

技術資料



Technical Data

切削負荷シミュレーションによる切削加工の高能率化

八田武士*, 中川純一*

High Efficiency of Machining Process Using Cutting Force Simulation Technology

Takeshi HATTA and Junichi NAKAGAWA

Synopsis

Lately, the geometry of components has become complex and machining processes have shifted to 5-axis machining from conventional 3-axis machining due to high-productivity. In 5-axis machining, an NC program is very important for optimization in terms of productivity and cost, but it strongly depends on programmer's skill. On the other hand, numerical simulation technology has progressed enough to be applied to the real machining process.

In this study, machining simulation was performed to improve machining efficiency and tool life using cutting force simulation on the machining process of a SUS630 impeller disk.

The results obtained are as follows.

1. Enough cutting force prediction precision was obtained by newly developing machinability D/B of SUS630.
2. Improvement of tool life and shortening of processing time were achieved at the same time through control of maximum cutting force.

1. 緒言

近年、自動車やエネルギー・航空機産業では地球環境への負荷低減の観点から、燃焼機関の高能率化や構成部品の軽量化が求められており、製品の強度強化や薄肉化・複雑形状化が進んでいる。それに伴い、製品の形状創製工程である機械加工においても更なる高精度と高能率・低コスト化が求められている。

このため、機械加工の製造現場には5軸制御のマシニングセンタの普及が進み、産業機械用インペラディスクや自動車用ターボチャージャなどの加工では同時5軸制御加工が主流になっている。これらの加工ではCAM (Computer Aided Manufacturing) を用いてNC (Numerical Control) プログラムの作成を行うが、工具姿勢が複雑に変化するため、従来の経験による加工条件やNCプロ

グラムの最適化は非常に困難になってきている。

複雑化するNCプログラム作成の一助として、近年では切削シミュレーション技術の活用が盛んに行われている¹⁾。工業的に用いられる切削シミュレーション手法は、有限要素シミュレーションと切削負荷予測シミュレーションが代表的である。前者は、切削工具の応力や温度分布などが得られ、工具形状デザインや切削条件の最適化に活用されている²⁾。後者は、切削工程全体の切削負荷とその変動の大きさが得られ、NCプログラムの最適化に活用されている³⁾。一方で、切削シミュレーションの予測精度は、解析に用いる被削材データベースと摩擦係数などの境界条件によって、その結果は大きく変化する。このため、市販の汎用ソフトが供給する標準データベースだけでは十分な予測精度が得られない場合が多く、この部分が各社のノウハウになっている。

2016年7月13日 受付

* 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

大同特殊鋼(株) (以下、当社という) では、市販の汎用ソフトをベースに、独自の評価技術を用いて、被削材データベースと境界条件⁴⁾ の高精度化を図り、機械加工工程の最適化や高能率化に取り組んできた。本稿では、そのとりくみ事例の一つとして切削負荷予測シミュレーションの活用事例を紹介する。

2. 切削負荷予測の高精度化

2. 1 切削負荷予測手法

切削負荷予測には市販の汎用ソフト Production-Module を用いた。本ソフトでは、解析対象となる切削工具の刃先を微小領域に分割し、その微小領域ごとに切削負荷係数を割り当て、積分することで工具全体に生じる切削負荷が計算されている (Fig. 1)。切削負荷係数は (1) 式で示される「平均切削厚み」、「切削速度」、「工具すくい角」の関数で表現されており、各材料の被削特性は C, a, b, c で示される定数で与えられる。

$$K = C \cdot (t_{ave})^a \cdot V^b \cdot (1 - \sin \alpha)^c \quad (1)$$

ここで、K: 切削負荷係数, t_{ave} : 平均切削厚み, V: 切削速度, α : 工具すくい角, C, a, b, c: 材料定数である。

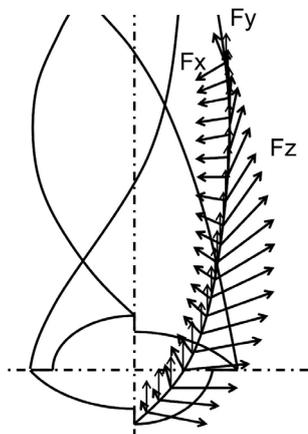


Fig. 1. Calculation method of cutting force.

2. 2 切削負荷係数データベースの構築

市販の汎用ソフトには、ソフトメーカーから供給される標準の切削負荷係数のデータベース (以下、D/B という) が登録されている。しかしながら、被削材の切削性は、素材の化学組成の違いや、加工熱処理の履歴によってその特性は大きく変化する。析出硬化型ステンレス鋼 SUS630 は、強度と耐食性に優れるため、産業機械用の

大型ポンプなどのインペラーディスクやシャフト等に用いられるが、時効熱処理の条件によって、その強度とじん性のバランスを制御することができ、使用用途によってさまざまな熱処理条件が選択される。その結果、熱処理条件によって、被削性は大きく変化するため、素材状態に応じた切削負荷係数 D/B の構築が必要になる。

当社では、(1) 式に示した切削負荷係数におよぼす材料定数を実験的に求め、独自の切削負荷係数 D/B を用いてシミュレーションを行っている。Table 1 に SUS630 における、切削負荷係数測定の実験条件を示す。切削負荷係数の測定は、平均切削厚みや工具すくい角などの各種切削パラメータを分離しやすい二次元切削に近い旋削によるブランチ加工で行った。Fig. 2 に切削負荷係数におよぼす平均切削厚みと工具すくい角の影響を示す。図中の α は工具すくい角を示す。切削負荷係数と平均切削厚みや工具すくい角などの変数との関係は、Fig. 2 に示されるように非線形の関係であることが多く、これらの特性を切削負荷係数 D/B に取り込むことが重要となる。Fig. 3 に汎用ソフトの標準 D/B を用いた場合と、評価試験で得られた D/B を用いた場合における、切削力の予測結果の比較を示す。標準 D/B の場合、平均切削厚みの増大に伴い切削力の予測誤差が大きくなっており、精緻な D/B を解析に用いることで、幅広い切削条件の範囲で標準 D/B に比べて高い予測精度を得ることができている。

Table 1. Experimental conditions.

Materials	SUS630 (HRC33)
Machining process	Turning
Width of cut	2 mm
Cutting velocity	80 m/min
Feed rate	0.01-0.3 mm/rev
Rake angle	Small, Middle, Large

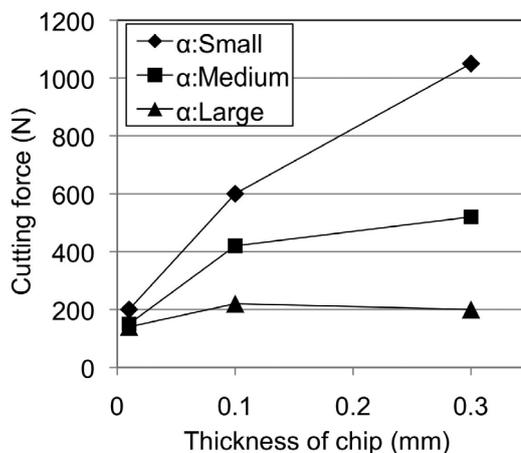


Fig. 2. Influence of a rake angle on cutting force of SUS630. (Cutting velocity 80 m/min)

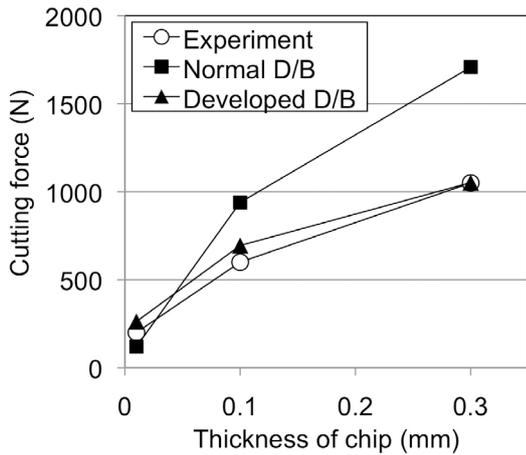
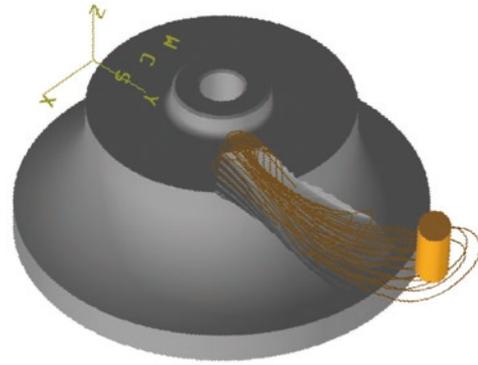


Fig. 3. Comparison of cutting force between experimental result and calculated value using normal D/B and developed D/B. (Cutting velocity 80 m/min, Rake angle: Small)

2. 3 実加工における予測精度の検証

先述の切削負荷係数 D/B は、二次元切削をベースとしているため、実際の製品加工における切削負荷予測精度の検証を行った。検証はインペラーディスクのミリング工具による同時5軸加工で行った。Fig. 4に検証加工モデルを示す。被削材は溶体化熱処理と時効熱処理を施した SUS630 を用い、試験機の制約から φ150 mm × H85 mm のミニチュアモデルで行った。検証加工は粗加工工程で行い、切削工具は φ12 ラジラスエンドミル (4刃) で加工を行った。加工は自由曲面を有する翼間の溝部を、ラジラスエンドミルを工具の根元側を支点に工具先端側を振り子状に往復させながら加工を行った。この加工は、切削工具と加工面との接触角度や接触面積が時々刻々と複雑に変化するため、同一送り速度で加工を行っても切削負荷が大きく変動しやすい加工となっている。切削負荷が最大となる部位では切削工具の欠損などの問題が生じやすく、最大切削負荷の制御が実加工では重要となる。そこで、通常の NC プログラムにおいて、実際の切削負荷変動と予測結果を比較しその予測精度を検証した。加工中の切削負荷はキスラー社製の回転式動力計を用いて測定を行い、切削負荷の比較は主分力に相当する切削工具の接線方向力で行った。

Fig. 5に接線方向の切削負荷の実験値とシミュレーションによる予測結果との比較を示す。本結果は粗加工の一部 (4パス分) の加工を抜粋して示している。実験結果と予測結果はほぼ一致しており、抜粋した部分以外も含め、粗加工の全工程に渡って切削負荷の予測誤差は 10 ~ 20 % 程度であり、十分な予測精度があることを確認した。



Material : SUS630 (HRC33)
Workpiece geometry : φ150 mm×H85 mm

Fig. 4. A test model of an impeller disk.

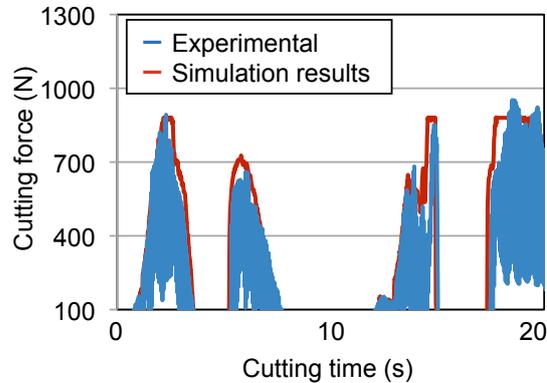


Fig. 5. Comparison of cutting force between observed and calculated results.

3. 高能率化の検討

次に、予測精度検証に用いたインペラーディスクのミニチュアモデルを使い、NCプログラムの最適化による高能率化を試みた。対象としたのは高負荷となる粗加工工程であり、高負荷加工となるが故に工具欠損が生じやすく工具寿命が問題となりやすい。一般的には、切削工具の欠損と切削力の大きさに相関があるため⁵⁾、加工中の最大切削力を抑制することで、工具欠損を予防しつつ、切削負荷が小さい領域では、送り速度を増加させることで加工時間の短縮を試みた。

まずはじめに、加工に用いる工具の寿命試験を行い、切削負荷の許容値を見積った。Fig. 6に切削力と工具欠損に至るまでの工具寿命時間との関係を示す。切削力の抑制によって工具寿命が改善される結果となっており、この実験結果から、最大切削力の許容値を設定し、切削負荷予測シミュレーションを用いて NC プログラムを最適化した。

Fig. 7(a) に従来の NC プログラムで加工した場合の切削負荷変動の予測値を, Fig. 7(b) に最適化 NC プログラムで加工した場合の切削負荷変動の予測値を示す. 最大切削力を抑制しながら, 低負荷領域の送り速度を増加させることで, 加工時間が 32 % 短縮された. Fig. 8 にそれぞれの NC プログラムで加工した後の工具刃先

写真を示す. 従来の NC プログラムでは, 工具刃先にチッピングが見られていたが, 切削負荷予測で最適化した場合, チッピングは見られなかった. 結果として, 工具欠損を回避しつつ, 高能率化を図ることが可能となった.

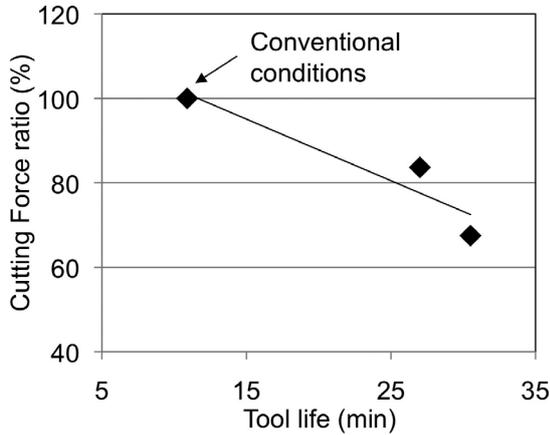


Fig. 6. Relationship between cutting force and tool life in end-milling process of SUS630.

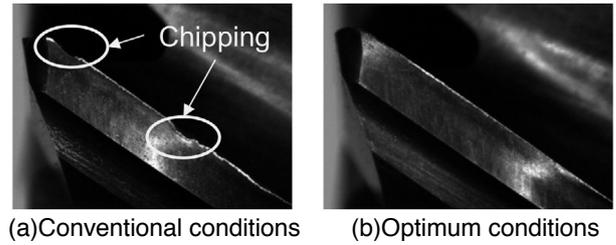


Fig. 8. Comparison of tool wear after rough machining process between conventional and optimum conditions.

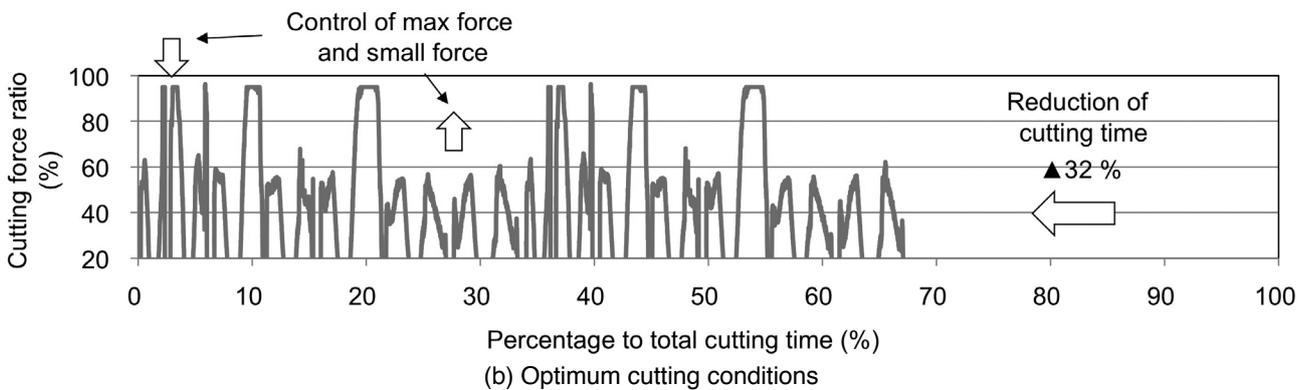
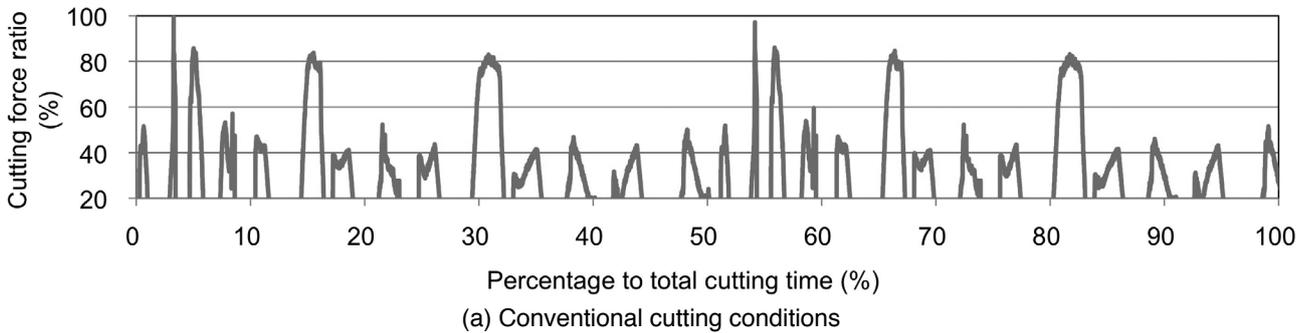


Fig. 7. Optimization example of NC program.

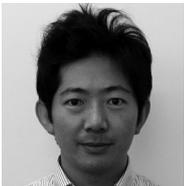
4. 結 言

インペラーディスク加工（SUS630）をモデルケースに、加工能率向上と工具寿命改善に対する切削負荷予測シミュレーションの活用事例を示した。

- 1) 被削材の切削特性を実験的に評価し D/B化することで、市販の汎用ソフトを用いても十分な切削負荷予測精度が得られることを示した。
- 2) 加工プロセスの最大切削力を制御することで、工具寿命の向上と加工時間の短縮を同時に実現できることを示した。

（文 献）

- 1) 松村隆：精密工学会誌，80(2014)，9，803.
- 2) 江渡寿郎，大西慶弘，越水重臣，白井秀二：精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集，2014，665.
- 3) 佐々木歩，岩崎孝行，長谷川雅信，佐賀立朗，澤田法吉：IHI技法，52(2012)，3，85.
- 4) 八田武士，糸魚川文広，杉野敦，木村利光：電気製鋼，82(2011)，2，109.
- 5) 中川純一，大江章平，杉野敦，八田武士：精密工学会秋季大会学術講演会論文集，2015，153.



八田武士



中川純一