トライボロジーロードマップ研究会 報告書 (第1版)

平成 27 年 5 月 11 日

目次

1	はじめに(中原)	. 3
	1.1. トライボロジーロードマップ研究会発足の経緯	3
	1.2. 本研究会の目的・目標と構成委員	3
2	トライボロジーロードマップの定義と枠組み	. 5
	2.1. トライボロジーロードマップの定義 (中原)	5
	2.2. 技術俯瞰図:トライボロジーの立ち位置と研究開発課題表	
	2.3. 研究開発課題・目標の要因	5
	2.3.1. 社会的要請(平岡)	5
	2.3.2. 企業の要請(中原)	8
	2.3.3. 技術の目標(中原)	8
	2.4. ブレイクスルー (中原)	9
	2.5. 時間軸が描けるものと描けないもの(中原)	9
3	システム・コンポーネント側からの要求に対するロードマップ(トップ	ダ
ヷ	アン)の例	10
	3.1. 自動車の省エネルギー・環境対応(馬渕)	10
	3.1.1. 摩擦低減:エンジン,タイヤ	. 11
	3.1.2. 摩擦増加:ベルト CVT, ブレーキ, スノータイヤ	. 14
	3.2. 鉄道(柿嶋)	
	3.3. 航空用エンジン,発電用ガスタービン(横山)	18
	3.4. 医療機器 (X線診断装置と回転陽極型 X線管) (服部)	
	3.5. 宇宙機(小原,野木)	25
4	トライボ要素技術各論(ボトムアップ 1)	31
	4.1. 転がり軸受(野口)	
	4.1.1. 社会環境と転がり軸受技術との関係	. 31
	4.1.2. 転がり軸受に要求されている性能に関する技術動向	. 31
	4.1.3. 産業分野分野別技術動向	. 33
	4.2. すべり軸受(中原)	40
	4.3. シール (杉村)	41
	4.3.1. 輸送分野	. 41
	4.3.2. エネルギー・産業分野	. 42
	4.3.3. シール技術のロードマップ	. 43

5	材料・表面処理(ボトムアップ 2) (梅原, 加納)	45
	5.1. RoHS(鉛などの有毒物質の規制)対応の代替材料開発(梅原,加納)	45
	5.2. 軽量化(梅原,加納)	46
	5.3. トライボ材料:パンタグラフのすり板(柿嶋)	46
	5.4. 表面処理(梅原,加納)	48
	5.4.1. 自動車部品への適用	49
	5.4.2. その他の産業分野への適用	51
	5.4.3. 今後の展望 ~ころがり疲労特性に関する研究動向~	51
6	潤滑剤(ボトムアップ 3)(益子)	52
U	6.1. 自動車用潤滑剤の今後	
	6.2. 産業界における潤滑剤の今後	54
	6.3. 潤滑剤の今後	55
	6.4. 今後の潤滑剤評価技術	55
7	解析ツール(ボトムアップ 4)	.57
	7.1. 潤滑シミュレーション技術の発展(服部)	57
	7.2. 試験法	58
	7.2.1. 摩擦摩耗試験法(加納)	58
	7.2.2. 加速試験法(中原)	60
	7.3. プローブ顕微鏡を用いた分析技術(安藤)	62
8	おわりに(中原)	65

1 はじめに(中原)

1.1. トライボロジーロードマップ研究会発足の経緯

21世紀に入り、いろいろな科学技術系の学会で「ロードマップ」が作られるようになり、日本機械学会でも 2007 年の創立 110 周年を契機に技術ロードマップ委員会を常設してロードマップ の作成を行っており、日本学術会議は 2011 年 8 月に「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」を発表している.

このような背景から、平成 20 年 (2012 年) 度の日本トライボロジー学会の理事会 (会長:山本隆司)でトライボロジーのロードマップ作成について検討を行うことが提案され、研究委員会での検討結果「第一種研究会」を立ち上げることが決定された。主査に中原綱光(東京工業大学名誉教授)を要請し、トライボロジーのロードマップの"枠組み"を作ることを目的として、第一種研究会の名称を「トライボロジーロードマップ検討研究会」として、そこで検討した結果、「トライボロジー技術俯瞰図」というマトリックス形式のトライボロジーロードマップの枠組みを作成した。しかし、その俯瞰図に具体性を持たせるために設置期間を1年延長し、不完全ながら技術課題も記入した「技術俯瞰図」を作成して、その研究会を終了した。その成果といくつかの分野のロードマップに関連する話題を加えて、トライボロジー会議 2012 年春の講演会で特別セッションを組んで発表したところ多数の聴講者があり、関心の高さがうかがえた。

そこで、上記「トライボロジーロードマップ検討研究会」で得た「技術俯瞰図」という枠組みを基礎にして、本来の目的である時間軸を入れたロードマップを作製する研究会として、「検討」という文字を削除した「トライボロジーロードマップ研究会」という名称に変えて第1種研究会を新設した.

1.2. 本研究会の目的・目標と構成委員

(1)目的・目標:本研究会では、技術俯瞰図においてまだ空白のマトリックスの技術・研究課題を埋め、それらの課題を分類整理し、分類された課題毎に先ずは 10 年後の予測を行い、順次に 20 年、50 年へと可能な範囲で拡大していくことにより、ロードマップを作製することを目的とした.

- (2) 設置予定期間: 2012年7月~2014年3月
- (3) 委員候補者:情報を収集し、整理する作業が主になるので、幅広い分野からある程度の人数が必要である. 先ず、前研究会の委員の残留が望ましいと考え、追加の新規委員として研究開発の長期計画に関わっている8名を加え、以下に示す委員構成とした.

前研究会の委員:

中原綱光 (元東京工業大学) 安藤泰久 (東京農工大学)

梅原徳次(名古屋大学)

小原新吾 (宇宙航空研究開発機構)

加藤孝久(東京大学)

杉村丈一(九州大学)

益子正文(東京工業大学)

.....

新規委員:

柿嶋秀史(鉄道総合技術研究所)

加納眞(神奈川県産業技術研究センター)

野木高 (宇宙航空研究開発機構)

野口昭治(東京理科大学)

服部仁志 (東芝 研究開発センター)

平岡正文(ものつくり大学)

横山文彦(IHI 技術開発本部 基盤技術研究所)

馬渕豊(日産自動車 要素技術開発本部 材料技術部)

2 トライボロジーロードマップの定義と枠組み

2.1. トライボロジーロードマップの定義(中原)

ロードマップ (road map) の元々の意味は文字通り「道路地図」であったが、目的地にたどり着くまでの日程表の意味にも使われるようになり、やがてプロジェクトマネジメントの思考ツールとして「工程表」の意味で用いられ、さらに、「未来における科学技術の進展を予想し、具体的に達成目標や優先順位、達成した場合の社会的な波及効果を示し、目的達成までの道のりを時系列で表現した」"技術ロードマップ"が主に科学技術や製品開発の分野で盛んに作られるようになった。「技術ロードマップ」が作成される目的は、目標管理が難しい研究開発においてトップダウン形式で選択と集中ができるようにするためである。したがって、トライボロジーのロードマップも技術ロードマップの範疇に入ると考えられる。

しかし、トライボロジーの技術は機械の基盤技術である要素に深く係る技術であるので、製品開発において研究開発の表にでてくることは少なく、表に出てくるときはその開発の障害になる場合である。したがって、製品開発の際にトライボロジー技術がどのように係るかを分析する必要がある。その分析が本研究会予備の「トライボロジーロードマップ検討研究会」で行われ、「技術俯瞰図」という形で提示された。

「技術俯瞰図」では 2.2 節で述べるように、システム、コンポーネントからの「トッポダウン」の要求の側面とトライボ要素自身の性能向上によるシステム、コンポーネントの底上げという「ボトムアップ」の二つの側面があることが示されている。上述のように、従来の技術ロードマップの目的がトップダウンの目標管理であるのに対し、トライボロジーのロードマップにおいてはトップダウンとボトムアップの両側面が必要であり、これがトライボロジーロードマップの特徴である。したがって、トライボロジーロードマップはこの両側面からの技術ロードマップと定義できる。

2.2. 技術俯瞰図:トライボロジーの立ち位置と研究開発課題表

(技術俯瞰図を別紙に示す)

2.3. 研究開発課題・目標の要因

2.3.1. 社会的要請(平岡)

(1) 社会的要請とは

本節では環境問題および省エネルギーに対する公的な合意や規制等の観点から、トライボロジーが果たしていかなければならない役割について俯瞰を試みる. 主としてインターネットからの情報に基づき、検討を行った.

(2) 温室効果ガス問題および省エネルギー

温室効果ガス問題に対する世界的枠組としては、周知のように「気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC)」がある. 2013 年第 19 回締約国会議 (COP19) が開催され、日本は 2020年の削減目標を 2005年比 3.8%減とすることを表明した. 長期的には 2050年までに世界の排出量を半減させる (先進国は 80%削減)という目標が 2009年の G8 サミットで確認されている.

省エネルギーに関しては、石油危機を契機として 1979 年に制定され、主として事業者を対象

とする「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(省エネ法)が何度か改正されつつ存続している。そこではエネルギー消費原単位の年平均 1%以上の低減 "努力" 義務が課されている。消費原単位とは、単位生産量や単位売上量あたりのエネルギーの実使用量を示し、非常におおまかにはエネルギー消費率と言い換えることができると思われる。

2005年と2012年の総排出量(森林による吸収等を考えない量)はほぼ同じ(若干増)だったので,2014年も2005年並と見て,2020年の温室効果ガスを2014年比4%減とするケースを考える.実際には森林による吸収や排出枠取引による減量が削減目標達成におおいに利用される模様だが,ここでは両年ともに総排出量の一定割合分(10%程度か?)にとどまるとして,総排出量自体の4%減を目標としてみる.

温室効果ガス排出量とエネルギー消費量が比例していると考える。たとえば平均経済成長率を年 1.5%とし、同じ率で消費原単位の分母となる生産量などが増加するとすれば、2020 年に総排出量 4%減とするには、2014 年比 13.5%、年あたりにして 2%の消費原単位低減が必要となり、省エネ法の 2 倍の低減努力が求められる。

動力機器について、摩擦損失低減のみでこの目標を達成することを検討してみる。エネルギー消費原単位をエネルギー消費率と読み替えると、2014年現在の一般的機器の摩擦損失率を 20% ~40%とすれば、2020年にはこれを 8%~30%に低減する必要がある。すなわち、現状の摩擦損失の 33%~66%まで低減する必要があり、ざっといえば今後 7年間で機器の摩擦を半減することが目標となる。

これはもちろんクリーンエネルギーへの転換など種々の考慮を省略した極端な計算であり、高い目標である。しかし、たとえば発電用タービン軸受の許容面圧を50%増とすることで軸受部摩擦損失が40%改善するとの試算がすでになされていたり[1]、シールや軸受の改良で、トライボ要素そのものに加え、機器自体の性能・効率が向上する効果があることも含めて考えると、不可能な数字ではないと思われる。温室効果ガス削減目標値3.8%が今後見直される可能性があることも考え、野心的な目標として考えてみてはどうだろうか。

(3) 廃棄物

廃棄物に関しては廃棄物処理法などがあり、それに基づき「廃棄物の減量その他その適正な処理に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための基本的な方針」(平成13年5月環境省告示第34号)が告示されている。そこでは産業廃棄物排出量を2015年度に2007年度比約1%増加に"抑制"、産業廃棄物再生利用率を約53%とすることが目標として定められている。

廃棄量の品目別比較において、潤滑油は第7位(134万トン/年)にランクされ(2002年)、廃棄物に占める割合は大きい、潤滑油再生利用率(大半が重油としての再生)は78%で、残余は他製品の原料、使用中の消失、焼却、廃棄等に回っていると推定される。再生利用率は上記告示に照らしかなり高いといえる。ただし、潤滑油としての再生利用が非常に少ないことが課題である。一方、2013年度の潤滑油消費量は2012年度比0.8%増加の見込みで、今後景気回復によりさらに増加する可能性があり、潤滑油使用量の低減・使用期間延長・潤滑油状態診断技術向上等の技術開発が、省資源の面からも期待される。

蒸気タービン軸受改良による 30%以上の給油量低減 (2001) の実績もあり、地道な技術開発を続けることで、相当量の潤滑油使用が削減できると期待できる.このほか、タイヤも廃棄物と

して大きな存在であり(2002 年廃棄量第 12 位. 103 万トン/年),その長寿命化なども取り組むべき課題である.

(4) 資源・エネルギー

経済産業省による海洋エネルギー・鉱物資源開発計画(平成21年3月),エネルギー基本計画(平成26年4月11日)など,資源・エネルギー需給に関する政府施策が危機感を持って策定されている。エネルギー基本計画においては風力・地熱エネルギーの導入加速や水素社会構築が謳われており,上述した省エネに加え,これら新エネルギー機器への対応がトライボロジーにも当然求められる。エネルギー機器に関係する個別機器・技術への対応については後に詳述されるので,ここでは資源の需給に関連してトライボロジー材料が曝されるであろう状況について,一般の潤滑剤ユーザの視点から見てみたい。

ほとんどの潤滑油の原料である「在来型」石油の今後の可採年数は 40~50 年といわれ、以前よりその枯渇問題が議論されてきた.しかし、シェールオイルなど、近年の「非在来型」資源の採算化により、優に今世紀中は石油時代が続くという見方もなされるようになってきた.政治的・商業的な理由に基づく供給不安は排除できないが、世界のグロスとしての石油供給には楽観的な見通しが多く見られる.原油精製における潤滑油留分のうち、潤滑油として生産されるのは数%であり、エネルギーとしての石油に比べ供給に余裕があるとの見方もあることから、潤滑油原料の石油からの代替は、当面は資源的な意味合いより生分解性やリサイクル性等、環境配慮の観点からなされることが多くなるのではないだろうか.

プラスチックの多くは石油や天然ガスを原料とするが、プラスチックの種類や国によって事情は異なるものの、シェールガス(天然ガス)採算化等により、世界規模で見た原料供給には潤滑油同様に楽観的な見通しが持たれているようだ。プラスチックにおいても、潤滑油同様、原料の石油・天然ガスからの代替は、環境対応の観点からなされることが多くなると思われる.

石油以外では、たとえばリチウムは世界需要の9%がグリース用であり(2010)、わが国は全量輸入している。その他固体潤滑剤もほとんど輸入に頼っているのは、わが国産業の例外ではない。潤滑剤やトライボ材料に多く用いられているレアアース・レアメタルあるいはそれに準じる材料は、資源的限界もさることながら、政治的・商業的理由で易々と供給不安に陥ることは経験済みである。他の分野同様、トライボロジーにおいても脱レアアース・レアメタルの技術開発が加速することが望まれる。

文献 [2.3]

[1] 中原:国家プロジェクトにおけるトライボロジー技術,トライボロジスト,57,11(2012)727.

(参考ホームページ)

http://www.env.go.jp/earth/cop/cop19/attach/cop19_gaiyo&hyouka_jp.pdf http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/summit/italy09/sum_gai.html http://www.enecho.meti.go.jp/topics/080801/kiso1.pdf https://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17394 http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2012sokuho.pdf

http://www.jmf.or.jp/japanese/commendations/energy/pdf/h20/20_03.pdf

http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/386/386288.pdf

http://www.env.go.jp/recycle/waste/kihonhousin/about.html

http://www.jalos.jp/jalos/paper/pdf/2011booklet01.pdf

http://www.paj.gr.jp/paj_info/press/2013/07/25-000646.html

http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H14/H14HO071.html

http://www.enecho.meti.go.jp/topics/kihonkeikaku/140411_energy.pdf

http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonseisaku/4th/4th-1.pdf

http://www.mech.nias.ac.jp/biomass/murakami-book-1kou.htm

http://www.japt.org/abc/a/gijutu/maizou.html

http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/2/2701/198308_086a.pdf

http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=14431

http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/part06/chapter01/section03.html

http://www.jccme.or.jp/japanese/11/pdf/2012_12/josei02.pdf

http://www.enecho.meti.go.jp/topics/090324/honbun.pdf

http://www.juntsu.co.jp/qa/qa1603.html

http://www.cecorp.ca/jp/future-energy/lithium.html

http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2012-05/28.Li_20120619.pdf

https://www.gsj.jp/data/chishitsunews/2010_06_06.pdf

2.3.2. 企業の要請(中原)

セールスにおける要請では、性能・機能だけでなくそれと価格のバランス、すなわちコストパフォーマンスが重要になる。開発においてコストの制約が大きな障害となることが多い。開発が技術的に成功してもビジネスで成功せず、消えてしまう場合もある。

もう一つの要請は開発期間の短縮である。開発期間で一つの障害は、信頼性確認のための実働 テストである。長い保証期間までテストできないことが多いのでので過酷試験や起動停止のイン ターバルを短くするなどの加速試験が行われるが、実働条件と異なってしまう問題がある。「加速 試験法」は今後も重要な課題である。

2.3.3. 技術の目標(中原)

一般に技術の進展の方向,すなわち技術目標には高速化,高効率化,高精度化,高強度化,軽量化,コンパクト化などがある。トライボロジー技術においては,高強度化は高面圧化となり,高速化と高面圧化を合わせた高 PV 値化,高速化の逆の極低速化,さらに高信頼性化,長寿命化,メンテナンスフリー化がトライボロジー技術課題の特徴である。過酷環境(高・低温,多湿,真空,冷媒雰囲気)の条件もトライボ要素がシステム・コンポーネント開発におけるハードルになる。

2.4. ブレイクスルー (中原)

技術課題というものは相反することをいかに両立させるか、その両立の向上が目標になるといえる。例えば、粘性摩擦を低減させるために潤滑油の粘度を下げると焼けつきの危険が増し、起動停止時の摩耗と摩擦係数増加を引き起こすので、それをどう両立させるかという課題が現在でも継続されている。相反する問題を克服することがいわゆる「ブレイクスルー」である。ブレイクスルーには設計や工作精度も無視できないが、トライボロジー技術においては潤滑剤と材料のイノベーションによることが多い。その際、コストと信頼性の相反問題の克服が実用化の鍵となる。

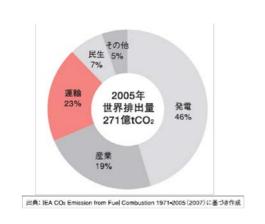
2.5. 時間軸が描けるものと描けないもの(中原)

システムやコンポーネントの開発ではスペックの目標が明示されるので時間軸を入れたロードマップを描きやすい. 一方、トライボ要素や材料・潤滑剤の場合は、2.3.3 項で述べたように技術の進展の方向があって、永遠の課題として際限がない目標となるので、システムやコンポーネントに特化した場合を除き、時間軸を入れたロードマップを描きにくい、すなわち、トップダウンの場合は描きやすく、ボトムアップの場合は描きにくいといえる.

3 システム・コンポーネント側からの要求に対するロードマップ(トップダウン)の例

3.1. 自動車の省エネルギー・環境対応(馬渕)

地球温暖化への対応として CO2排出量の削減がある。図 3.1-1 は 2005 年度の世界の CO2排出量の割合を示したもので、運輸部門の排出量が 23%を占めている[1]. ここには乗用車の他、船舶や航空機、鉄道も含まれるが、うち 73%が自動車からの排出であり、これは CO2排出量全体の14%に相当する。このため先進国に限らず世界の多くの地域で CO2排出量の削減に向けて、自動車の燃費規制が施行されている。図 3.1-2 は主要国の乗用車燃費規制による CO2排出量規制値の推移を示しており、どの地域も年々規制値が厳しくなっていく方向にある。日本における CO2排出量は、図 3.1-3 に示すように、国や各自動車メーカーの努力により 2000 年頃を境に減少に転じている。燃費向上の内訳は、自動車の燃費改善と交通対策による。今後さらに一層の燃費向上を達成するためには、図 3.1-4 に示すように、エンジンや駆動系の効率向上やハイブリッド化、アイドルストップ化、各部品の電動化の他、車両の空気抵抗やタイヤの転がり抵抗の低減、車両の軽量化等、多岐にわたる改善が必要である[2]. 燃費改善に有効な技術の具体的な効果の例を図3.1-5 に示す[3]. ガソリンエンジンや補機部品、駆動系部品でまだまだ改善余地の多いことが示されている。



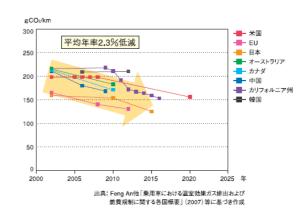


図 3.1-1 世界のセクター別 CO₂排出割合[1] 図 3.1-2 乗用車燃費規制/基準の CO₂エミッション[1]

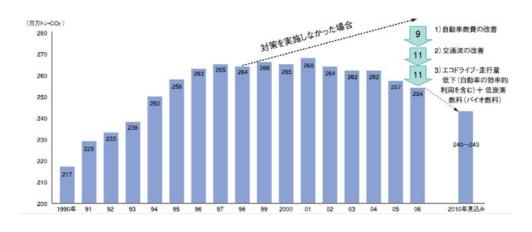


図 3.1-3 日本の運輸部門 CO₂排出量の推移[2]

主な燃費改善技術

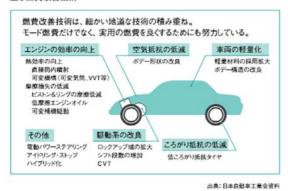


図 3.1-4 主な燃費改善技術[2]

ガソリンエンジンの改	息	補機類損失低減		
4バルブ	1%	電動パワーステアリング	2%	
2バルブ&2点点火	2~4%	充電制御	0.5%	
可変動弁系	1~7%	駆動系改良		
直噴ストイキエンジン	2%	アイドルニュートラル制御	1%	
直噴リーンバーンエンジン	10%	AT多段化	1~4%	
可変気筒	7%	CVT(L	7%	
ミラーサイクル	10%	自動MT(AMT·DCT)化	9%	
大量EGR	2%	MT/L	9%	
ローラカムフォロワー	1%			
オフセットクランク	2%			
可変圧縮比	10%			

図 3.1-5 2015 年度燃費基準策提示の 想定年譜改善技術と改善効果[3]

3.1.1. 摩擦低減:エンジン,タイヤ

図 3.1-6 は、時速 60km/h で走行する自動車の使用する燃料のエネルギーを 100%とした場合の、各部位毎で消費される割合を示している[4]. 燃料により生じるエネルギーのうち約 6 割は熱として冷却水や排気ガスとして排出される. 5%の空気抵抗を除く残り約 3 割が摩擦損失であり、その 1/3 がエンジンの摩擦損失として消費されている. エンジンでの摩擦低減は、この約 1 割の摩擦損失の低減に繋がり燃費向上に直結するため、これまで幅広い部品を対象に摩擦低減に向けた開発が行われている[5, 6, 7].

エンジン内の摩擦損失は、1) エンジン油の撹拌抵抗や粘性抵抗、2) 部品間の直接接触による摩擦の二つに大別できる. 前者では、エンジン油の主原料である鉱物油系の基油の精製度を上げて、いわゆる粘度の温度依存性の少ない低粘度油が普及している. これまで最低の粘度グレードであった 0W20 から、更に粘度レベルを下げた SAE16 の規格が新たに整備され[8]、今後更なる低粘度化の開発が検討されている. 部品間の摩擦低減は、部品自体の設計見直しにより接触点の面圧を下げて摩擦を減らす方法、接点での摩擦係数そのものを下げるために、部品表面の平滑化や固体潤滑性をもつ表面処理を用いる方法がある. 比較的、エンジンでは各部品間の摩擦損失の分担比が明確であるため、エンジンそれぞれの部位に対して、現在研究段階にある摩擦低減技術を採用した場合の効果を算出し、将来の燃費に対してどれだけ貢献が可能かの予測が行われている[4,9].

図 3.1-7 は、それぞれの潤滑状態での部品間の接点の摩擦係数が、今後の研究開発の進展によりどのように推移していくかを予測した図である。この予測によれば、例えば境界潤滑域にある部品間の摩擦係数が、2000 年時点で採用されている技術では 0.14 にとどまるが、2010 年で 0.1 に、現在研究段階の技術の採用により 2020年の時点では 0.01 にまで減少することを示している。その結果、2000 年から 2010 年の 10 年間での摩擦低減代は 42%、2010 年から 2020 年の間においてもほぼ同じレベルの削減率が維持されることを予想している。ここで摩擦を低減する手段としては、部品表面の平滑化や、平坦面に多数の微細なピットを形成したテクスチャ表面、ダイヤモンドライクカーボン膜の適用、更に潤滑油中の添加剤成分との相互作用による効果等を挙げている[4]。

図 3.1-8 は、日本トライボロジー学会第 1 種研究会である自動車のトライボロジーによる省資

源・省エネルギー予測調査研究会(以降、省エネ研究会)の作成した、2010 年から 2020 年での摩擦低減予測である[9]. 前記の Holmberg ら[4]の予測が、図 3.1-7 の乗用車採用の摩擦低減技術による、各潤滑域での摩擦係数の推移をベースに算出しているのに対し、本研究会では図 3.1-9 に示す、自動車メーカーや部品メーカーが想定した各部品毎の摩擦低減代を基に算出した、より現実的な予測を行っている。異なる方法による予測にも拘らず、エンジン、トランスミッション、ホイール周りを含めた摩擦低減効果代を約 40%と予測しており、結果としてほぼ同等の摩擦低減結果となっている点は興味深い。図 3.1-10 に、それぞれの予測を基にした自動車の燃費への影響を、ベース車両を 2010 年モデル(141gCO₂/km)として再計算し、日米欧各地域の燃費規制値の推移と比較した結果を示す。Holmbergらの予測を点線で、省エネ研究会の予測を〇で示す。省エネ研究会の燃費算出は、1)摩擦損失のみ、2)摩擦損失に伴う熱損失の低減を含むケース、3)遡上効果を含むケース(下流の摩擦損失に伴いエンジンに近い上流での摩擦損失の低減代を再計算)、の3つの段階で予測を行っている。摩擦低減に伴う付帯効果を加味した 2)及び3)の条件に従えば、各地域で今後施行される厳しい燃費規制の推移とほぼ同じ傾きとなる約30%の燃費効果が得られ、トライボロジー技術の燃費に影響するポテンシャルの高さを示している。

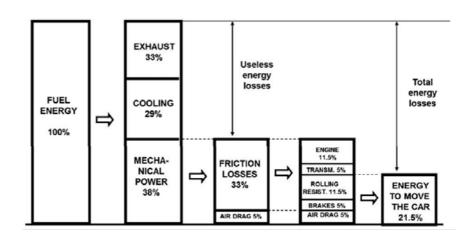


図 3.1-6 普通自動車のエネルギー消費内訳[4]

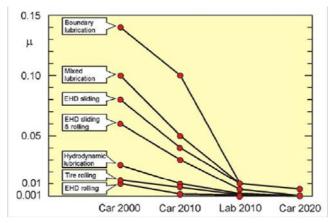


図 3.1-7 乗用車採用のフリクション低減技術による,異なる 潤滑領域での摩擦係数と転がり抵抗値の推移予測[4]

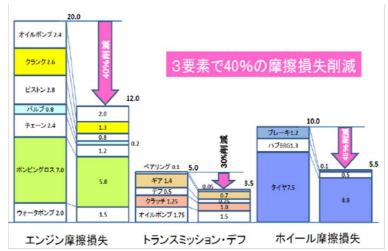


図 3.1-8 乗用車各要素の 2020 年における摩擦損失削減予測[9]

機器	要素	割合(%)	削減率(%)	削減手法
	オイルポンプ	2.4	17	オイル低粘度化
	クランクBRG	2.6	50	輻狭化、テクスチャー、表面処理、低粘度化
	ピストン	2.8	71	低面積, リング張力低減, 表面性状改善
エンジン	バルブ	0.8	75	表面性状改善、転がり化、シール改善
	チェーン・ベルト	2.4	50	ガイド材改善、チェーンリンク平滑化、幅狭化
	ポンピングロス	7.0	29	EGR(排気再循環)等
	ウォータポンプ	2.0	25	シール改善、電動化
	ベアリング	0.1	50	小型化, 低粘度化, 球軸受化
1	ギア	1.4	50	高精度化, 低粘度化
トランスミッション・デフ	デフ	0.5	50	高精度化, 低粘度化
/=/-//	クラッチ	1.25	20	低粘度化
	オイルポンプ	1.75	14	低粘度化
ホイール	ブレーキ	1.2	92	非接触化
	ハブBRG	1.3	62	シール改善, グリース改良
	タイヤ	7.5	35	材料分子設計、トレッド

図 3.1-9 乗用車各部品の 2020 年における摩擦損失削減予測

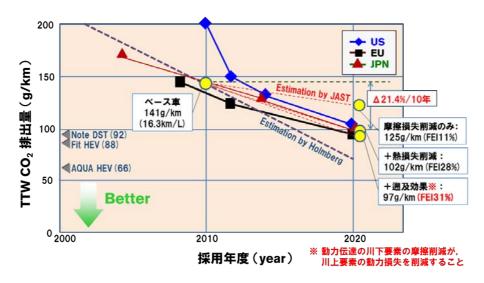


図 3.1-10 日米欧各地域での燃費規制と乗用車燃費の予測

一方,タイヤの転がり抵抗による摩擦損失の割合は,図 3.1-6 では約 10%,図 3.1-8 では約 8% とあり,一部品としての燃費への影響は最も大きい. 国際エネルギー機関 IEA による,G8 洞爺 湖サミット(平成 21 年 7 月)での勧告では,1)タイヤ転がり抵抗のラベル化(燃費 3%),2)タイヤ空気圧が保たれていることの施策(燃費 2%),が提案された[10].前者に対しては,平成 22 年 1 月から,国内で転がり抵抗性能とウエットグリップ性能を等級化したラベル表示精度が開始され,後者では普及促進に向けた広報活動が行われている.

タイヤの転がり抵抗の低減に向けては、補強フィラーであるカーボンブラックのシリカへの部分置換がされている[11]. シリカを配合した場合、カーボンブラックに比べて温度変化による硬さ変化が少なく、発熱も少ない. 加えてぬれた路面での摩擦力が高く、トレードオフである低燃費とウエットグリップ性能を両立させることができる[12]. これらの特性にはシリカなどのフィラーとゴム分子との相互作用が重要であり、図 3.1-11 に示す理化学研究所のスーパーコンピューター京を用いた解析も試みられている[13].

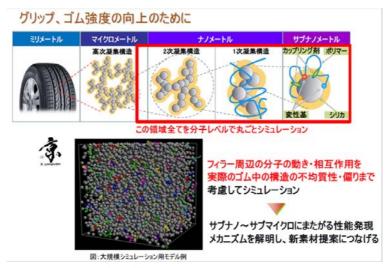


図 3.1-11 京を利用した大規模分子シミュレーションによるタイヤ材料開発[13]

3.1.2. 摩擦増加:ベルト CVT, ブレーキ, スノータイヤ

自動車では摩擦係数の増加が機能の向上に繋がる部品もある。図 3.1-12 に示すベルト・プーリー型自動変速機(以下ベルト CVT)[14]では、伝達トルク向上のため、主として潤滑油添加剤の最適化により、プーリーとベルト間の摩擦係数を向上する開発が行われてきた[15, 16, 17]. また、プーリー/ベルト間の油膜を排除して摩擦係数を増大する方法として、プーリー表面に、突起密度の高く、かつ頂部が平坦な突起を形成するスーパーフィニッシャー加工が採用され(図 3.1-13)、潤滑油添加剤の効果と合わせて 20%の摩擦係数の増加、2%の燃費向上につながっている[18].

ブレーキでは、環境影響からブレーキパッド材の開発動向に大きな変化がある. 1990 年代以降、 ノンアスベスト化による環境性能の改善が進み、今後は燃費改善を目的とした引きずり性の改善 と、図 3.1·14 に示す 2021 年からの北米での銅使用率低減規制に対して、銅代替材の仕様による 開発が進んでいる [19]. 銅は耐摩耗性や摩擦係数の保持を目的として繊維や粉末状で使用される が、他の金属や無機系の複数素材で機能を補うことで、図 3.1·15 に示すように、同等以上の寿命 と摩擦係数が得られている.

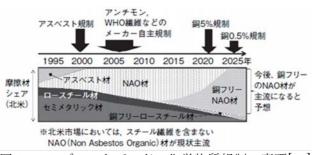






図 3.1-12 ベルト式 CVT[14]

図 3.1-13 プーリー表面のスーパーフィニッシャー加工[18]



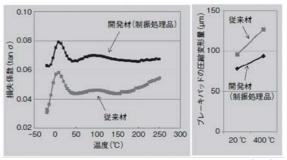


図 3.1-14 ブレーキパッドの化学物質規制の変遷[19]

図 3.1-15 鉛フリーNAO 材の摩擦特性 [19]

スタッドレスタイヤでは、雪氷路面での摩擦力をいかに高めるかが重要な技術課題である[20]. 図 3.1-16 は、スタッドレスタイヤでの駆動力、制動力の内訳を示したもので、路面の状態によりその寄与が異なる[21]. 雪柱せん断力はトレッドパターン溝部に入って固まった雪柱をせん断する力で、溝部の体積に影響される. エッジ効果はブロックやサイプ (トレッド上の細かいきざみ)の溝部が路面の雪氷を掘り起こす力である. ゴムの摩擦力をあげるには、雪氷面にフィットする軟らかいゴムを使用することや、雪氷面を引っ掻いて摩擦力を上げるための胡桃粉のような配合剤が有効であり、また雪氷面に発生する境界層の水を除去するために、図 3.1-17 に示す気泡のような空洞を配置することも有効である[22].

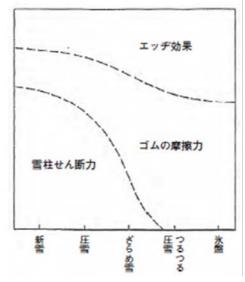


図 3.1·16 氷雪路面のタイヤ摩擦力 寄与率(概念図)[20, 21]

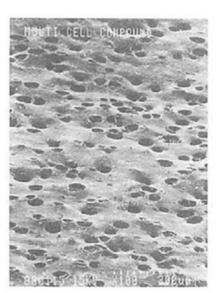


図 3.1-17 気泡を含むゴム (マルチセルコンパウンド) [20, 22]

文献 [3.1]

[1]自工会, "世界の道路交通セクターにおける CO₂削減の取り組みの提言", 2008 年 8 月発行, http://www.jama.or.jp/eco/wrestle/pdf/traffic_sector_j.pdf,

[2]自工会, "CO₂削減に取り組む自動車産業", 2008年7月発行,

http://www.jama.or.jp/eco/wrestle/pdf/co2_reduction.pdf,

[3]自工会 HP, JAMAGAZINE, 2010 年 5 月号, 特集 次世代自動車とエコ技術, 玉野昭夫, "自動車の燃費向上のためのエコ技術"

[4] KennethHolmberg, Peter Andersson, Ali Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars", Tribology International 47 (2012) 221-234

[5]水谷嘉之, "地球にやさしい車作りとトライボロジー", 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.28, No.1, (1993.3)

[6]加納眞,保田芳輝,"エンジンフリクション低減表面処理技術の動向",自動車技術,58,9(1999) p65

[7]馬渕豊, "自動車における最新の環境対応技術(1) - エンジンの省燃費化技術 - ", 表面技術, Vol.63, No.3, 2012

[8] SAE Standards, J300_201304, Engine Oil Viscosity Classification

[9]中村隆, "トライボロジーによる自動車の省エネルギー (中間報告)", トライボロジー会議 2013 年春 東京, 予稿集, F1

[10]国土交通省 HP, 低燃費タイヤ等普及促進協議会, 最終とりまとめ "低燃費タイヤ等に関する普及促進のあり方について"

http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000015.html,

[11] 箕内則夫, 川上和紀, "ナノテクノロジーによる独自のタイヤ用ゴム材料開発体系", 自動車技術, Vol.67, 4月号, P97-101

[12]東ソー・シリカ株式会社 HP, 技術資料, タイヤ用シリカの特徴

http://www.n-silica.co.jp/technology/tech04.html,

[13]中瀬古広三郎, "京を利用した大規模分子シミュレーションによるタイヤ材料開発", 京コンピューター・シンポジウム, 2013 年 5 月 13 日, 東京・イイノカンファレンスセンター

http://www.aics.riken.jp/jp/outreach/library/ksympo2013.html,

[14] NISSAN TECHNOLOGY MAGAZINE, CVT の進化 第一部, "スムーズに走って燃費もアップ", TUESDAY 22ND APRIL 2014

http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/FILES/2013/03/f514870288874d.pdf,

[15] Ishikawa, T., Murakami, Y., Yauchibara, R., and Sano, A., "The Effect of Belt-Drive CVT Fluid on the Friction Coefficient Between Metal Components," SAE Technical Paper 972921 [16] Y. Mabuchi, M. Kano, T. Ishikawa, A. Sano, T. Wakizono, "The Effect of ZDDP Additive in CVT Fluid on Increasing Friction Coefficient between Belt Elements and Pulleys of Belt-Drive Continuously Variable", Tribology Transactions, Vol. 43 (2000), 2, 229-236 [17] M.Yamazaki, Y. Kato, T Nakahara, T. Ichihashi; "Research on Improvement of Transmission Efficiency by improving Friction Coefficient between Element and Pulley of the

Belt CVT, ", Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, .39, .2, March 2008, 139 (0084277).

[18] NEDO HP, 実用化ドキュメント, "自動車の省燃費化を実現する無段変速機を開発", March 2013

http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201213jatco/index.html,

[19]伊藤哲夫, "「環境・安全・快適性能」を実現する自動車部材", 日立化成テクニカルレポート, No.55 (2013・1月), P47-50

[20]石川泰弘, "タイヤ技術の系統化", 国立科学博物館, 技術の系統化調査報告 Vol.16 2011.March

[21]「ゴム工業便覧」< 第四版> 日本ゴム協会編 平成6 年1 月 p754

[22]坂本孝雄, 平田 靖, "スタッドレスタイヤの開発(乗用車タイヤ)", 日本ゴム協会誌, 65, p713 (1992)

3.2. 鉄道(柿嶋)

鉄道には、パンタグラフのすり板、ブレーキ材、車輪、レールなどのトライボロジーが大きく関わる部材が使用されており、これらの部材は鉄道の安全性や信頼性を支えている。そして、高速化やメンテナンス軽減などの要求に応えるためにはこれらの部材の機能や性能の向上が必要となる。これらの部材は、例えばパンタグラフすり板は架線としゅう動、車輪はレールと転がり接触運動を行うなどトライボロジー現象を伴いながら使用される。このため、個々の部材の材質的な性能や品質の向上はもちろんのこと、すり板/架線はしゅう動通電性能など、車輪とレールは粘着力(レール長手方向の接線力)の向上などを検討する必要がある。ここでは、これら部材の高速化への対応とメンテナンス低減という観点からロードマップを検討した。いままで、鉄道の高速化のために、トライボロジーの観点からはすり板/架線系では、パンタグラフやすり板の性能向上[1]が、車輪/ブレーキ/レール系では粘着力の向上[2、3]、空転や滑走制御技術の向上[3、4]、ブレーキ材料の性能向上[5、6]等が図られてきて、これらの技術が一歩一歩着実に進展してきたことにより、新幹線に代表される高速鉄道の速度向上がなされてきた。今後も、この流れにそって高速化が行われると思われる。メンテナンス低減に関しては、個々の部材の摩耗低減や長寿命化や計画的な取換を阻害する損傷の防止技術の向上[7]が更に重要となる。

高速化への対応とメンテナンス低減という観点からのロードマップを図 3.2-1 に示す.

文献 [3.2]

- [1] 池田充 他:高速鉄道用パンタグラフのトライボロジーに関わる最近の動向,トライロジスト,58,7 (2013) 447-454
- [2] 大山忠夫:高速化と高粘着, RRR, 51, 12 (1994) 9-13
- [3] 小原孝則:高速鉄道を支える車輪とレール間のトライボロジー,トライボロジスト,58,7 (2013) 441-446
- [4] 隈部憲一: 高速鉄道のブレーキシステム, トライボロジスト, 58, 7 (2013)
- [5] 辻村太郎:ブレーキ材料の変遷と展開,金属,70,2(2000)119-127

[6] 小原孝則:高速走行に対応したブレーキディスク, RRR, 64, 7 (2007) 14-17

[7] 石田 誠:車輪/レール間潤滑による保守低減効果, RRR, 62, 4 (2005) 26-29

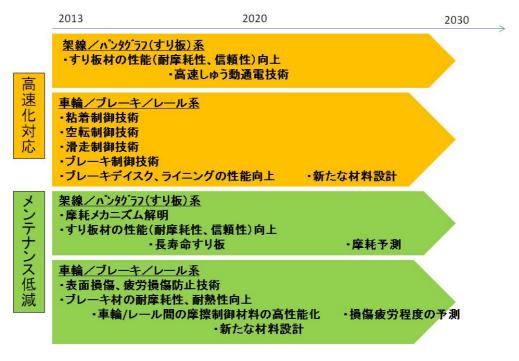


図 3.2-1 鉄道(高速化対応とメンテナンス低減)

3.3. 航空用エンジン、発電用ガスタービン(横山)

世界の航空機産業は約50兆円、家電の6倍以上という規模を有するだけでなく、民間航空機数では年率4%の成長と今後20年間で約2万6千機(約300兆円)の市場規模が見込まれている。しかし、日本での航空機産業は1兆2千億円程度で、航空が9000億円、宇宙が3000億円と小さい。これは、現在、市場の重心が日本ではなく、北米、欧州にあることによる。自動車や家電の市場では、欧米と互角以上の競争力を有する現状と比べ、航空機産業においては、潜在力を十分発揮できていないのが現状で、航空機産業の成長が期待されている状況にある。航空エンジンについては、防衛省航空自衛隊のブルーインパルスにも使われているT4練習機のF3エンジン、P3Cの後継機のP-1 哨戒機のF7エンジンと国産エンジンの開発実績があり、民間航空機用エンジンの開発・製造プログラムでも、担当部位の開発で要求性能を実現し得る状況になってきている。

民間航空機用エンジンの開発においては、"運用コストの削減"と "環境対策"に、必須の要求事項である "安全性・信頼性"を加えた 3 つの課題を中心に技術開発・エンジン開発プログラムが展開されている。 "環境対策"については、国際民間航空機関(ICAO)において、騒音規制や NOX 規制が強化されたことに加え、燃料消費効率ベースのグローバル目標として 2050 年までに年平均 2%改善という目標が設定される等、地球温暖化対策に関する議論が進んでいる。また、近年の原油価格高騰に(図 3.3-1)より、低燃費航空機へのニーズが高まっており、これらの観点から、環境性を高めるための技術開発がより重要になっている。このような状況下で、ボーイングは 2003 年末から新中型民間旅客機 B787 の開発を開始し、現在、市場にでてきている。さらに、

エアバスは B787 に対応する形で同クラスの A350 の開発を進めている。B787 と A350 の最大の特徴は、運用コストの大幅削減であり、その中心がエンジンの燃費の大幅改善であった。これらの機体に採用されるエンジンは、現行の中型機用エンジンに比較して約 15%の燃費改善が要求されていた。その要求にこたえる形で開発されたのが英国のロールスロイス(RR)のトレント 1000、米国のゼネラル・エレクトリック (GE) の GEnx である。これらのエンジン開発プログラムには、(一財)日本航空機エンジン協会の下で、トレント 1000 には川崎重工、三菱重工が、GEnx にはIHI、三菱重工の日本企業が開発・製造のパートナーとして参画している。



図 3.3-1 燃料価格の変遷[1]

ガスタービンの技術開発は、性能向上のための高温化と"運用コストの削減"と"環境対策"に対応した省エネのための軽量化の戦いであり、さまざまな材料の技術革新が関与していることは広く知られているが、トライボロジーー技術も、同様に貢献している。ガスタービンには、転がり軸受(大凡4つの転がり軸受で主軸を支えている。)、主軸から駆動力を補機に取り出す PTO (POWER TAKE OFF:動力出力用歯車装置)、油循環等の駆動するため出力軸が取り出せる AGB (Accessory Gear Box:補機駆動歯車装置)、シール等、トライボロジー技術が関わる機械要素が多数あり、開発エンジンの成立性をトライボロジー技術が握っていることも多い。

航空エンジンの設計段階では、潤滑油ヒートマネージメントが特に重要であり、高速化、高負荷化の要求にこたえるべく、軸受、歯車、シールなどの機械要素の発熱の低減およびその予測技術が課題になっている。また、運用段階では、"安全性・信頼性"を確保すべく、動翼とケーシング等の回転部品と静止部品での摩耗進行により圧縮効率低下につながる部位のコーティング処理等の補修技術の開発、そして効率的なメンテンスを実現するオンコンディションメンテナンス技術の向上も課題になっている。

代表的な要求性能毎でのトライボロジー技術に関わる課題は下記の通りである.

(1) タービン入口温度上昇

機体が年々大型化するに伴い、エンジンも高出力化が求められている。一般的には高出力を追究するとファン径が大きくなって重量増が避けられないが、それに伴う機体構造の強化・重量増加によってますます高出力のエンジンが必要になる悪循環を避けるため、単純な大型化ではなく、ファンのバイパス比化、要素の高温化、高圧化、高効率化を組み合わせた高出力化と軽量化に工夫が続けられてきた。

実際、タービン入口温度を上げると、同じエンジンサイズよりも、より高出力化が可能であり、また、圧力比の向上とバランスさせて高温化する場合はより熱効率を上げられるため、軍用・民間用のどちらも高温化が図られてきている(図 3.3-2)。タービン入口温度上昇に伴い、エンジン全体が高温になるため、潤滑油の使用環境も従来エンジンよりも高温となり、200℃近くになることも想定される。高速化、高負荷化に伴い、軸受、歯車、シールなどの機械要素の発熱増加も加味すると 200℃を超える場合もあり得る。軸受、歯車については、潤滑状態の維持・向上と、より耐熱性に優れた材料の開発、シールについては、熱変形を考慮した最適なシール機構の開発が課題になる。

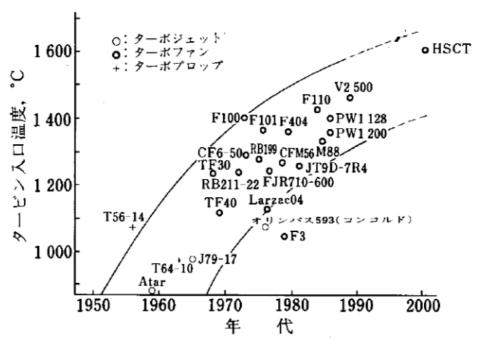


図 3.3-2 タービン入口温度のトレンド[2]

現在、ガスタービンに使用される航空用潤滑油は米軍規格(MIL SPECIFICATION)の要求を満たすものであり、産業用ガスタービン発電設備の主機である航空転用型ガスタービンにも同油が使用されている。1963年に米軍がPRATT&WHITNEYとMOBILに次世代の潤滑油を開発された潤滑油がいわゆる TYPE2 合成潤滑油といわれるヒンダードエステル系のガスタービンオイルである。同油は、MIL-L-23699(現在はMIL-PRF-23699)適合品として広く使用されているが、1983年以降、高温での安定性を改善したタイプの潤滑油が開発され、STD(STANDARD)油とHTS(HIGH THERMAL STABILITY)油と区別するように改訂されている。また、さらに

最近では、デポジットが著しく形成しがたい HPC (High Performance Capability) 油の開発も進んでいる. 高温域で潤滑油を使用する場合、酸化劣化の進行が極度に早くなり、寿命が短くなるだけでなく、高温金属表面にデポジットを形成し、潤滑油路を閉塞する可能性もあり、HPC油もしくは更なる性能を持つ開発油の適用が必要になってくると考えられる. また、潤滑油の使用温度が高いと、従来より蒸発が多くなるため、高温金属表面に形成するデポジットだけでなく、ベントライン(余分な油ミストを排出する通気口)等での気化成分によるデポジットの懸念も出てくるなど、従来、経験のない事象が発生することも想定され、潤滑油技術にかかる期待は大きい.

(2) 燃料消費率低減

高圧化、高温化や個々の要素効率の改善、また高バイパス比化等の組み合わせによって、エンジン全体の効率が向上し、燃料消費率が着実に下がってきている。さらに、国内では、航空エンジンとしての適用実績はないが、高 dn の時の遠心力が小さく、冷却も最小限でよいので、潤滑油系を小型化できる等、省燃費・性能向上に寄与できる可能性の高いハイブリッド軸受(転動体にセラミックを使用した軸受)の適用が検討されている。しかし、実際には、非破壊検査やオンラインでの損傷検知技術が開発され、保証がないと適用が困難であり、オンラインでの状態監視技術の開発に期待されているのが現状である。また、軽量化を図るため、AGB(Accessory Gear Box:補機駆動歯車装置)等に減肉化が図られた歯車を使うため、制約されたスペースへの配置、潤滑油の供給状態の最適化等が課題になる。さらには、ブレードに CMC 等の軽量な複合材料の適用を目指し、摺動特性も加味した材料開発も課題になっている。

ガスタービンは、主に圧縮機、燃焼器、タービンで構成され、吸気した空気を圧縮し、燃焼さ せ、タービンにて回転力を取り出す機構である. ターボファンエンジンと呼ばれる航空エンジン の場合、圧縮機の前段にファンがあり、ファンでの大量の低速排気ジェットと後段のタービンで の排気にて推力を得ている(図 3.3-3). 次世代の航空エンジンとして, ターボファンエンジンの バイパス比(主たる推力を発生するファンの部分とエンジン内部に流れる空気量の比率)を大き くすることによりエンジン効率を向上させ、推力向上、燃料消費率の低減を狙った開発がトレン ドになっている. 一つは, 数年後には商業運航が予定されている V2500 の後継機 PW1100G-JM に採用されたギヤードファンエンジン(GTF)である.ファンの直径が大きくなっても、先端の 周速が音速を超え、衝撃波による効率低下や騒音の発生を抑制するためにエンジン前方に減速機 を装備し,ファンの回転数を低圧タービンの 1/3 程度にしている.同エンジンでは,入出力軸の 同軸化のため、スター型の遊星歯車が採用されている。また、オープンロータと呼ばれるエンジ ンについても 2030 年以降の実用化を目指して、開発が進んでいる. GTF 同様、大きなバイパス 比による推力向上を狙ったエンジンで、従来のターボプロップの特性を拡大し、より高速域でも 高性能の運用を可能とする形式で、径の大きなファンブレードをファンダクトなしにエンジン外 側に配置させている. 遮断されないファン騒音の低減, プロペラピッチ角や回転速度制御のため の複雑な機構が技術課題になっている.

燃料供給システム,油圧系等の補機類についても、電動化技術の開発も進められている.高速 の主軸回転から出力を取り出して駆動する補機の回転数は従来,比較的高速で一定速度であった が、電動化により自由に回転数制御できるようになり、効率的な運用ができるようになる. その 反面、低粘度の燃料潤滑下で、軸受を低速域で使う状態も生じることになり、境界潤滑領域で優 れた特性をもつ軸受材料および形状の開発も課題になっている.

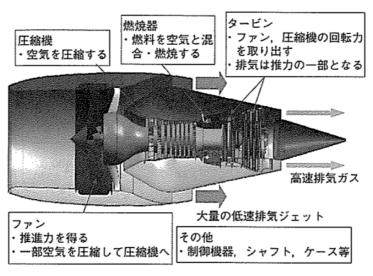


図 3.3-3 ターボファンエンジンの基本構造[3]

また、ガスタービンは、航空用エンジンだけでなく、護衛艦の主機エンジンおよび発電用エンジン、産業用ガスタービン発電設備($1\sim40\mathrm{MW}$)の主機にも使われている.

航空エンジン転用型のガスタービン発電設備の特徴は、他の発電設備と比し、高い熱効率、低 振動, 低騒音, 低 NOX 等が挙げられ, 最近の環境規制に十分対応できる発電設備である. 事業 用または自家発用のガスタービン発電設備は、既存の発電設備と比較して、小型、軽量であり、 冷却水が不要であるため、昨今、広く使用されるに至っている。構造が簡単で保守、点検や工事 が容易であることなど多くの利点を有し、排熱、蒸気を使用したガスタービンコジェネレーショ ンシステムとしても多く採用されている.ガスタービン発電設備でのトライボロジー分野での技 術課題は、潤滑油である、もともと、実績のある航空エンジンを発電用に転用しているため、軸 受,歯車,シールなどの機械要素の技術課題は多くはない.ただし,離陸時に負荷が高く,巡航 時には負荷がほとんどない航空エンジンとは運用方法が異なり、常に負荷が高い状態で連続的に 長時間運用される. そのため、特に軸受の寿命が課題になることもある. 潤滑油を 100℃以上の 高温域で使用される航空エンジンとは、異なり、潤滑油の供給温度が低いため、水分を多く含ん で運用することも多いことも影響している。また、潤滑油の劣化進行が航空機エンジンとは異な り、課題になることが多い、ガスタービンの主軸の各転がり軸受はサンプ室とよばれるハウジン グ内で潤滑油を強制給油することにより潤滑されており,潤滑油は排油ラインを経由して戻るが, 一部の潤滑油はシール部からのもれ、ベントラインからミストあるいは蒸気として排出されるこ とにより消費される. 通常、油タンク内の潤滑油を一定量に保つために、適宜、潤滑油(新油) が補充される. 航空エンジンの場合、オイルタンク容量が数十 L と比較的小さいため、新油補充 により、短時間でオイルタンク内の潤滑油が新油に置き換わり、常に新油で潤滑していることが 多く,潤滑油の劣化程度は概して小さい.一方,ガスタービン発電設備の場合,大型の減速機を

有し、多量な給油が必要なため、オイルタンクが 1kL 程度と大きくなるため、タンク内の潤滑油が新油と置き換わるにはかなりの時間を要する. そのため、経年的に劣化した潤滑油を蓄積して使用していることとなる. 経年的に劣化した潤滑油を使用していることによる諸影響が懸念され、転がり軸受の短寿命化にも影響していると考えられ、その改善も課題になる.

文献 [3.3]

- [1] (一財)日本航空機開発協会(http://www.jadc.or.jp/)
- [2] 大浜信一, 日本ガスタービン学会誌, 16, 66, 1989, 3
- [3] 西川秀次(IHI), "民間航空機用エンジン技術の発展", 日本機械学会誌, 2009, 112, 1092, 6-9

(参考文献,参考ホームページ)

(一財) 日本航空機開発協会 (http://www.jadc.or.jp/)

西川秀次, "民間航空機用エンジン技術の発展", 日本機械学会誌, 2009, 112, 1092, 6-9 大浜信一, 日本ガスタービン学会誌, 16, 66, 1989, 3

落合宏行,"大型航空エンジンのトライボロジー",トライボロジスト,58,12,2013,874-881 松浦厚志,"航空エンジンのトライボロジー",トライボロジスト,51,3,2006,204-210 新エネルギー・産業技術総合開発機構,"航空分野の技術戦略マップ",

http://www.nedo.go.jp/content/100109873.pdf

航空機国際共同開発促進基金, "近年の民間航空機用エンジン開発,技術の動向",

http://www.iadf.or.jp/8361/LIBRARY/MEDIA/H20_dokojyoho/h20-1.pdf

3.4. 医療機器 (X線診断装置と回転陽極型 X線管) (服部)

X線診断装置には,通常のレントゲン写真から血液・リンパ腺の流れを観察する循環器,乳ガン検診のマンモグラフィ,人体断面を撮影する CT 装置(図 3.4-1)など多くのバリエーションがある.また,そこで使われる X 線管はほとんどが回転陽極型 X 線管であるが,上記のシステムに合わせて様々な型式のものがある.ここでは,CT 装置を例にとって今後の動向に触れる.

[回転陽極型 X 線管の概要]

上述の X 線診断装置のキーコンポーネントである回転陽極型 X 線管は図 3.4-2 に示すような構造となっている.真空中において電子銃(陰極)からターゲット(陽極)に電子線を照射して X 線を発生させるが,その際のターゲット表面は局所的に 2, 900 もの高温となる.そのままであれば熱衝撃によってターゲット表面は瞬時に破壊するため,これを回転させて単位時間・単位面積当たりの照射熱量を抑え,表面の致命的な破損を防止している.ターゲットを支持する軸受には,(a)で示す固体潤滑玉軸受と,(b)のような液体金属を潤滑剤とした流体潤滑軸受を用いるタイプのものがある.

固体潤滑剤には、回転体と静止側とを電気的に導通させる必要があること、高温(~550 °C)・高真空(10· 4 Pa以下)中という過酷環境での潤滑を可能とするため、潤滑剤には軟質金属である鉛または銀を用いる、また、流体潤滑軸受で用いる液体金属は、ガリウム合金である.



図 3.4-1 代表的な X 線 CT 装置

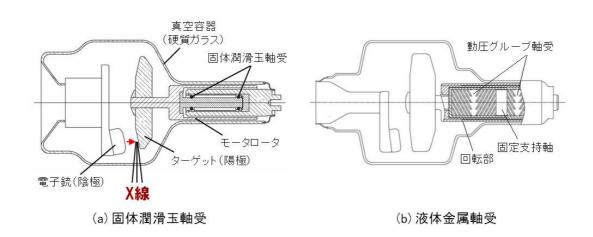


図 3.4-2 回転陽極型 X 線管の回転機構部

[今後の CT 装置と回転陽極型 X 線管]

図 3.4-1 で示した CT 装置では、ガントリと呼ばれる本体内で X 線管と対向配置された X 線検 出器を患者の周囲に回転させ、患者を寝台で送ることによって身体をらせん状に X 線走査する.今後の課題には、被ばく量の低減、息止め時間の短縮、心臓など動く臓器の鮮明な撮影などが挙 げられ、これらを実現するには、ガントリをさらに高速で回転させる必要がある.現在のガントリ回転数は最高 180rpm 程度であるが、例えば心臓を鮮明に撮影するには、200rpm 以上の回転数が要求される.また、心臓の動きをリアルタイムに動画撮影しようとすると、その数倍の回転数が必要だと言われている.

このため、回転陽極型 X 線管のターゲットは図 3.4-3 のように、自身の回転 (自転)とともに、 CT 装置のなかで患者を中心に公転運動をしている。よって、ガントリの回転数を上げるということは、ターゲットに作用する遠心力がますます増大することを意味する。図 3.4-4 によれば、ガントリ回転数が現在の 180rpm 程度で 24G もの遠心加速度がターゲットに作用している。しかし、回転数が 200rpm ともなると、加速度の値は 32G に跳ね上がる。このような状況から CT 装置の発展のためには、より高剛性・高負荷な軸受の開発が不可欠となる。X 線管用軸受の将来の姿を

考えると,固体潤滑の玉軸受より,受圧面積を大きく取れる液体金属の流体潤滑軸受のほうが有利だと言えよう.

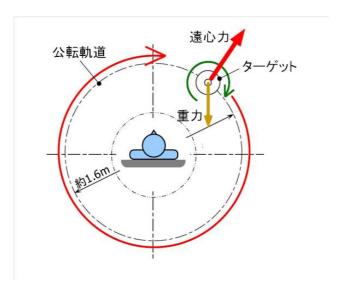


図 3.4-3 X 線管ターゲットの自転と好転運動

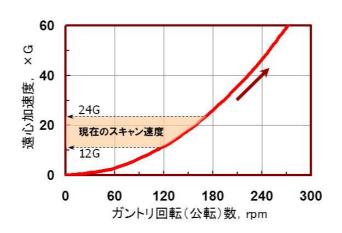


図 3.4-4 X 線管に作用する遠心加速度

3.5. 宇宙機(小原,野木)

(1) 人工衛星 人工衛星の搭載機器に要求される寿命は 2000 年代は静止軌道の衛星で 10 年,地球を周回する低軌道の衛星で 5 年程度であったが,2020 年までにそれぞれ 15 年,7 年,さらに 2030 年までにはそれぞれ 20 年,10 年という長寿命の実現が要求されている。軌道上の雰囲気は $10^{-4}\sim10^{-12}$ Pa の真空で, $-100\sim+100$ Cを超える温度差がある。人工衛星の構体内部では圧力は $1\sim2$ 桁高くなり,温度環境は $-40\sim+80$ C程度と狭まるものの,最長で 20 年もの間メンテナンスフリーで動作しなければならない環境としては過酷である。以下では,長寿命を実現する上で必須かつキーとなる潤滑剤と転がり軸受を取り上げる。

(1-1) 潤滑剤 液体潤滑剤(油,グリース) および固体潤滑剤のトライボロジーロードマップを

図 3.5-1 に示す. 液体潤滑剤については、高分子成分を精製した鉱油を利用することから始まり、1970 年代からは低い蒸気圧、高い粘度指数をもつフッ素系合成油 PFPE が宇宙用潤滑油、グリース基油として広く使用されてきた[1]. 宇宙機器の可動部は低速で動くものが多く、例えば観測センサの回転駆動機構ではほとんどが 100rpm 以下であり、混合〜境界潤滑状態で長期間の運用が必要となるため、摩擦と摩耗が小さい潤滑油、グリースの選定が重要となる. PFPE は境界潤滑状態で劣化しやすいという短所があるため、1990 年近くに PFPE と同程度の蒸気圧を有する合成炭化水素油 MAC が開発された. MAC は PFPE に比べて境界潤滑下で劣化しにくいことから現在では数多くの機器に採用され実績を広げつつある. MAC はリン酸エステル系極圧剤など添加剤が使用できるため摩擦摩耗特性に優れるが、上述のような長寿命化を実現するためには一層の低蒸気圧化、低摩擦低摩耗化が課題となっており、新潤滑剤の研究開発が進められている[2].

固体潤滑剤は、液体潤滑剤が対応できないおおむね-40℃以下の低温または 100℃以上の高温で使用される. 将来の宇宙開発において惑星探査の活動領域を拡張していくためには、固体潤滑剤の対応可能な温度範囲を大幅に広げていく必要がある. また、宇宙開発初期から現在まで主力の MoS2 系の固体潤滑剤については、真空中に比較して地上の湿度雰囲気で短寿命であり、この改善が課題である.

摩擦摩耗特性の向上には、潤滑剤の改良とともに、表面改質が有効である。例えば宇宙機器用の減速機としてグリース潤滑の波動歯車装置が広く使用されているが、真空中では大気中と比較して著しく潤滑寿命が短くなるため、DLCを含む各種の表面改質が適用され始めている[3].

(1-2) 転がり軸受 転がり軸受のトライボロジーロードマップを図 3.5-2 に示す。人工衛星 1 機当たりには数十個以上の深溝玉軸受またはアンギュラ玉軸受が使用されている。前述の通り,観測センサの回転駆動機構に関しては混合潤滑下での摩擦摩耗低減が課題であり,潤滑剤の性能向上が必要である。流体潤滑状態で使用される機器としてはホイール,ジャイロがあり,これらの軸受は最大 $6000\sim9000$ rpm の高速で安定した低トルクが要求されるため,1g より大幅に少ない微量の油で潤滑されている。このような場合,低蒸気圧の油の使用とともに,油の供給が重要になり,フェノール樹脂に油を含浸する方法が広く用いられている。しかし, $15\sim20$ 年の長寿命を実現するためには,何らかの潤滑剤供給システムが必要になると考えられ,微量の油を長期間安定して供給する技術の研究開発が進められている[2].

油の損失・劣化に加えて、高速軸受では保持器の不安定な運動(Retainer Instability)が問題になる。RI はトルクの増大、振動、温度上昇、油の飛散につながるため、確実に防止する必要がある。RI 対策設計にはシミュレーションが有効であり、保持器を含む各要素の運動、潤滑状態などが予測可能になってきている[3]。今後の解析技術に関しては、摩擦トルクの予測精度向上、寿命予測への発展が期待される。

長寿命の実現で大きな課題となるのは寿命の評価法であり、加速試験法の確立が必要不可欠である. 微量油の摩擦試験は一種の加速試験であり、短期間で潤滑寿命データが得られるため、油、グリースの評価に広く使用されており、定性的には長期間の軸受寿命と同じ傾向を示すことが確認されている[2]. しかしながら、摩擦試験の結果から実際の寿命を予測することは極めて困難な現状であり、寿命予測技術の開発が急務となっている.

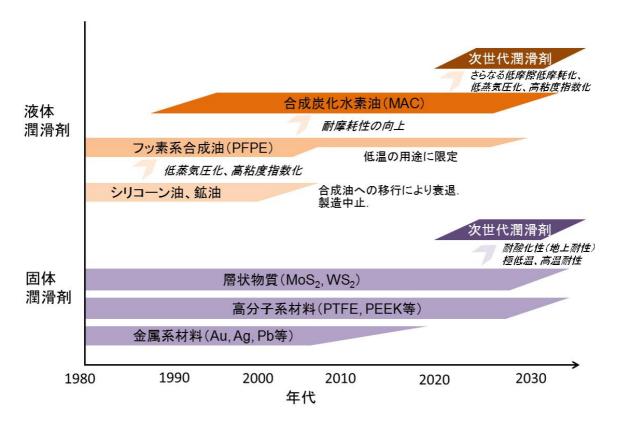


図 3.5-1 人工衛星で使用される潤滑剤に関するトライボロジーロードマップ

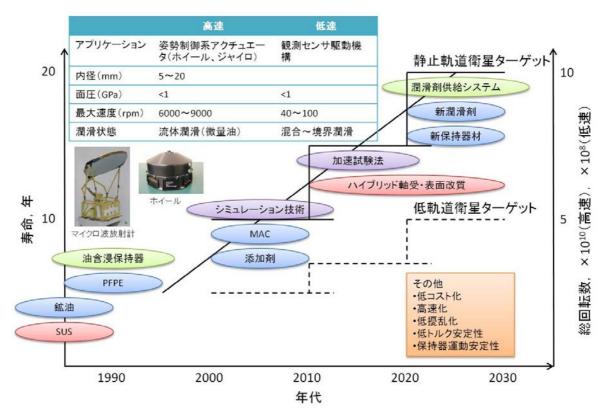


図 3.5-2 人工衛星の転がり軸受に関するトライボロジーロードマップ

(2) ロケット ロケットにおいてトライボロジーの観点で最も厳しいシステムはエンジンである. 液体燃料を用いるターボポンプ式ロケットエンジンは, 第二次大戦中にドイツで開発された V-2 ロケット用エンジンが最初とされている. V-2 ロケットの推進剤には, 燃料としてエタノール, 酸化剤として液体酸素が用いられた. これらの推進剤を高圧燃焼させるために, ターボポンプと呼ばれる燃料供給装置が開発されている. 高性能ロケットを開発する上で, ターボポンプ主軸を支持する軸受とポンプケーシングとタービンとの間を封止する軸シールは最重要部品であり, 現在においても, これら機構要素部品がエンジン性能を左右するキーテクノロジーの一つとして上げられている.

近年は、ロケットエンジンの高性能化のための推進剤の組合せとして、「液体水素/液体酸素」、「LNG/液体酸素」、「ケロシン/液体酸素」が上げられるが、どの組み合わせにおいても、液体酸素、液体水素、LNGのような極低温液体を用いており、一般産業機器で使用されている潤滑油の使用は困難である。また、エンジンへの要求寿命は4000s程度であるが、エンジンの小型軽量化のためにはターボポンプの高速回転が必要であり、軸受・軸シールへの技術要求はより厳しくなっている。

- (2-1) ロケットエンジン用軸受 極低温ターボポンプに使用される軸受は、潤滑油の無い状態で高い剛性と高速回転性能が要求される. 実験的に静圧軸受を用いたロケットエンジン以外では、今まで実用化された軸受は、信頼性の高さからほとんど転がり軸受である. しかし、近年のロケットエンジン用軸受開発の動向として、精密転がり軸受の製造が可能なメーカーが少ないことや最大回転数 (DN 値) の制約により、静圧軸受の研究開発も進められてきている. また、転がり軸受の研究においては、過去に限界とされていた DN 値を超える設計の軸受も研究されている. 図 3.5-3 にロケットエンジン用軸受のトライボロジーロッドマップを示す.
 - 転がり軸受 転がり軸受は、起動時の低トルクや外乱に対する耐久性など、極めて優れた特長をもっている。しかし、極限環境下で危険振動数を超える必要があるターボポンプにおいては、軸受内部での減衰が極めて少ないことや軸受設計計算と実運動との隔たりがあること等の問題も残されている。今後の研究方針としては、高減衰化、高速化、長寿命化、設計精度の向上が上げられる。
 - ジャーナル軸受 ジャーナル軸受は、理想的に設計製作できれば、転がり軸受よりも性能上は高くなることは周知の事実である。また、静圧をかけることで起動時の問題等もある程度は解決できる。しかし現実的には、転がり軸受と比較し、剛性が一桁小さいだけでなく、極限環境下での運転中の外乱に対し回復できる前に破壊に至ることが考えられる。今後の研究方針として、ジャーナル軸受の高剛性化、起動前および起動時接触問題の解決、作動安定性確保が期待されている。
- (2-2) ロケットエンジン用軸シール ターボポンプでは、要求されるシール性能を満たすために、シール要素を組み合わせたシールシステムが必要となる。軸シールには、高い密封性を持つ接触式シールと、優れた高速性能および耐久性を有する非接触シールがある。図 3.5-4 にこれらのトライボロジーロッドマップを示す。

- 接触式軸シール 接触式シールは、高いシール性能を持たせるがゆえに、接触面のトライボロジー問題を有している。特に高差圧下では、シール面を強く押しつけ封止性能を高める必要があるため摩擦摩耗が増大し、潤滑油が使用できないターボポンプにおいては、耐久性が極端に落ちる。今後の研究開発方針としては、高速回転性能の向上、耐久性の向上、長寿命化が上げられる。
- 非接触軸シール 非接触シールは、摺動面が非接触であるため、高い高速性能を持ち寿命も極めて長い。しかし非接触であるため漏洩量が多い。このため、要求を満たすには、いくつかのシール要素を組み合わせる必要があり、シールシステムに要する軸長が長くなる。今後の研究方針としては、シール要素の漏洩量を減らすだけでなく、コンパクト化が求められている。

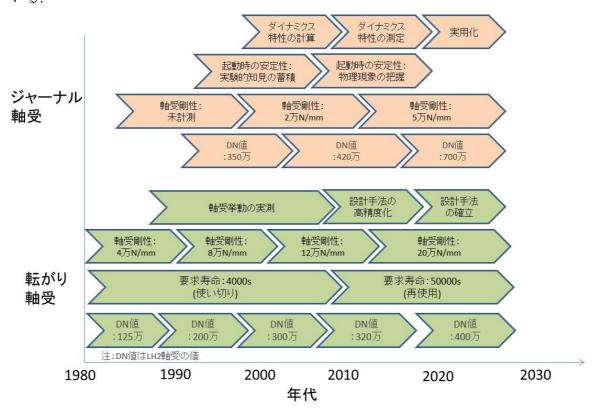


図 3.5-3 ロケットエンジン用軸受に関するトライボロジーロードマップ

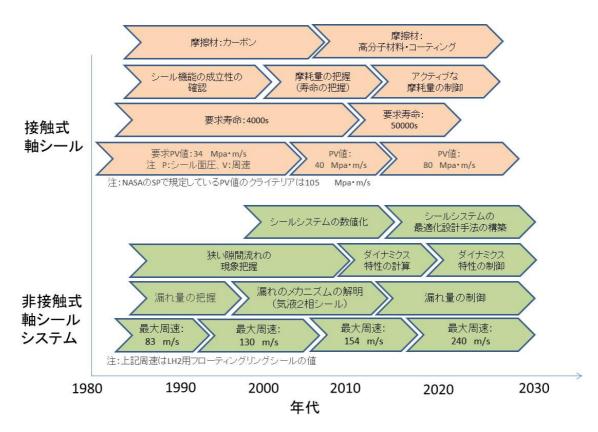


図 3.5-4 ロケットエンジン用軸シールに関するトライボロジーロードマップ

文献 [3.5]

- [1] 小原:宇宙機器用グリースの技術動向, トライボロジスト, 57, 6 (2012) 398.
- [2] 野木:宇宙用潤滑油の極限に挑む,トライボロジスト,56,9 (2011) 561.
- [3] 間庭・野木:人工衛星用機械要素のトライボロジーに関する最近の研究動向,トライボロジスト,58,12 (2013) 855.

4 トライボ要素技術各論 (ボトムアップ1)

4.1. 転がり軸受(野口)

転がり軸受は転動体の形状や負荷することのできる荷重の方向によって大きく分類されるが、大きさや使われ方は千差万別である。また、転がり軸受は回転や直動を案内する機械要素であり、使われる機械(システム)の技術動向によって要求される性能の優先度が異なってくる。軸受の技術開発においては、メーカー側が単独判断で開発が行われることは少なく、基本的に組み込まれる機械の要求に沿って行われることが圧倒的に多い。転がり軸受の技術ロードマップを作成するに当たっては、ひとつの図や表で全体を表すことは無理である。本文では、転がり軸受に要求されている全般的な性能の動向を概観した後に、分野を絞った技術動向を述べる。

4.1.1. 社会環境と転がり軸受技術との関係

少し古い出展ではあるが、社会環境と転がり軸受に求められている要求機能、対応技術の関係を図 4.1·1 に示す[1]. ここでは 3 つの大きな社会環境変化を挙げているが、転がり軸受とは関係がなさそうに思えるようなものでも、下流まで降りてくると転がり軸受との関係が見えてくる. 軸受の要求性能 (キーワード) では、低トルク、小形・軽量、長寿命、高速、高回転精度、低騒音などが挙げられているが、転がり軸受にとっては当たり前の要求で、革新的な性能要求は出てきていない. 結局の所、社会がどのように変化しようとも転がり軸受の根本的な使命は変わらず、いかに一般的な性能を向上させるか、要は従来要求を如何にして満たすかを地道に追求していくことに他ならない.

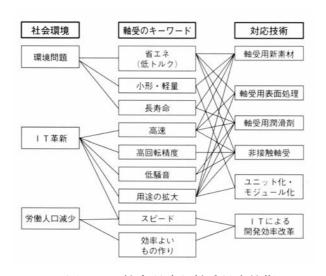


図 4.1-1 社会環境と軸受対応技術

4.1.2. 転がり軸受に要求されている性能に関する技術動向

(1)低トルク

転がり軸受の低トルク化は、機械効率の向上、省エネに直結しているので、非常に重要な開発課題である。自動車では軸受部の摩擦を半分にすると燃費が 3%向上し、1台当たり年間 43000Lの CO_2 を削減できるとされている。

自動車用円すいころ軸受においては, 2000 年を過ぎた頃から転がり粘性抵抗, 潤滑油の撹拌抵

抗,ころ/つば間のすべり抵抗等を減少させるための解析を行い,最適設計を適用した製品が軸受メーカー各社より発表された.2005年には潤滑油の流れを最適化することにより,50%以上の低トルクを達成している[2].

エンジンやトランスミッションに多く使われているスラストニードル軸受では、ころ端面と保持器の接触に着目して、保持器形状を改良することによって80%のトルク低減を達成している[3]. 玉軸受においても近年のハイブリッド車に対応するための高速・低トルク軸受の開発が行われている[4].

(2) 小型·軽量

機械本体の小型・軽量化にともなって、転がり軸受にも小型化の要求が高まっている。玉軸受では 2010 年に内径 0.5mm, 外径 1.5mm, 幅 0.65mm の玉軸受が開発された[5]。直径 0.25mm の転動体が 6 個組み込まれており、メーカーのホームページにはサンプル価格も示されているので、一般の方でも入手も可能である。また、各要素でも小型・軽量化は進んでおり、スタッド径 1.4mm のマイクロカムフォロアや、リード 0.5mm、軸径 1.8mm の精密ボールねじ、トラック幅 1mm のリニアガイド等が開発されている。

(3) 長寿命

転がり軸受の使用においては、機械の設計寿命まで壊れないことが重要である。機械の設計においては、まず疲労寿命の計算を行って最適な型番を選定している。しかし、繰り返し応力以外が原因で寿命となる場合も多く、より高い信頼性も求められている。最近では風力発電の風車等メンテナンスが難しい箇所に使われる例も増えており、寿命と高信頼性は転がり軸受にとって優先度の高い要求性能である。

疲労寿命を向上させる技術としては、鉄鋼材料の高清浄度化や熱処理技術の改善対策が軸受メーカーより発表されている[6,7]. 最近では表面起点型はくりが増えており、軸受材料ではなく内部空間を正常に保つ工夫が必要になってきた.粉塵が非常に多い鉱山で使われるコンベア用の玉軸受においては、高機能専用シールを使用することによって耐水性を 3 倍に高め、かつトルクを50%低減させることに成功している.また、耐水性を向上させたエンジン補機用アイドラ軸受も開発されている[8]. シールリップ部を M 字 2 重構造にした高密封性シールを採用することにより $SUV(Sport\ Utility\ Vehicle)$ 車や緊急車両のオフロード走行における耐水性を大幅に向上させている.

(4) 高速・高回転精度

転がり軸受においては、遠心破壊等を考慮する必要があるため、高速の尺度としては単純な回転速度(角速度)ではなく、dn 値、 d_mn 値と呼ばれるものが使われることが多い。工作機械の主軸やスピンドルに使われるアンギュラ玉軸受では、開発環境(実験室レベル)ではあるが、 d_mn 値で 400 万(回転速度で 45, 000 軸 min^{-1})を達成している[9]。しかし、工作機械のスピンドル回転速度については、JIMTOF が開催される毎に日本精工株式会社が調査して速報としてまとめているが、ここ数回の JIMTOF においては、高速化はあまり進んでいないようである。

また、転がり軸受の回転精度については、軸受内部の設計諸元と幾何学的な誤差の影響は理論的に明らかにされており[10]、ひとつの軸受に組み込まれる転動体の寸法相互差を小さくすること、転動体の真円度(特に偶数のうねり成分)を小さくすること、内外輪軌道面のうねり(凹凸)

について転動体数±1山を小さくすることなどの対策が提案されている.

(5) 環境負荷物質の低減

転がり軸受の潤滑は約80%近くがグリースである. グリースを使用することによりメンテナンスフリーや密封が可能になり、転がり軸受の需要に大きく貢献しているが、グリースに含まれる添加剤にはリンや硫黄などが含まれていた. グリースから環境負荷物質を排除する対策が進められているが、鉱油をベースにする限り、廃油処理においては CO_2 が増えてしまう. 生分解性を高めたグリースやカーボンニュートラルが適用される植物を原料とする純植物性グリースの性能評価[11]や植物由来の酸化防止剤の研究[12]も行われている. また、保持器にも生分解性プラスチックを使用した軸受も提案されている.

4.1.3. 産業分野分野別技術動向

(1) 自動車用軸受の技術動向

自動車の技術動向を図 4.1-2 に示す[13]. 環境, 快適, 安全の観点からの技術動向であり, 2015 年過ぎまでまとめられている. 先にも述べたが転がり軸受は使用される機械システムの要求に応える形で技術開発が行われる. 低トルク化は低燃費, 小形・軽量化とユニット化は車重軽減, 長寿命化は省資源, 低騒音化は居住性に繋がり, 自動車にとって転がり軸受の技術開発は大きな貢献ができる. パワートレイン系, ドライブトレイン系, ハイブリッドモータ用に至るまで, 図 4.1-3 に示すような製品の研究開発が行われている[14]. 具体的な軸受技術に関しては, 軸受メーカーの技報やホームページを参照いただきたい.

(2) 産業機械用軸受の技術動向

産業機械の技術動向を図 4.1-4 に示す[13]. 産業機械について、環境、生産性、安全・メンテナンスの観点から 2015 年過ぎまでまとめられている. 産業機械は分野が広く、発電、工作機械、ロボット、半導体製造装置など多くの産業が関係しており、個別の産業分野毎に技術動向が存在し、軸受についてもある程度まとめられている. 文献に幾つかを紹介しておくので参照されたい[15~19]. 全体としては、自動車でも述べたが、4.1.2 節で示した基本性能の向上が産業機械の性能向上に繋がるので、用途に応じた研究開発が行われている.

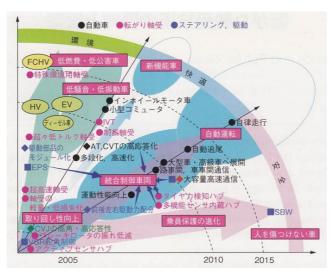


図 4.1-2 自動車の技術動向

メンテナンスや生産性の観点では、軸受損傷の早期診断が重要となる。軸受の損傷診断には振動計測が多く用いられるが、振動が大きくなった時点で軸受は損傷しているので事後診断となる。軸受損傷の兆候を事前に検出できれば、機械損傷防止やメンテナンスコストを抑制することが可能となる。そこでアコースティックエミッション(Acoustic Emission、AE)を用いた損傷診断技術が研究されている。はく離が生じる前から急激に AE の頻度が高くなることを利用した技術であるが、最近は摩擦摩耗の進展評価にも応用されるようになってきた[20]。また、振動に代わって電磁波[21]や超音波[22]を利用した異常・損傷診断に関する研究も行われている。

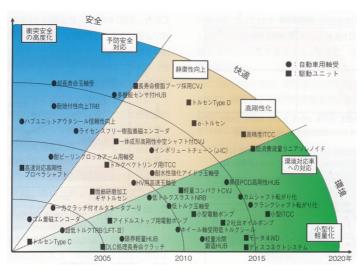


図 4.1-3 自動車用軸受と駆動ユニットの技術開発動向

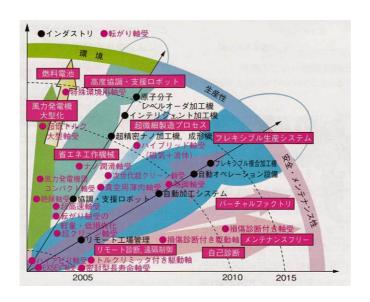


図 4.1-4 産業機械の技術動向

(3) 工作機械用軸受の技術動向

工作機械分野は、2年毎に日本国際工作機械見本市(JIMTOF)が開催されており、工作機械の技術動向に対応するための軸受技術変遷(動向)がよく把握されている分野である.工作機械

用軸受に対する軸受単体への要求性能は、高速化、高精度化、高剛性化などであるが、回転主軸の観点からは多軸機、複合機への対応や最適加工状態を維持するために予圧などを変化させるインテリジェント化の要求も高まっている。工作機械の生産は少し前までは日本が世界一であったが、中国にその座を奪われ、台数的にも差を付けられている。コストの問題もあり、日本の工作機械メーカーは高級機や多軸・複合機に活路を見いだしている。図 4.1-5 に日本の工作機械に要求される技術を示す[23]。

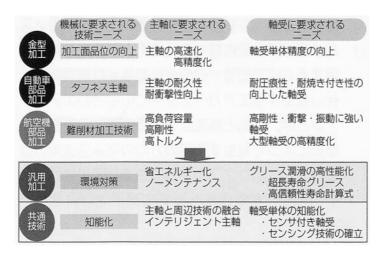


図 4.1-5 日本の工作機械に要求される技術

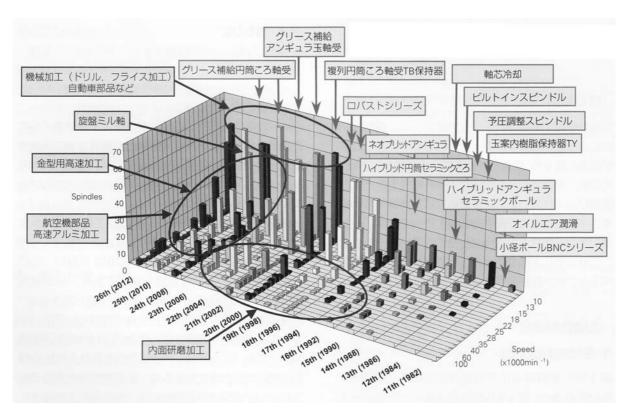


図 4.1-6 JIMTOF 高速主軸出展状況調査結果

工作機械用軸受の個別性能要求に対しては、軸受メーカーの技報やホームページに詳細があるので参照いただきたいが、技術ロードマップとして整理されている性能としては、主軸の高速化がある。図 4.1-6 は日本精工株式会社が JIMTOF の度に工作機械メーカーの展示ブースを調査してまとめたものである[23]. これを見ると高速化については、2000 年までは進んでいたが、ここしばらくは足踏状態であることがわかる。高速化に対する軸受対応をまとめたものを図 4.1-7 に示す[23]. これは日本精工株式会社の対応例であるが、他のメーカーでも同様の対応表が作られて、JIMTOF で展示されている.

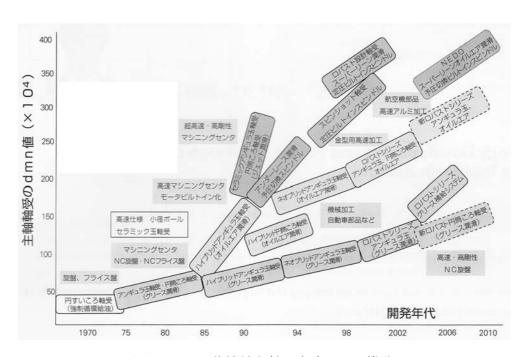


図 4.1-7 工作機械主軸の高速化への推移

(4) モータ用軸受の技術動向

工場などの産業用消費電力の 75%はモータの駆動に使われており、省エネに関する法規制が各国で施工されている。モータの高効率化に対する取り組みが加速し、国際電機標準会議(IEC)ではモータ効率規制の国際規格統一が進められ、IE1 から IE4 までの効率規格が定められた。効率規格を満たすために必要な技術を図 4.1-8[24]に示すが、磁気効率を高める対策と並行して、機械損出(損出全体の 12%を占めている)の削減が必要とされている。現在は損出に占める割合の大きな鉄損や銅損の削減を中心に対策が進められているが[25]、IE3、IE4 になると機械損出の低減要求が高まってくる。機械損出は軸受の摩擦であり、さらなる高効率を達成するためには、軸受の摩擦(動トルク)を小さくする必要がある。

小型のモータでは玉軸受が使われているが,玉軸受の摩擦損出原因と低減対策の関係を図 4.1-9 に示す[24]. 転がり抵抗,すべり抵抗,潤滑抵抗を削減する対策が進められており,標準品と比較して 50%の摩擦低減事例が報告されている.小型のモータでは,軸受に作用する荷重が小さく,疲労はくりで寿命となることは少ない.軽荷重環境で,高速,低摩擦(低トルク)となる軸受の開発が進められている.

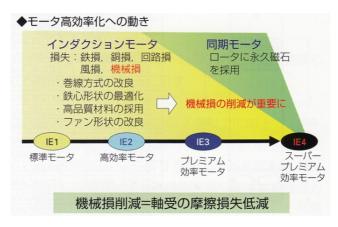


図 4.1-8 モータ効率化の動き

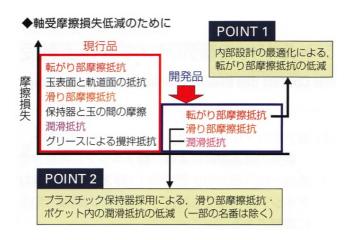


図 4.1-9 低摩擦玉軸受開発コンセプト

(5) 風力発電装置用軸受の技術動向[26]

全世界的なエコロジー活動の高まりとともに、自然エネルギーの利用が進んでいる。その中でも風力発電の導入が進んでいる。新規発電機導入量は年々増加しており、2015年の予測では全世界で 60×10^3 MW と予測されている。発電量を増やすには、発電機1機当たりの発電量を多くすることが効率的であり、風車の大型化(大径化)が進んでいる。図4.1-10に風車サイズの変遷を示すが、風車が大型化すると風車を支える軸受にも大きな力が作用することは想像に難くない。

風車は図 4.1-11 のような構造をしているが、風車を支える主軸用軸受には、高負荷容量、高剛性が求められている。そのため、発電量 2MW を越える風車においては、自動調心ころ軸受や複列円すいころ軸受などが使用されている。さらに、発電機は高度 100m 以上の位置に設置されるため、非常に高い信頼性(温度変化に対するロバスト性、10年以上の長寿命、洋上用であれば塩害対策等)が必要とされる。

増速機は遊星歯車機構を用いているが、全体を小型化するために、図 4.1-12 に示すような遊星 歯車と軸受を一体化した軸受が使用されることが多くなってきた. また、増速機はメインフレー ムには固定されずにトルクアームで回転方向のみ固定している場合が多い. そのため、振動に起 因した故障が多いので、潤滑方法や潤滑油の選定、清浄度管理なども重要である.

発電機は誘導発電機が多く用いられている. 誘導発電機に用いられる軸受は玉軸受であるが, 回転中に内外輪間に電位差が生じて, 内部で放電 (スパーク) が起こり, 軌道面が局所的に溶融する "電食"が発生しやすい. 玉軸受の電食に関する研究によれば, 電食を防止するには転動体を不導体であるセラミックにすることが有効であることが確認されており[27], 風力発電機でも高い信頼性が必要であることから, 転動体にセラミック (図 4.1-23) が用いられている. 材質は窒化ケイ素 (Si_3N_4) であるが, 2MW クラスの風車には直径約 50mm のセラミック球が使用されている. 風車の大型化にともなって, 発電機も大型化する必要があるが, 大径セラミック球の製作がキーポイントとなっている.

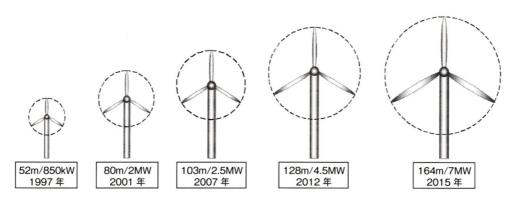


図 4.1-10 風車サイズの変遷



図 4.1-11 一般的な風車の構造

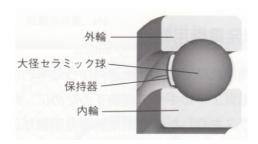


図 4.1-13 セラミック転動体の玉軸受

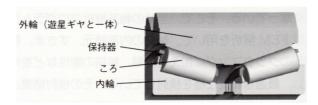


図 4.1-12 歯車と一体化した複列円すいころ軸受

文献 [4.1]

- [1] 湯川義清: Koyo ENGINEERING JOURNAL, No.159 (2001), 25.
- [2] 千葉博行・松山博樹・戸田一寿: Koyo ENGINEERING JOURNAL, No.168 (2005), 25.

- [3] 高見澤渉・外山正基・佐藤寛・中山義仁: 低トルクスラスト針状ころ軸受の開発, JTEKT Engineering Journal, 1003(2007)58.
- [4] トランスミッション用低トルク深溝玉軸受, NTN TECHNICAL REVIEW No.79 (2011), 78.
- [5] ミネベアグループ CSR レポート 2010, 24.
- [6] 中島碩一: ころがり軸受の材料・熱処理技術の動向, NTN TECHNICAL REVIEW, No.76(2008)10.
- [7] 毛利信之・田口一彦: 熱処理による浸炭鉱の耐摩耗性の向上, NTN TECHNICAL REVIEW, No.76(2008)17.
- [8] 竹谷侑馬・山口晋弘:外輪回転アイドラ軸受の耐水性能向上, JTEKT Engineering Journal, 1007(2009)65.
- [9] 株式会社 JTEKT: 工作機械商品のご提案, CAT.No.B2017
- [10] 野口昭治・小野京右:日本機械学会論文集(C編),64,620(1998)1398.
- [11] 森加奈子・八谷耕一・横内 淳:100%植物由来グリースの潤滑特性について,日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2010 秋福井予稿集 (2010),307.
- [12] 田口陽介・三上英信:潤滑グリースの酸化劣化抑制に及ぼすポリフェノールの効果,日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2010 春東京予稿集 (2010),283.
- [13] 北村昌之: 転がり軸受技術の動向と展望, JTEKT Engineering Journal, 1003(2007) 9.
- [14] 北村昌之:自動車用軸受・駆動ユニットの動向と展望, JTEKT Engineering Journal, 1009(2011) 6.
- [15] 大平隆昌:鉄鋼設備における軸受の技術動向, NSK Technical Journal, No678 (2005) 14.
- [16] 二之湯伸幸・八木壮一・丹羽 健:風力発電装置の大型化と軸受技術,NTN TECHNICAL REVIEW, No.77(2009)26.
- [17]河田真一・原 和宏:航空機用軸受の最新動向,
- [18] 伊東典之:鉄道車両用軸受の技術動向, NSK Technical Journal, No683 (2009) 2.
- [19] 上条治生:建設機械用軸受の技術動向, NSK Technical Journal, No683 (2009) 8.
- [20] 長谷亜蘭,和田正毅,三科博司,摩擦・摩耗の素過程で生じるアコースティックエミッション (第1報),日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2007 秋佐賀予稿集 (2007) 231.
- [21] 馬渡慎吾,角皆学,髙瀬健太郎,萱田良, 電磁診断技術による転がり軸受の劣化進展過程の 計測及び診断,日本保全学会 第7回学術講演会予稿集 (2010) 95.
- [22]小川昌哲, 竹内彰敏, 寺田聖一, 戸田 聡, 転がり軸受の超音波異常診断の効率化の検討, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2007 秋佐賀予稿集 (2007) 181.
- [23] 中村晋哉・河村 久・勝野美昭:工作機械主軸の技術開発と今後の状況, NSK Technical Journal, No686 (2013) 31.
- [24] 高効率モータ用省エネ玉軸受, NSK Technical Journal, No686 (2013) 62.
- [25] 森本茂雄:モータ技術の動向と展望, Panasonic Technical Journal, 55, 3(2009) 4.
- [26] 小林康裕: 風力発電装置における軸受の最新技術と市場動向, JTEKT Engineering Journal, 1010(2012) 49.
- [27] 野口昭治, 柿沼慎之右, 白木俊彦, 村上正之: 小型玉軸受の電食に関する研究(第4報) -

電食防止に関する実験的検討-,トライボロジスト,55,8 (2010) 579.

4.2. すべり軸受(中原)

すべり軸受の開発の変遷は例えば、自動車エンジン用すべり軸受の場合、図 4.2-1 に見られるようにエンジン性能向上の要求に応える形で PV 値の向上が図られ、最近では RoHS 規制に対応するために鉛フリーの軸受材料開発が行われている。規制に対応する場合は従来材料と同等の軸受性能を維持しつつ規制をクリアすることが求められるので、開発の成功はシステムやコンポーネントを変えるようなボトムアップにはならない。

PV 値の向上はエンジンの高速化、コンパクト化に寄与するのでボトムアップといえる.また、起動摩擦の低減はアイドルストップのバッテリー負荷の軽減になるのでこれもボトムアップと考えてよいと思う.このような軸受性能の技術革新は表面改質やコーティングを含めた材料と潤滑剤の技術革新によるところが大きい.材料と潤滑剤によらないすべり軸受の技術革新の候補としては現在研究が盛んな表面テクスチャ加工があるが、その効果のメカニズムが未解明である.また、昔からある技術の「なじみ」も最適設計が未完であるのでまだ開拓の余地がある.

もう一つボトムアップの重要な例は、ハードディスクの回転主軸受において転がり軸受からすべり軸受への転換によりハードディスクのコンパクト化と記録密度向上に大いに貢献した。この場合、グリース封入の転がり軸受と同様に初期に塗布した潤滑油だけで無給油 で使用できるようにしたことがその転換を可能にした。このように、給油システムが必要なすべり軸受の欠点を克服する技術革新もある。

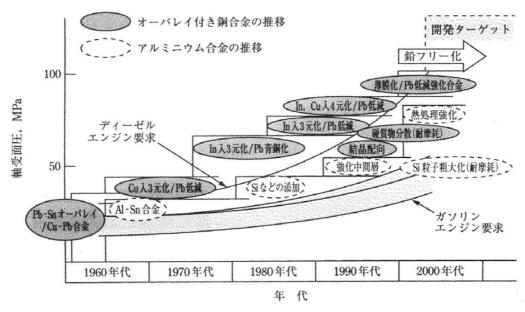


図 4.2-1 軸受面圧と軸受材料の研究開発の動向[1]

文献 [4.2]

[1] 岡本裕:トライボロジスト, 49-11 (2004) 827-832 (原典:Y. Kagohara, et al.: SAE 2003-01-0050 (2003))

4.3. シール(杉村)

シールは物質の漏れや侵入を防ぐ機械要素であり、さまざまな場面で使用されている。密封対象の物質や作動時の物理的・化学的条件は多岐にわたり、それぞれに適したシールが開発されてきた。オイルシール、メカニカルシール、パッキンなどの、しゅう動を伴う運動面シールがトライボロジーの対象であるが、静止面シール(ガスケット)においても接触界面が関わる問題はトライボロジーの守備範囲である。

他のトライボロジー問題の例にもれず、1990年代以降のシール技術における共通の課題は、省エネルギー・環境対応であり、個別の作動条件が厳しくなる中で低摩擦化、耐久性向上、低コスト化が図られてきた.以下に、ボトムアップの逆ではあるが、シールが使用されている対象機器のいくつかの例について技術動向と今後の展開を概観し、最後にシール技術全体の課題をまとめる.以下は、本会のシール研究会(第3種研究会)の活動の一環として行ったアンケート調査にもとづいて作成したものである.

4.3.1. 輸送分野

自動車では、エンジン、変速機、足回り、ブレーキ、燃料ポンプやエアコンなどの補機類など、さまざまな部位でさまざまな種類のシールが使われており、自動車はいわばシールの宝庫である。自動車の信頼性向上、燃費向上、低コスト化をめざして、他の要素技術と同様にシールにおいても、密封性とともに、低摩擦、高耐久性の両立が図られてきた。図 4.3-1 にエンジン、トランスミッション、足回り及びその他の補機の項目別に、シール技術の現在から 2020 年、2030 年までの流れを示す。

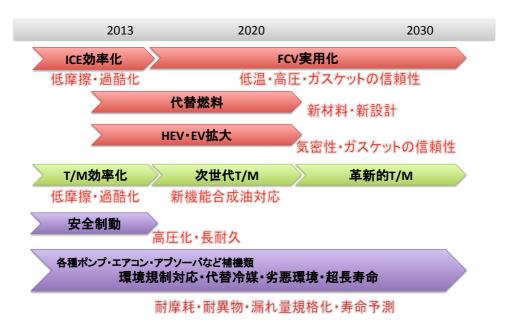


図 4.3-1 自動車用シールのロードマップ

エンジンやトランスミッションの軸シールとしてオイルシールが用いられるが, 潤滑油低粘度 化のもとで, 低摩擦化が現在の重要課題である. またエンジンのピストンリングやトランスミッ ションの往復動シールにおいては低摩擦とともに密封性のさらなる向上が求められている. ウォーターポンプなどの補機で使われているメカニカルシールについても漏れ低減による信頼性向上が課題である. いずれもシールの密封と摩擦の機構のより正しい理解とともに, シールに適した表面テクスチャリングの開発が必要とされている. また, 新興国の需要増加を背景として, 足回りのオイルシールなどでの耐泥水, 耐ダスト性が求められている.

カーエアコン用オイルシールは、地球温暖化防止を目的とした代替冷媒の導入に対応してきたが、現在も対応は続いており、加えて環境規制のさらなる強化のもとで、低漏れ量、低透過量のシール開発が求められており、現在のオイルシールにかわる新たなシール設計が模索されている.

今後は、ハイブリッド車や電気自動車など電動化が進み、電子システムやバッテリーの水に対する気密性が求められている。一方、CNG等の代替燃料や燃料電池自動車の普及へむけて、水素などのガスシール、ガスケットのシール性能と耐食性、信頼性の向上、低コスト化が求められるであろう。気体の透過や隙間漏れに関する評価・解析技術が今後重要となり、基本メカニズムの正しい理解が必要である。

建設機械では、劣悪な環境下で駆動系や油圧装置への異物や泥水の侵入を防ぎ、耐久性を向上させる必要がある。フィルターとの一体化など新しいシール技術の創成が期待される.

鉄道車両においては、これまで車両の高速化を背景として、車軸オイルシールの潤滑油漏洩防止が主たる課題であったが、3.2 でも触れられているように、高速化に加えて省メンテナンスが重要になってきたようである。塵埃や水の侵入を防止し耐久性を向上させるために、シールの材料や形状の新たな設計が必要であり、接触面圧の低減や、将来的には非接触をめざした研究開発が行われていくと思われる。

航空機エンジンについては 3.3 に技術動向が紹介されているが、エンジンで使用されるメカニカルシールにおいても、損失低減のための低摩擦化と密封性の両立が課題であり、しゅう動面のテクスチャリング技術への期待が今後さらに高まるであろう. 高速回転時の流体と構造の解析や、耐久性向上のための材料開発も重要とされている.

船舶の船尾管シールについては、古くから異物の侵入防止と耐摩耗性が求められてきたが、今後はさらなる損失低減のために、耐摩耗性の向上とともに低摩擦化が重要になると思われる.

宇宙輸送の分野については、3.5.1 に詳しく述べられている.液体ロケットエンジンにおいては、推進剤のターボポンプの高速回転軸シールがロケットの信頼性を担っていると言っても過言ではない. 高圧、極低温、高速といった極限環境下でメカニカルシール、セグメントシール、フローティングリングシールなどの密封性と耐久性が求められる. さらに今後は、有人宇宙飛行や機材の再使用を可能とするために、長寿命化と経済性の向上が追求されていくと予想され、シールに求められる技術的課題はつきないと思われる. 極低温での流体特性やシール面での二相化、シールの動特性など、基礎的な研究も必要不可欠である.

4.3.2. エネルギー・産業分野

エネルギー・産業の分野は広く、調査が全く不十分であるが、発電、化学プラントなどのタービンやコンプレッサ、ポンプ、バルブなどで使われるシールについて述べる.

化学プラント、複合発電設備などでの流体制御用バルブの、グランドパッキンやバルブプラグ

とシートのしゅう動部では、高温、高圧のもとでの耐久性、信頼性の確保が重要である.特に、 キャビテーションエロージョンや異物混入の影響については、評価方法が十分に確立していない.

発電用の蒸気タービンでは、高温、高差圧のガスのシールとして、ラビリンスシールやブラシシールが用いられており、特に高温での信頼性向上のための材料開発と流体・構造連成解析が必要である。原子力関係では、一次冷却剤ポンプにおけるシールの異常診断、異常予知技術の確立が望まれる。

高出力コンプレッサや工業用ポンプで用いられるメカニカルシールにおいても,高温,高圧, 高周速下での密封性が課題であり,運転条件がより苛酷になるなかでの最適設計のために,流体・ 構造連成解析が必要とされている.今後さらに,高温,ないし極低温への対応や省動力への要求 に対応するための新たな設計と表面技術が求められている.

エネルギー媒体としての水素の利用における最重要課題の一つは、高圧水素ガスの製造、貯蔵、輸送における漏洩防止である。 O リングやグランドパッキンなどのゴムや樹脂材料は、高圧による力学的負荷を受けるだけでなく、水素侵入による損傷や環境依存の摩擦摩耗特性をもつため、高圧水素に適した材料開発と設計が必要である.

設備が大型になればなるほど、シールの不具合が事故や設備停止による甚大な損失につながる ため、シールの設計とともに、信頼性の評価や寿命予知などの技術の進展が求められている.

4.3.3. シール技術のロードマップ

運動面シールの密封理論は存在する.しかし、いずれのタイプのシールについても、諸説ある 理論は開発に利用できるものはないと言われている.現在、シールに関する基礎研究はやや下火 であるが、密封理論の確立が強く望まれており、実験、解析の両面から研究すべきことは沢山あ る.

一方、上述のとおりシールが作動する温度、圧力、面圧、しゅう動速度などの条件は年々厳しくなり、密封対象も多様化している。図 4.3-2 にシールのトライボロジー技術のロードマップを示す。メカニカルシールでは今後も極限条件への対応が継続的に要求され、苛酷な条件下でのシール性、耐久性を確保するための材料開発、シール設計が必要である。オイルシールは、低摩擦化と耐摩耗性向上の両立をめざした開発が続き、密封対象に応じた材料設計、シール設計が必要だが、その背景として密封の原理や高分子の疲労や破壊に関わる研究が不可欠である。パッキンに関しても極限条件、特に極低温、高温、高圧への対応が求められ、弾性を維持する材料と構造の開発が必要とされる。ガスケットについては、環境規制への対応のため、透過漏れ低減やメタル化などの技術開発を行っていく必要がある。

シール全般としては、密封理論の構築によって、新規シール構造の合理的な設計をめざすべきである。密封理論とともに、損傷に関わる異物の扱い、寿命評価、異常予測とその対策が技術開発において最も重要な課題である。また、シールを使わない新たな技術創出にも期待したい。

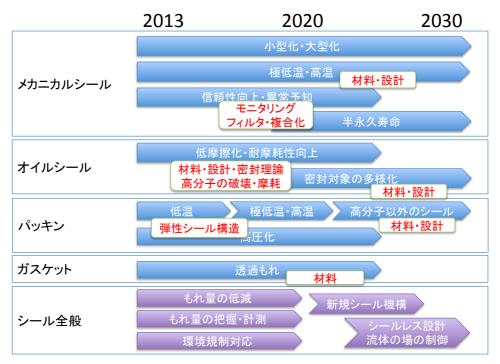


図 4.3-2 各種シールのトライボロジー技術ロードマップ

執筆協力

データ整理,分析など 佐藤祐樹 (NOK 株式会社)

情報提供(*はシール研究会委員)

佐藤祐樹*, 水田裕賢* (NOK 株式会社), 細江猛* (イーグル工業株式会社), 藤原宏樹* (NTN 株式会社), 坂上衆一*, 市橋俊彦* (出光興産株式会社), 松井規真* (キーパー株式会社), 西田隆仁* (日本バルカー工業株式会社), 田畠一二三* (株式会社 IHI), 秋田秀樹* (日立建機株式会社), 竹下興二* (元 三菱重工業株式会社), 不破良雄 (トヨタ自動車株式会社), 中島昌一 (株式会社日立パワーソリューションズ), 小島和夫 (日立オートモティブシステムズ株式会社), 松本謙司 (株式会社本田技術研究所), 南部俊和 (日産自動車株式会社), 吉田誠, 高田仁志 (宇宙航空研究開発機構), 村上洋一 (株式会社デンソー), 矢野昭彦 (三菱重工業株式会社), 曽根康友 (公益財団法人鉄道総合技術研究所)

5 材料・表面処理 (ボトムアップ 2) (梅原, 加納)

トライボロジー技術ロードマップを作成する上で、最近顕在化しつつある地球規模の異常気象や環境汚染問題に関する技術課題に貢献できる技術に焦点を絞りまとめることが重要と考えられる。これらの問題に最も大きな影響を及ぼしている工業製品は、乗用車を主とする自動車であると判断される。この自動車において上記課題に対する改善方策として最も効果的かつ実用的な技術は、化石燃料の燃費改善である。また、世界的な競争の激しい自動車に適用される技術は、コストパフォーマンスに優れることから、ロードマップ一覧表に分類されている航空・宇宙、鉄道、ロボット等の他産業への拡大適用の可能性も高い。したがって、この章においては自動車関連技術を中心に、種々の技術の進展について解説してゆく。

ここ数年、上記の課題解決に向け新型自動車においては急速に低燃費化技術の採用が増加している。その主なパワートレイン関連技術は、電気モータとガソリンエンジンを組み合わせた HEV(Hybrid Electric Vehicle)と小排気量ガソリンエンジンにアイドリングストップ機能、過給機を組み合わせたダウンサイジング化の二つである。これらに採用されるエンジンでは、燃費を少しでも改善させるために徹底的なフリクション低減が図られている。

また、車両重量の軽量化による燃費改善においては、高張力鋼板を用いた鋼板の薄肉化や鉄鋼材料からアルミニウム合金、CFRP等への軽量材料への置き換えが進んでいる.

さらには、鉛フリー合金を用いた軸受メタルの採用に見られる有害物質からの代替材料への置き換えについても、上記低燃費化技術と並行して大きく進展している.

5.1. RoHS(鉛などの有毒物質の規制)対応の代替材料開発(梅原,加納)

最近,供給(資源埋蔵量,資源と生産の偏在),価格(価格上昇や変動),需要(先端産業での需要) などの点からリスクの高い希少元素として,

W, Dy, La・・・中国偏在

Pt, Pd・・・南ア偏在

In, Ta, Li, Y, Co・・・需要増

Mn, Be, Mo, Cr, Ni・・・価格上昇

が挙げられている.

また,有害元素としては,人の健康や環境に有害となる,元素または化合物の規制がはじまっている.例えば,欧州電気電子機器規制(RoHS, 2006年)禁止物質は,

Hg, Pb, Cr, Cd

である.

これらの材料には、現在トライボロジー材料として、使われている材料もあり、今後、クラーク数上位の豊富に存在する元素で、強度、耐食性、耐熱性を有する優れたトライボロジー材料を探す必要がある。

また、セリウムは希土類元素であり、半導体デバイスの研磨工程の一般の Si ウエハの研磨においては広く酸化セリウムの砥粒として使われている。しかし、最近、輸入量が不安定であり、酸化セリウム砥粒を用いない Si ウエハの高能率研磨が進んでいる。また、パワーデバイス用のウエハとして期待されている SiC 単結晶基板の研磨において、Si ウエハより研磨能率が低いため、電

場や磁場、レーザー光等のエネルギーで支援することで研磨システムの高効率化が進められている。このような新しい研磨法においてトライボロジー材料技術を用いた最適なコーティング砥粒の開発などが鍵となると考えられる。

5.2. 軽量化(梅原,加納)

エンジンの燃費低減のようにエネルギーロスを低減させるためには、動いている部品の軽量化 が有効である. そのため、鉄系材料の部品においては徹底的な薄肉化やコンパクト形状設計がな されてきた.

一方、鉄系材料から比重の小さいアルミニウム、マグネシウム合金への置き換えも進んでおり、たとえば乗用車用エンジンのシリンダブロックとピストンのほとんどにアルミニウム合金が用いられている。この場合、アルミニウム合金同士の摩耗、焼き付きを抑制させるために、鉄系や Ni・P 系のメッキや固体潤滑剤成分である黒鉛、二硫化モリブデン、PTFE を樹脂バインダーに混合した焼成膜がアルミニウム合金ピストンスカート部に形成されている。一方、シリンダ側には、鋳鉄製のライナーが嵌装されている場合が多い。軽量化や冷却性の面では鋳鉄ライナーを除きたいものの、耐摩耗性が不十分となるため、シリコン析出物が多量に生成する高シリコンアルミニウム合金に置き換える必要がある。しかしながら、ピストンスカートとの摺動部の耐摩耗性向上のためだけに、シリンダ材料を変更するのはコストパフォーマンスが良好とは言えない。近年、汎用のアルミニウム合金シリンダに鉄系材料から成る溶射表面処理を採用することにより、ライナーレス化が図られる事例が出現している。

上記のように、汎用されているアルミニウム合金へのトライボロジー表面処理技術は、将来のロードマップ上で重要になると思われる。アルミニウム合金の耐摩耗性向上技術としては、アルマイト処理、先に述べたメッキ処理に限られているために、これらの処理と同等以上の耐摩耗性と固体潤滑焼成膜の低摩擦特性を有する表面処理技術は、自動車産業に限らず種々の産業分野からの要求が非常に高い。この将来技術候補として、後の表面処理で紹介するアルミニウム合金上へのDLCコーティング技術があげられる。

軽合金以外では、自動車分野における上記の軽量化の要求の中で、近年、自動車構造部材に炭素繊維からなる CC コンポジットや CFRP が採用され始めている.これらの材料は、航空機の燃費改善のための機体軽量化を目的として、最新のボーイング 787 等の航空機に大量に採用され始めたことで、材料価格が下がってゆくことが期待されているため、今後、自動車をはじめとする多くの産業機械にも広がってゆくものと思われる.

上記の炭素繊維材料の産業適用の現状は、比強度の高さを活かした軽量化に用いたものである. 今後、摺動部品としての要求特性をクリアし、相手材料や潤滑材料との適切な組み合わせにより、 耐摩耗性と優れた摩擦特性が見いだされることにより、将来の主要トライボロジー材料となることが期待される.

5.3. トライボ材料:パンタグラフのすり板(柿嶋)

パンタグラフのすり板(以下,すり板)はパンタグラフの最上部にあり、架線と接触して車両内部(制御系や駆動系等)へ電気を取り入れる役目を果たしている. すり板に要求される特性

は、①電気回路素子としての高い導電性、②車両部品としての高い強度、③摩擦材料として摩耗し難く、相手材も摩耗させない、④消耗品としての経済性である[1]. すり板の性能向上とはこれらの要求される特性を向上させることである. すり板の材料は焼結合金や炭素材料などであり、これら材料の性能向上のための改良や開発[2·4]が行われてきた. これからもより高性能を目指したすり板の研究開発が進められると思われる. 図 5.3·1 にすり板の今後の展開をまとめた. 基礎研究の分野では、すり板の摩耗メカニズム解明や C/C 複合材製すり板の摩耗メカニズム解明[5]があり、その後、これらの成果をベースとして、効率的なメンテナンスの実施に寄与する摩耗予測手法の確立が求められる. そして、開発の分野では耐摩耗性、潤滑性、機械的強度、耐熱性、信頼性の向上を目指したすり板の開発が進められる. なお、すり板の開発では、試作材の評価は、図示したように定置試験を経てフィールドで評価される. 定置試験では良かったがフィールドでは良くなかった場合は再度試作に戻ることになる. このような手戻りを防ぎ効率的な開発を行うためには定置試験での適切な評価が極めて重要である. また、炭素系新材料のすり板材への適用検討も進められていくものと思われる.

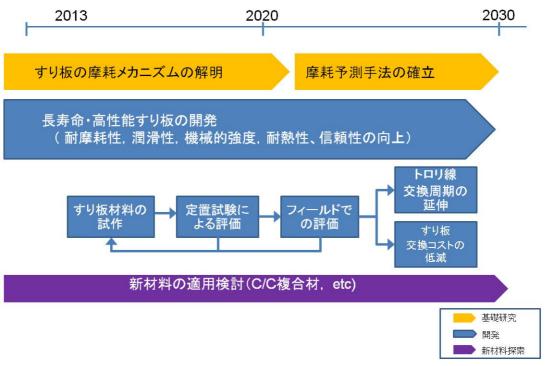


図 5.3-1 パンタグラフすり板の今後の展開

文献 [5.3]

- [1] 久保俊一 他:パンタグラフすり板とトロリ線の材料と摩耗, RRR, 63, 4 (2006) 26-29
- [2] 池田充 他:高速鉄道用パンタグラフのトライボロジーに関わる最近の動向,トライボロジスト,58,7 (2013) 447-454
- [3] 久保俊一 他:在来線用カーボンパンタグラフすり板の摩耗特性,鉄道総研報告,9,6(1995) 7-12
- [4] 土屋広志 他: C/C 複合材のパンタグラフすり板への適用, RRR, 66, 4 (2009) 10-13

[5] Y.Kubota et al :Sliding Wear Behavior of Copper Alloy Impregnated C/C Composites under an Electrical Current, Wear, Volume 302, Issues 1–2 (2013) 1492–1498

5.4. 表面処理(梅原,加納)

自動車に使われているトライボロジー表面処理のほとんどはエンジン、トランスミッションの 摺動部品に適用されている. 従来は、これらの摺動部品の摩耗を低コストで抑制させるために、 浸炭、窒化処理や高周波焼き入れといった熱処理が鉄鋼材料に施され、高硬度化や硬い析出物を 分散させた摺動表面を形成させることにより対応してきた.

さらには、自動車の高出力化や高性能化の継続的な要求から、新たな新車開発のたびに摺動部 品のコンパクト化が進み、その結果として接触面圧の上昇や潤滑油供給量低下により、厳しい摺 動条件下での耐摩耗性の向上技術が採用されていった.

これに関係する材料技術のいくつかの事例を紹介する. 従来, エンジン動弁系のカムシャフトの相手側のフォロワ部品に多用されていた鉄系焼結材料に代わり, 耐摩耗性が優れた窒化珪素セラミックス材料が採用された. しかしながらロッカーアーム摺動部に組み込む井厚さ 5mm 程度の蒲鉾形状のチップが高コストであったために, タクシー車両エンジン用のロッカーアーム部品への限定的な採用に限られていた. そもそも要求摩耗量が数ミクロンから数十ミクロンの摺動面に, 数ミリ厚の高価なセラミックス材料を用いることがオーバスペックと考えられた.

そこで注目されたのが、バルクのセラミックス材料よりも安価な表面処理である TiN, CrN といった硬質セラミックスコーティング材料が注目された。これらのコーティング材はすでに、切削工具のチップには採用されていた。切削工具においては、従来材料に対して工具寿命がコストアップに見合うだけ向上すれば採用されやすい。したがって、新規コーティング材料はロードマップ上の技術分野の中の加工機械の工具においてもっとも早期に実用化される傾向にある。これらのコーティング材料が、自動車部品としての生産性、品質安定性、コスト向上に見合う耐摩耗性向上パーフォーマンスを発揮するように部品適用開発が行われた結果、量産エンジン用バルブリフタやピストンリング摺動部品に採用された。

しかしながら、これらのコーティング材料は摩耗特性の著しい改善は図れるものの、摩擦係数自身は鉄系材料に比べて顕著に向上させることはできなかった。そこで注目されたコーティング材料が、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)である。ここからは、DLC膜の自動車エンジン部品をはじめとする工業適用事例を基に、将来に向けたロードマップについて解説してゆく。

2002年のトライボロジスト(第47巻,第11号)の解説記事に、特集"DLCダイヤモンド膜"が掲載されている。そこでは、ダイヤモンド膜から DLCまでの構造と物性[1]、成膜技術[2]、密着性および工具、自動車エンジン部品等への適用技術が取り上げられている。この時点では、適用に関する複数の記事からは、いずれも大規模な適用は実施されていない状況にあったことが分かる。

上記記事が掲載された前年度の 2001 年度から 2012 年度(予測)までの, DLC コーティングの 国内における受託加工事業の売上高推移を図 5.4-1 に示す.

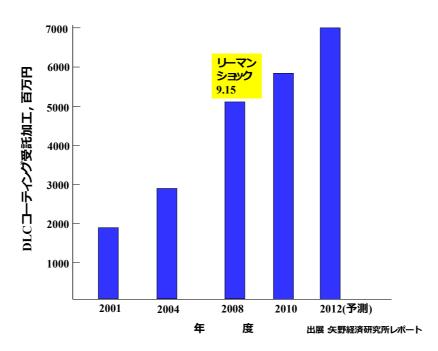


図 5.4-1 DLC コーティング受託加工金額の推移

2008 年 9 月に起こったリーマンショックという大きな経済破綻があったにもかかわらず、売上高は 2001 年度の 20 億円から 2012 年度予測の 70 億円へほぼ一直線に増加していることが分かる. さらには、実際の部品への DLC 膜の工業適用は量だけではなく種類や適用分野においても年々、確実に増加している. それにもかかわらず、DLC のトライボロジー特性のメカニズム解明や膜の分類、規格化は未だにゴールには程遠い状況にある. その要因の一つとして、DLC コーティング膜が炭素元素を主体とするアモルファスの厚さ 1 ミクロン程度の膜であるため、その構造を定量的に特定することが困難であること、摺動表面の化学状態を In Situ で分析することが難しいこと、黒鉛を原料にした PVD(Physical Vapor Deposition)法や炭化水素ガスを原料にしたPECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)といった成膜方法によって、DLC 膜の構成、トライボロジー特性が著しく異なること等が挙げられる.

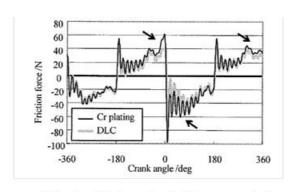
逆に言えば、上記課題が解決されてゆくことにより、材料品質保証や摩耗に対する要求特性が 厳しい航空宇宙、鉄道やロボット産業の摺動部品への適用拡大が期待される.

5.4.1. 自動車部品への適用

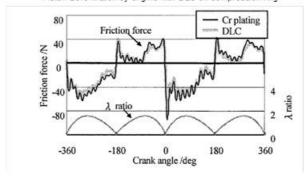
ここ数年,世界的に環境問題や資源の枯渇や価格急騰が日常の問題となり、それらの改善に向け自動車においては急速に低燃費化技術の採用が増加している。その主なパワートレイン関連技術は、電気モータとガソリンエンジンを組み合わせた HEV(Hybrid Electric Vehicle)と小排気量ガソリンエンジンにアイドリングストップ機能、過給機を組み合わせたダウンサイジング化の二つである。これらに採用されるエンジンでは、燃費を少しでも改善させるために徹底的なフリクション低減が図られている。

この一つ事例として、レース用エンジンの種々の部品の摺動面や高級車用ガソリンエンジンバルブリフタに適用されてきた DLC コーティングが、小排気量ガソリンエンジン用のバルブリフタ

とピストンリングに適用拡大していることが挙げられる.このことは DLC コーティングの量産における品質の安定性や部品単価の低廉化が進んでいることを示している.これらの部品では, DLC 膜に ta-C を適用することにより大幅なフリクション低減につなげている. 特にピストンリングへの適用においては、図 5.4-2 に示すようにトップリングとオイルリングの両者でフリクションが低減されるが、エンジンクランク角度による低減量においては、両者で異なる結果が得られている.この違いは、フリクション低減効果に加え、実機エンジンでの摩擦条件の把握が困難であるトップリングとオイルリングの摩擦状態の違いを示唆している点が興味深い.



Piston-Bore friction by engine with DLC on compression ring



Piston-Bore friction by engine with DLC on oil ring

図 5.4-2 DLC コーティングピストンリングのフリクション低減

さらには、DLC コーティング技術開発の先進国であるドイツにおいては、エンジンにおける DLC の低フリクション特性の研究にとどまらず、環境改善に向けたエンジンオイルとしてポリアルキレングリコール適用研究が実施されており、その摺動部材として DLC コーティング適用が検討されている 15~17)。この技術が確立されれば、有害物質を使わないエンジンの低燃費化技術が創出されることになる。 さらには、エアコンコンプレッサーのような潤滑が閉じた系であれば、エンジンよりも容易に採用されてゆくことが予測される。

上記の適用事例における DLC コーティングでは、浸炭鋼などの鉄基材料が基材として使われており、上記 5.2.の軽量材料への量産適用は実現していない. DLC 膜の主元素である炭素はアルミニウムとの親和性が悪いために、アルミニウム合金の切削や塑性加工用の工具に DLC コーティングが多用されている 10)20). このことは、アルミニウム合金上への DLC 膜の密着性が低いことを示している.そのため、乗用車用エンジンに汎用されているアルミニウム合金製ピストンやシリンダへの DLC コーティングの実用化は進んでいなかった. しかしながら、アルミニウム合金の

基材表面にタングステン微粒子をピーニングし、表層にタングステン微粒子分散層を形成した後、 DLC をコーティングすることにより、DLC 膜の密着・耐摩耗性を著しく改善した技術が開発されている。

このように今後は、DLC 膜種により異なるトライボロジー特性を最大限活用し、基材の表面改質との複合化による新たな技術を利用した自動車部品へ適用が急増してゆくものと思われる.

5.4.2. その他の産業分野への適用

そのほかの産業分野においても、DLC コーティングの適用は着実に、生産量および適用部品が拡大している。11年前の特集号で取り上げられていた工具への適用においては、アルミの凝着抑制の特性を活かした実用化の可能性が述べられていたが、現在ではアルミ切削用ドリルやエンドミルに種々のタイプの DLC コーティングが汎用されるようになっている。さらには、アルコールミスト潤滑と DLC コーティング工具を組み合わせることにより、通常の超硬工具と切削油を用いた切削性と同等の効果が得られる報告がある。この技術は、ロードマップの加工機械分野において、今後の環境に優しいアルミニウム合金切削加工技術として注目される。

身近なところでは、シェーバの替刃においては、刃の切れ味や耐摩耗性の向上を目的として適用されている。同様の目的で、理容師用のはさみの切削面へのセグメント構造 DLC 膜適用においては、切れ味に対する高い感性を持っている理容師に評価されている。これらの適用からは、ロードマップ上の医療機器分野において、種々の機器への応用が近いものと考えられる。また、人工関節に用いられている高分子量 PTFE 等の高分子材料の高寿命化として、DLC コーティングの適用が期待される。



エンジン性能評価 約 10分間、回転数1000~13000rpm以下



低シリコンA2618 耐熱アルミ合金製 シリンダーボア: Ni-Pメッキ



A2618⇒Wピーニング+凸部研磨+P-CVD, DLC シリンダーボア P-CVD DLC

図 5.4-3 DLC コーティングアルミニウムピストンの耐摩耗性向上

5.4.3. 今後の展望 ~ころがり疲労特性に関する研究動向~

最後に、すべり特性よりも現象解明や適用が進んでいない DLC コーティングのころがり疲労に関する研究動向にも簡単に触れる.

DLC コーティングによるころがり疲労寿命の向上は、以前より報告があるが、耐久途中に部分的に膜が剥離するにもかかわらず寿命が延びる要因が不明であった。その一つの要因として、高面圧下で転がり接触状態で、DLC 膜が健全な時には低摩擦でころがり接触するため、膜直下の鋼基材には高い圧縮応力が繰り返し負荷され、鋼の組織が超微細化する結果、膜が部分的に剥離した時には既に基材が強化されるため、ピッチング発生寿命が大幅に延びることが考えられている。疲労寿命向上を目的とした DLC コーティング適用により、自動車駆動系ギヤ等の小型化、長寿命化、低摩擦化への大きな貢献が期待されており、ロードマップ上の種々の機械の転がり摺動部品への適用が予測される。

図 5.4-4 に、硬質炭素膜の技術の特徴を示す。この図から、硬質炭素膜の技術分野においては、工業的進歩性が大きく、新規性が多く存在することを示している。この二つの指標は特許性や技術論文評価で最も重要とされているものであるので、今後も多くの特許出願や研究発表がなされてゆくものと思われる。また、環境に優しい材料であることから、"グリーントライボロジー"への貢献も期待される。したがって、DLC 膜の優れたトライボロジー特性と耐食性や人体整合性等の特徴を活かし、ロードマップ上の種々の産業分野、食品、医療、ロボット、航空産業に対してDLC コーティングの適用が広がることが予測される。

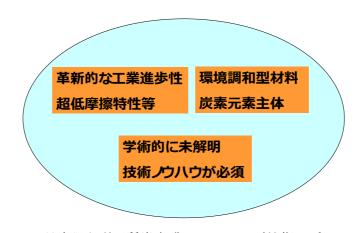


図 5.4-4 環境調和型硬質炭素膜コーティング技術のポテンシャル

文献 [5.4]

[1] 齋藤 秀俊: ダイヤモンド膜から DLC 膜まで,トライボロジスト,47,11(2002)795.

[2] 田中 章浩:最近の DLC 膜・ダイヤモンド膜の製作技術およびそれら被膜の諸特性,トライボロジスト,47,11(2002) 802.

6 潤滑剤 (ボトムアップ3) (益子)

6.1. 自動車用潤滑剤の今後

今後の自動車は、電気自動車の普及と、内燃機関の更なる進化が考えられ、それぞれで潤滑剤の高性能化が求められると考えられる。電気自動車の普及に伴う部分では、発電やスマートグリッド・燃料電池などの電力事業の高度化が求められ、それをサポートする潤滑剤として、発電用タービン油・絶縁油・圧縮機油の高度化も求められる。一方、内燃機関を用いた自動車の割合は、世界的には大きくは減少しないことが予想され、過給機・ダウンサイジング・直噴・可変バルブ・電磁バルブ(動弁系不要化)・表面処理(DLC・CNx)・CVT・プラスチック材・炭素繊維材といった新しい技術や装置が開発され、幅広く搭載されることが想定されることから、それらに関連して潤滑油に対する新たな課題が生じることが予想される。自動車用内燃機関油や駆動系油に求められる課題として、プレイグニッション対応、過給機による高温化に対応したデポジット低減技術、アルコール燃料などの新燃料への対応、また潤滑剤そのものの進化として、超高粘度指数化、超低摩擦化、金属フリー・水系潤滑剤、リサイクル対応も考えられる。

新たなハードウェアに対する潤滑油の課題としては、更なる省燃費化、長寿命化、新たな素材に対する耐摩耗性等が考えられる。内燃機関が小型化・高出力化された場合には、潤滑剤への熱負荷は大きくなり、潤滑剤自体の高性能化が要求される。省燃費化に対しては、流体潤滑・混合潤滑領域での高粘度指数化及び低粘度化と、混合潤滑・境界潤滑領域での低摩擦化が要求される。

低粘度化,高粘度指数化に関しては,基油の高性能化と粘度指数向上剤の添加により対応され,基油にはいわゆる鉱油系高度精製基油もしくはGtL基油のようなグループIII基油が使用される.こうした高性能基油は,高温での良好な耐熱性,酸化安定性を有しており,適用範囲拡大の加速が今後予想される.さらに高性能な基油であるPAOに代表される合成油の使用も考えられるが,依然として価格面からの制約から限定的な適用になると予想される.省燃費性能における低粘度化の限界は,基油の蒸発性によるが,ハードウェアの改良なしにはこの限界を引き上げるのは現状では困難であり,現在でも議論されているSAE粘度分類でのXW-8程度の低粘度が限界とみるのが現実的には妥当あろう[1].その反面,仮にハード面での基油の蒸発成分のコントロールが可能になったとすれば,潤滑性能面では更なる低粘度化は可能であり,また,ハードウェア母材の改良等で対応出来る場合は、水系潤滑剤の使用も考えられなくもない.

高粘度指数化に対しても様々な議論があるが、仮にコストを度外視して考えた場合であっても、 基油の高粘度指数化は 160 程度で限界である [2]. ただし、この場合は有機化合物である基油の 化学構造の観点から、低温流動性に対しては不利になる. 製造での収率等の採算性を加味すれば、 粘度指数 140~150 のものが主流となっていくと予想される. 現在の液体での最大の高粘度指数 化合物としてはポリシロキサン化合物があるが、極性が高く現在の流通している添加剤系には全 く対応しておらず、また、高温でのゲル化という課題があるため、既存の潤滑剤に適用する場合 には新たな添加剤組成に対する技術革新が求められる [3].

潤滑剤の高粘度指数化に関しては、粘度指数向上剤の進歩が鍵を握る.近年、従来の構造とは 異なる新たな向上剤が開発され、更なる高粘度指数化に寄与しているが [4]、今後もよりせん断 安定性、増粘作用に優れた向上剤の適用と高粘度指数基油の使用により、現在の 250 近辺の高性 能潤滑油の粘度指数は、300 近辺まで引き上げられると予想される. 一方の、低摩擦化に関しては、パワートレイン素材として多用されている金属系の母材に対して低摩擦を呈する添加剤としては、MoDTC に代表される金属系摩擦調整剤が現在のところ最小の摩擦係数を示しており、また、価格面でも有利であることから、これに変わるものが適用されていないのが現状である[5]. 昨今の表面処理技術の代表例である DLC に対して、新たな添加剤組成により低摩擦を示したエンジン油の例を挙げるまでもなく、CNx のような表面処理技術や炭素繊維母材と新たな添加剤配合技術の組み合わせにより、更なる低摩擦化が可能となろう[6].

内燃機関油にとっての長寿命化には、バイオ燃料に代表される多様化燃料の使用は負の因子となる場合が多い。また、塔内高圧縮化によるスス発生量の増加も考えねばならない課題である。こうした課題に対しては、添加剤組成の進化と共に、新規の添加剤コンポーネントの組み合わせによる潤滑剤の高性能化により対処していかねばならない。

パワートレインのもう一つの重要なユニットであるトランスミッションでの潤滑剤では、歯車の潤滑油に対しては、金属系の歯車に対しての耐摩耗性・耐焼き付性を発揮する添加剤組成はその化学的な特性から耐熱性に弱く、配合する潤滑剤の長寿命化を困難にする原因となっている。歯車の新たな表面処理技術や、炭素繊維素材や超高度プラスチック材などの歯車が適用されれば、これらの負の要因を排除した添加剤組成が可能となり、潤滑油自体の長寿命化、クラッチ材を含むパワートレイン系では、摩擦特性のさらなる長寿命化が可能であり、期待される。近年進歩の目覚ましい CVT ユニットに対しては、更なる潤滑剤の低粘度化、高粘度指数化と境界潤滑領域での高摩擦化が求められるが、クラッチ特性を加味したバランスの良い摩擦特性が必須である。高摩擦化に関しては、ここでも母材の進化と添加剤組成の革新により達成されていくものと予想される。

歯車、転がり軸受の潤滑油に対する低摩擦化にも低粘度化、高粘度指数化は有効であるが、ここでも先に述べた蒸発性が限界因子となる。また、こうした転がり要素に対する潤滑に対しての低粘度化は耐疲労性に対して負の因子であるので、ここでも表面処理技術、新素材での対応が求められる。こうした新たな素材の出現は、更なる低粘度化を可能にするものであり、ギヤボックス内の撹拌抵抗の低減につながり、車両の省燃費性に大きく寄与出来るものと考える。

6.2. 産業界における潤滑剤の今後

製造現場において潤滑剤は必須であるが、行政により環境配慮型事業所の普及促進が図られていることも手伝って、省エネを達成するための潤滑剤の進化、リサイクルに対応した潤滑剤の設計およびロングドレイン化による廃油量削減、安全性の更なる向上を目的とした化学物質管理・高引火点化・生分解性油剤の導入が、より強く要請されるようになると考えられる。電力セグメントにおいては、再生可能エネルギーの割合が大きくなることが計画されているが、そのバックアップ電源としての火力発電も今後も必要とされ、IPP(独立系発電事業者)が増え、また大規模で効率的な発電所や、小規模分散型の発電システムが想定される。それぞれの発電所に共通して、よりメンテナンスのしやすい潤滑剤が求められ[7]、同様にロングライフ化、生分解性、リサイクル性を考慮したものが強く求められるようになると思われる。

別の切り口として,産業界の「ものつくり」の変化に応じた潤滑剤の変化も期待されている. 例えば,少量多品種生産を目的とした 3D プリンタによる部品製造が幅広く普及することが予想 されており、既に現在でも樹脂材だけでなく金属材料も 3D プリンタにより製造が可能となっている。そうした部材やテクスチャに適合した潤滑剤の研究開発も興味深い点である。また、ネット社会の深化に応じて、製造業の事業所および各装置のオペレーションの最適化を目的に、すべての機械がネットワークに繋がることが想起される。機械の稼働状況がモニターされるだけでなく、センサによるオイル性状がリアルタイムで管理され、潤滑管理に活用されるであろう。また故障診断・故障予防にも応用されるシステムの構築、およびその普及も考えられる。

6.3. 潤滑剤の今後

将来の潤滑剤自体について着目すると、基油(流体)と添加剤の双方で新しい技術が開発され、その実用化が期待される。基油については、特に省エネルギー・省燃費・環境対応を目的に、基油の高性能化が進み、そうした高性能基油が潤滑剤に占める割合・分野が大きく増えると考えられる[8]また、粘性のアクティブ制御を目的とした磁性流体・液晶技術[9]の応用、イオン流体[10,11]、ダイラタント流体といった、現在研究開発が進められている新しい技術が開花し、一定の分野にて実用化・普及していることが期待される。鉱油に比べ潤滑性が劣ることから使用が限定されている水系潤滑油や、生分解性油[12]についても、耐摩耗性・耐荷重能などの改良を通じて、幅広く使用されるようになることが考えられる。潤滑油添加剤についても、同様に、超低摩擦化や超高 VI 化を達成するための化合物の開発が進み、また、マイクロカプセル化や吸着性に着眼した新規化合物の潤滑剤への活用なども考えられる。

素材・テクスチャ技術の進歩に対応して、新規潤滑剤の技術も求められる。今後さらに進歩するテクスチャ技術として、DLC コーティング・CNx コーティング、などのほか、新たなコーティングの出現も考えられ、また金属材料に代わる素材として、超硬度プラスチック材・炭素繊維材の普及が考えられ、対応する潤滑剤の研究開発が期待される。また、例えば生体関節の潤滑状態の研究[13]などの成果を通じて、生体の特性を応用した新しい潤滑システムの研究開発は興味がある。磁場軸受によるオイルフリー化、水潤滑・電動化・リニア技術によるオイルフリー化が進む分野が増えると考えられる一方、依然潤滑剤が求められる分野も残り、そうした用途で使用される潤滑剤には、これまで以上の長寿命性・高性能・生分解性が求められると考えられる。

6.4. 今後の潤滑剤評価技術

現在でも、性能評価のために多大な工数やコストが費やされることが、潤滑剤の開発時における大きな課題であるが、潤滑剤に対する要求性能の高度化に伴い、更なる評価技術の高度化も求められる。また、潤滑剤の研究開発分野においても、スーパーコンピューターによるシミュレーション技術の活用が進むと思われる。具体的には、機械要素の各部位における温度・圧力・せん断条件に応じた基油・ポリマーの粘度挙動、添加剤分子の相互作用や相乗効果、新素材やテクスチャの違いによる潤滑剤・添加剤分子の動態などについて、スーパーコンピューターを用いた解析がおこなわれ、得られた知見が潤滑剤の研究開発に活かされるようになるであろう。更に実機試験の一部をコンピューターシミュレーションによる評価に置き換えることも予想できる。例えば実際のエンジンを用いた潤滑剤の評価試験の代わりに、シミュレーションで評価がおこなえれば、評価に要する費用・時間が節約できるだけでなく、燃料や排出ガスの削減にもつながること

から環境的にも期待されるところである.

文献 [6.1~6.4]

- [2] 五十嵐仁一:潤滑油基油の現状と今後の動向,トライボロジスト,48,8 (2003) 265
- [3] 伊藤光一:シリコーン油, トライボロジスト, 8, 6 (1963) 421
- [4] 由岐剛:低粘度潤滑油における粘度指数向上剤の潤滑性向上技術,トライボロジスト,53,7 (2008)449
- [5] 並木直人:摩擦調整剤の動向,トライボロジスト,48,11 (2003)903
- [6] 加納眞:高硬質炭素膜のトライボロジーの研究動向、トライボロジスト、58、8 (2013) 524
- [7] 川端雅彦: 発電設備におけるメンテナンストライボロジービジネス, トライボロジスト, 49, 3 (2004) 206
- [8] 渡邊彰ら:特集「高性能基油の使用実例と研究動向」,トライボロジスト,52,4 (2007) 248
- [9] 田所千治, 中野健: 液晶の特異なレオロジー特性と潤滑剤としての応用, トライボロジスト, 58, 10 (2013) 715
- [10]上村秀人, 南一郎, 森誠之: 新規潤滑油としてのイオン液体, トライボロジスト, 50, 3(2005) 208
- [11]羽山誠:イオン液体の宇宙用潤滑剤への適用研究トライボロジスト, 58, 12 (2013) 868
- [12] 大塚正和, 村木正芳: 生分解性潤滑油の動向, トライボロジスト, 50, 3 (2005) 226
- [13] 鎗光清道,中嶋和弘,澤江義則,村上輝夫:生体関節液成分が人工軟骨候補材料の摩擦挙動および境界潤滑膜形成能に及ぼす影響,トライボロジスト,55,7 (2010) 489

執筆協力

長富悦史、永仮光洋(昭和シェル石油)

7 解析ツール (ボトムアップ 4)

7.1. 潤滑シミュレーション技術の発展(服部)

潤滑シミュレーション技術が発展する動機(モチベーション)には様々なケースがあろうが, ここではエアコン用コンプレッサを例にとり,製品市場のニーズ,製品開発サイドの要求から発 展していったケースについて触れる.

エアコン用ロータリコンプレッサは 1980 年代初頭にはインバータ制御による可変運転が始まり、1990 年代に高効率のツインロータリ式が登場するなど、常に高品位に進化してきた。また、オゾン層保護を目的に冷媒を R22 から R410A に変更した際、圧縮機構で起こる現象を改めて調べ直すという、基礎からの再開発を経験している。さらに次には、地球温暖化防止のための省エネルギー化が課題となり、効率向上のための技術開発が絶えず行われている。このような過程において、潤滑シミュレーション技術のニーズも変化し、結果的には図 7.1-1 に示すような変遷により発展していった。

「インバータエアコンと複合解析]

コンプレッサの回転数制御により、冷暖房能力を連続的に変化させ、より快適な室内空調を実現したインバータエアコンが 1980 年代初頭に登場した。このように可変運転を行うと、偏心回転部の不つり合い荷重量とともに、回転シャフトの曲げ変形の状態が変わってくる。よって、回転シャフト全体の振れまわり方も変わるので、軸受個々の負荷配分など諸特性の相互関係がどう変化するかを知る必要が生じた。そこで、軸受すべてのレイノルズ方程式を回転シャフトの運動方程式で結びつけ、それらを連成させた「回転体と軸受の複合解析」技術が開発され、バランシングの最適解、軸受給油溝の最適位置を見出すために活用された。

[ツインロータリと弾性流体潤滑解析]

1990年代に2組の圧縮機構を有するツインロータリコンプレッサが製品化されたが、軸受スパンが長くなるため、回転シャフトの曲げ剛性低下が課題の一つであった。曲げ変形によりシャフトが大きく傾斜すると、軸受端で摩耗・かじりなどの表面損傷が起きやすくなる。

このため、ロータリコンプレッサでは、図 7.1·1 にもあるように軸受に周溝を設け、端部を薄肉構造とする手段がとられた. これは軸受面が弾性変形することで、油膜をより厚く形成できるようにしたものと考えられる. そこで、薄肉部の肉厚、溝深さなど薄肉構造を最適設計するには、そこでの油膜厚さがどうなるかを知る必要がある. このことから、コンプレッサ特有の条件(片当りなど)を考慮した弾性流体潤滑解析技術の開発が行われ、本シミュレーション技術は軸受設計に大いに活躍した.

「地球環境保護(オゾン層保護・温暖化対策)と混合潤滑解析】

1990 年代以降は、地球環境保護の機運が高まり、それに伴うトライボロジー問題が大いにクローズアップされた時期である。オゾン層保護のために採用された代替フロン HFC では、混合・境界潤滑領域での固体接触部の表面損傷が大きな問題となった。さらにオゾン層保護対策が一段落した後は、地球温暖化防止の観点から消費電力低減(省エネ化)が要求されており、エアコン

心臓部であるコンプレッサの効率向上が継続的な課題となっている.この場合,固体接触が避けられないような潤滑面における摩擦をいかに小さくするかがポイントの一つである.

このような状況から、この時期には固体接触が混在する混合潤滑解析が必要とされ、そのシミュレーション技術が大いに発展した。図 7.1-1 にもあるように、オゾン層保護の際には、圧縮機構のベーン先端部分の摩耗低減・潤滑の最適化に混合潤滑解析技術が貢献し、さらに省エネ化においては、軸受の低摩擦化とシャフトの低速回転化を実現するために大いに活躍した。

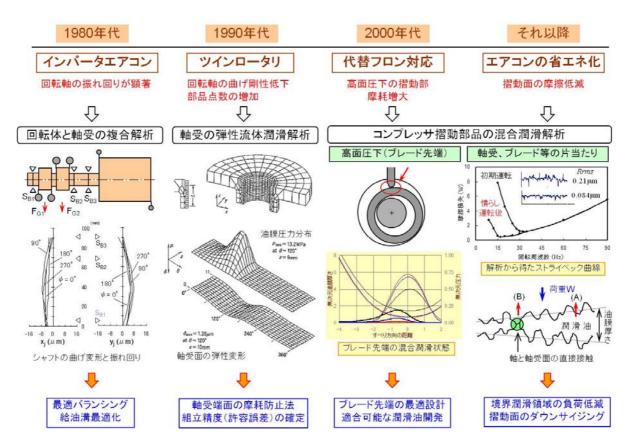


図 7.1-1 製品(エアコン用コンプレッサ)の開発と潤滑シミュレーション技術の発展

7.2. 試験法

7.2.1. 摩擦摩耗試験法(加納)

摩擦摩耗試験の標準化を狙い,日本機械学会標準化部会,機素潤滑設計部門内の「摩耗の標準試験法原案作成委員会」の中で,同一の鉄鋼材料を用いたラウンドロビン試験が 1999 年に実施された.しかしながら,試験機器は異なるメーカー製であるものの,同一の材料,同一形状の試験片,同一の荷重,すべり速度,すべり距離条件で摩耗試験が実施したにも関わらず,比摩耗量絶対値は1ケタ近くの違いが生じた[1].摩擦摩耗試験法の標準化の難しさを物語っている.

また、実際の産業の現場で問題となる摩擦摩耗は、工業製品の部品が実際の機械や金型に組み込まれ、潤滑下で摺動して発生する現象がほとんどであり、さらにはそういった現象の発生するタイミングが研究、開発、実稼働初期および耐久限界時期に分かれるために、それらの摩耗現象を定量的に評価する単体摩擦試験の条件を一律に決めることはできない。そこで、実際の単体摩

擦試験では、前記の実摺動部品に生じる摩耗形態を忠実に再現させることができるか、摩耗量レベル、特に実働時の良品~粗悪品の摩耗量の相対的な序列を合致させることができるかが重要となる.

すべり摩擦摩耗試験においては、対となる試験片の形により接触部の形状が面、線、点と大きく分類される[1]. たとえば、自動車エンジンで摩擦比率が高く摩耗も生じやすいために今までに多くの研究対象となってきたカム、フォロワに代表される摩擦環境に対応させるためには、700MPa 程度の高面圧下の境界潤滑状態でのすべり接触状態を形成させる必要がある[2]. このような高い面圧下の境界潤滑下条件を再現させるのに適した組合せとしてボールと平板の点接触や平行ピン側面と平板の線接触といった組み合わせが選択されている.

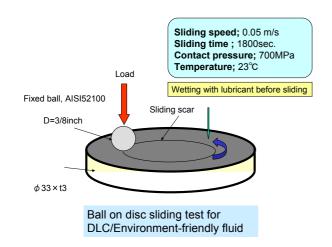
点接触のボールオンディスク摩擦試験は、高面圧下のすべり試験として世界中で幅広く用いられている。円筒形状のピンの先端に加工された球面もしくは回転しないように治具に固定したボールを、回転または往復運動する平板ディスクに一定荷重で押し付けることにより、すべり摩擦条件での評価となる(図 7.2-1)[3]. この試験法においては、球面と平面の接触となるために、片当たりのない点接触条件を発現できるが、初期の面圧が高いためにボール点接触部が早期に摩耗し円形状の平面を形成するために、初期面圧が保たれないデメリットもある.

上記のカム,フォロワの組合せのように、実際の産業機械の摺動部位では、潤滑下の線接触条件ですべり接触している場合がほとんどであり、その摩擦摩耗状態を再現することが重要となる.特に、潤滑下の摩擦において、点接触での摩擦試験では、潤滑油の接触部の巻き込み状況が線接触とは異なることが懸念される。従って、潤滑下において線接触条件ですべる機械部品を評価する場合には、線接触での摩擦試験が用いられることが多い。この線接触の試験方法として、SRV試験、ブロックオンディスク試験、ピンオンディスク試験(図 7.2-2)があげられる。

今後の、摩擦摩耗試験方法として、多岐にわたる摩擦摩耗試験状況を短時間、実際の摩耗現象 との高い相関性、低コストでフレキシブルに対応する必要性が、ますます強く要求されてゆくも のと考えられる.

この一つの取り組みとして、汎用のボールオンディスク試験用装置のボール固定治具の代わりに、片当たりを防ぐために切り込みを入れた接触線方向にフレキシブルに変形する平行ピン用の治具を作製することにより、平行ピンを用いた線接触摩擦試験が簡便に実施できるようになった(図 7.2-3)事例[4]がある.このような、高価な試験装置の本体を変更するのではなく、取り付け治具を工夫したり、オリジナルな治具を作製することが、前記のフレキシブルな要求に対応する一つの答えになると考えられる.

また、試験条件や試験方法に対してもフレキシビリティが要求され、ますますそれらの一律化が難しくなると予想される。そのような状況では、世界中で開発や研究で実施される種々の実試験方法とその結果の開示データの活用が重要となるために、それらがクラウドデータベースとして迅速かつ有効に検索され、それらを利用、応用もしくは改良した"使える摩擦摩耗試験法"が発展してゆくものと考えられる。



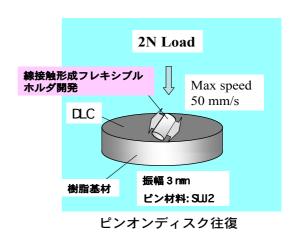


図 7.2-1 ボールオンディスク摩擦試験法の一例[3]

図 7.2-2 ピンオンディスク摩擦試験法の一例

試験装置 : トライボメーター ᠺイスCSM社)

当センターで可能な試験形態

- ●ボールオンディスク・ピンオンディスク摩擦試験 回転 往復)
- ●潤滑剤浸漬 塗布試験 温度~150°C)

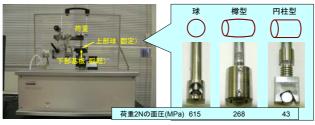


図 7.2-3 治具の工夫による接触形状の変更事例

7.2.2. 加速試験法(中原)

機械の品質は性能とおよびその性能を保証する信頼性であり、その保証期間に寿命が関係する. 多くのユーザから信頼を得た製品がブランドとなる.したがって、新製品開発において、保証期間の確認作業が極めて重要になる.その確認作業としての試験は、設計、コンポーネント試作、実機システムの三つの段階がある.

設計段階ではラボ試験と呼ばれる次の3種類の試験がある.

- (1) 単純な接触摺動試験で、ボールオンディスク、ブロックオンリング、中空円筒端面接触が代表的.
- (2) 接触荷重や摺動速度が変動するトライボ要素, 例えば歯車やカム接触を単純な二円筒転がりーすべり接触で代用するような接触模擬(シミュレーション)試験.
- (3) トライボ要素単一組合せ(歯車対,カムータペット,シリンダーピストンリングなど) 試験

上記(1)と(2)は摺動材料や潤滑剤の選定のために行われる試験で、接触条件が明確であり、

少量の油量で条件も幅広く行うことが容易であり、また表面分析も容易であるであるが、後述するように、この試験結果から実機の摩耗予測や焼付き条件の予測は困難である.

トライボ要素を組込んだコンポーネント試作段階では、

- (4) コンポーネントミニチュア試験(大型機械の場合)
- (5) コンポーネント試験

ここでいうコンポーネントとは、自動車でいえばエンジン、変速機など自動車サブシステムに相当する.この段階の試験は、コンポーネント間の相互作用およびコンポーネントとシステム全体の間の相互作用の影響は入らないが、当該コンポーネント内のトライボ要素における接触状態は実機のそれに近いといえる.

実機段階では.

- (6) 台上試験
- (7) フィールド試験 (実際の使用モード条件での試験)

最後に行う実機試験(フィールド試験)を保証期間にわたって行えば確実な実証になるが、それでは時間も費用も膨大になるだけでなく、市場に出たときは時代遅れとなっているので非現実的である. 試験時間を短くできれば、それだけ開発時間の短縮と開発費の低減になるので、試験期間の短縮、すなわち加速試験が不可欠となる.

部材の疲労試験の場合は、応力変動のサイクル周波数を増加させれば試験時間短縮ができるが、トライボ要素の保証期間の摺動距離を短時間で達成させるために摺動速度を設計スペックより早くすると、一般の油潤滑される要素では流体負荷能力が増加して、接触条件がよりマイルドに変わってしまう。接触条件の厳しさを同じにするためには、液体潤滑剤による潤滑下では混合潤滑条件および境界潤滑条件での固体接触部の分担面圧(荷重)が実際の機械に組み込まれたトライボ要素のそれと同じにする必要があるので、負荷荷重を増加させるか潤滑油の粘度を下げる必要がある。潤滑油の粘度を下げるためには油温を上げるかあるいは低粘度の潤滑油に変える必要があり、そうなると実際の固体接触部の境界潤滑の状態が異なることになる。また、負荷荷重を大きく増加させると摩耗が生じる混合潤滑状態では弾性流体潤滑の影響および摩擦発熱による温度上昇の影響が無視できなくなる。したがって、実機における接触状態(tribological contact condition)とすべて同じにして加速試験を行うことは困難である。ただし、起動停止を除いて流体潤滑領域で運転されるトライボ要素に関しては、起動停止のサイクルを速めることにより加速試験が可能である。

また、実機試験は、単純な接触のラボ試験に比べて、部品の工作精度および組立精度の影響が大きく、製作精度のばらつき影響を把握するために相当数の試験が必要になる。ラボ試験結果と実機試験結果の相関が取れないことが多い理由の一つがこの製作精度の影響である。もう一つはトライボ要素を支持している構造体の弾性変形および熱変形の影響である。これらの影響をある程度緩和するのが「なじみ」である。

一方、ラボ試験では、境界潤滑状態まで同一にすることは困難であるにしても、固体接触の荷

重分担の状態は同一にすることが容易であるので、その固体接触部での境界潤滑状態に注意すれば、加速試験は可能である.

したがって, 現状では次のような形で加速試験が行われているか, あるいは考えられる.

- (1) 起動停止を含めた種々の運転モードで、無休の試験運転により保証期間相当の時間、距離 または回数を稼ぐ、保証期間相当の負荷までいかない場合は、途中経過での摩耗量から保 証期間の推定を行う。
- (2) 固体接触の荷重分布または油膜厚さが同一となるよう、油温を上げた状態で実機以上の速度にして加速試験を行う.高温下では添加剤の劣化により摩耗が更に加速する可能性があるが、一方で酸化重合により基油粘度が上昇し油膜が厚くなる場合があるため注意する.
- (3) 製作精度を上げて、なじみによりラボ試験との相関が取れるようにし、ラボ試験での加速 試験結果に基づいて実機の摩耗量を理論的に推定する.
- (4) ラボ試験での加速試験と構造体の弾性変形・熱変形を考慮したトライボシミュレーション CAE を併用する.

トライボシミュレーション CAE で摩耗や焼付きの予測が可能にすることが最も信頼性・寿命確認作業の短縮および開発費で節減になるが、固体接触するサブミクロンの油膜厚さを精度よく推定することは、弾性変形や熱変形がその精度に比べて桁違いに大きいので、困難である。現状で実証されている現在計算シミュレーションで信用できる油膜厚さの下限値は構造体にもよるが数μm から 10μm 程度であると思われる。

したがって、今後の課題はトライボシミュレータの精度向上を行いつつ、現状の加速試験法を 進化させることと思われる.

文献 [7.2]

- [1] 社団法人日本機械学会: JSMES013-1999 摩耗の標準試験方法, 1999 年 5 月 14 日
- [2] 加納眞:自動車におけるトライボロジー試験の評価, 潤滑経済, No. 509, (2008) 10.
- [3] 加納眞: DLC コーティング適用技術の進展, 潤滑経済, No. 536, (2010) 15.
- [4] 吉田健太郎, 堀内崇弘, 加納眞: 低環境負荷潤滑剤を用いた DLC 膜の低摩擦特性に関する研究, 神奈川県産業技術センター 研究報告, No. 16, (2010) 5.

7.3. プローブ顕微鏡を用いた分析技術(安藤)

1982 年に IBM のチューリッヒ研究所で、G. Binnig らによって STM (scanning tunneling microscope) が開発され[1], その後 AFM (atomic force microscope) の開発につながった[2]. 現在の表面科学の発展はこれらの SPM (scanning probe microscope) 無くしては考えられない. トライボロジーも例外では無く、日本においては、1980 年代後半に金子らによって先駆的な研究が行われた[2].

トムリンソン・ロイターの Web of Science データベースに収録されている論文から,AFM を 摩擦測定に利用した研究を俯瞰した結果を図 7.3·1 に示す.データベースのトピックス入力フィ ールドに,atomic force microscop* と friction を入力し,それぞれのキーワードを両方含む各年 の論文数を示している。比較のために、トピックス入力フィールドに"friction force"を入力したときの論文数も合わせて示した。atomic force microscop* × friction で検索したときに、ヒットした最初の論文は Langmuir に 1991 年に掲載されている[3]。"friction force"の件数と比較してみると、ほぼ同じ割合で増加を続けている。1986 年に AFM の最初の論文が発表され[4],その5年後くらいから、常にトライボロジーの研究に対して、AFM が一定の貢献をしていることが推察できる。一方、同時期に掲載された STM に関する論文を scanning tunneling microscop* × friction で検索したしたところ、全期間を通じて年間平均で $2\sim3$ 報であり、トライボロジーの研究に AFM が利用されることが圧倒的に多いことが分かる。その理由として、STM と比較すると絶縁体、酸化物に覆われた金属表面など、摩擦に供される材料の観察や摩擦後の表面の観察を、AFM によって容易に行えることまず挙げられる。もう一つの理由は、AFM 自体が摩擦試験装置として利用できるからである[5·7]。

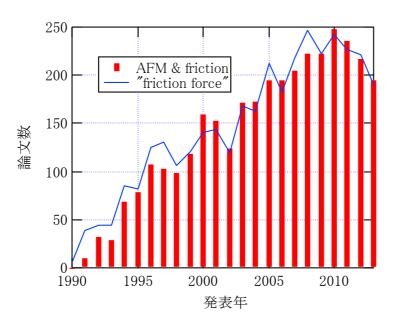


図 7.3-1 AFM と摩擦に関する論文の発表件数の推移

このような AFM を支える重要な技術にマイクロカンチレバーがある。マイクロカンチレバーは先端が鋭いプローブを備え、さらに擾乱に強く高分解能で表面の観察や分析を行うことを可能にしている。図 7.3-2 に、AFM 用マイクロカンチレバーについて、これまでの発展と今後に予想される展開を示した。AFM が市販された当初は $\mathrm{Si}_3\mathrm{N}_4$ 製が主流で、プローブ先端曲率半径は公称30nm であった。その後単結晶 $\mathrm{Si}_3\mathrm{N}_4$ 製が主流で、プローブ先端曲率半径は公称30nm であった。その後単結晶 $\mathrm{Si}_3\mathrm{N}_4$ 製が主流であり、現在のプローブ先端曲率半径は $\mathrm{5nm}_3\mathrm{m}_3\mathrm$

プローブの材質については、導電性を付与するために貴金属や DLC (diamond like carbon) のコーティングが行われてきている。しかし、コーティングによってプローブ先端曲率半径は大きくなってしまう傾向がある。今後はその問題を解決すると同時に、プローブの先端曲率半径をさらに小さくしていくために、導電性が付与された単結晶ダイヤモンドのプローブが利用されるようになると予想される。

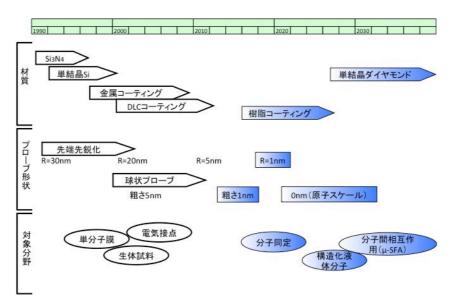


図 7.3-2 トライボロジーの分析技術におけるマイクロカンチレバーの展開

8 おわりに(中原)

本報告書は、「トライボロジーロードマップとはなんぞや」という定義から始め、技術俯瞰図というトライボロジーロードマップの枠組みを作成するまでに至った「トライボロジーロードマップ検討研究会」の3年間の準備期間の成果とその準備期間の成果である技術俯瞰図をベースとしてロードマップ作成を目的とした「トライボロジーロードマップ研究会」の2年間の成果、すなわち合計5年間の成果である.

本研究会の設置時の目的は、1.2 節で述べたように、検討研究会で作成した技術俯瞰図マトリックスの空白部分の技術・研究課題の充実を図り、次にそれらの課題を分類整理し、分類された課題毎に先ずは 10 年~50 年程度のロードマップを作製することを目的としたが、ロードマップ作成に関する議論を進める中で、トライボロジーの役割が、システム・コンポーネントからのトップダウンの要求に答える役割と機械要素およびトライボロジーの技術革新によるシステム・コンポーネントのボトムアップ(底上げ)の二つの役割があることから、その両面の観点でロードマップを作成することに方針を変更した。

本報告書から研究開発の責任者にトライボロジーの役割と重要性をより明確に理解され、トライボロジストの活躍の場が広がる効果とトライボロジストにとって研究課題を見つけやすくなる効果を期待している.

しかしながら、年数をかけた割には不十分な出来栄えとなったことに主査として責任を感じている。本報告書が会員の皆様の期待に十分に応えることはできなかった原因ついて、反省点を述べておく。一つは、ロードマップの完成度を高めることは際限がないので、研究会設置期を延長せずに期間内にできる範囲内に届溜めたことである。もう一つは、日本トライボロジー学会でロードマップ作製は初めての試みであったので、議論を重視した委員の人選を行ったが、結果的に委員に多忙な方々が集中し、研究会の開催回数が少なく、しかも全員が揃うこともない状況になった。また、会期の途中からロードマップ作成の実働部隊を作ることもできず、多忙な委員が兼務したことである。その結果、基本となるトライボ要素の内、「すべり軸受」は非常に不完全に、また「歯車」は完全に抜けてしまった。その他にも重要事項が少なからず抜けている。さらに、ロードマップ作成で障害になったのが、企業各社で研究開発のロードマップを作成しているが、その内容は企業の戦略に深く関わるので、会員が一番知りたいことは公表できないという問題を抱えていることである。

したがって、本報告書はトライボロジーロードマップの「ひな形」と考えていただきたい. ロードマップはその性格上、5~10 年毎に見直しが必要であるものなので、次のロードマップ作成時にこのひな形および上記の反省点と問題点が参考になれば幸いである.

謝辞 (中原)

3.1 節の「自動車の省エネルギー・環境対応」において、第一種研究会「自動車のトライボロジーによる省エネルギー予測調査研究会」の成果の一部の流用を許可していただいた主査の中村隆教授に感謝いたします。また、各執筆担当委員に個別に協力いただいた諸氏に感謝申し上げます。