

切削摩擦加工の研究を通じた教員間の技術伝承と研究成果

山本 通¹・薬師寺 輝敏¹

¹機械工学科

自動車, 化学や鉄鋼など日本を代表する一般企業では, ベテラン社員の技術伝承が課題となっている. 研究と学生への教育を主な業務としている高等専門学校(以下, 高専と言う)でも, 毎年, ベテラン教員が数多く定年退官を迎えているが, ベテラン教員の持つ技能, 知識や経験等の貴重な財産を, 残った教員に引き継ぐような体制は, 残念ながら整っていない. そこで, 長年ベテラン教員が行ってきた研究の一部を筆者の得意分野で行うことで, OJTのような手法で, ベテラン教員の研究に関する知識や技術を学ばせていただく取組みを, 最近独自に開始することができた. 取組みを開始してすぐに, 興味深い結果を得たため, 本稿で, その取組みの過程や研究成果等について紹介する.

キーワード: 切削摩擦加工, 5軸マシニングセンタ, 技術伝承, 被削材の評価

1. 緒言

一般企業では, 団塊の世代が大量退職される時期などに, ベテラン社員の技術伝承が課題となっており, 多くの取組みがされている¹⁻⁴⁾.

一方, 高専における研究は, 大学のように教授の下に, 准教授, 講師や助教などが付く講座制ではなく, 各教員が自分の得意とする専門分野で, テーマを決め研究を行っている場合が多い. このような研究形態は, 若手教員でも教員が行いたいテーマを自由に決められること, 余計なしがらみなどを気にする必要がなく研究が行いやすいなどのメリットがある. 次に, 研究環境について考えると, 高専教員は, 授業の持ちコマが多く, 部活動, 学生寮の宿直業務や学生指導に関する業務も多いことから, 研究に割ける時間は大学等の研究機関に比べて確保しにくく, 高専教員に赴任しても数年で他の研究機関に異動する者も少なくない. しかし, このような状況でも教育, 研究や学生指導を精力的に取り組んでいる教員もおり, 特にベテラン教員の中に, そのようなスーパー教員が含まれることが多い. しかし, そのような教員の持つ技能, 知識や経験を, 定年退官までに, 残った教員に引き継ぐような体制は, 残念ながら整っていない. そこで, 筆者らの所属する機械工学科において, 長年ベテラン教員(以下, 教員Aと言う)が行ってきたCNC旋盤を使った切削摩擦加工に関する研究を, 筆者(以下, 教員Bと言う)が研究対象としている5軸マシニングセンタで行うことで, 技術伝承を行う取組みを, 2020年6月より独自に始めた. 本稿では, その取組み過程や研究で得た成果等について紹介する.

2. 各教員のこれまでの取組みと本取組みに至った経緯

(1) 教員Aと切削摩擦加工

教員Aは, 高専教員として30年以上の勤務経験があり, 多くの実績⁵⁻⁸⁾を残してきている. その中で, 本取組みの基盤となった切削摩擦加工⁹⁾について, 以下で説明する. 切削摩擦加工とは, CNC旋盤等を用いて行う表面強ひずみ加工であり, 形状成形から表面処理をCNC旋盤のみで行える加工法である. 一般的な改質処理と比較すると, 特別な装置を必要とせず, 短時間, 低コストで表面処理を行える特長がある. また比較的大型の被加工材にも対応できるなどのメリットがあり, 教員AらはCNC旋盤で使用できる専用の切削摩擦加工用工具を製作し, Ti-6Al-4V, S45CやSCM435などの材料で疲労強度を向上させることに成功している.

(2) 教員Bと5軸マシニングセンタ

教員Bは, 民間企業(工作機械メーカー)で十数年の勤務をした後, 高専教員として約7年間勤務をしている, いわゆる中堅教員である. 工作機械メーカーでマシニングセンタに関わる仕事を主にしていたことから, これまで5軸マシニングセンタの精度や加工品位向上に関する研究^{10, 11)}や, 5軸マシニングセンタを使った切削による潜像加工¹²⁾に関する研究を行ってきた. しかし, 学生への教育や指導を最優先にしてきたため研究にかけられる時間は多くなかった. また近隣に類似の研究を行っている機関や施設等もなく単独で研究を進めており, 年に数度, 地場企業から切削

加工に関する相談に対応する程度で、世の中に大きく貢献できるような研究を行うまでには至っていなかった。

(3) GEAR5.0と共同研究

GEAR5.0とは、社会実装を主たる目的とした研究を高専のみならず様々な外部組織と連携して行い、その研究活動を通じて、学生を研究者、技術者として育成する国立高等専門学校機構のプロジェクトである。本年度より本校でも活動を開始し、十数名の教員や職員らでチームを構成し、社会実装と人財育成につながる研究の推進を行っている。今回、教員AとBもこのチームのメンバーとして選出され、研究活動を進めていくことになった。そこで、以前より教員Aのものづくり教育の方法や研究方法に関心を持っていた教員Bよりの提案で、教員Aの知識や技術を教員Bの研究に応用する方法を模索することとなった。手始めに、教員Bの専門としているマシニングセンタで切削加工を行う共同研究を開始した。

3. マシニングセンタによる切削摩擦加工

(1) 加工機と加工概要

前章でも説明したが、機械的性質を向上させるための切削摩擦加工は、これまでCNC旋盤を用いて行われていたが、これを、マシニングセンタに適用することで、より多様な形状に対応できる可能性が高い。ここで、工具側が回転するマシニングセンタで切削摩擦加工を実現するのは、CNC旋盤で切削摩擦加工を行う場合と比べて、変更する点も多いと容易に想像できた。そこで、まずは特別な治具や工具などを準備せず、すぐに準備できる道具を使い、かつ簡単な加工で現状を確認しながら、教員Aの知識や技術を応用する手法を採用した。

加工機は、図1に示すようなA軸とB軸を有する5軸マシ

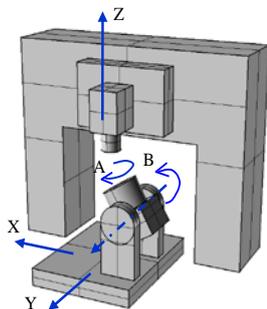


Fig.1 Experiment environment

Table1 Medium machining conditions

Spindle speed	1500 min ⁻¹
Feed rate	150 mm/min
Depth of cut	0.02mm
Tool	φ16mm end mill (OSG製 FX-MG-EDS 16)

ニングセンタを使用し、ボールエンドミルで平面加工を行い、そのときの被削材の状況を確認する。教員Aの切削摩擦加工は切れ刃以外の部分で加工していることから、極力切れない刃先で加工したほうが良いことになるが、どのような刃先処理をどのような方法で行うか検討するのは容易ではないと考え、よりシンプルな方法がないか検討した。その結果、主軸を逆回転にすれば、極力切れない刃先に近くなるのではと考え、主軸を正回転で加工した場合と、主軸を逆回転で加工した場合での被削材の状況を確認することとした。

(2) 加工実験

被削材の取り代を一定にするため、被削材の表面を表1の条件で前加工した後、図2に示す加工パスで、平面加工を行う。図に示すように、送り方向はX軸と平行にし、ピックフィード方向はY軸の正方向に向かって平面加工を行う。ただし、実線が切削送り、破線が早送りである。加工には、B軸を傾けない場合と30度傾けた場合で、それぞれ主軸を正回転と逆回転させ、表2に示すような4種類の加工方法で実験を行う。加工条件は表3に示す通りで、加工領域はそれぞれ5mm(X軸方向)×8mm(Y軸方向)とした。

Table2 Machining methods

Machining method number	A-axis angle	B-axis angle	Spindle rotation direction
1	0°	0°	Positive
2	0°	0°	Negative
3	0°	30°	Positive
4	0°	30°	Negative

Table3 Finishing machining conditions

Spindle speed	8000 min ⁻¹
Feed rate	800 mm/min
Pick feed	0.2mm
Depth of cut	0.05mm
Tool	R5mm ball end mill (OSG製 WXL-EBD R5×18)

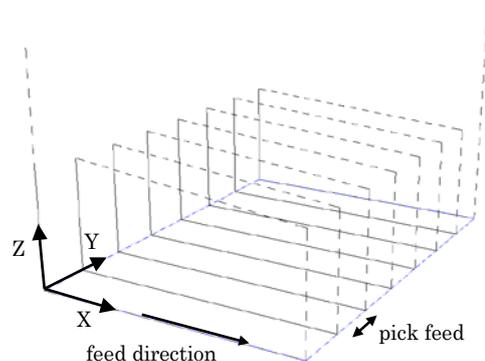


Fig.2 Machining path

4. 切削摩擦加工片等の評価

前章の実験で得た被削材は、目視や手触りでも表面の状態が大きく異なった。そこで、以下のような評価を行い、被削材の機械的性質等が向上されたかや各加工条件で機械的性質等がどの程度異なったかを確認した。

(1) 加工面の外観

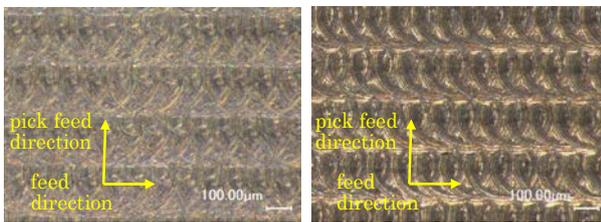
加工面の外観写真を図3に示す。図中の番号1から番号4で示す領域が、それぞれ前章の表2で示す加工法で加工した領域で、番号5は表1に示す加工条件で前加工を行った領域を示す。次に、それぞれの加工面の外観の詳細をマイクロSCOPE(キーエンス製 VHX-1000)で撮影した結果を図4に示す。B軸を傾けずに加工した加工方法1と2の加工面は、ボールエンドミルの周速ゼロ部付近で加工しているため、B軸を傾けた場合と比べて、金属の光沢感や加工品位に明らかな違いが見られた。

(2) 粗さ曲線

表面粗さ・輪郭形状統合測定機(東京精密製 Surfcom200 0 DX3)で、ピックフィード方向に各加工位置の粗さ曲線を測定した結果を図5に示す。当然のことではあるが、主軸を正回転させたほうが、逆回転に比べて外観、面粗さと

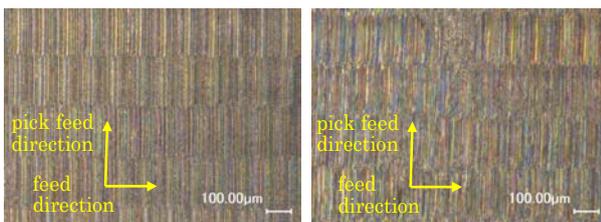


Fig. 3 Machining result



(a) Machining method 1

(b) Machining method 2



(c) Machining method 3

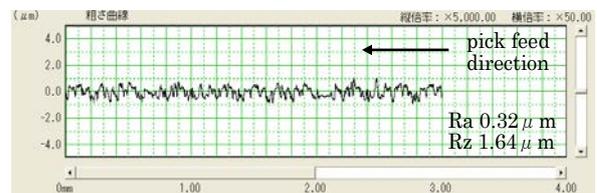
(d) Machining method 4

Fig. 4 Enlarged photos of machined surface

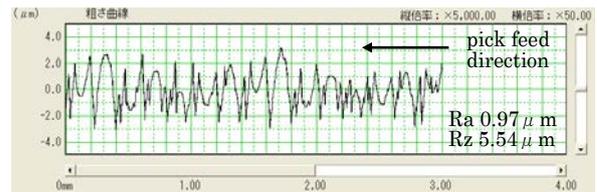
も良好であるが、ワークを30度傾けた場合は、主軸を逆回転させても、加工方法1で加工した場合と同等に近い結果を得ることができた。

(3) 表面硬さ

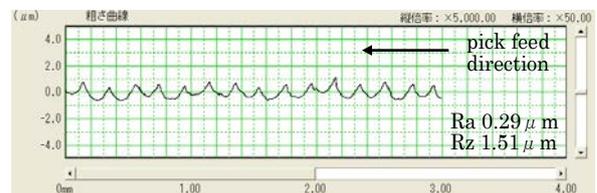
各加工位置の表面硬さをビッカース硬さ試験機(島津製作所製 HMV-1)にて測定した。測定条件は、押込み荷重 980.7mN, 保持時間15sとし、それぞれの加工方法で加工した加工面から任意の3点を測定し平均した値を表4に示す。表から読み取れるように、主軸を逆回転させて加工したほうが、いずれも表面硬さは向上していることが分かる。



(a) Machining method 1



(b) Machining method 2



(c) Machining method 3



(d) Machining method 4

Fig. 5 Roughness curve

Table 4 Hardness test results

Machining method number	HV
1	485
2	521
3	444
4	497
5	422

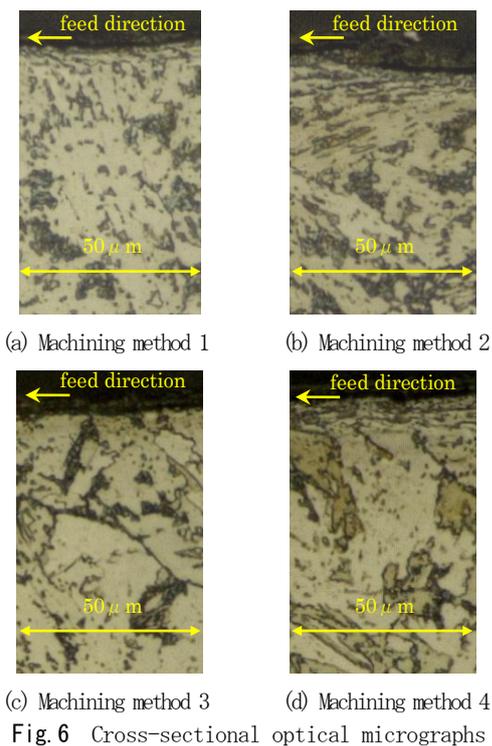


Fig. 6 Cross-sectional optical micrographs

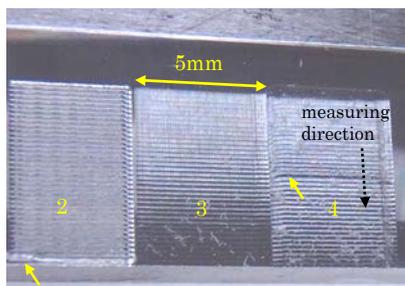


Fig. 7 Enlarged photo of machining result

(4) 組織観察

被削材をファインカッターで切断し、その切断面をエメリー研磨した後、バフ仕上げを行った。その後、ナイトール液で腐食させ、光学顕微鏡(Nikon ECLIPSE LV150N)で組織観察を行った。その結果を図6に示す。図から工具を逆回転して加工した場合、いずれも表面近くに塑性流動の痕跡が確認できる。また、工具を正回転させた場合でもボールエンドミル周速ゼロ部が加工に関わる加工方法1では、わずかではあるが塑性流動の痕跡が観察できる。一方、切れ味が良好だと考えられる加工方法3では、それらの痕跡は観察できない。以上のように、塑性流動の痕跡の大きさは、表4に示した表面硬さの結果と相関があり、大きなひずみが付与されたことで、被削材の表面硬さが向上したものと考えられる。

(5) 加工面の乱れ

加工後の被削材を目視で確認すると、加工方法4で加工した面の中心付近に、加工方向と平行な意図しない筋が見

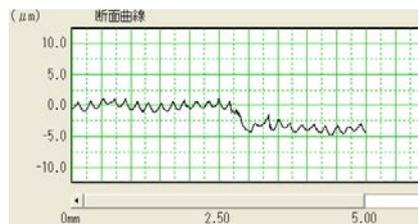


Fig. 8 Profile curve

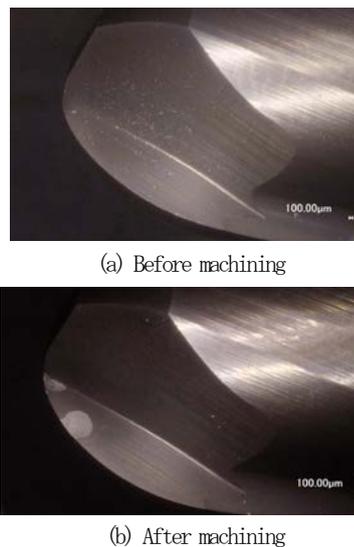


Fig. 9 Ball end mill pictures

られた。その加工不具合が分かるように撮影した写真が図7で、加工面に乱れが確認できる部分を、加工方法4で加工した領域の一部に斜め矢印で示している。次に図7の破線矢印方向に断面曲線を測定した結果が図8で、約4 μm程度の段差があるために筋のように見えることが分かった。また、図7を観察すると、加工方法2で加工した面も加工開始直後に斜め矢印で示すような加工面の乱れが発生していることも分かった。その後、図9に示すようにボールエンドミルの加工前と加工後の写真を確認すると、加工に関わったすくい面側に欠けが生じていた。これは、工具を逆転させたために、発生した欠損だと考えられる。

5. 結言

主題の取り組みを開始して、数ヶ月ほど経過した。この間、通常の授業、学生指導や部活動の業務も行う必要があったため、本取り組みにかかることのできた時間は、実質わずか数十時間程度である。しかし、かけた時間は多くはなかったが、興味深い成果を得ている。本研究で得られた結果や今後の課題や予定等を以下に示す。

- 1) ボールエンドミルを逆転させるだけで、部品の改質処理が行える可能性があることを示せた。ただし、工具を逆転させて使用する場合、今回のように工具欠損が発生する

可能性が高いため、実用化には、最適な工具開発や工具選定が必要であることも分かった。

2) 今回は、過去にCNC旋盤を使って行った切削摩擦加工の加工条件を参考に実験を行ったが、当然、工具形状、主軸回転速度、送り速度や切込み等の加工条件を変化させることで、その効果は異なると思われる。このような課題は、学生の卒業研究のテーマとしても最適ではないかと考えており、本取り組みを通して、社会実装に向けた取り組みを行いながら人材を育成できる新たな卒業研究テーマの発掘を行うこともできた。

3) 本取り組みを通して、筆者がこれまで経験したことのなかった組織観察などの材料評価手法を、ベテラン教員の指導のもと実践的に学ぶことができた。今後、疲労試験や残留応力測定等の技術伝承も行い、本研究が社会実装可能か確認していく予定である。

4) 本稿で紹介したような教員間の技術伝承に関する取り組みは、既に他の高専等でも行っておられる事例もあると考えるが、高専全体で、そのような取り組みを行っているわけではない。高専を取り巻く現状を考えると、このような取組みは、個別に行っていくしかないのかもしれないが、ベテラン教員が持つ技能、知識や経験などの財産を残った教員に引き継げるような何らかの仕組み作りも必要ではないかと考える。そのような取組みが、より高度な研究やより良い授業の構築につながり、結局は、学生を世界に通用する研究者や技術者として育成することにつながるのではないかと考える。

参考文献

- 1) 戸田伸一: エンジニアリング業における技術伝承, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 41, 6, pp.26-30, (2006)
- 2) 鈴木陽一郎, 小山秀夫, 金雁: 適切な技能伝承の進め方を定量的に選択する手法に関する研究(技能伝承過程に

おける生産プロセスのシミュレーションによる再設計), 日本機械学会論文集, 80, 812, DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0107, (2014)

- 3) 津村治: 日本製鋼所鑄造部門における教育, 人材育成の取り組み, 鑄造工学, 83, 8, pp.454-459, (2011)
- 4) 川西港, 布引雅之: きさげ作業の熟練度の定量化手法に関する研究 -きさげ動作の運動解析-, 2019 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.522-523, (2019)
- 5) 薬師寺 輝敏, 鹿毛 正治, 西谷 弘信: 低炭素鋼の疲労き裂停留に及ぼすひずみ時効の影響, 日本機械学会論文集 A編, 62, 593, pp.82-88, (1996)
- 6) 薬師寺 輝敏, 鹿毛 正治, 西谷 弘信: 低炭素鋼における疲労き裂停留の要因 : (酸化物誘起き裂閉口の影響), 日本機械学会論文集 A編, 65, 635, pp.1546-1551, (1999)
- 7) 薬師寺 輝敏, 岡 茂八郎, 吉田 敬志, 榎園 正人, 榎田 雄二: 残留磁気測定法によるSUS304鋼の疲労被害検出(生活温度範囲における平面曲げ疲労), 日本機械学会論文集 A編, 72, 724, pp.1970-1977, (2006)
- 8) 薬師寺 輝敏, 後藤 真宏, 鳥居 幸代: ワイヤ放電加工したS45C材の疲労強度, 材料, 64, 11, pp.940-945, (2015)
- 9) 薬師寺 輝敏, 徳澄 翼, 後藤 真宏: SCM435切削摩擦加工材の疲労特性に及ぼす圧縮残留応力の影響, 日本機械学会論文集, 85, 876, DOI: 10.1299/transjsme.19-00131, (2019)
- 10) 山本 通, 堤正臣: 微細溝切削による5軸制御マシニングセンタの幾何誤差推定方法の開発, 精密工学会誌, 77, 8, pp.776-780, (2011)
- 11) T.Yamamoto, S.Ninomiya: Flat Machining Test for five-axis Machining Center, Proceedings of International Design and Concurrent Engineering 2017 & Manufacturing Systems, No.4, pp.1-5, (2017)
- 12) 山本通, 安藤開: 切削による潜像加工への挑戦, 精密工学会誌, 84, 9, pp.796-800, (2018)

(2020.9.30受付)