

テクスチャリング表面の流体潤滑解析の現状と課題

Current Status and Issues of Hydrodynamic Lubrication Analysis on Textured Surface

産総研（正）*是永 敦

KORENAGA Atsushi

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. はじめに

トライボロジー特性を制御するための表面テクスチャリングに関する研究が盛んになってから約30年が経ち、すでに実用化されたものもある中で、最適設計のための数値解析は計算機資源の発達とも相まって、モデル化から計算法まで、さまざまなアプローチが試されてきている。特に近年はニューラルネットワークや機械学習など、新しいアルゴリズムを用いた方法も行なわれている。本報では、テクスチャリング表面の流体潤滑解析について、最近の動向と課題について報告する。

2. 表面テクスチャリングに関する論文数の動向

まず、表面テクスチャリングについての研究動向について述べる。Figure 1に、Web of Scienceでキーワードとして、「Texturing + Lubrication」、「Texturing + Wear」で文献検索した結果を示す。全体的に、表面テクスチャリングでは潤滑より摩耗に注目する論文が多く、その数はどちらも現在に至るまで増加傾向にあることがわかる。数百件あるとすべての論文を詳細にチェックできないが、全体的な傾向はこのグラフから見て取れると考える。このうち、例えば2022年では、約3割がシミュレーションに関する論文であった。論文数自体が少ないが、2010年、2015年ではその割合は6割を超えていたことから、実験的な論文が増え、シミュレーションの割合としては減少していることが伺える。ただ、その内容は、新たな手法の導入などにより、詳細に解析できる傾向にある。なお、検索された論文のうち、少なからずヒトの口の中のトライボロジーに関わるもの¹⁾がある。

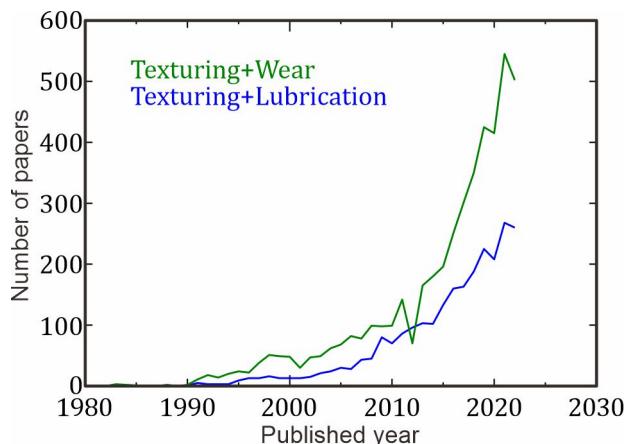


Fig.1 Transition in the number of published papers

3. 解析の対象

解析の対象は、テクスチャリング形状の最適化を目的とした、流体潤滑におけるキャビテーションをモデル化した解析²⁾や平行平板潤滑におけるディンプル形状の最適化を目的とした解析などがある³⁾。一例として、Khonsariらが有限要素法で Stokes 方程式とエネルギー方程式を Viscosity wedge を考慮して解いたディンプル内の流れを Fig.2 に示す。一方、特定のアプリケーションを対象とした解析もある。対象となるアプリケーションは様々で、初期の頃は磁気テープヘッドを対象とした論文⁴⁾もあったが、基本的には自動車部品を対象とした例が多い。例えば Meng らは、ピストンリングとシリンドライナの潤滑でどちらにテクスチャリングを施せば摩擦低減効果が得られるかを検討し、シリンドライナ側にディンプル加工することで効果が安定し、摩擦低減効果が得られることを明らかにした⁵⁾。

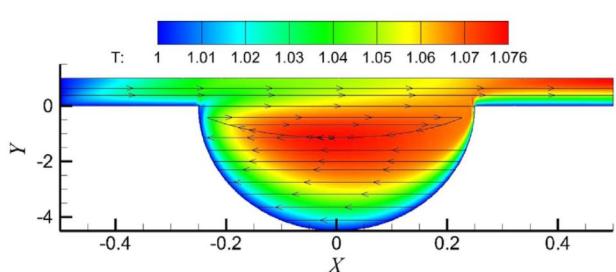


Fig.2 Fluid film temperature and velocity distribution³⁾

4. 解析方法

解析モデルに格子を用いて計算する手法が長く使われているが、特にトライボロジ一分野ではマクロとミクロの両方を検討しなければならないため、マルチグリッド法を用いることも有効な手法であり、テクスチャリングで重要なキャビテーションに対して、浮遊自由境界問題を克服するマルチグリッド手法により、計算時間を短縮した例⁶⁾などがある。計算時間を短縮する方法としては、空間分解能を粗視化し時間分解能を担保して反復計算を高速化する基底次元低減法に均質化法を組み合わせ、テクスチャリングジャーナル軸受を短時間で解析した例⁷⁾もある。

一方、格子法では計算領域が変形を伴う場合に計算が困難になることから、粒子で計算領域を離散化する粒子法を用いることも有効な手法である⁸⁾。

近年様々なシミュレーションに用いられているニューラルネットや機械学習も、トライボロジーの分野に浸透しつつある。ROMは物理学に基づいたニューラルネットワーク(PINN)を用いてキャビテーション領域における流体圧力と液体比率を予測し、有限差分で得られた結果とほぼ一致した⁹⁾。まだ発展途上でもあり、EHLや非定常流、非ニュートン流体への適用が課題である。Hessらは、弾性変形とキャビテーションを考慮したジャーナル軸受の圧力分布などの特性を機械学習で予測し、数値解析結果と比較して良好な結果を得た¹⁰⁾。一例として、Fig.3に溝付きジャーナル軸受の圧力分布を比較した結果を示す。

5. おわりに

テクスチャリング表面の流体潤滑解析について、最近の動向を中心に、ごく一部であるが報告した。特に機械学習やニューラルネットワークを用いる方法は、今後進化し、より正確かつ高速に広範な条件で解析できるようになれば、潤滑設計に大きな変化を及ぼす可能性もあり、注目していきたい。

文献

- 1) 例え X. Wang, X. Wang, R. Upadhyay and J. Chen: Topographic study of human tongue in relation to oral tribology, Food Hydrocolloids, 95 (2019), 116.
- 2) Y. Mao, L. Zeng and Y. Lu: Modeling and optimization of cavitation on a textured cylinder surface coupled with the wedge effect, Tribology International, 140 (2016), 212.
- 3) X. Meng, M.M. Khonsari: On the effect of viscosity wedge in micro-textured parallel surfaces, Tribology International, 107 (2017), 116.
- 4) B.Raeymaekers, I. Etsion and F.E. Talke: A Model for Magnetic Tape/Guide Friction Reduction by Laser Surface Texturing, Tribology Letter, 28 (2007), 9.
- 5) C. Gu, X. Meng, Y. Xie and Y. Yang: Effects of surface texturing on ring/liner friction under starved lubrication, Tribology International, 94 (2016), 591.
- 6) W. Xu, S. Zhao, M. Zhang and J. Yang: An explicit cavitation multigrid algorithm for accelerating simulation of surface-textured bearings, IMechE, J. Eng. Tribology (2022), <https://doi.org/10.1177/13506501221142655>
- 7) M. Rom and S. Muller: A Reduced Basis Method for the Homogenized Reynolds Equation Applied to Textured Surfaces, Communications in Computational Physics, 24-2 (2018), 481.
- 8) 田中・岩本：粒子法を用いた流体潤滑解析、トライボロジスト, 66-2 (2021), 98
- 9) M. ROM: Physics-informed neural networks for the Reynolds equation with cavitation modeling, Tribology International, 179(2023), 108141
- 10) N. Hess and L. Shang: Development of a Machine Learning Model for Elastohydrodynamic Pressure Prediction in Journal Bearings, ASME J. Tribology, 144 (2022), 081603.

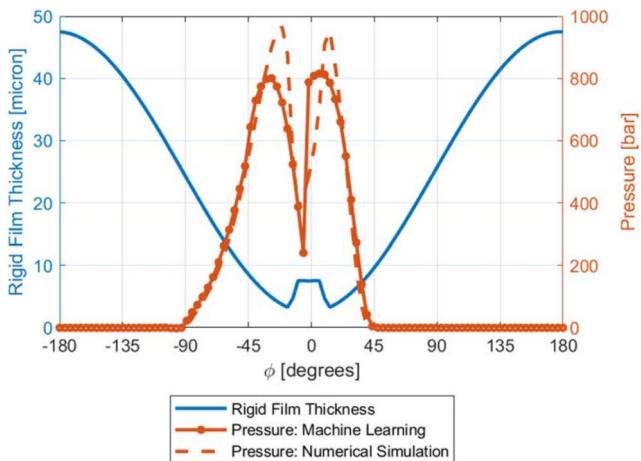


Fig.3 Machine learning and numerical simulation pressure distributions at the midplane of a journal bearing with a rectangular groove³⁾