

平成21年度戦略的基盤高度化支援事業

「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22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	開発課題① 精密切削加工技術の開発	9
2.2-1	現有切削加工設備、計測設備を用いた切削加工技術の評価	9
2.2-2	新規切削加工設備、計測設備を用いた切削加工技術の評価	12
	計測結果と考察	13
	①三次元計測機による真球度の計測	13
	②表面粗さ	16
	③チタン合金材の切削加工	17
2.3	開発課題② 精密研磨加工技術の開発	19
2.3-1	球面研削機による研削技術の確立	19
2.3-2	研磨加工後の真球度	20
2.3-3	カップの研磨加工後の表面粗さ	20
2.4	開発課題③ 流体潤滑条件の確立	21
2.4-1	振子式摩擦試験の概要	21
2.4-2	試作した Co-Cr-Mo 合金製臼蓋、骨頭の摩擦測定	22
2.4-3	切削研磨試料の振子式摩擦試験	23
第 3 章	総括	25

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潤滑するため、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ことが耐久性向上の要因となり、その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。

一方、航空機部品にも、耐久性強度を必要としている部品が多く、特に難削材への加工対応が求められている。航空機によく使用される部品のひとつであるボルトは、切削における表面粗さが悪いと締め付けトルクに対して、その部分から破断が起こる原因となり、決められた加工精度での品質の安定化が求められている。また、ボールベアリング等においては、ボールの真球度や表面粗さが悪いとかじりが起こり、回転部に異常をきたす。このように航空機部品においては、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る。航空機は、単純な形状部品から複雑な形状部品の大小様々な部品の組み立てによって構成されている。これらの部品の信頼性は、難削材への安定した高精度な加工対応と、安定した測定技術の確保によって向上保障されるものである。

このように、難削材の高精度加工技術は、医療、航空機両分野のシナジー効果が大きい。

なお、ここで、航空機部品の高精度化及び難削材加工対応への高度化目標及び技術的目標値は、医療機器に要求される目標値よりも緩く、医療機器の研究から得た技術での応用が可能なため、高度化目標は、医療機器に関してのみ研究開発を進める。

1. 2 目標

本研究では、人工関節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手法として振子試験を用い、流体潤滑条件の見直しと最適な半径隙間の確立を行う。

今回、新規加工機での検討を含め、表1に示した値を目標として技術開発を進めていく。

表1：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)	骨頭の真球度
0.01 μm	0.2 μm	5 μm

真球度は三次元的な形状の精密測定であり、

骨頭の赤道面及び赤道面から20度傾いた面の真円度の場合は3~5 μm

また、流体潤滑の実現のための最適条件の評価として、高精度コバルト・クロム・モリブデン合金製人工骨頭と、高精度コバルト・クロム・モリブデン合金製人工臼蓋を用いて、上記条件に加えて半径隙間を30 μm 、20 μm 、10 μm とし、流体潤滑条件の見直しと最適な半径隙間を確立する。

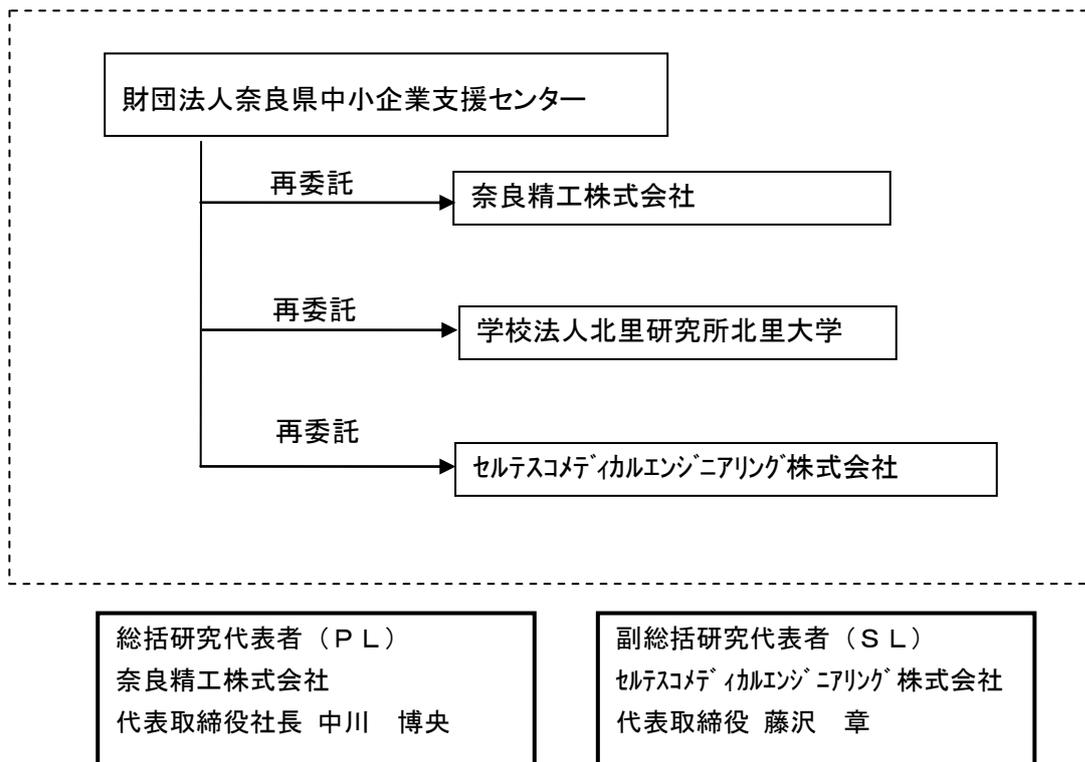
また、表2に示すように理想的な流体潤滑の摩擦係数は0.001~0.01であり、現行の人工股関節の摩擦係数は、0.1~0.3である。潤滑条件を改良した人工股関節の摩擦係数の目標値としては現行の製品の半分以下の0.05とする。計測方法は、北里大学・馬淵らが行っている振子法によるものとし、北里大学にて計測と評価を行う。

表2：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
氷どうし	0.03

1. 3 研究体制

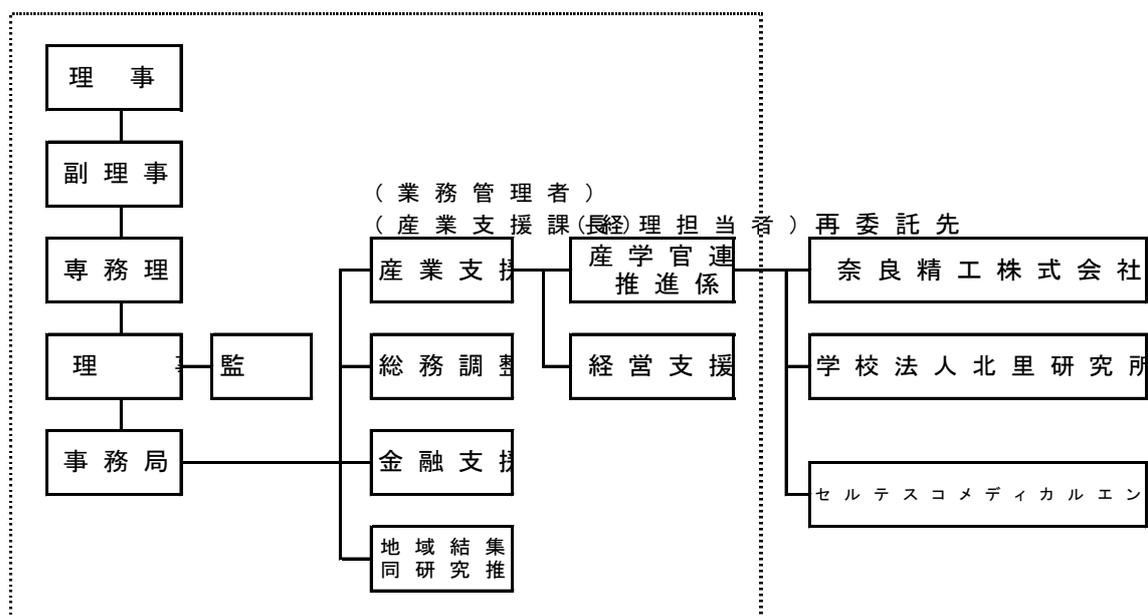
(研究組織)



(管理体制)

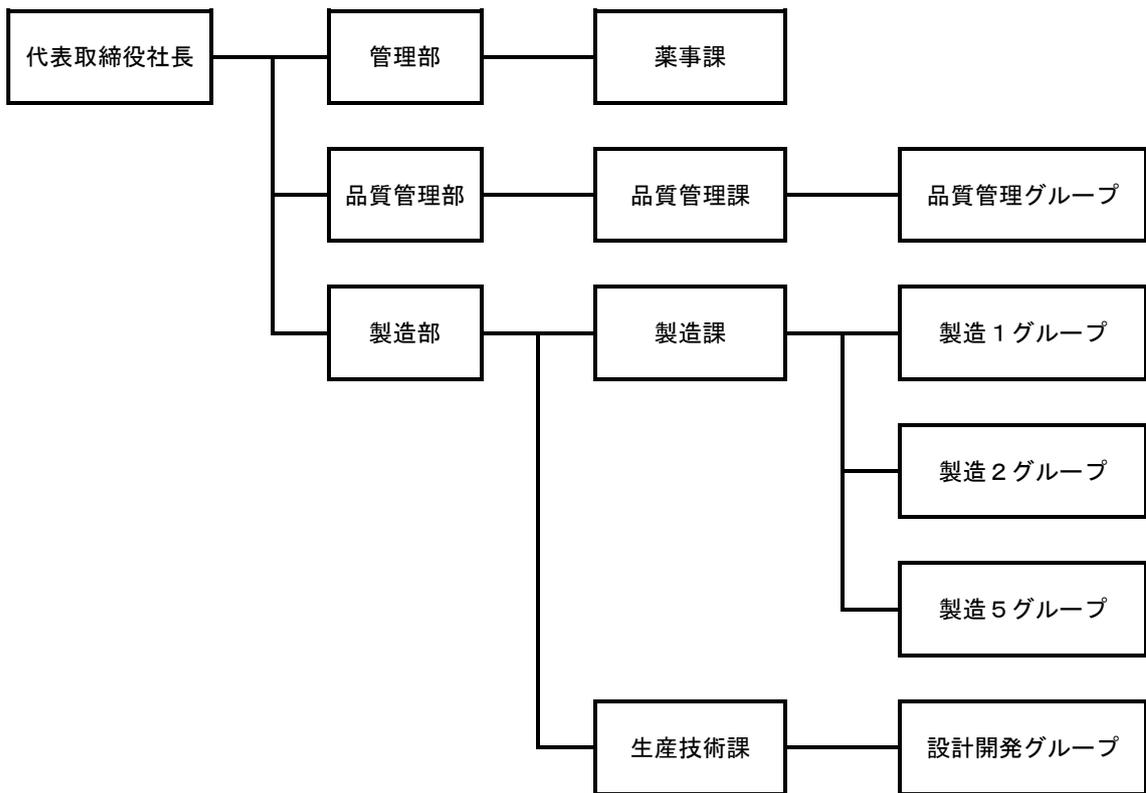
①事業管理者

[財団法人奈良県中小企業支援センター]

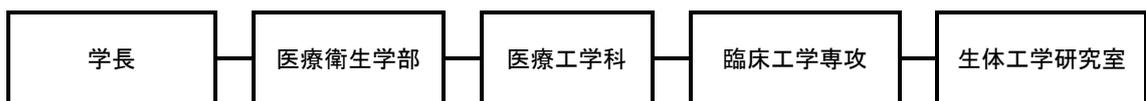


②再委託先

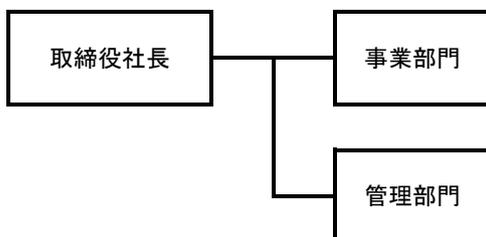
[奈良精工株式会社]



[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

1. $\phi 32$ の骨頭（ボール）及び臼蓋（カップ）の切削加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra）に関しては、真球度の目標値： $10\mu\text{m}$ にほぼ到達した試料が少数ながらあったが、歩留まりの向上が今後の課題である。
表面粗さに関して、目標値：Ra： $0.2\mu\text{m}$ は、16 個中目標をクリアしたボールは 10 個であり、歩留まりの向上が今後の課題である。
2. 骨頭（ボール）及び臼蓋（カップ）の研磨加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra、Rz）に関しては、研磨加工後の表面粗さの目標値は Ra： $0.01\mu\text{m}$ 、Rz： $0.2\mu\text{m}$ であることから、計測値の Ra： $0.03\sim 0.07\mu\text{m}$ では目標が未達成であるが、今後の検討で十分に達成可能と考えられる。最大粗さ：Rz についても今後の検討で十分に達成可能と考えられる。精密研磨機の調整と Co-Cr-Mo 合金の研磨が今後の課題である。
真球度に関しては、目標値： $5\mu\text{m}$ に到達した試料は、先行的に研磨を実施した試料でクリアした例があるが、この歩留まり向上が今後の大きな課題である。
3. 生体適合性向上の流体潤滑条件の確立に関しては、摩擦係数の目標値：0.05 に対して、ボールとカップの半径隙間が $20\mu\text{m}$ の条件で 0.12 を示し、流体潤滑様の結果を得た。なお、同時に実施した市販の人工股関節の超高分子量ポリエチレン（以下「UHMWPE」という。）製カップと金属骨頭の磨擦係数の計測値は 0.126 であり、この値とほぼ同一であった。しかし、さらなる検証が必要であり、今後の課題である。

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:0742-36-8313 FAX:0742-36-4003
担当者：大月 伸一

[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。この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い。流体潤滑を確保するために、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。

人工骨頭は一般的に球面が $3/4$ 程度で、人工臼蓋はほぼ $1/2$ 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UHMWPEの組み合わせであるが、UHMWPE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で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マイクロ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り、半径隙間も 0.1mm 程度の製品が多い。

そのため、高精度精密加工技術の確立が求められるものであり、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る。

本プロジェクトは次の①、②及び③のサブテーマから成る。

① 切削加工技術の開発

金属製品はコバルト・クロム・モリブデン合金とチタン合金を用い、複合旋盤加工機であるインテリジェント複合加工機を導入し、真球切削加工を行う。インテリジェント複合加工機は通常の医療機器加工での仕様から精密加工仕様にカスタマイズし、さらに専用治具について設計開発を行うことで、より精密で誤差のない切削加工を検討する。

ここで、加工物は機上での保持方法により歪みが発生するので、歪みを抑えるための専用治具についても併せて設計・開発を行い、高精度の測定を目指す。

また、加工物の回転数、刃物選定、送りスピード等の切削条件を検討し、加工での精度目標、真球度 $10\mu\text{m}$ 、を達成する切削条件を確立する。併せて、表面粗さの安定化を目指す。

これらの検証を行うため、高精度三次元測定機を用いた測定評価を行う。人工関節の真球凹凸形状の測定は、接触式三次元測定機を用いて行っている。

航空機部品で使用される材料でもあるチタン合金の高精度真球加工についても検討を行う。検討内容、精度目標については、コバルト・クロム・モリブデン合金と同様とする。

② 研磨加工技術の開発

真球に対する表面粗度の問題として、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。

複合旋盤加工機で、研磨工程を行うための条件設定、専用加工治具の設計と製作を進めていく。

また凹凸形状面の鏡面仕上げ研磨条件について検討する。切削加工後の精度目標は、平均粗さ(Ra) $0.2\mu\text{m}$ 以下とする。人工関節の摩耗は、平均粗さ(Ra)より最大粗さ(Rz)の方が重要な意味を持つが、この後の研磨工程での研磨により最大粗さ(Rz)は大きく左右されることから、この時の最大粗さ(Rz)を最終目標値 $0.2\mu\text{m}$ にするための研磨代について併せて検討を行う。また、その研磨代によって発生する真球形状の変化についても評価を行う。

工程削減のための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、主軸揺動をさせることで、加工時間の削減が可能となる。この斜軸型研磨機を使用する為には、加工物を保持する研磨用治具が必要となるため、この治具の設計開発を行う。併せて、研磨砥石及び研磨剤を検討し、研磨条件の確立を行う。ここでの精度目標は真球度 $5\mu\text{m}$ 、平均粗さ(Ra) $0.01\mu\text{m}$ 、最大粗さ(Rz) $0.2\mu\text{m}$ とする。これらの検証を行うため、真球度は高精度三次元測定機を用いた測定評価を行い、表面形状においては超深度形状測定顕微鏡を用いた多点測定による形状分析により、表面粗さを評価する。

③ 流体潤滑条件の確立

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。生体関節の摩擦を測定するために、振子法を用いる。

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する。振子揺動減衰曲線の包絡線から振子支点の摩擦を計測する。その評価のために、真球度 $5\mu\text{m}$ 、半径隙間を $30\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ とした高精度コバルト・クロム・モリブデン合金製人工骨頭と、高精度コバルト・クロム・モリブデン合金製人工臼蓋を用いて、流体潤滑条件の見直しと最適な半径隙間を確立する。

またここで、摩擦係数の目標である0.05が達成されているかどうかを確認する。

本試験研究プロジェクトは、大型装置類の導入後の研究実施期間が極めて短期間であることから、本プロジェクト開始時点で所有の切削加工設備、計測設備を用いた切削加工技術の評価を行い、大型装置類の導入後の限られた期間内に成果を出せるように計画した。

2. 2 開発課題① 精密切削加工技術開発

2. 2-1 現有切削加工設備、計測設備を用いた切削加工技術の評価

概要

【目的】

本試験研究プロジェクトで計画し、使用する材料及び設備が揃うまでの間に、本プロジェクトの開始時点で所有の材料と設備を使用してボール形状の試験体の切削加工と計測を行い、プロジェクト開始前の加工設備、治具による切削加工技術の評価を行った。

【概要】

まず、先行的にプロジェクト開始時点で所有保持している切削加工用旋盤を用いて Co-Cr-Mo 合金製 $\phi 45$ の半球形状のサンプル 1 個の切削加工を試行し、その真円度、真球度、表面粗さの計測をプロジェクト開始前に所有の測定機器を用いて評価を行い、基本的な問題点がないことを確認し、次いで 4 個の切削加工を同一条件で行い、計測と評価を行った。

真円度、真球度、表面粗さの計測を本プロジェクトの開始前から所有の測定機器を用いて行った。

材料及び切削加工

切削加工機：ワシノ製旋盤 A18

材料：Co-Cr-Mo 合金

形状： $\phi 45$ の半球形状サンプル（図 1 右図を参照）

個数：全 5 個（先行の No. 1、及び 4 個口の No. 2、No. 3、No. 4 及び No. 5）

切削加工：荒外形切削

仕上げ外形切削：同一の切削条件で 2 回仕上げ切削

計測方法及び計測機

i) 真円度

東京精密（株）製真円度計測機：ロンコム 20A

・フィルターは、50 ピーク/周回に設定

・真円度は、計測データの外接円と内接円の 2 つの同心円の半径差： μm

ii) 真球度

ミットヨ製三次元計測機：QM Measure 353

マブチ製スフェロメーター

iii) 表面粗さ

キーエンス製表面粗さ計 VK8510

計測結果と考察

①真円度計測機による真円度計測

東京精密製真円度計測機：ロンコム 20A を用いて、図 1 に示す半球形状サンプルの赤道面、すなわち 0° の緯度線の 1 周回、 30° の緯度線の 1 周回、 60° の緯度線の 1 周回の真円度を計測した。

真円度は、計測データの外接円と内接円の二つの同心円の半径差とした。

この計測結果を表 3 に示す。

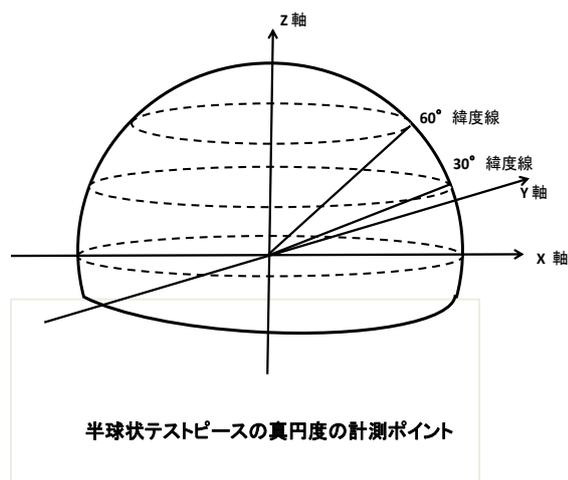


図1 ボール状サンプルの計測箇所（ライン）（左図）とサンプルの外観（右図）
30° 緯度線、60° 緯度線及び0°（赤道面）の波線が真円度計測のライン

表3 ロンコム真円度計により計測した試料 No. 1～5 の真円度（単位： μm ）

計測ライン	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
0°（赤道）：1 周回	8.2	9.6	7.1	5.3	5.1
30° の緯度線：1 周回	6.8	7.7	4.1	9.0	7.2
60° の緯度線：1 周回	3.8	9.2	8.0	11.3	9.7

②スフェロメーターによる真球度計測

スフェロメーターでの計測ポイントは、0°（赤道面）、30°、60°の緯度線と12等分すなわち15°分割の経度線との交点の36ポイントで計測した。

③三次元計測機による真球度：目標値は真球度10 μm

使用したミットヨ三次元計測機 QM Measure 3 5 3 による真球度の計測は、測定対象の球面の任意のポイントを選択して三次元的な空間の位置を計測し、複数のポイントの空間的位置から理想球面を計算し、この理想球面からのずれの最大値を真球度として算出し、出力するものである。この精度は数 μm のオーダーとされている。

計測値：No. 1 試料：17 μm
 No. 2 試料：32 μm
 No. 3 試料：8 μm
 No. 4 試料：11 μm
 No. 5 試料：17 μm

スフェロメーターによる計測値、真円度計による真円度、三次元計測機による真球度の計測値を一覧表として表4に示す。

なお、三次元計測機による真球度の計測の計測ポイントは、赤道円周上の12等分点、90度間隔の経線4本について各6等分点、合計24点、総計で36ポイントの計測による立体真球との最大の隔たり距離（ μm ）である。

表4：真円度、真球度結果一覧

試料 No.	計測位置	スフェロメーターによる計測値		真円度測定機による真円度	三次元測定機による真球度
		平均値	標準偏差		
No. 1	60°	3.67	1.15	3.8	17
	30°	1.25	1.66	6.8	
	0°	1.33	3.39	8.2	
No. 2	60°	26.17	2.12	9.6	32
	30°	20.83	0.94	7.7	
	0°	21.42	1.88	9.2	
No. 3	60°	2.92	1.24	7.1	8
	30°	2.33	2.39	4.1	
	0°	1.58	2.54	8.0	
No. 4	60°	3.42	5.30	5.3	11
	30°	2.33	1.44	9.0	
	0°	1.83	2.41	11.3	
No. 5	60°	12.75	1.48	5.1	17
	30°	10.75	7.20	7.2	
	0°	11.92	9.70	9.7	

④表面粗さ計測

表5に試料 No. 1～No. 5 の表面粗さを示す。

No. 1 試料は、先行的な切削加工であるため、Ra 値のみを測定し、No. 2～No. 5 は参考として最大粗さ：Rz も測定した。No. 3 試料のみ、目標である切削加工後 Ra: 0.2 μm を達成できた。

表5 表面粗さ実測値

試料 No.	平均粗さ Ra (μm)	最大粗さ Rz (μm)
No. 1	0.28	-
No. 2	0.47	4.70
No. 3	0.19	1.73
No. 4	0.30	1.94
No. 5	0.32	2.21

測定条件

- ・ カットオフ値：0.08mm
- ・ 並行な Tool mark (切削痕) に対して
直角方向に計測

まとめ

先行試作（試料 No. 1）及びこれに引き続いて第2回目の切削加工の結果（No. 2～5 の4個）は：
・ 真球度の目標値：10 μm に関しては、三次元計測機による測定で、目標達成は1個（試料 No. 3）、
で、新規設備の導入による目標の達成は十分に可能と推察された。

因みに、試料 No. 4 の真球度は 11 μm であり、試料 No. 3 及び No. 4 の2個が目標圏にある。
No. 2 は 32 μm と目標から大きく外れ、No. 5 は 17 μm であり、これはスフェロメーターの計測値がマイナスに大きく外れていることである。スフェロメーターの計測の基準点は Z 軸の頂点、すなわち北極に相当するポイントであることから、このポイントが凸に大きく外れており、このことが三次元計測機による真球度が大きく外れている原因と考えられる。

・ 試料 No. 2 及び No. 5 共にスフェロメーターによる 12 ポイントの計測値の標準偏差、すなわちばらつきは小さいことから赤道面、30° 及び 60° の緯度線の真円度は保たれており、あくまで北極地点の凸へのずれが主要な原因と考えられる。

2. 2-2 新規切削加工設備、計測設備を用いた切削加工技術の評価

材料及び切削加工、研磨加工

切削加工機：オークマ製複合旋盤

材料：Co-Cr-Mo 合金、及び Ti-6AL-4V 合金

形状： $\phi 32$ の人工骨頭及び人工臼蓋（半球状サンプル）

切削加工：荒外形切削

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

研磨加工：Co-Cr-Mo 合金材については精密切削加工後に精密研磨加工を施す。



図2 切削加工機 オークマ製複合旋盤

計測方法及び計測機

i) 真球度

ミットヨ製三次元計測機：LEGEX574

ii) 表面粗さ

キーエンス製表面粗さ計 VK8510



図3 三次元測定機 ミットヨ製三次元測定機

計測結果と考察

①三次元計測機による真球度の計測

【計測結果】

計測結果を表6に示す。表6において、各計測面の真円度を最少二乗法で求め、表中の最大は、最大内接円と最少二乗円との径差、最小は、最小外接円と最少二乗円との径差、(最大+最小)は、最大と最小の絶対値の和を表す。

真円度の数値は、三次元計測機のアウトプットとして出力されるが、この数値は表6における(最大+最小)の数値とほぼ一致している。すなわち、最少二乗法で求める真円度は、この最少二乗円からの最大と最小の絶対値の和であることが裏付けられる。

【計測精度の評価】

表6に示す同一球面を反対方向からスキャンした計測結果から、この計測法の精度と信頼性に関して推計することができる。すなわち表6のXZ面の計測値の差の2.81が最も大きく、YZ(45°)面の0.16が最小である。測定値に対するパーセントでは、大きな順でXZ、XZ(45°)、YZ、YZ(45°)で、それぞれに対応して18.4%、8.1%、1.7%、及び1.0%である。平均では7.3%である。

連続スキャンの計測で、0.2mmピッチの計測値の評価であることから、反対方向からスキャンした場合に、もし細かな凹凸がある場合に0.2mmピッチでの読み取り値が異なることは十分に考えられる。従って真円度の読み取り値の精度としては±10%程度と推定できる。なお、LEGEX 574の仕様では、計測精度は(0.35±L/1000) μm (L:測定長さmm)であり、直径45~32mmのボールの場合には精度のspec値は、0.4 μmである。

表6 同一計測面の計測値とその差

XZ(1 rev)	2.44	9.18	-3.26	12.44	
差	2.81	1.81	1.00	2.81	18.4
XZ(45°)	20.93	16.43	-4.50	20.93	
XZ(45° rev)	19.23	14.91	-4.32	19.23	
差	1.70	1.52	0.18	1.70	8.10
YZ(1)	14.24	9.96	-4.27	14.23	
YZ(1 rev)	14.00	10.13	-3.87	14.00	
差	0.24	-0.17	0.40	0.23	1.70
YZ(45°)	16.00	11.63	-4.37	16.00	
YZ(45° rev)	15.84	11.49	-4.35	15.84	
差	0.16	0.14	0.02	0.16	1.00

注 :最大・・・最大内接円と最少二乗円との径差
 最小・・・最小外接円と最少二乗円との径差
 rev・・・反対方向からのスキャン

表6に示す真円度と真球度との関係は、最も大きな真円度の値をもって真球度とすることが考えられる。従ってこの考え方に基づく真球度は20.9 μmである。4つの計測面の真円度の平均は16.0 μmである。因みに、三次元計測機:QM Measure 353を用いた試料No.4の真球度は11 μmである。QM Measure 353の計測は、計測ポイントをマニュアルで任意に決めて計測ポイント数も任意に決めることができるため、真球から外れるポイントがたまたま計測から外れる場合には見かけ上真球度は良くなる。

【新規導入設備を用いた Co-Cr-Mo 合金製ボールとカップの加工と真球度計測】

本プロジェクトで新規に導入した設備(図2)を用いて、Co-Cr-Mo 合金製ボール(骨頭)とカップの先行試作加工を行い、真球度の計測・評価を行った。図4に切削・研磨加工のボール(右)とカップ(左)の外観を示す。



図4 先行切削・研磨加工のボール(右)とカップ(左)の外観

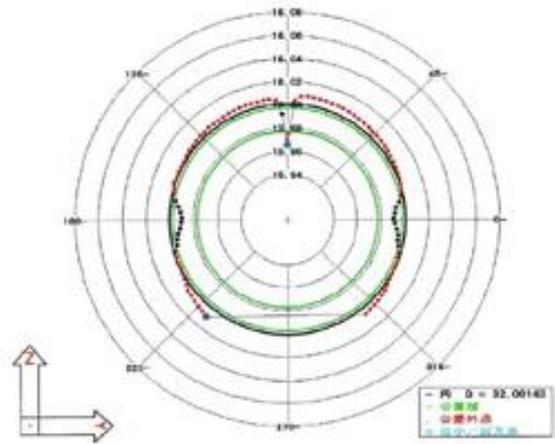


図5 切削加工ボールの真球度計測データ

図5は、切削加工後のボールの真球度計測データで、真球度の計測値は47μmである。頂上部分に凹みがみられ、また裾の部分に膨らみがみられることから、真球度の計測値が大きいのはこれらの影響と考えられる。

なお、導入した三次元計測機では、真球度の計測は、いくつかの断面の真円度の計測を行い、このなかの最も大きな真円度を真球度として表示する方式となっており、これを確認するためにいくつかの断面の真円度の計測を行った。この結果を表7に示す。

表7 切削加工ボールの真円度と真球度計測データ

計測部位	単位: μm		
	最大距離	最小距離	真円度
XZ面	9.63	30.91	40.53
XZ45°面	8.37	-35.91	44.29
YZ面	8.87	-32.75	41.62
YZ45°面	8.57	-35.30	43.86

注)真球度:47.7μm

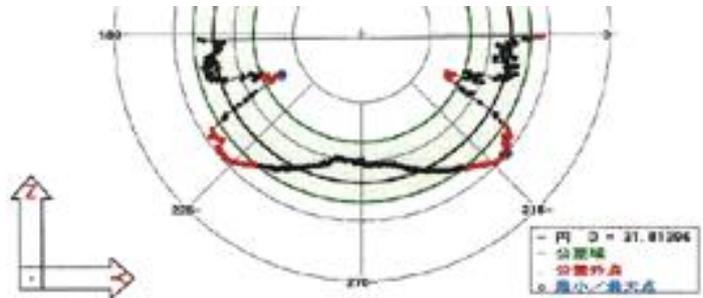


図6 カップの切削加工後の真球度計測データ

図6に、カップの切削加工後の真球度計測データを示す。45°の方向に大きな凹凸がみられる。表8に、切削加工カップの真円度と真球度計測データを示す。カップの真球度は約32μmで、この大きな原因が図6の45°の方向の大きな凹凸にあり、真球度の目標値に向けた改善には、この部分の改善が必須である。

表 8 切削加工カップの真円度と真球度計測データ

計測部位	単位: μm		
	最大距離	最小距離	真円度
X Z 面	13.04	-19.08	32.12
Y Z 面	13.13	-16.99	30.12

表 9 32mm骨頭の切削加工の量産試作品の真球度

骨頭#	真球度(μm)	直径(mm)
1	-	-
2	100	32.029
3	60	32.082
4	69	32.000
5	86	32.022
6	64	32.014
7	79	32.028
8	54	31.905
9	47	32.001
10	45	31.970
11	28	31.992
12	27	31.989
13	30	31.971
14	28	32.005
15	25	32.028
16	37	32.009
17	35	32.005
18	49	32.002
19	55	31.987
20	61	32.026



図 7 32mm骨頭の切削加工の量産試作品の外観

32mm骨頭の切削加工の量産試作品20個の真球度を表14に、外観を図7に示す。真球度の目標値は $10\mu\text{m}$ であり、20個で目標達成したものは未だ無い。因みに真球度の平均値は $51.5\mu\text{m}$ 、直径は目標32mmに対して平均が 32.0034mm である。すなわち $+3.4\mu\text{m}$ が研磨代である。

② 表面粗さ

32mm骨頭の切削加工の量産試作品20個の表面粗さ：Raを表10に示す。なお、切削加工後のRaの目標値は0.2μmである。20個中で計測した16個中目標をクリアしたボールは10個である。目標から大きくずれている試作品で特徴的な表面の顕微鏡写真を図8に示す。中心部とその周囲に外輪山状の突起がみられ、この存在が表面粗さ：Raが大きく悪化している原因と考えられる。今後解決すべき課題の1つである。

表10 32mm骨頭の切削加工の量産試作品20個の表面粗さ：Ra計測値

骨頭#	真球度(μm)	直径(mm)	Ra値		Ra値に対するRemarks
			代表値	別の箇所	
1	-	-			
2	100	32.029			
3	60	32.082	0.19		
4	69	32.000			
5	86	32.022	0.18		
6	64	32.014	0.49	0.11	へそ部に外輪山状の突起
7	79	32.028	0.16	0.12	辺縁部に粗い箇所
8	54	31.905	0.13	0.09	辺縁部に粗い箇所
9	47	32.001			
10	45	31.970	0.11	0.12	へそ部に粗い箇所
11	28	31.992	0.13	0.11	
12	27	31.989	0.12	0.10	へそ部に粗い箇所
13	30	31.971	0.36	0.12	へそ部に粗い箇所
14	28	32.005	0.17	0.20	
15	25	32.028	1.63		大きざ状
16	37	32.009	2.14	2.25	へそ部に外輪山状の突起
17	35	32.005	3.28	2.86	へそ部に外輪山状の突起
18	49	32.002	3.71	2.09	
19	55	31.987	2.46	1.22	へそ部に外輪山状の突起
20	61	32.026	0.36	0.08	へそ部に粗い箇所

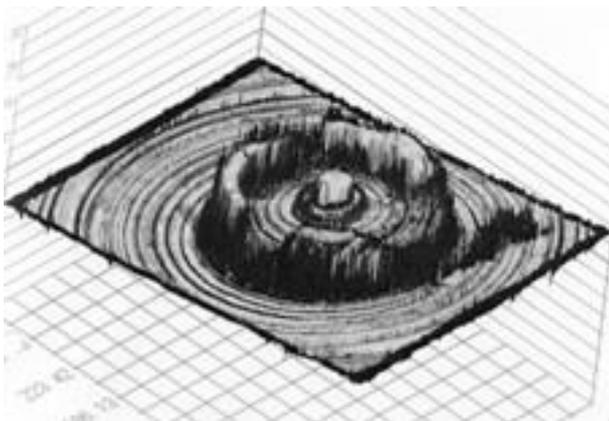


図8 Raの目標から大きくずれている切削加工品で特徴的な表面の顕微鏡写真：中心部とその周囲に外輪山様の突起がみられる。

③チタン合金材の切削加工

チタン合金 (Ti-6Al-4V) の切削加工による骨頭(ボール)と臼蓋(カップ)各3個の評価を行った。

表 1 1 Ti-6Al-4V の切削加工による
骨頭 (ボール) と臼蓋 (カップ)

種類	No.	真球度 (μm)	球直径 (mm)
骨頭	1	23.0	32.0
	2	29.6	32.0
	3	20.8	32.0
臼蓋	1	29.6	32.0
	2	31.9	32.0
	3	38.3	32.0

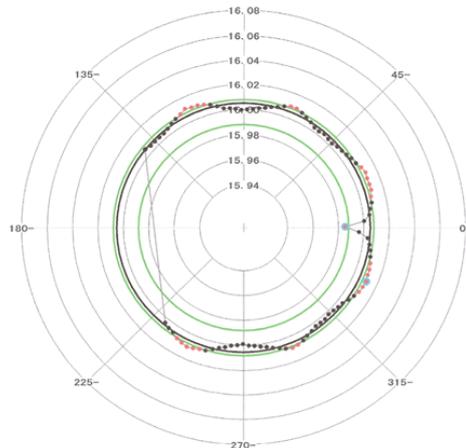


図 9 チタン合金製骨頭の真円度プロフィール

計測結果は、表 1 1 に示すように、真球度は骨頭と臼蓋とで $20\mu\text{m}$ 以上あり、この改善が課題である。骨頭の真球度プロフィール例を図 9 に示す。大きな波状のうねりの存在が示唆される。

治具の設計—チャック歪解消

4 つ爪チャックで固定し球面の切削加工を行い、チャックを外した場合に歪み生まれ、真球度がどの程度悪化するかの検証を、次の方法で行った。

試料 No. 2 及び No. 3 のグループ、及びこのグループと、このグループに対して 45° 回転させてチャックを把持した No. 4 及び No. 5 の 2 つのグループについて真円度、真球度の差異を調べた。

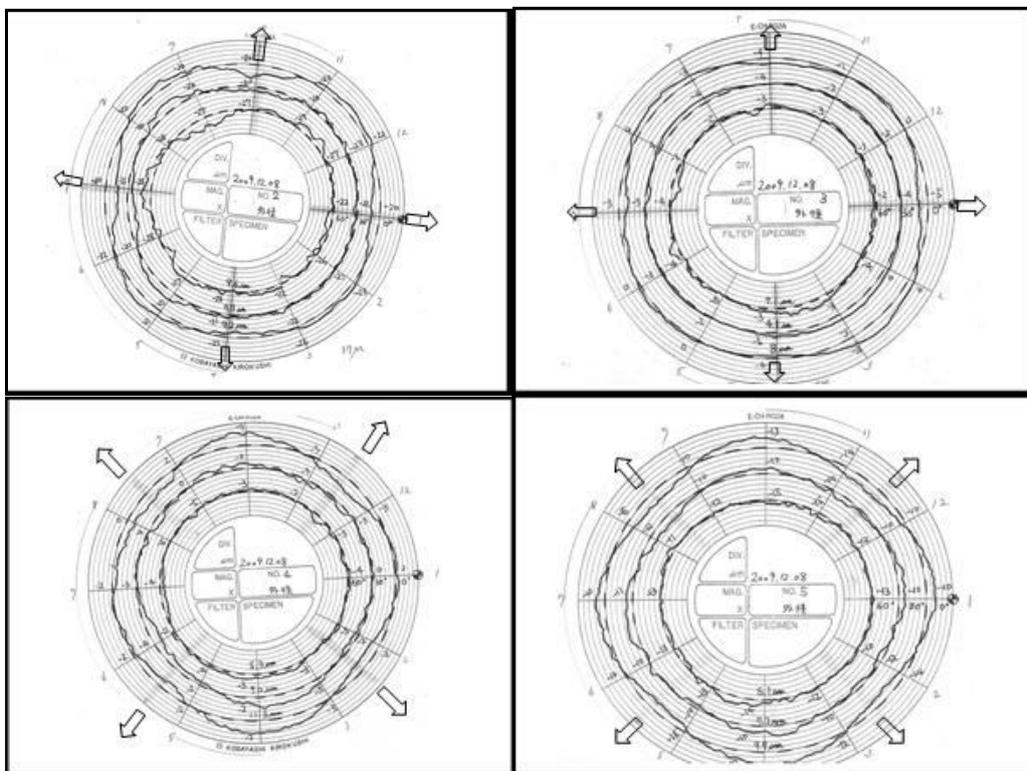


図 1 0 4 つ爪チャックの把持位置 (矢印) とロンコム 2 0 A 型真円度計による真円度
左上図 : 試料 No. 2、右上図 : 試料 No. 3、左下図 : 試料 No. 4、右下図 : 試料 No. 5

4つ爪チャックの固定位置と真円度の歪みには明らかに関連があるので、課題として取り組み、図11に示す6つ割りの把持様治具を設計・作成しこの治具を用いることにより解決を図った。

切削条件

使用機械：オークマ MULTAS300
 切削条件：前回の4つ爪チャックの条件
 主軸回転数：400rpm
 切り込み量：0.1mm
 送りスピード：0.05mm/rev
 バイト材質：超硬 T1200A ノーズ R0.8mm



図11 6つ割りの把持様治具の外観

結果

6つ割りチャックを使用し手切削したサンプルの測定チャートを図12に示す。

4つ割りチャックを使用した場合に最も良い真円度を示した試料 No. 4 との真円度の比較表を表18に示す。

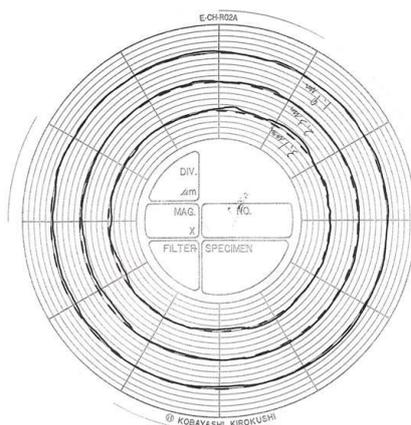


図12 6つ割りチャックの採用による真円度の向上

表12 6つ割りチャック治具の使用による真円度の向上

測定場所	4つ割チャック (μm)	6つ割チャック治具 (μm)
60°	6.3	3.1
30°	2.3	2.3
0° (赤道)	11.3	1.9

まとめ

4つ爪チャックの固定位置と真円度の歪みには明らかに関連があるので、課題として取り組み、この解決を図った。すなわち、本件課題に関しては6つ爪チャックとすることにより真円度の歪みがほぼ解消することを確認した。

2. 3 開発課題② 精密研磨加工技術の開発

2. 3-1 球面研削機による研磨技術の確立

精密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の確立を目ざし開発を行った。実験に用いた斜軸型精密研磨機の概観写真を図13に示す。



図13：研磨加工機 斜軸型精密研磨機

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、主軸揺動をさせることで、加工時間の削減が可能となる。

この斜軸型研磨機を使用する為には、加工物を保持する研磨用治具が必要となるため、この治具の設計開発を行った。

併せて、研磨砥石及び研磨剤を検討し、研磨条件の確立を行った。
精度目標は真球度 $5\mu\text{m}$ 、平均粗さ(Ra) $0.01\mu\text{m}$ 、最大粗さ(Rz) $0.2\mu\text{m}$ である。

結果と課題

真球度は目標 $5\mu\text{m}$ に対し $2.8\sim 8.2\mu\text{m}$ の結果を得た。さらなる検証が必要である。
表面粗さは $0.03\sim 0.07\mu\text{m}$ の結果を得た。さらなる検証が必要である。

今回は研磨時間が荒研磨120分、仕上げ研磨180分といずれも長く、これを短縮するために治具動作、砥石粒度をはじめとした研磨条件の見直しが今後の課題である。

2. 3-2 研磨加工後の真球度

カップの切削加工後に、精密研磨加工を行い、真球度を計測した。このXZ面及びYZ面の真円度チャートデータを図14に示す。切削加工で $32\mu\text{m}$ の真球からのずれが、研磨加工により、 $5\mu\text{m}$ 以下のずれ（本プロジェクトの目標値）に修正がなされた。このケースでは研磨代が大きいことから、生産性の向上には、この研磨代をいかに少なくするかが今後の課題である。

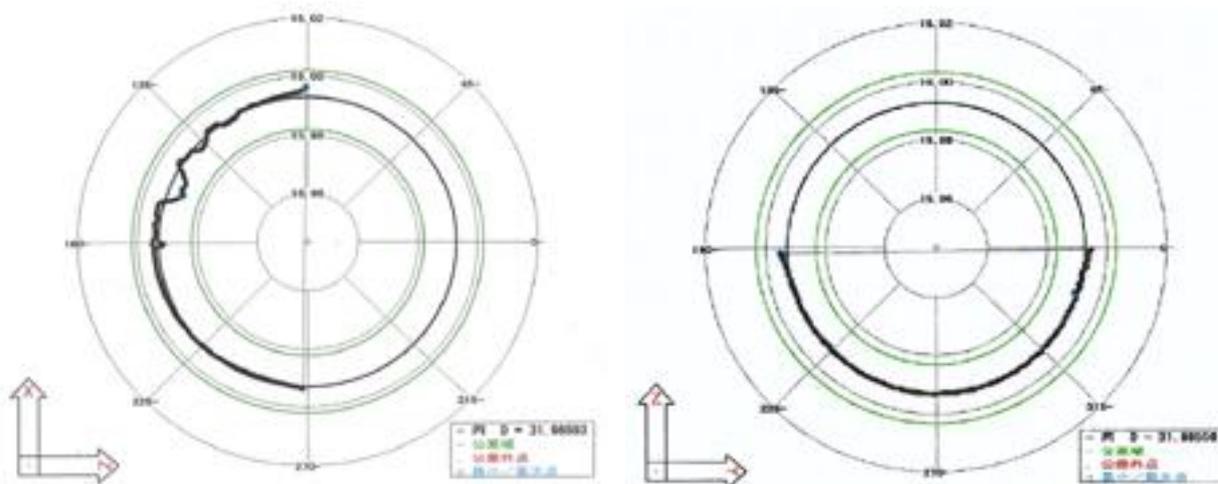


図14 研磨加工後のカップの真円度：xz面（左図）： $8.24\mu\text{m}$ 、及びyz面（右図）： $3.38\mu\text{m}$

2. 3-3 カップの研磨加工後の表面粗さ

カップの研磨加工後の表面粗さの計測値を表13に示す。また、その表面写真を図15に示す。

表13 カップの研磨加工後の表面粗さの計測値

	表面粗さの計測値	
	単位： μm	
	Ra	Rz
Scan No.1	<0.03	0.25
Scan No.2	<0.03	0.28

注)測定機の測定限界Ra: $0.01\mu\text{m}$

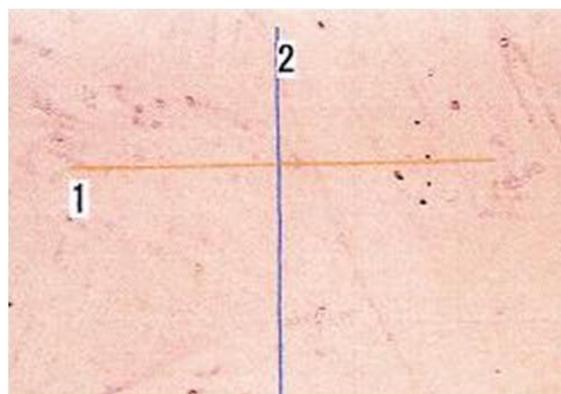


図15 カップの研磨加工後の表面粗さの計測面
図中の番号は、表20のScanNo.に対応する。

まとめ

Co-Cr-Mo合金製骨頭（ボール）及び臼蓋（カップ）の研磨加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra、Rz）に関しては、研磨加工後の表面粗さの目標値はRa： $0.01\mu\text{m}$ 、Rz： $0.2\mu\text{m}$ に対して、計測値はRa： $0.03\sim 0.07\mu\text{m}$ であり、目標値は未達成であった。ただし、今後の検討で、研磨時間数を十分にかければ達成可能と考えられる。最大粗さ：Rzに関しても今後の検討で十分に達成可能と考えられる。真球度に関しては、目標値の $5\mu\text{m}$ に到達した例があるが、この歩留まり向上が今後の大きな課題である。

2. 4 開発課題③ 流体潤滑条件の確立

2. 4-1 振子式摩擦試験（揺動振子法）の概要

振子法は、図 16 のような重力振子の支点に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。振幅の計測は、古くは目視で読みとっていた。

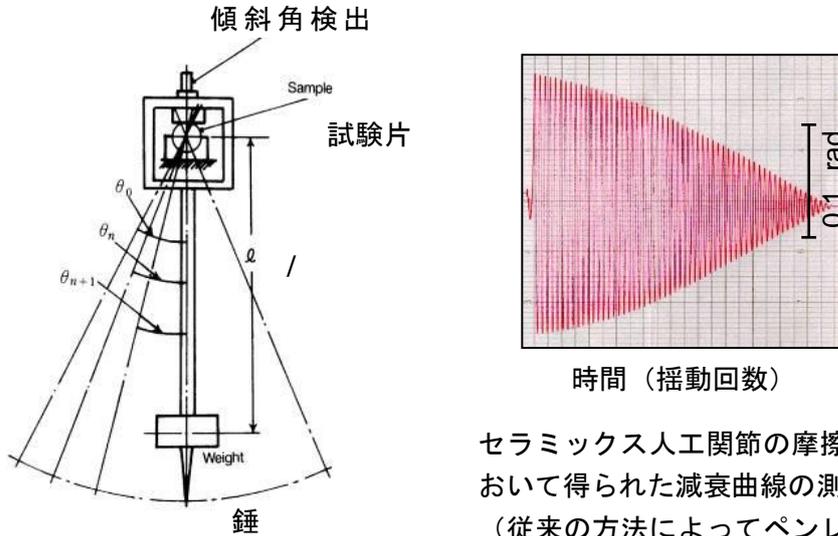


図 16 振り子装置の概略

セラミックス人工関節の摩擦測定において得られた減衰曲線の測定例（従来の方法によってペンレコーダに出力した減衰波形）

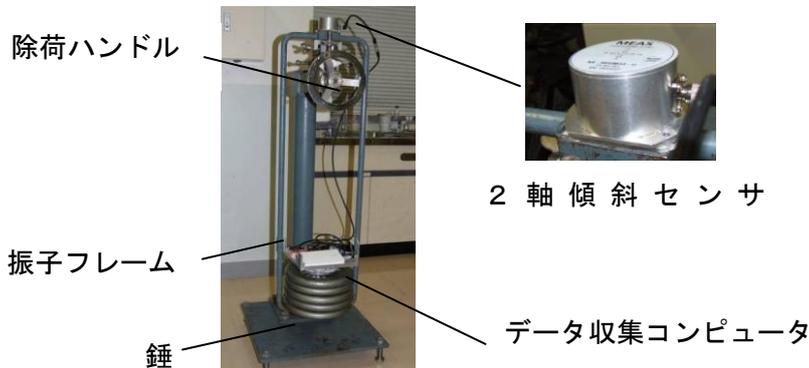


図 17 振り子装置の外観

その後、傾斜角検出器を用いる電気計測法を考案し現在に至っている。しかし、電気計測の場合は、電気配線が若干の抵抗を生むため、自由振動を妨げる。よって、千分の一の桁の摩擦係数の測定の際は、若干の誤差が避けられなかった。また、従来用いていた傾斜角検出器の測定範囲が ± 10 度と狭く、大きい振幅の測定はできなかった。また、測定方向が1軸であったため、振子の振れ回りによる振動方向の変化に対応できなかった。

本事業においては、従来の振子摩擦測定におけるこうした問題の解決を目指して、新規に振幅の計測システムを構築した(図 17)。傾斜角の検出には、図 17 に示すような ± 30 度までの計測が可能な、2軸傾斜センサを用いた。このセンサからのデジタル出力をノートパソコンに入力することでシステム全体を、振子の上に構築できた。さらに、このコンピュータを、無線 LAN を通じて外部のコンピュータと接続し、リモートデスクトップの機能を用いて、支配下に置いた。このシステムによって、ケーブルを接続せずにすべての角度データを収集した。

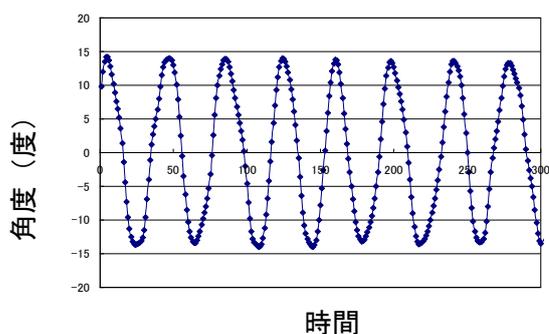


図 18 減衰振動波形のデータ例
 アルミナ骨頭／アルミナ臼蓋（骨頭径 28 mm）
 生理食塩液潤滑. 荷重 60 k g

2. 4-2 試作した Co-Cr-Mo 合金製臼蓋／骨頭の摩擦測定

本事業で試作した試験片の諸元は、表 1 4 のように、Co-Cr-Mo 合金の臼蓋 31.985 mm、骨頭 31.948 mm で、設計上の半径差は、18.5 μ m だった。また、既存の人工関節に用いられているアルミナ同士の組み合わせの試験片 1 と、UHMWPE とステンレス鋼の組み合わせの試験片 2 を比較対象として測定した（図 1 9）。

表 1 4 測定対象の諸元

	臼 蓋	骨 頭	半径差
試作品 102	Co-Cr-Mo 合金 31.985 mm	Co-Cr-Mo 合金 31.948 mm	18.5 μ m
対照試験片 1	アルミナ 28.0mm	アルミナ 27.966 mm	17 μ m
対照試験片 2	ステンレス鋼 30 mm	UHMWPE 29.8 mm	100 μ m



図 1 9 試作品 102 外観

アルミナ
骨頭

アルミナ
臼蓋



UHMWPE 骨頭

ステンレス
臼蓋

図 2 0 対照試験片外観.

流体潤滑の効果がある場合は、荷重を加えてからの時間に依存して摩擦が変化するので、荷重を加え直後の摩擦測定と、時間経過にともなう摩擦係数の変化についても測定を行った。潤滑液として生理食塩液を臼蓋に満たし、室温 23°Cの下で実験した。減衰振動波形は、図 16 のような、比較的直線的な減衰振動波形を描いた。よって、いずれの測定でも、包絡線の傾きから一定の減衰角度を求めることができた。

荷重直後の摩擦係数は、図 2 1 に示すように、試作品 102 では、平均 0.143 標準偏差 0.001、アルミナ/アルミナの試験片では、平均 0.028 標準偏差 0.001、UHMWPE/金属の試験片では、平均 0.126 標準偏差 0.003 だった。

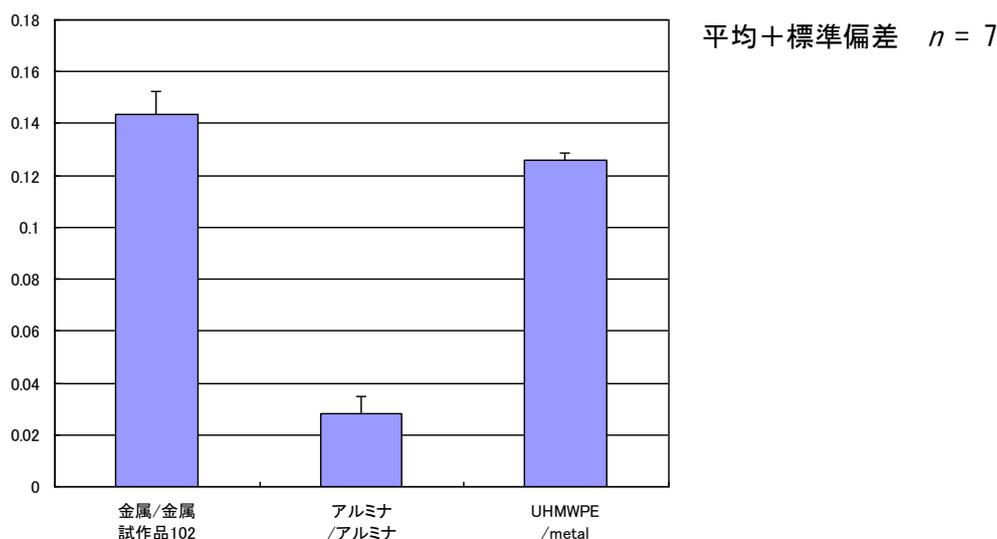


図 2 1 異種材料の摩擦係数. 60 kgf 荷重直後. 生理食塩液潤滑 室温 23°C

2. 4-3 切削研磨試料の振子式摩擦試験

本プロジェクトで製作した Co-Cr-Mo 合金製の $\phi 3.2$ のボールとカップの組み合わせの摩擦係数を北里大学において、振り子式摩擦試験機で計測した。ボールとカップの半径隙間をパラメータとしたため、カップは同一のものを使い、ボールを取り替えて計測した。潤滑液としては生理的食塩水を用い、各試料を 10 回ずつ測定し、その平均を求めた。

計測機、計測法は、前述の 2. 4-1 振り子式摩擦試験に記載の通りで、計測結果を表 15 に示す。

またボールとカップの半径隙間をパラメータとする摩擦係数を図 2 2 に示す。

図 4 6 によれば、半径隙間が $10.1 \sim 87.8 \mu\text{m}$ の範囲で、摩擦係数は $0.11600 \sim 0.15900$ の範囲にあり、半径隙間が $20 \mu\text{m}$ 近辺で摩擦係数の低下がみられる。この部分に流体潤滑の可能性があるが、今後のさらなる検証が必要であり、今後の課題である。なお、同時に実施した市販の人工股関節の UHMWPE 製カップと金属骨頭の摩擦係数の計測値は 0.126 であった。

表 1 5 摩擦係数の計測値

試料No.	ボールとカップの 隙間 (半径差: μm)	摩擦係数
2	18.5	0.12135
4	21.3	0.11600
5	41.5	0.14770
6	12.5	0.12230
8	87.8	0.15900
10	33.1	0.15800
11	20.6	0.12410
12	28.3	0.13430
14	49.6	0.14578
16	63.4	0.13436
20	10.1	0.13311

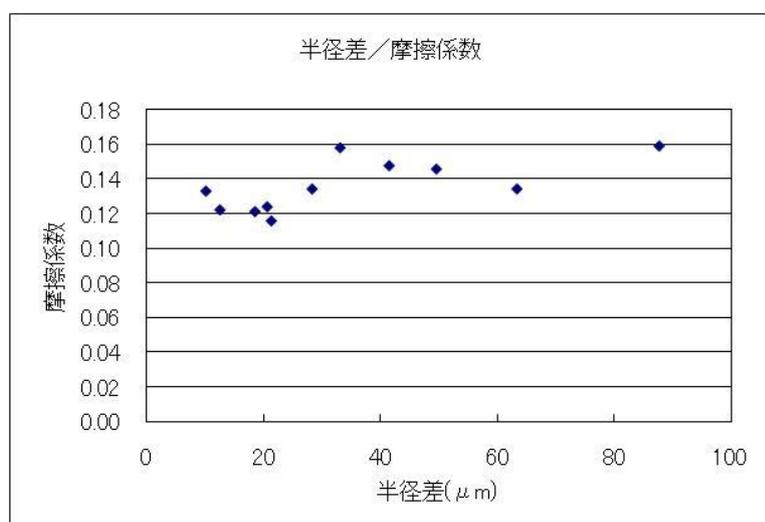


図 2 2 ボールとカップの半径隙間をパラメータとした摩擦係数の実測値

まとめ

振子式摩擦計測に関しては、本事業を契機にして、従来行ってきた振子式摩擦測定の見直しを行った。その結果、以下の成果が得られた。

- ①コンピュータのリモートデスクトップを応用することで、ワイアレス電気計測を可能にしてケーブル配線に伴う抵抗を除くことができた。
- ②最大 ± 30 度まで計測可能な2軸傾斜センサを用いることで、大振幅で自由な方向の揺動を正確に測定できるようになった。
- ③試作品 102 の Co-Cr-Mo 合金製のカップと骨頭の組み合わせの摩擦係数は、平均 0.143 の結果を得た。これは両者の隙間寸法が未だ管理されていないこと、表面粗さも管理されていないことなど、精密加工技術が開発途上にあり、試験片が目標の仕様を満足していないことが原因と考えられる。
- ④切削研磨試料の振子式摩擦試験において、半径隙間が $10.1 \sim 87.8 \mu\text{m}$ の範囲で、摩擦係数は $0.11600 \sim 0.15900$ の範囲にあった。

第3章 総括

本試験研究プロジェクトは、大型装置類の導入後の研究実施期間が極めて短期間であることから、本プロジェクト開始時点で所有の切削加工設備、計測設備を用いた切削加工技術の評価を行い、大型装置類の導入後の限られた期間内に成果を出せるように計画した。

【プロジェクト開始時点の切削加工技術の評価と課題】

1. プロジェクト開始時点で既に所有の設備及び Co-Cr-Mo 材料を用いて行った先行試作（試料 No. 1）及びこれに引き続いて第2回目の切削加工の結果（No. 2～5の4個）は、
 - ・真球度の目標値：10 μ m に関しては、三次元計測機による測定で目標達成は1個（試料 No. 3）で、新規設備の導入による目標の達成は十分に可能と推察された。
 - ・因みに、試料 No. 4 の真球度は11 μ m であり、試料 No. 3 及び No. 4 の2個が目標圏にある。No. 2 は32 μ m と目標から大きく外れ、No. 5 は17 μ m であり、この2個に共通しているのは北極に相当ポイントが凸に大きく外れており、このことが三次元計測機による真円度が大きく外れている原因と考えられる。
 - ・試料 No. 2 及び No. 5 共に、あくまで北極地点の凸へのずれが主要な原因と考えられる。
2. 表面粗さに関して、目標値 Ra : 0.2 μ m に関し、目標達成は1個であった。100 μ m 周期の大きな凹凸が、約0.3秒の周期で現れていることから、いくつかの仮説が考えられ、これらの仮説についての検証が課題である。
3. 4つ爪チャックの固定位置と真円度の歪みには明らかに関連があることが確認されたので、課題として取り組み、この解決を図った。
すなわち、本件課題に関しては6つ爪チャックとすることにより真円度の歪みをほぼ解消することができた。
4. 振り子式摩擦計測に関しては、本事業を契機にして、従来行ってきた振り子式摩擦測定の見直しを行った。その結果、以下の成果が得られた。
 - ①コンピュータのリモートデスクトップを応用することで、ワイヤレス電気計測を可能にして、ケーブル配線に伴う抵抗を除くことができた。
 - ②最大±30度まで計測可能な2軸傾斜センサを用いることで、大振幅で自由な方向の揺動を正確に測定できるようになった。
 - ③試作品102のCo-Cr-Mo合金製のカップと骨頭の組み合わせの摩擦係数は、平均0.143の結果を得た。これは両者の隙間寸法が未だ管理されていないこと、表面粗さも管理されていないことなど、精密加工技術が開発途上にあり、試験片が目標の仕様を満足していないことが原因である。

【本プロジェクトの実施】

本プロジェクトで計画した大型装置の導入と据付準備が平成22年1月に完了し、同2月から本格的に稼働を開始した。

【本プロジェクトの成果と課題】

1. 開発課題①精密切削加工技術開発、具体的な目標：Co-Cr-Mo合金製 ϕ 32の骨頭（ボール）及び臼蓋（カップ）の切削加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra）の向上に関しては、真球度の目標値（切削加工後）：10 μ m にほぼ到達した試料が少数ながらあったが、歩留まりの向上が今後の課題である。

表面粗さに関して、切削加工後目標値：Ra：0.2 μ mは、16個中目標をクリアしたボールは10個であり、歩留まりの向上が今後の課題である。

2. 開発課題②精密研磨技術開発、具体的な目標：Co-Cr-Mo合金製骨頭（ボール）及び臼蓋（カップ）の研磨加工精度（真球度及び表面粗さ：Ra、Rz）の向上に関しては、新規導入した精密研磨機の調整が時間不足から当初目標の機能を発揮するに至らなかったが、研磨加工後の表面粗さの目標値はRa：0.01 μ m、Rz：0.2 μ mであることから、計測値のRa：0.03～0.07 μ mでは目標が未達成である。しかし、表面粗さ計の計測限界が0.01 μ mであり、計測限界に近い値であり、また研磨時間数を十分にかける余裕が無かったことから、今後の検討で十分に達成可能と考えられる。最大粗さ：Rz についても今後の検討で十分に達成可能と考えられる。精密研磨機の調整とCo-Cr-Mo合金の研磨が今後の課題である。

真球度に関しては、目標値：5 μ mに到達した試料は、先行的に研磨を実施した試料でクリアした例があるが、この歩留まり向上が今後の大きな課題である。

3. 開発課題③生体適合性向上の流体潤滑条件の確立に関しては、摩擦試験に供するボールとカップの試験体の確保が真球度、表面粗さの条件が整った試料の必要量が時間的な制約により、必ずしも十分にできなかったことから、摩擦試験は限定的な結果を得るにとどまった。摩擦係数の目標値：0.05に対して、ボールとカップの半径隙間が20 μ mの条件で0.12を示し、流体潤滑様の結果を得た。なお、同時に実施した市販の人工股関節のUHMWPE製カップと金属骨頭の摩擦係数の計測値は0.126であり、この値とほぼ同一であった。しかし、さらなる検証が必要であり、今後の課題である。

4. 本プロジェクトで導入した三次元精密測定機の測定精度は、サブミクロンのオーダーであり、任意の球面の断面の真円度を計測することが可能で、真球度が悪い場合の原因究明に効果を発揮することを見いだした。

5. 以上をまとめ、本プロジェクトの成果を総括すると、本プロジェクトは、時間的に非常にタイトであり、極めて限定的な条件下での遂行を余儀なくされたものの、

- ①新規導入した精密旋盤、精密研磨機、精密三次元計測機のうち、精密旋盤に関しては時間の制約からタッチセンサーの効果を検証し、目標とする機能を発揮するまでの調整が不十分であった。また精密研磨機に関しては、取り付ける研磨用砥石の準備が納期の問題などにより不十分であり、Co-Cr-Mo合金の研磨に十分な効果を発揮できなかった。一方、精密三次元計測機に関しては、当初の予想通りの機能を発揮することを確認し、この装置の有用性を十分に確認することができた。
- ②上記の新規導入した設備の機能が限定的に発揮できたことから、難削材料（Co-Cr-Mo合金及びTi-6Al-4V合金）の切削加工による骨頭（ ϕ 32のボール）と臼蓋（ ϕ 32カップ）の切削加工では目標とする真球度、表面粗さは少数の個数では目標到達できたが、この歩留まり向上が今後の課題である。Co-Cr-Mo合金の切削後の研磨加工についてもこの歩留まり向上が今後の課題である。
- ③振り子式磨擦試験機による生体適合性の流体潤滑条件の確立に関しては、摩擦試験機の改良に成功し、データ取得の自動化やワイヤレス化に成功した。しかし、試験用のボールとカップの所定の仕様の試験体の準備が遅れたことから試験時間に制約を受けた。試験結果で、半径隙間が20 μ m近辺で磨擦係数の低下がみられ、この部分に流体潤滑の可能性はあるが、今後のさらなる検証が必要であり、今後の課題である。なお、同時に実施した市販の人工股関節のUHMWPE製カップと金属骨頭の摩擦係数の計測値は0.126であった。これらの検証が今後の課題である。