

加工現象の定量化と高能率切削加工技術

Quantification of Phenomena in Metal Cutting Processes and High-Efficiency Cutting Technologies

小島 彰 小池 栄二郎 佐藤 栄二

■ KOJIMA Akira

■ KOIKE Eijiro

■ SATO Eiji

蒸気タービンや、発電機、モータなどに代表される社会インフラ事業の製品の部品加工では、高品質化と、製造リードタイム短縮及びコスト削減を両立させるために、切削加工の高精度化及び高能率化が強く求められている。高精度化と高能率化を両立させるための課題を明確にして、早期に施策を立案し、効果を検証するためには、加工現象に基づいて加工条件を適正化し治工具及び装置を開発することが重要である。

東芝は、加工現象のモニタリングとシミュレーション技術を開発し、これらにより加工起因の課題を明確化して、高精度で高能率な切削加工技術を効率的に製造現場に適用している。

In the field of social infrastructure products including steam turbines, electric power generators, and motors, metal cutting technologies offering higher performance and higher efficiency are required both to maintain high quality and to reduce manufacturing lead times and costs. In order to efficiently improve a manufacturing process, it is necessary to perform sufficient analysis of phenomena in the metal cutting processes and to develop optimal machining conditions, tools, jigs, and other equipment based on this analysis.

Toshiba has developed monitoring and simulation technologies to quantitatively evaluate phenomena in metal cutting processes. Utilizing the results obtained, we have been applying high-precision and high-efficiency metal cutting technologies at our production sites.

1 まえがき

蒸気タービンや、発電機、送電・変電設備、モータに代表される社会インフラ事業の製品には、製品性能に直接影響を与える高精度な部品が多く含まれている。近年の急速に進展するグローバルな経営環境では、高品質なモノづくり力の維持及び向上とともに、製造リードタイム短縮とコスト低減が強く求められるようになってきた。そのため、加工技術でも高品質化と高能率化の両立がより重要となってきている。

従来の加工技術開発では、主に加工された結果に着目し、その精度のばらつきや表面品位と相関が高い加工パラメータを見つけ、それを調節するというアプローチが一般的であった。しかし、このようなアプローチは、高品質かつ高能率な加工を実現するためには必ずしも効率のよいものではなかった。

そこで東芝は、これまでより加工のメカニズムに基づいた課題解決策の立案ができるよう、加工点や加工機で発生する物理現象を定量的に把握するためのモニタリングとシミュレーション技術の開発に力を入れてきた。ここでは、これらの技術の概要とその適用事例について述べる。

2 切削加工現象と高能率切削加工

切削加工は被削材料あるいは工具を回転して、それらに対運動を与えることで被削材料の不要部分を除去し、所定の

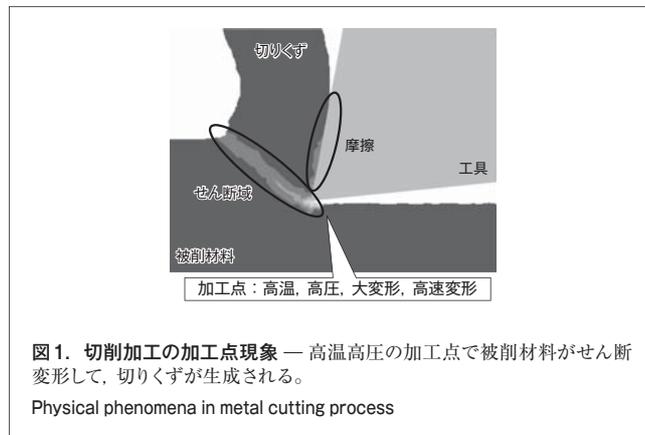


図1. 切削加工の加工点現象 — 高温高圧の加工点で被削材料がせん断変形して、切りくずが生成される。

Physical phenomena in metal cutting process

形状を得る加工方法である⁽¹⁾。

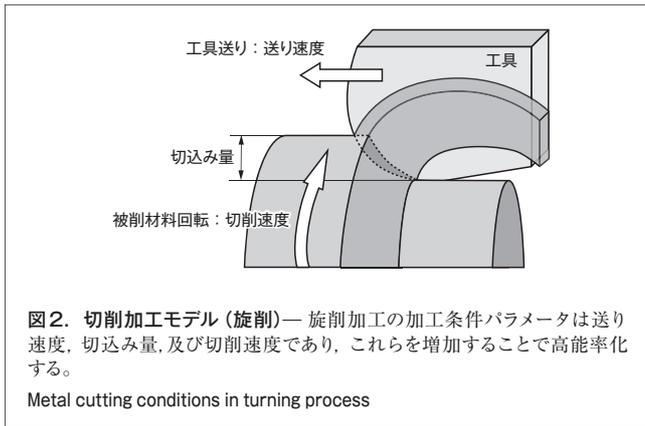
切削加工の加工点現象を図1に示す。工具は被削材料にせん断による塑性ひずみを与え、破断することで切りくずを生成する。切りくずは工具上面と接触し摩擦を生じながら工具上を滑り排出される。加工点の物理現象の特徴は、局所的に、かつ短時間で大変形が生じることである。その結果、加工点の応力は数GPa以上で温度は600℃以上に達する⁽²⁾。

切削加工の代表的なモデル(旋削加工)を図2に示す。

切削加工の能率は、次式で表すことができる。

$$\text{切削加工能率} = \text{送り速度} \times \text{切込み量} \times \text{切削速度}$$

切削加工を高能率化するためには、送り速度の増加、切込



み量の増加、及び切削速度の増加が必要である。

しかし高能率化に伴い、加工点では応力、ひずみ、及び温度が増加する。また、被削材料や、工具、工作機械に作用する力が増加するため、振動の発生や被削材料の変形による品質及び工具寿命の低下が生じる。

加工品質の維持と、工具の長寿命化、高能率化を同時に実現するには、加工点や加工機で発生する現象を定量的に把握したうえで工具や加工条件を選定することが重要となる。

3 モニタリングとシミュレーション技術の概要

加工点や加工機で発生する物理現象を定量的に把握するための手段として、図3に示すような様々なモニタリングとシミュレーション技術を開発している。

モニタリングとしては、加工点の可視化、切削抵抗の測定、振動加速度の測定、及び設備剛性の定量化に取り組んでいる。加工点の可視化の一例では切りくず処理性評価による工具の選定を、切削抵抗の測定では工具の選定と治具の把持力の決定を、振動加速度の測定では切削工程の異常判断を、設備剛性の定量化ではそれに基づく設備評価や加工条件の適正化を行っている。

シミュレーション技術としては、切削シミュレーションと構造解析に取り組んでいる。切削シミュレーションでは、工具形状や加工条件が切削抵抗や工具温度に及ぼす影響を定量化して、工具設計及び加工条件設定を行っている。構造解析では、工具と被削材料の変形量や振動振幅に基づいて、適正な工具の軌跡や、把持力、位置を決定している。

4 モニタリング及びシミュレーション技術の適用事例

ここでは、高品質かつ高能率な切削加工の実現を目的として、モニタリングとシミュレーション技術を適用した次の三つの事例について述べる。

- (1) 加工点の可視化による工具形状の設計
- (2) 構造解析による工具ホルダ形状の適正化
- (3) 切削シミュレーションを活用した高能率な加工条件の決定

4.1 加工点の可視化による工具形状の設計

加工点の可視化は、工具の切りくず生成過程や、工具への

図3. 切削加工のモニタリングとシミュレーション技術の概要 — 加工現象をモニタリングとシミュレーション技術により定量化して課題を明確にし、早期解決を図る。

Monitoring and simulation technologies in metal cutting processes

切りくず溶着などの現象を把握し、工具設計を行うための有効なモニタリング技術である。

自動化が進んだ現在の切削加工工程では、切りくずを適切に処理できない場合、切りくず除去の付帯作業のために設備を停止させなければならず、稼働ロスが発生する。また、切りくずが製品の仕上げ面を傷つけ品質不良が発生する場合もある。そこで、切りくず処理性を向上させることを目的に、工具には切りくずを分断するためのブレーカと呼ばれる凹凸形状を付与する。

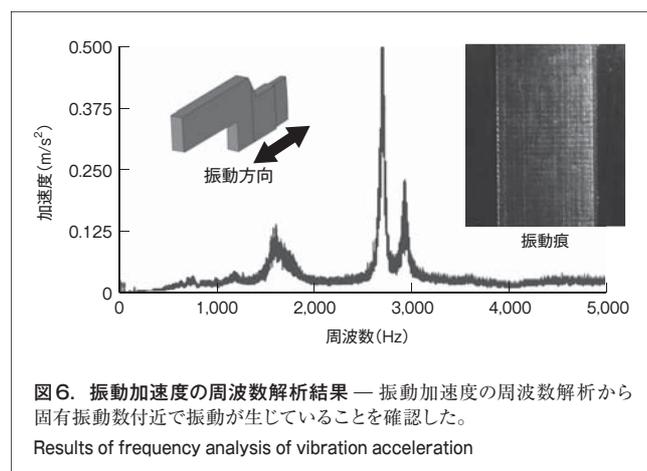
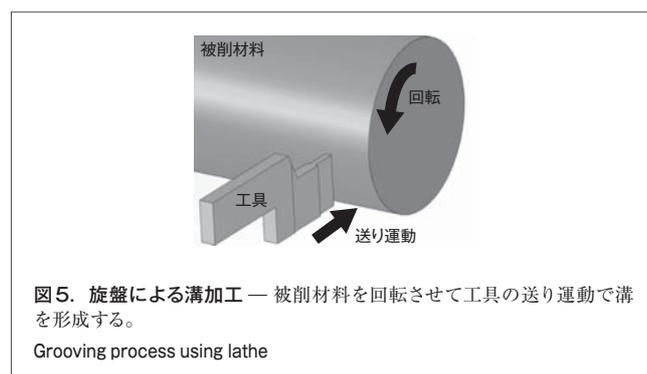
工具のブレーカによる切りくず生成状態を、高速度カメラを用いて撮影した結果を図4に示す。ブレーカAでは、工具に設けた突起部で切りくずが曲げられて、Cの字状に分断され排出されているようすが観察され、ブレーカの効果が確認できる。一方、ブレーカBでは切りくずがブレーカ突起部に届かずに、連続的な切りくずが排出されている。このような切りくずは工具や被削材料に絡み、品質低下の要因になる。

従来の加工試験では切りくずのブレーキング性能は切りくずを観察することで行ってきたが、工具のブレーカ形状や加工条件と切りくず分断性との相関関係を明確にすることは困難であった。可視化を用いることで、確実に切りくず処理できる工具形状と加工条件の決定が可能になった。これにより、稼働ロスや品質不良の発生を未然に防ぐことができる。

4.2 構造解析による工具ホルダ形状の適正化

図5に示すような溝加工で高能率化を図るためには、被削材料の回転数を増加することが有効である。しかし、回転数の増加は加工中に振動の増大を引き起こし、加工精度や表面粗さの悪化、及び工具の破損の要因となる。

そこで、工具ホルダ形状の動剛性を解析して高剛性化を図り、切削加工の高能率化を検討した。



溝加工中の振動加速度を測定した一例を図6に示す。2,700 Hzの周波数で振動スペクトルが強く、切りくずの観察からも同周波数の振動痕を確認した。また、工具ホルダの動剛性を測定した結果、2,700 Hz付近に大きなピークが発生していた。すなわち、工具の動剛性が弱いことから振動が励起されていることを確認した。

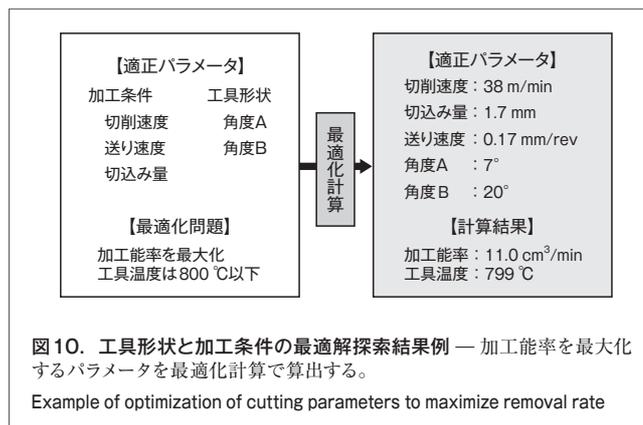
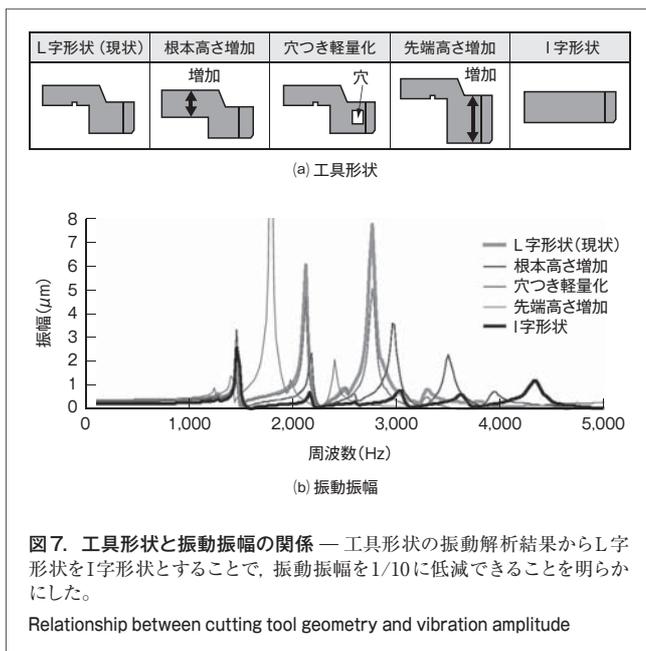
工具の動剛性を高める工具形状を明らかにするために実施した振動解析の結果を図7に示す。現状のL字型の工具ホルダ形状から高剛性なI字型の工具ホルダ形状に変更することで振動振幅を1/10に低減することができる。これにより、回転数の増加が可能となり、5倍の切削加工能率を得た。

4.3 切削シミュレーションによる加工条件の決定

図8に示す切削シミュレーションは、有限要素法を用いた弾塑性と熱伝導の連成解析であり、実験ではえがたい加工点の応力場と温度場を推定することが可能である。

このシミュレーションと実験計画法や応答曲面法を組み合わせることで、任意の工具形状と加工条件に対する切削抵抗や工具温度の関係を短時間で解析する仕組みを構築した。更に、自動最適化アルゴリズムを適用することで、最大の能率を達成する工具形状と加工条件の組合せを求めることも可能である。

この仕組みの概要と、切削速度及び送り速度と工具温度の関係を求めた一例を図9に示す。また、難削材料である超耐



熱合金の加工に最適化計算を適用した一例を図10に示す。加工能率11 cm³/min (通常8 cm³/min程度)を達成している。このほか切削抵抗など、加工点でのモニタリング測定結果と比較しながら、解析精度の向上にも取り組んでいる。

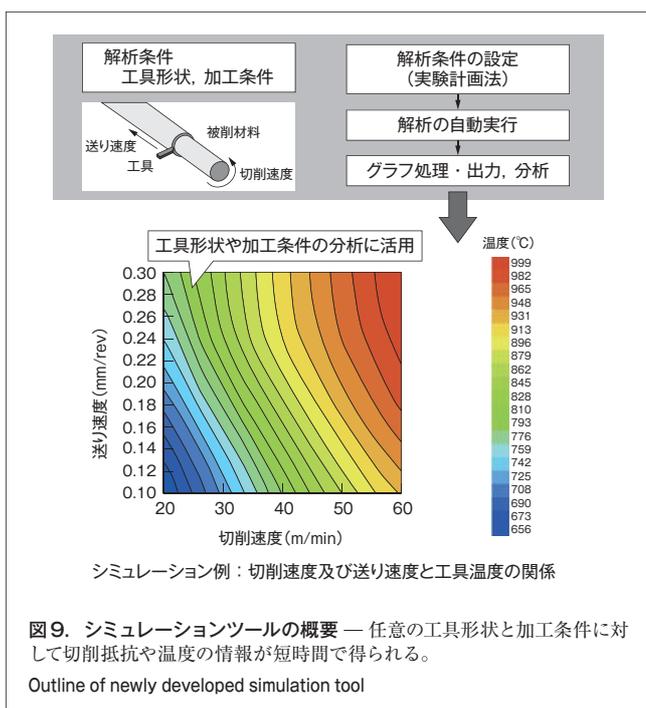
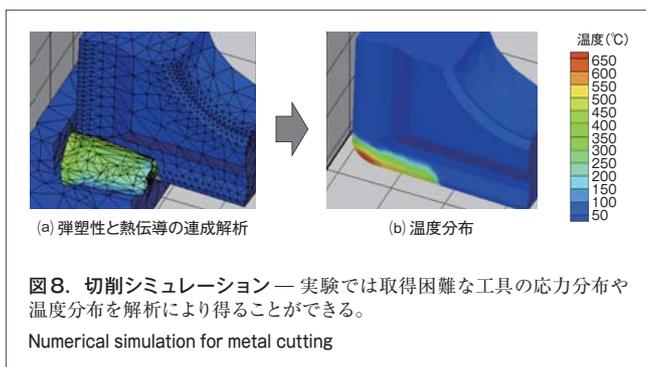
5 あとがき

切削加工技術の取組みとして、加工現象のモニタリング及びシミュレーション技術の概要と適用事例を述べた。これらの技術により、加工点や加工機で発生する物理現象を定量的に把握することができ、その結果、製造現場で高品質かつ高効率な切削加工を効率的に実現できるようになった。

今後は、これらの取組みをグローバルな製造現場に展開していく。

文 献

- 日本機械学会編. 加工学I—除去加工—. 東京, 丸善, 2006, 202p., (JSMEテキストシリーズ).
- 藤村善雄. 実用切削加工法. 東京, 共立出版, 1987, 217p.



- | | |
|--|--|
| | 小島 彰 KOJIMA Akira 生産技術センター 部品技術研究センター。 機械加工技術の開発に従事。精密工学会, Society of Manufacturing Engineers 会員。 Machinery Component Technology Research Center |
| | 小池 栄二郎 KOIKE Eijiro 生産技術センター 部品技術研究センター研究主幹。 CMP及び超精密加工技術の開発に従事。精密工学会, 砥粒加工学会 会員。 Machinery Component Technology Research Center |
| | 佐藤 栄二 SATO Eiji 電力システム社 京浜事業所 生産技術部グループ長。 CAM及び機械加工技術の開発に従事。精密工学会, 火力原子力発電技術協会 会員。 Keihin Product Operations |