

切削音による加工状態のインプロセス検出に関する研究

青 山 英 樹*・菊 地 千 之**

A Study on In-process Detection of Cutting Condition by Utilizing Cutting Sound

Hideki AOYAMA and Kazuyuki KIKUCHI

Abstract

A technique which automatically recognizes the condition in a cutting process is required to automate a machine work shop. We can detect cutting conditions, such as flank wear, regenerative chatter or chipping by the cutting sounds in turning. The cutting sound is gathered by a microphone and fed into a microcomputer. The data are analyzed into frequency by the fast Fourier transform and the linear prediction method in a microcomputer, and the remarkable frequency showing flank wear, regenerative chatter or chipping is investigated. The frequency corresponds with the characteristic frequency in a tool system or a work system. The characteristic frequency appears in the region of 3kHz through 5kHz, or at 500Hz. The peak of 3kHz through 5kHz rises with the progress of flank wear. A component of 500Hz grows with regenerative chatter. Chipping generates very big vibration at about 5kHz.

Key words : Cutting, Machine Tool, In-process Detection, Cutting Sound, Tool Wear, Cutting Condition, Characteristic Frequency

1. 緒 言

機械加工工場のFMS（フレキシブル生産システム）化が進められるなかで、切削工具の摩耗およびチッピング・欠損等の自動検出が大きな課題となっている。

切削加工の熟練者は経験的に加工状態を切削音により判断することがある。このことは、加工状態により変化する信号が切削音中に含まれていることを意味している。

本研究では、マイクロコンピュータを用いて切削音のスペクトル分析を行い、工具摩耗、チッピング、びびり等が発生することにより変化する周波数成分を抽出することにより、加工状態をインプロセス検出することを試みたので報告する。

2. 本研究の特徴

工具摩耗および破損の検出に関する研究は数多くなされておられ、間接検出法と直接検出法に分類できる。間接検出法は加工状態に伴い変化を生ずる信号、例えば、切削力抵抗¹⁾、電力²⁾、振動³⁾、AE（アコースティックエミッション）⁴⁾、切削音⁵⁾⁶⁾、表面粗さ⁷⁾、等から検出する方法であり、インプロセス検出が可能である。直接検出法はITV⁸⁾、などにより直接工具刃先を観察する方法であり、ポストプロセス検出となる。

本研究の方法は、切削音により加工状態をインプロセス検出する方法であり、以下に本方法の長所、短所について述べる。

2. 1 長 所

切削音検出センサとしてマイクロホンを使用しており、工作機械に特別な処理を必要としない。また、マイクロホンは非接触センサであり、旋盤のような工具が固定されている機械や、フライス

* 助 手 機械工学科

** 教 授 室蘭工業大学 産業機械工学科

盤・ボール盤のような工具が回転する機械に関係なく利用できる。

検出すべき切削音の周波数範囲は人間の可聴範囲と設定してよいため、20 kHz 以下であるが、予備調査の結果 10~20 kHz においては特徴を表していると見られる周波数が検出されなかったため、本研究においては分析周波数を 10 kHz 以下と設定した。これより、測定系、処理系ともに汎用的な安価な装置を用いることができることとなる。

2. 2 短 所

工場内においては、数種類の機械等が数多く稼働しているため、必要としている切削音以外の音を分離する技術が必要となる。

3. 実験方法

音の発生機構においては振動源が存在するが、切削音（旋削音）の振動源としては工具系（工具を含めた刃物台全体）と工作物系（工作物を含めたチャックおよび心押軸全体）が考えられ、加工状態によりこれらの系の振動状態が変化し、切削音に反映されるものと予想できるため、実験手順は図 1 に示すように四段階で行うこととする。

実験 A において工具系および工作物系の固有振動数を求める。実験 B において摩耗状態により変化する切削音中の固有振動数成分について検討を行う。実験 C において工具剛性の工具系固有振動数へ及ぼす影響について、また、実験 D においてびびりとチッピングについて検討を行う。

3. 1 実験装置

図 2 は実験装置の概略図である。NC 旋盤において被削材をチャックと回転センタにより設置する。心押軸突き出し長さは一定とし、被削材は長さ 350 mm、直径 85 mm の炭素鋼（S 55 C）とした。切削工具は超硬スローアウェイ工具とし、チップ材質は P 20、刃先形状は（-5°、-6°、5°、6°、15°、15°、0.5）である。実験 C 以外は、工具ホルダーの太さを 25×25 mm、工具突き出し長さを 40 mm とした。実験 C において工具剛性を変化させるため、工具ホルダー太さおよび工具突き出し長さを変化させた。

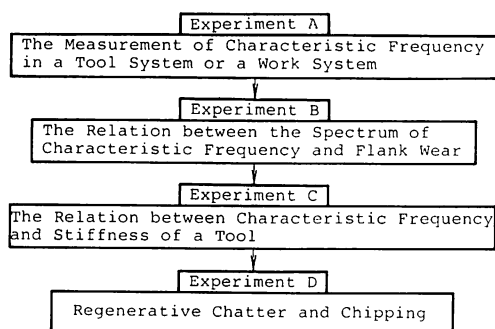


図 1 実験手順

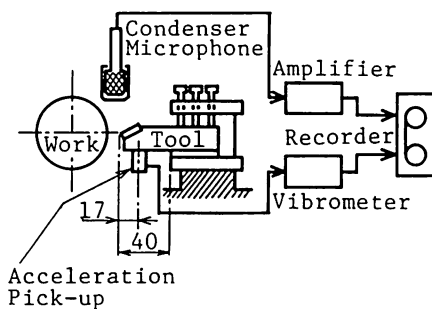


図 2 実験装置

3. 2 信号検出および記録

切削音は工具刃先上方に設置した単一指向性のコンデンサマイクロホンにより検出する。マイクロホンには風雑音を防ぐため、ウインドスクリーンを設置した。

実験 A において固有振動数を求めるため、工具系および工作物系を加振し、発生する振動を加速度ピックアップにより検出した。振動の測定位置および測定方向は、工具系の場合、工具先端における主分力方向および刃物台における主分力、送り分力、背分力方向とし、工作物系の場合、回転センタにおける上下方向とした。加振は無負荷運転（ $N=600 \text{ rpm}$, $f=0.20 \text{ mm/rev}$ ）による方法⁹⁾、負荷運転による方法（ $N=600 \text{ rpm}$, $f=0.20 \text{ mm/rev}$, $d=1.5 \text{ mm}$ ）による方法、工具の先端あるいは工作物の中央をハンマにより打撃する方法の三つの方法により行った。

切削音および振動はそれぞれ増幅器、振動計を通しレコーダに記録した。

3. 3 逃げ面摩耗工具の形成

実験 B においていくつかの摩耗した工具が必要であるため、ダイヤモンド工具研削盤により横

逃げ面と前逃げ面を研削し、その後切削を行い0.3, 0.5, 0.7, 0.9 mmの逃げ面摩耗を形成した。

3. 4 分析方法

レコーダに記録された切削音と振動波形の分析手順を図3に示す。レコーダからローパスフィルター（アンチ・エイリアジング・フィルター）を通し、A/Dコンバータを介してマイクロコンピュータへ切削音データおよび振動波形データを入力する。マイクロコンピュータにおいて512点の高速フーリエ変換（FFT）を行い、スペクトル分析を行う。図4にFFTにより切削音のスペクトル分析を行った一例を示す。このように、FFTによる分析結果はギザギザした形状となり、卓越周波数が見いだしにくい。そのため、線形予測法（LP法）により包絡線を求め、これよりピーク周波数を抽出する。図4にLP法により求めたスペクトル包絡線を示す。

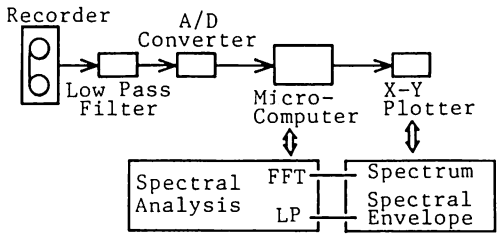


図3 分析方法

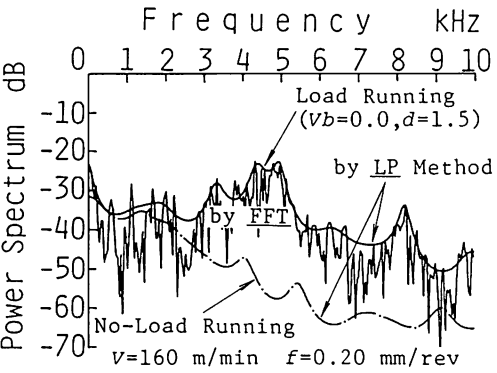


図4 FFTおよびLP法により求めたスペクトル分析結果

4. 実験結果および考察

4. 1 工具系・工作物系の固有振動数

図5に工具系の主分力方向（上下方向）の振動波形のスペクトル分析結果を示す。表1にはそれぞれの測定位置と加振方法を示している。図5より、工具系の主分力方向の固有振動数は、加振の方法によらず3～5 kHzに複数個（2～3個）存在している。工具系の送り分力および背分力方向の振動波形のスペクトル分析結果も図5と同じ傾向を示しており、工具系の固有振動数は3～5 kHzであることがわかる。

同様に工作物系の固有振動数を検討した結果、工作物の固有振動数は500 Hzおよび4～5 kHzであった。

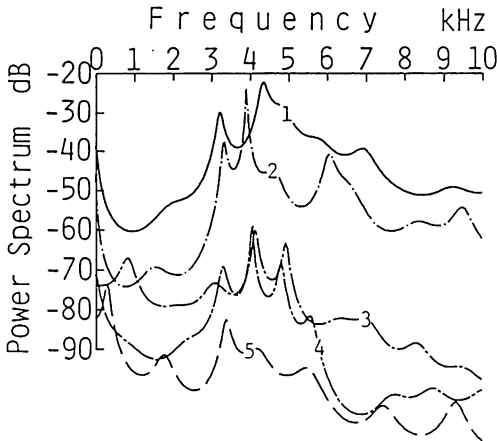


図5 工具系主分力方向振動の周波数特性

表1 図5に関する振動検出位置、方向および加振方法

Number	Position	Direction	Manner of Vibration
1	Cutting Tool	v-Axis	No-Load Running
2	Tool Post	v-Axis	No-Load Running
3	Cutting Tool	v-Axis	Tap by Hammer
4	Tool Post	v-Axis	Tap by Hammer
5	Tool Post	v-Axis	No-Load Running

4. 2 逃げ面摩耗と周波数特性

図6は切削速度160 m/min、送り速度0.20 mm/rev、切り込み1.5 mmの切削条件において、0.0 mmから0.9 mmの設定逃げ面摩耗幅を持つ工具により切削を行った際に発生した切削音の周波数特性を示している。図6において、スペクトル最大値（ピーク周波数）は逃げ面摩耗幅が0.7 mmに至るまでは3～5 kHzに表れているが、0.9 mmでは500 Hzに表れている。4. 1節におい

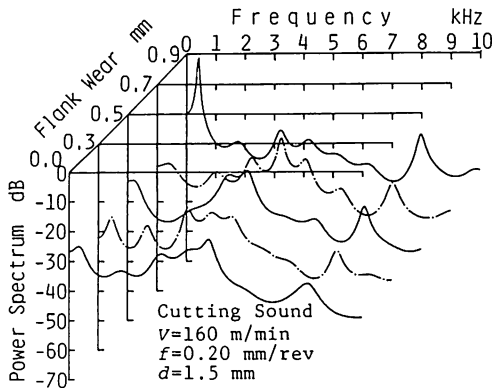


図6 逃げ面摩耗幅と切削音周波数特性

で明かとなった工具系および加工物系の固有振動数の結果より、切削音中には逃げ面摩耗幅が0.7 mmに至るまでは工具系の振動成分が支配的であり、0.9 mmでは工作物系の振動成分が支配的となることからわかる。

このように、逃げ面摩耗幅の0.7 mmを前後して、周波数特性が全く異なっているが、これは振動の形式が変わったことに原因している。切削過程で発生する振動は自励振動であり、「摩擦型びり」と「再生型びり」に分類される。逃げ面摩耗幅が0.7 mm以下においては、摩擦型びりが発生しており、主な振動源が工具系であると考えられる。これに対し、再生型びりはある限度以上の切削抵抗が生じた時に発生する振動形式であり、逃げ面摩耗幅が0.7 mm以上においては再生型びりが発生し、主な振動源が工作物系へと変化したと考えられる。

図6に示される周波数特性から、逃げ面摩耗幅とスペクトル最大値の関係を図7に示す。○印は周波数3～5 kHzにおいてピークが表れたことを意味し、(○)印は周波数500 Hzにおいてピークが表れたことを意味している。摩耗の進行にと

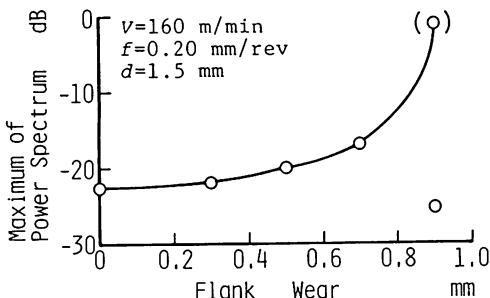


図7 逃げ面摩耗幅と切削音スペクトル最大値の関係

もないスペクトル最大値が増加しており、図7より切削音のスペクトル最大値を検出することにより、逃げ面摩耗幅を推定することが可能であることがわかる。

4.3 工具剛性の影響

工具ホルダーの太さあるいは工具突き出し長さを変化させ、工具剛性が変化した場合の工具系振動および切削音の周波数特性について検討を行った。図8は工具突き出し長さを変化させた場合の工具振動の周波数特性の変化を示している。切削条件は切削速度160 m/min、送り速度0.20 mm/rev、切込み量1.5 mm、逃げ面摩耗幅0.5 mmであり、工具太さ25×25 mmである。図8より工具突き出し長さが長くなるにつれ固有振動数は低くなり、固有振動数成分が明確に見られるようになる。また、そのスペクトル値も大きくなっている。同条件における切削音の周波数特性を図9に示すが、工具振動の周波数特性(図8)と良く一致している。

図10は工具突き出し長さを50 mm、工具太さを20×20 mmとして切削した場合に発生した工具振動と切削音の周波数特性である。図8、9における工具突き出し長さ50 mmの場合よりもピーク周波数が低くなっており、また工具振動と切削音の周波数特性が極めて良く一致している。

以上より、工具剛性が低くなると、工具系固有振動数も小さくなり、また切削音の周波数特性は工具剛性が低いほど工具系の振動特性と良く一致している。

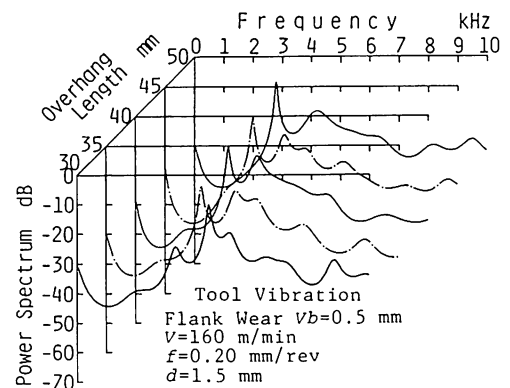


図8 工具剛性(工具突き出し長さ)と工具振動周波数特性

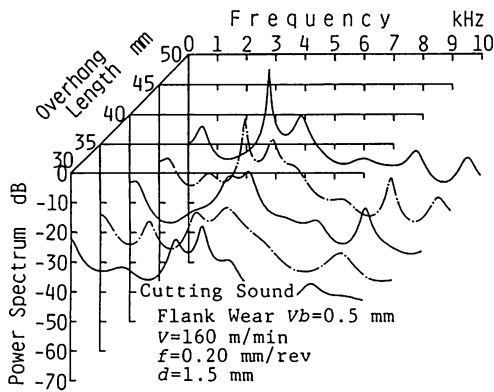


図9 工具剛性(工具突出し長さ)と切削音周波数特性

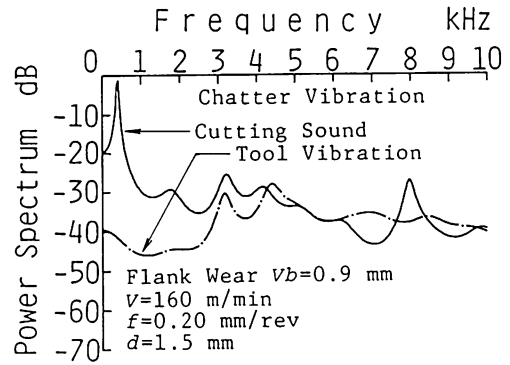


図11 再生ひびりにおける工具振動と切削音の周波数特性

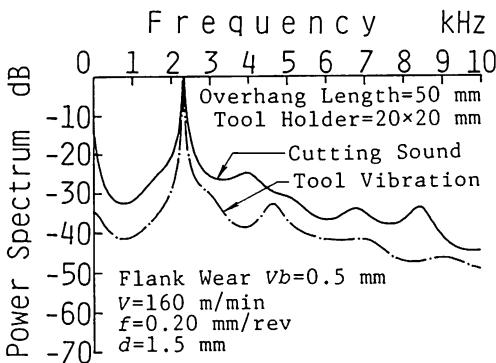


図11 工具剛性が小さい場合の工具振動と切削音の周波数特性

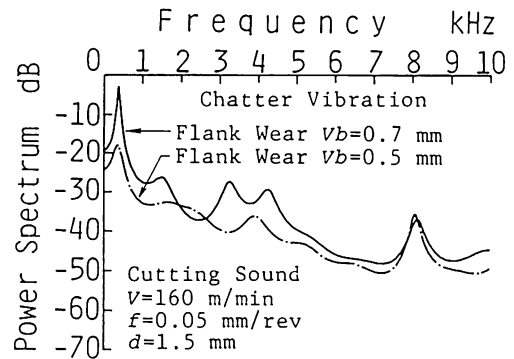


図12 再生ひびりにおける切削音周波数特性

4. 4 びびり・チッピング

図11は逃げ面摩耗幅0.9 mmとなり、切削抵抗がある限度を越えたために再生びびりを発生した場合の工具振動と切削音の周波数特性である。また図12は送り速度が0.05 mm/revと小さく、重複係数¹⁰⁾が大きいため再生びびりが発生した場合の切削音の周波数特性である。図11、12より再生びびりが発生した場合の切削音の周波数特性は工作物系の固有振動数である500 Hzにおいてピークが表れる。また、このとき図11における工具振動の周波数特性より、工具の振動は大きくないことがわかる。

図13は人工的にチッピングを発生させた切刃により切削を行ったときの切削音の周波数特性である。チッピングの大きさを図14に示す。チッピングの大きさがA、B程度ではその検出は困難であるが、C程度の大きさになると工具系固有振動数成分が極めて大きなスペクトル値となり、チッピングの検出が可能であることがわかる。

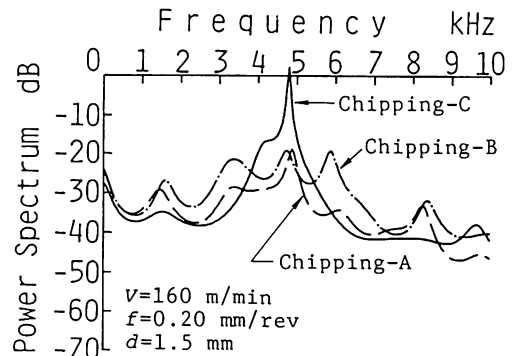


図13 チッピング発生時の切削音周波数特性

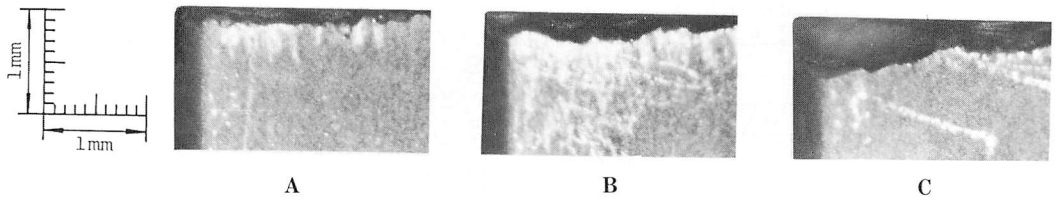


図14 チッピング切刃

5. 結 言

切削音のスペクトル分析を行い、切削音中より工具系および加工物系の固有振動成分を抽出することにより、加工状態のインプロセス検出を試みた結果、次の結論を得た。

- (1) 工具系の固有振動数は3～5 kHz、工作物系の固有振動数は500 Hzおよび4～5 kHzであり、これらの固有振動数は切削音の周波数特性に大きく影響し、加工状態を認識するうえで重要な要素となる。
- (2) 逃げ面摩耗の進行とともに、切削音の周波数特性において工具系および工作物系の固有振動数成分のスペクトル値が増加する。したがって、切削音中より、工具系、工作物系の固有振動数成分のスペクトル値を検出することにより、逃げ面摩耗量を推定できる。
- (3) 切削音の周波数特性において、工具系の固有振動数がピーク周波数となっている場合には摩擦型びびりが発生しており、また、加工物系の固有振動数がピーク周波数である場合には、再生びびりが発生している。
- (4) ある程度大きなチッピングが発生した場合には工具系の固有振動数成分が極めて大きなスペクトル値となるため、その検出が可能となる。
- (5) 以上より、マイクロホンにより切削音を検出しスペクトル分析を行い、工具系および工作物系の固有振動数成分を抽出することにより、逃げ面摩耗、びびり、チッピングのインプロセス検出が可能であることがわかった。

- 5) 竹山・ほか2名, 精密機械, 42-11(1976), 1063。
- 6) E. J. Weller, Trans. ASME, (1969), 525.
- 7) 三井・ほか1名, 機論, 44-377 (S53), 321。
- 8) 竹山・ほか3名, 機誌, 73-619 (S45), 1141。
- 9) 佐藤, 機誌, 76-658 (S48), 1105。
- 10) 竹山, 切削加工, (S55), 166, 丸善。

(昭和61年11月25日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐田・ほか1名, 精密機械, 38-10(1972), 788。
- 2) 岩田, 精密機械, 48-1 (1982), 90。
- 3) 能・ほか2名, 東芝レビュー, 32-2 (S52), 120。
- 4) 垣野・ほか2名, 精密機械, 46-3 (1980), 344。