

特集：新世代商品群の生産技術

33

アルミ切削加工のための低コスト高能率加工技術開発 Low Cost High Efficiency Machining Technology for Aluminum Cutting

榎本 智章*¹ 林 一哉*² 増田 雅彦*³
Tomoaki Enomoto Kazuya Hayashi Masahiko Masuda
森本 博幸*⁴ 藤原 秀行*⁵
Hiroyuki Morimoto Hideyuki Fujiwara

要 約

次世代商品群のエンジン部品は高機能化により、その加工時間は常に増える傾向である。そのため、加工品質を保証しつつ、更に高能率で加工を行うためには、加工中の切削状態を把握し、切削力に合わせて切削条件を適切にコントロールする必要がある。

これを実現するため、①正味切削力を高精度に計測する「切削力センシング技術」、②この技術により得られた実切削力とCAEとの整合取りを行い、最大切削効率となる切削力の目標値をCAEで予測する「切削力決定方式」、③これらの技術をベースとし、刃具摩耗や被削材硬度の変化に対し、常に最大切削効率となるように切削条件をコントロールする「適応制御技術」を開発した。これらの取り組みについて紹介する。

Summary

Machining time for the engine parts tends to increase by realizing high functionality of the products in next generation. In order to implement machining with higher efficiency while assuring machining quality, it is necessary to confirm the cutting condition during machining and control cutting conditions properly according to cutting force.

In order to realize this, the following technologies are necessary. 1. "Cutting force sensing technology" to measure net cutting force with high accuracy, 2. "Cutting force determination method" by ensuring consistency between actual cutting force with #1 technology and CAE, and expect the target value of cutting force as the maximum cutting efficiency by CAE. 3. Based on these technologies, for the changes by wear of cutting tool and hardness of work material, we developed "Adaptive control technology" to control cutting conditions to realize the maximum cutting efficiency. This article introduces the efforts of these technologies.

Key words : Production・Manufacture, Machining, Sensing of Cutting Force, Adaptive Control, High Efficiency Machining

1. はじめに

アルミニウム合金は特殊なものを除き被削性が良く、比較的高能率加工が容易であるが、さらなる加工能率を追求するには加工の状態をインプロセスでモニタリングすることで定量的に把握し、刃具の性能を十二分に引き出すよう切削力に合わせて切削条件を最適化する適応制御も視野に入れ、取り組む必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは主軸のサーボモーター負荷を参考としながら加工条件やツールの仕様を見直し、高能率加工に取り組んできた。しかしサーボモーターによる切削力評価は、使用回転数によってサーボモーター負荷の割合が異なり、切削力の変化に対する追従性が悪く、適応制御には向かない。

そこでマシニングセンターの主軸に力センサーを埋め込み、直接切削力を計測できるセンシング主軸を開発した。

*1～5 技術本部
Production Engineering Div.

2. 切削力センシング技術の開発

量産加工の過酷な状況の中で、安定的に高精度な切削力を計測するために次の3つを開発目標として、設備メーカーと協働で主軸に力センサーを組み込んだ。

- ①温度ドリフトが小さい (40N/分以下)
- ②計測精度が高い (計測精度±20N)
- ③応答性がよい (応答遅れ0.02秒以下)

力センサーは計測感度が高く、かつ高剛性である水晶圧電型を選択した。

センシング主軸の基本的な構造は筆者らが検討し、設備メーカーと何度も協議し、力センサーのレイアウトや油気圧配管経路を決定した。

主軸への力センサー組込み検討では、CAEによる静剛性解析を行い、マシニングセンターの軸移動性能に影響を与えないレベルで部材の寸法・形状を見直し、力センサー取り付けによる主軸剛性の低下に対する補強を行った。

また、温度ドリフトは、主軸内部を流れる切削油の温度変化が大きく影響を与えるため、断熱化と温度分布の均一化に主眼を置き、数パターンの切削油油路仕様を選定した。これらを熱変形解析で評価し、最適な切削油油路の仕様・レイアウトを選定した。

以上の対策を織り込んだセンシング主軸をFig. 1に示す。



Fig. 1 Main Sensing Spindle

また、ドリル加工における加工初期のセンシング主軸とサーボ負荷の計測状態を比較したものをFig. 2に示す。

センシング主軸はサーボ負荷に対し、応答遅れが0.001秒以下と少なく、制御のオーバーシュートの影響もない実切削力が測定可能である。

Fig. 3にセンシング主軸の入力荷重と出力荷重の関係を示す。入力荷重は水晶圧電型の力センサーで計測したものである。

Fig. 4に入力荷重に対する出力荷重の誤差との関係を示す。計測精度も±20N以下を確保した。

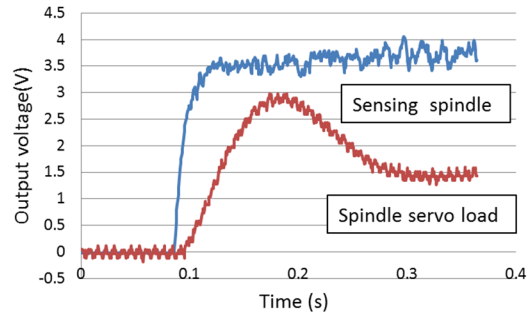


Fig. 2 Comparison of Cutting Force Responsiveness at Initial Period of Drilling

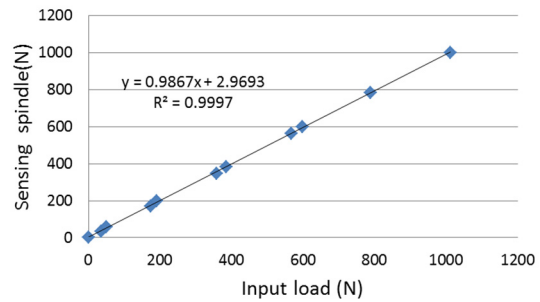


Fig. 3 Measurement Accuracy

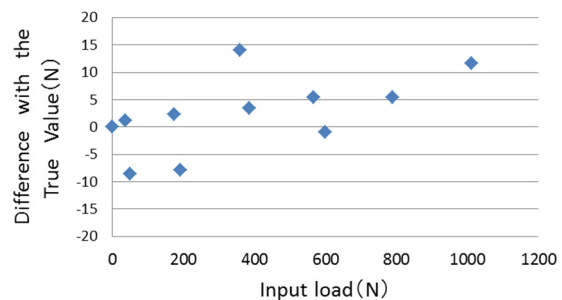


Fig. 4 Output Error for Input

Fig. 5に1台のワークを加工するために使用する刃具の、加工開始から終了までの温度ドリフトを示す。力センサーへの熱影響対策と、センサー近傍の温度変化を測定・計測値の補正を行い、温度ドリフトを40N/分以下とした。

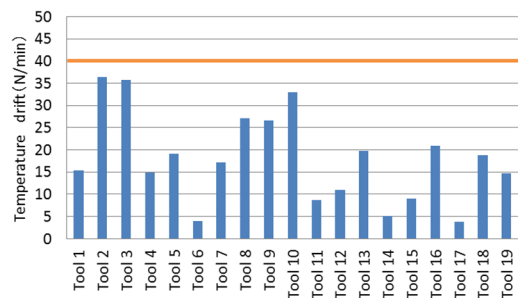


Fig. 5 Temperature Drift of Each Tool

3. 切削力決定方式の構築

高効率かつ加工品質を保証可能な目標切削力予測のため、まずFig. 6のように解析に使用する3Dモデルの溝・シンニング・逃げ角・マージンといった形状諸元を細部に至るまで再現することで、モデリング精度を向上させた。

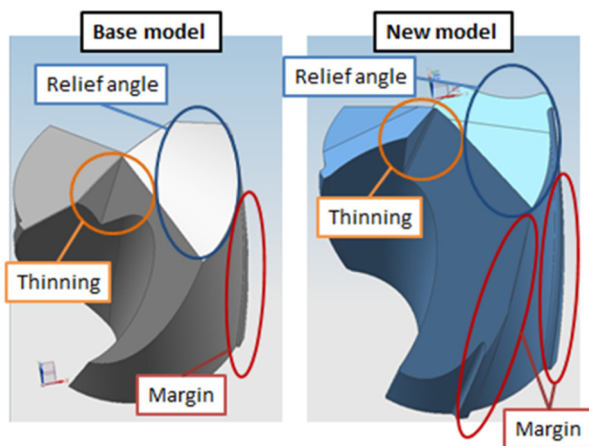


Fig. 6 3D Model of Drill Bit Shape

このモデルを使用し切削力シミュレーションと、センシング主轴による量産加工時の切削力を一致させ、解析の信頼性を向上した。

これらにより、CAEによる予測誤差を±50%から±6.0%以下とした (Fig. 7)。

この切削力シミュレーションをベースに、比切削抵抗が最小となる切削送りで発生する切削力を、最適切削力と定義して適応制御における目標値とした⁽³⁾⁽⁴⁾。

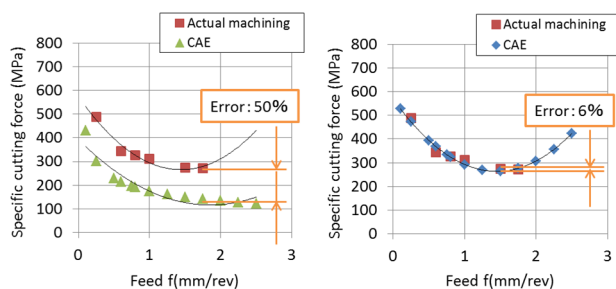


Fig. 7 Comparison of Actual Machining Data and CAE Data

4. 適応制御システムへの取り込み

開発したシステムの概略をFig. 8に示す。主轴に組み込んだ力センサーにかかる切削力をチャージアンプにて電圧変換する。この負荷信号をADコンバータにてデジタル化して、既設PLCにてフィードバック高速処理することで制御遅れを最小化し、Z軸の切削送りオーバーライド

を設定条件でコントロールする仕様となっている。切削送りオーバーライドとは加工プログラムで設定された送り速度に倍数をかけて、送り速度を変更する機能である。

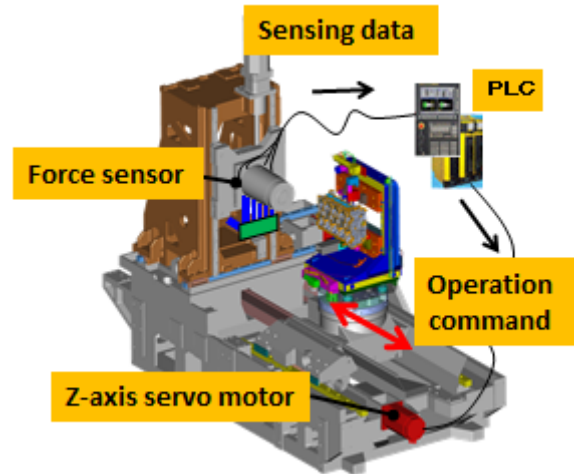


Fig. 8 System Schematic

量産部品加工において必要と考えられる制御ロジックを次の2つとした。

①1穴当たりの加工時間が数秒以上と長く、取り代や切粉排出性に変化を生じるものは、その瞬間ごとの切削力から、切削送りオーバーライドを変更 (以降、リアルタイム制御と記載) するロジックとした。Fig. 9に示すようにリアルタイム制御は、上下限の許容値を持たせた切削力为目标値とし、切削力が上限を超えた場合は設定した割合で送りオーバーライドを下げることで切削力が許容値に入るようコントロールし、切削力が下限を割った場合は、同様に設定した割合で送りオーバーライドを上げることで切削力が許容値に入るようコントロールする。この制御を随時行うことで送り速度を変化させ、切削力を許容値内に制御する。

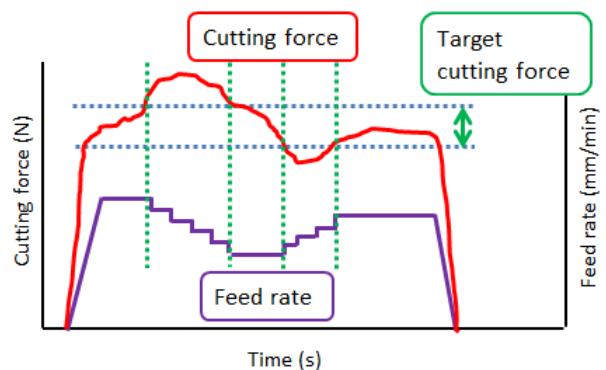


Fig. 9 Conceptual Diagram of Real-time Adaptive Control

②1穴当たりの加工時間が1秒前後以下と短く、切削条件が同じ場合、その平均切削力から次のワークで切削送りオーバーライドを変更（以降、ワンサイクル制御と記載）するロジックとした。Fig. 10に示すようにワンサイクル制御は切削力の平均値が、許容値に入るよう切削送りオーバーライドをワーク1台ごとにコントロールするもので、1台ごとの加工時の送り速度は一定である。

前回加工時の切削力が許容値を超えた場合は設定した割合で今回加工時の送りオーバーライドを下げることで切削力が許容値に入るようコントロールし、前回加工時の切削力が許容値を割った場合は設定した割合で今回加工時の送りオーバーライドを上げることで切削力が許容値に入るようコントロールする。

なお、①・②どちらの制御もオーバーライドの補正周期・量、及び切削力の許容値等を任意に設定できるよう開発した。

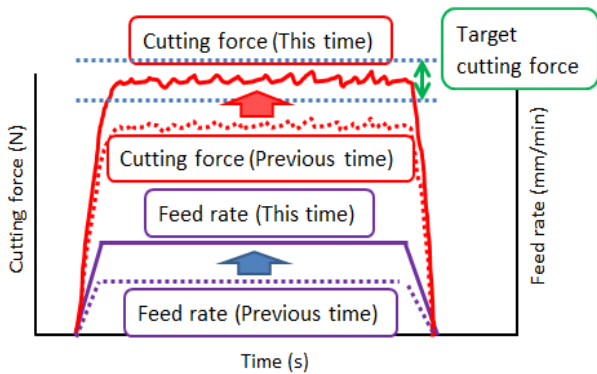


Fig. 10 Conceptual Diagram of Feed Rate Control

加工した部品の加工品質情報に、刃具ごとの加工数や切削力の情報を追加し、これをサーバーに蓄積することで量産加工における刃具の新品時から摩耗交換時までの切削力の推移と加工品質の相関を把握することが可能となった。この技術によって切削条件の設定や刃具諸元の選定を、定量的かつ実態の加工状態で比較・選択できるようになり、より高い切削効率を引き出せるようになった。

5. 適応制御加工による効果

エンジン部品のシリンダーブロックにおけるボア荒ボーリング加工にリアルタイム制御を導入した事例をFig. 11に示す。刃具の摩耗状況とシリンダーライナーの硬度バラツキに対し、随時切削送りオーバーライドをコントロールすることで、切削力によるボアライナー下端の割れを監視しながら、加工時間を平均で約25%短縮した (Fig. 12)。

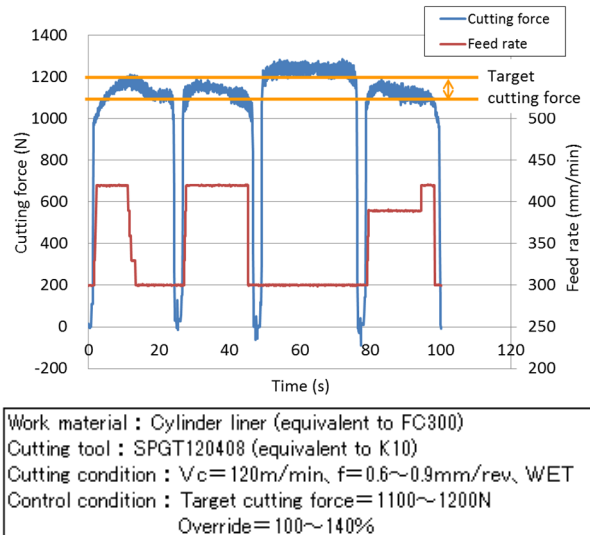


Fig. 11 Machining Example by Real-time Adaptive Control

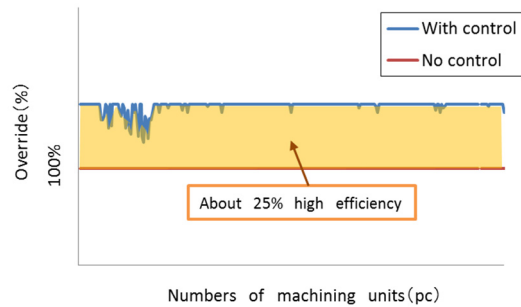


Fig. 12 Transition of Override

エンジン部品のシリンダーヘッドにおける油穴加工にワンサイクル制御を導入した事例をFig. 13に示す。刃具が新品時には切れ味がよいため、設定した上限送り速度で加工を行っている。刃先の摩耗に伴い、設定した上限切削力の2300Nを超えると切削送りオーバーライドを下げ、目標切削力の範囲に送り速度をコントロールする。

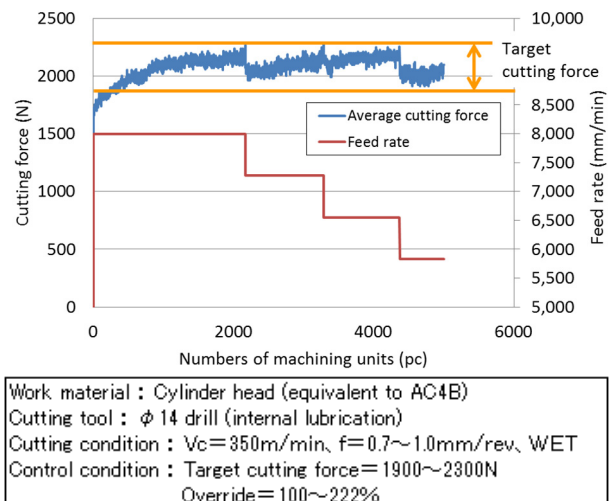


Fig. 13 Machining Example by Feed Rate Control

この制御の導入により、当初の切削条件に対し平均約30%の加工時間短縮を実現した (Fig. 14)。

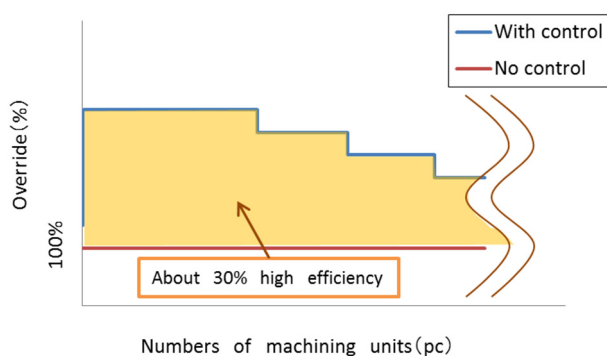


Fig. 14 Transition of Override

6. おわりに

アルミ製エンジン部品加工における高精度・高能率加工追求のため、量産加工用のマシニングセンターに、力センサーを組み込んだ切削力センシング技術を開発し、2種類の適応制御加工システムを内製した。

この技術による高能率化で、商品性機能UPのための加工部位増加への対応と、高精度化を実現することができた。

また、切削力の常時監視により、加工品質保証が可能となった。

参考文献

- (1) 社本英二, 樋野励, 梅崎雅之, 森脇俊道: 切削力モデルに基づくエンドミル加工状態の知的認識, 日本機械学会論文集(C編)69巻683号, pp.1927-1932 (2003-7)
- (2) 佐藤智典, 垣野義昭, 松原厚, 藤嶋誠, 西浦勲, 鎌谷康史: 知能化工作機械によるドリル加工制御に関する研究 (第1報), 精密工学会誌Vol.66, No.8, pp.1270-1274 (2000)
- (3) 切削油技術研究会: フライス加工ハンドブック, pp.35-34 (1988)
- (4) 切削油技術研究会: 現場技術者のための穴加工皆伝, pp.18-19 (1994)

この論文は公益社団法人精密工学会誌85巻2号に投稿した内容に追記・転載したものです。

■ 著 者 ■



榎本 智章



林 一哉



増田 雅彦



森本 博幸



藤原 秀行