

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機エンジン等難削材大径薄肉部品の無人化加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 4 年 3 月

委 託 者 関 東 経 済 産 業 局
委託先 財団法人長野県テクノ財団

目 次

	ページ
第 1 章 研究開発の概要	
1-1 研究開発のニーズ・背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織、管理体制、研究実施者、協力者、実施体制）	4
1-3 成果概要	6
1-3-1 加工歪の発生課題への対応	6
1-3-2 クランプ歪の発生課題への対応	6
1-3-3 素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応	7
1-3-4 加工監視・加工適正条件についての対応	7
1-4 当該プロジェクトの連絡窓口	8
第 2 章 加工歪の発生課題への対応 {円筒形状品に対する新加工法}	
2-1 歪自動調整クランプ装置の開発	9
2-2 サンプル加工	9
2-3 加工の評価	10
第 3 章 クランプ歪の発生課題への対応 {リング形状品に対する新加工法}	
3-1 無負荷クランプ法の開発	10
3-2 サンプル加工	11
3-3 加工の評価	11
第 4 章 素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応	
4-1 揺動加工法の開発	12
4-2 サンプル加工	13
4-3 加工の評価	13
第 5 章 加工監視・加工適正条件についての対応	
5-1 加工状態監視システムの開発	13
5-2 工具寿命管理システムの開発	15
5-3 加工情報収集システムの開発	16
第 6 章 全体総括	
6-1 成果の総括	16
6-2 当研究開発後の課題	16
6-3 事業化への展望および目標	17
6-4 まとめ	17

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発のニーズ・背景・研究目的及び目標

[ニーズ]

航空機産業においては、機体の大型化や航続距離延長に向けた流れを受けて、機体の軽量化が求められ、例えば構造の一体化、中空化、薄肉化等が進んでいる。この流れを受け、本研究開発事業である航空機エンジン部分についても、エンジンの燃費向上と軽量化の要請から、タービン部の高温化に伴った超耐熱材等の材料を大径薄肉部品に加工することが主流となっている。



図1 リング類

具体的には、ジェットエンジンは高効率化（燃費向上）のため、4基から2基のエンジンに採用をシフトしており、基数削減しながら推力を得るため、大型化を進めている。部品で言うと、航空機用エンジンの圧縮機部分、燃焼室部分のリング類（図1）、燃焼器ケース等

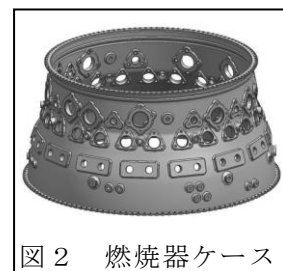


図2 燃焼器ケース

（図2）の大型化であり、更にコンプレッサーの圧力を高め燃焼効率を上げる必要があるため、超耐熱材であるニッケル基合金（インコネル）が使用され、かつ軽量化から薄肉化が求められている。この難削材であるインコネルを、加工品質（平行度等の精度）を確保した上で、外径寸法が大径化してきており（400mmから、600～1000mmに変化）、かつ薄肉複雑加工をしなければならない。しかしながら、現在の国内企業のエンジンの部品加工ではいくつかの課題を抱えている。一方、航空機用エンジンの生産予測は、3.5倍（2006年～2026年）と言われ、国内の川下製造企業の各社は、海外のエンジンメーカーや航空機メーカーと国際共同開発に積極的に参画しており、国産ジェット機であるMRJプロジェクトもH22年に生産開始するなど、今後の需要増加が見込まれている。川下製造企業は、高い信頼性を維持した上で、継続的な需要の増加が予想され、大幅な増産対策が必要となっているエンジン部品を、難削材大径薄肉部品の複雑形状による加工の難易度に対応した上で、安定した加工品質の確保による信頼性向上、コスト低減、増産化の全てを満たす、切削加工技術の高度化を求めている。我国航空産業は熾烈な国際競争に晒されており、唯一の解決策は無人化のみと云われている。本件は高難易度の代表である、航空エンジンの燃焼器ケース等の無人化に至る障害を抽出し、その解決を図るものである。

[研究開発の背景]

上記のような川下製造企業のニーズがある中、以下で対応しているのが現状である。

- (1) 航空機エンジン等の大径（600～1000mm）薄肉難削材部品（図2）の加工は、内部応力等による加工による歪が必ず発生（燃焼器ケースでは、1～2mm発生）し、その歪の量は素材毎にばらつきがあり、品質の維持を大きく阻害している。加工歪がある状態（治具面と部品面との間に隙間（歪））でクランプをすると部品面に変形を発生させてしまう。その対策は一旦機械を止め作業者がダイヤルゲージ式測定器を部品の上面と側面に当て、クランプ前（アンクランプ）とクランプ後（クランプ）のダイヤルゲージ数値が変化しない様に、

治具と部品面の隙間量に合わせシム（調整用薄板）を差し込んで調整をし、確認しながらクランプし再度加工をする。精度が確保されるまで、上記手順を繰り返す。現状加工手順は荒引（基準面加工）、中引き、仕上加工があり、そのつどアंकランプ、計測、シム調整、クランプを行い、5～7工程で精度を確保している。（同時5軸制御複合機使用の場合）このシム調整作業は熟練者でも1回30分以上の時間を要する。最終工程までにこの作業を最低5回行っている。また、部品用素材は難削材で高価、入手が困難で、もし加工不良を出すと、費用、期間の大きな損失となるため、難削材より安価な材料でプログラムの動作確認、類似加工条件をチェックし、事前加工を実施している。そのため多数の加工工数を必要としている。

（2）大径薄肉リング形状品（図1）は、高さはないが薄肉の難削材で、切削抵抗が大きい為、加工中動かないようある程度大きなクランプ力が必要で、内径または外径の3点を加圧クランプして加工すると、開放時（クランプ力なし）に歪みが必ず発生する。その歪は外径、内径方向に変形を起こし、両端面の平行度にも悪影響を生じ、品質の維持を大きく阻害している。現状では、熟練者の経験によりクランプ点を3点や多点化の工夫を行ったりしながら、何回も繰り返す多工程化によって、精度を確保している。また部品が大径となるほど、加工時の加工圧による変形も生じてくるおそれがある。

（3）上記（1）、（2）項の部品は、素材形状のばらつきが大きく、楕円形状部分の黒皮断続加工により、加工工具に致命的な寿命短縮、破損等をもたらし、安定した品質の確保の困難、及びコスト上昇の要因となっている。黒皮部の切削加工では工具寿命が通常の半分以下となってしまうが、なおかつ楕円形状により断続加工になると、工具寿命が更に読めないくらい破損が激しい。難削材加工では30%が工具費といわれており、工具寿命はコストに大きく影響する。そのため、作業者が常に監視する必要から無人化は全く出来ていない。

（4）加えてこれらの材料は1個400万～600万円と高価のものがあり、万が一の不適合発生は破滅的な損益ダメージと信用失墜等々を招くため、おびえマインドも手伝い無人化の阻害要因になっている。現状では、工具損傷や切屑絡み等の加工異常の監視は作業者に、また適正加工条件の設定は熟練者の経験による部分が多い。また、難削材加工における工具寿命の判断については、作業者に過剰な安全意識が働き、工具寿命前での工具交換を行っており、工具や段取変え時間のムダを発生させている。現状では難削材（インコネル）の加工において段取変え等を含めて10時間以上の加工時間を要しているが、その中で工具交換は1回15分毎程度で実施しており、10時間では40回の工具交換を行うことになる。工具交換作業時間を3分とすれば、計2時間の交換時間と40本の工具を要していることになる。

[当該分野の研究開発の動向]

航空機分野において、戦略的基盤技術高度化支援事業でいくつかのテーマが採択されている。概要説明から見ると川下製造業者のニーズは同一とみられるが、何れも本研究と加工技術が異なる方法と推測される。当該分野については、他分野での研究で一部関連するものの、航空機分野という設計から製造方法に一貫した指定が行われる特殊な分野では、

治具や人的監視に頼った多工程による加工で行われており、研究開発はあまり進んでいない。また加工監視システムについては、本研究の研究実施者の長野県工業技術総合センターにおいて、小型加工装置で、小型精密部品の加工中に検出可能な量（加工情報）に基づいて工具状態を主とした加工状態を監視するため、加工情報センシングの研究事例*¹があるが、大型部品で加工時に工具状態を推定、工具寿命の管理、折損の予知等には至っていない。

* 1 長野県精密工業試験場 研究成果報告「次世代材料加工情報デジタル化技術の研究」小口京吾他 平成 16 年 10 月

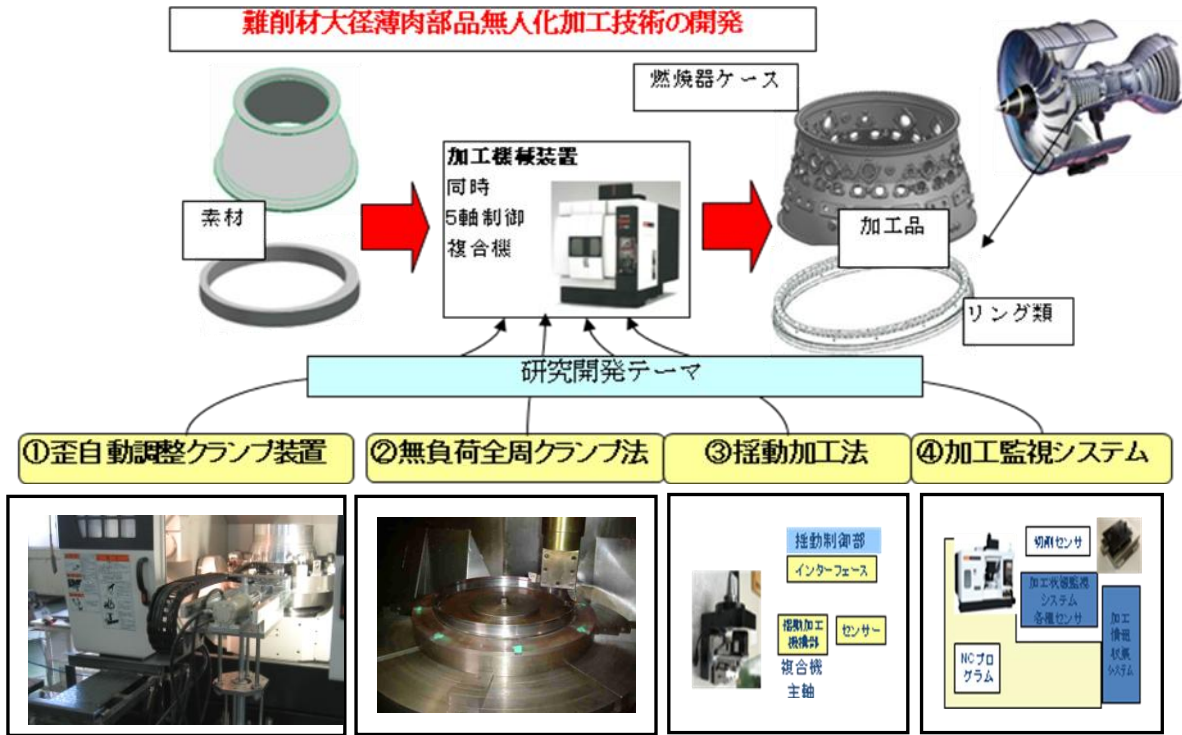
[研究の目的]

現在、航空機用エンジン難削材大径薄肉部品の加工においては加工歪、クランプ法、素材形状に合わせた加工法、監視システム等の分野の技術が確立されていない。これらの課題を解決し、安定した加工品質の確保による信頼性向上、コスト低減、増産化に対応した、エンジン部品の無人化加工技術の確立を目指す。

[研究の目標]

本事業では、航空機用エンジン難削材大径薄肉部品の無人化加工技術に至る課題を抽出し、その解決を図るものである。

図中に示すように、①加工歪の発生課題への対応 {円筒形状品に対する新加工法}、②クランプ歪の発生課題への対応 {リング形状品に対する新加工法}、③素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応 {素材の楕円形状に対する新加工法}、④加工監視・加工適正条件についての対応、の 4 項目の技術課題（テーマ）に 1 2 のサブテーマを設定し、目標を定め、研究開発を行い、川下企業のニーズに適合した技術の確立を図る。

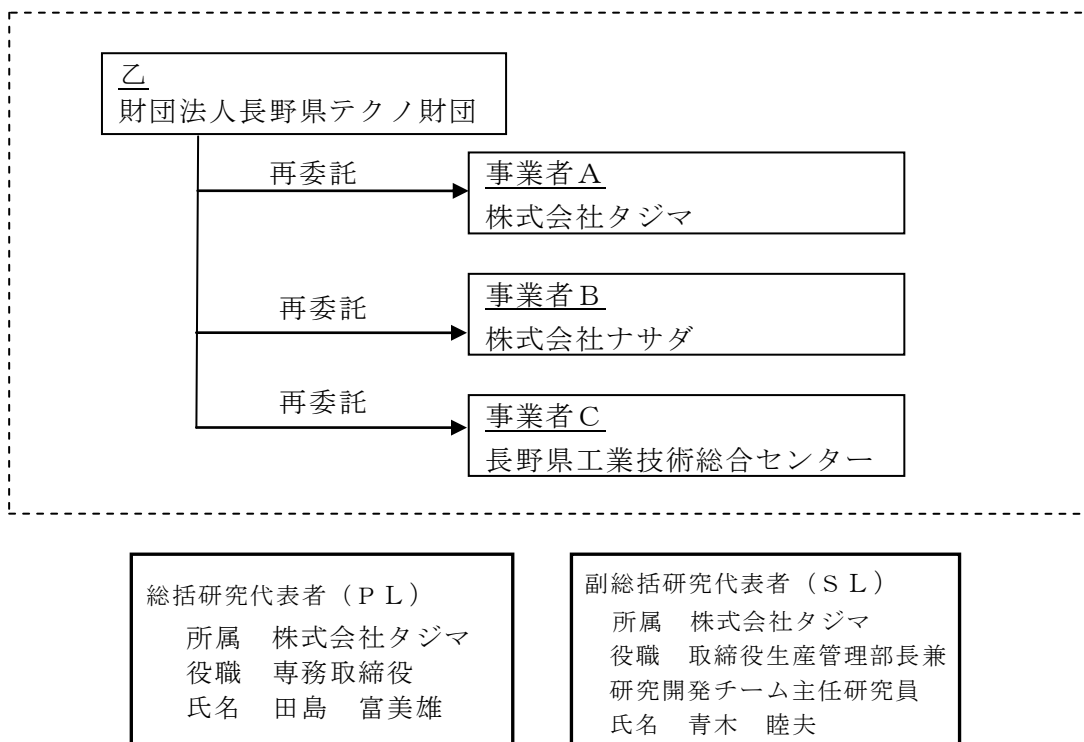


○技術課題（サブテーマ）

加工歪の発生課題への対応のため、歪自動調整クランプ装置を開発し、加工歪みに対応したクランプの自動化を図る。機能基盤部分を多点受けし、自動シム調整を行う。加工精度は従来と同等以上で、<u>工程短縮し、加工時間の50%削減を目標。</u>	クランプ歪の発生課題への対応のため、無負荷クランプ装置を開発し、<u>内径外径空間部を樹脂等で固め全周無負荷状態でクランプする。</u>製品精度の安定化を図る。	素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応のため、品物が回転中心から芯ふれした値または楕円の値を自動計測し、刃先が品物に追従する揺動加工法を開発する。<u>楕円形状に対する非断続切削加工を実現し、工具切削寿命時間を2倍に増やす。</u>	加工監視・加工適正条件についての対応のため、加工状態監視システムを開発、<u>工具寿命管理システムの開発により、工具寿命を推定し、20%の工具利用延長を目指す。</u>加工情報収集システムを開発し、センシング情報、工具状態や製品表面性状など加工ノウハウの蓄積と技術高度化・最適化を図る。
加工歪の発生課題への対応 ①-1 歪自動調整クランプ装置の開発 ①-2 サンプル加工 ①-3 加工の評価	クランプ歪の発生課題への対応 ②-1 無負荷クランプ法の開発 ②-2 サンプル加工 ②-3 加工の評価	素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応 ③-1 揺動加工法の開発 ③-2 サンプル加工 ③-3 加工の評価	加工監視・加工適正条件についての対応 ④-1 加工状態監視システムを開発 ④-2 工具寿命管理システムを開発 ④-3 加工情報収集システムを開発

1-2 研究体制

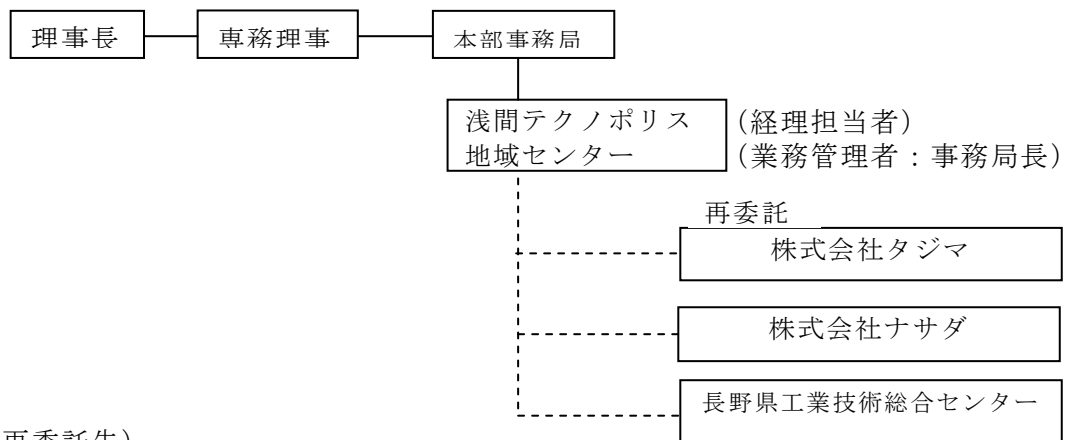
○研究組織（全体）



○管理体制

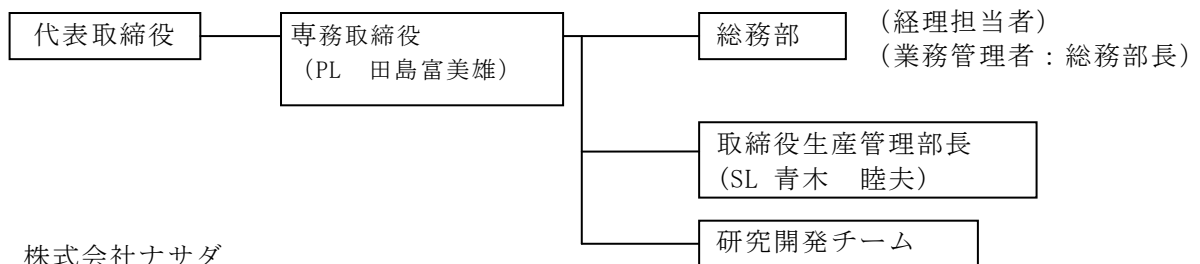
(1) 事業管理者

[財団法人長野県テクノ財団]

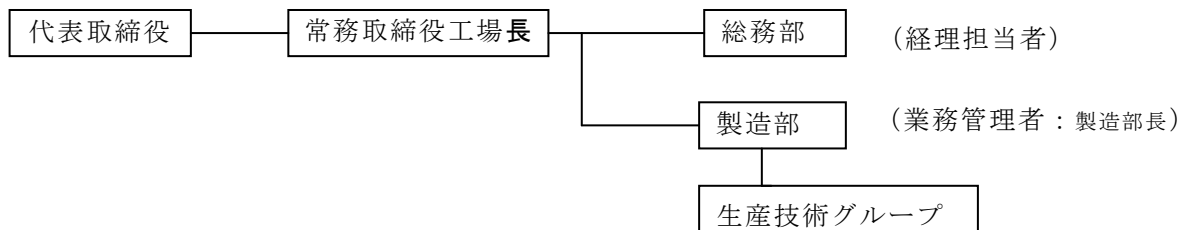


(2) (再委託先)

株式会社タジマ

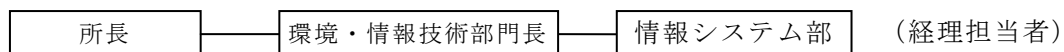


株式会社ナサダ



長野県工業技術総合センター

※業務管理者



○研究実施者

株式会社タジマ

株式会社ナサダ

長野県工業技術総合センター

○指導・協力者

国立大学法人東京農工大学

三菱重工業株式会社名古屋誘導推進システム製作所

三菱マテリアルツールズ株式会社

ヤマザキマザック株式会社

三菱重工業株式会社高砂製作所（H21～H22年度）

日本特殊陶業株式会社（H21～H22年度）

三菱重工業株式会社 O B（H21年度）

1-3 成果概要

1-3-1 加工歪の発生課題への対応【円筒形状品に対する新加工法】

加工歪みに対応したクランプの自動化を図るため、歪自動調整クランプ装置を開発した。ワークの基盤部分を多点（6点）受けし、加工前、仕上げ加工前に機械側から信号を受け、自動で芯出し及びシム調整を行う方法を確認した。加工精度は平行度 0.05mm 以下で、加工工程を7工程→2工程に短縮できることを確認した。加工前、加工途中の人的作業が無くなり、無人化自動運転へ目途がついた。

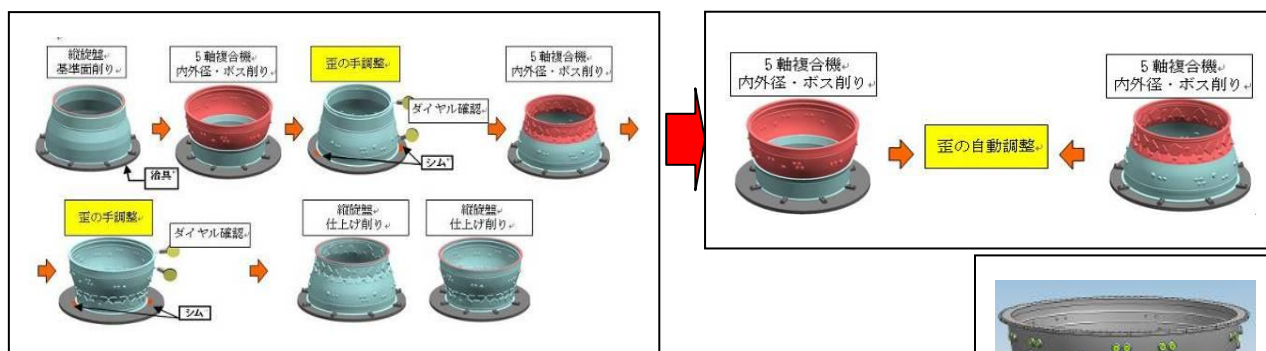


図3 従来の加工法と新加工法の比較

今後は製造現場での加工時間の50%削減を目標とした無人化自動運転の実用化を進める。

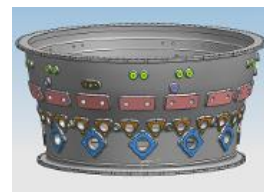


図4 サンプル加工品

1-3-2 クランプ歪の発生課題への対応【リング形状品に対する新加工法】

大径薄肉部品であるリング形状品の仕上げ加工を対象とし、クランプ歪みのない製品精度で安定した加工法を確認するため、従来の複数点クランプ法を見直し、クランプ歪を発生させない無負荷クランプ装置を開発した。この装置はワークの内径及び外径部を樹脂によるクランプ、アンクランプ方法を確認し、全周無負荷状態での加工法を実現できた。

難削材インコネル材でサンプル加工を行い、真円度 0.1mm 以内の加工精度を実現および作業者の経験（熟練者）に頼らない安定した製品精度が得られる見込みとなった。

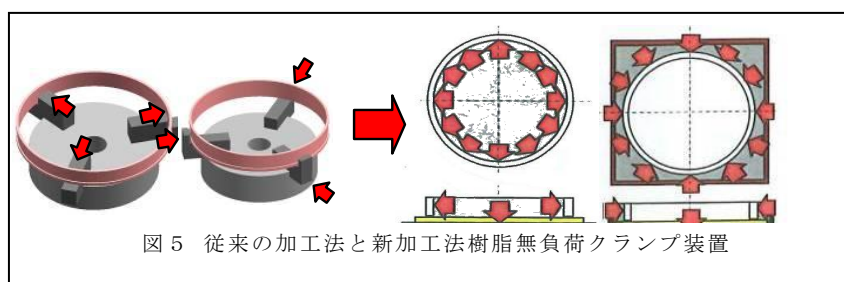


図5 従来の加工法と新加工法樹脂無負荷クランプ装置



図6 サンプル加工品

1-3-3 素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応 〔素材の楕円形状に対する新加工法〕

素材は表面が黒皮状態で、円筒品・リング形状品は楕円形状である。その形状を切削加工すると工具は断続切削加工となり、工具に致命的な破損等をもたらす。この課題解決のため、品物が回転中心から芯ふれした値または楕円の値を自動計測し、刃先がワーク表面に追従する揺動加工法を開発した。これにより楕円形状に対する非断続切削加工が可能となり、工具切削寿命の2倍程度の延長が見込めることとなった。サンプル加工では素材形状の測定、機械テーブル回転と揺動加工ユニットを同期させ、楕円形状から真円形状へ旋削による非断続切削加工を実現した。荒加工工程へ適用の目途がついた。

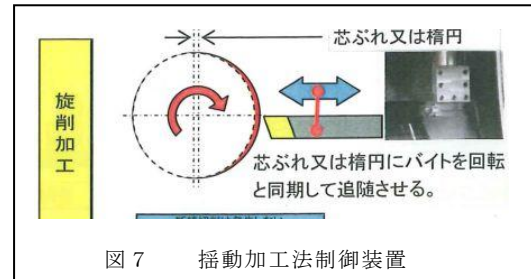


図7 揺動加工法制御装置

1-3-4 加工監視・加工適正条件についての対応

加工状態監視システムおよび工具寿命管理システムの開発を進め、システムのハード、ソフトは確立できた。今後は実機でのデータを蓄積することで、工具寿命の推定に適用し、20%の工具利用延長を目指す。さらに加工情報収集システムの開発を進めデータベースを構築した。今後センシングバイトからの加工情報を蓄積しながら、工具状態や製品表面性状など加工ノウハウと技術高度化・最適化をおしすすめる。

- ・難削材加工では30%が工具費
→工具の寿命推定による工具費のコストダウン
- ・難削材の加工条件は熟練者の経験
→加工状態監視システムのデータから加工情報収集システム内の加工情報データベースを構築し、最適加工条件のノウハウを蓄積する。

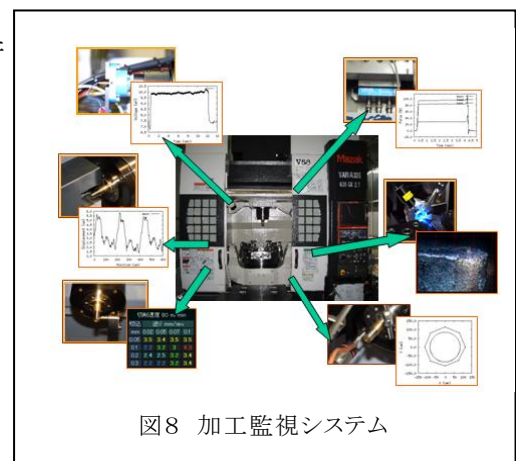


図8 加工監視システム

(1) 加工状態監視システムの開発

センサ類と処理回路を内蔵し加工情報を収集するセンシングバイトを開発した。サーミスタ温度センサ3個(0~200℃)、歪ゲージ8個(温度補償ハーフブリッジ4組、分解能1N)を24bitADC内蔵の32bitマイコンにて信号処理し、切削3分力、切削力の振動成分、バイト先端の温度分布、隣接温度センサの温度差を一括して、0.3秒毎にデジタル出力できた。切削力の振動成分は工具寿命直前に急速に増大することが検出できた。

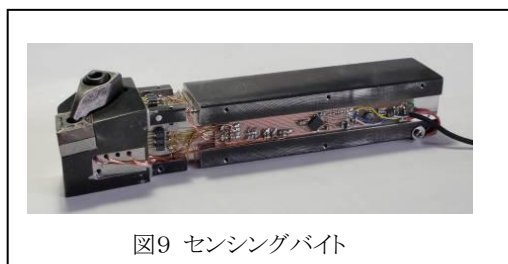
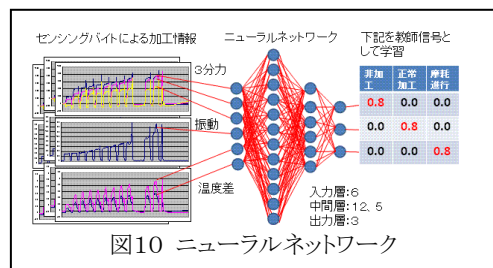


図9 センシングバイト

（２）工具寿命管理システムの開発

開発したニューラルネットワークは、入力層 6 セル、中間層 12、中間層 5、出力層 3 の 4 層構造で、加工監視システムからの情報により、バックプロパゲーション法で学習し、実験でセンシングバイトからの信号によりリアルタイムに工具寿命を判定、確認した。ニューラルネットワークソフトは、今後の応用・普及のため、小規模なワンチップマイコンにも搭載できるように配慮して開発した。



（３）加工情報収集システムの開発

開発した加工情報データベースはセンシングバイトからの加工情報を逐次記録することができる。加工プログラムの情報は、LAN 経由で参照可能とした。また単に記録するだけでなく、Web ブラウザにより加工情報をグラフィカルに表示することが可能である。

1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

事業管理者	財団法人長野県テクノ財団
代表者	理事長 市川 浩一郎
所在地	〒380-0928 長野県長野市若里 1-18-1 長野県工業技術総合センター内 3 階
担当者	浅間テクノポリス地域センター コーディネータ 小野 正明
所在地	〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1（信州大学繊維学部内）
連絡先	TEL：0 2 6 8－2 3－6 7 8 8 FAX：0 2 6 8－2 3－6 6 7 3 メールアドレス：ma-ono@tech.or.jp

第2章 加工歪の発生課題への対応【円筒形状品に対する新加工法】

2-1 歪自動調整クランプ装置の開発

(1) 微調整機能芯出し機構の機能モデル開発

微調整機能芯出し機構を開発試作し、機能の確認が出来た。

微調整機能を用い芯出し修正を行うことで、目標値の位置精度 0.02mm 以内に収めることが可能となった。

(2) 自動化による油圧接続機構の機能モデル開発

自動化油圧接続機構を開発試作し、単体機能、接続機能の確認が出来た。

自動化した本機構により、加工機ドアの開閉、油圧の自動接続及び歪自動調整クランプ装置を稼働させた状態で油圧低下すること無く、分離、接続が可能となった。

(3) 制御精度の確立と詳細機能の確認

歪自動調整クランプ装置に、微調整機能芯出し機構、自動化による油圧接続機構の制御精度の確立と詳細機能の確認が出来た。

ダミー材を使用した工程の短縮(現状5～7工程)を精度確保の上、2工程へ短縮への基礎技術の目途がついた。

(4) NCプログラムと装置制御通信機能開発

加工機械と自動化油圧接続機構を有線で接続し、通信機能の確認が出来た。

製品(ワーク)の固定や開放等の一連の動作を自動化(シーケンサに登録)し、各々を加工機側の機能(Mコード)に対応させた。

ワークに対する加工工程を加工終了までの一連の自動運転動作確認ができ、自動化に向けた基本技術が達成できた。ただし、ワークの乗せ降ろしは手作業にて行った。

2-2 サンプル加工

(1) ダミー材(アルミ材)を使用した複雑形状加工の実施

サンプル加工用のアルミ材を、歪自動調整クランプ装置を使用し、自動プログラムによる最終形状までのサンプル加工を実施できた。

ダミー材を使用した加工精度(平行度) 0.05mm 以下が達成できた。

工程短縮は加工工程を個別確認し、目標とする全工程(2工程)を実施し、加工歪の発生課題への加工対応の目途がついた。

(2) CATIA 5 軸自動加工成形システム(三次元 CAD)

三次元 CAD により図面作成、加工データ作成の試験で、自動化に向けた取り組みとして、物体形状を立体的に表現できる機能及び設計図から加工データへの変換機能を確認出来た。

2-3 加工の評価

- (1) 最終仕上がり形状のサンプル品（図 11）での加工時の各種制御動作と、加工状況、加工精度（平面度、平行度）を確認し、技術目標加工精度が達成出来た。
- (2) 三次元 CAD により加工データのフィードバックの試験を実施出来た。生産技術上のノウハウデータが得られ、加工歪の発生課題への加工精度の確保の目途がついた。
- (3) 技術目標の確認（技術目標の達成度）

（3 年間のまとめ）

- ・歪自動調整クランプ装置の自動化に向け、実用化基本技術の確立が得られた。
- ・ダミー材を使用した加工の工程短縮
現状 5～7 工程を製品精度確保の上、2 工程での実現見込みが確立できた。
- ・工程短縮実現（7→2 工程）により、加工時間の 50% 削減の達成できた。

（シミュレーションで確認 約 83% 削減）

- ① クランプ装置の芯出し精度 0.02mm 以下
- ② ダミー材を使用した加工精度（平行度） 0.05mm 以下
- ③ ダミー材を使用した工程の短縮

現状 5～7 工程 → 製品精度確保の上、2 工程

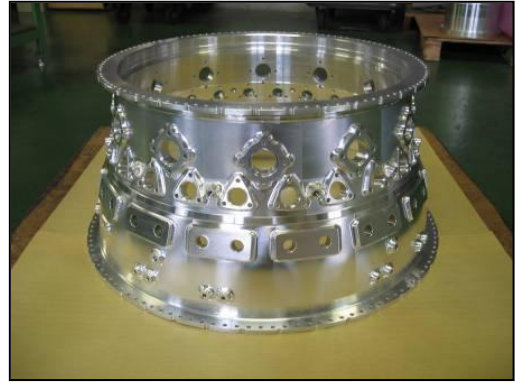


図 11 最終仕上がり形状状態

第 3 章 クランプ歪の発生課題への対応〔リング形状品に対する新加工法〕

3-1 無負荷クランプ法の開発

- (1) 無負荷クランプ法のクランプ用充填物の研究開発

充填物として、各種実験により剥離時に残留しない水崩壊樹脂材（2 液性）に決定した。水崩壊型樹脂を使用して各種条件の実験を行った。

- ・硬化温度と接着力の確認
- ・硬化温度と硬化時間の確認
- ・硬化剤混合比による最大接着力の確認・
- ・水温の違いによる崩壊性の確認

- (2) 無負荷クランプ装置の開発

無負荷クランプ装置の充填物（接着力を利用し、ワークを保持するもの）によるクランプ法の確立を図る。加工後にクランプ装置から被削材を取り外す時に、剥離力による変形が発生し、対策として、樹脂クランプ位置を下部から側面に変更し、剥離時に残留しない水崩壊樹脂材で再設計し、各種試験を実施した。

3-2 サンプル加工

(1) 無負荷クランプ装置を使用し、難削材(インコネル材)をサンプル加工

- ・リング形状に荒加工済みのインコネル材を用い、薄肉形状に仕上げ加工を行った。
- ・難削材のリング形状加工の基本技術の確認ができた。
- ・水崩壊樹脂接着剤に対し、加工時に水溶性切削液を使用しても、グリスにより防水することで、樹脂接着剤の変形、崩壊の発生を阻止できた。

(2) CATIA 5 軸自動加工成形システム (三次元 CAD)

三次元 CAD により図面作成、加工データ作成の試験で物体形状を立体的に表現できる機能及び、設計図から加工データへの変換機能を確認出来た。

3-3 加工の評価

(1) 難削材(インコネル材)を用いたリング形状の仕上げ加工を行い、その状況、精度の評価をした。

- ・無負荷クランプ装置を使用し、内外径を厚さ 1.3 mm の薄肉形状で加工した時の歪みを調査し、樹脂クランプ状態では真円度 0.1 mm を確認したが、ワーク取り外しの後の測定では 0.2 mm に変形してしまった。

各種実験の結果、水崩壊性樹脂が硬化時に収縮し、材料に影響を与えていることがわかった。樹脂の収縮による影響を調査する試験を行い、変形させずクランプする目処がついたので、今後はこの方法を加工治具へ取り込み、実証していく事とする。

- ・硬化収縮に対応できる治具構造を作り、加工精度(真円度)の目標数値 0.1 mm 以内は達成見込みであるが、今後の研究で確認が必要となっている。

- ・難削材での加工評価が実施でき、それぞれのノウハウが構築された。



サンプル加工品



仕上がり薄肉詳細

図12 サンプル品薄肉形状詳細

（２）技術目標の達成度（３年間のまとめ）

- ・難削材（インコネル材）を用いたリング形状の仕上げ加工後の、取り外し時に発生する変形を真円度 0.1mm 以内 → 硬化収縮に対応できる治具を作り、今後最終確認する。
- ・難削材（インコネル材）リング形状の仕上げ加工後の、樹脂残留付着無きこと。
→達成
- ・難削材（インコネル材）リング形状の仕上げ加工でのクランプ歪量の低減、加工精度・真円度 0.1mm 以内→達成
- ・加工精度の検証を行い、品質精度（バラツキ）の安定化の目途を立てる。→達成

第４章 素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応

４－１ 揺動加工法の開発

（１）揺動加工ユニット制御装置の開発

H 2 2 年度試作した揺動加工ユニット制御装置は、難削材（インコネル材）の切削抵抗に耐えられる強度が不足していたことが判明した。この課題を解決するため、難削材（インコネル材）加工に対応する剛性の高い揺動加工ユニット制御装置の設計開発を H 2 3 年度に新たに行った。特にリンク機構部、スライド機構部の再設計開発し、揺動振幅 5mm、テーブル回転数 300rpmに対応できた。

- （２）揺動加工ユニット制御装置の揺動加工ユニット部に素材の形状を測定する機能を搭載させ、測定結果（データ）を揺動加工ユニット制御装置から加工機械の制御部へ入力する入力法の開発を行った。素材形状測定非接触変位センサを揺動加工ユニット部に搭載し、機械テーブルを回転させ、素材形状の高速測定を行い、揺動加工ユニット制御装置で測定データを解析し、揺動ユニット部の制御値を設定するソフトウェアを開発し、動作確認ができた。

（３）揺動加工装置の開発

揺動加工装置は揺動加工ユニット制御装置に組み付けられた切削工具と同期をとるために、回転テーブル側に搭載する装置（位置決め治具）のことで、位置決めセンサ機能を持つ。揺動加工ユニット制御装置とセットにして使う。H 2 2 年度の開発ではダミー材（アルミ材）の切削加工を、位置決めセンサ機能を回転テーブル側に簡易的に組み付けて動作試験（精度を要求しない）を行ったが、今年度は難削材（インコネル材）の切削加工時に使用できるよう位置決め精度、耐久性等を考慮した実用的な装置を開発した。

- ・揺動加工装置のセンサ信号で、揺動加工ユニットをワークの回転に同期させるための制御回路及びソフトウェアを開発し、揺動加工法を実現する技術の確認が出来た。センサ信号で、テーブルの位置情報を収集し、テーブルの回転に合わせて揺動加工ユニット が動作することを確認した。

4-2 サンプル加工

(1) ダミー材(アルミ材)を使用した加工の実施

揺動加工ユニット制御装置の機能確認を行うため、ダミー材（アルミ材）を使用し、試験加工を行う。この試験では回転速度、切り込み量等の加工条件を変えて、ダミー素材の加工前、加工後の形状を測定し追従性、切削性等の機能を検証した。

- ・基本機能確認できた。
- ・揺動加工ユニット機構の強度を高めた結果、振動はなくなり安定した。その代わり摺動抵抗が増加傾向にあるため、実機搭載時には更なる見直しが必要である。

4-3 加工の評価

(1) ダミー材（アルミ材）の加工結果から、加工状況、加工精度、品質の評価の実施。

- ・加工面粗さは、荒加工レベルの要求を満たしている。

(2) 素材の楕円形状と測定データの比較確認及び、加工機回転テーブルと揺動加工ユニット制御装置の同期確認を実施した。

- ・揺動運動は 300rpm まで追従した。300rpm 以上（500rpm）でも制御装置は追従する。
- ・C 軸の回転に±0.1 度以内の誤差で追従する。

(3) 楕円形状に対する非断続切削加工を実現し、工具切削寿命時間、工具加工状態、切削条件の評価を実施した。難削材（インコネル材）の詳細確認は今後の継続とした。

(4) 技術目標の達成度（3 年間のまとめ）

- ・素材の楕円形状に対する非断続切削加工の実現。→ 実現達成の見込み
- ・揺動加工法の実現により、工具切削寿命時間を 2 倍に増やす。→ 達成見込み
- ・加工品質の安定化を図る。→ 難削材（インコネル材）での詳細は今後確認
- ・研究開発初年度に計画していた加工機制御による揺動加工法を、平 H 2 2 年度より揺動加工ユニット制御による揺動加工法に変更し、研究共同体内の担当の再検討、研究員を増やし、研究目標を達成できる装置開発が実現できた。アルミ材でのサンプル加工では、技術目標の達成ができたが、難削材（インコネル材）でのサンプル加工は今後の実施となった。遊びが小さく剛性の高い揺動加工ユニット機構の更なる検討を行う必要性がある。

第 5 章 加工監視・加工適正条件についての対応

5-1 加工状態監視システムの開発

切削三分力を測定するための複数の歪ゲージと複数の温度センサを搭載したバイトホルダを開発した。各種センサからのデータを加工情報収集システムに送信するソフトウェアを開発し、加工情報収集システムに必要な基礎データの収集ができた。

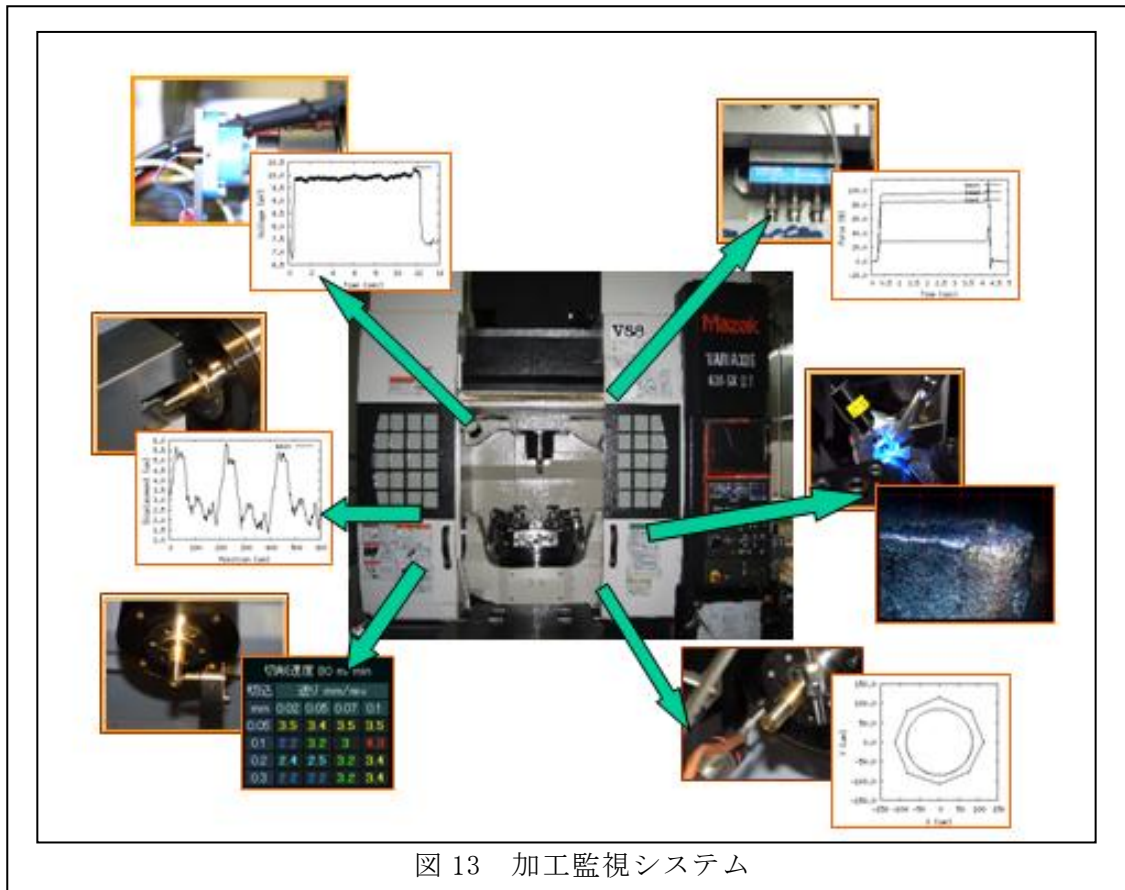


図 13 加工監視システム

(1) 通常のバイトホルダにセンサと処理回路を内蔵したセンシングバイトを開発
図 14 に示す。

- ・バイトホルダからの配線が従来の 5 本から 1 本に減少した。
 - ・センサと処理回路を直結した結果、耐ノイズ性が向上した。
 - ・バイトホルダの形状はそのままなので、通常の加工が可能である。
- a. 歪ゲージにより 3 分力と振動を測定。
- ・ 4 面に貼付した歪ゲージの値から 3 分力を算出。
 - ・ 高速の AD 変換により歪の振動成分を検出。
 - ・ 64 点 FFT 演算により歪の周波数分布を測定。
- b. 複数の温度センサによりホルダ先端付近の温度と熱流を検出。
- ・ 複数センサにより温度分布を測定。
 - ・ 隣接するセンサの温度差により熱流を検出。
- c. インコネル切削実験
- ・ 水溶性切削液による湿式切削
- $d = 0.25\text{mm}$, $f = 0.15\text{mm/rev}$, $v = 65\text{m/min}$ で実施
- d. 切削三分力の測定と結果
- ・ 4 個の歪ゲージ値からの 3 分力の算出
 - ・ 曲げ応力である主分力と配分力の検出は良好
 - ・ 圧縮応力である送り分力も感度は低いが検出は十分

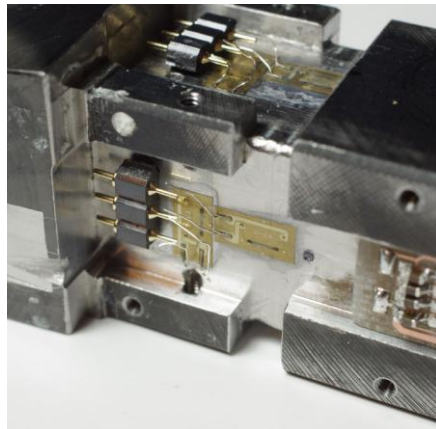
- ・切削力は単調に増加するが背分力の増大が顕著
- ・1kHz の高速サンプリングで切削力の振動成分を検出
- ・振動成分は工具寿命直前で急速に増大

e. バイト先端部の温度測定と結果

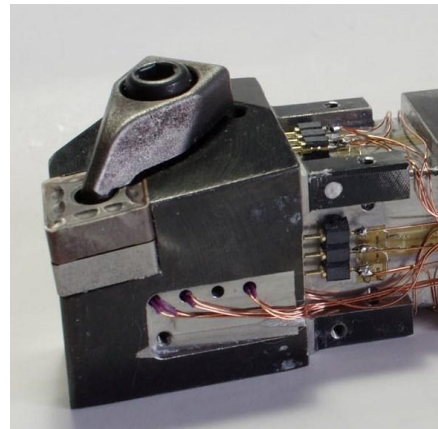
- ・切削中の温度変化は冷却状況の変化を反映していると考えられる。
- ・温度差はドリフト成分がキャンセルされる。
- ・温度差はバイトホルダ中の熱流を反映していると考えられる

(2) 画像による切屑形状の認識は今後の課題とした。

- ・複雑な処理を要するためセンシングバイトに搭載できない。
- ・切屑形状の変化を認識する有効な手法が見いだせなかった。



半導体ひずみゲージ



サーミスタ温度計

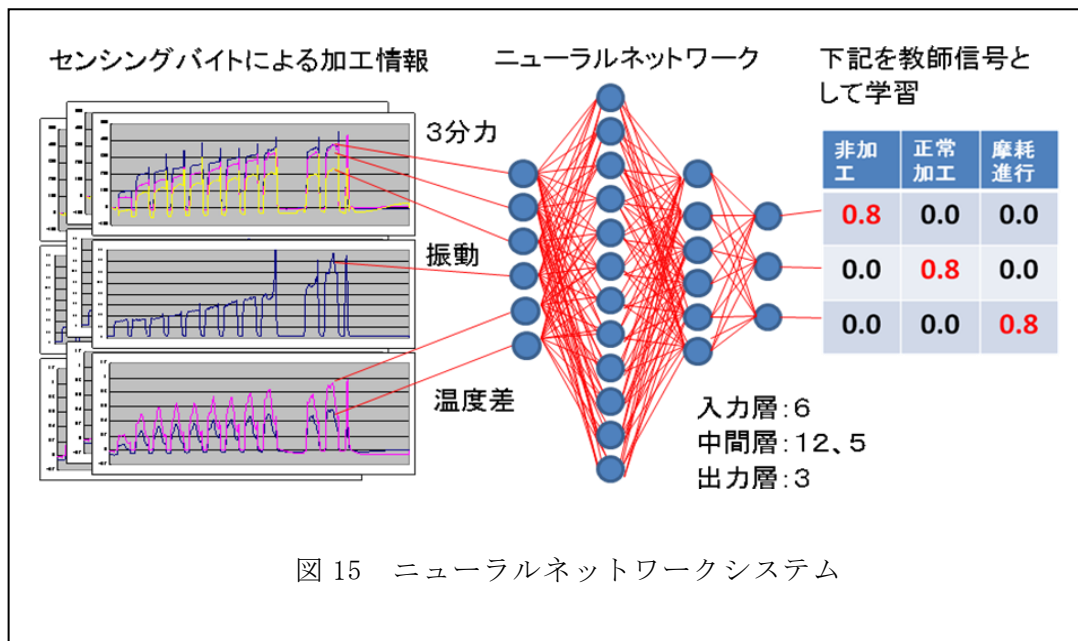
図 14 開発したセンシングバイト

5-2 工具寿命管理システムの開発

加工状態監視システムからのデータに基づき、工具寿命を予測するための、図 15 に示すニューラルネットワークシステムを開発した。

ニューラルネットワークによる推定機能の確認を実施した。

- 切削試験の結果を学習させ、工具摩耗の判定が可能であることを確認した。
 - ・切削 3 分力、切削力の振動成分、温度差を入力として学習。
 - ・期待通りに判定が行われることを確認。
- 加工状態監視システムで開発したデータベースと接続することで、総合的な寿命管理が可能となる。
 - ・中間層 2 層（12 および 5 セル）を含む 4 層構造が最も成績が良かった。
 - ・ニューラルネットワークに必要なメモリは少ないので、加工条件ごとに別々に学習したネットワークを状況に応じて切り替えることとした。



5-3 加工情報収集システムの開発

ネットワークを介してNC制御装置と情報交換するソフトウェアを実現した。

データ蓄積と閲覧（モニター）機能を確認した。

- 加工状態監視システムの情報を蓄積するデータベースを構築した。
- 加工状態監視システムからのデータをリアルタイムにグラフ化して閲覧する Web アプリケーションを開発した。これにより、システムに接続した端末から一般的な Web ブラウザにより加工状態を閲覧できる

第6章 全体総括

6-1 成果の総括

3年間の本研究開発の最終段階を迎えて、研究課題の当初目標はほぼ達成出来たと考える。ただし、一部新たな課題は発生しているが、自主研究の中で解決することとする。今後は実用化に向け、技術の確立を目指すこととし、従来の熟練者による人的作業に頼った加工を、自動化による加工技術の確立を図り、川下企業のニーズ情報を取得し、コスト低減、安定した品質の確保の上、無人化加工技術のノウハウを蓄積させる。

6-2 当研究開発後の課題

(1) 加工歪の発生課題への対応

今後の自主研究で、歪自動調整クランプ装置の総合評価を行い、加工歪発生への対応のクランプ法の確立と、難削材相当品によるサンプル加工を実施し、実用化に向け技術の確立を目指す。また、本研究成果が応用展開できる分野についても、実用化に向け調査、検討を進める。

(2) クランプ歪の発生課題への対応

今後の自主研究で、硬化収縮に対応できる装置改造により、加工精度（真円度）の向上、品質の安定を目的とした研究を行い、実用化に向け技術の確立を目指す。

(3) 素材の楕円形状による黒皮断続加工課題への対応

今後の自主研究で、実践加工に向けて、揺動加工ユニット機構部の再検討し、揺動機構の開発を行い、難削材（インコネル材）でのサンプル加工を実施し、生産に使用している工作機械への応用を行う。本機能は、従来の方法にはない、画期的なテーマであり、目標の難易度は高いところにある。実用化の方向性を見据えながら、研究内容を再確認し、目標の達成実現を目指す。

(4) 加工監視・加工適正条件についての対応

研究開発では、より少ないセル数の構造でも、ある程度学習できている。パラメタの最適値を自動的に探索するソフトウェアの開発が望ましいが、計算量が膨大となるため、高速なコンピュータが不可欠と考えられる。ニューラルネットワークによる予測精度向上には、より多くの加工条件に対する学習データが必要である。インコネル材は高価であり、切削試験には多大な費用を要する。今後は、従来手法による製品加工の際に並行して加工情報を収集し、データを蓄積していく必要がある。

6-3 事業化への展望及び目標

川下ユーザー等の評価、認証を必要とする製品、技術については、本研究の研究成果報告書を、川下ユーザーに向けて、説明会を実施し、生産応用への手順整備を進める。新規対象分野の川下ユーザーへも技術PRを実施し、製品加工への展開を図る。

自社内で応用展開が可能な生産品目については、生産時に、コストダウン、安定した加工品質の確保、信頼性の向上を図る。

6-4 まとめ

本研究開発により、難易度の高い課題テーマを解決するため、事業管理者をはじめ共同体メンバーがそれぞれ対等な立場で技術を持ち寄り機能的連携となった。

また共同体メンバーが基盤となる技術があり、これを活用することで成果を出せた。

一部課題は残されているが、最終技術目標を達成し、早期に事業化に結びつくよう今後も自主研究の推進に努める。

本研究開発にあたり、ご指導、ご協力いただきました関係各位に深謝いたします。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。

但しこの表裏紙（赤色）は、リサイクルできません。古紙回収に出す場合は取り除いて、ゴミとして処分してください。