

# 音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価

久富 茂樹      坂東 直行

## Evaluation of Tool Wear using Cutting Sound Obtained by Source Separation

Shigeki KUDOMI      Naoyuki BANDO

**あらまし** 部材を加工する工具は、製品精度を決定する重要な要素の一つである。工具が摩耗すると所望の加工精度を得ることができないため、工具の摩耗状態を把握し、適切な時期に工具交換を行う必要がある。工具摩耗状態を管理する手法は様々なものが提案されているが、導入費用、設置の煩雑さなどの理由から、生産現場への導入が進んでいない。切削音による工具摩耗量評価は、非接触計測が可能で、比較的安価にシステムを構築できるが、環境音の影響を受けやすく実用化に課題がある。

本研究では、環境音の影響を受けにくい工具摩耗評価を行うために、複数のマイク（マイクアレイ）によって測定した音のデータから、音源分離技術によって目的とする切削音のみを抽出することを試みた。旋削加工を対象として、コンプレッサの駆動音を雑音として与えた環境において、マイクアレイで測定したデータから切削音の分離を行った。低周波数域での分離は困難であったが、今回の切削条件で工具の摩耗状態によって差のあった0.9~1.7 [kHz] の周波数域に絞って評価すると、雑音であるコンプレッサの駆動音の影響を低減させることができた。

**キーワード** 音源分離, 遅延和法, マイクアレイ, 工具摩耗, 切削音

### 1. はじめに

部材を加工する工具は製品精度を決定する重要な要素の一つである。従来、工具摩耗の検出・工具交換管理技術として、切削抵抗の増加を監視するもの<sup>[1,2]</sup>, AE（アコースティック・エミッション）信号を利用するもの<sup>[3,4]</sup>, 加工後のワーク表面粗さを調べるもの<sup>[5]</sup>, 工具摩耗幅を測定するものなどの方法が研究されているが、計測装置が高価である、計測装置の設置・調整が困難である、測定に時間や手間がかかるなどの理由により、導入例は多くない。特に中小企業では、一定の加工時間や切削距離で工具交換をしたり、作業者の判断で工具交換したりすることが多い。

音情報を利用した方法は、計測装置が比較的安価で、非接触での計測が可能であることから、設置条件などの制約が少なく、既存の工作機械にも導入が可能であるため、中小企業にも導入しやすい方法である。これまでも音情報を利用した工具摩耗量評価に関する研究開発事例はあるが<sup>[6,7]</sup>, 実際には他の工作機械や搬送装置などのノイズが多く、ほとんど実用化されていない。

そこで、本研究では、環境音の影響を受けにくい工具摩耗評価を行うために、複数のマイク（マイクアレイ）によって測定した音のデータから、音源分離技術によ

て目的とする切削音のみを抽出することを試みた。旋削加工を対象として、コンプレッサの駆動音を雑音として与えた環境において、マイクアレイで測定したデータから切削音の分離実験を行ったので報告する。

### 2. 音源分離の基礎評価

複数の音源から発せられた混ざり合った音を、空間の異なる位置に複数のセンサ（マイク）を配置したセンサアレイを用いて測定し、複数の観測データから元のそれぞれの音を分離する技術が研究されている。本研究では、原理がわかりやすく、処理が容易な、遅延和法を用いて、目的音を分離・抽出することを試みた。

#### 2. 1 遅延和法の原理

複数のマイクで音を計測する場合、それぞれのマイクでは、音源とマイクの位置関係によって決まる時間分の遅れが生じて信号が観測されることになる。遅延和法は、各マイクについて目的音の位相が揃うように時間遅れを補償した上で、全マイクの信号を足し合わせる手法である<sup>[8]</sup>。  $m$  個のマイクで目的音  $s(t)$  と雑音  $n(t)$  が混在した音を計測した場合、各マイクで観測される信号  $x_m(t)$  は(1)式のように表される。

$$\begin{cases} x_1(t) = s(t - \tau_{s1}) + n(t - \tau_{n1}) \\ x_2(t) = s(t - \tau_{s2}) + n(t - \tau_{n2}) \\ \vdots \\ x_m(t) = s(t - \tau_{sm}) + n(t - \tau_{nm}) \end{cases} \quad \dots (1)$$

ここで、 $\tau_{sk}$  は  $k$  番目のマイクで観測される目的音の時間遅れ、 $\tau_{nk}$  は  $k$  番目のマイクで観測される雑音の時間遅れである。目的音の時間遅れがすべてのマイクで同じになるように位相を揃えて足し合わせ、マイク数で割ることにより、分離信号  $y(t)$  が求まる。1番目のマイクを基準にして、目的音の位相を揃えた場合、 $y(t)$  は(2)式ようになる。

$$y(t) = s(t - \tau_{s1}) + \frac{1}{m} \{ n(t - \tau_{n1}) + n(t - \tau_{n1} - \tau_{s1} + \tau_{s2}) + \dots + n(t - \tau_{nm} - \tau_{s1} + \tau_{sm}) \} \quad \dots (2)$$

右辺第1項が目的音で、第2項が雑音である。目的音は位相がすべて揃っているため、信号が減衰することなく、元の信号の振幅となる。一方、雑音は、各マイクで位相が不揃いであるため、信号を足し合わせることで振幅が減少する。その結果、ノイズを抑制して目的音を抽出できる。直線状にマイクを並べたマイクアレイを用いる場合、マイクアレイを目的音の方向に向ければ、各マイクで目的音の位相が揃うことになる。こうすれば、目的音の位相を揃える必要がなく、全マイクの信号を足し合わ

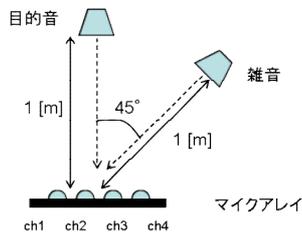


図1 正弦波信号の分離実験

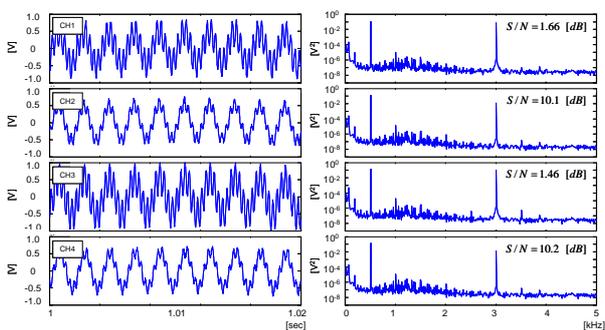


図2 観測波形と周波数解析結果

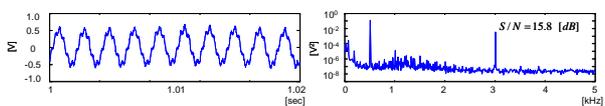


図3 分離波形と周波数解析結果

せるだけで良いので処理が容易である。

## 2. 2 正弦波信号の分離実験

実際に、どの程度、音源分離ができるかを確認するために、2つのスピーカから異なる周波数の正弦波を出力し、マイクアレイで測定した信号を遅延和法で分離する実験を行った。マイクアレイは、4個のエレクトレット・コンデンサ・マイク (DBProducts製C9767BB422LF-P、周波数特性：50 [Hz]~16 [kHz]) を100 [mm] 間隔で直線状に配置したものを作成した。目的音として、500 [Hz] の正弦波、雑音として、3 [kHz] の正弦波を使用した。図1に示すように、目的音源のスピーカは、マイクアレイの正面に 1 [m] 離して配置し、雑音源のスピーカは、マイクアレイに対して45度の方向に 1 [m] 離して配置した。各マイクの出力信号をオペアンプで増幅した後、データロガー (日置電機製MR8880) で記録した。サンプリング周波数は、50 [kHz] で、測定時間は、1 [sec] 間とした。

図2に各マイクの観測波形の一部とパワースペクトルを示す。また、図3に遅延和法で分離した信号の波形とパワースペクトルを示す。パワースペクトルは、測定した時系列データから5,000ポイント (0.1 [sec] 間) ずつ切り出してその区間のパワースペクトルを求め、1 [sec] 間分のデータを平均したものである。なお、パワースペクトルの縦軸は対数表示である。観測波形は、各マイクとも目的音の 500 [Hz] と雑音の 3 [kHz] の周波数成分が含まれた波形になった。ただし、マイク間で波形にバラツキが観察された。スペクトルからSN比を計算すると、1.46 [dB] から 10.2 [dB] までのバラツキがあった。遅延和法で分離した波形は、雑音の 3 [kHz] 成分が減衰して、SN比は、15.8 [dB] に向上しているものの、波形の歪みが目立つ結果となった。このバラツキは、各マイク素子の特性のバラツキ、マイクの取り付けのバラツキの影響であると考えている。遅延和法の原理から考えると、各マイクで雑音の強度が揃っていないと十分な減衰が期待できないため、各マイクの特性を揃える必要がある。

## 2. 3 マイク特性を補正した音源分離

遅延和法で想定している音は、平面波を想定している。そのため、理想的な観測音は、各マイクで、振幅特性はすべて等しく、位相特性のみが異なるはずである。しかし、実際の観測音は、前述のように、各マイクでパワースペクトルが異なり、振幅特性が異なっている。そこで、観測信号の位相特性のみを利用し、振幅特性はどれか1つのマイクに揃えてみる方法を試みた。具体的な処理方法は以下のとおりである。

- (1) 測定したデータから、5,000ポイント (1 [msec] 間) ずつ切り出してフーリエ変換する。
- (2) フーリエ変換して得られた複素数値の絶対値を求め、周波数帯域ごとに全測定区間の平均値 ( $|X_i(f)|$ ) を求める。
- (3) 周波数帯域ごとに、位相関係はそのまま、基準となるマイクの  $|X_1(f)|$  (ここでは1番目のマイクとした)

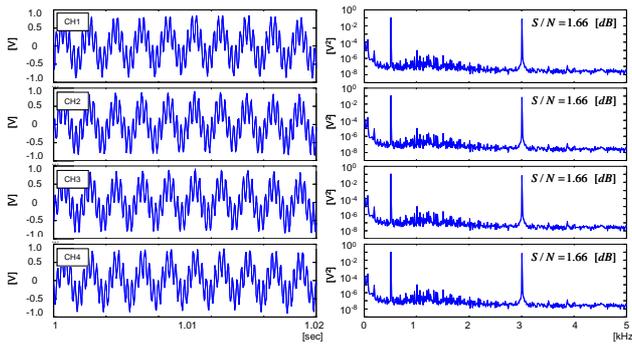


図4 補正波形と周波数解析結果

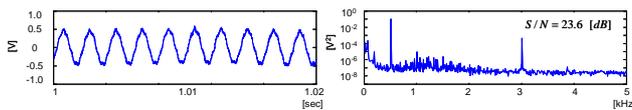


図5 補正データを使用した分離波形と周波数解析結果

に等しくなるように各マイクの振幅特性のみを補正する。

(4) 補正した周波数領域のデータを逆フーリエ変換によって時系列に変換する。

マイク特性を補正した各マイクの補正波形とパワースペクトルを図4に示す。補正波形は、位相特性は異なっているが、振幅特性は各マイクで等しくなっている。SN比を求めてみると、各マイクとも、基準にした1番目のマイクと同じ 1.66 [dB] に揃っている。

これらの補正波形を用いて、遅延和法で分離した分離波形とパワースペクトルを図5に示す。図3に示した補正前の分離波形に比べて、歪みの少ない目的音波形が得られた。SN比も 15.8 [dB] から 23.6 [dB] に向上し、補正の効果を確認することができた。

### 3. 音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価

#### 3. 1 工具摩耗に伴う切削音評価

まず、工具が摩耗すると切削音にどのような変化が現れるかを明らかにするために、他の工作機械などが稼働しておらず、極力ノイズの少ない環境で切削音を測定し、周波数解析を行った。汎用旋盤を用いて、被削材の外径を自動送りによって、表1に示す条件で切削し、その時の音をマイクで測定した。図6に旋削実験の様子を示す。被削材には、直径 45 [mm] のクロムモリブデン鋼 (SCM435) の丸棒を用いた。工具はスローアウェイチップを使用し、新品の正常なものと、刃先をヤスリで研磨し摩耗状態にしたものとの2種類で比較実験をした。測定は、エレクトレット・コンデンサ・マイクを1個使用して、サンプリング周波数: 50 [kHz] , 測定時間: 5 [sec] 間で行った。2章の実験と同様に、測定したデータから、5,000ポイント (0.1 [sec] 間) ずつ切り出して、その区間

のパワースペクトルを求め、5 [sec] 間分のデータを平均した。図7に測定音のパワースペクトルを示す。摩耗した工具を使用した場合、0.9~1.7 [kHz] 付近のスペクトルが大きく現れており、工具が摩耗したときの特徴量として利用できそうである。

#### 3. 2 切削音測定における雑音の影響

次に、雑音の影響を調べるために、旋盤と同じ部屋にあるコンプレッサを駆動させた状態で同様の実験を行った。旋盤、コンプレッサ、マイクは図8に示すような位置関係である。

周波数解析結果を図9に示す。解析に使用したデータは、マイクアレイ内の1個のマイクのデータのみである。比較のため、図7で示したコンプレッサ音がない場合の結果も合わせて示している。コンプレッサを駆動させた場合、1 [kHz] 以下の低周波数域に駆動音のピークが顕著に現れているが、工具が摩耗したときの特徴量となり得る 0.9~1.7 [kHz] 付近のスペクトルにも重畳している。マイク1個のみの測定では、雑音がそのまま測定結果に影響を及ぼし工具摩耗評価を正しく行うことができない。

#### 3. 3 音源分離による切削音抽出

次に、4個のマイクアレイで測定したデータを使用して、2章で述べた方法で補正した後、遅延和法で切削音の分離を行った。図10に分離音のパワースペクトルを示す。低周波数域でのスペクトルは、マイク1つで測定したものとあまり変わらないが、1 [kHz] 以上の領域については、切削音のみの場合のスペクトル値に近くなっており、コンプレッサ音の影響が抑制されている結果を得た。各

表1 切削条件

主軸回転数 [rpm]	550
切り込み量 [mm]	0.5
送り [mm/rev]	0.2



図6 旋削実験の様子

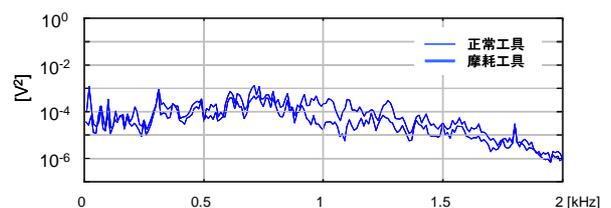


図7 切削音の周波数解析結果

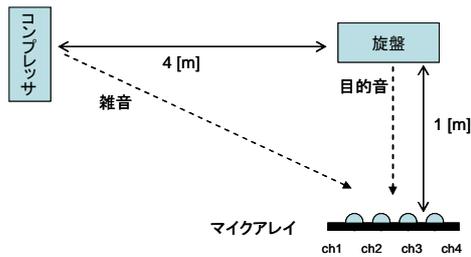


図8 実験配置図

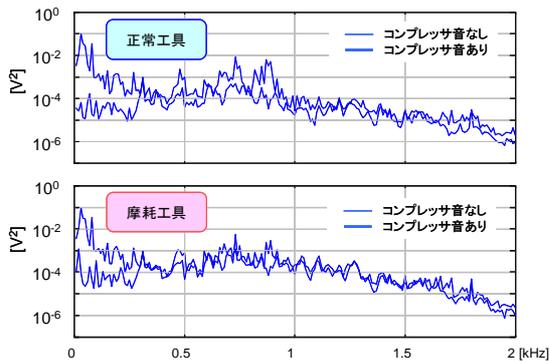


図9 コンプレッサ駆動音がある場合の切削音の周波数解析結果 (1マイク測定)

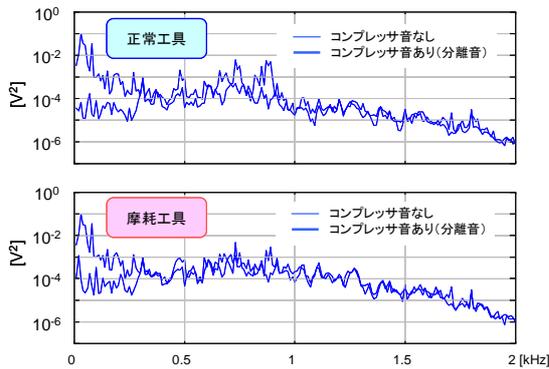


図10 マイクアレイを使用して求めた分離音の周波数解析結果

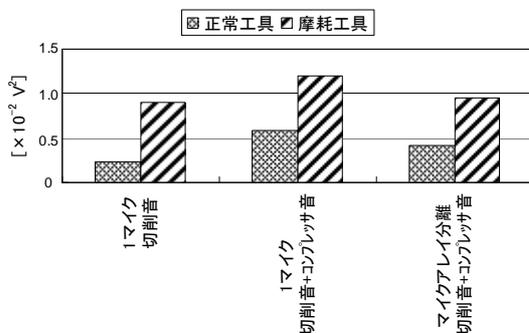


図11 0.9~1.7[kHz]のパワースペクトル累積値

実験条件で得られた 0.9 [kHz]~1.7 [kHz] のパワースペクトルの累積値を図11に示す. マイク1つの場合, コンプレッサ音加わると, その影響でスペクトルの累積値も増加している. これは, 工具の摩耗状態を判断する上で障害となる. 一方, マイクアレイで測定したデータから求めた分離音の値は切削音のみの場合の値に近くっており, この累積値を監視することで, 環境の雑音の影響を抑制し, 工具の摩耗状態を検出できそうである.

#### 4. まとめ

切削音から工具の摩耗状態を評価することを目的として, 雑音と切削音が混ざった環境において, 音源分離技術の一つである遅延和法を適用して, 目的とする切削音のみを分離抽出することを試みた. 低周波数域での分離は困難であったが, 今回の切削条件で工具の摩耗状態によって差のあった 0.9~1.7 [kHz] の周波数域に絞って評価すると, 雑音であるコンプレッサの駆動音の影響を低減させることができた.

今後, 切削音をより精度よく分離抽出するためにマイクアレイの設計を見直すとともに, 加工条件, 被削材が変わったときのデータを増やし, 工具摩耗との関係を調べていきたい.

#### 文献

- [1] 釜洞文夫ほか, “切削工具の異常検出装置”, 特公昭62-60221, 1987.
- [2] 山北誠人, “工具寿命予測方法”, 特開昭57-171244, 1982.
- [3] 藤原弘次, “工具異常監視方法及びその装置”, 特開平6-218655, 1994.
- [4] 岩本竜一ほか, “軟質金属の超精密加工技術に関する研究”, 鹿児島県工業技術センター, No.19, pp.55-60, 2005.
- [5] 亦野直木, “切削工具の摩耗検出方法”, 特開平6-344246, 1994.
- [6] 竹山秀彦ほか, “マイクロホンによる切削工具摩耗の測定方法”, 特公昭56-11890, 1981.
- [7] 山本晃, 森和男, “加工音による工具状態インプロセス診断技術”, 広島県立東部工業技術センター研究報告, No.9, pp.64-67, 1996.
- [8] 浅野太, “音のアレイ信号処理 —音源の定位・追跡と分離—”, コロナ社, 2011.