

# 機械加工シミュレーション技術による高能率加工

## High Efficiency Machining through the Employment of Machining Simulation Technology

佐々木 渉 技術開発本部生産技術センター加工技術部  
岩 崎 孝 行 技術開発本部生産技術センター加工技術部 課長  
長谷川 雅 信 技術開発本部生産技術センター加工技術部  
佐 賀 立 郎 技術開発本部生産技術センター加工技術部  
澤 田 法 吉 株式会社 IHI ターボ 生産センター生産技術部

近年、製品のさらなる高品質化、リードタイム短縮およびコスト削減が求められており、機械加工においても高精度、高能率化が求められている。今なお、製造現場では過去の経験やトライアンドエラーに頼った加工の最適化が行われている一方で、数値解析の進歩に伴い機械加工にもシミュレーションが適用されるようになり、加工現象の予測が可能になりつつある。そこで本稿では、FEMによる機械加工シミュレーション、振動解析による加工びびり予測、および切削負荷解析によるNC(Numerical Control)プログラムの最適化、によって高能率化する手法を示し、その適用事例を紹介する。

In recent years, there have been demands for higher quality, shorter lead time and cost reduction with regard to the manufacturing of products. In addition, high accuracy and efficiency is also required in machining process. However, attempts are still being made to resolve machining process problems based on past experience and trial and error. On the other hand, numerical simulation is being used in machining processes to predict processing phenomena by making use of advances in numerical analysis. This paper shows the possibilities for improving machining efficiency using machining simulation that employs the finite element method, the prediction of chatter vibration in machining through vibration analysis and the optimization of NC programs through cutting forces analysis.

### 1. 緒 言

近年、製品のさらなる高品質化、リードタイム短縮およびコスト削減が求められており、機械加工においても高精度化、高能率化が求められている。しかし、今なお、製造現場では過去の経験やトライアンドエラーに頼った加工の改善が行われているのが現状である。特に当社で扱うような大型構造物やチタン合金やニッケル基合金といった高価な難削材を使用するジェットエンジン部品などでは、試験、試作を繰り返すことは時間とコストの両面で容易ではなく、実験的アプローチには限界がある。

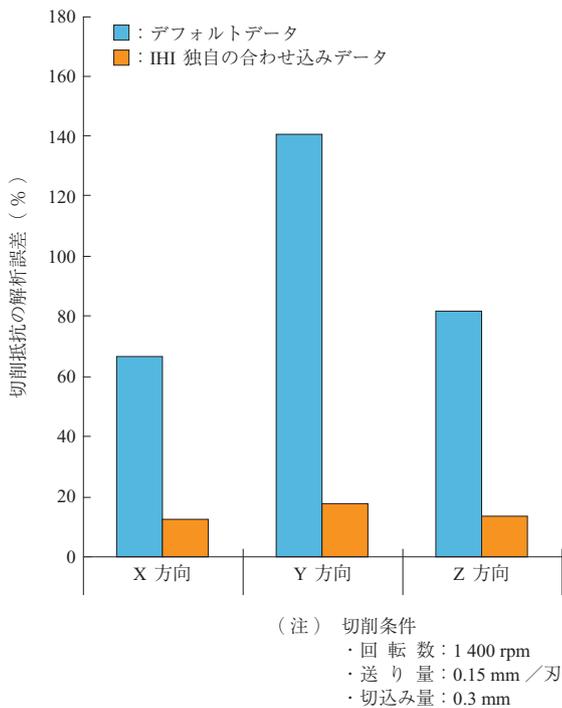
一方で、数値解析の進歩に伴い機械加工にもシミュレーションが適用されるようになり、加工現象の予測が可能になりつつある。当社では、自社開発の機械加工シミュレータに加え、市販の汎用ソフトウェアを導入し、これらを組み合わせて加工条件の最適化技術の開発を進めてきた。本稿では、その取り組み事例について紹介する。

### 2. 機械加工のシミュレーション技術

#### 2.1 有限要素法を用いた切削シミュレーション

有限要素法(FEM)を用いた切削シミュレーションでは、実験では計測することが困難な材料・刃物の内部応力や刃先の温度などを得ることができる。これによって、切削現象を理解し、効果的な改善を実施できることが期待され、当社では、AdvantEdge®を導入している。解析に用いる材料物性値はその取得が困難であるが、本ソフトウェアではデータベースとしてデフォルトデータ(あらかじめ、登録されたデータ)が内包されており、100種以上の材料についてシミュレーションができる。しかし、デフォルトのデータだけでは十分な精度を得られない事例も多く、各種の社内材料試験結果から材料物性値を取得し、シミュレーションの高精度化を図っており、これが当社のノウハウとなっている。

第1図に、SCM440H材のフェースミル( $\phi 32$  mm, 2枚刃工具)における実験結果と解析結果の切削抵抗における誤差比較の例を示す。AdvantEdge®のデフォルトデー



第 1 図 切削抵抗解析誤差の材料物性値による比較  
 Fig. 1 Comparison of material properties for analytical errors related to cutting force

タを用いた場合と、取得した材料物性値を用いた場合における解析結果を比較した。本事例では取得したデータの場合、切削時の X, Y, Z 各方向の切削抵抗の解析結果と実験結果との誤差を 20% 以内に抑えることができた。

## 2.2 切削負荷予測シミュレーション

FEM によるシミュレーションは、解析時間の関係上、極めて短時間の切削現象を解析することしかできない。しかし、一般的に実製品の加工では、時々刻々と切削条件が変化するため、工程全体のシミュレーション技術も必要となる。切削負荷予測には ProductionModule® を導入している。実験で得られる比切削抵抗をベースとして、工程全体の切削負荷をシミュレーションによって予測し、さらにはその切削負荷を最適化変数として NC ( Numerical Control ) プログラムの送り速度を最適化するソフトウェアである。本ソフトウェアの適用事例の詳細は後述する。

## 2.3 びびり予測・回避のためのシミュレーション

切削加工時に問題になるびびりには幾つかの種類があり、その種類を見極めて適切な対策を講じる必要がある。当社では、実加工で最も問題となる、切りくず厚さの変動に起因する再生びびりを予測できる、びびり予測ソフト CUTPRO® を導入し、再生びびりの予測・回避に利用してきた。また、断続切削に伴う周期的衝撃力に起因する強制びびりの予測プログラムを作成し<sup>(1)</sup>、加工能率を下げ

ずに両方のびびりを連動的に解析、回避する独自の技術開発を進めている。第 2 図にその加工適用例を示す。

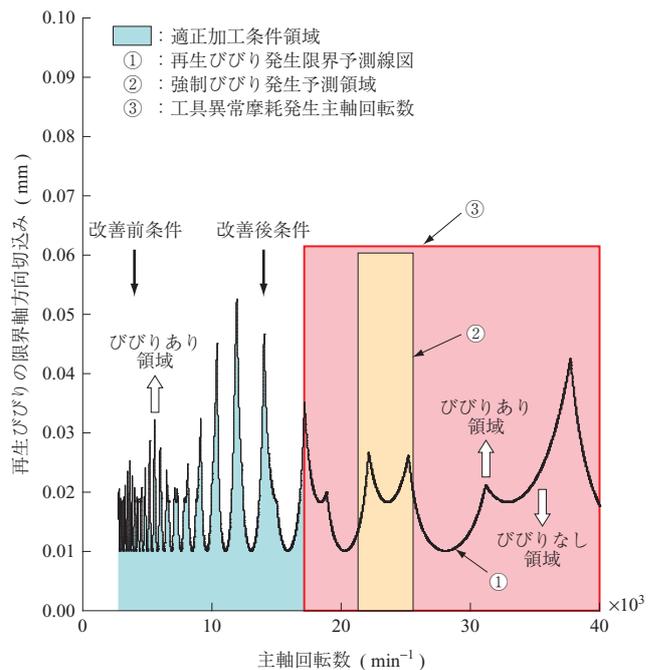
① CUTPRO® で予測した再生びびり発生限界予測線  
 ② 作成プログラムで予測した強制びびり発生予測領域  
 ③ 工具の異常摩耗が発生する主軸回転数、を要素試験結果と、加工時の工具とワークの接触状態から算出している。これら三つの現象を考慮することで、再生びびりを避けるだけでなく、強制びびりおよび工具異常摩耗領域を回避した主軸回転数や軸方向切込み量を求めることができる。第 2 図の例では、改善前条件に対して、主軸回転数を高速回転側に変えることによって、びびりおよび工具異常摩耗を回避した条件に改善した事例である。この結果、従来の 3 倍の効率で加工することができた。

## 3. 切削負荷予測シミュレーションの適用事例

本章では、特に実用的で即効性のある ProductionModule® による切削負荷予測と NC プログラムの最適化に関する適用事例について紹介する。

### 3.1 NC プログラムの最適化技術

当社で生産している航空機用ジェットエンジン部品や自動車用ターボチャージャー部品などの複雑形状部品の加工では、近年、5 軸制御のマシニングセンタと小径のボールエンドミルによる切削加工が多用されるが、工具とワークの接触状態や NC プログラムが複雑で、経験と勘による高能率化には限界がある。また、複雑な形状を



第 2 図 びびり回避手法の適用例  
 Fig. 2 Example of application of a method to avoid machining chatter

同時 5 軸加工する場合、従来の CAM ( Computer Aided Manufacturing ) の機能では選定した最適切削条件を安定して実現することは困難である。

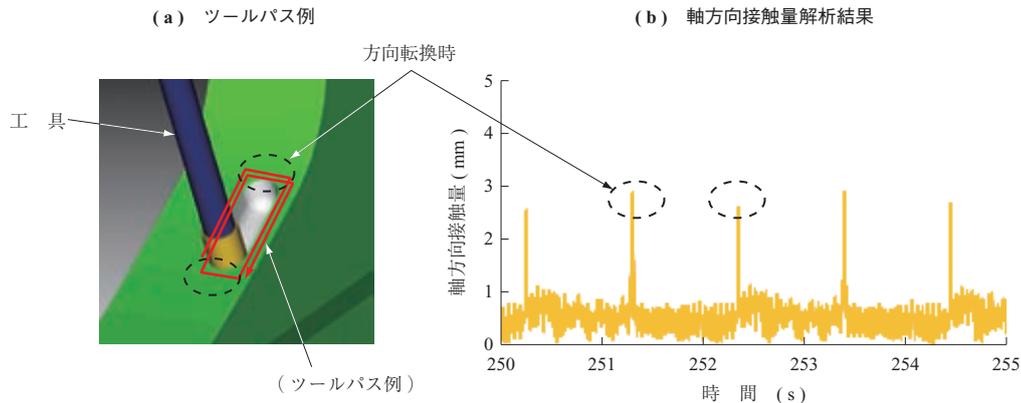
第 3 図に、ボールエンドミルを用いた簡単な例として、CAM で作成した NC プログラムについて、軸方向の接触量を解析した例を示す。この例では、ボールエンドミルの送り方向が反転する瞬間に、軸方向接触量が急増していることが分かる。このように軸方向接触量が急増する部分では、過大な切削負荷が工具に掛かり、刃先の欠損などの不具合を引き起こす場合がある。実際の加工においては、このような瞬間的な切削条件の変動に対して適切なプログラム修正を行うことは困難であり、プログラム全体の送り量を小さくするなどして対応せざるを得ず、加工時間の増大を招く。

第 4 図に、接線抵抗を最適化変数として、送り速度を調整した NC プログラム最適化の例を示す。第 4 図 - ( a ) は最適化前の状態を示しており、加工機および工具剛性を考慮したときに、許容される接線抵抗の上限値に対して乖離が生じており、十分に能力を引き上げ切れて

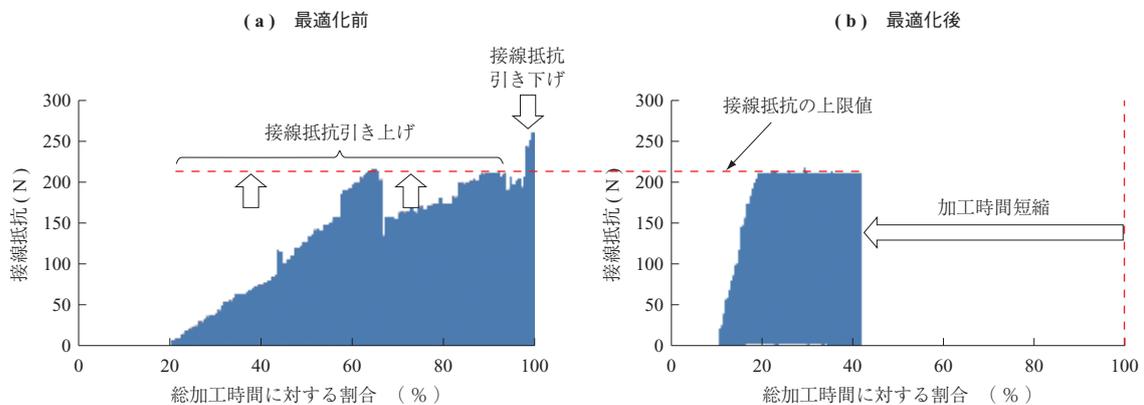
いない部分と逆に上限値を超えた部分が見られる。これに対して、第 4 図 - ( b ) に示した最適化後の結果では、接線抵抗が上限値で一定に安定するように送り速度を調整して、NC プログラムを最適化している。送り速度の調整は、NC プログラムの 1 行ごと ( さらに分割することも可能 ) に行うことができるので、ピンポイントの調整が可能である。CAM で出力した NC プログラムには、通常、切削負荷が低い部分が多数存在するため、切削負荷の平滑化による工具寿命や加工精度の向上と加工時間の短縮を両立できる場合が多く、第 4 図の例では、59%の加工時間が短縮された。

### 3.2 適用事例

インペラ加工へ適用した事例を紹介する。最適化変数を接線抵抗とし、従来の加工条件の接線抵抗解析結果を基準条件を設定する。瞬間的なピーク値を除き、残った部分の最大値の半分の値を接線抵抗の基準条件 ( 条件 1 ) とした。さらに、基準条件から接線抵抗の目標値を引き上げた 2 条件を加え、合計 3 条件での最適化を行い、試作を行った。第 1 表に各工程における最適化変数の目標値



第 3 図 ボールエンドミル加工の軸方向接触量解析例  
Fig. 3 Analysis case involving the axial depth of cuts in ball-end milling



第 4 図 NC プログラムの最適化例  
Fig. 4 Example of NC program optimization

第 1 表 最適化変数および目標値  
Table 1 Optimization variables and target values

工 程	最適化変数	最適化変数の目標値			
		基準条件比率	条件 1	条件 2	条件 3
①	接線抵抗	1.0	1.0	1.3	1.7
②		1.0	1.0	1.3	1.7
③		1.0	1.0	1.3	1.7
④		0.17	1.0	1.5	2.0
⑤		0.027	1.0	1.5	2.0
⑥		0.67	1.0	1.0	1.0

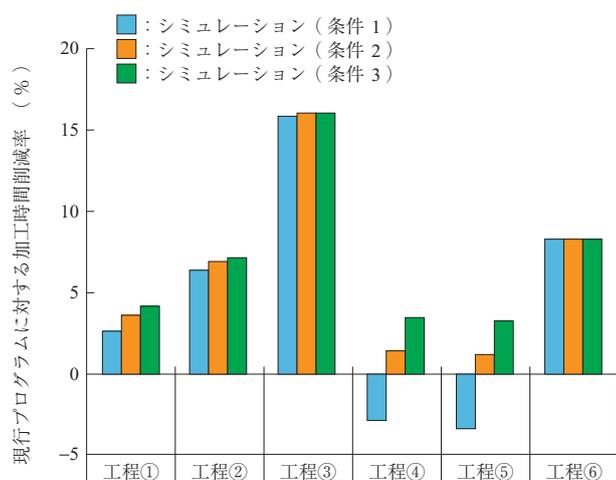
を示す。条件 2, 3 は条件 1 に対する割合で示す。なお、加工精度に大きな影響を与える工程④, ⑤では目標値を低めに設定し、取り代が十分少ない工程⑥においては、解析結果を参考にして、工程内の送り速度は一定に設定している。

第 5 図に、各条件における現行 NC プログラムに対する加工時間削減率の解析結果を示す。工程④, ⑤では、接線抵抗の目標値が低い条件 1 において加工時間が増大する。しかし、工程全体では、すべての条件において加工時間が短縮できると予想された。

最も時間短縮効果が大きい条件 3 においても、最適化前の切削条件に比べて加工精度は向上し、仕様を満足することが確認された。過大な切削負荷を抑制することでワークの逃げを防止し、加工精度も向上させることができたと考える。また、条件 3 での試作では、最適化前の加工条件と比較して、23%の加工時間が短縮された。

### 3.3 今後の課題

現時点では実績データや要素試験データを用いることなしに最適化変数の目標値を定量的に設定することは困難な



第 5 図 各条件における現行プログラムに対する加工時間削減率の比較

Fig. 5 Comparison of cutting conditions for the rate of reduction for machining time for the current NC program

場合が多い。本事例においても、3 回の試作を要しているが、ある程度の精度と時間で加工できることが明らかな従来の加工条件がなければ、さらなるトライアンドエラーが必要とされるであろう。今後、試作を行わずに、最適化変数の目標値を定量的に定義するためには、十分な精度で変数を計算できるシミュレータと、変数の上限目標値などを理論的に定義できる技術が必要である。

## 4. 結 言

本稿では、機械加工現場における過去の経験やトライアンドエラーに依存した加工条件の最適化に対して、機械加工シミュレーションを活用した NC プログラムの最適化手法の有効性を示した。本手法を適用した事例において、切削負荷を抑え加工品質を安定に保ちつつ、切削負荷に余裕がある部分に対しては送りを大きくすることで加工時間を削減することができた。

近年、工作機械や NC, 工具, CAM といった機械加工における要素技術の高速化, 高性能化が進んでおり、当社でも、これまで鋳造やプレスによって製造されていた複雑形状部品が、機械加工で対応可能になる事例がでてきている。

一方、客先ニーズの多様化, 変種変量生産に加え、歴史的円高, 新興国の台頭などによって、短納期, 低コスト化への要求がますます高まっている。さらなる要求に応えるためには、カイゼンレベルを超えた、革新的な高能率加工技術を開発し、圧倒的な低コスト化を実現しなければならない。

その一つ的手段として、高度化した要素技術を最大限に有効利用するため、今後も機械加工シミュレーション技術は重要な役割を果たすものと考えられる。シミュレーションによって機械加工を数値的に捉え、理論, 理屈に基づいた現象解明を行うことによって、試験, 試作を減らし、革新的な加工方法や工具, 加工条件の開発を効率的にスピードをもって進めていく。今後とも、革新的な機械加工技術をもって、新しい製品の開発や仕組みの構築に寄与し、社会の発展に貢献していく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 鈴木教和, 井加田勲, 樋野 励, 社本英二: 強制・自励型びびり振動を回避するエンドミル加工条件の総合的検討 精密工学会誌 Vol. 75 No. 7 2009 年 7 月 pp. 908 - 914