

## 水素エンジンの潤滑課題

### Potential of Tribology Issues for Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines

都市大・総研（正）\*三原 雄司

Yuji MIHARA\*

\*Tokyo City University (TCU)

#### 1. はじめに

燃料電池はもとより、ガスタービンや往復動機関等への水素利用の研究開発が加速している。第6次エネルギー基本計画に於いて8t以上の商用車の水素エンジンの可能性も示唆され、欧州でも2030年に向けて直噴型水素エンジンの実用化を目指す動向が多い（Figure 1参照）。一方、水素燃焼の基礎特性やエンジン性能の報告は多いが、実用化に向けた耐久性や信頼性の報告は非常に少ない。本稿では水素エンジンの潤滑課題の可能性をいくつか紹介したい。

#### 2. トライボロジーの課題

水素特有の燃焼に基づき、①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、②シリンダ壁温と凝縮水発生機構、③凝縮水が潤滑油へ与える影響、④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、⑤LOC(オイル消費)/LOE(オイル蒸発)特性などが主な課題と考えるが、研究報告例はほとんど無い（凝縮水発生防止のシリンダ壁温の対策の特許などは散見される）。今後は、⑥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/焼付きリスク、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（Fig.2参照）、⑦運転条件とBBY中の水素割合計測、⑧BBY中の水素や水分の分離/活用、⑨シリンダ壁温と凝縮水発生量把握、⑩スラッジが無い前提のピストン/リング設計、⑪専用潤滑油と摺動面の表面処理等の研究が必要と考える。

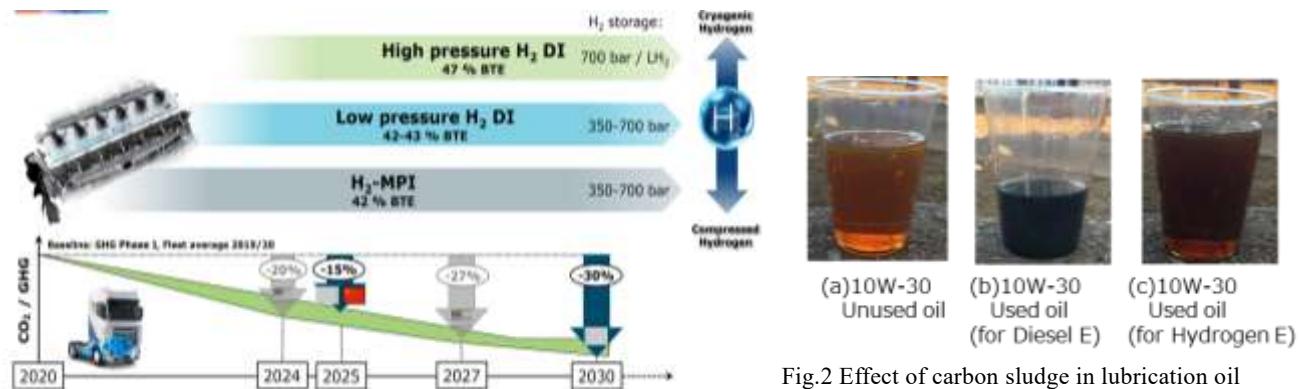


Fig.1 Tendency of hydrogen engine toward 2030<sup>1)</sup>

Fig.2 Effect of carbon sludge in lubrication oil  
(Collected from TCU engine)

#### 3. 先行研究

**3.1 AVL社(オーストリア)の事例** 水素エンジンは特に重量車での応用とし、コスト的にも天然ガスエンジンと同等になると見込んでいる。また、懸案の高負荷領域でもシステム効率を確保できるとし、低純度水素に対する耐性と短期での市場への展開が可能としている。一方で改善課題も示しており、Fig.3に示すようにディーゼル/天然ガス燃料に対して異常燃焼(バックファイア等)が多く、トライボロジー関係ではオイル消費・水素を含んだBBY・インジェクターの耐久性、次いで排ガス水分の増加やバルブシート摩耗等が水素エンジン開発で注視すべき内容となっている。

**3.2 シティバス用エンジン(Gent Univ.)** シティバス(全長8m)への搭載を目的とし、90kWでトルク300Nm以上の出力を目標としている(Fig.4)。実用化に向けた検証項目のうち、潤滑油に関してはTable 1のようにクランクケース内の大幅な水素の増加が確認され、摩擦調整剤や耐摩耗剤(ZnDTP)が大幅に減少し、粘度上昇や粘性係数の低下が報告されている。要因は水素を含んだブローダウンガスとされ、クランクケース内ガスの強制換気とオイルセパレーターが提案されている。水素エンジン用の特殊なエンジン潤滑油も必要とされている。

**3.3 都市大の研究経験から** 本学における水素自動車開発(自動車用多気筒/研究用単気筒)の研究資料から耐久性に関する記述のみを取り上げた(Table 2参照)。トライボロジーの課題は主に高圧噴射弁のシールや液体水素ポンプの摺動部が多いが、エンジン機関部品のトライボロジーではAVLやGent Univ.と同様に水素燃焼で発生する水分が凝縮水となって摩耗や冷間時の潤滑油の白濁等を引き起こす事例が挙げられている。Fig.5は燃料のH/Cモル割合を変えた場合の摩耗量の変化を示す実験結果で、長い研究経験からメタノールの延長線上にあると考察されている。

**3.4 推進しているトライボ研究** 水素特有の潤滑油や、水素エンジンで使用後の潤滑油の分析結果を基にした試作油でのトライボロジー特性、特に滑り軸受を対象とした摩擦トルク変化や摩耗及び焼付きに至るトルクスパイクを調べる研究を進めている(Fig.6参照)。また、水素燃焼時のシリンダ壁温の変化(特に冷間時等)と凝縮水の発生状況に関しては、クランクケース内オイルだけでなく、ピストン各部(1st リング溝/2nd ランド/2nd リング溝)から実働中のオイルを採取して分析することで水素エンジン特有の潤滑油性状の変化要因を探求する研究を進めている(Fig.7参照)。

Failure Mode	Diesel Engine	CH <sub>4</sub> Engine (λ = 1)	H <sub>2</sub> Engine (λ > 1.7)	Main Relevant Engine Subsystems for Development
Irregular Combustion Events	○	>	>>	Combustion Chamber, Piston Group, Ventilation System, Spark Plug, DI-Injector
Oil Input into Combustion	○	>	>>	Piston Group, Ventilation System
Hydrogen Content in Crankcase	n.a.	n.a.	>>	Ventilation System
Durability of Injectors	○	=	>>	Injectors, Cylinder Head, Cooling System
Hydrogen Fuel Supply Components	n.a.	n.a.	>>	Fuel Supply System
Water Content of Exhaust Gas	○	>	>	EAS, Ventilation System
Valve Seat Wear	○	>>	>	Valve, Valve Seats, Cylinder Head
Thermo Mechanical Fatigue - Cylinder Head Cracks	○	>	>	Combustion Chamber, Cylinder Head
Piston Temperature - Oil Coking	○	>	<	Piston Group, Piston Cooling, Cooling System
Durability of Spark Plugs	n.a.	○	<	Spark Plugs

○ Reference for development relevance

Relevance for Development: < Lower > Higher >> much higher

n.a.: not applicable

### Focus on Relevant Engine Subsystems during Hydrogen Engine Development

Fig.3 Reliability solutions for hydrogen internal combustion engines (Relevance of failure modes compared to diesel engine) <sup>1)</sup>

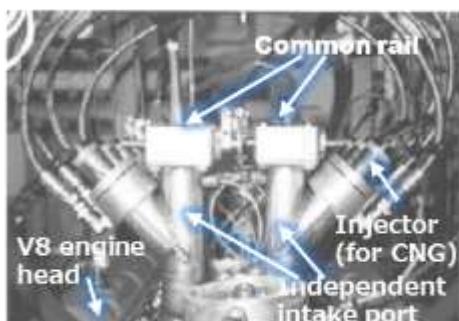


Fig.4 V8 H2 engine <sup>2)</sup>

Table 2 Issue of H<sub>2</sub> engine in TCU

①	Leakage H <sub>2</sub> from injection valve (sealing)
②	Wear of valves and valve seat
③	H <sub>2</sub> gas adheres to cylinder wall and condenses. Occurrence of corrosive wear.
④	Large wear at high output
⑤	Dew point at max. output of H <sub>2</sub> engine (72°C)/ Cooling water temp.(80°C). Appropriate cylinder temp. required
⑥	Lots of moisture in combustion gas, and lubricating oil became cloudy in cold operation.
⑦	Requires cooling water temperature control and newly surface treatment

### おわりに

水素燃料の場合は、本学の経験でも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。今後は各産業分野/企業独自の水素エンジンの開発が進み、個別もしくは共通のトライボロジーの課題が生じると予想する。ガソリンやディーゼル燃料とは異なる課題に対しても、解明に向けて推進したい。

### 文献

- 1) Reliability Solutions for Hydrogen Internal Combustion Engines, The 10th International Conference of ICE Reliability Technology, (2021)
- 2) S.Verhelst, R.Sierens: Hydrogen enginspecific properties, Hydrogen Energy, (2001)
- 3) Takumi Iwata et.al: Excellent Seizure and Friction Properties Achieved with a Combination of an a-C:H:Si DLC-Coated Journal and an Aluminum Alloy Plain Bearing, Coatings,11(9), (2021)
- 4) 中小路他：ディーゼル機関の燃料によるオイルの希釈に関する研究, 第32回内燃機関シンポジウム, (2021)



(a)Injection System (Durability, Reliability)  
Flow late optimization



(b)Cooling of fire deck & Spark plug  
(c)Avoid oil carry over & No edge and corners in combustion chamber  
(d) Optimal piston cooling

Table 1 Hydrogen engine and its tribological problems <sup>2)</sup>

Engine spec.	7400cm <sup>2</sup> V8、Bore-stroke : 107.95×101.6 [mm] Comp.ratio 8.5:1, Rotational speed 700–4000rpm
Fuel supply	0.3MPa (Supplied to each cylinder by common rail. Premixed type with inlet pipe installed in each cylinder)
Tribo. target items	Detail of items by H <sub>2</sub> combustion engine
Gas component in crankcase	High percentage hydrogen confirmation. (+5 Vol% or more. Over range of detector )
Effect on additives	Both friction modifiers and anti-wear agents are reduced. Significant reduction in ZnDTP concentration
Viscosity change	Unused oil : 111.8mm <sup>2</sup> /s(40°C) 14.33mm <sup>2</sup> /s(100°C) After test: 141.9mm <sup>2</sup> /s(40°C), 17.25mm <sup>2</sup> /s(100°C) Viscosity increase in the test
Viscosity index	Decreased from 163 fresh oil to 99 after the test

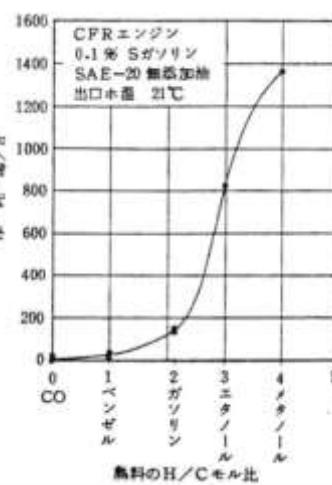


Fig.5 Relationship between fuel H/C molar ratio and wear amount

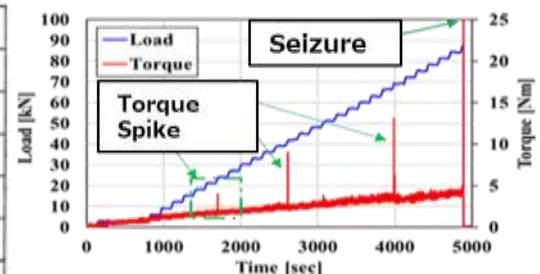


Fig.6 Torque spike and seizure characteristic between engine oil properties <sup>3)</sup>



Fig.7 Direct Oil sampling system from piston ring groove and land <sup>4)</sup>