

水素エンジンのブローバイ計算のための解析的パイプ流れモデル

Analytic pipe flow model for blow-by in hydrogen engine

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、CO₂ 排出量削減は地球規模で大きな関心を集め、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いるが、これまでと同等、もしくはさらなる高効率のシステムを開発することを要求されている。その中には性能評価、信頼性の向上、音振動(NVH)の低減といった複合的な観点での全体最適化の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となっている。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現可能な代替手段の1つとして注目されているが、既存ICEに水素燃料を使用する過程で発生する新たな課題を設計段階で評価し、最適化することが重要となっている。

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に焦点を当て、水素エンジンの信頼性と性能にとって重要な因子であるブローバイガス評価のためのCAE予測手法について紹介する。内容としてはCAE予測手法に使用したソフトウェアの概要、ブローバイガス計算のためのオリフィス流れと解析的パイプ流れの比較検証、そして実機による妥当性確認となる。

2. ブローバイガス計算のためのCAEソフトウェア

ピストンリングのブローバイガス計算をするために使用した市販の業界標準ツールであるAVL社EXCITE™ Piston&Ringsを図1に示す。エンジンのピストンとリングを数値モデルとして作成し、ピストンリング溝内のリング挙動を時間積分ソルバーによって計算するCAEツールである。トライボロジーに関連した結果出力としてはリング外周面およびリング上下側面の流体圧力、粗さ接触圧力、摩擦、摩耗などがあり、ランド圧力やリングパッケージ内の隙間を通過してクランクケース内へ流れるブローバイガス、リングパッケージ内のオイル移送モデルを使った定常・過渡のオイル消費量といったものがある。

クランクケース内へ流れるブローバイガスを計算より予測するために必要な入力値や計算モデルで扱っている物理現象を図2に示す。目標としたエンジン効率を満足する燃焼コンセプト、リングに作用する様々な外力や接触荷重によって決まるリング挙動、リングの断面形状やリング合口形状といった設計値、そしてリングとライナ間の潤滑やそのシーリング性能、実稼働時における熱変形といったリングの追従性など、ブローバイガスはここで述べた因子が相互作用する複雑なシステムによって決まる物理現象である。実際のブローバイガス計算ではモデル化が容易ではない現象やより厳密な解を得ようとすると計算負荷が増加してしまうといったことがあるため、適切かつ実用的な物理モデルを構築して検証し、実機現象と比較して妥当性検証を行うことが多い。その中には一般的にガス流量係数と呼ばれる数値パラメータを調整することが含まれ、計測されたガス流量やランド圧との相関性を確認する必要があるが生じ、使用者にとって時間を要する検証作業となっている。

このような課題を解決する1つの方法として、新たに実装した解析的パイプ流れを次に紹介する。

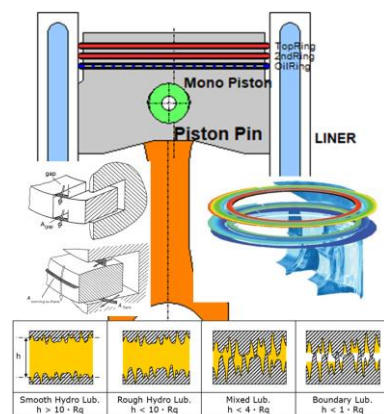


Fig. 1 EXCITE™ Piston&Rings

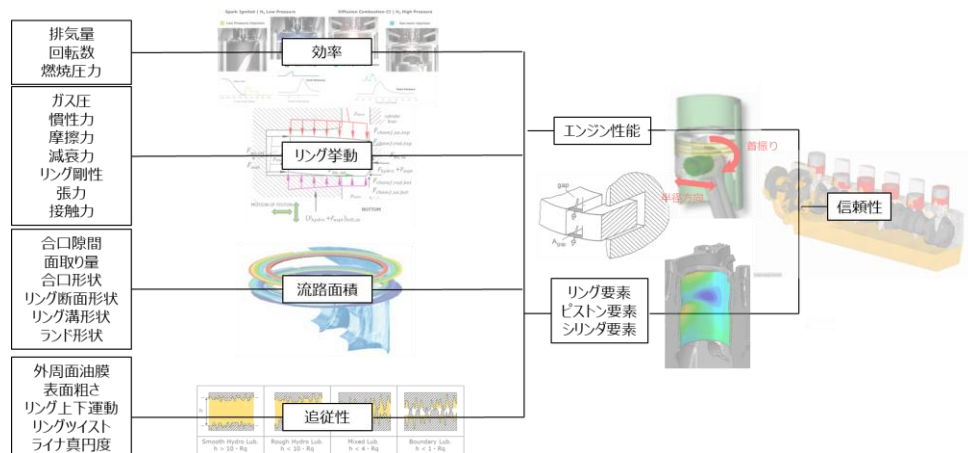


Fig. 2 Modeling workflow of Piston Ring dynamics and blow-by flow

このような課題を解決する1つの方法として、新たに実装した解析的パイプ流れを次に紹介する。

このような課題を解決する1つの方法として、新たに実装した解析的パイプ流れを次に紹介する。

3. ブローバイガス計算モデルの比較検証

ブローバイガス計算のためのリングパッケージモデリングを図3に示す。容積空間と絞り部(オリフィス)を連結したモデル化となっている。

次に、これまで使われてきたオリフィス流れモデルと新たに実装した解析的パイプ流れモデルを図4、および図5に、ブローバイガス量の計算式を式(1)と式(2)にそれぞれ示す。オリフィス流れモデルは流量係数 ψ 、開口面積 A 、圧力比 P_m/P_{m-1} (下流側圧力/上流側圧力)、気体定数 R 、容積内の温度 T 、等エントロピー指数 κ 、定圧比熱 C_p を用いて等エントロピー流れを解くことで各絞り部の単位時間当たりのガス質量を、境界条件として既知の燃焼圧力とクランクケース内圧を与えて計算する。絞り部を通過するガス質量変化分による各容積部の圧力変化を質量保存則、状態方程式より繰り返し計算してその時間変化を計算する。この結果としての圧力比と、開口面積はリング周りに作用した外力による運動として解かれた値を使い、流量係数を含むそれ以外の値は使用者が一定値として与えることになる。

一方、解析的パイプ流れモデルはリング溝とリング側面の開口率を考慮した流量係数 ψ を経験則^{2,3)}より求める方法を採用し、計算過程で係数が算出される。ここで、リング幅 B 、隙間 h 、レイノルズ数 Re 、内部変数 X 、 Y 、 μ がそれぞれ用いられる。

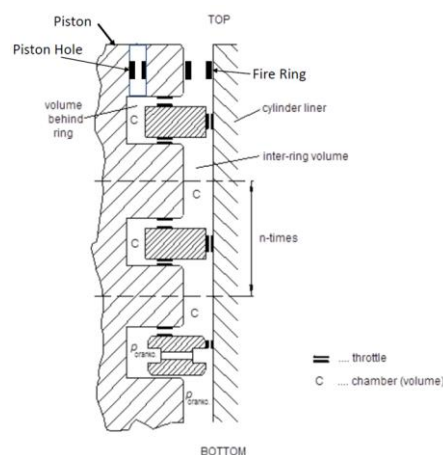


Fig. 3 Orifice gas flow model

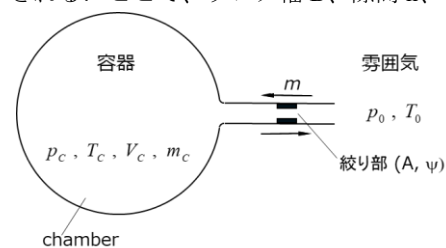


Fig. 4 Orifice flow model

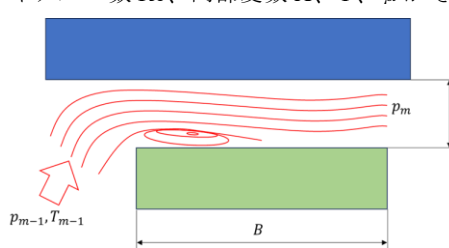


Fig. 5 Analytic pipeflow model

$$\begin{aligned} \psi &= 10^{-(10^Y)} \\ Y &= 0.0284X^2 - 0.459X - 0.1375 \\ X &= \log \left[\left(\frac{h}{B} \right) Re \frac{1 - \frac{P_m}{P_{m-1}}}{0.5} \right] \\ Re &= \frac{P_{m-1} h}{\mu} \sqrt{\frac{k}{RT_{m-1}}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \\ \mu &= 3.3 \cdot 10^{-7} \cdot T_{m-1}^{0.7} \end{aligned}$$

$$\text{mass flow } \dot{m} = \begin{cases} \psi A \frac{P_{m-1}}{RT} \left(\frac{P_m}{P_{m-1}} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{2C_p T \left[1 - \left(\frac{P_m}{P_{m-1}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} & \text{if } \left(\frac{P_m}{P_{m-1}} \right) > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/[k-1]} \\ \psi A P_{m-1} \sqrt{\frac{k}{RT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} & \text{if } \left(\frac{P_m}{P_{m-1}} \right) \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/[k-1]} \end{cases} \quad (1)$$

比較検証例として、これまでにモデル検証され、かつ実機による妥当性検証をしてきたガソリンエンジン計算モデルのクランクケースへのブローバイガス量をオリフィス流れモデルと解析的パイプ流れモデルのそれぞれで比較した。その結果を図6に示す。新たに実装した解析的パイプ流れモデルは良い相関を示すことが確認された。計算では事前の流量係数の合わせ込みを行っておらず、一度の計算で相関の取れた結果を得られたことはこれまで時間を要していたモデル化の課題を解決する1つの方法になると言える。

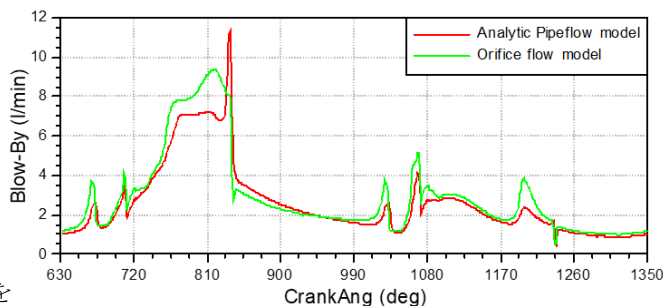


Fig. 6 Blow-by flow

4. 水素エンジン実機による妥当性検証

従来の内燃エンジンにおいては、実測ブローバイガス量と比較した予測精度は $\pm 10\%$ 以内で、燃焼・運転条件(回転数)・負荷条件(アイドル～全負荷)によっては $\pm 5\%$ の精度があることを確認してきた。これが代替燃料の水素エンジンとなると燃焼をはじめとした前提条件が大きく異なり妥当性検証の積み上げがより重要⁴⁾となるため、ここで述べた解析的パイプ流れモデルの活用と妥当性検証を進めている。

文献

- 1) Stephen Richard Bewsher, Gunter Offner : A Comparison of Hydrogen and Gasoline Piston Ring Simulations, Lubricants 2023, 11, 444.
- 2) Shapiro AH. The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow. Vol.1 New York: Roland Press Company, 1953.
- 3) Koszalka, G. and Guzik, M., "Mathematical model of piston ring sealing in combustion engine", POLISH MARITIME RESEARCH 4(84) 2014 Vol.21; pp. 66-78 10.2478/pomr-2024-0043
- 4) AVL SIMpulse Alternative Fuels for Internal Combustion Engines, Advanced Simulation Technologies, April 2024