液膜形成と液滴・液膜干渉を考慮した壁面衝突噴霧の分散と
混合気形成過程のモデリング*千田二郎^{*1}, 神田知幸^{*2}
草野茂之^{*3}, 藤本元^{*1}Modeling on Dispersion and Mixture Formation of Spray Impinging
on the Wall Considering Film Formation and Droplet-Film InteractionJiro SENDA, Tomoyuki, KANDA,
Shigeyuki KUSANO and Hajime FUJIMOTO

In this study, a new submodel concerning fuel film formation process is proposed order to simulate the behavior of diesel spray impingement on wall surface. Here, super-heating degree of the surface, defined by the temperature difference between the wall surface and the fuel saturated temperature, is newly considered for behavior of impinged liquid droplets. In this spray impingement submodel, fuel film formation process, droplet interaction film breakup process, and velocity and direction of dispersing droplets were considered based on several experimental results. This new submodel was incorporated into KIVA-II code. As a results, it is found that the calculated results of impinging spray behavior by the new model agree well with experimental results.

Key Words: Diesel Engine, Impinging Spray, Fuel Film, Droplet Breakup Modeling, Simulation

1. 緒 言

小型高速直接噴射式ディーゼル機関においては、燃料噴射圧力の高圧化に伴い、噴射された燃料のピストンキャビティ壁面あるいはシリンダ壁への衝突が顕著になる。また壁面に衝突するまでに微粒化が完了し、蒸気形成が迅速であるため、壁面近傍に可燃混合気が早期に形成される。しかし壁面上に燃料液膜が形成されると、すすや未燃炭化水素(UHC)の生成原因となる。このため、壁面近傍の混合気と液膜の形成過程を調べることは重要である。そこで筆者らは、まず定容容器内で室温・高圧の静止雰囲気における非蒸発の壁面衝突噴霧の挙動をレーザ光透過光減衰法により調べ⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、また高温・高圧場における壁面衝突噴霧にExciplex蛍光法を適用し、液相と気相の可視化および

蒸気濃度の定量解析を行なってきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。

一方、内燃機関内での流動と噴霧現象さらに燃焼過程を解析するため、KIVA⁽⁸⁾、KIVA-II⁽⁹⁾コードを用いて数値解析が行なわれており、そのコードの計算精度向上のため、様々な物理現象のサブモデルの研究がされている。Wachtersら⁽¹⁰⁾は高温壁面に衝突するいわゆる膜沸騰状態での水滴の変形および反射挙動について実験し、液滴のWeber数がその重要な因子であるとしている。膜沸騰条件では壁面に衝突後の分裂液滴は、蒸気流の水平方向吹き出しにより半径方向へ飛散する⁽¹¹⁾。Naberら⁽¹²⁾はその結果を基に、液滴の壁面衝突時における入射Weber数と反射Weber数の関係についてモデリングを行なっている。しかし小型直噴式ディーゼル機関の燃焼室の壁面温度は燃料の軽油成分に対してその固液界面の沸騰状況は非沸騰から核沸騰域に対応する。この核沸騰条件では衝突液滴の沸騰による分裂現象はあまり見られず、遷移沸騰では分裂液滴は蒸気の鉛直方向吹き出しにより壁面上方へ飛散する⁽¹¹⁾。よって、Wachtersらの結果を基にしたNaberらのモデルは実際の現象を記述していない。このため筆

* 原稿受付 1998年2月20日。

*¹ 正員, 同志社大学工学部(☎610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3)。*² 正員, (株)本田技術研究所(☎321-3301 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630)。*³ 学生員, 同志社大学大学院。

E-mail: jsenda@mail.doshisha.ac.jp

者らは、燃焼室の壁面温度が低い条件と高い条件を想定して、それぞれ壁面上での液膜形成過程と衝突液滴の沸騰分裂過程を考慮したモデルを提案した⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

本研究では、冷間始動時に相当する非蒸発の衝突噴霧から、高負荷運転時に相当する蒸発場の高温壁面に衝突する噴霧の双方に適応するモデルを構築するために、まず燃料液滴の壁面衝突時における沸騰現象の違いに着目した。さらに燃料噴霧の壁面衝突現象に重点を置き、液滴の壁面衝突による分裂・飛散現象、液滴同士の干渉効果、液膜の形成過程、液滴と液滴の干渉効果を考慮し、モデリングを行なった。その際、衝突液滴の持つエネルギーにより、 $We = \rho_l d_{in} V_{in}^2 / \sigma$ で定義される Weber 数で、それが低い場合 ($We \leq 300$) と高い場合 ($We > 300$) に分類した。衝突エネルギーが低い場合には、連続して液滴が衝突する場合の液滴と液滴および液滴と液膜の相互干渉効果を考慮してモデル化を行なった。また、衝突エネルギーが高い場合には液滴の壁面衝突による Splash 現象に着目しモデル化を行なった。さらに各場合とも壁面衝突時における壁面上の液膜の有無により、その壁面衝突挙動が異なる。図1に示すように衝突液滴の分裂形態は、壁面上に液膜が形成されている場合、液膜の無次元膜厚と液滴の Weber 数によって表すことができる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。また乾き壁面の場合、衝突エネルギーが低い際には液滴と液滴の相互干渉を考慮し、逆に衝突エネルギーが高い場合では臨界 Weber 数を用いて液滴の Splash 現象を考慮した。

Fig.1 Breakup regime

2. 壁面衝突噴霧のモデリング

2.1 壁面過熱度による液滴の分裂・蒸発挙動

2.1.1 壁面温度による衝突液滴の分裂形態 筆者ら⁽¹¹⁾は、水滴を用いて高温壁面に衝突する液滴の分裂形態について、壁面温度およびWeber数をパラメー

タに実験を行なってきた。その結果、液滴の分裂形態は7種類に分類され、またその形態は壁面過熱度 ΔT_{sat} (= 壁面温度 T_w - 液体の飽和温度 T_{sat}) と液滴の Weber 数によって変化する。ここでは、核、遷移および膜沸騰領域における液滴の分裂挙動の違いについて簡単に記す。大気圧下において、壁面過熱度が $\Delta T_{sat} = 25$ [deg.]、すなわち核沸騰領域における衝突液滴の分裂挙動は、蒸気泡が液膜内部に発生し崩壊する際に多数の微細な液滴を生じ、液膜は壁面上に残留する。また遷移沸騰領域 ($\Delta T_{sat} = 100$ deg.) における衝突液滴の分裂は、壁面から上方に吹き抜けることによって分裂し、小液滴が吹き上げられ液膜は壁面上に残留する。さらに膜沸騰領域 ($\Delta T_{sat} = 200 \sim 300$ deg.) においては、液膜下を蒸気が壁面の半径方向に吹き出し、液膜は小さな液滴に分裂し、半径方向に飛散する。以上のことから、壁面に衝突する液滴をモデリングするにあたり、壁面過熱度を考慮する必要がある。

Fig.2 Estimation of boiling curve of gas oil in engine conditions

2.1.2 壁面過熱度に関する考察 まず、壁面衝突時の液滴の挙動に重要な影響を与える壁面上での沸騰現象について考える。本研究で対象とする小型直噴式ディーゼル機関の壁面温度の範囲は、3～6 [MPa] の加圧条件下で 473～673 [K] である。これを壁面過熱度 ΔT_{sat} に変換して考えると、軽油の飽和温度を 50% 留出温度とすれば大気圧下で約 498 [K] であるから、壁面過熱度の範囲は -25～175 [deg.] になる。また筆者らが実験に用いた燃料は、軽油の一成分である n-トリデカンであり、その飽和温度は大気圧下で 509 [K] であることから軽油の代表的な特性と一致すると考えた。

しかし、実際の機関内で燃料噴霧が壁面に衝突する際にはその雰囲気圧力は 3～6 [MPa] であり、燃料

Fig.3 Impingement model for low Weber number ($We \leq 300$) Fig.4 Impingement model for high Weber number ($We > 300$)

の臨界圧力を越えた条件である。臨界圧力を越えた条件下では、燃料の飽和温度は臨界温度に置き換えて考えられる⁽¹⁷⁾。n-トリデカンの臨界温度は約 673 [K] である。また圧力の上昇と共に沸騰曲線は壁面過熱度の低い方へシフトすることから、図2に示すように壁面過熱度の範囲は -200 ~ 0 [deg.] となる。よって臨界圧力を越えた条件下での沸騰形態は、非沸騰から核沸騰の条件となり、遷移沸騰あるいは膜沸騰における固液界面の沸騰現象に伴う液滴の激しい分裂は生じないと考えられる。よって、室温壁面、高温壁面のどちらの条件においても、その壁面上での液滴の挙動および液膜の形成過程は同様であると考えられ、モデリングの際には同様の現象として取り扱う。

2.2 低 Weber 数モデル ($We \leq 300$) (図3参照)

2.2.1 液滴と液滴の干渉効果 単滴は壁面衝突後、壁面上で拡がり、再び収縮して跳ね返る。この壁面上での液滴の滞留時間の間に後続の液滴が衝突した場合、その液滴の表面波の振動モードとの関係により液滴の分裂が生じる場合がある。この干渉効果は、Al-Roub ら⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾の壁面に衝突する水滴の実験により、その分裂過程への影響が詳細に調べられている。この実験では、液滴同士の空間を示すパラメータとして液滴間距離 L_d と液滴径 d の比 L_d/d で表わし、時間間隔パラメータとして $TR = \Delta t / \tau_{\text{res}}$ を用いている。ここで、 Δt は液滴の衝突する時間間隔、 τ_{res} は壁面上での滞留時間であり次式で表される。

$$\tau_{res} = \pi \sqrt{\frac{\rho_f d_{in}^3}{16 \cdot \sigma}} \quad \cdots(1)$$

d_{in} : 入射液滴径 [m], ρ_f : 燃料の密度 [kg/m^3], σ : 表面張力 [N/m]

図3に2つの液滴が表面温度 $T_w=373$ [K] の乾き壁面に衝突した場合の分裂確率 ψ と TR との関係を示す. ψ は最初の液滴の表面波と後続の衝突液滴との干渉のため, TR により大きく変化している. しかし, 入射時の Weber 数によらず $TR=0.4 \sim 0.6$ で比較的高い分裂確率を示している.

2.2.2 液膜形成モデル Weber 数が低い場合, 壁面に衝突した液滴はほとんどが壁面に付着する. しかし, 壁面上に形成された液膜との干渉を考えると, その表面波の振動モードとの関係より液膜からの液滴の分裂が生じる場合がある. Al-Roub ら⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ は, 壁面上に形成された液膜上への液滴の衝突実験を行ない無次元膜厚 δ_{non} とその分裂確率 ψ について, 次のような関係式を得ている.

$$\psi = 0.423 - 0.096\delta_{non} + 1.610\delta_{non}^2 - 1.470\delta_{non}^3 + 0.367\delta_{non}^4 \quad \cdots(2)$$

ここで, δ_{non} : 無次元膜厚 ($\delta_{non} = \delta_{fl}/d_{in}$), δ_{fl} : 膜厚 [m], d_{in} : 入射液滴径 [m] である.

2.2.3 液膜分裂モデル 液滴と液膜の干渉効果を調べた研究⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾によると, 液滴の分裂形態は次の3タイプに分類できる.

- (1) リムタイプ: 液膜の縁に隆起したリム状の突起から1つの液滴が分裂する場合.
- (2) クラスタタイプ: クラウン状の突起より複数個の小さな液滴群が分裂する場合.
- (3) コラムタイプ: 液膜中央部に表面波の反射により大きく隆起したコラムが生じ, それより比較的大きな液滴が分裂する場合.

2.2.4 分裂液滴の飛散モデル 液膜から分裂した液滴の分散過程は, 上述した分裂形態によって異なる. 図3に反射後の液滴の Weber 数と無次元膜厚との関係を示す. この図で, We_p が壁面に対して水平方向の Weber 数, We_n が垂直方向の Weber 数である. これより, クラスタタイプの場合に高い垂直方向への反射 Weber 数を持つことがわかる. 一方, リムタイプとコラムタイプの場合には垂直方向への反射 Weber 数が非常に低くなっている. また, 水平方向への反射 Weber 数は, どの分裂タイプにおいてもほとんど一定とみなせる.

2.3 高 Weber 数モデル ($We > 300$) (図4参照)

2.3.1 付着と分裂の臨界値 比較的低温の壁面に衝突した液滴は, その入射 Weber 数が低い場合壁面上

で液膜を形成する. 一方, 高い Weber 数で液滴が乾き壁面あるいは液膜の上に衝突すると, 液滴自身の分裂あるいは液膜からの液滴の分裂飛散が生じ, いわゆる Splash 現象が起こる. この Splash が起こる場合と液膜に付着する場合の臨界 (臨界値) については, Coghe ら⁽¹⁸⁾, Mundo ら⁽¹⁹⁾, Yarin ら⁽²⁰⁾, Marengo⁽²¹⁾ により調べられている. 特に, Marengo はこの境界について詳細に調べ, 臨界の Weber 数について以下の実験式を提案している.

$$We_{cr} = (2164 + 7560\delta_{non}^{1.78})La^{-0.2} \quad \cdots(3)$$

ここで, La : Laplace 数 ($La = \rho_f \cdot \sigma \cdot d_{in} / \mu_f^2$), μ_f : 燃料の粘性係数 [$\text{N} \cdot \text{s/m}$] である.

本研究のモデルにおいては, 上式の臨界 Weber 数を用いて液滴が液膜に付着するか, 分裂飛散するかの判定を行なった.

2.3.2 分裂液滴径と分裂数 Splash 現象では, 衝突した液滴あるいは液膜は比較的微小な液滴に分裂する. Mundo ら⁽¹⁹⁾ は図4に示すように, 分裂液滴群のザウタ平均液滴径と入射液滴径の比と衝突時の液滴の状態を表わす無次元パラメータ K との関係を, 荒い壁面と滑らかな壁面に衝突する場合のそれぞれについて調べている. 本モデルではこの図の関係から分裂飛散した液滴群のザウタ平均粒径を求めた.

さらに, 壁面上に形成された液膜はその表面が波打っており, 衝突液滴径相当の凹凸が生じていることから, 荒い壁面に対する関係式を液膜に衝突する場合に, 滑らかな壁面に対するものを乾き壁面に衝突する場合にそれぞれ適用した.

2.3.3 飛散速度 液滴の分裂後の飛散速度は, 入射時と分裂飛散後におけるエネルギー保存により考え, 次式が成り立つ.

$$E_{out} = E_{in} - E_{cr} \quad \cdots(4)$$

ここで, E_{out} : 反射後の液滴のエネルギー [J], E_{in} : 入射時の液滴のエネルギー [J], E_{cr} : 液膜からの分裂に必要なエネルギー [J] である. これより,

$$V_{out} = (2E_{out}/m_{out})^{1/2} \quad \cdots(5)$$

が成り立つ. ここで, 液滴の衝突前後の位置エネルギーは非常に微小であるためここでは考えない.

2.4 液膜蒸発モデル 本研究では, 液滴の壁面衝突後の挙動と液滴および蒸気濃度の空間分布に重点をおき, 液膜形成に関してはそれが衝突液滴に及ぼす影響のみ考慮する. そのため, 液膜については以下の仮定を設け, 液膜蒸発のモデル化の際には出来るだけ簡略化する.

- (1) 液膜は剛体とする。
- (2) 液膜内部の流動は無視する。
- (3) 各液膜セル内の温度は一樣とする。
- (4) 各液膜セル間の熱伝導は考慮しない。

2.4.1 液膜蒸発モデル 液滴の衝突により形成された液膜は、その初期においては液滴温度と等しく、その後、壁面や雰囲気気体より与えられた熱量を液膜の温度上昇および蒸発に費やす。そこで、液膜に供給される熱量と液膜が消費する熱量を等しいとすると、エネルギー保存則より次式が成り立つ。

$$Q_f + Q_{\text{evap}} = Q_{g-f} + Q_{w-f} \quad \cdots(6)$$

Q_f : 液膜の温度上昇に費やされる熱量 [J],

Q_{evap} : 液膜の蒸発に費やされる熱量 [J],

Q_{g-f} : 雰囲気気体より液膜に供給される熱量 [J],

Q_{w-f} : 壁面から液膜に供給される熱量 [J]

2.4.2 液膜の温度上昇と蒸発過程モデル 雰囲気気体および壁面より液膜に供給された熱により、液膜はその温度を上昇させながら蒸発を開始する。ここで、ある時間間隔 Δt において液膜温度が T_f から T'_f に上昇したとすると、次式が成り立つ。

$$Q_f = m_f \cdot c_f \cdot (T'_f - T_f) \quad \cdots(7)$$

m_f : 液膜質量 [kg], c_f : 液膜の比熱 [J/(kg · K)]

また、単位面積あたりの絶対質量流束を $\dot{m}$ とおくと、全液膜の蒸発に必要な熱量は次式で表される。

$$Q_{\text{evap}} = \dot{m} \cdot A_f \cdot L \quad \cdots(8)$$

A_f : 液膜面積 [m²], L : 蒸発潜熱 [J/kg]

ここで、 $\dot{m}$ は次式で表される。

$$\dot{m} = \frac{(\rho D)_{\infty} \cdot Sh \cdot (Y_{\infty} - Y_{fs})}{l(1 - Y_{fs})} \quad \cdots(9)$$

ρ_g : 雰囲気気体の密度 [kg/m³], h : 物質移動係数 [m/s], Y_{fs} : 液膜表面における質量分率, Y_{∞} : 無限遠における質量分率, D : 拡散係数 [m²/s], Sh : Sherwood 数, l : 代表長さ [m]

なお、Sherwood 数 Sh については様々な実験式が提案されているが、上述の仮定より、Chilton-Colburn の相似則より得られる値を用いた⁽²²⁾。

$$Sh = 0.037 Sc^{1/3} Re^{0.8} \quad \cdots(10)$$

Sc : Schmidt 数, Re : Reynolds 数

2.4.3 壁面および雰囲気気体からの熱伝達モデル 液膜が壁面から Δt 期間に供給される熱伝達量 Q_{w-f} は、次式で表される。

$$Q_{w-f} = \alpha_f \cdot A_f \cdot (T_w - T_f) \cdot \Delta t \quad \cdots(11)$$

α_f : 壁面から液膜への熱伝達率 [W/(m² · K)], T_w : 壁面温度 [K], A_f : ある液膜セルの面積 [m²]

ただし、壁面—液膜間の熱伝達率 α_f は、液滴の壁面衝突時の接触圧力と液膜の接触圧力を考慮して、後述する壁面—液滴間の熱伝達率 α_d の 1/5 とした⁽²³⁾。

また、気流から液膜への熱伝達については、上述の仮定より、KIVA-II コード内で計算される熱流束の値を用いた。

2.5 液滴熱伝達モデル 壁面に衝突した液滴は、ある一定期間壁面上で液膜状に拡がり、その後収縮し、ある量を壁面上に残して分裂飛散する。ノズルより噴射された液滴の温度は、高温雰囲気から熱を供給されるため、その温度はある程度上昇するが、壁面衝突時の液滴温度 T_d は壁面温度 T_w よりも低いと思われるため、壁面より液滴へ熱移動が起こる。また液滴が液膜に衝突した際にも、ある程度の温度差があるため、液膜と液滴間においても同様の熱移動が生じる。

壁面（液膜）から液滴への熱伝達量 Q_{w-d} は次式で与えられる。

$$Q_{w-d} = \alpha_d \cdot d_{\text{max}} \cdot (T_w - T_d) \cdot \tau_{\text{res}} \quad \cdots(12)$$

α_d : 壁面（液膜）から液滴への熱伝達率 [W/(m² · K)],

T_w : 壁面（液膜平均）温度 [K], τ_{res} : 滞留時間 [s]

壁面から液滴への熱伝達率 α_d は、千田らの結果を用いて 2500 [W/(m² · K)] 一定とした⁽²⁴⁾。また、壁面上での液滴の滞留時間 τ_{res} については、入射液滴の持つ Weber 数が 300 を越えると、液滴の激しい分裂飛散現象（いわゆる Splash 現象）が起こるため、壁面上の滞留時間は Weber 数が小さいときに比べて短くなる。そこで、 $We > 300$ の滞留時間 τ_{res} は千田らの実験結果⁽¹¹⁾ とそれからの外挿により、 $We \leq 300$ の条件の 1/2 と設定した。

3. 実験及び計算条件

3.1 実験条件 非蒸発場の実験条件および方法については、参考文献(25)を参照されたい。蒸発場の実験条件を表1に示す。実験方法には、Meltonら⁽²⁶⁾によって考案されたExciplex蛍光法を用いて、蒸発噴霧の計測を高温・高压容器を用いて行なった。容器や光学系などの実験方法に関しては参考文献(5)～(7)と同様であり、噴射系は文献(25)と同様である。

3.2 計算条件 計算条件を表2に示す。計算領域は半径方向に 50 [mm](60 メッシュ), 軸方向に 32 [mm](32 メッシュ), 円周方向に挟角 θ が 0.5 [deg.](1 メッシュ)のセクタメッシュである。半径方向の分割は、ノズル軸に近づくほど細くなっている。計算には KIVA-II コードを用い、液滴の分裂モデルには TAB モデル⁽²⁷⁾を用いた。また Senda ら⁽²⁸⁾は TAB モデルに対していくつかの修正を行ない、その結果を実験結果

と比較し、粒径分布などを見積もっている。そこで、今回の計算では自由度 $\phi=6$ のカイ2乗分布を分布関数として与えた。また、液滴の振動、歪みおよび表面張力のエネルギーに対する振動、歪みエネルギーの割合を示す定数 K の値を実際の噴霧の粒径とほぼ等しくなるように、 $10/3$ から $8/9$ に修正した。さらに、KIVA-IIコードにおいて考慮されている液滴の衝突による合体現象は、実際の噴霧においてその現象の生じる確率が非常に低いと考えられるため、本研究においては考慮していない。

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	Type : Hole nozzle DLLA-p		
	Diameter of hole d_n [mm]	0.2	
	Length of hole L_n [mm]	1.1	
Ambient gas		N_2 gas	
Ambient temperature	T_a [K]	700	
Ambient pressure	P_a [MPa]	2.55	
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	12.3	
Temperature of wall surface	T_w [K]	550	
Injection duration	t_{inj} [ms]	1.8	
Mean injection pressure	P_{inj} [MPa]	99	
Quantity of injected fuel	Q_{inj} [mg]	12.3	
Impingement distance	Z_w [mm]	30	

Table 2 Computational conditions

		non-evaporation	evaporation
Injection velocity	V_{inj} [m/s]	338	
Injection duration	t_{inj} [ms]	1.54	
Injection quantity	Q_{inj} [mg]	12.0	
Initial droplet temperature	T_{pi} [K]	293	
Fuel		n-Tridecane	
Number of parcel	N_p	1000	
Ambient temperature	T_a [K]	293	700
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	17.3	12.3
Wall temperature	T_w [K]	293	550
Impingement distance	Z_w [mm]	30	
Impingement angle	α_w [deg.]	0	
Maximum time step	dt_{max} [s]	1.0×10^{-6}	
Minimum time step	dt_{min} [s]	0.5×10^{-8}	
Number of mesh		$60 \times 1 \times 32$ (sector mesh)	

4. 計算結果

4.1 非蒸発噴霧の解析 図5に、噴射圧力 $P_{inj}=99$ [MPa]、衝突距離 $Z_w=30$ [mm]の条件における、噴射開始から $t=1.2$ [ms]の噴霧の液滴パーセル分布および実験結果を示す。(a)の実験結果は透過光減衰法によって得られた同時刻の噴霧写真である。KIVA-IIオリジナルコードによる計算結果を、(b)に示す。オリジナルコードでは壁面衝突後の液滴の分散のモデルが組み込まれていないため、衝突した液滴パーセルは

壁面に付着するだけである。したがって、半径方向 $R_w=20$ [mm]付近に見られるいくつかの液滴パーセルが周囲気体の流動により半径方向に拡がるのみで、ほとんどの液滴は噴霧中心軸近傍に付着している。また、壁面上方への成長は小さい。次に、(c)のNaber-Reitzのモデルを組み込んだものは、高いWeber数を持つ液滴が壁面衝突後半径方向へwall jet状に拡がるため、噴霧の先端部に多くの液滴が存在している。この先端部では、壁面上方へも噴霧が成長している。(d)の本研究のモデルでは、噴霧が半径方向へ成長するとともに壁面上方へも大きく成長している。また、図中の白丸の大きさが粒径を表わしており、(c)と比べると壁面上に拡がっている液滴の粒径が小さいことがわかる。本モデルでは衝突後分散した液滴が空間中に広く分布しており、噴霧液滴の空間分布が他のモデルと比べて実験結果と良く一致している。

Fig.5 Comparison of spatial distributions of the droplet parcels ($P_{inj}=99$ [MPa], $Z_w=30$ [mm], $t=1.2$ [ms])

噴霧の外形形状として、噴霧半径 R_w と噴霧高さ h_w について調べた。図6は噴射圧力 $P_{inj}=99$ [MPa]、衝突距離 $Z_w=30$ [mm]の条件での、噴霧半径と噴霧高さの時間変化を示したものである。(a)の噴霧半径は各噴霧モデルにおいて違いはなく、実験結果とも良く一致している。しかし、(b)の噴霧高さにおいては、オリジナルコードでは増加傾向は実験値と一致するが、全時間において過小に見積もられている。Naber-Reitzのモデルは $t-t_{imp} > 1.2$ [ms]では、比較的实验値と良く一致するが、初期の値が小さく噴霧の成長過程が実験結果と一致しない。また、本研究のモデルでは絶対値

はわずかに小さいが、噴霧の壁面上方への成長過程を良く表現している。壁面上方への成長は、雰囲気流動の巻き上げ渦に液滴が追従することによるものと考えられ、オリジナルコードとNaber-Reitzのモデルでは壁面衝突後の液滴の分裂が考慮されていないために、粒径が大きく噴霧高さが過小に見積もられるものと考えられる。

(a) Spray radius R_w

(b) Spray height h_w

Fig.6 Temporal change in spray radius R_w and spray height h_w ($P_{inj}=99$ [MPa], $Z_w=30$ [mm])

4.2 蒸発噴霧の解析 図7に噴射圧力 $P_{inj}=99$ [MPa], 衝突距離 $Z_w=30$ [mm] の場合の噴射開始から $t=1.4$ [ms] の燃料蒸気および液滴パーセルの空間分布とExciplex蛍光法により撮影された同時刻の蒸発噴霧の蒸気相および液相の画像を示す。図中の(a)は実験結果を、(b)はKIVA-IIオリジナルコードによる計算結果、(c)はNaber-Reitzのモデルを組み込んだもの、(d)は本研究のモデルによる計算結果をそれぞれ示す。(b)のオリジナルコードでは、燃料蒸気はその濃度が

非常に薄く、壁面上方への拡がりも実験結果と比べて小さい。また、液相は比較的实验結果と一致しているが、壁面上に液滴が多数付着しており実際の挙動を示すものではない。(c)のNaber-Reitzのモデルでは、(b)に比べて蒸気濃度は濃くなり壁面上方へも成長している。しかし、液滴パーセルの分布を見ると、大粒径の液滴が噴霧先端部の壁面上方にも存在しており、燃料液滴の蒸発が進んでいないことがわかる。一方、(d)の本研究のモデルでは、燃料蒸気濃度は実験値に近い値を示しているが、分布が異なっている。液滴パーセルの分布は、液滴の壁面衝突による分裂を考慮しているため、反射後の粒径が小さく、液滴の蒸発が進んでいる。半径方向に $R_w=15$ [mm] 付近までは液滴の数密度が高いが、 $R_w > 15$ [mm] では液滴の数が少なく、実際の噴霧現象を表現しているといえる。先端部に蒸気濃度の高い領域が存在している原因としては、実際の噴霧では壁面近傍で蒸発した蒸気が壁面上方に巻き上がり、そこで周囲気体と混合・拡散していくが、KIVA-IIコードでは燃料の蒸発が遅く、拡散がうまく取り扱われておらず、液相が噴霧先端部で蒸発しているためであると考えられる。

Fig.7 Comparison of spatial distribution of fuel vapor concentration and droplet parcels

図8にそれぞれのモデルによる計算結果における、燃料蒸気質量の時間変化を示す。図中の黒丸のプロットはExciplex蛍光法により撮影した噴霧画像を軸対象であると仮定して、蒸気濃度を積算した結果であり、

各時刻における撮影結果から求めた値を平均化(5回平均)したもので、上下の横線が計測値の最大値と最小値を示す。実験結果においてばらつきが大きいのは、実際の噴霧は半径方向および高さ方向だけでなく円周方向にも濃度分布を持っているため、一現象の瞬間の2次元断面画像を積算した値に誤差が含まれるためであると考えられる。また、蒸気量が噴射終了後に急激に減少しているのは、蒸気が捕らえられないほど拡散してしまったことによると考えられる。本研究のモデルによる結果は比較的实验値と一致しており、本研究のモデル、Naber-Reitzのモデル、オリジナルコードの順に蒸気濃度が減少している。このことから、燃料蒸気量を見積もるためには、液滴の壁面衝突による微粒化を考慮することが重要であると考えられる。

Fig.8 Temporal change in fuel vapor mass Q_{vap}
($P_{inj}=99$ [MPa], $Z_w=30$ [mm])

5. 結論

本研究では、壁面に衝突するディーゼル噴霧に対して、液膜の形成過程ならびに壁面からの熱伝達を記述する数値解析モデルを考案し、KIVA-IIコードに組み込んで計算を行なった。さらに実験結果との比較を行ない下記の結論を得た。

- (1) 液滴の壁面衝突挙動を詳細にモデリングすることにより、非蒸発場における噴霧の外形状、液滴の空間分布を見積もることができる。
- (2) 蒸発場における計算において、壁面衝突による微粒化現象および壁面から液膜、液滴への熱伝達を考慮することにより、燃料蒸気濃度を算定することが可能である。

参考文献

- (1) 藤本, 斎藤, 箕浦, 千田, 機論, 54-503(B), (1988), pp.2252-2259.
- (2) 桂, 斎藤, 千田, 藤本, 機論, 56-521(B), (1990), pp.227-234.
- (3) 斎藤, 橋本, 長江, 千田, 藤本, 機論, 57-543(B), (1990), pp.3973-3980.
- (4) 千田, 岩下, 倉橋, 斎藤, 藤本, 自技論, Vol.25.No.2, (1994), pp.76-81.
- (5) 小林, 田邊, 千田, 藤本, 第11回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1993), pp.265-270.
- (6) 千田, 神田, 小林, 田邊, 藤本, 機論, 63-607(B), (1997), pp.322-327.
- (7) 神田, 千田, 小林, 田邊, 藤本, 機論, 63-607(B), (1997), pp.328-333.
- (8) Amsden, A.A., Ramshaw, J.D., O'Rourke, P.I. And Dukowicz, J.K., Los Alamos National Laboratory report LA-10254-MS, (1985).
- (9) Amsden, A.A., O'Rourke, P.I. and Butler, T.D., Los Alamos National Laboratory report, (1987).
- (10) Wachters, L.H.J. and Westerling, N.A.J., chem.Eng.Sci., 21, (1996), pp.1047-1057.
- (11) 千田, 山田, 竹内, 三木, 機論, 52-481(B), (1985), pp.3372-3379.
- (12) Naber, J.D. and Reitz, R.D., SAE Paper No.880107, (1998).
- (13) 千田, 小林, 岩下, 藤本, 機論, 60-578(B), (1994), pp.341-348.
- (14) Senda, J., Kobayashi, M., Iwashita, S. and Fujimoto, H., SAE Paper No.941894, (1994).
- (15) Al-Roub, M.A., Farrell, P.V. and Senda, J., SAE Paper No.960863, (1996).
- (16) Al-Roub, M.A., Ph.D. Thesis at Univ. of Wisconsin-Madison, (1995).
- (17) 廣安, 角田, 千田, 機論, 39-328, (1973), pp.3779-3787.
- (18) Coghe, A., Cossali, G.E. and Marengo, M., 11th European Conference of ILASS-Europe, (1995).
- (19) Mundo, C.H.R., Sommerfeld, M. and Tropea, C., Int. J. Multiphase Flow, Vol.21, No.2, (1995).
- (20) Yarin, A.L., Weiss, D.A., J. Fluid Mech., Vol.283, (1996).
- (21) Marengo, M., Ph.D. Thesis at Univ. of Erlangen-Nuremberg, (1995).
- (22) 国井, 古崎, 移動速度論, 培風館, (東京), (1980-5), pp.109-160.
- (23) Eckhaue, J. E. and Reitz, R. D., Atomization and Sprays, vol.5, (1995), pp.213-242.
- (24) 千田, 山田, 藤本, 三木, 日本機械学会論文集(B), 53-485, (1987), pp.176-182.
- (25) Senda, J., Kanda, T., Al-Roub, M.A., Farrell, P.V., Fukami, T. and Fujimoto, H., SAE Paper, No.970047.
- (26) Melton, L.A., Applied Optics, 22-14, (1983), pp.2224-2226.
- (27) O'Rourke, P.J. and Amsden, A.A., SAE Paper, No.872089, (1987).
- (28) Senda, J., Dan, T., Takagishi, S., Kanda, T. and Fujimoto H., The 7th Int. Conf. Liquid and Spray Systems (ICLASS-'97), (1997), pp. 149-156.