対向流場における燃料噴霧の蒸発・燃焼挙動の数値解析

Numerical simulation on liquid fuel spray evaporation and combustion behavior in counterflow

○准 中村 摩理子 (阪大院) 正 赤松 史光 (阪大工) 正 香月 正司 (阪大工)

Mariko NAKAMURA, Fumiteru AKAMATSU and Masashi KATSUKI,

Department of Mechanical Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka

Numerical simulations were conducted on the evaporation and combustion processes of n-decane spray flames in a laminar counterflow. In addition, the validity of the "droplet parcel" approximation was examined. As for the gaseous phase, we used the mass, momentum, energy and species conservation equations. These equations were solved using the finite control volume method with a SIMPLE algorithm. Transport properties and thermodynamic data of gaseous species were obtained from CHEMKIN. Concerning the dispersed phase, we tracked all the individual droplets or the droplet parcels. The droplet vaporization model included the effects of the Stefan flow on the heat and mass transfer between the droplet and the gas. The differences in the spray evaporation quantity and gaseous phase temperature between the cases with and without the "droplet parcel" approximation were found.

Key Words: Spray Combustion, Numerical Simulation, Evaporation, Counterflow

1. はじめに 噴霧燃焼の数値解析コードでは、計算負荷を軽減させる目的で、火炎中の無数の油滴をすべて追跡する代わりに、多数の油滴 (n 個) を含んだ仮想的な油滴パーセルを追跡し、単滴の蒸発量を単純に n 倍して、蒸発量を見積もることが多い。しかし、油滴は個々に異なった挙動をするため、これでは油滴の密集効果、すなわち、油滴群燃焼を正確に考慮することはできないと考えられる。

本研究では、油滴パーセルの概念を適用して、油滴の蒸発と燃焼を数値解析した場合に生じる影響を明らかにすることを目的に、以下に示す非定常数値計算を行った。

バーナの下側ポートから気体燃料の予混合気、上側ポートから空気を供給して対向流平面ガス火炎を形成し、上側空気流に噴霧を添加した際の非定常燃焼挙動を対象とした。気相は、エネルギー保存式と化学種保存式とともに Navier-Stokes 方程式を直接解くことでオイラー的に求め、分散相である油滴については、火炎中のすべての油滴、もしくは複数の油滴 (10, 40, 85 個) を含む油滴パーセルを、ラグランジュ的に追跡した。

2. 計算方法 対向流場を計算の対象とした。流れ場を平面二次元とし、x-y 座標の原点は上側ポート出口中心に位置している。x 座標は上側ポートから鉛直下向きにとり、y 座標は x 軸に直交する方向にとる。計算領域は、縦横 20mm×20mm の正方形領域とし、157×153 の等間隔格子 (コントロールボリューム実寸法 130μm×130μm) に分割した。非定常計算のタイムステップは 0.1875 ms とし、1000 タイムステップまで計算を行った。

上側ポートからは常温常圧の空気 (300 K, 0.1013 MPa, 酸素質量分率=0.2375) が、下側ポート-3≤y≤3 mm の領域からは空気と n-デカン (C₁₀H₂₂) 蒸気の予混合気 (当量比 φ_g=0.6) が、-10 mm≤y<-3 mm, 3 mm<y≤10 mm の領域では空気が、すべて流速 0.4 m/s で流入し、対向流場 (伸張率 40 1/s) にガス火炎が形成される。その後ある時刻 t=0 ms を起点に、上側ポート-3≤y≤3 mm の領域から一様に、n-デカン噴霧が初期速度 0.4 m/s (空気と同速)、供給当量比 φ_l=0.1 もしくは 0.3 で供給される。噴霧の粒径分布には、30μm の単分散を仮定した。油滴については、すべての油滴、もしくは、10 個、40 個、85 個の油滴を含むパーセルをラグランジュ追跡した。

数値計算手法は有限体積法⁽¹⁾に基づいており、圧力場の解法には SIMPLE アルゴリズムを用いた。考慮した化学種は O₂, N₂, CO₂, H₂O, C₁₀H₂₂ (気相と液相) の 5 つであり、気相化学種の物性値と輸送係数は CHEMKIN^(2,3)により求めた。液相 n-デカンの物性値は文献(4)から得た。考慮した支配方程式は、(1) 質量保存式、(2) x 方向運動量保存式、(3) y 方向運動量保存式、(4) エネルギー保存式、(5) 化学種保存式であり、それぞ

れの式の生成項に油滴と気相の相間干渉項を考慮した。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = S_{l,m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v - \mu \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \rho g + S_{l,u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v - \mu \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y} + S_{l,v} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h - \rho a \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h - \rho a \frac{\partial h}{\partial y}) = S_{l,h} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial y}) = S_{comb,k} + S_{l,Y_k} \quad (5)$$

ここで、 ρ は気相の密度、 u は気相の x 方向速度、 v は気相の y 方向速度、 μ は粘性係数、 P は気相の圧力、 g は重力加速度、 h は気相の比エンタルピー、 a は熱拡散率、 Y_k は化学種 k の質量分率、 D は物質拡散係数、 $S_{comb,k}$ は燃焼反応による生成項、 $S_{l,\phi}$ は従属変数 ϕ の油滴との相互干渉項を示している。ただし、 ρ は理想気体の状態方程式から求める。

噴霧モデルに関しては、Crowe らの PSI-Cell モデル⁽⁵⁾に基づいており、以下の仮定をおいた。1) 油滴の衝突・分裂はない。2) 油滴は球形で内部の組成、温度、物性値には分布がなく一様である。3) 油滴の占める体積は無視できる。4) 1 タイムステップ間の油滴と気相の相間干渉項は油滴の移動後の位置で考慮する。

気相中の油滴の運動方程式は以下のように表される。

$$m_i \cdot d\mathbf{V}_i / dt = \mathbf{F} + m_i \cdot \mathbf{g} \quad (6)$$

$\mathbf{F} = (F_x, F_y)$ は油滴が気相から受ける力であり、以下のように表される。

$$\mathbf{F} = 1/8 \cdot \pi d_i^2 \rho (\mathbf{V} - \mathbf{V}_i) |\mathbf{V} - \mathbf{V}_i| C_D \quad (7)$$

ただし、 d_i は油滴直径、 ρ は混合気の密度、 $m_i = (\pi/6) \cdot d_i^3 \rho_i$ は油滴の質量、 ρ_i は油滴の密度、 $\mathbf{V} = (u, v)$ は気相速度ベクトル、 $\mathbf{V}_i = (u_i, v_i)$ は油滴速度ベクトル、 $\mathbf{g} = (g, 0)$ は重力加速度ベクトル、 C_D は油滴の抵抗係数である。 C_D については蒸発の影響を考慮し、Bailey らのトランスファ数による修正⁽⁶⁾を行っている。

Abramzon らによれば、気相と油滴の相対運動に起因する対流が物質と熱の移動に及ぼす影響を考慮した場合、油滴の蒸発率 $\dot{m}_i$ と気相から油滴へ熱移動量 Q_i は以下のように表せる⁽⁴⁾。

$$\dot{m}_i = \pi d_i \rho_f D_f Sh^* \ln(1 + B_M) \quad (8)$$

$$Q_l = \dot{m}_l \cdot (c_{pf} (T - T_l) / B_T - L(T_l)) \quad (9)$$

ここで、 ρ_f と D_f は油滴表面付近の混合気の密度と拡散係数、 c_{pf} は油滴表面付近の燃料蒸気の定圧比熱、 $L(T_l)$ は油滴温度 T_l での蒸発潜熱、 Sh^* はステファン流の影響を考慮して修正されたシャーウッド数、 B_M と B_T は Spalding の物質および熱トランスファ数である⁽⁴⁾。

式(8)、(9)中の ρ_f 、 D_f 、 c_{pf} を算出する際、油滴表面付近の温度と濃度分布は一樣と仮定し、その代表温度および燃料蒸気の質量分率は、Hubbard らの 1/3 ルール⁽⁷⁾にもとづいて、以下のように表した。

$$T_f = T_l + A(T - T_l), \quad Y_{ff} = Y_{fs} + A(Y_f - Y_{fs}) \quad (10)$$

ただし、 T_f は油滴表面付近の混合気温度、 T_l は油滴の温度、 A は重み係数 (=1/3)、 T は気相温度、 Y_{ff} は油滴表面付近の燃料蒸気の質量分率、 Y_{fs} は油滴表面の燃料蒸気の質量分率、 Y_f は気相中の燃料蒸気の質量分率である。

油滴の粒径と温度変化は次式を用いて求めた。

$$\frac{d(d_l^3)}{dt} = -\frac{6}{\pi \rho_l} \dot{m}_l \quad (11)$$

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\dot{m}_l c_{pf}}{B_T m_l c_{pl}} (T - T_{ls}) - \frac{\dot{m}_l L(T_l)}{m_l c_{pl}} \quad (12)$$

燃焼反応モデルには、n-デカンの一段総括反応⁽⁸⁾を用いた。

3. 計算結果と考察 Fig.1 は、液体燃料供給当量比 $\phi_l = 0.3$ 、噴霧開始から 187.5ms 経過後の、油滴の位置、粒径とグレイスケールで示された燃焼反応率 R_f である。x=14mm 付近の燃焼反応の強い領域は、下側ポートから供給される予混合気によって形成される対向流平面ガス火炎である。また、x=10mm 付近に見られる弱い燃焼反応領域は、上側ポートから供給される液体燃料噴霧が予蒸発し、その蒸気が予混合的に燃焼している領域である。

Fig.2 に、Fig.1 中に示した領域 A における噴霧の総蒸発量の時間変化を示す。また、Fig.3 に、中心軸上の x=10mm の点 (Fig.1 中の点 B) における気相温度の時間変化を示す。計算は、全油滴を個々に追跡した場合と、複数の油滴を含む油滴パーセルを仮定した場合について行った。図(a)は液体燃料供給当量比 $\phi_l = 0.1$ 、(b)は $\phi_l = 0.3$ の場合である。

実線はすべての油滴を個々に追跡して計算した場合 (case1)、破線は 10 個 (case2)、一点鎖線は 40 個 (case3)、二点鎖線は 85 個 (case4) の油滴を含む油滴パーセルを仮定した場合である。また、1000 タイムステップ間に供給された油滴 (粒径 30 μ m 均一) の個数は $\phi_l = 0.1$ の場合は 2826 個、 $\phi_l = 0.3$ の場合は 8482 個である。

Fig.2(a)では、case3、case4 の場合に変動が見られるものの、総蒸発量の時間変化は、ほぼ、全油滴を個々に追跡した case1 の傾向と同様である。Fig.3(a)では、すべての場合において、気相温度がほぼ一致している。しかし、Fig.2(b)では、パーセルに含まれる油滴個数が増加するにつれて、油滴からの総蒸発量が多く見積もられる傾向があり、噴霧開始から 187.5ms 後における、case4 の全蒸発量は case1 よりも約 20%増となっている。Fig.3(b)では、case3、case4 において case1 との大きなずれが見られ、最大で約 150K も気相温度が低く見積もられている。

4. 結言 噴霧燃焼の数値解析に、油滴パーセル近似を適用した場合の影響を、対向流噴霧火炎の非定常数値解析を用いて調べた。結果より、油滴の密集度が高い場合、油滴パーセルを仮定して計算を行うと、蒸発量が多く見積もられ、気相温度が低く見積もられる

ことが分かった。これは、油滴群燃焼の影響が考慮されていないためである。噴霧燃焼数値解析コードの信頼性を高めるためには、油滴の密集効果を考慮した、油滴群燃焼モデルの確立が必要不可欠であるといえる。

参考文献 (1) 水谷・香月 共訳 (Patankar, S. V. 原著), コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版 (1985). (2) Kee, R. J., et al., SANDIA Report, SAND87-8215B (1987). (3) Kee, R. J., et al., SANDIA Report, SAND86-8246 (1986). (4) Abramzon, B. and Sirignano, W. A., ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf. (1987), Vol. 1, 11. (5) Crowe, C. T., et al., Trans. ASME, J. of Fluids Eng., **99** (1977), 325. (6) Bailey, et al., British Chemical Engineering, 15(1970), 912. (7) Hubbard, G. L., et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, **8**(1975), 1003. (8) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., Prog. Ener. Combust. Sci., **10** (1984), 1.

Fig.1 Droplet location and combustion reaction rate ($\phi_l = 0.3$, 187.5 ms)

Fig.2 Comparison of the total evaporation quantity obtained in the case with and without the droplet parcel approximation.

Fig.3 Comparison of the gaseous phase temperature in the case with and without the droplet parcel approximation.