

# スキャニングライダーによる SPM濃度の空間分布計測に関する基礎的研究

神田学<sup>1</sup>・石井宏明<sup>2</sup>・類家誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京工業大学 工学部開発システム工学科 (〒152-0033 目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>学生会員 東京工業大学大学院 土木工学専攻修士課程

<sup>3</sup>株式会社アイ・エヌ・シー・エンジニアリング 技術本部 エンジニアリング部

本研究では、目に無害なレーザービームの採用により3次元のスキャニングを可能としたアイセーフライダー(石川播磨重工製)を用いて、大気中のSPM濃度の空間分布を定量的に計測するための基礎的検討を行った。具体的には、明治神宮から新宿副都心に至る大気境界層の時空間構造をライダー観測し、同期観測されたSPM濃度計(レーザー式及びβ線吸収式)の計測値と定量的に比較することにより、以下の結論を得た。(1)倍率補正、およびエアロゾル粒子の湿度膨潤誤差に対する理論的補正などにより、ライダーがSPM濃度の定量評価に有効である可能性を示した。ただし、他季節・他地域への適用については別途同様のキャリブレーションが必要である。(2)空間分布計測より、新宿と神宮の森上における大気境界層高さの違いなどを捉えることが出来た。

**Key Words:** Scanning LIDAR, SPM, β-ray absorption method, Light scattering method, the boundary layer height

## 1. はじめに

ヒートアイランド現象をはじめとする都市大気現象の研究は観測機器の開発とともに進んできた。近年、リモートセンシング技術の一つである、レーザーライダーの利用によって境界層高さの変動<sup>1)</sup>や、海風の侵入挙動<sup>2)</sup>が捉えられるようになってきた。レーザーライダーはレーザーを放射し、SPM<sup>3)</sup>(浮遊粒子状物質で粒径が $10\mu\text{m}$ 以下のものを指す)による後方散乱を受信することによって、SPMの相対濃度分布を得ることができる。また逆に、SPMの分布は大気構造に依存しているので、SPMをトレーサーとして大気構造を可視化する事もできる。

これまで大気観測におけるレーザーライダーの欠点は2つあった。一つは人間の目に対する安全性からレーザーを真上に向けた鉛直次元計測が主であったこと、もう一つは、後方散乱受信信号強度は浮遊物質分布の定性的な把握に使われるだけで、既存のSPM計などとの比較による定量的な議論が十分に行われていないことである。レーザーライダーは遠隔的に測定する装置であり、当然、重量法などの直接計測ほどの精度は得られないが、ある程度定量化できれば点計測では得られない空間的なSPM濃度を計測できること

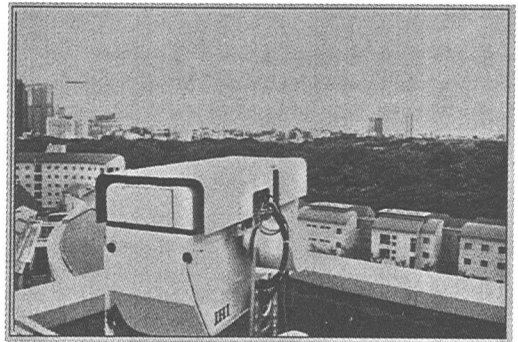


写真-1 スキャニングライダーと観測点からの風景  
(明治神宮北半分と新宿駅付近)

になる。これはより詳細な大気構造解明にだけでなく、現在、環境基準達成率の低いSPMの改善にも貢献するものと考えられる。

今回使用したスキャニングライダーは、 $2.1\mu\text{m}$ 帯のアイセーフレーザー<sup>4)</sup>を光源としているためレーザービームを走査させることが可能になり、よって二次元あるいは三次元的に相対濃度分布を計測できるものである。

本研究の目的は、この新型スキャニングライダーを用いて、(1)既存のSPM濃度計による同期計測値と比

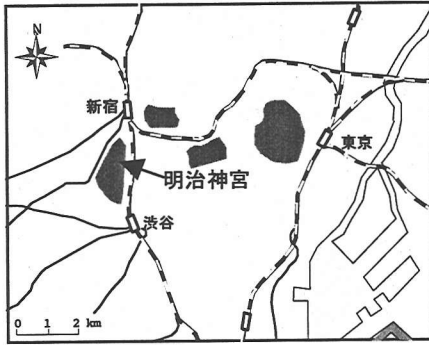


図-1 明治神宮位置図

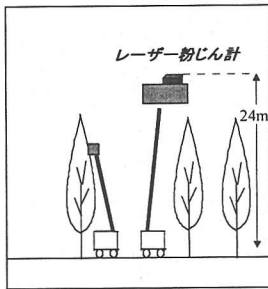


図-3 レーザー粉じん計の設置図  
(明治神宮内の観測ポイント)

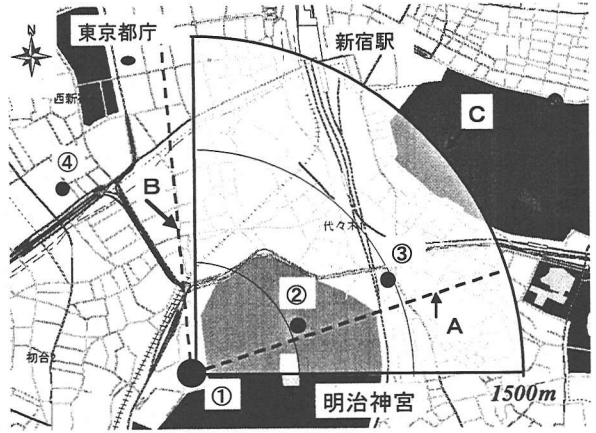


図-2 各計測器設置場所(①~④)とライダーの測定断面(A~C)  
 ①スキャニングライダー  
 ②レーザー粉じん計  
 ③β線吸収法計測場所(大気汚染常時測定局 北参道)  
 ④湿度・気温計測(大気汚染常時測定局 本町)  
 A鉛直断面I(神宮の森方面)  
 B鉛直断面II(新宿副都心方面)  
 C水平断面

較検討することにより、受信信号強度からSPM濃度を定量化する手法について検討すること、及び、(2)神宮の森から新宿上空に至る大気のスキャニング観測の結果より、SPMの空間分布と大気境界層の時空間構造解析への適用例を示すこと、の2点である。

今回、観測エリアとして都内最大級の人工緑地である神宮の森(図-1)を選んだのは、周囲が新宿・渋谷といった大市街地に囲まれ、大気境界層の空間的違いが顕著に現れることを期待したことと、同時期に、著者らのグループにより神宮内で大規模な環境計測<sup>5)</sup>が行われていたこと、に依るものである。

## 2. スキャニングライダー観測概要

### (1) 観測日時と場所

1997年8月1日から9日まで、明治神宮と新宿副都心を一望できる代々木の青少年オリンピックセンターの屋上でスキャニングライダー観測を行った。屋上からの風景を写真-1に示す。明治神宮の北半分と左端に新宿副都心が撮影されている(明治神宮と新宿の位置は図-1に、スキャニングライダーの設置場所は図-2に示す)。計測範囲である半径1500m内の建物や森林より高いところに位置するため、ほとんど障害物はなく、スキャニングライダー観測には好都合な場所であった。

### (2) 観測方法

スキャニングライダーは角度を変えながら計測する事で二次元、あるいは三次元データを得る。神宮の森から新宿上空に至る大気構造を立体的にとらえるために、3種類(横一断面、縦二断面)の断面を設定した。これを1セットとし、2時間おきに計測した。横計測は、明治神宮と新宿副都心部上空を含む範囲を垂直角度(仰角)0°として行った(以下、水平計測と呼ぶ、図-2C)。縦計測は神宮の森方面と新宿副都心方面に一断面ずつ設定した(以下、それぞれ鉛直断面I、IIと呼ぶ、図-2A、B)。この基本計測の他に、垂直角度(仰角)25°で横計測(以下、斜め計測と呼ぶ)を数回行った。各断面の測定範囲、走査ステップを表-1にまとめておく。

### (3) 使用するSPM測定器について

#### a) スキャニングライダー

2.1μmのパルス波を送信し、大気粒子状物質からの後方散乱を受信する。スキャニング時間は一断面につき、約25分である。1パルスの間隔が200nsecであるので送信方向の空間解像度は約30mである。

レーザーによる後方散乱の受信信号強度から相対SPM濃度分布を求めるための一般的な方法を以下に示す。送信方向に距離 $r$ 離れた地点の受信信号強度 $P$ はレーザーライダー方程式、式(1)、(2)で表せる<sup>6)</sup>。

表-1 断面計測の測定範囲

水平角度：真東 0° 真北 -90°  
 垂直角度：水平 0° 鉛直方向 90°

	水平計測	鉛直断面 I 神宮の森方面	鉛直断面 II 副都心方面	斜め計測
水平角度	0°～-90°	-17.5°	-97°	0°～-90°
垂直角度	0°	0°～70°	0°～70°	25°
走査ステップ	2°	1°	1°	2°

$$P(r) = P_0 \times \frac{c\tau}{2} \times A \times \frac{\beta(r)}{r^2} \times T(r)^2 \quad (1)$$

$$T(r) = \text{EXP} \left[ - \int_0^r \alpha(r') dr' \right] \quad (2)$$

$P_0$ はレーザーレーダーの出力(W),  $r$ はレーザーレーダーからの距離,  $c$ は光速,  $\tau$ はレーザーパルス幅,  $A$ は検出器の面積,  $T(r)$ は $r$ の地点までの光の透過率,  $\alpha(r)$ は消散係数,  $\beta(r)$ は後方散乱係数である。

粒径分布の形が空間的に一様であるとすれば $\beta(r)$ はSPM重量濃度に比例する。よって、後方散乱係数 $\beta(r)$ の分布から相対SPM濃度分布を求めることができる。レーザーレーダー方程式を変形し受信信号から $\beta(r)$ に比例する値として次式(3)が得られる。

$$\beta(r)P_0 \frac{c\tau}{2} AT(r)^2 = P(r)r^2 \quad (3)$$

式(3)の右辺をライダー信号(相対SPM濃度)と呼ぶことにする。

断面計測結果の表示では距離による減衰が著しいので、透過率をスロープ法<sup>6)</sup>で求め補正した。スロープ法は消散係数が一定であることを仮定し、減衰の傾きから消散係数を求める。

なお、粒径分布の仮定については、一般に大気ではJunge分布であると言われていることによる。現段階ではレーザー出力から粒径分布情報を得ることは難しいため仮定したが、2偏光レーザーを用いて粒径の時間変化を定性的に抽出する試みもなされ始めている。

3章において比較に用いたライダー信号は、スキャニング観測結果からレーザー粉じん計の計測ポイント付近(図-2中②)のデータを取り出し平均した点データである。具体的には、水平計測における水平角18°、送信方向500～600mのデータの平均値と、鉛直断面Iにおける仰角0°、送信方向500～600mのデータの平均値を用いた。

#### b) レーザー粉じん計

レーザー粉じん計は同研究室における神宮内観測班により、神宮内観測地(図-2②)で地上高さ約24m(樹高から約4m, 図-3)の地点で計測された。これは

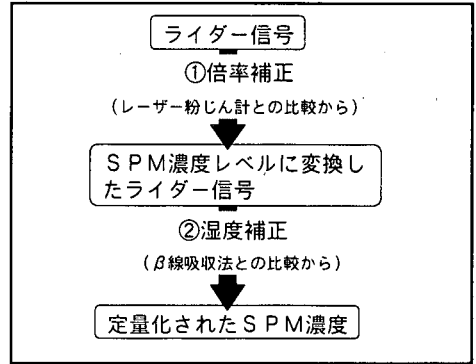


図-4 定量化の手順

スキャニングライダーにおける水平計測の高さとほぼ一致する。測定間隔は1分である。

測定方法は、外気を取り込み光を照射し、このときの浮遊粒子による散乱光量によって質量濃度を算出する、前方散乱受信光方式である。用いられているレーザーの波長は0.78nmである。湿度の影響を強く受け、大気中で誤差が大きいとされている。

#### c) β線吸収法

β線吸収法によるSPM濃度については、大気汚染常時測定局の北参道(図-2③)におけるルーチン観測データを用いた。測定間隔は1時間である。

測定方法は外気をポンプによって吸い込み、ろ紙上に粒子を捕集し、β線を照射する。β線がろ紙上の物質を通過するときの吸収量が、その物質の質量に比例するという原理を利用し、SPM濃度を直接計測することができる。10μmまでの粒子を測定している。もともと一般的なSPM計であるが、これも湿度の影響を受けるという報告が出されている(水野ら<sup>7)</sup>)。

### 3. ライダー信号のSPM濃度への定量化手法

ライダー信号を既存のSPM計(レーザー粉じん計とβ線吸収法)の出力と比較・観察しながら、SPM濃度へ定量化する手法について以下に詳述する。そのフローチャートを図-4に示す。定量化手法は大きく、1) 粉じん計とのキャリブレーションによる倍率補正、及び、2) 粒子の膨潤理論に基づく湿度補正、の2ス

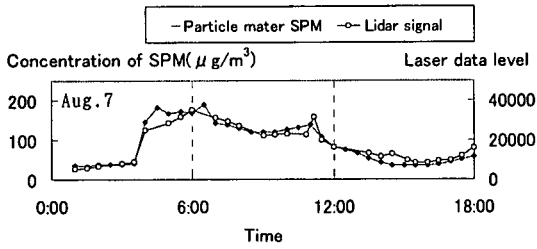


図-5 レーザー粉じん計SPM濃度とスキャニングライダーの受信信号レベル（ライダー信号）の比較

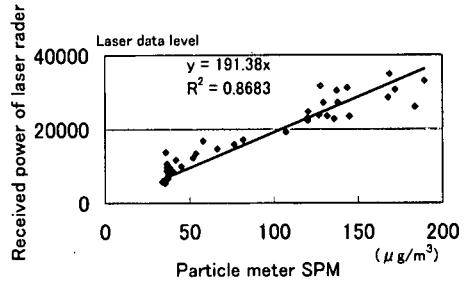


図-6 レーザー粉じん計でのSPM濃度とレーザーライダーの受信信号レベルの比較（1次近似直線の傾きは受信信号レベルとSPM濃度の比を表す）

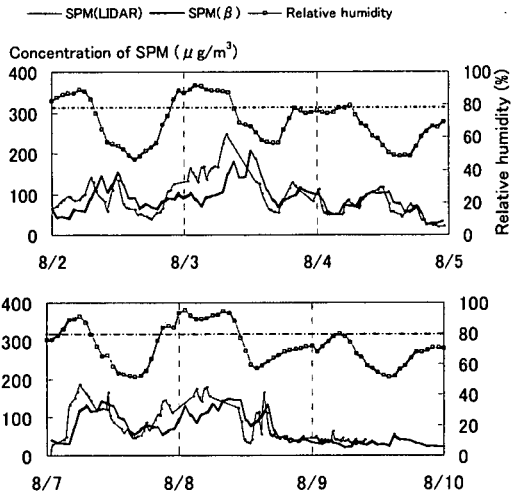


図-7 SPM濃度レベルに換算したライダー信号（ $SPM_{LIDAR}$ ）とβ線吸収法のデータ（ $SPM_{\beta}$ ）の比較、湿度は渋谷区測定局のデータ

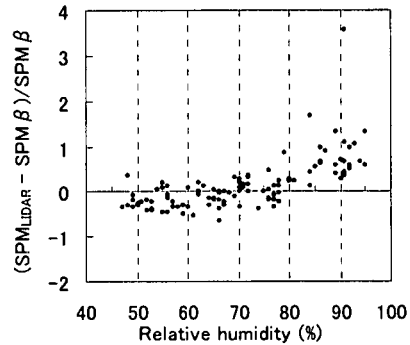


図-8  $SPM_{\beta}$ に対する差（ $SPM_{LIDAR} - SPM_{\beta}$ ）の比と湿度の相関

テップより成る。

### (1) ライダー信号の倍率補正

典型的な静穏、晴天日であった8月7日、0時から18時のデータを用い、レーザー粉じん計のSPM濃度と、ライダー信号を図-5に比較する。両者の物理次元は全く異なるが、非常によく対応を示していることが分かる。そこで、定量化ステップの第一段階として倍率補正を行った。具体的には、図-6に示すようにライダー信号と粉じん計SPM濃度の相関図から傾きを求め、その逆数(変換係数)をライダー信号に乗じて、ライダー信号をSPM濃度の次元へ変換させることとした(以下、 $SPM_{LIDAR}$ )。ここで、変換係数については、場所、季節により粒子の組成、粒径分布、吸収性などが変化するため、場所、季節ごとに求める必要があると考えている。

次に、一般に粉じん計は大気中では誤差が大きいと言われていることから、倍率補正だけでは定量化は不十分であると考え、倍率補正された $SPM_{LIDAR}$ と、よ

り一般的に使われているβ線吸収法のSPM濃度(以下、 $SPM_{\beta}$ )と図-7に比較してみた。

観測期間を通して、夜間から朝方にかけて $SPM_{LIDAR}$ が $SPM_{\beta}$ よりも過度に大きくなっている。それに比べると、昼から夕方はいよ対応をしており、8月4日、8～9日に至っては、定量的にほぼ一致している。この不一致を生み出す要因はいくつか考えられようが、2(3)で前述したとおり既存のSPM濃度研究を鑑みると、「湿度の影響」を強く受けていることが推察される。実際、図-7の右軸に示してある湿度との対応を見てみると、湿度80%を越える2,3,7,8日の早朝いずれも $SPM_{LIDAR}$ は $SPM_{\beta}$ に比べ大きくなっている。一方、湿度が80%を越えない4,9日の早朝は $SPM_{\beta}$ と $SPM_{LIDAR}$ は非常によく一致している。そこで、 $SPM_{LIDAR}$ と $SPM_{\beta}$ の差と湿度との相関をとってみる(図-8)。湿度80%以下では両者はほぼ一致しているのに対し、湿度80%以上では湿度の増加に伴って $SPM_{LIDAR}$ が $SPM_{\beta}$ よりも大きくなっていく傾向が顕著に読みとれる。

以上の点を踏まえ、定量化のための湿度に対する補正を以下理論的に考察していく。

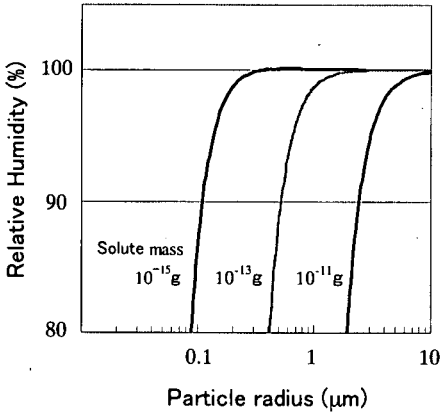


図-9 ケーラー曲線

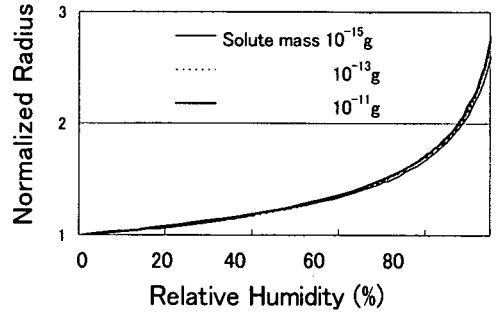


図-10 湿度0%のときの凝結核半径で標準化した膨潤エアロゾルの半径

(2) 理論的考察による湿度補正(β線吸収法との比較と粒子の膨潤理論から)

湿度がSPM<sub>LIDER</sub>に及ぼす影響は物理的に次の2つが考えられる。1つめは湿度が高くなるにつれSPMが水蒸気を吸収して膨潤することによる影響である。SPMが膨潤して粒径が大きくなった分、後方散乱光が強くなる。ミー散乱理論より、後方散乱光は散乱断面積に比例することが知られているので、湿度による粒子半径の膨張率が分かれば、その膨張分を差し引くことにより湿度による膨潤の効果を除去することができる。2つめとして、大気透過率の影響を考慮に入れる。

a) 膨潤の影響評価について

一般に雲は空気中のエアロゾルを凝結核とすることで成長することが知られている。雲物理の分野で雲粒の粒径半径Rと湿度Hの関係がケーラー曲線として理論的に得られている(式(4))<sup>8),9)</sup>。これをSPMの膨潤と考え、湿度と粒子半径の膨張率の関係を求める。ケーラー曲線は曲率効果と溶質効果の関係から得られる。

$$\frac{H}{100} = 1 + \frac{B}{R} - \frac{C}{R^3} \quad (4a)$$

$$B = \frac{3.2 \cdot 10^{-5}}{T} \quad (4b)$$

$$C = \frac{8.6m}{M'} \quad (4c)$$

Tは温度、M'は溶質の分子量、mは溶質質量である。ケーラー曲線は凝結核の溶質質量mによって、異なる湿度-粒径曲線をとる。図-9には、食塩を例に代表的な3タイプの粒径、すなわち、巨大粒子(1μm以上)、大粒子(1μm以下0.1μm以上)、エトケン粒子(0.1μm以下)に関するケーラー曲線が描かれている。食塩の密度は0.97g/cm<sup>3</sup>であるので、球形を仮定すれば溶質質量10<sup>-11</sup>gのとき凝結核としての粒径

は約1.3μmである。ケーラー曲線の意味するところは、溶質質量10<sup>-11</sup>gのときで考えると、1.3μmの海塩粒子がとけ込んだ粒子は湿度による膨潤の結果、湿度80%で約2μm、95%で約3μmとなるということである。図-9を見ると異なる溶質質量に対するケーラー曲線はいずれも相似分布に見える。そこで図-10には、ある湿度での粒径を湿度0%の時の粒径で除した正規化粒径(Normalized Radius)と湿度の関係を記す。異なるケーラー曲線を正規化すると一つの曲線で表せることが分かる。分子量の異なるNaCl以外の物質((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>)においても同様の結果が得られた。正規化粒径と湿度の関係は溶質質量・分子量によらず、ほぼ一つの「正規化ケーラー曲線」で表せることがわかる。

ただし、ここでは簡単のためすべて吸湿性粒子を仮定し、粒子の特性は考慮していない。これらの大胆な仮定の妥当性については4章で改めて検討する。

湿度0%の時の粒径で正規化した粒子半径(SRa)がほぼC(溶質質量と分子量の比)によらないとして「正規化ケーラー曲線」を近似式(5)で与える。

$$SRa(Xh) = (0.00082Xh^3 - 0.09607Xh^2 + 3.37325Xh + 100)/100 \quad (5)$$

3(1)で行った相関図(図-8)に対する考察から、湿度80%以上で膨潤の効果が現れるとし、湿度80%の半径に対する膨張率を補正半径比として、次式(6)により算出する(80%基準化)。

$$CRa(Xh') = SRa(Xh = Xh') / SRa(Xh = 80) \quad (6) \\ (Xh' \geq 80)$$

この湿度と補正半径比の関係を図-11(a)に表す。補正半径比の自乗は膨潤による散乱断面積の増加率を表

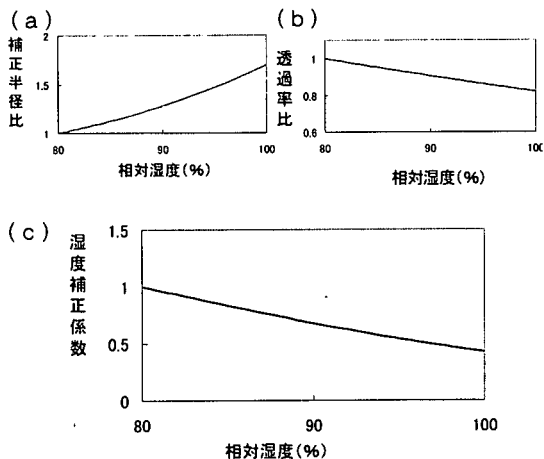


図-11 (a) 湿度80%基準化で求めた補正半径比  
(b) 湿度と透過率比の関係  
(c) 湿度補正係数

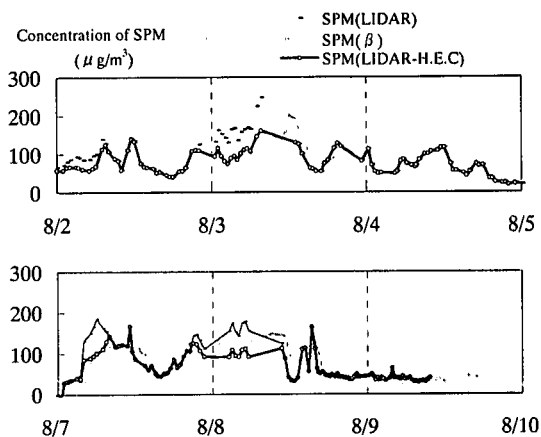


図-12 湿度補正後のライダー信号とβ線吸収法データの比較

す。後方散乱光は散乱断面積に比例するので、補正半径比の自乗でライダー信号を割ることによって湿度による膨潤の効果を除去することとした。

#### b) 透過率の影響評価について

湿度が高くなると大気透過率が減少する。レーザーレーダー方程式において大気透過率は消散係数の関数で表されているので、相対湿度  $H$  と消散係数  $\alpha$  の関係を中島ら<sup>4)</sup>の観測結果から一次式(7)で仮定する。

$$\alpha = 1.0 \times 10^{-5} H (m^{-1}) \quad (7)$$

ここで消散係数  $\alpha$  が送信方向距離によらず湿度のみの変数であるとしている。レーザーレーダー方程式に代入すると式(8)が得られる。

$$T(r)^2 = \text{EXP}[-2 \times (1.0 \times 10^{-5} \times H \times r)] \quad (8)$$

膨潤の効果にあわせて80%で基準化する。つまり、湿度80%までの湿度の影響はないものとし、それ以上の湿度に関しては80%の時の透過率に対する比で透過率の影響を取り入れる。地上レベルの比較は送信方向500m付近のデータで行っているので  $r = 500$  とすると、透過率影響比  $T'(Xh)^2$  は式(9)で表せる。

$$\begin{aligned} T'(Xh)^2 &= \frac{T(Xh)^2}{T(80)^2} = \frac{\text{EXP}[-2 \times (1.0 \times 10^{-5} \times Xh \times 500)]}{\text{EXP}[-2 \times (1.0 \times 10^{-5} \times 80 \times 500)]} \\ &= \text{EXP}[-2 \times (1.0 \times 10^{-5} \times (Xh - 80) \times 500)] \quad (9) \end{aligned}$$

#### c) 湿度補正係数

以上の二つの湿度補正により地上レベルでの湿度補正係数  $H.E.C$  を湿度80%以上で以下のように定義す

る(式(10))。

$$H.E.C = \frac{1}{CRa(Xh)^2 \times T'(Xh)^2} \quad (10)$$

この湿度補正係数を  $SPM_{LIDAR}$  に掛けることで、湿度の影響を取り除いた  $SPM$  濃度が得られる(以下  $SPM_{LIDAR-H.E.C}$ )。図-12によれば、湿度補正係数による第2ステップの定量化手法(図-4)により大きな改善が見られる。あわない部分は、測器の設置位置の違いや粒径分布の時間変化など湿度以外の影響も考えられるが、従来、相対値としてしか議論されることのなかったライダー信号が、既存の  $SPM$  濃度計と定量的に互換性を持った意義は大きい。

#### (3) 鉛直方向の湿度補正に関する補足

(2)で地上レベルではライダーの受信信号から求めた  $SPM$  濃度が倍率補正と湿度補正により、ある程度定量的に扱えることが確かめられた。しかしこのことは、空間的なスキミング観測をする際には、空間的湿度データが必要であることを意味する。空間的湿度データを観測で得るのは実用的でない。そこで、今回は暫定的に、数値計算により湿度の空間分布データを得た。

用いたモデルはRAMS (Pielke, 1992<sup>11)</sup>)である。同モデルは、4次元データ同化手法、4重ネストグリッド手法(最大解像度200m)、人工廃熱分布データ、を用いて環八雲のシミュレーションに応用され(井上ら<sup>12)</sup>)、湿度の鉛直分布の再現性について確認されている。

表-2 潮解係数

Relative humidity	10	20	30	40	50	60	70	80
Deliquescence characteristic $F(f)$	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1

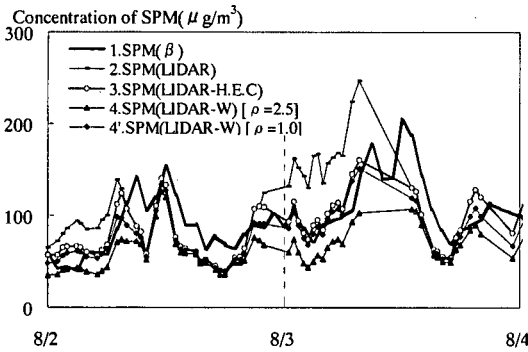


図-13 Winklerの式を用いて全湿度域にわたる湿度補正(全湿度補正)とH.E.Cによる湿度補正の比較

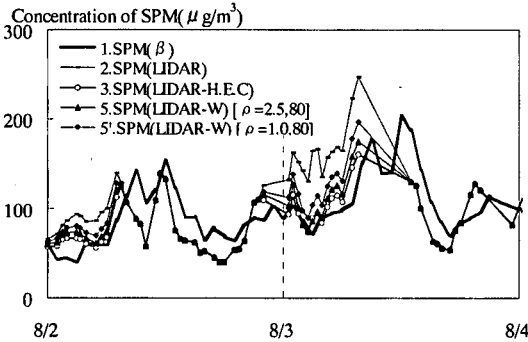


図-14 Winklerの式を用いて湿度80%以上を対象とした湿度補正(湿度80%補正)とH.E.Cによる湿度補正の比較

#### 4. 湿度補正による定量化手法の妥当性

3(2)の湿度補正においては、湿度80%以上でのみ補正を行っていること、粒子の吸湿性が仮定されていること、粒子特性のパラメータが入っていないことなど、大胆な仮定が盛り込まれており、その妥当性を検討しておく必要がある。SPMに及ぼす水分影響の式として、しばしば用いられるより厳密なWinklerの実験式<sup>10)</sup>を用いた湿度補正を行い比較してみる。

##### (1) Winklerの実験式

ラウールの法則から導かれたWinklerの式は、一つの粒子にはいろいろな成分が含まれる(内部混合状態)として、そのなかの吸湿性物質のために水分が取り込まれるとしている。Winklerの式は次のようにかける。

$$\frac{r}{r_0} = \left[ 1 + \frac{0.14 \times C \times F(f)}{1 - f} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11a)$$

$$C = s \times \frac{\rho_0}{\rho_w} \quad (11b)$$

表-3 Winklerの式を用いた湿度補正との比較におけるポイント整理 (番号は図-13, 14に対応)

番号	データ名	湿度補正	補正湿度範囲	粒子密度
1	SPM <sub>β</sub>	なし		
2	SPM <sub>LIDAR</sub>	なし		
3	SPM <sub>LIDAR-H.E.C</sub>	H.E.C	80%以上	
4	SPM <sub>LIDAR-W</sub> [2.5]	Winklerの式	全湿度域	2.5
4'	SPM <sub>LIDAR-W</sub> [1.0]	Winklerの式	全湿度域	1.0
5	SPM <sub>LIDAR-W</sub> [2.5,80]	Winklerの式	80%以上	2.5
5'	SPM <sub>LIDAR-W</sub> [1.0,80]	Winklerの式	80%以上	1.0

ここで、 $r$ :膨潤後の粒子半径、 $r_0$ :相対湿度0%での粒子半径、 $f$ :相対湿度、 $F(f)$ :経験的潮解係数(Winkler, 表-2参照)、 $C$ :粒子特性に関するパラメータ、 $s$ :全重量に対する水溶性物質の重量比、 $\rho_0$ :乾燥粒子密度、 $\rho_w$ :水の密度(1g/cm<sup>3</sup>)である。粒子密度 $\rho_0$ はWinklerから1.0~2.5の幅を持たせ、 $s$ は水野ら<sup>7)</sup>から0.7とした。

##### (2) Winklerの実験式を用いた湿度補正との比較と考察

湿度と膨潤後の粒子半径が得られるので、3(2)同様、 $r/r_0$ の自乗でSPM<sub>LIDAR</sub>を割ることによって湿度補正する事ができる。表-3に示すように全湿度域にわたる補正(全湿度補正)と、湿度80%以上を対象とした補正(湿度80%補正)を行い、それぞれSPM<sub>LIDAR-H.E.C</sub>と比較した(図-13, 図-14)。

###### a) 湿度80%以上での補正について

湿度80%補正に比べ全湿度補正は過補正気味であることが分かる。これは湿度80%以上における湿度影響がSPM<sub>β</sub>とSPM<sub>LIDAR</sub>の差に効いているとした仮定を支持する結果となっている。

###### b) 吸湿性について

一つの粒子は内部混合状態であり、湿度80%以上では潮解係数1となっているので、吸湿性の仮定も妥当であるといえる。

###### c) 粒子特性パラメータ

Winklerの式では、水溶性物質比と乾燥粒子密度が粒子特性パラメータとして考慮されているが( $\rho_0=1.0 \sim 2.5$ )、80%基準化の比較(図-14)から補正に与える影響は小さい。

##### (3) 本論の定量化手法の妥当性と課題

吸湿性を仮定し、粒子特性を考慮せず導いたH.E.Cによる湿度補正は妥当な範囲にあることが分かった。粒子特性を空間的、連続的に計測するのが困

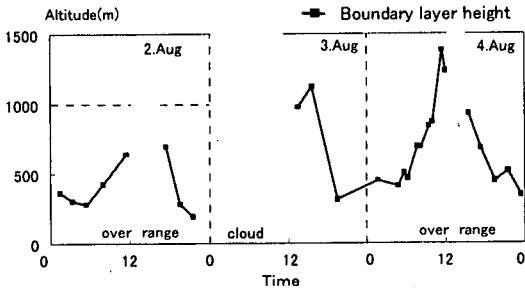


図-15 境界層高さの時間変化

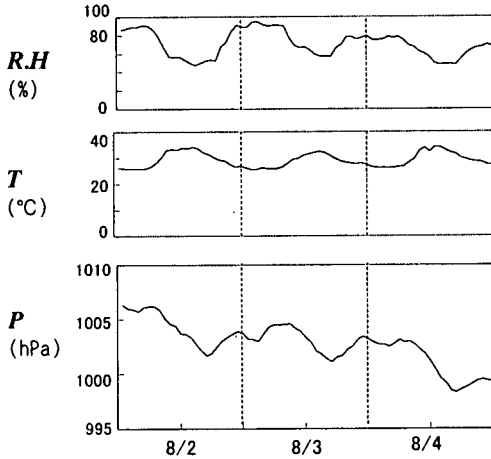


図-16 (a)相対湿度(渋谷区本町)  
(b)気温(渋谷区本町)  
(c)気圧(東京管区気象台)

難であること考えると、それらを考慮せずに補正ができるという点で *H.E.C* は便利であると考えられる。今後、粒子特性を考慮した補正法により精度を向上させていくべきであるし、今回の補正法の長期適応性、他の場所における適応性についてもデータを蓄積していかなければならない。

## 5. 神宮, 新宿上空におけるスキャニングライダー観測結果

### (1) 境界層高さの日変化

観測期間のうち、3日連続降雨がなく、晴天が続いた8月2~4日の境界層高さの日変化を議論する。境界層高さの検出は松井らの方法を参考にしておこなった。松井ら<sup>1)</sup>は、レーザー受信レベルから換算したSPM濃度レベルの鉛直勾配に対して、局所的な濃度で正規化した濃度勾配を求め、これが一定の値を越える高度をもって混合層高さとしている。

欠測、誤測を取り除き、鉛直断面I計測結果から求めた境界層高さの時間変化を図-15に示す。いずれの日も夜間は200m~500m、昼間は800~1500mと明確な混合層高度の日変化が認められる。特に興味深いことに、8/2~8/4へと日を追うごとに次第に境界層の高さが昼夜とも高くなっており、8/2と8/4では日中のピーク時の混合層高度は、2倍程度も違う。この原因を明らかにするため、図-16に8/2~8/4における渋谷区本町(図-2④)での相対湿度(a)、気温(b)と東京管区気象台の気圧の日変化(c)を示す。混合層の漸増傾向は、気温、湿度とは顕著な対応が見られないが、地上気圧の低下とよい対応関係が見られる。8/2~8/4へかけて高気圧場から低気圧場へと総観場が徐々に推移し、それに伴って、混合層高度に顕著な変化が見られたものと考えられる。混合層高度が気圧場や地形の影響を強く受けることは言われている。例えば、高気圧に覆われているような場合は、下降流のため、混合層の発達には抑制される(Stull, 1988<sup>3)</sup>)。

### (2) 鉛直断面計測結果

8月2日は弱風でとりわけSPMの空間分布が顕著に観測されたので、以下、8月2日の断面計測結果を中心に議論を進める。8/2の断面計測結果のうち、きわめて特徴的なSPM濃度分布を示した4つのイベントの鉛直断面図を図-17に示し、以下その特徴を述べる。

①8:00では、地上~500mまでの層と900m以上の層に高いSPM濃度が検出されており、2層の大気境界層構造が形成されている。地上から500m程度までの高濃度SPM層は、朝方の低い対流混合層内に地上起源のSPMが集積しているものと考えられる。900m付近の高濃度エコーは前日の残留混合層の上端と対応しているものと思われる。②10:00では、8:00に見られた500m以下の高濃度SPM層が消え、900m以上の高濃度SPM層だけが維持されている。これは日射の増加に伴い500m近傍にあった対流混合層が急激に発達し、前日の残留混合層まで到達したものと考えられる。地上~900mまでの混合層内では、SPM濃度は鉛直混合によりほぼ一定となっているが、混合層高度上昇に伴う希釈効果で、8:00の混合層内のSPM濃度よりも小さな値となっている。一方、混合層の上端ではきわめて強いエコーが検出されているが、これは、しばしば混合層上端に形成される積雲である(Stull, 1988<sup>3)</sup>)。③11:30では、地上から700mまで高濃度域が現れており、10:00までの傾向と一変している。鉛直一次的には、日射の増加に伴い、混合層高度は増加していくはずであるから、地上~700mまでの高SPM濃度層は、海風フロントなどの移流の影響であると想像される。④13:30では、③で見られた700m



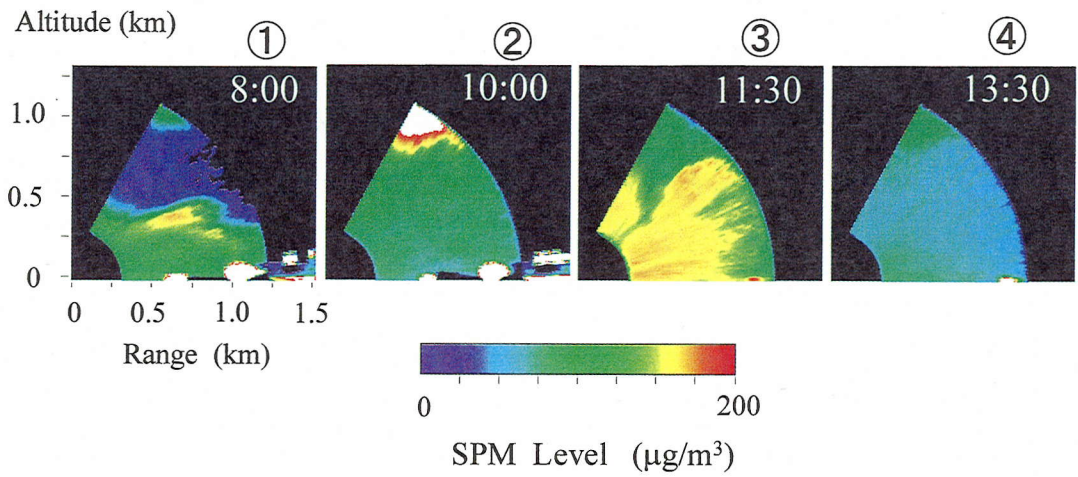


図-17 8月2日における鉛直断面計測結果（神宮の森方面）  
 赤色は高濃度，青色は低濃度を示す。  
 (①～④は図-18, 20 と対応している)

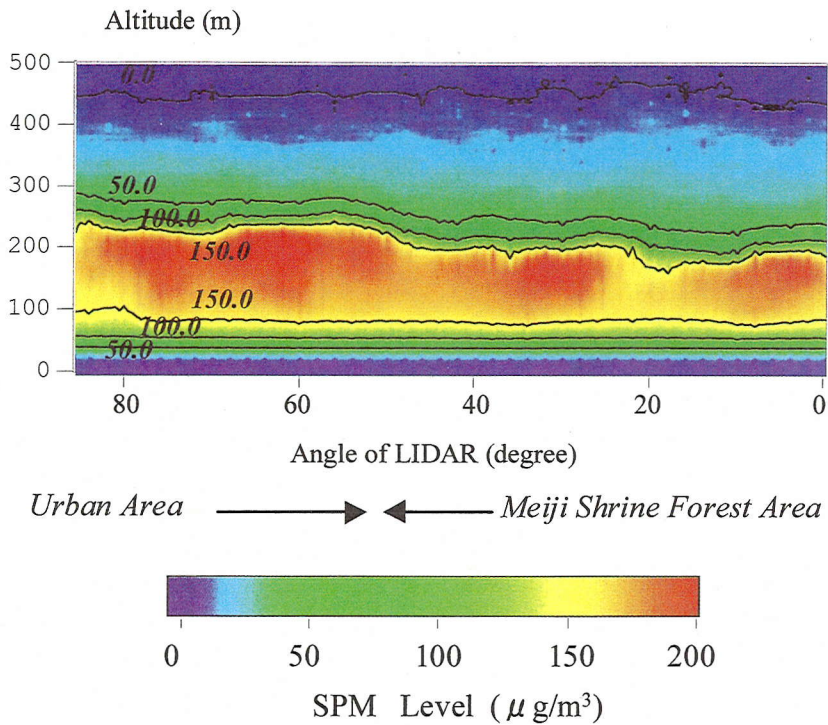


図-21 斜め計測結果  
 横軸の角度0～45° までが神宮上空，45° ～は都市域上空を示す

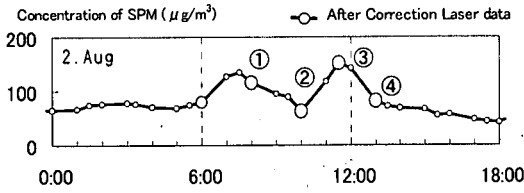


図-18 ライダー計測から得られたSPM濃度の時系列(①~④は図-13に対応)

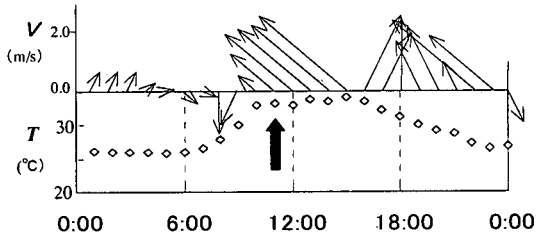


図-19 8月2日渋谷区本町における風向風速, 温度

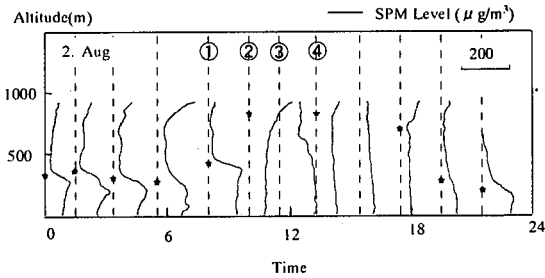


図-20 SPM濃度の鉛直分布(各計測時間を表す点線からの右側へのずれがSPM濃度を表す)と濃度勾配から検出した境界層高さ(図中星印)  
①8:00 ②10:00 ③11:30 ④13:30

付近の高濃度域は消え、観測高度範囲内ではほぼ一様に、低いSPM濃度が分布している。

以上4つの特徴的なSPM濃度分布の形成メカニズムの考察を補足するため、地上レベルにおけるSPM濃度の日変化を図-18に(番号は図-17に対応)、地上における風向風速、温度の時系列変化を図-19に示す。また図-20には、スキャニングライダーから求めたSPM濃度の鉛直分布と境界層高度(図中星印。算出方法は5(1)と同じ)の日変化を示す。用いたライダー信号は3章と同じくスキャニングライダー設置場所から500~600mの平均値である。

地上レベルのSPM濃度変化(図-18)を見ると、特徴的なダブルピークを形成している。これは8/2に限らず、観測期間中の静穏晴天日に共通してみられた傾向である。一つ目のピークが8:00頃で図中①に、二つ目のピークが11:30頃で図中③に対応している。人間

活動が始まる6:00頃からSPM濃度は上昇を開始するが、図-20の混合層高度の時間変化が示すように、6:00~8:00間の混合層高度の上昇はまだそれほど大きくなく、400m~500m程度である。そのため、地上で発生したSPM濃度が地上付近に滞留し一つ目のSPM濃度のピーク①を形成しているものと考えられる。8:00~10:00にかけて日射強度の増加とともに混合層高度が約2倍近くに急激に発達するため(図-20)に、地上付近のSPMが希釈され、次第にSPM濃度が減少して極小値を示すのは上述したとおりである(図-17のイベント②)。

次に二つ目のピークについて考える。図-19より、10:00~11:00頃にかけて、風向が北よりから南よりに変わり、気温上昇が停止していることから、11:00前後に海風フロントが通過したことがわかる(福田ら、1998<sup>(4)</sup>)。蒲生ら<sup>(5)</sup>による、沿岸域における海風フロントの到着が汚染物質濃度のピークに一致するという指摘と、図-17で示された700mという高度が観測地近傍の海風境界層の厚さとして妥当なものである(福田ら、1998<sup>(4)</sup>)ことから二つ目のピーク(図-17のイベント③)は、海風フロントによって輸送されたものと考えられる。そのメカニズムについては、Kitada et al.(1990<sup>(6)</sup>)に詳しい。

### (3)都市と神宮における境界層高さの違い

8月2日の22時18分から、仰角を25度とし、水平方向0から90度までの水平計測を行った結果、神宮の森と都市域の大気境界層高さの違いを明確に捉えることができた。図-21にその結果を示す。

SPM濃度勾配がきつくなっているSPM濃度100 µg/m³のコンター線を境界層高さとして比較すると、都市域のほうが50m程度高くなっているが分かる。神宮上空から都市上空へスキャニングするのに約20分かかっているため時間変化の影響を含んでいる可能性もあるが、夜中のこの時間帯で、急激な混合層高度の上昇があるとは考えにくい。むしろ、境界層高さの時間変化(図-20)を見ると放射冷却により低下していることがわかる。従って、夜間においても都市域で人工廃熱が存在することや、森林上空の方が放射冷却しやすいなどの理由により、場所的な顕熱の違いが生じ、それが境界層高度の違いとなって現れたものと考えられる。このような水平方向の違いは弱風で大気が安定な夜間に捉えやすく、大きな乱流混合の生じている不安定な日中には有意な差を見出すことは出来なかった。

## 6. 結論

1997年8月1日から9日にかけてスキャニングライ

ダーを用いた観測を行った結果、レーザーライダーによるSPM濃度計測のための以下の基礎的技術を得た。

①レーザー粉じん計を用いたキャリブレーションによる倍率補正と、湿度による粒子の膨潤を理論的に見積もることで湿度の影響補正をすることにより、ライダー信号から定量的にSPM濃度計測ができることがわかった。

②神宮の森から新宿上空に至るスキヤニング観測の結果より、境界層高度の上昇によるSPMの希釈効果、海風に伴うダストフロントの通過、都市・森林の境界層高度の違いなどを示した。

謝辞:本観測を行うにあたり、スキヤニングライダーの面ではINCの井出氏、類家氏、西村氏、観測場所の面では代々木青少年オリンピックセンターにお世話になりました。β線吸収法SPM濃度データと湿度データは渋谷区測定局に提供していただきました。あわせてここに感謝いたします。

#### 参考文献

- 1)松井一郎:ミエ散乱レーザーライダーによる都市域における低層大気構造の連続観測,光学,第19巻,第7号,1990.
- 2)中根英昭,笹野泰弘:大型レーザーライダーによる海風前線の構造の観測,国立環境研究所報告,第107号,155-165,1987.
- 3)環境庁:平成9年版環境白書解説,大蔵省印刷局,1997.
- 4)中島勇人,山本貴史,松坂文夫,原熙,藤井政光,甲斐健次:アイセーフレーザーによる大気環境計測,レーザー研究,一月号,1997.
- 5)神田学,森脇亮,高柳百合子,横山仁,浜田崇:明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(1)1996年夏期集中観測,天気,第44巻,1997.

- 6) Klett, J.D.: Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Apl, Opt.*, vol. 20, no. 2, pp211-220, 1981.
- 7) 水野建樹, 兼保直樹: 水分影響を考慮した浮遊粒子状物質濃度シミュレーション, *大気汚染学会誌*, 第29巻, 第6号, 340-350, 1994.
- 8) 高橋劭著: 第II期気象学のプロムナード4 雲の物理-雲粒形成から雲運動まで-, 東京堂出版.
- 9) 三崎方郎: 微粒子が気候を変える, 中公新書, 1992.
- 10) Peter Winkler: The growth of atmospheric aerosol particles as a function of the relative humidity-II. An improved concept of mixed nuclei, *J. Aerosol Science*, vol. 4, pp373-387, 1973.
- 11) Pielke, R.A., Cotton, W.R., Walko, R.L., Tremback, C.J., Lyons, W.A., Grasso, L.D., Nicholls, M.E., Moran, M.D., Wesley, D.A., Lee, T.J. and Copeland, J.H.: A Comprehensive Meteorological Modeling System-RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.* 49, 69-91, 1992.
- 12) 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 (投稿中).
- 13) Stull, R.B.: An Introduction to Boundary layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- 14) 福田忠弘, 鹿島正彦, 鈴木譲, 神田学: 海風前線マップの作成による都市河川の風道効果の検証, *水工学論文集*, 第44巻, 1998.
- 15) 蒲生稔: 海岸線位置を読みとる方法の比較, *公害* 26, 31-38, 1991.
- 16) Toshihiro Kitada and Eiichi Kitagawa: Numerical analysis of the role of sea breeze fronts on air quality in coastal and inland polluted areas, *Atmospheric Environment*, Vol. 24A, 1545-1559, 1990.

(1998.4.16 受付)

## ESTIMATION OF SPM BY USING SCANNING RIDAR AND IT'S APPLICATION TO URBAN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

Manabu KANDA, Hiroaki ISHII and Makoto RUIKE

A new technique for quantifying SPM concentration by using a scanning lidar was developed and applied to the observation of SPM above the Meiji-shrine forest and the Sinjuku-city in summer 1997. The following results were obtained; 1) coupling of calibration by using outputs of ground based SPM sampler and theoretical correction for so called Raoult's effect of aerosol particles made it possible to estimate SPM concentration from rider signals, 2) temporal and spatial distribution of SPM concentration were observed by the rider, and they were used to discuss corresponding meso-scale climate meteorological fields such as diurnal change of atmospheric boundary and sea breeze penetration.