

# レーザーシートを用いた室内作業環境における木材粉塵の

## 空間分布計測手法の提案

三浦 和希, 阿保 真

東京都立大学大学院システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

### A Proposal for Measuring the Spatial Distribution of Wood Dust in Indoor Workplaces Using Laser Sheets

Kazuki MIURA and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

**Abstract:** Wood dust has adverse effects on the human body, such as respiratory problems, cancer, and allergic diseases, and is also a cause of workplace fires and explosions. However, in Japan, there are no legal regulations regarding the concentration of wood dust in the work environment, so the management of wood dust is currently left to voluntary control. It is necessary to monitor the distribution of wood dust in the workplace to improve the working environment, such as the placement of processing machines and exhaust systems. Although there have been reports of indoor aerosol measurements using lasers, there have been no cases focusing on the unique behavior of wood dust. In this study, we propose a method to visualize and quantify the spatial distribution of wood dust in the workplace using a laser sheet and camera.

**Key Words:** laser sheet, dust, camera, particulate measurement

#### 1. はじめに

木材加工場等で多量に発生する木材粉塵には、呼吸器障害、がん、アレルギー性疾患等の人体への影響<sup>1,2)</sup>に加え、火災や爆発等の事故の要因となるリスクがある。しかし、日本においては、作業場での木材粉塵の作業環境濃度や人体への暴露濃度に法令上の規制はなく、木材を取り扱う職場における木材粉塵の取り扱い、事業場の自主的な管理に任されているのが現状である。室内環境のエアロゾル計測については、ライダーを掃引して計測する手法<sup>3)</sup>や、可視光レーザーとカメラを使ったイメージングライダーを用いる手法<sup>4)</sup>などが提案されている。しかし、比較的大きな粒子が疎になって飛散するという木材粉塵特有の挙動を、従来の手法で測定することは困難である。この課題は、広範囲を一括で測定できるレーザーシートとカメラを用いることで解消できると考えられる。

本研究では、木材加工場における木材粉塵の飛散実態を正確に把握し、機材や排気装置の配置等作業環境の改善につなげるために、レーザーシートを用いた作業環境内における木材粉塵の空間分布を可視化する手法を提案し、画像に写った粉塵の輝度積分値から粒径分布および質量濃度を求める手法の検討を行う。

#### 2. レーザーシートを用いた木材粉塵の空間分布測定原理

##### 2.1 実環境における空間分布の測定方法

本研究では、作業場に設置したレーザーシートによる木材粉塵の散乱光を高感度カメラで撮影することにより、その空間分布を測定する方法を提案する。木工室において木材加工を行う状況下で、木材粉塵を測定するイメージ図を Fig.1 に示す。レーザーシートは机上の木工機械から上方に舞う木材粉塵をターゲットに、床に対して水平に照射する。その散乱光を上部に設置したカメラで撮影し、画像に写った木材粉塵の散乱光から各木材粉塵の粒径分布を求める。さらに、木材粉塵の粒径分布を用いて、木材粉塵の空間分布を可視化・定量化する。レーザーシートによる微粒子の可視化システムはすでに製品化されているが、本研究では実環境で粉塵濃度の定量

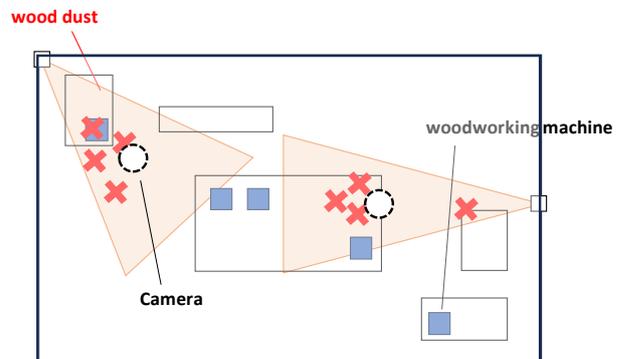


Fig.1 Schematics of wood dust distribution measurement in a woodworking shop using laser sheets.

化を目指すところに特徴がある。

## 2. 2 撮影画像から木材粉塵の粒径を求める原理

レーザシート内で散乱された光をカメラで捉える位置関係を Fig.2 に示す。木材粉塵は比較的大きい粒子であるため、そのレーザ散乱光は背景散乱光に対して独立した輝点として計測される。レーザシート内の木材粉塵 1 個で散乱された光のカメラセンサ上での受信光強度  $P_p(r)$  は、カメラと粒子の距離を  $r$  とし、近距離であるため大気減衰を無視すると式(1)で与えられる。

$$P_p(r) = IA\eta \frac{\sigma_p}{r^2} \quad (1)$$

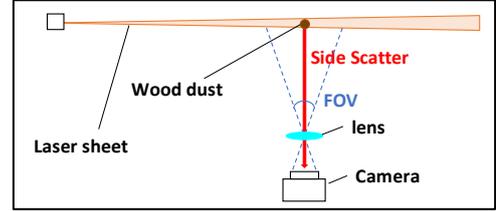


Fig.2 Positioning of laser sheet and camera.

ここで、 $I$ は散乱点におけるレーザシートの放射照度、 $A$ は受光光学系の受光面積、 $\eta$ は受信系の効率、 $\sigma_p$ は木材粉塵の散乱断面積である。波長に対して木材粉塵が十分大きく、等方散乱を仮定すると、粉塵の散乱断面積は幾何学的断面積に近似できる。さらに粒子を球形と仮定すると散乱断面積  $\sigma_p$  と粒径  $d$  には次式の関係がある。

$$\sigma_p \approx \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2)$$

画像に写った木材粉塵の散乱光は、露光時間中に木材粉塵が移動する可能性があるため、単一もしくは複数の画素で構成される。この木材粉塵 1 個を構成する全画素の輝度値を積算した値(以下、輝度積分値とする)を散乱強度の指標として用いると、輝度積分値  $L$  と各画素の輝度値  $p_i$  の関係は

$$L = \sum_{i=1}^n p_i \quad (3)$$

となる。ここで  $n$  は木材粉塵 1 個の散乱光を構成する画素数である。一方、画像上の粉塵の輝度積分値は露光時間を  $T$  とすると、

$$L = TP_p(r) \quad (4)$$

となる。カメラの視野が狭く距離  $r$  を一定とみなせる場合、装置の仕様やセッティングにより決まるパラメータ  $\alpha$  を式(5)のようにまとめると、式(6)の関係が成り立つ。

$$\alpha = TIA\eta \frac{\pi^2}{4r^2} \quad (5)$$

$$L = \alpha d^2 \quad (6)$$

したがって、 $\gamma = 1/\sqrt{\alpha}$  とおくと式(7)より、輝度積分値から粒径を推定することができる。

$$d = \gamma\sqrt{L} \quad (7)$$

係数  $\gamma$  の値を理論的に導出することは困難であるため、実験的に求める必要がある。

## 2. 3 木材粉塵の粒径分布から質量濃度の空間分布導出の原理

空間分布を表す指標として、粉塵の管理基準値に用いられている質量濃度を用いることとする。2.2 の測定により求めた粒径  $d$  から各木材粉塵の質量  $m$  を次式で求める。

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho \left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (8)$$

ここで、 $\rho$  は木材粉塵の密度である。

質量濃度  $c$  は、撮影画像を領域に分割し、各領域に撮影された木材粉塵の質量の和  $m_{total}$  の画像 1 枚あたり

の平均値を、領域の面積 $S$ とレーザーシートの厚さ $t$ の積で表される測定体積で割ることにより、次式で求める。

$$c = \frac{m_{total}}{St} \quad (9)$$

以上の処理を行うことで、撮影範囲の木材粉塵の質量濃度空間分布を求めることができる。

### 3. 粒径と粒子散乱光の輝度積分値との相関を調べる実験

#### 3.1 装置の配置と実験条件

木材粉塵の輝度積分値から粒径を求めることが可能であることを検証するために、輝度積分値と粒径の相関を調べる実験を行った。実験の配置図を Fig.3 に、装置の主な仕様を Table.1 に示す。実験装置は、木材粉塵による散乱の信号成分と背景光雑音成分の比が最大となる 940nm の近赤外波長レーザーと、近赤外波長に感度が高い CMOS カメラを用いて設計した。本実験では、縦方向は扇形に、奥行き方向は拡がり非常に小さいレーザーシートを横向きに照射した。なお、カメラ視野の位置におけるレーザーシートの厚みは 2.4mm である。また、CMOS カメラはレーザーシートから 2m 離れた位置に設置した。計測ではふるいで粒径 45~600 $\mu$ m の範囲を 9 段階に分粒した木材粉塵のサンプルを上から散布し、それぞれ露光時間 100ms、撮影時間 10s で連続撮影した。

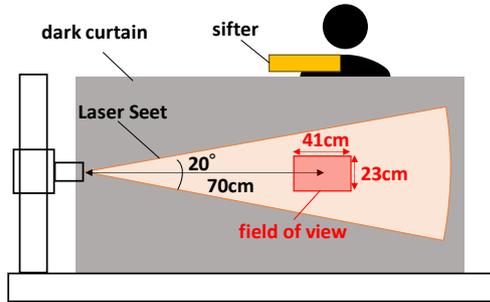


Fig.3 Arrangement of the experiment to determine the correlation between the total luminance of the particle scatter and the particle size.

Table.1 Specification of the experimental setup

Laser Diode (M9-940-0200)	Wavelength (nm)	940
	Output power (mW)	200
Collimating Lens (AL2520M-B)	Focal length (mm)	20
Diffusion Lens (LK1336RM-A)	Focal length (mm)	-50
CMOS Camera/Lens (ASI462MC)	Resolution (pixel)	1936×1096
	Focal length (mm)	8
	F-number	1.2
Bandpass Filter (#65-185)	Center wavelength (nm)	940
	FWHM (nm)	10

#### 3.2 画像処理と結果

撮影した画像に対して、前処理としてノイズ除去とレーザーシートの広がりによる放射照度補正を行った。なお、ノイズの閾値は背景画像の輝度値から決定した。前処理後に二値化した画像の例を Fig.4 に示す。上から木材粉塵を散布したことで、各粒子の散乱光は落下速度に応じた縦の筋状に写っている。

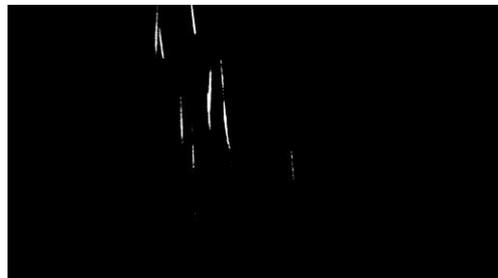


Fig.4 An example of a binarized image of wood dust scattering.

分粒したサンプル毎に撮影した複数の画像から、セグメント処理により木材粉塵散乱光領域を検出し、各領域の輝度積分値とアスペクト比を求めた。大きい粉塵ほど落下速度が速いため、アスペクト比も大きくなる。そこで、アスペクト比のヒストグラムを参照し、サンプル毎にアスペクト比の下限閾値を設定することで、サンプル粒径範囲外の極端に小さい木材粉塵を除去した。なお、この処理は前処理で除去し切れなかったノイズの除去も兼ねている。

各分粒したサンプルの中心粒径と、比較パラメータ（輝度積分値の二乗根 $\sqrt{L}$ ）の中央値の関係を Fig.5 に示す。なお、図中の横線は各サンプルの粒径範囲を、縦線はパラメータの 40 パーセント値と 60 パーセント値の幅を示している。

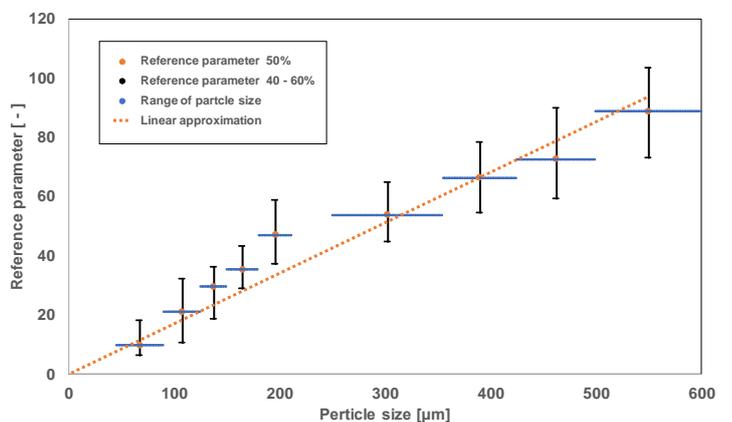


Fig.5 Correlation between the particle size and the reference parameter.

Fig.5 より、粒径と比較用パラメータの間に式(7)のような正の相関があることが確認できる。これにより輝度積分値による木材粉塵の粒径測定が可能である事が確認出来た。

#### 4. 木工機械から発生する木材粉塵の計測実験

##### 4. 1 装置の配置と実験条件

実際に使用される木工機械から発生する木材粉塵を本提案法で計測する実験を行った。実験装置の配置は Fig.3 と、装置の仕様は Table.1 と同じである。計測では、トリマ(マキタ M373)に 6mm のストレートビットを取付け、パイン材の板を研削することで木材粉塵を発生させ、その様子を露光時間 100ms, 撮影時間 10s で連続撮影した。なお、パイン材と研削に用いたトリマは、カメラの画角に被らないように Fig.3 のレーザー照射位置から 150cm 以上離し、レーザーシートの照射方向に対して垂直になる位置に配置した。

##### 4. 2 実験結果

###### 4. 2. 1 粒径分布の導出

撮影画像に対して、3.2 と同様の画像処理を行い、撮影画像に写った木材粉塵を検出して輝度積分値を算出した。木材粉塵を検出して輝度積分値を求めた例を Fig.6 に示す。Fig.6 では検出した木材粉塵を赤い円で囲むとともに、輝度積分値の値を併記している。次に式(7)と 3.2 で求めた係数  $\gamma = 5.87$  を用いて輝度積分値を粒径に変換した。検出した木材粉塵を粒径別に色分けした円でプロットした図を Fig.7 に示す。

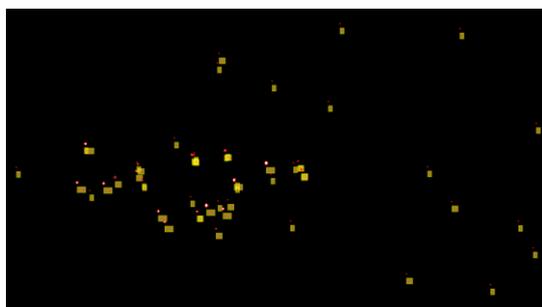


Fig.6 Example of spatial distribution of total luminance of wood dust from a woodworking machine.

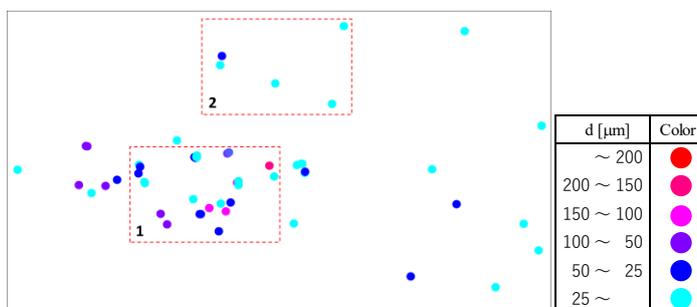


Fig.7 Example of spatial distribution of particle size of wood dust from a woodworking machine.

###### 4. 2. 2 質量濃度の導出

Fig.7 の粒径分布からカメラ視野全体(縦 41cm×横 23cm)における木材粉塵の質量濃度を求めた。式(8)を用いて撮影領域内に存在する全木材粉塵の粒径から質量を求め、式(9)よりの質量の和を、画角の面積とレーザーシートの厚みの積で表される体積で割った値は  $43\mu\text{g}/\text{m}^3$  となった。なお、各木材粉塵の質量を求める際に使用した木材の密度は、測定時に使用したパイン材の密度  $0.60\text{ g}/\text{cm}^3$  を用いた。

また、Fig.7 中に赤枠で示した領域 1 と領域 2 における質量濃度は、それぞれ、 $404\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.7\mu\text{g}/\text{m}^3$  となった。以上の結果より、今回提案する手法により検出した木材粉塵の質量濃度の空間分布を定量的に比較できることが確認出来た。

#### 5. まとめ

本研究では、レーザーシートを用いた作業環境内における木材粉塵の空間分布を可視化する手法の提案と、木材粉塵の輝度積分値から粒径および質量濃度を求める手法の検討を行った。2 つの実験では、木材粉塵の輝度積分値と粒径の相関関係を利用して、空間分布を可視化できる可能性が示された。今後の課題として、実際の木工作业環境に近い場所での広い領域測定や、キャリブレーション方法について検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 堀江 正知 他：第 89 回日本産業衛生学会 P2-108 (2016).
- 2) 高橋 清 他：日本胸部疾患学会雑誌 **24** (1986) 447.
- 3) 左成 信之 他：レーザーセンシング学会誌 **3** (2022) 71.
- 4) Y. Qiu et al. : Environ. Sci. Technol. Lett. **6** (2019) 612.