

# 平成23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24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 研究開発の背景とこれまでの成果

1-2 本課題への取り組み方針

1-3 研究の目的と目標

1-4 研究体制

### 第2章 本論

## 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 研究開発の背景とこれまでの研究成果

#### 1.1.1 研究開発の背景

(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にはその場で高速回転による処理が行われるため、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。

このような製造装置の高性能化の要求に従い、プラスチックベアリングにも高精度化のニーズが高くなってきている。従来の射出成型プラスチックベアリングの精度は $100\mu\text{m}$ 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、 $10\mu\text{m}$ 単位まで高めるという精度要求に応えると、半導体製造装置において、低発塵プラスチックベアリングへの置き換えが可能となる。

このためには、これまでに試作された射出成型ベアリングを基準にすると、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

づける必要があることが川下企業から要求されている。

また、直線運動においては金属製のものが主流であるため、スライド機構への樹脂の展開がなされていない。これは、ますます軸受用樹脂の耐久性評価が重要になっているにもかかわらず、その開発の取り組みが遅れているためである。しかし、現在は申請者が本開発期間中にスライドベアリングのプロトタイプの試作に成功し、これを用いた研究が可能となっている。この直線運動用スライドベアリングの研究はこれまではなされていなかった分野にまで展開が期待でき、工業的にこれまで厳しかった環境でも位置決め技術向上の成果をもたらすため、2009年度後半に依頼のあった川下産業からの開発要求(後述)も本課題で達成できることが期待されている。

### 1.1.2 当該分野における研究開発動向と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。また、ウェハーの搬送工程においては位置決めのために上下ローラーでウェハーを挟み込み次の工程に送る装置があり、その箇所はラジアル・スラスト両方向から負荷がかかるためアンギュラベアリングが必要となる。しかしながら、従来アンギュラベアリングはリテーナーなしのフルボールタイプしかなく、それでは精度がでない上に回転不良まで引き起こし正確な位置の確保が困難であった。

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。

このように、金属やセラミックスではその適用が難しい腐食環境へのプラスチックベアリングの適用が注目されながら、プラスチックのベアリングでは加工精度向上が困難視されていた。本課題では、この二つの課題を同時に克服するため、軌道輪・リテーナーの機械加工技術を開発し、これにより新しい半導体製造装置に役立つベアリングを開発する。これまで各社で取り組まれた試作ではプラスチックをベアリング材料に用いても、その軌道輪・リテーナーは射出成型により製造されたものであるため、ベアリングの耐食性と位置決め精度には限界があった。

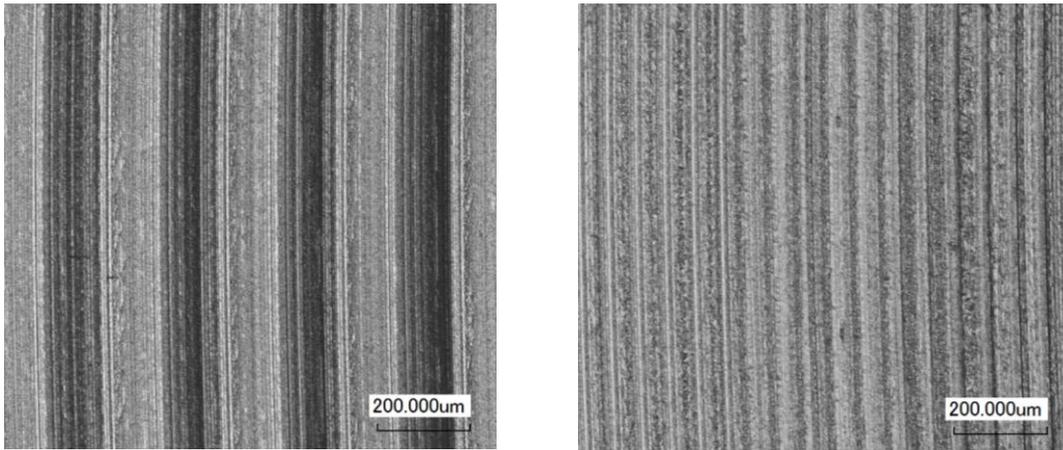
そこで新規のベアリング製造では機械加工可能な材料(射出成型材よりも高強度)で製作する軌道輪・リテーナーを組み込む技術を開発する。具体的には、1. 3で後述するように、全機械加工によるプラスチック軸受を開発する際に必要となる、機械加工条件・材料特性・軸受形状を関係づけ、中小規模の会社でも、半導体などの装置に部品を十分供給できるように加工条件をデータベース化する。この製法により加工したプラスチックベアリングにより、エッジグリップチャック搬送アーム継ぎ手及び回転認知用位置決め部品、さらにはより高度な搬送ローラー用のアンギュラベアリング、直線運動用のスライドベアリングの、イ 高精度化、ウ 低振動化、 オ 低発塵化を実現する。

先に述べたように、エッジグリップチャックや回転認知装置には、ウエハーの種類や温度、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の要求がますます強くなっている。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。機械加工が必要となる多品種少量生産には 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、H21 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。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開発する。プラスチックに関する製品特許の申請はその多くが、射出成型品、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。

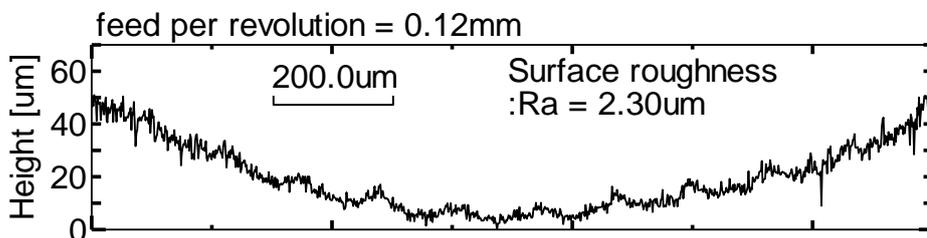
また、これまでに、位置決め用部品に関する分野の研究開発動向については省コスト化の観点から駆動部の回転体要素には、射出成型による加工が施された部品、あるいは従来からの踏襲で金属が多く使われてきた。また一方で、高品質、すなわち高耐久性、高精密化、小型・軽量化、低フリクション化のための位置決め装置の総合な技術開発が取り組まれてきた。これらは昨今の国際競争力のためのコスト削減の観点から、また高速化による軽量化の観点から研究が続けられるものと思われる。ただし、ここでは、高耐久性・高強度化・軽量化・高精度化・短納期化はそれぞれがトレードオフの関係にあり、それぞれを満足する技術はないのが現状である。

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ことを目標に研究開発を行った。本課題の基礎は H21 年度は「戦略的基盤技術高度化支援事業(補正予算)」の採択により、近畿 0908006 で認定された認定計画(H21~H24 年度)のうち、初年度の研究を行った結果である。まず、「オール樹脂軸受の加工と樹脂の変形特性を利用した樹脂用軸受け溝の設計指針作成」という実施計画の目標を達成した。ここでは、新規に、準静的圧縮疲労試験機を設計・導入し、球圧縮下での PEEK 材料の変形特性を得た。このデータは世界的にみて初めてのものである。これは、ベアリングの溝形状が鋼材を基準にしているため樹脂に対しては測定方法・基準となるデータがないためである。H21 年度には、プラスチックベアリングの溝を球より 2%大きくすれば摩擦がすくなく

なることがわかった。(図 1-1(c)) これは鋼の 5%に比べて小さい値である。これにより実機 PEEK ベアリングの溝形状を設計することが可能となった。また、ベアリングの疲労試験機等の導入により、認定計画達成に必須な材質 PEEK・PPS の変形特性のデータを得るとともに、課題であった機械加工条件のデータベース構築を行い、PEEK について疲労に強い加工条件を見出した。このデータベースで新しく溝加工することにより、40  $\mu\text{m}$  (図 1-1(a))が 20  $\mu\text{m}$  の加工精度にまで到達した (b)。



(a) 研究前のベアリング溝の表面 (b) 20  $\mu\text{m}$  の精度に到達(右(b)) (高精度化に成功)



(c)設計した溝の加工例

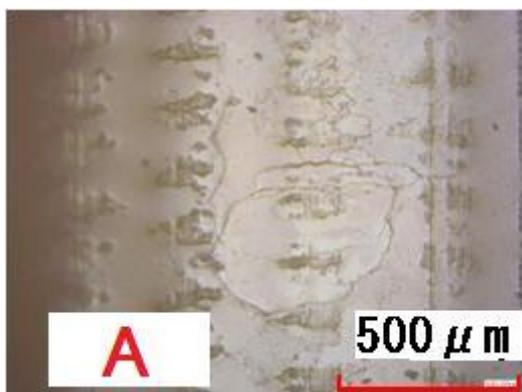
図 1-1 微細加工によるベアリング表面の溝加工観察結果

H21 年度の成果をもとに、川下産業数社とコンタクトをとったところ、新たに、別の洗浄装置では左右に基盤やウェハーを移動し次の工程に移る際に、すべり摩擦を用いた装置がある場合があり、この場合には、すべり摩擦を利用した装置はクリアランスを少なく保ち精度よく左右の移動が出来る反面、摩擦係数が高く、洗浄液が飛散し滑り摩擦面に少しでも介在するとスティックスリップを起こすことが明らかとなった。ここで、円滑な移動を実現すれば、ウェハー移動工程でも、本課題の成果適用が可能となることを打診された。

さらに、平成 22 年度には、今年度と継続となる「軌道輪・リテーナーの疲労測定」では、「はく離とき裂の観察」について研究を行い、これまでの結果から、損傷に最も影響を及ぼしているのは送り速度であることを背景に、加工条件 F0.25 に高荷重を与

え損傷を意図的に発生させることで、き裂およびはく離の発生の観察を試みた。

図 1-2 にき裂からはく離に至る過程の写真を示す。これは F0.25 に荷重 382.2N を与え水中で試験を行った軸受のインナー損傷部分の写真である。(a)の写真を見ると、表面に発生したき裂が進展し、繋がりかけていることがわかる (図中A)。次に(b)をみるとき裂が繋がることで小規模な欠けが発生する過程が観察された。本研究では軌道輪上に発生した損傷の起点となる小規模な欠けを“微小孔”と呼称した。微小孔は表面解析の結果、60  $\mu\text{m}$ 程度の深さがあり、表面の粗さによらずき裂が深く進展し繋がることで発生したものである、発生した微小孔を起点として、インナーの周方向へき裂が成長して行くことがわかる (図中B)。また、周方向に伸びたき裂から複数の軸方向への細かいき裂が発生している。このように、中央にできたき裂およびはく離からベアリングの軸方向に複数のき裂が進展していくことがわかる。その後、き裂が繋がっていくものはく離へ至り、はく離同士も繋がることで最終的には一つの大きなはく離へと至ることがわかった。この結果を踏まえ、疲労の研究と発塵特性に関する研究を行った。



(a)  $2.9 \times 10^5$  での写真 (き裂)



(b)  $4.3 \times 10^5$  での写真 (微小孔とき裂)

図 1-2 き裂からはく離に至る過程  
(F0.25, 382.2N)

## 1.2 本課題への取り組み方針

### 1.2.1 中小企業政策との整合性・技術戦略マップとの関連性

今提案で新たに大学とともに開発する UHA 工作システムはデータベース化による加工法の情報化も行い、誰もが使えるシステムを目指している。これはものづくり基盤技術振興基本法にある、「中小事業者の経営基盤の強化を図るため、新たな設備の設置その他資本装備の高度化、生産管理の合理化等に関し必要な施策を講ずる」という内容に沿ったものである。これは、特に、「我が国の発展を担ってきた熟練工等経験を有する優れた技術者が有する技術や技能を若い人材に確実に継承することに役立つものであり、かつ、基礎的な研究やデータ収集及び新製品、新分野のニーズに対応した研究開発に関して、川下製造業者等や大学等と連携して効率的な研究開発を行っていくことが望ましい」という、本申請プログラムの基本方針にも合致する。

本課題は川下産業からの依頼を受け、枚葉式スピン洗浄（エッチング）装置に関する位置決め装置の開発としてスタートしたものである。このシステムは、経済産業省・半導体分野の技術戦略マップでの最重要課題「システム LSI (SoC)」の製造上に必要なものとして、リストアップされており、「低コスト、QTAT、多品種変量生産対応」基盤技術「CMOS 技術」 SoC 開発／製造工程のエンジニアリング・製造統合制御プラットフォーム・工程制御技術（枚葉化を実現した階層的搬送制御技術）の高精度化という戦略マップの目的実現に役立つものである。

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。そこで、本課題は回転および摺動部、さらに H21 年度新たに川下産業から開発の打診があった直線運動部の高精度・高耐久性をプラスチックベアリングにより実現する。これらのニーズは、まだ解決していない問題として、その解決方法が模索されている。この解決のため、申請者である鹿島化学金属株式会社は問題解決の依頼を受けているメーカーを新たにアドバイザー企業として受け入れ、これとともに研究成果の実証を行う。

このように、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、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。

### 1.2.2 特徴をもとにしたコストダウンの方法

本課題の特徴は、射出成型困難な材料を切削加工すること、また、高精度化の要求に対応し、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である。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、初期単価は上がるが、寿命強度が延びるため、ランニングコストの大幅な低減により結果的に約 1/2 のコストダウンが可能である。この場合、さらにメンテナンスにかかる費用も削減できることを加味すると、最低でもトータル 1/3~1/4 のコストダウンが可能となる。

### 1.3 研究の目的と目標

製造装置の高性能化の要求に従い、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 $\mu$ 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 $\mu$ 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。

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)」の第 2 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。

#### 1.3.1 高度化目標

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、ウエハーの種類や温度、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、ベアリングを構成する軌道輪とリテーナー(ボール保持器)のうち、リテーナーは一体成形可能である樹脂を用いて、射出成形法によって作製されてきた。その樹脂材料の種類は軌道輪の材料に比べ限定され、かつ低強度なため、機械加工可能な軌道輪を強く作っても、ベアリングそのものの性能は、低強度な保持器に従うこととなり、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、これらの各目標を達成するために、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んだ。

### 1.3.2 川下産業からの具体的要請と実施内容の関係

川下産業からは、洗浄環境下でも使用可能なエッジグリップチャック用のアームの位置決め部材について、 $10\mu\text{m}$ 単位の高精度化と従来の UHMWPE を用いたベアリングよりも **30%以上の低発塵性(耐摩耗性)**、**3%以上の低振動化(静音化)**が求められている。

認定計画の初年度である H21 年度は、これを達成するため認定内容に従い、「リテーナーと軌道輪の高精度加工」の研究開発を行った。この達成には、加工条件と精度に関する基礎的データベースが必須であったため、このデータベース化に取り組み、加工条件に関する精度を上げることができるという成果を得た。また、この条件をもとに、ヒューマンファクターをできるだけ少なくするため、工作機械用のプログラミングでの加工最適化を行うとともに、さらに静的圧縮試験機での研究成果から導き出した溝形状と軸受け性能のデータを基に「軌道溝の設計」指針のためのデータベースを作成した。

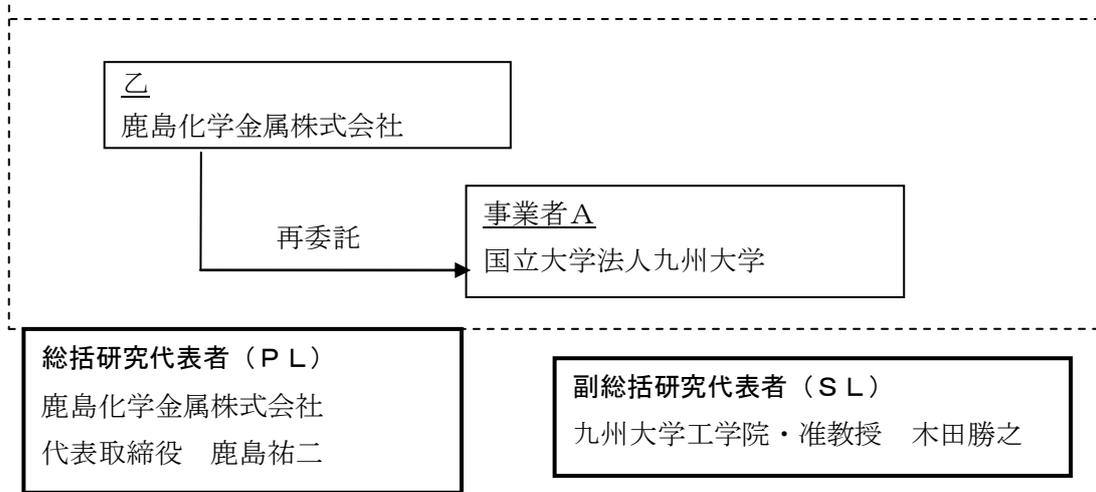
さらに精度を上げる過程で、加工熱による表面への影響が摩耗に大きく関与することもわかってきたので、低発塵を実現する加工条件(**温度・刃物・切削・治具設計**)を新たな要素として前進することができた。

H22 年度からはこれをもとに、加工時間を短くし、回転軸の振れや振動を抑え H21 年度に到達した  $20\mu\text{m}$  から、さらに  $10\mu\text{m}$  レベルの高精度化、これによる **10%の低振動化(低騒音化)**、**30%以上の発塵量減少**を目指した。H23 年度は、引き続き、精度向上時の疲労特性の解明と、日米の規格に照らした、発塵特性のデータベース化に取り組んだ。

## 1.4 研究体制

### 1.4.1 研究組織及び管理体制

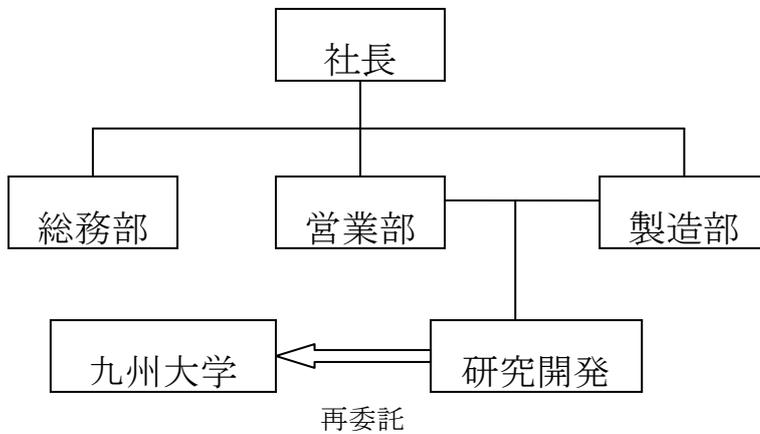
#### 1) 研究組織（全体）



#### 2) 管理体制

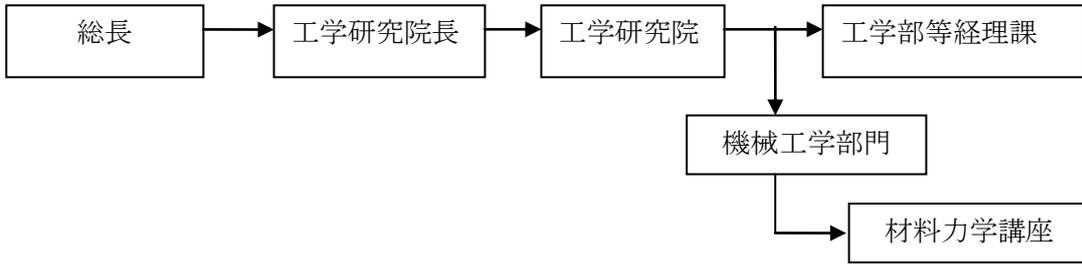
##### ①事業管理者

[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]



1.4.2 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
鹿島 祐二	代表取締役
鹿島 啓子	総務部 取締役経理部長

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, 1-2, 1-3, 2-1
東 弘之	取締役工場長	1-1, 1-2, 1-3, 2-1
高祖 一雄	（製造部）主任研究員	1-1, 1-2, 1-3, 2-1
松本 正樹	（製造部）研究員	1-1, 1-2, 1-3, 2-1
中野 公洋	（製造部）研究員	1-1, 1-2, 1-3, 2-1
金子 大輔	（製造部）研究員	1-1, 1-2, 1-3, 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	1-1, 1-2, 1-3, 2-1

#### 1.4.3 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 安東裕之  
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

#### 1.4.4 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

#### 1.4.5 委託期間

平成22年8月24日から 平成23年3月31日まで

### 1.4.6 実施日程

【番号】実施内容  (使用する機器設備) ※レンタル・リースを含む	実施者 (実施場所)	実施時期											
		22年度				23年度							
		1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4
【1】静音化又は低振動化と低発塵に対応した技術開発		形状設計と疲労測定 精度 10 $\mu$ m <sup>オーダー</sup>				疲労測定 発塵量 30% <sup>ダウン</sup>							
【1-1】軌道溝設計	(鹿島化学金属株) 鹿島祐二 東 弘之 (九州大学) 木田勝之	→											
【1-2】リテーナーの形状設計	(鹿島化学金属株) 鹿島祐二 東 弘之 (九州大学) 木田勝之	→											
【1-3】軌道輪・リテーナーの疲労測定	(鹿島化学金属株) 鹿島祐二 東 弘之 (九州大学) 木田勝之					→							
【2】低発塵化に対応した技術開発		形状設計と疲労測定 精度 10 $\mu$ m <sup>オーダー</sup>				疲労測定 発塵量 30% <sup>ダウン</sup>							
【2-1】クリーンルーム内の各条件での低発塵の測定とデータベース化	(鹿島化学金属株) 鹿島祐二 東 弘之 (九州大学) 木田勝之					→							

### 1.4.7 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	

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 ドバイスをいただいた。
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 バイスをいただいた。
中根 和昭	国立大学法人 大阪大 学 大学院 医学系研究科 招聘准教授	画像解析・数値解析の専 門家の立場から、軌道溝 設計時の変形特性を理解 するための数値解析につ いてアドバイスをいただ いた。

1.4.8 問合せ担当者

鹿島化学金属株式会社  
代表取締役 鹿島祐二  
電話 06-6472-0556  
Mail mail@kashima-kagaku.com

## 第2章 本論

### 2.1. 静音化又は低振動化と低発塵に対応した技術開発

#### 樹脂材料

今回の試験で使用した樹脂材料について説明する。表 2-1 に樹脂材料の材料特性について示す。これは、後に示すように、結晶構造による損傷評価に必要であるからである。

表 2-1 PEEK と PPS の材料特性

	Melting point	Glass transition point	Specific gravity	Hardness	Coefficient of liner expansion	Tensile strength	Bending strength	Bending elastic modulus
	°C	°C		HRM	10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>	MPa	MPa	GPa
PEEK	334	143	1.32	105	4.7	97	156	4.1
PPS	275	90	1.35	93	2.6	83	142	3.9

#### PEEK (ポリエーテルエーテルケトン)

芳香性ポリエーテル樹脂の一種で結晶性熱可塑性樹脂に属する。融点は 334°C で、ガラス転移温度は 143°C と耐熱性に優れ、濃硫酸に侵されるのみで耐食性も高い。強度が高く、剛性も高いなど力学的特性に優れ、疲労強度、耐摩耗性も高い。このため、耐荷重性、耐熱性の必要な環境において金属軸受に代わる材料として実機へ適応が期待されている。

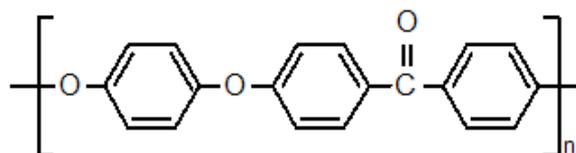


図 2-1 PEEK の分子構造

#### PPS (ポリフェニレンサルファイド)

フェニル基とイオウが交互に繰返される分子構造をもった結晶性の線状高分子であり、耐熱性が高く、融点は 275°C で高温時でも機械的特性の変化が小さい。耐薬品性には特に優れており、200°C 以下で PPS を溶かす溶剤はない。強度、剛性に優れているが、靱性が低く衝撃に弱い。熔融時の流動性が高く、成形性が高いため複雑な形状にも加工しやすい。

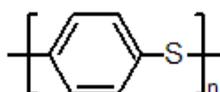


図 2-2 PPS の分子構造

#### 2.1.1 軌道溝設計

静音・低振動及び低発塵をもたらす耐摩耗のための高負荷許容には、溝形状のファクターが必要であるが、球形状を基準に1~10%曲率を変化させれば、プラスチックの発塵特性が把握できる。

荷重付加時の変形を測定し、そのデータを使った非線形 FEM 解析により、各材質、各寸法のボールを用いて変形が飽和する溝形状を見つける。ここでは、球の曲率を基準として、その大きさと変形の関係から材質別、大きさ別、負荷別に溝加工を行った。

#### <軌道輪 形状設計> (溝 R 設計)

昨年度の成果から、2%の場合を例に溝形状の大きさを変えると、寿命が延びる可能性があることがわかった。そこで、本年度は材質や長い寿命に焦点をあて、軌道溝の形状を検証するにあたっては、まずボールはインチサイズであるためその寸法に近いミリサイズのRと、ボールRに対し5%大きなRとで疲労試験を比較し、摩耗・変形・面粗度を比較検討した結果を例に報告をまとめた。(表 2-1-2、2-1-3)

尚、今回実験に用いた試験機は、外輪固定、内輪摺動のため外輪のR形状は一定とした。

表 2-1-2 軌道輪設計における加工状態の観察  
(ボール形状に沿った R 加工の場合)

サンプルNo	(8kgf)	溝幅	溝深さ	R	面粗度Ra	試験前重量(g)	試験後重量(g)	重量差
	CAD寸法	5.082	1.05	3.6		26.3183	26.2921	0.0262
1外輪	試験前	5.09120	1.05695	3.59394	1.942			
	試験後X	5.16728	1.10584	3.57107	0.531	外輪 9.5934	9.5781	
	試験後Y	5.09446	1.05798	3.59540	1.688	内輪 5.4570	5.4457	
						リテーナー 5.2739	5.2721	
1内輪	試験前	5.22234	1.06050	3.74487	1.43	ボール 5.9940	5.9962	
	試験後X	5.20634	1.08167	3.67325	0.607			
	試験後Y	5.20190	1.08068	3.67028	0.626			

表 2-1-3 軌道輪設計における加工状態の観察  
(ボール形状よりも5%大きいR加工の場合)

サンプルNo	(8kgf)	溝幅	溝深さ	R	面粗度Ra	試験前重量(g)	試験後重量(g)	重量差
11外輪	試験前X	5.08282	1.04667	3.63414	1.810	26.2058	26.1602	0.0456
	試験前Y	5.08026	1.04286	3.63633	1.824	外輪 9.4551	9.4384	
						内輪 5.4723	5.4317	
	試験後X	5.24096	1.12268	3.63306	0.047	リテーナー 5.2957	5.2922	
	試験後Y	5.15477	1.04566	3.62914	1.550	ボール 5.9867	5.9987	
11内輪	試験前X	4.99567	1.03659	3.57952	0.765			
	試験前Y	4.99546	1.03572	3.59035	0.793			
	試験後X	5.28287	1.10072	3.62837	0.066			
	試験後Y	5.22396	1.10025	3.63121	0.082			

ここで、ボール径に沿った加工の結果、溝は R3.6 となり、5%大きな加工の場合は、R3.75 となる。

まず内輪の溝幅を疲労前後で比較すると、R3.6 溝は 0.2mm 強広がっているのに対し 5%大きな R3.75 は溝幅がマイナスになっている。これは、摩耗による変化がはく離片や摩耗粉の凝着やフィルムのような変性として、くっついたものと考えられる。

溝深さについては、R3.6 の場合は 0.06mm 深くなり、R3.75 の場合は 0.02mm 深くなってい

る。

R形状はR3.75が小さくなっているのに対しR3.6は少し大きくなっているだけである。重量差はR3.6の方が大きい。

これらから、接触圧の高い溝底では摩耗による体積の減少が進行するものの、溝の表面端部では、摩耗粉や小さいはく離片の凝着が起こる機構が疲労のメカニズムであることがわかる。

これらを総合的に判断すると、疲労の過程では、回転によって溝形状はある一定の形状になるものと考えられる。したがって、疲労による損傷を少しでも小さくするには、疲労後の形状に近い形状を最初につくっていると、摩耗量が減少すると考えられる。

以上のことから、溝形状の加工はボールの半径の5%大きな形状が望ましいことがわかった。

#### <軌道輪 疲労測定> (PEEK,PPS材)

次に、R形状の比較検討から得た結果をもとに、内輪の軌道溝のRを5%大きいRで120万回転疲労試験を行い、負荷を変えて場合における摩耗状況と軌道溝の変形及び面粗度の比較実験を行った。

その結果をPPS+アルミナセラミックについて、荷重を8kgf、4kgf、2kgf、1kgfとし、以下に順に示す。

#### 1. PPS+アルミナセラミックの場合について

(実験条件)

回転数：200rpm

荷重：8kgf (表 2-1-4)

4kgf (表 2-1-5)

2kgf (表 2-1-6)

1kgf (表 2-1-7)

潤滑：ドライ

表 2-1-4 PPS+アルミナセラミックにおける疲労測定結果 (8kgf)

サンプルNo	8kgf	溝幅	溝深さ	R	面粗度Ra	試験前重量(g)	試験後重量(g)	重量差
	CAD寸法	5.082	1.05	3.6		27.2581	27.2544	0.0037
1外輪	試験前	5.06859	1.05126	3.58037	1.84			
	試験後X	5.07740	1.05975	3.57069	0.571	外輪 10.0091	10.0067	
	試験後Y	5.07079	1.05350	3.57763	1.652	内輪 5.6639	5.6602	
						リテーナー 5.5899	5.5897	
1内輪	試験前	5.20039	1.05200	3.73941	1.105	ボール 5.9952	5.9978	
	試験後X	5.18618	1.06022	3.70121	0.607			
	試験後Y	5.18307	1.05845	3.70182	0.641			

(実験結果と考察)

実験では、2000回転を過ぎたころから時々異音が発生し、4000回転に到達した頃から異音が頻繁にするようになった。

異音の発生以外に大きな障害が見られなかったので、実験を継続したが、徐々に振動が起こりだし安定した回転が得られなくなったので68692回転で停止した。

摩耗深さと形状、及び面粗度を計測したが、面粗度がよくなっている以外には、変化は見られなかった。

重量の測定結果から、摩耗がほとんどないことがわかる。

これらから、ボールに微量の摩耗粉の付着があり、これが異音と振動の原因と考えてよい。

また、寿命には至らなかったものの、実際の稼働条件にもとめられる要素には、稼働中の静音性も含まれるため、この条件での使用は不可と思われる。

次に、負荷を 4kgf、2kgf に軽減して実験を行った。その結果を順に示す。

表 2-1-5 PPS+アルミナセラミックにおける疲労測定結果 (4kgf)

サンプルNo	4kgf	溝幅	溝深さ	R	面粗度Ra	試験前重量(g)	試験後重量(g)	重量差
	CAD寸法	5.082	1.05	3.6		26.9153	26.9131	0.0022
2外輪	試験前	5.07688	1.05453	3.58250	1.812			
	試験後X	5.13327	1.07331	3.60548	0.532	外輪 10.0077	10.0047	
	試験後Y	5.09727	1.04634	3.62711	0.941	内輪 5.6598	5.6565	
						リテーナー 5.2557	5.2553	
2内輪	試験前	5.20222	1.05380	3.73707	1.185	ボール 5.9921	5.9966	
	試験後X	5.30942	1.06386	3.84414	0.489			
	試験後Y	5.30154	1.06163	3.84016	0.531			

表 2-1-6 PPS+アルミナセラミックにおける疲労測定結果 (2kgf)

サンプルNo	2kgf	溝幅	溝深さ	R	面粗度Ra	試験前重量(g)	試験後重量(g)	重量差
	CAD寸法	5.082	1.05	3.6		26.9178	26.9153	0.0025
3外輪	試験前	5.08006	1.05599	3.58287	1.8			
	試験後X	5.15314	1.08748	3.59607	0.646	外輪 10.0046	9.9965	
	試験後Y	5.07091	1.04937	3.58771	1.193	内輪 5.6629	5.6539	
						リテーナー 5.2574	5.2568	
3内輪	試験前	5.20240	1.05534	3.73338	1.128	ボール 5.9929	6.0081	
	試験後X	5.24072	1.09734	3.67728	0.505			
	試験後Y	5.27587	1.09325	3.72920	0.575			

#### (実験結果と考察)

両実験でも実験途中で異音が発生した。ここでは、4kgf の実験では 2500 回転、2kgf では 3000 回転を過ぎたころから異音が発生し、それぞれ振動が出始めたので、87472 回転、68468 回転で停止した。

試験後に摩耗深さ、形状、面粗度を測定、面粗度をそれぞれの試験片で測定した。しかし、これらの値には量試験片でほとんど差が見られなかった。

このため、さらに負荷を 1kgf に軽減して実験を行った。その結果を次に示す。

#### (実験結果と考察)

本条件では、120 万回転の疲労試験に成功した。しかし、異音・振動は試験中に発生した。したがって、PPS+アルミナセラミックはドライでの使用は軽い荷重のみで可能であることがわかった。

ここで、実験に用いた球の材質の影響を調べるため、PPS を試験片に用い、球をセラミックにした場合と SUS304 にした場合で実験を行った。その結果を図 2-3 に示す。

表 2-1-7 PPS+アルミナセラミックにおける疲労測定結果 (1kgf)

サンプルNo	1kgf	溝幅	溝深さ	R	面粗度Ra	試験前重量(g)	試験後重量(g)	重量差
	CAD寸法	5.082	1.05	3.6		26.9544	27.2126	-0.2582
4外輪	試験前	5.07834	1.05613	3.58042	1.773			
	試験後X	5.13196	1.08025	3.58769	0.664	外輪 10.0066	9.9996	
	試験後Y	5.07407	1.05378	3.58093	1.648	内輪 5.6603	5.6559	
						リテーナー 5.5936	5.5518	
4内輪	試験前	5.20249	1.05576	3.73242	1.162	ボール 5.9939	6.0053	
	試験後X	5.18100	1.06653	3.67930	0.64			
	試験後Y	5.16670	1.06253	3.67175	0.66			

縦軸は、摩耗量であり、横軸は疲労試験の時間である。この結果から、PPSは硬いセラミックス球での摩耗の方が、柔らかいSUS304よりも摩耗量が大きいことがわかる。

このように、球の材質によらずPPS試験片では、摩耗が時間とともに大きく進行していくため、ドライ環境での使用は極めて短時間でしか適さないことがわかった。

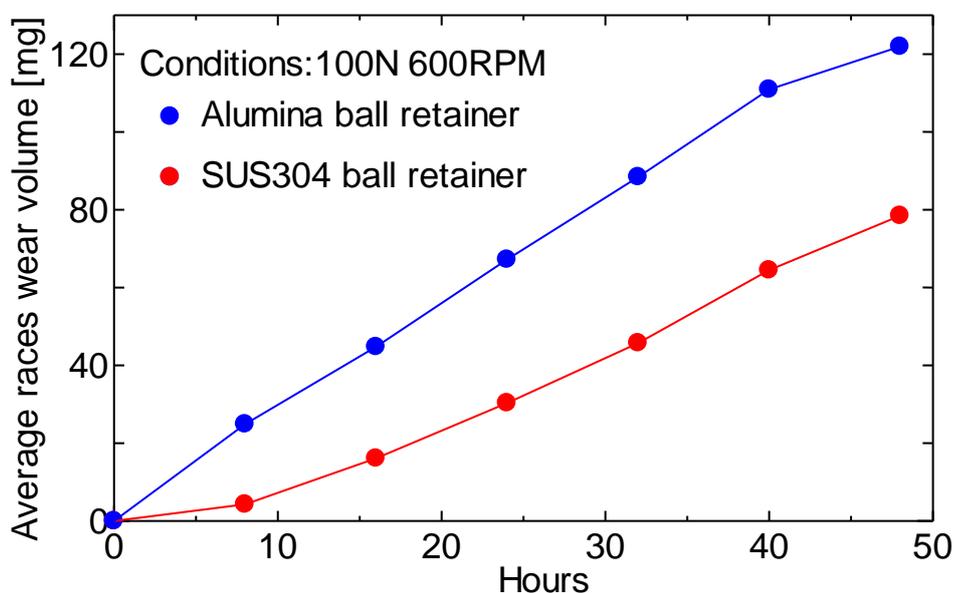


図 2-3 PPS 試験片における疲労試験の時間と摩耗量の関係  
(球は  $Al_2O_3$  と SUS304)

以上の軌道溝設計の課題では、軌道溝の形状を開発し、プラスチック材料の耐荷重を最大限生かすことを目標としており、耐荷重をあげることがそのまま摩耗量を減らすことにつながる。

軌道溝の形状を検証するにあたって、まずボールはインチサイズであるためその寸法に近いミリサイズのRと、ボールRに対し5%大きなRとで疲労試験を比較し、摩耗・変形・面粗度を比較検討した。PEEK材料の加工条件と荷重が寿命に及ぼす影響を実験により求めた。また、ここでは、充填材と球の材質の影響も調べた。その結果、アルミナ球を用いた場合を例にとると、充填材を含んだ材料の強度が高く、その耐荷重性能は9kgfであることが分かった。また、静音性については、音圧の変化が評価因子として適して

いることを明らかにし、測定環境を整えた。音圧の変化には、自己発熱が関係していることがわかった。ここで、耐荷重性については基準定格寿命を定義する繰返し数  $1.0 \times 10^6$  を考慮に入れると、9kgf の場合には、120 万回転( $1.2 \times 10^6$  回)の寿命が達成されていること、従来の荷重は 4kgf であったため、十分目標の 30%を達成することができた。

### 2.1.2 リテーナーの形状設計

リテーナーの加工を行い、その回転精度を確かめた上で、実機試験を行い、疲労強度との関係を調べた。その結果、振動荷重の変動は  $\Delta 0.01N$  であり、従来の  $\Delta 0.8N$  と比較すると、摩擦抵抗と振動は数パーセント、少なくとも 10%以下になった。ただし、自己潤滑性については適用可能な荷重条件の範囲は狭いため、一般化するにはさらなる実験が必要である。また、音圧測定は良好な測定因子となりうることがわかった。この結果をもとに、音圧と関係する自己発熱が起らない使用条件をもとめ、音圧の比較を行うと、30%減少させることに成功した。

このことから、溝の設計とリテーナーの加工条件については目標を達成することができた。ただし、上記のように、荷重条件を一般化するには引き続き実験が必要である。

また、水中では、給水条件が寿命を延ばすこと、および、はく離には加工条件が大きな影響を及ぼしていることがわかった。ここで、摩耗による加工目の変化は初期に起こるものの、はく離には加工目が最も影響を及ぼしていることが分かった。すでに精度と音と振動に関しては上記のように目標を達成することができたが、このときの加工目の減少量は  $10 \mu m$  レベル以下であること、また、表面の粗さと重量を初期の値と比較すると、給水無しの場合であっても  $0.01mg$  以下の差しかないこと、これは、従来の摩耗量  $0.1mg$  と比較すると、 $1/10$  以下であることから、30%を目標とした低発塵化への取組は十分成功したといえる。

### 2.1.3 軌道輪・リテーナーの疲労測定

川下企業のニーズにこたえるべく高精度、静音・低振動、低発塵のベアリングの目標値となる、精度要求  $10 \mu m$  レベル達成、音と振動を 3%以上減らし、30%以上の低発塵を目標としたが、これは H22 年度と H23 年度の 2 年間の目標であり。H23 年度は、H22 年度で研究した軌道輪・リテーナーによる音と振動数の結果を踏まえて、 $10 \mu m$  の精度で加工した軸受を用いて、その疲労特性を明らかにした。これにより、精度と疲労の関係を明らかにした。具体的には、樹脂転がり軸受の実用化の検討、かつ寿命の向上のため、水中転がり疲労試験におけるスラスト PEEK ベアリングの表面起点き裂のき裂進展挙動の観察を行った。表面起点き裂を観察しやすくするため、かつ油圧によるき裂の開口効果を確かめるため、下軌道輪の転動輪上に微小穴を加工し、試験を行った。その結果、微小穴周辺に多数のはく離、き裂が観察された。また微小穴周辺の断面観察も行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- ・ はく離は摩耗ではなくき裂の発生、進展が原因で発生する。き裂の中でも表面から浅い内部で転走方向に沿って進展するき裂はある深さまで進展した後、水平に伸び、その後、表面に向かった。そのき裂の最大深さは主最大せん断応力が発生する深さよりも深くまで進展した。これは、

圧縮応力が大きいいため、せん断応力がピークとなる位置では、せん断応力がき裂進展に影響せず、また、圧縮応力の値が小さくなる深さで、き裂がせん断応力によって進展したといえる。

- ・ 表面起点き裂は、内部進展き裂の先端より転走方向に対して、後方で発生していた。また内部き裂の先端より転走方向に対して前方では、表面起点き裂は発生していなかった。表面起点き裂は、内部進展き裂の影響で発生し、表面起点型で発生するはく離の領域は、表面内部で進展するき裂によって決定された。
- ・ 本実験において、くさび効果による、微小穴を起点とした放射状に進展するき裂は観察されなかった。したがって、本実験において、表面き裂内に侵入した油圧によりき裂が進展するというモード I 型き裂進展機構は支配的でなかった。
- ・ ヘルツの理論におけるリングクラックのき裂発生モデルと、本実験の観察結果におけるき裂進展モデルは異なった。

## 2.2 低発塵化に対応した技術開発

実際にクリーンルームの中で転がり摩耗試験機で実験しそのデータを得るには、稼働条件と材料の関係をデータベース化することが必要である。このため、稼働条件で材質を選定するときにフィードバックできる技術の構築、つまりデータベース化を行った。

### 2.2.1 クリーンルーム内の各条件での低発塵の測定とデータベース化

ここでは、振動変化と発塵量の関係について、パーティクルカウンター(落下塵  $1\mu\text{m}$ ・浮遊  $0.3\mu\text{m}$  レベルまで)を使った測定を行った。さらに発塵特性に関しては、米国と日本国内の基準と本研究を比較することにより、以下のことが分かった。

- ・ 基準のデータと本研究の結果を比較すると、荷重  $20\text{kgf}$ 、回転数  $800\text{rpm}$  ではアメリカ基準のクラス 1000、JIS 規格のクラス 4 は厳しいがそれ以下の条件では適合する可能性があることがわかった。ただし、保持器はカーボングラファイト充填 PTFE を用いることで摩耗量の低減をはかれる。

## 2.3 まとめ

以上の研究開発により、発塵量を 30%以上の低減に抑え生産効率を引き上げる事ができた。

以下に、本課題で得た技術を使って製作を行った製品の例を示す。



図 2-1-3-4 製品の例 (PTFE 軸受)

## 2.4 講演発表成果

1. Koshiro Mizobe, Takashi Honda, Hitonobu Koike, Edson Santos, Katsuyuki Kida and Yuji Kashima, Relationship between load, rotation speed and, strength in all - PEEK and PEEK race – PTFE retainer hybrid polymer bearings under dry rolling contact fatigue, Applied Mechanics and Materials Journal (2012, in pres).
2. Hitonobu Koike, Katsuyuki Kida, Takashi Honda, Koshiro Mizobe, Shunsuke Oyama, Justyna Rozwadowska, Yuji Kashima and Kenji Kanemasu, Observation of crack propagation in PEEK polymer bearings under water-lubricated conditions, Applied Mechanics and Materials Journal, (2012, in press).
3. Koshiro Mizobe, Takashi Honda, Hitonobu Koike, Edson Costa Santos, Katsuyuki Kida and Yuji Kashima, Effect of thrust load and rotation speed on wear loss in PPS race – PTFE retainer hybrid polymer thrust bearings under dry contact, Applied Mechanics and Materials Journal, (2012, in press).
4. Shunsuke Oyama, Katsuyuki Kida, Edson Costa Santos, Hitonobu Koike, Takashi Honda and Yuji Kashima, Observations of Cracks from Microscopic Holes of PEEK Bearings under Rolling-Contact Fatigue in Water, Applied Mechanics and Materials Journal, (2012, in press).
5. Hitonobu Koike, Katsuyuki Kida, Edson Costa Santos, Justyna Rozwadowska, Yuji Kashima, Kenji Kanemasu, Self lubrication of PEEK Polymer Bearings in Rolling Contact Fatigue under Radial Loads, Tribology International, Vol. 49 (2012), pp.30-38.
6. Hitonobu Koike, Katsuyuki Kida, Kenji. Kanemasu, Edson Costa Santos, Justyna Rozwadowska, Megumi Uryu, Kenichi Saruwatari and Takashi Honda, Influence of wear and thermal deformation on machined PEEK plastic bush and Ti crank shaft, Polymers and Polymer Composites, Vol. 20 (2012), No.1-2, pp. 127-132.
7. Koshiro Mizobe, Edson Santos, Takashi Honda, Hitonobu Koike and Katsuyuki Kida, Observation of wear in PEEK race – PTFE retainer hybrid polymer bearings under dry contact, Advanced Materials Research, Vols. 457-458, (2012), pp 557-562.
8. Hitonobu Koike, Takashi Honda, Katsuyuki.Kida, Edson Costa Santos, Justyna Rozwadowska, Keisuke Hoiri, Megumi Uryu, Yuji Kashima and, Kenji Kanemasu, Influence of radial load on PEEK plastic bearings life cycle under water lubricated conditions, Advanced Materials Research, Vol. 217-218 (2011) pp.1260-1265.
9. Hitonobu Koike, Takashi Honda, Katsuyuki Kida, Edson Costa Santos, Yuji Kashima and Kenji Kanemasu, Influence of radial load on PEEK plastic bearings life cycle, Advanced Materials Research, Vols. 154-155 (2011) pp 1288-1291.
10. Takashi Honda, Katsuyuki Kida , Edson Costa Santos and Yuji Kashima, The Influence of Surface Texture on Rolling-Contact Fatigue of PEEK Bearings in Water, Advanced Materials Research,, Vols. 154-155 (2011) pp 1713-1716.
11. Hitonobu Koike, Edson Costa Santos, Katsuyuki Kida, Tadashi Honda, J. A. Rozwadowska, Yuji Kashima and Kenji Kanemasu, Tribological behavior of machined PEEK plastic bearings under dry and water lubricated conditions, Proc. Processing and Fabrication of Advanced Materials XIX, January 14-17, 2011, Auckland, New Zealand, pp. 481-486.
12. Takashi Honda, Katsuyuki Kida, Edson Costa Santos, Hitonobu Koike, Yuji Kashima and Kenji Kanemasu, Fatigue Behavior of Machined PEEK Ball Bearings under Rolling Contact Loading in Water, Proc. Processing and Fabrication of Advanced Materials XIX, January 14-17, 2011, Auckland, New Zealand, pp. 515-520.
13. Takashi Honda, Katsuyuki Kida , Edson Costa Santos and Yuji Kashima, The Influence of Surface Texture on Rolling-Contact Fatigue of PEEK Bearings in Water, Advanced Materials Research, Vols. 154-155 (2010) pp 1713-1716.