



2022年 9月 30日

報道機関 各位

東北大学流体科学研究所

世界で初めてスパコンでエンジンの摺動部摩耗と焼付き 発生部位のシミュレーション予測に成功 — 次世代の高性能エンジン開発への応用に期待 —

【発表のポイント】

- スーパーコンピュータでエンジンピストンピン摺動部における摩耗・焼付き発生部位に関するシミュレーション予測に世界で初めて成功した。
- ピストンピンの弓なり状の変形が、コンロッドエッジにおける機械接触・焼付きの原因であることを特定した。
- ピストンピンとコンロッド双方の弾性変形ならびに非定常流路変化を伴う薄膜キャビテーション^{注1}潤滑を考慮した、3次元混相流体—構造体連成解析手法^{注2}の開発に成功した。

【概要】

レシプロエンジン(ピストンエンジン)は燃焼による動力を往復運動として取り出し、回転運動に変換することで駆動を行う、自動車や航空機、発電機など多数の用途に使用される動力機械です。燃焼による大きな動力を、駆動系に効率よく伝達することが重要ですが、そのような過酷な稼働条件下では部品に対し高耐久性が求められます。実際に、レシプロエンジンの故障原因として最も多くあげられるのが部品の摩耗・焼付きであり、これは潤滑油の油膜が途切れることにより金属部品が接触し、傷が付いたり固着する現象で、動力機械全体の性能を左右します。焼付きが生じると、多くの場合エンジンの始動が不可能になり、エンジン自体を交換する必要があるなど、被害が極めて大きくなる可能性が高い故障となります。特に、ピストンピン—コンロッド間の潤滑は、内燃機関において最も厳しい条件下での流体潤滑が求められます。しかしながら、流体潤滑における摩耗・焼付き発生部位の検証には理論や計算による予測は不可能であると考えられ、長期間にわたる負荷試験を行わざるをえませんでした。

東北大学流体科学研究所の石本淳 教授と本田技研工業株式会社の研究グループは、エンジンピストンピン—コンロッド小端間の相変化を伴う狭あい潤滑油液膜流れ

に着目し、構造体の弾性変形と流路変化を考慮した混相流体－構造体連成解析手法を新たに開発し、厳しい負荷条件下におけるトライボロジー^{注3}特性に関するシミュレーション予測法を開発しました(図1)。その結果、摺動部における摩耗・焼付き発生部位のシミュレーション予測に成功するとともに、構成部品の特異な変形挙動が摩耗・焼付きの発生要因であることを発見しました。

本研究手法は自動車用エンジンのみならず流体潤滑を用いた全ての摺動部品要素に適用可能であり、輸送機械・産業機械の損傷予測や構成要素の安全性指針策定に貢献します。本研究により、摩耗・耐久性試験時間や製造コストが削減され、機械接触を伴う全ての構成要素の最適設計が可能になります。

本研究成果は、2022年8月29日付で米国機械学会の学術誌`ASME Journal of Tribology` On-line版に掲載されました。

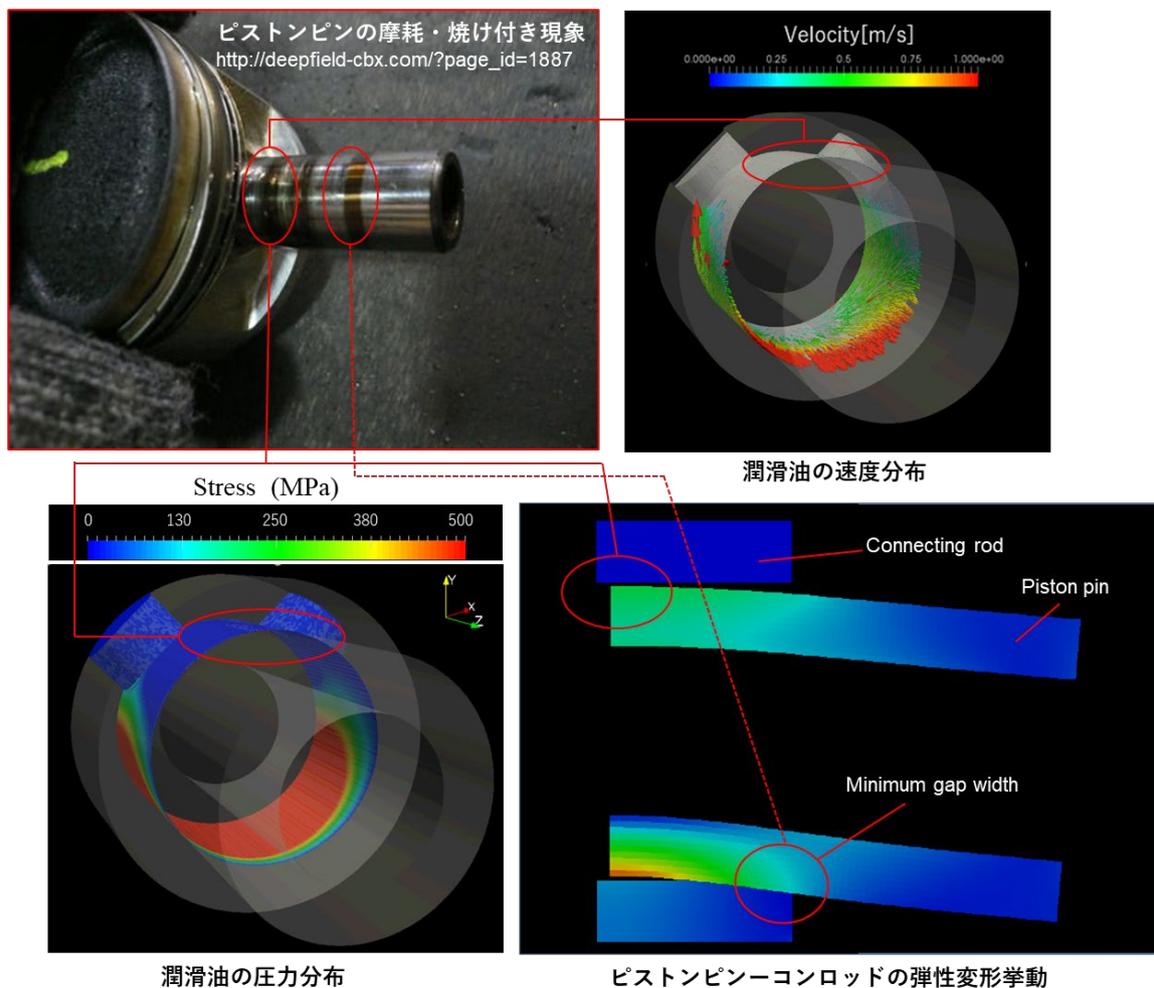


図1 エンジンピストンピン摺動部における摩耗・焼付き発生部位に関するシミュレーション予測に成功(ピストンピンとコンロッド双方の弾性変形ならびに非定常流路変化を

伴う薄膜キャビテーション潤滑を考慮した、3次元多相流体－構造体連成計算結果)

【問い合わせ先】

<研究に関して>

東北大学流体科学研究所

附属未到エネルギー研究センター長

教授 石本 淳

Tel: 022-217-5271

E-mail: ishimoto@alba.ifs.tohoku.ac.jp

URL: <http://alba.ifs.tohoku.ac.jp/>

<報道に関して>

東北大学流体科学研究所 広報戦略室

Tel: 022-217-5873

E-mail: ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

（研究背景）

自動車用エンジンの駆動源に使用される部品要素であるピストンピンとコンロッドは、往復・回転運動を常に行っていますが、摺動面において潤滑油膜－固体表面間摩擦・発熱・相変化、表面粗さ等の複雑な物理現象が同時に発生し、摩耗発生に至るまでの詳細なメカニズムに関しては未解明なままでした。

本研究は、これら機械要素の運転時における流体潤滑と固体変形に関する相互作用を考慮した超並列スーパーコンピューティングによる連成解析アプローチを行い、固体の弾性変形・キャビテーションを伴う薄膜内流動を解明するとともに、ピストンピンの摩耗・焼付き発生部のシミュレーション予測に成功しました(図 2, 図 3)。このように、潤滑油膜の流動特性と構成部品の弾性力学的挙動を同時に扱う連成解析手法は、輸送機械・産業機械の損傷予測や構成要素の高耐久性設計に貢献すると同時に、総合学術的にも非常に有用と考えられます。

（研究内容）

本研究では 内燃機関のピストンピン－コンロッド小端間の相変化を伴う狭い潤滑油液膜流れに着目し、構造体の弾性変形と流路変化による相互作用を考慮した混相流体－構造体強連成解析手法を新たに開発し、厳しい負荷条件下におけるトライボロジー特性に関するシミュレーション予測法を開発した点に特色を有しています。ピストンピンとコンロッド双方の弾性変形挙動、潤滑油の非ニュートン流体^{注4}効果、摩擦熱、接触表面粗さ等を考慮した新型の混相流体－構造体連成解析を実施した結果、以下の知見が得られました。

ピストンピンに加わる荷重によって潤滑油中の圧力が荷重方向に上昇するが、その分布は同時に実施した剛体連成解析よりも滑らかでした。これは、弾性変形が圧力上昇を抑制する効果を有するためと考えられます。また、荷重が加わった際にピストンピンが弓状に変形することが判明しました。コンロッドの変形量はピストンピンの変形量よりも小さく、ピストンピンの変形量が両者の隙間幅に大きく影響することを明らかにしました。また、ピストンピンの弓状変形により、コンロッドの端部で機械接触が発生する可能性が高いことを示しました。

【論文情報】

Authors: Yudai Narumi, Jun Ishimoto, Daisuke Kanayama, Hiroshi Kuribara and Yoshikatsu Nakano

Title: Computational Fluid–Structure Interaction Analysis of Piston Pin Multiphase Elastohydrodynamic Lubrication with Unsteady Flow Channel Variation

Journal: *ASME Journal of Tribology*, 2022 (online)

DOI: 10.1115/1.4055407

URL: <https://doi.org/10.1115/1.4055407>

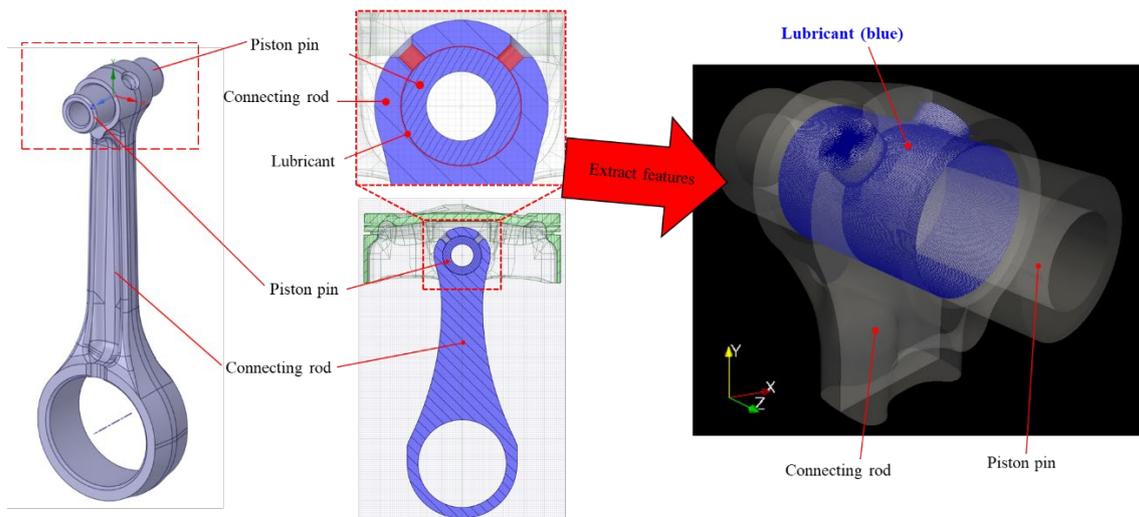
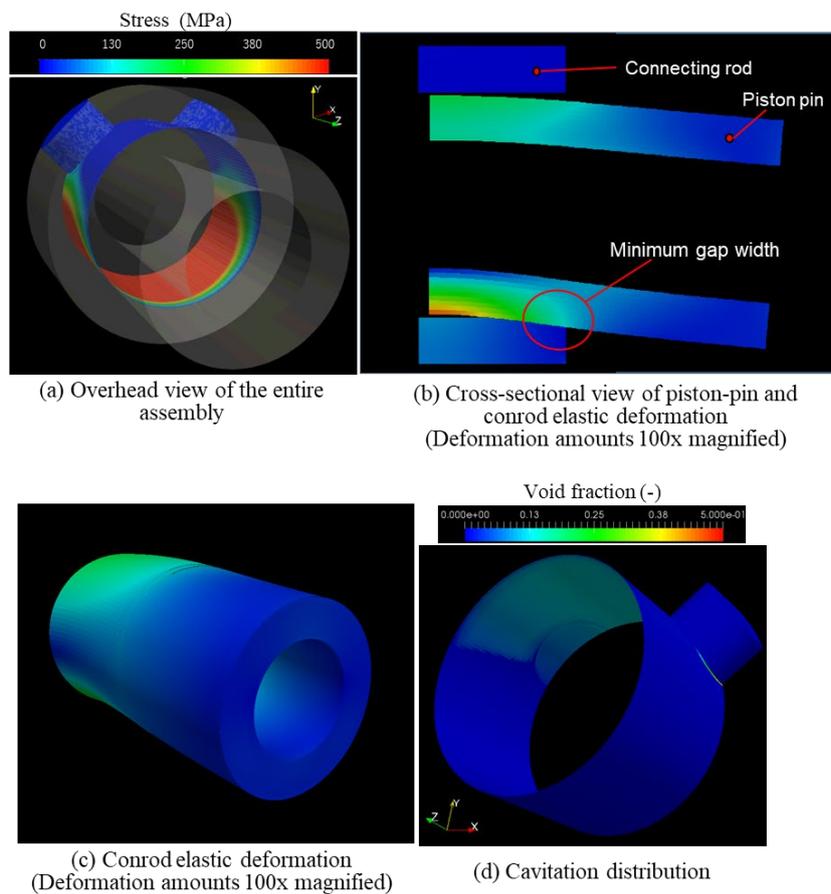


図 2 ピストンピンーコンロッド間における流体潤滑計算モデル



Instantaneous FSI-EHL numerical results of the piston pin and connecting rod behavior ($t = 1.5 \times 10^{-3}$ s)

図 3 非定常流路変化を伴うピストンピンーコンロッド間油膜弾性流体潤滑に関する混相流体ー構造体連成解析結果

(研究の意義・今後の展望)

輸送機用エンジンのみならず再エネ水素活用システムに利用されるコンプレッサ等のレシプロ系動力源は、構成機械要素に対する長期間にわたる高耐久技術の開発が急務であり、これに伴う劣化・損傷予測に関する次世代技術の要請として、本研究の価値はますます重要性を増すと考えられます、また、将来的には本連成解析手法に加えて、運用中のレシプロ系動力源における諸トラブル、エンジン停止事故事例に関する情報を収集し摺動機器安全運転用データベースを構築するとともに深層学習を用いた高信頼設計の基礎指針を得ることが可能になると考えられます。

【用語解説】

注 1. キャビテーション:ある温度における液体流れ場中の圧力が飽和蒸気圧以下となった条件で短時間に気泡が生成、また液体圧力が回復すると気泡消滅が生じる物理現象

注 2. 連成解析:2つ以上の物理現象が相互に及ぼす影響を考慮した解析をすることを指します。本研究の場合、主に弾性力学・流体力学・熱力学の3つの物理化学現象の相互作用を考慮した解析となっています。

注 3. トライボロジー:潤滑や摩擦・摩耗・焼付きなど相対運動しながら互いに影響し合う2つの表面の間に起こるすべての現象を対象とする科学と技術を指します。

注 4. 非ニュートン流体:流れの剪断応力(接線応力)と流れの速度勾配(ずり速度、剪断速度)の関係が線形ではない粘性の性質を持つ流体