用的にするためにはこの点についてより現実的な仮定をする必要がある。また分析結果を見る限り説明力という点について疑問をはさまざるを得ないが、道路交通の特徴を反映した説明変数を加えたり、道路種別に分析するなどの工夫をする余地であろう。データを見てみると平成 2 年から 6 年にかけての変化があまりない。より明確な分析結果を得るためにはもっと離れた時点で比較するか、年や月の平均交通量データを用いる方がよいと考えられる。

本稿で仮定した起終点が一様に分布する都市というのはあまりにも非現実的であるが、誘引力を持った都心 1 点を加えるだけである程度の説明力を期待してもよいことが示されたことを強調しておきたい。すなわち、このモデルにさらにいくつかの「都心」を加えることで実用的なモデルになると考えられる。つまり筆者の主張の 1 つは政策目的が要求する精度を正しく判断することが先決であるという点にあり、交通量等の調査にかかる膨大なコストを勘定に入れると、場合によっては「当たり」の良さよりも調査・分析の手軽さが優先することもあるのではないだろうか。

参考文献

- 1) (社) 交通工学研究会 (1984): 交通工学ハンドブック. 技報堂出版株式会社.
- 2) 腰塚武志 (1992): 都市域の流動に関する理論的考察. 日本都市計画学会学術研究論文集第 27 号, pp343-348.
- 3) 西野嘉彦 (1994): 都市域の流動と集中について. 筑波大学第三学群社会学類卒業論文.
- 4) Vaughan Rodney (1987): URBAN SPATIAL TRAFIC PATTERNS. Pion Limited.
- 5) 大津 晶 (1997): 都市内流動量を数理的に分析する方法. 筑波大学博士課程社会学研究科修士論文.
- 6) 建設省道路局・(社) 交通工学研究会 (1995): 平成 6 年度 道路交通センサス-全国道路交通情勢調査.