

(解説)

切削加工の数値シミュレーション

尾崎勝彦(工博)*・赤澤浩一*・吉村省二**

*技術開発本部・生産技術研究所 **機械カンパニー・開発部

Cutting Process Computer Simulations

Dr. Katsuhiko Ozaki・Koichi Akazawa・Shoji Yoshimura

Chip formation analysis and stability lobe predictions are key aspects for machining processes. Kobe Steel has developed a new computer technique to simulate the chip formation process in orthogonal machining and to predict milling lobe stability. Elastic-plastic and thermal finite element methods were used for chip formation analysis. Chip shape, cutting force and cutting temperature predictions were based on the initial cutting conditions and tool shape. Lobe stability analytical prediction were based on a cutting force model and a regenerative chatter model.

まえがき = 素材から部品を製造する方法として、大きく分けて変形させる塑性加工と削り取る機械加工がある。中でも切削加工は機械加工における重要な工程である。このため、被削材に対して切削加工における加工の容易さ被削性が求められている。例えば、自動車軽量化のために材料の高強度化を進めると、工具寿命や切屑断性を低下させることになる。被削性の改善には材料開発(素材の組織、成分)のみならず切削加工方法(工具形状、切削条件、工具パス)の改良も重要である。その際、刃先周辺部での切削現象を明らかにし、適正な対策をこうじることが重要である。一方、種々の材料開発や部品の高機能化のために、新たな素材に対して切削加工が適用されるようになってきている。その際、生産性及び品質特性を満足させる工具形状、切削条件などを最適化する必要がある。しかしながら、これまでは実験解析的にこれらの検討が行われており、開発期間の短縮のために、シミュレーション技術の開発と適用が始まったばかりである。

材料特性と加工条件から切屑形状、切削抵抗を予測するために変形のみを考慮した2次元モデルを用いた切削数値シミュレーション技術が開発されて以来、3次元への拡張、温度との連成などが検討されてきた^{1)~4)}。他方、加工機械の振動問題を予測するために、工具と加工物の動特性と工具に加わる切削力をモデル化し、動的切削数値シミュレーションも可能になってきている^{5)~8)}。本報では、これらシミュレーション技術について代表例を用いて紹介する。

1. 切削機構の理解(2D 温度連成切削シミュレーション)

筆者らは、陽解析法を用いた温度連成切削シミュレーション技術(AdvantEdge)を導入し、切削現象への各種要因について調査した。

シミュレーションの計算フローを図1に示す。ここで、 d : displacement, v : velocity, a : acceleration, σ : stress, ϵ : strain, q : heat source, T : temperature である。切削現象の予測には、加工条件(切削速度、切込み量及び工具形状)と材料の変形特性及び被削材・工具の熱物性値を入

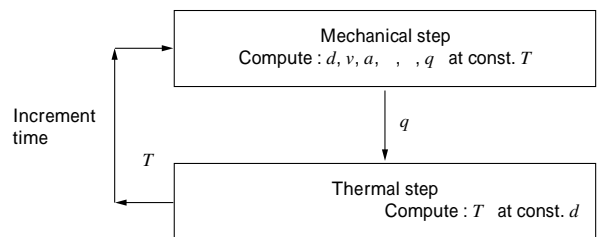


図1 温度連成計算フロー
Fig. 1 Cal. flow of thermo-mechanical couple model

力し、変形と熱伝導を交互に計算することにより、切削抵抗・切削温度・切屑形状が求められる。なお、被削材側の材料特性は、温度ごとの圧縮試験から求めた応力歪関係を用いる。この時の連成計算として、変形については運動方程式(1)を、温度については熱伝導方程式(2)を用いて解析が進められる。

$$\left. \begin{aligned} d_{n+1} &= d_n + t \cdot v_n + 1/2 \cdot t^2 \cdot a_n \\ a_{n+1} &= M^{-1} (R_{n+1}^{ext} \cdot R_{n+1}^{int}) \\ v_{n+1} &= v_n + 1/2 \cdot t (a_{n+1} + a_n) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

d : displacement, v : velocity, a : acceleration
 M : mass matrix, R : force array, t : time

$$\left. \begin{aligned} T_{n+1} &= T_n + t \cdot \dot{T}_n \\ C \dot{T}_{n+1} + K \cdot T_{n+1} &= Q_{n+1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

T : nodal temperature, Q : heat source

ここでは、S45C材における旋削加工の計算例を示す(図2)。切削速度を50, 150, 300m/min, 切込み量を0.1mmとし、工具はノンコーティング超硬工具(K種)

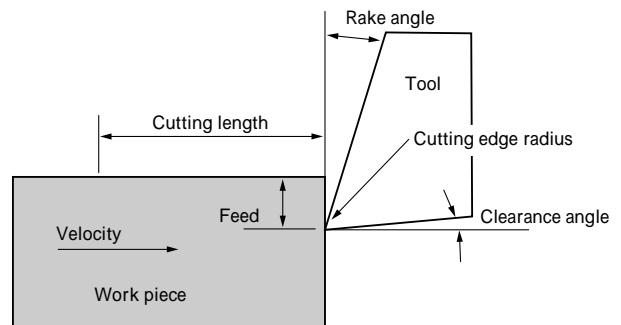


図2 2次元切削解析モデル
Fig. 2 Model of orthogonal machining

を設定した。図3に切屑生成過程を示す。工具が進むにつれて、刃先において材料が分離され、切屑が生成されていく様子を計算することができる。切削温度は、すくい面において最高温度を示し、図4に示すように、切削速度の増加とともに切削温度は高くなり、切削速度300m/min以上になるとすくい面最高温度はほぼ800に達している。

本計算結果を用いた鉄鋼材料での快削添加元素の有効領域の予測について述べる。例えば被削性を向上するために快削元素を添加する場合、添加元素の快削化機能が有効に働くことをあらかじめ予測することは、鋼種設計

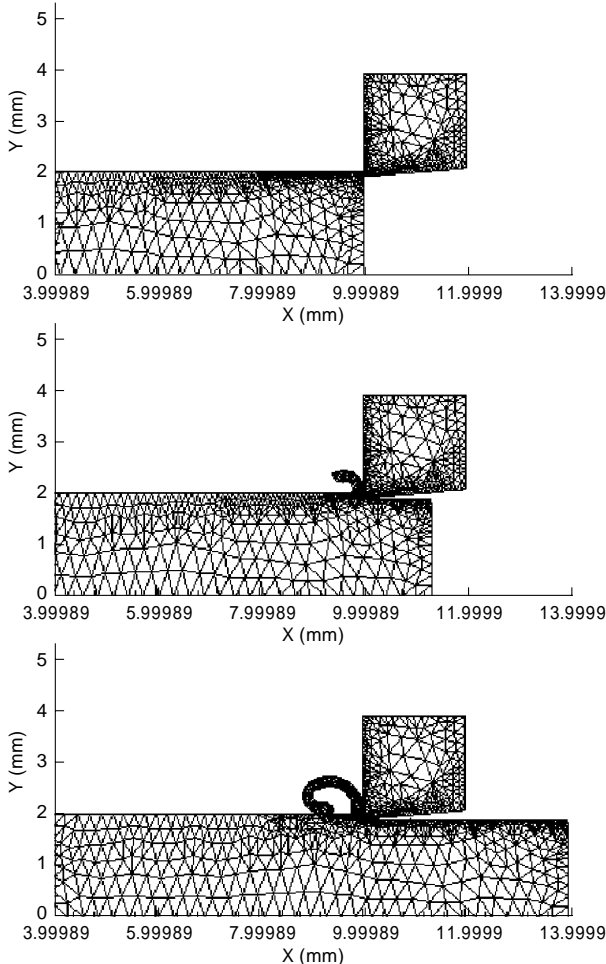


図3 切屑生成過程
Fig. 3 Chip formation process

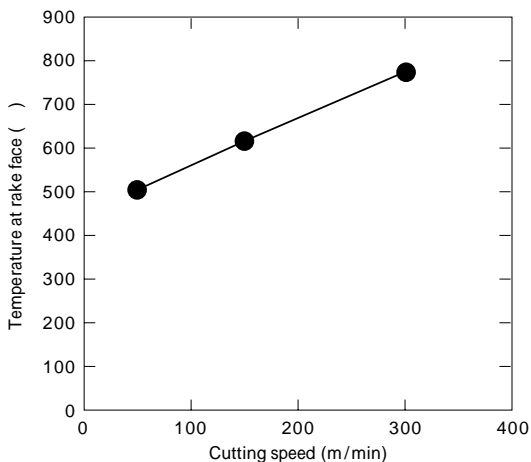


図4 切削温度に及ぼす切削速度の影響
Fig. 4 Effect of cutting speed on the cutting temperature

の面でも重要である。快削元素のなかで最も広く用いられているものの一つとして鉛があげられる。

鉛は融点(327)が低く、加工部位が鉛の融点近傍にまで温度上昇すると組織を脆化させる働きをする。その結果、切屑断断性が向上することが広く知られている。この効果を得るためには、ユーザ加工条件下において切削中の切屑内温度が鉛の融点近傍にまで上昇している必要がある。超硬旋削の場合、切屑内部は加工発熱により十分に加熱され、鉛の金属溶融脆化は有効に働くことが予想できる。

しかしながら、フローチ加工のように非常に切削速度が遅い場合切屑中の温度は約180と低く(図5)、鉛の快削化機能は十分に機能するかは疑わしい。そこで、工具形状による切屑断断性向上方法を検討するか、もしくは、Biのように鉛よりもより低い融点の添加材を選定する必要がある。

2. 最適加工条件の設計(切削モデルとびり限界予測)

機械構造部材や様々な部品を切削加工により製造する場合、工具・加工条件・カッタパス及びワークの保持方法を設定する必要がある。加工効率を下げる要因の一つとしてビブリの問題が古くから知られているが、その対策は経験とトライアンドエラーに強く依存している。ここでは、工具形状・加工条件及びワーク保持剛性から、ビブリ発生限界の予測技術について述べる。

図6にビブリ限界予測の構成図を示す。本手法は、切

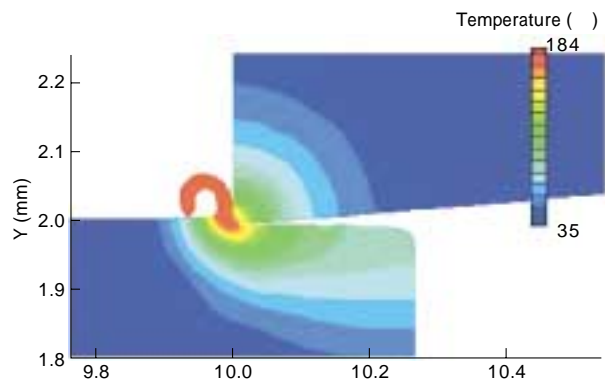


図5 切屑温度分布(切込み量0.01mm, 切削速度15m/min)
Fig. 5 Distribution of cutting temperature
(Depth of cut; 0.01mm, Cutting speed; 15m/min)

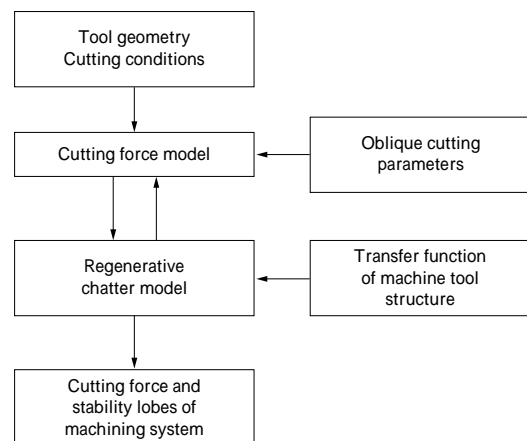


図6 ビブリ限界予測構成図
Fig. 6 Diagram of analytical prediction of stability lobes

削力モデルを用いて工具形状及び材料特性から切削力を算出する。次に、この切削力と工具取付け時の動特性から理論上のビビリ発生限界加工条件を予測する。このとき、ワーク側の材料特性として、2次元切削実験により求めたすくい角、工具傾斜角と切削抵抗値の関係をあらかじめ求めておく。次に、切削力モデルにより、エンドミルの刃先を微小分割し、微小部に加わる切削力を先の関係式から求め、切削部分の切刃全体に渡って積分して切削抵抗値を算出する。一方、工具・機械の動特性を求めるために、機上でエンドミルの加振実験から、システムのバネ定数と粘性係数を求める。この切削力と工具取付け時の動特性から理論上のビビリ発生限界加工条件を予測する。

2次元切削の概要図を図7に示す。図中の t は時間を表し、 T は主軸1回転時間を表す。ここで実切込み $h(t)$ は次式となる。

$$h(t) = h_0(t) + \{y(t-T) - y(t)\} \dots\dots\dots(3)$$

また、切削抵抗 $F_y(t)$ は比切削抵抗 K_f と切削幅 a により次式となる。運動方程式より系の伝達関数は次式となる。

$$F_y(t) = K_f \cdot a \cdot h(t) \dots\dots\dots(4)$$

式(4)をフーリエ展開した伝達関数の周波数表示は次式となる。

$$y(s) = (s) \cdot F_y(s) = (s) \cdot K_f \cdot a \cdot h(s), \quad (s) = \frac{n^2/K_y}{s^2 + 2 \cdot \frac{n}{n} \cdot s + \dots} \dots\dots(5)$$

式(5)より再生びり振動の伝達関数が導かれ、特性方程式を解くことにより限界安定条件が求められる。びり振動の発生限界の切削幅 a は以下ようになる。

$$a = -\frac{1}{2K_f \cdot G}, \quad G = \frac{\left(1 - \frac{2}{n}\right)}{K_y \left(1 - 2 \frac{2}{n} + \frac{4}{n^2} + 4 \frac{2}{n}\right)} \dots\dots(6)$$

ここで、 n は振動の周波数であり、主軸回転数に相当する値となる。以上により、系の動特性(n :固有振動数、 ζ :減衰率、 K_y :剛性)、切削力 K_f 及び主軸回転数からびり振動が発生する限界の切削幅を求めることができる。

ここでは、アルミ合金ブロック(A7075)の側面を加工した場合のビビリ限界を示す。使用工具は、超硬2枚刃ソリッドエンドミル(径10mm)を用いた。切削条件は、径方向切込み量2.0mm、送り速度0.05mm/刃とした。

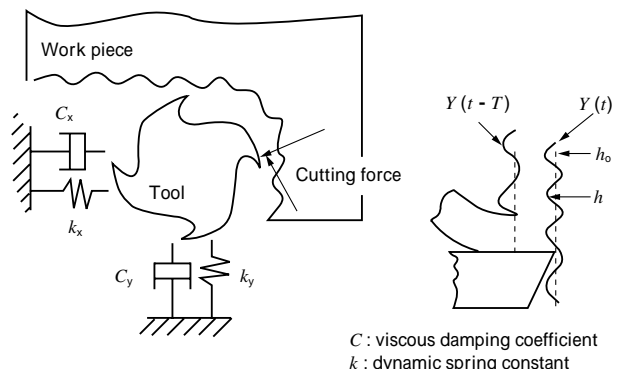


図7 切削加工概念図
Fig. 7 Schematic figure of cutting process

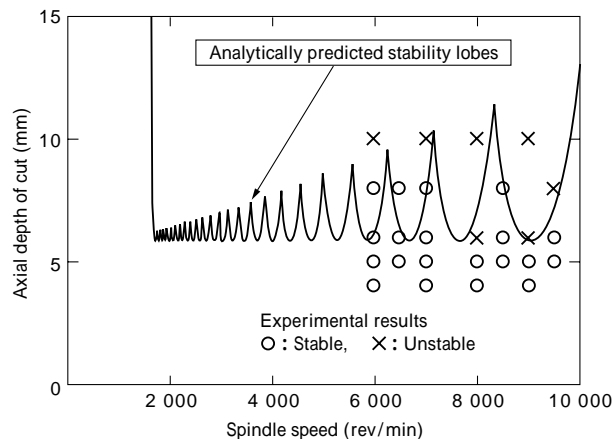


図8 ビビリ限界予測結果
Fig. 8 Predicted stability lobes

ビビリ限界条件の予測結果を図8に示す。工具回転数が増加するに従って切込み量の限界値が増減し、高速回転時にも切込み量を大きく設定できる加工条件が存在することを示している。実際に加工した結果、図8に示すように、高速回転時にも加工できることを確認した。これらの手法は、ワーク側にも適用することにより、工具機械及びワーク側の動特性を考慮したビビリ発生限界加工条件の予測を行うこともできる。

3. 工具形状の修正 (スクリュ圧縮機用ホブカッタ加工シミュレーション)

3.1 目的

スクリュロータにおいては、性能を維持するため、数ミクロンの加工精度が要求される。加工にはホブカッタが使用される。カッタ形状は歯形形状から計算したカッタ座標に従い製作される。しかし、正確に製作することは困難で、いままでは加工したロータ形状の3次元測定結果をもとに、試行錯誤を繰返しカッタ形状を修正してきた。そのため、修正に時間がかかり、また正確には修正ができなかった。そこで、短時間に正確にカッタを修正する方法を検討した。

3.2 カッタ形状

雌ロータのカッタ形状を図9に示す。ホブカッタ軌跡の包絡線が雌ロータ形状になるようにカッタ形状を計算している。図10はカッタ軌跡、及び雌ロータ形状を示している。この図からわかるようにカッタ軌跡の包絡線が雌ロータ形状になっており、カッタ座標と歯形座標は1対1に対応していることがわかる。

3.3 加工シミュレーション手法

カッタ座標と歯形座標は1対1に対応しているため、

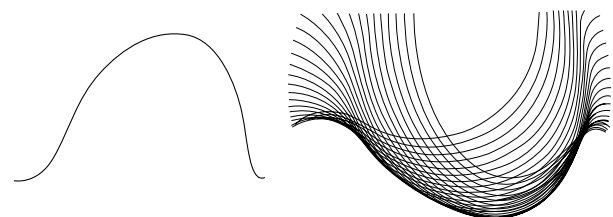


図9 雌ロータカッタ形状
図10 カッタ軌跡
Fig. 9 Cutter profile of female rotor
Fig. 10 Locus of cutter

ホブカッタを雌ロータ形状をしたカッタで加工すると考えてもいい。そこで、以下の手順によりシミュレーションを行う。

- 1) 誤差を含んだホブカッタにより切削されたロータを3次元測定する。
- 2) 3次元測定されたロータをカッタと見なし、ホブカッタを切削するシミュレーションを行う。このシミュレーションにより計算されたカッタ形状をAとする。
- 3) 歯形誤差が0であるロータをカッタと見なし、ホブカッタを切削するシミュレーションを行う。このシミュレーションにより計算されたカッタ形状をBとする。
- 4) AとBを比較し、形状の差がカッタ誤差となる。この差から、カッタの修正位置、修正量を算出する。
- 5) ホブカッタを修正し、ロータ加工/3次元測定により確認する。

3.4 結果

図11に修正前ロータ3次元測定結果、及びカッタの修正位置、修正量のシミュレーション結果を示す。また、図12にカッタ修正後の3次元測定結果を示す。この図からわかるように、シミュレーションによりカッタ修正を行った結果、ロータの加工精度が向上したことがわかる。本方法を用いることにより、修正量の定量的把握が可能となり、修正時間を短縮することができた。

むすび=切削加工では、過去の経験とトライアンドエラーによる加工方法の適正化が行われているが、切削加工をモデル化し、数値計算と評価方法を組み合わせることにより徐々にではあるが加工現象、加工条件を予測することができつつある。ここで紹介したように、基本的な現象は解析できるようになってきているが、さらに、被削性面では、材料組織の加工現象に及ぼす影響のモデル化や工具とワーク間の摩擦摩耗の予測、加工形状から加

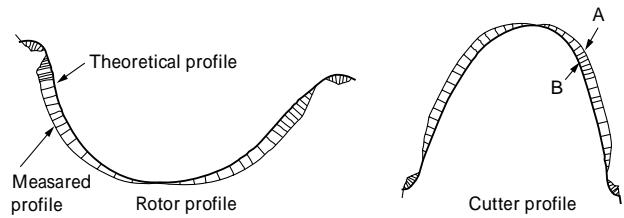


図11 シミュレーション結果(修正前)
Fig.11 Simulation result before correction

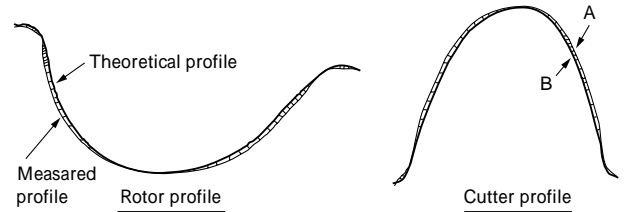


図12 シミュレーション結果(修正後)
Fig.12 Simulation result after correction

工方法(工具,加工条件,加工順位など)を予測する技術の開発が望まれている。

参考文献

- 1) J. S. Strenkowski et al. : Trans. ASME, J. Engg. Ind., 107, Nov. (1985) p.349 .
- 2) 森脇俊道ほか: 精密工学会誌, Vol.57, No.12 (1991) p.217 .
- 3) K.Osakada et al. : Int.J.Mech.Sci., 24 (1984) p.459 .
- 4) T. D. Marusich et al. : Simulation of Materials Processing : Theory, Methods and Applications (1995) p.101, Balkema .
- 5) E. Shamoto et al. : MED, Vol.6-1 (1997) p.58 .
- 6) Y. Altinas et al. : Annals of the CIRP, Vol.45, No.1(1996) p.59 .
- 7) Y. Altinas et al. : Annals of the CIRP, Vol.44, No.1 (1996) p.357 .
- 8) E. Budak et al. : Trans. ASME. J. Dynamics Systems. May(1998) p.22 .