

工作物偏心を考慮したパラレルターニングにおける安定限界線図の導出とびびり振動回避

慶應義塾大学 ○大熊俊樹 ◎柿沼康弘

要旨

工作機械による切削加工において発生する問題として、加工表面品位の劣化や工具折損等の悪影響を引き起こすびびり振動がある。特にパラレルターニングでは動的システムの複雑さから安定予測が難しく、安定限界線図描画法の提案もあるが工具振動のみがモデル化され工作物の偏心の影響は考慮されていない。本研究では、工作物の偏心にも焦点をあて、その影響を考慮した安定限界線図の導出を提案し、切削試験により予測性能を評価する。

1. 結論

マルチタレットの工作機械において二つの工具で同時に旋削を行うパラレルターニングは、高い材料除去率を実現でき、生産性が格段に向上する。一方で、単一工具による旋削加工と比較し、加工時の安定性が低下し、びびり振動が生じやすい。びびり振動とは工具と被削材の間で生じる不要な振動であり、加工表面品位の悪化や、工具寿命の短縮等の問題を引き起こす。そこで、Brecher⁽¹⁾らはパラレルターニングにおけるびびり振動回避手法として安定限界線図を用いた手法を提唱した。しかし、この手法では工具振動のみがモデル化され、工作物偏心による影響は考慮されていない。特に長尺の工作物を加工する際、工作物偏心は大きくなるため、考慮する必要がある。そこで本研究では、パラレルターニングにおける工作物偏心の影響を考慮したモデルを用いて安定限界線図を導出し、加工実験により導出した安定限界線図の予測性能を評価した。

2. 工作物偏心の影響を考慮した安定限界線図の導出

パラレルターニングにおける加工プロセスのフィードバックループをブロック線図で表したものを図1に示す。はじめに、切削力 F によって $x_d = G_g(j\omega) \cdot F$ で示されるような工具変位が起こり、工作物が加振される。 $G_g(j\omega)$ は工具のコンプライアンスである。この振動によって切削面に波形が形成され、もう一方の工具が工作物表面を切削するとき、それぞれの工具により生成された加工面の波形の位相差により切り取り厚さが変動する。このときの切り取り厚さ h は半回転前の工具変位 $x_d(t - T_d)$ から現在の工具変位 x_d を引いたものになり、 $h = x_d(t - T_d) - x_d(t)$ と表せる。ただし、 T_d は半回転の工具間のむだ時間である。この切り取り厚さの変動により $F = b \cdot k_{cb} \cdot h$ と表せる切削力が発生し、再び工作物が加振される。ここで、 b は切削幅、 k_{cb} は比切削抵抗である。工作物偏心の影響を考慮するためには、工作物のコンプライアンス G_w をパラレルターニングのモデルに含める必要がある。そこで、図1に示すように、それぞれの工具に働く切削力 F_1 、 F_2 の差分と G_w の積を工作物の変位量 x_w とし、切り取り厚さ h に加えた。図1から算出できる一巡伝達関数 G_0 は、切削幅 b 、びびり周波数 ω 、主軸回転数 n の3つの変数を含む。Nyquistの安定判別法によると、一巡伝達関数 G_0 の実部が-1、虚部が0となるときに安定限界となるため、以下の手順で安定限界線図が導出できる。

- ① 切削幅、びびり周波数、主軸回転数の範囲をそれぞれ決定する。
- ② 定めた範囲内で主軸回転数を代入する。
- ③ それぞれの主軸回転数において、切削幅とびびり周波数も代入する。
- ④ Nyquistの安定判別法に従い、条件に合う値のみをプロットする。

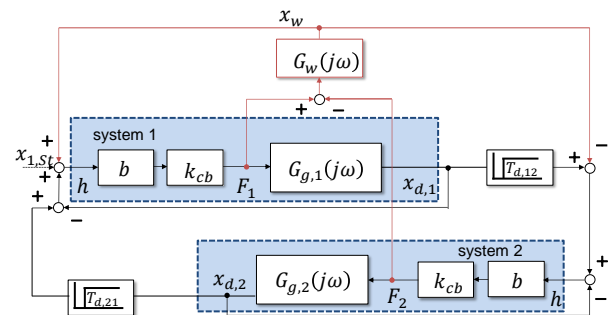


図1 工作物偏心を考慮したパラレルターニングにおける加工プロセスのブロック線図

3. 実機の構成

本研究で使用するマルチタレット型複合加工機を図2に示す。主軸に取り付けられた工作物に対し、左上下タレット1、2を用い、パラレルターニングを行う。ただし、各タレットの駆動軸は互いに垂直ではない。図2において、X軸は水平面から60°傾いており、さらにX軸とY軸間の角度は45°となっている。また、X軸方向に直交する軸をY軸とした。加工の際には、2つの工具が同一面を加工できるように、回転軸方向に対する工具刃先の位置を揃えた状態でパラレルターニングを行った。加工条件を表1に示す。

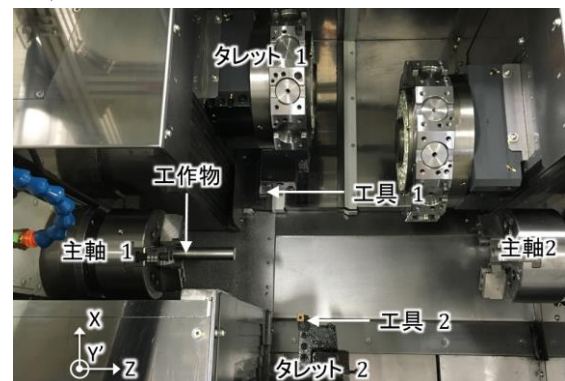


図2 マルチタレット型複合加工機

表1 加工条件

工具	超硬
工作物[mm]	SUS303 φ24.9
突き出し量[mm]	160
送り速度[mm/min]	180
擬似微分のカットオフ周波数[Hz]	1000
切削力オブザーバのカットオフ周波数[Hz]	1000

4. パラレルターニングにおける工作物偏心の測定実験

パラレルターニング時に生じる工作物偏心量を測定した。図3のように3対の渦電流式変位計を工作物端部に設置し、三点法により工作物中心の振動軌跡を計測した。図4は、工作物をZ方向から見た場合のX軸方向とY軸方向の振動変位を示している。図4より、X軸方向に最大で0.3 mm、Y軸方向に0.34 mmの偏心が確認できる。切削幅は0.2 mmであるため、工作物偏心はそれよりも大きいことが分かる。したがって、工作物偏心の影響は大きく安定限界線図を導出する際に考慮するべきと考えられる。

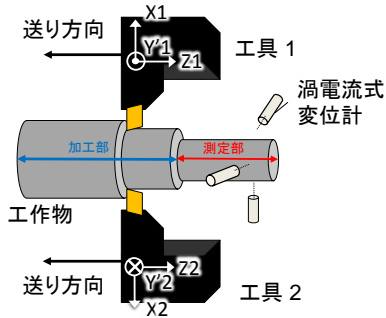


図3 工作物偏心の測定方法

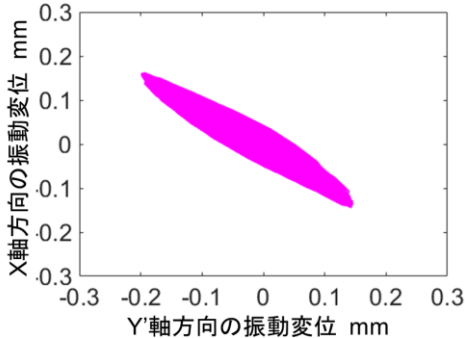


図4 工作物中心の振動軌跡

5. 加工実験による予測性能の評価

図5に、工作物偏心を考慮したパラレルターニングにおける安定限界線図と加工実験結果を示す。各主軸回転数において、安定領域（ロープの上部）及び不安定領域（ロープの下部）となる切削幅を図5に示す安定限界線図から選択し、加工実験を行った。本研究では、主軸回転数 1200 ~ 1500 min^{-1} 、切削幅 0.05~0.1 mm の範囲で加工条件を変更した。加工の安定性は、上タレットのY軸制御系で実装した切削力オブザーバを用いて切削力を推定し、推定切削力に周波数解析を施すことで得られた振幅スペクトルの最大値によって判別した。主軸回転数 1300 min^{-1} で加工実験を行った際に得られた推定切削力に時間一周波数解析を施した結果を示す。図6 (a)より、切削幅が0.06 mmにおいては、パワースペクトル密度が低く、びびり振動は発生していない。一方、図6 (b)より切削幅が0.07 mmでは、800 Hz付近でパワースペクトル密度が高くなっておりびびり振動が生じている。したがって、1300 min^{-1} において、切削幅が0.06~0.07 mmとなる際に安定性が変化することから、安定限界線図による予測結果とおおよそ一致する結果を得ることができた。しかし、他の主軸回転数においては明確な一致を得られなかった。本研究では工作物先端部のコンプライアンスを測定したが、実際の加工では工具を工作物の根元方向に送るため、力点におけるコンプライアンスと測定値が異なる可能性があり、誤差の原因となったと考えられる。また、本研究ではX軸方向の工作物偏心のみを考慮しているため、Y軸方向の偏心も考慮した安定限界線図の導出が今後の課題である。

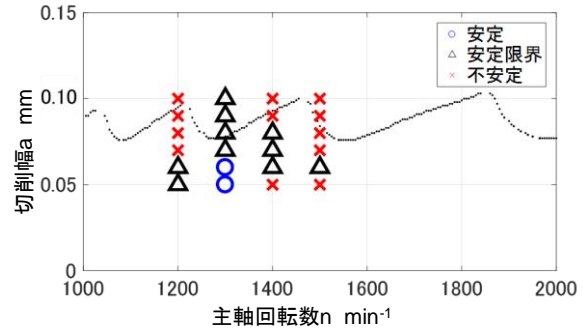
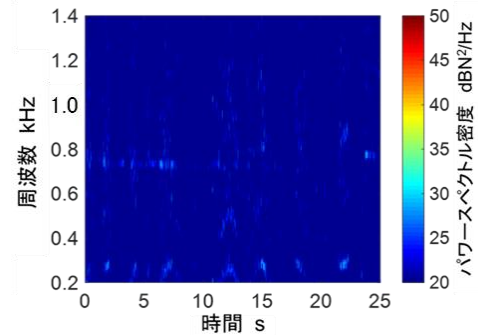
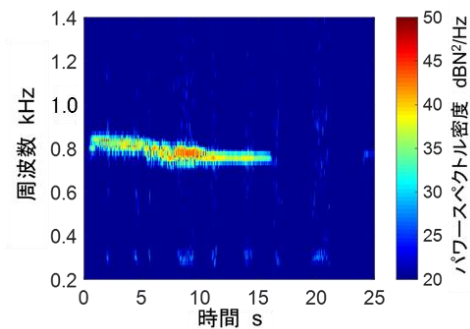


図5 工作物偏心を考慮したパラレルターニングにおける安定限界線図と加工実験結果



(a) 0.06 mm



(b) 0.07 mm

図6 推定切削力の時間一周波数解析結果

6. 結論

本研究では、工作物偏心を考慮したパラレルターニングにおける安定限界線図の導出法を提案し、加工実験によってその予測性能を評価した。加工実験の結果より、主軸回転数が 1300 min^{-1} において、導出した安定限界線図の限界曲線付近で安定性が変化したことから、びびり振動の回避手法の可能性を示すことができた。しかし他の主軸回転数においては導出した安定限界と実験結果は一致しなかった。安定限界線図と実験結果が一致しなかった原因として、力点の変化に伴う工作物のコンプライアンスの変動や、主分力方向の工作物偏心の影響を考慮していないことが考えられる。今後、これらの影響等を考慮した安定限界線図を導出する必要がある。

7. 参考文献

- (1) C. Brecher, A. Epple, S. Neus, M. Fey, "Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 95 (2015) 13–19