

## 養成技術者の研究・研修成果等

1. 養成技術者氏名：安 秉一

2. 養成カリキュラム名：トラック用LNG（液化天然ガス）機関の研究

3. 養成カリキュラムの達成状況

天然ガスの気筒内直接噴射による効率改善方法に関しては、エンジン気筒内を模擬した定容容器内の高温高圧場に直接噴射した圧縮天然ガス（CNG）の噴流を対象に、Ar+レーザーによるシュリーレン法と高速度カメラを用いて写真撮影を行い、噴流特性と周囲空気との混合特性を調べた。さらに気筒内直接噴射のレーザーによる観察技術が確立できたので、これを他の燃料に応用することの可能性を探るため、ジメチルエーテル（DME）について、高温高圧場に噴射される噴霧の分散、蒸発過程を高速度撮影し、DME圧縮着火機関のエンジン性能及び排出ガス特性との関係を調べた。

LNGのウェザリングに関する研究では、この状態を模擬した条件でエンジン実験を行い、ウェザリングにより生じた燃料組成の変化が燃焼に与える影響を明らかにした。また実際に製作したLNG配管系を用い、実用状態を模擬した実験を繰り返してウェザリング現象の正確な把握に努めるとともに、エンジン実験による排気測定を行って、これにより生じる燃料組成の変化が燃焼に与える影響を明らかにした。

天然ガス機関におけるHC排出メカニズムの解析では、未燃炭化水素(UHC)排出のメカニズムについて高速FID測定(FID)を用いて明らかにした。

4. 成果

### 気筒内直接噴射による効率改善方法

直接噴射式天然ガスエンジンでは、ディーゼルエンジンと同様に燃料を気筒内に直接噴射することで高効率期待される。そこで前年度までこの方式の基礎的検討をさらに進めた。エンジン気筒内を模擬した定容容器内の高温高圧場に直接噴射した圧縮天然ガス（CNG）の噴流を対象に、Ar+レーザーによるシュリーレン法と高速度カメラを用いて写真撮影を行い、噴流特性と周囲空気との混合特性を調べた。CNG噴流に及ぼす霧囲気圧力、霧囲気温度、霧囲気密度等の影響を詳細に検討した。その結果、霧囲気圧力の増加により抵抗力が増大し、噴流の到達距離および体積ともに大きく減少し、霧囲気圧力が高い条件では、噴射圧力を高くする必要があること、高密度、高温になるほど噴流幅の広がりが大きく、先端部の濃度が薄くなることで周囲ガスとの混合が促進されること等が明らかになった。

本年度はこの方式の基礎的検討をさらに進めた。高圧で天然ガスを噴射する場合、噴口の最も絞られた場所で臨界状態が生じ、噴射圧力を上げてても気筒内に天然ガスが十分供給されない状態が生じる可能性がある。しかし、油圧等を用いないため、電気信号により応答性良く駆動できる電磁駆動の噴射弁を用いた場合、電気信号と比例した量の天然ガスを噴射できる噴射ノズルであることが望ましい。

そこで噴射圧力10MPaと15MPaの場合について、時間変化に対する噴流画像を比較した。噴

射圧力 10 MPa の場合、雰囲気温度が高くなるにつれて噴流の到達距離が少々短くなるものの、大きな変化は現れない。噴射圧力 10 MPa、15 MPa の噴流画像と軌跡を比べて見ると、雰囲気変化に対して同様の傾向が見られる。また、時間変化に対する噴流の到達距離と体積を比較すると、噴射圧力が高いほど、噴流の到達距離および体積ともに若干増加する傾向が見られる。噴射圧力が高くなることにより、噴流の運動量が増大されるものと考えられ、噴射圧力 10 MPa、15 MPa の噴射量を測定した結果、1 パルス当たり各々 41mg、46mg となり、それほど差があまり大きくないことから噴射圧力が高くなるにつれ臨界流量に近づくことで CNG 噴流の到達距離と体積には大きな変化があらわれないことがわかった。この現象は雰囲気圧力にも大きく左右されることから、今後、この影響を詳細に調べることが必要であり、直接噴射天然ガスエンジンの燃焼改善を行う上では、さらに高温高圧場での混合気濃度測定を検討する必要があることがわかった。

以上の結果から、初年度より実施してきた、気筒内直接噴射のレーザーによる観察技術が確立できたので、これを他の燃料に応用することの可能性を探った。液体燃料である軽油は噴射後の蒸発過程が複雑であることから、天然ガスと軽油の中間の性質を持ち天然ガスからの大量生産が可能で、セタン価が高く、軽油運転時と同等の熱効率が期待できるジメチルエーテル (DME) について、高温高圧場に噴射される DME 噴霧の分散、蒸発過程を高速撮影し、DME 圧縮着火機関のエンジン性能及び排出ガス特性との関係を調べた。

単気筒エンジンの圧縮時の温度、圧力を模擬して、燃焼に至るまでの DME 噴霧の微粒化、蒸発現象をレーザーシュリーレン法を用いて調べた。レーザーの散乱光の撮影結果から噴射圧力の上昇に伴い、液滴の到達距離が長くなる傾向が認められた。実機の圧縮時に近い雰囲気条件 ( $P_a=3.23\text{MPa}$ 、 $T_a=700\text{K}$ ) においても、微粒化された液滴が周囲の熱を受けて蒸発しながら噴霧先端まで液滴が到達することで軽油噴霧と同様の挙動を示した。一方、シュリーレン撮影の結果から、散乱撮影結果と同様に、噴射圧力が高くなるほど、液滴と蒸気を含んだ噴霧の到達距離が長くなり、液滴の蒸発が促進されることで噴霧の外周部において乱れが大きい蒸気部が広がる傾向が見られたことから、天然ガスの高圧噴射時と似た挙動も観察された。散乱撮影による液相の到達距離はシュリーレン画像と比べて短くなるものの、噴射終了時まで伸びる。一方、噴霧体積を比べると、いずれの噴射圧力においても大きくなり、それは噴射圧力が高いほど顕著になる。また本実験の最も噴射圧力が高い 35MPa 場合において、噴霧同士の干渉もなく、液滴の微粒化及び活発が活発になることを確認した。着火時 (-3degATDC) において、最も噴射圧力が高い 35MPa の場合でも DME 噴霧は、分散しながらもキャビティーの中に納まり、噴霧同士の干渉もなく、活発な蒸発現象が行われることが確認できた。その結果により、燃焼の改善する上で適切な噴射系とピストンのキャビティーの設計が重要であることがわかった。

次に DME エンジンとベースディーゼルエンジンの全負荷性能を比較した。噴射圧力が高くなるほどエンジン出力は増加し、低回転時ではディーゼルの場合、スモークリミットにより低くなっており、DME の場合は煙が発生しないことから十分トルクアップが可能であることがわかった。

以上の結果、本研究で開発したレーザーシュリーレン法が蒸発を伴う DME にも適用できること、噴霧の撮影結果から噴射圧力 35MPa までは、噴霧同士の干渉もなく液滴の微粒化および蒸発が活発になる現象が把握できた。また DME 噴霧は圧縮上死点近傍相当の高温高圧場において、微粒化された液滴が周囲の熱を受けて蒸発しながらも、噴霧先端まで液滴が到達し、軽油噴霧と同様の挙動を示すことがわかった。さらに、噴射圧力が高くなるほど、予混合燃焼が活発になり燃焼期間が短縮すること、NOx 排出量は増加するが、高速高負荷域においてもエネルギー消費率は向上することがわかった。

#### LNG のウェザリングにおける燃料組成の変化が燃焼に与える影響の解明

LNG を長期間保存すると沸点の低い成分が揮発して組成が変化する。これをウェザリング (Wethering) と言う。13 年度はこの状態を模擬した条件でエンジン実験を行い、ウェザリングにより生じた燃料組成の変化が燃焼に与える影響を明らかにした。14 年度は実際に製作した LNG 配管

系を用いてウェザリングを実験的に再現し、エンジン実験による排気測定を行った。今年度は前年度に引き続き、実際に製作したLNG配管系を用いて、実用状態を模擬した実験を繰り返し行ってウェザリング現象の正確な把握に努めるとともに、エンジン実験による排気測定を行ってウェザリングにより生じる燃料組成の変化が燃焼に与える影響を明らかにした。

ウェザリングによるエンジン燃焼状態及び排出ガスの変化を実験的に考察するために長期間の放置状態を模擬した場合を想定して、ウェザリングによる燃料の組成の変化は、メタンでは88%から30%の範囲とし、エタンは6%から60%、プロパンは4%から9%の範囲内とすればよいことがわかった。

そこで、この結果に基づいて試験的に混合燃料を製造し、実験に供した。都市ガスとして供給されている市販の13Aを標準燃料と考え、これを用いた。一方混合ガス1はメタン濃度が低くエタン含有率の高い燃料とし、混合ガス2はメタン含有率がさらに低くエタンを60%程度含み、ブタンの含有率も高い燃料とした。燃料性状が変化した場合の燃焼制御は点火時期を変更することにより行うが、点火時期を早めると急激に出力が増大した。これは13Aではメタンが主成分のため燃焼速度が混合ガスA、Bより遅いため点火時期を早めると、十分な燃焼期間が確保されるためと考えられる。したがって燃焼性が良く燃焼速度が速いエタン、プロパン等を多く含む混合ガスA、Bでは点火時期を早めると出力が増大するもののその効果は13Aより少なくなる。メタン含有率が低くなり、エタン等が増加する条件で燃料が絞られエンジンとしての負荷は軽負荷側に移行することがわかる。すなわち実用時において要求動力が一定の場合は、燃料性状の変化によりエンジン出力が増大する方向にいくので、運転性の面では大きな障害にならないことが予想される。

したがってウェザリングにより燃料の性状に変化を生じて燃焼の悪化には通じず、むしろ燃焼変動は改善される傾向にあるため振動、騒音等は少なくなることが予想される。

NOxはウェザリングが進むにつれて急激に排出濃度が増加する傾向にある。一方、THCは減少する。なおCOは大きく変化しない。これは、実用機関で得られていた結果であるが模擬試験においても再確認されその関係を定量的に把握できた。ウェザリングが進むにつれて燃料中のメタン割合が低くなり、着火性の高いエタン及びプロパンが増加することから、燃焼が活性化してNOxが増えるとともにCO、THCの生成が押さえられている。EGRは、燃焼の悪化を招くもののNOx低減には効果的である。したがってウェザリング時には、燃焼変動等が改善されることがわかったことから、30%を超える多量EGRの可能性が明らかになった。

なお、実用機関による実験の積み重ねから、ウェザリングが生じて実用上問題を起こさない容器放置時間、すなわちトラックの場合運転を行わず連続して駐車状態においた状態に相当する時間は4日程度であった。すなわち4日以上容器を放置するような場合ウェザリング対策が必要になる。ウェザリングを防止するためには、車載ガス圧縮機を用いてLNG容器内の圧力を高める方法が考えられるが、ボイルオフガスを再度液化しない限り、許容放置時間を2倍程度伸ばす効果にとどまると考えられる。

#### 天然ガス機関におけるHC排出メカニズムの解析

燃料自体が環境に与える影響の少ないメタン(CH<sub>4</sub>)を主成分とする天然ガスは埋蔵量の多さと都市ガスを基盤として容易に供給が可能なることから有望視されている。メタン分子は比較的安定で、層流火炎速度が他の炭化水素燃料に比べて最も低い。これは内燃機関の燃料として用いる場合、未燃炭化水素の排出が高くなる原因の一つである。また、メタンは地球温暖化物質であることからその排出は少ないことが望ましい。

前年度は、天然ガス機関の希薄燃焼における未燃炭化水素(UHC)排出のメカニズムについて高速FID測定(FIFID)により検討した。その結果、排気行程における排気バルブ近傍の炭化水素濃度の測定から排気行程における炭化水素濃度は主燃焼ガスの噴出により、一端急激に低下し、小さなピークを生じた後低いレベルを保ち、排気バルブが閉まる直前に高濃度になることがわかった。また点火時期を遅らせた場合、後期燃焼が活性化して炭化水素の排出を抑える効果があること

が示された。従来のF I D測定によれば、未燃炭化水素は が増加するにつれて増加する。これと同様の傾向がF F I D測定でも確認され、排気行程の濃度変化を解析することによりそのメカニズムを解明した。

本年度は超高速F I Dを用いて、実車搭載用の天然ガスエンジンの過渡運転時における排出傾向を把握した。その結果、加速における変速時に高濃度のH Cが排出されており、これは大きな燃焼サイクルの変動によるものと思われる。混合気濃度の変動によるNO xのピーク状の排出が見られることから、実用上では、負荷、回転速度の変動が伴う過渡運転時における対策が重要と考えられる、等が明らかになった。

## 5 . 成果の対外的発表等

( 1 ) 論文発表 ( 論文掲載済、または査読済を対象。 )

「液化天然ガスを用いた貨物自動車用機関の技術評価に関する研究」

平成 13 年度環境保全研究成果集, (2002.8)

「天然ガス機関から排出される未燃H C 生成機構の解析」

交通安全環境研究所報告第 2 号 平成 14 年 11 月, (2002.11)

「高温高圧場におけるC N G噴流の可視化と解析」 自動車技術会論文集, (2004.1)

「コモンレール式DME噴射系を用いた圧縮着火機関の燃焼改善(噴射圧力の影響)」

交通安全環境研究所報告, 第 5 号, 平成 16 年 2 月

「ジメチルエーテル圧縮着火機関における燃焼改善」

( 噴射圧力の高圧化による性能向上 ) 自動車技術会論文集、(投稿中)

( 2 ) 口頭発表 ( 発表済を対象。 )

「Combustion of Mixtures of Natural Gas and Hydrogen Containing producer Gas in a SI Engine」

日本機械学会東北支部第 37 期総会, (2002.3)

「Analysis of Mechanism causing UHC Emissions from Natural Gas Engines」

自動車技術会講演会前刷集 No.49-02 (2002.7), p1-4

「Analysis and Visualization of Compressed Natural Gas Spray under high Temperature and Pressure Conditions」 自動車技術会講演会前刷集 No.77-02 (2002.11), p19-22

「高温高圧場におけるC N G噴流の可視化と解析」 交通安全環境研究所研究発表会 No.23(2002.11), p163-167

「ジメチルエーテル圧縮着火機関の燃焼改善 ( 噴射圧力の影響 )」

自動車技術会講演会前刷集 No.62-03 (2003.9), p1-4

「DMEを燃料とするクリーンディーゼルエンジンの研究開発」

交通安全環境研究所研究発表会, No.3(2003.12), p129-160

( 3 ) 特許等の出願件数

なし