

工具突出長が長い場合の機械剛性を考慮した仕上切削法の検討

西川隆敏、前田圭治、山下弘之

Study of high speed and high accuracy milling

Finish end milling method in case of long overhang considering stiffness of machine tool

NISHIKAWA Takatoshi , MAETA Keiji , YAMASHITA Hiroyuki

Recently, high speed milling technique realizes high efficiency and high accuracy in the manufacturing of die and mold. But it is difficult to get high accurate machined surface in case of milling deep cavity. In this study, finish end milling with long overhang are discussed. The main result are as follows ;

- (1) Roughness of the finished surface is affected by dynamic stiffness of machine tool and surface roughness before finish milling.
- (2) Method for finding fine milling condition considering dynamic stiffness is proposed.

キーワード：金型加工、仕上面粗さ、動剛性、工具突出長

1 緒 言

近年、高硬度材の金型加工において、放電加工から高速切削加工への転換が行われ、多くの成果（工数低減事例）が報告されている¹⁾。しかし、小さなRをもつ深い形状の加工を行う際には工具突出長/工具径（L/D）が大きくなり、それに伴う剛性低下により加工面悪化などの問題が発生する場合が多い²⁾。その際、切削条件の変更が必要となるが、「実際に削ってみないと分からない」ことが多く、その変更は、経験等に基づき試行錯誤で行われているのが現状である。また、使用する工作機械により加工特性が異なる、いわゆる“機差”は経験的に認知されており、他の機械での良好な切削条件がそのまま適用出来ないといった問題も生じている。これらは、ユーザにとって工作機械がブラックボックスになっているためであると考えられ、工作機械や工具、ホルダなどの特性を考慮した切削手法が必要となっている。

本研究は、L/Dが大きい条件での高硬度材の切削加工において、加工前に使用する工作機械の特性（工具、ホルダを含めた機械動剛性）を把握し、良好な加工面の得られる切削条件を得ることを目的としている。金型加工は一般に、荒、中仕上げ、仕上げの順に行われるが、本報では仕上加工に着目し、仕上面粗さを評価対象とした。仕上加工では仕上加工前の加工面の状態（表面粗さ）が負荷変動になり、仕上面粗さへ影響を及ぼすと思われるため、その影響をL/Dの異なる条件において評価した。そのうえで工具、ホルダを含

めた工作機械の動剛性と仕上面粗さとの関係性を評価し、L/Dの大きな条件でも良好な仕上面の得られる加工手法を提案した。

2 切 削 実 験

2.1 実験方法

実験に使用した工作機械、工具、ホルダ、被削材を表1に示す。切削方法は図1のとおりで、工具軸に対して被削材の法線方向を30°傾斜させ直線切削（送り方向Y軸）を行い、送り方向の表面粗さを測定した。工具突出長は写真1に示すとおり18mm（L/D=3）、36mm（L/D=6）、54mm（L/D=9）の3種類を使用し、突出54mmに相当するやきばめホルダも使用した。切削条件は表2のとおりで、仕上加工前の表面粗さの

表1 工作機械、工具、ホルダ、被削材

工作機械	形式	豊田工機株式会社 マシニングセンタ
	主軸回転数	max50000min ⁻¹
	主軸テーパ	HSK-A40(特)
	主軸保持方式	機械軸受
工具	種類	MMC コベルコツール株式会社 TiAlN コーティング 超硬ボールエンドミル
	工具R	3mm
	工具直径D	6mm
	刃数Z	2
ホルダ	黒田精工株式会社 コレットホルダ、及び	

	MST コーポレーション(株)製やきばめホルダ
被削材	SKD61 (硬度 HRC45)

影響を評価するために、送り方向の仕上前表面粗さを $5\mu\text{m} \sim 250\mu\text{m}$ の 6 通りとした。主軸回転数は 5000min^{-1} (切削点周速 $26 \sim 65\text{m/min}$) から 50000min^{-1} (同 $262 \sim 652\text{m/min}$) までの 19 通り。ピックフィード、及び送り量については、予備実験より、送り方向とピック方向の粗さの差が少なく効率的な切削が出来る条件(主軸 1 回転当り送り量 (1 刃当り送り量 $f \times$ 刃数 Z) = ピックフィード pf) とした。また、表面粗さ(最大高さ R_z) の目標値を $3\mu\text{m}$ と設定し、 $f=0.1\text{mm/刃}$, $pf=0.2\text{mm}$ とした (実質理論粗さ $1.67\mu\text{m}((f \times Z)^2 / 8R) = (pf)^2 / 8R$)。工具を主軸に取付けた状態で、2 枚刃の R 中心付近の静的な振れは $3\mu\text{m}$ 以下とし、各切

(最大高さ R_z)	
切削油様式	エアブロー, ダウンカット

削条件での切削距離は、工具摩耗の影響を少なくするため 200mm とした。写真 1 の各条件毎に工具一本を使用し、各条件の切削距離は 22.8m ($0.2\text{m} \times 114$ 通り) である。

2.2 実験結果

図 2 に $L/D=3$ (コレット), $L/D=9$ (コレット), $L/D=9$ (やきばめ) における仕上面粗さを示す。なお、粗さのカットオフ値は、仕上面のうねり成分も考慮するため 8mm とした。 $L/D=3$ (コレット) の場合は全条件で表面粗さが安定しており、仕上前粗さを $40\mu\text{m}$ 以下とすることにより、全回転数で目標の $3\mu\text{m}$ を達成出来る。図には示していないが、 $L/D=6$ (コレット) の場合は仕上前粗さを $20\mu\text{m}$ とすること、主軸回転数 7500min^{-1} 、

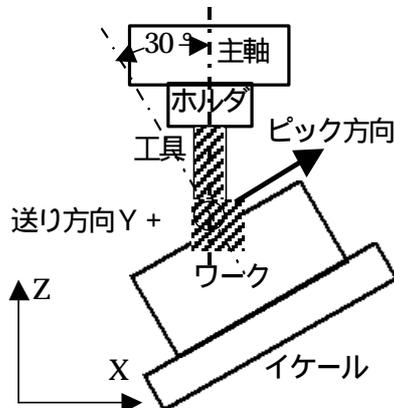


図1 実験方法

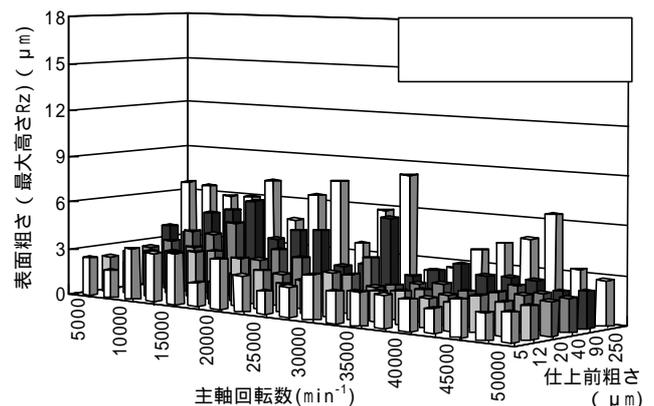
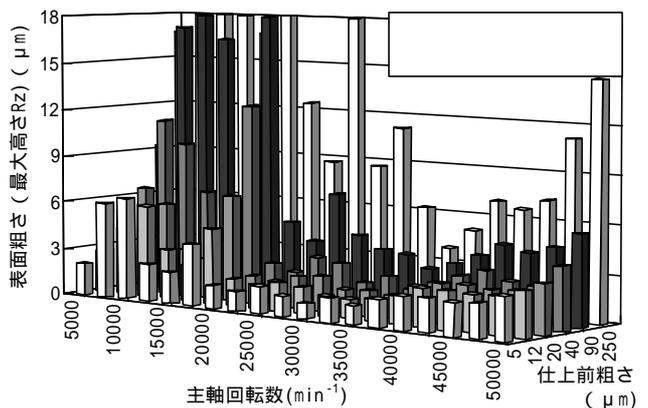
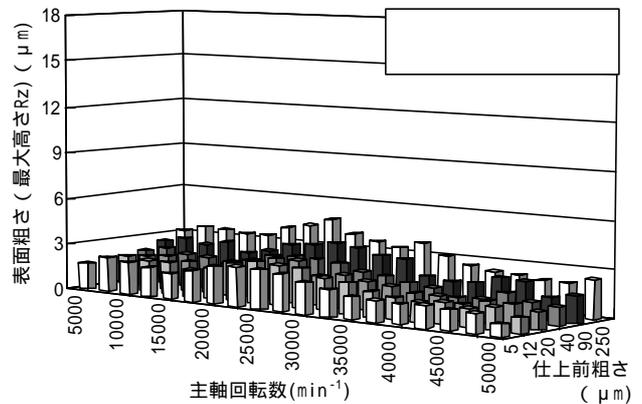


写真1 工具突出長、及び使用ホルダ

表2 切削条件

主軸回転数 S	min^{-1}	$5000 \sim 50000$ (2500pitch)
1 刃当り送り量 f	mm/刃	0.1
切込 ad	mm	0.1
ピックフィード pf	mm	0.2
仕上前の粗さ	μm	5, 12, 20, 40, 90, 250

図2 仕上面粗さ

及び 15000~20000min⁻¹の4条件を除き 3μm以下であり、これらの4条件においても 3.6μm以下である。L/D=9(コレット)の場合は、他の条件と比較して、仕上前粗さが大きい場合に粗さの悪化が顕著であり、また、主軸回転数の違いに対する粗さのばらつきが大きい。例えば、仕上前粗さ 20 μmでは 5000~12500, 17500, 50000min⁻¹を除き 3μm以下であるが、7500, 17500min⁻¹では6μmを越えており、加工面が大きく悪化している。L/D=9(やきばめ)の条件では L/D=9(コレット)に対して粗さが改善されているが、これは、やきばめホルダ使用による剛性の向上によるものと考えられる(詳細は3.1節に記載)。

これらの結果から、L/Dが大きい条件において良好な仕上面を得るためには、仕上前粗さを小さくする必要があり、また、切削条件(適切な主軸回転数)の選定が重要であるといえる。

3 機械動剛性を考慮した切削手法の検討

3.1 切削中の振動、動剛性

主軸ヘッド部に加速度ピックアップを取付け、切削中の振動を測定した。測定信号には主軸回転に伴うノイズがみられ正確な振動値を得ることは出来なかったが、粗さが大きい場合には主軸ヘッド部の振動変位が相対的に大きいことが確認された。図3に粗さが最も大きな値を示した 17500min⁻¹での L/D=9(コレット)と L/D=3(コレット)の振動変位(送り方向)を周波数分析した結果を示す。いずれの条件でも回転数成分である 292Hz(17500/60)、及び切削時の強制周波数のn次成分(主軸回転数(min⁻¹)/60 × 刃数 × n(n=1,2,3...))である 583Hz, 1167Hz, 1750Hz...の振動が確認でき、特にL/D=9(コレット)では1750Hzの成分が大きくなっている。同様に、粗さの大きかった 7500min⁻¹においても 1750Hz(強制周波数の7次成分)の振動が大きいことが確認された。

切削中の振動には工具、ホルダを含めた工作機械の

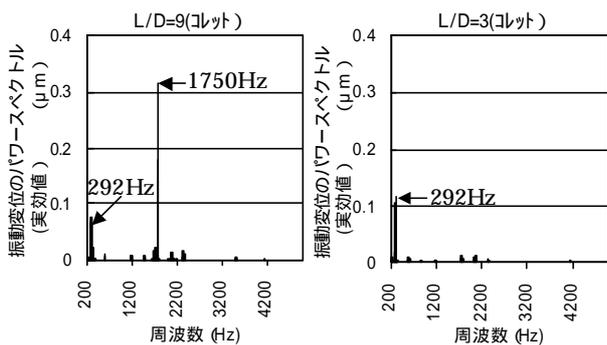


図3 切削中の振動変位(主軸回転数 17500min⁻¹) 動剛性が影響していると思われる。動剛性とは周波数応答関数の一つで、加振力と変位の比(力/変位)を周波数の関数として示したものである。写真1の4条件にて機械主軸に工具を取付けた状態で、工具のR中心部に加速度ピックアップを取付け、インパルスハンマで加振し、工具、ホルダを含めた機械動剛性を測定した。測定方向はX方向及びY方向、周波数領域は5kHzとし、加振は8回行い平均値を求め、図4に示すコンプライアンス(動剛性の逆数で(変位/力)を示したもの)として整理した。測定方向(X, Y)による違いはほとんど確認されなかったため、X方向の値を示している。

L/D=9(コレット)の固有振動数は1530Hzとなっており、切削中の振動で確認された1750Hzとは若干異なっている。主軸停止時に測定された固有振動数に対して、実際の加工(主軸回転)時には、主軸の熱膨張や軸受の遠心力による軸受の予圧増大により軸受剛性が大きくなり、その結果、主軸の固有振動数が若干上昇することが報告されている³⁾。このことから、切削中には固有振動数が1750Hz付近であったものと考えられる。

固有振動数は他の条件においても確認されるが、L/Dが小さい場合は動剛性値そのものが大きいため、仕上面粗さへの影響が少ないと考えられる。L/Dが大きい場合には固有振動数での動剛性の低下が顕著であるため、切削時の強制周波数成分が固有振動数に近づく条件(主軸回転数)の場合に表面粗さが大きく悪化する。このため、主軸回転数の違いによる表面粗さのばらつきが大きくなっていると考えられる。また、仕上前粗さが大きい場合は切削中に負荷変動が発生し、動剛性の小さい条件ではエンドミルの逃げ(変位)の差が大きくなるため、うねりを含めた加工面粗さが大

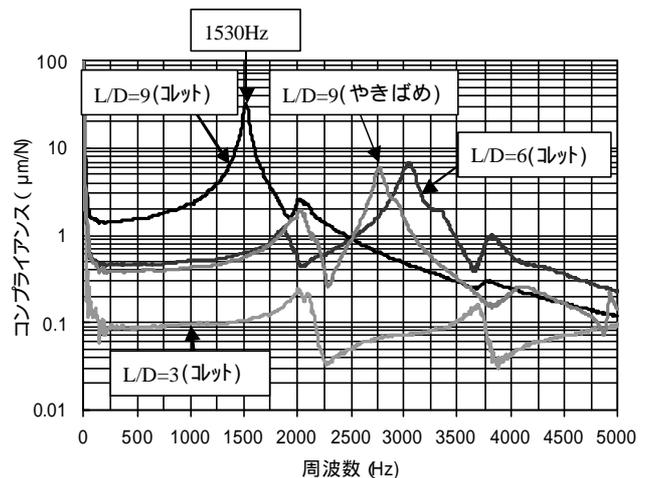


図4 L/Dとコンプライアンス(動剛性の逆数) 大きくなっていると考えられる。

L/D=9(やきばめ)は、L/D=9(コレット)と比較して動剛性が大きいですが、これは、主軸端面から工具先端までの距離が短くなることなどによるものと思われ、この剛性向上により粗さが改善されたと考えられる。

3.2 「代表コンプライアンス」と表面粗さ

工具を含めた機械の動剛性と表面粗さとの間に関係があることが確認されたため、これを利用し、切削前に良好な条件を得る手法を考える。切削時の強制周波数のn次成分がコンプライアンスの大きい部分に近づく場合に、切削時の振動が大きくなり、表面粗さが悪化している。そこで、強制周波数のn次成分におけるコンプライアンスのうち最も大きい値がその切削において支配的なコンプライアンスとなると考え、各回転数に対して次式の「代表コンプライアンス」Cを定義した。

$$C = \max (c_{f(1)}, c_{f(2)}, \dots, c_{f(i)}, \dots, c_{f(n)})$$

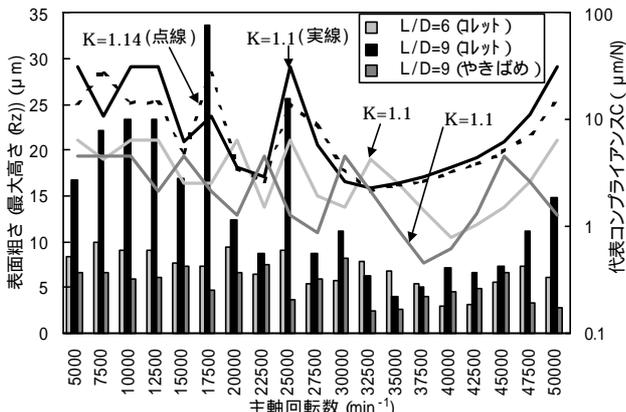
$c_{f(i)}$: 周波数 $f(i)$ Hz のときのコンプライアンス値
 $f(i) = 1/K \times (S/60 \times Z \times i)$ ($i=1,2,3 \dots, n$)

K : 回転中の固有振動数上昇を考慮する係数

S : 主軸回転数 (min^{-1})、Z : 工具の刃数

ここで、主軸回転による周波数の上昇については、周波数に対する一定の比率で上昇するものとしている。周波数範囲は、最大 5kHz までとした。

代表コンプライアンスCと、今回の実験のうち、最も条件の厳しい1仕上前粗さ 250 μm での表面粗さとの関係を図5に示す。なお、係数Kについては1.1とした(L/D=9(コレット)については1.14のグラフも記載)。この係数の同定手法については今後検討が必要であるが、K=1.1~1.14程度において代表コンプライアンスと表面粗さの傾向が良く一致していることが確認できる。従って、代表コンプライアンスを求めることによ



注) 棒グラフは表面粗さ、折れ線グラフは代表コンプライアンスを示す

図5 代表コンプライアンスと表面粗さ
 り、あるホルダ・工具の条件のもとで、切削負荷変動に対してロバストで、良好な加工の行える切削条件(主軸回転数)を選定することが可能である。

4 考 察

今回、工具 主軸系の動剛性と表面粗さとの間に密接な関係のあることが確認された。一方、ワーク支持系などの機械構造自体の固有振動数についても切削特性へ影響を与えるものと思われる。しかし、これらの固有振動数は比較的低い⁴⁾ことが予測され、主軸を高速に回転させる高速加工では、これらの固有振動数を回避することができ、ある程度高い周波数の固有振動数をもつ工具 主軸系の動剛性のみを考慮するだけで、表面粗さと良好一致を示したと考えられる。これは、高速加工のメリットといえる。

本手法を実加工へ適用する際には、代表コンプライアンスに加えて工具磨耗(工具材種、ワーク材種などから求まる適正切削速度)や切削能率なども考慮し、切削条件を決定する必要がある。代表コンプライアンスの小さい条件が工具磨耗の点で必ずしも最適の条件とはならないことも考えられるが、適正切削速度は工具コーティング技術の開発などにより、今後十分変化が見込まれる。従って、新工具の採用などにより高速化を検討する場合や、現状の切削条件を見直す際にも、動剛性(代表コンプライアンス)を把握しておくことは重要であると考えられる。

5 結 言

L/Dの大きな条件における仕上加工において、良好な加工面を得るための手法を次のとおり得た。

1. 工具・ホルダを含めた機械動剛性を把握し、主軸回転数に対する「代表コンプライアンス」を得ることで、良好な加工の行える切削条件(主軸回転数)を選定出来る。
2. 仕上加工時の負荷変動を抑えるために、仕上前の表面粗さを小さくする必要がある。
3. 工具・ホルダは干渉などの制限の許す限り、できるだけ剛性が高いもの(やきばめホルダなど)が有利である。

今後は、切削抵抗や工具磨耗も含めた評価や、固有振動数を予測する手法の検討を行っていきたい。

終わりに、本研究をすすめるにあたり協力頂いた豊田工機株、MMCコベルツール株に感謝致します。

文 献

- 1) 例えば嶽岡、宮口：機械と工具,42(1998)4, 28
- 2) 例えば安斎：機械技術,48(2000)6,90

3) 中村、垣野：精密工学会誌,58(1992)12,2017

4) 星：機械加工の振動解析,(1990),31