

# メタン希薄予混合気の着火制御に関する研究

環境システムコース 環境安全システム工学

16653 宮森可奈子

## 1. 緒言

省エネルギー化や環境負荷低減に対する要求が一層強まる中、発電やコージェネレーション用の定置式エンジンに対しても効率の向上と NO<sub>x</sub> を代表とする有害物質の排出量削減が求められている。メタンを主成分とする天然ガスを燃料とした定置式エンジンには火花点火希薄燃焼エンジンが用いられている。しかしながら、火花点火希薄燃焼エンジンの燃料希薄化は燃焼限界によって制限され、圧縮比はノッキングにより制限されるため、効率向上には限界がある。また、火花点火希薄燃焼エンジンにより生成する NO<sub>x</sub> は三元触媒のよって除去できないという問題がある。

このような、天然ガス燃料定置式エンジンの問題点を解決するため、予混合圧縮着火エンジンの研究開発が進められている。予混合圧縮着火エンジンとは、空気と燃料を混合し、均一な混合気を形成させ、その混合気を圧縮することにより自然発火させ燃焼させるエンジンである。予混合圧縮着火エンジンの長所は、超低 NO<sub>x</sub> 排出、高効率であることである。予混合圧縮着火エンジンの場合、均一に希薄な混合気であり、燃焼温度が高温にならないため、排気ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度が数 ppm 程度に抑えられる。また、予混合圧縮着火エンジンは、燃焼速度が大きいため理想サイクルに近いことと高圧縮比で運転できることから高効率である。一方、予混合圧縮着火エンジンには、着火時期が運転条件により固定されるため回転数や出力の急激な変更が難しい、高負荷運転が難しいなどの特徴もあるが、定置式エンジンでは、回転数や負荷を固定して運転するため、通常運転時はこれらの欠点は大きな問題とはならない。しかしながら、天然ガス燃料定置式予混合圧縮着火エンジンにおいて、始動時は燃料が着火しないため、着火を制御する必要がある。

天然ガス燃料予混合圧縮着火エンジンの始動時の着火制御方法の一つとして、少量の液体副燃料を燃焼室中の希薄天然ガス予混合気に噴射して着火させることによる方法が考えられる。希薄天然ガス予混合気の液体燃料による着火制御方法を確立するためには、定容燃焼器を用い、温度、圧力、混合気濃度等を制御した条件での基礎的研究が重要となる。

また、天然ガスの主成分であるメタンは、自然発火しにくく、自然発火温度が 550 との報告もなされているが、メタンの高圧下での酸化特性について系統的に研究がなされた例がない。メタンの酸化に関する基礎的知見は、予混合圧縮着火エンジンの着火制御やメタンの安全な取り扱いに関する基礎的知見につながる。

## 2. 目的および方針

本研究では、メタンの自然発火特性に関する知見を得ることと、メタン希薄予混合気中の液体副燃料の噴射による着火制御に関する基礎的知見を得ることを目的とした。本研究では、まず、希薄メタン混合気を着火試験装置に導入し、混合気中に液体副燃料を噴射することにより着火燃焼させる実験システムを構築した。次に、メタン希薄混合気の温度、圧力を系統的に変化させ、メタンの高圧下での酸化特性を評価した。さらに、メタン希薄混合気中への液体副燃料の噴射燃焼実験を行い、混合気中のメタンが液体副燃料の着火に及ぼす影響や液体副燃料の噴射によるメタン燃焼について系統的に評価した。

## 3. 実験

### 3.1 実験装置

#### 3.1.1 高圧メタン/空気希薄混合気調製システム

本研究では、着火試験装置 FIA-100 の燃焼室内に高圧で混合気を導入する必要がある。また、酸素とメタンを混合するため、安全性は十分確保しなくてはならない。そこで、安

全に高圧で流量を制御して混合気を調製するシステムの構築を試みた。

図 1 に高圧メタン/空気希薄混合気調製システムの概要を示す。窒素ガスおよびメタン 9.7%/窒素 90%混合ガスの高圧での流量制御は高圧マスフローコントローラ（東京計装、TC2100）を用いた。また、酸素 40%/窒素 60%混合ガスの流量測定は高圧マスフローメータ（東京計装、TF3610）を用いた。この三種のガスを高圧レギュレーターにより高

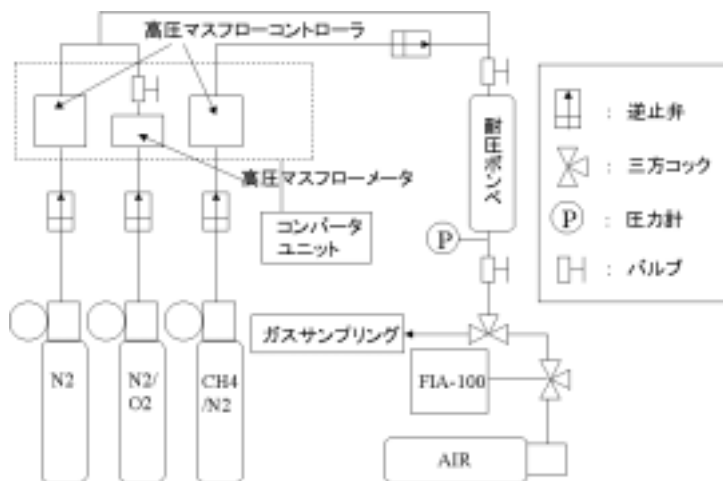


図 1 高圧メタン/空気希薄混合気調製システム

圧マスフローコントローラまたは高圧マスフローメータを介して 3.2L 耐圧ボンベに導入することにより混合し、混合したガスを着火試験装置 FIA-100 に導入できるようにした。

### 3.1.2 着火試験装置 FIA-100

着火試験装置としては、船舶燃料である重油の着火性の評価に用いられている、FUEL TECH 社製 FIA-100 を用いた。図 2 に着火試験装置 FIA-100 の概略を示す。FIA-100 は、0.65L の定容燃焼室内に直径 0.35mm の一穴ノズルが設置されている。ノズル周辺には燃料の蒸発を防ぐため冷却媒が流れている。吸気により高圧の燃料ガスを燃焼室内に導入し、燃焼室内温度が設定値になるとノズルから自動的に液体副燃料を噴射する。噴射圧は約 200kg/cm<sup>2</sup>、噴射期間は約 2ms である。噴霧角は 15 度で、噴射した燃料は燃焼室内の壁面に到達しない。燃焼室内の下部には圧力センサーがついており燃焼室内の圧力変化を、噴射後 100ms まで測定できる。

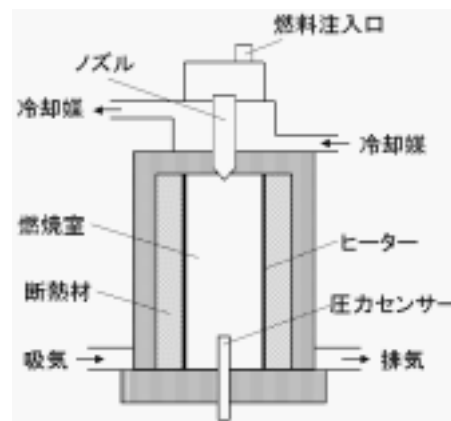


図 2 着火試験装置 FIA-100

### 3.1.3 ガスクロマトグラフィー

濃度測定はガスクロマトグラフィー（島津 GC-8A TCD）を用いて行った。混合気 1ml 中のメタン、酸素、一酸化炭素、二酸化炭素、窒素の各ピーク面積より、それぞれの検量線から濃度を算出した。

## 3.2 実験方法

### 3.2.1 メタン希薄予混合気の高圧下での酸化特性評価

メタン希薄予混合気の高圧下での酸化特性を評価するため、メタン 3%、酸素 20%、窒素 77%の混合気を調製し、着火試験装置の燃焼室内に導入する実験を行った。メタン濃度は火花点火における希薄燃焼限界以下の濃度であり、予混合圧縮着火エンジンにおける実験で用いられる濃度領域である。着火試験装置による着火試験では、燃焼室内の気体を設定温度の 30 以下から加熱して、設定温度に到達した瞬間に燃料噴射する方式をとり、加熱時間は約 3 分間を要する。そこで、温度、圧力を 350 ~ 550 、1 ~ 3MPa にそれぞれ設定し、温度が設定温度に到達する直前の燃焼室内のメタン濃度をガスクロマトグラフィーにより測定し、燃焼室内導入前のメタン濃度と比較することによりメタンの酸化特性を評価

した。

本実験に先立ち、着火試験装置に導入するメタン希薄混合気の調製が確実に行われているかの確認実験を行った。メタン 3%、酸素 20%、窒素 77%の混合ガスが調製されるようにマスフローコントローラの設定を行い、調製した混合気をサンプリングし、濃度を測定した結果、設定濃度に近い値で調整可能であることを確認した。

### 3.2.2 液体副燃料噴射がメタン希薄予混合気の着火に及ぼす影響評価

液体副燃料噴射がメタン希薄予混合気の着火に及ぼす影響を評価するため、メタン 3%、酸素 20%、窒素 77%の混合気を着火試験装置 FIA-100 の燃焼室内に導入し、市販軽油を噴射し燃焼させる実験を行った。軽油噴射時の燃焼室内の温度は 350 および 400 、圧力は 1~3MPa にそれぞれ設定した。液体副燃料を噴射した時点から 100ms 経過時点までの圧力信号を PC に取り込み、データの解析を行った。燃料を噴射してから、圧力が 0.12MPa 上昇するまでの時間を着火遅れ時間、最大圧力と燃料噴射直前の圧力差を最大圧力上昇と定義した。また、メタン希薄予混合気を用いた実験に先立ち、燃焼室内に空気を導入し軽油を噴射し燃焼させる実験を行い、メタン希薄予混合気を用いた場合の結果との比較を行った。さらに、メタン希薄予混合気中に軽油を噴射し燃焼させた後のガスは、ガスクロマトグラフィーを用いて分析した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 メタン希薄予混合気の高圧下での酸化特性評価

液体副燃料噴射直前でのメタンの残存割合についての結果を図 3 に示す。設定温度 400 までは、メタンはほとんど消費されずに残存しているが、400 を超えると、メタンの残存割合は減少している。これにより、設定温度が 400 を超える条件でメタンの酸化反応が開始することがわかる。したがって設定温度は 400 以下とすべきである。また、いずれの圧力条件においても 400 を超えた条件で酸化が開始していることから、圧力はメタンの酸化の開始には影響を及ぼさないと考えられる。一方、圧力上昇に伴い、メタンの残存濃度の減少が確認されることから、圧力のメタン酸化速度への寄与が示唆される。

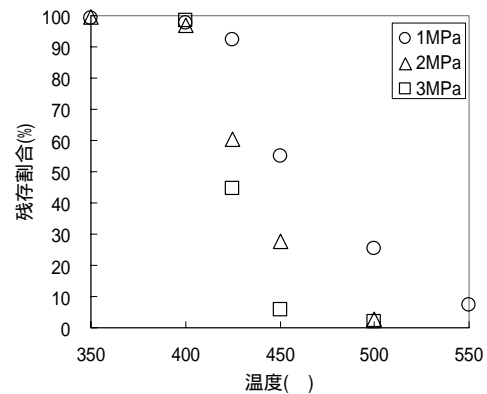


図 3 液体副燃料噴射直前でのメタンの残存割合

着火試験装置の燃焼室は外部からヒーターで加熱するため、燃焼室壁面は燃焼室中心部より約 50 温度が高くなっている。また、燃焼室はステンレスで構成されている。このため、本条件においては、メタンの酸化反応は、高温の壁面のステンレスによる触媒作用によって開始していると考えられる。

メタンは自然発火しにくい物質として知られている。しかし、本研究により、高圧下においては、ステンレスの壁面温度 450 以上で酸化反応が進行することがわかった。今後のメタンの燃焼や安全な取り扱いを考える上で、このことを考慮する必要がある。

### 4.2 液体副燃料噴射がメタン希薄予混合気の着火に及ぼす影響評価

まず、空気雰囲気下での市販軽油の着火試験を、燃焼室温度 300 ~ 500 、燃焼室圧力 1MPa~3MPa の条件で行った。図 4 に市販軽油の着火遅れ時間を示す。いずれの圧力条件においても、設定温度 300 の条件では、着火が確認できる圧力上昇が見られなかった。この結果と、4.1 での実験で、450 以上の設定温度では混合気中のメタンが燃焼室内で酸化することを考慮し、メタン希薄予混合気中に軽油を噴射させる実験は、設定温度 350 、

400 の条件で行った。

図 5 に、メタン 3%の混合気中に軽油を噴射して着火させた時の着火遅れ時間を示す。メタン混合気中に噴射した場合、空気中に噴射した場合と比較して着火遅れ時間が長くなっている。本実験より、メタンが、ディーゼル燃料の前着火段階のラジカル連鎖反応を抑制していることが示された。既往の研究より、天然ガス

と軽油のデュアル燃料のディーゼルエンジンの燃焼では、着火遅れ時間が長くなるという現象が報告されており、その原因は天然ガス導入による混合気中の酸素濃度低減が原因ではないかと考えられていた。しかし本研究では、酸素濃度一定のもとで実験を行っているため、天然ガス中のメタンが軽油の着火反応を抑制していることが示唆される。

図 6 にメタン 3%の混合気中に軽油を噴射して着火させた時の最大圧力上昇を示す。メタン 3%の混合気中に市販軽油を噴射して着火させた場合、空気中の場合と比較して最大圧力上昇が大きくなり希薄メタン混合気が燃焼したことが確認された。メタン濃度は火花点火における希薄燃焼限界以下の濃度であることから、火炎伝播により燃焼したのではなく、軽油の着火による温度上昇によって、メタン予混合気の前着火段階の反応が促進され、メタンが着火に至ったと考えられる。このことから、メタン希薄予混合気液体副燃料を噴射することによる、メタン着火制御の可能性が示された。

燃焼後のガス分析より求めたメタンの燃焼割合についての結果を表 1 に示す。いずれの場合も燃焼割合は 50% 以下となっている。この原因としては、着火試験装置の燃焼室内下部に、低温部が存在しているためと考えている。

### 5. まとめ

本研究では、メタンの自然発火特性に関する知見を得ることと、メタン希薄予混合気中の液体副燃料の噴射による着火制御に関する基礎的知見を得ることを目的とし、まず、高圧メタン/空気希薄混合気調製システムを構築し、メタン希薄混合気の温度、圧力を系統的に変化させ、メタンの高圧下での酸化特性を評価した。その結果、1MPa 以上の圧力下においては、設定温度 400 (壁面温度 450 ) 以上でステンレスの壁面効果により酸化反応が進行することが確認された。次に、メタン希薄予混合気中への軽油の噴射燃焼実験を行った。その結果、メタン 3%混合気中に軽油を噴射して着火させた場合、空気中に軽油を噴射した場合と比較して最大圧力上昇が大きくなり希薄メタン混合気が燃焼したことが確認された。このことから、メタン希薄予混合気液体燃料噴射による着火制御の可能性が示された。軽油の着火遅れ時間は、空気雰囲気中への噴射と比較して増大し、メタンによる軽油の前着火段階のラジカル連鎖反応の抑制が示唆された。

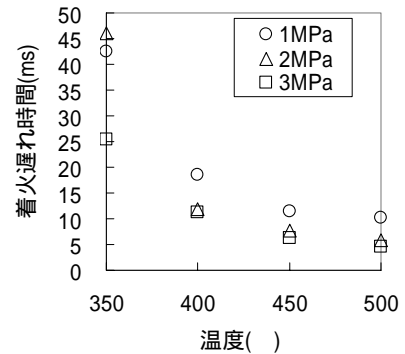


図 4 市販軽油の着火遅れ時間

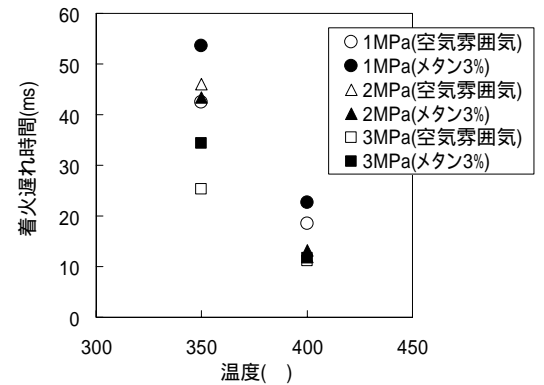


図 5 メタンの着火遅れ時間

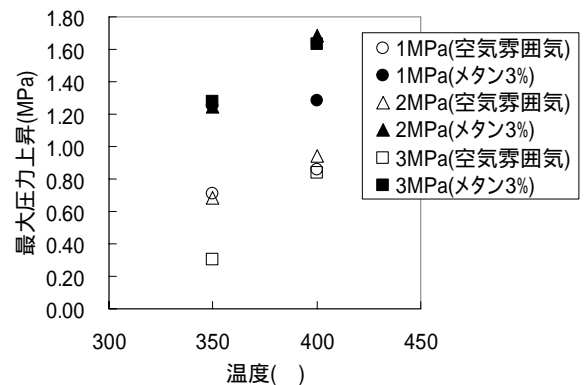


図 6 メタンの最大圧力上昇

表 1 メタンの燃焼割合 単位(%)

	1MPa	2MPa	3MPa
350	38	44	42
400	43	30	47