

貨物車消費エネルギーと都市特性に関する研究

環境システム工学専攻 インフラ計画研究室 酒井 大輔

指導教官 佐野 可寸志

松本 昌二

1. はじめに

高度経済成長期より我が国では、交通手段を自動車に大きく依存した社会構造が継続しており、都市部における深刻な渋滞のみならず、エネルギー消費の増大、大気汚染、騒音などに代表される社会問題を引き起こした。特に、本研究で注目するエネルギー消費の急激な増大は、今後地球環境を考えるなかで大変重要な問題であり、早急かつ持続的なエネルギー低減策が必要であると言えよう。また、エネルギー消費の問題は貨物車交通に関しても例外ではなく、運輸部門におけるエネルギー消費の約3割をしめており、その存在が重要であることは明らかである。

自動車交通がエネルギー消費に与える影響要因として、都市特性や都市構造といったものが考えられ、既存研究においても、自動車交通のエネルギー消費と都市特性や都市構造の関連性を扱ったものが存在する。しかし、自動車交通といっても自家用乗用車、バス、貨物車が存在し、これらの交通行動は明らかに異なるにもかかわらず、統合もしくは乗用車交通、バス交通のみを考えたものが多く、貨物車に限ったものはあまり行われていないのが現状である。

そこで本研究は、貨物車のエネルギー消費と都市特性の関連性に着目し、エネルギー消費に影響する要因を抽出することを目的とする。

自動車交通のエネルギー消費や都市特性、都市構造を扱った研究は、実在都市を用いてエネルギー消費の少ない都市構造を模索したもの¹⁾²⁾、政策等のケーススタディを用いたもの³⁾⁴⁾⁵⁾、仮想都市を想定したもの⁶⁾等が存在する。これらの研究から明らかとなったこととして、中心市街地への集積や、高密度化、コンパクト化がエネルギー消費の低減につながるとしている。しかし、既存研究は主として自家用乗用車や公共交通が対象であり、貨物車は統合して考えられており、貨物車のみに着目したものはほとんど見られない。

2. 対象都市と使用データ

本研究では、他都市の影響が少ない比較的自立した都市を対象とするため、以下の選定条件のように決め、該当する70都市を対象とした。

- ・ 政令指定都市を除く人口10万人以上の都市
- ・ 政令指定都市に隣接していない都市
- ・ 貨物車の全トリップに占める内内トリップの割合が50%以上である都市

エネルギー消費量の算定には、平成11年度道路交通センサス自動車起終点調査、交通関係エネルギー要覧を用いた。都市に関するデータは国勢調査、都市計画年報、事業所・企業統計調査、商業統計表、工業統計表を用いた。

3. 貨物車エネルギー消費量の算定

平成11年度道路交通センサス自動車起終点調査データを使用し、都市の内々交通を対象としたトリップ数の集計及び平均トリップ長、エネルギー消費量の算定を行った。また、集計は自動車の発生ゾーン(Origin)と集中ゾーン(Destination)からなるOD表と、発生施設と集中施設からの施設OD表を作成した。

(1) エネルギー消費量算定式

エネルギー消費量は、(1)式を用いて算定を行った。各車種のエネルギー消費量を合計し、貨物車エネルギー消費量とする。

$$E_n^k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m Q_{ij}^k \cdot T_{ij}^k \cdot e_k \cdots (1)$$

ここに、

E_n^k : 都市n, モードkのエネルギー消費量[kcal/day]

Q_{ij}^k : 車種k, 起点i, 終点jのトリップ数[veh/day]

T_{ij}^k : 車種 k, 起点 i, 終点 j の平均トリップ長[km/veh]

e_k : 車種 k のエネルギー消費効率[kcal/km・veh]

(車種): 軽貨物車・小型貨物車・貨客車
普通貨物車・特殊車

(2) エネルギー消費量

図-1 は算出した各都市の貨物車エネルギー消費量と人口の散布図である。これを見ると、おおむねエネルギー消費量は人口に比例して増加するといえる。

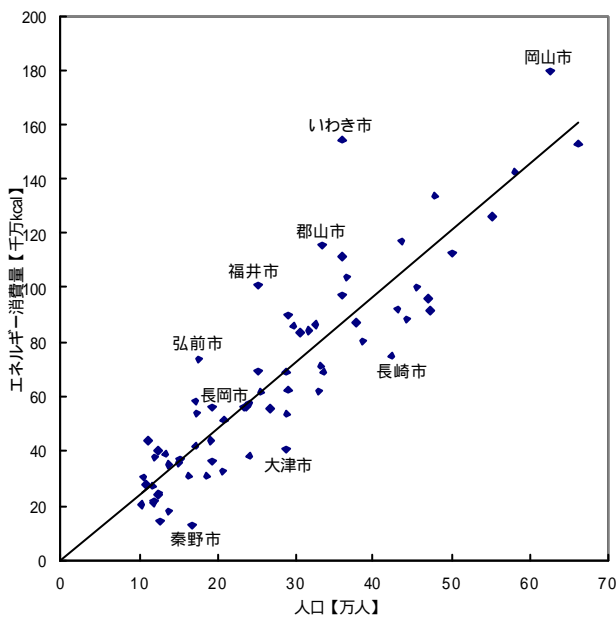


図-1 エネルギー消費量と人口

4. エネルギー消費量と都市特性の相関分析

貨物車エネルギー消費量と都市の指標との相関分析を行った結果を表-1 に示す。また、エネルギー消費量はトリップ数とトリップ長、エネルギー消費効率の積から計算していることから、同時に貨物車トリップ数と都市指標、貨物車平均トリップ長と都市指標の相関分析を行った。

(1) エネルギー消費量と都市特性の相関分析

表-1 より、前節でも述べたが、エネルギー消費量は人口関連指標である人口、DID 人口と正の相関が見られ、相関係数も高い値を示している。

(2) トリップ数と都市特性の相関分析

表-1 より、トリップ数は人口関連指標である人口、DID 人口と正の相関が見られ、相関係数もかなり高い値を示している。人口が多くなるほど配送の需要が増え、また、人口が多くなるほど企業の立地も多くなり、結果的にトリップ数が増加することから高い相関を示していると考えられる。

(3) 平均トリップ長と都市特性の相関分析

表-1 より、面積関連指標である市域面積、都市計画区域面積、市街化区域面積、住居系用途地域面積と正の相関がみられる。しかし、相関係数が最も高い指標である市域面積との相関係数でも 0.584 であり、これだけによってトリップ長が決まるとは言えない。つまり、都市の大きさ以外にもトリップ長に影響を及ぼす他の要因があると考えられる。その要因の一つとして考えられることは、トリップの発生する施設、集中する施設が、都市内においてどのように立地しているかということである。その際、トリップの発生・集中する施設の配置状況を間接的に表す指標として、土地利用状況が考えられ、ある特定の施設が多く立地している用途地域が都市内で分散しているのか、集積しているのかという状況がトリップ長に影響を与えると考えられる。この用途地域の分散を空間指標とし、トリップ長に与える影響を分析する。

表-1 エネルギー消費量と都市特性の相関分析結果

		全貨物車		
		エネルギー消費量	トリップ数	平均トリップ長
人口関連指標	人口	0.903	0.941	0.394
	人口密度	0.309	0.475	-0.208
	DID人口	0.825	0.872	0.355
	DID人口密度	0.284	0.379	0.028
	DID人口割合	0.175	0.298	-0.215
面積関連指標	市域面積	0.507	0.340	0.591
	DID面積	0.836	0.834	0.418
	DID面積割合	0.113	0.127	0.077
	都市計画区域面積	0.710	0.581	0.536
	都市計画区域面積割合	0.033	0.130	-0.311
	市街化区域面積	0.755	0.673	0.530
	市街化区域面積割合	0.152	0.240	-0.168
	住居系用途地域面積	0.878	0.823	0.537
	商業系用途地域面積	0.751	0.764	0.337
	工業系用途地域面積	0.313	0.216	0.354
産業関連指標	事業所数	0.871	0.941	0.327
	製造業事業所数	0.596	0.703	0.053
	製造品出荷額	0.370	0.394	0.087
	小売業商店数	0.868	0.931	0.345
	小売業年間販売額	0.875	0.929	0.359
	卸売業商店数	0.831	0.898	0.295
	卸売業年間販売額	0.747	0.819	0.245

5. 空間指標への着目

(1) 着目する空間指標

表-2 はセンサデータより、貨物車のトリップを施設間集計し、各施設間の平均トリップ長を算出した結果である。施設数は20施設存在するが、トリップ数の多い3施設について掲載する。表より、「【10】工場・作業所」間のトリップ長が8.2kmと最も長い。施設間のトリップ長が長いということは、施設相互が遠い位置に立地していることであり、都市内に分散して立地していると考えることが出来る。また、一台あたりのエネルギー消費の多い普通貨物車のトリップが多い施設でもある。よって、「【10】工場・作業所」が立地していると考えられる工業系用途地域(準工業地域,工業地域,工業専用地域)の分散に着目した。

表-2 施設間平均トリップ長

終点施設 \ 起点施設	【1】住宅寮	【5】事務所 会社 銀行	【10】工場 作業所	発生平均
【1】住宅寮	5.9	6.7	6.7	6.4
【5】事務所 会社 銀行	6.9	6.7	7.8	7.6
【10】工場 作業所	7.0	7.9	8.2	8.9
集中平均	6.3	7.2	8.2	6.8

表内の単位は【km】

(2) 空間指標の表し方

地理情報システム(GIS),画像処理を用いて,各都市の都市計画総括図(図-2)より,工業系用途地域マスク(図-3)を作成し,空間指標を算出した。図-3のようにx軸方向とy軸方向のヒストグラムを作成し,ヒストグラムのx軸方向の位置*i*とその度数を用い式(2)のx軸方向に関する分散,式(3)のy軸方向に関する分散を算定した。1つの空間指標として考える場合は,式(4)のように考える。

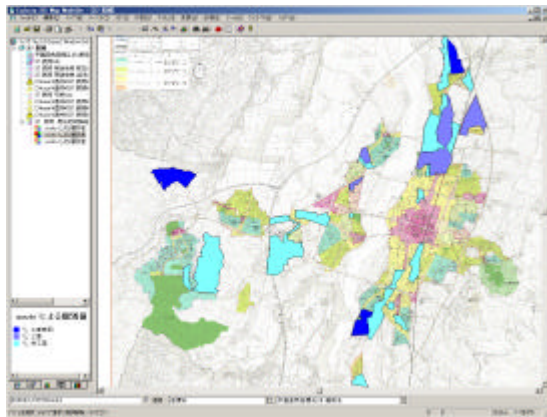


図-2 都市計画総括図

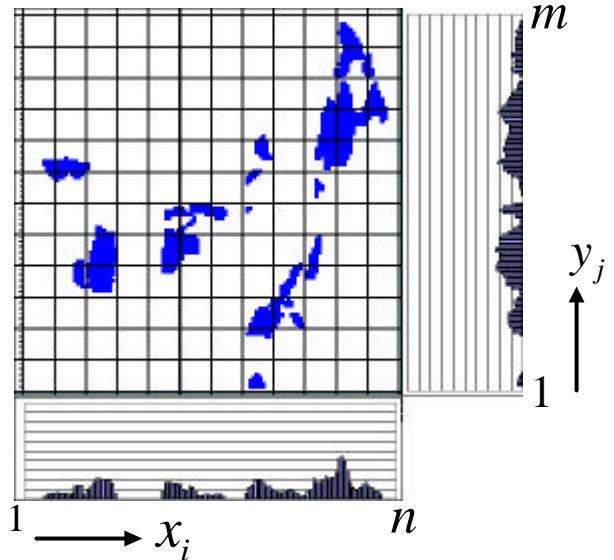


図-3 工業系用途地域マスク

$$V_x = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n Z_i - 1} \quad \dots \quad (2) \quad V_y = \frac{\sum_{j=1}^m P_j (y_j - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^m P_j - 1} \quad \dots \quad (3)$$

V_x : x軸方向のばらつき

V_y : y軸方向のばらつき

x_i : x軸方向の位置

y_j : y軸方向の位置

Z_i : 位置*i*の度数

P_j : 位置*j*の度数

$$\text{空間指標} = \sqrt{V_x + V_y} \quad \dots \quad (4)$$

6. トリップ長の要因分析

貨物車のトリップ長に与える要因を分析するため,貨物車の平均トリップ長を目的変数,都市指標を説明変数とした重回帰分析を行った。

(1) 説明変数

平均トリップ長を目的変数とした重回帰分析を行うにあたり,説明変数として表-3を用いた。

表-3 トリップ長の説明変数

(V_x+V_y)	工業専用工業専用地域面積
市域面積	第1種低層住居専用地域面積割合
人口密度	第2種低層住居専用地域面積割合
DID面積	第1種中高層住居専用地域面積割合
DID人口密度	第2種中高層住居専用地域面積割合
DID面積割合	第1種住居地域面積割合
DID人口割合	第2種住居地域面積割合
昼夜間人口比率	準住居地域面積割合
都市計画区域面積	近隣商業地域面積割合
都市計画区域面積割合	商業地域面積割合
市街化区域面積	準工業地域面積割合
市街化区域面積割合	工業地域面積割合
第1種低層住居専用地域面積	工業専用工業専用地域面積割合
第2種低層住居専用地域面積	事業所数
第1種中高層住居専用地域面積	製造業事業所数
第2種中高層住居専用地域面積	製造品出荷額
第1種住居地域面積	製造品出荷額割合
第2種住居地域面積	小売業商店数
準住居地域面積	小売業年間販売額
近隣商業地域面積	小売業年間販売額割合
商業地域面積	卸売業商店数
準工業地域面積	卸売業年間販売額
工業地域面積	卸売業年間販売額割合

(2)分析結果

説明変数の選択にあたり、まず変数増減法を用いた。その結果、回帰式を構築する変数となったものを基準とし、変数の増減を行いながら分析を行った。結果、決定係数が高く、回帰式と変数の判定が有意となる変数の組み合わせは、「分散指標 ($(V_x + V_y)$)」と「市域面積」となった。分析結果を表-4、観測値と重回帰推定値の散布図を図-4に示す。

表-4 トリップ長の重回帰分析結果

重回帰式				
変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t 値	判定
($V_x + V_y$)	0.042	0.482	5.71	1%有意
市域面積	0.009	0.444	5.27	1%有意
定数項	3.656		11.29	1%有意
精度				
決定係数	0.597			
修正決定係数	0.585			
重相関係数	0.773			
修正消費相関係数	0.765			
分散分析表				
要因	偏差平方和	自由度	平均平方	判定
回帰変動	46.24	2	23.12	1%有意
誤差変動	31.22	67	0.47	
全体変動	77.46	69		

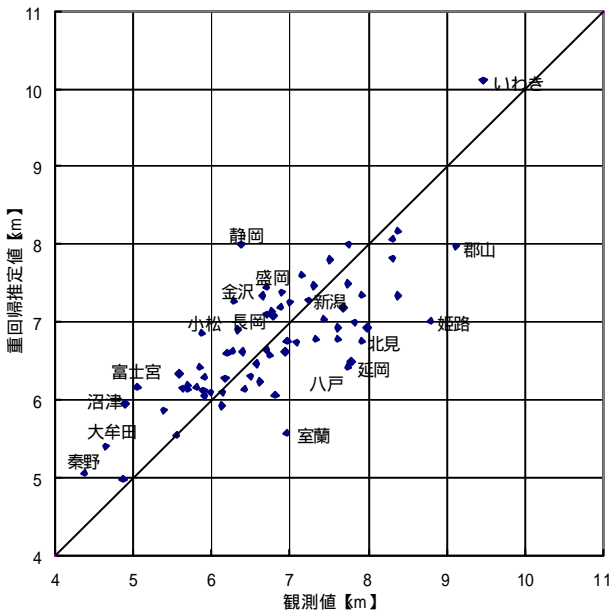


図-4 トリップ長の散布図

表より回帰式の判定は 1%有意を満たしている。また、偏回帰係数の符号と単相関の符号が一致しており、t 値も高く、変数の判定結果も 1%有意を満たしている。説明変数から考えられる考察として、「分散指標 ($(V_x + V_y)$)」は、標準偏回帰係数の符号が正であることから、分散により平均トリップ長は長くなる。「市域面積」については、標準偏回帰係数の符号が正であることから、市域面積が大き

く平均トリップ長は長くなる。修正決定係数は 0.58 とそれ程高い値であるとは言えないものの、一般的に考えて変数が及ぼすトリップ長への影響に矛盾がないことから、工業系用途地域の分散が大きくなるほど、市域面積が大きいほど、トリップ長が伸び、結果的にエネルギー消費量は増加するという傾向を本分析で示すことができた。

7. 貨物車エネルギー消費量の要因分析

エネルギー消費量は人口による影響が大きいため、エネルギー消費量を人口で除した、人口当たりの貨物車エネルギー消費量の要因分析を重回帰分析を用いて行った。

(1) 説明変数

人口当たりの貨物車エネルギー消費量を目的変数とした重回帰分析を行うにあたり、説明変数として表-5を用いた。

表-5 人口当たりエネルギー消費量の説明変数

($V_x + V_y$)	
面積	工業専用工業専用地域面積
人口密度	第1種低層住居専用地域面積割合
DID面積	第2種低層住居専用地域面積割合
DID人口密度	第1種中高層住居専用地域面積割合
DID面積割合	第2種中高層住居専用地域面積割合
DID人口割合	第1種住居地域面積割合
昼夜間人口比率	第2種住居地域面積割合
都市計画区域面積	準住居地域面積割合
都市計画区域面積割合	近隣商業地域面積割合
市街化区域面積	商業地域面積割合
市街化区域面積割合	準工業地域面積割合
第1種低層住居専用地域面積	工業地域面積割合
第2種低層住居専用地域面積	工業専用工業専用地域面積割合
第1種中高層住居専用地域面積	事業所数/人口
第2種中高層住居専用地域面積	製造業事業所数/人口
第1種住居地域面積	製造品出荷額/人口
第2種住居地域面積	製造品出荷額割合
準住居地域面積	小売業商店数/人口
近隣商業地域面積	小売業年間販売額/人口
商業地域面積	小売業年間販売額割合
準工業地域面積	卸売業商店数/人口
工業地域面積	卸売業年間販売額/人口
	卸売業年間販売額割合

(2) 分析結果

説明変数の選択にあたり、まず変数増減法を用いた。その結果、回帰式を構築する変数となったものを基準とし、変数の増減を行いながら分析を行った。この際、住宅・商業・工業それぞれのトリップもしくは距離を表す指標が変数に含まれるように変数の増減を行った。また、平均トリップ長の重回帰分析同様 施設間トリップも考慮した。結果、決定係数が高く、回帰式と変数の判定が有意となる変数の組み合わせは、「分散指標 ($(V_x + V_y)$)」、「DID 人口密度」、「DID 面積割合」、「商

業地域面積割合」,「卸売業年間販売額割合」となった。分析結果を表-6,観測値と重回帰推定値の散布図を図-5に示す。

表-6 人口当たりエネルギー消費量の重回帰分析結果

重回帰式	偏回帰係数	標準偏回帰係数	T 値	判定
$(Vx+Vy)$	16.12	0.309	3.864	1%有意
DID人口密度	-31.38	-0.530	5.876	1%有意
DID面積割合	-29.27	-0.401	5.254	1%有意
商業地域面積割合	-52.73	-0.238	2.971	1%有意
卸売業年間販売額割合	1901.18	0.511	5.598	1%有意
定数項	3228.22		10.962	1%有意

精度	
決定係数	0.631
修正決定係数	0.602
重相関係数	0.794
修正重相関係数	0.776

分散分析表				
要因	偏差平方和	自由度	平均平方	判定
回帰変動	17698450	5	3539690	1%有意
誤差変動	10367221	64	161988	
全体変動	28065671	69		

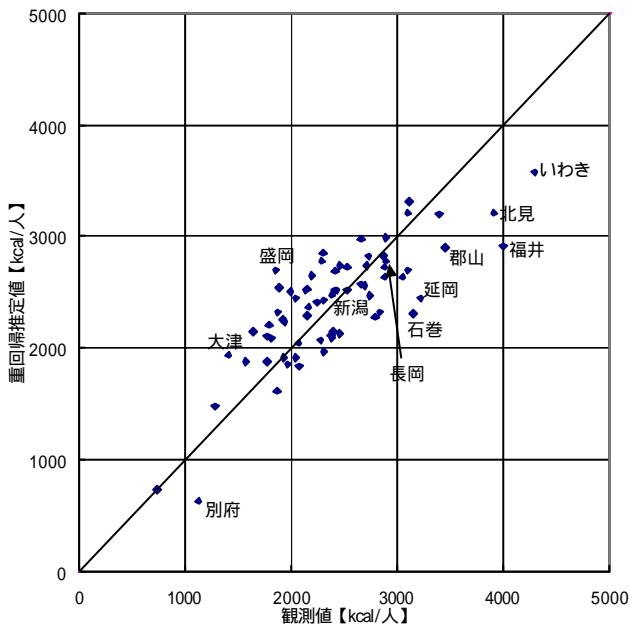


図-5 人口当たりエネルギー消費量の散布図

表より回帰式の判定は 1%有意を満たしている。また,偏回帰係数の符号と単相関の符号が一致しており,t 値も高く,変数の判定結果も 1%有意を満たしている。以下に説明変数から考えられる考察を述べる。

工業系用途地域の分散 ($Vx + Vy$)

この変数は主にトリップ長への影響と考えられ,工業系用途地域が分散していることにより,移動距離が長くなり結果的にエネルギー消費量が多くなることを表していると考えられる。

DID 人口密度

この変数は主にトリップ長への影響と考えられ,DID 人口密度が高ければそれだけ都心部に集積していることであるため,集積により移動距離が減少し結果的にエネルギー消費量が少なくなると考えられる。

DID 面積割合

この変数は主にトリップ長への影響と考えられる。DID 面積の割合が大きければ,人口が集積している割合が大きいため,集積により移動距離が減少し結果的にエネルギー消費量は少なくなると考えられる。

商業地域面積割合

商業地域内では小売業の立地が多いと考えられる。製造業は材料の輸送と製品の輸送が必要であり,卸売業はメーカーから卸売業への輸送と卸売業から小売業への輸送が必要である。しかし,小売業はメーカーもしくは卸売業からの輸送のみとなり,製造業・卸売業と比較してトリップ数が少なくなる。そのため,小売業が多くなると,トリップ数が減少し,エネルギー消費量は少なくなると考えられる。

卸売業年間販売額割合

卸売業年間販売額割合多くなると,それだけ卸売業が多くなることにつながり,製造業から直接小売店に輸送している流通経路に比べ,流通経路が増える。流通経路の増加がトリップ数やトリップ長の増加につながり,結果的にエネルギー消費が多くなると考えられる。

8. エネルギー消費量の推定

前節において,人口当たりのエネルギー消費量を目的変数とした重回帰推定式を構築した。重回帰式では,人口 1 人当たりのエネルギー量を推定となるが,実際にエネルギー消費量の議論をする際は,総エネルギー消費量を用いることから,重回帰推定式から求められた値に人口をかけ総エネルギー消費量に戻し,観測値との比較をしたものが図-6の散布図である。この結果から R^2 で 0.912 と高い相関性が確認できた。

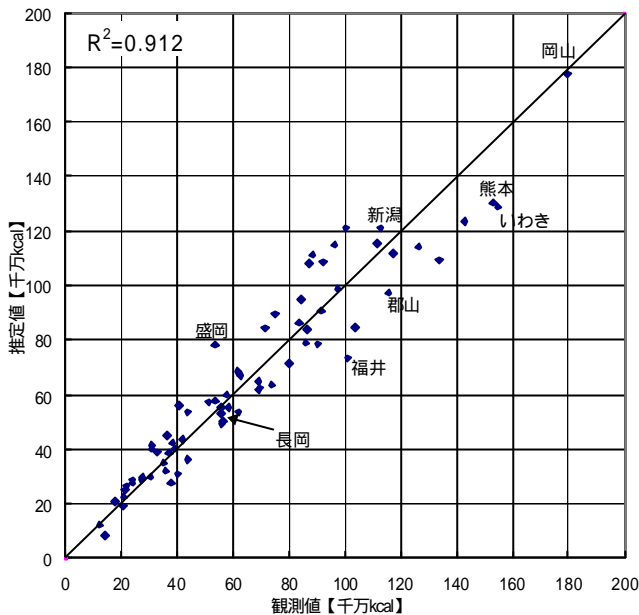


図-6 エネルギー消費量の散布図

9. まとめと今後の課題

(1) まとめ

貨物車のエネルギー消費量と都市特性の関係性について相関分析、重回帰分析を用いて分析を行った。結果、エネルギー消費量に影響する都市特性は、主に都市の広がりや集積に関する指標である知見を得た。また、エネルギー推定では、 R^2 で0.9以上の良好な結果を得た。

以上より、市街地拡大の抑制、中心市街地の活性化による中心部への人口充填等の政策が、貨物車のトリップ長を抑制し、都市問題のみならずエネルギー消費等の環境問題に関して有効な方策であると言える。一方、現在顧客のニーズに合致した多頻度配送、小口・少量配送が増加していることから、今後貨物車のトリップ数、トリップ長の増加の懸念がある。この点を踏まえても市街地拡大の抑制や人口集積の効果は、1台当たりの積み込み量（ロットサイズ）を大きくする効果が見込め、トリップ長の減少、ひいてはトリップ数の減少という相乗効果をもたらす期待が持て、都市問題の改善ばかりではなくエネルギー消費の増加対策に不可欠であることと言える。

(2) 今後の課題

空間指標として今回は工業系用途地域の分散に着目したが、住宅系用途地域の分散や商業系用途

地域の分散などを変数として導入することも必要である。また、用途指定されていても実際は施設が立地していない場所も存在し、立地していない部分の誤差が含まれるため、実際に立地している部分のみを考慮することが必要である。

また、今回は、平成11年の一時点でのデータを使用し、貨物車のエネルギー消費に与える要因を分析した。しかし、一時点では現状と現状の関係性であり、影響要因をより明らかにするためには、時系列で都市特性や都市構造の変化に伴うエネルギー消費の推移を分析することが必要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 小根山裕之, 大西博文 (1997.11) 「環境負荷の小さい都市構造・交通体系に関する一考察」土木計画学研究・講演集 No.20(2) p.129 - 132
- 2) 山本克也, 森本章倫, 森田哲夫, 最首恵 (2001) 「首都機能移転を想定した仮想都市の都市構造と交通環境負荷に関する研究」日本都市計画学会学術研究論文集 No.36 p.655 - 660
- 3) 森本章倫, 小美野智紀, 品川純一, 森田哲夫 (1996.8) 「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・講演集 No.20 p.361 - 368
- 4) 堀裕人, 細見昭, 黒川洸 (1999) 「自動車エネルギー消費量から見たコンパクトシティに関する研究 - 宇都宮都市圏の2時点におけるPTデータを用いて - 」日本都市計画学会学術論文集 No.34 p.241 - 246
- 5) 森本章倫, 古池弘隆 (1998) 「都市構造からみた輸送エネルギー削減施策の効果推計に関する研究」日本都市計画学会学術研究論文集 No.33 p.181 - 186
- 6) 森本章倫, 古池弘隆 (1995) 「都市構造が運輸エネルギーに及ぼす影響に関する研究」日本都市計画学会学術研究論文集 No.30 p.685 - 690