

省エネ・環境に貢献するシール研究

Sugimura, Joichi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University

<https://hdl.handle.net/2324/25745>

出版情報：トライボロジスト. 56 (2), pp.105-111, 2011-02. 日本トライボロジー学会
バージョン：
権利関係：(C) 2011 Japanese Society of Tribologists



解 説

特集・省エネ・環境に貢献するシール技術

省エネ・環境に貢献するシール研究

原稿受付 2010 年 11 月 1 日

“トライボロジスト” 第 56 巻 第 2 号 (2011) 105~111

杉 村 丈 一

九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門
(〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

1. はじめに

シールは、ゴムや紙や金属などのさまざまな素材から作られるガスケット、すなわち静止用シールと、オイルシール、パッキン、グランドパッキン、メカニカルシール、ピストンリングなどしゅう動部で使用される運動用シールに大別される。機械のさまざまな部位で、流体の漏洩を防止し、異物の侵入を遮断するシールは、その密封機能によって機械の性能を左右するだけでなく、環境保護と省エネルギーに直接関係する重要な機械要素である。20 世紀後半に、理論と実際の連携の結果としてシール技術が飛躍的に進歩したと言われているが、その後の進展は開発現場の努力に負うところが大きいと思われる。今後、環境・エネルギー問題への取組みを進め、新たな産業構造を構築していくためには、既存技術の改良だけではなく、革新的な技術の創出が求められる。そのためには、裏付けとなる基本メカニズムの解明や実用をめざした理論面からの研究が必要不可欠である。

以下では、シールの基礎研究に焦点をあて、まず国内外の研究動向を概観し、次に運動用シールの摩擦低減などに関する最近の研究を紹介する。

2. 国内外の研究動向

学会等での研究発表や論文の形で報告される、シール技術に関する研究の動向をみてみよう。表 1 と表 2 に、2009 年 9 月に京都で開催された第 4 回世界トライボロジー会議 (World Tribology Congress 2009) と、同年 10 月に英国ノッティンガムで開催された第 20 回流体シール国際会議 (20th International Conference on Fluid Seal-

表 1 第 4 回世界トライボロジー会議におけるシール関係の発表

国	実験／解析	対象	備考
ドイツ	実験	リップシール	レーザ蛍光
フランス	解析	メカニカルシール	混合 TEHL
イギリス	解析	PTFE回転シール	非線形 FEM
フランス	解析	メカニカルシール	表面粗さ
日本	実験	PTFE回転シール	表面改質
日本	実験	シール材料	セラミックス
日本	実験	リップシール	気体移動
フランス	解析・実験	メカニカルシール	水、相変化
日本	実験	O リング	低温、高圧
ドイツ	実験	PTFE回転シール	CO ₂
アメリカ	解析	油圧機器用シール	総説
日本	実験	ガスシール	接触の可視化
日本	実験	リップシール	加圧状態
日本	実験	往復動シール	テクスチャ
日本	実験	往復動シール	摩擦測定
日本	実験	ガスケット材料	ゴム
日本	実験	メカニカルシール	ロータリ血液ポンプ
イスラエル	実験	メカニカルシール	テクスチャ・総説
日本	実験	メカニカルシール	テクスチャ
イスラエル	実験	リップシール	テクスチャ
韓国	実験	ピストンリング	テクスチャ

ing) での、シールに関する発表内容を示す。

前者では特にテクスチャや表面粗さなど、低摩擦化などをめざした基礎研究が目立つのに対し、後者では研究開発に即した内容が多く、ドイツからの発表が目立つ。また、いずれの会議でも、解析的研究よりも実験的研究の発表が多い。

表 3 は、2005 年から 2009 年の 5 年間に、米国機械学会の Journal of Tribology、英国機械学会

Researches on Seals for Energy Saving and Environment

By Joichi SUGIMURA, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University (744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 819-0395, E-mail: sugi@mech.kyushu-u.ac.jp)

Key Words: seal, review, experiment, analysis, lubrication, surface texture

表 2 第 20 回流体シール国際会議での発表

国	実験／解析	対象	備考
ドイツ	実験	リップシール	レーザ蛍光
フランス	解析・実験	リップシール	温度特性
イギリス	解析	PTFE回転シール	温度
日本	実験	往復動シール	流体潤滑
ドイツ	実験	O リング	油圧シリンダ
ドイツ	解析	静的シール	油圧シリンダ
ドイツ	実験	往復動シール	異物
ドイツ	実験	シール材料	空圧シリンダ
ドイツ	実験	往復動シール	実験装置
アメリカ	解析	往復動シール	表面粗さ
イギリス	実験	シール材料	コーティング
ドイツ	実験	往復動シール	油膜計測
ドイツ	実験	メカニカルシール	コーティング
フランス	実験	静的シール	振動, 疲労
イギリス	実験	メカニカルシール	配管用
アメリカ	実験	ゴム材料	材料評価
マルタ	実験	O リング	破壊
スイス	実験	ゴム材料	新規材料
イタリア	実験	ゴム材料	低温用
イギリス	実験	ゴム材料	材料評価

の Journal of Engineering Tribology, Elsevier 社の Tribology International に掲載されたシール関係の論文数を示したものである。論文はほとんど海外の著者によるものであり、リップシールやメカニカルシールなどについては解析的研究が多い。一方、ここに数は挙げないが、本誌トライボロジストにおけるシール関係の論文はきわめて少ない。

以上から、ここ数年に限って言えば、シールのトライボロジーは独仏米英で活発であり、日本では理論解析の研究が少ないことがわかる。その背景には、国内の大学や研究機関におけるシールのトライボロジー研究者の減少がある。今後の状況改善が望まれる。

3. メカニカルシール

近年、表面テクスチャが盛んに研究され実用化されている。これは、しゅう動面に定まった形の多数の微小なくぼみ、ないし溝を人為的に付与してしゅう動特性を向上させるものであるが、平滑な面にレーザやエッチングなどの方法でくぼみを

表 3 国際誌に掲載されたシール関係の論文数

	実験／解析	J.Trib.	J.Eng.Trib.	Trib.Int.
シール材料	実験	3	2	3
リップシール・回転シール	実験	1	3	3
	解析	3	3	7
往復動シール	実験	0	5	2
	解析	5	2	2
メカニカルシール	実験	2	1	1
	解析	5	3	1
ガスシール	実験	2	0	0
	解析	3	0	1
その他	実験・解析	10	1	8

付与するタイプの適用対象として、早い時期から研究されたのがメカニカルシールであった。くぼみはディンプル、ピット、穴などさまざまな言葉で表現されるが、以下ではすべて「くぼみ」と書くことにする。

メカニカルシールは、静止リングと回転リングの端面をばねなどで押し付け流体の漏れを抑えるものである。しゅう動面間にすきまがなければ漏れを完全に止められるが、現実的にはすきまが存在し、密封流体が流入して潤滑膜が形成される。この潤滑膜によるしゅう動面の保護と潤滑膜破断による漏れ防止作用とが両立して働く状態が理想的と考えられている¹⁾。その密封のメカニズムについては未だ統一的な理解には至っていないが、密封部位の圧力差に逆らって低圧から高圧への流れを作り出すために有力と考えられている要因の一つが、表面の微細な形状である²⁾。スラスト軸受などでスパイラル状の溝が流体を半径方向に引き込み、流体圧の発生を促進させることは良く知られているが、原理的にはこれと類似したものである。

このような表面の微細な形状の作用を能動的に作り出すために、レーザなどの新しい加工方法によって表面凹凸を付与することが提案され、表面粗さや従来からあった凹凸形状と区別して表面テクスチャと呼ばれるようになった³⁻⁷⁾。表面テクスチャの当初のねらいは、流体潤滑効果の向上であった^{3,4)}。イスラエルの ETSION らは、シール面間での流体膜の存在を前提として、負圧領域での

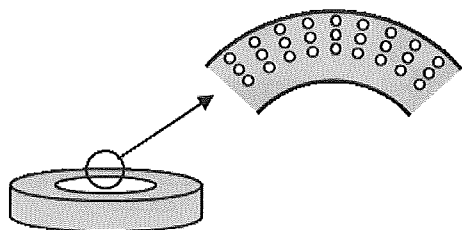


図1 外周側にくぼみを配置した表面テクスチャの概念図

キャビテーションを考慮にいれてレイノルズ方程式を解き、表面テクスチャの流体圧発現効果を示した。また、くぼみの数よりもくぼみの深さとシールリングの内外径比との比が圧力発生に大きく影響し、くぼみ深さに発生圧力を極大とする最適値があること、発生圧力に対して密封圧力が十分小さいときにくぼみの作用が有効であることなどを示し、水ポンプのシールで実証した⁴⁾。圧力の発生はくぼみ部に生じるキャビテーションによって圧力の正負対称性がくずれるためである。またキャビティー部では2面間に粘性によるせん断力が実質的に働かないため、キャビティーがない場合よりも摩擦トルクが低くなる。

その後、高压側にテクスチャを配置することによって密封作用が発現することが示された⁵⁾。図1に示すように、リングの外周側にくぼみを配置することで、結果的に外周から内周へ向けて半径方向に狭まりすぎまの効果が生まれる。これにより流体の流量は抑制されるが、これだけで逆向きの流れを発生することはない。FELDMANらは、この部分テクスチャをガスのシールにも適用し、上と同様の原理で漏れ量が低減するとともに、ガス膜の剛性が向上することを理論解析によって示した⁶⁾。

一方、SIRIPURAMらはLIGAプロセス（フォトリソグラフィーによってつくられた型から電気めっきによって金型を作り、これを用いて塑性加工を行う微細加工技術）によってさまざまな形の突起やくぼみを表面に付与し、その潤滑特性を調べた。断面形状が円形、四角形、三角形、六角形などの突起とくぼみを比較し、摩擦係数は形や配向にほとんど依存しないが、漏れ量が形状に依存することを示した⁷⁾。また、BAIらは、ガスシールのシール面に円形のくぼみを付与し、その配向によ

って密封効果を増大させることができることを理論解析によって示した⁸⁾。YAGIらは、円形のくぼみの配置を変えることによって流れが変わり、しゅう動特性が変わることを示した⁹⁾。また徳永らは、くぼみを周方向に配置することによって、くぼみに沿ってキャビティーが環状に形成されることを実験的に見出した¹⁰⁾。

表面テクスチャは、シール以外の機械要素、すなわち軸受、ピストンリング、スカートなどさまざまなしゅう動面において摩擦低減や圧力発生などの流体効果のほか、摩擦粉のマイクロトラップ効果、枯渇部への潤滑油供給などが期待できることが示され、実用化されている。さらに詳細は文献11、12に譲る。オイルシールへの応用については次章で紹介する。

メカニカルシールのトルク低減のアイデアとして、壁面滑りを応用した研究がある。SALANTは、撥水性ないし撥油性を有する固体表面上で流体が滑ることがあること¹³⁾を利用し、シール表面を“滑る”部分と“滑らない”部分とで構成することで流れが変化し、シールの潤滑・密封特性を著しく向上させることが可能なことを理論解析によって示した¹⁴⁾。

メカニカルシールの密封機構を論ずるうえで、熱の影響を無視することはできない。数値解析技術の発展にともない90年代以降、多くの理論解析がフランスや米国でなされている。TOURNERIEらは熱流体潤滑の理論計算を行い、シール面上の温度分布に及ぼすシール材内の熱伝導、シール表面の熱伝達、流体による対流、シール表面のうねりなどの影響の程度を調べた¹⁵⁾。また、流れが乱流に移移することで見掛けの粘度が上昇し、もれ量が低減されることを示した¹⁶⁾。さらに計算を発展させ、ガスの端面シールにおける熱変形、ガスの圧縮性、慣性力などを考慮に入れた熱弾性流体潤滑（TEHL, Thermo-Elasto-Hydrodynamic Lubrication）の理論解析を行いシールの特性が熱によって大きく影響を受けることを示した¹⁷⁾。また、DJAMAIらは熱弾性流体潤滑解析に基づき、回転リングの縁にノッチ（縁の一部を削ったもの）を設けた場合について検討し、ノッチが摩擦トルク低減に有効であり、特に低速、

高面圧でその効果が高いこと、熱変形によってシール面にうねりが発生するが動圧発生には大きく影響しないこと、などを示した¹⁸⁾。一方、LUANらはシール周辺の熱流体流れの解析を行い、冷却効果への影響を議論している。さらに、シール面での伝熱の理論解析を行い、シール面の温度に及ぼす表面粗さの影響が顕著であることを示した^{19,20)}。これらの成果が、メカニカルシールの密封性、潤滑性の向上につながることを期待したい。

4. オイルシール

オイルシールの密封の基本原理は、20 世紀後半の研究の積み重ねによって、定性的にはほぼ解明されたと考えられている^{2,21~23)}。すなわち、油側から大気側への流体の漏れを抑える原理は、漏れの方向と逆向きの流体力学的なポンピング作用が働くこと、その作用はリップ表面の微小突起の変形によってもたらされる軸方向の流れによるものであること、その変形はリップと回転軸間に働く接触面圧分布が油側に寄った位置に最大値をもつ非対称分布であること、である。図 2 に概念図を示す。このほかにも、密封機能と潤滑作用にかかわる二次的な因子は多々あるが^{22,23)}、支配的な要因はゴムと回転軸とのマイクロ EHL (Micro Elasto-Hydrodynamic Lubrication) に集約できる。80 年代から 90 年代にかけて、特に理論面での裏付けを最も精力的に行ったのは、米国ジョージア工科大学の SALANT らの研究グループであった²²⁾。

ポンピング作用を増大させるために、リップの大気側の端部にらせん状のリップ（ろっ骨状の突起を円周方向に並べたもの）を設けることがしばしばあるが、そのような表面テクスチャ的な効果は付加的なものであり、上に述べたようなリップ先端でのマイクロ EHL の作用が密封の基本原理解である。しかし、その働きについては完全な理解には至っていない。省エネ・環境の観点から、機械メーカーではさらなる摩擦低減と密封性能の向上が求められており、そのための基礎作りのためには、表面粗さのどのような性質が効いているか、作動中のリップ表面はどう変形し、キャビティはどのように発生するか、などについてさらに実

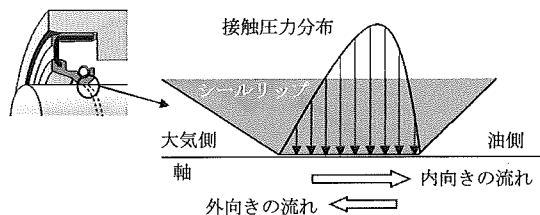


図 2 リップ部の圧力分布と流れ（一部出典：文献 21）

験的、理論的な研究が必要である。

佐藤ら^{24,25)}は、レーザ蛍光法による油膜形状の測定と摩擦トルクの測定を行い、表面粗さを有するリップ表面の突起が平らにつぶれること、回転軸の周速の変化に対して膜厚の変化はきわめて小さいこと、膜厚が小さいほど摩擦係数が低いこと、漏れと摩擦係数の相関はないこと、摩擦係数の軸受特性数に対する変化が従来から認められていた関係とはやや異なること、などを実験的に示した。また、三角関数状の表面形状を想定し、変形は考慮に入れない簡単なモデル解析を行って、上述の実験結果を裏付けた²⁵⁾。このなかで、漏れと摩擦係数の相関関係がない点は重要な発見である。すなわち、シールの密封作用と潤滑作用はマイクロ EHL において直接つながっているが、潤滑性を左右する支配的な流れの方向は円周方向であるのに対して、漏れの方向はそれと直交する方向である。これは、表面粗さの両方向の機能を両立させることが、シールの設計では重要であることを示唆している。シール密封部の直接観察や膜厚測定については、文献 26 に詳しく解説されているので参考にされたい。

一方、理論解析の面では、ゴムの変形やキャビティ発生などを、いかに適切にモデルに組み込んで精度よく解析するかが 90 年代以降の課題であり、その方向で研究が進んでいる。最も精力的に進めていると思われるのはフランスのボワティエ大学のグループである^{27~30)}。HAJJAM らは、三角関数状の粗さモデルについてソフト EHL の数値解析を行い、油膜厚さ、摩擦トルク、キャビティの発生領域、ポンピング量などが実際の現象とよく合うと述べている²⁷⁾。さらに、同様の形状モデルにおいて、流体の非ニュートン性を考慮すると摩擦トルクはより低くなることを示した²⁸⁾。

これらの研究を通じて熱の影響が無視できないことが明らかになり、その後、熱弾性流体潤滑の解析に発展させ、表面突起の変形の非対称性に基づく温度分布によってポンピング作用が左右されるが、摩擦トルクへの影響は少ないことなどを示した^{29,30)}。

数値解析を行ううえで表面の微視的形狀をどう与えるかが重要であるが、これらの例からもわかるように数値解析においては極めて単純な初期形状を与えざるを得ないのが現状である。上述のとおり粗さの挙動について、さらなる探求が必要である。

表面の微視的形狀と流体の流れの関係を捉えるために、杉村らは視点をかえ、オイルシールにおける気体の移動現象の研究を行った³¹⁻³³⁾。オイルシールが大気側の空気を吸い込み、密封側の気体を吸い出すことは経験的に知られているが、そのメカニズムは明らかではなかった。中岡らは、気体の移動が気体の潤滑油への溶解と潤滑油の流れによるものであり、移動量は気体の溶解度と回転軸の速度に関係することを実験によって明らかにした³²⁾。また、単純な輸送モデルをたててその関係を理論的に説明した³³⁾。

次にテクスチャの応用を紹介する。オイルシールのゴムのリップは一般に摩耗することを前提に設計されているため、ゴム表面に前述の表面テクスチャを施すことは考えにくい。回転軸側に表面テクスチャを施す試みがいくつかある³⁴⁻³⁶⁾。既出のイスラエルのグループのSHINKARENKOらは、数値計算により回転軸にくぼみ列を付与することにより負荷容量の増大と摩擦の低減が期待できることを示した³⁴⁾。このグループは最近、ゴム側にテクスチャを施した場合についても検討しているようである。

一方、HADINATAら³⁵⁾は、回転軸にさまざまな形状の多数の突起を付与することで、負荷能力向上、摩擦低減だけでなくポンピング作用向上が得られる可能性を理論解析によって示し、さらに同じ米国の研究グループは三角形のくぼみについて実験による検証を行った³⁶⁾。その実験によれば、回転軸上のくぼみは総じて潤滑性能を向上させるが、密封機能が低いものはリップの摩耗が増加し

た。三角形の頂点を油槽側に向けた場合には膜厚が厚く摩擦は低くなるが流体の漏れが生じるのに対し、大気側に向けた場合には漏れは生じないがリップのゴムの摩耗量が増え、摩耗によってリップの表面粗さが増加した。この摩耗を抑えることができれば、回転軸上への表面テクスチャ付与の実用可能性が高まるであろう。

5. その他のシールのトピックス

往復動シールは、油圧、空圧のシリンダやバルブなどの往復動部位に使用されている。その密封作用の基礎原理については、流体潤滑に基づいた理論が確立している^{2,37)}。しかし、より定量的に往復動シールの特性を理解し、低摩擦化や長寿命化を図るためには、表面粗さ、混合潤滑、非線形の力学特性をもつゴム等の材料の変形、非定常状態など、さらに明らかにしなければならない点が多々あり、研究が続けられている^{38,39)}。過去80年間にわたる膨大な研究が文献39で解説されているので参考にされたい。

往復動シールの混合潤滑に関する最新の理論解析としては、Oリングに関するÖNGÜNらの数値計算⁴⁰⁾、平均流モデル⁴¹⁾を用いたSCHMIDらの解析⁴²⁾、SALANTらの非定常、粘弾性を考慮したU型のロッドシールのシミュレーション⁴³⁾が挙げられる。いずれも表面粗さの影響を調べているが、市販のソフトウェアパッケージを用いており、数値解析技術のハードルの高さを伺わせる。

最後に、環境に関連した分野として、水素に係るシールの研究を紹介する。水素の圧縮機やポンプにおけるトライボロジカルな問題の多くはシールに関するものである⁴⁴⁾。往復動のシールとしては四フッ化エチレン (PTFE, Polytetrafluoroethylene) などの樹脂材料が無潤滑で使用されるが、特に数十MPaの高圧下での信頼性については十分な検証データがない。中嶋、澤江らは、高圧水素ガス中でのしゅう動において、相手面であるステンレス鋼上のPTFE転移膜の形成状態が、鋼表面での水素の吸着や還元反応によって影響を受けることを報告した^{45,46)}。

トライボロジーの分野から少し離れるが、ゴムのOリングを高圧ガスの密封に用いた場合、ゴム

内に侵入した気体が減圧時に急速に放出される際にゴム自体の破壊を引き起こす, いわゆるブリスタが問題となる. 山辺らは, エチレンプロピレンゴムの高圧水素によるブリスタ破壊に及ぼすゴム充てん剤の影響を調べ, 充てん材の水素吸蔵量の違いに依存することを突き止めた. すなわち, ゴム内への水素の侵入量は充てん材の種類によらずヘンリーの法則に従うこと, 充てん材としてカーボンブラックは侵入水素量が多く, シリカは少ないこと, 低い水素量と強度によってシリカ充てんエチレンプロピレンゴムが耐ブリスタ性に優れていること, などを示した^{47,48)}. このような, 固体へのガス成分の侵入挙動とそれによる強度特性の変化に関する知見は, トライボロジーにおいても大いに参考になる.

6. おわりに

本稿では, 運動用シールの密封, 潤滑機構に関する研究を中心に解説したが, 言うまでもなく, シールの摩耗とその低減方法に関する研究も省エネ・環境の観点から重要である.

また, シールはトライボロジーの分野だけではなく, ターボ機械や医療機器, 圧力容器, 燃料電池などさまざまな分野で研究されており, それらのシステムのなかでのシールについてトライボロジーが貢献できることは沢山ありそうである. 環境と省エネの世紀においてますます重要な位置を占めるシールの研究課題は尽きることはなく, 研究が活発になることを願ってやまない.

文 献

- (社)日本トライボロジー学会編: トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001) 289.
- 兼田: シールの密封理論, トライボロジスト, **43**, 2 (1998) 125.
- I. ETSION & L. BURSTEIN: A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure, Trib. Trans., **39** (1996) 677.
- I. ETSION, Y. KLIGERMAN & G. HALPERIN: Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces, Trib. Trans., **42** (1999) 511.
- I. ETSION: Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing, Trib. Lett., **17**, 4 (2004) 733.
- Y. FELDMAN, Y. KLIGERMAN & I. ETSION: A Hydrostatic Laser Surface Textured Gas Seal, Trib. Letters, **22** (2006) 21.
- R. B. SIRIPURAM & L. S. STEPHENS: Effect of Deterministic Asperity Geometry on Hydrodynamic Lubrication, J. Trib., **126** (2004) 527.
- S. BAI, X. PENG, Y. LI & S. SHENG: A Hydrodynamic Laser Surface-Textured Gas Mechanical Face Seal, Trib. Lett., **38** (2010) 187.
- K. YAGI, W. TAKEDOMI, H. TANAKA & J. SUGIMURA: Improvement of Lubrication Performance by Micro Pit Surfaces, Trib. Online, **3**, 5 (2008) 285.
- Y. TOKUNAGA, H. INOUE, K. OKADA, T. SHIMOMURA & Y. YAMAMOTO: Effects of Cavitation Ring Formed on Laser-Textured Surface of Mechanical Seal, Proc. World Tribology Congress 2009 (2009) 177.
- I. ETSION: State of the Art in Laser Surface Texturing, J. Trib., **127** (2005) 248.
- 是永: サーフェステクスチャの形状寸法とトライボロジー特性, トライボロジスト, **55**, 2 (2010) 101.
- Y. ZHU & S. GRANICK: Phys. Rev. Lett., **88**, 10 (2002) 106102.
- R. F. SALANT: Numerical Simulation of a Mechanical Seal with an Engineered Slip/No-Slip Face Surface, 17th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHR Group Ltd. (2003) 15.
- B. TOURNERIE, J. C. DANOS & J. FRÈNE: Three-Dimensional Modeling of THD Lubrication in Face Seals, J. Trib., **123** (2001) 196.
- N. BRUNETIÈRE, B. TOURNERIE & J. FRÈNE: Influence of Fluid Flow Regime on Performances of Non-Contacting Liquid Face Seals, J. Trib., **124** (2002) 515.
- S. THOMAS, N. BRUNETIÈRE & B. TOURNERIE: Thermohydrodynamic Behavior of Mechanical Gas Face Seals Operating at High Pressure, J. Trib., **129** (2007) 841.
- A. DJAMAÏ, N. BRUNETIÈRE & B. TOURNERIE: Numerical Modeling of Thermohydrodynamic Mechanical Face Seals, Trib. Trans., **53** (2010) 414.
- Z. LUAN & M. M. KHONSARI: Numerical Simulations of the Flow Field around the Rings of Mechanical Seals, J. Trib., **128** (2006) 559.
- Z. LUAN & M. M. KHONSARI: A Thermohydrodynamic Analysis of a Lubrication Film between Rough Face Seals, J. Eng. Trib., **223** (2009) 665.
- 文献 1) の p. 280.
- R. F. SALANT: Theory of Lubrication of Elastomeric Rotary Shaft Seals, Proc. Instn. Mech. Engrs., **213**, Pt. J (1999) 189.
- P. BAART, P. M. LUKT & B. PRAKASH: Review of the Lubrication, Sealing, and Pumping Mechanisms in Oil- and Grease- Lubricated Radial Lip Seals, J. Eng. Trib., **223** (2009) 347.
- 佐藤・杉村・山本: オイルシールしゅう動面の油膜形成と摩擦特性に関する研究, トライボロジスト, **48**, 6 (2003) 494.
- Y. SATO, K. SEKI, J. SUGIMURA & Y. YAMAMOTO: Experiments and Simple Modeling of Hydrodynamic Lubrication in Radial Shaft Seals, 17th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHR Group (2003) 139.

- 佐藤：シール技術を支える可視化技術，トライボロジスト，**52**，12（2007）861.
 - M. HAJJAM & D. BONNEAU : Elastohydrodynamic Analysis of Lip Seals with Microundulations, J. Eng. Trib., **218** (2004) 13.
 - M. HAJJAM & D. BONNEAU : Non-Newtonian Effects on Elastohydrodynamic Behaviour of Rotary Lip Seals, J. Eng. Trib., **220** (2006) 79.
 - A. MAOUI M. HAJJAM & D. BONNEAU : Analysis of Three-Dimensional Non-Axisymmetric Elastic Effects of the Lip on the Thermoelastohydrodynamic Radial Lip Seal Behaviour, J. Eng. Trib., **221** (2007) 859.
 - A. MAOUI, M. HAJJAM & D. BONNEAU : Effect of 3D Lip Deformations on Elastohydrodynamic Lip Seals Behaviour, Trib. Int., **41** (2008) 901.
 - 杉村・榎藤・山本・中岡・佐藤：オイルシールの気体吸込み特性に関する研究，トライボロジスト，**51**，12（2006）906.
 - S. NAKAOKA, Y. SATO & J. SUGIMURA : Gas Transportation Mechanisms in Radial Lip Seals, Proc. World Tribology Congress 2009, F-332 (2009) 607.
 - H. MIZUTA, S. NAKAOKA, Y. SATO & J. SUGIMURA : Simulation of Gas Transportation in Radial Shaft Seal with Model Surfaces, Proc. IJTC 2010 (2010) IJTC 2010-41260.
 - A. SHINKARENKO, Y. KLIGERMAN & I. ETSION : The Effect of Surface Texturing in Soft Elastohydrodynamic Lubrication, Trib. Int., **42** (2009) 284.
 - P. C. HADINATA & L. S. STEPHENS : Soft Elastohydrodynamic Analysis of Radial Lip Seals with Deterministic Microasperities on the Shaft, J. Trib., **129** (2007) 851.
 - V. KANAKASABAI, K. H. WARREN & L. S. STEPHENS : Surface Analysis of the Elastomer in Lip Seals Run against Shafts Manufactured with Micro-Cavity Patterns, J. Eng. Trib., **224** (2010) 723.
 - 文献1)のp. 292.
 - B. S. NAU : Historical Review of Studies of Polymeric Seals in Reciprocating Hydraulic Systems, Proc. Instn. Mech. Engrs., **213**, Pt. J (1999) 215.
 - G. K. NIKAS : Eighty Years of Research on Hydraulic Reciprocating Seals : Review of Tribological Studies and Related Topics since the 1930 s, J. Eng. Trib., **224** (2010) 1.
 - Y. ÖNGÜN, M. ANDRÉ, D BARTEL & L DETERS : An Axisymmetric Hydrodynamic Interface Element for Finite-Element Computations of Mixed Lubrication in Rubber Seals, J. Eng. Trib., **222** (2008) 471.
 - N. PATIR & H. S. CHIENG : An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication, J. Lub. Tech., **100** (1978) 12.
 - T. SCHMID, M. ANDRÉ & G. POLL : A Transient 2D-Finite-Element Approach for the Simulation of Mixed Lubrication Effects of Reciprocating Hydraulic Rod Seals, Trib. Int., **43** (2010) 1775.
 - R. F. SALANT, B. YANG & A. THATTE : Simulation of Hydraulic Seals, J. Eng. Trib., **224** (2010) 865.
 - 牧野：水素エネルギーシステムとトライボロジー，トライボロジスト，**49**，5（2004）383.
 - 澤江・杉村：水素雰囲気でのトライボロジー，J. Vac. Soc. Jpn., **53**，4（2010）280.
 - K. NAKASHIMA, A. YAMAGUCHI, Y. KURONO, Y. SAWAE, T. MURAKAMI & J. SUGIMURA : Effect of High-Pressure Hydrogen Exposure on Wear of PTFE Sliding against Stainless Steel, J. Eng. Trib., **224** (2010) 285.
 - 山辺・中尾・藤原・西村：10 MPa水素ガス中で曝露したエチレンプロピレングムの水素侵入特性とブリスタ破壊に及ぼす充てん剤の影響，機論，A編，**74**，743（2008）971.
 - J. YAMABE & S. NISHIMURA : Influence of Fillers on Hydrogen Penetration Properties and Blister Fracture of Rubber Composites for O-Ring Exposed to High-Pressure Hydrogen Gas, Int. J. Hydrogen Energy, **34** (2009) 1977.

■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■ 著者プロフィール ■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■

杉村 丈一 1958年生まれ、東京大学大学院工学系
研究科航空学専門課程博士課程修了。現在、
九州大学大学院工学研究院機械工学部門教
授、工学府水素エネルギーシステム専攻長。
主に表面粗さに関連した研究に従事、現在
興味を持っているテーマは、気体の作用、
水素、シール、グリース、安全評価など。
第47、48、53、54期理事。



