

従業地側人口制約を緩和した個人属性別居住地—従業地分布の推計手法*

Estimation of Residence-Workplace Population Distribution by Individual Attributes Under Relaxation of One-side's Population Constraints*

金森 亮**

By Ryo KANAMORI**

1. はじめに

低炭素社会の実現に向けて交通・都市構造/分野にて取り組んでいくべきことは多く、道路や公共交通のサービスレベル改善施策やTDM施策の導入に加え、集約型都市構造への転換も望まれている¹⁾。集約型都市構造は移動距離の短縮、自動車から公共交通や自転車・徒歩への利用交通手段転換が期待でき、環境負荷低減と都市活動の効率化に寄与するとされる。

都市圏レベルの都市構造評価としては、都心居住などのシナリオに応じて夜間人口や従業人口の人口配置を外生的に設定することが多く²⁾、自動車交通の混雑状況を考慮し、発生・集中交通量（夜間人口・従業人口など）を制約条件とした両側制約付き均衡モデル³⁻⁷⁾を適用することで、現況把握やシナリオ評価ができる。利用交通手段の変更は交通手段選択モデルを組み込むことで反映することができるが、利用者属性の考慮、対象ゾーンの細分化などより詳細に記述される傾向にあり、集約型都市構造の評価モデルとしてはマルチクラス型両側制約付き統合均衡モデルが望ましいといえよう。

Boyce and Bar-Gera⁷⁾はシカゴ都市圏を対象とした大規模ネットワーク（自動車リンク数：39,000）、詳細ゾーン（ゾーン数：1,790）にマルチクラス型両側制約付き統合均衡モデルを適用している。距離帯別OD交通量の再現性は妥当であるが、ゾーン内々交通量や12地区間OD交通量の再現性は低い結果となっている。この理由としては、実データとして入手困難な詳細ゾーンレベルのクラス別発生・集中交通量を制約条件として設定する必要があり、その推計精度が低いことにあると考えられる。PT調査等で入手可能なゾーンレベルまでゾーンを統合する推計手法も提案されているが⁸⁾、予測対象外となる詳細ゾーンレベルでのOD交通量の再現性は高くはなく、更なる改良が必要といえる。我が国では国勢調査にて町丁・字等別の性・年齢階層別夜間人口と利用交通手段構成（ただし、10年間隔）、事業所・企業統計調査

*キーワード：OD推計， エントロピー最大化， 統合均衡モデル

**正員， 博（工）， 東京大学大学院工学系研究科

（東京都文京区本郷7-3-1 工学部11号館4階020号室

TEL: 03-5841-0586, E-mail: kanamori@bin.t.u-tokyo.ac.jp

で町丁・字等別の従業人口を把握することができるが、個人属性別の従業人口・通学人口まで把握することはできない。

一方、自動車の観測断面交通量等を用いてOD交通量を推計・補正する手法が多数提案されている⁹⁾。なかでもYang et al.¹⁰⁾は、交通混雑による利用者経路選択行動を考慮できる均衡モデルを含む二段階最適化問題を提案し、OD交通量推計と統合均衡モデルとの親和性は高まった。

本研究では、都市圏レベルの都市構造の現況把握を目的に、交通手段選択行動に影響を及ぼす個人属性別に詳細ゾーンレベルの通勤・通学OD交通量の推計手法を提案する。具体的には、Yang et al.¹⁰⁾のOD交通量推計手法を参考に、詳細ゾーン間OD交通量を与件とした分担—配分のマルチクラス型統合均衡モデルを下位問題、複数の詳細ゾーンから構成される地区別従業・通学人口（集中交通量）を制約条件としてOD交通量を推計するエントロピー最大化モデル¹¹⁾を上位問題とした二段階最適化問題を定式化し、実都市圏に適用する。本提案モデルでは詳細ゾーン別に個人属性別従業人口・通学人口を算出できるため、先述したマルチクラス型両側制約付き統合均衡モデルの制約条件として用いることもできる。

2. 二段階最適化問題

(1) マルチクラス型統合均衡モデル

本研究で対象とする通勤・通学OD交通を行うに際し、各個人の交通行動は図-1の通り、交通手段—経路選択からなるNested Logitモデルにて記述できると仮定する。詳細ゾーンへの適用を前提とし、通学交通も対象とすることから交通手段選択肢は、自動車、鉄道、バスに加え自転車・徒歩も設定している。

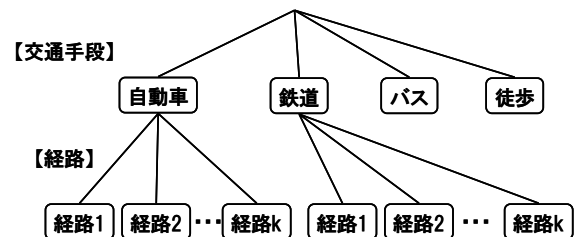


図-1 交通行動の選択ツリー構造

ここで、利用者クラス別交通行動モデルを組み込んだマルチクラス型統合均衡モデルは、以下の等価最適化問題として定式化できる。

$$\begin{aligned} \min .Z_2 = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ & + \sum_{i,rs,m,k} \frac{1}{\theta_1^{i,m}} f_{m,k}^{i,rs} \ln(f_{m,k}^{i,rs} / q_m^{i,rs}) \\ & + \sum_{i,rs,m} \frac{1}{\theta_2^i} q_m^{i,rs} \ln(q_m^{i,rs} / Q_{rs}^i) \\ & + \sum_{i,rs,m',k} f_{m',k}^{i,rs} C_{m',k}^{i,rs} + \sum_{i,rs,m} q_m^{i,rs} V_m^{i,rs} \end{aligned} \quad (1a)$$

subject to

$$x_a^m = \sum_{i,rs,k} f_{m,k}^{i,rs} \cdot \delta_{a,k}^{i,rs,m} \quad \forall m, a \quad (1b)$$

$$\sum_k f_{m,k}^{i,rs} = q_m^{i,rs} \quad \forall i, rs, m \quad (1c)$$

$$\sum_m q_m^{i,rs} = Q_{rs}^i \quad \forall i, rs \quad (1d)$$

$$f_{m,k}^{i,rs} \geq 0, q_m^{i,rs} \geq 0, Q_{rs}^i \geq 0 \quad \forall i, rs, m, k \quad (1e)$$

ここで、

$t_a(\cdot)$: 自動車リンク a のリンクコスト関数

x_a^m : 交通手段 m のリンク a の交通量

$f_{m,k}^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m の経路 k の交通量

$q_m^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m の交通量

Q_{rs}^i : 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通量

$C_{m',k}^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m' の経路 k の交通一般化費用

$\delta_{a,k}^{i,rs,m}$: リンク・経路の接続行列要素

$V_m^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m を利用する際の確定効用項

$\theta_1^{i,m}, \theta_2^i$: スケールパラメータ

(2) エントロピー最大化モデル

詳細ゾーン間の個人属性別通勤・通学OD交通量を推計するため、本研究ではエントロピー最大化モデルを採用する。また、OD交通量を補正する外部データは、交通手段別の観測リンク交通量と市区町村別従業人口・通学人口とし、観測リンク交通量には調査対象年次のずれや通勤・通学交通以外（貨物車交通、非定期券利用者など）の影響、市区町村別従業人口・通学人口には都市圏

外居住者の影響など誤差（平均値は0）を含むものとする。さらに、ターゲットOD交通量はPT調査データなどを利用して推計されているとする。このとき、エントロピー最大化モデルは以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \min .Z_1 = & \sum_{i,rs} Q_{rs}^i (\ln Q_{rs}^i - \ln \hat{Q}_{rs}^i - 1) \\ & + \sum_{m,a} x_a^m (\ln x_a^m - \ln \hat{x}_a^m - 1) \\ & + \sum_{l,u} D_u^l (\ln D_u^l - \ln \hat{D}_u^l - 1) \end{aligned} \quad (2a)$$

subject to

$$x_a^m = \sum_{i,rs} Q_{rs}^i \cdot \Pr[a | i, rs, m] \quad \forall m, a \quad (2b)$$

$$D_u^l = \sum_{i,rs} Q_{rs}^i \cdot \delta_i^l \cdot \delta_s^u \quad \forall l, u \quad (2c)$$

$$N_r^i = \sum_s Q_{rs}^i \quad \forall i, r \quad (2d)$$

$$Q_{rs}^i \geq 0, x_a^m \geq 0, D_u^l \geq 0 \quad \forall i, rs, m, a, i, u \quad (2e)$$

ここで、

\hat{Q}_{rs}^i : 利用者クラス i の OD ペア rs 間のターゲット交通量

\hat{x}_a^m : 交通手段 m のリンク a の交通量【設定値】

D_u^l : 市区町村 u の職業 l の従業地側人口

\hat{D}_u^l : 市区町村 u の職業 l の従業地側人口【設定値】

N_r^i : 居住地ゾーン r の利用者クラス i の夜間人口【設定値】

δ_i^l : 利用者クラス i が職業 l に含まれる場合 1 となるダミー変数

δ_s^u : 従業地ゾーン s が市区町村 u に含まれる場合 1 となるダミー変数

$\Pr[a | i, rs, m]$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m の経路 k にリンク a が含まれる割合

観測交通量などの事前設定値のOD交通量に対する相対的な信頼度（不確実性の重み）を考慮することもできるが^{12,13}、本研究では同程度であると仮定している。

式 (2) から得られる各利用者クラスのOD交通量などは、Lagrangian関数の1次の最適性条件から、以下のように算出される。

$$Q_{rs}^i = \hat{Q}_{rs}^i X_r^i \prod_{m,a} X_a^m \Pr[a | i, rs, m] \prod_{l,u} X_u^l \delta_i^l \cdot \delta_s^u \quad (3a)$$

$$X_a^m = \hat{X}_a^m X_a^{m-1} \quad (3b)$$

$$D_u^i = \hat{D}_u^i X_u^{i-1} \quad (3c)$$

ここで、

$\lambda_a^m, \lambda_u^l, \lambda_r^i$: 制約条件式(2b)~(2d)に対応する Lagrangian 乗数

X_a^m, X_u^l, X_r^i : 各 Lagrangian 乗数を置換えたもの (例えば、 $X_a^m = \exp(-\lambda_a^m)$)

また、各Lagrangian乗数は、制約条件式(2b)~(2d)と式(3)から導出される次式を解くことで得られる。

$$\hat{X}_a^m X_a^{m-1} = \sum_{i,rs} \text{Pr} \cdot \hat{Q}_{rs}^i X_r^i \prod_{m,a} X_a^{m \text{Pr}} \prod_{l,u} X_u^{l \delta_i^l \delta_s^u} \quad (4a)$$

$$\hat{D}_u^l X_u^{l-1} = \sum_{i,rs} \delta_i^l \delta_s^u \hat{Q}_{rs}^i X_r^i \prod_{m,a} X_a^{m \text{Pr}} \prod_{l,u} X_u^{l \delta_i^l \delta_s^u} \quad (4b)$$

$$N_r^i = X_r^i \sum_s \hat{Q}_{rs}^i \prod_{m,a} X_a^{m \text{Pr}} \prod_{l,u} X_u^{l \delta_i^l \delta_s^u} \quad (4c)$$

(3) 二段階最適化問題

個人属性別の詳細ゾーンレベルの通勤・通学OD交通量の推計手法は、個人属性別OD交通量と与件としたマルチクラス別統合均衡モデル (式 (1)) を下位問題、詳細ゾーン別個人属性別夜間人口を制約条件とし、観測リンク交通量と市区町村別従業人口・通学人口にて個人属性別OD交通量を補正するエントロピー最大化モデル (式 (2)) を上位問題とする二段階最適化問題として表現できる。

二段階最適化問題の解法アルゴリズムはYang et al.¹⁰⁾ が提案する、上位問題と下位問題を繰り返して解くヒューリスティックな解法を援用する。具体的な手順は以下の通りである。

<Step1>

OD交通量 $Q_{rs}^{i(n)}$ ($n=0$, 初回は別途推計されたターゲットOD交通量) を与件として下位問題を解き、補正対象のリンク利用率 $\text{Pr}[a | i, rs, m]$ を算出する。ここで、 $\text{Pr}[a | i, rs, m]$ はNested Logitモデルから算出される。

$$\text{Pr}[a | i, rs, m] = \delta_{a,k}^{i,rs,m} \cdot \frac{\exp[-\theta_1^{i,m} C_{m,k}^{i,rs}]}{\sum_k \exp[-\theta_1^{i,m} C_{m,k}^{i,rs}]} \cdot \frac{\exp[-\theta_2^i (V_m^{i,rs} + S_m^{i,rs})]}{\sum_m \exp[-\theta_2^i (V_m^{i,rs} + S_m^{i,rs})]} \quad (5a)$$

$$S_m^{i,rs} = -\frac{1}{\theta_1^{i,m}} \ln \sum_k \exp[-\theta_1^{i,m} C_{m,k}^{i,rs}] \quad (5b)$$

$S_m^{i,rs}$: 利用者クラス*i*のODペア*rs*間を交通手段*m*で移動するときの期待最小費用

<Step2>

交通手段別観測リンク交通量、市区町村別従業人口・通学人口を用意し、下位問題から算出されたリンク利用率を用いて上位問題 (式 (4)) から個人属性別OD交通量を求める。

【Step2-1】 $X_r^{i(k)} = 1.0$, $k=0$ として、式 (4a, 4b) から $X_a^{m(k)}$, $X_u^{l(k)}$ を算出する。

【Step2-2】 式 (4c) から

$$X_r^{i(k+1)} = \frac{N_r^i}{\sum_s \hat{Q}_{rs}^i \prod_{m,a} X_a^{m(k) \text{Pr}} \prod_{l,u} X_u^{l(k) \delta_i^l \delta_s^u}}$$

として $X_a^{m(k+1)}$, $X_u^{l(k+1)}$ を算出する。

【Step2-3】 $X_a^{m(k+1)} \approx X_a^{m(k)}$, $X_u^{l(k+1)} \approx X_u^{l(k)}$ なら

<Step3>へ、そうでなければ $k=k+1$ として 【Step2-2】へ戻る。

<Step3>

<Step2>で算出された X_a^m, X_u^l, X_r^i , 式 (3a) より利用者クラス別OD交通量 $Q_{rs}^{i(n)}$ を算出する。

<Step4>

$Q_{rs}^{i(n+1)} \approx Q_{rs}^{i(n)}$ なら終了、そうでなければ $n=n+1$ として <Step1>へ戻る。

3. 名古屋都市圏への適用

(1) 前提条件

2. で定式化した二段階最適化問題を名古屋都市圏の個人属性別通勤・通学交通の算出に適用する。対象とする名古屋都市圏はゾーン数515 (名古屋市内16区は259区分) であり、予測対象年次は2005年とする。

ターゲットOD交通量は、2001年のPT調査データから推計された既往研究¹⁴⁾ の出勤・登校目的における活動場所-交通手段-経路選択モデルのパラメータ、2005年の交通ネットワークに対応したLOSデータ等から算出する。ここで、通勤・通学交通における交通手段選択等は朝ピーク時 (7-10時) の交通サービスレベル下で行なわれていると仮定し、自動車ネットワークはリンク交通容量を3倍 (3時間分相当)、鉄道・バスは8時台のLOSデータを設定した。

また、ゾーン別の個人属性別夜間人口は、2005年国勢調査 (町丁・字等別) データから性別・年齢階層 (5~14歳, 15~64歳, 65歳以上) をゾーン別に集計し、直近のPT調査から性・年齢階層別職業構成比、免許保有率、自動車保有率を算出し、性別・年齢階層別・職業

別・免許保有有無別・自動車保有有無別夜間人口を設定している。

OD交通量を補正する外部データは2005年道路交通センサスデータ（朝ピーク時の自動車断面交通量，5箇所），2005年大都市交通センサスデータ（定期券利用者の初乗り・最終降車駅人員，各20駅），2005年国勢調査データから集計した名古屋市内16区別従業人口・通学人口である。

(2) ケース設定

本研究の提案手法の有効性を検証するため，以下の3ケースを設定する。

- Case1：ターゲットOD交通量（初期OD交通量）
- Case2：名古屋市内16区別従業人口・通学人口で補正
- Case3：区別従業人口・通学人口に加えて，交通手段別観測リンク交通量にて補正

また，現況再現性の確認は，名古屋市内16区別従業地側人口，自動車リンク交通量，鉄道駅初乗り・最終降車駅人員とする。

(3) 現況再現性の検証

名古屋市区別従業人口・通学人口の再現性をみると（表-1，図-2），マルチクラス型（居住地側人口制約付き）統合均衡モデルで算出されたターゲットOD交通量

のCase1に比べて，従業地側人口を制約条件とすることで改善されることが確認できる。推計差（国勢調査－推計値）は従業人口・通学人口全体でCase1：－53千人からCase3：－6千人と小さくなっている。特に名古屋市外から鉄道の利便性が高い名古屋駅周辺地区を含む中村区は，従業地側人口の制約設定により大きく改善されている。

表-2の自動車リンク交通量の再現性は，観測データの誤差が大きいと判断して対象箇所を少なくしたことから改善効果は小さくなっている。また，表-3の鉄道リンク交通量の再現性をみると，従業地側人口のみを制約条件とするCase2では十分な改善効果は得られず，Case3のように鉄道利用状況に関する補正情報を追加することで大きく改善される。一方，採用する経路選択モデルの精度の影響も大きくなるため，通勤・通学交通のように料金弾性値が小さな習慣行動を対象とした経路選択モデルの精緻化も重要となる。

国勢調査から得られる町丁・字等別の従業人口を用いた詳細ゾーン別従業人口の再現性，Boyce and Bar-Gera⁷⁾の提案モデルにて精度が低かった地区間OD交通量の再現性など更なる検証は必要であるが，統合均衡モデルをそのまま適用する従来の従来のマルチクラス型両側制約付き統合均衡モデルよりも，外部データ情報にて補正する本研究の提案モデルは，より望ましい結果が得ら

表-1 ケース別従業人口・通学人口の推計精度

	Case1			Case2			Case3		
	従業人口	通学人口	合計	従業人口	通学人口	合計	従業人口	通学人口	合計
相関係数	0.992	0.625	0.983	0.997	0.712	0.993	0.998	0.787	0.997
回帰係数	0.990	0.963	0.982	0.987	0.974	0.983	1.002	0.991	0.997
RMSE (人)	8640	6416	11417	4502	5742	6946	4082	4463	4777
推計差(人)	-50111	-2605	-52716	-25360	-2957	-28317	-11099	5450	-5650

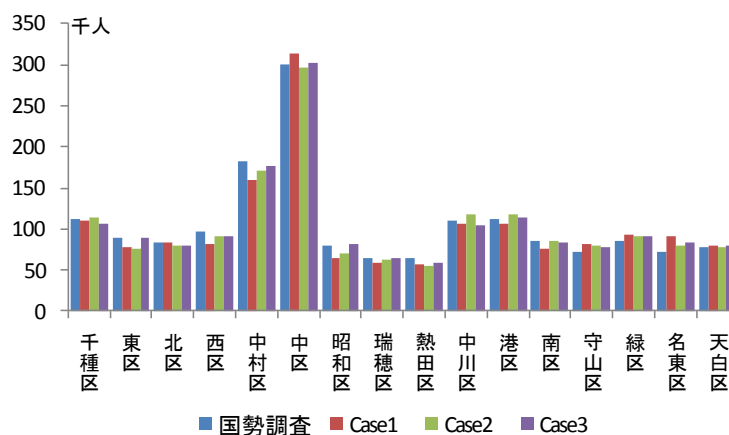


図-2 ケース別区別従業地側人口の推計結果

表-2 ケース別自動車リンク交通量の推計精度

	Case1	Case2	Case3
相関係数	0.655	0.657	0.656
回帰係数	1.190	1.133	1.139
RMSE (台)	3817	3566	3597

表-3 ケース別鉄道リンク交通量の推計精度

	Case1		Case2		Case3	
	初乗り駅	最終降車駅	初乗り駅	最終降車駅	初乗り駅	最終降車駅
相関係数	0.599	0.752	0.609	0.748	0.846	0.813
回帰係数	0.684	0.730	0.757	0.749	0.712	0.850
RMSE (人)	3311	5885	3085	5677	1932	5016

れる可能性は高いといえよう。

4. おわりに

本研究では都市構造評価の基礎情報として、詳細なゾーンレベルにて個人属性別の通勤・通学OD交通量の把握の必要性、また都市構造評価モデルの1つであるマルチクラス型両側制約付き統合均衡モデルの適用の際に事前準備する必要がある利用者クラス別従業地側人口の設定の難しさを問題背景として、マルチクラス統合均衡モデルとエントロピー最大化モデルを組み合わせた二段階最適化問題を提案し、名古屋都市圏の通勤・通学交通の推計に適用した。更なる再現性検証は必要であるが、概ね妥当な結果が得られることが確認できた。

集約型都市圏構造の評価としては、本提案モデルから算出される個人属性別通勤・通学交通（詳細ゾーンレベルでの個人属性別居住地側人口・従業地側人口）を用いることで、例えば鉄道駅周辺ゾーンへの人口集約シナリオに沿う人口配置に制約条件を変更し、マルチクラス型両側制約付き統合均衡モデルを適用することで、導入効果を詳細かつ精緻に分析することができるだろう。また、将来目標年次を対象とする場合、詳細ゾーンレベルの夜間人口予測¹⁵⁾ や土地利用・交通モデルによる市区町村別（従業地側）人口予測¹⁶⁾ などと本提案モデルを組みあわせることで、将来の都市構造シナリオ評価を行うことができると思う。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局都市計画課：低炭素都市づくりガイドライン（案），2010。
- 2) 例えば，小島浩，吉田朗，森田哲夫：交通・環境負荷を小さくする都市構造と交通施策に関する研究，都市計画論文集，No.38-3，pp.553-558，2003。
- 3) Evans, S.P. : Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment, Transportation Research, Vol.10, pp.37-57, 1976.
- 4) Florian, M. and Nguyen, S. : A combined trip distribution modal split and trip assignment model, Transportation Research, Vol.12, pp.241-246, 1978.
- 5) Lam, William H.K. and Huang, Hai-Jun : A combined trip distribution and assignment model for multiple user classes, Transportation Research Part B, Vol.26 No.4, pp.275-287, 1992.
- 6) Abrahamsson, T. and Lundqvist, L. : Formulation and estimation of combined network equilibrium models with applications to Stockholm. Transportation Science, Vol.33 No.1, pp.80-100, 1999.
- 7) Boyce, D and Bar-Gera, H. : Validation of multiclass urban travel forecasting models combining origin-destination, mode, and route choices, Journal of Regional Science, Vol.43 No.3, pp.517-540, 2003.
- 8) De Grange, L., Fernández, E., de Cea, J. and Irrazábal, M. : Combined model calibration and spatial aggregation, Networks and Spatial Economics, in press.
- 9) 例えば，飯田恭敬：交通計画のための新パラダイム—交通ネットワーク信頼性とOD交通量逆推定，技術書院，2008。
- 10) Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y. and Asakura, Y. : Estimation of origin-destination matrices from traffic counts on congested networks, Transportation Research Part B, Vol.26 No.6, pp.417-434, 1992.
- 11) Van-Zuylen, H. J. and Willumsen, L.G. : The most likely trip matrix estimated from traffic counts, Transportation Research Part B, Vol.14 No.3, pp.281-293, 1980.
- 12) Willumsen, L.G. : Estimating time-dependent trip matrices from traffic counts, Proceedings of the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.397-411, 1984.
- 13) Brenninger-Göthe, M., Jörnsten, K.O. and Lundgren, J.T. : Estimation of origin-destination matrices from traffic counts using multiobjective programming formulations, Transportation Research Part B, Vol.23 No.4, pp.257-269, 1989.
- 14) 金森亮，森川高行，山本俊行，三輪富生：総合交通戦略の策定に向けた統合型交通需要予測モデルの開発，土木学会論文集D，Vol.65, No.4, pp.503-518, 2009。
- 15) 奥村誠：国勢調査メッシュデータに基づく地区の将来人口構成予測手法，都市計画論文集，Vol.40-3, pp.193-198, 2005。
- 16) Muto, S., Ueda, T. and Yamasaki, K. : Impacts of transport infrastructure policies in population-declining metropolitan area -Business productivity and quality of urban life in Tokyo-, Papers presented at the 11th Uddevalla Symposium 2008, pp.515-535, 2008.