



Title	ディーゼル燃焼の相似性に関する三次元数値シミュレーションによる検討
Author(s)	菊田, 和重; Kikuta, Kazushige; 吉沢, 幸大 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 158, 33-41
Issue Date	1992-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42304
Type	departmental bulletin paper
File Information	158_33-42.pdf



ディーゼル燃焼の相似性に関する 三次元数値シミュレーションによる検討

菊田 和重 吉沢 幸大
近久 武美 村山 正
(平成3年10月31日受理)

Numerical Investigation on Combustion Similarity in Diesel Engines Using 3-D Simulation Program, KIVA

Kazushige KIKUTA, Koudai YOSHIZAWA,
Takemi CHIKAHISA, and Tadashi MURAYAMA
(Received October 31, 1991)

Abstract

The paper examines the possibility of a combustion similarity in diesel engines by computer simulation. In a previous work the authors analyzed fundamental equations which govern combustion phenomena in diesel engines, and predicted the possibility of combustion similarity in different sized diesel engines. The numerical analysis was conducted with a 3-D simulation program, KIVA, with some modifications. Comparison was made for engines with bore sizes from 125 to 400 mm under a variety of conditions in combustion chamber configuration, injection speed, swirl speed, and engine revolution. The results showed good agreement with the theoretical prediction. Development of temperature and fuel concentration distributions were very similar when theoretically predicted conditions necessary for the similarity were established.

1. ま え が き

ディーゼル機関内の燃焼に関してこれまでに膨大な数の研究がなされているが、エンジン内の現象を体系化し、個別データを普遍化する試みは著しく立ち後れていると言える。これに対する一つの試みとして、著者らはディーゼル機関における燃焼の相似性について理論的検討を行ない、異なったサイズの機関の間に、燃焼が相似となる条件が存在することを示した。¹⁾この場合、燃焼現象が相似であるということは、シリンダ内の流れ、噴霧挙動、着火状態、および熱発生分布などがクランク角度に対して全く同様に変化することを意味している。この理論予測を検証する目的で、次に実機における熱発生率の比較を試みた。その結果、ボアが260 mm, 320 mm および400 mm の機関の間で、予測したように相似的な燃焼が得られることが確認された。²⁾しかし、このような検証は様々な角度から、多くのデータを比較して初めてなされるものであり、少ない実験で結論づけるべきでないことは言うまでもない。

そこで本研究では、この相似理論の妥当性を検証するために、三次元数値シミュレーションプログラムの一つである「KIVA」コードを用いて、異なったサイズの機関どうしの燃焼比較を行った。

その結果、KIVA プログラムはディーゼル燃焼をシミュレートするにはまだ不完全であるものの、ボアを 125 mm から 400 mm まで変化させても、燃焼は理論予測通り相似となり得ることが示された。すなわち、燃焼室形状や噴射条件あるいはスワール比などを変化させても、燃焼状態の変化傾向には良好な相似性が認められた。

なお、この種の研究により燃焼の相似性が立証されるならば、大型機関の模型実験が可能となるほか、膨大な数のデータを相互に関連づける事ができ、エンジンの設計などに役立つものと思われる。

記 号

D	: ボア m	$\Delta\theta$: 噴射期間 rad
n	: 回転数 rpm	dp	: 噴霧粒径(SMD) m
u_0	: 平均噴射速度 m/s	Vf	: 噴射燃料量 m^3
Nz	: ノズル噴孔数	Vh	: 行程容積 m^3
SR	: スワール比	λ	: 空気過剰率
T_0	: 吸入空気温度 K	At	: 乱流粘性方程式の係数
ρ_0	: // 密度 kg/m^3	L	: 渦の特性スケール m
h	: 熱伝達係数 $W/(m^2 \cdot K)$	q	: 乱流エネルギー m^2/s^2
T_w	: 燃焼室壁面温度 K		

2. 理論相似条件

前報¹⁾の理論的検討から予測された相似条件を示すと、以下の通りである。

- (1) 燃焼室及び噴射系の幾何学形状が相似であること。
- (2) $nD/(60 \cdot u_0)$ を一致させること。
- (3) クランク角表示による着火遅れを一致させること。
- (4) クランク角当りの噴射率を $\rho_0 D^3$ に比例させること。
- (5) スワール比を一致させること。
- (6) 量論空燃比および発熱量が同一な燃料を用いること。
- (7) 噴霧粒径を $\sqrt{D/u_0}$ に比例するように噴射圧や燃料の粘性、あるいは表面張力などをコントロールすること。
- (8) 平均的な $h(T-T_w)/u_0$ が同一となるようにシリンダ壁面温度を調整すること。

以上が燃料の蒸発速度や壁面への熱伝達までも含めて燃焼を相似にするための条件であるが、これらの中で最も基本的なものは(1)から(5)までの条件であり、他はそれほど重要ではないものと推定している。

3. 計算方法および計算条件

計算には、本学の日立製スーパーコンピューターS 820/80を用いた。KIVAはCRAY コンピューター用にかかれているため、計算に先だって、組み込み関数や有効数字の取扱いなどに関

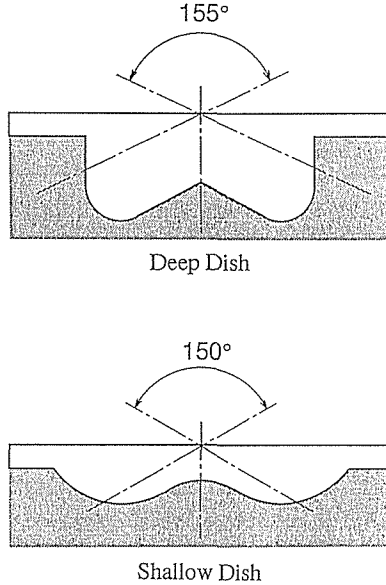


Fig. 1 Simulated combustion chamber configurations

し、変換を行った。また、KIVA はコーン状に噴射された噴霧に火花点火する DISC エンジン をシミュレートしたものであるため、噴霧および着火部分をディーゼル燃焼に適するように変更した。一方、計算結果の表示には、汎用構造解析プログラムである NISA-II のポストプロセッサを利用した。

解析は図 1 に示すような二種類の燃焼室を対象として行った。一つは、主として大型機関で用いられている浅皿型燃焼室であり、他の一つは小型エンジンで多用されているトロイダル型の深皿型燃焼室である。

表 1 は計算条件を示したものであり、重要な相似条件の一つである $nD/60 \cdot u_0$ に着目して、種々のボアサイズの機関について比較を行った。この場合、深皿型燃焼室のものは無過給運転で正味平均有効圧が約 0.5 MPa に相当する噴射量となっているのに対して、浅皿型燃焼室のものは過給運転で正味平均有効圧が約 1.5 MPa に相当した噴射量となっている。また、噴射開始時期はすべて上死点前 10 度に設定した。

なお、KIVA プログラムにおける乱流の取扱はプラントルの一方程式モデルを用いて行っており、この乱流混合の取扱がシミュレーション結果に及ぼす影響を観察するために、以下に示す乱流粘性係数に関する式の係数 At を、通常値である 0.05 から 0 まで変化させて比較を行った。

$$\mu_t = At \rho Lq^{1/2}$$

一方、メッシュに切ったセル内が均一であるとしてエンタルピーや物質の輸送を解く Full Donor Cell モデル法と、エンタルピーや物質濃度の勾配を仮想し、対象とするセルと輸送方向のセルとの情報に、流速に対応した重みをかけてそれらの輸送量を解く Interpolated Donor Cell モデル法の両方についても検討を行った。

なお、今回の場合、NO の算出に必要な化学平衡計算部分を削除し、計算時間の短縮を計った結果、クランク角度にして 60 度程度計算するのに、初期設定計算時間ステップ $DT = 2 \times 10^{-4} \text{sec}$ の条件で、約 12 分の計算時間であった。

Table 1 Simulation conditions

	Deep Dish			Shallow Dish		
	A	B	C	D	E	F
D mm	125	260	400	125	260	400
u_0 m/s	104	217	167	208	217	167
n rpm	1000	1000	500	2000	1000	500
$nD/60 u_0$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Nz	4	4	4	10	10	10
SR	2.0	2.0	2.0	0	0	0
$\Delta\theta$ CA	-10~-2	-10~-2	-10~-2	-10~-16.2	-10~-16.2	-10~-16.2
dp mm	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	7.1×10^{-3}	3.5×10^{-3}	5.0×10^{-3}	7.1×10^{-3}
Vf/Vh	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-5}	9.3×10^{-5}	9.3×10^{-5}	9.3×10^{-5}
λ	2.02	2.02	2.02	2.83	2.83	2.83
MODEL*	F, I	F, I	F, I	F	F	F
At	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.05

* F: Full Donor Cell, I: Interpolated Donor Cell

4. 計算結果および考察

4.1 シミュレーション精度の確認

相似性の検討に先だて、シミュレーション精度に関する検討を行った。図2は4噴孔ノズルを有したボア125 mmの深皿型燃焼室に対する熱発生率を、実機に対する計測結果と比較したものである。この場合、Full Donor Cellモデル(以下FDCと略す)、およびInterpolated Donor Cellモデル(以下IDCと略す)の比較を行ったほか、乱流係数 At の影響についても比較した。

図より、実際の燃焼に比べて計算値は初期燃焼がきわめて高く、燃焼期間が短いことがわかる。これは噴射直後における噴霧中への空気導入が実際に比べて強すぎることを示している。そしてこの傾向は、 At を0として乱流混合をゼロとしてもそれほど変わっていない。このような結果となったのは、噴霧の拡散現象が小さな渦スケールの混合に支配されており、計算グリッドに比べて局所性が強いことに起因していると推定される。なおFDCモデルとIDCモデルとでは、IDCモデルの方が拡散が遅く、燃焼がやや緩慢となっていることが観察される。また、実際の燃焼に比べて、最高圧力が大きく異なっているが、これは噴射時期ならびに着火時期が若干異なっていたことによるものである。

図3は過給を行った浅皿型燃焼室に多量の燃料を噴射した場合の温度分布の一例を示したものである。この場合、噴霧の受ける抵抗係数 Cd を本来の値の10分の1にしているほか、乱流係数 At を0とし、さらにIDCモデルを使って、噴霧の到達距離が極力大きくなるようにしている。しかし、それにもかかわらず、噴霧の到達距離は実際のものよりも随分短く、後述するように噴霧の貫徹力不足のために極度の不完全燃焼をしていた。これは、上述したように噴射直後の噴霧中への空気導入が、実際に比べて強すぎることによるものである。

このように、KIVAは局所性の強い拡散噴霧現象を正しくシミュレートしておらず、この点の修正が必要と言える。しかし、このようなモデルであっても、燃焼状態の定性的な変化の傾向は同様に表現することができるものと思われ、サイズが大きく異なった機関どうしの噴霧の拡散や燃焼の相似性に関する傾向を比較することは可能であると考えられる。

なお、浅皿型燃焼室のシミュレートでは噴射燃料量が多いため、IDCモデルを用いた場合にしばしば局所温度が高すぎる結果となったので、浅皿型燃焼室ではFDCモデルを、深皿型燃焼室で

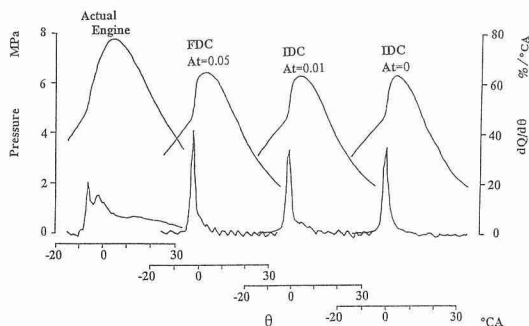


Fig. 2 Indicator diagrams and rates of heat release of the simulations, compared with an actual engine: deep dish, $D=125$ mm, $u_0=104$ m/sec, $BMEP=0.5$ MPa, $n=1000$ rpm.

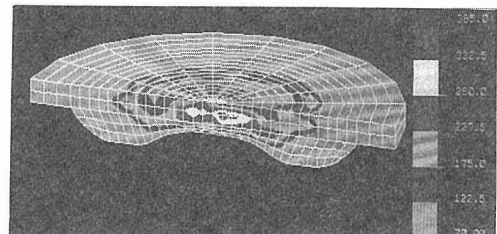


Fig. 3 Example of weak spray penetration, which is one of the poor simulation of KIVA: 18 deg. ATDC, shallow dish, $D=400$ mm $n=1000$ rpm, $BMEP=1.5$ MPa, $Cd=0.1^*Cd$ (normal), $At=0$, IDC model.

は IDC モデルを用いて計算を行った。

4.2 サイズの異なる相似機関の燃焼比較

図4は深皿型燃焼室において、相似条件を保ちながらボアを125 mmから400 mmまで変化した際の温度分布を比較したものである。左の図はトップクリアランスのほぼ中央で水平に切断した断面の温度分布であり、噴射の方向は図の垂直・水平方向となっている。右の図は噴射の方向と最も温度が高くなる方向の2面で垂直に切断した断面を示したものである。なお、この場合のクランク角度は18° ATDCであり、噴射終了後20°経過している。スワール比はいずれも2.0であり、図では時計方向に回転している。一方、図5はボア260 mmの機関において、図4と同一な相似条件で回転速度と噴射速度の組合せが異なるものを比較したものである。これらの図を比較すると、いずれも極めて類似した温度分布となっていることがわかる。例えば、キャビティ内の高温部の分布や等温度線の間隔、あるいはクリアランス部への燃焼ガスの進入傾向など、非常によく一致している。また、上部から観察したスワールによる燃焼部の移動状態も、極めてよく一致していると言える。さらに、異なった機関回転速度でも、 $nD/60 \cdot u_0$ が同一となるように噴射速度を設定したものは、ほとんど同一の燃焼となることがわかる。なお、他のクランク角度における温度分布や燃料濃度分布の発達傾向も、ほとんど相似的事実であることが確認された。ただし、それらは完全に同一とはなっておらず、噴霧の受ける抵抗や遠心力あるいは蒸発速度、ならびに

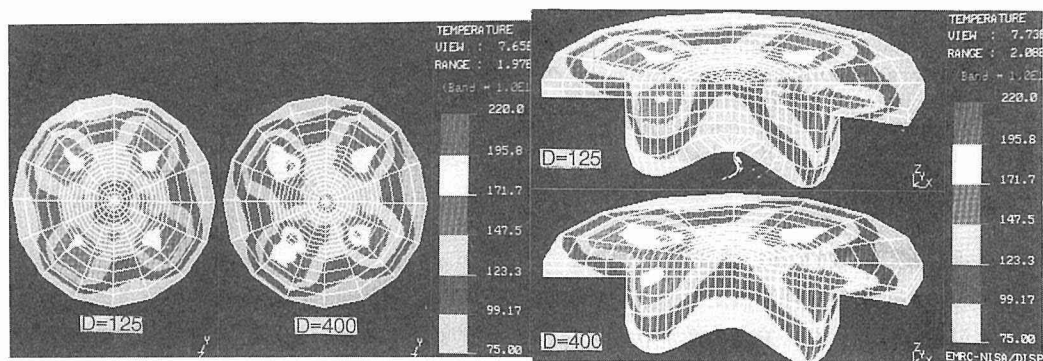


Fig. 4 Comparison of temperature distributions for different sized diesel engines: 18 deg. ATDC, deep dish, $nD/60 u_0 = 0.02$.

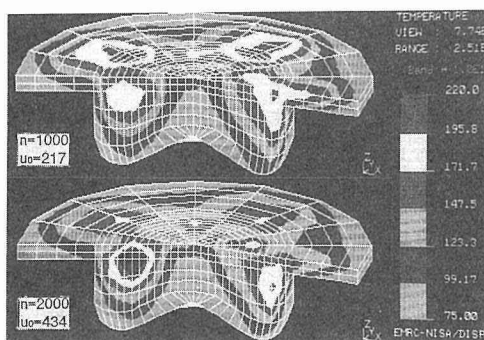


Fig. 5 Temperature distributions at different sets of engine revolutions and injection speeds at same $nD/60 u_0$: 18 deg. ATDC, deep dish, $D = 260$ mm, $nD/60 u_0 = 0.02$.

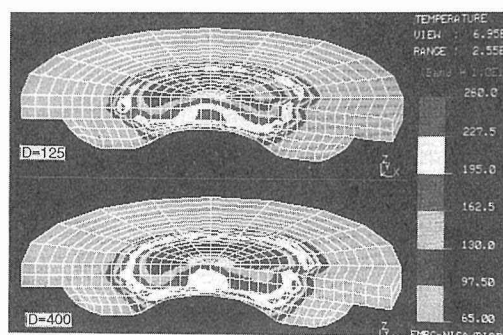


Fig. 6 Comparison of temperature distributions for different sized diesel engines with shallow dish chamber: 18 deg. ATDC.

乱流強度などにサイズによる差が若干現れたためと推察される。

図6は浅皿型燃焼室で過給を行い、多量の燃料を噴射した条件での解析結果であり、両者は相似条件を満足している。この場合のクランク角度は 18° ATDCであり、噴射終了時期は 16.2° ATDCとなっている。ボアが125 mmと400 mm というように大幅にサイズが異なる機関であっても、いずれもよく一致した温度分布となっていることがわかる。

図7は図4および図5に対応したサイズの異なる相似機関の指圧線図および熱発生率を比較したものである。ボアが400 mm のものは若干初期燃焼が低く燃焼期間が長くなっているが、熱発生経過は概ね一致しており、指圧線図の比較からも相似性が成立することが確認される。

以上、機関サイズや回転速度が大幅に異なる機関であっても、相似条件を満足した場合には、極めてよく類似した燃焼となることがわかった。

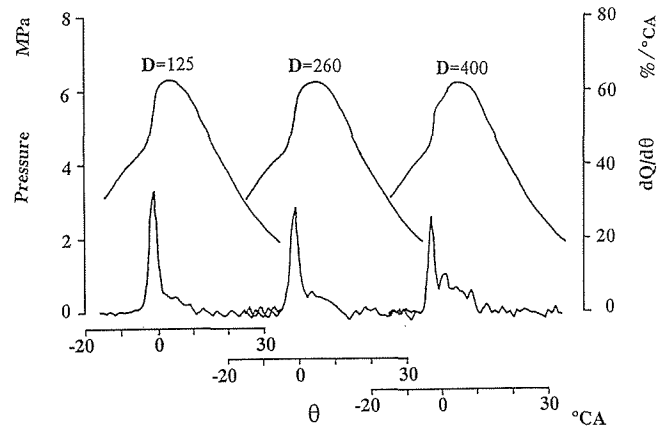


Fig. 7 Comparison of indicator diagrams and rates of heat release for different sized engines: deep dish, conditions of A, B and C in table 1.

4.3 噴射速度に対する燃焼変化の相似性

前節において相似条件を満足した場合の温度分布はほとんど同一になることが示されたが、相似条件が成立していない場合の燃焼状態も類似した温度分布になることが考えられ、これだけではエンジン設計に際して必要な微妙な燃焼の変化が異なったサイズの機関で相似的に再現されるとは言い切れない。そこで本節では、噴射条件を変化させた際の燃焼状態の傾向が、異なったサイズの機関の間で同様であるかどうか比較を行った。

図8は、図5と同一のボアおよび機関回転速度の条件で、噴射速度が2倍になるように高圧噴射をした際の温度分布であり、上は噴孔径を小さくして噴射期間を図5と同一にしたもの、下は噴孔径を変えずに噴射期間を半分にしたものをそれぞれ示している。また図9は図8に対応した高圧噴射時の指圧線図および熱発生率を、通常噴射のものと比較したものである。

噴孔径を小さくしたものは図5に比べて燃料の拡散混合が良好であり、より均一な燃焼が得られていることがわかる。そして、燃焼の終了が高圧噴射をしないものに比べて早くなっているのが温度分布の変化から観察された。一方、噴孔径を変えずに噴射期間を半分にしたものは、噴霧の運動量が大きいいため貫徹力が他に比べて大きくなっており、高温部分がより周方向に移動しているのがわかる。また、燃焼は噴孔径を小さくしたものよりも活発であり、噴射率を高めた効果が認められる。

このように、噴射速度を変えた場合の温度分布や燃焼パターンは明かに異なっており、こうした変化は、ボアを400 mm とした場合にも同様に観察された。すなわち噴射条件による燃焼の変

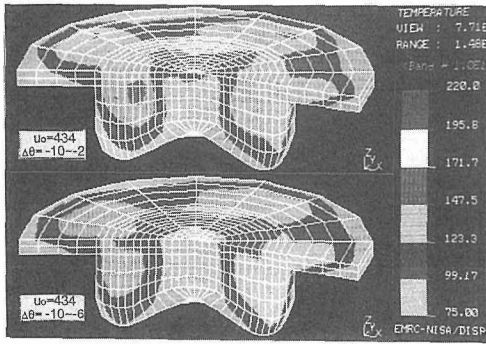


Fig. 8 Changes in temperature distributions at higher fuel injection speed; $\Delta\theta = -10 \sim -2$ deg. with smaller nozzle diameter than Fig. 5 (top), and $\Delta\theta = -10 \sim -6$ deg. with equal nozzle diameter (bottom): 18 deg. ATDC, deep dish, $D=260$ mm, $u_0=434$ m/s, $n=1000$ rpm.

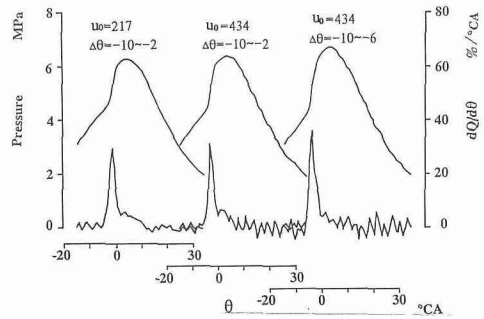


Fig. 9 Comparison of indicator diagrams and rates of heat release for fuel injection speeds and periods.

化は、サイズの異なる機関でも全く同様に再現されるといえる。

4.4 スワール速度に対する燃焼変化の相似性

前節と同様に、本節ではスワール速度を変化させた場合の燃焼傾向に関し、相似性の比較を行った。

図10はボアが125 mmと400 mmの深皿型燃焼室で、スワール比を4.0にした際の温度分布である。図4に比べて燃焼領域がスワールに強く流されており、一方高温の領域がキャビティ下方に伸びていることがわかる。また高温部が局所的に存在しており、燃料と空気の混合がやや悪化していることが燃料濃度分布の解析などからも確認された。こうした変化は、ボアを125 mmから400 mmにしても同様に観察されるが、両者は必ずしも良く一致した温度分布とはなっていない。これはスワールにより液体である噴霧が受ける遠心力や抵抗に関して、サイズによる差が若干現れたためと推察される。ただし、ガス体に対する遠心力にはサイズによる差がないことが次元解析から推定された。

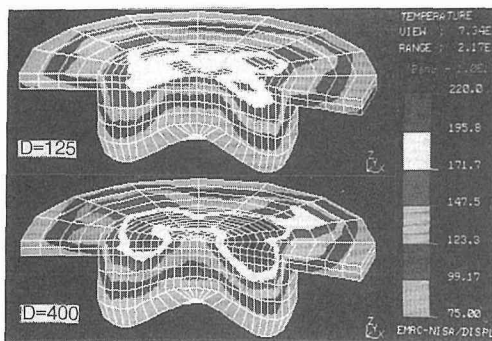


Fig. 10 Changes in temperature distributions at higher swirl ratio than Fig. 4: 18 deg. ATDC, deep dish, $D=125$ mm, $SR=4.0$, $nD/60 u_0=0.02$.

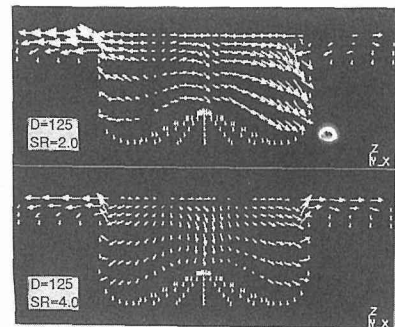


Fig. 11 Comparison of velocity vectors for different swirl ratios: 18 deg. ATDC, deep dish, $D=125$ mm, $u_0=104$ m/s, $n=1000$ rpm.

図11は図4および図10に対応した流速分布であり、スワール強さを増した場合にはキャビティ下方への流速が若干増加することがわかる。図10におけるキャビティ下方への高温部の広がり、こうした流れによるものと考えられる。なお、ボアを400 mmとした相似機関における流速分布も、全く図11と同一であった。

以上、スワール強さによる燃焼変化に関しても、異なったサイズの機関の間で相似となることが確認されたが、スワールが強い場合には相似性は若干低下した。

4.5 サイズによる最適燃焼室形状の差異に関する検討

機関サイズによって最適な燃焼室形状が異なることはよく知られており、燃焼の相似性が成立し得ることと矛盾があるように思われる。この要因については次のような事が考えられる。(1) $nD/60 \cdot u_0$ が機関サイズにより大きく異なっている、(2) シリンダ断面積に対するノズル総噴孔面積の比が大きく異なっている、(3) 着火遅れが大きく異なっている、(4) 噴射燃料量が過給の度合によって大きく異なっている。

この点について検討を行う目的で、高過給の浅皿型燃焼室においてノズル噴孔数を4と10にした場合の燃焼比較を試みた。図12は4噴孔にした際の温度分布であり、図6の10噴孔のものと同運転条件が対応している。両者を比較すると4噴孔のものの方が噴霧の貫徹力が強く、壁面近傍の空気をよく利用していることがわかる。図13はこの両者の熱発生率を比較したものであり、10噴孔の場合には噴霧がシリンダ中央に滞留してしまうために、かなり不完全燃焼していることがわかる。

通常、高過給の大型機関では多噴孔ノズルの方が適しており、本解析結果と対応していない。これは、4.1節で述べたようにKIVAプログラムにおける噴霧の混合の記述が不十分な事に起因していると言える。したがって、KIVAプログラムの解析精度を上げることが、機関サイズによる最適燃焼室形状の差異を論ずる上でまず必要であると言える。

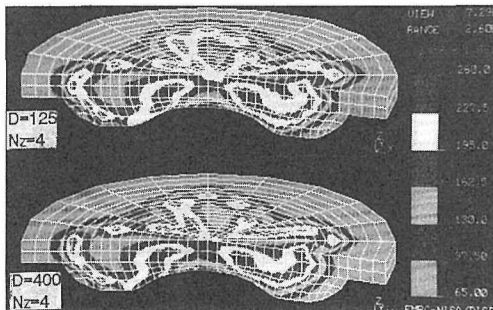


Fig. 12 Temperature distributions with a 4-hole nozzle in shallow dish engines: 18 deg. ATDC, $nD/60 u_0 = 0.02$.

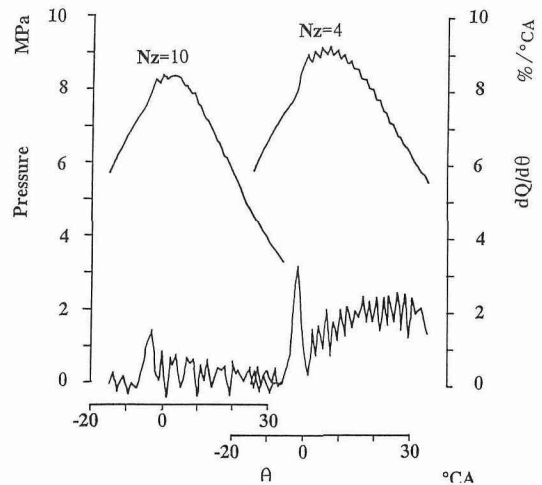


Fig. 13 Comparison of indicator diagrams and rates of heat release for number of nozzle holes: shallow dish, $D=260$ mm, $u_0=217$ m/s, $n=1000$ rpm.

5. 結 論

- (1) KIVA プログラムはディーゼル燃焼を十分にシミュレートしていないが、それでもなお大幅にサイズの異なる機関の間で燃焼の相似性が成立し得ることが、3次元数値シミュレーションの結果確認された。
- (2) 燃料噴射条件やスワール速度および燃焼室形状を変化させても、異なったサイズの機関で同様の燃焼変化が観察された。ただし、スワールが強い場合には相似性は若干低下した。
- (3) 機関サイズによって最適燃焼室形状に差異がある理由について解析するには、KIVA のシミュレーション精度が不十分であり、今回この点を明らかにすることはできなかった。

本研究の遂行に当たり、日産自動車㈱から援助を頂いた。また、㈱ゼクセルから構造解析プログラムの援助を頂いた。一方、新潟鉄工㈱からは大型機関の燃焼に関し、助言を頂いた。ここに特記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 近久, 村山, 機論 B, 54 - 508, (1988), 3579
- 2) T. Chikahisa and T. Murayama, Proc. of COMODIA 90, (1990), 571