

赤外二波長法による減圧沸騰噴霧の蒸気濃度計測

Measurement of Fuel Vapor Concentration in Flash Boiling Spray by Infrared Extinction / Scattering Technique

足立 正之, 田中 大輔, 北條 義之, Marwan Al-Roub, 千田 二郎, 藤本 元
(Masayuki ADACHI)(Daisuke TANAKA)(Yoshiyuki HOJYO), (Jiro SENDA)(Hajime FUJIMOTO)
(株)堀場製作所 同志社大 シャープ(株) Wisconsin大 同志社大
(Horiba,Ltd) (Doshisha Univ.) (Sharp,Ltd) (Wisconsin Univ.) (Doshisha Univ.)

Recently, MPI(multi point injection) technique is widely used for gasoline engines due to its high response and high controllability of fuel injection quantity. The pressure in the intake manifold becomes below the saturated vapor pressure of some components of gasoline in some operating conditions, and this causes the flash boiling phenomenon of the components. The phenomenon has great influence on processes of spray atomization and vapor formation.

In this study, the distribution of fuel vapor concentration of n-pentane was detected by applying Infrared Extinction / Scattering method, the fuel vapor concentration can be calculated from the intensities of transmitted infrared lights, under various spray condition including the flash boiling spray.

Key words : Vapor Concentration, Fuel Injection, Gasoline Engine, Flash Boiling Spray, Vaporization, Infrared Absorption Method

1. はじめに

現在のガソリン機関の燃料供給方法は、機関の運転状況に応じた噴射量や噴射時期の細かな制御が可能であるなどの利点から、各気筒ごとの吸気弁近傍に電子制御式燃料噴射ノズルを設置するMPI方式が主流となっている。しかし、この方式は噴射ノズルの設置位置が必然的に吸気弁に近くなるため、吸気管内部での燃料噴霧と吸入空気の混合時間が短く、運転条件によっては噴霧の微粒化が悪くなり、未燃HC等の有害排出物増加の原因となる。またMPI方式を用いたガソリン機関では、マニホールドを介して数気筒分の吸気絞りを共有するため、吸気管内の圧力は他気筒の吸気行程において負圧となり、燃料噴霧中の一部の低沸点成分の飽和蒸気圧を下回ることが考えられる。このような条件では減圧沸騰現象⁽¹⁾が生じ、微粒化が極めて良好な噴霧が得られる。

筆者らはこれまでに、この方式の燃料噴射ノズルを用い、比較的低压場および単一の燃料の飽和蒸気圧以下の低压場における噴霧特性⁽²⁾、その背圧による変化⁽³⁾、⁽⁴⁾を詳細に調べた。さらに減圧沸騰噴霧内の蒸気泡の核生成過程をモデル化し、キャビテーション気泡の成長過程および燃料液膜表面からの蒸発過程を解析

することにより、減圧沸騰噴霧の微粒化特性と蒸発過程のモデリングを行なった。⁽⁵⁾、⁽⁶⁾

本研究では、室温で静止雰囲気場を有する定容容器内で、この減圧沸騰噴霧の蒸気濃度分布を測定することを目的とする。実験に際しては、電子制御式燃料噴射ノズルを用い、ガソリンの成分であるn-ペンタンを供試燃料とし、減圧沸騰噴霧を形成させた。測定には、赤外線減衰散乱法⁽⁷⁾を本研究の為に改良し、赤外線半導体レーザによる2波長の光強度減衰を測定する手法で、非定常噴霧中の蒸気濃度を求めた。なお、本研究手法と同様の発想として、鈴木ら⁽⁸⁾は蒸発過程中のディーゼル噴霧に対して紫外域と可視域の2波長光を照射し、蒸気濃度と液相濃度の別計測を行なっている。

2. 赤外域2波長濃度測定法

本測定法では、光源からの赤外線が直接試料に照射され、その透過光が検出器に到達する。このときの赤外線の波長は、濃度測定を行なう化学種の吸収帯が存在する波長である。このような光学系において、試料中の化学種の濃度が高いほど光吸収量が多くなるため、

検出器に到達する光量は少なくなる。したがって、赤外線の透過率から試料中の化学種濃度が検知できる。また、赤外線半導体レーザー装置は高時間分解能の測定が可能であるため、本実験のような非定常噴霧の濃度測定に適している。

本研究の赤外域2波長光による、吸収・散乱を応用した減圧沸騰噴霧内の燃料蒸気濃度の計測法の概念を図1に示す。図2は気相のn-ペンタンの吸収スペクトルである。n-ペンタン蒸気では、1450cm⁻¹付近に吸収帯があり、1308cm⁻¹付近ではほとんど吸収は起こらない。このため、1450cm⁻¹の赤外線をn-ペンタンに照射すると、気体による吸収および液体による吸収と散乱の影響をうける。したがって1450cm⁻¹の赤外線の吸光度 $\log(I_0/I)_{1450}$ は以下ようになる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1450} = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1450, \text{Vab}} + \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Lab}} + \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Lsc}} \quad (1)$$

ここで、 $\log(I_0/I)_{1450, \text{Vab}}$ は1450cm⁻¹の赤外線の気体による吸光度、 $\log(I_0/I)_{\text{Lab}}$ は赤外線の液体による吸光度、 $\log(I_0/I)_{\text{Lsc}}$ は液体による散乱である。同様に1308cm⁻¹の赤外線をn-ペンタンに照射すれば、気体による吸収および液体による吸収と散乱の影響を受ける。図2の593ppmにおける吸収スペクトルでは、気相による1308cm⁻¹の赤外線の吸収はほとんど無い。しかし、本実験が対象とする高濃度蒸気場の条件では、n-ペンタン濃度が593ppmよりもさらに高くなり吸収があることも考えられる。このため、燃料蒸気による1308cm⁻¹の赤外線の吸収も考慮に入れた。よって1308cm⁻¹の吸光度 $\log(I_0/I)_{1308}$ は以下ようになる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1308} = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1308, \text{Vab}} + \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Lab}} + \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Lsc}} \quad (2)$$

蒸発過程にあるメタノールの定常噴霧の場合、式(1),(2)中の $\log(I_0/I)_{\text{Lab}}$ は、 $\log(I_0/I)_{\text{Vab}}$ に対して非常に小さいことが足らにより報告されており⁽⁸⁾、本研究においてもこの項は無視できるものとする。また、この2つの式における液滴の散乱 $\log(I_0/I)_{\text{Lsc}}$ はそれぞれの入射波長が近いので、波長の相違による散乱光強度の違いはほとんどないと考え、同一量と仮定する。よって両式より以下の式が導かれる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1450} - \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1308} = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1450, \text{Vab}} - \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1308, \text{Vab}} \quad (3)$$

つまり、1450cm⁻¹の測定結果より1308cm⁻¹の測定結果を差し引くことにより噴霧内の燃料蒸気のみによる吸光度が求められる。

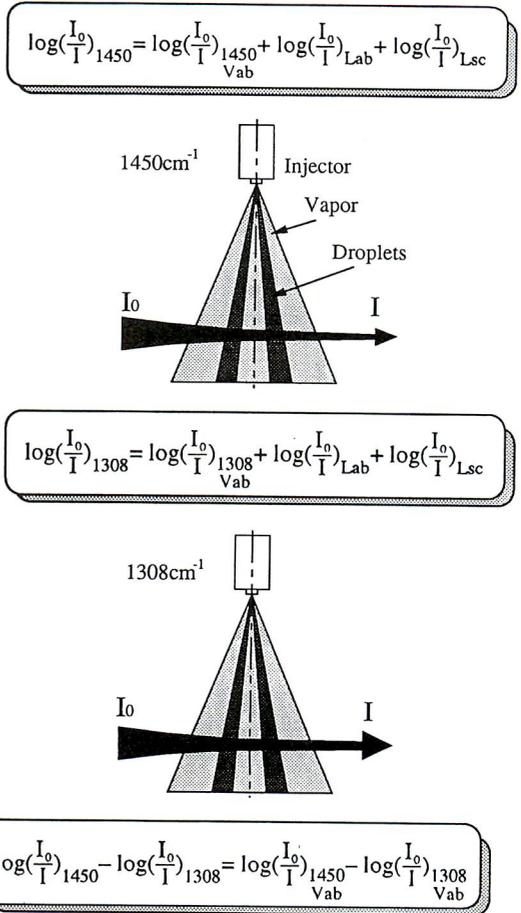


Fig. 1 Two infrared absorption and scattering method

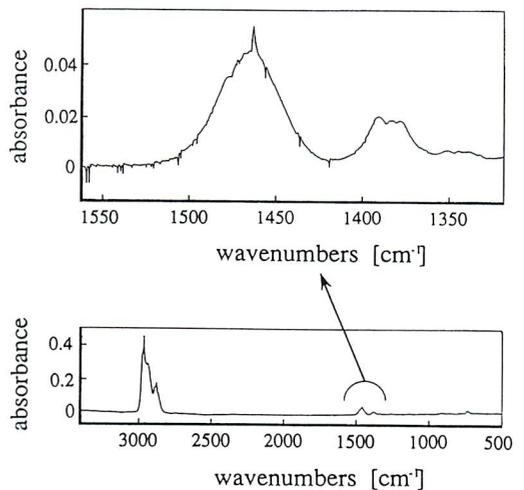


Fig. 2 Absorption spectrum of n-pentane vapor (concentration : 593ppm)

燃料蒸気の吸光度 $\log(I_0/I)_{V_{ab}}$ は、Lambert-Beerの法則により次式で与えられる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{V_{ab}} = \epsilon CL \quad (4)$$

ここで、 ϵ はモル吸光係数(molar absorption coefficient)($m^2/(mol \cdot m)$)、 C は燃料蒸気濃度(mol/m^3)、 L は光路長(m)である。1450 cm^{-1} と1308 cm^{-1} の赤外線燃料蒸気によるモル吸光係数をそれぞれ ϵ_1 、 ϵ_2 とすると、以下の式が成り立つ。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1450, V_{ab}} = \epsilon_1 CL \quad (5)$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1308, V_{ab}} = \epsilon_2 CL$$

よって、 C と L が明確な条件で、 $\log(I_0/I)_{1450, V_{ab}}$ ならびに $\log(I_0/I)_{1308, V_{ab}}$ を測定すれば ϵ_1 、 ϵ_2 を求めることができる。本研究では、 C を圧力10kPa、温度293Kにおける飽和濃度(23.2 mol/m^3)一定として、 L を変化させて検定を行なった。検定で得られた ϵ_1 、 ϵ_2 、測定される吸光度 $\log(I_0/I)_{1450}$ と $\log(I_0/I)_{1308}$ 、および L の測定から、噴霧中の燃料蒸気濃度 C を算定することが可能となる。

3. 実験装置、方法および実験条件

実験に先立ち、モル吸光係数 ϵ を求めるための検定を行なった。この場合の検定法の概略を図3に示す。 N_2 ボンベ①から流量計②を通して流量を制御された窒素ガスは、ウォータバス③(水温313K)中の銅管④を経てフラスコ⑤に入り、バブラー⑥によってバブリングされる。バブリングされたフラスコ中の液体のn-ペンタンは気化され、窒素ガスと共にウォータバス⑦(水温293K)中の銅管⑧とフラスコ⑨を通り、101kPa、293Kの飽和濃度(23.2 mol/m^3)のn-ペンタンが検定セル⑩内に送り込まれる。なお、ここで2段階の水温を用いているのは、確実に飽和蒸気を得る為である。検定セルの光路長 L は、4,5,10,17,22,30mmと変化させ、赤外線の減衰からそれぞれの波長のモル吸光係数を求めた。

実験装置の概略を図4に示す。燃料は、定容容器①(幅150mm、高さ250mm、奥行170mm)内に噴射される。容器の内容積は十分に大きく、噴霧挙動に影響を及ぼさない。供試燃料はn-ペンタンで、使用したピントル型噴射ノズル(噴孔径0.931mm、ピントル径0.798mm、ピントル角度 26°)は、噴孔噴出直後から

噴霧を観察できるように、ノズル先端のスリーブが切除されている。測定用の赤外線は赤外線レーザー装置(Laser Photonics社製)のコントローラ②によって制御され、ダイオードレーザー③から発振される。レーザー光は定容容器に備え付けられたフッ化カルシウム製の光学窓④を通り、噴射ノズル⑤から噴射された噴霧に照射される。照射後の赤外線はディテクタ⑥により検出され、プリアンプ⑦を介してオシロスコープ⑧、または噴射ノズルの噴射開始と同期されたトランジェントメモリ⑨に転送後、コンピュータ⑩の命令に応じて

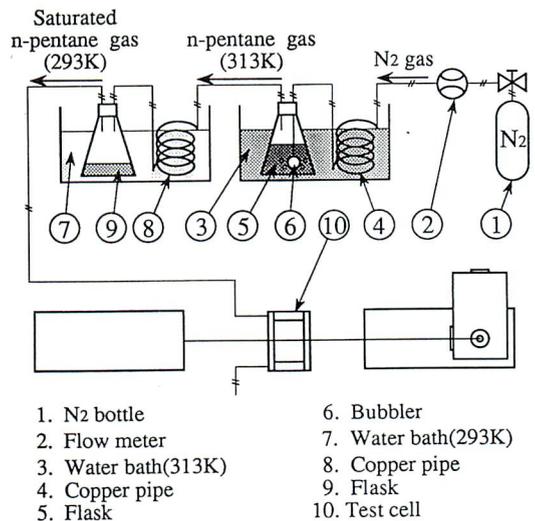


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for calibration of molar absorption coefficient

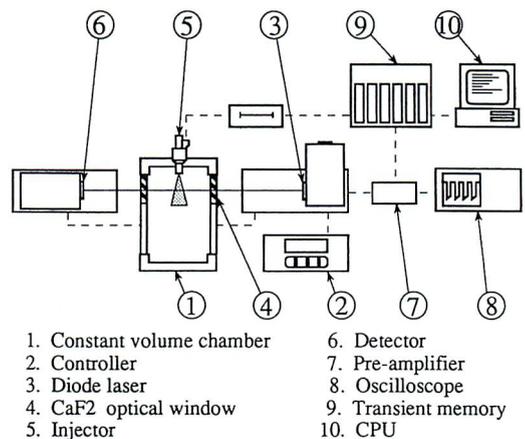


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus for measurement of vapor concentration distribution

数値処理される。なお、この実験におけるトランジェントメモリのサンプリング周期は $2\mu s$ 、時間は $20ms$ である。

定容容器内の背圧 P_b は $48, 35, 21, 14kPa$ と変化させた。燃料噴射圧力 P_{inj} と P_b の差圧 ΔP は $250kPa$ 一定とし、 P_{inj} は $298, 285, 271, 264kPa$ のように変化させた。燃料温度 T_r および雰囲気温度 T_b は共に $293K$ とした。計測は噴霧半径方向に噴霧軸から $2mm$ 間隔で噴霧半径方向距離 $x=14mm$ まで、噴霧軸方向には噴射ノズルから $5mm$ 間隔で軸方向距離 $z=30mm$ までの計 48 点で行なった。

本研究の噴霧は軸対称、渦なしと仮定した。2波長の吸光度の測定値から、光路長にわたる計測線上の積算燃料蒸気濃度を得た後、同心円モデルを用いて噴霧断面の蒸気濃度分布を求めた。

また、噴霧中の蒸気濃度分布と噴霧断面の形状を比較するため噴霧のレーザーシート散乱光撮影を行なった。光源にはNd-YAGレーザーの第2高調波($532nm$)を用いた。気相には散乱の影響がないため、この方法で撮影される噴霧像は液膜および液滴群のみのものであり、燃料蒸気は捕えられない。

4. 検定結果

4. 1 噴霧の再現性

本研究では、非定常噴霧に2波長の赤外線を別々に照射するため、十分な噴霧の再現性が必要である。図5(a),(b)に一例として $P_b=48kPa$ における10回の噴射の赤外吸収量のデータを、噴射開始からの時間 $t=1, 2, 3ms$ について示す。いずれの波長の場合も各時間における赤外線の吸収量の再現性は非常に高く、誤差は最大でも5%以内である。したがって、2波長の赤外線を別々に照射することによる蒸気濃度測定値における誤差は、十分に小さいと見なせる。

4. 2 燃料蒸気濃度と吸光度の関係

図6にそれぞれの波数のレーザー光の吸光度と光路長の測定結果を示す。背圧 P_b は $101kPa$ 、差圧 ΔP は $250kPa$ 、 T_r と T_b は $293K$ である。これらの較正関係より、前者の場合には、

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1450} = 1.24CL \quad (6)$$

後者の場合には

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1308} = 0.05CL \quad (7)$$

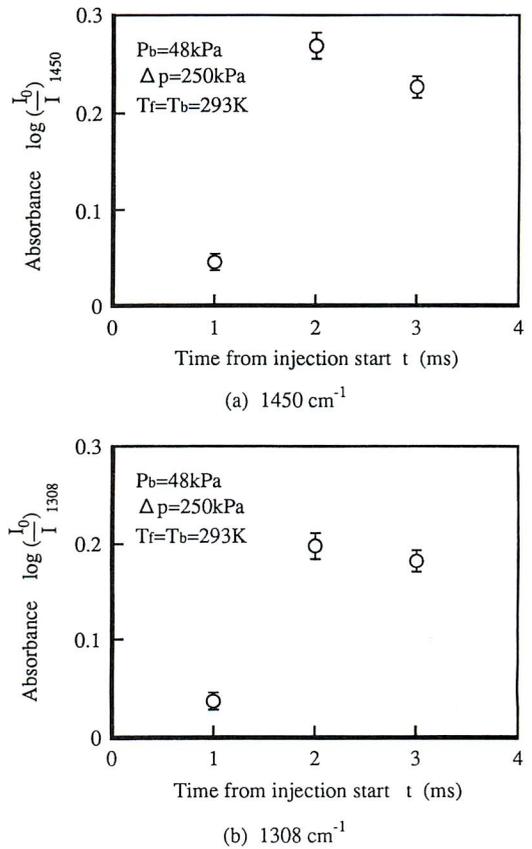


Fig. 5 Repeatability of absorbance for ten measurements

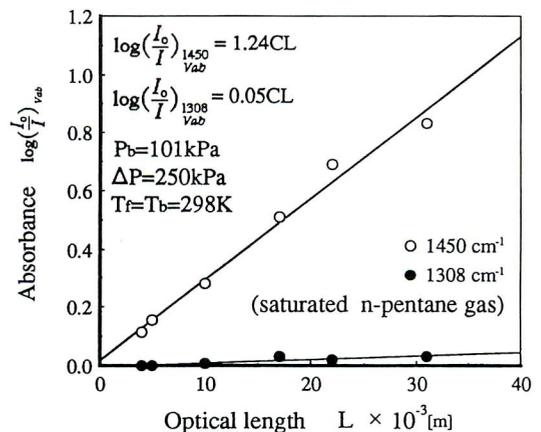


Fig. 6 Relation between absorbance and optical length

の関係が得られ、結局次式が成り立つ。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1450} - \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{1308} = 1.19CL \quad (8)$$

以下式(8)を用いて蒸気濃度を算定する。

モル吸光係数 ϵ は温度や圧力に依存するといわれている。(9)しかし、プロパンにおいては ϵ の温度・圧力による変化は、非常に小さいことが報告されており、(10)分子構造がプロパンと類似の n-ペンタンの場合も同様であると考えられる。また、本実験における燃料温度の変化は、 ϵ に影響を及ぼす程大きくはなく、圧力の変化も無視できる程度のものであると考えられる。そこで、常温・常圧における ϵ に関する検定結果を、すべての実験条件において用いることとした。

5. 燃料蒸気濃度分布

図7(a),(b) に背圧 $P_b=21\text{kPa}$ 、差圧 $\Delta P=250\text{kPa}$ 、燃料温度 T_f と雰囲気温度 T_b は 293K 、半径方向距離 $x=0\text{mm}$ すなわち中心軸、軸方向距離 $z=20\text{mm}$ の条件において、ディテクタが検出した赤外線透過光強度の一例を示す。赤外線は $50\ \mu\text{s}$ で変調されている。噴射開始からの時間 $t=1.0\text{ms}$ 以後では噴霧がレーザー光軸上に存在し、n-ペンタンの気相による吸収および液相による吸収と散乱の影響を受け、減衰が生じる。これらのデータより気相による吸収量を求めた。

図8(a),(b)、図9(a),(b)にそれぞれ $P_b=48\text{kPa}$ および $P_b=14\text{kPa}$ における、燃料蒸気濃度の空間分布の測定結果の一例を、同条件で撮影した噴霧のレーザーシート散乱光写真と共に示す。

集束噴流(9)が現れる $P_b=48\text{kPa}$ 、減圧沸騰噴霧の現象が生ずる $P_b=14\text{kPa}$ いずれの場合も、レーザーシート散乱光写真上に噴霧が観察される領域に、赤外線吸収法により測定された燃料蒸気が存在する。その蒸気濃度は写真上の噴霧の輝度に、燃料蒸気の広がりには噴霧の広がりにおおよそ対応し、本測定法による蒸気濃度分布が妥当なものであることが伺える。また、局所的な燃料蒸気濃度の時間的変化は小さい。

図8の $P_b=48\text{kPa}$ の場合、噴霧軸近傍の燃料蒸気濃度が非常に高い。これは噴霧が集束噴流の形態を生じ、燃料蒸気の発生位置が噴霧中心軸周辺に限られるためと思われる。(a)の $t=1.0\text{ms}$ の場合では、半径方向距離 X が増して 4mm に達すると、軸方向距離 $Z=10\text{mm}$ 付近で濃度はほぼ0であり、 $Z=15\text{mm}$ 付近では蒸気が認められ、 $X=8\text{mm}$ で濃度は再び0となる。すなわち、噴霧の外縁部で蒸気濃度が高く、また噴射ノズルのピントル

の影響を受け、中空円錐噴霧の形状が認められる。

これに対し、図9の $P_b=14\text{kPa}$ の場合は、噴射直後から燃料蒸気が半径方向に拡散される。すなわち、減圧沸騰の影響が強く現れ、燃料蒸気濃度の半径方向への広がりが助長され、かつ燃料蒸気濃度分布が空間的に均一化される。この傾向は背圧 P_b が低下するほど顕著になる。これは、減圧沸騰による相変化が加速され、また噴霧の分裂が顕著になって表面積が増大し、液膜および液滴表面からの蒸発量も増加するためである。また、写真の噴霧の存在範囲にほぼ対応して燃料蒸気が存在するのは、集束噴流の場合と同様である。

本報告では主に燃料蒸気濃度の測定方法に関して記したが、今後、レーザービーム径を小さくするなどして、空間分解能を高めて測定精度を向上させ、かつ取り扱った噴霧の特性を詳細に解明する予定である。

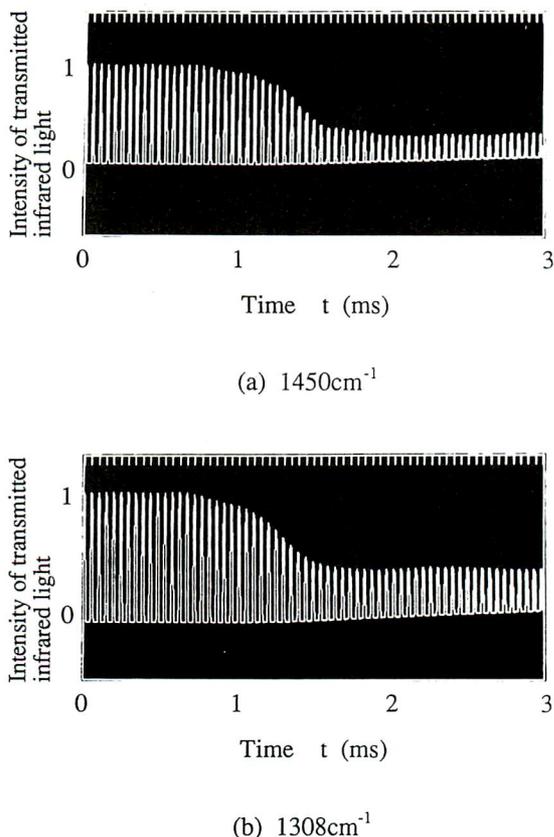


Fig. 7 Temporal change in intensity of transmitted infrared light ($P_b=21\text{kPa}, \Delta P=250\text{kPa}, x=0, z=20\text{mm}$)

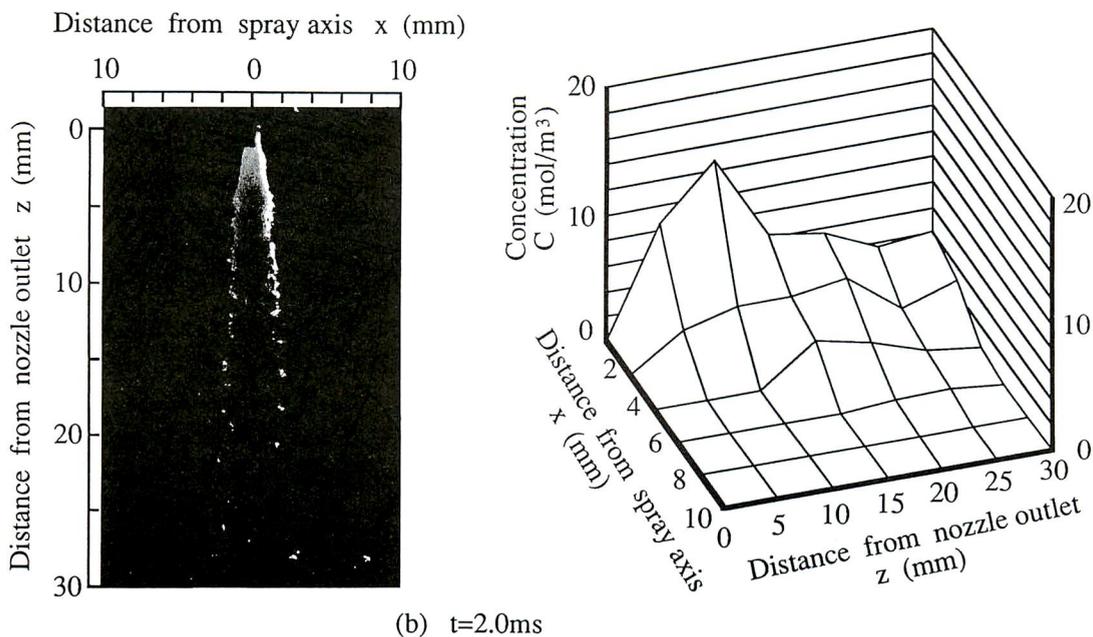
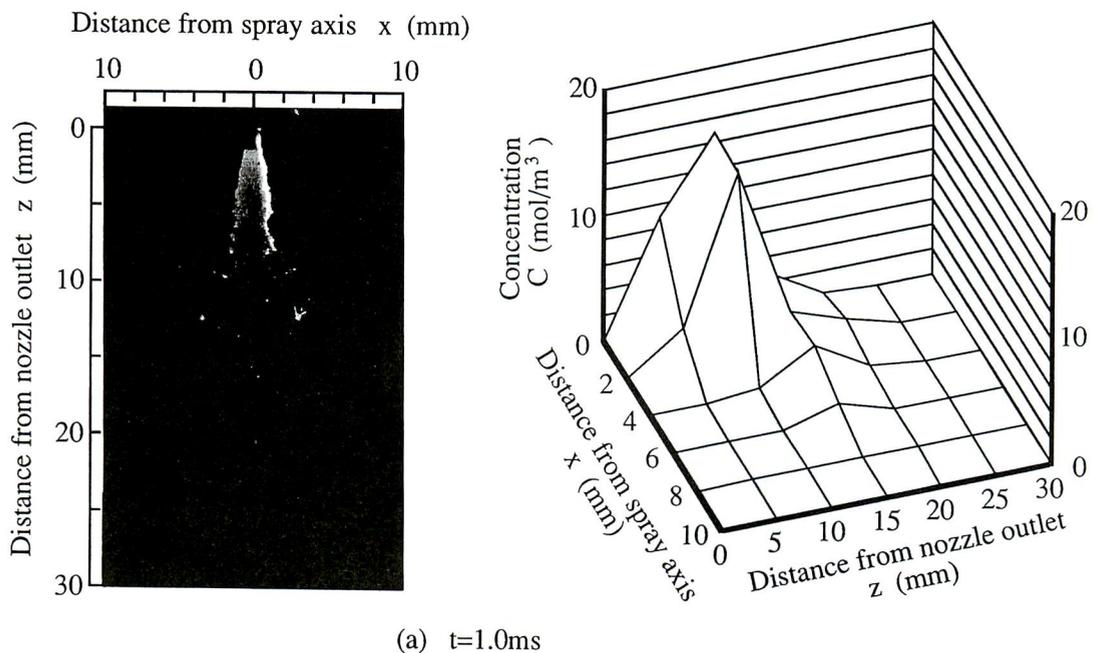
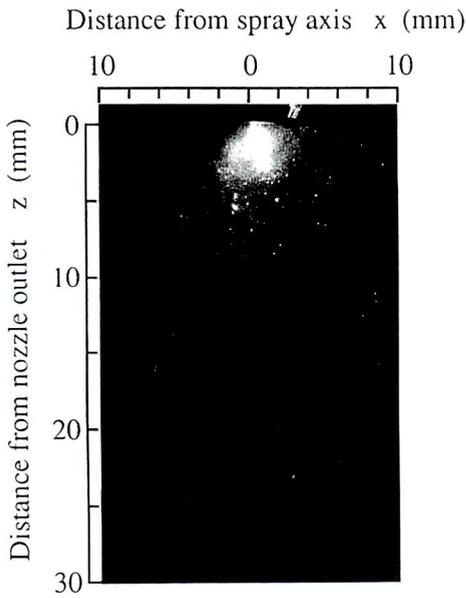
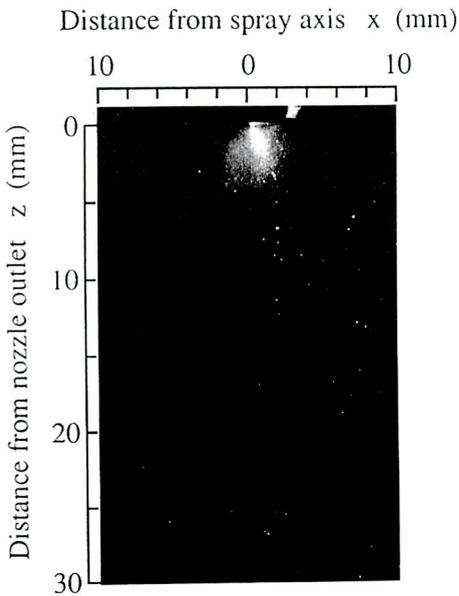
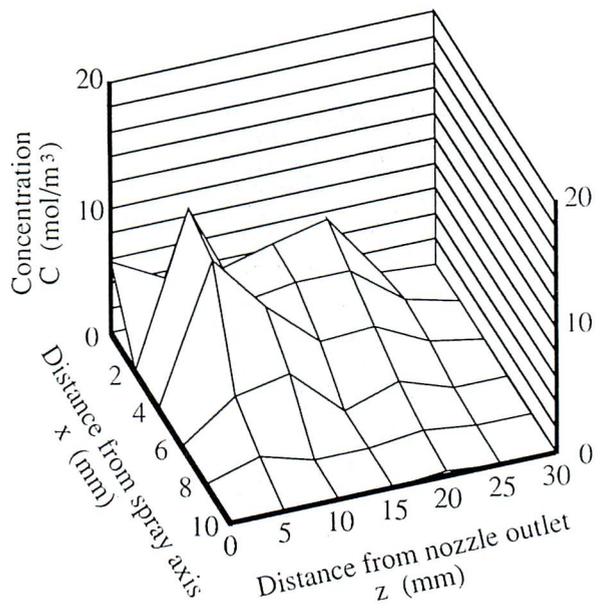


Fig. 8 Concentration distribution of n-pentane vapor
 $(P_b = 48\text{kPa}, \Delta P = 250\text{kPa}, T_r = T_b = 293\text{K})$



(b) $t=1.0\text{ms}$



(b) $t=2.0\text{ms}$

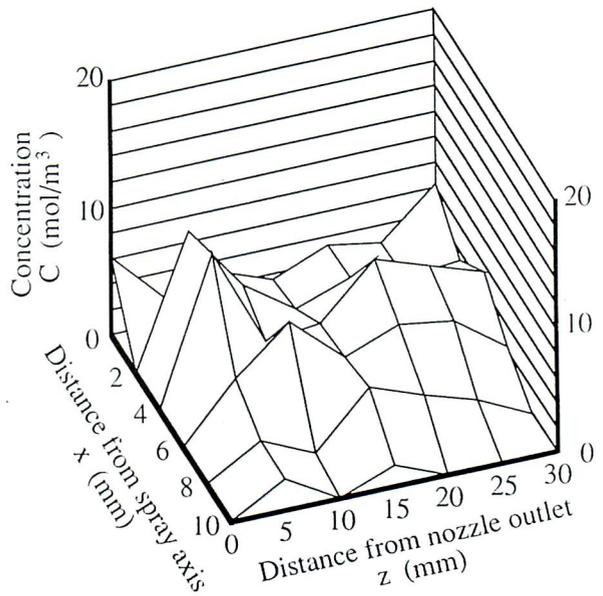


Fig. 9 Concentration distribution of n-pentane vapor
($P_b=14\text{kPa}, \Delta P=250\text{kPa}, T_i=T_b=293\text{K}$)

6. おわりに

本研究では、赤外域2波長吸収法により減圧沸騰噴霧中の燃料蒸気濃度分布の測定を行ない、減圧沸騰現象が燃料蒸気濃度分布に及ぼす影響について調べた。その結果、本研究の実験範囲で次のような結論が得られた。

- (1) 赤外域2波長吸収法により、減圧沸騰噴霧内の燃料蒸気濃度分布の定量的な測定が可能である。
- (2) 散乱光写真において噴霧が観察される領域の範囲にはほぼ対応して燃料蒸気が存在しており、その濃度は写真の輝度と相関がある。
- (3) 背圧が低下して減圧沸騰噴霧の領域に入ると、噴霧全体の燃料蒸気量が増加し、かつ広い領域にほぼ均一に分布するようになる。

終わりに、本実験を遂行するにあたり、協力された山本 白氏(当時本学学生)に謝意を表する。

参考文献

- (1) 須藤 他3名：自技論,16(1978),17.
- (2) 塚本 他4名：機論B,58-547(1992),977.
- (3) 千田 他3名：機論B,58-553(1992),2919.
- (4) Senda,J.,et.al. : SAE Paper,920382.
- (5) 千田 他4名：機論B,60-578(1994),3551.
- (6) 千田 他4名：機論B,60-578(1994),3556.
- (7) M.Adachi,et.al. : Combustion Science and Technology,75(1991),179.
- (8) 鈴木 他2名：機論B,59-563(1993),2334.
- (9) 小林 他3名：内燃シンポ,7-1416(1993),265.
- (10) 吉山 他3名：機論B,60-572(1994),1486.



足立 正之
(株)堀場製作所 生産本部
エンジン計測開発部
〒601 京都市南区吉祥院
宮の東町2
Tel.075-313-8121
Fax.075-321-5937

略歴：1985年 立命館大学 理工学部 数学物理学科
物理課程 卒業
同年 堀場製作所入社 以来現在まで 燃焼
排気ガス分析計の開発に従事
内 1988年より1990年まで カリフォル
ニア大学アーバイン校 燃焼研究所
研究員, 1992年より1994年まで同
志社大学 工学部 機械系学科 研修員



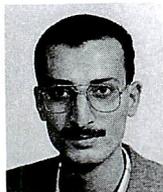
田中 大輔
同志社大学 大学院 工学研究科
機械工学専攻 藤本・千田研究室
〒610-03 京都府綴喜郡田辺町
多々羅都谷1-3
Tel.0774-65-6747
Fax.0774-65-6741

略歴：現在 同志社大学大学院 工学研究科 修士課程
在学中。自動車用電子制御式燃料噴射弁
を用いて噴霧特性に関する研究に従事。



北條 義之
シャープ株式会社 生産技術開発
推進本部 精密技術開発センター
〒632 奈良県天理市樺本町
2613番地の1
Tel.07436-5-2463
Fax.07436-5-2459

略歴：1995年 同志社大学大学院工学研究科修士
課程修了
同年 シャープ株式会社に入社、磁気記憶
装置の開発に従事。



Marwan Al-Roub
University of Wisconsin-Madison
Engine Research Center
Engineering Research Building
1500 Johnson Drive
Madison, WI 53706 U.S.A.
Tel. (608)263-1620

略歴：1995年 10月 University of Wisconsin-Madisonに
Ph.D取得.

現在 University of Wisconsin-Madison, Engine
Research CenterにてResearch Associate
として内燃機関の噴霧、燃焼の研究に
従事.



千田 二郎
同志社大学 工学部 機械系学科
助教授
〒610-03 京都府綴喜郡田辺町
多々羅都谷1-3
Tel.0774-65-6405
Fax.0774-65-6826

略歴：1985年 同志社大学大学院工学研究科博士課程
修了.

同年 ヤンマーディーゼル(株)に入社,
技術研究所にて燃焼、噴射系の研究に
従事.

1990年 同志社大学工学部機械系学科専任講師

1992年 同志社大学工学部機械系学科助教授

1994年 7月より1カ年 米国ウイスコンシン
大学客員助教授



藤本 元
同志社大学 工学部 機械系学科
教授
〒610-03 京都府綴喜郡田辺町
多々羅都谷1-3
Tel.0774-65-6404
Fax.0774-65-6826

略歴：1966年 (株)三井造船内燃機研究室研究員

1973年 慶應義塾大学工学部助手

1979年 三重大学工学部助教授

1982年 10月より1ヶ年 ドイツ連邦共和国
クイザースラウテルン大学工学部客員
教授

1984年 同志社大学工学部助教授

1985年 同志社大学工学部教授