

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「生体用インプラント部品のシンクロナイズド切削加工機の開発」

研究成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 鹿沼商工会議所

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1 - 1 本研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1 - 2 研究体制	9
1 - 3 成果概要	15
1 - 4 当該プロジェクトの連絡窓口	17
第2章 研究開発の内容と成果	18
2 - 1 卓上型の専用切削加工機	18
2 - 2 個別の研究開発	22
(1) 遊星ギヤユニット	22
(2) 遊星ギヤ仕様の増速スピンドル	25
(3) 増速スピンドルの精度と機能評価の実験	28
(4) 反転機構を持った精密加工保持具の開発	30
第3章 研究開発の総括	33
第4章 事業展開への期待	36

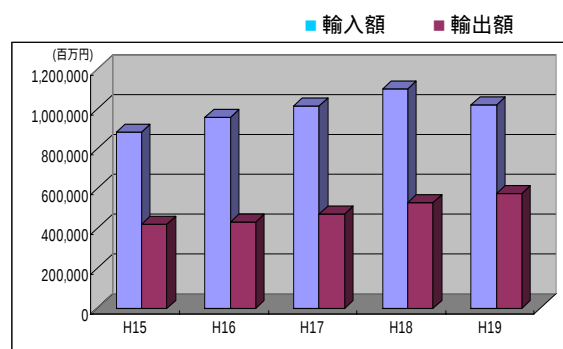
第1章 研究開発の概要

1-1 本研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

1) 国内の高度医療機器産業の実情

現在、25兆円産業規模の医療機器分野において、日本の市場シェアは世界第3位でありながら、わずか10%にとどまっている。また、平成19年度薬事工業生産動態統計によれば、輸入額1,021,974百万円に対して輸出額が575,054百万円であり、貿易収支の赤字は年々拡大している。特に、体内埋込型医療機器は89.5%、人工関節に関しては80%が輸入に依存しているのが現状である。このような海外企業依存型の医療機器・インプラント産業分野において、厚生労働省の薬事認可という、ハードルもあるが、日本の特に中小企業の製品開発力、精密加工技術は医療機器産業に合致している。技術開発の向上により欧米はもとより東南アジア圏に対して圧倒的優位に立つことが急務である。



資料：平成19年度薬事工業生産動態統計より

図1-1 国内医療機器の輸出入の比較

2) 生体用インプラントの部品製造の現状

生体用インプラント、特に人工関節用のものは70%がチタン合金の難切削材料であり、自動車等の輸送機分野で使用されている材料の加工に比べると低効率、コスト高になる。また、それらは生体各部位ごとに類似なものが多いものの、その部位の種類と大きさは多岐にわたり多種少量のロット生産形態となっている。そのため、インプラント部品の市場価格は高い。したがって、インプラント産業における製造現場は国内外を問わず、短納期、コスト削減に対するニーズが高い。このような現状に対して、国内のインプラント関連メーカーが国際競争力を得るには、海外企業の製造能力に対して、納期、コストの面で圧倒的な優位性を示す必要がある。本提案はこのような現状に基づいたものであり、以下の技術開発を目的とする。

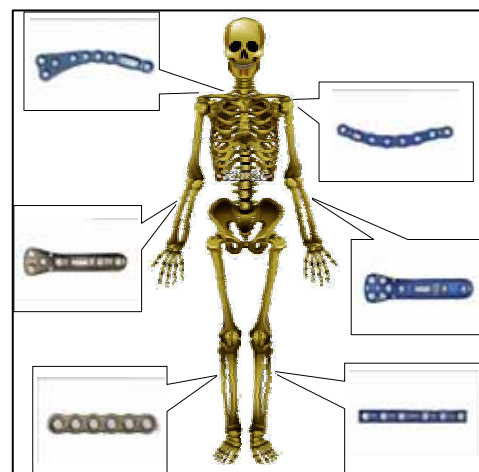
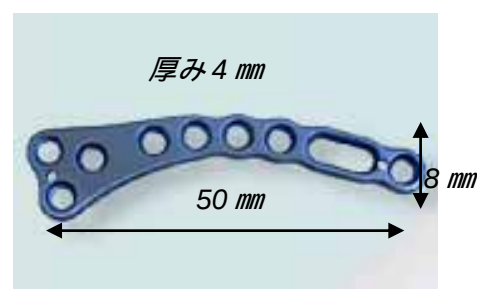


写真 1-1 類似形状多種多様な生体用インプラント



インプラント部品加工のための高能率な専用加工機とその要素技術を開発する。
インプラント部品の切削技術の高度化を図る。

3) 生体用インプラントの部品製造の現状

総括研究代表者は難切削材料の異形状部品および微細部品を市場に提供しており、その受注先の分野は自動車部品と医療機器である。特に、これまで20年間にわたり歯科用インプラント部品を製造し、2005年には医療機器の製造許可を取得し、2007年にはISO13485を取得している。また、QMS適合性の調査・実施を受けており、公的に医療機器部品の製造が承れて。本提案は、統括研究代表者のこれまでの歯科用インプラント製造事業から生体用インプラント製造事業への展開を図るものである。

(2) 研究開発の目的及び目標

切削加工に関わる技術において達成すべき高度化目標として、特定ものづくり基盤技術高度化指針の「(4) 医療機器に関する事項」に該当する。

特定ものづくり基盤高度化指針「医療機器に関する事項」より

川下製造業者の抱える課題及びニーズ：「ウ.低コスト化」「オ.納期短縮」

が示されている。以下、川下製造業の抱える課題について詳細を記述する。

1) 短納期低価格化

現在、国内における生体用インプラント部品は海外メーカーからの供給がほとんどである。一方、高齢化社会への移行に伴い年々10%の割合で骨折治療患者が増加すると言われ、インプラント部品市場が一大産業として拡大することが予測される。したがって、川下側のインプラント製造販売メーカーでは、部品調達における短納期化と低コスト化が急務とされている。

2) 各個人の体型に対する適合性の向上

今後のインプラント産業における高付加価値化への取り組みとして、各個人の体型に適合する高精度、高品位なインプラント部品を供給することが要求されている。すなわちテーラメード型治療に対する対応を製造面で検討しなければならない。

上記の2つのニーズに対し、既に多くの部品サプライヤは、コンピュータ支援設計と製造(CAD/CAM)を導入しているが、いずれも生産ソフトウェアのレベルでの対応であるため、類似技術の導入では、他社との差別化および競争力にはならない。本提案は、このような実情に基づいたものであり、複数のスピンドルを有する専用機の開発とエンドミル切削過程に着目した加工技術を併用し、生産ハードウェアの面から他社との差別化および他社への競争力強化を図ろうとするものである。

川下企業が抱える課題・ニーズに対応するために、特定ものづくり基盤技術高度化指針にて、以下のような技術の高度化目標と高度化の方向性が示されている。

表 1-1 特定ものづくり基盤高度化指針の課題に対応する高度化目標・高度化の方向性

高度化目標	「ア.難削材(チタン等)加工対応」「ウ.高精度化」
高度化の方向性	「(2)高効率化に対応した技術開発の方向性、加工時間短縮に資する技術開発、主軸回転・送りの高速化、新加工方法の確立」

上記方向性のもとで、本事業では以下の観点から技術課題を設定する。

1) 高能率加工

生体適合材料であるチタン合金は難切削材料であるため、工具寿命や仕上げ面品位の観点から切削速度や送りを上げることが困難である。すなわち切削条件の最適化では高能率化に対する改善に限界がある。そこで、複数のスピンドルによる同時加工により、生産性の向上を図る。また、シンクロナイズド切削を実施するために、それぞれのスピンドルの回転を同期させる。

2) 設備投資の削減

インプラント部品の価格が依然として高いのは、類似の小型部品でありながら、高価なマシニングセンタによって加工されているからである。すなわち、設備の初期投資額が大きいため、少量のロットで生産するインプラント部品製造で減価償却を考えると、単価を上げざるを得ない。本研究開発ではこの実情を踏まえ、必要とされる機能に特化した専用小型加工機を開発し初期投資を削減する。

3) 高精度・高品位加工

体内埋込型部品である生体用インプラントにおける高精度化は、術後の患者に対する痛みや負荷の軽減にある。すなわち、患者の体型に適した部品の供給が不可欠となる。また、関節部などある程度の動きが必要とされる部品では、トライボロジー的な観点からその表面仕上げも無視できない。このようにテーラメード治療に対する試みとして、高精度・高品位な部品加工に対して十分な配慮が必要となる。従来の部品加工における精度と品位は加工機および切削条件で制御されていたが、薄板の難切削材のプレート加工では加工保持力が不十分であり、加工部位の振動(板の「バタツキ」)が問題となる。そこで、エンドミル切削過程に着目し、切れ刃の回転位相差を利用して加工反力変動を抑制する。

本事業における高度化への指針とその解決方法を以下にまとめる

表 1-2 高度化指針 - 課題の原因 - 解決方法

高度化への指針	課題となっている原因	解決方法
---------	------------	------

(1)高能率加工	難切削材チタン合金の加工	複数のスピンドルによる同時加工
(2)設備投資の削減	大型で高価なマシニングセンタでの加工	必要とされる機能に特化した専用小型加工機を開発
(3)高精度・高品位加工	薄板プレート加工における保持力不足と、加工部位の振動(板の「バタツキ」)	シンクロナイズド切削において、エンドミル切れ刃の回転位相差を利用した加工反力変動の抑制

本事業において最も差別化となるポイントは「高精度・高品位加工」に対する複数のエンドミルによる同時かつ同期切削であり、この「シンクロナイズド切削加工」により切れ刃回転位相差を積極的に利用して加工変動力を抑制することにある。また、高能率加工と設備投資の削減の指針に対する解決方法の複数のスピンドルを搭載した専用小型加工機は、シンクロナイズド切削加工の必要課題である。

(3) 目標達成のための研究開発サブテーマ

本事業において、(2)で掲げた目標を達成するために以下の研究開発を実施する。

1) 同期制御可能な小型スピンドルの開発

高度化への指針である高能率加工の解決方法である複数スピンドルの同時加工を達成するために、下記の仕様で同期制御可能な小型スピンドルを開発する。

総括研究開発代表者(スズキプレシオン)は、既にクランク式にて3倍速のスピンドルの開発を実現している。本事業では、その開発実績に基づいて、小型遊星ギヤ機構による「5倍速」のスピンドル開発を実現するものである。

サブテーマ 1-1：精密小型遊星ギヤユニットの開発

本事業においては、ギヤ直径とギヤ比の最適設計によって増速機構を製作する。遊星ギヤによる増速機構の利点は、次のようにまとめられる。なお、小型遊星ギヤの活用には、小径ギヤの形状が最適でなければ噛み合わせ不良による磨耗の原因となる、ギヤの加工寸法の誤差が大きいと、振れによって振動・発熱・騒音が生じて耐久性が極端に悪くなるといった課題がある。そのような課題を解決するためのツールとして、アドバイザーのテクファ・ジャパンが開発したギヤ設計システム (GetGear) を活用して最適形状設計を行うものである。

- ・ 駆動モータ自体は低速であるため発熱が少ない。
- ・ サーボモータを使用することによって回転同期制御を可能にする。
- ・ 自社内で生産可能であるため、同クラスのスピンドルの通常価格の半値で搭載可能である。

また、本サブテーマの目標数値は以下のように設定する。

【サブテーマ 1-1 の目標数値】

- 小型ギヤ形状精度：高精度ワイヤカットにて 0.005 mm
- ギヤ形状と軸心との同軸度：0.002 mm

サブテーマ 1-2：遊星ギヤ仕様増速スピンドルの開発

3 倍速スピンドルの組立ノウハウを利用して、小型遊星ギヤユニットを高精度に組み込む。なお、埃や塵の介入を抑えるためにクリーンルーム内にて組立を行う。

本サブテーマの目標数値は以下のように設定する。

【サブテーマ 1-2 の目標数値】

- 主軸最高回転数：25,000min-1
- 回転制御： $\theta = 0.001$

サブテーマ 1-3：遊星ギヤ仕様増速スピンドルの精度と機能評価

精度評価用の専用スピンドルホルダを製作して、試験用治具に取り付けて、設定回転 (Rpm25,000 回転) で振動測定を行い、組立精度を確認する。

切削工具を取り付けて回転振れ量を測定する。

連続回転 (24 時間) にて、発熱・スピンドル伸びの測定を行い、機能評価を行う。

本サブテーマの目標数値は以下のように設定する。

【サブテーマ 1-3 の目標数値】

- スピンドル熱変位：0.01 mm MAX
- 主軸振れ精度：0.001 mm MAX

2) エンドミル切れ刃の回転位相差を利用した加工反力変動の抑制と高精度加工システムの開発

サブテーマ 2-1: 6 本のスピンドルを搭載した生体用インプラント用小型専用加工機の開発

生体用インプラントプレートを高効率で加工できる専用加工機を開発する。前項にて開発した 5 倍速のスピンドルを 6 本搭載するものである。

スピンドル 6 本は専用に製作した主軸用ホルダーにセットし、本機の製品取り付けテーブルに対しての Z 軸、Y 軸の直角度等機械組立精度の検証を行う。

サーボ機構によってスピンドル回転の同期化を図る。サーボモータ (6 セット) と本機への制御組込みを行い、個々のモータの回転と角度確認を行う。

複数の薄板プレートの加工において、その保持具の開発は大切である。本事業では、反転機構を持った精密加工保持具の研究開発と製作を行う。

本サブテーマの目標数値は以下のように設定する。

【サブテーマ 2-1 の目標数値】

- 制御軸：4 軸 (同時 3 軸)
- 制御方式：サーボモータ
- 最大加工範囲：200 mm × 200 mm × 150 mm
- スピンドル軸数：6 本
- 繰り返し位置決め精度：0.001 mm 以下

サブテーマ 2-2: エンドミル切れ刃の回転位相角の設計

開発する加工機は同時多数個の部品を加工するが、プレート全体にかかる保持の安定を図るため、加工反力反動をエンドミルの切れ刃回転角の位相差を利用して制御する。位相差の切削加工技術については、アドバイザーである東京電機大学の切削シミュレーションを活用する。

本サブテーマの目標数値は以下のように設定する。

【サブテーマ 2-2 の目標数値】

- 加工反力変動幅：1 切れ刃にかかる最大切削力 40% 以下

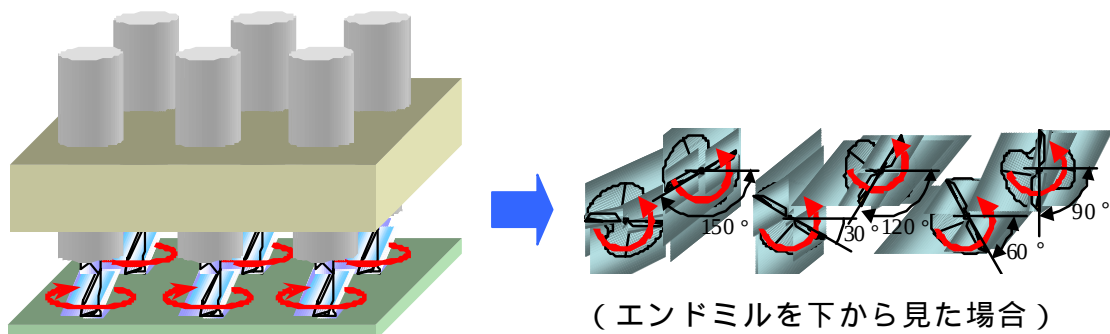


図 1-2 スピンドル回転同期化と回転位相差制御のイメージ

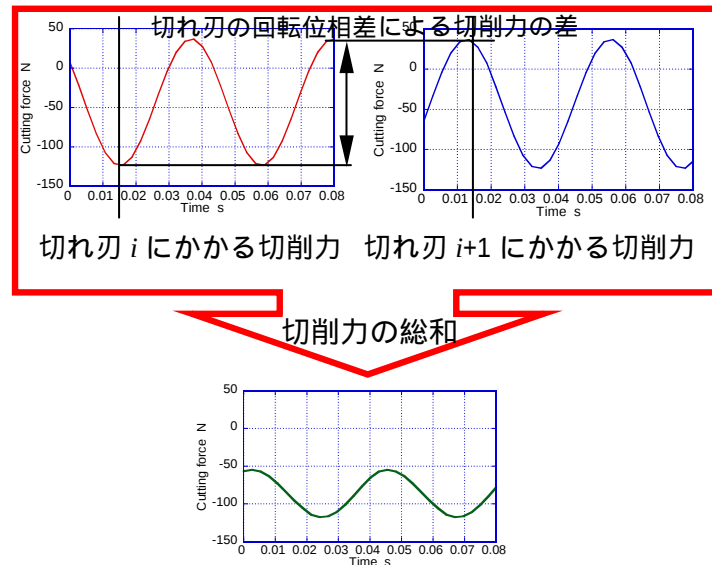


図 1-3 被削材やスピンドルヘッドにかかる加工反力変動解析イメージ

サブテーマ 2-3：エンドミル切れ刃の位相差制御による加工試験と製品の評価

完成した加工機において、ワークのプレート被削材にかかる加工反力変動を測定することで本研究開発の妥当性を確認する。同じく試作品の加工精度、表面精度の検証を行う。

また、加工機自体の加工試験として、単一切削工具での切れ刃磨耗試験、最適加工条件の設定、同時 6 個加工品の制度バラツキの検証を行う。そして、最終的に本研究開発の最終的な目的である従来比 3 倍効率の加工が実現しているか、平均インプラント・ワークの加工時間の比較を行う。

本サブテーマの目標数値は以下のように設定する。

【サブテーマ 2-3 の目標数値】

- 加工精度： $\pm 0.005 \text{ mm}$
- 加工面粗さ： $Ra1 \mu\text{m}$ 以下
- 表面形状精度： 0.02 mm 以下
- 1 個当たりの加工速度：3 倍（20 分）

今までの技術

マシニングセンタによる切削加工



現行加工機械画像

製造現場における問題点

低い生産効率

- 個別部品加工

多額な設備投資と部品市場価格高

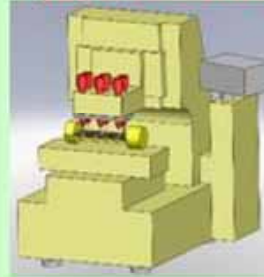
- 多機能・高性能な汎用的 NC 機
- 大型加工機運用に伴う多額な電力費
- 高価なビルトインモータ

不安定な精度・品位

- 低剛性な薄板プレートの加工部位の振動(板のバタツキ)

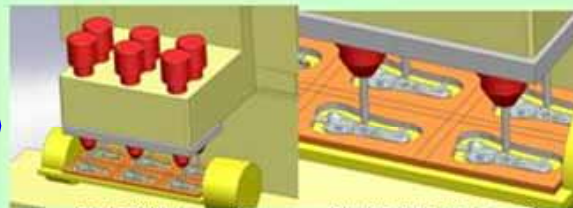
本事業で取り組むこと

6本スピンドルシンクロナイズド切削加工

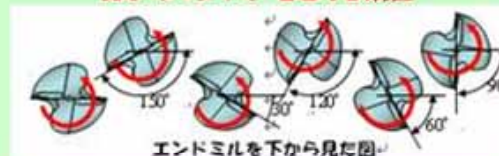


加工機の特徴

同時多数加工(6個)
両面一括加工
省スペース 0.5m²
省電力 1.5kw
単一刃物で全加工

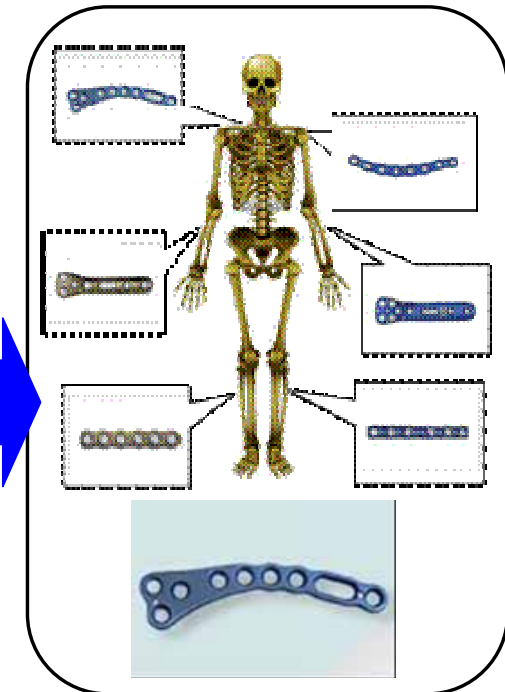


⑥高精度⇒切れ刃回転位相差制御による低反力化
によりバタツキ・ビビリを改善



切れ刃回転位相差の制御による
反力変動の最小化

インプラント部品の 切削加工を3倍効率化



低コスト
短納期
高精度

生体用インプラ
ントメーカー
【川下企業】

図 1-4 本研究開発計画の概要

1 - 2 研究体制

(1) 研究体制及び管理体制

研究実施者

(株)スズキプレシオン	代表取締役社長	鈴木 庸介
(株)橋本精機	代表取締役	橋本 一郎
栃木県産業技術センター	所長	天神林 孝二

【総括研究代表者と副総括研究代表者】

総括研究代表者

鈴木 庸介 (株)スズキプレシオン 代表取締役社長

副総括研究代表者

橋本 雅和 (株)橋本精機 専務取締役

管理法人

鹿沼商工会議所

アドバイザー

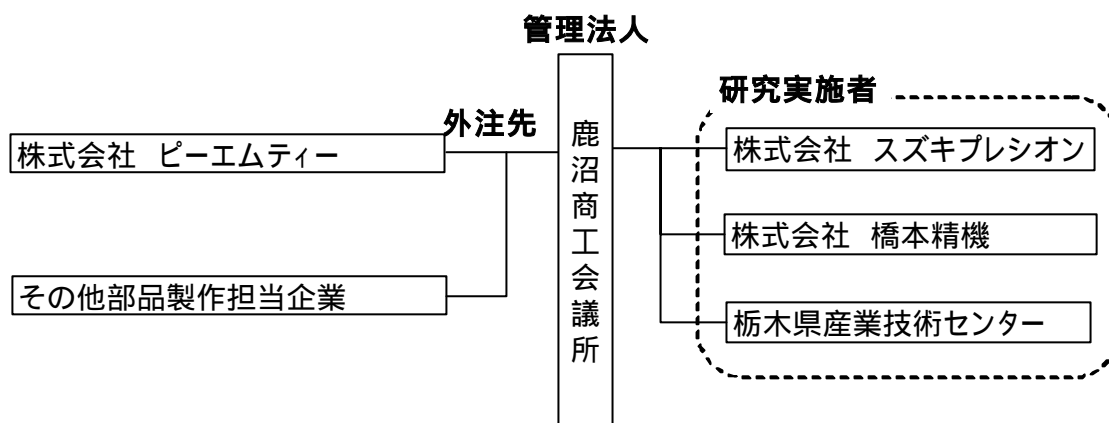
テクファ・ジャパン(株)

ヒラガメカトロ企画

(株)ロバート・リード商会

シチズンマシナリー(株)

東京電機大学



【統括研究代表者(PL)】
株式会社 スズキプレシオン 代表取締役社長 鈴木 庸介

【副統括研究代表者(SL)】
株式会社 橋本精機 専務取締役 橋本 雅和

図 1-5 管理体制図

表 1-3 研究実施者と主なアドバイザーの役割分担概要

課 題	研究実施者(参加企業)			アドバイザー		
	スズキプレシオン	橋 本 精 機	栃 木 県 産 業 技 術 セ ン タ ー	テ ク フ ァ ・ ジ ャ パ ン	ヒ ラ ガ メ カ ト ロ 企 画	東 京 電 機 大 学
課題 1: 同期制御可能な小型スピンドルの開発	小型遊星ギヤの製造 スピンドルの組立		スピンドルの特性評価	増速用遊星ギヤの設計	アドバイス全般	
課題 2: エンドミル切れ刃の回転位相差を利用した加工反力変動の抑制と高精度加工システムの開発	小型専用加工機の設計開発 加工試験と実用性評価	保持具の開発	加工反力測定 精度・仕上げ 面粗さ測定			切れ刃回転位相差の設計

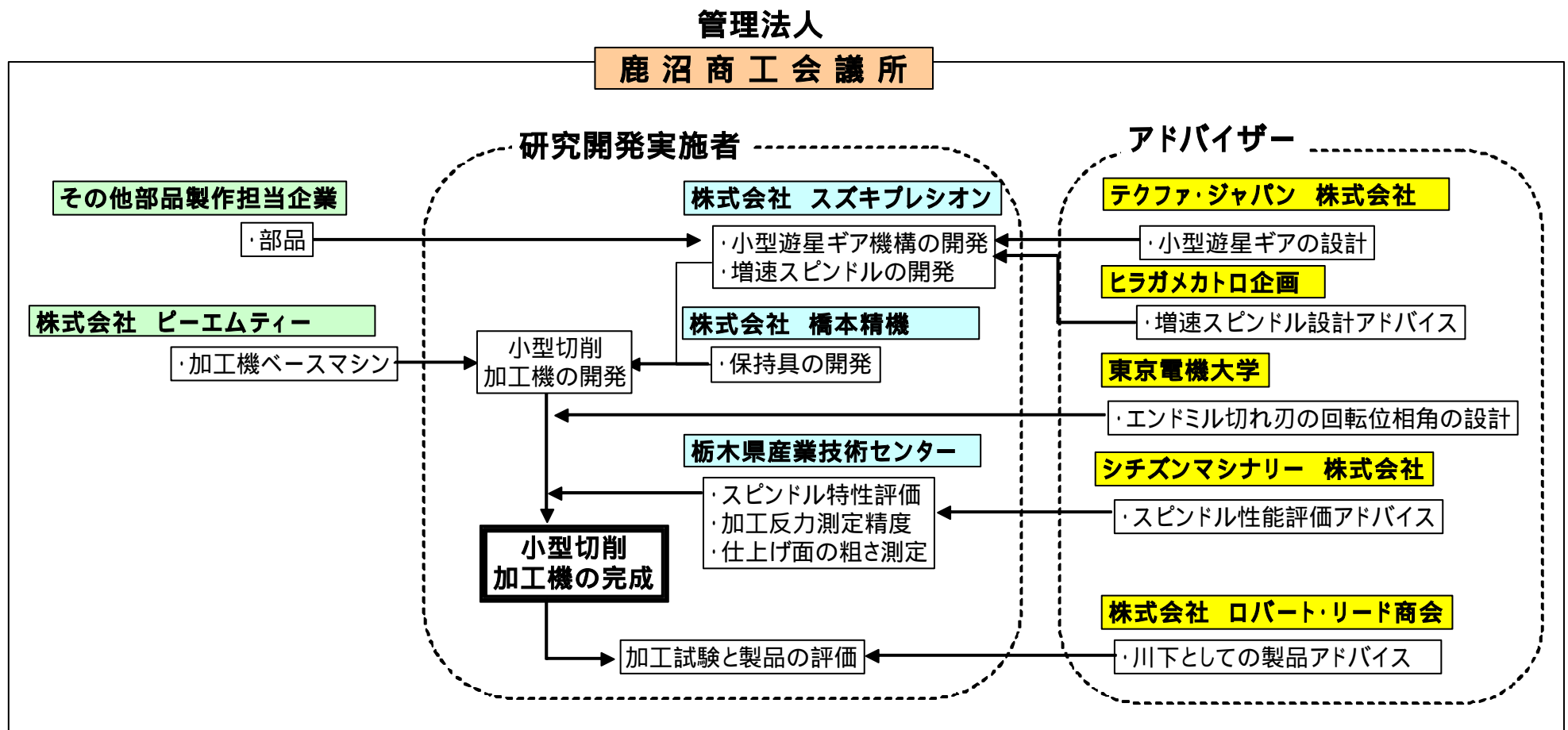
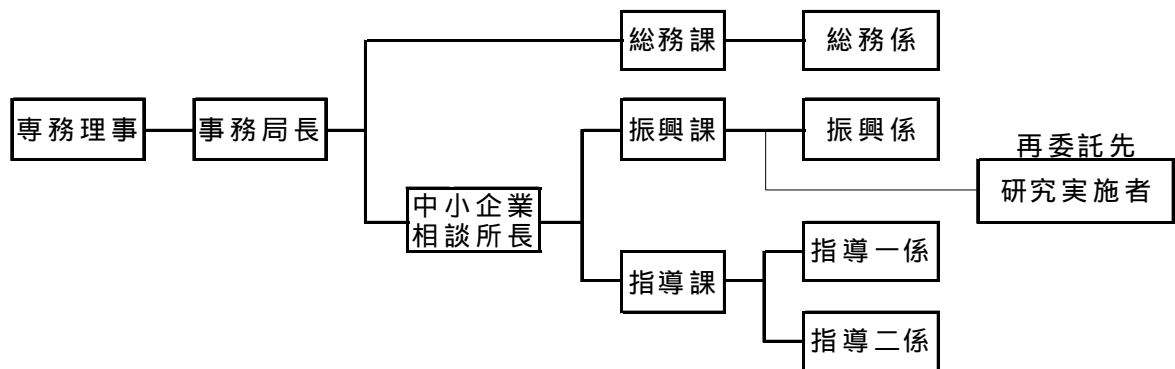


図 1-6 研究体制及び管理体制

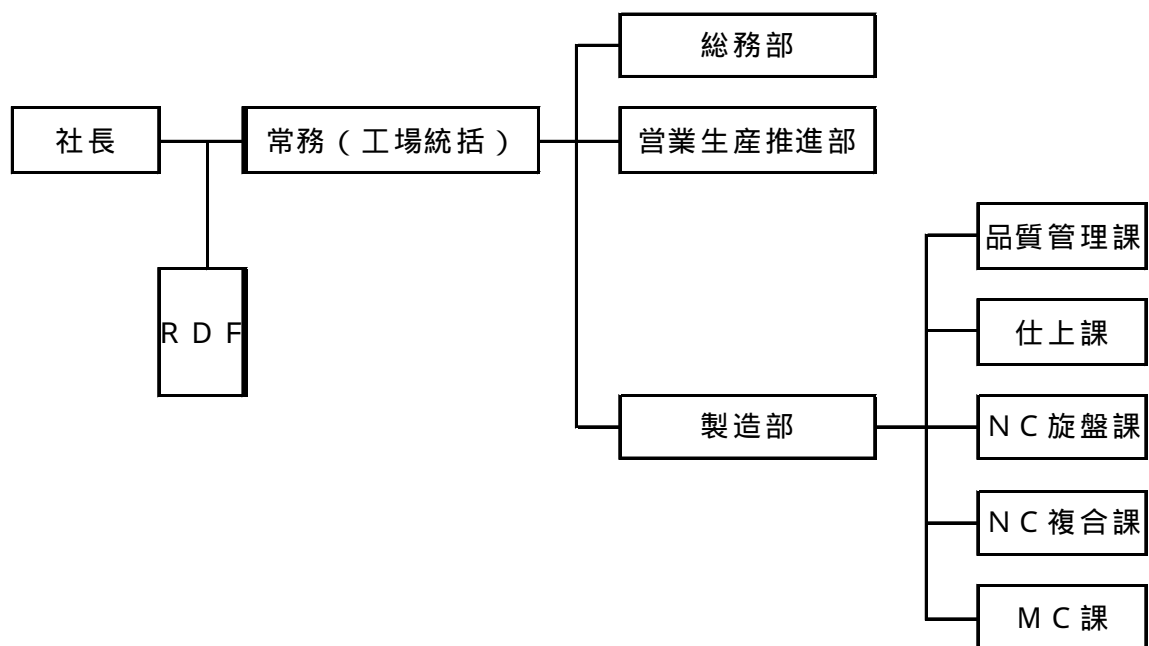
(2) 管理体制

管理法人 【鹿沼商工会議所】

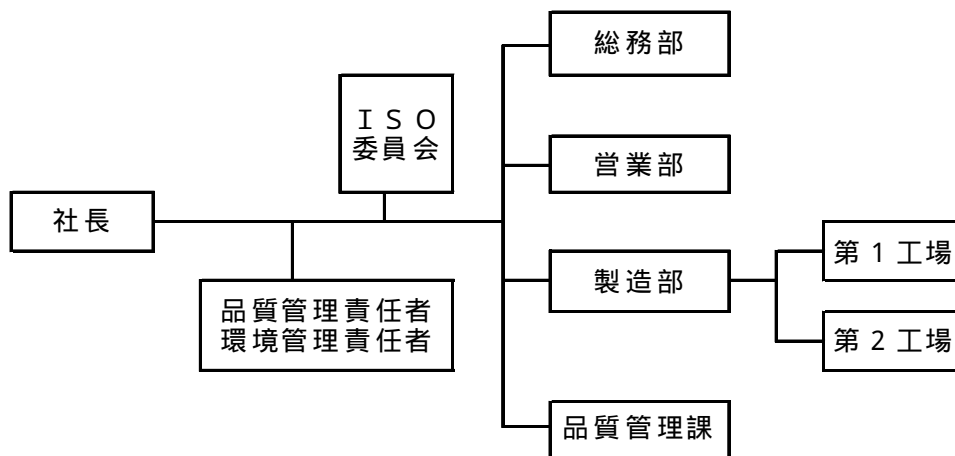


研究実施者

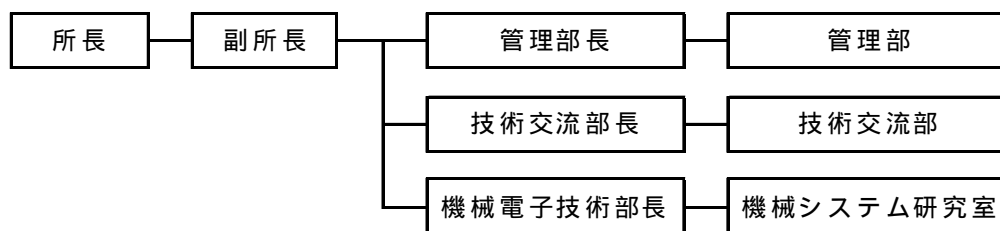
【(株)スズキプレシオン】



【(株)橋本精機】



【栃木県産業技術センター】



(3) 鹿沼商工会議所・戦略的基盤技術高度化支援事業推進委員会

氏名	所 属	備考
鈴木 庸介	(株)スズキプレシオン 代表取締役社長	研究実施者 P L
小林 栄	(株)スズキプレシオン 製造部 G M	研究実施者
金子 晴彦	(株)スズキプレシオン 製造部 マネージャー	研究実施者
花輪 潤	(株)スズキプレシオン 営業部 マネージャー	研究実施者
手塚 博之	(株)スズキプレシオン 製造部	研究実施者
橋本 雅和	(株)橋本精機 専務取締役	研究実施者 S L
黒内 利明	栃木県産業技術センター機械電子技術部 部長	研究実施者
柏崎 親彦	栃木県産業技術センター機械電子技術部 T L	研究実施者
田村 昌一	栃木県産業技術センター機械電子技術部 主任	研究実施者
香取 英男	テクファ・ジャパン(株) 代表取締役社長	アドバイザー
平賀 義二	ヒラガメカトロ企画 代表	アドバイザー
椿 久尚	シチズン・マシナリー(株)	アドバイザー
村瀬 貴博	(株)ロバート・リード商会	アドバイザー
松村 隆	東京電機大学 工学部機械工学科 教授	アドバイザー
結城 幸一	(財)日本システム開発研究所 研究員	アドバイザー

1 - 3 成果概要

本年度得られた成果の概要は以下のように図示できる。

(1) 同時制御可能な小型スピンドルの開発

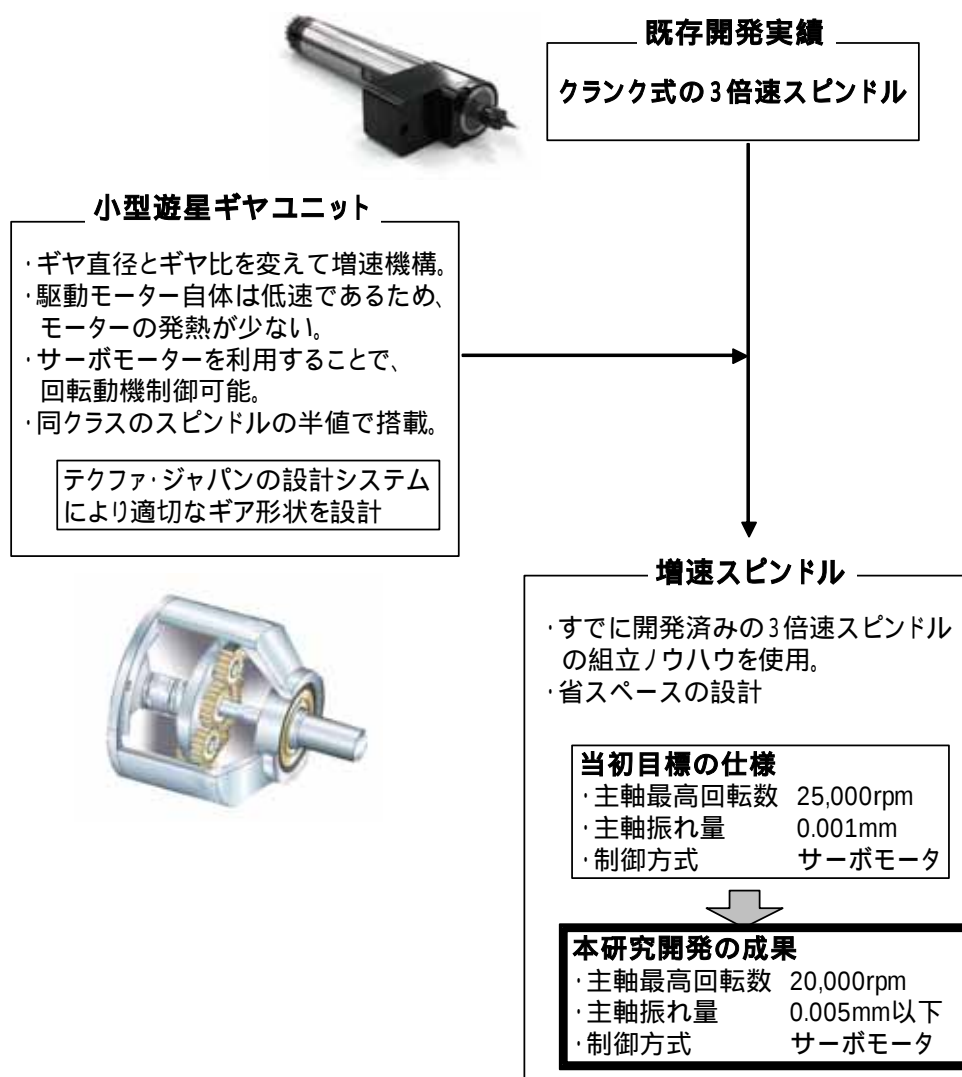
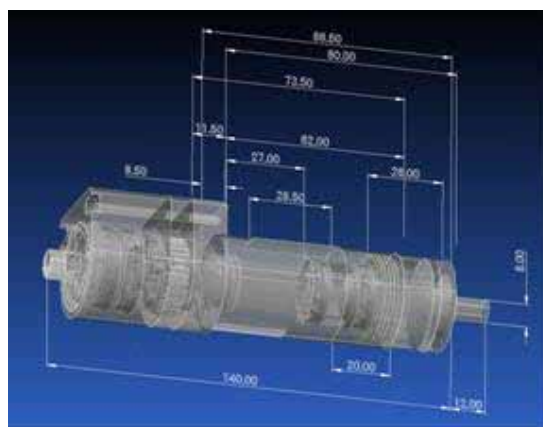


図 1-7 小型スピンドルの開発



(2) エンドミル切れ刃の回転位相差を利用した加工反力変動の抑制とインプラント用高精度加工機の開発



図 1-8 切削加工機の開発

(3) 研究開発スケジュールの概要 (平成 2 1 年度実績)

実施内容	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1 - 1 精密小型増速遊星ギアユニットの開発	←					→	
ギアユニット構成部品の設計	→			→			
各ギアブランク製作				→			
各ギアの超精密ワイヤー加工					→	→	
ユニット組立					→	→	
1 - 2 遊星ギア仕様増速スピンドルの開発		←				→	
遊星ギア周辺のスピンドル設計		→	→	→			
構成部品の部品設計		→	→	→			
部品加工				→	→		
部品購入				→	→		
スピンドル組立					→	→	
1 - 3 遊星ギア仕様増速スピンドルの精度と機能の評価							↔
2 - 1 6本のスピンドルを搭載した生体用インプラント用小型専用加工機の開発			←				→
サーボモータの取り付け方法及びスピンドルホルダー設計			→	→			
6個スピンドルホルダー製作					→		
スピンドル及びスピンドルホルダーの本機への取り付け						→	
制御系統の検証						→	
ワーク反転精密加工治具の設計・製作						設計	製作
完成							→
2 - 2 エンドミル切れ刃の回転位相角の設計							↔
2 - 3 エンドミル切れ刃の位相差制御による加工試験と製品の評価							↔
委員会の開催		○		○			○

図 1-9 開発スケジュール (実績)

1 - 4 当該プロジェクト連絡窓口

鹿沼商工会議所

〒322-0031 栃木県鹿沼市睦町287-16

TEL: 0289-65-1111 FAX: 0289-65-1114

第2章 研究開発の内容と成果

2 - 1 卓上型の専用切削加工機

本年度の研究開発成果物として、インプラントプレートの高効率切削加工を可能にした6本の増速スピンドル搭載のシンクロナイズド切削加工機が完成した。

(1) 本研究開発の成果物

研究実施者の(株)スズキプレシオンでは、すでに既存研究開発成果物として、「クランク式」の3倍速スピンドルを開発して、部品加工に使用している。その開発実績に基づき、本研究開発では「遊星ギヤ機構」による新たな増速スピンドル、及びそのスピンドルを搭載した切削加工機を開発するものである。通常、遊星ギヤ機構は減速に使用するが、本研究開発ではギヤ直径とギヤ比を変えることで増速に使用する。

最終的に本研究開発で目指す切削加工機は、小型遊星ギヤ機構を用いた増速スピンドルを6機搭載する。切削加工機は、サーボ機構によってスピンドルの回転を同期化するほか、高品質加工・高精度加工を実現するため、精密保治具の開発と切れ刃の回転位相差を利用した加工反力変動の抑制を実現している。

本研究開発成果物の特徴を改めて整理すると、次のようになる。

- 小型遊星ギヤの活用によりスピンドルの小型化と増速を実現。
(自社内生産のため通常価格の半値で提供可能)
- スピンドルはサーボモータによる回転動機制御可能。
- 複数スピンドルによるシンクロナイズド切削加工で高効率化を実現。
- 反転機構を持った精密加工保治具を装着。
- 小型の卓上マシン。また、専用機であるため安価な装置。

図 2-1 研究開発成果物の特徴

(2) 完成した加工機の全体図

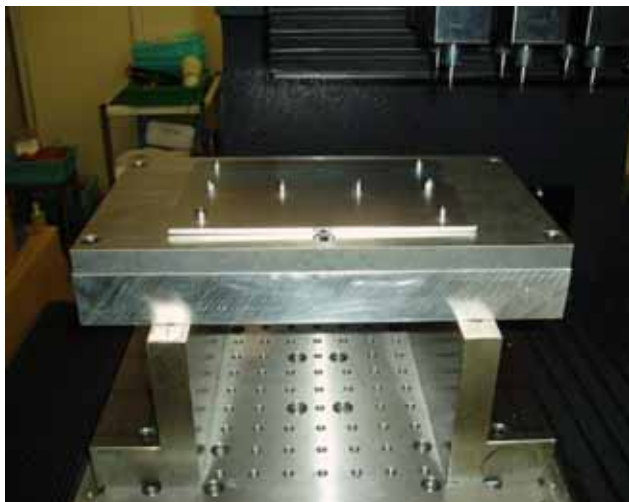


写真 2-1 完成した加工機

(3) 完成した加工機の設計図

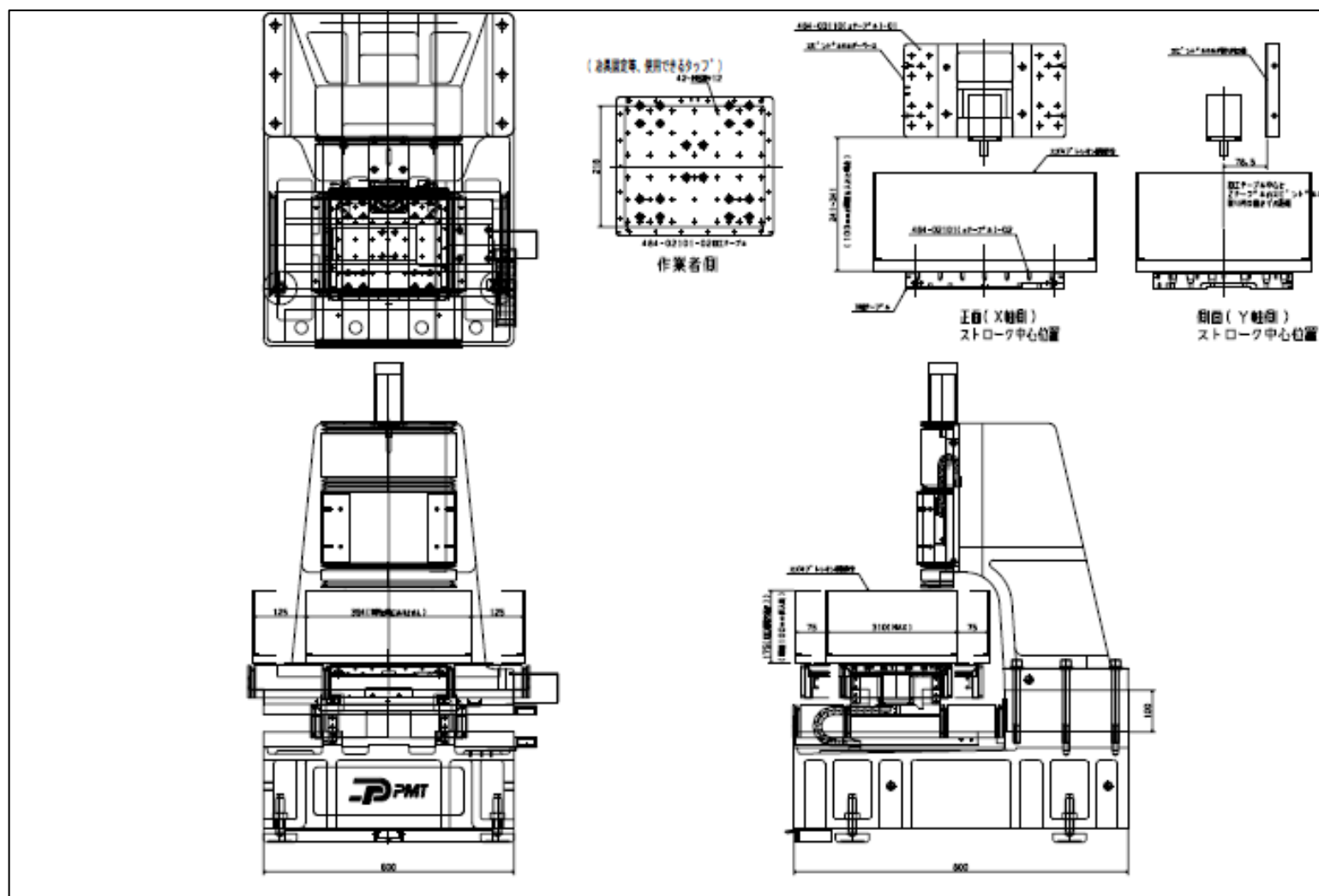


図 2-2-1 完成した加工機の全体図

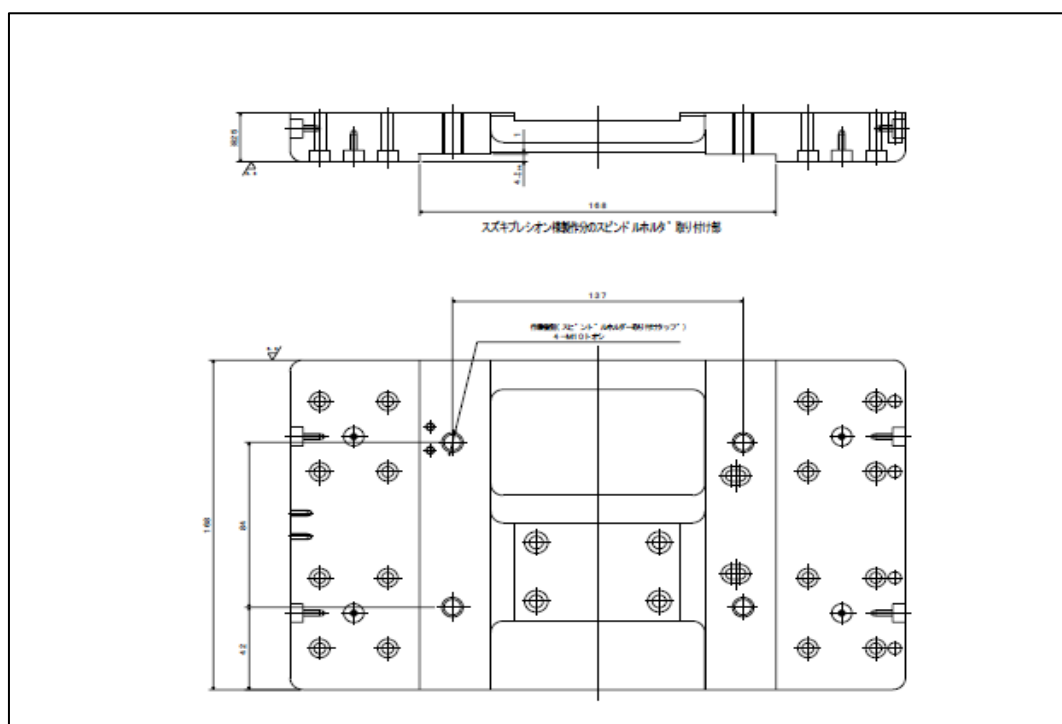
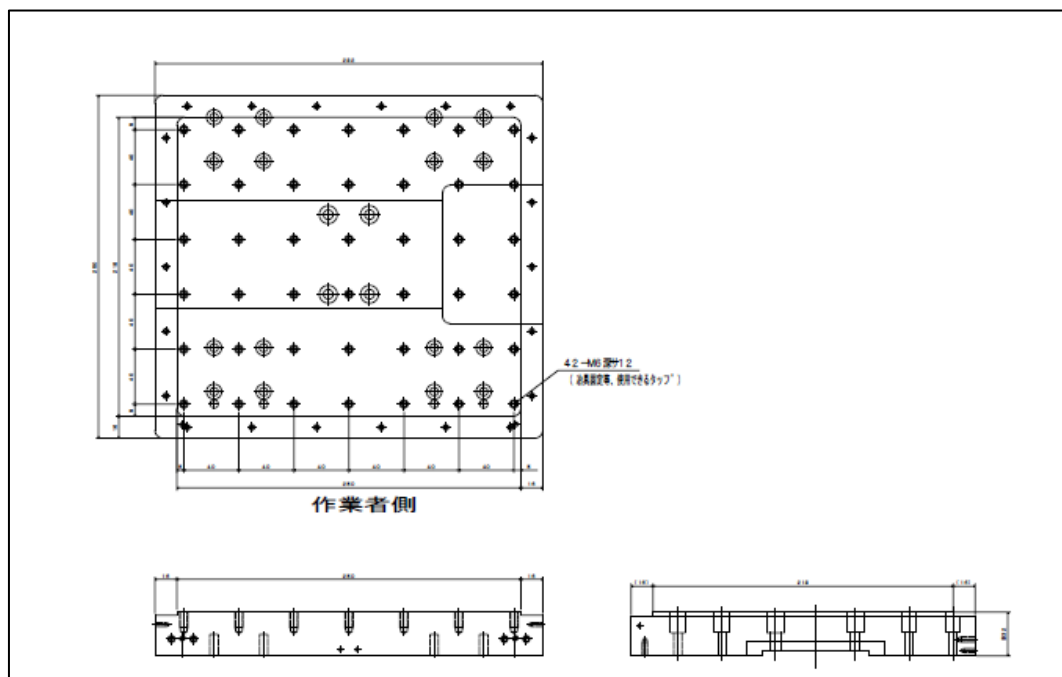


図 2-2-2 完成した加工機のテーブル配置図
(上：X テーブル、下：Z テーブル)

2 - 2 個別の研究開発

(1) 遊星ギヤユニット

遊星ギヤユニットに用いる小型遊星ギヤは、アドバイザーのテクファ・ジャパンの有するギヤ設計システムを用いて設計した。設計図を基にして、高精度ワイヤ加工機によりギヤを削りだした。

遊星ギヤの種類は、中心のサンギヤ、中間のプラネタリギヤ、外側のインターナルギヤの3種類からなる。

項目	駆動	従動
かみ合いピッチ円直径	15.0	20.0
かみ合い中心距離	17.5000	17.5000
かみ合い圧力角	20.0	20.0
かみ合い率	1.5191	1.5191
歯ざき量	.2500	.2500

メインメニューへ戻る 表示

図 2-3 ギヤ設計システム
Get Gear での最適形状設計

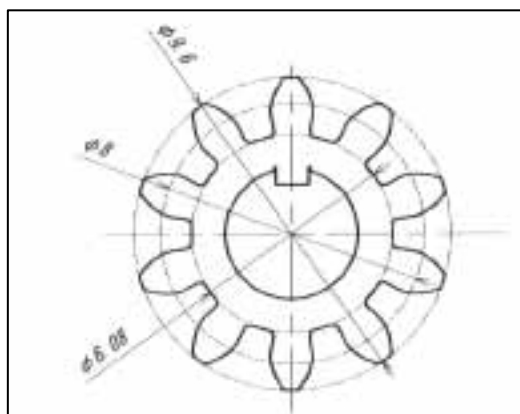


図 2-4 サンギヤ

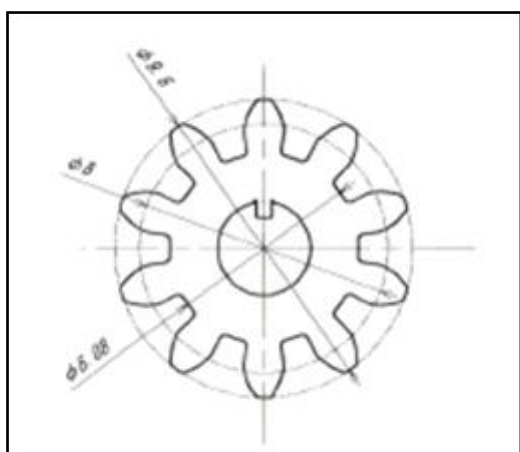
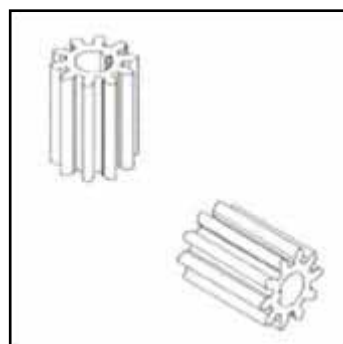
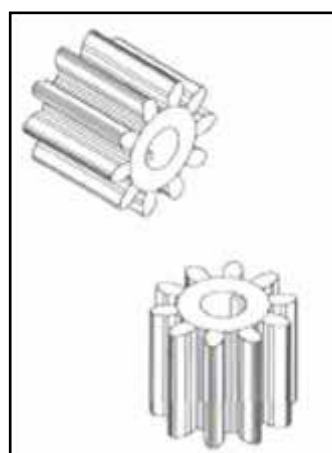


図 2-5 プラネタリギヤ



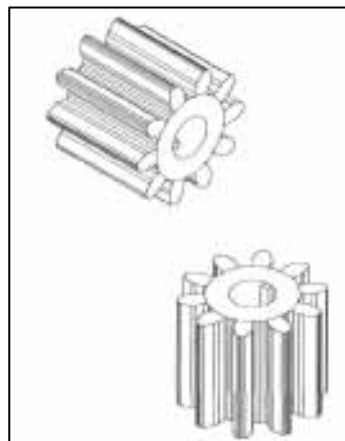
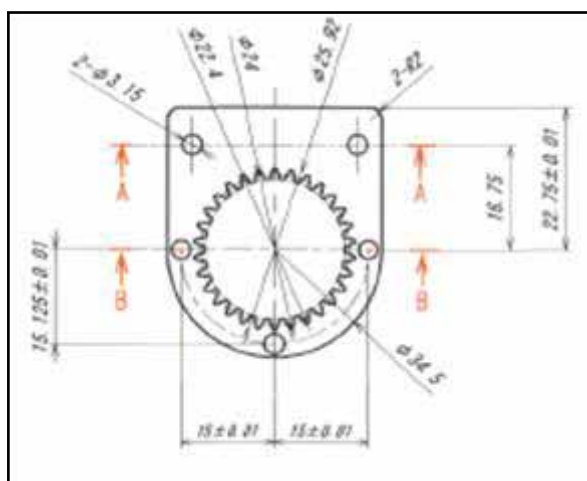


図 2-6 インターナルギヤ



写真 2-2 ギヤを加工する高精度ワイヤ放電加工機

本研究開発では、非常に高精度なギヤの開発に成功している。加工データが理想形状であるため、周辺部品との精度誤差が生じることとなり、各ギヤを組み立てても回転しないという状態になった。

そのため、アドバイザーの知見を借りながら、各ギヤをオフセットして加工することで対応した。

表 2-1 遊星ギヤユニット開発段階での課題と解決

各シーンと問題点	原因推測	対応策
各ギヤをひと通り加工し仮組立実施。回転しない。	加工データが理想形状であるため周辺部品の精度誤差が影響。	サンギヤおよびインターナルギヤを $\phi - 0.02$ オフセットして加工。
サンギヤおよびインターナルギヤの $\phi - 0.02$ オフセット品での仮組立品は回転はするが滑らかな回転にならない。	テクファ香取先生にアドバイスを求め基本的にプラネタリギヤをオフセットすべきとのこと	プラネタリギヤを $\phi - 0.05$ オフセットして加工。
プラネタリギヤの $\phi - 0.05$ オフセット品と他のギヤを組み合わせて仮組立。	インターナルギヤとサンギヤのオフセット0のものとの組合せでも滑らかな回転を確保。	サンギヤ、インターナルギヤの加工は当初の加工データの通り。プラネタリギヤは $\phi - 0.05$ オフセットして今後の加工を進める。

ギヤをオフセットして加工した後、遊星ギヤの試組検証結果は以下のようになっている。

表 2-2 ギヤ測定データと組み合わせ評価

ギヤ測定データ

No	品 目	またぎ歯厚	O/P量	歯先円直径	歯底円直径	
	サンギヤ オフセット0	3.644	9.930	9.599	6.082	
	サンギヤ オフセット0.02	3.626	9.882	9.580	6.066	
	インターナルギヤ オフセット0	—	21.858	22.423	25.918	
	インターナルギヤ オフセット0.02	—	21.789	22.385	25.937	
	プラネタリーギヤ オフセット0	3.644	9.926	9.599	6.080	

各ギヤの組み合わせによる評価

No	組み合わせ	回転感覚		
1		×	回転せず	
2			回転重い	
3		○	回転やや重い	
4		○	軽く回転するがゴロゴロ感有り	

評価結果より、基本的にはサンギヤとインターナルギヤはオフセットをかけるべきではなく、プラネタリギヤでオフセットをかけることとなった。ギヤ以外の他の部品の精度誤差も踏まえて、オフセット量は思い切った数値とする。結果として、プラネタリギヤのオフセットを $\phi 0.05$ として再加工した。

（２）遊星ギヤ仕様の増速スピンドル

遊星ギヤを活用した増速スピンドルは、その構成として、大きく以下の３つに分かれる。前項で開発した遊星ギヤ機構ユニットのほかに、先端出力部、本体胴部のユニットを連結することで完成する。

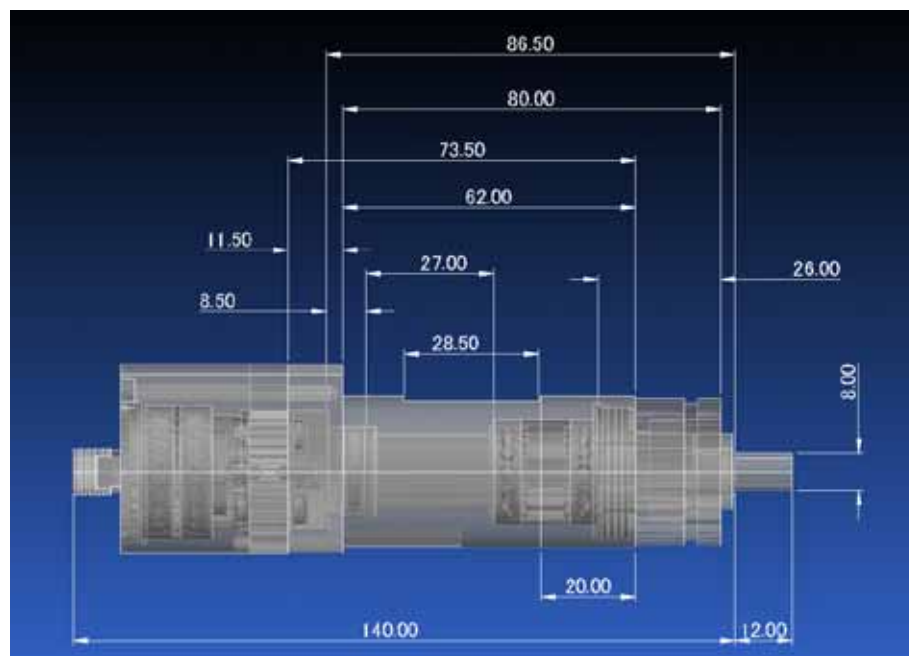


図 2-7 増速スピンドル



写真 2-3 増速スピンドルの各機構

本研究開発では、遊星ギヤでは高精度加工が実現したが、各種部品においては通常の加工技術によるものが多い。そのため、部品精度の問題等により振れ調整ができない等の問題が生じた。そのため、ユニット内部のベアリング、スペーサー等を再加工・再製作した。

表 2-3 出力部ユニット開発段階での課題と解決

各シーンと問題点	原因推測	対応策
出力部ユニットの振れ調整が出来ない	ベアリングスペーサーを研削しても改善しない	ハウジング内径のベアリング当り面の形状不良のためベアリング端面が均一に当たらない。 修正加工実施(社内)。
本体ユニットの振れが10 μ以下にならない。	胴体部ハウジング内径のベアリング当り面の形状不良。	修正加工実施。(社内)
	ベアリングのテンションが効かない。	ベアリングスペーサーの厚み不足。 使用する個々のベアリングに合わせたスペーサーの厚みが必要。 スペーサーを再製作し、個々のベアリングに合わせて厚み研削により対応。 内・外輪を同位置で押さえるスペーサーは、内輪用と外輪用を同時研削し厚みを揃えた。

スピンドル自体は、本体胴部ユニットから出ている2本のピンにて位置決めをする。しかし、位置決めピンのずれによって、ユニット連結後に回転しないという課題が生じた。そのため、各ユニットの位置決めピン穴を精密測定して、ずれ量が多い本体胴部のピン穴修正加工等を施した。

表 2-4 スピンドル完成段階での課題と解決

各シーンと問題点	原因推測	対応策
本体ユニット、遊星ギヤユニット、出力部ユニットの各ユニットの結合。各ユニットを結合すると回転しない。	各ユニットを連結するための位置決めピン穴がユニット毎にずれている。	各ユニットの位置決めピン穴を精密測定し、ズレ量の大きい本体胴部のピン穴修正加工を実施。 これに合わせ、使用する位置決めピンも修正品に対応するため段付ピンとし社内製作実施。

表 2-5 増速スピンドル本体胴部 2 - Φ 3 穴位置ズレデータ

短胴 (S P - 0 0 9 C O
V E R 0 2 L = 7 3 . 5)

No	X	Y
	0.023	-0.040
	0.018	-0.015
	0.004	-0.022
	0.013	-0.013
	0.011	-0.025
	0.011	-0.007
	0.006	-0.017

長胴 (S P - 1 3 0 C O
V E R L = 1 3 6 . 5)

No	X	Y
	0.105	-0.299
	0.105	-0.302
	0.075	-0.077
	0.101	-0.303
	0.110	-0.089
	0.126	-0.308

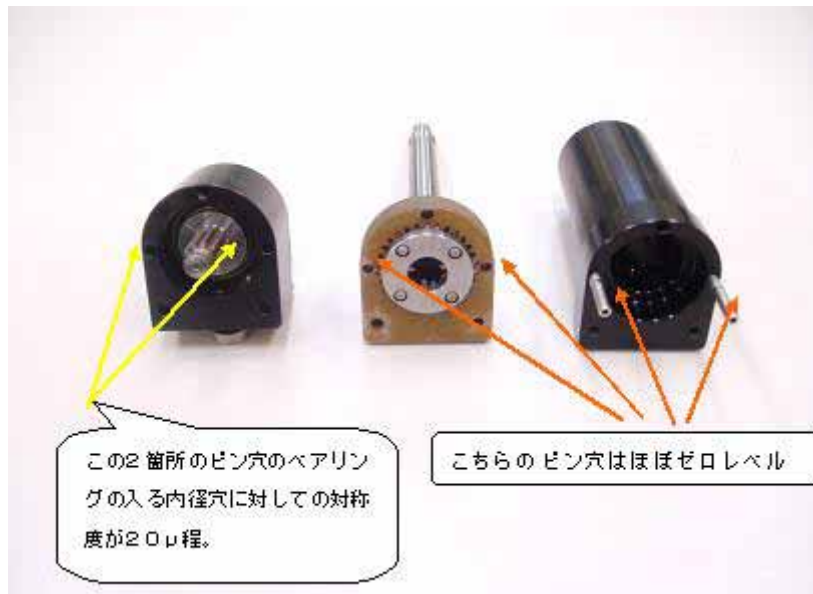


写真 2-4 各ユニットのピン穴精度

先端部ユニットの振れ精度は、約 $2 \sim 4 \mu$ で収めることができた。先端部ユニットの連結用ロックピン穴の位置精度は 20μ 程度であり必ずしも良いとは言えないが、本体部側の精度は問題がない。精度の差は連結すると回転が重くなるのが課題である。

完成したスピンドルは順次スピンドルホルダに取り付けていく。

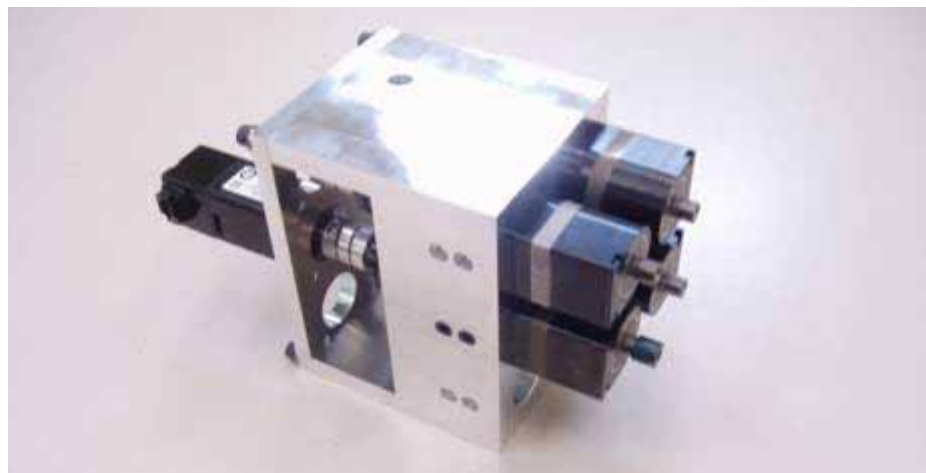


写真 2-5 スピンドルホルダ

(3) 増速スピンドルの精度と機能評価の実験

1) 振動測定による組立精度確認

前項でも述べたように、完成したスピンドルをボール盤にて 400 回転 × 4 倍の馴らし運転を実施したところ、運転後の振れ精度は $5\ \mu = 0.005\text{mm}$ 以下となっている。なお、スピンドルの先端部ユニットの振れ精度は約 $2 \sim 4\ \mu$ ($0.002\text{mm} \sim 0.004\text{mm}$) となっている。

2) 主軸の温度上昇、スピンドル伸び量の測定

実験目的

本プロジェクトで開発した遊星ギヤを用いたスピンドルユニットは高速回転するため発熱しやすい。一般的に、スピンドルの発熱は熱伝導によりユニット全体を温度上昇させ、各部に熱膨張を生じさせる。特にスピンドルから近い工具は、温度上昇が顕著になり工具先端位置と被削材との距離が温度変化に伴い変化するため Z 方向切り込み量が増加し、加工精度低下を引き起こす。そこで、本実験では増速スピンドルの温度上昇を測定し、工具先端と被削材との距離に及ぼす影響について検討した。また研究計画においては 24 時間の温度変化を測定することとしたが、現状では 24 時間稼働による温度測定は装置破損のリスクがあるため、1 時間で評価することとした。

実験方法

本プロジェクトで開発した図 2-8 の装置を用いて、増速スピンドルの性能を評価した。増速スピンドルの回転による温度上昇が工具刃先位置に及ぼす影響を調べるため、同図に示す通り、増速スピンドルに温度センサーを取り付けスピンドル回転時の温度変化を計測した。また温度変化による刃先先端の Z 軸位置を調べるため、切削動力計を用いて刃先位置の検出を行った。図 2-9 に示すように、切削動力計のテーブル上面に超硬チップを取り付け、回転中の工具を装置 Z 軸手動移動し、超硬チップと接触させる。工具と超硬チップの接触は切削動力計アンプから出力される電圧をオシロスコープにより測定した。また本装置は増速スピンドルが A から F まで 6 個取り付けられているが、温度センサー取り付け位置に手を触れたとき温度上昇が最小と思われた図 2-8 向かって左手前の A スピンドルと温度上昇最大と思われた図 2-8 向かって中央手前の C スピンドルを対象に性能評価を行った。

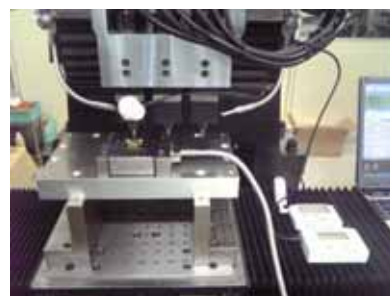


図 2-8 Machining tool and sensors

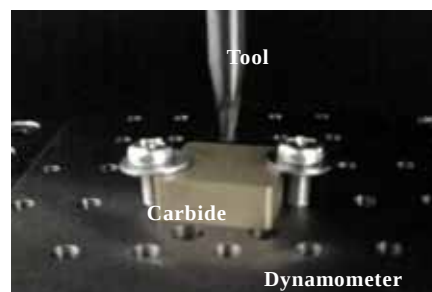


図 2-9 Measured tool displacement with dynamometer

実験結果と考察

A 増速スピンドルの温度上昇

図 2-10 にスピンドル回転数 10,000rpm のときのスピンドル温度と稼働時間の関係を示す。スピンドル A は 30 程度で安定しており、スピンドル C は 57 程度で安定する。これは遊星ギヤユニットが回転により歯車同士の摩擦等により熱が発生するが、各歯車の形状誤差やユニット組み付け誤差などの要因により、各増速スピンドルの温度上昇に誤差を生じさせたものと考えられる。

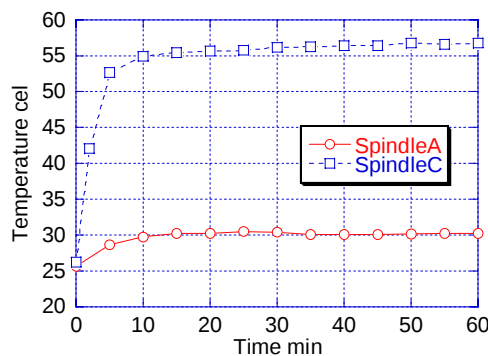


図 2-10 Temperature of spindle-A and spindle-C

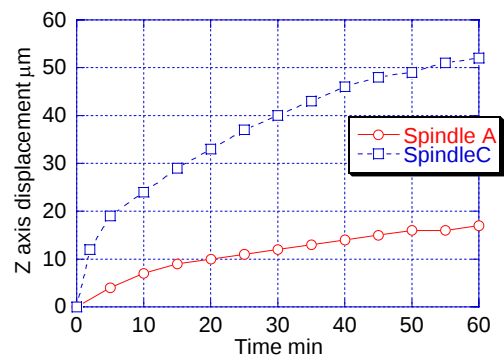


図 2-11 Displacement of spindle-A and spindle-C

B 工具先端位置

図 2-11 にスピンドル稼働時間と各増速スピンドルに取り付けられた工具先端 Z 軸位置の変化の関係を示す。工具先端位置はスピンドル回転開始時の位置を基準値とし、工具先端と超硬チップの距離が小さくなった場合変位は正として表す。スピンドル回転時間の増加に伴い、工具先端位置が変化することが分かる。スピンドル回転数 10,000rpm，加工時間 20 分程度のもので、加工精度 $\pm 0.005\text{mm}$ を実現するためには、少なくともスピンドル A では 5 分、スピンドル C は 30 分以上の暖機運転が必要であることがわかる。

C スピンドル温度上昇が刃先先端位置に及ぼす影響

図 2-12 に C スピンドルの温度と工具先端位置の変化を示す。スピンドル回転時間の増加に伴い、スピンドル温度と工具先端位置が変化していることがわかる。スピンドルの温度上昇は、スピンドルユニットや工具等を熱膨張させ、工具先端位置と超硬チップの距離を小さくしたと考えられる。またスピンドルは回転開始後急激に温度上昇するが、工具先端位置の変化はスピンドルの温度上昇変化の割合より緩やかである。スピンドルの温度測定位置は遊星歯車ユニットの直近に設

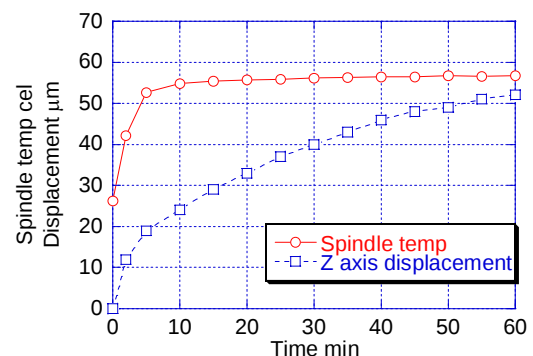


図 2-12 Change of temperature and displacement

置しているため、遊星ギヤから発生する熱による温度変化が早い段階で測定できる。それに対し、工具刃先位置の変化は、遊星ギヤユニットの発生源から距離があるため、熱伝導するまでに時間がかかり、工具先端位置の変位が緩やかになっていると考えられる。

まとめ

- ・ スピンドル回転時間が増加すると、スピンドルの温度が上昇するが 10 分程度で安定する。
- ・ スピンドル 10,000rpm , 加工時間 20 分、加工精度 $\pm 0.005\text{mm}$ 以下を目指すには、スピンドル A は 5 分以上、スピンドル C は 30 分以上暖機運転が必要である。

(4) 反転機構を持った精密加工保持具の開発

薄板プレートの加工において、その保治具の開発は重要である。また、インプラントプレートは、表面のみならず裏面の加工を施すことによって完成する。インプラントの表面加工が終了したのちに反転させる必要がある。そのため、本研究開発では、反転機構を持った精密加工保治具を開発した。なお、今回の反転機構は手動であり、自動化は今後の課題である。



写真 2-6 保治具本体

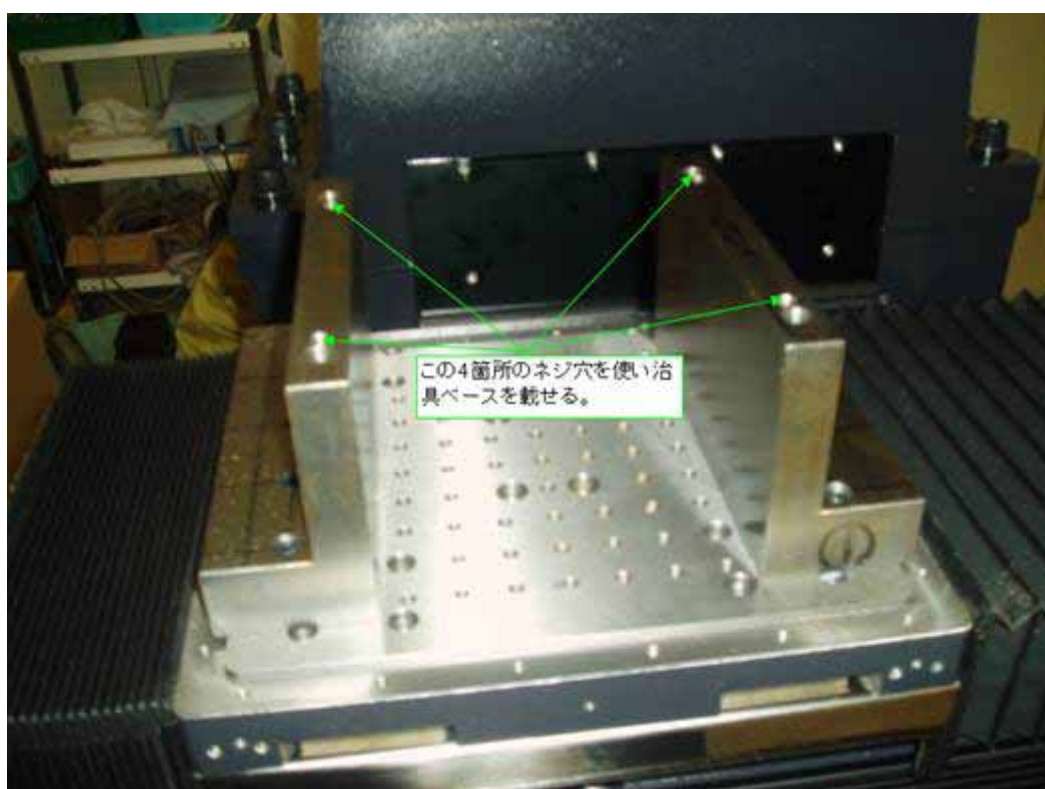
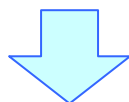


写真 2-7 反転機構を持った精密加工治具

<加工効率について>

3月24日現在において製品の実加工は未実施である。最適加工効率については今後、加工機による実加工や仕上げ面粗さ評価、最適化好条件の設定等を経て、加工速度の検証を実施していく。

現在までのテスト結果を基に加工速度を推測すると、以前マシニングセンターにて加工した同様のワークを加工すると仮定したときには6個同時に加工したときの加工時間は約45分と推測できる。よって1個当りは7.5分となる。



以前のマシニングセンターでのデータでは1個当り 23 分であったので、加工効率は「3.07 倍」となる事が予測される。



写真 2-8 切削動力計の取り付け

第3章 研究開発の総括

(1) 開発コンセプトに対する研究開発成果

研究開発で目指したコンセプトに対して、本研究開発の成果は次のように整理できる。増速スピンドルの核となる小型遊星ギヤは当初の目的と比較して非常に精度の高いものができた。一方、スピンドル自体については、強度不足の問題から、当初の5倍速ではなく、4倍速の回転数とした。

表 3-1 小型遊星ギヤユニット及び増速スピンドル開発の成果

No	開発目標	開発結果	反省点
1 - 1	精密小型増速遊星ギヤユニットの開発		
	小型ギヤ形状精度 0.005mm	0.001mm	線径φ0.05ワイヤー対応の精密ワイヤーカット機により予想以上の効果を得られた。 加工速度が著しく遅く、加工データの見直しを含め加工速度のスピードアップが課題。
	軸芯の同軸度 0.002mm	0.002mm	ユニットを構成する周辺部品の精度向上。
1 - 2	遊星ギヤ仕様増速スピンドルの開発		
	主軸回転数 25,000min ⁻¹ (5倍速)	20,000min ⁻¹ (4倍速)	5倍速での設計とすると、周辺部品が極小となり強度不足になってしまうため、4倍速とした。

研究開発当初の目的であるサーボモータによる制御方式、スピンドルの6本搭載等を実現させ、最大加工範囲もほぼ想定していたものと同じレベルになった。また、制御軸については、特に加工に影響は無いため同時3軸とした。

表 3-2 インプラント用専用加工機

No	開発目標	開発結果	反省点
2 - 1	6本のスピンドルを搭載した生体用インプラント用専用加工機の開発		
	制御軸: 4軸 (同時3軸)	3軸 (同時制御)	加工ワークの自動反転を実現させるためにC軸を付加した、4軸制御を目標としていたがC軸の役割は反転のみであり、割出し加工はしないことから、3軸同時制御のみとした。
	制御方式 サーボモーター	サーボモーターによるスピンドルの回転制御実現	安川電機社製の小型100Wを選定し、主軸ユニットのコンパクト化の一役を担った。
	最大加工範囲 200×200×150	機械本体テーブル 218×250×100	治具面へのワーク取付最大寸法 180×120 Z軸ストロークは100
	スピンドル軸数 最大6本	6本	機械本体コラムへの取付け重量の配慮が必要

(2) 今後の取り組み

1) 加工効率試験

今後、開発された加工機によって、インプラントプレートの実加工に取り組む。現在、予測値として当初目標の加工効率3倍の達成が期待できる。以下、平成22年3月24日現在による、実加工試験のスケジュールを記載する。また、次ページにインプラントプレートの完成予想図を掲載する。

表 3-3 加工効率試験のための研究計画

No	研究開発項目	完了日程
1	被削物製品のシンクロナイズド切削加工による実加工	3月末
2	加工精度、仕上げ面粗さの評価	3月末
3	最適加工条件の設定	4月中旬
4	最適条件下での加工速度検証	4月末

2) 今後の追加研究開発

本研究開発において高精度な遊星ギヤの加工を実現したが、加工速度が著しく遅いため、コスト面も含め今後の改善課題である。また、小型遊星ギヤ以外の増速スピンドルユニットの部品加工においても精度が要求される。今後、加工機を2台・3台と増産するにあたり、各種部品加工においてもコンスタントに高精度な加工ができるようになることが望ましい。

反転機構をもった精密加工治具であるが、今回は手動で反転する仕組みとなっている。今後、更なる作業効率を上げるため、自動反転機構の開発を進める。

今回開発したインプラント切削加工機は、主に指部位のインプラントのプレート加工を想定している。今後は、事業化を進めるとともに、大腿骨用のインプラントプレートの加工等、更なる需要が見込める部分での加工にも取り組んでいく。

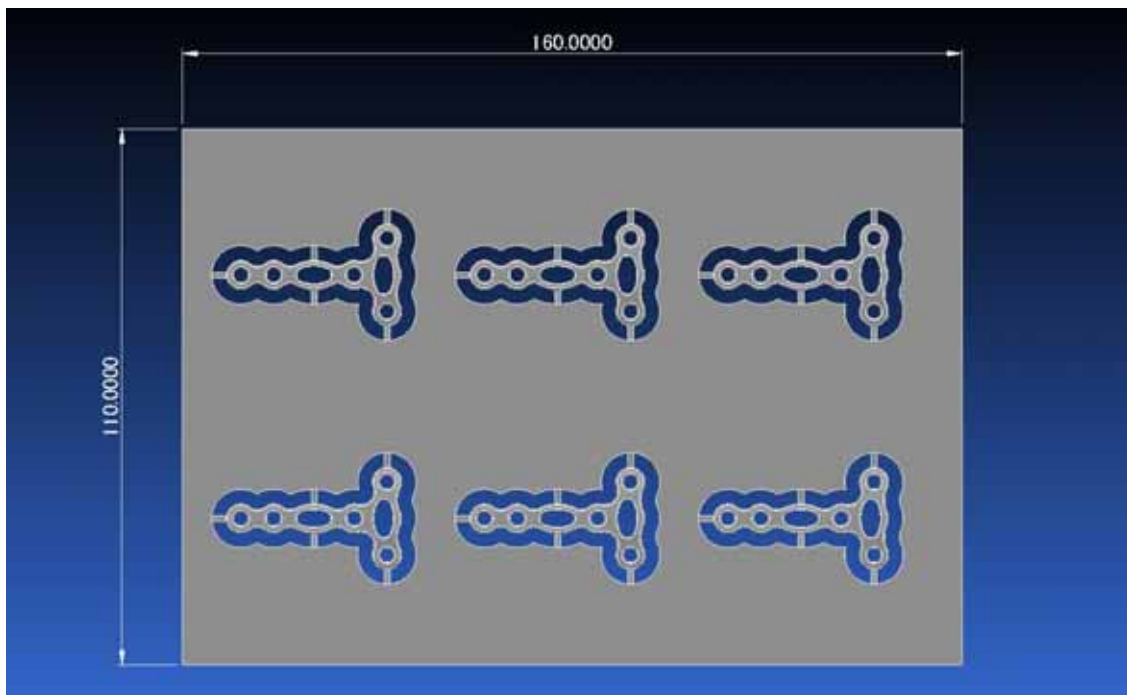
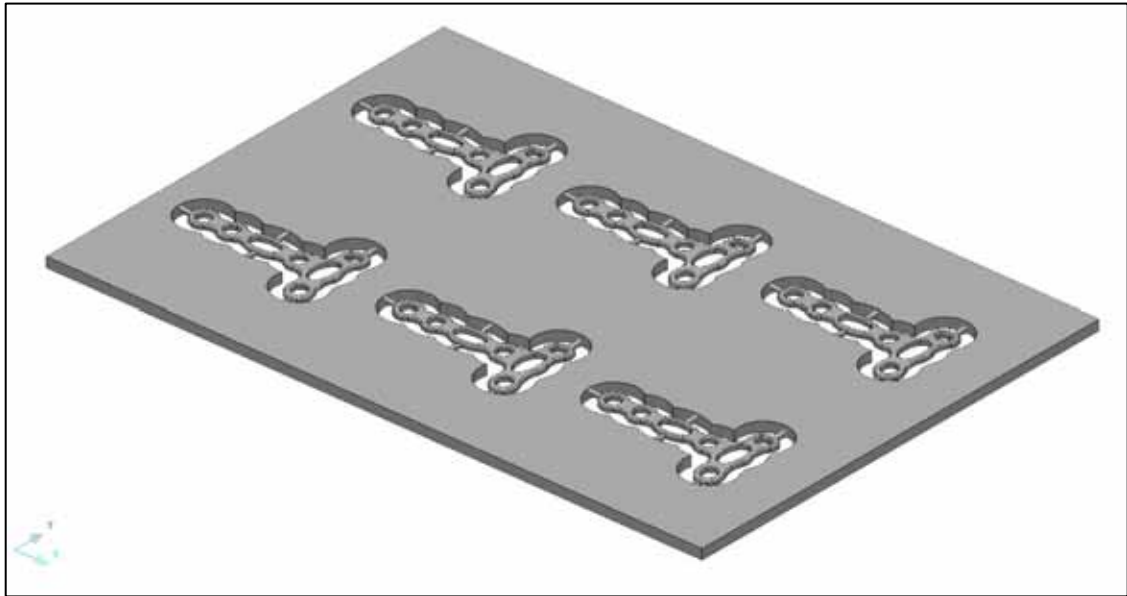


図 3-1 インプラントプレート完成予想図

第4章 事業化への期待

4 - 1 事業化目標

【販売製品】事業化では、次の2製品の販売を計画する。事業化はどちらも研究実施者の（株）スズキプレシオンが担当する。

（１）安価な「生体用インプラントプレート部品」販売

・・・国産の安価なインプラント供給を目指し、共同体に参加している川下（医療用機器製造・販売業者）への販売を行う。すでに国内にインプラントを製造販売している業者であり、既存インプラント市場における輸入品の代替を狙う。

（２）本研究開発成果物である「シンクロナイズド切削加工機」

・・・我が国生体用インプラント市場が抱える課題を解決するには、1社でも多くの企業が、安価にインプラントプレートを供給することが必要である。研究開発の共同体参加者等の鹿沼市・栃木県等の周辺地域中小製造業に「シンクロナイズド切削加工機」を販売することで、目的達成とともに、加工機販売ビジネスにつなげる。

（１）安価な「生体用インプラントプレート部品」

我が国において、生体用インプラントは「需要先行型」市場であるが、材料がチタン等難削材であり、かつ多品種小ロット生産である特徴から「供給能力（コスト・スピード）」が追いついていない。そのため、現在も広がり続けている需要を外国製品（輸入物）に奪われ続けている。

本研究開発成果物である「シンクロナイズド切削加工機」を活用すれば、インプラントプレート部品1個あたりで、以下のような生産能力向上が見込まれる。

	現状	今回成果物の活用
加工時間	60 分	20 分
メーカーへの納入価格	約 10,000 円	約 5,000 円

注）インプラントは部位によって加工時間・価格とも多種多様。上記はあくまで平均である。

図 4-1 インプラントプレート加工の生産能力向上

研究実施者では、すでに年間 400 枚～500 枚のインプラントプレート部品を供給しているが、本研究開発成果物である「シンクロナイズド切削加工機」を活用すれば、生産量を約 20 倍にすることが可能である。

	現状	2 年目の目標
生産量（年間）	500 枚	10,000 枚
売上（年間）*プレートのみ	500 万円	5,000 万円

図 4-2 インプラントプレートの販売目標

研究実施者である㈱スズキプレシオンはすでにインプラント製造業者との取引を持ち、医療機器関係の展示会等での参加を通して、そのほか業者との接点を持つ。20 倍の供給量を捌くため、まず初年度は既存取引業者であるロバート・リード商会への供給から始まり、5 年後は別業者にも供給を拡大して、約 50,000 枚（250,000 千円）の生体用インプラント部品の販売を目指す。

また、インプラントを部位別に見てみると、金額的には「大腿骨」用に対して大きなシェアが期待できる（現在の販売額シェアから見て、他の部位と比べて約 4 倍の需要が期待できる）。スズプレシオンにてすでに取り扱っているその他整形外科用・歯科用に次いで、3 年目以降に大腿骨用のインプラント生産・供給に取り組むことで、より大きな市場を狙っていく。

< 医療製造業者によるインプラント製品販売 >

現在、我が国におけるインプラントの市場は約 1,000 億円である（薬事工業生産動態統計年報 H.18）。しかし、その 80%～90%（800 億円～900 億円）は輸入に頼っているのが現状である。そのために、本研究開発成果によって開発された加工機を用いたインプラントを、事業化 2 年目にて現状の 20 倍の供給量（10,000 個）を目指す。

（2）本研究開発成果物である「シンクロナイズド切削加工機」

シンクロナイズド切削加工機については、あくまで本事業は「我が国生体用インプラント市場に国産の安価な部品を供給する」ことが目的である。そのため、栃木県及び鹿沼市周辺にて、インプラントプレート供給ビジネス開始を考える切削加工業者への販売を行う。主に、対象は「地域の中小製造業者」であることを勘案し、5 年間で 10 台程度の販売数量を目標とする。

	1 年目	3 年目	5 年目
切削加工機	4 台		6 台

図 4-3 切削加工機の販売目標

5 年目以降は自動車産業、情報通信機器産業等の他の産業分野への拡販も試み、加工機の販売も視野に入れる（目標販売台数：10 台 / 年間）。

4 - 2 事業化（実用化）の実施体制

本事業の実施体制は以下のとおりである。

（１）生体用インプラントプレート、切削加工機の生産

- ・(株)スズキプレシオン【共同体メンバー】

（２）技術アドバイス、技術支援

- ・(株)橋本精機【共同体メンバー】
- ・栃木県産業技術センター【共同体メンバー】
- ・東京電機大学【共同体メンバー】
- ・テクファ・ジャパン(株)【共同体メンバー】
- ・鹿沼ものづくり技術研究会メンバー【スズキプレシオン、橋本精機を含めて 12 社】

（３）販売体制

インプラント

- ・(株)ロバート・リード商会【アドバイザー】

切削加工機

- ・(有)モリヤエンジニアリング【アドバイザー】
- ・シチズンマシナリー(株)【アドバイザー】

（４）総合的な支援（施策適用や販路開拓支援等）

- ・鹿沼商工会議所【事業管理者】
- ・鹿沼市 ・ 栃木県 ・ 関東経済産業局

4 - 3 事業化（実用化）計画

（１）安価な「生体用インプラントプレート部品」

すでに研究実施者が販路を持つ製造販売業者へのインプラントプレート供給を進める。そして、我が国医療現場ニーズに適合したインプラントを供給することで目標達成を図る。特に、生体用インプラントを扱う医療機器メーカーを通して、国内医療機関へ生体用インプラントを販売する。

、3年目以降はそのほかの医療機器メーカーへの部品供給を目指す。研究実施者の(株)スズキプレシオンは、すでに国内の医療機器展示会等を通して、医療機器メーカーとの販路開拓を続けており、供給体制が整えば、各社へのプレート供給が可能になるように営業を続けている。

その他にも、生体用インプラントには、整形外科用と歯科用があるが、研究実施者はすでに歯科インプラントを取り扱っている。やがて、より高価な部位（大腿骨等）の取り扱いを始めることを目指し、本研究開発の成果であるシンクロナイズド切削加工機による新たなインプラント製品の開発を進める。

（２）本研究開発成果物である「シンクロナイズド切削加工機」

本研究開発の成果物であるシンクロナイズド切削加工機を地域企業に普及することで、地域企業の産業分野参入を促し、国産インプラント比率上昇をバックアップする。

鹿沼地域における販売戦略

栃木県鹿沼市では、「鹿沼を微細加工の集積地に」を合言葉に、「鹿沼ものづくり技術研究会」が平成１１年から立ち上がっており、従前からの下請型ビジネスから、提案型・開発型に転換するため、産学連携による技術の高度化や国内外の販路開拓活動を続けている。このように鹿沼地域には微細加工をキーワードとした意欲ある企業集団があり、本研究開発の共同体メンバーも研究会参加者であり、その他メンバーへの販売が考えられる。

栃木県／首都圏北部地域における販売戦略（基盤技術の集積と医療機器産業への期待）

首都圏北部地域は、経済産業省「産業クラスター計画」の一角に担っており、従来から地域に立地している自動車・航空を中心とした機械産業分野にて、切削をはじめとする各種基盤技術系中小ものづくり企業が集積している。近年は、「川上・川下ネットワーク構築事業」等を活用して、積極的に異業種川下への展開する動きも見られ、新たなターゲットとして医療分野は大きな期待がある。得に、栃木県では、平成２１年度より企業立地促進法に基づく産業振興の基本戦略の柱の一つに「医療機器産業」が追加された。それに伴い、「とちぎ医療機器産業振興協議会」が立ち上がり、地域中小製造業による医療機器産業参入を促進している。総括研究代表者はすでに、このような協議会に参画しており、その動きと連携して、地域中小ものづくり企業への切削加工機の販売とそれによる生体用インプラントプレートの供給を図る。

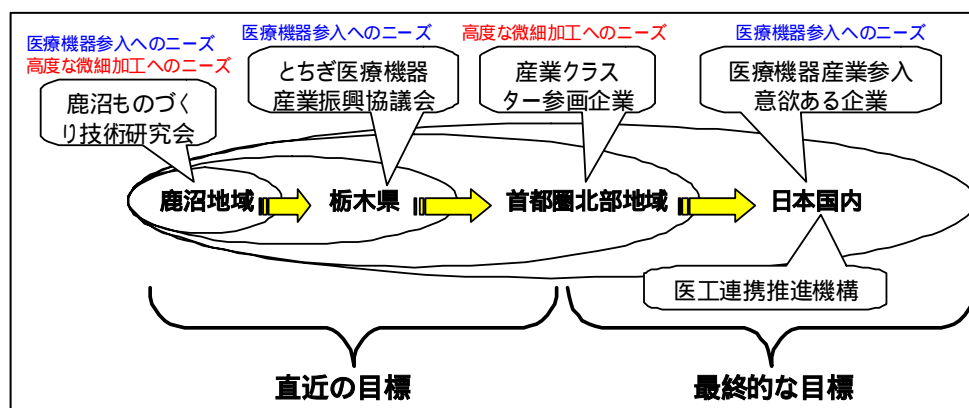


図 4-5 加工機の販売戦略

<販路開拓戦略>

上記のような川下企業や商社、直販による切削加工機械と医療機器メーカーに対する生体用インプラント販売のみならず、栃木県や鹿沼市のバックアップを受けながら、積極的に国内外の展示会・見本市に成果物を発表することで新規販路を開拓、より多くの潜在的顧客へのプロモーションを実施する。（候補展示会：機械要素技術展、MEDTEC Japan など）

また、研究開発成果である「シンクロナイズド切削加工機」の流通は、あくまで地域内（最大でも日本国内）に留めることで、国際競争力維持に努める。

