

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

**「超微細高速ステッピング加工による加工熱が発生しない
難削材対応切削加工機の開発」**

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

受託者 近畿経済産業局

委託先 ハリキ精工株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2 研究体制(研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者)	4
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8

第2章 研究開発報告

2-1 プロトタイプ型超微細高速ステッピング加工機の製作・検証	9
2-2 超微細高速ステッピング加工の原理解析と最適条件の抽出・制御システム開発の為の基礎データの収集	9
2-3 安定したステッピング運動(振動)を得るための NC 制御装置の開発、及び複数軸に対してもステッピング運動(振動)の制御が可能な NC 制御装置の開発	9
2-4 超微細高速ステッピング加工機の製作	21
2-5 切削加工熱の低減	22
2-6 切削加工スピードの向上	23
2-7 切削加工精度の向上	24
2-8 加工工具の超寿命化	26
2-9 加工稼働率の向上	26

第3章 全体総括

3-1 全体総括	28
----------	----

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

<研究開発の背景>

これまで、切削加工技術は日進月歩進化を遂げ、日本のものづくりを支える基盤技術の一つとしてその地位を確立してきました。

そして戦後日本の高度経済成長の一翼を担い、「技術立国日本」と言わしめるまでになった事は周知の事実です。



しかし昨今、市場の中心が飽和した先進国市場から新興国へ次々と移行する中で、数多くの企業が国外へ進出するとともに、加工技術の流出も加速しています。

また、工作機械自体の性能も向上し、比較的容易に高品位な製品が出来る様になったことと、新興国企業の技術力も進展してきたため、日本国内の企業は非常に過酷な競争を強いられることとなり、このままでは日本のものづくり自体が弱

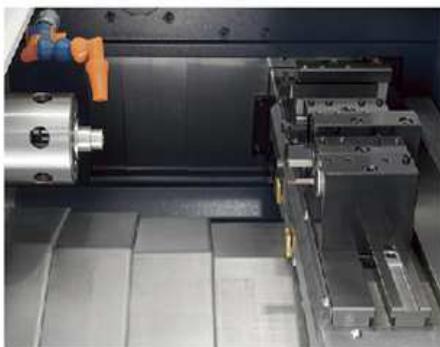
体、消滅化する方向にあります。

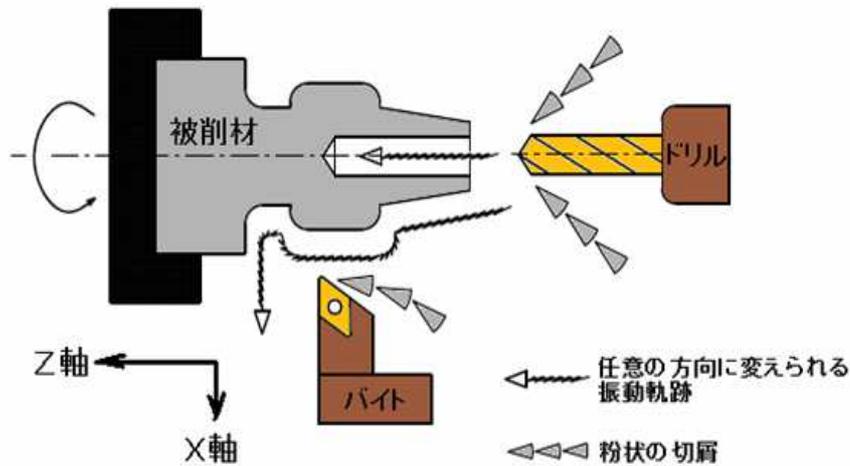
それを断固阻止する為に、日本の切削加工技術の分野にもイノベーションを起こす必要があると考え、我々は、「振動切削」という方法で切削性を飛躍的に向上させるにも関わらず、日の目を見ない技術に着目しました。

その多くは超音波を用いた振動切削で、それらは高速切削に向かない、条件設定に熟練を要する、ツーリングに制約がある、加工シーンに制約がある、汎用的でない割に高価である、といったような問題点が数多くあることが、実用化はされているものの、一般に普及しない原因とみました。

そこで我々は「リニアサーボ制御による超微細高速ステッピング加工」という新たな技術により、上述のような問題点を克服し、日本国内の切削加工を生業とする企業に普及する画期的なNC旋盤の研究開発を目指すこととしました。

そして2015年度の新燃費基準の策定に伴った、更なる燃費向上の為に必要な新技術で用いられようとする、極めて切削困難な(SUH660材)耐熱鋼部品の2014年からの量産加工に間に合わせ、実現する事を具体的目標としました。





<研究目的及び目標>

研究目的は、リニアサーボ制御による低周波振動切削加工工法の確立により、超微細高速ステッピング加工機の開発で、そのための主要研究内容は次の通りである。

- ステッピング加工(低周波振動切削加工)の有用性の検証、確認
- リニアサーボ制御でのステッピング(低周波振動)再現性の確認
- 加工条件・振動条件の最適化
- 超微細ステッピング運動が可能な NC 制御装置の開発
- 切削加工熱の低減
- 切削スピードの向上
- 切削加工精度の向上
- 加工工具の超寿命化
- 加工稼働率の向上

目標としては、難削材加工時において

- 工具寿命の向上としてバイト 1 個で無人で 100 個加工可能を目標。
- 内外径 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内の精度での仕上がりを目指とする。
- 切削加工スピードの向上(難削材加工の切削時間短縮) 目標周波数:80Hz
- 超微細ステッピング加工機の量産機の製作
- 稼働率の向上として夜間の無人運転化の実現

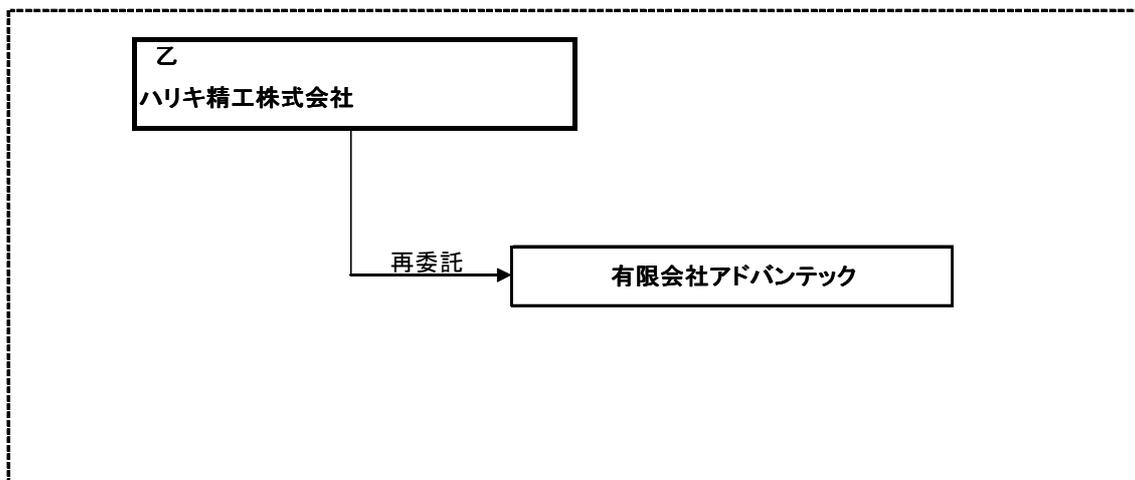
更に、研究の最終到達点は、従来の切削機の問題点である、加工時の切削熱を冷却効果を高めることにより極限まで減少し、安全、精密、後処理レス、研削レスをも可能とする切削加工機(超難削材の加工を容易に出来る機械)を製作販売し、日本国内の製造業の活力を取り戻す事である。

1 - 2 研究体制

(研究組織・管理体制・研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織



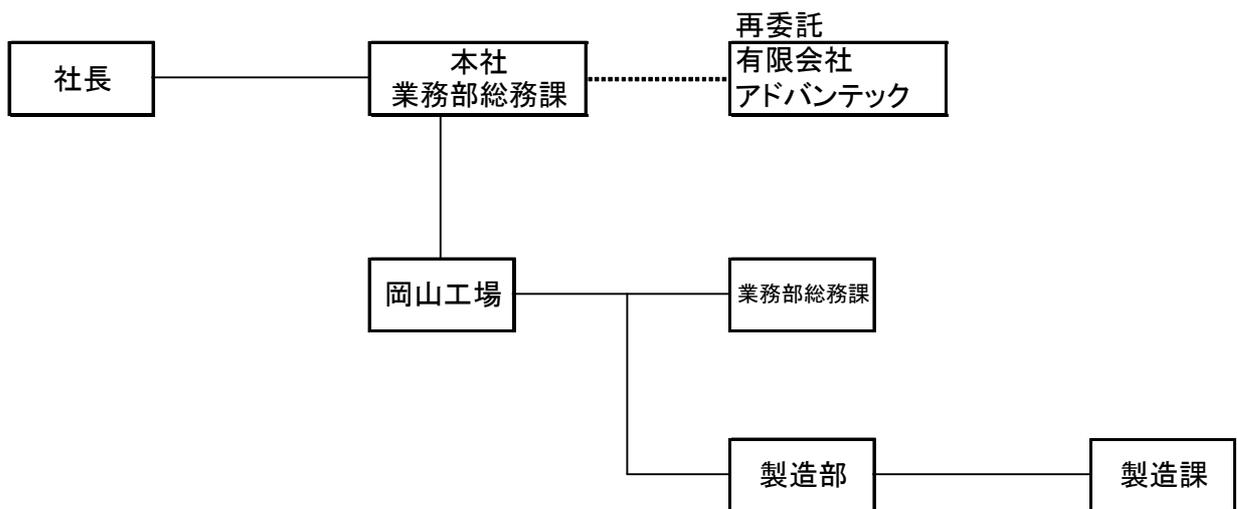
総括研究代表者
有限会社アドバンテック 代表取締役
今崎 能吉

副総括研究代表者
ハリキ精工株式会社・取締役
製造統括・小林 孝一

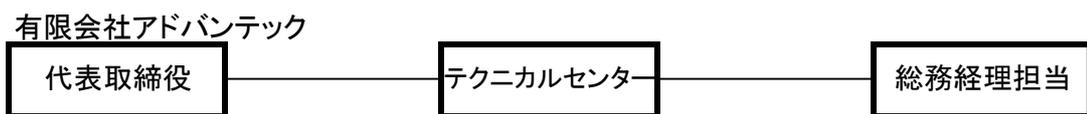
2) 管理体制

① 事業管理機関

[ハリキ精工株式会社]



②(再委託先)



3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】ハリキ精工株式会社

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
榛木 竜	代表取締役社長	
小林 孝一	取締役製造統括	
藤沢 保憲	本社業務部長	
小池 徹哉	本社業務部総務課	
小林 香奈江	岡山工場・業務部総務課総務係係長	

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
榛木 竜	代表取締役社長	
小林 孝一	取締役製造統括	
野々上 明	製造2課 技能士	

【再委託先】

有限会社アドバンテック

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
今崎 能吉	代表取締役	

③【アドバイザー】

国立大学法人大阪大学大学院工学研究科

氏名	役職
榎本 俊之	教授

1-3 成果概要

本事業の目標は、超微細ステッピング加工により、加工熱に対する冷却効果が高く、難削材対応となる工作機械を開発し、商品として市場に出す事であり、社内作成したアカゲラ1号と、23年度に研究開発し作成したテスト用ステッピング加工機アカゲラ2号を使用し、更にステッピング加工機を量産化に繋げるための具体的な事項の刃物、工具の研究と、切削スピードの向上の研究開発を行い、必要な能力を備えた機械作成を具現化するまでが本研究の目標であり、目標達成の為に取り組んだ内容を纏めると次のようになる。

23年度の研究開発を基に開発したステッピング加工機、アカゲラ2号を中心に使用しステッピング加工機に最適な、且つ難削材加工可能な工具の開発に工具メーカーと共同で取り組んだ結果、工具寿命、面粗さについては顕著に差が出て、ステッピング加工の優位性が実証された。

またバリ高さについても、現状では2度加工している事に比べ、1度の加工で50個の連続加工後もバリの発生を小さい範囲で抑制出来る事が確認できた。

一方、平面度に関しては、ステッピング加工の特性上、端面加工においては表面にうねりが発生する形状となり、どうしても平面度が悪くなってしまいう事が分った。

バリ高さ、平面度については、改善のために加工条件、ステッピング条件の設定が重要であり、今後量産機を作成するにあたり各製品により最適条件設定が出来る内容に仕上げる事が必要である。

また次の図 1-3-1～1-3-4 よりステッピング加工機にて専用工具での有効性の効果が見てとれる。

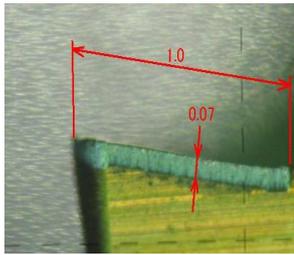


図 1-3-1 ステッピング加工用工具

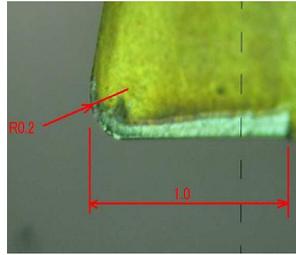


図 1-3-2 ステッピング加工用工具

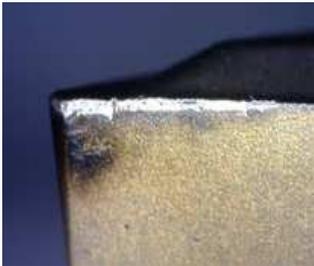


図 1-3-3 慣用工具



図 1-3-4 慣用工具

連続加工テストを実施した結果、SUS304 材を使用し 2 日間の連続加工を行ったところ、機械としても問題なく稼働し、加工工具の摩耗、損傷もほとんどなしに約 400 個の連続加工を行う事が出来たことから、量産加工に対しても十分に対応出来る事が確認できた。

超微細高速ステッピング加工機（アカゲラ 2 号）の量産加工への実用化に向けては、切削加工のスピードアップが必要で、スピードアップには周波数のアップ（振動数 UP）が不可欠であり、その為にはコアレスモーターでのステッピング加工が必要であると考え、自社製アカゲラ 1 号機にコアレスモーターを載せ換え周波数の確認を行うと同時に、その特性からリニアモーター及びリニアモーターガイドの耐久性が懸念される為、コアレスモーターにより超微細高速ステッピングを繰り返す動作試験を実施、3, 7 2 6 時間動作後のテーブル、リニアローラウェイ等の状況調査を行い、耐久性の確認も合わせて行った。

コアレスモーターに載せ替え実験した結果、最終 93.4Hz を確認出来、周波数の違いによる切り屑の状況変化も其々に異なる事を確認した。

逆に言えば条件により切り屑の状態をコントロールする事も可能と言え、現在加工時に刃物への悪影響を及ぼす切り屑のコントロールが出来れば、切削加工の条件を何時も最適に近い状態で加工が可能な条件を維持できる事が可能と言える。

ただ、実際加工を行うにあたっては MAX 周波数での加工を行う事が可能か否か、MAX での加工に近づける為にはまだ問題点がある為、今後も研究が必要となる。

メーカーにも協力を仰ぎ、繰り返し動作後のリニアモーター及びリニアモーターガイドの評価を行ったところ、有意な問題は存在しない事が確認でき、超微細高速ステッピ

ング加工機へのリニアモーターの導入は可能であると判断した。

1-4 当核研究開発の連絡窓口

(1) ①事業管理機関

ハリキ精工株式会社 本社(最寄り駅:大阪市営地下鉄 千日前線 今里駅)
〒537-0012 大阪府大阪市東成区大今里3丁目26番17号

②研究実施場所

有限会社アドバンテック テクニカルセンター

(最寄り駅:JR 西日本 福知山線 伊丹駅)

〒661-0951 兵庫県尼崎市田能6丁目8番2号

第2章 研究開発報告

2-1 プロトタイプ型超微細高速ステッピング加工機の製作・検証

まず通常は旋盤型の工作機械には使用されず、マシニングに用いられるような高速演算処理が可能なNC制御装置を搭載した、単軸のプロトタイプ機(アカゲラ1号)を作成し、ステッピング運動制御の実証実験を行う事とした。

尚、振動周波数の目標値を、実用性を考慮し、30Hz 以上とした。

以下に示す、図2-1-1が、独自に作成した単軸プロトタイプステッピング加工機(アカゲラ1号)である。

【 リニアサーボ制御のプロトタイプCNC旋盤 アカゲラ1号 】



図 2-1-1

2-2 超微細高速ステッピング加工の原理解析と最適条件の抽出・制御システム開発の基

基礎データ収集

2-3 安定したステップング運動を得るためのNC制御装置の開発、及び複数軸に対してもステップング運動の制御が可能なNC制御装置の開発

アカゲラ1号を使用し空運転にて、図 2-2-1 に示すような滑らかなサインカーブ(正弦波)を描くステップング(振動)運動が出来、且つ一定の振幅を保つ事が出来るようサーボ調整を繰り返し行い、周波数が最大と出来る条件を試行錯誤により見出すよう試みた。

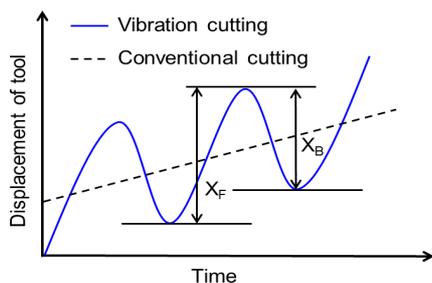


図 2-2-1

その結果、空運転の状態、図 2-2-2 のように滑らかな波形且つ一定の振幅(0.03mm)を維持した上で最大周波数46.875Hzを達成し、目標周波数である30Hzをクリアする事ができた。

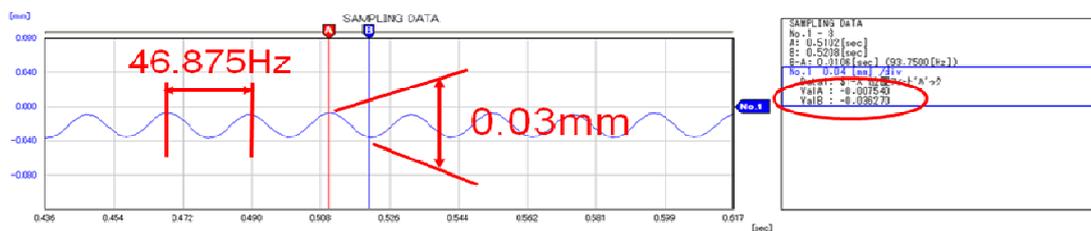


図 2-2-2

次に、ステップング加工が実切削加工に対し有効である事を確認するため、前進量、後退量、送り速度、主軸回転数等の諸条件が最適になるようにテストを繰り返し、最適条件を導き出した。その結果、図 2-2-3 に示すように、周波数46.875Hz で理想的な波形のステップング運動を実現する事が出来た。

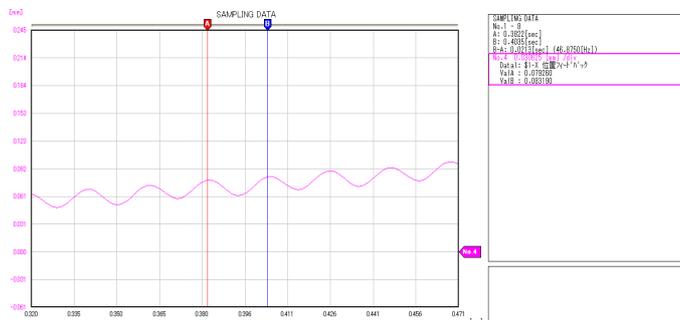


図 2-2-3

本条件を基に、慣用切削とステップング加工の差違、ステップング加工における刃物、材料、条件等についてそれぞれの加工条件の研究を実施した所、慣用切削とステッ

ピング加工では結果に明らかな違いが見られた。

図 2-2-4 は、アルミ合金を被削材とし、実切削加工を行った際の切屑である。一見して明らかなように、慣用切削では繋がった切屑になる所が、ステッピング加工では、切屑が粉になる事が確認でき、切屑排出性が飛躍的に向上する事が確認出来た。

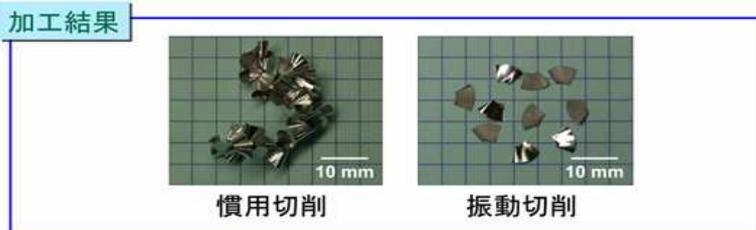
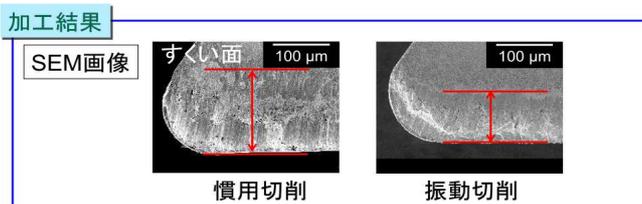


図 2-2-4

図 2-2-5 はステンレス鋼を切削加工した刃物の刃先の拡大写真であるが、慣用切削の刃先はすくい面に構成刃先がびっしり付着しているが、ステッピング加工の刃先は構成刃先の溶着は慣用切削に比べ、大幅に抑制されており、刃物寿命の延長、加工物の精度向上の効果が期待される

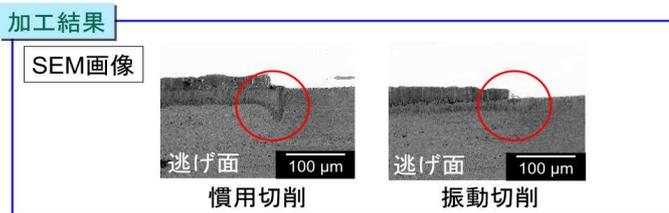
加工結果(ステンレス鋼加工)



構成刃先を抑制

図 2-2-5

また境界磨耗についても図 2-2-6 からも見て取れるように、バイト逃げ面からみた磨耗量はステッピング加工の方が明らかに少ないことが解る。



境界摩耗を抑制

図 2-2-6

これらの事象により、刃物への負荷はステッピング加工の方が慣用切削に比べて大幅に低減されており、且つ切削時の発熱温度も慣用切削は高温になっているが、ステッピング加工は発生した加工熱が効率よく冷却される為、加工温度が低い事が予想され、此の

事より構成刃先の抑制、境界磨耗の抑制効果があり、工具磨耗が少なく工具寿命の延長、寸法精度の向上が効果として期待できる。

実際同じ材質の材料をDry加工とWet加工で加工した加工ワークを測定した結果、明らかな違いが出ている。図 2-2-7 を見て解る様に、Dry加工においてもWet加工においても、加工径のバラツキが慣用切削の方が大きく、ステッピング加工の方が安定している事が解る。此のことより慣用切削には無いステッピング加工特有の優位性が製品の安定性を確保していると考えられる。

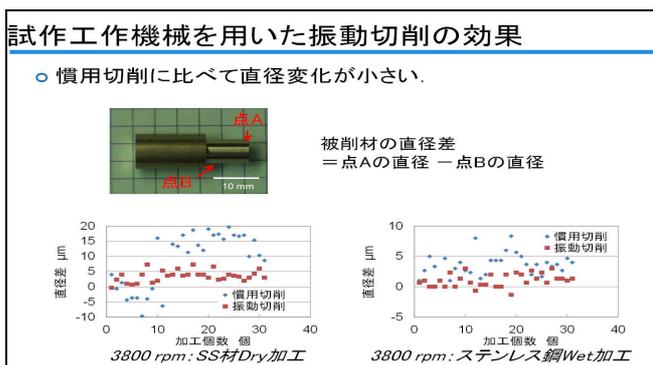


図 2-2-7

一方ステッピング加工においては回転数により構成刃先の発生度合いが異なり、低速回転の300rpm では発生しているが、600rpm を超えると構成刃先の発生付着は確認できず、通常切削に使用する加工範囲の回転数では十分効力があるとの結果であると考えられる。

ただ、図 2-2-8 中の右側の写真のように、回転数と振動数の条件が合わない場合には、切屑は分断出来ず、粉状ではなく繋がった切屑になり、条件により繋がったり、粉状になったりする事がある事が確認でき、周波数と主軸回転数の関係性に注意しなければならないが、逆に考えれば条件により切屑の状態を変える事が可能とも言える。

実験結果(アルミニウム合金加工)

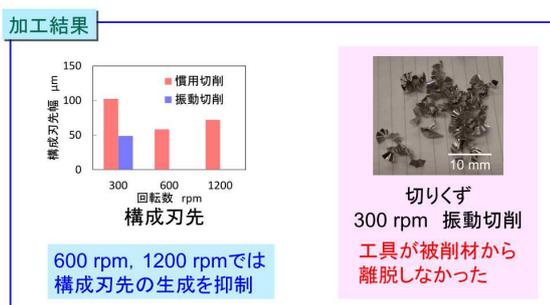


図 2-2-8

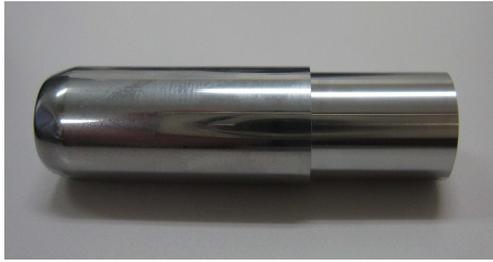


図 2-2-11



図 2-2-12

また、加工面の精度を測定したのが、図 2-2-13 の面粗測定データで、図 2-2-14 が真円度、図 2-2-15 が円筒度の測定データである。

このデータを見ても解るように、面粗度 Ra0.19 μ m、真円度0.4 μ m、円筒度0.7 μ m と非常に高精度に仕上がっており、ステッピング加工の優位性は難削材でも効果が大きくでている。

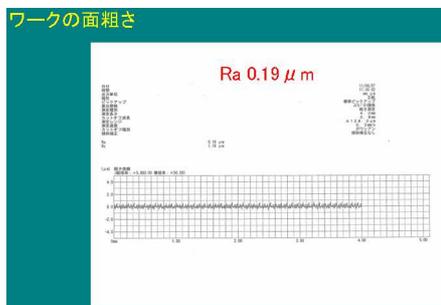


図 2-2-13

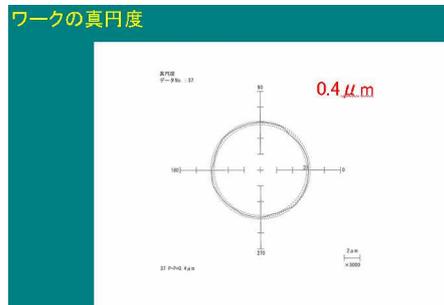


図 2-2-14

複数軸に対してもステッピング運動可能な補間制御開発の為の実験として、現在保有の駆動機構にボールネジを用いたNC工作機にてステッピング運動の補間制御加工が可能か否かを確認するためにプログラムを作成し(周波数9Hz)テストを行った。

図 2-2-16 がSKD材を加工した物で、仕上がり面もよく刃物欠けもなく非常にスムーズな加工が可能であった上、目的の本質である2軸による補間制御でのR加工、テーパ加工も、図 2-2-17 で解るように非常に綺麗で滑らかなテーパ加工の仕上がりを確認でき、本研究の最終目標である、複数軸での補間加工の制御も可能であり、これにより制御装置とリニアサーボの組み合わせでの機械の製作も可能な事を確信できた。



図 2-2-16

更に、最新の検証結果として、本開発にて作成した超微細高速ステッピング加工機(ア

カゲラ2号)での、2軸補間振動の結果を図 2-2-17 に示す。

各種パラメータの調整を繰り返すことで、周波数46.875を達成し、且つX軸・Z軸共に滑らかなサインカーブ(正弦波)状の波形が達成出来た。

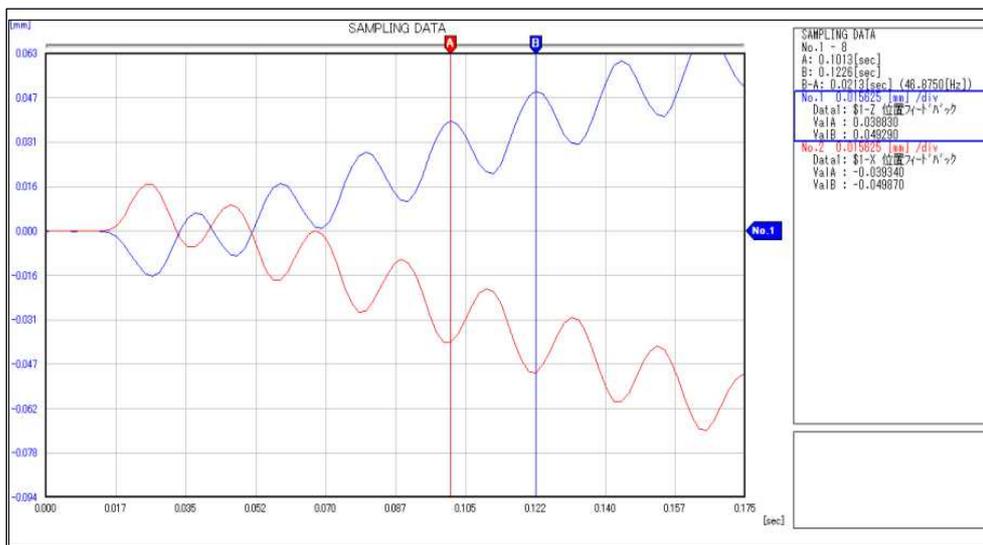


図 2-2-17

また、SUS304材を被削材として、作成したアカゲラ2号機を用いて2軸補間のステッピング加工にてテーパ加工の実切削テストを実施した。

Φ10-SUS304をテーパ補間振動切削したワークと切粉



図 2-3-1

Φ10-SUS304をテーパ補間振動切削した切削面の面粗度と拡大図

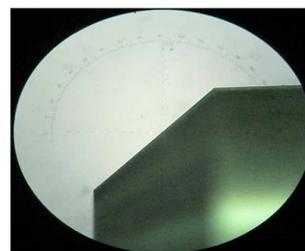


図 2-3-2

図 2-3-1 が2軸での補間制御によりテーパ加工した製品と切粉で、非常に滑らかに綺麗なテーパ加工となって居り、且つ切粉も分断され粉状になっており、図 2-3-2 の面粗度測定においても Ra0.91um、テーパ部分を投影機にて拡大して確認してもバリ発生もなく、シャープで綺麗なテーパ加工面である事が確認できる。

上記のテスト結果から、2軸でのステッピング補間制御は可能であり、今後更にアカゲラ2号を用いて性能確認、検証を進める事とする。

次に本研究開発により作成した、超微細高速ステッピング加工機(アカゲラ2号)の量産加工へ

の実用化に向けては、安定した連続加工が可能となる事が必須であり、そこで改造によりワークの自動供給排出機能を持たせたアカゲラ2号で2日間にわたる連続加工実験を行い、その効果の確認を実施した。

<加工対象ワーク>

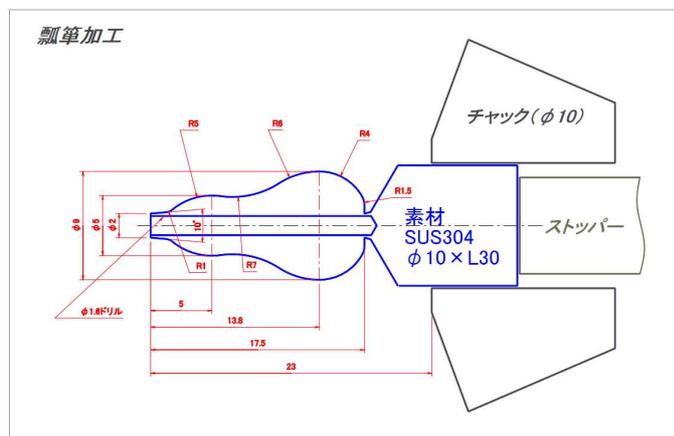


図 2-3-3

一般に難削材として知られるSUS304を加工対象とし、慣用切削では刃物工具に対する負荷が高いために刃物工具の交換頻度が高く、量産性に乏しい図 2-3-3 の瓢箪形状の連続加工を行ない、量産性及び品質の安定性の確認を行った。

また、通常の慣用切削では実現できないφ1.8ドリルの深穴一発加工を行い、量産性の確認を行った。

下記 図 2-3-4 にて、φ9部外径の寸法測定データを示す。

検査データ			実	
No.	検査時間	n 個目	φ9 部	偏り量
1	7/5 9:00	156 目	φ8.993	-7
2	7/5 10:00	174 目	φ8.996	-4
3	7/5 11:00	192 目	φ9.001	+1
4	7/5 12:00	210 目	φ9.003	+3
5	7/5 13:00	228 目	φ9.003	+3
6	7/5 14:00	246 目	φ9.004	+4
7	7/5 15:00	264 目	φ9.003	+3
8	7/5 16:00	282 目	φ9.003	+3
9	7/5 17:00	300 目	φ9.003	+3
翌日 9:00 より再スタート				
10	7/6 10:00	318 目	φ8.993	-7
11	7/6 11:00	336 目	φ8.996	-4
12	7/6 12:00	354 目	φ8.999	-1
13	7/6 13:00	372 目	φ8.999	-1
14	7/6 14:00	390 目	φ8.999	-1

図 2-3-4

検査データ

測定値

一般的に、通常の慣用切削では、刃物工具の摩耗の影響を加味しない時の寸法変化量

は 10~11 μm であり、このことからステッピング加工の安定性が実証されたと言える。

LMガイドの動き： 30mm振動前進後、30mm通常後退を繰り返す

- ・振動周波数： 46.875Hz
- ・1振動当りの前進量： 0.01mm(進み量0.04mm、戻り量0.03mm)
- ・通常後退速度： 1,000mm/min ・サイクルタイム： 65秒
- ・連続運転時間： 3,726時間 ・往復回数： 206,355往復

LMガイドメーカーにも協力を得て、繰返しテスト実施後のLMガイドの状態を評価し、耐久性に問題がないか評価を実施した。その結果を以下図 2-3-5、2-3-6、2-3-7 に示す。

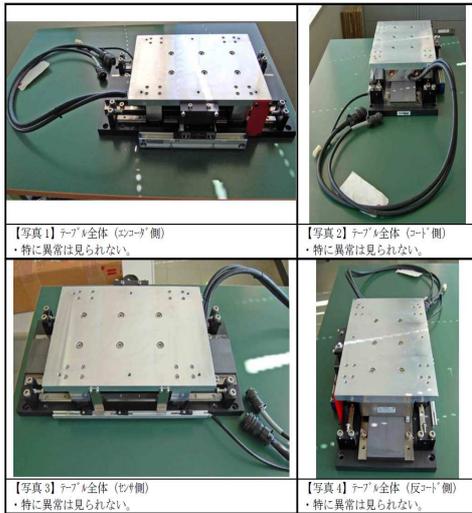


図 2-3-5

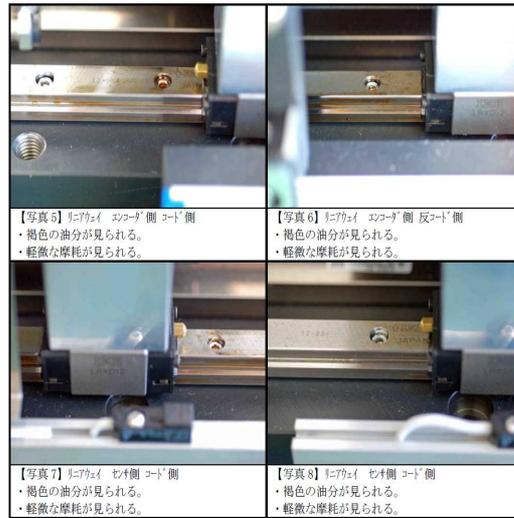


図 2-3-6

(1) 繰返し位置決め精度

測定状態	返却時	工場出荷前
測定値※	±0.16	±0.15
単位	μm	

※異常無し。

図 2-3-7

上記のように、軽微な摩耗や通常レベルの油分の付着が見られるが、ステッピング加工による特異な物ではなく、繰返し位置決め精度に対しては異常なし、とのメーカー見解であり、ステッピング加工機へのLMガイドの使用時の耐久性については問題なし、と考えられる。

次に平成23年度に作成した簡易型切削動力計を用いて、Z軸方向の切削抵抗値を計測することにより、慣用切削加工とステッピング加工とで切削抵抗値に有効な差異があるのかを検証し、ステッピング加工における最適加工条件の抽出に活かすことを目的とした。

具体的には、ドリルによる穴明加工と、バイトによる外径加工の切削抵抗を計測して行なった。尚、慣用切削加工とステッピング加工の条件が同じになる様、「回転数」「1回転当りの送り量」「加工時間」の設定に留意した。

下記図 2-3-8~2-3-19 がその内容を条件毎にテストした結果の一部を示す。

<実験内容>

1. ドリルによる穴明加工

- ・被削材: SS400 ・ドリル: NACHISG-ESS- ϕ 3.5
- ・切削油: 日本グリースサンカット EF-5N ・穴明長: 10mm

1-1: 1回転当り0.5振動の条件に相当する慣用切削及びステッピング加工時の切削抵抗測定

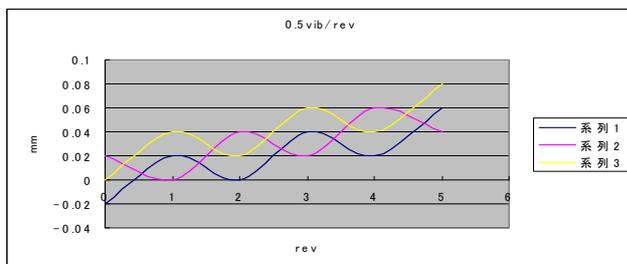


図 2-3-8 (1回転当り0.5ステッピング時の波形)

1-2: 1回転当り2.5振動の条件に相当する慣用切削及びステッピング加工時の切削抵抗測定

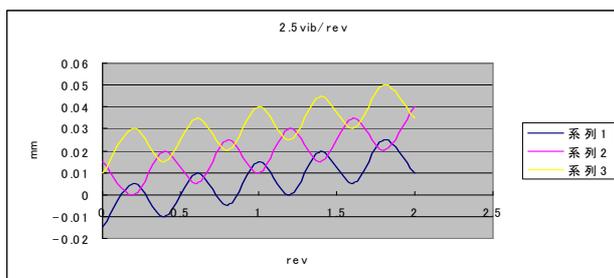


図 2-3-10 (1回転当り2.5振動のステッピング波形)

2. バイトによる外径加工

- ・被削材: SUS304- ϕ 10 ・バイト: 京セラ DCGT11T301ER-U-PR930
- ・切削油: 日本グリース サンカット EF-5N ・取り代: 片肉 1.5mm ・切削長: 10mm

2-1: 1回転当り2.5振動の条件に相当する慣用切削及びステッピング加工時の切削抵抗測定

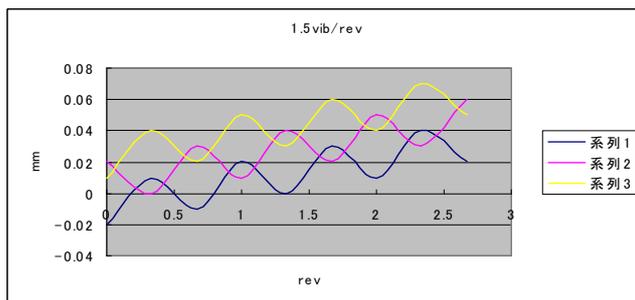


図 2-3-11 (1回転当り1.5振動のステッピング波形)

<テスト結果> 1-1: A) 穴明け慣用切削

回転数: 4,821rpm (周速 53m) 送り速度: 0.01mm/rev

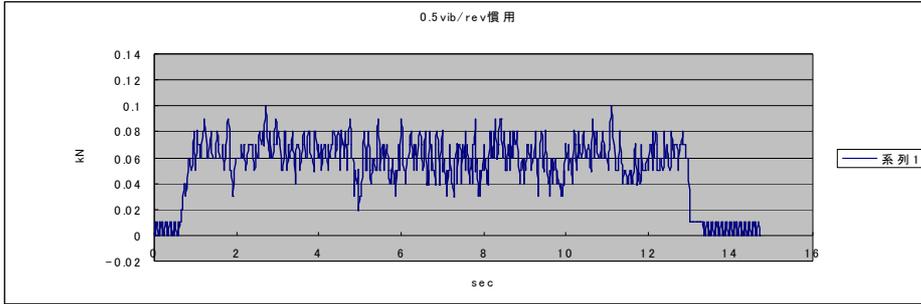


図 2-3-12 (0.5vib/rev 相当 慣用切削加工時切削抵抗)

B) 穴明け 0.5vib/rev ステッピング加工

回転数: 4,821rpm (周速 53m) 周波数: 40.18Hz

進行量: 0.01mm/rev (前進量:0.04mm、後退量:0.02mm、送り速度: 330/min)

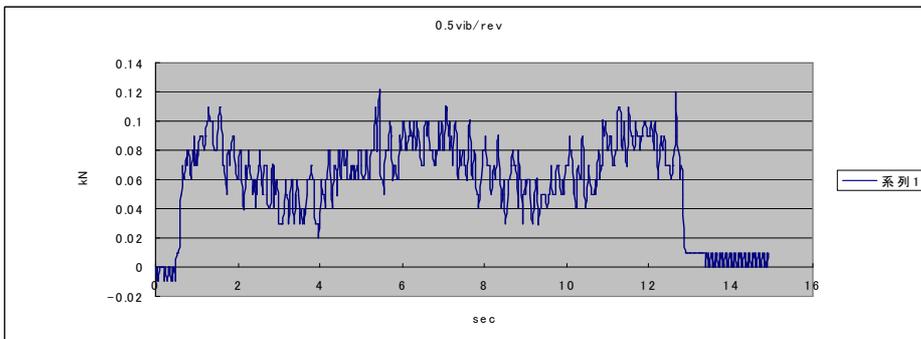


図 2-3-13 (0.5vib/rev ステッピング加工時切削抵抗)

1-2: A) 穴明け慣用切削

回転数: 1,875rpm (周速 21m) 送り速度: 0.015mm/rev

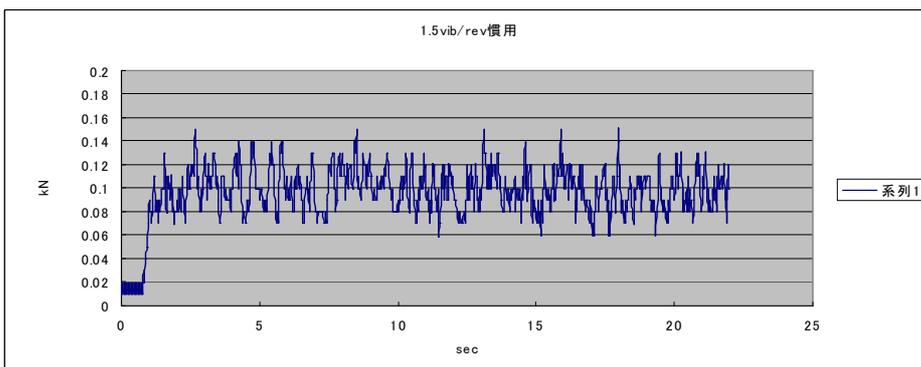


図 2-3-14 1.5vib/rev 相当 慣用切削加工時切削抵抗)

B) 穴明け 1.5vib/rev ステッピング加工

回転数: 1,875rpm (周速 21m) 周波数: 46.88Hz

進行量: 0.015mm/rev (前進量:0.03mm、後退量:0.02mm、送り速度 330/min)

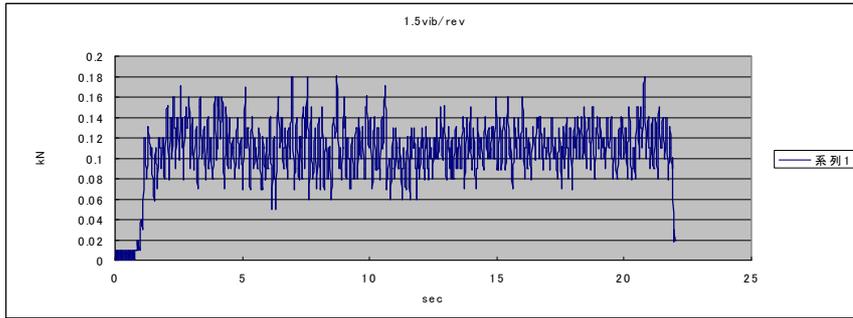


図 2-3-15 (1.5vib/rev ステッピング加工時切削抵抗)

B) 穴明け 2.5vib/rev ステッピング加工

回転数: 1,875rpm(周速 21m)

周波数: 46.88Hz

進行量: 0.013mm/rev (前進量:0.02mm、後退量:0.015mm、送り速度 250/min)

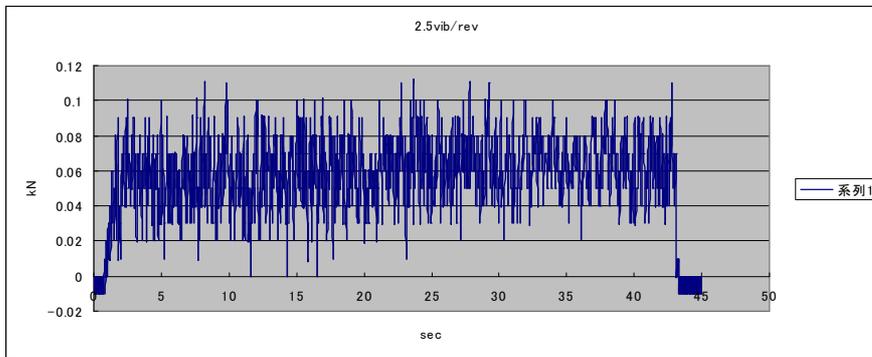


図 2-3-17 (2.5vib/rev ステッピング加工時切削抵抗)

2-1: A) 外径慣用切削

回転数: 1,875rpm(周速 59m)

送り速度: 0.015mm/rev

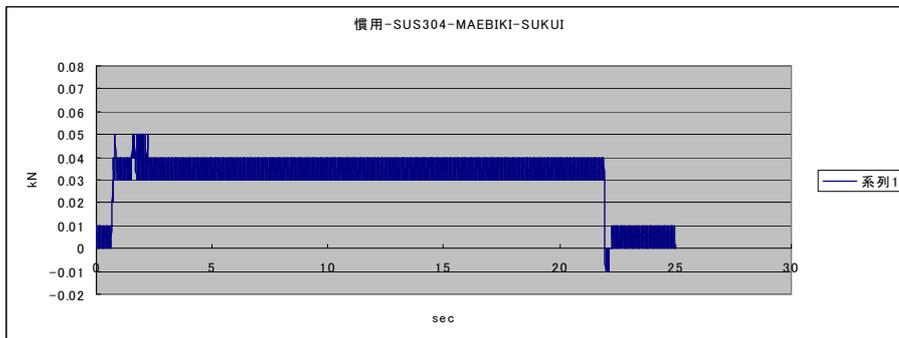


図 2-3-18 (1.5vib/rev 相当 慣用切削加工時切削抵抗)

B) 外径 1.5vib/rev ステッピング加工

回転数: 1,875rpm(周速 59m)

周波数: 46.88Hz

進行量: 0.015mm/rev (前進量:0.03mm、後退量:0.02mm、送り速度 330/min)

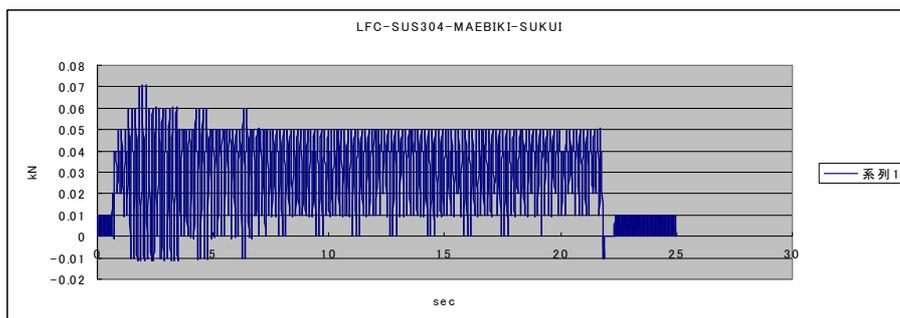


図 2-3-19 (1.5vib/rev ステッピング加工時切削抵抗)

上記の結果より、同じ切削速度と取り代においての、慣用切削の送り量とステッピング加工の進行量による切削抵抗値の違い、1回転当りの振動数の変化における違いも判明した。

その他1ステッピング量と進行量、進入角での抵抗の違い、後退時の抵抗値の変化等、切削抵抗値の振れ幅の慣用切削時とステッピング加工時の違い、またその挙動の違いも判明してきた。

以上の研究にて得たデータを基に、制御装置メーカーと組んでステッピング運動の制御が可能なNC制御装置の作成に取り掛かった。

実際作成に取り掛かったが、被削材の違い製品により加工条件が異なる事で、同一条件下での切削ではない為、ステッピングの条件も其れに合わせて変更が必要で、その度に機械的、システムの問題があり、これに対応するためには其々の加工条件に合うステッピング条件を変更が必要となり、この部分の条件設定の為のテスト、乱数表の様な条件表を作成する必要が出てきたため、無数の組み合わせの中からの条件の組み合わせが必要で、今後量産機作成までにこの条件表を独自のノウハウとして造り込んでゆく。

2-4 超微細高速ステッピング加工機の製作

今までの研究で得られた成果、結果を纏め、装置改造メーカー、制御メーカーに持ち込み詳細に打ち合わせを重ね、研究の核の部分を如何に旨く装置として注入していくかの検討を行い、本年度の最終目標であるステッピング加工可能なアカゲラ2号機の完成となった。

図 2-4-1～図 2-4-4 がアカゲラ2号の完成写真である。



図 2-4-1



図 2-4-2

主軸装置

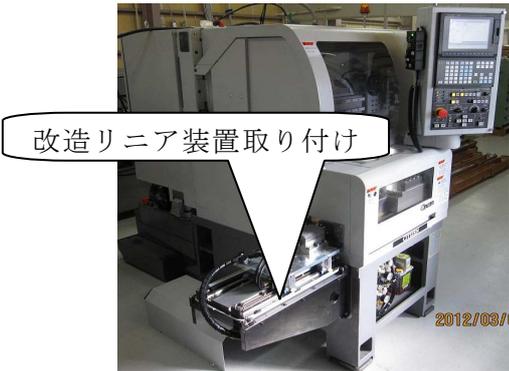


図 2-4-3



図 2-4-4



アカゲラ2号 仕様

パワーチャック	空圧	3" (4") 精密チャック
ダイヤモンドチャック	空圧	4"
コレットチャック最大口径	静止型(バッド方式)	φ35 mm
	引型(バッド方式)	φ40 mm
最大加工長さ		50 mm
主軸モーター	15分/連続	2.2/1.5 kW
主軸回転速度範囲		80~8,000 min ⁻¹
角バイトのシャンク高さ		□10 mm、□12 mm、(□16 mm)
穴工具シャンク部の直径		φ20 mm
刃物台移動量	X軸	170 mm
	Z軸	170 mm
刃物台移動	リニアサーボモータ	X軸/Z軸
機械の高さ		1,600 mm
主軸中心高さ		875 mm
所要床面積(開口×奥行き)		700 mm×1,480 mm
機械質量(本体)		1,500 kg

図 2-4-5

上記図 2-4-5 がステッピング加工機アカゲラ2号の仕様内容。

今後このステッピング加工機(アカゲラ2号機)を用いて、2軸補間加工を中心に、更なる研究を継続実施する。

2-5 切削加工熱の低減

本条件を基に、慣用切削とステッピング加工の差違、加工条件下での差違の研究を実施し、慣用切削とステッピング加工では結果に明らかな違いが見られた。

図 2-5-1 は、アルミ合金を被削材とし、実切削加工を行った際の切屑である。この切り屑の違いから見て、ステッピング加工の切屑排出性が飛躍的に向上する。

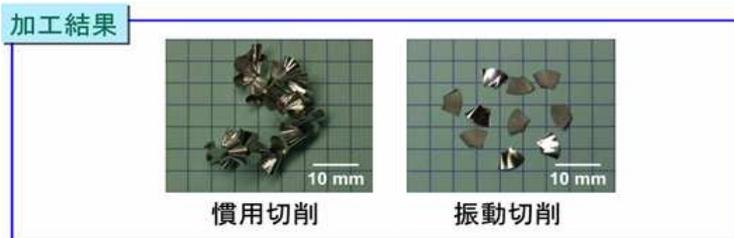
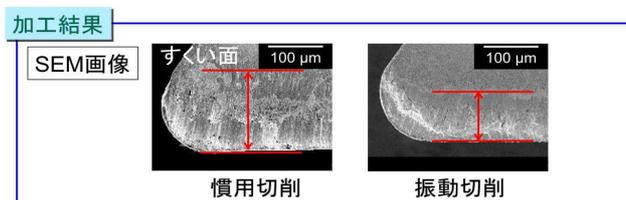


図 2-5-1

図 2-5-2 はステンレス鋼を切削加工した刃物の刃先の拡大写真であり、慣用切削の刃先

はすくい面に構成刃先がびっしり付着しているが、ステッピング加工の刃先は構成刃先の溶着は大幅に抑制され、刃物寿命の延長、加工物の精度向上の効果が期待される

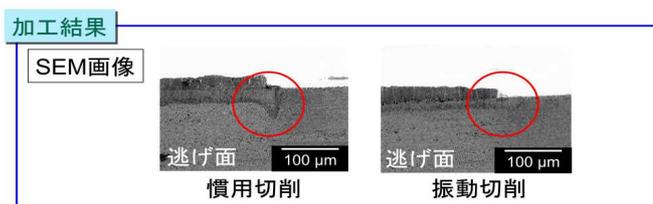
加工結果(ステンレス鋼加工)



構成刃先を抑制

図 2-5-2

また境界磨耗についても図 2-5-3 から見て取れるように、バイト逃げ面からみた磨耗量はステッピング加工の方が明らかに少ないことが解る。



境界磨耗を抑制

図 2-5-3

これらの事象により、刃物への負荷はステッピング加工の方が大幅に低減されており、且つ切削時の発熱温度も、ステッピング加工は発生した加工熱が効率よく冷却される為、加工温度が低い事が予想され、此の事より構成刃先の抑制、境界磨耗の抑制効果があり、工具磨耗が少なく工具寿命の延長、寸法精度の向上が期待できる。

2-6 切削加工スピードの向上

一般に工作機械に用いられるモーターは振動、加工負荷などが発生する為、コア付きモーターでなければならないと考えられているが、本研究開発による超微細高速ステッピング加工機の場合、加工負荷が慣用切削と比較し大幅に減少すると考えられ、コアレスモーターによる加工が可能になると予想される。

コアレスモーターは非接触で動作するという特性上、摩擦がないため、速度、精度、定速性の面で非常に優れ、既存のコア付きモーターでは成し得ない更なる周波数の向上、スライドへの負荷低減、メンテナンスが容易、機械価格の低減など多くのメリットが見込まれる。

ただ、超高速微細ステッピング加工用に専用の制御装置が開発されている状態ではなく、複数軸への導入は現状困難であるため、まずは単軸にのみコアレスモーターを導入する事とした。

写真 2-6-1~2-6-2 がコアレスモーター導入後の各装置



図 2-6-1 (コアレス装置制御盤)

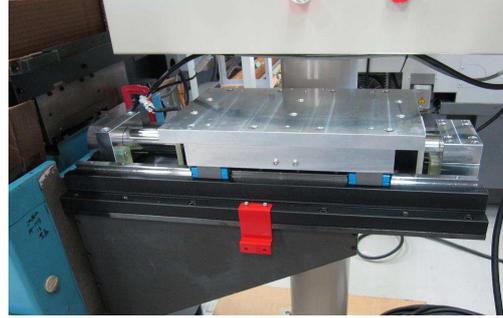
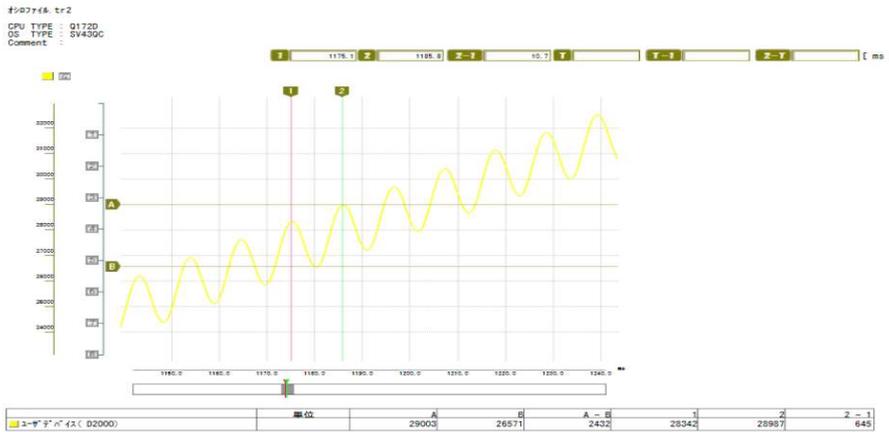


図 2-6-2(コアレスモーターテーブル拡大)

前項にて導入、設置したコアレスモーターの効果を確認するため、周波数アップの実験検証を行った。制御については、超微細高速ステッピング加工が実現可能な制御装置がないため、モーションコントローラーにより前進、後退を行う事とした。

<実験検証の結果>

コアレスモーターで周波数アップを実験検証



周波数 93.4 Hz を達成

図 2-6-3(コアレスモーターによるステッピング波形)

周波数 46.8 Hz と 93.4 Hz の切屑(SUS304)比較



図 2-6-4(周波数の違いによる切粉の差異)

図 2-6-3 に示すように周波数は目標として設定した80Hzを大きく上回る93.4Hzを達成すること事が出来、コア付きモーターでのステッピングに比べ2倍以上の周波数を達成。

また、写真 2-6-4 の比較の様に切粉の状態も、周波数の高さに反比例して細かく分断される事

が確認できた。

逆に言えば周波数により切粉の状態を制御する事が可能といえ、材質により切粉の形状を制御し、後処理が安易に出来る様になる。

単軸による実験検証で効果の確認、高周波数の実現が確認できたため、複数軸への応用を期待したいところであるが、残念ながらそれに対応するNC制御装置が存在せず、本研究開発としての検証は、単軸のみで終える事とした。

2-7 切削加工精度の向上

SUH660と同様に耐熱鋼としても良く知られるインコネルは、高強度で耐食性にも優れることから航空機関係等にも多く使用されている素材であるが、加工困難な難削材である。

そこで、開発工具とアカゲラ2号による超微細高速ステップング加工を用いることにより、前項と同様にその効果についての検証を行った。

以下に、インコネルの端面加工について、慣用切削加工（荒加工＋仕上加工）とステップング加工（図中では、“LFC”と略す）の比較実験データを示す。

<比較実験データ>

	現行工具交換前		LFC加工数(回)									
	荒	仕上	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
バリ1	0.179	0.000	0.015	0.010	0.015	0.022	0.022	0.013	0.0115	0.0014	0.0154	0.0118
バリ2	0.154	0.000	0.015	0.015	0.030	0.018	0.027	0.0116	0.0182	0.0055	0.0114	0.0255
バリ3	0.146	0.000	0.020	0.020	0.005	0.015	0.030	0.0138	0.0074	0.0025	0.0147	0.0067
バリ高さ平均	0.160	0.000	0.017	0.015	0.017	0.018	0.026	0.013	0.012	0.003	0.014	0.015
面粗さ1	9.560	6.570	2.632	2.973	3.613	3.263	3.742	4.080	4.168	5.285	4.705	5.194
面粗さ2	10.225	6.990	2.542	3.053	4.218	3.285	4.385	4.455	4.703	4.340	5.305	5.143
面粗さ3	9.738	6.720	2.510	3.487	4.163	3.392	3.690	4.105	4.646	4.905	4.406	5.168
面粗さ4	9.915	6.660	2.678	3.260	3.858	3.045	4.168	4.543	4.408	4.460	5.010	5.428
面粗さ5	10.370	6.670	2.657	3.115	4.090	3.300	3.110	4.645	4.377	5.178	4.825	5.235
面粗さ平均	9.962	6.722	2.604	3.178	3.988	3.257	3.819	4.366	4.460	4.834	4.850	5.234
平面度	0.004	0.002	0.004	0.004	0.005	0.003	0.004	0.003	0.005	0.004	0.005	0.006

図 2-7-1

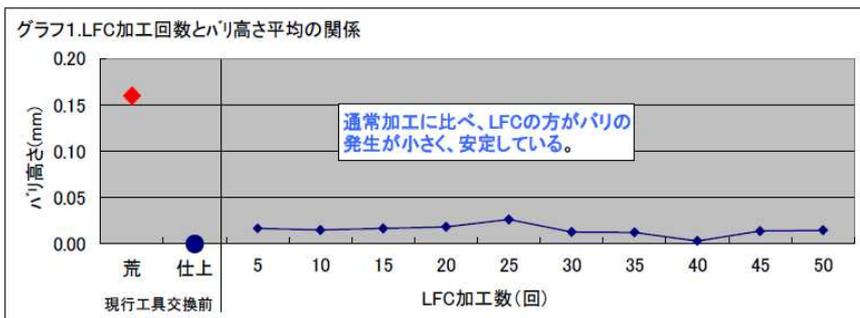


図 2-7-2

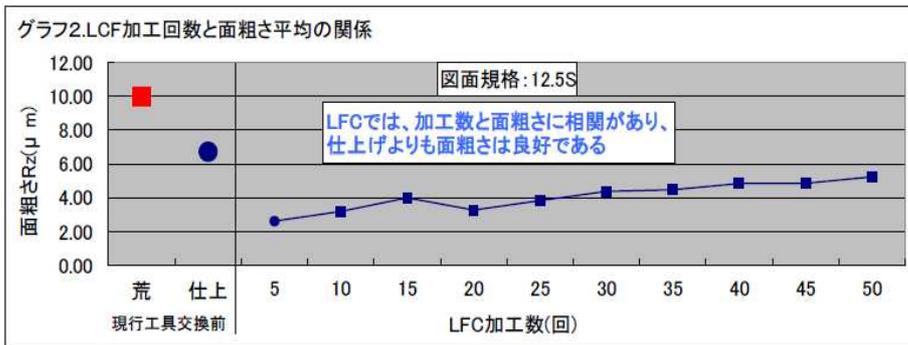


図 2-7-3

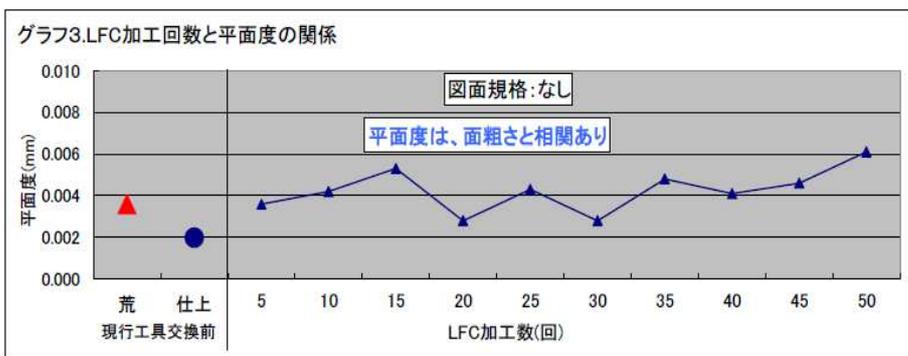


図 2-7-4

図 2-7-1~2-7-4 にてバリの発生については、現行の加工条件では、1度目の加工(荒)においては大きなバリが発生し、それを2度目の加工(仕上)により除去する加工内容となっている事が分かる。

一方、ステッピング加工の方は、1度目の加工にもかかわらず、50個の連続加工後もバリの発生を小さい範囲で抑制できることが確認できたが、慣用切削2度目の加工(仕上)と同様の小ささまでは達成できておらず、引き続き最適な刃物工具の選定、加工条件の抽出が必要である。

また、面粗さについては、現行の加工条件では、1度目の荒加工の状態では図面規格は達成できているものの、その工程能力の低さから安全率を見て2度目の仕上加工を行っているが、大幅に改善しているとは言い難い、一方ステッピング加工の方は、連続加工の過程で若干の数値悪化傾向にあるものの、終始図面規格値の半分以下を維持できており、十分にその効果が見られる。

一方、平面度については、ステッピング加工の方が、現行の加工条件の荒加工よりも悪い結果となった。

平面度については、面粗度とある程度の相関関係にあるが、ステッピング加工はその特性上、端面にうねりが生じることから平面度が悪くなっていると考えられる。

2-8 加工工具の超寿命化

2-9 加工稼働率の向上

<加工内容>

被削材: SUH660
素材径: $\phi 6.5$
加工長: 70mm
切込量: 0.5mm

<加工条件>

回転数: 3,470rpm
毎回転送り: 0.010mm
周波数: 41Hz
使用工具: CCGT0602HP-KC730

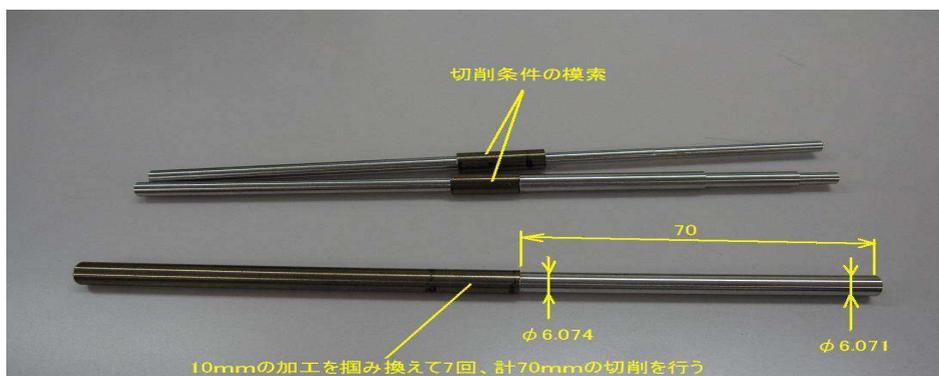


図 2-8-1

<連続加工後の工具摩耗>

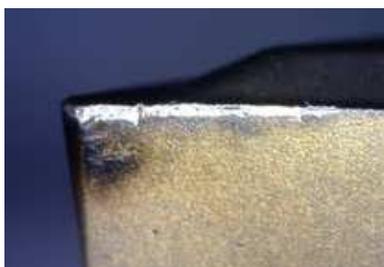


図 2-8-2 慣用工具



図 2-8-3 慣用工具

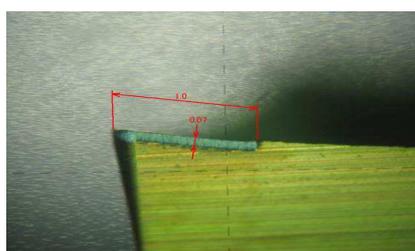


図 2-8-4 ステッピング用工具

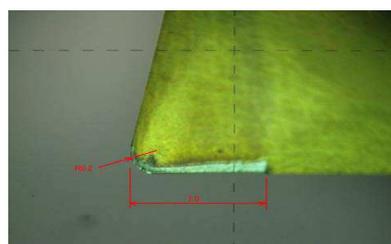


図 2-8-5 ステッピング用工具

写真 2-8-1 がテスト加工に使用した SUH660 の加工後で、写真 2-8-2、2-8-5 がこの時使用の工具の使用後状態で、明らかに慣用切削による通常工具とは摩耗の状態も良く、刃先の熱による焼けもなく、安定的な加工が可能と判断でき、これにより現状の慣用切削における加工時には、刃持ちが悪いため人が付きっきりで加工せねばならなかったものが、超微細高速ステッピング加工に専用開発工具を用いることにより、安定的な連続加工が可能となり、加工機の長時間無人運転加工が可能となり、量産性が実現されることが確認できた。

最終章 全体総括

本研究開発は、切削工具を微細ストロークかつ高速にステップ状に前進、後退(振動作用)させることにより、被削材からの切屑が分断されると同時に、加工熱が抑制される為、難削材に対しても容易に対応可能な切削加工機を実用化する事に取り組んだもので、ステップング運動の安定化、およびその有用性と効果の確認、加えて事業化に向けた実験検証を行う事に努めた。

平成23年度は、超微細高速ステップングを安定的かつ制御可能な状態で実現する為、リニアサーボモーターを使用して、その能力の検証と制御方法の確立を試み、実加工においてその効果を確認した。通常の慣用切削に比べて加工スピードを維持、向上させるためには、高いステップング数(周波数)で前進、後退(振動)させることが必須であり、まず単軸のみのステップング運動について、周波数30Hzが実現可能な制御条件の抽出を行った。その結果、46.875Hzの周波数を実現することが出来、また実加工においても、慣用切削では成し得ない条件で切屑を分断しながら安定加工できることが確認できた。

また、工作機械メーカーとタイアップし、2軸を振動させることが出来る超微細高速ステップング加工機(アカゲラ2号)を製作し、2軸を同期させての振動についても単軸の時と同じく、周波数46.875Hzを実現する事が出来た。このことにより、テーパ加工、R面加工においても、ステップング加工が可能となり、切屑も安定的に分断する事ができるようになった。

更に平成24年度については、事業化のために必須である事項の実験検証を進めた。具体的にはまず、難削材の代表格であるニッケル基合金にてステップング加工の効果の確認を行い、慣用切削に比べて十分優位性がある事が確認できた。更に連続加工を可能にするために、平成23年度製作のアカゲラ2号にワークの供給、排出機能を加える改造を行い、その後連続加工実験を行った。その結果、慣用切削に対し相当な優位性があることが出来、工作機械メーカーから見ても大変魅力のある技術としてその存在感を示すことが出来た。加えて、超微細高速ステップング加工は、周波数が加工時間に関係するため周波数を上げる事が必要で、その為には移動の為の出力が小さい物が有利なため、コアレスモータにてのステップングが必要と考えコアレスで何処まで周波数が上がるかのテストも実施し、目標の80Hzには到達した。

只ステップング運動は前進、後退を微細かつ高速で行うため、その動力源であるリニアモーター、およびガイドの摩耗及び劣化が通常の使用時間に比して加速的に進行する事が懸念されたが、これについても耐久試験を行なった結果、メーカーからも問題無しとの評価を得ることが出来た。

これまでの実験検証において、本研究開発のテーマである超微細高速ステップング加工の有用性が実証され、製作したアカゲラ2号についても2軸でのステップング加工が可能であり、十分に実用化できる目途が立ったと考えられ、今後は事業化に向け、工作機械メーカー、制御装置メーカー、刃物工具メーカーなどとタイアップし、具体的な取り組みを進めて行く予定である。

