

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「軽量化エンジン部品の切削加工における、高性能な刃具刃先仕上げ形状
の開発とその刃先形状を実現できる専用工作機械の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成25年 3月

委託者 中部経済産業局
委託先 公益財団法人 三重県産業支援センター

目次

第1章	研究開発の概要	3
	1. 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
	2. 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	4
	3. 成果概要	7
	4. 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章	本論	8
	1. 刃具寿命を延ばし、加工面精度と加工速度を向上させる 刃先形状の実験研究 (サブテーマ①)	8
	2. 刃先形状を高精度に仕上げる専用工作機械の開発 (サブテーマ②)	11
	3. 位置決め機構の開発 (サブテーマ③)	12
	4. 仕上げ治具・仕上げツールの開発 (サブテーマ④)	13
	5. 制御システムの開発 (サブテーマ⑤)	14
	6. 刃先形状の実証研究 (サブテーマ⑥)	15
第3章	全体総括	18
	1. 複数年の研究開発成果	18
	2. 研究開発後の課題・事業化展開	19

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1. 研究開発の背景・目的

軽量化に向けて、自動車メーカーは高 Si アルミニウム(以下アルミニウム合金*)を使用して車両全体の重量を減らそうとしてきた。ボディはもとより、エンジン部品もその対象となっている。シリンダーブロックやシリンダーヘッドは、エンジンの根幹をなす部分であるが、これらを鉄からアルミ合金に替えることで、軽量化に貢献している。アルミ合金は加工が困難であると云う難点もある。

このような背景の中で、自動車の軽量化に対応してエンジン部品の材質が切削困難な高 Si アルミニウムへ移行するなか、刃具の刃先仕上げ技術を、刃具寿命を伸ばし、加工の高速化を実現することが本研究の目的である。

1-2. 研究開発の目標

切削における加工精度、加工速度の向上及び刃具の長寿命化を実現するための要素には、

- ①刃具の刃先仕上げ形状の開発、②新素材の開発、③コーティング技術の開発がある。本研究開発は、①刃具の刃先仕上げ形状の開発に関するものである。

最適な刃先仕上げ形状に係る技術は理論的には提唱されてきているが、実証の面で確立されておらずそれを求める研究が急務必至であることは刃具メーカーの共通の認識である。

本研究を通じて、軽量化目的のエンジン部品の切削加工における刃具寿命向上、加工速度向上、刃具交換時間の削減を実現する。具体的目標として、刃具寿命を10%以上、加工速度を50%以上向上させて加工能率をあげ、軽量化対応部品の切削加工を革新する。

目標達成の基本的方策としては、まず刃先の仕上げ形状を、要求される任意形状に自在に製作できるチャンファー仕上げの機械と仕上げツールを開発し、次にこれらを用いて刃具の最適仕上げ形状を導き出すこととした。

エンジン部品の切削には、超硬合金製の刃具やダイヤモンドの刃具などが多用され、通常、刃具には高切削性と長寿命化の目的により、尖鋭な刃先に微細な(0.03~0.1mm 程度)丸み(以下チャンファーRと呼ぶ)をつけて仕上げる。刃先を仕上げる加工法は表1-1の通りであるが、本研究開発では次に述べ理由により「ブラシホーニング仕上げ方法」を採用し研究開発を進めることとした。

刃具の開発要素

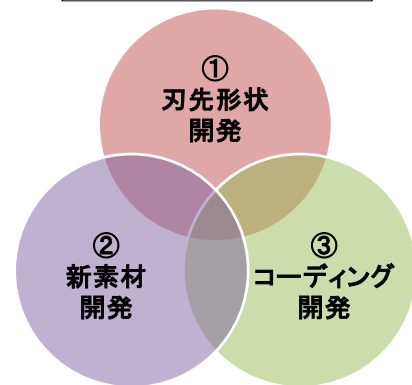


表1-1 刃先を仕上げる4つの方法と特徴

加工方法 \ 特徴	自動化の可能性	小型刃具への適用性	複雑刃具への適用性	仕上げ処理量の制御性	仕上げ処理の生産性
ブラシホーニング仕上げ	○	○	○	○	小
ネガランド仕上げ	○	×	×	○	大
バレル仕上げ	×	○	○	×	小
ブラスト仕上げ	○	○	○	×	小

「ブラシホーニング仕上げ方法」は、自動化対応性・小形や複雑形状化の対応性・仕上げ量の制御などの観点で優れた特徴があり、当社の固有技術を生かすことができるという理由からこれを選択した。

本研究開発の目標値は、刃具寿命10%以上の向上と、加工速度50%の向上である。この目標を達成するためのサブテーマ(方策)及びサブテーマごとの目標は下表に示すとおりである。なおここでいう“加工速度”とは、切削加工能率と類似の概念であり、単位時間当たりの被削材の除去体積の大きい場合を加工速度が大きいものとする。

表 1-2 複数年の研究開発の目標

研究項目	(サブテーマ)目標達成の方策	技術的目標	
		指標	目標値
1. 刃具刃先の実験研究	(サブテーマ ①) 刃具寿命を延ばし、加工面精度と加工速度を向上できる刃先形状の実験研究	刃具寿命向上 加工速度向上	10%以上 50%以上
2. 専用工作機械、位置決め治具、仕上げ治具・ツール及び制御法等の開発	(サブテーマ ②) 刃先形状を最適に仕上げる専用工作機械(ホーニング仕上げ機)の開発	4軸制御能力	チャンファー比とチャンファーRが加工可能
		良品率	95%以上
		生産性 (サイクルタイム)	達成率 100%
	(サブテーマ ③) 位置決め機構の開発	クランプ能力 (小形・複雑形状に対応)	治具飛び出し無きこと
		刃具の外観	欠け、傷等が無きこと
	(サブテーマ ④) 仕上げ治具・仕上げツールの開発	仕上げ精度	要求値達成
		耐久性	刃具 15 万個以上/セット
		経済性	3 円以内/個(ツール費)
(サブテーマ ⑤) 刃先仕上げの複雑な動作に対応する制御システムの構築	仕上げ精度 (X,Y,Z,A 軸)	制御指令値と移動距離値の誤差を最小化	
	生産性 (サイクルタイム)	達成率 100%	
3. 刃先形状の実証研究	(サブテーマ ⑥) データ分析、シミュレーション、最適刃先形状の実証	刃先形状確立	刃具寿命向上の実証 加工速度向上の実証

2. 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

2-1. 研究実施機関

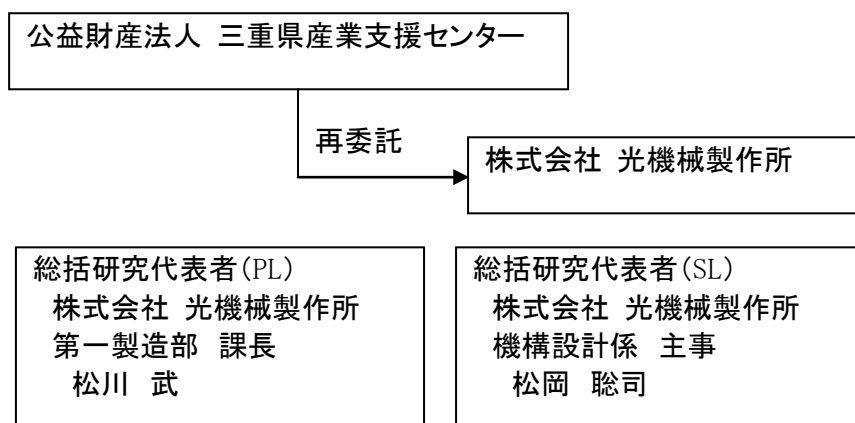
研究実施機関 (機関名)	代表者 役職氏名	連絡先
株式会社光機械製作所	代表取締役社長 西岡 慶子	① 〒514-0112 三重県津市一身田中野 8-1 ② 松川 武 ③ Tel:059-227-5511 ④ Fax:059-227-5514 ⑤ E-mail アドレス matsukawa-t@hikarikikai.co.jp

2-2. アドバイザー

機関名又は氏名	所在地又は住所	代表者等
住友電工ハートメタル株式会社	〒664-0016 伊丹市昆陽北 1-1-1	① 湊 嘉洋 代表取締役社長 ② 田中 克享 技術開発部 部長 ③ 072-771-3129
三重大学	〒514-8507 津市栗真町屋町 1577	① 内田 淳正 学長 ② 牧清 二郎 工学部教授 中西 栄徳 助教 ③ 059-231-9379
三重県工業研究所	〒514-0819 津市高茶屋 5-5-45	① 河合 真 所長 ② 増井 孝実 主任研究員 ③ 059-231-9379
株式会社 豊田自動織機 自動車事業本部 エンジン事業部 生産技術部兼 鑄造技術室	〒447-8507 愛知県碧南市浜町 3 番地	① エンジン事業部 生産技術部 主査 兼鑄造技術室室長 小泉 義樹 ② 0569-26-4841

2-3. 研究体制 研究組織及び管理体制

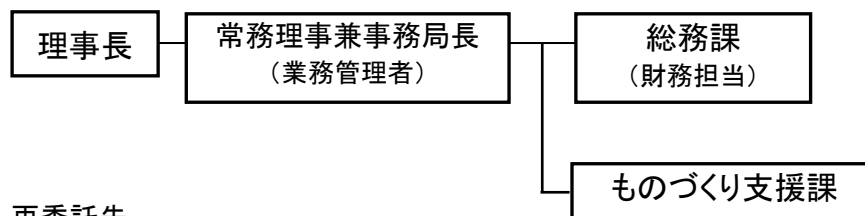
(1) 研究組織



(2) 管理体制

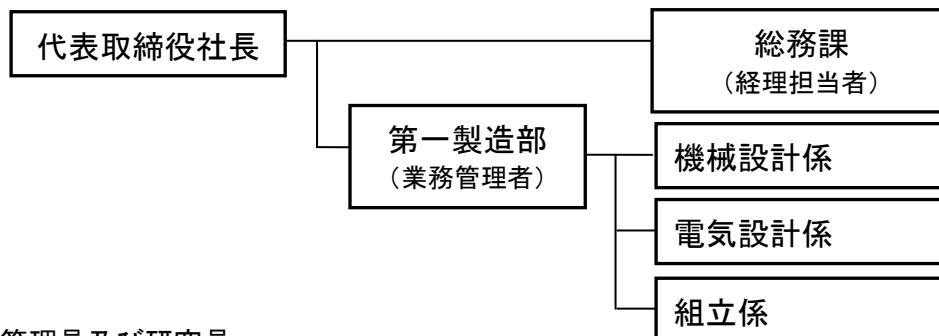
① 事業管理機関

公益財団法人三重県産業支援センター



② 再委託先

株式会社光機械製作所



(3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人三重県産業支援センター

管理員

氏名	所属・役職
片山 良夫	常務理事兼事務局長
岡本 美千代	総務課(財務担当)課長補佐心得
村上 和美	ものづくり支援課・課長
中津 平一	ものづくり支援課・課長補佐
藤原 基芳	ものづくり支援課
菊田 繁樹	ものづくり支援課
鍵谷 清作	ものづくり支援課

【再委託先】

研究員

株式会社光機械製作所

氏名	所属・役職
松川 武	第一製造部 課長
松岡 聡司	機械設計係 主事
門 正次	機械設計係 参事
中本 友子	機械設計係 係員
柳本 繁晃	電気設計係 係員
方波見 康清	組立係 係長
米川 健太	組立係 係員
澤山 和弥	機械設計係 係員
森川 正人	機械設計係 係員
三崎 有紗	機械設計係 係員

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人三重県産業支援センター

(経理担当者) 総務課(財務担当)課長補佐心得 岡本 美千代

(業務管理者) 常務理事兼事務局長 片山 良夫

(再委託先)

株式会社光機械製作所

(経理担当者) 総務課 前田 敦美

(業務管理者) 第一製造部 課長 松川 武

3. 成果の概要

総委託事業期間の研究開発の成果を表 1-3 に示す。

研究項目	サブテーマ	技術的目標の達成値		成果
		指標	目標値(実績)	
1. 刃具刃先の実験研究	サブテーマ① 刃具寿命を延ばし、加工面精度と加工能率を向上させる刃先形状を研究開発	刃具寿命向上 切削能率向上	125~175%向上 50%以上向上	1. 刃具寿命を延ばす刃先ホーニング形状の特定完了。 2. 刃具寿命工場10%、切削能率向上50%達成。 3. 切削負荷に関する各種データの収集、分析完了。 4. 加工速度が面粗さと硬度に与える影響がないことを確認完了
2. 専用工作機械、位置決め治具、仕上げ治具・ツール、及び制御法等の開発	サブテーマ② 刃先形状を最適に仕上げる工作機械(ホーニング仕上げ機)の開発	4軸制御稼動	チャンファー比とチャンファーRが加工可能	刃先形状を最適に仕上げる工作機械:ホーニング仕上げ機の開発完了。 4軸数値制御により刃具の刃先ホーニング比率を設定し仕上げを行うことが出来る機能開発
		良品率	99.5%以上	製品の良品率:99.5%
		生産性	20秒/サイクル	企画サイクルタイムに対する達成率100%
		小形・複雑形状に対応するクランプ性能	全数確実に保持でき、治具からの飛び出しなどが無いこと	小型刃具φ2.4孔有刃具用クランプ治具の開発完了。 治具の刃具クランプ後治具からのワークの飛び出し"0"を達成。
	サブテーマ④ 仕上げ治具・仕上げツールの研究開発	刃具の外観(欠け、傷等)	欠け、傷等の原因にならないこと	刃具の刃先周囲の欠け、損傷なし。
		仕上げ精度	企画要求精度	刃先ホーニング比率1:1、2:1、3:1、4:1、R形状0.03mmを達成。
		経済性	ツール費:3円以内/個	ブラシコスト0.15円/個。直径で30mm、生産可能な数量は225,000個を達成。
		耐久性	刃具15万個/月・セット以上の生産に対応	25d*20h**60min*60sec/20sec*2pcs*85%=153,000pcs 機能達成
	サブテーマ⑤ 刃先仕上げの複雑な動作に対応する制御システムの構築	仕上げ精度	数値制御指令に対する追従性	X軸、Y軸0.001mm、Z軸0.003mm、A軸0.08°の数値制御指令に対する追従性を確認、従来機に対し、より高精度な刃先仕上げを可能にした。
		サイクルタイム	企画サイクルタイムに対する達成率100%	1サイクル=20秒以下を達成。
3. データの収集、分析、理論構築	サブテーマ⑥ データ分析、理論づけ、最適な刃先形状の割出を行う。	刃先形状確立	最適な刃先形状	刃先ホーニング比率1:1、2:1、3:1、4:1、R形状0.03mmについて刃具寿命、切削応力、摩耗、面精度等の関連とデータ分析、理論づけを完了。

4. 当該研究開発の連絡窓口

株式会社光機械製作所

(業務管理者)

第一製造部 課長

松川 武

第2章 本論

1. 刃具寿命を延ばし、加工面精度と加工速度を向上させる刃先形状の実験研究

(サブテーマ①)

刃具寿命を延ばし、加工速度を向上させる刃先形状をおおよそ絞り込んだ。刃具寿命と刃先ホーニング形状の関係、そして加工速度と刃先ホーニング形状の関係を把握すべく、ホーニング形状(チャンファー比率とチャンファーR)を数種類設定して切削実験を行った。

1-1. 刃具寿命を向上させる実験研究

1-1-1. 緒論

刃具寿命と刃先ホーニング形状の関係を把握すべく、刃先チャンファー比率を数種類設定して切削実験を行い、工具寿命の主要因である刃先の逃げ面摩耗の量の観察を行った。

1-1-2. 研究開発の方法

1). 刃具の試作

刃具寿命向上を図るために刃先のタイプを4種類設定し、刃先ホーニング形状の寸法を表 1-1-1 の様に定めた。

刃先のタイプ	チャンファー比率(a:b)	a すくい面 寸法(mm)	b 逃げ面 寸法(mm)	角度 (度)	チャンファーR
1	1:1	0.04±0.01	0.04	45°	0.01~0.03
2	2:1	0.04±0.01	0.02	26.6°	0.01~0.03
3	3:1	0.04±0.01	0.013	18.4°	0.01~0.03
4	4:1	0.04±0.01	0.01	14°	0.01~0.03

・インサートの種類: 刃先ホーニング加工に用いたインサート(刃具)は、表 1-1-2 に示す市販品を採用した。

・刃具の工作装置: 目標とする刃先形状に加工するために、本委託事業費で導入した「専用工作機械(ホーニング仕上げ機)」を使用し、表 1-1-1 に示す寸法公差内に加工した。

・観察装置: 微細な寸法を測定評価するために、本委託事業費で導入した「専用光学式3次元顕微鏡装置」を導入し、切削実験の前と後で刃先形状の観察と形状計測を行った。

分類	工具型番
A	SEET13T3AGSN-N, A30N
B	SEET13T4AGSN-G, EH250
C	SEET13T5AGFN-L, H1

2). 切削実験の方法: 被削材・装置・治具など

試作した4タイプの刃先ホーニング形状を有する刃具で、Al-Si 材のエンジンプロックを切削し、切削回数により工具摩耗幅がどのように進展するのかを観察し計測した。

逃げ面摩耗幅を測定する度にインサートを取り外すと、装着具合の差によって測定結果のバラツキが増えると考え、図 1-1-1 に示す様な治具を作製し、その治具にフェイスミルを取り付けて「専用光学式3次元顕微鏡装置」で観察した。

工具の寿命判定は、逃げ面の摩耗幅 VB が 150 μm を超えた時点をも寿命とした。

・切削条件: 1,000 m/min、送り: 0.3 mm/tooth、切り込み: 1.5 mm

・被削材: Al-Si 材のエンジンプロック

・切削加工装置: マシニングセンタ(ヤマザキマザック社製、VCN410A)

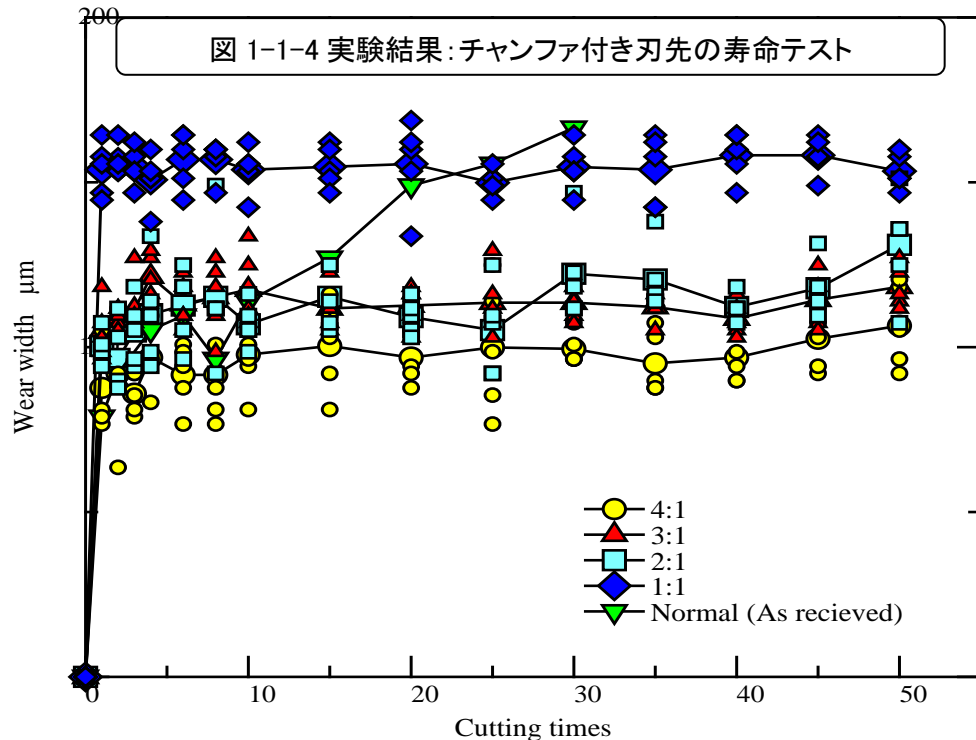
・刃具の装着方法: インサート、カッター5 枚刃のフェイスミルを用いた(図 1-1-2)。

・切削方向: カッターパスは図 1-1-3 に示すように、左から右へ工具を3 回通過させて被削材の面全体を加工した。



1-1-3. 切削実験の成果

チャンファー比率が4:1、3:1、2:1、1:1の刃先の摩耗量変化を図1-1-4に示す。ほとんどの場合は、切削実験の結果50回の切削をおこなっても逃げ面の摩耗幅が150 μ mに達しなかった。なお、図中の“逆 Δ Normal”は、刃先のチャンファー加工を施さない工具であり、30回加工時に摩耗が150 μ mとなった時点をも寿命とした。



1-1-4. 結論

刃先チャンファー比率が、1:1 \rightarrow 2:1 \rightarrow 3:1 \rightarrow 4:1の順に、刃具の逃げ面摩耗量が少なくなる、つまり刃具の寿命が延びるという結果を得た。

1-2. 加工速度を向上させる実験研究

1-2-1. 緒論

「1-1. 刃具寿命を向上させる実験研究」の結論を踏まえ、当初想定した中でベストであった刃先ホーニング比率が4:1の刃具を採用し、加工速度向上を目的とした切削実験を行った。ここで言う加工速度とは、単位時間当たりの被削材の除去体積の大きさを意味し、その主要因である「切削速度」と「送り速度」をパラメータとして切削実験を行った。

1-2-2. 実験の方法

1). 切削条件の設定

本研究開発の主目標である加工速度50%向上は、「切削時の単位時間

切削条件	標準	b)速度50%up	a)送り50%up	c)速度22%up 送り23%up
切削速度 V_c (m/min)	471	707	471	575
回転当たりの送り f_n (mm/rev)	1.5	1.5	2.25	1.845
1刃当たりの送り f_z (mm/tooth)	0.3	0.3	0.45	0.369
回転数 n (min^{-1})	1500	2250	1500	1830
1分間当たりのテーブル送り V_f (mm/min)	2250	3375	3375	3376

あたりのテーブル送り量 50%向上」に相当することから、切削速度と送り速度に展開した。「加工速度 50%向上」の状態、つまり「切削時の単位時間あたりのテーブル送り量 50%向上」の状態が同じになるように、切削速度と送り速度を組み合わせ、表 1-2-1 に示す a)、b)、c) の 3 種類の切削条件を設定した。

2). 実験に用いた刃具の種類、及び実験方法

ここでは、刃先チャンファー比率が4:1の刃具と、比較対象として刃先ホーニング加工を行っていない刃具を用いた。

切削実験の方法はすでに述べた「1-1. 刃具寿命を向上させる実験研究」と同じとし、刃具の寿命となる磨耗量を 150[μm]と規定し、寿命に至るまでの加工数と磨耗量を観察し計測した。

1-2-3. 切削実験の成果

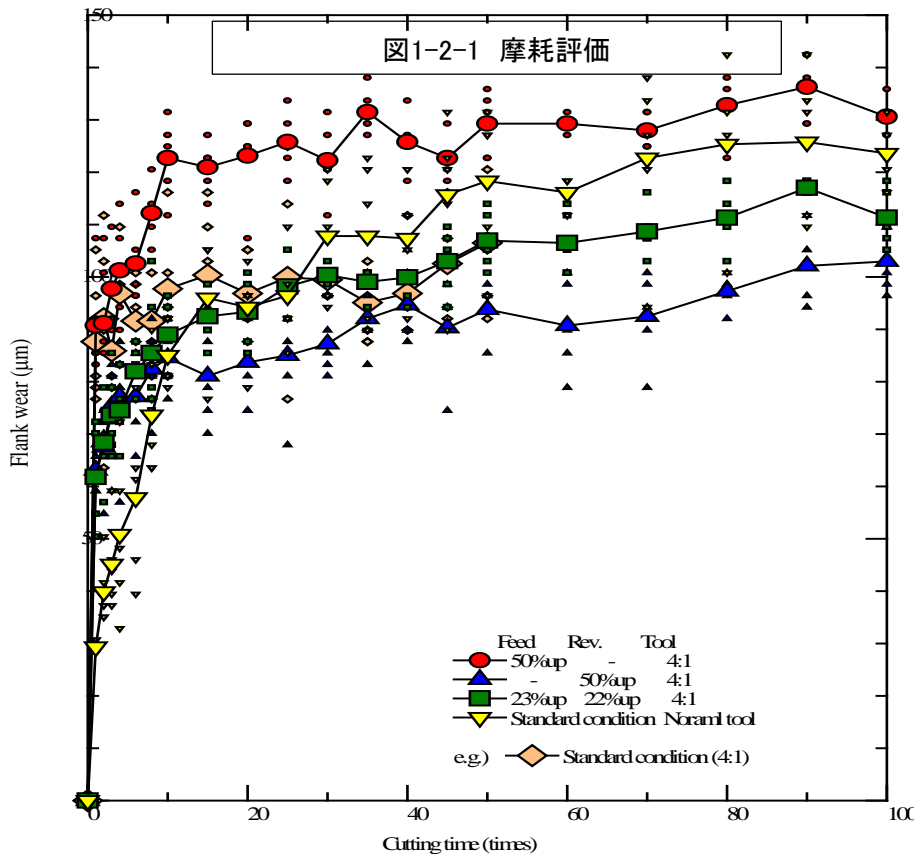
加工速度 50 向上となる3つの切削条件の違いによる、刃具寿命の観察結果を表 1-2-2 に示す。そして、切削条件の違いによる刃先磨耗量の評価結果を図 1-2-1 に示す。

切削条件	実験内容	実験結果
a)	切削速度を一定にして送り速度を増速	1刃当たりの送り速度を 50%増加すると、標準の刃具に比べて磨耗量が 8%程度多くなった。
b)	切削速度を増速して送り速度を一定	周速(刃具の回転速度)を 50%増加すると磨耗量が 25%程度少なくなった。
c)	切削速度と送り速度の両方を増速	送り 23%、周速 22%増加すると磨耗量が 15%程度少なくなった。

刃先ホーニング比率が4:1の刃具は、切削速度を50%増速した場合【図1-2-1の△(青色塗色)】が最も磨耗量が少なく刃具寿命が長い結果が得られた。

加工速度を50%増加させた場合、磨耗量の減少の割合から寿命の延びを試算することで次の事がいえる。

- ・ 切削速度を50%増加させた場合は、25%の寿命の延びが見込める。
- ・ 送り23%、切削速度22%増加させた場合は15%の寿命の延びが見込める。



1-2-4. 結論

刃先ホーニング加工の効果を確認するために、刃先ホーニング比率が4:1の刃具と刃先チャンファー加工を行っていない刃具【図 1-2-1 逆△(黄色塗色)】を比較した結果、次の事が言える。

摩耗量の減少の割合から寿命の延びを計算により推定して、

- ・切削速度を50%増加させた場合には、25%摩耗が減少する。これは切削回数にして175%の寿命の延びに相当する。
- ・送り23%、切削速度22%増加させた場合には、15%摩耗が減少する。このことは切削回数にして125%の寿命の延びに相当する。

つまり、刃先ホーニング比率が4:1(ホーニング R0.03)刃具は、加工速度を50%増加させた状態でも、刃具寿命が125%~175%向上すると推定できた。

2. 刃先形状を高精度に仕上げる専用工作機械の開発(サブテーマ②)

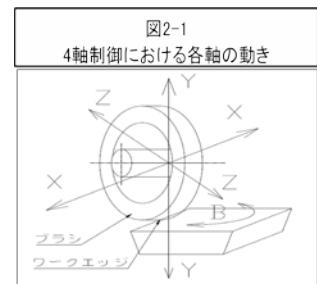
2-1. 緒論

サブテーマ①の刃先形状の実験研究を行うに当たって、刃先ホーニング形状を正確に加工するための専用工作機械が必須であり、さらには試作刃具を確実にクランプする機構、ブラシホーニングするためのツール、加えて刃先先端へのブラシ接触を高い精度で制御可能なシステムが必要であった。ここから述べるサブテーマ②~⑤はそのための一連の開発である。まず、専用工作機械の開発について述べる。

2-2. 開発方法

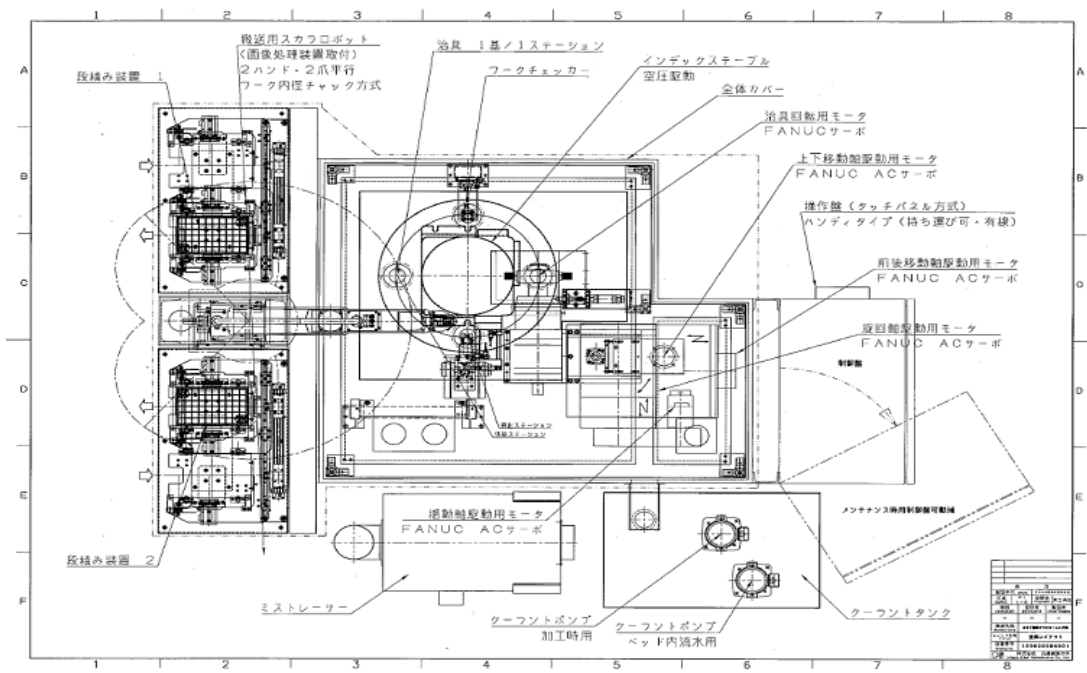
刃先ホーニング形状を正確に加工するために、4軸NC制御を採用してより複雑な動きを可能にした。4軸とは、刃先形状に倣ったツールの上下運動、ツールの前後運動、ツールの左右運動、治具の回転のことである。この4軸制御により、三次元運動を要求される複雑な刃具刃先の仕上げを可能にした。専用工作機械における各軸の動きは「図 2-1」に示す。

なお、この図は秘匿のために意図的に不鮮明とした。



2-3. 研究開発の成果

4軸NC制御を採用してより複雑な動きを可能にした専用工作機械の外観を下図に示す。なお、この図は秘匿のために意図的に不鮮明とした。



2-4. 結論

開発した専用工作機械が本研究開発で求められる微細な刃先形状を試作可能な仕様であることを以下の項目で評価した。

1) 刃先ホーニング形状の加工精度

試作した5個の各刃具において4コーナー(図2-2)をの刃先を計測し、チャンファーR0.01~R0.03、そして、チャンファー比率が1:1、2:1、3:1、4:1に仕上がること(図2-3)を確認した。

a、bの寸法バラつきが0.01mm以内で加工が出来ることを確認した。(XYZA軸繰り返しテストも実施)

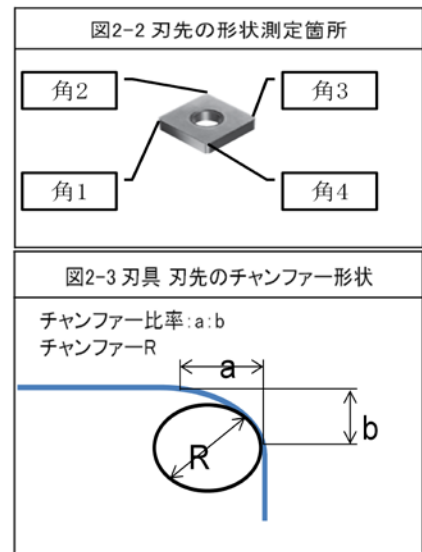
2) 良品率の確認

4軸制御稼働で良品率99.5%以上確保出来ることを確認した。(1,000サイクルでミス0であった)

3) 生産性の確認

企画時の目論見であったサイクルタイムは達成率100%であった。(サイクルタイム20秒/2個)

以上の事から、この専用工作機械が刃先ホーニング形状(チャンファー比率とチャンファーR)をパラメータとした切削実験に使用可能であると判断した。



3. 位置決め機構の開発 (サブテーマ③)

3-1. 緒論

従来のブラシホーニング仕上げ機における位置決め方法は、刃具の外周形状に沿った凹型治具に刃具を置くだけの構造であり、飛び出しやガタツキの問題があった。本研究開発で要求される刃先ホーニング形状の正確な寸法を保証するには、ブラシホーニング加工時に刃具を確実に保持する新たな手段が必要であった。

このサブテーマでは、孔有りタイプの刃具(図3-1)を位置決めする機構の開発を行ったので、以下でその成果などを述べる。

孔有りタイプ		孔無しタイプ
シンプル形状	複雑形状	
		

3-2. 開発方法

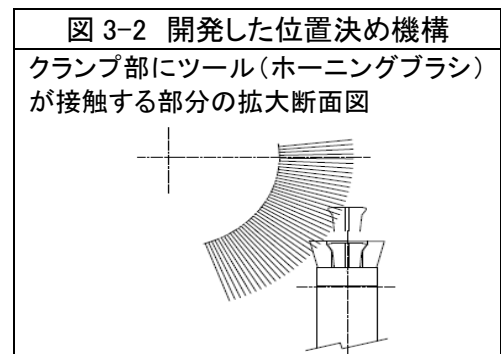
目的達成のために、刃具中央にある孔(一般的にはΦ2.4mm)を利用する高精度コレットチャック方式を採用して、独自の保持機構を開発して実機で動作確認を行った。

3-3. 研究開発の成果

加工中に刃具を確実に保持できることで、刃先ホーニング形状の正確な寸法を保証した刃具を試作可能とした。

3-4. 結論

本研究開発における試作のみならず、1,000個連続自動加工稼働テストでクランプ不良による刃具の飛び出しが無い事を確認し、事業化段階でも採用可能な機構と言えよう。



4. 仕上げ治具・仕上げツールの開発（サブテーマ④）

4-1. 仕上げ治具(穴なし刃具用治具)の開発

4-1-1. 緒論(仕上げ治具の開発)

従来の位置決め方法は、本研究開発には適しないことは先に述べた通りであるが、加えて「孔無しタイプ刃具」の試作も可能にする必要があった。また事業化を考慮すると、このタイプの刃具需要が全体の10%程度あることが判明したので、本委託事業費による自社製作で穴なし刃具用治具を開発した。

4-1-2. 研究開発方法

1) 孔無し刃具のクランプ方法の開発

磁気の吸着力を利用した機構を選択し、吸着のON/OFFを操作できる機構の治具を開発した。

OFF時にエアブローに依り研削粉と砥粒をブローアウト清掃する方法で、不具合要因となる粉や粒の堆積を防止する構造とした。

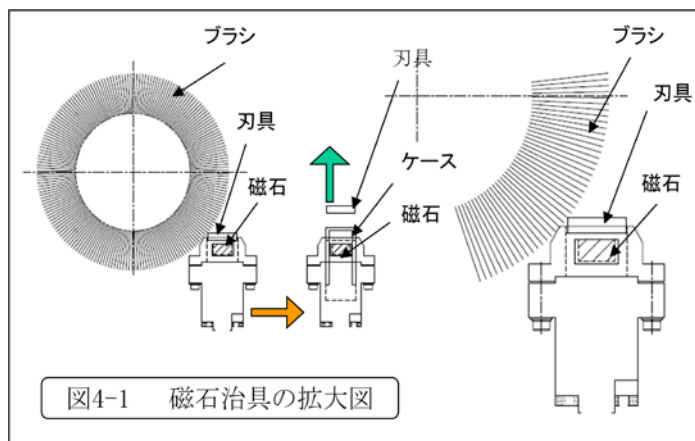


図4-1 磁石治具の拡大図

2) 動作確認実験

確実に刃具をクランプ可能であること、また治具からの刃具の飛び出し等の無い安定した位置決め機構であることを確認した。

3) 残留磁気の確認

磁気吸着を利用した為、脱磁装置を用いて残留磁気の低減実験を行なって、刃具に残留した磁気が実用上支障のないレベルであることを確認した。

4-1-3. 研究開発の成果

孔無しタイプ刃具についても、刃先ホーニング形状の正確な寸法を保証できる刃具の試作を可能とした。

4-1-4. 結論

連続自動加工稼働テストを行った結果、クランプ不良による刃具の飛び出しが無い事を確認し、事業化段階でも採用可能な機構を完成した。

4-2. 仕上げツール(ダイヤモンドブラシ)の開発(サブテーマ④)

4-2-1. 緒論

市販の仕上げツールを調査した結果、価格が非常に高くして刃具1個当たりの単価を押し上げることが判明したので、経済性と耐久性に優れた仕上げツール(ダイヤモンドブラシ)の評価を行ったので報告する。

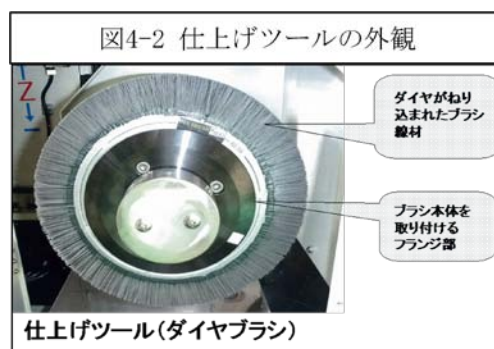
4-2-2. 開発方法

刃先ホーニング形状の仕上がり特性にはブラシの仕様に大きく左右される。(表 4-1)

ブラシの仕様		刃先への要因
1	ブラシの毛の材質、太さ、長さ	ホーニングR仕上げの滑らかさに影響する
2	ダイヤモンドの砥粒の粒度、密度	面粗さ、仕上げ速度に影響する
3	ブラシの径、幅	刃先形状の仕上がりの均一性に影響する

刃具刃先の仕上がり要因を考慮していくつかの仕上げツールを選択してホーニング仕上げ実験を行った。その結果、砥粒の粒度#400番のブラシは仕上げ加工がスムーズであること、#600番は加工時間が3倍かかること、#800番と#1000番のブラシでは本研究開発が求める精度の仕上げが困難であるという実験結果を得た。

またブラシのコストに関して、ブラシ1個当たりのコストは、当初のF社、I社に対してN社は1/5～1/4のコストダウンが図れることが明らかになった。



4-2-3. 研究開発の成果

ダイヤモンドブラシの耐久性を評価した結果、1mm 磨耗する間に7,500個分の加工を行うことができた。また、今回選定したブラシの限界磨耗量をブラシ直径で30mmとすると、生産可能な数量は225,000個となり0.15円/個となり、事業化においても実用に十分満足する結果を得た。

4-2-4. 結論

本研究開発において試作をする際に有効なツールを選択することができた。また事業化ステージにおいてもこのツール仕様の採用の可能性を得た。

5. 制御システムの開発(サブテーマ⑤)

5-1. 緒論

サブテーマ①の刃先形状の実験研究を行うに当たって、刃先ホーニング形状を正確に加工して試作するためには、刃先先端へのブラシ接触を高い精度で制御するためのシステムが必要であった。このサブテーマでは指令信号に対してリアルタイムに応答する制御システムを構築し、専用工作機械による刃具試作を可能としたのでその内容を以下に述べる。

5-2. 研究開発方法

- 1) 専用工作機械で想定している動作範囲内で加工制御が可能であることを確認し、個々の制御指令に対する動作・位置認識・フィードバックといったプロセスの動作確認を行った。
- 2) 4軸 NC 制御により3次元ウェーブ刃具形状の刃先に対して、ホーニング比率が均一に加工可能な制御プログラムを開発した。

5-3. 研究開発の成果

- 1) 数値制御指令に対しての機械追従性の正確さを表5-1に従って計測した結果、X軸:0.005[mm]以下、Y軸:0.005[mm]以下、Z軸:0.005[mm]以下、A軸:0.001[度]以下の精度で機械追従能力があることを確認した。
- 2) サイクルタイムが20sec以下/2個であること、また0.05[mm]以上の欠けが無く、かつ刃先部に傷の無いことを確認した。

項目	機械の最大動作範囲 (mm、度)	動作範囲の許容誤差 (mm、度)	位置精度の保証値 (μ 、度)
1 X軸	150	0.005	$\pm 2.5/1000$
2 Y軸	60	0.005	$\pm 2.5/1000$
3 Z軸	150	0.005	$\pm 2.5/1000$
4 A軸	360°	0.001°	$\pm 5/10000^\circ$

5-4. 結論

専用工作機械の仕上げ精度・数値制御指令に対する追従性を確認し、刃先ホーニング形状を正確に加工できる状態とした。

6. 刃先形状の実証研究（サブテーマ⑥）

「サブテーマ①刃具刃先の実験研究」の結論として、次の2つの結論を得た。

1. 刃先チャンファー比率が1:1→2:1→3:1→4:1の順に、刃具の逃げ面摩耗量が少なくなる、つまり刃具の寿命が延びる。
2. 刃先ホーニング比率が4:1の刃具は、加工速度を50%増加させた条件でも、刃具寿命が125%～175%向上する。

これらのことについて、シミュレーションによるモデル分析で理論的解釈を行い考察したので以下に述べる。ここでは、刃具寿命向上と加工速度向上に分けて考察することとした。

6-1. 刃具寿命向上の実証研究

6-1-1. 緒論

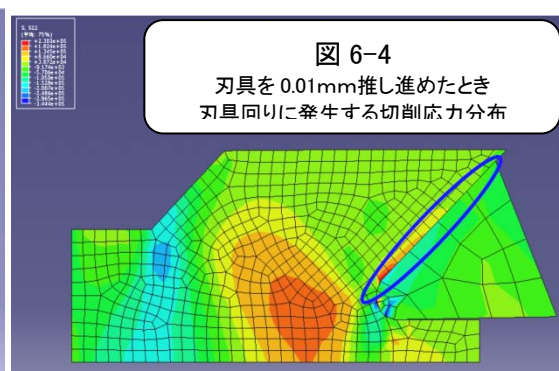
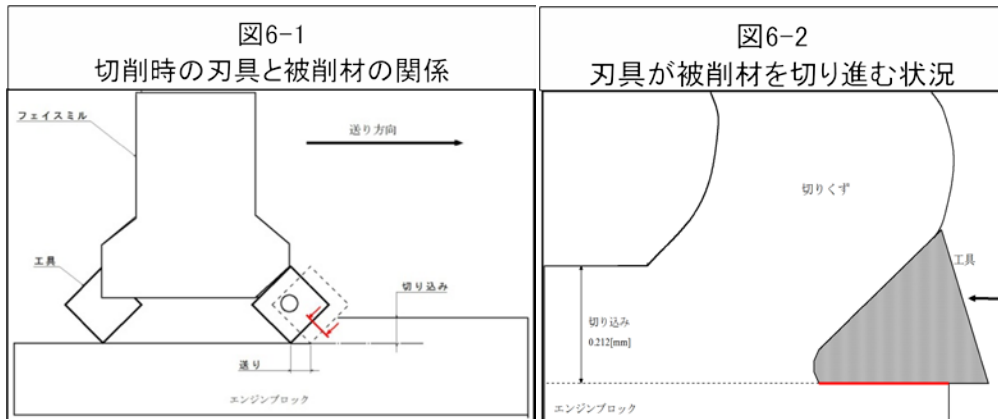
「1-1. 刃具寿命を向上させる実験研究」で得た結論、つまり刃先チャンファー比率が1:1→2:1→3:1→4:1の順に、刃具の逃げ面摩耗量が少なくなるという実験結果を、FEM(有限要素法 以下 FEM)のシミュレーションによりモデル分析を行って、切削加工のどのような要因が寄与するのかを究明した。

6-1-2. 実験方法 < モデル分析による切削応力の解析方法

分析モデルとして次に様に考えた。切削においては、工具には主分力および背分力が作用する。特に背分力は工具を材料に押しつける方向に働き逃げ面摩耗の要因になる。刃先の先端通過直後から被削材の新生面が上方に盛り上がり(回復し)工具逃げ面と接触し摩耗が進展すると考えた。

シミュレーション計算結果は、図6-2の赤線で示した新生面において工具通過後に弾性回復すると考え、工具ではなく図6-2に赤線で示した新生面に上方の変位を与える事にした。すくい面近傍での応力の平均およびそれらの比を元に新生面に与えたy方向の変位を表6-1に示す。

図6-5から図6-8に計算結果を示す。各図はy方向の応力の大きさを示しており、工具逃げ面側においてy方向の荷重が分布している範囲が1:1から4:1になるにつれて小さくなっているため、4:1の工具では逃げ面摩耗量の進展が遅くなると考えられる。



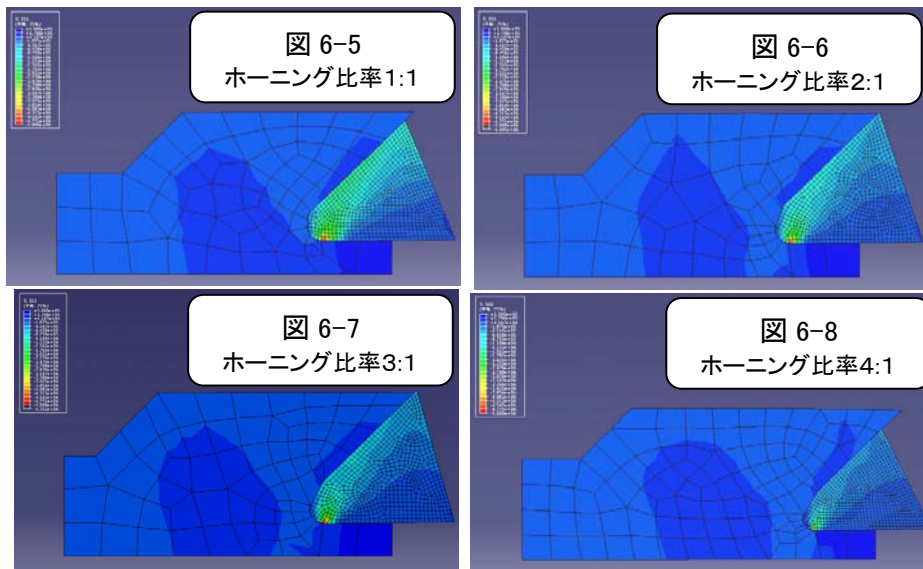


表 6-1 すくい面近傍での応力の平均 y 方向の変位

チャンファー比率	1:1	2:1	3:1	4:1
荷重(平均)	58452.26	43217.8	40433.07	20241.2
比	2.89	2.14	2.00	1.00
変位 [mm]	0.00289	0.00214	0.00200	0.00100

6-1-3. モデル分析による成果

本解析とチャンファー付き刃具の刃具寿命テストの実験結果が同じ傾向であり、チャンファー比率が1:1→2:1→3:1→4:1になるに従って刃具の逃げ面摩耗が少なくなる。つまり、刃先チャンファー比率 4:1、チャンファーR0.03 の刃具寿命が延びたと考えられる。

6-1-4. モデル分析による結果

「1-1. 刃具寿命を向上させる実験研究」の結果を、「6-1. 刃具寿命向上の実証研究」でモデル分析した結果、刃先チャンファー比率が 1:1 から 4:1 に小さくなるにつれて背分力が小さくなり、逃げ面摩耗が小さくなることで刃具寿命が長くなるという、理論的解釈が可能となった。

6-2. 加工速度向上の実証研究

6-2-1. 緒論

「1-2. 加工速度を向上させる実験研究」で得た結論、つまり刃先ホーニング比率が 4:1 (ホーニング R0.03) 刃具は、加工速度を 50%増加させた状態でも、刃具寿命が 125%~175%向上すると推定できる、という実験結果を、FEM(有限要素法 以下 FEM)のシミュレーションによるモデル分析で切削応力の解析を行った。

6-2-2. モデル分析による解析方法。

分析モデルとして次に様に考えた。まず、刃具が材料を切削する時の被削材の受ける応力と変位を図 6-8、図 6-9、図 6-10 に示す。

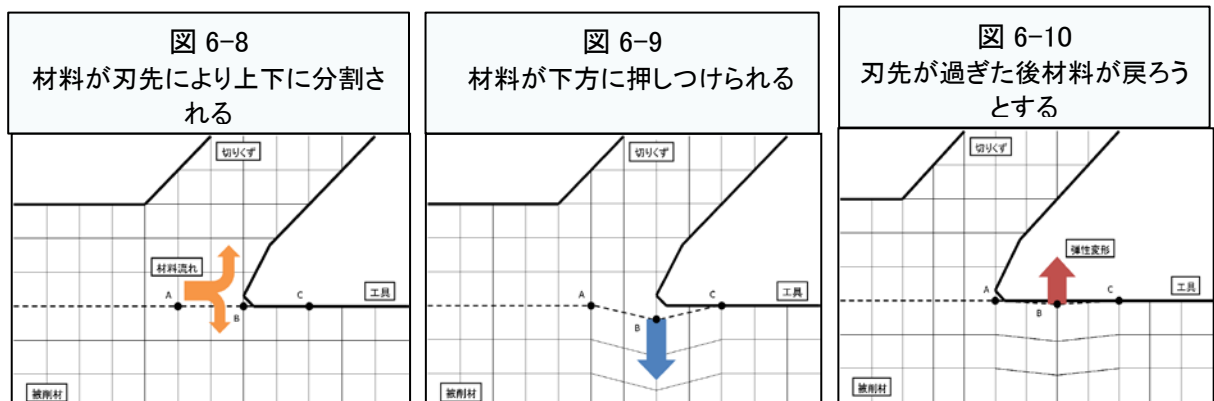
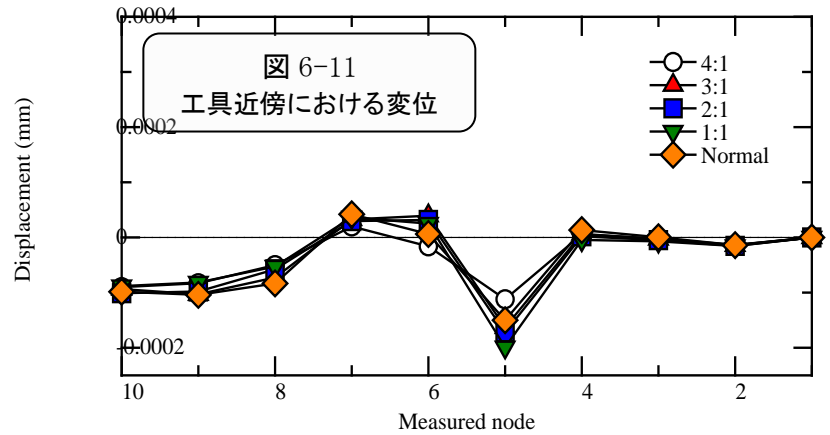


図 6-8 に示すように、切削中に工具前方で下方に沈み込んだ材料は、図 6-10 に示すように工具通過後には上方に戻ろうとする。下方に変位が大きいほど工具通過後には上方により戻ろうとするため工具逃げ面と強く接触し、その結果として逃げ面摩耗が進展すると考えた。

6-2-3. モデル分析による成果

図 6-11 に、刃先近傍の上下方向の変位を示す。なお、x 軸におけるノード番号 5 が工具先端の位置となる。

切り込み 0.3mm に於いては常に 4:1 の工具【図 6-11 の○白色】が最も沈み込みが少ない結果が得られた。(チャンファー比率 4:1 の工具が最も沈み込みが少ない。)



6-2-4. モデル分析による結論

逃げ面摩耗の量は、「1-1. 刃具寿命を向上させる実験研究」で得た結論においても、「6-1. 刃具寿命向上の実証研究」による結論においても、逃げ面に係る押しつけ力に大きく影響受けることが明らかである。

ホーニング比率が小さい方(4:1)が、ホーニング比率が大きい方(1:1)よりも逃げ面に対する押しつけ力が小さくなり、摩擦が小さくなるので逃げ面摩耗が少なくなると考えられる。(言い換えると、逃げ面に対する押しつけ力で言えばホーニング比率 4:1 の刃先が、1:1 に比べて応力が小さくなる。) 結果として、逃げ面摩耗が小さくなり、刃具寿命が長くなると言える。

第3章 全体総括

1. 「複数年の研究開発成果」

総委託事業期間における研究開発の方策及び成果の概要を表 3-1 に示す。

研究項目	サブテーマ	技術的目標の達成値		成果
		指標	目標値(実績)	
1. 刃具刃先の実験研究	サブテーマ① 刃具寿命を延ばし、加工面精度と加工能率を向上させる刃先形状を研究開発	刃具寿命向上 切削能率向上	125~175%向上 50%以上向上	1. 刃具寿命を延ばす刃先ホーニング形状の特定完了。 2. 刃具寿命工場10%、切削能率向上50%達成。 3. 切削負荷に関する各種データの収集、分析完了。 4. 加工速度が面粗さと硬度に与える影響がないことを確認完了
	2. 専用工作機械、位置決め治具、仕上げ治具・ツール、及び制御法等の開発	サブテーマ② 刃先形状を最適に仕上げる工作機械(ホーニング仕上げ機)の開発	4軸制御稼動	チャンファー比とチャンファーRが加工可能
良品率			99.5%以上	製品の良品率:99.5%
生産性			20秒/サイクル	企画サイクルタイムに対する達成率100%
サブテーマ③ 位置決め機構の開発			小形・複雑形状に対応するクランプ性能	全数確実に保持でき、治具からの飛び出しなどが無いこと
サブテーマ④ 仕上げ治具・仕上げツールの研究開発		刃具の外観(欠け、傷等)	欠け、傷等の原因にならないこと	刃具の刃先周囲の欠け、損傷なし。
		仕上げ精度	企画要求精度	刃先ホーニング比率1:1、2:1、3:1、4:1、R形状0.03mmを達成。
		経済性	ツール費:3円以内/個	ブラシコスト0.15円/個。直径で30mm、生産可能な数量は225,000個を達成。
耐久性	刃具15万個/月・セット以上の生産に対応	25d*20h**60min*60sec/20sec*2pcs*85%=153,000pcs 機能達成		
サブテーマ⑤ 刃先仕上げの複雑な動作に対応する制御システムの構築	仕上げ精度	数値制御指令に対する追従性	X軸、Y軸0.001mm、Z軸0.003mm、A軸0.08°の数値制御指令に対する追従性を確認、従来機に対し、より高精度な刃先仕上げを可能にした。	
	サイクルタイム	企画サイクルタイムに対する達成率100%	1サイクル=20秒以下を達成。	
3. データの収集、分析、理論構築	サブテーマ⑥ データ分析、理論づけ、最適な刃先形状の割出を行う。	刃先形状確立	最適な刃先形状	刃先ホーニング比率1:1、2:1、3:1、4:1、R形状0.03mmについて刃具寿命、切削応力、摩耗、面精度等の関連とデータ分析、理論づけを完了。

2. 研究開発後の課題・事業化展開

本研究開発では、概ね目標を達成できたので、事業化の進展について述べる。

1) 本事業により開発する技術を用いた製品等

本研究開発の成果を用いた製品としては、一つは刃先ホーニング形状の試作で培った技術を導入した「専用工作機械(刃先ホーニング仕上げ機)」であり、もう一つは「専用工作機械」による高性能刃先を有した「刃具」である。

製品等の名称		製品等の概要(用途、特徴等)
1	専用工作機械(刃先ホーニング仕上げ機)	本事業によって開発した刃具の刃先仕上げ技術を導入した、刃先ホーニング仕上げ機(刃先を企画した通りに自在に仕上げることができるNC4軸制御の専用工作機械)を販売する。
2	高性能刃先の「刃具」	上記専用工作機械を導入し、高性能な刃先仕上げ加工を行った刃具を生産する。

専用工作機械の事業化展開計画は表 3-2-2 に、高性能刃先の刃具の事業化展開計画は表 3-2-3 に示す通りである。

製品等の名称		専用工作機械				
開発事業者		株式会社 光機械製作所				
スケジュール	事業終了後の経過年数	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
	サンプルの出荷		●	→		
	追加研究		●	→	→	→
	設備投資	●	→			
	製品等の生産		●	→	→	→
	製品等の販売		●	→	→	→
売上見込	売上高(千円)			120,000	200,000	280,000
	販売数量			3台	5台	7台
	売上高の根拠	光機械製作所はこれまで主要切削刃具メーカーと永く良好な取引関係を構築しており、各種の刃具専用工作機械を販売している。現行の刃先ホーニング仕上げ機も年間数台ベースで販売していることから、本事業によって開発した専用工作機械は、現行機よりも格段に性能が高い革新的な機械になるため、販売価格を40,000千円/台と企画している。各年度で3台、5台、7台以上の販売を見込めると考える。				

製品等の名称		高性能刃先の「刃具」				
開発事業者		株式会社 光機械製作所				
スケジュール	事業終了後の経過年数	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
	サンプルの出荷	●	→			
	追加研究		●	→		
	設備投資	●	→			
	製品等の生産		●	→	→	→
	製品等の販売		●	→	→	→
売上見込	売上高(千円)			10,000	15,000	20,000
	販売数量			4万個	6万個	8万個
	売上高の根拠	光機械製作所は、40年余にわたり大手切削刃具メーカーのOEM加工を行っている。その生産量は15~20万個/月である。本事業によって開発した専用工作機械を自社工場に導入することにより、新たに新製品等のOEMを従来生産に加えることが見込めると考える。				

用語解説

* アルミニウム合金(アルミニウム合金、aluminum alloy) : アルミニウムを主成分とする合金である。
アルミニウムには軽いという特徴がある一方、純アルミニウムは軟らかい金属である為、銅、マンガン、ケイ素、マグネシウム、亜鉛、ニッケルなどと合金にすることで強度など金属材料としての特性の向上が図られる。アルミニウム合金の軽さと強度を応用した例として、航空機材料としてのジュラルミンの利用が挙げられる。ジュラルミンは Al-Zn-Mg-Cu 系のアルミニウム合金である。

参考文献

- ・"Tool and Manufacturing Engineers Handbook、fourth edition" Thomas J Drozda, PE, CMfgE & Charles Wick, CMfgE
- ・"Metals Handbook, ninth edition Volume 16 Machining" Richard K. Pitler,P, & Edward L. Langer,MD
- ・機械加工学 津和秀夫著 2006年 養賢堂
- ・超精密加工のエッセンス 伊藤豊次著 美研プリンティング 1996年
- ・加工の工学 篠崎襄著 開発社 1998年
- ・難加工材の切削・研削・ドリル加工 鈴木節男著 海文堂出版 1992
- ・切削加工の技術情報 狩野勝吉著 工業調査会 2008年
- ・切削加工実践 Q&A 狩野勝吉著 日刊工業新聞社 2007年