

水素内燃機関のトライボロジーと信頼性に関する研究の取り組み

Introduction of research on tribology and reliability issues of hydrogen engines

都市大・総研（正）*三原 雄司

Yuji MIHARA*

*Tokyo City University (TCU)

1. はじめに

水素(H_2)やアンモニア(NH_3)等のカーボンニュートラル(CN)燃料を用いた内燃機関の研究開発が進むにつれて、熱効率向上や NO_x の低減、高負荷領域での異常燃焼の抑制が課題となる。加えて、各しゅう動部品の摩擦・摩耗特性、潤滑油の燃料希釈や凝縮水の混入も顕在化している。水素内燃機関に注視すれば、都市大では1970年以降、予混合～10MPaの直接噴射式の水素内燃機関の研究を進めてきたが、近年の2～5MPaの噴射圧力による燃焼研究とその実用化研究に繋がり、近年は燃焼性能や異常燃焼(Fig.1 参照)の要因解明のみならず、水素特有の高水蒸気分圧の燃焼ガスやブローバイへの水素混入、凝縮水発生とオイル劣化、油膜破断(損傷・焼き付き(Fig.2 参照))などの研究を進めている。ここでは水素内燃機関に起因する課題と本学で研究推進している内容を中心にいくつか紹介したい。

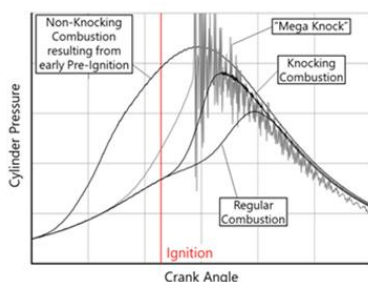
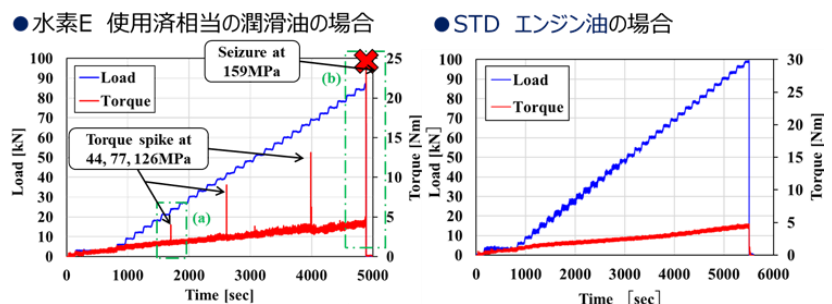


Fig. 1 Abnormal combustion in hydrogen engines under high load¹⁾



(a) W/ Oil deterioration

(b) W/O Oil deterioration

Fig. 2 Effect of oil deterioration on journal seizure characteristics

2. 燃焼が潤滑油に与える影響の課題

2.1 水素燃焼に起因する課題

燃焼起因の課題は、燃焼ガスやブローバイ(BBY)への水素混入と潤滑油の性状変化、シリンダ壁温と凝縮水発生機構、凝縮水が潤滑油へ与える影響、凝縮水混入がエンジンの各摺動部の摩擦・摩耗・焼き付きへ与える影響、LOC(オイル消費)/LOE(オイル蒸発)特性などが主な課題と考える。今後は、カーボンスラッジが無い燃焼による潤滑油添加剤設計と摩擦/摩耗/焼き付きリスク、水素エンジンで得たオイル性状でのトライボの基礎特性、運転条件とBBY中の水素割合計測、BBY中の水素や水分の分離/活用、シリンダ壁温と凝縮水発生量把握、スラッジが無い前提のピストン/リング設計、専用潤滑油と摺動面の表面処理等の研究が必要と思われる。

2.2 凝縮水が潤滑油へ与える影響の研究例

2.2.1 実験装置

都市大で実施された研究例を紹介する。供試機関は排気量 550 cc の単気筒エンジンで潤滑油は SAE 0W-30 とした。シリンダ壁温はモータリングでは 20℃一定、ファイアリングでは 40℃一定とし、高温側では 80℃一定とした。各条件の運転時間は 3 時間を基準とし、その後は 6 時間ずつ実験時間を延長し最大 30 時間とした。

2.2.2 実験結果

Fig.3 は壁温が 40℃の時の潤滑油中の水分割合(wt%)の結果で、新油と比べてモータリング運転では 0.05(wt%)でほぼ同じだったが、ディーゼル燃焼では約 1.2 倍、水素燃焼では 20～30 倍となった。Fig.4 は壁温を 40℃一定で水素燃焼させ、3 時間毎にオイルサンプリングを行い、合計 30 時間稼働した際の各オイルの外観の変化で、運転時間に応じたオイルの白濁が確認でき、水分量は実験時間にほぼ比例して増加した。Fig.4 のオイルをしばらく放置すると、Fig.5 のように上澄みの油分と白色の沈殿物に分離した。上澄みの油分の動粘度は新油と大きく変わらず粘度指数は約 10%増加し、酸価は若干の増加が見られ、塩基価は約 25%減少した。元素分析の結果では、沈殿物には清浄剤や ZnDTP 由来の成分が含まれていることが分かった。水分量は上澄みのみの場合は 0.03mass%で新油に比べて 30 倍程度の増加であったが、上澄みと沈殿部分を再攪拌した場合は 10mass%を超える水分量となった、

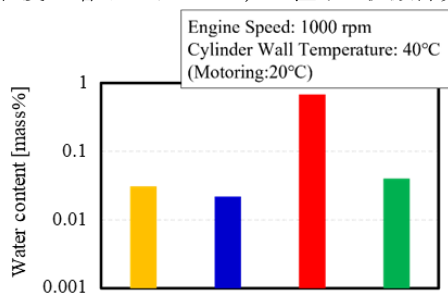


Fig.3 Water content in oil²⁾

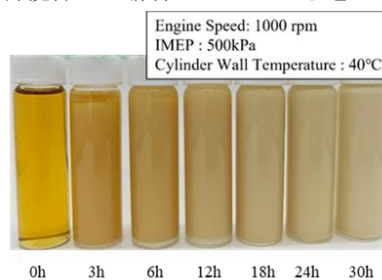


Fig.4 Appearance of lubricating oil over operating time²⁾



Fig.5 Observations of lubricant after experiment²⁾

3. 水素エンジンの燃焼に関する潤滑課題

3.1 水素エンジンのブレイグ 水素を吸気管内に供給する予混合方式と筒内に直接水素を供給する直噴方式がある。高負荷運転時の課題として、バックファイアやブレイグニッションなど異常燃焼があるが、ブレイグニッションの発生要因として、点火プラグの異常放電や点火プラグの接地電極によるホットスポット、近年には潤滑油起因による発生も示唆されている。そのため、多様な計測技術を活用し発生要因を切り分け、発生条件を把握する必要がある。

3.2 潤滑油が起因となる事例

過給ダウンサイジングエンジンは低速での高過給化が求められるため低速ブレイグニッション(LSPI)が課題となる。潤滑油起因に注目すると、直噴ガソリンエンジンでは燃料噴霧がシリンダーライナーに付着し、ここでしゅう動面の潤滑油と混合して液滴となり、燃焼室に飛散することが要因と報告されている^{3),4)}。潤滑油起因の場合は金属系清浄剤である Ca と Mg の配合比率が LSPI の改善要因になるなど報告されるが、水素エンジンの異常燃焼でもガソリン機関と同様に潤滑油起因の異常燃焼の可能性が各企業や研究機関から示唆され、研究が開始されている(Fig.6 参照)。

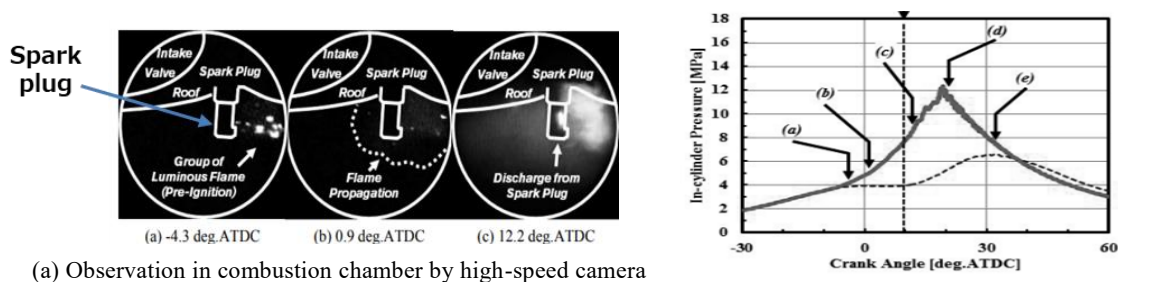


Fig. 6 Visualized In-cylinder Phenomenon of LSPI (1st abnormal cycle)⁵⁾ (b) Pressure profile of LSPI (1st cycle)⁵⁾

4. 水素脆化へのアプローチ

水素内燃機関を検討する上で、懸念される現象に水素脆化がある。水素エンジンの潤滑では、様々な水素燃焼方式特有の現象の把握が必要となる。高水蒸気分圧の燃焼ガスが燃焼室壁面で燃焼室を構成する部品に接し、長時間の経年変化で Fig.9 のような水素脆化を引き起こすことが懸念事項となる。水素脆化とは、金属が水素を吸蔵することで靱性が低下して脆くなる現象である。特徴として金属中の水素は、結晶粒界や格子欠陥、亀裂の先端や母相-介在物界面等に捕捉され易い特性を持つため、①水素を燃焼したテストを繰り返しながら、エンジン部品を観察し、経年劣化による水素脆化を観察する(長期的計画 Fig. 7,8 参照)、②水素脆化を疑似的に起こし、その状態を詳細に観察する、③表面の色変化を彩色計で計測し、巨視的に水素脆化を捉えてエンジン部品の状態を管理する方法などを計画している。



Fig.7 Combustion chamber parts exposed to hydrogen gas, such as pistons and piston rings used in hydrogen engines



Fig.8 Color change of piston surface due to hydrogen combustion

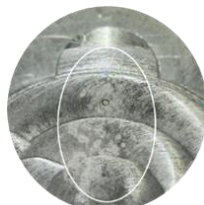


Fig.9 Hydrogen embrittlement type peeling formed near the shallow surface layer⁶⁾

おわりに

水素燃料の場合はカーボンスラッジ等は激減し、見た目は新油の状態を維持する。このため、自動車用潤滑油の添加剤の検討も必要と感じている。各産業分野/企業独自の水素エンジンの開発が進み、上述した潤滑油に起因する異常燃焼や水素脆化の要因の解明について、個別もしくは共通のトライボロジーの課題と合わせて推進したい。

文献

- 1) Ralf M. et al : Component and Combustion Optimization of a Hydrogen Internal Combustion Engine to Reach High Specific Power for Heavy-Duty Applications , 2023 JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, 2023-32-0038
- 2) 三原雄司他 : 混合水素エンジンの運転条件とシリンダ壁温の違いが潤滑油中の凝縮水割合に与える影響, 自動車技術会 2024 春季大会, 文献番号 20245283(2024)
- 3) Dahnz, C. et. Al.: Investigations on Pre-Ignition in Highly Supercharged SI Engines, SAE Paper 2010-01-0355(2010)
- 4) 越後亮他 : 過給直噴ガソリンエンジンにおけるブレイグニッションのメカニズムに関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.4, P763-768(2015)
- 5) 葛西理晴他 : 過給直噴エンジンにおける Low Speed Pre-Ignition の突発的発生メカニズムの解析, 自動車技術会論文集, Vol.46, No5, September 2015
- 6) 木南他 : 浸炭及び浸炭室材の水素脆性型転動疲労強度に及ぼす微細析出物の影響, 電気製鋼, 第 81 巻, 2 号 (2010)