AE 信号による断続切削時の初期欠損 の検出 (第 1 報)*

——二次元断続切削時の AE 計数率と振幅分布について——

北 野 彰 彦** 中 村 示*** 山 本 明†

Detection of Initial Fracture of Tool Edge by AE Signal (1st Report)
—AE Count Rate and Amplitude Distribution in Orthogonal Interrupted Cutting—

Akihiko KITANO, Shimesu NAKAMURA and Akira YAMAMOTO

In the usual detecting method of initial fracture of tool edge by AE signal, the burst AE signal over a threshold level has been employed for detecting tool fracture in metal cutting. However, it is uneasy to pick up only the AE signal caused by tool fractures among those which are generated from the region near cutting edge. In this study, the orthogonal interrupted cutting has been carried out and some AE parameters; AE count rate, accumulative count and amplitude distribution; have been measured in order to obtain the relations between initial fracture of tool edge and AE parameters and to confirm the relations between initial fracture of tool edge and disengage angle. As the result of experiment, it has found out to detectable the initial fracturing state of tool edge by AE parameters. In addition, it is able to keep away the misdetection by the shock of interrupted cutting or chip in this measuring method.

Key words: acoustic emission, tool fracture, interrupted cutting, metal cutting, detection of tool fracture, amplitude distribution

1. 緒 言

これまで初期欠損に及ぼす離脱角の影響について、切削実験¹⁾や光弾性実験によって工具刃先に作用する応力を求めたり、有限要素法による応力解析によって被削材内の応力分布を求めたりして調べた結果²⁾、次のようなことが明らかになった。すなわち、二次元断続切削時における初期欠損は主として離脱時に起こり、しかも、ある特定の範囲の離脱角のときに顕著に表れる。また、そのときの工具すくい面に作用する切削抵抗は主に垂直分力のみとなることがわかった。他方、有限要素法による被削材内部の応力解析によって、離脱角が0°のとき、離脱端面付近に負のせん断断面が発生し、そのときの切りくずは定常切削時とは異なった方向に成長することがわかった²⁾。そのために工具刃先が離脱時に初期欠損を起こしやすくなるものと考え

られる。

しかし、断続切削時の初期欠損は突発的に起こるので、その予測、検出は非常に困難であり、また、自動化の進んでいる最近の工作機械や無人生産システム(FMS)においては、工具刃先の欠損がそれらの経済性や生産性に重大な影響を与えるため、工具刃先の欠損機構の解明とともに、そのインプロセス検出も極めて重要な課題となっている。

この刃先欠損のインプロセス検出法としてはこれまでに、ITVカメラ³⁾や目視によって工具刃先や加工面を直接観察する方法と、切削力、切削温度、振動⁴⁾、切削音、負荷電流⁵⁾、仕上面粗さ、光沢などによって検出する方法などが考えられているが、いずれの方法も一長一短があり、また、断続切削時には利用できないものなどもあり、その検出法の確立が切望されている。

ところで、原子炉や化学プラントなどの高圧容器の疲労破損などの各種割れの発生とその進行の探知⁶⁾などに威力を発揮しているアコースティックエミッション(以下 AE 信号という)が工具刃先の欠損検出にも適用し得るという報告も数多くあり^{7)~9)}、最近その実用化も図られ、工具刃先欠損検出器なるものが商品化

* 原稿受付 昭和 60 年 1 月 14 日、昭和 59 年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和 59 年 10 月 1 日)にて発表

** 学生会員 大阪大学基礎工学部(現、東レ(株):大津市園山 3-2-1)

*** 正 会 員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山町 1-1)

† 正 会 員 近畿大学理工学部(東大阪市小若江 3-4-1)

Fig. 1 Measuring set-up of AE signal in orthogonal interrupted cutting

されている。しかし、これらの商品では工具欠損に伴う AE 信号を検出する方式で、あるしきい値を越えるパルスが現れた時を欠損時と判断しており、その値の設定は勘と経験に頼らざるを得ず、また、断続切削時や切りくずの衝突などによる信号や電氣的ノイズなどによっても誤動作する恐れが多分にある。

そこで、断続切削時の工具刃先の初期欠損を AE 信号によってインプロセス検出することを目的とし、AE 信号の全計測数、計数率、振幅分布などを計測するとともに、工具刃先の欠損状態や切りくず形状の変化なども観測し、工具刃先の欠損状態を検出し得る基準を求めるための基礎的実験を行った結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

文献 1) の図 2 に示したような形状・寸法の被削材 (熱間圧延軟鋼板 SPHC, 3.2 mm) を試料ホルダを介して旋盤主軸に固定し、被削材の外周端面を断続二次元切削する方式で実験を行った。切削部の板厚は 1 mm とし、離脱角 D_e は $+60^\circ$ より -60° まで 15° おきに変化させた 9 種類のものを使用した。また、文献 10) で明らかにしたように、食いつき時の初期欠損は工具の刃元より食いつくときよりも、刃先より食いつくときの方が起こり難いので、食いつき時の初期欠損の影響を少なくするため、食いつき角は 0° とし、常に刃先より食いつくようにした。さらに、使用する工具の材質は工具刃先の摩耗の影響を少なくするためと、工具刃先を欠損しやすくし、実験時間を短くするために、主に超硬合金の P 10 を用いることにし、刃先形状はすくい角 $\alpha=10^\circ$ 、逃げ角 $\gamma=10^\circ$ 、工具角 $\beta=70^\circ$ とした。

その他の切削条件は主として切削速度 $V=60$ m/min, 切込み $t=0.025$ mm/rev, 切削幅 $b=1$ mm (板厚) 一定とした。

AE 信号の計測は図 1 に示すような計測システムを用いた。すなわち、AE センサ (AE-905 D) は工具シャンクの刃先に近い側面部に圧着し、その出力をプリアンプ (AE-911) に入力し、20 dB 増幅するとともに、100 kHz のハイパスフィルタを通し、その出力をディストリミネータ (AE-921) に入力する。ここでも 20 dB 増幅するとともに、1 MHz のローパスフィルタを通し、モニタ信号と検波平均値信号を得る。モニタ信号はカウンタとアンブリチュードディテクタ (AE-971 A) に入力する。カウンタでは 75 dB 以上の AE 信号パルスを計数するようにした。アンブリチュードディテクタでは AE 信号を高速 Log A/D 変換し、ピーク値やサンプル値を求め、それらの値に比例したパルス列を出力する。このパルス列をディストリビューションアナライザ (AE-963) に入力し、AE 信号の振幅分布を求める。その結果はシンクロスコープまたは X-Y レコーダで表示する。シンクロスコープでは最小 1 s おきの振幅分布を表示し、X-Y レコーダでは 10 s おきの振幅分布の変化が得られる。シンクロスコープ上に表示される振幅分布は 2 コマ/s で連続的に写真撮影を行って、その分布を求める。その一例を図 2 に示す。

一方、データレコーダに記憶された検波平均値出力は必要な所をいったんウエーブメモリー (WM-840) に移し、X-Y レコーダで記録することができる。

実験は毎回刃先を研削仕上したチップを用い、約 15 s 間種々の切削条件で断続二次元切削を行い、そのと

Fig. 2 Example pattern of amplitude distribution of AE signal

Fig. 3 Relation between disengage angle and fracturing rate of tool edge

きの AE 信号を計測するとともに、切削終了後、工具刃先の欠損状態を観察・測定し、また、生成された切りくずの形状などについても観察した。

3. 実験結果および検討

3.1 離脱角による欠損率の変化

前記の切削条件で 10 s 間断続二次元切削（断続切削回数 80 回）を行い、後述のような方法で AE 計数率と AE 信号の振幅分布を計測し、その結果より、工具刃先の欠損時期を判定した。そして、工具刃先が欠損するまでの断続切削回数で工具刃先の欠損率を求め、この欠損率 f と離脱角 D_e の間の関係を求めた結果を図 3 に示す。

なお、同図は同一実験を 10 回行い、平均値を求めたものである。この結果より離脱角 $-15 \sim 30^\circ$ の間では欠損率は 100% 近い値となり、工具刃先はほとんど完全に欠損しているのに対し、 -45° 以下または $+45^\circ$ 以上の離脱角のときにはほとんど欠損しないことがわかった。なお、この結果は文献 1) で明らかにしたものと非常によく似ている。

Fig. 4 Variation of total counts of AE signal in orthogonal interrupted cutting

3.2 AE 信号の計数率

断続切削中に発生する AE 信号の中には、加工物が切りくずとして塑性変形している領域や工具刃先部表面と加工面や切りくずとの摩擦面で発生する AE 信号と、切りくずが工具や加工物に衝突する時や断続切削に伴う機械的衝撃などにより発生する AE 信号や、工具刃先部に発生するき裂や欠損に伴う AE 信号などが混在している。

これらの信号の中で、刃先部の欠損やき裂の発生に伴うものや切りくずの衝突などにより発生する信号は突発的であるのに対し、他のものは切削継続中常に連続的に発生するものである。さらに、この信号は刃先部での切削現象に伴う全情報を含んでいるものと考えられる。

そこで、主としてこの連続的に発生する AE 信号に注目して、その信号のパルス数を計測し、工具刃先の欠損状態と AE 信号の全計測数や計数率との間の関連を調べてみた。

図 4 は離脱角 $D_e = 30^\circ$ で約 13 s 間、断続切削を行ったときに発生する AE 信号の内、信号レベル 45 dB 以上の AE 信号の全計測数の時間的変化を示したものである。同図で、白丸は最初から工具刃先がある程度欠損した工具（逃げ面の欠損幅最大 0.2 mm 程度）で切削した時に得られた結果であり、黒丸は全く新しい、刃先の鋭い工具で切削した時のものである。最初から工具刃先に欠損のある場合の全計測数 N は時間の経過とともにほぼ一様に増加しており、その時の刃先の欠損状態はほとんど変化していなかった。他方、新し

Fig. 5 Variation of AE counts by fracturing state of tool edge at $D_e = -15^\circ$

い工具で切削した場合には、切削初期は時間の経過とともに全計測数 N の増加率は大きくなり、切削が進行し、工具刃先が欠損し始め、欠損部が成長するに従って、最初から欠損した工具を用いたときとほぼ同じような増加率となり、図示のように2本の線はほぼ平行となることがわかった。

次に、図4に示したような実験結果より、切削終了時から5s前までの5s間に発生する45dB以上のAE信号の全計測数 n の時間的変化を求めた結果を図5~7に示す。これらの図では実験値はそれぞれ1本の直線で表され、その直線の傾き角は計数率に相当するものである。

図5は離脱角 $D_e = -15^\circ$ におけるもので、S1は工具刃先が全く欠損しなかった場合を示し、S0, B0は微小な欠損が表れたときで、B1, B2, B3, B4となるに従って欠損部の大きさが大きくなった場合を示している。図6は $D_e = -30^\circ$ のときに対するものであり、S1, S2, S3はほとんど欠損が見られなかったときのものを示し、B0は微小な欠損が見られたときに対するもので、B1, B2となるに従い、欠損部が大きくなった場合を示している。

図7は $D_e = -45^\circ$ のときのもので、図5, 6の場合と同様に、S1, S2, S3は欠損が見られなかったときを示し、S0, B0は微小な欠損が表れたときを、B1は欠損部が少し大きくなったときのものを示している。

これらの図より、AE信号の計数率がS0またはB0の値（以後この値を臨界計数率という）を境にして、この値より大きい計数率のときは工具刃先が欠損しており、小さいときは未欠損であるということがわかつ

Fig. 6 Variation of AE counts by fracturing state of tool edge at $D_e = -30^\circ$

Fig. 7 Variation of AE counts by fracturing state of tool edge at $D_e = -45^\circ$

た。

3.3 臨界計数率の離脱角による変化

上述のように臨界計数率によって工具刃先の欠損の状態を判定できるものと考えられる。しかし、本実験に用いた被削材の形状では、離脱角の値によって切削長さ（円弧の長さ）は宿命的に変化することは避けられない。

そのために、ある一定の切削時間中に発生するAE信号の発生数は実切削総長さが変化するので、当然変化するものと考えられる。

そこで、基準切削長さ当たり（ $D_e = 0^\circ$ のときの切削長さを基準とする）の全計測数に変換して表示してみると、図8に示すように、離脱角 D_e の値には無関係

Fig. 8 Relation between total counts of AE signal per unit cutting length and passage time of cutting

Fig. 9 Variation of amplitude distribution of AE signal as tool edge has fractured during cutting

で、時間 t に比例して増加するようになる。なお、この図は新しい、鋭い工具刃先で切削し、全く欠損を生じなかったときのものを示している。

これらの図より、切削中に発生する AE 信号の基準切削長さ当たりの臨界計数率は離脱角 D_e によっては変化しないので、あらかじめ、微小な欠損のある工具を用いて、ある切削条件のもとで、予備切削を行いこの基準臨界計数率を求めておけば、この値から工具刃先の欠損を検出することができるものと考えられる。

3.4 AE 信号の振幅分布

離脱角 $D_e = -15^\circ$ のもとで断続二次元切削を行ったときの AE 信号の振幅分布の時間的変化を求めた結果を図 9～11 に示す。図 9 は全く新しい、鋭い刃先の工具で切削したとき、次第に工具刃先が欠損し始め、欠損部が成長していく場合のもので、切削開始後 2 s における振幅分布では、振幅 A は 55 dB 位の所に高いピークがあり、50 dB 付近に谷が見られるが、切削の進行とともに、55 dB の所にあったピークは小さくなり、

Fig. 10 Variation of amplitude distribution of AE signal as tool edge has not fractured during cutting

Fig. 11 Variation of amplitude distribution of AE signal as tool edge has fractured in advance

50 dB の所の値が次第に大きくなるとともに、45 dB の振幅のものが増大していることがわかる。また、図 10 は新しい、鋭い刃先の工具で断続二次元切削を行っても、全く工具刃先に異状が現れなかったときの振幅分布の時間的変化を示したもので、振幅分布を表す曲線のパターンはほとんど変化していないことがわかる。他方、最初から工具刃先にあらかじめある大きさの欠損がある工具で切削し、そのときの欠損部の大きさがほとんど変化しなかったときの振幅分布の時間的変化を示したものが図 11 であり、さきの図 10 のものとは全く異なったパターンとなり、45～50 dB の振幅の所にピークがあり、時間的にほとんど変化していないことがわかる。これらのことから、AE 信号の振幅分布のパターンやその時間的変化の様子によっても、容易に工具刃先の欠損状態を判断することができるものと考えられる。

3.5 AE 信号変動のメカニズム

1) 計数率変動のメカニズム

AE 信号は転位の移動やマイクロクラックの発生

(a) In case tool edge does not fracture yet (b) In case tool edge has fractured

Fig. 12 Examples of cross-section of chip obtained

成長などに伴って発生すると言われているが、図4に示したように、工具刃先の欠損状態により計数率が変化する要因は切りくず形状の変動に伴う切削のメカニズムが変化することにあると考えられる。

図12(a)は全く新しい工具で削ったときの切りくずの断面で、流れ型切りくずであるのに対し、同図(b)は欠損した刃先に対するもので、せん断型切りくずとなっており、カール半径は小さく、切りくずの色はテンパーカラーのやや青みがかった色となっている。このようにせん断型切りくずとなると、せん断角は小さくなり、せん断ひずみは大きくなる。そのために、AE信号の発生数もひずみの増加とともに増大するものと考えられる。

2) 振幅分布変動のメカニズム

次に、工具刃先の欠損状態によって図9, 10に示したように、AE信号の振幅分布状態が時間的に変化する要因について考えることにする。

一般にAE信号の振幅は応力、ひずみ、温度、材料の組織、肉厚など種々の因子の影響を受けることが明らかになっている¹¹⁾¹²⁾。これらの中で、応力とひずみが大きくなれば振幅は大きくなるが、温度が高くなれば振幅は小さくなる。また、組織が粗くなったり、肉厚が大になれば振幅は大になるといわれている。

これらの因子の中で、工具刃先の欠損によって影響を受けると考えられるものは応力、ひずみ、温度で、他のものはほとんど影響を受けないのではないかと考えられる。

応力とひずみは刃先の欠損によって増大し、AE信号の振幅は大きくなるが、切削温度が上昇するため、振幅は逆に小さくなるとうする。これらの効果の中で、温度によるものの方が大きな影響を与えるため、図9,

10に示したような変化をするのではないかと考えられる。

詳細については今後引き続き研究を重ねて行くつもりである。

4. 結 論

従来のAE信号による工具刃先の欠損検出法では、工具刃先が欠損した時に発生するAE信号に着目して、しきい値なるものを設定し、この値以上のAE信号の発生した時を工具刃先の欠損時と判定して来た。しかし、この方法では、このしきい値の設定がむずかしく、経験を必要とし、さらに、断続切削時や切りくずの衝撃によるAE信号や電氣的ノイズなどによっても誤動作するおそれがある。

そこで、切削中に発生する全AE信号によって、その時の切削状態を評価できるのではないかと考え、断続二次元切削時のAE信号の全計測数、計数率、振幅分布などを測定するとともに、工具刃先の欠損状態や切りくず形状などを観測することによって、断続切削時の工具刃先の欠損をインプロセス検出するための基礎的実験を行った。その結果、次のようなことがわかった。

- (1) 切削中のAE信号の全計測数や計数率は新しい、鋭い工具刃先のときは小さい値であるが、工具刃先に欠損が発生し、成長するに従い、これらの値は次第に増加する。
- (2) そこで、加工面に悪影響を与えない程度の小さい欠損発生時の計数率を臨界値としてあらかじめ求めておくことにより、工具刃先の欠損状態をこの値で判定することができる。
- (3) さらに、単位切削長さ当たりの臨界値を考える

と、離脱角による差異がなくなる。そのため、断続切削の影響をほとんど受けないで、欠損状態を正確に評価できるようになる。

- (4) また、AE 信号の振幅分布によっても工具刃先の欠損状態を把握することができる。すなわち、新しく鋭い工具刃先のときは比較的大きい振幅の所にピークがあるが、欠損が進行するに従い、ピーク値は小さい振幅の方に移動するようになる。
- (5) このように工具刃先の欠損状態によって、AE 信号の計数率や振幅分布が特異な変化をするメカニズムは3.5節で述べたように、切りくず生成域のせん断角、せん断ひずみ、切削温度などの因子の影響によって説明できるのではないかと考えられるが、今後詳細に検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 中村 示, 山本 明, 今井 誠: 二次元断続切削による実験的研究——初期欠損に及ぼす離脱角の影響について(第1報), 精密機械, 49, 8 (1983) 1038.
- 2) 中村 示, 山本 明: 初期欠損に及ぼす離脱角の影響について(第2報), 昭和58年度関西地方定期学術講演会講演論文集 (1983) 49.
- 3) 竹山秀彦, 本多庸悟, 関口 博, 高田孝次: 旋削加工の最適化制御, 日本機械学会誌, 73, 619 (1970) 1141.
- 4) 佐田登志夫ほか: スペクトル分析による工具摩耗のインプロセス測定, 昭和49年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1974) 3.
- 5) 塩田泰仁, 比留間道昭: 電力監視によるフライス加工の状態認識, 昭和52年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1977) 31.
- 6) 渡辺哲夫ほか: AE 法による大型圧力容器の欠陥検査システム, 非破壊検査, 22, 12 (1973) 757.
- 7) 垣野義昭, リュック・ディ・チョン, 小林昌彦: アコースティックエミッションによる工具破損の検出, 精密機械, 46, 3 (1980) 344.
- 8) 岩田一明, 森脇俊道, 橋本英文, 柴坂敏郎: アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出, 精密機械, 46, 7 (1980) 875.
- 9) 岩田一明, 森脇俊道, 橋本英文, 柴坂敏郎: アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出(続報), 精密機械, 48, 7 (1982) 933.
- 10) 中村 示, 山本 明, 河村一郎, 今井 誠: 工具すくい面に作用する応力の食いつき角による変化——断続切削における食いつきの研究(第3報), 精密機械, 47, 8 (1981) 962.
- 11) H. L. Dunegan & A. T. Green: Factors Affecting Acoustic Emission Response from Materials, Materials Research & Standards, 11, 3, (1971) 21.
- 12) D. Dilipkumar, V. S. R. Gudimetla & W. E. Wood: Amplitude Distribution of Acoustic Emission, Experimental Mechanics, 19, 12, (1973) 438.

CAD/CAM 標準化推進

通産省は普及著しいCAD/CAM(コンピュータ支援設計・製造)システム業界を一本化して、工業会組織にする構想を固め、準備会を発足させた。CAD/CAM システムは、産業界が競って進めているFA(ファクトリーオートメーション)化の中核になるものだけに、ここ数年需要が拡大、システムメーカの新たな参入も多く、各システム間の互換性問題が叫ばれるなど、ユーザーズに対応するためにも業界の統合化が求められていた。工業界の設立構想は、こうした業界の意思の疎通を図り、情報交換を通じてCAD/CAM システムの入出力形態を含めたシステム全体の標準化を推進するため具体化してきたもので、CAD/CAM 業界やユーザからも早期実現が待たれている。

そもそもわが国のCAD/CAM システムの普及状況を見ると、十数年前から航空、造船、自動車産業など一部の大企業が導入、活用し始めているが、本格的な普及はここ数年である。最近では大型汎用コンピュータを使っ

た大型システムから、ミニコンピュータやスーパーミニコンピュータを使ったターンキーシステム、パソコンを使ったパソコンCADと中小企業でも手軽に導入できるシステムが開発され、導入企業の実態をみても、製造業ではほとんどすべての業種がなんらかの形で利用しているほか、建築・土木や通信・サービス業などでも導入が進んでいる。

こうした需要のすそ野の広がりに伴いシステムメーカやベンダの数も増え、その数は200社を超えるといわれる。しかも、コンピュータメーカから工作機械、精密機器、電気、造船、商社、システムハウス、ソフトハウスなどあらゆる業界が参入しているのが実情で、ユーザの要望に的確に対応するためにも業界の一本化が急務として業界の一部で組織化への取組みが行われたものの、足並みがそろわず立ち消えになったいきさつがある。

(p. 1186へ続く)