

都市構造と旅客交通からの大気環境負荷物質 排出量の関連に関する横断的解析

明石 修¹・松岡 譲²

1 学生会員 京都大学大学院地球環境学舎地球環境学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: hanayarou@yahoo.co.jp

3 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科・地球環境学舎 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

本研究の目的は、都市旅客交通からのCO、NO_x、PM、CO₂排出を対象に、環境負荷量と都市構造との関連に関する都市横断的知見を得ることである。まず、世界の都市において環境負荷量が異なる要因を解析した。結果、すべての物質について、交通量が環境負荷量の都市間差異を最も説明することが示された。続いて、交通需要量を人口密度、都市面積等の変数を用いて説明する交通需要モデルを構築した。交通需要モデルおよび排出係数モデルを用いた感度分析の結果、人口密度を20%増加させた場合、面積あたりNO_x排出量は6.2%~25.8%増加し、一人あたりCO₂排出量は3.1%~11.3%減少することが示された。一人あたりCO₂排出量減少率は、乗用車トリップ分担率が60%程度の都市で大きいことが示された。

Key Words : *urban passenger transport, air pollutant and CO₂ emissions, urban structure, transport demand model, world cities*

1. はじめに

都市旅客交通は、CO、NO_x、PM、CO₂などのガスの排出により、一般に、大気汚染問題、地球温暖化問題の一因となっている。しかし、個々の都市に目を向けるとそれぞれの都市で環境負荷の内容と程度は大きく異なる。例えば、途上国の多くの大都市では深刻な大気汚染問題を抱える一方、先進国の多くの都市では環境の中心的課題はCO₂排出による地球温暖化問題へと移行しつつある。また、例えば、アメリカの都市では年間一人あたり平均4,405kgのCO₂が排出されるのに対し、西ヨーロッパの都市では、平均1,269kgしか排出されていない(Kenworthy, 2003)¹⁾。このように都市により環境負荷量が異なる要因はどこにあるのだろうか？都市の面積や人口密度は、交通パターンに影響を与えることを通じ、間接的にエネルギー消費量や環境負荷量に影響する(松岡ら, 1992, 加藤ら, 1998)^{2,3)}ことが知られている。本研究の目的は、面積や人口密度といった指標で表される都市構造と環境負荷量の関連に関して都市横断的知見を得ることである。

近年、都市構造と環境負荷のかかわりに関する研究として、都市のコンパクト化と交通量および環境負荷量のかかわりに関する研究が数多く行われている(例えば、

堀, 1999, 松橋, 2000)^{4,5)}。それらの多くは個別的都市におけるコンパクト化の影響を分析するものである。そのため対象都市に関する知見は得られるが、多くの都市に適用可能な知見は得られない。都市構造と交通量の関係を都市横断的に解析したものとしては、Kenworthy et al(1999)⁶⁾がある。しかし、都市構造と交通量の統計的相関を示すにとどまっており、都市構造と交通量の影響メカニズムはモデル化されていない。そのため、都市構造変化と交通量の変化に関して定量的な解析は行われていない。

本研究では、都市横断的なデータを用いて、面積や人口密度、一人あたりGDPといった都市のマクロ的指標と交通需要間の影響関係をモデル化する。さらに、構築したモデルを用いて人口密度を変化させたときの環境負荷量の変化を定量的に解析する。

2. データ

(1) データソース

都市圏面積、人口、都市GDPおよび交通関連データは、Millennium Cities Database for Sustainable Mobility

(International Association of Public Transport, 2001)⁷⁾ (以下, MCD) および, Mobility in Cities Database (International Association of Public Transport, 2006)⁸⁾ (以下, MCD2) のデータを用いた。前者には, 1995 年における世界 100 都市のデータが収められており, 後者には, 2001 年における世界 52 都市のデータが収められている。表-1 に MCD および MCD2 にデータが収録されている都市の一覧を示す。

表-1 MCD, MCD2 に収録されている都市の一覧

西ヨーロッパ	バルセロナ	ヒューストン	チュニス
グラーツ	マドリッド	ロサンゼルス	ハラーレ
ウィーン	ビルバオ	ニューヨーク	アジア
ブリュッセル	セビリア	フェニックス	香港
グゼン	パレンシア	サンディエゴ	大阪
コペンハーゲン	ストックホルム	サンフランシスコ	札幌
ヘルシンキ	ベルン	ワシントン	東京
リール	ジュネーブ	ラテンアメリカ	シンガポール
リヨン	チューリッヒ	アエノスアイレス	台北
マルセイユ	グラスゴー	ブラジリア	北京
ナント	ロンドン	クリティバ	上海
パリ	マンチェスター	リオデジャネイロ	広州
クレルモンフェラン	ニューカッスル	サルバドル	ムンバイ
ベルリン	中央・東ヨーロッパ	サンパウロ	チェンナイ
フランクフルト	ブダペスト	サンティアゴ	デリー
ハンブルク	クリン	ボゴタ	ジャカルタ
デュッセルドルフ	ブダペスト	メキシコシティ	ソウル
ミュンヘン	クラクフ	カラカス	クアラルンプール
ルール	ワルシャワ	中東	マニラ
シュツットガルト	モスクワ	テヘラン	バンコク
アテネ	イスタンブール	テルアビブ	ホーチミン
ダラリン	北アメリカ	リヤド	オセアニア
ミラノ	カルガリー	トカイ	アリスベン
ボローニャ	モントリオール	アフリカ	メルボルン
ローマ	オタワ	アビジアン	バース
トリノ	トロント	カイロ	シドニー
アムステルダム	バンクーバー	カサブランカ	ウェリントン
ロッテルダム	アトランタ	ダカール	
オスロ	シカゴ	ケープタウン	
リスボン	デンバー	ヨハネスブルグ	

MCD に収録されているデータは, 都市により推計値を含むものの, 多くの都市において調査により得られたデータである。(VIVIER, 2001)⁹⁾

(2) 排出量の算出

MCD, MCD2 には排出量指標が収録されているが, 欠損値が多いこと, 計算の前提が不明瞭なこと, MCD2 では複数の物質の排出量の和のみしか利用できないことから, 本研究では使用しなかった。代替として Emission Inventory Guidebook 2006 (EMEP/CORINAIR, 2006)¹⁰⁾ の方法 (以下, 排出係数モデル) により排出係数を求め, 交通量を乗じることにより排出量を計算した。排出係数の計算法は式(1)～式(2)により表される。

$$EV_{i,m,g} = \sum_l SH_{i,m,l} \times EVT_{i,m,l,g} \quad (1)$$

$$EVT_{i,m,l,g} = f(SP_{i,m}, TD_{i,m}, T_i) \quad (2)$$

ここで,

i : 都市

m : 輸送機関 (乗用車, 二輪車, バス, 鉄道)

l : 車種

g : ガス (CO, NOx, PM, CO₂)

$EV_{i,m,g}$: 都市 i の輸送機関 m , ガス g の排出係数

$SH_{i,m,l}$: 都市 i の輸送機関 m における車種 l のストック構成

比

$EVT_{i,m,l,g}$: 都市 i の車種 l , ガス g の排出係数

$SP_{i,m}$: 都市 i の輸送機関 m の平均走行速度

$TD_{i,m}$: 都市 i の輸送機関 m の平均トリップ長

T_i : 都市 i の年平均気温

ここで車種とは, どの排ガス規制に適合しているかによって区分される車両の種類である。表-2 に車種の一覧を示す。

表-2 車種一覧

機関	車種
乗用車	ガソリン乗用車 EURO1規制以前の車両
	ガソリン乗用車 EURO1規制適合車両
	ガソリン乗用車 EURO2規制適合車両
	ガソリン乗用車 EURO3規制適合車両
	ディーゼル乗用車 EURO1規制以前の車両
	ディーゼル乗用車 EURO1規制適合車両
	ディーゼル乗用車 EURO2規制適合車両
	ディーゼル乗用車 EURO3規制適合車両
	LPG乗用車 EURO1規制以前の車両
	LPG乗用車 EURO1規制適合車両
二輪車	50cc未満二輪車 EURO1規制以前の車両
	50cc未満二輪車 EURO1規制適合車両
	2ストローク50cc以上二輪車 EURO1規制以前の車両
	2ストローク50cc以上二輪車 EURO1規制適合車両
	4ストローク50cc以上二輪車 EURO1規制以前の車両
	4ストローク50cc以上二輪車 EURO1規制適合車両
バス	バス EURO1規制以前の車両
	バス EURO1規制適合車両
	バス EURO2規制適合車両
	バス EURO3規制適合車両
鉄道	鉄道車両

ストック構成比 ($SH_{i,m,l}$) は, ストック交換を記述するストックモデルにより計算した。ストックモデルは, 式(3)～式(8)で表される。

$$SH_{i,m,l,t} = \frac{STT_{i,m,l,t}}{ST_{i,m,l,t}} \quad (3)$$

$$STT_{i,m,l,t} = STT_{i,m,l,t-1} - RT_{i,m,l,t-1} + IT_{i,m,l,t} \quad (4)$$

$$IT_{i,m,l,t} = MSH_{i,m,l,t-1} \times I_{i,m,l,t} \quad (5)$$

$$I_{i,m,l,t} = ST_{i,m,l,t} - ST_{i,m,l,t-1} + R_{i,m,l,t-1} \quad (6)$$

$$RT_{i,m,l,t} = \sum_{t'} \{STE_{i,m,l,t',t+1} - STE_{i,m,l,t',t}\} \quad (7)$$

$$STE_{i,m,l,t',t} = IT_{i,m,l,t'} \times RM_{i,m,l,t',t} \quad (8)$$

残存率はワイブル分布を仮定することにより, 式(9)の通り表される。

$$RM_{i,m,l,t',t} = \exp\left(-\frac{\ln 2}{LIFE_{i,m,l}} \cdot (t-t')^\beta\right) \quad (9)$$

ここで,

$ST_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年における輸送機関*m*, 車種*l*のストック量

$ST_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年における輸送機関*m*のストック量

$RT_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年における輸送機関*m*, 車種*l*のリタイア量

$IT_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年における輸送機関*m*, 車種*l*の導入量

$MSH_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年における輸送機関*m*, 車種*l*の販売シェア

$I_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年における輸送機関*m*の導入量

$R_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年における輸送機関*m*のリタイア量

$STE_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年に導入された車種*l*の*t*年における残存ストック量

$RM_{i,m,t}$: 都市*i*の*t*年に導入された車種*l*の*t*年における残存率

$LIFE_{i,m,t}$: 都市*i*における輸送機関*m*, 車種*l*の平均耐用年数

β : 形状パラメータ

販売シェア ($MSH_{i,m,t}$) は, 各国の排ガス規制の導入年を用いて設定した。具体的には, 規制導入以降, 次の規制が導入されるまで当該車種の販売シェアが 100%になると設定した。表-3 に排ガス規制導入年の設定値を示す。

表-3 排ガス規制導入年の設定値

	乗用車 (ガソリン車, ディーゼル車)			二輪車		バス		
	EURO1	EURO2	EURO3	EURO1	EURO2	EURO3	EURO3	EURO3
アルゼンチン	(’96, ’96)	(’00, ’00)	(-, -)	-	’95	’98	-	-
オーストラリア	(’92, ’92)	(-, -)	(-, -)	’99	’92	’98	’00	-
ブラジル	(’96, ’96)	(’00, ’00)	(-, -)	-	’94	’98	-	-
EU	(’92, ’92)	(’96, ’96)	(’00, ’00)	’99	’92	’98	’00	-
カナダ	(’92, ’92)	(’96, ’96)	(’00, ’00)	’99	’92	’98	’00	-
中国 ¹⁾	(’00, ’00)	(-, -)	(-, -)	-	’01	-	-	-
インド ²⁾	(’00, ’00)	(’01, ’01)	(-, -)	-	’96	’01	-	-
インドネシア	(-, -)	(-, -)	(-, -)	-	-	-	-	-
日本	(’92, ’92)	(’96, ’96)	(’00, ’00)	’99	’92	’98	’00	-
マレーシア	(’97, ’97)	(’00, -)	(-, -)	-	’97	-	-	-
ニュージーランド	(’92, ’92)	(-, -)	(-, -)	’99	’93	’99	’01	-
香港	(’95, ’95)	(’97, ’97)	(’01, ’01)	-	’95	’97	’01	-
フィリピン	(-, -)	(-, -)	(-, -)	-	-	-	-	-
シンガポール	(’94, ’98)	(’01, ’01)	(-, -)	’01	’98	’01	-	-
韓国	(’93, -)	(’00, ’00)	(-, -)	’00	’93	’00	-	-
台湾	(-, -)	(’99, ’99)	(-, -)	-	-	’99	-	-
タイ	(’96, ’96)	(’99, ’99)	(-, -)	-	’96	’00	-	-
アメリカ合衆国	(’92, ’92)	(’96, ’96)	(’00, ’00)	’99	’92	’98	’00	-
ベトナム	(-, -)	(-, -)	(-, -)	-	-	-	-	-
その他	(’00, ’00)	(-, -)	(-, -)	-	’00	-	-	-

なお, 日本, アメリカについては EURO 以外の排ガス規制を設けているが, 車両に関する技術水準が EU と同程度であると想定し, EU における規制導入年を用いた。中国, インドは国全体と大都市で別の規制を設けているが, 本研究では対象とする都市が含まれる大都市における規制を採用した。排ガス規制に関する情報が得られなかった都市については表中最下段の「その他」の規制年を設定した。LPG 乗用車の規制導入年についてはすべての国でガソリン乗用車と等しいとした。

式(9)の残存率の計算に用いた平均耐用年数と形状パ

ラメータを表-4 に示す。平均耐用年数は都市*i*, 車種*l*によらず同一輸送機関で一定とした。

表-4 平均耐用年数と形状パラメータ

	平均耐用年数	形状パラメータ
乗用車	10年	3.5
二輪車	7年	3.5
バス	12年	3.5
鉄道	20年	3.5

(3) データの概要

表-5 に都市のマクロ的特性を表す指標, 交通量, 環境負荷量の概要を示す。なお, ここで示したのは, すべての指標が利用可能な 75 都市の統計量である。ここで環境負荷量として CO, NOx, PM では都市面積あたり排出量を用いているのに対し, CO₂ では一人あたり排出量を用いていることに留意する必要がある。これは, 排出の空間的広がり が負荷量を表す上で意味を持つ大気汚染物質については, 排出量を面積で除したものを指標とするのが適切である一方, 空間的広がり が意味を持たない CO₂ 排出に関しては, 人口で除したものを指標とするのが適切であると考えられるためである。

表-5 都市指標, 一人あたり交通量, 環境負荷量の概要

	単位	最小値	最大値	平均値	変動係数
都市指標					
人口	1000人	240	32,343	4,898	1.19
都市面積	1000ha	6.44	1,066	102	1.49
人口密度	人/ha	6.36	337	73.2	0.96
一人あたり GDP	\$/人	396	54,692	23,029	0.64
一人あたり					
乗用車	台/km/人	60.7	20,197	4,678	0.75
交通量					
二輪車	台/km/人	2.72	1,247	135	1.73
バス	台/km/人	14.4	420	51.6	1.11
鉄道	台/km/人	0.18	168	32.5	1.00
環境負荷量					
CO	kg/ha	361	15,828	3,250	0.80
NOx	kg/ha	89.7	2,038	378	0.73
PM	kg/ha	1.21	91	12.4	1.05
CO ₂	kg/人	69.0	3,609	1,079	0.57

都市の規模を表す人口および都市面積をみると, 人口は 240,000 人 ~ 32,343,000 人, 都市面積は 6.440ha ~ 1,066,000ha の大小様々な規模の都市が含まれていることが分かる。人口密度, 一人あたり GDP についてもそれぞれ 6.36ha/人 ~ 337ha/人, 396\$/人 ~ 54,692\$/人の都市が含まれており, 非常に多様な都市が含まれていることが分かる。一人あたり交通量は, 変動係数が乗用車交通では 0.75 であるがその他の輸送機関ではすべて 1.0 以上であり, 都市によるばらつきが非常に大きいといえる。環境負荷量をみると, すべての物質について最大値と最小値に非常に大きな差があることが分かる。最大値と最小値の比をとると, CO, NOx, PM, CO₂ は, それぞれ 44 倍, 23 倍, 75 倍, 52 倍となる。また, 変動係数をみると, CO₂ では 0.57 であり他の指標にくらべ多少小さい値であるが, 他の物質では 0.73 以上であり都市によるばらつきは大きいといえる。

3. 環境負荷量の都市間相違に関する要因分析

これまでに、環境負荷量は都市間で大きく異なることが明らかになった。環境負荷量は、環境負荷量は式(10)、式(11)に示すように、面積あたり、または一人あたりの交通量と排出係数で表すことができる。

$g=\text{CO, NOx, PM}$ のとき：

$$QA_i^g = \sum_m \{VA_{i,m} \times EV_{i,m}^g\} \quad (10)$$

$g=\text{CO}_2$ のとき：

$$QP_i^g = \sum_m \{VP_{i,m} \times EV_{i,m}^g\} \quad (11)$$

ここで、

QA_i^g ：都市*i*におけるガス*g*の面積あたり排出量 (g/ha)

$VA_{i,m}$ ：都市*i*における輸送機関*m*の面積あたり交通量 (台 km/ha)

EV_m^g ：輸送機関*m*、ガス*g*の排出係数 (g/台km)

QP_i^g ：都市*i*におけるガス*g*の一人あたり排出量 (g/人)

$VP_{i,m}$ ：都市*i*における輸送機関*m*の一人あたり交通量 (台 km/人)

環境負荷量が都市により異なるのは、交通量と排出係数のどちらの要因によるのであろうか？環境負荷低減対策を考える際には、この要因を明らかにする必要がある。なぜなら、環境負荷量の都市間相違が交通量で説明されるのであれば交通量対策が一般に負荷低減に有効であるといえるし、排出係数により説明されるのであれば排ガス規制など排出係数を削減させる対策が負荷低減に有効であるといえるからである。そこで、75都市を対象に環境負荷量の都市間相違について要因分析を行った。

(1) 要因分析手法

始めに、式(10)、式(11)を用いて各都市の環境負荷量(QA_i^g , QP_i^g)を交通量($VA_{i,m}$, $VP_{i,m}$)と排出係数(EV_m^g)で表した。その後、Log-mean Divisia Index Method I (Ang et al, 2000)¹¹⁾を用いて各都市の環境負荷量の基準都市からの相違について要因分析を行った。Log-mean Divisia Index Method Iの詳細は付録に示す。ここで、環境負荷量の基準都市からの相違とは、各都市の環境負荷量と基準都市の環境負荷量の比である。基準都市には、交通量($VA_{i,m}$, $VP_{i,m}$)と排出係数(EV_m^g)が75都市の中央値となる仮想的都市を想定した。各都市の環境負荷量と基準都市の環境負荷量の比は、式(12)、式(13)に示す通り、交通量の基準都市との比によって説明される部分と排出係数の基準都市との比によって説明される部分に分解される。

$g=\text{CO, NOx, PM}$ のとき：

$$\frac{QA_i^g}{QA_0^g} = DA_i^g = \prod_m DAVA_{i,m}^g \cdot DAEV_{i,m}^g \quad (12)$$

$g=\text{CO}_2$ のとき：

$$\frac{QP_i^g}{QP_0^g} = DP_i^g = \prod_m DPVP_{i,m}^g \cdot DPEV_{i,m}^g \quad (13)$$

ここで、

QA_0^g ：基準都市におけるガス*g*の面積あたり排出量

DA_i^g ：ガス*g*の面積あたり排出量の基準都市との比

$DAVA_{i,m}^g$ ： DA_i^g のうち輸送機関*m*の面積あたり交通量の基準都市との比により説明される部分（以下、面積あたり排出量における輸送機関*m*の交通量要因）

$DAEV_{i,m}^g$ ： DA_i^g のうち輸送機関*m*の排出係数の基準都市との比により説明される部分（以下、面積あたり排出量における輸送機関*m*の排出係数要因）

QP_0^g ：基準都市におけるガス*g*の一人あたり排出量

DP_i^g ：ガス*g*の一人あたり排出量の基準都市との比

$DPVP_{i,m}^g$ ： DP_i^g のうち輸送機関*m*の一人あたり交通量の基準都市との比により説明される部分（以下、一人あたり排出量における輸送機関*m*の交通量要因）

$DPEV_{i,m}^g$ ： DP_i^g のうち輸送機関*m*の排出係数の基準都市との比により説明される部分（以下、一人あたり排出量における輸送機関*m*の排出係数要因）

(2) 結果

75都市についてCO, NOx, PM, CO₂の環境負荷量の基準都市との比を要因に分解した。図-1にCO₂についての要因分解の結果を示す。横軸に一人あたり排出量の基準都市との比を、縦軸に各要因をとっている。

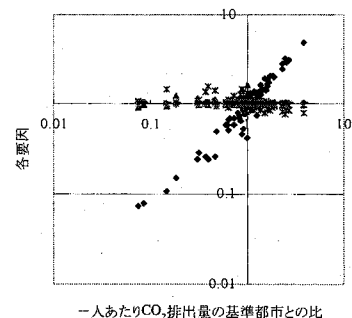


図-1 CO₂の要因分解結果

一人あたりCO₂排出量の基準都市との比と乗用車交通量要因の間に明らかに正の相関がみられる。一人あたりCO₂排出量の大きい都市は、乗用車要因が大きい。つまり、一人あたり排出量の大小は乗用車要因により説明されると解釈できる。表-6に環境負荷量の基準都市との比と各要因の相関係数を示す。相関係数の高い要因ほど、環境負荷量の大小を説明する能力が高いと考えられる。ガス別に見ると、面積あたりCO排出量では乗用車の交通量、二輪車の交通量の説明力が高く、面積あたりNOx排出量および面積あたりPM排出量では、バスの交通量とバスの排出係数の説明力が高い。要因別で見ると、乗用車の交通量は、すべての環境負荷について有意に説明力が大きい。特にCO₂の環境負荷量では相関係数は0.978となっている。

表-6 環境負荷量の基準都市との比と各要因の相関係数

	一人あたりCO ₂ 排出量	面積あたり CO排出量	面積あたり NOx排出量	面積あたり PM排出量
乗用車交通量 要因 ¹⁾	0.978	0.631	0.543	0.466
二輪車交通量 要因 ¹⁾	— ²⁾	0.544	0.270	0.463
バス交通量要 因 ¹⁾	— ²⁾	0.299	0.834	0.830
鉄道交通量要 因 ¹⁾	— ²⁾	0.353	— ²⁾	— ²⁾
乗用車排出係 数要因	-0.527	0.514	— ²⁾	0.337
二輪車排出係 数要因	— ²⁾	— ²⁾	— ²⁾	-0.251
バス排出係数 要因	-0.363	0.396	0.638	0.743
鉄道排出係数 要因	— ²⁾	— ²⁾	— ²⁾	— ²⁾

1) 交通量は、CO₂については一人あたり交通量、CO、NOx、PMについては面積あたり交通量
2) —は、5%水準で有意でないことを表す

4. 大気環境負荷物質排出モデルの構築

要因分析から、環境負荷量の都市間相違について乗用車やバスの交通量の説明力が大きいことが明らかになった。では、都市のどのような特性により交通量に差異が生じるのであろうか？その影響メカニズムを明らかにするために、構造方程式により交通量を説明する交通需要モデルを構築した。さらに、交通需要モデルをEmission Inventory Guidebook 2006(EMEP/CORINAIR, 2006)¹⁰⁾の排出係数モデルと組み合わせることにより大気環境負荷物質排出モデルを構築した。

(1) 交通需要モデル構造の特定

a) 手法

都市*i*の輸送機関*m*の一人あたり輸送量 ($VP_{i,m}$) は、以下の式(14)の通り分解される。

$$VP_{i,m} = 365 \times TR_i \times \sum_m \left\{ SMT_{i,m} \times TD_{i,m} \times \frac{1}{NP_{i,m}} \right\} \quad (14)$$

$VP_{i,m}$: 都市*i*の輸送機関*m*の年間一人あたり輸送量

TR_i : 都市*i*の一人一日あたりトリップ数

$SMT_{i,m}$: 都市*i*の輸送機関*m*のトリップ分担率

$TD_{i,m}$: 都市*i*の輸送機関*m*の平均トリップ長

$NP_{i,m}$: 都市*i*の輸送機関*m*の1台あたり平均乗車人数

都市面積、人口、都市GDPといった都市のマクロ特性や、車両保有台数、交通インフラの整備度、走行条件は直接的あるいは間接的に一人あたりトリップ数 (TR)、機関分担率 (SMT_m)、トリップ長 (TD_m)、平均乗車人数 (NP_m) に影響を与えていると考えられる。そこで、それらの変数間の構造的な影響関係を探索的な回帰分析により特定した。表-7に、使用された変数の一覧を示す。

表-7 使用された変数一覧

変数	
AU	都市面積 (ha)
PP_AU	人口密度 (人/ha)
GD_PP	一人あたりGDP (\$/人)
T_MIN	月平均気温の最低値 (°C)
T_MAX	月平均気温の最高値 (°C)
TR_TT_PP	一人あたりトリップ数 (トリップ/人/日)
SMT_NMT	非動力交通のトリップ分担率 (-)
SMT_PC	乗用車トリップ分担率 (-)
SMT_MC	二輪車トリップ分担率 (-)
SMT_BS	バストリップ分担率 (-)
SMT_RL	鉄道トリップ分担率 (-)
SP_RD	道路ネットワーク平均速度 (km/h)
ST_PC_PP	乗用車保有水準 (台/1000人)
ST_MC_PP	二輪車保有水準 (台/1000人)
ST_BS_PP	バス車両保有水準 (台/百万人)
ST_RL_PP	鉄道車両保有水準 (台/百万人)
TD_PR	私的交通平均トリップ長 (km/トリップ)
TD_PB	公共交通平均トリップ長 (km/トリップ)
NP_PC	乗用車1台あたり平均乗車人数 (人/台)
NP_MC	二輪車1台あたり平均乗車人数 (人/台)
NP_BS	バス1台あたり平均乗車人数 (人/台)
NP_RL	鉄道一両あたり平均乗車人数 (人/両)
LN_RD_PP	一人あたり道路延長 (m/人)
LN_RL_RD	鉄道軌道延長の道路延長に対する割合 (-)

できるだけ多くのサンプルを用いて分析を行うために、回帰分析にはMCDおよびMCD2のデータを用いた。MCDは1995年のデータであり、MCD2は2001年のデータである。本分析では、1995年～2001年の6年間で変数間の関連構造に大きな変化がないこと、また時点間の差異に比べ、都市間の差異が有意に大きいと仮定し、2時点のデータを用いた。

b) 結果

表-8に回帰分析の結果を示す。表中の変数名は表-7で使用したものと同様である。なお表-8で示した各式は、構造方程式群となっており、被説明変数が他の式の説明変数となっている。

表-8 回帰分析の結果

被説明変数 観測値数 自由度修正済みR ²	説明変数名 係数 (t値)				
ln(TR_TT_PP)	ln(GD_PP)	ln(PP_AU)			
140	0.15	-0.11			
0.484	(20.17)	(-6.40)			
ln(SMT_PC/SMT_NMT)	定数項	ST_PC_PP	SP_RD		
75	-1.68	3.04E-03	0.04		
0.555	(-5.44)	(5.08)	(3.28)		
ln(SMT_MC/SMT_NMT)	定数項	T_MIN	T_MAX		
75	-6.32	0.04	0.11		
0.369	(-9.12)	(2.20)	(3.38)		
ln(SMT_BS/SMT_NMT)	定数項	PP_AU	ST_BS_PP	DR2	DR4
75	-1.81	0.00	1.79E-04	1.02	1.74
0.344	(-12.54)	(2.87)	(2.89)	(2.43)	(3.61)
ln(SMT_RL/SMT_NMT)	定数項	PP_AU	ST_RL_PP		
75	-2.36	2.72E-03	2.20E-03		
0.355	(-11.13)	(1.75)	(6.52)		
ln(TD_PC)	定数項	ln(AU)	ln(PP_AU)		
140	2.40	0.05	-0.15		
0.173	(6.76)	(1.91)	(-4.19)		
ln(TD_RL)	定数項	ln(AU)	ln(PP_AU)		
138	0.17	0.18	0.03		
0.188	(0.38)	(5.59)	(0.63)		
NP_PC	定数項	ln(ST_PC_PP)			
142	2.44	-0.18			
0.508	(29.34)	(-12.10)			
NP_MC	定数項	ST_MC_PP			
93	1.08	1.08E-03			
0.242	(88.15)	(5.51)			
ln(NP_BS)	定数項	ln(ST_BS_PP)	DR12	DR14	DR15
92	3.69	-0.13	-0.54	0.95	0.99
0.286	(7.36)	(-1.81)	(-3.44)	(3.59)	(2.98)
ln(NP_RL)	定数項	ST_RL_PP	DR8		
77	3.49	-3.51E-04	1.14		
0.419	(39.64)	(-2.03)	(6.26)		
ln(ST_PC_PP)	定数項	ln(GD_PP)	ln(PP_AU)		
145	2.86	0.48	-0.45		
0.702	(4.85)	(10.74)	(-7.37)		
ln(ST_MC_PP)	定数項	ln(GD_PP)	ln(PP_AU)	DR16	DR17
144	-3.23	0.45	0.47	2.12	-2.80
0.246	(-2.73)	(4.98)	(3.71)	(4.62)	(-2.68)
ST_BS_PP	定数項	ln(LN_RL_RD)	DR17		
75	7.49E+02	-31.86	1.25E+04		
0.830	(3.02)	(-0.47)	(18.90)		
ln(ST_RL_PP)	定数項	ln(LN_RL_RD)			
75	8.21	0.83			
0.464	(21.73)	(8.06)			
ln(SP_RD)	定数項	ln(LN_RD_PP)	ln(ST_PC_PP)		
131	3.60	0.26	-0.06		
0.458	(21.76)	(8.06)	(-1.79)		
ln(LN_RD_PP)	定数項	ln(GD_PP)	ln(PP_AU)		
138	1.74	0.24	-0.83		
0.787	(3.33)	(6.22)	(-15.43)		
ln(LN_RL_RD)	定数項	PP_AU	GD_PP	DR2	DR3
75	-4.18	2.95E-03	2.74E-05	1.51	-1.44
0.363	(-13.53)	(1.68)	(3.34)	(3.11)	(-4.77)

DR1~DR9は、地域を表すダミー変数

if 地域 = k DRk = 1, else DRk = 0

地域: 西ヨーロッパ(k=1), 中央・東ヨーロッパ(k=2), 北アメリカ(k=3), ラテンアメリカ(k=4), 中東(k=5), アフリカ(k=6), アジアの高所得都市(k=7), その他アジア(k=8), オセアニア(k=9), 日本(k=10), 日本以外のアジアの高所得都市(k=11), アメリカ(k=12), カナダ(k=13), 中国(k=14), インド(k=15), 中国, インド以外のその他アジア(k=16), フィリピン(k=17), ベトナム(k=18), 中国, インド, フィリピン, ベトナム以外のその他アジア(k=19)

(2) 大気環境負荷物質排出モデル

a) 大気環境負荷物質排出モデルの構造

特定された交通需要への影響構造を表す構造方程式群とEmission Inventory Guidebook 2006(EMEP/CORINAIR, 2006)¹⁰⁾を組み合わせたことにより, 大気環境負荷物質の排出構造を表すモデル(以下, 大気環境負荷物質排出モデル)を構築した。図-2に, 大気環境負荷物質排出モデル

における各変数間の関連構造を示す。図中の矢印は変数間の影響関係を表している。また, 交通需要モデルにおける変数間の関係に関しては, 影響の大きさを示す標準化回帰係数を矢印の傍らに示している。

b) モデルの評価

大気環境負荷物質排出モデルは, 回帰分析により特定された構造方程式群からなる交通需要モデルとEmission Inventory Guidebook 2006(EMEP/CORINAIR, 2006)¹⁰⁾の排出係数モデルを組み合わせたものである。この内独自に構築した交通需要モデルに関しては, モデルから計算される交通需要がMCD, MCD2を再現できているかどうか評価を行う必要がある。評価は, 以下の2通りの方法で計算された一人あたり排出量を比較することにより行った。

①交通需要モデルにより計算された一人あたり交通量と排出係数モデルにより計算された排出係数(トリップ長, 平均走行速度は交通需要モデルで計算されたものを用いる)を掛け合わせることで得られる一人あたり排出量(以下, モデルにより計算された排出量)

②MCD, MCD2の一人あたり交通量と排出係数モデルにより計算された排出係数(トリップ長, 平均走行速度はMCD, MCD2のものを用いる)を掛け合わせることで得られる一人あたり排出量(以下, MCD, MCD2から計算された排出量)

交通需要モデルで計算された結果とMCD, MCD2のデータを直接比較するのではなく, そこから計算される排出量を比較することによりモデルの評価を行った理由は, 本研究の分析対象は環境負荷量であるため, モデルの推計値を用いた場合と報告値を用いた場合で, 環境負荷量にどの程度違いがあるかを評価する必要があるためである。図-3~図-6に, モデルにより計算された排出量とMCD, MCD2から計算された排出量の比較を示す。相関係数は, COで0.77, NOxで0.91, PMで0.75, CO₂で0.90となり概ね良好な結果であるといえる。CO, PMで若干低い値になっているのは, これらの2つの物質では他の物質に比べ二輪車交通量の寄与が大きいが, 二輪車交通量の推計精度が他の輸送機関に比べ低いためであると考えられる。表-5に示した通り二輪車交通量は都市によるばらつきが非常に大きい(変動係数は1.73)ことから推察される通り二輪車交通量を都市横断的分析により推計することは難しい。しかしモデル全体の評価としては, 相関係数がCOで0.77, PMで0.75と高い値が得られていることから, 十分な精度があると判断した。

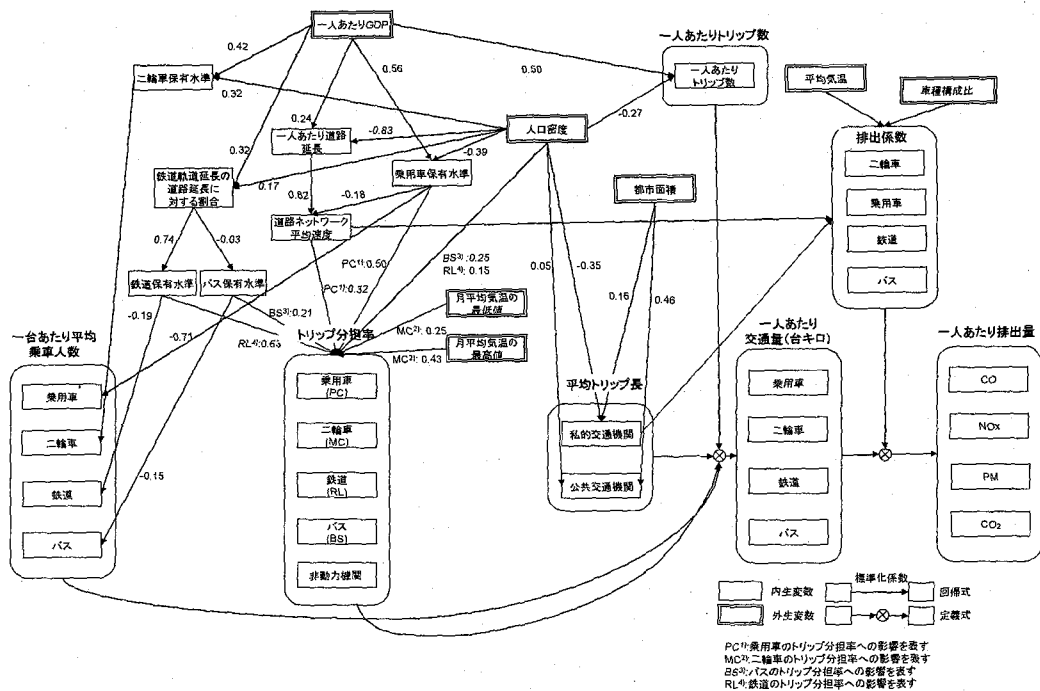


図-2 大気環境負荷物質排出モデルにおける各変数間の関係

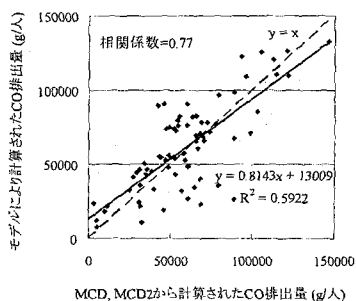


図-3 モデルの評価 (CO 排出量の比較)

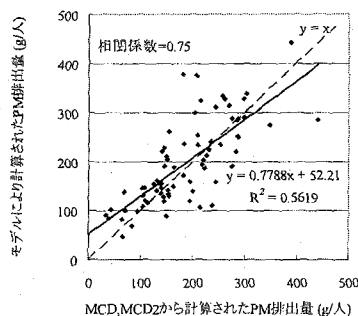


図-5 モデルの評価 (PM 排出量の比較)

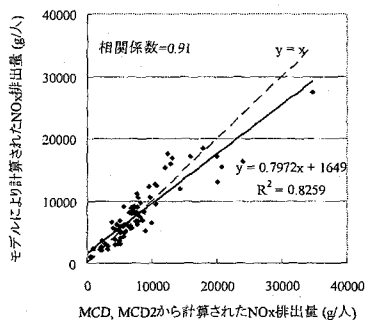


図-4 モデルの評価 (NOx 排出量の比較)

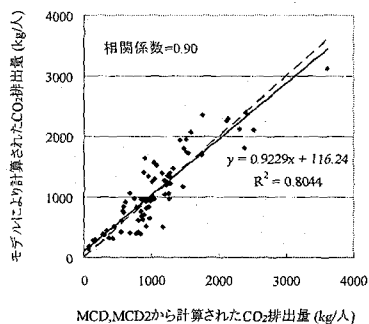


図-6 モデルの評価 (CO₂ 排出量の比較)

5. 人口密度変化による環境負荷量変化の定量解析

人口密度と環境負荷量の関係を定量的に解析するために、4章において構築した大気環境負荷物質排出モデルを用いて75都市を対象に人口密度を変化させたときの環境負荷量の変化を推計した。具体的には、対象とした75都市について、人口を現状値に固定し、人口密度を現状から-20%～+20%の範囲において5%刻みで変化させたとき（このとき都市面積は人口密度の変化に対応し、+20%～-20%の範囲を5%刻みで変化させる）の排出量を推計するという手法をとった。その他の外生変数である一人あたりGDP、平均気温、車種構成比は現状値に固定した。図-7、図-8に推計結果を示す。図では、同一都市における排出量の変化率を折れ線でつないで表示している。

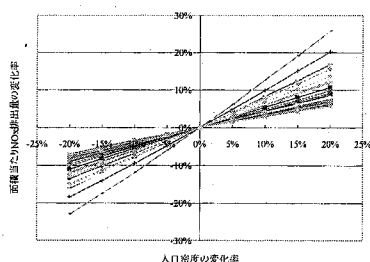


図-7 人口密度の変化によるNOx環境負荷量の変化

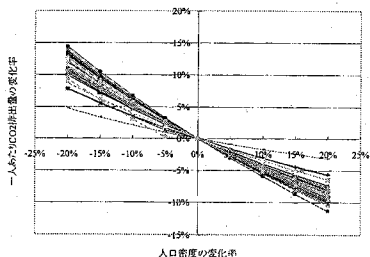


図-8 人口密度の変化によるCO₂環境負荷量の変化

人口密度を増加させる（都市面積を減少させる）と、面積あたりNOx排出量は増加、一人あたりCO₂排出量は減少する傾向があることが見てとれる。また、人口密度の変化率と環境負荷量（面積あたりNOx排出量、一人あたりCO₂排出量）の変化率はほぼ線形関係にあることが分かる。人口密度変化に対する環境負荷量の応答（線分の傾き）は都市により大きく異なる。例えば、人口密度を20%増加させた場合のNOx環境負荷量の変化率には6.2%～25.8%の幅があり、CO₂環境負荷量の変化率には-3.1%～-11.3%の幅がある。これは人口密度変化によって環境負荷量が変化しやすい都市と、変化しにくい都市が

あることを示している。このことは、例えばCO₂削減対策として都市の高密度化を考える際に重要である。一体どのような都市で高密度化によるCO₂削減率が大きいのだろうか？図-9に現状における乗用車トリップ分担率と人口密度を20%増加させたときの一人あたりCO₂排出量の変化率の関係を示す。

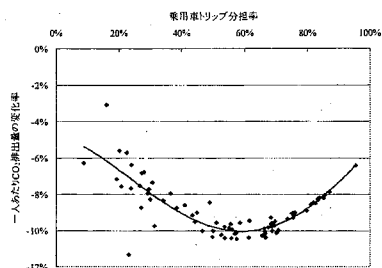


図-9 乗用車トリップ分担率とCO₂の排出量変化率の関係

乗用車トリップ分担率が60%付近に明らかな屈曲点が存在することが分かる。このことから、現状においてトリップ分担率が60%程度の都市において、高密度化によるCO₂排出削減が最も効果的であることが分かる。

図-7、図-8から、人口密度の増加は一人あたりCO₂排出量を減少させる効果がある一方、面積あたりNOx排出量の増加をまねくことが分かる。人口密度を増加させたときの一人あたりCO₂排出量の変化率と面積あたりNOx排出量の変化率の間にはどのような関係があるのだろうか？図-10に人口密度を20%増加させたときの、一人あたりCO₂排出量の変化率と単位面積あたりNOx排出量の変化率の関係を示す。

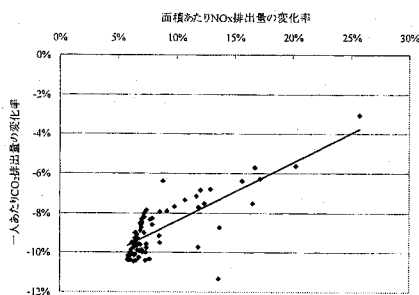


図-10 一人あたりCO₂排出量の変化率と面積あたりNOx排出量の変化の関係

一人あたりCO₂排出量の削減率が大きい都市ほど、面積あたりNOx排出量の増加率が小さい傾向があることが分かる。このことから、都市の高密度化によりCO₂排出量の削減をする対策はNOxによる大気環境負荷量の増加という副作用を招くが、CO₂排出量削減効果の大きな都市ほどその副作用は小さいことを示している。

6. おわりに

本研究では、世界の都市を対象に環境負荷量の都市間差異の要因分析を行い、さらに、都市構造が交通需要に与える影響を明示的に記述した大気環境負荷物質排出モデルを構築した上で、人口密度変化が環境負荷量に与える影響を定量的に分析した。以下に本研究で得られた知見を列挙する。

- (1) 一人あたりCO₂排出量の都市間相違については、乗用車交通量の説明力が非常に高い。
- (2) 面積あたりCO₂排出量の都市間相違については、乗用車交通量、二輪車交通量の説明力が高い。
- (3) 面積あたりNO_x排出量および面積あたりPM排出量の都市間相違については、バスの交通量、バスの排出係数の説明力が高い。
- (4) 交通需要量は一人あたりGDP、人口密度、都市面積を外生変数とするモデルで説明できる。MCD、MCD2に基づき計算された一人あたり排出量とモデルにより計算された一人あたり排出量を比較すると、相関係数は、CO₂で0.77、NO_xで0.91、PMで0.75、CO₂で0.90となった。
- (5) モデルを用いて、人口を一定としたときの人口密度変化が環境負荷量に与える影響を分析した結果、人口密度を20%増加させた場合、面積あたりNO_x排出量は6.2%~25.8%増加し、一人あたりCO₂排出量は3.1%~11.3%減少する。
- (6) 高密度化によるCO₂の削減率は、現状において乗用車トリップ数が60%程度の都市で最も高い。
- (7) 高密度化によるCO₂削減率が高い都市ほど、NO_x環境負荷の増加率は小さい。

謝辞：本研究は、環境省の地球環境研究総合推進費(B-52)の支援を受けている。ここに記して謝意を表する。

付録 Log-mean Divisia Index Method I による要因分析

t 年における排出量は式(15)に示す恒等式により表される。

$$Q(t) = \sum_m Q_m(t) = \sum_m \{V_m(t) \times EV_m(t)\} \quad (15)$$

Q : 面積あたり、または一人あたり排出量

Q_m : 輸送機関 m の面積あたり、または一人あたり排出量

V_m : 輸送機関 m の面積あたり、または一人あたり交通量

EV_m : 輸送機関 m の排出係数

式(15)の両辺の対数をとって t で微分すると式(16)が得られる。

$$\frac{d \ln Q(t)}{dt} = \sum_m \frac{Q_m(t)}{Q(t)} \left(\frac{d \ln V_m(t)}{dt} + \frac{d \ln EV_m(t)}{dt} \right) \quad (16)$$

式(16)の両辺を $t=[0, T]$ の期間で積分すると式(17)が得られる。

$$\ln \frac{Q(T)}{Q(0)} = \sum_m \int_0^T w_m(t) \left(\frac{d \ln V_m(t)}{dt} + \frac{d \ln EV_m(t)}{dt} \right) dt \quad (17)$$

このとき、

$$w_m(t) = \frac{Q_m(t)}{Q(t)} \quad (18)$$

式(17)の指数をとることにより式(19)が得られる。

$$\frac{Q(T)}{Q(0)} = \exp \left(\sum_m \int_0^T w_m(t) \left(\frac{d \ln V_m(t)}{dt} \right) dt \right) \cdot \exp \left(\sum_m \int_0^T w_m(t) \left(\frac{d \ln EV_m(t)}{dt} \right) dt \right) \quad (19)$$

式(19)の右辺は、式(20)の通りを離散近似できる。

$$\begin{aligned} \frac{Q(T)}{Q(0)} &\equiv \exp \left(\sum_m w_m(t^*) \ln \frac{V_m(T)}{V_m(0)} \right) \cdot \exp \left(\sum_m w_m(t^*) \ln \frac{EV_m(T)}{EV_m(0)} \right) \\ &= \prod_m \exp \left(w_m(t^*) \ln \frac{V_m(T)}{V_m(0)} \right) \cdot \exp \left(w_m(t^*) \ln \frac{EV_m(T)}{EV_m(0)} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

このとき、

$$w_m(t^*) = \frac{L(Q_m(0), Q_m(T))}{L(Q(0), Q(T))} \quad (21)$$

$$L(x, y) = \frac{y - x}{\ln y - \ln x} \quad \text{for } x \neq y \quad (22)$$

$$L(x, y) = x \quad \text{for } x = y$$

式(20)は、以下の式(21)の通り表すことができる。

$$D = \prod_m DV_m \cdot DEV_m \quad (23)$$

D : $t=T$ の排出量と $t=0$ の排出量の比 ($=Q(T)/Q(0)$)

DV : D のうち輸送機関 m の輸送量により説明される部分

DEV : D のうち輸送機関 m の排出係数により説明される部分

式(23)は、ある時点 $t=T$ の排出量と基準となる時点の $t=0$ 排出量の比を要因に分解する方法として導出された。しかし、Zhang et al (2001)¹²⁾で行われているように、この方法は、ある地域の排出量と基準となる地域の排出量の比の要因分解といった横断的な分析にも用いることができる。

参考文献

- 1) Kenworthy JR: Transport Energy Use and Greenhouse Gases in Urban Passenger Transport Systems: A Study of 84 Global Cities, Presented to the international Third Conference of Regional

- Government Network for Sustainable Development, Notre Dame University, Fremantle, Western Australia, September 17-19, 2003.
- 2) 松岡 譲, 森田恒幸, 有村俊秀: 都市構造及び都市配置と地球温暖化=都市計画論再考=, 環境研究, No.86, pp.51-65, 1992.
 - 3) 加藤博和, 林 良嗣: 都市旅客交通に伴うCO₂排出メカニズムの定式化と実際の都市への適用, 土木計画学研究・講演集, No. 21(2), pp.681-684, 1998.
 - 4) 堀 裕人, 細見 昭, 黒川 洗: 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—, 1999年度第34回日本都市計画学会学術研究論文集, 1999.
 - 5) 松橋啓介: 大都市圏の地域別トリップ・エネルギーから見たコンパクト・シティに関する考察, 2000年度第35回日本都市計画学会学術研究論文集, 2000.
 - 6) Kenworthy, J.R. and Laube, F.B.: Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy, Transportation Research Part A, Vol.33, pp.691-723, 1999.
 - 7) International Association of Public Transport: The Millennium Cities Database for Sustainable Transport, CD-ROM, 2001.
 - 8) International Association of Public Transport: Mobility in Cities, CD-ROM, 2006.
 - 9) VIVIER, J.: Millennium cities database for sustainable mobility analysis and recommendations, UITP, 2001.
 - 10) EMEP/CORINAIR: Emission Inventory Guidebook, 2006.
 - 11) Ang, B. W. and Liu, F. L.: A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation, *Energy*, Vol.26, pp.537-548, 2001.
 - 12) Zhang, F. Q. and Ang, B.: Methodological issues in cross-country/region decomposition of energy and environment indicator, *Energy Economics*, Vol.23, pp.179-190, 2001.

A CROSS-SECTIONAL ANALYSIS OF URBAN STRUCTURE AND AIR POLLUTANTS EMISSIONS FROM URBAN PASSENGER TRANSPORT

Osamu AKASHI and Yuzuru MATSUOKA

The objective of this research is to obtain universal knowledge on relation between urban structure and CO, NO_x, PM and CO₂ emissions from urban passenger transport. Firstly, we conducted contributing factor analysis on variations of pollutants emissions among world cities. It is shown that variations of emissions are mostly contributed by transport volume for all pollutants. Secondly, we developed transport demand model which explains transport demand using variables including population density and urban area as explanatory variables. Then, we simulated influence of population density change to pollutants emissions by using transport demand model and emission factor model. It is shown that NO_x emissions per urban area increase by 6.2% - 25.8% while CO₂ emissions per capita decrease 3.1% - 11.3% when population density increases by 20%. It is also shown that reduction rate of CO₂ emissions per capita is the highest in cities where modal share of passenger car is about 60% in trip base.