

交通起源の大気汚染物質の 三次元移流拡散シミュレーション

NUMERICAL STUDY ON AIR POLLUTANT
EMITTED FROM TRAFFIC

妹尾泰史¹・神田学²

Hiroshi SENOO, Manabu KANDA

¹学生会員 工学 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

To investigate the diurnal variation of SPM (Suspended Particulate Matter) emitted from automobiles in metropolitan area, meso-scale numerical simulations were carried out using RAMS (Atmospheric Modeling System). The following results were obtained;

(1) The wind field dominantly affect the diurnal variation of SPM. When simulated wind fields agree with those of the observation, diurnal variations of SPM also agree well with those of the observation.

(2) Sea breeze and boundary layer have strong influence on the SPM variation. In the morning, SPM is relatively high concentration, since a stable layer restrains vertical diffusion of SPM. In the afternoon, SPM concentrations suddenly decrease in accordance with the sea breeze and boundary layer development. Atmosphere in the BL is well mixed and SPM is diffused and advected.

Key Words : SPM, urban, traffic, automobiles, Regional Atmospheric Modeling System

1. 本研究の目的

ヒートアイランド現象や集中豪雨の多発・大気汚染物質の高濃度化などが過密都市の存在により顕在化している。著者らは、これらの都市気象を明らかにする研究の一環として地域気象モデルを用いて数値シミュレーションを行ってきた。その結果、地表面材料や人工廃熱に代表される都市特有の地表面条件が都市の熱・水収支に大きく寄与していることがわかった。しかしそこでは、大気の混濁度等、物質科学的な議論はなされていなかった。大気汚染物質のソースは都市における生産活動であり、大気境界層内において変質・移流拡散する。それをふまえると、都市気象において水・エネルギー循環プロセスだけではなく、物質循環プロセスの相互作用が重要となってくる。そこで本研究では物質循環プロセスに着目し、第一段階として、大気汚染物質の一つであるSPM (Suspended Particulate Matter, 浮遊粒子状物質) の移流拡散過程のシミュレーションを試みる。SPM発生源として交通起源大気汚染物質排出量推計モデルと融合することにより、都市における大気汚染物質濃度の日変動特

性をどの程度再現可能か、検討するものである。

SPMは粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子状の物質を指す。また、SPMはその発生源の多様性(工場などの固定源、交通などの移動排出源・自然起因など)・大気中における化学変化・大気からの除去過程(沈着や沈降)に不明な点が多い。本研究では、大気中の二次エアロゾル生成機構が十分に解明されていないので一次生成粒子のみを考慮する。

後藤らは道路ネットワーク上を移動する車両のミクロシミュレーションより、当該地域から発生する交通起源のSPM排出量の推定を行っている²⁾。本研究ではこのシミュレーションから得られたSPM排出量推計データを用いることにする。交通起源のSPMは大気中の総濃度のうち約三割を占め、また人間の呼吸器に有害な粒径の小さい物質である点において、交通起源のSPMを高解像度で三次元的予測をすることは、都市の生活環境情報としてもまた非常に価値がある。

2. 気象モデル

気象モデルはColorado State Universityで開発された

表-1 本計算で用いたモデルオプション

基礎方程式	圧縮・非静水圧
水平座標系	ポーラステレオ座標
鉛直座標系	σz 座標
湿潤過程	雲・雨・雪・雹・霰・氷晶・凝集体の7種類の微物理過程
地表面過程	2層キャノピーモデル (Tremback and Kessler, 1985) ⁵⁾
地表面以外の境界条件	ラージスケールナッジング
放射過程	短波・長波とも微物理量に対応した2ストリームモデル
乱流過程	鉛直: レベル2.5クロージャーモデル (Mellor and Yamada, 1982) ⁶⁾

表-2 各グリッドの計算条件。鉛直方向のメッシュ分割は、最下層が100mで上方に上がるに従って1.1倍のストレッチング幅で増加させ、最も大きいもので1000mとした。

	鉛直格子数	水平解像度 (km)	鉛直格子数	鉛直解像度 (m)	時間解像度 (s)
GRID1	46×36	10	25		15
GRID2	56×48	2.5	25	100-1000	5
GRID3	48×96	0.8	25		2.5
GRID4	60×88	0.2	29		0.83

地域気象モデルRAMS (Regional Atmospheric Modeling System) を用いた。RAMSはこれまで、スギ花粉の動態シミュレーション、環八雲の再現³⁾、黄砂の飛散シミュレーション⁴⁾等に応用されている。

RAMSはユーザーによってモデルの計算スキームを選択することができる。表-1に本研究におけるモデルオプションの選択を示す。計算に用いた領域内の標高データ及び土地利用データは、国土地理院より発行される国土数値情報を利用した。土地利用データは植被情報として用い、地表面過程はTremback and Kessler (1985)⁵⁾ の2層キャノピーモデルを用いた。本研究では都市域に着目していることから、都市域における熱収支特性を考慮するために、熱物理係数を都市の主要材料であるコンクリートの以下に示す値とした。

$$C\rho\lambda = 3.6 \times 10^6 (J^2 s^{-1} K^{-2} m^{-4}) \quad (1)$$

ここに $C\rho$ は単位体積熱容量($Jm^{-3}K^{-1}$)、 λ は熱伝導率($Wm^{-1}K^{-1}$)を表す。ここで都市キャノピーは陽的には考慮していない。

初期条件・境界条件は、ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) の Operational Pressure Level Analysis Data (鉛直15層、水平解像度0.5度)を総観場の気象データとして6時間毎の客観解析データを作成し、四次元データ同化手法により連続的に取り込んだ。

多重ネスティング手法を用いることにより、解像度の異なる計算領域の解析結果を相互に反映させ、総観場の影響を局所場に反映させた。Grid1で東日本全域を、Grid2は関東地方、Grid3, 4は大気汚染が激しい地域であ

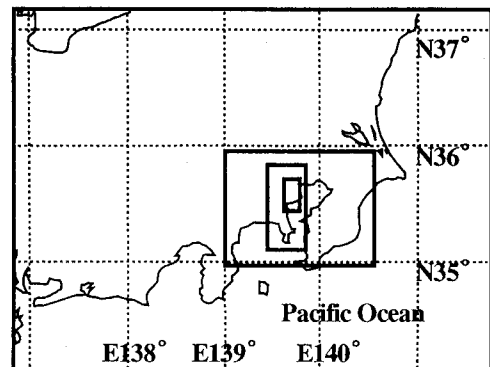


図-1 計算領域。外側の枠から順にGrid1, 2, 3, 4を示す。

る首都圏臨海域と設定した(図-1)。計算条件の詳細は表-2に示す。

計算は東京工業大学学術国際情報センターの超並列スーパーコンピュータOrigin2000を用い、64CPUの超並列計算モードで行った。

3. 解析対象とSPM排出量データ

解析対象日は川崎市各測定局において、近年、SPM濃度の高かった1998年8月10日から14日の5日間とした。また計算開始後第1日目は計算の安定のため、解析対象を11日から14日とした。ここで用いられるSPM排出量データ(解像度500m)は、後藤ら(2002)による、自動車起源のSPM排出量マップを使用した。これは東京都南部、川崎市、横浜市の約20km四方のOD交通量や車種構成・道路勾配などから車種別交通量・速度等の推計を割り出し、排出係数を掛けて算出される。交通量推計の信頼性及び詳細については文献²⁾を参照されたい。

計算値と観測値の比較には、環境省の大気汚染物質広

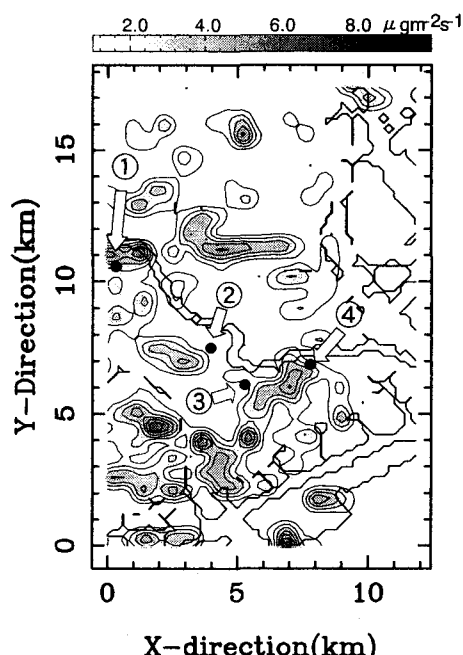


図-2 Grid4におけるSPM排出量分布(午前9時)。コンターは1.0($\mu\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$)間隔のSPM排出量を示す。①中原②幸③川崎④大師各測定局。

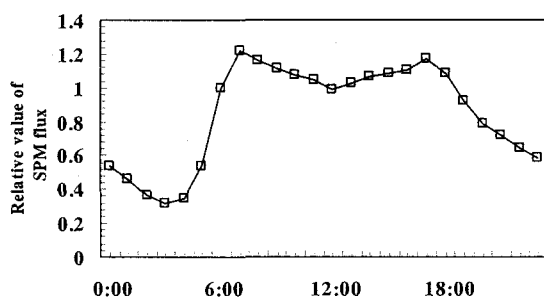


図-3 午前6時を1とした場合の、一日のSPM排出量の時系列図。

域監視システムの測定値を用いた。測定局には一般大気環境測定局と自動車排出ガス測定局がある。前者は住宅地などの一般的な生活空間に設置されている。後者は沿道などに設置されているため、車両の排気ガスによる局所的な高濃度SPMが計測されている。よって、本研究で行うような大域的な気象場によるSPM濃度分布を議論する上では検証データとして不適切である。本研究では移流拡散過程によるSPM濃度変化を捉えている、一般大気環境測定局の測定値を用いた。Grid4における排出推定量及び計算結果を検証する際にデータを用いた測定局の分布を図-2に、排出量の時間変化を図-3に示す。

本研究ではRAMSに(2)式で示すような移流拡散方程式を追加し改良を行った。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2)$$

ここに、 C :SPM濃度(μgm^{-3})、 t :時間、 u, v, w : 風速の x, y, z 方向成分、 K_H, K :水平及び鉛直方向の乱流拡散係数である。

時間ステップ毎の底面境界条件は(3)式のように与えられる。

$$-K \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=z_d} = F \uparrow \quad (3)$$

ここに z_d :発生源高度(m)である。本研究において慣性衝突及び乾性沈着は考慮しない。

4. SPMの移流拡散シミュレーション

(1) 気象場の再現性

石井ら(1999)はSPM濃度分布の観測的研究において、SPM濃度の空間分布について海風による移流拡散効果、及び境界層発達による希釈効果を指摘している(詳細は、石井⁷⁾を参照されたい)。それらを考慮すれば気象場の再現性は非常に重要な要素となってくる。

対象領域のほぼ中央である幸測定局における気温(I)・風速(II)・風向(III)の計算値と測定値の比較を図-4に示す。

気温は、位相は再現されているが、モデルは日格差を明らかに過大評価している(図-4・I)。都市の熱慣性の再現性に問題があるといえる。地表面近傍の解像度が粗いため、地表面温度に気温が追従していると考えられる。都市は建物群で構成されているため、フラット面でのモデリングには限界があると思われる。都市キャノピーモデルの導入により、都市の熱慣性を正確に表現することが不可欠であるが、これについては今後の課題とする。

風速(図-4・II)は、B点前及びB-C間でモデル計算値の過大評価が見られる。これは風向及び強くなる時間から推測して、海風を過大評価しているものと考えられる。A-B間では測定値においても海風が見られるものの継続時間は短く、一方、B-C間では海風らしきものが明確には現れない。その他の時間帯においては、比較的良好な再現性を得ることができた。

風向に関しては(図-4・III)、測定においても弱い海風の見られるA-B間での再現性は短時間の急激な変化も再現するほど良好であった。実際に海風が明確に現れなかったB-C間では、測定値の風向は北寄りとなっているのに対し、計算値では海風の風向である南を示した。海風の再現性は良いとは言えない結果となった。その原因のひとつとして、幸測定局が都市キャノピーの中にあることによって、地物の影響を受ける可能性について検討する。図-5に横浜気象官署における風速の時系列図を

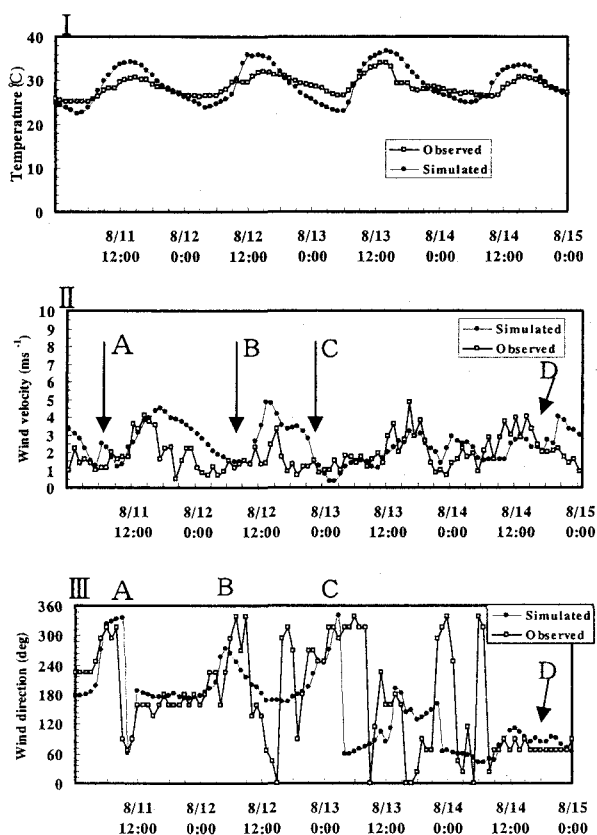


図-4 川崎市幸測定局における気象場の再現性。Ⅰ・気温、Ⅱ・風速、Ⅲ・風向。

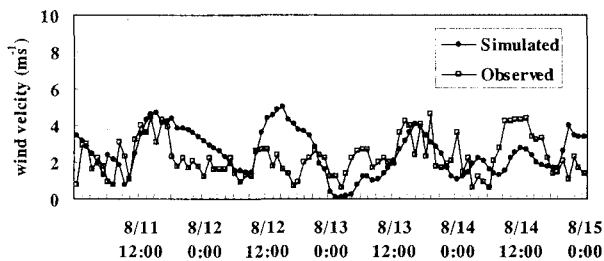


図-5 横浜気象官署における、風速の観測値と計算値。

示す。周囲の影響が十分排除されている気象官署においても、B点前及びB-C間で幸測定局と同様、海風の侵入が弱いという挙動が示された。このことにより、測定値に地物の影響が含まれていた可能性は低い。

もう一つの原因として気温の再現性が考えられる。海風は、日中の陸上が海上に比べて顕熱輸送が大きく、昇温し、気圧下降して起こる循環流である。モデル計算値では日中の気温を高く見積もっているため、海風が卓越しやすいと考えられる。海風の再現性の点から見ても気温の再現性の向上は非常に重要な課題となる。

(2) SPM濃度の再現性

SPM濃度の測定値と計算値の比較を図-6に示す。図中に示すA～Dは図-4におけるものと対応している。本計算では自動車起源のSPMのみを対象としている。自動車

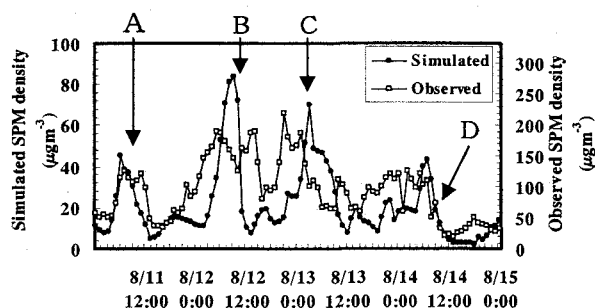


図-6 幸測定局における、SPM濃度の再現性。

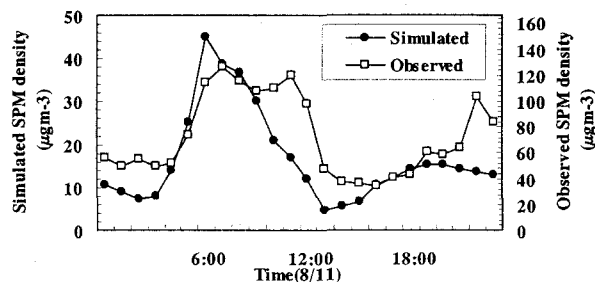


図-7 幸測定局における、8月11日(図-4 A)のSPM濃度の再現性。左軸はモデル計算値、右軸は測定値を表す。左軸のスケールアップ率は図-4と同様10/3倍。

起源のSPMは大気中のSPMの三割程度(環境庁⁸⁾)とされているため、計算値の軸に対して10/3倍のスケールアップを施した。また、左軸にSPM濃度計算結果、右軸をSPM濃度の測定値とした。

一概に比較はできないが、図-6 A及びDの挙動は極めて似ているものの、中盤ではその再現性は良くない。

モデル計算値では、Bにおいて突発的に短時間だけ高濃度を示す箇所が見受けられる(図-6 B)。SPM濃度測定値では、A点後の極小値からB点に向けゆっくりと濃度が上昇し、その後も数時間高濃度を維持している。この時間帯の風速の再現性を基に検証していく(図-4 II・B)。測定値において風速はB以前で $1\sim 2\text{ms}^{-1}$ の弱風を推移している。それによりSPM濃度測定値はB以前から緩やかにSPM濃度が上昇したと考えられる。

一方モデル計算値では、前述したように、風速は明らかに過大評価しBに至っている。またB以降、モデル計算値は再び風速を過大評価している。それらを考慮するとSPM濃度計算値は、B以前の風速の過大評価によって留まることなく移流され、濃度は上昇しなかった。そしてBにおいて風速が極小となったとき、SPMが滞留し濃度は急激に上昇した。その直後、再び風速を過大評価し始め、滞留していたSPMは移流され濃度が急激に低下したと考えられる。モデル計算値において、突発的に高濃度となったメカニズムは風速の再現性で説明される。

次に図-6のCに着目する。SPM濃度のピークに位相差があることがわかる。これについても前述と同様、B点及びC点の間の風速の過大評価(図-4 II)が原因である

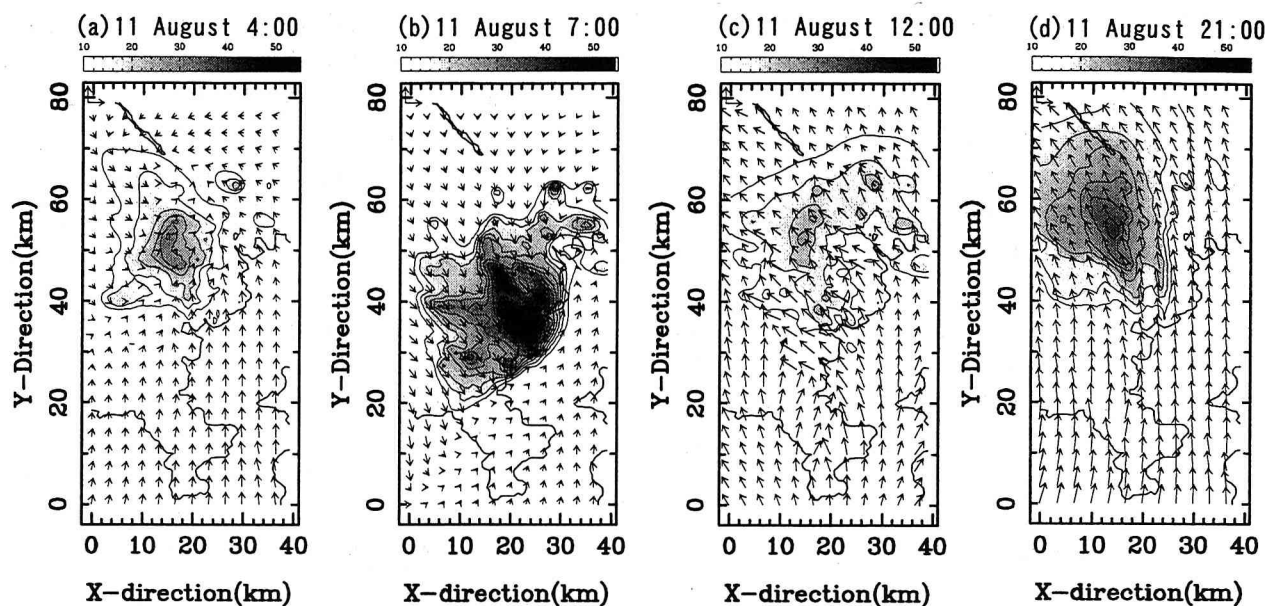


図-8 モデル地上50m地点のSPM濃度分布(Grid3)。(a)11日4:00(b)11日7:00(c)11日12:00(d)11日21:00。コンター間隔は $5.0(\mu\text{g m}^{-3})$ 。各図左上のベクトルが $5.0(\text{ms}^{-1})$ を表す。

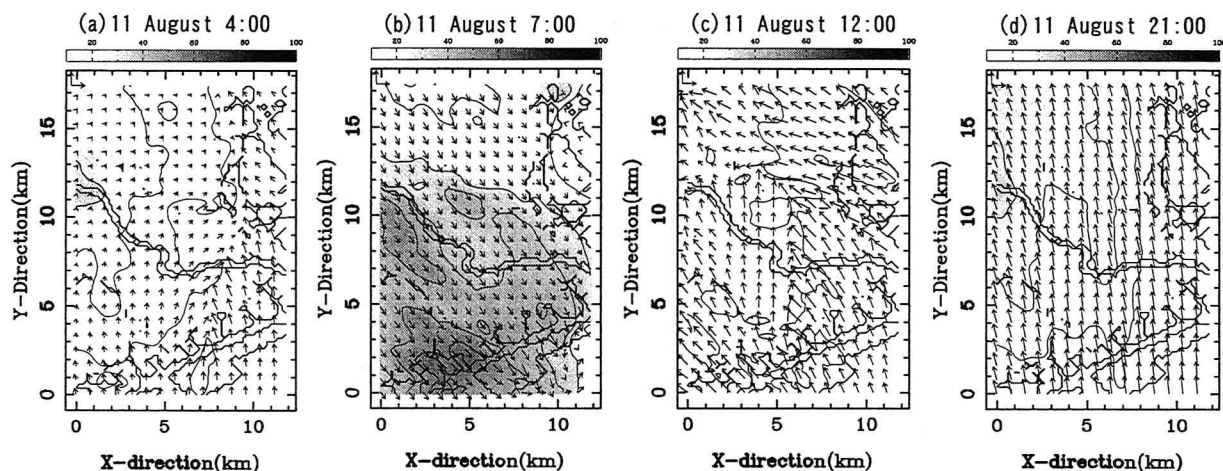


図-9 モデル高さ50m地点におけるSPM濃度分布(Grid4)。(a)11日4:00(b)11日7:00(c)11日12:00(d)11日21:00。コンター間隔は $10.0(\mu\text{g m}^{-3})$ 。各図左上のベクトルが $5.0(\text{ms}^{-1})$ を表す。

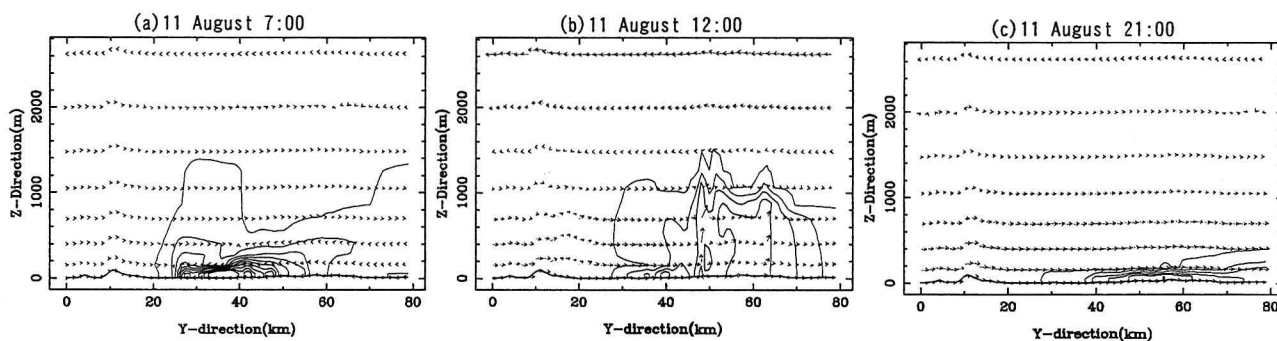


図-10 図-8におけるX=21ラインの鉛直断面SPM濃度コンター。(a)11日7:00(b)11日12:00(c)11日21:00。コンター間隔は $5.0(\mu\text{g m}^{-3})$ 。

と説明できる。実際にはC以前の弱風時にSPMは滞留し高濃度となったが、計算値ではなかなか風速が衰えずピークに達する時間が遅くなったと考えられる。

風速・風向の再現性が良好であるAにおいてモデル計

算値の濃度変化が、ピーク濃度の継続時間に違いは見られるものの、ピーク濃度となる時間がほぼ同時であることなど、測定された濃度変化に似ている点に興味深い(図-7)。そこで、このような濃度変化になった理由につ

いて移流拡散の観点から検討する。A点頃の風向の時間履歴を大別すると、「南→北→南(図-4ⅢA)」となっている。幸測定局の南方には強い排出源があり(図-2)、そこから排出されたSPMが南風で北方へ移流され内陸側で滞留し、北風とともに幸測定局周辺に移流されピーク濃度を示した。その後、南からの海風の卓越により濃度低下を引き起こしたと推測される。これについては次節で詳しく議論することとする。

このように、風系の再現性がよい時間帯ではSPM濃度の変動も測定値に極めて似ていること、またSPM濃度の変動が測定値とかけ離れていても風系の再現性を議論することにより説明されることから、風系はSPM濃度の変動に対し支配的であることがわかる。

(3) 移流拡散過程に伴う日変動のメカニズム

前述の議論をふまえて、移流拡散過程が日変動パターンに及ぼすメカニズムについて考える。ここではモデル計算によるSPM濃度の日変動が測定値に似ている、8月11日(図-6A及び図-7)について議論する。

4:00[図-8(a), 9(a)]の段階では沿岸付近で弱い南風となっている。海岸線から数kmほど内陸側では、ほぼ無風状態であり、そこに海沿いの地域から排出されたSPMが滞留していることがわかる。

7:00[図-8(b), 9(b), 10(a)]には弱いながらも北風が入ってくる。ちょうど川崎市臨海域に収束する形となり、4:00の段階で内陸側で滞留していたSPMが風の収束線付近に集まり高濃度域を形成する。

12:00[図-8(c), 9(c), 10(b)]になると沿岸域では海風が卓越し、川崎市を取り囲むような濃度分布を見せ、海風前線において比較的高濃度を示している。境界層の発達によりSPM粒子が高度1000m付近まで拡散し、濃度の鉛直勾配も緩やかになっている。この結果は、海風の卓越と境界層の発達にSPM濃度希釈効果があるという石井らの指摘を支持している。

21:00[図-8(d), 9(d), 10(c)]には日中発達した境界層も次第に衰退し、鉛直方向への拡散が弱くなっている。大気の状態が成層状態に移行し、低層を這う様に移流していく様子が見てとれる。また、鉛直方向への拡散が弱まったことにより濃度は上昇し、風下側で高濃度域が見受けられた。未だ境界層の発達が見られず、鉛直方向への拡散が抑制され濃度勾配は強くなっている。

5. まとめ

地域気象モデルを用い、大気汚染物質のひとつであるSPMの三次元移流拡散シミュレーションを行った結果を以下にまとめる。

- i) 自動車交通という空間的・時間的に不均一なSPM排出源を与えて日変動の再現性について検討した。自動車起源のSPMのみを考慮したにもかかわらず、気象場の再現性が良好であるとき、SPM濃度の日変動が測定値の日変動に良く似ている。またSPM濃度の日変動が計算値と測定値でかけ離れていることは風系の再現性で説明される。これにより、SPM濃度の日変動は、風系の影響が支配的であることが示唆された。
- ii) 移流拡散に伴う日変動のメカニズムについて検討した。結果として、境界層が発達しきっていない明け方に、鉛直方向の拡散が抑制されるため一日のピーク濃度となりやすく、また、午後には海風の移流効果により濃度は極小値をとりやすいことが示された。このことから、これまでの観測的研究において、境界層の発達と海風の卓越にSPM濃度希釈効果があるという指摘を支持する結果となった。日中卓越する海風と境界層が日変動を検討する際に重要な要素であることが示された。

謝辞: 本研究で用いたSPM排出量データは東京工業大学 土木工学専攻屋井教授・後藤亮氏からいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 神田学, 張翔雲, 鶴野伊津志, 川島茂人, 高橋裕一, 平野元久: 地域気象モデルによる花粉飛散の数値シミュレーション, 天気, 49, 267-277, 2002.
- 2) 後藤亮, 白濱好文, 屋井鉄雄: 第22回交通工学研究発表会論文報告集, CD-ROM, 2002.
- 3) 神田 学, 井上裕史, 鶴野伊津志: “環八雲”の数値シミュレーション, 天気, 47, 83-96, 2000.
- 4) Uno, I., H.Amano, S.Emori, K.Kinoshita, I.Matsui and N.Sugimoto: Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998, A numerical simulation J. Geophys. Res. 106, D16, 18331-18344.
- 5) Tremback, C.J. and R. Kessler: A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models, Preprints. 7th AMS Conference on Numerical Weather Prediction, June 17-20, Montreal, Quebec, Canada, Amer. Meteorol. Soc., Boston, 355-358.
- 6) Mellor, G.L. and T.YAMADA, : Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys. 20, 851-875.
- 7) 石井宏明, 神田学, 類家誠: スキャニングライダーによるSPM濃度の空間分布特性に関する基礎的研究, 第54回年次学術講演会講演概要集第7部, 228-229, 1999.
- 8) 環境庁: 浮遊粒子状物質総合対策に係る調査・検討結果について, 報道発表資料, 平成11年6月11日, 1999.

(2002. 9. 30受付)