

切削加工機の振動計測

切削加工条件の変更による 機械共振問題の特定

東陽テクニカ 内藤 周太郎

近年日本では工作機械そのものが複合・高機能化してきたため構造が複雑になり予期せぬ振動が問題になっている。一方、投資効果を狙って安価な輸入機械を導入すると低い機械剛性(たとえば、鋳物の量が少ないなど)のため、従来の加工条件で切削すると精度不良に悩まされるという話も聞く。工作機械の使用者は、そういった振動問題に直面しても現場で効率よく手軽に現状把握し対策立案ができれば大変助かるものである。

ではどのような計測を行ない、どのようなデータを取得すれば現状把握から対策立案を行なうことができるようになるのだろうか。ここでは主軸が高速に回転する切削加工機の振動計測について述べる。

●切削加工機の振動

切削加工で振動が発生した場合、主軸回転数はそのままにして加工条件を軽減(たとえば、送り速度や切込み量を軽減)する手当をする。この手当により振動が抑えられれば強制力による振動であるとわかる。

一方で加工条件を軽減しても一向に振動が収まらない場合、すなわち刃工具にかかる切削力を軽減しても振動が収まらないときは機械そのものが自励振動(共振)しているとわかる(自励振動のほかに偶力を発生させるアンバランスが主軸に存在している場合や加工条件が再生びりの条件にあたる場合も同様の現象になる。しかし、ここではそれらについては論じない)。

切削加工機の自励振動(共振)は機械剛性によるもので、機械剛性に一番寄与するのは主軸剛性である。主軸剛性が高いか低いかで工作機械の性能が決まるといっても過言ではない。

切削加工機は高速に回転させる工夫(組合わせ、予圧、潤滑方法など)を軸受に施している。軸受予圧を高く設定するとラジアル剛性、スラスト剛性が、と

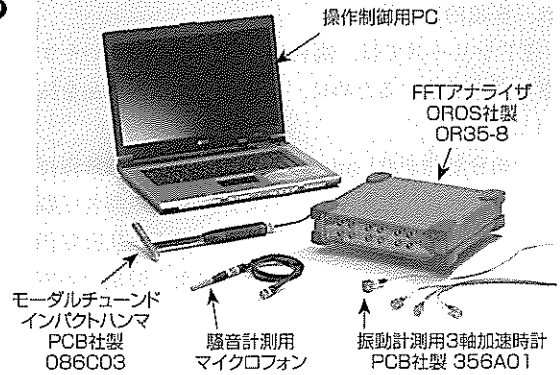


図1 主軸剛性・回転振動計測機器の標準システム

も大きくなり、大きな荷重に対して主軸先端部の変位は小さくなる。一方では内部摩擦抵抗が大きくなることで軸受内での発熱量が多くなる。その結果として、内輪と外輪に挟まれた転動体はつぶれ、軸受内予圧が大きくなり高速回転には不利な方向に働くことになる。反対に軸受予圧を小さく設定すれば高速回転に有利になるが剛性は下がる。したがって、高い周波数で主軸を回そうとすると、主軸の固有振動数は低くなる傾向にあり、主軸回転数と固有振動数を一致させないように注意する必要がある。

主軸回転数と固有振動数を一致させないようにするためには、切削加工機の剛性値を調べる必要がある。回転周波数に対する剛性値は主軸の伝達関数を調べることで知ることができるので、機械剛性の代表値として主軸剛性(伝達関数)の計測を行なうことが振動問題の一つの解決策となる。

●主軸剛性は伝達関数で表現される

伝達関数は周波数領域での機械剛性を表現するものである。機械系の評価において最もよく使用される伝達関数はイナータンスで、加速度(m/s^2)÷力(N)で表現される。単位は $1/kg$ 、つまり質量の逆数である。

イナータンスは主軸剛性(伝達関数)の各周波数における質量の逆数の分布を表現しており、“イナータンスが小さいときはその周波数での質量が大きい”といえる。反対に“イナータンスが大きいと質量が小さい”といえる。軽いものは簡単に揺れ重いものはなかなか揺れないことを意味する。

伝達関数の別の表現の仕方にコンプライアンスがあり、変位(m)÷力(N)で表現されます。単位はm/N、つまり、ばね定数(k)の逆数である。“コンプライアンスが小さいときはその周波数でのばね定数が大きい”といえる。反対に“コンプライアンスが大きいと、ばね定数が小さい”といえる。柔らかいばねはよく揺れ、固いばねはなかなか揺れないことになる。コンプライアンスは感覚的に理解しやすく、工作機械を扱うかたがたの間ではコンプライアンスという表現の方が多いようである。

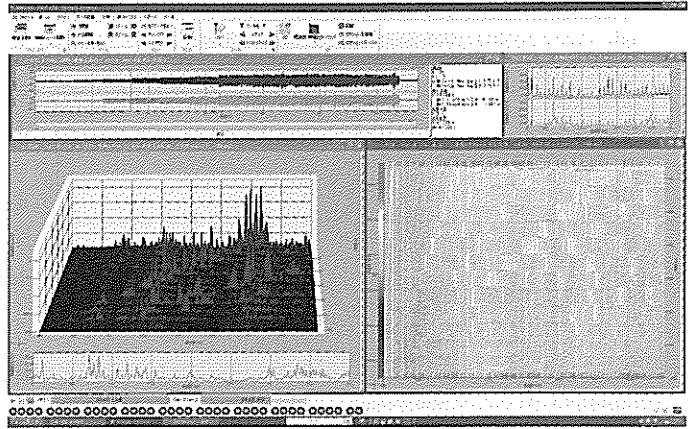


図2 ウォータフォールの図

●伝達関数計測装置について

伝達関数は以下の述べる装置を使用して求められる。切削加工機械の主軸に力を加えるためのモダルチューンドインパクトハンマ、このハンマには精密なロードセルが用いられている。次に力に対する応答を捕らえるための加速度センサ。そして伝達関数を計算するためのFFTアナライザである(図1)。

FFTアナライザは振動や騒音の計測に必要な機能をまとめた計測器である。運転中の機械が発生する振動や騒音信号の波形をオンラインで観察ができ、観察と同時に周波数分析を行なうこともできる。これにより振動・騒音の発生原因を探ることができるようになる。

なお、近年のFFTアナライザでは波形の観察、周波数分析だけでなくデータ収録も同時に行なえるようになっているため、現場で計測した後にオフラインでの処理を行なうことも可能である。

FFTアナライザを使うことで次のような測定が可能になる。

(1) 振動・騒音波形の観察による現象の把握

周波数分析による問題周波数の特定、周波数変化を時間軸方向で表現する3次元(ウォータフォール)分析やオーダトラッキング分析などによる特定次数の変動観察ができる。図2は加工機主軸回転数をステップ状に上げていったときの主軸頭における加速度の変化を計測した例である。振動データを現場収録した後オフラインで分析している。

(2) 共振問題の分析

モダルチューンドインパクトハンマや電動加振による伝達関数測定が可能である。主軸やベッドなどの動剛性を計測できる。

●伝達関数による共振のを見つけかた

加速度センサを用いて計測した場合、得られた加速度 a を2階積分すれば変位 D になる。 $F=D \times k$ 、 $D/F=1/k$ すなわちコンプライアンスである。加速度センサを用いて計測した場合、FFTアナライザで2階積分すればコンプライアンスで表示することができるようになる。また、イナータンス、コンプライアンスに関わらず一般的に伝達関数はボード線図(位相情報とイナータンス)で表し、コヒーレンス関数も併せて表示することが多い(図3)。

この図3に問題の共振とはどこかを図示した。このグラフでは縦に線を引いたところが共振になる。位相が180°からまわり、90°になり、さらに0°に落

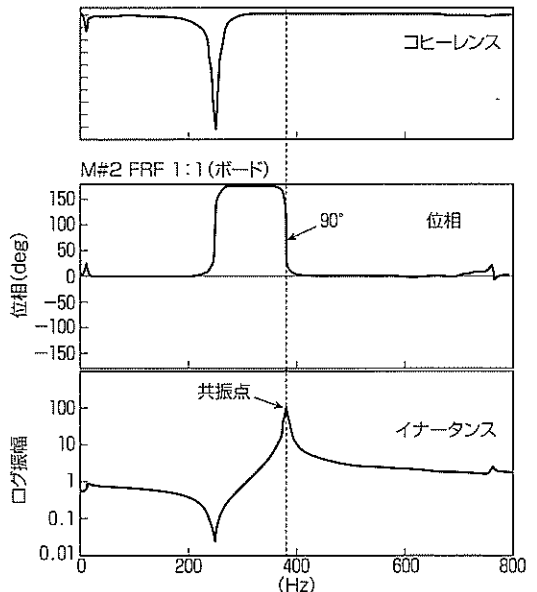


図3 イナータンス伝達関数共振位置

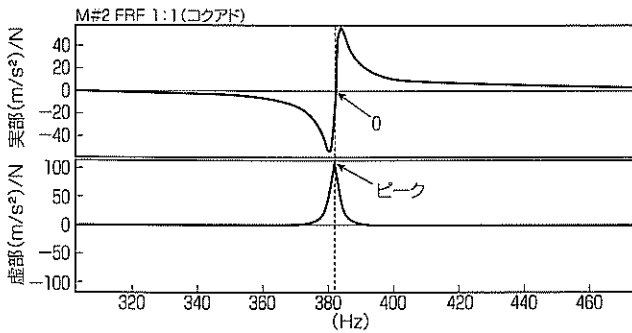


図4 コクアド

ち着くという状態が観測された場合、90°近傍が共振点となりイナータンスは極大になる。また、その周波数が主軸の危険速度となり、加工時の主軸回転周波数と一致することは避けなければならない。

余談であるがイナータンスが極小になっている箇所がある。これは反共振点である。この周波数では共振とは逆に主軸は揺れにくくなる。脱水機はこの原理を利用している。また別の見方としてコクアド図というものがある(図4)。

伝達関数のイナータンス実部が0、イナータンス虚部が極大である周波数が共振点といえる。(図3、図4は説明のための例である。実際の主軸を計測した結果ではない)。

●コヒーレンス

インパクトハンマで加振したことが主軸の応答に寄与したのか否か？ 結果である伝達関数は正しく計測されたものなのか？ この疑問に答える関数がコヒーレンスになる。

値は0%から100%で表され、0%は加振した力と振動が無関係であることを意味する。100%なら完全に関連があることを意味する。 $(\text{コヒーレンス})^2 = (\text{力}$

と加速度のクロススペクトラムの平均) $^2 / ((\text{力のオートスペクトラム平均}) \times (\text{加速度のオートスペクトラム平均}))$ という関係式で計算することができる。

加振の方法や試験対象に何らかの問題がある場合はコヒーレンスが低くなり、とくに加速度センサの感度が低い場合や試験対象の非線形性も災いしてインパクトハンマの入力が小さい場合にコヒーレンスが低くなる。

●計測と評価

加速度センサは主軸質量に比べ十分軽いもの、インパクトハンマは十分な加振力を入力することができる重量のものを選択する。加速度センサやハンマはおおのこの用途に応じて多様な種類があり、計測する対象物に合わせて適切に選択することで精度のよいデータを得ることができる。

実際に現場にあるスピンドルの伝達関数を計測するときの加速度計の取付けやインパクトハンマの叩く方向の例を図示する。半径方向は写真1を、軸方向は写真2を参照のこと。加速度センサは主軸ノーズ端ギリギリの場所、半径方向とスラスト方向に接着させる。注意すべき点は加速度センサを半径方向に接着する場合、加速度計の接着面が主軸の曲率に対して大きいと、傾いた接着となる。このような場合、主軸ラジアルからの応答方向が狂い、正確に伝達関数を計測できない。また、主軸はなるべくフリーの状態にする。ブレーキがかかった状態では正確に剛性を計測できなくなってしまう。剛性評価の解析周波数は最低でも主軸回転周波数×刃工具の刃数分は必要である。その周波数帯域までしっかり加振エネルギーを主軸に入力する。

加振する周波数を決めるのはインパクトハンマに

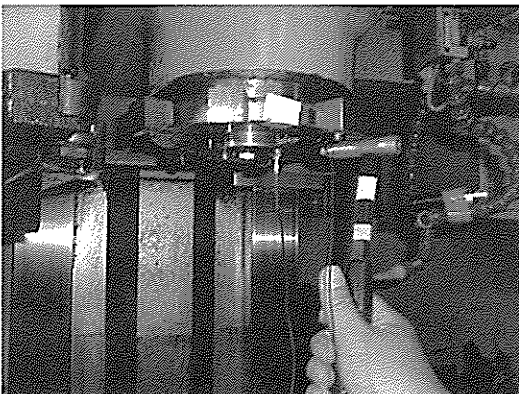


写真1 スピンドルノーズ端の剛性(ラジアル)を計測

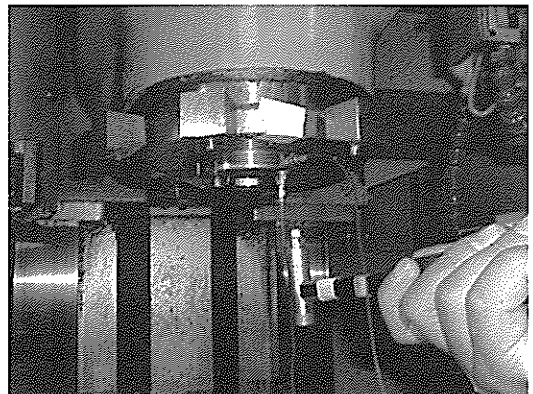


写真2 スピンドルノーズ端の剛性(スラスト)計測

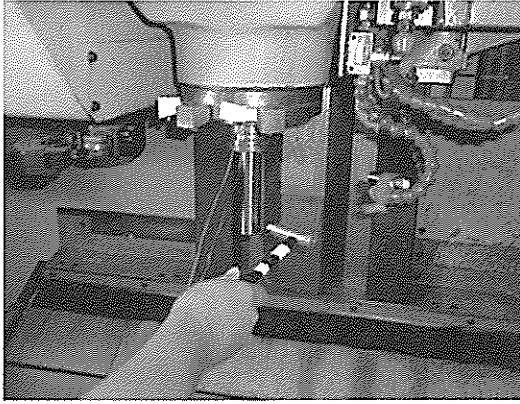


写真3 工具重量の影響(スピンドルノーズ端合剛性)計測

付属しているいろいろな種類の先端チップである。ゴム、プラスチック、金属それぞれチップの材質硬度によって入力できるおおよその上限周波数が決まっているため、使用時にどのチップにするか選択する必要がある。

ゴムはおおよそ100Hzまで、プラスチックはおおよそ2000Hzまで、金属チップはおおよそ9500Hzまでの加振が可能である(図5)。たとえば主轴の最高回転数が 12000min^{-1} 、刃工具の刃数が2枚ならば $12000 \div 60 \times 2 = 400\text{Hz}$ となる。この場合プラスチックチップを選択すると対象となる周波数まで加振できることになる。

次に刃工具を取付けた場合の刃工具の突出しによるラジアル剛性とスラスト剛性を計測する。写真3ではテストバーを使用している。刃工具の先端剛性を計測する場合、刃工具先端に加速度計を接着しなくてもよい場合がある。工具引揚げ機構によって主轴と工具ホルダはほぼ一体となり、構造上は線形と仮定できるためである。線形と仮定できるので、相反定理にもとづき加速度センサの位置を固定、加振ハンマ移動で加振各点の伝達関数を求めることが可能となる。

なお、スラスト方向はラジアルに比べ構造上剛性が低いため、工具重量は主轴のスラスト剛性の変化に大きく影響します。スラストの共振によって振動が大きくなる場合もあるため、ラジアル剛性だけでなくスラスト剛性も確認しておくことが重要である。

●適切な主轴回転の周波数の検討

伝達関数を計測することで共振周波数を知ることができた。ではどれくらいの周波数な

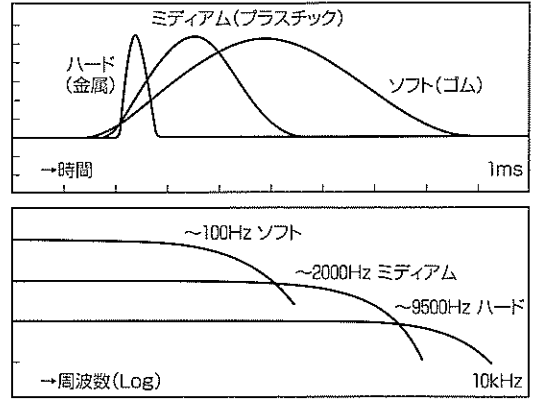


図5 チップの性格

ら主轴回転に適しているといえるのか？ それは主轴系の第1次の共振周波数の $1/\sqrt{2}$ より低い周波数なら共振の影響を受けなくなると考えられる。

図6は質量1kg、ばね定数10000N/m、減衰係数0.01kg/sの1自由度モデルのイナータンスである。共振周波数から見て左側に向かってイナータンスが1になるところより低い周波数は共振の影響を受けないと考えられる。その周波数が共振周波数の $1/\sqrt{2}$ になる。つまり、共振周波数の約70%以下なら危険周波数ではないと考えられ、主轴回転の周波数に適しているといえる。

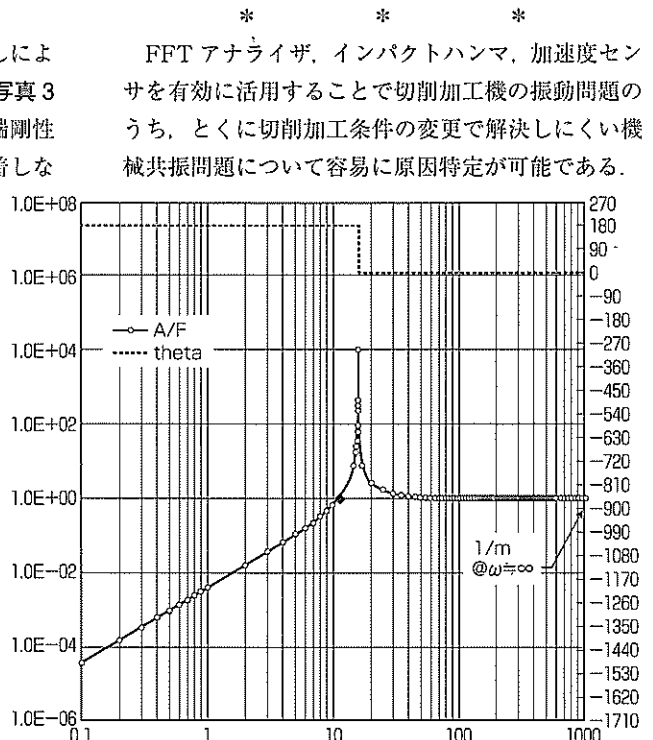


図6 共振の影響