

## 特異空間における視覚装置の研究開発 (第2報)

## 煙環境下での赤外線反射画像の生成

Research and Development of Imaging System in Fire Environment (Series 2)

Reproduction of infrared reflection image in Smoke-filled Environment

加藤 俊之\*

井越 昌紀\*\*

## 概 要

煙環境において消防活動を行うためには、煙の中で対象物が良く見えなければならぬが、肉眼による視界は煙粒子による散乱、吸収によって著しく低下する。消防活動で使用される一般的な可視領域の光に比較して、赤外線は煙粒子による散乱や吸収を受けにくい性質を持つ。そこで、煙環境において有効な視覚情報を獲得するために赤外線を利用した視覚装置の開発を行っている。

試作したアクティブ型赤外線視覚装置は、CO<sub>2</sub>レーザー (10.6 $\mu$ m) とHe-Neレーザー (3.39 $\mu$ m) を利用しており、2種類の波長による反射画像を生成することができる。研究室の実験の結果、この視覚装置は、煙環境において良好な視界を得ることが確認できた。さらに、視覚装置で生成した2種類の波長による反射画像を比較することによって視認対象物の材質を識別することが可能となった。

To perform fire fighting activity in the smoke-filled environment, it is important that objects should be seen as clearly as possible. A visibility of naked eyes decreases extremely because of light scattering and absorption of smoke particles. Comparing with visible lights which exit at fire scenes, infrared light is not reduced by the smoke particles. For this reason, the infrared light is used for the development of our imaging system in order to obtain effective visual information from the smoke-filled environments.

The active infrared imaging system employs CO<sub>2</sub> laser (10.6 $\mu$ m) and He-Ne laser (3.39 $\mu$ m), therefore, it reproduces two kinds of reflection images. In the indoor test, this system showed high visibility in smoke-filled environment. Moreover, by comparing reflection ratio of objects in the obtained images, the system could determine materials of the objects.

## 1 はじめに

火災環境において煙による視程の低下が、避難行動や消防活動を著しく妨げることは、周知の事実である。これは、肉眼が感知することのできる可視光領域の光が、煙粒子による散乱、吸収の影響を受け、物体からの光が減衰するためである。このような環境の中で有効な視覚情報を獲得するためには、煙の影響を除去する方法を確立しなければならない。この方法として2種類のアプローチが考えられる。一つは、散乱の影響を除去し、物体からの反射光を高感度で捉える方法であり、もう一方は、散乱、吸収の影響を受けにくい光を利用する方法である。前者の方法は、視認の対象となる物体からの光が

観察者に届く時にだけ光を受け取り、煙粒子の散乱による光を減少させる方法である。また、後者は煙の影響を受けにくい光(赤外光)を利用することで、光の減衰、散乱量を減少させることによって物体からの光を捉える方法である。

過去に行われた研究では、煙環境と画像との関係が明確にされておらず、限界性能を検討することができない。また、単一波長の光源では、対象物の材質などの属性を知ることが困難である。

第3研究室では、環境を認識するための視覚を獲得することを目的に、赤外線を利用して視程を伸ばす方法を利用した、アクティブ型の視覚装置について研究を進めている。この方法により、通常使用されている熱画像カメラでは、捉えることのできない環境と同等の温度をもつ物体についても映像化できる。また、2波長の赤外線

\*第三研究室 \*\*東京都立大学

を利用することにより反射光強度を比較し、対象物の材質などを識別する方法についても検討している。

前報では、煙環境での光の透過性を実験的に明らかにし、理論式から実験範囲外についての予測を行った。その結果、赤外線レーザー光の有効性が確認された。

本報では、煙環境での視程に関する理論的な検討を行い、物体の見え方を左右する反射特性について実験的に明らかにした結果を報告する。また、これまでの実験の結果をもとに試作した視覚装置による実験結果についても報告する。

## 2 煙環境中の視程

### (1) 煙の影響のモデル化

煙の中で視認性が低下する原因は、煙粒子が物体に照射される光を減衰させることと、散乱された光が背景となる領域の見かけの明るさを増すことによるコントラストの低下である。この現象を図1に示す。照射光は煙の層を通過することによって、減衰係数 $C_e$ に応じて減衰するとともに、散乱係数 $C_s$ 、 $C_e$ に応じた散乱光を生ずる。それぞれの係数は、煙の生成条件によって変化することが知られている。<sup>文献3,4</sup>そこで、実験を通してこれらの値を求めることで、実際的な煙の影響モデルを構築し、視認性に関する検討を行った。

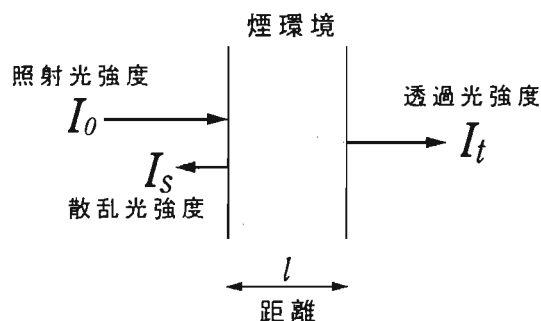


図1 煙環境の光学的影響モデル

ここで、 $I_0$ は照射光強度、 $I_t$ は透過光強度、 $I_s$ は散乱光強度を示し、それぞれは、以下で表現される。

$$I_t = I_0 e^{-C_e l}$$

$$I_s = A I_0 \frac{C_s}{C_e} (1 - e^{-C_e l})$$

$C_e$ : 減光係数     $A$ : 定数

$C_s$ : 散乱係数

### (2) 各係数の算出法

前報で報告した煙の透過性の<sup>文献5</sup>実験結果から、煙粒子の減衰、散乱現象に関してもmieの理論による理論式が利用できることが確かめられた。そこで各係数を算出する方法として、理論式に仮想パラメータを代入することで求められる仮想減光係数曲線と実験で得られた減光係数曲線とのマッチングを行い、2乗誤差が最小となるパラメータの組を求めることとした。その結果を図2に示す。

パラメータには、煙粒子の屈折率、粒径、個数濃度、光の波長があり、それぞれのパラメータの減光係数曲線に及ぼす影響は、屈折率が曲率を左右し、粒径、(球状粒子と仮定した)、波長、個数濃度が曲線の位置を決定する。粒径、波長、個数濃度による影響割合は、屈折率決定後に、それぞれについて分離することができ実質的な値を求めることが可能になる。この実験値に適合する減光係数曲線から、測定範囲外での減光係数が推測でき、また、求められたパラメータから、散乱係数についても算出することができる。

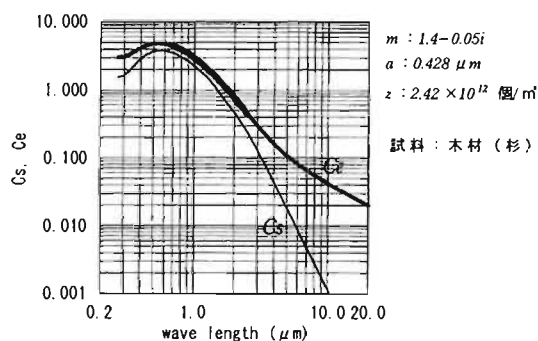


図2 パラメータの推定結果 (例)

### (3) 視程に及ぼす影響

煙による視程に及ぼす影響を $C_e$ 、 $C_s$ で示し、これらを煙の生成条件、燃焼材と結びつけてモデル式を作成することで、様々な煙環境を必要に応じて再現することができる。

$$C_e = C_s + C_a$$

$$C_s = f(g(m, \alpha), a, z)$$

$$C_a = f(h(m, \alpha), a, z)$$

$$\alpha = 2\pi a / \lambda$$

$C_e$ : 減光係数

$C_s$ : 散乱係数

$C_a$ : 吸収係数

$m$ : 屈折率     $z$ : 個数濃度(個/m<sup>3</sup>)

$a$ : 粒径(μm)     $\lambda$ : 波長(μm)

図3は前述した透過光強度、散乱光強度を相対値としてそれぞれ求めた減光比:  $R_e$ 、散乱比:  $R_s$ の一例を示したものである。この減光比、散乱比によって視程について検討することができる。図から光の波長が

長くなることで、視程の向上が十分に期待でき、特に散乱比における減少が顕著に現れていることが分かる。これは、波長が長くなるに従い、吸収係数が、減光係数に対して相対的に減少するためである。

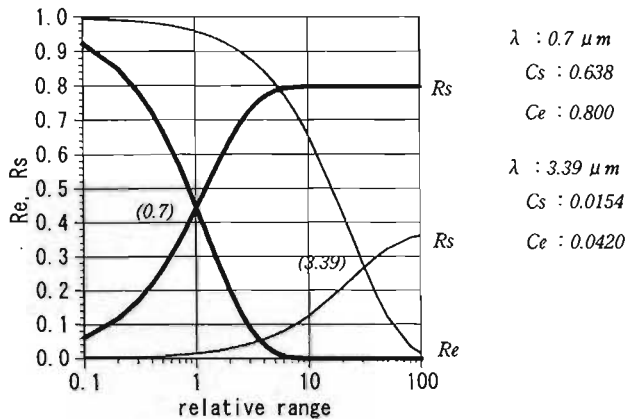


図3 減光比、散乱比と相対距離の関係

### 3 反射特性

図4は、物体面での反射特性について示したものである。図4(a)は、反射光強度の分布状況、(b)は受光強度を示している。赤外線が煙環境において透過性の面から有効であることが確認されたが、アクティブ型の赤外線利用を考える場合、反射特性についても重要な条件となる。ここで言う反射特性とは、反射率、反射分布のことである。赤外線は反射特性の面からは必ずしも有効とは言えないことが予想される。反射率については、金属面で高い反射率を示すが、非金属では波長が長くなるにつれて、全般的に低下するとされている。また、反射分布は、反射面の粗さと波長によって変化するため、波長の長い赤外線は表面の粗さによる散乱が小さく、反射分布が狭くなることになり大きな傾きを持つ面は見えにくくなる傾向がある。

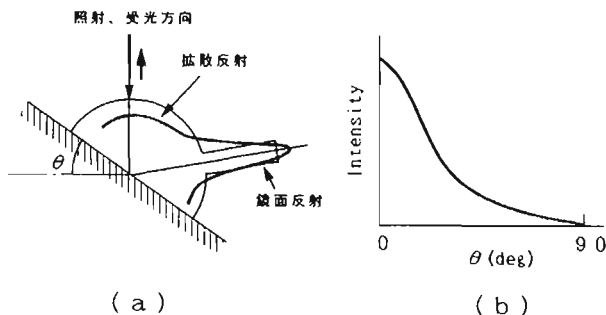


図4 物体面での反射特性

以上のことについては、一般的な記述はあるが、実際のデータとしては乏しいのが現状である。そこで、反射特性について実験的にデータを集め、一般的な環境における反射特性を整理することとした。

#### (1) 実験方法

実験装置の構成を図5に示す。

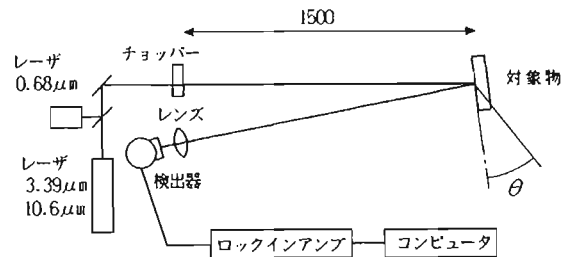


図5 実験装置の構成

反射率、反射分布の測定は、光源としてレーザー光を利用し、1.5mの距離にある各種対象物に照射し、その反射光を有効径50mmのレンズにより集光した。集光した光強度は波長に適合した受光素子により電気信号に変換し、ロックインアンプを利用して増幅してGP-IBを介してコンピュータに記録した。また、対照物は回転ステージに取り付けて回転させることにより反射分布について測定した。

レーザー光源には、0.68 $\mu\text{m}$  (半導体レーザー)、1.15、1.51、3.39 $\mu\text{m}$  (He-Neレーザー)、10.6 $\mu\text{m}$  (CO<sub>2</sub>レーザー)を利用し、検出器にはPbS、MCT受光素子を用いた。

また、対象物には通常的环境中に存在する金属、プラスチックなどについて計測した。

実験装置及び実験条件を表1に示す。

表1 実験装置及び実験条件

項目	内容
光源	半導体, He-Ne, 炭酸ガスレーザー
受光素子	PbS, MCT受光素子
増幅器	ロックインアンプ
集光レンズ	有効径 50 mm
光路長	1500 mm
波長	0.68, 1.15, 3.39, 10.6 $\mu\text{m}$
対象物	金属, プラスチック, 木材, その他
粗さ	Rmax: 0.8, 1.6, 3.2, 6.3, 12.5, 25 $\mu\text{m}$ (アルミニウム)
反射面角度	0 ~ 45 deg

(2) 実験結果

ア 赤外光の反射特性

図6、7に可視光として $0.68\mu\text{m}$ 、赤外光として $10.6\mu\text{m}$ のレーザーによる反射特性を示す。また、反射強度は、ミラーの反射強度を1としたときの相対値として示している。

可視光の反射特性は、塗装面（光沢）において強い鏡面反射成分をもつことが分かるが、他の材質ではほとんど角度による依存性がなく、拡散反射と見なして良いと言える。また、反射率についても材質間で大きな変化がないことが分かる。

これに対して、赤外光では、鏡面反射成分を持つ材質が増え、反射強度が照射される面の角度により大きく影響することが分かる。また、反射率についても、材質間で大きく変化し、反射面角度が10度の場合で、反射率の強度比は10の3乗のオーダーにまで拡大することが分かる。このような大きな差は、反射光を捉える場合、広い検出範囲が必要となることが分かる。

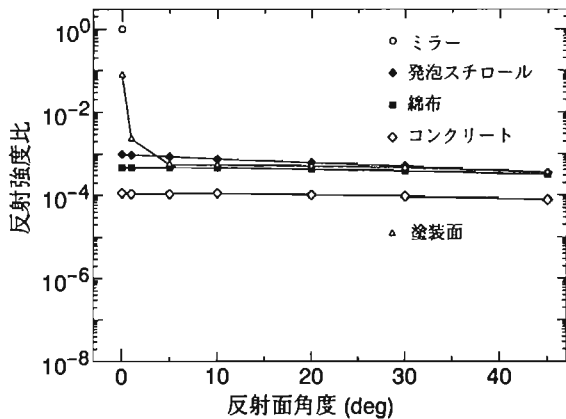


図6 0.68 $\mu\text{m}$ レーザー光の反射特性

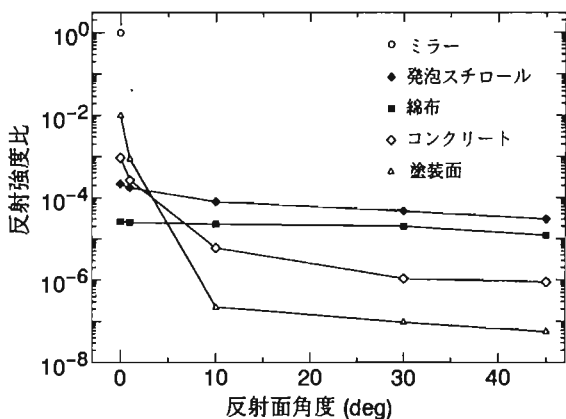


図7 10.6 $\mu\text{m}$ レーザー光の反射特性

イ 波長による反射特性の変化

図8は $3.39\mu\text{m}$ 、 $10.6\mu\text{m}$ の反射特性の違いを示したものである。縦軸は2波長の反射強度の比を示している。反射面の粗い発泡スチロール、布などは、反射率の違いを明確に確認することができる。これは反射光強度が反射面の角度に依存しないためであると考えられる。これに対して、コンクリートなどの平滑な面は、鏡面反射が優勢になることにより、反射光強度が反射面の角度に大きく依存する傾向が見られる。

このことから、反射面の粗い物体は、反射強度の比を取ることで、その材質を知ることができる。また、鏡面反射の優勢な材質では、反射の分布状況を捉えて判断しなければならないといえる。

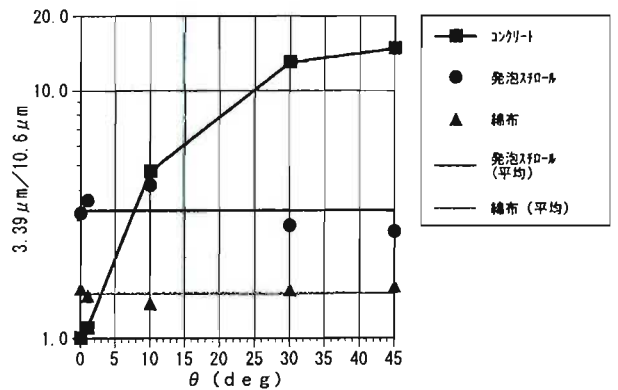


図8 反射面角度と反射率比の関係

ウ 粗さによる反射率の変化

図8に粗さによる反射率、反射分布の変化を示したものである。材質はアルミニウムとし、2波長、3種類の粗さで比較した。

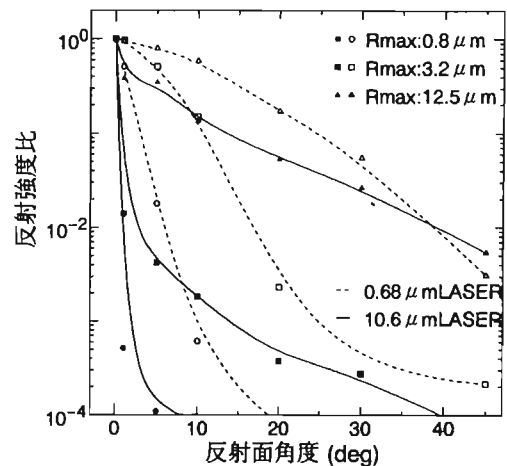


図9 反射分布と表面粗さの関係

同一の粗さでは、波長が短くなることで反射分布が広がる傾向が確認できる。また、波長が長い場合でも、粗さが大きくなることで、同様に反射分布が

広がる事が分かる。2波長間の反射分布の変化割合と反射率比を比較することで、反射面の材質を確認することが可能になると考えられる。

(3) 考察

反射赤外線によって画像を得ようとするためには、受光強度範囲をできるだけ広く取り、各種材質の拡散反射の範囲に合わせる必要があるといえる。また、光源を複数利用することによって反射面の材質に関する情報を得ることが出来ると考えられる。このためには、拡散反射が優勢な材質については、反射強度の比を取ることで、材質の違いを識別することが可能となる。また、鏡面反射が優勢な材質については、反射率比の他に、反射率の変化割合を比較することで識別情報を得ることができると考えられる。

4 視覚装置の試作

これまでの基礎的な実験結果を踏まえて、煙環境において視覚情報を捉えることのできる装置の試作を行ない、その有効性について検証実験を行った。

(1) システムの構成

視覚装置の主要部を構成する光学系、信号処理系を図10に示す。

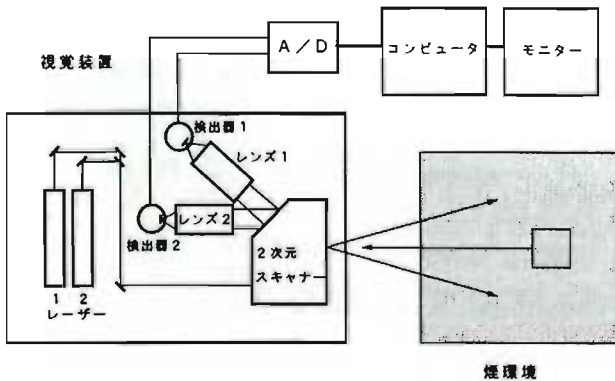


図10 視覚装置概要図

光源には、波長が $3.39\mu\text{m}$ で出力が $5\text{mW}$ のHe-Neレーザーと波長が $10.6\mu\text{m}$ で出力が $100\text{mW}$ の $\text{CO}_2$ レーザーを利用している。レーザー光はミラーにより折り返され2次元スキャナーに導かれる。2次元スキャナーは水平方向走査のための8面体ポリゴンミラーと垂直方向走査のためのガルバノミラーによって構成されている。この2次元スキャナーにより対象物に照射されたレーザー光は対象物面で反射し、同一のスキャナーによって捉えられる。この対象物からの反射光は、レーザー光の種類によって2方向に分割され、 $3.39\mu\text{m}$ の反射光はレンズで集光され、レーザー光以外の光を除去するためのバンドパスフィルタを透過した後、

InSb受光素子によって電気信号に変換される。 $10.6\mu\text{m}$ の反射光も同様の経路を経てHgCdTe受光素子により電気信号に変換される。反射光の強度に応じた電気信号はAD変換器によりデジタル信号に変換されてコンピュータに入力される。コンピュータでは、信号を処理しモニターに反射光の強度の応じた明暗画像を表示する。

試作した視覚装置の諸元を表2に示す。

表2 諸元・性能

項目	内容	
光源・検出系	光源 1	$\text{CO}_2$ レーザー
	光源 2	He-Ne レーザー
検出器	検出器 1	HeCdTe 単素子型受光器
	検出器 2	InSb 単素子型受光器
走査系	水平走査	8面体ポリゴンミラー
	垂直走査	ガルバノミラー
	有効径	50mm
画像表示	画素数	$128 \times 85$
	フレームレート	1フレーム/秒 ( $128 \times 85$ )
	視野角	垂直 $10\text{deg}$ × 水平 $15\text{deg}$
信号	信号分解能	14 bit
	入力信号レベル	$\pm 10\text{V}$

(2) 煙環境下での画像生成

煙環境はスモークマシンによる粒径 $3\sim 5\mu\text{m}$ の疑似煙を満たし、これを透して画像の生成を行った。煙濃度は、可視領域の波長である $0.68\mu\text{m}$ のレーザー光の減衰係数で示すこととした。

ア 実験条件

表3に実験条件を示す。画像はCCDカメラ、He-Neレーザー、 $\text{CO}_2$ レーザーの画像を生成してその比較を行った。

表3 実験条件

	光源出力	受光素子
CCDカメラ画像	ハロゲンライト	CCD受光素子
He-Neレーザー	5mW	InSb受光素子
$\text{CO}_2$ レーザー	100mW	HgCdTe受光素子

イ 実験結果

図11、図12にCCD画像の煙が無い状態とCe値が6の場合の画像、図13、図14に $\text{CO}_2$ レーザーによる同様の画像を示す。対象物は発泡スチロールで作成した文字を利用し、視覚装置から $1.2\text{m}$ の距離に設置した。

CCD画像では、散乱光により画面全体が白色になるのに対してCO<sub>2</sub>レーザーによる画像は散乱光の影響をほとんど受けないことが分かる。



図11 CCDカメラ(Ce:0)



図12 CCDカメラ(Ce:6)



図13 10.6 $\mu$ m(Ce:0)



図14 10.6 $\mu$ m(Ce:6)

(3) 2波長レーザー光による対象物の識別

図15、図16は、発泡スチロールで作成した文字の前方に左から綿布、木材、プラスチック製品を並べた状態を画像化したものである。図15はHe-Neレーザー光

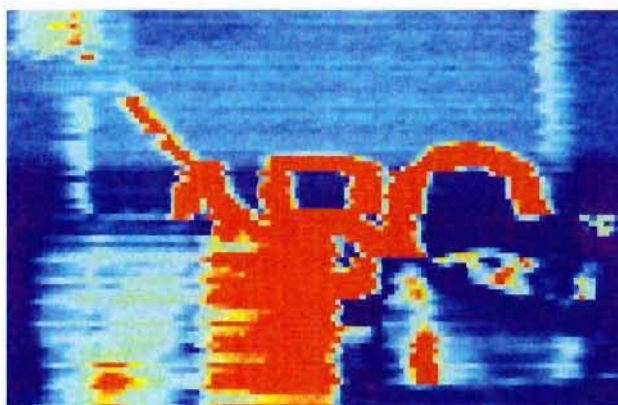


図15 He-Neレーザーによる画像



図16 2波長の反射強度比による画像

のみの画像であり、図16は2波長のレーザー光画像の反射強度の比を映像化したものである。単一の波長だけでは、木材と発泡スチロールの識別が困難であるが、反射強度比を捉えた画像ではその差が明確に現れていることが分かる。今後、多くの材質について測定するつもりであるが、反射率の差異による物体の識別法は物質によって可能である考えられる。

6 まとめ

- (1) 煙環境においてアクティブ型の赤外線視覚装置は、有効な視覚情報を獲得できることが分かった。
- (2) 2波長のレーザー光を利用することにより、物体の識別を行うことが可能であると言える。

今後は、煙濃度に対する限界性能を明確にすることで、理論的な裏付けを行う予定である。また、波長間の反射率の変化についても各種の材質について測定を行い、識別率の限界を明確にする必要がある。

参考文献

- 1 Range-gated underwater laser imaging system Opt. Eng. 32(9) (1993) G. R. Fournier et al.
- 2 移動ロボット用CO<sub>2</sub>レーザーダ3次元視覚センサ 日本ロボット学会誌 Vol. 8-4 (1990) 高橋ほか
- 3 煙中の視程について 消防研究所報告 No40 1975 神
- 4 基礎エアロゾル工学 養賢堂 (1978) 高橋
- 5 アクティブ赤外線による火災環境認識のための基礎実験 日本赤外線学会 第5回研究発表会 (1995) 加藤、井越