アコースティックエミッションによる工具破損の検出*

垣野義昭** リュック・ディ・チョン*** 小林昌彦†

In Process Detection of Tool Breakage by
Making Use of Acoustic EmissionYoshiaki KAKINO, Luc Dieu CHUONG
and Masahiko KOBAYASHI

The in process detecting method of the cutting tool's breakage has been investigated by making use of acoustic emission. The following results have been obtained. (1) Acoustic emission was detected mainly in the frequency ranges below 100 kHz for a case of normal cutting and a case when the chips cling to the machine, while for the case of tool breakage, acoustic emission was detected mainly at

100-300 kHz. (2) By detecting the acoustic emission of higher than 100 kHz, it was possible to detect tool breakage even for interrupt cutting. (3) The amplitude of the detected acoustic emission was approximately proportional to the second order root of the surface area of the breakage. (4) The proper positions of the detector for the machine tools used in these experiments were the tool post for the lathe, the spindle head for the milling machine and the quill for the drilling machine.

Key words: acoustic emission, cutting tool breakage, in process detection.

1. 緒 言

切削加工の自動化のためには工具破損の検出がきわめて重要であることはいうまでもない。近年これについてのさまざまな試みが非常に精力的に行われている。たとえばその主な試みとして振動¹⁾、切削力²⁾、電力消費量³⁾、仕上面粗さの変化⁴⁾などを利用するものがある。

しかしながら、これらの方法にはそれぞれ一長一短があり、実用上の問題が非常に多い。その第一の理由は信頼性の問題であり、第二は工作機械または工具の構造に特別な工夫を必要とし、切削状態に悪い影響を与える。第三に経済性の問題がある。第四にほとんどの方法は連続切削には適用できても、断続切削には適用が困難である。

そこで本研究においては、これらの問題が比較的少ないアコースティックエミッション（以下AEと略す）を用いて工具破損を検出する方法について研究することとした。AEによって摩耗を主とした工具損傷を検出できる可能性があることは既に岩田らによって報告されている⁵⁾。

本研究においては、まず工具破損時と正常切削時に発生するAEの基本的な性質を調べるために種々な材料を種々な工具で旋削し、そのときに発生するAEの周波数解析を行った。次に工具破損の大きさとAE信号の大き

さの関係を調べるために、平削り盤を用いて実験を行った。最後に機種の異なる3台の工作機械についてそれぞれに適したAEセンサの配置場所を検討した。

2. 実験装置と方法

2.1 正常切削時と工具破損時に発生するAEの周波数解析

切削加工中に発生するAEの基本的な性質を調べるために一般によく使用されている工業用材料10種を各種の切削工具11種を用いて切削した。実験に用いた材料の組成と硬さを表1に示す。

AEの周波数解析に用いた実験のセットアップと信号処理の概略を図1に示す。工具ホルダ後端に取付けたAEセンサAによって検出した信号をプリアンプとディスクリミネータに内蔵されているアンプで40dB増幅し、デジタルメモリーに記憶する。正常切削時には手動でデジタルメモリーの外部トリガを作動させ、記憶の更新をとめる。工具破損時には、工具ホルダ側面に取付けたAEセンサBによって検出した信号を同様に40dB増幅後、バンドパスフィルタを通して100kHz~1MHzの成分のみを取出し、これを検波した信号をデジタルメモリーの外部トリガ信号として用いた。いずれの場合もデータのサンプリング間隔は0.2μsで8ビットで2048個記録した。これを20msの間隔で呼び出し、リアルタイムアナライザを用いてパワースペクトルを求めた。

実験に用いた主な測定装置は次の通りである。

○ AE関係

センサ: PZT 圧電素子 (NF 回路設計ブロック製)

* 原稿受付 昭和54年7月16日。昭和54年度精機学会春季大会学術講演会(昭和54年3月28日)にて発表。

** 正 会 員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

*** フジテック(株)(茨木市庄1-28-10)

† 久保田鉄工(株)(大阪市浪速区船出町2-22)

表1 実験に使用した各種材料の組成と硬さ

(単位: %)

材 料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Co	その他	硬さ (H _B)
S 48 C	0.50	0.24	0.84	0.018	0.023	0.01	0.02	0.11	—	—	—	440
S 15 C	0.17	0.23	0.36	0.08	0.016	0.15	0.09	0.07	—	—	—	120
SK 4	0.99	0.19	0.37	0.018	0.011	0.19	0.08	0.10	—	—	—	293
FC 20	2.78	1.28	0.53	0.17	0.094	—	—	—	0.04	—	—	197
SNCM 8	0.39	—	0.71	—	—	—	1.85	0.87	0.22	—	—	324
SUS 50 B	0.11	0.32	0.85	0.02	0.01	—	—	12.9	—	—	—	249
SUS 304	0.07	0.60	1.63	0.027	0.006	0.04	9.50	18.80	0.11	0.17	—	282
ナイモニック	0.06	0.06	0.04	0.000 4	0.000 4	—	残	19.73	—	0.13	Al 1.41 Fe 1.79	331

材 料	Mn	Cu	Ni	Fe	Al	Sn	Pb	Zn	硬さ (H _B)
黄 銅	0.32	58.39	0.12	0.51	0.49	0.43	2.81	36.95	140

材 料	H	O	N	Fe	C	Ti	硬さ (H _B)
純チタン	0.026	0.063	0.007	0.029	0.009	残	127

図1 正常切削時と工具破損時に生じる AE のパワースペクトル測定用セットアップ

AE 905 S, プリアンプ: AE 911, ディスクリミネータ: AE 921

○ デジタルメモリー: 岩崎通信機製 DM-901

○ リアルタイムアナライザ: ニコレット製 440 A (20 kHz)

実験を行った被削材と工具材種の組合せと切削条件を表2に示す。工具破損時の測定のためにはそれぞれの工具材種に応じてできるだけ工具破損を起こしやすい条件を選んで、破損しにくい工具材種の場合には幅20 mmのみぞを付けた被削材を切削した。

2.2 工具破損の大きさと AE 信号の大きさの関係

この実験では被削材を構造用炭素鋼 S 48 C に限定し、これを2種類の超硬工具 P 10, P 20 で切削した。この実験は切削加工中に生じた工具破損と AE 信号の関係を厳密に検討しやすい平削り盤を用いて行った。すなわち1回切削するごとに、テーブルの運動を止め、工具の状態を観察し、刃先部に異常が生じた場合には顕微鏡撮影した。この作業を工具が破損するまで繰返した。工具に小さなチップングが生じた場合には顕微鏡を用いて破損した表面積を測定し、大きな破損が生じた場合には朱肉

表2 実験に用いた切削条件

a) 被削材を変えた場合 (正常切削)

b) 工具を変えた場合 (正常切削, 工具破損)

被 削 材	工 具	切削速度 (m/min)	切込み (mm)	送り (mm/rev)
S 48 C	P 20	120	2.0	0.4
S 15 C	P 20	120	1.0	0.32
SK 4	P 20	100	1.0	0.315
FC 20	P 20	120	1.0	0.32
SNCM 8	P 20	120	1.0	0.32
SUS 50 B	P 20	100	1.0	0.4
SUS 304	P 20	70	1.0	0.32
黄 銅	P 20	120	1.0	0.315
純アルミニウム	P 20	120	1.0	0.315
チタン	K 10	70	1.0	0.4
ナイモニック	P 30	40	1.0	0.2

被 削 材	工 具	切削速度 (m/min)	切込み (mm)	送り (mm/rev)
S 48 C	P 10	120	1.5	0.4
	P 20	120	2.0	0.4
	P 30	100	2.0	0.4
	P 40	80	2.0	0.4
	M 10	120	1.5	0.4
	M 20	120	2.0	0.4
	K 10	120	1.5	0.4
	K 20	100	2.0	0.4
	サーメット	160	2.0	0.4
	セラミック	20	1.5	0.63
	SKH 4	36	1.5	0.36

を付けた破損面を紙におしあてて転写させて表面積を測定した。

工具ホルダの後端に取付けたセンサによって検出した AE 信号はプリアンプとディスクリミネータに内蔵されている アンプで 40 dB 増幅し、通過帯域幅 100 kHz~1 MHz のバンドパスフィルタを通し、さらに包絡線検波を行ってからデータレコーダ (TEAC R 410, 公称周波数範囲 DC~5 kHz) に収録した。これをステレオシノに再生し、その大きさを読みとった。

切削条件としては、できるだけ工具が破損しやすい条件を選んで実験した。また大きさの異なる破損を生じさせるために、切削速度、送り、切込みを下記の条件で適当に組合わせて切削した。

切削速度: 13, 22, 28 m/min

切 込 み: 1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm

送 り: 0.4, 0.65, 0.8, 1.0 mm/stroke

2.3 センサの取付場所

センサの取付場所によって工具破損時に検出される AE 信号にどの程度の差があるかを調べるために、次の代表的な 3 種類の工作機械を用いて実験を行った。

○旋盤 (西ドイツ VDF 高速旋盤 S 500)

ベッド上の振り: 520 mm, 最大心間距離: 1 000 mm, 主軸動力: 15 kW, 最大主軸回転数: 3 030 rpm

○フライス盤 (日立精機 MK 3)

ストローク: X 850 mm, Y 350 mm, Z 500 mm, 主軸動力: 19 kW, 最大主軸回転数: 1 500 rpm

○ボール盤 (吉田鉄工所 YUD-650)

テーブルの移動距離: 200 mm×570 mm, 主軸動力: 3.7 kW, 最大主軸回転数: 1 500 rpm

実験のセットアップと信号の処理方法は、センサの配置場所と AE 装置を 2 組用いたことを除けば 2.2 節と全く同一である。まず基準となるセンサを各機械について基準位置 (旋盤: 工具ホルダ後端, フライス盤: 主軸頭, ボール盤: 被削材) に取付け、もう一つのセンサをそれぞれの工作機械に特徴的な位置に取付ける (後述の図 7, 8, 9 参照)。工具破損時の AE 信号を同時に 2 か所で検出し、基準位置に取付けたもので検出した AE 信号の大きさと他の位置に取付けたもので検出した AE 信号と比較した。

この実験では被削材として構造用炭素鋼 S 48 C を用いた。その他の切削条件は次の通りである。

○旋削

工具: セラミック, 切込み: 1.5 mm, 送り: 0.8 mm/rev, 切削速度: 20 m/min

被削材: S 48 C, 工具: 超硬 P 20, ゲイン: 40 dB, 切削速度: 120 m/min, 切込み: 2 mm, 送り: 0.4 mm/rev

図 2 正常切削時, 切りくずのからみつき時および工具破損時に検出された AE のパワースペクトル

○フライス削り (正面フライス)

フライス径: 6" (1 枚刃), 工具: 超硬 P 20, 切込み: 1.5 mm, 送り: 1.76 mm/tooth, 切削速度: 40.7 m/min

○ドリル加工

工具: 高速度鋼 SKH 2, 直径: 5 mm, 回転数: 210 rpm, 送り: 手動

(切削送りをかけながらテーブルを手動で水平方向へ移動させ、ドリルを強制的に折損させた。)

3. 実験結果と考察

3.1 正常切削時と工具破損時に発生する AE の周波数解析

構造用炭素鋼 S 48 C を超硬 P 20 で切削した場合の正常切削時と工具破損時に測定された AE を周波数解析して得られた典型的な一例を図 2 に示す。正常切削時には被削材の塑性変形の際に生じる AE が大部分を占めていると考えられるが、この場合には 100 kHz 以下の範囲にのみパワーの大きな成分が存在していることがわかる。切りくずがからみついた時には、正常切削時と比べると AE のレベルは大きくなるが、分布はほとんど変わらない。それに対し、工具破損時には 100~300 kHz の範囲にパワーの大きな成分が存在しており、これは主として工具材料が破壊したときに生じた AE であると考えられる。ただし切削速度、送り、切込みが大になると、すなわち切りくず除去率が大になると、図 2 に示した正常切削時の AE のレベルも高くなる。

実験を行った範囲のすべての被削材と工具の種類について、正常切削時、工具破損時ともにはば図 2 と同様の結果が得られた。この結果に基づいて図 3 に示す工具破損の検出法を考案した。すなわち、切削加工中に検出さ

図3 AEによる工具破損の検出法

図4 図3の各プロセスにおける信号の状態

れるAE信号を増幅した後、100kHzのハイパスフィルタを通し、包絡線検波して、信号弁別器に入れる。設定したしきい値以上の信号が検出されると弁別器が破損の信号を出力する。2.2節以下の実験はこの結果に基づいている。

この方法には次の利点がある。みぞ付きの被削材を断続切削する場合を考える。すべての周波数範囲のAEを検出すると、一定の切削条件の下ではそれに応じたほぼ一定の大きさのAEが発生しているので、図4(a)のようにこれより大きいAEの発生を感知することにより何

(a) P20

(b) P10

図5 工具破損の大きさと検出されたAE信号の大きさとの関係

らかの異常を知ることができる。しかし変速切削、切込みが変わる切削のように、切りくず除去率が変化する切削の場合には、それに応じてしきい値を変えねばならない。それに対して図4(b)のように100kHz以上のAEのみを検出する場合には、切りくず除去率が変わってもしきい値を変える必要はない。また被削材の種類によってもしきい値を変える必要はない。

3.2 工具破損の大きさとAE信号の大きさの関係

S48C鋼を超硬P10とP20で平削りしたときに生じた工具破損の表面積 S (mm²) と工具ホルダ後端に取付けたセンサによって検出されたAE信号の大きさ V (V) との関係をそれぞれ図5(a), (b)に示す。図中の実線は最小自乗法によって求めた直線である。これらの図にはかなり大きなばらつきが存在するが、二つの直線の勾配は0.49と0.47と、いずれも0.5に近く、検出されたAE信号の大きさ V は工具破損の表面積 S の平方根に比例していることがわかった。このような関係が存在することは実用上大変便利である。すなわち切削加工においては、工作物は粗加工、中仕上、最終仕上の段階に分かれて加工されることが多く、この順に小さな破損までも検出する必要がある。逆に粗加工の場合にはある程度のチップングまでは許容しうることが多い。したがって各加工段階によって検出しなければならない破損の大きさも

上: 刃物台, 電圧 1 V/div, ゲイン 40 dB
下: ホルダ, 電圧 2 V/div, ゲイン 40 dB

図 6 二つのセンサで検出された工具破損信号の大きさの比較

違っているが, 図 5 の関係から検出したい破損の大きさに応じたしきい値を設定することができる。

図 5 においてプロットした点の中で黒丸で示したケースの電圧は最終破損時に検出されたものではない。この場合には最終破損の 1~2 回前の切削時に大きな AE 信号が検出されたが, 工具の表面には注目すべき破損やクラックは視認されなかった。そこで切削を続行したところ, その 1~2 回後の切削において工具が大きく破損したが, この時には小さな AE 信号しか検出されなかった。これは内部にクラックが存在していたためと思われる。

図 5 において半黒印で示したものはクラックが工具の表面に観察されたが, その時には最終破損には至らなかったケースである。これらのいずれの場合においても, 最大の AE 信号が生じたときに最も大きな破損が生じたものと見なして, このときに検出された AE 信号の大きさ V と最終的な破損時の表面積 S を用いてプロットしている。

3.3 センサの配置場所

3.3.1 旋 盤

一例として基準位置 (工具ホルダ後端) と刃物台上に取付けた二つのセンサで検出した工具破損時の AE 信号を図 6 に示す。基準位置である工具ホルダ後端ではゲイン 40 dB で 3.98 V の信号が得られ, 刃物台ではゲイン 40 dB で 1.2 V の信号が得られた。これに用いた AE 測定装置の感度は同一ではないので, 同一の箇所に二つのセンサを取付けて比較実験を行ったところ, 基準位置に取付けたものの方が 27% だけ感度が良かった。これらのことより基準位置で得られる信号の大きさを 100 とすると, 刃物台上で得られた信号の大きさは 38 となる。

同様の方法によって各所に取付けたセンサによって検出された工具破損時に得られる信号の大きさを比較したところ, 図 7 が得られた。すなわち, センタ (C) では 3.6, 心押台 (D) では 1.3, 主軸台 (E) では 2.1, 往復

A: 基準位置

図 7 旋盤におけるセンサ位置と得られる工具破損時の AE 信号の大きさの関係

A: 基準位置

図 8 フライス盤におけるセンサ位置と得られる工具破損時の AE 信号の大きさの関係

台 (F) では 4.9 の大きさの信号が検出された。ただし, 工具ホルダの後端, 刃物台, 往復台にセンサを取付けた場合には, ほぼ同じ大きさの信号が検出されたが, センサを心押台, センタおよび主軸台に取付けた場合には検出される信号の大きさには変動があった。これは切削点とセンサの間の距離が切削点の移動とともに変化したためであろう。図 7 において検出される信号の大きさは切削点から離れるとともに小さくなり, 接合面を通るとさらに大きく減衰することがわかる。

以上の結果より, センサを工具ホルダ後端に取付けた場合には最も大きい信号が得られるが, 工具交換, 切りくずのからみつきによるケーブルの破損などの問題があるので, 次に大きな信号が得られる刃物台の内部にセンサを取付けるのが実用上有利であろう。

3.3.2 フライス盤

旋盤の場合と同様の方法で測定した工具破損時の AE 信号の大きさとセンサの取付場所との関係を図 8 に示す。基準位置である主軸頭で得られた信号の大きさを 100 として, 被削材では 600, バイスでは 472, テーブルでは 32 の大きさの信号が得られた。この場合には信号の大きさは最大ではないが, 切りくずや切削液が届きにくく, かつ切削点とセンサ間の距離が変わらない主軸頭にセンサを取付けるのが実用上有利であろう。

図9 ボール盤におけるセンサ位置と得られる工具破損時のAE信号の大きさの関係

3.3.3 ボール盤

旋盤の場合と同様の方法で測定した工具破損時のAE信号の大きさとセンサの取付場所との関係を図9に示す。基準位置である被削材で得られた信号の大きさを100とすると、バイスでは27、テーブルでは3.0、クイルでは4.9、主軸頭では1.1の大きさの信号が得られた。この場合にはクイルや主軸頭にセンサを取付けるのが、切りくずからみつきの防止などの点から望ましいが、主軸頭では信号が非常に小さくなるので、クイルが適当であるといえよう。しかしクイルの突出し量に応じて信号の取出し量のケーブルを伸ばす工夫を必要とする。

4. 結 論

アコースティックエミッションを用いて切削工具の破

損をインプロセス検出する方法について研究した結果、次のことがわかった。

- (1) 実験を行った範囲では、正常切削時と切りくずのからみつき時に検出されたAEは主として100 kHz以下の周波数範囲に存在し、工具破損時に検出されたAEは主として100~300 kHzの範囲に存在した。
- (2) (1)の結果に基づいて100 kHz以下のAE成分を遮断して、100 kHz以上のAE成分のみを検出することによって、断続切削においても、工具破損をインプロセス検出することができた。
- (3) 実験を行った範囲では工具破損時に検出されるAE信号の大きさは、破損表面積の平方根にほぼ比例していた。
- (4) 実験を行った機械については、旋盤の場合は刃物台、フライス盤の場合は主軸頭、ボール盤の場合はクイルがセンサの配置場所として適当であった。

参 考 文 献

- 1) 例えば、能 明彦ほか：切削加工における工具欠損検出器，東芝レビュー (1977-2) 120.
- 2) W. Koenig: Automate Detection of Tool-breakage in Turning Operations, presented at the Meeting of STC "Cutting" of CIRP, (1978).
- 3) 塩田泰仁ほか：電力監視による加工状態のリアルタイムの認識，昭和50年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1975) 183.
- 4) 佐田登志夫ほか：工作機械の適応制御のためのインプロセス測定法，精密機械，38, 10 (1972) 788.
- 5) K. Iwata & T. Moriwaki: An Application of Acoustic Emission Measurement to In Process Sensing of Tool Wear, Ann. CIRP, 26, (1977).