

有限要素法を用いた柔軟弾性体の切削における切りくず分離過程シミュレーション

室蘭工業大学 平松文宏, 寺本孝司

要旨

本研究は、FEM（有限要素法）を用いた柔軟弾性体の切削における切りくず分離過程のシミュレーションを目的としている。本報告では、柔軟弾性体の大変形特性と摩擦特性に関する基礎的な評価結果と、これらを基にしたエンドミル切削における食いつき時の応力解析結果について報告する。

1. 研究目的

現在、ゴムなどの柔軟弾性体の試作や小ロット加工を実現するために柔軟弾性体の切削加工が注目されている。しかしながら、加工誤差については明確な検討がなされておらず、加工誤差のモデル化が求められている。

柔軟弾性体の切削加工時の誤差要因のとして、工作物の加工時における弾性変形による誤差と切りくず分離過程における分離位置の違いによる誤差が考えられる。本研究では、切りくず分離過程における分離位置の違いによる誤差に着目し、FEM解析を用いた解析により、切りくず分離過程のメカニズムを明らかにすることを目的とする。

柔軟弾性体の切削過程のFEM解析を実現するためには、柔軟弾性体の大変形特性および破断条件、工具-工作物間の摩擦特性、工具刃先の精密な形状モデル、が必要となる。本報告では、破断条件をのぞくモデル化を行ったうえで、切削初期の応力状態の解析をすることで、切りくず分離過程における分離位置について検討した。

2. 大変形特性の同定と評価

2-1 単軸引張試験

今回対象とするウレタンゴム硬度 90° の材料特性を加工物モデルに反映するために、引張試験を行い大変形特性の同定を行った。引張試験の結果から求めた応力-ひずみ曲線から、ひずみエネルギー密度関数の構成式に対する材料定数値を同定した。今回使用したひずみエネルギー密度関数は Mooney-Rivlin Model の 5 次構成式を使用する。

引張試験では、加工実験に使用するウレタンゴム硬度 90° と同一の材料を用いてダンベル状試験片を作成し引張試験を行った。万能試験機による引張試験中には、工作物変形とヘッド移動量の撮影を行うことで、試験片の標点間距離の変化と万能試験機のヘッド移動量との関係が算出可能となった。万能試験機から得られるヘッド移動量と荷重データと撮影した動画を画像解析することで得られた標点間伸びデータを用いて応力-ひずみ曲線を作成した。

2-2 同定した特性の評価

同定した柔軟弾性体の大変形特性を評価するために単軸引張試験を再現したシミュレーションを行った。ダンベル状試験片の引張試験を模した 2 次元解析を行うことで、荷重-伸び曲線の比較を行い、切削時の解析の際に使用する材料特性の妥当性を評価する。解析には汎用 FEM ソフトウェアを使用した。

Fig.1 はシミュレーション結果と単軸引張試験の荷重伸び曲線のグラフを比較したものである。解析結果と引張試験の荷重伸び曲線の全般的な傾向において一致しており、Mooney-Rivlin Model の 5 次構成式を変形のモデルを用いることが妥当であるといえる。

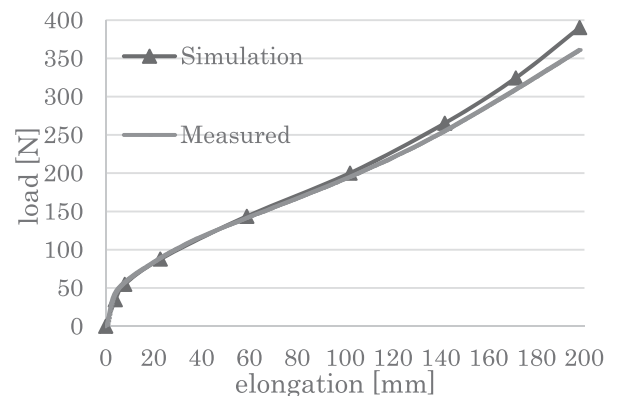


Fig.1 Load elongation curve of the test results and FEM simulation results

3. 切削過程の概要

3-1 エンドミル切削実験の概要

ウレタンゴム切削加工実験⁽¹⁾を FEM 解析でモデル化する。加工の概要は硬度 90° のウレタンゴムを工具径 6mm の 2 枚刃直刃エンドミル (HSS) で切削加工を行う。ウレタンゴムの形状は 10×10×20mm であり、1 刃当たりの送り量を変えた条件での実験を解析で再現する。また切削加工実験では、動力計による切削力の測定、高速度カメラでの計測と画像処理による変形量の測定、非接触形状測定器を使用した加工誤差を計測を行った。Fig.2 の①, ②, ③はウレタンゴム切削加工実験で切削力, 変位, 加工誤差を計測した場所である。今回の FEM 解析では Fig.2 の①における切削を解析する。

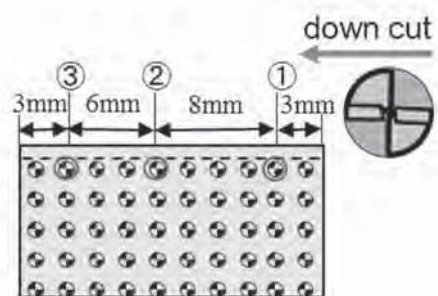


Fig.2 Measuring position of workpiece deformation

3-2 エンドミル工具のモデル化

エンドミル断面形状のモデル化を行うために、実験で使用した工具と同一の工具を切断し、エンドミル断面をマイクログラフで拡大して、断面形状を測定した。測定した結果、刃先丸み 20 μm, すくい角 6.2°, 逃げ角 11.5°, 逃げ面幅 1mm であった。測定したエンドミル形状を FEM 解析ソフトウェアの工具モデルに反映して工具モデルを作成した。

3-2. 動摩擦係数の計測

工具-工作物間の接触問題を解析するためにウレタンゴムと鋼の動摩擦係数を測定した。Fig.4 は動摩擦係数計測実験の概要図である。ウレタンゴムに角度をつけた鋼材を当て、NCフライス盤のテーブルを1秒間分移動させる。このとき動力計を使用して3軸の力を測定する。NCフライスのテーブルが1秒間移動したときの荷重データから時間両端 0.25 秒間を切り取り、テーブル移動方向の力と垂直抗力の平均値を求め、動摩擦係数を算出した。実験5回分の動摩擦係数の平均を採用することとし、今回の解析で使用する動摩擦係数は0.856とした。

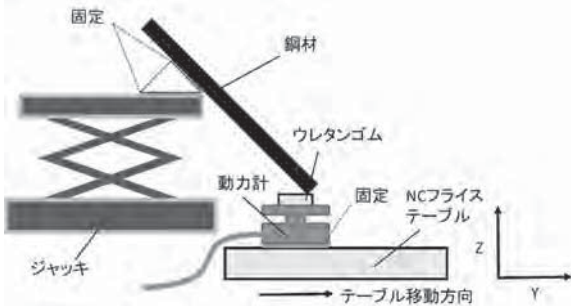


Fig.4 Measurement of coefficient of dynamic friction

以上より作成したモデルを Fig.5 に示す。要素は3節点アイソパラメトリック要素であり、境界条件は工作物の底面は実験同様完全固定である。工作物モデルに回転させたエンドミルモデルを接触させることで、工具一刃による切削を再現した静的2次元接触解析を行う。

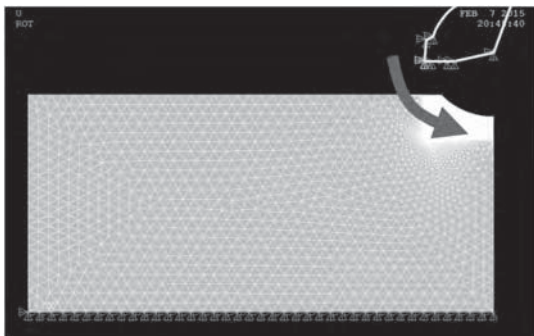


Fig.5 Analysis model of urethane rubber cutting experiment

4. 解析結果

柔軟弾性体の破壊は界面を開かせる力、つまり裂け目が広がる力（引張力）が働くときに破壊が進み、圧縮力が働く力では破壊は進まないことがわかっている²⁾。そこで、本研究では引張力が柔軟弾性体の破断に影響していると仮定し、主応力に着目し解析結果を考察する。

今回の解析で、1刃当たりの送り量を0.0167mm/tooth, 0.0042mm/toothとして計算した。Fig.6 および Fig.7 は、1刃当たりの送り量がそれぞれ0.0167mm/tooth, 0.0042mm/toothにおける接触時（エンドミル刃先角度34.5°）の主応力のコンター図である。Fig.8 は1刃当たりの送り量0.0167mm/toothにおける接触時のベクトル方向表示図であり、切削面に垂直方向の引張力が作用していることが分かる。Fig.6, Fig.7の最大主応力の位置に注目すると、工具の移動面後方で発生していることがわかる。つまり、切りくず分離位置は刃先先端と工作物の接触面で

はなく、工具の移動面後方で工作物の破断が起きている可能性がある。以上のことから、本研究でのウレタンゴム切削加工では工具先端の軌跡より外側で切りくず分離が起きている可能性がある。

今後は汎用 FEM ソフトウェアの要素削除機能を使用して切りくず分離過程の解析を行う予定である。

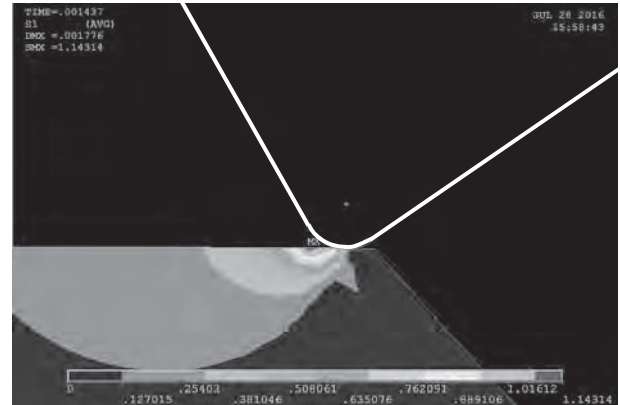


Fig.6 Principal stress contours at the time of contact, feed of 0.0167mm/tooth

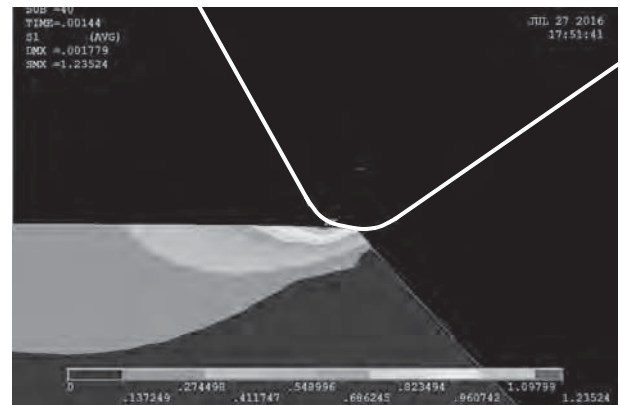


Fig.7 Principal stress contours at the time of contact, feed of 0.0042mm/tooth



Fig.8 Principal stress of vector direction at the time of contact, feed of 0.0167mm/tooth

参考文献

- (1) 荒木 拓磨, 寺本 孝司, 柔軟弾性体のエンドミル加工における加工誤差への切りくず分離誤差の影響, 2015年度精密工学会秋季大会予講集, pp.163-164(2015)
- (2) 深堀美英著, “高分子の寿命と予測 ゴムでの実践を通して”, 技報堂出版, 2013