

大気環境シミュレーション

研究報告

箕浦宏明

Air Quality Simulation

Hiroaki Minoura

要 旨

従来、煙突からの排煙の影響を調査する目的でプルーム・パフモデルが使用され、今日でもアセスメントの中核をなしている。自動車排気や都市全体から排出される汚染物質の影響予測など、近年、大気環境関連の計算シミュレーションは、目的に応じ種々のモデルが開発されてきた。

自動車排気の大気環境への影響を把握する上で、沿道での汚染物質拡散とNO_xやHCがもたらす広域での影響（特にオゾン）の予測が重要である。ここでは、広域大気モデルを用いた南カリフォルニア（SCAB）でのオゾン濃度予測とその対策について計算結果を示す。SCABでは大気改善のために、排気削減を2010年までに実施する計画

(SIP)がある。米国EPAの認証モデルUAMを用いて現在のオゾン濃度を計算し、UAMの能力を確認するとともに、排気規制後のオゾン濃度を予測した。SIPによりオゾン濃度が環境基準内に収まることが明らかとなった他、SCABでのNO_xとHCの排出量に依存した高濃度オゾンの出現特性を把握し、HCの削減が効果的であることを明らかにした。

SIP達成のために電気自動車の投入が検討されているが、排出量予測を行った結果、車齢の大きいいわゆるハイエミッターの代替が効果的な対策であることが明らかとなった。

キーワード

シミュレーション, オゾン, NO_x, 炭化水素, 自動車排気, 排気削減

Abstract

A plume model or a puff model is traditionally used when investigating the influence of exhaust from a chimney, being the core of assessment today. As for the predictions of the influence on the atmospheric environment by pollutants emitted from motor vehicles and the whole city, for example, various kinds of numerical simulation models have been recently developed for this purpose.

For understanding the atmospheric influence due to vehicle emission, the diffusion of exhaust gases along a roadside and photochemical reactions (especially ozone formation) over a broad area are important phenomena. A calculation result using an air quality model for the South Coast Air Basin (SCAB) in California and measurements have predicted the ozone concentration. There is a plan (SIP) enforcing exhaust reduction by 2010 for atmosphere improvement in the

SCAB. The current ozone concentration was calculated using the certification model UAM from US EPA, and the ability of UAM was confirmed. The ozone concentration after emission regulation of SIP was then predicted. As a result of the simulation under SIP conditions, it became clear that the ozone concentration was satisfied in the environmental standard. The relationships between the highest ozone concentration in the SCAB and amounts of NO_x and HC emissions were found and it became clear that the reduction of HC was effective in this area.

The use of an electric vehicle was examined for the SIP achievement. It became clear that countermeasures for replacing the so-called high-emitter or old vehicles with new ones was effective as a result of the mobile exhaust prediction.

Keywords

Simulation, Ozone, NO_x, Hydrocarbon, Vehicle emission, Exhaust reduction

1. シミュレーションモデルの種類と特徴

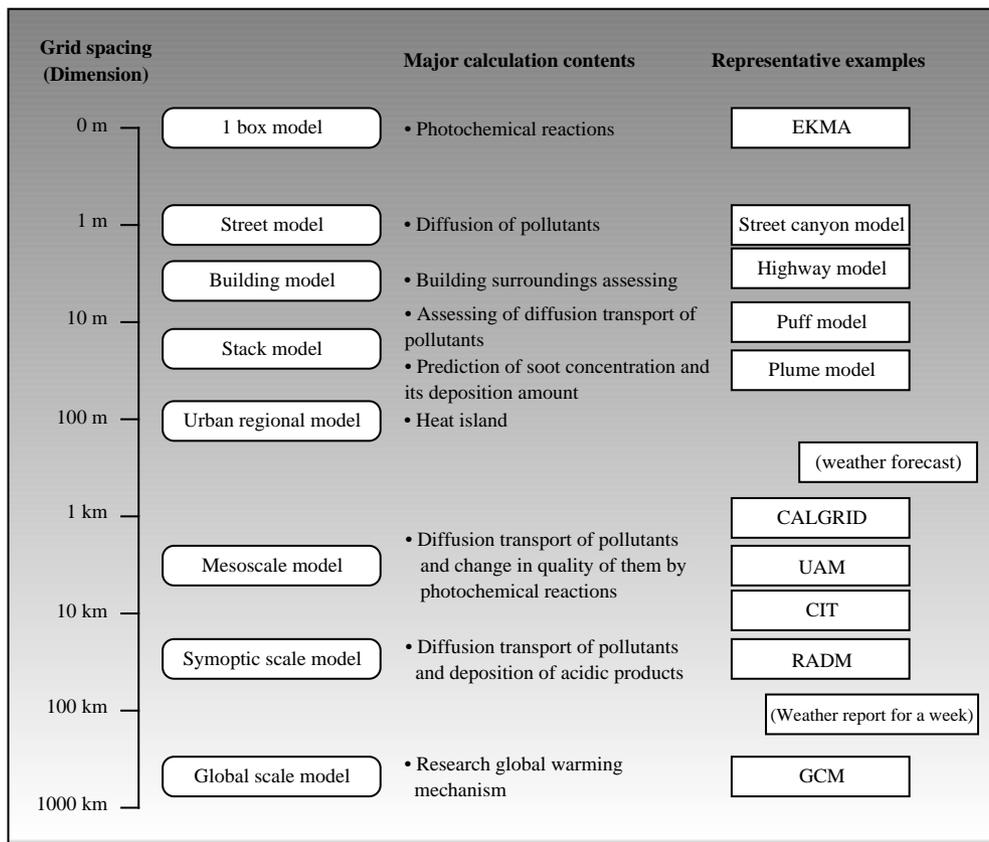
大気中の汚染物質の挙動を把握する手法として種々のシミュレーションモデルが開発されてきた。Fig. 1に空間スケールで分類したシミュレーションモデルを示す。

空間スケールを持たないいわゆるゼロ次元モデルは、物質の拡散輸送を考慮しない物質の濃度の時間変化を解析するモデルで、大気中に放出されたガスのオゾン生成に関わる寄与を推定するEKMA (Empirical Kinetic Model Analysis) が有名である¹⁾。このモデルでは、汚染物質放出の時間シナリオと放出された物質が混合層内に速やかに拡散すると仮定して、混合層高度と日射強度を時間関数として与え光化学反応を解く計算を実行す

る。

1次元スケールを持つモデルは大気汚染分野では少なく、フロン、 N_2O など安定物質が成層圏やその上層部に位置する中間圏でどのような振る舞いをするかを予測するために、鉛直輸送と光化学反応過程を考慮した物質循環を解くモデルを始め、地球大気と太陽光や太陽エネルギーとの相互作用を放射伝達方程式から予測するモデル等が使用されている²⁾。

上記モデルに対し、2次元スケールのモデルは大気汚染関連の研究で最も多く活用されている。代表的なモデルは煙突から排出されたガスが下流でどのような濃度となるかを予測する煙突モデルや、ビルで囲まれた車道から排気されるガス濃度分布を予測するストリートキャニオンモデル、高



EKMA: Empirical Kinetics Modeling Approach (Cater)
 CALGRID: California air resources board model (Yamartino)
 UAM: Urban Airshed Model (Morris)
 CIT: Carnegie/California Institute of Technology model (Russell)
 RADM: Regional Acid Deposition Model (Chang)
 GCM: Global Circulation Model

Fig. 1 Lists of models of air quality study concerned, and their grid scales and major uses.

速道路や高架橋道路等から道路と直行して拡散する汚染ガス濃度を予測するハイウェイモデル等、が上げられる³⁾。ただし、煙突モデルでは水平方向の拡散も考慮したプルーム・パフモデルが主流である(その意味から3次元モデルと分類される場合がある)。これらのモデルは、対象となる時空間スケールは比較的小さい。ストリートキャニオンモデルやハイウェイモデルで、1キロ・数分以内の時空間スケール、煙突モデルでも大きくて数キロ、1時間以内の現象を予測する目的としている。従ってこれらのモデルでは、物質の移流・拡散を主体に計算し、化学反応計算はほとんど考慮されていない。

上記した2次元スケールモデルは、対象となる汚染源や拡散過程が単純化されており、計算予測が比較的容易である反面、現実を把握する上で多くの問題を残している。例をあげると、ストリートキャニオンモデルでは、風上側ビル壁面に汚染物質がよどむ傾向を一般に予測しているが、ビルを水平に回り込む気流の存在による濃度の過大評価が指摘されている。さらに近年、種々の発生源から大気環境として考慮すべき多くの化学物質が放出され、複合した汚染の影響を考慮すべき状況となった。オゾンはその代表と考えられる物質で、原因物質であるNO_xや炭化水素(HC)が、人為的あるいは自然的に発生し、発生源とは異なる場所で高濃度となる現象がしばしば見られる。これらの問題を解析する上で、3次元スケールモデルは、重要な役割を担う。

3次元スケールモデルは、数メートルの現象から地球規模の現象まで、対象とする時空間スケールはさまざまである。これまで自動車の排ガスを対象として活用されてきたモデルは、ストリートキャニオンでより高精度な濃度分布を予測するために3次元に拡張された沿道モデルと、数百キロの領域でオゾン分布を予測する大気質モデルが代表的である。前者は圧縮性非静力流体モデルに乱流拡散モデルを組み込んだ物質輸送に重点を置いたモデルで、後者は局所循環流などを解く流体モデルとその結果を利用して光化学反応モデルを解く化学反応に重点を置いたモデルとに特徴が分かれる。3次元スケールモデルは、多くの格子点情

報を扱うため計算機資源や能力の制約上、物質輸送過程と化学反応過程を同時に扱うことが困難であった。今日、計算機能力のめざましい向上により、厳密な流体計算と並行して光化学反応計算を実行するモデルが開発されつつある⁴⁾。

ここでは、大気質モデルについて現状を報告する。

2. 大気シミュレーションによるオゾン濃度予測

オゾンは、光化学スモッグの原因物質で生体影響の観点から、環境基準が定められている。米国ではオゾン濃度で120ppbと決められているが、Fig. 2に示すようにカリフォルニア州のオゾン濃度は基準を大幅に越す高い濃度で、ここ数年改善は見られるものの300ppbを越す濃度が観測されている。カリフォルニア州大気資源局(CARB)では、大気質改善のため自動車を含めた南カリフォルニア(SCAB)における年間排出量の大幅な削減を検討している。現在の総排出量と排出削減計画(SIP)後の2010年の排出量とを比較し、Fig. 3に示す。CARBではSIP実現のために自動車の排出量削減に関し、電気自動車(ZEV)を自動車販売台数に応じて投入することを法制化している。SCABにおけるオゾンの環境基準達成のため、SIPがどの程度有効な施策であるか、SIPに代わりうるZEVよりもコスト効果の高い自動車の排気浄化施策が存在するのか、等について大気質モデルから

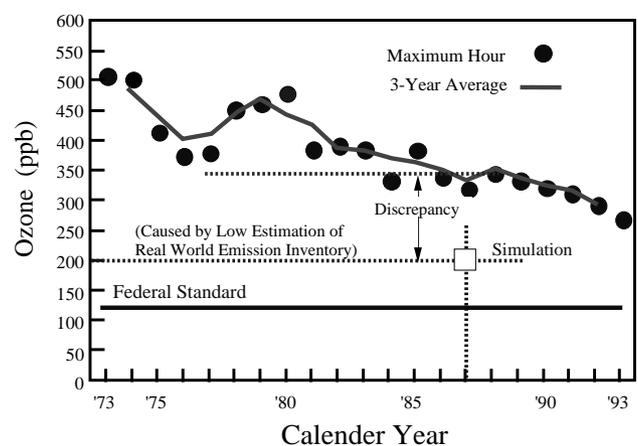


Fig. 2 Annual change of average ozone concentration of South Coast Air Basin (SCAB).

検討を行った。

大気質モデルは、Fig. 4に示すように地形（海拔高度，表面素度，土地利用，等）を考慮した，3次元格子の中で，各時間ごとに化学物質の濃度を3次元で予測するモデルである。その際，エミッションシナリオに応じた汚染ガスの放出と各格子点上の気象情報（風向・風速，気温，等）を与え，汚染物質の移流・拡散と光化学反応を解く計算を実行している。物質の移流・拡散や光化学反応計算のアルゴリズムにより，多くの大気質モデルが開発されている。主なモデルはどれも米国で開発され，個々の特徴をTable 1に示す⁵⁻⁸⁾。

なお，本報告ではTable 1に示されたもののうち，米国大気保護局（EPA）が公認したUAM（Urban Airshed Model）での予測結果を示す。大気質モデルに入力するデータのうち，固定発生源や一般家庭から排出されるエミッションインベントリーはCARBによる公開データを使用した。自動車からの排出はFig. 5に示すように，後述する自動車単体からの排出モデルEMFAC7F⁹⁾，および物流・輸送モデルTRANPLANから出力される排出源データと交通量から，交通流モデルDTIM2を用いて格子点内の平均排出量を時間毎に算出した。

Fig. 6は，Fig. 3で示す排出規制シナリオによる

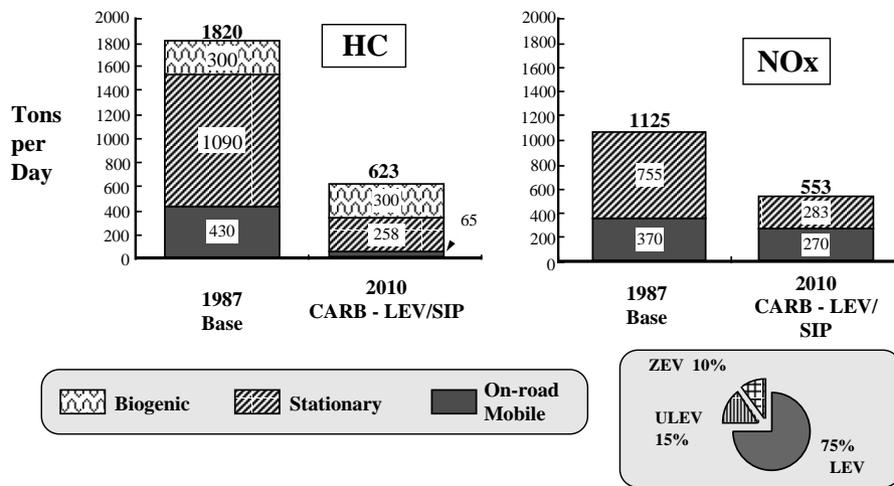


Fig. 3 Emission reductions from CARB's LEV program with SIP.

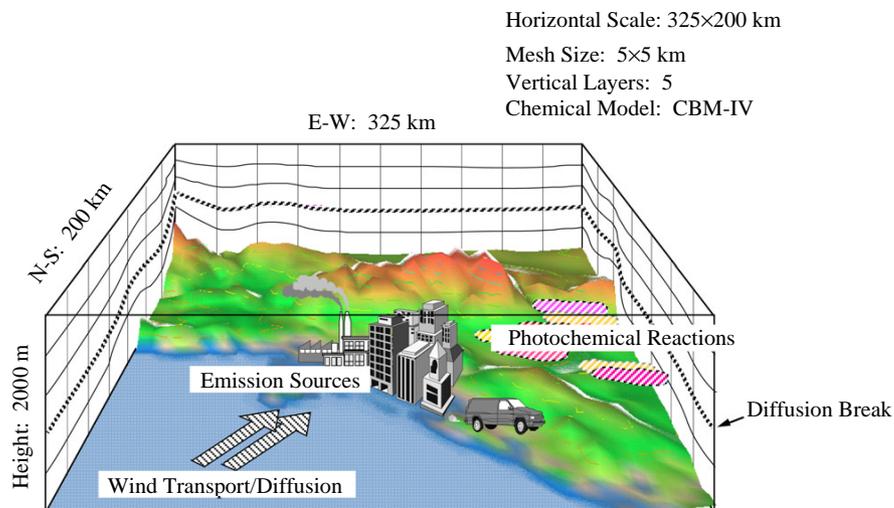


Fig. 4 Air quality simulation by urban airshed model.

Table 1 Characteristic comparison of air quality simulation model.

| Model name | CALGRID | CIT | UAM |
|---|---|--|--|
| Promotion | CARB* ¹ | | EPA * ² |
| Development organization | J.Scire, R.Yamartino (Sigma Research Corporation, MA) G. Carmichael, Y. Chang (University of Iowa) | Gregory J. Mcrae (MIT) Armistead G. Russell (Carnegie Mellon University) Robert A. Harley (University of California) | Systems Applications International |
| Tested version and Development year | 1.5 (1992yr) | 3.01 (1993yr) | 4 (1991yr) |
| Program size (lines) | 2 175 (involving modified lines in TCRD* ³) | 11819 | 15453 |
| Subroutine numbers | 114 (involving modified 13 routines in TCRD* ³) | 74 | 76 |
| Atmosphere top height (a default value) | 5000 (m) | 1100 (m) | 2000 (m) |
| Vertical layer number (a default value) | 10 Layers (Thickness is Variable with time) | 6 Layers (Fixed layer) | 5 Layers (2 mixed layers, 3 free convection layers) |
| Vertical distribution of thickness | The lower layer is thin (coordinate system which considered ups and downs of topography) | The lower layer is thin (the parallel atmosphere which does not consider the topography) | Thickness is changed in proportion to diffusion-break height |
| Photochemical reaction model | SAPRC | LCC | CBM-IV |
| CPU time for 1 day event by SGI* ⁴ Indigo2 workstation | 8 hr | 8 hr | 2 hr |

*1 California Air Resources Board

*2 Environmental Protection Agency, U.S.A.

*3 Toyota Central R&D labs.,Inc.

*4 Silicon Graphics, Inc.

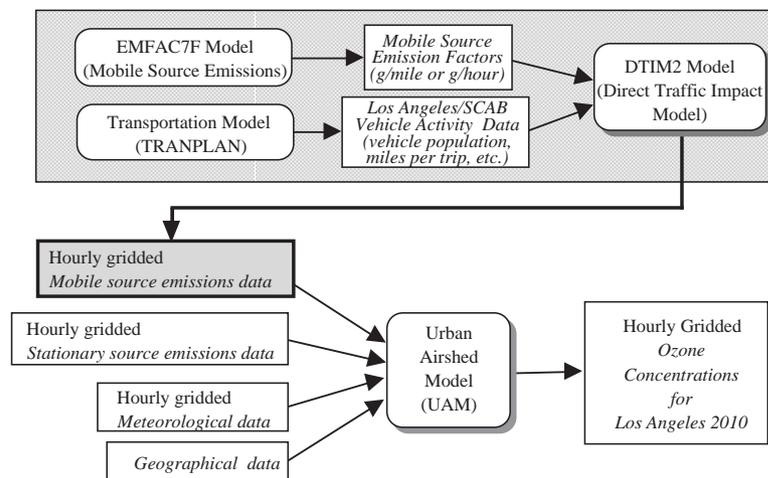


Fig. 5 Air quality simulation of Los Angeles/SCAB 2010. Block diagram of data set using in the UAM air quality simulation especially waited on making vehicle emission which are changeable between space time.

オゾン削減効果を確認するため、1987年7月における排出量とSIPにより排出削減した2010年のオゾン濃度の時空間分布（地上近傍の濃度）の結果を合わせて示す。オゾンは光化学反応で生成するため、日射の強い日中に環境基準を超える高濃度となる（黄色で表示された部分）。都心部より放

出された汚染ガスは海風によって内陸部に輸送され、輸送過程でオゾンは生成されるため都心よりは山麓部分で高いオゾン濃度が観測される。1987年のシミュレーション結果は、地上に設置されたオゾン濃度測定局で観測された結果と良い一致を示し、モデルが正確にオゾン濃度予測をしたこと

Figure 6-a

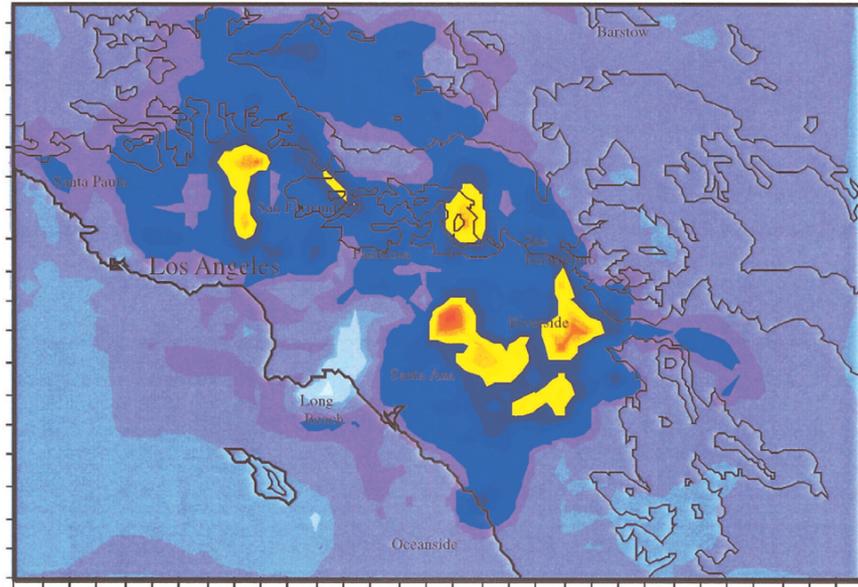


Figure 6-b

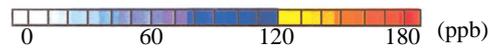
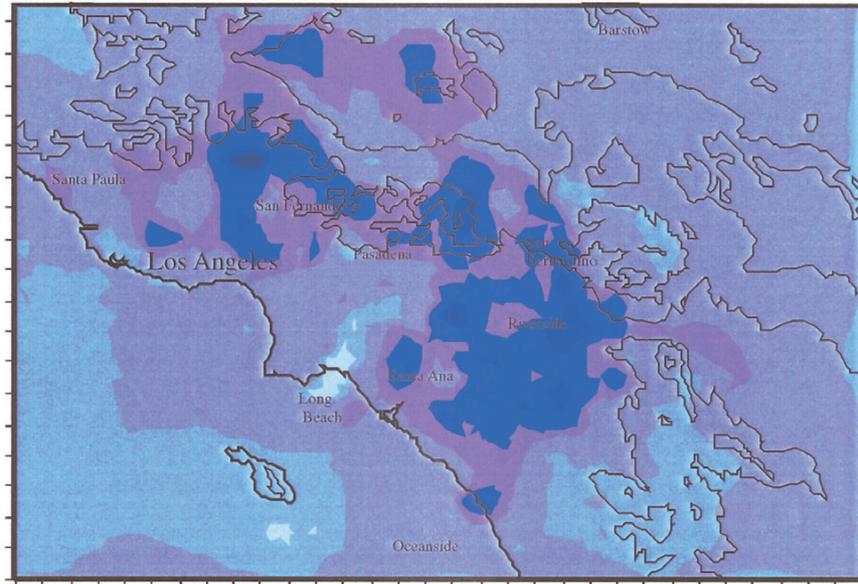


Fig. 6 Estimated results of ground level ozone concentrations for (a) base case (upper) and (b) the SIP 2010yr case (lower).

が実証されている。一方、2010年の予測結果では、1987年と同様に山麓部分で高濃度となるものの、環境基準である120ppbをいずれの場所でもクリアできることが明らかとなった。よってSIPは、環境基準をクリアするに十分な条件と判断できた。

SCABにおけるNO_xおよびHCの排出量と生成するオゾン濃度との関係を把握するため、1987年のエミッションインベントリーに適切な係数を掛けて排出総量を相対的に低下（あるいは増加）させ、同様のシミュレーション実験を行った。その時に計算領域内で予測された最大オゾン濃度を、NO_xおよびHCの排出量の関数としてFig. 7に示す。SIPは、1987年のオゾン状況（Fig. 7中のA点）からC点へ向かう大気改善であることが明らかとなった。ここで、B点はSIPによる排出削減を実施しなくても、2010年までに自動車の新車への代替等により見込まれる削減量を考慮した排出量とその到達オゾン濃度を示す。

Fig. 7に示す等オゾン濃度線の間隔が水平方向で密なことから、オゾンの環境基準達成のために、HCの削減はNO_xの削減に比べ効果的であることが分かった。この結果から、オゾンの環境基準達成のためには、HCのみを削減するD点に向かう方向でも同様のオゾン削減効果が期待できること

が明らかとなった。自動車から排出されるNO_xやHCの削減を考えた場合、NO_xの削減はHCの削減に比べ技術的に難しい。オゾン生成の抑制のみを考えた場合のD点に向かう開発は、コスト効果の高い排気対策と言える。一方、国内（とりわけ関東圏）では、SCABに比べNO_xの排出量は差がないものの、HCの排出量が2倍近くあり、状況が異なっている。すなわち、Fig. 7に示した等オゾン濃度線はSCABとは逆に垂直方向で密となり、NO_xの削減の方が効果的である結果となった。

SCABでのSIPによる排出規制が、大気環境を改善する効果があることが明らかとなった。このSIPの規制に沿う自動車排気改善をどのように進めるか、コスト効果の高い方策を検討する。第1はFig. 7が示す特性を利用し、技術的に難しいNO_x削減よりは積極的なHC放出削減を実施する方法である。第2は次に示す路上での自動車の排出実態を把握し、排出対策車を投入することで排出低減を目指す方法である。

Fig. 8は、SCABにおける現在の自動車の車齢分布を表したグラフである。Fig. 8によると、車齢2年の自動車が最も多いものの、車齢10年を越すものや20年の車がそれぞれ29%、6%も路上を走行していることを示す。このような車齢の高い車が

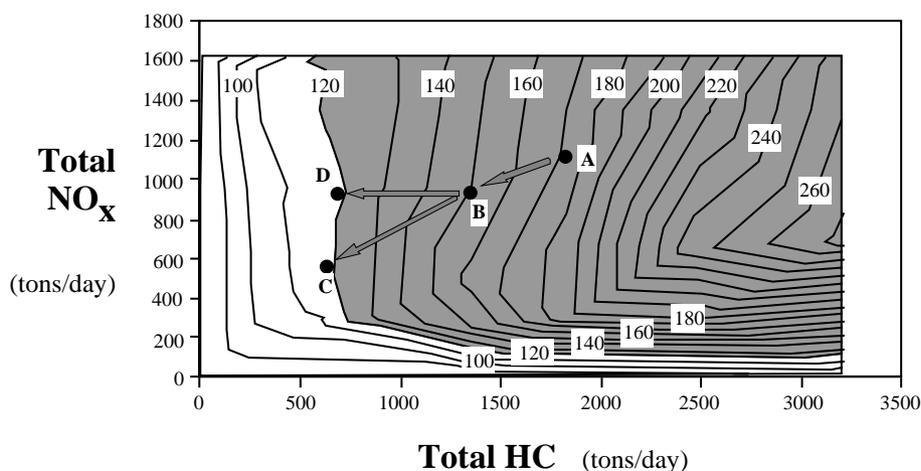


Fig. 7 Maximum ozone concentrations which depended on a discharge of NO_x and HC in SCAB. Point A is a base condition in 1987. Point B is estimated value of maximum ozone concentration in 2010 with present LEV and stationary source regulations. Point C is maximum ozone concentration in 2010 with SIP regulations. Point D is maximum ozone concentration in 2010 with SIP HC regulations but non-NO_x reduction.

ら排出されるHCの量は，Fig. 9に示すように現在の排出規制（Tier1またはLEV）に対応した車両に比べ，数倍多いと予測される。これらいわゆるハイエミッターと呼ばれている車を現行車両に置きかえるだけで，大きな排出削減ができると思込まれる。現在の自動車排出量をCARBの車両排出量

予測モデルEMFAC7Fを基に積算した結果と，SIP規制後のFig. 3に示す車両構成での2010年の排出量，およびハイエミッターの元となる10年以上の車齢の車を新車に替えるスクラッププログラムを展開した場合とで，HC排出量を計算した。比較した結果をFig. 10示す。この結果によると，排気浄化対策をした車両（LEVおよびULEV）の積極的な投入やスクラッププログラムが，ZEVの投

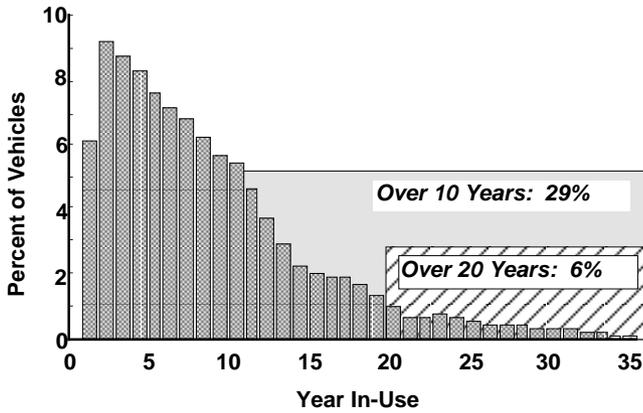


Fig. 8 Population distribution of In-Use vehicles based on EMFAC7F simulation.

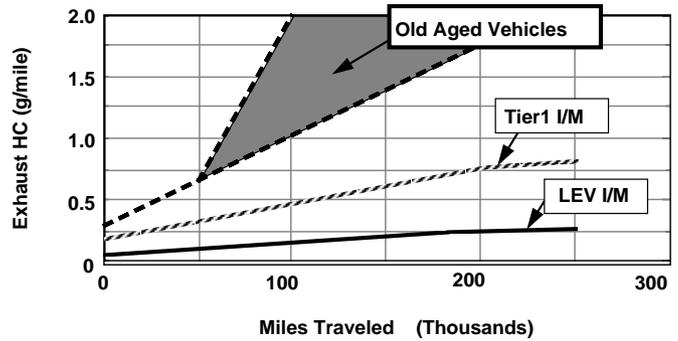
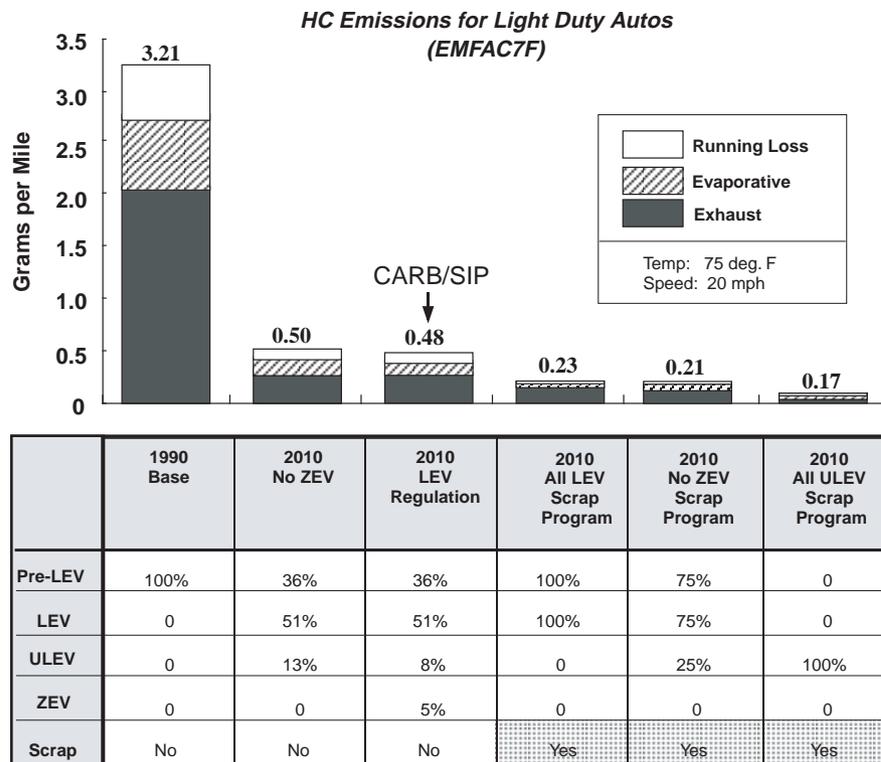


Fig. 9 Estimated vehicles exhaust HC for functions of traveled miles.



**Scrap Program = Remove vehicle after 10 years old.

Fig. 10 Comparison of exhaust HC for light duty vehicles on the basis of several regulation programs.

入に匹敵する効果があることが明らかとなった。

3. 今後の大気予測

自動車排ガスが大気環境に及ぼす影響予測において、米国（特にSCAB）の研究に比べ、日本の状況は遅れをとっている^{13, 14}。大気環境測定局の数は関東圏で500局を越し、SCAB以上の体制を整えているが、大気予測に必要な固定発生源からの排出源データに乏しい状況にある。CARBでは煙突一本一本から排出されるガス成分と濃度を公開している¹⁰。他、大気常時監視局での大気汚染ガス濃度がインターネットでリアルタイム閲覧できる¹¹など、開かれた対応が見られる。さらに、大気予測を実証するために地上では把握できない上空での汚染状況を、航空機やゾンデを用い気流などと同時に測定する立体的な集中観測が、10億ドルの規模で1987年以降数度に渡り繰り返されるなど、政府主導の積極的な展開が注目される。

一方、国内では工場や事業所等からの発生量が非公開のままである他、単発的な都市域での観測はあるものの、総合的な観測はほとんど見られない。1999年に成立した情報公開法ならびに同年から2年間の実施が予定されているJCAP(Japan Clean Air Program)¹²での総合観測の結果を期待したい。

これまで欧米での大気予測の中心はオゾン（国内ではNO₂）であり、ガスを対象とした移流・拡散輸送と光化学反応計算を実施してきた。近年、大気中の浮遊粒子（取り分け微小粒子）の健康影響が問題となってきた。粒子は本特集でも併記されているように、すすや煤塵など排出源から一次的に排出されるもの（一次粒子）と、ガスで排出された後大気中で二次的に生成する粒子（二次粒子）がある。一次粒子についてはこれまでも、移流・拡散係数をガスのそれと分けて計算したり、地上へ沈着する際の係数を増やすなどの工夫をした大気モデルも考案された。しかし、二次粒子を扱うモデルは無機塩の生成に関わる若干のモデル以外はほとんどなく、二次粒子の粒径が小さく人体の気道深くまで進入することから、大気中の挙動を早急に予測できるモデルの開発が切望されている。

4. まとめ

大気環境予測シミュレーションは、計算機能力や計算資源の拡張と共に日々進化している。ここでは、南カリフォルニア地域のオゾン生成を、NO_xとHCの排出量と関係づけて計算予測し、将来の排気規制SIPの効果と、それに替わるコスト効果の大きい排出削減案の検討を実施した。

今後は、オゾンに留まらず種々の有害大気汚染物質の影響予測が要求される。その中で、粒子生成に対する計算予測が緊急課題となっている。国内外においても粒子生成の予測ツールの開発が始まったばかりである。

謝辞

本研究を進めるに当たり、元豊田中央研究所契約研究員であったMr. Brent Craryに、排気予測で全面的協力を得た点を感謝致します。

参考文献

- 1) Carter W. P. L. : "Effects of Kinetic Mechanisms and Hydrocarbon Composition on Oxidant-precursor Relationships predicted by the EKMA Isopleth Technique", Atmos. Environ., 16(1982), 113 ~ 120
- 2) 横山長之 : 地球環境シミュレーション, (1991), 285, 白亜書房
- 3) 大気汚染物質の動態 磯野謙治編 : (1979), 257, 東京大学出版会
- 4) 水野建樹, ほか : 大気環境学会モデリング・動態解析分科会論文集, 大気環境学会モデリング・動態解析分科, (1999), 319
- 5) Yamartino, R. J., Scire, J. S., Hanna, S. R., Carmichael, G. R. and Chang, Y. S. : "CALGRID: A Mesoscale Photochemical Grid Model", CARB Rep., A049-1, 95812(1989), 87
- 6) McRae, G. J., Russell, A. G. and Harley, R. A. : "CIT Photochemical Airshed Model", CRC Rep., SCAQS 8, (1992), 17
- 7) McRae, G. J., Goodin, W. R. and Seinfeld, J. H. : "Development of a second-generation mathematical model for urban air pollution - I. Model formulation", Atmos. Environ., 16(1982), 679 ~ 696
- 8) Morris, R. E. and Myers, T. C. : "User's guide for the urban airshed model", EPA Rep., EPA-450/4-90-007A, (1990), 259
- 9) California Air Resources Board., September, : Methodology for Estimating Emissions from On-Road Motor Vehicles, Volume I (1993), EMFAC7F

- 10) <http://www.arb.ca.gov/emisinv/emsmain/emsmain.htm>
- 11) <http://www.arb.ca.gov/adam/cgi-bin/db2www.exe/adamhourly.mac/start>
- 12) JCAP Promotion Department Petroleum Energy Center : Clean Air Program Act. Rep., April, (1998), Japan
- 13) 林誠司, 柳漢吳, 國見均, 吉川康雄, 箕浦宏明: "自動車排出ガスの大気環境影響シミュレーション", 自動車研究, 19-2(1997), 48 ~ 51
- 14) 柳漢吳, 林誠司, 國見均, 吉川康雄, 箕浦宏明: "関東圏における大気環境シミュレーション", 自動車研究, 19-11(1997), 444 ~ 447

(1999年10月20日原稿受付)

著者紹介



箕浦宏明 Hiroaki Minoura

生年：1956年。

所属：反応制御研究室。

分野：大気環境計測と解析に関する研究。

学会等：日本気象学会，大気環境学会，

日本エアロゾル学会会員。

理学博士。