メタン噴流の着火遅れ*

坂根 篤**・村上 聡***
利岡才次**・小原敬史***

Ignition Delays of Methane Jets

By Atsushi Sakane, Satoshi Murakami
Saiji Toshioka, Keishi Obara

Gas burning diesel engines with using LNG as fuel have been developed for the purpose of applying to prime movers of LNG carriers and electric generators. For developing these engines, the investigations of the methods of ensuring for ignition of fuel are important, because natural gas is harder to ignite than conventional liquid fuel. This study has been carried out as a fundamental study of ignition of fuel jets in gas burning diesel engines.

Methane was injected in a closed vessel filled with the hot burnt gas, in which remained oxygen concentration was about 21vol%, and then the ignition delay, ignition temperature, and heat release rate for initial combustion duration were investigated. Moreover, the ignition delays measured in the closed vessel were compared with that in a gas burning diesel engine. The results are as follows:

- (1) The data of ignition delays of transient methane jets measured in the closed vessel can be applied to gas burning diesel engines.
- (2) In order to shorten the ignition delays to the allowable level for gas burning diesel engines, it is necessary to raise the temperature of gas in their combustion chamber above 1100K.
- (3) The heat release rates for initial combustion duration of transient methane jets increase in proportion to their ignition delays.

1. ま え が き

高圧の気体燃料を噴射し、拡散燃焼させるガスディーゼル機関は、気体燃料を予混合燃焼させる従来のガス機関に比べ、高い出力率および熱効率を有しているため、LNG船の主機関、および発電用機関として注目され、開発が行われてきた^{1)~3)}。LNGを燃料として使用する場合、LNGの主成分であるメタンは着火性が悪いので、ガスディーゼル機関では、燃焼の最適化とともに燃料の着火方法の開発が重要であり、そのため、混合気形成過程や着火過程に関する知見が不可欠である。

本研究では、ガスディーゼル機関における着火過程に関する知見を得るために、定積容器内で $\text{CH}_4-\text{O}_2-\text{N}_2$ 酸素過剰予混合気を燃焼させて、容器内を高温、高圧にし、その中にメタンを単発噴射して、着火遅れ、着火温度、および燃焼初期の熱発生率を測定した。さらに、試

験用ガスディーゼル機関におけるメタン噴流の着火遅れの測定値との比較を行い、定積容器を使用して得られた結果が、実機に適用できることを確認した。

2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置制御系統図である。容器内部の形状は、三角おむすび形であり、底辺160mm、高さ210mm、奥行き70mm、容積1330 cm^3 である。メタンは着火性が悪いので、容器内の温度をかなり高温にして実験する必要があると考えられる。そこで、 N_2 が55vol%、 O_2 が37vol%、 CH_4 が8vol%の割合になっている予混合気を容器内において燃焼させて、容器内を高温、高圧にした。 N_2 、 O_2 、および CH_4 の混合割合は、予混合気が燃焼した後、残留 O_2 濃度が21vol%になるように決められている。気体噴射弁は、噴射制御ポンプ（ボッシュ型ディーゼル噴射ポンプ）の油圧によって作動し、蓄圧室に充填されたメタンを噴射する。噴射圧（蓄圧室内のメタンの圧力）に対する噴射開始時の容器内圧力の比が、臨界圧力比になるように、メタンの噴射圧を設定した。蓄圧室と気体噴射弁の燃料通路の総容積は75 cm^3 であり、

* 原稿受付 昭和63年2月12日

昭和61年春季学術講演（昭和61年5月20日）

** 正会員 三井造船㈱（玉野市玉3-1-1）

*** 三井造船㈱（玉野市玉3-1-1）

図1 実験装置制御系統図

噴射量に比べて十分大きいので、噴射期間中の噴射圧の降下は無視できる。噴射弁ノズル部を図2に示す。

図3に実験装置の作動時間系統図を示す。任意時刻にスタート信号を発生させると、噴射制御ポンプの下死点信号が遅延回路に取り込まれ始める。1番目の下死点信号が取り込まれてから、所定時間 t_r 経過した後、遅延回路は出力信号を発する。その信号に同期して、点火装置（フルトランジスタ式）が作動し、点火電極で放電が起こって、容器内の予混合気が燃焼し、温度、圧力が上昇する。2番目の下死点信号に同期してポンプコントローラが作動し、噴射制御ポンプのコントロールラックが押し込まれて、気体噴射弁作動油の圧縮が始まる。作動油圧が、気体噴射弁の針弁を押えているばね力よりも高くなると、針弁は上昇し、メタンが噴射される。気体噴射弁の針弁が上昇開始するときを噴射開始時刻、また、メタン噴射開始後、容器内の圧力が再上昇開始するとき

図2 気体噴射弁ノズル

図3 実験装置の作動時間系統図

を着火時刻とし、両者の時間差 t_d を着火遅れとした。メタン噴射開始時の容器内温度および圧力は、予混合気の初期圧力および時間 t_r を変えることにより変化させた。なお、予混合気の初期温度および初期圧力は、C-A 熱電対およびブルドン管式圧力計により測定した。また、容器内圧力および噴射圧の時間的な変化は、歪ゲージ式圧力変換器で測定し、気体噴射弁の針弁リフトは、渦電流式変位計で測定した。

表 1 に、メタン噴射開始時の容器内圧力 P_{gi} 、メタンの噴射圧 P_f 、噴射期間 t_{inj} 、噴射されるメタンの質量 M_t 、ノズル径 d_n の条件を示す。

表 1 実験条件

P_{gi} (MPa)	0.5 ~ 4.0
P_f (MPa)	0.9 ~ 7.4
t_{inj} (ms)	8.6
M_t (mg)	5.5 ~ 44.7
d_n (mm)	0.74

$\text{CH}_4 - \text{O}_2 - \text{N}_2$ 予混合気が燃焼する場合、燃焼前と燃焼後の気体の総モル数は変化しない。また、容器内の気体の温度は均一ではないが、本研究では、メタン噴射開始時の容器内の気体温度 T_{gi} を、理想気体の状態式より得られる式(1)でもって表わした。

$$T_{gi} = T_{g0} P_{gi} / P_{g0} \quad (1)$$

ただし、 T_{g0} および P_{g0} は、 $\text{CH}_4 - \text{O}_2 - \text{N}_2$ 予混合気の初期温度および初期圧力である。なお、着火遅れ期間中の容器内の気体温度の変化は、無視できるくらい小さい。

3. メタン噴流の着火遅れ

3.1 定積容器における着火遅れ

メタン噴射開始時の容器内の気体温度 T_{gi} と、着火遅れ t_d の関係を、 P_{gi} の種々の値について調べた結果を図 4 に示す。いずれの P_{gi} の場合も T_{gi} がある温度になるまでは、 T_{gi} の上昇とともに着火遅れは短くなるが、ある温度以上になると、 T_{gi} が上昇しても着火遅れの変化は小さくなる。なお、文献(1)に示されている方法で、本研究におけるメタン噴流先端到達距離を計算すると、噴流が容器の壁に衝突するまでに、10 ms 以上の時間を要するので、測定範囲内では、噴流は容器の壁に衝突していないと考えられる。

t_d を $1/T_{gi}$ に対してプロットすると、図 5 のようになる。いずれの P_{gi} の場合も、 T_{gi} がある温度になるまでは、 $\log(t_d)$ は、 $1/T_{gi}$ の減少とともにほぼ直線的に減少する。しかし、ある温度以上に T_{gi} が上昇すると、直線は折れ曲がり、勾配は緩やかになる。新井ら⁴⁾の軽油の噴霧の着火遅れに関する研究でも、同様の結果

図 4 メタン噴流の着火遅れ

図 5 t_d と $1/T_{gi}$ の関係

が得られており、メタン噴流固有の現象ではなさそうである。直線の折れ曲がる一因として、高温の場合は、可燃混合気形成に要す時間、すなわち物理的遅れが、着火遅れに対し支配的であり、低温の場合は、化学反応に要す時間、すなわち化学的遅れが支配的であることが考えられる。

t_d を P_{gi} に対しプロットすると、図 6 のようになる。なお、ここに示す t_d は、図 4 に引いた曲線から読みとった値である。また●の記号で示すのは、試験用ガスティンゼル機関における着火遅れの測定値であるが、これについては、次項で述べる。 T_{gi} が 1000 ~ 1100 K の間では、着火遅れはほぼ P_{gi}^{-n} に比例しており、軽油など

図6 t_d と P_{gi} の関係, および試験用ガスディーゼル機関における測定値との比較

の着火遅れ⁴⁾と同じ傾向を示している。

3.2 試験用ガスディーゼル機関における着火遅れとの比較 定積容器を使用して得られた結果が, 実機にも適用できることを確認するために, 試験用ガスディーゼル機関の着火遅れと比較した。

表2に試験用ガスディーゼル機関の主要目を示す。燃

表2 試験用ガスディーゼル機関主要目

シリンダ数	1
シリンダ径 (mm)	420
ピストンストローク (mm)	450
機関回転数 (rpm)	500

料は, メタンがほぼ100%の圧縮天然ガスである。この機関では, 圧縮行程終りの空気の温度が, 900 K程度にしかならないので, それを定積容器での実験と同程度の温度まで高めるために, A重油を下死点後約30度に少量噴射し, 約150度に自己着火により燃焼させた。図7に示すように, A重油はパイロット噴射弁より噴射し, 天然ガスは, 下死点後約170度に, シリンダの中心に取り付けた気体噴射弁より放射状に噴射した。噴射開始および終了は, 試験用ガスディーゼル機関により駆動される噴射制御ポンプの油圧によって制御した。着火遅れの定義, および気体噴射弁の針弁リフトと燃焼室内圧力の測定方法は, 定積容器における実験の場合と同じである。針弁リフトおよび燃焼室内圧力の検出器からの出力は, クランク角1度ごとにデジタル化し, その128サイクルのアンサンブル平均値から着火遅れおよび燃焼室内温度を求めた。なお, 試験用ガスディーゼル機関の場合には, 定積容器での実験の場合と異なり, 着火遅れ期間中に燃焼室内圧力および温度が変化するので, 着火遅れ期間中の燃焼室内圧力の平均値7.1 MPaおよび温度の平均値1000 Kを P_{gi} および T_{gi} とした。このようにして得られた試験用ガスディーゼル機関の着火遅れを, 図6に●の記号で示す。定積容器実験での着火遅れと試験用ガスディーゼル機関での着火遅れが, ほぼ, P_{gi}^{-n} の同一線上にあることから, 定積容器での実験で得られた結果は, 実機に適用できると考えられる。

ディーゼル機関では, 燃料の着火遅れが長くなると, ディーゼルノックやサイクル変動の問題が生じる。着火遅れの許容限度は一概に決めることはできないが, 中・大形のディーゼル機関の場合, 着火遅れは2~3 ms以下に抑えることが望ましい。そのためには, 燃焼室内温度を1100 K以上にする必要がある。

図7 試験用ガスディーゼル機関の燃料噴射系

4. メタン噴流の着火温度

メタン噴射開始時の容器内圧力を変化させ、メタン噴流の着火温度を調べた結果を図8に示す。着火した場合は○、しなかった場合を×の記号で示す。ここでは、噴射開始後20 ms以上経過しても着火しなければ、着火しないものとみなした。図8の中で、実線で結んでいるのは、確実に着火するとみなせる最低温度、すなわち、その雰囲気圧力におけるメタン噴流の着火温度である。雰囲気圧力が上昇するにしたがって、着火温度は低下するが、圧力がある程度高くなると、着火温度は一定温度に近づく。

図8 メタン噴流の着火温度

5. メタン噴流の燃焼初期の熱発生率

定積容器内圧力の時間的な変化の一例を図9(a)(b)に示す。(a)は、点火電極で放電が起こってからの経過時間 t_{sp} を時間軸にとった場合であり、(b)はメタン噴射開始前後の圧力変化を拡大して示したもので、噴射開始後経過時間 t を時間軸にとっている。(b)には気体噴射弁の針弁リフト L_v 、および容器内の圧力変化より計算で求めた積算熱発生量 Q をあわせて示す。メタン噴流の燃焼初期は、予混合的燃焼が行われていると考えられるが、酸素過剰 $\text{CH}_4-\text{O}_2-\text{N}_2$ 予混合気の燃焼による圧力上昇率に比べて、メタン噴流の燃焼初期の圧力上昇率は高い。

着火遅れ期間中に形成される予混合気の量は、着火遅れの長さに比例するので、メタン噴流の初期燃焼期間の熱発生率は、着火遅れの長さの影響を受けるものと考え

(a) $\text{CH}_4-\text{O}_2-\text{N}_2$ 酸素過剰予混合気
燃焼開始後の容器内圧力変化

(b) メタン噴射開始前後の容器内圧力変化

図9 定積容器内の圧力変化

られる。メタン噴流が着火してから、1回の噴射質量の10%が燃焼したときの積算熱発生量を $Q_{0.1}$ とし、着火してからそこまでの期間を初期燃焼期間として $\Delta t_{0.1}$ と表わす。

図10に、 $P_{gi} = 4.0 \text{ MPa}$ の場合のメタン噴流の着火遅れ t_d と、初期燃焼期間の平均熱発生率 $Q_{0.1}/\Delta t_{0.1}$ の関係を示す。初期燃焼期間の平均熱発生率は、着火遅れにほぼ直線的に比例して大きくなる。 $Q_{0.1}/\Delta t_{0.1}$ が 100 kJ/s の場合、容器内の圧力上昇率は約 20 MPa/s であり、図9(a)に示す $\text{CH}_4-\text{O}_2-\text{N}_2$ 予混合気の燃焼初期の圧力上昇率に比べはるかに大きい。どちらも予混合的燃焼であるが、噴流の場合には、火花点火に比べて着火源が大きく、さらに乱流状態にあるため、非常に速く燃焼するものと考えられる。また、そのほかの P_{gi}

図10 メタン噴流の初期燃焼期間の平均熱発生率と着火遅れの関係

の条件の場合にも同様な傾向を示し、本研究の実験範囲内では、初期燃焼期間の平均熱発生率は着火遅れに比例して大きくなる。

6. あとがき

ガスディーゼル機関における燃料の着火に関する知見を得るために、メタンを高温、高圧の容器内の酸素過剰燃焼ガス中に噴射し、メタン噴流の着火遅れ、着火温度、および燃焼初期の熱発生率を測定した。そして、試験用ガスディーゼル機関におけるメタン噴流の着火遅れとの比較を行った。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 定積容器による実験で得られたメタン噴流の着火遅れに関する結果は、実機にも適用することができる。

(2) メタンを中・大形のディーゼル機関の燃料として使用する場合、許容できる程度の着火遅れにするためには、燃焼室内の温度を 1100 K 以上にする必要がある。

(3) 本研究の実験範囲内では、メタン噴流の燃焼初期の平均熱発生率は、着火遅れに比例して大きくなる。

終りに、本研究をまとめるにあたり、懇切なご指導と貴重なご助言を賜った、岡山大学工学部 浜本嘉輔教授に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Miyake, M., ほか 5 名, Conference Papers of 15th CIMAC Congress, (1983), 1193.
- 2) Engesser, B., ほか 6 名, Conference Papers of the 12th International LNG/LPG Conference & Exhibition (GASTECH 86), Vol. 1 Session 5 Paper No. 11 (1986-11).
- 3) Terashima, Y., ほか 6 名, Conference Papers of the 12th International LNG/LPG Conference & Exhibition (GASTECH 86), Vol. 1 Session 5 Paper No. 12 (1986-11).
- 4) 新井・樋口・廣安, 機論, 50-453, B (昭59), 1345.

〔質 疑 応 答〕

質問者 石川島播磨重工業技術研究所 佐藤順一
〔質問〕

1) 燃料が噴射されてから壁面に衝突するまでの時間と着火遅れを比べてみた場合、着火は噴霧が壁面に衝突するまでに起きているか否か。

2) 図5において、空気温度が高くなると物理的遅れが相対的に大きくなり Ignition delay - $1/T_s$ の曲線の勾配がゆるやかになると講演者は考察しているが、メタンのようなガス燃料の場合、重油のような液体燃料と異なり、物理的遅れに液滴の蒸発のような時間の比較的多くかかる過程が存在しないため、物理的遅れが非常に小さいと思うがいかがか。

〔回答〕

1) 10 ms 以内であれば噴霧は壁面に衝突していない。

2) 燃料と周囲の気体とが混合し、可燃混合比となるにはある助走期間が必要である。また、着火にいたるためには反応が持続する必要があるが、そのためには流速のあまり高くない場所である必要がある。本研究でいう物理的遅れとは、そのような場を形成するのに要す時間である。液体燃料噴霧でも同じ過程が存在しており、液体燃料噴霧の混合気形成過程の研究^{付(1)} 参考にとすると、その時間は 0.5 ~ 1 ms と考えられる。

付(1) たとえば廣安・ほか 2 名, 機論, 44-385 (昭53), 3208.