

素材／工具間における摺動摩擦過程のAE法による オンラインモニタリング技術の開発

若山修一* 楊 明**

1. はじめに

素材／工具間の摩擦は、塑性加工における成形限界や成形精度を支配する重要な因子である。しかしながら、摩擦力の大きさやその変動等の摩擦形態は大変複雑であり、正確に同定することは困難である。特に、実際の加工中に動的に摩擦形態を把握することはほとんど不可能であった。

材料に変形や破壊が生じる際には、それに伴う弾性波が放出される。これはいわば材料の中での地震であり、この地震波（弾性波）を検出することにより、生じた変形や破壊の微視的な形態を動的かつ高感度に知る手法としてアコースティック・エミッション（AE）法¹⁾が利用されている。

摩擦形態のAE法によるオンラインモニタリングの試みは、アメリカ合衆国のデンバー大学を中心とした研究グループや韓国の国立非破壊評価研究所などで行われている²⁻⁴⁾。しかしながら、摩擦形態は供試体や摩擦速度などにより様々に変化し、摩擦力が一定であっても発生するAE信号は様々に異なる。特に、摩擦速度のAE発生挙動に及ぼす影響は大きいと考えられるが、従来の研究ではそれらの相関は明らかになっていない。

そこで、本研究では素材／工具間での摩擦により生じる弾性波を利用して、AE法によりそれを検出し、摩擦力のオンラインモニタリングを試みた。また、微視的な摩擦過程の解明のため、表面粗さや実際の摺動面積の調査も行い、発生したAE信号との相関についての考察を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には深絞り用冷間圧延鋼板SPCEを用い、板厚は0.7mm、表面はショットダル仕上げとした。表面粗さは $R_a = 1.03 \mu\text{m}$ である。また、試験片は、幅20mm、長さ400mmの短冊形とし、圧延方向（L方向）と摺動方向が平行となるように切り出した。

2.2 摺動試験

試験は川崎製鉄(株)千葉技術研究所の摺動試験機を使用して、摺動時の摩擦により発生するAEの計測を行っ

た。試験装置の概略を図1に示す。試験は無潤滑状態と潤滑状態の両方で行った。無潤滑状態の場合には、試験片をアセトンで超音波洗浄して表面の汚れを除去した。また、潤滑状態の場合は、比較的低粘度である鋼板防錆油を 1.5 g/m^2 の厚さで両面に均一に塗布した。なお、使用した潤滑油の粘度は40℃で約15cStである。

摺動試験中の押付け荷重は200～2000N（約20～200kgf）、引抜き速度は実際の塑性加工時と同程度の20、50、100および150mm/sで一定とし、この摩擦過程中的摩擦力（引抜き荷重）および摩擦係数を測定した。

2.3 AE計測¹⁾

材料の破壊に伴うAE信号は1ms程度の持続時間を持つ突発型のパルス信号であり、それらの発生時刻や発生数及びピーク電圧値などをパラメータとして検出し統計的に解析することによって、材料内での破壊現象の微視的形態、すなわち微視割れの発生位置や大きさなどの情報が得られる。

一方、摩擦過程で得られるAE信号は連続型の信号であり、上述のようなパラメータ解析を行うことは困難である。これについての詳細は後述するが、摩擦過程では微視的な音源である凝着部の破壊が同時に多発しており、複数の突発型のパルス信号が常時重なり合っており、結果として連続型のAE信号が得られるものと考えられている。

以上の点から、本研究ではAE信号の実効値電圧（AE RMS）を測定して評価に用いた。AE RMS値はいわば発生したAE信号の単位時間あたりのエネルギーに相当

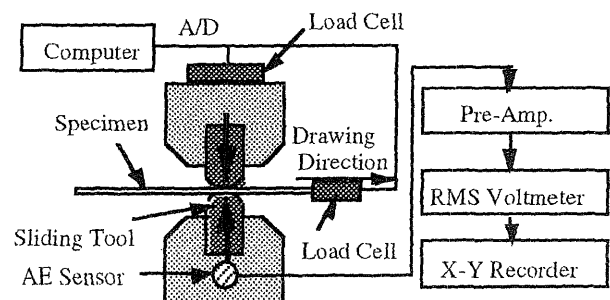


図1 摺動試験及びAE計測システム

する量であり、巨視的に得られる摩擦過程の情報（摩擦力や摩擦係数）と併せて考察することにより、摩擦形態の解明に用いている。

AE 計測の際には環境雑音と信号との分別が重要である。実験室で計測を行う場合には、機器等から発生する機械的及び電気的雑音を極力抑制することができるが、実際の塑性加工中に摩擦形態を AE 法でオンラインモニタリングする際には、環境雑音を抑制することは困難であると考えられる。したがって、環境雑音と AE 信号の周波数特性の差を利用して雑音と AE 信号との分別を行った。すなわち、環境雑音に比べて AE 信号が大きな周波数領域を調べ、その帯域が 150kHz 付近であることが見出されたため、AE センサは共振周波数 150kHz のものを使用し、AE 信号はプリアンプを通して 53dB で増幅し RMS 計測装置で RMS 信号に変換し記録した。

2.4 摺動面積の測定

後述するように、摩擦力の要因と考えられる新生面の凝着について調査するため、摺動試験後の試験片表面状態を光学顕微鏡で観察し、写真撮影を行った。この写真を CCD カメラを用いてパーソナルコンピュータへ取り込み、画像処理プログラムにより二値化して実際の摺動面積を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 摺動試験における AE 信号の発生挙動

図 2 に摺動試験における AE RMS の変化の概略を押し付け荷重、引抜き荷重の変化とともに示す。図のように、摺動開始直後や引抜き荷重（摩擦力）に変化が生じた際に AE 信号のピークが現れる。このことは以前に Carpenter ら²⁾らによって示された摩擦力等の変化時に AE 信号においてピークが現れる現象と同傾向を示した。したがって、AE 信号において摩擦状態の変化を把握するために最も特徴を有しているのは初期のピーク値

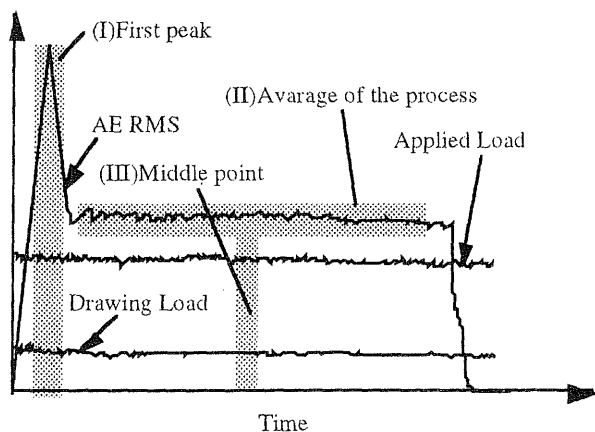


図 2 押し付け荷重、引き抜き荷重及び AE RMS の変化

であるものと考え、本研究では第一の試みとして、摺動開始直後の AE RMS ピーク値を種々の評価に用いることにした。

3.2 AE 信号と引抜き荷重の相関

図 3 に引抜き速度が 20 および 100mm/s の下で無潤滑状態で摺動試験を行ったときの AE RMS と押し付け荷重の関係を示す。図より一定引き抜き速度では押し付け荷重が大きいほど大きな AE 信号が検出されることがわかる。したがって、塑性加工中において摺動速度を把握することができれば、摩擦力の変化を直接 AE RMS によって検出できる可能性が示されたと言える。

しかしながら、AE RMS は引抜き速度の増大にも伴って大きくなっており、引き抜き速度と押し付け荷重の双方を含んだ AE 発生モデルを検討する必要があることが理解される。

3.3 摩擦の際の真の接触面積

本研究では無潤滑または潤滑状態で摺動試験を行った。また、本研究で用いた潤滑剤は比較的低粘度のため、摺動面間の潤滑剤の膜厚はきわめて薄い状態、すなわち境界潤滑状態であると考えられる。これら無潤滑または境界潤滑状態の場合、固体どうしの摩擦過程は以下に述べる微視的な凝着過程により説明される。

一般に金属の表面には凹凸があり、一般の工学的な加工により作製される面は少なくとも数十 μm の粗さがある。したがって、それらが接触する際には面全体ではなくまず表面の凸部同士が接触することになる。一方、それらの表面は汚れ膜、ガスなどの吸着分子膜、金属酸化膜さらには加工硬化などの加工変質膜で覆われている。接触した面にさらに圧力が加えられると、凸部には見かけよりも大きな圧縮応力が作用して塑性変形が生じ、表面の種々の膜が破壊されて新生面が生成される。摺動の際には、これらの新生面が凝着して凸部にせん断応力を発生し、さらにせん断を加えると凝着部が離脱する。結局、これらの過程でのせん断応力の重ね合わせにより摩擦力が発生すると考えられる。

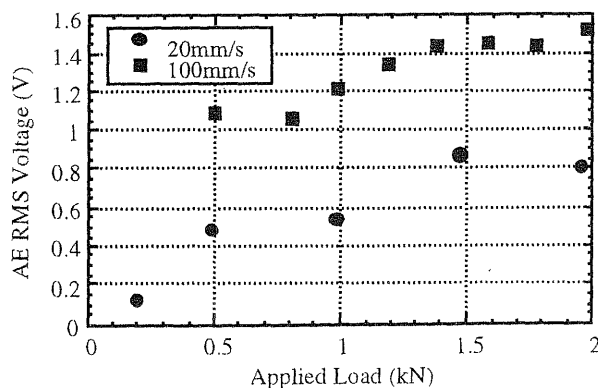


図 3 AE RMS に及ぼす押し付け荷重の影響

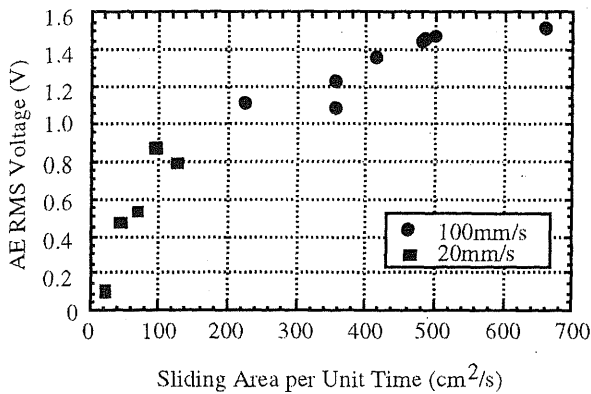


図4 AE RMS に及ぼす単位時間当りの真の摺動面積の影響

本研究では、試験後の試験片表面の観察により、凝着を生じた新生面、すなわち真の摺動面積を測定した。図4にAE信号と引抜き速度から求めた単位時間当たりの真の摺動面積との関係を示す。ここで調査した摺動面積はAE信号でピークの現れた部分に対応する摺動開始直後の部分のものである。図より、引抜き速度によらず、AE信号と単位時間当たりの真の摺動面積には1対1対応があることが理解される。したがって、AE信号による摩擦力検出に関する引抜き速度の影響を定量的に扱うことのできる可能性が示された。

3・4 摩擦に伴うAE発生機構

前述のように、金属同士の摩擦の際には、金属表面の微視的な凸部で凝着を生ずることにより凸部はせん断応力を受けて塑性変形し、凝着部の離脱によって弾性的に回復（スプリングバック）する。この過程で、AE信号の発生過程は、せん断塑性変形とスプリングバックの2つが考えられる。

AEの発生原理は地震と等価であることはすでに述べたとおりである。ここで、地震について考えてみると、地殻内に蓄積されたエネルギーが活断層の急激な運動によって地震波（弾性波）が発生する。しかしながら年間数十cm～数mのゆっくりとした日常的な断層運動では地震は観測されない。このことから、震源である活断層の運動速度が大きい場合のみ地震が観測されることが理解できる。

これと同じことを摩擦の際の微視的な表面凸部の変形過程に当てはめて考えてみると、凸部のせん断塑性変形よりもスプリングバックの方が大きな速度であると推察されるため、AEの発生源はスプリングバックであると結論される。すなわち、せん断塑性変形時に凸部に蓄えられたひずみエネルギーが、凝着の離脱時に解放され、AE信号として放出されるものと考えられる。したがって、この凝着の離脱する量の増大に伴いAE信号が増大するものと推察される。また、図3のように引抜き速度が大きいほどAE RMSが高くなったのは、単位時間当

たりの凝着の離脱量が引抜き速度の増加に伴い増大したためであることが理解できる。

これらのことを考慮すると、摩擦過程におけるAE発生モデルは以下のように考察される。

単位体積あたりのせん断ひずみエネルギー W は、

$$W = \tau^2 / 2G \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力、 G は横弾性係数である。せん断応力は、凝着部、すなわち真の接触部で生じており、それらの重ね合わせが引き抜き力（摩擦力） F であるから、

$$\tau \propto F/r \quad (2)$$

ここで r は真の接触面積の見かけの接触面積に対する割合である。これら2式から蓄えられるせん断ひずみエネルギーは

$$W \propto (F/r)^2 \quad (3)$$

となることが示される。

一方、単位時間あたりに変形する領域の体積 V' は、真に接触している凸部の体積の総計であり、引き抜き速度 v に比例して大きくなるから、

$$V' \propto v \cdot r \cdot l \quad (4)$$

ここで、 l は凸部の高さである。

以上から、単位時間に解放されるエネルギー U' は

$$U' = W \cdot V' \propto F^2 \cdot l \cdot v / r \quad (5)$$

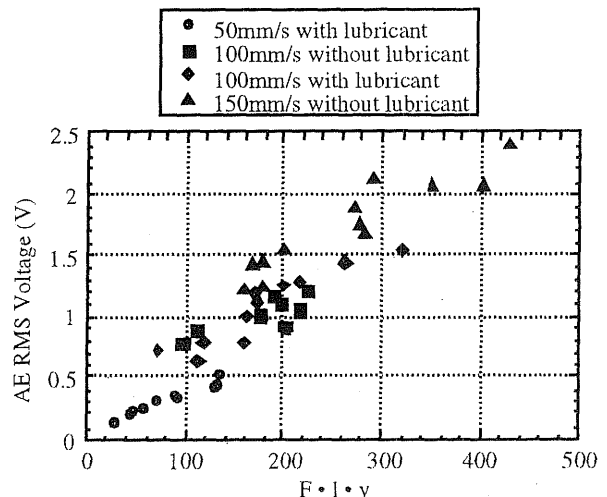


図5 凝着を考慮した摺動モデルとAE RMS値

で与えられる。AE RMS は単位時間あたりのエネルギーと等価であるから、

$$AE\ RMS \propto U' \propto F^2 \cdot l \cdot v / r \quad (6)$$

なお、図3及び図4からもわかるように、Fとrは比例することが実験的に明らかになっており、結局、微視的な凝着の離脱現象に伴って生じるAE信号は以下のように表すことができる。

$$AE\ RMS \propto F \cdot l \cdot v \quad (7)$$

以上のように得られた結果を実験結果と比べると、図5が得られる。図より、潤滑の有無に関わらず、すべての引き抜き速度でAE RMSはF・l・vと比例しており、式(7)によって摺動摩擦の際のAE発生機構が説明されることが理解される。ただし、図5を得る際に、凸部の高さlは摺動後の試験片の表面粗さを用いている。これを実際の塑性加工中に測定することは困難であり、この点について今後さらに検討する必要がある。また、本研究では第1の試みとして図2に示したように摺動開始直後のピーク(I)に注目している。この点についても、呈上状態の平均値(II)あるいは瞬間値(III)で検討を進めることも重要であり、今後の研究課題としたい。しかしながら、本研究によって塑性加工中の素材/工具間における摩擦状態をAE法を利用したオンラインモニタリングできる可能性が示されたと言える。さらに、これらの結果は固体接触と流体潤滑膜の共存する境界摩擦状態、あるいは完全な流体潤滑状態等の摩擦メカニズムの解明に対するAE法の有用性を強く示唆しているものといえる。

4. 結び

本研究において、摩擦過程の評価に対して、AE法により摩擦力をオンラインモニタリングできる可能性が示された。また、摩擦検出の際には単位時間当たりの真の摺動面積について整理することにより、定量的に扱うことのできる可能性が示された。この結果をもとに、将来的には塑性加工時の摩擦過程をオンラインモニタリングし、時時刻々変化する加工環境に対して検出したAE信号をフィードバックすることによる加工条件の最適化への応用が期待される。

なお、本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により遂行されたことを記し、ここに心からの謝意を表します。また、摺動試験機の使用に多大なるご尽力をいただいた川崎製鉄(株)千葉技術研究所の阿部英夫氏、比良隆明氏、関野喜信氏、磯野和人氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) AE法に関する解説は多数あるが、たとえば「アコースティック・エミッション」, (株)日本非破壊検査協会, (1990)
- 2) S.H.Carpenter et al; PROGRESS in AE VI, The JSNDI, (1992), p353-p360
- 3) Yasuhiko MORI; PROGRESS in AE VI, The JSNDI, (1992), p77-p82
- 4) 朴俊緒ら; 第8回AE総合コンファレンス論文集, (1991), p99-p104