

都市交通と環境：諸都市における大気の本質

小林良邦
KOBAYASHI, Yoshikuni

(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所主任研究員

中村英夫
NAKAMURA, Hideo

(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所長

有村幹治
ARIMURA, Mikiharu

(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所研究員

はじめに

前号に引き続き、本講座では、運輸政策研究所において実施されている「都市交通と環境に関する国際共同研究プロジェクト(CUTEプロジェクト)」の成果の一部を報告する。本プロジェクトの最終報告書は英語と日本語による出版が予定されているが、「諸都市における大気の本質」は、最終報告書の第3章「都市交通に起因する環境問題」の一部として報告される。

1 3つのアプローチと都市間比較の困難性

大自然のなかで数日を過ごして帰宅した都市住民は、多かれ少なかれ街の空気の汚れを実感するであろう。ここでは大自然と街の大気の本質が比較されている。同様に、世界の多数の都市を訪れた経験をもつ人は、主観的にではあるが、汚染の著しい都市を列挙することができるだろう。比較により物事の相対的な位置関係を知るとは、認識や判断に有力な根拠を与える。「世界で最も清浄な都市はどこか、逆に最も汚染された都市はどこか、それらに比してわが都市はどうか」という素朴な問いは市民や市長等にとって興味ある関心事の1つであろう。さらに一歩踏み込んで、「世界の諸都市における大気の本質の差異と都市交通の差異はどれほど関係しているのだろうか」という問いかけは本書の趣旨により密接に関わっている。

しかしながら、結論を先取りして述べると、これら都市間比較の設問に客観的、科学的に正確な解答を与えることは非常に困難であり、現時点では不可能と言うのが正直な答えであろう。比較可能な一定の条件のもとで観測、推定された都市別データが不足している、ないしは欠如していることがその大きな原因である。「比較可能な一定の条件」のなかには比較対象都市の地理的範囲をどのように規定するかという厄介な問題も含まれる。

自動車利用などの活動が大気を介して人間の生活に影響を与えるメカニズムには、排出、拡散、到達の

3つの段階がある。各段階に対応して、大気の本質を議論するための3つアプローチがある。以下、都市間比較の観点から検討してみよう。

1.1 総排出量アプローチ

汚染物質の推定排出量によって各都市の汚染度を比較しようとするこのアプローチは、実質的な大気の本質をとらえる上では次に述べる濃度アプローチにおよばない。総排出量が等しい都市であっても地理的、地形的、気象的条件などの違いによりその影響は大きく異なるからである。しばしば大気汚染の著しい都市の例として Mexico City があげられるが、その高度と盆地状地形が問題をより深刻化させていると指摘されるのはその一例である。

しかしながら、このような総排出量アプローチの特性は、決してその有用性を否定するものではない。なぜならば、それは都市の諸活動が環境に与える本源的負荷量を示しているからである。強い風で都市から持ち去られるからといって、工場や自動車からの汚染物質の排出が免罪されるわけではない。さらに、このアプローチには汚染物質の発生源ごとに排出量を測定ないし推定できる点に大きなメリットをみいだせる。

都市間比較のうえで問題となるのは、各都市におけるさまざまな排出量が比較可能な一定の条件のもとで推定されているかどうかである。自動車からの汚染物質排出量についていえば、車両セグメント(車種、重量、車齢等)に応じた走行台キロ実績値と、当該都市での走行状況(道路勾配や混雑等)を反映させた代表走行モードによる排出係数試験データが必要となる。しかしながら、現状においては、経年的にこのような推計を実施している都市は皆無ないし極めて少数であると思われる。この種のデータを世界の諸都市から収集した場合、推定年次の不統一はもとより、推定精度においても著しい差異が存在するであろうことは想像に難くない。

1.2 汚染濃度アプローチ

大気汚染濃度による都市間比較アプローチは、前記の「世界で最も清浄な都市はどこか、逆に最も汚染された都市はどこか、それらに比してわが都市はどうか」という問いに、より直接的に答える指標といえる。但し、このアプローチにおいては汚染濃度を発生源別に特定することはできない。

汚染濃度の都市間比較を行おうとする場合、最大の問題は、各都市の複数の観測局で観測されたデータの平均値が、必ずしも当該都市の比較可能な代表値とはならない点にあるだろう。多数の観測点をもつ都市相互であれば、平均値による比較もある程度可能だが、観測点が少数の場合(概してそれらは汚染度の高い地点に集中していよう)は都市全体の代表性に欠ける。極端な理想論からいえば、都心から連担する一定以上の人口密度をもつ地域を一定間隔のグリッドで区切り、必要な統計精度を確保しうる無作為サンプル点を抽出し、これらの地点での観測データを得て都市間比較を行うことが考えられるが、多額な費用を要するなどの理由から現実的とはいえない。従って、少なくとも、沿道観測局と住宅地区観測局のデータを区分するなど、土地利用と観測点の対応をとった比較分析が必要である。

1.3 汚染影響度アプローチ

最後に、顕在的ないし潜在的汚染影響の評価値によって、都市間の大気質を比較する方法が考えられる。我々は、しばしば「どこそこの都市においては、大気汚染により気管支疾患罹病率が全国平均より何%高い」といった記述を目にする。局地環境において、最終的影響の多寡は最も本質的な問題といえる。しかしながら、衆知のように、汚染と人的、物的被害の因果関係を特定することは、一般的には困難である。疫学的な調査や裁判で争われた特殊なケース、プロジェクトにおける環境アセスメント等でのデータは多数存在するが、都市全体を評価する目的を意図したものではないため、この方法は都市間比較での現実的なアプローチとはいえないだろう。

ただし、「潜在的影響(暴露)人口」という考え方は重要である。前記2つのアプローチにおいて、同量の総排出量、同程度の大気汚染濃度であっても、当該都市の人口密度が高いほど、その社会的影響は大きいからである。

2 既存データによる大気汚染濃度比較

以上に述べたように、諸都市の大気質を比較しようとする試みには、非常に多くの困難が横たわっている。

我々はまずこの状況を十分に認識しておかねばならない。しかしながら他方では、世界の諸都市からのデータ収集に多大な努力が払われてきているのも事実である。それらのデータには、通常、比較可能性に関する注意喚起の一文が付されている。

本章および次章ではそのような既存データについて、若干の検討を加えておこう。

まず、World Bank, World development indicators, 2001に掲載されている世界主要都市の大気汚染濃度データ^{注1}をみることにする。同資料の解説文には「都市の観測地点からの報告による年平均濃度値であり、・・・汚染物質の濃度は地域の状況に影響されるため、同じ都市でも異なる観測地点では濃度が異なる可能性がある。したがって、これらのデータは各都市の空気の質の一般的な指標とのみ考えるべきであり、各国間比較には注意が必要である」と述べられている。この資料には110都市の浮遊粒子状物質(SPM)、SO₂及びNO₂の値が収集されている(一部欠損値を含む)が、ここでは、後述の総排出量分析で参照する都市と重複する59都市を対象にする。なお、汚染濃度のデータは1990-98年のうち入手可能な最新年のもので、その多くは1995年値である。

まず、これら3つの汚染濃度間の相関関係を調べてみると、SPMとSO₂の間(相関係数0.50)およびSO₂とNO₂の間(同0.58)には統計的に有意な相関がみられるが、SPMとNO₂の間(相関係数0.30)の相関は統計的に棄却された。すなわち、ほごりっぼい、見通しが悪いといった視覚的認識が可能なSPM濃度が高いからといって、NO₂の汚染濃度も高いとはいえない。

各都市の汚染濃度の状況を順次みていこう(図1参照)。

2.1 浮遊粒子状物質濃度: SPM

SPMデータのある47都市の平均濃度は110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (標準偏差100)で、17都市がWHOガイドライン^{注2}の90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えている。SPM濃度は概して人口密度順に並べたグラフの上位のほうで高い値をとっている。人口密度との相関(0.60)は統計的に有意である。SPM濃度が200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える都市をあげると Delhi, Beijing(北京), Guangzhou(広州), Mexico City, Jakarta, Tehran, Shanghai, Mumbai, Bangkok, Manila, 逆に30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満の都市はStockholm, Paris, Oslo, Vancouverである。開発途上国の主要都市は概して高い人口密度となっていることを想起しよう。SPM濃度と所得水準(1人当たり都市GDP)も有意な逆相関値(-0.67)を示す。

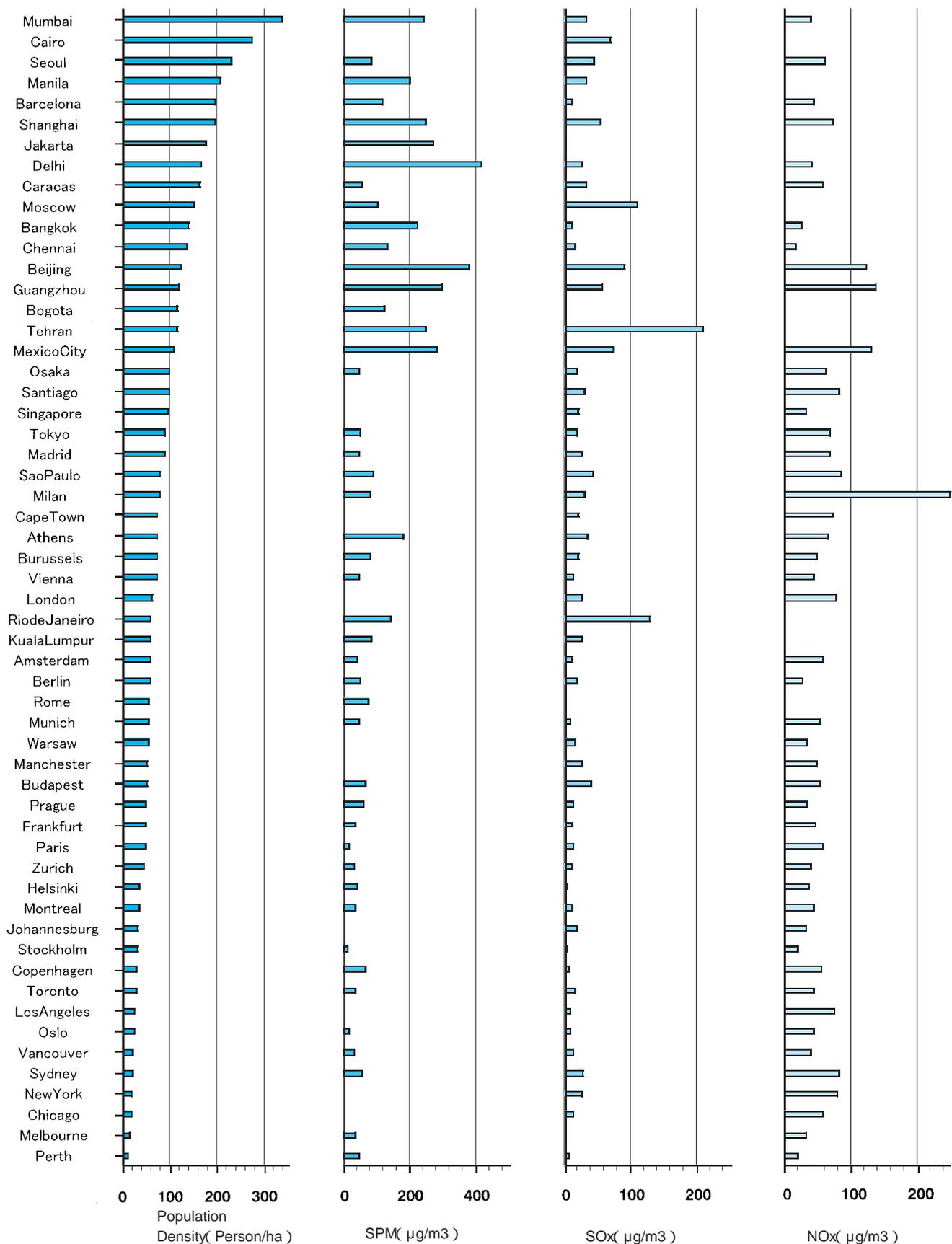


図 1 都市人口密度及びSPM, SO2, NO2の大気中濃度

出所：汚染濃度はWorld Bank, World development indicators, 2001。人口密度はUITP Millennium Cities Database for Sustainable Transport(2000)

注：本文では59都市を対象に分析しているが、本図では人口密度データが欠如しているTurin, Lisbon及びIstanbulが除かれている。また濃度水準がゼロとなっているもの多くはデータの欠落によるものである。

表 1は米国の大気汚染物質の発生源別排出量比率を参考までに示したものであるが、いずれの汚染物質も様々な発生源から排出され、大気の汚染濃度に影響を与えていることがわかる^{注3)}。この米国の例では、特にSPM(表中のParticulates)には分類不能な「その他」が92%をも占めている。

表 1 Air pollutant emissions by pollutant and sources (%): 1998

Source	Particulates	SO ₂	NO _x
Total	100.0	100.0	100.0
Fuel combustion, stationary sources	3.1	85.1	41.7
Industrial processes	1.7	7.4	3.2
Waste disposal and recycling	0.9	0.2	0.4
Highway vehicles	0.7	1.7	31.8
Off highway	1.3	5.5	21.6
Miscellaneous	92.2	0.1	1.4

Source: U.S. Environmental Protection Agency, National Pollutant Emission Trends, 1900-98

多くの発展途上国都市の場合、発電所や工場における排煙処理が十分でない、家庭における暖房や厨房で燃料が直接燃焼されて煙が排出される(Beijingなど冬季寒冷地での石炭暖房などが典型例)、環境管理が行き届かない都市ゴミの処理、未舗装道路からの土ほこりなどが、高いSPM値の原因として指摘されている。いうまでもなく都市交通の観点からは、整備が不良な自動車エンジン、とくにディーゼルエンジンからの排気の影響も大きいだろう。また、これらの都市のなかには砂漠など緑被率の少ない土地に近接しているために、砂塵が多いことがSPM濃度に影響していることもある。人的活動による粒子状物質の排出と自然起源のそれとを区別してとらえる必要がある。

2.2 二酸化硫黄濃度: SO₂

SO₂に関しては59都市中データのある55都市の平均濃度は32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (標準偏差37)であり、SPMやNO₂に比べてバラツキが大きい。人口密度との相関(0.31)もある程度有意であるが、GDPとの相関(-0.49)のほうが統計的有意性はより高い。WHOガイドラインの50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を上回る濃度を示している都市を列挙すると、Tehran, Rio de Janeiro, Istanbul, Moscow, Beijing, Mexico City, Cairo, Guangzhou, Shanghai(上海)の諸都市である。SO₂濃度が20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満の29都市は大半が先進国の諸都市であるが、Bangkok, Chennaiが含まれる。SO₂排出抑制は先進諸国の大気汚染対策の中でも歴史的に先行した分野であり、55都市の濃度の平均を上回る先進国都市はSeoul, Athensの2都市に過ぎない。中国諸都市などのSO₂濃度が高い原因としては、発電用ボイラーや寒冷地暖房での石炭燃焼が指摘されている。SO₂濃

度の高い都市では燃焼ガスからの排煙脱硫や燃料自体の脱硫化などの対策強化が必要とされている。

2.3 二酸化窒素濃度: NO₂

他方、NO₂濃度については、前2者とかなり様相が異なっている。データのある48都市の平均濃度は59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (標準偏差38)でSPMやSO₂に比べて最も分散が小さく、半数を超える25都市がWHOガイドラインの50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を上回る濃度となっている。70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えている都市を挙げると、Guangzhou, Mexico City, Beijing, Sao Paulo, Santiago, Shanghai, Cape Townの他、Milan, Sydney, New York, London, Los Angelesといった先進国都市でもかなり高い値となっている。既出の表1の米国の場合でみると、NO₂の発生源は、自動車交通が32%、オフロード(農業用トラクター、建設機材、レクリエーション用船舶や芝刈り機のような小型機材が含まれる)が22%を占めていて、SPMやSO₂とは異質である。なお、MilanのNO₂濃度248 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ は異常に高い。同都市の乗用車普及率は1000人あたり400台で、例えばNew York(NO₂濃度79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)の440台を多少下回る。欧州では相対的にNO₂排出係数の高いディーゼル車比率が大きいことを考慮しても濃度の開きは大きすぎる。地形や気候、あるいは自動車以外の発生源などで特殊な事情があるのだろうか。それとも測定法の違いや統計的な誤謬なのであろうか。

3 既存データによる総排出量比較

次に、UITP Millennium Cities Database for Sustainable Transport(2000)に収録されている、各種汚染物質の都市別総排出量を検討する^{注4)}。対象汚染物質はCO, SO₂, VHC(揮発性炭化水素または不完全燃焼燃料; volatile hydrocarbons or unburnt petrol), NO_xの4種類であり、いずれも都市域での交通に起因した排出量と定義されている。この定義では交通起因とされているが都市交通においては自動車起因と考えて大過ないであろう。

都市面積あたりのこれら汚染物質排出量はいずれも都市ごとに非常にばらついている(表2)。COを例にとれば、最小値は0.8 ton/ha(Osaka)、最大値は21.5 ton/ha(Tehran)、87都市平均は4.2 ton/haで、データのバラツキを示す標準偏差は4.2 ton/ha、すなわち変動係数は87%にも達している。SO₂, VHC, NO_xの同係数はそれぞれ108%, 124%, 84%となっている。他方、これら4つの排出量の間には弱いながらも表2に示されるような統計的に有意な相関関係が認められ、特にCOとVHCの間の相関係数は0.81とかなり高い。

図 2は世界89都市のCO,SO₂,VHC,NO_xの単位面積当り排出量を比較したものである。また同図は総排出指標の大きい順に並べられている,ここで総排出指標とは,4汚染物質の単位面積当り排出量それぞれのZ-score(平均0,分散1に基準化した指標)を求め,それらの各都市平均値と定義している。同指標が1を超えているのは11都市で,Bangkok, Ho Chi Ming City, Tehran, Cairo, Bologna, Manila, Guangzhou, Mexico City, Jakarta, Taipei, Shanghaiである。総排出量指標の高い都市の多くは都市人口密度も高い(両指標の相関係数は0.7)。これは汚染排出物質による潜在的な影響,すなわち暴露人数が多いことを意味するため,問題はより深刻であるといえよう。

3.1 一酸化炭素排出量: CO

COは4つの汚染物質のなかでは量的には最も多く排出されている。VHCとともにエンジンの不完全燃焼等による排出が主要源であるとされる。Tehran, Mexico City, Ho Chi Ming City, Manila, Bangkok, Riyadh, Bologna, Athens, Taipei, Jakarta, Cairoでは年間都市面積(ha)当り10トンを超えている。交通量の多寡やエンジン性能の良否に影響される。2気筒エンジン二輪車の利用が多いアジアの諸都市では,それらの影響も反映していると思われる。

3.2 二酸化硫黄排出量: SO₂

年間のSO₂排出量が都市面積(ha)当り0.2トンを超え

ている都市は,Cairo, Bangkok, Rome, Tehran, Manila, Munich, Hong Kong, Bologna, Sapporo, Milan, Viennaで,先進国の諸都市もかなり含まれる。交通量の多寡に加え,自動車燃料,特にガソリンよりも硫黄含有量の多い軽油を使用するディーゼル車の走行割合等も影響しているであろう。但し,SO₂の面積当り排出量はCO,VHC,NO_xに比して1桁小さなオーダーである。

3.3 揮発性炭化水素または不完全燃焼ガス排出量: VHC

Ho Chi Ming Cityにおいては年間7.8トン/haと極端に大きな排出量が報告されている。その他,2トン/ha以上のVHC排出量となっているのは,Bangkok, Mexico City, Manila, Guangzhou, Taipei, Bologna, Shanghai, Athensである。

3.4 酸化窒素排出量: NO_x

NO_xの年間排出量が2トン/haを超えているのは,Bangkok, Bologna, Johannesburg, Hong Kong, Seoul, Cairo, Guangzhouの諸都市である。但し,前述のようにここで扱っている汚染4物質中,NO_x排出量は都市間でのバラツキが比較的小さい。

以上ここまでは個々のデータの比較可能性に疑問を持ちつつも,各都市別比較を行ってきた。そこでこれらのデータを世界の各地域別に集計し,全般的な傾向を読み取ることにした。表-3はThe Millennium Cities Database for Sustainable Transport, Analysis and

表 2 単位面積あたり汚染物質排出量(Ton/ha)及び排出量相互間の相関

	Mean	S.D.	MAX		MIN		Coefficient of correlation			
			Value	City	Value	City	CO	SO ₂	VHC	NO _x
CO	4.79	4.16	21.48	Tehran	0.84	Osaka	1.00			
SO ₂	0.09	0.10	0.49	Cairo	0.00	Berne	0.56	1.00		
VHC	0.88	1.09	7.78	Ho Chi Ming City	0.10	Perth	0.81	0.47	1.00	
NO _x	0.78	0.64	2.92	Bangkok	0.09	Dakar	0.60	0.68	0.49	1.00

出所: UITP Millennium Cities Database for Sustainable Transport(2000)により作成。
注: 各相関係数は1%有意水準で無相関が棄却される。

表 3 Density, modal choice and atmospheric pollution from vehicles for personal travel

Region	Density (inhabitants per hectare)	Proportion of journeys on foot, by bicycle and by public transport(%)	Emissions (CO, SO ₂ , NO _x , VHC) per inhabitant(kg)	Emissions (CO, SO ₂ , NO _x , VHC) per hectare(kg)
USA and Canada	19	14	237	3,950
Oceania	15	21	189	2,800
Western Europe	55	50	88	4,800
Central and Eastern Europe	71	72	89	4,600
Asia(affluent cities)	134	62	31	3,900
Asia(other cities)	190	68	84	14,200
Middle East	77	27	215	15,000
Africa	102	67	148	8,600
Latin America	90	64	118	9,300

Source: The Millennium Cities Database for Sustainable Transport, Analysis and Recommendations

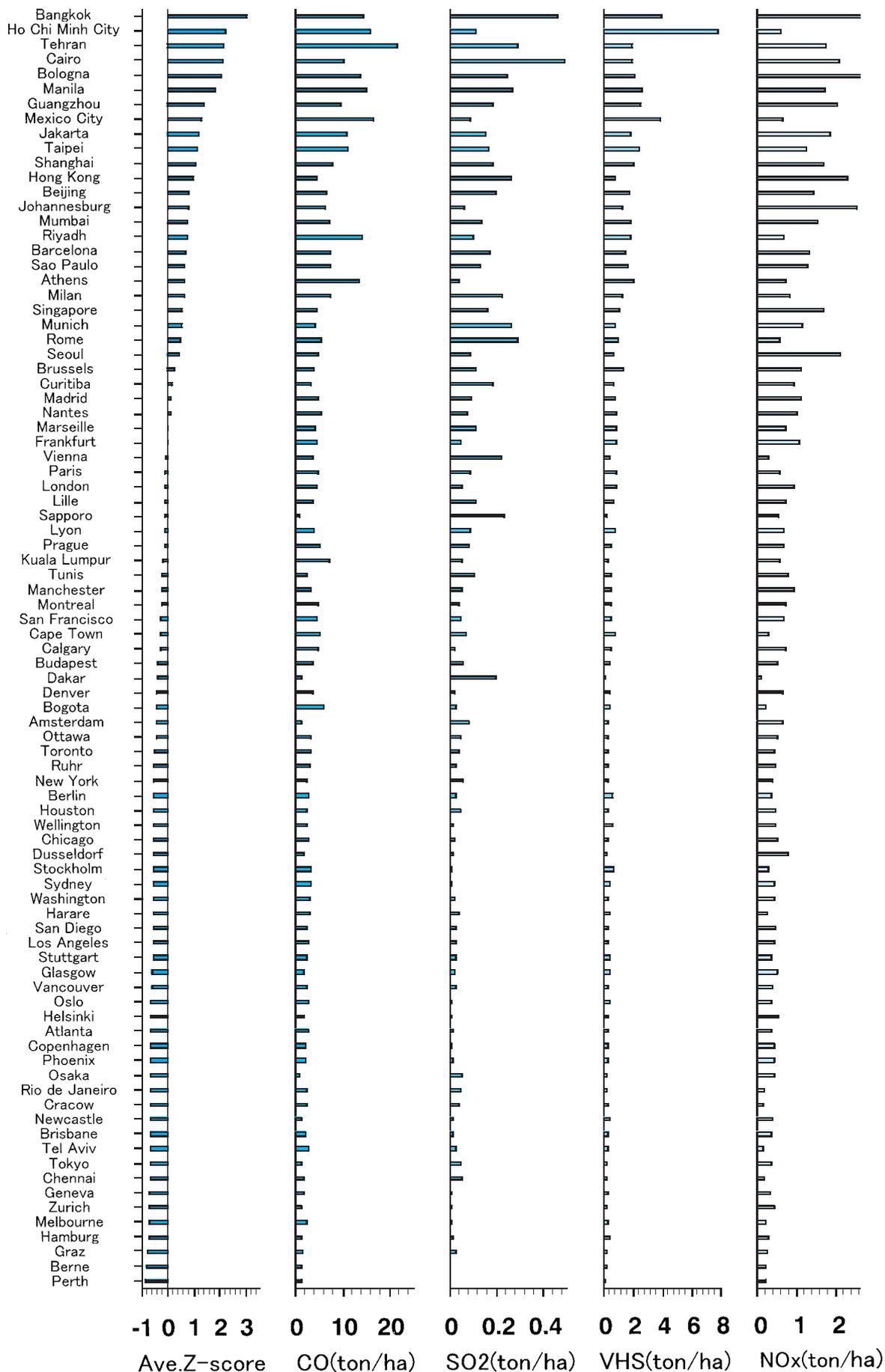


图 2 Yearly pollutants emissions related transport
 Source : UITP Millennium Cities Database for Sustainable Transport(2000)

Recommendations から引用したものである。この表では自動車の排出する4つの汚染物質の排出重量合計を総合的な排出量指標としている。

この表によると、自動車交通分担率の高い米国・カナダ、豪州、中東で都市住民一人あたりの汚染物質排出量は高い値を示す。自動車分担率が95%を占めるAtlantaでは498kg/人と収録都市中最も高い値を示し、豪州ではBrisbane(286kg)、中東ではRiyadh(379kg)などの都市があげられる。しかしながら、米国・カナダ、豪州の場合は都市人口密度が極めて低いため都市面積あたりの排出量は低くなる。例えば人口密度が6.4人/haに過ぎないAtlantaのそれは3,200kg/haに止まる。他方で、中東の都市の場合は人口密度も中程度に高いため、面積あたりの排出量はかなり高い値を示す。Tehran(223kg/人、114人/ha)の例では22,500kg/haと収録都市中の最高値となっている。開発途上のアジア、アフリカ、ラテンアメリカ諸国の都市では、徒歩、自転車及びバス等の公共交通の分担率が高く、1人当り汚染物質排出量は比較的低位にあるが、都市人口密度が高いことから面積あたりではかなり高い排出量となっている。アジアではHo Chi Ming City(24,200kg/ha)、Bangkok(21,500kg/ha)、アフリカではJohannesburg(10,200kg/ha)、ラテンアメリカではMexico City(20,900kg/ha)などの都市での面積あたりの汚染排出が多い。

以上、既存のデータに即して若干の分析を試みた。しかし、都市別データ比較には既述のような多くの問題がある。ここでは、面積あたりの交通量が多いほど、排出規制がルーズなほど、さらにはアジアの諸都市にみられるような二輪車利用が多いほど、自動車による汚染物質の総排出量は増加するという定性的な結論に止めておくのが適切かもしれない。

4 自動車交通量と走行条件の汚染物質排出への影響の試算

汚染物質排出量の多寡に影響する要因としては、各都市における自動車交通量や、車種別のエンジン性能、規制実施の有無等が挙げられる。また、都市の道路ネットワーク構造や信号制御等の交通施設整備状況も自動車の総走行状態を介して要因の一つとなりえる。本章ではこれらの状況を表わす試算結果を紹介する。

4.1 自動車関連指標と汚染物質排出量との相関分析

まず、UITP(2000)で出されているデータを用いて自動車交通関連指標と汚染物質排出量との関連をみてる

ことにしよう。但し、ここでは重要なデータ上の制約を記しておかねばならない。UITP(2000)に掲載されている自動車交通関係の指標は、非常に残念なことに乗用車、タクシー、バス及び二輪車に限られ、貨物車のデータが欠落している。そこで極めて概略であるが、それぞれの国の全自動車に占める貨物車の割合が当該国の都市においても同率^{注5)}、また全貨物車の平均走行キロは乗用車の1.3倍^{注6)}と仮定して貨物車台数、走行台キロの値とする。その上で以下の4指標と単位面積あたり汚染物質排出量の相関分析をおこなった〔〕内は予想される相関関係の符号を示す。

指標1. 単位面積あたり自動車台数(二輪車を含む)〔+〕

指標2. 単位面積あたり自動車走行台キロ〔+〕

指標3. 平均自動車走行速度〔-〕

指標4. 1人当り平均GDP〔-〕

指標4.の1人当り平均GDPは、自動車の車齢、低公害車普及度、あるいはエンジンのメンテナンスの良否等、所得水準に深く関連する当該都市での自動車使用状況を間接的に説明する代理変数とみなして分析項目に加えた。結果を表4に示す。各汚染物質排出量と要因指標との相関関係は、符号及び統計的検定上有意な値を示している。

表4 汚染物質排出量と要因指標の相関

	Ave. Z-score	CO	SO2	VHC	Nox
1. V Number/ha	0.54	0.44	0.38	0.61	0.36
2. v.km/ha	0.37	0.31	0.26	0.31	0.37
2'. v.km/ha*(先進国のみ)	0.55	0.43	0.52	0.46	0.45
3. Velocity	-0.59	-0.47	-0.54	-0.47	-0.48
4. GDP per capita	-0.67	-0.49	-0.29	-0.41	-0.29

注：相関有無のt-検定結果は、SO2-v.km/haが有意水準5%で有意のほかは全て有意水準1%で有意。V.km/ha*は先進国56都市のみのデータによる結果である。

しかしながら、地域の総排出量と最も密接な関係が予想される面積あたりの走行台キロ(v.km/ha)の相関係数(表4の2)は自動車数とのそれ(表4の1)よりも低い値となっている。ちなみに先進国都市のみのデータ(v.km/ha*、表4の2')で相関をみると係数は上昇する。また、先進国都市のみのデータによる場合は1人当りGDPを除き、他の指標の相関係数は上昇し、他方1人当りGDPとの相関は統計的に否定される。各指標とも一般的に統計的には有意であるものの相関係数が必ずしも高くないことは、自動車の車種別等を捨象したマクロ的な分析であることにも原因があるろうが、より本質的には各都市の排出量推計に使用されている排出係数に大きな開きがあることによると推察される。

各都市の1台・kmあたりの平均排出係数を求めてみると、同係数が高い上位10都市^{注7)}平均は4つの汚染物質に関していずれも87都市平均の3～4倍に達している。試算上のデータの制約や原データの比較可能性などの問題はあがるが、以上の結果は発展途上国諸都市における使用車の高車齢、整備不良等による汚染物質の高い排出量の実態を反映したものと考えられる。

4.2 モデル車走行による排出量試算

上記のように汚染物質排出量を決める主要な要因が車両の排ガス抑制性能にあることは確かである。そこで以下のような問題を考えてみよう。都市によるそのような車の違いの影響を排除するために、仮に、世界の各都市で同一の排ガス性能をもつ自動車(モデル車)のみが走っていると仮定したとき、各都市の汚染物質排出量にどのような相対的差異が現れるかを求めてみよう。総排出量は、自動車交通量の多い都市ほど、走行条件が悪い都市ほど大きくなるはずである。言い換えれば、都市交通システムの影響への優しさを評価しようとする試みである。

この試算では以下のような排出量算定式を用いる。すなわち、各車種別の走行車両台数(各都市を基準化するために単位面積当たりとする)に各モデル車1台・km当りの排出原単位を乗じる。但し、走行条件を反映させるために、排出原単位は平均値ではなく走行速度に依存した関数とする。

すなわち、求めようとする単位面積当たり年間排出量(g/Year.ha)をTEとすれば、それは、単位面積当たり車両数(Vehicles/ha)N_j、Q-V曲線と呼ばれる走行速度別台当り走行距離(km/Year)M_j(v)、いわゆるE-V曲線と呼ばれる走行速度別排出係数(g/vehicle・km)E_j(v)により、次の式で算定できる。なお、ここでjは自動車車種、vは走行速度(km/hr)を意味している。

$$TE = \sum_j [N_j \cdot \{ \sum_v E_j(v) \cdot M_j(v) \}]$$

この試算で使用したデータ及び設けた仮定は次の通りである。まず、自動車車種であるがデータの制約からここでは乗用車(タクシーを含む)と二輪車のみが対象であり、バス及び貨物車は対象外である点は注意を要する。それらの都市別単位面積当たり車両数はUITP(2000)のデータを使用した。対象車両のエンジン別構成については、乗用車の9割を4気筒ガソリン車、残り1割を小型及び中型ディーゼル車が各5%ずつと仮定した。また、二輪車については全て2気筒ガソリン・エンジンを仮定した。次に、乗用車及び二輪車の1台当り年間総走行距離

はUITP(2000)データが利用できるが、これを走行速度別に分解する必要がある。そこで、域内の走行速度別台当り年間総走行距離は、平均走行速度を平均値、変動係数50%とする標準偏差を持つ対数正規分布に従う^{注8)}との仮定を置く。なお、ここで道路の平均走行速度データはUITP(2000)から得られる。最後に、E-V曲線、すなわち各エンジン種別に応じた速度別排出係数のデータが必要になるが、本試算では日本におけるCO、HCに関する1986年規制、NO_xに関する1990年規制対応年の値を使用した。図3にその一部を例示した。

以上のような算定方法を用いて、現状の自動車交通量及び走行条件(道路走行速度)でモデル車が走っているとした場合を「基準ケース: Case-1」として、現状よりも自動車交通量を削減した場合を「交通量削減ケース: Case-2」、現状よりも走行条件が改善した場合を「走行条件改善ケース: Case-3」として、それぞれの場合の排出量を試算する。

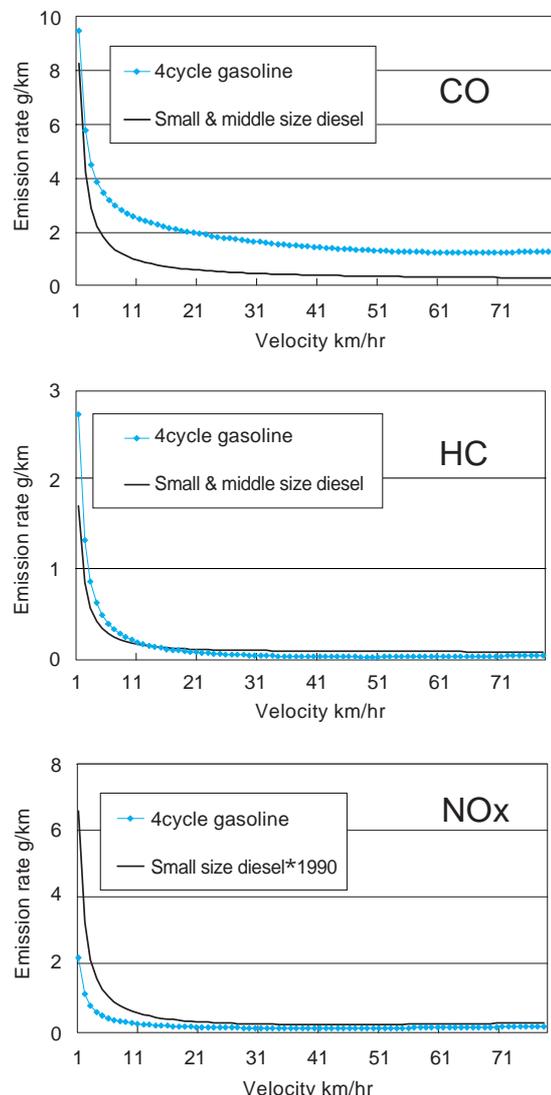


図3 Emission rate & velocity
Source: 環境庁, 自動車排出ガス原単位および総量に関する調査報告書, 1998

4.2.1 現状の自動車交通量及び走行条件でのモデル車走行の試算 (Case-1)

Case-1の内容をオーストラリアのPerth,タイのBangkokの2都市で4気筒ガソリン・エンジン乗用車により例示しよう。Perthの車両台数は6.5台/haで年間走行距離は12.4千km,平均走行速度は46km/hrである。他方,Bangkokは車両保有密度が32.3台/haとPerthより高いが,都市道路の平均走行速度は15km/hrと低速で,年間の1台当り走行距離は3.1千kmにすぎない。以上のデータのもとに,両都市の乗用車1台当りの走行速度に応じたCO排出量分布($E(v) \times M(v)$)を描いたのが図4である。車両1台当りの年間CO排出量は各曲線下の面積で求められ,Perthでは18.7kg,Bangkokでは7.1kgと1台当り平均排出量ではPerthの2分の1以下である。同排出量に台数を乗じるとPerthでは単位面積当り年間121kg/ha,Bangkokでは約2倍の228kg/haの総排出量となる。

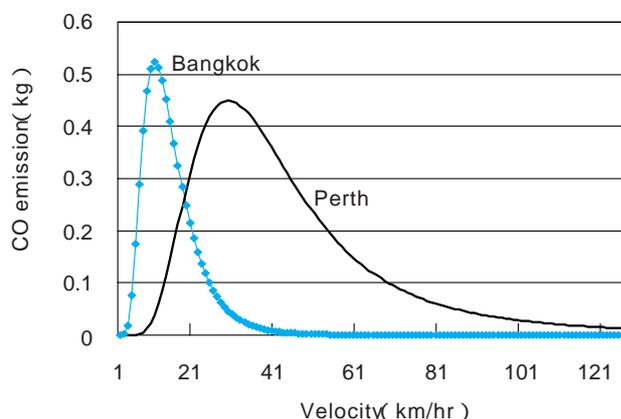


図4 CO emission by velocity in case of Perth & Bangkok

上記Perth, Bangkokの例に準じて,全ての乗用車及び二輪車による汚染排出物質(CO,NO_x,HC)ごとの年間単位面積当り排出量を世界87都市について試算した。以下では,これら3つの排出量試算値をそれぞれZ-scoreに変換(基準化)し,都市ごとの各score平均値を総排出量指標と呼ぶことにする。

この試算で総排出量指標が高い,すなわち面積あたりの排出量の多い10都市は,Taipei, Seoul, Ho Chi Ming City, Bangkok, Barcelona, Bologna, Mexico City, Geneva, Stuttgart, Madridであり,他方,指標の小さい,すなわち面積当り排出の少ない10都市はChennai, Perth, Johannesburg, Bogota, Shanghai, Curitiba, Brisbane, Cracow, Harare, Dakarとなった。既存データによる総排出量比較(3章)において芳しくない成績を示した都市のうち,本試算ではTaipei, Ho Chi Ming City, Bangkok, Bologna, Mexico City等は依然として汚染物質排出量の多いグループに属し,Johannesburg, Shanghai, Guangzhou,

Cairo等の都市はむしろ排出量の少ないグループに含まれることとなった。すなわち,前者のような都市は自動車交通量が多いとか走行条件が悪いために,同一の排ガス性能をもったモデル車が走っていると仮定しても,汚染物質の排出水準は高く,他方,Shanghaiをはじめとする後者の例のような都市ではモデル車が走っているなら汚染物質の排出水準は低い,すなわち現実にも排出の多さは自動車の排ガス性能の悪さによるのである。BangkokとShanghaiを比べてみると,Bangkokの交通量(台km)はShanghaiの約4倍,平均走行速度はShanghaiの20km/hrに対して15km/hrとより低速であり,このことが走行する車が同じならばBangkokの方が総排出量指標が高い,すなわち総排出量が多いことに反映しているわけである。

本試算でのもう1つの注目点は,総排出量指標の上位10都市のなかに先進国都市がかなり含まれていることである。すなわち「先進国諸都市の自動車交通の状況は途上国年よりも環境にやさしい」とは必ずしもいえない。本試算の仮定(同一のE-V曲線)のもとでは当然の結果であるともいえるが,一般的に自動車保有率が高く,1台当りの年間走行キロが多く,また都市によっては公共交通分担率が低下している先進国の諸都市の環境は,そこを走る車の排ガス性能によって,かろうじて発展途上諸国のそれより良くなっているのである。

なお,本試算は乗用車3車種,二輪車1車種区分で行っているが,大まかにみればそれら全体の走行台kmと総排出量指標は線型関係にある。しかしながら,Taipei, Bangkok, Ho Chi Ming Cityに関しては大きくはずれている。その原因はこれらの都市における二輪車(各種排出係数が相対的に高い)の利用が極度に高いことによる^{注9)}。

4.2.2 自動車交通量削減の影響の試算 (Case-2)

次のケースとして,各都市において乗用車及び二輪車の交通量がそれぞれ1割削減された場合を考えよう。算定方法はCase 1と同様である。この場合,単位面積当りの自動車保有密度が1割減少する,自動車保有密度は変わらないが,1台当りの年間総走行距離が1割減少する,自動車保有密度と1台当り走行距離の積,つまり単位面積当りの台・キロが1割減少する,の3つのケースがありうる。しかしながら,それらの効果は全く同一で^{注10)},各汚染物質の単位面積当り排出量は等しく1割減少することになる。

この場合,汚染物質の排出抑制の量的な効果が大きいのは基準ケースであるCase-1での排出量が多い都市ということになる。CO及びHCの単位面積当り排出が多

い5都市はTaipei, Seoul, Ho Chi Ming City, Barcelona, Bangkokで,NOxに関してはBolognaが加わってBangkokがこれに続く。

本試算においては排出係数の高い二輪車が結果にかなりの影響を及ぼしている。そこで,極端な仮定ではあるが,二輪車が全て乗用車に転換した場合のCO排出量を求めてみた。これによると,Bangkok, Mumbai, Jakarta, Beijing, Chennai, Ho Chi Ming City等の都市では単位面積当りの排出量が相当量削減される。例えば最も効果が高いBangkokの場合,基準ケースでの730kg/haから426kg/haへと42%もの減少率になる。但し,これらの都市においては二輪車1台の年間総走行距離が乗用車のそれよりも多いかほぼ等しい現状にあり,ここでの試算による二輪車から乗用車への転換効果には走行距離の縮小分が含まれている。

4.2.3 走行条件改善(走行速度向上)の影響の試算(Case-3)

次に行った試算は,前記Case-1を基準ケースとして,各都市道路の平均走行速度が20%改善されたとしたときの汚染物質排出量の変化をみるものである。すなわち,道路整備や交通流制御の改善による交通渋滞の緩和の効果を試算する。よりスムーズな走行が可能になれば,都市の自動車交通量は増加するかもしれない。逆に,平均走行速度を引き上げるためには,公共交通への転換や自動車の利用規制など自動車交通量の削減が必要かもしれない。しかしながら本試算における自動車交通量はCase-1のときと変わらないとする。

試算の方法はCase-1と同様の方法によるが,Case-1のQ-V曲線の仮定における平均走行速度を20%増加させてある。従って対数正規分布型によるQ-V曲線はCase-1に比べて右方にシフトする。

ここでもまず例を示そう。図5はBangkokの4気筒ガソリン・エンジン乗用車1台当りのCO排出量と速度分布の関係を描いたものである。同図では平均走行速度

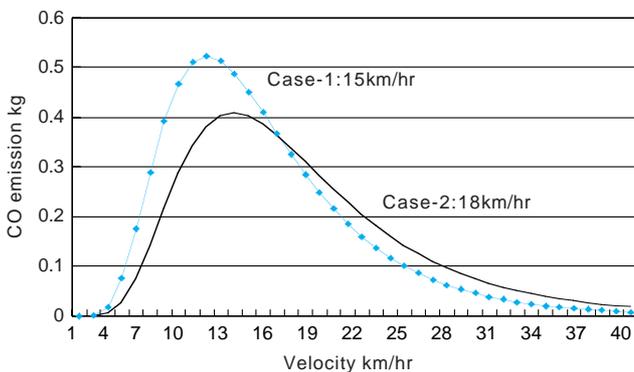


図5 CO Emission by velocity : Comparison case1 and 2

15km/hrであったCase-1に対して,走行速度を18km/hrに向上させたCase-2の分布は右方にシフトしている。そのとき,車両1台当りのCO排出量はCase-1の7.06kgからCase-2では6.57kgに低下する。これに都市面積当りの車両保有密度を乗じると,COの総排出量は228kg/haから6.8%少ない212kg/haへと削減されている。

世界87都市について同様の試算をしてみると,図6のCOの例にみるように,平均走行速度と汚染物質排出改善率の間には緩やかな曲線的関係がみられる。しかしながら,平均走行速度が遅く,従って排出削減率の高い諸都市では図の左下部にみられるように,この曲線にはかなりのバラツキがでてくる。これらは二輪車の影響によるところが大きい。

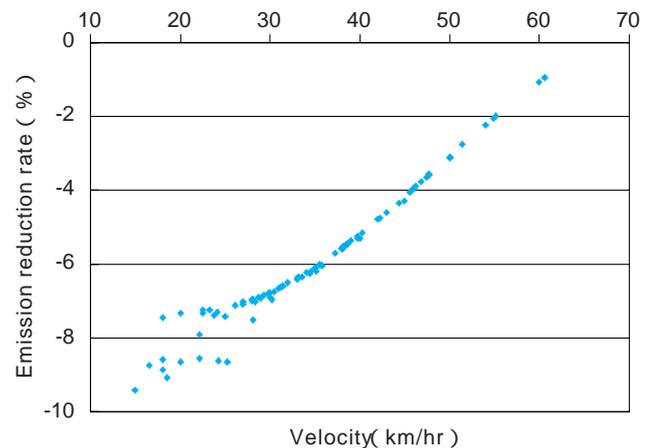


図6 Reduction rate of CO emission by city average velocity

3つの汚染物質それぞれの単位面積あたり排出量(全ての乗用車及び二輪車による排出)について,このようにして求めた結果を概括すると以下のとおりである。

CO削減率の大きな上位12都市はBangkok, Jakarta, Guangzhou, Taipei, Shanghai, Ho Chi Ming City, Chennai, Beijing, Mumbai, Tehran, Kuala Lumpur, Manilaといずれも途上国諸都市である。これら都市での削減率は9.4~7.5%である。

HCに関しては,削減率でみるとMexico City, Cairo, Cracow, Manila, Marseille, Geneva, Tokyo, Sao Paulo, Hamburg, Lyon, Vienna, Grazの諸都市が上位12を占め,COと異なり先進国諸都市がかなり含まれる。12都市の削減率は19.7~17.4%とかなり大幅な結果となっている。しかしこれを削減量の絶対値でみるとTaipei, Bangkok, Seoul, Ho Chi Ming City, Barcelona, Mexico City, Manila, Bologna, Jakarta, Athensなどの主として途上国都市で,走行条件を改善し,速度を向上させたときの効果が高いといえる。

NOxについては,Manila, Cairo, Mexico City, Marseille,

Cracow, Taipei, Bangkok, Sao Paulo, Seoul, Beijing, Tokyo, Genevaの諸都市が削減率6.8～10%で上位を占める。しかしながら、低速域では走行が上がるにつれて低下するNO_xの排出量は、速度が一定以上速まると再び増加する。このため、本試算では、San Diego, Houston, Denver, Atlanta, Riyadh, Brisbane, Toronto, Copenhagen, Harare, Phoenix, Calgary, Los Angeles等24都市では速度上昇がかえってNO_x排出量を増加させている。都市名をあげた12都市での平均走行速度は47～61km/hrで、その20%の平均速度上昇によるNO_x排出量の増加率は5.4～2.0%であった。

種々の仮定に基づくものではあるが、このCase-3の試算は、世界の諸都市、とりわけ途上国都市においては、自動車の走行条件の改善が環境対策に相応の効果を発揮しうること、しかしながら既に高速走行が実現している都市においてはNO_x対策として速度抑制も視野に入れるべきこと、を示している。

なお、本試算で使用した各種排出係数は、途上国の実情よりもかなり低い値のものである。一般に古い車種のE-V曲線はより急な速度勾配を示している。そのような排出係数のもとでの走行条件の改善は、本試算よりも大きな効果を生むであろう。

5 結び

以上、本稿では「世界で最も大気汚染の少ない大都市はどこか、逆に最も汚染された都市はどこか、それらに比してわが都市はどうか」という素朴な問いかけから出発して、世界諸都市の局地環境状況の比較問題を扱った。まず、大気汚染濃度や自動車による汚染物質排出量に関する既存のデータは、都市間比較が可能な一定の条件を必ずしも満たしていないことを強く指摘した。比較される対象都市域はどのような基準で設定されるべきか、比較可能な汚染濃度の測定はいかにあるべきか、汚染物質の排出量推定にはいかなる共通の基準を満たしたデータと手法が用いられるべきか。これらの問題に応え、「比較可能な一定の条件」を満たすような都市交通及び環境のデータ開発が必要とされている。なぜならば、比較により物事の相対的な位置関係を知ることは、認識や判断に有力な根拠を与えるからである。このようなデータ開発のための国際協調や取り組みが強く求められているといえるだろう。

本稿では次に、このような比較可能性の問題を捨象するという条件を付したうえで、世界各都市の大気汚染濃度、自動車による大気汚染物質の排出量について、既存

データにより現状を観察した。この場合十分な科学的裏付けをもった定量的な結論をだすことは望むべくもない。しかしながら、定性的にはいくつかの傾向を読み取ることができる。大気汚染濃度に関しては途上国都市の問題は極めて深刻であることを第1に挙げなければならない。また、それらの都市は全般的に人口密度が非常に高く、大気汚染の潜在的暴露量が大きいことにも注目すべきである。工場や発電所、ゴミ処理場などでの固定発生源対策、自動車の排ガス規制や燃料対策、さらに車両検査制度など移動発生源対策において先進諸国は長年にわたる経験を積み重ねてきた。それらの経験が一層生かされるような技術的、資金的国際協力の道が開かれねばならない。

様々な活動の結果として観測される大気汚染濃度と違って、各種汚染物質の排出量推計は個々の汚染源ごとの特定が可能である。既存データによる現状の観察からいえることは、自動車による汚染物質の排出量は、自動車交通量や交通流、排出規制の程度(特に途上国都市ではこの要因が大きいであろう)に依存すること、また、NO_xのように先進諸国都市でも難しい問題を抱えていること、などである。都市形態と交通モード選択の視点から世界の都市を、人口が稠密で自動車交通への依存が高い都市、人口密度は高いものの公共交通分担率が高い都市、広範囲に郊外化が進み(低密度)、もっぱら自動車に依存している都市、の3つに区分してみる。が最も深刻な局地的環境問題に直面していることは明らかである。はいわゆるコンパクトシティと呼ばれ、に比して環境に優しい。のタイプの都市は、都市面積当りの汚染排出量は相対的に少ないが、人口1人当りの排出量は大きい。

世界の自動車化は現在なお進行中で、途上国では一層の加速をみせている。経済成長や人々の生活の豊かさに交通が果たす役割は極めて大きい。しかしながら無秩序なモータリゼーション進展の容認は、排ガスを今後とも増加させ、都市の環境負荷を高める。我々は将来に向けて都市形態と都市交通の選択の岐路に立たされている。

本稿の後半で紹介した若干の分析からは、まず、途上国諸都市の自動車による汚染物質高排出の主因が排出係数の高い車両の使用にあることが推察された。また、世界のどの都市においても排出ガ斯特性の同じ自動車(モデル車)だけが走っているとすれば、先進国都市のどれもが途上国都市よりも環境的に良好だとはいいたいことが示された。さらに、都市での走行条件の改善は多分に排出抑制につながることで、他方、NO_xのように

自動車の高速化が場合によってはかえってその排出量を増加させてしまうこと,すなわち,汚染物質削減手段間のトレードオフ問題についても指摘した.これらの分析は極めて限られたデータと大胆な仮説設定に基づいている.しかしながら,比較可能な一定条件を満たした都市間比較データが欠如している現状においては,こうした試算も都市比較分析の1つのアプローチであるだろう.

参考文献

- 1)UITP: Millennium Cities Database for Sustainable Transport(<http://www.uitp.com/project/index4.htm>)
- 2)JAMA Report No.92, Japan Auto Manufacturers Association Inc. 2002.Nov.
- 3)Peter Newman & Jeffrey Kenworthy, "Sustainability and Cities", ISLAND PRESS
- 4)環境と運輸・交通 - 環境にやさしい交通体系を目指して - Japan Transport Economics Center 1994.(in Japanese)
- 5)Shin Kirikoshi, "Road Improvement and Environmental Measures", presentation report from Japan Ministry of Land Infrastructure and Transport Environment, The International Cooperation Day Commemorative Symposium 2002.Oct.(in Japanese).
- 6)"大気環境保全技術研修マニュアル総論",社団法人海外環境協力センター,1998.Mar.(in Japanese)
- 7)United Nations: "World Urbanization Prospects The1996 Revision". pp24
- 8)World Bank, Road and the Environment - A Handbook, WB Technical Paper No.376, 1997

9)環境庁,自動車排出ガス原単位および総量に関する調査報告書,1998

注

- 注1)データの出所はWHO: Healthy Cities Air Management Information System及びWorld Resources Instituteと記されている.
- 注2)WB, World development indicators(2001)は,WHOガイドラインにおける年平均基準値としてSPM: 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,SO₂: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,NO₂: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の各値を挙げている.
- 注3)但し,それら発生源別の排出比率がそのまま汚染濃度への影響度を示すわけではないことに注意しよう.高煙突からの排煙はより広範囲に拡散希釈されるため,地表を走行する自動車よりも影響は少ないであろう.
- 注4)データの年次は1995年であり,95年のデータがない場合は前後年のデータから補正されている.都市域の定義は,通勤後背圏が一般に用いられるが,収録された都市はデータ収集の容易さから行政区域とされている.しかし東京等,一部の都市では通勤後背圏が用いられているため,データの解釈には注意が必要となる.
- 注5)World Road Statisticsによる1995年データを使用した.
- 注6)日本における1995年値を参考にした.
- 注7)CO,SO₂,VHC,NO_xのうち,SO₂における2例を除き他は全て発展途上国都市である.
- 注8)日本における乗用車の速度別走行割合を参考にして仮定した(参考文献⁹⁾).E-V曲線データも同資料による.
- 注9)Taipeiについてはタクシーに関する原データが異常に大きな値となっていることも原因.
- 注10)前記の算定定義式は年間1台当り総走行距離をM_j,走行速度別台・キロ出現確率をP_j(v)として,次のように書くこともできるからである.

$$TE = \sum_j [N_j \cdot M_j \{ \sum_v P_j(v) \cdot E_j(v) \}]$$

Local Air Quality and Transport in Different Cities

By Yoshikuni KOBAYASHI, Hideo NAKAMURA, Mikiharu ARIMURA
