

# ターンミリングにおける切削状態の解析的予測

東京農工大学 ○七里 翔紀, 内海 幸治, ©笹原弘之

## 要 旨

ターンミリングとは回転する棒材の側面をミリングする加工法であるが、切削速度に加え、工具姿勢など多数あるパラメータが切削力や表面性状、工具摩耗に及ぼす影響の調査は不十分である。本報告ではターンミリングの切削力予測モデルの構築を目的とする。点群で表現した被削材と切れ刃との干渉領域を求め、予備実験により求めた切削係数を利用して、ターンミリング時の切削力を解析的に求めるシミュレーションを開発した。得られた結果は実験結果と一致することを示した。

## 1. 緒 言

環境性能の向上を実現する手段の1つとしてはタービン機関の燃費向上が挙げられ、それに伴ってTi合金やNi基超耐熱合金などの難削材の更なる高速・高能率切削が求められている。

難削材の高能率加工を実現する方法として、ターンミリングが注目されている。これは連続もしくは断続的に回転する被削材をミリングする加工法で、複数の切れ刃に切削熱が分散するため工具温度の上昇が抑制され、さらに断続加工となるため切りくずの排出性に優れている。加工形状は円筒に限らず、ブレードなどの創成も可能である。またB軸を回転させて工具軸を傾斜させ、さらにY軸方向にオフセットして工具姿勢を変えることができ自由度が高い。さらに、それにより従来の旋削加工よりも大きな切込みでの加工が可能である。しかしターンミリングでは切削速度、一刃送り、切込みの他に、工具チルト角やリード角といったパラメータがあり、それらが加工状態や切削力に及ぼす影響についての研究が十分には行われていない。

そこで本研究では、ターンミリングにおいて生じる切削力を予測するシミュレーションモデルを開発し、解析的にターンミリング時の工具姿勢をはじめとする切削条件が切削力変動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. ターンミリングによる切削試験

図1に実験装置のセットアップを示す。複合加工機(INTEGREX i-200)の工具スピンドルに回転式動力計(KISTLER製9123B)を取り付け、その先端にブルノーズエンドミルを取り付けた。旋削主軸には直径60mmのSUS304丸棒を固定し、これをターンミリングして切削力を測定した。

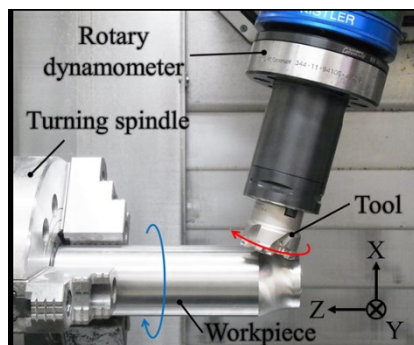


Fig.1 Schematic image of turn-milling

図2に各パラメータの定義を示す。ミリングを主体として工具軸切込み $a_p$ と工具半径切込み $a_r$ は図示のように定義される。工具軸を $\beta$ 傾斜させた状態でのターンミリングで

は、被削材1回転あたりのZ軸方向への工具移動量 $FR_z$ は $FR_z = a_p / \sin(\beta)$ となる。また、被削材が円柱形状であるため、工具半径切込み $a_r$ は食いついた時点から離脱するまでの間に変化する。工具半径切込みの最大値を $a_{rmax}$ と定義する。工具一刃送り $f_r$ は被削材回転による周速とZ軸方向への工具送り速度の合成速度を、工具回転速度と刃数で除した値となる。さらに、工具のY方向位置によっても被削材と工具の相対的な姿勢が変化する。XY面内で、工具先端中心点と被削材中心を結ぶ直線とX軸とのなす角をリード角 $\alpha$ と定義する。回転方向については、被削材の端面側から見て時計回りをCW、反時計回りをCCWと定義する。なお、切削力は工具に着目し、接線方向成分を $F_t$ 、半径方向成分を $F_n$ 、工具軸方向成分を $F_a$ と定義する。

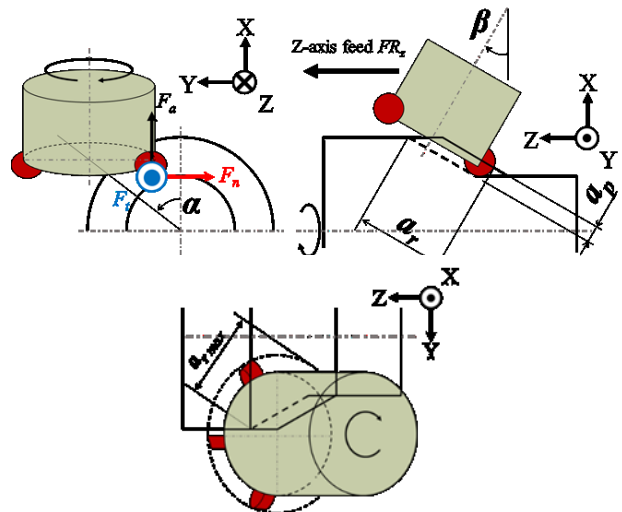


Fig.2 Geometric relationship of turn-milling

表1に実験条件を示す。 $\beta$ を変え、切削力に対する影響を調べた。なお、工具半径切込みの最大値 $a_{rmax}$ が一定になるように工具位置を調整したので、工具チルト角 $\beta$ が大きくなるほど加工後の被削材径は小さくなる。

Table1 Conditions of turn-milling experiment

Workpiece material	-	SUS304
Tool diameter $D_t$	mm	50
Insert radius $R_e$	mm	5
Feed rate $f_r$	mm/tooth	0.10
Cutting speed $V$	m/min	200
Tool axial depth of cut $a_p$	mm	0.5
Tool radius depth of cut $a_{rmax}$	mm	22.2
Tool lead angle $\alpha$	°	-35
Tool tilt angle $\beta$	°	15, 30, 45, 60
Number of tooth $N$	-	1
Workpiece rotation	-	CCW

図3に各条件での切削力波形を示す。工具チルト角による工具軸方向成分の大きな変化は見られない。一方、接線方向成分では、工具チルト角による向きと大きさの変化が確認できる。

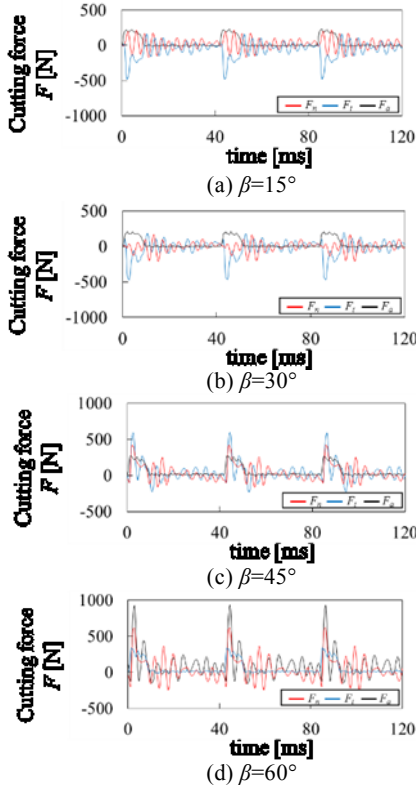


Fig.3 Cutting force of tilted turn-milling

図4に $\beta=15^\circ$ と $\beta=60^\circ$ のとき、工具が被削材を削る際的位置関係を示す。図中の工具切れ刃の移動軌道のうち、赤で表示している部分が工具が被削材と接触する区間である。この区間の長さは $\beta$ によらず一定であり、工具が1回転する時間の除去体積は常に等しい。

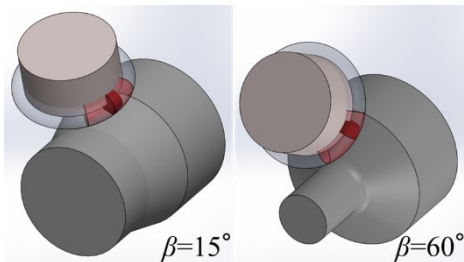


Fig.4 Positional relation between tool and workpiece

図5に、工具チルト角に対する最大切削力の変化を示す。 $\beta$ が $15^\circ$ と $30^\circ$ の場合は最大切削力に大きな違いは無いが、 $45^\circ$ を超えた付近から最大切削力が増大する傾向がある。これは $\beta$ と共に $X$ 軸方向の力が大きくなり振動が大きくなった影響によるものと考えられる。

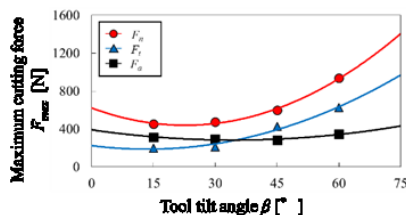


Fig.5 Maximum cutting force of tilted turn-milling

### 3. ターンミリングの切削力シミュレーション

本研究では、被削材を点群で表現し、微小時間ごとに工具と干渉する領域から切り取り厚さを求め、その瞬間の切削力を算出する。図6に切れ刃と被削材の干渉領域計算の概要を示す。切れ刃のコーナ部のすくい面を微小な扇形に分割し被削材点群との接触判定を行う。各微小領域で接触と判定された点群のうち、切れ刃までの距離が最大となる点を被削材表面にあるものと判定する。これより切り取り厚さと、切れ刃が切り取る形状が求められる。これによって得られた幾何形状と、SUS304の溝切削加工平均切削力から算出した切削力係数を用いて<sup>2)</sup>、ターンミリングの切削力シミュレーションを行った。

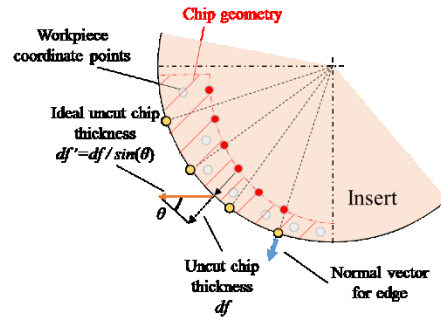


Fig.6 Schematic view of cutting force simulation for turn-milling

図7にシミュレーション結果と実際の切削力波形の比較を示す。条件は $\beta=45^\circ$ である。 $\Phi$ は工具回転角を表し、食いついた瞬間を $\Phi=0$ とする。いずれの方向成分も振動のため大きくずれているが、 $F_t$ と $F_a$ は概ね一致している。

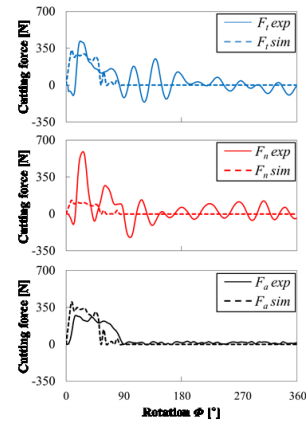


Fig.7 Comparison of experiment and simulation results ( $\beta=45^\circ$ )

### 4. 結 言

- (1) ターンミリング時の工具姿勢とパラメータをモデル化し、工具チルト角が切削力変動に与える影響を示した。
- (2) 被削材を点群で表現し、ターンミリングの切削力をシミュレーションする手法を開発した。

### 参 考 文 献

- 1) 帯川利之：難削材切削におけるクーラント利用技術の動向と課題，日本機械学会 2015 年次大会講演論文集，No.15-1, (2015)，日本機械学会
- 2) Tony L. Schmitz, K. Scott Smith, *Machining Dynamics*, (2009), p.136-171.