

特異空間における視覚装置の研究開発 (第1報)

火災現場における煙環境の光学的特性

Research and Development of Imaging System in Fire Environment (Series 1)

Optical Characteristics of Smoke-Filled Environment

加藤 俊之*

井越 昌紀**

概 要

煙環境において有効な視覚情報を提供するための方法として、レーザー光を利用した視覚装置の研究開発を行っている。そこで、視覚装置の開発に必要な基礎資料を得ることを目的として、光に及ぼす煙環境の影響を実験をとおして明らかにし、理論との照合から煙環境を特徴付けるパラメータの推定も行った。

実験では、試料をくん焼状態とした煙中で可視から近赤外域(0.7 μ mから2.5 μ m)の光の波長における透過率の変化を測定した。その結果、煙環境中で利用する視覚装置の光源としては、波長を長くすることが有効である。

Smoke is one of the major obstacles for fire fighting.

As a means of obtaining the visual information from the smoke-filled environment, a laser imaging system was proposed.

To initiate the development, it was necessary to clarify the influence of the smoke on light. Tests were made to survey the change of the penetration of light in the smouldering condition. The results indicated that the infrared laser showed good penetration and was suited to the light source of the imaging system in the smoke-filled environment.

1 はじめに

火災現場では、煙によって視覚が遮られ、周囲の環境を認識することが困難となる。このため消防活動は大きな制約を受け、作業効率が低下する。この煙による視覚障害の原因は、肉眼が感知する可視光が煙粒子によって散乱、吸収を受けて減衰するためである。そこで、煙によって減衰されにくい光、すなわち煙中での透過率が高い光を利用した視覚装置の開発が必要となる。

本報では、光に及ぼす煙環境の影響を明らかにするために可視から近赤外域での波長における、煙中での透過率を測定し、定量的に把握した結果について報告する。また、実験結果と理論との照合から煙環境を特徴付けるいくつかのパラメータを推定し、測定領域外での特性についても言及する。

そして、これらの結果を、視覚装置の可能性の検証と具備すべき要件における基礎資料とする。

2 煙の生成

火災で発生する煙はその多くの場合、高分子化合物が燃焼した場合に生成される液体粒子、固体粒子、生成ガスからなる。その生成過程を図1に示す。

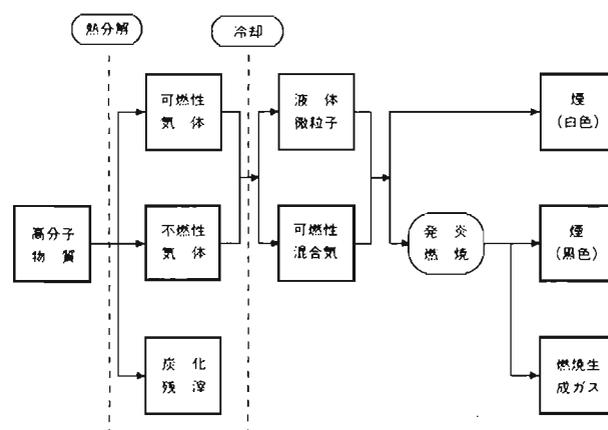


図1 煙の生成過程

木材、プラスチック、油脂などの高分子化合物は、加熱されることによって熱分解し、燃焼物体内部から外部に放出され、可燃性気体、不燃性気体、炭化残滓といった成分に分かれる。これら外部に放出された各成分は霧

*第三研究室 **東京都立大学

囲気温度で冷却され、液体粒子や可燃性混合気となる。このうち可燃性混合気は燃焼条件が満たされた場合、炎を有した燃焼状態（有炎燃焼）となり、スス等の固体粒子、CO₂、CO等の燃焼ガスを生成する。また、燃焼条件が満たされない場合（くん焼）は、主として液体粒子を生成する。このように煙として知覚されるものは、液体粒子（一般に白色）、固体粒子（一般に黒色）であり、その他に各種生成ガスが存在する。

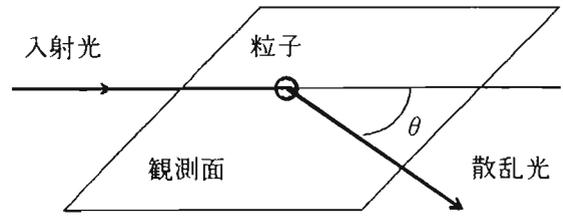


図 2

3 光の散乱と減衰

煙の本質は粒子であることから、光に対する煙の影響は、粒子によって生じるものと見なすことができる。そこで、粒子と光について理論的に検討し、煙環境に適応させたものを紹介する。

粒子で満たされた空間を透過する光は散乱、吸収されて減衰し、透過率が低下する。この現象は一つの粒子を扱ったミーの散乱理論¹⁾と、その粒子が空間を満たしている状態を扱ったランバートの法則から説明することができる。そこでまずはじめに、ミーの理論から粒子による減衰について導き、つぎにランバートの法則から空間的に拡張する。

(1) 粒子による減衰

粒子による減衰は、ミーによってマックスウェルの電磁方程式から以下のように導き出されている。

粒子は半径 a の球形粒子とし、媒質および粒子の光の屈折率をそれぞれ μ_1, μ_2 、媒質および真空中の光の波長をそれぞれ λ, λ_0 として、光散乱に関する基本的因子をつぎのように定義する。

$$\lambda = \lambda_0 / \mu_1$$

$$m = \mu_2 / \mu_1$$

$$\alpha = 2 \pi a / \lambda \quad (\text{粒径パラメータ})$$

$$\beta = m \alpha$$

ミーの理論はこれらをパラメータとし、一個の粒子に単位強度の偏向されていない自然光の入射があった場合粒子からの距離 R （ただし、 $R \gg a$ ）、散乱角 θ における散乱光強度 I_θ は次式で表される。ただし、 θ は図 2 で示すように、入射光の進行方向から測定した角度、 i_1, i_2 はそれぞれの振動方向が観測面に垂直または平行な、直線成分を表す。

$$I_\theta = \frac{\lambda^2}{8 \pi^2 R^2} (i_1 + i_2)$$

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \pi_n + b_n \tau_n\} \right|^2$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{b_n \pi_n + a_n \tau_n\} \right|^2$$

ただし、

$$a_n = \frac{S_n'(\beta) S_n(\alpha) - m S_n'(\alpha) S_n(\beta)}{S_n'(\beta) \phi_n(\alpha) - m \phi_n'(\alpha) S_n(\beta)}$$

$$b_n = \frac{m S_n'(\beta) S_n(\alpha) - S_n'(\alpha) S_n(\beta)}{m S_n'(\beta) \phi_n(\alpha) - \phi_n'(\alpha) S_n(\beta)}$$

$$S_n(\alpha) = \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2}} J_{n+1/2}(\alpha)$$

$$C_n(\alpha) = (-1)^n \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2}} J_{-(n+1/2)}(\alpha)$$

$$\phi_n(\alpha) = S_n(\alpha) + i C_n(\alpha)$$

$$\pi_n = \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)$$

$$\tau_n = \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)$$

以上は、ある方向に対する散乱光の強度であることから、これを全立体角について積分することで、粒子による散乱量の度合を示す減光作用係数 (Q_{ext}) を導くことができる。

$$Q_{ext} = \frac{\lambda^2}{2 \pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ \text{Re}(a_n + b_n) \}$$

Q_{ext} の傾向を調べるために実際に計算した結果を図 3 に示す。これは、屈折率を 1.20 ~ 1.80 とした場合である。図からわかるように減光作用係数は、光の波長と粒径の関係から 3 つの領域に分けられる。すなわち波長に対して粒径が

- (1) 小さい領域 (α に比例する)

$$Q_{ext} \propto \alpha$$

- (2) 大きい領域 (一定値をとる)

$$Q_{ext} \doteq \text{const}$$

(3) 中間領域

過渡領域

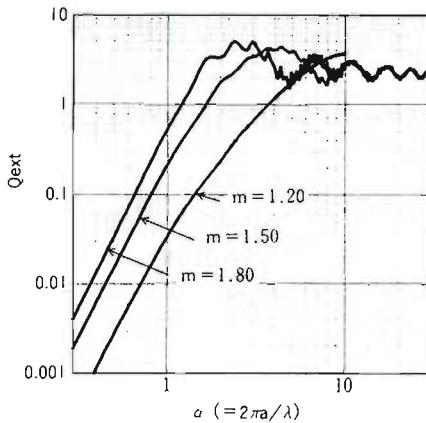


図3 粒径パラメータと減光作用係数の関係

と分けることができる。このことから、 α を小さくすることによって減光作用係数もまた小さくなることが分かる。言い換えれば、粒径に対して波長が十分に長ければ、その波長の光の透過率は向上するというのである。また、過渡領域では、減光作用係数が逆転する部分もあり、透過率に関して言えば部分的に短波長側で透過率が向上する現象が見られることを意味する。

(2) 粒子で満たされた空間での光の減衰

粒子で満たされた空間を通過する平行光線の減衰は、粒子濃度と透過距離との積の指数関数となるというランバートの法則に従う。これは、次式で表される。

$$\frac{I}{I_0} = e^{-C_s l}$$

ただし、 I_0 、 I はそれぞれ入射光、透過光強度、 l は光路長、 C_s は減光係数を表す。

粒子1個当たりの光の減光断面積 (C_{ext}) は前述した減光作用係数 (Q_{ext}) から粒子断面積との積

$$C_{ext} = \pi a^2 Q_{ext}$$

で表され、粒子が満たされた空間の減光係数 (C_s) は減光断面積 (C_{ext}) と個数濃度 (Z) との積から、

$$C_s = C_{ext} Z$$

となる。

以上のことから、粒子による光の減衰は、波長、粒径、屈折率、個数濃度といったパラメータによって特徴付けることができる。これらの結果は、後の考察において実験値との照合を含めて言及する。

4 生成ガスによる吸収

さらに、煙環境において光の透過性を左右する要因として、生成ガスによる吸収が考えられる。火災煙とくに高分子化合物が燃焼した場合に生成するガスとして一般的なガスは、二酸化炭素、一酸化炭素、メタン、エチレン、アセチレンなどのガスが生成されると言われている。これらのガスには、光の選択的な吸収帯が存在する。

5 実験の概要

以上述べてきた煙環境の透過性に影響する因子をまとめたものを図4に示す。

煙環境の光の透過性は、煙粒子の屈折率、形状(粒径)、個数濃度、光の波長、透過距離、生成ガスによる吸収といった理論的因子によって左右される。しかしながら、これらを左右するものは燃焼試料の種類や量、燃焼条件と言った実際の因子である。このことから、実験では実際の因子を変化させた結果から、間接的に理論的因子である屈折率、形状(粒径)、個数濃度の変化に置き換えて考察した。また、実験で用いた透過率(Transmission)と減光係数(Extinction coefficient)は以下のようにして求めた。

$$\text{Transmission} = \frac{I}{I_0}$$

$$\text{Extinction coefficient} = \frac{1}{\ell} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

I_0 : 入射光強度

I : 透過光強度

ℓ : 光路長

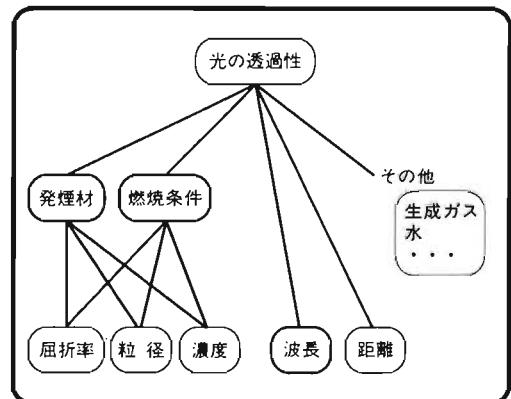


図4 煙環境の透過性に関する因子

6 実験方法及び条件

7 実験結果

実験装置の構成を図5に示す。煙環境の生成は、密閉したスモークチャンバー（光路長500mm×400mm×400mm）内に設置したヒーターによって試料を加熱する方法をとった。スモークチャンバーの両端には、ビニリデンフィルムを窓材とした光の出入射口を設けることで、光の光路を確保した。煙の影響を受ける窓材は透過率が高く、交換が用意なものとしてこの素材を用いた。

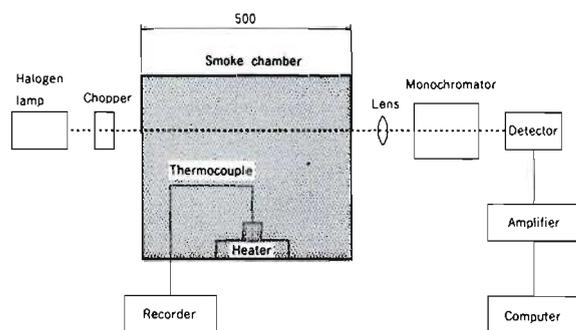


図5 実験装置の構成図

表1 実験装置及び実験条件

実験装置		実験条件	
光源	ハロゲンライト	測定波長	0.7 μ m~2.5 μ m
受光素子	Pbs受光素子	燃焼温度	300°C~400°C
分光器	回折格子型 モノクロメータ	燃焼試料	クリブ（杉の気乾材） 発砲スチロール 塩化ビニール 紙（ボール紙）
増幅器	ロックインアンプ	燃焼条件	くん焼状態
温度計	熱電対（K線）		

充滿した煙中にチャンバーの一端からハロゲン光を入射させ、他端に設置した回折格子型モノクロメータで透過光を分光する。その分光した光の強度はPbs受光素子により検出し、ロックインアンプで増幅してコンピュータに記録した。透過率は煙を発生させる前の状態で測定した光の強度と、煙を透過したものとを比較することにより求めた。

燃焼試料は、一般的な建材として杉の気乾材（クリブ）、プラスチック系材料として発砲スチロールを主として用い、300°Cから500°Cの温度範囲で加熱して炎の伴わないくん焼煙を発生させた。また、クリブの燃焼では、試料内部に熱電対を埋め込み燃焼時の温度変化についても測定した。

測定波長は可視光（0.7 μ m）から近赤外光（2.5 μ m）について行った。

(1) 煙の生成状態

図6には本実験における煙の発生状態の一例としてクリブを400°Cで加熱した時の試料内部温度と透過率の変化を示す。加熱時間の経過とともに内部温度が上昇し100°Cを越えた付近から煙の発生が見られ、温度上昇とともにその発生量が増加する。そして、内部温度が400°Cを越えた付近から煙の発生量は低下し、500°C付近では煙の発生は確認できない。また、500°C付近での内部温度の停滞は、クリブ中の有機化合物のほとんどが熱分解し、残った炭（C）の酸化反応時の温度と考えられる。

煙は有機化合物の熱分解によって生成したガスが雰囲気温度で冷却された液体粒子と、有炎燃焼時のような急激な酸化反応によって生成される固体粒子からなる。ここで、有機化合物の発火温度は400°Cから600°Cにあることを考えると、本実験で生成された煙は400°Cまでに発生していることからそのほとんどが液体粒子によって構成されていると言える。また、煙は白色であり、炎も観測されなかった。

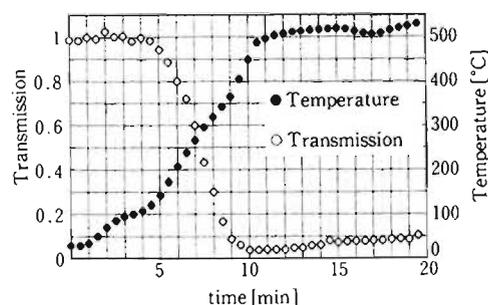


図6 煙発生時の透過率と試料内部温度

(2) 光の波長による透過率の変化

図7に波長による透過率の変化の様子を示す。試料は発砲スチロールとし、加熱温度は400°Cで行った。光の波長が長くなるに伴って透過率が向上することが分かる。また、長波長側では短波長側に較べて透過率の向上率（傾き）が大きくなる。すなわち、透過率の向上は長波長側でより顕著なものになると言える。これは、煙の粒径に比較して波長が長くなるためだと考えられる。

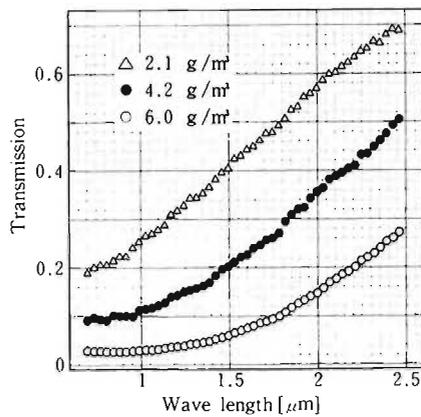


図7 光の波長による透過率の変化

(3) 試料重量による透過率の変化

図8に試料重量による透過率の変化の様子を $0.7\mu\text{m}$ で測定した結果を示す。透過率は燃焼試料の重量比に対して指数的に低下することが分かる。また、試料の違いによって透過率の変化に大きな違いが見られた。これは燃焼によって発生した煙粒子のうち酸化される量が異なるためであると考えられる。木材の燃焼はプラスチックなどに較べて燃焼速度が遅いため酸化される煙粒子の量が多くなり、煙粒子も減少する。これに対し燃焼速度の速いプラスチックは、煙粒子が酸化する量が少なく煙粒子の量が多くなる。この結果が透過率の違いに表れたものと考えられる。

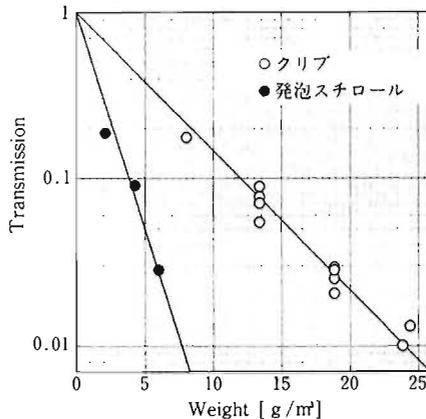


図8 試料重量による透過率の変化

(4) 試料の違いによる透過率の変化

図9に光の波長と透過率の変化の様子について試料による違いを示す。試料の違いは、煙を構成する液体粒子の屈折率、粒径、個数濃度に現れる。このため一概には言えないが、クリブの燃焼による煙粒子は、発砲スチロールに較べて屈折率が小さく、粒径も小さいために透過率の変化割合が大きくなったと考えられる。

(5) 燃焼条件による透過率の変化

図10に透過率の変化の様子を加熱条件を変化させた場合について示す。高温で加熱した場合のほうが透過率が高くなること分かる。熱分解されたガスが雰囲気

気温度で冷却されるときに液体粒子を生成し、これが、高温であることによって粒子径が小さくなり透過率が向上したものと考えられる。

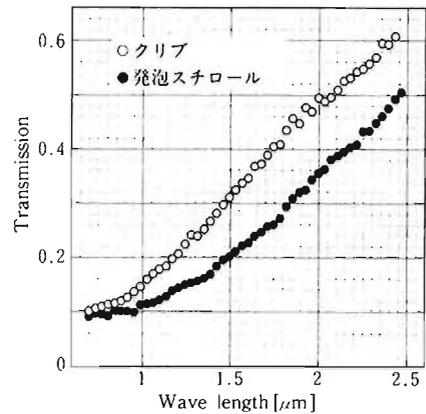


図9 試料の違いによる透過率の変化

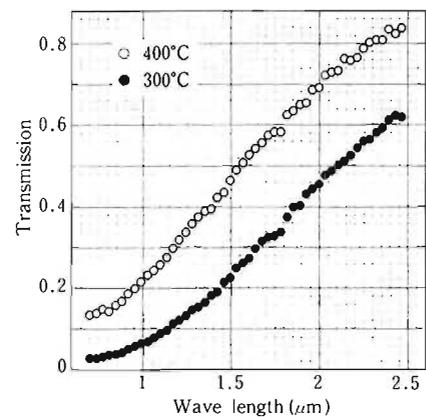


図10 燃焼条件による透過率の変化

(6) 煙発生後の経過時間による変化

図11に波長による透過率の変化の様子を経過時間での影響を示す。時間経過によって透過率が全体的に上昇する傾向と、最低値を示すピーク値が長波長側に移動していることが分かる。全体的な上昇については、煙の供給がないために時間経過によって煙が消散することによるものであるが、ピーク値の変化は煙粒子が

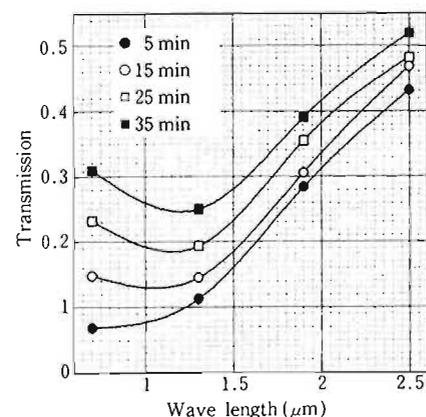


図11 経過時間による透過率の変化

凝縮することによって粒径が大きくなるためだと考えられる。

8 理論式パラメータの推定

図12、図13、図14に実験値から求めたパラメータをもとに理論式を解き、今回の測定範囲外の波長で減光係数を計算した結果を示す。それぞれ、屈折率、粒径、個数濃度の変化の影響を表している。煙中での減光係数は、波長が長くなるにつれて減少する傾向が推定できる。また、屈折率の違い、粒径の増大、個数濃度の増加により減光係数が変化の様子が把握できる。

以上のことをまとめると煙と光の関係は、ミーの理論とランバートの法則から定性的に説明することができ、実験によって必要なパラメータを推定することで測定範囲外の傾向を推定することが可能であると言える。このことから導き出される煙粒子の屈折率、粒径、個数濃度、光路長と光の波長の関係の概略は以下ようになる。

- (1) 粒径に対して波長が長くなることにより散乱量が減少し透過率が向上する。
- (2) 屈折率によって透過率の変化割合が異なる。
- (3) 個数濃度、光路長増加に対して透過率は指数的に低下する。

この結果をもとに実験範囲外での煙環境についても透過性を推測できることから、視覚装置の性能についての検討が行えることになる。

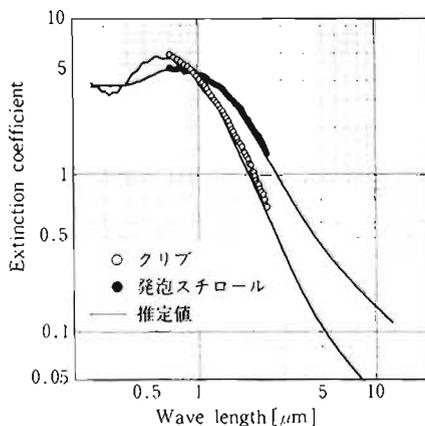


図12 屈折率と減光係数の関係

9 まとめ

煙の透過率に関する実験から以下の結論が得られた。

- (1) 煙中の透過率の変化を理論式により定性的に説明できることが確認できた。

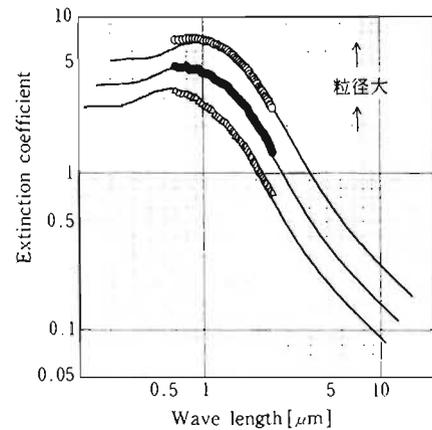


図13 粒径と減光係数の関係

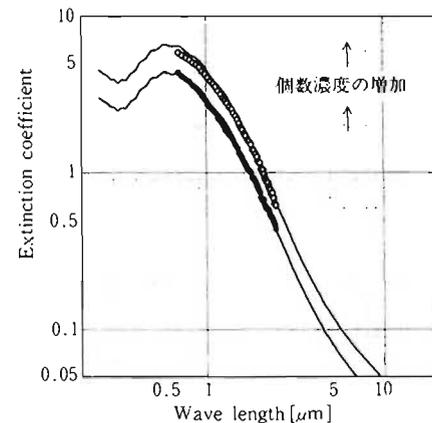


図14 個数濃度と減光係数の関係

- (2) 近赤外域の透過率の実験で理論式のパラメータが得られたことにより、測定範囲外での透過率の推定値を求めることができた。
- (3) 煙中で利用する光は透過率を考えた場合、波長が長いほど有効であることが分かった。

10 今後の方針

現在、視覚装置の光源として煙環境において有効とされた波長の光を発振するレーザー光を利用して物体面の反射特性の実験を予定している。これは、視覚装置の画像を得るためには、物体面での反射強度、分布が重要な要因であり、「見え方」を検討するデータとして必要となるためである。

参考文献

- 1 高橋：基礎エアロゾル工学、養賢堂、(1978)
- 2 神：日本火災学会論文集、Vol22, No1,2 (1974)