アコースティックエミッションを利用した旋削プロセスの監視*

小島 浩二**, 稲崎 一郎***, 三宅 亮一****

Monitoring of Turning Process with Acoustic Emission Signals

by Koji KOJIMA, Ichiro INASAKI, and Ryoichi MIYAKE

Automatic monitoring of the cutting condition is a key technology to increase the reliability of modern machining process. In this study, practical methods which use acoustic emission (AE) signals are proposed to monitor the wear and breakage of the cutting tool and the condition of chip formation in turning process. The signal processing method developed in this study is efficient to measure the amplitude of continuous type AE signal which is closely related to the wear of cutting tool. The tool breakage is detected by monitoring the stepwise increase of AE signal. Formation of the tangled chip is successfully detected by paying attention to the frequency component of the AE signal.

Key Words: Cutting, Automatic Monitoring, Acoustic Emission, Tool Wear, Tool Breakage, Chip Formation

1. 緒 言

切削加工の自動化, 無人化を推し進めるうえで, 切削状態および工具の自動監視技術が非常に重要となっている。本研究では, アコースティックエミッション(以下 AE と略す)を採り上げ, 切削中に発生する AE 信号から工具の摩耗や欠損を検出するアルゴリズムの開発を第 1 の目的とした。AE 信号を利用してインプロセスで工具摩耗および欠損を検出する可能性はすでに報告されている^{(1)~(4)}。しかし各種外乱に対する信頼性の点で問題が残されており, 特に摩耗監視においては実用化のうえで多くの問題点があるのが現状である。

本研究では, 生成する切りくず形態の変化が AE 信号に大きく影響を及ぼすことを考慮し, この影響を取り除くための AE 信号の処理方法を開発し, AE 信号を利用して工具摩耗を間接的に監視する方法の信頼性を高めることを試みた。次いで工具切れ刃の欠損の検

出, 仕上面に傷をつける有害な切りくずの形成, 安全上問題となる被削材にからみつく連続切りくずの形成などを AE 信号を利用して判別することを試み, 切削プロセス監視における AE の多目的利用の可能性を検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図 1 に示す。工具シャンクに直接取付けた AE センサにより検出した AE 信号をプリア

図 1 実験装置

* 昭和 60 年 10 月 2 日 第 63 期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和 59 年 10 月 31 日.
** 学生員, 慶応義塾大学大学院(〒223 横浜市港北区日吉 3-14-1).
*** 正員, 慶応義塾大学理工学部.
**** 正員, 立石電機(株)(〒616 京都市右京区花園土堂町 10).

ンプで増幅し、外部からの振動・騒音などのノイズを取り除くために、100 k~1 MHz のバンドパスフィルタを通し、全波整流した〔これを AE 信号振幅 AE (V) とする〕。検出信号を 200 μ s のサンプリング間隔で 4 000 点サンプリングし、コンピュータに入力して処理した。また FFT を用いて AE 信号の周波数分析も行った。実験に使用した旋盤は主軸動力 2.2 kW で、これによって S 45 C 材を外周切削した。工具は超硬 P 20 のチップブレーカ付四角形スローアウェイチップ (6, 6, 6, 6, 15, 15, 0.4) を用いた。

3. 工具フランク摩耗幅と AE 信号の関係

3.1 AE 信号の処理方法 図 2 は、AE 信号を 1 kHz の時定数で全波整流した AE 信号振幅 AE (V) の波形である。この図のように AE 信号は定常な連続形 AE の上にレベルの高い突発形 AE が重なった形となっている。前者はすくい面と切りくずおよび逃げ面と被削材の間の摩擦、またせん断領域におけるせん断変形などにより発生し、後者は切りくずが切断あるいは工具と衝突する際に発生するものと考えられる。したがって、工具の摩耗は主として連続形 AE に影響を与えと考えられる。そこで工具の摩耗状態を監視するには、突発形 AE を取り除き連続形 AE だけのレベルを求めなければならない。

著者らの一部は、これまで AE 信号のレベルを求めるために AE (V) をローパスフィルタ 1 Hz に通し、これを AE 信号振幅レベル $\overline{AE}(V)$ として工具摩耗と関連づけることを試みた。しかし、この処理方法は図 2 に示してあるように、発生する切りくず形態の違いにより突発形 AE のレベルおよび発生頻度が異なると大きく影響を受けてしまう欠点があった。このような

図 2 AE 信号振幅波形と確率密度関数

突発形 AE の影響はローパスフィルタの実用的な遮断周波数範囲では取り除くことができない。そこで本研究では切りくず形態の変化の影響を除去するために、AE 信号振幅の確率密度関数を求め (図 2), それが最大となる値を求め、 $\overline{AE}(M)$ とした。これによって、連続形 AE の情報をより確実に取り出すことが可能となった。

3.2 切削条件が AE 信号に及ぼす影響 数種類の異なったフランク摩耗幅をもつチップを用意し、各切削条件と $\overline{AE}(M)$ との関係を求めた。図 3 はその一例で、切削速度の影響を示している。この図 3 より切削速度と $\overline{AE}(M)$ の間には指数関数的な関係のあることがわかる。このように切削速度が AE 信号に大きく影響を及ぼす原因として、切削速度に比例して材料の歪速度が増加することや、すくい面と切りくず、逃げ面と被削材の摩耗速度が増加することが考えられる。フランク摩耗が進行した工具では、 $\overline{AE}(M)$ が増大している。

図 4 は、送りと $\overline{AE}(M)$ の関係を示したものである。摩耗幅が小さい場合に AE 信号は送りにはほとんど影響を受けないのに対し、摩耗が進行した工具では送りが小さいほど $\overline{AE}(M)$ が大きくなっている。送りが大きいほど切削抵抗が増え、AE 信号は大きくなるように思われるが、図 4 の結果は逆になっている。この理由の一つとして被削材の加工硬化の影響が考えられる。送りが小さいほど切削厚みは小さく、切削によって加工硬化された層を切削する割合が増加することが一因としてあげられる。

次に切り込みと $\overline{AE}(M)$ の関係を示したのが図 5 である。切り込みが 1 mm 以上では、切り込みの増加に伴ってわずかではあるが $\overline{AE}(M)$ も増大するのに対し、1 mm 以下では切り込みが小さくなっているに

図 3 切削速度と AE 信号の関係

もかわらず逆に $\overline{AE}(M)$ は大きくなっている。このような傾向は切り込み 0.5 mm 以下で更に顕著となる。

以上の結果を要約すると、AE 信号は工具摩耗だけでなく、切削速度、切り込み、送りなどの切削条件の影響を受け、その程度は工具摩耗が進行するほど著しくなるといえる。これらの結果は、AE 信号を利用して工具の摩耗状態を間接的に監視するうえで、適切な切削条件が存在することを示唆している。このような切削条件を設定する場合、AE 信号の変化が摩耗に対して敏感となるように、切削速度は大きく (図 3)、送りは小さくしたほうがよい (図 4)。また、切り込みについては、これが小さいほうがよいが、あまり小さいと切り込み深さの変動による誤差が大きくなる恐れがあるので (図 5)、実用上はノーズ半径よりも若干大きくしたほうがよいと考えられる。上述のように設定された条件で時々試し切削を行い、工具摩耗の状態を監視する方法が提案される。工具と被削材の接触開始直後は AE 信号も非定常であり、摩耗を推定するためには定常化した後の AE 信号を検出せねばならない。このため摩耗監視のための試し切削には、少なくとも 5～10 s 程度を要する。

3.3 フランク摩耗幅と AE 信号の関係 各種の切削速度において、フランク摩耗幅 VB と $\overline{AE}(M)$ と

図 4 送りと AE 信号の関係

図 5 切り込みと AE 信号の関係

の関係を示したのが図 6 である。この図 6 から、 VB と $\overline{AE}(M)$ の間にはよい相関があり、切削速度が大きいほど AE 信号は工具摩耗の影響をより敏感に受けるようになることがわかる。しかし実際には、多数回の実験を行うと、以下に示すように、見かけの切削条件を同一にしても、AE 信号と工具摩耗の間にはかなりのばらつきが生ずる。

図 7 は同一の切削条件においての $\overline{AE}(M)$ とフランク摩耗の関係を示したものである。被削材と工具もその成分と形状を同一としている。それにもかかわらず図 7 に示した程度のばらつきが生じている。この原因としては、被削材の性質の違いが最も大きいと考えられる。被削材は S 45 C と公称されているが硬度には明らかに差があり ($H_{RB}=87.6\sim92.1$)、硬度の高い材料を切削した場合の AE 信号が大きいたことが確認された。このような被削材のわずかな性質の違いが大きく AE 信号に影響を及ぼすため、本方法の適用にあたっては材料の品質管理がかなり厳密に行われていること

図 6 フランク摩耗幅と AE 信号の関係

図 7 フランク摩耗幅と AE 信号の関係

が要求される。しかし本信号処理方法により、従来の方法、すなわち単にAE信号振幅レベル $\overline{AE}(V)$ を用いる場合より、突発形AEの影響を取り除いてフランク摩耗とより良い相関関係を得ることが可能となった。

3・4 AE信号の周波数特性 図8(a), (b)にフランク摩耗幅がそれぞれ20, 200 μm の工具で切削した場合のAE信号のパワースペクトラムを示す。これらの図より、切削によって発生するAE信号は約350 kHzまでの周波数に大きな影響をもっていると考えてよい。工具摩耗が進行すると全体的なレベルは増すが、特に100~200 kHzの成分の増大が大きいことがわかる。そこで、バンドパスフィルタを通して周波数帯域別に $\overline{AE}(M)$ を求め、フランク摩耗幅VBに対してプロットしたものが図9である。この図から特に100~150 kHzの帯域が他の帯域に比べて摩耗幅の影響を敏感に受けていることがわかる。

4. AE信号による工具欠損の検出

溝付き丸棒を切削することなどにより各種の規模の欠損を生じさせた工具を数種用意し、同一条件で切削

図8 AE信号のパワースペクトラム

した時の $\overline{AE}(M)$ との関係を求めた。ただし実際の切り込み深さは、欠損による刃先後退量だけ設定切り込

図9 フランク摩耗幅とAE信号の関係

図10 欠損面積とAE信号の関係

(a) 円弧形切りくず

(b) うずまき形切りくず

(c) 切りくずのからみつき

図11 パワースペクトラムの面積比

みより減少させている。これは実切削中に欠損が生じた場合に対応させるためである。

工具刃先の欠損した部分をすくい面に直角な方向から見て単純な三角形と見なした場合の欠損面積と $\overline{AE}(M)$ の関係を図 10 に示す。図 10 には 2 種類の切削速度の結果が示されているが、いずれの場合にも、欠損した工具で切削すると AE 信号は大きくなり、欠損面積と $\overline{AE}(M)$ の間には良い相関が得られている。欠損面積が約 0.05 mm^2 の工具を用い、切削速度 162 m/min で削った場合、 $\overline{AE}(M)$ がかなり大きくなっているが、これは切りくずが連続となり、被削材あるいは工具にからみついたためである。以上の結果より、工具欠損が生ずると $\overline{AE}(M)$ は段階的に上昇するので、この傾向をとらえることにより、工具欠損の検出が可能である。

5. 切りくず形態の判別

工具摩耗が進行すると切りくずが次第に正常な円弧形からコイル状、更にはうずまき形に変化していく場合が多い。うずまき形切りくずは仕上げ面に傷をつけるという問題を生ずる。また、条件の設定によっては切りくずは連続形となり、工具あるいは被削材にからみつく。このような事態も工具摩耗、工具欠損と同様に検出しなければならない。

うずまき形切りくずおよび切りくずのからみつきは AE 信号が急増することにより検出できると思われるが、切削条件が異なるとそのレベルも異なるので判別が不可能となる。そこで本研究では AE 信号振幅のレベルではなく周波数成分にも注目した。切りくずが円弧形、うずまき形、またからみついた場合の AE 信号振幅のパワースペクトラムから、 100 Hz ごとのパワーの全体のパワーに対する比を求めた結果が図 11 で

図 12 パワー比による切りくず形態の判別

ある。また図 11 に、各々の切りくず形態の写真を示す。これらから、うずまき形および切りくずがからみついた場合、低い周波数成分が大きくなっていることがわかる。ただし、AE 信号振幅の DC 成分の影響を受けないように 0 Hz および 5 Hz の成分は省略してある。図 11 から、うずまき形は円弧形に比べ $10 \sim 100 \text{ Hz}$ 、および $100 \sim 200 \text{ Hz}$ の成分が大きくなっているのに対してからみつきが生ずると $10 \sim 100 \text{ Hz}$ の成分だけが大きくなっていることがわかる。そこで、 $(10 \sim 100 \text{ Hz の成分}) / (10 \sim 500 \text{ Hz の成分})$ のパワー比 $R1$ と、 $(10 \sim 100 \text{ Hz の成分}) / (100 \sim 200 \text{ Hz の成分})$ のパワー比 $R2$ を各切りくず形態に対して計算したのが図 12 である。図 12 より、うずまき形は $R1$ が 0.28 以上になることにより、またからみつきは $R1$ が 0.28 以上、 $R2$ が 1.2 以上になることからそれぞれ判別しうることがわかる。円弧形切りくずの場合、 $R1$ が 0.2 付近であるが、これは各パワー比がほとんど等しく、 $10 \sim 500 \text{ Hz}$ の成分に対し $10 \sim 100 \text{ Hz}$ の成分がほぼ $1/5$ になっていることを表している。また、 $R2$ が 1 付近であるのは、 $10 \sim 100 \text{ Hz}$ の成分と $100 \sim 200 \text{ Hz}$ の成分の割合が $1:1$ となっていることを表している。したがって、うずまき形切りくずが生ずると $R1$ が 0.28 以上、切りくずがからみつくと $R1$ が 0.28 以上、 $R2$ が 1.2 以上になるというこれらの境界値は、

図 13 切りくず形態判別装置の構成原理

ほぼ妥当な値であると考えられる。

以上述べた結果を利用し実際に試作した切りくず形態判別装置の構成原理を図13に示した。本装置により、ここで述べた3種類の切りくず形態が実切削中に判別されることが確認された。

6. 結 言

本研究では、AE信号による、旋削プロセスの監視すなわち工具フランク摩耗、工具欠損、切りくず形態などのインプロセス検出を行うことを試み、AEの多目的利用の可能性を検討した。得られた結果を以下に要約する。

(1) AE信号振幅の確率密度関数の最大密度 $\overline{AE}(M)$ を用いることにより、突発形AEの影響を受けないう工具摩耗の状態を推定することが可能となり、摩耗のインプロセス検出の信頼性を高めることができた。しかし被削材性質の相違による信号のばらつきはかなり大きく、ここで提案した方法を適用するにあたっては、被削材の品質管理がかなり厳密に行われてい

る必要がある。

(2) 工具欠損が生じた場合に $\overline{AE}(M)$ は急上昇する。この段階的增加をとらえることにより、工具欠損を検出できる。

(3) うずまき形切りくずおよび切りくずのからみつきなど、実作業上問題となる切りくずの形態をAE信号振幅のパワースペクトラムの面積比により判別することを可能とした。

最後に本研究の遂行にあたり、本学部生 今村圭吾君の協力を得た。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 三輪・ほか2名, 機論, 47-424, C(昭56), 1680.
- (2) 垣野・ほか3名, 精機学会春季大会学術講演会講演論文集, (昭54-3), 39.
- (3) 岩田・ほか4名, 精機学会春季大会学術講演会講演論文集, (昭54-3), 37.
- (4) Asibu, E. K. Jr. and Dornfeld, D. A., *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 103 (1981), 330.

討 論

〔質問〕 森 脇 俊 道〔神戸大学工学部〕

切削加工におけるAE信号の定量的解析と評価は今後さらに重要性を増すと考えられ、その意味で貴重な研究と思う。

(1) AE信号は本研究で検討しておられる切削条件のほかに、被削材材質、工具材質によっても影響を受けると考えられるが、これに関する検討結果があればお教え願いたい。

(2) 切りくず形態によってスペクトルに変化が生じる原因はどこにあるとお考えか。また切りくずの破断周期とスペクトルの間の相関はあるのか。

〔回答〕 (1) ご指摘のように、AE信号は被削材材質、および工具材質によっても影響を受ける。

これまでの実験では、被削材に関してはS45C材のほかにステンレスおよび黄銅の切削を行ったが、AE信号振幅は大きく変化する。工具材質に関しては、各種の被覆工具を比較したが、やはり影響を受ける。したがって本方法の適用にあたっては、これら材質の影響に十分注意する必要がある。

(2) 主として切りくずの破断周期の違いによってスペクトルに変化が生じていると考えられる。連続した切りくずが形成される場合を除いて、両者の間に相関のあることが実験的に確認されている。

〔質問〕 吉田 嘉太郎〔千葉大学工学部〕

AEによる切削現象を知る方法はいろいろ試みられているが、よくまとめられた論文と思う。

(1) 被削材材質、切りくず形状、工具形状によりAEの発生がかわると思うが、それらについてどのように取扱われるか。

(2) とくに摩耗幅(フランク摩耗)をとっておられるが、逃げ面、すくい面を含んだ切削ゾーン、つまり切りくず面積の中で工具刃先と直接接触している面積が関係するようになる。単にフランク摩耗幅だけによる検討で十分か。

また、チップブレーカの形状もAE発生に影響すると思われるが、ご教示願いたい。

〔回答〕 (1) ご指摘された各種因子の影響については森脇氏への回答⁽¹⁾をご参照いただきたい。AE信号の振幅はこれら因子の影響を大きく受けるため、本方法の適用例としては、例えば一定の被削材と工具の組合せに対して、1回めの加工物の信号をマスターカーブとして記憶させ、これと比較して工具寿命を判定する方式が実用的と考えている。

(2) ご指摘のように、AE信号はフランク摩耗だけでなく、すくい面の摩耗にも影響される。特にクレーク摩耗の進行は切りくずの形態を変化させる場合も

あるため、時にはフランク摩耗より大きな影響をもつことも考えられる。しかし本研究では、クレータ摩耗との関連については深く検討していない。ところで工具寿命の判定という問題を実際の立場から考えると、フランク摩耗およびクレータ摩耗のいずれも間接的な判定基準であり、加工物寸法のばらつきの増大、

あらさの劣化、バリの発生などが最も直接的な判定基準と考えられる。したがって今後は、これらの現象との関連を追求していくことが必要と考えている。

またチップブレーカの形状も切りくずの破断特性に影響をもつため、AE 信号にも当然影響を与えられ、考えられるが、本研究の範囲では未検討である。