

# 第1章 序 論

## 1.1 緒 言

密封装置（軸封装置、シール）は、機械装置内部の潤滑剤や作動流体の漏洩を防止または軽減し、外部からのダストや泥水等の異物の侵入を防止することを目的とした機械要素の総称であり、設備保全はもとより防災、環境保全などの観点から機器の機能および作動の信頼性を確保するためには必要不可欠な機能部品である。そのため、密封装置は、自動車、建設機械、生産機械、船舶、原子力、航空宇宙などあらゆる産業分野で、その用途・目的および使用条件に応じて密封機構、形状、材質の異なる多種多様なものが開発され使用されている。

密封装置は図1.1に示すように固定用シール（ガスケット）または運動用シール（パッキン）に大別され、さらに用途、機能、作用の点から20種類程度に分類される<sup>(1)</sup>。固定用シールは、静止状態における密封機能に限定されるため、取り扱いも簡単で、技術的問題点も比較的容易に解明される<sup>(1)(2)(3)</sup>。運動用シールは接触式と非接触式に分類されるが、表1.1に示すように接触式シールの方が非接触式よりも一般的に密封性能が高く<sup>(4)</sup>、実際に使用されている数もはるかに多い。表1.2は代表的な接触式シールの圧力、速度の使用条件範囲を各運動方式ごとに示したものである<sup>(5)</sup>。往復動用シールの方が回転用シールよりも低速領域で使用され、高圧の流体を密封することが多いといえる。この事実は、往復動用シールの使用条件は、摩耗や摩擦の観点から他のシールに比較して過酷であることを意味する。

往復動用シールの中、オイルシールおよびUパッキンは接触部にくさび状の非対称な断面形状をもつリップが採用されているため良好な密封特性を示すが、Oリングなどに比べて高い摩擦係数を示す傾向にあるため<sup>(6)</sup>、摩擦力を低減させることが課題となる。高圧下で使用されるリップパッキンなどでは機器が高出力であるため、シールの摩擦力の出力に影響する比率は相対的に低い。しかし、低圧条件下で使用されるオイルシールなどは摩擦力の占める割合が大きくなるため、摩擦力低減は、機器の高性能化や省燃費化の観点から特に重要になる。また、往復動用シールにおいては、漏れ防止、あるいは、異物混入防止

の信頼度を高めるという観点から、シールを複数個使用する多段式用法が多い。また、自動車用ショックアブソーバーなどでは、密封圧力によるリップの変形を小さく抑えるため、複列式リップ形状のオイルシールを採用するのが普通である。しかしながら、これらの用法においては、シール間あるいはリップ間に圧力が発生して<sup>(49)(50)</sup>、はみ出し破損や漏洩などの不具合が発生することがある。したがって、シールの向き・配列やリップ形状が密封および摩擦特性に与える影響をシールあるいはリップ間圧力との関連のもとに把握することが必要となる。

ところで、往復動用シールにおいては、往復両行程に対応する接触圧力分布が上昇変曲点（圧力こう配の極値）を持てば、粘度×すべり速度／荷重で規定される無次元特性数がある値以上であれば、連続流体膜が密封面間に形成され、密封面の保護を図りながら密封機能を維持できることが流体潤滑の逆問題<sup>(1)(2)</sup>の適用によって説明されている<sup>(3)~(5)</sup>。しかしながら、往復動用シールの密封特性や潤滑特性について、さらなる改善あるいは向上を図った設計指針を確立するためには、実際の密封面間に形成される油膜分布ならびにその挙動を明らかにするとともに、油膜挙動とトライボ特性との関係を正確に把握することが必要不可欠である。

本研究の目的は、非対称なくさび状の接触形状をもつ往復動用リップシールを対象として、密封面における油膜挙動と、摩擦力の変動状態とを関連づけることによって、摩擦・密封特性に及ぼす接触圧力分布の影響を正確に把握し、得られた結果を流体潤滑の逆問題を適用して統一的に解釈することによって、高い密封特性を維持しながら低摩擦抵抗を達成する往復動用シールの設計指針を確立することである。

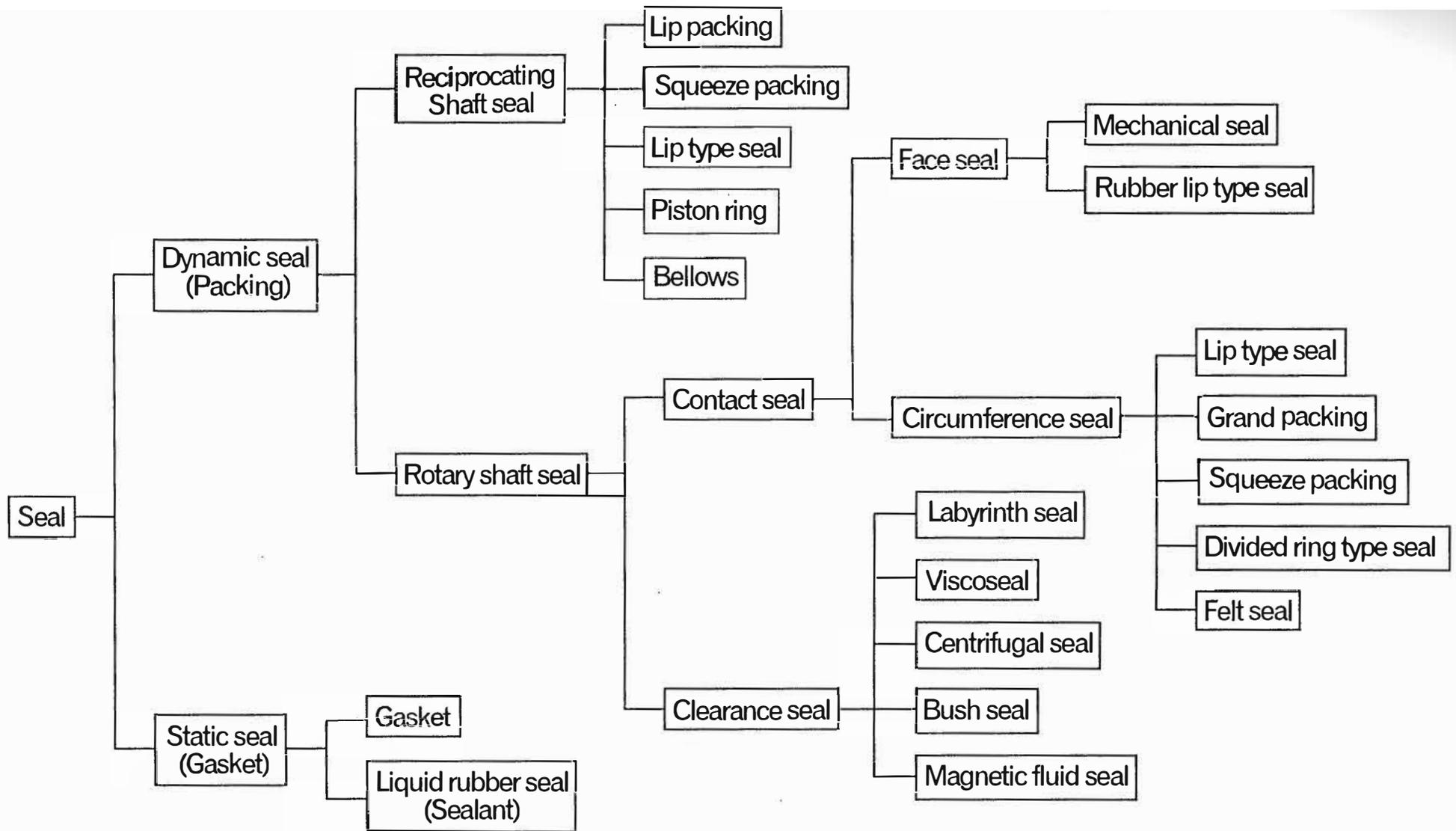


Fig. 1.1 Classification of sealing device <sup>(1)</sup>

Table 1.1 Characteristics of dynamic seals<sup>(4)</sup>

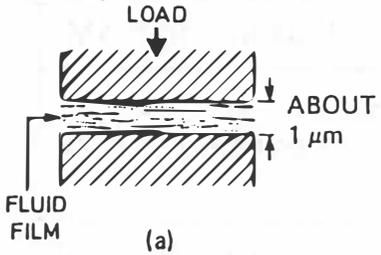
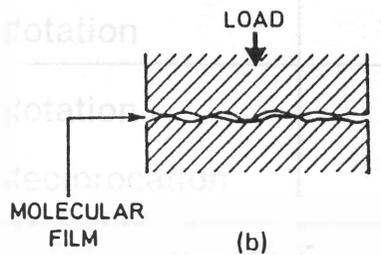
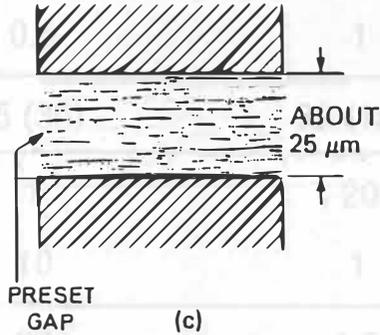
	<i>Contact seals</i>		<i>Clearance seals</i>
Sealing interface	<p>Surfaces loaded together: (i) Hydrodynamic operation (normal loads, speeds and viscosities)</p>  <p>LOAD FLUID FILM ABOUT 1 μm (a)</p>	<p>(ii) Boundary lubrication (high loads, low speeds, low viscosities)</p>  <p>LOAD MOLECULAR FILM (b)</p>	<p>Predetermined separation</p>  <p>ABOUT 25 μm PRESET GAP (c)</p>
Leakage	(i) Low to very low or virtually zero	(ii) As (i)	High, except for viscoseal and centrifugal seal at design optimum
Friction	Moderate	High	Low
Life	Moderate to good	Short	Indefinite
Reliability	Moderate to good	Poor	Good

Table 1.2 Kinds of seals and its usable range<sup>(5)</sup>

		Kinds of seals	Motion type	Usable range	
				Pressure (MPa)	Speed (m/s)
Dynamic seal	Contact type	Oil seal (Lip type seal)	Rotation	0.03	16
			Reciprocation	0.6	1
		Mechanical seal	Rotation	5 (30)	30 (100)
		Grand packing	Rotation	1	20
			Reciprocation	10	1
	Lip packing	Reciprocation	20	1.5	
	O - ring (Squeeze packing)	Reciprocation	10 (25)	1 (2)	
Non-contact type	Labyrinth	Rotation Reciprocation	————— —————	————— —————	
Static seal	Gasket	Stationary state	30 (100)	0	

Note : Numerical values in ( ) are for particular application.

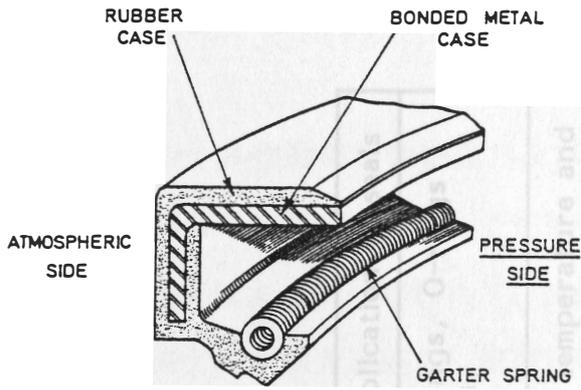
## 1.2 往復動用シールの構造と特徴

リップ部をしゅう動面に接触させる構造のオイルシールやUパッキンは、リップを持たないOリングやグランドパッキンに比べて良好な密封性能を有している<sup>(3)</sup>。図1.2 (a)～(e)にオイルシール、リップパッキン(Uパッキン、Vパッキン)、グランドパッキン、Oリング(スクイズパッキン)など、代表的な往復動用シールの構造および装着例をそれぞれ示す<sup>(7)</sup>。グランドパッキンの大半を除いて、往復動用シールの主要部は、柔軟な材料であるゴム(エラストマー)で構成されている。

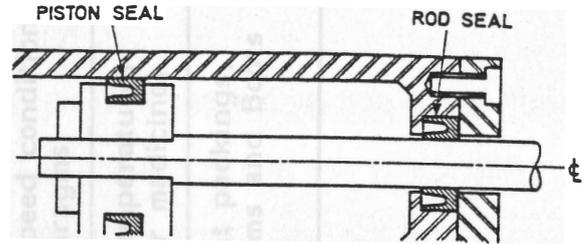
自動車のショックアブソーバーなどに使用されるオイルシールは、くさび状の接触形状をもつリップ部を構成する合成ゴムを金属補強環の端部に焼き付け接着し、軸への接触荷重(緊迫力)を安定に維持させるためにリップ背面にスプリングを組み込んだ構造となっている。スプリングは、接触荷重の安定維持の目的のみならず、軸振れに対するリップ追随性の付与、リップ先端と軸との接触圧力分布の制御のためにも使用される。オイルシールは他の往復動用シールと比較すると低圧領域で使用されるが、ショックアブソーバー用シールなどでは、密封圧力によるリップの変形を小さく抑えるため、複列リップ形状が採用されることが多い。

建設機械、生産機械の油圧シリンダーなどの高圧条件に適用されるリップパッキンは、オイルシールと同様にリップ先端部で接触しゅう動する構造を持つが、パッキン全体が合成ゴムのみで構成されており、溝部に組み込まれて使用される。Vパッキンおよびグランドパッキンは、通常、多段に装着して使用し、大気側端面からの増し締めによって漏れ量を調整する。UパッキンやOリングにおいては高い密封圧力条件になると隙間との関係から密封圧力側と逆側にゴムがはみ出して破損を生じる場合があるが<sup>(74)</sup>、樹脂製のバックアップリングを組み込むことにより、これを防止して使用することができる。

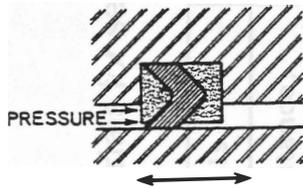
往復動用シールに用いられる代表的な合成ゴムの特長と適用例を表1.3に示す。耐熱性、耐寒性、耐油性、耐薬品性などは耐使用環境に関係する特性であり、硬さや弾性率、引張り強度や伸び、耐摩耗性、耐クリープ性、耐疲労性などは密封性能に関係する特性として重要である。これらのゴム材料の中、安価で汎用性の高いニトリルゴムが一般的に多く使用されているが、近年の使用条件の過酷化によって徐々にフッ素ゴムなどのグレードの高いゴムの使用に推移してきている。



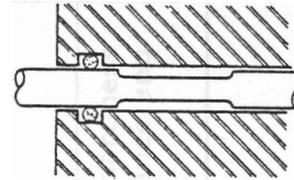
SEALING CONTACT  
(0.25- 1.0 mm)  
**(a) Lip type seal**



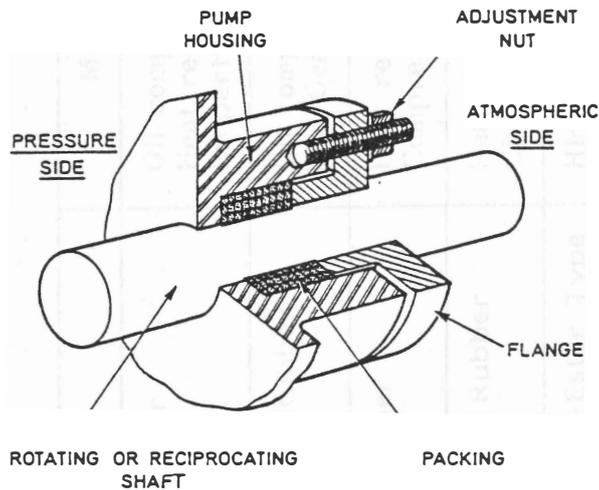
**(b) Square-backed 'U' seals as piston and rod seals in a hydraulic cylinder**



**(c) Chevron seal with shaped support rings**



**(d) 'O' ring seal on control valve spool**



**(e) Packed gland**

**Fig.1.2 Schematic diagrams of reciprocating seals assembled<sup>(7)</sup>**

Table1.3 Typical rubber materials for seals

Materials	Merits for using as seals	Examples of application to seals
Nitrile Rubber (NBR)	Oil compatibility, Wear resistance, Heat resistance, Low price and Property for molding	Oil seals, Packings, O-rings and Diaphragms
Polyacrylate Rubber (ACM)	Oil compatibility, Heat resistance and Gear oil compatibility	Oil seals (High temperature and speed conditions and gear oils)
Silicone Rubber (VMQ)	Heat resistance, Cold resistance and Compression set resistance	Oil seals (High speed condition), O-ring and Diaphragms
Fluorocarbon Rubber (FKM)	Heat resistance and Chemical resistance	Oil seals (High temperature) and Packings (for medicine)
Polyurethane-Ester Type (AU)	High tensile strength and hardness, Weather-proof, Wear resistance and Cold resistance	Pressure resistant packings, Wipers, Diaphragms and Boots

## 1.3 往復動用シールに関する従来の研究

### 1.3.1 基本的シール作動特性の把握および理論的アプローチ

ゴムあるいは高分子材料で構成される往復運動用シールを理論的に取り扱った最初の研究は、D. F. Denny によって行われた<sup>(8)</sup>。彼はゴムパッドを往復運動するガラス平面に接触させるというモデル実験を実施し、摩擦特性を計測し、流体潤滑理論を基礎として、単位長さあたりの摩擦力が  $F=(p\mu u B)^{1/2} (a + b p_0 / p)$  で与えられることを示した。ここで、 $p$ 、 $p_0$ 、 $\mu$ 、 $u$ 、 $B$ はそれぞれ密封圧力、しゅう動面の初期平均面圧、粘性係数、しゅう動速度、接触幅であり、 $a$ と $b$ は油種ごとに実験で求められる係数である。また、油膜厚さの式を提示するとともに、流体潤滑域から非流体潤滑域への遷移点における油膜厚さが密封圧力、弾性率および相手のしゅう動表面状態に依存することを示した。しかしながら、上記の摩擦力を与える式は、密封圧力 $p$ が0に近づくにつれて摩擦力 $F$ が増大することを示し、実際の摩擦現象と合致していない。

その後、Denny は各種の往復動用シールに関する実験研究を進めている<sup>(9)(10)</sup>。Uパッキンを用いた実験においては、摩擦力は密封圧力の増加に伴って増加するが、その増加率はUパッキンの種類によって異なることを示すとともに、漏れ量はしゅう動速度の2乗に比例すると述べている。また、漏れ量に与える密封圧力の影響を一定圧と変動圧力で調査している。一定圧力条件では、低圧で漏れ量が多く、特定圧力以上で漏れ量が一定になることを示している。変動圧力については、押し行程（軸が大気側に向かって運動する行程）と引き行程（軸が密封流体側に向かって運動する行程）の中どちらか一方の行程のみを高圧とした2つの変動圧条件で実験を行っており、その条件によって漏れ量が異なることを示し、この原因を、高圧条件となる行程で緊迫力が増大して油膜厚さが薄くなり、次行程の低圧条件における厚い油膜厚さとの差によって漏れが促進されると結論づけている。Vパッキンなど多段で用いるシールについても同様の実験を実施し、Uパッキンと同様な結論を導くとともに、使用パッキン段数が多いほど漏れ量は少ないが、摩擦力は大きくなることを指摘している。これらの Denny の研究は、密封圧力に影響される緊迫力の作用のみを強調した考察に偏っており、各種試料間で摩擦・密封特性が相違する原因などについてほとんど言及されていない。しかし、往復動用シールが流体力学的に取り扱えることを

示した点は高く評価される。

L. E. Ceyney、W. J. Mueller、R. E. Duval は航空機用Oリングを用いた実験を行い、つぶし率、軸表面粗さ、しゅう動速度の摩擦力に与える影響について報告している<sup>(11)</sup>。実験データは、非常にばらついており、有用な結論は示されていないが、往復動用シールに関する初期の系統的实验として多くの実用的資料を提供している。

岩浪、近森らは、しゅう動軸が貫通するシリンダの両端にOリングを装着して漏れ量の計測実験を行い、漏れ量が粘度の $3/2$ 乗、速度の $2$ 乗に比例するという結果を得た<sup>(12)(13)</sup>。この結果を説明するために、滑り軸受理論を適用し、軸径、速度、粘度、ゴム硬度と漏れ量との間の実験式を導いているが、得られた式では粘度の指数が $1$ であり、実験で得られた $3/2$ との相違を密封面における圧力による粘度増加としている。

J. M. Lawrie、J. P. O'Donoghue は自動車用クラッチとブレーキマスターシリンダの油圧系統に用いられるUパッキンの潤滑や漏れの機構を導電性ゴムを用いた接触比率の計測と、透明シリンダと高速カメラによるしゅう動部の状態の観測によって究明しようと試みた<sup>(14)</sup>。その結果、油膜はしゅう動初期に形成され、押し行程で薄く、引き行程では厚いことを示した。また、ストローク端におけるスクイズ効果についても言及している。しかしながら、理論的な考察は充分に行われていない。

R. F. Cnops は、カップパッキンを用いた往復運動の実験結果から、せん断力による接触部の応力分布の変化、油膜の形成、リップおよびヒール部の挙動について述べ、摩擦力がしゅう動速度とともに減少することを示し、ストローク端でリップのクリープが起こることを見出している<sup>(15)</sup>。しかしながら、実験結果に対する理論的考察はほとんどなく、定性的説明に止まっている。

H. K. Müller は、OリングおよびXリングを用いた実験結果を基礎に、往復運動用シールの密封特性と摩擦特性を理論的に取り扱っている<sup>(16)~(18)</sup>。すなわち、粘度、速度、圧力、ゴム硬度、形状を考慮して、油膜厚さ、摩擦力、漏れ量の式を滑り軸受理論を適用して無次元形で導くとともに、シールの接触圧力分布を軸に設けた微小孔の流体圧力との釣り合いによって静的に求め、押し行程および引き行程における圧力分布の作用の違いによって油膜厚さが異なり、そのために漏れ量と摩擦係数にも差異が生じることを論じた。また、最小油膜厚さが軸およびシールのしゅう動部の表面粗さの総和以下では、潤滑状態が流体

潤滑域から非流体潤滑域へ遷移することを指摘した。この理論は、以下に述べる流体潤滑の逆問題を潜在的に取り扱ったものといえ興味深い。

石渡、神林は往復動用オイルシールの摩擦特性について理論的、実験的研究を行っている<sup>(19)~(21)</sup>。滑り軸受理論を適用することによって、摩擦係数  $f$  と潤滑特性数  $G = \mu u L / Pr$  ( $\mu$  : 粘度、 $u$  : 速度、 $L$  : 軸円周長、 $Pr$  : 緊迫力) との間には  $f \propto G^{1/2}$  の関係が成立することを導き、得られた実験結果を理論的に説明している。さらに、リップ先端の接触しゅう動部の油膜挙動を透明軸を用いて観察するとともに、導電性ゴムを用いた電気抵抗法によって軸とリップとの直接接触の頻度を計測し、潤滑特性数が増加して、潤滑状態が非流体潤滑域から流体潤滑域へ遷移するに伴って、油膜が形成されやすくなることを定性的に確認するとともに、流体潤滑域から非流体潤滑域への遷移点、すなわち、最小摩擦係数を与える潤滑特性数  $G_c$  が軸の表面粗さの関数として表示されることを指摘している。これらのオイルシールにおける結果は、Oリング、Xリングを用いた H. K. Müller の知見と一致している。

1965年、H. Blok、H. J. Koens は光干渉法を用いて、Oリングとガラス面間に形成される油膜形状を直接観察し、往復運動下においては、くさび膜作用とスクイズ膜作用の位相差のために周期的に変動する油膜が形成されることを確認した<sup>(43)</sup>。その後、A. D. Robert、D. Tabor とも油膜の形成を確認している<sup>(44)</sup>。しかし、彼らは油膜の変動と摩擦特性との関係については言及していない。

実際の油膜挙動を直接観察することは、往復動用シールのトライボ特性を把握する上で、極めて重要と考えられる。しかし、光干渉法の利用は反射率の低い黒色ゴムが観測対象になること、軸との接触をモデル化する場合の実験装置における光学系の制約などが原因で観測を困難とすることが多い。また、その他の油膜計測法は未だ定性的な評価の域を出ておらず、往復動用シールそのものにおける油膜挙動の直接観察による実験はその後実施されていない。シール以外においては、西川、半田、兼田が、鋼球を用いて往復しゅう動面のEHL油膜の直接観察を実施し、しゅう動接触面下流に発生した気泡が次の行程での油量不足をもたらすことを明らかにしている<sup>(45)</sup>。この結果は、往復動用シールに関わる実際の油膜挙動の知見として興味深い。

### 1.3.2 往復動用シールの基礎理論の発展と確立

柔軟材料で構成されている往復動用シールの作動特性は、密封面の弾性変形を考慮した弾性流体潤滑 (EHL) 理論によって論ぜられるべきである。変形しやすい柔軟材料では、鉄鋼材料などと比較して、同じ接触荷重に対して接触面積は広く、接触圧力も低い。その結果、潤滑油の粘度や密度の圧力依存性を無視でき、密封流体を非圧縮性ニュートン流体として取り扱うことが可能になる。このような等粘度・弾性体としての取扱いが可能な EHL 問題をソフト EHL と呼び、高圧粘度・弾性体としての取扱いが必要な現 EHL 問題 (ハード EHL) と区別している。ソフト EHL では、粘度や密度の圧力依存性は無視できるものの、ハード EHL で無視可能な接触表面の曲率の影響や柔軟材料特有の粘弾性挙動の考慮が必要となるため、未だソフト EHL を取り扱う一般的理論式および解析手法は確立されていない<sup>(57)~(60)</sup>。

D. Dowson、P. D. Swales は、弾性流体潤滑 (EHL) 理論の往復動用シールへの適用について研究を進め、電気抵抗法などを利用して油膜厚さを計測した結果と比較している。また、シールの片側に圧力が作用すると、押し・引き両行程で油膜厚さに差を生じて漏れることを検証するとともに 摩擦せん断力が圧力分布、油膜厚さに影響することを指摘している<sup>(46)~(48)</sup>。

G. J. Field、B. S. Nau は、2 個の角リングで構成される往復動用シールの実験によって、往復運動に伴って 2 個の角リング間の圧力が異常に上昇し、それに伴ってシールのはみ出しが起きることを見出し、シール間圧力の上昇は往復両行程の流量差によって生ずることを指摘して漏れ量制御の重要性を示した<sup>(49) (50)</sup>。さらに、EHL 理論の適用により圧力分布および油膜の厚さと形状の計測結果と比較を試み、摩擦・密封特性に影響を与えるシールの内部応力や接触部形状の重要性を指摘している<sup>(51)~(54)</sup>。

K. Herrebrugh は柔軟材料における EHL 問題を現 EHL と同様の方法で取り扱い、その解を積分方程式で表示するとともに、柔軟材料を対象としたソフト EHL では金属を対象としたハード EHL で特徴的な圧力スパイクの発生がないことを指摘している<sup>(55)</sup>。また、I. D. C. Gaman、G. R. Higginson、R. Norman はスクイズ運動下における油膜厚さの減少割合は、接触面積の増大のために弾性係数とともに低下することを示している<sup>(56)</sup>。

1957 年、H. Blok は流体潤滑の逆問題を提唱した<sup>(22) (23)</sup>。ゴムあるいは高分子材料の

ような高い変形性をもち、弾性変形量が流体膜厚に比較して非常に大きい場合には、流体膜形状が変動しても接触圧力分布はほとんど影響を受けない。すなわち、接触圧力分布が先天的に与えられているとみなすことができる。この場合には、油膜形状を予め設定して圧力分布を求める古典的流体潤滑理論とは逆に、既知の接触圧力分布を満足する油膜厚さを求める問題となるため、流体潤滑の逆問題と呼ばれる。平野はスクイズ効果を考慮して逆問題を動的に取り扱い<sup>(24)</sup>、静的取扱いでは解決不可能であった解の2価性の問題に決着をつけた。

平野、兼田は、動的逆問題を往復動用シールに適用して、安定膜形成や密封に与える接触圧力分布の最大圧力こう配の存在の影響、摩擦波形に与えるスクイズ作用の影響などを明らかにするとともに、流体膜の崩壊が発生する限界条件を接触幅に対する行程長の関係で示すなど、往復動用シールの基礎理論を確立した<sup>(25)~(28)</sup>。

H. K. Müller は、先の往復動用シールの研究<sup>(16)~(18)</sup>では流体潤滑理論を適用していたが、逆問題を取り上げ直し、一様速度での往復運動を仮定して往復両行程での圧力分布の変曲点の大きさに差があれば、油膜厚さに差を生じて漏れることを示している<sup>(29)</sup>。

F. H. Theyse は、静的逆問題の往復動用シールへの適用法を解説し<sup>(30)</sup>、W. Schmitt は、逆問題に基づき往復動用シールの挙動を一般的に解説している<sup>(31)</sup>。H. W. Baron と J. Enting は逆問題を適用することによって、圧力分布を制御したシールを設計し、密封を達成したと報告している<sup>(32)</sup>。神林、大竹、石沢は、Vパッキンについて  $f \propto G^{1/2}$  の関係を実験で示し、この比例定数について逆問題を適用し、H. K. Müller の手法によって静的に計測した接触圧力分布の最大圧力こう配との間に対応関係があることを報告している<sup>(33)</sup>。

C. J. Hooke、J. P. O'Donoghue らはOリングの接触圧力分布を弾性論を適用することによって計算し、逆問題を適用して、往復行程の油膜厚さおよび摩擦力を密封圧力を変数とした式で表示している<sup>(34)~(37)</sup>。また、漏れは、押し・引き両行程において油膜厚さが異なるため、その流量差によって生じることを示した。

平野、河原らは、往復動用Oリングの実験結果から、潤滑特性数Gの大きい領域で、摩擦特性が  $f \propto G^{1/2}$  の関係となり、流体潤滑が支配する領域であることを示した。密封特性については、漏れ  $Q \propto G^{3/2}$  の関係になること検証している<sup>(38) (39)</sup>。さらに、河原、石渡、市川は、Uパッキンの摩擦波形に及ぼすストローク長と密封圧力の影響を実験で求めるとと

もに、密封圧力条件を変化させたときのUパッキンの接触圧力分布を光弾性実験によって、密封圧力増大によるパッキンヒール部の軸への接触によって摩擦力が増加することを示した<sup>(40)~(42)</sup>。

このように、流体潤滑の逆問題は、柔軟材料で構成される往復動用シールの基礎理論としての地位を確保し、実際のシールへ幅広く適用されてきている。

### 1.3.3 実用シールへの逆問題の応用と実際の諸問題

往復動用シールにおける摩擦・密封特性の究明過程で得られた成果の実際問題への適用あるいは多くの実用シールの技術的諸問題の解決についても多方面から多彩な研究が実施されている。特に、往復動用オイルシール<sup>(61)~(63)</sup>やパッキン<sup>(64)~(66)</sup>についての実際の使用に関わる報告は実用データとして有用である。

#### (1) 逆問題の応用の代表例

河原、平林らは往復動用オイルシールの漏れ制御に逆問題を適用している。すなわち、接触圧力分布の最大圧力こう配をリップ形状によって制御し、ステムしゅう動部に適度な漏れ流量を供給することによって内燃機関におけるバルブステムのしゅう動焼き付きを防止することができることを示している<sup>(67)(68)</sup>。

末次、小林らは、往復動用オイルシールにおいて、押し行程における速度の方が引き行程よりも速い場合に漏れ量が多くなることを実験によって確かめるとともに、逆問題の適用によって、漏れ防止の条件として、押し・引き両行程の速度比に対する押し・引き両行程の最大圧力こう配の比を大小関係で示している<sup>(70)</sup>。

#### (2) 摩耗と破損

大竹らは、往復しゅう動によって生じるシールの摩耗を取り扱っている。オイルシール、Uパッキンについて摩擦特性に関する実験の結果から、非流体潤滑域で顕著に摩耗が発生することを確認するとともに、摩耗発生に対応して非流体潤滑域側に向かって油膜破断が顕著になることを電気抵抗法によって指摘している。また、Dリングを用いて非流体潤滑域で発生する摩耗は、ゴム材料の機械的強度を高めることによって低減できることを示している<sup>(71)(72)</sup>。

往復動用シールに用いられる合成ゴム材料の破壊現象は、伸長破壊と疲労破壊に大別される。伸長破壊については、T. L. Smith が伸長破断時の歪みと引張り応力との関係を明らかにし、破壊包絡曲線といわれる1本の曲線を提示している<sup>(73)</sup>。これを用いれば耐伸長破壊を考慮した設計をすることができる。しかし、繰り返し伸長が作用する場合には、疲労破壊が支配的となる。この破壊機構は、未だ明確に解明されていないが、有用な知見を与えるものとして、大竹、河原らが行った実験がある<sup>(74)(75)</sup>。彼らは、ゴムダンベル試験片を用い、破壊寿命に与える温度、歪み振幅、周波数の影響を多くの実験点から求め、寿命回数は、ゴムのガラス転移温度で最大値を示し、歪みおよび周波数が増加するほど減少するという興味深い事実を明らかにしている。往復動用シールでは柔軟で大きい変形性をもつゴム材料が使用されるため、高圧条件で“はみ出し”による破損を生じやすくなる。ゴムがはみ出すと、溝のエッジ部から亀裂が発生し、試験時間とともに成長してやがて欠落する。さらにその破損部分が大きく成長していく。大竹、河原らはこの破損が圧力とすき間に影響され、ダンベル試験と同様に温度にも影響されることを示した<sup>(74)</sup>。

### (3) シール間圧力の発生

往復動用シールにおいては、漏れ防止、あるいは、異物混入防止の信頼度を高めるという観点からシールを複数個使用する多段式用法が多い。その結果、接触圧力分布形状によってはシール間に正または負の圧力が発生する場合がある。G. J. Field、B. S. Nau は、前述したように往復運動に伴って2個のシール間の圧力が異常に上昇し、それに伴ってシールにはみ出し破損が起きることを角リングを用いた実験によって見出している<sup>(49)</sup>。兼田は、2つのOリング装着溝底面の軸方向傾斜を変え、これらの組み合わせを変えることによって、複列で形成される種々の接触圧力分布形状の摩擦・密封特性およびシール間圧力に及ぼす影響を系統的实验で求めている<sup>(76)</sup>。その結果、特定の組み合わせでシール間に圧力が異常発生することを確認し、この圧力発生機構を逆問題に基づいて説明している。実用上、往復動用シールの多段式用法に主眼を置いたこれらの研究は重要である。しかしながら、密封性の高いリップシールを多段で用いた場合の摩擦・密封特性を評価した研究は未だ存在しない。リップシールは、接触面の両側に十分な流体が存在するとすれば、接触圧力分布の形状から往復両行程における膜厚の差が大きいため、シール間圧力の上昇が容易に起こる可能

性がある。そのため、系統的な研究によってシール間圧力がリップシールの摩擦・密封特性に与える影響を把握することは、シールの設計指針を確立する上で極めて重要となる。

#### (4) 軸粗さおよび人工突起付与シール

河原、平林らは、軸表面粗さが摩擦特性に及ぼす影響について、前述したバルブシステムシールを用いた実験から、非流体潤滑域から流体潤滑域への遷移点にあたる潤滑特性数  $Gc$  は軸の最大粗さの2乗に依存してシフトすることを見出している<sup>(67)(68)</sup>。また、R. K. Flitney、B. S. Nau は、軸の仕上げ方法によって表面粗さとその形態を種々変えて、Uパッキンの摩耗および摩擦・密封特性に及ぼす影響を調査している。摩擦係数はばらつきの大い結果となっているが、漏れは粗さの増大に伴って増加する傾向を示している。しかし、潤滑状態の評価がなされておらず、系統的な知見は見い出されていない<sup>(69)</sup>。

河原、本橋らは、リップ円周方向に人工的な多段突起を成形付与した往復動用オイルシールを用いて、摩擦特性に及ぼす突起の影響を検討し、摩擦係数は突起高さが増加するほど全体的に低下することを示すとともに、突起は、非流体潤滑域で発生しやすいスティックスリップの防止に効果があると論じている<sup>(77)</sup>。また、U. Frenzel、H. K. Müller<sup>(78)</sup> は、Uパッキンのリップとヒール間の表面に島状突起をレーザーで加工付与し、摩擦特性に与える影響を検討し、突起付きの方が突起なしに比べて引き行程で低く、押し行程で高くなることを示している。突起部およびヒール部の変形状態の観察やレーザー加工により変化する表面物性の影響が考慮されていないが、突起の存在が摩擦特性に大きく影響を与えることを示すものといえる。

これらの研究はシール表面の凹凸状態を適正に制御すれば、摩擦あるいは摩耗の改善に適用可能なことを示唆するものである。

#### 1.3.4 従来の研究からの研究課題

以上の諸研究全体を通してみると、その目的とするところは、次の二つに大別される。

- (1) 往復動用シールの摩擦・密封特性および摩耗特性について実際の現象に即した基礎理論を確立すること。

(2) 実際に使用される往復動用シールで発生する技術的諸問題やシールの機能・性能に対する要求課題を基礎理論の適用によって解決すること。

流体潤滑の逆問題による理論的な取り扱いが提唱されて以来、往復動用シールの基本特性はこの理論を基礎として飛躍的に進展しており、今日では逆問題は往復動用シールの基礎理論の本流として定着しているといっても過言ではない。すなわち、上記(1)の基礎は一応確立されているといえる。

ところで、逆問題においては、接触圧力分布の最大圧力こう配に対応した膜厚の形成が摩擦・密封特性を本質的に決定するが、その場合に接触域入口側に十分な流体が存在することが前提となる。したがって、逆問題を往復動用シールへ適用するにあたっては、密封面の両側に流体が充分存在するものと仮定せざるを得ないが、密封状態を呈する実際のシールにおいては、密封面の片側（大気側）には密封液側から漏れ出た流体量しか存在せず、必ずしも逆問題の適用前提を満足しないと考えられる。実際の往復動用シールにおける諸特性をさらに正確に取り扱うためには、実際条件における接触領域の油膜挙動を詳細に観測し、逆問題の成立前提の適否を明らかにすることが、重要かつ不可避の課題であると考えられる。

また、実際によく使用される多段式シールの摩擦・密封特性、あるいは、シールリップ表面上の粗さや人工的に付与された突起の摩擦・密封特性に及ぼす影響に関しては、逆問題によって統一的に説明できるかどうかは未だ不明であり、重要な課題と考えられる。

## 1.4 研究の意義、目的と内容

機械装置の相対運動部における流体の漏洩防止を主目的とした運動用シールは、密封対象流体を漏らさず、摩擦損失が微小で、摩耗や損傷がなく安定した機能を維持して長時間使用できることが理想である。しかし、接触しゅう動方式のシールでは、密封しゅう動面の摩耗や損傷、発熱を生じやすく、長期間にわたって作動の安定性を保つことは難しい。したがって、完全な流体膜の形成によって密封面を保護することが必要になるが、それに伴って必然的に生じる漏れを最小にするように配慮しなければならない。すなわち、シール技術の根幹は、漏れ防止と密封面の潤滑性向上という相反する要求目的をいかにしてバランスよく設定するかという問題に帰着する。しかし、密封性を重要視する実用のシールにおいては、摩擦や摩耗は不可避のものとして使用されているのが実状であり、理想的なシールとはほど遠い。シールにおけるこの重要問題を克服するためには、シールの密封面で実際に起きているトライボ現象をできるだけ詳細に観測するとともに、その現象を基礎理論を適用して統一的に評価することが必要不可欠であるといえる。

本研究は、密封性重視の現在のニーズに鑑み、非対称なくさび状の接触形状をもつ往復動用リップシールを対象として、その密封面における油膜挙動を光干渉法を利用して直接観測し、摩擦力の変動状態と関連づけることによって、摩擦・密封特性に及ぼす接触圧力分布の影響を明らかにするとともに、この知見に立脚して、リップシールの多段式用法、多段突起や複列リップによって形成される多段接触圧力分布の摩擦・密封特性に及ぼす影響を系統的な実験で明らかにし、さらに、それらの結果を流体潤滑の逆問題を適用して統一的に解釈することによって、往復動用シールの設計に反映させ、低摩擦往復動用シールの設計指針を確立することを目的とする。

本研究で得られる実際の現象に基づいた成果は、往復運動する種々のシールの摩擦・密封特性の基本的知見を与えるとともに、逆問題を基礎とした往復動用シールの設計や用法に重要な指針を与えるものと考えられる。

本論文の内容は次の通りである。

第2章では、本研究の理論的基盤を与える流体潤滑の逆問題について説明する。

第3章では、円形断面を持つ軸と往復動用リップシールの組合せを、往復運動するガラ

ス平板とくさび状の接触断面形状をもつ帯状ゴムの組合せでモデル化し、往復運動に伴う密封面における油膜挙動を光干渉法を利用して直接観察できる装置を開発して、膜厚変化と摩擦力変化とを関連づけるとともに、それらの挙動が流体潤滑の逆問題によって説明できることを示し、本研究の研究基盤を確立する。

第4章では、ピストンの多段溝に装着されたリップシールと往復運動する透明シリンダで構成される装置を用いて、多段往復動用シールの摩擦・密封特性を全反射を利用した密封面の直接観察を併用して把握し、シールの向きや配列の相違によってもたらされるシール間圧力の発生の有無と程度および密封特性の相違などが流体潤滑の逆問題によって説明できることを明らかにする。また、漏れ量は大気側シールに大きく影響されるが、漏れは油側近くに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ことを示す。

第5章では、正弦波状の往復運動をするガラス平板に、間隔、高さ、頂角、傾斜角などの相違する規則的な直交突起を持つ帯状ゴム試料を押しつけ、それらの摩擦挙動や油膜挙動などを把握し、柔軟材料で構成される潤滑面のマイクロ形状に対する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は有効であるが、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する。

第6章では、第4章および第5章の知見を基礎に、単一リップおよび複列リップに規則的人工突起を付与した場合の摩擦および密封特性を第4章で開発した実験装置を用いて議論し、突起の存在は摩擦係数の低下をもたらすものの、漏れを助長することを示す。

第7章では、第4章で得られた多段リップシール間における圧力発生の概念と第6章の結果に立脚して、リップ間圧力の計測を可能にした3種類の複列リップシールを作製し、高い密封作用を持ちながら、密封圧力にはほとんど依存せず摩擦係数の大幅な低減を実現できるシールが開発可能であることを実験事実と流体潤滑の逆問題から示す。

第8章は総括であり、本研究の成果を要約した。