

博士学位論文

直接噴射式ガソリンエンジンの
粒子状物質低減に関する研究

同志社大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻

植木 毅

2018年3月

目次

第1章 緒論	1
1.1. 自動車を取り巻く環境	1
1.2. 内燃機関の排気規制動向	6
1.3. 本研究の位置付けと目的	9
1.4. 本論文の構成	10
参考文献	11
第2章 本研究に関連する従来研究	13
2.1. 粒子状物質(Particulate Matter: PM)の生成に関する基礎研究	13
2.1.1. PM の構成	13
2.1.2. PM の大きさ	15
2.1.3. PM の生成過程	15
2.1.4. ディーゼル自由噴霧における PM 生成に関する研究	18
2.2. PM の計測手法	19
2.2.1. 重量計測手法① フィルタ捕集法	19
2.2.2. 重量計測手法② フィルタ振動法	20
2.2.3. 数計測手法① 光散乱を利用した個数濃度計測	21
2.2.4. 数計測手法② 電気移動度を利用した分級計測	22
2.2.5. 成分計測手法	24
2.2.6. その他計測手法① スモークメータによる黒煙濃度計測	25
2.2.7. その他計測手法② レーザ誘起赤熱法による Soot 体積濃度計測	26
2.3. ガソリンエンジンにおける PM 解析に関する従来研究	27
2.3.1. 排気系における PM 計測	27
2.3.2. 燃焼室内の PM 観察	27
2.4. 本研究の意義	28
参考文献	28

第3章 直接噴射式ガソリンエンジンのPM排出特性	32
3.1. 実験装置と計測方法	32
3.1.1. 低慣性エンジンダイナモを用いた過渡運転によるPM粒子数評価	32
3.1.2. 評価したテストサイクル	32
3.1.3. 供試エンジン	33
3.1.4. 供試燃料	35
3.1.5. 排気PMの計測方法	36
3.2. テストサイクル走行時におけるPM排出特性	37
参考文献	40
第4章 燃焼室内の燃料噴霧と燃焼過程	41
4.1. 実験装置と計測方法	41
4.1.1. 可視化エンジンを用いた燃焼室内の可視化手法	41
4.1.2. 供試燃料	43
4.1.3. エンジン運転条件	43
4.2. 燃焼室内の燃料噴霧と燃焼挙動	45
4.2.1. 触媒急速暖機運転における燃料噴霧と燃焼挙動	45
4.2.2. 冷間時の加速運転における燃料噴霧と燃焼挙動	46
4.2.3. アイドル運転における燃料噴霧と燃焼挙動	47
4.2.4. PM排出が多い燃焼室内の燃焼挙動の特徴	47
参考文献	48
第5章 ピストン頂面の燃料液膜の挙動	49
5.1. 実験装置と計測方法	49
5.1.1. 燃料液膜の計測構成	49
5.1.2. 供試エンジン	50
5.1.3. 使用燃料の蛍光特性	51
5.1.4. 燃料液膜の撮影方法	52
5.1.5. 燃料液膜厚さの定量化	52

5.2. PM 排出が多い運転条件における燃料液膜の挙動	53
5.2.1. 燃料液膜の挙動	53
5.2.2. 燃料液膜と輝炎の関係	55
参考文献	56
第 6 章 放射強度を利用した PM の計測原理	57
6.1. レーザ誘起赤熱法の計測原理	57
6.2. 時間分解レーザ誘起赤熱法の計測原理	60
6.2.1. 概要	60
6.2.2. レーザ照射による Soot 粒子の放射強度の算出方法	61
6.2.3. レーザ照射による Soot 粒子のエネルギー吸収	62
6.2.4. レーザ照射による Soot 粒子の周囲への熱伝達	62
6.2.5. レーザ照射による Soot 粒子の蒸発	63
6.2.6. レーザ照射による Soot 粒子の熱放射	64
6.2.7. レーザ照射による Soot 粒子の内部エネルギー変化	64
6.2.8. Soot 粒子の質量保存	64
6.2.9. レーザ照射による Soot 粒子の放射強度の時間履歴	65
6.2.10. Soot 粒子径の算出	66
6.2.11. 数値計算により求められる Soot 粒子径の考察	67
6.3. Soot 粒子の数密度計測に対する考え方	67
6.4. 代表粒子径と実測の違いに対する考察	68
参考文献	69
第 7 章 燃焼室内の PM の生成挙動	71
7.1. レーザ誘起赤熱法による燃焼室内の Soot 粒子の可視化	71
7.1.1. 実験装置と計測手法	71
7.1.2. エンジン運転条件	72
7.1.3. 触媒急速暖機運転における Soot 生成と排出挙動	73
7.1.4. サイクル経過による Soot 生成の変化	74

7.2. 時間分解レーザ誘起赤熱法による燃焼室内の Soot 粒子解析	77
7.2.1. 実験装置と計測手法	77
7.2.2. エンジン運転条件	79
7.2.3. Soot 粒子径分布の計測結果の検証	80
7.2.4. 輝炎と Soot 生成の時間推移	81
7.2.5. Soot 粒子径のサイクル中の時間推移	83
7.2.6. Soot 粒子径分布のサイクル変動	85
7.2.7. ピストン頂面に形成する燃料液膜のサイクル間バラツキ	87
7.3. 触媒急速暖機運転における燃焼室内の PM 生成	88
参考文献	89
第 8 章 燃料の高噴射圧化による噴霧特性の変化	90
8.1. 評価ノズル	91
8.1.1. 評価ノズル仕様	91
8.1.2. 噴霧形状と噴霧先端到達距離	93
8.2. 噴霧粒子径の計測	94
8.2.1. 噴霧粒子径の計測方法	94
8.2.2. 噴射圧力による噴霧粒子径の変化	96
8.3. 噴霧への空気導入過程の計測	97
8.3.1. 噴霧への空気導入の計測方法	97
8.3.2. 大気圧雰囲気における噴霧への空気導入過程の噴射圧力の影響	99
8.3.3. 加圧雰囲気における噴霧への空気導入過程の噴射圧力の影響	102
8.4. まとめ	104
参考文献	104
第 9 章 燃料の高噴射圧化による PM 生成要因への影響	106
9.1. 燃料の高噴射圧化による噴霧挙動への影響	106
9.1.1. 供試エンジン	106
9.1.2. 評価ノズル	107
9.1.3. エンジン運転条件	107

9.1.4. 燃料噴射圧力による燃焼室内の噴霧挙動への影響	108
9.2. ピストン頂面に形成する燃料液膜	109
9.2.1. エンジン実働時におけるピストン頂面の燃料液膜の計測方法	109
9.2.2. エンジン運転条件	109
9.2.3. 燃料の高噴射圧化によるピストン頂面に形成する燃料液膜への影響	109
9.3. 燃料液膜の時系列挙動	111
9.3.1. 定容容器での壁面衝突時における燃料液膜の時系列計測方法	111
9.3.2. 実験条件	113
9.3.3. 燃料噴射圧力による壁面衝突後の燃料液膜への影響	113
9.4. 混合気分布計測	115
9.4.1. レーザ誘起エキサイプレックス蛍光法の計測原理	115
9.4.2. エンジンでのレーザ誘起エキサイプレックス蛍光法の計測構成	116
9.4.3. レーザ誘起エキサイプレックス蛍光法に使用した蛍光剤	118
9.4.4. 使用燃料の二相領域	118
9.4.5. エンジン燃焼室内の混合気分布	119
9.4.6. 定容容器でのレーザ誘起エキサイプレックス蛍光法の計測構成	121
9.4.7. 壁面衝突時の混合気の時系列変化	122
9.5. まとめ	124
参考文献	125
第 10 章 燃料の高噴射圧化による PM 生成過程の変化	126
10.1. 実験装置と計測方法	126
10.1.1. 供試エンジン	126
10.1.2. 評価ノズル	126
10.1.3. エンジン運転条件	126
10.1.4. PM 粒子数の計測方法	127
10.2. 燃料噴射圧力による触媒急速暖機運転の燃焼特性	127
10.3. 燃料噴射圧力による触媒急速暖機運転の PM 排出特性	128
10.4. まとめ	131
参考文献	132

第 11 章 結論	133
11.1. エンジン燃焼室内の現象把握より明らかにした PM 生成要因	133
11.2. 燃料の高噴射圧化による噴霧特性の変化と PM 低減	135
11.3. 今後の展望	136
主な使用記号	138
本論文に関する公開論文と研究発表	141
論文	141
研究発表	141
その他	142
謝辞	143

第1章 緒論

1.1. 自動車を取り巻く環境

18世紀中期より始まった第1次産業革命では、蒸気機関の発明により、工業の機械化、交通の高速化が進んだ。続く19世紀半ばより始まった第2次産業革命では、電力の産業への普及が促進し、内燃機関の実用化により交通や産業が発展した。これら産業革命を経て、各分野での技術革新が進み、産業は発展し、人類の生活は豊かになり、利便性がもたらされたものの、一方で地球環境の悪化が進行した。

地球環境の変化として、1880年以降における大気温度の変化を、図1-1に示す^{(1-1), (1-2)}。1940年以降、大気温度変化はプラスで推移し、年々上昇傾向がみられ、現在では1deg.C/年を越え、地球温暖化は確実に進行、加速している。地球温暖化を食い止め、持続可能な社会を維持していくため、企業や研究者らは、地球環境温暖化の抑止に向けた研究を日々進めている。

ここで、地球温暖化を引き起こす温室効果ガスは、環境省が排出量を管理しているものとして7種類あり、二酸化炭素(Carbon dioxide, CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(Nitrous oxide, N₂O)、ハイドロフルオロカーボン類(Hydrofluorocarbon, HFCs)、パーフルオロカーボン類(Perfluorocarbon, PFCs)、六フッ化硫黄(SF₆)、三フッ化窒素(NF₃)がある。国連気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)によれば、人為的に排出される温室効果ガスのうち、地球温暖化への影響が大きいのはCO₂と見積もられている⁽¹⁻³⁾。ここでCO₂濃度の推移を、図1-2に示す。1750年以降、CO₂濃度は年々増加し、1950年以降ではCO₂濃度が急増している。IPCCによれば、CO₂の排出量と世界平均の大気温度の変化には比例関係があり、地球温暖化の支配的要因として人類活動による可能性が極めて高いと報告されている。

2014年におけるCO₂排出への用途別の内訳を図1-3に示す⁽¹⁻⁴⁾。熱や電気のエネルギー生産に42.1%を占め、次に輸送関連に23.3%、製造および建設関連に19.2%と続く。ここで輸送関連のうち、我々個人の生活に密接に関連する車両からのCO₂排出は全CO₂排出のうち17.5%を占めており、車両に対するCO₂低減の期待は大きいと考えられる。

自動車シェアのこれまでの推移と今後の予測として、国際エネルギー機関(International Energy Agency, IEA)が提示する2DSシナリオ(CO₂を含む温室効果ガスの排出量を削減し、産業革命以降の気温上昇を2deg.C以下に抑える、持続可能なエネルギーシステムの展望を提示するシナリオ)における乗用車および小型車における販売台数の推移と予測を、図1-4に示す⁽¹⁻⁵⁾。この先20年以上にわたり、内燃機関付きの乗用車および小型車の販売増加が見込まれている。ここで例えば2040

年時点での予測では、乗用車および小型車のうち、内燃機関付きの乗用車および小型車の比率は77%を占め、そのうちガソリンエンジンを搭載する車両は65%を占める。これよりガソリンをはじめとする内燃機関は、今後も継続した技術開発が必要不可欠である。

内燃機関の燃料源である石油の需要実績と今後の予測を、図 1-5 に示す⁽¹⁻⁶⁾。ここで図中に示した各シナリオの定義を以下に示す。

現行シナリオ：従来の政策流れに大きな変化を織り込まないシナリオ

新政策シナリオ：各国で採用の確度が高いエネルギー環境政策の実施を想定したシナリオ

低価格シナリオ：2014 年後半から急落した原油価格の新常態が常態化すると想定したシナリオ

450 シナリオ：温室効果ガスの大気中濃度を450ppm以下にするシナリオ。2100年の温暖化を2deg.C以下にするため、温室効果ガスの大気中濃度を450ppm以下に設定し、2100年から現在にさかのぼって予測したもの

石油の需要は増加傾向がみられるが、地球環境の維持を考慮すると、石油消費量の削減への取り組みは必要と考えられる。このため、自動車の燃費規制が強化されている。ガソリンエンジンにおける燃費規制として、CO₂規制値の推移を図 1-6 に示す⁽¹⁻⁷⁾。ここでは、ガソリン 1LあたりのCO₂排出を2321gとして換算している。ここで例えば2010年規制値に対する2020年導入予定値の低減率をみると、日本 -25%、アメリカ -44%、欧州連合(European Union, EU) -32%であり、各国の規制とも大幅なCO₂低減が要求されている。この規制に対応すべく、各カーメーカは内燃機関の熱効率の向上に取り組んでいる。内燃機関の最大熱効率の推移は、図 1-7 に示すように、ガソリン、ディーゼルとも熱効率は年々向上している^{(1-8), (1-9)}。日本では、熱効率の飛躍的な向上の実現に向けて、産学が連携し取り組む戦略的イノベーション創造プログラム(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, SIP)が、2014年に立ち上がり、5年間の計画で取り組まれている。SIPでは、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンともに最大熱効率50%を目標に、新燃焼形態の実現に向けた研究が行われている^{(1-8), (1-9)}。

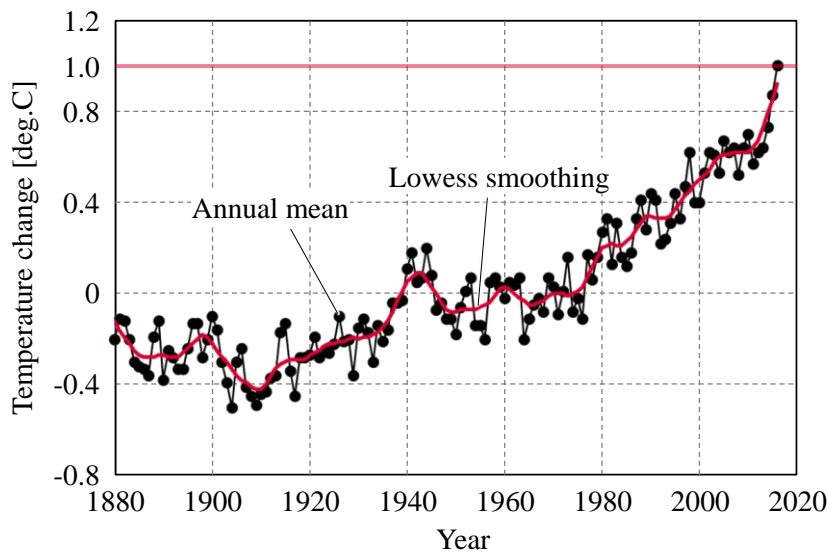


Figure 1-1. Global annual mean surface air temperature change ^{(1-1), (1-2)}

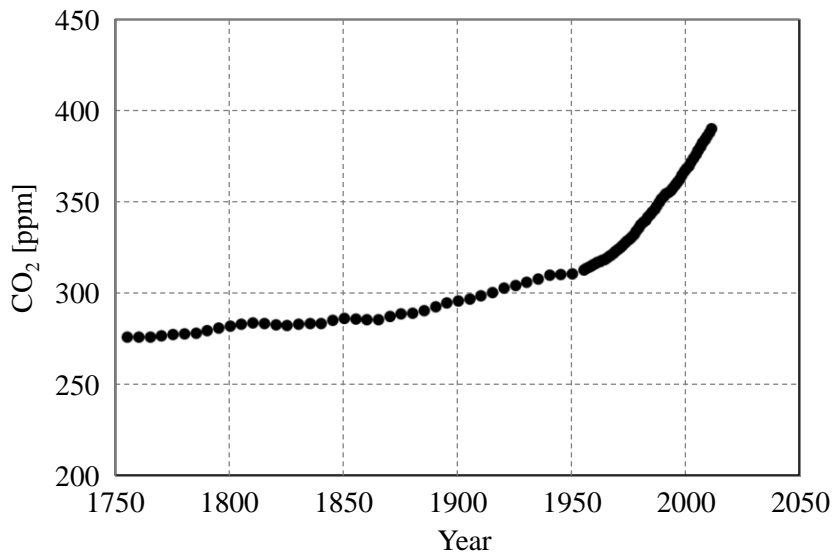


Figure 1-2. Globally averaged CO₂ concentration ⁽¹⁻³⁾

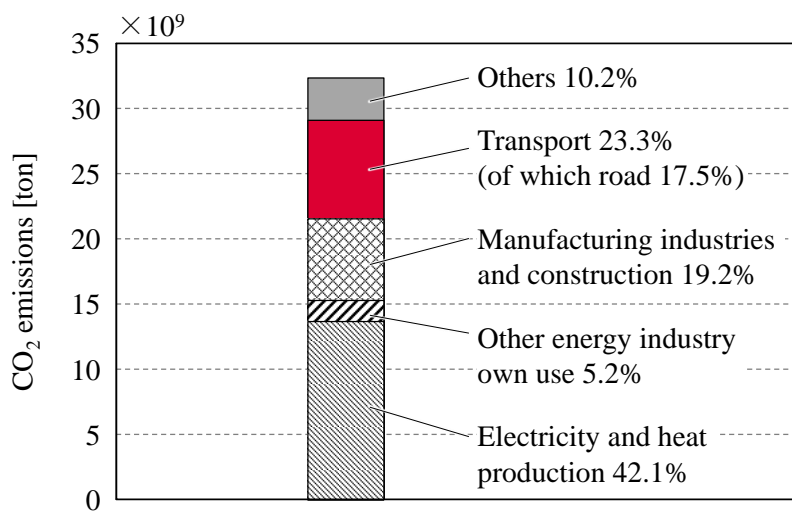


Figure 1-3. CO₂ emissions from fuel combustion by sector in 2014 ⁽¹⁻⁴⁾

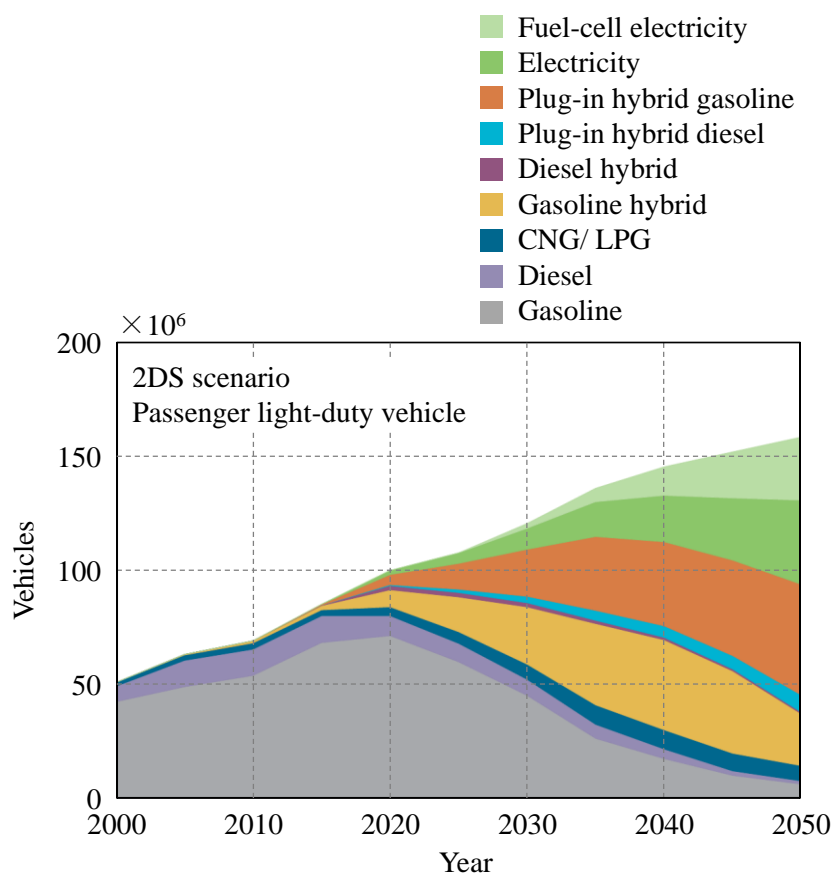


Figure 1-4. Global portfolio of technologies for PLDVs in the 2DS ⁽¹⁻⁵⁾

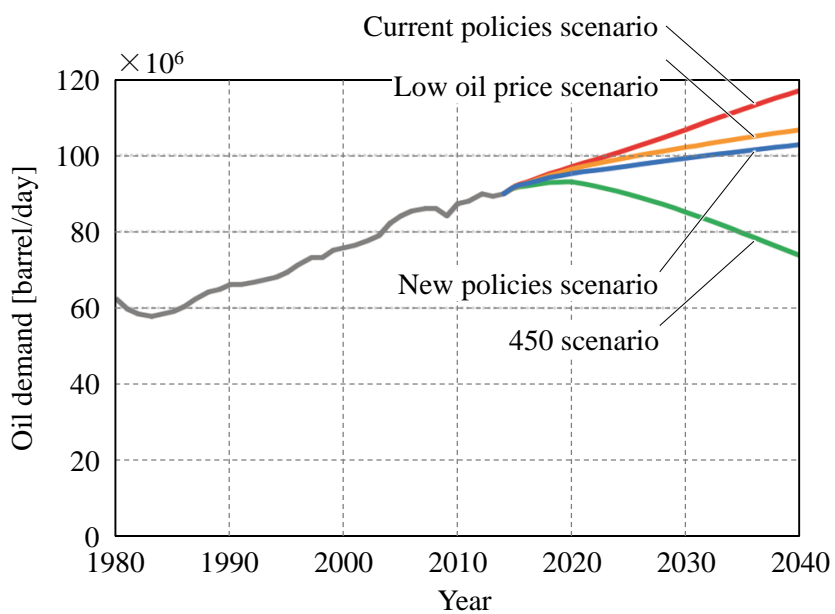


Figure 1-5. World oil demand by scenario ⁽¹⁻⁶⁾

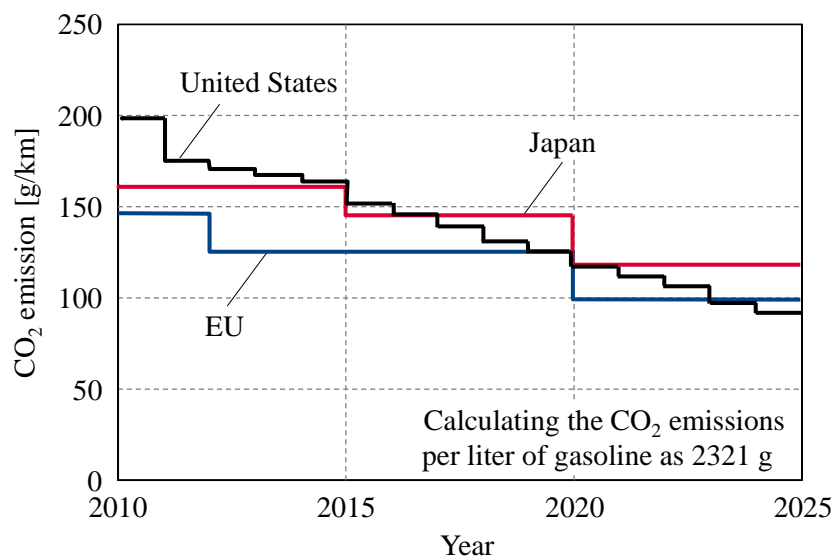
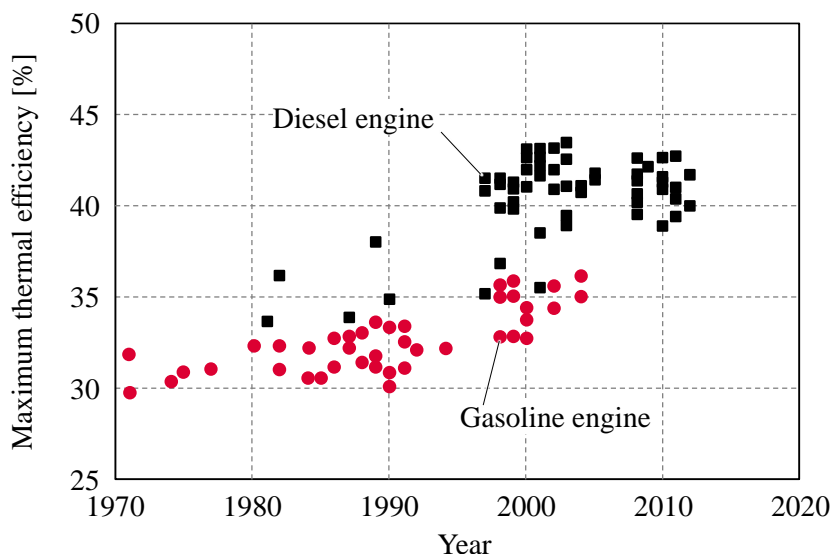


Figure 1-6. Fuel efficiency regulation of passenger car ⁽¹⁻⁷⁾

Figure 1-7. Maximum thermal efficiency of engine ^{(1-8), (1-9)}

1.2. 内燃機関の排気規制動向

内燃機関では熱効率向上による燃費向上に加えて、有害な排気エミッションの低減も必須である。自動車から排出されるガスは、温暖化の元凶である CO_2 以外に、有害なガスとして炭化水素 (Hydrocarbon, HC), 窒素酸化物 (Nitrogen oxides, NO_x), 粒子状物質 (Particulate matter, PM), 一酸化炭素 (Carbon monoxide, CO) などがある。これら有害な排気ガスの規制についても、年々強化されている。日本, EU, アメリカにおける規制名称と計測時に使用されるテストサイクルを図 1-8 に、EU を例にした規制値の推移を図 1-9 に示す^{(1-10), (1-11), (1-12), (1-13)}。各国とも順次規制およびテストサイクルが見直されている。ここで、EU が 2017 年 9 月、日本が 2018 年 10 月より導入が計画されている WLTC (Worldwide Light-duty Test Cycles) は、様々な国や地域における幅広い実走行パターンを基に策定されたもので、従来のテストサイクルよりも実走行に即したテストサイクルである。図 1-9 に示した EU での排ガス規制値の推移において、着目すべきは、粒子状物質の規制の強化として、2009/9 の EURO 5 にて加わった ガソリンエンジンへの PM 規制と、2014/9 の EURO 6b にて新たに規制項目に加わった PM の粒子数 (Particulate number, PN) の規制導入である。PM は燃料の不完全燃焼により生じる主成分が炭素で構成される微粒子のことである。ガソリンエンジンでは、新たに規制対象となる PM の低減に取り組む必要がある。

ディーゼルエンジンでは、自動車より排出されるPMを低減するために排気管中にPM粒子を捕集するフィルタDPF(Diesel Particulate Filter)を装着することで、規制対応を図っている。一方、ガソリンエンジンでは、ディーゼルエンジンと同様にPM捕集用のフィルタを設置するには課題がある。一つ目が、排気系での圧力損失の低減である。ガソリンエンジンは、ディーゼルエンジンに比べて、高回転数で出力を取り出すため、PM捕集用のフィルタを設置すると、排気系の圧力が増加し、出力が低下する可能性がある。二つ目が、フィルタ捕集されたPMの浄化方法の確保である。フィルタに捕集したPMは酸化反応により浄化させる必要があるが、ディーゼルエンジンと異なり、理論空燃比での燃焼を基本とするガソリンエンジンでは排気中に酸素がなく、酸化反応をさせにくい。酸化反応の促進のために、希薄燃焼や排気系への空気導入などにより意図的に酸素を排気系に送り込む手法があるが、三元触媒の浄化機能が低下し、HC、NO_x、COが浄化されずに、自動車から排出される可能性がある。三つ目が、製造コストの低減である。ディーゼルエンジンと比較し、燃焼圧が低く、燃料噴射圧が低く構成できるガソリンエンジンは、低コストで製造することができる。PM捕集用のフィルタの設置や既存の三元触媒へのPM捕集機能の付与は、コストの増加となりうる。このように、ガソリンエンジンのPM低減のためにPM捕集フィルタを装着する場合には、これら課題を解決する必要がある。カーメーカや触媒メーカはガソリンエンジン用のPM捕集フィルタ(Gasoline Particulate Filter: GPF)の技術開発を進めているが、上記課題により、現在までに量産化に至っている車両は一部に限られている。このような状況であることから、ガソリンエンジンではフィルタ捕集といった排気での後処理に頼らず、燃焼過程中のPM低減が要求されている。

ここで、ガソリンエンジンには、燃料噴射するインジェクタ(燃料噴射ノズル)の搭載位置により、吸気ポートに燃料噴射するインジェクタを備えるポート噴射式ガソリンエンジンと、燃焼室内に燃料を直接噴射する直接噴射式ガソリンエンジン(直噴ガソリンエンジン)が存在する。直接噴射式ガソリンエンジンは、燃焼室に直接燃料噴射できることから、混合気の形成自由度が高い。そのため、例えば希薄燃焼を用いることで燃費低減でき、また噴射燃料の気化潜熱を利用し吸入空気を冷却することで吸入空気の体積を縮小させ、さらなる吸気により出力向上できるなどのメリットを持つ⁽¹⁻¹⁴⁾。しかし一方で燃焼室内に燃料噴射インジェクタを備えるため、燃料噴射後～点火までの噴射燃料の気化時間がポート噴射ガソリンエンジンに比べて短く、噴射燃料が点火時に気化しきれず、不完全燃焼し、PMが発生しやすいことも知られている。小林ら、伏見らの研究によると、直接噴射式ガソリンエンジンを備える自動車からの排出PM粒子数は、ポート噴射式ガソリンエンジンの10倍以上であると報告されている⁽¹⁻¹⁵⁾、⁽¹⁻¹⁶⁾。またディーゼルエンジンはDPFを装着することで、ポート噴射式ガソリンエンジン並に排気PM粒子数を抑制できる⁽¹⁻¹⁶⁾。これより、内燃機関においては、特に直接噴射式ガソリン

エンジンのPM低減が必要で、ガソリンエンジンのメリットを活かすためには、燃焼時に生成するPM低減に向けた技術開発が要求されている。

このような状況に加えて、昨今の加速する欧州の自動車の電動化への動向にも注視する必要がある。2016年9月、ドイツ連邦参議院では、2030年までに内燃エンジンを搭載する新車の販売中止を求める決議を可決した⁽¹⁻¹⁷⁾。この決議には法的拘束力はないものの、EU全体での実施を求めている。2017年7月、フランス政府が2040年までにガソリン車とディーゼル車の販売を禁止すると発表した⁽¹⁻¹⁸⁾。これは先進国G7(Group of Seven)として、初めての表明である。同月、イギリス政府も同様の声明を発表した。欧州カーメーカーであるVolkswagen AGは、2016年6月、2025年までに、電動化車両を30車種以上投入すると発表した⁽¹⁻¹⁹⁾。また、Volvoは、2017年7月、2019年以降に販売する新型車は電気自動車かハイブリッド自動車にすると発表した⁽¹⁻²⁰⁾。

このように、地球環境保全に向けた自動車の電動化動きも着実に進んでいる。しかし、先述したように向こう数十年は内燃機関付きの自動車が増加する予測がある。内燃機関には、電動化により低コスト、小型化、軽量化が要求されるとともに、排気エミッションを低減することの両立が求められる。

		2010	2015	2020	2025
Japan	Regulation	Post New Standards			
	Test cycle	10/15	JC08	WLTC	
EU	Regulation	Euro5b	Euro6b	Euro6d-TEMP	Euro6d
	Test cycle	NEDC		WLTC	
United States CARB*	Regulation	LEV II	LEV III		
	Test cycle	LA#4, US06, SC03			

* California Air Resources Board

Figure 1-8. Tailpipe emissions regulation ^{(1-10), (1-11), (1-12), (1-13)}

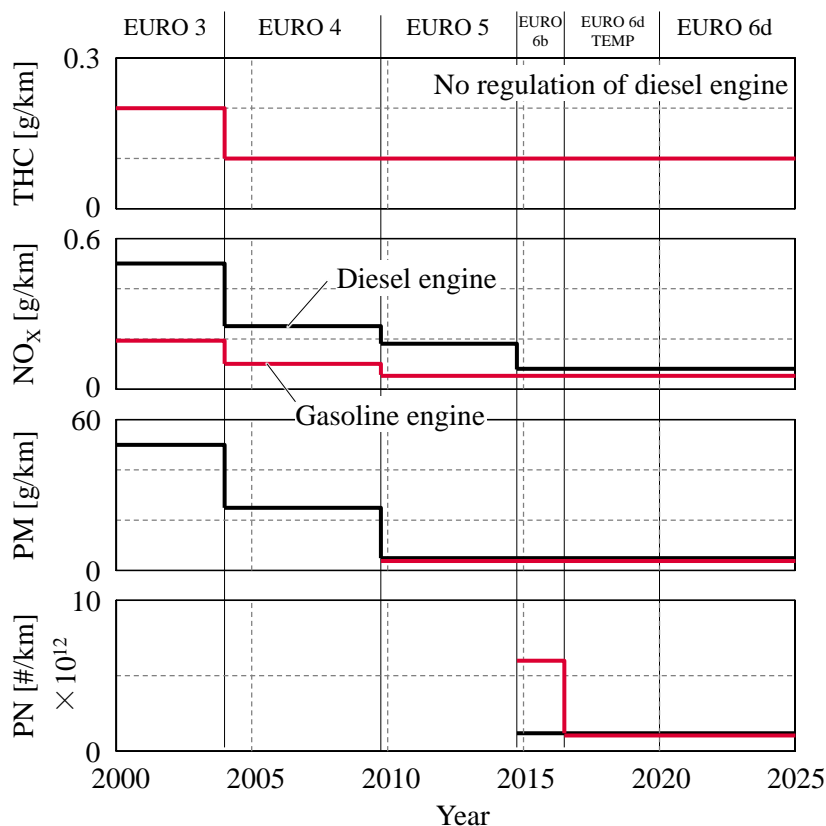


Figure 1-9. Tailpipe emissions regulation in EU (1-10), (1-11), (1-12), (1-13)

1.3. 本研究の位置付けと目的

前節で述べたように、今後数十年にわたり活用が見込まれる内燃機関であるが、地球への環境負荷軽減のためにも、熱効率の向上と排気エミッションの一層の低減が要求されている。その中でも、直接噴射式ガソリンエンジンの排気 PM の低減は、重要課題と考えられる。直接噴射式ガソリンエンジンの排気 PM 低減に向けた技術開発を進めるに当たって前提となるのが、PM が生成する燃焼室内における実現象の解明である。本研究では、まず燃焼室内の現象を解明する。燃料噴射から燃焼、そして PM 生成、排出に至る一連の過程を燃焼室内で体系的に計測解析する。噴射燃料がどのように噴射され、気化し、壁面に付着するか、そして燃焼特性や火炎伝播が、生成する PM にどのように影響するかを実際のエンジン燃焼室内で解明する。そして、明らかにした燃焼室内の現象をもとに、PM 低減策を探索し、その効果を確認し、直接噴射式ガソリンエンジンの排気 PM エミッション低減の一助となる研究を目指す。

以上より、本研究の目的は、直接噴射式ガソリンエンジンの PM 低減に向けて、エンジン燃焼室内の現象解明として、PM 生成およびその要因、生成した PM の排出特性を明らかにし、現象に基づき PM 低減策を提案し、その PM 低減効果を明らかにすることである。

1.4. 本論文の構成

本論文は、11 章で構成される。

第 1 章では、自動車を取り巻く環境として、地球環境の変遷と自動車の関与、そして地球環境保全のための燃費や排気エミッション規制動向について述べ、自動車用エンジンの方向性を記す。その中で直接噴射式ガソリンエンジンの PM 低減に対する重要性と課題を述べ、本研究の位置付けについて記す。

第 2 章では、本研究に関する従来研究として、PM 生成に関する基礎研究から、PM の計測手法、そして内燃機関の排気 PM に関する研究結果について述べ、本研究の意義について記す。

第 3 章では、直接噴射式ガソリンエンジンの PM の排出特性について述べ、PM 排出が多い運転条件を明らかにする。

第 4 章では、第 3 章で明らかにした排出 PM が多い運転条件におけるエンジン燃焼室内の噴霧、燃焼観察より、排出 PM が多い条件の特徴を明らかにする。

第 5 章では、第 3 章と第 4 章の結果より、PM 生成要因と推定したピストン頂面上の燃料液膜について、エンジン実働時における計測を行い、PM が多い運転条件における燃料液膜の特徴を明らかにする。

第 6 章では、燃焼室内の PM の位置、粒子径、数密度を明らかにするため、PM 粒子の放射強度を利用した計測手法の原理について述べる、そして、この手法を応用し、PM の粒子径や数密度の算出方法について述べる。

第 7 章では、第 6 章の手法を用いて、第 3～5 章で明らかにした排出 PM が多い運転条件におけるエンジン燃焼室内の PM 生成と排出過程、粒子径分布について明らかにする。そして、排出 PM が多い運転条件における燃料噴霧、燃焼過程、そして PM 生成について体系的にまとめる。

第 8 章では、第 3 章～第 7 章で得られた知見より、PM 低減策として、燃料の高噴射圧化の期待を述べる。燃料の高噴射圧化による PM 低減効果を確認すべく試作したインジェクタについて述べる。そして、燃料噴霧の単体特性として、噴霧形状、噴霧粒子径、噴霧への空気導入を評価し、燃料の高燃料圧化による噴霧特性の変化について述べる。

第9章では、燃料の高噴射圧化により、PM生成要因である燃料液膜と過濃混合気を実エンジン運転下で低減していることを述べる。

第10章では、本研究で提案した燃料の高噴射圧化による排気PM低減について、実エンジンで明らかにした結果を述べる。

最後に、第11章では、本論文で得られた知見をまとめ、本論文を閉じる。

参考文献

- (1-1) National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs> (accessed 2017/9/9)
- (1-2) J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato, K. Lo, Global surface temperature change, *Reviews of Geophysics*, Vol. 48, p. 1-29 (2010)
- (1-3) Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013 the Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report* (2013)
- (1-4) International Energy Agency, *CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2016*
- (1-5) International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2015*
- (1-6) International Energy Agency, *World Energy Outlook 2015*
- (1-7) International Council on Clean Transportation, Passenger car CO₂ emissions and fuel consumption, normalized to NEDC, <http://www.theicct.org/file/2709/download?token=ysnKr9Jp> (accessed 2017/9/9)
- (1-8) 古野志健男, 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)シンポジウム 2014 革新的燃焼技術 日の丸内燃機関が地球を救う計画, http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sympo1412/subject/subject_01.html (accessed 2017/9/9)
- (1-9) 第3回 SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム, 高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究開発, <http://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympo3rd/team1-1.pdf> (accessed 2017/9/9)
- (1-10) 環境省, 中央環境審議会大気環境部会 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について 第二次答申, 第五次答申, 第八次答申, 第九次答申, 第十次答申, 第十三次答申
- (1-11) Official Journal of the European Union, 715/2007, 692/2008, 2017/1151, 2017/1154
- (1-12) California Air Resources Board, Title 13 California Code of Regulations 1961, 1961.2

- (1-13) International Council on Clean Transportation, A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards, http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf (accessed 2017/9/9)
- (1-14) 定金伸治, 高宮二三郎, 森田晃司, 生駒卓也, 新型 V6 ガソリンエンジンの開発(第 2 報), 自動車技術会論文集, Vol. 36, No. 2, p. 53-58 (2005)
- (1-15) 小林伸治, 近藤美則, 伏見暁洋, 藤谷雄二, 齊藤勝美, 高見昭憲, 田邊潔, 直噴ガソリン乗用車の粒子状物質排出特性, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 5, p. 1009-1014 (2012)
- (1-16) 伏見暁洋, 齊藤勝美, 小林伸治, 近藤美則, 藤谷雄二, 高見昭憲, 田邊潔, 直噴ガソリン乗用車の粒子状物質排出特性—粒径別化学組成と形態—, 自動車技術会 2013 年春季大会前刷集, Vol. 85-13, p. 15-18 (2013)
- (1-17) SvenBöll, Bundesländer wollen Benzin- und Dieselaautos ab 2030 verbieten, SPIEGEL, Vol. 41 (2016)
- (1-18) Bloomberg, France Aims to End Sale of Fossil-Fuel-Powered Cars by 2040, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-07-06/france-aims-to-end-sale-of-fossil-fuel-powered-cars-by-2040> (accessed 2017/9/9)
- (1-19) Volkswagen AG Strategy 2025, <https://www.volkswagenag.com/en/group/strategy.html> (accessed 2017/9/9)
- (1-20) Volvo Car Group Press Release, Volvo Cars to go all electric, <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/210058/volvo-cars-to-go-all-electric> (accessed 2017/9/9)

第2章 本研究に関連する従来研究

第1章にて述べたように、地球への環境負荷軽減のためにも、内燃機関には熱効率の向上と排気エミッションの一層の低減が要求されている。その中でも、直接噴射式ガソリンエンジンより排気される粒子状物質(Particulate Matter: PM)の低減は、重要課題と考えられる。

本章では、PM に関する従来研究について述べる。最初に PM の構成成分や大きさ、生成過程といった基礎研究について紹介する。この PM に関する基礎研究は、主にディーゼル燃焼を対象に、従来より研究が盛んに行われてきた。次に、PM に関する計測手法として、量や数、成分など多岐にわたる計測手法について紹介する。そして最後に、本研究の対象であるガソリンエンジンにおける PM 解析に関する研究について紹介し、研究課題について言及し、本研究の意義について述べる。

2.1. 粒子状物質(Particulate Matter: PM)の生成に関する基礎研究

2.1.1. PM の構成

エンジンより排出される粒子状物質(Particulate Matter: PM)は、構成物質や特性に明確な定義はなく、エンジンから排出されたフィルタに捕集されたものとして定義される。その構成として、Johnson らの PM 模式図を、図 2-1 に示す⁽²⁻¹⁾。固体の炭素粒子を主体に、その周りに炭化水素や硫化物などが凝集した鎖状の形態をとる。西貝らはディーゼル噴霧の燃焼中における直接サンプリングにより PM 粒子を観察しており⁽²⁻²⁾、図 2-2 に示すよう Johnson らの模式図に類似している。この PM の組成を大別すると、固体の炭素分である Soot、有機溶剤に溶ける可溶性有機成分(Soluble Organic Fraction: SOF)、硫化物である Sulfate に分類できる。構成する成分の一例は図 2-3 に示すように、Soot の炭素分が主成分であり、未燃オイルや Sulfate や水が続く⁽²⁻³⁾。

粒子状物質 (Particulate Matter: PM)

{ 炭素分 (Soot)
 可溶性有機成分 (Soluble Organic Fraction: SOF)
 硫化物 (Sulfate)

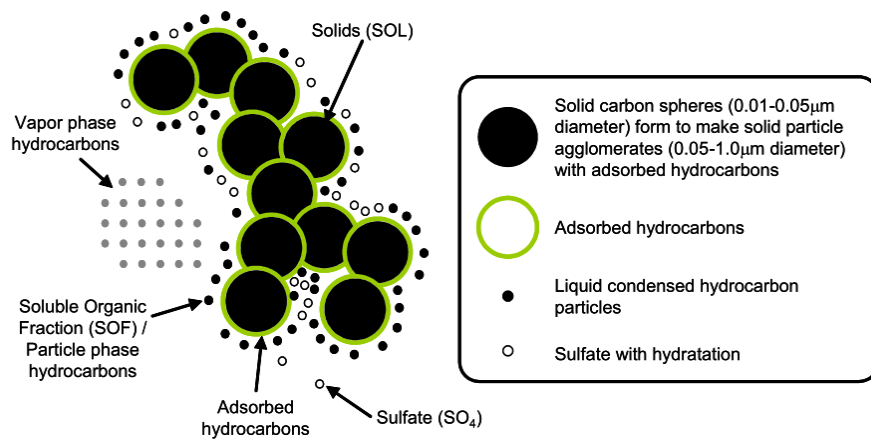


Figure 2-1. Schematic diagram of particulate matter and gas phase compounds ⁽²⁻¹⁾

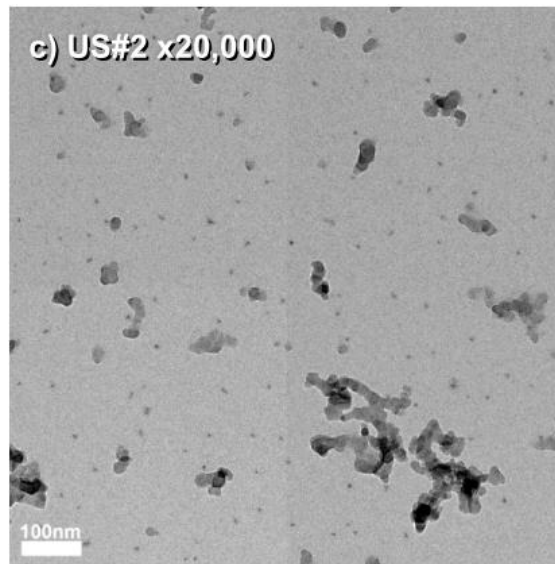


Figure 2-2. Sample TEM images of soot particles directly sampled in diesel spray flame ⁽²⁻²⁾

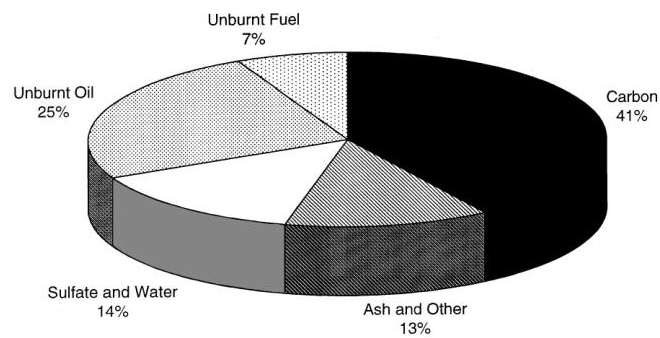


Figure 2-3. Typical particle composition for a heavy-duty diesel engine ⁽²⁻³⁾

2.1.2. PM の大きさ

PM の大きさについて、Kittelson らの研究によるディーゼルエンジンからの代表的な粒形分布を、図 2-4 示す⁽²⁻³⁾。個数基準で見ると、PM は 20nm 以下に大きなピークと、20nm から 200nm 付近に分布を持つ。このうち、20nm 以下の大きなピークは、核生成モード(Nuclei mode)と呼ばれ、SOF や Sulfate と考えられ、排ガスの冷却や希釈の際に生じる凝集により生成する。そして、20nm から 200nm 付近の分布は、累積モード(Accumulation mode)と呼ばれ、燃焼により生成する Soot の凝集体とその表面に吸着する有機物質が主成分である。

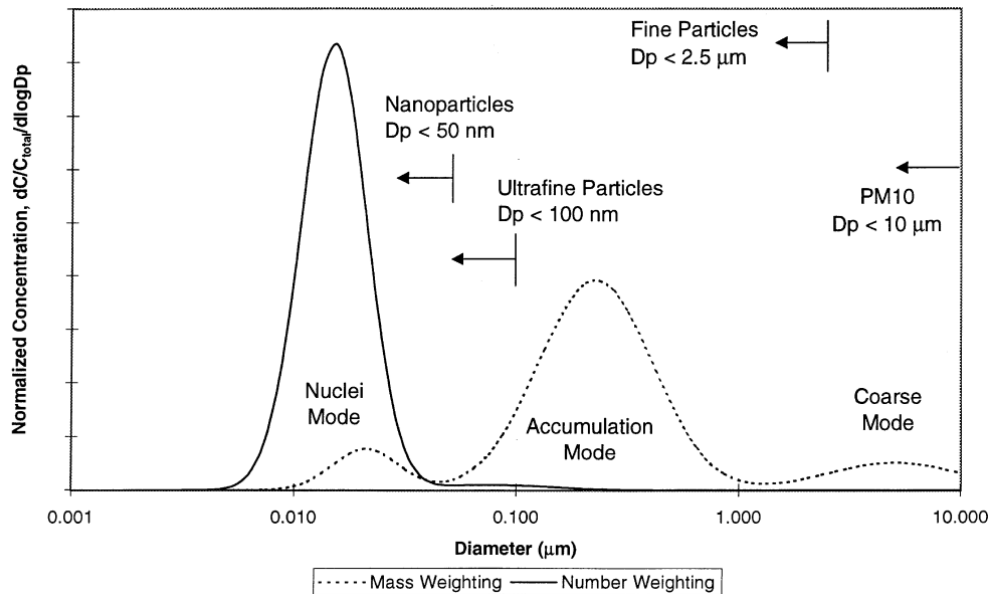


Figure 2-4. Typical particulate matter size distribution ⁽²⁻³⁾

2.1.3. PM の生成過程

PM は燃焼中の燃料が過濃な領域で生成する。その生成過程の模式図を図 2-5 に示す⁽²⁻⁴⁾。PM は、①燃料中の炭化水素が熱分解し、低級化した炭化水素が、脱水素や重縮合の繰り返しにより高分子化し Soot の核を形成し、②Soot の核が表面成長や凝集により一次粒子を形成し、周囲の未燃炭化水素や硫化物を吸着しながら凝集して二次粒子を形成し、PM が生成する。

①については、Flenklachらが提案した多環芳香族炭化水素(Poly Aromatic Hydrocarbon: PAH)を経由し、これが前駆体となり Soot 生成する説が有力と考えられている⁽²⁻⁵⁾。熱分解した低級炭化水素

は、その後再結合や反応を繰り返し、ベンゼン環を形成する。初期段階ではベンゼンやナフタレンなどの炭素数の少ない PAH を形成するが、次第に炭素数の多い PAH へと成長していく。Flenklach はこの成長には、図 2-6 に示すような水素原子を引き抜き、アセチレンを付加する現象(Hydrogen Abstraction C₂H₂ Addition: HACA)を伴うと報告している⁽²⁻⁶⁾。このように、熱分解した燃料が PAH となり成長し、Soot の核となる前駆体が生成する。このように炭化水素が低級化や PAH を生成するのは、温度により安定する成分が変化するためである。図 2-7 には温度に対する Gibbs の自由エネルギー ΔG^0 を示している⁽²⁻⁷⁾。 ΔG^0 が低いほどエネルギー的に安定するが、温度により安定する成分が変化する。燃焼に伴う高温化により、エネルギー的に安定するように、炭化水素が低級化し、アセチレンが生じる。これら低級炭化水素やアセチレンにより PAH が生成していく。

②については、Flenklach らは炭素数がある程度多くなった PAH は、脱水素反応や重合反応により Soot の一次粒子が生成すると提案している⁽²⁻⁵⁾。また、Kroto は図 2-8 に示す表面成長により殻が成長するモデル Icospiral model を⁽²⁻⁸⁾、Heath は図 2-9 に示す表面成長する殻が閉じるモデルを提案し⁽²⁻⁹⁾、Soot の一次粒子が生成すると提案している。生成した一次粒子は、周囲の既燃ガスや未燃ガスを吸着する。このときに燃焼ガス中の水分や未燃燃料の液状分がバイндаとなり Soot 一次粒子が凝集していくことで、鎖状構造になるものと考えられている。

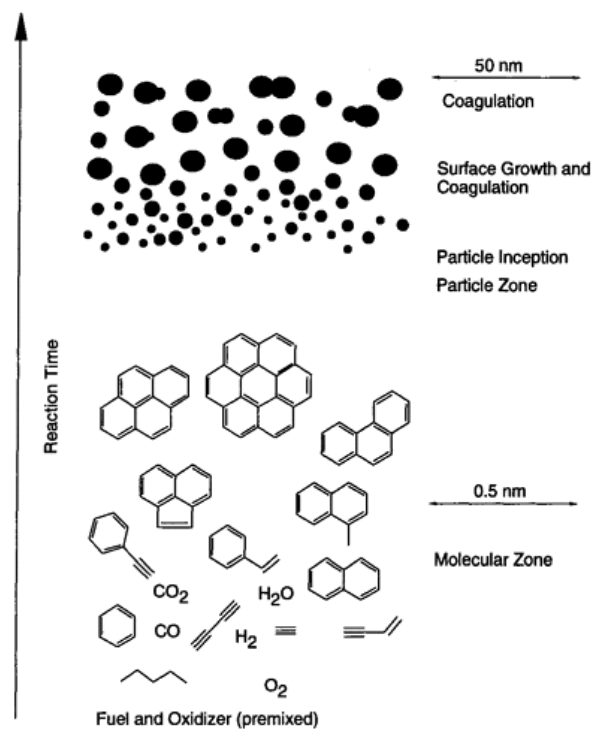


Figure 2-5. A rough picture soot formation in homogeneous mixtures ⁽²⁻⁴⁾

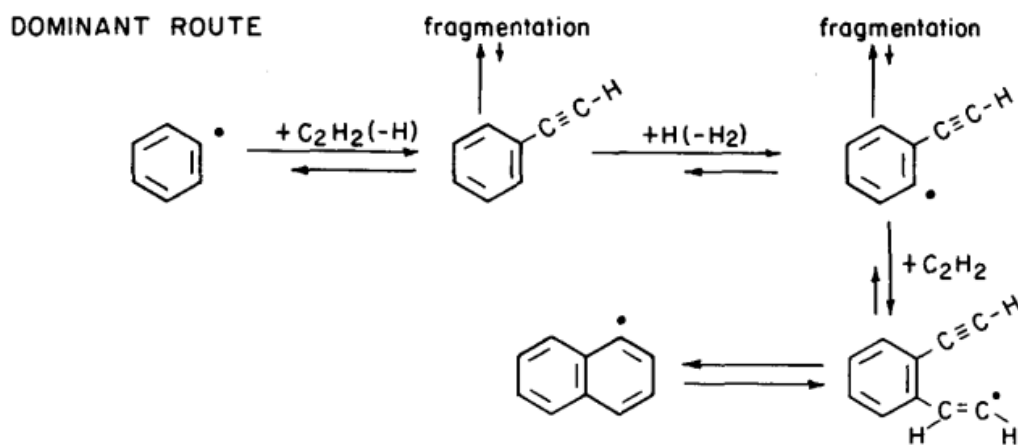


Figure 2-6. Poly aromatic hydrocarbon growth by hydrogen abstraction C_2H_2 addition ⁽²⁻⁶⁾

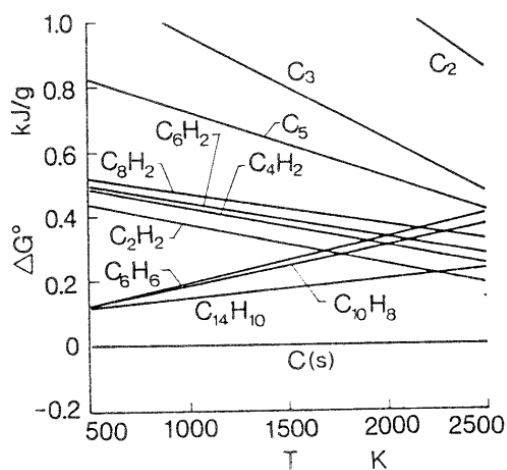


Figure 2-7. Gibbs free energies of formation of intermediate products ⁽²⁻⁷⁾

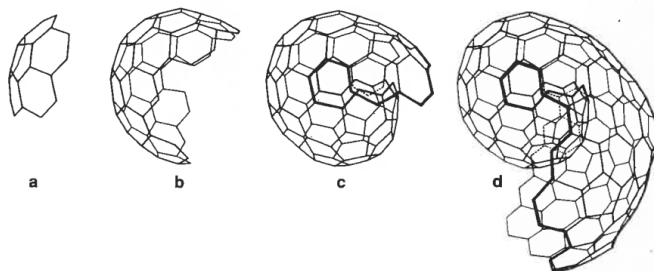


Figure 2-8. Illustration of icospiral nucleation models ⁽²⁻⁸⁾

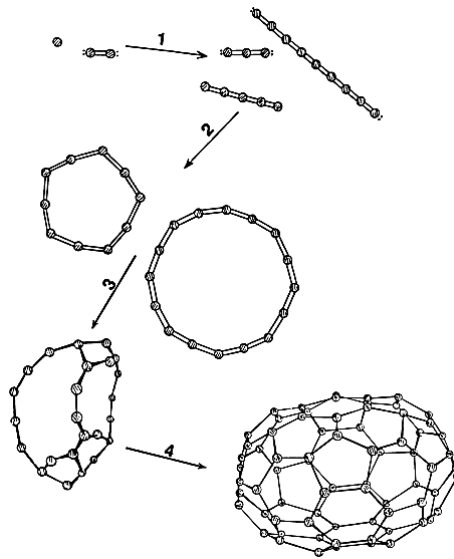


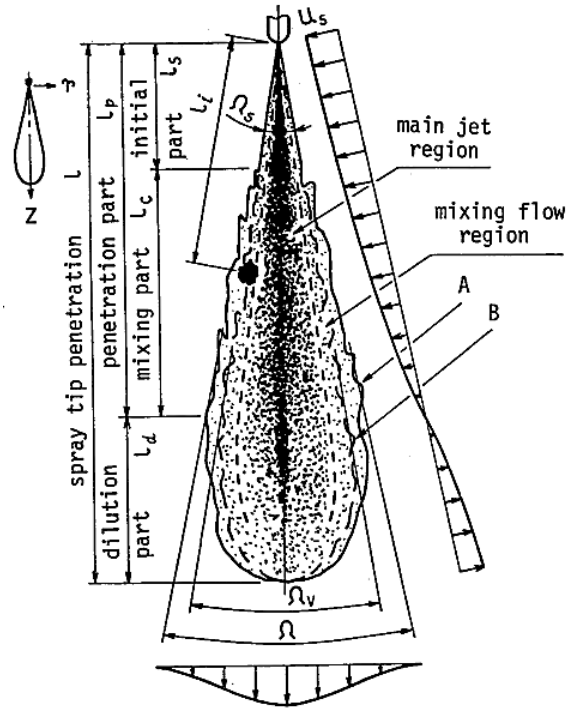
Figure 2-9. A chemical model for the generation of fullerenes from atomic and dimeric carbon vapor ⁽²⁻⁹⁾

2.1.4. ディーゼル自由噴霧におけるPM生成に関する研究

PMの生成に関する研究解析は、ディーゼル分野で多くの研究が行われてきた。ディーゼル噴霧の主な燃焼形態は拡散燃焼であり、高温高压雰囲気下で噴射された燃料噴霧が周囲空気と混合し、低温酸化反応を経て、着火、燃焼に至り、PMが生成する。

Fujimotoらは、燃料噴霧から着火、そして燃焼に至る一連の現象を詳細解析している⁽²⁻¹⁰⁾。ディーゼル噴霧の構造の模式図を、図2-10に示す。雰囲気環境およびノズル諸元が噴霧特性に与える影響を詳細解析し、噴霧角と噴霧先端到達距離に対する実験式を提案している。そして、燃焼については、着火から火炎成長、そして主燃焼に至る過程を解析し、噴霧特性と紐付けている。Fujimotoらの研究は、ディーゼル噴霧燃焼のPM生成の考察に必要な不可欠な実現象について、体系的にまとめ上げている。

Decら、小酒ら、そしてNakagawaらは、ディーゼル噴霧におけるSootの生成過程について研究を行っており、レーザー誘起赤熱法とレーザー誘起蛍光法をディーゼル自由噴霧火炎に適用し、火炎断面における相対Soot濃度、相対Soot粒子径、相対Soot数密度の2次元分布を測定している⁽²⁻¹¹⁾、⁽²⁻¹²⁾、⁽²⁻¹³⁾。また、Decらは、大型ディーゼル機関における光学計測から、ディーゼル噴霧燃焼におけるSoot形成の概念図を示した⁽²⁻¹⁴⁾。噴霧火炎の中心はSootの生成が開始される領域であり、小粒子径かつ高数密度のSootが存在し、火炎先端ではSootが凝集や合体により大粒子径・低数密度のSootであることを示している。

Figure 2-10. Structure and shape of the fully developed diesel spray ⁽²⁻¹⁰⁾

2.2. PM の計測手法

PM の計測方法は、計測する位置や計測対象など多岐にわたる。これは、前節で記したように、PM はフィルタに捕集されたものと定義されるため、生成条件により構成や成分などが大きく変化することが一因として挙げられる。計測位置は、例えば自動車のテールパイプ、エンジン燃焼室内、燃焼する火炎中などである。計測対象は、例えば PM の重量や数といった物理的な計測や、成分分析や元素分析といった化学的な計測がある。これら計測には市販される計測器や確立された計測手法が多数存在しており、代表的な重量、数、成分の計測手法の概要を以下に記す。

2.2.1. 重量計測手法① フィルタ捕集法

1つめの重量計測手法として、フィルタ捕集によるものがある。ガラス繊維フィルタなどを用いて、エンジン排ガスを一定流量で濾過捕集し、捕集前後での重量を計測し、その差から重量を算出する。計測値は、捕集時の流量を基に単位体積 1m^3 あたりの重量濃度として用いられる。フィルタの重量計測は、電子天秤を用いた直接計測や、酸化反応による二酸化炭素および二酸化硫黄の濃度から Soot, SOF, Sulfate の各重量を算出する分析器(堀場製作所製、超微量 PM 分析計, MEXA-1370PM)がある。MEXA-1370PM の装置構成を図 2-11 に示す⁽²⁻¹⁵⁾。石英ガラス製フィルタに捕集した PM を 980deg.C の高温炉内に設置し、まず窒素雰囲気とし sulfate と SOF を気化させ、後

段の酸素と反応させ SO_2 と CO_2 とし、濃度分析する。これらの分析後に、雰囲気ガスを酸素に切り替えることで、残った Soot を CO_2 に酸化させ濃度分析する。これら SO_2 と CO_2 の分析値から Soot, SOF, Sulfate の各重量を分離計測する。

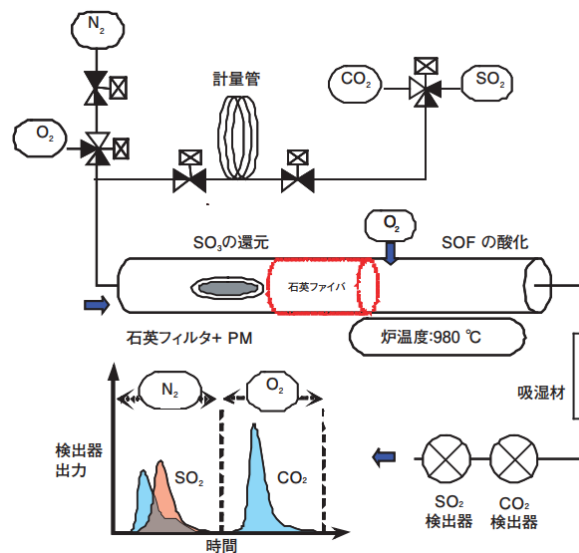


Figure 2-11. Device configuration of MEXA-1370PM (2-15)

2.2.2. 重量計測手法② フィルタ振動法

2つめの重量計測手法は、フィルタ振動法(Tapered Element Oscillating Microbalance: TEOM)である。計測部の概要を図 2-12 に示す⁽²⁻¹⁶⁾。円錐状の秤量素子の先端にフィルタカートリッジを備える。これらは固有の周波数で振動しているが、そこに粒子が捕集されることにより振動数が減少する。この粒子捕集量と振動数変化に関係性があることを利用して、周波数計測から、捕集量を算出する。計測分解能は $0.01 \mu\text{g}$ 程度であり、連続計測が可能である。この手法は日本工業規格(Japanese Industrial Standards: JIS)にも規格化されており⁽²⁻¹⁷⁾、計測器が市販化されている。

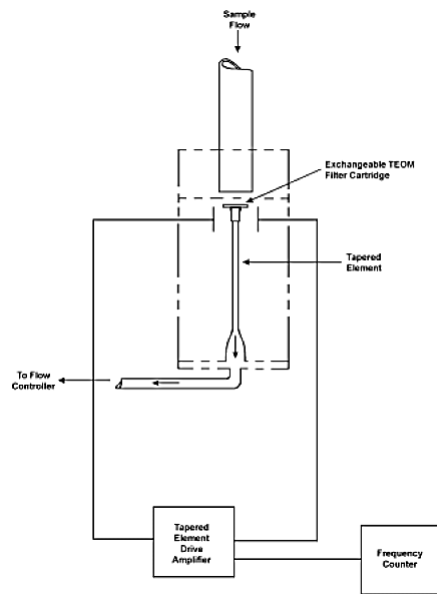


Figure 2-12. Schematic of mass transducer of TEOM (2-16)

2.2.3. 数計測手法① 光散乱を利用した個数濃度計測

PM の数を計測する手法としては、粒子の個数濃度を計測する手法と、粒子径の個数濃度分布を分級計測する手法に大別される。

このうち、粒子の個数濃度を計測する代表手法として、凝縮核計数器(Condensation Particle Counter: CPC)がある。計測器の概要を図 2-13 に、分析部詳細を図 2-14 に示す^{(2-18), (2-19)}。2.1.2 で示したように数十 nm の大きさである PM 粒子を核として、過飽和のアルコールもしくは水蒸気の中を通過させることで、PM 粒子の核の周りにアルコールもしくは水が凝縮して液滴となる。この液滴を、レーザダイオードなどの光照射による散乱光パルスをもとにフォトディテクタにて検出し、個数に換算する。本手法は、世界各国で導入が決定もしくは予定されている PM 粒子数計測の法規に認証した標準計測器として定められている。

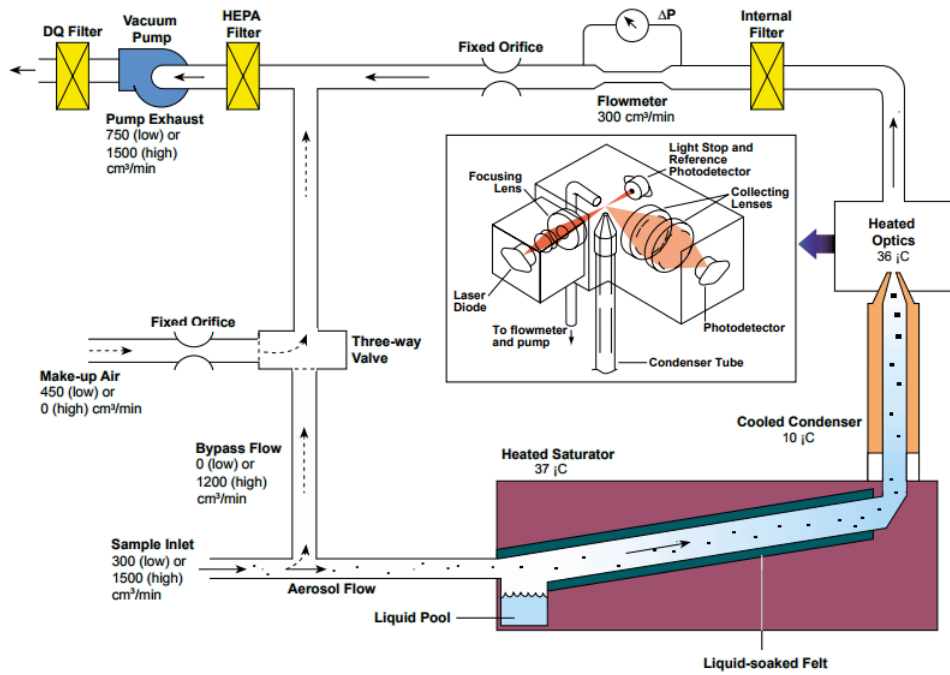


Figure 2-13. Configuration overview of CPC (2-18)

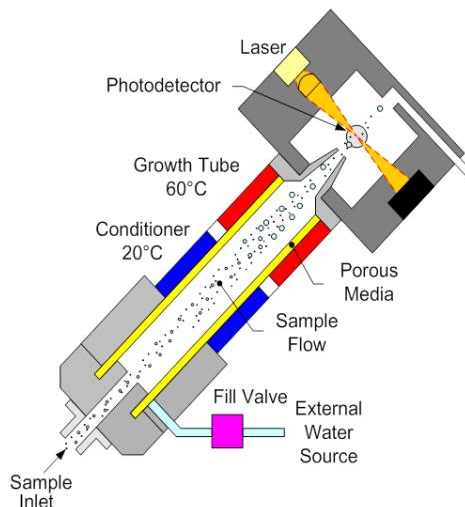


Figure 2-14. Detail of measuring section of CPC (2-19)

2.2.4. 数計測手法② 電気移動度を利用した分級計測

PM 粒子を分級計測するために利用する粒子の特性は主に 3 つあり、電気移動度、慣性衝突、そしてブラウン拡散である。図 2-15 には、物理因子による微粒子の移動速度を示す⁽²⁻²⁰⁾。上述した 3 つの中でも数十 nm サイズの PM 粒子では静電気力による移動速度が大きく、この特性を利用した様々

な計測器が市販化されている。その中でも、過渡計測にも対応した分級計測器で、本研究においても使用した Engine Exhaust Particulate Sizer: EEPS について説明する。EEPS は、上述したように、粒子を帯電させた際の電気移動度の違いを利用し、分級捕集により、粒子径分布を算出する。PM 粒子径分布計測器の一つである。EEPS 計測器内におけるフローを図 2-16 に示す⁽²⁻²¹⁾。サイクロンにより粗大粒子(1 μm 以上)が除去され、PM 粒子を含む希釈された排ガスはチャージャー部へと導入され、全粒子をプラスに帯電させる。下流の中央部にはプラス電極の高電圧ロッドがあり、反発した PM 粒子は、外側の多段エレクトロメータへと流れる。ここで粒子径により帯電量が異なるため、電気移動度に差が生じる。大径粒子は帯電量が多く電気移動度が大きいいため上流側のエレクトロメータに、小径粒子は帯電量が少なく電気移動度が小さいため下流側のエレクトロメータに捕集されることで、粒子径分布を計測することができる。また、この計測原理では、連続的に粒子径分布を計測することができるため、過渡での計測に対応可能である。計測に用いた PM 粒子径分布計測器 EEPS の仕様を表 2-1 に示す。計測可能な粒子径範囲は 5.6nm - 560nm, 時間分解能は 0.1s である。

なお、EEPS で計測される粒子数は、2.2.3 の法規認証計測器である CPC に対し良い相関があることを、欧州委員会(European Commission: EC)の共同研究センター(Joint Research Centre: JRC)が報告している⁽²⁻²²⁾。

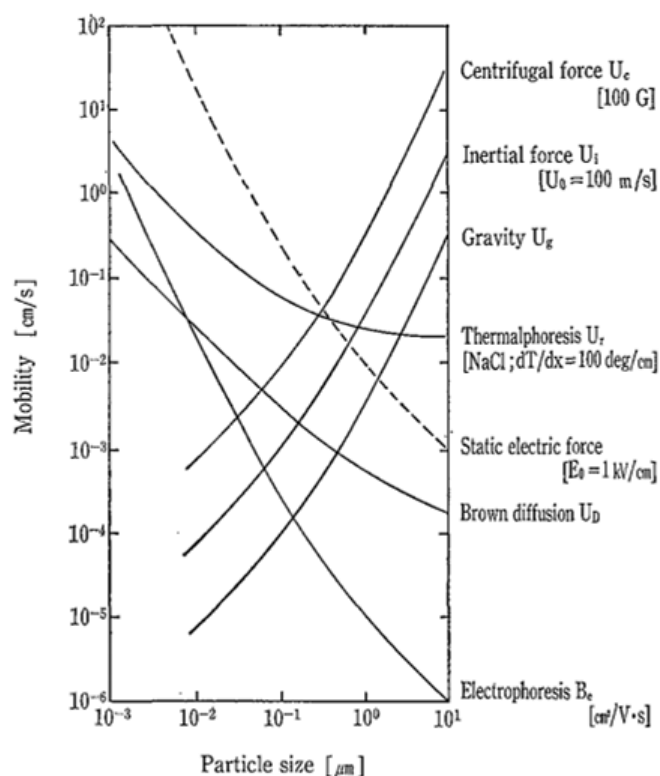


Figure 2-15. Particle size and mobility ⁽²⁻²⁰⁾

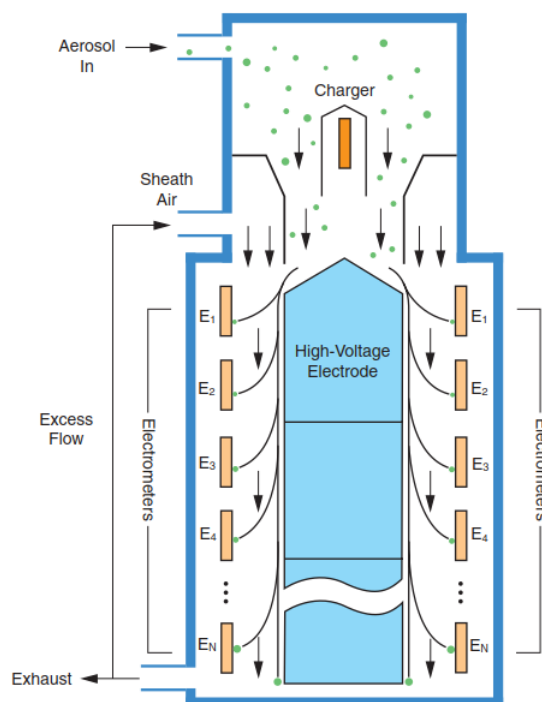


Figure 2-16. EEPS flow schematic (2-21)

Table 2-1. Specifications of EEPS

Particle Size Range	5.6 nm - 560 nm
Particle Size Resolution	32
Electrometer Channels	22
Time Resolution	0.1 s
Sample Flow	10 L/min

2.2.5. 成分計測手法

PM は 2.1.1 で記したように、固体の炭素分である Soot, 有機溶剤に溶ける可溶性有機成分 (Soluble Organic Fraction: SOF), そして硫化物である Sulfate の集合体である。これらの構成比率は、使用するエンジンや燃料, 運転条件により変化する。そのため、PM の生成要因を推定するため、成分分析によるアプローチも実施されている。一例として、分析手法名と分析項目を表 2-2 に挙げる。構成元素の同定や物理的/化学的な特性など、多面的に Soot や SOF に関する分析が存在する。

Table 2-2. PM analysis method

分析手法	分析
電子線マイクロアナライザ Electron Probe Micro Analyzer: EPMA	PM中の元素分析. 例えば, PM中の潤滑オイル分のPM生成への影響把握.
熱重量示差熱分析 Thermogravimeter/Differential Thermal Analyzer: TG-DTA	熱による試料の物理的や化学的変化分析. 例えば, SOFの由来の探索.
ガスクロマトグラフ質量分析 Gas Chromatograph-Mass Spectrometer: GC-MS	主にSOF分の同定や定量分析. 例えば, SOFの由来の探索.
ソックスレー抽出 Soxhlet extractor	炭素分のSootと有機化合物であるSOFの分離.

2.2.6. その他計測手法① スモークメータによる黒煙濃度計測

排気中の黒煙濃度を計測する手法としてスモークメータがある。黒煙とはその名前の通り、エンジンより排気される黒い煙のことで、PMが主成分である。代表的な計測手法は2つあり、1つ目が排ガス中への光照射による透過光もしくは散乱光の強度変化を利用する方法と、もう1つは排気ガスをフィルタ捕集し光の反射強度を利用する方法がある。これら手法は、国際標準化機構(International Organization of Standardization: ISO)や日本工業規格(Japanese Industrial Standards: JIS)で技術基準が策定されている^{(2-23), (2-24), (2-25)}。このうち、フィルタ捕集による手法の概念図を図2-17に示す⁽²⁻²⁶⁾。計測方法は、まず所定容積の排気ガスを吸引し、フィルタを通過させ、PMを捕集する。捕集後、検出部までフィルタを送り、検出部で光を照射し、受光部で光強度 I_{smoke} を計測する。黒煙による汚染度をFSN(Filter Smoke Number)と呼称し、式(2-1)で定義される。

$$FSN = \left(1 - \frac{I_{smoke}}{I_{new}} \right) \times 10 \quad (2-1)$$

ここで、

I_{smoke} : 計測時の受光強度

I_{new} : 新品状態の受光強度

である。

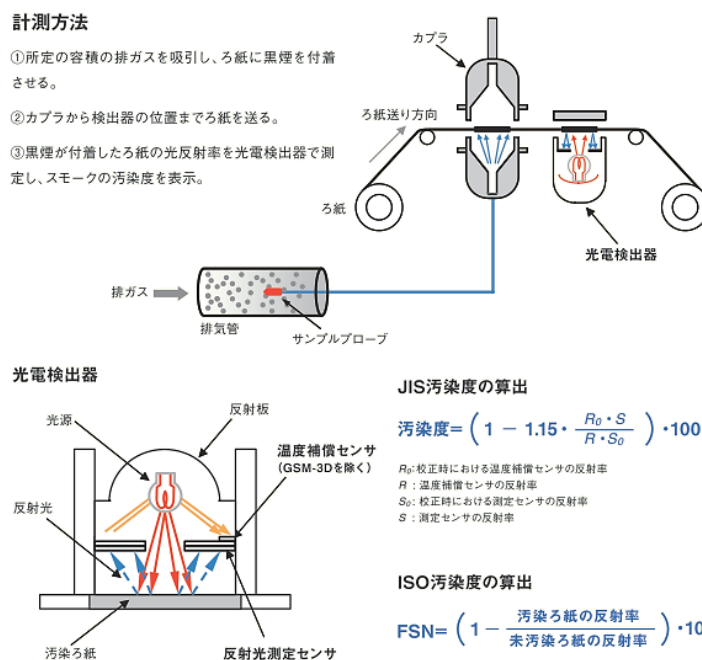


Figure 2-17. Conceptual diagram of measurement smoke meter (2-26)

2.2.7. その他計測手法② レーザ誘起赤熱法による Soot 体積濃度計測

レーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence: LII)は、PM 粒子の主な構成成分である Soot 粒子への高強度のレーザー照射により、Soot 粒子がレーザー光を吸収し放射される光を検知することで、Soot を把握する手法である。LII 法に関する研究として、Eckbreth や Melton らが実験や数値計算による研究を行っている^{(2-27), (2-28)}。Melton は、単一球形の Soot 粒子へのレーザー照射による赤熱と昇華に関する数値解析を行っており、この放射光の最大強度は、Soot 粒子温度が最大の時、概ね Soot 粒子の体積濃度に比例すると報告している⁽²⁻²⁸⁾。

LII 法で、照射するレーザー光をシート状にすることで所定断面における Soot 分布画像を得ることができる。小酒ら、藤本ら、朝井ら、稲垣らをはじめとする多くの研究者らが、LII 法を用いてディーゼル噴霧の Soot 解析を行っている^{(2-29), (2-30), (2-31), (2-32)}。

本研究においても、この LII 法をガソリンエンジンの燃焼室内に適用し、燃焼室内における Soot 生成について解析を実施した。詳細な計測原理は、第 6 章にて述べる。

2.3. ガソリンエンジンにおける PM 解析に関する従来研究

2.1.に示した PM 特性や生成過程に関する基礎研究や、2.2.に示した PM に関する様々な計測手法は、主に拡散燃焼を主体とするディーゼル分野にて研究され、PM 特性が解明され、そして計測手法が確立されてきたものである。しかし、第 1 章にて示したように、予混合燃焼を主体とするガソリン分野においても、PM の低減は重要視されつつあり、昨今研究が盛んに行われている。本節では、ガソリン分野における研究の一例を示す。

2.3.1. 排気系における PM 計測

Smallwood らは、エンジン運転条件が変化する過渡運転時における PM 排出特性を把握するため LII 法をガソリンエンジンの排気系に適用し、モード運転時の PM 排出を計測し、冷間始動時に PM が多く排出されていると報告している⁽²⁻³³⁾。堀らは、直接噴射式ガソリンエンジンにおいて、排気される PM と PAH の計測を行っている⁽²⁻³⁴⁾。ディーゼルエンジンと比較し、PM や PAH 排出に差はみられるものの、PM 生成メカニズムはディーゼル燃焼と同様と推測している。Seong らは、排気管中の PM を透過電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope: TEM)にて観察を行った⁽²⁻³⁵⁾。燃料噴射時期変更により粒子径が変化することから、混合気形成状態が PM 生成に影響している可能性を示唆した。これら研究により、排気系での PM はエンジン運転条件により、その量や大きさ、成分が異なることが判った。これより、PM 低減に向けては、燃焼室内での燃焼状態と排気 PM を関連付けることが重要であり、そして燃焼室内における PM 生成要因とその影響度を合わせて把握する必要があると考える。

2.3.2. 燃焼室内の PM 観察

燃焼室内で生成した PM を観察するために、2.2.7 で示した LII 法をガソリン燃焼場に適用した研究も近年実施されている。

Block らは、LII 法をエンジン燃焼室に適用し Soot の可視化を行った⁽²⁻³⁶⁾。限られた範囲ではあるが燃焼室内の Soot 位置を観察し、サイクル毎に解析している。

Velji らは、燃焼室中央に燃料噴射用インジェクタを備えるエンジンにて、LII 法を用いて予混合燃焼と成層燃焼による燃焼室内の Soot 生成位置を可視化している⁽²⁻³⁷⁾。Soot 生成位置から生成要因を推定しており、予混合燃焼では、壁面に形成した燃料液膜からの燃焼、成層燃焼ではこれに加えて空間の過濃混合気からの Soot 生成について推察している。

また、燃焼室内の PM 生成を燃焼光から推測する研究も実施されている。内山らや Koegeler らは点火プラグの円周方向に多点に設置された光ファイバにより、それぞれの光ファイバからの燃焼光から Soot 生成の位置について解析した^{(2-38), (2-39)}。Koegeler らの研究では、Soot が多いと推測される火炎放射光が強い方向は、運転条件によって異なり、冷間始動時はピストン方向、暖機後では吸気方向であると報告している⁽²⁻³⁹⁾。

上記で PM 生成要因との一つとして推定している燃料液膜の燃焼による PM 生成についても研究が進められている。小林らは、ガソリン模擬燃料を用いて、層流拡散火炎バーナを用いて、炭化水素成分による PM 生成への影響を調査した⁽²⁻⁴⁰⁾。PM 排出が多いのは、芳香族や二重結合を持つものであると報告している。

2.4. 本研究の意義

以上のように、PM 生成メカニズムに関する研究は、ディーゼル燃焼を主体に多く実施されており、PM 生成に関する知見や、それを明らかにするための計測技術も数多く確立されてきた。これに加えて、1 章でも述べたように近年のガソリンエンジンに対する PM 規制の導入もきっかけとなり、ガソリンエンジンにおいても PM に対する研究が実施されている。しかし、これら研究では、生成した PM のみを可視化したり、燃焼形態の違いによる PM 生成の差を確認するなど、現象ごとの解析に留まっている。

本研究では、ガソリンエンジンの PM 低減に向けて、燃料噴霧の特性、燃料噴霧と燃焼の挙動、そして PM 生成要因が PM 生成に及ぼす影響を体系的にエンジン燃焼室内で把握することが重要だと考え、評価を行った。加えて、本研究では、PM 生成要因と推定されている燃料液膜や過濃混合気に対しても解析を行い、それぞれの PM 生成への影響度を把握した。このような各現象の体系的な解析により、燃料噴霧の特性と PM 生成を紐付けられることができ、PM 低減に要求される燃料噴霧特性を考察することができる。以上より、本研究は、将来ガソリンエンジンの PM 低減に必要な燃料噴射システムを開発する上で重要な知見を創出する研究であると考えられる。

参考文献

- (2-1) John H. Johnson, Susan T. Bagley, Linda D. Gratz, David G. Leddy, A review of diesel particulate control technology and emission effects, SAE Paper 940233 (1994)

- (2-2) 西貝大樹, 山口輝夫, 近藤克文, 相澤哲哉, Jean-Guillaume Nerva, Caroline L. Genzale, Sanghoon Kook, Lyle M. Pickett, 高分解能透過型電子顕微鏡を用いたディーゼル噴霧火炎内すす粒子の観察, 第22回内燃機関シンポジウム, p. 1-6 (2011)
- (2-3) David B. Kittelson, Engines and Nanoparticles: A Review, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 29, p. 575-588 (1998)
- (2-4) Henning Bockhorn, Soot Formation in Combustion Mechanisms and Models, *Springer Series in Chemical Physics* (1994)
- (2-5) Michael Frenklach, Hai Wang, Detailed modeling of soot particle nucleation and growth, 23rd Symposium International on Combustion, Vol. 23, No. 1, p. 1559-1566 (1991)
- (2-6) Michael Frenklach, David W. Clary, William C. Gardiner, Jr., Stephen E. Stein, Detailed kinetic modeling of soot formation in shock-tube pyrolysis of acetylene, 20th symposium International on Combustion/ The Combustion Institute, Vol. 20, No. 1, p. 887-901 (1985)
- (2-7) Y. Yoshihara, M. Ikegami, Homogeneous Nucleation Theory for Soot Formation, *JSME International Journal*, Vol. 32, No. 2, p. 273-280 (1989)
- (2-8) H. Kroto, Space Stars C_{60} and Soot, *Science*, Vol. 242, p. 1139-1145 (1988)
- (2-9) James R. Heath, Synthesis of C_{60} from Small Carbon Clusters A Model Based on Experiment and Theory, *ACS Symposium Series*, Vol. 481, p. 1-23 (1992)
- (2-10) H. Fujimoto, H. Sugihara, H. Tanabe, G. T. Sato, Investigation on Combustion in Medium-Speed Marine Diesel Engines Using Model Chambers, *Proc. 14th CIMAC*, p. D38-1-D38-27 (1981)
- (2-11) John E. Dec, Axel O. zur Loye, Dennis L. Siebers, Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Laser-Induced Incandescence Imaging, *SAE Technical Paper 910224* (1991)
- (2-12) 小酒英範, 西垣隆弘, 原田伸一, 神本武征, レーザー誘起赤熱・散乱光法による非定常噴霧火炎内のすす生成と酸化に関する研究, *日本機械学会論文集 B編*, Vol. 61, No. 590, p. 3426-3431 (1995)
- (2-13) H. Nakagawa, H. Endo, Y. Deguchi, LIF Imaging of Diesel Spray Combustion, 4th International Symposium COMODIA, p. 359-364 (1998)
- (2-14) John E. Dec, A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging, *SAE Technical Paper 970873* (1997)

- (2-15) 福島宏和, 内原博, 超微量 PM 分析装置 MEXA-1370PM, 堀場製作所技術情報誌 Readout, No.23, p. 26-30 (2001)
- (2-16) THRMOFISHER SCIENTIFIC, TEOM 1405 Operating guide
- (2-17) JIS B 7954 : 2001, 大気中の浮遊粒子状物質自動計測器
- (2-18) TSI, Condensation Particle Counter Model 3022A Product information
- (2-19) Fundamentals of Condensation Particle Counters (CPC) and Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) Spectrometers Application note CPC-003
- (2-20) 山本英夫, 田村俊彦, 分級 The classification, 神鋼パンテック技報, Vol. 34, No. 3, p. 1-7 (1990)
- (2-21) TSI, Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer 3090 Catalog
- (2-22) Barouch Giechaskiel, Francesco Riccobono, Pierre Bonnel, Feasibility study on the extension of the Real Driving Emissions (RDE) procedure to Particle Number (PN), JRC science and policy reports (2015)
- (2-23) ISO 11614 : 1999, Reciprocating internal combustion compression-ignition engines - Apparatus for measurement of the opacity and for determination of the light absorption coefficient of exhaust gas
- (2-24) ISO 10054 : 1998, Internal combustion compression-ignition engines - Measurement apparatus for smoke from engines operating under steady-state conditions - Filter-type smoke meter
- (2-25) JIS D 8004 : 1986, 自動車用ディーゼルエンジン排気煙濃度測定用反射式スモークメータ
- (2-26) 司測研, フィルタ式スモークメータ総合カタログ, uApr2016/ pMay2016/ 500/ SmVer01
- (2-27) Eckbreth, A. C., Effect of Laser-Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics , Journal of Applied Physics, Vol.48 , p.4473-4479 (1974)
- (2-28) Lynn A. Melton, Soot Diagnostics Based on Laser Heating, Applied Optics, Vol.23, p.2201-2208 (1984)
- (2-29) 小酒英範, 西垣隆弘, 神本武征 原田伸一, レーザ誘起赤熱・散乱光法による非定常噴霧火炎内のすす生成と酸化に関する研究, 第 12 回内燃機関シンポジウム講演論文集, p. 61-66 (1995)
- (2-30) H. Fujimoto, G. Asai, J. Senda, Soot Visualization in Diesel Flame by Means of Optical Methods, 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference (1996)

- (2-31) 朝井豪, 倉田和郎, 横山哲也, 千田二郎, 藤本元, 直噴ディーゼル機関におけるレーザ誘起散乱法・レーザ誘起赤熱法を用いたすす挙動の解明, 自動車技術会論文集, Vol. 28, No. 3, p. 29-34 (1997)
- (2-32) 稲垣和久, 三浦晋平, 中北清己, 渡部哲, LII によるすす濃度定量計測法の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 63, No. 615, p. 316-323 (1997)
- (2-33) Gregory J. Smallwood, David R. Snelling, Omer L. Gulder, Dan Clavel, Daniel Gareau, Robert A. Sawchuk, Transient Particulate Matter Measurements from the Exhaust of a Direct Injection Spark Ignition Automobile, SAE Technical Paper 2001-01-3581 (2001)
- (2-34) 堀重雄, 阪本高志, 佐藤辰二, 後藤雄一, 直噴ガソリン車から排出される PM および PAH 排出挙動について, 自動車技術会 学術講演前刷集, No. 29-07, p. 11-14 (2007)
- (2-35) HeeJe Seong, Kyeong Lee, Seungmok Choi, Effects of Engine Operating Parameters on Morphology of Particulates from a Gasoline Direct Injection (GDI) Engine, SAE Technical Paper 2013-01-2574 (2013)
- (2-36) B. Block, W. Oppermann, R. Budack, Luminosity and Laser-induced Incandescence Investigations on a DI Gasoline Engine, SAE Technical Paper 2000-01-2903 (2000)
- (2-37) Amin Velji, Kitae Yeom, Uwe Wagner, Ulrich Spicher, Martin Roßbach, Rainer Suntz, Henning Bockhon, Investigating of the Formation and Oxidation of Soot Inside a Direct Injection Spark Ignition Engine Using Advanced Laser-Techniques, SAE Technical Paper 2010-02-0352 (2010)
- (2-38) 内山雅史, Guenter Fraidl, Paul Kapus, ガソリン直噴エンジンの Euro6 PN 規制への対応手法, 自動車技術会 シンポジウムテキスト, No. 14-11, p. 67-72 (2012)
- (2-39) Hans Michael Koegeler, Khai Vidmer, Ernst Winklhofer, Flame Analysis Techniques for Particulate Emissions Development of GDI Engines, MTZ 0512014, Vol. 75, p. 12-17 (2014)
- (2-40) 小林佳弘, 田中里美, 新井雅隆, 種々の擬似ガソリン燃料の層流拡散火炎を用いた PM 特性の調査, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 5, p. 1199-1204 (2013)

第3章 直接噴射式ガソリンエンジンのPM 排出特性

直接噴射式ガソリンエンジンにおける粒子状物質(Particulate Matter: PM)の低減に向け、本研究では、最初に実現象を明らかにし、明らかにした実現象に基づき、PM 低減策を検討し、その低減策によるPM 低減効果を確認する。本章では、直接噴射式ガソリンエンジンのPM の排出特性について述べ、PM 排出が多い運転条件を明らかにし、PM 排出が多い条件を研究対象の運転条件に選定する。

3.1. 実験装置と計測方法

3.1.1. 低慣性エンジンダイナモを用いた過渡運転によるPM 粒子数評価

排気PM の評価は、各国における排気規制を評価する際に使用されるテストサイクルをエンジン単体で模擬運転し、その際エンジンより排出するPM の粒子数を時系列計測した。このテストサイクルの模擬は、過渡運転に適する低慣性エンジンダイナモを用いて、エンジン単体での運転により行った。実際の車両でテストサイクル走行時のエンジン運転データを事前に取得しておき、エンジン回転数とスロットル開度を0.1s 毎の時間ステップで低慣性エンジンダイナモに入力し、エンジン単体で擬似的にテストサイクル走行を模擬した。

3.1.2. 評価したテストサイクル

模擬したテストサイクルは、主に欧州で用いられる排気ガスや燃費のテストサイクルの一つであるNEDC (New European Driving Cycle)である⁽³⁻¹⁾。このNEDC は、市街地や郊外における走行を再現したテストサイクルを組み合わせたものである。図3-1にNEDC の走行パターンを示す。エンジンが冷えた状態(冷却用の油/水温25℃)から開始し、市街地を想定した走行パターン(Elementary Urban Cycle)を4回繰り返し、その後、郊外を想定した走行パターン(Extra Urban Cycle)を1回行う。最高時速は120km/hで、総走行時間は1180sである。

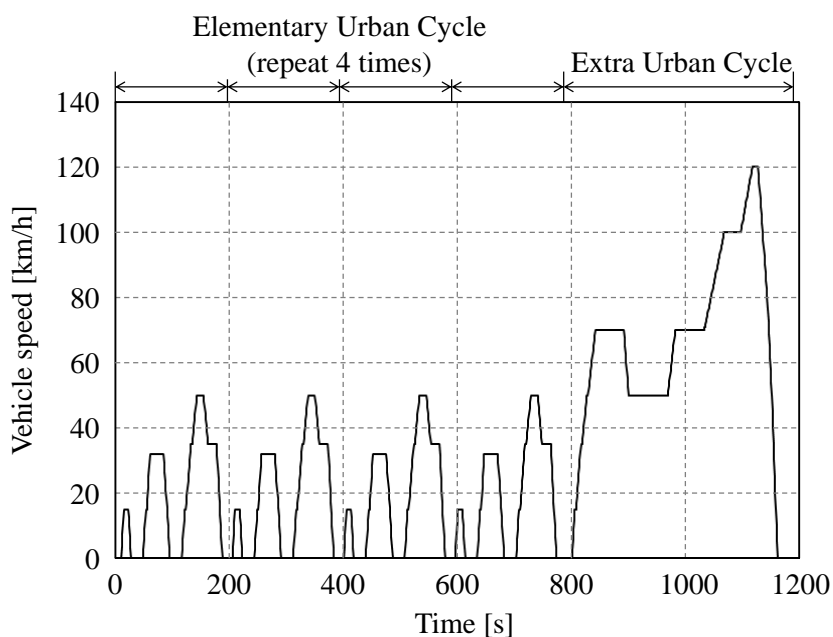


Figure 3-1. New European Driving Cycle (NEDC)

3.1.3. 供試エンジン

供試エンジンには、表 3.1 に示す V 型 6 気筒の直接噴射式ガソリンエンジンを用いた。そして本エンジンに搭載する供試ノズルの仕様を、表 3.2 に示す。噴霧形状がファンスリット状となるよう矩形噴孔を持つスリットノズルを研究用に試作した。本ノズルは、Matsumura らや橋本らの研究結果^{(3-2), (3-3)}をもとに、将来要求される高比出力と低エミッションを実現しうる燃焼コンセプトを想定し、噴射方向を吸気流れと同調する方向に狙った。図 3-2 に示す下向きの噴射角 V と定義すると、 $V = 29\text{deg.}$ に設定した。噴霧画像を図 3-3 に示す。燃料噴射圧 12MPa であり、噴射開始後 2ms における 2 方向からの撮影画像である。環境条件は大気圧、室温である。

Table 3-1. Engine specifications

Type	V6
Displacement	2.5L
Bore × Stroke	φ83mm × 77mm
Compression ratio	12.0 : 1
Injection system	Direct Injection
Spray type	Fan shaped spray
Downward injection angle V	29deg.

Table 3-2. Nozzle specifications of slit nozzle

Actuator	Electric solenoid
Slit number	1
Worked angle	91 deg.
Slit thickness t_s	0.12 mm
Injection angle α	0 deg.

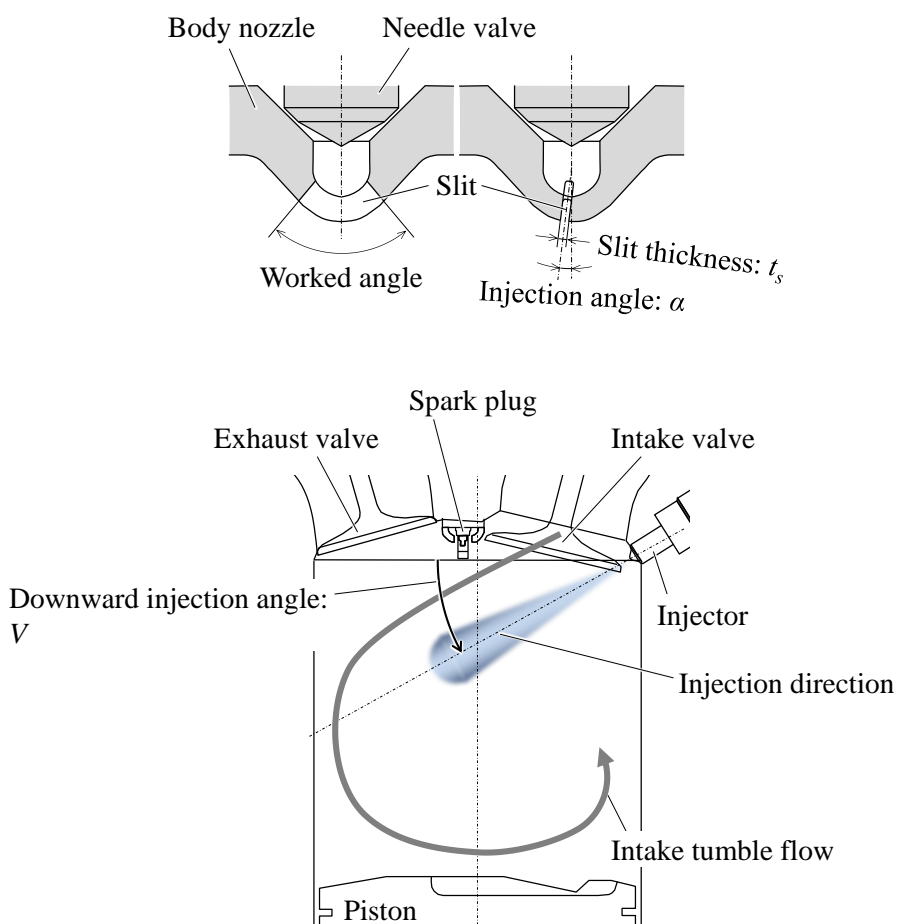


Figure 3-2. Direction of direct injection spray

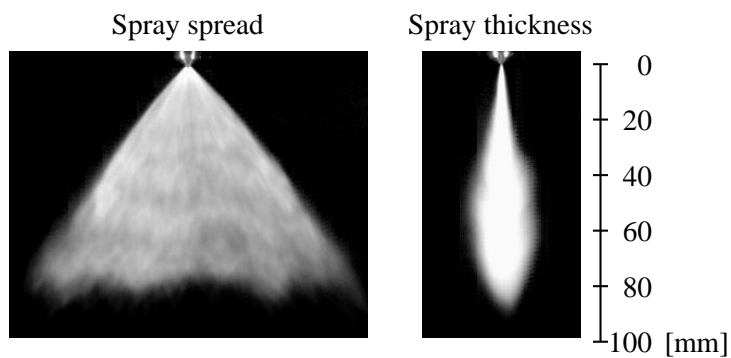


Figure 3-3. Configuration of direct injection spray

3.1.4. 供試燃料

供試燃料には、表 3.3 に示す国内市販相当のプレミアムガソリンを用いた。供試燃料の蒸留特性を、図 3.4 に示す。蒸留点の計測は、日本工業規格(Japanese Industrial Standards: JIS)の JIS K2254 に基づき計測した⁽³⁻⁴⁾。供試燃料の初留点は36deg.C, 終点は183deg.Cである。また、供試燃料の理論空燃比は14.4 である。

Table 3-3. Fuel properties

Density @15deg.C	0.75 g/cm ³
Research octane number (RON)	100
Aromatics	38.1 vol.%
Olefins	18.4 vol.%
Oxygen	0.0 mass%
Ethanol	0.0 vol.%
Benzene	0.5 vol.%
Methanol	0.0 vol.%
Kerosene	0.0 vol.%
Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE)	0.0 vol.%
Sulfur	4 ppm

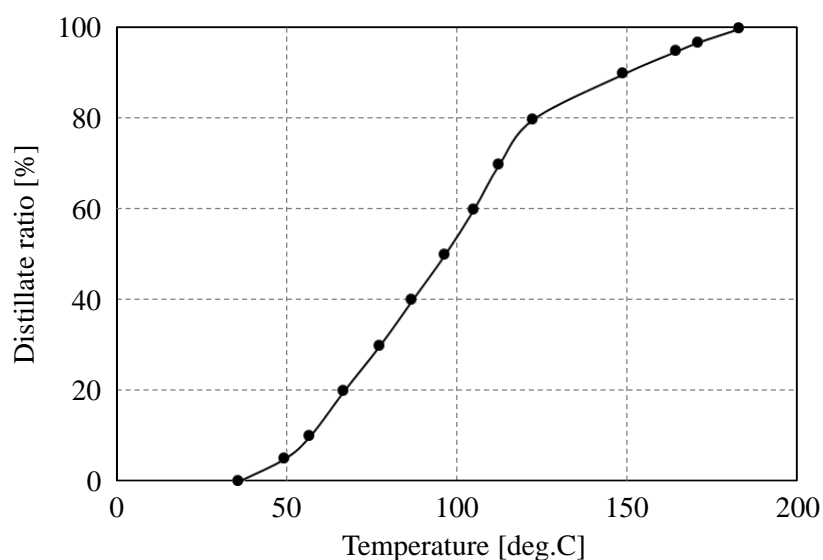


Figure 3-4. Distillation characteristics of the test fuel

3.1.5. 排気PMの計測方法

排気PMは、PM粒子径分布計測器（TSI製、EEPS Model 3090）でPM粒子数を計測した。計測時における構成を、図 3-5 に示す。エンジン排気管より排ガスをサンプルし、ホットプローブを通じ、排ガス希釈器、サーモデニユダを経て、PM粒子径分布計測器に導入し、PM粒子数を計測する。

排気ガスのサンプリング位置は、3.1.3 に示した V 型 6 気筒の直接噴射式ガソリンエンジンの左バンクのスタートアップ・コンバーター触媒前約 50mm の排気管中央部である。この位置でサンプリングした理由は、計測時の応答性の向上を考慮したためである。車両を使った計測評価では、サンプリング位置はテールパイプでの計測が主流であるが、エンジン出口～テールパイプまでは数 m もの距離があり、また触媒や消音用マフラーなどが複数介在するため、エンジンから排出された PM 粒子数の計測値が鈍ってしまいエンジン運転条件変更による出力変化を精度良く捉えていないと考え、上流側で排ガスをサンプリングした。サンプリング管は、水の凝縮による計測値への影響を抑制するため、管の温度を 120℃に温度調整し、排ガス希釈器（Matter Engineering 製、MD19-2E）に接続した。

排気ガスをサンプルした後に排気ガス希釈器に接続し、2 段階で排気ガスを空気希釈する。1 段階目における排ガス希釈の概念図を図 3-6 に示す⁽³⁻⁵⁾。A: 排ガスラインと B: 計測ラインの独立したラインがあり、これらラインに対して窪みを持ったディスクが覆いかぶさるように設置されている。このディスクが回転することにより、A: 排ガスラインから B: 計測ラインへと排ガスが輸送される。このディスクの回転数を管理することにより、任意の一定の希釈倍率で排ガスを希釈することができる。この後、2 段階目の希釈として、もう一度空気希釈する。なお、希釈に使用する空気は、空気中の塵を取り除く高効率微粒子除去フィルタ(High Efficiency Particulate Air Filter: HEPA)を通したものを使用した。本計測での希釈倍率は、1 段階目 25 倍、2 段階目 4 倍とし、総希釈倍率は 100 倍とした。

排ガス希釈器の後に、サーモデニユダ（DEKATI 製、Thermodenuder）にて揮発分を除去する。排ガス中の揮発分は、未燃燃料や潤滑油に由来するもので、排ガスの希釈時に核化や凝集、再拡散を引き起こすため、PM 粒子数の計測時における外乱要因となり、計測精度および信頼向上のためには、事前に処理する必要がある。まずサーモデニユダの前段部の内部ヒータで 275℃に加熱した後、後段に設置した二重管構造の活性炭を通過することで、排ガス中の揮発成分を吸着、除去する。

このように、排ガスが所定の倍率で希釈され、揮発分が除去された後に、PM 粒子径分布計測器（TSI 製、EEPS Model 3090, Engine Exhaust Particulate Sizer）へと導入され、PM 粒子数を計測する。

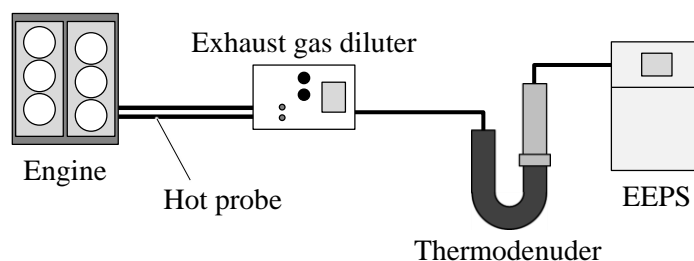


Figure 3-5. Experimental apparatus for measuring particulate number measurement

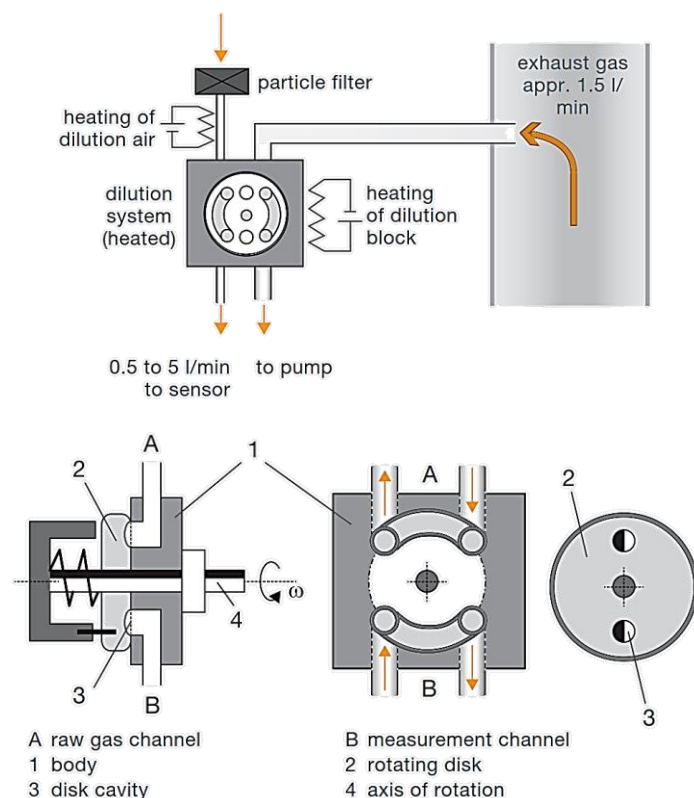


Figure 3-6. Conceptual diagram of exhaust gas diluter MD19-2E ⁽³⁻⁵⁾

3.2. テストサイクル走行時におけるPM 排出特性

NEDC 走行時におけるPM 粒子数の排出挙動を図3-7に示す。過去の研究結果より、PM 粒子数の排出は冷間始動時において特に多いことから⁽³⁻⁶⁾、本研究における評価は、エンジンが冷えた状態(冷却用の油/水温 25℃)から、市街地を想定した走行パターン(Elementary Urban Cycle) の1回目終了する0s から200s までの区間で実施した。

ここでPM粒子数は、粒子径23nm以上(23nm - 560nm)の粒子の単位時間辺りの排出個数(個/s)で表記した。まず、粒子径範囲の選定については、1.2に示したEuro6bでのPM粒子数規制を考慮し、23nm以上に設定した。そして、エンジンから排出される単位時間あたりの排出PM粒子数 PN_n の算出方法を、式(3-1)に示す。

$$PN_n = PN_d \times (G_a + G_f) \times \frac{1}{\rho_a} \times 10^3 \quad (3-1)$$

ここで、

PN_n : PM粒子数 [個/s]

PN_d : PM粒子数濃度 [個/cm³]

G_a : エンジン吸入空気質量流量 [g/s]

G_f : 燃料質量流量 [g/s]

ρ_a : 空気密度 [kg/m³]

である。排出PM粒子数 PN_n は、PM粒子径分布計測器EEPSの出力である1cm³辺りの粒子数 PN_d と排気ガス流量の積から算出した。排気ガス流量は、吸入空気質量流量 G_a と燃料質量流量 G_f の和から概算した。排気ガス密度は、25℃標準状態における空気密度 ρ_a で代用した。

図3-7は上からNEDCの走行を想定した際の車速、エンジン回転数、PM粒子数を示している。PM粒子数は、始動時と加速時に多く排出されており、特に始動時の排出が多い。なお、この始動時は、初爆と連爆を経て、触媒急速暖機運転までを含む期間である。ここでより詳細に把握するため、計測したNEDC 0-200sの期間におけるPM排出の内訳を図3-8に示す。排出PM粒子数のうち、始動時が75.3%と最多を占め、続いて加速全体で17.9%を占め、始動と加速で93.2%と大半を占める。残る条件(アイドルや定常走行、減速時)は合わせても6.8%でPM粒子数への寄与は小さい。これより直接噴射式ガソリンエンジンのPM排出が多い条件は、始動時であり、その期間約25sの大半を占める触媒急速暖機運転がPM排出の多い運転条件であると考えられる。

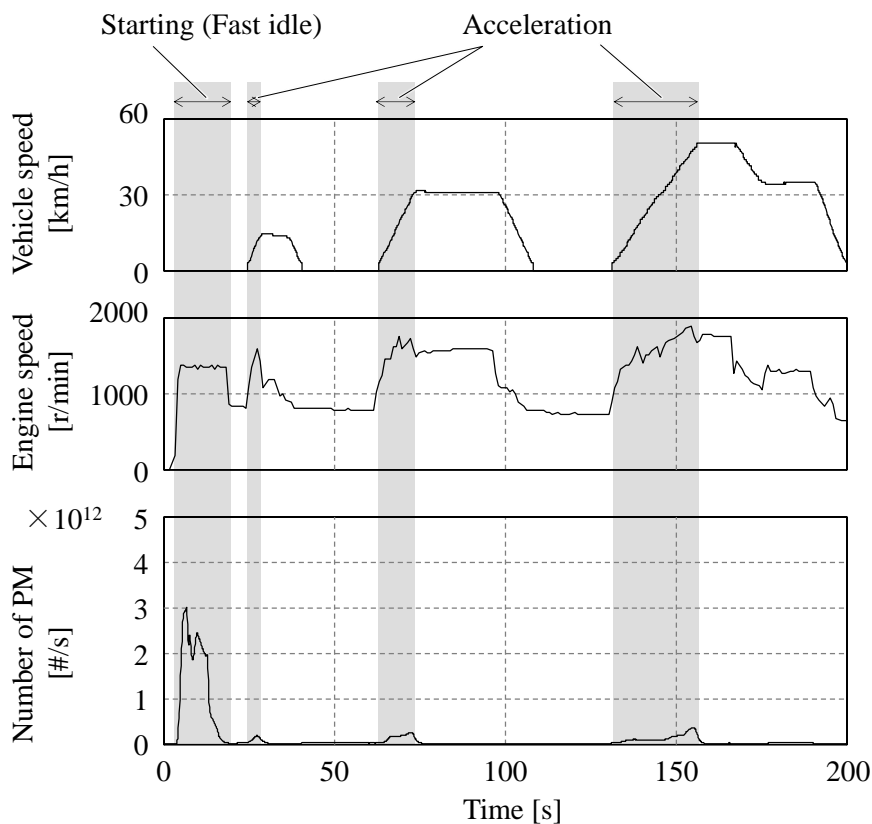


Figure 3-7. PM emission (NEDC, 0s - 200s)

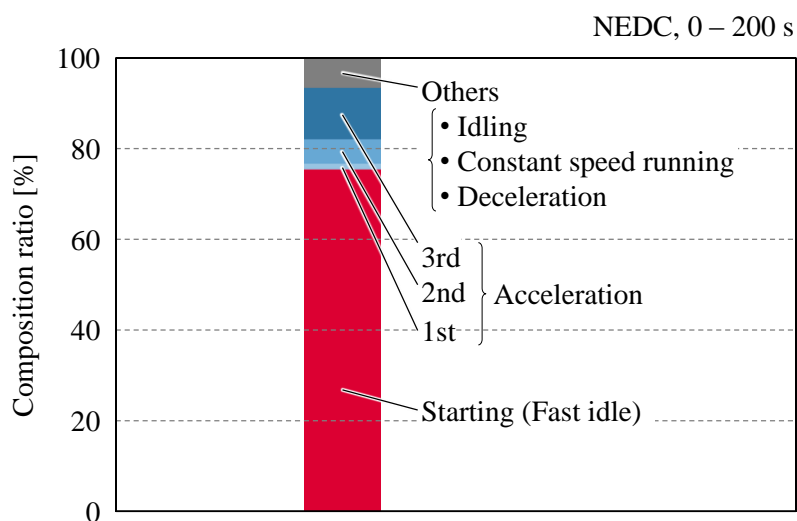


Figure 3-8. PM emission rate according to engine operating conditions

参考文献

- (3-1) United Nations Economic Commission for Europe, United Nations Vehicle Regulations - 1958 Agreement Regulation No. 101, <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3e.pdf> (accessed 2017/6/15)
- (3-2) E. Matsumura, M. Kanda, F. Hattori, Toyota's Innovative Concept for a SI Direct Fuel Injection System, 34th International Vienna Motor Symposium (2013)
- (3-3) 橋本晋, 服部文昭, 野村啓, 村瀬栄二, 噴流活用ガソリン直噴エンジンの開発, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 1, p. 33-38 (2013)
- (3-4) JIS K 2254: 1998, 石油製品一蒸留試験方法
- (3-5) TESTO, Raw gas sampling and conditioning for particle characterization, <https://media.testo.com/media/49/55/943bc34e8cdf/Brochure-ViPR-EN.pdf> (accessed 2017/6/15)
- (3-6) Hans Michael Koegeler, Khai Vidmer, Ernst Winklhofer, Flame Analysis Techniques for Particulate Emissions Development of GDI Engines, MTZ 0512014, Vol. 75, p. 12-17 (2014)

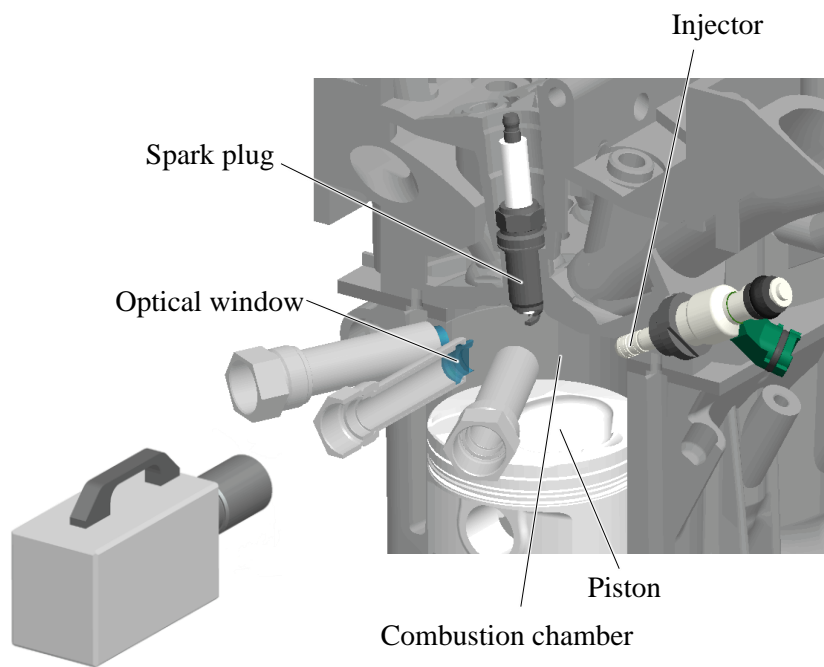
第4章 燃焼室内の燃料噴霧と燃焼過程

第3章で示した直接噴射式ガソリンエンジンで排出PMが多い始動時におけるPM排出要因を調査するため、本章ではエンジン燃焼室内における燃料噴霧と燃焼過程を観察した。第3章で用いた同じ諸元のエンジンを使い、燃焼室内を観察できるように改造した可視化エンジンを製作し、排出PMが多い始動時を含め、テストサイクルの代表条件を観察し、PM排出が多い条件の特徴を抽出する。

4.1. 実験装置と計測方法

4.1.1. 可視化エンジンを用いた燃焼室内の可視化手法

燃焼の可視化には、3.1.3の表3-1に示した諸元と同じエンジンをベースに、図4-1に示す燃焼室内観察用の可視化加工を施した可視化エンジンを用いた⁽⁴⁻¹⁾、⁽⁴⁻²⁾。可視化気筒は#6気筒とし、シリンダヘッドのリア側より3つの窓を燃焼室のペントルーフに通じるよう設けた。3つの窓のうち中央の窓を観察用、左右の窓を光源用とすることで、噴霧から燃焼まで一連の現象を観察することができる。中央の窓からの撮影には、高速度ビデオカメラ(Photron製、FASTCAM SA1.1、撮影速度20000フレーム/s)を用いた。各窓はサファイア製で、先端の窓を凹形状とし、観察範囲を広角化している。凹レンズの球の半径 SR と視野角 θ_{va} の関係を、図4-2に示す。視野角の算出に用いた代表波長は、可視光域で代表的に用いられるナトリウム原子の輝線スペクトルの一つであるD線波長589nmを用い、ガラスの材質はサファイア(屈折率1.768)とした。本研究では、燃焼室内の広範囲における噴霧および燃焼挙動を観察するため、凹レンズの有効径 d_{cl} と球の半径 SR を入射角 θ が臨界角直前となるよう、有効径 d_{cl} 12mm、球の半径 SR 11mmとし、視野角 θ_{va} を83deg.とした。撮影視野の一例を図4-3に示しており、吸気バルブや排気バルブを確認でき、燃焼室内の広範囲を観察することができる。なお、本可視化エンジンは、安全率10で耐圧10MPa以上を有しており、常用運転領域全域で可視化することが可能である。評価インジェクタは、3.1.3の表3-1と図3-2に示した評価インジェクタと同じファンスリット噴霧を用いた。



High speed video camera

Figure 4-1. Optically accessible engine

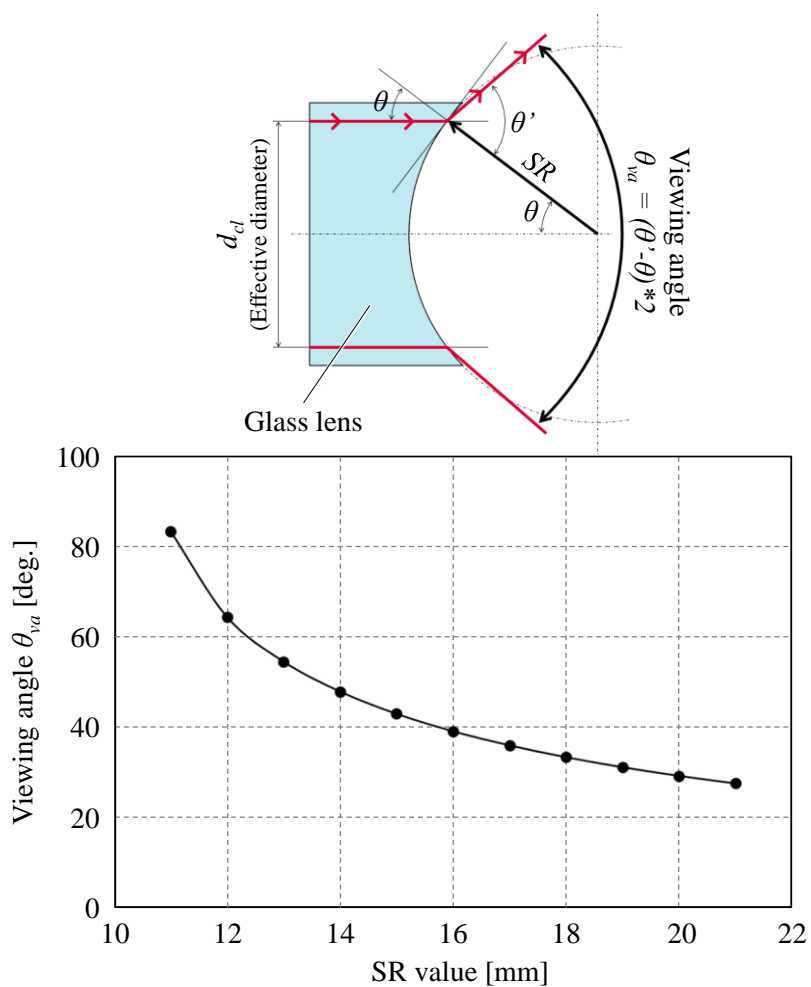


Figure 4-2. Viewing angle by SR value of concave lens

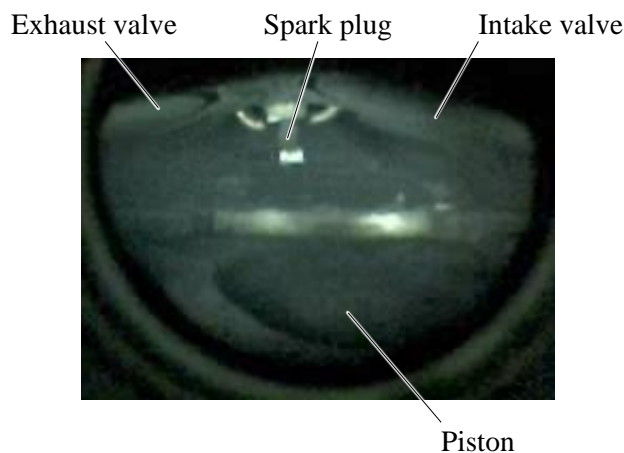


Figure 4-3. Observation area

4.1.2. 供試燃料

供試燃料は、3.1.4と同様の国内市販相当のプレミアムガソリンを用いた。

4.1.3. エンジン運転条件

PM 排出が多いエンジン始動時の触媒急速暖機運転と冷間時の加速運転における燃料噴霧と燃焼挙動の特徴を把握するため、PM 排出が少ない定常アイドル運転における挙動と比較した。この3条件における運転条件を表4-1に示す。

条件①触媒急速暖機運転は、その名称が示すように、触媒の早期活性を狙うために触媒を急速に暖機する(温める)運転であり、エンジンが停止している冷間時の始動時にのみ使用される運転であり、通常燃焼とエンジン制御が大きく異なっている。表4-1に示すように、通常燃焼の一例として、条件③アイドル運転や条件②加速運転では、主に吸気行程に燃料噴射し、圧縮上死点前に点火するエンジン制御である。これに対し、条件①触媒急速暖機運転では、触媒の早期活性を狙い、意図的に後燃えするよう、圧縮行程に燃料噴射することで成層混合気を形成させ、圧縮上死点後に点火することで後燃えさせ、排気温度を短時間で触媒活性温度まで上昇させるエンジン制御を実施している。これより、条件①触媒急速暖機運転の特徴として、燃料噴射時期が通常燃焼と比較して、大幅に遅いことが挙げられる。なお、この触媒急速暖機運転は、車両停止中に行われるエンジン制御であり、同様の停止中のアイドル運転よりもエンジン回転数が高い。そのため、Fast idle (ファストアイ

ドル)と呼ばれることもある。エンジン回転数が高い理由は、早期に触媒を活性化させるためや、燃焼の安定性を確保するためである。

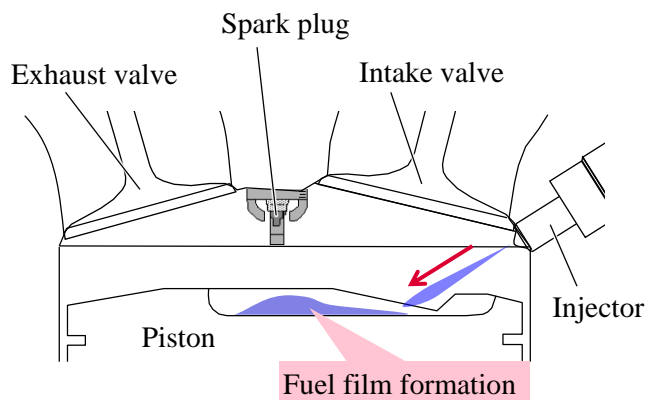
ここで、条件①触媒急速暖機運転におけるPM生成要因を推定してみると、使用したエンジンは、成層混合気の形成に、ウォールガイド方式を採用しており、ピストンキャビティをガイドとして利用して、噴射燃料を点火プラグ付近に誘導している^{(4-3), (4-4), (4-5)}。これより、PM生成要因として、図4-4に示すように、ピストンに噴射燃料が衝突することで、燃料の一部が付着し形成するピストン頂面の燃料液膜がPM生成要因の一つになっていると考えられる。そして、噴射燃料の衝突後に、噴霧が飛散したり巻き上がったたり、ピストン頂面の燃料液膜が蒸発することで形成される過濃混合気もPM生成要因として考えられる。これら要因の寄与度は、エンジン制御や燃焼室内の環境により、燃料噴霧の挙動や形成する燃料液膜やその蒸発特性、燃焼室内の気流が変化し、大きく変わると考えられる。

次に、条件②加速運転は、PMの少ない条件③アイドル運転に対し、回転数が高く、図示平均有効圧 (Indicated Mean Effective Pressure: IMEP) が大きく、負荷が高い。本研究の運転条件では、噴射圧と噴射時期、排気A/Fは同じ設定値とした。この運転条件の違いから、加速運転におけるPM生成の推定要因を以下に記す。加速運転はアイドル運転に対し、回転数が1.5倍と高い。これより、点火までの燃料の気化時間が、条件②加速運転では36.8ms、条件③アイドル運転では56.3msと加速運転の方が約35%短い。このことから、条件②加速運転は条件③アイドル運転に対し、燃焼室内に付着した燃料液膜や空間を浮遊する液滴の気化不足が推測される。加えて、条件②加速運転の方が、負荷が高いことから、燃料噴射量が多く、点火時における気化しきれない液状燃料がより存在しやすい環境であると考えられる。

Table 4-1. Engine operating conditions

Operating condition		①	②	③
		Catalyst warm-up (Fast idle)	Acceleration	Idle
Engine speed	[r/min]	1300	1200	800
Indicated Mean Effective Pressure (IMEP)	[kPa]	210	400	300
Injection pressure	[MPa]	12	12	12
Injection timing	[deg.BTDC]	40	280	280
Spark timing	[deg.BTDC]	-16	15	10
A/F	-	15.5	14.5	14.5
Water temperature	[deg.C]	25	25	25

Fuel injection



Soot formation

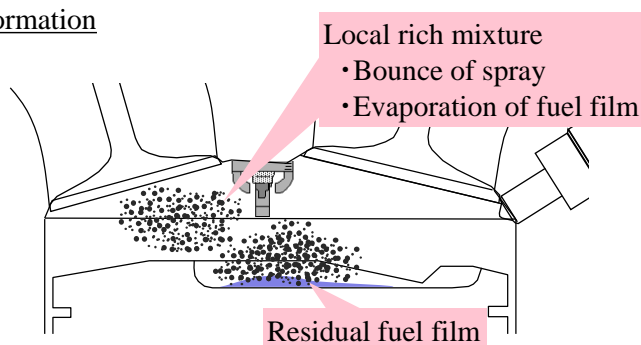


Figure 4-4. Estimated PM formation at fast idle

4.2. 燃焼室内の燃料噴霧と燃焼挙動

4.2.1. 触媒急速暖機運転における燃料噴霧と燃焼挙動

触媒急速暖機運転における噴霧・燃焼挙動を図4-5に示す。圧縮行程において噴霧はピストンに衝突した後に、ピストン頂面上を沿って移動し、ピストンリップを介して、上方へと巻き上がり、点火プラグ方向に移動する。

燃焼過程において、PM生成の指標として、火炎中にPMが生成し、その固体放射による輝きのある赤橙色の炎である輝炎に着目した。輝炎は、点火直後に排気側と空間に筋状に存在していることが確認できる。その後、ピストン頂面上にも輝炎が確認できる。そして、排気バルブが開いたときにも輝炎は存在しており、排気ポートへと排出される。

輝炎の発生位置と4.1.3.で示した運転条件をもとにPM生成要因として、排気側の輝炎は噴霧の巻き上がりや燃料液膜の蒸発などにより形成される過濃混合気、空間の筋状の輝炎は空間を浮遊する燃料液滴、ピストン頂面上の輝炎はピストン頂面に形成する燃料液膜と考えられる。

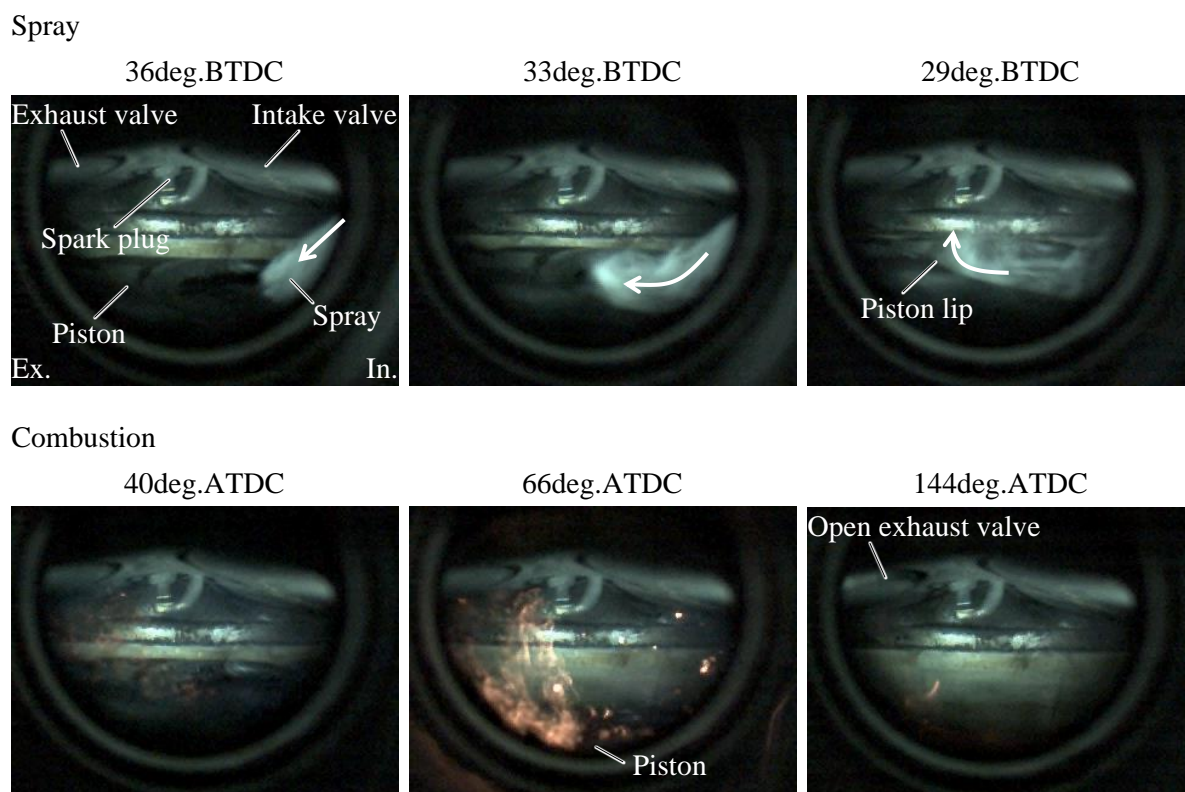


Figure 4-5. Spray and combustion behavior during fast idle

4.2.2. 冷間時の加速運転における燃料噴霧と燃焼挙動

加速運転における噴霧・燃焼挙動を図4-6に示す。吸気行程での燃料噴射は吸気バルブ開時に燃焼室空間に向かって噴射している。燃焼時の輝炎は、ピストン頂面と空間に確認できる。

輝炎の発生位置と4.1.3.で示した運転条件をもとにPM生成要因は、ピストン頂面上の輝炎はピストン頂面に形成する燃料液膜、空間の筋状の輝炎は空間を浮遊する燃料液滴と考えられる。

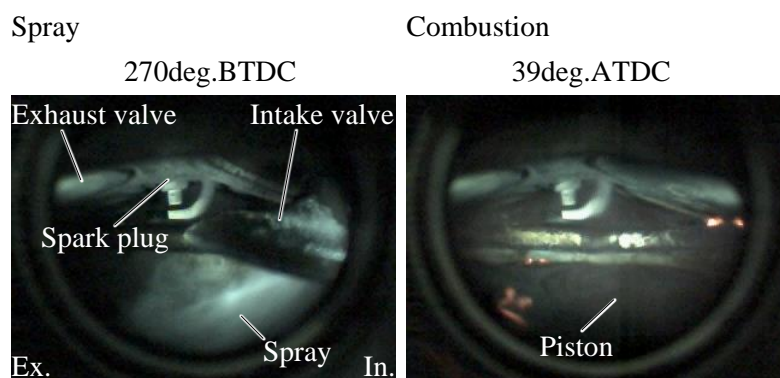


Figure 4-6. Spray and combustion behavior during acceleration

4.2.3. アイドル運転における燃料噴霧と燃焼挙動

アイドル運転における噴霧・燃焼挙動を図 4-7 に示す。吸気行程での燃料噴射は燃焼室空間に向かって噴射している。燃焼時の輝炎は、空間にわずかに確認できるが、PM 排出が多い触媒急速暖機運転や加速運転と比較するとその量は少ない。

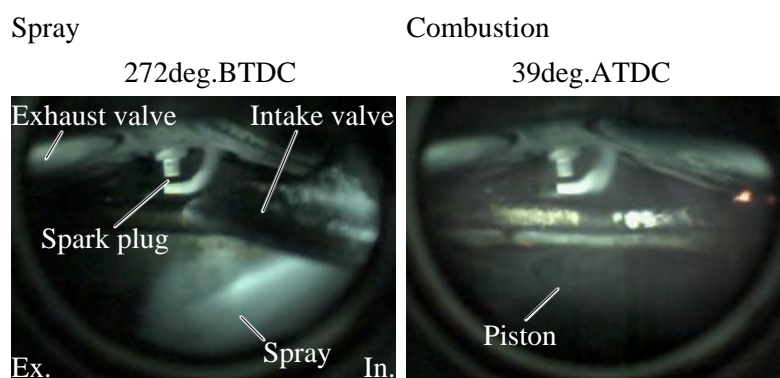


Figure 4-7. Spray and combustion behavior during idle

4.2.4. PM 排出が多い燃焼室内の燃焼挙動の特徴

4.2.1～4.2.3で示したように、PM 排出が多い触媒急速暖機運転および加速運転では、燃焼中に発生する輝炎が多い特徴があることが判った。そして、PM 排出がより多い触媒急速暖機運転において、輝炎が多い。本研究では、排出 PM がより多い触媒急速暖機運転を主な研究対象とし、次章以降で詳細解析を実施した。

参考文献

- (4-1) 榎本滋郁, 松田三起夫, 福井伸治, 自動車分野における計測技術, 自動車技術, Vol. 65, No. 7, p. 12-19 (2011)
- (4-2) 泉桂広, 青木文明, 飯塚基正, 岡田吉弘, 過給 SI エンジンにおける低速プレイグの可視化解析, 自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 1, p. 21-26 (2015)
- (4-3) 岡野博志, 古野志健男, 神田睦美, 服部文昭, 直噴ガソリンエンジンの開発, トヨタ・テクニカル・レビュー, Vol. 50, No. 2 (2000)
- (4-4) Werner Hentschel, Optical diagnostics for combustion process development of direct-injection gasoline engines, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, No. 1, p. 1119-1135 (2000)
- (4-5) C. Arcoumanis, T. Kamimoto, Flow and Combustion in Reciprocating Engines, Springer, (2009)

第5章 ピストン頂面の燃料液膜の挙動

これまで直接噴射式ガソリンエンジンの排出 PM が多い条件として、冷間始動時の触媒急速暖機運転と加速運転であることを確認し、燃焼時の輝炎が多いことを確認した。これら条件における共通点として、ピストン頂面から輝炎の発生がみられた。これより、PM 生成要因としてピストン頂面の燃料液膜が考えられる。本章では、ピストン頂面の燃料液膜を把握し、輝炎発生位置と比較する。

5.1. 実験装置と計測方法

5.1.1. 燃料液膜の計測構成

ピストン頂面の燃料液膜厚さは、蛍光染料入り燃料を用い紫外線照射による蛍光発光強度を計測する方法で計測した。計測時の構成を図 5-1 に示す。ガラスシリンダエンジンを用いて、エンジン外よりガラスシリンダを通じて紫外線を照射し、点火プラグ穴に設置した凹レンズを通して、ピストン頂上の燃料液膜を撮影する。

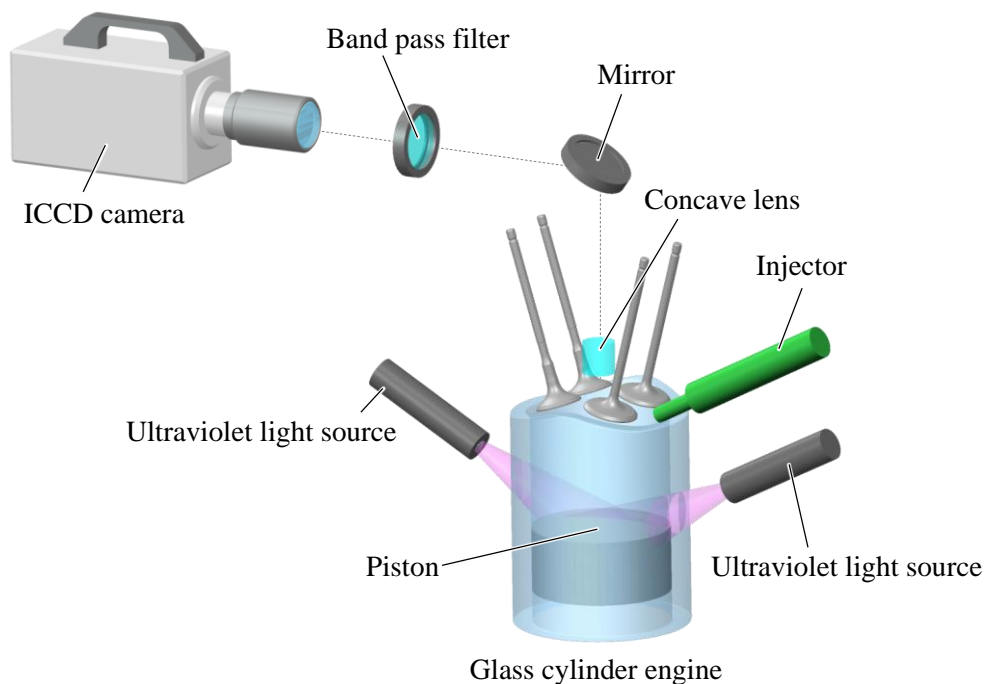


Figure 5-1. Experimental Apparatus for measuring piston fuel film deposition

5.1.2. 供試エンジン

エンジンは、表 5-1 に示す諸元のガラスシリンダエンジンを用いた。ガラスシリンダエンジンとは、シリンダライナを石英ガラスに置き換えたエンジンであり、燃焼室内をエンジン外から直接観察することができる⁽⁵⁻¹⁾。ガラスシリンダの設置気筒は最もリア側の#4 気筒とした。ここで本エンジンは、第 3 章にて評価したエンジン(表 3-1)と異なるが、第 3 章で使用した可視化エンジンと同じ下向きの噴射角 $V = 29\text{deg.}$ となるよう表 5-2 に示すインジェクタノズルを使用した。

Table 5-1. Engine specifications

Type	4-cylinder, in-line
Displacement	2.0L
Bore × Stroke	$\phi 86\text{mm} \times 86\text{mm}$
Compression ratio	10.5 : 1
Injection system	Direct Injection
Spray type	Fan shaped spray
Downward injection angle V	29deg.

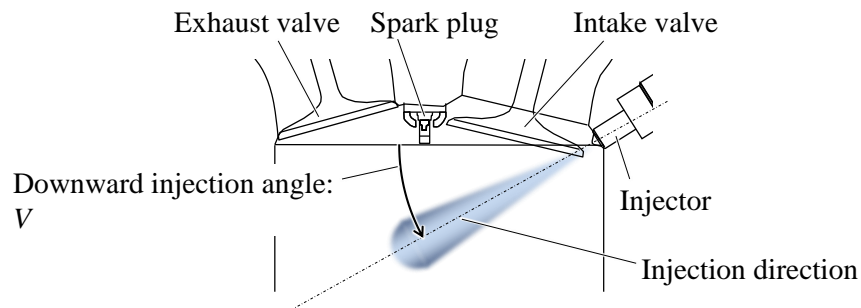
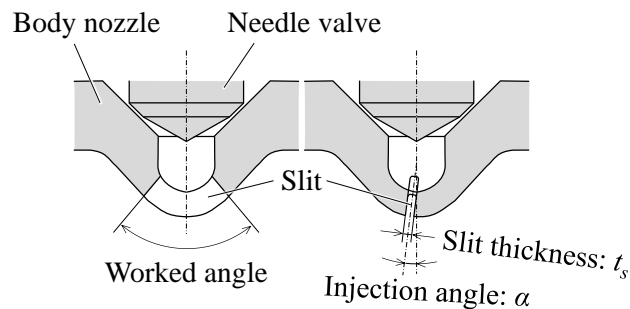


Table 5-2. Nozzle specifications

Actuator	Electric solenoid
Slit number	1
Worked angle	91 deg.
Slit thickness t_s	0.12 mm
Injection angle α	5 deg.



5.1.3. 使用燃料の蛍光特性

燃料にはプレミアムガソリン(3.1.4.参照)に油溶性蛍光染料(Marktec 製, OL-200 II)を 1%vol.混入させた^{(5-2), (5-3)}. 蛍光染料の特性を表 5-3 に示す. 蛍光染料はリン酸トリスの溶媒に溶解されている. 初留点は 220-250deg.C であり, 使用したプレミアムガソリンの終点温度以上(図 3-4 参照)である. これより本章での評価は, 噴射燃料のピストンへの衝突位置およびその際の液膜厚みを解析対象とし, 燃料液膜の蒸発過程については, 実現象と乖離が生じるため解析対象外とする.

照射する紫外線と本燃料による蛍光のスペクトルを図 5-2 に示す. 各々の最大強度を 1 としている. スペクトルの計測は, ストリークカメラ(浜松ホトニクス製, C-4187, スリット幅 100 μ m, 露光時間 500ms)と分光器(浜松ホトニクス製, C-5094, グレーティング 300gr/mm)を用いて実施し, ストリークカメラへの光の導入にはバンドルファイバ(三菱電線工業製, KV95PZSL STV230D/26)を用いた. 波長の校正は, 波長スペクトルが既知の標準水銀ランプを用いて, 事前に調整した.

スペクトルの分布についてみると, 本研究で用いた紫外線の光源は特定波長に急峻なピークがみられ, 波長 365nm で最大強度を持つ. 特定波長でピークを持つ理由は, 光源に水銀キセノンランプを用いているためである. 一方, 紫外線による蛍光波長は, 紫外線光源よりも長波長側に位置し, 450nm から 600nm 超の幅広い波長域を持ち, 500nm 付近に最大強度を持つ.

Table 5-3. Fluorescent agent

	Marktec Co., Ltd. Super tracer OL-200 II
Component / Ratio	Tris(2-chloroethyl) phosphate / 92% Fluorescent dye / 8%
Initial boiling point	220 - 250 deg.C
Flash point	204 deg.C
Specific gravity (15deg.C)	0.94 g/cm ³
Kinetic viscosity (38deg.C)	12 mm ² /s

Manufacturer nominal value

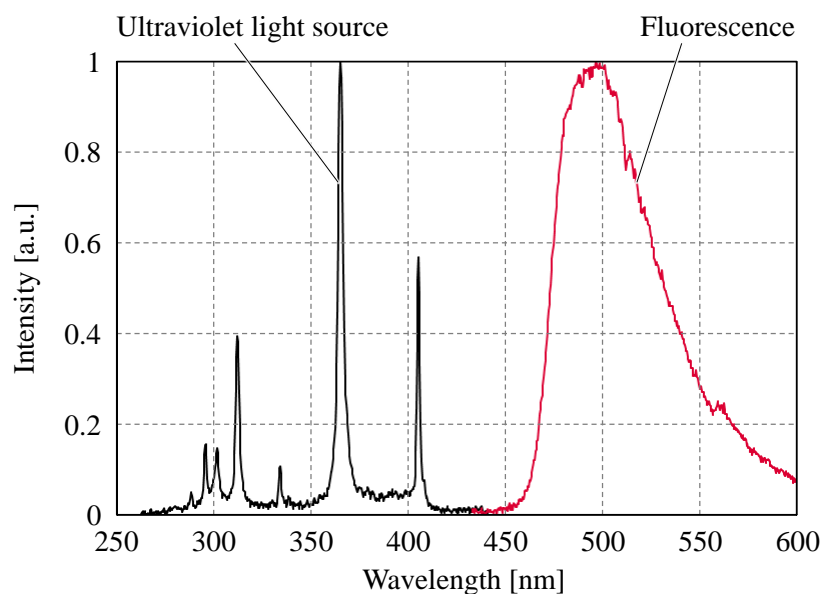


Figure 5-2. Fluorescence spectrum from 250nm to 600nm

5.1.4. 燃料液膜の撮影方法

ガラスシリンダエンジンを用いて、紫外線をエンジン外よりガラスシリンダを通してピストン頂面に均一照射した。点火プラグ穴に凹レンズを設置し、撮影はモータリング運転の 1 サイクルで実施し、ICCD カメラ(浜松ホトニクス製, C7972-51C, イメージインテンシファイアのゲート幅 $100 \mu\text{s}$)を用いて、燃焼行程下死点(180deg.ATDC)で撮影した。ICCD カメラの前には燃料液膜の蛍光のみを撮影するため、バンドパスフィルタ(中心波長 550nm, 半値幅 210nm)を設置した。

5.1.5. 燃料液膜厚さの定量化

燃料液膜と蛍光強度の関係を図 5-3 に示す。燃料液膜の厚さは、事前に実施した同一光学系での液膜厚さと蛍光発光強度の検定評価より定量化した。図 5-1 に示す計測構成において、ピストンを取り外し、計測時にカメラで撮影するピストン位置(180deg.ATDC)に燃料液膜厚さを管理した検定用セルを設置し、液膜厚さと蛍光強度の関係を把握した。燃料液膜と蛍光強度には線形の関係性があり、近似式より液膜厚さを定量化した。液膜厚さの計測ばらつきは $\pm 10\%$ である。

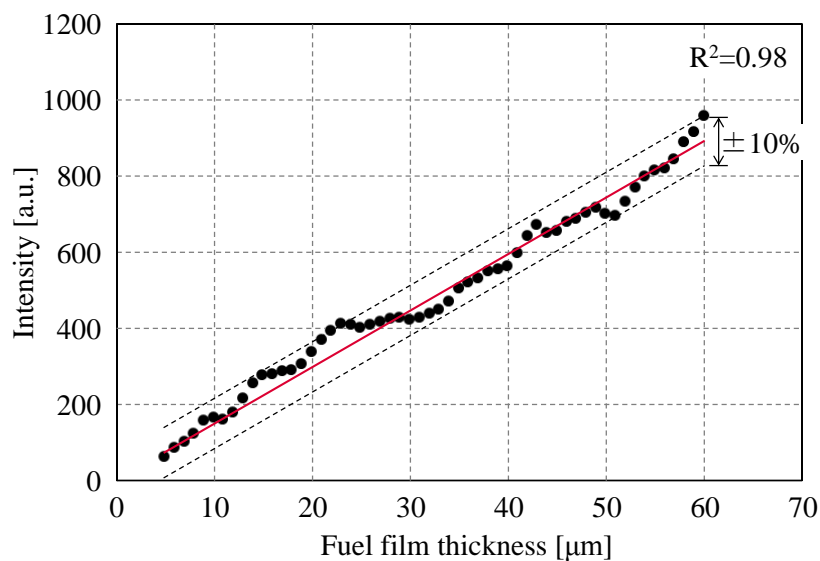


Figure 5-3. Calibration of fuel film thickness and image intensity

5.2. PM 排出が多い運転条件における燃料液膜の挙動

5.2.1. 燃料液膜の挙動

触媒急速暖機運転および加速運転における燃料液膜の挙動を図 5-4 に示す。そして、吸気-排気方向のボア中心断面における燃料液膜厚さを比較したものを図 5-5 に示す。触媒急速暖機運転における燃料液膜は、ピストンのキャビティ部中央に燃料液膜が厚く分布しており、最大 20 - 30 μm 程度である。また、燃料液膜はリップ付近にも 5 - 10 μm 程度で見られる。一方、加速運転では、ピストン中心付近に 5 μm 程度で薄く分布している。

このような燃料液膜分布になった理由について、燃料の噴射方向と噴射時におけるピストン位置から考察する。図 5-6 に触媒急速暖機運転と加速運転における噴射開始時のピストン位置の模式図を示す。触媒急速暖機運転の燃料噴射開始時におけるピストン位置と噴射方向の交わる位置は、ピストンキャビティ中央であり、燃料液膜が厚くなった位置と一致する。

一方、加速運転における燃料噴射方向とピストン位置が交わる位置は、排気側に位置しており、液膜形成位置とやや異なる。これは、加速運転時の燃料噴射は吸気行程のピストン下降時に行われるが、燃料噴霧は最初にピストンに衝突したのではなく、最初にシリンダライナに衝突し、その後跳ね返りや飛散によりピストンに再度衝突したことで、ピストン中央付近に薄い燃料液膜を形成したものと考える。

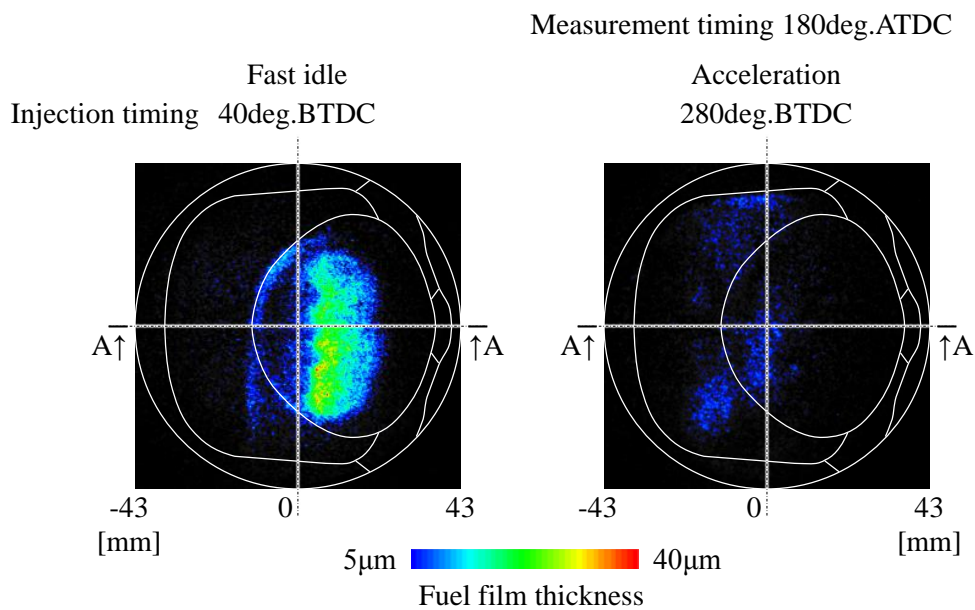


Figure 5-4. Piston fuel film distribution

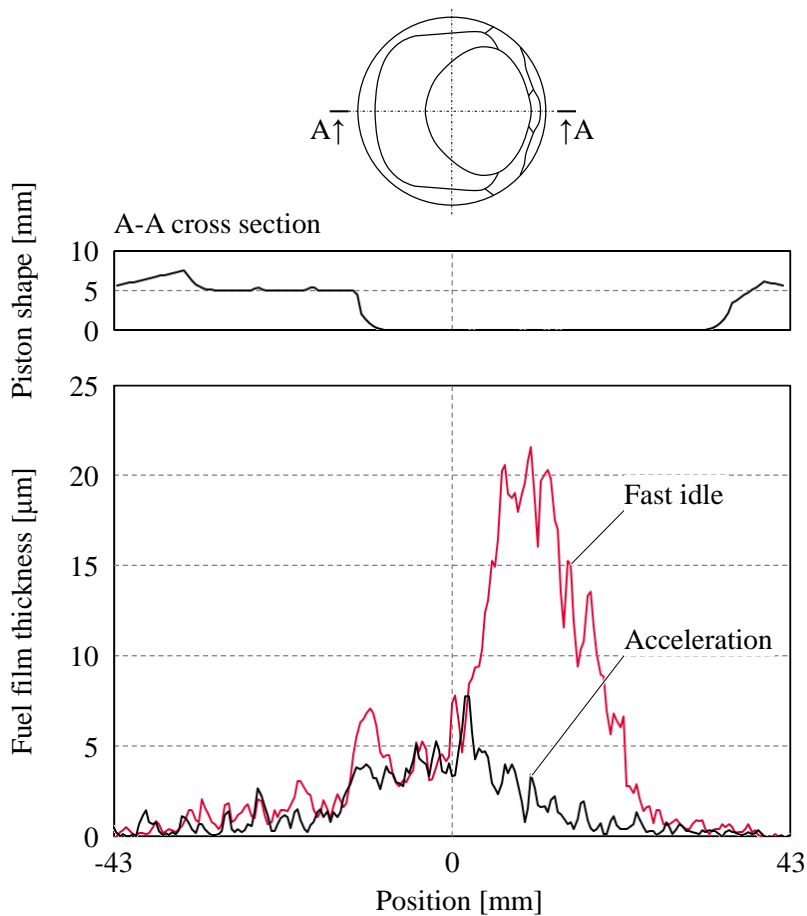


Figure 5-5. Fuel film thickness distribution

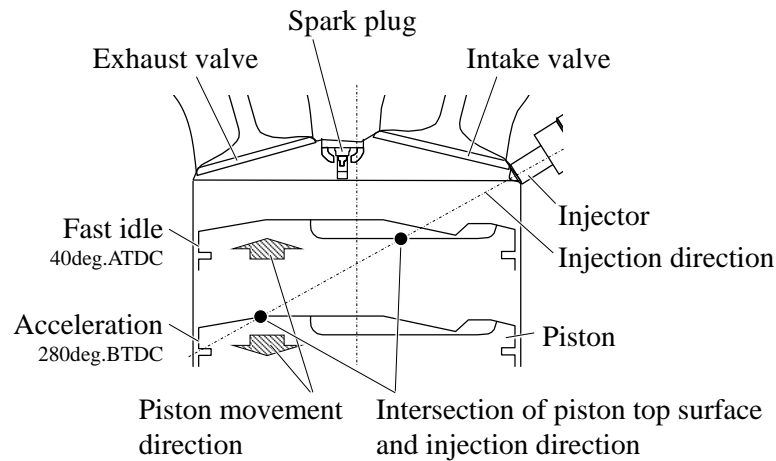


Figure 5-6. Piston position at the start of injection

5.2.2. 燃料液膜と輝炎の関係

ここまで確認してきた燃料液膜と第4章で確認した輝炎の比較を図5-7に示す。触媒急速暖機運転および加速運転ともに、図中の丸で囲んだ破線部に示すように燃料液膜の直上付近に輝炎が存在していることが判る。これより燃料液膜がPM生成要因であることが考えられる。しかし、燃料液膜の直上以外にも輝炎が存在している。これは、PM生成要因が燃料液膜以外に存在することを示唆している。特に触媒急速暖機運転では、燃料液膜の直上以外における輝炎が多く、特に排気側の空間で多い。これは過濃混合気によるものと考えられ、噴霧のピストン衝突後、噴霧の巻き上がりや飛散、ピストン頂面に形成する燃料液膜の蒸発により形成するものと推定する。また、加速運転においても燃焼室空間に輝炎がわずかに確認できる。これは、空気と噴霧のミキシング不足による過濃混合気や、点火までに残留した粗大液滴によるものと推定する。

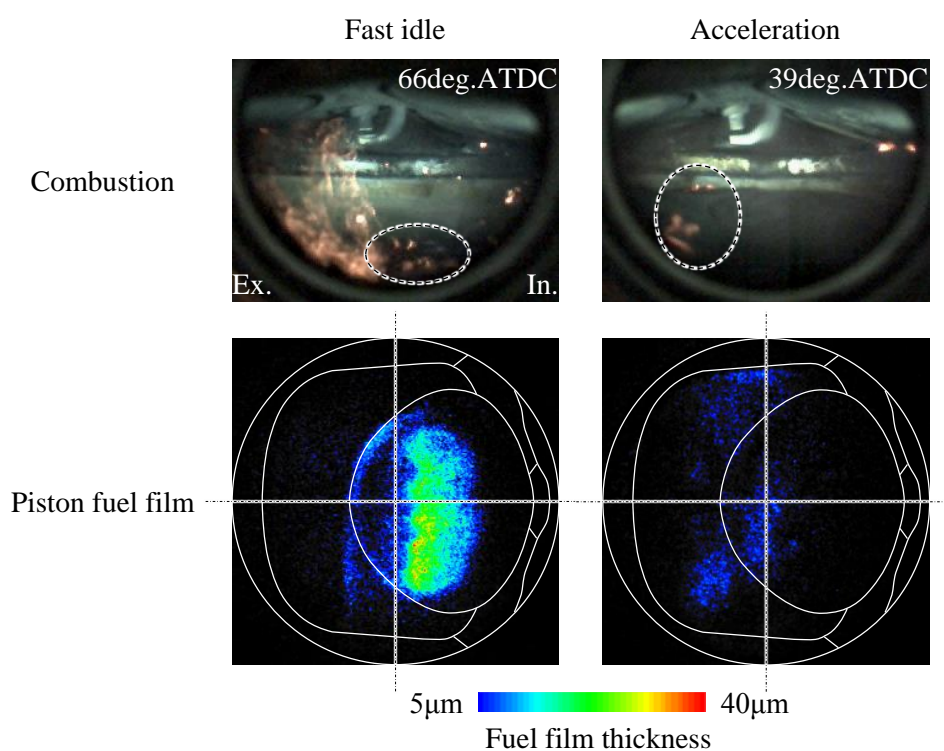


Figure 5-7. Combustion and piston fuel film

参考文献

- (5-1) 斎藤公孝, 猪頭敏彦, 中田雅彦, エンジンオイル消費現象の解析(第1報)ーガラスシリンダエンジンによるオイル挙動観察ー, 第8回内燃機関合同シンポジウムテキスト, p. 387-392 (1989)
- (5-2) 市瀬茂徳, 岩出純, 河合秀敏, 畑善晴, ピストンオイルリング溝内のオイル挙動計測, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No. 69-12, p. 21-24 (2012)
- (5-3) Shigenori Ichinose, Kiyoshi Iwade, Yoshiharu Hata, Oil Flow in Piston Oil Ring Groove, SAE Technical Paper 2014-01-1670 (2014)

第6章 放射強度を利用したPMの計測原理

これまでに直接噴射式ガソリンエンジンからのPM排出が多い触媒急速暖機運転では、燃焼時の輝炎発生が多く、その発生位置はピストン頂面の壁面および空間であることを明らかにしてきた。この結果より、次に燃焼室内における輝炎とPMの関係性を明らかにするため、燃焼室内における燃焼行程から排気行程にかけてのPMの生成位置や排出挙動、そしてPM粒子の特性として大きさ(粒子径)や数(数密度)の計測を行った。本章では、これらの計測手法の原理について述べる。

本研究において基本となる計測手法は、レーザ誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence: LII)である。LII法は、PM粒子への高強度のレーザ照射により、PM粒子がレーザ光を吸収し放射される光を検知することで、PMを把握する手法である。そして、LII法を発展した時間分解レーザ誘起赤熱法(Time Resolved Laser Induced Incandescence: TR-LII)についても、本研究に適用した。TR-LII法は、PM粒子の粒子径を把握する手法である。これらLII法やTR-LII法は、ディーゼル燃焼場で研究実績がある手法であり⁽⁶⁻¹⁾、本研究ではガソリンエンジン燃焼室内に適用した。

本章では、これらLII法とTR-LII法の計測原理について述べる。そして、本研究では従来研究で試みられていないエンジン燃焼室内のPMの数(数密度)の計測について実施を試みており、この考えについても述べる。

6.1. レーザ誘起赤熱法の計測原理

レーザ誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence: LII)は、PM粒子の主な構成成分であるSoot粒子への高強度のレーザ照射により、Soot粒子がレーザ光を吸収し放射される光を撮影することで、Sootを検知する手法である。LII法に関する研究として、EckbrethやMeltonらが実験や数値計算による研究を行っている^{(6-2), (6-3)}。Eckbrethは、基礎特性として、レーザ入射後、蒸発に起因して時間経過とともにSoot粒子径が減少すること、また入射レーザ強度が高くなるにつれ粒子温度が増加し、赤熱発光強度が強くなることを報告している⁽⁶⁻²⁾。Meltonは、Soot粒子からの放射光の強度 S_{Rad} は、Soot粒子温度が最大するとき体積濃度に比例し、式(6-1)、式(6-2)で導かれることを示した⁽⁶⁻³⁾。

$$S_{Rad} \propto N_p \times d_p^x \quad (6-1)$$

$$x = 3 + \frac{154}{\lambda_{em}} \quad (6-2)$$

ここで,

N_p : 一次粒子径の数密度 [個/cm³]

d_p : 一次粒子径 [nm]

λ_{em} : 検出波長 [nm]

である.

この LII 法は, 撮影波長を短波長域にすることで, 火炎による放射光の影響を抑えることができ, 燃焼光の有無に関わらず, Soot 粒子を撮影することができる. この理由について説明する. まず, Soot 粒子からの放射光強度 S_{LII} は, Planck 放射則より式(6-3)で与えられる.

$$S_{LII} = \varepsilon_{\lambda_s} \frac{2\pi^2 d^2 hc^2}{\lambda_s^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_s k_B T}\right) - 1 \right]} \quad (6-3)$$

ここで,

ε_{λ_s} : 波長 λ_s における放射率 [-]

d : Soot 直径 [nm]

h : プランク定数 6.63×10^{-34} [J·s]

c : 真空中の光速 2.998×10^{10} [cm/s]

λ_s : 波長 [nm]

k_B : ボルツマン定数 1.38×10^{-23} [J/K]

T : Soot 粒子温度 [K]

であり, 波長 λ_s における放射率 ε_{λ_s} は, 式(6-4)で与えられる.

$$\varepsilon_{\lambda_s} = \frac{4\pi d E(m)}{\lambda_s} \quad (6-4)$$

ここで,

$E(m)$: 無次元屈折率関数 0.176 [-] ⁽⁶⁻⁴⁾

である. 式(6-3)が示すように, 放射光強度 S_{LII} は, Soot 粒子温度 T に依存する. ガソリンエンジンにおける燃焼温度を 2500K とし, LII 法のレーザ照射による Soot 粒子の到達温度を Melton の研究を参考に 4300K とした時の放射光強度を図 6-1 に, その比を図 6-2 に示す. 放射光強度は, Soot 粒子温度に関わらず放射光は紫外域から赤外域まで連続スペクトルである. 2500K と 4500K における放射強度の比をみると, 短波長側ほど大きくなっていることが判る. 例えば, 波長 400nm では, LII 法を

想定した放射光強度の方が約400倍高い。この結果より、LII法で短波長側を撮影波長に選定することで、燃焼による発光の影響を抑えながら、Soot位置を把握することができる。

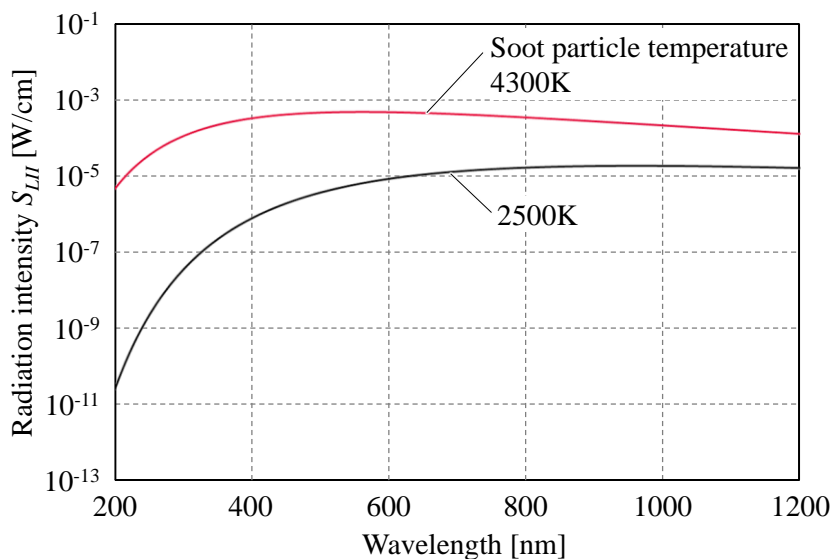


Figure 6-1. Radiation intensity at 4300K and 2500K

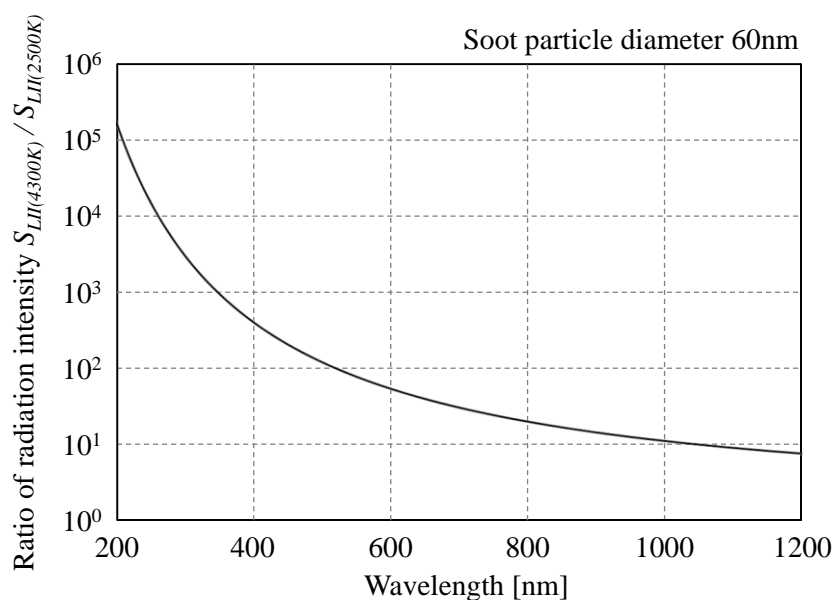


Figure 6-2. Ratio of radiation intensity

6.2. 時間分解レーザー誘起赤熱法の計測原理

6.2.1. 概要

時間分解レーザー誘起赤熱法(Time Resolved Laser Induced Incandescence: TR-LII)は、LII法を発展させた手法で、放射強度の時間的特性からSoot粒子径を計測する手法であり、WillらやRothらにより提唱された手法である^{(6-5), (6-6)}。TR-LII法は、Soot粒子へのレーザー照射による放射強度の時間減衰が粒子径により異なる性質を利用し、粒子径を算出する。放射強度の時間履歴の算出方法は後述する本項にて後述するが、図6-3にSoot粒子径による放射強度の時間履歴の算出結果の一例を示す。放射強度はSoot粒子径によって異なり、粒子径が大きい方が放射強度の時間減衰がなだらかであることが判る。この特性から、時間差をつけた放射強度の比(減衰比)とSoot粒子径の関係を、図6-4に示すように得ることができる。

実際のTR-LII法での計測はカメラ撮影により実施する。ある二時刻(Time 1とTime 2)での撮影画像からピクセル毎に輝度の減衰比を求め、これと図6-4を照らし合わせることで、ピクセル毎のSoot粒子径を得ることで、撮影画像全域のSoot粒子径分布を得ることができる。これより、Soot粒子径分布を得るためには、図6-3に示した各粒子径における放射強度の時間履歴を求める必要がある。

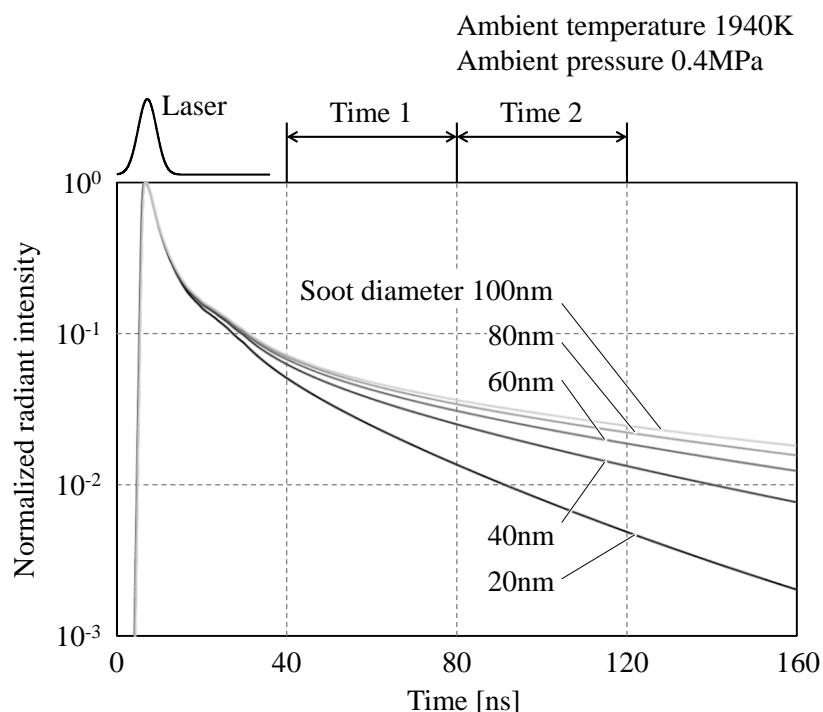


Figure 6-3. Time history of radiation intensity

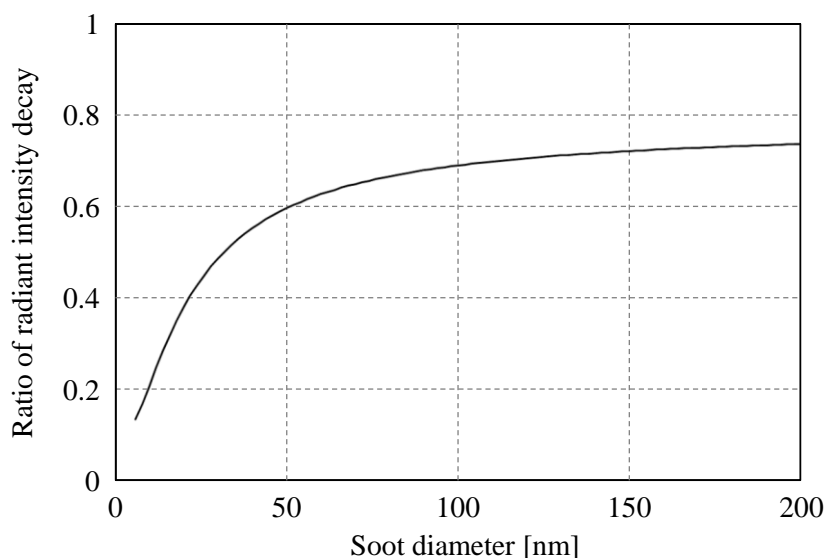


Figure 6-4. Relationship between soot diameter and ratio of radiant intensity decay

6.2.2. レーザ照射による Soot 粒子の放射強度の算出方法

レーザー照射による Soot 粒子の放射強度の時間履歴は理論式から算出する。本研究では, Melton と同様に, 粒子径を d , 放射率を 1 の球体と仮定した単一の Soot 粒子には, 図 6-5 の模式図に示すよう, レーザ照射時に, レーザの吸収 $Q_{\text{Absorption}}$, 熱伝達 $Q_{\text{Conduction}}$, 蒸発 $Q_{\text{sublimation}}$, 熱放射 $Q_{\text{Radiation}}$, そして内部エネルギーの増加 $Q_{\text{Internal Energy}}$ があると考え, エネルギー保存則の式(6-5)と質量保存則の式(6-6)が成り立つとした⁽⁶⁻³⁾.

$$Q_{\text{Absorption}} + Q_{\text{Conduction}} + Q_{\text{Sublimation}} + Q_{\text{Radiation}} + Q_{\text{Internal energy}} = 0 \quad (6-5)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_s\right)}{dt} \quad (6-6)$$

ここで,

M : Soot 重量 [kg]

ρ_s : 炭素の密度 2.26 [g/cm³]

t : 時間 [s]

である。この 2 式から, Soot 粒子温度の時間履歴を算出する。そして, この Soot 粒子温度の時間履歴をプランクの放射則の式(6-3)に代入することで, 粒子径毎の放射強度の時間履歴が得られる。

以降の項において, Soot 粒子の放射強度の時間履歴を算出するための, 式(6-5), 式(6-6)で示した保存則について説明する。

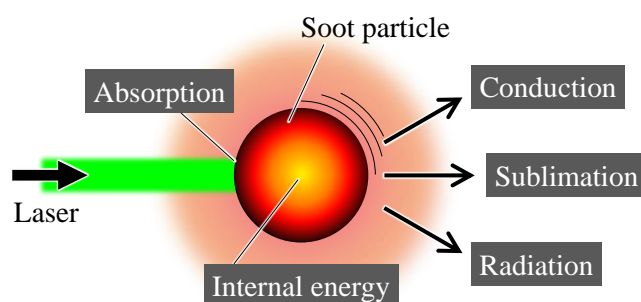


Figure 6-5. Conceptual diagram of energy balance for soot particle exposed to laser

6.2.3. レーザ照射による Soot 粒子のエネルギー吸収

式(6-5)の $Q_{\text{Absorption}}$ は、Soot 粒子へのレーザー照射によるエネルギー吸収項であり、式(6-7)で与えられる。

$$Q_{\text{Absorption}} = \frac{1}{4} K_{\text{abs}} \pi d^2 q \quad (6-7)$$

ここで、

K_{abs} : Soot 粒子の吸収係数 [-]

q : レーザ強度 [W/m^2]

である。Soot 粒子の吸収係数 K_{abs} は、Lee らや Carter らの研究より、式(6-8)で与えられる^{(6-4), (6-7)}。

$$K_{\text{abs}} = \frac{4\pi d E(m)}{\lambda} \quad (6-8)$$

ここで、

λ : レーザ発振波長 [nm]

である。

また、レーザー強度 q は実測により与えており、レーザーエネルギーセンサによるエネルギー計測とフォトダイオードによる散乱光強度の時系列計測により、レーザーの強度の時間履歴として与えた。

6.2.4. レーザ照射による Soot 粒子の周囲への熱伝達

式(6-5)の $Q_{\text{Conduction}}$ は、Soot 粒子へのレーザー照射による周囲への熱伝達項であり、式(6-9)で与えられる。

$$Q_{\text{Conduction}} = 2 \frac{K_a (T - T_0) \pi d^2}{d (1 + GK_n)} \quad (6-9)$$

ここで,

K_a : 周囲気体への熱伝導率 [W/cm・K]

T_0 : 火炎温度 [K]

G : 幾何学因子 [-]

K_n : クヌーセン数 [-]

である. 式(6-9)における周囲気体への熱伝導率 K_a , 幾何学因子 G , クヌーセン数 K_n は, それぞれ式(6-10), 式(6-11), 式(6-12)で与えられる^{(6-8), (6-9), (6-10), (6-11), (6-12)}.

$$K_a = 5.83 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{0.82} \quad (6-10)$$

$$G = \frac{8f}{\alpha(\gamma+1)} = \frac{8}{\alpha(\gamma+1)} \left(\frac{9\gamma-5}{4} \right) \quad (6-11)$$

$$K_n = \frac{l}{A} \quad (6-12)$$

ここで,

f : Euchen factor [-]

γ : 空気の断熱指数 [-]

α : thermal accommodation coefficient 0.9 [-]

l : 平均自由行程 [cm]

A : 代表長さ [cm]

である. ここで, 平均自由行程 l は, エンジン燃焼室内での高圧環境場を想定し, Hofmanらの研究より, 式(6-13)を適用した⁽⁶⁻¹³⁾.

$$l = \frac{k_p T_0}{\sqrt{2} \sigma p_{amb}} \quad (6-13)$$

ここで,

k_p : ボルツマン定数 1.38065×10^{-17} [Pa・cm³/K]

σ : average molecular across section 3.0×10^{-15} [cm²]

である.

6.2.5. レーザ照射による Soot 粒子の蒸発

式(6-5)の $Q_{Sublimation}$ は, Soot 粒子へのレーザ照射による蒸発項であり, 式(6-14)で与えられる.

$$Q_{\text{Sublimation}} = \frac{\Delta H_v}{W_s} \frac{dM}{dt} \quad (6-14)$$

ここで、

ΔH_v : Sootの蒸発潜熱 7.78×10^5 [J/mol]

W_s : 炭素の分子量 12 [g/mol]

である。

6.2.6. レーザ照射によるSoot粒子の熱放射

式(6-5)の $Q_{\text{Radiation}}$ は、Soot粒子へのレーザ照射による熱放射項であり、式(6-15)で与えられる。

$$Q_{\text{Radiation}} = \sigma_{sb} (T^4 - T_0^4) \pi d^2 \quad (6-15)$$

ここで、

σ_{sb} : ステファン・ボルツマン定数 5.6704×10^{-12} [W/cm²K⁴]

である。

6.2.7. レーザ照射によるSoot粒子の内部エネルギー変化

式(6-5)の $Q_{\text{Internal energy}}$ は、Soot粒子へのレーザ照射による内部エネルギー変化項であり、式(6-16)で与えられる。

$$Q_{\text{Internal energy}} = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_s C_s \frac{dT}{dt} \quad (6-16)$$

ここで、

C_s : 炭素の比熱 1.9 [J/g·K]

である。

6.2.8. Soot粒子の質量保存

Soot粒子へのレーザ照射による質量保存の式(6-6)について、Soot粒子の昇華を考慮すると、式(6-17)で与えられる。

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{6} \pi d^3 \rho_s\right)}{dt} = \frac{1}{2} \pi d^2 \rho_s \frac{dd}{dt} = -\pi d^2 \rho_s U_v \quad (6-17)$$

ここで,

ρ_v : 炭素の蒸気密度 [g/cm³]

U_v : 蒸気速度 [m/s]

である. そして, 式(6-17)中の炭素の蒸気濃度 ρ_v , 蒸気速度 U_v は, それぞれ式(6-18), 式(6-19)で与えられる.

$$\rho_v = \frac{pW_v}{RT} \quad (6-18)$$

$$U_v = \left(\frac{RT}{2W_v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6-19)$$

ここで,

p : 炭素の蒸気圧 [MPa]

W_v : 炭素の蒸気モル濃度 36 [g/mol]

R : 空気の気体定数 8.3145 [J/K·mol]

である. さらに, 式(6-18)中の蒸気圧 p は, Clapeyron の式より, 式(6-20)で与えられる.

$$p(T) = p^* e^{\frac{\Delta H_v(T-T^*)}{RTT^*}} \quad (6-20)$$

ここで, T^* は炭素蒸気圧 p が p^* に等しいときの温度である. 本研究における T^* は, ガソリンエンジン燃焼室での高圧場での TR-LII 法の適用を考慮し, Leider らが研究した炭素の蒸気圧線図から近似した式(6-21)を用いた⁽⁶⁻¹⁴⁾.

$$T^* = \frac{-4.48711}{\log\left(\frac{p_{amb}}{0.101325}\right) - 11.46132} \times 10^4 \quad (6-21)$$

ここで,

p_{amb} : 雰囲気圧 [MPa]

である.

6.2.9. レーザ照射による Soot 粒子の放射強度の時間履歴

レーザ照射による Soot 粒子の放射強度の時間履歴は, 式(6-5)と式(6-6)を基に, 初期条件として雰囲気温度 T_0 と雰囲気圧力 p_{amb} , 粒子径 d_0 を与え, 常微分方程式を解き, Soot 粒子の粒子径 d と

温度 T の時間履歴を求める。そして、得られた Soot 粒子の粒子径 d と温度 T を基に、式(6-3)を用いて、Soot 粒子の放射光強度 S_{LII} の時間履歴を算出する。

計算の一例として、触媒急速暖機運転の燃焼期間を想定し、初期雰囲気温度 T_0 1940K、初期雰囲気圧力 p_{amb} 0.4MPa、初期 Soot 粒子径 d_0 20nm における計算結果を図 6-6 に示す。Soot 粒子へのレーザ照射により Soot 温度が上昇し、放射光強度 S_{LII} が増加する。そして Soot 温度上昇にともなう蒸発量の増加により、Soot 粒子径にわずかな減少がみられる。また、これらの現象はおよそ 20ns という非常に短い時間の間に生じる。

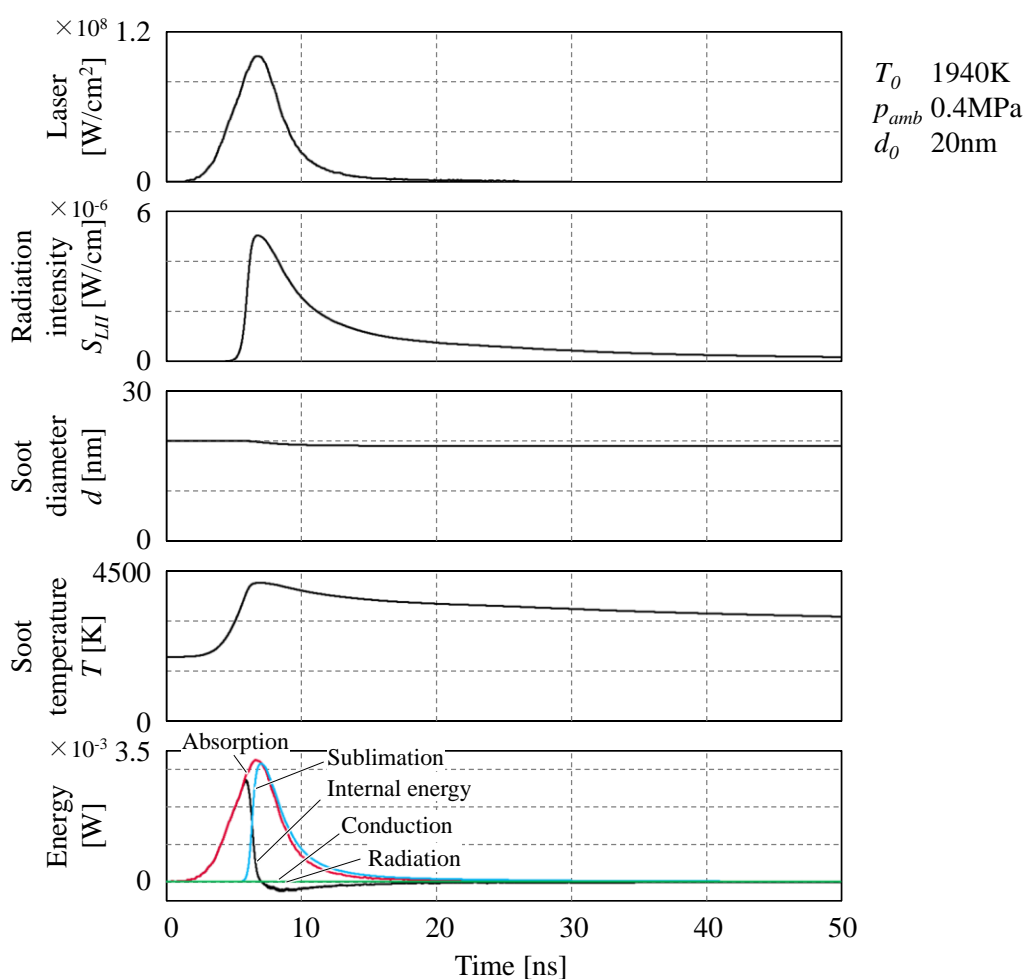


Figure 6-6. Calculation example of radiation intensity of soot particle by laser irradiation

6.2.10. Soot 粒子径の算出

Soot 粒子径は、6.2.1 で概略を示したように放射強度の時間減衰から算出する。図 6-3 に示した Soot 粒子径による放射強度は、Soot 粒子径が大きいほど放射強度の時間減衰が緩やかであること

が判る。これは、大径粒子の方が、熱容量が大きく、また体積に対する表面積の割合が小さいため、熱の放散が緩やかなためである。次に、Soot 粒子径に対する放射強度の時間減衰として、図 6-3 に示した 2 時刻(Time 1, Time 2)における放射強度 S_{LII} の比 R を図 6-4 に示す。放射強度の時間減衰が緩やかな大径粒子の方が放射強度比 R は大きい。

実際の TR-LII 法での計測はカメラ撮影により実施することから、ある二時刻(Time 1 と Time 2)での撮影画像からピクセル毎に輝度の減衰比を求め、これと図 6-4 を照らし合わせることで、ピクセル毎の Soot 粒子径を得ることで、撮影画像全域の Soot 粒子径の空間分布を得ることができる。

6.2.11. 数値計算により求められる Soot 粒子径の考察

6.2.10 で述べた数値計算により求められる Soot 粒子径が表現するものについて考察する。エンジンから排気される PM 粒子は数十 nm～百数十 nm 程度の大きさである。実際の撮影における 1 ピクセルのサイズを考えてみると、例えば、撮影分解能 1000 ピクセル×1000 ピクセルのカメラで、視野 100mm×100mm の範囲を撮影した場合、1 ピクセルの大きさは、 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ と、粒子サイズに対して、 $10^3 \sim 10^4$ 倍程大きい。そのため、1 ピクセルの中にも複数粒子が存在し、粒子径分布を持っていると考えられる。そのため、本研究の TR-LII 法による計測では、Soot 粒子 1 個 1 個の粒子径を計測するのではなく、時間差をつけ撮影した 2 枚の画像から、1 ピクセル毎の輝度変化から減衰比を求め、減衰比から求められる粒子径をそのピクセルにおける代表粒子径と定義した。また後述する粒子数については、1 ピクセルに存在する代表粒子径の数を数密度として算出した。

6.3. Soot 粒子の数密度計測に対する考え方

6.1 と 6.2 で述べた LII 法や TR-LII 法は、他の研究者らにより提唱された計測手法である。本研究では、このうち TR-LII 法を発展させて、新たに燃焼室内の Soot 粒子の数密度計測にも取り組んだ。本節ではこの考えについて述べる。

単位領域あたりの Soot 粒子の放射強度は、領域内に存在する粒子径分布に依存すると考えられる。そこで、TR-LII 法における 1 ピクセルの放射光強度と、TR-LII 法を用いて算出される 1 ピクセルあたりの代表 Soot 粒子径から、Soot 粒子の数に関する指標を抽出できると考えた。ここで、1 ピクセルあたりの放射光強度 S_{LII}' は、代表 Soot 粒子径 d_{rep} の放射強度と数密度 N_p の積算と考え、式(6-22)で与えられると定義した。

$$S_{LII}' = S_{LII}(d_{rep}, T) \times N_p(d_{rep}) \quad (6-22)$$

そして、実際のTR-LII法での撮影を考慮すると、カメラでの撮影輝度 S_{LII}'' は式(6-23)で与えられる。

$$S_{LII}'' = S_{LII}(d_{rep}, T) \times N_p(d_{rep}) \times X \quad (6-23)$$

ここで、

X : カメラ撮影時の感度定数 [-]

である。この X については、炭素粒子発生器(PALAS 製, DNP-3000)を用いた校正実験から事前に導出した。炭素粒子発生器から発生する炭素粒子の粒子径分布と数密度を変更し、TR-LII法による炭素粒子の赤熱発光の撮影とPM粒子径分布計測器(TSI 製, EEPS3090)による粒子径と数密度の計測結果を比較し X を算出した。

これより本研究では、まずTR-LII法により各ピクセルの代表Soot粒子径 d_{rep} を算出し、その後、式(6-23)の関係からSoot粒子の数密度 N_p を算出することで、エンジン燃焼室内のSoot粒子径 d_{rep} と数密度 N_p の空間分布を計測することができる。

6.4. 代表粒子径と実測の違いに関する考察

本研究では、TR-LII法で算出される粒子径は、1ピクセル辺りの代表粒子径と定義した。そこで算出される代表粒子径が、1ピクセル内に分布する粒子径分布に対し、どう対応するか考察した。ここで、1ピクセル内のSoot粒子の粒子径分布は対数正規分布に従うと仮定し、式(6-24)で与える。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad x > 0 \quad (6-24)$$

ここで、

σ : 分布パラメータ(対数を取って得られる正規分布の平均値) [-]

μ : 分布パラメータ(対数を取って得られる正規分布の標準偏差) [-]

である。Soot粒子分布を仮定した対数正規分布の平均値と分散を変更した時におけるTR-LII法における算出粒子径を図6-7に示す。本研究では粒子径分布の広がりの影響についても確認するため、標準偏差を1.4, 1.6, 1.8と変更した。いずれの標準偏差にしても、与えた対数正規分布の平均値に対し、TR-LII法で算出される粒子径は大きくなり、標準偏差が大きいほどその乖離は大きい。

このような結果となる理由として、粒子径による赤熱発光強度の影響が異なるためと考える、TR-LII法によるSoot粒子へのレーザ照射による赤熱発光強度は、式(6-3)で示したようにSoot粒子径の2乗で寄与する。そのため、各粒子の赤熱発光強度の積算となるTR-LII法においては、大径

粒子の影響が大きくなり、対数正規分布の平均値よりも高く、算出値が見積もられたと考えられる。また、標準偏差が大きいほど、粒子径分布の裾野が広く、大径粒子径が存在するため、標準偏差が大きいほど、その乖離が大きくなったと考えられる。このように、TR-LII法で算出される粒子径は、粒子径分布の平均値より大きい。

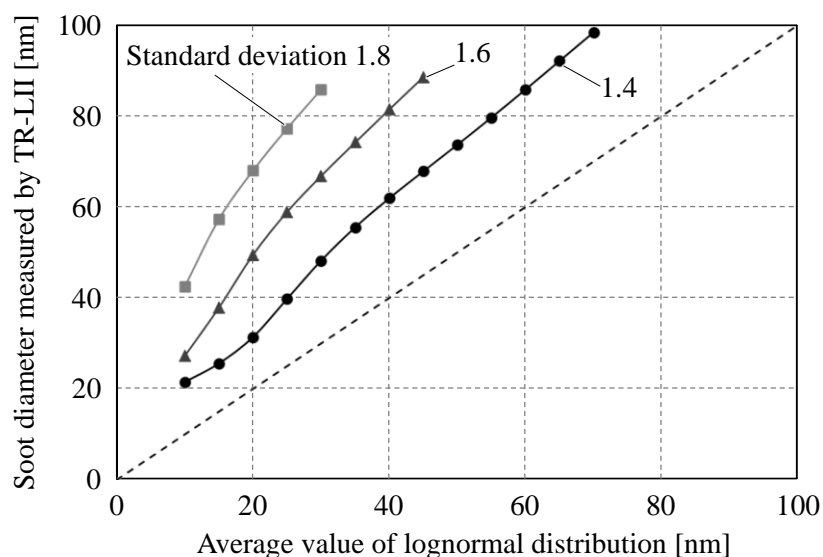


Figure 6-7. Soot diameter measured by TR-LII method

参考文献

- (6-1) 伊藤貴之, 非定常噴霧燃焼場における微粒子生成機構の解明, 同志社大学 博士論文 (2004)
- (6-2) Alan C. Eckbreth, Effect of Laser-Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics, *Journal of Applied Physics*, Vol. 48, p. 4473-4479 (1974)
- (6-3) Lynn A. Melton, Soot Diagnostics Based on Laser Heating, *Applied Optics*, Vol. 23, p. 2201-2208 (1984)
- (6-4) S. C. Lee, C. L. Tien, Optical constants of soot in hydrocarbon flames, *Symposium International on Combustion*, Vol. 58, No. 1, p. 1159-1166 (1981)
- (6-5) Stefan Will, Stephan Schraml, and Alfred Leipertz, Two-dimensional soot-particle sizing by time-resolved laser-induced incandescence, *Optics Letters*, Vol. 20, No. 22, p. 2342-2344 (1995)

- (6-6) P. Roth, A. V. Filippov, In situ ultrafine particle sizing by a combination of pulsed laser heatup and particle thermal emission, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 27, No. 1, p. 95-104 (1996)
- (6-7) J. G. Carter, R. H. Huebner, R. N. Hamm, R. D. Birkhoff, Optical Properties of Graphite in the Region 1100 to 3000 Å, *Physical Review Journals Archive*, Vol. 137, No. 2A, p. A639-A641 (1964)
- (6-8) C. Allouis, F. Beretta, A. D'Alessio, Sizing soot and micronic carbonaceous particle in spray flames base on time resolved LII, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, No. 4, p. 455-463 (2003)
- (6-9) K. A. Thomson, D. R. Snelling, G. J. Smallwood, F. Liu, Laser induced incandescence measurements of soot volume fraction and effective particle size in a laminar co-annular non-premixed methane/air flame at pressures between 0.5–4.0 MPa, *Applied Physics B*, Vol. 83, No. 3, p. 469-475 (2006)
- (6-10) H. A. Michelsen, F. Liu, B. F. Kock, H. Bladh, A. Boiarciuc, M. Charwath, T. Dreier, R. Hedef, M. Hofmann, J. Reimann, S. Will, P. -E. Bengtsson, H. Bockhorn, F. Foucher, K. -P. Geigle, C. Mounaïm-Rousselle, C. Schulz, R. Stirn, B. Tribalet, R. Suntz, Modeling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models *Applied Physics B*, Vol. 87, No. 3, p. 503-521 (2007)
- (6-11) Robin Devillers, Kevin Thomson, Greg Smallwood, Matthew Johnson, Open path LII diagnostic for the determination of PM emissions from flares. Year 2 report to Natural Resources Canada, National Research Council Canada Technical Report, p. 1-36 (2010)
- (6-12) W. Ketren, P. Vallikul, A. Garo, G. Grehan, Numerical Simulation on Effects of Laser Fluence on Temporal and Time Integrated LII-Process of Soot Particle, *Journal of Sustainable Energy and Environment*, Vol. 1, No. 4, p. 173-179 (2010)
- (6-13) Max Hofmann, Wolfgang G. Bessler, Christof Schulz, Helga Jander, Laser-induced incandescence for soot diagnostics at high pressures, *Applied Optics*, Vol. 42, No. 12, p. 2052-2062 (2003)
- (6-14) H. R. Leider, O. H. Krikorian, D. A. Young, Thermodynamic properties of carbon up to the critical point, *Carbon*, Vol. 11, No. 5, p. 555-563 (1973)

第7章 燃焼室内のPMの生成挙動

本章では、第3～5章で明らかにしてきた排出PMが多く、輝炎が発生する触媒急速暖機運転におけるエンジン燃焼室内のPM生成～排出過程、粒子径および数密度について、第6章で計測原理を説明した手法を用いて評価し、燃焼室内のPM生成挙動についてまとめる。エンジン燃焼室内のPM生成～排出過程の計測はレーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence: LII)、Soot粒子径および数密度の計測は時間分解レーザー誘起赤熱法(Time Resolved Laser Induced Incandescence: TR-LII)を用いた。

7.1. レーザ誘起赤熱法による燃焼室内のSoot粒子の可視化

7.1.1. 実験装置と計測手法

レーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence: LII)によるエンジン燃焼室内のSoot可視化の光学系構成を、図7-1に示す^{(7-1), (7-2), (7-3), (7-4), (7-5)}。エンジンは、5.1.2と同一諸元のガラスシリンダエンジンを用い、搭載するインジェクタも同一のファンスリット噴霧のインジェクタを使用した。レーザー(Quantel製, Brilliant)にはNd-YAGレーザーの第二高調波532nmを用い、シリンドリカルレンズを用いて高さ約90mm、厚さ約0.5mmのシート光を形成し、エンジン排気側よりシリンダボアセンタに照射した。そして、エンジンリア側よりミラーを介して、Sootを撮影するICCDカメラ(浜松ホトニクス製, C7972-51C, シャッター速度40ns)と燃焼光を撮影する高速度ビデオカメラ(Photron製, FASTCAM SA1.1, シャッター速度50 μ s)へと導いた。ICCDカメラの前には、レーザー光を抑制し、短波長域を撮影するため、ノッチフィルタ(中心波長532nm, 半値全幅27nm)とバンドパスフィルタ(中心波長405nm, 半値全幅158nm)を設置した。ピストンは新品を用い、ピストンキャビティのSootを可視化するため、ピストンには、レーザー通過用の溝をリア側に追加工した。供試燃料には、3.1.4に示したものと同様のプレミアムガソリンを用いた。

なお、本計測で用いたレーザーは、発振周波数10Hzのパルス発振であることから、後述する本計測条件(7.1.2. 表7-1)のエンジン回転数1200r/minでは、Soot分布画像は1サイクルで1枚取得できる。このため評価したSoot画像の時系列挙動は、別サイクルで取得した画像を並べたものである。

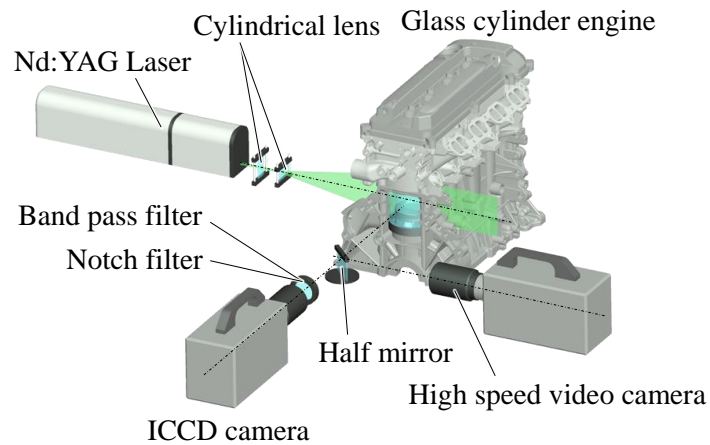


Figure 7-1. Experimental setup of the LII technique

7.1.2. エンジン運転条件

第4章と第5章での評価結果から、触媒急速暖機運転のPM生成に影響を及ぼすと考えられる燃料液膜によるSoot生成への影響を把握するため、表7-1に示すよう燃料噴射タイミングの変更により、燃料液膜形態を図7-2のように変更させた。燃料液膜の計測手法は、5.1.に示した手法を用いた。評価した燃料液膜形態は、主にピストンキャビティ上で燃料液膜を形成しており、最大厚さがCase1が約 $30\mu\text{m}$ で、Case2が約 $15\mu\text{m}$ と異なる。

Table 7-1. Experimental conditions

	Case 1	Case 2
Engine speed	1200 r/min	←
Injection pressure	12 MPa	←
Injection timing / Ratio of fuel injection amount	40 deg.BTDC / 100%	180 deg.BTDC / 50 % 40 deg.BTDC / 50 %
Spark timing	16 deg.ATDC	←
A/F (target)	15.5	←
Oil temperature	25 deg.C	←

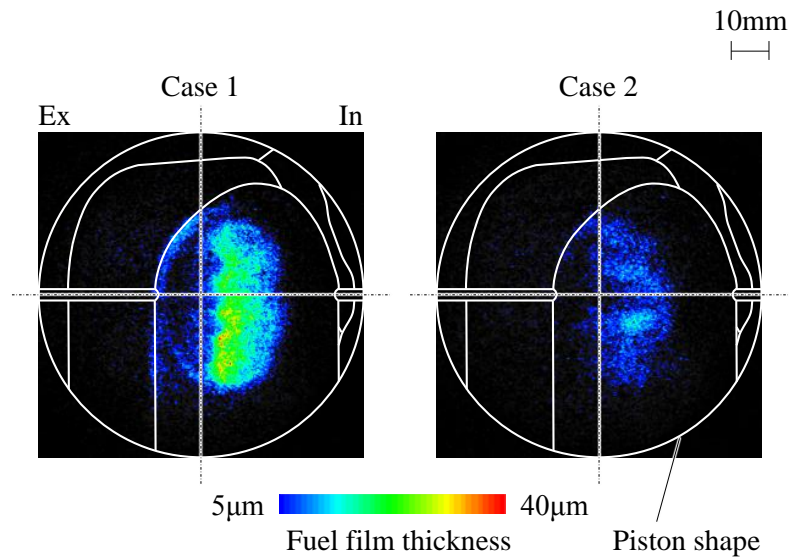


Figure 7-2. Piston fuel film distribution

7.1.3. 触媒急速暖機運転における Soot 生成と排出挙動

実験条件 Case1 と Case2 における、触媒急速暖機運転の燃焼室内 Soot 分布のクランク角での推移を、図 7-3 に示す。画像は、LII 法による放射強度を撮影したものである。ここで、Melton の研究によると、LII 法で計測される Soot 粒子の放射光の最大強度は、Soot の体積濃度、つまり単位体積あたりに Soot 粒子が占める体積割合に概ね比例する⁽⁷⁻⁶⁾。図 7-3 は、強い放射光強度(Soot 体積濃度が高い)を Rich と表記し、弱い放射光強度(Soot 体積濃度が低い)を Lean と表記している。

評価は、モータリング始動後、触媒急速暖機運転を 51 サイクル実施し、所定タイミングで、LII 法による燃焼室内 Soot 分布計測を実施した。なお、7.1.1 で述べたように本計測で用いたレーザは、発振周波数 10Hz のパルス発振であることから、本計測条件のエンジン回転数 1200r/min では、Soot 分布画像は 1 サイクルで 1 枚取得できる。このため評価した Soot 画像の時系列挙動は、別サイクルで取得した画像を並べたものである。撮影タイミングは燃焼行程前半の 60deg.ATDC から排気行程後半の 300deg.ATDC まで変更した。各タイミングの Soot 分布画像は、51 サイクルのアンサンブル平均である。

まず、燃焼室内全域でみると、Case1 の方が Case2 に対して、Soot が多く分布していた。Soot の分布位置は、燃料液膜が存在するピストンキャビティの直上ではなく、排気側ピストン頂面上の空間で多くみられ、特に Case1 で顕著に確認できた。Soot の生成時期についてみると、Case1 では、60deg.ATDC から 240deg.ATDC 付近まで、Soot が増加する傾向がみられた。

このようなSoot生成過程となった理由として、局所過濃混合気によるSoot生成が考えられる。圧縮行程の燃料噴射により、ピストンキャビティへの燃料衝突による飛散や巻き上がる燃料や、燃料液膜の蒸発によって、排気側で過濃混合気を形成していると考えられる。Case1の方がSoot生成が多い理由は、圧縮行程に1回燃料噴射を行うCase1の方が、吸気行程と圧縮行程で分割して燃料噴射を行うCase2に対して、燃料噴霧の巻き上がりや飛散燃料が多く、局所過濃混合気が形成しやすくなったためと考える⁽⁷⁻⁷⁾。

なお、評価した触媒急速暖機運転では生成したSootは大きく拡散することなく、排出することが判った。これより、触媒急速暖機運転では、Sootの再燃焼は期待できず、PM低減には、生成そのものを抑制する必要があると考える。

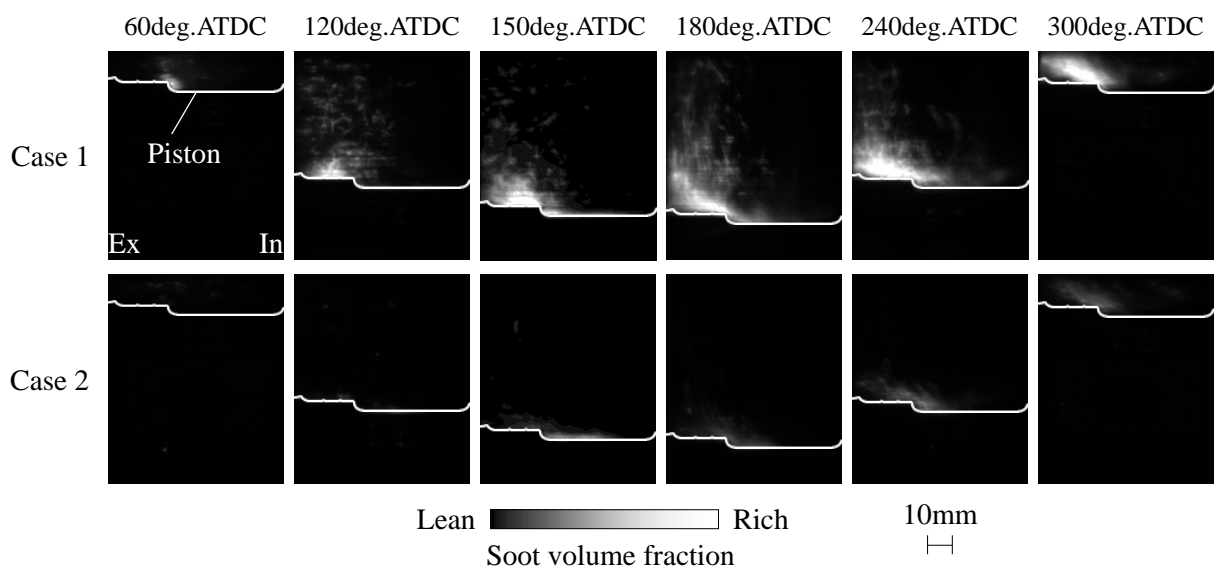


Figure 7-3. In-cylinder soot distribution

7.1.4. サイクル経過によるSoot生成の変化

次に、Soot生成を詳細に把握するため、Soot生成の場所と、クランク角毎やサイクル経過によるSoot生成の変化について解析した。場所は、PMの生成要因である燃焼液膜と空間の過濃混合気について知見を得るため、図7-4に示すよう燃料液膜が形成されるピストンキャビティ周辺と、その他の燃焼室の空間に分割した。そして、図7-5に、Case1とCase2における、ピストンキャビティ周辺とそ

の他空間における、総 Soot 体積濃度のクランク角推移を示す。時間は、前項 7.1.3 で評価した 51 サイクルを 3 分割し、1-17 サイクル、18-34 サイクル、35-51 サイクルに分割した。ここで評価には、Soot 量の指標として、撮影画像における各ピクセルの輝度(Soot 体積濃度に比例)をエリア毎に積分した総 Soot 体積濃度を用いた。なお、算出した総 Soot 体積濃度の最大値(Case1 18-34 サイクル 180deg.ATDC における空間の数値)を 1 とし、無次元化した。

図 7-5 より、燃料液膜が存在するキャビティ内で生成する Soot は少なく、クランク角の変化も少ない。また、燃料液膜の違いによる影響も少なかった。一方、空間から生成する Soot には、クランク角、サイクル経過、燃料液膜による違いがみられた。燃料噴霧がピストンに衝突する Case1 をみると、1-17 サイクルでは、Soot は 150deg.ATDC 付近から増加し始めるが、サイクル経過した 18-34 サイクル、35-51 サイクルでは 90deg.ATDC 付近から Soot が増加しており、サイクル経過により、Soot の増加時期が早まった。そして、Soot の生成量もサイクル経過により増加した。ここで図 7-6 に示す Case1 の 180deg.ATDC における燃焼室内 Soot 分布をみると、排気側の Soot がサイクル経過とともに増加していることが判る。また、ピストンへの燃料噴霧の衝突が少ない Case2 では、サイクル経過による変化は少なく、270deg.ATDC 付近まで緩やかな Soot 増加がみられるが、その量は Case1 に比べて少ない。

このように、空間からの Soot 生成がサイクル経過や燃料液膜状態により変化した理由として、局所過濃混合気の形成が変化したことが考えられる。まずサイクル経過により Soot 生成が増加した理由は、ピストン頂面温度により噴射燃料の衝突状態が変化したためと考える。冷間状態の始動直後に行われる触媒急速暖機運転では、サイクル経過により、ピストン頂面温度が上昇する。ピストン温度上昇により、ピストンに衝突時の燃料噴霧が上方に飛散しやすく、またピストン頂面に付着した燃料が気化し易いため、過濃混合気が形成しやすくなり、Soot 生成が増加したと考えられる。そして、もう一つの燃料液膜状態により Soot 生成が変化した理由は、Case1 と Case2 では、圧縮行程にける燃料噴射量の違いにより、噴霧の巻き上がりや飛散により形成される局所過濃混合気に差があり、より局所過濃混合気が形成しやすい Case1 で Soot 生成に影響が強くあらわれたものとする。

また、燃料噴霧がピストンに衝突し、燃料液膜が形成される直上では、Soot の生成は少ないことが判った。そして、燃料液膜蒸発による Soot 生成への影響が、燃料液膜厚さによらず、少ないことが判った。

以上より、冷間始動時の触媒急速暖機運転における Soot 生成要因は、燃料液膜から直接生成する Soot よりも、燃料噴射により形成する局所過濃混合気から生成する Soot の方が格段に多いと考える。これより Soot 低減には、この局所過濃混合気を形成させないよう、燃料噴霧と空気とのミキシング促進が有効だと考えられる。この実現手法としては、燃料噴霧の貫徹力強化や燃焼室内気流の強

化による流動を利用した手法や、燃料噴射ノズルからの噴出速度を上昇させ噴霧内への周囲空気を多く取り込む手法が考えられる。

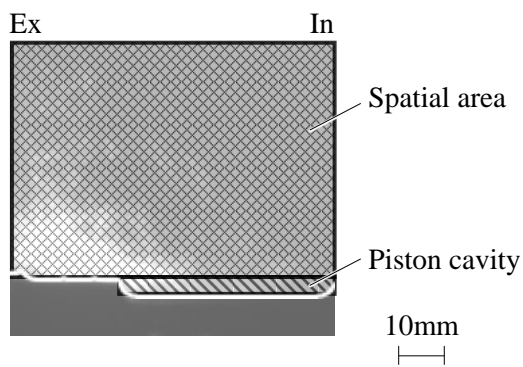


Figure 7-4. Measurement area

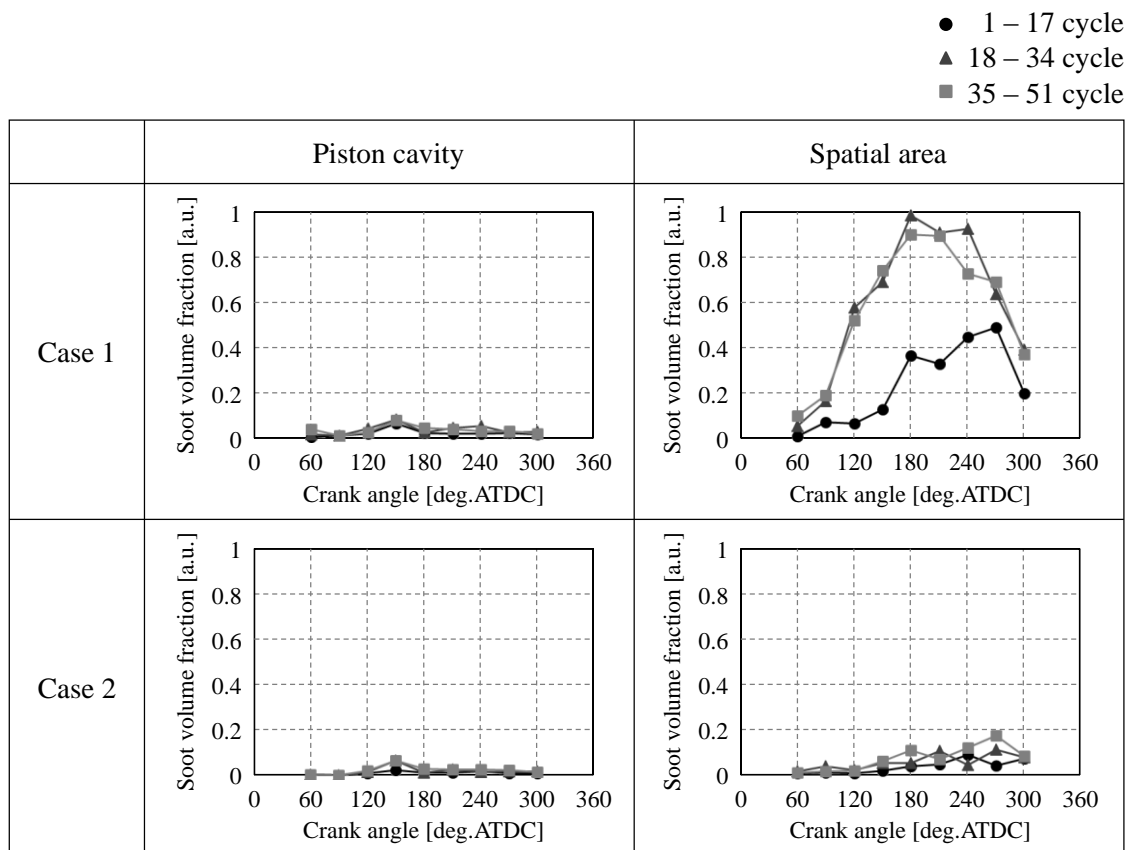


Figure 7-5. Relationship between crank angle and total soot volume fraction

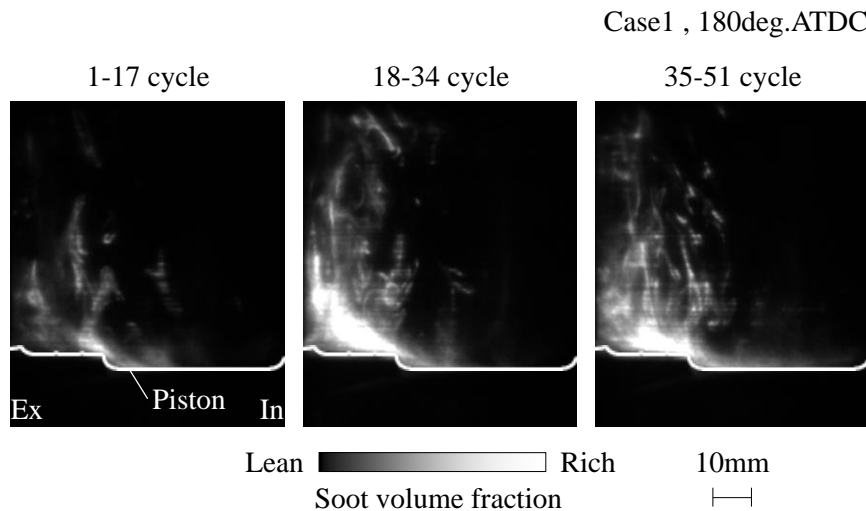


Figure 7-6. Temporal change in soot formation

7.2. 時間分解レーザー誘起赤熱法による燃焼室内の Soot 粒子解析

7.2.1. 実験装置と計測手法

時間分解レーザー誘起赤熱法(Time Resolved Laser Induced Incandescence: TR-LII)の光学系構成を図 7-7 に示す^{(7-8), (7-9), (7-10)}. LII 法との光学系構成の相違点は, Soot を撮影する ICCD カメラを 2 台使用していることである. これは, 2 台の ICCD カメラで時間差をつけて, レーザ照射による Soot の赤熱発光の強度減衰を把握するためである. エンジンは 5.1.2 に示した同諸元のガラスシリンダエンジンであり, 噴霧形状がファンスリットとなる燃料噴射インジェクタを搭載した. TR-LII 法での計測では, 経時のピストン状態を模擬するため, ピストン頂面には擬似的なデポジットとして, 炭素粉を厚さ約 0.5mm でピストン頂面全域に付着させたピストンを用いた. レーザ(Quantel 製, Brilliant)には Nd-YAG レーザの第二高調波 532nm を用い, シリンドリカルレンズを用いて高さ約 90mm, 厚さ約 0.5mm のシート光を形成し, エンジン排気側よりシリンダボア中央に照射した. そして, エンジンリア側よりハーフミラーを介して, Soot を撮影する ICCD カメラ(浜松ホトニクス製, C7972-51C, シャッター速度 40ns)2 台へと導き, 時間差で撮影した. 各 ICCD カメラの前には, レーザ光を抑制し, 短波長域を撮影するため, ノッチフィルタ(中心波長 532nm, 半値全幅 27nm)とバンドパスフィルタ(中心波長 405nm, 半値全幅 158nm)を設置した. なお, ピストンキャビティ内の Soot を可視化するため, ピストンにレーザー通過用の溝とリア側に追加工を施した.

また, 本評価では TR-LII 法での評価に加え, 燃焼の直接観察も行った. この際には, ICCD カメラに代わり, 高速度ビデオカメラ(Photron 製, FASTCAM SA1.1, 撮影速度 20000 フレーム/s)を用いて,

撮影を行った。燃焼観察時には、主にPM生成の指標となる輝炎の挙動を追った。輝炎とは、燃焼により生成したSootの固体放射による赤橙色の発光である。

計測タイミングチャートを、図7-8に示す。レーザ照射開始から40ns後に、1回目の撮影を40nsの期間行い、2回目の撮影をそれと近接するように同じ40ns撮影した。このレーザの照射時期を、燃焼行程から排気行程にかけて変更することで、任意のタイミングにおけるSootの粒子径と数密度の空間分布を計測できる。

なお、TR-LII法での計測においても、LII法と同じパルス発振のレーザを用いており、評価した各Soot画像は、別サイクルで取得した画像である。

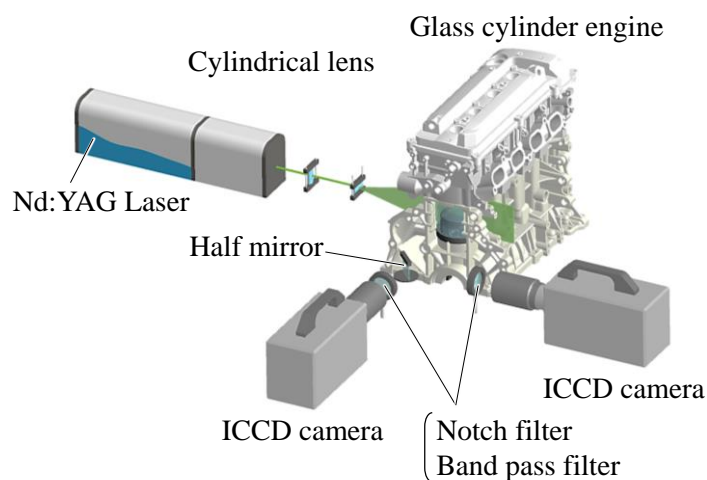


Figure 7-7. Experimental setup of the TR-LII technique

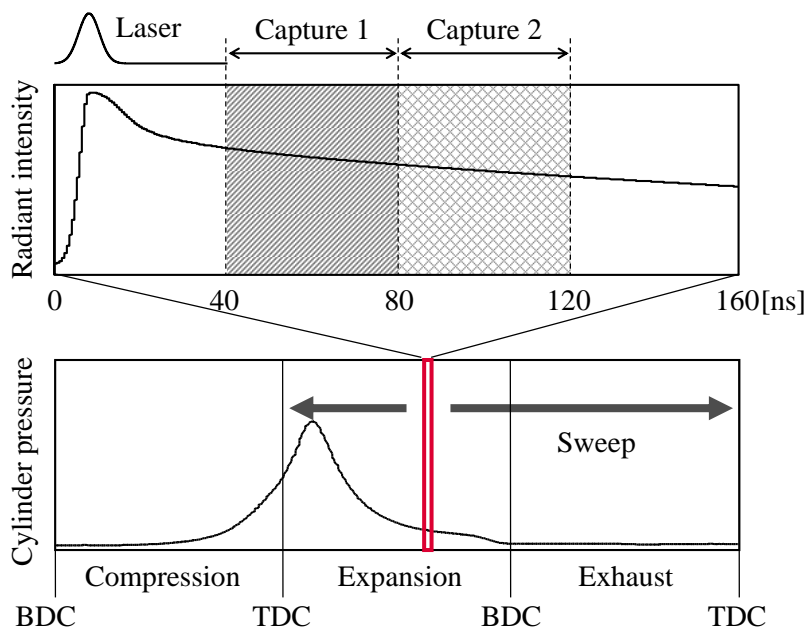


Figure 7-8. Capture timing

7.2.2. エンジン運転条件

評価した運転条件は、モード走行時にPM排出が多い触媒急速暖機運転で、7.1.2で示した表7-1のCase 1で実施した。PM排出が多い触媒急速暖機運転におけるSoot粒子径と数密度の空間分布について、サイクル中のクランクタイミング別の評価を行った。計測タイミングは図7-9に示す4つのタイミングで、熱発生が最大付近の60deg.ATDC、排気バルブが開く前の120deg.ATDC、排気バルブが開いた180deg.ATDC、そして排気行程後半の300deg.ATDCである。図7-10にSoot粒子径と数密度の空間分布の解析例を示す。計測タイミングは、180deg.ATDCである。このようにして各計測タイミングで得られるSoot粒子径と数密度の空間分布を基に解析を行った。

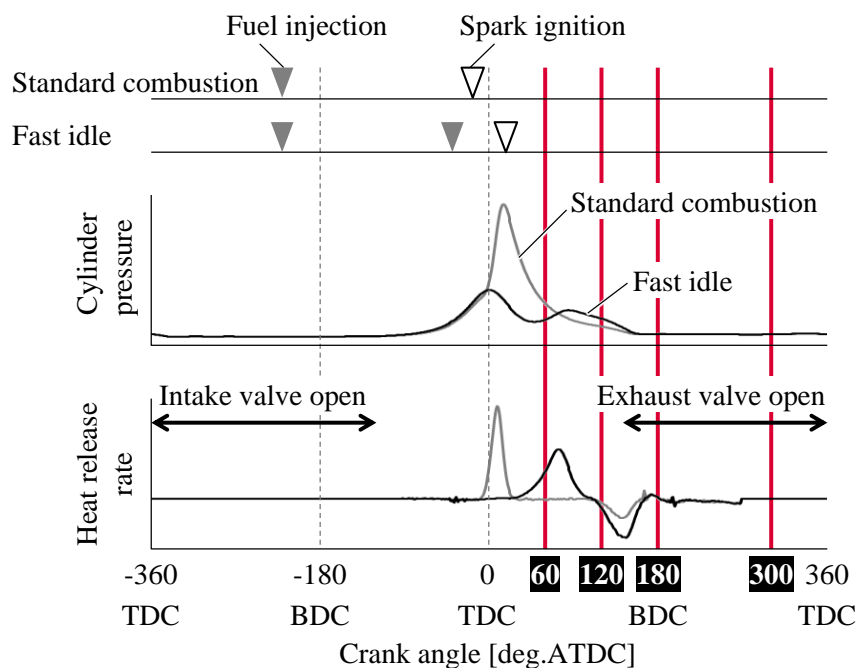


Figure 7-9. Measurement timing

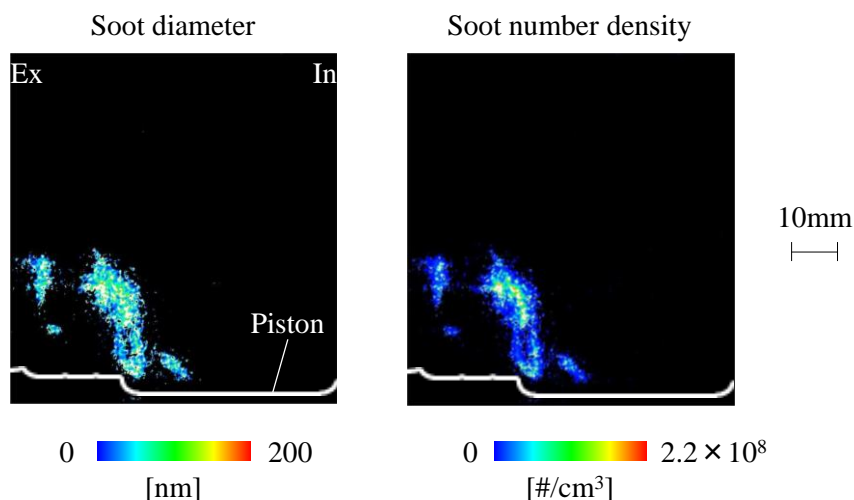


Figure 7-10. Soot diameter and number density by TR-LII (180deg.ATDC)

7.2.3. Soot 粒子径分布の計測結果の検証

本研究で用いた TR-LII 法を応用した計測手法による Soot 粒子数と数密度分布の計測結果の妥当性を検証するため、市販計測器との比較を行った。Soot 粒子径分布の比較を、図 7-11 に示す。市販計測器として PM 粒子径分布計測器 EEPS(Engine Exhaust Particulate Sizer)を用いた。計測位置は、本研究の計測手法では排気行程後半の 300deg.ATDC における燃焼室内での計測、市販計測器 EEPS では排気バルブ下流 10mm における計測とし、完全に同一場所ではないもの、燃焼後に生成した PM について計測した。なお、本研究で用いた TR-LII 法の応用手法ではレーザシート照射による燃焼室内の断面計測であり、市販計測器 EEPS は排ガスの一部サンプリングによる計測であることから、粒子数を直接比較できないため、各計測における粒子径分布の最大値を 1 として相対表記している。エンジン運転条件は、触媒急速暖機運転である。

図 7-11 より、本研究の計測手法による Soot 粒子径分布は、市販計測器 EEPS と概ね一致する結果を示し、本研究の計測手法に対し市販計測器の方がやや大粒子径側に位置する結果となった。この粒子径分布の差の一要因として、Soot を含む燃焼室内の燃焼ガスが排気バルブ通過により凝縮し、Soot が凝集することが推測され、燃焼室内で計測する本研究の計測手法に対し、排気バルブ通過直後で計測する市販器 EEPS での計測の方が、計測粒子径が大きくなったと考える。

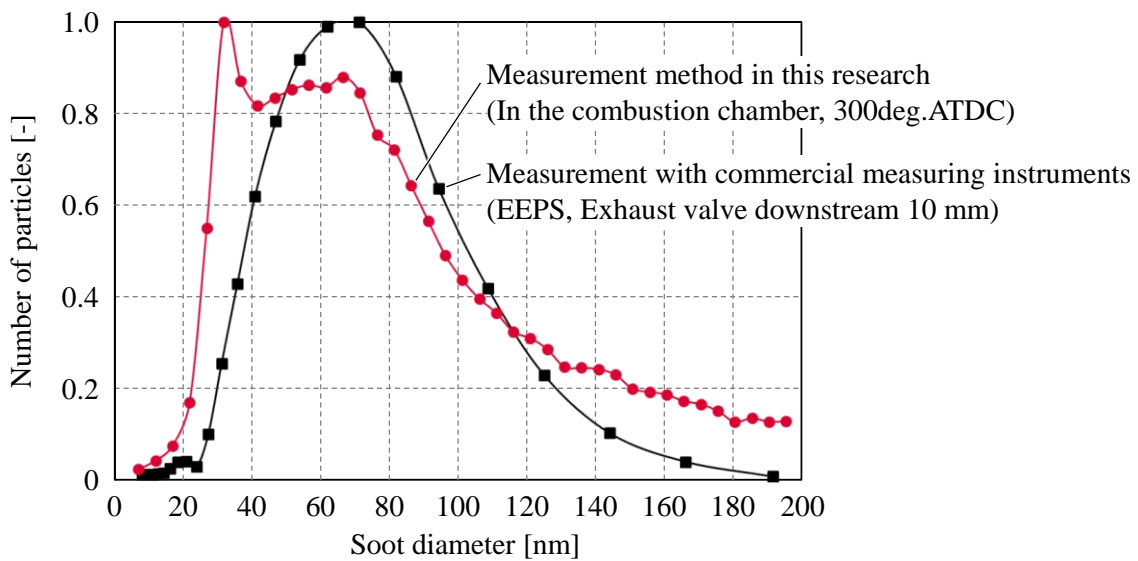


Figure 7-11. Comparison of PM particle size distribution

7.2.4. 輝炎と Soot 生成の時間推移

輝炎と Soot の発生時期と場所の関係を把握するため、図 7-12 に、各計測タイミングにおける直接撮影による燃焼火炎と TR-LII 法による Soot 数密度の分布を示す。燃焼火炎撮影と Soot の空間分布計測はそれぞれ別サイクルで実施し、燃焼による輝炎と Soot 発生位置が同様なサイクルをピックアップして表記した。120deg.ATDC までは、空間からの輝炎発生が確認され、空間で数密度がやや高くなっている。しかし、120deg.ATDC から 180deg.ATDC にかけて様子が一変し、180deg.ATDC ではピストンリップ付近の空間から輝炎が発生し、Soot 数密度が高くなり、120deg.ATDC よりも高くなった。その後、300deg.ATDC においても、ピストンリップ付近の空間からの輝炎発生はみられ、Soot 数密度も高く維持した。

図 7-13 には撮影した燃焼室内のレーザー照射エリア全域における総 Soot 粒子数の時間推移として、各計測タイミングの Soot 数密度分布の積算値(40 サイクル平均)を示す。数密度から数への換算に必要な体積情報は、1 ピクセルの大きさ(面積)とレーザーシート光の厚みから算出した。レーザーシート光の厚みは、光学レイアウトから幾何学的に求めており、レーザー出口部の照射径とシート光にするために使用したシリンダリカルレンズ仕様をもとに算出した。粒子数は、各計測タイミングとも 40 サイクルの平均値を示している。図 7-13 で示すように、180deg.ATDC での増加が顕著であることが判る。このタイミングはピストンリップ付近からの輝炎発生タイミングであり、この場所が触媒急速暖機運転におけ

る Soot 生成の主要発生源と考えられる. そして 180deg.ATDC にて Soot 粒子数は最大となり, 300deg.ATDC にかけて減少する傾向がみられる. これは 180deg.ATDC 前での排気バルブ開弁により, 生成した Soot が排気ポートに排出され, 燃焼室内の Soot が減少したためと考えられる.

なお, 7.1 節での LII 法での Soot 可視化と比較すると, TR-LII 法での Soot 増加の方がやや急峻であった. これは, 排気側の空間に存在する過濃混合気の差による影響と推定する. 評価に用いたピストン頂面のデポジット有無により圧縮行程後半の燃料噴霧のピストン衝突挙動が異なることが考えられる. TR-LII 法での評価では擬似的なデポジットをピストン頂面に付着させており, LII 法での評価では新品のピストンを用いた. デポジットは内部に微細な空隙を持ち, また表面粗さも増加している. このため, デポジット有りのピストンで評価した TR-LII 法の評価の方が, 圧縮行程の噴射燃料が捕捉されやすく, 衝突による飛散燃料や巻き上がりが少なくなり, 空間の過濃混合気が低減していると考えられる. そのため, TR-LII 法では点火から 120deg.ATDC の空間に火炎伝ばする期間での Soot 生成が少なく, 180deg.ATDC でピストン頂面の燃料液膜からの Soot 生成が増加したものと考える. この結果からも, ウォールガイド式の触媒急速暖機運転における燃焼のような, ピストン頂面に燃料衝突を伴う燃焼形態では, ピストン頂面のデポジット形成状態も PM 生成に大きな影響を及ぼすことを示唆していると考えられる.

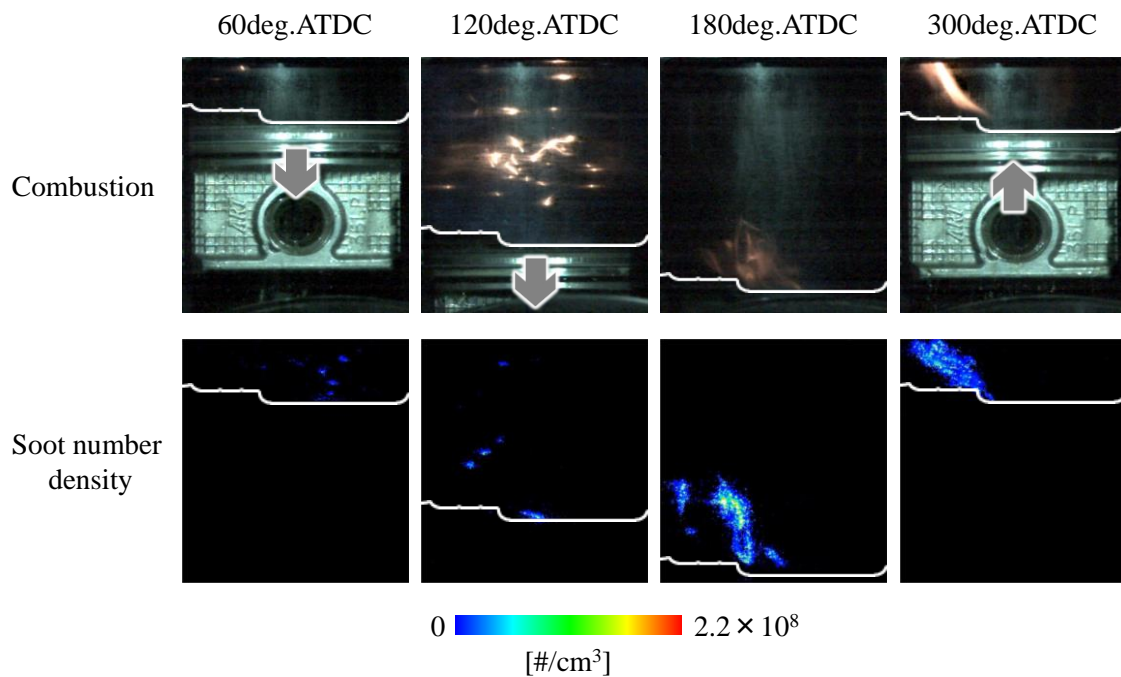


Figure 7-12. Combustion flame and soot number density distribution

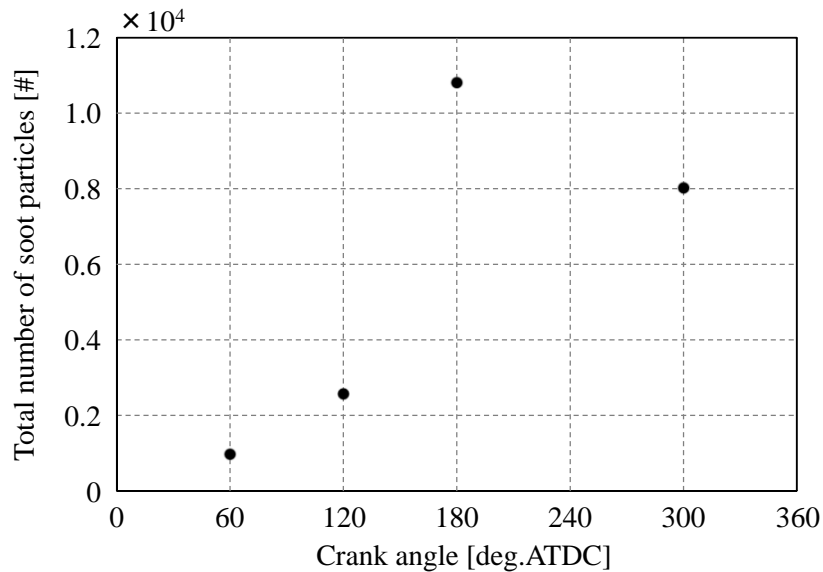


Figure 7-13. Total number of soot particles

7.2.5. Soot 粒子径のサイクル中の時間推移

次に、Soot粒子径分布の推移を図7-14に示す。Sootが多量発生する前の120deg.ATDCまでは、およそ30nmに最頻値を持つ粒子径分布であるが、Sootが多量発生した180deg.ATDCでは、60nm付近に最頻値を持つ分布へと変わる。この180deg.ATDCでの粒子径分布は、排気行程後半の300deg.ATDCまで大きく変わらない。

さらに、Soot粒子径と数密度の関係について詳細把握するため、図7-15にSoot粒子径と数密度のピクセル度数分布マップ(40サイクル平均)を示す。空間から輝炎が発生する60deg.ATDCと120deg.ATDCでは、Soot粒子径が小さく、数密度が低いところに分布している。そして、ピストンリップ付近から輝炎が発生する180deg.ATDCでは、Soot粒子径は大径側に、数密度は高い側に拡大し、数密度は2倍程度に高い領域まで拡大した。そして、180deg.ATDCから300deg.ATDCにかけて、数密度がわずかではあるが小さくなる傾向がみられた。この180deg.ATDCから300deg.ATDCでみられた数密度のわずかな減少は、生成したSootの拡散によるものと考えられるが、その程度は小さい。

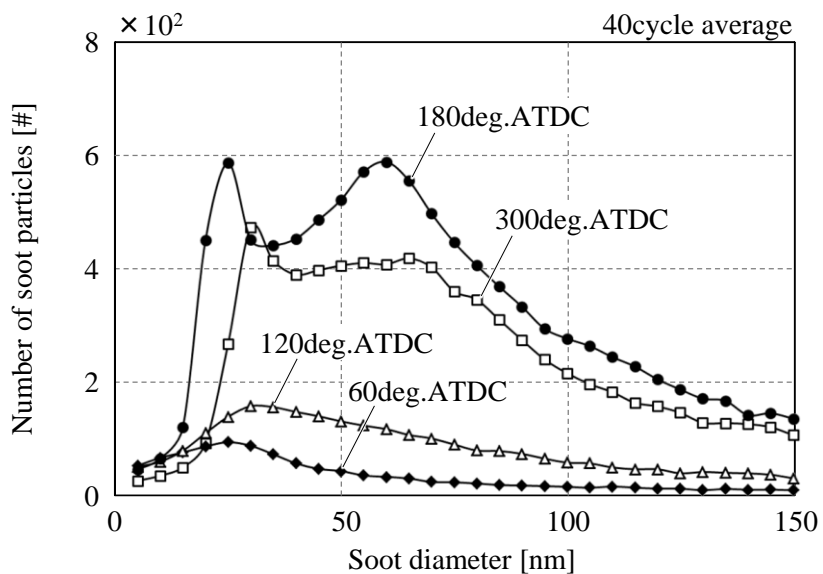


Figure 7-14. Soot particle size distributions

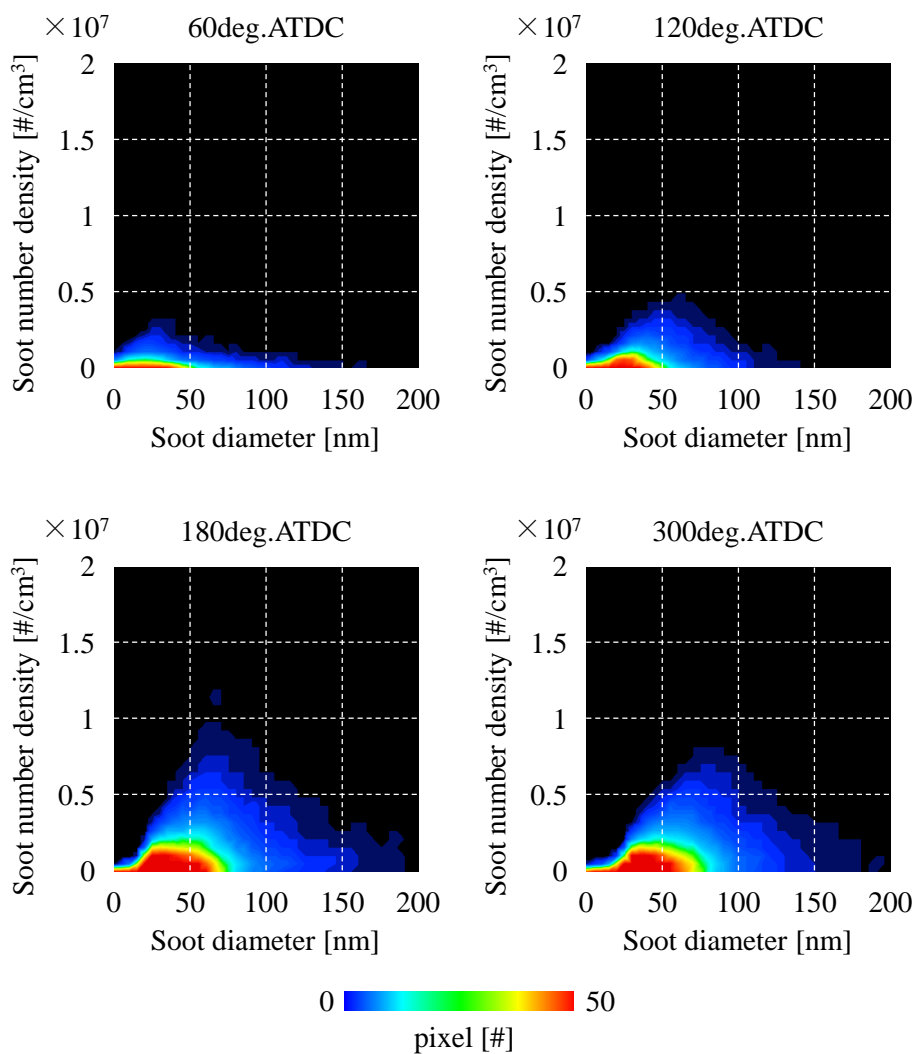


Figure 7-15. Relationship between soot diameter and number density

7.2.6. Soot 粒子径分布のサイクル変動

次に、Soot粒子径分布のサイクル変動について調査した。図7-16は、4つの計測タイミングにおける粒子径分布を並べたもので、各計測タイミングとも、40サイクル重ね書きしている。特にSootが多量発生した180deg.ATDCからのサイクル変動が大きい。図7-17には、各計測タイミングにおける総Soot粒子数の変動係数(標準偏差を算術平均値で除した値。相対的なばらつきを表す指標、Coefficient of Variation : COV)を示しているが、いずれの計測タイミングにおいても1以上となっており、サイクル変動が大きい。図7-18には、180deg.ATDCにおけるSoot数密度分布として、平均的なサイクルとSoot多量発生サイクルの代表サイクルを示す。平均的なサイクルに対し、多量発生したサイクルでは、ピストンリップ付近に多量のSootが確認できる。

このサイクル変動要因は、局所過濃混合気のサイクル変動と推測する。局所過濃混合気は、燃料噴射が起因するものと燃焼室内の気流が起因するものがある。燃料噴射起因は、ピストンへの燃料衝突がばらつき、その後の噴霧の巻き上がりや飛散、ピストン燃料液膜の蒸発量変動するものである。一方、気流起因は、タンブル流やスワール流、そして乱れのサイクル変動により、ピストンに衝突した燃料噴霧の巻き上がりや飛散、ピストン頂面に形成する燃料液膜の蒸発が変化することが考えられる。このうち、燃料噴射起因による影響を把握するため、ピストン頂面の燃料液膜の厚さと量の変動について、次項7.2.7で評価した。

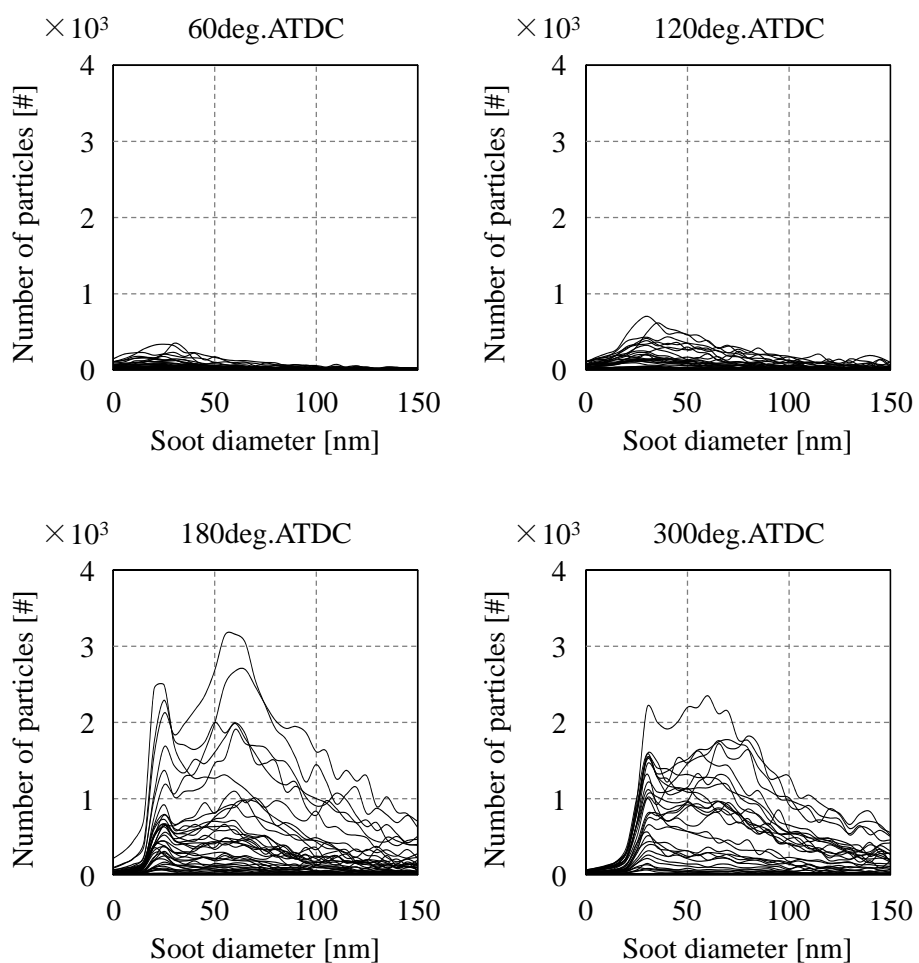


Figure 7-16. Cycle variation of particle size distributions (40 cycle)

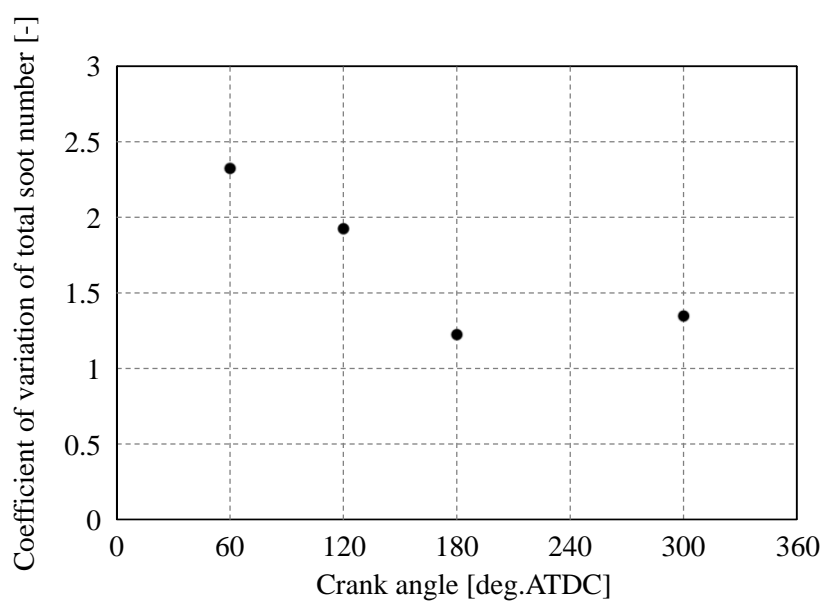


Figure 7-17. Coefficient of variation of total soot number

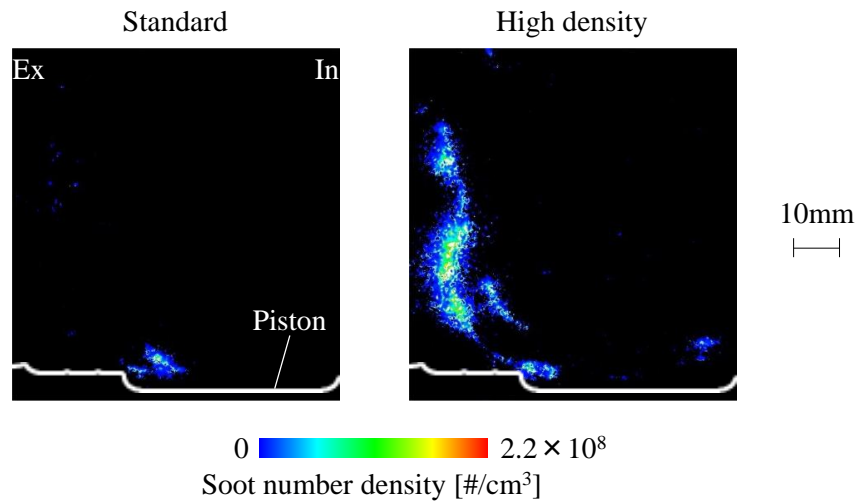


Figure 7-18. Soot number density distribution

7.2.7. ピストン頂面に形成する燃料液膜のサイクル間バラツキ

7.2.6 に記した Soot 発生の推定要因のうち燃料噴射起因による影響として、ピストンへの噴霧衝突バラツキを確認するため、ピストン頂面に形成する燃料液膜のサイクル間バラツキを評価した。燃料液膜の計測手法は、5 章 5.1 に示した手法を用いた。得られた燃料液膜の厚さ分布より、ピストン全域における最大燃料厚さと燃料量を算出した結果を、図 7-19 に示す。平均値は、厚さ $34.0 \mu m$ 、量 $14.8 mg$ であった。各変動係数 COV 値は、厚さ 0.063、量 0.081 であることから、燃料液膜のバラツキは小さいと考えられる。また、図 7-17 に示した総 Soot 粒子数の COV 値の 1 以上に比べて小さい。

この結果から、Soot のサイクル変動要因は、燃料噴射起因の影響は少なく、もう一つの Soot 発生要因である気流起因による局所過濃混合気の変動が主要因と考える。本研究で使用したサイド噴射のウォールガイド方式では、圧縮行程で噴射した燃料は、ピストン衝突後、ピストンリップを介し点火プラグまで移送される間で空気とミキシングされる。圧縮上死点近傍では燃焼室の空間形状が大きく変わることから、タンブルやスワールの流速が低下し、それに伴い乱れが大きくなる。これより、ピストン衝突後の噴霧の巻き上がりや飛散した燃料の挙動や、空気とのミキシングがサイクル間で変動し、Soot 発生のサイクル変動につながったと考える。サイクル変動による Soot 増加を抑制するには、気流の変動によらず、燃料噴霧の特性で過濃混合気を低減するような燃料噴霧の性能向上が重要であると考える。

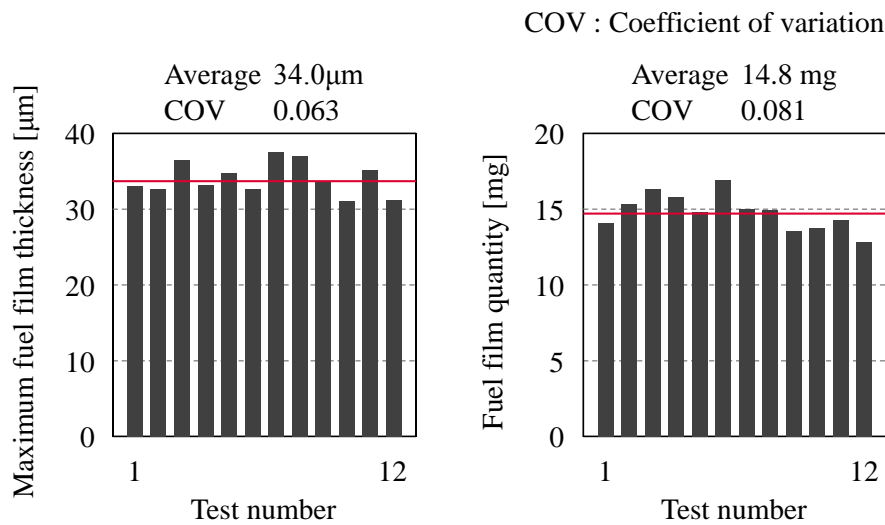


Figure 7-19. Fuel film thickness and quantity

7.3. 触媒急速暖機運転における燃焼室内のPM生成

本章では、レーザ照射による Soot 粒子の放射強度を利用し Soot 分布を可視化する LII 法、そして Soot 粒子径と数密度の空間分布を計測する TR-LII 法を、直接噴射式ガソリンエンジンの燃焼室内に適用した。加えて、従来研究では解析例が少ない燃焼室内の Soot の数について、TR-LII 法を応用し、解析を行った。これら計測手法を用いて、テストサイクル走行時の排気 PM が多い触媒急速暖機運転での燃焼室内に生成する Soot を解析し、以下の知見を得た。

点火後～120deg.ATDC までは、空間に輝炎発生がみられるが、Soot 発生は少ない。しかし、180deg.ATDC になると、ピストンリップ付近から輝炎が発生し、そこから Soot が多量発生した。そのとき Soot の生成場所は、燃料液膜の直上ではなく、排気側の空間で多くみられる。

Soot 粒子径は、空間で Soot が発生する前の 120deg.ATDC までは、およそ 30nm に最頻値を持つ粒子径分布である。その後、ピストンリップ付近で多量発生する 180deg.ATDC 以降は、60nm 付近に最頻値を持つ分布へと変わる。

圧縮行程における燃料噴射量が多く燃料液膜が厚い運転条件の方が、燃焼室内の Soot 生成が多く、そしてサイクル経過により、排気側空間からの Soot が増加する。

Soot のサイクル間ばらつきは、ピストン頂面に形成する燃料液膜の厚さや量のバラツキより大きい。また、Soot が多量発生するサイクルでは、ピストンリップ付近での Soot 生成が多い。

これより、触媒急速暖機運転における PM 低減に向けては、燃料液膜と過濃混合気の低減が必要である。このうち、Soot 生成が多くみられた過濃混合気は、圧縮行程の噴射燃料がピストン頂面に衝

突し、飛散や巻き上がりにより形成されると考えられる。そのため、過濃混合気起因によるPM低減には、燃料噴霧の性能向上が必要であり、噴射開始から点火までの期間にいかに関空気を噴霧内に取り込み、燃料と空気をミキシングするかが重要と考える。

参考文献

- (7-1) 小酒英範, 西垣隆弘, 神本武征, 原田伸一, レーザ誘起赤熱・散乱光法による非定常噴霧火炎内の Soot 生成と酸化に関する研究, 第 12 回内燃機関シンポジウム講演論文集, p.61-66 (1995)
- (7-2) 朝井豪, 倉田和郎, 横山哲也, 千田二郎, 藤本元, 直噴ディーゼル機関におけるレーザ誘起散乱法・レーザ誘起赤熱法を用いた Soot 挙動の解明, 自動車技術会論文集, Vol. 28, No. 3, p. 29-34 (1997)
- (7-3) 稲垣和久, 三浦晋平, 中北清己, 渡部哲, LII による Soot 濃度定量計測法の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 63, No. 615, p. 316-323 (1997)
- (7-4) 広安博文, ディーゼルエンジンの Soot 生成と再燃焼機構, ディーゼルフォーラム 2001, No.467, p. 13-22 (2001)
- (7-5) 相澤哲哉, 小酒英範, 松井幸雄, レーザ誘起蛍光・赤熱法による非定常噴霧火炎内 Soot 生成過程の 2 次元可視化, 日本機械学会論文集, Vol. 69, No. 680, p. 229-235 (2002)
- (7-6) Lynn A. Melton, Soot Diagnostics Based on Laser Heating, Applied Optics, Vol.23, p.2201-2208 (1984)
- (7-7) 高橋幸宏, 中瀬善博, 佐藤孝明, 久保田正人, 噴射条件が壁面衝突後の液膜挙動に及ぼす影響, 第 13 回微粒化シンポジウム講演論文集, p.225-231 (2004)
- (7-8) S. Schraml, S. Will, A. Leipertz, Simultaneous Measurement of Soot Mass Concentration and Primary Particle Size in the Exhaust of a DI Diesel Engine by Time-Resolved Laser-Induced Incandescence (TIRE-LII), SAE Technical Paper 1999-01-0146 (1999)
- (7-9) 千田二郎, 伊藤貴之, 植田真人, Time-Resolved LII によるディーゼル火炎内部の Soot 粒子計測, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No.01-04, p.69-75 (2004)
- (7-10) 伊藤貴之, 非定常噴霧燃焼場における微粒子生成機構の解明, 同志社大学 博士論文 (2004)

第 8 章 燃料の高噴射圧化による噴霧特性の変化

これまでに直接噴射式ガソリンエンジンの PM 低減に向けて、実エンジン焼室内における燃料噴霧、燃焼、PM 生成の挙動を可視化解析した。PM の可視化は、PM の主な構成成分である Soot を可視化するレーザ誘起赤熱法をエンジン燃焼室内に適用し解析を行った。その結果、PM 排出が多い触媒急速暖機運転の Soot の生成位置は、噴射燃料がピストン衝突により形成される燃料液膜の直上、およびピストンへの衝突による噴射燃料の飛散や巻き上がりが起因と思われる燃焼室空間であることを明らかにした。この結果より PM 生成要因は、燃料液膜と過濃混合気であり、PM 低減には燃料液膜の低減と、過濃混合気の低減が必要であることを示唆した。

PM 低減に向けた考えを図 8-1 に示す。燃料液膜の低減には、ピストン壁面に燃料噴霧を衝突させない、もしくは衝突して燃料液膜を形成しても早期に気化させることが挙げられる。そして、過濃混合気の低減には、空気との混合を促進することや、液滴燃料の気化を促進させることが挙げられる。これらを実現する手法として、例えば燃料の加熱による液滴燃料の気化促進、吸入空気の流動強化による空気と燃料の混合促進などがあるが、本研究ではこれまでの評価解析結果から、燃料噴霧の質を向上する手法として、燃料の高噴射圧化に着目した。燃料の高噴射圧化は、上述した PM 生成要因である燃料液膜と過濃混合気の低減の両方に対応できる。ここで、燃料の高噴射圧化による期待効果の模式図を図 8-2 に示す。燃料の高噴射圧化により、ノズルからの噴出速度が増加するため、空気とのせん断力が増加し、噴射燃料が微粒化し、気化性が向上する。微粒化により燃料液滴の運動量が小さくなり、周囲空気との追従性が向上するため、壁面に衝突しにくく、燃料液膜の形成が少なくなる。また、せん断力増加により、燃料噴霧への空気導入が増加することで、燃料噴霧内に取り込まれる空気が増加し、空気と燃料の混合促進が期待できる^{(8-1), (8-2)}。特に、触媒急速暖機運転のような噴射から点火までの時間が短い条件においては、燃料噴霧への空気導入を増加させることは早期に空気との混合を促すことができるため、局所過濃混合気の低減に有効だと考える。

以上より、本章では、PM 低減の一策として、燃料の高噴射圧化に着目し、PM 低減に寄与する燃料噴霧特性として、噴霧粒子径と噴霧への空気導入について評価した。

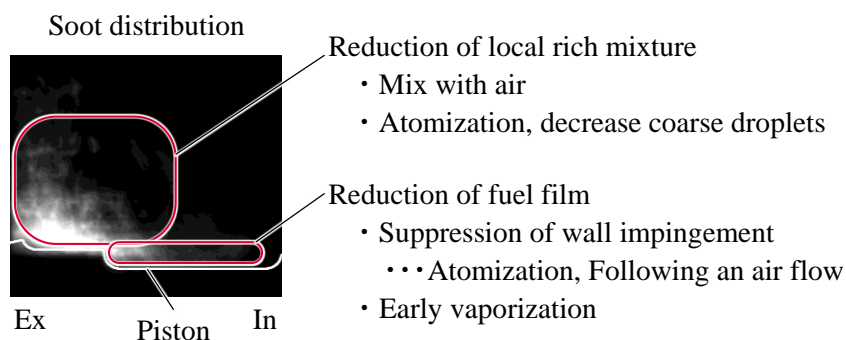


Figure 8-1. Toward PM Reduction of fast idle operation

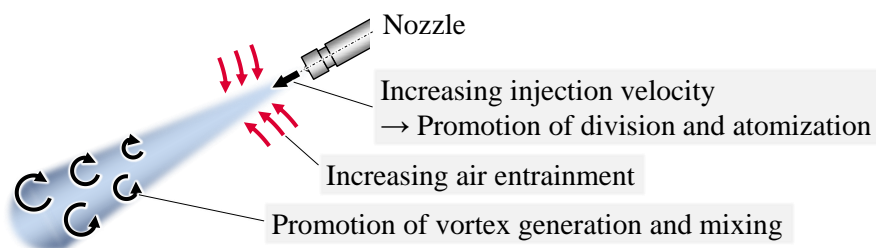


Figure 8-2. Expectation of high fuel injection pressure

8.1. 評価ノズル

8.1.1. 評価ノズル仕様

評価ノズルは、図 8-3、表 8-1 に示す仕様のノズルを用いた。各ノズルは、燃料噴射圧力 $p_{inj} = 20\text{MPa}$, 50MPa , 80MPa で最大噴射率が同等となるよう、スリット厚み t_s を高噴射圧ほど薄くしている。インジェクタは噴射制御アクチュエータにピエゾスタックを用いた研究用の試作品であり、電圧を印加することによりピエゾ素子の変形する逆電圧効果を利用し、ニードルを開閉し、噴射を行う駆動方式である。ノズルには、噴霧形状がファンスリット状となるよう矩形噴孔を持つスリットノズルを用いた (8-3), (8-4), (8-5), (8-6)。各ノズルの噴射率を図 8-4 に示す。噴射率は Bosch 長管法で計測し、噴射による圧力変化から噴射率を算出した。

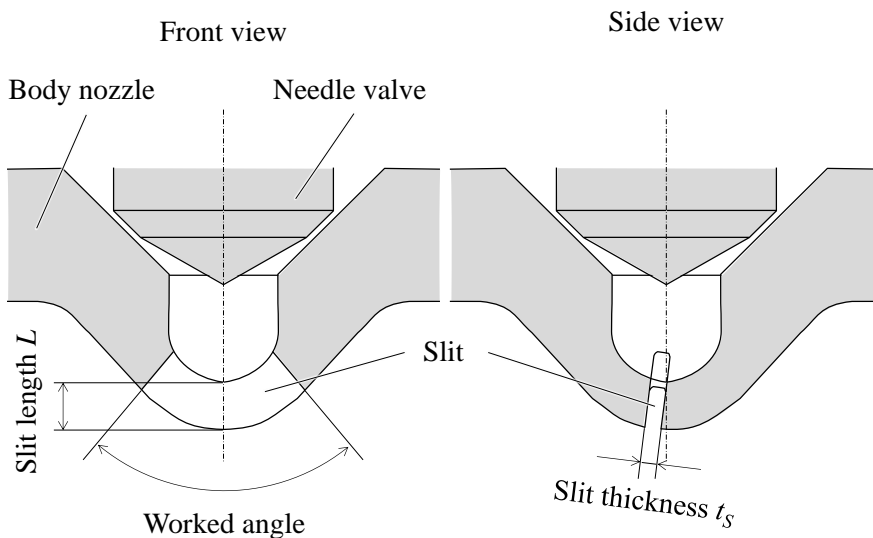


Figure 8-3. Nozzle geometry (slit type)

Table 8-1. Nozzle specifications (slit type)

Nozzle	A	B	C
Actuator	Piezoelectric element		
Slit number	1		
Worked angle	91 deg.		
Slit length L	0.3 mm		
Slit thickness t_s	0.21 mm	0.13 mm	0.10 mm
L/t_s	1.4	2.3	3.0

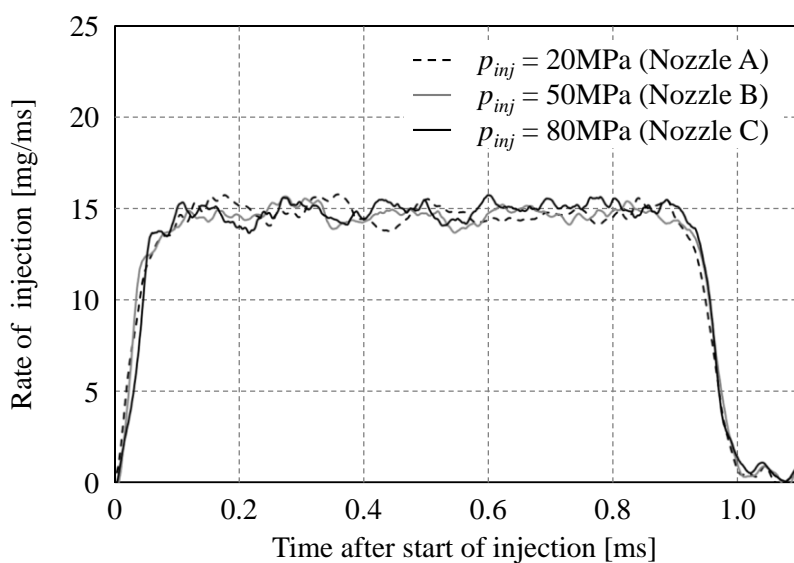


Figure 8-4. Rate of injection profiles

8.1.2. 噴霧形状と噴霧先端到達距離

噴霧形状を評価した燃料噴射条件を表 8-2 に示す。燃料噴射量はエンジン運転の軽～中負荷域に相当する 13.8mg に設定し、燃料には n-ヘプタンを用いた。噴霧画像を図 8-5 に示す。噴霧画像は 5 ショットの平均画像で、撮影タイミングは噴射開始後 $t = 0.7\text{ms}$ である。燃料噴射開始後の時間 t を噴射期間 t_{inj} で除した無次元化した指標 t/t_{inj} は、0.71 である。噴霧画像をもとに算出した噴霧先端到達距離の時間変化を図 8-6 に示す。燃料噴射開始直後の噴霧先端到達距離の変化は高噴射圧ほど大きく、時間が経つにつれ噴霧先端到達距離の差は小さくなる傾向がみられた。評価に用いた 3 諸元のノズルは、燃料噴射圧力が違うものの最大噴射率を揃えており、高噴射圧用ノズルほどスリット厚さを薄くし開口面積を小さくしている。ノズル出口における噴射速度を、流量係数を 1 と仮定し、噴射率と噴孔の開口断面積から算出すると、燃料噴射圧 20MPa ノズル 92m/s、燃料噴射圧 50MPa ノズル 158m/s、燃料噴射圧 80MPa ノズル 202m/s となり、高噴射圧用ノズルほどノズル出口の噴射速度が速く、燃料噴射開始直後の噴霧が伸びたものとする。また、時間とともに燃料噴射圧力による噴霧先端到達距離の差が小さくなったのは、微粒化過程における噴霧液滴の大きさが影響していると推定しており、スリット厚みが薄い高噴射圧用ノズルほど、ノズル出口での噴出速度が速く、微粒化が向上して、微細な液滴群へと分裂し、その後周囲気体の抗力によって飛行速度が減衰し易いためと考えられる。そこで次節 8.2 に噴霧粒子径の評価結果を示す。

Table 8-2. Experimental conditions

Nozzle		A	B	C
Injection pressure	p_{inj}	20 MPa	50 MPa	80 MPa
Test fuel		n-heptane		
Injection quantity	q_{inj}	13.8 mg		
Fuel injection duration	t_{inj}	0.98 ms		
Ambient gas		Air		
Ambient temperature	T_a	298 K		
Ambient pressure	p_a	0.1 MPa		

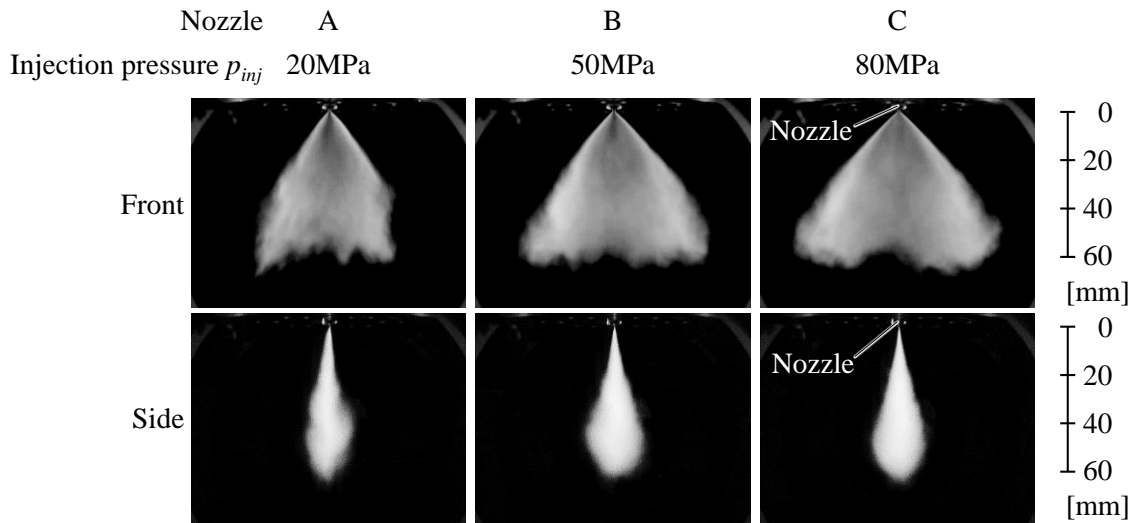


Figure 8-5. Spray images (t/t_{inj} 0.71)

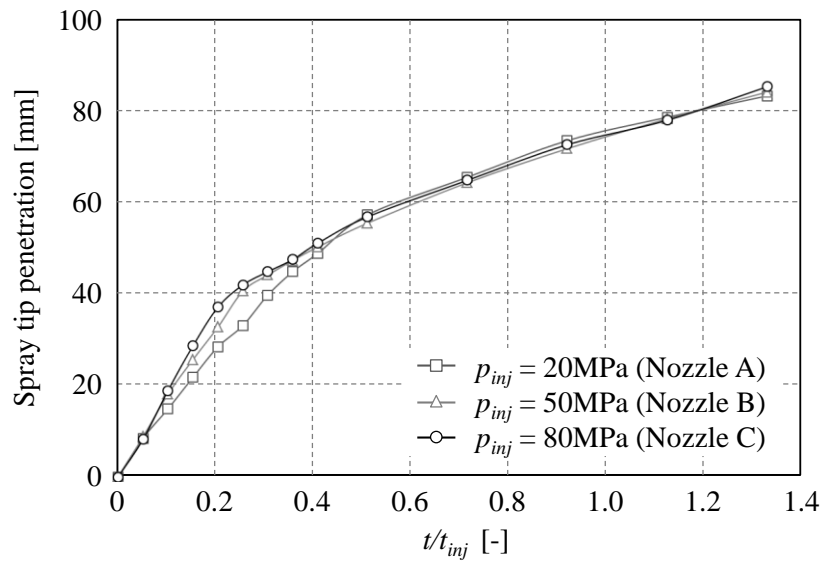


Figure 8-6. Spray tip penetration

8.2. 噴霧粒子径の計測

8.2.1. 噴霧粒子径の計測方法

噴霧粒子径の計測には影写真法を用いた^{(8-7), (8-8)}。影写真法は、噴霧に光を背面より照射し、噴霧の影を撮影し、画像処理により粒子径を計測する手法である。影写真法の構成を図 8-7 に示す。光源には Nd-YAG パルスレーザー(Spectra Physics 製, Quanta Ray PIV200)の第二高調波(波長 532nm)を用い、レンズで拡大させた後、波長変換素子を通させ、燃料噴霧に照射した。撮影はその下流側で行い、被写界深度の浅い(7 μm)対物レンズ(ミツトヨ製, M Plan Apo 10x)介して、CCD カ

メラ(SONY 製, XCL-5000, 2456×2058 画素)で撮影した。ここで波長変換素子の光学特性を図 8-8 に示す。波長変換素子の役割は、レーザ光の単一波長を広帯域の波長に変換し、撮影画像のスペックルノイズを抑制することである。レーザ光と波長変換素子の組み合わせにより、高強度かつ広波長域の短パルス光となり、直接噴射式ガソリンエンジン用インジェクタのような高数密度の噴霧における噴霧粒子を撮影することができる。図 8-9 に撮影例を示す。本研究における噴霧撮影範囲は、ノズル先端下方 50mm の噴霧中心で、撮影画角は 0.84mm×0.70mm(1 画素=0.34 μm×0.34 μm) である。燃料には n-ヘプタンを用いた。

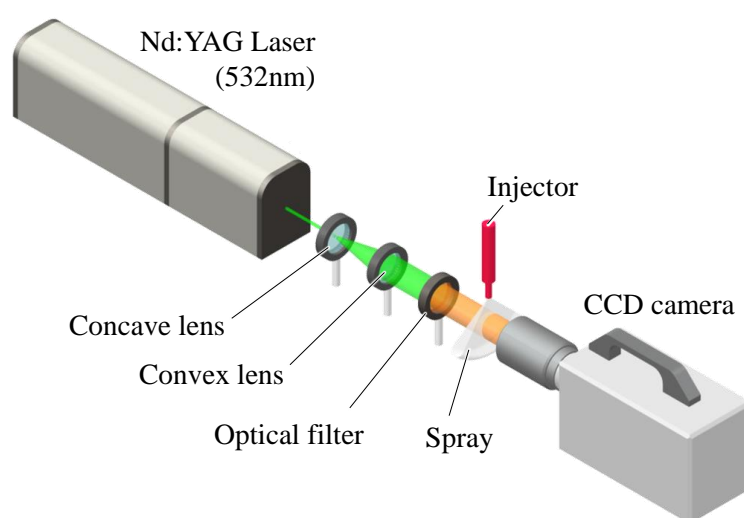


Figure 8-7. Experimental apparatus for measuring droplet diameter

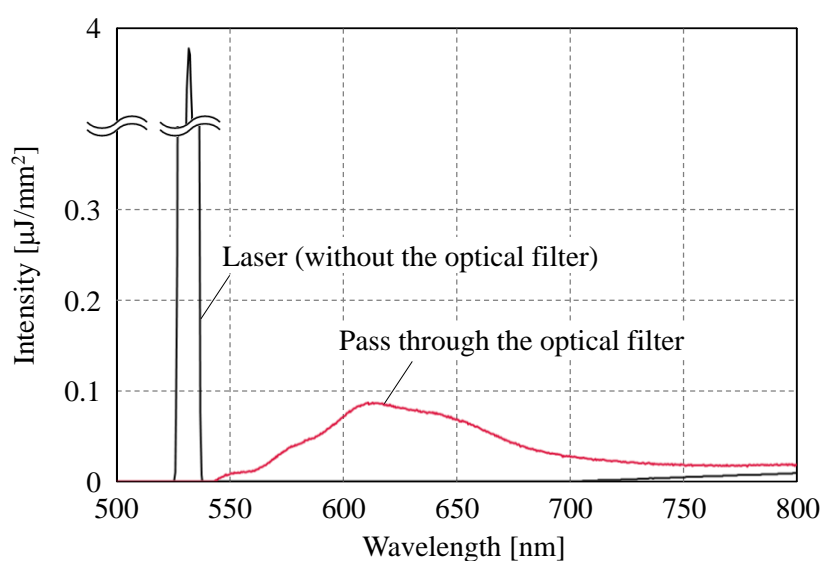


Figure 8-8. Incident light spectrum

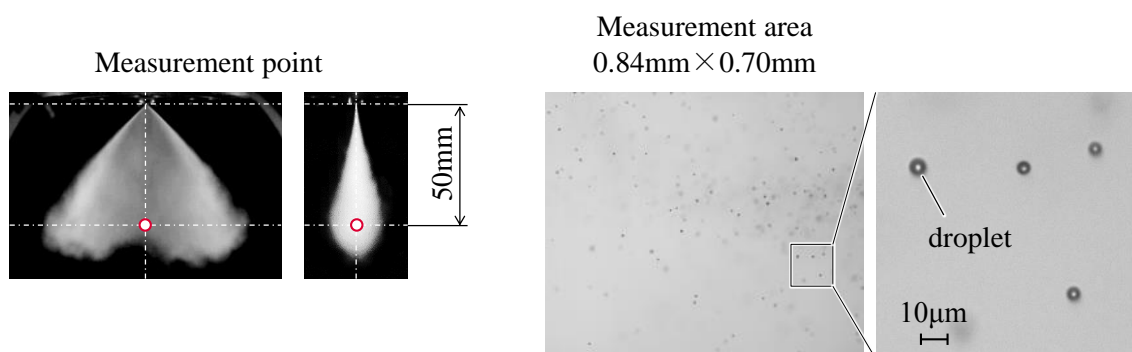


Figure 8-9. Fuel droplet measured by shadowgraph method

8.2.2. 噴射圧力による噴霧粒子径の変化

噴霧粒子径として、各ノズルの所定噴射圧におけるザウター平均粒子径(Sauter Mean Diameter, 以下 SMD)と体積頻度 90%到達時の体積平均粒子径 Dv_{90} を図 8-10 に示す. SMD は液滴の体積の総和と表面積の総和の比であり、体面積平均粒子径と呼ばれる. また、 Dv_{90} は計測した液滴の総体積に対し、90%に達するときの粒子径を表したものであり、体積平均粒子径と呼ばれ、粗大液滴の存在を表す指標として用いた. 個々の液滴粒子径は球体と仮定し算出し、SMD や Dv_{90} を求めた.

実験条件は、表 8-2 に示した条件と同一である. 計測時期は、噴射開始後 0.7ms 後($t/t_{inj}=0.71$)で図 8-4 に示す噴射率より、噴射が安定している時期である. 計測位置は、ノズル先端から噴射方向に下方 50mm の位置で計測し、計測時の噴霧全長 L に対し、およそ $0.8 \times L$ の位置である. カウントした粒子数はいずれの条件とも 4000 個程度である.

図 8-10 より、高噴射圧化により、SMD と Dv_{90} とも小さくなっており、粗大液滴が低減し、微粒化している. 噴射圧 20MPa から 80MPa の高圧化により、SMD は $10.4 \mu\text{m}$ から $6.1 \mu\text{m}$ と約 41% 小さくなり、 Dv_{90} は $20.2 \mu\text{m}$ から $10.8 \mu\text{m}$ と約 46% 小さくなる. さらに詳しく把握するため、粒子径分布として噴霧液滴の体積頻度分布を図 8-11 に示す. 高噴射圧化により、 $10 \mu\text{m}$ 以下の粒子径が増加し、 $15 \sim 30 \mu\text{m}$ の粗大液滴が低減しており、特に 20MPa から 50MPa にかけて顕著である.

以上より、燃料の高噴射圧化により、粗大液滴が低減し、微粒化することを確認した. 次に、高噴射圧化のもう一つの狙いである噴霧への空気導入について評価した. 次節 8.3 に記す.

SMD : Sauter Mean Diameter

Dv90 : Droplet diameter corresponding to 90% volume distribution

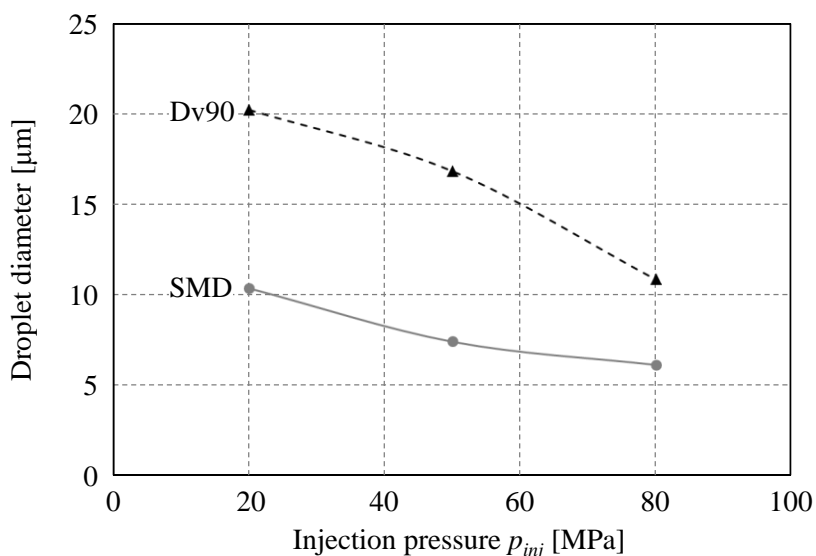


Figure 8-10. Droplet diameter SMD and Dv90

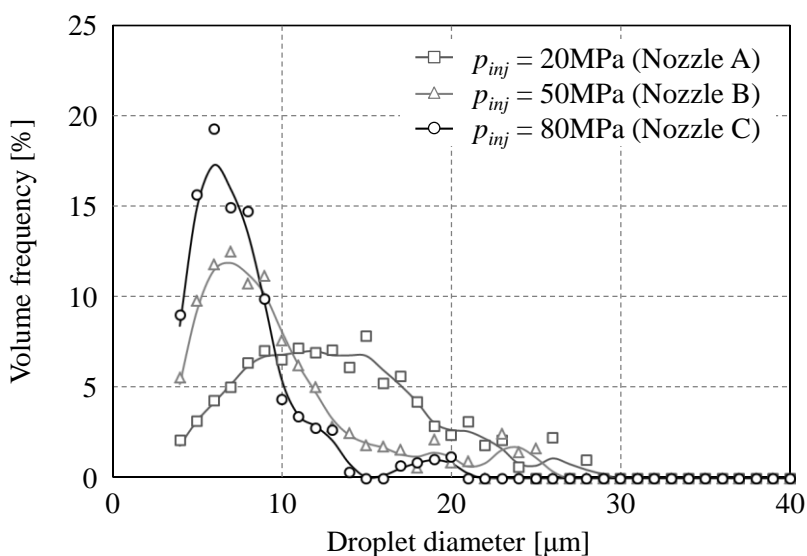


Figure 8-11. Droplet size distribution

8.3. 噴霧への空気導入過程の計測

8.3.1. 噴霧への空気導入の計測方法

噴霧に誘引される空気の流速は、粒子追跡法(Particle Tracking Velocimetry, 以下 PTV 法)により計測した^{(8-9), (8-10), (8-11), (8-12)}。PTV 法とは、空間に浮遊させたトレーサ粒子の個々の速度と方向を画像解析により求める手法である。一噴射中における噴霧に誘引される空気流速を時系列計測するため、

高繰り返しレーザと高速度カメラを同期させ撮影した。PTV 法の構成を図 8-12 に示す。容器には一辺 100mm の定容容器を用い、トレーサには平均粒子径 $2.0\text{-}2.5\ \mu\text{m}$ の SiO_2 中空粒子(鈴木油脂工業製, ゴッドボール B-6C, 真密度 $2.1 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$)を用い、攪拌機を用いて、容器内に均一に浮遊させた。光源には Nd-YAG レーザ(Spectra Physics 製, Navigator II, 発振周波数 50kHz, 波長 532nm, 発光期間 20ns)を用い、シリンドリカルレンズを介してレーザシート平行光として容器内に照射した。この際、噴霧にレーザシート光がかかると、強い散乱光により周囲のトレーサ粒子が認識できなくなるため、レーザシート光は噴霧外縁に沿うように照射した。燃料は、イソオクタンを用いた。

ここで、周囲流れに対するトレーサの追従性の指標として、トレーサの終端速度 v_s と流れの代表速度 U の比であるストークス数 St は式(8-1)で与えられる。

$$St = \frac{v_s}{U} = \frac{\rho_p d^2 U}{18\eta L} \quad (8-1)$$

ここで、

- v_s : トレーサの終端速度 [m/s]
- U : 流れの代表速度 [m/s]
- ρ_p : 粒子密度 [kg/m^3]
- d : 粒子直径 [m]
- η : 環境流体の粘性 [kg/(m s)]
- L : 流れの代表長さ [m]

である。実験環境におけるストークス数 St は、 5.9×10^{-3} 程度となり、1 より十分小さく、本計測に用いたトレーサは、周囲流れに良く追従しており、算出される流速は周囲空気の流速を再現していると考えられる。

本計測では、スリット噴霧の厚み方向に誘引される空気流速を PTV により算出した。解析エリアは図 8-13 に示すよう、噴霧外縁から 3mm の範囲である。解析エリアで検出された流速のうち、噴霧外縁に対する垂直成分を空気導入速度と定義した。

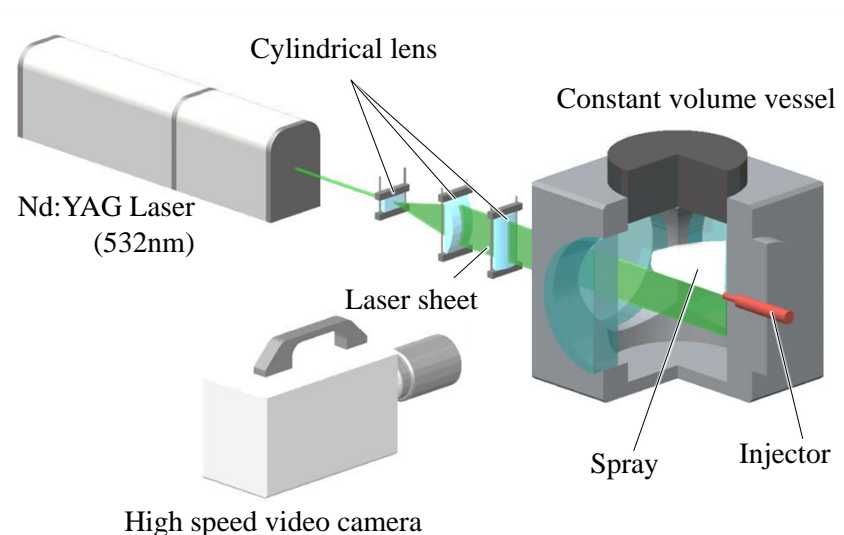


Figure 8-12. Experimental apparatus for measuring air entrainment into spray

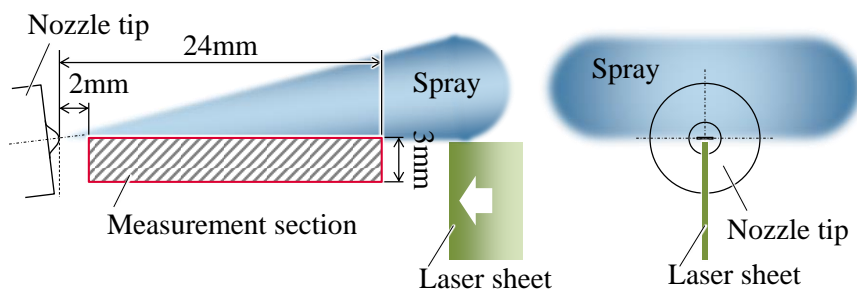


Figure 8-13. Measurement section of air entrainment

8.3.2. 大気圧雰囲気における噴霧への空気導入過程の噴射圧力の影響

基礎的な特性として、大気圧雰囲気での噴霧への空気導入を計測した。実験条件は、表 8-2 に示した条件と同一である。PTV 法による計測例として、 $t/t_{inj} = 0.71$ (噴射開始後 0.7ms 後) の結果を図 8-14 に示す。矢印の向きが流れの方向を表している。どの噴射圧においても、ノズル近傍では、概ね噴霧に向かって誘引される傾向がみられる。時間および位置に対する空気導入速度の燃料噴射圧力の影響を把握するため、この解析画像をもとに処理を行った。解析範囲は、図 8-13 で示したように、解析範囲は噴霧外縁～3mm の区間で、解析対象は噴霧外縁に対し垂直成分(空気導入速度と定義)の流速である。計測サンプル数を確保するため、複数ショットの撮影画像から各燃料噴射圧力ともに 1,500～2,000 個の粒子の速度を統計処理した。

燃料噴射圧力に対する空気導入速度の時間履歴を、図 8-15 に示す。計測位置はノズル先端 2mm～10mm であり、各時刻での平均速度を表記している。燃料噴射圧力に関わらず、噴射開始と

ともに空気導入速度は増加し、およそ $t/t_{inj} 0.5$ 以降では速度変化は小さく、収束する傾向がみられた。

このように、高噴射圧ほど空気導入速度が速くなった理由として、噴霧速度と噴孔サイズが影響していると考えられる。掛川らによると燃料噴霧への空気導入量 J_{s0} は以下の式(8-2)で与えられる⁽⁸⁻¹³⁾。

$$J_{s0} \propto V^2 d_0 \left(\frac{-1}{2}\right) t^{\frac{3}{2}} J_f \quad (8-2)$$

ここで、

V : 燃料の噴出速度 [m/s]

d_0 : ノズル噴孔径 [m]

t : 噴射開始後の経過時間 [s]

J_f : 燃料噴射量 [kg/s]

である。ここで本研究では等噴射率のノズルで評価していることから J_f は同等である。これより、空気導入量 J_{s0} は、噴出速度 V とノズル噴孔径 d_0 が噴射圧により変化する。図 8-16 に、本研究のノズル諸元および図 8-6 に示した噴霧先端到達距離の時間変化から求めた噴出速度をもとに、式(8-2)の空気導入量の算出結果を示す。噴射圧 20MPa における空気導入量を 1 とし、相対表記している。ノズル噴孔径 d_0 は、スリット厚さで与えた。高噴射圧ほど空気導入量が大きくなる傾向がみられる。これより、評価ノズルにおける空気導入量は、ノズル噴孔径 d_0 よりも噴出速度 V の影響が大きいことが判る。

次に、位置による空気導入速度に対する燃料噴射圧力の影響として、速度が収束した $t/t_{inj} 0.5 \sim 0.8$ における、ノズル先端位置に対する空気導入速度を図 8-17 に示す。ノズル先端 2mm~24mm の区間で 2mm 毎に区分けして各平均速度を算出した。どの位置においても、高噴射圧ほど空気導入速度が速い傾向がみられた。各噴射圧による挙動をみると、噴射圧 20MPa では位置による速度変化は小さいが、噴射圧 50MPa と 80MPa ではノズル先端から遠ざかるにつれ速度が増加し極大となった後に減少する傾向がみられた。また、その位置は 80MPa の方が若干ノズル先端に近いようにみえる。

このように空気導入速度が極大をとった後の減衰が高噴射圧ほど大きいのは、高噴射圧ほど、噴射速度が速く、噴霧の分裂長さが短くなり、空気導入が低下したものと考えられる。清水らによると、噴霧の分裂位置は噴射速度が速いほど短くなる傾向にある⁽⁸⁻¹⁴⁾。本研究では、8.1.2 で示したように高噴射圧ほど噴射速度が速く、噴霧の分裂位置が短くなるため、極大値がノズル側にシフトしたと考えられる。

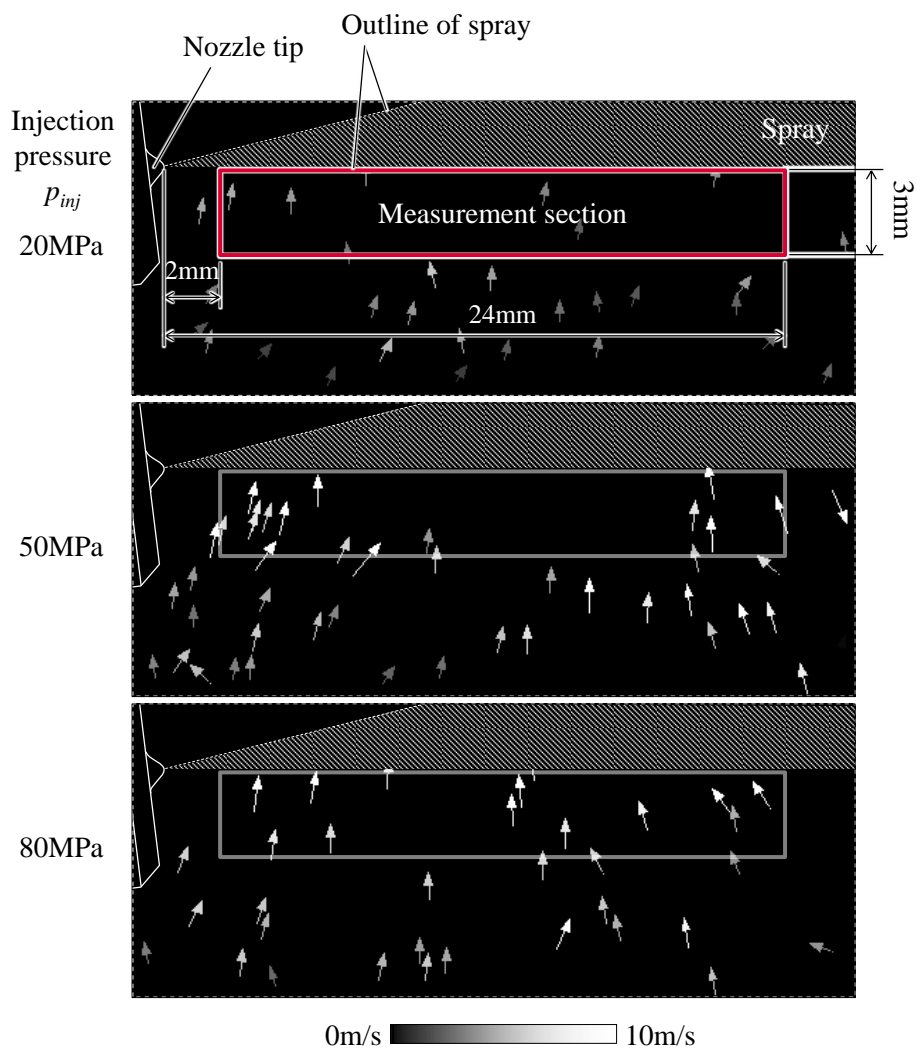


Figure 8-14. A measurement example of air entrainment velocity distribution (t/t_{inj} 0.71)

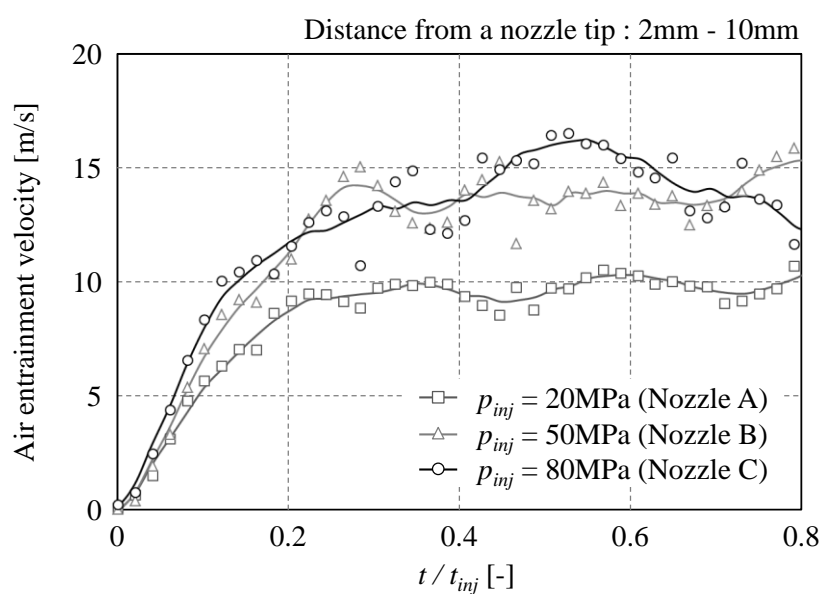


Figure 8-15. Temporal change in air entrainment velocity

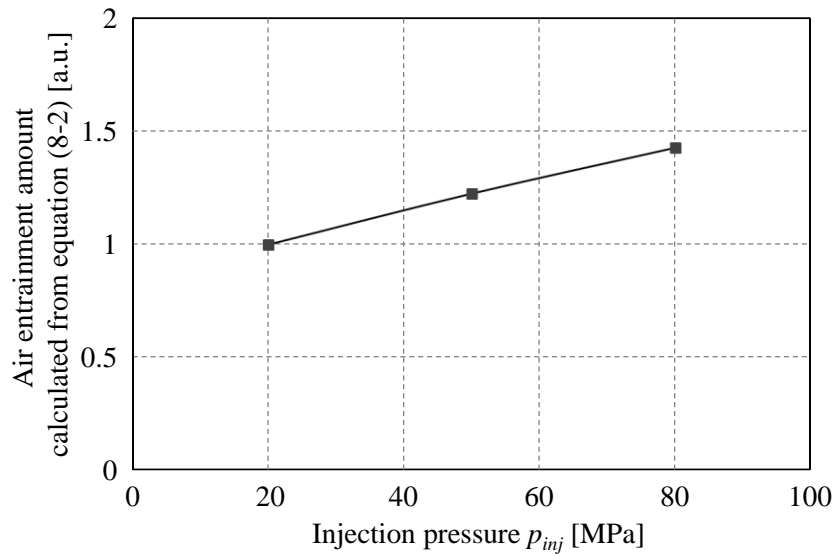


Figure 8-16. Air entrainment amount J_{SO} (t/t_{inj} 0.7)

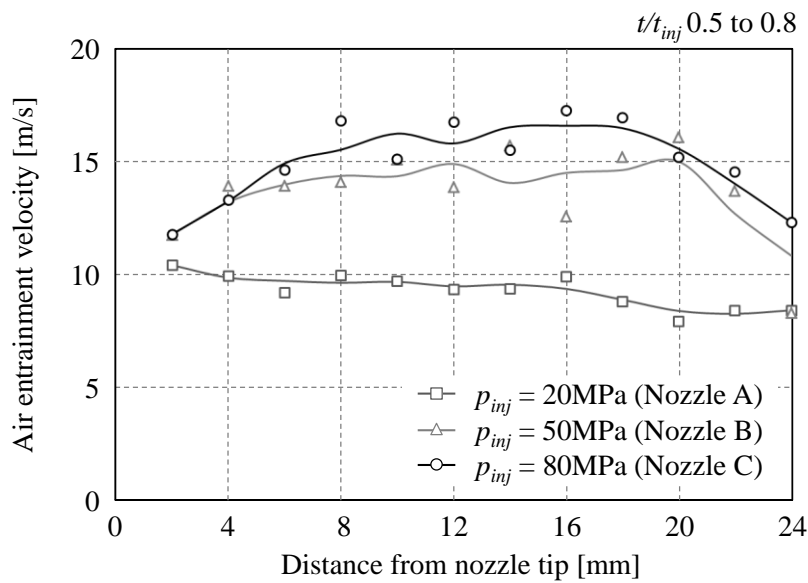


Figure 8-17. Variation of air entrainment velocity

8.3.3. 加圧雰囲気における噴霧への空気導入過程の噴射圧力の影響

次に、触媒急速暖機運転での圧縮行程噴射を想定した加圧雰囲気での計測結果を示す。実験条件を表 8-3 に示す。燃料噴射条件は 8.3.2 と同一で、雰囲気環境を本研究の研究対象である触媒急速暖機運転の燃料噴射開始時期を想定し、雰囲気温度 T_a 423K、雰囲気圧力 p_a 0.4MPa とした。解析は大気圧雰囲気と同様の手法で実施した。燃料噴射圧力に対する空気導入速度の時間履歴を、図 8-18 に示す。計測位置はノズル先端 2mm~10mm であり、各時刻での平均流速を表記してい

る。大気圧環境での評価結果と同様に、噴射圧に関わらず、噴射開始とともに空気導入速度は増加し、およそ t/t_{inj} 0.2 以降、空気導入速度の変化は小さく、一定値に収束する傾向がみられた。

次に、ノズル先端からの位置に対する空気導入速度として、速度が収束した噴射開始後 t/t_{inj} 0.3 ~0.7 における空気導入速度を図 8-19 に示す。ノズル先端 2mm~24mm の区間において 2mm 毎に区分けして各平均速度を算出している。どの噴射圧においてもノズル先端からの距離が 6mm~12mm 付近で空気導入速度が極大となる傾向があり、高噴射圧ほど極大値が大きい。また極大となった後の速度低下は高圧噴射ほど大きい傾向がみられた。大気圧環境での評価結果と比較し、極大値がよりノズル側となる結果となった。これは、加圧場の方が噴霧の分裂位置が短いためと考える (8-14)。

以上より、燃料の高噴射圧化により、噴霧への空気導入が増加することを確認した。

Table 8-3. Experimental conditions

Nozzle		A	B	C
Injection pressure	p_{inj}	20 MPa	50 MPa	80 MPa
Test fuel		n-heptane		
Injection quantity	q_{inj}	13.8 mg		
Fuel injection duration	t_{inj}	0.98 ms		
Ambient gas		N ₂		
Ambient temperature	T_a	423 K		
Ambient pressure	p_a	0.4 MPa		

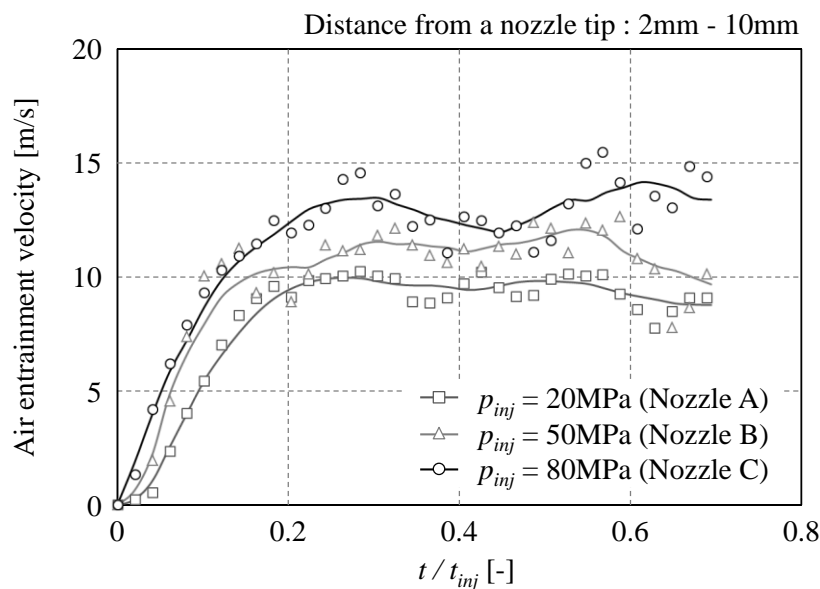


Figure 8-18. Temporal change in air entrainment velocity

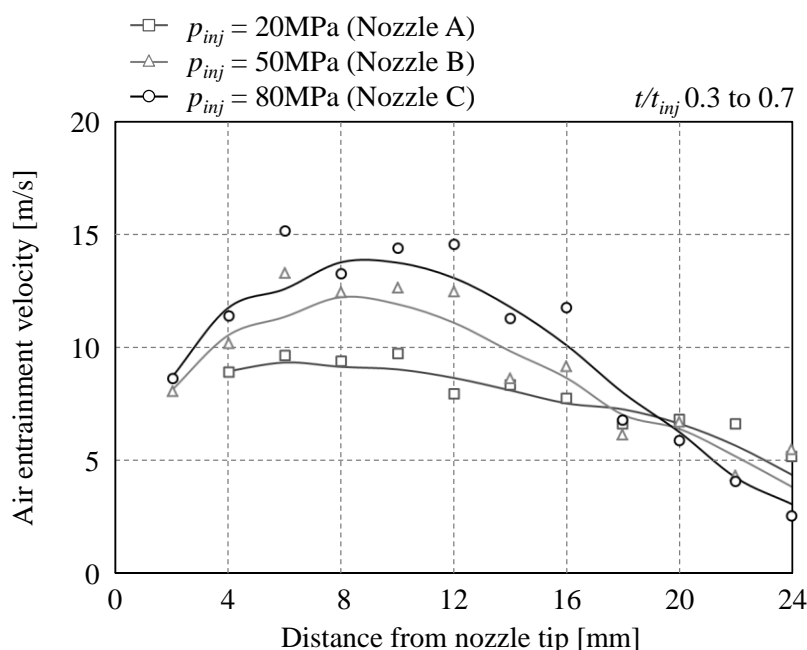


Figure 8-19. Variation of air entrainment velocity

8.4. まとめ

以上より、燃料の高噴射圧化により、粗大液滴が低減し微粒化すること、そして噴霧への空気導入が増加することを確認した。微粒化により燃料液滴の運動量が小さくなり、周囲空気との追従性が向上するため、壁面に衝突しにくくなり、燃料液膜の低減が期待できる。これに加えて、噴霧への空気導入が増加することで、噴霧内に取り込まれる空気が増加し、噴霧内での空気と燃料の混合および気化促進し、過濃混合気の低減が期待できる。これを次章にて確認する。

参考文献

- (8-1) H. Fujimoto, H. Sugihara, H. Tanabe, G. T. Sato, Investigation on Combustion in Medium-Speed Marine Diesel Engines Using Model Chambers, Proc. 14th CIMAC, p. D38-1-D38-27 (1981)
- (8-2) H. G. Fujimoto, H. Adachi, T. Yano, N. Marubayashi, T. Hori, J. Senda, Spatial Droplets Size Distribution in a Diesel Spray Taken by Photography with Super High Resolution, ILASS-Europe 2010 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, p. 1-6 (2010)

- (8-3) Eriko Matsumura, Takashi Tomita, Keiso Takeda, Shigeo Furuno, Jiro Senda, Analysis of Visualized Fuel Flow inside the Slit Nozzle of Direct Injection SI Gasoline Engine, SAE Technical Paper 2003-01-0060 (2003)
- (8-4) 松村恵理子, 直噴ガソリンエンジン用スリットノズル内の燃料流動と噴霧特性に関する研究, 同志社大学 博士論文 (2006)
- (8-5) 後藤守康, 吉丸清考, 加藤典嗣, 松村恵理子, 噴流活用ガソリン直噴エンジンの開発(第 2 報), 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 5, p. 1147-1153 (2013)
- (8-6) 柴田仁, 村瀬栄二, 鬼頭孝範, 加藤典嗣, 次世代直噴エンジン向け新概念噴霧の開発, 自動車技術会 学術講演会 講演予稿集, No. 42-15A, p. 1004-1008 (2015)
- (8-7) F. Aoki, S. Enomono, Y. Nakase, H. Oumura, Spray Analysis of Port Fuel Injector, SAE Technical Paper 2005-01-1154 (2005)
- (8-8) 調尚孝, 姉崎幸信, 槍野素成, 松村恵理子, 高数密度燃料噴霧の影画像処理による粒径計測に関する研究, 微粒化シンポジウム講演論文集, No.17, p.333-336 (2008)
- (8-9) H. Fujimoto, G. T. Sato, T. Matsuzawa, Investigation on Combustion in Medium-speed Marine Diesel Engines Using Constant Volume Combustion Chamber, Naval architecture and ocean engineering, No. 17, p. 190-210 (1979)
- (8-10) Dong-Ryul Rhim, Patrick V. Farrell, Air Flow Characteristics Surrounding Evaporating Transient Diesel Sprays, SAE Technical Paper 2002-01-0499 (2002)
- (8-11) Jingyu Zhu, Olawole Abiola Kuti, Keiya Nishida, Effects of Injection Pressure and Ambient Gas Density on Fuel - Ambient Gas Mixing and Combustion Characteristics of D.I. Diesel Spray, SAE Technical Paper 2011-01-1819 (2011)
- (8-12) N. Toda, H. Yamashita, M. Mashida, PTV analysis of the entrained air into the diesel spray at high-pressure injection, Proceedings of International Conference on Optical Particle Characterization, Vol. 9232, p. 92320C1-92320C6 (2014)
- (8-13) 掛川俊明, 塩路昌宏, 辻村欽司, 複数の混合領域を考慮したディーゼル燃焼の確率過程論モデル, 自動車技術会論文集, Vol. 23, No. 2, p. 3-8 (1992)
- (8-14) 清水正則, 新井雅隆, 廣安博之, 高速噴流の分裂長さの測定, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 49, No. 448, p. 2886-2892 (1983)

第9章 燃料の高噴射圧化によるPM生成要因への影響

これまでに、直接噴射式ガソリンエンジンでは触媒急速暖機でPM排出が多いことを明らかにし、燃焼室内の現象解析により、触媒急速暖機におけるPM生成要因は壁面に付着する燃料液膜と衝突後の過濃混合気であることを示唆した。この燃焼室内の現象解析により得られた知見をもとに、触媒急速暖機におけるPMの低減策として、第8章で燃料の高噴射圧化を提案した。そして、燃料の高噴射圧化により、粗大液滴が低減し微粒化すること、また燃料噴霧への空気導入が増加することを確認した。この噴霧特性の評価結果から、微粒化により燃料液滴の運動量が小さくなり、周囲空気との追従性が向上するため、壁面に衝突しにくくなり、燃料液膜低減が期待できる。そして、微粒化による気化促進に加えて、噴霧への空気導入が増加することで、噴霧内に取り込まれる空気が増加し、噴霧内での空気と燃料の混合および気化促進し、過濃混合気の低減が期待できる。本章では、エンジン燃焼室内で、PM生成要因である燃料液膜と過濃混合気の燃料の高噴射圧化による影響を明らかにする。

9.1. 燃料の高噴射圧化による噴霧挙動への影響

9.1.1. 供試エンジン

供試エンジンは表9-1に示す仕様のサイド噴射レイアウトの直接噴射式ガソリンエンジンで、シリンダライナを石英ガラスに置き換えたガラスシリンダエンジンを用いた。ガラスシリンダの設置気筒は最もリア側の#4気筒である。ピストンが下死点位置におけるリア側からの視野を図9-1に示す。観察範囲は、燃焼室のペントルーフ部を含む全域を観察可能であり、燃料噴射から燃焼に至る一連の現象を把握することができる。なお、本エンジンは、#4気筒へのガラスシリンダ(肉厚12mm)設置によるスペース確保のため#3気筒は廃止し、構造の簡素化のため冷却水の循環はなしとした。また、ピストンキャビティ内の燃料噴霧や燃焼の挙動、そして混合気状態を把握するため、ピストンにボアセンタへの溝とリア側一部を追加工した。

Table 9-1. Engine specifications

Type	4-cylinder, in-line
Displacement	2.0L
Bore × Stroke	φ86mm × 86mm
Compression ratio	10.5 : 1
Injection system	Direct Injection
Spray type	Fan shaped spray
Injection direction V	36deg.

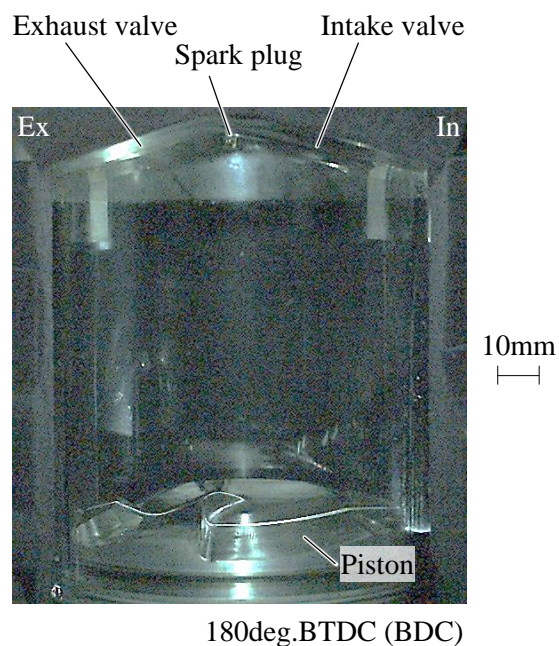


Figure 9-1. Observation area

9.1.2. 評価ノズル

評価ノズルは、8.1.1 記載のノズルと同じ仕様のノズルを用いた。

9.1.3. エンジン運転条件

評価条件は、表 9-2 に示す触媒急速暖機条件にて実施した。図示平均有効圧(Indicated Mean Effective Pressure: IMEP)が 210kPa, 排気 A/F が 15.0 となるよう、燃料噴射量と吸入空気量を調整した。燃料噴射は、吸気/圧縮行程の 2 回噴射で、等量に分配している。使用燃料は、3.1.4 で示した国内市販相当のプレミアムガソリンで、RON100, 理論空燃比は 14.4 である。

Table 9-2. Experimental conditions

Engine speed	1200 r/min
IMEP (average)	210 kPa
Injection pressure p_{inj}	20, 50, 80 MPa
Injection timing	220deg.BTDC, 40 deg.BTDC
Spark timing	18 deg.ATDC
A/F (target)	15.0
Oil temperature	40 deg.C

9.1.4. 燃料噴射圧力による燃焼室内の噴霧挙動への影響

9.1.1 に示したガラスシリンダエンジンを用いて、燃焼室内の燃料噴霧画像を図 9-2 に示す。撮影タイミングは、圧縮行程の燃料噴射開始時期から 7deg.CA 後の 33deg.BTDC であり、燃料噴射終了後である。撮影は、高速度カメラ(Photron 製, FASTCAM Mini AX, 撮影速度 12000 フレーム/s)を用いて直接撮影し、燃料噴霧を撮影するため、メタルハライド光源を照射し、燃料噴霧の散乱光を撮影した。燃料噴霧の散乱光は燃料液滴が起因となる光であることから、燃料の気化性の判断指標となる。なお、図 9-2 中の噴霧は視認性を向上させるため、画像処理により着色処理を施している。

燃料噴霧は、壁面への衝突後、壁面を沿って移動し、壁面からの巻き上がりが確認できる。また、燃料噴射圧の影響をみると、高噴射圧ほど散乱光が少ない傾向がみられる。上述したように散乱光は燃焼液滴が起因となる光であることから、燃料の高噴射圧化により燃料気化が促進していると考えられる。

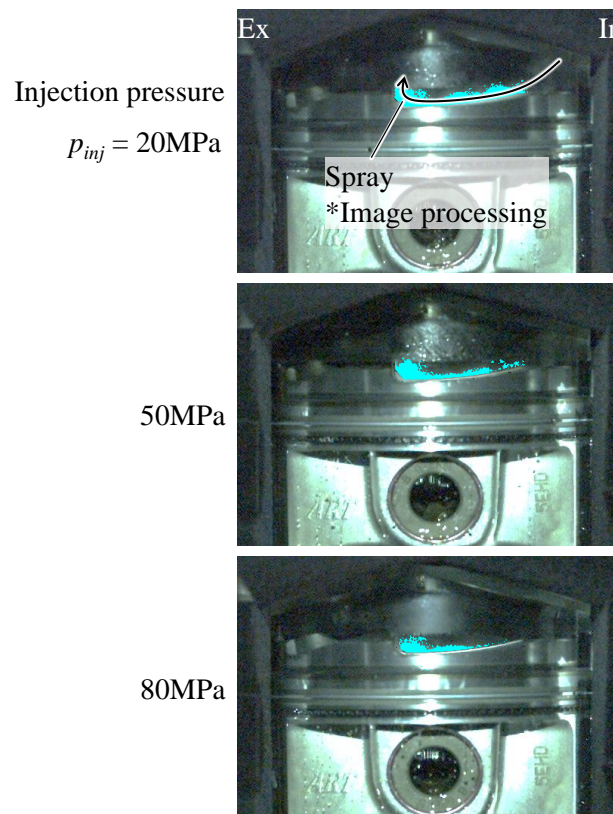


Figure 9-2. Spray within a cylinder (33deg.BTDC)

9.2. ピストン頂面に形成する燃料液膜

9.2.1. エンジン実働時におけるピストン頂面の燃料液膜の計測方法

エンジン実働時におけるピストン頂面の燃料液膜の計測方法は、5.1と同じ手法を用い、9.1に記したガラスシリンダエンジンとノズルを用いた。

9.2.2. エンジン運転条件

実験条件は、触媒急速暖機を想定した表 9-3 に示す条件で実施した。エンジン運転条件は、9.1で評価した条件に準じており、燃焼なしのモータリング運転で、触媒急速暖機条件相当の吸入空気量である。燃料噴射は、燃料液膜形成への影響が大きい圧縮行程後半のみ実施した。

Table 9-3. Experimental conditions

Engine speed	1200 r/min
Intake air amount	2.8 g/(s·cylinder)
Injection pressure p_{inj}	20, 50, 80 MPa
Injection timing	40 deg.BTDC
Fuel injection duration	0.49 ms
Oil temperature	40 deg.C

9.2.3. 燃料の高噴射圧化によるピストン頂面に形成する燃料液膜への影響

ピストン頂面の燃料液膜を計測した代表画像を図 9-3 に示す。撮影時期は膨張行程下死点(180deg.ATDC)で、燃料液膜厚さをコンター表記している。図中の線表記はピストン形状線を表す。

図9-3に示した燃料液膜の形成位置についてみると、噴射圧20MPaではキャビティとリップ付近にみられる。燃料噴射圧力による燃料液膜への影響をみると、高噴射圧化により液膜が低減する傾向がみられる。なお、本研究で使用したピストンには、9.1.1に示したように追加工しているが、本研究の評価では追加工に伴うリップ位置変更によりリップ付近の燃料液膜位置に差異はみられたが、その他の燃料液膜への影響は小さい。

次に、燃料噴射圧力による燃料液膜形成への影響を定量的に把握するため、噴射圧力に対する燃料液膜の最大厚さを図 9-4 に、面積を図 9-5 に示す。高噴射圧化(20MPa→80MPa)により燃料液膜の最大厚さは55.6%低減、面積は80.7%低減し、高噴射圧化により燃料液膜が薄く小さくなってい

る. この要因として, 高噴射圧ほどピストン頂面に衝突する燃料液滴が少ないため考える. 燃料液膜は運動量の大きい粗大液滴が随伴流に追従しきれずに壁面に衝突することで形成される. これまでの評価から高噴射圧ほど粗大液滴が少なく, 微粒化することを確認していることから, 高噴射圧ほどピストン頂面に衝突する液滴が少なくなり, 燃料液膜が少なくなったと考える.

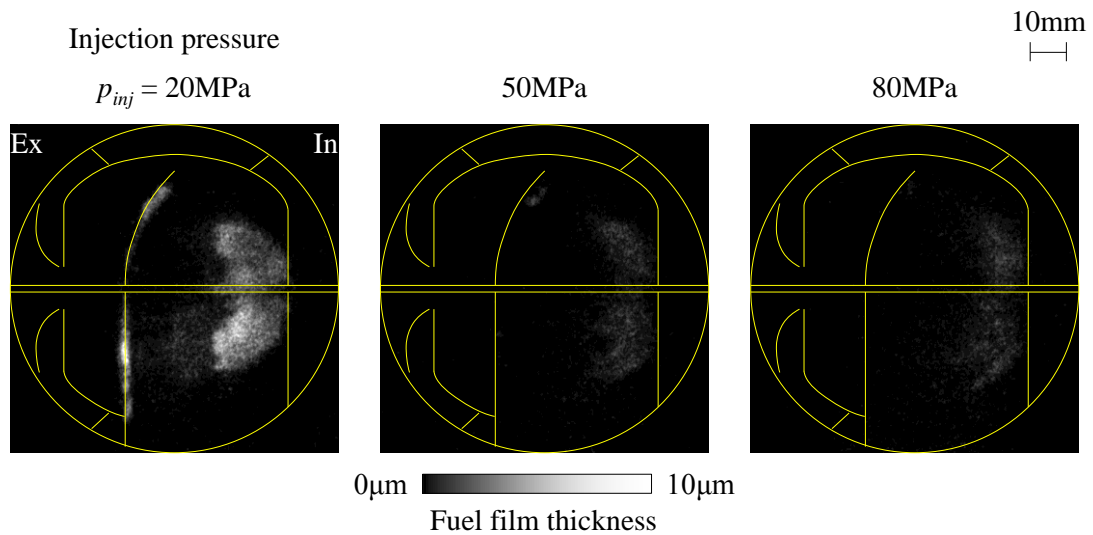


Figure 9-3. Piston fuel film distribution (180deg.ATDC)

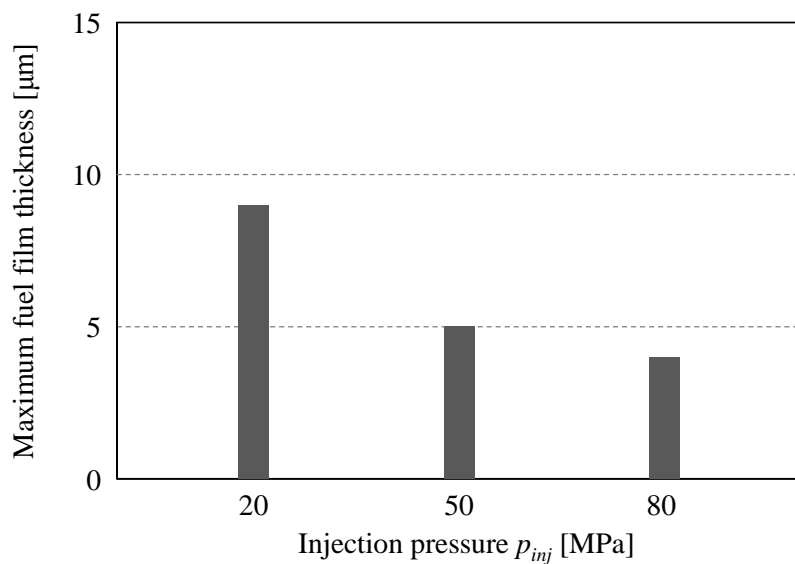


Figure 9-4. Fuel film thickness

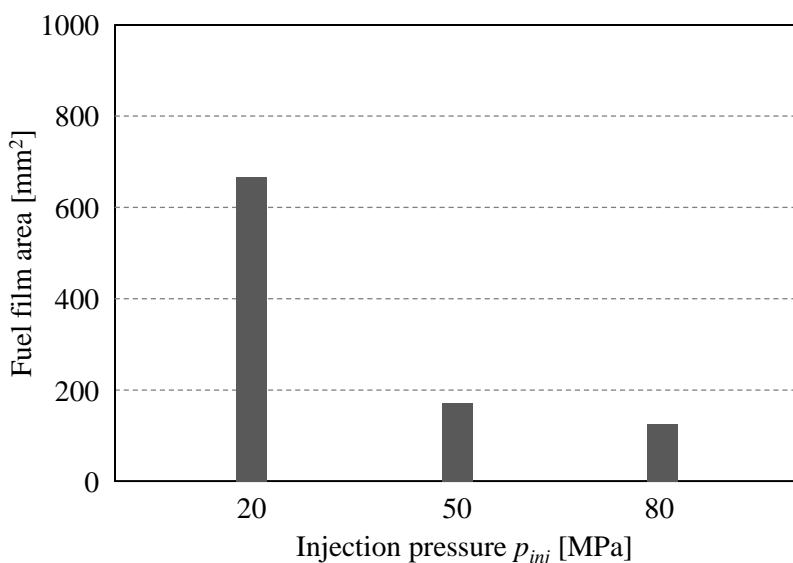


Figure 9-5. Fuel film area

9.3. 燃料液膜の時系列挙動

9.3.1. 定容容器での壁面衝突時における燃料液膜の時系列計測方法

前節 9.2 の燃料液膜の計測手法は、表 5.3 記載の油溶性の蛍光染料(Marktec 製, OL-200 II)を燃料に混入している。蛍光染料と燃料のイソオクタンについて、それぞれ単体における沸点は、蛍光染料 220-250deg.C, イソオクタン 99deg.C であり温度に乖離がある。このため、9.2.1 の手法は、燃料噴霧の壁面への衝突による付着位置を計測する手法ではあるものの、乖離する温度差により、燃料が壁面に付着した後の蒸発挙動は正確に捉えきれていないと考える。第 5 章での結果からも、燃料液膜は PM 生成要因となることから、燃料噴霧の衝突による付着燃料に加え、点火時に燃料液膜が存在するかどうかも重要と考え、付着した燃料液膜の時系列挙動について、定容容器を用いて解析を行った。

壁面衝突時の燃料液膜の時系列計測は、壁面の散乱光変化から評価した^{(9-1), (9-2)}。計測構成を図 9-6 に示す。壁面には、切削加工時の表面粗さを想定したすりガラス(砂番#1500, 十点平均粗さ Rz 3.3 μm)を用いた。すりガラスのすり面を燃料噴霧側とし、壁面下方からメタルハライド光源を均質照射し、高速度カメラ(Photron 製, FASTCAM SA1.1, 撮影速度 20000 フレーム/s)にて撮影した。すりガラスに燃料が付着すると、散乱光が変化し、輝度に変化する。燃料付着の評価指標としてカメラにて撮影された壁面からの散乱光の面積を採用した。

インジェクタノズルと壁面の位置関係は、図9-7に示すように、ノズルは壁面に対して θ_n 29deg.傾いて搭載し、噴射方向軸に対する壁面と角度は θ_s 36deg.で、壁面からのノズル先端高さは H_n 20mmである。

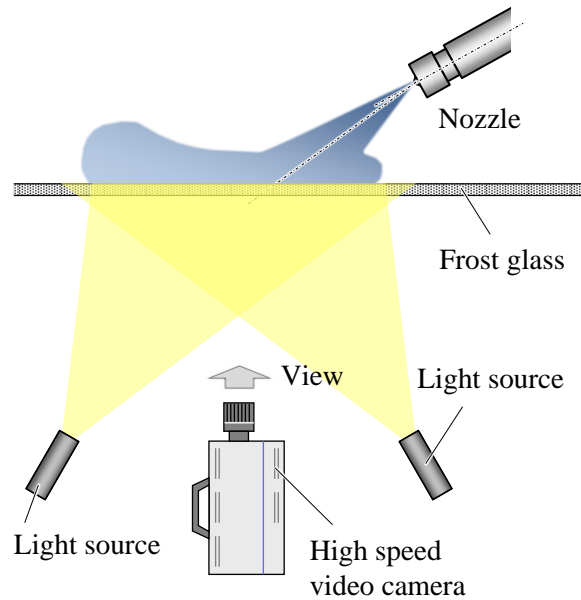


Figure 9-6. Experimental apparatus for measuring fuel film

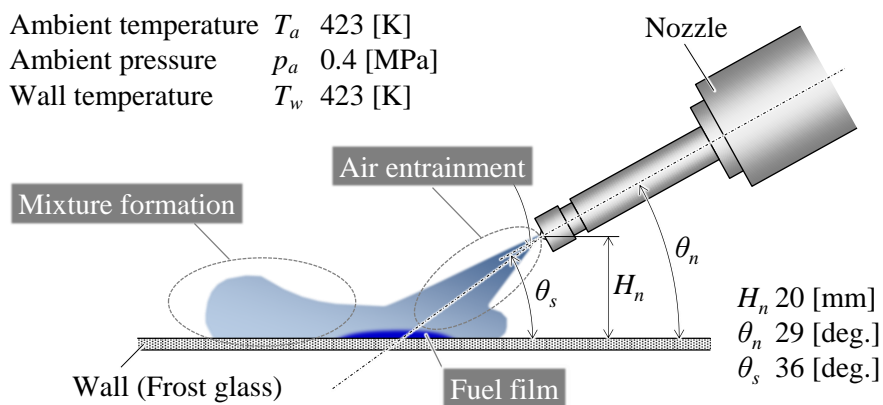


Figure 9-7. Spray impinging on the wall

9.3.2. 実験条件

燃料噴射および雰囲気条件を、表 9-4 に示す。想定したエンジン条件は、PM 排出が多い冷間始動時の触媒急速暖機とし、その際に行われる圧縮行程の燃料噴射開始時期を想定した環境条件とした。燃料には、沸点がガソリンの 50% 留出温度近傍のイソオクタンを使用した。雰囲気環境は、密度 ρ_a 3.2kg/m³(圧力 p_a 0.4MPa, 温度 T_a 423K)で、窒素雰囲気である。壁温 T_w は雰囲気温度と同じく 423K とした。

Table 9-4. Experimental conditions

Nozzle		A	B	C
Injection pressure	p_{inj}	20 MPa	50 MPa	80 MPa
Test fuel		iso-octane		
Maximum rate of injection	q_{max}	14.7 mg/ms		
Fuel injection duration	t_{inj}	0.98 ms		
Ambient gas		N ₂		
Ambient density	ρ_a	3.2 kg/m ³		
Ambient temperature	T_a	423 K		
Ambient pressure	p_a	0.4 MPa		
Wall temperature	T_w	423 K		

9.3.3. 燃料噴射圧力による壁面衝突後の燃料液膜への影響

壁面に付着した燃料液膜の代表画像として、 t/t_{inj} 1.5 における燃料液膜を図 9-8 に示す。高噴射圧ほど液膜が少ないことが判る。このように撮影される画像より算出した液膜面積の時系列変化を図 9-9 に示す。なお、 t/t_{inj} 0-1.5 にかけては、空間(壁面上方)の噴霧の映り込みによるノイズのため解析対象外とした。いずれの燃料噴射圧とも時間経過とともに液膜面積は減少する。そして高圧噴射ほど液膜面積が小さく、燃料液膜が無くなるまでの時間が短い。燃料液膜は、運動量の大きい粗大液滴が噴霧の随伴流に追従しきれず壁面に衝突することで形成される。これまでの評価から高噴射圧ほど粗大液滴が少なく微粒化しており、高噴射圧ほど衝突する燃料液滴が少なく、燃料液膜の面積が小さくなったと考える。次に、燃料液膜の気化性の指標として、燃料液膜面積の減少速度を図 9-10 に示す。燃料噴射圧 50MPa と 80MPa では単調に減少速度が小さくなり、20MPa では一定期間後に減少速度が小さくなる減少傾向がみられた。この燃料液膜面積の減少速度は、壁面衝突後の液膜流動による面積拡大と、蒸発による面積縮小の影響度で決まると考えられる。燃料噴射圧 20MPa の衝突直後では、液膜の蒸発に加え流動による影響が加わり蒸発速度が変動し、液膜の流

動が収まった後に単調変化したと推測する。一方、燃料噴射圧 50MPa と 80MPa では粗大液滴が少なく、燃料液膜が薄く形成されるため、流動による影響が小さく、単調に変化したものと推測する。

ここで、本評価で想定しているウォールガイド方式の触媒急速暖機条件では、噴射と点火のインターバルはおおよそ 7-10ms であり、 t/t_{inj} 換算すると 7.1-10.2 となる。この時間を図 9-10 で考慮すると、燃料噴射圧 50MPa 以上で燃料液膜が起因となる PM を抑制できる可能性があると考ええる。

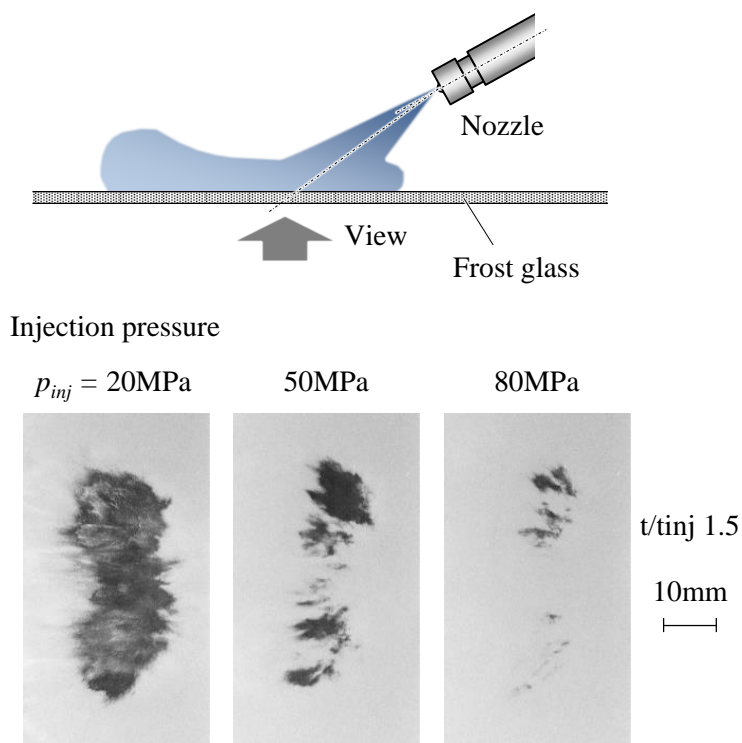


Figure 9-8. Fuel film images

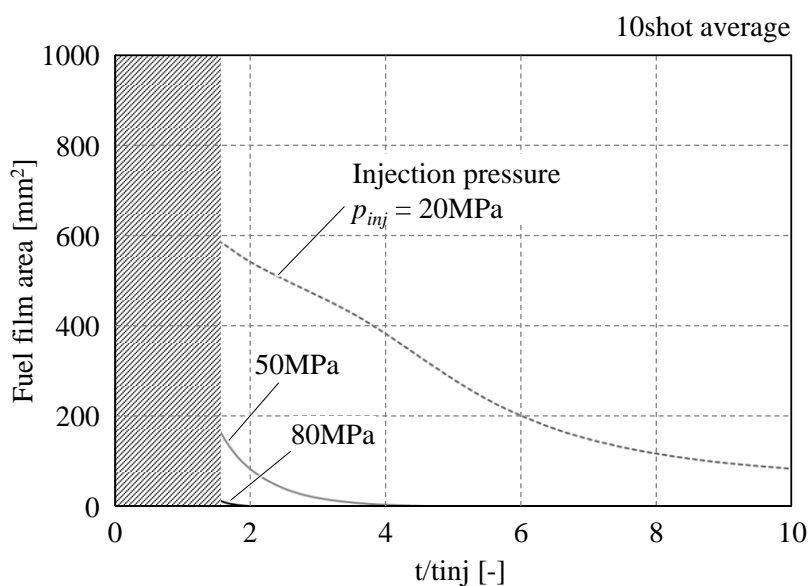


Figure 9-9. Fuel film area

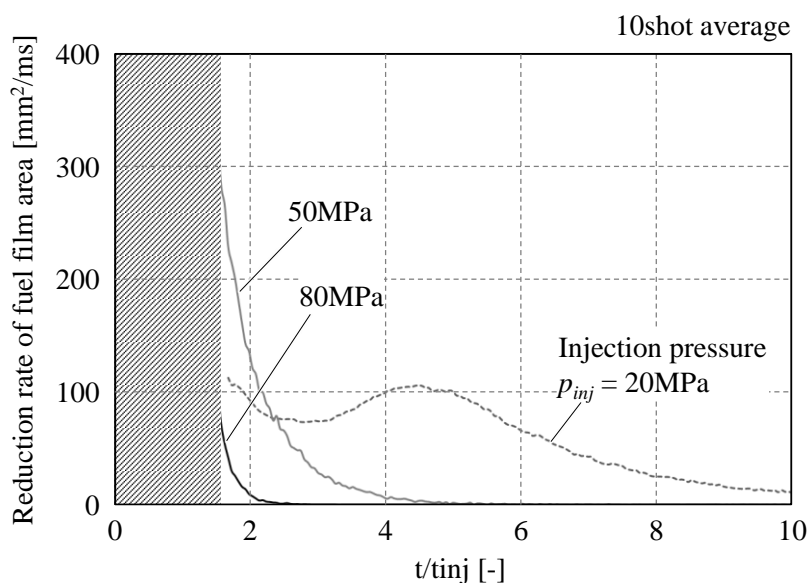


Figure 9-10. Reduction rate of fuel film area

9.4. 混合気分布計測

9.4.1. レーザ誘起エキサイプレックス蛍光法の計測原理

混合気分布は、レーザ誘起エキサイプレックス蛍光法(Laser Induced Exciplex Fluorescence : LIEF 法)により計測した⁽⁹⁻³⁾。LIEF 法とは、蛍光剤を混入した燃料にレーザを照射することにより、分子を励起させ蛍光を誘起させる手法である。物質に光を照射すると、物質は光の一部を吸収し、残りは散乱や透過する。光のエネルギーを吸収した物質は、励起状態に遷移し、再び基底状態に失活する際に蛍光を発する。また、励起状態に遷移した物質は、他の分子と衝突により、錯体(Excited complex: Exiplex)を形成する場合がある。この錯体 Exiplex も、基底状態に失活する際にも蛍光(Exiplex 蛍光)を発する。Exiplex の状態を模式的に示すと、以下の式(9-1)で示される。



ここで、

$1M^*$: 励起状態の蛍光剤 M

N : 基底状態の蛍光剤 N

$1(M \cdot N)^*$: 励起状態の M と N の錯体

である。この変化は可逆的であり、分子間の距離による特徴を持つ。分子間距離が近い(密度が高い、例えば液相)状態では、分子の衝突確率が高く、錯体 $I(M \cdot N)^*$ を形成しやすい。一方、分子間距離が遠い(密度が低い、例えば気相)状態では、分子の衝突確率が低く、錯体 $I(M \cdot N)^*$ が形成されにくく、各蛍光剤の励起状態で存在する。錯体 $I(M \cdot N)^*$ からの蛍光は、錯体を形成する際にエネルギーを奪われるため、蛍光波長は IM^* に対し、長波長側にシフトする。これら性質を利用することで、撮影波長域を①蛍光剤 M の蛍光波長域と②錯体 $I(M \cdot N)^*$ の蛍光波長域とすることで、①を気相、②を液相と定義し、燃料の気/液相の状態やその濃さを推測することが可能である。

このLIEF法はMeltonが提唱した計測手法であり⁽⁹⁻³⁾、ガソリンエンジンを対象にした研究にも使用されている。^{(9-4), (9-5), (9-6), (9-7)}

9.4.2. エンジンでのレーザ誘起エキサイプレックス蛍光法の計測構成

LIEF法による混合気分布計測の構成を図9-11に示す。9.1.1に示したガラスシリンダエンジンを用いて、レーザシート光を点火プラグ穴より燃焼室内に照射し、それと直交するようリア側からICCDカメラ(浜松ホトニクス製、C7972-51C、イメージインテンシファイアのゲート幅 $200 \mu s$)を用いて、燃焼室内の混合気分布を計測した。撮影視野は、図9-12に示す点火プラグ周辺である。

レーザ(Quantel製、Q-smart 850)はNd-YAGレーザの第四高調波(波長266nm、エネルギー80mJ)を用い、点火プラグホール内に光学レンズを複数設置し、吸気-排気方向を長手方向とするレーザシート光としてシリンダボアセンタに照射した。レーザシート光はおよそ50deg.の拡がりをもち燃焼室に照射される。点火プラグ穴出口から15mm位置におけるレーザ強度分布について、光学設計ソフト(Zemax)での計算結果を図9-13に示す。本計測での撮影範囲においては、レーザシート光の長手方向での強度ばらつきは±5.7%である。

気相と液相を同時撮影するためICCDカメラの前には2系統同時撮影光学系を設置し、1台のカメラで同一視野の2画像を横並びで撮影する。各光路中にはバンドパスフィルタを設置しており、各バンドパスフィルタは9.4.3で後述する使用燃料の気/液相の発光スペクトルを基に選定した。また、酸素による蛍光剤の消光作用を抑制するため、エンジンへの吸気ガスには窒素を用いた。

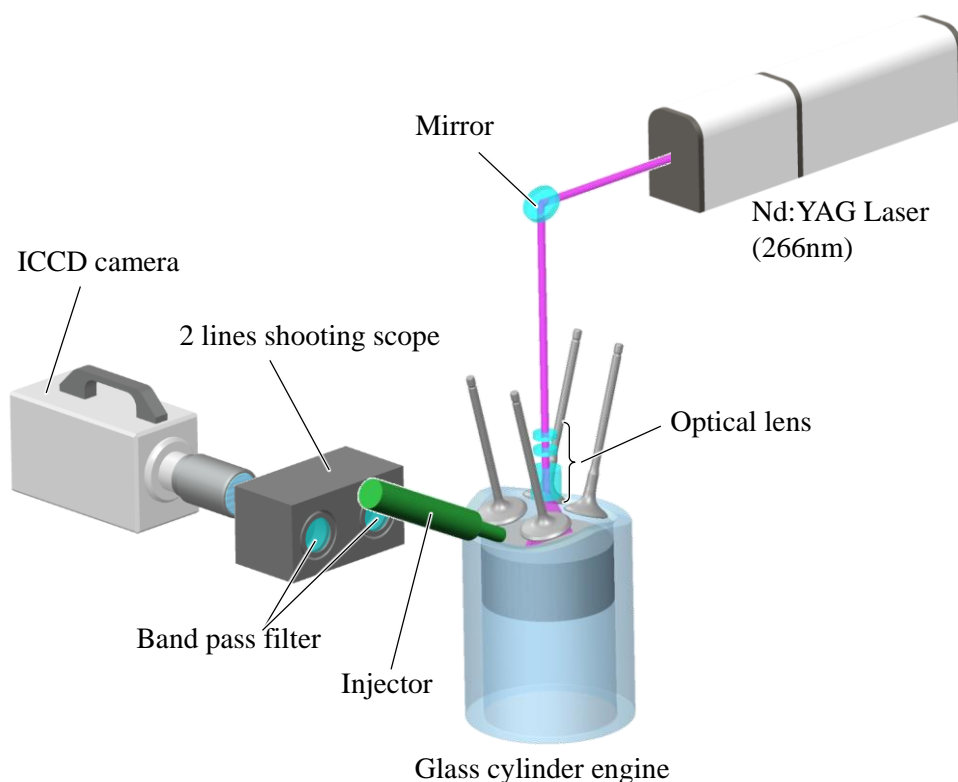


Figure 9-11. Experimental setup of the LIEF technique

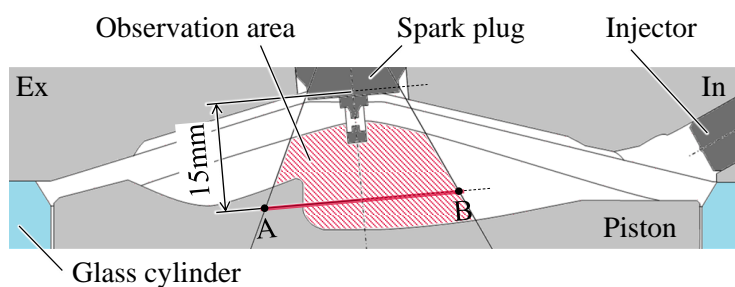


Figure 9-12. Observation area

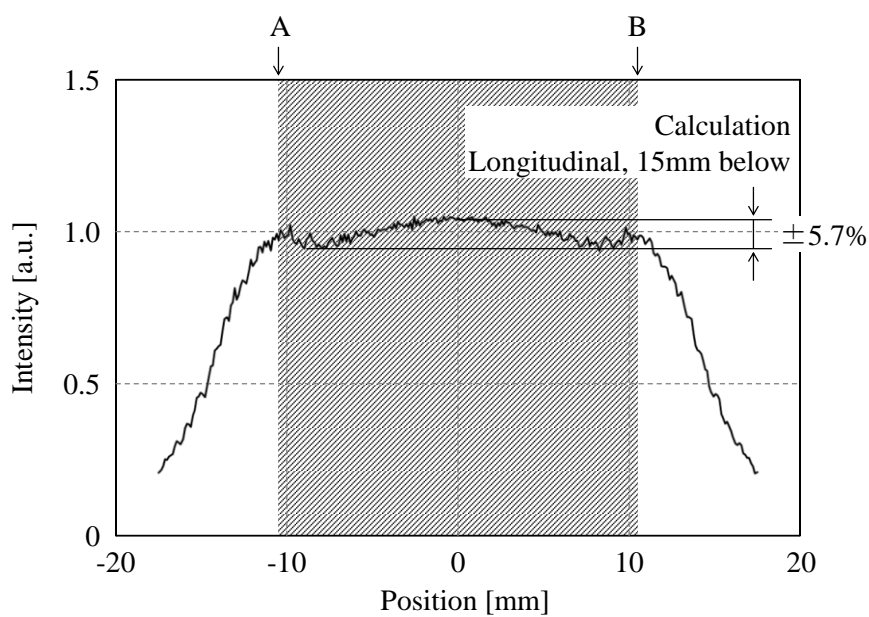


Figure 9-13. Laser intensity

9.4.3. レーザ誘起エキサイプレックス蛍光法に使用した蛍光剤

LIEF法に用いた燃料は、本研究では清水らの研究を参考に、基材には波長266nmの光で蛍光を発しないイソオクタンを用い、蛍光剤にはN,N-ジメチルアニリン3%wt.とナフタレン5%wt.を用いた⁽⁹⁻⁸⁾。使用燃料の気/液相における蛍光スペクトルを図9-14に示しており、液相の最大輝度を1とし相対表記した。蛍光スペクトルの計測方法は、石英セルに評価サンプルを注入し、レーザ(Quantel製, Q-smart 850, 266nm)を照射し、分光器(Princeton Instruments製, Spectra Pro 2300i)を通じ、イメージインテンシファイア(invisible vision製, uvi 4018-100)で増感させ、高速度ビデオカメラ(nac製, MEMRECAM GX-1)にて撮影した。事前に発光波長が既知の標準水銀ランプでのスペクトル計測により、発光波長を校正した。

本研究では、図9-14に示すArea1とArea2の波長域を選定し、Area1における撮影画像を気相、Area2を液相と定義し、バンドパスフィルタ(気相:中心波長314nm・半値幅8nm, 液相:中心波長419nm・半値幅10nm)を選定した。

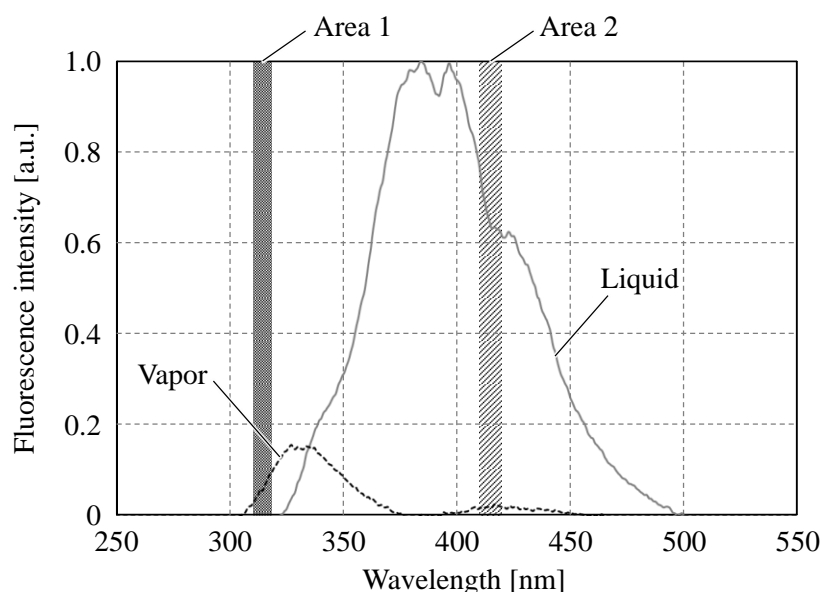


Figure 9-14. Fluorescence spectrum

9.4.4. 使用燃料の二相領域

LIEF法での使用燃料は基材燃料のイソオクタンに蛍光剤2種を混合した多成分燃料である。それぞれの1気圧環境場における沸点は、基材のイソオクタンの沸点が99deg.Cで、蛍光剤はN,N-ジメチルアニリン194deg.C、ナフタレン218deg.Cと乖離がある。各成分の飽和蒸気圧曲線は互いに

引き寄せ合い、低沸点成分は高沸点成分に、高沸点成分は低沸点成分に引き寄せ合う性質を持つ。このときに二相領域と呼ばれる液相と気相が存在する圧力と温度条件が存在する。例えば、二相領域が広いと各物質の液相と気相状態が異なるため、LIEF法においては基材燃料による蒸発特性を正確にトレースできていない可能性がある。これより、LIEF法では使用燃料における二相領域の把握が重要であると考え、本研究でのLIEF法の使用燃料の二相領域を算出し、事前把握を行った。

二相領域は、修正状態方程式の一つであるPeng-Robinson式により算出した。この式は高圧環境下にも対応しており、本研究のエンジン燃料室内にも適用可能と考えた。図9-15に本研究で使用したLIEF燃料の二相領域および各成分単体の飽和蒸気圧曲線を示す。例えば、本研究の解析対象である触媒急速暖機運転の圧縮行程における燃料噴射開始時の雰囲気圧力0.4MPaにおける飽和温度をみると、二相領域は160deg.Cから178deg.Cの範囲である。これは蛍光剤単体よりもイソオクタンの飽和温度側に寄った温度帯に位置している。基材燃料に近い蒸発特性を持つことから、使用燃料は蒸発特性に大きな乖離は無いと判断し、実験用燃料として用いた。

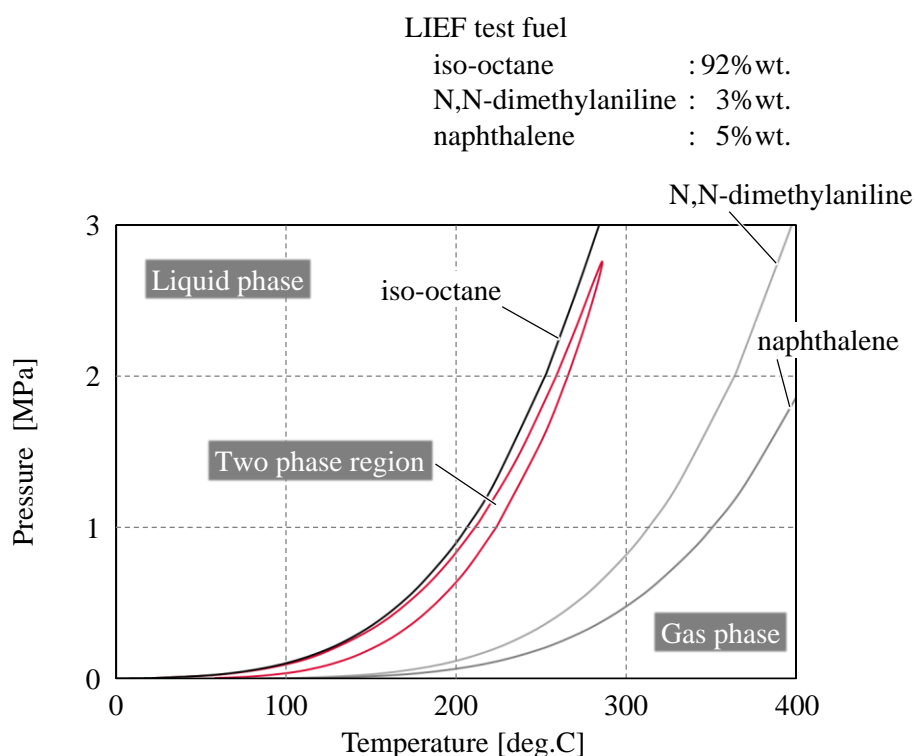


Figure 9-15. Two-phase region of LIEF test fuel

9.4.5. エンジン燃焼室内の混合気分布

エンジン燃焼室内の混合気分布をLIEF法で計測した代表画像を図9-16に示す。2系統同時撮影光学系を用いて撮影した気相と液相の画像について、コンター表記した気相画像の上に、液相画

像を重ね合わせている。計測断面は、吸気-排気方向のボアセンタである。撮影タイミングは、点火時期に相当する18deg.ATDCである。評価は、点火プラグの代わりに光学レンズを設置しレーザを照射しているが、混合気と点火位置の関係を把握するため、画像には点火プラグを仮想表記している。

気相に着目してみると、いずれの噴射圧とも、点火プラグの点火位置近傍に混合気が濃い傾向がみられ、また場所によるバラツキが確認できる。場所による混合気バラツキを確認するため、気相画像の輝度頻度分布を図9-17に示す。高圧噴射ほど低輝度側と高輝度側が低くなり、一峰性が若干強まる傾向がみられる。これは、高噴射圧化による混合気の均質性向上を示していると考えられる。この要因として、高噴射圧化することで、粗大液滴が減少し微粒化し、そして噴霧への空気導入が増加することから、ミキシングが促進したためと考える。

次に、図9-16に示した液相分布に着目してみると、燃料噴射圧20MPaにおいて、ピストンキャビティのリップ下部周辺に液相が確認できる。燃料噴射圧20MPaより高圧の50MPaと80MPaではほとんど確認できなかった。燃料噴射圧20MPaで確認できた液相は、圧縮行程での燃料噴射が起因するものと考えられ、ピストンへの噴霧衝突により飛散した液滴、もしくは、衝突により巻き上がった粗大液滴が滞留したものと考える。

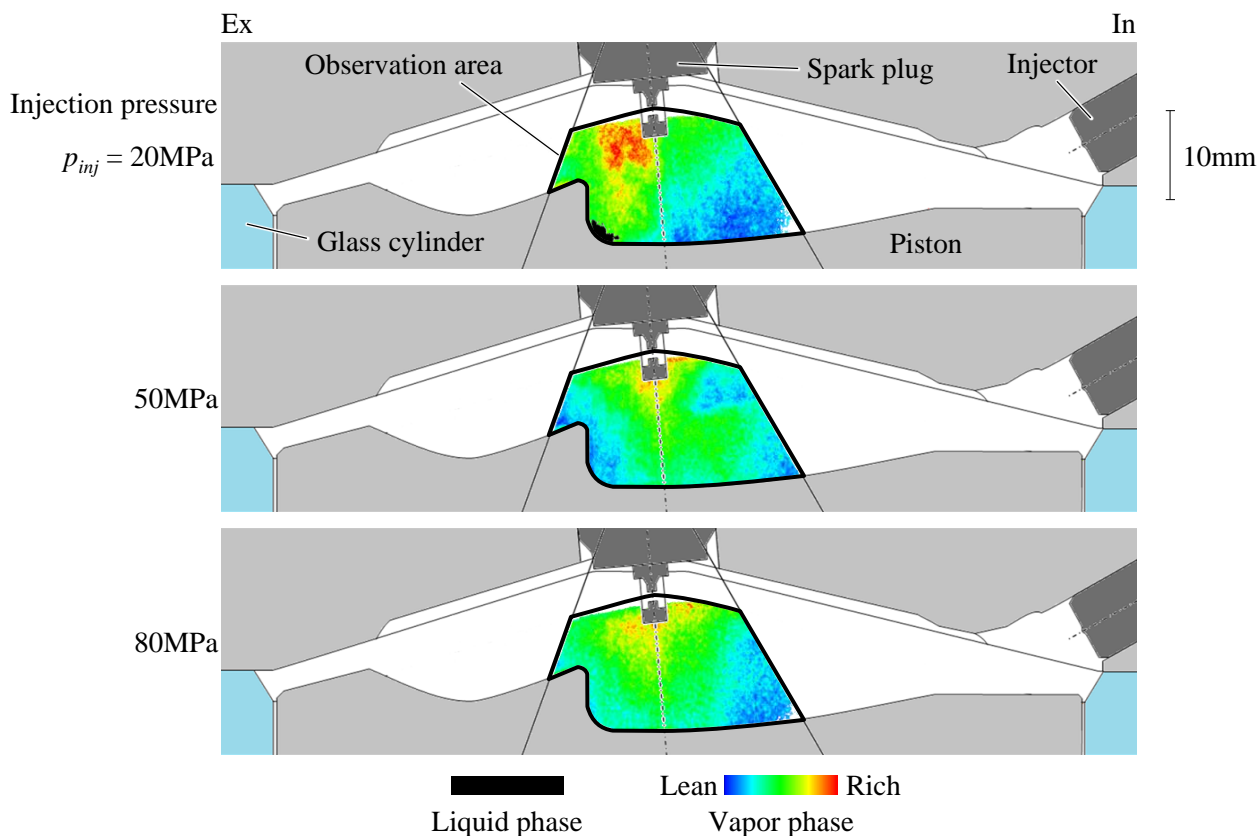


Figure 9-16. Fuel vapor/liquid phase distribution (18deg.ATDC)

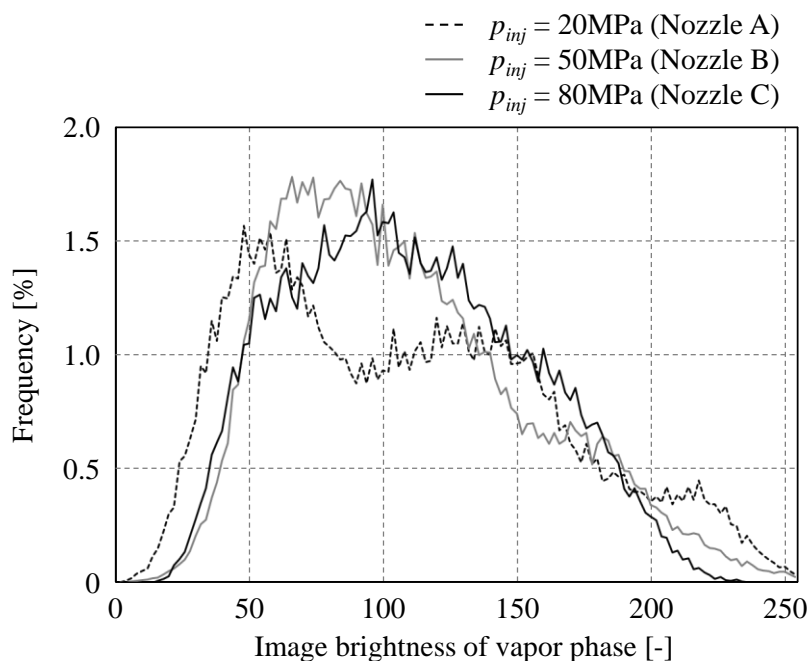


Figure 9-17. Frequency distribution of vapor phase

9.4.6 定容容器でのレーザー誘起エキサイプレックス蛍光法の計測構成

9.4.5 にて、触媒急速暖機条件の点火時期にて、燃料の高噴射圧化によるミキシング向上を確認した。また第8章の噴霧の単体評価にて、燃料噴霧の微粒化と噴霧への空気導入の増加を示した。これより、燃料の高噴射圧化により、噴射開始初期から、微粒化により気化が促進し、空気導入増加により燃料と空気のみキシングが向上していると考えられる。そこで、実エンジン燃焼室内を想定した環境下において、壁面衝突時の混合気を LIEF 法にて計測した。

LIEF 法による定容容器を用いた壁面衝突時の混合気分布の計測構成を図 9-18 に示す。レーザーシート光は、壁面衝突後の混合気分布を計測するため、壁面上方より照射し、それと直交するようにバンドパスフィルタを介して、ICCD カメラ(浜松ホトニクス製, C7972-51C)で撮影した。レーザーには、Nd-YAG レーザ(Quantel 製, Q-smart850)の第四高調波 266nm を用い、シリンダリカルレンズを介してレーザーシート平行光として容器内に照射した。レーザーシート光の照射位置は、噴霧中央である。LIEF 法に用いた燃料は、エンジンでの評価と同じ、基材イソオクタン、蛍光剤として、N,N-ジメチルアニリン 3%wt.とナフタレン 5%wt.である。雰囲気ガスには窒素を用い、酸素による蛍光剤の消光作用を抑制した。

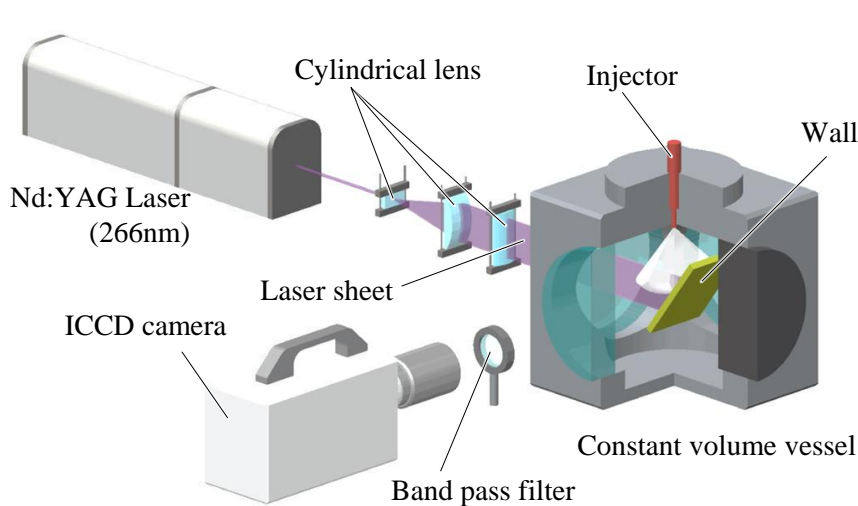
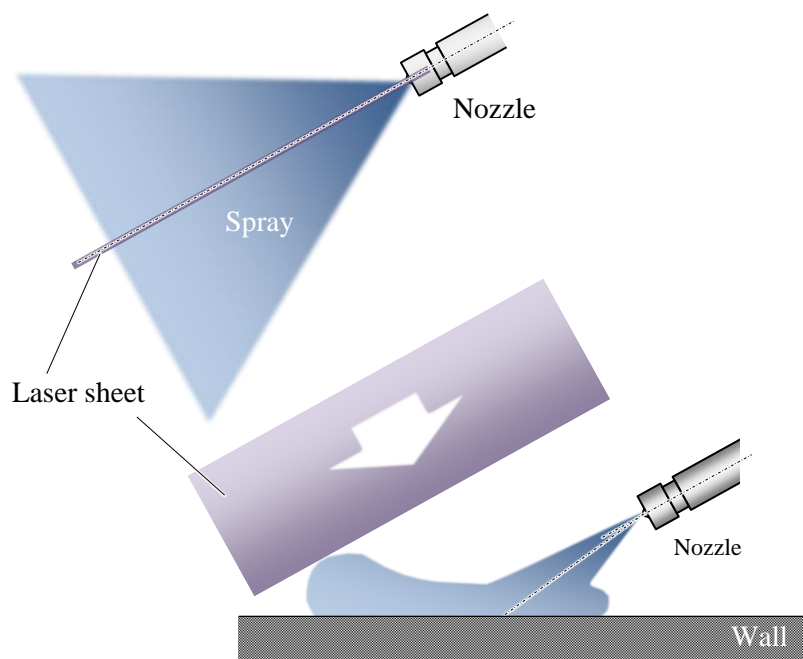


Figure 9-18. Experimental setup of the LIEF technique

9.4.7. 壁面衝突時の混合気の時系列変化

壁面衝突時における燃料の気相/液相の空間分布画像を図 9-19 に示す. 撮影時期は, 噴射開始後の時刻を t ms とすると, t/t_{inj} 0.7, 1.1, 1.5 である. 気相と液相は別々に撮影し, それぞれ 1 ショットの気相の代表画像に, 液相画像を 10 ショット平均化し重ね合わせている. 気相の濃さは, コンターで定性表記している. なお図中一部にハッチング部(Area X)があるが, これはレーザ透過の減衰により,

レーザ強度が弱く、蛍光が不十分と判断した箇所である。時間経過に対する挙動をみると、どの燃料噴射圧力においても、時間経過とともに液相が減少し、気相域が拡大している。そして燃料噴射圧力による気相/液相の違いについてみると、高噴射圧ほど気相が濃く、液相域が狭い傾向がみられ、噴射燃料の気化が促進していることを示唆している。特に、噴霧先端の気相域が拡大している傾向がみられることから、噴霧先端の気相高さについて図 9-20 に示す。壁面への噴霧衝突後の気相の高さ H_s について、各噴射圧ともに 10 ショットとその平均値を表記している。各ショットでばらつきはあるものの、平均値をみると高噴射圧ほど壁面衝突後の気相が高くなる傾向がみられ、燃料噴射圧 20MPa に対し 80MPa では平均値換算で約 19.3% 高くなった。これは、壁面衝突による燃料液滴の気化による吹き上げ作用と燃料噴霧の巻き上がりにより、燃料液滴や蒸気が壁面上方に拡散したためと考える⁽⁹⁻⁹⁾。

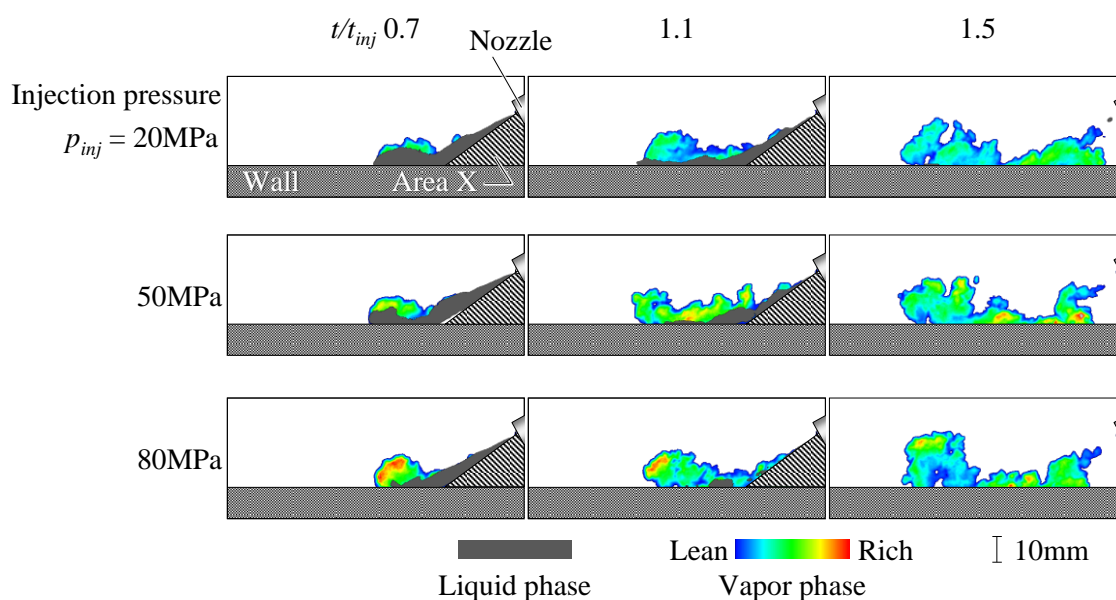


Figure 9-19. Fuel vapor/liquid phase distribution

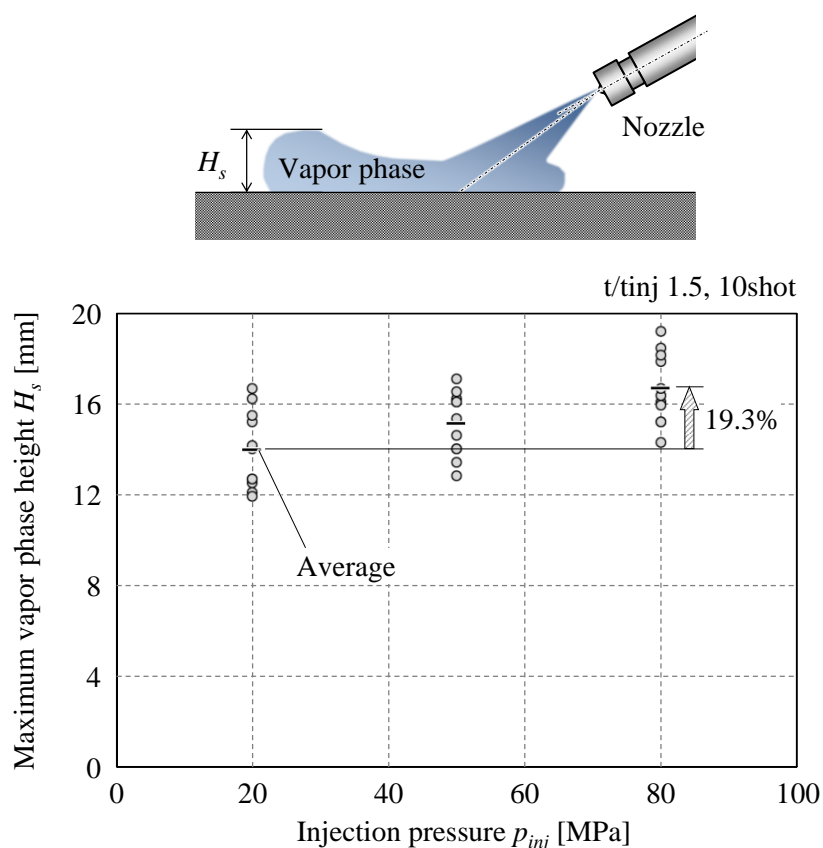


Figure 9-20. Vapor phase height after impinging on the wall

9.5. まとめ

直接噴射式ガソリンエンジンの排気PM低減に向けて、燃料の高噴射圧化におけるPM生成要因への影響を把握するため、ピストンに付着する燃料液膜の計測、LIEF法による混合気分布の計測を冷間始動時の触媒急速暖機環境で実施した。

ピストン頂面の燃料液膜は、高噴射圧化(20MPa→80MPa)により、薄くなり、面積が低減する。壁面衝突により形成する燃料液膜は高噴射圧ほど少なく、かつ早く気化する。ウォールガイドを想定した触媒急速暖機環境下では、噴射圧 50MPa 以上で付着燃料起因のPM生成を抑制できる可能性があることを示唆した。

燃焼室内の混合気分布は、高噴射圧化(20MPa→80MPa)により液相が減少し、気相の濃淡バラツキが低減し、均質化する。

以上より、燃料の高噴射圧化は、PM生成要因である燃料液膜と過濃混合気を低減できることを確認した。次章10章にて、直接噴射式ガソリンエンジンにおいて、燃料の高噴射圧化による排気PM低減を確認する。

参考文献

- (9-1) 藤間浩平, 松本康義, 大聖泰弘, 高橋真嘉, 高林徹, 筒内に直接噴射された燃料噴霧の壁面衝突と燃焼特性, 自動車技術会論文集, Vol.44, No. 5, p. 1115-1161 (2013)
- (9-2) 橋本淳, 植田拓己, 鶴留直之, 高橋大樹, 田上公俊, 窪山達也, 森吉泰生, 壁面付着燃料の蒸発と燃焼により生じる粒子状物質に関する研究, 第26回内燃機関シンポジウム講演論文集, No. 93, p. 1-6 (2015)
- (9-3) Lynn A. Melton, Spectrally separated fluorescence emissions for diesel fuel droplets and vapor, *Applied Optics*, Vol. 22, No. 14, p. 2224-2226 (1983)
- (9-4) J. B. Ghandhi, Fuel distribution measurements in a direct-injection stratified-charge engine, Princeton University Doctoral Thesis (1995)
- (9-5) Teruyuki Itoh, Akihiko Kakuho, Hiroko Hishinuma, Tomonori Urushiahara, Yasuo Takagi, Kazuyuki Horie, Makoto Asano, Eisuke Ogata, Takashi Yamasita, Development of a New Compound Fuel and Fluorescent Tracer Combination for Use with Laser Induced Fluorescence, SAE Technical Paper 952465 (1995)
- (9-6) 安秉一, 大聖泰弘, LIF法による二成分燃料噴霧の蒸発過程可視化, 日本機械学会論文集B編, Vol. 67, No. 653, p. 203-209 (2001)
- (9-7) 藤川武敏, LIF法による燃料濃度分布の定量測定及び燃焼変動解析への応用, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No. 10-02, p. 40-45 (2002)
- (9-8) 清水里欧, 松本清市, 古野志健男, 井口哲, 藤川武敏, 小島普璽, LIEF法を用いたリーンバーンエンジン内の混合気分布測定, 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, p.301-306 (1992)
- (9-9) 千田二郎, 神田知幸, 小林正明, 田邊弥彦, 藤本元, エキサイプレックス蛍光法によるディーゼル噴霧濃度場の定量化, 日本機械学会論文集B編, Vol. 63, No. 607, p. 1068-1073 (1997)

第 10 章 燃料の高噴射圧化による PM 生成過程の変化

これまでに直接噴射式ガソリンエンジンの排気 PM 低減に向けて、PM 排出が多い条件として、冷間時始動時の触媒急速暖機運転であることを明らかにした。この触媒急速暖機運転における PM 生成要因は、圧縮行程の燃料噴射がピストンに衝突により形成される燃料液膜と、ピストンへの噴霧衝突による飛散や巻き上がりなどにより形成する空間の過濃混合気であることを明らかにした。これらエンジン燃焼室内の現象解析から、PM 低減策として燃料の高噴射圧化が有効であることを提案した。

これを証明するため、研究用としてノズルを試作し、燃料の高噴射圧化による燃料噴霧の特性およびエンジン性能への影響について評価した。燃料噴霧の特性として、燃料の高噴射圧化により、粗大液滴が低減し微粒化し、そして噴霧への空気導入の増加していることを明らかにした。そして、エンジン燃焼室内における PM 生成要因への影響を明らかにするため、燃料液膜と混合気分布計測を実施し、燃料の高噴射圧化により PM 生成要因である燃料液膜が低減し、過濃混合気も低減することを確認した。

本章では、エンジン燃焼室内の現象解析を通じて得られた PM 低減策である燃料の高噴射圧化による PM 低減について明らかにする。

10.1. 実験装置と計測方法

10.1.1. 供試エンジン

エンジンからの排気 PM の評価は、9.1.1 の表 9-1 に示した同じ諸元のサイド噴射レイアウトの直接噴射式ガソリンエンジンを用いた。排気 PM 評価時には通常エンジンを用い、燃焼室内の燃料噴霧と燃焼過程の可視化には 9 章でも使用したガラスシリンダエンジンを用いた。

10.1.2. 評価ノズル

評価ノズルは、第 8 章と第 9 章で評価に使用した 8.1 の図 8-3、表 8-1 に示す仕様のノズルを用いた。

10.1.3. エンジン運転条件

評価条件は、9.1.3 の表 9-2 に示した触媒急速暖機運転と同条件で実施した。図示平均有効圧 (Indicated Mean Effective Pressure: IMEP) が 210kPa、排気 A/F が 15.0 となるよう、燃料噴射量と

吸入空気量を調整した。燃料噴射は、吸気行程と圧縮行程の 2 回噴射で、等量に分配している。使用燃料は、3.1.4 で示した国内市販相当のプレミアムガソリンで、RON100、理論空燃比は 14.4 である。

10.1.4. PM 粒子数の計測方法

PM 粒子数の計測には、2.2.4. でも述べた PM 粒子径分布計測器である Engine Exhaust Particulate Sizer: EEPS を用いた。排気ガスのサンプリング位置は、排気ポート直下にある触媒の下流 50mm の排気管中心である。サンプルガスは、計測器のサンプル入口まで 120°C に温調し、排気ガスの凝縮による水発生を抑制した。PM 粒子数は、表 9-2 に示した定常運転で、PM 粒子数は計測時間 1min の平均値で評価した。欧州での PM 粒子数規制に倣い粒子径範囲 23nm–560nm における PM 粒子数の積算値を用いた。

10.2. 燃料噴射圧力による触媒急速暖機運転の燃焼特性

触媒急速暖機運転における燃料噴射圧力による PM 生成への影響を評価する上で、事前に燃焼安定性を評価した。触媒急速暖機運転は、冷間時に冷えた触媒を浄化作用が発揮する活性温度まで急速に到達させるために、意図的に後燃えさせる燃焼形態を持つ。そのため、燃焼が不安定になりやすい。このため、触媒急速暖機運転の PM 低減には、燃焼を安定した上で、PM 低減を成立させる必要がある。燃焼安定性の指標には、IMEP の変動率を用いた。

触媒急速暖機運転における、圧縮行程の燃料噴射開始時期を変更した際の IMEP 変動率を、図 10-1 に示す。いずれの燃料噴射圧とも、IMEP 変動率が安定する領域が存在する。燃料噴射圧力による IMEP 変動率への影響をみると、燃料噴射圧が高いほど燃焼が安定する IMEP 変動率は小さく、そして IMEP 変動率が安定する範囲は広い傾向がみられる。

この要因として、触媒急速暖機運転に用いられる燃焼形態である成層燃焼の混合気形成が関わっていると考えられる。評価エンジンは、ウォールガイド方式と呼ばれる燃料噴霧をピストン頂面の壁面をガイドして利用し、燃料噴霧を移動させ、ピストンリップを介して、燃料噴霧を点火プラグ方向に移送させている^{(10-1), (10-2), (10-3)}。この移送の間に、燃料噴霧に取り込まれる空気と燃料液滴がミキシングされ、混合気となる。これより、成層燃焼を良好にするためには、点火時に混合気が点火プラグ周囲に存在することが重要であり、燃料噴射時のピストン位置による影響を強く受ける。燃料噴射時期を進角し過ぎると、インジェクタとピストンとの間の距離が遠く、ピストン頂面を燃料噴霧のガイドとして利用

できなくなり、成層混合気が形成できず、着火性が悪くなり、燃焼が悪化する。また、燃料噴射時期を遅角しすぎると、インジェクタとピストンとの間の距離が近く、燃料噴霧がピストン頂面に衝突し飛散する程度が増加することや、燃料噴射から点火までの時間が短いため燃料噴霧に導入された空気とのミキシングが不足するため、混合気が形成不良となり、燃焼が悪化すると考えられる。これより、上記の燃焼悪化の影響を受けにくい燃料噴射タイミングにて、燃焼変動が小さくなり、燃焼が安定する領域が存在する。

そして、燃料の高噴射圧化ほど燃焼が安定するのは、第 8 章と第 9 章で示したように高噴射圧化ほど微粒化し、燃料噴霧への空気導入が多いことから、燃料の気化が促進しかつ空気とのミキシングが促進することから、成層混合気の燃料濃度ムラが少なく、着火性が良好かつサイクル間で変動しにくいためと考える。

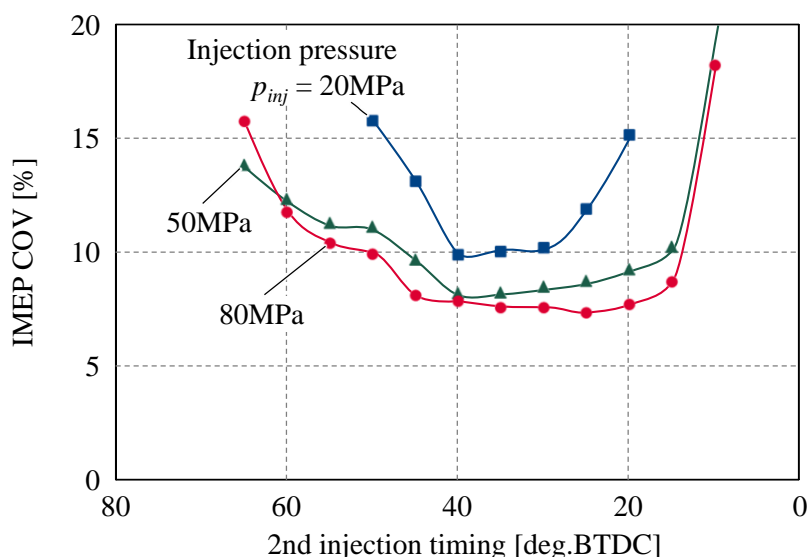


Figure 10-1. Cycle-to-cycle variation of combustion

10.3. 燃料噴射圧力による触媒急速暖機運転の PM 排出特性

10.2.で燃焼変動として示した IMEP 変動率と同様に、圧縮行程の燃料噴射開始時期を変更した際の PM 粒子数の変化を、図 10-2 に示す。いずれの燃料噴射圧とも、圧縮行程の燃料噴射時期を進角するほど PM 粒子数が減少する傾向がみられる。そして、燃料噴射圧が高いほど、PM 粒子数が少ない傾向がみられる。

これら 2 つの要因は、PM 生成要因である燃料液膜と過濃混合気の低減が影響していると考えられる。燃料噴射時期を進角するほど PM 粒子数が減少したのは、燃料噴射時期を進角するほど、燃料噴射開始時のピストン位置とノズル間の距離が遠くなり、燃料噴霧がピストンに衝突するまでに燃料噴霧が微粒化し、周囲空気と運動量交換し、噴霧液滴が減速するため、周囲空気流に追従しやすくなり、燃料液膜が減少したと考えられる。また、燃料噴射開始から点火までの時間が延びることから、燃料噴霧に取り込まれた空気や周囲空気とのミキシングが進行するため、過濃混合気も低減していると考えられる。

そして、同じ燃料噴射時期でも、燃料の高噴射圧化ほど PM 粒子数が少なくなったのは、第 9 章にて確認したように、燃料液膜の減少と、成層混合気のミキシング向上によるものである。図 10-3 には燃焼挙動(90deg.ATDC)を示しており、噴射圧ほどピストン頂面および空間からの輝炎が減少している。この結果は、高噴射圧化による燃料液膜の減少と成層混合気のミキシング向上を裏付けている。

触媒急速暖機運転における燃焼の安定性と PM 粒子数の関係を把握するため、10.2 で示した各燃料噴射圧とも燃焼変動が小さくなった、燃焼が安定する燃料噴射開始時期 40deg.BTDC における、燃焼変動率 IMEP COV と PM 粒子数の関係を図 10-4 に示す。PM 粒子数は対数表記している。燃料の高噴射圧化により、燃焼が安定し、PM 粒子数が低減する。PM 粒子数は、特に噴射圧 20MPa から 50MPa にかけての低減が大きく、PM 粒子数は 84%低減する。また、噴射圧 20MPa から 80MPa では PM 粒子数は 95%低減する。このように、燃料の高噴射圧化は、触媒急速暖機運転の燃焼を安定させながら、PM を大幅に低減することができる。

ここで本研究では、最初に直接噴射式ガソリンエンジンの排気 PM 特性として、欧州で用いられるテストサイクルの一つである NEDC モード走行時における PM 粒子数を評価し、運転パターン(始動、加速)による PM 排出の内訳を図 3-8 に示した。これに、燃料の高噴射圧化による触媒急速暖機運転の PM 低減効果を考慮した場合の、PM 排出の内訳を図 10-5 に示す。これは、触媒急速暖機運転時の PM 排出が噴射圧 20MPa から 80MPa により 95%低減したことを加味したものである。NEDC モード 0-200s では、PM は 71%減少する見積もりとなった。ここで、内山らや、Rodriguez らの研究によると、NEDC モード 0-200s で排出される PM が NEDC モード全体 1180s 走行に占める割合は、車両によるばらつきはあるものの、60%程度である^{(10-4), (10-5)}。これを勘案しても、本研究で実施した燃料の高噴射圧化による PM 低減効果は大きいと考えられる。

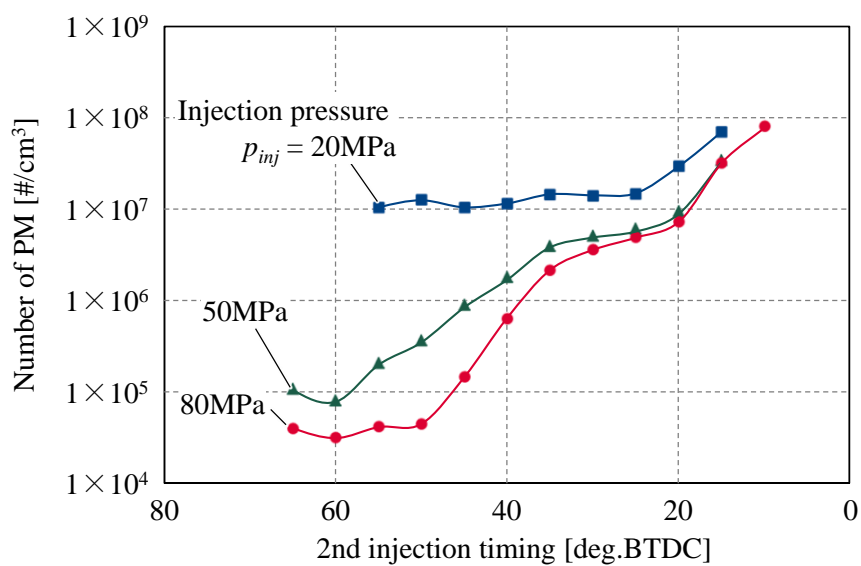


Figure 10-2. Number of PM

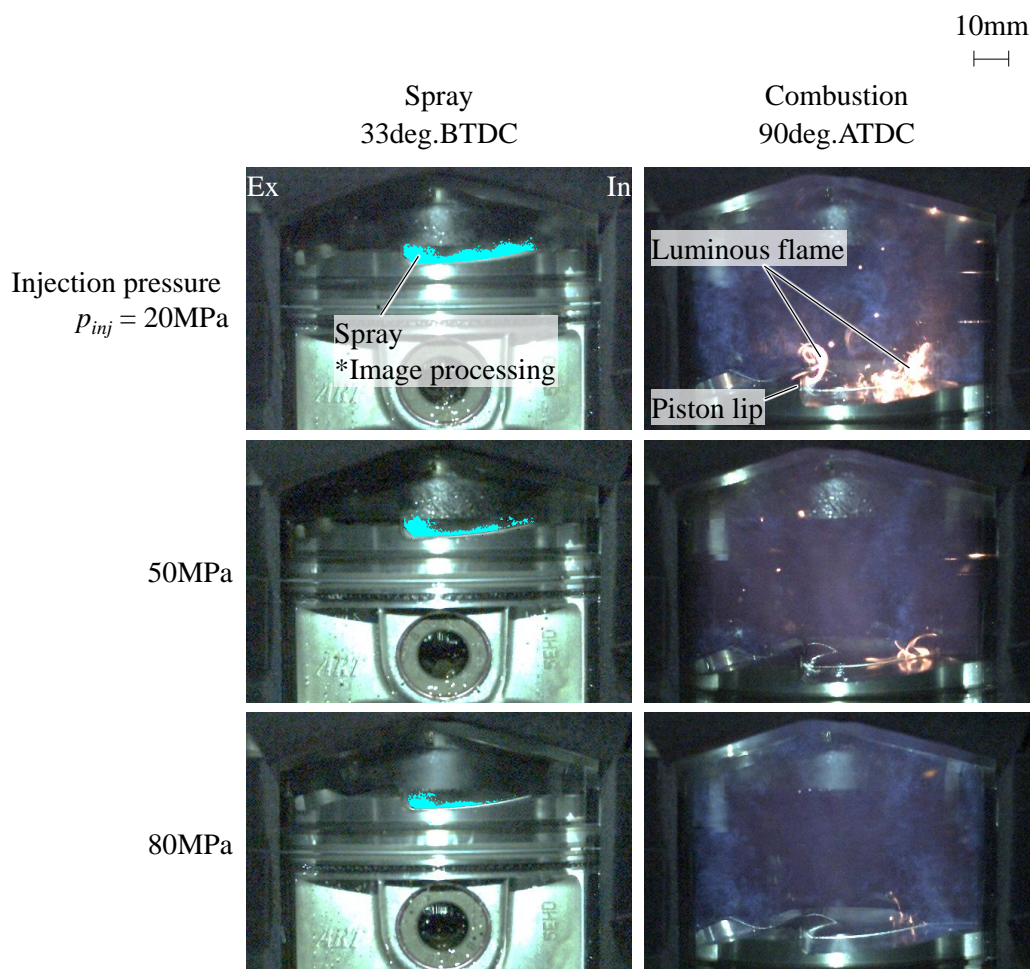


Figure 10-3. Spray and combustion within a cylinder

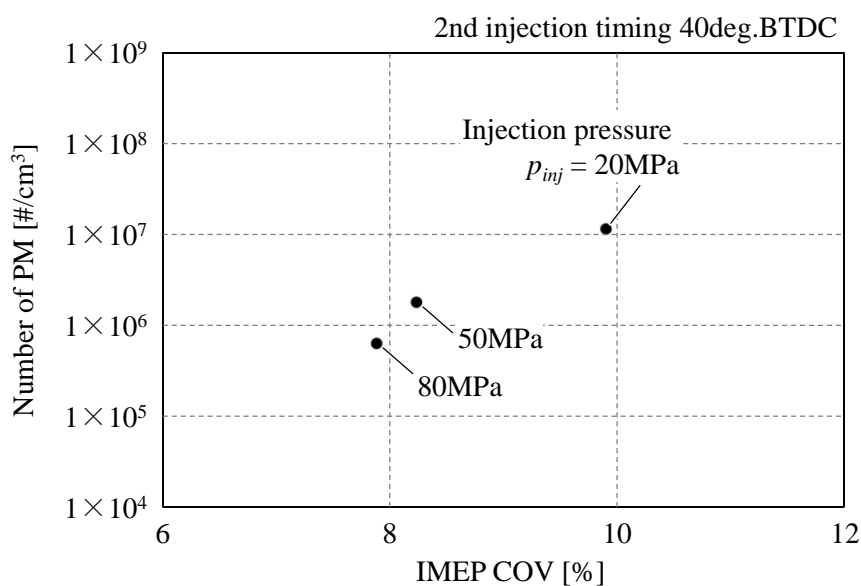


Figure 10-4. Relationship between combustion variation and PM

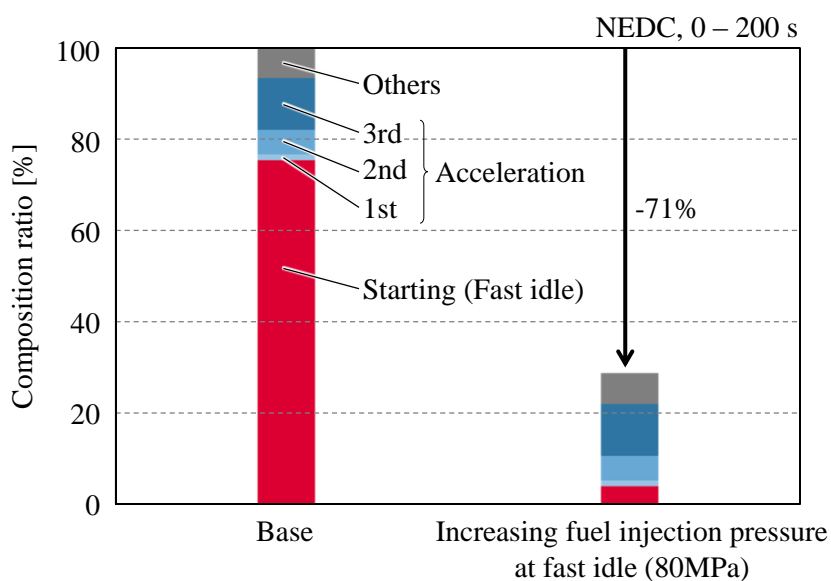


Figure 10-5. PM emission rate according to engine operating conditions

10.4. まとめ

以上より、直接噴射式ガソリンエンジンの触媒急速暖機運転における燃料の高噴射圧化は、燃焼変動を小さくでき、燃焼の安定を図りながら、PM 粒子数を低減できる手段であることを明らかにした。

参考文献

- (10-1) C. Arcoumanis, T. Kamimoto, *Flow and Combustion in Reciprocating Engines*, Springer (2009)
- (10-2) 岡野博志, 古野志健男, 神田睦美, 服部文昭, 直噴ガソリンエンジンの開発, トヨタ・テクニカル・レビュー, Vol. 50, No. 2 (2000)
- (10-3) Werner Hentschel, Optical diagnostics for combustion process development of direct-injection gasoline engines, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, No. 1, p. 1119-1135 (2000)
- (10-4) 内山雅史, Guenter Fraidl, Paul Kapus, ガソリン直噴エンジンの Euro6 PN 規制への対応手法, 自動車技術会 シンポジウムテキスト, No. 14-11, p. 67-72 (2012)
- (10-5) J. Felipe Rodriguez, Wai K. Cheng, Effect of Operation Strategy on First Cycle CO, HC, and PM/PN Emissions in a GDI Engine, *SAE Technical Paper 2015-01-0887* (2015)

第 11 章 結論

昨今、強まる地球環境負荷の低減要求により自動車の電動化シフトが始まっているものの、向こう数十年間は内燃機関付き自動車が大半を占めると予測されており、内燃機関にはこれまで以上に熱効率の向上と排気エミッションの低減が要求されている。その中でも、燃焼室内に燃料噴射インジェクタを備える直接噴射式ガソリンエンジンは、混合気形成の自由度が高いことから、理論空燃比よりも希薄な燃焼形態を実現できるため、熱効率向上のポテンシャルが大きく、今後数十年の一翼を担う内燃機関として考えられている。この実現には直接噴射式ガソリンエンジンの排気エミッションのより一層の低減が要求されており、特に昨今欧州で排気規制項目に新たに加わった粒子状物質 (Particulate Matter: PM) の低減が重要課題であり、対応が急務である。

そこで、本研究では、エンジン燃焼室内の実現象解明から PM 低減に貢献することを目標に取り組んだ。PM 低減に向けて、まず PM がどのような運転条件で排出が多いのかを明らかにし、その運転条件におけるエンジン燃焼室内の燃料噴射～燃焼～PM 生成の実現象を明らかにし、PM 生成要因を明確にすることが重要だと考えた。そして、明らかにしたエンジン燃焼室内の実現象から PM 低減策を導き出し、PM 低減策による PM 生成要因への影響を体系的にまとめ、PM 低減効果を実証する考えのもと研究を遂行した。

本研究で得られた知見を、以下に記す。

11.1. エンジン燃焼室内の現象把握より明らかにした PM 生成要因

最初に、直接噴射式ガソリンエンジンの PM 排出が多い運転条件を把握するため、欧州で用いられるテストサイクル走行時にエンジンより排出される PM 粒子数を計測した結果、冷間始動時と加速時で PM 排出が多くみられ、特に冷間始動時の触媒急速暖機運転で多く、始動～200 秒の間では触媒急速暖機運転からの PM が約 75% も占めることが判った。これより本研究では触媒急速暖機運転を研究対象の運転条件に選定した。

ここで、触媒急速暖機運転の燃焼形態は、点火プラグ周りに混合気を形成する成層燃焼である。この燃焼は、燃料噴霧をピストン壁面に衝突させ、ピストン頂面をガイドとして利用し、点火プラグに混合気を輸送することで、燃料濃度の濃い混合気を点火プラグ周りに形成し、点火プラグによる着火および燃焼の安定を狙っている。これより PM 生成要因を明らかにするには、燃料噴霧と燃焼、そして PM 生成を紐付ける体系的な現象解析が重要と考えた。そこで、燃焼室内の実現象把握に向け、

燃焼室内を視認できる可視化エンジンと、さらに可視化自由度の高いシリンダライナを透明ガラスに置き換えたガラスシリンダエンジンを製作し、光学的手法により燃焼室内の現象を可視化解析した。

最初に、燃料噴霧と燃焼の現象把握を行った。エンジン燃焼室内の直接撮影により、燃料噴射はピストンが上昇する圧縮行程後半に行われ、燃料噴霧の一部がピストン頂面に衝突し、ピストン頂面上に燃料液膜を形成する。残る燃料噴霧は飛散や巻き上がりにより、ピストン頂面上を移動し、ピストン中央に設けられたリップを介して、点火プラグ方向に向きを変える。そして、点火プラグでの点火により燃焼が開始される。燃焼過程において、火炎中にPMが生成しその固体放射による輝きのある赤橙色の輝炎に着目すると、輝炎は点火直後に空間に筋状に存在する。その後、火炎伝ばとともに燃焼が進行し、燃焼行程後半では、輝炎はピストンリップ上部の空間と燃料液膜が形成するピストン頂面上に発生し、特にピストンリップ上部に輝炎が多い。

次に、PMの可視化により、燃焼との関係を調査した。PMの可視化にはPMの主構成成分であるSoot粒子へのレーザー照射による放射光強度を利用したレーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence: LII)、およびSoot粒子径の計測にはLII法を発展させたSoot粒子径を計測する時間分解レーザー誘起赤熱法(Time Resolved Laser Induced Incandescence: TR-LII)を用いた。Sootと燃焼の関係を評価した結果、燃焼により生成するSoot位置は、燃焼の輝炎が存在する位置と概ね一致する。特に、輝炎と同じく、燃焼行程の下死点以降でピストンリップ上部のSoot生成が多い。そして、Sootは燃焼終了後も存在し、大きく拡散することなく、排気行程で排気ポートへと排出される。また、圧縮行程後半に実施される燃料噴射量を減量し、ピストン頂面への燃料液膜厚さを薄くすると、燃料液膜上加えピストンリップ上部の空間からのSootが減少する。これは、噴射燃料のピストン衝突による飛散や巻き上がりが減少し、ピストンリップ上部の空間の過濃混合気が減少したことを示唆していると考えられる。

LII法やTR-LII法は、他の研究者らにより提唱された計測手法であるが、本研究では新たに燃焼室内のSoot粒子の数密度計測にも取り組んだ。単位領域あたりのSoot粒子の放射強度は領域内に存在する粒子径分布に依存する考えのもと、TR-LII法を応用し、燃焼室内のSoot数密度分布について解析を試みた。触媒急速暖機運転におけるSoot数密度は、点火後～120deg.ATDCで確認される輝炎中でのSoot数密度は少ないものの、180deg.ATDC付近で発生するピストンリップ付近から輝炎中でのSoot数密度が高いことが判った。そして、Soot粒子径に対する数分布の時系列変化は、点火からSootが多量発生する前まではおよそ30nmに最頻値を持つ粒子径分布であり、ピストンリップ上部の燃焼室空間でSootが多量発生する燃焼行程後半では60nm付近に最頻値を持つ分布に変化することを明らかにした。

以上より、エンジン燃焼室内の現象解析から、触媒急速暖機運転における PM 生成要因は、燃料噴射のピストン衝突によって生じる燃料液膜と、衝突後の噴霧の飛散や巻き上がりなどにより形成される過濃混合気であることを示した。

11.2. 燃料の高噴射圧化による噴霧特性の変化と PM 低減

次に、明らかにしたエンジン燃焼室内の現象と PM 生成要因をもとに、PM 低減策について検討した。本研究では PM の低減策として燃料の高噴射圧化が有効であると考え、その可能性について評価した。この燃料の高噴射圧化を選定した理由は、PM 生成要因であるピストン頂面の燃料液膜および空間の過濃混合気はいずれも噴射燃料のピストン頂面衝突に起因することから、噴霧がピストン頂面に衝突するまでの短い時間で噴霧の質を改善することが有効であり、燃料の高噴射圧化でこの噴霧の質の改善が実現できると考えたためである。燃料の高噴射圧化による噴霧の特性および PM 生成要因への影響として、以下の仮説を立てた。

“燃料の高噴射圧化により、ノズルからの噴出速度が増加するため、空気とのせん断力が増加し燃料が微粒化し、気化性が向上する。噴霧の微粒化により燃料液滴の運動量が小さくなり、周囲空気との追従性が向上するため、壁面に衝突しにくく、燃料液膜の形成が少なくなる。また、高噴射圧化によるせん断力増加により、燃料噴霧への空気導入速度が増加するため、燃料噴霧内に取り込まれる空気量が増加し、燃料噴霧内での空気と燃料の混合促進により過濃混合気が低減する。”

この仮説を立証するため、燃料の高噴射圧化による影響解析として、燃料噴霧の特性、PM 生成要因、そして排気 PM エミッションへの燃料噴射圧力による影響を評価した。燃料の噴射圧は、現在市販車で一般的に採用されている 20MPa をベースに、50MPa と 80MPa を選定した。評価は、燃料噴射圧 20, 50, 80MPa で最大噴射率が同等となるようにインジェクタ先端のノズルを研究用に試作し、評価した。

燃料噴霧の特性として、噴霧粒子径と噴霧に取り込まれる空気流速を評価した。噴霧粒子径は、影写真法により噴霧粒子径分布を計測し、燃料の高噴射圧化により、粗大液滴が低減し、微粒化することを確認した。噴霧粒子径の指標の一つであるザウター平均粒子径は、噴射圧 20MPa から 80MPa により、 $10.4 \mu\text{m}$ から $6.1 \mu\text{m}$ と約 41% 小さくなる。次に、燃料噴霧内に取り込まれる空気の指標として、噴霧への空気導入速度を粒子追跡法により計測した。燃料の高噴射圧化により、燃料噴霧への空気導入速度が高まり、空気導入量が多くなることを確認した。

PM 生成要因の一つであるピストン頂面の燃料液膜厚さは、蛍光染料入り燃料を用い紫外線照射による蛍光発光強度を計測する方法で計測した。燃料の高噴射圧化により、ピストン頂面の燃料液膜は薄くなり、面積が低減する。これは確認した燃料の高噴射圧化による微粒化により、各燃料液滴の運動量が小さくなり、周囲空気との追従性向上によるものと考えられる。そして、高噴射圧ほど燃料液膜が薄くなり、燃料液膜の面積の減少速度は早くなる。燃料噴射圧 50MPa 以上では噴射開始～点火までに形成した燃料液膜が気化する。これより、ウォールガイド方式を想定した触媒急速暖機運転下では、燃料噴射圧 50MPa 以上で付着燃料起因の PM 生成を抑制できる可能性があることを示唆した。

もう一つの PM 生成要因である過濃混合気の時空間特性を把握するため、混合気分布をレーザ誘起エキサイプレックス蛍光法(Laser Induced Exciplex Fluorescence : LIEF 法)により計測した。LIEF 法とは、蛍光剤を混入した燃料にレーザを照射することにより、分子を励起させ蛍光を誘起させる手法である。点火時における混合気分布は、燃料の高噴射圧化により液相が減少し、気相の濃淡バラツキが低減し、均質化することを確認した。これは、高噴射圧ほど燃料噴霧への空気導入量が多いことから、空気との混合促進によるものと考えられる。

最後に、燃料噴射圧変更による排出 PM 粒子数を評価した。高噴射圧ほど PM 粒子数が少なく、特に噴射圧 20MPa から 50MPa にかけての PM 粒子数の低減が大きく、低減割合は 80%を超える。本研究で最初に評価したテストサイクル走行における PM 排出を想定すると従来比 71%減となり、燃料の高噴射圧化は大幅に PM 低減するポテンシャルを持つことを確認した。

以上、PM 低減には、燃料の高噴射圧化は有益な手法であることを、エンジン燃焼室内の現象解析と PM 生成要因解析により示した。

11.3. 今後の展望

本研究では、直接噴射式ガソリンエンジンの PM 低減に向け、エンジン燃焼室内の PM 生成現象を解明するため燃料噴霧と燃焼、そして PM の主構成成分である Soot、さらに PM 生成要因である燃料液膜と過濃混合気をエンジン燃焼室内で実際に計測し、体系的にまとめた。そして、得られた知見から、PM 低減策として燃料の高噴射圧化による PM 低減を提案し、燃料の高噴射圧化による噴霧粒子径や噴霧への空気導入といった物理量の変化や、PM 生成要因への影響を系統立ててまとめ、優れた PM 低減効果があることを示した。本研究が今後の各カーメーカや研究者らのエンジン開

発にとって、PM エミッションの改善はもちろん、燃焼室内の現象把握するための重要な知見や計測技術の適用に幅広く活用されることを期待する。

本研究では、PM 低減策として燃料の高噴射圧化を取り上げ、その PM 低減効果を明らかにした。燃料の高噴射圧化は有用な PM 低減策であるものの、実用化には様々な課題への対応も勘案する必要がある。例えば、高噴射圧に耐えられる部材強度の確保、高い燃料圧力下でも噴射可能なインジェクタの駆動方法の選定、燃料圧送ポンプの昇圧方法の選定などである。PM 低減に向けては、燃料の高噴射圧化を含め、対策とそれに対する課題への対応について多角的に検討し、燃費や他のエンジン性能とともに総合的に判断していかなければならない。また本研究では、燃料の高噴射圧化による噴霧特性評価から PM 評価までを体系的にまとめ、PM 低減に必要な噴霧特性を示した。この知見は、例えばノズルの噴孔改良といった別のアプローチで PM 低減策を検討する際にも有用な知見になりうると推察される。

昨今の内燃機関を取り巻く環境は目まぐるしく変動している。社会情勢により、現在予測されているエネルギー利用や自動車のシナリオも大きく変化する可能性もある。しかし、内燃機関付きの自動車は今後数十年間大半を占めると考えられ、継続した技術開発は必須であり、さらにエンジン性能を大幅に向上する技術革新も要求されている。これに携わる技術者として、これまで先人たちが幾重にも積み重ねてきた歴史や知見を労を厭わず学び、PM 低減の技術開発を含め、内燃機関の発展に貢献する技術開発を遂行し続けることが責務であると考えます。

主な使用記号

A	代表長さ	[cm]
c	真空中の光速	[cm/s]
C_s	炭素の比熱	[J/(g·K)]
d	Soot 直径	[nm]
d_0	ノズル噴孔径	[mm], [m]
d_p	一次粒子径	[nm]
d_{rep}	代表 Soot 粒子径	[nm]
$E(m)$	無次元屈折率関数	[-]
f	Euchen factor	[-]
G	幾何学因子	[-]
G_a	エンジン吸入空気質量流量	[g/s]
G_f	燃料質量流量	[g/s]
h	プランク定数	[J·s]
H_n	壁面からのノズル先端高さ	[mm]
J_f	燃料噴射量	[kg/s]
J_{SO}	噴霧への空気導入量	[kg/s]
K_a	周囲気体への熱伝導率	[W/(cm·K)]
K_{abs}	Soot 粒子の吸収係数	[-]
k_B	ボルツマン定数	[J/K]
K_n	クヌーセン数	[-]
l	平均自由行程	[cm]
L	流れの代表長さ	[m]
M	Soot 重量	[kg]
N_p	一次粒子径の数密度	[個/cm ³]
p^*	霧囲気圧力	[MPa], [kPa]
p_c	炭素の蒸気圧	[MPa]
p_{amb}	環境圧力	[MPa]
p_a	環境圧力	[MPa]

p_{inj}	燃料噴射圧力	[MPa]
PN_n	PM 粒子数	[個/s]
PN_d	PM 粒子数濃度	[個/cm ³]
q	レーザー強度	[W/m ²]
$Q_{Absorption}$	レーザー照射による Soot 粒子のレーザーの吸収	[W]
$Q_{Conduction}$	レーザー照射による Soot 粒子の熱伝達	[W]
$Q_{Internal Energy}$	レーザー照射による Soot 粒子の内部エネルギーの増加	[W]
$Q_{Radiation}$	レーザー照射による Soot 粒子の熱放射	[W]
$Q_{sublimation}$	レーザー照射による Soot 粒子の蒸発	[W]
R	空気の気体定数	[J/(K・mol)]
S_{Rad}	Soot 粒子からの放射光強度	[W/cm]
S_t	ストークス数	[-]
S_{LII}	Soot 粒子からの放射光の強度	[W/cm]
S_{LII}'	1 ピクセルあたりの放射光強度	[-]
t	燃料噴射開始後の経過時間	[s], [ms]
T_0	火炎温度	[K]
T_a	温度	[K]
t_{inj}	燃料噴射期間	[ms]
T_w	壁面温度	[K], [deg.C]
T^*	炭素蒸気圧 p が雰囲気圧 p^* に等しいときの温度	[K]
U	流れの代表速度	[m/s]
U_v	蒸気速度	[m/s]
V	燃料の噴出速度	[m/s]
v_s	トレーサの終端速度	[m/s]
W_s	炭素の分子量	[g/mol]
W_v	炭素の蒸気モル濃度	[g/mol]
X	カメラ撮影時の感度定数	[-]
α	thermal accommodation coefficient	[-]
γ	空気の断熱指数	[-]

ΔH_v	Soot の蒸発潜熱	[J/mol]
ε_{λ_s}	波長 λ_s における放射率	[-]
θ_n	壁面に対するノズルの傾斜角	[deg.]
θ_s	壁面に対する噴霧軸の傾斜角	[deg.]
λ	レーザ発振波長	[nm]
λ_{em}	検出波長	[nm]
λ_s	波長	[nm]
η	環境流体の粘性	[kg/(m·s)]
ρ_a	空気密度	[kg/m ³]
ρ_p	粒子密度	[kg/m ³]
ρ_s	炭素の密度	[g/cm ³]
ρ_v	炭素の蒸気密度	[g/cm ³]
σ	average molecular across section	[cm ²]
σ_{sb}	ステファン・ボルツマン定数	[W/(cm ² K ⁴)]

本論文に関する公開論文と研究発表

論文

- (1) 植木毅, 村瀬栄二, 可視化によるガソリン直噴エンジンのすす生成に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 1, p. 63-68 (2014/1)
- (2) 植木毅, 村瀬栄二, ガソリン直噴エンジン燃焼室内におけるPM生成の空間分布解析, 自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 2, p. 337-342 (2015/3)
- (3) 植木毅, 後藤守康, 松村恵理子, 千田二郎, ガソリン直噴インジェクタノズルの高噴射圧化による噴霧特性解析, 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 6, p. 1253-1258 (2016/11)
- (4) 植木毅, 後藤守康, 柏崎貴司, 松村恵理子, 千田二郎, 高温高压雰囲気場におけるガソリン直噴インジェクタノズルの噴霧特性解析, 自動車技術会論文集, Vol. 48, No. 2, p. 259-264 (2017/3)
- (5) 植木毅, 高千穂慧, 柏崎貴司, 松村恵理子, 千田二郎, 直噴ガソリンエンジンの高噴射圧化による排出 PM への影響解析, 自動車技術会論文集, Vol. 48, No. 6, p. 1219-1224 (2017/11)
- (6) 植木毅, 後藤守康, 高千穂慧, 柏崎貴司, 松村恵理子, 千田二郎, 直噴ガソリンエンジンにおける噴射燃料の高圧化による排出 PM の低減, ハリス理化学研究報告書, Vol. 58, No. 4, p. 157-167 (2017/12)

研究発表

- (1) 植木毅, 村瀬栄二, 可視化エンジンによるガソリン燃焼のすす生成に関する研究, 自動車技術会 2013 年春季大会 学術講演会前刷集, No. 23-13, p. 1-6, パシフィコ横浜 (2013/5)
- (2) 植木毅, 村瀬栄二, ガソリン直噴エンジンにおける PM 生成の空間分布解析, 自動車技術会 2014 年秋季大会 学術講演会前刷集, No. 94-14, p. 1-6, 仙台国際センター (2014/10)

- (3) 植木毅, 村瀬栄二, ガソリン直噴エンジンにおける生成 PM の空間分布解析, 自動車技術会シンポジウム, No. 12-15, p. 31-38, 発明会館ホール (2016/1)
- (4) 植木毅, 後藤守康, 松村恵理子, 千田二郎, ガソリン直噴インジェクタノズルの高噴射圧化による噴霧特性解析, 自動車技術会 2016 年春季大会 学術講演会 講演予稿集, No. 32-16, p. 761-766, パシフィコ横浜 (2016/5)
- (5) 西脇豊治, 植木毅, エンジンの燃料噴霧・燃焼の計測解析, 第4回 ガソリン機関部門委員会・ディーゼル機関部門委員会 合同公開委員会, 東京大学 山上会館 (2016/10)
- (6) 植木毅, 後藤守康, 柏崎貴司, 松村恵理子, 千田二郎, 高圧雰囲気場におけるガソリン直噴インジェクタノズルの噴霧特性解析, 自動車技術会 2016 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集, No. 1-146, p. 1221-1226, 札幌コンベンションセンター (2016/10)
- (7) 植木毅, エンジンの燃料噴霧・燃焼の計測解析, 自動車技術会シンポジウム, No. 08-16, p. 34-42, 発明会館ホール (2016/12)
- (8) 植木毅, 高千穂慧, 柏崎貴司, 松村恵理子, 千田二郎, 直噴ガソリンエンジンの高噴射圧化による排出PMへの影響解析, 自動車技術会 2017 年春季大会 学術講演会 講演予稿集, No. 64-17, p. 1704-1709, パシフィコ横浜 (2017/5)

その他

- (1) 自動車技術会 2013 年春季大会 学術講演会 優秀講演発表賞 受賞

謝辞

本研究は、同志社大学および株式会社 SOKEN で行われた研究であり、本論文の作成にあたり、ご指導ご助言を賜りました同志社大学 理工学部 千田二郎教授、松村恵理子准教授に深く感謝申し上げます。同志社大学 藤本元名誉教授におかれましても、機会あるごとに温かいご助言とご指導を賜り深く感謝いたします。

本研究を遂行する機会を与えて下さった株式会社 SOKEN 古野志健男専務取締役、鳥谷尾哲也取締役におきましては、心より深謝の意を表します。

本研究は株式会社トヨタ自動車、株式会社デンソーのご厚情に依ったことを記し、感謝を表します。その中におきましても、トヨタ自動車株式会社 清水里欧主査、同 服部文昭主査、同 村瀬栄二主査、株式会社デンソー 柴田仁担当次長には、本研究の実施をご理解いただいたご厚意に謝意を表します。

株式会社 SOKEN は社屋移転という大きな変換期の中で、通常の研究業務に加え、移転に伴う膨大な業務が加わる中で、中瀬善博部長、岡部伸一担当次長、高橋幸宏室長、安藤彰浩課長には、業務調整に腐心いただき、学業に専念させていただいたご厚恩に拝謝いたします。実際の研究遂行にあたっては、同 後藤守康担当次長、山下勇人課長、戸田直樹担当係長、高千穂慧氏、柏崎貴司氏には、多大なご協力とご支援を賜りました。心より感謝申し上げます。そして、本研究の実験準備に際しては、同 試作試験室の皆様にご協力いただきました。特に、松尾和樹課長、大地秀幸係長、鈴木知文係長、田部尚夫係長、坂中一夫班長、小川幸慈班長、首藤純也担当班長、磯貝聖慈担当班長、杉浦大介氏のご尽力によるところが多く、心より御礼申し上げます。

また、研究者として未熟者であった筆者に対し、研究者としての基礎や多岐にわたる計測技術の習得に際しご指導ご鞭撻を賜り、そして本研究を始まるきっかけを与えて下さった株式会社 SOKEN 斎藤公孝取締役、株式会社デンソー 馬崎政俊課長には、感謝の念に堪えません。

そして、本研究の計測技術の確立で行き詰った際に、初対面でありながらも快くご支援ご指導をいただきました一般財団法人自動車研究所 伊藤貴之氏に感謝いたします。

また、現在も同志社大学の学内で研究されている噴霧・燃焼工学研究室の各位に対しまして御礼申し上げます。20歳ほども歳が離れている筆者を温かく迎えて下さり、机を並べて研究できたことに謝意を表します。特に、向山智之氏には、入学以来、学内生活から研究支援まで様々なご援助を賜り感謝申し上げます。

すべての方のお名前を記す事はできませんが、研究の遂行から論文の作成にいたるまで多くの方々にご支援いただきました。心より感謝の意を表します。

最後に、本研究に取り組むことについて理解し、快く送り出し、長い研究期間にわたって献身的に支えてくれた妻と2人の娘に心より感謝いたします。

2018年3月1日

植木 毅