

ピストンリング解析モデルを使った水素とガソリンエンジンの比較

A Comparison of Hydrogen and Gasoline Piston Ring Simulation

AVL (正) *陰山 俊雄 (非) ステファンリチャードビューシャー (非) ギュンターオフナー

Toshio Kageyama*, Stephen Richard Bewsher**, Gunter Offner**

*AVL JAPAN K.K., **AVL List GmbH

1. はじめに

世界中の政府や議員によって定められた厳しい要求により、地球規模の排出量削減は大きな関心を集め、世界中のエンジニアが関心を寄せている。輸送手段として電気自動車や燃料電池自動車の選択肢が広がってきており、これらの複合的なシステム全体の高効率化だけではなく、性能評価、信頼性の向上、音振動(NVH)の低減といった様々な観点で新たな技術構築が必要とされ、特に自動車およびパワートレイン部門全体で大きな課題を抱えている。一方で内燃エンジン(ICE)と代替燃料技術を組み合わせることでこれまでのICEで確立された技術に基づいたコスト効率の高いパワートレイン開発も進められており、燃料として水素を利用した水素燃料ICEはカーボンフリーモビリティへの移行を実行可能な代替手段の1つとして注目¹⁾されつつ、既存ICEに水素代替燃料を使用する過程で発生する副作用を設計段階で評価し、最適化することが重要²⁾となっている。

そこで本報告ではICEを構成する機械要素の1つであるピストンリングのトライボロジーに焦点を当て、ピストン・ライナー・リングで構成されるガソリン燃料と水素燃料の2つの単気筒ICE数値モデルを作成した。ガソリンと水素の燃焼圧力を使い、数値計算を通してリング・ライナー間の最小油膜厚さ、機械損失(フリクション、パワーロス)、接触圧力およびクランクケースへのガス流れ(ブローバイ)を算出し、これらの違いをガソリンエンジンと水素エンジンで比較した。

2. ピストンリング数値解析モデル

ピストンリングのトライボロジーに関わるデータを計算するために使用した市販の業界標準ツールである AVL EXCITE™ Piston&Ringsを図1に示した。エンジンのピストンとリングの数値モデルを作成し、時間積分ソルバーを使ってリング挙動や摩擦、オイル消費、NVHを評価するためのCAEツール³⁾である。計算モデルとしては流体潤滑モデルと混合潤滑モデルが実装されており、計算モデルで考慮可能な接触状態を図2に示した。さらにガス流れモデルとオイル消費モデルも実装されており、リングパッケージを通過するガス流れ計算を導入するための容積一開口面積を図3に示した。検証事例としては単気筒エンジンテストベッドとの予実比較をした事例⁴⁾がある。

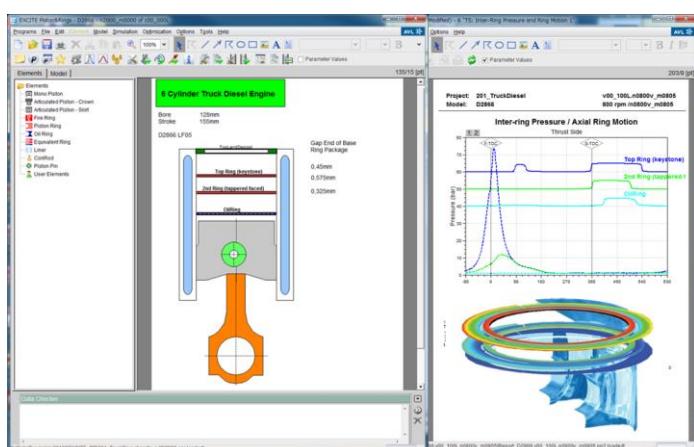


Fig. 1 AVL EXCITE™ Piston&Rings software

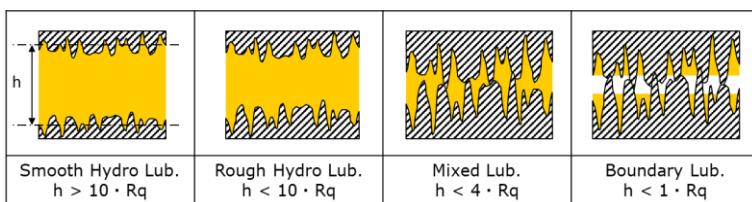


Fig. 2 Elasto-hydro lubricated contact model

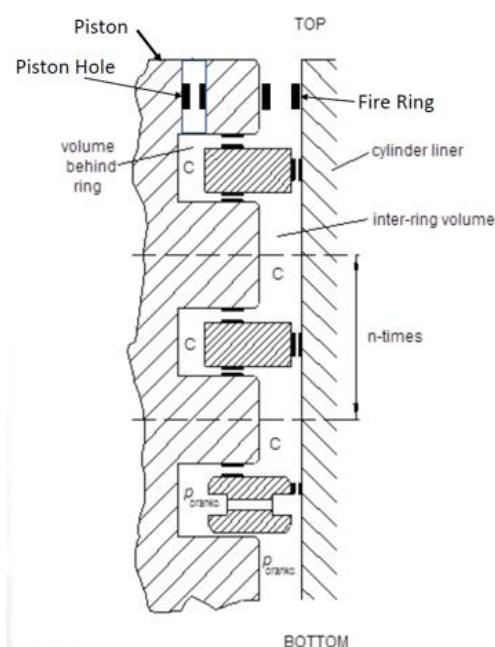


Fig. 3 Gas flow model for ring pack

3. エンジンデータ

計算対象としたエンジンは燃料をガソリンと水素に切り替えが可能な排気量 1.4L の単気筒エンジンとした。主なエンジン諸元を表 1 に示した。ガソリンと水素の燃焼圧力は負荷違いと回転数違いの計 3 条件を設定した。回転数 3000rpm の全負荷(100% Load)の燃焼圧力カーブを図 4 に示した。

Table 1 Engine Data

| Parameters | Values | Units |
|---------------|----------|----------------|
| Bore Diameter | 76 | mm |
| Crank Radius | 37.8 | mm |
| Conrod Length | 144 | mm |
| Engine Type | 4-Stroke | Not Applicable |
| Liner Height | 120 | mm |

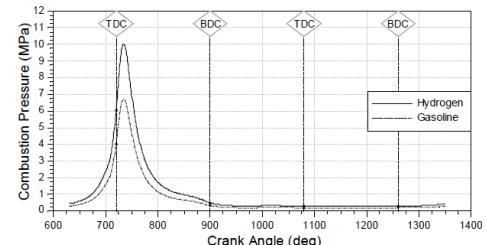


Fig. 4 Combustion pressure at 3000rpm

4. 計算結果の比較

回転数 3000rpm の全負荷の計算結果を示す。ガソリンエンジンと比較すると、トップリングの最小油膜厚さは TDC 付近で最大 0.05micron 程度低くなることを図 5 に、フリクションは燃焼圧力の大きさによって TDC 付近で差異が見られたことを図 6 に、パワロスは固体間接触の増加によって 200W 近く増加することを図 7 に、ブローバイガスはサイクル平均で約 40% 増加することを図 8 にそれぞれ示した。

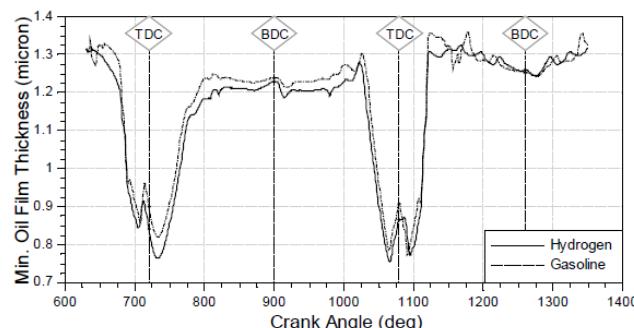


Fig. 5 Minimum oil film thickness at 3000rpm and full load

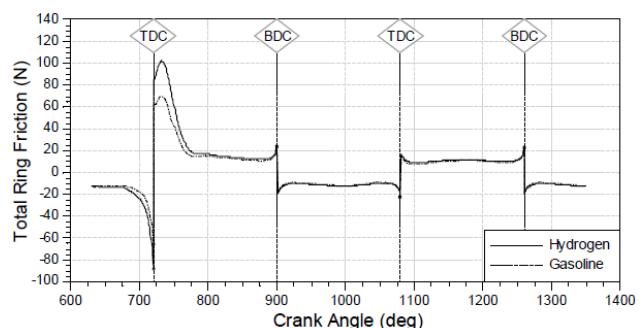


Fig. 6 Total ring friction at 3000rpm and full load

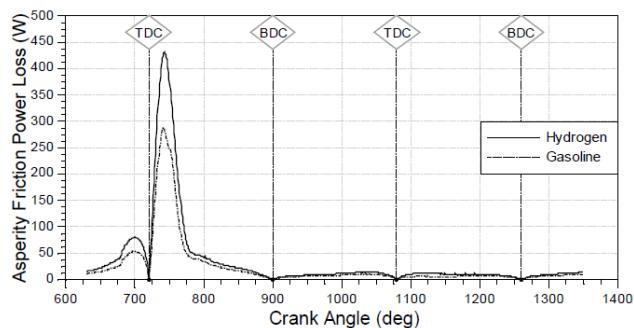


Fig. 7 Asperity power loss at 3000rpm and full load

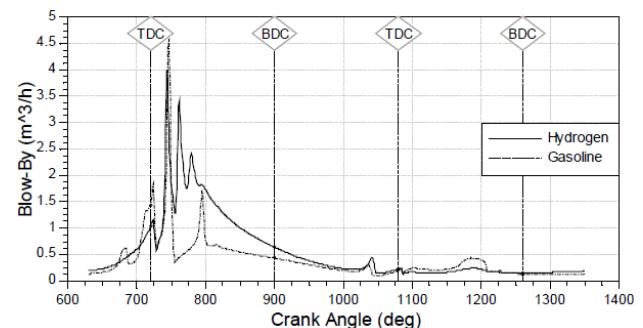


Fig. 8 Blow-by at 3000rpm and full load

5. 結論

ガソリンと水素エンジンの数値計算モデルを構築して結果を得られた。すべての計算条件で水素エンジンのほうがより高い機械損失とブローバイガスの両方が観察され、この傾向は文献で報告されているフィールドテストと一致した。特に水素を含むブローバイガスの増加はエンジン機械要素の水素脆化と潤滑油劣化などの望ましくない副作用を発生させ、エンジンの全体的な効率と寿命に関して重大な問題を引き起こす可能性がある。そのため、新しいリング形状、コーティングおよびリングパックをより適切にシールするための潤滑方法を検討することが将来の水素燃料 ICE にとって重要である。

文献

- 1) Wolfgang Schoeffmann, Paul Kapus, Mirko Plettenberg, Michael Howlett, Christoph Sams : The CO₂ neutral hybrid IC engine providing hydrogen, ethanol and e-fuel compatibility within current engine boundaries. JSAE Annual Congress 2023.
- 2) Stephen Richard Bewsher, Gunter Offner : A Comparison of Hydrogen and Gasoline Piston Ring Simulations, Lubricants 2023, 11, 444.
- 3) AVL List GmbH. AVL EXCITE Piston&Rings Theory version 2023 : Software Documentation 2023.
- 4) Gotze, A; Jaitner, D. : Combined experimental and simulative approach for friction loss optimization od DLC coated piston rings. Automot. Engine Technol. 2022, 7, 283-293.