

NC 旋盤の動作中の動特性解析

○福田 哲也, 金沢大学 ◎高杉 敬吾, 浅川 直紀

要旨

近年の工作機械が抱える問題の一つであるびびり振動を解決するためには、動特性の解析が必要である。様々な手法のうちもっとも手軽なものでインパルス加振試験があるが、この手法では動作中の工作機械の動特性の解析は困難である。そこで、本研究では高速正弦波加振を応用した新手法を提案し、インパルス加振試験との結果を比較、検討する。

1. はじめに

工作機械に発生する問題の一つとして、びびり振動がある。この現象は加工のエネルギーが正のフィードバックとして切削系へ流入することで生じる自励振動であり、仕上げ面荒さや工具の寿命に悪影響を及ぼす。この現象を起こさないようにするためには事前に工作機械の動特性を正確に把握する必要がある¹⁾。従来、動特性測定的手法としてインパルス加振試験が広く行われてきた。しかしこの方法では加工中の工作機械への加振は難しくまた危険を伴うことから、動特性を正確に解析することは困難である。また、ハンマにより加えられる加振力の大きさや持続時間は測定者の経験に頼る部分が多く、試験結果の精度が不十分であることもある²⁾。

そこで本研究では動特性測定手法の一つである高速掃引正弦波加振を応用し、切削そのものを加振入力とする高速掃引正弦波切削試験を提案する。この手法では切削中の工作機械への任意の周波数領域における加振が可能となり、また実行者の経験によらない動特性の解析を行うことができるようになる。本研究では、高速掃引正弦波切削試験を行い、インパルス加振試験との比較、検討を行う。

2. 原理

2.1 高速正弦波掃引加振³⁾ 高速掃引正弦波加振とは、目的の周波数領域で加振周波数を高速でスイープさせることにより、FFTの標準化時間内で始点から終点までの全周波数領域の加振が行われるようにしたものである。図1にの時間軸波形とフーリエ変換後の周波数スペクトルを示す。この方法を用いる長所は、加振力の大きさとその周波数分布状態、周波数帯域、掃引速度を正確に調整することができる点である。

2.2 高速掃引正弦波切削 高速掃引正弦波加振を旋削加工で実現するため切削抵抗が正弦波状となる試験片を製作する。一般的に切削抵抗は比切削抵抗に対して切りくず断面積を乗じたものであるとされる⁴⁾。 q 、 K_s はそれぞれ切りくず断面積[mm²]、比切削抵抗[MPa]である。

$$F_t = K_s \cdot q \quad (1)$$

また、切りくず断面積は式(2)に示すように1回転あたりの送りに対して切り込み深さをかけることで得られる。 f 、 t はそれぞれ1回転あたりの送り[mm/rev]、切り込み深さ[mm]である。

$$q = ft \quad (2)$$

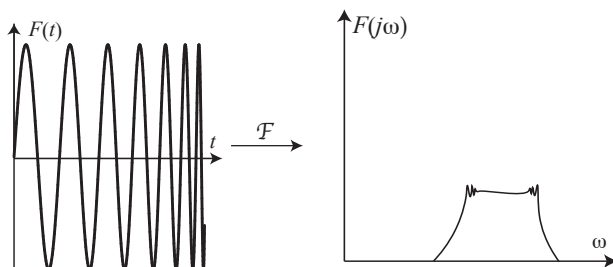


Fig.1 Illustration of fast swept sine excitation

なお、Kronenbergによると比切削抵抗は(3)の式で定義される。

$$k_s = C_{ks} \left(\frac{G}{5} \right)^{g_s} q^{z_s} \quad (3)$$

C_{ks} は工作物の材質及び工具のすくい角による定数、 g_s と z_s は工作物による定数である。そのため、切削抵抗は切り込み、送りあるいは両者に相関して増加することがわかる。他にもASMEによる式や海老原による式がある⁵⁾がそれらも切削抵抗は同様な要因で定まると示している。つまり、一回転あたりの送りは一定で、切り込み深さを正弦波状に変化させることによって切削抵抗は正弦波状になる。そのため、図2に示す様に表面を正弦波状にした断面を持つ試験片を作成し、毎回転送り一定のもとで主軸回転数を線形に増加させながら旋削することで、高速掃引正弦波加振を実現することができる。この切削による加振方法を高速掃引正弦波切削と呼ぶことにする。

$$C = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = r + A \sin n\theta \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

なお、試験片は式(4)に示す式の様な断面を持つ。 r 、 A 、 n 、 C 、 θ はそれぞれ基礎円半径[mm]、基礎円からの振幅[mm]、正弦波の数、ワーク表面の位置ベクトル、回転角[deg]である。実際に製作した試験片を図3に示す。

2.3 試験片製作 予備実験として行ったインパルス加振の結果、NC旋盤の固有振動数は1098.8 Hzであった。そのため、本試験法での加振周波数範囲は900~1300 Hzと設定する。

このとき、旋削チップの許容切削条件及びスピンドルの最高回転数を鑑みて、表1に示すように切削速度 V [m/min]を50~400 m/minとする。また、旋削チップのノーズ半径と切り込み量

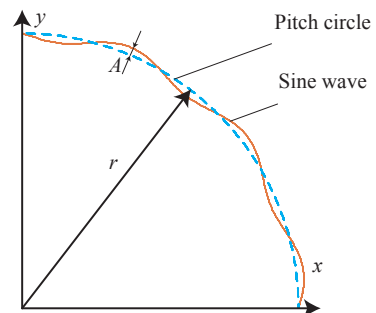


Fig.2 Profile of testpiece

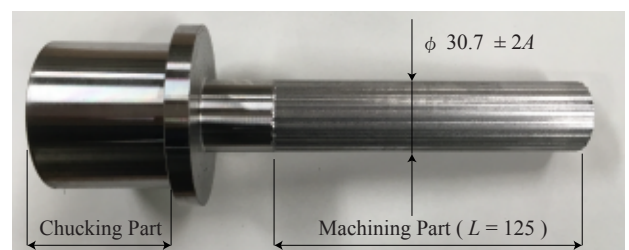


Fig.3 Testpiece

から切削跡が重複しないよう毎回転送り f_r [mm/rev] は 0.7 とする。この場合、設定加振周波数を満たすには、 $r = 15$, $n = 20$ とすることによって理論加振周波数 899 ~ 1317 Hz が得られる。また、加振力の大きさによる影響を調べるため、振幅は 0.08, 0.14, 0.17, 0.20 mm と、4 パターン異なるものを製作した。また、加工長さ L は加工機のストロークを考慮して $L = 125$ とした。

3. 実験

図 4 に加振試験の概略図を示す。製作した 4 パターンの試験片を NC 旋盤を用いて切削することで加振する。切削振動は工具側に取り付けた加速度ピックアップセンサ及び切削動力計で主分力方向および背分力方向を測定する。記録されたデータを周波数応答解析することで、従来のインパルス加振試験と比較する。

4. 結果と考察

片振幅 0.20 mm の試験片に対する加工試験から得られた加速度とインパルス加振試験のスペクトルを図 2 に示す。ただし、

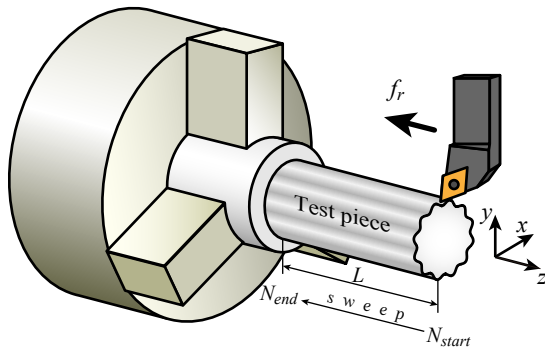


Fig.4 Cutting test

Table 1 Cutting conditions

Base radius [mm]	r	15
Amplitude [mm]	A	0.05~0.2
Number of sine wave	n	20
Static cutting depth [mm]	m	0.1
Feed per revolution [mm]	f_r	0.7
Length of test piece [mm]	L	125
Cutting speed [m/min]	V	50 ~ 400
Spindle speed [min^{-1}]	N	540 ~ 4330
Measuring frequency [Hz]	f	180 ~ 1443
Radius of turning tip [mm]		0.2
Material		S55C

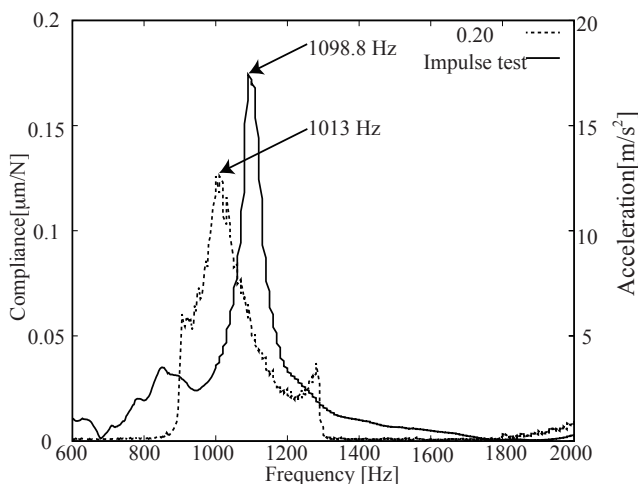


Fig.5 Comparison between impulse and real cutting response

インパルス加振試験の結果はコンプライアンス [$\mu\text{m}/\text{N}$] であるが、加工試験の結果は加速度 [m/s^2] である。これは、加工試験時の切削動力計から得た切削抵抗は、切削抵抗の理論値の様に様な振幅ではなく、固有振動数付近で変化が見られるためである。

また、試験片間の固有振動数で比較した周波数スペクトルを図 3 に示す。他の片振幅の試験片に対しても、加工試験による固有振動数はインパルス加振試験から得られた固有振動数と比べて全て低下していた。試験片の片振幅の増加するにしたがって固有振動数が低下していることがわかる。原因として、次の 2 点が考えられる。

- (1) 工具、ワーク間、あるいはホルダーや工具の締結部においてクーロン摩擦が生じることによる非線形な減衰効果。
- (2) 高応力状態にある工具とワークの間に振動モデルが存在し、切削系が 2 自由度系となっている。

5. おわりに

本研究では、高速掃引正弦波加振を応用した加工試験による動特性の評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) 高速掃引正弦波加振を応用した切削による加振方法を提案し、その手法による加振が可能であることを確認した。
- (2) 試験片の片振幅が増加すると固有振動数は減少する傾向にあり、その原因として工具と試験片の間に発生するクーロン摩擦と、切削系が 2 自由度の振動系であることが考えられる。

また今後の展望を以下に示す。

- (1) 切削動力系から測定された切削抵抗ではなく、主軸回転数から得られた理論切削抵抗値を用いてコンプライアンスの算出を試みる。
- (2) カーブフィット法を用いて試験片と工具の理論式を求め、そこから試験片と工具間の振動モデルを求める。

参考文献

- 1) 星 鐵太郎：機械加工の振動解析，工業調査会，(1990)，20
- 2) 森脇 俊道他：インパルス応答法による工作機械動剛性の測定（第 1 報），精密機械，44，2（1978）72。
- 3) 長松 明男：モード解析入門，コロナ社，(2012)，268~271
- 4) 米津 栄：機械工作法 II：朝倉書店，(1971)，32
- 5) 末澤 芳文：先端 機会工作法 -NC 工作法から航空機製作法まで-，共立出版株式会社，(2009)，82-84

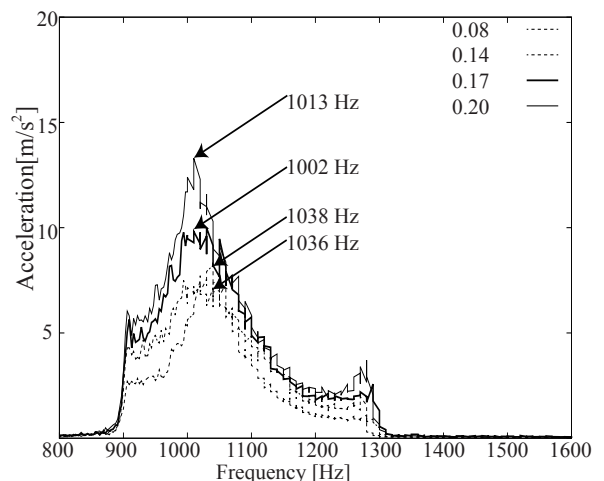


Fig.6 Comparison of real cutting response between several amplitudes