

## 11. 機素潤滑設計部門

### 11.1 機素潤滑設計部門の目的と活動概要

#### 11.1.1 目的と取組みの概要

本部門は、機械の設計・製造に関わる工学・工業の研究・教育および技術において、歯車や各種動力伝達要素などの機械要素、アクチュエータやセンサ等の機能要素、各種摺動要素や摩擦・摩耗・潤滑を取扱うトライボロジー、新しい機構解析・設計技術といった基盤技術と、これらを総合した機械の設計・解析に関する学問／技術の発展への寄与を目的としている。日本機械学会のマークの歯車に象徴されるように、機械工学の最も伝統的かつ基盤的な一領域を本部門が担っているという責任と誇りを持ち、会員および社会への技術情報の提供と普及に努めるとともに、機械工学の新分野への展開に寄与すべく、新時代に対応した機素潤滑設計分野の研究、教育に積極的に取り組み、機械工学の伝統と発展の両面から活動することを基本方針としている。このため、本部門では上述の各分野の研究・教育活動を、四つの技術企画委員会[機械要素 1 技術企画委員会、トライボロジー・機械要素 2 技術企画委員会、機械設計技術企画委員会、アクチュエータシステム技術企画委員会]が受け持ち、そして全体の運営に携わる総務、広報、表彰の各委員会を設けて積極的に活動を行ってきた。2016 年 11 月末日において、第 1 位から第 3 位で当部門に登録している正会員数は 2443 名であり、本部門はやや小型であるが、独立した分野の横断的な部門である。

本部門の具体的活動方針や活動概要、取組みは以下に示すとおりである。

- (1) 学術講演会の充実：部門講演会と日本機械学会年次大会を中心に講演会の更なる充実を進めている。毎年開催する部門講演会は、隔年ごとに韓国機械学会との合同開催「生産機素潤滑設計に関する国際会議(ICMDT)」として実施しており、進展している。年次大会では、他部門との合同企画も推進し、部門横断活動にも寄与している。歯車などの伝動装置に関して、専門性の高いシンポジウム(伝動装置)(MPT: Motion and Power Transmission)を適宜開催している。
- (2) 国際化：ICMDT は、日韓だけではなくアジア地区への拡大を視野に入れている。また、MPT は隔年で「動力・運動伝達系国際会議(MPT)」として国際化を推進している。国際ジャーナル Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JAMDSM)の充実にも力を注いでいる。
- (3) 技術情報の提供：歯車、トライボロジー、機構の解析と設計、アクチュエータ等に関する基礎的な講習会は、若手技術者の企業教育にも利用できる講座として好評である。このような標準的、基盤的技術の提供・普及は、会員、社会、企業の需要に応える重要な使命と考えており、同時にその活動をとおして会員数増強につなげる努力を行っている。
- (4) 機素潤滑設計分野の新展開：新時代の機械工学を切り拓く基盤技術としての役割も極めて高い。特に、マイクロナノメカニズム、マイクロトライボロジー、ニューアクチュエータ／センサ、ライフサポート機器等の社会的期待の高い新分野の研究を推進している。

#### 11.1.2 主催学術講演会

部門講演会、ICMDT および MPT について、その概要を表 1 に示す。このように、部門講演会は講演数 80 程度、参加者数 120 名程度であり、部門登録者数からすると適当な規模で開催できていることがわかる。東日本大震災のあった 2011 年度の ICMDT2011 は講演・参加のキャンセルが多数あったものの、韓国からも講演・参加者を得て、すべての行事を予定通り実施している。これら以外にも、福祉工学シンポジウム 2008

(山口)，第9回評価・診断に関するシンポジウム(香川，2010)，生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会2013(山梨)，第14回評価・診断に関するシンポジウム(福井，2014)を幹事部門として開催している。

### 11.1.3 社会普及活動

部門内の各技術企画委員会が企画・実行している講習会について，表2にまとめる。大別すると，機械設計技術者として習得しておくべき，機構学，歯車，トライボロジーなどの基礎的知識を幅広く具体例を通して解説する形式のものと，表面改質技術やアクチュエータなどの最新の研究成果を産業に応用することを目的とした形式のもの2通りを用意している。このような講習会を毎年5つ程度開催し，トータルで150名以上の受講者を得ており，産業基盤を支える機械設計技術者の育成，機械設計技術の向上に貢献している。

また，本部門が中心となって出版した書籍：JSME テキストシリーズ「機構学」，「歯車損傷図鑑」，「アクチュエータ工学」は基礎的かつ標準的な専門書・技術書として大学・高専などの教育機関や企業の設計現場において有効活用されている。

表1 部門主催学術講演会の歴史(2007年以降，10年間)

#### (a) 部門講演会

講演会名称	開催年月	開催地	講演数	参加者数
ICMDT2007 (第7回部門講演会)	2007年7月	札幌	165	223
第8回部門講演会	2008年4月	倉敷	88	149
ICMDT2009 (第9回部門講演会)	2009年6月	韓国・済州島	277	331
第10回部門講演会	2010年4月	新潟	82	116
ICMDT2011 (第11回部門講演会)	2011年4月	蒲郡	160	177
第12回部門講演会	2012年4月	松山	69	121
ICMDT2013 (第13回部門講演会)	2013年5月	韓国・釜山	250	280(日本118, 韓国162)
第14回部門講演会	2014年4月	長野	79	129
ICMDT2015 (第15回部門講演会)	2015年4月	沖縄	262	352(日本175, 韓国171, 台湾2, ドイツ1, マレーシア1, ハンガリー1, タイ1)
第16回部門講演会	2016年4月	芦原	77	136

#### (b) シンポジウム「伝動装置」

名称	開催年月	開催地	講演数	参加者数
MPT2007	2007年11月	鳥取	81	244
MPT2009(国際)	2009年5月	仙台	131	193
MPT2013	2013年11月	宮崎	70	188
MPT2017(国際)	2017年3月	京都	121 (日本63, 海外58)	266

表2 講習会の歴史(2007年以降，10年分)

#### (a) 機械要素関連

講習会名称	開催年月(日数)	開催地	参加者数	概要
歯車技術基礎講座	2007年11月(2日)	東京	87	設計：幾何学，強度，振動 製造：材料，熱処理，加工法 に関する基礎的内容。
歯車技術基礎講座	2008年11月(2日)	京都	106	同上
歯車技術基礎講座	2009年11月(2日)	横浜	68	同上
歯車技術基礎講座	2010年11月(2日)	岡山	55	同上
歯車技術基礎講座	2011年11月(2日)	横浜	53	同上
歯車技術基礎講座	2012年11月(2日)	福岡	65	同上
歯車技術基礎講座	2013年11月(2日)	横浜	67	同上
歯車技術基礎講座	2014年11月(2日)	京都	69	同上
歯車技術基礎講座	2015年11月(2日)	横浜	61	同上
歯車技術基礎講座	2016年11月(2日)	名古屋	73	同上

## (b) トライボロジー関連

講習会名称	開催年月(日数)	開催地	参加者数	概要
トライボ機械要素の最新技術動向	2007年12月(1日)	東京	36	工作機械主軸等の転がり軸受, リニアガイド, ボールねじ, すべり軸受, 空気軸受などの技術動向を紹介.
転がり軸受の最新技術動向	2008年12月(1日)	東京	43	基礎的内容(技術動向から長寿命化, 潤滑, 理論解析)と応用事例(自動車部品, 小型モータへの適用)について解説.
転がり軸受の最新技術動向	2009年12月(1日)	東京	31	基礎的内容(技術動向から長寿命化, 潤滑, 理論解析)と応用事例(家電品, 自動車部品, 工作機械への適用)について解説.
総括! DLC膜を創る・測る・活かす	2011年1月(1日)	名古屋	25	盛んに開発が進められているDLCについて3つの視点から習得することを目的.
試してみよう! 微粒子ピーニング	2012年11月(1日)	愛知	16	研究開発の最新情報と統合化知識の紹介から実際の装置製造工程見学及び処理実演.
じっくり聴く境界潤滑の基礎と応用	2014年1月(1日)	東京	50	同上. 常識と誤解について解説.
試してみよう! ショットピーニング	2015年1月(1日)	愛知	27	トピックテーマ(今回はショットピーニング)を取り上げ, 研究開発の最新情報と適用事例の紹介から実際の製造設備の見学と実演.
じっくり聴く機械要素の実用トライボロジー設計の勘所	2015年2月(1日)	東京	36	一つのテーマをじっくり聴く企画. トライボロジー設計の考え方, 手法, 実例の紹介.
じっくり聴く転がり軸受の基礎と応用	2015年10月(1日)	東京	33	同上. 転がり軸受の実用設計に役立つ勘所と最新の研究事例の紹介.
じっくり聴く(デモ付)摩擦の核心に迫るトライボロジー試験	2016年11月(1日)	東京	36	同上. 機械設計に役立つ要素試験のポイントについて紹介.
来て観て触って学ぶ表面改質のフロンティア	2016年12月(1日)	名古屋	13	摩擦特性改善のための微粒子ピーニングとバニシングの複合表面改質法の紹介と実演.

## (c) 機械設計関連

講習会名称	開催年月(日数)	開催地	参加者数	概要
機械設計におけるシミュレーション技術の活用	2007年11月(1日)	東京	56	若手機械設計技術者を対象とし, 有限要素法やマルチボディシステムの汎用ソフトウェアの機械設計への応用法について, 理論と実践の両面から解説.
新しいメカニズム創出に役立つ機構学基礎講座	2008年10月(2日)	東京	58	若手機械設計技術者を対象とし, JSMEテキストシリーズ「機構学」をテキストとして利用.
新しいメカニズム創出に役立つ機構学応用講座	2009年10月(2日)	東京	32	同上
新しいメカニズム創出に役立つ機構学応用講座(基礎編, コンピュータ演習)	2010年8月(2日)	東京	24	同上に加え, コンピュータによる解析演習を導入し, 解析ソフトの提供もあり.
メカトロニクス時代のメカニズムと制御系の基本設計	2011年10月(2日)	東京	42 43	若手機械設計技術者を対象とし, JSMEテキストシリーズ「機構学」を参考書とし, 機構解析の基礎, 制御系設計の基本内容と設計実例の紹介.
精密位置決め基礎と超精密位置決めへの適用事例	2012年11月(1日)	東京	38	若手機械設計技術者を対象とし, 精密位置決め装置の設計に関わる基礎から応用まで講義, 大学の研究室見学付.
機械設計のための機構学と, 機構における摩	2013年11月(1日)	東京	45	若手機械設計技術者を対象とし, 機構学のエッセンスの解説から摩擦を考慮した解析

擦の基本的取り扱いと活用事例				手法と摩擦による影響の体験まで。
機械設計のための機構学と、機構における摩擦の基本的取り扱い及び活用事例	2014年11月（1日）	東京	32	同上。
機械設計技術者のための機構学と摩擦の取り扱い	2015年11月（1日）	東京	28	同上。体感用の模型を実際に触りながら理解を含めることを強調。
機構学の基礎理論と実際の現場から得た勘所の事例紹介	2016年10月（1日）	東京	34	若手機械設計技術者を対象とし、機構学のエッセンスの解説から具体的な設計におけるポイントを紹介。

(d) アクチュエータ関連

講習会名称	開催年月（日数）	開催地	参加者数	概要
ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ	2007年6月（各1日）	横浜 京都	52 43	科研費の特定領域研究の成果出版物「アクチュエータ工学」をテキストとして利用。
ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ	2008年5月（各1日）	浜松 名古屋	24 30	同上。
触覚技術の基礎と応用	2008年7月（1日）	東京	90	13名の講師によりヒトの触覚理解から触覚センサ、触覚ディスプレイへの応用まで紹介。
ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ	2009年11月（1日）	東京	24	次世代アクチュエータの現状と展望から各種駆動原理のアクチュエータを紹介。
触覚技術の基礎と応用	2009年7月（各1日）	大阪 名古屋	41 66	基礎と応用事例の紹介。
ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ	2010年6月（各1日）	名古屋 大阪	18 17	次世代アクチュエータの現状と展望から各種駆動原理のアクチュエータ、加工方法などを紹介。
触覚技術の基礎と応用	2010年7月（1日）	東京	88	15名の講師によりヒトの触覚理解からヒューマンマシンインターフェースやロボットへの応用まで紹介。
触覚技術の基礎と応用	2011年10月（1日）	東京	96	12名の講師によりヒトの触覚理解からヒューマンマシンインターフェースやロボットへの応用までをデモを含めて紹介。
実用化が近い新原理アクチュエータ	2011年12月（1日）	岡山	29	さまざまな駆動原理のアクチュエータの紹介。
触覚技術の基礎と応用	2012年7月（1日）	名古屋	78	17名ほかの講師により、ヒト触覚の力学的・神経科学的理解といった触覚の基礎から、触覚センサ／ディスプレイの開発といった応用技術にいたるまでの最先端の触覚研究について実機を含めて紹介。
圧電アクチュエータのすべて	2012年12月（1日）	東京	33	1冊の専門書「アクチュエータ研究の最前線」記載の話題から1つを選び、原理から応用まで解説する企画。
触覚技術の基礎と応用	2013年11月（1日）	東京	84	22名ほかの講師により、ヒト触覚の力学的・神経科学的理解といった触覚の基礎から、触覚センサ／ディスプレイの開発といった応用技術にいたるまでの最先端の触覚研究について実機を含めて紹介。
フルード（流体）を用いたアクチュエータ技術の最前線	2013年12月（1日）	東京	39	同上。
産業に役立つアクチュエータ研究開発の最前線	2014年12月（1日）	名古屋	47	自動車、航空機産業の盛んな地域を対象とした企画。新原理のアクチュエータの紹介。
産業に役立つアクチュ	2015年12月（1日）	横浜	39	最新アクチュエータの要素とアクチュエー

エータ研究開発の最前線				タシステムへの展開について紹介。
産業に役立つアクチュエータ研究開発の最前線	2016年11月（1日）	名古屋	28	最新アクチュエータの要素とアクチュエータシステムへの展開について紹介。

## 11.2 機素潤滑設計部門に関する技術動向

### 11.2.1 機械要素

歯車、ベルト、ねじ、軸受・案内、シールに分けて代表例を順に挙げて研究動向を概観する。まず歯車伝動に関して、加工法、振動、動力損失・効率、強度および計測技術に分類する。加工法としては、ホブ切り調質歯車のラッピング(2007)、ホブ切りにおける切りくず生成機構(2008)、5軸マシニングセンタによるフェースギヤの加工(2015)、内歯歯車のスカイビング加工(2016)などである。振動については、中凸形に歯面形状を修整した歯車の振動(2007)、遊星歯車装置の諸誤差がねじり振動や伝達誤差に与える影響(2013)、多段歯車装置におけるかみ合い非整数時振動の不良原因歯車特定方法(2016)などである。動力損失・効率については、ハウジング内すき間のかくはん損失に及ぼす影響(2008)、CFDを用いた歯車効率のシミュレーション(2010)、超音波振動を活用した歯面の摩擦抵抗低減法(2013)、グリース潤滑小形ギヤードモータ用歯車減速機の損失解析(2014)などである。強度に関しては、高濃度浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労損傷予知(2007年)、内歯コニカルギヤの歯面接触解析(2008年)、浸炭硬化ローラの疲労寿命(2015年)、歯面の摩擦力を考慮したマイクロピッチング発生機構(2016年)などである。計測・損傷診断技術に関しては、レーザ光による歯面損傷診断(2008年)、振動計測による起振力推定法(2009年)、繰返し疲労試験における経験的モード分解による歯車歯面損傷診断(2015年)などである。

ベルト伝動については、正逆転時におけるはすば歯付ベルトの回転伝達誤差(2007)、歯付ベルトのかみ合い解析(2008)、リブベルトの疲労損傷の一形態であるポップアウトの発生メカニズム(2011)、トラクションドライブでは、リングコーン式3K型CVTの開発(2007)、遊星ローラ式トラクションドライブの弾性リングの破損予知検知(2011)などである。

ねじについては、製造工程で生じる残留応力と疲労強度の関係(2009)、実問題評価として大型車用ホイールボルトの締付け解析(2010)、ゆるみ止めナットのゆるみ防止効果(2013)、せん断継手部材におけるねじ締結体の疲労強度(2014)、ねじ転造によって生じるねじ底の残留応力の評価(2016)などである。

軸受・案内については、フォイル軸受、動圧軸受などの特性・性能評価(2009)、磁気軸受特性の振動解析・制御法(2010)、静水圧を利用した案内テーブルの開発(2010)、AEによる玉軸受の疲労過程の観察(2011)、光ファイバセンサによる転がり軸受の転動体荷重測定法(2012)、軸受内部の潤滑油の挙動のCFD解析(2013)、玉軸受の電食損傷における振動周波数解析(2014)などである。

シールについては、リップシールの特性解析(2009)、人工心臓用メカニカルシールにおける摺動面の表面あらさの影響(2011)、蒸気タービン用ラビリンスシールのシール部流れに起因した回転体の不安定振動(2015)などである。

### 11.2.2 トライボロジー

トライボロジー分野の研究は、耐摩耗薄膜としての硬質膜、表面改質技術、マイクロトライボロジー、観察・測定技術、難削材の加工技術などに大別される。代表的な研究例を挙げて概観する。硬質膜については、DLC関連について多くの研究成果の発表が行われ、2006年頃からはカーボンナノチューブなどの新しい炭素系薄膜が新しい特性の発現が期待できるとして多く研究がなされてきた。表面改質技術に関しては、微粒子ピーニング(2006)、大気圧プラズマを用いた表面テクスチャの形成法(2011)が注目された。2007年頃より、添加剤としてのナノ粒子によるトライボロジー特性の改善や固体接触下におけるナノ粒子の役割などに関する研究に注目が集まるようになった。観察・測定技術としては、中性子反射率法を用いた摩擦面の評価法(2011)、切削加工時の工具と被削材間の接触電気抵抗変化に基づく工具摩耗のインプロセス計測法(2013)、レーザ誘起蛍光法を用いた油膜厚さ計測法(2014)、放射光を用いた摩擦面のその場XRD分析(2014)、高速カメラと蛍光粒子を用いた潤滑油流れの可視化(2014)などが挙げられる。難削材の加工については、ドライ切削時のTiAlNなどのトライボロジー特性解析(2013)、固体潤滑剤の活用による穴あけ加工時のばり発

生抑制技術 (2015) , TiAlN などを PVD コーティングすることによる工具寿命の延長(2016)などが挙げられる。

### 11.2.3 機械設計および運動機構

運動機構については、過去に引き続いてパラレルメカニズム・ロボットに関する研究が多くを占め、6 自由度機構の多軸材料試験機などへの具体的な産業応用研究と 6 自由度未満の機構を対象とした解析・総合・特性評価手法の開発が行われてきた。また、2007 年頃には、冗長自由度や冗長駆動を利用した機構、部材の弾性変形を利用したコンプライアントメカニズムなどに関する研究が広く行われ、機構設計技術のバリエーションが広がった。また、2009 年頃からは、ゼロバックラッシ二重球面ジョイント、ハイブリッドアクチュエータ、駆動系と計測系を分離した機構構造など、機構構造の単純化と高精度化を同時達成する機構開発が進められた。この頃から折り紙構造を活用した運動機構の研究が活発に行われるようになった。

福祉支援・介護支援、健康志向といった社会的関心に対応し、2006 年頃よりさまざまな構造・自由度の各種動作支援機器の開発が活発に行われるようになり、歩行支援機、歩行訓練機、パワーアシスト機器の開発が活発に進められた。また、2007 年度の年次大会において本部門では、「生き生き！自立生活～機械工学による介護支援・生活支援～」と題する市民フォーラムを企画し、その後も継続的に機械技術者、医療現場従事者および市民と一緒に超高齢社会のあり方を議論する場を設けてきた。そして、2010 年頃からは、より実用に向けた研究開発が行われるようになり、人との物理的なインタラクションのあるロボットの設計・開発が活発に行われ、安全性に優れた関節の開発、使用者を含めた支援機器の機構設計、松葉杖を活用した歩行支援機械、部材の弾性変形を活用したハイブリッド制御系を有する歩行補助機の開発などが進められた。2013 年頃からは、支援機器をさらに普及させるために、作業を特定した装置や、アクチュエータを使わずに姿勢保持をするといった、低価格で実用的な装置の開発研究が進められるようになった。2013 年には、ヒューマン・マシン・インターフェース設計研究会を発足させ、運動機能に関連するもの以外にも、匂い強度の増幅装置、消費エネルギーの可視化など、感覚に関連した装置開発も進められるようになった。

設計・製造支援に関しては、作業現場における技術伝承の重要性を背景として 2008 年頃までに、鋳造機能のバーチャルリアリティを用いた訓練システムを代表とするシステム開発や、デザインレビューシステムなどの設計支援システムが開発された。

### 11.2.4 アクチュエータ

既存の各種機械装置の高性能化とともに新たな機械装置の創造を可能とするために、その駆動源であるアクチュエータに要求される高出力化、高効率化、小型化、インテリジェント化、ソフト化などを目的として、電磁モータなどの既存のアクチュエータの性能向上に資する技術開発と実用化とともに新原理のアクチュエータの研究開発が活発に進められた。特に、2004 年から 5 年間継続された文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」の後半にあたる 2007 年頃からは、超精密ナノ、マイクロ、スマート、パワー、特殊環境の各アクチュエータに関する研究成果が多く生み出された。具体的な例を挙げると、次のようになる。弾性表面波モータ(2006)、レーザトラッカ用球面モータ(2006)、センサ内蔵インテリジェントラバーアクチュエータ(2006)、機能性流体 ECF を利用したマイクロモータ(2006)、医療用流体アクチュエータ(2009)、電界を用いた液滴操作(2009)、形状記憶ポリマーや交流電気浸透流を用いたアクチュエータ(2010)、空気圧ゴム人工筋を用いたウェアラブルパワーアシストスーツ(2010)、電気油圧アクチュエータを用いたパワーアシストロボット(2011)、極低温対応の超音波回転モータ(2012)、セグメント DLC を被覆した弾性表面波リニアモータ(2012)、人工心臓向けの電磁マイクロポンプ(2012)、電解共役流体アクチュエータを用いたマイクロポンプ(2012)、イオン伝導性高分子アクチュエータを用いたマイクロポンプ(2012)、パターンを印刷したシート素材を折り曲げて作る Origami-inspired ロボットに組込可能で印刷技術により作成可能な空圧アクチュエータ(2014)等である。

[武田 行生 東京工業大学]