



## 高温・高圧力環境で蒸発するパームメチルエステル液滴の温度および直径履歴の計測

### Measurement of Temporal Variations of Temperature and Diameter of a Palm Methyl Ester Droplet Evaporating at High Temperatures and High Pressures

金子 堅太郎, 野村 浩司, 橋本 望  
 (Kentarō KANEKO) (Hiroshi NOMURA) (Nozomu HASHIMOTO)  
 日本大学 日本大学 電力中央研究所  
 (Nihon Univ.) (Nihon Univ.) (CRIEPI)

Temporal variations of droplet temperature and diameter were measured for palm methyl ester (PME) to obtain fundamental data on spray combustion of biomass fuel. Experiments were conducted in high-pressure and high-temperature nitrogen environments. Light oil and n-hexadecane were also examined as reference fuels. Ambient temperature was varied from 473 to 873 K. Ambient pressure was varied from 0.10 to 2.0 MPa. Initial droplet diameter was set between 0.50 and 0.55 mm for all tests. The droplet temperature at the end of evaporation was obtained from droplet temperature histories as a function of the ambient temperature and pressure. The evaporation constant and the normalized 95 vol% droplet lifetime were obtained from droplet diameter histories as a function of the ambient temperature and pressure. As the ambient pressure increased, the evaporation constant increases and the normalized 95 vol% droplet lifetime decreases at high ambient temperatures. On the other hand, the evaporation constant decreases and the normalized 95 vol% droplet lifetime increases at low ambient temperatures. Relationship between the droplet temperatures at the end of evaporation and the ambient temperature which are normalized by the boiling point or the final boiling point of distillation curve was almost identical for all three fuels at the ambient pressure of 0.10 MPa and for n-hexadecane at all subcritical ambient pressures. The normalized droplet temperature at the end of evaporation increases and then approaches asymptotically to unit as the normalized ambient temperature increased.

Keywords: Droplet, Evaporation, Biomass Fuel, Palm Methyl Ester, Temperature Measurement

#### 1. はじめに

化石燃料の大量消費に伴う地球温暖化の問題や化石燃料枯渇の不安は、近年深刻な状況である。これらを解決する方法の一つとして、植物由来のバイオマス燃料の利用が挙げられる。植物由来のバイオマス燃料は、有限資源である化石燃料とは違って数年から数十年の短い期間で再生し、半永久的に使用できること、燃焼時に発生する二酸化炭素は燃料の原料となる植物の成長過程で光合成により回収されるというカーボンニュートラルの性質を有していること、既存の燃焼機関に大幅な変更を加える必要がなく使用できることなどの点から、化石燃料の代替燃料として期待されている。

パームメチルエステル(PME)をはじめとした種々のバイオマス燃料を実機に用い、燃焼特性を調査した例<sup>(1~6)</sup>は多くあるが、実機を用いた噴霧燃焼実験の結果を解析する基礎データは依然不足している。噴霧燃焼を微視的に捉えた単一液滴を用いて噴霧燃焼の基礎データを取得することは有効である。これまで本研究では、高温・高圧雰囲気にてPMEの単一液滴を挿入し、液滴直径履歴を取得してきた<sup>(7)</sup>。本報では、蒸発中の液滴温度

を計測できるように実験装置の改造を行い、PME、比較燃料として単一成分燃料である正ヘキサデカンおよび実用燃料であり多成分燃料である軽油を対象に液滴蒸発実験を行った。液滴温度測定には、直径13 μmのK種熱電対を用いた。雰囲気温度・圧力および燃料種を変化させ、液滴直径履歴および液滴温度履歴を取得した結果を報告する。

#### 2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は、高温容器、液滴生成装置、液滴支持装置および液滴移動装置から構成される内部モジュール、高圧容器、制御装置および液滴観察装置からなる。高圧容器は常用耐圧が5 MPaであり、内部モジュールを高圧容器に格納することで高圧雰囲気での液滴蒸発実験が可能になる。高圧容器内の昇圧は、高圧窒素を充填することで行う。昇圧に用いた窒素は高圧容器内に設置された高温容器の内部を充たし、燃料の自発点火を防ぐ。液滴は、液滴生成装置により高温容器下方の液滴生成部で生成され、液滴移動装置のアームに取り付けられた懸垂線に懸垂される。実験開始時には、液滴は懸垂線に懸垂された状態で液滴移動装置のアームにより高温容器下部に設けられたスリットから高温容器に挿入される。

図2に懸垂線支持枠の概略を示す。本報では3つのタイプの懸垂線支持枠について性能評価を行った。支持枠Aは直径1mmのステンレス管で作られている。懸垂線支持枠に、直径7μmのAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバ(チビアルフ, (株)ニチビ製)を交差させて設置し、その交点に温接点が位置するようにアーチ状に直径13μmのK種熱電対を設置した。液滴はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバの交点に懸垂した。懸垂線支持枠BおよびC(直径1mmのステンレス管製)は、支持枠の高温室に挿入される部分を極端に減らし、代わりに直径78μmのSiCファイバで、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバと熱電対を所定の位置に保持している。縦方向に設置された直線状のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバと温接点を頂点としたアーチ状の熱電対を、熱電対の温接点で交差させ、その交点に液滴を懸垂した。懸垂線支持枠Bの場合、横方向に直線状に張られたSiCファイバから約4mm上方に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバと熱電対の交点を設置した。懸垂線支持枠Cの場合、アーチ状に張られたSiCファイバの頂点から約3mm上方に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバと熱電対の交点を設置した。液滴温度計測を行わない場合は、熱電対をAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバに変更した。熱電対、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>ファイバ、およびSiCファイバが交わる交点は、微量のCERAMABOND 569-T (AREMCO 社製)で接着した。

小型ピエゾポンプによりテフロンチューブを介して圧送された燃料を、ガラス管を引き延ばして製作した先端直径約40μmのガラス針から吐出し、熱電対温接点に液滴として付着させた。燃料液滴は、スライダ・クランク機構を用いた液滴移動装置によって、約175msで液滴生成部から実験部である高温容器内に挿入される。液滴が高温容器中心位置に置かれた瞬間の液滴温度T<sub>0</sub>は、液滴が高温容器内を移動してきたため、実験条件によって異なる。高温容器は内容器と外容器の二重構造になっている。内容器(内直径30mm, 高さ30mm)には電気シースヒータが巻かれ、外容器との間には断熱材が挿入されている。高温容器内温度は、液滴を蒸発させる位置から水平方向に約9mm離れた位置で、シース直径1.6mmのK種熱電対により計測した。この温度計測データをシーケンサにフィードバックし、電気シースヒータの出力をPID制御することで、高温容器内を所定の温度に保った。

現象観察のため、高温容器側面には一対の観察窓が設けられている。ビームスプリッターとミラーを組み合わせた光学系により、1台の高速度ビデオカメラ(フレームスピード: 10~200fps, 露光時間4.9ms)で実験部と液滴生成部の拡大撮影・記録を可能にした。高温容器に挿入する直前の静止した液滴の直径計測を行うことで、移動に伴う液滴の振動や密度の揺らぎの影響を受けずに初期液滴直径の計測を行うことができる。液滴の撮影にはバックリット法を用い、高速度カメラで記録した。液滴の蒸発挙動をモニタリングすることで、蒸発中に熱電対の温接点が液滴内部にあることを確認した。得られたデジタル画像データをパーソナルコンピュータに取り込み、自作計測ソフト<sup>⑧</sup>で直径履歴を得た。液滴温度測定用熱電対の出力信号は、シーケンサのA/D変換器を介してシーケンサ内部メモリに記録した。サンプリング周期は50~1000msとした。取り扱う時系列データの時刻の原点は、懸垂線支持枠が実験位置に静止した時刻とした。

実験パラメータは、初期液滴直径d<sub>0</sub>、雰囲気温度T<sub>a</sub>、雰囲気圧力P<sub>a</sub>および燃料種である。燃料にはPME, 正ヘキサデカンおよび軽油を用いた。燃料の主要物性値を表1に示す。雰囲気温度は、473から873Kの範囲で変化させた。雰囲気圧力は、0.10から2.0MPaの範囲で変化させた。初期液滴直径d<sub>0</sub>は、0.50から0.55mmの範囲で一定とした。実験は全て通常重力環境で行った。測定項目は、液滴温度T<sub>d</sub>および液滴直径dであり、それらの履歴から種々の特性値を求めた。図3に取得した特性値の定義を示す。液滴消滅寿命τ<sub>e</sub>は、時刻の原点から液滴の消滅が目視で確認されるまでの時間と定義した。蒸発速度定数kは、液滴直径の2乗が、初期

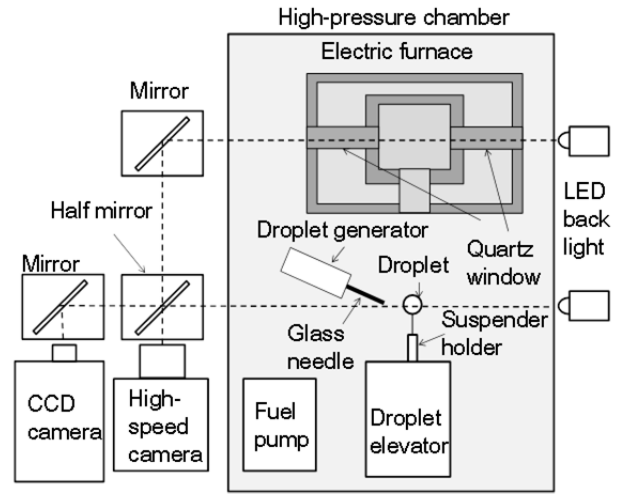


Fig.1 Experimental apparatus.

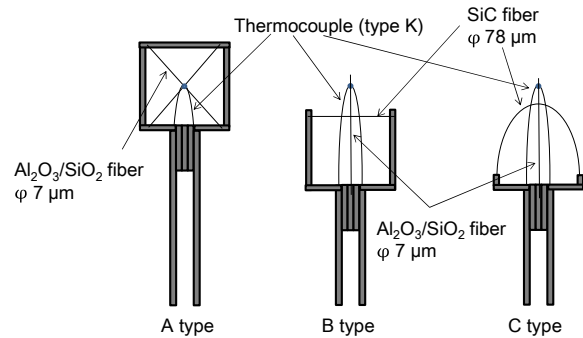


Fig.2 Suspender holders.

Table 1 Properties of fuels.

Property	Fuel	PME	n-hexadecane <sup>(9)</sup>	Light oil
Density @ 303 K	g/cm <sup>3</sup>	0.8636	0.770 @ 293 K	0.8252
Viscosity @ 303 K	mm <sup>2</sup> /s	5.627	-	3.292
Critical temperature	K	-	722	-
Critical pressure	MPa	-	14.1	-
Normal boiling point	K	-	560	-
Final boiling point	K	620	-	617
Carbon content	wt%	76.4	85	86.4
Hydrogen content	wt%	12.4	15	13.5

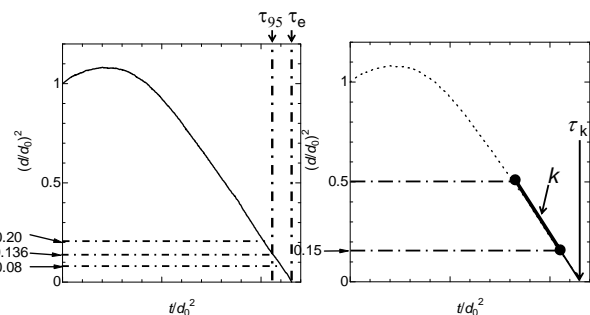


Fig.3 Definitions of measured characteristics.

液滴直径の2乗の50%から15%に減少する期間の履歴を最小2乗近似した直線の傾きの絶対値と定義した。その近似直線を液滴直径が0になるまで延長して求められる正規化液滴寿命を  $w/d_0^2$  とした。95 vol%液滴寿命  $w_{95}$  は、時刻の原点から、液滴の体積が初期液滴体積の5%になるまでの時間と定義した。液滴直径の2乗履歴グラフより、液滴体積が初期液滴体積の9%から2%に減少する区間を最小2乗法で直線近似し、その直線から体積が5%、すなわち  $(d/d_0)^3 = 0.136$  になる時刻を求めた。これらの寿命を初期直径の2乗で除した値が修正液滴消滅寿命  $w/d_0^2$  および修正95 vol%液滴寿命  $w_{95}/d_0^2$  であり、液滴蒸発の速さの指標である。図4は、軽油の液滴直径の2乗履歴および液滴温度履歴である。この図を用いて液滴蒸発最終温度  $T_{de}$  を求める方法を説明する。液滴蒸発最終温度は、初期上昇期間を経た後の液滴温度履歴がほぼ直線的になる期間を直線近似した直線と、熱電対温接点が雰囲気に露出したことにより再度温度が直線的に急上昇する期間を直線近似した直線の交点から求めた。液滴蒸発最終温度を求めた交点の正規化時刻を  $t_{de}/d_0^2$  とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 懸垂線支持枠の評価

液滴を懸垂せずに、高温容器に懸垂線支持枠 A, B および C を挿入して取得した温度履歴を図5に示す。実線が懸垂線支持枠 A, 破線が B, 点線が C に設置された熱電対で取得された温度履歴である。時刻 0 s, すなわち熱電対の温接点が高温容器中心に静止した時刻の熱電対指示温度  $T_0$  は、懸垂線支持枠 A を用いた場合、他の支持枠を用いた場合と比較して 9 K 低くなっている。これは、懸垂線支持枠 A の場合、熱電対の移動経路を熱電対が通過する前に懸垂線支持枠の上の横棒(図2を参照)が通過しているため、経路が冷やされたことが原因と考えられる。時刻 0 s 以降も、懸垂線支持枠 A を用いた場合、温度が雰囲気温度に収束するのに非常に長い時間を要している。熱電対を温度が一樣、物性値が均一な無限に長い円柱であると近似し、気相について軸対称一次元の熱伝導方程式を差分法により数値的に解くことによって求められた熱電対の温度履歴からは、雰囲気温度と初期温度の差の95%に熱電対温度が達するまでの時間は約 60 ms であった。懸垂線支持枠 A を用いた場合、懸垂線支持枠静止後も支持枠が高温容器中心部の雰囲気を冷却していると考えられる。温度測定部に対する懸垂線支持枠の冷却作用を低減させるため、懸垂線支持枠の改良を行った。懸垂線支持枠 A の枠上部を削除した懸垂線支持枠 B を用いた場合、改善は見られたものの、熱電対指示温度が雰囲気温度と初期温度の差の95%に達するまでの時間は約 33 s であった。更に改良を行った懸垂線支持枠 C を用いた場合は、熱電対指示温度が雰囲気温度と初期温度の差の95%に達するまでの時間は 770 ms となり、大幅な改善が見られた。よって、これ以降の実験には懸垂線支持枠 C を用いた。

前章で記述したように、本報では液滴温度履歴測定の実験以外では、熱電対を  $Al_2O_3/SiO_2$  ファイバに変更して実験を行っている。両者は直径や熱伝導率などが異なるため、液滴蒸発に及ぼす熱的な影響の度合いが異なる。そこで、蒸発速度定数をそれぞれの懸垂線を使用して取得し、比較した。雰囲気圧力は 0.10 MPa とし、燃料には正ヘキサデカンを用いた。結果を図6に示す。熱電対を懸垂線として用いて取得した蒸発速度定数も  $Al_2O_3/SiO_2$  ファイバを用いて取得したそれも、実験を行った雰囲気温度範囲でおおむ

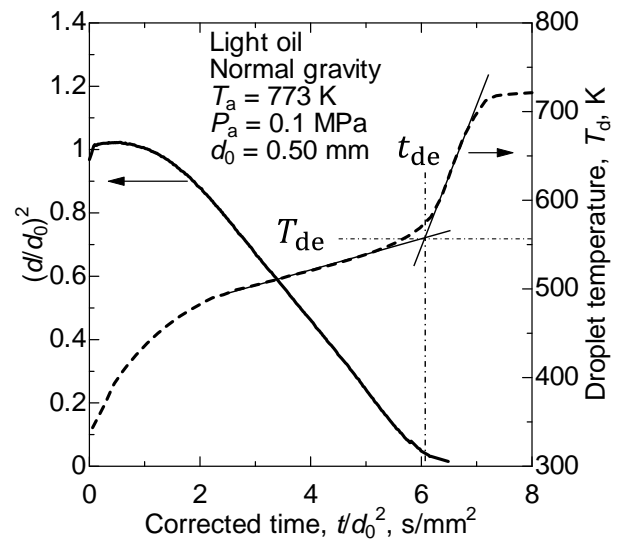


Fig.4 Definition of the droplet temperature at the end of evaporation.

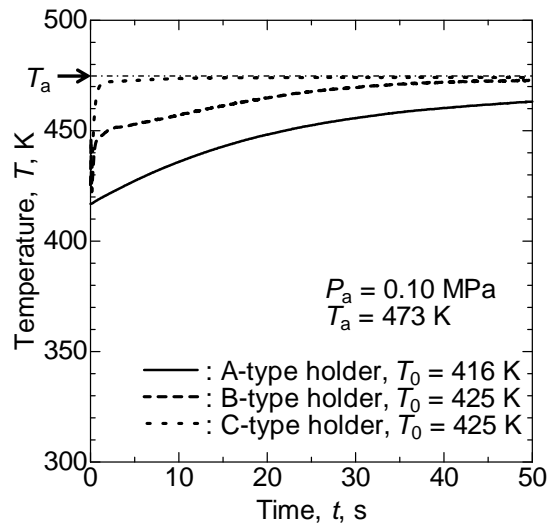


Fig.5 Effect of suspender holder on temperature measurement.

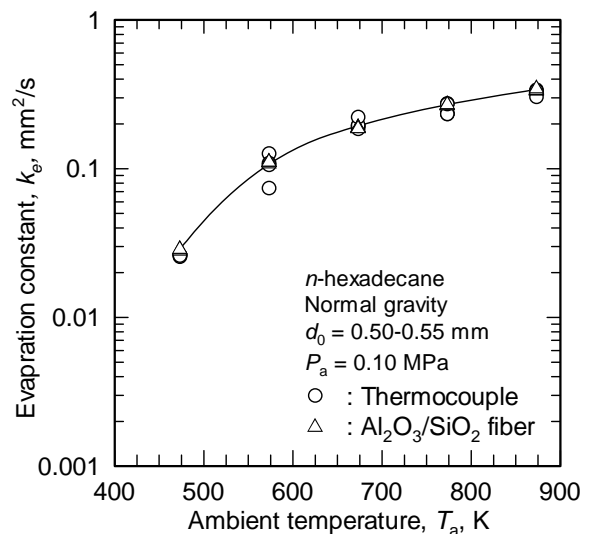


Fig.6 Comparison of the evaporation constants obtained with the thermocouple suspender and the alumina/silica suspender.

ね一致している。よって、両懸垂線が液滴蒸発現象に及ぼす熱的な影響の大きさの違いは無視できる程度であると判断した。  
 $Al_2O_3/SiO_2$  ファイバを使用した懸垂線が、液滴蒸発・燃焼現象に及ぼす影響の考察に関しては、既報の文献 8 を参照して欲しい。

図 7 は、雰囲気温度が 873 K、雰囲気圧力が 0.10 MPa の条件で蒸発する正ヘキサデカン液滴の直径 2 乗履歴および温度履歴である。初期液滴直径は 0.52 mm である。図中のバックリット画像の液滴の頂部から少し突き出ているのが縦に設置された  $Al_2O_3/SiO_2$  ファイバである。画像より、熱電対と  $Al_2O_3/SiO_2$  ファイバの交点、すなわち熱電対の温接点は、蒸発後期まで液滴に包含されていることがわかる。また、雰囲気温度が雰囲気圧力の飽和温度より十分に高い図 7 の条件で計測された温度履歴が、液滴が消滅する少し前の  $4.11 \text{ s/mm}^2$  まで飽和温度 (560 K) を超えることがなかったことより、蒸発中の大半の期間で熱電対は液滴の温度を正しく計測していると考えられる。しかしながら、時刻が  $\tau_{95}$  付近になると液滴の温度上昇率が增大している。この時期においては熱電対の指示温度が雰囲気の影響を受けていると考えられる。以上の結果より、時刻が  $\tau_{95}/d_0^2$  付近になるまでは懸垂線支持棒 C の熱電対の設置方法で液滴温度を正しく計測できると判断した。

3.2 蒸発速度定数

図 8 に正ヘキサデカンの蒸発速度定数の圧力依存性を示す。各実験条件について 3 回の実験を行い、全ての結果を図中に示した。各条件で雰囲気温度が 573 K 以下の条件において、蒸発速度定数は、雰囲気圧力の増大に伴って単調に減少し、雰囲気温度が 773 K 以上の条件では、逆に増大することがわかる。雰囲気温度 673 K の条件では、雰囲気圧力の増大に伴って 0.50 MPa まで蒸発係数がわずかに増大し、それ以上の雰囲気圧力でわずかに減少した。雰囲気温度 673 K 付近に蒸発速度定数の圧力依存性が負から正へと変わる雰囲気温度が存在すると考えられる。また、雰囲気温度の上昇に伴って蒸発速度定数は実験を行った全ての雰囲気圧力において単調に増大することがわかつ

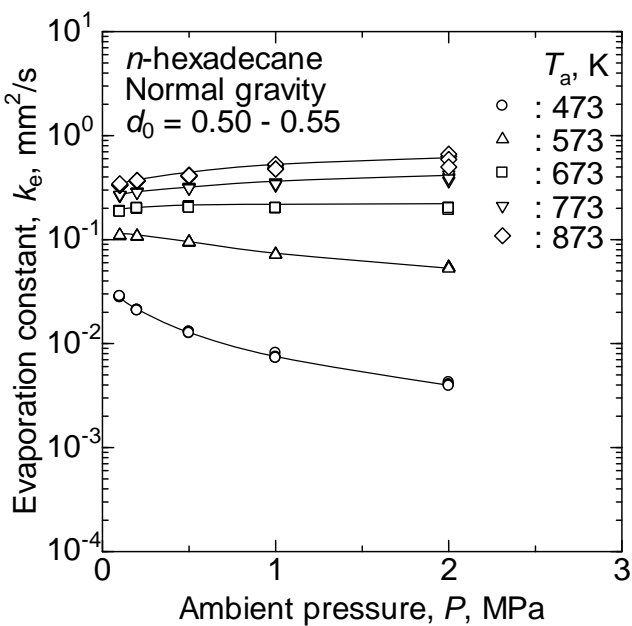


Fig.8 Relations between evaporation constant of n-hexadecane and ambient pressure.

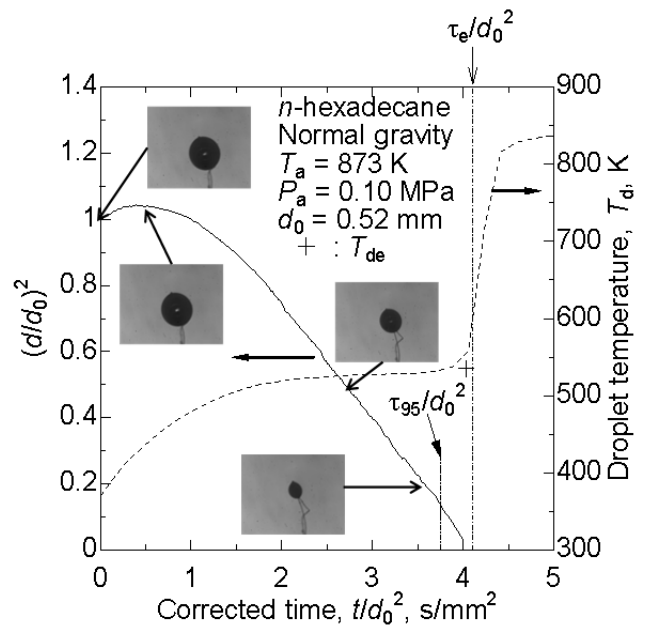


Fig.7 Histories of temperature and squared nondimensional diameter of a n-hexadecane droplet.

た。

図 9 に PME の蒸発速度定数の圧力依存性を示す。雰囲気温度が 573 K 以下の条件において、蒸発速度定数は、雰囲気圧力の増大に伴って減少し、雰囲気温度が 773 K 以上の条件では、逆に増大することがわかる。雰囲気温度 673 K の条件では、雰囲気圧力が増大しても蒸発係数は若干減少する程度であり、あまり変化しない。雰囲気温度 673 K 付近に蒸発速度定数の圧力依存性が負から正へと変わる雰囲気温度が存在すると考えられる。また、雰囲気温度の上昇に伴って蒸発速度定数は実験を行った全ての雰囲気圧力において単調に増大することがわかつ

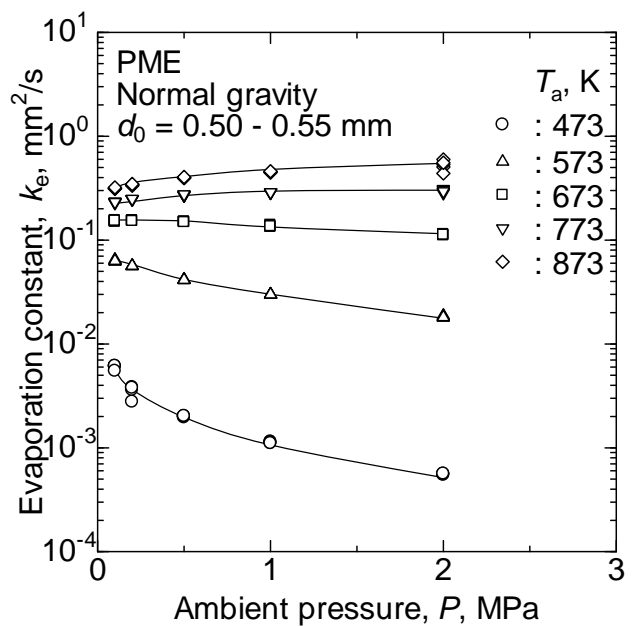


Fig.9 Relations between evaporation constant of PME and ambient pressure.

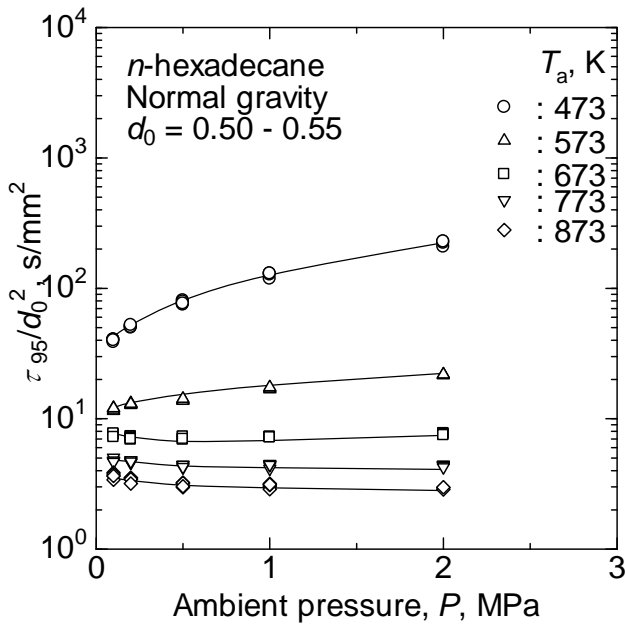


Fig.10 Relations between normalized lifetime of 95 vol% evaporation of n-hexadecane and ambient pressure.

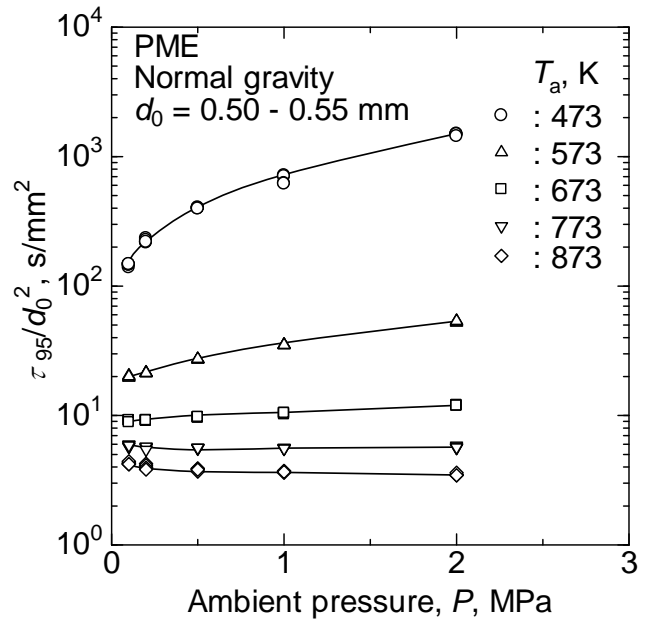


Fig.11 Relations between normalized lifetime of 95 vol% evaporation of PME and ambient pressure.

### 3.2 正規化 95 vol%液滴寿命

図 10 に正ヘキサデカンの正規化 95 vol%液滴寿命の圧力依存性を示す。各実験条件について 3 から 5 回の実験を行い、全ての結果を図中に示した。雰囲気温度が 573 K 以下の条件において、正規化 95 vol%液滴寿命は、雰囲気圧力の増大に伴って単調に増大し、雰囲気温度が 773 K 以上の条件では、逆に減少した。雰囲気温度 673 K の条件では、蒸発速度定数と同様、雰囲気圧力の増大に伴って 0.50 MPa まで正規化 95 vol%液滴寿命がわずかに減少し、それ以上の雰囲気圧力ではほとんど変化しない。また、雰囲気温度の上昇に伴って正規化 95 vol%液滴寿命は実験を行った全ての雰囲気圧力において単調に減少することがわかった。

図 11 に PME の正規化 95 vol%液滴寿命の圧力依存性を示す。雰囲気温度が 673 K 以下の条件において、正規化 95 vol%液滴寿命は、雰囲気圧力の増大に伴って単調に増大し、雰囲気温度が 773 K 以上の条件では、逆に減少した。また、雰囲気温度の上昇に伴って正規化 95 vol%液滴寿命は実験を行った全ての雰囲気圧力において単調に減少することがわかった。

### 3.3 液滴蒸発最終温度

液滴蒸発最終温度  $T_{de}$  の物理的な意味を考察するため、 $T_{de}$  を温度履歴から求めた際の交点 (図 4 参照) の正規化時刻  $t_{de}/d_0^2$  と  $\tau_k/d_0^2$  の比較を行った。 $\tau_k/d_0^2$  の取得には、 $Al_2O_3/SiO_2$  ファイバのみで構成される懸垂線を使用した。PME の大気圧条件において得られた結果を図 12 に示す。各実験条件について 3 回の実験を行い、全ての結果を図中に示した。いずれの雰囲気温度においても、 $t_{de}/d_0^2$  と  $\tau_k/d_0^2$  は一致しており、液滴蒸発最終温度は準定常的な蒸発が液滴消滅まで続いたと仮定したときの液滴蒸発最終温度を表していると考えられる。よって、PME や軽油などの多成分燃料においては、微量含まれる高沸点成分の影響は無視されてしまうことに注意しなければなら

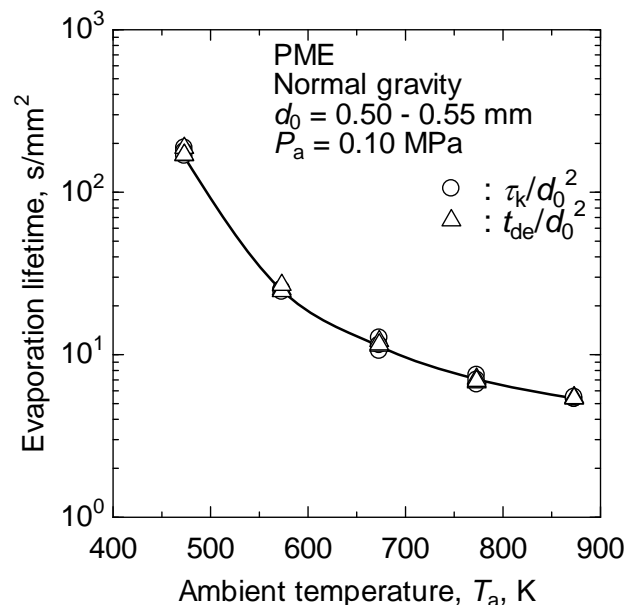


Fig.12 Comparison of the evaporation lifetimes of PME derived from the droplet temperature history and the squared droplet diameter history as a function of ambient temperature.

ない。

図 13 に、正ヘキサデカン液滴蒸発最終温度の圧力依存性を示す。各実験条件について 3~5 回の実験を行い、全ての結果を図中に示した。参考のために、図中に正ヘキサデカンの飽和温度と雰囲気圧力の関係<sup>9)</sup>を示した。雰囲気圧力の増大に伴い、液滴蒸発最終温度が上昇していることがわかる。いずれの雰囲気温度においても、低い雰囲気圧力では液滴蒸発最終温度が雰囲気圧力の増大に伴って急激に上昇しているが、高い圧力雰囲気では徐々に上昇していることがわかる。これは、雰囲気圧力

が増大するのに伴って燃料の飽和温度が上昇し、飽和温度が雰囲気温度を超えるまでは液滴蒸発最終温度も上昇するが、飽和温度が雰囲気温度を超えてしまうと液滴蒸発最終温度は雰囲気温度に漸近するからであると考えられる。正ヘキサデカンの雰囲気温度が 673 K の場合、雰囲気圧力が増大しても蒸発速度定数および正規化 95 vol%液滴寿命はほとんど変化しなかったが、液滴蒸発最終温度は上昇していることがわかる。液滴蒸発最終温度は、雰囲気温度の増大に伴っておおむね上昇しているが、雰囲気圧力 2.0 MPa の雰囲気温度 773 K から 873 K にかけては減少している。この原因については不明であるが、雰囲気温度および圧力が燃料の臨界値を共に越えていることより、超臨界雰囲気で起こる現象の可能性がある。

蒸発速度定数の圧力依存性を考察するため、実験で得られた液滴最終温度を用いて正ヘキサデカンの蒸発速度定数を簡便な方法で計算した。蒸発速度定数  $k$  に及ぼす自然対流の影響を表す式として、グラスホフ数  $Gr$  とプラントル数  $Pr$  を用いた次式が提案されている<sup>(10, 11)</sup>。

$$k = k_0 \left\{ 1 + 0.215 (Pr Gr)^{0.25} \right\} \quad (1)$$

ここで、自然対流の影響を無視した蒸発速度定数  $k_0$  は次式で計算した。

$$k_0 = \frac{8\lambda_g}{\rho_l c_{pg}} \ln \left( \frac{c_{pg} (T_a - T_d)}{L} + 1 \right) \quad (2)$$

式中の  $L$  は蒸発潜熱、 $\lambda_g$  は気相の熱伝導率、 $\rho_l$  は燃料液体の密度、 $c_{pg}$  は燃料蒸気の比熱である。 $T_d$  には液滴蒸発最終温度  $T_{de}$  を使用した。雰囲気気体は窒素とし、熱伝導率には窒素の値を使用した<sup>(12)</sup>。液体密度には室温大気圧の正ヘキサデカンの値を使用した<sup>(12)</sup>。正ヘキサデカンの飽和温度と比熱は計算で求めた<sup>(9)</sup>。蒸発潜熱の計算には Watson の式を用いた<sup>(13)</sup>。プラントル数は 1 と仮定し、グラスホフ数は次式で計算した。

$$Gr = \frac{gd^3\beta(T_a - T_d)}{\nu^2} \quad (3)$$

ここで、 $g$  は重力加速度、 $\beta$  は体膨張係数、 $\nu$  は動粘性係数である。雰囲気は窒素とし、理想気体を仮定した。 $T_d$  には液滴蒸発最終温度  $T_{de}$  を、 $d$  には液滴初期直径  $d_0$  を使用した。動粘性係数には窒素の値を使用した<sup>(12)</sup>。雰囲気温度が 573 K から 873 K の範囲、雰囲気圧力が 0.10 から 2.0 MPa の範囲で計算を行った。図 14 に結果を示す。黒プロットが自然対流の影響を無視した蒸発速度定数の計算結果であり、白プロットが自然対流の影響を考慮した蒸発速度定数の計算結果である。黒プロットは、すべての雰囲気温度で雰囲気圧力の増大に伴い、蒸発速度定数が単調に減少していることがわかる。これは図 8 の実験結果とは定性的に異なる。白プロットは、雰囲気温度 573 および 673 K では、雰囲気圧力の増大に伴い、蒸発速度定数が減少しているが、雰囲気温度 873 K では、雰囲気圧力の増大に伴い、蒸発速度定数が増大していることがわかる。この傾向は、図 8 の実験結果と定性的に一致している。計算では、雰囲気温度 773 K 付近が、蒸発速度定数の圧力依存性が負から正に変化する境界となった。実験結果とのこの違いは、グラスホフ数の計算に燃料蒸気を考慮していないため、自然対流の影響を過小評価していることが原因と考えられる。以上の考察より、本実験条件の範囲において蒸発速度定数の雰囲気圧力依存性が雰囲気温度の増大に伴って負から正に変わるのは、圧力の増大に伴う自然対

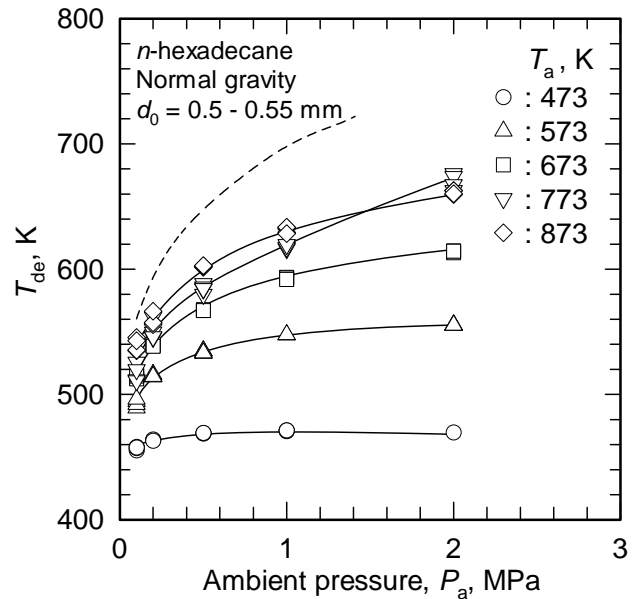


Fig.13 Droplet temperature at the end of evaporation as a function of ambient pressure. Fuel is n-hexadecane. Dashed line indicates the boiling temperature of fuel.

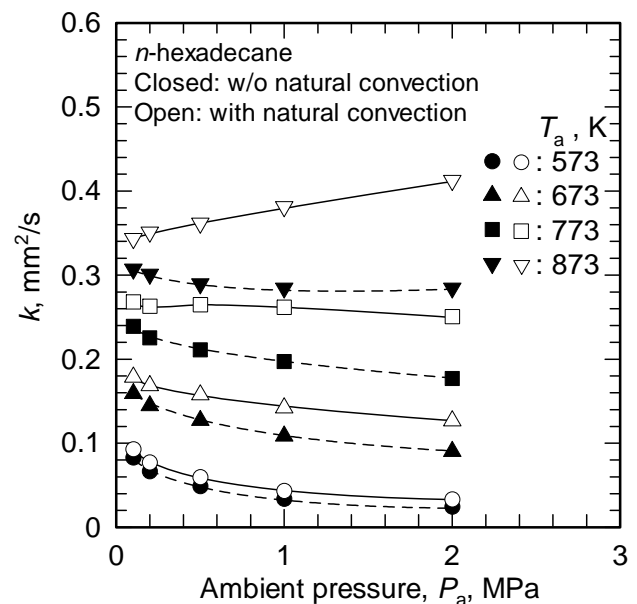


Fig.14 Relations between calculated evaporation constant of n-hexadecane and ambient pressure.

流の液滴蒸発促進効果の増大が、高温雰囲気では圧力の増大による液滴蒸発抑制効果を上回るためだと考えられる。ディーゼル機関などの実機の噴霧に多く含まれる直径数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$  の燃料液滴<sup>(14, 15)</sup>の場合、グラスホフ数およびレイノルズ数が非常に小さいので、その蒸発は自然対流や強制対流の影響をほとんど受けないと考えられる。計算に用いた液滴温度は通常重力環境で取得した実験値であるが、蒸発中の液滴温度は自然対流の影響をあまり受けないことが知られている<sup>(10)</sup>。よって、実機の噴霧燃焼においても、図中の黒プロットと同様、873 K 程度までの雰囲気中で蒸発する燃料液滴の蒸発速度定数は、圧力の増大に伴って単調に減少することが示唆される。

図 15 に PME 液滴蒸発最終温度の圧力依存性を示す。PME

の場合、雰囲気圧力が 2.0 MPa、雰囲気温度が 473 K の条件で液滴内部において発熱反応<sup>(16)</sup>が起こった。発熱反応は液滴蒸発寿命の前半で起こった。図中にプロットされている値は、発熱反応が終了した後に計測された液滴蒸発最終温度である。PME も正ヘキサデカンと同様に雰囲気温度および雰囲気圧力が上昇するに伴い、液滴蒸発最終温度が上昇していることがわかる。図 16 に軽油液滴蒸発最終温度の圧力依存性を示す。液滴蒸発最終温度は、どの燃料においてもほぼ同じ圧力依存性を示すことがわかった。

雰囲気温度の上昇に伴って正ヘキサデカンの液滴蒸発最終温度は飽和温度に漸近する。その漸近の仕方に雰囲気圧力が及ぼす影響を調べた。結果を図 17 に示す。縦軸は、雰囲気圧力に対応する飽和温度  $T_{sat}$  で液滴蒸発最終温度を無次元化した無次元液滴蒸発最終温度であり、横軸は飽和温度で雰囲気温度を無次元化した無次元雰囲気温度である。正ヘキサデカンの各雰囲気圧力における飽和温度は計算<sup>(9)</sup>で求めた。雰囲気圧力が正ヘキサデカンの臨界圧力を超えている雰囲気圧力が 2.0 MPa のデータは考察の対象から除いた。図中には、多成分燃料である PME および軽油についても、雰囲気圧力 0.10 MPa で取得された液滴蒸発最終温度を示した。ただし、縦軸・横軸の無次元化には蒸留曲線の終点 (PME の終点<sup>(9)</sup>: 620 K, 軽油の終点: 617 K) を代用した。各実験条件で取得された 3~5 個のデータの平均値を図中に示した。いずれの雰囲気圧力および燃料のプロットも一つの曲線にほぼのっていることがわかる。この曲線は、無次元雰囲気温度が低い領域では原点を通る傾きが 1 の直線に、無次元雰囲気温度が高い領域では飽和温度を示す  $T_{de}/T_{sat} = 1$  の直線に漸近する。さらに多くの燃料と雰囲気圧力に関して実験データを集める必要があるが、図 17 の曲線と燃料の飽和温度あるいは終点から液滴蒸発最終温度を見積もることができる可能性が示唆された。

#### 4. おわりに

通常重力環境において、雰囲気温度を 473 から 873 K の範囲で、雰囲気圧力を 0.10 から 2.0 MPa の範囲で変化させ、正ヘキサデカン、PME および軽油について単一液滴の温度履歴および直径履歴を取得した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 雰囲気温度 673 K 付近を境に、正ヘキサデカンの蒸発速度定数の圧力依存性は負から正に、正規化 95vol%液滴寿命の圧力依存性は正から負に変わる。
- 2) 雰囲気温度 773 K 付近を境に、PME の蒸発速度定数の圧力依存性は負から正に、正規化 95vol%液滴寿命の圧力依存性は正から負に変わる。
- 3) 蒸発速度定数の雰囲気圧力依存性が雰囲気温度の増大に伴って負から正に変わるのは、圧力の増大に伴う自然対流の液滴蒸発促進効果の増大が、高温雰囲気では圧力の増大による液滴蒸発抑制効果を上回るためだと推察された。
- 4) 液滴蒸発最終温度と雰囲気温度の関係を調べた。液滴蒸発最終温度は、雰囲気温度および圧力の増大に伴って単調に上昇する。亜臨界圧力雰囲気の正ヘキサデカンの結果については飽和温度で、雰囲気圧力 0.10 MPa の PME および軽油の結果については蒸留曲線の終点で無次元化した液滴蒸発最終温度と雰囲気温度の関係は、全てほぼ同一の曲線になることがわかった。

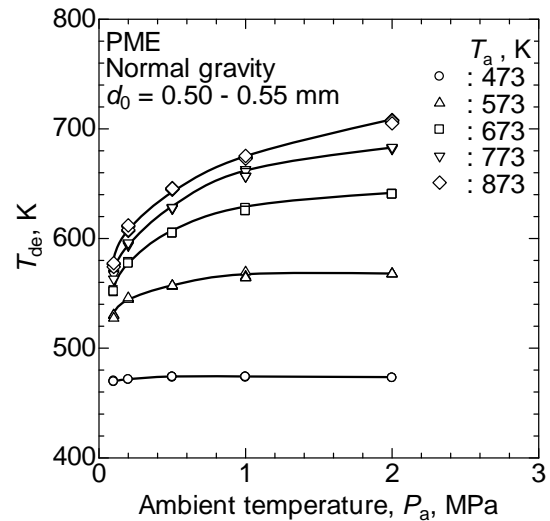


Fig.15 Droplet temperature at the end of evaporation as a function of ambient pressure. Fuel is PME.

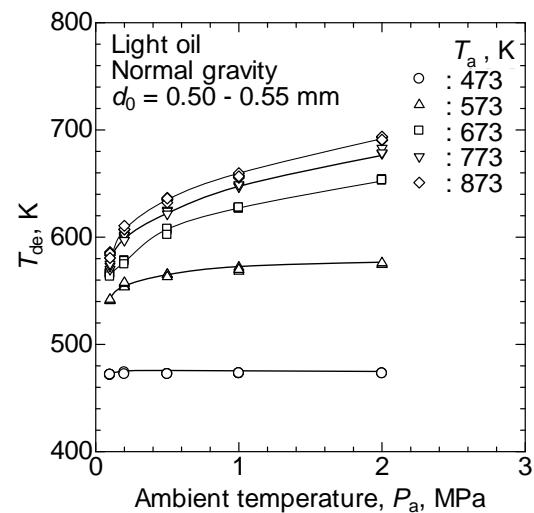


Fig.16 Droplet temperature at the end of evaporation as a function of ambient pressure. Fuel is light oil.

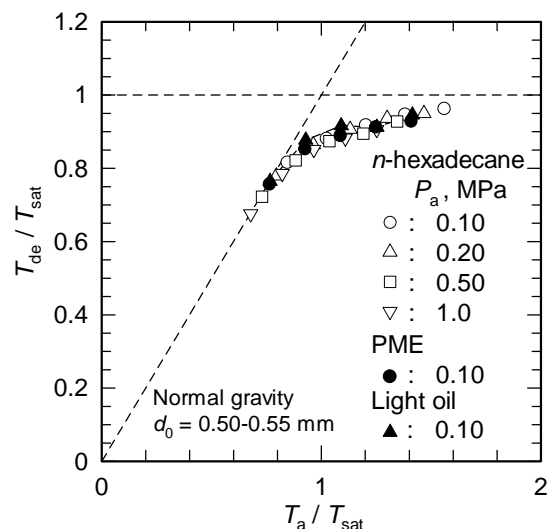


Fig.17 Relationship between the normalized droplet temperature at the end of evaporation and the normalized ambient temperature.

文 献

- (1) 浜崎和則, 木下英二, 松尾佳朋, Wira, J. : ディーゼル燃料としてのパーム油の利用, 日本機械学会論文集 B, 68-667(2002), 958-963.
- (2) 橋本望, 小沢靖, 森則之, 百合功, 久松陽: パームメチルエステルの基礎燃焼特性に関する研究, 燃焼シンポジウム講演論文集(2006), 298-299.
- (3) 木下英二, Thet. M., 浜崎和則, 西章吾: パーム油エチルエステルのディーゼル燃焼特性, 日本機械学会論文集 B, 73-728(2007), 1135-1141.
- (4) 木下英二, 下之角智史, 浜崎和則, 塚田真琴: パーム油メチルエステル・軽油混合燃料のディーゼル燃焼, 日本機械学会論文集 B, 73-729(2007), 1250-1255.
- (5) 木下英二, 浜崎和則, 中禮佳樹, Choesnul, J. : バイオディーゼル燃焼に及ぼす脂肪酸メチルエステル組成の影響, 日本機械学会論文集 B, 70-690(2004), 546-550.
- (6) 木下英二, 羽田遼二, 牧内大樹, 張汝坤, 浜崎和則: バイオディーゼル燃焼に及ぼす不飽和脂肪酸組成の影響, 日本機械学会論文集 B, 75-756(2009), 1699-1705.
- (7) 松本隆宏, 野村浩司, 橋本望: 高温雰囲気におけるバイオディーゼル燃料液滴の蒸発, 微粒化, 19,(2010) 167-172.
- (8) 鈴木真人, 野村浩司, 橋本望, 氏家康成: バイオマス燃料液滴の蒸発・燃焼と微小重力実験装置の開発, 微粒化, 17-58(2008), 74-80.
- (9) Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Poling, B. E.: The Properties of GASES & LIQUIDS 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill Book Company, (1986), 657.
- (10) 甲藤好郎: 伝熱概論, 養賢堂(1964), 164 および 240.
- (11) Williams, F. A. : Combustion Theory, Westview Press, (1985), 62.
- (12) 日本機械学会編: 流体の熱物性値集, 丸善(1983), 22-23, 141-142.
- (13) 佐藤一雄: 物性値定数推算法, 丸善(1954), 235.
- (14) 河野通方, 角田敏一, 藤本 元, 氏家康成: 最新内燃機関, 朝倉書店(1995), 52-56.
- (15) 日本液体微粒化学会編: アトマイゼーション・テクノロジー, 森北出版(2001), 裏表紙裏.
- (16) 金子堅太郎, 野村浩司, 橋本望: 高温雰囲気におけるパームメチルエステルおよび軽油の液滴の蒸発温度測定, 第21回微粒化シンポジウム, 東京(2012), 73-78.



金子 堅太郎  
 日本大学 大学院  
 生産工学研究科 機械工学専攻  
 〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1  
 Tel. 047-474-2356  
 Fax. 047-474-2349  
 e-mail: cike12012@g.nihon-u.ac.jp

略歴: 2012 年 日本大学大学院生産工学研究科博士前期課程入学. 微小重力環境を利用したバイオマス燃料液滴の高温・高圧雰囲気における蒸発の研究に従事.



野村 浩司  
 日本大学生産工学部 教授  
 〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1  
 Tel. 047-474-2356  
 Fax. 047-474-2349  
 e-mail: nomura@cit.nihon-u.ac.jp

略歴: 1992 年 東京大学大学院工学系研究科航空学専攻博士課程修了. 同年日本大学生産工学部勤務. 液滴燃焼, 噴霧燃焼, および固体酸化物形燃料電池製作への静電噴霧の応用に関する基礎研究に従事.



橋本 望  
 (財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所 主任研究員  
 〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1  
 Tel. 046-856-2121  
 Fax. 046-856-3346

略歴: 2004 年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了, 同年(財)電力中央研究所に入所. これまでに, 微粉炭を用いたボイラの燃焼に関する研究および液体燃料を用いたガスタービンの燃焼に関する研究に従事.