

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「難削材の高精度加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年3月

委託者 経済産業省近畿経済産業局

委託先 財団法人奈良県中小企業支援センター

# 目 次

## 第 1 章 技術開発の概要

1. 1	背景	2
1. 2	目標	3
1. 3	研究体制	4
1. 4	成果概要	6
1. 5	本プロジェクトの窓口	6

## 第 2 章 本論

2. 1	研究の目的・目標	7
2. 2	使用設備	10
2. 3	研究内容・結果・考察	
①	精密切削加工に向けた加工技術の開発	
①- 1	難削材(Co-Cr-Mo 合金)高精度真球切削加工	12
①- 2	高精度量産加工検討	14
①- 3	難削材(チタン合金)高精度真球切削加工の応用	15
①- 4	結果まとめ	18
②	精密研磨加工に向けた研磨技術の開発	
②- 1	難削材(Co-Cr-Mo 合金)真球凸形状の研磨加工	19
②- 2	難削材(Co-Cr-Mo 合金)真球凹形状の研磨加工	23
②- 3	難削材(チタン合金)真球研磨加工の応用	30
②- 4	結果まとめ	34
③	生体適合性向上の流体潤滑条件の確立	
③- 1	生体適合性向上の流体潤滑条件の確立	35
③- 2	結果まとめ	37

第 3 章	全体総括	38
-------	------	----

## 第1章 技術開発の概要

### 1. 1 背景

現在の医学においては、変形性関節症や関節リウマチなどの重症の関節疾患に対して、人工関節置換術が広く用いられており、人工股関節、人工膝関節をはじめとして足関節、肩関節、肘関節、手関節などの各種の人工関節が開発され、患者の治療に用いられている。これらの人工関節置換術は、欧米や日本を中心に、およそ年間100万例の手術が行われていると言われており、日本では人工股関節で年間約8万例、人工膝関節も約4万例、そしてその他足、肩、肘などの関節も合わせて年間13万例もの人工関節が用いられている。このように、人工関節は現在広く普及しているものの、課題も多い。性能面の課題は、耐久性の向上である。人工股関節の場合、手術後20年までに約20%が再手術を行っており、この耐久性を向上させることが、大きな課題である。

人工関節は人工骨頭と人工臼蓋の二つの部材が摺動するため、これらの組み合わせについて、摩耗が少ないスムーズな潤滑を確保するためには両者が直接接触する潤滑より、両者の間に関節液(潤滑液)による流体膜が存在する流体潤滑が望ましい。流体潤滑を確保するためには、両者の潤滑面が滑沢で、表面粗さやうねりが極めて小さいこと、両者の潤滑面の形状がフィットし、流体潤滑に最適な隙間が保たれていることなどの条件を満たす必要がある。本研究では、難削材である高精度コバルト・クロム・モリブデン(Co-Cr-Mo)合金を素材とした人工骨頭と人工臼蓋について、潤滑面の精密切削加工法の確立と、生体適合性向上の流体潤滑条件の確立を目指し、形状精度及び面精度向上に資する技術開発に取り組む。その技術を客観的に評価する方法として、振り子試験を用い、流体潤滑条件の見直しと、最適な半径隙間の確立を行なう。

また、航空機部品において、例えばボルトやナットといった非常に単純な形状のものであっても、その品質が確保されていなければ重大な事故につながる危険がある。一方、耐久性を確保するため、航空機のベアリング等にはステンレス鋼が使用されているが、ステンレス鋼は比重が大きいため、環境への配慮などの観点から、航空機の軽量化を図るために比重の小さな金属素材への転換が求められている。その素材として考えられているチタン合金は、難削材であり加工が難しく、品質の確保が難しい。品質(精度)が悪いと、激しい摩耗の要因となり、事故につながる原因となる。本研究では、単純な形状から複雑な形状、また、大きささまざまな部品の組合せによって構成される航空機部品を低コスト、軽量化するため、難削材の加工法の確立に向けた研究開発を行なう。

## 1. 2 目標

難削金属材料のコバルト・クロム・モリブデン (Co-Cr-Mo) 合金及びチタン合金 (Ti-6Al-4V) を用いて、ミクロンオーダーの真球度、表面粗さが求められる人工骨頭、人工臼蓋及びスフェリカルベアリングを精密切削加工する技術開発を行う。特に、最適な加工治具と加工条件の追及による切削精度、研磨精度の向上が技術開発の具体的な内容となる。

人工股関節は、一般的に、潤滑面の摩耗が最も少なく摩擦係数も小さい、両者の間に流体が介在する流体潤滑であり、医療機器の人工骨頭と人工臼蓋の摩擦面についても、関節液が介在する流体潤滑が望ましいとされている。両者の潤滑面が滑沢で形状がフィットし、表面粗さやうねりが極めて小さく、最適な隙間が保たれることについて、高精度精密加工技術の確立が必須であり、それにより生体適合性向上の流体潤滑条件の見直しと確立が求められるものである。本研究ではその両面から研究開発を進め、流体潤滑の実現のための最適条件の確立を目指し、形状精度及び面精度向上に資する技術開発に取り組む。

また、航空機部品について、本研究では、スフェリカルベアリングを低コスト化、軽量化するため、難削材の加工法の確立に向けた研究開発を行う。

それぞれの合金について、切削加工後及び研磨加工後の目標値を以下に示す。

### (1) Co-Cr-Mo 合金製品 (骨頭及び臼蓋) の切削加工後の目標値

潤滑面の表面平均粗さ (Ra)	真球度
0.25 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

### (2) Co-Cr-Mo 合金製品 (骨頭及び臼蓋) の研磨加工後の目標値

潤滑面の表面平均粗さ (Ra)	潤滑面の表面最大粗さ (Rz)	真球度
0.005 $\mu\text{m}$	0.15 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$

### (3) Ti-6Al-4V 製品 (スフェリカルベアリング) の切削加工後の目標値

表面平均粗さ (Ra)	真球度
0.5 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$

### (4) Ti-6Al-4V 製品 (スフェリカルベアリング) の研磨加工後の目標値

表面平均粗さ (Ra)	表面最大粗さ (Rz)	ベアリングの真球度
0.01 $\mu\text{m}$	0.2 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$

また、流体潤滑の実現のための最適条件を評価する。すなわち、高精度Co-Cr-Mo合金製人工骨頭と、高精度Co-Cr-Mo合金製人工臼蓋を用いて、半径隙間を30  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$ として摩擦係数を評価することにより、流体潤滑条件の見直しと最適な半径隙間を確立する。

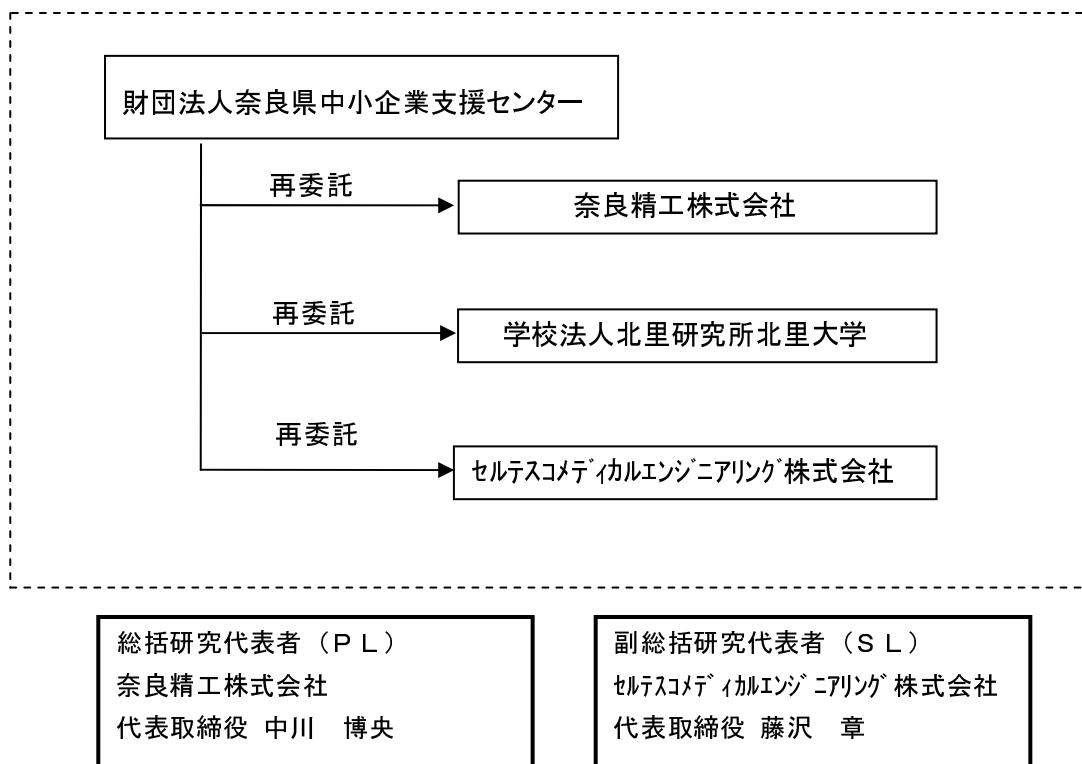
また、表1に示すように、理想的な流体潤滑の摩擦係数は0.001~0.01であり、現行の人工股関節の摩擦係数は、0.1~0.3である。計測方法は、北里大学・馬淵らが行っている振子法による。目標とする摩擦係数としては現行の製品の半分以下の0.05とする。

表1：摩擦係数の目安 (寺山：人工関節学会、2003)

潤滑の種類	摩擦係数
境界潤滑	0.05~0.15
流体潤滑	0.001~0.01
生体潤滑	0.005~0.02
現行の人工股関節	0.1~0.3

### 1. 3 研究体制

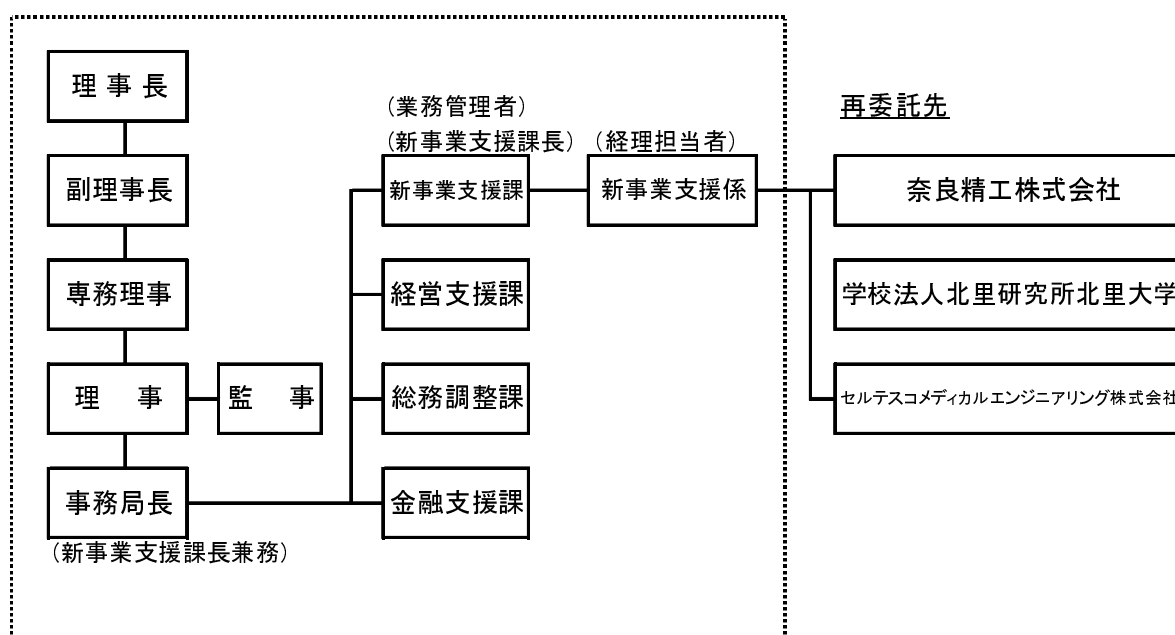
( 研究組織 )



( 管理体制 )

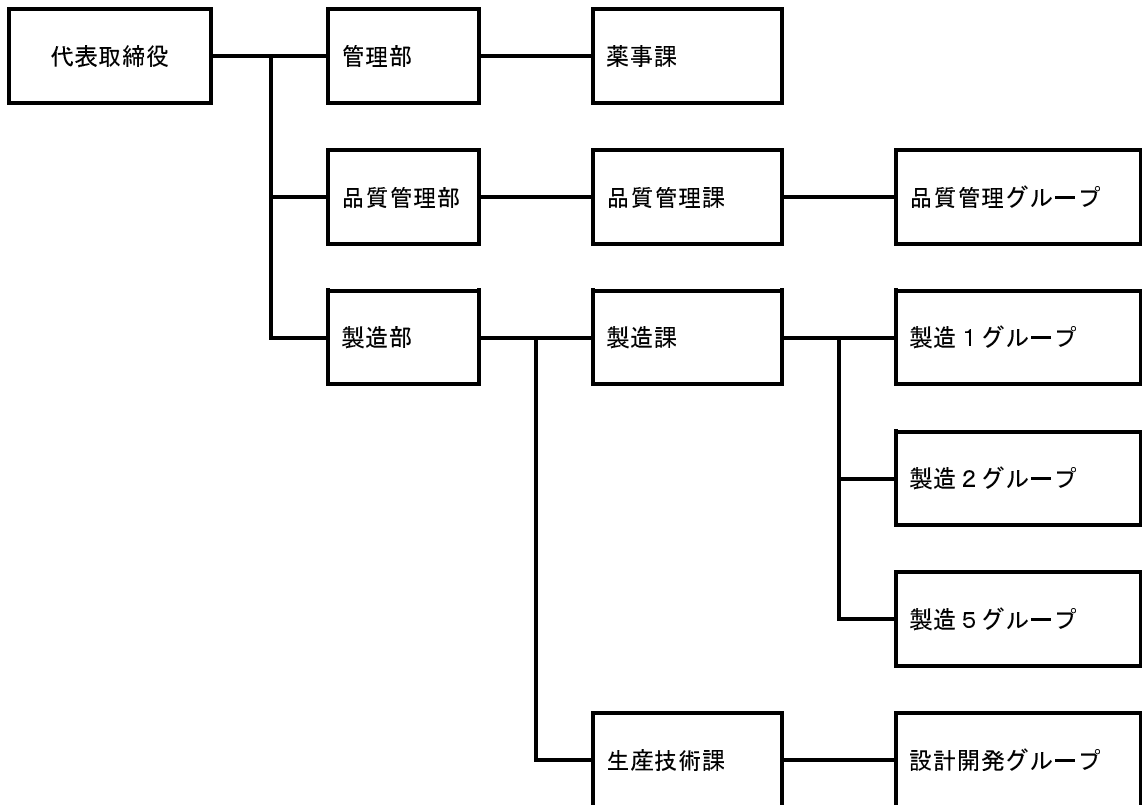
#### ①事業管理者

[財団法人奈良県中小企業支援センター]

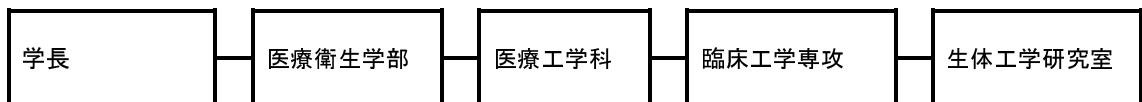


②再委託先

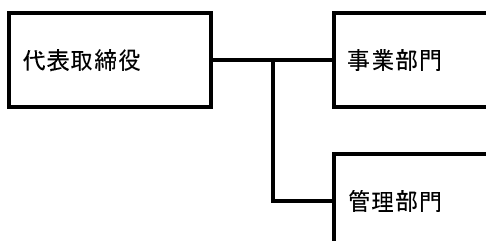
[奈良精工株式会社]



[学校法人北里研究所北里大学]



[セルテスコメディカルエンジニアリング株式会社]



## 1. 4 成果概要

目標値と実績（最良値）は以下のとおり。

1. 骨頭の切削後加工精度に関しては、  
表面粗さ：Ra 0. 25  $\mu\text{m}$  に対して 0. 05  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
真球度の目標値：10  $\mu\text{m}$  に対して 4  $\mu\text{m}$  まで到達した。
2. 臼蓋の切削後加工精度に関しては、  
表面粗さ：Ra 0. 25  $\mu\text{m}$  に対して 0. 13  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
真球度の目標値：10  $\mu\text{m}$  に対して 6  $\mu\text{m}$  まで到達した。
3. スフェリカルベアリングの切削後加工精度に関しては、  
表面粗さ：Ra 0. 5  $\mu\text{m}$  に対して 0. 07  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
真球度の目標値：5  $\mu\text{m}$  に対し 1  $\mu\text{m}$  まで到達した。
4. 骨頭の研磨後加工精度に関しては、  
表面粗さ：Ra 0. 005  $\mu\text{m}$  に対して 0. 003  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
表面粗さ：Rz 0. 15  $\mu\text{m}$  に対して 0. 006  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
真球度の目標値：0. 5  $\mu\text{m}$  に対して 0. 4  $\mu\text{m}$  まで到達した。
5. 臼蓋の研磨後加工精度に関しては、  
表面粗さ：Ra 0. 005  $\mu\text{m}$  に対して 0. 002  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
表面粗さ：Rz 0. 15  $\mu\text{m}$  に対して 0. 009  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
真球度の目標値：0. 5  $\mu\text{m}$  に対して 0. 7  $\mu\text{m}$  まで到達した。
6. スフェリカルベアリングの研磨後加工精度に関しては、  
表面粗さ：Ra 0. 01  $\mu\text{m}$  に対して 0. 009  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
表面粗さ：Rz 0. 2  $\mu\text{m}$  に対して 0. 046  $\mu\text{m}$  まで到達した。  
真球度の目標値：1  $\mu\text{m}$  に対し 1. 6  $\mu\text{m}$  まで到達した。
7. 生体適合性向上の流体潤滑条件の確立に関しては、  
200kg 荷重骨頭／臼蓋振り子試験において摩擦係数 0. 0486 まで到達した。

## 1. 5 本プロジェクトの窓口

[プロジェクト全体に関すること]

財団法人奈良県中小企業支援センター  
〒630-8031 奈良県奈良市柏木町 129-1  
TEL:0742-36-8312 FAX:0742-36-4010  
担当者：金澤 良浩

[研究開発内容に関すること]

奈良精工株式会社  
〒633-0101 奈良県桜井市小夫 3681 番地  
TEL:0744-48-8511 FAX:0744-48-8244  
担当者：中川 博央

## 第2章 本論

### 2. 1 研究の目的・目標

人工関節の現在のテーマとして、性能面では耐久性の問題が挙げられている。耐久性を向上させるには、流体潤滑条件を確保することが望ましく、潤滑面が滑沢で、表面粗さやうねりが極めて小さいこと、潤滑面の形状がフィットし、流体潤滑に最適な隙間が保たれていることなどの条件を満たす必要がある。人工骨頭(図1参照)は一般的に球面が3/4程度で、人工臼蓋(図1参照)はほぼ1/2すなわち半球面の窪みをもっている。現在使用されている大多数の材料は、人工骨頭が金属やセラミックス、潤滑の相手である人工臼蓋が超高分子量ポリエチレンとの組み合わせであるが、超高分子量ポリエチレン製人工臼蓋の摩耗の問題点が指摘されて以来、両者の材料をセラミックスや金属といった同一材料を用いることも行われている。セラミックス対セラミックスや金属対金属の固い材料同士の球面関節でスムーズな潤滑を確保するためには、両者の球面の真球度をミクロンオーダーで管理する必要がある。これらは、研究としては進んでいるが、金属同士の加工技術の研究に関しては発展途上である。そのため、高精度精密加工技術の確立、生体適合性向上の流体潤滑条件の見直しと確立が求められるものである。

一方、航空機部品について、今回取り上げるスフェリカルベアリング(図2参照)においても、ボールの真球度や表面粗さが悪いとかじりが起こり、回転に異常をきたすように、単純な形状の部品においても大きな事故につながる危険性があり、精度向上が求められる。

これらのことから、本研究では、ミクロンオーダーの真球度、表面粗さが求められる人工骨頭、人工臼蓋、人工関節やスフェリカルベアリングの素材として難削材のコバルト・クロム・モリブデン(Co-Cr-Mo)合金及びチタン合金(Ti-6Al-4V)を用い、加工治具の開発と最適な加工条件の探求を行い、精密切削・研磨加工技術の確立を目指す。また、高精度精密加工技術の確立と共に、人工股関節の生体適合性の向上のために望ましいとされている流体潤滑実現のための条件を探求する。



図1 骨頭形状(左)と臼蓋形状(右)

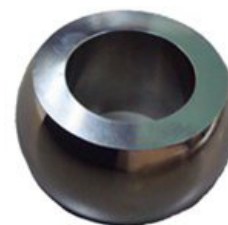


図2 スフェリカルベアリング形状

本プロジェクトは次の①、②及び③のサブテーマから構成する。

#### ① 精密切削加工に向けた加工技術の開発

##### 【概要】

Co-Cr-Mo合金とチタン合金を用い、複合旋盤加工機(図3)を導入して精密切削加工を行う。

##### ①-1 難削材(Co-Cr-Mo合金)高精度真球切削加工

Co-Cr-Mo合金の真球切削加工において、真球度、表面粗さの目標を達成し、目標精度を安定的に出すため、加工条件(切削刃物、切削抵抗、骨頭の形状等)について、設計・開発を行う。

切削後の目標値は、真球度  $10\mu\text{m}$  表面粗さ(Ra)  $0.25\mu\text{m}$  とする。



## ①-2 高精度量産加工検討

①-1により設計された条件をもとに、量産化に適した治具を再検討する。

## ①-3 難削材(チタン合金)高精度真球切削加工の応用

Co-Cr-Mo合金の真球切削加工から導き出された切削条件を、スフェリカルベアリングをはじめとしたチタン合金の切削加工に応用し、スフェリカルベアリングの加工に最適な治具の設計、刃物形状や刃物材質の検討選定を行なうとともに、最適加工条件の検討を行う。

切削後の目標値は、真球度 $5\mu\text{m}$ 、表面粗さ(Ra) $0.5\mu\text{m}$ とする。

### 【設備】

切削加工の検討を行うため、複合旋盤加工機(図3)を用いる。また、検証には、真球度の正確な測定のため高精度三次元測定機(図6)を用い、表面の正確な観察を行うためデジタルマイクロスコープ(図8)を使用する。表面粗さの評価は、超深度測定顕微鏡及び超精密非接触三次元表面性状測定機(図7)を使用する。

## ② 精密研磨加工に向けた研磨技術の開発

### 【概要】

真球に対する表面粗さの問題として、従来は高精度の製品を加工する際の工程数も多く、加工時間とコスト面でも問題があった。また、複雑形状を均一に精密加工することにも限界があった。

そこで、量産に適した精密球面研磨加工の検討を行う。

### ②-1 難削材(Co-Cr-Mo合金)真球凸形状の研磨加工

球面研磨加工工程としてレンズ磨きを基にした球面研磨加工技術を確立する。レンズの形状として、通常は半球以上の真球を磨くことは想定されていないが、球面研削盤の軸芯を傾けることにより、半球以上の真球研磨が可能になる。また、研磨側または被研磨側を揺動させることで、加工時間の削減が可能となる。そのため、斜軸型研磨機及び円弧球芯型研磨機を導入し、研磨用治具の設計、研磨砥石及び研磨剤を検討し、研磨条件の確立を行う。

研磨後の精度目標値は、真球度 $0.5\mu\text{m}$ 、表面粗さRa $0.005\mu\text{m}$ 、同Rz $0.15\mu\text{m}$ とする。

### ②-2 難削材(Co-Cr-Mo合金)真球凹形状の研磨加工

半球以上の凹形状研磨加工の場合、砥石形状が研磨状態に影響を与え、単純形状の砥石の使用では均一な研磨が困難なため、新たに砥石、治具、工程について研究開発し、研磨加工の安定化を目指す。

研磨後の精度目標値は、真球度 $0.5\mu\text{m}$ 、表面粗さRa $0.005\mu\text{m}$ 、同Rz $0.15\mu\text{m}$ とする。

### ②-3 難削材(Ti合金)真球研磨加工の応用

真球研磨技術を用いて、チタン合金のスフェリカルベアリングの高精密研磨加工を行う。スフェリカルベアリングは完全な球状ではないが、治具を工夫し、斜軸型研磨機及び円弧球芯型研磨機の双方を用いて、砥石材質、砥石形状の検討を行う。

研磨後の目標値は、真球度 $1.0\mu\text{m}$ 、表面粗さRa $0.01\mu\text{m}$ 、同Rz $0.2\mu\text{m}$ とする。

#### 【設備】

加工検討のため、斜軸型研磨機(図4)及び円弧球芯型研磨機(図5)を用いる。また、検証には、真球度の正確な測定のため高精度三次元測定機(図6)を用い、表面の観察はデジタルマイクロスコープ(図8)を使用し、表面粗さの評価は、超精密非接触三次元表面性状測定機(図7)を使用する。

### ③ 生体適合性向上の流体潤滑条件の確立

#### 【概要】

高精度の真球加工技術による製品を用いて、流体潤滑の見直しを行う。関節の摩擦を測定するため、振子法を用いる。

#### ③-1 生体適合性向上の流体潤滑条件の確立

- ①、②で製作した人工骨頭と臼蓋を用いて、流体潤滑の生成確認と最適な半径隙間を確立する。  
摩擦係数の目標値は0.05とする。

#### 【設備】

生体内関節の基本動作を模した60kgと200kg荷重の振り子試験機(図9)を用いて評価を行う。

## 2. 2 使用設備

- ・ 切削加工

オークマ製複合旋盤加工機



図3 複合旋盤加工機

- ・ 研磨加工

マブチS & T製斜軸型研磨機、製円弧球芯型研磨機



図4 斜軸型研磨機



図5 円弧球芯型研磨機

- ・ 真円度及び真球度測定

ミットヨ製三次元測定機：LEGEX574



図6 三次元測定機

・表面粗さ測定

キーエンス製超深度測定顕微鏡 VK8510（奈良精工(株)既所有）

テーラーホブソン製超精密非接触三次元表面性状測定機：タリサーフCCI



図7 非接触三次元表面性状測定機

・表面状態確認

キーエンス製デジタルマイクロスコープ



図8 デジタルマイクロスコープ

・摩擦係数測定

振り子試験機－ 60 kg 荷重対応－（北里大学既所有）

振り子試験機－ 200 kg 荷重対応－



図9 振り子試験機－ 200 kg 荷重対応－

## 2. 3 研究内容・結果・考察

### ①精密切削加工に向けた加工技術の開発

#### ①- 1 難削材 (Co-Cr-Mo 合金) 高精度真球切削加工

Co-Cr-Mo 合金の骨頭形状及び臼蓋形状の切削後真球度、表面粗さ及び歩留まりの向上を目指し、切削条件の検討を行った。

#### (1) 骨頭の切削加工

材料として Co-Cr-Mo 合金を用い、 $\phi 3.2\text{mm}$  の人工骨頭形状の切削加工を行った。主な加工工程と使用工具を表 2 に示す。

表 2 主な加工工程と使用工具

1 工程目		2 工程目	
加工の種類	使用工具	加工の種類	使用工具
荒外径	超硬ノーズ R0.8	荒外径	超硬ノーズ R0.8
中荒外径	超硬ノーズ R0.4	中荒外径	超硬ノーズ R0.4
内径荒・仕上げ	超硬ノーズ R0.4	仕上げ丸駒	R2.03
仕上げ外径	超硬ノーズ R0.4		

結果として、真球度は  $29\mu\text{m}$  から  $57\mu\text{m}$  の範囲にあった。三次元測定チャートを図 10 に示す。

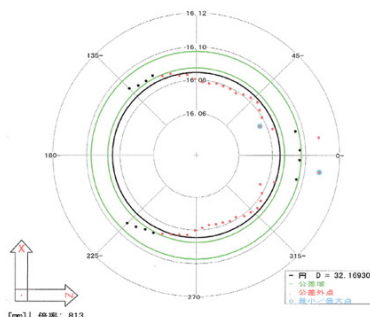


図 10 三次元測定チャート：製品を経線方向に測定  
(プロットは、骨頭の頂点部分が右位置)

図 10 から、頂点部分がいびつになっていることが分かったため、仕上がり状態に影響すると思われる切削 2 工程目の加工条件を変更して切削加工し、仕上がり状態を確認した。主な加工条件は、前述の表 2 と同様で、変更した加工条件と、切削結果、真球度測定結果を表 3 に示す。

表 3 各種切削条件 (表 1 の 2 工程目) と真球度、表面粗さ

試料	仕上げ切削条件 (変更)	真球度 ( $\mu\text{m}$ )	表面粗さ Ra ( $\mu\text{m}$ )
No. 1	送り速度 : $0.02 \rightarrow 0.015\text{mm/rev}$	22	0.12
No. 2	送り速度 : $0.015 \rightarrow 0.03\text{mm/rev}$ 回転数 : $300 \rightarrow 450\text{rpm}$	19	0.11
No. 3	回数 2 回 取り代片肉 $0.04\text{mm}$	4	0.16
No. 4	送り速度 : $0.03 \rightarrow 0.022\text{mm/rev}$ 回数 1 回	11	0.16

No. 3の試料で最も良い真球度が得られ、頂上部分のいびつ形状が解消された。  
三次元測定チャートを図 1 1 に示す。

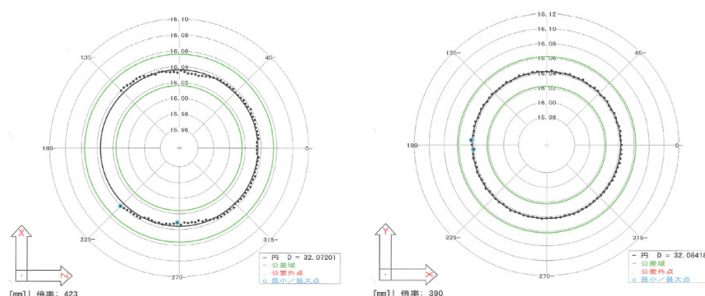


図 1 1 三次元測定チャート (表 3 -No. 3)

左：製品を経線方向に測定 (プロットは、骨頭の頂上部分が右位置になっている)  
右：製品を赤道方向に測定

## (2) 臼蓋の切削加工

材料として Co-Cr-Mo 合金を用い、 $\phi 3.2\text{mm}$  の人工臼蓋形状の切削加工を行った。基本加工工程での使用工具を表 4 に示す。

表 4 基本加工工程での使用工具

荒外径	超硬 R0.8
仕上外径	超硬 R0.4
荒・仕上内径	VP コート R0.4 35°
ドリル	VP コート $\phi 16$
ボールエンドミル	$\phi 3.0$ R1.5
突っ切り	$\phi 3.0$ 超硬 R0.2

表 4 に示す基本加工条件に加え、条件変更や追加設定、刃物交換、プログラム変更なども行いながら加工を進めたが、中央部分にへそ残り (図 1 2 参照)、切削面のびびり (図 1 3 参照) が確認された。そこで、刃物運行方向などの改善検討を行った。

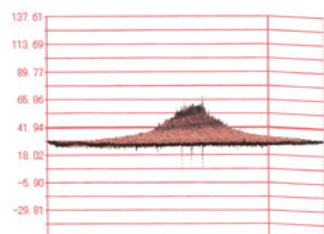


図 1 2 へその状態

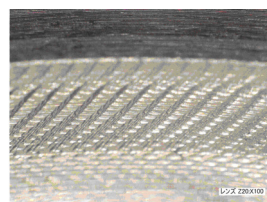


図 1 3 面状態観察写真

(2-1) 切削刃物の運行方向を反対にすることにより、切削状況を検討した。

これまででは、臼蓋の中心部分から外側に向けて刃物を動かしていたが、反対に、外側から中心に向けて動かした。従来方法 (図 1 4) と、改善した切削方法 (図 1 6) について、切削後の三次元測定チャートをそれぞれ図 1 5、図 1 7 に示す。

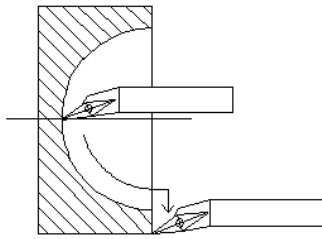


図 1 4 改善前の運行略図

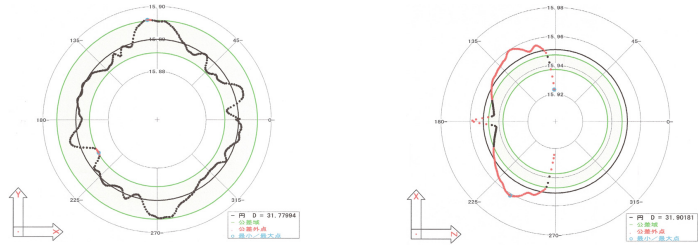


図 1 5 改善前の切削状態三次元チャート

左：製品を赤道方向に測定

右：製品を経線方向に測定（プロットは、  
臼蓋の底部分が左位置になっている）

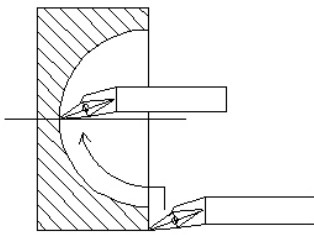


図 1 6 改善後の運行略図

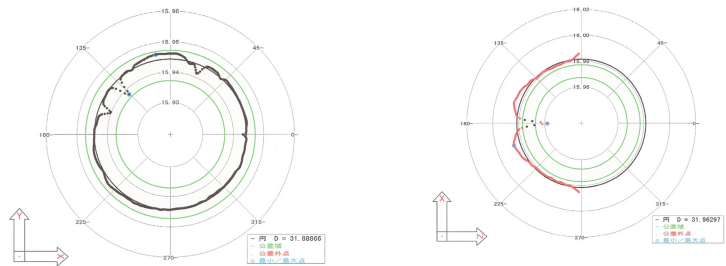


図 1 7 改善後の切削状態三次元チャート

左：製品を赤道方向に測定

右：製品を経線方向に測定（プロットは、  
臼蓋の底部分が左位置になっている）

(2-2) 刃物の抵抗を均一にする目的で、刃物角度を従来の $5^\circ$  から $10^\circ$  に変更して切削状況を検討した。刃物位置の概略を図 1 8 に、変更後の三次元測定チャートを図 1 9 に示す。

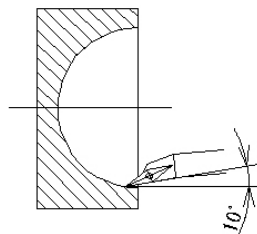


図 2 2：変更後略図

刃物角度  $10^\circ$

（従来は  $5^\circ$ ）

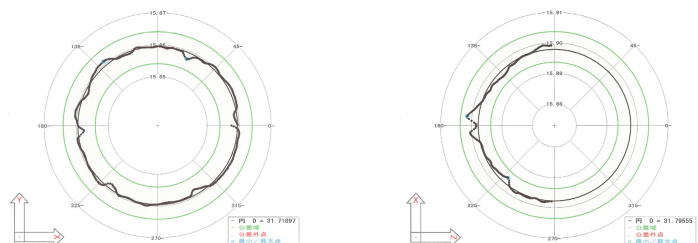


図 2 3 刃物角度変更後の三次元測定チャート

左：製品を赤道方向に測定

右：製品を経線方向に測定（プロットは、  
臼蓋の底部分が左位置になっている）

## ①-2 高精度量産加工検討

切削抵抗に耐えられる治具の検討として、剛性を向上させるため、治具の根元部分をより太く強固なものを製作した。また、上記のほか、焼入れ鋼を用いて製作した治具の写真を図 2 0 に示す。硬度は以下のとおり。

S K 焼入れ鋼	57.6	
比較：Co-Cr-Mo 合金	22.6	（単位：HRC）



図 2 0 焼入れ鋼治具

これらを用いて骨頭の切削精度を検証した結果を表5に示す。焼入れ鋼治具を使用することで、真球度、表面粗さ(Ra)の精度が著しく向上することが判明した。

表5：焼き入れ前後の骨頭切削精度

	真球度最良値	真球度平均値	表面粗さ(Ra) 最良値	表面粗さ(Ra) 平均値
焼入れ鋼治具使用前	11 μm	16 μm	0.13 μm	0.18 μm
焼入れ鋼治具使用后	4 μm	14 μm	0.05 μm	0.13 μm

### ①-3 難削材(チタン合金)高精度真球切削加工の応用

チタン合金の高精度真球切削加工検討として、材料にチタン合金(Ti-6Al-4V)を用い、スフェリカルベアリング形状の切削加工を行った。加工条件を表6に、三次元測定チャートを図21に示す。

表6 加工条件

治具	硬爪	-		
使用工具	外径荒	超硬 80°	内径荒・仕上げ	超硬 60°
	外径仕上げ	超硬 35°	溝内径	巾 1.0
	センタードリル	コーティング	溝外径(突切)	巾 3.0
	ドリル	φ16		
切削方法	荒外形切削後、仕上げ外形切削：同一の切削条件で2回仕上げ切削			

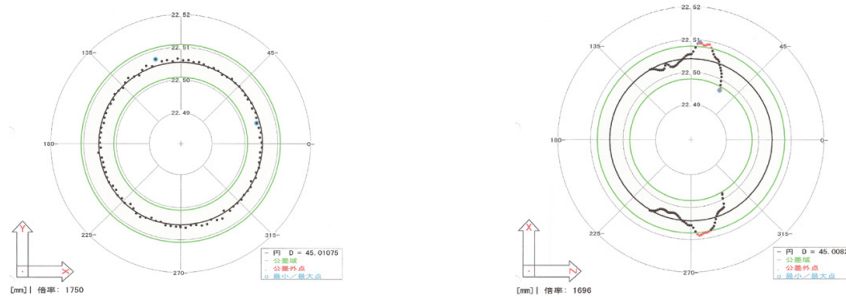


図21 Ti-6Al-4V製スフェリカルベアリング形状加工後の三次元測定チャート  
左：製品を赤道方向に測定 右：製品を経線方向に測定

刃物がRの頂点を過ぎてから、真球形状が崩れだしているので、35°刃物の切れ刃の当たる位置が悪いのではないかと判断し、丸駒チップに換えて再度加工を行った。加工条件を表7に示す。

表7 加工条件

治具	硬爪	-		
使用工具	外径荒	超硬 80°	内径荒・仕上げ	超硬 60°
	外径仕上げ	丸駒 R2.035	溝内径	巾 1.0
	センタードリル	コーティング	溝外径(突切)	巾 3.0
	ドリル	φ16		
切削方法	荒外形切削後、仕上げ外形切削：同一の切削条件で2回仕上げ切削			

結果として、丸駒チップを用いることにより、真球度8~13 μmが得られた。



切削加工後の三次元測定チャートを図 2 2 に示す。

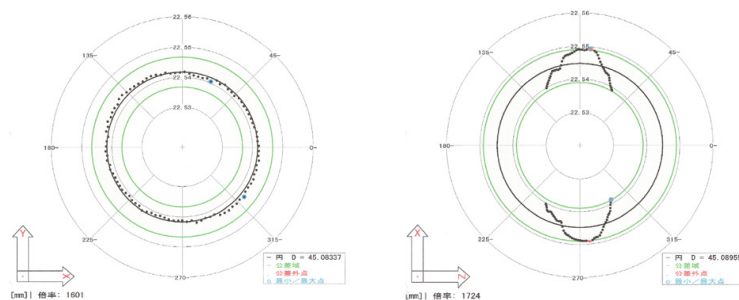
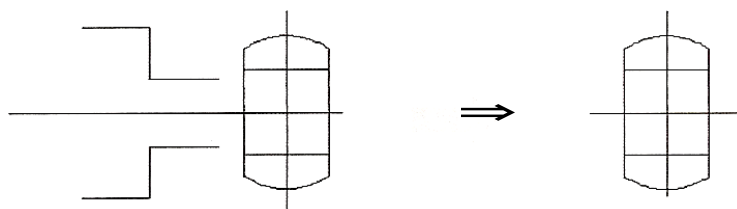


図 2 2 Ti-6Al-4V 製スフェリカルベアリング形状加工後の三次元測定チャート  
 左：製品を赤道方向に測定 右：製品を経線方向に測定

ベアリング形状の加工においても、加工工程、刃物運行方向からの改善検討を行った。

(1) 切削工程の改善

これまでは、切削段階でベアリング形状、仕上がりに近い寸法にしたあと研磨で仕上げていた。



第 1 工程（仕上がり寸法に近い状態に切削） ⇒ 研磨工程へ

図 2 3 従来の加工手順

この方法ではエッジ部分がダれる（両端部分が磨き過ぎる：図 2 4 参照）  
 ことがわかったので、次の方法を検討した。

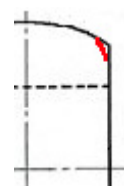
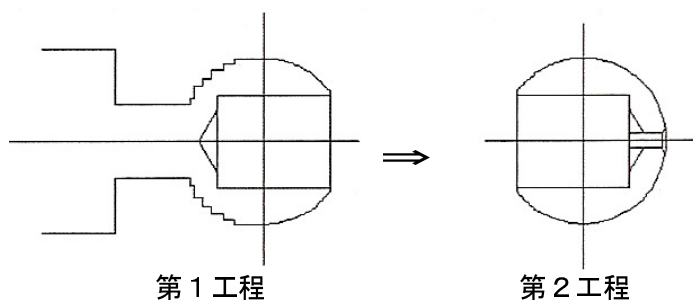
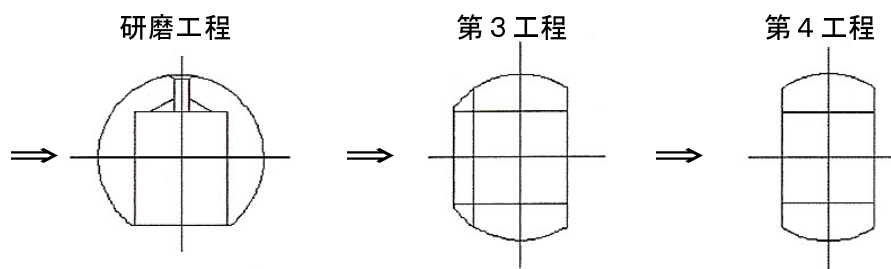


図 2 4 ダレ部分  
 (赤色部分)



切削段階(第 2 工程まで)では、  
 余肉のある状態にしておき、  
 研磨後、余肉部分を切り落とす。  
 (第 3 工程、第 4 工程)



図：2 5 加工手順の改善

この方法により、ダれた部分のないベアリング形状とすることが可能となった。

(2) 刃物運行変更による加工精度向上

真球度の改善を目的に、切削加工条件の見直しを行った。

切削物に当たる刃物の角度、状態を再検討した結果、現行のスクイ付丸駒チップに変えて、スクイなし丸駒チップを使用し、刃物の運行方法を以下のように条件を変えて確認を行った。  
(図26 ①~③)

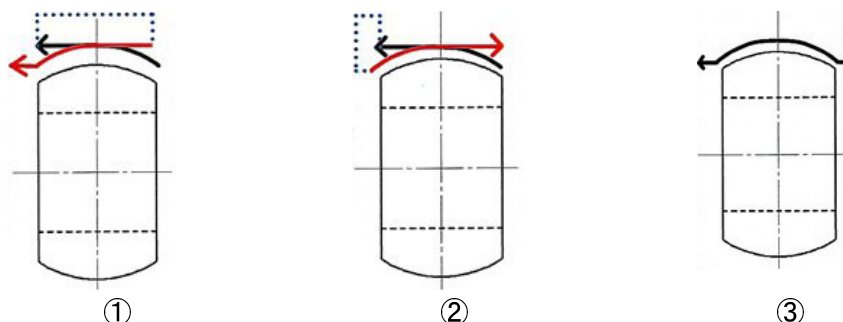


図26：切削加工における刃物運行方向

(従来方法)①：端部から開始、頂上部分で水平に逃げる。  
頂上部分に水平に入り、もう片方の端に進む。

(新方法)②：端部から開始、頂上部分で水平に逃げる。  
もう片方の端部から入り、頂上部分で水平に逃げる。

(新方法)③：端部から開始、もう片方の端部まで進む。

結果、③が最も良い真球度を示した。(表8参照) このときの表面粗さ(Ra)は0.07 $\mu$ mであった。

表8：各切削運行方向における  
Ti-6Al-4V合金切削加工後の真球度測定結果

刃物運行方向	真球度 ( $\mu$ m)
①	8 ~ 13
②	4 ~ 14
③	1 ~ 5

なお、この検証時に、丸駒チップの刃先R形状不良による切削状態不良が発見されている。  
(図27参照) チップ形状、精度、R寸法など、加工精度に大きく影響していることが考えられるので、今後の検証が必要である。

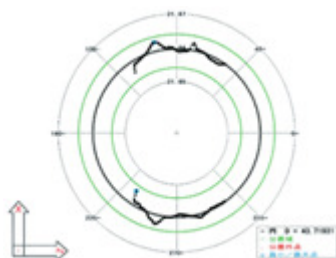


図27 チップ形状不良により切削状態不良が発生した製品の三次元測定チャート(経線方向)

#### ①-4 結果まとめ

Co-Cr-Mo 合金製骨頭、臼蓋形状及びTi-6Al-4V 製スフェリカルベアリング形状の形状加工について得られた加工精度は以下のとおりである。

##### 1) 骨頭について

真球度目標値  $10 \mu\text{m}$  に対して最良値で  $4 \mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

表面粗さ Ra 目標値  $0.25 \mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.05 \mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

骨頭切削加工については最良値で目標を達成し、今後の技術開発課題は歩留まりの向上である。

##### 2) 臼蓋について

真球度目標値  $10 \mu\text{m}$  に対して最良値で  $6 \mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

表面粗さ Ra 目標値  $0.25 \mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.13 \mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

臼蓋切削加工も、最良値では目標を達成した。面のビビリや中心部のへそ残りが完全に解消されたわけではないので、今後も切削条件や工具選定などの検討が必要である。

##### 3) スフェリカルベアリングについて

真球度目標値  $5 \mu\text{m}$  に対して最良値で  $1 \mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

表面粗さ Ra 目標値  $0.5 \mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.07 \mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

スフェリカルベアリングの切削加工精度も、最良値では目標を達成した。ただし、チップ形状による影響が大きいため、今後、チップ形状の再検討、チップ R 径と加工物径との関係検証などが必要である。

## ② 精密研磨加工に向けた研磨技術の開発

### ②-1 難削材(Co-Cr-Mo合金)真球凸形状の研磨加工

#### (1) 斜軸型研磨機を用いた研磨

斜軸型研磨機を用い、表9に示した条件で研磨加工を行った。

表9 斜軸型研磨機 研磨条件

荒研磨		仕上げ研磨	
エア一圧	0.2MPa	エア一圧	0.1MPa
主軸速度	1000rpm	主軸速度	1200rpm
主軸揺動速度	40cpm	主軸揺動速度	40cpm
カンザシ揺動速度	20cpm	カンザシ揺動速度	20cpm
主軸揺動角度	45° ~60°	主軸揺動角度	45° ~60°
砥石	WA#220	砥石	クリスル#1200

研磨時間について、荒研磨は約0.01mm/20minの研磨量で安定している。

仕上げ研磨は最初の1時間で約0.002~0.004mm研磨される。その後、時間をかけて研磨を行っても大きな寸法変化はしていない。

研磨時間と研磨面の仕上がりの良さは比例する。最終仕上げに必要な研磨時間は1時間~2時間である。

#### (2) 円弧球芯型研磨機を用いた研磨

##### (2-1) 研磨条件

円弧球芯型研磨機を用い、表10に示した条件で研磨加工を行った。

表10 円弧球芯型研磨機 研磨条件

荒研磨		仕上げ研磨	
エア一圧	0.3MPa	エア一圧	0 MPa
主軸速度	900rpm	主軸速度	900rpm
主軸揺動速度	40cpm	主軸揺動速度	40cpm
カンザシ揺動速度	10c/min	カンザシ揺動速度	10c/min
揺動角度	-60° ~80°	主軸揺動角度	50° ~80°

研磨量については、荒研磨は約0.03mm/10minで研磨される。しかし、研磨開始後1時間を越えると研磨量が約0.01mm/20~30minに低下し安定しない。仕上げ研磨では斜軸型研磨機と同様、最初の1時間で約0.002~0.004mm研磨される。引き続き研磨を行っても大きな寸法変化はしない。また、仕上がりが斜軸研磨機と比べて悪い。さらに、研磨圧を上昇させると大きなビビリ音が発生した。そのため、軸のブレ、たわみ発生を抑制する目的で、発生軸径をφ20mmからφ25mmに変更し、テーパと軸の繋ぎ目の首の部分をφ8mmからφ10mmへ太くした。

結果、各部を太くする事により研磨治具の剛性が上がり、ブレ、たわみが抑えられビビリ音も解消された。

また、研磨範囲が砥石のサイズにより大きく変化する。円弧球芯型研磨機は主軸が揺動しない為に研磨範囲が制限され、カンザシの揺動終了角度は80°までで制限があるので、砥石の内径の大きさにより研磨範囲をカバーしなければならない。そこで、全Rをカバーするための内径の把握や、研磨効率の確認を、砥石の内径φ25から1mm刻みでφ31まで検証を行った。

## (2-2) 内径把握

検証時の機械条件を表11に、結果を表12に、概略図を図28示す。

表11 研磨の条件

荒研磨、仕上げ研磨共通条件			
球芯角度	17.7度	揺動開始角度	30°
主軸速度	950rpm	揺動終了角度	80°
カンザシ揺動数	10c/min.	使用砥石	荒研磨 WA#220
エア一圧	0.3MPa	使用砥石	仕上げ研磨 クリスタル#2000

表12：研磨結果

内径φ25mm	縁5.5mm残り
φ26mm	縁3.8mm残り
φ27mm	縁2.8mm残り
φ28mm	縁2.0mm残り
φ29mm	縁1.0mm残り
φ30mm	全R OK
φ31mm	北極部へソ残り

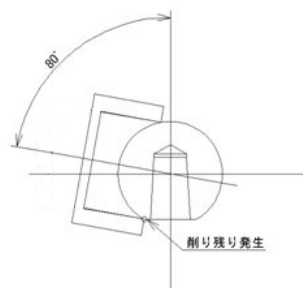


図28：研磨概略図

## (2-3) 研磨効率

砥石φ30にて60分以上研磨を行うとどの様に研磨効率が変わるのかを、機械条件は前記と同様として検証を行った。結果を表13に示す。

表13：切削量

時間(min)	0	0→30	30→60	60→80	80→100	100→130	130→150
研磨時間(min)	—	30	30	20	20	30	20
ワーク直径(mm)	32.08	32.041	32.031	32.02	31.987	31.963	31.911
研磨量(mm)	—	0.039	0.01	0.011	0.033	0.024	0.052

機械条件は一切変更していないにもかかわらず研磨量が非常に不安定である。

## (2-4) 研磨後形状

研磨後の形状を確認したところ、図29のように、歪が生じている事を確認した。

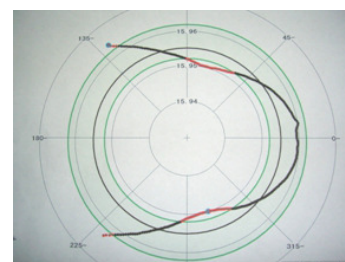


図29 三次元測定チャート  
(経線方向に測定)

## (2-5) 円弧球芯型研磨機のまとめ

これまでの結果から、円弧球芯型研磨機での真球度と全R研磨の高レベルな両立は不可能といえる。結果、今後は斜軸型研磨機のみで研磨検証を行なうこととした。

### (3) 斜軸型研磨機での検証

#### (3-1) 研磨条件

斜軸型研磨機の研磨条件について検証を行い、最良と判断した研磨条件を表14に示す。

表14：斜軸型研磨機の研磨条件

	荒研磨	仕上げ研磨
主軸速度	1000rpm	1200rpm
主軸揺動角度	45～60°	45～60°
主軸前後揺動速度	40cpm	40cpm
カンザシ前後揺動速度	20cpm	10cpm
エア一圧	0.2Mps	0.1Mps
主軸前後揺動	自動	自動
カンザシ強制回転	停止	停止

#### (3-2) 研磨砥石

使用する砥石について、従来の荒研磨 #220 を経て仕上げ研磨 #2000 という工程から荒研磨から中仕上げ、または仕上げ研磨後に最終仕上げという様にして、精度向上と研磨時間の短縮を検討した。砥石種類は今までと同様、荒研磨はWA、仕上げはクリスタルとし、番手を以下のとおり変更した。

WA 砥石 : #220 #320 #600 #800 #1000  
クリスタル砥石 : #1000 #1500 #2000 #3000

#### WA 砥石

20分おきに直径を計測しながら連続して研磨を行い、研磨量を測定した。結果を表15に示す。

表15：WA 砥石による研磨量(mm)

	0→20min	20→40min	40→60min	60→80min	80→100min	100→120min
#220	0.029	0.024	0.024	0.029	0.024	0.022
#320	0.056	0.041	0.034	0.028	0.041	0.031
#600	0.066	0.037	0.034	0.040	0.035	0.034

#800, #1000 は砥石の磨耗が激しく、使用、検討が出来る状況ではなかった。  
#320, #600 は研磨量が安定しない。

#### クリスタル砥石

20分おきに直径を計測しながら連続して研磨を行い、研磨量を測定した。結果を表16に示す。

表 16 : クリスタル砥石による研磨量 (mm)

	0→20min	20→40min	40→60min
クリスタル #1000	0.123	0.056	0.127
クリスタル #1500	0.002	0	0.001
クリスタル #2000	0.001	0	0
クリスタル #3000	0.001	0	0

#1500, 2000, 3000 は殆ど寸法変化がなく安定している。#1000 は切削量が大きく安定しない。また表面状態も磨き傷が目立つ。他の 3 種は寸法変化もなく表面状態も良好だが #1500 は若干の磨き傷が見られた。#2000 の後に #3000 で研磨を行うと磨き傷もほぼ無くなり綺麗な研磨面となった。

結果として荒研磨は従来どおり #220 とし、仕上げ研磨 (2 種類) を経て最終仕上げの工程とした。変更前と変更後では精度にも差が出ており真球度、表面粗さともに精度が向上した。(表 17 参照)

表 17 : 改善前と改善後の精度結果比較

	真球度	真球度	表面粗さ (Ra)	表面粗さ (Ra)	表面粗さ (Rz)	表面粗さ (Rz)
	最良値	平均値	最良値	平均値	最良値	平均値
改善前	1.2 $\mu\text{m}$	3.3 $\mu\text{m}$	0.02 $\mu\text{m}$	0.03 $\mu\text{m}$	0.17 $\mu\text{m}$	0.24 $\mu\text{m}$
改善後	0.4 $\mu\text{m}$	1.6 $\mu\text{m}$	0.003 $\mu\text{m}$	0.005 $\mu\text{m}$	0.006 $\mu\text{m}$	0.017 $\mu\text{m}$

改善前 : WA# 220 → クリスタル # 2200

改善後 : WA# 220 → クリスタル # 2000 → クリスタル # 3000

### (3-3) 最終研磨

#### バレル研磨

最終研磨としてバレル研磨を検討した。バレル研磨では、面全体を均一に研磨されるので真球度が崩れる恐れはないと考えられる。メディアはクルミチップを使用した。

#### 結果

非常に仕上り面が良好であり真球度も影響される事もなく微細な磨き傷がなくなった。また、砥石では時間と共に比例して表面粗さは向上するが大きく時間を要する為、最終研磨でバレル研磨を行った方が結果として精度も良く、時間短縮につながる。バレル研磨時間は 1 時間で仕上がる。

### (3-4) 研磨時間

WA 砥石 #220 を使用の場合 10 分で約 0.01~0.015mm、1 時間で約 0.06mm 研磨されることになる。荒研磨の研磨時間は削り代の大きさと狙い寸法の差により左右されるが、平均で約 3 時間である。

仕上げ研磨のクリスタル砥石 #2000 は最初の 1 時間で約 0.002~0.004mm 研磨される。その後時間をかけても大きな寸法変化は見られない。#3000 ではほぼ寸法変化は無い。表面状態により時間の配分は微調整するがトータルで約 1 時間である。バレル研磨は 1 時間で仕上がる。仕上げ研磨では以前は 3 時間かかっていたものが最終仕上げを含め約 2 時間に短縮された。

## ②-2 難削材 (Co-Cr-Mo 合金) 真球凹形状の研磨加工

臼蓋形状の研磨条件の把握を行う。

### (1) 既存の弾性をもった砥石にて研磨を行う方法

既存の弾性を持った砥石を半球状に加工して製作し、またこれを保持するための治具も考案、製作を行い斜軸型研磨機にて研磨を行った。研磨条件を表 1 8 に、治具写真を図 3 0 に示す。

表 1 8 臼蓋の斜軸研磨機による研磨の条件

荒研磨		仕上げ研磨	
エア一圧	0.2MPa	エア一圧	0.2MPa
主軸速度	500rpm	主軸速度	500rpm
主軸揺動速度	72cpm	主軸揺動速度	72cpm
カンガシ揺動速度	10cpm	カンガシ揺動速度	10cpm
主軸揺動角度	20° ~ 30°	主軸揺動角度	20° ~ 30°
主軸揺動	自動	主軸揺動	自動

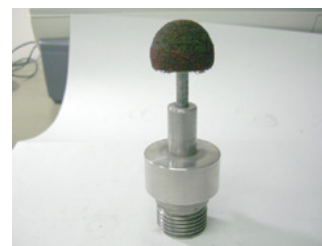


図 3 0 考案した治具

結果として、Co-Cr-Mo 合金が非常に硬いため時間がかかる。ダイヤモンドコンパウンドを併用しても大きな変化はない。また研磨を進めていくと中心部のみが減ってゆき、縁に近づくにつれ研磨効率が低下していた。機械条件を変更しても同様の結果であった。この方法は部位による研磨圧が均一でなく、また砥石と臼蓋が完全に同一 R でないと R 全体を研磨するのは不可能と考えられる。

### (2) 円柱状の砥石にて研磨を行う方法

円柱の砥石を揺動させ、円周上の線接触により R 全体にあてる方法を考えた。砥石は骨頭で使用している同じ番手とし、臼蓋の中に入る大きさのものを数種類考案し製作した。またこれを保持する為の治具も考案した。砥石と治具写真を図 3 1 に示す。

これについては、斜軸型、円弧球芯型の両方で検証を行った。

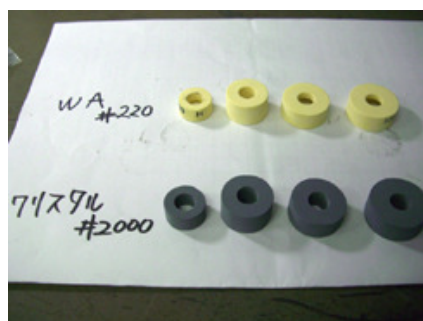


図 3 1 検証した円柱状の砥石(左) と 考案した砥石を保持する治具(右)

#### (2-1) 斜軸型研磨機にて研磨を行った結果

研磨条件を表 1 9 に示す。



表 19 臼蓋の斜軸研磨機による研磨の条件

荒/仕上げ研磨条件 (1)		荒/仕上げ研磨条件 (2)	
エア一圧	0.1MPa	エア一圧	0.2MPa
主軸速度	100rpm	主軸速度	150rpm
主軸揺動速度	15cpm	主軸揺動速度	15cpm
カンザシ揺動	無	カンザシ揺動	無
主軸揺動角度	30~60°	主軸揺動角度	10~60°
アーム長	手前 20mm	アーム長	手前 23mm

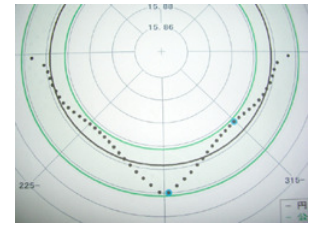


図 3 2

臼蓋の三次元測定チャート  
(経線方向に測定)

小さい砥石の場合、臼蓋との接触面積が少なく大きく揺動させると脱落し、大きい砥石の場合、臼蓋の縁と砥石が接触して研磨が出来なくなる。直径 28mm のものが安定していた。全 R は研磨可能となったが中心部が大きく削れ 45° 付近がほとんど削れない形状となった。(図 3 2 参照) 斜軸型研磨機はカンザシが前後に動き下に押さえつけるだけなので、揺動して中心から離れると、圧が小さくなるため、この様な減り方になると考えられる。

(2-2) 円弧球芯型研磨機にて研磨を行った結果

研磨条件を表 2 0 に示す。研磨後の状態を図 3 3 に示す。

表 2 0 臼蓋の円弧球芯型研磨機による研磨の条件

荒/仕上げ研磨			
エア一圧	0.1MPa	揺動開始角度	0°
主軸速度	80rpm	揺動終了角度	80°
カンザシ揺動数	10c/min	球芯角度	21.3°
研磨砥石	30mm		



図 3 3

臼蓋の磨き残り…赤い範囲

斜軸型研磨機で使用していた砥石の大きさでは縁と中心部があたらない。30mm の砥石を使用し再トライするが中心部にわずかな磨き残しがあり、最大にまで揺動角度を大きくしてみるが、同様の結果であった。真球度は斜軸型研磨機よりもわずかに良いだけといった結果であった。

(3) 研磨皿にパッドを貼り付けて研磨を行う方法

研磨皿にパッドを貼り付け臼蓋とパッドの間に研磨剤ダイヤモンドスラリー6μm を介在させ、円弧球芯型研磨機で研磨した。研磨条件を表 2 1 に、治具を図 3 4 に示す。

表 2 1 臼蓋の円弧球芯型研磨機による研磨の条件

荒研磨		仕上げ研磨	
エア一圧	0.1MPa	エア一圧	0.1MPa
主軸速度	200rpm	主軸速度	80rpm
カンザシ揺動数	15c/min	カンザシ揺動数	10c/min
揺動開始角度	0°	揺動開始角度	0°
揺動終了角度	60°	揺動終了角度	80°
球芯角度	31.7°	球芯角度	21.3°



図 3 4 パッド貼り付け研磨皿

結果として、底部はよく研磨されているが、縁に近づくにつれ切削効率が落ち、また、均一でないため、研磨はできているが当たりが弱い。揺動範囲を大きくしたが大きな変化はなかった。研磨時間を増加させても同様の結果であった。また、研磨効率が非常に低く、粒子の大きいダイヤモンドコンパウンドを使用して研磨を行ったが、大きな変化はなく、真球度も改善されなかった。

#### (4) 研磨皿と臼蓋をすり合わせて研磨を行う方法

これまでと逆に、臼蓋のRに沿わせて研磨を行うといった方法を検討した。臼蓋よりもわずかに大きい研磨皿を使用し、研磨材としてダイヤモンドコンパウンドを使用し、お互いにすり合わせて研磨皿を落とし込んでゆく方法であるが、結果として、臼蓋の直径よりも大きな研磨皿を使用するので縁の部分が広がってしまうが、R全体を研磨出来た。真球度も10 $\mu$ m以下でほぼ安定している。

円弧球芯型と斜軸型の両方で研磨を行ったが、円弧球芯型研磨機の方の研磨精度が良好であった。

以上の結果、(4)の方法で円弧球芯型研磨機を用いて研磨を進めた。荒研磨条件を表22に示す。

表22 臼蓋の円弧球芯型研磨機による荒研磨の条件

エア一圧	0.1MPa	揺動開始角度	-5° ~0°
主軸速度	40rpm	揺動終了角度	5° ~10°
カンザシ揺動数	5c/min	研磨材	ダイヤモンドコンパウンド#1200、#2000

研磨剤としては、水溶性のダイヤモンドコンパウンドを主に使用した。#5000以上で研磨を行うと逆に磨き傷が付くことが分かった。コンパウンドが団粒構造を呈しているものと考えられる。

また油性のものも試してみたが、相性が悪いようで仕上げ研磨で綺麗にならなかった。

ケイ素系の研磨剤も試したがサラサラしており、すり合わせすぐに乾燥し食いつきが起った。

結果として、なるべく負荷が掛からないように揺動を開始し、終了角度を小さくし主軸回転も落とし、微調整をして研磨を行う。

次に、仕上げ研磨を、表23の条件で行った。

表23 臼蓋の円弧球芯型研磨機による仕上げ研磨の条件

エア一圧	0.1MPa	揺動開始角度	-5° ~30°
主軸速度	50~100rpm	揺動終了角度	10° ~30°
カンザシ揺動数	5c/min	研磨材	ダイヤモンドコンパウンド#3000、#5000

揺動角度は大きく振り過ぎると磨き傷の原因となるので、30°位で留めた。研磨時間について、荒研磨では直径約0.02~0.03mmの範囲で研磨され、ブランクの表面状態により1時間~4時間の研磨時間を要した。仕上げ研磨では、直径約0.01~0.02mmの範囲で研磨される。おおよそ#3000で1時間~3時間、#5000で1時間~2時間の研磨時間を要した。

さらに、研磨治具として、臼蓋を主軸に取り付ける為の治具と研磨皿を考案した。研磨皿は鉄、焼入れ鉄、銅の3種類の材質で用意し研磨をおこなった。結果を表24に示す。

表 2 4 研磨皿の材質を変えたときの研磨評価結果

	鉄	焼入れ鉄	銅
真球度	13 $\mu\text{m}$	7 $\mu\text{m}$	3~7 $\mu\text{m}$
Ra	0.04~0.06 $\mu\text{m}$	0.03 $\mu\text{m}$	0.04~0.05 $\mu\text{m}$
Rz	0.39~0.78 $\mu\text{m}$	0.2~0.26 $\mu\text{m}$	0.31~0.43 $\mu\text{m}$
状態	細かい磨き傷有り	深い磨き傷が付く。 摩耗性は良い	磨き傷が付きにくい様で表面の仕上がりは良い。摩耗が早く研磨時間長め

研磨皿の鉄、焼入れ鉄、銅の3種類の材質の差による影響ははっきりとは見受けられなかった。金属同士の研磨によるカジリと研磨剤により磨き傷が出来るのが大きな原因であると考えられる。

このように、研磨皿を使用したすり合わせによる研磨方法では研磨時間が長く、また金属同士をすり合わせているので研磨面に磨き傷が入り研磨面の向上には限界があった。また、すり合わせにより研磨皿もワークと共に研磨されて小さくなってゆく。したがって研磨皿は再利用は出来ない。結果、大きなコストがかかり、品質にも問題がある事から、この研磨方法は現実的ではない。

#### (5) 新たな研磨方法の考案

円弧球芯型研磨機は凸凹どちらも研磨可能であり、指定したRに倣ってカンザシが動くことから、主軸にワークを取り付け、カンザシ側に砥石を取り付けてやればワークのRにならった動きをする。これで砥石をワークに接触させ、研磨可能かどうか検証した。

半球状で全Rを点接触させようとした場合、カンザシが90°まで揺動しないと赤道まで研磨が不可能である。また仮に90°まで揺動したとしても臼蓋の縁の部分と治具が接触する事になる。したがって機械的に点接触させる事は不可能といえる。

線接触での場合、研磨砥石は円柱状のものを使用しその円周状で線接触させてカンザシを揺動、主軸を回転させる。またカンザシが80°までしか振らないので磨き残りが発生する事になる。磨き残りを、砥石の直径を大きくしてカバーする事により全Rが研磨可能になるかの検証を行った。

円筒状の砥石を保持するための形状を考案し製作した。外観を図35に示す。



①円筒の砥石を保持させ  
その上にカンザシ受けを  
付けたもの



②円筒の砥石を保持させ  
その上に軸を延ばして  
カンザシ受けを付けたもの



③カンザシと砥石ホルダーを  
一体物にしたもの

図 3 5 考案した研磨治具の外観

### ①の治具の検証

表 2 5 ①の研磨評価条件

球芯角度	31.3°	主軸速度	100rpm
揺動開始角度	0°	エア一圧	0.05MPa
揺動終了角度	70°	砥石	直径 2.3mm 高さ 1.0mm
カンザシ揺動数	10c/min		

#### 結果

揺動角 0° の時は主軸回転と共に共回りしていたが、揺動角が増加しカンザシが傾斜していくと砥石は傾斜せず水平の状態を維持し続け、揺動しなかった。砥石の動きはバタつきがあり全く安定していない。さらに揺動角度を増加していくとカンザシから砥石の脱落がおこった。研磨圧が足りない為かと思い 0.2MPa まで上昇させたが、同様の結果であった。カンザシの揺動角が増加しても砥石は追従せず水平を保ったままであり、カンザシの揺動の動きに砥石が追従出来ない事が分かった。

### ②の治具の検証

表 2 6 ②の研磨評価条件

球芯角度	31.3°	主軸速度	950rpm
揺動開始角度	0°	エア一圧	0.2MPa
揺動終了角度	55°	砥石	直径 2.0mm 高さ 1.0mm
カンザシ揺動数	10c/min		

#### 結果

カンザシの揺動に追従して砥石が移動し、脱落する事もなく動きは良好であった。また、図 3 6 のように研磨前と研磨後では全く異なり R の線が綺麗な球状をしている。揺動時の砥石のバタつきもなく安定しており、この研磨方法は非常に有効である。

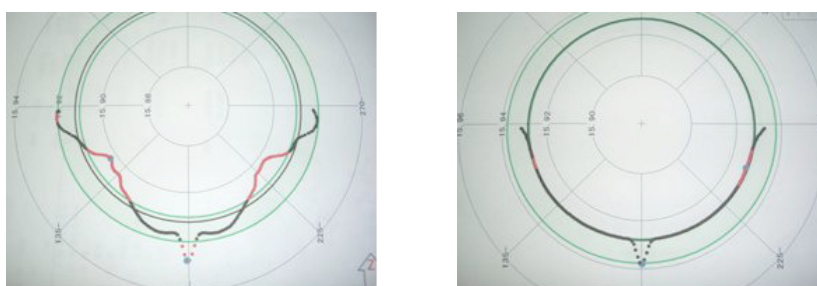


図 3 6 三次元測定チャート(左)研磨前 (右)研磨後 (経線方向に測定)

### ③の治具の検証

表 2 7 ②の研磨評価条件

球芯角度	31.4°	主軸速度	800rpm
揺動開始角度	-30°	エア一圧	0.1MPa
揺動終了角度	55°	砥石	直径 2.3mm 高さ 1.0mm
カンザシ揺動数	5c/min		

## 結果

研磨範囲は 45° 付近から下が研磨されず砥石が当たっていない状態であった。エア一圧を 0.3MPa に上昇させたが砥石が偏減りするだけであった。砥石の動きを観察した結果、砥石が減ってゆくとつれてセンターがズレていき、これが原因で揺動させた時に砥石の円周があたらず偏減りしている。この事から球面を磨く為には砥石とカンザシの接触部はフレキシブルに動かないと研磨は不可能である事が分かった。従ってこの治具での研磨は不可能といえる。

### (6) 研磨砥石の検討

(5)-②の治具で研磨が可能であると分かったので次に砥石の検討を行う。

直径φ20、21、22、23、24、25、28、30(mm)の異なる大きさの砥石を製作し検証を行った。

検証時の機械条件は表28に、結果を表29に示す。

表28 研磨条件

エア一圧	0.2MPa	揺動開始角度	0°
主軸速度	950rpm	揺動終了角度	研磨範囲を観察し調整
カンザシ揺動数	10c/min		

表29：砥石直径及び揺動角度を変化させたときの研磨状況 (砥石直径：mm)

揺動角度	φ20,21,22	φ23	φ24	φ25	φ28	φ30
0~45°	バタつき ブレ発生	中心4mm 縁3mm 磨き残り	縁2mm 磨き残り	中心5mm 縁0.1mm 磨き残り	中心10.5mm 磨き残り	—
0~50°	—	中心1mm 縁2mm 磨き残り	縁1.5mm 磨き残り	中心2.8mm 磨き残り	中心8.1mm 磨き残り	—
0~55°	—	縁1mm 磨き残り	縁0.5mm 磨き残り	中心0.6mm 磨き残り	中心6.1mm 磨き残り	—
0~60°	—	縁0.2mm 磨き残り	縁0.2mm 磨き残り	全面OK	中心3.9mm 磨き残り	中心8.6mm 磨き残り
0~65°	—	全面OK	縁0.1mm 磨き残り	—	中心1.7mm 磨き残り	中心6.4mm 磨き残り
0~67°	—	—	全面OK	—	—	—
0~70°	—	—	—	—	全面OK	中心4.7mm 磨き残り
0~75°	—	—	—	—	—	中心2.2mm 磨き残り
0~80°	—	—	—	(研磨歪発生)	—	全面OK

### 検証結果

φ25mm 以上は磨き残しが中心に残る傾向にある。荒研磨ではφ23~φ25mm では大きな差はみられず安定している。特にφ24 及びφ25mm が真球度も良好であった。目視確認では全面を均一に研磨出来ている。ただ、砥石φ25mm、揺動終了角度80° と設定した場合、縁と45° 付近が大きく切削されている事が分かった。揺動角度が大きい為にこの様な形状になったと考えられる。研磨範囲だけを考慮して揺動角度を増加させても真球度は崩れる。これにより砥石が全Rにあたる様に最小限の角度範囲にする為、φ24、25mm の両方で揺動終了角度を検証した結果、60° ~67° の範囲が一番適しているという結果となった。従ってφ24 及びφ25mm の2種類から状態を見ながら選択し研磨を行った。

(7) 砥石の再検討

表面粗さ向上と研磨時間短縮の為、砥石番手の検証を行った。砥石サイズは 25×10×t10 とした。

表 3 0 研磨条件

エア一圧	0~0.2MPa (仕上げ研磨では表面状態を観察しその都度微調整)
主軸速度	950rpm
揺動開始角度	0°
揺動終了角度	65° (研磨範囲を観察しその都度微調整)
カンザシ揺動数	10c/min

表 3 1 : 使用砥石と研磨状態

砥石	研磨状態
WA # 320	磨き傷が多数入りその傷をまた消すのにも時間がかかる為、使用は難しい
WA # 600	切削効率も程良く、磨き傷の深さも#220 と比べ浅く仕上げ研磨は容易
WA # 800	砥石の磨耗が異常に激しく、磨き傷も深くコバルトクロムには不向き
WA #1000	砥石の磨耗が異常に激しく、磨き傷も深くコバルトクロムには不向き
クリスタル #1500	砥石の磨耗は普通であるが細かい磨き傷が入りツヤが出ない
クリスタル #3000	砥石の磨耗も小さくツヤはあり表面状態は良好

WA 砥石では、砥石が細くなるにつれ砥石の磨耗が大きくなる現象がみられた。しかし#600 は磨き傷も一番小さく切削量も極端に大きくないので荒研磨としては#600 のみを使用する事とした。

クリスタル砥石では#1500 は細かい磨き傷が入りツヤはあまり出ない。中研磨として使用してみたが結果的に時間が掛かり使用は難しい。#3000 は微細な研磨傷は残るがツヤは出て良い。#2000 の後に#3000 を入れる事により研磨傷もほぼなくなった。これにより、仕上げ研磨は#2000 の後に#3000 と併用して使用する事とした。(表 3 2 参照)

表 3 2 : 砥石一覧

	荒研磨砥石	仕上げ研磨砥石
改善前	WA #220	クリスタル #2000
改善後	WA #600	クリスタル #2000→クリスタル #3000

この研磨方法に変更した事により、真球度、表面粗さ、全てにおいて精度向上がみられた。結果を表 3 3 に示す。

表 3 3 : 改善前後の精度

	真球度 最良値	真球度 平均値	表面粗さ (Ra) 最良値	表面粗さ (Ra) 平均値	表面粗さ (Rz) 最良値	表面粗さ (Rz) 平均値
改善前	1.0 μm	5.0 μm	0.03 μm	0.04 μm	0.21 μm	0.29 μm
改善後	0.7 μm	2.3 μm	0.002 μm	0.005 μm	0.009 μm	0.023 μm

## (8) 研磨時間

### 荒研磨

荒研磨では研磨量にバラつきがみられる為、現時点での臼蓋の荒研磨は機械加工の面が無くなるまで確認を行ないながら研磨を行い、時間としては概ね 10 分～20 分で完了する。

### 仕上げ研磨

状態を確認しながら時間を微調整するが、#2000 で 10 分～30 分、#3000 で 20 分～30 分である。

### 結果

研磨皿による研磨時間では合計 8 時間掛かっていたものが、新しい研磨方法により 1.5 時間以内に研磨可能となり大きく時間短縮を行う事が出来た。ただし、表面状態の仕上がり具合によりシビアな微調整を、その都度行わなければならない。

## ②-3 難削材(Ti 合金)真球研磨加工の応用

スフェリカルベアリングの研磨条件把握を行う。

### (1) 研磨方法の考案

#### (1-1) ベアリングを挟み込んで保持

ベアリングを治具で挟み込んで固定し研磨を行った。

(図 5 3 参照)

砥石は骨頭で使用しているクリスタル砥石#2000 を使用した。

斜軸型、円弧球芯型両方で研磨を行ったが、結果としてはどちらも両サイドが極端に切削されてゆき真球度が全く出なかった。機械条件を変更しても同様の結果であった。砥石が柔らかいのでこれが原因と考えられ、WA 砥石を使用した結果は同じであった。

真球度は  $10\mu\text{m}$  以上であり、目標未達成の値である。



図 3 7 治具写真  
両サイドでサンドして保持

#### (1-2) ベアリングが球体になる様に治具で挟み込んで保持

(1-1)の方法では両サイドが空いている為、ここに研磨圧が逃げて極端な減り方の原因になっていると考え、治具で球になる様にして治具ごと研磨を行うといった方法で行った。(図 5 4 参照)

斜軸型、円弧球芯型で研磨を行ったが、結果としては、どちらも(1-1)と同じ結果であった。

研磨量が足りない為と考え、WA 砥石にて約  $0.03\text{mm}$  研磨を行ったが、さらに形が崩れていくだけであった。また内径の大きいものでも試したが、改善されなかった。

真球度は  $10\mu\text{m}$  以上であり、目標未達成の値である。



図 3 8 治具写真  
球体になる様に  
治具で挟み込んで保持

三次元測定チャートを図39に示す。

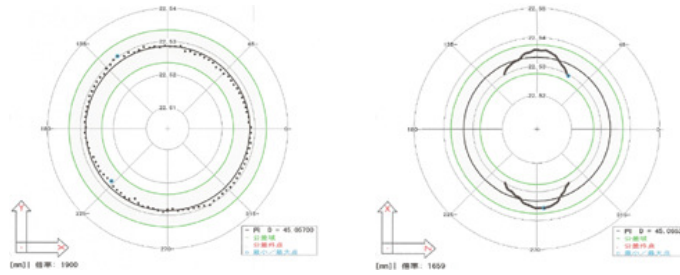


図39 Ti-6Al-4V製スフェリカルベアリング形状研磨後の三次元測定チャート  
左：製品を赤道方向に測定 右：製品を経線方向に測定

(1-3) R4.5mmの研磨皿にパッドを貼り付けすり合わせて研磨

大きく研磨を行なうと形が崩れていくので、表面を一層だけ研磨するといった方法で行った。円弧球芯型では研磨皿が小さく縁までとどかないので、斜軸型でのみ行った。研磨治具を図40に示す。



図40 治具…同Rの皿にパッドを貼り付け

表34 研磨前後の測定結果比較

状態	切削後球径 (mm)	真球度 ( $\mu\text{m}$ )	表面粗さ(Ra) $\mu\text{m}$		表面粗さ(Rz) $\mu\text{m}$	
			60°	90°	60°	90°
研磨前	45.068	0.010	0.18	0.12	1.23	1.25
研磨後	45.062	0.009	0.03	0.03	0.23	0.20

(1-4) 最終仕上げとしてバレルを用いた研磨

チタンは柔らかく現在ある砥石では光沢が出ない。既存のパフを使用して手研磨を行う事も可能ではあるが、磨き傷が付いたり真球度が崩れて精度が出ない恐れがある。バレルでは均一に研磨されるので、磨き傷や真球度が崩れる恐れはない。メディアはクルミチップを使用して研磨を行った。結果として、非常に仕上り面が良好であった。

以上より、(1-3)と(1-4)の併用という方法でスフェリカルベアリングの研磨を進めた。研磨条件を表35に示す。

パッドを使用するので熱を持ちやすいため、主軸回転を落として出来るだけ摩擦しない様にし、また、縁に付いているバイト目が消えにくいため、カンザシを揺動させる研磨方法をとった。

表35 研磨条件

エア一圧	0.1MPa	アーム長	奥へ 28mm
主軸速度	100rpm	カンザシ揺動速度	20cpm
主軸角度	60°	カンザシ揺動幅	5mm
主軸揺動	停止	研磨材	ダイヤモンドコンパウンド#220



研磨時間は約4時間～7時間で、直径約0.01～0.03mm研磨された。最終仕上げのバレル研磨は1時間実施した。研磨材はダイヤモンドコンパウンド#220を使用した。

当初、金属が柔らかいので大きな磨き傷が入ることを避けるため、#1000台を使用していたが、切削効率が悪い為に大幅に番手を下げた。仕上がりは良好であった。研磨材としてダイヤモンドスラリー、ケイ素系も試してみたが、切削効率が悪く研磨時間が大幅に増加する為に除外した。

結果として、真球度9μmを得たが、目標未達成であった。研磨皿を使用しての研磨は、カンザシを揺動させ一層だけ表面を削るといった方法が良い様である。しかし、この研磨方法は安定性、効率ともに問題がある。結局、安定性等を考えると、やはり砥石を使った研磨方法が良いと判断し、砥石の番手の再検討、研磨方法を考えることにした。

## (2) 研磨機の選択

スフェリカルベアリング形状を研磨する場合、円弧球芯型か斜軸型のどちらの研磨機が適しているのかまだ確定していなかったが、円弧球芯型の場合、骨頭研磨でも述べたとおり、主軸が動かずカンザシ揺動終了角度が80°までであり全Rをカバーし研磨するには砥石を大きくする必要あるが、この方法では真球がくずれる。

そのため、スフェリカルベアリングの、砥石を使用した研磨については、斜軸型研磨機を使用することとした。

## (3) 研磨方法の検証

スフェリカルベアリングの研磨結果については、縁が大きく削れ、ダレた様な形状をしていた。この原因は砥石とTi合金との相性が悪い為なのか、研磨方法が合っていない事によるものなのか不明であった為、検証を行った。

Co-Cr-Moを使用し、同形状で製作したものを研磨したところ、Ti合金と同様のダレが生じた。この事から、研磨方法に問題があると考え、ベアリングの形状を変更し幅を大きくし研磨後、両端面を切削する事となった。(図4-1及び前述の図2-5参照) 検証時の研磨条件を表3-6に示す。

表3-6 検証時の研磨条件

エア圧	0.05MPa
主軸速度	500rpm
カンザシ前後揺動速度	10cpm
カンザシ揺動幅	10mm
主軸揺動角度	60° (固定)
カンザシアーム長	手前40mm
突き出し量	50mm

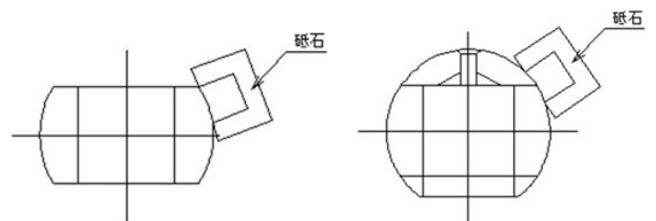


図4-1 研磨概略図

(左：従来 右：幅を大きくして研磨)

砥石はクリスタル#3000で仕上げ研磨のみで仕上げた。

外観は特に問題は無く仕上がりは良かったが、砥石の消耗は大きい。しかし縁の形状はダレておらず、綺麗なR形状であった。ダレの原因は砥石とワークの接触面積に関係すると考えられる。

(4) 砥石の検証

表面粗さ向上と研磨時間短縮を目的として砥石の検証を行った。結果を表37に示す。

表37 検証結果

砥石	結果
WA 砥石 #1000 で荒研磨後 クリスタル #3000 で仕上げ研磨	外観は荒研磨による磨き傷が付いており仕上げ研磨で取りきれない。砥石の消耗も大。ツヤは無い
WA 砥石 #1000 で荒研磨後 クリスタル #2000 で仕上げ研磨	外観は荒研磨による磨き傷が付いており使用は難しい。砥石の消耗も大。ツヤは無い
クリスタル砥石 #1500 中仕上げ研磨後 クリスタル #3000 にて仕上げ研磨	外観は磨き傷も無く良好 ツヤは無い
クリスタル砥石 #2000 中仕上げ研磨後 クリスタル #3000 にて仕上げ研磨	外見は磨き傷も無く良好 ツヤは無い
クリスタル砥石 #2000 仕上げ研磨のみ	外見は深い磨き傷も無く良好 ツヤは無い
クリスタル砥石 #3000 仕上げ研磨のみ	外見は磨き傷も無く良好 ツヤは無い

検証の結果、WA での荒研磨は Ti 合金との相性も悪い様で砥石に異常磨耗が見られた。また表面状態も悪く仕上げ砥石では荒研磨での傷が取りきれない程の深いものであった。

クリスタル砥石で仕上げたものでは1種類のみと2種類併用とでは仕上がり、研磨時間共に大きな差は見られなかった。ツヤはやはり出ないが #2000 #3000 で研磨したのを見た目では仕上がりも良く研磨時間もかからないと思われる。表面状態をみてこの2種類を使用する事とした。

(5) 研磨条件

研磨効率に大きく関わる部分の機械条件を変更し検証を行った。

- ・ 主軸回転を 500rpm 750rpm 1000rpm に変化させた場合は主軸回転が大きくなる比例して砥石の磨耗が大きくなった。
- ・ カンザシ前後揺動速度を 5cpm 15cpm 20cpm に変化させた場合、大きな変化は見られなかった。
- ・ エアー圧を 0MPa 0.1MPa 0.2MPa に変化させた場合はエアー圧に比例し砥石の磨耗が大きくなった。0 MPa の時では表面状態はツヤがやはり出ないが磨き傷もなく表面状態は良い。Ti 合金を研磨する場合、研磨圧を出来るだけ小さくした方が適していると考えられる。

最終的にスフェリカルベアリングの研磨条件は表38の通りとした。

表38 研磨条件

エアー圧	0MPa	カンザシ前後揺動速度	10cpm
主軸速度	300rpm	カンザシ前後揺動幅	10mm
主軸揺動角度	60°	カンザシアーム長	手前 40mm
主軸揺動	固定	カンザシ突き出し量	50mm

## (6) 最終仕上げ研磨

Ti 合金は砥石の番手を変更し検証を行ったが光沢が出ない。バフを使用した手研磨では磨き傷が付き、真球度が崩れる恐れがある。バレルでは均一に研磨されるので、メディアはクルミチップを使用して研磨を行ったところ、1時間で光沢のある研磨面が得られた。作業効率は良い。

ここまでの研磨機使用による研磨方法の変更とバレル研磨の結果として、真球度が最良値で  $1.6\mu\text{m}$ 、表面粗さ Ra が最良値で  $0.009\mu\text{m}$ 、表面粗さ Rz が最良値で  $0.046\mu\text{m}$  まで到達した。

## (7) バレル研磨のみでの検証

研磨工程の効率化を検討するため、バレル研磨のみで検証した。(研磨時間：1時間)

結果、切削加工でのバイト目が残っており、目視でもスジとなって目立つ。光沢も出ていない。このことから、バレル研磨のみで行う場合には、切削段階での精度向上が必須条件となる。

## ②-4 結果まとめ

研磨加工について、以下の結果を得た。

### (1) 骨頭について

真球度目標値  $0.5\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.4\mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

表面粗さ Ra 目標値  $0.005\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.003\mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

表面粗さ Rz 目標値  $0.15\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.006\mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

### (2) 臼蓋について

真球度目標値  $0.5\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.7\mu\text{m}$  まで到達した。

表面粗さ Ra 目標値  $0.005\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.002\mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

表面粗さ Rz 目標値  $0.15\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.009\mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

臼蓋について、真球度が未だ目標達成に至っておらず、さらに検討が必要となっている。

### (3) スフェリカルベアリングについて

真球度目標値  $1\mu\text{m}$  に対して最良値で  $1.6\mu\text{m}$  まで到達した。

表面粗さ Ra 目標値  $0.01\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.009\mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

表面粗さ Rz 目標値  $0.20\mu\text{m}$  に対して最良値で  $0.046\mu\text{m}$  まで到達した。[目標達成]

スフェリカルベアリングについても、真球度が未だ目標達成に至っておらず、砥石の再選定、研磨条件の再検討などを行う必要がある。

### ③生体適合性向上の流体潤滑条件の確立

#### ③-1 生体適合性向上の流体潤滑条件の確立

##### (1) 振子式摩擦試験（揺動振子法）の概要

振子法は、図42のような重力振子の支点到試験片の摩擦部分を置き、自由揺動を与える。

その際の振幅の減衰の様子を検出して、摩擦係数を求める方法である。

強制的に初期振幅  $\theta_0$  [rad]を与えた後、自由に揺動させると、錘の位置エネルギーが摩擦によって、熱エネルギーとなって失われるため、次第に振幅が減少する減衰振動と呼ぶ振動をなす。その際の、

1回の振動での振幅の減衰量  $\theta_n - \theta_{n-1}$  [rad]から、摩擦係数が次式で算出される。

$$\mu = \frac{l \cdot (\theta_n - \theta_{n-1})}{4r}$$

ここで  $l$  [m]は、重心から支点までの距離、 $r$  [m]は試験片の摩擦面半径である。

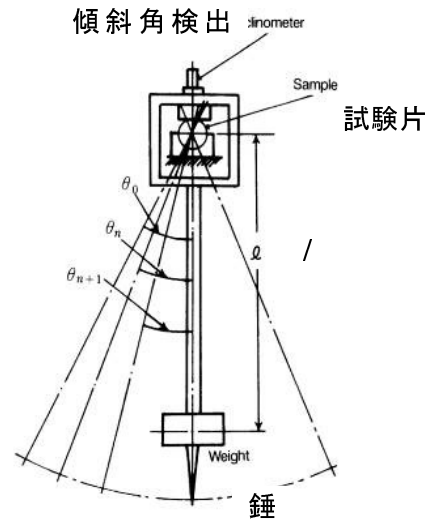


図42 振り子装置の概略

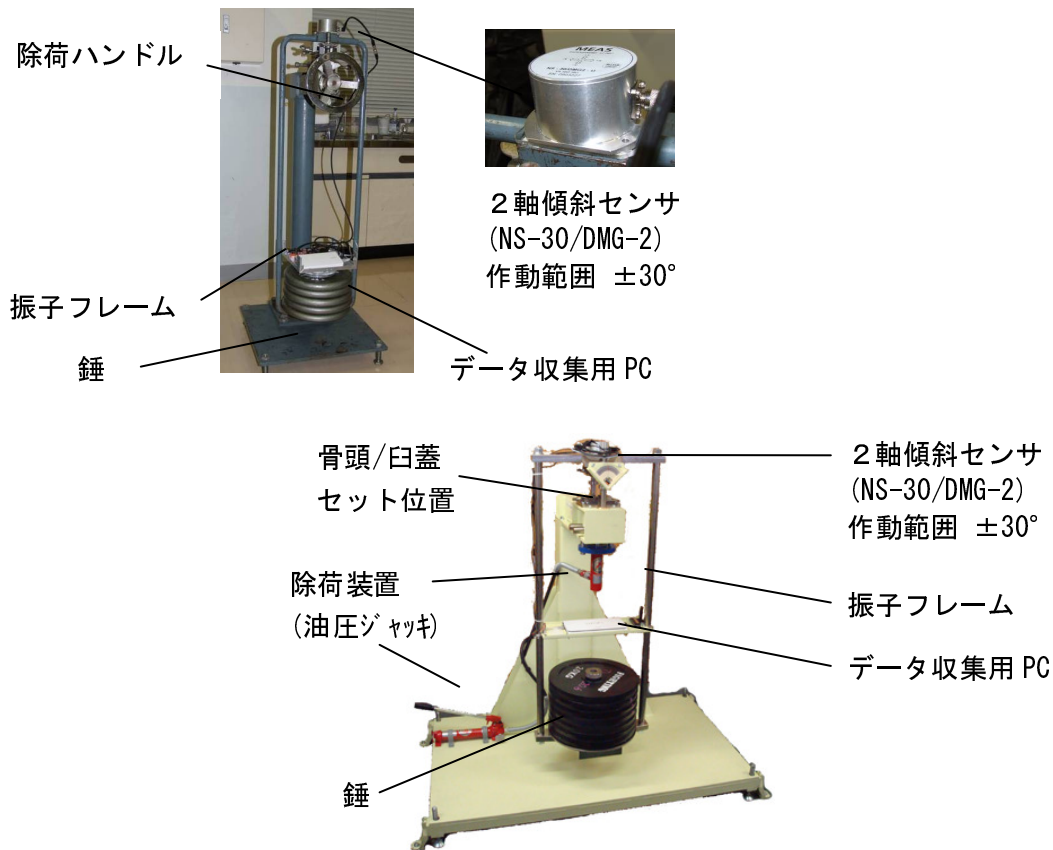


図43 振り子装置の構造（上：60kg荷重型 下：200kg荷重型）

(2) 切削研磨試料の振り子式摩擦試験

本研究で製作した Co-Cr-Mo 合金製の骨頭と臼蓋の組み合わせの摩擦係数を、60kg 荷重の振り子式摩擦試験機で計測した。潤滑液として生理的食塩水を用い、各試料を 3～10 回ずつ測定した。60kg 荷重の振り子式摩擦係数計測機による Co-Cr-Mo 合金製骨頭 18 個と同一材質の臼蓋 14 個の 224 の組み合わせの摩擦試験結果を図 4.4 に示す。5 次の多項式近似曲線を併せて示す。この曲線では半径差が 20～30  $\mu\text{m}$  の領域において摩擦係数が極小を示すものの、摩擦係数は 0.25 程度である。

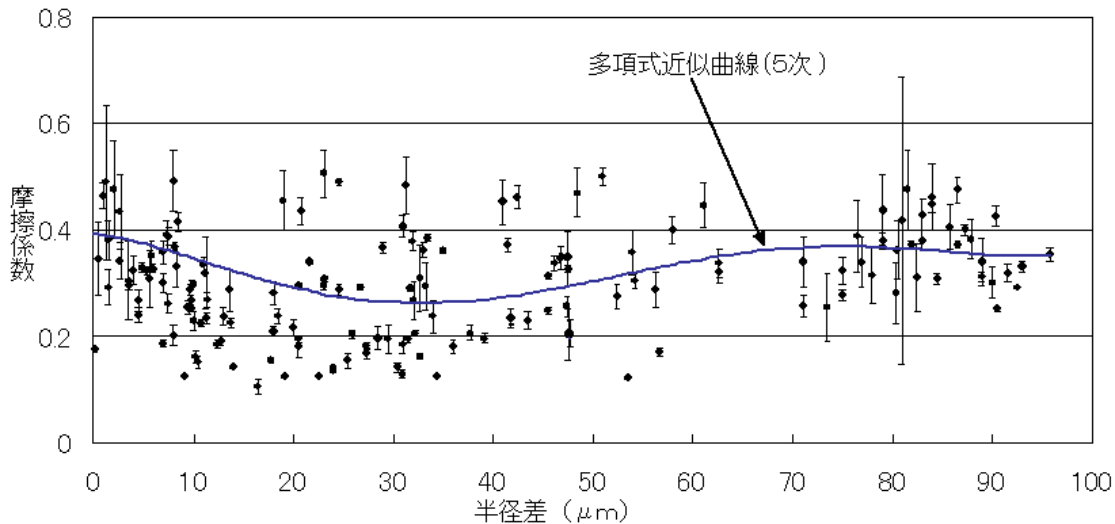


図 4.4 骨頭と臼蓋の半径隙間と 60kg 荷重での摩擦係数のプロット及び 5 次多項式近似曲線

次に 200kg 荷重の振り子式摩擦係数計測機による測定を行なった。なお、半径隙間 10, 20, 30  $\mu\text{m}$  の 3 種類を目安としたが、サンプル中からこの範囲をカバーする骨頭と臼蓋を選択して使用した。また同一サンプル組合せの繰り返し測定について、2 回目は、1 回目から、骨頭と臼蓋の位置関係を 90 度回転させて、3 回目は、2 回目から 45 度回転させて実施している。

測定結果を表 3.9 に示す。

半径隙間 33  $\mu\text{m}$  で最小値 0.103 が得られた。

いずれの半径隙間においても、測定 1 回目に比べて 2 回目以降が低い値を示している。

高荷重に対する製品の馴染みが原因の一つと考えられるが、更なる検証が必要であると考える。

表 3.9 臼蓋と骨頭の半径隙間と 200kg 荷重の振り子式試験機を用いた摩擦係数計測値

半径隙間 $\mu\text{m}$	摩擦係数		
	1 回目	2 回目	3 回目
12	0.23	0.176	0.173
18	0.204	0.124	0.124
21	0.215	0.135	0.120
28	0.19	0.176	0.156
33	0.164	0.103	0.103

## ●表面硬化処理

摩擦係数の向上を目的とし、骨頭及び臼蓋の表面について硬化処理を行い、振り子試験を行った。

硬 さ : 硬化処理前 約 230  
(HV) 硬化処理後 約 1000

振り子試験の結果を表40に示す。硬化処理後において、ただ1回の最良値ではあるが、目標をクリアする摩擦係数0.0486が得られた。

表40 振り子試験結果

半径隙間 $\mu\text{m}$	摩擦係数 <硬化処理前> 平均値※		摩擦係数 <硬化処理後> 平均値 (カッコ内は実測値)
12	0.175	→	0.127 (0.1272, 0.1285, 0.1266)
18	0.124	→	0.088 (0.0998, 0.0890, 0.0755)
21	0.128	→	0.114 (0.1133, 0.1198, 0.1091)
28	0.166	→	0.077 (0.0812, 0.0697, 0.0800)
33	0.104	→	0.052 (0.0503, 0.0557, 0.0486)

※硬化処理前の平均値は、値の高い1回目を除いた測定2,3回目の平均値を表記した

### ③-2 結果まとめ

振り子試験における摩擦係数測定で以下の結果を得た。

表面硬化処理実施後の振り子試験において

200kg 荷重試験において、最良値0.0486を、複数回の平均最良値で0.052を得た。  
そのときの半径隙間は33 $\mu\text{m}$ であった。

表面硬化処理後振り子試験サンプルは、先に、処理前の段階で振り子試験を実施したサンプルの再使用品であり、表面粗さや、馴染みなどの影響が加味されているため、一概に結果を好意的に考察することはできないが、最良値とはいえ目標摩擦係数0.05をクリアするものが出来たという事実は、今後の研究に可能性を残せたという意味で大きな成果であると考えられる。

### 第3章 全体総括

#### 本研究事業の計画と実施

本研究事業は平成21年度に開始し、平成22年度及び平成23年度の継続事業として、以下の3テーマにつき実施した。

##### ①精密切削加工

Co-Cr-Mo合金人工股関節骨頭及び臼蓋形状の切削加工技術の確立を目指した。

Ti合金スフェリカルベアリング形状の切削加工技術の確立を目指した。

##### ②精密研磨加工

Co-Cr-Mo合金人工股関節骨頭及び臼蓋形状の研磨加工技術の確立を目指した。

Ti合金スフェリカルベアリング形状の研磨加工技術の確立を目指した。

##### ③生体適合性向上の流体潤滑条件の確立

振子法を用いた生体内関節環境を模擬したシステムを構築し、Co-Cr-Mo合金製人工骨頭と人工臼蓋を用いて摩擦係数の計測を行い、流体潤滑条件の見直しを目指した。

#### 研究開発成果 及び 研究開発後の課題

1. 精密切削加工の具体的な目標：Co-Cr-Mo合金製骨頭形状の切削加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra）の向上に関して、
  - ・真球度の目標値：10 $\mu$ mに対して、最良値で4 $\mu$ mまで到達し、目標を達成した。
  - ・表面粗さRaの目標値：0.25 $\mu$ mに対して、最良値で0.05 $\mu$ mまで到達し、目標を達成した。安定して目標値が達成できるよう、歩留まりの向上を図ることが今後の課題である。
2. 精密切削加工の具体的な目標：Co-Cr-Mo合金製臼蓋形状の切削加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra）の向上に関して、
  - ・真球度の目標値：10 $\mu$ mに対して、最良値で6 $\mu$ mまで到達し、目標を達成した。
  - ・表面粗さRaの目標値：0.25 $\mu$ mに対して、最良値：0.13 $\mu$ mまで到達し、目標を達成した。安定して目標値が達成できるよう、歩留まりの向上を図ることが今後の課題である。
3. 精密切削加工の具体的な目標：Ti合金製スフェリカルベアリング形状の切削加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra）の向上に関して、
  - ・真球度の目標値：5 $\mu$ mに対して、最良値で1 $\mu$ mまで到達し、目標を達成した。
  - ・表面粗さRaの目標値：0.5 $\mu$ mに対して、最良値で0.07 $\mu$ mまで到達し目標を達成した。安定して目標値が達成できるよう、下記内容を検討することが今後の課題である。
  - 1) 切削刃物刃先形状による真球度への影響
  - 2) 刃先形状と製品外径とのバランスによる真球度への影響丸駒チップのR精度については、真球度に大きく影響することが判明したので、高精度のもの（目標値から考えて精度1 $\mu$ m以内のもの）を選定しなければいけない。

4. 精密研磨加工の具体的な目標：Co-Cr-Mo合金製骨頭形状の研磨加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra, Rz）の向上に関して、
- ・真球度の目標値：0.5  $\mu\text{m}$ に対して、最良値で0.4  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標を達成した。
  - ・表面粗さRaの目標値：0.005  $\mu\text{m}$ に対して、最良値で0.003  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標を達成した。また、表面粗さRzの目標値：0.15  $\mu\text{m}$ に対して、最良値で0.006  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標を達成した。

安定して目標値が達成できるよう、歩留まりの向上と加工時間の今後の課題である。

5. 精密研磨加工の具体的な目標：Co-Cr-Mo合金製臼蓋形状の研磨加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra, Rz）の向上に関して、
- ・真球度の目標値：0.5  $\mu\text{m}$ に対し、最良値で0.7  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標未達成となった。
  - ・表面粗さRaの目標値：0.005  $\mu\text{m}$ に対して、最良値で0.002  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標を達成した。また、表面粗さRzの目標値：0.15  $\mu\text{m}$ に対して、最良値で0.009  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標を達成した。

目標未達成となった真球度に対して、更なる表面状態の安定化を図る研磨方法の考案が今後の課題である。

6. 精密研磨加工の具体的な目標：Ti合金製スフェリカルベアリング形状の研磨加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra, Rz）の向上に関して、
- ・真球度の目標値：1  $\mu\text{m}$ に対して、最良値で1.6  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標未達成となった。
  - ・表面粗さRaの目標値：0.01  $\mu\text{m}$ に対しては最良値で0.009  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標を達成した。また、表面粗さRzの目標値：0.2  $\mu\text{m}$ に対しては最良値で0.046  $\mu\text{m}$ まで到達し、目標を達成した。

目標未達成となった真球度に対して、更なる表面状態の安定化を図る研磨方法の考案が今後の課題である。

また、事業化のため、切削品質を向上させてバレル研磨で仕上げるという方向も目指したい。

7. 生体適合性向上の流体潤滑条件の確立に関しては、ただ1点ではあるものの、表面硬化処理を施したサンプルの振り子試験において、半径隙間が33  $\mu\text{m}$ で摩擦係数最良値0.0486と流体潤滑様を示す値が得られた。

引き続き、流体潤滑条件の確立に向けて、以下の観点から検討する。

- 1) 真球度及び表面粗さ
- 2) 半径隙間
- 3) 表面硬度（今回、表面硬化により摩擦係数が低くなったことから、表面硬度は重要。）



## 事業化展開に向けて

### 人工股関節

製品化、実用化の目安として参考にするため、現在国内で市販されている米国製品 3 種類の骨頭及び臼蓋共に金属 (Metal on Metal) の人工股関節形状実測数値と、唯一の公的な規格である米国規格協会 ASTM : F2033-05<sup>1)</sup> の Metal on Metal 人工股関節潤滑面の真球度及び表面粗さ Ra 規格値、及び本研究の目標値を表 4 1 に示す。

表 4 1 Metal on Metal 人工股関節 3 種類の形状実測値/ASTM 規格値/本研究目標値一覧

メーカー	部品	呼び径 mm	隙間 $\mu\text{m}$	真球度 $\mu\text{m}$	粗さ Ra $\mu\text{m}$	粗さ Rz $\mu\text{m}$
Z 社	骨頭	28	47.7	6.3	0.0018	0.0138
	臼蓋	28		3.7	0.0007	0.0043
J 社	骨頭	36	41.8	12	0.0024	0.0145
	臼蓋	36		5.1	0.0007	0.0046
B 社	骨頭	32	47.5	3	0.011	0.073
	臼蓋	32		10.4	0.0051	0.0172
ASTM 規格 <sup>1)</sup>	骨頭/臼蓋			5	0.05	
研究の 目標値	骨頭	32	10-30	0.5	0.005	0.15
	臼蓋	32		0.5	0.005	0.15

本研究の目標値は厳しい数値となっているが、人工股関節の実用化を考慮する上では、市販の製品の計測実績値と比較して、真球度： $0.5\mu\text{m}$  に関しては ASTM 規格値： $5\mu\text{m}$  並の規格で十分であると考えられるが、表面粗さ Ra： $0.005\mu\text{m}$  に関しては、ASTM では  $0.05\mu\text{m}$  であるにもかかわらず、市販品の実測データでは 3 社製品で最悪でも  $0.01\mu\text{m}$  であり、目標値は維持すべきである。よって、本研究開発の成果による高精度加工技術で Metal on Metal 人工股関節の潤滑面の製品化・実用化をはかることについては、技術的に十分な成果を得ることができたといえる。

人工股関節の製品化には、大腿ステムのデザイン等の開発、及び人工臼蓋の寛骨と接する面の形状や表面状態のデザイン等の開発と認証、および大腿ステムや人工臼蓋のデザインに合致する大腿骨や寛骨の手術器具などの開発と認証が必須であり、これらのことを考慮すれば、既存の大腿ステムに嵌め合わせる Co-Cr-Mo 合金製の人工骨頭、既存の人工臼蓋のデザインに合わせた Co-Cr-Mo 合金製の人工臼蓋の製品化が早道であり、そのためには、既存の人工関節メーカーに対しての骨頭と臼蓋の部材供給の契約の締結による製品の供給が考えられる。その他、Co-Cr-Mo 合金製の人工臼蓋技術を用いたバイポーラ人工関節用のカップなどの部品製作も有望である。

1) ASTM F2033-05 Standard specification for total hip joint prosthesis and hip endoprosthesis bearing surfaces made of metallic, ceramic, and polymeric materials、Annual Book of ASTM Standards, section13 (Medical Devices and Services), 2011, ASTM International, PA, USA

## スフェリカルベアリング

航空機には大小さまざまな部品が多数使われており、航空機の軽量化という観点から、1つの部品ではわずかでも全体としては大きな数値になるため、スフェリカルベアリングの軽量化に興味をもたれるメーカーが多い。

製品化、実用化の目安として参考にするため、A)実使用相当品と、B)本研究での切削加工品を実使用研磨工程に供したものと の外径精度（真円度、表面粗さ）の比較を行った<sup>2)</sup>。結果を表4 2および図4 5に示す。

表 4 2 実使用相当品と本研究品の精度比較<sup>2)</sup> ( $\mu\text{m}$ )

	真円度	表面粗さ (Ra)	表面粗さ (Rz)
A) 実使用相当品	1.144	0.150	0.500
B) 本研究品	2.685	0.472	2.065

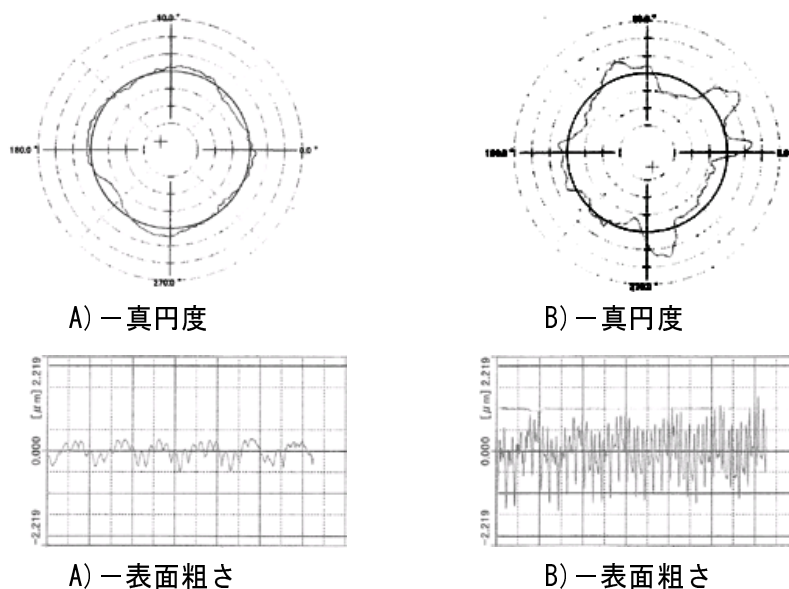


図 4 5 A) 実使用相当品と B) 本研究品の測定チャート<sup>2)</sup>

この結果から、本研究品はまだ実使用品と同等の精度レベルには達していないといえる。今後さらに、試作レベルから、実用化を見据えた切削、研磨方法とその精度向上、安定化を図り、商品化に向けた動きを進めていきたい。

2) 精度比較は、実使用研磨工程実施先における既存の測定機を用いて行ったものであり、本研究における測定とは異なる試験機、試験条件である。