収束デトネーションを用いたガスエンジン用
点火システムに関する研究*石井 一 洋^{*1}, 久保田 倫弘^{*2}, 藤 本 寛 幸^{*3}
坪 井 孝 夫^{*4}, 鈴 木 実^{*5}A Study on Ignition System of Gas Engines
Using Imploding DetonationKazuhiro ISHII^{*6}, Michihiro KUBOTA, Hiroyuki FUJIMOTO,
Takao TSUBOI and Minoru SUZUKI^{*6} Department of Mechanical Engineering, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

In the present work performance of a novel ignition system based on imploding detonation was studied in order to improve ignition ability and combustion enhancement of gas engines using a natural gas for power generation. Deflagration generated in the pre-chamber was introduced into the imploding chamber whose cross-sectional area decreases in the propagation direction and then transition to detonation occurs. Flame jet emanating from a nozzle fixed at the implosion center is expected to have superior ignition ability due to high temperature and pressure inherent to imploding detonations. The experimental results show that maximum pressure at the implosion center was 300 to 350 times higher than the initial pressure. The burning time in the main combustion chamber of 350 mm in diameter ranged from 2.5 ms to 4 ms and decreased with increase in the nozzle diameter under the condition that the nozzle orifice was choked. From the estimation of burning velocity and cell size of a stoichiometric methane-air mixture under the gas engine condition, it was requested that the nozzle diameter must be larger than 4.0 mm and that the volumetric ratio of the pre-combustion chamber to the main combustion chamber is less than 0.01, in order to detonate the mixture in the pre-combustion chamber more easily with comparison to the present test.

Key Words: Detonation, Ignition, Combustion, Flame Jet, Internal Combustion Engine

1. 序 論

天然ガスを用いる発電用の大型ガスエンジンでは、天然ガスの点火性の悪さと、シリンダが大口径であることに起因するエンドガスのノッキングが問題となる。このため少量の油燃料を予燃焼室内に噴射し、生ずるパイロット火炎により主燃焼室の予混合ガスの点火を行うマイクロパイロット着火方式が採用されている⁽¹⁻³⁾。この方式により従来の火花点火方式に比べて強力な点火エネルギーを得ることができ、ノッキング限界近傍域の高効率領域での運転、希薄燃焼化による低 NO_x 化の実現が可能となっている。一方、パイロット火炎の燃料には重油を用いることが多く、この場合新たに SO_x 排出の問題が生ずる。

これに対して、デトネーションを収束させてエンジン主燃焼室内に噴射する⁽⁴⁾ことによっても、天然ガス

—空気混合気を迅速かつ確実に燃焼させることが可能と考えられる^(5,6)。この方式はOppenheimらが内燃機関の燃焼制御を目的として考案したパルスジェット燃焼⁽⁷⁻⁹⁾と類似している。しかしながら、デトネーションの収束により予燃焼室内では非常に高い圧力が得られる⁽¹⁰⁾ため、通常のパルスジェットよりもジェットの運動量が大きく、貫通力が高い。したがって、マイクロパイロット着火方式と比べてジェット噴出時の火炎面積が大きく、より等容度の高い燃焼が期待できる。また燃料としては天然ガスのみを使用するため、 SO_x 排出の問題も生じない。

本研究では、収束デトネーションにより生成されるフレイムジェットをディスク型の主燃焼室内で中心より半径方向に噴射し、混合気初期圧力およびノズル噴射孔径を変化させて主燃焼室内での燃焼特性を調べた。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す。本装置は大きく分けて予燃焼室、収束室、主燃焼室から構成されている。これら各室には同一組成の混合気が同一圧力で充填され、予燃焼室端に設置された点火プラグにより点火さ

* 原稿受付 2007年9月18日。

^{*1} 正員, 横浜国立大学大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。^{*2} 横浜国立大学大学院工学府。^{*3} 横浜国立大学工学部。^{*4} 正員, フェロー, 横浜国立大学大学院工学研究院。^{*5} 正員, JFEエンジニアリング (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田1-1) [現: 東邦大学理学部 (〒274-8510 船橋市三山2-2-1)]。

E-mail: kazishii@ynu.ac.jp

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.
Dimensions in mm.

れる。予燃焼室内ではデフラグレーションが進行するため、火炎に先行して圧縮波が下流側に伝播し、収束室内の未燃混合気の燃焼前圧力は最大で初期圧力の3倍程度に増加すると考えられる。予燃焼室を伝播し終えた火炎は引き続き収束室に進入するが、予燃焼室と収束室との連絡通路内壁に旋条に溝が切られており、これにより乱流火炎への遷移を促進する。次に火炎はいったん放射状に広がり、外周部に設けられた直径約8 mmの小孔群を通じて軸方向に向きを変える。このあと火炎は直径約8 mmの蜂の巣状の穿孔を通じて収束室へ導かれ、火炎面素ができるだけ収束中心から等距離となるように調整される。収束室では伝播につれて断面積が減少する構造となっており、収束中心にて高温・高圧の状態が得られる。収束室側壁には100 mmの距離をおいて2箇所、火炎面検出用のイオンプローブが埋め込まれている。

収束中心とノズルとは直径7 mm、長さ40 mmの流路にて接続されている。ノズルは主燃焼室半径方向に噴射する4孔タイプを用い、噴射孔径を2 mm, 3 mm, 4 mmと変化した。なお噴射孔はノズル設置側の壁より4.5 mm離れており、噴射方向は主燃焼室半径方向に対して10°傾いている。図2に示すように主燃焼室は直径350 mm、厚さ36 mmのディスク型である。また主燃焼室中心から90 mmの位置に有効直径50 mmの観測窓が取り付けられており、ノズルより噴出されるフレームジェットの観測が可能である。主燃焼室側壁付近には汎用圧力変換器(昭和測器 HVF-20MPa)が設けられている。なお収束中心圧力を計測する際には、ノズルの代わりに圧力変換器(Kistler 6213B)を取り付け、フレームジェットを収束室から噴出させない条件で計測を行った。

Fig. 2 Main combustion chamber.

燃料としては天然ガスの主成分であるメタンを用い、酸化剤は酸素富化空気(O_2 30% in volume)として、当量比は1.0とした。酸素富化空気を用いた理由としては、実際のエンジンではピストンにより圧縮された混合気に点火しており、圧縮行程中の温度上昇に伴う反応性向上を模擬するためである。混合気初期圧力 P_0 は0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPaと変化させ、初期温度は室温である。また点火には自動車用火点プラグおよび一次電流遮断型の点火装置を用いた。

3. 実験結果

3・1 収束中心圧力 図3に混合気初期圧力 P_0 を変化させた場合の収束中心の圧力履歴およびイオンプローブ信号の波形を示す。このとき、前述したように図1のノズル部分を圧力変換器が装着可能なホルダーに交換しており、図3に示す L とは収束中心から圧力変換器受圧面までの距離を意味する。また同図の横軸は予燃焼室における火花放電時からの時間を表す。収束中心の最高圧力は、いずれの場合も初期圧力の約300倍から350倍の値が得られている。使用した混合気のCJ圧力は初期圧力の約20倍であるから、収束中心の最高圧力はこれよりも一桁大きい。しかしながら装置の都合上、すず膜によるデトネーション遷移の直接的な確認は困難であり、圧力波形だけでは収束中心でデトネーションなのか、それとも高速デフラグレーションであるのかは判断できない。

ところで図3では、いずれの場合もイオンプローブ1が反応してから約0.25 ms後にイオンプローブ2が反応しており、イオンプローブ間の平均火炎速度は約

Fig. 3 Pressure histories at the implosion center (upper) and output signal of ion probes fixed in the imploding chamber (lower). L denotes the distance between the implosion center and the position of the pressure sensor.

Fig. 4 Effects of initial pressure on the maximum pressure at the implosion center.

400 m/s となる。この速度は CJ 速度の 1958 m/s ($P_0 = 0.3$ MPa) ～1969 m/s ($P_0 = 0.5$ MPa) と比較すると一桁低い。本研究では示していないが、酸素富化空気中の酸素濃度が 26% と本実験条件よりも低い場合には、イオンプローブ 2 が反応する以前に収束中心圧力がいったん初期圧力の数倍に上昇し、その後急激に圧力上昇するという二段階の様相を呈した。これは火炎加速により生じた圧縮波群が先行衝撃波を形成し、イオンプローブ 2 の火炎検出より以前に先行衝撃波が収束中心に到達したためと考えられる。しかしながら、図 3 では上述したような二段階の圧力上昇は生じていない。すなわち先行衝撃波が収束中心に到達する以前に、より強力な波がこれを追いついたことを意味しており、収束中心での圧力上昇の様子からデトネーションが形成されていると判断できる。したがって、本研究ではデトネーション遷移の直接的な確認はできないものの、

少なくとも収束中心付近ではデトネーションが形成されていると考えられる。

図 4 に初期圧力を変化させた場合の収束中心での最大圧力を示す。 $L = 46.5$ mm の場合、最高圧力は初期圧力の約 300 倍以上に達しており、初期圧力の上昇とともに増大している。 $L = 82.9$ mm の場合には、最高圧力は $L = 46.5$ mm と比較すると減少しているものの、初期圧力とともに線形的に増大している。収束部付近ではデトネーション波は断面収縮の影響で強いオーバードリブン状態となっている。このデトネーション波が収束中心と圧力変換器受圧面までの一定断面部分を通過する際には、境界層による速度欠損以外にも、波面背後の膨張波により衝撃波が減衰する。そのため、図 4 に示されるように距離 L の増大とともに最高圧力の値は減少することとなる。

3・2 主燃焼室火炎速度 図 5 にノズルから噴出するフレームジェットの高速度画像を示す。画像はモノクロであるが、撮影にはカラー高速度カメラ (nac MEMRECAMfx K4) を用い、図 2 に示す可視化用窓より 20,000 fps で撮影を行った。フレームジェットの噴出方向は右から左であり、図中の第 1 コマ目の火花放電時からの撮影時刻は (a)～(c) で異なる。

図 6 に、複数回の高速度撮影から求めた観測窓 $\phi 50$ mm 内のフレームジェットの速度変化を示す。ノズル噴射孔径 $d = 2$ mm では、ばらつきはあるものの火炎速度は 220 m/s から 200 m/s 程度に緩やかに減少している。一方、 $d = 3$ mm, 4 mm では火炎速度は 200 m/s から 300 m/s まで増速している。単なるジェットであれ

Fig. 5 High-speed images of flame jet emanating in the main chamber. Flame jet travels from right to left. Frame rate: 20,000 fps. d denotes the nozzle orifice diameter.

Fig. 6 Velocity of flame jet obtained from the high-speed images.

ば噴射孔径によらず周囲気体との運動量交換によって減速するはずであるが、既燃ガスの膨張によりフレームジェット前方には未燃ガスの流れが生ずる。また、ジェット噴出当初は、既燃ガスと未燃ガスとの乱流混合により単位時間当たりの発熱量が時間とともに増大する。これらの効果が運動量交換によるジェットの減速を相殺し、ジェット噴出量の少ない $d=2$ mm ではフレームジェットは緩やかに減速し、 $d=3$ mm, 4 mm では逆に見かけ上加速していると考えられる。なお、 $d=3$ mm と 4 mm で速度履歴に大きな差異が見当たらないのは、後述するチョークのためと思われる。

3・3 主燃焼室内の燃焼時間 図7に主燃焼室内の代表的な圧力履歴を示す。本研究では、フレームジェットの点火・燃焼促進に与える影響を燃焼時間により評価した。本来であれば燃焼時間を計測する際の時間原点は点火時であり、これはフレームジェットの噴出時刻に相当するものの、この時刻は装置の構成上計測が困難である。図3に示すように、収束中心ではデトネーションより先に先行衝撃波が到達することはないので、デトネーション波面より前方には擾乱は存在しない。したがってノズル出口にデトネーション波面が到達する時刻をフレームジェット噴出時刻と見なし

Fig. 7 Pressure histories in the main combustion chamber.

Fig. 8 Effects of nozzle orifice diameter on the burning time in the main combustion chamber.

てよいと考えられる。しかしながら主燃焼室を用いた場合、装置の構造上からノズル出口におけるデトネーション到達を検出することは困難である。そこで本研究では、前々節で述べた収束中心圧力計測にて圧力値が最大となる時刻をフレームジェット噴出時刻とみなした。なお、前述した収束中心から圧力変換器受圧面までの距離 $L = 46.5$ mm の場合であるが、この距離は収束中心からノズル出口までの距離と等しくなるよう設計しており、フレームジェット噴出に至るまでの伝播距離は変わらず、よってフレームジェット噴出時刻の見積りにも影響しない。主燃焼室における燃焼時間は、このようにして得られたフレームジェット噴出時刻から主燃焼室での最高圧力到達時刻までの期間と定義した。なおこのとき主燃焼室にて取り付けた圧力変換器はひずみゲージ式であり、ストレインアンプの応答周波数は最大 2 kHz であるため、フレームジェット噴出時に生ずる衝撃波を捉えることはできなかった。

図 8 にノズル噴出孔径を変化させた場合の燃焼時間を示す。 $d = 3$ mm もしくは $d = 4$ mm の場合の燃焼時間は 2.5 ms 程度であり、 $d = 2$ mm よりも 1 ms 以上短く、図 6 の火炎速度の増減と対応している。また同一噴射孔径では、ばらついているものの初期圧力 0.4 MPa の場合に燃焼時間がわずかながら長くなっているが、この理由は現時点では不明である。

本研究における燃焼時間は 2.5 ms から 4.0 ms の範囲であり、とくに燃焼時間の短縮はノッキング回避に有効である。条件が異なるが、マイクロパイロット着火方式の実機⁽¹⁾の燃焼時間と比較してみると、噴射開始時期の上死点前 20 CA から最大圧力となる上死点後 10 CA を燃焼時間とみなし、定格回転数 1000 rpm とすると実時間で 5.0 ms となる。この機関のシリンダ系は 260 mm と本研究の 350 mm よりも一回り小さいこと、後述する混合気燃焼速度の差異も含めると、収束デトネ

Fig. 9 Effect of total sectional area of the nozzle on the burning time in the main combustion chamber.

ーション利用の点火システムはマイクロパイロット着火方式と比較して十分に高い点火・燃焼促進能力を有するといえる。

図 9 に燃焼時間を全噴射孔断面積で整理した結果を示す。図中の $d = 7$ mm とは、図 1 の収束中心からノズルまでの流路が直径 7 mm であり、これと同一直径の単孔ノズルの断面積を意味している。 $d = 3$ mm まではノズル噴出孔でチョークしているためにフレームジェットの流量はノズル噴出孔断面積で決定され、燃焼時間もノズル孔径とともに減少してゆくと考えられる。一方、 $d = 4$ mm の場合の全断面積は単孔の $d = 7$ mm よりも大きくなる。したがってこの場合の最小断面は、収束中心からノズルまでの流路であり、この部分でチョークをしていることとなる。 $d = 4$ mm の場合には $d = 3$ mm よりも若干燃焼時間が減少しているものの、噴射孔の断面積変化に比べてその差異が少ないことは、既に収束中心からの流路でチョークしていることで説明できる。

4. 考察

本研究では、圧縮行程中の温度上昇に伴う反応性向上を模擬するために酸素富化空気を用いているが、実機では空気の使用が望ましい。とくに天然ガスの主成分であるメタンと空気の混合気はデトネーションを起こしにくいことで知られている。したがって実機に適用した場合にデトネーションに移移するかどうかの疑問が生ずる。本章ではこの問題に関して燃焼速度およびデトネーション移移し易さの指標であるセルサイズの両面から検討を行う。

まず実際のガスエンジンの点火時期における予燃焼室の温度および圧力を算出する必要がある。本研究で用いた実験装置では、予燃焼室および収束室と主燃焼室の間には複数の絞りが存在するため、圧縮行程中で予燃焼室に充填される混合気の圧力、温度は主燃焼室とは一般に異なる。本研究ではデトネーションを確実に起こすために、主燃焼室に比べて予燃焼室、収束室が大きい構造となっている。しかしながら、これは逆にデトネーションへの移移時間増大による機関回転数の制限、熱損失の増加をもたらす。したがって予燃焼室、収束室の縮小化が必要となる。ここでは、簡単のため予燃焼室と収束室を一体として予燃焼室として取り扱い、これがノズルを通じて主燃焼室と接続しているものとした。

対象としたガスエンジンはボア 350 mm、ストローク 400 mm、圧縮比 12、コンロッド長とクランク半径の比が 4 と設定し、点火時期を上死点前 20 °CA⁽¹⁾ とした。ノズルは 4 孔として $d=2$ mm, 4 mm, 6 mm の 3 種類とし、ノズル効率を 1 とした。予燃焼室の体積に関しては、これが大きいと全体の圧縮比が低下し、機関としての熱効率を低減させる。さらに熱損失低減の

面からも、予燃焼室は可能な限り小さい方が望ましい。しかしながら、デフラグレーションからデトネーションへの移移にはある程度の距離を要するため、むやみに予燃焼室を小さくはできない。したがって最適化検討を鑑みて、主燃焼室に対する予燃焼室の体積比 V_{pre}/V_{main} を 0.01 から 0.1 の範囲で変化させた。過給を想定してシリンダ内が 0.15 MPa, 300 K の状態から圧縮を開始し、比熱比は 1.4 として、予燃焼室と主燃焼室の圧力比に応じてチョークの有無を確認しながらノズルを通過する質量流量を逐次求めた。

以上のようにして求めた圧縮上死点前 20 °CA における予燃焼室の圧力と温度を図 10 に示す。なお予燃焼室を取り付けない場合、このクランク角での主燃焼室圧力と温度はそれぞれ 3.0 MPa, 706 K となる。ノズル径の増大および V_{pre}/V_{main} の減少とともに、予燃焼室圧力および温度は上昇してゆく。条件によっては主燃焼室よりも予燃焼室の温度の方が高くなるが、これはノズルを通過した主燃焼室気体の膨張仕事のためである。

次に図 10 で得られた温度、圧力に対してメタン-空気混合気の燃焼速度およびセルサイズを推定した。まず燃焼速度に関しては、メタン-空気混合気について $0.05 \text{ MPa} < P < 3.0 \text{ MPa}$ ならびに $291 \text{ K} < T < 850 \text{ K}$ の範囲で圧力指数は -0.32, 温度依存性は累乗関数の指数が 2.33 という報告⁽¹¹⁾がある。これより 0.1 MPa, 300 K における燃焼速度 35 cm/s ⁽¹¹⁾基準として、高温・高圧下の燃焼速度を求めた。セルサイズに関しては、各種温度・圧力条件におけるメタン-空気混合気のデータは完備されていない。そこで反応誘導距離とセルサイズがほぼ比例するという関係⁽¹²⁾を利用した。反応誘導距離の計算には Shepherd が開発した 1 次元 ZND デトネーションの波面構造プログラム ZND^(13,14)を用い、反応

Fig. 10 Calculated pressure (a) and temperature (b) in the pre-combustion chamber at 20° CA before TDC. Bore: 350 mm; stroke 400 mm; compression ratio: 12; initial pressure: 0.15 MPa.

Fig. 11 Calculated burning velocity (a) and cell size (b) of a stoichiometric methane-air mixture in the pre-combustion chamber at 20° CA before TDC.

モデルには GRI-Mech 3.0⁽¹⁵⁾を利用した。反応誘導距離は衝撃波面から OH 濃度が最大となる地点までの距離⁽¹⁶⁾とし、0.1 MPa, 293 K のセルサイズ 300 mm⁽¹⁷⁾を基準とした。

このようにして求めたメタン-空気量論混合気の燃焼速度およびセルサイズを図 11 に示す。比較として、本研究で使用したメタンと O₂ 30% + N₂ 70% の酸素富化空気との混合気に対する燃焼速度を見積もると、室温・大気圧下での値 75 cm/s⁽¹⁸⁾と、上記の圧力指数 2.33 が適用可能として 0.5 MPa, 293 K で 45 cm/s となる。セルサイズについては、0.1 MPa, 293 K で 50 mm⁽¹⁹⁾と見積もられ、Bauer らのデータ⁽²⁰⁾から圧力指数を 1.1 とすると 0.5 MPa, 293 K で 8.5 mm となる。

図 11 より、燃焼速度に関しては $d = 2$ mm の場合は V_{pre}/V_{main} が 0.055 以下で、他のノズル径では全計算範囲で本実験時の値 45 cm/s を上回る。とくに V_{pre}/V_{main} が 0.01 の場合には、上述の温度依存指数の適用範囲を僅かに外れるものの $d = 4$ mm で 190 cm/s、本実験時の約 4 倍の値となる。一方セルサイズは本実験の値 8.5 mm を下回るのは $d = 6$ mm かつ V_{pre}/V_{main} が 0.02 以下の場合であり、 $d = 4$ mm で V_{pre}/V_{main} が 0.01 ではセルサイズ約 10 mm と僅かに上回る。

以上の結果から収束デトネーションのガスエンジン適用を検討した場合、4 孔タイプではノズル径 4 mm 以上は必須であり、より孔径が大きい方が望ましい。予燃焼室における燃焼速度の向上は容易に実現できるものの、セルサイズは温度よりも圧力に敏感なため、 V_{pre}/V_{main} も 0.01 以下が要求される。上述したように、本研究ではデトネーションを確実に起こすために、主燃焼室に比べて予燃焼室、収束室が大きい構造となっ

ており、このままでは実機適用には向かない。したがって点火システム最適化の検討が必要となるが、それには実機混合気を想定したデトネーション遷移の実験が必要となる。

5. 結 論

収束デトネーションにより生成されるフレイムジェットをディスク型燃焼室の点火に用いる装置を設計・製作し、その性能について調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 本実験装置によりデトネーション収束中心において初期圧力の約 300 から 350 倍の高圧状態を得ることができる。
- (2) 内径 350 mm の主燃焼室における燃焼時間は 2.5 ms から 4 ms であり、ノズル噴出孔でチョークする条件では噴出孔径が大きい方が燃焼時間が短い。
- (3) メタン-空気を使用した圧縮比 12 のガスエンジン点火時期の混合気条件では、本実験時と比較して予燃焼室におけるデトネーション遷移をより容易にするためには 4 孔タイプではノズル径 4 mm 以上は必須であり、主燃焼室に対する予燃焼室体積の比も 0.01 以下とする必要がある。

文 献

- (1) Goto, S., Nishi, H., Nakayama, S., Takahashi, S., Developing of High Density Gas Engine 22 AG, *Ishikawajima-Harima Engineering Review*, Vol. 43, No. 6, (2003), pp. 216-219.
- (2) Goto, S., Takahashi, N., Yamada, T., Yamada, T., Development of High Density Gas Engine 28AG,

- Ishikawajima-Harima Engineering Review*, Vol.46 No.1, (2006), pp. 1-5.
- (3) Fukatani, N., Tomita, E., Kawahara, N., Maruyama, K., Komoda, T., Combustion Characteristics and Performance of Supercharged Micro-pilot Natural Gas Engine, *Proceedings of FISITA 2006 World Automotive Congress*, Paper No. F2006P230, (2006), pp. 1-10.
 - (4) Kubota, M., Nakano, T., Ishii, K., Tsuboi, T., Suzuki, M., A Study on Ignition System of Natural Gas Engines Using Imploding Detonation, *Proceedings of Symposium on Shock Waves in Japan*, (2006), pp. 317-320.
 - (5) Hotta, K., Inoue, T., Moriue, O., Tatefuku, T., Suzuki, M., Murase, E., Combustion of Lean Mixtures Initiated by an Imploding Detonation Plug, *Proceedings of the 18th Internal Combustion Engine Symposium (International)*, (2005-12), Paper No. 41.
 - (6) Tsuboi, T., Nakamura, S., Ishii, K., Suzuki, M., Availability of the Imploding Techniques as an Igniter for Large-scale Natural-gas-engines, *Proceedings of the 26th International Symposium on Shock Waves*, (2007), Paper No. 1600.
 - (7) Oppenheim, A.K., Teichman, K., Hom, K., Stewart, H.E., Jet Ignition of an Ultra-lean Mixture, *SAE Transactions*, Vol.87, Section 3 (1978), pp.2416-2428.
 - (8) Oppenheim, A.K., Beltramo, J., Faris, D.W., Maxson, J.A., Hom, K., Stewart, H.E., Combustion by Pulse Jet Plumes -Key to Controlled Combustion Engines, *SAE Transactions*, Vol.98, *Journal of Engines* (1990), pp. 175-182.
 - (9) Murase, E., Ono, S., Hanada, K., Nakahara, S., Endo, H., Oppenheim, A.K., Combustion Enhancement of Lean Mixture by Plasma Jet Ignition and Pulsed Jet Ignition, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 58, No.546 (1992), pp.561-567.
 - (10) Ishii, K., Tsuboi, T., Takada, H., Torikai, Y., Nishizuka, S., Direct Pressure Measurement of Imploding Detonation Waves, *Review of High Pressure Science and Technology*, Vol.7, (1998), pp.903-905.
 - (11) Nishida, H., Ogawa, T., Wakisaka, E., Tachibana, T., Laminar Burning Velocities for Methane/Air under High Pressure and High Temperature Conditions, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 71, No. 704 (2005), pp. 1183-1189.
 - (12) Lee, J. H. S., Dynamic Parameter of Gaseous Detonations, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 16 (1984) pp. 311-336.
 - (13) Shepherd, J. E., Chemical Kinetics of Hydroge-Air-Dilunet Detonations, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 106 (1986) pp. 263-293.
 - (14) Browne, S., Shepherd J. E., California Institute of Technology, *GALCIT Report FM2006.007* (2005).
 - (15) GRI-Mech (<http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>)
 - (16) Austin, J. M., Shepherd, J. E., Detonations in Hydrocarbon Fuel Blends, *Combustion and Flame*, Vol. 132 (2003) pp. 73-90.
 - (17) Knystautas, R., Guirao, C., Lee, J. H., Sulmistras, A., Measurement of Cell Size in Hydrocarbon-air Mixtures and Predictions of Critical Tube Diameter, Critical Initiation Energy and Detonability Limits, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 94 (1984), pp. 23-37.
 - (18) Lewis, B., von Elbe, G., *Combustion Flames and Explosions of Gases*, Third Ed., Academic Press (1987), p. 401.
 - (19) Akbar, R., Kaneshige, M. J., Schultz, E., Shepherd, J. E., Detonations in $H_2-N_2O-CH_4-NH_3-O_2-N_2$ Mixtures, *Technical Report FM97-3*, Explosion Dynamics Laboratory, California Institute of Technology (1997).
 - (20) Bauer, P., Presles, H. N., Heuze, O., Brochet, C., Measurement of Cell Lengths in the Detonation Front of Hydrocarbon Oxygen and Nitrogen Mixtures at Elevated Initial Pressures, *Combustion and Flame*, Vol. 64 (1986), pp. 113-123.