

トポロジー最適化を用いた革新的な表面テクスチャ形状の探索

Innovative Exploration of Surface Texturing Shapes Using Topology Optimization

イーグル工業（正）*王 岩 大阪大・工（非）矢地 謙太郎

Iwa Ou*, Kentaro Yaji**

*Eagle Industry Co., Ltd. **Osaka University

1. はじめに

表面テクスチャリング（以降、表面テクスチャ）は機械部品のしゅう動面上に付与される表面改質の一種であり、トライボロジー特性を向上させる効果を有することが知られている。各種回転機械の軸封部に使用されるメカニカルシールでは、表面テクスチャを付与することで、しゅう動面間に形成される流体膜によるトルク低減と、漏れた流体を回収する機構による高密封性の両立が実現可能であると報告されている¹⁾。表面テクスチャで発生する圧力分布はレイノルズ方程式に基づく流体潤滑解析により求められ、潤滑性・密封性が評価される。最適な形状は、回転速度、圧力、液種、温度等の使用環境に依存する。通常は、遺伝的アルゴリズム等を用いてアプリケーションや使用条件毎に表面テクスチャの設計を最適化することが必須となるが、与えられる設計変数に限りがあるため、形状に制約が生じる。これを回避する根本的な方法として、トポロジー最適化が挙げられる。この手法は与えられた設計空間内で自由な形状を設計できる勾配ベースの最適化のひとつである。最近では、スラストベアリングの負荷容量の最大化を目指した研究がいくつか行われている²⁾。また、メカニカルシールにおいては、与えられた漏れ制約条件下で負荷容量を最大化する研究も行われている³⁾が、レベルセット法と呼ばれる一様の表面テクスチャ深さしか設定できない手法を用いているため形状に潜在的な制約が生じている。

本研究では、深さを密度として表現し、深さの多様性を制限しない密度法に基づくトポロジー最適化を表面テクスチャの設計に適用することで、性能向上を試みた。また、前述により最適化した表面テクスチャ設計に基づく評価サンプルを実際に加工・製作し、従来手法で得られた最適形状との試験比較を行ったので報告する。

2. 最適化手法

流体潤滑解析には、Elrod のアルゴリズムに基づきキャビテーションを考慮したレイノルズ方程式を採用した。この際、すき間 (h) は膜厚 (h_{\min}) とテクスチャ深さ (h_g) の合算値で定義される ($h = h_{\min} + h_g$)。テクスチャ深さが設計変数となるが、これを任意の最大深さ ($h_{g\max}$) に対する割合として正規化された疑似的な密度 (d) で表現し ($h_g = h_{g\max} \times d$, $0 \leq d \leq 1$)、この密度分布を負荷容量等の目的関数が最大となるように密度法に基づくトポロジー最適化により最適化した。

次に最適化のフローを述べる。初めに密度の初期値を与え、レイノルズ方程式を用いて目的関数を計算する。目的関数が収束すれば最適化計算を終了する。収束しなかった場合は、目的関数の感度を計算し、勾配法に基づき密度を更新した後に、目的関数を計算する初期ステップに戻る。密度の更新には Method of moving asymptotes (MMA)法を用いた。また、密度の更新の際、形状の平滑化のために偏微分方程式型のフィルター処理を加えた。なお、計算ソフトウェアとして、目的関数とその感度計算に COMSOL Multiphysics を、密度の更新に MATLAB を用いた。

解析条件であるメカニカルシール内径は 19.5mm、外径は 26.6mm、内周圧は 0MPaG、外周圧は 0.1MPaG、流体粘度は 0.89 mPa・s (水 25℃)、回転数は 1500rpm、膜厚 (h_{\min}) は 2 μm とした。また表面テクスチャには 6 等配モデルを採用し、メッシュ数は径方向に 50、周方向に 150、平滑化に用いるフィルターサイズは 0.05mm、初期の密度分布は周方向に対して正弦波、テクスチャ最大深さ ($h_{g\max}$) は 10 μm とした。

3. 最適化結果

3.1 負荷容量最大化

まずは負荷容量 (Load carrying capacity, 以降 LCC) を目的関数とし、これを最大化する最適化を実施した。LCC が増大すると、押し付け荷重 (65N) とのバランスで決まる実条件での膜厚が増大し、結果的にトルク低減につながる。

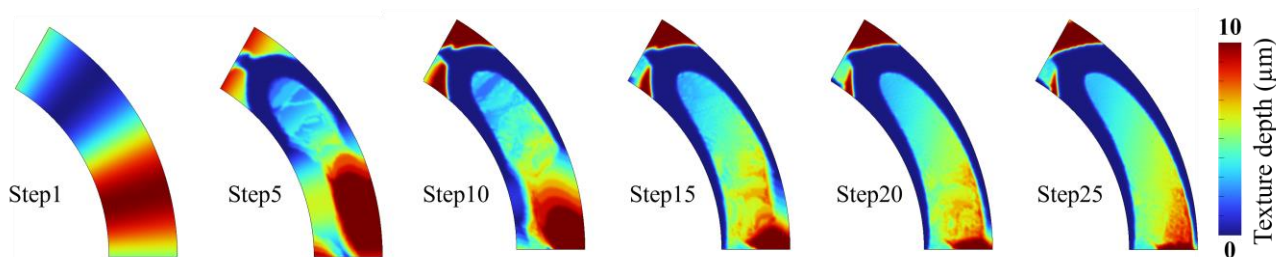


Fig. 1 Optimization process.

最適化経過を Fig. 1 に、最適化後の形状と圧力分布を Fig. 2 に示す（流体の回転方向は紙面反時計回りである）。最適化が進むにつれ、後端（上流側）のみが内外周に接続され、先端（下流側）に向かって先細りする形状へ変化した。深さについては、後端が最大深さをとることで流体の導入を促進し、先端に向かうにつれ浅くなることで、くさび膜効果による動圧発生を促進する分布へ変化した。LCC は、初期の正弦波形状の 22N から最適形状では 75N と大幅に向上した。

次に比較対象として、スラストベアリングで良く用いられるヘリングボーン形状を選定し、従来手法である遺伝的アルゴリズムを用いて形状寸法を最適化した。形状寸法の設計変数は、内外周側テクスチャの径方向比率、内周側テクスチャ深さ、内周側テクスチャ傾斜角、外周側テクスチャ深さ、外周側テクスチャ傾斜角、テクスチャ周方向比率の 6 つである。最適化後の形状と圧力分布を Fig. 3 に示す。Figure 3 右に示すように、ヘリングボーン最適化形状で発生する動圧は、Fig. 2 右に示すトポロジー最適化形状の動圧に比べて、最大値が小さく範囲も狭いため、LCC は 53N とトポロジー最適化形状の 75N より小さい値となった。

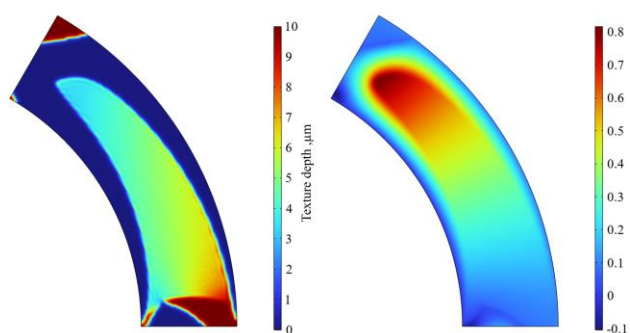


Fig. 2 Optimal design (left) and pressure distribution (right) by topology optimization.

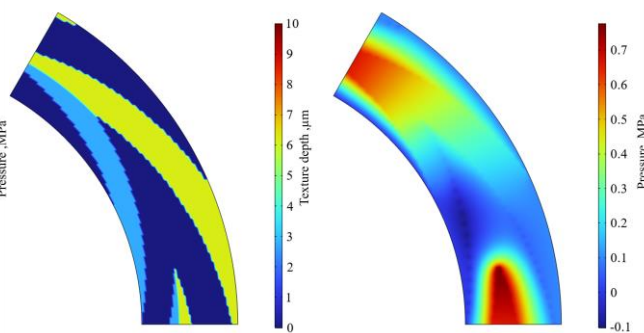


Fig. 3 Optimal design (left) and pressure distribution (right) of herringbone pattern by generic algorithm.

3.2 負荷容量最大化+漏れ量最小化

LCC に加え、内周での径方向流量を目的関数に合算して最適化を実施した。本解析条件では、内周側を機内側、外周側を密封流体側と想定しているため、低トルクと漏れ量最小化（または吸い込み量最大化）の多目的最適化となる。

Figure 4 左に最適化形状を示す。Fig. 2 左と近い形状ではあるが、内外周のテクスチャが自然と分離し、内周側の大きなテクスチャによって外周側へ向かう流量が増大するように変化した。LCC は 45N、径方向流量は外周側に向けて 350ml/h となった。ただし、内周側テクスチャの内周との連通部が 2 つに分離しており、また、一部が外周に接続している等、非合理的な部分が見られた。これらはキャビテーションを取り扱う際の非連続性に起因すると考えられるため、今後の改善が求められるが、本事例ではこれらに修正を加えた Fig. 4 右に示す試験片にて試験検証を行った。

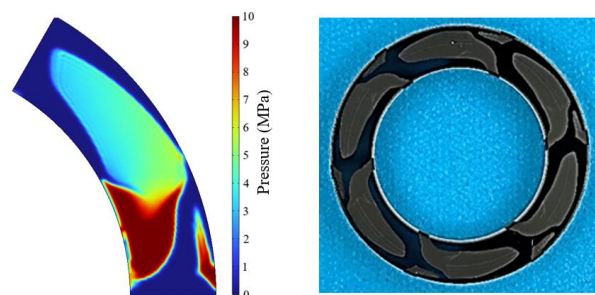


Fig. 4 Optimal design (left) by topology optimization and modified surface textured test piece (right).

4. 実験結果と考察

4.1 負荷容量最大化

トポロジー最適化と従来手法で得られた最適形状を、それぞれ炭化ケイ素の試験片のしゅう動面にレーザ加工で施し、Fig. 5 に示す回転試験機にてトルク測定を行い比較した。また、これら試験片の相手面には、表面テクスチャ加工を施していない炭化ケイ素の試験片を用いた。

トルクの測定結果と数値解析結果を Fig. 6 に示す。この際、数値解析では、膜厚を実条件に合わせて押し付け荷重との収束計算により変化させている。

実験結果より、低速（500rpm）以下ではヘリングボーン最適化形状のトルクが低く、中速（1000rpm）以上ではトポロジー最適化形状のトルクが低いことがわかった。

実験結果について考察する。低速では境界潤滑または混合潤滑が支配的であるため、内外周との連通部の開口が広く、しゅう動面へ流体を導入させやすいヘリングボーン最適化形状がより低トルクとなったと考えられる。一方で、中速以上では流体潤滑が支配的となるため、トポロジー最適化形状がより低トルクとなったと考えられる。このこと

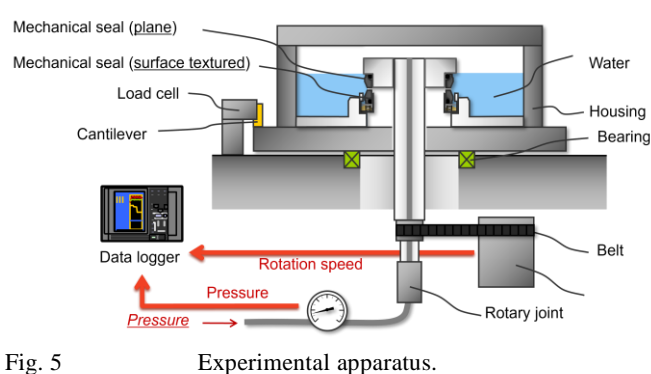


Fig. 5

Experimental apparatus.

は、解析条件の 1500rpm を含む中速以上の領域で、試験結果と数値解析結果（流体潤滑解析）が同一の傾向を示すことから明らかである。試験で計測されたトルク値が、数値解析結果よりも少し高い値となる要因は、実試験片に含まれるうねり、粗さを数値解析では考慮できていないためと考えられる。また、実使用においては、低速での性能も目的関数で評価する等の工夫が必要となる。

4.2 負荷容量最大化+漏れ量最小化

トポロジー最適化形状に修正を加えた Fig. 4 右に示す形状について、しゅう動面の可視化試験を行った。試験片の相手面には石英ガラスディスクを用いることで、しゅう動面を CCD カメラで直接観察した。回転試験前に内周側（機内側、漏れ側）へ恣意的に漏らしていた流体が、軸の回転に伴い次第に外周側（密封流体側）へと吸い込まれる様子から、Fig. 4 右に示す形状が密封性能を有することが確認できた。

5. おわりに

密度法に基づくトポロジー最適化により、自由度の高い表面テクスチャ形状の最適化を行った。負荷容量最大化を目的とした最適化では、従来手法よりも性能の良い形状を設計することができた。実際に表面テクスチャ加工を施した試験片を用い、回転試験においてトルク測定を行った結果、数値解析結果と定性的に一致する良好な結果が得られた。また、負荷容量最大化および漏れ量最小化を目的とした最適化では、一部に非合理的な部分が見られたものの、それらを修正した試験片を用いて回転試験を行った結果、密封性を有する表面テクスチャ形状であることが確認できた。

従来は高精度で表面テクスチャを加工する技術が無く、本研究のような取り組み自体が困難であったが、加工精度の向上に伴い、より設計自由度の高い革新的な最適化手法を実サンプルに適用することが可能となった。

文献

- 1) 徳永・杉村・山本：密封機構と摩擦低減機構を有するメカニカルシールの開発と性能評価-実験的検討, トライボロジスト第 60 巻 第 5 号(2015) 332.
- 2) M. Zhirong, M. Xiangkai, P. X. Yi: Shape optimization of hydrodynamic textured surfaces for enhancing load-carrying capacity based on level set method, Tribology International 162 (2021) 107136.
- 3) X. Meng, Z. Tu, Y. Ma, J. Jiang, X. Peng: Topology optimization of liquid lubricating zero-leakage mechanical face seals, Tribology International 169 (2022) 107490.

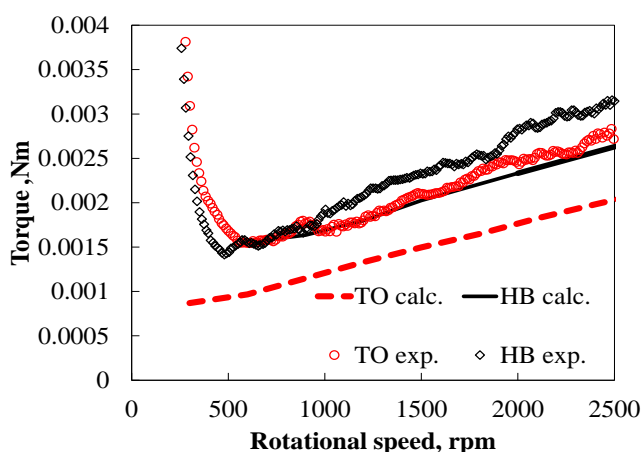


Fig. 6 Experimental results (solid lines) and numerical calculation results (dashed lines) of torque for topology optimization shape (red) and herringbone shape (black).