気流中における2球まわりの蒸気濃度分布*

角 田 敏 一^{*1}, 門 脇 健^{*2}

Vapor Concentration Profile around Two Spheres in an Air Stream

Toshikazu KADOTA and Ken KADOWAKI

The laser Rayleigh scattering technique was applied for the remote and nonintrusive probing of the vapor concentration around two spheres of liquid fuel evaporating in a vertically upward free stream of air with uniform velocity and temperature profiles. The Rayleigh signal from a minute volume of vapor air mixture subjected to the monochromatic radiation of a focused argon laser was collected by the optical detection system. The results showed that the time-averaged vapor concentration profile directly upstream of the rear sphere resembled the one formed at the same position due to the evaporation of the front sphere alone for the inter sphere distance approximately four times longer than its diameter. It was also revealed that the vapor concentration profile downstream of the rear sphere was not affected by the existence of the front sphere. The vapor concentration increased with an increase in air temperature and the volatility of liquid fuel while it was independent of the air velocity.

Key Words: Mass Transfer, Droplet Evaporation, Vapor Concentration, Interaction, Rayleigh Scattering, Laser Diagnostics

1. 結 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応用されている重要な問題であるため、これまでに多くの研究が行われ、それらの結果をまとめた解説論文^{(1)~(4)}も発表されている。しかしながら、従来の実験では蒸発速度定数あるいは液滴温度など液滴に関する特性値の決定に力点がおかれており、蒸発中の液滴周囲に形成される蒸気-空気混合気層の挙動ならびにその内部で生じる移動過程に関する知識は乏しく未解明の点が多く残されている。

そこで、最近著者らはこれらの現象に関する基礎的知見を得る目的で、一様気流中におかれた単一蒸発球まわりの蒸気濃度分布を測定した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。光学系の構成に十分な注意を払いレーザレイリー散乱法を適用すれば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濃度測定が可能であることを示した後、蒸気濃度分布に及ぼす空気温度、空気流速ならびに試料液体の性状の影響を明らかにした。ついで石

英糸に懸垂された単一液滴の後流部における蒸気濃度分布を測定し、液滴列蒸発時に生じる隣接液滴間の相互干渉効果に関して蒸気濃度分布が重要な役割を果たすことを示唆した⁽⁷⁾。

本研究では、ひきつづきレイリー散乱法を適用し、一様気流中におかれた2個の蒸発球まわりの燃料蒸気濃度分布を測定し、それに及ぼす各因子の影響を明らかにすると同時に単一球に関する結果と比較しながら蒸気濃度分布に及ぼす干渉効果について検討を行った。

2. 測 定 方 法

図1に測定装置概略を示す。コンプレッサから送られた空気はサージタンク、シリカゲルを充てんした乾燥容器、メンブランフィルタ(0.3 μ m)、オリフィス流量計、加熱部および整流メッシュを通過した後直径30mmの四分円ノズルから垂直上方へ流出する。このようにして清浄な乾燥空気が得られ、じんあいからのミー散乱光は検出されなかった。熱電対および熱線流速計により空気温度ならびに流速の測定を行ったところ、これらの分布は測定領域内で十分均一であることがわかった。上下移動可能な二つの容器から送られた液体燃料は気流中に設置された2個のポーラス球(直

* 平成元年11月21日 九州支部・中国四国支部合同長崎地方講演会において講演。原稿受付 平成元年3月10日。

*¹ 正員、広島大学工学部 (〒724 東広島市西条町下見)。

*² 正員、松江工業高等専門学校 (〒690 松江市西生馬町)。

径5 mm)の表面からしみ出し蒸発をする。球の支持および液体燃料送付のため、球の中心を通り水平方向に外径1 mmのステンレスパイプを取付けた。供試燃料としては、沸点および分子量を勘案し *n*-ペンタン、*n*-ヘキサンおよび *n*-ヘプタンを選んだ。

前述のように、蒸気濃度測定にはレイリー散乱法を適用した。前報⁽⁵⁾⁽⁸⁾で述べたように、この方法の測定原理は、気体分子をレーザー光で照射するとき生じるレイリー散乱光の強度が気体の種類に依存することを利用して対象とする化学種の濃度を測定するものである。レイリー散乱は弾性散乱であり入射レーザー光に基因する迷光ならびにミー散乱の影響を受けやすいが、振動ラマン散乱に比べ散乱断面積が約 10^3 倍大きい⁽⁹⁾ため時間的および空間的分解能の高い濃度測定に適している。また、光学系の構成が比較的簡単であるという利点も有している。

総合出力2 Wのアルゴンレーザーから発する488 nmの単色光をレイリー散乱の光源として用い、レンズに

より測定部に集光する。入射レーザー光に基因する迷光強度をできるだけ低減するため、4個のピンホールおよびビームトラップを設置した。散乱光はレンズならびに絞りを通過した後フォトマル(浜松フォトニクス R 928)へ達する。フォトマルからの電気信号はアンプならびにローパスフィルタ(遮断周波数:1 kHz)を通過した後ストレージオシロスコープで記録され、X-Yレコーダに出力される。

図2は球の配置ならびに座標系を示したものである。前方球および後方球の中心を原点にとり、一様空気流の方向(垂直上方)をそれぞれ Z_1 軸および Z_2 軸、それと直角方向(水平方向)を r_1 軸ならびに r_2 軸とした。前方球を対象として論議する場合は主として Z_1 および r_1 軸を用い、後方球について述べる場合は Z_2 および r_2 軸によった。図2中、 l および s はそれぞれ球中心間の垂直ならびに水平方向距離である。また、 d は球の直径であり、本実験では5 mm一定とした。平面図に示されるように、受光系から見て球の裏側に測定部を設定し、散乱角を 35° とした。なお、入射レーザー光と受光系の光軸とは同一平面内にある。散乱光強度と空間分解能の両者を勘案し、直径 $170 \mu\text{m}$ の円とレーザーウェスト直径(約 $75 \mu\text{m}$)との交差する空間を測定体積とした。2組の球と燃料容器をそれぞれ異なる二つの移動台に設置し、それぞれの球から燃料液面までの高さを一定に保ちながら球中心間距離 l および s を変えた。それら全体および四分ノズルをさらに別の移動装置に設置し、固定した光学系に対し移動することにより蒸気濃度分布を測定した。なお、レイリー散乱光強度と蒸気濃度との関係を求めるための校正実験については、前報⁽⁶⁾において述べたのでここでは省略する。

図1 測定装置

図2 球の配置および座標系

3. 測定結果

図3は n -ヘプタン蒸発時における2球まわりの時間平均蒸気濃度（以後蒸気濃度と略記）の空間分布を示したものである。図3中 T_a は空気温度, Re は球の直径を代表長さとするレイノルズ数であり, l, d および s は図2に示すとおりである。 $Z_1=3.5$ mm のように前方球の後流部の球表面に近い領域では, 水平方向蒸気濃度分布が流れの中心軸すなわち $r_1=0$ mm で極小値をとるいわゆるくさ形分布となっている。これに対し後方球の後流部においては顕著なくさ形分布が現れず, $Z_1=13.5$ mm でも流れの中心付近で平坦な台形分布となる。さらに下流へ移り $Z_1=20$ mm では顕著な山形分布が現れている。図4に単一球 ($l/d=\infty$) まわりの蒸気濃度分布を示す。この場合には2球蒸発時における前方球後流部の蒸気濃度分布に見られたようなくさ形分布は現れていない。 $Z_1=5$ mm における水平方向蒸気濃度分布は流れの中心軸付近で平坦な台形分布に近く, 下流へ移るにしたがってこの平坦部分が消失し山形分布へと遷移している。図3と図4とを比較するとつぎのようなことがわかる。すなわち, $l/d=2$ での前方球後流部における蒸気濃度分布形状は単一球後流部における結果と大きく異なるが, 後方球後流部における分布形状は単一球の結果と類似している。また, 流れの中心軸上で球中心から下流側等距離の位置における蒸気濃度を比較すると, 前方球, 単一球, 後方球の順に高くなっている。二つの球が流れ方向に直列に配置された場合前方球の後流部に馬てい

図3 2球まわりの蒸気濃度分布

うずが形成される⁽¹⁰⁾ため, 図3に示すようにこの位置での水平方向蒸気濃度分布がくさ形になったものと考えられる。これに対し, 後方球後流部の流動様式は単一球後流部のそれと同様である⁽¹⁰⁾ことから, 両者の蒸気濃度分布形状に類似点がみうけられるものと思われる。

図5は後方球ならびに単一球のまわりに形成された蒸気-空気混合気層の外端位置を示したものである。図5から明らかなように, l/d の増大とともに混合気層外端位置は流れの中心軸に近づく傾向にある。 $l/d=1$

図4 単一球まわりの蒸気濃度分布

図5 蒸気-空気混合気層外端位置

あるいは $l/d=2$ の場合のように前方球の干渉があると、単一球の場合にくらべて流れの中心軸から混合気層外端位置までの距離が増大するが、この傾向は後方球の上流側において顕著である。後方球の後流側（図5において $Z_2 \geq 5 \text{ mm}$ ）では、混合気層外端位置は球中心間距離にほとんど依存しないことがわかる。

つぎに、蒸気濃度に及ぼす各因子の影響について述べる。代表値として、後方球の前方よどみ点の上流側、球表面から 2.5 mm 離れた点すなわち $r_2=0 \text{ mm}$, $Z_2=-5 \text{ mm}$ における蒸気濃度を選んだ。図6は空気温度の影響を示したものであり、空気温度の上昇とともに蒸気濃度が上昇することがわかる。また、球間距離が短いほど蒸気濃度の温度依存性が高い。図7に異なる燃料に対する蒸気濃度を示す。図7より明らかなように、 n -ペンタン、 n -ヘキサン、 n -ヘプタンの順に標準沸点が上昇するにつれ蒸気濃度が低くなっているが、蒸気濃度の温度依存性は燃料性状によらずほぼ同様である。図8は蒸気濃度に及ぼす空気流速の影響を示したものであり、 $l/d=2 \sim 8$ の範囲では蒸気濃度は空気流速に依存しないことがわかる。

つぎに、後方球まわりの蒸気濃度分布をさらに詳細に調査し、濃度分布に及ぼす二つの球の干渉効果について検討を行った。図9は後方球の上流側 $Z_2=-5 \text{ mm}$ における水平方向蒸気濃度分布を示したものである。なお、比較のため、前方球が単独で存在するものと仮定した場合に $Z_2=-5 \text{ mm}$ に相当する位置すなわち $Z_1=5 \text{ mm}$ および 10 mm にて予想される結果も

図9中に示す。 $l/d=2$ における蒸気濃度分布とそれに相当する単一球の結果を比較すると、最高値は等しいが分布形状が大きく異なっていることがわかる。これに対し $l/d=3$ の場合は単一球の場合とほぼ同様の蒸気濃度分布になっている。このことは、球中心間距離が長くなると後方球前方 ($Z_2=-5 \text{ mm}$) における蒸気濃度分布が単一球後流部の結果からほぼ推定できることを示している。図10は後方球後流部における水平方

図7 燃料性状の影響

図6 空気温度の影響

図8 空気流速の影響

向蒸気濃度分布ならびに後方球が単独で配置された場合に同じ位置で予想される結果を示したものである。後方球に対する蒸気濃度分布と単一球の結果を比較すると、前者のほうがやや高濃度であるが分布形状には大差がないことがわかる。これらの結果は、球中心間距離が短い場合を除いて、後方球後流部における蒸気濃度分布が前方球存在の有無による影響をほとんど受けないことを意味するものである。

図11は、 $r_2=0$ mm, $Z_2=-5$ mm および $Z_2=5$ mm における蒸気濃度に及ぼす球中心間距離の影響を示したものである。図11中 α および β は次式により定義される値である。

$$\alpha = \frac{x_b - x_{2b}}{x_{1b}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta = \frac{x_a}{x_{1a}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、図11中に説明するように、 x_a, x_b ：2球が存在する場合 $Z_2=-5$ mm, $r_2=0$ mm, および $Z_2=5$ mm, $r_2=0$ mm における蒸気濃度、 x_{1a}, x_{1b} ：前方球が単独で存在するものと仮定した場合同じ位置における蒸気濃度、 x_{2b} ：後方球が単独で存在するものと仮定した場合 $Z_2=5$ mm, $r_2=0$ mm における蒸気濃度である。図11より明らかなように、球中心間距離の増大とともに α は減少して零に漸近し、 β は増大し1に近づいている。また、球中心間距離が等しい場合 s/d の増大とともに β の値は大きくなっている。この結果よりつぎのことがわかる。すなわち、流れ方向に直列に配

置された2球の中心間距離が直径の4倍程度以上離れると、後方球前方よみ点上流における蒸気濃度は前方球が単独に存在するものと仮定した場合同一位置において得られる値に等しくなる。また、後方球後方よみ点下流における蒸気濃度は、後方球だけが単独で存在する場合の値に等しく前方球の影響を受けない。

本実験により得られた結果から以下のような考察が可能である。2個の球がかなり広い間隔（本実験の条件下では $l/d \geq 4$ ）で流れ方向に直列に配置された場合、それぞれの球まわりにおける蒸気濃度分布の差異は球の上流側で顕著であり、下流側蒸気濃度分布は大略同様である。この結果を拡張し、それらの後方にさらに第3、第4の球が配置された場合を考えると、最上流側にある球まわりの蒸気濃度分布だけが異なり、後流側三つの球まわりの蒸気濃度分布はほぼ等しくなるものと予想される。著者らの一部は以前流れ方向に直列に配置させた5個の懸垂液滴の蒸発実験を行い、最上流側にある液滴の蒸発速度定数が他に比べて大きいことおよび下流側4個の液滴の蒸発速度定数はほぼ等しいことを報告した⁽⁷⁾が、以上の推論はこの結果を支持するものである。

4. 結 言

レイリー散乱法を適用し、一様気流中におかれた2個の蒸発球まわりの燃料蒸気濃度分布を測定し、それに及ぼす各因子の影響を明らかにすると同時に単一球に関する結果と比較しながら蒸気濃度分布に及ぼす干

図9 水平方向蒸気濃度分布（後方球上流）

図10 水平方向蒸気濃度分布（後方球後流）

図 11 α, β

渉効果について検討を行った。その結果つぎのような結論が得られた。

(1) 後方球のまわりに形成された蒸気-空気混合気層の外端位置は球中心間距離の増大とともに流れの中心軸へ近づくが、後方球の下流側ではその変化は小さい。

(2) 後方球の上流側における蒸気濃度は空気温度の上昇、燃料標準沸点の低下とともに上昇するが、空

気流速にはほとんど依存しない。

(3) 2球の中心間距離が短い場合、後方球上流側における蒸気濃度分布形状は前方球が単独で存在すると仮定した場合その後流部に形成される蒸気濃度分布形状と大きく異なるが、後方球後流部の蒸気濃度分布形状はそれのみが存在する場合の結果に類似している。

(4) 2球の中心間距離が直径の4倍程度以上離れると、後方球前方よどみ点上流における蒸気濃度は前方球が単独に存在する場合の蒸気濃度に等しくなる。また、後方球後方よどみ点下流部での蒸気濃度は後方球だけが単独で存在する場合の値に等しい。

本研究費の一部はゼネラル石油研究奨励財団の援助によった。記して深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) Williams, A., *Combust. Flame*, **21**-1 (1973), 1.
- (2) Faeth, G. M., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **3** (1977), 191.
- (3) Law, C. K., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **8** (1982), 171.
- (4) Sirignano, W. A., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **9** (1983), 291.
- (5) 角田・ほか2名, 機論, **53**-489, B (1987), 1585.
- (6) Kadota, T., ほか2名, *Proc. 1st KSME-JSME Thermal Fluids Eng. Conf.*, **1** (1988), 417.
- (7) 角田・ほか2名, 機論, **54**-503, B (1988), 1843.
- (8) Kadota, T., *SAE Paper*, No. 872151 (1987).
- (9) Eckbreth, A. C., *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, (1988), 210, Abacus Press.
- (10) 辻・ほか4名, 機論, **47** 423, B (1981), 2103.