

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

位置決め装置用低発塵プロセッシングプラスチック軸受の開発

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 鹿島化学金属株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-2 研究体制

1-3 成果概要

1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2-1 高精度に対応した加工技術の開発

2-2 静音化又は低振動化と低発塵化に対応した技術開発

2-3 開発の管理・運営

最終章

第1章 研究開発の概要

半導体製造では、部材の高耐摩耗・高精度化とともに、小型化高速化が求められ、中でも位置決め装置にはクリーンルーム内での低発塵化の要求も強い。本課題では、射出成型素材を使用せず、これらを満たす高機能樹脂軸受を全機械加工により開発する。リテーナー・軌道輪の温度管理を行い、高精度・静音化・低発塵化を単一材料のプラスチック軸受で達成する。この位置決め用軸受はロボットの関節などの軽量装置にも適用可能である。

1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

1.1.1 研究開発の背景及び当該分野における研究開発動向

(実施内容は戦略的基盤技術高度化支援事業の要領に従い、下記のように分類されている。漢数字(十二)や課題番号(2)、項目イなどはこの要領上の番号である。本節のみに使用する。)

(十二) 位置決めに係る技術に関する事項

1 位置決めに係る技術において達成すべき高度化目標

・川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

(2) 半導体製造装置等に関する事項

イ.高精度化 ウ.静音・低振動化 オ.低発塵化

半導体製造装置、例えば「枚葉スピン処理洗浄（エッチング）装置」では洗浄・エッチングのため、従来の浸漬バッチ処理と比較して均一処理の再現と、省スペースや多様化したサイズに対応することが求められている。そのために、従来にも増して高速化・高精度の要求が厳しく、クリーンルーム内であるために低発塵の基準を満たす環境でも正確に位置決めすることが求められる。

この正確な位置決め用部品には、例えばエッジグリップ方式で処理槽に運ばれる時のアームの継ぎ手部分には、高精度で低発塵のベアリングが要求される。また位置決めされたウェハーや基盤はその場で高速回転による処理がなされるため、その回転が正確な位置でかつ正常になされているかどうかを検知するベアリングが位置決め保持に用いられる場合があり、この場合は特に低発塵と静音・低振動が求められる。

製造装置の高性能化の要求に従い、そうしたプラスチックにも高精度化のニーズが要求されてきている。つまり、本来のプラスチックの精度は100 μ m単位とされてきたが、これに金属なみとは言わないまでもさらに精度を上げ、10 μ m単位まで高めた精度が要求されている。

また静音・低振動に関しては現状の3%低減、さらに低発塵に関しては、要求されたクラス（例えばクラス1000に対して現状は満たされにくい場合もある）に少しでも近づける必要がある。

1.1.2 研究開発の背景やこれまでの取り組み

枚葉式スピン洗浄（エッチング）装置には、強酸を使用した高温処理にも対応するため、処理カップに PTFE が用いられている。このほか、強酸の使用でも本体やコントローラ部が腐食しにくい設計とするため、耐食材料が多く使われている。しかし、ウェハー裏面の均一な洗浄、エッチングを行うためにエッジグリップタイプのチャックが使用されているが、これに用いられる位置決め部品の材料は形状・方式・材質が決まっておらず、金属のピンやセラミックスが使用されており、ウェハーに傷がついたり、チャックそのものが破損することも報告されている。

これまでに申請者である鹿島化学金属は、川下業者からの軽量化・静音化・低発塵化の要求に応えるため、プラスチック機械要素の開発を行ってきた。特に、射出成型困難な材料を切削加工することにより、高精度化の要求に対応してきている。独自設計したリテーナーを機械加工することにより機械要素を構成する全部品を同一の材料で作成することに成功してきた。つまり、この製法は機械要素でネックとなっている低強度な射出成型部品を用いないため、材質本来の性能から機械要素の性能を発揮することができる。

この製法により加工したプラスチックベアリングにより、エッジグリップチャック搬送アーム継ぎ手及び回転認知用位置決め部品の、イ 高精度化、ウ 低振動化、オ 低発塵化を実現する。

申請者は多品種少量生産に IT を活用し、その製品の加工管理にも全社を上げて取り組んできたが、2009 年には、IT 化による企業努力が認められ「IT 経営実践認定企業」（経済産業省）に認定された。また、エッジグリップチャックや回転認知装置には、ウェハーの種類や温度、スピン洗浄の各種条件に合わせた、プラスチックベアリングが求められている。このような多品種少量生産に応えるには、それぞれに適したベアリングを提案する必要がある。

このような当社の特徴を活かし、今回の計画では、IT を活用し 4 種類の加工条件に最適化された高精度ベアリングを提案する。

プラスチックに関する製品特許の申請はその多くが、射出成形品、あるいは新商品としての特許や実用新案である。現在も商品としての特許は数点出されている状況であるが、リテーナーを含めた単一材料の射出成型品は見当たらない。そこで今回は、全機械加工のプラスチックベアリングの製法とその構造に関するロジックで特許をねらう。

1.1.3 当該分野の研究開発動向

半導体プロセスがハーフミクロンレベルに到達し、よりクリーンな環境でも洗浄・エッチング処理に高精度化が要求されている。枚葉スピン処理はこの高度化するニーズに対応するために開発されたものであり、従来の浸漬バッチ処理と比較して、均一処理と再現性、クリーン度が大きく向上した。今後は、防錆対策の強化、ミスト汚染の防止や排気処理など、クリーン度の向上に加え、プロセスの安定性も求められる。

これまでに、位置決め用部品に関する分野の研究開発動向については省コスト化の観点から駆動部の回転体要素には、射出成型による加工が施された部品、あるいは従来からの踏襲で金属が多く使われてきた。また一方で、高品質、すなわち高耐久性、高精密化、小型・軽量化、低フリクション化のための位置決め装置の総合な技術開発が取り組まれてきた。これらは昨今の国際競争力のためのコスト削減の観点から、また高速化による軽量化の観点から研究が続けられるものと思われる。ただし、ここでは、高耐久性・高強度化・軽量化・高精度化・短納期化はそれぞれがトレードオフの関係にあり、それぞれを満足する技術はないのが現状である。

そこで、本課題は回転および摺動部の高精度・高耐久性をプラスチックベアリングにより実現する。

1.1.4 本課題への取り組み方針

申請者は半導体や電子・電気部品の業界で、これまでの社会ニーズを踏まえ、低発塵特性の向上や軽量化目的とした、高機能プラスチック材を用いた回転部品・摺動部品の開発に力を入れるとともに、他社にはない製品を世に出してきた。材料特性の把握、レース素材そのものの性能を損なうことなく、プラスチック部品を開発している。また、各プラスチック部品の特性はサブリーダー候補である九州大学、木田先生と共同研究している。

申請者は位置決め用摺動部材の開発でも産業ニーズにこたえるため、いち早く機械加工によるプラスチック部品の非射出成型部品化技術の開発に取り組み、世界で初めて、プロセッシングプラスチックベアリング(オール機械加工軸受)を開発した。その中でも、特に従来の射出成型された球-保持器(リテーナー)が高速安定化には不向きなことに着目し、これをオール機械加工したことにより、高速化・高強度化に成功している。これにより上記位置決め技術のニーズに応える。

1.1.5 研究の目的

半導体製造装置、例えば「枚葉スピン処理洗浄(エッチング)装置」では洗浄・エッチングのため、従来の浸漬バッチ処理と比較して均一処理の再現と、省スペースや多様化したサイズに対応することが求められている。そのために、従来にも増して高速化・高精度の要求が厳しく、クリーンルーム内であるために低発塵の基準を満たす環境でも正確に位置決めすることが求められる。

この正確な位置決め用部品には、例えばエッジグリップ方式で処理槽に運ばれる時のアームの継ぎ手部分には、高精度で低発塵のベアリングが要求される。また位置決めされたウェハーや基盤はその場で高速回転による処理がなされるため、その回転が正確な位置でかつ正常になされているかどうかを検知するベアリングが位置決め保持に用いられる場合があり、この場合は特に低発塵と静音・低振動が求められる。

製造装置の高性能化の要求に従い、そうしたプラスチックにも高精度化のニーズが要求されてきている。つまり、本来のプラスチックの精度は100 μ m単位とされてきたが、これに金属なみとは言わないまでもさらに精度を上げ、10 μ m単位まで高めた精度が要求されている。

また静音・低振動に関しては現状の3%低減、さらに低発塵に関しては、要求されたクラス（例えばクラス1000に対して現状は満たされにくい場合もある）に少しでも近づける必要がある。

また、半導体製造装置には、強酸や強アルカリを使用した高温処理にも対応するため、処理カアッパに高耐食部品が要求され、本体やコントローラ部を始め各部品にいたるまで腐食しにくい材料が多く使われる設計がなされている。しかし現状はウェハー表面の均一な洗浄、エッチングを行うためのプラスチック部品は形状・方式・材質が決まっておらず、それは「プラスチック＝射出成形＝精度が悪い」の図式が一般化していたためである。

そこで、独自設計した軌道輪・リテーナーを機械加工することにより、低強度な射出成型品では実現しえない高精度で、材質の本来の特性をフルに活かしたプラスチックベアリングを開発し、イ 高精度化、ウ 低振動化、オ 低発塵化が出来るベアリングを開発することを目的とし、実現する。

この中で、本課題は H21 年度～H24 年度に認定を受けた「位置決め装置用低発塵プロセッシングプラスチック軸受の開発(計画認定番号：近畿 0908006)」の初年度計画を実施するものである。その具体的内容を次に示す。

H21 年度の研究目標

回転および摺動部の位置決め部品に樹脂を用いる設計は、耐食性向上の観点から発展してきた。近年、新しい樹脂の開発に伴い、クリーン環境かつ、動作時の精度が要求される半導体製造装置を構成する装置の中でも、特に部品の強度や耐久性が求められる位置決め装置にとって非常に重要な要素となっている。また、省エネルギー、環境性能向上、静音化も重要な課題となっているため高温耐食性を活かしたベアリングが開発されている。

エッジグリップチャックのアームの継ぎ手部分には、ウェハーの種類や温度、スピン洗浄の各種条件に合わせた、プラスチックベアリングが求められている。このような多品種少量生産に応えるには、それぞれに適したベアリングを提案する必要がある。しかし、一体成形可能である樹脂の特徴は、射出成形法に限られ、高精度化 静音化・低振動化 低発塵化に対応するには限界となっている。そこで本課題は、これを達成するために、エンジニアリングプラスチックを用いた「プロセッシングプラスチックベアリング」(オール機械加工軸受)の開発を行い、エッジグリップチャックのアーム用の位置決め部材および高速回転処理用位置決めローラーベアリングの高度化目標に取り組む。

まず、高精度化に対応した技術開発の観点から、各種プラスチック材料で軌道

輪・リテーナーの開発について取り組む。具体的には、軸振れ低減を目的として、軌道輪・リテーナーの加工精度を上げるため、従来の加工形状を変える。さらに、高強度化・高精度化として射出成型品から機械加工品に変える。

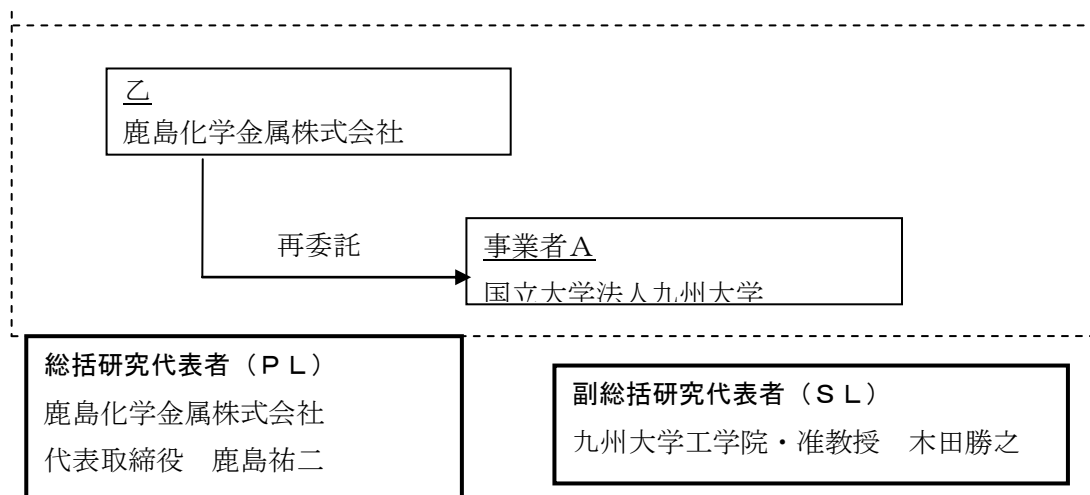
このため、目的としては「リテーナー・軌道輪の高精度加工」に取り組む。材質、温度、刃物、切削条件、治具の選定及び材質ごとの最適条件を探り出す。最適条件とは、加工時間の短縮、回転軸の振れや振動の抑制を目指す。加工条件と加工後の変形量に関するデータベースを得た。また、ベアリング試験片を用いて、摩耗量を測定した。その結果、疲労状態と摩耗量の関係を洗浄環境で得ることができた。

次に、低発塵化に即した観点から軌道輪の溝形状の最適化を検証する。プラスチックは負荷にともない変形する。特にベアリングの場合球とレースが接触するため、その変形は複雑である。そこで、球とレースに負荷をかけ、変形量を実測することで、ボールの大きさと各材質に対する荷重との相関関係を探り出し、どのような溝形状にすることが、各材質の最大限の性能を発揮できるかを探り出すため、変形量の時間変化を調べた。

1-2 研究体制

1.2.1 研究組織及び管理体制

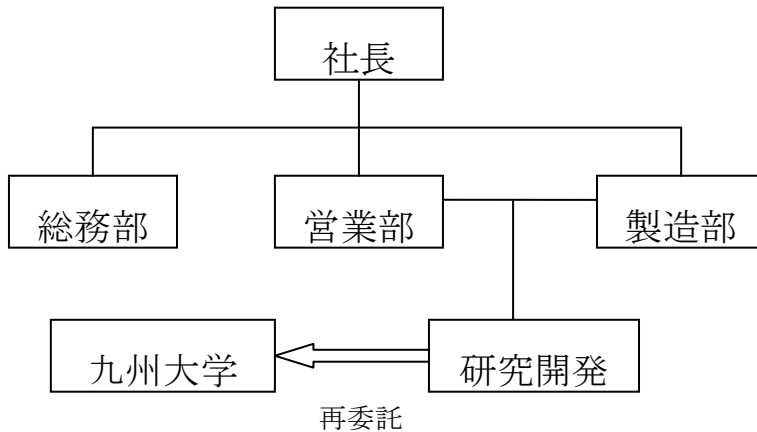
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

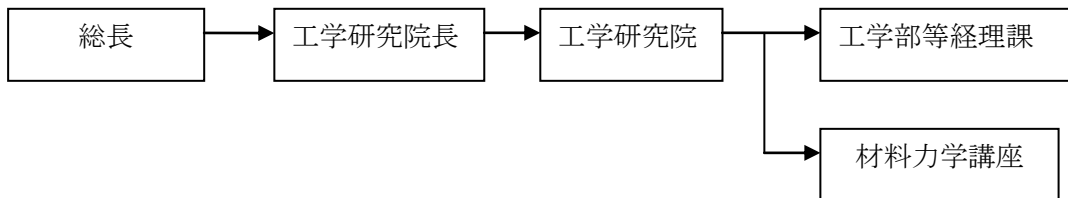
①事業管理者

[鹿島化学金属株式会社]



② (再委託先)

[国立大学法人九州大学]



1.2.2 管理員及び研究員

【事業管理者】 鹿島化学金属株式会社

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)※
鹿島 祐二	代表取締役	3
鹿島 啓子	総務部 取締役経理部長	3

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)※
鹿島 祐二 (再)	代表取締役	1-1-1、1-2-1、2-1
東 弘之	取締役工場長	1-1-1 ~ 1-2-1
高祖 一雄	(製造部) 主任研究員	1-1-2 ~ 1-2-1
松本 正樹	(製造部) 研究員	1-1-2 ~ 1-2-1
中野 公洋	(製造部) 研究員	1-1-2 ~ 1-2-1

【再委託先】 ※研究員のみ

国立大学法人 九州大学

氏名	所属・役職			実施内容(番号) ※
木田 勝之	工学研究院	機械工学部門	准教授	1-2-1、2-1
S a n t o s E d o s o n C o s t a	工学研究院	機械工学部門	学術研究員	1-2-1、2-1
R o z w a d o w s k a J u s t y n a	工学研究院	機械工学部門	技術補佐員	1-2-1、2-1
古池 仁暢	工学研究院	機械工学部門	技術補佐員	1-2-1、2-1
瓜生 めぐみ	工学研究院	機械工学部門	事務補佐員	1-2-1、2-1

※ 本 1.2.2 節での実施内容は下記のように平成 21 年度「位置決め装置用低発塵プロセッシングプラスチック軸受の開発」に係る委託業務実施計画書に基づく番号である。

- ※ 1. <高精度に対応した加工技術の開発>
 - ※ 1-1 (加工条件の選定)
 - ※ 1-1-1. 材質の選定
 - ※ 1-1-2. 温度条件の選定
 - ※ 1-1-3. 刃物の選定
 - ※ 1-1-4. 切削条件の選定
 - ※ 1-1-5. 加工時具の開発
 - ※ 1-2 (加工精度の検証)
 - ※ 1-2-1. 転がり精度測定
- ※ 2. <静音化又は低振動化と低発塵化に対応した技術開発>
 - ※ 2-1. 圧縮試験機の開発
- ※ 3. <開発の管理・運営>

1.2.3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名
(事業管理者)

鹿島化学金属株式会社

(経理担当者) 総務部 経理部長

鹿島啓子

(業務管理者) 代表取締役

鹿島祐二

(再委託先)

国立大学法人 九州大学

(経理担当者) 工学研究院 工学部等経理課 経理 佐々野彰子
係長

(業務管理者) 工学研究院 機械工学部門 准教授 木田勝之

1.2.4 所在地

①事業管理者

鹿島化学金属株式会社 本社 (最寄り駅：阪神電車本線 姫島駅)

〒555-0025 大阪市西淀川区姫里2丁目9番21号

②研究実施場所 (主たる研究実施場所については、下線表記のこと。)

鹿島化学金属株式会社 本社 (最寄り駅：阪神電車本線 姫島駅)

〒555-0025 大阪市西淀川区姫里2丁目9番21号

〃 第二工場 (最寄り駅：阪神電車本線 姫島駅)

〒555-0025 大阪市西淀川区姫里2丁目5番28号

国立大学法人 九州大学 (最寄り駅：JR鉄道筑肥線 九大学研都市駅)

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地

1.2.5 委託期間

平成21年10月26日から 平成22年3月31日まで

1.2.7 その他（委員会）

①見交換委員会及び報告委員会委員

氏名	所属・役職	備考
鹿島 祐二	鹿島化学金属株式会社 代表取締役	P L
木田 勝之	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 准教授	S L
東 弘之	鹿島化学金属株式会社 取締役工場 長	
鹿島 啓子	鹿島化学金属株式会社 取締役経理 部長	
Santos E doston Co sta	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 学術研究員	
Rozwadow ska Ju styna	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 技術補佐員	
古池 仁暢	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 技術補佐員	
瓜生 めぐみ	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 事務補佐員	

②意見交換委員会、他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

氏名	機関名	指導・協力事項
田邊 裕貴	滋賀県立大学 工学部 機械 システム工学科 准教授	軸受使用環境に関 して、強度の専門家 としてのアドバイ スをいただく。
森本 孝克	(株)ベンチャーラボ関西支社長 理学博士	プラスチック工業 製品の専門家の立 場から、プラスチッ クをベアリングに 適用した時の課題 のアドバイスをい ただく。

新庄 秀光	工学経営研究所 技術士	生産管理の専門家としての立場から、ベアリング製造時の能率管理と生産体制のアドバイスをいただく。
-------	-------------	---

1-3 成果概要

高精度に対応した加工技術の開発のために、軸受を構成するリテーナー、軌道輪の加工条件の選定を行った。具体的には、「材質の選定、温度条件の選定、刃物の選定、切削条件の選定、加工時具の開発」を行った。これらについて、「転がり精度測定」の目的である転がり疲労に与える影響を研究した。その結果、従来では剥離損傷が発生していた軸受の使用条件でも剥離を起こさない加工条件を得ることができた。

材質を PPS に選定した場合を例にすると、その刃物切削条件 F を $F=0.24$ 、 0.18 、 0.01m/s とした。洗浄環境を模擬するために開発した装置を用い、洗浄環境下で転がり疲労試験を行った。 $F=0.24$ の場合、摩耗と表面剥離による発塵がみられたが、 $F=0.18$ の場合、加工後の表面が滑らかになり、試験後も表面損傷が発生しなかった。これにより、低発塵ベアリングの開発を行った。

このなかで、再委託先である鹿島化学金属(株)は加工を、(国)九州大学は疲労試験と加工後のベアリングの観察と損傷評価を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

鹿島化学金属株式会社 本社（最寄り駅：阪神電車本線 姫島駅）

〒555-0025 大阪市西淀川区姫里2丁目9番21号

(フリガナ)： カシマ ユウジ

氏名： 鹿島 祐二

所属役職： 代表取締役社長

Tel：06-6472-0556 Fax：06-6474-3630

E-mail： mail@kashima-kagaku.com

第2章 本論

※ 本2章での実施内容は平成21年度「位置決め装置用低発塵プロセッシングプラスチック軸受の開発」に係る委託業務実施計画書に基づく番号も付記する。

2-1<高精度に対応した加工技術の開発>

2.1.1 (加工条件の選定)

(委託業務実施計画書 1-1)

高精度加工を維持できる加工条件を選び出す目的で下記の課題を行った。ここでは、高精度として、従来と比較し加工時の寸法精度がより高い、100 μ 単位以下であることを定義とした。

ここで、「2.1.1.1 刃物条件の選定」の結果と「2.1.1.2 切削条件の選定」の結果は、「2.1.1.3 切削条件の選定」においてこれと合わせて述べる。

2.1.1.1 材質の選定 (鹿島化学金属株式会社 : 鹿島祐二、東 弘之)

(委託業務実施計画書 1-1-1)

高精度・低発塵に即した材質選定には、耐水、耐薬品、耐摩耗性能が必要である。そこでそれらを満たす材質として PTFE、PCTFE、PVDF、PEEK、PPS の無充填材と、以上5種類の材質に、ガラス充填、カーボン充填、有機物充填、無機物充填された材質を選択し各材質が高精度・低発塵に合致するか探し出すことを目標とした。尚、上記材質の優位性の検証として UHMWPE と PP 材も選択した。主に使われる16種類から、下記のように用途を考慮し、種類の特性を分類した。

フッ素樹脂 (4種類)

樹脂の中で耐薬品性能にもっとも優れた材質として、フッ素樹脂を選定した。

種類としては4フッ化エチレン(以下 PTFE と呼ぶ)の無充填 PTFE を選択した。ここでは、高精度を出すためには通常品よりもアフターベーク(成形後の熱処理)をした「再焼成グレード」を試験材とした。

この無充填 PTFE との比較として充填材グレードも選択した。

さらに、3フッ化樹脂(PCTFE)、2フッ化樹脂(PVDF)も耐薬品性が高いため、無充填の PTFE との性能を比較するため、選択した。

超高分子量ポリエチレンとポリプロピレン (3種類)

フッ素樹脂以外に、耐薬品性が高く液晶・半導体業界で広く使われる安価な材料として UHMWPE (超高分子量ポリエチレン) と PP (ポリプロピレン) を選択した。また、無充填 PP と比較するため、PP に関してすべり性能(摩耗に影響する)を向上させた PTFE 充填グレード「HEP-PF」を選択した。

PEEK と PPS (3種類)

PEEK、PPS は耐熱が高く、耐薬品性も既出材質の次に優れており、しかも加工精度が一番良好であろうと思われる材質である。この特徴から、近年、液晶・半導体業界

で多く使われている材質として有名である。

PPS に関しては、無充填グレードに加えカーボンを充填した耐摩耗グレードと、もう 1 種類耐摩耗グレード「PPS-HPV」というグレードを加え、耐摩耗性能の比較検討を行った。

POM とカーボン(2 種類)

この他に、POM は射出成型品として広く使われているため、上記材料と加工状態を比較するために選定した。

最後にプラスチックではないが、カーボン材料は耐薬品性能が高く、耐摩耗性、高精度が望めるので加えた。

2.1.1.2 温度条件の選定

(鹿島化学金属株式会社 : 東 弘之、高祖一雄、松本正樹、中野公洋)

(委託業務実施計画書 1-1-2)

プラスチックは、温度に大きく左右される。まず、季節による温度変化における材料の寸法変化を考慮する必要がある。また、通常機械設置場所は就業時間外の空調を行っていない。従って外気温によって設置場所の温度が左右される。そこで、季節ごとの空調・機械稼働前の材料・加工品と設置場所の温度測定と寸法測定を行い、次に空調後の時間推移の材料・加工品と設置場所の温度の変化と寸法変化の推移を測定し検証する必要がある。このため、加工がどれほど加工後の寸法変化に影響を与えるかを検証した。具体的には、PEEK と PTFE に熱処理条件を変えて、それぞれの熱処理条件が、加工後の寸法変化に及ぼす影響を測定した。

※ 「2.1.1.4 切削条件の選定」で切削後一定時間経過後の寸法変化も測定したが、本節では、その結果も一緒に示した。

(熱処理条件)

- ① 熱処理なし・荒引きなし
- ② 200℃8 時間熱処理・荒引きなし
- ③ 200℃8 時間熱処理・外径荒引き研磨あり

加工直後の寸法と数日放置した寸法を計測して、変化量を比較した。

【PEEK 通常品 : G6204PK】【PEEK シールド形状 : G6204PK-BL】

通常品、シールドタイプ両方とも条件①②③の顕著な差はみられず変化量も変わらなかった。

【PEEK カーボン充填 : G6204PKG】と【PEEK カーボン充填シールド形状 : G6204PKG-BL】

カーボンを充填している分、無充填より変化量は小さいが、通常品、シールドタイプ両方とも条件①②③の顕著な差はみられず変化量も変わらなかった。

【PPS 通常品 : G6204PS】【PPS シールドタイプ : G6204PS-BL】

通常品、シールドタイプ両方とも条件①②③で顕著な差はみられず変化量も変わら

なかった。

【PPS カーボン充填：G6204PSG】

【PPS カーボン充填シールド形状：G6204PSG-BL】

PPS はカーボンを充填しても、無充填と変化量は変わらなかった。通常品、シールドタイプ両方とも条件①②③で顕著な差はみられず変化量も変わらなかった。

【PPS 耐摩耗グレード：G6204PSH】

【PPS 耐摩耗グレードシールド形状：G6204PSH-BL】

通常品、シールドタイプ両方とも条件①②③で顕著な差はみられず変化量も変わらなかった。

表 2.1.1.2.1 PPS 耐摩耗グレード材における熱処理条件が加工後の寸法変化に及ぼす影響

熱処理条件	径の変化 [mm]			測定時の 温度 [°C]
	熱処理なし	8H 200°C		
研磨条件	荒研磨なし		外径のみ荒研磨あり	
外径 加工後	+0.06、+0.08	+0.02、+0.05	+0.02、+0.04	19
24H 放置後	+0.04、+0.05	-0.01、+0.02	-0.01、+0.01	9
内径 加工後	+0.70、+0.73	+0.67、+0.69	+0.65、+0.67	19
24H 放置後	+0.69、+0.71	+0.64、+0.67	+0.64、+0.67	9

2.1.1.3 刃物条件の選定

(鹿島化学金属株式会社 : 東 弘之、高祖一雄、松本正樹、中野公洋)

(委託業務実施計画書 1-1-3)

刃物の条件はプラスチック加工を行うときに発生する加工熱が寸法変化をおこす要因として非常に重要である。加工熱が少なければ熱による寸法変化が少なくなりプラスチックの寸法出し、すなわち高精度に大きく関わってくる。また、当然刃物のきれが表面粗さにも影響を及ぼし、表面粗さは寸法測定に影響を及ぼす。従って材質により当然刃物選定、及び刃物形状は重要である。

そこで、刃物の材質としては、超硬、ハイス、コーティング材、ダイヤモンド等で樹脂材質の性質によって下記のように選定した。また、その形状については、プラスチックの場合切りくずの排出が重要で、切りくずを綺麗に排出できれば切りくずの焼付けや熱の蓄積が少なくなり、加工寸法のブレが少なくなる。このため、刃物材質については、これも下記のように選定した。選定結果は、「先端部シャープエッジをもった超硬材」および、「先端部平坦な部分をもった超硬材」である。

※ 実験結果については、次節「2.1.1.4 切削条件の選定」で合わせて示す。

2.1.1.4 切削条件の選定

(鹿島化学金属株式会社 : 東 弘之、高祖一雄、松本正樹、中野公洋)

(委託業務実施計画書 1-1-4)

切削条件に関しては、一定の回転数で送り速度の条件を変えることで行った。ここで、切削直後の寸法と、その後ある一定の時間経過で寸法変化を測定したが、この結果は、すでに「2.1.1.2 温度条件の選定」にまとめた。

材質による切削刃物の組み合わせを選び出す過程でこの切削条件を組み合わせると非常に膨大な実験条件が必要になる。従って、切削条件は材質と刃物の組み合わせを「2.1.1.3 先端部シャープエッジをもった超硬材、先端部平坦な部分をもった超硬材」のそれぞれに対して研究した。ここで、「先端部平坦な部分をもった超硬材」は従来行ってきた加工方法であり、これを「先端部シャープエッジをもった超硬材」という新しい加工法と比較した。両者の比較は、切削条件が表面粗さに及ぼす影響について行った。このときの切削条件は下記のとおりである。

(切削条件)

回転数一定 : 800rpm

切削速度: F=0.10mm/rev.; F=0.18mm/rev ; F=0.24mm/rev

このときの表面粗さの観察結果を示すが、表中 A が、新しい「先端部シャープエッジをもった超硬材」であり、B が従来の「先端部平坦な部分をもった超硬材」である。

【UHMWPE】

A と B それぞれにおいて、全ての切削速度で、切削速度が速くなると、表面粗さが大きくなっていることがわかる。

また、全ての切削速度で A と B を比較すると A の方が表面粗さが小さくなっていることがわかる。これは、A 先端部シャープエッジをもった超硬材で切削速度を遅くした場合に、最も表面粗さが小さくなることを意味している。

表 2.1.1.4.1 UHMWPE における刃物条件・切削条件が表面粗さに及ぼす影響

条件 粗さ	A-F0.1		A-F0.18		A-F0.24		B-F0.1		B-F0.18		B-F0.24	
	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra
1回目	5.1	1.11	9.3	2.23	12.5	3.11	9.2	1.9	13.9	3.39	16.3	4.01
2回目	5.3	1.14	8.8	2.17	13.8	3.11	9	1.82	14.3	3.52	15.7	3.87
3回目	5.2	1.1	8.6	2.17	12.3	3.11	9.2	1.84	13.8	3.41	15.2	3.95
平均	5.20	1.12	8.90	2.19	12.87	3.11	9.13	1.85	14.00	3.44	15.73	3.94

以下、各種材質で UHMWPE と同様の方法でデータベースを得たが、結果のみを示す。

【PP】

この材質はオレフィン系樹脂で上記 UHMWPE とは兄弟関係にある樹脂であるが、UHMWPE とは違って A 先端部シャープエッジをもった超硬材では B 先端部平坦な部分をもった超硬材ほど、表面粗さが上がらず、しかもこの B 先端部平坦な部分をもった超硬材では、切削速度が遅い条件で表面粗さが低くなるとは限らない事がわかった。

【HEPPP】

HEPPP は、前出の PP に PTFE を充填した材質である。A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の方が、表面粗さが大きくなった。

【PEEK】

A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の方が、 $F=0.18$ 以上では、表面粗さが大きくなった。

A 先端部シャープエッジをもった超硬材では、切削速度が遅い場合に表面粗さが小さくなった。この結果から、先端部シャープエッジをもった超硬材の場合は切削速度が遅いほうがよいことがわかった。

【PEEKFC】

A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の方が、表面粗さが小さくなった。

また、B 先端部平坦な部分をもった超硬材では、切削速度を落とした方が表面粗さが増加することがわかった。

しかしながら刃物の摩耗が無充填材質より激しいので、今後の課題として数を増やした切削ではどうなるかを検証する必要がある。

【PPS】

A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の方が、表面粗さが小さくなる。

最も表面粗さが小さくなるのは、先端部シャープエッジをもった超硬材で切削速度を落としたものであることがわかった。

どちらが耐摩耗性に適しているかを検証すると、シャープエッジの切削速度を落としたものと、平坦部分をもった刃物で速度を落としたものとの違いを理解できる。この研究は、次年度 H22 年度に行う予定である。

【PPSCF】

A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の方が、表面粗さが小さくなる。

B 先端部平坦な部分をもった超硬材では、切削速度を落とすと表面粗さが小さくなる。

この材質も PEEKFC と同じく刃物の摩耗が無充填材質より激しいので、N 値を増やしたデータの取得と、表面粗さが小さくなる条件の詳細を研究することが必要である。

【HPV】

HPV 材は、無充填の PPS 材の耐摩耗グレード用として開発された材料である。切削条件が表面粗さに与える影響は、無充填の PPS と同じ傾向であった。つまり、A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の方が、表面粗さが小さくなった。

最も表面粗さが小さくなるのは、先端部シャープエッジをもった超硬材で切削速度を落としたものであることがわかった。もっとも表面粗さが小さくなるのは、A 先端部シャープエッジをもった超硬材を用い、切削速度を落とした場合である。

今後、無充填の PPS 材と同様、どちらが耐摩耗性に適しているかについては、さらに送り速度 F を調整して比較検討する必要がある。

【PVDF】

A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の表面粗さが小さくなる傾向があったが、送り速度 $F=0.1$ の場合は、極端に表面粗さが大きくなった。逆に、A 先端部シャープエッジをもった超硬材の送り速度 F が小さい場合は、表面粗さが全ての条件の中で、最も小さくなった。この結果から、表面粗さのコントロールには、A 先端部シャープエッジをもった超硬材が適していることがわかった。

【PCTFE】

A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の表面粗さの方が小さくなる傾向があった。しかし、これも前述の PVDF と同様に、A 先端部シャープエッジをもった超硬材の送り速度 F が小さい場合は、表面粗さが全ての条件の中で、最も表面粗さが小さくなった。

PVDF と PCTFE はよく似た材質であることが知られており、これは切削性でも同様な傾向が得られた。

【POM】

A 先端部シャープエッジをもった超硬材と B 先端部平坦な部分をもった超硬材の結果を比較すると、B 先端部平坦な部分をもった超硬材の表面粗さの方が小さくなる傾向があった。しかし、これも前述の PVDF・PCTFE と同様に、A 先端部シャープエッジをもった超硬材の送り速度 F が小さい場合は、表面粗さが全ての条件の中で、最も表面粗さが小さくなった。

また、切削速度 F が表面粗さの与える影響が大きいため、切削速度の調整が重要であることがわかった。

2.1.1.5 加工治具の開発

(鹿島化学金属株式会社 : 東 弘之、高祖一雄、松本正樹、中野公洋)

(委託業務実施計画書 1-1-5)

従来はベアリングの開発は勘と経験に頼る部分が多く時間もかかっていたが、治具

を作る事で加工時間の短縮をはかる。また、プラスチックは強い力でチャッキングすると当然変形し、チャッキングから解放されると変形が元に戻らない。また加工熱とチャッキングによる負荷はプラスチックの精度を著しく損なう。そのため従来は各工作機に各ロットごとの治具が必要であった。

そこで複合工作機で使える治具を開発した。これには工作機の特徴と切削条件とを選びだすことでリピート使用の出来る機能を持たせることを目的に行い、最終的に、加工熱と負荷による部材の変形を少なくし精度を上げるような加工治具とした。

このとき、具体的な材質としては、プラスチック素材とステンレス素材の両方を作り繰り返し性能に有効なほうを選んだ。プラスチック素材では、形状変化の少ない必要があるため、エポキシ、FRP の寸法変化の小さい構造用プラスチックを比較した。

ステンレスは SUS303 が加工しやすいが、これに加え SUS304、SUS316、SUS440C も比較した。その結果、異なる部品で把持する必要があったものから、一度に加工できる工夫により、最も加工に適した治具を製作することができた。このときの軸製作時間は、従来の治具製作時間のマイナス 20%であることから、本課題の目標値は達成できた。

2.1.2 (加工精度の検証)

(委託業務実施計画書 1-2)

高精度で加工された軌道輪・保持器を検証し、 $10\mu\text{m}$ オーダーの観察精度で、転がり疲労特性を評価し、2.1.1における加工条件との関係を示す。

2.1.2.1 転がり精度測定

(鹿島化学金属株式会社：東 弘之、高祖一雄、松本正樹、中野公洋、菅 武史、岩原純二 国立大学法人九州大学：木田勝之、Santos Edson Costa、Rozwadowska Justyna、古池仁暘)

(委託業務実施計画書 1-2-1)

2.1.2.1.1 スラスト軸受試験

本研究で使用した転がり疲労試験機は、鹿島化学金属株式会社と(有)吉則工業と木田らが共同で新規に開発、製作したもので次のような特徴がある。まず従来の試験機よりも低荷重下での安定した試験が可能であり、荷重の微調整も可能である。また回転数も 1800rpm から 100rpm 間で任意に設定でき、高回転、低回転問わず長時間の安定した試験が行える。

この試験機の実写真を図 2.1.2.1.1.1 に示す。A の皿に重すいを乗せることで軸受にスラスト方向の荷重が作用する。この際、B の重りの位置を左右に移動させることで荷重を微調整することができる。C にはロードセル(KYOWA・LCN-A-2KN)が取り付けられており、軸受に作用する荷重を $\pm 1\text{N}$ の誤差範囲で測定する。試験は軸受に荷重を負荷した状態で D の電動機によって上軌道輪を回転させることで行う。電動機はインバーター制御されており、回転速度は $\pm 1\text{rpm}$ の誤差範囲で設定できる。

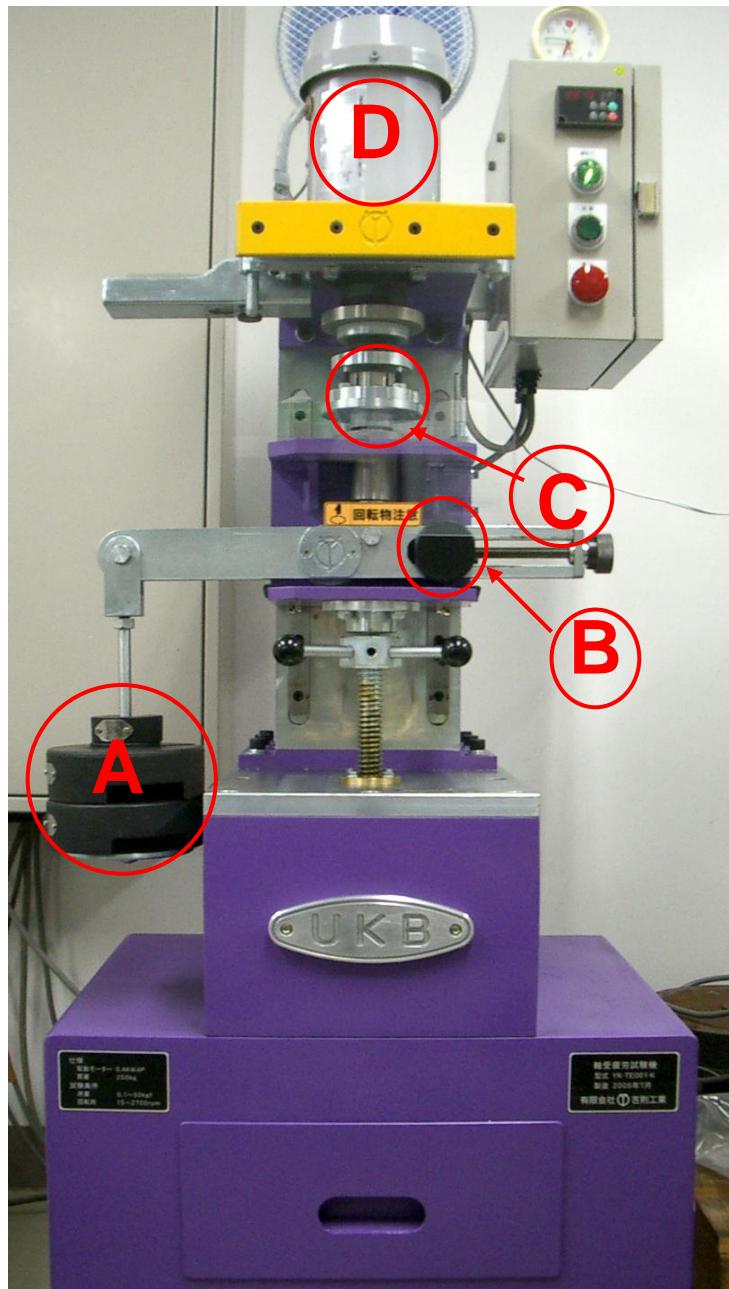


図 2. 1. 2. 1. 1. 1 スラスト用転がり疲労試験機
A:Saucer(for weight), B:Weight adjustment lever, C:Loadcell, D:Motor



図 2.1.2.1.1.2 洗浄環境下での実験における洗浄バスの拡大写真

Volume : 0.450

洗浄環境下で転がり疲労試験を行うため、ベアリングを図 2.1.2.1.1.2 のような水槽型の治具に取り付けた。摩擦熱によって水温が上昇しないように、容量 0.640 の外付けタンクを用意し、水槽と外付けタンク内の水を電動ポンプにより流量 $440\text{cm}^3/\text{min}$ で循環させた。

2.1.2.1.2 樹脂材料

今回の試験で使用した樹脂材料は PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）と PPS（ポリフェニレンサルファイド）である

2.1.2.1.3 試験方法と試験片の構成

試験は単式スラスト玉軸受を用いて行った。単式スラスト玉軸受は軌道溝を持つ上下軌道輪、転動体の玉及びそれを保持する保持器の 3 部品で構成される。樹脂軸受では軌道輪、保持器共に各樹脂を用い、転動体は直径 $3/8\text{inch}$ のアルミナの玉を 9 個使用した。

軸受の主要寸法は国際標準化機構 (ISO) で規定されており、日本では ISO に準拠して JIS-B-1512 (転がり軸受の主要寸法) に規格されている。本試験では呼び番号 #51305 を模擬した軸受を用い (鹿島化学金属 (株) ・製)、試験を行った。またピッチ円半径は、 19.25mm とした。なお、この規格は金属軸受の規格であり、材料特性の違う樹脂軸受の寸法規格は現在のところ作られていない。

2.1.2.1.4 実験方法

上記の試験機を用いて、インバーター制御により回転数を 1rpm 誤差範囲で設定し、ロードセルで $\pm 1\text{N}$ の誤差範囲で荷重を設定した後、総回転数が 17.28×10^5 になるまで連続回転試験を行った。なお総回転数は軸受の回転速度を 600rpm とし、一日の運転時間を八時間とした場合に運転日数が六日間になるように定義した。また試験中に激しい振動や軸受の大き

な変形がみられた場合には直ちに試験を中止した。

2.1.2.1.5 観察方法

2.1.2.1.5.1 摩耗量

試験前後の上下軌道輪，保持器(転動体)の質量を電子分析天秤 AUX320(島津製作所・製)で 0.1mg 単位まで測定し，質量差から摩耗量を算出した。

2.1.2.1.5.2 接触面観察

接触表面観察及び表面粗さ測定には，レーザ顕微鏡を用いた。分割した観察視野内の各ピクセルをスキャンする。各ピクセルの反射光は受光素子で検出され，レーザを走査していくことで最終的に全体の画像を得る。次に対物レンズを Z 軸方向に駆動し，スキャンを繰り返すことにより各ピクセルの Z 軸位置毎の反射光量を取得する。これを基にピクセルごとに最も反射光量の高い Z 軸位置を焦点として，高さ情報と反射光量を検出する。これにより，観察視野全体に焦点の合った光量超深度画像と高さ情報を得ることができる。

軸受の加工条件は，主軸回転速度を $n = 800\text{rpm}$ とし，送り速度を $F=0.06, 0.12, 0.25\text{mm/rev}$ の 3 種類の条件で加工を行った。なおインサートのノーズ半径は 0.4mm とした。各条件で加工後の軌道輪溝底の拡大写真と断面形状について，比較した。切削表面の表面粗さは送り速度が $F=0.06, 0.12\text{mm}$ の場合には，あまり差が見られなかったが $F=0.25\text{mm}$ の場合は，他の条件と大きく異なっていた。

ここでは，PEEK の表面観察結果を示したが，PPS についても同様の傾向がみられたことから，以上の観察結果をもとに， $F=0.12\text{mm/rev}$ 、 $n=800\text{rpm}$ の加工条件を選択し，摩耗に及ぼす荷重の影響を調べた。

2.1.2.1.6 摩耗量の変化

各樹脂軸受の転がり疲労試験後の摩耗量を観察した。なお複数の軸受において接触表面にはく離が発生していたが，これらの軸受では，はく離した部分の質量を除いて，真の摩耗量を求めるのは困難なため，摩耗量にははく離した質量も含まれている。

試験結果から試験を行った荷重，回転速度の条件内では摩耗量が PEEK では 4mg を，PPS では 3mg を超えることはなかったことがわかる。このことから PPS，PEEK 軸受が共に十分な耐摩耗性を持つことが分かった。

以上の試験結果から，樹脂軸受は高い耐摩耗性を持つことが分かった。しかし摩耗量が少ない試験条件下においても接触表面にはく離が発生していた。このことから樹脂軸受の損傷及び寿命を考える上で，転がり疲労によるはく離が重要になると思われる。

2.1.2.1.8 損傷の原因と加工条件の関係

すでに述べたように，軸受の加工条件は，主軸回転速度を $n = 800\text{rpm}$ とし，送り速度を $F=0.06, 0.12, 0.25\text{mm/rev}$ の 3 種類の条件で加工を行った。なおインサートのノーズ半径は 0.4mm とした。このなかで， $F=0.12$ の条件で軸受の性能確認をし，その損傷が摩耗ではなく，き裂進展によるはく離であることが明らかとなった。通常，樹脂の損傷は摩耗による表面が削られる現象と理解させているが，本課題が対象としている半導体の洗浄環境では，き裂進展によるはく離が発生することが明らかとなった。

そこで、新たに、加工条件がき裂の発生要因となるという観点から、PEEKのベアリングを例にとり、加工状態が素材にどのような影響を与えるのかを研究した結果、表面粗さが最適となる加工条件では、表面で結晶性が確認されたこと、および、その深さは表面近傍約 $8.8\mu\text{m}$ 以下であることがわかった。次に、切削加工条件が表面の結晶性にどのような影響を与えるのかを研究するため、FTIR(フーリエ変換型赤外分光)を用いて、赤外線吸収スペクトルを測定した。この結果、回転数が赤外線吸収スペクトルに影響を及ぼしていることが分かったため、今後結晶性の定量評価の指標とすることができることがわかった。

2.1.2.1.9 ラジアル軸受試験による摩耗と上昇温度

ラジアルベアリングの性能評価を行うため、ラジアル式の転がり疲労試験機を導入し、転がり疲労試験を行い、発熱と摩耗に関する基礎的なデータ取得を行った。このため、実験は無潤滑で行った。サンプル形状は#6205 ラジアル型の単列深溝玉軸受を模擬し、Ballは9個使用した。内輪、外輪およびリテーナはPEEK樹脂を機械による切削にて作製したものを使用した。BallはアルミナおよびSUS304を用いた。スラストベアリングでは、接触面積が荷重に垂直となるため、発熱の影響をとらえることが難しい。しかし、ラジアルベアリングでは、外輪の外側に温度測定可能な治具を取り付けることができる。

実験では、ベアリングの外輪をジグ固定し、ベアリングを上方に引き上げることでラジアル荷重を負荷した。内輪をシャフトに固定し、ラジアル荷重100N、回転数600rpmの試験条件で軸受を回転させ、4時間ごとにリテーナ、内輪、外輪、Ballの質量を電子天秤で0.1mg単位まで測定し、試験前の質量との差から摩耗量を求めた。また、Ballおよび軌道面の摩耗の分布および損傷の状態について確認した。機械加工作製によるPEEK樹脂とアルミナ玉およびSUS304玉の組合せにおいて、無潤滑100Nラジアル荷重下での 2.88×10^5 回の転がり疲労試験の結果、PEEK/Aluminaでは、ベアリング回転時のきしみ音に加え、焼付きにより内輪の回転が断続的となり著しい回転性能の低下がみられた。また、PEEK/SUS304もベアリング回転が不規則になる現象がみられリテーナ、内輪、外輪それぞれに多量の黒色摩耗物の付着を確認した。示温ラベルでの温度計測では外輪の温度は 100°C 以上 120°C 未満であった。

サイクル数と各構成部品の摩耗量の関係から各軸受要素の摩耗量を比較すると、いずれのサンプルも内輪の摩耗量が最大となった。PEEK/Aluminaでは10.4mgに対しPEEK/SUSでは9.0mgであった。また、各構成部品の総摩耗量を比較した場合、PEEK/Aluminaの組合せでは 2.88×10^5 回終了時で25.4mgの摩耗量に対してPEEK/SUSでは12.8mgであり、後者は前者のおよそ半分の摩耗量であった。この結果SUS304 ballの方が摩耗量が少ないことが分った。

前節と本節および、使用している樹脂の熱処理後の再結晶温度が少なくとも140度以上であること、および、外輪の温度上昇の上限は120度までであることから、稼働で発生する温度がそのまま、結晶構造に与える影響よりも、加工条件が結晶構造に与える影響が大きいと結論づけられる。

2-2 <静音化又は低振動化と低発塵化に対応した技術開発>

(申請書実施内容番号2)

2.2.1 静的圧縮試験機の開発

(鹿島化学金属株式会社 : 鹿島祐二)

(国立大学法人九州大学 : 木田勝之、Santos, Edson Costa, Rozwadowska Justyna、古池仁暘)

(申請書実施内容番号 2-1)

単球で荷重 20kg の負荷能力、 $1\mu\text{m}$ の精度での押し込み量を時間経過とともに測定のできる静的圧縮試験機を開発し、圧縮試験を行った。各材質で” 3/8 ボールを基準として、100 時間以上での変形特性を得た。その結果、変形に対する抵抗を得ることができた。従来の規格で決まっている溝形状は鋼に対するものである。しかし、ここで得られた実験結果は、樹脂の場合、材質によって変形量が異なることから、樹脂固有の溝形状が必要であると結論した。

2-3 <開発の管理・運営 >

(申請書実施内容番号 3)

(鹿島化学金属株式会社 : 鹿島祐二、鹿島啓子)

プロジェクトの全体的な進捗状況を確認し、再委託先の管理及び経理上の業務を行った。プロジェクト会議は下記の日程で行った。

(a)平成 21 年 11 月 11 日 第一回意見交換会

(b)平成 22 年 1 月 27 日 第二回意見交換会

(c)平成 22 年 3 月 19 日 第三回意見交換会

最終章

高精度に対応した加工技術の開発のために、軸受を構成するリテーナー、軌道輪の加工条件の選定を行った。具体的には、「材質の選定、温度条件の選定、刃物の選定、切削条件の選定、加工時具の開発」を行った。これらについて、「転がり精度測定」の目的である転がり疲労に与える影響を研究した。その結果、従来では剥離損傷が発生していた軸受の使用条件でも剥離を起こさない加工条件を得ることができた。

例として、材質を PPS に選定した場合、その刃物切削条件 F を $F=0.24$ 、 0.18 、 0.01m/s とした。洗浄環境を模擬するために開発した装置を用い、洗浄環境下で転がり疲労試験を行った。 $F=0.24$ の場合、摩耗と表面剥離による発塵がみられたが、 $F=0.18$ の場合、加工後の表面が滑らかになり、試験後も表面損傷が発生しなかった。

このように、低発塵ベアリングの開発にむけた基礎的なデータベースを得ることができた。

このなかで、再委託先である鹿島化学金属(株)は加工を、(国)九州大学は疲労試験と加工後のベアリングの観察と損傷評価を行った。