エンジンシリンダ壁面への燃料噴霧衝突を模した異種液体間
液滴・液膜衝突の観察岡本 真也^{*1}, 川島 久宜^{*2}, 内田 亮^{*3}, 田中 大輔^{*4}, 石間 経章^{*2}Observation of droplet/liquid film impingement between different kinds of liquid
simulating fuel spray collision on engine cylinder wallShinya OKAMOTO^{*1}, Hisanobu KAWASHIMA^{*2},
Ryo UCHIDA^{*3}, Daisuke TANAKA^{*4} and Tsuneaki ISHIMA^{*2}^{*1} Graduate School of Science and Technology, Gunma University
1-5-1 Tenjin, Kiryu-shi, Gunma 376-8515, Japan^{*2} Division of Mechanical Science and Technology, Gunma University
1-5-1 Tenjin, Kiryu-shi, Gunma 376-8515, Japan^{*3, *4} Nissan Motor Co., Ltd.
560-2 Okatsukoku, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0192, Japan

Received: 30 September 2020; Revised: 28 December 2020; Accepted: 5 February 2021

Abstract

Droplet impingement to wet wall is observed and classified. The wet wall has a thin liquid film which is different kind of liquid from the droplets. The present study models the droplets impingements to wet engine walls in gasoline engine. The alternative fuel droplets injected by the injector for port injection system impinge to the silicon oil film simulating wet cylinder wall of actual gasoline engine. In this experiment, a rectangular flow section is used as an example of collision between different liquids in a port injection engine. The viscosity of the liquid film was varied as experimental parameter. The experimental results are well organized using Weber number calculated by using vertical velocity. As Weber number increases, the impingement type changes from rebound to deposit then splash. The tendency is same as impingement regime under the case of same liquid for wet wall and droplets, however critical Weber number is different from them. The liquid film viscosity strongly affects the droplet impingement form. Splash does not occur under the large liquid film viscosity. It is difficult to categorize the impingement regime by common Laplace number based on droplet viscosity. The modified Laplace number which is based on the viscosity of the liquid film is proposed. In the case of different kinds of liquids droplet-film impingement, the phenomenon can be categorized by modified Laplace number and Weber number based on the vertical velocity component of droplet velocity.

Keywords : Droplet collision, Fuel droplets, Collisions between different liquid, Engine, Injection, Thin liquid film

1. 緒 言

ガソリンエンジンにおいて、インジェクタから噴射された燃料がシリンダ壁面や吸気ポート、ピストン冠面等に付着することは避け難い問題である。燃料付着は未燃 HC や粒子状物質(PM)の排出や、エンジン出力の過渡特性に影響を与える(Almkvist et al., 1995; Hentschel et al., 1997; Koederitz et al., 2002)。したがって、ガソリンエンジンの環境性能向上のために、壁面に付着する燃料液膜の挙動を明らかにすることは極めて重要である。エンジンシ

No.20-00338 [DOI:10.1299/transjsme.20-00338], J-STAGE Advance Publication date : 16 February, 2021

^{*1} 正員, 群馬大学大学院理工学府, 博士後期課程 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)^{*2} 正員, 群馬大学大学院理工学府^{*3} 日産自動車 (株) (〒243-0192 神奈川県厚木市岡津古久 560-2)^{*4} 正員, 日産自動車 (株)

E-mail of corresponding author: ishima@gunma-u.ac.jp

リンダ壁面にはしゅう動するピストンとの摩擦の低減を目的として、エンジンオイルが潤滑剤として利用されている。実際のエンジン内でのシリンダ壁面への燃料液滴の衝突は、燃料液滴とエンジンオイルの薄膜の異種液体間の衝突に固体壁面が干渉する複雑な現象となる。エンジンシリンダに燃料液滴が衝突する現象を表すものとして千田らのモデルが知られている(千田, 松田, 2003)。しかしながら、千田らのモデルは液滴と液膜が同一の液体の場合であり、燃料液滴とエンジンオイル液膜間の現象への適用は検討されていない。燃料噴霧が壁面、液膜面に衝突する際の挙動を観察する実験もいくつか行われている(八百幸他, 2010)ものの、多くは燃料と壁面上の液膜に同一の液体を用いた結果である。異種液体間の液滴-液膜衝突における衝突挙動に関する研究は近年行われ始めており、水滴-水膜と水滴-HFE7100 膜の衝突現象を比較する実験(Manzello and Yang, 2002)や、水と水-グリセロール混合溶液間の液滴-液膜衝突実験(Banks et al., 2012), ヘキサデカン液滴-油圧作動油膜の衝突挙動を分類する研究(Geppert et al., 2014)等が行われている。しかしながら、実機に近い条件で燃料噴霧液滴が異種液体膜に衝突する現象を観察した実験はいくつか行われているものの(溝渕他, 2018; 神戸他, 2019), 液膜の粘性に注目した研究は行われていない。

本実験ではエンジン内の燃料液滴とエンジンオイル膜の衝突挙動を模擬する実験例として、ポート噴射エンジンの吸気ポート内をモデル化し、燃料噴霧液滴群とエンジンシリンダ壁面上に形成されているエンジンオイル膜の衝突、干渉過程の現象解明を行う。ポート噴射ガソリンエンジンの吸気ポートを参考にした可視化用実験流路を構築し、インジェクタによる燃料噴霧液滴群がポート内を通過したのち、エンジンオイル膜を有するシリンダを模擬した観察壁面に衝突するときの挙動を観察する。観察壁面にはシリコンオイルの薄膜を設置し、シリコンオイルの粘性を変更することで、液膜粘性が衝突現象に与える影響について調査する。

2. 実験装置および方法

自動車用ポート噴射インジェクタ(JECS A46-00)から噴射した燃料噴霧を既知の粘性のシリコンオイルの薄膜を持つ壁面に衝突させ、そのときの挙動を高速度カメラ(Phantom v710)で撮影した。図1に実験装置外略図を、図2に計測部概略を、図3に実験流路とインジェクタ、高速度カメラの位置関係を示す。なお、図2は今回の実験での噴霧と計測部の位置関係を大まかに示すための予備実験時の可視化画像であり、詳細な実験条件は異なっている。噴霧が衝突する壁面は、長さ120 mm、厚さ10 mmのアルミニウム製であり、40 mm×30 mmの矩形断面の可視化流路中に設置した。流路形状は、実際のエンジンを参考にして断面積を決定し、可視化のために矩形形状としたうえで側面と上面をアクリル製とした。可視化流路の下流にはブロアが設置されており、ポート噴射エンジンのポート内の気流を模擬して実験した。観察流路内の空気の流れは26.8 m/sとした。流路内平均流速は可視化流路とブロアを接続しているパイプ内に設置したオリフィスの前後の差圧から算出した。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment.

噴霧液滴の衝突・干渉の可視化観測は図2の破線の長方形内について実施した。図2に示したように、噴霧はポート壁を模擬した実験流路の下面に衝突したのち、気流とともに下流に到達し、観察面に到達する。高速度カメラは液滴衝突現象が確認できるように衝突壁に対して20度の角度で設置した。撮影速度は100,000 fps、撮影解像度は128×256 pixelとした。噴射条件として燃料はn-heptane(密度 $\rho = 0.684 \text{ kg/m}^3$, 粘性係数 $\mu_d = 0.417 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), 燃圧は燃料ポンプによる加圧で350 kPa, 噴射期間は10 msとした。インジェクタの設置角度は水平に対して35°とした。液膜はシリコンオイル(信越化学工業株式会社製KF-96シリーズ)とし、動粘度 $\nu_f = 1, 20, 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ (粘性係数 $\mu_f = 0.865, 19.0, 96.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)の3種類を用いた。壁面へのシリコンオイル設置は、はじめに壁面にシリコンオイルを適量塗布した後に、へらを強く壁面に押し付け壁面をなぞることで薄く広げた。予備実験により液膜の厚さは $7 \pm 1 \mu\text{m}$ であることを確認した。

Fig. 2 Side view of test section and spray. The camera angle is different from the actual experiments. The dashed square is the observation region.

Fig. 3 Arrangement of test section and a high-speed camera.

3. 実験結果

3・1 可視化結果

図4に可視化実験結果の一例を示す。図は液膜粘性係数 $\mu_f = 0.865 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ($\nu = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$)の結果の例である。図中の画像の右上の時間は、液滴が液膜面に衝突した時刻を0 msとした場合の経過時間である。経過時間が負の場合は衝突前の様子を示している。図中白破線丸で示した注目した液滴の直径は $d = 0.17 \text{ mm}$ であった。注目液滴は図左から右下方向に壁面からの角度が20°、速度16.8 m/sで液膜面に衝突した。画像から求めた速度、液滴径を

用いて計算したこの液滴の We 数は 1570 である。液滴は液膜面に衝突してから、液膜面上でクラウン状の構造を形成し、衝突後 0.16 ms でクラウンの右側の縁から小さな液滴が分裂している(図中矢印)。

→ Main Flow

Fig. 4 Example of visualization experiment. Splash phenomenon is observed after droplet collision.

本実験で観察された液滴の衝突現象は、すべて図4のような、液滴が液膜面に対して角度を持って衝突する現象であった。単一液滴の壁面衝突挙動観察において、液滴を斜め方向から液膜に衝突させる実験(Chen and Wang, 2005; Lenewit et al., 2005), 斜面に液滴を滴下させる実験(Sikalo and Ganic, 2006)では、図5に示すような液滴の代表速度 V を接線方向速度 V_T (tangential-)と壁に垂直方向の速度 V_N (normal-)に分解し、現象の整理が行われている。これらを参考として、本実験でも噴霧液滴の壁面に対しての垂直方向速度 V_N を用いて計算した We_N を用いて現象を整理することとした。

Fig. 5 Description of We_N . We_N is Weber number calculated with vertical velocity. These are used in angle droplet collision experiments.

過去の研究において、同一液体間の液滴、液膜衝突現象の衝突挙動は、液滴が壁面衝突後に液膜に取り込まれる Deposit, 液滴が壁面衝突後にクラウンを形成し、クラウンの淵から液滴が分裂、飛散が見られる Splash, 液滴が壁面衝突後に跳ね返る Rebound の3つの現象に分類できる(Bai and Gosman, 1995). Bai らによると、液滴の We

数が小さい場合に Deposit 現象がみられ、大きくなると Splash に変化する。また、液滴の We 数が非常に小さい場合は Rebound 現象が見られると報告している。異種液体間の衝突実験である本実験でも同様の傾向が見られた。図 6, 7, 8 に各現象の代表的な衝突挙動を示す画像を示す。図 6 は Deposit 現象の衝突挙動を示したものであり、 We 数が小さく液膜の粘性が大きい条件で主に観察された。図 7 は Splash 現象の衝突挙動を示したものであり、 We 数が大きく液膜の粘性が小さい条件で観察された。図 8 は Rebound 現象の衝突挙動を示すものであり、 We 数 30 程度以下の非常に小さい条件で観察された。

Fig. 6 Example of deposit phenomenon. Droplets do not break-up and scatter after collision.

Fig. 7 Example of splash phenomenon. Droplets break-up and scatter after collision.

Fig. 8 Example of rebound phenomenon. Droplets bounce after collision on liquid film surface.

本実験の液滴はインジェクタから噴射され、気流に乗って運ばれたのちに液膜面に衝突する。図4より、図で注目している液滴以外にもいくつかの液滴が画像中に存在し、液膜に衝突しているのを確認できる。本実験では液滴が衝突した箇所に短時間で再度液滴が衝突した場合のデータを無効とした。これは、以前に衝突が起きた箇所周辺は液膜がシリコンオイルと液滴由来の成分である *n*-heptane の混合液体となり、液膜の粘性が変化するためである。本実験では撮影された画像から、以前に衝突の起きていない液膜面に衝突した液滴のみを抜き取り、解析対象とした。

3・2 同一液膜粘性における We 数違いの比較

図9に同一液膜粘度における液滴の衝突挙動の比較を示す。図9は上から $We_N = 78, 190, 556$ の液滴が壁面に衝突した際の挙動を示すもので、左から右に時系列で並んでいる。図より、 We_N が大きくなるとともに液滴が液膜に取り込まれ壁面状に広がる Deposit 型から液滴の分裂、飛散の起こる Splash へと変化し、さらに We_N が大きくなるとより激しい Splash に変化していくことが確認できる。 $\mu_f = 19.0, 96.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 条件においては、本実験の We_N 数範囲において基本的に Splash 現象は見られず、Deposit 型の衝突が支配的だった。

$We_N = 78, \mu_f = 0.865 \text{ mPa}\cdot\text{s} (\nu = 1 \text{ mm}^2/\text{s}), d = 0.10 \text{ mm}$

$We_N = 190, \mu_f = 0.865 \text{ mPa}\cdot\text{s} (\nu = 1 \text{ mm}^2/\text{s}), d = 0.17 \text{ mm}$

$We_N = 556, \mu_f = 0.865 \text{ mPa}\cdot\text{s} (\nu = 1 \text{ mm}^2/\text{s}), d = 0.32 \text{ mm}$

Fig. 9 Experimental results at the same liquid film viscosity. Splash phenomenon occurs when We_N is large. Larger We_N causes more intense Splash phenomenon.

表1に粘性係数 $\mu_f = 0.865 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ における画像から得られた液滴の壁面に衝突した際の液滴径 d 、代表速度 V 、代表速度から計算した We 、垂直方向速度 V_N から計算した We 数の We_N 、推定無次元液膜厚さ δ_{non} 、衝突した際に見られた挙動、計算によって求めた Splash と Deposit の切り替わる臨界値 We_c の一例を示す。表は液滴の We_N が小さいものから順に並べた。ここで、推定無次元厚さとは、液膜の初期厚さ ($7 \mu\text{m} = 0.007 \text{ mm}$) を液滴径で割った

ものである。臨界値 We_c とは、千田ら(千田, 松田, 2003)による同一液体間の解析における Splash と Deposit の臨界値(We_c : Critical Weber number)を示すもので、以下の Marengo の実験式

$$We_c = (2164 + 7560 \delta_{non}^{1.78}) La^{-0.2} \quad (1)$$

を用いて計算した。式中の La は Laplace 数であり、以下の式に示される。

$$La = \rho_d d_d \sigma / \mu_d^2 \quad (2)$$

ρ_d : 液滴密度

d_d : 液滴直径

σ : 気液界面の表面張力

μ_d : 液滴粘性係数

表より粘性係数 $\mu_f = 0.865 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ において、 We_N が 140 前後で衝突後に見られる挙動が Deposit から Splash に切り替わることがわかる。一方、代表速度を用いて計算した We においては、1920 程度で Splash を起こさない液滴があるが、1580 程度で Splash を起こす液滴も確認できる。これより、異種液体間の液滴・液膜衝突においても垂直方向の速度 V_N で計算された We_N 数で現象を整理することが妥当であることが示された。Marengo の実験式による Splash-Deposit の臨界 We 数は 300 程度となる一方、本実験で Splash と Deposit の臨界 We 数は $We_N = 140$ となり、両者には差があった。これは、Marengo の実験式は液滴と液膜が同一の液体における衝突現象を示した式であり、異種液体間の衝突現象には当てはまらないためである。

Table 1 Example of experimental results ($\mu_f = 0.865 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) It is arranged in order from the low We_N droplet.

d mm	V m/s	δ_{non}	We	We_N	Collision type	We_c (Marengo)
0.11	22.2	0.063	1919	45	Deposit	362
0.11	18.8	0.063	1377	61	Deposit	362
0.14	17.0	0.050	1394	61	Deposit	344
0.11	19.8	0.066	1438	64	Deposit	367
0.10	21.7	0.070	1634	78	Deposit	372
0.17	15.0	0.041	1327	121	Deposit	328
0.16	16.6	0.044	1508	132	Deposit	334
0.17	16.7	0.041	1658	134	Deposit	328
0.17	18.5	0.041	2027	148	Splash	328
0.16	17.1	0.045	1581	157	Splash	335
0.22	15.2	0.032	1741	170	Splash	312
0.20	15.3	0.034	1664	187	Splash	316
0.17	16.8	0.041	1663	190	Splash	329
0.21	16.1	0.033	1894	194	Splash	313
0.14	21.5	0.051	2213	218	Splash	344
0.22	15.8	0.032	1881	230	Splash	312
0.14	20.4	0.051	1998	301	Splash	344
0.22	21.2	0.032	3375	540	Splash	312
0.32	18.4	0.022	3728	556	Splash	288
0.25	22.0	0.028	4209	600	Splash	302

3・3 同一 We における液膜粘性違いの比較

図 10 に同程度の We_N における液膜粘性違いの衝突挙動の比較を示す。図は、上段から液膜粘性係数 $\mu_f = 0.865$, 19.0, 96.5 mPa・s の液膜に $We_N = 190$ で液滴が衝突した際の衝突挙動を示すものである。図より、液膜粘性係数 $\mu_f = 0.865$ mPa・s の条件では Splash が観察されるものの、液膜粘性係数 $\mu_f = 19.0, 96.5$ mPa・s の条件においては Deposit 型の衝突挙動が観察された。これより、同程度の We 数で液滴が液膜衝突した場合、液膜の粘性が低くなると Splash しやすくなる傾向が示された。

図 11 に、参考までに画像取得の直前に衝突があった箇所周辺に再度液滴が衝突した場合の画像を示す。この液滴の We_N 数は 226、液膜の粘性は $\mu_f = 19.0$ mPa・s であり、おおよそ図 10 中央と近い条件となっている。この条件では本来図 10 中央と同様 Splash は見られず、Deposit 型の衝突現象が見られるはずである。しかし、以前に衝突が起きた近傍に再び液滴の衝突が発生した場合の図 11 では激しい Splash が発生していた。これは、以前に衝突が起きた箇所周辺では、液膜がシリコンオイル(粘性: $\mu_f = 19.0$ mPa・s)と液滴由来の成分である n-heptane(粘性 $\mu_d = 0.42$ mPa・s)の混合物となり、液膜の粘性が低下したためと考えられる。この結果からも液膜の粘性が低下した際に Splash がおきやすくなることが確認できる。

以上より、液膜の粘性は、衝突挙動に影響を与えることが示された。異種液体間の液滴、液膜衝突においては液膜の粘性が小さいと Splash しやすくなり、粘性が大きいと Deposit しやすくなる。

$We_N = 190$, $\mu_f = 0.865$ mPa・s ($\nu = 1$ mm²/s), $d = 0.17$ mm

$We_N = 190$, $\mu_f = 19.0$ mPa・s ($\nu = 20$ mm²/s), $d = 0.12$ mm

$We_N = 190$, $\mu_f = 96.5$ mPa・s ($\nu = 100$ mm²/s), $d = 0.20$ mm

Fig. 10 Experimental results at the same We_N . Splash phenomenon occurs as the viscosity of the liquid film decreases. The viscosity of the liquid film definitely affects the collision behavior.

Fig. 11 A case where a droplet has collided again with a previously collided place. Experimental condition are $We_N = 226$, $\mu_f = 19.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. The condition is close to the center of Fig.10. Viscosity changes at the point of recollision. Therefore, the collision behavior changes.

3・4 We 数と La による噴霧挙動

図 12 に本実験で観察された衝突挙動のうち Deposit と Splash についてまとめたものを示す。過去の研究より、同一液体間の Splash-Deposit 間の臨界値をまとめる際には We と $La^{-0.2}$ の関係がよく用いられる (Cossali et al., 1997; Rioboo et al., 2003; Okawa et al., 2008; Alghoul et al., 2011; Seo et al., 2016)。そこで、図 12 も同様にまとめた。図 12 の縦軸は垂直方向 We 数である We_N 、横軸は $La^{-0.2}$ である。図より、Splash 現象が見られるのは図左上の We_N が大きく、 $La^{-0.2}$ が小さい条件である。Deposit 現象が見られるのは図右下の We_N が小さく、 $La^{-0.2}$ が大きい条件である。しかしながら、プロットが重なっている部分も多く、単純に We_N と $La^{-0.2}$ では現象をまとめられない。これは、3・3 節にも示したように、明らかに液膜の粘性は衝突挙動に影響を与えているにもかかわらず We 数にも La 数にも液膜の粘性に関する変数を含まないことに起因すると考えられる。

Fig. 12 Summary of experimental results. Summarized by We_N and $La^{-0.2}$. There are overlapping plots.

We 数は慣性と表面張力の比を、 La 数は慣性と表面張力の積と粘性力の比を現す無次元数である。これらの無次元数は異種液体間の現象を想定したものではない。そのため、異種液体間の現象に適応するためには修正を加える必要がある。 We 数は運動エネルギーと表面自由エネルギーの比を表す無次元数であり、液滴の持っている運動エネルギー、表面自由エネルギーであると考え、そのまま用いた。 La 数の慣性は液滴の持つ力であり衝突の際の運動エネルギーに寄与していると考え、密度、直径を液滴由来の物性値とした。衝突挙動は液膜由来の現象であり、 La 数の表面張力と粘性力の比が液滴の分裂、飛散に寄与していると考え、表面張力、粘性係数を液膜由来の物性値とした。これらをまとめた修正 La 数(以下 La^* 数)を以下に定義して、現象の整理を行う。

$$La^* = \rho_d d_d \sigma / \mu_f^2 \quad (3)$$

ρ_d : 液滴の密度

d_d : 液滴の直径

σ : 空気と液膜液体界面の表面張力

μ_f : 液膜の粘性係数

図 13 に We_N 数と La^* 数を用いて本実験で観察された現象をまとめたものを示す. 図の縦軸は We_N であり, 横軸は $La^{*-0.2}$ である. 図より, La^* 数を用いてまとめた場合も, La 数でまとめた場合(図 12)と同様に高 We 数, 低 $La^{*-0.2}$ 条件で Splash が, 低 We 数, 高 $La^{*-0.2}$ 条件で Deposit が見られる点で一致しているものの, Splash, Deposit の領域が分かれ, 衝突現象の整理が可能となった.

Fig. 13 Summarized by We_N and $La^{*-0.2}$. The plot area is divided. Collision phenomena can be organized.

4. 結 言

実際のエンジン内での液滴の壁面衝突を模擬するため, ポートインジェクタによる噴霧液滴を燃料とは異なる液体薄膜を有する壁面上に衝突させたときの現象を観察した. 可視化結果を分類することで以下の知見を得た.

- ・ 液滴と異種液膜間の衝突においても, 同一液体間の液滴と液膜の衝突と同様, We 数が大きくなると衝突形態は Rebound から Deposit, Splash に変化する.
- ・ 液膜の粘性は衝突挙動に影響を与える. 液膜の粘性が大きいと Splash は発生しにくくなる.
- ・ 同一液体間衝突で現象を整理する際に用いられてきた La 数はそのままでは用いることができない. La 数に液膜の粘性を導入した修正 La 数を提案した.
- ・ 垂直方向の速度で計算した We 数と修正 La 数により衝突現象を整理することができた.

文 献

- Alghoul, S. K., Eastwick, C. N. and Hann, D. B., Normal droplet impact on horizontal moving films: an investigation of impact behavior and regimes, Experiments in Fluids, Vol.50 (2011), pp.1305-1316.
- Almkvist, G., Denbratt, I., Josefsson, G. and Magnusson, I., Measurement of fuel film thickness in the inter port of an S.I.engine by laser induced fluorescence, SAE technical paper, 952489 (1995).
- Bai, C. and Gosman, A. D., Development of methodology for spray impingement simulation, SAE technical paper, 950283 (1995).
- Banks, D., Ajawara, C. and Aquilar, G., Effects of drop and film viscosity on drop impacts onto thin film, ICLASS2012

(2012).

- Chen, R. H. and Wang, H. W., Effects of tangential speed on low-normal-speed liquid drop impact on a non-wettable solid surface, *Experiments in Fluids*, Vol.39 (2005), pp.754-760.
- Cossali, G. E., Coghe, A. and Marengo, M., The impact of a single drop on a wetted solid surface, *Experiments in Fluids*, Vol.22 (1997), pp.463-472.
- Geppert, A., Gomaa, H., Meister, C., Lamanna, G. and Weigand, B., Droplet wall-film interaction: impact morphology and splashing/deposition boundary of hyspin/n-hexadecane two-component systems, *ILASS Americas 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (2014).
- Hentschel, W., Grote, A. and Langer, O., Measurement of wall film thickness in the intake manifold of standard production SI engine by spectroscopic, *SAE technical paper*, 972835 (1997).
- 神戸浩揮, 井上昌樹, 村松恵理子, 北村高明, 潤滑油膜に対するディーゼル噴霧衝突挙動のモデリング(第2報) – ポスト噴射における微小量噴霧特性 –, *自動車技術会論文集*, Vol.51, No.1(2020), pp.39-46.
- Koederitz, K. P., Evers, M. R., Wilkinson, G. B. and Drallmeier, J. A., Break-up of liquid fuel films from the surface of the intake port and valve in port-fuel-injected engine, *Int.J.Engine Research*, Vol.3, No.1 (2002), pp.37-58.
- Leneweit, G., Koehler, R., Roesner, K. G. and Schafer, G., Regimes of drop morphology in oblique impact on deep fluids, *J. Fluid Mech*, Vol.543 (2005), pp.303-331.
- Manzello, S. L. and Yang, J. C., An experimental study of a water droplet impinging on a liquid surface, *Experiments in fluid*, Vol.32 (2002), pp.580-589.
- 溝渕直人, 神戸浩揮, 村松恵理子, 北村高明, 渡邊哲也, 大坪康彦, 潤滑油膜に対するディーゼル噴霧衝突挙動のモデリング – 臨界ウェーバ数の計測 –, *自動車技術会論文集*, Vol.49, No.2(2018), pp.175-180.
- Okawa, T., Shiraishi, T. and Mori, T., Effect of impingement angle on the outcome of single water drop impact onto a plane water surface, *Experiments in Fluids*, Vol.44 (2008), pp.331-339.
- Rioboo, R., Bauthier, C., Conti, J., Voue, M. and De Coninck, J., Wxperomental investigation of splash and crown formation during single drop impact on wetted surfaces, *Experiments in Fluids*, Vol.35 (2003), pp.648-652.
- 千田二郎, 松田健, エンジンスプレーの燃焼室壁面への衝突過程に関する体系的モデリング, 微粒化, Vol.12, No.39 (2003), pp.38-53.
- Seo, J., Kim, H. Y., Park, S., James, S. C. and Yoon, S. S., Experimental and numerical simulations of spray impingement and combustion characteristics in gasoline direct injection engines under variable driving conditions, *Flow Turbulence Combust*, Vol.96 (2016), pp.391-415.
- Sikalo, S. and Ganic, E. N., Phenomena of droplet-surface interactions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.31 (2006), pp.97-110.
- 八百幸誠二, 青木文明, 野口泰, ポート噴射インジェクタ噴霧の壁面衝突挙動挙動解析, 第19回微粒化シンポジウム後援論文集 (2010), pp.67-70.

References

- Alghoul, S. K., Eastwick, C. N. and Hann, D. B., Normal droplet impact on horizontal moving films: an investigation of impact behavior and regimes, *Experiments in Fluids*, Vol.50 (2011), pp.1305-1316.
- Almkvist, G., Denbratt, I., Josefsson, G. and Magnusson, I., Measurement of fuel film thickness in the inter port of an S.I.engine by laser induced fluorescence, *SAE technical paper*, 952489 (1995).
- Bai, C. and Gosman, A. D., Development of methodology for spray impingement simulation, *SAE technical paper*, 950283 (1995).
- Banks, D., Ajawara, C. and Aquilar, G., Effects of drop and film viscosity on drop impacts onto thin film, *ICLASS2012* (2012).
- Chen, R. H. and Wang, H. W., Effects of tangential speed on low-normal-speed liquid drop impact on a non-wettable solid surface, *Experiments in Fluids*, Vol.39 (2005), pp.754-760.
- Cossali, G. E., Coghe, A. and Marengo, M., The impact of a single drop on a wetted solid surface, *Experiments in Fluids*, Vol.22 (1997), pp.463-472.
- Geppert, A., Gomaa, H., Meister, C., Lamanna, G. and Weigand, B., Droplet wall-film interaction: impact morphology and splashing/deposition boundary of hyspin/n-hexadecane two-component systems, *ILASS Americas 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (2014).

- Hentschel, W., Grote, A. and Langer, O., Measurement of wall film thickness in the intake manifold of standard production SI engine by spectroscopic, SAE technical paper, 972835 (1997).
- Kambe, H., Inoue, M., Matsumura, E. and Kitamura, T., Modeling diesel spray impinging behavior on oil film (second report) –characteristics of small-quantity spray in post injection-, Transactions of society of automotive engineers of Japan, Vol.51, No.1(2020), pp.39-46 (in Japanese).
- Koederitz, K. P., Evers, M. R., Wilkinson, G. B. and Drallmeier, J. A., Break-up of liquid fuel films from the surface of the intake port and valve in port-fuel-injected engine, Int.J.Engine Research, Vol.3, No.1 (2002), pp.37-58.
- Leneweit, G., Koehler, R., Roesner, K. G. and Schafer, G., Regimes of drop morphology in oblique impact on deep fluids, J. Fluid Mech, Vol.543 (2005), pp.303-331.
- Manzello, S. L. and Yang, J. C., An experimental study of a water droplet impinging on a liquid surface, Experiments in fluid, Vol.32 (2002), pp.580-589.
- Mizobuchi, N., Kambe, H., Matsumura, E., Kitamura, T., Watanabe, T. and Ohtsubo, Y., Modeling of diesel spray impinging behavior in lubricating oil film –measurement of critical weber number-, Transactions of society of automotive engineers of Japan, Vol.49, No.2(2018), pp.175-180 (in Japanese).
- Okawa, T., Shiraishi, T. and Mori, T., Effect of impingement angle on the outcome of single water drop impact onto a plane water surface, Experiments in Fluids, Vol.44 (2008), pp.331-339.
- Rioboo, R., Bauthier, C., Conti, J., Voue, M. and De Coninck, J., Wxperomental investigation of splash and crown formation during single drop impact on wetted surfaces, Experiments in Fluids, Vol.35 (2003), pp.648-652.
- Senda, J. and Matsuda, T., Modeling on interaction processes of engine sprays and chamber wall, Atomization:journal of the ILASS-Japan, Vol.12, No.39 (2003), pp.38-53 (in Japanese).
- Seo, J., Kim, H. Y., Park, S., James, S. C. and Yoon, S. S., Experimental and numerical simulations of spray impingement and combustion characteristics in gasoline direct injection engines under variable driving conditions, Flow Turbulence Combust, Vol.96 (2016), pp.391-415.
- Sikalo, S. and Ganic, E. N., Phenomena of droplet-surface interactions, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.31 (2006), pp.97-110.
- Yaoko, S., Aoki, F. and Noguchi, Y., Analysis of PFI spray impinging on a flat wall, 19th Symposium (ILASS-Japan) on Atomization (2010), pp.67-70 (in Japanese).