

延性モード切削における高精度初期接触検知技術

High-Accuracy Detection Technology of Initial Contact in Ductile Regime Machining

上 村 康 幸*・谷 泰 弘*
Yasuyuki KAMIMURA and Yasuhiro TANI

1. は じ め に

脆性材料を金属材料と同じように延性モード状態で切削するためには、微小の切り込み制御を行うことが必要となる¹⁾。単結晶シリコンの延性／脆性の臨界切り込み深さは $0.1\ \mu\text{m}$ 前後と言われており、硬脆材料の延性モード切削を実現するためには、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の実切り込み深さを常に維持しなければならないことから、nm オーダで検出する初期接触検知技術が必要となってくる。最も敏感な初期接触の検知方法としては、電気導通を利用する方法が考えられるが、これを利用するには工作物および工具が電気良導体であることが必要である。一方、絶縁材料を対象とした検知方法としては、磁気ヘッドのヘッドクラッシュ現象の検知²⁾や延性／脆性遷移の識別に用いられているアコースティックエミッション (AE) 信号³⁾を用いた方法がある。

本研究では、全ての工作物と工具の組み合わせにおいて適用可能である AE を用いた方法の検出感度や AE の検知媒体としての有効性を電気導通信号との比較により明確にするとともに、初期接触感度の支配的要因等について検討した。

2. 初期接触検知方法

2.1 ダイヤモンド針の導電化処理方法および工作物使用条件

Table 1 にダイヤモンド針の Ar スパッタリングの加工条件を、Fig. 1 に Ar スパッタリング処理後のダイヤモンド針先端の光学顕微鏡写真を示す。工具として使用したダイヤモンド針 [株ナガオカトレーディング製] は人工の単結晶ダイヤモンドで、これにチタンの軸に銀ろう付けしたものを使用した。このダイヤモンド針を Table 1 の条件で 5 時間 Ar スパッタすると、その先端半径は $10\ \mu\text{m}$ 前後か

ら $1\ \mu\text{m}$ 程度にまで削られ、円錐形の鋭利なダイヤモンド針が生成された。加工と同時にダイヤモンド針表面は、アモルファスカーボン化され、当初絶縁体であったものが導電性を有したダイヤモンド針に創成される⁴⁾。Table 2 に初期接触検知に使用した工作物の使用条件を示す。アルミニウム基板の加工面はダイヤモンドターニング (DT) 面で、その時の抵抗値は約 $0\ \Omega$ となっている。また、シリコン基板は P をドーピングして導電化処理されたものを使用しており、その時の抵抗値は $300\ \Omega$ 前後が得られている。使用した工作物の仕上げ面粗さが異なるが、 $60\ \text{nmRy}$ 以下の工作物に対して初期接触検知を試みた結果、粗さはほとんど影響を与えないことが確認されている。

Table 1 Ar spattering conditions of the diamond needle

High frequency power	200 W
Vacuum pressure	1×10^{-5} Torr
Pressure of Ar gas	3×10^{-3} Torr
Spattering time	5 h
Resistance value	$65\ \Omega$

Table 2 Surface conditions of the workpieces

Al substrate (3.5")		Si substrate (3")	
Surface	DTed surface	Surface	Polished surface
Surface roughness (Ry)	30nm	Surface roughness (Ry)	10nm
Resistance value	$0\ \Omega$	Resistance value	$300\ \Omega$

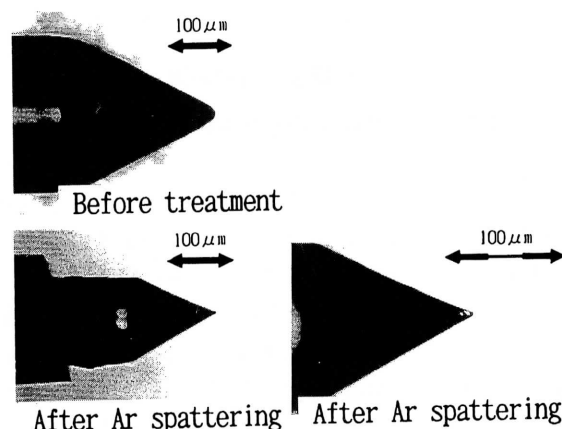


Fig. 1 Effect of Ar spattering of the diamond needles

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

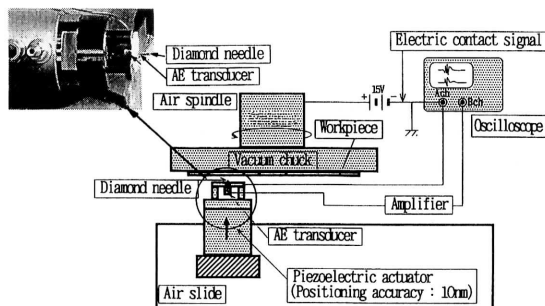


Fig. 2 Overview of a detection apparatus of initial contact

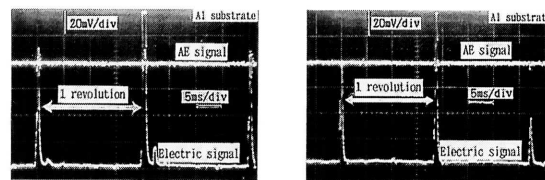
2.2 初期接触検知装置

Fig. 2 に、初期接触検知装置の概略を示す。導電化処理したダイヤモンド針をジルコニア製の直径20 mm の円板の中央部に接着剤で埋め込んだ。このダイヤモンド針の背面部に AE センサ〔株エヌエフ回路設計ブロック製〕を取り付けた。これを Fig. 2 左上図のように分解能10 nm のピエゾアクチュエータ〔PI・ポリテック(株)製〕の端面に固定した。一方、工作物は空気軸受スピンドルの前面のアルミニウム製の同心円溝付き真空チャックにより固定した。電気接触を検知するために、陽極をブラシにより真空チャックに接触させ、陰極をダイヤモンド針のチタン軸部に接続し、このダイヤモンド針と工作物間に15 V の電圧を印加した。予備実験で軸方向の外周ふれは初期接触感度にほとんど影響しないことを確認したが、工作物を取り付けた状態でのスピンドル軸方向の外周ふれは可能な限り高精度 ($0.1 \mu\text{m}$) に調整した。初期接触実験では、まずスピンドルの回転数を3500 rpm まで上げた後フリーラン状態にし、回転している工作物にピエゾアクチュエータの1ステップずつ工具を近づけて初期接触検知を行った。初期接触時の AE 信号の生波形および電気導通信号の直接観察には、100 MHz 対応のオシロスコープを使用した。

3. 初期接触検知結果

3.1 アルミニウム基板使用時の初期接触検知

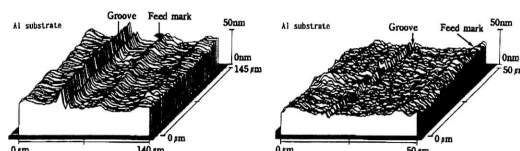
工作物にアルミニウム基板を、工具に Ar スパッタしたダイヤモンド針を使用した際の、初期接触時に検知された電気導通信号と AE 信号の信号波形を Fig. 3 に示す。また、Fig. 3 の検知実験により残された痕跡の形状を、フィゾー干渉法の非接触平面度・形状測定機〔株東京精密製〕により三次元計測した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 3 および Fig. 4 の (a) は AE 信号を、(b) は電気導通信号をトリガ信号とした時の結果を示している。Fig. 4 で奥行き方向に連続して連なっている尾根はダイヤモンド切削時の送



(a) Detection of initial contact triggered by using AE signals

(b) Detection of initial contact triggered by using electric signals

Fig. 3 Initial contact signals in case of aluminum discs



(a) Initial contact groove triggered by using AE signals

(b) Initial contact groove triggered by using electric signals

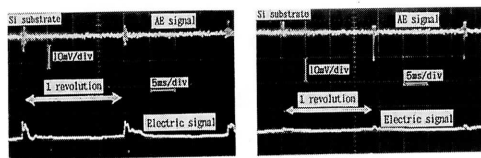
Fig. 4 Contacts grooves on aluminum discs measured by applying a laser interferometric flatness tester

りマークであり、接触痕もこの送りマークと平行に走っている。Fig. 4 測定結果より、接触痕の深さは接触痕幅の最大位置で、(a) で28 nm 前後、(b) で10 nm 前後の高精度な値が得られており、初期接触の感度として (a) と (b) で3 倍程度の差があることが判る。この結果は、Fig. 3 の (a) と (b) で観察された AE 信号の振幅の差からも伺える。すなわち、電気導通信号でトリガした際には、AE 信号は非常に微弱で、AE 信号でトリガした際の AE 信号の $1/3$ 程度の振幅となっている。

3.2 シリコン基板使用時の初期接触検知

工作物に導電化処理したシリコン基板を、工具に Ar スパッタしたダイヤモンド針を使用した時の初期接触検知の信号波形を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の (a) は AE 信号を、(b) は電気導通信号をトリガ信号とした時の信号波形であるが、(a)、(b) 共に電気導通信号の信号振幅は、アルミニウム基板を対象とした時の電気導通信号と比べ、減小していることが判る。これは、工作物をシリコン基板に換えたことで、抵抗値が約 0Ω から 300Ω 前後に増加したことによるものである。一方、(a) と (b) で検知された AE センサの信号振幅の大きさは、トリガ入力信号にかかわらずほぼ同程度になっている。これは、シリコン基板を対象とした時には、AE と電気導通の検出感度が近くなったことを示している。

次に、Fig. 5 の初期接触検知実験により残された接触痕



(a) Detection of initial contact triggered by using AE signals
(b) Detection of initial contact triggered by using electric signals

Fig. 5 Initial contact signals in case of silicon substrate

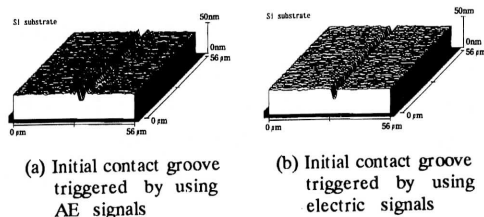


Fig. 6 Contact grooves on silicon substrate measured by applying a laser interferometric tester

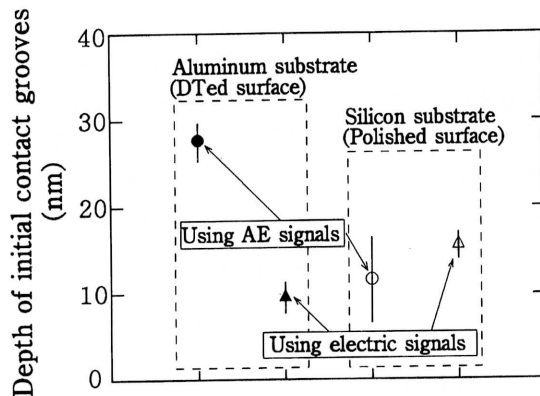


Fig. 7 Depth of initial contact grooves

の形状を三次元計測した結果を Fig. 6 に示す。初期接触時の痕跡は非常に明瞭で、その深さは、電気導通信号をトリガ信号とした場合が15 nm 前後、AE 信号をトリガ信号とした場合が12 nm 前後であった。

以上の結果を、初期接触時の接触痕深さについてまとめたものが Fig. 7 である。電気導通信号による初期接触の検知はアルミニウム基板を対象とした時の方が感度が高くなっており、一方、AE 信号による初期接触の検知はシリコン基板を対象とした時の方が感度が高くなっている。これは、電気導通信号を検知媒体として用いる場合には工作物の電気抵抗が小さいほど感度が高くなるためであろう。また、AE 信号を検知媒体として用いる場合には工作物の硬度が高いほど検出感度が高くなるものと考えられる。し

たがって、導電性の優れた金属材料を工作物とした場合の初期接触検知には電気導通が、一方破壊衝撃の大きい硬脆材料を工作物とした場合の初期接触検知には AE が検出媒体として適しているものと考えられる。

4. 初期接触感度の支配的要因

4.1 AE センサのインパルス加振試験

初期接触感度の支配的要因を明確にするためには、使用した AE センサの特性を調べることが必要である。Fig. 8 の (a) に AE センサの加振試験時の生波形と平均値振幅(生波形を半波整流した直流電圧)との関係を、(b) に 3 章で述べた接触実験時の生波形と平均値振幅との関係を示す。AE センサの加振試験方法としては、センサの背面を金属棒で軽くたたくことで行った。その結果、(a)、(b) 共に AE 信号の平均値振幅は、最初に急峻な立ち上がりを示し、その後、徐々に減小していく傾向が見られた。この定性的に相似な結果から判断して、AE センサは工具と工作物との接触を一種の衝突現象として認識し、初期接触検知しているものと思われる。初期接触を衝突現象として捕えた場合、AE センサが接触検知しやすくなる要因として接触時の衝突エネルギーが考えられる。そこで、小球の自由落下により AE センサのインパルス加振試験を行った。試験方法としては、センサの取り付け具にベアリングに使用されている小球を垂直に落下させて行った。この際、小球の質量を二段階に変えた。また、初期高さを四段階に変えることで衝突時の速度を変化させた。この衝突時のエネルギーに対する AE センサの平均値振幅のピーク値を示したものが Fig. 9 である。同図より、両者は比例関係にあることが判る。この結果から推定して、初期接触実験時の AE センサの感度は工作物の回転速度に大きく影響するものと考えられる。

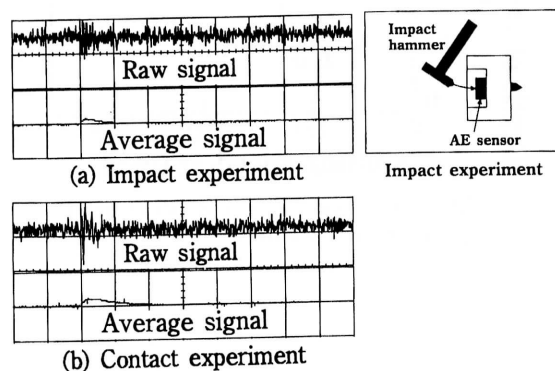


Fig. 8 AE signals in impact experiment and initial contact experiment on silicon substrate

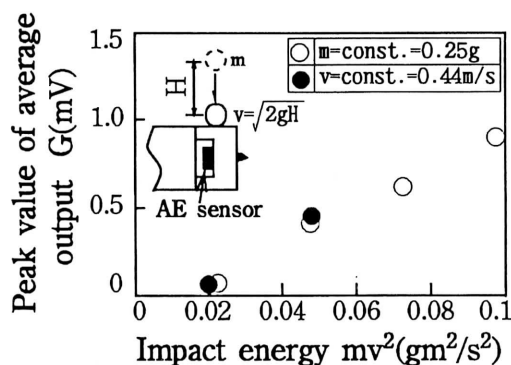


Fig. 9 Impact experiment of an AE transducer

4.2 工作物回転速度変化による初期接触検知

そこで、工作物の回転速度を変化させ初期接触検知を行った。Fig. 10 に、AE により初期接触が検知された時の切削速度と接触によって残された痕跡の深さとの関係を示す。接触検知の工具には、先端半径 $15\mu\text{m}$ のダイヤモンド針を使用し、接触痕の深さは触針子 $0.1\mu\text{m}$ を用いた表面形状測定器 [ランクテラーホブソン(株)製] で測定した。切削速度が増加するにしたがい痕跡の深さが小さくなっている。これは、工作物の回転数が高いほど、微小な切り込みでも AE センサが感知しやすくなることを示唆している。これらの結果より、AE センサの接触感度は、工具と工作物の衝突エネルギー、すなわち速度に大きく影響され、衝突時のエネルギーが大きくなる高い回転数ほど、高精度な初期接触を実現できることが判った。

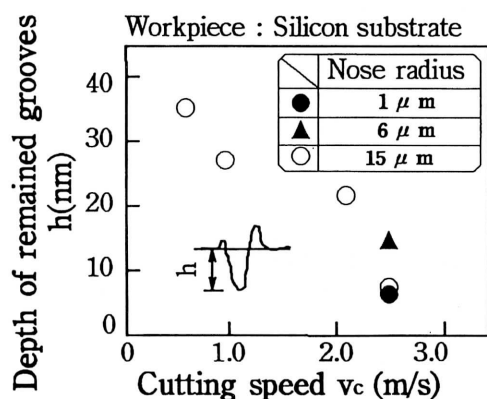


Fig. 10 Effect of cutting speed on depth of remained grooves (Silicon substrate)

4. お わ り に

硬脆材料の延性モード切削加工を実現するために、工具の設定切り込みの原点である工具と工作物との接触を nm オーダで検出する初期接触検知技術について検討を行った結果、以下のような結論を得た。

(1) 工作物にアルミニウム基板を用いた初期接触検知では、電気導通信号が AE 信号の 3 倍程度の感度を示し、10 nm レベルの高精度な初期接触検知が可能となることが判った。

(2) 工作物にシリコン基板を用いた初期接触検知では、電気導通信号と AE 信号の検出感度は共に 10 nm レベルの高精度な値を示した。したがって、硬脆材料の初期接触検知には、AE センサが適用できることが示された。

(3) インパルス加振試験から、AE センサの検出感度は衝突時のエネルギーによることが示された。この結果を受けて初期接触実験を行った結果、工作物の回転数を上げることで AE センサの接触感度が高くなることが判った。

最後に、本研究の遂行にあたり、貴重なご助言を頂いた東海大学の安永暢男教授、実験に御協力頂いた元東海大学学生の安藤直人君、各種装置および試料の提供を頂いた新日本製鐵(株)の阿部耕三氏、(株)東京精密の小田切延之氏、ランクテラーホブソン(株)の関係者各位、東京大学生産技術研究所第 4 部の光田好孝助教授および七尾研究室の関係各位に記して深謝申し上げます。(1995年11月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 谷 泰弘：延性モード加工，生産研究，43，11 (1991) 41.
- 2) 三矢保永：磁気ディスクのトライボロジーにおける高信頼化技術，潤滑，31，5 (1986) 317.
- 3) 市田良夫，他 2 名：ファインセラミックスの引き溝形成の延性／脆性遷移の AE 法による識別，精密工学会誌，58，5 (1992) 97.
- 4) I. Miyamoto et al.: Ion Beam Fabrication of Diamond Probes for a Scanning Tunneling Microscope, Nanotechnology, 2 (1991) 52.