

(様式 5)

令和 2 年 12 月 8 日
Year Month Day

学位（博士）論文要旨

(Doctoral thesis abstract)

| | |
|---|---|
| 論文提出者 (Ph.D. candidate) | 工学府博士後期課程 機械システム工学 専攻 (major) 平成 27 年度入学(Admission year) 学籍番号 15833012 氏名 三宅 章仁 (student ID No.) (Name) |
| 主指導教員氏名 (Name of supervisor) | 笹原 弘之 |
| 論文題目 (Title) | 旋削加工における送り方向への低周波振動の効果に関する研究 Study on Low Frequency Vibration applied to Feed Direction on Turning Process |
| 論文要旨（2000 字程度） (Abstract(400 words)) ※欧文・和文どちらでもよい。但し、和文の場合は英訳を付すこと。 (in English or in Japanese) 低周波振動切削技術（LFV: Low Frequency Vibration-Cutting）とは数値制御により工具を切削送り方向に振動させ、その振動と主軸回転を同期させて切削を行う新加工技術である。本技術は振動の付与に工作機械の NC 指令を用いることで、従来の振動切削とは異なり追加の装置を必要としない特徴がある。従来、加工中の切りくず分断に用いられてきたチップブレイカや高圧クーラントは、被削材種や材料径、工具、加工形状、加工条件の変更など実際に製造業の現場で起こりうる様々な環境の変化に対して、その効果を安定して維持するのが難しいという課題を有していた。しかし本技術では振動条件を変更することでこれら環境の変化に柔軟に対応できるという利点を有している。本技術は実用化が先行したものの、低周波振動切削が加工に与える影響やそのメカニズムについては明らかとなっていない部分が多く、技術的な裏付けが乏しいという課題があった。 そこで本論文では低周波振動切削による切りくず分断メカニズムを明らかにし、適切な切りくず排出のための制御指針を示すとともに、切りくず形成や被削材に及ぼす影響について明らかにした。学術的な観点による議論や技術的裏付けを与えるだけでなく、産業的にも有益な LFV の条件設計手法を提案した。 第 1 章「緒論」では、本研究の背景として旋削加工における切りくず処理の課題と現在採られている対策の問題点について述べた。従来の研究としてこれまでの振動切削の歴史と類似研究をまとめ、本技術の新規性を示すとともに、本研究の目的について述べた。 第 2 章「低周波振動切削（LFV）の原理と定式化」では、低周波振動切削の加工原理を示し、その動作原理から切りくず分断のモデルと制御パラメータを用いた定式化を提示した。低周波振動切削では前加工面に転写された振動を伴う加工経路と、現在の振動加工経 | |

路が交差する際に、工具が被削材から離脱・空振りする非切削時間（Air cutting time）を周期的に生じさせる。定式化した振動挙動から導かれる加工特性として切削厚さの変動に着目し、振動中に切削時間が占める割合を意味する切削時間比率を定義し、切りくずの分断条件と制御切削長さを提示した。

第3章「切りくずの分断と形状の制御」では、難削材として知られるステンレス鋼に対し低周波振動切削を適用し、その振動挙動と排出される切りくず形状の関係を明らかにした。低周波振動切削で排出される切りくずの形状を、旋削加工における切りくず分類と照合し、その処理性を評価するとともに、制御指針を提示した。また従来の振動切削では困難であった円弧・テーパ加工においても、低周波振動切削では切りくずを分断可能であることを示し、その実用性を評価した。

第4章「切削力、切削温度、工具摩耗に及ぼす影響」では、低周波振動切削の被削性を示す重要な因子として切削力と切削温度、工具摩耗に着目し、実験から低周波振動切削の切削特性を明らかにした。まず、慣用切削と比べて、低周波振動切削の最大切削力は増大するが平均切削力が減少するという実験結果から、振動切削中には比切削抵抗の低減が生じることを明らかにした。低周波振動切削は切削エネルギーを低減させる効果が期待できることを示した。次に、工具-被削材熱電対法により切削中の加工点（工具刃先）温度を測定し、低周波振動切削により生じる工具の空振りは、切りくずを分断するだけでなく、工具刃先の冷却効果を与えることを明らかにした。さらに、慣用切削と比べ低周波振動切削では境界部の工具摩耗が抑制されることを実験から明らかにした。工具刃先の元素分析から、低周波振動切削後の刃先には慣用切削後には見られなかった切削油剤由来と考えられる炭素元素の分布が確認でき、これまでの連続切削加工では困難であった加工点へのクーラント供給が可能であることを示した。

第5章「加工面形状に及ぼす影響」では、第2章で定式化されたLFVの振動挙動をもとに低周波振動切削が創成する3次元的な加工面形状と輪郭形状を可視化し、表面粗さと真円度を予測するシミュレータを開発した。これにより、低周波振動切削によって加工面に創成される特徴的なパターンの形成メカニズムを明らかにした。シミュレータを用いた検証によって切りくずの分断だけでなく、加工面形状への影響も考慮した低周波振動切削の制御指針を提示した。シミュレータを用いて解析的に予測した真円度を最小化するような振動条件を探索し、加工条件に反映する応用手法を提案した。この振動条件を用いた実験では、以前の加工物の輪郭形状に見られた特徴的な凹凸は曖昧となり、測定される真円度の変化も解析的に予測した傾向と一致することを明らかにした。開発したシミュレータの妥当性を示すとともに、産業的にも有益なLFVの条件設計手法を提案した。

第6章「結論」では以上の知見を総括した。

(英訳) ※和文要旨の場合(400 words)

LFV (Low Frequency Vibration-Cutting) is a new machining technology that uses numerical control to vibrate the tool in the direction of the cutting feed, and synchronizes the vibration with the rotation of the spindle to cut. This technology uses the Numerical Control to apply the vibration and does not require any additional equipment. LFV achieves flexible and reliable chip breaking, unlike chipbreakers and high-pressure coolants. In this paper, a chip breaking mechanism on LFV was elucidated and control guidelines for proper chip evacuation were presented. Its effects on chip formation and the machined surface shape were discussed.

The machining principle of LFV was presented, and a formulation using a developed model and control parameters for chip breakage were presented. LFV periodically produces a non-cutting time in which the tool leaves from the workpiece. From the formulated vibration behavior, the chip breaking conditions and controlled cutting lengths were presented. Chip breaking by LFV was confirmed in stainless steel, which is known as a difficult-to-cut material. The processability of the chips The shape of divided chips was evaluated and control guidelines were presented. It was shown that chips can be broken in LFV, even in arc and taper machining.

Several experiments were conducted and it was shown that LFV can be expected to reduce cutting energy. It was found that the non-cutting time caused by LFV has a cooling effect on the tool edge. It was shown that tool wear was suppressed in LFV and that coolant could be supplied to a cutting point that had been difficult to supply.

A simulator to visualize the three-dimensional machined surfaces was developed. It also can visualize contours created by LFV and can predict surface roughness and roundness. The verification by the simulator was reflected in the vibration conditions. It was shown that LFV produces characteristic irregularities in the contour shape of the workpiece depending on the conditions from the analysis and the experiments. As an application of this simulator, an improvement of the roundness by the appropriate vibration conditions was proposed. By this method, the unevenness in the contour of the workpiece, which is characteristic in LFV, became vague, and the change in roundness agrees with the predicted trends. The validity of the developed simulator and a conditions design method for LFV were presented.