

切削加工中における NC 工作機械の動的特性の評価

神戸大学 ○外菌泰介, ◎佐藤隆太, 西田 勇, 白瀬敬一

要 旨

切削加工中には工具切れ刃と工作物との接触によって工作機械全体の振動特性が変化すると考えられるが、その変化を定量的に評価した研究例はみあたらない。本研究では、送り軸のモータトルクを使った加振試験を行うことで加工中の工作機械の周波数特性を測定した。その結果、加工中には固有振動数がわずかに上昇するとともに、振動振幅がさがることが確認された。さらに、工具切れ刃と工作物との接触を考慮したシミュレーションも試みたので報告する。

1. 緒 言

切削加工中には、工具切れ刃と工作物との接触によりプロセスダンピングと呼ばれる現象が生じることが知られている。また、工具切れ刃と工作物間の接触剛性による影響もあり、工作機械全体の特性に影響を及ぼしていると考えられる。切削加工中の工作機械の挙動を正しく理解するためにはこれらを考慮する必要があるが、これまでも多くの研究例がある。Altintas¹⁾は、再生効果による切り厚さの変動を除去した状態でプロセスダンピング係数を求める方法を提案している。また池田²⁾は、切削力理論と外乱オブザーバ技術を組み合わせることにより、インプロセスで機械構造の周波数伝達関数を得ることで、機械構造の動剛性を推定する方法を提案している。しかし、工具切れ刃と工作物との接触が工作機械全体の振動特性に及ぼす影響を定量的に評価した例はみあたらなかった。

そこで本研究では、加工中に加振試験を行って工具切れ刃と工作物との接触が工作機械の周波数特性に及ぼす影響を定量的に評価した。さらに、その結果に基づいて接触剛性とプロセスダンピングの影響を考慮したシミュレーションを試みたので報告する。

2. 実験方法

本研究では、小形の 3 軸立て形マシニングセンタを用いて実験を行った。本研究では、工具切れ刃と工作物が連続的に接触するよう図 1 に示すようなボーリング加工を行う。切削条件を表 1 に示す。工具は直径 50 mm のインサート式のフェイスミルであり、本来 5 枚刃である。切れ刃の接触による影響をより明確に評価するため、1 枚を残してインサートチップを外し、1 枚刃の工具として使用した。実験の前には直径 45 mm の穴加工を行い、1 回転あたり軸方向に 0.1 mm の切り込みとなる条件で加工を行う。

切削中と非切削中とに Y 軸モータへのトルク指令として外乱トルクを印加することで加振を行い、その時に測定されたテーブルの Y 軸方向の振動加速度に基づいて切れ刃と工作物との接触が工作機械の周波数特性に及ぼす影響を検証する。外乱トルクの印加タイミングは主軸回転角度に基づいて設定することができる。また、加工中の切削力はキスラー社製の水晶圧電式切削動力計(9257B)、テーブルの加速度は小野測器社製のプリアンプ内蔵型加速度検出器(NP-3120)で測定した。

Table 1 Cutting condition

| | |
|---------------------|---------------|
| Workpiece material | JIS S45C |
| Tool type | φ50 face mill |
| Helix angle | 14° |
| Number of flutes | 1 |
| Radial depth of cut | 2.5 mm |
| Spindle speed | 180 rpm |
| Feed rate | 18 mm/min |

3. 外乱トルクによる加振試験

3.1 外乱トルク

周波数特性の評価ではインパルスハンマによる加振試験がよく行われるが、加工中のハンマリングは危険であるため、本研究では Y 軸モータのトルク指令に外乱トルクを印加する方法で加振を行った。送り駆動系のブロック線図を図 2 に示す。送り駆動系には位置制御ループと速度制御ループが存在し、位置制御器は比例制御、速度制御器は比例積分制御となっている。また、位置制御器は、モータの回転角度をフィードバック信号とするセミクロード制御となっている。外乱トルクは、速度制御器から出力されるトルク指

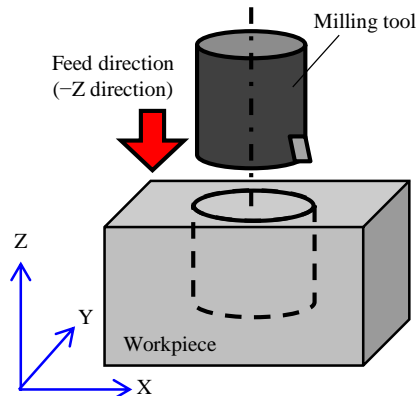


Fig. 1 Cutting test

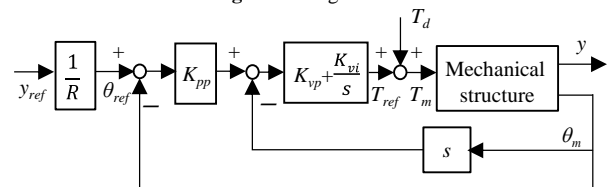


Fig. 2 Excitation by applying disturbance torque

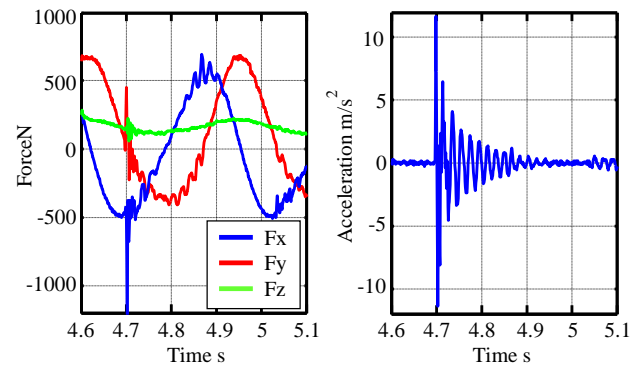


Fig. 3 Measured cutting force and acceleration

令にパルス状の指令(T_d)として加算する。

3.2 実験結果

本研究で得られた切削力と加速度の波形の例を図 3 に示す。ここでは、加振方向を-Y 方向とし、逃げ面が Y 軸方向を向いた状態で加振することで、加振によって逃げ面が被削材に押付けられる状態とした。図 3 においては、時刻 4.7 秒で外乱トルクが印加されている。図 3(a)の切削力波形において、各方向の切削力の 1 周期分が工具一回転分に相当する。また、図 3(a)の切削力波形をみると、4.7 秒で X 軸方向の切削力が急激に増大しているが、これは Y 軸方向への押付けによって切込み量が增大したためである。切削力波形はその後急激に減衰しているが、図 3(b)の加速度波形をみると、4.7 秒で生じた振動が約 0.2 秒間持続していることがわかる。

測定された加速度波形から求めた周波数特性を図 4(a)に示す。図 4(a)によると、切削加工中(図中青線)には、非切削時(図中赤線)と比べて 50Hz 付近で生じている振動の振幅が減少している。また、振動数も約 2Hz 上昇した。

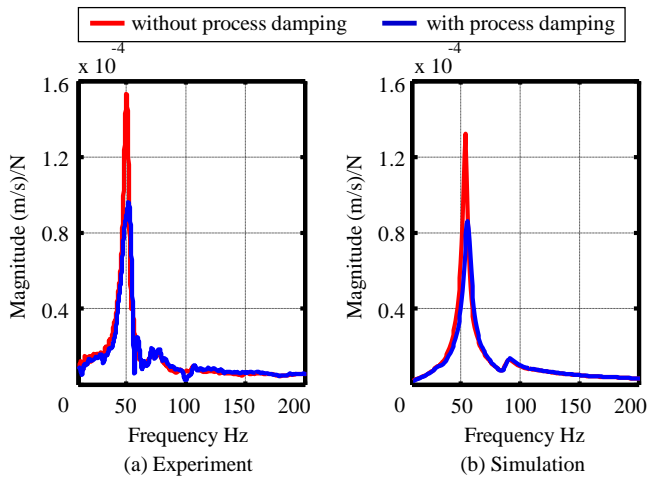


Fig. 4 Comparison of measured and simulated frequency responses

4. 接触剛性とプロセスダンピングを考慮した連成シミュレーション

4.1 連成シミュレーション

送り駆動系を含む工作機械の構造モデル(図5)と主軸駆動系モデルおよび切削力シミュレータを組み合わせた機械の動的挙動と切削力の連成シミュレーションが可能であることが確認されている³⁾。本研究では、この数学モデルの主軸頭-テーブル間に剛性と粘性とを図5に示すように考慮することで、工具切れ刃と工作物との間の接触剛性とプロセスダンピングとを表現する。

4.2 周波数解析結果に基づくパラメータの同定

数学モデルに組込む接触剛性とプロセスダンピングについては、図4(a)の実験結果における接触による振動振幅の減少率と固有振動数の変化に着目し、数学モデルにおける加振シミュレーションで同様の変化が生じるように決定した。接触時と非接触時との周波数特性のシミュレーション結果を図4(b)に示す。この時、剛性は 2.50×10^6 、粘性係数は 3.35×10^3 となった。

4.3 シミュレーション結果

軸方向切込み量を5 mm、半径方向切込み量を5 mmとし、X軸方向の肩加工の実験とシミュレーションとを行った。このときの工具は図1に示す実験に用いたものと同じであるが、通常のフライス加工のために切れ刃は5枚刃としてある。切削力波形の測定結果とシミュレーション結果を図6に示す。図6によると、図6(a)の測定結果と図6(b)のプロセスダンピングを考慮したシミュレーション結果とはよく似た波形となっている。比較のため、接触剛性とプロセスダンピングとを考慮しない場合のシミュレーション結果を図6(c)に示す。この場合、切削力波形が大きく乱れ、びびり振動が発生している。このように、工具切れ刃と被削材との間の接触は加工中の挙動に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

5. 結 言

本研究では、加工中に加振試験を行って工具切れ刃と工作物との接触が工作機械の周波数特性に及ぼす影響を定量的に評価した。さらに、その結果に基づいて接触剛性とプロセスダンピングの影響を考慮したシミュレーションを試みた。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- 1) 送り駆動系内部のトルク指令に外乱トルクを印加することで、加工中の工作機械の周波数特性を評価できる。
- 2) 工具切れ刃と工作物との接触によって工作機械の周波数特性が変化し、固有振動数の増加と振幅の減少がみられた。
- 2) 工具切れ刃と工作物の接触による影響を剛性と粘性として数学モデルに考慮することで、接触による影響をシミュレーションで表現できる。

今後、切削速度や加振力の違いによる影響についても評価を進め、加工条件が接触剛性やプロセスダンピングに及ぼす影響を明らかにするとともに、切削加工中における工作機械の挙動を明らかにする予定である。

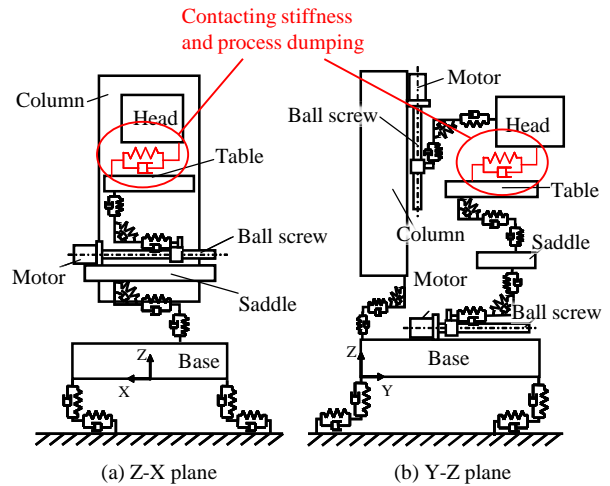
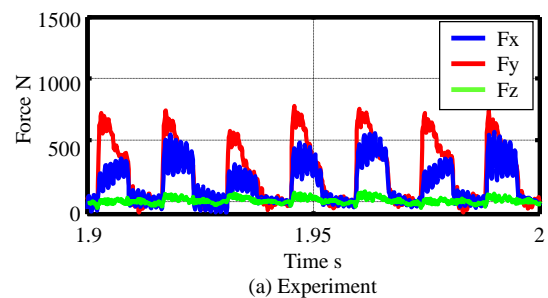
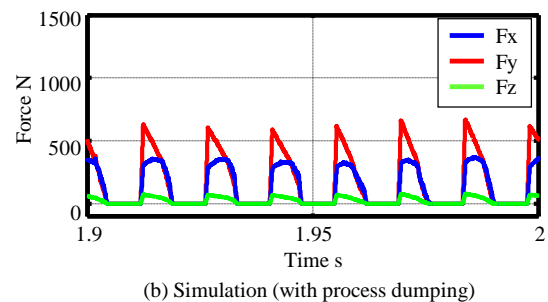


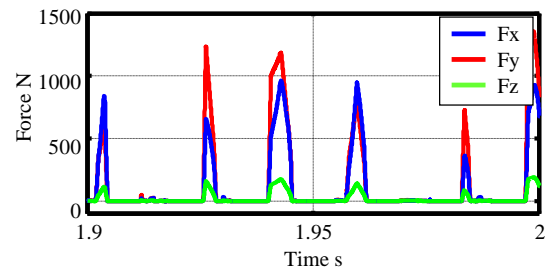
Fig. 5 Dynamics model of machine tool structure



(a) Experiment



(b) Simulation (with process damping)



(c) Simulation (without process damping)

Fig. 6 Comparison of measured and simulated cutting forces

謝 辞

本研究は、科研費基盤 B 18H01350 および大澤科学技術振興財団研究助成によって実施された研究の一部であり、関係各位に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Y. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka : Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57, (2008), 371-374.
- 2) 池田達輔, 鈴木教和, 佐野憲司, 社本英二 : CNC の内部情報を利用した機械構造伝達関数の新しい推定法, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2015), 261-262.
- 3) 野口晋, 西田勇, 佐藤隆太, 白瀬敬一 : 切削加工のボクセルシミュレータを用いた工作機械の動的挙動と切削力の時間領域連成シミュレーション, 日本機械学会論文集, 83, 856, (2017), 17-00254.