

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「アンモニア直接燃焼」

研究題目「アンモニアレシプロエンジンの燃焼技術開発」

研究開発期間：平成 26 年 7 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日
研究担当者： 小池誠
所属研究機関： 株式会社豊田中央研究所

目次

1. 本研究の目的	4
2. 研究開発目標	4
3. 研究開発実施内容	5
3-1. 燃焼効率の算出について	5
3-2. アンモニアの基礎燃焼特性	6
3-2-1. 水素と既燃ガスの層流燃焼速度への影響	6
3-2-2. 高温・高圧場の層流燃焼速度	7
3-2-3. 壁面に接近する火炎の消炎距離	10
3-2-4. 基礎燃焼特性のまとめ	12
3-3. 各種燃焼系パラメータの燃焼効率への影響	13
3-3-1. エンジン試験装置	13
3-3-2. 気流強さの影響	13
3-3-3. エンジン燃焼状態の観察	17
3-3-4. クレビス容積の影響	20
3-3-5. 多点点火の影響	22
3-3-6. 筒内噴射による燃焼改善	25
3-3-7. 排気量の影響	26
3-3-8. 燃焼効率のまとめ	30
3-4. まとめ	31
3-5. 今後の展望	31
4. 外部発表実績	31
5. 特許出願実績	32
6. 参考文献	32

図表一覧

図 2-1	定容容器実験の概略	7
図 2-2	アンモニア火炎の例	7
図 2-3	S_{L0} に対する水素の影響	8
図 2-4	S_{L0} に対する既燃ガス希釈の影響	8
図 2-5	RCM 試験装置の概略	8
図 2-6	圧力履歴と点火時期	9
図 2-7	点火時期における圧力と温度	9
図 2-8	アンモニア火炎のシャドウグラフ像	9
図 2-9	圧縮時の燃焼速度	10
図 2-10	燃焼速度の圧力影響	10
図 2-11	消炎距離の測定装置	11
図 2-12	壁面近傍のアンモニア火炎	11
図 2-13	アンモニア燃焼の消炎距離	12
図 2-14	メタン燃焼の消炎距離	12
図 2-15	層流燃焼速度に対する消炎距離の比較	12
図 3-1	実験装置の概略	13
図 3-2	実験に使用したシュラウド弁	14
図 3-3	MBT における燃焼時期の比較	14
図 3-4	タンブル比による熱発生率の比較	15
図 3-5	タンブル比の未燃率に対する影響	16
図 3-6	アンモニアとメタンの燃焼タイミングの比較	16
図 3-7	アンモニアとメタンの未燃率の比較	16
図 3-8	エンジン筒内の可視化装置	17
図 3-9	エンジン筒内のアンモニア火炎	18
図 3-10	アンモニア火炎に対する筒内流動の影響	18
図 3-11	凹みガラスで撮影した筒内火炎	19
図 3-12	膨張行程後半におけるボア近傍からの発光	19
図 3-13	ピストン周辺部	20
図 3-14	未燃率に対するクレビス高さの影響	21
図 3-15	クレビス高さ低減(7.5→2.5mm)に対する未燃率の変化	21
図 3-16	点火プラグの位置	22
図 3-17	熱発生率に対する点火位置・数の影響	22
図 3-18	5 点点火による燃焼期間短縮効果	23
図 3-19	点火数・位置に対する未燃率の変化	24
図 3-20	筒内噴射用シリンダヘッドの概略	25
図 3-21	熱発生率に対する燃料供給方法の影響	26
図 3-22	筒内噴射の未燃率への影響	26
図 3-23	バルブ、点火プラグのレイアウト	27
図 3-24	熱発生率の比較	27
図 3-25	未燃率の比較	28
図 3-26	多点点火の熱発生率への影響	29

図 3-27 多点点火の未燃率への影響 29
図 3-28 燃焼効率に関する試験結果 30

1. 本研究の目的

本研究の対象は「アンモニア直接燃焼技術」における各種燃焼器のなかのレシプロエンジンであり、さらに具体的には火花点火式エンジンとした。本研究の目的はアンモニアを燃料とした熱機関を成立させるために、熱サイクルの中で燃焼が果たすべき基本要件である燃焼速度と燃焼効率に対する各燃焼系パラメータの効果を明らかにして、炭化水素燃料と同等レベルの燃焼性能を実証することである。

2. 研究開発目標

上記のことから、本研究では燃焼強化技術に関して下記の目標を設定した。

本課題ではレシプロエンジンに特徴的な間欠燃焼における燃焼効率（研究開始時点におけるアンモニア燃焼効率 90-95%）の向上を図り、実用的な燃焼機関としての性能を確保するための燃焼強化技術の研究開発を行う。具体的には、アンモニア分解によって得られる水素を補助燃料としたときに、水素の発熱量割合を 10%以下にして、燃焼変動率*3%以下、燃焼効率 98%以上を達成する燃焼技術を開発する。（*；燃焼変動率は図示平均有効圧力 (IMEP)の標準偏差をサイクル平均の IMEP で除した値を百分率で表した値とする）

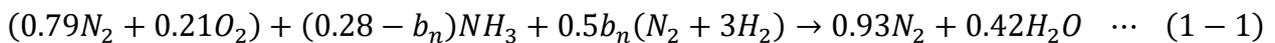
燃焼効率の目標値とした 98%は、一般的なガソリンエンジンの未燃 HC 排出量を参考に定めた値である。量論混合比のガソリン燃焼の燃焼効率は不完全燃焼成分の CO も加えると多くは 98%以下であり、目標値とした 98%はガソリン燃焼を上回る値とも言える。また、補助燃料の水素割合 10%は、将来のアンモニア専焼に向けたチャレンジ目標として加えた。

3. 研究開発実施内容

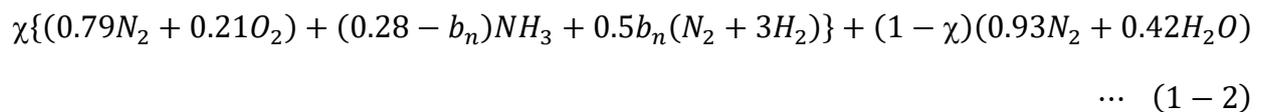
3-1. 燃焼効率の算出について

はじめに、本研究における実験条件と燃焼効率について述べる。現在、レシプロエンジンの排気浄化について最も優れている方式は、燃料-空気の量論比制御と酸化還元触媒を組み合わせた方式であり、不完全燃焼分と窒素酸化物を同時に浄化できる点が特に優れている。この考え方はアンモニア燃焼に対しても有効であると考えられるので、本研究は量論混合気の燃焼特性を中心に調べている。

本研究には水素との混焼条件が多く含まれるが、この水素は最終的にはアンモニアを分解して得ることを想定し、モル比で水素 3 に対して窒素 1 を加えている。これによって、水素とアンモニアの比率を変えても混合気中の水素、窒素、酸素の原子比率は変化しないことになり、完全燃焼時の総括反応式は式(1-1)で表すことができる。



ここで、 b_n は水素生成に割り振ったアンモニアのモル数を示し、式(1-1)では $0 \leq b_n \leq 0.28$ の範囲である。左辺の混合気の一部、割合 χ が燃え残ったとすると、排気ガス中のガス成分は式(1-2)のように表され、反応後のモル数は式(1-3)で表すことができる。



$$(\text{モル数}) = 1.35 + (b_n - 0.07)\chi \quad \dots (1-3)$$

排気分析計で測定されるアンモニア濃度はウェットベースであるから、排気濃度 $[NH_3]_{ex}$ は式(1-4)となり、最終的に未燃率 χ は式(1-5)で計算できる。

$$[NH_3]_{ex} = (0.28 - b_n)\chi / 1.35 + (b_n - 0.07)\chi \quad \dots (1-4)$$
$$\chi = 1.35[NH_3]_{ex} / (0.28 - b_n - (b_n - 0.07)[NH_3]_{ex}) \quad \dots (1-5)$$

式(1-5)で求める未燃率 χ は、アンモニアを混合気の代表濃度として扱っており、水素とアンモニアの未燃率は同じと仮定していることになる。そのため、混合気中のアンモニア比率が変わること自体は未燃率算出に影響しない。

炭化水素燃焼の場合は、排気中の HC と CO 濃度から求めた低位発熱量の総和を、燃料の低位発熱量で除した値、すなわち不完全燃焼分を未燃率とした。また、HC の割合は酸化の影響を受けていない未燃 HC 率として別途計算した。

3-2. アンモニアの基礎燃焼特性

燃焼強化技術に関わる基礎燃焼特性として、静止場における火炎伝播と消炎、乱流場における点火と火炎伝播について調べた。静止場における燃焼速度計測については、エンジン燃焼の観点から、混合気に含まれる水素および既燃ガスの影響と圧力・温度の影響を調べ、それぞれの条件における層流燃焼速度を算出した。試験は定容容器のほか、高温・高圧場の計測に急速圧縮装置（以下 RCM ; Rapid Compression Machine）を用いた。消炎は壁面近傍に着目し、定容容器を用いて火炎が壁面に近づくときの消炎距離を測定した。火炎情報は可視化によって取得した。以下にそれぞれの試験について具体的に示す。

3-2-1. 水素と既燃ガスの層流燃焼速度への影響

図 2-1 に定容容器試験装置の概略を示す。試験に用いたガスは、 $\text{NH}_3/\text{N}_2/\text{H}_2/\text{Air}/\text{H}_2\text{O}$ である。 NH_3 と N_2 、 H_2 はガスボンベを、Air は圧縮空気を用いた。水素を含む場合はアンモニア分解を想定して水素 3 モルに対して 1 モルの窒素を加えた。水は別室で水蒸気を生成し、燃焼室に供給した。各成分の混合比は分圧法により調整した。水分を含む試験の場合は、凝縮を避けるため、燃焼室壁温を 100°C 、配管系および予混合気タンクをそれぞれ 120°C 、 140°C に制御した。点火電極間距離は 2.2mm であり、コイルへの通電時間は 5ms とした。このときの放電エネルギーは約 60mJ であった。撮影した画像の一例を図 2-2 に示す。火炎速度の計測範囲は点火位置から壁面までの距離を勘案し $r < 15\text{mm}$ としたため、容器内圧力の変化はほとんどなく、定圧条件の試験と考えてよい。また、火炎は完全な円形にはならなかったが、同一面積となる等価半径を火炎半径として求めた。球状火炎については式(1)~(3)の関係式が成り立つと仮定し、各時刻における κ と S_L の関係を線形近似した後、その外挿値から火炎が伸長を受けていない時の速度を求め、層流燃焼速度 S_{L0} とした。

$$\kappa = \frac{2}{r} \cdot \frac{dr}{dt} \quad \dots (1) \qquad S_L = \frac{\rho_b}{\rho_{ub}} \cdot \frac{dr}{dt} \quad \dots (2) \qquad S_L = S_{L0} - L_b \cdot \kappa \quad \dots (3)$$

κ : 火炎伸長率、 r : 火炎半径、 t : 時刻、 S_L : 各時刻の燃焼速度、 ρ_b : 既燃ガス密度、 ρ_{ub} : 未燃ガス密度、 S_{L0} : 層流燃焼速度、 L_b : Markstein 長さ

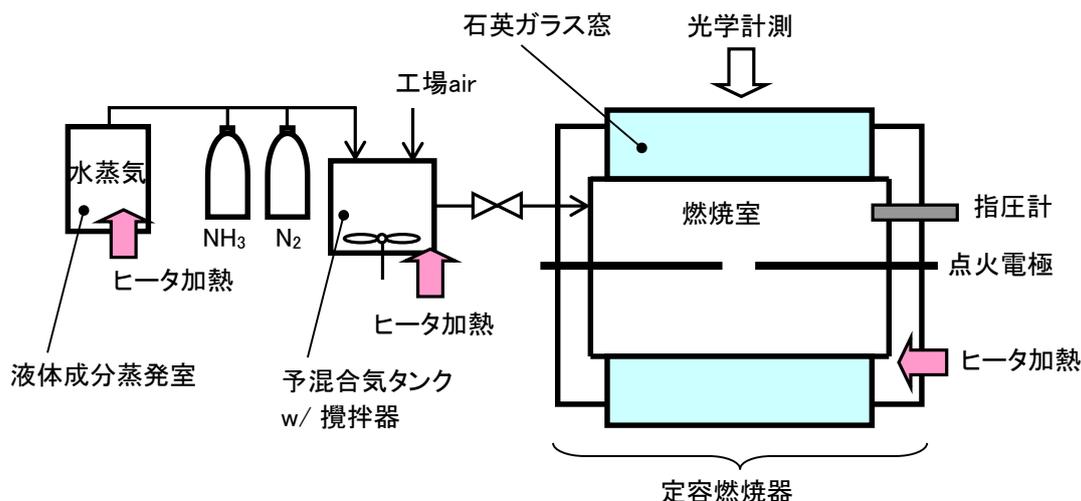


図 2-1 定容容器実験の概略

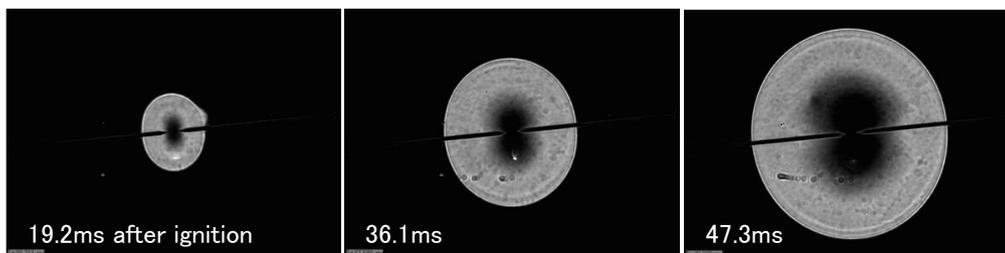


図 2-2 アンモニア火炎の例（初期圧力：0.25MPa_abs、初期温度：25℃）

以下に、水素混合の影響と既燃ガスの影響を示す。

(1) 水素混合の影響

図 2-3 は各圧力におけるアンモニア-水素混合気の層流燃焼速度 S_{L0} を示す。水素割合は総低位発熱量に対する水素の発熱量割合 (LHV%) を表している。この図より、水素割合に対しては概略、線形的に S_{L0} が増加していることがわかる。大気圧(0.1MPa)の場合は水素割合 0%と 10%で S_{L0} の違いが大きい、大気圧で水素 0%の場合にはアンモニア点火が困難であり、点火できないケースも多数あったため、この条件の結果は参考値としたい。圧力については負の依存性があり、圧力指数を計算すると-0.6~-0.5 となった。メタンなどの炭化水素で言われている-0.4~-0.3[1]と比べて圧力影響が大きい結果となった。また、同じ試験装置を用いて求めた量論比メタン混合気の S_{L0} (大気圧、25℃) は水素割合を 40%としたときの S_{L0} とほぼ一致することがわかった。

(2) 既燃ガスの影響

既燃ガスは N_2 と H_2O で模擬し、 NH_3 の完全燃焼を仮定して $N_2 : H_2O$ のモル比を 1 : 3 とした。図 2-4 は既燃ガスによって混合気を希釈した時の層流燃焼速度を示す。図中 5.7、11.4、17.0%は (既燃ガス) / (既燃ガス+空気-アンモニア混合気) を希釈率としたときの値である。これより、希釈率を高めていくと何れの圧力においても S_{L0} が大きく低下することがわかる。希釈率 17%では S_{L0} は約 1/2 まで低下する。これより、アンモニア燃焼は EGR の影響を受けやすいと考えられる。

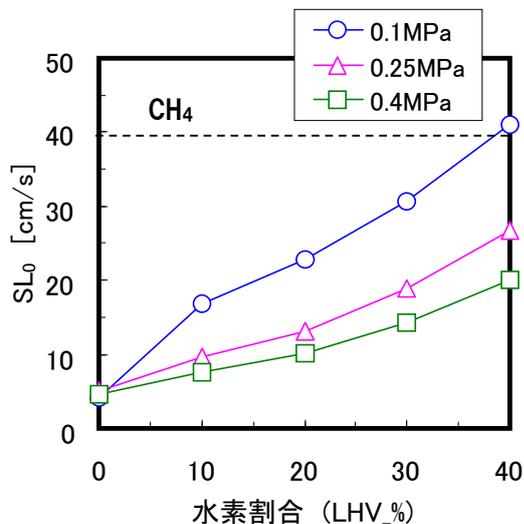


図 2-3 S_{L0} に対する水素の影響

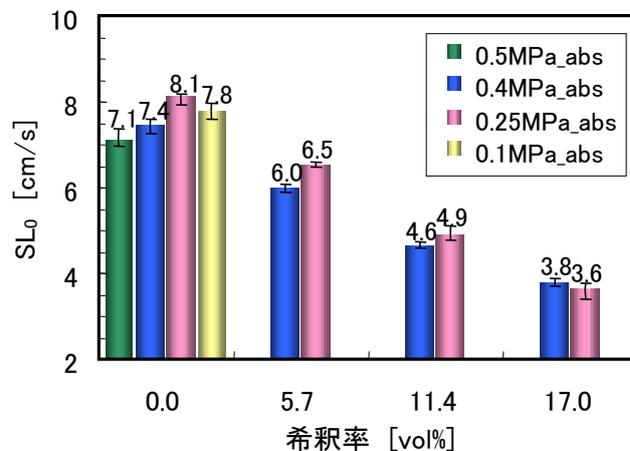


図 2-4 S_{L0} に対する既燃ガス希釈の影響

3-2-2. 高温・高圧場の層流燃焼速度

試験に用いた RCM 試験装置の概要を図 2-5 に示す。シリンダーボア径は 85mm、最大ストロークは 93mm であり、油圧によってピストン速度と位置が制御できるようになっている。本実験ではピストンストロークを 93mm、88mm、82mm の 3 段階設定した。圧縮比に換算するとそれぞれ 4.6, 6.3, 9.1 に相当する。圧縮開始時のガス温度は 300K で一定であるが、圧力は 0.05、0.1、0.15MPa の 3 条件を設定した。ピストンの移動時間を 50ms とし、ガス流動の影響を小さくするためにピストン停止から 100ms 後に点火した。このときの圧力履歴を図 2-6 に、圧力と状態方程式から算出した点火開始時刻における圧力とガス温度を図 2-7 に示す。

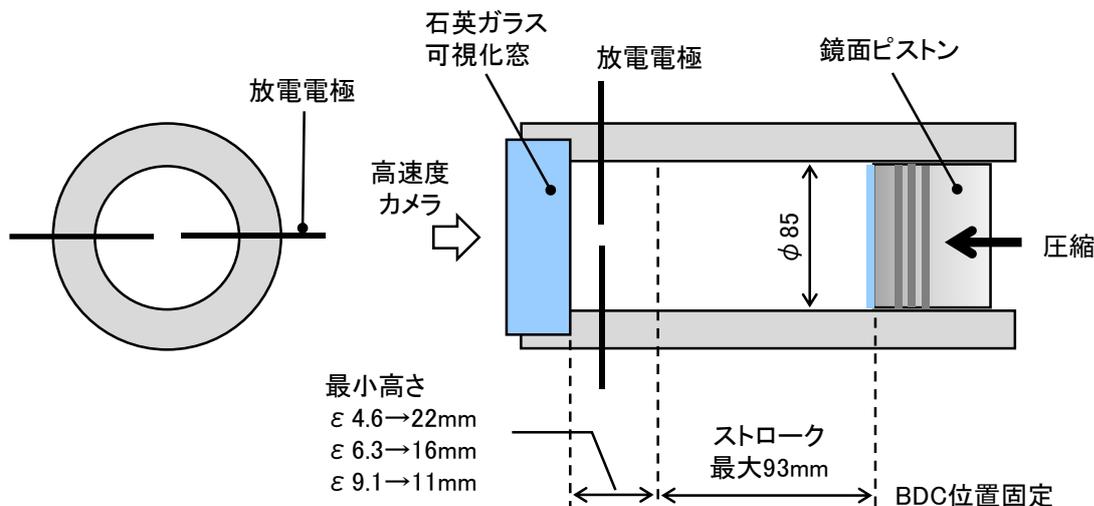


図 2-5 RCM 試験装置の概略

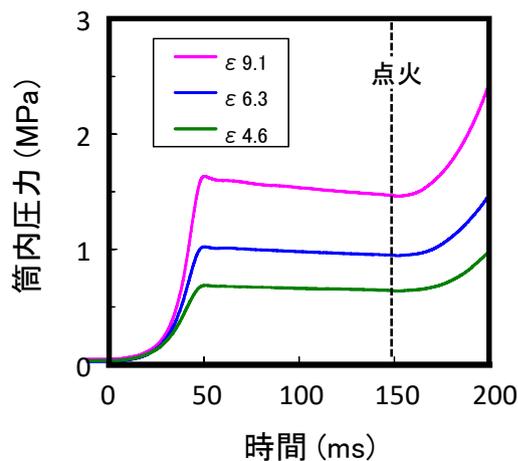


図 2-6 圧力履歴と点火時期

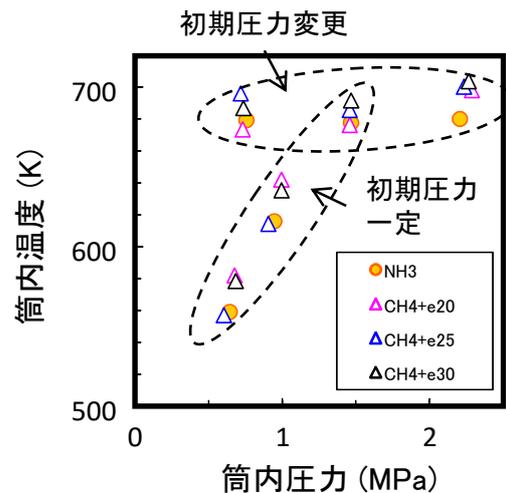


図 2-7 点火時期における圧力と温度

図 2-8 に撮影した火炎の一例を示す。皺の少ない火炎が計測されているが、ピストン-可視化窓間の距離が短く、途中から火炎の一部が壁面に接触している。右端の写真に黒い影が見られるのはその影響である。前述した手法と同じ処理によって燃焼速度を算出しているが、前述の結果と区別し、ここでは、単に燃焼速度として表記することにする。また、相対比較ができるようにメタン混合気についても実験を行った。このとき、EGR を模擬した $N_2: 88.3\text{vol}\% + CO_2: 11.7\text{vol}\%$ からなる混合ガスで希釈した (希釈率 20、25、30wt%)。

図 2-9 は各圧縮比に対する燃焼速度、図 2-10 は圧力影響を示す。図 2-9 には点火時期のガス温度と圧力を副尺として付記している。以上の結果を見ると、アンモニアの燃焼速度は希釈率 25% のメタン混合気の燃焼速度と概ね一致する。前述の定容容器を用いて測定した希釈率 25% におけるメタン燃焼の SL_0 (室温、圧力 0.4MPa) は約 5cm/s であり、図 2-3 に示したアンモニア燃焼の SL_0 とほぼ一致したため、温度、圧力によらず、アンモニア燃焼の燃焼速度は希釈率 25% のメタン燃焼とほぼ等価と考える良いと思われる。ただし、前述した定容容器試験では、圧力に対する影響はメタンよりアンモニアの方が大きく、図 2-10 の傾向とやや異なっている。温度場が異なることも要因の一つに挙げられるが、火炎が球形でないことによる誤差も含まれると考えられる。

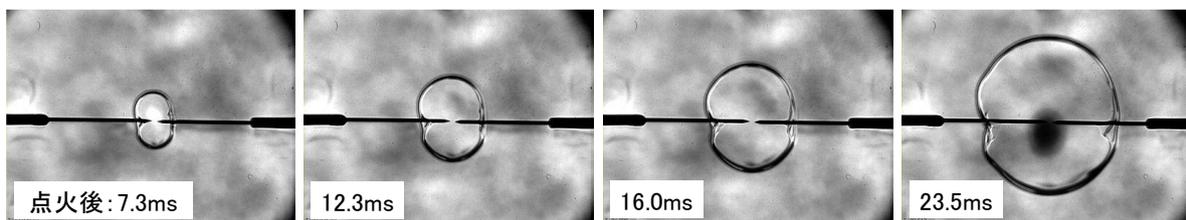


図 2-8 アンモニア火炎のシャドウグラフ像 (圧縮比 : 6.3)

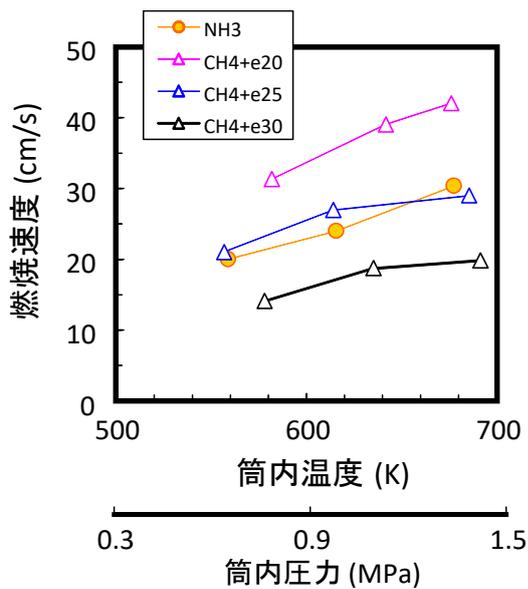


図 2-9 圧縮時の燃焼速度

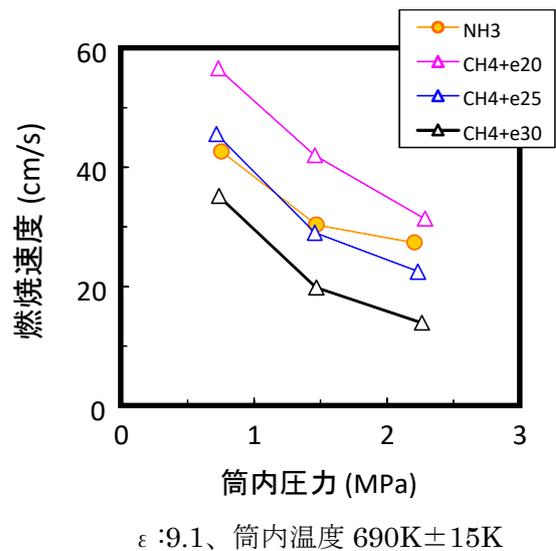


図 2-10 燃焼速度の圧力影響
ε:9.1、筒内温度 690K±15K

3-2-3. 壁面に接近する火炎の消炎距離

図 2-1 の定容容器内にブロックを取り付けて壁面近傍の消炎観察を試みた。図 2-11 にその概要を示す。ブロックは幅:8mm、高さ:30mm の直方体であり、放電電極と直交する方向に距離 10mm 離して配置した。ブロック端面には撮影画像のスケールとして用いるため、直径 0.5mm の金属棒を取り付けた。実験は点火後にブロックに接近する火炎を測定し、最も近づいた時の火炎位置とブロックの距離を消炎距離として測定した。消炎には、壁面に垂直方向から近づく火炎の消炎 (Head-on Quenching) と壁面に沿って移動する火炎の消炎 (Side-wall Quenching) があり [2]、本装置では点火ギャップに対向する面で Head-on Quenching を、側面で Side-wall Quenching を測定した。火炎面の位置は火炎の自発光をイメージインテンシファイア (浜松ホトニクス、C6653) によって増感し、高速カメラ (nac、MEMRECAM HX-3) で撮影した画像から判定した。画像の分解能は 11 μ m である。なお、消炎距離は火炎に歪みが出るブロックの角部を除外して測定した。図 2-12 はアンモニア火炎の撮影像を示しており、暗い消炎領域が認識できる。消炎距離の計測は輝度の高い火炎面が最も壁面に近づくタイミングとした。この例では(d)の画像から Head-on Quench 長さを、(e)の画像から Side-wall Quench 長さを求めている。

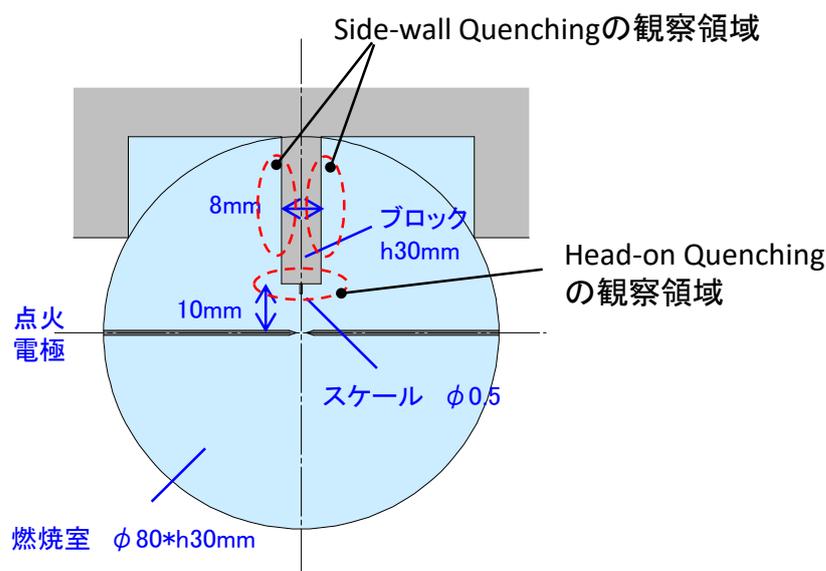


図 2-11 消炎距離の測定装置

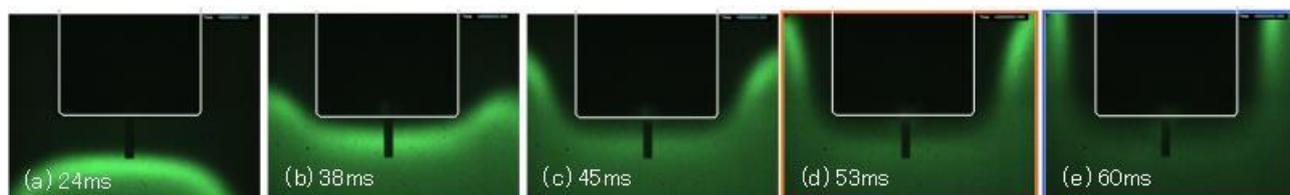


図 2-12 壁面近傍のアンモニア火炎（時間は点火後の経過時間）

図 2-13 はアンモニア-水素混合気、図 2-14 はメタン-混合気の消炎距離を示す。メタン混合気は RCM のメタン燃焼試験と同様に EGR を模擬した $N_2:88.3\text{vol}\% + CO_2:11.7\text{vol}\%$ による希釈をパラメータとしている。アンモニア-水素混合気の場合は水素割合が小さいほど、メタン燃焼の場合は希釈率が大きいほど、消炎距離が長くなることがわかる。メタン混合気の場合は希釈率が下がると、コントラストが下がり Head-on Quench 長さを判別するのが難しくなったが、アンモニア-水素混合気の場合は Side-wall Quench 長さの方がやや大きくなる特徴が見られた。メタン燃焼の場合も同様の結果が報告されている[3]ため、これ自体はアンモニア燃焼に固有のことでは無いと考えられる。

次にこれら消炎距離を層流燃焼速度で整理して比較した結果について示す。消炎は火炎の熱発生と壁への熱損失のバランスで決まると考えられ、この比を表す Peclet 数は消炎距離と火炎帯厚さの比で近似できることが知られている[3]。火炎帯厚さと層流燃焼速度との相関は強いことから、層流燃焼速度で比較するのは妥当であると考えられる。メタン燃焼は Head-on Quench 長さが測定できていないが、レシプロエンジンの消炎は Side-wall Quench に近い状況が多いと考えられるので、Side-wall Quench 長さの比較は有用である。図 2-15 は層流燃焼速度に対する消炎距離を示す。両者の消炎距離はほぼ一致し、アンモニア燃焼の消炎はメタン希釈燃焼の場合と同等と考えられることがわかった。

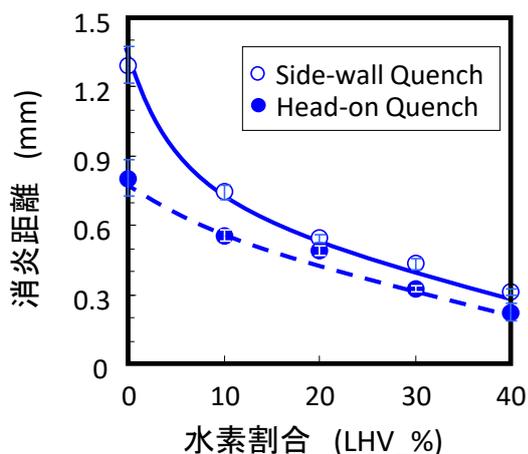


図 2-13 アンモニア燃焼の消炎距離

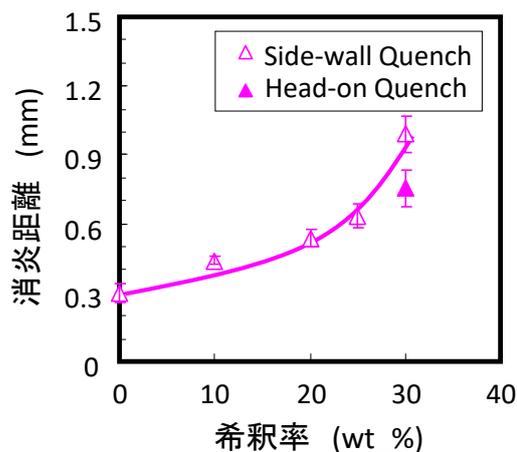


図 2-14 メタン燃焼の消炎距離

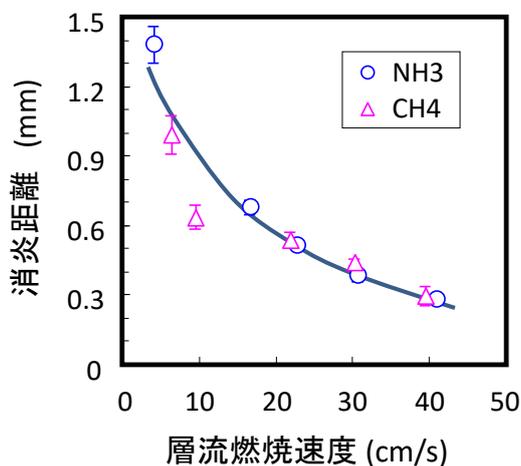


図 2-15 層流燃焼速度に対する消炎距離の比較

3-2-5. 基礎燃焼特性のまとめ

アンモニア燃焼の層流燃焼速度は窒素+二酸化炭素混合気 30%で希釈したメタン燃焼の場合とほぼ等しく、水素割合 40%（発熱量割合）のアンモニア-水素混焼の層流燃焼速度は希釈しないメタン燃焼とほぼ等しい関係にある。一方、高温高圧場の燃焼速度は希釈率 25%のメタン燃焼に近い。

常温常圧場で固体壁に接近する火炎の消炎距離は水素割合を減らしてアンモニア専焼に近づけるほど大きくなり、Head-on-quench 距離の方が Side-wall-quench より短い。層流燃焼速度で整理した時の消炎距離はメタン燃焼とほぼ同じである。

3-3. 各種燃焼系パラメータの燃焼効率への影響

3-3-1. エンジン試験装置

エンジン試験の概略を図 3-1 に示す。実験に用いたエンジンはボア径 86mm、ストローク 86mm、排気量 500cc の試験用単気筒エンジンであり、実験の目的に応じてシリンダヘッドまたはシリンダヘッドの構成部品である吸気バルブ、点火プラグを取り換えて試験を行った。空気を含むガスの流量はマスフローコントローラで調量した。アンモニア燃焼の場合は $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ を、メタン燃焼の場合は $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{N}_2$ を空気と混合した。 CO_2/N_2 は EGR の模擬ガスであり、基礎燃焼試験で用いた CO_2 -11.7%、 N_2 -88.3% を既燃ガス成分とした。また、ガソリンを用いる場合は噴射弁の噴射期間で調量した。混合比は排気管に取り付けた空燃比センサの出力をもとに調整した。

エンジン燃焼状態は筒内圧力、排気温度、排気ガス成分濃度により計測・解析した。データ収録装置に取り込んだクランク角毎のデータから各サイクルの図示平均有効圧力 (IMEP、Indicated Mean Effective Pressure) を計算するとともに、熱発生率を計算した。アンモニア燃焼の排気ガス濃度は FTIR (岩田電業製、FAST2000) により、メタンおよびガソリン燃焼の排気ガス濃度 (堀場製作所製、MEXA7100D) により計測した。

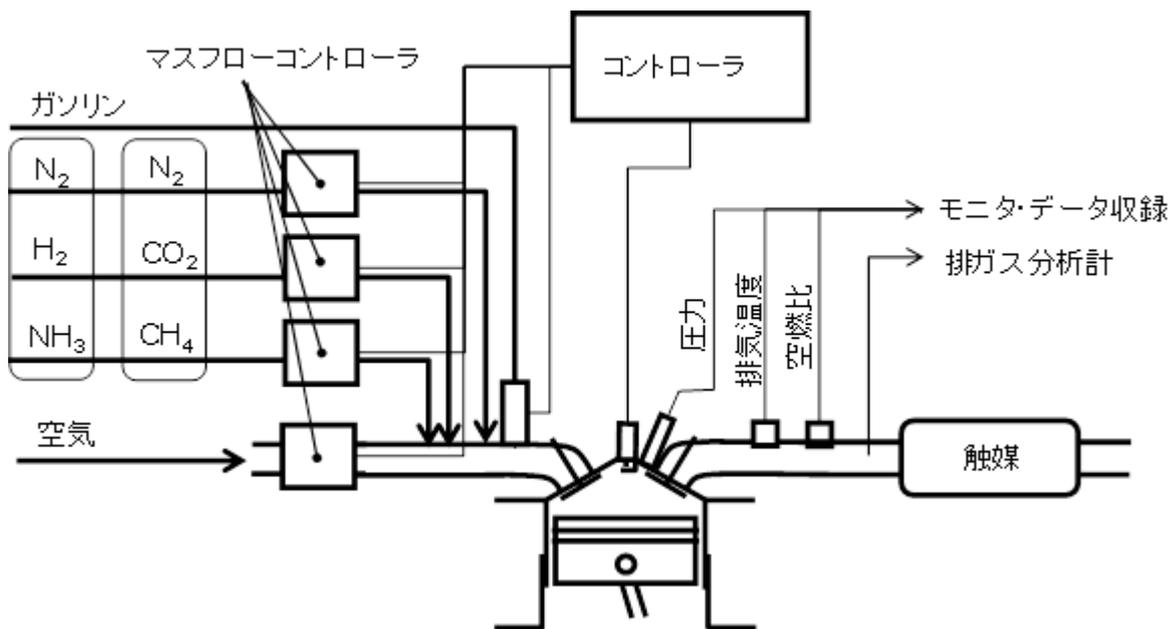


図 3-1 実験装置の概略

3-3-2. 気流強さの影響

図 3-2 に示す 3 種類のシュラウド弁を吸気に取り付けることにより、筒内に形成されるタンブル強さを変えて燃焼期間と燃焼効率に与える影響を調べた。負荷影響を調べるために、それぞれのタンブル比に対して 1 サイクル当たりの供給熱量を 3 条件設定し、370J/st、740J/st、1110J/st とした。供給熱量一定のため、IMEP はタンブル比 (T.R.) や水素割合によって異なるが、それぞれ概ね 200kPa、550kPa、850kPa であり、自然吸気式エンジン

では低・中・高負荷条件に相当する。図 3-3 は燃焼時期に関して各供給熱量におけるタンブル比の影響をまとめたもので、点火時期(MBT、Minimum Spark Advance for Best Torque)と熱発生率から求めた 10%と 90%発熱時期を示す。なお、図中右端の塗潰しプロットはメタン燃焼の燃焼時期を示している。

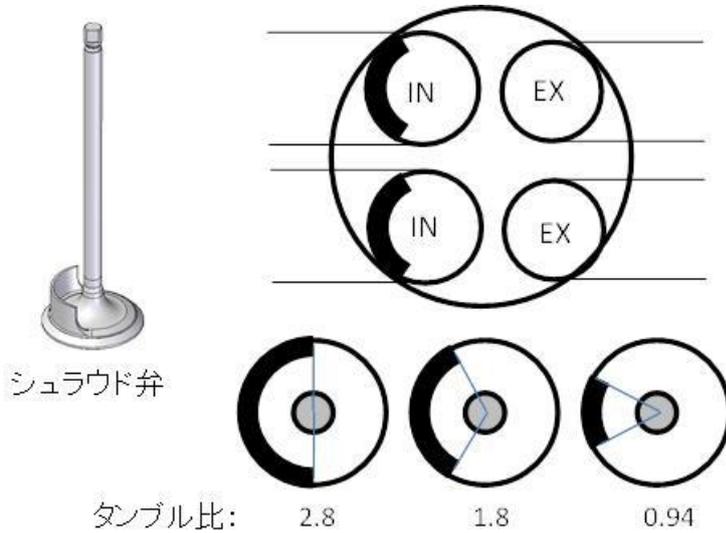
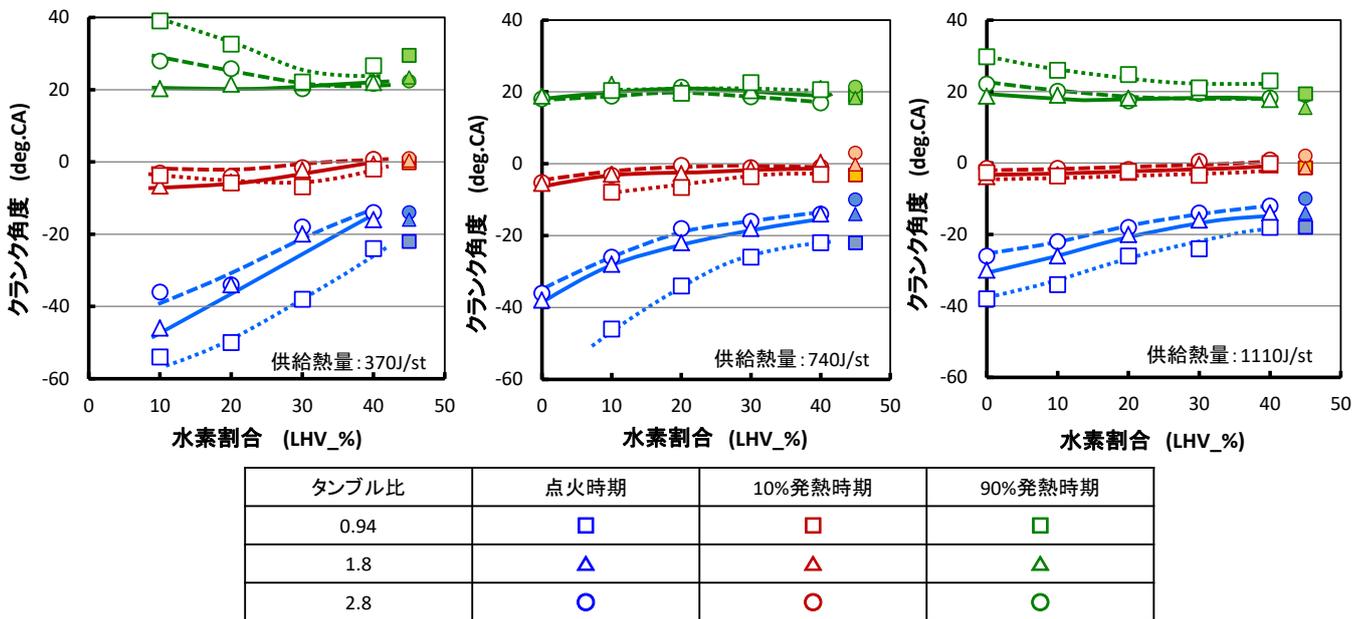


図 3-2 実験に使用したシュラウド弁



エンジン回転数：1200rpm

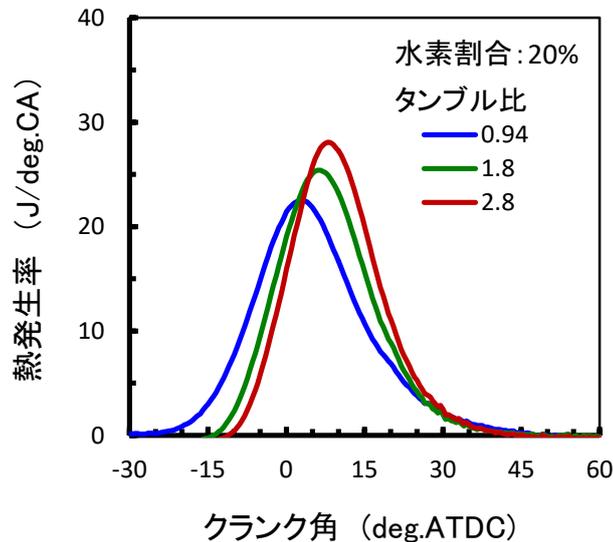
図 3-3 MBT における燃焼時期の比較

まず、メタン燃焼と比較すると、何れの条件においても、水素割合を 40%にすると点火時期および 10%、90%発熱時期がほぼ一致することがわかる。この水素割合 40%は前節で示したように、層流燃焼速度がメタン燃焼と一致する条件であり、動力性能に関わるマクロな燃焼形態は層流燃焼速度を合わせることにより、炭化水素燃料と同様の動作が可能と考

えられる。水素割合が小さくなった時には、点火時期が最もその影響を強く受け、MBTが進角側に移動する。進角量はタンブル比が小さいほど大きい。これは、点火から火炎が発達する初期段階では乱れの影響が少なく、水素減少による層流燃焼速度低下の影響を受けやすいためと考えられる。これに比べると10%燃焼時期と90%燃焼時期は一部を除いて水素割合の影響を強く受けていない。これは、熱発生の主要部分が乱流燃焼で進行しているためと考えられる。層流燃焼速度が低いとはいえ、式(3-1)に示す S_T が乱れ強度 u' に依存するとする一般的な乱流燃焼の考え方がアンモニア燃焼にも適用できる。

$$S_T = S_{L0} + u' \quad (S_T: \text{乱流燃焼速度}, u': \text{乱れ強度}, u' > S_{L0}) \quad (3-1)$$

タンブル比を高めると点火時期が遅角側に移動し、点火から燃焼終了までの期間が短くなるが、10%から90%発熱までの期間の変化は小さい。データ毎に熱発生率を比較すると、実際には図3-4に示すようにタンブル比による違いが見られるが、10%と90%の発熱時期は図3-3の通りであり、点火時期に比べるとタンブル比の影響は大きくないと言える。



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：740J/st

図 3-4 タンブル比による熱発生率の比較

図 3-5 は図 3-3 の条件における未燃率を示す。未燃率は水素割合が小さいほど大きく、タンブル比の影響はあまり見られない。どちらかと言えばタンブル比の小さい未燃率の方が小さくなる傾向がある。すなわち、気流によって層流燃焼速度の低いアンモニア混合気の燃焼期間は短縮できるが、未燃率の低減に対する効果は得られなかった。

本試験では、同じ構成でメタン燃焼についても調べた。このとき、 $N_2 : 88.3\text{vol}\% + CO_2 : 11.7\text{vol}\%$ からなる混合ガスで希釈し、層流燃焼速度 S_{L0} を変えて試験した。希釈率に対する層流燃焼速度は図 2-1 に示した定容容器で測定した。MBT における点火時期と 10%発熱時期、90%発熱時期を層流燃焼速度に対して整理し、アンモニア燃焼と比較した結果を図 3-6 に示す。アンモニア燃焼とメタン燃焼は同じ層流燃焼速度であれば、ほぼ同じ点火時期、発熱時期になることがわかる。一方、本研究で着目する未燃率を比較すると、図 3-7 に示すように、燃料流量、すなわち負荷が高くなるほど小さくなる傾向は同じであるが、

層流燃焼速度に対する感度は大きく異なり、層流燃焼速度が低下した時の未燃率増加はアンモニア燃焼の方が大きくなった。

前節の結果から、層流燃焼速度を合せるとメタン燃焼とアンモニア燃焼の消炎距離の違いは小さく、図 2-15 に示したように、層流燃焼速度が 40cm/s から 10m/s まで低下すると消炎距離は約 2 倍以上に増加する結果が得られている。圧力・温度が異なる点には留意が必要であるが、これから類推すると、層流燃焼速度低下に伴うアンモニア燃焼の未燃率増加は消炎距離の増加と相関がある。メタン燃焼の未燃率増加が少ないのは、火炎伝播終了後に未燃ガスが既燃ガスと混合して酸化されるためと考えられ、アンモニアとメタンの未燃率が違う要因の一つと推測される。

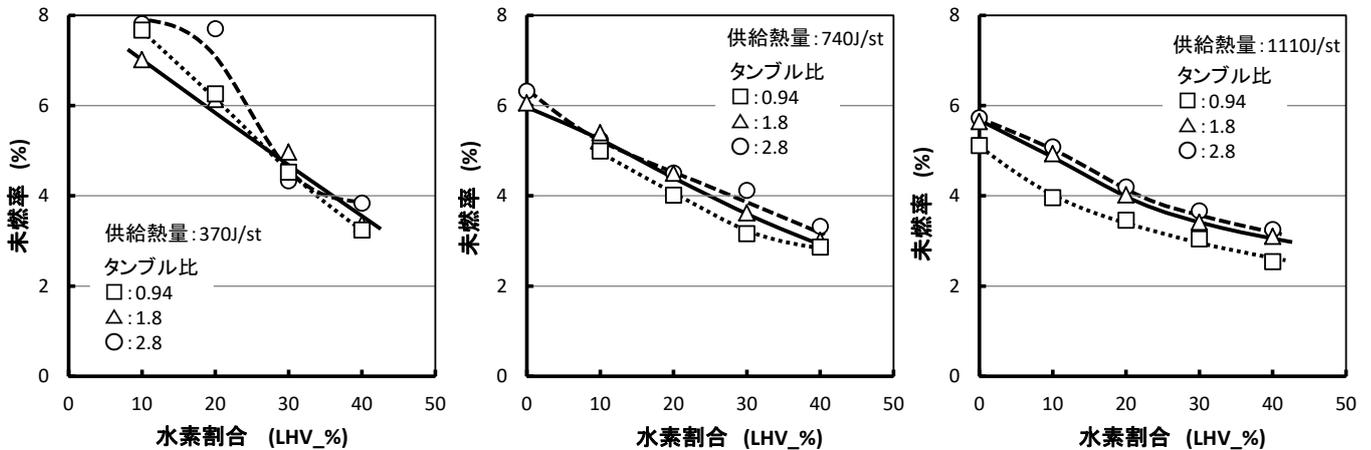
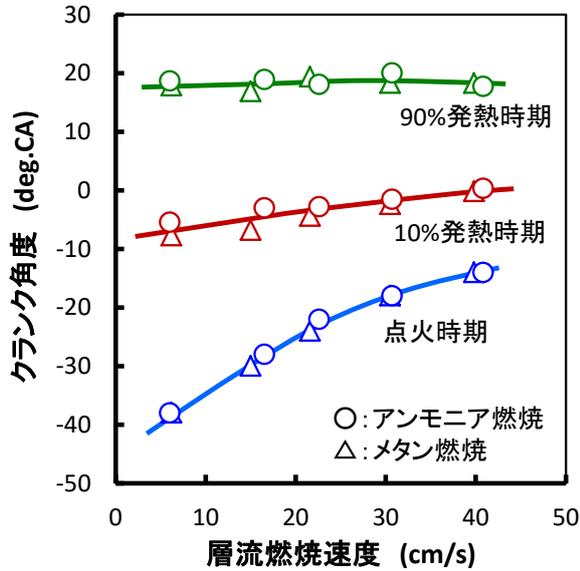
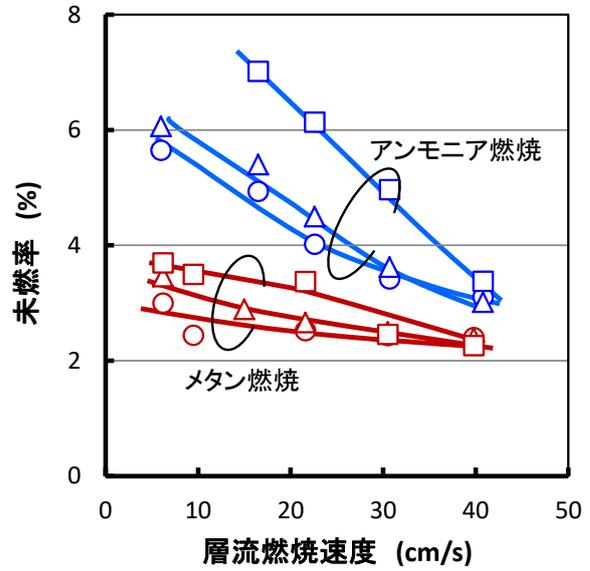


図 3-5 タンブル比の未燃率に対する影響



タンブル比: 1.8, 供給熱量: 740J/st

図 3-6 アンモニアとメタンの燃焼タイミングの比較



タンブル比: 1.8

図 3-7 アンモニアとメタンの未燃率の比較

3-3-3. エンジン燃焼状態の観察

図 3-8 は可視化エンジンの概略を示す。可視化方式はボトムビュー方式であり、延長したピストンの頂面にガラスを嵌め込んでピストン裏面側から観察した。ガラスは 2 種類製作した。一つは厚みを一定、上下面をフラットにしたガラスで、可視化範囲はシリンダ軸を中心に直径 60mm 内と制限されるが (ボア径 86mm)、歪みのない画像が得られる。もう一つは裏面に球状の凹みを形成し、レンズ効果により視野を拡大できるようにしたガラスである。光学窓の大きさは同じ直径 60mm であるが、火炎伝播の終了ほぼ完了するクランク角 40deg.ATDC を過ぎるとシリンダ壁面まで観察できるように設計した。

可視化エンジンは試験単筒エンジンと同じボア、ストロークであり、同じシリンダヘッドが使用できる。圧縮比はガラス取り付けに関する無駄容積を極力小さくすることにより、12.8 まで高めることができた。撮影に使用したカメラはナック製 MEMRECAM HX-3(64GB)である。時間分解能はクランク角 1deg.程度になるように 8000fps とし、露光時間は 1/10000sec とした。

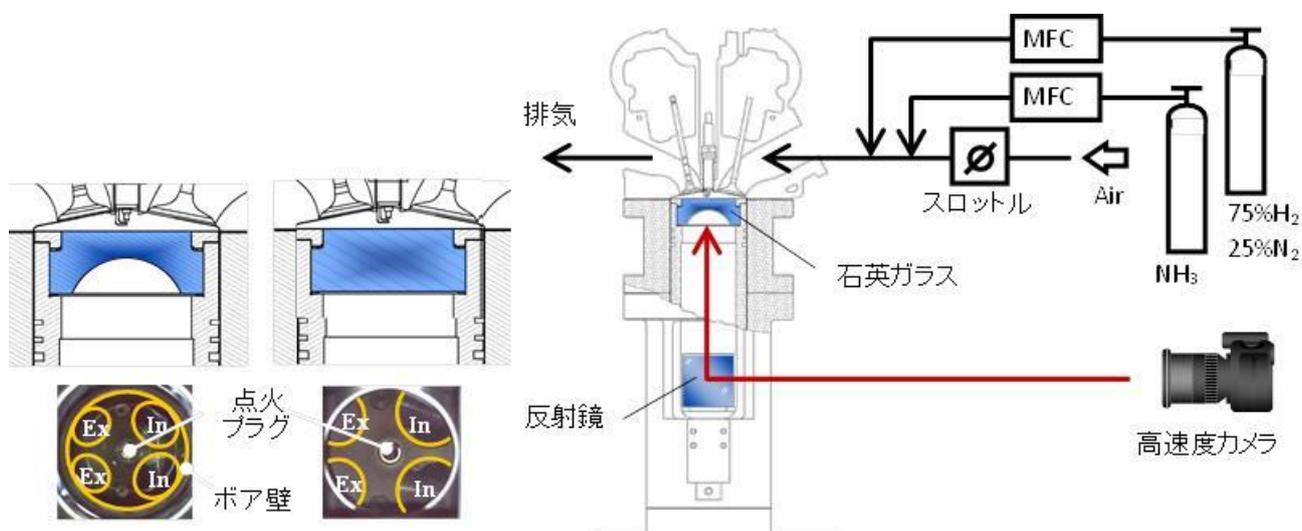


図 3-8 エンジン筒内の可視化装置

以下に示す火炎は、アンモニア専焼、エンジン回転数 1200rpm、供給熱量 740J/st、点火時期-56deg.ATDC の条件で撮影したものである。図 3-9 はシュラウドが無い一般的な吸気バルブを使用した時の火炎であり、タンブル比はほぼ 0 である。図は点火後 30deg.CA が経過し、火炎の広がり確認される-25deg.ATDC から 5deg.CA 毎の火炎を示している。可視化視野には瓣状の火炎が同心円状に広がっていく様子が捉えられており、バルク消炎などは認められない。火炎は黄色であり、主に NH_2 ラジカルからの発光と考えられる[4]。

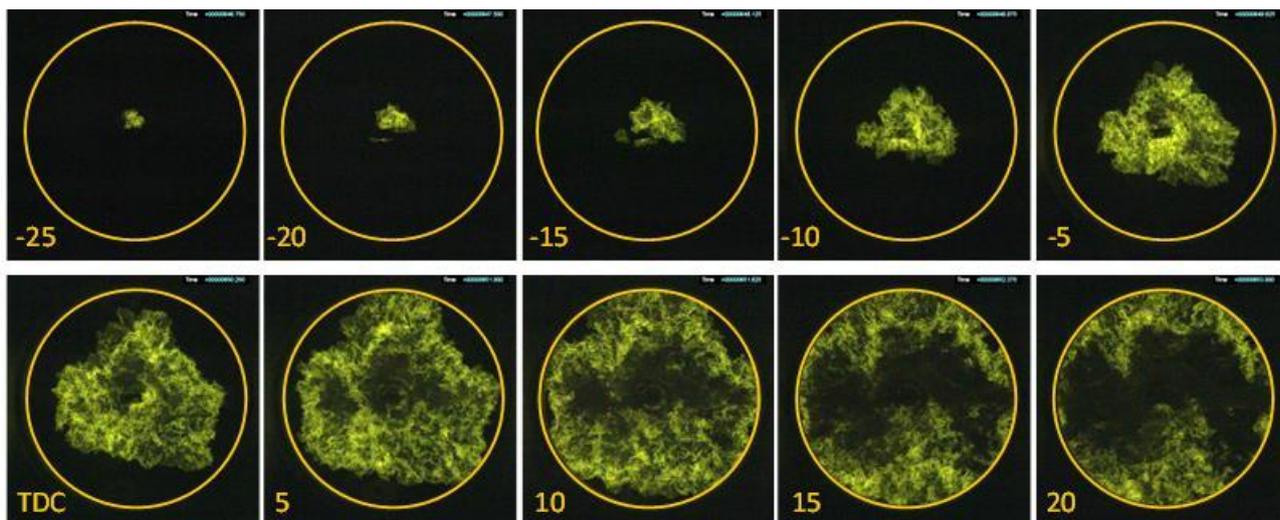
図 3-10 はタンブル比 0.94 における火炎を示す。火炎はタンブルに流されてはじめ排気側に広がり、その後、シリンダを回り込むように吸気側に燃え広がる。同じクランク角で比べると図 3-9 より火炎の広がりが早く、15deg.ATDC 以降は排気側に火炎は観察されないが、吸気側の火炎は比較的長く観察される。

図 3-11 は裏面に凹みを形成してボア壁周辺まで可視化した時の火炎を示す。○枠で囲った内部が凹面内の像である点に留意されたい。この撮影では画像下側 (リア側) の混合気

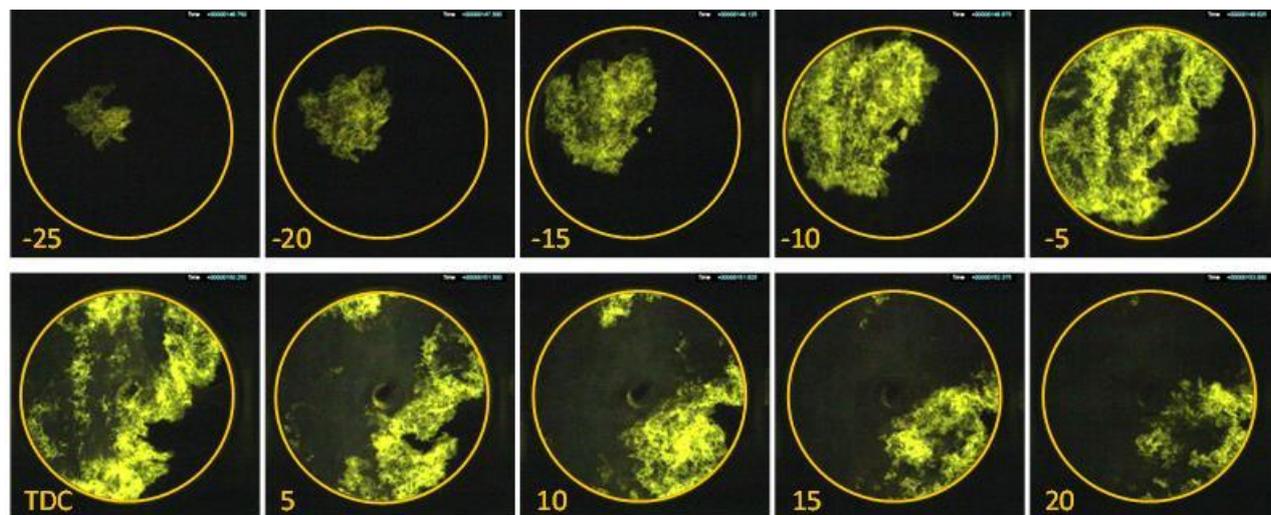
が後半燃えている状況を捉えているが、燃え残っている部分は発光が長く続いており、酸化が緩やかであることがわかる。クランク角 40deg.ATDC 以降は発光が弱くなったため、II（イメージインテンシファイア）を利用して膨張行程を撮影した結果を図 3-12 に示す。ボア周辺に弱い発光があり、酸化反応が進んでいることがわかる。

以上の火炎観察をもとに、下記の実験を行った結果を以下 3 節、4 節に示す。

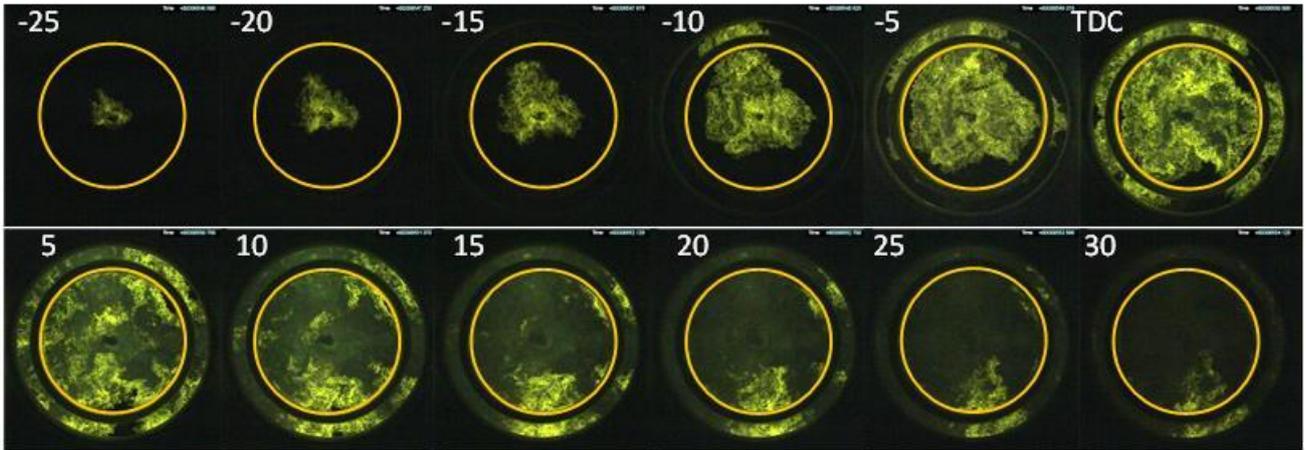
- ・ボア周辺部においてデッドボリュームの多くを占めるクレビス容積の削減
- ・ボア周辺部からの多点点火燃焼



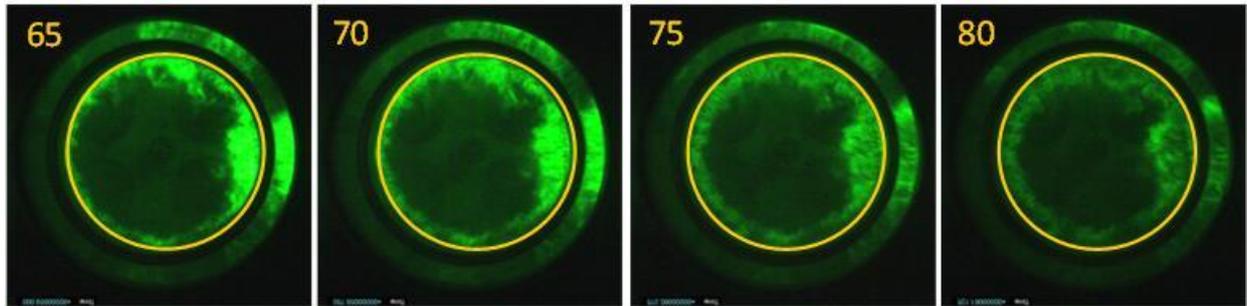
図中の数字はクランク角度(deg.ATDC)
 図 3-9 エンジン筒内のアンモニア火炎



図中の数字はクランク角度(deg.ATDC)
 図 3-10 アンモニア火炎に対する筒内流動の影響（タンブル比：0.94）



図中の数字はクランク角度(deg.ATDC)
 図 3-11 凹みガラスで撮影した筒内火炎



図中の数字はクランク角度(deg.ATDC)
 図 3-12 膨張行程後半におけるボア近傍からの発光

3-3-4. クレビス容積の影響

図 3-13 にピストン周辺部の概略を示す。ピストンのトップリングから上部のピストンとボアに囲まれる隙間のクレビスは壁面が近いので未燃で残る割合が多いと考えられる。ここではクレビスの高さを変えて容積の影響を調べた。変化幅を大きく取るため、標準としたピストンのクレビス高さ 7.5mm より大きな 15mm も試験に加えた。圧縮比は全て 13.9 になるようにピストンとヘッドの位置を調整した。

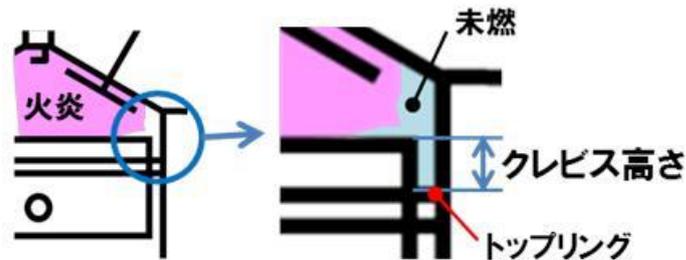
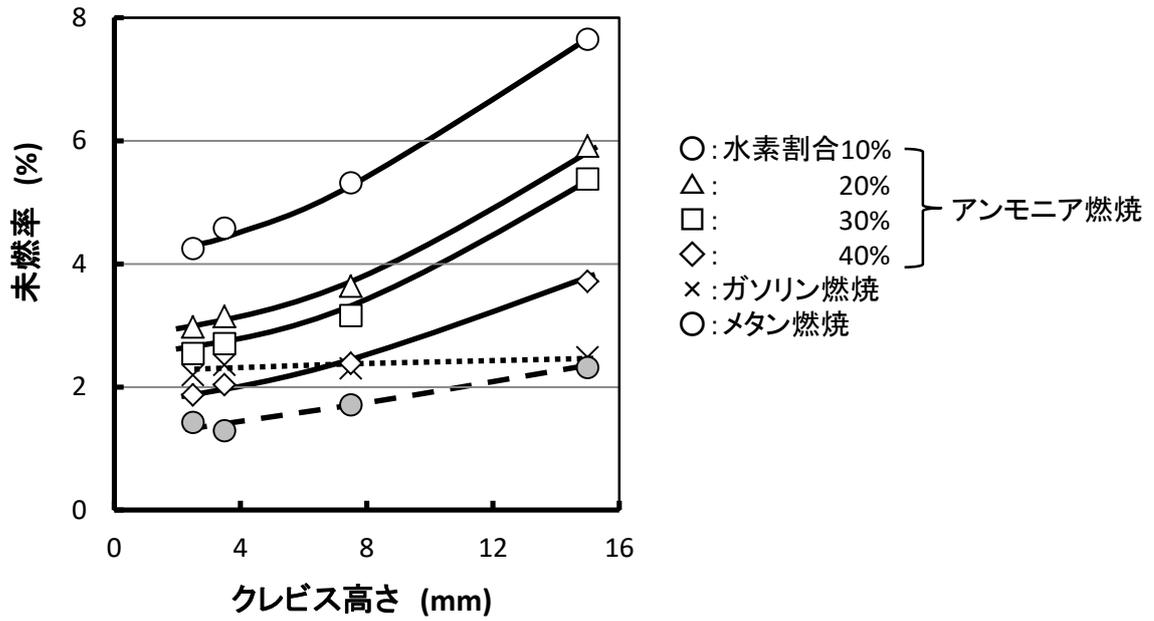
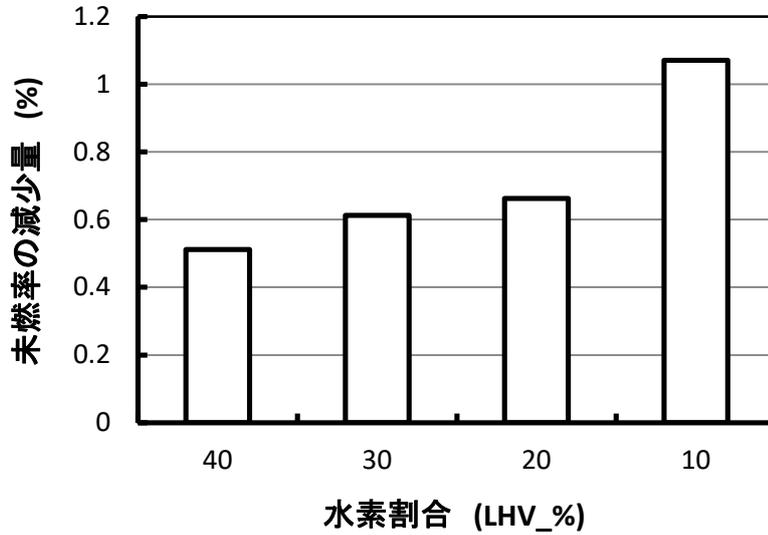


図 3-13 ピストン周辺部

図 3-14 は未燃率の変化を示す。アンモニア燃焼では何れの水素割合においてもクレビス高さを小さくすると未燃率が低減している。メタン燃焼の場合にも減少するが、同じ層流燃焼速度、同じ消炎距離の特性を持つ水素割合 40%のアンモニア燃焼に比べてその変化は小さい。ガソリン燃焼の場合はさらに未燃率の変化が小さい。図 3-15 はクレビス高さを 7.5mm から 2.5mm にした時の未燃率の変化を水素割合毎に示したものであり、水素割合が小さい方が未燃率の減少が大きくなっている。これらのことから、水素を減らし、燃焼性の低いアンモニアの比率を高めて利用する場合はデッドボリュームも小さくすることが望ましいことがわかる。しかし、図 3-14 から分かるように、クレビス高さ 0mm のときの未燃率を外挿しても未燃率は高い値であり、水素割合 10%では4%近くが未燃として残る。他の水素割合も含めると、クレビス高さ 7-8mm 程度の場合。未燃率に占めるクレビス容積の影響は概ね 2 割から 3 割と思われる。



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：740J/st
 図 3-14 未燃率に対するクレビス高さの影響



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：740J/st
 図 3-15 クレビス高さ低減(7.5→2.5mm)に対する未燃率の変化

3-3-5. 多点点火の影響

ボア周辺の燃料を早期に燃やすことによる燃焼効率の向上について検討した。周辺から多点点火すればアンモニア燃焼の燃焼期間短縮にも効果があると考えられる。図 3-16 は点火プラグの配置を示す。中央を含めて最大 5 点まで点火可能である。

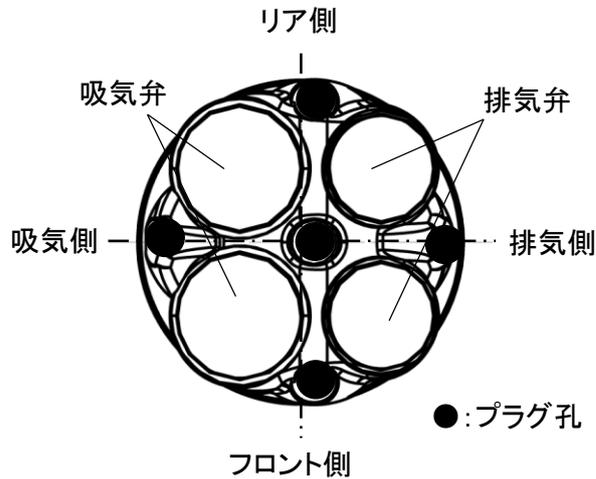
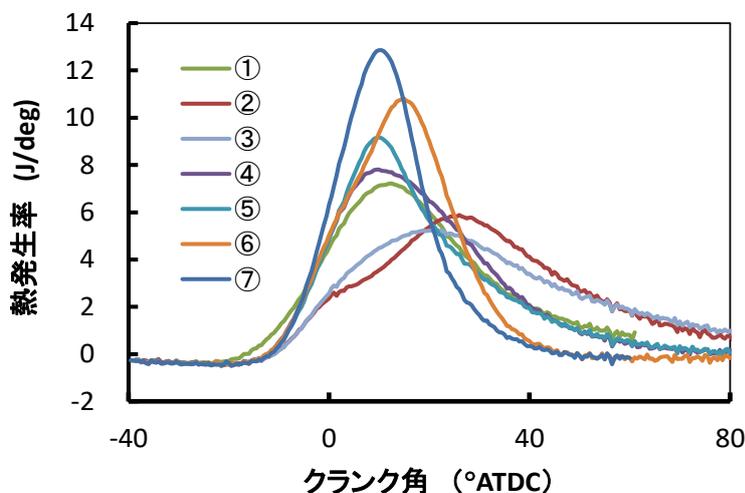


図 3-16 点火プラグの位置

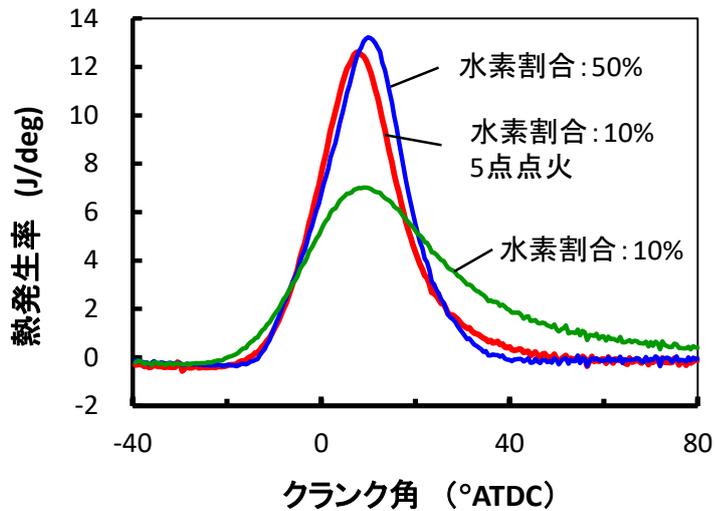
図 3-17 は水素割合点火位置、点火数を変えた時の熱発生率を示す。中央 1 点での点火(図中①)に対して中央を含む 3 点(④,⑤)、周辺 4 点(⑥)、5 点全点(⑦)の場合は燃焼期間が短縮したが、吸気・排気 2 点(②)、フロント・リア 2 点(③)は燃焼期間が長くなった。最も燃焼期間が短縮した 5 点点火を用いると、図 3-18 に示すように、水素割合 10%における熱発生率は、中央 1 点火の水素割合 50%における熱発生率とほぼ一致するレベルまで短縮する。さらに同じ水素割合 10%で比較すると、中央 1 点点火では 11%近くあった燃焼変動率が 2%未満まで低減する効果も得られた。



No	点火数	点火位置
①	1	中央
②	2	吸気、排気
③	2	フロント、リア
④	3	中央、吸気、排気
⑤	3	中央、フロント、リア
⑥	4	フロント、リア、吸気、排気
⑦	5	全点

エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：370J/st、水素割合：20%

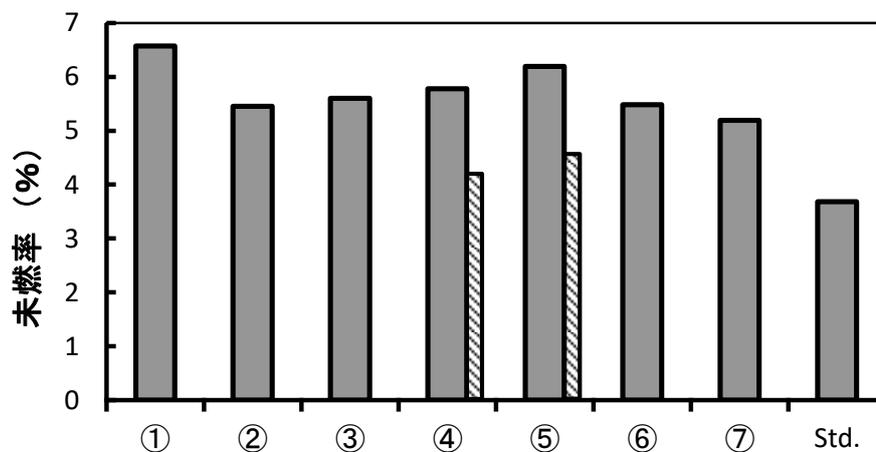
図 3-17 熱発生率に対する点火位置・数の影響



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：370J/st

図 3-18 5 点点火による燃焼期間短縮効果

図 3-19 は図 3-17 の各条件における未燃率を示す。右端の“Std.”は中央点火ヘッドの未燃率を示す。①と Std.の違いは周辺プラグの有無であり、点火しないプラグがあると 3% 近く未燃が増加した。④と⑤については、点火しない点火プラグを先端が平面なダミープラグに交換して実験した結果を斜線付棒グラフ付記しているが、何れも Std.より高い未燃率となり、全点点火した場合はそれらよりもさらに未燃率が大きくなった。この理由については次のように考えられる。本試験の多点点火は、火炎の伝播方向を逆にし、通常最後に燃える周辺部の混合気を温度・圧力・乱れの条件が良い早いタイミングで燃焼させるとともに、早く周辺部に高温の既燃ガスを作り、未燃燃料の酸化機会を長く取る利点があると考えられる。しかし、一方、早いタイミングで周辺部の混合気が消炎してしまうので、圧力が下がって膨張し燃焼室に戻された時には、既に周辺部は火炎伝播が終了しており、既燃ガス温度も低下して、燃えにくい環境となる可能性もある。本試験で未燃分が増加したのは主に後者の理由によると考えられ、周辺部からの点火は燃焼期間短縮には効果があるものの、燃焼効率にはマイナスであることがわかった。



No	点火数	点火位置	No	点火数	点火位置
①	1	中央	②	2	吸気、排気
③	2	フロント、リア	④	3	中央、吸気、排気
⑤	3	中央、フロント、リア	⑥	4	フロント、リア、吸気、排気
⑦	5	全点	Std.	1	中央(他4点はメクラ栓)

エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：370J/st、水素割合：20%

④、⑤の斜線は点火に使用しない点火プラグを先端が平面なダミープラグに交換

図 3-19 点火数・位置に対する未燃率の変化

3-3-6. 筒内噴射による燃焼改善

これまでは燃料となるアンモニアと水素を吸気ポートに供給し、ミキサで空気混合し予混合気を作っていた。ここでは、吸気バルブから空気と水素の予混合気を供給し、アンモニアをシリンダ中央から筒内噴射により供給した結果について示す。ピストンには凹みを形成し、シリンダ中央にアンモニア、周辺部に水素が偏在するようにして未燃分の低減を試みた。図 3-20 に試作したヘッドの概要を示す。アンモニアを供給する中央のバルブは外開弁であり、傘角は 90° シート径は 9mm とした。バルブの上部はプッシュロッドを介してヘッドカバー上部に取り付けたソレノイドと接しており、ソレノイドを駆動することによりバルブを押し下げるようになっている。点火プラグは噴射弁を挟んでフロント-リア方向に 2 つ付いている。

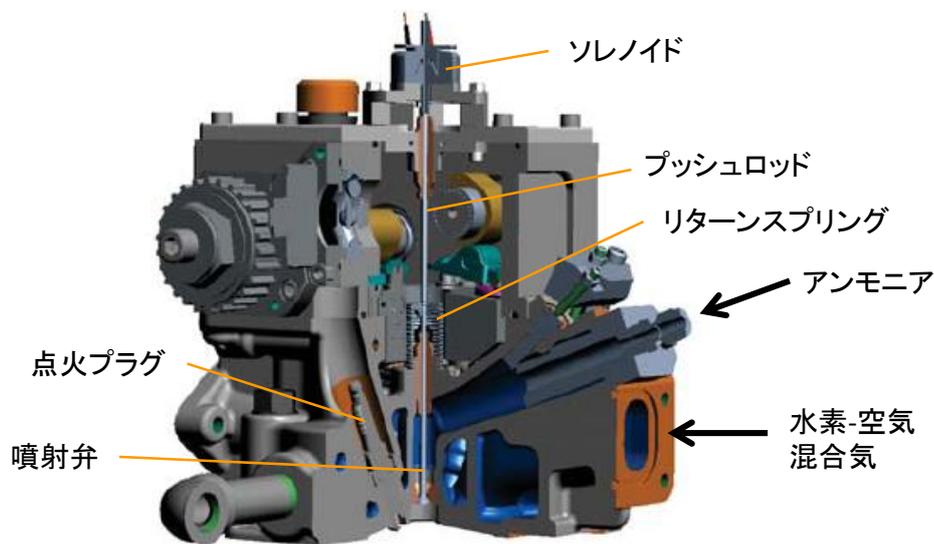
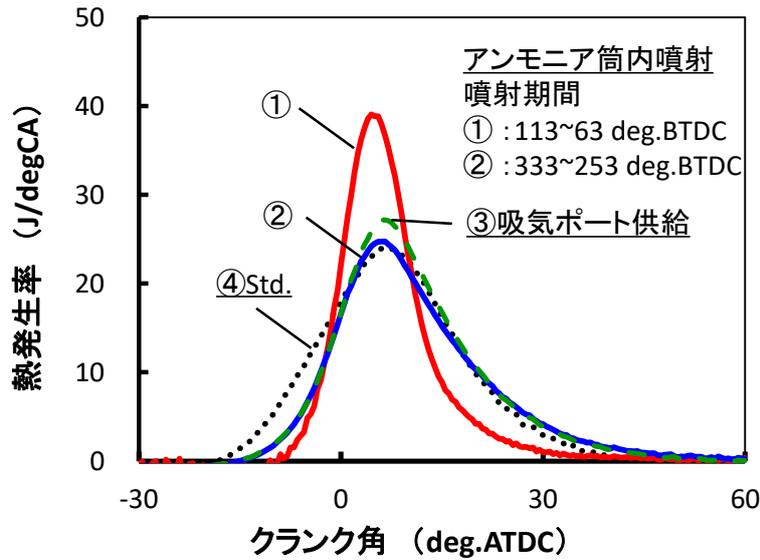


図 3-20 筒内噴射用シリンダヘッドの概略

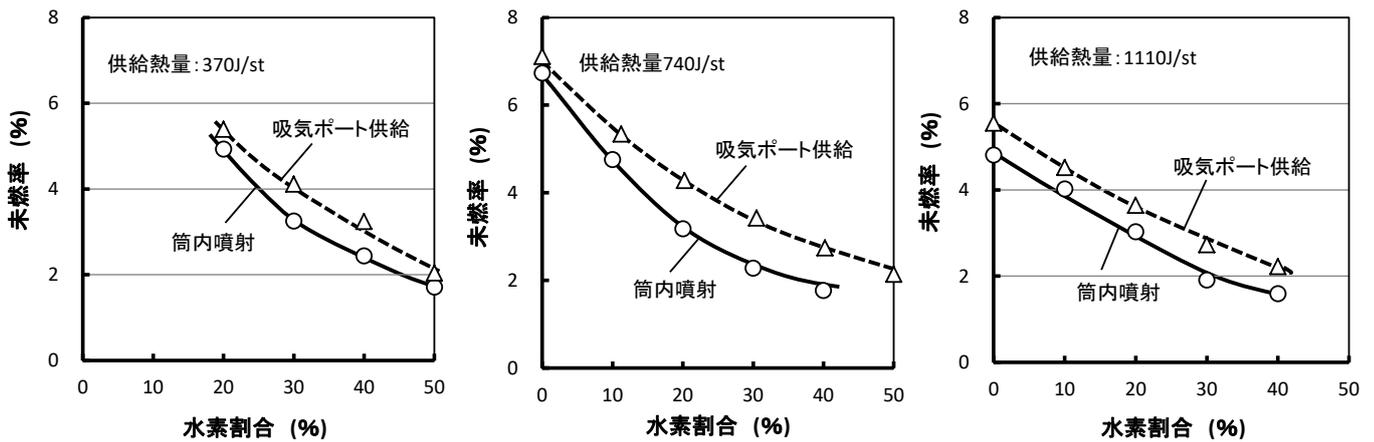
図 3-21 は各燃料供給方法における熱発生率を比較したものである。圧縮比およびエンジン回転数、燃料流量、水素割合は同一になるよう調整している。③と④は吸気ポートにアンモニアと水素を供給した時の熱発生率であり、④Std.は前節までの試験に用いたエンジンを示す。試作エンジンは 2 点点火のため、燃焼前半が早い、その他は概ね④と同じである。アンモニアの筒内噴射については、吸気行程で噴射した②と圧縮行程で噴射した①の熱発生率を示しており、吸気行程噴射の熱発生率は③の吸気ポート噴射の場合とほとんど同じであることがわかる。一方、圧縮行程で噴射した場合は燃焼期間が短く、最大熱発生率も大きくなっている。これは噴射による乱れ増加の効果と考えられる。量論比におけるアンモニアは大きな体積を占めるため(21.8 v/v_%)、効果が大きいと考えられる。

図 3-22 は未燃率を比較した結果を示す。供給熱量(負荷)や水素割合によらず、何れの場合においても筒内噴射方式の未燃率の方が小さくなり、燃焼期間の短縮と同時に燃焼効率向上が可能なことがわかった。ただし、未燃率の減少は多くて 1%程度であり、目標の燃焼効率 98% (未燃率 2%) には 30%以上の水素割合が必要である。



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：740J/st、水素割合：20%

図 3-21 熱発生率に対する燃料供給方法の影響



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：740J/st

図 3-22 筒内噴射の未燃率への影響

3-3-7. 排気量の影響

アンモニアはノックが起きにくいいため、排気量の大きなエンジンにも適用できる可能性がある。そこで、ボア 135mm、ストローク 150mm、排気量 2150cc に対して火花点火のアンモニア燃焼を試みた。シリンダヘッドは排気量 500cc のエンジンを模擬した 4 弁ペントルーフ型とし、フラット頂面のピストンで燃焼室を構成した。点火プラグはペントの中央とフロント、リア側に取り付け可能である。試験では点火に使用しない場合は点火プラグの代わりに先端が平面なダミープラグを取り付けた。図 3-23 にバルブと点火プラグのレイアウトを示す。クレビス等のデッドボリウムは上死点における容積比で約 3%であり、500cc エンジンの 2.5%とほぼ同等であるが、同じ位置における燃焼室表面積と容積の比 S/V は 3.3(1/cm)であり、500cc エンジンに比べて約 14%小さい。

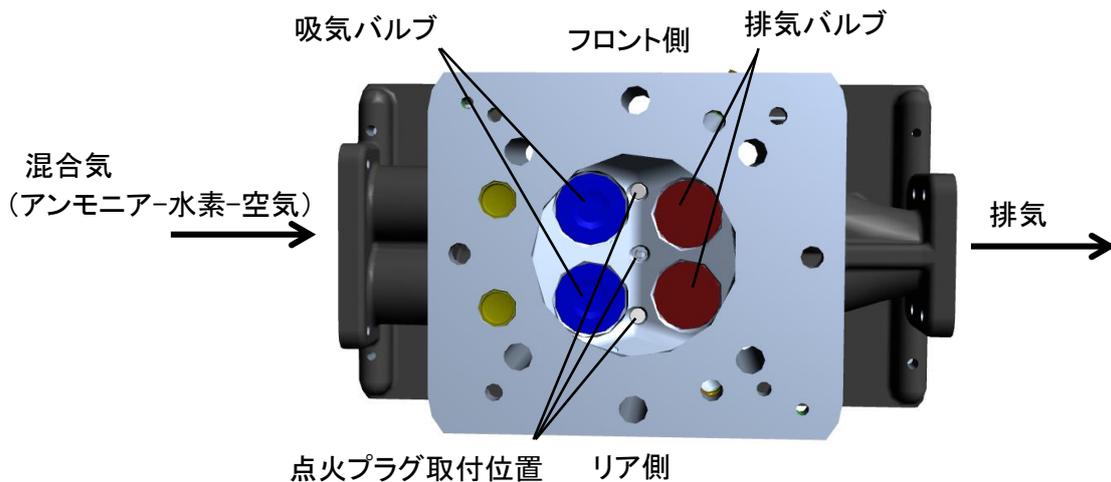
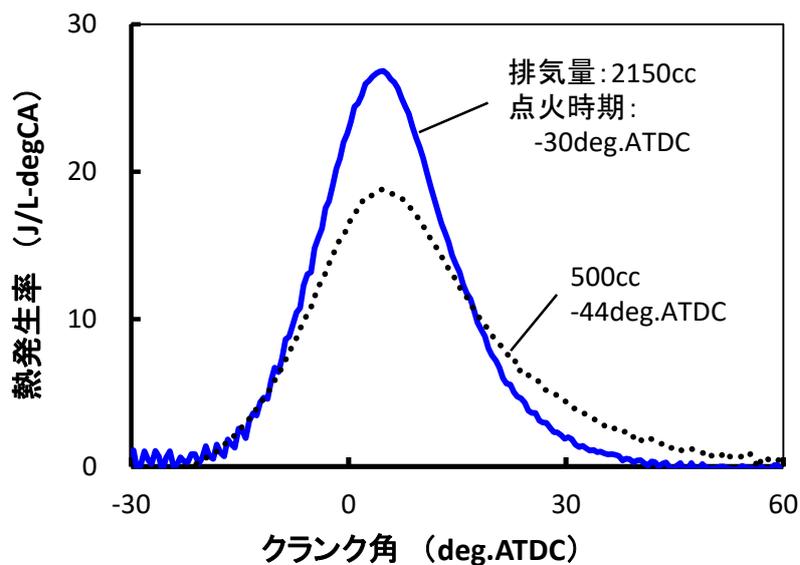


図 3-23 バルブ、点火プラグのレイアウト

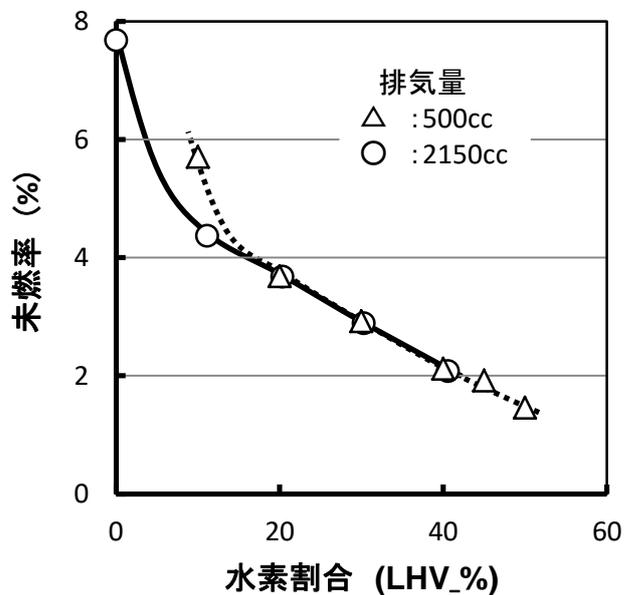
図 3-24 は排気量 500cc エンジンとの比較のために、排気量当たりの供給熱量を等しくして試験した時の熱発生率を示す。熱発生率は排気量で除した単位 $J/L\text{-deg.CA}$ で比較した。点火は中央の 1 ヶ所とし、フロント、リア側の点火位置には先端が平面なダミープラグを付けた。点火プラグからボアまでの火炎伝播距離は 57%長くなっているが、熱発生率を見ると燃焼期間は逆に短くなっている。点火時期も遅角側にあることから、燃焼室形状がほぼ同じでも大排気量エンジンの方がよりアンモニア燃焼に適していると考えられる。燃焼室レイアウト以外では、排気量 500cc エンジンに比べて、ストローク/ボア比が大きいこと、排気量に対する吸気バルブ径がやや小さいことが挙げられる。これらは使用回転範囲が限られるから選べる諸元でもあり、混合気の吸入速度を高め、筒内の乱れを増やす効果があるため、燃焼期間が短縮した大きな要因の一つと考えられる。



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：740J/L-st、水素割合：20%

図 3-24 熱発生率の比較

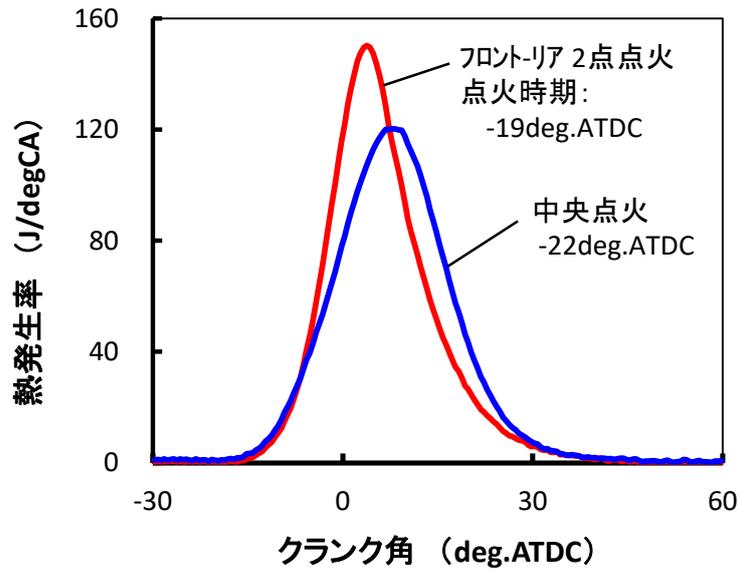
図 3-25 は未燃率の比較を示す。排気量 500cc については試験結果の中から最も低い未燃率の結果を選んでいる。水素割合 10%では燃焼安定性の向上による未燃率の減少が見られるが、それ以上の水素割合では排気量の影響はなく、ほぼ同じ未燃率となった。



エンジン回転数：1200rpm、供給熱量：740J/L-st

図 3-25 未燃率の比較

点火数の影響を図 3-26 に示す。前半の熱発生率が大きくなることがわかる。未燃率を比較すると、図 3-27 に示すようにフロント-リアの 2 点点火の方が低い未燃率になることがわかった。3 節に示した多点点火とことなり、燃焼室中心に近い初期火炎が早く大きくなる機能が大きく、後半の燃焼安定化に寄与した効果と考えられる。



エンジン回転数：600rpm、供給熱量：3160J/st

図 3-26 多点点火の熱発生率への影響

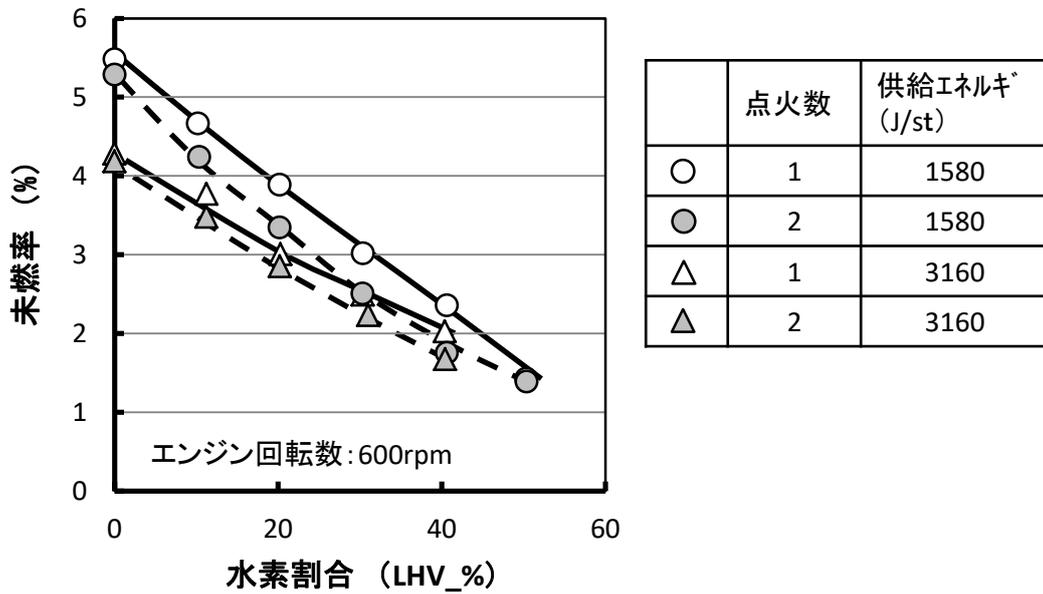


図 3-27 多点点火の未燃率への影響

3-3-8. 燃焼効率のまとめ

アンモニア燃焼の燃焼効率改善に対して、気流強化、点火強化、デッドボリウム削減、とアンモニア筒内噴射の効果について検討した。さらに、排気量の大きなエンジンに対するアンモニア火花点火燃焼の適用可能性を調べた。

水素割合を減らしてアンモニア専焼に近づけるためには、燃焼期間の短縮と燃焼効率の向上、すなわち未燃率低減が課題となる。気流強化、多点化による点火強化、アンモニア筒内噴射は何れも燃焼期間の短縮に効果があり、特に、点火の多点化、筒内噴射は大きな燃焼期間の短縮が確認された。

一方、未燃率低減に対しては、デッドボリウムの削減と筒内噴射には効果が認められたが、気流強化の影響は小さく、改善は見られなかった。多点点火は点火位置によって異なる結果を示した。ボア周辺部から点火すると未燃率は増大したが、燃焼室中心近傍での多点点火では未燃率の減少が確認された。

以上の結果から、燃焼期間の短縮と燃焼効率向上には、クレビスなどのデッドボリウムを小さくした筒内噴射式エンジンが適しており、多点点火構成が可能な場合は点火位置を燃焼室中央付近とすることが望ましいことがわかった。また、アンモニア燃焼は排気量が大きくても同様な燃焼性能が得られることが確認できた。排気量に対するロバスト性は高いと思われる。

図 3-28 は本節で示した試験アイテムの燃焼効率をまとめて示す。負荷、回転数が異なるものも含めている。燃焼効率向上に効果のあった、大排気量の 2 点点火、筒内噴射、クレビス容積低減はプロットを変えて区別した。総じて未燃率に最も強く影響したのは水素割合であり、燃焼効率 98%以上（未燃率 2%以下）には少なくとも発熱量ベースで 30%の水素割合が必要であった。水素割合を 10%に減じた場合の燃焼効率は 96%であった。

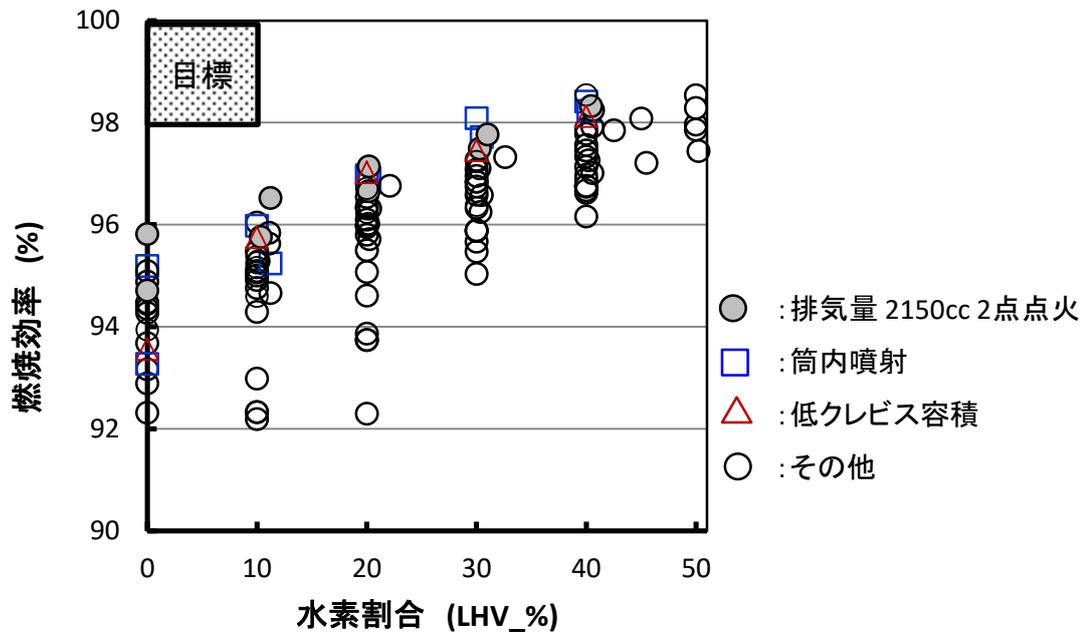


図 3-28 燃焼効率に関する試験結果

3-4. まとめ

レシプロエンジンにアンモニアを適用した場合、点火時期や燃焼期間といったマクロな指標は層流燃焼速度をそろえたメタン燃焼とほぼ一致する。すなわち、燃焼制御の観点では、アンモニア燃焼は高 EGR の炭化水素燃焼とほぼ等価である。燃焼速度が低い課題に対しては、気流強化、多点点火、筒内噴射が有効であり、水素割合を減らしても必要な燃焼期間で燃焼を完了させることができる。

一方、燃焼効率に関しては、同じ層流燃焼速度で整理してもメタン燃焼と同じ燃焼効率が得られず、アンモニア燃焼の方が低くなる。さらに、アンモニア専焼に近づけるほどメタン燃焼との差は大きくなる。常温常圧場で測定される消炎距離は、層流燃焼速度で整理するとメタン燃焼と同じであることから、燃焼効率が低くなるのは火炎伝播時の消炎だけでなく、膨張・排気行程で既燃ガスと未燃ガスが混合するときの反応性の違いが影響していると考えられる。現状、98%以上の燃焼効率には発熱量ベースで30%以上の水素が必要であり、水素割合を10%にした時の燃焼効率は96%に減少する。

3-5. 今後の課題

レシプロエンジンでは、一部の高負荷を除くとアンモニア専焼は困難であり、水素との混焼が望ましい。そのため、アンモニアをエネルギーキャリアとした場合はアンモニア改質が重要な技術となる。従来、レシプロエンジンで研究されていた燃料改質は排熱回収やエミッション改善が目的であり、どちらかと言えば付加的技術アイテムであったが、アンモニアエンジンに関しては動力システムを成り立たせるための必須アイテムである。この観点では、改質器に性能の長期安定性が求められる。アンモニア改質は吸熱反応であり、排熱回収としても期待できるが、現状、作動温度が高いために、本試験で用いたような部分酸化型の改質器か外部加熱が必要である。システム効率を高めるには、作動温度の低温化とともに排熱回収を含めた熱マネージが重要である。

燃焼に関しては、できるだけアンモニア専焼に近づけ、水素利用を減らすことが望ましい。これは、改質器の負担軽減のみならず、熱効率向上にも大きく貢献する。今回、燃焼期間に関しては複数の短縮手段があることがわかったが、燃焼効率の大幅な改善には至らなかった。根本的に改善するには、さらに基礎燃焼に関する深い理解が必要と考えられる。また、今回はガス化したアンモニアを用いたが、システムとして見た場合には、気化に要する熱量が大きいという課題がある。一部を液体のまま供給し、燃焼利用できれば、蒸発器への要求を低減させ、将来的には省ける可能性もあり、システムの簡素化が期待できる。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 0件

<査読なし(総説等含む)> 1件

・日本燃焼学会誌 第58巻184号、水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアとレシプロエンジン燃焼への適用、2016

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> 国内1件、海外0件

- ・第56回燃焼シンポジウム、アンモニアを燃料とするレシプロエンジンの燃焼特性、2018.

<口頭発表> 国内2件、海外0件

- ・第52回燃焼シンポジウム、アンモニアのエンジン燃焼特性、2014
- ・第53回燃焼シンポジウム、アンモニアのエンジン燃焼効率に関する研究、2015

<ポスター発表> 国内2件、海外0件

- ・SIP公開シンポジウム、2016
- ・SIP公開シンポジウム、2018

(3) プレス発表

なし

(4) マスメディア等取材による公表

なし

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	特願2017-253401	アンモニアエンジンの排気浄化装置	2017.12.28.	(株)豊田中央研究所
2	特願2018-66863	アンモニアエンジン	2018.03.30.	(株)豊田中央研究所
3	特願2018-53646	アンモニアエンジンの排気浄化装置	2018.03.21.	(株)豊田中央研究所
4	特願2018-53645	アンモニアエンジンの排気浄化装置	2018.03.21.	(株)豊田中央研究所
5	特願2018-226269	排気浄化装置および内燃機関システム	2018.12.03.	(株)豊田中央研究所
6	特願2018-226268	排気浄化装置および内燃機関システム	2018.12.03.	(株)豊田中央研究所

6. 参考文献

- [1] 水谷幸夫、燃焼工学、森北出版
- [2] B.Boust, et al., A thermal formulation for single-wall quenching of transient laminar flames, Combustion and Flame 149 pp.286-294, 2007.
- [3] J. Jarosinski, Flame quenching by a cold wall, Combustion and Flame 50, pp.167-175, 1983.
- [4] Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Kudo, T., Kobayashi,H., Mech. Eng. J. 2: No.14-00402, 2015.