ガス溶解燃料を用いたディーゼル噴霧の微粒化特性*

(第3報, 液化CO₂混合燃料噴霧の微粒化特性と蒸気生成量の予測)

千田 二郎^{*1}, 浅井 崇胤^{*2}
川口 文悟^{*2}, 藤本 元^{*1}

Characteristics of Gas-Dissolved Diesel Fuel Spray

(3rd Report, Spray Characteristics and Simulating Flash Boiling Process)

Jiro SENDA, Takatsugu ASAI,
Bungo KAWAGUCHI and Hajime FUJIMOTO

The new injection system by using mixed fuel dissolved with liquefied CO₂ was proposed in this paper. Liquefied CO₂ was mixed into n-tridecane under pressurized state in order to promote the spray atomization and evaporation due to the effect of the flash boiling phenomena in fuel injection, and to control the combustion process due to the effect of internal EGR effect of CO₂ gas. Therefore, the simultaneous reduction of soot and NO_x can be achieved effectively by use of this injection system. In this paper, the characteristics of diesel fuel spray dissolved with liquefied CO₂ were investigated quantitatively by means of several optical measurements. And the spray characteristics were revealed by the analysis of chemical thermodynamics. As a result, the atomization of this fuel is promoted due to the flash boiling much more than n-tridecane as the reference of the normal fuel and the spray structure is highly different from that of the normal fuel. Moreover, the numerical analysis for the atomization and the vaporization process was carried out based on the flash boiling spray models.

Key Words: Fuel Injection, Atomization, Diesel Engine, Spray Structure, Flash Boiling, Gas Separation

1. 緒言

ディーゼル機関における低排気エミッション化研究として, これまで高圧燃料噴射技術の適用による排出濃度の大幅な低減が得られている. ここでは, NO濃度の低減のため噴射時期のリタードや, 小噴孔径ノズルの使用による比較的均一な混合気の形成手法が試されている. しかし, この高圧噴射と小噴孔径ノズルの適用によっても火炎内のNO濃度は低減できていない. さらに近年, 予混合圧縮着火や過早燃料噴射による希薄で均一な混合気の急速燃焼法による低NO_x化が提案されているが, HCの排出, 高負荷条件でのNO濃度の増加など問題が多く, 種々の負荷域での低HC, 低NO燃焼の実現に至っていない⁽¹⁾.

このような背景のもとに, 著者らは全く別の観点から, 燃料に何らかの添加物を混入し, その物理的作用(例えば減圧沸騰現象)により高圧噴射に依存せずに噴霧の微粒化と蒸気形成過程を改善し, さらにその化学的作用により燃焼過程自体を制御し, 結果的に高効率かつ低排気エミッション噴霧燃焼法が具現化できないかを

模索している⁽²⁾⁽³⁾. 具体的には, CO₂を高圧下で液化し, それを軽油の成分であるn-トリデカン(n-C₁₃H₂₈)と液-液混合させた液化CO₂混合燃料を用い, 比較的低圧の燃料噴射圧力条件下で, その噴霧特性を調べた. その結果, 雰囲気圧力の低い条件およびCO₂モル分率の高い条件で噴霧の拡がり角度が増加し, 噴霧内部の燃料濃度が希薄化していることを確認した. 本報では, この液化CO₂混合燃料噴霧の微粒化特性を定量的に評価し, さらに著者らがこれまでに提案した減圧沸騰噴霧モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いて解析した蒸気生成特性の結果を示す. なお, 本液化CO₂混合燃料を用いた場合の噴霧燃焼時での燃焼性能および排気性能の改善効果は確認済みである⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

2. 二成分系溶液に関する化学熱力学理論

2.1 二成分系溶液の飽和蒸気圧曲線

純粋な単一成分の燃料が異成分の気体を溶解すると, 分子レベルで気体を取込む状態となるため, その物性は前報で詳述したような二成分系溶液に関する化学熱力学的理論に基づく. 二成分系溶液さらには多成分系溶液の場合, 飽和蒸気圧曲線はある一定の幅を持つ二相領域で表され, 二相領域の上部および下部の境界線である

* 原稿受付 1998年10月5日.

^{*1} 正員, 同志社大学工学部 (☎610-0321 京田辺市多々都谷1-3).

^{*2} 学生員, 同志社大学大学院.

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

飽和液体曲線および飽和蒸気曲線は臨界点において合致する。本研究で用いた n -トリデカン- CO_2 溶液系の CO_2 モル分率 (以下 X_{CO_2}) に対する二相領域は修正 BWR 式⁽⁸⁾により, 臨界軌跡は Chueh-Prausnitz 法⁽⁹⁾および Kregewski-Kay 法⁽¹⁰⁾により推算した。

2.2 二成分系溶液の減圧度に依存する相変化

二成分系溶液の減圧による相変化は図 1 に示す様に減圧の度合いによって三形態に分けられる。まず, 減圧が二相領域にまで達しない場合, 相変化は起こらない(Process①)。二相領域内部にまで減圧されると液相と気相が共存する状態となる。この時, 蒸発潜熱により系の温度降下が起こる(Process②)。さらに二相領域の飽和蒸気曲線下部にまで減圧されると系内部の液相がすべて蒸気になり, この場合においても蒸発潜熱により系の温度は前述の状態よりもさらに下がると考えられる(Process③)。

ここで, 溶液内部の領域を考えた場合, 溶液内部の圧力は周囲圧力とほぼ同等と考えられ, しかも急激な減圧において系は周囲からの熱の授受のない閉じた系と考えられるのため, 溶液あるいは液滴内部からの蒸発(沸騰)には, 減圧が二相領域に達するかもしれない二相領域を横切ることが条件となる。

また, 上記の仮定が成り立たない静的な状態(周囲からの熱の移動が十分に行なわれる状態)ではヘンリーの法則⁽¹¹⁾に従い, 噴射に伴う急減圧により減圧沸騰現象が起こらなかった場合でも, 噴射された燃料が静的な状態へと変化することにより, 規定される溶解度より多くの CO_2 が溶解されていた場合は, その過飽和分の CO_2 の析出は十分に起こり得ると考えられる。

3. 実験手法および実験条件

3.1 噴射装置 図 2 に本研究で用いた燃料噴射装置の概略を示す。液化 CO_2 はポンペから高压容器②(耐圧: 20[MPa])内に供給され, 液化状態を安定に維持するために窒素で 10[MPa]に加圧した状態で準静的に増圧器 1③(シリンダ容積: 77[cc])に導かれる。液化 CO_2 は燃料と任意の割合で混合可能であり, 空気圧シリンダ④のピストンと連結したロッドが増圧器 1 内に差し込まれ, ロッドの先端には円盤が取り付けられており, これが空気圧で上下することにより燃料の混合・攪拌が行なわれる。増圧器の駆動には空気ボンベからレギュレータ⑤を通して導かれた空気を用い, 増圧器への給油と加圧行程は 5 ポート電磁弁⑥にて制御される。燃料の噴射圧はレギュレータ⑦により制御され, ノズルの針弁は増圧器 2⑧により油圧制御され

Fig.1 Illustration of phase changes accompanying rapid decompression

Fig.2 Injection system of gas dissolved fuel

る。また, 噴射ノズルホルダにはマイクロヒータ⑭(200W)が巻き付けられ燃料温度を任意に設定でき, 熱電対(シース熱電対 K 型 $\phi 0.53$ [mm])により温度管理される。

3.2 実験条件および撮影系 実験では, 液化 CO_2 溶解燃料 ($X_{\text{CO}_2}=0.8$), 比較対象の代表燃料として n -トリデカン燃料 ($X_{\text{CO}_2}=0.0$)を用い, 噴射期間を 10[ms], 噴射圧力を 20[MPa]に設定した。また, 一般に通常の燃料噴霧の微粒化は雰囲気気体の液体噴流への剪断力として雰囲気気密度 ρ_a に左右されるものと考えられる。本実験では雰囲気圧力 p_a の変化による CO_2 溶解燃料噴霧の微粒化・蒸発などの噴霧特性の変化を調べることを目的としているため, 雰囲気気密度 ρ_a に起因する剪断力による微粒化効果を除外するために各種気体を混合することにより雰囲気気体を構成し, ρ_a を実機における燃料噴射時期相当の 17[kg/m³]と一定とした。各背圧における組成を表 1 に示す。

本実験では, 噴霧内部の微視的観察および定量的粒径測定のため 35mm スチルカメラによる噴霧の直接撮

大散乱光撮影を行なった。撮影系の概略図を図3に示す。拡大撮影はペローズを取り付けた35mm スチルカメラ (レンズ: 焦点距離 105[mm]; $f1.8$) により行ない、用いたフィルムは高線解像度フィルム (MINI COPY FILM HR2 線解像度 850 本/mm) である。粒径測定に十分な撮影解像度を得るために、35mm スチルカメラによりフィルム等倍撮影を行なった。35mm スチルカメラによる撮影範囲は、ノズル先端から噴孔下流 40~64[mm]の位置で半径方向には噴霧軸を中心に 35[mm]の領域である。容器内背圧は $p_a=2.9, 2.0$ および 1.1[MPa]、 CO_2 モル分率は $X_{\text{CO}_2}=0.0$ (燃料温度 $T_f=293[\text{K}]$) および $X_{\text{CO}_2}=0.8$ ($T_f=383[\text{K}]$) とした。

Table 1 Composition and partial pressure of ambient gas
Condition in $p_a=17.0$ [kg/m³], $T=290$ [K]

Ambient pressure p_a [MPa]	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9
Partial pressure Ar [MPa]	0.835	0.060					
Partial pressure He [MPa]			0.321	0.670	1.018	1.367	1.715
Partial pressure Air [MPa]	0.265	1.340	1.379	1.330	1.282	1.233	1.185

Fig.3 Photographic system for laser sheet scattering photography

なお散乱撮影法により噴霧液滴径の測定を行なうに際し、正確な粒径分布を把握するために予め粒径が既知であるガラスビーズ (東芝マイクロビーズ MB20 平均粒径 11[μm]; 2~20[μm]) による検定実験を行なった。実際のガラスビーズの粒度分布と測定値を比較することにより一定の補正値を求め、この補正値を実際の噴霧粒子に適用することで噴霧液滴径の測定を行なった。ここでのガラスビーズによる検定結果を図4に示す。

また、液化 CO_2 溶解燃料の減圧沸騰噴霧の定性的観察のために、高速度 VTR による噴霧シャドウグラフ撮影を行なった。撮影速度は 9000[fps]である。撮影範囲は噴霧全領域であり、実験条件は同様に $p_a=2.9, 2.0$ および 1.1[MPa]、 $X_{\text{CO}_2}=0.0$ ($T_f=293[\text{K}]$) および $X_{\text{CO}_2}=0.8$ ($T_f=383[\text{K}]$) とした。なお、二相領域と実験点の相互

関係を図5に示す。

Fig.4 Calibration results of glass beads diameter

Fig.5 Comparison of experimental points with saturated liquid lines of n-tridecane with CO_2 dissolved

4. 実験結果および考察

4.1 液化 CO_2 溶解燃料噴霧の微粒化特性 燃料噴霧液滴の粒径測定に際し、高解像度フィルムを用い拡大撮影を行なった結果を図6に示す。噴霧中流部にあたる $t=6[\text{ms}]$ 時の、 $p_a=2.9[\text{MPa}]$ の条件の噴霧全体写真において、 $X_{\text{CO}_2}=0.8$ の条件では $X_{\text{CO}_2}=0.0$ の条件に比べて噴霧の液相および液滴高密度領域の散乱光強度が減少し、やや瘦せた噴霧形状を示している。噴霧外縁部写真において、 $X_{\text{CO}_2}=0.8$ の条件ではやや噴霧内部燃料濃度の希薄化が進んでいるが、噴霧のいわゆる枝状構造⁽¹²⁾⁽¹³⁾が依然確認でき、噴霧構造の大きな変化は見られない。噴霧外縁部局所写真においても $X_{\text{CO}_2}=0.0$ では大粒径の液滴もしくは液滴塊が存在し、 $X_{\text{CO}_2}=0.8$ においても比較的大きな燃料液滴が確認できる。さらに減圧を行なった $p_a=1.1[\text{MPa}]$ の条件では、 $X_{\text{CO}_2}=0.8$ の場合の液滴の高密度領域による散乱光は大きく減少し、先に確認された噴霧のしわ状部が全く確認されず、非常に希薄かつ均一な噴霧が形成されている。外縁部においてもその差は明瞭であり、極微小粒径の液滴群の拡散が確認できる。

次に、上記の結果を定量的に解析するために、ガラ

(a) Time after injection start $t=6$ [ms], $p_a=2.9$ [MPa] (b) Time after injection start $t=6$ [ms], $p_a=1.1$ [MPa]

Fig.6 Photograph and microscopic photograph by laser light scattering

スピーズによる検定結果を基にして算出した噴霧液滴の粒度分布を図7に示す。 $p_a=2.9$ [MPa], $X_{CO_2}=0.0$ の条件においては液滴径が $20\sim 30[\mu m]$ 付近で広範囲に分布しており最大頻度も 10 [%]以内にとどまっている。最も大きな液滴径は $70[\mu m]$ 以上にまで達している。 $X_{CO_2}=0.8$ の条件においては、 $17\sim 20[\mu m]$ 付近の頻度が高くなり 20 [%]に達していることから、やや噴霧液滴の小粒径化、均一化が進んでいる。しかし、依然として $30[\mu m]$ 以上の粒径が存在している。

一方、 $p_a=1.1$ [MPa]になると、 $X_{CO_2}=0.8$ の噴霧において $14\sim 17[\mu m]$ 付近で最大頻度を持ち、その値は 25 [%]を超え 30 [%]にも達している。また、 $20[\mu m]$ 以上の液滴がほとんど存在しなくなっていることから、大幅な微粒化促進効果が確認でき、急激な減圧沸騰現象による噴射早期からの燃料液体の微粒化および燃料噴霧の希薄、均一化が推察される。

次に上記の粒度分布に基づき算出したザウタ平均粒径(以下 d_{32})の時間変化を図8に示す。 $X_{CO_2}=0.0$ において d_{32} は各背圧で多少のばらつきはあるがほぼ $30\sim 40[\mu m]$ で推移している。対照的に $X_{CO_2}=0.8$ ではほぼ各背圧において d_{32} は $20[\mu m]$ 以下にまで減少しており、 $X_{CO_2}=0.0$ に比べ約 $15\sim 20[\mu m]$ 程の微粒化改善効果が確認される。また、 $X_{CO_2}=0.0$ では d_{32} は p_a に依らずほぼ一定の変化を示すのに対し、 $X_{CO_2}=0.8$ では約 $20[\mu m]$ 程の微粒化効果があるとともに、 p_a の低下とともに d_{32} はさらに $5\sim 10[\mu m]$ 程減少する。

以上、噴霧直接拡大撮影による液滴径分布の測定により、液化 CO_2 溶解燃料による減圧沸騰噴霧の形成により大幅な微粒化改善効果があることが確認できた。また、この傾向は背圧の低下すなわち二相領域内部への減圧度の増加に伴い大きくなるとともに、燃料液滴の微粒化だけでなく微小粒径液滴の大幅な均一化も促進されることが確認できた。

Fig.7 Particle size distribution ($t=6$ [ms]) Fig.8 Distribution of mean droplet diameter d_{32}

4.2 シャドウグラフ撮影による減圧沸騰噴霧特性

本研究のような減圧沸騰噴霧を形成する場合、気泡の成長による蒸発すなわち液化された CO_2 成分の沸騰により燃料噴霧の蒸発が促進される。本研究の所期の目的の一つである沸騰あるいは析出気体すなわち CO_2 ガスによる燃焼制御もこれを利用したものであり、 CO_2 ガスを含めた燃料蒸気の沸騰と析出の状態を把握する必要がある。そこで、シャドウグラフ法により減

Fig.9 Temporal change of spray pattern by shadow graph method ($p_a = 1.1$ [MPa])

圧沸騰噴霧における蒸気の析出状態を観察したものを図9に示す。ここで、背圧条件は $p_a = 1.1$ [MPa] であり、 $X_{CO_2} = 0.8$ において、噴霧液相部の暗い影の領域が $X_{CO_2} = 0.0$ に比べて希薄化し、かつ噴射直後から噴霧が半径方向へ広がっている。また時間の経過とともに $X_{CO_2} = 0.0$ に比べ噴霧先端到達距離が短くなるとともに、気相の析出はさらに激しくなり噴霧内部からの激しい減圧沸騰現象がより明瞭に確認できる。

シャドウグラフによる画像をもとに求めた噴霧先端到達距離 (Spray tip penetration) の時系列変化を図10に示す。図10において、 $X_{CO_2} = 0.0$ の噴霧の到達距離は、 p_a の低下とともにやや伸びる傾向にある。これは、 p_a の低下に伴う噴出速度の増加に起因していると考えられる。対照的に $X_{CO_2} = 0.8$ の条件では p_a の低下とともに到達距離が短くなる傾向にある。これは、噴射初期からの減圧沸騰噴霧の影響がかなり大きく、シャドウグラフの結果からも確認されたように、噴射開始後早期からの半径方向への広がりが大きいことに起因している。

以上より、先に行なった非常噴霧の噴霧散乱光撮影では捉えることのできなかった噴霧外縁部および下流部の蒸気相をシャドウグラフにより明らかにするとともに、減圧沸騰現象による内部からの噴霧構造の崩壊を時系列的に確認することができた。また、減圧沸騰現象に起因する燃料噴霧の比較的早期からの短到達距離化および広域拡散化を確認することができた。

5. 液化 CO_2 溶解燃料を用いた減圧沸騰噴霧モデル

5.1 解析モデル これまでの実験解析により背

Fig.10 Temporal change of spray tip penetration

圧 p_a が二相領域内部に位置する場合に、減圧沸騰現象が噴霧特性および微粒化特性に大きく影響することが解明された。ここでは、以前に考案した単成分燃料を対象とした減圧沸騰噴霧モデル⁽⁵⁾を、本研究における n -トリデカン- CO_2 系の二成分系溶液に適用するために改良し計算を行なった。なお、モデルの概略を図11に示す。

5.1.1 気泡核生成モデル 液体の抗張力は非常に大きく、液体内部で蒸気泡が成長するためにはその核となる気泡核の存在が不可欠である。発生気泡数 N は核生成理論より与えられ、本モデルでは式(4-1)を適用している。なお、 ΔT_0 は初期過熱度を示す。

$$N = 1.11 \times 10^{12} \exp(-5.28 / \Delta T_0) \{10^{-4.34 \exp(-5t)}\} \quad (4-1)$$

5.1.2 気泡成長過程 減圧沸騰噴霧の解析モデルにおいて、気泡の成長過程は次の Rayleigh-Plesset の式(4-2)で記述できる。

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho}(p_w - p_r) \quad (4-2)$$

ここで、 R は気泡半径、 ρ は気泡周囲の流体の密度である。 $\dot{R}$, $\ddot{R}$ は時間を t とした場合、それぞれ dR/dt , d^2R/dt^2 を示す。また、次に示す気泡壁の流体圧力 p_w の式(4-3)⁽¹⁴⁾を式(4-1)と併せて用いることにする。

$$p_w = p_v + \left(p_{r0} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3n} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu_1 \dot{R}}{R} - \frac{4\kappa \ddot{R}}{R^2} \quad (4-3)$$

ここで p_{r0} は初期の気泡核周囲の流体圧力、 R_0 は気泡核半径であるから、 $p_{r0} + 2\sigma/R_0$ が気泡核内ガス圧力に相当する。また、 n はポリトロップ指数、 μ_1 は燃料液体の粘性係数、 κ は表面粘性係数である。

5.1.3 液膜分裂過程 本研究のように液膜が気泡流である場合、液膜内部で気泡群の体積が大きくなると液膜は液滴群へ分裂すると考えられる。本研究では、この液膜の分裂を気泡の体積割合を示すボイド率 ε によって規定し、この ε が臨界ボイド率 ε_c を超えたときに分裂が起こるとする。液膜内の気泡体積の割合を示す ε は次式(4-4)で与えられる。

$$\varepsilon = V_{\text{bubble}} / (V_{\text{bubble}} + V_{\text{liquid}}) \quad (4-4)$$

一般に、極めて小さい気泡が液相中に分散するような気泡流では、液相の粘性より大きい見かけの粘性係数を持つことが知られている。そこで、本研究では $\varepsilon_c = 0.55$ とした。また、分裂後の液滴は気泡数の2倍の数の液滴群に分裂するものと仮定した。

5.1.4 蒸発過程 加熱過程による沸騰現象の蒸発は液体内部のエネルギーすなわちエンタルピーの変化に起因する現象であるのに対し、減圧沸騰現象には温度だけでなく圧力の変化も起こるため、その蒸発を簡単に記述することはできない。本研究では、減圧沸騰現象による蒸発を、気泡成長による蒸発 (図中(4-5)式)、熱伝達による液膜・液滴表面からの蒸発 (図中(4-6)式)、過熱度による蒸発 (図中(4-7)式) に分類し、それぞれについて解析した。

ここでは、計算により推算した気泡成長過程および燃料蒸気濃度の結果について報告する。

5.2 減圧沸騰における減圧度に依存する気泡成長過程

各背圧 p_a による $X_{\text{CO}_2}=0.6$ および $X_{\text{CO}_2}=0.8$ の条件における気泡成長過程を図12および図13に示す。図12より $X_{\text{CO}_2}=0.6$ では、 $p_a=1.1, 1.4$ および 1.7 [MPa] において気泡成長が起こりやがて分裂するが、 $p_a=2.0$ [MPa] 以上の条件では気泡は一旦成長するものの成長・収縮を繰り返し、次第に一定の気泡径となることにより成長しなくなる。また、気泡の分裂は気泡径がほぼ $20[\mu\text{m}]$ 付近で起こり、 p_a が低下するにつれ分裂に至るまでの時間も短くなる。 $p_a=2.0$ [MPa] では気泡径は $20[\mu\text{m}]$ 付近にまで成長するが分裂には至らず、 $4[\mu\text{s}]$ 付近から収縮し始め、成長・収縮の増加割合は小さくなり約 $17[\mu\text{m}]$ 付近で一定値を示す。 p_a が増加するに従い成長・収縮の度合いは低下し、気泡径も小さい値で収束する。図13より $X_{\text{CO}_2}=0.8$ では、 $X_{\text{CO}_2}=0.6$ と異なり $p_a=2.0$ [MPa] においても気泡は成長後分裂に至る。また、分裂するまでに成長する気泡径も $X_{\text{CO}_2}=0.6$ よりやや大きくなる傾向を示す。 $p_a=2.3$ [MPa] 以上の背圧条件では $X_{\text{CO}_2}=0.6$ 同様に気泡が成長・収縮を繰り返し、

Fig.11 Analytical model of flash boiling spray in this study

Fig.12 Change in bubble growth with ambient pressure ($X_{CO_2}=0.6$, $T_c=383[K]$)

Fig.13 Change in bubble growth with ambient pressure ($X_{CO_2}=0.8$, $T_c=383[K]$)

Fig.14 Temporal change in vapor mass ($X_{CO_2}=0.6$, $T_c=383[K]$)

Fig.15 Temporal change in vapor mass ($X_{CO_2}=0.8$, $T_c=383[K]$)

やがてある一定の気泡径に収束する。以上の結果は実験結果⁽¹⁵⁾と非常に良い一致を示すとともに、背圧すなわち二相領域内への減圧度に依存する減圧沸騰現象を気泡成長の観点から見ることができる。

5.3 減圧沸騰における燃料蒸気濃度 各背圧 p_a による $X_{CO_2}=0.6$ および $X_{CO_2}=0.8$ の条件における燃料蒸気濃度の時間変化をそれぞれ図 14 および図 15 に示す。図 14 に示すように、気泡の分裂が起こる $p_a=1.7[MPa]$ 以下の条件において、噴射開始後 1.5[ms] における総蒸気量は $p_a=1.1[MPa]$ ではほぼ $2.0 \times 10^{-4}[\text{mol}]$ に達している。 $X_{CO_2}=0.8$ では、図 15 に示すように蒸気化は $X_{CO_2}=0.6$ に比べてさらに促進され、 $p_a=1.1[MPa]$ では同時刻において $2.7 \times 10^{-4}[\text{mol}]$ にまで増加している。また、 $p_a=2.0[MPa]$ においても大幅に増加している。減圧沸騰噴霧の総蒸気量のほぼ 90%以上が CO_2 であり、この条件で燃料噴射が行なわれた場合には、 CO_2 の化学的效果を考慮すると所期の目的を達成し得る可能性は大きいと思われる。

6. 結言

本研究では、ディーゼル燃料として n-トリデカン中に液化 CO_2 を溶解した液化 CO_2 溶解燃料の、燃焼過程に大きく影響を及ぼす噴霧特性および微粒化特性に着目し、二相領域という化学熱力学的観点から実機相当雰囲気密度条件での液化 CO_2 溶解燃料の減圧沸騰噴霧の実験解析を行なった。また、減圧沸騰噴霧の蒸発過程に対して減圧沸騰噴霧モデルによる数値シミュレーションを適用した。以上、噴霧観点からの実験結果を考察し、以下のような結論が得られた。

- (1) 液化 CO_2 溶解燃料噴霧は、減圧沸騰現象により先端到達距離の短い短到達距離噴霧を形成する。
- (2) 液化 CO_2 溶解燃料噴霧は、燃料噴射早期からの噴霧の希薄・均一化および広域拡散化を可能にする。
- (3) 液化 CO_2 溶解燃料噴霧の微粒化効果は、本実験条件において、n-トリデカン噴霧に比べて S.M.D. で約 20[μm] の低減であり(約 57[%]低減)である。また減圧度の大きい $p_a=1.1[MPa]$ の条件においては

参考文献

- (1) 千田二郎, ディーゼルエンジンの新しい燃焼技術, 日本機学会東海支部・関西支部合同企画第29回座談会資料, (1996), 17-28.
- (2) 千田二郎・柴田一郎・段智久・藤本元, ガス溶解燃料を用いたディーゼル噴霧の特性(第1報, 窒素溶解燃料噴霧の特性), 機論, 63-613, B(1997), 3173-3178.
- (3) 千田二郎・柴田一郎・藤本元, ガス溶解燃料を用いたディーゼル噴霧の特性(第2報, 液化CO₂混合燃料噴霧の特性), 機論, 63-613, B(1997), 3179-3186.
- (4) 千田二郎・錦織環・北條義之・塚本時弘・藤本元, 減圧沸騰噴霧の微粒化・蒸発過程のモデリング(第1報, 噴霧特性の背圧による変化), 機論, 60-578, B(1994), 3511-3555.
- (5) 千田二郎・錦織環・北條義之・塚本時弘・藤本元, 減圧沸騰噴霧の微粒化・蒸発過程のモデリング(第2報, 微粒化と蒸発過程のモデル解析), 機論, 60-578, B(1994), 3556-3562.
- (6) 千田二郎・平谷有祐・伊福義治・橋本耕二・藤本元, 急速圧縮膨張装置を用いた液化CO₂混合燃料噴霧の燃焼特性, 自技論, 28-3, (1997), 35-40.
- (7) 千田二郎・横山哲也・池田護・伊福義治・藤本元, 液化CO₂溶解燃料によるディーゼル機関のすす・NO_xの同時低減, 自技論, 30-1, (1999), 15-20.
- (8) 斎藤正三朗, 平衡物性推算の基礎, 培風館, (1988), 143-184.
- (9) Chueh, P.L., Prausnitz, J.M., Vapor-liquid Equilibria at High Pressure: Calculation of Critical Temperature, Volume and Pressure of Nonpolar Mixture, AIChE J., 13-6, (1967), 1107-1113.
- (10) Kreglewski, A., Kay, W.B., The Critical Constants of Conformational Mixtures, J. Phys. Chem., 73-10, (1969), 3359-3366.
- (11) J.N. Murrell, E.A. Boucher, (中西浩一郎, 飯田雅康, 岡崎進 訳), 液体と溶液, 啓学出版, (1984), 150-155, 134-138.
- (12) Nishida, M., Nakahira, T., Komori, M., Tsujimura, K., Yamaguchi, I., Observation of High Pressure Fuel Spray with Laser Light Sheet Method, SAE(Detroit), 920459, 1-10.
- (13) 和栗雄太郎, 藤井勝, 網谷竜夫, 恒谷礼二郎, ディーゼル機関燃料噴霧到達距離に関する研究, 機論(第2部), 25-156, (1958-8), 820-826.
- (14) 井田富夫, 杉谷恒也, 圧力変化を受ける油中の気泡の運動(第2報, 単一気泡の実験解析), 機論, 45-399, B(1979), 1650-1658.
- (15) 浅井崇胤, 松井宏次, 千田二郎, 藤本元, 液化CO₂溶解燃料を用いたディーゼル噴霧の特性, 第13回内燃シンポジウム講演論文集, (1996-7), 25-30.