

燃料設計によるディーゼル機関の効率化、 低公害化に関する研究（第2報）

- 噴射系パラメータによる低・高沸点混合燃料の排出ガス改善効果の解析 -

環境エネルギー部

鈴木 央一

石井 素

後藤 雄一

1. はじめに

燃料噴霧の高速な拡散化を行うことが、安定した低公害化ディーゼル燃焼への鍵となる。ディーゼル機関の低公害化に対する強い社会的要請から、これについて多くの試みがなされている。高圧噴射化はそれに対する有効な手法であることから、燃料噴射圧力は年々上昇し、これまで大幅なPM低減効果をもたらした。だが、これ以上の大幅な低減は高圧噴射化のみでは困難と考えられる。一方、当所でも以前研究を行った予混合圧縮着火燃焼は、飛躍的なエミッション改善のポテンシャルを持つものの、使用運転領域が広く負荷や回転数の変動の激しい自動車用機関として着火制御の安定性を確保する問題が解決できていない。これらのことから、さらなる安定した低エミッション燃焼を行うには、着火遅れ期間レベルの短期間に高度な拡散化を図ることが重要であり、それには燃料面からのアプローチも必要であると考えられる。

前報¹⁾において著者らは、燃料の蒸発の際に液相と気相の(二相)共存領域を利用した拡散化向上性²⁾に着目し、噴射開始時期に二相領域になりうるn-ペンタン(C₅H₁₂)とn-トリデカン(C₁₃H₂₈)を混合した燃料では、同等セタン価のn-ノナン(C₉H₂₀)を燃料とした場合よりもPMが低減することを明らかにした。その一方で、前報では混合燃料の蒸発性向上効果がどのような環境下で効果を発揮するのか、について明らかにされていない。燃料の蒸発性の違いが影響すると考えられる要素としては、噴霧粒径と周囲の温度、蒸発時間などがある。それらは、固定値である圧縮比をのぞくと噴射の開始時期および圧力、負荷率等で決まる。それにパイロット噴射を加えた場合には、限られた範囲ではあるが、着火

遅れや、予混合燃焼と拡散燃焼の比重を変化させることができる。

本報告では、単気筒ディーゼル機関を用いた実験的手法により、噴射圧力を変化させることで噴霧の微粒化に違いを持たせた場合、およびパイロット噴射や負荷率に変化を与えることにより予混合燃焼と拡散燃焼の関係に違いがみられる場合について、PMを中心とした排出ガス挙動比較を行い、混合燃料による拡散性向上効果の解析を行った。

2. 実験装置および実験条件

2.1. 実験装置

表1 エンジン諸元

Type	4 cycle, single cylinder
Combustion Chamber	Direct injection
Bore x Stroke mm	135.0 x 150.0
Displacement L	2.147
Compression Ratio	16.0
Maximum Power kW	25 / 2000 rpm
Swirl Ratio	2.2
Injection pump	Common rail
Nozzle Spec. mm x #	0.26 x 6

供試機関は4サイクル直接噴射式単気筒ディーゼ

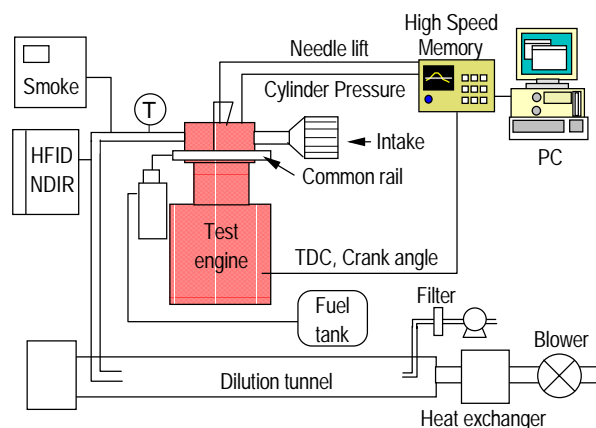


図1 実験装置

ル機関でコモンレール式噴射ポンプを装着している。その諸元を表1に、また、実験装置概要を図1

表2 供試燃料諸元

component 1	C9H20	C5H12
mole fraction	1	0.679
component 2	-	C13H28
mole fraction	0	0.321
Density kg/L	0.718	0.691
Cetane Index*	58	55**
Vapor point temp. K	424	323
Dew point temp. K	424	463
Lower heating Value kJ/kg	44473	44348
Delta_h 298K to 473K kJ/kg	722.29	722.51

* 圧縮着火試験機 FIA-100 で測定³⁾

** 混合燃料のセタン価はペンタン、トリデカンそれぞれの測定結果を基に算定

に示す。使用燃料には n-ノナン (C9H20) 単体燃料 (以下、単体燃料) と、n-ペンタン (C5H12) と n-トリデカン (C13H28) を体積割合 1:1 で混合した混合燃料 (以下、混合燃料) を用いた。上記混合燃料のペンタンとトリデカンのモル比率は約 2:1 (67.9:32.1) である。両燃料の諸元を表2に示す。これより蒸発特性をのぞく諸元値は、ほぼ同等であり、それらの違いは蒸発性と比較してその影響が十分小さいものと考えられる。

排出ガス測定について、CO、CO₂には NDIR、NO_xには CLD、THCには HFID (ともに堀場製作所 MEXA-7100) を用いた。PMの測定はダイリキュレーショントンネルを用いて、30分間定常運転し、全量希釈を行いフィルタに捕集した。また、燃焼解析には、ピエゾ式圧力変換器により気筒内圧力を測定し、連続した20サイクルの平均値を用いた。

2.2 実験方法

実験は機関回転速度 1,000rpm の定常状態で行った。各燃料の燃焼特性を解析するパラメータとして、負荷率、コモンレール圧力、パイロット燃料割合を用いた。負荷率はコモンレール圧力 50MPa 時のスモークリットとなる正味トルクを全負荷 (そのときの空気過剰率 1.28) とし、それに対する割合から決定した。本実験では負荷率 25、50、75%を用いた。50%負荷率での空気過剰率は約 2.6 である。コモンレール圧力は 35、50、75 および 100MPa とした。燃料噴射開始時期は、50%負荷時に各コモンレール

圧力で最高燃費率を維持できる範囲でリタードした値とし、コモンレール圧力の低い条件からそれぞれ 10、8、5、3deg.BTDC とした。

燃料噴射時の気筒内圧力は二相領域の有無に影響を与えることから、各条件の比較を行うには燃料噴射条件をそろえる必要がある。しかしながらコモンレール圧力により、噴射期間もまた異なることから同一条件を作り出すことは不可能であり、最高燃費率となる時期にそろえた。

二段噴射条件では、パイロット噴射開始時期を 56deg.BTDC とした。パイロット燃料割合は、0%の通常燃焼の場合に加えて、10%、45%の条件を用いた。負荷率 50%におけるパイロット燃料割合 10%は、パイロット噴射燃料が少量であるため主噴射の着火以前には熱炎反応が観察されない条件であるのに対して、45%はパイロット燃料が主噴射の着火以前に圧縮自己着火燃焼を起こす条件である。

3. 実験結果および考察

3.1 噴射圧力による排出ガス挙動変化

50%負荷としてコモンレール圧力を変化させた場合の、単一燃料と混合燃料における排出ガス挙動を図2に示す。コモンレール圧力の上昇に伴い一般的に NO_x は増加し、PM は低減した。コモンレール圧力が高い条件ほど噴射開始時期を遅らせているが、噴射期間が短縮化し、急激な燃焼が行われるため NO_x は増加した。それに対して PM はコモンレール圧力が上昇するほど燃料噴霧の微粒化が促進されて低減したが、75MPa 以上ではほとんど変化がない。燃料による排出傾向を見ると、混合燃料時において単一燃料使用時より NO_x が増加し PM が減少している。NO_x と PM 排出が、いわゆるトレードオフ関係にあるが、PM 排出は最大 40%以上の低減がみら

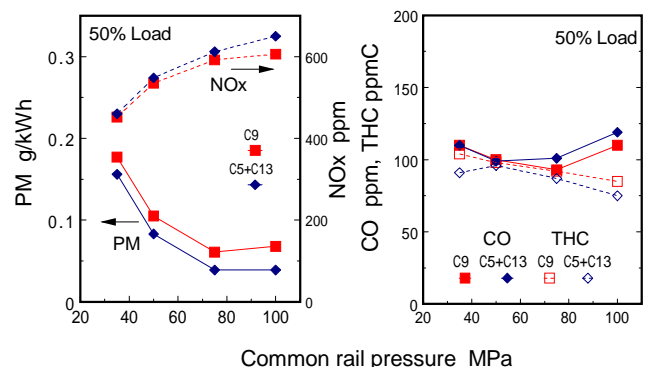


図2 コモンレール圧力による単一、混合燃料使用時の各種排出物の排出特性

れるのに対して、NO_x 排出増加は最大でも7%程度であり、PM 低減量に比較すると相対的に小さい。CO、THC 排出に関しては、明確な傾向は見られないが、前報と同様に、THC 排出はいずれの条件においても混合燃料使用時にわずかに低減した。

これらより、NO_x、CO、THC 排出は燃料による違いが最大でも10%未満であり、大きな変化とはいえない。それに対してPMのみ40%を超す変化がみられたことから、混合燃料によるPM低減の傾向についてさらなる解析を行った。

各条件におけるPM排出傾向について明らかにするため、混合燃料を用いた場合のPM排出量を、単一燃料での排出量と比較した排出率を図3に示す。この図より、コモンレール圧力が高くなるに従って、混合燃料によるPM低減効果が拡大したことがわかる。このことから混合燃料を使用することによる拡散性向上効果は、コモンレール圧力の高く、より噴霧粒径が小さくなる場合に大きくなる。

そのときの燃焼挙動について、コモンレール圧力50および100MPa時の気筒内圧力、熱発生率を図4に示した。単一燃料、混合燃料ともにセタン価は同等であり、図においても着火遅れはほぼ等しい。それぞれ熱発生率についても、予混合燃焼部分の最大値がやや異なる他は、ほとんど違いがない。このことより、気筒内温度に顕著な違いは生ぜず、同等のNO_x排出になったと考えられる。また、燃料消費率において燃料の違いによる有意な差はなかった。熱発生率最大値は、どちらのコモンレール圧力でも混合燃料の場合の方が高い値を示し、その差はコモンレール圧力の上昇とともに拡大した。このことから熱発生率最大値と混合燃料時のPM排出率と何らかの相関がある可能性もある。しかしながら、同一負荷率の熱発生量全体がほぼ等しい場合には、予混合燃焼部分の増加は、熱発生全体に対する拡散燃焼割合の低下を意味することになる。拡散燃焼部分の大小がPM低減効果に影響を及ぼしている可能性も考えられる。そこで、同一コモンレール圧力で負荷率を変化させることで拡散燃焼部分を変化させた場合、そしてパイロット噴射を行い高圧噴射ながら予混合燃焼を抑制した場合について、実験を行った。

3.2 負荷率による混合燃料のPM低減効果

コモンレール圧力を一定とし、負荷率を変化させることで、ほぼ同等の予混合燃焼を行いつつ、拡散

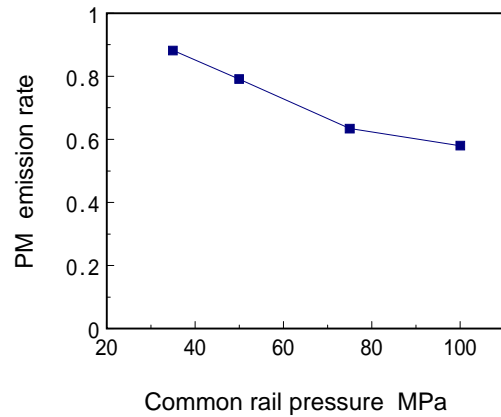


図3 コモンレール圧力による混合燃料使用時の単一燃料に対するPM排出率

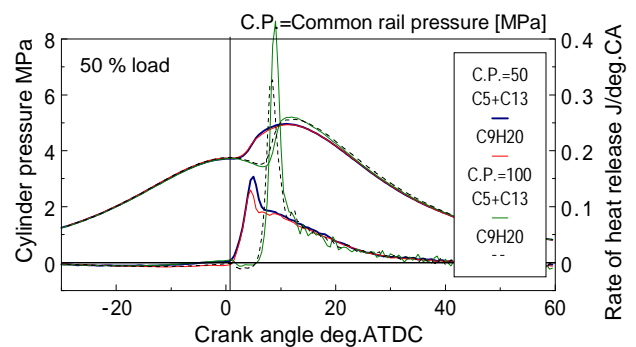


図4 コモンレール圧力による単一、混合燃料使用時の気筒内圧力と熱発生率

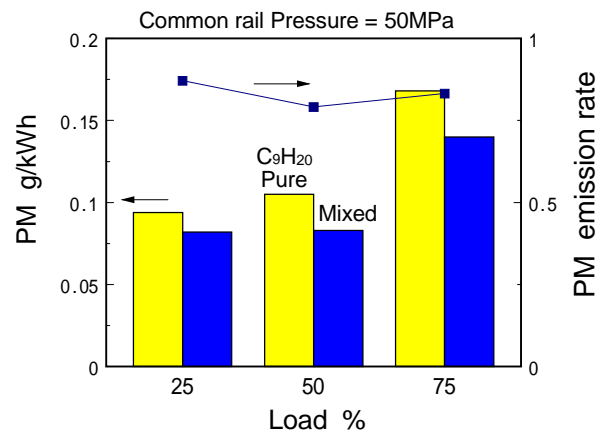


図5 負荷率による各燃料におけるPM排出量と混合燃料使用時のPM排出率

燃焼部分の熱発生量を変化させることができる。コモンレール圧力を50MPaとし、負荷率を25、50、75%に変化させた場合のPM排出量と混合燃料時の単一燃料に対するPM排出割合を図5に示す。この図より、負荷率を変化させることでPM低減率に明確な違いや傾向は現れなかった。25%負荷時に低減

率がやや低くなっているが、これは軽負荷時には燃焼室内に燃料過剰領域が少ないことから、拡散性向上効果の影響が表れにくいことも考えられる一方で、PM の絶対的な排出量が少ないために、高負荷時よりも測定精度がやや落ちていることも考えられる。以上より、拡散燃焼部分が変化することは、PM 生成量の絶対量には影響を与えるが、混合燃料による低減効果にはほとんど影響を与えないものと考えられる。

3.3. パイロット噴射による PM 低減率変化

パイロット噴射を加えた二段噴射を行うことにより、着火遅れを小さくし、予混合燃焼を抑制することができる。そこで通常燃焼で混合燃料による PM 低減効果の大きいコモンレール圧力 100MPa として、パイロット噴射を行ったときの PM 排出量を測定した。そのときの PM 排出量および単一燃料に対する混合燃料時の排出割合を図 6 に、混合燃料使用時のパイロット噴射割合による気筒内圧力と熱発生率挙動の違いを図 7 に示す。図 6 より、PM 排出量そのものはパイロット噴射割合によって異なるが、混合燃料による PM 低減効果はパイロット噴射割合を高くするにつれて一様に減少した。一方、図 7 よりパイロット噴射割合を高くするとともに、着火遅れ、主噴射による熱発生率最大値ともに小さくなった。このことから、高コモンレール圧力条件下においても、着火遅れと主噴射による熱発生率最大値も PM 排出割合に影響をおよぼすことも考えられる。パイロット噴射割合 45% 時には、パイロット噴射燃料が上死点以前に圧縮自己着火を起こすことから、主噴射開始時期においてすでに混合燃料の二相領域をとりうる圧力を大きく上回る。このため二相領域を利用した拡散性向上効果は期待できない。このことが混合燃料による PM 低減効果を抑制していると考えられる。

3.4. PM 低減率への影響要因についての考察

上記の実験結果より混合燃料使用による PM 低減効果は、コモンレール圧力が高く噴霧の微粒化が促進される状況下で高く、パイロット噴射を行うことで着火遅れが小さくなり予混合燃焼が抑制される状況下では低くなることが分かった。それらの要因と低減効果の関係について、解析を試みた。

コモンレール圧力の高いほど PM 低減効果が大きくなる一方で、高コモンレール圧力条件でもパイロ

ット噴射時には低減効果が小さくなることから、着

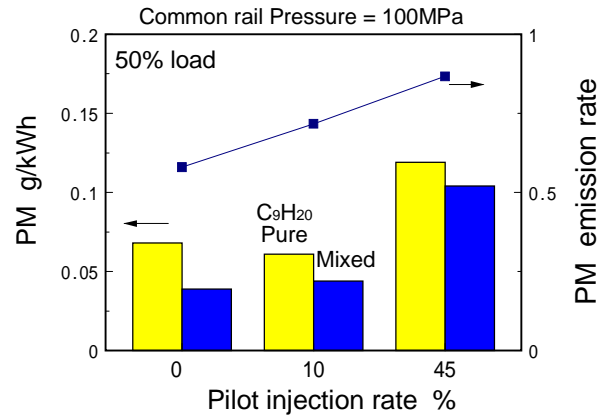


図 6 パイロット噴射割合による各燃料における PM 排出量と混合燃料使用時の PM 排出率

火開始時の噴霧の拡散と PM 低減効果との関係を調

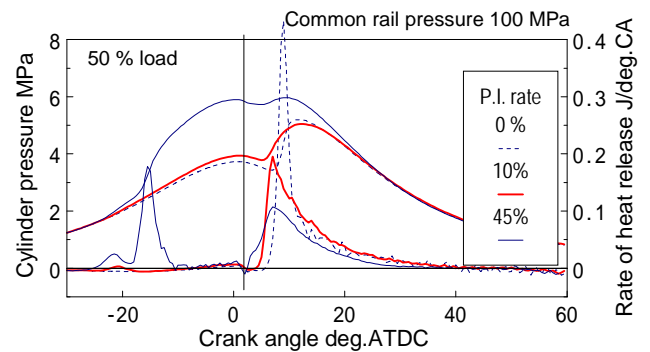


図 7 混合燃料使用時の各パイロット噴射割合における気筒内圧力と熱発生率

べた。噴霧の拡散に関して、噴射圧力の影響の大きい噴霧到達距離に着目した。1ms 程度以下では、噴霧到達距離 S は、噴射圧力と雰囲気圧力の差 P を用いて下記の式で示される⁴⁾。

$$S = 0.39 \left(\frac{2 \cdot P}{\rho} \right)^{0.5} t$$

ρ = 液体密度

この式から、噴霧到達距離は噴射圧力の平方根と噴射開始後の時間に比例する。ここでは、着火開始時の噴霧到達距離をコモンレール圧力 50MPa、50% 負荷時を基準として無次元化して噴霧到達指数とした。図 8 は各運転条件における噴霧到達指数と、混合燃料時の PM 排出割合との関係を示したものである。混合燃料と単一燃料で基本的に着火遅れはほぼ同じだが、わずかにずれる場合についてはその平均値とした。図より、噴霧到達指数が増大するにつれ

て PM 低減効果は拡大し、相関もかなり高いことが分かった。パイロット噴射時には、高コモンレール圧力にして微粒化を促進させても、着火遅れが小さ

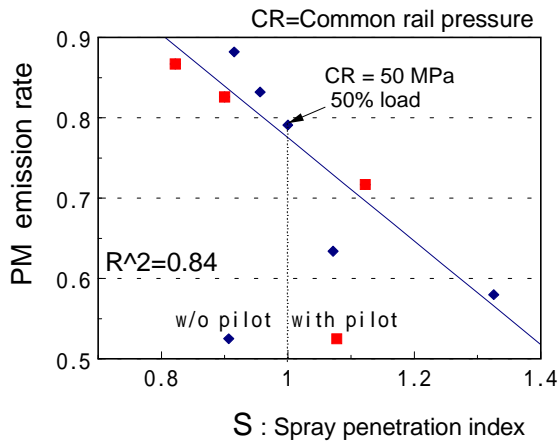


図8 各運転条件における噴霧到達係数と混合燃料時のPM排出率の関係

くなることから、パイロット噴射なしの場合と同一直線上にプロットされた。以上から噴霧が遠距離まで到達し、混合の促進される条件ほど PM 低減効果が大きくなることがわかり、この図でその関係を示すことができた。

その一方で、拡散燃焼部分のみが変化しても燃焼全体での PM 低減効果がほぼ同じであることから、予混合燃焼部分が変化することによる効果は拡散燃焼部分においてもそのまま維持されている。拡散燃焼部分への影響についてコモンレール圧力と着火遅れから説明することは困難である。

そこで図9は各条件の主噴射による予混合燃焼部分の熱発生率最大値と混合燃料時の PM 排出割合の関係について示した。主噴射による予混合燃焼の熱発生率最大値について、パイロット噴射時等で明確な極大値を示さない場合は、熱発生率の立ち上がりの傾きが減少する変曲点での値とし、単一燃料と混合燃料とではやや差があることから、両者の平均値とした。この図を見ると、予混合燃焼の熱発生率最大値が大きくなるにつれて PM 低減効果が直線的に増大し、両者の相関性は高い。予混合燃焼が活発化した場合、予混合燃焼が行われた部分については局所的に酸素濃度が低下する。そのためその領域に既に存在する、あるいはその場所へ噴射される燃料噴霧については、混合あるいは拡散が不十分な場合は、燃料過剰雰囲気のまま燃焼が行われ、PM 生成につながるものと考えられる。そして予混合燃焼が活発

化するほど局所的な O₂ 濃度低下が大きくなるため、混合燃料による拡散向上効果が、PM 低減により顕著に現れるものと考えられる。

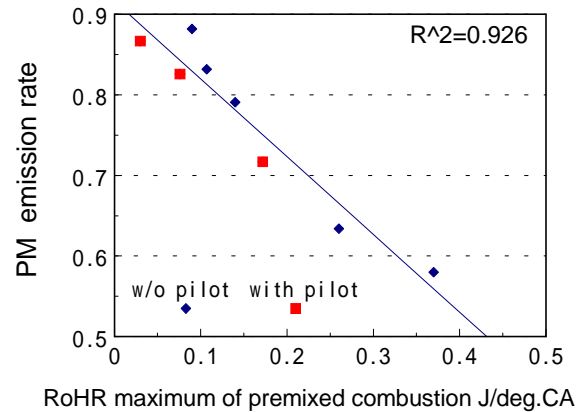


図9 各運転条件における主噴射による予混合燃焼の熱発生率最大値と混合燃料時のPM排出率の関係

図9においては、パラメータとしてコモンレール圧力や着火遅れは入っておらず、予混合燃焼部分の熱発生率最大値のみが PM 低減効果に関係しており、コモンレール圧力等によらずその関係は成立している。しかしながら、実際は予混合燃焼の熱発生率最大値は、コモンレール圧力および着火遅れと独立したパラメータではない。予混合燃焼は、着火開始時期に可燃混合気になっている燃料質量および単位発熱量に依存するが、コモンレール圧力が高いほど、単位クランク角あたりの燃料噴射量が増加し、着火遅れが大きいほど、長い蒸発時間がある。そのため、予混合燃焼の熱発生率最大値が混合燃料による PM 低減効果と強い相関があることが、ただちにコモンレール圧力や着火遅れに依存しないことを意味するわけではない。したがって、混合燃料を用いたことによる PM 低減効果は、コモンレール圧力、着火遅れ、それと予混合燃焼の状況との複合効果により決定されると考えられる。パイロット噴射条件においては、主噴射の開始以前にパイロット燃料が着火し、着火遅れ期間における気筒内圧力が、混合燃料の二相領域をとる範囲を超えている場合が存在した。しかしそのような条件においても、図8および図9において他と同様の関係を示したことから、特別な現象が生じたとは確認できず、今回の結果のみからでは二相領域の PM 生成への影響度を判断することは困難である。

4. まとめ

n-ノナン単一燃料と、n-ペンタン・n-トリデカン混合燃料を用いて、混合燃料における燃料噴霧の拡散性向上効果について、噴射系諸要素を変更してPMを中心とした排出ガス測定を行うことで解析を行った。

(1)噴射系諸要素を変更した場合、混合燃料使用時の単一燃料と比較したPM低減効果は下記ようになる。

・コモンレール圧力が高くなるとPM低減率は増加する。

・パイロット噴射率が高くなるとPM低減率は低下する。

・負荷率はほとんど影響しない。

(2)上記影響要因と関連して、各条件における混合燃料によるPM低減率はパイロット噴射量やコモンレール圧力によらず予混合燃焼部分の熱発生率最大値と高い相関を示した。

(3)本報告の範囲では、二相領域の有無による排出ガス挙動への明確な影響は見られなかった。

このようにPMの絶対生成量の少ない高い噴射圧力で低減効果が見られたことから、燃料の蒸発性が高い次元での低エミッション化に一つの鍵となるといえる。

参考文献

(1) 鈴木、石井、後藤、小高：第30回交通安全公害研究所研究発表会講演概要 p.81, 2000

(2) 千田ほか，自動車技術会講演会前刷集 No.26-99 p.13, 1999

(3) Sholes K., Odaka M., Goto Y., Ishii H., Suzuki H., 第16回内燃機関シンポジウム講演概要集, p.73, 2000

(4) 広安，自動車技術会シンポジウム「次世代エンジン技術を考えよう」教材 p.49, 1998