

工具－工作物間の接触状態が工作機械の振動特性に及ぼす影響 ～接触率と固有振動数及び振動減衰性との関係～

神戸大学 ○五十嵐優, 外菌泰介, ◎佐藤隆太, 白瀬敬一

要 旨

工具－工作物間の接触状態は工作機械全体の振動特性に影響を及ぼす。本研究では、工具逃げ面と工作物との間の電気抵抗の変化を利用して接触を検知する方法を開発した。加振試験時の接触検知結果から単位時間当たりの接触時間を接触率として定義し、接触率と振動の固有振動数および減衰性との関係を調査した。その結果、固有振動数は接触率が90%以上で大きく上昇し、振動減衰性は接触率が0~10%の範囲で大きく上昇することが確認された。

1. 精 言

工作機械において、その振動特性は加工精度や能率に大きな影響を及ぼす。工作機械の振動特性は、加工中に工具と工作物が接触することによる影響を受けると考えられ、外菌ら¹⁾は、工具切れ刃－工作物間の接触が振動特性に及ぼす影響について実験的に調査した。しかし、工具－工作物間の接触状態の変化と振動特性との関係を明らかにするには至っていない。本研究では、工具－工作物間の接触を検知する方法を開発し、加振試験時の接触状態と振動特性との関係を調査した。

2. 実験方法

2.1 接触検知回路

金属同士の接触において、真実接触面積に対応して接触電気抵抗の変化が生じる。これは接触状態を表すための代表的な指標である。深田ら²⁾は、半浮上すべり面間の油膜による接触状態を接触電気抵抗の変化で評価した。本研究では工具－工作物間の接触をその接触抵抗の変化を利用して検知することを試みた。実験方法の概略図を図1に示す。本研究では、テーブル側にX軸とY軸が配置された小型の3軸立て形マシニングセンタを使用して実験を行い、工具切れ刃の逃げ面が-Y方向を向いた状態で、工作物側面を工具逃げ面に押付けるようにした。切れ刃先端は、工作物上面から3 mmだけ下がる位置となるようにし、工作物上面に静電容量型の変位センサを固定し、工具と工作物との間の相対変位を測定した。

実験装置の陽極は工作物の側面に空けたねじ穴に設置し、陰極は主軸に固定したマグネットベースを用いて工具の側面に設置した。工具と工作物との接触による押付け力はキスラー社製の水晶圧電式切削動力計(9257B)を用いて測定し、動力計と接触検知回路からの信号は横河計測社製の高速データロガーDL850Eで記録した。また、テーブル側面に加速度を取付け、加振時の加速度変化を測定した。工具－工作物間の接触は、工具と工作物との間に電流を流し、接触抵抗の変化を測定することで検知する。動力計や主軸内部に電流が流れることを防ぐため、工作物と動力計との間にビニールフィルムを挟むことで電氣的に絶縁した。接触検知回路を図2に示す。接触部と直列にバッファ抵抗 R_2 を接続し、それらと並列に抵抗 R_1 を接続した。電源電圧 V_{all} と接触部の電位差 $V_{contact}$ とを測定し、 V_{all} と $V_{contact}$ との比を式(1)で示す分離度 τ (%)として定義した。

$$\tau = \frac{V_{contact}}{V_{all}} \times 100 = \frac{R_{contact}}{R_2 + R_{contact}} \times 100 \quad (1)$$

すなわち、工具と工作物が接触し電氣的に短絡しているときに $\tau = 0\%$ 、完全に隔てられると $\tau = 100\%$ となる。万が一主軸軸受に電流が流れた場合の軸受の電食防止のため、電源には、最大電流を10 mAに制限³⁾した定電流電源を使用した。

2.2 加振試験

周波数特性の評価ではインパルスハンマによる加振実験がよく行われているが、インパルスハンマによる加振では、その加振力を一定に制御することが難しい。本研究では、Y軸モータへのトルク指令にインパルス状の加振トルクを印加することによって加振試験を行った。簡略化した送り駆動系のブロック線図を図3に示す。加振トルクは、速度制御器から出力されるトルク指令に加算する。加振時のテーブル加速度を測定し、周波数特性を計算した。このとき、加振トルクの大きさ T_c は31.8 Nm、持続時間 t_i は1.5 msとした。

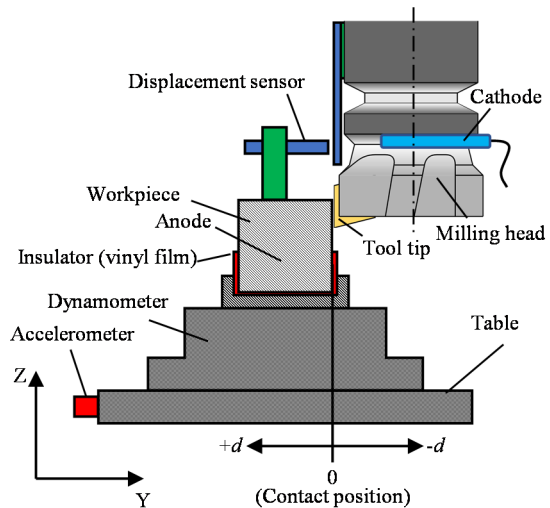


Fig.1 Experimental set-up

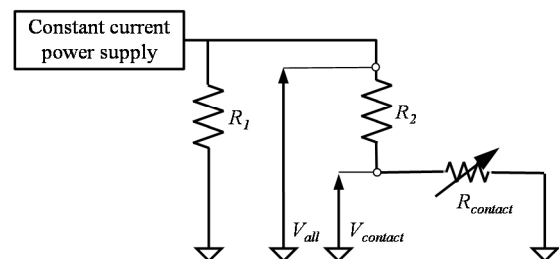


Fig.2 Circuit to detect contact between tool tip and workpiece

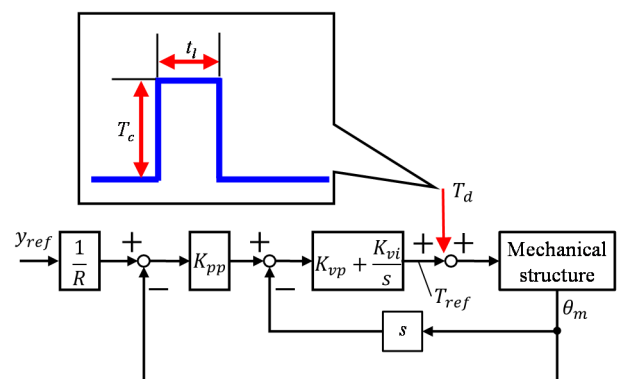


Fig.3 Excitation method by impulse torque command

加振試験は、Y軸(テーブル)を1 μmずつ送り、動力計で力を検出した位置を基準位置(0 μm)とした。その状態から、Y軸を±100 μmの範囲で20 μmずつY軸の位置指令を変化させ、各々の初期位置に停止した状態で加振試験を行った。その際、図1中の+d方向は工具と工作物との間を離す方向、-d方向は工具を工作物に押付ける方向を表している。

2.3 加振試験結果

加振実験を行い、Y軸方向力、工具-工作物間の相対変位、および分離度 τ を測定した結果を図4に示す。図は、動力計で接触を検知した位置から+d方向にY軸を10 μm 送り、工具と工作物との間に若干の隙間が生じる状態で実験を行った結果である。動力計で接触を検知した位置を相対変位0としており、相対変位が0 μm 以下の場合に工具と工作物が接触している。図によると、分離度が0となる範囲は、相対変位が0 μm 以下になる範囲と対応している、動力計による測定結果でも接触時に負方向の力が検出されており、本研究で製作した接触検知回路によって工具-工作物間の接触を適切に検知できているといえる。

3. 接触率と振動特性との関係

3.1 接触率

接触状態と振動特性との関係の評価するため、式(2)のように加振から振動が収まる0.3秒間における接触時間の割合を、接触率 ζ (%)として定義した。

$$\zeta = \frac{\sum a_i}{0.3} \quad (2)$$

ここで、 $\sum a_i$ は総接触時間であり、図5(a)に示すように、分離度が50%を下回った時間の合計とした。すなわち、接触率100%は工具と工作物が常に接触していたことを、0%は一度も接触しなかったことを表す。

初期位置を変えて加振試験を行ったときの接触率を、初期位置との関係として図5(b)に示す。初期位置0 μm では実験を2回行った。図によると、初期位置を-20 μm よりも小さい、すなわち押付け方向にテーブルを変位させた場合には、すべての条件で接触率は100%となった。初期位置を+20 μm より大きくする、すなわち工具と工作物を離す方向に変位させた場合、接触率は徐々に低下した。また、初期位置が-20 μm と+20 μm との間にある場合に接触率が大きく変化し、初期位置を0 μm とした場合には、接触率にばらつきが生じることがわかった。

3.2 接触率と固有振動数及び振動減衰性との関係

初期位置を変えた場合の周波数特性の変化を図6に示す。初期位置を+d方向、すなわち工具と工作物との間を離す方向にすると固有振動数が低下して振幅が上昇し、-d方向、すなわち工具を工作物に押付ける方向にすると、固有振動数が大きく、振動振幅は小さくなるがわかった。

最も主要な振動である50 Hz付近の振動について、その固有振動数と振幅とを読み取り、接触率との関係として表した結果を図7に示す。図によると、固有振動数は接触率が0~80%程度までは緩やかに上昇する傾向にあり、接触率が90%以上になると急激に上昇していることがわかる。これは、工具と工作物との間の接触剛性には、接触圧の変化による実接触面積が影響を及ぼし、接触率90%以上で接触圧が急激に変化したためと考えられるが、原因を明らかにするには至っていない。一方、速度振幅は接触率0~10%の範囲で急激に減少、すなわち振動減衰性が急激に上昇している。その後は接触率の上昇とともに速度振幅が緩やかに減少していることがわかる。これは、衝突によるエネルギーの散逸との関係として説明できる可能性があり、今後その解析に取り組む予定である。

4. 結 言

本研究では、工具と工作物との間の接触を検知する方法を開発し、その結果に基づいて振動中の接触率を定義した、また、接触率と振動特性との関係を調査した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- 1) 加振時の工具と工作物との間の接触状態によって振動特性は大きく変化する。
- 2) 接触率と固有振動数との間には正の相関があり、接触率が90%以上で固有振動数は大きく上昇する。
- 3) 接触率と振動振幅との間には負の相関があり、接触率が0~10%の間に振動振幅は大きく低下、すなわち振動減衰性が大きく上昇する。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(B) 18H01350 の支援により行わ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) 外菌泰介, 佐藤隆太, 西田勇, 白瀬敬一: 工作機械の振動特性

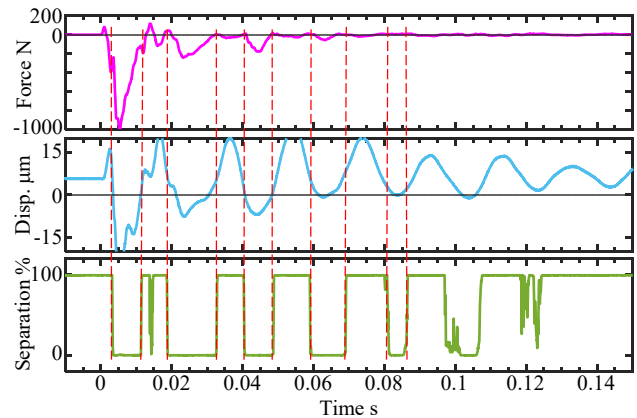
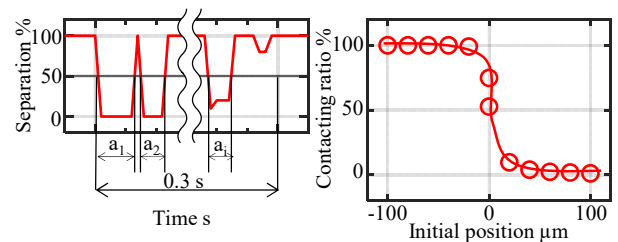


Fig.4 Example of measure force, displacement, and separation after excitation



(a) Definition of contacting ratio

(b) Relationship between initial position and contacting ratio

Fig.5 Definition of contacting ratio and changing of the ratio depending on the initial position

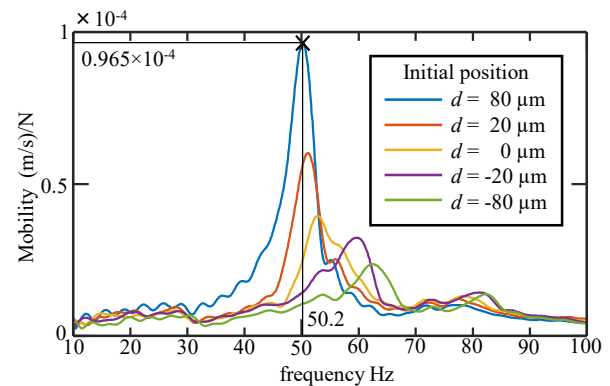


Fig.6 Comparison of frequency characteristics with various initial position

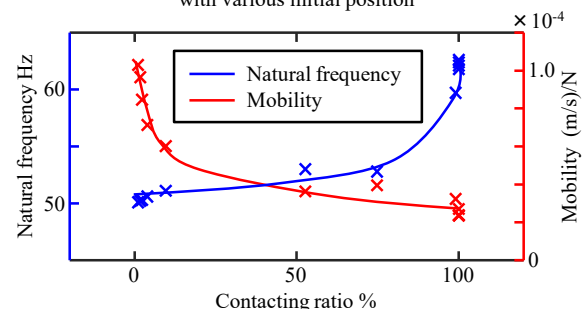


Fig.7 Relationships between contacting ratio and frequency characteristics

に及ぼす工具-工作物間の接触の影響(評価方法の検討と切れ刃接触長さの影響) 日本機械学会論文集, Vol.86, No.892, (2020), No.20-00185.

- 2) 深田茂生, 中城幸浩, 堀木淳矢: 油圧半浮上すべり面の分離電圧を基準とする接触状態制御の研究, 2019年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2019), pp 615-616.
- 3) 野口昭治, 和知恭平: 小型玉軸受の電食発生限界電流密度に関する研究, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2008), pp.1105-1106.