

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機部品の薄肉軽量化及び、信頼性向上に対応した
振動制御機能を有する高精度高能率加工技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成23年 9月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人岐阜県産業経済振興センター

目次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制）	1
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 リアルタイム振動計測システム構築	
2-1 研究目的	6
2-2 研究内容	6
2-2-1 振動解析システム	
2-2-2 切削動力計	
2-2-3 ビビリ抑制装置	
2-3 研究成果	7
2-3-1 振動解析システム動作確認	
2-3-2 切削動力計動作確認	
2-3-3 ビビリ抑制装置動作確認	
第3章 振動増大の予知技術確立	
3-1 研究目的	8
3-2 研究内容	9
3-2-1 エンドミル	
3-2-2 ドリル	
3-3 研究成果	13
第4章 加工時のフィードバック方式による自律制振機能確立	
4-1 研究目的	19
4-2 研究内容	19
4-3 研究成果	20
第5章 事業化への取り組み	23
第6章 全体総括	24

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1. 研究開発の背景・研究目的

航空機メーカーは一層の燃費向上、信頼性向上を求めており、また、民間航空機の量産化に対する国内部品メーカーの供給体制強化が進んでいる。これらの状況を受け部品供給をおこなっている国内部品メーカーでは、今後大幅に増加すると予想される部品に対し、薄肉軽量化（薄肉形状・中空形状加工対応）、高精度化及び低コスト・短納期対応が課題となっている。また、薄肉・軽量部品の加工は切削時の振動により、刃具折損・食い込み等が生じ製品に問題を生じている。

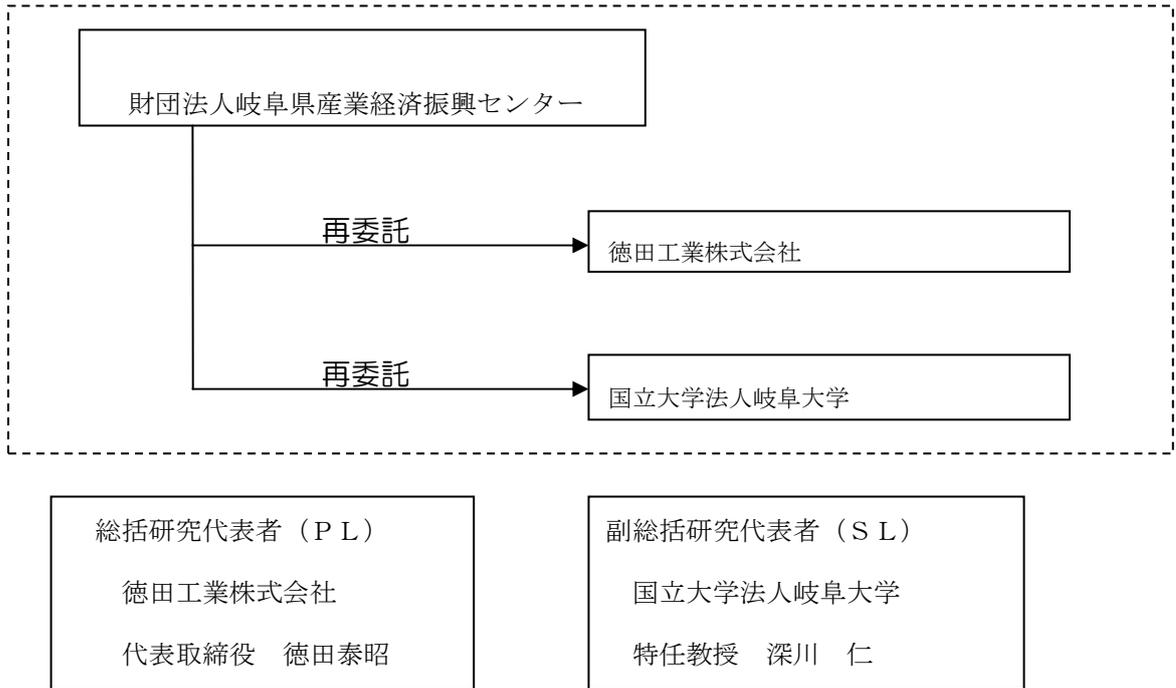
徳田工業株式会社では航空機事業に対する国際競争力を高めるため、生産性向上を可能とする治具レス・ワンチャックでの切削加工に取り組んでいるが、今後想定される航空機部品の量産によるさらなる短納期・コストダウンの要求と薄肉形状、高精度化に対応するために今以上の高精度・高能率化が急務となっている。しかしながら機械加工の高速化により再生ビビリ振動による食い込み、加工精度の低下等の問題が発生しており、加工能力を十分に活かしていない。高精度・高能率化を実現するためその弊害として発生する再生ビビリ振動の制振制御技術（自立制振機能）の開発と、高速切削による高精度高効率加工により、超多品種少量生産の総合生産システムが必要と考えた。

航空機部品は高い信頼性を有した軽量化が求められ、同時にコスト低減も強く求められている。そのため生産性向上を目指し高速加工に取り組んでいるが、部品の薄肉化が進むほど切削時の振動が品質面・コストに大きな影響を与えている。本研究開発では切削刃具と薄肉化する部品の組み合わせによる振動特性の変動をデータベース化し、フィードバックできる自律制振機能を有した加工方法を開発し、高精度高能率加工を実現する。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制等）

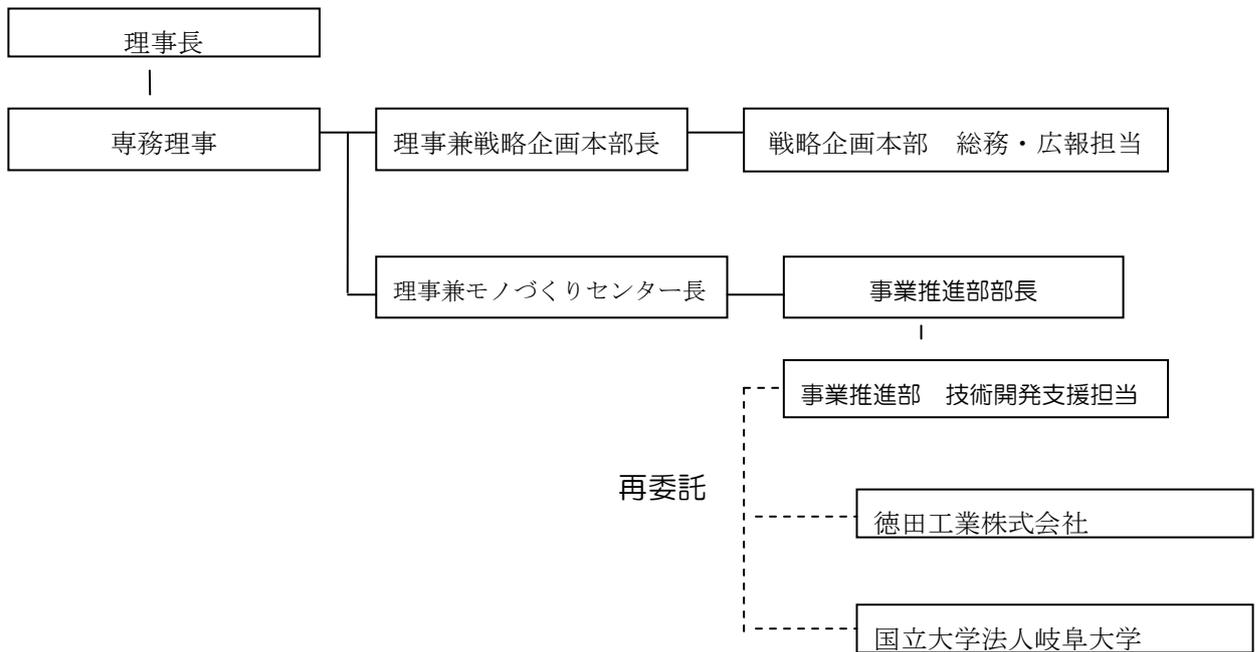
研究組織及び管理体制

1. 研究組織（全体）



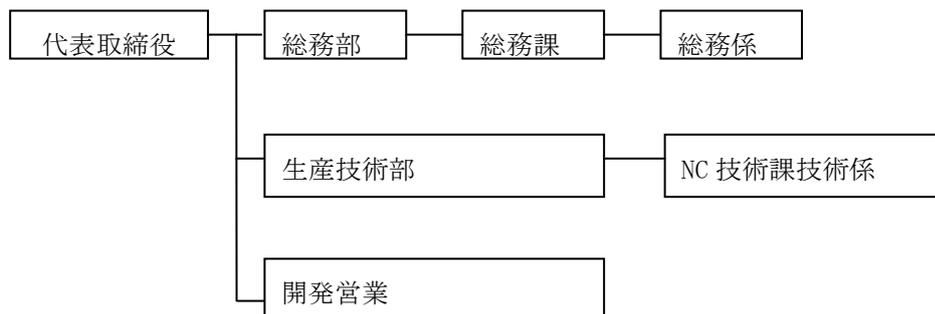
2. 管理体制

(1) 事業管理者 [財団法人岐阜県産業経済振興センター]



(2) 再委託先

[徳田工業株式会社]



[国立大学法人岐阜大学]



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人岐阜県産業経済振興センター

①管理員

氏名	所属・役職
石樽芳直	理事兼モノづくりセンター長
宮田 高	事業推進部 部長
小川 誠	事業推進部 主査

②研究員

【再委託先】

徳田工業株式会社

氏名	所属・役職
徳田 泰昭	代表取締役
大木 啓司	生産技術部・部長
笹田 猛	生産技術部 NC 技術課技術係・係員
河津 貴彦	生産技術部 NC 技術課技術係・係員
葦澤 正雄	生産技術部 NC 技術課技術係・係員
栗本 頼昌	生産技術部 NC 技術課技術係・係員
小澤 紀仁	生産技術部 NC 技術課技術係・係員
山下 哲哉	主事（開発営業）

国立大学法人岐阜大学

氏 名	所属・役職
深川 仁 加藤 隆雄	産官学融合本部 特任教授（プロジェクト研究） 工学部 准教授

1-3 成果概要

航空機部品は高い信頼性を有した軽量化が求められ、同時にコスト低減も強く求められている。航空機部品加工業界では、生産性向上を目指し高速加工に取り組んでいるが、部品が薄肉化すればするほど切削時の振動が品質面・コストに大きな影響を与えている。

本研究開発では切削刃具と薄肉化する部品の組み合わせによる振動特性の変動をデータベース化し、フィードバックできる自立制振機能を有した加工方法を開発し、高精度高能率加工を目指した。実施したテーマとその概要は次のとおり。

リアルタイム振動計測システム構築

5軸NC加工機に振動解析システム、切削動力計、ビビリ抑制装置を取り付けることで、切削加工中に発生する振動をリアルタイムに計測できるシステムを構築した。

振動増大の予知技術の確立

振動解析システムを用いて刃具の固有振動数を計測し、切削刃具が安定して加工できる条件を導き出すことで、40%程度の加工時間削減が見込め、目標を達成することができた。

加工時のフィードバック方式による自律制振機能確立

加工中の再生ビビリ振動を、あらかじめ解析しておいた安定加工条件から外れた時に、ビビリ抑制装置がスピンドル回転数を自動的に最適化、5軸NC加工機へフィードバックするシステムを構築した。このシステムを使用することで、直線加工のみではあるが振動抑制・品質精度・面精度・手仕上げ時間の短縮の目標は達成できた。今後は試験により出てきた課題を克服し、事業化をしていく予定である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

徳田工業株式会社

生産技術部長 大木 啓司

電話：058-380-0003

FAX：058-383-8484

財団法人岐阜県産業経済振興センター

事業推進部主査 小川 誠

電話：058-277-1093

FAX：058-273-5961

e-mail：gifu-sapoin@gpc-gifu.or.jp

第2章 リアルタイム振動計測システム構築

2-1 研究目的

切削時に発生する強制振動や自励振動を防ぐため、事前の切削テストや切削加工機へタッピングテスト（*）など実施してきたが、複雑な加工パスが多く、また、材料の切削過程において材料の振動特性の変化などから十分な効果が上がっていない。そのため、変動する振動をリアルタイムに計測するシステムを構築する。

切削音（振動音）をマイクロフォンと加速度計で取得し、振動解析システムを用いて、切削油等の外界影響のフィルタリングを行う。チタン材料を用い切削テストを行い、外界影響の少ない加速度計とマイクロフォンの最適設置位置を導き出し、実用可能なリアルタイム振動計測システムを構築する。切削テストで使用する工具は徳田工業株式会社が使用している条件をベースとし、航空機部品の高速切削加工に特化した国立大学法人岐阜大学の知見を踏まえて最適品を選定する。

*：タッピングテスト：工作機械主軸の刃具先端に加速度センサーを取り付け、ハンマーで主軸先端を打撃し、機械の固有振動数を算出するテスト

2-2 研究内容

切削加工機に加速度計とマイクロフォンを取り付け、チタン材料の切削を行い切削時に発生する振動をリアルタイムに計測し、解析を行うシステムを構築した。

2-2-1 振動解析システム

加速度センサーを主軸に取り付け、加工中の刃具・機械本体の振動の計測を行った。また、マイクロフォンを取り付ける事で加工中の音を計測し、ビビリ振動の判定を行った。

2-2-2 切削動力計

刃具切り込み量の増大は切削抵抗に直結しており、主軸回転数を制御するだけでは振動を抑制する事が困難である。切削動力計を加工機に取り付けることでX Y Z成分の切削力を解析し把握した。

2-2-3 ビビリ抑制装置

タッピングテストにより解析された各刃具の安定回転数をNCプログラムに反映しても有効なのはワーク剛性が高い加工序盤のみである。実際に加工を開始すると、時々刻々とワーク形状が変化してしまう為、振動を制御するには主軸回転数を適宜かつ最適回転数にコントロールしなければならない。ビビリ抑制装置を取り付けることで、加工中にビビリ振動を検知した時に主軸回転数をコントロール出来るように改造を実施した。

2-3 研究成果

2-3-1 振動解析システム動作確認

(1) マイクロフォン

マイクroフォンを加工室外に設置している為、切削油や他加工機音、隣接するチップコンベアの稼働音等の外界影響があるかを検証した。

外界音と加工音を比較すると、外界音は加工音に比べて非常に小さい値になっていた。この結果から加工時の振動情報に大きな影響はないと考えられるが、加工室外に設置すると外界音がデータに入り込んでしまう為、加速度センサーを振動情報取得の主とし、マイクroフォンは参考値として用いることにした。

(2) 振動情報の取得

被削材を Ti-6Al-4V とし切削試験を行い、振動解析システムが振動情報を取得出来るかを検証した。刃具情報を表 2.3.1 に示す。

振動解析システムを使用する事で、切削中の振動情報の取得をする事が出来た。よって、この振動解析システムを使用して切削中の振動情報の取得を行う。

表 2.3.1 刃具情報

種類 [-]	直径 [mm]	刃数 [枚]
ラジアスエンドミル	12	4

2-3-2 切削動力計動作確認

振動情報の取得と同様の切削試験を行い、切削動力計の動作確認をした。一定の周期で各軸成分の最大値と最小値をとっている事が分かる。これは、刃先が材料に当たる時に最大値を取り、刃が抜ける時に最小値を取っていることが読み取れた。よって、切削力の計測は問題ないと考えられる。

2-3-3 ビビリ抑制装置動作確認

被削材を Ti-6Al-4V とし切削試験を行い、ビビリ抑制装置の動作確認を行う。(刃具は表 2.3.1 を参照) 再生ビビリ振動を判定して、スピンドル回転数が自動で変更されなければならない為、再生ビビリが発生する条件で試験を行い、スピンドル回転数が 1%刻みで変化していく様子を確認することが出来た。よって、この装置を使用して、再生ビビリの発生を抑制する。

第3章 振動増大の予知技術確立

3-1 研究目的

切削加工においては強制振動とともに自励振動による再生ビビリ振動が問題となる。そこで振動解析システムを用いてタッピングテストを実施し、それによって導き出された安定限界曲線を等ピッチ/等リード及び不等ピッチ/不等リード刃具に対して実施・データベース化し、振動の発生判定と最適な回転数を導き出すシステムを構築する。

3-1-1 等ピッチ/等リード刃具のタッピングテストによる安定限界曲線のデータベース化

振動解析システムを用いて、チップ交換式刃具やエンドミル等の等ピッチ刃具に対してタッピングテストを実施し、それによって導き出された安定限界曲線をデータベース化する。また、薄肉形状を加工する際には、加工の進行に伴い振動特性も変化するため、安定ポケット領域がシフトすると考えられる。そのため、航空機部品で想定される薄肉部品（肉厚が約1～5mmのリップ形状品）に対してチタン材料を用い切削テストを行い、導き出された安定限界曲線の有効性を検証し、安定回転数の範囲を求める。

3-1-2 不等ピッチ/不等リード刃具のタッピングテストによる安定限界曲線の算出

等ピッチ刃具では幅が狭くて使用出来ない安定ポケット領域が不等ピッチ、不等リード刃具にとっては有効となる。そのため、振動解析システムを用いて不等ピッチ刃具に対してもタッピングテストを実施し、それによって導き出された安定限界曲線をデータベース化する。チタン材を用い切削テストを行い、導き出された安定限界曲線の有効性を検証し、安定回転数の範囲を求める。

3-1-3 振動発生予知システムの構築

チタン材料を使用し切削テストを行い、振動発生時の周波数と加工面の面粗度（小型表面粗さ測定器で測定する）との比較を行い振動発生の判断基準を明確化するとともに、振動帯の周波数音発生時に、使用している工具径、刃数、刃具の種類等をキーワードに、最適な回転数を導き出すシステムを構築する。

なお、国立大学法人岐阜大学とともに、各切削テストの加工条件については、徳田工業株式会社が使用している条件をベースとし、上記3-1-1、3-1-2の結果を反映させながら導き出す。一方、切削試験時に再生ビビリ振動では無いと判定された振動には、治具の振動対策や加工方法による振動対策の検討を行う。

3-1-4 ドリル加工時の振動発生予知システムの評価

航空機部品加工において、急増するチタン合金の薄肉・中空形状加工、高精度化が課題であ

るが、切削時のビビリ振動により、刃具折損・食い込み等から、製品の品質保持と加工コスト低減上のネックとなっている。本研究の中で、徳田工業において主に、エンドミル加工の高速切削時のビビリ振動解析を行なうが、岐阜大学はドリル加工を研究分担し、研究を補間する。

3-2 研究内容

振動解析システムを用いてタッピングテストを実施し、それによって導き出された安定限界曲線をもとに安定領域の加工条件と不安定領域の加工条件で、切削テストを行い安定限界曲線の評価を行った。

3-2-1 エンドミル加工試験

(1) タッピングテストによる固有振動数の測定

各エンドミルを一定の突出し長にセットし図 3.2.1 の様に刃具先端に加速度センサーを取り付け、ハンマーで 5 回叩き振動を測定した。固有振動数の測定は X 方向、Y 方向両方行わなければならない。表 3.2.1 に供試体、図 3.2.1 にタッピングテストの概略図を示す。尚、測定値は 5 回の平均である。

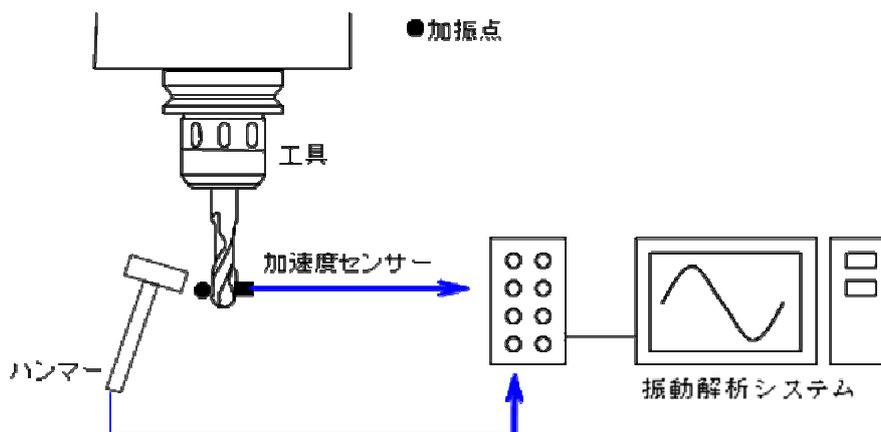


図 3.2.1 タッピングテスト概略図

表 3.2.1 供試体

供試体番号	直径 [mm]	刃数 [枚]	備考
①	12	6	等ピッチ/等リード
②	12	4	不等ピッチ/等リード
③	16	4	等ピッチ/等リード
④	16	4	不等ピッチ/等リード

(2) 安定限界曲線の算出

タッピングテストの結果を用いて、振動解析システムで解析計算を行い、安定限界曲線のおおよその形を把握し、解析計算の結果を見て主軸回転数範囲を定めてタイムドメイン計算を行った。タイムドメイン計算とは、時間経過で加工作業を再現して安定限界曲線を計算する方法である。図 3.2.3 に解析計算による安定限界曲線を、図 3.2.4 にタイムドメイン計算による安定限界曲線を示す。図 3.2.3 から高回転数帯に安定領域が存在することが確認出来るが、高回転数帯では周速が速過ぎる為、周速 100[m/min]前後の回転数でタイムドメイン計算を行った。

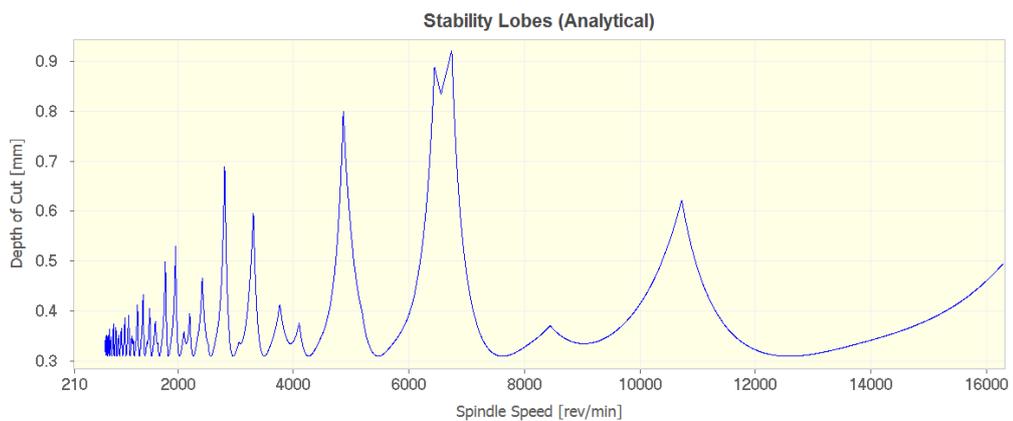


図 3.2.2 解析計算による安定限界曲線



図 3.2.3 タイムドメイン計算による安定限界曲線

(3) 切削試験

安定限界曲線の有効性を検証する為に、条件を変更して切削試験を行った。条件 1 は安定領域で加工、条件 2 はスピンドル回転数を小さくし不安定領域で加工、条件 3 はスピンドル回転数を大きくし不安定領域で加工、条件 4 は軸方向切り込みを大きくし不安定領域で加工を行った。(切削条件の判定図は図 3.2.4 を参照)

この切削試験を行うことで、安定限界曲線の有効性を検証し、安定限界曲線のデータベース化を行うものとする。

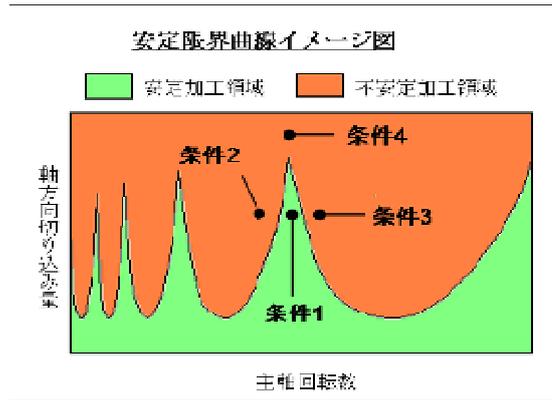


図 3.2.4 切削条件の判定図

(4) 製品形状模擬部品加工

タッピングテストにより解析された各刀具の安定回転数を、CAM システムを用いてNCプログラムに反映し、ワーク形状が変化していく中での安定限界曲線の有効性を検証した。各供試体で1つのポケットの底面と側面の加工を行うものとし、各ポケット加工に掛る時間も記録する。加工工程を表 3.2.3、供試体情報を表 3.2.4 に示す。

表 3.2.3 加工で使用する刃具

加工工程	使用刃具
	名称
1次加工 (面削)	φ 32
	φ 25
2次加工 (面削)	φ 32
	φ 16EM
3次加工 (ポケット)	φ 12EM
	φ 16EM
	φ 12EM
	φ 12EM
	φ 16EM
	φ 20EM
	φ 16EM

表 3.2.4 供試体

供試体番号	直径 [mm]	刃数 [枚]	備考
⑤	12	4	等ピッチ/等リード
⑥	12	4	不等ピッチ/等リード
⑦	16	4	等ピッチ/等リード
⑧	16	4	不等ピッチ/等リード
⑨	20	5	不等ピッチ/不等リード

3-2-2 ドリル加工試験

本研究開発ではチタン合金の振動特性変動をデータベース化し、フィードバックできる自律制振機能を有した加工方法を開発する中で、ドリル加工時の振動が抑制できるか試験評価する。

(1) タッピングテストによる固有振動の測定

- ・各ドリルを一種類ホルダーに取付け、指定した突出し長にセット
- ・ハイスと超硬 超硬 2枚刃と3枚刃 は径毎にそれぞれ同じ突き出し長にセット
- ・5回ハンマーで叩き振動を測定し平均値を求める (振動解析システム使用)

検証項目として、ドリル材種 (ハイスと超硬) による 振動特性の違い 2枚刃と3枚刃による振動特性の違いを見る。

(2) ドリル条件設定試験

振動試験実施前に最適なドリル加工条件を設定し、代表して超硬ドリルで実施した。振動が大きくなる直前の領域をできるだけ探して設定した。被削材を図 3.2.5 に示す。



図 3.2.5 使用した被削材 Ti-6Al-4V

使用機材は次のようである。

- ・切削動力計
- ・振動解析システム
- ・ハンディタコメーター
- ・非接触式温度計

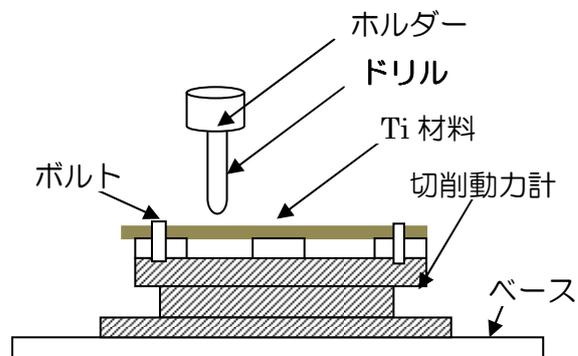


図 3.2.6 切削イメージ図

(3) 振動測定試験

(2) で設定した加工条件に絞って、回転数送り速度を変えた各種条件で加工し、(送り速度をプラスマイナス 20% 変化させ)、振動影響の違いを測定する。

3-3 研究成果

3-3-1 エンドミル加工試験

(1) タッピングテストによる固有振動数の測定

タッピングテストから得られた結果をゲイン位相表示し、各供試体の固有振動数を求めた。

表 3.3.1 に測定したエンドミルの固有振動数を示す。

表 3.3.1 供試体の固有振動数

供試体番号	突き出し長 [mm]	固有振動数 [Hz]
①	45	790
②	45	787
③	50	776
④	50	776

(2) 安定限界曲線の算出

タッピングテストの結果から、各供試体の安定限界曲線を算出した。例として、図 3.3.1、図 3.3.2 に供試体①、②のタイムドメイン計算による安定限界曲線を示す。図 3.3.1 と図 3.3.2 を比較すると、等ピッチ/等リード刃具に比べて、不等ピッチ/等リード刃具は軸方向切り込みが大きく出来る傾向にある。(図中の赤丸は、理想条件の位置)

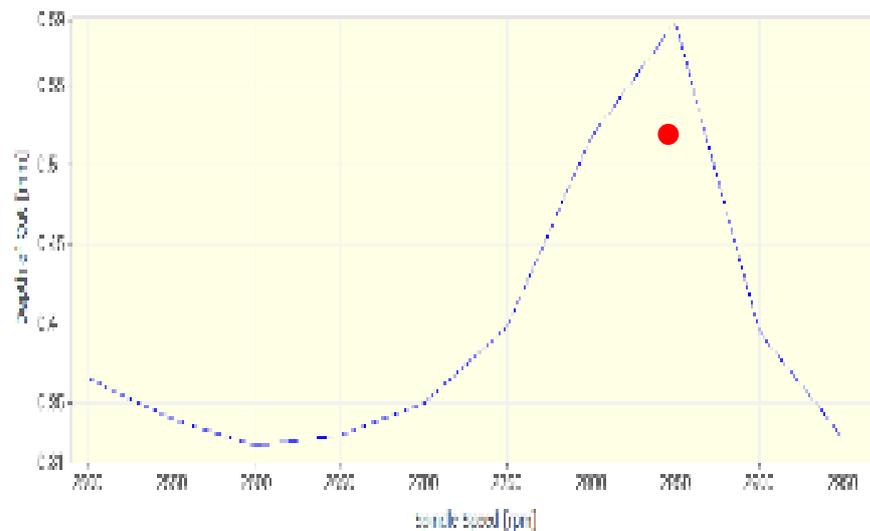


図 3.3.1 タイムドメイン計算による安定限界曲線/供試体①

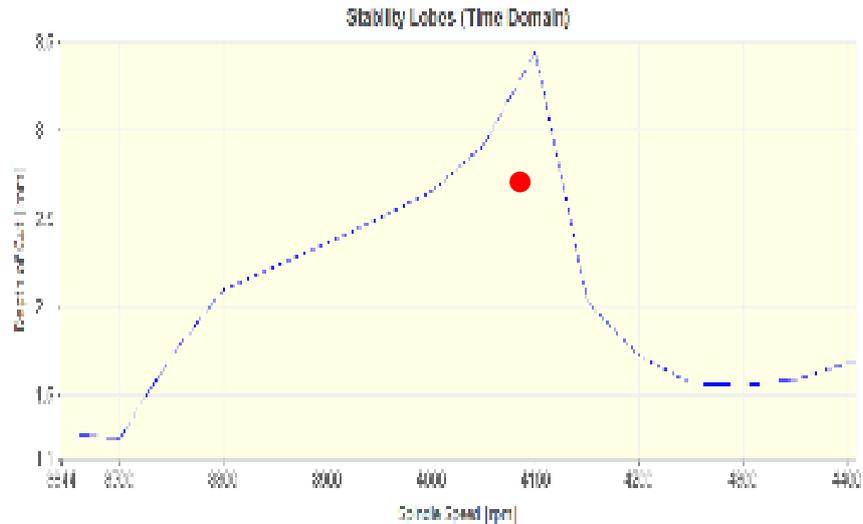


図 3.3.2 タイムドメイン計算による安定限界曲線/供試体②

(3) 切削試験

①結果

供試体①の実験結果を表 3.3.2、供試体②の実験結果を表 3.3.3、供試体③の実験結果を表 3.3.4、供試体④の実験結果を表 3.3.5 に示す。

・振動

安定領域の条件 1 は一番加速度が小さく安定している傾向にあった。近傍にある不安定領域の条件は音量が大きくなり、耳に聞こえてくる音も大きく感じる。また、加速度を FFT 解析の結果から判断しても条件 4 は工具通過周波数 (T P F) の整数倍以外の振動が発生しているので、振動の最大値も条件 1 に比べて大きくなり、再生ビブリの発生が見られた。等ピッチ/不等ピッチともに同様の傾向にあり、算出された安定限界曲線の有効性が認められた。

・切削力

安定領域の条件 1 より条件 2、3 は切削力にあるあまり大きな違いは見られないが、切り込み量が増える条件 4 はやはり条件 1 より切削力が大きくなる傾向にあった。

・加工面肌

測定方法は表面粗さ計で計測を行った。供試体①、②は条件 1→条件 4 という順に表面粗さが荒くなっていた。供試体③、④の表面粗さは、条件を変更しても大きな変化は見られなかった。

②まとめ

安定領域の条件は加速度、音量ともに小さく、安定しているが、不安定領域の条件では加速度、音量ともに大きくなる傾向にある。切削力は切り込み量が増える条件 4 一番大きい値をとる。加工面肌は条件 1、2、3、4 で大きな差は見られない。周速 150m/min 以上の加工が理想ではあるが、周速 150m/min を越える条件では工具に溶着が見られ、工具寿命に影響が出ると考えられる。

表 3.3.2 供試体①の実験結果

振動、切削力が小さい好条件

		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	
加速度[V]	最大	0.23	0.23	5.2	7.49	
	最小	-0.20	-0.98	-5.5	-6.62	
音量[V]	最大	0.0010	0.0017	0.0029	0.0041	
	最小	-0.0016	-0.0018	-0.0035	-0.0036	
切削力[N]	X成分	最大	159.77	160.11	160.04	162.51
	Y成分	最大	160.20	160.36	161.10	320.32
	Z成分	最大	161.01	161.40	161.54	171.11

表 3.3.3 供試体②の実験結果

振動、切削力が小さい好条件

		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	
加速度[m/V]	最大	4.2	5.7	5.7	14.88	
	最小	-5.3	-5.8	-6.3	-14.9	
音量[m/V]	最大	0.0030	0.0030	0.0030	0.0039	
	最小	-0.0034	-0.0034	-0.0034	-0.0037	
切削力[N]	X成分	最大	241.52	242.76	300.08	300.09
	Y成分	最大	958.61	960.45	960.47	1000.20
	Z成分	最大	239.21	239.33	200.12	240.00

表 3.3.4 供試体③の実験結果

振動、切削力が小さい好条件

		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	
加速度[V]	最大	0.58	0.68	0.80	1.08	
	最小	-0.99	-1.11	-1.43	-1.25	
音量[V]	最大	0.0024	0.0073	0.0052	0.0078	
	最小	-0.0033	-0.0077	-0.0048	-0.0070	
切削力[N]	X成分	最大	270.10	271.10	261.30	450.6
	Y成分	最大	53.50	57.22	52.28	83.98
	Z成分	最大	103.30	116.50	72.85	45.07

表 3.3.5 供試体④の実験結果

振動、切削力が小さい好条件

		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	
加速度[V]	最大	2.50	2.61	3.30	3.66	
	最小	-2.67	-2.67	-3.25	-3.27	
音量[V]	最大	0.0035	0.016	0.0041	0.013	
	最小	-0.0039	-0.0046	-0.0045	-0.0049	
切削力[N]	X成分	最大	444.40	444.40	438.50	732.30
	Y成分	最大	132.00	130.20	118.40	186.50
	Z成分	最大	36.01	76.54	49.41	40.53

(4) 製品模擬形状加工

①結果

・振動

供試体すべてにおいて、再生ビビリ振動の発生が見られたが、供試体⑥、⑧、⑨はビビリ振動が発生しにくい不等ピッチ/不等リード刀具だが、再生ビビリ振動が見られた。このことから、材料の剛性が低いリブ形状の加工では安定限界曲線のデータを使用しても再生ビビリが発生する事が分かった。

・加工時間

加工時間は、研究開発前の加工方法では回転数が低く、切削送り速度を速くする事が出来なかったが、安定限界曲線を考慮した加工方法では、回転数を速くする事が出来たので、切削送り速度が速くなり、4分23秒加工時間を短縮することが出来た。

・まとめ

ビビリ振動に強いとされている不等ピッチ/不等リードの刀具を使用しても、製品の形状や材料の剛性が低くなるとビビリ振動が発生してしまう。これを防ぐ為には、常に振動を検出してスピンドル回転数を変える事の出来るビビリ抑制装置が必要だと思われる。

表 3.3.6 加工時間

供試体番号	研究開発前の加工時間		安定限界曲線を使用した加工時間	
	底面	側面	底面	側面
⑤	3分7秒	52秒	3分0秒	46秒
⑥	5分10秒	1分14秒	5分10秒	58秒
⑦	10分52秒	1分4秒	9分35秒	57秒
⑧	8分6秒	1分41秒	7分28秒	1分21秒
⑨	16分19秒	53秒	14分37秒	43秒
合計時間	43分34秒	5分44秒	39分50秒	4分45秒

3-3-2 ドリル加工試験

(1) タッピングテストによる固有振動測定

エンドミルと同様にして、各ドリルの固有振動数を求めた。表 3.3.7 に固有振動数の測定結果を示す。2 枚刃と 3 枚刃では固有振動数の差に大きな違いは見られなかった。固有振動数には材質と突出し長が深く関係している事が分かった。

表 3.3.7 各ドリルの固有振動数

ドリル種類	直径 [mm]	刃数 [枚]	突き出し長 [mm]	固有振動数 [Hz]
コバルトハイス	4	2	40	1100
コバルトハイス	6	2	40	2160
コバルトハイス	6	2	50	1470
コバルトハイス	8	2	40	2450
コバルトハイス	8	2	60	1580
超硬ロング	4	2	40	2040
超硬ロング	4	2	50	1080
超硬ロング	6	2	40	2500
超硬ロング	6	2	50	1930
超硬ロング	8	2	40	2500
超硬ロング	8	2	50	2150
超硬ロング	8	2	60	1510
超硬ロング	6	3	40	1750
超硬ロング	6	3	50	1960
超硬ロング	8	3	40	1410
超硬ロング	8	3	60	1990
スタブドリル	25.4	2	50	950

(2) 安定限界曲線の算出

タッピングテストの結果から安定限界曲線を算出したが、振動解析システムにドリルの安定限界曲線の計算がない為、エンドミルの安定限界曲線の計算を代用として行った。よって、ドリルの安定限界曲線の値は参考値として扱う。

(3) ドリル条件設定試験

振動試験実施前に、最適なドリル加工条件を設定する目的で、各種条件で試験を行った。この時の切削荷重を動力計で測定した。その結果、 $\phi 8\text{mm}$ と $\phi 25.4\text{mm}$ の 2 枚刃ドリルで振動が激しくなる条件を見出したので、ビビリ振動と想定して、その条件を設定した。(表 3.3.8 参照)

表 3.3.8 各ドリルの加工条件設定試験結果

種類	直径 [mm]	刃数 [枚]	回転数 [rpm]	送り [mm/min]	切削荷重 [N]	備考
コバルトハイス	4.0	2	2300	220	—	—
コバルトハイス	6.0	2	2000	240	—	—
コバルトハイス	8.0	2	1200	240	—	—
超硬ロング	4.0	2	2300	440	—	下にアルミスパーサ
超硬ロング	6.0	2	2000	480	800	クーラント OFF クーラント ON
			2000	480	950	
			4000	480	850	
			6000	480	730	
			5000	480	760	
			6000	540	750	
超硬ロング	8.0	2	1200	480	400	6 mm φ の下穴あり
			1200	480	1100	
			2400	540	1800	
			3600	540	1700	
超硬ロング	6.0	3	2000	540	—	—
超硬ロング	8.0	3	1200	540	2500	ビビリ減衰 ビビリ減衰
			2400	540	2150	
			3600	540	1850	
			3600	540	1850	
			3600	810	2150	
スタブドリル	25.4	2	500	40	2300	—
			500	60	2800	
			500	80	3200	
			1000	80	2200	

(4) 振動測定試験

3-3-2 (2) で設定した加工条件のうち、送り速度をプラスマイナス 20%変化させ、振動影響の違いを測定した。尚、試験は超硬ドリルφ8[mm]2枚刃・3枚刃、スタブドリルに限定して行った。(表 3.3.9 参照)

表 3.3.9 加工条件

ドリル種類	径 mm	回転数	送り	切削荷重
超硬ロング 2枚刃	8.0	3600	540	1750
		3600	540×1.2= 648	400
		3600	540×0.8= 432	1850
超硬ロング 3枚刃	8.0	3600	810	2200
		3600	810×1.2= 972	2250
		3600	810×0.8= 648	2000
スタブドリル(スロー アウェイ)		500	80	3200
		500	80×1.2= 96	3500
		500	36×0.8= 64	2900

第4章 加工時のフィードバック方式による自律制振機能確立

4-1 研究目的

加工中の再生ビビリ振動を加速度計により取得してあらかじめ解析しておいた安定加工条件を外れた場合は、2-3 で構築した振動発生予知システムによりスピンドル回転数を自動的に最適化、加工機へフィードバックし、常に再生ビビリ振動を抑えた高速加工を実現する。

4-1-1 システム構築

切削加工においては、ワーク形状の変動により発生する振動により、加工精度、表面粗さ、工具寿命などに大きな影響を及ぼすことから、振動を制御する必要がある。振動の発生を抑えるため、振動と切削負荷との因果関係を解析し、その解析結果を以下の自動制御機能に反映させる。

発生する振動を抑えるために、ビビリ抑制装置を加工機に接続し、加工機の主軸オーバーライド機能を利用した主軸回転数の自動制御機能を追加する。それにより常に安定した加工条件で加工を行い、再生ビビリ振動を抑えた高速加工を実現する。

4-1-2 切削テストによる評価

システム構築後、チタン材料の切削テストを行い、小型表面粗さ測定器を用いて機能の確認/評価を実施する。その切削テストの結果から、より安定した加工を行うための刃具や加工方法を国立大学法人岐阜大学とともに導き出す。

4-2 研究内容

加工機にビビリ抑制装置を接続し、加工時に発生する再生ビビリ振動を抑える為に、スピンドル回転数に自動で変更するシステムを使用し、切削試験による評価を行った。

(1) システムの構築

第2章で述べた様に、加工機にビビリ抑制装置を接続し、加工機のオーバーライドを外部から操作出来るようにした。

(2) 切削試験

被削材はチタン材を使用、安定限界曲線から外れた条件を設定し、ビビリ抑制装置が自動でスピンドル回転数を変化させ、常に再生ビビリ振動を抑えた高速加工を実現させる。尚、ビビリ抑制装置はエンドミルしか対応していないが、ドリルにも適用できるかどうかを試験した。

①エンドミル

供試体は⑦を使用し、手仕上げの工程をなくす為に、製品模擬形状の仕上げ加工に着目し

て試験を行う。切削条件は模擬形状の加工時と同じにし、ビビリ抑制装置が形状加工にも有効である事の検証をする。但し、今回の試験では、直線部のみの加工とした。コーナー部は曲がる瞬間に切削条件が変わってしまう為、直線部のみの試験とした。

②ドリル

今回の試験では、超硬ロングφ8.0[mm] 2枚刃とスタブドリルに絞って実験を行う。材料はビビリ振動抑制装置が動作するまでの時間を考慮して、Ti ブロック（厚さ 1.5in）を使用した。また、ソフトウェア上の制限からスタブドリルの回転数を 500[rpm]から 1000[rpm]に変更して行う。表 4.2.1 に試験条件を示す。

表 4.2.1 試験条件

ドリル種類 径 mm	回転数	送り	備考
超硬ロング 8.0 2枚刃	3600	540	ステップ送り 3回 6mm×3回 連続送り 約 19mm 切り込み
	3600	540	
スタブドリル 25.4 (スローアウェイ)	1000	80	同一条件で再現
	1000	80	

4-3 研究成果

(1) システムの構築

第2章2-3-3を参照。

(2) 切削試験

①エンドミル

・結果

・振動

図 4.3.1 に加速度を FFT 解析した結果を示す。振幅の最大値を比較すると、ビビリ抑制なしは最大値約 0.065[m/V]に対してビビリ抑制ありは最大値約 0.015[m/V]と全体的に振動が抑えられている事が分かる。これは、ビビリ抑制装置が、0.3[s]おきに再生ビビリ振動か強制振動かを判断し、スピンドル回転数を変化させている為に、加工中の振動が抑えられたのではないかとと思われる。また、加工面肌についてはあまり差がでなかった。

・品質精度

従来の加工方法で加工した場合と安定限界曲線とビビリ抑制装置を使用して加工した場

合の品質精度の比較を表 4.2.3 に示す。測定箇所については図 4.3.2 を参照。結果は最大 0.025mm で寸法精度にほとんど差は見られなかった。目標値±0.125mm の範囲内で収まる結果となった。

・まとめ

以上の結果から、ビビリ抑制装置を使用すれば、直線部のみではあるが、形状加工時でも振動を抑える事ができ、高周速領域での共振帯 0 の目標を達成する事が出来たが、実際に部品加工を行う事を想定すると、コーナー部での振動抑制が新たな課題となる。

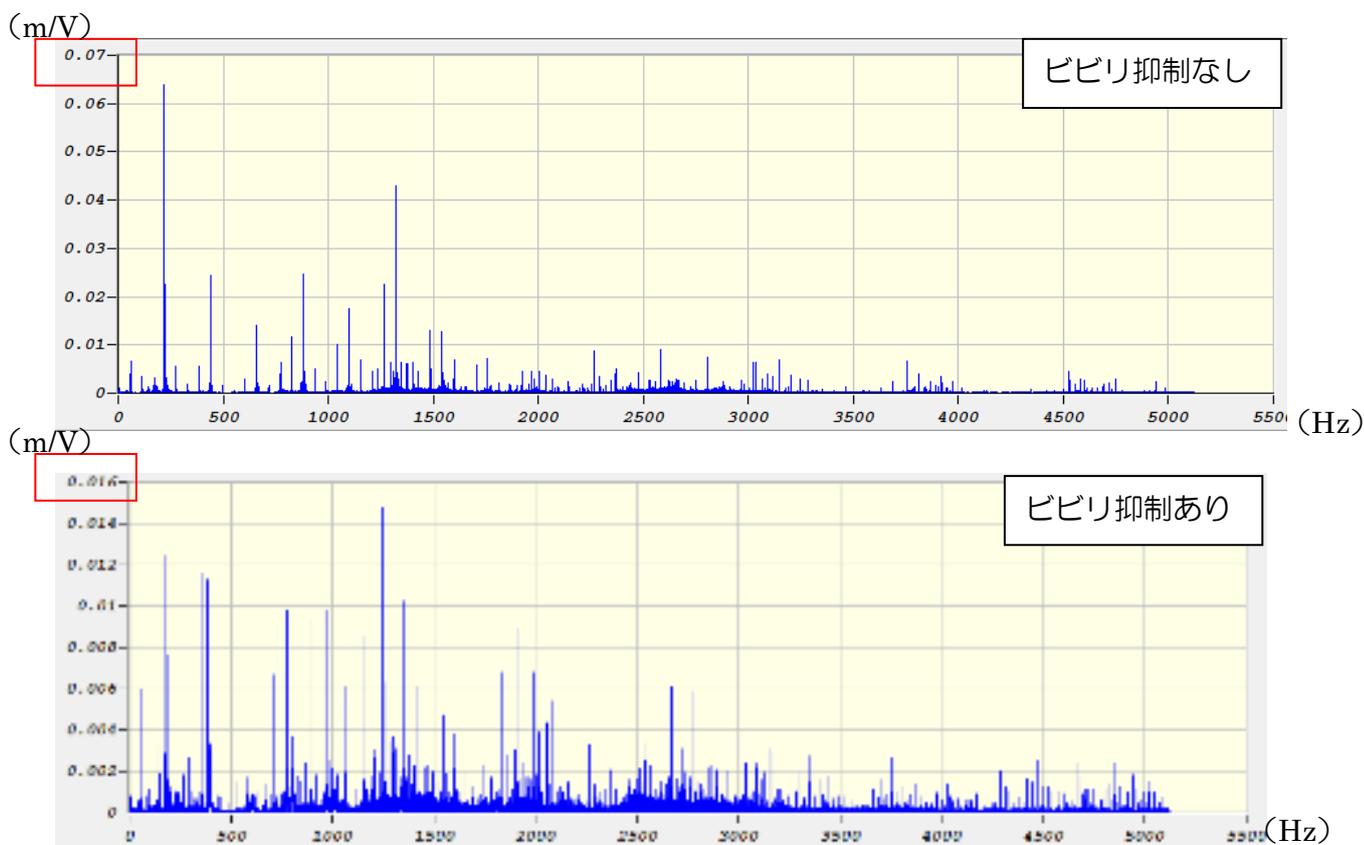


図 4.3.1 ビビリ抑制装置のあり、なしの比較/FFT解析 (加速度計)

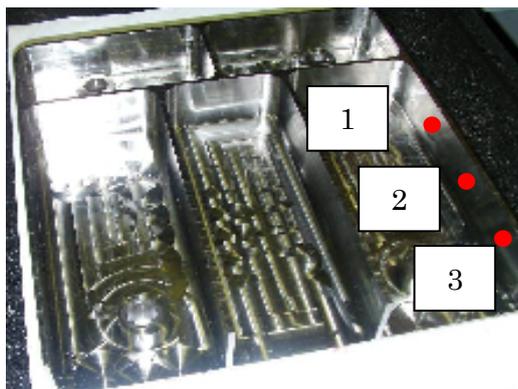


図 4.3.2 寸法測定箇所

表 4.3.1 寸法測定結果

測定点	従来の加工条件	安定限界曲線 + ビビリ抑制装置	誤差
1	2.561	2.563	0.002
2	2.511	2.498	0.013
3	2.405	2.380	0.025

②ドリル

試験結果から、ドリル加工であってもエンドミル加工と同じように振動回避が自動的に働くことが確認されたが、ビビリ抑制装置にはドリル加工の想定がされておらず今回はソフトの誤認で回転数に変化が現れた可能性も考えられる。

表 4.3.2 測定結果

ドリル種類 径 mm	回転数	送り	振動計	備考
超硬ロング 8.0 2枚刃	3600 →減速	540	振動大 →小	ステップ送り 3回 6mm×3回 連続送り 約 19mm 切り込み
	3600 →減速	540	振動大 →小	
スタブドリル 25.4 (スローアウェイ)	1000 →減速	80	振動大 →小	同一条件で再現
	1000 →減速	80	振動大 →小	

第5章 事業化への取り組み

本研究開発の成果はチタン材のみならず、ジュラルミン等の切削加工部品にも応用が可能である。実用化に向けての課題はあるが、薄肉航空機部品の切削加工の信頼性の向上を目指し、鉄道産業等の他産業の新規市場/ニーズ収集・分析をし、最終的に各産業のニーズにあった製品製作技術の確立を目指すとともに、事業化に向けた検討を行っていく。

・チタン部品のコスト・加工時間

現在、徳田工業で受注しているチタン部品に関して、客先から要求されている価格単価と実際の加工費用には大きな差があり、大幅なコストダウンが急務となっている。従って、本研究にて得た成果を基に加工条件の見直しを行って、良品を目標単価にて製作する技術を確立する。

第3章での結果も参考にして、コスト・加工時間・製品精度を考慮した新しい加工条件についてプランを立てる。100mm×100mm×30mm 相当の部品を想定した場合、最大約8分の加工時間の短縮も可能であるが、現在の工具では、工具寿命が短くなりコストとしては今とあまり変わらない。

事業化に向けて、コストと加工時間の兼ね合いから最適な加工条件を見つけ、さらなるコストダウンを狙っていく予定である。

第6章 全体総括

チタン材料 (Ti-6Al-4V) 高速加工における目標値に対する達成値

区分	条件	研究開発時	目標値	達成の有無
振動対策	リアルタイム計測による回転数の自動制御	—	高周波数領域の共振帯0	達成
加工時間	周速：150m/min (100mm×100mm×30mm 相当部品)	20分	14分	達成
品質精度	周速：150m/min	周速：50m/min ±0.125mm	周速：150m/min ±0.125mm以内	達成
面精度	周速：150m/min	周速：50m/min Ra6.3	周速：150m/min Ra6.3以内	達成
手仕上げ時間	周速：150m/min	20分	10分	達成

今回の研究により当初目標は達成する事が出来た。引き続き早期事業化に向けて研究を進める。