

「機械と工具」誌 平成 29 年 6 月号掲載

びびり無し加工条件設定の手順

－事例による解説－

星技術研究所

第 1 部

荒加工におけるびびり無し条件

改訂 平成 29 年 8 月 7 日

1.1 前書き

加工技術担当者がびびりを起こさずに加工できる加工条件を予め設定し、現場の職員が工作物と工具を機械上に用意した後でさらに加工条件の確認作業と修正を行うことなく、手際よく部品加工がおこなえるようにすることを目標としている。

びびりを起こさず加工するための条件は CutPRO ソフトウェアによる安定ポケットの予測計算と、プロセスダンピングに関する近年の研究成果を用いて本稿に示す方法により次のように設定することができる。

1.2 条件設定の原理

1.2.1 安定ポケット [機械と工具、2015 年 5 月号 p65-77]

故トラスティ教授が 19560 年代に発見した再生びびりの理論が 1960 年台には広く認められるところとなり、主軸回転数の非常に高い領域でびびりが起こらない安定ポケットのあることが予測されていたが、トラスティ教授とその教え子たちの研究によって 2000 年頃に初めて実用されるようになり、最初はアルミ合金の航空機構造部品の加工に用いられるようになった。安定ポケットにより設定するびびり無し加工は比較的高速な加工条件となる特徴がある。安定ポケットを使用するためには Y.アルティンタス教授により開発が続けられており CutPRO なる名称でカナダブリテイッシュコロンビア大学の MAL 社から市販されているソフトウェアを用いて、機械主軸に取り付けた工具刃先の動特性

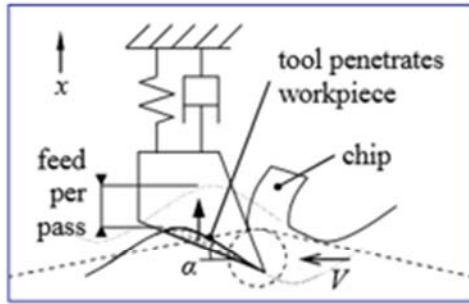
FRF を実際に測定し、続いて安定限界線図を計算して使用する主軸回転数を設定する。

先端に力センサーを取り付けたインパルスハンマーを用いて、工具刃先を軽く打撃するいわゆるインパルステストによって、刃先にかかる変動力（これを入力信号とする）を検出し、同じく刃先に取り付けた加速度計によって刃先に生じる応答振動（これが出力信号である）を検出する。FRF とは **Frequency Response Function**（周波数応答関数）の事で、周波数に対して変化する二つの変数、（制御工学ではゲインと呼ぶ入力信号に対する出力信号の振幅比と、両者の間の時間的なずれ、つまり位相差の二つの変数、びびり理論では検出した加速度信号から変位振幅を計算した上で、実数部と虚数部の二つの変数）を記述するものである。Tlusty 教授が展開したびびり理論は二つの実用上重要な帰結を与えており、一つは実数部が示す負の最大値（最大負実部、Gmin という）がびびり易さの指標であり、もう一つは最大負実部を示す周波数がびびりの起こる周波数となるという二点である。

削り込んで薄肉となった工作物が原因となってびびりを発生する場合もあるが、この場合にはその工作物について動特性 FRF を測定し、最大負実部を工具刃先のそれと比較して、値の大きい方がびびりを生じる。

1.2.2 プロセスダンピング

低い切削速度においてびびりを抑制する制振力が発生する現象はプロセスダンピング作用によるものとされているが、それには2種類の発生機構があり、良く理解されているのは図 1.1 に示すような、切れ刃の丸みと逃げ面のフラック摩耗による加工面との干渉の現象によって工具切れ刃に振動を抑制するような変動力が発生する。CutPRO ソフトウェアは、この種類のプロセスダンピングを図 1.2 に示すように安定限界線図の計算に組み込むことに成功している。この種類のプロセスダンピングは仕上げ加工において有効に作用するがその理由は図中に示すように切れ刃の丸みと逃げ面摩耗幅が半径方向切込みと同等なオーダーの値となるためである。

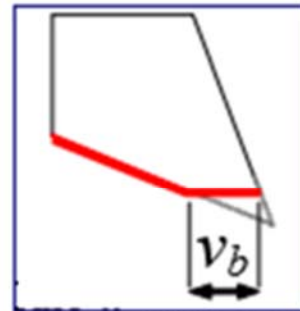


切れ刃と加工面の干渉現象の二つの要因の説明

出典：” Process Damping and Cutting Tool Geometry in Machining” CM Taylor, ND Sims and S Turner., The University of Sheffield IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 26(2011)012009



要因 1 : 切れ刃の半径



要因 2 : 逃げ面摩耗

図 1.1 切れ刃と加工面の干渉の二つの要因の説明図

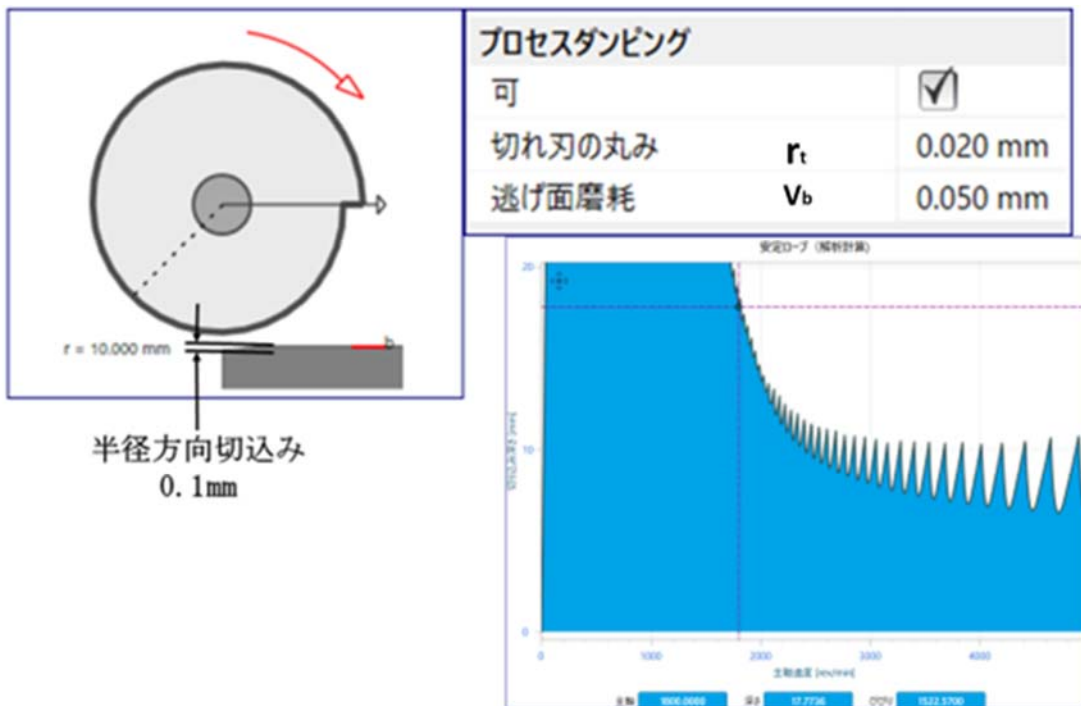


図 1.2 CutPRO ソフトウェアによるプロセスダンピング計算

1.2.3 切削主分力の作用方向変化に伴うプロセスダンピング

主分力は切削力の切削速度の方向に働く分力であるが、振動に伴って切削速度の方向が変動するので、主分力の方向も変動し、振動を抑制するような変動力が新たに発生する。Das Tobias はこの仮説を 1960-64 年に提唱しており、その後切削実験によりこのモデルに従って振動減衰力が発生する事が確認されている。〔機械と工具、2015年7月号 p71-75〕

この現象については切込みをどのように大きくとってもびびりが発生しない**臨界切削主軸回転数 S_{as}** を求める計算式がある。この式で重要な変数はびびりが生じる周波数であり、前項にのべた工具刃先のインパルステストによって同定されている。主軸速度を S_{as} 以下にすれば、切込みをどのように大きくとってもびびりを生じることは無い。この方法により設定するびびり無し加工は比較的低速な加工条件となる特徴がありまた荒加工において有意な結果を与える。

1.2.4 シャープコーナーで発生するびびりの回避

凹み面のコーナR部はびびりが起こりやすいため、何らかの工夫を行ってびびりを起こさずに荒加工および上げ加工することが必要である。図 1.3 の左側に示すような直線輪郭の仕上げ加工では、半径方向切込みが小さいためびびりは起こり難い。しかし右側に進んでコーナRに入ると、一瞬の間ではあるが、いわゆるインマージョン角が大きい状態となるためびびりが極めて起こりやすい。

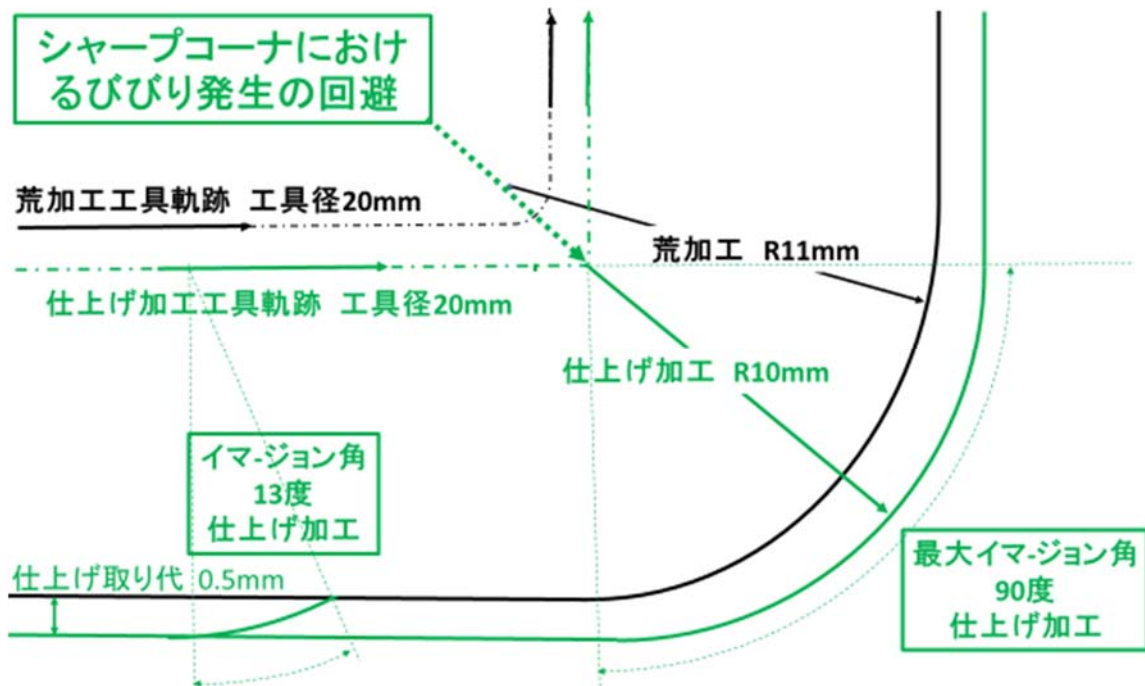


図 1.3 直線輪郭とコーナーR部とのインマージョン角の違い

それまで半径方向切込みの小さい仕上げ加工の状況であったものが、コーナRにかかった瞬間に突然荒加工と同じ状況となるのでその一瞬だけびびりが起こりやすい。それを防ぐには次の二つの方法のいずれかを取ればよい。

CutPRO ソフトで計算される安定ポケットを使用して比較的高速域で加工する場合には、安定限界を計算する際に、半径方向切込みの値を大きくとって置き、インマージョン角が大きい場合にもびびりが起こらない安定条件を確保する。最も安全なのは、インマージョン角が 180 度となるよう、半径方向切込みを工具直径と等しく設定して溝削りと同じ状況で安定限界計算を行う。

主軸速度を**臨界切削主軸回転数 S_{as}** 以下にして比較的低速域で加工する場合には、切込みがいかに大きくなってもびびりは起こらないから、シャープコーナにおいてインマージョン角が大きくなってもびびりが起こらない条件が自動的に保たれる。

1.2.5 シャープコーナに残る振動マーク

前節の方法によりびびり回避を行っても、シャープコーナの加工跡にかすかな振動マークが見られる事が有るが、加工中の振動周波数の解析結果から、これはびびりではなく、主軸の振じれ固有振動が誘起された結果であることが確かめられている。この振動は高い周波数で生じるがその影響を避けるためには、図 1.4 に示す吸振合金を介して工具を把持することが有効である。

図1.4 主軸の振じれ固有振動の影響を抑制するのに有効な吸振合金のエンドミル把持具。

コレット (エンドミル用)

スターサイレント 応用編 (エンドミルコレット)

1. スターサイレント組込エンドミルコレットの寸法表

型番	外径 (mm)	内径 (mm)
DSSC3208 (M8)	φ32	φ8
DSSC3210 (M8)		φ10
DSSC3212 (M6)		φ12
DSSC4212 (M10)	φ42	φ12
DSSC4216 (M8)		φ16
DSSC4220 (M6)		φ20

エンドミル用スリーブ

スターサイレント 応用編 (エンドミル用スリーブ)

1. スターサイレント製エンドミル用スリーブ寸法表

型番	外径 (mm)	内径 (mm)
DSE5080060	φ8	φ6
DSE5095080	φ9.5	φ8
DSE5120100	φ12	φ10

エンドミル用スリーブ





1.3 加工事例 1 アルミ合金 –その1–

工作物材質 5056 アルミニウム合金
 使用工作機械 オークマ MU400VA ホルダ BT40
 最高主軸回転数 15,000rpm
 ストローク X762mm, Y460mm, Z460mm
 使用エンドミル直径 20mm 4枚刃

1.3.1 高速域びびり無し荒加工条件

〔手順 1〕 工具刃先の動特性 FRF の測定
 使用する工具を機械の主軸に使用する状態に装着する。CutPRO ソフトの MalTF モジュールを用いてインパルス加振実験を行う。

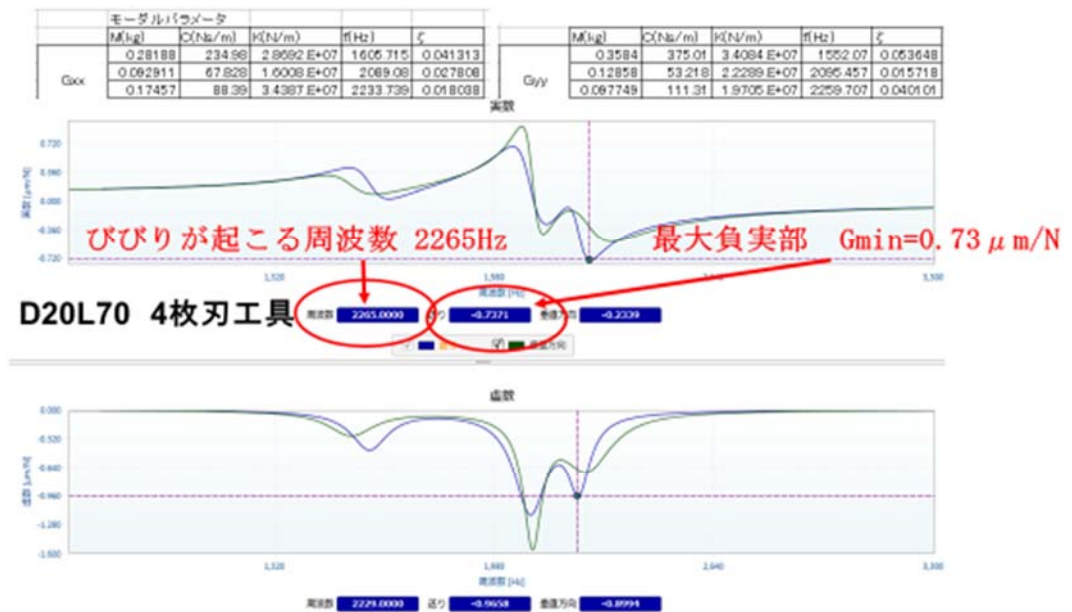


図 1.5 使用工具刃先の動特性 FRF データ測定結果

びびりを起こす周波数は 2265Hz と比較的高い周波数である。最大負実部の値は $0.73 \mu\text{m/N}$ と比較的小さい値であるから、かなり良く加工できる工具である。

〔手順 2〕 上記の動特性 FRF データを使用して安定限界線図を計算する。図 1.6 の計算結果から、機械の最高主軸回転数 1,500rpm 以内で最も高いのは安定ポケット #3 であるから、その回転数 10,795rpm の主軸回転数を使用するも

のとしその回転数における安定限界の軸方向切込みが 1.3mm であるから、それ
 以内の 1mm を軸方向切込みとする。

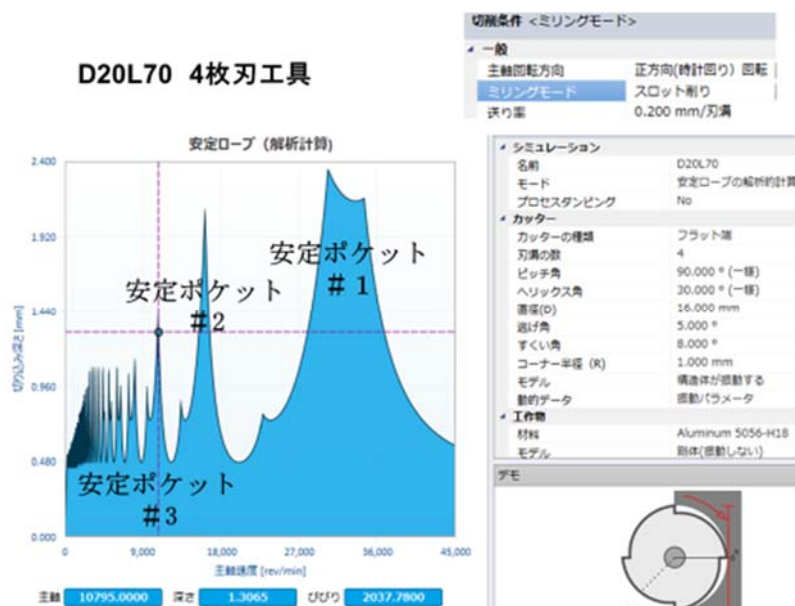


図 1.6 安定限界線図の計算結果

〔手順 3〕 選定した加工条件の確認

ミリングプロセスシミュレーション計算を行い、びびりが発生しないことと、主軸の所要動力が機械の可能範囲にある事を確認する。

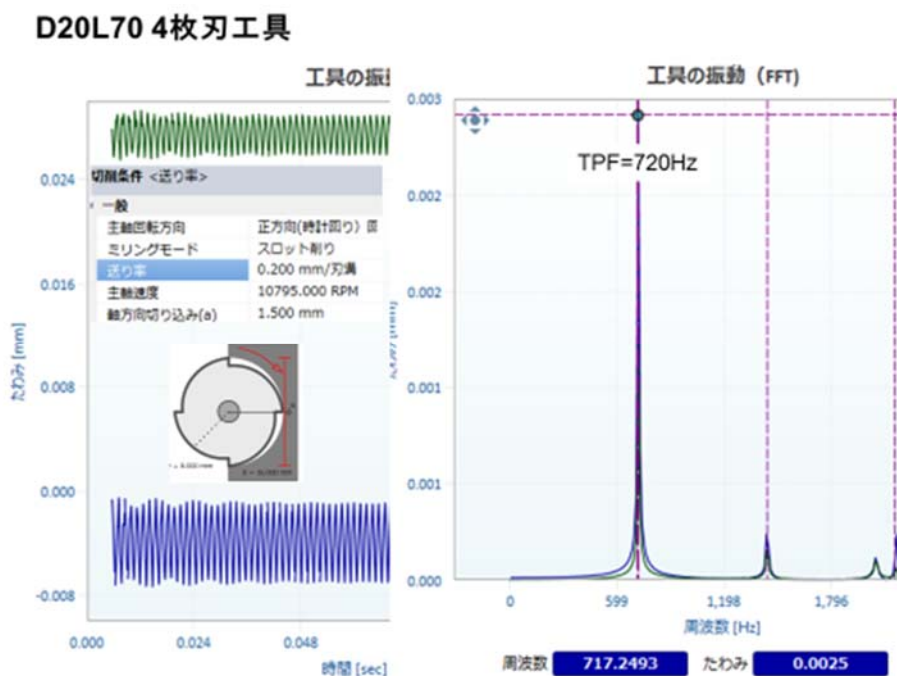


図 1.7 ミリングプロセスシミュレーション計算によるびびり無しの確認

主軸回転数 S10,795rpm, 送り f0.2mm/刃、F8636mm/min, 半径方向切込み 20mm (溝削り), 軸方向切込みは1mmより大きい 1.5mm の加工条件でも発生する振動は図 1.7 に見るように強制振動であることが確認された。

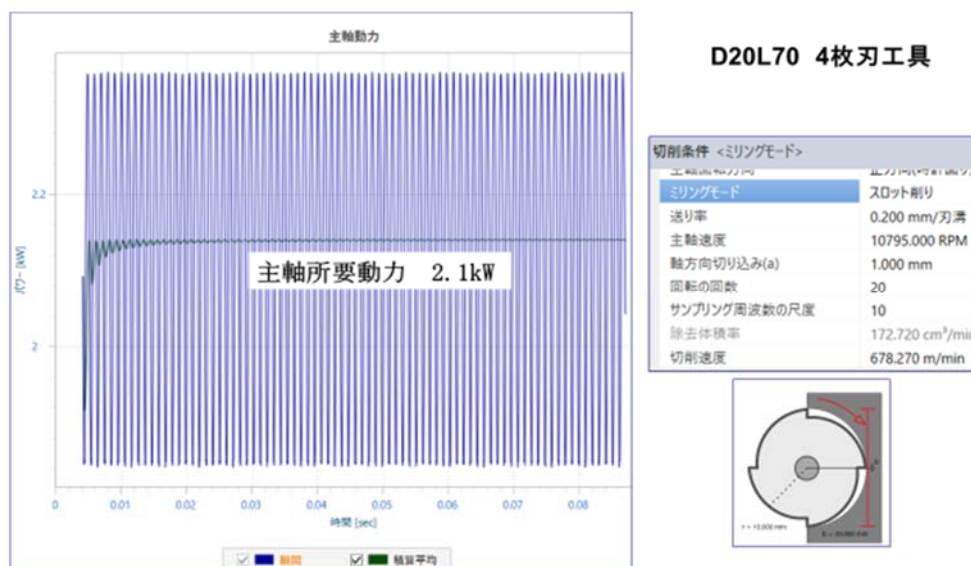


図 1.8 ミリングプロセスシミュレーション計算による主軸所要動力の確認

軸方向切込み 1mm の加工条件で、図 1.8 のように 2.1kW の主軸動力を要することが判ったが、これは機械の能力以内であることが確認された。

1.3.2 低速域びびり無し荒加工条件

〔手順 1〕 図 1.5 の測定結果から、びびりの起こる周波数は 2265Hz であるから、その値を用いて臨界切削主軸回転数 S_{as} を図 1.9 のように計算する。

その結果から主軸回転数 S3000rpm を使用することを決定する。この回転数を選べば、軸方向切込みがいかに大きくても、またシャープコーナにおいてインマージョン角がいかに大きくなってもびびりは発生しないはずである。

ほかの加工条件は送り f0.2mm/刃、F600mm/min, 半径方向切込み 20mm (溝削り), 軸方向切込み 10mm とする。

D20L704枚刃工具 プロセスダンピングの適用

臨界切削主軸回転数

$$Sas(\text{rpm}) = 120 (\text{固有振動数, Hz}) \gamma Cs f / (\text{工具直径, mm})$$

$$= 120 \times 2265 \times 2.0 \times 0.63 \times 0.2 / 20 = 3425 \text{rpm}$$

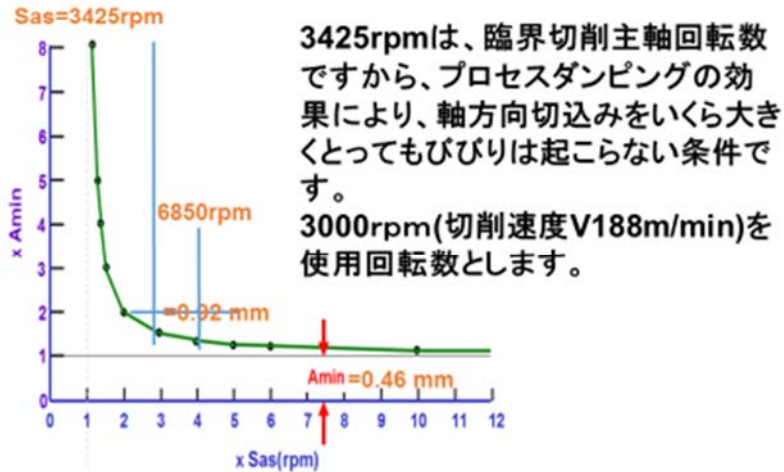


図 1.9 Das Tobias (1960-64)モデルによる臨界切削主軸回転数の計算

〔手順 2〕 主軸の所要動力が機械の可能範囲にある事を確認する。

図 1.10 に見るように 6.3kW の所要動力を要するが機械の能力以内であることが確認された。



図 1.10 ミリングプロセスシミュレーションによる主軸所要動力の計算結果

1.3.3 溝荒加工びびり無し条件の比較

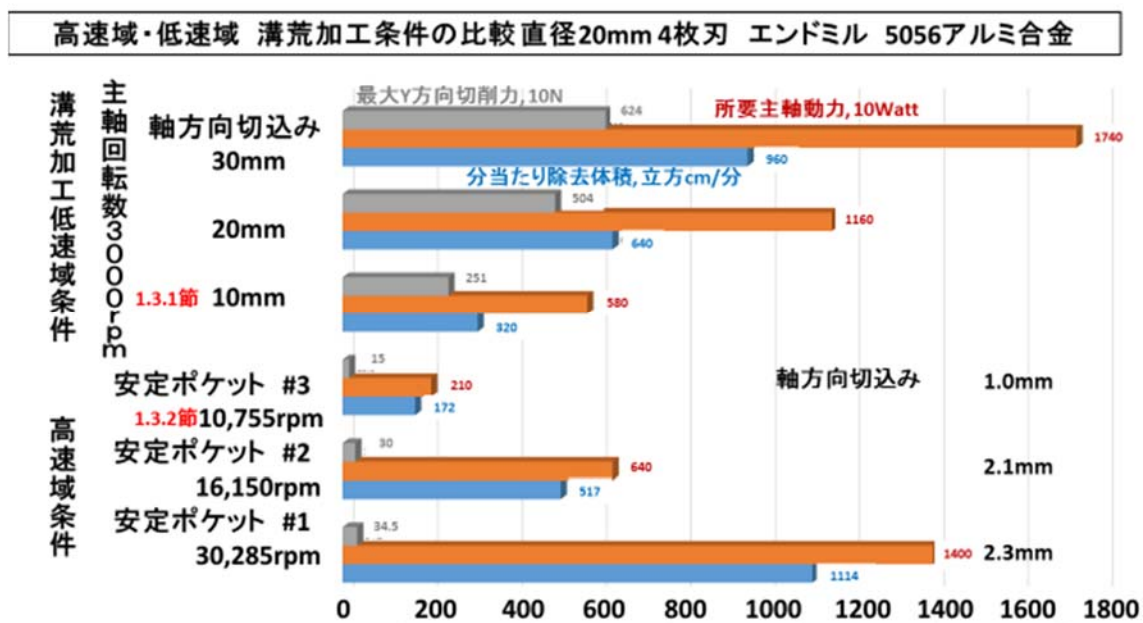


図 1.11 選定した溝荒加工条件の比較一覧図

低速域条件は 1.3.1 節では軸方向切込みを 10mm としていたところを、さらに深い切込みを採用すればびびり無しでそれ以上の高能率加工が可能ではあるが、機械の主軸動力の制限と、工具が折損する限界以下で抑えなければならない。高速域条件は 1.3.2 節では安定ポケット#3 を採用したが、軸方向切込みが 1mm と小さい。機械の最高主軸回転数がさらに高ければより低次の#2 あるいは#1 の安定ポケットを使用することにより、軸方向切込みは高々 2.3mm と大きな値をとらないために切削力はさほど増大する事なしにさらに高能率な加工が可能である。

第 I 部 終了