運輸エネルギー消費を最小化する 最適都市構造の評価

学生員 宮武 昌史 (東京大)

学生員 秋澤 淳 (東京大)

正員 茅 陽一 (東京大)

Evaluation of Optimal Urban Structure Minimizing the Energy Consumption in Automobile Transportation
Masafumi Miyatake, Student Member, Atsushi Akisawa, Student Member, Yoichi Kaya, Member
(The University of Tokyo)

After the oil shock, industrial sector made an effort and succeeded in energy conservation. However, in transportation sector, effective means for energy conservation was not sufficiently developed yet. Especially, the road traffic in urban areas is not still efficient because of its heavy traffic jam. Since fuels for automobiles are one of main sources of CO₂ emission, reducing fuel consumption in transportation sector is certainly effective to avoid global warming. To make remarkable improvement in energy conservation in transportation sector, not only improvement of the efficiency of engine but also arrangement of land use in urban areas to reduce trip length is effective.

The purpose of this paper is to suggest an appropriate urban structure minimizing necessary transportation energy consumption. To simplify the problem, we concentrated on the city model with commuting and business trip by automobiles. We developed an optimization model in which the fuel consumption is minimized by adjusting the distribution of living area, business area, and street area. Simulation results demonstrate some features of optimal structure; Optimized urban structure changes depending on population density; it has the optimal point of the density to minimize fuel consumption per person. These results are compared with schematic distribution of population density in real cities.

キーワード: 省エネルギー, 運輸エネルギー, 交通, 都市構造, 非線形最適化

1. はじめに

オイルショックをきっかけとして、エネルギーシステムには変化があらわれ、エネルギー効率面での無駄が改善されてきた。さらに近年話題になってきたCO₂による地球温暖化の対策の一つとして再び省エネルギーが叫ばれている⁽¹⁾。日本のエネルギー消費の約半分を占める産業部門の省エネルギーはすでにかなり進んでいることを考えると、民生・運輸部門での省エネルギーが大きな課題となる。特に運輸用の流体燃料は、ほぼ全量を化石燃料に依存している。

産業部門エネルギー消費の伸びが停滞している一方で、運輸エネルギー消費の伸びは、GNPの伸びにほぼ比例的に増加する傾向を示している。このことは、経済成長と地球温暖化抑制の両立を図るためには早急に運輸エネルギー消費の抜本的な削減方法を議論する必要性を示唆している。

一方、運輸エネルギー消費の中心である都市部における道路交通の混雑には改善の兆しはみられず、交通渋滞の結果燃費の悪化等をもたらしている⁽²⁾。したがって、現在の

都市は運輸エネルギー多消費型の構造となってしまうと言わざるを得ない。

運輸エネルギー消費を、燃費(kcal/km)÷乗車人数(人)×輸送量(人キロ)と捉えれば、基本的に都市の運輸エネルギー削減の方法には、次の3つの方向性が考えられる。

- (i) 自動車単体の燃費の向上
- (ii) 乗車効率や積載効率の向上
- (iii) 都市構造の省エネルギー化

(iii)は、都市構造を変更することで輸送人キロを減少させることに相当する。(i),(ii)は、ユーザーサイドを中心とした比較的短期的な方策である一方、(iii)は公共政策的な面が強い長期的課題といえる。しかしながら、地球温暖化抑制のために構造的に化石燃料消費を削減するためには(iii)の視点が不可欠である。一方、従来都市構造と交通に関しての数学的関係についての研究は二、三あるが、交通エネルギーにまで目を向けた研究は見当たらない。そこで、本研究では(iii)に注目し、都市構造と運輸エネルギー消費の関

係をモデル化し、最適な都市構造を導いてみた⁽³⁾。

2. 都市構造モデルの前提

<2・1> 前提条件 本研究で作成した最適化モデルは、都市の土地利用とそこから生じる交通量をモデル化し、都市全体の運輸エネルギー消費を最小化するものである。実際の都市構造や交通現象は複雑かつ不確定的な要素が多いので、運輸エネルギー消費に影響する要因を端的に把握できるよう、本研究では次の仮定をし、簡略化を行った。

- (i) 土地利用は、居住地・業務地・道路に区分する。
- (ii) 自動車による通勤交通と業務交通のみを考慮する。
- (iii) 通勤時間帯には通勤交通のみ、業務時間帯には業務交通しか生じない。
- (iv) 都市外との交通は一切無視する。
- (v) すべての人口が通勤する。
- (vi) 2点間の交通発着量は2点の人口の積に比例する。
- (vii) 通勤、業務の各時間帯内では交通量は定常とする。
- (viii) 通勤交通と業務交通のトリップ数比は一定とする。

必要な諸定数は文献資料を参考に、表1のように仮定した。

表 1: 各定数の値
Table1. Values of constants.^{(4) (5) (6) (7)}

定数	記号	設定値
通勤時間帯	T_c	2(時間)
業務時間帯	T_b	8(時間)
居住地人口密度	ρ_h	20000(人/km ²)
業務地雇用人口密度	ρ_b	50000(人/km ²)
車1台当たり	通勤 業務	2(人)
乗車人数		
通勤交通/業務交通	β	1.5
単位幅当たり渋滞密度	k_j	25000(台/km ²)
自由走行速度	v_f	40(km/h)

注) 自由走行速度は信号待ちの時間なども含む

<2・2> 交通量と燃料消費の関係 道路の基本的諸量である、交通量・速度・時間・燃料消費の関係式を以下に説明する。単位幅当たりの渋滞密度を k_j (台/km²)、自由走行速度 (他に車がない時の走行速度) を v_f (km/h)、道路幅を w とする。一般に、片方向の交通密度 k (台/km) と走行速度 v (km/h) の関係は、(1) 式のように表わされる⁽⁶⁾ ことが多い。

$$k = \frac{k_j w}{2} \left(1 - \frac{v}{v_f}\right) \quad (1)$$

片方向の交通量 q (台/h) と交通密度 k には (2) 式の関係があるので、交通量 q と走行速度 v の関係は (3) 式で書ける。

$$q = kv \quad (2)$$

$$q = \frac{k_j w}{2} v \left(1 - \frac{v}{v_f}\right) \quad (3)$$

図 1: 交通量、速度、燃料消費量の関係

Fig.1. Relation between traffic quantity and velocity (a), between velocity and fuel consumption (b).

(3) 式を v について解くと、(4) 式が得られる。

$$v = \frac{v_f + \sqrt{v_f^2 - \frac{8v_f q}{k_j w}}}{2} \quad \left(q \leq \frac{k_j w v_f}{8}\right) \quad (4)$$

これを図示すると図 1(a) の実線のようにになる。なお、点線の部分は渋滞が発生した時の特性を示している。ここでは渋滞でない状態を仮定し、実線部のみを用いる。

速度 v と燃料消費量 ϵ (ml/台 km) の関係は、文献⁽⁸⁾によると (5) 式で近似できる。(5) 式を図 1(b) に図示する。

$$\epsilon = \left(\frac{1103.0}{v} - 1.414v + 0.0151v^2 + 73.86\right) \quad (5)$$

これをもとに以下では、1次元都市についてモデル化を行い、最適解の感度解析を行なった。さらに、2次元都市にモデル化を拡張し、1次元モデルの結果が2次元においても妥当であることを確認した。

3. 1次元モデルの基本構成

本モデルで用いる変数を表2に示す。

表 2: 変数の定義
Table2. Definition of variables.

種別	居住地 (km ²)	業務地 (km ²)	道路 (km ²)
土地利用面積	h_i	b_i	r_i
種別	交通量 (台/h)	通過時間 (h)	燃料消費 (ℓ/台)
通勤	q_{ci}^+	t_{ci}^+	ϵ_{ci}^+
交通	q_{ci}^-	t_{ci}^-	ϵ_{ci}^-
業務交通	q_{bi}	t_{bi}	ϵ_{bi}

注) 業務交通量は両方向とも同じとなるため、一つの変数としてある。

<3・1> 都市形状 1次元都市として、 n 個のブロックを1次元方向に並べた図2のモデルを考えた。各ブロックは、居住地・業務地・1次元方向の道路からなっている。居住地・業務地から生じる通勤・業務交通量と、それを道路でさばく場合に生ずるエネルギー消費などの諸量をモデル化する。

図 2: 1 次元モデルの基本的構成

Fig.2. Basic scheme of One-Dimensional-Model.

<3・2> 制約条件 各ブロックの面積について (6) 式が成り立つ。

$$h_i + b_i + r_i = DL \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

また、総人口 P が、各ブロックの居住地人口の和に等しいことで (7a) 式、業務地雇用人口の和に等しいことで、(7b) 式が成立する。

$$P = \rho_h \sum_{i=1}^n h_i \quad (7a)$$

$$P = \rho_b \sum_{i=1}^n b_i \quad (7b)$$

さらに、土地利用について、(8) 式の仮定を設けた。これによって、道路がないブロックや道路ばかりの非現実的なブロックができることを防いでいる。

$$0.1DL \leq r_i \leq 0.9DL \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

以上に加えて、各変数について非負条件が設定される。

<3・3> 交通量 あるブロックの発トリップ数が、各ブロックの業務地人口に比例して分配されるとする。例えば、通勤交通の場合、ブロック i の発トリップ数 $\rho_h h_i$ をブロック j の業務地人口比 $\rho_b b_j / P$ で分配する。よって、ブロック i から j に生じる通勤トリップ数 T_{ij} は (9) 式のようなになる。

$$T_{ij} = \rho_h h_i \frac{\rho_b b_j}{P} \quad (9)$$

T_{ij} が分かれば、ブロック i を右方向に利用するトリップ数は、同一ブロック内の交通も近似的に含めて (10) 式で求められる。

$$A_i^+ = \sum_{j=1}^i \sum_{k=i}^n T_{jk} \quad (10)$$

このトリップ数を単位時間当たりの車の交通量 q_{ci}^+ に直すと、(11) 式となる。

$$q_{ci}^+ = \frac{A_i^+}{T_c \alpha_c} \quad (11)$$

左方向の場合、業務交通の場合も同様に考えると、土地利用と第 i ブロックを通過する交通量の関係は (12)~(14) 式のようなになる。

$$q_{ci}^+ = \frac{\rho_h \rho_b}{PT_c \alpha_c} \sum_{j=1}^i \sum_{k=i}^n h_j b_k \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

$$q_{ci}^- = \frac{\rho_h \rho_b}{PT_c \alpha_c} \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^i h_j b_k \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

$$q_{bi} = \frac{\rho_b^2}{PT_b \alpha_b \beta} \sum_{j=1}^i \sum_{k=i}^n b_j b_k \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

<3・4> 目的関数 目的関数は、必要な総走行時間と燃料消費の両方を設定し、最適解の比較を行う。(12)~(14) 式で得られる交通量に基づき、(4)~(5) 式から通過時間および燃料消費量を求める。走行時間と燃料消費の目的関数は、ブロック内交通も含め、それぞれ (15), (16) 式のように表される。なお、通勤交通の係数 2 は、朝夕の 2 回という意味で、業務交通の係数 2 は、左右両方向という意味である。

$$Time = \sum_{i=1}^n \left\{ \underbrace{2T_c(t_{ci}^+ q_{ci}^+ + t_{ci}^- q_{ci}^-)}_{\text{通勤}} + \underbrace{2T_b t_{bi} q_{bi}}_{\text{業務}} \right\} \quad (15)$$

$$Energy = \sum_{i=1}^n \left\{ \underbrace{2T_c(\epsilon_{ci}^+ q_{ci}^+ + \epsilon_{ci}^- q_{ci}^-)}_{\text{通勤}} + \underbrace{2T_b \epsilon_{bi} q_{bi}}_{\text{業務}} \right\} \quad (16)$$

<3・5> 変数と制約条件の整理 ここでは、 $n = 10$ とし、左右の対称性を考えて変数の削減を行った。表 2 の各変数は $i = 1 \sim 5$ の 5 個ずつとなる。

さらに、等号制約を用いて変数を削減する。(4) 式、(5) 式から t, ϵ は q で表現が可能であるので、(15) 式、(16) 式は、表 2 の変数 $h_i, b_i, r_i, q_{ci}^+, q_{ci}^-, q_{bi}$ のみで表すことができる。したがって実際の変数の数は、 $h_i, b_i, r_i, q_{ci}^+, q_{ci}^-, q_{bi}$ の 30 個と考えてよい。これに対し、等号制約は (6) 式が 5 本、(7a) 式、(7b) 式、(12) 式~(14) 式が 15 本で合わせて 22 本である。したがって、必要な変数は 8 個であり、ここでは $h_1 \sim h_4, b_1 \sim b_4$ を変数として用いた。

不等号制約は、(4) 式に付随するものが $q_{ci}^+, q_{ci}^-, q_{bi}$ について 15 本、(8) 式が 10 本、 h, b の非負条件が 10 本で、合計 35 本である。ただし、 $h_1 \sim h_4, b_1 \sim b_4$ の非負条件 8 本については、例えば $h_1 = H_1^2$ などの変数変換によって簡単に除去できるので、最終的に変数 8 個、不等式制約 27 本の非線形計画モデルとして表現できる。

非線形計画問題の解法にはさまざまなものがあるが、今回解く問題は性質上、精度をそれほど必要としないので、最も簡単な部類の最大傾斜法を用いた。また、不等式制約は、ペナルティーとして目的関数に含め、探索点が不等式制約を外れると大きな値が課せられるようにした。しかし、不等式制約の外では、(4) 式の関係で (15) 式、(16) 式が複素数となる場合が生じる。この場合はペナルティーのみの計算を行なうことにした。また、Local Minimum に陥るのを防ぐ必要があるが、単純な方法として探索の初期値をさまざまに変えて最適性のチェックを行なった。

なお、このモデルでは、余った土地はすべて道路になるため、算出された道路面積がすべて必要とは限らない。これを判断するには交通量と照らし合わせる必要がある。

図 3: 人口密度と一人当たり燃料消費, 走行時間の関係
 Fig.3. Relation between population density and fuel consumption per head (a),
 between population density and trip time per head (b).

図 4: 最適化された都市構造および道路の混雑度
 Fig.4. Optimized urban structure and degree of road traffic congestion.

4. 1次元モデルによる解析

<4・1> 人口密度による感度解析 人口および、幅 $D=1(\text{km})$ を一定にして都市構造を最適化した。さらに、都市の長さを変えることにより人口密度を変化させ、燃料消費および走行時間の分析を行った。人口は10万人から50万人まで、10万人刻みで設定した。結果を図3に示す。ここでは、異なる人口での比較のため、人口密度と一人当たり燃料消費および走行時間の関係として整理した。

図3をみると、まず、燃料消費最小化と走行時間最小化の差はほとんどない(最大で1%程度)ことがわかる。このモデルでとりうる速度は20~40km/hとなるが、この領域では、式(5)が速度にほぼ反比例し、近似的に時間を表わす量になることに起因する。

また、人口に対して、消費燃料が最小となる人口密度が存在することが読み取れる。この人口密度より低密度では都市が長くなることによるトリップ長の増加、高密度では十分な道路が確保できないための道路の混雑により消費燃料が増える。そして、必要最低限の道路すら確保できなくなった地点で解が出なくなり、最大の限界人口密度を与える。また、道路の混雑よりトリップ長の増加のほうが燃料消費に与える影響が大きいことも読み取れる。

ところで、図3では、人口が増えるほど一人当たり燃料消費または走行時間が大きくなっている。これは、人口規模が大きくなるにつれ、都市の長さが拡大することによる。しかし、小さい都市の方が省エネルギー性が高いかという点は、本モデルでは含めていない都市間交通のことを考慮する必要がある。これは、各都市が自立した経済圏を作れるか否かに依存する問題である⁽⁹⁾。

<4・2> 最適都市構造 人口10万人のときの、人口密度による最適都市構造の変化を、図3における(A)~(D)の4通りについて示したものが図4である。なお、走行時間最小化と燃料消費最小化の場合の目立った差は見られなかったため、走行時間最小化の場合について図示した。図中で用いている混雑度は、(17)式で定義する。

$$\text{混雑度} = \frac{\text{現実の交通量 (台/h)}}{\text{道路がさばける最大交通量 (台/h)}} \quad (17)$$

これらの図をみると、人口密度が低いうちは業務地が中心にあり、職住分離の形をしている。これは、業務交通による燃料消費を軽減しようということに起因する。やがて、人口密度が大きくなるにつれて、居住地が都市の中心部に入ってきて、職住近接の形を取るようになる。この土地利用の変化は、図4の混雑度のグラフから分かる通り、通勤時に上りと下りの交通量の差を小さくし、限られた道路を有効に利用するためと解釈できる。

5. 2次元モデルへの拡張

<5・1> 定式化 1次元モデルの拡張として、放射道路と環状道路を持つ円形の2次元モデルを考える。この概

要は図5のように、居住地・業務地・放射道路・環状道路の4種類の土地利用を考慮したもので、基本的には1次元モデルを回転させたものと考えてよい。しかし、1次元と異なり、中心の1点に集まる環状道路を通らない交通をさばくため、中心にロータリ区域を設けた。

図5: 2次元モデルの基本構成

Fig.5. Basic scheme of Two-Dimensional-Model.

図6: 環状道路の使用条件

Fig.6. Condition of using circular road.

また、2次元の場合、1次元の時にはなかった経路選択という問題が生じる。今回の研究では単純化のため、最短距離の経路を通ると仮定した。すなわち、2地点と中心のなす角が2rad以下のときに、中心に近い地点を通る環状道路を使う⁽¹⁰⁾ことになる(図6)。このとき、環状道路を使う車の平均移動角は、1radとなる。

表3: 変数の定義(2次元モデル)

Table3. Definition of variables (Two-Dimensional-Model).

種別	居住地 (km^2)	業務地 (km^2)	道路 (km^2)	
			放射	環状
土地利用面積	h_i	b_i	r_{ri}	r_{ci}
種別			交通量 (台/h)	燃料消費 ($\ell/\text{台}$)
通勤交通	放射 道路	下り	q_{cri}^+	ε_{cri}^+
		上り	q_{cri}^-	ε_{cri}^-
	環状道路		q_{cci}	ε_{cci}
業務交通	放射道路		q_{bri}	ε_{bri}
	環状道路		q_{bci}	ε_{bci}

2次元モデルは1次元の時と同様に、次のように定式化される。各領域の土地利用を表3のように置くと、面積的な制約として(18)式が成り立つ。

$$h_i + b_i + r_{ri} + r_{ci} = \pi(iL + L_0)^2 - \pi\{(i-1)L + L_0\}^2 \\ = \pi\{(2i-1)L^2 + LL_0\} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

これ以外は1次元モデルとほぼ同様の制約式が付く。ただし、簡略化のため、(8)式に相当する式は除いた。

各道路の交通量を求める場合、交通のパターンとしては、

- (i) 環状道路を使わず、中心を通る交通
- (ii) 環状道路を使う交通

があり、放射道路の交通量を考える場合は(i),(ii)、環状道路の交通量を考える場合は(ii)を考えればよい。

放射道路の交通量は、1次元と同じような考え方で求められるが、(i)の場合、図6のように、一旦中心を通ることから、外側の領域どうしの交通が内側の領域の交通量にも影響を与えることに注意する必要がある。すなわち、(i)における領域*i*の放射道路の交通量は、領域1~*n*と領域*i*~*n*の間に生じる交通量として定式化できる。また、(ii)における領域*i*の放射道路の交通量は、領域1~*i*と領域*i*~*n*の間に生じる交通量として定式化できる。

そして、領域*i*の環状道路を通る交通量は、領域*i*と領域*i*~*n*の間に生じる交通量として計算でき、前述のように平均移動角が1radであるので容易に処理することが可能である。交通量が出れば、あとは1次元の議論と同様に燃料消費など、他の諸量が求められる。

エネルギー消費に関する目的関数は(19)式で表される。この式では、道路諸量は片方向のみを考えている。

$$Energy = \sum_{i=1}^n \left\{ 2T_c(\varepsilon_{cri}^+ q_{cri}^+ + \varepsilon_{cri}^- q_{cri}^- + 2\varepsilon_{cci} q_{cci}) \right. \\ \left. + 2T_b(\varepsilon_{bri} q_{bri} + \varepsilon_{bci} q_{bci}) \right\} \quad (19)$$

<5・2> 変数と制約条件の整理 ここでは、放射方向を5つのブロックに分けて解析を行った。変数は、1次元に比べて環状道路 r_c が増えることにより、5個増の13個となる。したがって、 $h_1 \sim h_4, b_1 \sim b_4, r_{r1} \sim r_{r5}$ を変数として用いることにした。

また、不等号制約は1次元に比べると、(8)式に相当する式がないことで10本減、 q_{cc}, q_{bc} の環状方向の交通が加わることによる非負条件で10本増、 r_c の非負条件で5本増、 r_r の非負条件が $r_{r1} = R_{r1}^2$ などの変数変換で消去できることで増減なしとなる。以上から、変数13個、不等号制約合計32本の非線形計画モデルとして表現できる。

<5・3> 最適解 解析結果を中心を通る断面図で示したのが図7である。ただし、ロータリ部分は除いてある。この結果では、居住地と業務地の関係は1次元のときと同様の傾向が得られており、2次元の場合に対しても1次元モデルが定性的に有効であることを示している。

6. 現実の都市との対比

ここでは、現実の都市構造と、モデルの解析結果を比較し、モデルの妥当性を検討する。現実の都市のデータを図

図7: 2次元モデルの最適化都市構造
Fig.7. Optimized urban structure
of Two-Dimensional-Model.

8(b)に紹介する⁽¹¹⁾。ただし、居住人口密度と業務人口密度のみのデータである。一方、図8(a)は解析結果を比較しやすいように、同じ形式にまとめたもの(代表として図4の人口10万人(A),(D)の場合)である。

今回のモデルから得られた都市中心部に業務地が分布する結果は、実際の都市における傾向に合致する。また、周辺に居住地、中心に業務地があるという点で、図8(a)低人口密度の結果はニューヨーク、パリの全体的構造とよく合う。両都市の中心部だけに注目すると、中心部にも居住地があるという点で図8(a)高人口密度の構造に近いともいえる。したがって、本モデルは都市構造の一つの傾向を表現できていると考えられる。一方、東京は中心に居住地が少なく、周辺にも業務地が広がっており、他の2都市と比べてモデルとの類似性がやや弱い。この点は、地価、居住様式や公共交通などの違いによる影響と予想される。ところで、モデルより実際の人口密度が特に中心部で大きいのは、実際の都市中心部の高層化が進んでいるためと考えられる。これは、本モデルでは考慮しなかった高層化の影響を含めたモデルを構成する必要性を示唆している。

7. おわりに

本研究では、本来非常に複雑な問題である交通現象や都市構造の基本的な特性のみを考え、できる限りの簡略化を行った。それにより、燃料消費を最小化する都市構造を定量的に導出できたことが一つの大きな成果である。

また、今後の課題として挙げられる主なものは、公共交通の考慮による省エネルギー性の検討、都市間交通も含めた議論、2次元での交通流の迂回効果の評価、都市の高層化と合わせた議論などである。また、本研究では制約条件付き非

(a) モデルの解析結果

(b) 現実の都市

図 8: モデルの解析結果と実際の都市の中心部居住地人口・業務地人口分布構造の比較

Fig.8. Comparison of simulation results with real cities.

線形計画法を解いているが、不等号制約や Local Minimum の処理が難しく計算時間を要するため、細かい分割による解析が困難であった。詳細な解析のために、さらに効率のよいアルゴリズムを工夫する必要がある。

今回は運輸エネルギーのみに限って議論を進めてきた。さらに、運輸燃料消費を最適化する都市構造に加え、居住地の集中が地域熱供給の可能性を高める効果など、民生用エネルギー消費に対する影響も考えられる。その意味で、今回の研究が、環境に調和した都市像構築のために民生エネルギー消費なども含めた総括的な議論の中に取り入れられ、役立っていくことを期待している。

(平成 6 年 7 月 4 日 受付、同 6 年 12 月 28 日再受付)

文 献

- (1) 茅・鈴木・中上・西廣:「エネルギー新時代」,財団法人 省エネルギーセンター,(1988)
- (2) 日産自動車株式会社 交通研究所:「自動車交通 1992」,(1992)
- (3) 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)
- (4) 東京都都市計画局:「東京の土地利用 S61 東京都区部」,(1986)
- (5) 総務庁統計局:「国勢調査」,(昭 60)
- (6) 土木学会:「第四版 土木工学ハンドブック」,技報堂出版,(1989)
- (7) 東京都市圏交通計画委員会:「昭和 55 年度東京都市圏総合都市交通体系調査報告書」,(1980)
- (8) 建設省道路局資料,(1988)
- (9) 松岡・森田・有村:「都市構造及び都市配置と地球温暖化」,環境研究 1992, No.86, pp.51-65,(1992)

- (10) 田口・大山:「ネットワーク構造に基づく道路の重要度評価」,オペレーションズ・リサーチ Vol.38 No.9, pp.465-470,(1993)

- (11) 東京大学工学部交通工学研究共同体:「東京の交通問題」,技報堂出版, p.9,(1993)

宮武 昌史 (学生員) 昭和 47 年 3 月 16 日生。平成 6 年 3

月東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程進学。現在は主に交通システムを対象とした研究に従事。

秋澤 淳 (学生員) 昭和 36 年 12 月 29 日生。昭和 62 年

3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月株式会社三菱総合研究所入社。現在、東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程在籍中。主にエネルギーシステムを対象とした研究に従事。

茅 陽一 (正員) 昭和 9 年 5 月 18 日生。37 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、38 年 4 月同助教授、53 年同教授となり現在に至る。工学博士。システム制御工学、最近はエネルギー・電力システムの計画・分析に従事。過去に電気学会論文賞 2 回を含む学会賞受賞 6 回。