

音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価(第2報)

久富 茂樹 田畑 克彦

Evaluation of Tool Wear using Cutting Sound
Obtained by Sound Source Separation (2nd Report)

Shigeki KUDOMI Katsuhiko TABATA

あらまし 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。切削音から工具摩耗を判断する方法は、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。

昨年度より、環境音の影響を受けにくい工具摩耗評価を行うために、複数のマイクロホン（マイクロホンアレイ）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ている。本年度は、無指向性マイクロホンのアレイと指向性マイクロホンを組み合わせたマイクロホンユニットを構成し、音源分離手法の検討を行った。2つの単一周波数音源を使った音源分離実験では、SN比を 37 [dB]とすることができ、提案手法の効果を確認した。また、ホワイトノイズを加えた環境において切削音の分離を試みた。

キーワード 音源分離、遅延和法、マイクロホンアレイ、工具摩耗、切削音

1. はじめに

工具摩耗の検出、工具交換管理を目的として、切削音を利用した工具摩耗評価に関する研究を実施している^[1]。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取り付けが可能であるため、中小企業にも導入しやすい方法である。その反面、環境音の影響を受けやすく、大きな機械音が発生している工場内では安定した計測が困難である。そこで、本研究では、複数のマイクロホン（マイクロホンアレイ）を用いて、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ている。

昨年度は、無指向性マイク4個を直線上に配置したマイクロホンアレイを試作し測定を行った。正弦波信号の分離については、一定の効果が認められたが、切削音の分離に関しては、十分な効果を得ることができなかった。分離性能を向上させるには、より多くのマイクロホンを使用して目的方向の指向性を高めることが必要であると考え、今年度は、マイクロホン数を8個に増やしたマイクロホンアレイを試作し、さらに、指向性マイクロホン1本を加えたマイクロホンユニットを構成して、目的音の分離性能の向上を試みた。

2. マイクロホンアレイ

2. 1 マイクロホンの指向性

一般的に、マイクロホンアレイには無指向性マイクを使用することが多い。音源の方向が一定ではない場合には、どの方向からの音も同じ音圧で測定できたほうが都合がよいためである。しかし、今回の目的のように、音源の位置が既知であり、それほど移動しない場合には目的方向の音のみを捉えることができればよい。ショットガンマイクと呼ばれる指向性マイクロホンは、側面にスリットを開けた干渉管をマイクロホンの前に取り付けた構造になっており、側面方向からの音は、干渉管によって減衰するように設計されている。その結果、正面方向の感度が高い指向性となる。今回、このような特性を持つ指向性マイクロホン（オーディオテクニカ製AT8015）と、これまでに使用してきた無指向性マイクロホン

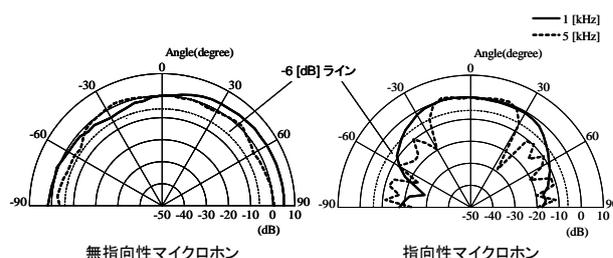


図1 マイクロホン単体の指向性

(DBProducts製C9767BB422LF-P)によるマイクロホンアレイを組み合わせて、マイクロホンユニットを構成し、狭指向性の実現を目指す。

まず、それぞれのマイクロホンの指向性を測定した。測定は、マイクロホンと正対している方向を0 [deg]として、スピーカの位置を-90 [deg]から+90 [deg]まで 5 [deg]ごとに半径 2 [m]の円弧上を移動させ、マイクロホンで音を計測した。0 [deg]の計測音の振幅を基準にしてデシベル表示した結果を図1に示す。指向性マイクロホンでは、±60 [deg]方向からの音に対しては約-10 [dB]の感度になっており、側面からの音の感度が低くなっている。しかし、工場のような騒音環境の中で、切削音の微妙な違いを検出するには、この特性では不十分である。工場内の音圧レベルは80~90 [dB]ほどあり^[2]、静かな事務所の50 [dB]程度の音圧レベルにするには、30~40 [dB]程度減衰させる必要がある。

2.2 無指向性マイクロホンのアレイと指向性マイクロホンを組み合わせたマイクロホンユニット

正面方向の指向性を一層高くするためには、指向性マイクロホンを複数並べてマイクロホンアレイにすることも考えられるが、指向性マイクロホンは比較的高価であることを考慮して、今回は、指向性マイクロホン1本と安価な無指向性マイクロホンのアレイを組み合わせたマイクロホンユニットを構成した。図2に構成したマイクロホンユニットを示す。マイクロホンアレイは、8個の無指向性マイクロホンを70 [mm]間隔で直線状に配置したものを製作した。そして、その中心位置に指向性マイクロホンを設置した。

マイクロホンユニットの各マイクロホンで計測した信号から、以下の2種類の方法で正面方向の分離信号を求めた。

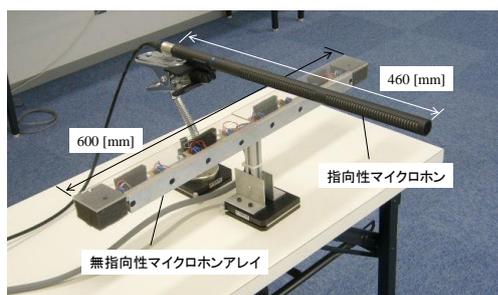


図2 マイクロホンユニット

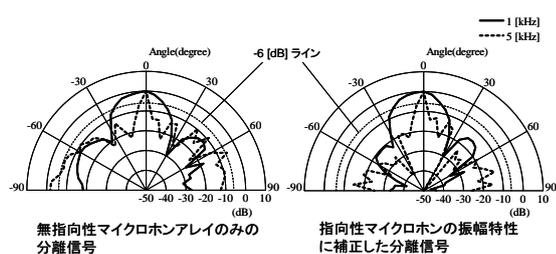


図3 マイクロホンユニットの指向性

<方法1>

マイクロホンアレイの各マイクロホンの出力信号を使用し、遅延和法^[3]によって正面方向の分離信号を求める。

詳細については、4個のマイクロホンを使用して実施した昨年度の方法と同様のため前報^[1]を参照されたい。

<方法2>

マイクロホンアレイの各マイクロホンの出力の周波数毎の振幅特性を指向性マイクロホンの特性に一致するように成形した後、遅延和法によって正面方向の分離信号を求める。

具体的な方法は、以下のとおりである。マイクロホンアレイの各計測信号と、指向性マイクロホンの計測信号をそれぞれ離散フーリエ変換した複素数列 $X_{n_i,k}$, $X_{d,k}$ ($k=0,1,\dots,N-1$) を(1)式で表す。ただし、 N は計測データ数、添え字の i はマイクロホンの番号である。

$$\begin{cases} X_{n_i,k} = A_{n_i,k} e^{-j\alpha_{n_i,k}} \\ X_{d,k} = A_{d,k} e^{-j\alpha_{d,k}} \end{cases} \quad \dots (1)$$

ここで、 j は虚数単位である。無指向性マイクロホンの計測信号の位相特性はそのまま維持し、振幅特性を指向性マイクロホンのものに置き換えた数列を $X_{a_i,k}$ ($k=0,1,\dots,N-1$)とすると、 $X_{a_i,k}$ は(2)式ようになる。

$$X_{a_i,k} = A_{d,k} e^{-j\alpha_{d,k}} \quad \dots (2)$$

(2)式を逆離散フーリエ変換し、補正信号 $x_{a_i,n}$ を得る。

$$x_{a_i,n} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{a_i,k} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (n=0,1,\dots,N-1) \quad \dots (3)$$

この補正信号を使って、遅延和法により分離信号を求める。

本マイクロホンユニットを使用して、前節と同様に指向性を求めた。図3に指向性パターンを示す。方法1により、マイクロホンアレイのみの信号を使って分離信号を求めた場合、1 [kHz]の特性では、指向性マイクロホン単体での特性に比べると、正面方向の指向性が高くなっているが、±60 [deg]付近にサイドローブができており、その付近では-10 [dB]の減衰にとどまっている。5 [kHz]の特性は更に多くサイドローブが発生しており、複雑なパターンになっているが、正面方向以外からの音に対しては、-10~-20 [dB]程度の減衰にとどまっている。一方、方法2によって、指向性マイクロホンの振幅特性と一致するように、マイクロホンアレイの各信号を補正した場合、1 [kHz]の特性では、±45 [deg]付近に発生しているサイドローブでも-15~-20 [dB]程度に減衰している。±60 [deg]以上の方向からの音に対しては、-30 [dB]以上の減衰を示しており、正面方向への指向性を高くすることができた。5 [kHz]の特性に関しても、指向性パターンは複雑であるが、方法1に比べて正面方向の指向性を高めることができた。

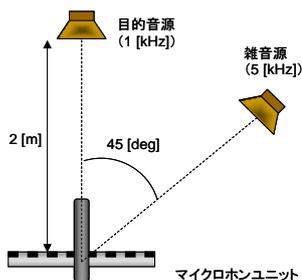


図4 2つの単一周波数音源を使用した音源分離

3. 単一周波数音源の分離

前章で述べたマイクロホンユニットを用いて、2つの単一周波数音源の分離を試みる。図4に実験の配置図を示す。マイクロホンユニットと2[m]離して正対するように、目的音源のスピーカを設置し、1[kHz]の単一周波数の音を出力した。また、45[deg]の方向に雑音源のスピーカを設置し、5[kHz]の単一周波数の音を出力した。マイクロホンユニットで計測した各信号はAD変換器によって、44.1[kHz]のサンプリングでPCに取り込んだ。

図5に無指向性マイクロホン単体での計測信号、指向性マイクロホン単体での計測信号、前章の方法1で求めた分離信号、方法2で求めた分離信号の各時系列信号とそのパワースペクトルを示す。無指向性マイクロホン単体での計測信号は、目的信号である1[kHz]の音と雑音信号である5[kHz]の音がほぼ同程度の強さで混合された波形になっている。指向性マイクロホン単体での計測信号は、無指向性マイクロホンに比べると雑音信号が減衰しており、パワースペクトルからSN比(5[kHz]の音を基準にしたときの1[kHz]の音の強さ)を求めると、10.7[dB]となった。しかし、まだ十分に雑音信号が減衰しておらず、波形も歪んだ形状となっている。方法1によってマイクロホンアレイの計測信号から求めた分離信号は、よりSN比が向上しており、18.3[dB]であった。さらに今回提案した方法2によって求めた分離信号は、SN比が37.0[dB]となり、雑音信号が十分減衰する結果が得られた。波形を見てもほとんど歪みがない1[kHz]の正弦波となっていることがわかる。

4. 切削音と雑音との分離

汎用旋盤を用いて、被削材の外径を自動送りによって切削し、その時の音を構成したマイクロホンユニットで測定した。正常な工具を使用した場合と摩耗した工具を使用した場合の切削音をウェーブレット変換^[4]し、スカログラムを表示させることによって、切削音の比較を行った。切削に使用した正常工具と摩耗工具を図6に示す。また、切削条件は、表1に示すとおりである。

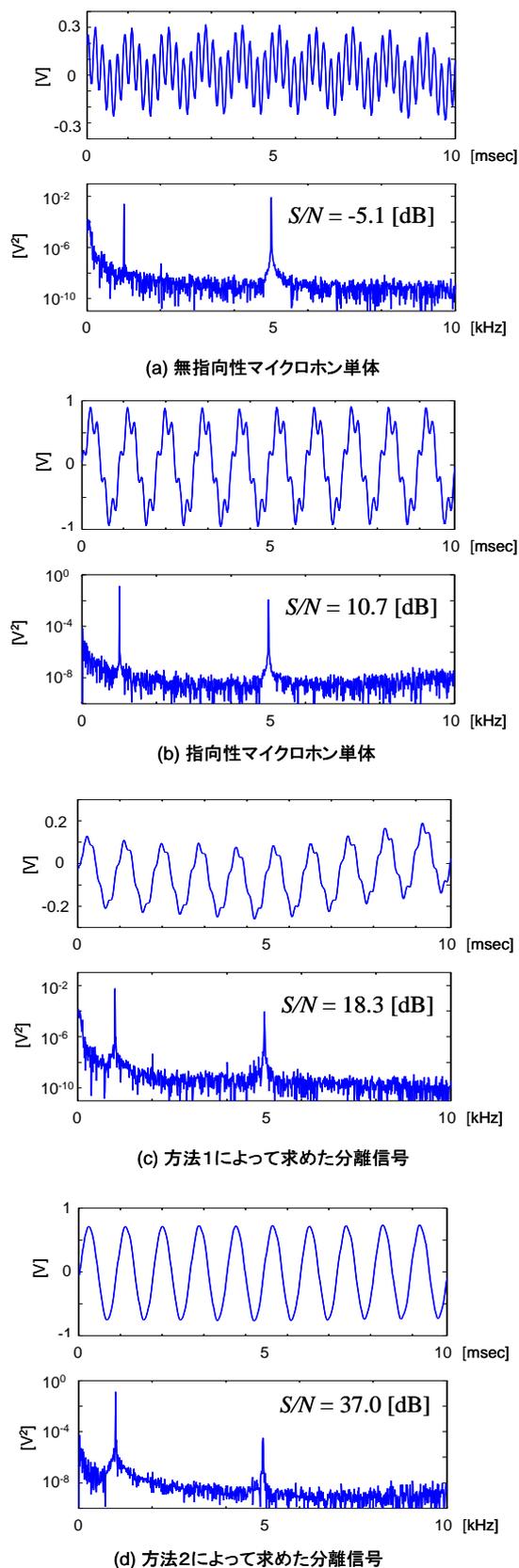


図5 時系列信号 (上段) とパワースペクトル (下段)

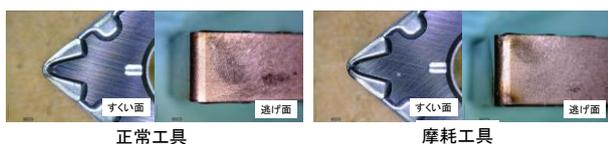


図6 切削工具

表1 切削条件

被削材	S45C丸棒材 (φ90)
主軸回転数	550 [rpm]
切り込み量	0.3 [mm]
送り	0.2 [mm/rev]

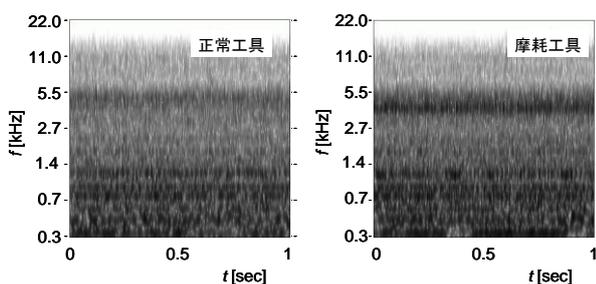


図7 測定音のウェーブレット変換
(ノイズなし, 指向性マイクロホンのみ)

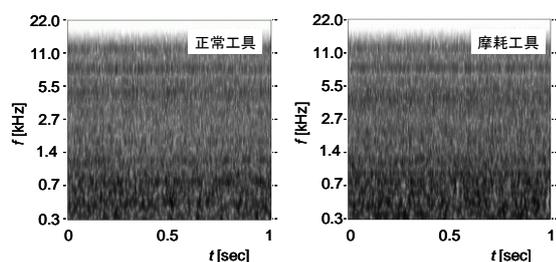


図8 測定音のウェーブレット変換
(ホワイトノイズあり, 指向性マイクロホンのみ)

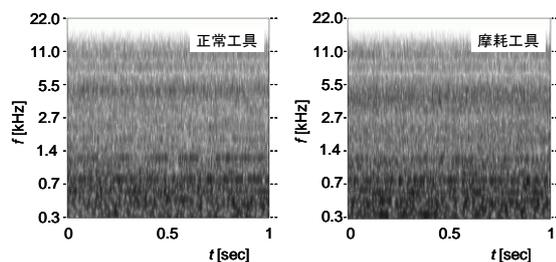


図9 分離音のウェーブレット変換
(ホワイトノイズあり, マイクロホンユニットを使用)

まず, ノイズのない実験室環境で切削を行い, 指向性マイクロホンにより切削音を計測した. マイクロホンは切削部に向けて, 1.5 [m]離して設置した. 図7に計測信号のウェーブレット変換結果を示す. 横軸は時間, 縦軸は周波数を示しており, 色が濃くなるほど信号強度が高い

ことを示している. 2つの図を比較すると, 最も特徴的な部分は, 4 [kHz]付近の周波数域であり, 摩耗した工具では, その部分の強度が高い. この結果から, 表1の切削条件では, 工具摩耗の判断指標として, 4 [kHz]付近のスペクトル値が使用できそうである.

次に, 工場内の雑音を模擬するために, ホワイトノイズをスピーカから出力した状態で同様の実験を行った. スピーカはマイクロホン正面に対して, 45 [deg]の方向に1.5 [m]離して設置した. 図8に指向性マイクロホンで計測した信号のウェーブレット変換結果を示す. 全周波数域にノイズが重畳して, 切削音がマスキングされた結果になっている. 正常工具の場合と摩耗工具の場合で, 4 [kHz]付近のスカログラムも違いが不明瞭になってしまっている. 図9に2章で述べた<方法2>によって求めた分離信号のウェーブレット変換結果を示す. 図7に比べると全体的に強度が低下しており色が薄くなっているが, 図8ではほとんど違いがわからなくなっていた 4 [kHz]付近のスカログラムも違いが認められた. 構成したマイクロホンユニットを用いて音源分離を行うことで, ノイズ環境であっても, 工具摩耗に起因した特徴量を抽出できそうであることがわかった.

5. 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, 切削音のみを分離することを試みた. 無指向性マイクロホンのアレイと指向性マイクロホンを組み合わせたマイクロホンユニットを構成し, 遅延和法により音源分離を行った. 2つの異なる単一周波数音源を使った分離実験では十分な分離効果が確認できた. ノイズ環境中で切削音を測定した実験でも, 提案手法のノイズ低減効果を確認することができた. しかしながら, 今回の研究では, 切削音の分離が十分ではなく, 工具摩耗状態の定量的な考察を行うまで至らなかった. 今後, さらに優れた音源分離手法, 計測方法を検討していき, 工具摩耗を評価できる手法を確立したい.

文 献

- [1] 久富茂樹, 坂東直行, “音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第14号, pp.33-36, 2013.
- [2] 騒音の基礎知識,
<http://www.city.gifu.lg.jp/secure/6589/soukiso.pdf>
- [3] 浅野太, “音のアレイ信号処理 —音源の定位・追跡と分離—”, pp.71-79, コロナ社, 2011.
- [4] 戸田浩, “最新ウェーブレット実践講座”, ソフトバンククリエイティブ, 2005.