

水素エンジンの燃焼とトライボロジーにおける課題 Hydrogen Engine Combustion and Potential of tribology Issues

都市大・総研（正）*三原 雄司

Yuji MIHARA*

*Tokyo City University (TCU)

1. はじめに

高出力密度の内燃機関の有用性は現時点でも非常に高く、カーボンニュートラル(CN)の実現に向けて更なる熱効率の向上やゼロエミッションが要求されている。燃焼に伴う CO_2 の削減には合成燃料(e-fuel 含む)やメタノール、及び水素やアンモニアなどが産業機械や発電機、及び輸送用機器を対象として実用化の可能性に向けて研究開発が進んでいる。本学で長年研究を続ける水素エンジンには予混合式や直噴式等の燃料供給方法があり、直噴式の場合は加えて燃料噴射圧力や時期なども使用用途に応じたエンジン性能や NO_x などの排ガス特性、及びブローバイ中水素などにおいて重要となる。2020 年頃から活発化した実用化に向けた開発は、上述の性能向上に加えてトライボロジー上の課題等も最近注目され、水素燃焼特有の高水蒸気分圧の燃焼ガスが、燃焼室壁面近傍で凝縮水となり、潤滑油に混入する現象の研究も進められている²⁾。従来の研究では摩耗が多いとも言われ、潤滑油への混入量が炭化水素系燃料よりも非常に多い場合は潤滑油の劣化が懸念される。加えて水素エンジンのブローバイガス中の水蒸気が潤滑油に与える影響等の懸念もあるが、具体的な研究例はない。本研究では、水素エンジンの開発動向に加え、燃焼で発生する高水蒸気分圧の燃焼ガスと壁温の設定が潤滑油の水分量に与える影響などについて、実験で得られた傾向も含めて紹介する。

2. 開発の動向

日本においては 8t 以上の商用車の水素エンジンの可能性も示唆され、環境省でも 5t クラスのディーゼルエンジンのコンバージョン式の予混合式水素エンジンの開発助成も行われた。産業界でもその取り組みのスピードは早く、ハンドヘルド用の小型 2 ストロークエンジンから大型の発電機や船舶用までの開発動向が発表されている。欧州でも小型商用車から 10000 cm^3 を超えるトラック・発電機用まで様々な用途向けの研究開発が進むが、当初の予混合型(Fig.1 中 MPI: Multi-port injection 噴射圧力 0.1~0.6MPa)での開発は、エンジンの使用用途に依るが、出力特性に加えて異常燃焼となるブレイクニッションや NO_x に課題が残る、1~6MPa の筒内直接噴射へ開発の主体が移っている(Fig.1 中 Low pressure DI)。開発の課題は特に水素を車載する場合の燃料の効率的な利用や噴射弁の耐久性が懸念事項で、このような課題がクリアになればより熱効率向上が見込める 10MPa を超える高圧燃料噴射に移る可能性もある。

3. トライボロジーの課題

現時点では機関性能向上の開発途中が多く、実用化に相応できるエンジンの信頼性に関わる具体的な課題への報告は少ない。従来からの項目を列挙すれば燃焼ガスやブローバイ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、オイル性状変化や凝縮水混入がエンジンの各摺動部の摩擦・摩耗・焼付きへ与える影響、LOC(オイル消費)/LOE(オイル蒸発)特性などが主な課題とされる。なお、現状での主たる課題は様々なボア径でのブレイクニッションの要因究明などが主流で、上記の報告例はほとんど無い。一方、カーボンスラッジが無い燃焼による潤滑油添加剤の設計、特に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は重要で、運転条件とブローバイ中の水素割合計測、ブローバイ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は、ピストン/ピストンリング/シリンダ表面の摺動面設計にも影響を与える可能性もあり、焼付きリスクの高い滑り軸受の摺動特性も重要になる。

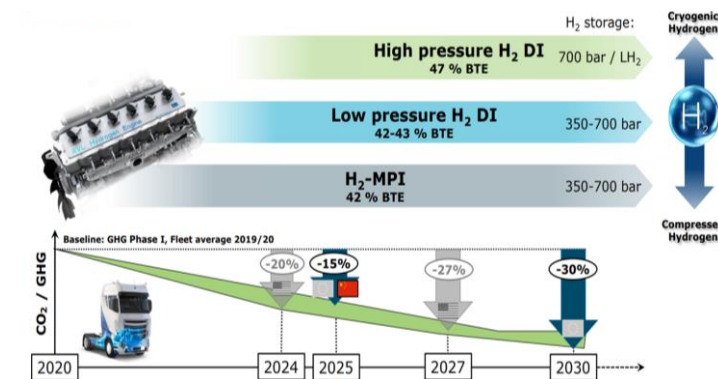


Fig.1 Tendency of hydrogen engine toward 2030¹⁾

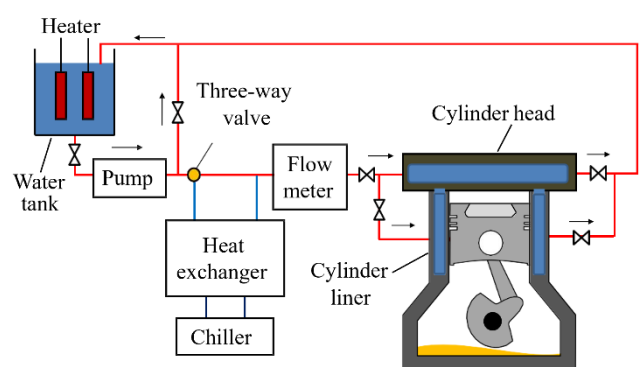


Fig.2 Cooling water system for test H₂ & DI engine

4. 研究事例

4.1 凝縮水の発生と潤滑油の成分性状 シリンダ壁面温度と潤滑油中の水分量の相関の把握を目的とし、Fig.2 のようにシリンダ壁温を 20℃から 80℃まで設定できる冷却水回路を排気量 550cm³の単気筒エンジンに設置した。また、このエンジンでは軽油直噴のディーゼル燃焼と、吸気ポートに水素噴射弁を設け、燃焼室にスパークプラグを取り付けた予混合水素エンジンの2つの燃焼方式が取れるようにした。実験毎の吸入空気中の水分量は 0.4%に調整し、レギュレータで調整して吸気管に 0.4MPa で水素を供給した。その他、未燃水素の把握や NOx 他の排ガスの分析計を設け、ブローバイ量の計測とこのガス中の水素量を水素濃度計で計測した。潤滑油は SAE 粘度グレード 0W-30 とした。

4.2 壁温の違いによる凝縮水の変化例

Fig.3 は壁温が 80℃と 40℃の時のモータリング・水素燃焼・ディーゼル燃焼時の潤滑油中の水分割合の分析結果である。壁温 80℃の場合は、水素燃焼では新油とほぼ変わらず、モータリングとディーゼル燃焼では新油に比べて 80%程度となったが、基本的にはばらつきの範囲と考える。一方、壁温が 40℃では、新油とモータリング運転ではほぼ同じであったが、ディーゼル燃焼では若干の水分割合が高く、水素燃焼の条件では実験結果のばらつきも含めると新油に比べて 20~30 倍となった。即ち、低温下では水素燃焼では軽油よりもオイル中の水分増加が明確となった。

4.3 壁温の違いとブローバイガス量及びブローバイガス中の H₂ 濃度

Fig.4 はシリンダ壁温の違いがブローバイ量に与える影響で、80℃の場合は約 0.5L/min だったが、40℃になると 1.2L/min と倍増した。この結果をもとにブローバイ中の H₂ 濃度を調べた結果、Fig.5 のように 80℃の場合の 6vol%だが、40℃の時は 10vol%に増加した。ブローバイ中の H₂ 濃度の増加は未燃水素を増大させ最大 1%の熱効率低減に相当する報告もある。また、3.2 で述べた燃焼室壁面で冷却された水蒸気による凝縮水による乳化に加えて、ブローバイ中に含まれる水蒸気による影響も考えられる。

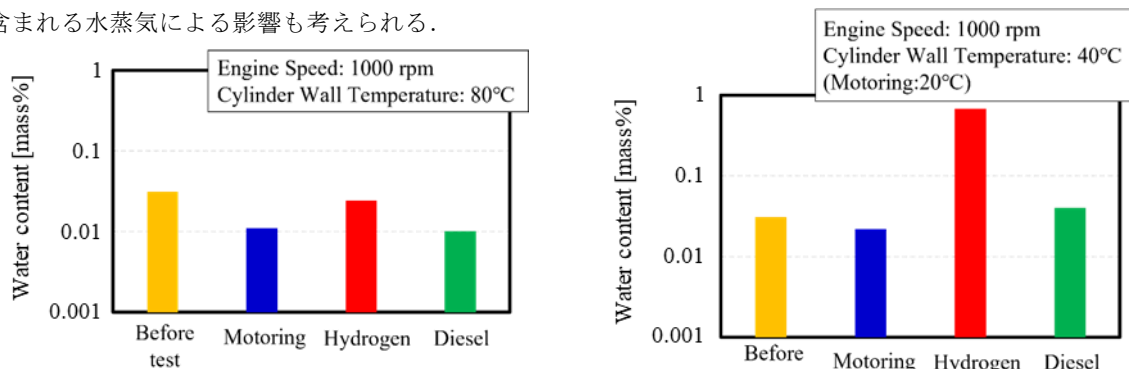


Fig.3 Comparison of water content in oil under different engine operating conditions and cylinder wall temperatures²⁾

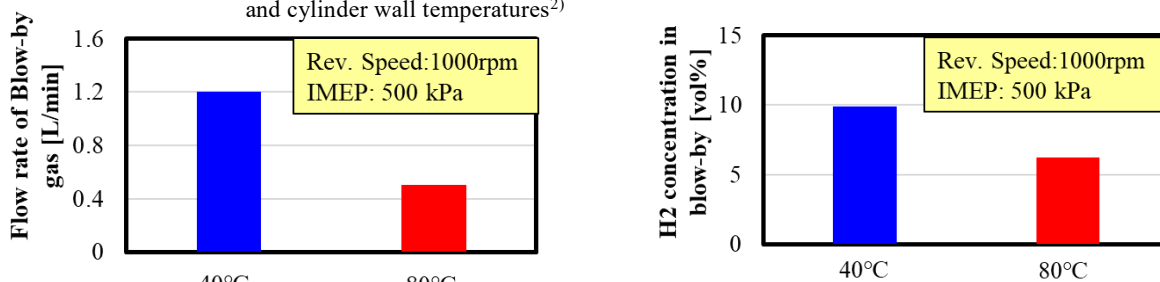


Fig.4 Blow-by gas flow rate at different cylinder wall temperature

Fig.5 Relationship between cylinder wall temperature and H₂ concentration in blow-by gas

5. おわりに

本稿では水素燃焼エンジンでの実験事例を紹介した。本学の経験でもディーゼル燃焼の場合と比べて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。一方、壁温が 50℃以下の状態での運転を繰り返すと潤滑油の白濁や沈殿物は明らかに増加する。現時点ではトライボフィルム形成で重要な添加剤の成分変化を継続して調べているが、予混合/直噴等でも異なる可能性もあり、燃焼状態とトライボロジー上の課題を今後も継続して明らかにしたい。

6. 謝辞

この成果は、AICE「自動車用内燃機関技術研究組合」との共同研究事業の成果です。関係者各位に深く感謝します。

文献

- 1) Reliability Solutions for Hydrogen Internal Combustion Engines, The 10th International Conference of ICE Reliability Technology, (2021)
- 2) 三原雄司他：予混合水素エンジンの運転条件とシリンダー壁温の違いが潤滑油中の凝縮水割合に与える影響,自動車技術会春季大会前刷集(2024)