

ものづくりにおける生産性向上に関する研究

— 切削加工プロセスの生産性向上 —

鏑木哲志・新井宏章*・黒岩広樹*・小宅 勝**

Study on productivity improvement in manufacturing

— Productivity improvement in cutting work —

Tetsushi KABURAGI, Hiroaki ARAI, Hiroki KUROIWA, Masaru OYAKE

ものづくりにおける生産性向上を図るため、切削加工において熟練作業者と同等に加工状態を評価する手法の開発を試みた。生産性の低い低剛性工具による加工を対象として、切削抵抗の時刻歴波形から加工状態を特徴化し、熟練作業者の評価と比較した。熟練作業者が良いと評価する状態は、時刻歴波形の平均値および積分値による特徴化が相当した。本評価手法により切削加工の最適化が可能となる。

キーワード：切削加工、生産性向上、状態評価、最適化

To improve productivity in manufacturing, we developed a method comparable to evaluation of cutting condition conducted by skilled workers. The indicators characterized from cutting resistance waveform in low rigidity tool were compared with the results evaluated by skilled workers. Indicators of average and integral showed a good correlation with evaluation by skilled workers. This evaluation method can be effective for optimization of cutting process.

Keywords : cutting work, productivity improvement, condition evaluation, optimization

1 まえがき

我が国では、少子高齢化に伴う労働人口減少が深刻な問題であり、労働生産性の向上が重要な社会的課題である。ものづくりの分野では、これまで我が国の高い技術力を支えた熟練技能者の高齢化が進み、その優れた技能の後世への伝承が十分に行われておらず、我が国の優位性が失われつつある中、その対策が急務となっている。

我が国が目指す社会のあり方である Society 5.0 では、人口知能、ロボット及び IoT など、生産性を劇的に向上させるイノベーションの実現が必要とされる¹⁾。この実現には IT 化が必要不可欠であるが、中小製造業における多くの生産現場では、直接業務以前に間接業務においても IT 化が進んでいないのが現状である。

このような背景の中、我々は生産プロセスへの IT 活用に向けた取組に注力している。

具体的には、手作業を主体とする作業の機械化や熟練作業者の勘と経験のセンサによる数値化等の IT 手法を実際の生産プロセスに適用し、改善を図る取組である。この取組から、実際の現場での IT 化への動機付けには、身近な具体的事例での成功体験が最も有効である。

本研究では、身近な加工方法である切削の生産性向上に資する手法の開発を行った。熟練作業者の評価と同等に加工状態を評価することを目的として、切削抵抗の時刻歴波形からの状態の特徴化について検討した結果について報告する。

2 加工状態評価の基本的な考え方

一般的な加工条件の決定方法は、工具メーカー等が推奨する条件を参考に実際に加工を行い、その結果から回転速度、切込み量及び送り速度等を調整する。この方法では加工の結果として確認できる振動や音、表面品質、寸法精度ある

いは工具摩耗等の結果系が参考指標となることから、作業者の勘と経験による主観評価となるため、加工能率を単調に下げていく対策となる。

そこで、我々が提案する加工の最適化のあるべき姿を図1に示す。加工の最適化を図るためには、加工の因果関係を解明することが重要となる。従来の対策ではなかった原因系の評価に切削抵抗測定を用いることで、工学的手法に基づく加工の分析が可能となる。これにより、従来困難であった加工能率を上げる対策も合理的に検討することができ、生産性向上の実現が期待できる。

この際、参照となるのは熟練作業者の評価基準である。熟練作業者は経験的に加工状態の良否を五感で捉えており、加工の最適化に反映している。この貴重な技能を原因系の測定で定量化することが課題となる。

本研究では、従来の対策では生産性向上が極めて困難であった細くて長い低剛性工具での加工を対象として、切削抵抗から得られる情報から加工の最適化を検討する。

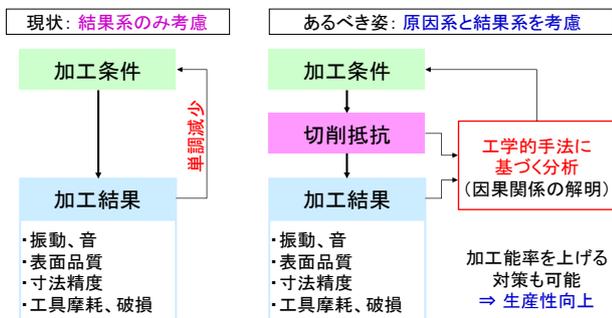


図1 加工の最適化のあるべき姿

3 実験方法

3.1 実験装置

切削加工には汎用のマシニングセンタを用いる。切削抵抗測定にはキスラー製切削動力計 9257B を用いる。工具には、超硬合金製直径 2mm、突き出し長さ 40 mm、3 枚刃を用いる。

3.2 被削材

被削材には合金工具鋼鋼材 SKD61 相当品を用いる。試験片形状は、縦横それぞれ 100 mm、高さ 50 mm の直方体である。切削動力

計のねじを用いて試験片を固定する。図2に加工実験の様子を示す。

3.3 実験条件

加工方法は溝加工とする。実験条件を表1に示す。切込み量が 0.5 mm に到達するまで切込みピッチにて加工を繰り返す。熟練作業者がこれまでの経験により適正と判断する従来条件を No. 1 として、送りおよび切込みピッチを変化させ加工能率が従来条件の 1.3 倍及び 1.5 倍となる条件を設定する。切削動力計のデータ取得間隔は 1 ms とする。

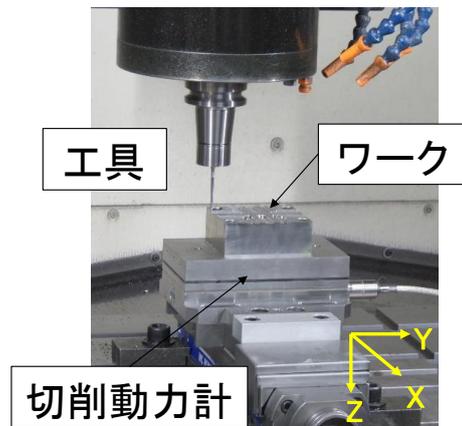


図2 切削加工実験

表1 実験条件

実験No.	回転数 [rpm]	送り [mm/min]	切込みピッチ [mm]	No.1に対する能率
1	2200	300	0.02	1
2		345	0.023	1.3
3		390	0.02	
4		300	0.026	
5		375	0.025	1.5
6		450	0.02	
7		300	0.03	

3.4 波形解析

特徴化のための波形解析には、平均、変動（標準偏差）及び積分とする。平均は、切込み量が 0.5 mm に到達するまでのそれぞれの加工について求め、その平均と標準偏差及び最大最小を求める。標準偏差はそれぞれの加工について求める。積分は切込み量が 0.5 mm に到達するまでの総和を求める。

4 実験結果及び考察

4.1 波形解析による特徴化

切削抵抗の時刻歴波形の例として表 1 に示す実験 No. 1 の加工条件のものを図 3 に示す。この時刻歴波形に対して平均、変動および積分処理したものをそれぞれ図 4 から図 6 に示す。

切削抵抗の時刻歴波形である図 3 から、各軸方向の切削抵抗の変動や振幅の大きさが可視化される。切削動力計では図 2 に示した座標系に従い、直交する 3 方向の力が測定される。図 3 ではこの 3 方向の力を合成力 F も併せて表示する。各軸方向でそれぞれ切削抵抗の大きさと変動度合いが異なる。工具の進行方向が+Y、鉛直下向きが+Z である。エンドミルによる切削加工では複数の切れ刃が回転しながらワークを切断して除去するため断続加工となる。この状態が切削抵抗の変動に表現される。

平均の特徴化である図 4 から、各加工条件の平均的な切削抵抗の大きさが可視化される。誤差範囲により、切削抵抗の最大値がわかることから、工具破損の可能性についての検討が可能となる。ここで、No. 2 から No. 4 は従来条件に対して加工能率が 1.3 倍、No. 5 から No. 7 は同様に 1.5 倍であるが、同じ加工能率でも特徴化された指標に差が生じる。

変動の特徴化である図 5 から、各加工条件での加工回数と変動の関係が可視化される。全ての加工条件において、加工回数が増加すると変動も増加する。従来条件である No. 1 が最も小さく、加工能率ごとにほぼ同様な増加の傾向を示す。全体的な傾向として、変動の増加の傾きが加工前半に比べ後半が小さくなる。この理由として、工具の角 R による影響が挙げられる。使用した工具の角 R は 0.5 mm である。加工回数が増加し加工溝深さが深くなると工具とワークの接触面積が徐々に増加し、理論的に 0.25 mm の切込み深さで角 R 部が全てワークに接触する。その後は、加工深さが増加すると、工具の直線的な円柱部が接触し始める。工具の円柱部が接触すると工具の進行方向に対して直角方向が拘束される状態となり、変動に影響する工具の

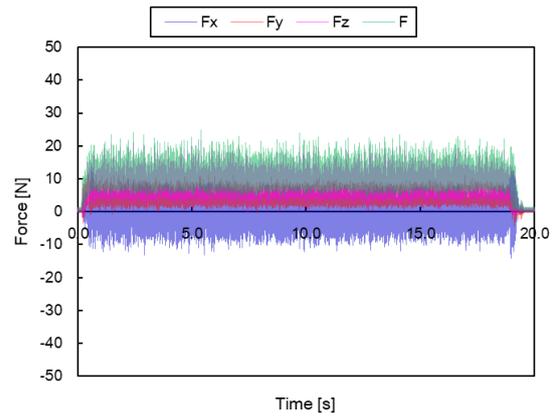


図 3 切削抵抗の時刻歴波形 (No. 1)

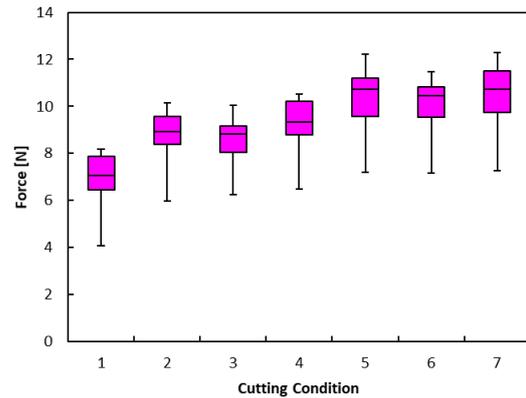


図 4 平均

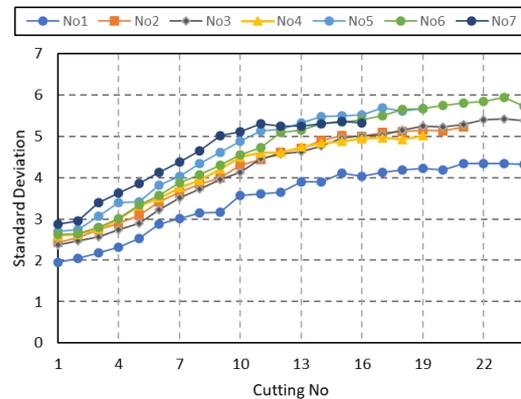


図 5 変動 (標準偏差)

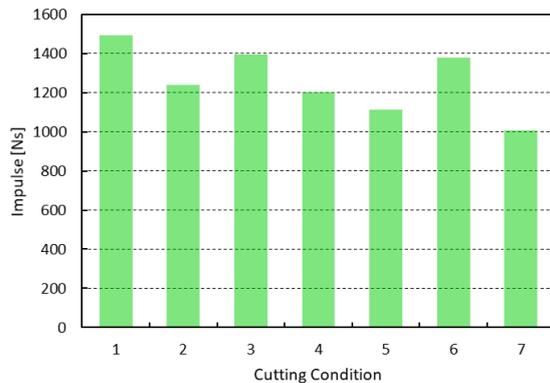


図 6 積分

変形による振動成分が抑制されると考えられる。

積分の特徴化である図 6 から、各加工条件の加工仕事の大きさが可視化される。ワークが工具から受ける力の総和である。積分値は切削抵抗である力と時間の積であり、力積の次元となるが、ワークに作用した力であることから除去加工に要した等価仕事として考えることができる。平均と同様に同じ加工能率であっても条件の違いにより特徴化された指標に差が生じる。それぞれの加工能率において特に No. 3 及び No. 6 が高い値を示す。いずれの条件も切込み量が小さく送り速度が速いものである。積分値の高さは力の転写性の高さである。本実験では全ての加工条件で除去量が同じため、積分値が高いほど効率が高い。そのため、除去加工以外に要した無駄仕事が少ないと考えられる。また、最近の工具開発は切込み量を小さくして送り速度を速くするいわゆる高送りに適した開発が進められており、その特徴が良く活かされた結果が表現されていると考えられる。

4. 2 熟練作業者の評価との比較

熟練作業者が良い状態と判断した条件は No. 3 と No. 6 である。この条件は、能率 1.3 倍及び 1.5 倍の中で切込み量が小さく送り速度が速いものである。この条件での特徴は、図 4 より平均値が低く工具負荷が小さいこと、図 6 より積分値が高く力の転写性が高いことである。前節の考察のとおり高送りの条件である。加工機構に着目すれば、工具負荷が小さいことから工具の変形の抑制や損傷の防止に有効となる。力の転写性が高いことから加工での無駄仕事が抑制され振動や発熱等の防止に有効となる。そのため、加工に有効に作用すると考えられる。熟練作業者の主観的な評価について、切削抵抗の時刻歴波形から特徴化された指標によって加工機構を考察することにより、同様の評価が行える可能性を示した。

この加工条件を実際の金型加工に適用したところ、複雑な部品加工において約 30% の時間短縮と 5% のコスト削減に貢献した。加えて、工具摩耗が抑制されたことにより、加工面品質及び寸法精度が向上した。このように

生産プロセスに IT を活用し熟練作業者の技能を定量化することは、これまでにない加工プロセスの改善への効果が期待され、今後のものづくりにおいて必要不可欠になると考える。

5 まとめ

ものづくりにおける生産性向上を図るため、切削加工における熟練作業者と同等の評価を切削抵抗の時刻歴波形から行う手法を開発した。

本手法により加工の特徴が可視化され、加工機構の考察が可能となり、加工プロセスの生産性向上が可能となる。また、職人の技能の定量化はそれを技術として後世に伝承することも可能となり、ものづくり全体の生産性向上が期待できる。

文 献

- 1) 第 5 期科学技術基本計画、内閣府(2019)
- 2) 中小企業・小規模事業者の IT 利用の状況及び課題について (平成 29 年 3 月), 中小企業庁(2018)

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な御助言を賜りました群馬工業高等専門学校黒瀬雅詞教授、埼玉工業大学河田直樹准教授及び群馬大学名誉教授久米原宏之様に感謝申し上げます。本研究での実験等に御協力いただきました有限会社山口精工様、有限会社石川鉄工所様、鈴木工業株式会社様及びスバル工業株式会社様に感謝申し上げます。