

動的に変化する表面粗さを取り込んだマルチボディダイナミクス計算モデル

Dynamic Roughness Adjustment for Multi-Body Dynamics Modeling

エイヴィエルジャパン（正）*陰山 俊雄 エイヴィエル（非）ステファン ビューシャー

Toshio Kageyama*, Stephen Bewsher**

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

1. はじめに

世界的な関心事であるカーボンニュートラル社会の実現のため、既存の内燃エンジン機関を改良した高効率なエンジンが開発されている。高効率化にはダウンサイジング（軽量化）、燃焼コンセプトの刷新、損失低減、電動化・ハイブリッド化などの手段が用いられているが、その実現を支えるエンジン構造と構成部品の信頼性や振動 NV を既存エンジンと同等、あるいはそれ以上の性能を目指そうとすると、より複雑化するエンジニアリングタスクを解決する手段と、それを知見とした最適部品設計案をフィードバックする取り組みが必要となる。

その中でもエンジンのクランクシャフトを支持する主軸受は高負荷を含む様々な運転条件の下で使用され、初期なじみから累積摩耗の進行といったトライボロジーにおける非正常問題の 1 つである摩耗を課題として抱えている。本講演では摩耗によって時間的に変化する表面粗さを扱った手法を紹介し、それをエンジン軸受評価に使われているマルチボディダイナミクス計算モデルに適用した検証結果を紹介する。

2. マルチボディダイナミクス計算モデル

モデル検証には AVL EXCITE™ M マルチボディダイナミクス計算モデル「Fig. 1」を用いた。エンジンを構成する部品を質量、減衰、剛性を持つ弾性体としてモデル化し、燃焼荷重を主な外力として作用させ、軸受部で発生する接触反力などの動荷重バランスを収束条件として、時間積分器よりエンジン構造物の変位、速度、加速度といった運動量を計算する CAE ツール¹⁾である。

軸受部の接触には弾性流体潤滑モデル (EHD) を用いて、流体潤滑下では軸や軸受の弾性変形による潤滑隙間の変化を考慮したレイノルズ方程式で流体圧力を計算し、混合潤滑下では表面粗さを使用した接触モデル (Greenwood / Tripp) で固体間接触圧力を計算した。さらに、粗さによる圧力流れやせん断流れの変化は平均流レイノルズ方程式にて流体圧力を計算した。粗さは軸受メタルの表面粗さを計測したデータを使用し、摩耗は Archard のすべり摩耗モデルを用いた。

適用事例としては、計測した表面粗さを一定値として与えて計算した軸受メタル摩耗量を軸受隙間の変化量として逐次更新し、さらに潤滑接触状態の変化による摩擦係数を更新することでなじみや摩耗進行時の摩擦力を評価する計算モデルの検証がなされてきた²⁾が、摩耗による表面粗さの変化を考慮するモデルはなかったため、その影響を考慮することは出来なかった。

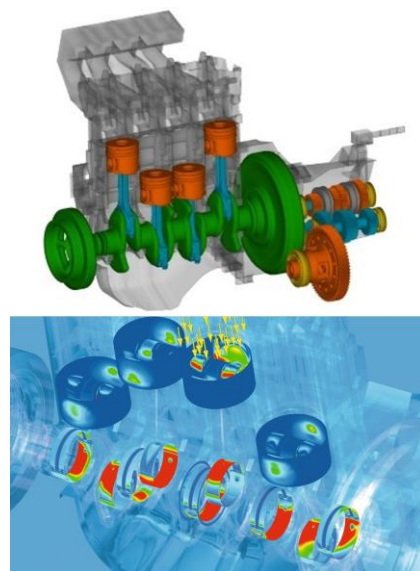


Fig. 1 AVL EXCITE™ M

3. 動的に変化する表面粗さモデル

軸受メタル表面の摩耗量に応じて表面粗さを動的に変化させるモデルを導入した。表面粗さはエンジン実機で使用された軸受メタルの複数の摩耗箇所表面粗さを高解像度の白色光干渉計測器で測ったデータ「Fig. 2」から、頭頂部粗さ (Summit Height、 R_{pk} の RMS) と平均線高さの差 (Mean Summit Height、 R_k) の 2 つを抽出した。「Fig. 3」

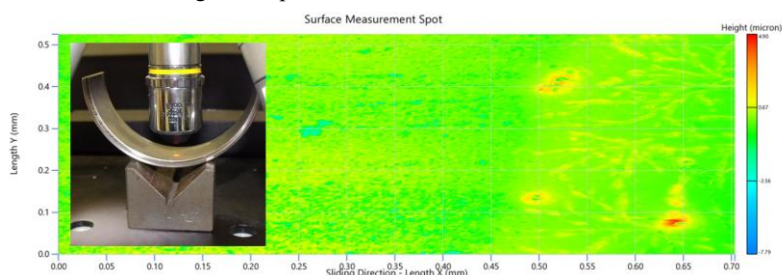


Fig. 2 3D Surface Roughness

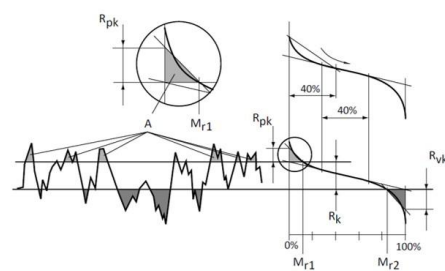


Fig. 3 Roughness Height

表面粗さを動的に変化させる接触計算は、始めに表面粗さを使用した Greenwood / Tripp モデルより固体接触圧力を計算して Archard モデルより摩耗量を計算し、次にその摩耗深さに対応した表面粗さを Greenwood / Tripp モデルへ反映させ、計算ループ内で表面粗さの更新とここまでの累積摩耗による隙間変化を加える、という手法とした。使用し

た摩耗深さごとの表面粗さをまとめた表を「Table. 1」に示した．なお、実稼働時の軸と軸受メタルの接触箇所は上下メタルで異なるため、それぞれ個別に粗さデータを用意した．

Table 1 Roughness Parameters by Wear Depth

| Wear Depth (μm) | Summit Height Lower (μm) | Mean Summit Height Lower (μm) | Summit Height Upper (μm) | Mean Summit Height Upper (μm) |
|------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| 0.0 | 0.527 | 0.572 | 0.469 | 0.424 |
| 1.0 | 0.177 | 0.189 | 0.155 | 0.143 |
| 15.0 | 0.116 | 0.129 | 0.106 | 0.092 |

4. モデル検証

摩耗量の計算は先述した Archard すべり摩耗モデルを使用し、一定の表面粗さ（変数 A）と動的に変化する表面粗さ（変数 B）の 2 つの計算モデルを使用した．エンジン回転数は 1500rpm、全負荷の荷重条件とし、5000 時間経過後として計算された摩耗量を比較した．「Table. 2」

Table 2 Wear Depth and Surface Roughness Comparison

| Variant | Max Wear Depth (μm) | Relative Difference | Summit Roughness (μm) | Mean Summit Height (μm) |
|---------|----------------------------------|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| A | 5.49 | - | 0.527 | 0.572 |
| B | 2.98 | -46% | 0.168 | 0.182 |

最大摩耗量は変数 A モデルに対して変数 B モデルは約 46 % 減という結果となった．また、軸受面内で発生した最大摩耗量の時間変化を示した「Fig. 4」より、摺動開始時のなじみによって表面が摩耗して固体間接触圧力が低下、もしくは発生が遅れることで摩耗進行の違いを再現したことを確認できた．

軸受メタル表面を軸方向と円周方向に展開して摩耗量の大小を色合いの強弱で示し「Fig. 5」、それらを変数 A モデルと変数 B モデルで比較すると、摩耗は軸受面内で一様には進行しておらず、摩耗によって表面粗さが変化しない変数 A モデルでは軸受端面と中央の箇所両方で摩耗しているのに対し、変数 B モデルは滑らかに摩耗が進行して潤滑性が向上する現実的ななじみ性を再現していることが分かった．なお、初期の表面粗さと摩耗後の表面粗さを比較すると、最大摩耗量が観測された箇所でも 68 % ほど表面粗さが小さくなっていることも計算モデルより確認できた．

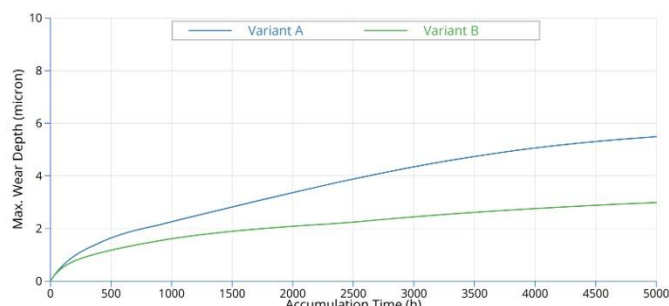


Fig. 4 Time progress of wear depth for both variants

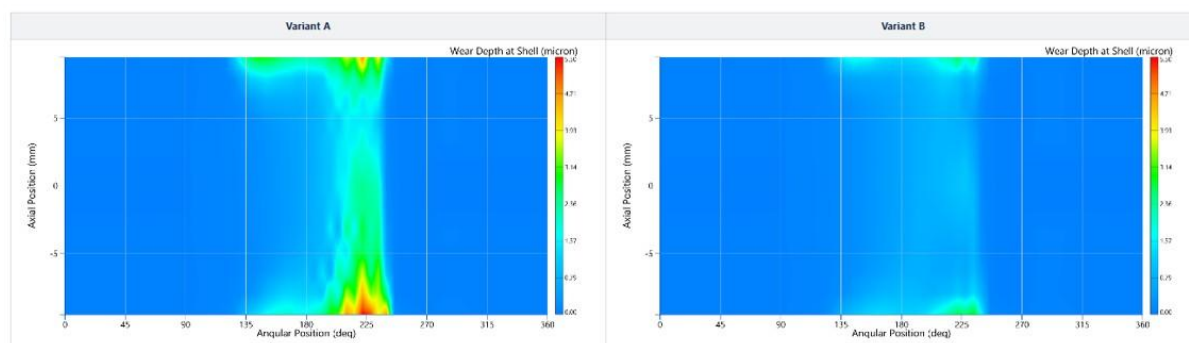


Fig. 5 Wear Profiles after 5000 hours, Left Var.A, Right Var.B

5. 結言

動的に変化する表面粗さを取り込んだマルチボディダイナミクス計算モデルを使用することで、過大な摩耗量の予測を回避できること、なじみ過程の摩耗進行を予測できること、実稼働条件を模擬したエンジンモデルに適用できること、を示した．また、工学的な意義としては、摩耗分布を考慮した油溝やオイル供給の軸受設計への活用、対摩耗性を向上する表面コーティング方案やテクスチャリング設計の最適化、摩耗による軸挙動変化を考慮した初期なじみ軸受プロファイルの作成、継続的な摩耗進展箇所の予測による長寿命化の検討、などが考えられる．

文献

- 1) O. Gunter, S. Bewsher: AVL EXCITE Theory Manual 2025R1, AVL List GmbH, 2025
- 2) Y. Kurabe, Y. Suzuki, Y. Kajiki: Friction Prediction Method for Engine Bearings using EHD Analysis Considering Modified Friction Coefficient and Running-in depending on Lubrication Conditions, JSAE 20239206, SAE 2023-32-0162, 2023