

間欠噴霧燃焼の初期燃焼誘発乱流が混合
および化学反応促進
に及ぼす効果

(課題番号 10650221)

平成10年度～平成11年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成12年3月

研究代表者 山根 浩二

(滋賀県立大学工学部 助教授)

目次

1. はしがき	1
2. 研究組織・研究経費	2
3. 研究発表	2
4. 研究成果	
(1) 微細多噴孔ノズルを用いたディーゼル燃焼の高速度撮影	3
(2) 直接噴射式ディーゼル機関の噴射率制御における NO および スートの多次元数値シミュレーション	11
(3) Numerical Analysis of the Role of Initial Combustion on Reduction of NO and Soot from DI Diesel Engines	18
(4) Combustion and Emission Characteristics of Direct-Injection Compression Ignition Engines by Means of 2-Stage Split and Early Fuel Injection	28

1. はしがき

ディーゼル機関は、熱効率に優れており、地球温暖化ガスである二酸化炭素削減には欠くことのできない動力システムである。しかし、高い熱効率を維持したまま、排気中の微粒子および窒素酸化物を同時に低減することが大きな課題となっており、未だに実現していない。この実現には、これまでの拡散燃焼主体のディーゼル燃焼から脱却した燃焼システムの研究が必要である。この観点から、本研究ではこれまで窒素酸化物の生成を抑えるために採られてきた初期燃焼の抑制の役割、噴射率や噴射パターンの制御による燃焼制御の可能性に関して検討を行った。

すなわち、ディーゼル機関において燃焼初期の予混合燃焼による急激な熱膨張によって生じる誘発乱流が、燃焼後期までの燃料と空気の微視混合および燃焼生成物であるすすや窒素酸化物の生成に対して及ぼす影響を明らかにするため、エンジン内の多次元数値シミュレーションおよび高速度撮影による火炎の可視化観察を実施した。得られた成果の概要を以下に示す。

1. 直接噴射式ディーゼル機関のノズル噴孔径や噴射圧力を変更して噴射率を制御した際の燃焼室内の流動や燃焼生成物を多次元数値シミュレーションによって予測した。その結果、初期の噴射率を上げて初期熱発生率を高めるとそれによって誘発される乱れが強まり、噴射終了後も乱れエネルギーは強く、そのためすすの酸化反応が促進されることが予測できた。
2. 噴孔径 $d=0.08\text{mm}$ 、噴孔数 14 の微細多噴孔ノズルおよび噴孔面積が同一の $d=0.14\text{mm}$ 、噴孔数 5 のノズルを用いて、ノズル径が燃焼および排気特性に及ぼす影響を実験的に調査し、さらに高速度撮影による火炎の可視化観察を行った。その結果、 $d=0.08\text{mm}$ の微細噴孔ノズルを用いた実験によれば、同一総噴孔面積である $d=0.14\text{mm}$ の場合に比較して窒素酸化物濃度が低く排気煙濃度が高い。この理由は、噴孔径が小さいほど着火遅れが短く初期熱発生率が低くなり燃焼ガス温度が低下することと、着火後に噴射された燃料・空気の混合が悪くなったためと推察された。さらに、可視化観察の結果、噴孔径 $d=0.08\text{mm}$ 、噴孔数 14 の火炎は燃焼室周囲への広がりが弱く、スワールによるサーマルピンチを生じやすく、拡散燃焼期の火炎が燃焼室中心に固まることから裏付けられた。

2. 研究組織・研究経費

研究組織

研究代表者	山根 浩二	(滋賀県立大学工学部助教授)
研究分担者	嶋本 讓	(滋賀県立大学工学部教授)
	河合 英直	(滋賀県立大学工学部助手)

研究経費

平成10年度	2,500千円
平成11年度	500千円

3. 研究発表

(1) 学会誌等

- ・山根, 嶋本, "直接噴射式ディーゼル機関の噴射率制御におけるNOおよびスートの多次元数値シミュレーション", 日本機械学会論文集, B編, 65巻639号, (1999), pp.3853-3859.
- ・K. Yamane and Y. Shimamoto, "Prediction of NO and Soot from Diesel Engines with Fuel Injection Rate Shaping Using Multidimensional Engine Simulation", Proc. of The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International), (1999-7), pp.489-494.
- ・K. Yamane and Y. Shimamoto, "Numerical Analysis of the Role of Initial Combustion on Reduction of NO and Soot from DI Diesel Engines", SAE Technical Paper Series, No.2000-01-2035, pp.1-10.
- ・K. Yamane and Y. Shimamoto, "Combustion and Emission Characteristics of Direct-Injection Compression Ignition Engines by Means of 2-Stage Split and Early Fuel Injection", Proc. of ASME 2000 Spring Technical Conference, (2000-4), pp.1-6.

(2) 口頭発表

- ・山根, 嶋本, 河合, "多次元数値シミュレーションによるディーゼル機関の先立ち噴射におけるNOおよびスートの予測", 日本機械学会関西支部第256回講演会論文集, No.984-2 (1998-10), pp.12/1-12/2.
- ・山根, 嶋本, "ディーゼル機関の初期燃焼がNOおよびスート生成に及ぼす影響(多次元数値シミュレーションによる予測)", 日本機械学会関西支部第74期定時総会講演会論文集, No.994-1 (1999-3), pp.5/23-5/24.
- ・山根, 嶋本, "ディーゼル機関の2段早期燃料噴射における燃焼および排気特性", 日本機械学会1999年度年次大会講演会論文集(IV), No.99-1 (1999-7), pp.315-316.

4. 研究成果

(1) 微細噴孔ノズルを用いたディーゼル燃焼の高速度撮影

まえがき

2段燃焼を伴う圧縮点火機関内の燃焼においては、初期燃焼が弱いほど燃焼温度が上昇しないために窒素酸化物排出量が少なく、またシリンダ内圧力も抑えられるため燃焼騒音も低いことが知られている。しかし、初期燃焼が弱いと、それによって誘発される乱れが弱いために燃焼後期における混合が不十分になり燃焼を悪化させ、スートを発生させる場合もあることが、数値解析などによって示唆されている。

本研究は、ノズル噴孔径を変更することによって、初期燃焼時の熱発生率を変えた際の燃焼火炎を高速度撮影により観察し、火炎の広がり、火炎形状の変化、熱発生率や火炎面積の比率などのクランク角経過を調べることにより、初期燃焼時における初期形成火炎がその後の火炎の発達過程に及ぼす影響を高速度撮影によって調べることを目的として行う。

実験装置および方法

(1) 供試機関および燃料

本実験には水冷縦型単気筒4サイクル直接噴射式圧縮点火機関（日産ディーゼルFD-1、ボア×ストローク；108×115mm、行程体積；1.053L、正味圧縮比；16.7：1、スワール比；2.1）をボトムビュー可視化観察用に変更して使用した。機関断面を図1に示す。燃料には、JIS 2号軽油（比重0.82kg/l、低位発熱量42700kJ/kg）を使用し、噴射系にはPES4A型ポッシュ式噴射ポンプおよびDLLA-P型ホールノズルを用いた。

(2) 高速度撮影系

撮影系は、図1に示すように、本実験では高速度イメージカメラ（コダックエクタブロHS4540）によって延長ピストン内に取付けた反射鏡を介して燃焼室キャビティ内のみをピストン下部から撮影する方法を採用している。HS4540のフレームメモリは64MBあり、1枚の絵はフルフレームで画素数は縦×横：256×256×8bit=65kBで表現されるので、計1024枚の画像を記録できる。カメラは毎秒4500コマで動作させると、機関回転速度900rpmで約0.23秒間（1.7サイクルに相当）の撮影が可能である。なお、撮影した画像データはパソコンにTIFF形式のファイルとして1コマ毎に保存すると同時に、ビデオテープレコーダにアナログ画像として記録した。カメラには焦点距離105mmのUVレン

ズを装着し、絞り4および22で撮影した。照明装置は出力500Wおよび300Wのハロゲンライト（LPL VL-501およびVL-G301）をシリンダブロックの端から約500mm離して設置した。

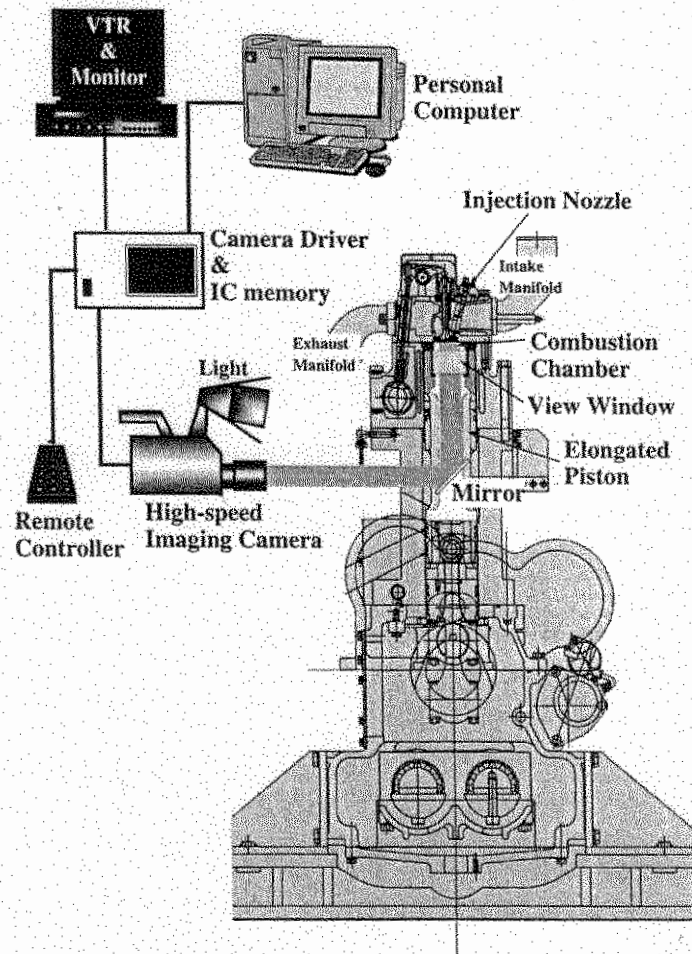


図1 可視化機関断面図および高速度撮影光学系配置図

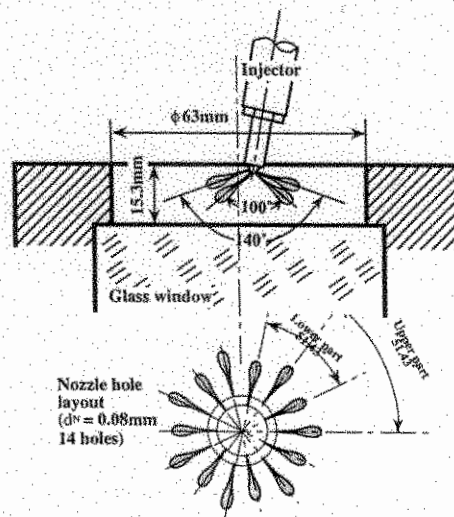


図2 燃焼室形状および微細多噴孔ノズルの配置図

本実験では撮影の際クランク角度をタイミングマークとして火炎画像とともに写込めないため、画像ごとに対応するクランク角度は熱発生率の開始時期、機関回転数およびカメラの撮影速度から推算して決めた。

(3) 燃焼室および燃料噴射ノズル諸元

燃焼室形状は図2のように可視化観察用に底面を厚み45mmの耐熱ガラス（パイレックス）にした円筒形のものである。ノズルは鉛直線に対してオフセット角 14° で取付けられている。ノズルは噴孔総面積が一定の14噴孔孔径 $d_N = 0.08$ mmおよび5噴孔 $d_N = 0.14$ mmを用い、燃焼火炎の比較のため通常の5噴孔 $d_N = 0.29$ mmも使用した。図中のノズル直径 $d_N = 0.08$ mmのノズルはノズル先端に二段構造に7孔ずつ配置されている。噴射角度は上側が 140° 、下側が 100° で噴射間隔は上下とも 51.43° の等間隔である。

(4) 各種測定機器および実験条件

シリンダ内圧力はシリンダヘッドに取り付けた圧電式圧力変換器（キスラー 6001）からの信号をチャージアンプ（キスラー 5011B）を通し、ニードルリフト量はホール効果を利用したセンサーの電圧を増幅して燃焼解析装置（小野測器 DS-9200）に取り込んだ。トリガ信号には、クランク軸に取り付けた電磁式ピックアップ（小野測器 MP-910）からの1回転につき1パルスの電圧信号をデジタルパルス発生器（Le Croy 9210）に取り込み、波形を整え遅延した後のパルス信号を用いた。吸入空気量は、層流流量計（司測研 LFE-50B）からの吸気差圧をデジタル圧力計（司測研 PE-33D）で読み取った値から求めた。なお、撮影に先立って予め燃焼条件を決定するため、燃料噴射量を燃料通路の途中に設けた玉形ピュレットによって液面が一定量通過する時間をストップウォッチで計測しておき、この結果から燃焼条件を決めた。

実験は機関回転速度 900rpm、動的燃料噴射時期 5° BTDC、冷却水温度 80°C 一定のもとで当量比 $\phi = 0.45$ および 0.16 の2通りの負荷で行った。

(5) 火炎面積割合を求める方法

スートが加熱された際に発光する輝炎の発生量を定量的に把握するために、256階調のTIFF形式の画像の全画素に対する明るさについてのしきい値を128と決め、それを超

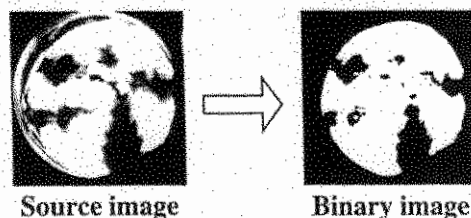


図3 原画像および二値化画像の出力例

えるものを輝炎，超えないものを不輝炎とみなして二値化した．火炎面積割合 χ_f はある画像の総輝炎画素数を全画像中の最多総輝炎画素数で割って100倍したものである．撮影した画像と二値化した画像の例を図3に示す．

実験結果および考察

(1) 当量比 $\phi=0.45$ における噴霧および燃焼過程

図4は，噴射量が比較的多い当量比 $\phi=0.45$ における3種類のノズルに対する高速度直接火炎像のクランク角変化を示す．図中の燃焼写真の1コマ目が燃焼開始を示し，以後 2.4°CA 間隔のクランク角経過を示す．なお，カメラの絞り22とした場合には着火時の発光がほとんど確かめられないため，解析時に色調補正した画像を用いて燃焼開始とした．図5には，シリンダ内圧力 p ，熱発生率 \dot{q} ，平均ガス温度 T_g ，ニードル揚程 h_2 ，および火炎面積割合 χ_f のクランク角経過を示す．

図4から， $d_N=0.08\text{mm}$ のノズルの場合には，他のノズルに比べて着火が早く，火炎がスワールに流されやすい．なお，火炎内に写っている黒い円形のはノズル下部の噴孔からの燃料が燃焼室底面に直接噴射されて付着したものである．このとき図7の熱発生率経過では燃焼初期の値が他のノズルに比べて小さいものの，燃焼期間は他の場合とあまり変わらない．火炎面積割合は $d_N=0.14\text{mm}$ よりも緩やかに立上がり， 40°ATDC 付近で低下し始める．燃焼ガス温度や筒内圧力も3種類のノズルの中で最も変化が緩やかである．これは初期燃焼が弱く，それによって誘発される乱れが低下して緩慢な燃焼になっているものと考えられる．

$d_N=0.14\text{mm}$ は噴霧が明確に写っており，着火は噴霧の先端部から発生する．火炎はスワールの影響を受けるものの燃焼室壁面まで到達し，3種類のノズルの中で最も火炎面積が大きい．これは燃料粒径が $d_N=0.08\text{mm}$ より大きくなったため，噴霧の貫徹力が増大し，噴霧が全体的に広がることで強い初期燃焼を起こし，それに伴う乱れが次の噴霧の着火を促進するからである．図5において，熱発生率の最大値も $d_N=0.08\text{mm}$ の約15倍あり， 10°ATDC 付近までやや高い状態が続いており，筒内圧力，燃焼ガス温度もそれに伴って増加している．なお，火炎面積割合が100%を示し一端低下した後，再び上昇していることや，熱発生率がクランク角後期までだらだらと続いているのは2次噴射の影響である．しかし，今回は噴射期間までの燃焼初期の現象に着目したので，燃焼後期の現象については記述しない．

$d_N=0.29\text{mm}$ の場合，着火遅れが長く，着火後の熱発生率，燃焼ガス温度などは他の2種類のノズルの場合に比べて急激に大きく変化する．初期燃焼が急激なのは，他の2つ

のノズルに比べて噴孔面積が大きく、このためジャーク式噴射系の場合には噴射圧力が低下し、そのため着火可能混合気の生成が遅れ、着火遅れが長くなって爆発的な燃焼に至る。図4から燃焼がノズル近傍で始まり、その後も全体的に広がらないことからノズル付近で停滞した燃料と空気が予混合燃焼を起こすと考えられる。着火遅れの長い燃焼形態では可燃混合気が着火前に多量に形成され、それが急激に燃焼するため、火炎温度は高くなり、窒素酸化物の発生量が増加する。

以上のことから、ノズル噴孔径を絞ると、噴霧粒径が小さくなって、燃料液滴の総数は多くなるので、噴霧の表面積が大きくなり、空気導入率（噴霧内部の空燃比）が $d_v=0.14\text{mm}$ の場合より大きくなる。そのため噴霧の蒸発時間が短くなって着火遅れは減少し、ノズルから噴射された燃料は燃焼室壁面に到達する前に着火する。燃料液滴が軽いために貫徹力が小さくなることから、強いスワールによってサーマルピンチを起こし、第2期燃焼（拡散燃焼）が緩慢になり、その結果、燃焼中期の火炎の広がりが小さくなる。なお、燃焼ガス温度の低さから窒素酸化物の発生は3種類のノズル中では最も少ないと予想されるが、初期燃焼による乱れが弱いため不完全燃焼を生じ、そのためスト

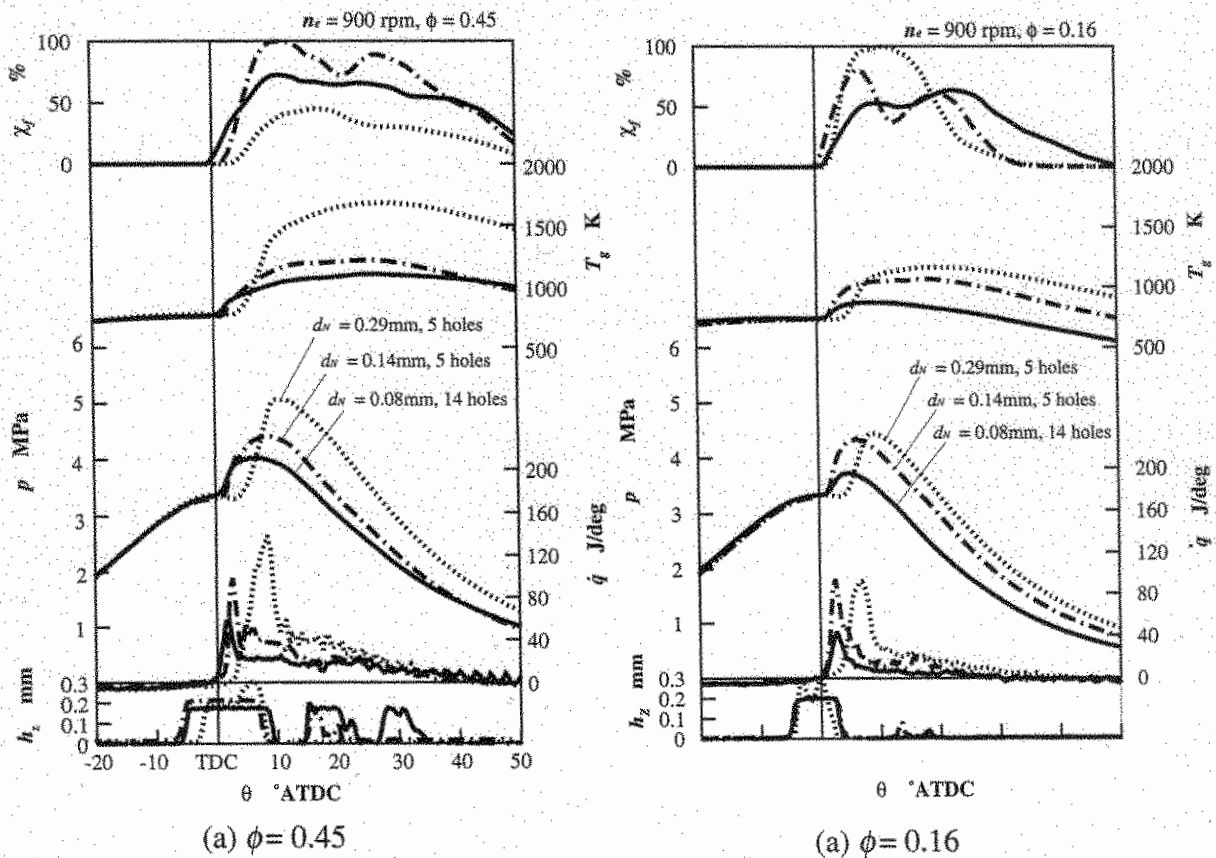


図5 シリンダ内圧力 p 、熱発生率 q 、平均ガス温度 T_g 、火炎面積割合 X_f 、噴射弁揚程 h_z のクランク角経過

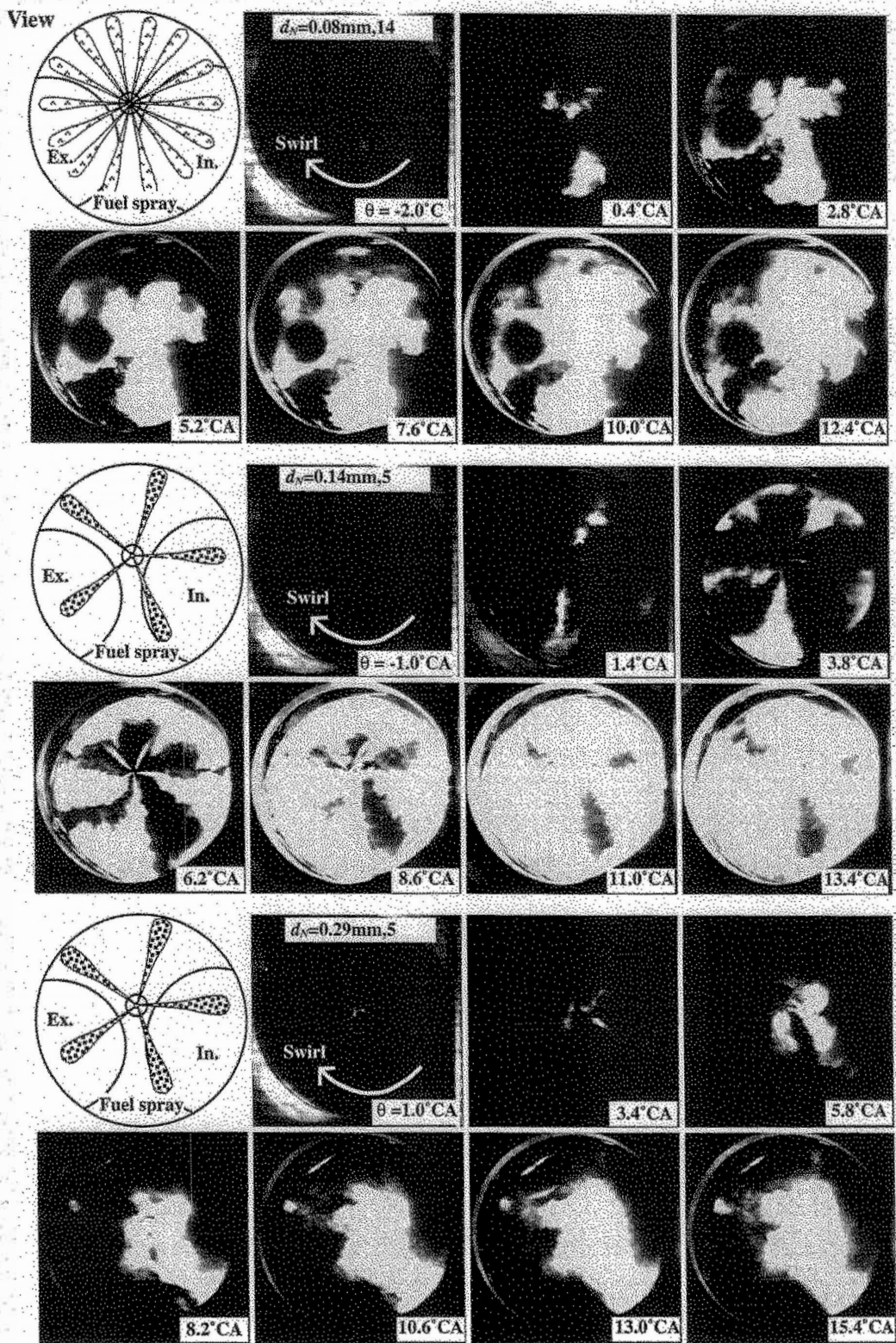


図4 各種ノズルにおける直接火炎写真 ($\phi=0.45, n_e=900\text{ rpm}$)

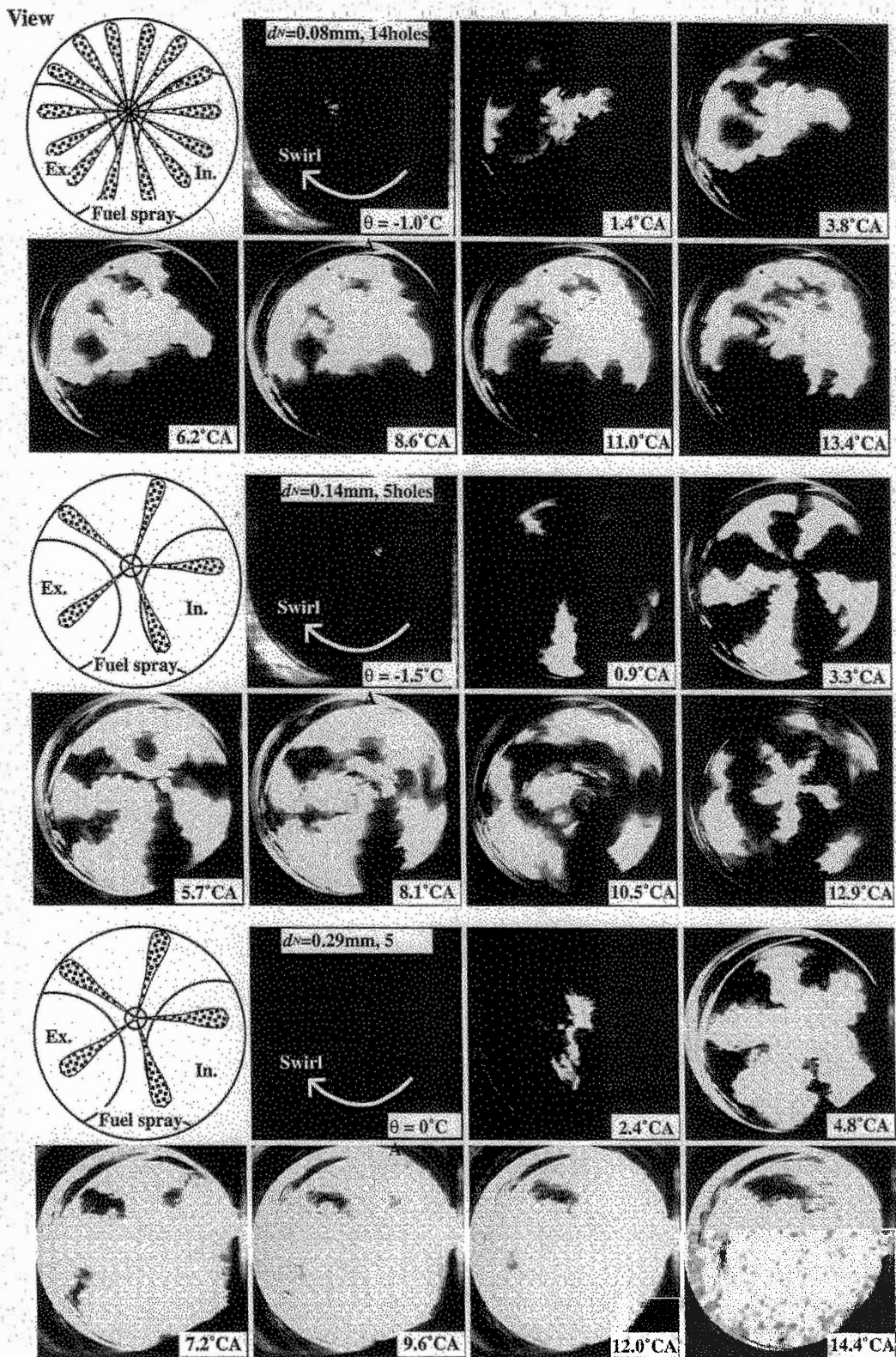


図6 各種ノズルにおける直接火炎写真 ($\phi=0.16$, $n_e=900\text{rpm}$)

や未燃燃料の排出が増加すると考えられる。

(2) 当量比 $\phi=0.16$ における噴霧および燃焼過程

図6および図7は、 $\phi=0.16$ の低噴射量時における直接火炎および熱発生率などのクラック角経過を示す。

図6において $d_N=0.08\text{mm}$ ではスワールの影響で火炎が偏って分布しており、図7の火炎面積割合が低く、燃焼ガス温度も低い値になっている。シリンダ内圧力の最大値および熱発生率も小さいため必要な出力は得られない。

$d_N=0.14\text{mm}$ の場合、噴霧の貫徹力が強く火炎の分布も噴霧に沿った形になっている。熱発生率は $d_N=0.29\text{mm}$ よりも高い値を示すものの火炎面積割合、燃焼ガス温度は低い値を示している。このことから $d_N=0.29\text{mm}$ より高い熱効率を有しながら、スートと窒素酸化物の発生量を低減できると考えられる。

$d_N=0.29\text{mm}$ の場合、図7においては火炎が 7.2° ATDC以降急速に広がっているのは、長い着火遅れ期間に多量の可燃混合気が生成され、着火に伴って、それが爆発的に燃焼するためにキャピティ全体に広がったものと推察される。

ま と め

本研究は、ノズル噴孔径を絞ることによって、初期燃焼時における熱発生率や熱膨張を変更し、それらが火炎の発達過程に及ぼす影響を高速度撮影によって調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

1. ノズル噴孔径を絞ると、噴霧粒径が小さくなって、燃料液滴の総数は多くなるので、噴霧の表面積が大きくなり、ノズルから噴射された燃料は燃焼室壁面に到達する前に着火する。
2. 燃料液滴が軽いために貫徹力が小さくなり、スワールによってサーマルピンチを起こしやすい。このため初期燃焼時の熱発生率が低下し、熱膨張も弱いためシリンダ内圧力も高くない。このことが緩慢な第2期燃焼をもたらす、火炎の広がりも小さくなる。
3. 同一噴孔面積において孔径が大きい場合には、初期の熱発生率も高く、それによる熱膨張も強いため、高いシリンダ内圧力が得られる。このため、2次噴射が発生する場合においても、噴射された燃料と空気の混合が促進し、拡散燃焼が孔径を絞った場合のように緩慢な燃焼にならない。