

北東アジアにおける窒素酸化物排出量の将来予測 —モータリゼーションと自動車からの排出量の増加—

PROJECTION OF FUTURE EMISSION OF NO_x IN NORTHEAST ASIA - MOTORIZATION AND INCREASE OF EMISSION OF NO_x FROM AUTOMOBILES -

白井 朗* 花木 啓祐** 秋元 肇*
Akira USUI*, Keisuke HANAKI**, Hajime AKIMOTO*

ABSTRACT ; Emission of nitrogen oxides (NO_x) in Northeast Asia (China, South Korea, Taiwan and Japan) has been predicted in the near future of 21st century (2000, 2010 and 2020). In order to increase accuracy of estimate of NO_x emission from automobiles accompanying with "motorization" in this region, a new method of predicting automobile owning per capita based on GDP per capita converted by purchasing power parity (PPP) has been developed. Total amounts of NO_x emissions from automobiles in the Northeast Asia was estimated to be 2.69, 3.91, 6.04 M t/yr in 2000, 2010, and 2020, respectively, which is larger than the value, 2.51 M t/yr, in 1995 by a factor of 1.1, 1.6, 2.4, respectively. The contribution of China to the total NO_x emission from automobiles in the Northeast Asia are 41, 63, 77% in 2000, 2010, and 2020 as compared to 38% in 1995.

KEYWORDS; NO_x Emission, Future projection, Motorization, China, Northeast Asia

1. はじめに

1. 1 研究の背景と目的

アジア諸国における急速な工業化と経済成長は、化石燃料燃焼に伴う SO_2 、 NO_x を初めとする大気汚染物質の排出量の増加をもたらし、局地的な大気汚染の激化を招いているばかりでなく、酸性雨・対流圏オゾン増加など長距離越境輸送による大陸規模での大気汚染の拡大をもたらすことが危惧されている。特に中国、韓国、台湾などの北東アジアの近隣国・地域における大気汚染物質の排出量の増加は、わが国の大気環境にも大きな影響を及ぼす可能性が高く、その将来予測には大きな関心が持たれている。

わが国自身は1960年代から大気汚染防止対策に本格的に取り組み始めた結果、 SO_2 に関しては現在ではその直接的環境影響は殆ど問題にならない濃度レベルまで低下している¹⁾。一方、 NO_x に関しては、固定発生源、移動発生源に対する排出防止技術がかなりの水準に達し、世界で最も厳しい排出規制が行われているにも関わらず、自動車の増加により、1980年代以降大きな改善は見られていない¹⁾。この結果、現在わが国では大気汚染物質（酸性降下物の原因物質）として NO_x の寄与が SO_2 より高く、この傾向は将来とも続くものと思われる。

近隣の北東アジア諸国の内、中国ではエネルギー・産業部門・民生部門における石炭燃焼から排出される SO_2 による大気汚染が現状においては圧倒的に重要である²⁾。 NO_x に関しては、現時点では大気汚染物質としての比重は未だ低いが、将来自動車保有台数の増加と共に排出量が増加することが予想される。韓国、台湾においては、最近の自動車保有台数の増加により NO_x の排出量が急速に増加する一方、 SO_2 については排出抑制対策の導入により、増加率が以前に比べて低下し、現在大気汚染物質として NO_x は SO_2 と同程度の重要度となってきている²⁾。

* 東京大学先端科学技術研究センター

* Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo.

** 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 ** Department of Urban Engineering, University of Tokyo.

このように21世紀の北東アジアにおいては、自動車から排出される NO_x が大気汚染物質として相対的に重要となることが容易に予想される。 NO_x 排出量の増加は、降水酸性化の主要原因物質を硫酸イオンから硝酸イオンへ変化させ、単なるpHの低下とは異なる環境影響をもたらす可能性がある³⁾。窒素Nは植生については硫黄Sと異なり、肥料に成るといった側面がある。しかしながら、例えば自然森林にとっては過剰栄養となり、逆に森林を枯らしてしまうといった影響が指摘されている。また、窒素成分による湖沼の富栄養化の原因ともなる。また、 NO_x の増加により大陸規模で地表オゾンが増加し、それによる森林・農作物被害が、わが国を含めた北東アジア全域に拡大するおそれがある。モータリゼーション（車の大衆化）に伴う自動車排気ガスからの NO_x の放出量の増加に着目した定量的な研究は未だほとんどなされていないが、北東アジアの将来の環境問題を考えるうえで、自動車からの排出量の予測を精度良く行う手法を開発することは極めて重要である。

北東アジアを含むアジアを対象に過去および現在の NO_x 排出量の推計を行った研究例としては、Kato and Akimoto⁴⁾、Akimoto and Narita⁵⁾ および東野ら⁶⁾ の論文がある。Kato and Akimotoの論文⁴⁾ は、IEAのエネルギーバランス表を基に、1975、1980、1985、1987年を対象にアジア各国の国別（中国、インドについては省・州別）の NO_x 排出量の推計を行ったものである。Akimoto and Narita⁵⁾ の論文は、これらのデータを基に北緯10-55度、東経60-150度の範囲で $1^\circ \times 1^\circ$ の分解能で発生量分布を与えている。東野ら⁶⁾ の論文は、1990年を対象に中国の NO_x 排出量の推計を行い、80 km $\times$ 80 km および $1^\circ \times 1^\circ$ の分解能で発生量分布を与えている。 NO_x 排出量の将来予測を行った研究としては、五藤ら⁷⁾ による報告がある。この研究では、特定の経済モデルに基づいて各国の将来エネルギー消費の予測を行い、2000、2010年を対象にアジア各国の NO_x 排出量の将来予測を行っている。しかし、これらの論文は移動発生源の詳細な推定をしていない。

本研究では、21世紀の近い将来（2000、2010、2020年）の中国、韓国、台湾、日本における NO_x 排出量の推計を行った。特に、各国の所得水準から自動車の普及状況、およびこれを基に NO_x の排出量を推定する手法を開発し、モータリゼーションに伴う NO_x の排出量の推定精度の向上を目指した。

1. 2 北東アジアの自動車保有台数増加の状況

日本を除くアジアの自動車市場は全世界の約1割を占めるにすぎないが、高い経済成長力と膨大な人口に伴って自動車販売台数は急激に増え、自動車保有台数も増大する傾向にある⁸⁾。中でも特に中国は、約12億という人口規模から考えても、北東アジア最大の潜在規模を持つものと考えられ、今後乗用車保有台数の急速な増加が予想される。

2. 研究の手法

本研究で用いられた、自動車からの NO_x 排出量の将来予測手法の流れ図を図1に示す。まずはじめに、アジアおよび欧米諸国における過去25年間（1971-1995年）の1人当たりGDPと1人当たり自動車保有台数のデータからそれらの間の一般的相関則を見出し、この関係とGDP成長率の推定とから中国・韓国・台湾・日本の4つの国・地域について、1人当たり自動車保有台数の将来予測（2000、2010、2020年）を行った。次に、この値に各国の人口の将来推定値をかけ、1人当たりGDPと車種別構成比率（乗用車/商用車）との関係を利用して、将来における車種別保有台数を推定した。さらに、保有台数1台当たりの燃料消費量と1人当たりGDPとの間にも一定の関係が見られたので、この関係を利用して各国の自動車走行による自動車燃料（ガソリンおよび軽油）の将来の消費量の推定を行った。最後に、日本の自動車排出ガス規制の推移を見ただけで、将来における自動車からの NO_x の排出係数を国別に推定し、これらを基に自動車からの NO_x の排出量の将来予測を行った。すなわち、

$$S_{mi} = P \cdot N \cdot F_i \cdot E_i \quad (1)$$

ここで S_{mi} は自動車からの年間 NO_x 排出量、 P は人口、 N は人口1人当たり自動車保有台数、 F は1台当たり年間燃料消費量、 E は燃料単位消費量当たりの NO_x 排出係数、 i はガソリンと軽油の区別である。また、ここでは乗用車とトラック・バスの保有台数の合計を自動車の保有台数とした。

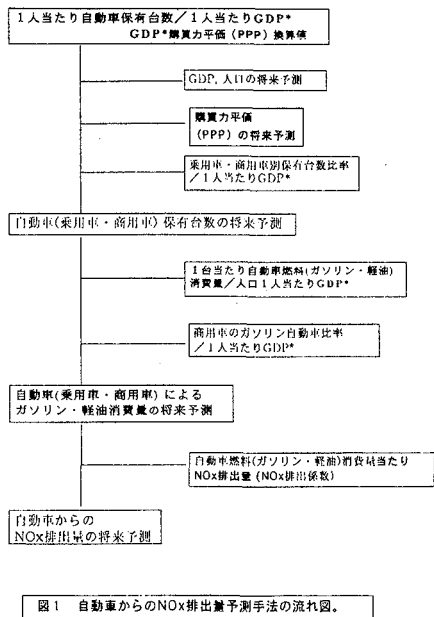


図2 各国における1人当たりGDPと1人当たり自動車保有台数の相関(1971-1995)。

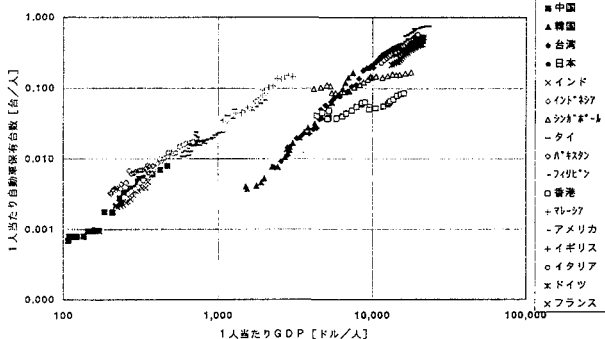


図3 各国における1人当たりGDPと1人当たり自動車保有台数の相関(1971-1995)。

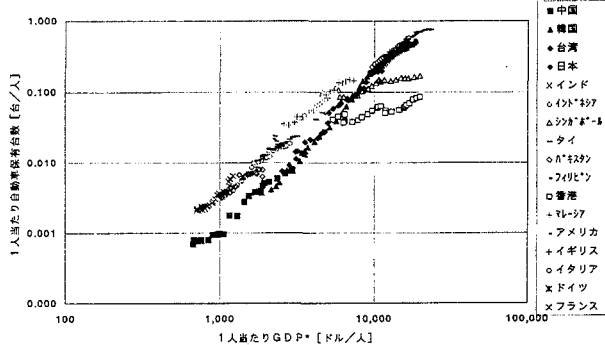


図4(a) 北東アジアにおける1人当たりGDP*と
1人当たり自動車保有台数の相関。GDP* < 10,000ドル
(日本1980-1972、台湾1971-1991、韓国1971-1994、中国1982-1994)。

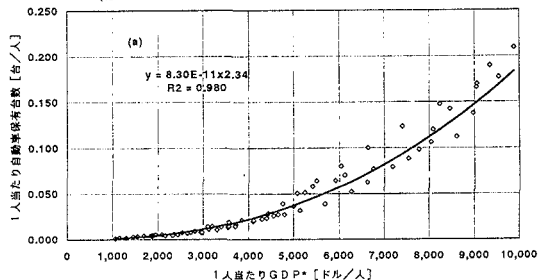


図5 アジアおよび欧米各国の1人当たりGDPと
購買力平価(PPP)換算係数の相関。

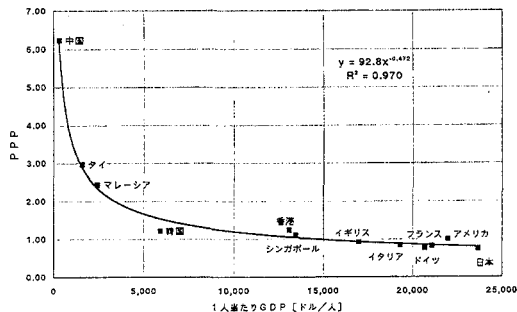


図4(b) 北東アジアにおける1人当たりGDP*と
1人当たり自動車保有台数の相関。
GDP* ≥ 10,000ドル (日本1973-1994、台湾1992-1994)。

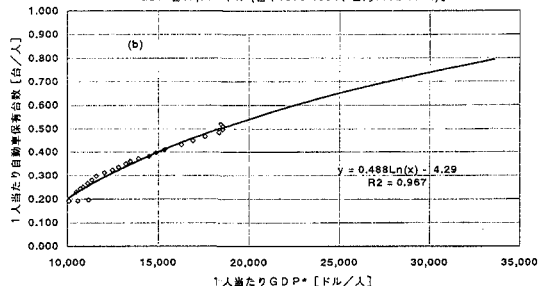
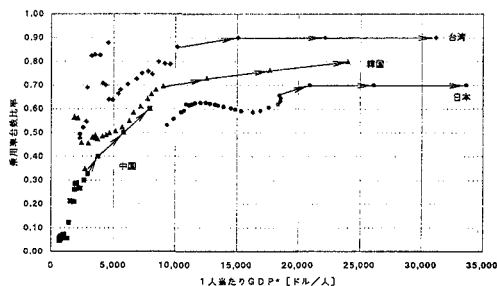


図6 北東アジア各国における1人当たりGDPと乗用車台数比率の相関。



3. 解析結果

3. 1 自動車保有台数の将来予測

3.1.1 自動車保有台数とGDPの相関

図2はアジア12ヶ国（インド、インドネシア、韓国、シンガポール、タイ、台湾、中国、日本、パキスタン、フィリピン、香港、マレーシア）に欧米の自動車先進国5ヶ国（アメリカ、イギリス、イタリア、ドイツ、フランス）を加えた17ヶ国について、1971年から1995年までの過去25年間について、人口1人当たりのGDP（1990年米ドル市場為替レート換算）と1人当たり自動車保有台数の関係を両対数プロットしたものである。ここで1人当たりGDPの値としては、IEAのエネルギーバランス表OECD/IEA「Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries」¹³⁾によるデータを用いた。また、自動車保有台数としては、日本自動車工業会「主要国自動車統計」¹⁰⁾によるデータを用いた。

まず、アジアおよび欧米各国の人口1人当たり自動車保有台数（自動車普及水準）を時系列的に見ると、一般的に右上がりの傾向を示し、所得水準が上がると自動車普及水準も上がる様相を示している。1995年の自動車普及水準と比較して見ると、自動車先進国である日本の人口1人当たり0.53台に対し、台湾、韓国はそれぞれ0.21、0.19台（日本の25年前の水準）、中国は0.009台（台湾、韓国の20年前の水準）となっている。特に、中国全体での1人当たり自動車保有台数は、現在アジアでは最低の水準にある。

図2に見られるように、対数プロットは、国別に似たような傾きの曲線を与えるが、例えば中国は先進国（日本および欧米）やNIES諸国（台湾、韓国、香港、シンガポール）に比べ、グラフの曲線が左にずれており、所得水準の割には自動車普及水準が高いように見受けられる。このことはインド、パキスタンなどの南アジアの諸国、インドネシア、タイ、マレーシアなどの東南アジア諸国についても同様に見られる。この乖離の理由は市場レートと実際の購買力との格差によるものと考えられる。そこで、GDPの値を世界銀行による1990年のアジアおよび欧米各国の購買力平価(PPP)¹⁴⁾の値で換算したものをGDP*（1990年米ドル購買力平価換算）と定義した。1人当たりGDPの代わりに1人当たりGDP*を用いて同様のグラフを作成すると、図3に見られるように右上がりの比較的分散の少ない曲線となり、所得水準と自動車普及水準の間にはかなり一般的な相関があることが分かった。GDPを購買力平価で換算すると自動車普及水準との相関が良くなることは、井上ら¹⁵⁾でも指摘されている。

図3に見られる様にシンガポールおよび香港の2ヶ国のデータは、他のアジア各国のデータと比較してかなり異なる推移を示している。これらの国は面積の狭い都市国家であるため、所得水準がそのまま自動車保有台数に反映されないものと考えられる。特にシンガポールは、政府の自動車抑制政策により自動車保有台数に、今後大きな伸びが期待されない状況にある。図3からこの2ヶ国のデータを除くと、他の15ヶ国のデータは右上がりの比較的単一の相関を与えることが分かった。このグラフを見ると、1人当たりのGDP*が10,000ドルまでは明らかに2次以上の相関があるが、10,000ドルを超えると曲線の傾きが小さくなり1次の相関に近づくことが分かる。さらに詳細に見ると、まず第一の段階として1人当たりGDP*が約2,000ドルの水準までは1人当たり自動車保有台数は比較的緩やかな増加しか示さないが、1人当たりGDP*がこの水準を超えると自動車の普及が急ピッチで進み、1人当たり自動車保有台数は急上昇する。この段階では乗用車の普及が急速に進んでおり、この段階を「モータリゼーション（自動車の大衆化）」と定義することができる。すなわち「モータリゼーション」とは1人当たりGDP*で2,000-10,000ドル、1人当たり自動車保有台数が0.01台以下から0.2台へと急上昇する段階に相当することが分かる。ちなみに1人当たり自動車保有台数が0.1台に達するのは1人当たりGDP*が5,000ドル前後である。最終的には1人当たりGDP*が10,000ドルを超えたレベルになると、1人当たり自動車保有台数が約0.2台を越え、大衆層にも自動車普及が行き渡ることから、自動車保有台数の伸びはゆるやかになる傾向が見い出される。図に見られるように南アジア、東南アジアでは北東アジアに比較して、GDP*に対する自動車普及率が2-3倍高めに出る傾向が見られるが、その理由は不明である。また、図3から北東アジアの中国、韓国、台湾、日本については非常に相関の良い1本の曲線で近似されることが分かる。本研究では中国、韓国、台湾、日本についての予測を目的としているため、その将来予測もこの曲線で良く近似されるものと仮定し、以下の算定ではこの4ヶ国についてだけの曲線を用いることにした。

3.1.2 GDP*と総自動車保有台数

北東アジアの中国・韓国・台湾・日本について、自動車保有台数将来予測の精度を上げるため、日本の更に遡った過去のデータ(1960-1970年)を加え、一つの曲線を定義した。この曲線を関数近似するためにまず、全体を三次関数でフィッティングする事を試みた。得られた最適関数はデータ点と非常に良い相関($r^2 = 0.983$)を与えるが、この関数ではGDP*が30,000ドル付近に極大が現れてしまう。したがって、将来の日本のようにGDP*がこれを越えるような場合には、GDP*の増加と共に1人当たり保有台数が減少することになり、将来予測には不適切であることが分かった。次に、ロジスティック曲線(Xが大きくなると、Yが一定の値に近づく成長曲線)でのフィッティングも試みたが、適合の度合は低かった。

そこで本研究では、人口1人当たりのGDP*が1,000-10,000ドルまでと、10,000ドルを超えたレベルの2つに分けて、前者を指数関数で近似し、後者については対数関数で近似することとした。得られた最適関数は1,000-10,000ドルについて

$$Y = 8.30 \times 10^{-11} x^{2.34} \quad (r^2 = 0.980) \quad (2)$$

であり、10,000ドル以上については、

$$Y = 0.488 \ln x - 4.30 \quad (r^2 = 0.967) \quad (3)$$

となる。得られた曲線を、それぞれ図4a, 4bに示した。後述のように中国、韓国、台湾、日本の1995年現在の1人当たりGDP*はそれぞれ、約2,000、11,000、13,000、20,000ドルであり、本研究で仮定されたGDPの伸び率によれば、2020年の中国、韓国、台湾、日本の1人当たりGDP*はそれぞれ、約5,000、16,000、18,000、37,000ドルとなる。したがって、本研究では中国の将来予測には(2)式のみを、韓国、台湾、日本の将来予測には専ら(3)式を用いた。

中国・韓国・台湾・日本について、本研究で用いた経済成長率と人口増加率を表1に、また表2には国連統計¹⁶⁾に与えられた人口、表1から計算されたGDPの将来推計値、1990、1995年のGDP実績値、およびこれから計算される人口1人当たりGDPの値を掲げた。ここで、1971-1995年の経済成長率、および1990、1995年のGDP実績値についてはOECD/IEA¹³⁾の値を、1995-2010年の経済成長率についてはOECD/IEA¹⁷⁾に与えられた世界銀行の想定値を、2010-2020年の経済成長率についてはRAINS-Asiaの想定値¹⁸⁾を採用した。ここで採用したRAINS-Asiaの2010-2020年の経済成長率の値は、中国は5.5%、韓国および台湾は4.0%、日本は2.4%とした。また、OECD/IEA¹⁷⁾に与えられた世界銀行による推定に従うと、1995-2010年のGDPの伸び率の不確定性の幅は、高成長ケース～低成長ケースに相当する値として、中国9.5-6.1%、韓国および台湾7.3-4.7%、日本3.0-1.0%とされている。本研究では世界銀行1996による中位推定を将来予測に使用したが、ここ数年の経済状況からみるとかなり高成長ケースであり、NO₂排出量としてはワーストケースに近い推計値である。

本研究で採用した自動車保有台数推計手法によれば、各国についての将来の1人当たりGDP*の数値が必要である。上に計算されたGDPからGDP*を算出するのに必要な購買力平価による換算係数は、一般にそれ自身がGDPの関数であり、経済成長に伴って値が小さくなるものと考えられる。北東アジア各国について将来の適正な購買力平価換算係数の推定を行うため、1990年の国連国際比較プログラム(ICP)による中国、韓国、台湾、日本を含むアジア12カ国と欧米5ヶ国(アメリカ、イギリス、イタリア、ドイツ、フランス)のデータを基に、為替レート換算の人口1人当たりGDPと換算係数との関係をプロットしてみた。

図5に示されるように人口1人当たりのGDPと換算係数との間の関係は、単一の比較的良い曲線で近似できることが分かった。すなわち、換算係数は、1990年時点で1人当たりGDPが300ドルの中国が5.2で最も高く、約1,500ドルのタイが3.0、2,400ドルのマレーシアが2.5、6,000ドルの韓国が1.4、24,000ドルの日本が0.78とGDPの増加と共に低下しているのが分かる。一般にGDPの値が10,000ドルを越えると換算係数は1.0に近づく。そこで、台湾については1995、2000、2010、2020年の換算係数を、それぞれ1.10、1.04、1.00、1.00と推定し、韓国については同様に、1.22、1.18、1.00、1.00とした。また日本については現状の値0.78が将来も変化しないものとした。

将来の換算係数の変化は中国について最も大きく、その推定値が中国の自動車保有台数の予測に大きな影響を与えるものと考えられる。そこで中国についての将来の換算係数を推定するため、図5のプロットに指数近似式、

表1 経済成長率^{a)}・人口増加率^{b)}の推定(年平均増加率: %)

	実績値		推定値		推定値	
	1971-1995	1995-2000	2000-2010	2010-2020	1971-1995	1995-2000
	GDP	人口	GDP	人口	GDP	人口
中国	8.52	1.59	8.80	0.97	7.08	0.77
韓国	8.29	1.38	8.80	0.86	5.90	0.74
台湾	8.27	1.41	8.80	1.41	6.90	0.98
日本	3.80	0.76	2.30	0.20	2.40	0.05

^{a)} 経済成長率: 1971-1995 実績値はOECD^{a)}より、1995-2010 推定値は光世16に考えられた世界銀行による中位推計値から算出。
2010-2020 推定値はPARIS- ASIA (文庫19)より。
^{b)} 人口: 中国統計 世界人口予測1950-2050 (1996年版)¹⁾ 中位の推計値から算出。

表2 GDP、人口、1人当たりGDP、PPP、1人当たりGDP*の推定値

単位: GDP [1990年10億米ドル]、人口 [百万人]、1人当たりGDP及びGDP* [ドル/人]					
		推定値			
		1990	1995	2000	2010
中国	GDP	366	634	987	1,901
	人口	1,136	1,203	1,262	1,363
	1人当たりGDP	313	527	786	1,395
	PPP購買力	615	3,87	3,35	2,86
	1人当たりGDP*	1,612	2,041	2,688	3,718
韓国	GDP	254	364	426	609
	人口	43	46	47	51
	1人当たりGDP	6,917	8,009	9,009	11,578
	PPP購買力	1,39	1,39	1,39	1,19
	1人当たりGDP*	8,242	10,947	11,715	13,672
台湾	GDP	186	216	251	347
	人口	20	21	23	26
	1人当たりGDP	9,188	10,164	11,083	13,338
	PPP購買力	1,46	1,34	1,23	1,10
	1人当たりGDP*	12,089	12,611	13,308	16,326
日本	GDP	2,970	3,191	3,658	4,637
	人口	124	128	127	124
	1人当たりGDP	24,042	25,413	28,838	36,375
	PPP購買力	0,781	0,781	0,781	0,781
	1人当たりGDP*	19,788	19,859	22,535	28,424

表3 自動車保有台数の推計値

単位: 1人当たり台数 [台/人]、総台数 [百万台]					
		推計値			
		1995	1995	2000	2010
中国	1人当たり台数	0.009	0.005	0.008	0.019
	総台数	10.5	5.6	10.0	25.6
	(内乗用車台数)	3.5	1.8	4.0	12.8
韓国	1人当たり台数	0.188	0.239	0.272	0.347
	総台数	8.5	10.7	12.8	17.7
	(内乗用車台数)	6.0	7.6	9.3	13.6
台湾	1人当たり台数	0.211	0.308	0.334	0.403
	総台数	4.5	6.5	7.7	10.1
	(内乗用車台数)	3.9	5.6	6.9	9.1
日本	1人当たり台数	0.532	0.529	0.591	0.704
	総台数	66.9	86.7	75.1	89.5
	(内乗用車台数)	44.7	44.6	52.6	62.6

図7 日本における1人当たりGDP*と1台あたり自動車走行台の相関。

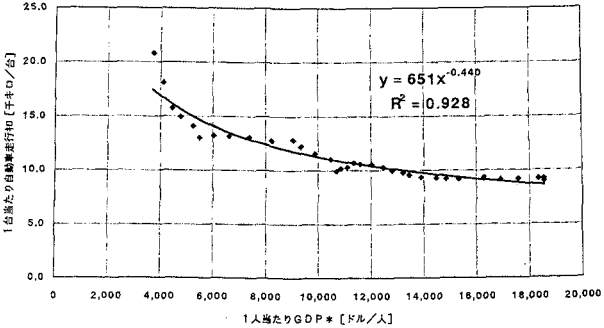


表4 各国の自動車1台あたり年間燃料消費量 (1993-1994年平均値)

単位: [kトン]									
	中国	韓国	台湾	日本	アメリカ	イギリス	イタリア	ドイツ	フランス
自動車燃料消費量 ^{a)}									
	自動車台数	31,365	16,829	8,638	62,638	394,238	36,886	30,782	61,783
	1台あたり燃料消費量	8,798	6,839	4,093	84,137	194,786	27,431	32,467	42,461
ガソリン消費量 ^{a)}									
	ガソリン自動車台数	3.59	2.44	2.03	0.97	2.62	1.38	0.95	1.22
	1台あたりガソリン消費量	26,200	6,638	6,386	38,083	319,023	23,306	16,189	30,446
軽油消費量 ^{a)}									
	ディーゼル自動車台数	7,315	2,684	2,746	39,794	162,767	19,024	18,666	28,824
	1台あたり軽油消費量	3.46	2.16	1.96	0.90	1.96	1.23	0.87	1.14
燃料消費量 ^{a)}									
	ディーゼル自動車台数	6,166	11,091	3,172	26,633	76,215	12,380	14,583	21,338
	1台あたり燃料消費量	1,483	4,276	1,349	24,343	31,989	8,406	13,911	16,637

^{a)} OECD IEA統計¹⁾より作成。

$$Y=43.1 X^{0.384} \quad (r^2 = 0.936) \quad (4)$$

をあてはめてみた。

中国における1人当たりGDP*の推計値を世界銀行のGDP増加率中位推計値から算出した場合、2000年、2010年の推定保有台数は、10.0百万台、25.6百万台と中国政府発表のそれぞれの値、19.0百万台、49.0百万台に比較してかなり低い値となる。世界銀行の経済成長率の高位推計値から算出した場合、中国の2000年および、2010年の推定値はそれぞれ16.6百万台、47.3百万台と中国政府発表の値にほぼ近い値となることが分かった。従って、この推計誤差の要因としては、GDPの将来予測の不確定性が最も大きいのではないかと考えたが、最近の各国の経済成長率の実績から、本研究では世界銀行¹⁷⁾で与えられたGDP増加率の中位推計に基づく自動車保有台数の値を将来予測値とした。

この曲線に基づいた推計を行うに当たり、1人当たりGDP*の推計値を世界銀行の経済成長率の中位推計値から算出した場合を対象とし、これらから計算された1995年および将来の1人当たりGDP*の推計値を表2に示した。さらに、これらの値を用いて式(2)および(3)から計算された自動車保有台数の1995年の推定値および将来予測値を表3に掲げた。

3.1.3 乗用車比率

本研究では自動車からのNO_xの排出量推計を、ガソリン自動車と軽油自動車に分けて行った。そのためには将来における保有自動車中における乗用車の比率を推定する必要がある。図6に北東アジア各国の自動車総台数に対する乗用車台数比率の推移を示す。図6に見られるように、各国とも1人当たりGDP*の増加と共に乗用車台数比率が増加していることが分かる。ただしその値は同じ1人当たりGDP*に対しても国毎に大きく異なり、単一の曲線とはならないのが大きな特徴である。そこで本研究では、国毎の過去のトレンドから乗用車比率の将来推移を図6に実線で示されるように設定した。

北東アジアのなかでは乗用車比率は、台湾が最も大きく現在既に0.9に近い。韓国がこれに次ぎ現在約0.7。日本は0.7と先進国の中ではこの比率が低く、商用車の比率が高いのが大きな特徴である。本研究での乗用車の比率設定値としては、台湾については1995年の実績値0.86を基に将来は0.9で一定と想定した。韓国では1995年の実績値0.71から将来は緩やかに増加すると想定し、2000、2010、2020年における値をそれぞれ0.73、0.77、0.80と設定した。日本については1995年の実績値0.67を基に、将来は0.70で一定と想定した。これに対し中国の乗用車比率は、図に見られるように年々増加している。本研究では中国政府の将来目標値を参考に乗用車の需要拡大を想定し、2000、2010、2020年における値をそれぞれ0.40、0.50、0.60と仮定した。これらの値から推計された、乗用車の将来推計値を表3に示した。

3.2 自動車による燃料消費量と排出係数

3.2.1 燃料消費率の考察

自動車には、自動車用ガソリンを燃料とするガソリン自動車と軽油（ディーゼルオイル）を燃料とするディーゼル自動車がある。ガソリン自動車に比べてディーゼル自動車は、耐久性が高く、燃費が良いことからトラックとバスを中心に普及してきたが、一般に排出ガス中のNO_x濃度が高いことが指摘されている。

本研究ではまず燃料消費量の将来推定を行う前提として、データの入手できる日本について、自動車1台当たりの走行キロ数と燃料消費率の過去35年間の経年変化（1960～94）について考察を行った。図7は日本における自動車1台当たり走行キロ¹⁹⁾の値を、1人当たりGDP*に対してプロットしたものである。図にみられるように1台当たりの走行キロ数はGDP*の増加と共に減少して行くことが分かる。これはGDP*の増加に伴い、自動車保有台数が増加するため、1台当たりの稼働率が低下するためと考えられる。

次に、日本における自動車1台当たり走行キロの値と自動車1台当たり燃料消費量の値から、燃料重量ベースでの平均燃料消費率（燃費）の値を算出した。図8は日本における平均燃料消費率の経年変化をプロットしたものである。燃料消費率は1970年代中頃までは技術的な向上により改善しているが、それ以降はほぼ横這いで推移している。これは技術的な向上による燃料消費率の向上が、自動車の大型化や、交通渋滞、高速走行などで帳消しになっているものと考えられる。図8には参考のため、日本の国産車に対する単体での10モードおよび10・15モード燃料消費率の報告値²⁰⁾を同時にプロットしてみた。本研究で総走行量と

総燃料使用量から算出された平均燃料消費率が、単体燃料消費率の70%程度にすぎないことは興味深い。その原因としては交通センサス¹⁹⁾による総走行量がわが国の総走行量をとらえ切れていないか、10・15モード燃費が、わが国の走行実態を表現しきれていないか、またはその複合原因によるものと考えられる。

図9は北東アジアにおける燃料消費率の値を、1人当たりGDP*の値に対してプロットしたものである。ここで、過去の長期データの入手可能な日本については1960-1994年、韓国については1980-1994年の変化を、台湾、中国については1993、1994年の値をプロットした。図に見られるように人口1人当たりのGDP*が増加するにつれて、自動車1台当たり年間燃料消費量は減少する傾向が見られる。これは、わが国について図7、8に見られたように、GDP*が増加することによる燃料消費率の改善と、1台の自動車の年間稼働率の低下によってもたらされるものであることが分かった。

3.2.2 燃料消費量の将来予測

以上の考察に基づき本研究では、まず自動車保有台数1台当たりの年間ガソリン使用量と年間ディーゼル使用量を推定し、これを基にそれぞれの燃料の消費量の将来推定を行った。

日本以外の中国・韓国・台湾については、ガソリン自動車とディーゼル自動車の構成比率が明らかでない。中国については、自動車の導入初期段階にあり、ここでは日本でもかつてそうであったように商用車でもガソリンが主な自動車燃料となっている²¹⁾。現状においては、乗用車の全てと、商用車の90%がガソリン自動車であると考えられる。韓国・台湾については、乗用車の90%がガソリン自動車であり、一方トラック・バス等の商用自動車の90%がディーゼル自動車であると仮定した。これらの値を用いて、1993-1994年平均のガソリン自動車、ディーゼル自動車それぞれ1台当たりのガソリン、軽油の年間消費量を求めた。

日本については、ガソリン自動車、ディーゼル自動車の保有台数が年度毎に分かっている¹⁰⁾ので、その値とガソリン、軽油の使用量から、1993-1994年平均のガソリン自動車、ディーゼル自動車1台当たりの燃料使用量を算出した。また参考のため、アメリカ、イギリス、イタリア、ドイツ、フランスの欧米5ヶ国についても、1993-1994年平均の1台当たりの燃料使用量を算出してみた。

各国毎に得られた1993-1994年のガソリン自動車、ディーゼル自動車1台当たりの燃料使用量を表4に掲げる。図10はこれらの値を、1人当たりGDP*の値に対してプロットしたものである。各国の将来の自動車1台当たり年間燃料消費量を求めるにあたっては、図10に示したようにこの相関対数曲線で近似した。日本については日本の自動車1台当たり年間燃料消費量（ガソリン自動車：0.90t/台・yr、軽油自動車：1.09t/台・yr）が将来とも変わらないものとしてこの値を用いた。この推定結果を表5に自動車1台当たり年間燃料消費量の将来予測としてまとめた。

3.2.3 排出係数の設定

自動車からのNO_x排出係数の設定に関しては、各国の将来の排気ガス規制の効果等を推定する必要がある。図11に日本における自動車からのNO_x排気ガス規制値の推移を示す。図11に示されるように、日本の場合1人当たりGDP*が10,000ドルを超えた時点で初めて規制が導入され、以後NO_x規制は順次、段階的に強化されている。その結果、1994年時点では未規制時の排出量に比べ、ガソリン自動車では8%、ディーゼル自動車については中量車で21%、重量車で35%にまで減少してきている。このようにディーゼル車については、ガソリン車に比べて対策が遅れているが、将来的には一層の規制強化が行われようとしている。一方、韓国では米国基準での自動車排気ガス規制が1987年7月に導入されている。このときの韓国の1人当たりGDP*は約5,700ドルである。1人当たりGDP*で表した場合に、日本に比べ導入の時期が早まっているのは、時代が下るにしたがって技術進歩の恩恵を受けることによるものと考えられる。同様に台湾においても、米国並みのNO_x排気ガス規制が既に導入されている。

本研究ではガソリン自動車、ディーゼル自動車1台あたりのNO_x排出係数を、未規制車、75日本基準車、92日本基準車に分けて推定をおこなった。ここで、未規制車とは日本の1973年4月以前に、75日本基準車とは日本の1975年規制に、92日本基準車とは1992年以降の日本の自動車に相当する。特に中国、韓国、台湾における未規制車については現時点でも、日本の過去における未規制車とほぼ同じであると思わ

表5 自動車1台当たりの消費燃料の推計値

	実績値 1993～94	単位: [t/台・yr]		
		2000	推計値 ^{a)} 2010	2020
中国				
ガソリン自動車	3.45	3.70	3.20	2.82
ディーゼル自動車	4.15	4.40	3.80	3.33
韓国				
ガソリン自動車	2.16	1.65	1.44	1.21
ディーゼル自動車	2.59	1.93	1.69	1.40
台湾				
ガソリン自動車	1.96	1.48	1.29	1.05
ディーゼル自動車	2.35	1.72	1.49	1.20
日本				
ガソリン自動車	0.90	0.90	0.90	0.90
ディーゼル自動車	1.09	1.09	1.09	1.09

a) ガソリン自動車: $y = -1.35 \cdot \ln(x) + 14.3$ ($r^2 = 0.968$, 最小値=0.90),
ディーゼル自動車: $y = -1.63 \cdot \ln(x) + 17.2$ ($r^2 = 0.970$, 最小値=1.09) より推定。
但し、 $x = 1$ 人当たりGDP*, $y =$ 自動車1台当たり年間燃料消費量。

図8 日本における自動車燃料消費量の推移(1960-93)。

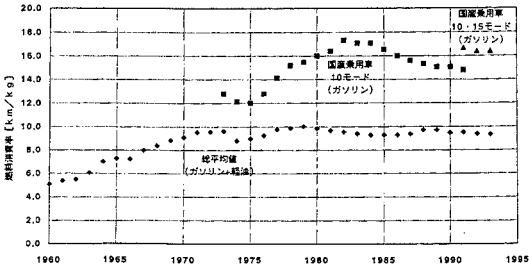


図9 北東アジア各国における1人当たりGDP*と1台当たり年間燃料消費量の相関。

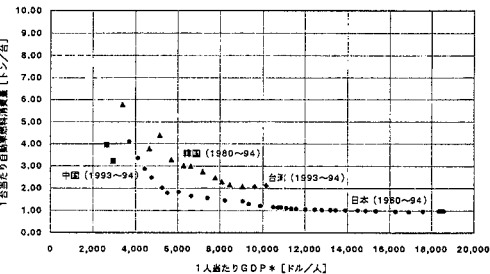


図10 1人当たりGDP*とガソリン自動車1台当たり年間ガソリン消費量および軽油自動車1台当たり年間軽油消費量の相関(1993-94)。

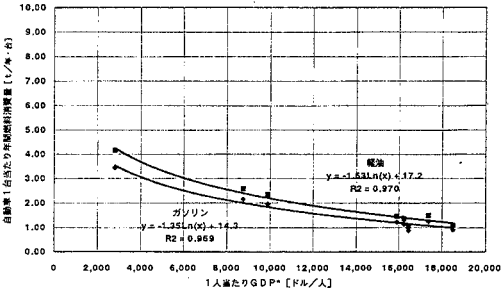
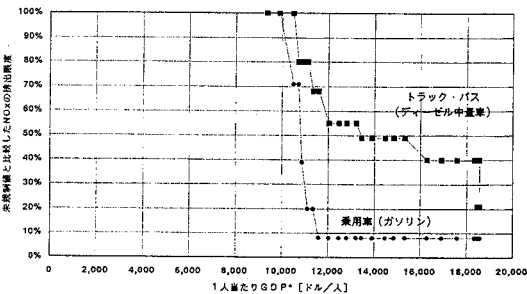


図11 日本の1人当たりGDP*と自動車排出ガス規制の経緯との相関 (1971～1994)



れるのでその値をそのまま用いた²²⁾。用いられた、未規制、75日本基準、92日本基準の値は、ガソリン車についてはそれぞれ、31.7, 15.9, 3.41 kg NO₂/t、ディーゼル車についてはそれぞれ、27.4, 22.9, 17.0 kg NO₂/t である。次に、各国、各年毎に未規制車、75日本基準、92日本基準車の走行割合の見積もりを行った。韓国、台湾については既に75日本基準での規制が新車に対して導入されていることから、2000、2010年にはそれぞれ走行車の90、100%が75日本基準車であると考えた。また、表 2 に見るように韓国、台湾の2010年における一人当たりGDP*はそれぞれ14,000-15,000ドルであることから、一人当たりGDP*との対応だけから考えれば92日本基準が新車に対して導入される可能性もあると考えられる。しかしながら、92日本基準車の導入がなされるかどうかは、単に一人当たりGDP*によるのではなく、その社会的な特殊性による部分が大きく、例えば欧米では一人当たりGDP*は十分高いにも関わらず、92日本基準は導入されていない。従って、2020年までに韓国、台湾において92日本基準が適応されているかどうかについては、不確定性が大きい。ここでは2020年には韓国、台湾における走行車の20%が92日本基準車であると仮定した。中国については、将来の排ガス規制の動向が不明であるので、表 2 に見るように2020年における1人当たりGDP*が5,000ドルであることから、本研究で対象とする期間内には、75日本基準の規制の導入もなされないものとして推定を行った。

日本については、まず1973-1990年についての科学技術政策研究所²²⁾のNO_x排出量の推定値と1990年までのガソリン、軽油の使用量とから、この期間の燃料当たりのNO_xの排出係数を算出した。次に自動車からのNO_x排出削減の長期目標値が2020年に実現されるものと仮定し、科学技術政策研究所²²⁾のデータを参考に2020年における排出係数をガソリン車について3.41kgNO_x/t、ディーゼル車について17.0 kgNO_x/t と推定し、1995、2000、2010年については、1990年と2020年の値から指数関数を用いて内挿することにより排出係数を推定した。得られた排出係数の経年推移を図12に示す。

以上の考察を基に、ガソリン車、ディーゼル車に対する各国・各年毎のNO_xの排出係数を表6のように設定した。

3.3 自動車からのNO_x排出量の将来予測のまとめ

これらのデータを基に、ガソリンおよび軽油の消費量に排出係数を乗ずることにより、各国のNO_x排出量を求めた。表7と図13に自動車からのNO_x排出量の将来予測の結果を示す。本研究の結果からは北東アジアにおける自動車からのNO_xの放出量は、1995年に比べて2010年には約1.6倍、2020年には約2.4倍を越えるものと思われる。

2000、2010、2020年における自動車からのNO_xの排出量は、中国1.10、2.48、4.63 Mt/yr、韓国0.50、0.39、0.35 Mt/yr、台湾0.22、0.17、0.19 Mt/yr、日本0.87、0.87、0.87 Mt/yrとなる。

中国 中国についてはモータリゼーションもこれからという段階であり、本研究での2020年まで自動車排出ガス規制が導入されないとする仮定に基づく、2010、2020年には自動車からのNO_xの排出量は、同様の手法で算定された1995年の値(0.95 Mt/yr)に比較してそれぞれ、2.6、4.9倍に増加する予測となる。絶対量では現在既に、中国からの自動車によるNO_xの放出量は日本の放出量を越えているが、2010年には日本の約3倍、2020年には日本の約5倍となる。

韓国 自動車燃料消費量は2010、2020年には1995年の実績値に比べて、1.8、1.9倍に増加するが、1987年に導入された自動車排出ガス規制の効果によって、2010年以降自動車からのNO_x排出量は1995年の値(0.44 Mt/yr)と比較すると0.9倍程度の変化でほぼ横這いとなるものと考えられる。

台湾 韓国と同様に、自動車燃料消費量は2010、2020年には1995年に比べて、1.7、2.3倍に増加する事が見込まれるが、自動車排出ガス規制の効果によって、NO_xの増加は1995年(0.21 Mt/yr)に比べてそれぞれ、0.8、0.9倍程度に抑えられる。

日本 日本では、自動車排ガス中のNO_x低減対策として、自動車排気ガス規制に基づくエンジン改造、触媒浄化装置の採用などが行われてきたため、燃料消費量に比べてNO_xの排出量は小さく、その増加率も他の国に比べ低い。すなわち、2000、2010、2020年におけるNO_xの排出量は1995年の値(0.91 Mt/yr)とほぼ変わらないものと予測される。最新の計画で大幅な削減を目指しているが、何らかの抜本的対策がなされない限り今後30年以上日本全体での排出量の現状レベルからの減少は期待されないことを意味している。

表6 NOx排出係数の推定値

		単位: (kg NOx / l)			
		排出 係数			
		1995	2000	2010	2020
中国	ガソリン自動車	31.7	31.7	31.7	31.7
	ディーゼル自動車	27.4	27.4	27.4	27.4
韓国	ガソリン自動車	23.8	17.5	16.9	13.4
	ディーゼル自動車	25.2	23.4	22.9	21.7
台湾	ガソリン自動車	23.8	17.5	16.9	13.4
	ディーゼル自動車	26.2	23.4	22.9	21.7
日本	ガソリン自動車	9.64	6.84	4.65	3.41
	ディーゼル自動車	21.0	19.8	18.2	17.0

図12 日本における自動車からのNOx排出係数の推移(1973-2020)。

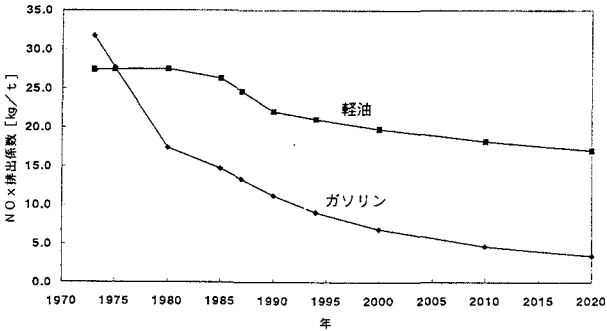
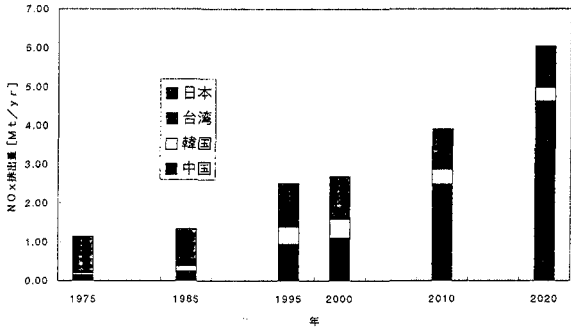


表7 北東アジアにおける自動車からのNOx排出量の将来予測

		実績推定値 ⁷⁾			予測値		
		1975	1985	1995	2000	2010	2020
中国	NOx排出量	0.16	0.25	0.95	1.10	2.48	4.63
	割合	14%	19%	38%	41%	63%	77%
韓国	NOx排出量	0.05	0.13	0.44	0.50	0.39	0.35
	割合	4%	10%	18%	19%	10%	6%
台湾	NOx排出量	0.04	0.10	0.21	0.22	0.17	0.19
	割合	3%	8%	8%	8%	4%	3%
日本	NOx排出量	0.89	0.88	0.81	0.87	0.87	0.87
	割合	78%	64%	36%	32%	22%	
合計		1.14	1.35	2.51	2.69	3.91	6.04
		100%	100%	100%	100%	100%	100%

図13 北東アジアにおける自動車からのNOx排出量の推移。



4. 考察

北東アジアにおける自動車からのNO_xの排出量について将来予測を行った研究は、著者らの知る限り、2000、2010年に対するアジア全体の運輸部門のNO_xの排出量推定を行った五藤ら⁷⁾の報告を除いてはほとんどない。五藤らの研究⁷⁾では運輸部門のNO_x排出量の将来予測に関しては、本研究のような自動車普及率の急速な伸びは考慮されていない。本研究の手法は以下に述べるような多くの推定の不確実性を含んでいるとはいえ、もし中国で2020年まで自動車排ガス規制が行われなかったとしたらどれだけのNO_xが放出されるかについて、より実態に近い推定値を与えているものと思われる。

本研究における推計の不確実性の要因として、本研究における購買力平価の将来予測による不確実性が考えられる。この不確実性は特に中国について大きいものと思われる。すなわち、中国の2000-2020年の1人当たりGDPの推定値は表 2に見られるように770-2200ドルの範囲であるので、将来の購買力平価予測については図 5 の曲線の勾配が最も急な部分を推定していることになり、仮定された関数による近似の不確実性が非常に大きいことが予想される。そこで、購買力平価の将来予測による不確実性幅の推定のため、図 5 においてタイ、マレーシアのデータを無視して、残りの10カ国について対数近似式をあてはめると、

$$Y=-1.24 \ln X + 13.0 \quad (R^2 = 0.944) \quad (5)$$

となる。中国についてこの式を基に推計した場合、2020年における購買力平価の値が表 2 に与えられた予測値2.23に比べて3.51となる。後者から得られる1人当たりGDP^{*}の値、自動車保有台数の推定値から算出すると1994年の自動車保有台数の推定値が9.25 百万台と、実績値9.42 百万台に非常に近い値となるが、中国の2000年および、2010年の推定値はそれぞれ21.7 百万台、64.4 百万台と中国政府発表の値19.0 百万台、49.0 百万台に比べてこれをかなり上回った値となることが分かった。したがって、本研究の手法による自動車保有台数の予測、ひいては自動車からのNO_xの排出量の予測に対する不確実性の要因の一つは購買力平価の将来予測にあると考えられ、その予測精度の向上が望まれる。その他の推定の不確実性としては1人当たりGDP^{*}に対する1台当たり燃料使用量の推定(図10)、排出係数の将来推定などに伴う不確実性からもたらされるものと思われる。

参考文献および注釈

- 1) 環境庁 (1996) 環境白書：総論，平成8年度版，大蔵省印刷局，277-296.
- 2) 大気汚染研究協会編 (1993) 地球大気環境問題とその対策：アジアからの視点，オーム社，151-162.
- 3) Elliot S., M. Shen, D.R. Blake, R. Lu, A.G. Russel, C.Y.J. Kao, G.E. Streit, X.P. Zhao, E.I. McCreary, F.S. Rowland, M.J. Brown and R.P. Turko (1997) Regional to global scale atmospheric Effects of emerging mainland Chinese transportation system, J Atmos. Chem., 27, 31-70, 1997.
- 4) Kato N. and H. Akimoto (1992) Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia : Emission inventories, Atmos. Environ., 26A, 16, 2997-3017.
- 5) Akimoto H. and H. Narita (1994) Distribution of SO₂, NO_x, and CO₂ emission from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1° x 1° resolution, Atmos. Environ., 28, 2, 213-225.
- 6) 東野晴行・外岡 豊・柳沢幸雄・池田有光 (1996) 東アジアを対象とした排出量の推計 (II)：中国におけるNO_x, CO₂排出量推計を中心とした検討，大気環境学会誌，31, 262-281.
- 7) 五藤隆彦・加藤信夫・大西 昭・小川芳樹・坂本 保 (1993) アジア地域のエネルギー利用と地球環境影響物質 (SO_x, NO_x, CO₂) 排出量の将来予測，NISTEP REPORT No. 27, 科学技術政策研究所.
- 8) 牧野昇 三菱総合研究所著 全予測アジア1996 ダイアモンド社 124-129.
- 9) 中国国家統計局 (1990-98) 中国統計年鑑 1990年版～1998年版，中国統計出版局.
- 10) 日本自動車工業会 (1971-1998) 主要国自動車統計 1971年版～1998年版，日本自動車工業会.
- 11) 三菱総合研究所編 (1996) 中国情報ハンドブック1995年版，蒼蒼社，50-75.
- 12) 中国は1989年に国内6自動車事業グループを重点投資対象とする三大三小プロジェクトを発表後、1991年に国家プロジェクトに認定した。1992年に二微を追加して三大三小二微プロジェクトに発展させている。三大三小二微とは、乗用車生産の3つの大きなプロジェクトと3つの小さなプロジェクトを意味する。概要は、2000年に三大は年産90万台 (3拠点で各30万台：大型・中型・小型車)、三小は年産30万台 (3拠点で各10万台：貨客車・ジープ・1.0 リットルクラス微型車) の計120万台の乗用車を生産する。二微は1.0 リットルクラス未満の超微型車 (軽自動車に相当) を担当するが、その生産目標が示されていないため、全体では120万台+αの計画となっている。
- 13) IEA(International Energy Agency) (1998) Energy statistics and balances of non-OECD countries 1995～1996, OECD/IEA.
- 14) 国連の国際比較プログラム (ICP = International Comparison Program) は為替レートの代りに購買力平価 (PPP = Purchasing Power Parity) を換算係数として、GDPを国際比較可能な尺度で測る計測法を開発した。PPPによる換算係数は、米国において1ドルで買えるものと同量の財とサービスを国内市場で買うために必要なその国の通貨単位の数量として定義される。PPPはドル当たりの実質価格を等しくし、各国間の比較ができるよう企図されたものである。
- 15) 井上隆一郎・百本和弘・牛島辰男 (1995年) 三菱総合研究所報NO.28「中南米地域の自動車市場の現状に関する分析」，三菱総合研究所.
- 16) 国際連合経済社会情報政策分析局人口部編・阿藤誠監訳 (1996) 国際連合世界人口予測1950-2050 (1996年版)，原書房.
- 17) OECD/IEA 編・資源エネルギー庁監訳 (1996) 2010年世界のエネルギー展望 (1995年度版)，通商産業調査会出版部。及び IEA(International Energy Agency) (1998) World Energy Outlook 1998 Edition, OECD/IEA..
- 18) Green, C., J. Legler, J., A. Sarkar, and W. Foell (1995) RAINS-ASIA : An assessment model for air pollution in Asia, Chapter 3 Energy Module, Report on the World Bank Sponsored Project "Acid Rain and Emission Reduction in Asia," Submitted to the World Bank.
- 19) 運輸省運輸政策局情報管理部編・運輸経済統計要覧，平成7年度版 (1995).
- 20) 運輸省自動車交通局編・乗用車燃費一覧，平成8年度版 (1996).
- 21) World Road Statistics, 1970～1995, International Road Federation.
- 22) (a) 加藤信夫・小川芳樹・小池俊也・坂本 保・坂本 進 (1991) アジア地域のエネルギー消費構造と地球環境影響物質 (SO_x, NO_x, CO₂) 排出量の動態分析，NISTEP REPORT No.21, 科学技術政策研究所. (b) 科学技術政策研究所 (1992) アジアのエネルギー利用と地球環境：エネルギー消費構造と地球汚染物質の放出の動態，大蔵省印刷局.
- 23) McKee, D.J. Ed (1994) Tropospheric Ozone, Human Health and Agricultural Impacts, Lewis Publishers, Boca Raton, pp 9-206.