道路混雑度一定の都市モデルに基づく 総トリップ長を最小化する土地利用構造

正員 秋澤 淳 (東京農工大)
正員 茅 陽一 (慶応大)

Land Use Structure of Minimum Total Trip Length based on Congestion-Free-City Model

Atsushi Akisawa, Member (Tokyo University of Agriculture and Technology)

Yoichi Kaya, Member (Keio University)

The energy consumption in transportation sector is still increasing nevertheless of the oil crises. Since transportation sector strongly depends upon fossil fuels, it is expected to be effective for energy conservation to reduce CO₂ emission to cope with global warming. In this study the authors investigate the relationship between transportation activities and land use structure in urban areas from the viewpoint of minimizing total trip length to reduce energy consumption in transportation sector. Two models are developed based on congestion-free city concept which means the supply of road is adjusted to satisfy the traffic. One is the model in which people move depending on the population at their destination while the other depending on the trip length. The latter model describes the preference of shorter commuting. In the former model the optimal land use to minimize total trip length is attained. The result shows that offices are allocated around the center while residential area is relatively on the suburbs, which indicates similar pattern of land use compared with actual cities. On the other hand, results of the latter model show that there exists the optimal preference of commuting length which causes minimization of the automobiles' trip length per capita. Result concerning road area is also discussed and compared with the empirical data of Tokyo.

キーワード： 土地利用，都市構造，自動車交通，トリップ長，職住近接

1. はじめに

地球温暖化問題により人為的なCO₂の発生を可能な限り抑制することが要請されている。具体的には化石燃料の消費を減らすこととして社会的な対処が求められている。日本におけるエネルギー消費を歴史的に振り返ると、産業部門の消費は石油ショック後横ばい傾向を示しているのに対し、民生および運輸部門では年々消費が増大傾向にある。したがって、民生部門、運輸部門における省エネルギー対策は重大な課題といえる。とりわけ運輸部門は燃料のほとんどを化石燃料に依存している一方、都市部における渋滞の恒常化など燃費の悪化要因も増してきており、今後地球温暖化対策を考える上で見過ごすことができない。

運輸部門の省エネルギー対策の基本的視点として次の3点があげられる。

- i) 自動車単体の燃費を改善する。
- ii) トリップ数を減らす。
- iii) トリップ長を減らす。

2点目としては、例えば相乗りすることでトリップを削減することが可能である。トリップ自体を直接減少させることは経済活動を抑制することにつながるため、合意形成に困難が予想される。3点目の考え方はトリップの出発地と目的地の配置を適正化することによって移動距離を減らす。こ

の場合トリップは確保されており運輸サービスとしての低下はないため、対策として実行可能なものと考えられる。

筆者らは既に運輸エネルギー消費最小化の観点から都市内の土地利用についてモデル分析^[1]を行ったが、そこでは総トリップ長よりも総燃料消費に注目した。また、大河原ら^[2]は東京周辺の通勤トリップ実績に基づいて、出発地と目的地の再配置による通勤時間短縮効果を評価している。しかしながら、居住地・業務地分布は固定され、望ましい土地利用像は議論されていない。

そこで本研究では、直接的に総トリップ長を最小にする土地利用構造を求めることを目的とする。その際に都市内の交通が渋滞しない状況の一つの理想像と考え、混雑度がいたるところ一定の都市をモデル化する^[3]。現在の都市では道路整備を上回って自動車交通が増えているため、都心部での渋滞が激しくなっている。逆に言えば、道路容量を考慮せずに事務所ビルの立地が進められている。したがって、混雑緩和を実現するために必要な土地利用分布を見出すことは、将来的な都市形成にとって意味深い。また、現実に道路整備も混雑緩和を目指して実施されているはずである。さらに、近年いわれている職住近接を考慮した場合の都市構造や近接程度の総トリップ長に対する影響を分析する。

2. 混雑度一定の都市モデル

〈2.1〉都市モデルの前提 現実の交通行動は複雑であるので、モデル化に際し簡単化を行った。今回の都市モデルを作成する上での前提は次の通りである。

- i) 1次元の都市を考える。
- ii) 都市は居住地、業務地、道路から成る。
- iii) 自動車交通のみを取り扱う。
- iv) 通勤交通および業務交通を考慮する。
- v) すべての人口が通勤する。
- vi) トリップ発生時間要因は考えない。
- vii) 都市の幅は1kmとする。

現実には鉄道のエネルギー消費量は小さく自動車による消費が支配的であることから、本モデルでは自動車交通のみを対象とした。

以下で用いる記号を次のように定義する。

- x : 都市中心からの距離,
 $f(x)$: 居住地面積比率, $g(x)$: 業務地面積比率,
 ρ : 居住地人口密度, σ : 業務地就業人口密度,
 P : 総人口, r : 距離減衰係数, R : 都市の長さの半分,
 $t_1(x)$: 業務交通, $t_2(x)$: 通勤交通,
 b_1 : 業務トリップの時間あたり発生率,
 b_2 : 通勤トリップの時間あたり発生率,
 c : 道路幅員あたりの時間あたり通過台数

〈2.2〉交通トリップ 2地点間のトリップの発生メカニズムとして次の2種類を想定する。

業務地人口依存型:

$$\phi(x_1, x_2) = \frac{\sigma g(x_2)}{P} \quad \dots (1)$$

距離依存型:

$$\phi(x_1, x_2) = \frac{r}{2} \exp(-r|x_1 - x_2|) \quad \dots (2)$$

ただし、 ϕ , φ : 地点 x_1 から x_2 へのトリップの割合

(1)式は x_1 で発生するトリップが着地の人口に比例して配分されることを意味する。一方、(2)式はトリップが2地点間の距離に対して指数関数的に減少することを表わす。すなわち、長距離移動の割合は長距離になるほど少なくなる。(1)(2)式はそれぞれ以下で述べる総トリップ長最小型都市モデルと職住近接型都市モデルにおける通勤トリップに対応する。業務トリップについては相手の多い地点により大勢移動すると仮定し、常に(1)式を用いる。

〈2.3〉業務地分布 ある地点の業務地面積比率はその地点に通勤する人口によって定まる。(2)式の場合は次式で求められる。

$$g(x_2) = \frac{1}{\sigma} \int_{-R}^R \rho f(x_1) \phi(x_1, x_2) dx_1 \quad \dots (3)$$

〈2.4〉混雑度一定の条件 今回の都市モデルの特徴である混雑度一定の条件は次式で与えられる。

$$1 - f(x) - g(x) = \frac{1}{c} \{b_1 t_1(x) + b_2 t_2(x)\} \quad \dots (4)$$

左辺は道路面積の供給を示し、右辺は業務交通および通勤交通をさばくために必要となる道路面積を表わす。すなわ

ち、混雑度一定の条件は各地点における道路の需給が均衡する条件を与えている。混雑の程度はパラメータ c に依存するが、混雑度一定として任意の地点で混雑が弱いあるいは渋滞のない状態を表現している。なお、今回のモデルでは通勤時間帯や業務時間帯を区別せず、両方のトリップが同時に発生している状況を仮定する。

3. 総トリップ長最小型都市構造

〈3.1〉総トリップ長最小型都市の考え方 混雑度一定の条件の下では都市内のいたるところ走行状態が同じであるので、自動車燃費も同一となる。そのため、総運輸エネルギー消費量は総トリップ長に比例する。したがって、トリップ長を最小化する土地利用によってエネルギー消費最小化が達成できる。ここでは(1)式に基づき業務トリップおよび通勤トリップが発生するとした時に、(4)式を制約条件としながら総トリップ長を最小化する問題を考える。

〈3.2〉モデル定式化

(1) 業務交通および通勤交通

土地利用が原点对称になることは容易にわかる。ある地点の人口が(1)式に従って各地点に移動する時、地点 x を通るトリップ数は業務交通、通勤交通それぞれについて次のように求められる。

$$\begin{aligned} t_1(x) &= 2 \int_{-R}^x \int_x^R \sigma g(x_1) \phi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\ &= \frac{2\sigma^2}{P} \int_{-R}^x g(x_1) dx_1 \int_x^R g(x_2) dx_2 \\ &= \frac{P}{2} - \frac{2\sigma^2}{P} \left(\int_0^x g(u) du \right)^2 \quad \dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_2(x) &= \int_{-R}^x \int_x^R \rho f(x_1) \phi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\ &\quad + \int_x^R \int_{-R}^x \rho f(x_1) \phi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\ &= \frac{2\sigma\rho}{P} \left\{ \int_{-R}^x f(x_1) dx_1 \int_x^R g(x_2) dx_2 + \int_x^R f(x_1) dx_1 \int_{-R}^x g(x_2) dx_2 \right\} \\ &= \frac{P}{2} - \frac{2\sigma\rho}{P} \int_0^x f(x_1) dx_1 \int_0^x g(x_2) dx_2 \quad \dots (6) \end{aligned}$$

(2) 混雑度一定条件

(5)(6)を(4)式に代入して整理し、次式を得る。

$$1 - y' - z' = \frac{P}{2c} \{b_1 + b_2\} - \frac{2\sigma}{cP} \{b_1 \sigma z + b_2 \rho y\} z \quad \dots (7)$$

ただし、 y , z は次の通り置き換えた。

$$y(x) = \int_0^x f(u) du \quad \dots (8)$$

$$z(x) = \int_0^x g(u) du \quad \dots (9)$$

(3) 総トリップ長

今回のモデルでは都市内の任意の2地点間でトリップが発生する。 b_1 , b_2 の値によっては必ずしもすべての人口が自動車で移動するとは限らないが、すべてが自動車による場合がエネルギー的にみて最悪ケースを与えることから、ここではすべてのトリップ長の合計を最小化の対象とする。業

務交通、通勤交通それぞれのトリップ長の総和 L_1 , L_2 は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \int_{-R}^R \int_{-R}^R |x_1 - x_2| \sigma g(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 \\
 &= \frac{2\sigma^2}{P} \int_0^R \int_0^R \left\{ |x_1 - x_2| + x_1 + x_2 \right\} g(x_1) g(x_2) dx_1 dx_2 \quad \cdots \cdots (10)
 \end{aligned}$$

$$L_2 = \frac{2\sigma\rho}{P} \int_0^R \int_0^R \left\{ |x_1 - x_2| + x_1 + x_2 \right\} f(x_1) g(x_2) dx_1 dx_2 \quad \cdots \cdots (11)$$

往復を考慮すれば、総トリップ長は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 J &= 2(L_1 + L_2) \\
 &= \frac{4\sigma}{P} \int_0^R \int_0^R \left\{ |x_1 - x_2| + x_1 + x_2 \right\} \left\{ \rho y'(x_1) + \sigma z'(x_1) \right\} z'(x_2) dx_1 dx_2 \\
 &= \frac{8\sigma}{P} \int_0^R \left\{ \rho y'(x_1) + \sigma z'(x_1) \right\} \left(K + \int_0^{x_1} z(x_2) dx_2 \right) dx_1 \quad \cdots \cdots (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ただし,} \\
 K &= R z(R) - \int_0^R z(x_2) dx_2 \quad \cdots \cdots (13)
 \end{aligned}$$

(4) 問題の定式化

以上から、総トリップ長最小化型の土地利用分布は、次の評価関数および制約条件によって記述される。

$$J = 2(L_1 + L_2) \rightarrow \text{Min.} \quad \cdots \cdots (14)$$

$$\begin{aligned}
 \text{s.t.} \\
 y' + z' - \frac{2\sigma}{cP} (b_1 \sigma z + b_2 \rho y) z + \frac{P}{2c} (b_1 + b_2) - 1 &= 0 \quad \cdots \cdots (15)
 \end{aligned}$$

$$y(0) = 0, y(R) = \frac{P}{2\rho} \quad \cdots \cdots (16)$$

$$z(0) = 0, z(R) = \frac{P}{2\sigma} \quad \cdots \cdots (17)$$

本モデルでは都市の内部のみに交通が発生する。したがって、都市境界には道路が必要ない。 $y(R)$, $z(R)$ についての境界条件は次の条件、すなわち、都市の境界において道路面積はゼロになることを意味する。

$$f(R) + g(R) = 1 \quad \cdots \cdots (18)$$

〈3.3〉最適土地利用 上記の問題は変分法を用いて解くことができる。そこで、パラメータを設定し、数値的に微分方程式を解いて最適解を求める。

(1) 解法

この問題の積分汎関数は(15)式を束縛条件とした次式で表わされる。ただし、 G は(15)式左辺、 λ , μ はラグランジェ乗数である。

$$F = \frac{8\sigma}{P} \left(\rho y' + \sigma z' \right) (K + v) + \lambda G + \mu (v' - z) \quad \cdots \cdots (19)$$

$$\begin{aligned}
 \text{s.t.} \\
 v(x) &= \int_0^x z(t) dt \quad \cdots \cdots (20)
 \end{aligned}$$

変分法を適用しオイラー方程式から以下を得る。

$$y = \left\{ 1 - \frac{2\sigma(4c + b_1 \lambda)}{\rho(4c + b_2 \lambda)} \right\} z \quad \cdots \cdots (21)$$

$$\lambda' = -\frac{2\sigma\rho}{P} \left(4 + \frac{b_2}{c} \lambda \right) z \quad \cdots \cdots (22)$$

$$\mu = \frac{8\sigma}{P} (\rho y + \sigma z) \quad \cdots \cdots (23)$$

さらに、(21)を(15)式に代入して z に関する微分方程式を得る。この微分方程式系を解くには(16)(17)式の境界条件を満たすように $\lambda(0)$ および人口 P を設定する。

(2) 最適解

今回、パラメータ値は東京都に関するデータ[4,5,6]を参考に表1の通り設定した。これに基づいて得られた最適土地利用分布を図1に示す。図より次の特徴が導かれる。

- 業務地は都市中心部に集まる傾向を持つ。
- 居住地は都市外延部にいくほど比率が増加する。
- 道路は都市中心部に向かって急速に増大する。
- 都市中心部ではかなりの比率を道路にとられる。

都市の内部に業務地が集まり、その周辺に居住地が広がる傾向は、基本的に現状の都市における傾向と同様である。従来の都市構造理論[7]では“付け値曲線（地価の支払い可能額、都心ほど高くなる特性を持つ）”を先見的に与え、より高額を負担できる業務系が都心部に立地し、相対的に低額しか支払えない住宅系がその外側に立地するとモデル化されている。それに対し、今回のモデルでは経済的な支払い能力は全く考慮せず、トリップ長の最小化という確定的な基準のみから土地利用を導いた。言い替えれば、今回の結果は、土地利用形成には地価など経済的要因だけではな

表1 パラメータ設定値

Table 1. Parameters

パラメータ		単位	設定値
居住地人口密度		人/km ²	30,000
業務地就業人口密度		人/km ²	100,000
トリップ発生率	b ₁	1/h	0.23
	b ₂	1/h	0.08
道路幅員あたり交通量		台/h/m	300
都市の長さの半分		km	15

図1 総トリップ長を最小にする最適土地利用構造

Fig. 1. The optimal land use structure to minimize total trip length

図2 東京23区における距離別土地利用
Fig. 2. Land use structure in central districts of Tokyo.

く、トリップ長の短縮に伴う時間やエネルギーの削減などの物理的要因も基礎になっていることを示唆している。

現実との比較のため、東京23区において皇居を中心とした距離別土地利用面積比率を図2に示した[8]。これは半径1km幅きざみごとの平均土地利用比率を示す。業務地、居住地分布の傾向としては、モデルの結果は現実の分布に似ていると評価できる。道路については、モデルでは都市の境界から内側に入るにしたがって道路の比率が急速に拡大しているのに対して、実際は都心部の比率は周辺部よりわずかに高い程度である。周辺部の道路比率がモデルの結果よりも大きいことは、実際には23区の外側にも業務地・居住地が立地することや通過交通が存在することなどによる。また、都心部における業務地分布のピークが大きい点は、モデルは1次元のため中心部への集積が2次元の場合に比べて弱まること、現実の東京都心部は一極集中により過剰に業務地が立地していると考えられることに起因する。混雑緩和という点から見れば、モデルの結果から都心部では周辺部より相当に道路を確保しなければならないことが定性的にいえるが、現実には交通の集中に対して道路が不足している状況がみてとれる。

4. 職住近接型都市構造

4.1) 職住近接型都市の考え方 近年、増大する通勤混雑の緩和方策として“職住近接”がいられている。これは居住地近くの出先オフィスに勤務することによって、都心部への通勤を減らすことを目指している。この考え方は省エネルギーの観点からも都市計画において議論された[9]。それらは業務地と居住地の機能をコンパクトにまとめた小規模の都市を作れば遠距離移動が削減できるであろうことをねらいとした。ただし、その場合に必要または望ましい都市構造については定量的に示されていない。

そこで、本研究では混雑度一定の都市の中に職住近接の考え方を盛り込んだ場合に得られる土地利用構造を導くとともに、距離減衰係数で表現される近接の度合と総トリッ

プ長の関係を分析する。

4.2) モデル定式化 前モデルとは異なり今回は規範的モデルではなく、微分方程式系で表現される。

(1) 業務地分布

居住地は都市の内部だけに立地すると仮定するが、本モデルでは通勤トリップが距離に依存するので、都市の境界を越えて通勤が発生する。したがって、業務地は都市の外にも広がることになる。(2)および(3)式より、業務地分布は次式で求められる。

$$g(x_2) = \frac{\rho}{2\sigma} \int_{-R}^R \exp\left[-r\left|x_1 - x_2\right|\right] f(x_1) dx_1 \dots (24)$$

これは x_2 の存在範囲によって次の3通りに分かれる。

i) $x_2 < -R$ のとき

$$g(x_2) = \frac{\rho}{2\sigma} e^{rx_2} \int_{-R}^R e^{-rx_1} f(x_1) dx_1 \dots (25)$$

ii) $-R \leq x_2 \leq R$ のとき

$$g(x_2) = \frac{\rho}{2\sigma} \left\{ e^{-rx_2} \int_{-R}^{x_2} e^{rx_1} f(x_1) dx_1 + e^{rx_2} \int_{x_2}^R e^{-rx_1} f(x_1) dx_1 \right\} \dots (26)$$

iii) $R < x_2$ のとき

$$g(x_2) = \frac{\rho}{2\sigma} e^{-rx_2} \int_{-R}^R e^{rx_1} f(x_1) dx_1 \dots (27)$$

都市内部における(26)式より、 $g(x_2)$ は次式となる。

$$g'(x_2) = \frac{\rho}{2\sigma} \left\{ -e^{-rx_2} \int_{-R}^{x_2} e^{rx_1} f(x_1) dx_1 + e^{rx_2} \int_{x_2}^R e^{-rx_1} f(x_1) dx_1 \right\} \dots (28)$$

$$\therefore \left\{ rg(x_2) - g'(x_2) \right\} e^{rx_2} = \frac{\rho}{\sigma} \int_{-R}^{x_2} e^{rx_1} f(x_1) dx_1 \dots (29)$$

(29)式を微分して積分項を除けば、 $f(x)$ と $g(x)$ の関係は次の微分方程式で記述される。

$$\rho f(x) = -\frac{\sigma}{r^2} g''(x) + \sigma g(x) \dots (30)$$

(2) 業務交通と通勤交通

このモデルでも業務トリップは業務地人口に比例して発生するので、トリップ数は(5)式と同じ考え方で表わされる。一方、通勤トリップの発生は(2)式に従う。前述のように都市の内部とともに外部にも業務交通、通勤交通が存在するが、ここでは都市の内部 ($-R \leq x \leq R$) における交通を定式化する。業務地が無限遠まで存在するため、トリップの積分範囲も無限大までとなる。(25)~(27)式を用いて業務交通は次式で表現される。

$$\begin{aligned} t_1(x) &= 2 \int_{-R}^x \int_x^\infty \sigma g(x_1) \frac{\sigma g(x_2)}{P} dx_1 dx_2 \\ &= 2 \frac{\sigma^2}{P} \left\{ \int_{-R}^{-x} g(x_1) dx_1 + \int_{-x}^x g(x_1) dx_1 \right\} \left\{ \int_x^R g(x_2) dx_2 + \int_R^\infty g(x_2) dx_2 \right\} \\ &= \frac{P}{2} - \frac{2}{P} \left\{ \frac{\sigma}{r^2} g'(x) + \rho \int_0^x f(u) du \right\}^2 \dots (31) \end{aligned}$$

通勤交通は(2)式を用いて次式で求められる。

$$\begin{aligned}
t_2(x) &= \int_{-R}^R \int_{-R}^R \rho f(x_1) \varphi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\
&\quad + \int_{-R}^R \int_{-R}^R \rho f(x_1) \varphi(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\
&= \frac{\rho}{2} \left\{ e^{rx} \int_{-R}^R e^{-rx_1} f(x_1) dx_1 + e^{-rx} \int_{-R}^R e^{rx_1} f(x_1) dx_1 \right\} \\
&= \frac{\rho}{r} g(x) \quad \dots (32)
\end{aligned}$$

(3) 混雑度一定条件

混雑度一定条件を表わす(4)式をこの場合に適用すれば次式が導かれる。

$$f(x) + \left(1 + \frac{b_2 \sigma}{c r}\right) g(x) - 1 + \frac{b_1 P}{2c} - \frac{2b_1}{c P} \left\{ \frac{\sigma}{r^2} g'(x) + \rho \int_0^x f(u) du \right\}^2 = 0 \quad \dots (33)$$

これに(30)式およびその1回積分を代入し、 $g(x)$ に関する次の微分方程式を得る。

$$\begin{aligned}
\frac{\sigma}{\rho r^2} g''(x) - \left(1 + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{b_2 \sigma}{c r}\right) g(x) + 1 - \frac{b_1 P}{2c} \\
+ \frac{2b_1 \sigma^2}{c P} \left\{ \int_0^x g(u) du \right\}^2 = 0 \quad \dots (34)
\end{aligned}$$

(4) 問題の定式化

(34)式から積分項を除くことは可能であるが解法を難しくするので、ここでは $g(x)$ の積分を求解の対象に置き換える。すなわち、次のようにおく。

$$w(x) = \int_0^x g(u) du \quad \dots (35)$$

これより、職住近接の土地利用は次の微分方程式を解くことに帰着される。

$$w''' - k_1 w' + k_2 + k_3 w^2 = 0 \quad \dots (36)$$

ただし、

$$k_1 = \left(1 + \frac{\rho}{\sigma}\right) r^2 + \frac{b_2 \rho}{c} r \quad \dots (37)$$

$$k_2 = \left(1 - \frac{b_1 P}{2c}\right) \frac{\rho r^2}{\sigma} \quad \dots (38)$$

$$k_3 = \frac{2b_1 \sigma \rho}{c P} r^2 \quad \dots (39)$$

(36)式の結果から、居住地および業務地分布は次で得られる。

$$f(x) = -\frac{\sigma}{\rho} \left\{ \frac{w'''(x)}{r^2} + w'(x) \right\} \quad \dots (40)$$

$$g(x) = w'(x) \quad \dots (41)$$

(36)式を解くときの境界条件は次の通り。

$$w(0) = 0 \quad \dots (42)$$

$$w'(0) = g(0) \quad \dots (43)$$

$$w''(0) = g'(0) = 0 \quad \dots (44)$$

さらに制約条件として次の総人口の制約および都市境界においてなめらかに業務地分布が接続する制約が付属する。前者の条件は次式で表される。

$$2 \int_0^R \rho f(x) dx = P \quad \dots (45)$$

後者については、都市境界における業務地比率とその微分係数の関係は(26)(28)式より次のようになる。

$$g'(R) = -\frac{\rho r^2}{2\sigma} e^{-rR} \int_{-R}^R e^{rx_1} f(x_1) dx_1 = -r g(R) \quad \dots (46)$$

これらを満足するように $g(0)$ および P を決めれば解が得られる。

〈4.3〉土地利用分布 距離減衰係数 r に関する感度解析を行った結果を図3に示す。なお、(2)式のトリップ発生メカニズムによれば平均通勤距離は $1/r$ となるので、距離減衰係数は平均通勤距離の逆数という意味を持つ。計算結果から次のような特徴がまとめられる。

業務地： r が小さい場合（通勤距離が長い場合）には業務地は都心部の比率が最も高く、周辺部にいくに従って緩やかに減少する。 r が増加するにつれて都市外縁部の比率が増大する。分布は外縁部にピークを持ち、都市境界付近で急激に比率が減少する。また、 r の増加により都市外部の業務地立地が減るため、内部の業務地面積が拡大する。

居住地：都心部から外縁部に向けて緩やかに比率が増加する。この増加傾向は r が大きくなるに従って強まるとともに、都市境界の直前で比率が急増する。この時、近距離通勤になるにつれて都市外部に立地する業務地が減少するので、都市内部と外部間の交通が減少する。これに伴い都市境界付近の道路が居住地・業務地に置き替わるため、都市人口が増大する傾向を示す。

道路：道路比率は都市中心部で高く、都市境界部分に近づくにつれて減少していく。 r が小さいほど境界での道路比率が大きい点は、外部の業務立地が多くなるため内外間の業務交通、通勤交通が増加することに起因する。分布の概形は総トリップ長最小化型モデルと同様であり、都市中心部における交通の集中を反映している。

総トリップ長最小化型モデルの結果が現実的な都市の状況に似ていたのに対し、職住近接型モデルでは業務地が都市内にはほぼ一様に広がっており、様相がかなり異なる。これは通勤形態が都市構造に大きな影響を及ぼすことを表わしている。現実に東京都心部に集中している業務機能を横浜、大宮、千葉などの周辺部に立地する都市に分担させるべく都市開発が進められているが、今回の結果には職住近接のためには都心部に集積する業務部門を広く都市外縁部に拡散させる必要があることが示唆されている。

〈4.4〉総トリップ長 職住近接型の場合には距離減衰係数が大きくなるにつれて通勤距離は減少するが、一方で業務交通の移動距離も影響を受けるため必ずしも総トリップ長が減少するとは限らないと予想される。図4に距離減衰係数に対する業務交通および通勤の総トリップ長と、1人・1時間あたり自動車トリップ長を示す（距離減衰係数0.1と1.0では総人口が7%程度拡大する）。なお、ここでの総トリップ長には自動車によらないものも含む。

図より、1人あたり自動車トリップ長は距離減衰係数が0.1から増加するにしたがって急激に減少するが、0.5で最小値をとりその後はやや増加する。総トリップ長についても同様の傾向が認められる。距離減衰係数の増大につれて業務トリップ長は通勤距離とともに減少するが、0.5で最小

(a) $r = 0.1$ の場合

(b) $r = 0.5$ の場合

(c) $r = 1.0$ の場合

図3 職住近接型の場合の土地利用

Fig. 3. Land use structure for shorter-commuting-preferred case.

図4 総トリップ長に対する距離減衰係数の影響

Fig. 4. Effects of parameter "r" on the total trip length.

となった後に増加に転ずる。業務と通勤合わせて0.8以降はほぼ飽和傾向を示している。前半の減少は業務立地が都市の内側に移行してくることに起因し、後半の増加は外縁部における業務立地の比重が高まることによる。

このことから、運輸エネルギー消費削減の観点からみればトリップ長を最小にする最適な距離減衰係数が存在する。言い替えば、従来通勤者の立場から職住近接が言われてきたが、任意の業務地間で業務トリップが発生する条件の下ではやみくもに職住近接を図るよりも適当な通勤距離の選択状態をとることが望ましいといえる。

5. おわりに

本研究では都市における土地利用と運輸エネルギー消費との関係の分析を目的として、2種類の混雑度一定の都市モデルを作成した。総トリップ長最小化型モデルは業務地が都心部に、居住地が外縁部に立地することの最適性を示し、物理的尺度に基づいて実際の都市に似た傾向を導き出したことは興味深い。また、職住近接型モデルは外縁部まで業務地が広がる傾向を示し、通勤混雑緩和のために求められる都市整備の方向性を示唆しているように思われる。さらに、職住近接と業務交通を含めた総トリップ長の関係に関する議論^[10]は従来あまり見受けられなかったが、今回の結果から運輸エネルギー消費を最小化する上で最適な通勤距離選好の存在が定量的に求められた。

混雑度一定の都市モデルは現状の道路の不足状態をみる一つの尺度になると考えられる。今回は1次元モデルであるが、計算結果は都心部にかなり道路を確保する必要があることを示している。現実には都市は2次元で広がっているため、都心部における交通の集中は一層激しく、今回得られた道路比率は控えめな値とみるべきである。その意味でも東京23区中心部の道路面積の現状値は混雑緩和のためには不足であると評価できる。

従来、運輸エネルギー消費削減に関して公共交通の利用促進が強く言われているが、貨物輸送や業務交通など公共交通に転換できない部分が残ることを考えれば、土地利用を適正化することによって混雑を緩和し、走行燃費を改善することは不可欠である。さらに長期的・構造的に運輸エネルギー消費を削減するためには、都市全体を省エネルギー型の土地利用に改善していくことが重要と考えられる。

現実の都市形態を反映するため、2次元円形の都市をモデル化することが今後の課題である。それにより都心部における交通の集中がより現実的に記述することが可能となるとともに、放射状道路、環状道路の分布を得ることができるとともに、旅客輸送だけでなく貨物輸送を含めることも課題である。

なお、東京23区の土地利用データ解析に関して東京大学先端科学技術研究センター花木教授、一ノ瀬助手に御協力いただいたことを感謝申し上げます。

(平成6年10月17日受付、同7年3月6日再受付)

文 献

- (1) 宮武・秋澤・茅：「運輸エネルギー消費を最小化する最適都市構造」，平成6年電気学会全国大会，No.1650 (1994)
- (2) 大河原・鈴木：「職住の最適割り当てによる通勤時間の削減効果ー東京大都市圏での実証分析ー」，電力中央研究所報告，Y92015 (1993)
- (3) 田口：「混雑のない都市のモデル」，1993年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集 (1993)
- (4) 「東京都統計年鑑」，東京都総務局
- (5) 「昭和55年度東京都市圏総合都市交通体系調査報告書ーパーソントリップ調査総括編ー」，東京都市圏交通計画委員会 (1981)

- (6) 「昭和60年度道路交通センサス 自動車起終点調査集計報告書 集計編」，建設省道路局 (1987)
- (7) 山田：「都市の経済分析」，東洋経済新報社 (1980)
- (8) 一ノ瀬，花木，松尾：「細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布構造解析」，環境工学研究論文集，vol. 31 (1994)
- (9) Comptroller General："Greater Energy Efficiency Can Be Achieved Through Land Use Management"，United States General Accounting Office (1981)
- (10) 腰塚：「一極集中問題をめぐって」，文部省科学研究費補助金重点領域研究「高度技術社会のパスベクティブ」第15回研究懇談会講演録 (1992)

秋澤 淳

(正員) 1961年12月29日生まれ。87年3月東京大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)三菱総合研究所入社。平成7年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京農工大学工学部講師。博士(工学)。主としてエネルギーシステムの分析を対象とした研究に従事。計測自動制御学会，日本オペレーションズ・リサーチ学会，エネルギー・資源学会，日本シミュレーション学会会員。

茅 陽一

(正員) 1934年5月18日生まれ。62年3月東京大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年4月同大学工学部講師，63年4月同助教授，78年同教授。平成7年4月慶応大学大学院政策・メディア研究科教授。工学博士。システム制御工学，エネルギー，電力システムの計画・分析，および地球温暖化対策の評価に関する研究に従事。電子情報通信学会，計測自動制御学会，エネルギー・資源学会，IEEE会員。