

「機械と工具」誌 平成 28 年 2 月号掲載

安定ポケットの理解と実用

応用事例 10

ハードターニング仕上げ加工に残る振動模様

1. はじめに

焼き入れ材のハードターニングにおいて次の二つの問題が生じていた。

問題 1 加工面に傾いた振動模様が見られる。

問題 2 量産加工中、工具インターバルに至る前に度々、面粗度が悪くなる事象が発生する。

当初はツール 1 本で粗と仕上げの 2 カットで加工していた。仕上げ加工径 14mm。主軸回転数は 2099rpm、仕上げ加工の送りは 0.055mm/rev 、半径方向 (Z 方向) 切込み 0.1mm、直径公差幅 0.01mm である。

粗加工については応用事例 9 で効果のあった制振合金でバイトの上下を挟み、振動の軽減を図ったが当事例では大きな効果は見られなかった。続いて工具刃先近くに Y(切削速度) 方向に有効なフリクシオンダンパー (応用事例 12 参照) を取り付けたところ、振動振幅が 7%に低下する効果があり、問題 2 が解消されたので、粗加工ではそれを使用している。

2. 仕上げ加工後に残る振動模様。

三速度の主軸回転数で加工した後に残る仕上げ面模様を図 1-3 の写真に示す。

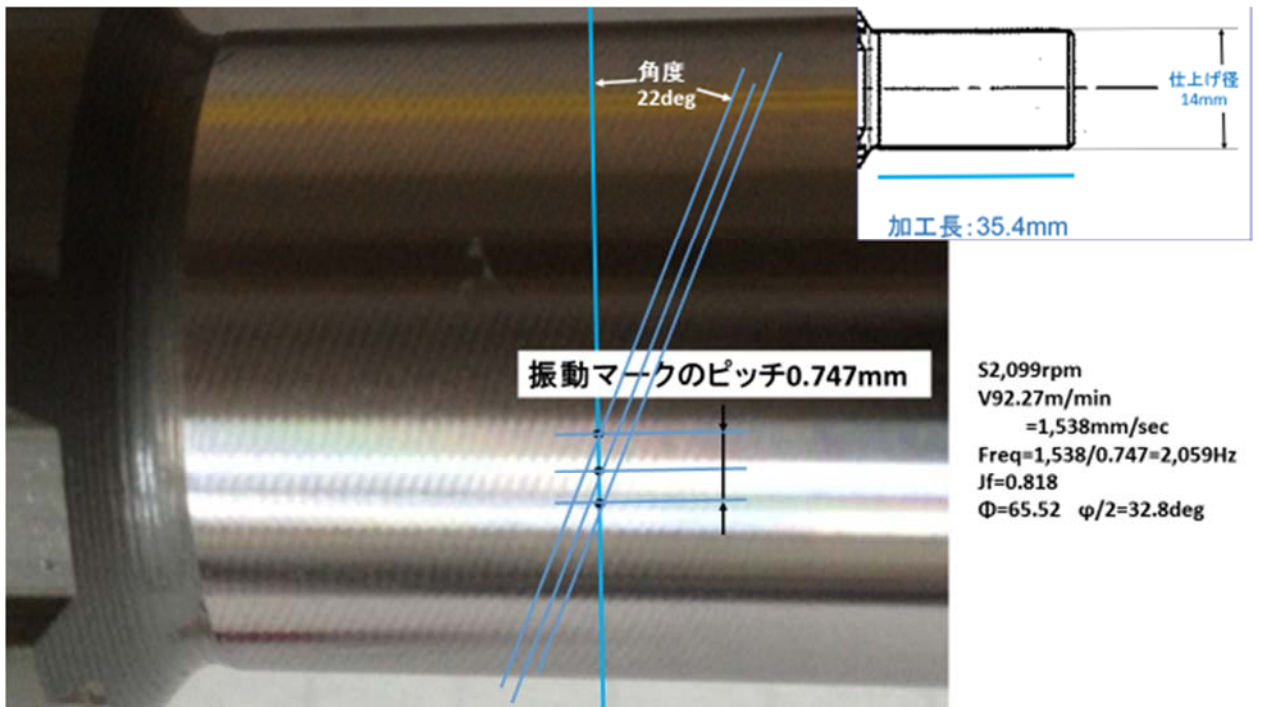


図1 主軸回転数 S2, 099rpm 仕上げ後の振動模様

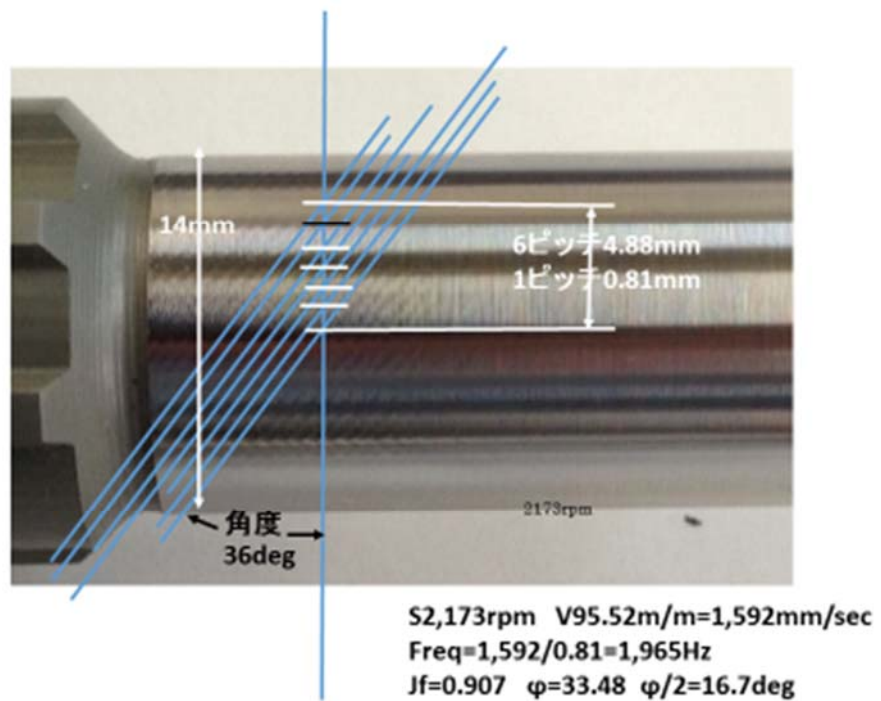


図2 主軸回転数 S2, 173rpm 仕上げ後の振動模様

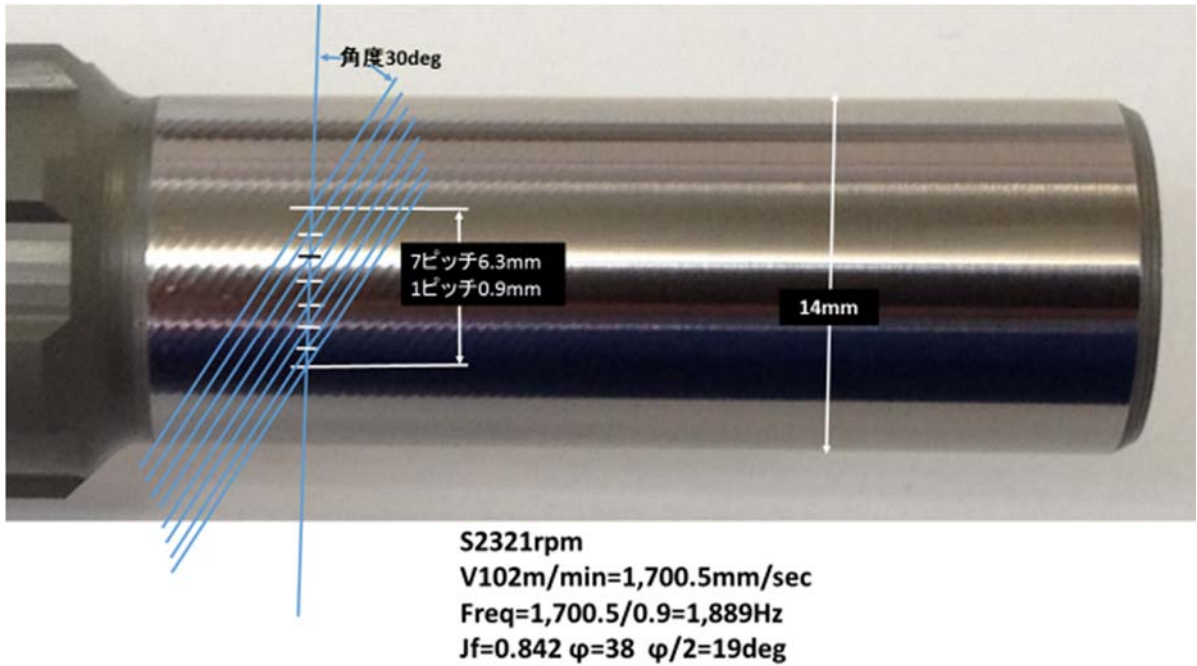


図3 主軸回転数 S2, 321rpm 仕上げ後の振動模様

写真中に線を描き入れて、振動模様のピッチ（波長） λ 、振動模様の傾き角度 γ 、周波数、および値 Jf と ϕ を求めている。

値 Jf は工作物 1 回転中に生じる振動模様の数の端数であり、 ϕ はそれから生じるイナーモジュレーションとアウターモジュレーション間の位相差である（第 1 回 6 月号掲載 図 1 参照）。これらの値は次の図 4 の手順によって作図して求めることができる。

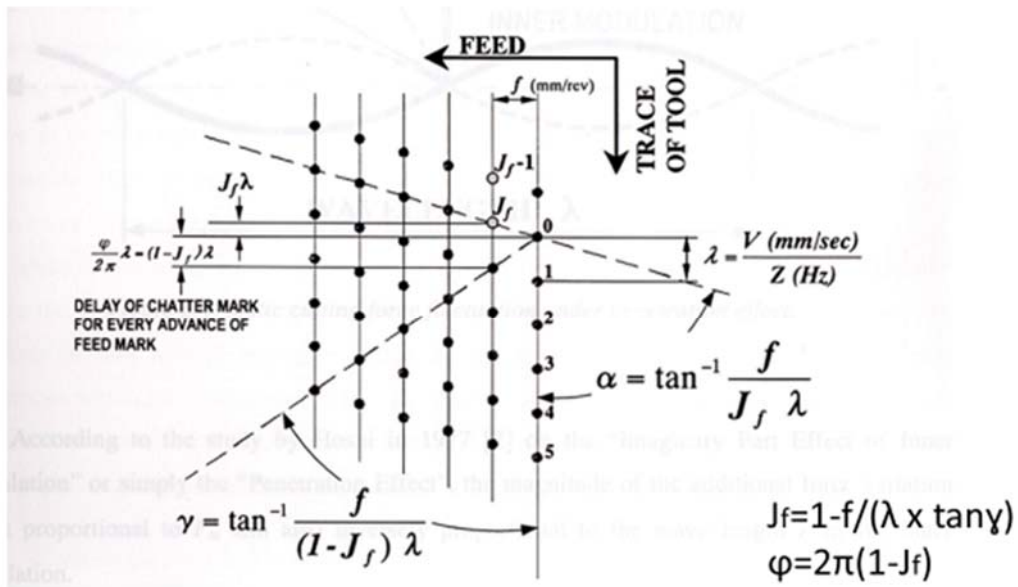


図4 振動マークから作図して Jf と ϕ を求める手順

これらの値を求めた結果は次のようになっている。

測定した値の一覧表			
	Photo1	Photo2	Photo3
	2,099rpm	2,173rpm	2,321rpm
周波数	2,059Hz	1,965Hz	1,889Hz
Feed	0.05mm/rev	0.05mm/rev	0.05mm/rev
λ	0.747mm	0.81mm	0.9mm
γ	22deg	36deg	36deg
Jf	0.818	0.9065	0.916
φ	65.5deg	33.6deg	30.2deg

図5 写真から作図によって求めた値の一覧表

図1 - 3の仕上げ面写真を観察して次の二つの特徴のある事が判る。

- (1) 模様の傾きがいずれも左下がりで共通している。

再生びびりの場合、通常の旋盤削りでは左上がりとなるが、使用機械は逆さバイトで加工しているため左下がりで共通していることは、再生びびりと同じ特徴である。しかし振動模様が薄く極く僅かである事から、再生びびりが起こっていたとは考えられない。

- (2) 周波数は1,900Hz から2,000Hz 前後である。

工具刃先あるいは工作物の持つ固有振動数が2,000Hz あたりにあるのではないかと疑われるので、測定結果を見ると図6の工具先端のFRFには見られないが、図7の工作物のFRF測定結果には固有振動数がY(切削速度)方向、Z(切込み)方向ともに2,000Hz 近くにある事が確認される。工作物は丸棒であるからY,Z両方向にほぼ同じ固有振動数を示すことは当然である。

工具先端の
FRF測定結果



図 6 工具刃先端 Y(切削速度)方向と Z (切込み) 方向の FRF 測定結果

工作物の
FRF測定結果

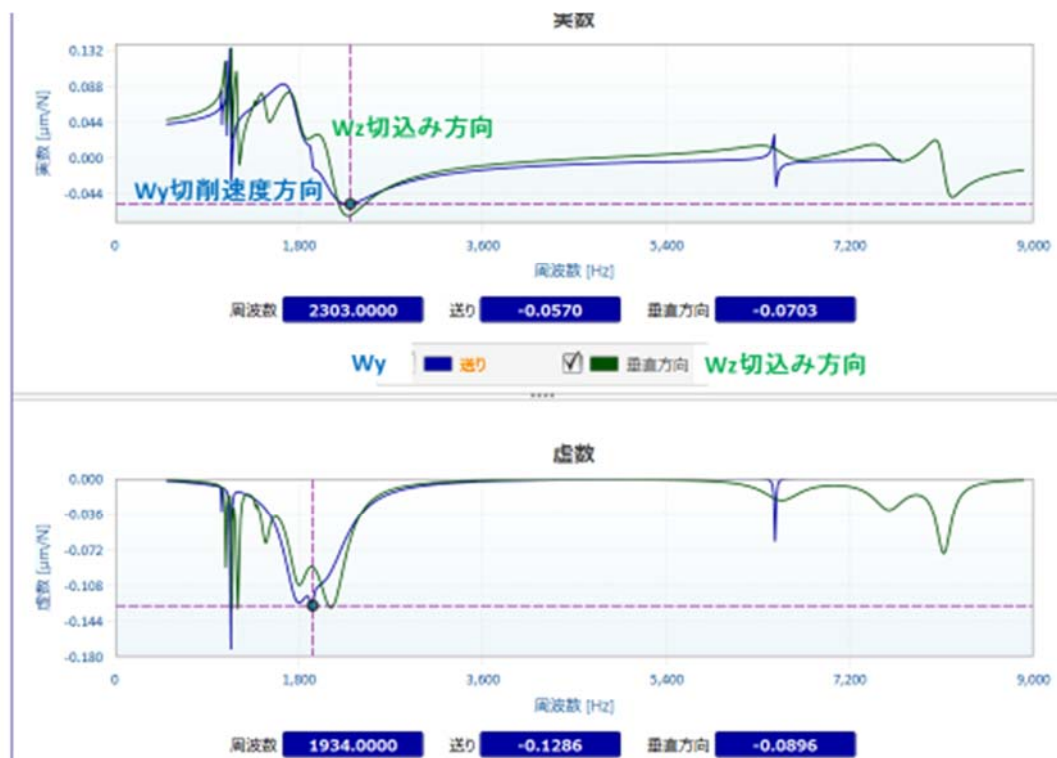


図 7 工作物 Y(切削速度)方向と Z (切込み) 方向の FRF 測定結果

また、工作物 Z 方向の 2,000Hz 近くの周波数成分は工具刃先にも伝達されて Z 方向に検出されていたはずであるが、次の図 8 に示すように約 2,000Hz に確認されている。

仕上げ加工 工具先端の Z方向振動

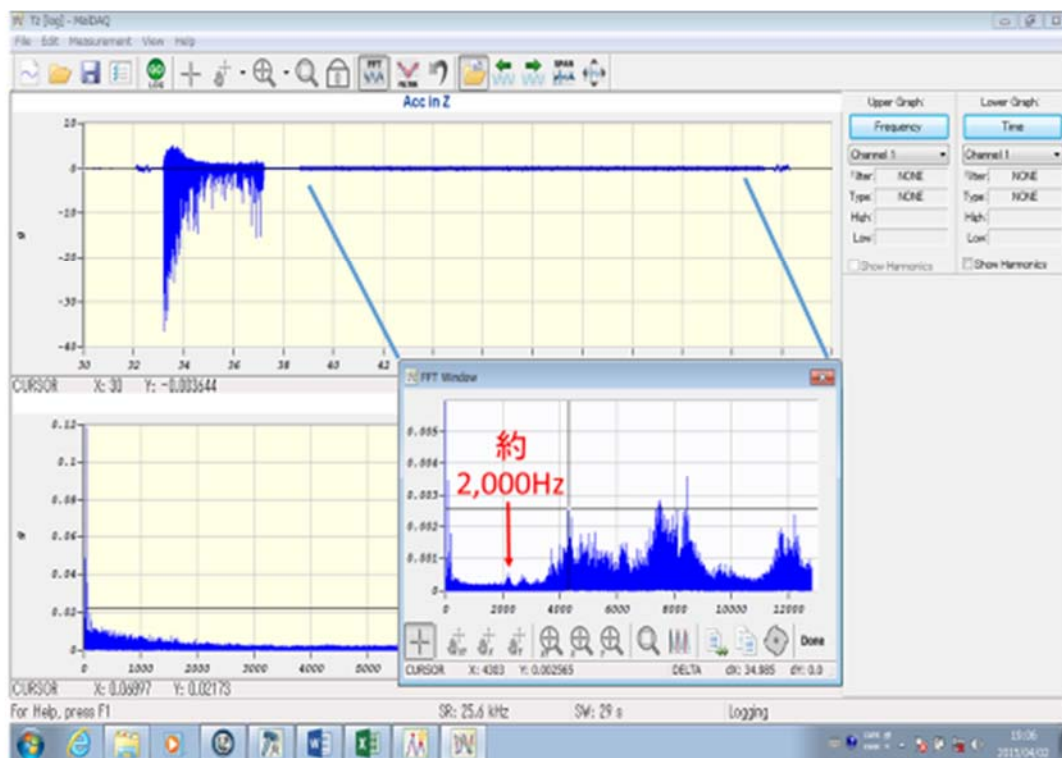


図 8 仕上げ加工中の工具先端 Z（切込み）方向の振動加速度測定結果

3. 仕上げ加工後に残る振動模様の発生機構

3.1 変動外力力

図 1-3 の仕上げ面写真に見たような振動模様が残る現象は、以上の解析結果から、次のような仕組みによって発生しているものと解釈される。

焼き入れした高硬度鋼、チタン合金やニッケル合金などの耐熱材料の切削加工は、応用事例 9（平成 28 年 1 月号掲載）で論じたように、剪断型切りくずを生じる状況にあり、顕著な振動を生じることがある。その仕組みはこれまで不明であったが、次のように説明することができるようになった。

すなわち剪断型切りくずは切りくずの一片が生成されるごとに図 9 上部に示すようなパルス状の周期的な変動切削力を生じる。一個のパルスの時間幅 P は亀裂状の剪断変形が起こる間の時間であって、0.1 ミリ秒以下の短い時間である。

切りくず生成が連続して繰り返すに伴ってパルス状の変動切削力が繰り返し生じるので、切削力の変動はパルス列状となる。時間間隔 L は切りくず生成の周期であってミリ秒オーダーの時間である。

このようなパルス列状の変動切削力はフーリエ展開すると図9下部に示すような周波数成分からなっている。これは 10kHz 以上の広い周波数範囲に分布する密集したスペクトルである。

3.2 外乱力による振動模様の発生

もしその周波数範囲内に工具刃先または工作物が Z (切込み) 方向に振動し易い固有振動数を持っていると、その固有振動数の変動切削力成分が外乱となって Z (切込み) 方向にわずかな振動が引き起こされる結果となり、それが仕上げ面に残る振動模様となる。

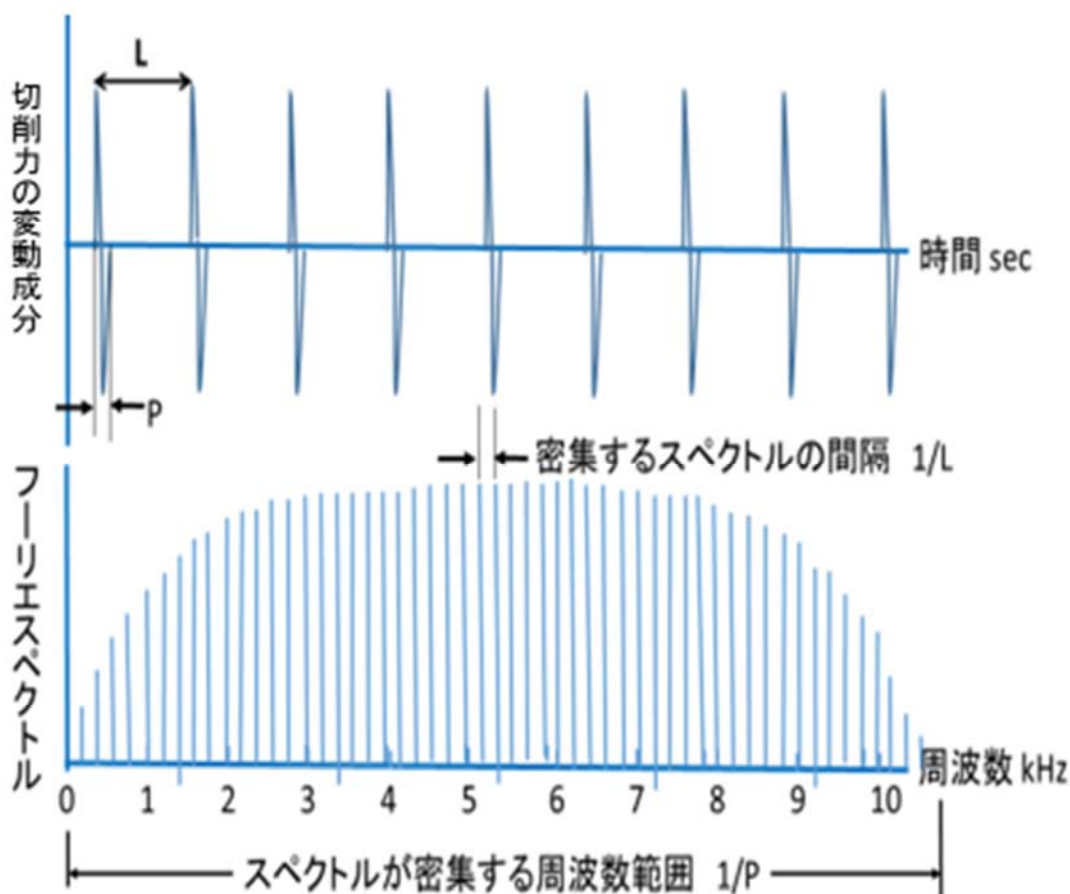


図9 剪断型切りくず生成に伴うパルス列状 Y 方向刃先変位 (上図) と周波数成分が密集するペクトル分布 (下図)

3.3 再生効果の関与

図 9 下図に示すスペクトル分布は密な間隔で極めて多数の周波数成分を含んでいる。仕上げ加工中に、その内の特定の一つの周波数の振動がかすかではあるが起こり、振動模様となって残るようにフィルターをかける特殊な仕組みが作用しているものと予想される。

それは、工作物表面に生じる切削過程の再生効果によって、ある周波数の成分だけが増幅されて現れる力外乱型強制振動のしくみである。

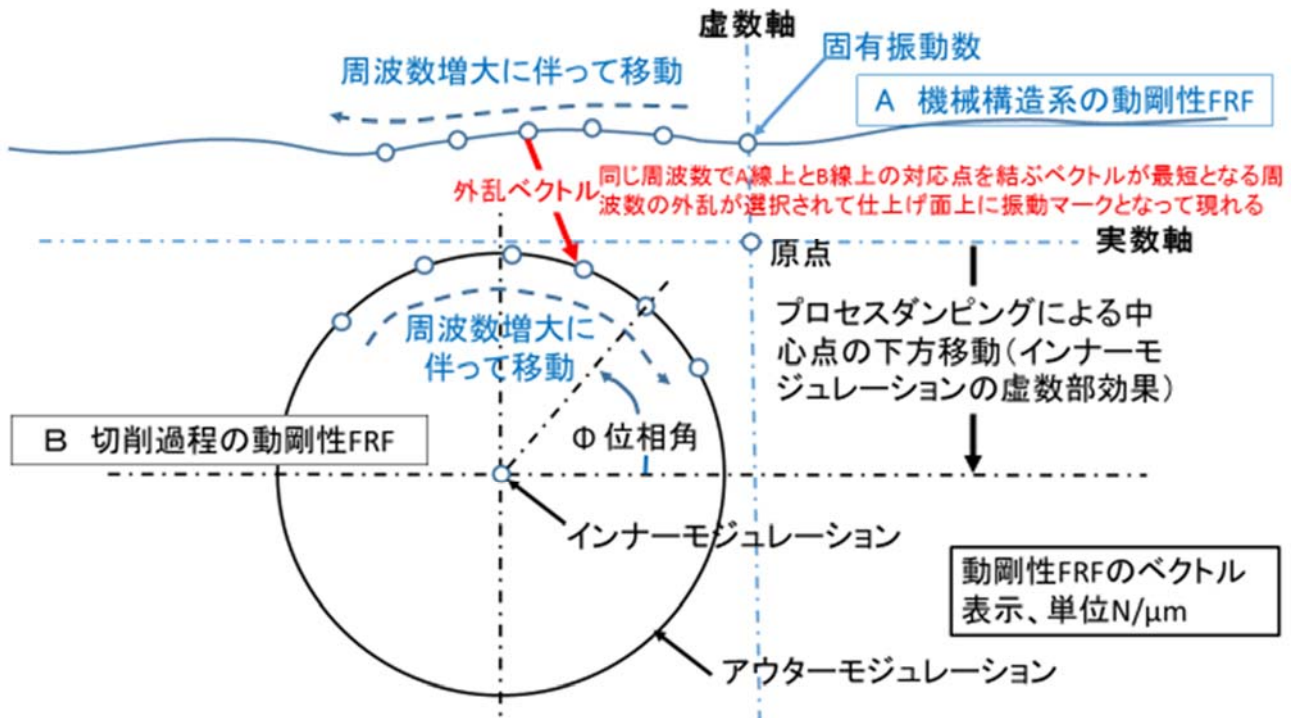


図 10 切削過程の再生効果によって、ある周波数の成分だけが増幅されて現れる力外乱型強制振動のしくみ

図 10 は機械構造系と切削過程の動剛性 FRF をベクトル線図に表示しており、図中で表示されるベクトルは動剛性つまり振動変位に対する変動力の比を示す。

機械構造系の動剛性 FRF は図上方のややうねっている線 A 上の点で表され、虚数軸上の点が固有振動数に対応し、それより周波数が増大すると線 A 上を左方向に移動する。

切削過程の動剛性 FRF は図中左側の円 B で表されている。再生びびりが起こらない状況であるから、円 B は機械構造の動剛性 FRF の線 A から大きく離れている。つまりこの状況では円 B の中心点はインナーモジュレーションを表しているが、プロセスダンピングが効いていて実数軸より下方に移動しており、アウターモジュレーションを表す円 B は線 A と交わることなく、再生びびりは起こらない状況である。

工作物 1 回転当たりの振動の山数は

$$J=J_i \text{ (整数)} + J_f \text{ (端数)} = 60 \text{ (周波数 Hz)} / \text{(回転数 rpm)}$$

与えられるから、問題とする振動の周波数を高くすると端数 J_f が増大し、アウターモジュレーションに対するインナーモジュレーションの位相遅れ角 $\phi = 360(1 - J_f)$ は小さくなるので、対応する動剛性 FRF 上の点は円 B 上を右回りに移動する。

図 9 下図に見られる多数のスペクトルの周波数を当てはめてみると、周波数が高くなるに従って A 線上の対応点は左に移動し、B 円上の対応点は右に移動するから、両者の対応点を結ぶベクトルが最短となる周波数がある。

ベクトルの長さは、外乱変動力に対する振動変位振幅の逆数であるから、ベクトルが最短であれば、同一の外乱変動力に対し最も大きい振動変位振幅を生じる状況であり、仕上げ面にはその周波数の振動模様が残ることとなる。

この仕組みによって多数ありうる周波数の中の特定の 하나가選択されて仕上げ面の振動模様として現れる。

4. 結論

焼き入れ材のハードターニングにおいて

問題 1 加工面に傾いた振動模様が見られる。

問題 2 量産加工中、工具インターバルに至る前に度々、面粗度が悪くなる事象が発生する。

の二つの問題があったが、当初はツール 1 本で粗と仕上げの 2 カットで加工していたのを、粗加工と仕上げ加工で別工具を使用することとし、粗加工では、従来の工具の刃先近くに Y(切削速度) 方向に有効なフリクシオンダンパー (応

用事例 12 参照) を取り付けたところ、振動振幅が 7% に低下する効果があり、問題 2 が解消された。

仕上げ加工した工作物面に傾いた振動模様が見られる問題 1 は、仕上げ面の観察結果と加工中の振動を収録して解析した結果、および工作物の動特性 FRF の測定結果から見られる特徴に基づき、剪断型切りくず生成に伴う外乱型強制振動であることを明らかにした。

その結果として問題 1 の解決策は次の二つが提案できる。

- (1) 切れ味のよい工具の使用
両すくい角がポジの切れ味のよい工具を使用して、剪断型切りくずがなるべく発生しないようにする。
- (2) 主軸回転数を下げ (例えば現行 2,000rpm を 1,000rpm に下げる)、替わりに送りを増やして (例えば現行 0,055mm/rev を 0.1mm/rev に増やす) プロセスダンピングの効果を高め、図 10 中の円 B を下方にさらに下げて、赤色で示される外乱ベクトルを長くして発生する振動変位を減少させる。括弧書きの例ではプロセスダンピングが約 3 倍に増大するので、振動模様が見えにくくなるものと期待される。この場合、仕上げ表面の粗さが大きくなりすぎないように、工具の刃先 R は 1.2mm と大きい R をとることが必要である。

当事例では仕上げ加工に (1) の工具を採用して、問題を解決することができた。

以上