

平成23年度第3次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業

「波動歯車装置（ハーモニックドライブ）を使った

ロボット用小型独立関節機構の軽量高強度化技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 2月

委託者 近畿経済産業局

委託先 有限会社 吉則工業

## 目次

第1章	研究開発の概要	3
1-1	研究開発の背景・研究目的および目標	
1.1.1	研究開発の背景及び当該分野における研究開発動向	
1.1.2	研究開発の背景やこれまでの取り組み	
1.1.3	研究開発動向と本課題の取り組み	
1.1.4	研究の目的	
1-2	研究体制	7
1.2.1	研究組織及び管理体制	
1.2.2	管理員及び研究員	
1.2.3	経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	
1.2.4	所在地	
1.2.5	委託期間	
1.2.6	その他（委員会）	
1-3	成果概要	10
1-4	当該研究開発の連絡窓口	11
第2章	本論	12
2-1	100Wクラス関節駆動システムの高強度・高精度化	
2-2	100Wクラス両持ち機構（耐ラチェッティング対策）の開発	
2-3	200Wクラス関節駆動システムの開発	
2-4	400Wクラス関節駆動システムの開発	
2-5	プラスチック部材の最適化と高強度化	
最終章	全体総括	22
論文等		24

## 第1章 研究開発の概要

ロボット用動力伝達装置では高出力・高精度・軽量・コンパクト化が求められている。これまでの機構では、その重さと出力のバランスにより、大型化に限界があった。本課題では、波動歯車による高強度・高精度・軽量化をチタン・プラスチックで達成する多軸駆動機構を開発する。この駆動機構は複雑な多軸制御関節を実現することも可能なため、従来法に比べ、ロボット以外のより複雑な自動製造システムにも適用可能である。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

#### 1.1.1 研究開発の背景及び当該分野における研究開発動向

(実施内容は戦略的基盤技術高度化支援事業の要領に従い、下記のように分類されている。漢数字(八)や課題番号(3)、項目ア、イなどはこの要領上の番号である。本節のみに使用する。)

#### (八) 動力伝達に係る技術に関する事項

##### 1 動力伝達に係る技術において達成すべき高度化目標

#### ア. 歯車等の高精度化 イ. 高強度化・長寿命化

#### (3) ロボットに関する事項

##### ①川下製造業者等の抱える課題及びニーズ

#### ア. 歯車等の高精度化 イ. 高強度化・長寿命化

実用的な課題として医療、福祉等の分野に用いられるサービスロボットは、安全で多様な動作が求められている。

動作時に大きな負荷の掛かる二足歩行ロボットでは、部品の強度や耐久性は非常に重要な要素である。また、近年では省エネルギー、環境性能向上が求められるとともに、静音化も重要な課題となっている。特に二足歩行技術においては、関節制御の高精度化により、高速動作時の負荷に対応した小型独立関節機構の開発及び生産性効率向上のための多軸化等が必要になっている。また、吉則工業はこれらの課題について、本課題のアドバイザーかつ、ロボット製作者である「はじめ研究所」から技術開発の依頼を受け、平成17年から歯車機構の開発・改良・製作を行ってきた。特に主要取引製品である二足歩行ロボットでは、強度・軽量・低振動を満たす歯車機構の開発を行っている。

これまでは40Wが限界であったが、本課題では、駆動装置を開発することにより、100kg級ヒューマノイド型ロボットの開発を行うために必要な100W、200W、400W級小型関節機構の開発を行う。特に、ロボットに関する具体化した課題の中でも、ア. 歯車等の高精度化、イ. 高強度化・長寿命化、に焦点をあて、川下産業からの依頼を達成するためには軽量化する必要がある、波動歯車を用いた小型軽量高出力な関節歯車機構の開発を行う。

#### 1.1.2 研究開発の背景やこれまでの取り組み

「経済産業省技術ロードマップ 2009」には、次世代産業用ロボット分野の搬送ロボット、サービスロボット分野の搬送案内ロボット警備（安全・安心）お供（見守り）ロボット・メデアサービスロボット・日常生活支援ロボット・介護・福祉従事者支援ロボット、フィールドロボット分野の建設ロボット・水中作業ロボット・防災ロボット・プラント保全ロボット・

農業用ロボットの全タイプにおいて、移動技術研究の重要性を上げている。その中でも、本課題が目標とする「小型独立関節機構」は、二足多足機構実現の基盤技術の開発が必要な重要技術開発項目として「ロボット分野の技術マップ 重要技術」に挙げられている。また、経済産業省の「新経済成長戦略」にみられる、研究開発を加速化することが重要である理由として、外部リソースの積極的活用、我が国が強みを持っている産学官による「協働」の拡大、チームワークによる異なる知識やアイデアの融合などにより、技術革新等を起こす力を高めることが重要である」と記されており、①世界をリードする新産業の創出の項には、「新産業創造戦略」で位置づけられたロボット開発の重要性が述べられている。

申請者である吉則工業はロボット分野でも川下産業である「はじめ研究所」からの産業ニーズにこたえるため、小型独立関節機構の開発を行ってきた。はじめ研究所の二足歩行ロボット「はじめロボット 25 号」(平成 17 年)における市販平歯車による減速機の検討に始まり、次にウォーム歯車・平歯車の組み合わせによる減速機の試作を行い、これらすべての効率・出力の調査を行ったうえで、現在の波動歯車による種々の減速機の採用に至っている。「はじめロボット 33 号」(平成 21 年)では、そのひざ部分の駆動システムを設計し、世界最大となる 2.1m の二足歩行ロボットでロボカップジャパンオープン 2009 に参加し、その高い技術力が評価され、「日本ロボット学会賞 (2009)」を受賞した。はじめロボットはロボカップにおいて常に優秀な成績をおさめている。その技術力は国内外で高く評価されている。吉則工業はその関節の評価のため独自に関節用トルク試験機や疲労試験機を開発し、平成 21 年に大阪府から試験機製作をテーマとした経営革新計画が承認された。また同年大阪府の「大阪ものづくり優良企業賞 2009」において優良企業賞に選定された。

このように、ロボットに限らず、汎用的な観点からも試験機の開発を行うなど、国際的に、学術的・技術的観点から研究用・産業用の機器に関する研究開発を行っている。

### 1.1.3 研究開発動向と本課題の取組み

独立関節機構を組み入れたロボットや産業機械の大きさには厳しい制限があった。これは出力に比例し重くなるためである。従来のロボット用関節は 40W 程度であり大型に対応したものはなかった。また、従来の平歯車の減速機ではバックラッシが大きくなり、平歯車・軸受けベアリングの強度にも問題があり、使用には耐えない。本研究では高トルク型・少バックラッシ・軽量型の関節を波動歯車及びリンク機構で開発する。目標とするのは最終的に従来の 10 倍となる 400W である。この課題を「チタン難削材の高度な加工技術」を開発することにより、軽量化と高強度化を同時に満たす関節を開発する。

本課題では、上記技術開発のため、川下企業であるはじめ研究所をアドバイザーにチタン・樹脂による小型独立関節機構を実現するシステムの開発を目指す。この技術目標は「はじめロボット」で取り組んだプロトタイプの小型独立関節機構を基礎に、4kg・400W・2600kgfcm を実現する。

国内外で広く取り組まれている鋼材にかわり、チタン・樹脂リンク機構にチャレンジするため、加工の高精度化による高強度化・省伝達ロス化を行う。すなわち、削りだしによるシングルリンク機構を用いた波動歯車の出力を高効率化する伝達するシステムを開発する。

高度な制御が必要なロボットに適用することで申請者は世界に先駆け、2m 級ロボ

ットの二足歩行、ならびに、自律制御状態でサッカーボールをゴールに入れる稼働をすべて安定した駆動制御により実現しロボット学会賞を受賞するなど(はじめロボット 33号 平成 21年)、世界最先端の産業能力を有する。本課題の成果は、小型独立関節機構だけに限定されるものではなく、産業用に重要なオートメーションシステムの軽量化に適用可能である。

従来の小型独立関節機構での課題において、それぞれを満足させる技術を目指し、データベースと、その利用による軽量高強度化を満足するロボット用関節駆動システム開発(関節駆動部の高出力・高強度化と波動歯車ケーシングリンク機構の開発)を行う。

#### 1.1.4 研究の目的

本課題は、川下企業であるはじめ研究所をアドバイザーに軽量高強度化を満足するロボット用関節駆動システムを開発する。チタン・樹脂による小型独立関節機構を実現するシステムの開発を目指す。

ここで、今年度内は、川下産業となる「はじめ研究所・東洋理機工業」からは、膝関節用小型独立駆動装置について、10%以上の軽量化、20%以上の高強度化が求められている。具体的には、従来は波動歯車機構がラチェッティングを起こすことが欠点であった。例えば歯車径38mmでは、650kgfcmまでが限界であった。本課題では、駆動装置を開発することにより、通常の片持ち機構を両持ち機構に変え840kgfcmを22年度に100Wクラスとして実現し、23年度はその倍の200Wクラス、24年度には100kg級ヒューマノイド型ロボットの開発を行うために必要な400W級小型関節機構の開発を市場動向を見ながら着実に行う。

特に、ロボットに関する具体化した課題の中でも、ア. 歯車等の高精度化、イ高強度化・長寿命化、に焦点をあて、川下産業からの依頼を達成するためには軽量化する必要があるため、波動歯車を用いた小型軽量高出力な関節歯車機構の開発を行う。

#### 高度化目標

##### ア. 高精度化

従来は、鉄鋼系材料の平歯車を組み合わせていた。この場合、バックラッシが大きい。

このため、本課題では組み合わせ平歯車に変わり、バックラッシの小さい波動歯車の減速機構を作成する。この場合、ラチェッティングを起こさない構造設計とする。また、より高トルク化を目指しリンク機構を高精度化する。

また、従来はフライス加工によりリンク部を製作する場合、必要となる加工は多工程に及ぶ。

本課題では、単工程で可能な、チタンのリンク部加工を行うための多軸制御加工システムを導入し、生産の効率化と材料の高強度化も同時に達成する。その利点は軽量条件を満足する高精度化・高強度化であり、 $2\mu\text{m}$ レベルの高精度化を達成する。さらに、高強度化のため駆動軸と取付け座を一体加工し、原理的にはめあい誤差をなくす。さらに、バックラッシ量を1/6にする。この技術は、NEDO技術戦略マッ

プ2009設計・製造・加工分野の(2) 研究開発の取り組みにあげられている各種技術においても、「チタンなどの難削材の加工技術」や「大型設備を使わないで製品の大きさにあった省エネタイプのミニマム製造技術」が製造現場から求められているというニーズにこたえるものでもある。

#### イ. 高強度化

従来の鉄鋼材料の関節機構では、波動歯車に関節機構を取り付けて耐荷重性を向上させている。この場合、出力を10%向上させるには、最低でも、波動歯車機構の1.5倍の重量が必要となるため、ロボットの大幅な重量増加につながる。

本課題では、これを軽減するため、安価なジュラコン系、高価なPEEK系の摺動部材が有力な候補としてアドバイザーである「はじめ研究所」坂本元氏から指摘があり、2009年ロボカップにおいて、はじめロボット33号と39号の摺動部に両材料を試験的に用いた。ここでは、軽量化の観点から、従来の鉄鋼系材料と比較し、36%にまで軽量化されることがわかっている。(例 歯車径38mmに対する内径40mm外径50mm厚さ5mmの摺動部について、比較すると、28gが10gになる。) しかし、駆動部の強度に関しては、加工の仕上げとその表面精度、摺動特性により、どの摺動部材が適切か、が明らかではない。今後、摺動部材の選択が極めて重要視されることがアドバイザーからも指摘されているため、ジュラコン系樹脂とPEEKについて、ラチェッティングトルクで100回繰返しても、耐えうる材質を見つける。

#### 技術目標値

##### ア. 高精度化

本課題では、単工程で可能な、チタンのリンク部加工を行うための多軸制御加工システムを導入し、生産の効率化と材料の高精度化も同時に達成する。2 $\mu$ mクラスの高精度化を達成する。組合わせ誤差を従来の50 $\mu$ m から原理的に0にする。最終的に、従来はバックラッシ量30arc minが限度であったが、波動歯車とリンク機構により5arc minを目指す。

##### イ. 高強度化

本課題では、ジュラコン系の摺動部材により従来の鉄鋼系材料と比較し、ラチェッティングトルクで100回の繰返しでも変化しない材料を見つける。関節機構全体で高強度化を行うため、樹脂を取り入れることにより、直接動力を伝達可能なシステムを作り、軽量条件を同時に満足する高強度化を目指す。

従来技術と比較し、20%の高強度化を行う。Φ38サイズの波動歯車について、従来の650kgfcmのラチェッティングトルクを840kgfcmにまで上げる。400Wクラスの駆動装置に耐えうる高強度化を行う。人間の屈伸運動を実現するため、400Wクラスでは、2600 kgfcmを目指す。このように、従来に比べ、20%の高強度化・軽量化を目指す。軽量化の観点から限られた可動範囲の場合は、波動歯車の大型化でトルクupを計るより、リンク機構を採用することで軽量化・高トルク化を計る。

## 研究目標のまとめ

ロボット用動力伝達装置では高出力・高精度・軽量・コンパクト化が求められている。これまでの機構では、その重さと出力のバランスにより、キッズサイズが限界であった。本課題では、波動歯車による高強度・高精度・軽量化をチタン・プラスチックで達成する多軸駆動機構を開発する。この駆動機構は複雑な多軸制御関節を実現することも可能なため、従来法に比べ、ロボット以外のより複雑な自動製造システムにも適用可能である。

独立関節機構を組み入れたロボットや産業機械の大きさには厳しい制限があった。これは出力に比例し重くなるためである。従来のロボット用関節は40W程度であり大型に対応したものはなかった。また、従来の平歯車の減速機ではバックラッシュが大きくなり、平歯車・軸受けベアリングの強度にも問題があり、使用には耐えない。本研究では高トルク・少バックラッシュ・軽量型の関節を波動歯車及びリンク機構で開発する。目標とするのは最終的に従来の10倍となる400Wである。この課題を「チタン難削材の高度な加工技術」を開発することにより、軽量化と高強度化を同時に満たす関節を開発する。

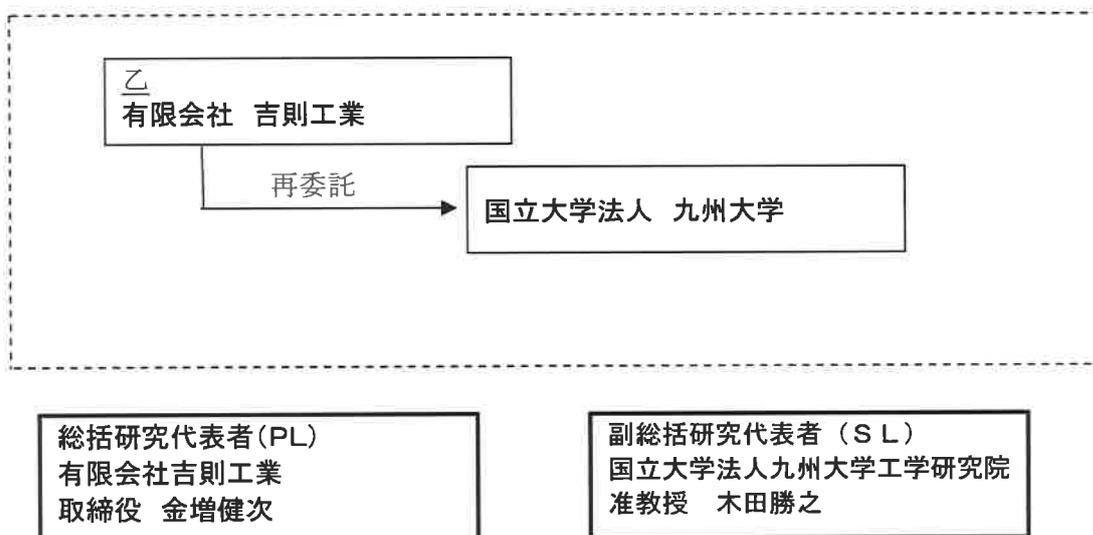
従来、波動歯車機構の欠点の一つはラチェッティングを起こすことであった。その原因は種々考えられるが一般的な使われ方である片持ち構造であることが一つの原因である。その欠点の一解決方法として波動歯車内部のベアリングを両持構造とし、そのケーシングを含めた構造設計を行い耐ラチェッティング性を高める。そして、川下産業からの依頼である大トルクで重量当たり、より高トルクな関節機構を100W・200W及び400Wクラスで波動歯車を用いた小型軽量高出力な関節歯車機構の開発を行う。

## 1-2 研究体制

事業を円滑に推進するため、プロジェクトの運営・管理、事業進捗状況管理、プロジェクト参画者間の調整、財産管理、事務的管理及び研究開発成果の普及等を行う。

### 1.2.1 研究組織及び管理体制

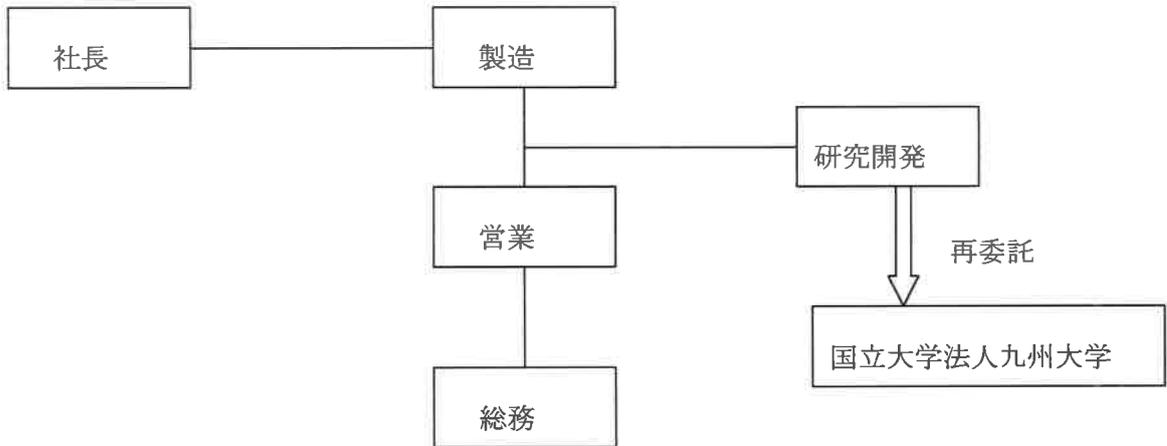
#### 1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

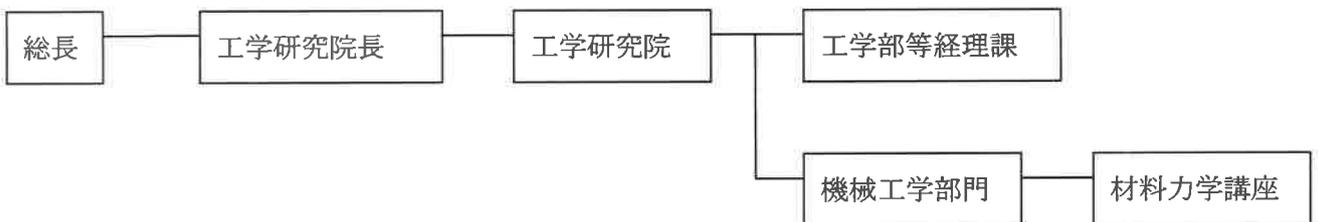
①事業管理者

[有限会社吉則工業]



② (再委託先)

[国立大学法人九州大学]



1.2.2 管理員及び研究員

【事業管理者】 有限会社吉則工業

①管理員

氏名	所属・役職	
金増健次	取締役	
金増恵子	総務 経理主任	

②研究員

氏名	所属・役職	
金増 健次	取締役	
金増 順二	研究員	
古池 仁暢	研究員	
金増 恵子	研究員	

【再委託先】 国立大学法人 九州大学

氏名	所属・役職	
木田 勝之	工学研究院 機械工学部門 准教授	

1.2.3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者) 有限会社吉則工業

(経理担当者) 経理主任

金増 恵子

(業務管理者) 取締役

金増 健次

(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

1.2.4 所在地

①事業管理者

有限会社 吉則工業 本社 (最寄り駅: 阪神電車本線 姫島駅)

〒555-0034 大阪府大阪市西淀川区福町 1-1-7

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。)

有限会社 吉則工業 本社 (最寄り駅: 阪神電車本線 姫島駅)

〒555-0034 大阪府大阪市西淀川区福町 1-1-7

国立大学法人 九州大学 (最寄り駅: J R 鉄道筑肥線 九大学研都市駅)

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地

1.2.5 委託期間

平成22年9月1日 から 平成24年12月28日まで

1.2.6 その他 (委員会)

①意見交換委員会及び報告委員会委員

氏名	所属・役職	備考
金増 健次	有限会社吉則工業 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
金増 恵子	有限会社吉則工業 経理主任	
金増 順二	有限会社吉則工業 技術研究員	
古池 仁暢	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 テクニカルスタッフ	

Rozwadowska Justyna	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 テクニカルスタッフ	
瓜生 めぐみ	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 テクニカルスタッフ	
猿渡 憲一	国立大学法人九州大学 工学研究院 機械工学部門 テクニカルスタッフ	
坂本 元	有限会社 はじめ研究所 取締役	
細見 成人	東洋理機工業株式会社 代表取締役 RooBO 運営委員長	
田邊 裕貴	公立大学法人滋賀県立大学 工学部 准教授	

## 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
坂本 元	有限会社 はじめ研究所	二足歩行ロボットの専門家として、小型独立関節機構のシステム開発に対するアドバイスをいただく。
細見 成人	東洋理機工業株式会社	産業用ロボットの専門家として、高出力関節の産業への応用に関するアドバイスをいただく。
田邊 裕貴	(公) 滋賀県立大学	材料強度の専門家として、チタン材料の表面損傷についてアドバイスをいただく。

### 1-3 成果概要

ロボット用動力伝達装置では高出力・高精度・軽量・コンパクト化が求められている。本課題では、波動歯車による高強度・高精度・軽量化をチタン・プラスチックで達成する多軸駆動機構を開発した。この駆動機構は複雑な多軸制御関節を実現することも可能なため、従来法に比べ、ロボット以外のより複雑な自動製造システムにも適用可能である。従来の鉄鋼材料・アルミ材料に変わるチタンを加工するため、CAD/CAMを導入し、また、新装置高効率複合加工機による一括加工で生産の高効率を達成した。さらに、装置の高精度化・高強度化を達成するため、新装置、高効率複合加工機械を導入した。従来の鋼材と比較し、軽いチタンとジュラコンの特性を把握するため、摩耗特性の分析を行った。具体的には、樹

脂の変形特性を実験で確認し、その後、100W リンク機構用疲労試験機を用いて、リンクと樹脂ブッシュの稼働特性を評価した。ここで、本研究では強化PEEK, PEEK, POMを用いたが、PEEKはバックラッシが小さく、安定することがわかった。また、POMでは、摩耗試験負荷回数5000回まで動作したが、接触面が大きく摩耗してバックラッシが増加し、安定しない。強化PEEKでは、この2つの材料に比べ摺動性、耐摩耗性ともに優れていることがわかった。また、強化PEEKでは、摩耗試験負荷60,100,140,200kgfcmの条件で実験した結果、摩耗試験負荷が大きくなるほど接触面の変色面積が増えて、表面粗さは小さくなることがわかった。このように、バックラッシが増減している理由としては摩耗粉の影響、表面粗さの影響などが考えられる。摩耗試験負荷トルク200kgfcmの場合はブッシュの摩耗が大きくなるため結果的に摩耗試験負荷140kgfcmの場合が最もバックラッシの推移が安定した。ここで、摩耗試験負荷トルクとバックラッシの関係は様々な要因から変化していたが、表面粗さ、摩耗、なじみによる影響、材料特性などに着目して考えることで理解することが出来た。ここで、強化PEEKを用いることで小型独立関節のブッシュに必要な摺動性、耐摩耗性を得ることが出来、200kgfcmまでトルクを出力することが出来た。また、バックラッシの大きさは10~20arcminとなり、キッズサイズロボットに用いられる多段平歯車機構と比較して出力は33%、バックラッシは66%改善された。バックラッシは摩耗試験回数や摩耗試験負荷トルクに比例して大きくなる訳でなく、本研究では二番目に負荷が大きい140kgfcmの場合にバックラッシが最も小さくなるという結果を得ることが出来た。これは、140kgfcm以下の負荷ではブッシュの片当たりから十分ななじみの影響を受けることが出来ず、200kgfcm以上の負荷では摩耗の影響が大きく出たため、バックラッシが大きくなったことが原因である。

以上のように、1年目に100Wクラスの関節、2年目においては200Wクラスの関節の研究を行い、それぞれその目標を達成した。その間その試験に対応する試験機等を順次開発し、本年最終年は本研究の最終目標である400Wクラス関節、最大トルク2600kgfcmで100サイクル稼働を達成した。バックラッシに於いても、目標である5arcmin以下を $2 \times 10^3$ 回作動時に於いて達成した。その後、 $10^4$ 回の継続テストに於いてバックラッシは12arcminとなった。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

有限会社吉則工業 本社（最寄り駅：阪神電鉄本線 姫島駅）  
〒555-0034 大阪市西淀川区福町1丁目1番7号  
（フリガナ）：カネマス ケンジ  
氏名： 金増 健次  
所属役職： 取締役  
Tel: 06-6475-0067 Fax: 06-6475-0274  
E-mail: [kanemasu@yosinori.co.jp](mailto:kanemasu@yosinori.co.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 100W クラス関節駆動システムの高強度・高精度化

従来の駆動伝達では、波動歯車で発生したトルクを受ける機械要素である「ピンとベース」は別部品であり、それぞれを別加工していた。この場合、ピンの根元にかかる荷重が過大に集中することにより設計が難しい、また、ゆるみが発生するという欠点があった。本課題では、この解消に取り組んだ。

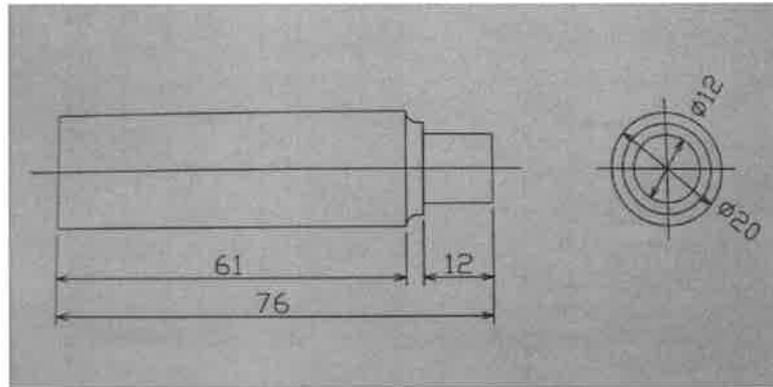


図 2-1-1 ピン

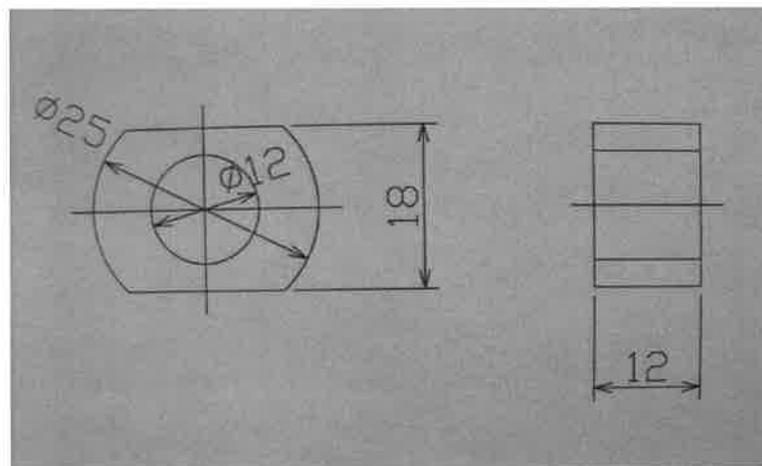


図 2-1-2 ブッシュ

この技術開発では、高強度化と軽量化を同時に行う必要があるため、従来の鉄鋼材料・アルミ材料に変わる「チタン」を加工するための設計を行った。CAD/CAMを導入して、ピン根元における応力集中が緩和されるように、設計図面を作成した。また、その構成部品を材料等の選択も含め設計を行った。自社既存の設備を用いて 100W リンク機構用疲労試験機を自主製作し、設計品の組み合わせを確認した。チタンの組み合わせの相手材(ブッシュ)には、樹脂ブッシュを用いた。

リンク機構構成部材であるクランクシャフトを評価試験用に単純モデル化したシャフト(図 2-1-1) 及びその相手部材ブッシュ(図 2-1-2)を設計した。シャフト材料においては高強度・軽量・耐食性に優れ最も汎用で流通量も豊富なチタン(TB340)と軽量で安価なジュラルミン(A2017)、高強度な超々ジュラルミン(A7075)について検討した。ブッシュ材においては安価で汎用品のポリアセタール(POM)、高価であるが高強度なポリエーテル・エーテル・ケトン(PEEK)のそれぞれのナチュラルとハイグレードの全4種について検討した。

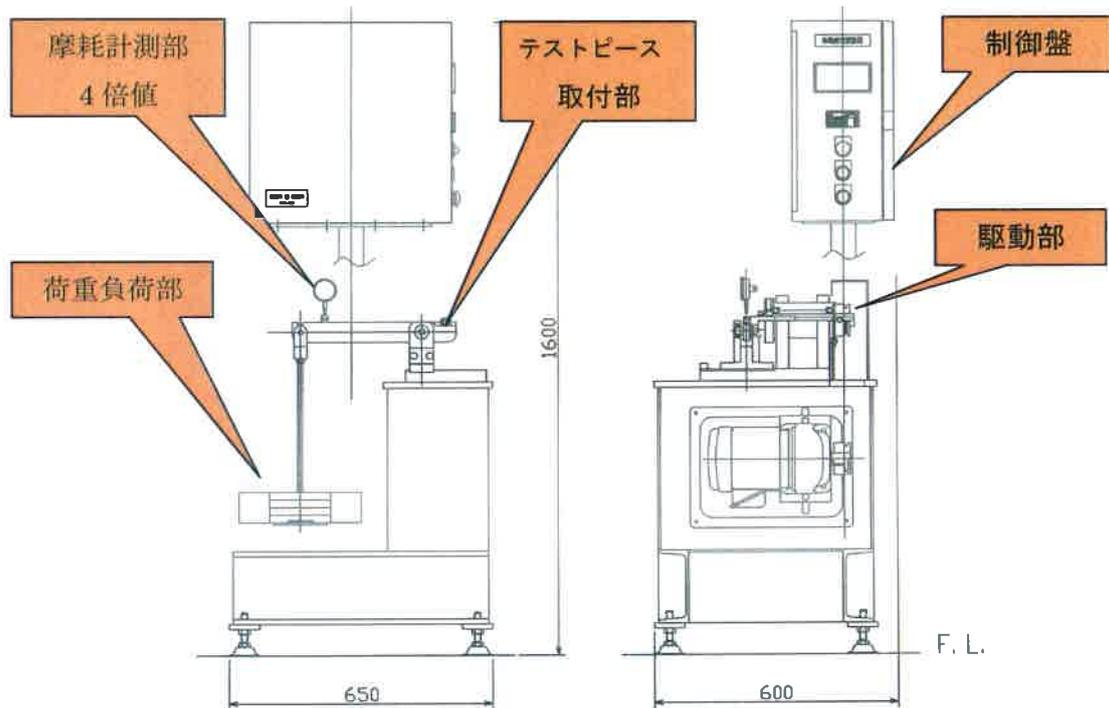


図 2-1-3 試験機の模式図

評価試験機としては、100W リンク機構用疲労試験機を構想立案した。具体的には、リンク機構構成部品であるシャフト（Ti・Al 材）とブッシュ（POM・PEEK 材）間の摩擦による摩耗及び疲労強度を測定する試験機を開発した。その試験機のプロトタイプを図 2-1-3 に示す。

この試験機の仕様は下記のとおりである。

[試験条件]	[仕様]
荷重 20~400kgf	電源 3φ200V60Hz
回転数 40~140rpm	駆動モーター AC0.75kw

切削条件については、ほぼ 3 条件を確かめれば、最適な回転数を定めることができることに注目し、3 条件で確かめた。次に、送り速度は表面粗さに影響するので、送り速度を 3 条件で確かめた。また、切り込み量は 3 条件で確かめた。そのあと、仕上げ加工を行ったが、この仕上げについて、顕微鏡で確認した。また、装置本体開発を行った。自社既存の設備を用いて 100W モデル関節用疲労試験機を自主製作し、試作加工品の組付けを確認した。チタン製クランク軸の加工条件別の PEEK ブッシュへの摩耗および熱変形の影響について評価を行い、生産のバランスからも適切な加工条件を決定した。この結果、標準加工条件として 315rpm F30 がよいことがわかった。従来は、鉄とアルミの部品を全 12 個の歯車を組み合わせ、すり合わせによる最終仕上げをしていた。これによる精度は、最終的にバックラッシュ量 30arc min が限度であった。本課題では、これまでの複数工程を新しく一体加工に集約する。この集約化により、ゆるみの発生をなくし、装置の高精度化・高強度化を達成する。このため、新装置、高効率複合加工機械を導入した。これは 4 軸加工により、ワンチャッキングで多面加工が可能である。新装置の高速回転機能による切削速度は、従来に比べ 10 倍高速化されており、加工時の切削精度の向上をもたらす。これにより、つかみなおし回数を削減し、人的ミスをなくし寸法精度を 2 $\mu$ m 以内に抑えることができた。

前節で決定した加工条件によりチタンシャフトと PEEK ブッシュの組合せとする部品を製作し組み付け試作関節を製作した。その図を図 2-1-4 に示す。その評価試験機としてバックラッシ測定装置及び 100Wモデル関節用疲労強度評価試験機を開発した。



波動歯車装置  
(ハーモニックドライブ)  
SHD-14-100-2SH

図 2-1-4 試作した関節

バックラッシ測定装置の構造については、リンク機構を内蔵する関節駆動ユニットのバックラッシを計測するバックラッシ測定装置の構想を立案した。その内容を図 2-1-5 に示す。

この試験機の仕様を下記に示す。

[試験条件]

負荷トルク 30～150kgf・cm

最小検出角度 0.25arcmin/1PLS

[仕様]

電源 単相 100V60Hz

(5arcmin/20PLS)

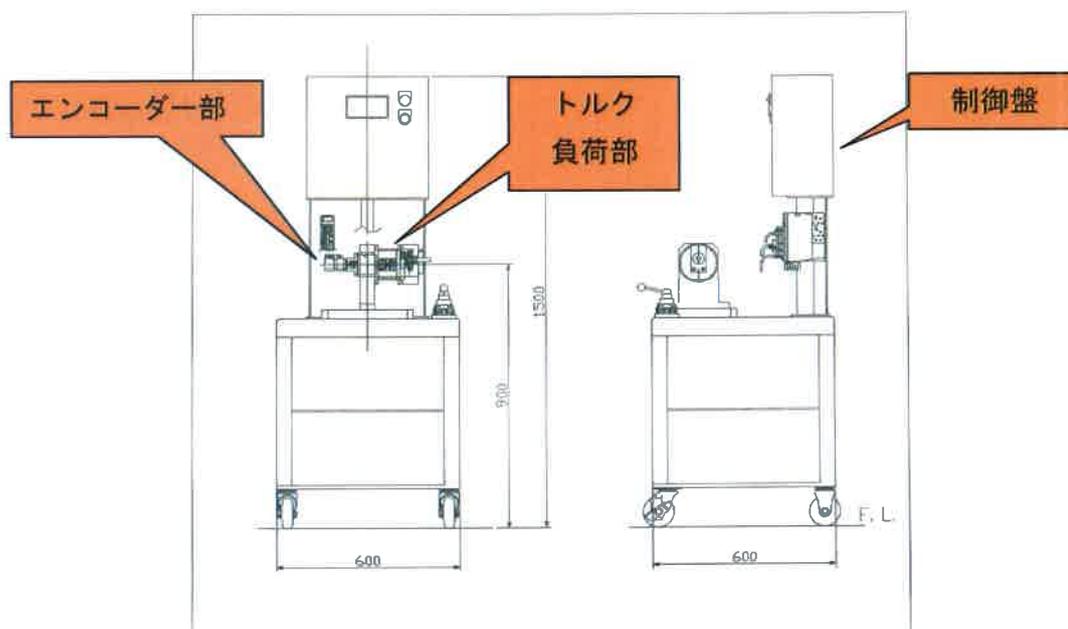


図 2-1-5 バックラッシ測定装置の構造

## 2-2 100W クラス両持ち機構（耐ラチェッティング対策）の開発

次に、生産の効率化に対応した技術開発の方向性、難削材加工技術の研究開発、工

作機械の低コスト化に関する研究開発を行った。

片持ち機構を両持ち機構に変え 840kgfcm を実現するため、昨年度に導入した加工装置を用いて、CAD データをもとに加工を行った。図 2-1-1、図 2-1-2 および図 2-1-3 示した図面をもとに構造比較を行い、高機能複合立形マシニングセンターを用いて、部品の加工を行った。2 種類のアルミ合金(A2017 A5052)をその強度及び切削性を考慮すると A2017 が優位である。

図 2-2-1 加工完成品  
及び関節組立品



図 2-2-1 はその加工完成品及び関節組立品である。

この加工において、3 次元 CAD/CAM を利用し、両持ち部のケーシングの構造を設計することができた。

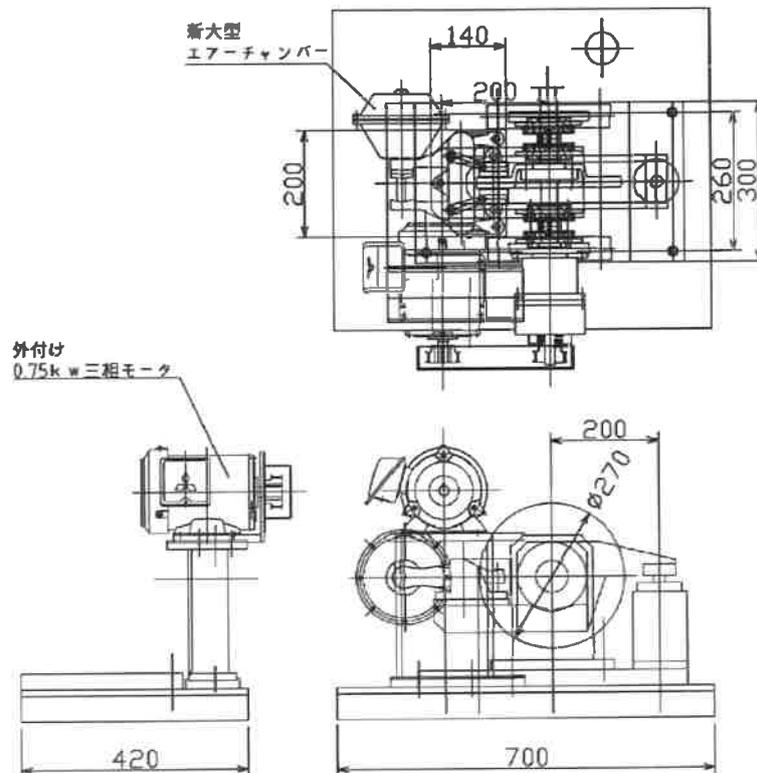


図 2-2-2 強度評価試験機

大型・高トルク仕様関節の強度評価試験のため、前年開発の試験機の高トルク機を改造設計した (図 2-2-2)。大型エアーチャンバーによりクランプ力を高める等による従来比、約 3

倍の 2200kgfcm の高トルク化を達成した。また外付けモーターの大型化により、従来比、10 倍の試験時間の効率化ができた。

トルク負荷をかける部分に関節の出力軸を固定し、出力軸に正転と逆転のトルク負荷を与える。エンコーダーで正転、逆転の負荷を与えた時の時のパルスを読み取り、パルスモニターに出力した。パルスモニターには 0.25 arcmin/pulse として値が出力される。本研究ではこの正転と逆転のパルスの差をバックラッシと定義した。

バックラッシ測定結果を図 2-2-3 に示す。幅 18mm のブッシュは測定負荷が大きくなるにつれ、バックラッシが大きくなった。バックラッシ測定負荷トルクに比例して大きくなっていることからブッシュの変形によるものと考えられる。しかし、幅 17mm のブッシュは条件 D(50.87 kgfcm)と条件 E(59.43 kgfcm)の間で急激にバックラッシが大きくなった。これは条件 D まで出力軸に与えられた負荷トルクをリンクユニットのカムプレートを挟み込んでいる部分の摩擦力が負担しているためと考えられる。実験の結果から、バックラッシを評価するためには、42.30kgfcm 以上の測定負荷トルクが必要であることがわかった。また、隙間がない場合にはバックラッシ測定負荷トルクに比例してバックラッシが大きくなることがわかった。

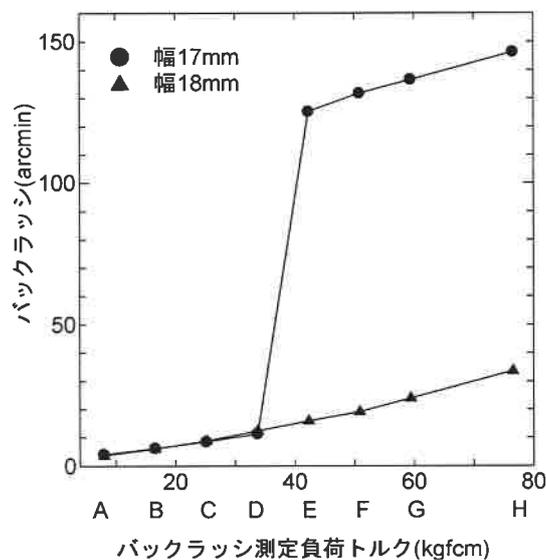


図 2-2-3 測定負荷トルクとバックラッシの関係

### 2-3 200W クラス関節駆動システムの開発

本課題では、一括加工により生産の高効率化が達成できるが、部品点数の減少により、摩擦ロスをなくすため、CAD 設計を行った。このとき、切削条件については、ほぼ 3 条件を確かめれば、最適な回転数を決めることができる。表面観察結果から、加工条件を決めた。前節の装置を用いて、200W クラスのロボット歩行に必要な耐トルク強度を測定した。組み立てる前にブッシュのカムプレートとの接触面を 3D レーザー顕微鏡(LCM)で観察する。その後、ブッシュを小型独立関節に組み込み、ブッシュの位置を出力軸に対し 12 時方向の位置にモーター制御によって移動させ、バックラッシを測定し、摩擦試験を行った。摩擦試験を 500 回行い、その後バックラッシの測定を行う。5000 回に達し

たら小型独立関節からブッシュを取り出し、ブッシュのカムプレートとの接触面を観察した。摩耗試験は開発した試験機を用いて行った。関節の出力軸とブレーキディスクをカップリングで締め付けることで連結させ、ブレーキディスクをブレーキパッドではさみ、関節を作動させることで出力軸にトルク負荷を与えることができる（図 2-3-1）。摩耗試験負荷トルクの値はロードセルを用いて荷重を読み取った。摩耗試験の負荷トルクの条件は表 2-3-1 に示す。2m級大型人型ロボットでは 800kgfcm 程度が必要となるが、今回用いた小型独立関節は試作機であるため、200kgfcm を目標トルクとした。出力軸の揺動角は  $60^\circ(\pm 30^\circ)$  とした。また、サーボモータの入力軸の回転速度は 1000rpm、揺動運動をしている出力軸の揺動速度は 14 往復/min とした。バックラッシの測定には前節で示したバックラッシ測定機を用いた。測定方法も同様に用いた。

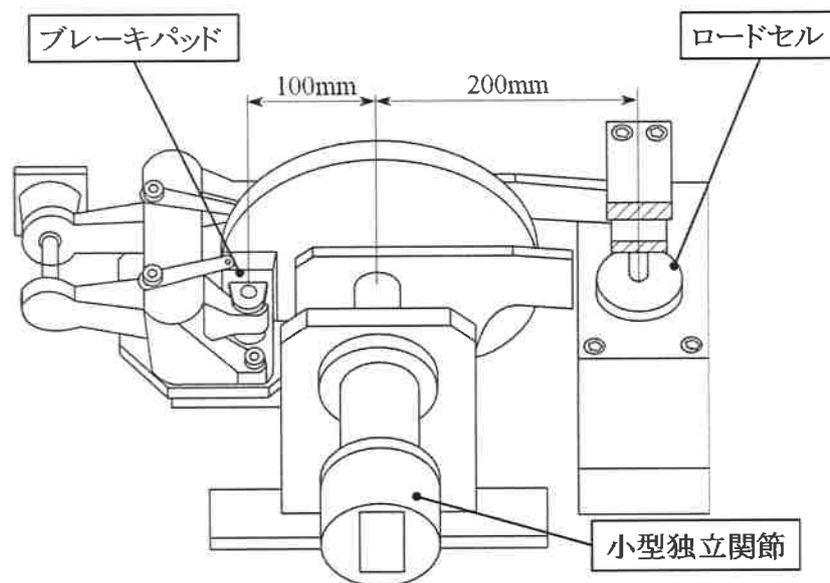


図 2-3-1 摩耗試験機簡略図

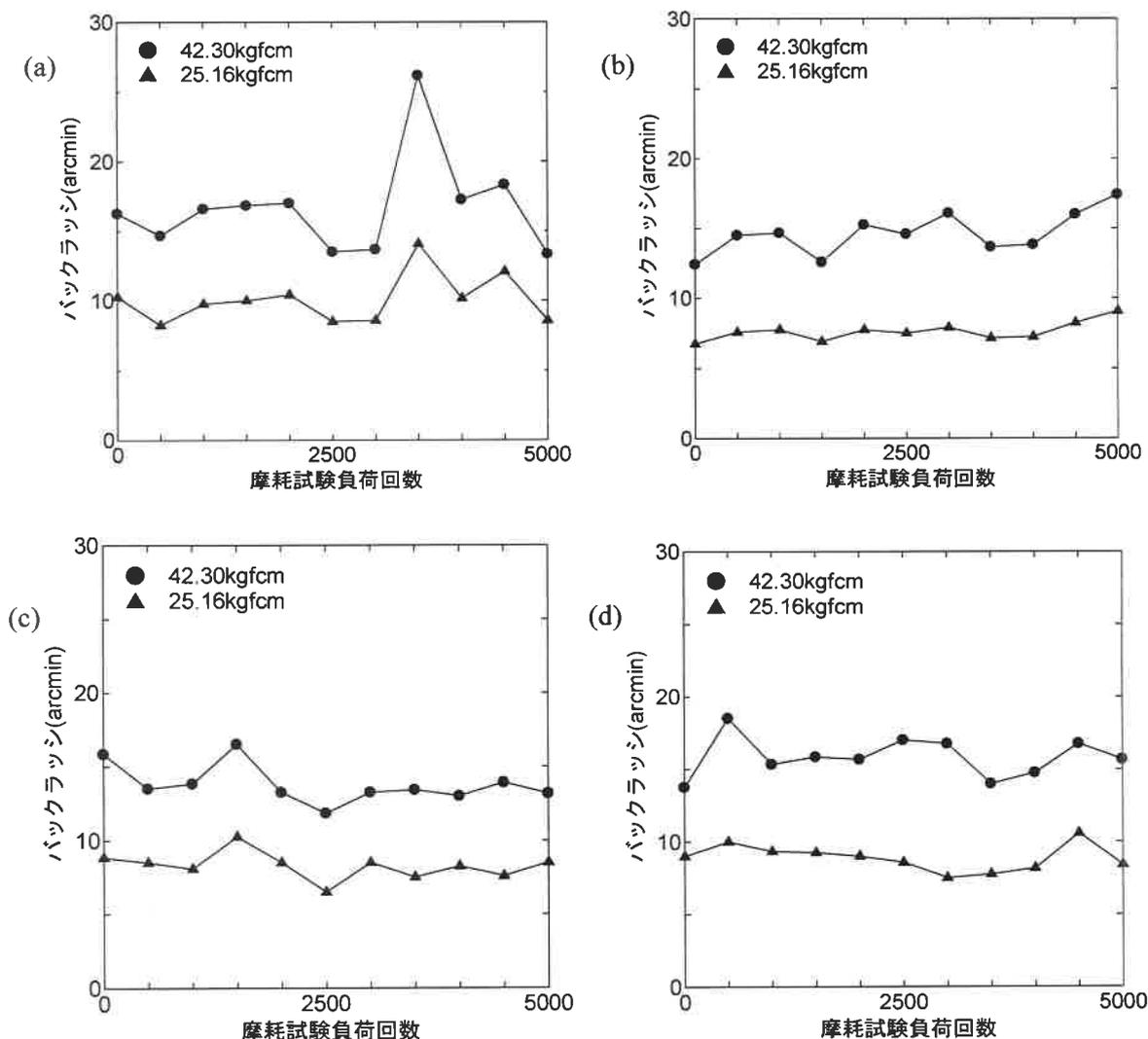
表 2-3-1 摩耗試験条件

		材料	負荷トルク (kgfcm)	負荷回数 (cycles)
サンプル 1	条件 1	強化 PEEK	60	5000
	条件 2		100	
	条件 3		140	
	条件 4			
サンプル 2	条件 5	PEEK	200	4200*1
サンプル 3	条件 6	POM		5000

\*1 摩耗試験中、出力軸が  $\pm 30^\circ$  の揺動運動をしなくなったため停止した。

摩耗試験とバックラッシ測定を 500 回毎に交互に行ったバックラッシ測定結果を図 2-3-2 に示す。本報では、強化 PEEK で摩耗試験負荷トルクを変えた場合について論じる。

図 2-3-2 (a)の負荷 60kgfcm では、バックラッシの増減の幅が大きく、摩耗試験負荷回数に対する推移が不安定になった。また、バックラッシ測定負荷トルクの違いによるバックラッシの推移が測定負荷に比例した形となっているので、前節の結果からブッシュとカムプレートとの間の隙間は存在していないと考えられる。図 2-3-2(b)の負荷 100kgfcm では負荷 60 kgfcm と比べるとバックラッシの増減の幅は小さく、安定した。しかし、初期のバックラッシに対して増加しており、バックラッシ測定負荷トルクの違いによるバックラッシの推移が少し異なっているため、60kgfcm に比べて隙間が生じていると考えられ、その結果バックラッシが増加したと考えられる。



- (a) 強化 PEEK, 摩耗試験負荷トルク 60kgfcm での負荷回数に対するバックラッシの推移
- (b) 強化 PEEK, 摩耗試験負荷トルク 100kgfcm での負荷回数に対するバックラッシの推移
- (c) 強化 PEEK, 摩耗試験負荷トルク 140kgfcm での負荷回数に対するバックラッシの推移
- (d) 強化 PEEK, 摩耗試験負荷トルク 200kgfcm での負荷回数に対するバックラッシの推移

図 2-3-2 負荷回数に対するバックラッシの変化

図 2-3-2 (c)の負荷 140kgfcm では低負荷と比べると、バックラッシの増減の幅はかなり小さく摩耗試験負荷回数 3000 回以降は変動していない。また、100kgfcm 負荷のようなバック

ラッシの増加は見られなかった。バックラッシ測定負荷トルクによる違いも 100kgfcm 負荷の場合と比較して小さかった。 図 2-3-2 (d)の負荷 200kgfcm では、バックラッシの増減の幅は 140kgfcm 負荷の場合と比較して大きくなり、ほとんど増減しなくなる領域もなかった。また、これまでの負荷条件の中で最も測定負荷トルクの大きさによるバックラッシの推移の違いが大きくなった。 強化 PEEK では、60, 100, 140, 200kgfcm の負荷を与えて実験した結果、低負荷ではブッシュとカムプレートとの間に隙間はほとんどできない。バックラッシが増減している理由としては摩耗粉の影響、表面粗さの影響などが考えられる。摩耗試験負荷トルクが大きい方のバックラッシの増減の幅が比較的小さく、安定している理由は、なじみによる影響を受けているためと考えられる。摩耗試験負荷トルクが 200kgfcm の場合は隙間が発生し、140kgfcm 負荷した場合のバックラッシに比べ大きくなった。バックラッシは 140kgfcm で最も小さく安定した。

#### 2-4 400W クラス関節駆動システムの開発

クランク軸に使用するチタン材のエンドミル側面切削加工の表面状態と粗さの関係を調べるために回転速度 200rpm、300rpm、450rpm、送り速度 F25、F40、F60 及び加工方向アップカット、ダウンカットの両方向で試みた。観察の結果、次のようにチタン材切削加工による摩耗への影響が分かった。

- ・摩耗は初期に発生し、これにより加工品の寸法は変化する。
- ・その後、摩耗はほとんど発生せず、安定した加工寸法が得られる。

次に、アルミ材加工における結果は次のとおりである。

- ・少ロット時にほとんど変化がみられず、寸法は安定する。

クランク軸加工完成品を図 2-4-1 に、カムプレート完成加工品を図 2-4-2 に、完成品を図 2-4-3 に示す。両持ち機構の強度測定器は 2000kgfm クラスが対象であったが、新たにエアブレーキによるディスククランプで、ダイナミックトルクを測定するシステムにより 3000kgfm の試験機を開発した。ここで用いた 3 倍力ユニット高負荷耐久試験に用いたユニットを図 2-4-4 に示す。



図 2-4-1 クランク軸



図 2-4-2 カムプレート



図 2-4-3 完成した関節

クランクシャフトの揺動角は $\pm 28.8^\circ$ 、停止条件は 1500 回連続運転、またはモータ温度が 67 度に達したときとした。ブッシュは同じものを使い、バックラッシュ測定は最初とモータ停止条件の後に行った。試験の結果、改良を行った装置を用いて、900kgfcm（ロードセル荷重：45kgf）で連続 1500 回の試験を行うことができた。次に、出力とモータの関係を確かめるために、疲労回数の増加が温度上昇に及ぼす影響を調べた。1300kgfcm では、550 回転で 67 度に達したため、試験を停止した。このため、出力の限界は、1100kgfcm であることがあきらかとなった。



図 2-4-4 #17-3 倍力リンクユニット

本条件下でのバックラッシとトルクの関係を図 2-4-5 に示す。この図から、3 倍力の新型ユニットは、2 倍力よりも安定しかつトルク負荷時のバックラッシが小さいことがわかる。特に重要なことは、高負荷トルク時において従来品よりも安定している。次に、揺動角 $\pm 39.6^\circ$ では、1200kgfcm まで安定して出力可能なこと、 $\pm 28.8^\circ$ よりも全ての負荷で早期にモータ温度が上昇すること、また、モータ温度の上昇により、900kgfcm 以上では 1000 回連続運転が困難であることが示された。

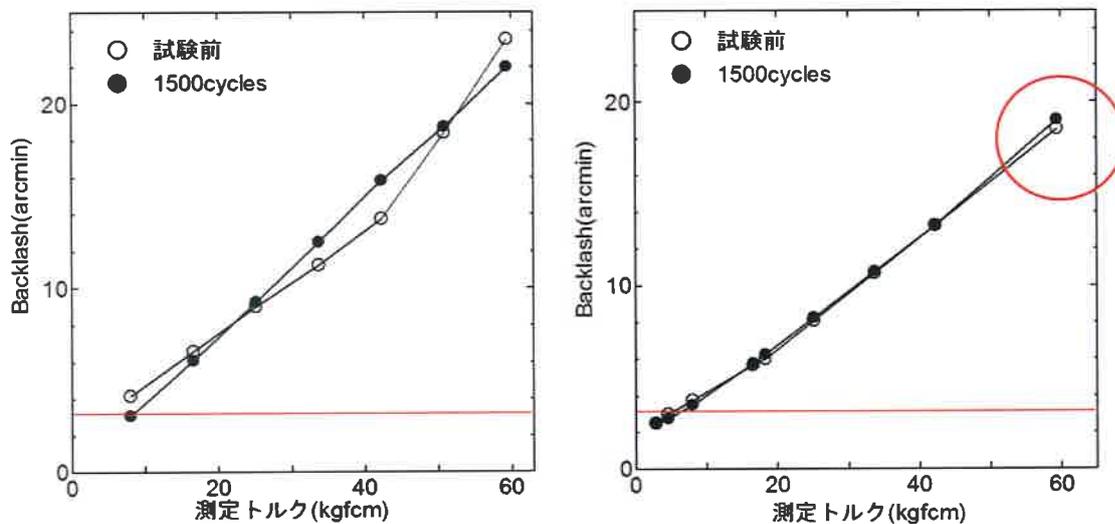


図 2-4-5 バックラッシ調査 (#17-3 倍力ユニット) 測定トルクとバックラッシの関係  
左：2 倍力ユニット 200kgfcm 負荷 右：新型 3 倍力ユニット 900kgfcm 負荷

## 2-5 プラスチック部材の最適化と高強度化

申請者は、すでに、はじめ 33 号による二足歩行の成功により、ジュラコン系部材の有用性が確認されていることから、駆動部に関しては、チタンとジュラコンに焦点を当てる。本節では、これらの特性を把握するため、ロボット関節として必要な材料の摩耗特性の分析を行った結果について示す。



図 2-5-1 サンプル軸表面計測位置

具体的には、樹脂の変形特性を実験で確認した。その後、疲労試験機を用いて、リンクと樹脂ブッシュの稼働特性を評価した。次に、モデル関節用疲労試験機を用いて、試作加工品の稼働特性を評価した。前節で製作したバックラッシ測定・強度評価装置を用いて、試作品の稼働特性評価を行った。樹脂の変形特性を実験で確認するため、サンプルの加工条件を測定した。

フライス加工では図 2-5-1 で示す位置でチタンが最も滑らかであること、旋盤では A2017

あるいは A7075 のほうがチタンよりも粗さが小さいことが分かった。また、超々ジュラルミンのフライス加工による段差は約  $3\mu\text{m}$  であった。

ナチュラルグレードと摺動グレードを比較すると、摺動グレードの方が加工目の影響を受けているものの、表面粗さである Ra 値は減少した。このときの計測は ISO4287:1997 に従って行った。

次に、摩耗テストの結果を図 2-5-2 に示す。旋盤の条件では、ブッシュ変形量は小さかったが、摩耗量は最も大きくなることが分かった。

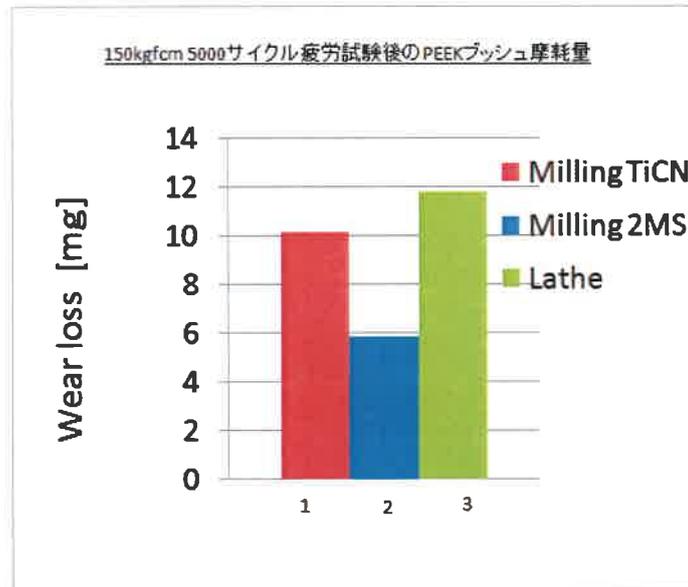


図 2-5-2 ブッシュ摩耗量

## 最終章 全体総括

近年、小型ロボットが危険な場所での人命探索等に活用されているが、実際の救助や安全の確認は人間によって行われる。この場合、人間サイズのロボットが作業環境の安全性の確認だけでも負担すれば人間への危険度を大きく低下させることが出来る。しかし、人間サイズのロボットの開発にはいくつかの問題があり、特に負荷の高くなる関節部分において、その重量増加、部品点数の多さによる低信頼性、精度や強度低下等の問題が指摘されている。実用的な課題として医療、福祉等の分野に用いられるサービスロボットは、安全で多様な動作が求められている。

動作時に大きな負荷の掛かる二足歩行ロボットでは、部品の強度や耐久性は非常に重要な要素である。また、近年では省エネルギー、環境性能向上が求められるとともに、静音化も重要な課題となっている。特に二足歩行技術においては、関節制御の高精度化により、高速動作時の負荷に対応した小型独立関節機構の開発及び生産性効率向上のための多軸化等が必要になっている。

本研究開発では、駆動装置を開発することにより、100kg 級ヒューマノイド型ロボットの開発を行うために必要な 100W、200W、400W 級小型関節機構の開発を行う。特に、ロボットに関する具体化した課題の中でも、歯車等の高精度化、高強度化・長寿命化、に焦点をあてた。

この過程では、下記の成果を得た。

従来の鉄鋼材料・アルミ材料に変わるチタンを加工するため、CAD/CAM を導入して、ピン根元における応力集中が緩和されるように、設計図面を作成した。また、新装置高効率複合加工機による一括加工で生産の高効率が達成するため、切削条件については、ほぼ 3 条件を確かめ、送り速度を 3 条件で確かめた。自社既存の設備を用いて 100W モデル関節用疲労・強度評価試験機を自主製作した。次に、これまでの複数工程を新しく一体加工に集約化するため、ゆるみの発生をなくし、装置の高精度化・高強度化を達成した。このため、新装置、高効率複合加工機械を導入した。従来に比べ 10 倍高速化されており、加工時の切削精度の向上をもたらした。バックラッシ測定装置を製作した。

チタンとジュラコンの特性を把握するため、摩耗特性の分析を行った。具体的には、樹脂の変形特性を実験で確認し、その後、100W リンク機構用疲労試験機を用いて、リンクと樹脂ブッシュの稼働特性を評価した。

本研究では強化 PEEK, PEEK, POM を用いたが、PEEK はバックラッシが小さく、安定していたが、4200 回転で揺動運動しなくなるため摺動性が悪いことがわかった。また、POM では、摩耗試験負荷回数 5000 回まで動作したが、接触面が大きく摩耗してバックラッシが増加し、安定しない。強化 PEEK では、この 2 つの材料に比べ摺動性、耐摩耗性ともに優れていることがわかった。また、強化 PEEK では、摩耗試験負荷 60,100,140,200kgfcm の条件で実験した結果、摩耗試験負荷が大きくなるほど接触面の変色面積が増えて、表面粗さは小さくなることがわかった。また、LCM 観察結果から低負荷ではブッシュはほとんど摩耗せず、カムプレートとの間に隙間は生じない。バックラッシが増減している理由としては摩耗粉の影響、表面粗さの影響などが考えられる。摩耗試験負荷トルクが大きい方のバックラッシが比較的小さく、増減の幅も小さくなった理由は、変色部位の面積が増えていることから、なじみによる影響を受けているためと考えられる。しかし、摩耗試験負荷トルク 200kgfcm の場合はブッシュの摩耗が大きくなるため結果的に摩耗試験負荷 140kgfcm の場合が最もバックラッシの推移が安定した。ここで、摩耗試験負荷トルクとバックラッシの関係は様々な要因から変化していたが、表面粗さ、摩耗、なじみによる影響、材料特性などに着目して考えることで理解することが出来た。さらに、PEEK のブッシュでは耐摩耗性に優れているため摩耗量が少なく、バックラッシの増減の幅が小さい。しかし、途中で小型独立関節が作動しなくなる。POM のブッシュでは強化 PEEK、PEEK に比べ、摩耗量が多く、バックラッシが大きくなる。PEEK では摺動性、POM では耐摩耗性に乏しいため、小型独立関節のブッシュに用いるのは困難であることが分かった。強化 PEEK を用いることで小型独立関節のブッシュに必要な摺動性、耐摩耗性を得ることが出来、200kgfcm までトルクを出力することが出来た。また、バックラッシの大きさは 10~20arcmin となり、キッズサイズロボットに用いられる多段平歯車機構と比較して出力は 33%、バックラッシは 66%改善された。バックラッシは摩耗試験回数や摩耗試験負荷トルクに比例して大きくなる訳でなく、本研究では二番目に負荷が大きい 140kgfcm の場合にバックラッシが最も小さくなるという結果を得ることが出来た。これは、140kgfcm 以下の負荷ではブッシュの片当たりから十分なじみの影響

を受けることが出来ず、200kgfcm 以上の負荷では摩耗の影響が大きく出たため、バックラッシが大きくなったことが原因である。

以上のように、1年目に100Wクラスの関節、2年目においては200Wクラスの関節の研究を行い、それぞれその目標を達成した。その間その試験に対応する試験機等を順次開発し、本年最終年は本研究の最終目標である400Wクラス関節、最大トルク2600kgfcmで100サイクル稼働を達成した。バックラッシに於いても、目標である5arcmin以下を $2 \times 10^3$ 回作動時に於いて達成した。その後、 $10^4$ 回の継続テストに於いてバックラッシは12arcminとなった。

今後については、その数値の向上を目指し商品化に向けた研究開発を進める予定である。

#### 論文

1. Hitonobu Koike, Kenji Kanemasu, Kiyoto Itakura, Ken'Ichi Saruwatari, Justyna Rozwadowska, Megumi Uryu, Edson Santos and Katsuyuki Kida, Wear and transmission error between PEEK bush and 7075 aluminium alloy cam plate components in robot joints, Applied Mechanics and Materials (Trance Tech Publications, ISSN: 1660-9336), Volume 307, pp.3-8, (February, 2013). Doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.307.3.
2. Kiyoto Itakura, Hitonobu Koike, Katsuyuki Kida and Kenji Kanemasu, Observation of Wear Surface between pure PEEK and counterpart materials; Titanium and 7075 aluminum alloy, in Robot Joint, Applied Mechanics and Materials (Trance Tech Publications, ISSN: 1660-9336), Volume 307, pp.347-351, (February, 2013). Doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.307.347.
3. Hitonobu Koike, Katsuyuki Kida, Kenji Kanemasu, Kiyoto Itakura, Ken'Ichi Saruwatari, Justyna Rozwadowska and Megumi Uryu, Influence of wear and backlash on machined PEEK polymer bushes and 7075 Aluminium alloy cam plates used in robot joints, Applied Mechanics and Materials (Trance Tech Publications, ISSN: 1660-9336), Volumes 157 - 158, pp.1178-1185. (2012). Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.157-158.1178.
4. Kiyoto Itakura, Hitonobu Koike, Katsuyuki Kida and Kenji Kanemasu, Measurement of Joint Element Transmission Error in a Humanoid Walking Robot, Advanced Materials Research (Trance Tech Publications, ISSN: 1022-6680), Vol. 566, pp 348-352. (2012). doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.566.348.
5. 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 (ISMITHERS, ISSN: 0967-3911), Vol. 20, No.1-2, pp. 127-132. (January, 2012).

#### 受賞

1. Best Paper Award. 2011 The 2nd International Conference on Mechatronics and Applied Mechanics(ICMAM2011)

Hitonobu Koike, Katsuyuki Kida, Kenji Kanemasu, Kiyoto Itakura, Ken'Ichi Saruwatari, Justyna Rozwadowska and Megumi Uryu, Influence of wear and backlash on machined PEEK polymer bushes and 7075 Aluminium alloy cam plates used in robot joints, Applied Mechanics and Materials (Trance Tech Publications, ISSN: 1660-9336), Volumes 157 - 158, pp.1178-1185. (2012). Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.157-158.1178.