レイリー散乱法による液滴周囲蒸気濃度の測定*

角田 敏一^{*1}, 住田 孝司^{*2}, 角田 長三多^{*1}

Vapor Concentration Measurement around a Droplet via the Rayleigh Scattering Technique

Toshikazu KADOTA, Kohji SUMIDA, and Osata SUMIDA

The laser Rayleigh scattering technique has been applied for the time and space resolved measurements of vapor concentration in the boundary layer formed around a droplet evaporating in a uniform field of air stream. The droplet evaporation is simulated by a porous sphere method to remedy the inaccuracy arising from the distortion and the fluctuation of droplets in a conventional suspended droplet method. The results show that the optical system provided in the present study is successful in identifying the Rayleigh scattering light unaffected by the background noise due to the reflection of the incident laser beam. The time averaged concentration is observed to be fairly uniform, except in the vicinity of the surface. A low concentration region exists in the central portion of the wake. It is also indicated that an increase in Reynolds number causes a decrease in the boundary layer thickness, while the concentration profile remains similar.

Key Words: Mass Transfer, Droplet Evaporation, Vapor Concentration, Rayleigh Scattering, Boundary Layer

1. 緒 言

液滴の蒸発は噴霧燃焼および噴霧乾燥をはじめ工業上広い分野で利用されている重要な問題であるため、これまでにこの現象に関する数多くの研究結果が報告されている^{(1)~(3)}。しかしながら、従来の実験は蒸発率についてなされたものが多く、蒸発中の液滴周囲に形成される濃度境界層の挙動ならびにその内部の蒸気濃度分布に関する詳細な測定データは見当たらない。液滴周囲の蒸気濃度分布は、単一液滴の蒸発はもとより着火過程において大きな役割を果たす⁽⁴⁾ばかりでなく、液滴群蒸発時に生じる隣接液滴間の相互干渉でも重要な影響因子となる⁽⁵⁾ことからその解明が望まれている。

そこで、本研究では一様気流中で蒸発している単一液滴を対象として、その周囲に形成される濃度境界層厚さおよびその内部の蒸気濃度分布を測定することにした。測定対象が小さくかつ時間的に変動するため、従来用いられてきた直接採取法のかわりにレーザ散乱法を用いて、測定場にじょう乱を与えることなく時間

的ならびに空間的分解能の高い測定を試みた。レーザの散乱光を利用する種々の方法が考えられるが、光学系が比較的簡単で散乱断面積が大きくかつ実時間に対して連続的な濃度測定のできるレーザレイリー散乱法を適用することにした。

レイリー散乱法による濃度測定例はこれまでにいくつか報告されている^{(6)~(10)}が、それらはすべて噴流など固体壁が存在しない現象を取扱ったものであり、本研究のように壁近傍における測定を行った例はない。レイリー散乱はラマン散乱とは異なり弾性散乱であるため、この応用に当たっては固体あるいは液体表面からの反射光ならびに空気中のじんあいなど微粒子からのミー散乱光を遮断することが重要となり、この点に関する検討も行った。また、このようにして得られた結果に考察を加えるため、シュリーレン写真による濃度境界層の観察を同時に行った。なお、この種の測定に従来よく用いられてきた懸垂液滴法では、液滴が蒸発中に變形、あるいは振動し液滴表面から測定点までの距離が変動することがあるので、この点の精度を確保するためポラス球によるしみ出し蒸発を採用した。

* 昭和61年12月3日 第24回燃焼シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和61年12月25日。

^{*1} 正員、広島大学工学部 (〒724 東広島市西条町下見)。

^{*2} 学生員、広島大学大学院。

2. 測定方法

気体分子をレーザー光で照射するとレイリー散乱が生じるが、散乱断面積が気体の種類により異なるので、これを利用して混合気体の濃度測定を行う。混合気体に強度 I_0 のレーザー光が入射した場合、レイリー散乱光強度 I_r は次式で与えられる。

$$I_r = C I_0 N \sum_i x_i \sigma_{ri} \quad \cdots (1)$$

ここで、 C ：光学系から決まる定数、 N ：分子数密度、 x_i ： i 成分モル分率、 σ_{ri} ： i 成分のレイリー散乱断面積である。理想気体を仮定すると、式(1)は次式となる。

$$I_r = \frac{C I_0 A P}{R T} \sum_i x_i \sigma_{ri} \quad \cdots (2)$$

ここで、 A ：アボガドロ数、 R ：ガス定数、 P ：圧力、 T ：温度である。入射光強度、圧力ならびに温度が一定の場合には式(2)は次式のように表される。

$$I_r = K \sum_i x_i \sigma_{ri} \quad \cdots (3)$$

ここで、 K は定数である。成分 a および b からなる2成分系の場合には式(3)は次式となる。

$$x_a = \frac{\frac{I_r}{K} - \sigma_{rb}}{\sigma_{ra} - \sigma_{rb}} \quad \cdots (4)$$

$x_a = 0$ で、 $I_r = I_{r0}$ 、 $x_a = x_{as}$ で $I_r = I_{rs}$ とすると、式(4)より次式が導かれる。

$$\frac{x_a}{x_{as}} = \frac{I_r - I_{r0}}{I_{rs} - I_{r0}} \quad \cdots (5)$$

すなわち、 x_{as} 、 I_{rs} および I_{r0} をあらかじめ求めておくと、 I_r を測定することにより x_a を知ることができる。

図1に測定装置概略を示す。コンプレッサ(16)から送られた空気はサージタンク(17)、シリカゲルを充てんした乾燥容器(18)、メンブランフィルタ(0.3 μm)(19)およびステンレス鋼メッシュ(20)を通り直径30 mmの四分円ノズル(21)から上方に流出する。これにより清浄な乾燥空気が得られ、じんあいによるミー散乱光を除去することができる。上下に移動可能なタンク(6)から送られた液体は気流中に設置された直径10 mmのポラス球(5)の表面からしみ出しながら蒸発する。供試液体としては、レイリー散乱断面積、沸点および危険性などを考慮してフロン113を選んだ。総合出力2 Wのアルゴンイオンレーザー(1)から発する488 nmの単色光を光源として用い、レンズ(2)によりそれを測定部に集光する。迷光をできるだけ減少させるため、ピンホール(3)、(4)、(7)およびビームラップ(8)を設置した。散乱光はレンズ(9)、

ピンホール(10)を通過した後フォトマル(浜松フォトニクス R 928)(11)へ達する。フォトマルからの信号はアンプ(12)ならびにローパスフィルタ(13)を通過した後ストレージオシロスコープ(14)に記録され、XYレコーダ(15)に出力される。

濃度測定にあたっては、供試液体用タンク、ポラス球および四分円ノズルを二次元移動台に設置し、それらの相対位置を一定に保ちながら固定した光学系に対し全体を移動させた。なお、測定にさきだち式(5)中の I_{rs} を決定したが、その際には四分円ノズル先端部に固定した内径2 mmのステンレスパイプから空気-フロン113混合気体を空気流に沿って流出させた。また、LDAにより四分円ノズル下流部(上方)における空気流速を測定する場合には、シーディング粒子としてメンブランフィルタ下流部からオイルミストを混入した。

図2に測定部詳細を示す。レイリー散乱光の波長は入射レーザー光の波長と等しいため、球表面からの反射光が同時に受光系に入るとレイリー散乱光が識別できなくなる可能性がある。そこで、レーザー光、球および受光系の相対位置を種々変えながら、反射光が受光系に入ることなく球近傍における測定が可能となる最適配置を見いだすための検討を行った。球上部における測定では、光学系の配置に対する制約はなかった。球側部の測定において、球と受光系の間をレーザー光が通過する配置にしたところ、球表面での強い反射光が受光系に入りレイリー散乱光を識別することが困難であった。そこで、図2に示すように、受光系から見て球の裏

図1 測定装置

側に側定部を設定し、受光系を水平面内でレーザー光に対して 30° 傾けた。測定体積が小さくなるほど空間分解能が向上し表面近くでの測定が容易になるが、散乱光強度は低下する。ここでは両者を勘案し、直径 $250\ \mu\text{m}$ の円とレーザー束直径から決まる空間を測定体積とした。

3. 測定結果

四分円ノズル下流における半径方向ならびに軸方向流速分布を図3に示す。図中の r , h はそれぞれノズル中心軸からの半径方向距離およびノズル上面からの垂直方向距離である。この図に示されるように、流速分布は広範囲にわたり均一となることがわかった。以後の測定においては、 $r=0\ \text{mm}$, $h=15\ \text{mm}$ の位置にボラス球中心を固定し、レーザー光に対して球および四分円ノズルを同時に移動させた。

図4は、異なる場所で得られたレイリー散乱光強度の時間変化の例を示したものである。図中の x および y は、図2に示すように、球中心からの水平ならびに垂直距離である。信号Aは主流空気中で得られたものであるが、ミー散乱光は見当たらずメンブランフィルタにより空気中のじんあいは十分除去されていることがわかる。信号BおよびCはそれぞれ境界層外端付近および内部におけるものである。なお、前述のように図の縦軸に示すレイリー散乱光強度はフレオン113の濃度に対応している。図から明らかなように、境界層内では濃度が時間的に大きく変動している。中心部では変動幅は小さいが、境界層外端に近づくにつれその

幅および周期が増大し、やがて間欠的な信号となる。

フレオン113の蒸気が全く存在しなくなる点を境界層外端とし、これを異なるレイノルズ数において測定した結果を図5に示す。なお、図の横軸に示す δ は図2で定義したとおりである。この図から、レイノルズ数の増加とともに境界層厚さが減少していく様相がわかる。

異なるレイノルズ数における時間平均濃度分布を図6に示す。図に見られるように、表面近傍 $1\ \text{mm}$ まではすべての条件において測定データが得られている。濃度こう配の大きい領域は球表面近傍に限られており、その他の領域では垂直ならびに水平方向とも濃度変化が小さいことがわかる。また、 y —一定の線にそって水平方向分布を見ると、流れの中心 ($x=0\ \text{mm}$) よ

図3 気流速度分布

図2 測定部詳細

図4 レイリー散乱光強度

りも境界層外端部でやや高濃度になっている。以上のことは本実験の範囲内でレイノルズ数によらず成立する。

図4に示すような波形をもとに濃度の最高値と最低値を読み取り、その差の分布を示したのが図7であるが、これより濃度変動も外端付近で大きくなる傾向にあることがわかる。

以上述べたようなレイリー散乱法による濃度測定結果に考察を加えるため、シュリーレン写真により濃度境界層の挙動を観察した。その一例として $Re=260$ の場合の連続写真を図8に示す。隣接写真の時間間隔は約0.5sであるが、境界層の形状ならびにその内部の濃度分布は時間的に大きく変動していることがわかる。このことから図4および図7に示すような結果が得られたものと考えられる。また、球後流部では中心よりも外端部に高濃度領域が認められ、図6に示す結果とよく対応している。中心部の濃度が低下する原因として次のことが考えられる。すなわち、流れの可視化実験⁽¹¹⁾により明らかにされ、また図8からも推定されるように球後流部には渦が形成され逆流が生じており、この結果低濃度混合気が巻き込まれるためと思われる。

4. 結 言

乾燥した清浄な一様空気流中に設置したポリス球表面からフロン113を蒸発させ、球周囲に形成された濃度境界層厚さおよびその内部における蒸気濃度をレイリー散乱法により測定した結果、次のことがわか

(a) $Re=260$

(b) $Re=410$

(c) $Re=620$

図6 時間平均濃度分布

図5 境界層厚さ

図7 濃度変動

図 8 シュリーレン写真 ($Re=260$)

った。

(1) 本実験の光学系により、球表面近傍 1 mm までは迷光の影響を受けることなく蒸気濃度の測定が可能である。

(2) 時間平均濃度こう配の大きい部分は球表面近傍に限られておりその他の領域ではほとんど均一分布となるが、境界層外端部で極大値を示す傾向にある。

(3) レイノルズ数 260~620 の範囲内では、レイノルズ数とともに境界層厚さは減少するが、濃度分布そのものには大きな変化は現われない。

(4) 球後流部では蒸気濃度が時間的に大きく変動しており、その変動量の空間的分布はほぼ均一である。

文 献

- (1) Law, C. K., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 8-3 (1982), 171.
- (2) Faeth, G. M., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 9-1 (1983), 1.
- (3) Sirignano, W. A., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 9-4 (1983), 291.
- (4) 角田・ほか 2 名, 機論, 41-348 (昭 50), 2475.
- (5) 實諸・ほか 4 名, 機論, 52-473 (昭 61), 215.
- (6) Graham, S. C., ほか 2 名, *AIAA J.*, 12-8 (1974), 1140.
- (7) Dyer, T. M., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 17-8 (1978), 92.
- (8) Escoda, M. C. and Long M. B., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 21-1 (1983), 81.
- (9) Arcoumanis, C., *Exp. Fluids*, 3 (1985), 103.
- (10) 高城・ほか 2 名, 機論, 52-474 (1986), 785.
- (11) Modi, V. J. and Akutsu, T., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 106 (1984), 66.