

インペラ加工の高能率化と切削シミュレーション

東京農工大 ○木村 太郎 ©笹原 弘之

要 旨

本報告ではターボチャージャー用インペラをテーパボールエンドミルにより加工する際の加工能率を向上するために、その加工状態を明らかにすることを目的とする。テーパボールエンドミルによる加工工程ごとの切削力波形の測定と切りくず排出の状況を観察し、工具ねじれ角などの工具形状との関係を明らかにした。また、インペラ加工特有のテーパボールエンドミル加工時の切削力のシミュレーションを開発し、切削力変動の予測を行い、3パスで荒加工を行うのに適した工具経路設定を明らかにした。

1. 緒 言

自動車のエンジンのダウンサイジングと省エネのためにターボチャージャーの需要が高まっており、軽量化と回転バランスの取りやすさからインペラは無垢材から切削加工により削り出して製作されるようになってきている。しかし、加工の高能率化に相反して発生するびり振動や工具摩耗・工具折損の回避が大きな課題となっている。

そこで、インペラ加工に用いられるテーパボールエンドミルを用いて切削動力の測定や切りくずの排出状態の観察を行った。これにより適切な工具形状および切削条件を解明する。また、インペラ加工時の切削力変動をモデル化し、荒加工について解析を行い、実加工実験結果と比較する。最終的に工作物の設計段階で切削中にかかる工具への負荷を予測し、製品を高品位・高能率化させることを本研究の目的とする。

2. テーパボールエンドミルを用いた切削加工の切削力測定

図1に実験装置を示す。多成分動力計に工作物を固定し加工を行った。図中の矢印は動力計の座標系を示している。図2に用いたテーパボールエンドミルを示す。ねじれ角、超硬材種、コーティングなどが異なっており、その詳細および切削条件を表1と表2に示す。

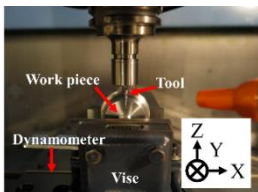


Fig.1 Experimental set up

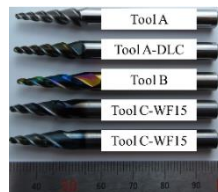


Fig.2 Taper ball endmill

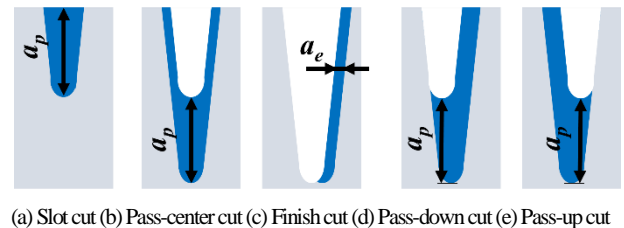
Table 1 Shape of tools

	Material type	Helix angle [deg.]	DLC coating
Tool A	KR10	45	No
Tool A-DLC	KR10	45	Yes
Tool B	KR10	30	Yes
Tool C-KR10	KR10	30~40	Yes
Tool C-WF15	WF15	30~40	Yes

Table 2 Cutting condition

	Slot cut	Pass cut	Finish cut
a_p mm	7		0
a_e mm	0		0.60, 0.85, 1.10
F mm/min	1000, 2000, 3000		4000, 5200
S min ⁻¹	18000, 25000		
Work piece	A2618-T6511		

主軸回転速度 $S=18000 \text{ min}^{-1}$ の時、送り速度 F は Slot cut, Pass cut において $F=1000, 2000, 3000 \text{ mm/min}$ の3条件, Finish cut において $F=4000, 5200 \text{ mm/min}$ の2条件とし、 $S=25000 \text{ min}^{-1}$ の時は一刃送りの値が一致するように送り速度を設定した。インペラの加工では翼と翼の間に深い溝を加工する必要がある。その溝を形成する過程は、図3(a)~(c)に示すように Slot cut, Pass cut, Finish cut の順で行われる。ここで図の灰色部分がワーク、青色部分が該当除去部分、白色部分が加工済みの部分を示している。さらに図3(d),(e)に示すように Pass cut の切削経路を Slot cut で切削した側面に合わせて加工を行い、その加工を上から見た概略図を図4に示す。それぞれ加工がダウンカットおよびアップカットとなっているため名称を Pass-center cut, Pass-down cut, Pass-up cut の3種類に分類した。また、図5に $F=1000 \text{ mm/min}$ での3種の Pass cut において測定した加工中の切削力波形の定常部分での x, y, z 各成分の平均切削力を示す。



(a) Slot cut (b) Pass-center cut (c) Finish cut (d) Pass-down cut (e) Pass-up cut

Fig.3 Machining path



(a) Pass-down cut

(b) Pass-up cut

Fig.4 View from the top

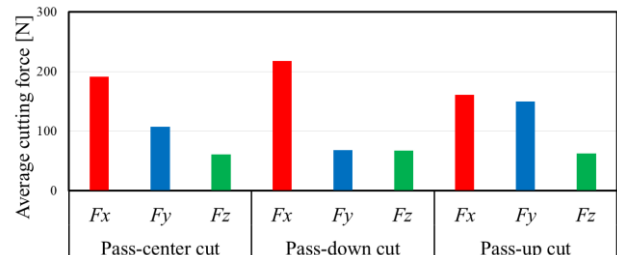


Fig.5 Average cutting force

Pass-center cut を基準とすると Pass-down cut では加工面に垂直方向の切削力 F_x が大きく、工具送り方向の切削力 F_y が小さくなり、Pass-up cut ではその逆の傾向が見られた。工具軸方向である切削力 F_z には大きな差は見られない。 F_x の値が小さいと、工具や被削材の振動

が小さくなるということであり、正確な加工面で高精度に切削できる。また、 x, y, z 各成分の平均切削力においても、最大値が各経路の中で Pass-up cut による加工の際が最も小さくなっており、インペラ加工中の工具への負荷、加工面粗さ等の観点で考えると Pass-up cut が最も適した加工経路だと考えられる。また、工具ごとでの切削力波形を比較すると、DLC コーティングが施されており、ねじれの大きいもしくは粒度の小さい超硬材種の工具を用いると切削力波形の振幅が小さくなることがわかった。

図6に Tool A-DLC での3種の Pass cut における加工面粗さを示す。切削力の傾向とは異なり加工面粗さの大きさは送り速度に比例していないことがわかる。 $F=2000$ mm/min の時が最も加工面粗さが小さくなっている。これは特定の切削条件下で発生するびびり振動の影響であると考えられる。3種の Pass cut の加工経路によっての変動は $F=1000$ mm/min での加工以外大きな差は見られない。また、工具ごとでの加工面粗さを測定した結果、DLC コーティングが施され、ねじれが大きく粒度の小さい WF15 の工具を用いると表面粗さが小さくなることがわかった。

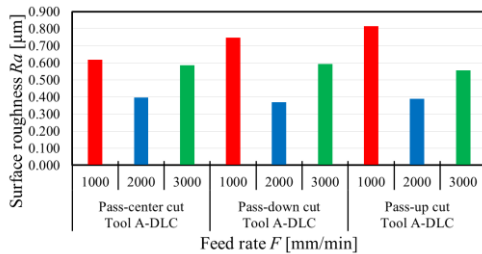


Fig.6 Surface roughness

3. ハイスピードカメラによる加工中の切りくず排出状況の観察

切削中にハイスピードカメラを用いて切りくず排出状況の観察を行った。図7に3種の Pass cut における切りくず排出中の写真と、赤矢印で切りくず流出の方向、青矢印で工具回転方向を示す。図7において奥行き方向が工具送り方向であり、切削は図の左方向から工具が被削材に進入し、右方向に脱出する間に溝加工を行っている。切りくず流出方向は、Pass-center cut と Pass-down cut では切れ刃の切削点の移動と同じ工具軸右上方向であるが、Pass-up cut では工具軸左上方向であった。これは up cut で切削を終えてから切りくずが溝内で工具と一緒に約 100° 回転し、溝から出た後に工具から離脱しているためだと考えられる。また、DLC コーティングが施されたねじれの大きい工具であると、切りくずが工具軸上方向に排出され、排出性が良く加工中の工具への負荷が小さいと考えられる。

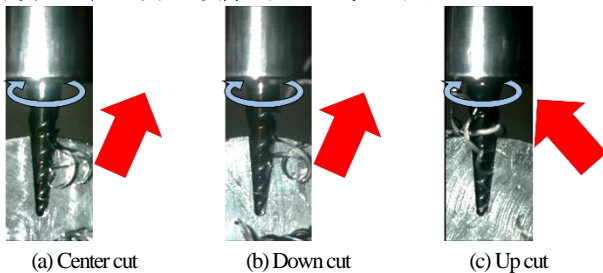


Fig.7 Direction of chip flow in Pass cut

4. 切削力シミュレーション

高速エンドミル切削で連続周期が短いと精度よく切削力を測定できないため、より低速での切削を行い、切削力シミュレーションと比較した。切削力シミュレーションは、Schmitz らの方法によるもので

溝切削時の平均切削力から単位切り取り厚さあたりの切削力係数を求め、軸方向に微小分割した部分の切削力を足し合わせることで求めた⁴⁾。図8に Tool A-DLC による Pass-center cut での実験値とシミュレーション値を比較したものを示す。切削力の大きくなる周期や平均切削力の大きさが実験値と近い値が計算されていることがわかる。また、いずれの加工経路、送り速度においても平均切削力のシミュレーション値は、実験値との相対誤差が $\pm 30\%$ 以内に収まっている。

Pass cut における軸方向切込み深さの下半分は Slot cut と同様でありその切削力も同じであるため、3種の Pass cut における切削力波形の相違は上半分の切削によって生じる。そこで3種の Pass cut での工具軸方向切り込み深さの上半分における切削力波形のシミュレーション結果を図9に示す。前述したように Pass-center cut と比較して Pass-down cut において F_x が大きく、 F_y が小さくなっており、Pass-up cut においてその逆の傾向が見られる。これは被削材に工具が被削材に進入および脱出する際の切り取り厚さの大小によるものだと考えられる。

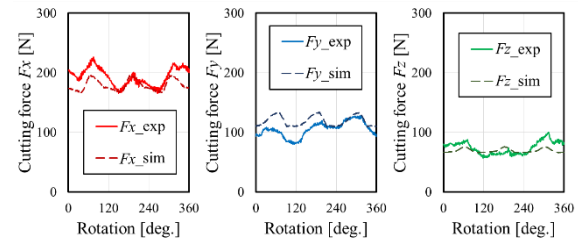
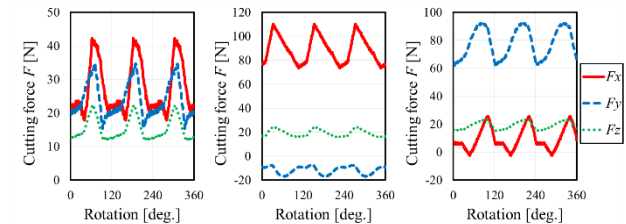


Fig.8 Simulation and experimental of cutting force waveform



(a) Pass-center cut (b) Pass-down cut (c) Pass-up cut

Fig.9 Cutting force waveform on upper half of Pass cut

5. 結 言

- (1) 切削実験および加工面粗さの測定を行うことで、インペラの荒加工における適切な工具形状や切削条件を明らかにした。
- (2) 加工の様子をハイスピードカメラで観察することにより切りくず排出性の評価を行い、Tool A-DLC もしくは Tool C-WF15 の工具がインペラの溝加工に適することを明らかにした。
- (3) テーパーボールエンドミルによる切削加工のシミュレーションを行い、溝を3回で切削する際の切削力波形を示した。Pass-up cut が切削力の加工面垂直成分が小さくなり加工誤差が小さくなることを示した。

参 考 文 献

- 1) Tony L. Schmitz, K. Scott Smith, *Machining Dynamics*, (2009), p.136-171.
- 2) T. Huang, D. J. Whitehouse, "Cutting force formulation of taper end-mills using differential geometry", *Precision Engineering*, Vol. 23, Issue 3, (1999), p.196-203.
- 3) 森田昇, 吉田嘉太郎, 岸岡成泰, 武藤学, 上野滋, "高硬度材の高速エンドミル加工に関する研究: 第2報. 工具ねじれ角が切削抵抗および工具摩耗に及ぼす影響", 日本機械学会論文集 C 編, (1997), p.4354-4358