

持続可能なモビリティ技術の研究

研究代表者 草鹿 仁
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

近年、温室効果ガスの大量排出に伴う地球温暖化の悪化が問題視されている。また自動車の排ガス問題の解決策として期待されていた電気自動車においても大容量バッテリーを製造時に多量のCO₂を排出すること、輸送用大型自動車においては航続距離不足に悩まされているなど課題が浮上した。これらを考慮し、現状より高効率で排ガスがクリーンな内燃機関の開発は急務と言える。そこで、環境対応車及び高効率熱機関の開発、性能評価、情報技術などを通じてこれらの諸問題の解決方法を追求し、その成果を社会に還元することを目標としている。本研究では、特にCO₂排出削減効果が期待されるCH₄-H₂混合燃料を用いた内燃機関に着目し、その実用化に向けた課題である異常燃焼の抑制を目的とした。今回は特に、過早着火の発生要因として知られるシリンダ内の飛散潤滑油液滴が燃焼に与える影響を調査した。

2. 主な研究成果

2.1 実験装置

予燃焼室式機関におけるCH₄-H₂混焼時に生じる過早着火、特にシリンダ内へ飛散した潤滑油液滴による自己着火の発生条件を解明するため、ヘッド部にインジェクタを取り付けて潤滑油を噴射することによって飛散液滴を再現できるようにした急速圧縮膨張装置(以下、RCEM: Rapid compression and expansion machine)を用いて実験を行った。RCEMの概略図を図1に示す。

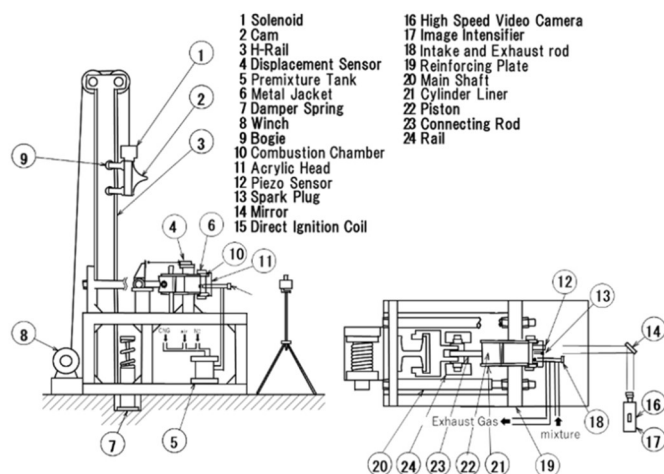


Fig.1 Schematic of RCEM

2.2 実験条件

まず、シリンダヘッド部に予燃焼室を追加し、等価機関回転数を800 rpmとして、燃料のCH₄-H₂混合率や空気過剰率、潤滑油の噴射量を変更することでそれらの影響を調査した。具体的な実験

条件を、表 1 に示す。次に、油のグループの違いが過早着火に与える影響を調査するため、表 2 に示す各種潤滑油を用いて燃焼試験を行った。なお、今回の試験では予備試験で添加剤の有無による影響が確認されなかったため、添加剤の影響を無視できるものと仮定した。

Table1 Experimental conditions (lubricant ignition and premixture parameter change)

Case name	Lubricant mass			H ₂ /CH ₄ ratio		Excess air ratio	
	Baseline	1	2	3	4	5	6
Initial pressure kPa	180	180	180	180	180	162	200
Excess air ratio (fuel)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.6	2
Initial temperature K	314	314	314	314	314	314	314
H ₂ /CH ₄ ratio vol.%	25/75	25/75	25/75	50/50	0/100	25/75	25/75
Heat input (fuel) kJ	5.88	5.88	5.88	5.90	5.86	5.88	5.88
Injection duration ms	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
Injection lubricant mass mg	2.10	4.57	1.27	2.10	2.10	2.10	2.10
Heat input (Lubricant) J	92.4	201.08	55.88	92.4	92.4	92.4	92.4
Lubricant energy ratio %	1.55	3.31	0.941	1.54	1.55	1.55	1.55

Table2 Features of various lubricant oils used for combustion test

Base oil group	I	II	III ①	III ②	V
Base oil	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Synthetic oil
Features	Baseline	Hydrotreating Low viscosity index	Hydrocracking High viscosity index	Hydrocracking High viscosity index	Ester

2.3 RCEM による燃焼実験結果

RCEM を用いた燃焼試験では、まず、各種条件において燃焼過程でのシリンダ内圧力を測定し、熱発生率 (RHR) を算出することで、潤滑油噴射量、水素混焼率、空気過剰率を変化させた際の過早着火の発生のしやすさを評価した。各条件を変更した場合の結果を図 2～図 4 に、熱発生開始時のクランク角と 1 段目の RHR のピークの比較図 5 に示す。なお、図中の黒い破線は一部の商用エンジンで採用されている -8.5 deg. ATDC の火花点火タイミングを示す。

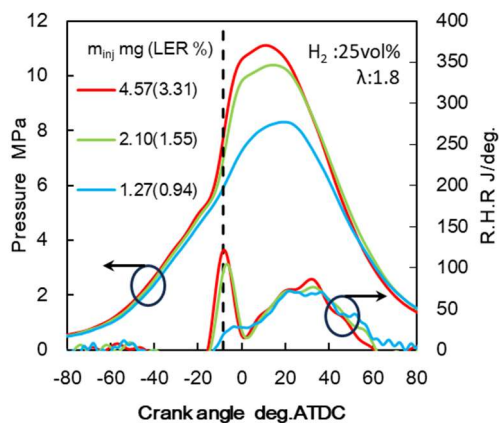


Fig.2 Impact of lubricant injection mass on histories of pressure and RHR of lubricant droplet combustion

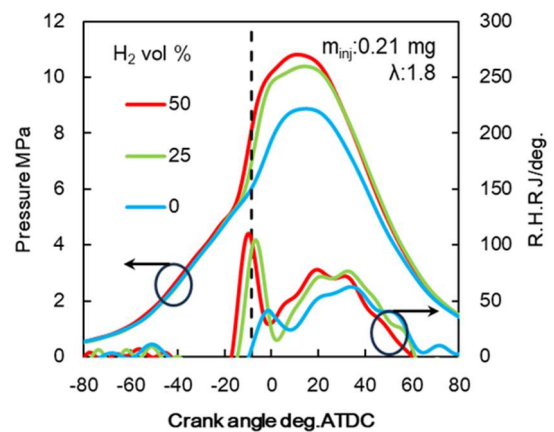


Fig.3 Impact of H₂ vol% on histories of pressure and RHR of lubricant droplet combustion

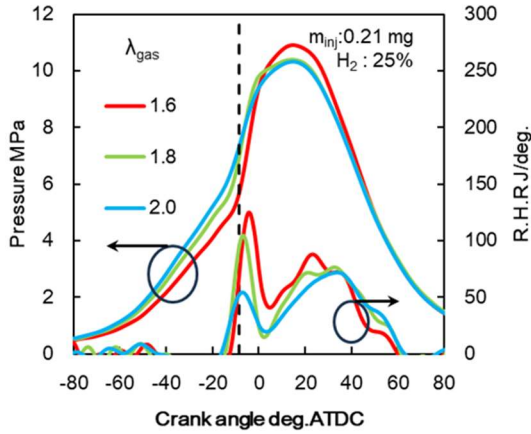


Fig.4 Impact of excess air ratio on histories of pressure and RHR of lubricant droplet combustion

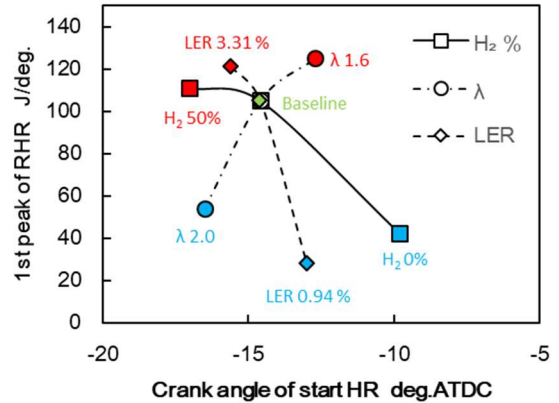


Fig.5 Comparisons of crank angle of start HR and 1st peak of RHR when conditions are changed

これらの結果から、潤滑油による自着火は、商用エンジンの火花点火時期よりも早く熱発生が開始していることから、飛散した潤滑油液滴が過早着火のリスクとなり得ることが確認された。また、潤滑油噴射量および水素混焼率の増加は熱発生の開始時期を進角化し、1段目の熱発生のピーク値も増大することが確認された。一方で、空気過剰率の増加は着火熱発生の開始時期を進角化するが、1段目の熱発生のピーク値が小さくなることが分かった。このことから、空気過剰率の条件は負荷等の運転条件に応じた最適化を要すると推測される。

次に、基油のグループが異なる潤滑油を用いて試験を行い、その違いによる燃焼への影響を調査した。試験結果を図6、図7に示す。グループⅢ①のオイルでは、熱発生率の1段目ピークが170J/deg.程度と他のオイルよりも大きい値となった。一方でエステル系の潤滑油であるグループⅤのみ熱発生開始時期が-10deg.ATDCと大きく遅角し、1段目の熱発生率のピークが確認されなかった。したがって、グループⅢ①の潤滑油には燃焼を促進する要因が、グループⅤの潤滑油には燃焼を抑制する要因があると考えられる。金属添加剤が水素-メタン混合燃料下での燃焼に影響せず、グループが同一の潤滑油でも差異が生じることから、その要因は潤滑油に含まれる炭化水素の組成の違いによるものと推察される。

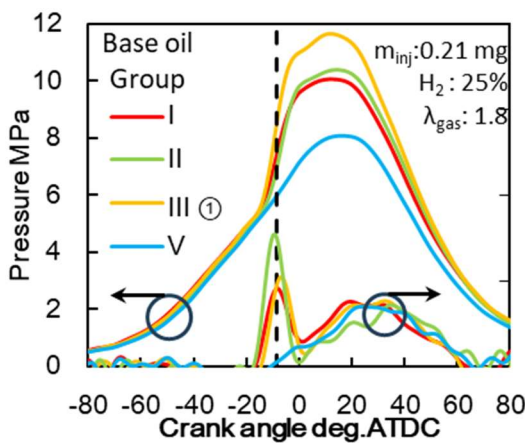


Fig.6 Impact of base oil group on pressure and RHR of lubricant droplet combustion

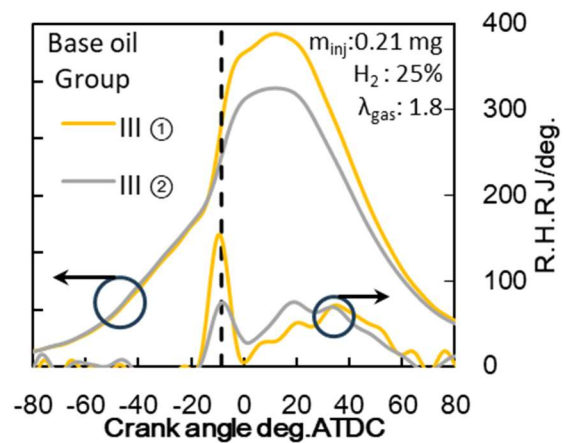


Fig.7 Comparisons of histories of pressure and RHR of group III oils

2.4 大気圧化学イオン化法 (MS-APCI) を用いた潤滑油の質量分析

燃焼試験で使用した各種潤滑油について、過早着火に影響する成分を特定するため、MS-APCIを用いて質量分析を行った。各潤滑油の質量分析結果を図8に示す。

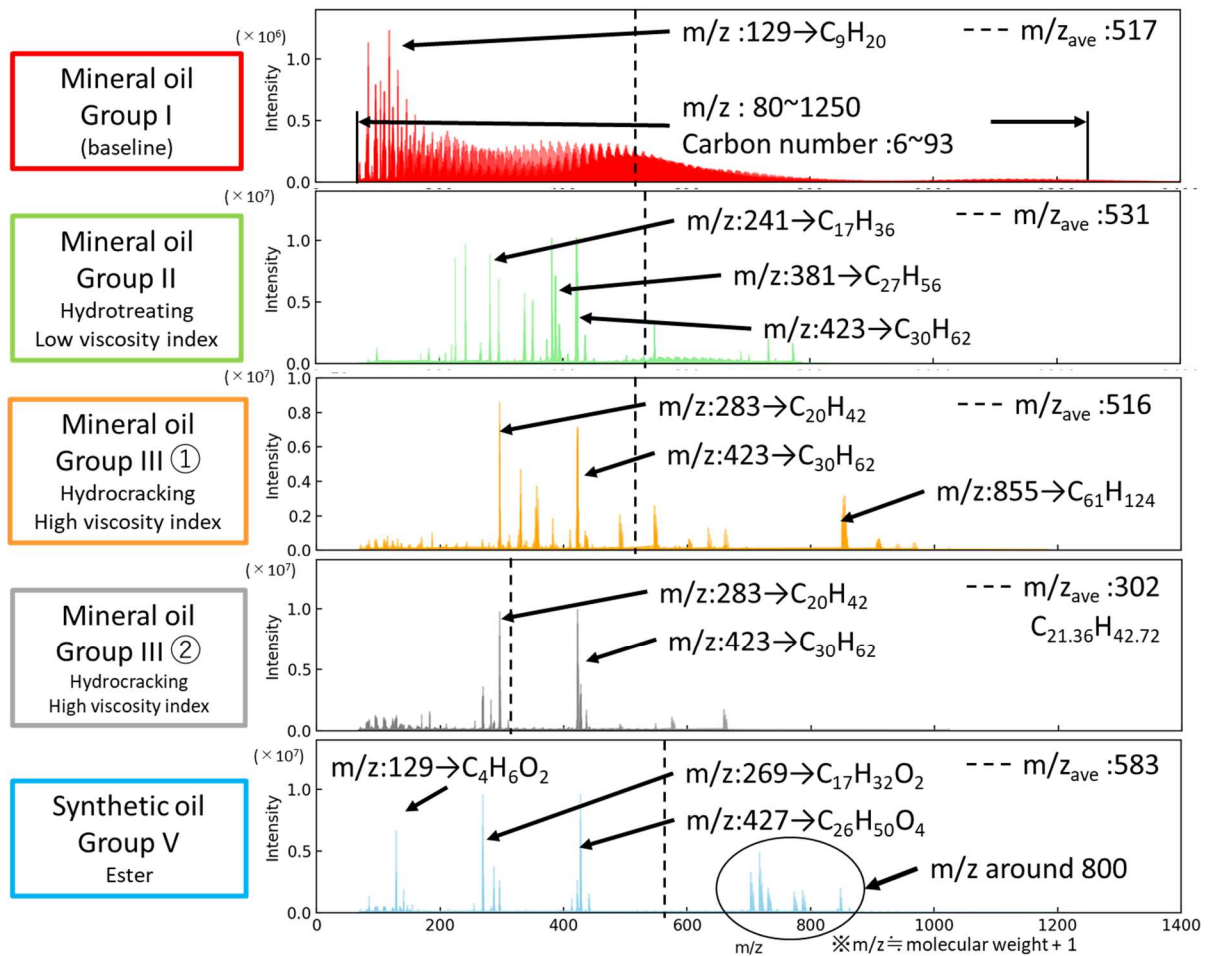


Fig.8 Impact of excess air ratio on histories of Pressure and RHR of lubricant droplet combustion

グループ I の基油を用いたオイルでは、精製度の低さから含まれる炭化水素の炭素数が 6~93 とばらつきが大きいことが確認された。次に、グループ II, III 精製度の上昇に伴い検出される炭化水素の m/z ピークのばらつきは減少することが確認された。一方で、グループ III ①の基油を使用した潤滑油については、 m/z 800 付近にピークが検出された。また、グループ V の基油は合成油であることからマススペクトルの検出ピークのばらつきは少なかった。また、検出されたピークが m/z 800 付近にも位置することから炭素数の大きいエステルを含むと考えられる。グループ III ①の潤滑油には熱分解を生じやすい高炭素数の炭化水素が含まれることによって、熱発生率の 1 回目のピークが高まったと推測される。またグループ V の潤滑油に関しては、グループ III ①の潤滑油と同程度の分子量の炭化水素成分を含有するにも関わらず、潤滑油自体の着火および気体燃料への引火が遅角化している。したがって潤滑油の過早着火の抑制効果があると推察される。これは極性分子であり蒸発しにくい点や、エステル結合を持ち直鎖のアルカンと比較して熱分解に高い耐性を持つ点がその要因になっていると考えられる。

3. 共同研究者

Ratnak Sok	(早稲田大学・研究院准教授)
江利川 透磨	(草鹿研究室・修士)
楊 溢	(草鹿研究室・修士)
中尾 隆太	(草鹿研究室・学士)

4. 研究業績

4.1 学術論文

2026年10月(公社)自動車技術会秋季大会で発表予定、およびSAE Journal (Engine) に投稿予定

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

なし

5. 研究活動の課題と展望

試験結果から、潤滑油に含まれる炭素数 61 の高炭素数成分による着火後の燃焼の促進効果が確認されたが、着火時期が変化していないことから、過早着火のトリガーとなる成分は炭素数 20~40 といった中程度の成分であることが予想される。したがって、幅広い炭素数の成分を含む潤滑油ではなく、単一の炭化水素成分を噴射した際の燃焼試験を行い、初期の着火に支配的となる成分の特定が必要である。加えて、エステル系の成分を含む潤滑油において過早着火の抑制効果があることが確認された一方で、エステル系の潤滑油にもジエステル、ポリオールエステルといった種類があるため、各種のエステル系潤滑油の燃焼試験を行い、より過早着火の抑制効果の高い成分を特定すべきである。さらに、過早着火をより効果的に抑制するためには、過早着火の予測モデルが必要となる。そのため、三次元数値熱流体計算を用いたシミュレーション上で潤滑油液滴による過早着火を再現できる反応機構の構築を要する。

また、運輸交通問題の解決には機械工学以外にも電気工学、環境工学、情報通信技術、運輸交通システムや人間工学など多くの分野における研究成果が必要である。今後はさらに厳しくなる環境規制、燃費規制を意識し効率向上及び電動技術との連携、排気ガスのクリーン化を目指し有効な技術の評価を行っていきたい。