

### 正ドデカン及び正ヘキサデカンを用いた多段 対向噴霧による燃焼改善について

KOBAYASHI, Itsuki / 小林, 樹

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026304>

# 正ドデカン及び正ヘキサデカンを用いた 多段対向噴霧による燃焼改善について

## IMPROVEMENT OF COMBUSTION BY MULTI-STAGE IMPINGING INJECTION USING NORMAL DODECANE AND NORMAL HEXADECANE

小林樹

Itsuki KOBAYASHI

指導教員 川上忠重

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

In recent years, internal combustion engines have been widely used in automobiles and power generators. However, to realize a sustainable society, it is necessary to improve thermal efficiency by improving existing internal combustion engines. As one of the methods to improve thermal efficiency, we are studying a multi-stage impinging injection method. In this study, we investigated the effects of premixing and fuel atomization by changing the fuel injection ratio on the combustion characteristics from the viewpoints of heat release ratio, Ignition delay time(ID), Total heat release(THR), total burning time(TBT), and Maximum burning pressure(MBP). The main conclusions are as follows:

- (1) It is possible to control combustion by the ratio of premixed combustion using multi-stage impinging injection.
- (2) When the multi-stage impinging injection is used, the THR is increased by up to 8% even at the same overall equivalence ratio by controlling the injection amount and injection timing of different fuels.
- (3) When the multi-stage impinging injection is used, the MBP is increased by up to 9% and the TBT is reduced by up to 10% by controlling the injection amount and injection timing of different fuels.

**Key Words** : *Internal combustion engines, Fuel injection, Combustion analysis, Multi-stage impinging injection*

### 1. 緒論

近年では内燃機関が自動車や発電機などに広く用いられているが、持続可能な社会を実現するためには、水素やバイオ燃料などの代替エネルギーの利用による二酸化炭素の排出低減や、既存内燃機関の改良による更なる熱効率向上が求められる。熱効率を向上させる方法の一つとして、著者らは不均質燃焼場での多段噴射と、対向噴霧方式を組み合わせた多段対向噴霧方式について検討を行っている。多段対向噴霧方式の利用により、燃料の未燃成分の低減や、着火遅れ時間の制御による燃焼改善の可能性が示唆されている。本研究では、著者らの先行研究で確認されている多段対向噴霧方式の燃焼改善効果の向上を実現するために、燃料噴射量割合の変更による予混合化及び燃料の微粒化が燃焼特性に及ぼす影響について、熱発生率、着火遅れ時間、総発生熱量、全燃焼時間及び最高燃焼圧力の観点から検討を行った。

### 2. 実験装置及び方法

#### (1) 実験装置

図1に実験装置の概略図、図2に燃焼容器の断面図を示す。装置は主に定容燃焼容器、プロパン-空気混合気作成のための混合タンク、データサンプリング制御系及び燃料噴射・点火装置とその遅延回路から構成されている。図2に示した燃焼容器は内径160mm、奥行280mmの円筒形で、180度向き合ったガソリンエンジン用のポート噴射式インジェクター(噴孔径150 $\mu$ m, 8孔)が2対(計4本)取り付けられている。液体燃料の加圧にはエア加圧式タンクを用いた。燃料タンクに燃料を封入後、燃料出口の反対側から圧縮空気で加圧することで、安定した噴射圧で実験が可能となっている。噴霧粒径の測定実験はMicrotrac社製粒径分布装置、エアロトラック LDSA-SPR1500Aを使用した。

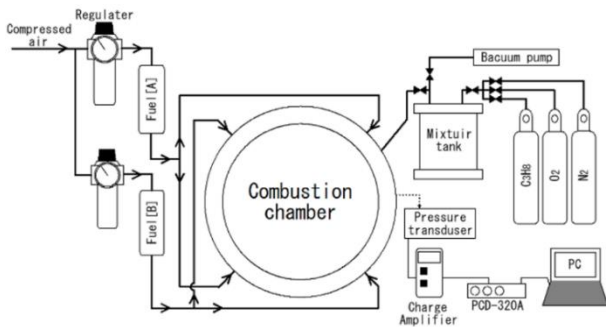


Fig. 1 Experimental apparatus

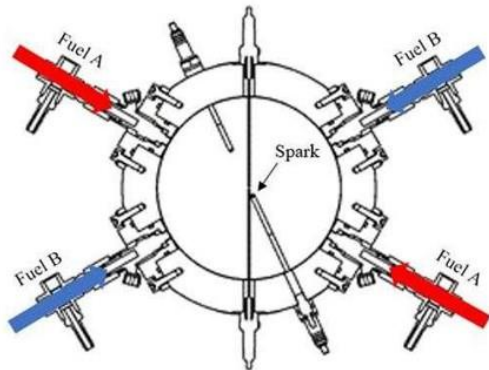


Fig. 2 Combustion chamber

## (2) 実験方法

実験はまず、予め混合タンクに作成しておいた所定当量比のプロパン-空気混合気を室温・大気圧で燃焼容器内に封入し、スイッチの投入により遅延回路を介して液体燃料の噴射と火花点火を行うことで、不均質燃焼場を模擬した燃焼実験を行った。火花点火の位置は図 2 に示したように噴霧衝突が行われる燃焼室中心部である。燃焼圧力は圧電式センサー (KISTLER 社製 6041A, チャージアンプ 5011B) を用いて測定した。実験は 1 条件につき 10 回行った。最高燃焼圧力および点火から最高燃焼圧力到達までの時間が最大・最小となる実験データを除き算術平均した後、各生データと算術平均値の差の割合が±5% (時間については±15%) を超えるデータを除きアンサンブル平均することで、平均指圧線図を得た。平均指圧線図の最高燃焼圧力到達時を燃焼完了とし、それまでの熱発生率を算出した。なお、定容燃焼容器での実験である為、熱発生率は圧力上昇のみの関数となり、また比熱比  $\kappa$  は 1.34 (一定) とした。また、燃焼完了時の総発生熱量 Total heat release (THR) を基準にその 1% の熱発生が得られるまでの時間を着火遅れ時間 Ignition Delay time (ID), 点火から燃焼完了までの時間を全燃焼時間 Total burning time (TBT), 燃焼時の最高圧力を最高燃焼圧力 Maximum burning pressure (MBP) と定義した。

## (3) 実験条件

本実験では点火の前後に噴射する燃料の噴射量割合と、使用する燃料を変化させた場合の燃焼改善効果について検討を行った。燃料は n-ドデカン及び n-ヘキサデカンを

用いた。燃料性状を表 1 に示す。点火タイミングを基準に、点火前に行う燃料噴射を前噴射、点火後に行う燃料噴射を後噴射とし、多段噴射を行った。噴射のタイミングは先行研究の結果から、着火遅れや全燃焼時間の短縮等の燃焼改善効果が観察された pre10 及び post10 とした。なお、pre10 は前噴射の噴霧後端が燃焼室中心に到着する時間から点火までの時間が 10 ms であり、post10 は点火から後噴射の噴霧先端が燃焼室中心に到着するまでの時間が 10 ms である。前噴射及び後噴射は噴射期間を変化させることで噴射量を設定し、前後合わせた噴射量及び総括当量比は全ての条件で同一にした。表 2 に実験条件を示す。噴射燃料は n-ドデカン及び n-ヘキサデカンを点火前後で組み合わせて用いた。

Table 1 Liquid fuel properties

Properties/Test fuels		n-Dodecane	n-Hexadecane
Lower heat value	kJ/mol	7515	9951
Density	g/ml	0.749	0.774
Kinematic Viscosity	mm <sup>2</sup> /s	1.85	4.46
Autoignition point	K	473	478
Flash point	K	347	408
Boiling point	K	489	560

Table 2 Experimental condition

Fuel	Hexadecane / Dodecane	
Overall equivalence ratio $\Phi$	0.95	
Fuel injection pressure [MPa]	0.5	
Injection timing [ms]	Pre10, Post10	
Injection amount ratio of MFI (Pre, Post)	A	39%, 61%
	B	46%, 54%
	C	54%, 46%
	D	61%, 39%

## 3. 実験結果及び考察

図 3 に対向噴霧方式での燃焼室中心位置における各噴射条件で測定したザウタ平均粒径 (Sauter Mean Diameter, SMD) を示す。SMD は式(1)を用いて算出した。

$$SMD = \frac{\sum V_i}{\sum \left( \frac{V_i}{d_i} \right)} \quad (1)$$

ここで

$i$ : 粒子個数

$V$ : 粒子体積

$d$ : 粒子直径

である。

図 3 より、噴霧先端が燃焼室中心に到達した後に、噴霧液滴の衝突により時間経過とともに液滴粒径が減少し

ていることが確認できる。前噴射に n-ドデカンを用いた場合には、n-ヘキサデカンを用いた場合と比較して微粒化の効果が大きく、衝突初期からの液滴粒径の減少が観察された。これは燃料の動粘度の差異に起因しており、動粘度の小さい燃料ほど微粒化の影響が大きくなると考えられる。また、燃料噴射量による液滴粒径の差はほとんど観察されていない。

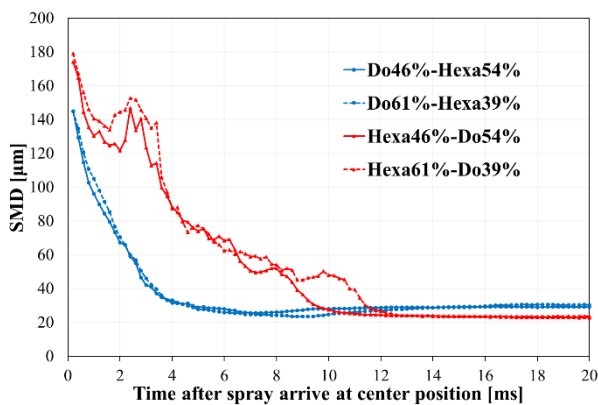


Fig. 3 The SMD on center position of different injection conditions

各噴射条件において多段対向噴霧方式を用いた場合の熱発生率の履歴を図 4 に示す。熱発生率は、以下の式(2)を用いて算出された。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{C_v}{R} V \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

ここで

$dQ/dt$ : 熱発生率

$C_v$ : 定容比熱

$R$ : 気体定数

$P$ : 圧力

$V$ : 燃焼室容積

である。

図 4 のグラフより、各条件での最大熱発生率は使用した燃料性状に関わらず、B 条件の噴射量割合で著しく増大し、A 条件で最小となっていることが確認できる。A 条件では前噴射の噴射量が少なく、十分な予混合化が促進されず燃焼が緩慢になったと考えられる。また、B 条件では一転して活発な燃焼が観察されたため、十分な予混合燃焼を得るための最低限の噴射量がこの間に存在すると考えられる。さらに、同一の噴射量割合条件ごとに比較した際には、噴射前後の燃料性状によらず最大熱発生率は同程度であることが確認できる。これらのことから、本実験範囲内では、熱発生率は噴射する燃料性状よりも噴射量割合の影響を強く受けていると思われる。ここで、50 ms 以降の燃焼後半に着目すると、後噴射にヘキサデカン

を使用した条件では 2 段目燃焼による熱発生率の維持領域が観察できる。これはヘキサデカンがドデカンと比較して発熱量が大きい燃料であり、2 段目の燃焼が活発になったことに起因していると考えられる。

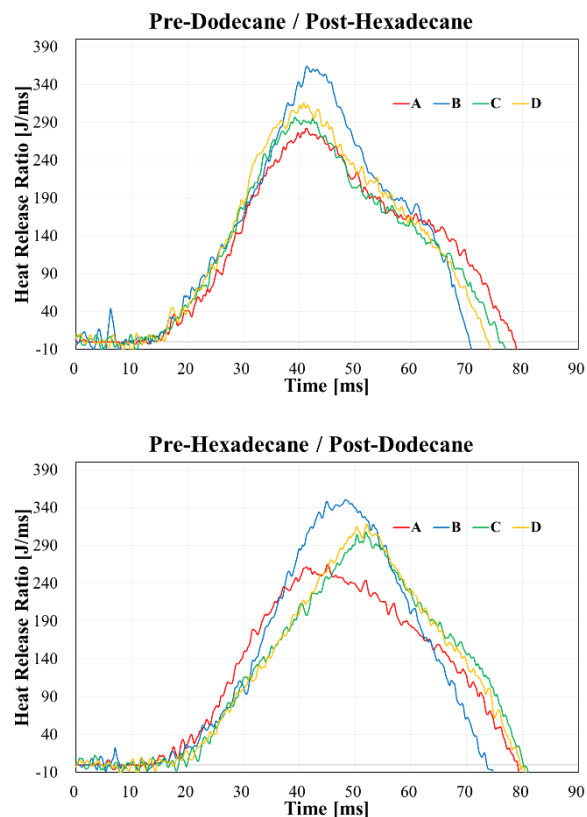


Fig. 4 Heat release ratio in time after spark ignition of different injection conditions

着火遅れ ID と総発生熱量 THR の結果を図 5、最高燃焼圧力 MBP と全燃焼時間 TBT の結果を図 6 に示す。

図 5 及び図 6 のグラフより、ID は前噴射にドデカンを使用した場合には B 条件、ヘキサデカンを使用した場合には D 条件が最短となっていることが確認できる。前噴射にヘキサデカンを使用した場合には、ドデカンよりも揮発性が低く予混合化が遅延し、噴射量を増加させることで一部予混合化が促進し着火遅れが短縮したと考えられる。また、使用した燃料で比較すると、前噴射にドデカンを使用した条件では着火遅れが平均して 12 ms 程度短縮されていることが確認できる。これは両燃料を比較すると、ヘキサデカンは動粘度が高いことにより液滴粒径が増大し、対向噴霧による微粒化効果の影響が小さくなるため、ドデカンと比較して着火遅れが増大したと考えられる。ここで THR 及び MBP は使用した燃料の条件に関わらず、B 条件の噴射量割合でどちらも最大となっていることが確認できる。THR は最大で 8% 程度増加しているが、今回の実験では全ての実験条件で総括当量比を同一にしていることから、燃焼改善効果が得られていることが確認できる。同様に MBP は最大で 9% 程度増加し

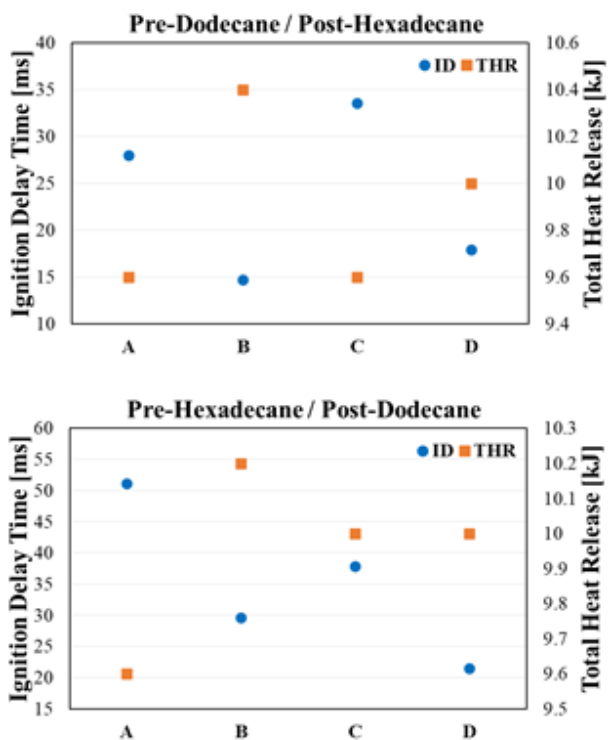


Fig. 5 ID and THR of different injection conditions

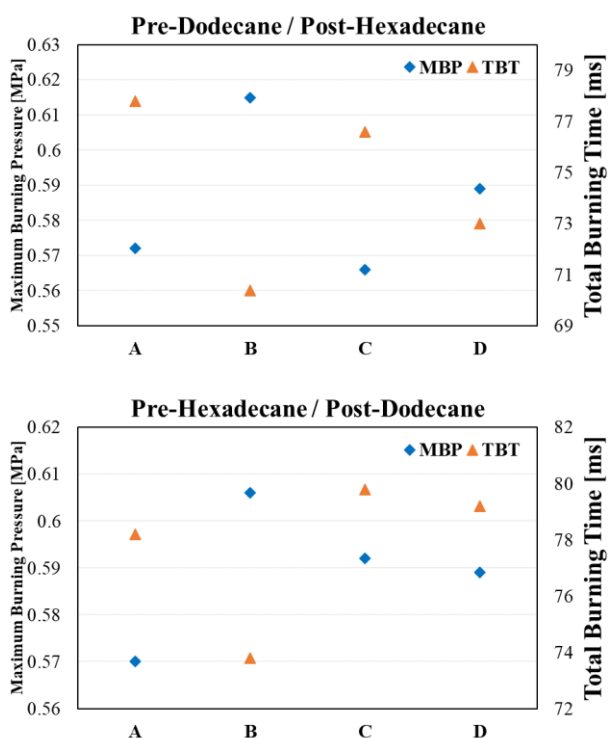


Fig. 6 MBP and TBT of different injection conditions

ており、燃焼改善効果が観察された。さらに、THR 及び MBP と熱発生率には噴射量に対する同様の傾向があり、適切な噴射量の設定により予混合燃焼を十分に促進させることで、これらの増大が可能であると考えられる。TBT は B 条件が最短であり、最大 10% 程度短縮されている。前噴射にヘキサデカンを使用した場合の D 条件に着目すると、ID が最短となっているが、TBT はあまり短縮されていない。このことから、TBT の短縮は ID 短縮の影響のみならず、後噴射による 2 段目燃焼の影響も大きいと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、多段対向噴霧方式を用いて、燃料噴射割合と燃料性状が不均質燃焼場の燃焼特性に及ぼす影響について検討を行った。以下に結論を示す。

- 1) 多段対向噴霧方式を用いた場合には、予混合燃焼の割合による燃焼制御が可能である。
- 2) 多段対向噴霧方式を用いた場合には、異種燃料の噴射量及び噴射タイミングの制御により、同一総括当量比においても総発生熱量が最大で 8% 増大する
- 3) 多段対向噴霧方式を用いた場合には、異種燃料の噴射量及び噴射タイミングの制御により、最高燃焼圧力が最大で 9% 増大、全燃焼時間が最大で 10% 短縮する。

#### 参考文献

- 1) 大岩亮友, 川上忠重: 多段型対向噴霧による不均質燃焼場の燃焼特性に関する一考察, 山梨講演会 2020 講演論文集, 200-3, 2020
- 2) 劉金茹, 川上忠重: 多段対向噴霧方式を用いた不均質燃焼場での燃焼改善に関する一考察, 日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集, 20-1, 2020
- 3) 小林樹, 川上忠重, 劉金茹: 多段対向噴霧を用いた不均質燃焼場の燃焼特性に及ぼす噴射タイミングおよび燃料性状の影響に関する研究, 山梨講演会 2021 講演論文集, 210-3, 2021
- 4) 小林樹, 川上忠重, 劉金茹: 多段対向噴霧方式による不均質燃焼場の燃焼改善に関する研究, 日本機械学会関東支部講演論文集, 210-1, 2022
- 5) 小林樹, 川上忠重, 劉金茹: 不均質燃焼場の燃焼特性に及ぼす異種燃料の噴射割合及び噴射タイミングの影響, 山梨講演会 2022 講演論文集, 220-3, 2022
- 6) 小林樹, 川上忠重, 劉金茹: 不均質燃焼場の燃焼特性に及ぼす異種燃料の噴射割合に関する研究 一特に予混合化および微粒化の影響について一, 日本機械学会関東支部講演論文集, 220-1, 2023