

## 第8章 総括

本研究は、柔軟材料でできた非対称なくさび状の断面形状を持ち、そのリップ先端を相対的に往復運動する軸表面に押し付けることによって流体を密封する機能を持つ往復動用リップシールの摩擦・密封特性の向上をもたらすための設計指針の基礎を確立するために実施したものである。

この目的達成のために、光干渉法を利用して単一リップしゅう動面の油膜形状計測を実施し、油膜形成状態と摩擦力との関係を把握した。ついで、シールを多段使用した場合のシール間圧力の発生機構を全反射を利用した密封面の直接観察と流体潤滑の逆問題を利用して解明するとともに、摩擦および密封特性との関係を把握した。さらに、柔軟材料で構成される潤滑面に規則的な直交突起を付与し、流体潤滑の逆問題の適用は平均油膜厚さが低下したときに有効であるが、膜厚が接触面の全体的形状に支配される場合には有効ではないことを明らかにした。また、実際に使用されている直交突起付与リップシールの摩擦・密封特性を複列および単列リップシールに対して検討し、突起に関しては流体潤滑の逆問題の適用は有効でないこと、突起は平均すき間を先天的に厚くするため、特に流体潤滑支配領域での摩擦の低減をもたらすが、漏れの増大をもたらすなどを明らかにした。最後にこれらの研究で得られた知見を基礎に、高い密封特性を維持した低摩擦往復動用シールは、現用の複列リップシールをリップ間に正圧が発生するように改良することによって実現できることを示した。

上記研究で得られた知見は各章の終わりに結論として述べたが、本章ではそれを取りまとめ、往復動用シールの設計に関しての指針を提示する。

### (1) 往復動用リップシールの油膜挙動と摩擦特性

- (a) 往復動用シールの密封・摩擦特性は、押し・引き両行程における入口側の油膜状態と流体潤滑の逆問題を併用することによってより詳細に説明することができる。
- (b) すなわち、シールの油膜挙動は基本的には接触圧力分布形態によって支配される。

- (c) 負の漏れをもたらす接触圧力分布をもつシールでは、押し行程において大気側へ薄い油膜しかもたらさないため、引き続く引き行程では油量不足をもたらして厚膜形成を困難とし、予測される値よりも高い摩擦係数をもたらす。
  - (d) 往復各行程中の平均油膜厚さは、速度増加とともに増大し、行程中央付近で最大値をとる。
  - (e) また、往復周波数の増加にともない油膜厚さは全体的に厚くなる。
  - (f) 往復両行程中での摩擦力の変動は、形成される油膜厚さに大きく依存する。
  - (g) 引き行程中において発生するエアレーションは、押し行程においても残留して押し行程初期に油量不足をもたらす、油膜の形成を阻害し、摩擦力に影響を与える。なお、エアレーションの押し行程での残留領域は往復周波数が高いほど大きくなる。
- (2) 多段往復動用シールの作動特性
- (a) 密封およびシール間圧力の発生は逆問題によって説明できる。
  - (b) 多段シールの漏れ量は、大気側シールに大きく影響されるが、漏れは油側に近く配置された最も密封性の高いシールによって主として制御される。
- (3) 突起付与往復動用シールの作動特性
- (a) 往復動用シールの円周方向に沿って形成した直交突起の存在は、摩擦係数の低下をもたらすが、漏れを助長する。
  - (b) その影響は、流体潤滑領域で大きく、非流体潤滑域で小さくなる。
  - (c) 低摩擦係数の原因は、突起によって接触域における平均すき間が厚くなるためであり、突起高さが高く、間隔が狭いほど、その低下率は大きい。
- (4) 低摩擦複列リップ往復動用シールの作動特性
- (a) 複列リップ往復動用シールの密封・摩擦特性および複列リップ間の圧力発生機構は流体潤滑の逆問題によって説明することができる。
  - (b) すなわち、シールの基本的特性は接触圧力分布の形態によって支配される。
  - (c) 断面形状が対向するリップの場合には両リップ間に正の圧力が発生する。
  - (d) このリップ間圧力の発生は摩擦力の大きい低減をもたらす。
  - (e) 上記摩擦力の低減は、リップ間圧力の発生による緊迫力の低減ならびに大気側リップの潤滑特性の改善によってもたらされる。

- (f) 密封圧力の増大による緊迫力の増加は、リップ間圧力の増加によって打ち消されるため、摩擦係数は密封圧力にほとんど依存しない。

すなわち、往復動用リップシールしゅう動面の油膜形状分布計測の成功に裏付けられたしゅう動面の直接観察を併用した摩擦・密封特性の評価実験を通して、流体潤滑の逆問題が往復動用リップシールの特性評価の理論的基盤となることが明らかにされた。この成果を応用し、漏れ量を規準内におさえ、しゅう動摩擦抵抗を大幅に低下可能にする対向リップを持つリップシールの開発が可能であることを明確に示すことができた。また、シール性能の向上を目指してリップシールに付与された直交突起の摩擦・密封特性に与える影響を検討するとともに突起への流体潤滑の逆問題の適用限界を明らかにすることができた。

これら本研究で得られた知見は、往復動用シールの特性向上に直接貢献するものであり、シール設計の際の設計指針の基盤を与えるものと考えられる。すなわち、往復動用シールは従来の実用経験をもとに機器に応じた漏れおよび摩擦損失動力規準に適合させて形状設計がなされるのが普通であるが、流体潤滑の逆問題を適用した論理的設計が可能であることを本研究は示している。例えば、漏れ防止、異物侵入防止を目的とした複列リップシールは主リップおよびダストリップの逆問題に立脚した形状変更によってシール性能を飛躍的に向上させることにつながり、シール部への突起付与は漏れや摩擦特性の変更に直接寄与するといえる。つまり、往復動用リップシールはシール部の全体的形状のみならず、シール面のマイクロ形状を含めて流体潤滑の逆問題で得られた知見を基礎に設計にあたるべきであると断言できる。その適用にあたっては機器の使用条件や適用限界を考慮すべきであるのは当然であり、シール性能向上のためには今後とも多方面からの研究が必要である。