

平成 30 年度 博士学位論文

**アコースティックエミッション技術を用いた  
工作機械の機上計測システムに関する研究**

2018 年 9 月

埼玉工業大学大学院  
工学研究科 システム工学専攻

古賀 俊彦

# **Research on On-Machine Measurement System for Machine Tools Using Acoustic Emission Technique**

By  
Toshihiko KOGA

## **Abstract**

In the Fifth Science and Technology Basic Plan Society 5.0 and the Japan Revitalization Strategy 2016, the fourth industrial revolution utilizing IoT, big data, artificial intelligence and robots, and sensing technology is considered a key to a future productivity revolution. In the manufacturing industry, realizing smart factories utilizing IoT and AI is becoming increasingly important, and intelligent machine tools are indispensable; in addition to the functions of current NC machine tools, these intelligent tools allow capturing information on cutting state for making autonomous decisions. Quality is maintained through a stable machining process. For realizing intelligent machine tools, sensing technology for machining processes is necessary to take advantage of IoT and AI technologies. Sensing technology for machine tools is used in the preprocess measurement of the cutting edge position of high-precision tools and the in-process measurement to monitor cutting quality. It is difficult to create a database for this purpose, as both of these measurements call for the expertise of experienced personnel; thus, this is a problem that needs to be studied.

Previous studies explored various measurement technologies for measuring the cutting edge position of machine tools and for monitoring cutting quality in machine tools. Although high-precision machine tools have been developed for allowing the measurement of the cutting edge position, measurements have not been performed in an actual machining environment, involving thermal deformation in machine tools. Actual measurements involve size measurements of the product after machining the workpiece and estimating the difference with the target value as the correction value for the machine

tool. Skilled personnel, who make use of their experience to estimate the correction value, can realize high precision machining. Thus, such measurements are highly dependent on the expertise of the personnel. For monitoring the cutting state, the cutting power, vibration, and machining heat are sensed; although favorable results have been obtained in monitoring tool wear, there are very few instances of putting these techniques into practice for problems concerning equipment and machine installation.

In this study, an acoustic emission (AE) technique that has been found effective for detecting damage and breakage in machine tools during the cutting process was used for sensing the cutting edge position of the tool and the cutting state. When measuring the cutting edge position, contact was detected using an AE signal that was generated when the cutting tool came in contact with the workpiece. The detection range of contact between the tool and workpiece using the AE technique was studied at a machining center, which was equipped with an ultra-precision lathe with diamond tools having the high-precision characteristics required for ultra-precision machining and which was also equipped with the end mill tools suitable for interrupted cutting. For monitoring the cutting state, AE signals, which were detected with changing cutting conditions, were studied for ultra-precision turning. Moreover, at the machining center, the AE signals generated by friction and wear process were detected and analyzed to study the relationship between cutting state and AE signals by end mill tools. A measurement system was implemented enabling these two measurements. The system evaluation and verification results were summarized based on measurements of cutting edge position in actual machining.

# アコースティックエミッション技術を用いた 工作機械の機上計測システムに関する研究

古賀 俊彦

## 概 要

第5期科学技術基本計画の Society 5.0 や日本再興戦略 2016 の中で、今後の生産性革命を主導する最大の鍵は、IoT、ビッグデータ、人工知能・ロボット、センシング技術を活用する第4次産業革命であるとされている。製造業においても、IoT、人工知能などを活用したスマートファクトリーの実現が重要になっている。その中で工作機械は、現在の機能に加えて、切削状態の情報をとらえ自らの意思で決定し、加工プロセスを安定に保ち、品質を維持するなどの知能化が不可欠である。知能化された工作機械の実現のためには、IoT、人工知能に関する技術を活かすための加工プロセスのセンシング技術の確立が求められる。

工作機械の刃先位置計測や切削状態の監視に関しては、これまでに様々な計測方法が研究されている。しかしながら、工具刃先位置計測においては、高精度な機器が開発されているものの、工作機械の熱変形などを含んだ実際の加工状態での計測ができていない。実際の計測では、被削材を加工後に製品の寸法測定を行い、目標値と比較してその差分を工具の補正值として求めている。その中で、熟練者は今までの経験をもとに補正值を推測して高精度な加工を実現している。現状では、計測を熟練者の技術に依存していることが多い。切削状態の監視においては、切削動力・振動・加工熱などのセンシングが行われており、工具摩耗の監視などに成果がみられるものの、装置・機器の設置の問題などにより実用化されているものは少ない。

本研究では、切削プロセス中の工具の損傷、破損などの検出に有効性を示しているアコースティックエミッション（AE）技術を用いて工具刃先位置と切削状態をセンシングすることにした。工具刃先位置の計測では、工具と被削材が接触したときに検出される AE 信号を利用し、AE 技術による工具と被削材の接触検



知の適用範囲を検討した。切削状態の監視では、切削条件を変更したときに検出される AE 信号について検討した。また、工具の摩擦および摩耗過程で発生する AE 信号を検出・解析し、切削状態と AE 信号の相関関係を検討した。この二つの計測が可能な機上計測システムを構築し、実加工状態での工具刃先位置の計測を行い、システムの評価・検証に関する研究の成果をまとめた。

本論文は、全 7 章より構成される。

第 1 章では、知能化された工作機械の構成要素とその要素の重要性について述べている。その中の工具刃先位置計測のプリプロセス計測と切削状態の監視のインプロセス計測における現在の計測システムの問題点と本研究の必要性から、本研究の目的と研究指針について述べている。

第 2 章では、超精密旋削加工において、工具と回転中の被削材の接触検知を行うために必要な AE 技術を用いた実験装置の構成について述べている。また、ダイヤモンド工具を回転中の被削材に接触させ、接触時に放出される弾性波を AE 技術により検出し、接触検知の適応範囲を明らかにしている。さらに、切削初期の接触検知信号より被削材の取付け誤差の影響について言及している。

第 3 章では、超精密旋削加工における切削状態の監視として、加工中に発生する切削状態の変化について検討している。安定切削時において、切削速度、切込み深さ、送り速度の切削速度を変更し、加工現象と AE 信号の関係を明らかにしている。また、安定切削中に起こる不安定な切削状態を AE 信号により検出できる可能性を示唆している。

第 4 章では、フライス系の切削加工で一般的な加工精度の領域において使用されるマシニングセンタを対象に、エンドミル工具の接触検知の適応範囲を明らかにしている。

第 5 章では、ステンレス鋼 (SUS304) のスクエアエンドミルの側面加工を対象とし、工具摩耗状態の監視を試み、AE 技術による工具摩耗状態の検出について言及している。

第 6 章では、AE 技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムを構築し、工具刃先位置計測を行うことで本計測システムの応答性や信頼性を明らかにしている。また、異なるエンドミルの刃先位置の計測を行い、それぞれの工具で仕上げる切込み深さを与えて被削材を加工し、二つの加工面の段差および深さを

測定することで評価している。その結果、本計測システムにより、マシニングセンタの位置決め精度と同等の工具刃先位置の計測が可能であることを実証している。

第 7 章では、本論文の各章での結言のまとめと今後の課題について述べている。

# 「アコースティックエミッション技術を用いた 工作機械の機上計測システムに関する研究」

## <目 次>

主な記号 .....	I-II
<b>第 1 章 緒 論</b> .....	1
1.1 背 景 .....	1
1.2 機上計測システムの現状と問題点 .....	5
1.2.1 工具刃先位置計測 .....	5
1.2.2 切削状態の監視 .....	8
1.2.3 AE 技術を用いた機上計測システム .....	11
1.3 目的と研究指針 .....	14
1.4 本論文の構成 .....	17
参考文献 .....	20
<b>第 2 章 超精密旋削加工における AE 技術を用いた接触検知</b> .....	27
2.1 緒 言 .....	27
2.2 実験方法 .....	29
2.2.1 実験装置 .....	29
2.2.2 工具刃先位置の検出に関する接触検知実験方法および実験条件 .....	32
2.2.3 AE 信号の評価パラメータ .....	34
2.3 実験結果および考察 .....	35
2.3.1 接触検知の適応範囲 .....	35
2.3.2 切削初期の AE 信号と被削材の取付け誤差 .....	37
2.4 結 言 .....	41

参考文献.....	42
-----------	----

### 第3章 超精密旋削加工における AE 技術を用いた

#### 切削状態の監視 ... 43

3.1 緒言.....	43
3.2 実験方法.....	43
3.3 実験結果および考察.....	45
3.3.1 端面加工における切削速度と AE 信号の関係 .....	45
3.3.2 外径加工時に検出される AE 信号による切削状態の監視 .....	48
3.3.3 外径加工における切削条件と AE 信号の関係.....	51
3.3.4 切削点近傍で検出される AE 信号の検討 .....	54
3.3.5 工具刃先の接触弧長さと AE 信号の関係 .....	57
3.4 結 言.....	60
参考文献.....	61

### 第4章 マシニングセンタにおけるエンドミル工具の

#### AE 技術を用いた接触検知 .... 63

4.1 緒 言.....	63
4.2 実験方法.....	65
4.2.1 実験装置.....	65
4.2.2 AE センサ取付け位置の検討実験 .....	67
4.2.3 スクエアエンドミルおよびボールエンドミルの	
接触検知実験方法および実験条件.....	68
4.3 実験結果および考察.....	71
4.3.1 AE センサ取付け位置の検討 .....	71

4.3.2 スクエアエンドミルによる接触検知の適応範囲.....	73
4.3.3 ボールエンドミルによる接触検知の適応範囲.....	81
4.4 結 言.....	84
参考文献.....	86

## 第 5 章 マシニングセンタにおけるエンドミル工具の

### AE 技術を用いた切削状態の監視 .... 87

5.1 緒 言.....	87
5.2 実験方法.....	87
5.3 実験結果および考察.....	90
5.3.1 切削現象と AE 信号の実効値の関係 .....	90
5.3.2 AE 原波形と切削力波形の特徴 .....	95
5.3.3 工具摩耗の経過と AE 信号周波数の関係 .....	98
5.3.4 AE 発生源の領域別にみられる工具摩耗に関する考察 .....	101
5.4 結 言.....	107
参考文献.....	108

## 第 6 章 マシニングセンタの機上計測システムの

### 基本性能評価..... 109

6.1 緒 言.....	109
6.2 機上計測システムの提案および検証.....	111
6.2.1 目 的.....	111
6.2.2 機上計測システムの概要.....	111
6.2.2.1 エンドミルの機上計測原理.....	111
6.2.2.2 機上計測システムの構築.....	113
6.2.2.3 機上計測システムで取得可能な AE 信号とシステムの応答性 ..	115

6.2.3 システムの応答性検証の実験方法.....	120
6.2.3.1 マシニングセンタの制御系応答遅れの検証.....	120
6.2.3.2 システム全体の応答性の検証.....	120
6.2.4 実験結果および考察.....	122
6.2.4.1 機上計測システムの応答性の検証.....	122
6.2.4.2 実用化のためのノイズ対策と工具刃先位置補正の検討.....	132
6.2.5 まとめ.....	133
6.3 機上計測システムの評価.....	134
6.3.1 目 的.....	134
6.3.2 実験方法.....	135
6.3.3 実験結果および考察.....	139
6.3.4 まとめ.....	142
6.4 実用化のための工具アプローチの検討.....	143
6.4.1 目 的.....	143
6.4.2 実験方法.....	143
6.4.3 実験結果および考察.....	145
6.4.4 まとめ.....	149
6.5 結 言.....	149
参考文献.....	151
<b>第 7 章 結 論.....</b>	<b>152</b>
7.1 本研究の成果.....	152
7.2 今後の課題および展望.....	156
<b>謝 辞.....</b>	<b>157</b>
<b>論文目録.....</b>	<b>159</b>

## 主な記号

$a$	: 切込み深さ	[mm]
$a_a$	: 軸方向切込み深さ	[mm]
$a_a'$	: 概算切込み深さ (ボールエンドミル)	[mm]
$a_r$	: 半径方向切込み深さ	[mm]
$b$	: 加工痕の幅	[mm]
$D$	: ボールエンドミルの直径	[mm]
$D'$	: ボールエンドミルの実直径	[mm]
$E_{AE}$	: AE総エネルギー	[V・s]
$F$	: 送り速度	[mm/min]
$F_{ap}$	: アプローチ送り速度	[mm/min]
$f$	: 送り速度 (送り量)	[μm/rev]
$f_z$	: 送り速度 (一刀当たりの送り量)	[mm/tooth]
$L$	: 接触長さ	[mm]
$N$	: 回転速度	[min <sup>-1</sup> ]
$N_{AE}$	: AE計数	[count]
$Q_\gamma$	: 接触深さ	[μm]
$Q_\delta$	: マシニングセンタの制御系応答の遅れ	[μm]
$r$	: コーナ半径	[mm]
$T_c$	: 切削時定数	[msec]
$T_s$	: サーボ時定数	[msec]
$V$	: 切削速度	[m/min]
$V'$	: 実切削速度	[m/min]
$V_{AE}$	: AE平均値	[mV]
$V_H$	: ハイレベルしきい値	[mV]
$V_L$	: ローレベルしきい値	[mV]
$V_{RMS}$	: AE実効値の平均値	[mV]
$Z_c$	: マシニングセンタから取得したZ座標値	[mm]
$Z_{pos}$	: 補正したZ座標値	[mm]

---

$\alpha$	: イベント信号として認識するまでの時間	[msec]
$\beta$	: マシニングセンタが割込み信号と認識するまでの時間	[msec]
$\gamma$	: 割込み信号を取得してから工具が停止するまでの時間	[msec]
$\delta$	: 工具が被削材に接触してから停止するまでの時間	[msec]
$\theta$	: コーナ半径と被削材の接触角	[°]
$\theta_D$	: 被削材の傾斜角度	[°]
$\pi$	: 円周率	[–]



## 第1章 緒 論

### 1.1 背 景

製造業を取り巻く環境は、近年大きく変化しており、世界の産業は変革時期を迎えようとしている。産業革命を振り返ると、第1次産業革命は、18世紀から蒸気機関、繊維工場などの軽工業の機械化の時代、第2次産業革命は、19世紀後半から、電気・石油を新たな動力源とする重工業中心の大量生産の時代であった。第3次産業革命は、20世紀後半からコンピュータなどの電子技術を活用したマイクロエレクトロニクス革命による自動化の時代、そして、21世紀から現在の第4次産業革命へと時代が移り変わっている<sup>1)</sup>。

2010年にドイツが提唱した「Industrie 4.0」<sup>2,3)</sup>を発端として、世界中の国々が第4次産業革命を意識した国家戦略<sup>4)</sup>を進めている。ドイツの「Industrie 4.0」では、製造業のIoT (Internet of Things) 化を通じて、産業機械・設備や生産プロセス自体をネットワーク化し、注文から出荷までをリアルタイムで管理することを目指している。その他、アメリカ、イタリア、中国などの国でも同様の国家戦略<sup>5)</sup>が練られている。日本においても2016年の「第5期科学技術基本計画のSociety 5.0」<sup>6)</sup>、「日本再興戦略 2016」<sup>7)</sup>の中で、今後の生産性革命を主導する最大の鍵は、IoT、ビッグデータ、AI (Artificial Intelligence, 人工知能)・ロボット、センシング技術を活用する「第4次産業革命」であるとされている。日本では特に、人口減少に伴う供給制約や人手不足を克服するために必要な革命であるといえる。

第4次産業革命はどの国においても、蓄積されたあらゆる情報のデータ化・ネットワーク化により自由に情報のやり取りを行うIoTの活用と集まった大量のデータを分析し、新たな付加価値を生み出すためのビッグデータの活用を基本に置いている。製造業では、データの採取のために様々なセンシング技術を導入し、あらゆる場所にセンサ等が設置されており、製造全体を管理する「見える化」「モニタリング」が推進されている。そして、採取したビッグデータを活用し、機械が自ら学習し、人間よりも優れた高度な判断が可能なAI・ロボットなどを

使って解析し、新たな製品・サービス開発につなげる改革が進められている<sup>8)</sup>。

このように製造業では、自動化の時代から、IoTによる自立化の時代へと変化している。その中で、グローバルレベルでの競争の激化やニーズの多様化、製品開発の短納期化に加えて、生産性・品質の向上、製品の高付加価値・高機能化が求められている。日本においては、このようなIoTなどの生産プロセスの変化以外に、少子高齢化により労働力の不足が課題となっている。また、2012年より続いている団塊の世代の退職による熟練技術者の減少や若年・中堅者への技能伝承問題も深刻化している<sup>9)</sup>。そのため、技能・技術伝承するためにカン・コツなどの経験を数値化することが望まれている。このような製造業の変化に対して、IoT、AIを活用した「スマートマニュファクチャリング」、「スマートファクトリー」（考える工場）の実現が重要になっている。これらは、「工場内の設備等に情報技術を取り入れて工場の生産性の向上や新しいビジネスの創造を目指す技術の総称」<sup>10)</sup>とされている。IoT技術をもとに製造業は、生産システムにかかわる様々な情報をネットワークでつないで利用可能にしている。さらに工作機械の知能化を前提に生産工程の情報や工作機械を効果的に使い、製品のライフサイクル全体の生産管理を最適化することが求められている<sup>11)</sup>。

しかしながら、ネットワークを中心として生産管理の最適化・見える化などの議論が先行して、製品を生み出すための加工プロセスや切削状態の監視などを行う工作機械の見える化や知能化などがあまり進んでいないとされている<sup>2)</sup>。スマートファクトリーを実現するうえでは、知能化された工作機械の早期開発が求められている。工作機械の知能化の役割として、例えば切削加工では、熟練技術者が工作機械の前で五感を働かせ、視覚による加工面、切りくず、工具などの状態や聴覚、触覚による加工音、振動などから得られる情報を基に加工が適切かどうかの判断を可能とするインプロセス計測が求められる。そのほかにも、製品の加工精度や作業時間の短縮にも関係する工作機械の熱変形など機械特性を熟知した段取り作業のプリプロセス計測の最適化も挙げられる。

前者は、モニタリング技術、解析技術、誘導・制御技術を活用し、製品を指示された精度で効率よく機械加工することが必要である。そのため工作機械は、これら三つの技術を用いて切削状態をモニタリングし、工具摩耗などの情報を検出・解析し、切削条件、工具補正量の変更および工具交換などを誘導・制御する

必要がある。後者は、熟練技能者の経験である加工環境、機械特性、加工形状などの情報を踏まえたうえで段取り作業の一部である工具刃先位置の測定、ワーク座標系設定などが可能な自動化された計測システムが必要である。これらを含む知能化された工作機械の概念を図 1.1 に示す。

図 1.1 に示すように、工作機械の知能化とは現在の NC 工作機械の機能に加え、切削状態の情報をとらえ、自らの意思で決定し、加工プロセスを安定に保ちながら、品質を維持することが求められている<sup>12)</sup>。現在の工作機械では、図に示すプリプロセス計測の段取り作業と切削加工（動作）が行われている。工作機械の知能化では、現在の工作機械を含む図の 7 項目の要素技術が必要となる。データベース管理では、過去から現在までの技能・技術やこれからの情報等の大量データを収集する。コンピュータシステムでは、現在の CAD/CAM 技術と融合し、収集した情報を基に自らの意思で製品図面から工程設計を自動で行う。プリプロセス計測の段取り作業では、現在のシステムよりも加工環境や工作機械などの特性を考慮した高精度で短時間な自動化された計測等の技術が求められる。切削加工に関しても、より高速で高精度な加工が要求される。インプロセス

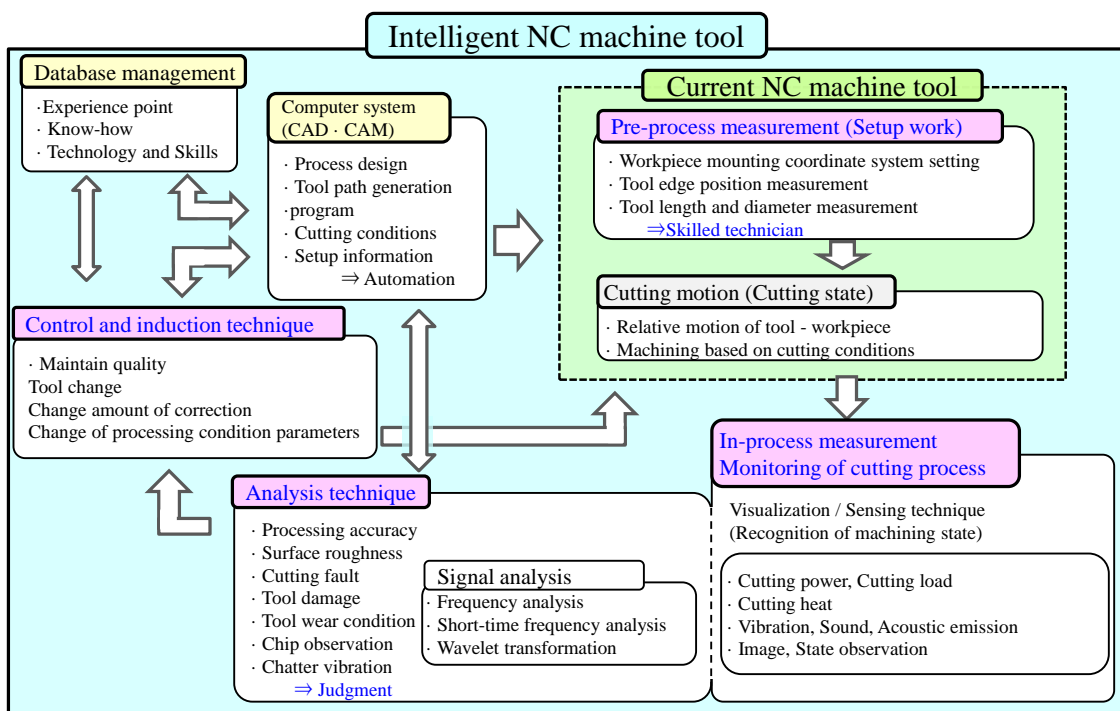


Fig. 1.1 Intelligent machine tools concept.

計測では切削状態のモニタリングを行い、様々な測定器を用いたセンシング技術の確立が必要となる。分析技術では、AI を利用してセンシングにより取得したデータを分析し、切削状態の良否を学習・判断する。誘導・制御技術では、品質維持のために最適な方法を判断し、工具交換や補正量の変更、さらには切削条件の変更などの情報をコンピュータもしくは工作機械に指令を送る。これらの情報は常にデータベースにネットワークを介して送られ蓄積される。このような一連の仕組みを工作機械の知能化としている。ここでは、熟練技術者の技能・技術を必要とされるプリプロセス計測の段取り作業、インプロセス計測のモニタリング、解析技術に着目する。

プリプロセス計測が必要な段取り作業において、例えばマシニングセンタ加工の場合、工具長および工具径の測定や工具刃先から被削材（加工原点）までの距離を必要とするワーク座標系の設定がある。この測定を正確に行わなければ、加工後に測定を行い、目標の寸法と比較してその誤差を補正量として、再加工する必要がある。インプロセス計測の切削状態の監視として、安定した切削状態から異常な切削状態の変化を検出しなければならない。異常な切削状態の変化とは、工具の損傷、工具の摩耗、構成刃先の発生、切りくずの排出異常などがある。このような異常が発生した時にも、工具の交換や補正量の変更による再加工を行う必要がある。

このようなプリプロセスによる正確な測定やインプロセスによる切削状態の監視などの機上計測は、今後の工作機械の知能化には欠かすことができない。機上計測を実現する計測機器やセンサは、現在様々なものが開発・研究されている。段取り作業においては、市販されている計測機器が多く、工具刃先位置の計測において、ツールプリセッタ、レーザおよび CCD（Charge Coupled Device）カメラなどが使用されている。切削状態の監視<sup>13-16)</sup>では、センシング技術により加工力、加工熱、振動などのデータを収集している。センシング技術により集められた情報を分析する信号処理も欠かすことができない。信号処理で最も多く利用されているのが周波数解析であり、短時間周波数解析やウェーブレット変換の結果など波形の特徴のほかに時系列の変化を分析に取り入れている。

このように IoT, AI を活用した「スマートマニュファクチャリング」、「スマートファクトリー」の実現には、工作機械の特性などを考慮した工具刃先位置を正

確に行うなどの段取り作業のプリプロセス計測と、異常な切削状態を検知できるインプロセス計測可能な機上計測システムを備えた知能化された工作機械が必要になる。

## 1.2 機上計測システムの現状と問題点

### 1.2.1 工具刃先位置計測

工具刃先位置の測定には、様々な方法が検討されており、市販されているものも多い。近年、切削加工の分野では超精密加工や微細加工技術が発達し、高精度・高品質な工業製品を短時間で効率よく生産することが求められている。工業製品の複雑化に伴って複数の工具を使用することが多く、工具の測定や座標系設定の回数が多くなるため、加工精度や段取り作業の時間などに大きく影響を及ぼす。そのため、工具刃先位置の計測は、迅速かつ高精度に計測する必要がある。

切削加工では、旋削加工とフライス加工による工具刃先位置計測がある。本質的には、同じものである。ここで取り扱う工具の刃先位置計測とは、座標系設定の際に必要な工具と被削材間の距離の計測、もしくは作業空間内のワーク座標位置および工具刃先位置を計測する段取り作業である。工具刃先位置計測においては、測定の温度環境などが大切である。しかしながら、環境が管理されていても、図 1.2 に示すように、切削加工中に工作機械から発生する熱等により、

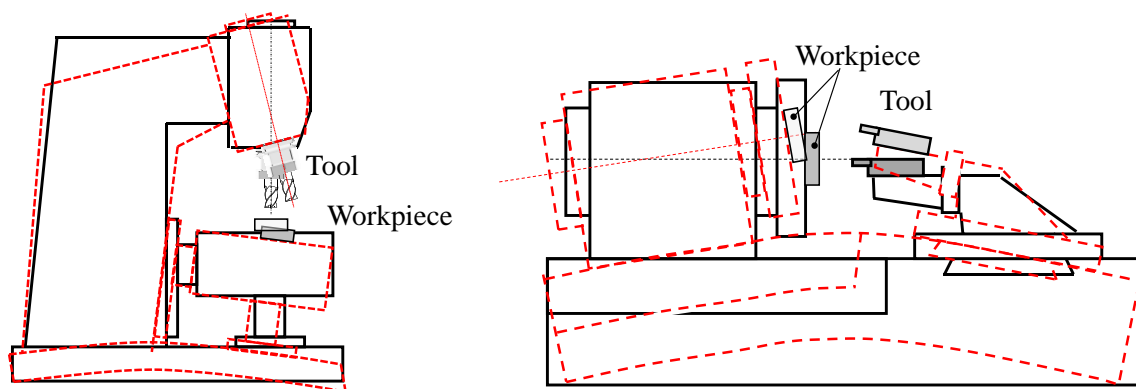


Fig. 1.2 Change in cutting edge position in thermal deformation of machine tools.

主軸の伸び、主軸の倒れ、テーブルの変形などが要因で工具刃先位置の制御ができない。このような工作機械の動的な変化を含んだ計測を高精度に行わなければ、被削材の加工後に寸法測定を行い、目標値と比較してその差分を工具の補正值として求めた後に、再加工するなどの対応を強いられる。また、工具交換を必要とする場合に、工具交換前後の加工面では、工具刃先位置のずれが生じたときに、平面形状であれば平面に段差が生じ、自由曲面であれば曲面のつなぎ目に形状誤差が生じる。熟練技能者は、これらの工作機械の特性を考慮して、経験をもとに工具刃先位置の補正量を推測して形状誤差を少なくしている。

旋削加工においては、近年、光学部品、宇宙航空部品、情報通信関連部品等の高精度化に伴い要求精度が増し、超精密加工がより重要となっている。一般的に超精密加工の定義はなく、サブマイクロメートルオーダの輪郭形状精度とナノメートルオーダの表面粗さが求められており、年々要求精度が高まっている<sup>17,18)</sup>。超精密旋削は主に単結晶ダイヤモンド工具が使用されている。ダイヤモンド工具による切削加工では、仕上げ面への切れ刃形状の転写性が高く、比較的容易に要求された仕上げ面を得ることができる。しかしながら、工具の性能が良くても製品の要求精度を満たすためには、正確な工具刃先位置を求める必要がある。そのために、簡単な方法として、工具を被削材に接触させた最初の位置を加工原点として設定し、刃先位置を計測していることが多い。ダイヤモンド工具は、結晶の特定方向に沿って割れやすい性質であるへき開性を有し、簡単に破壊しやすいため接触による工具刃先位置計測には注意を払う必要がある。そのために熟練した技能と技術が要求される。したがって、超精密旋削においては、工具刃先位置の計測として工具破損防止のため非接触計測や微小接触による計測などの研究が進められている。

非接触式の測定において、青山ら<sup>19)</sup>は、レーザの全反射を使用して、工具刃先位置を検出する方法を提案している。吉岡ら<sup>20)</sup>は、単結晶ダイヤモンド工具において、刃先部でレーザ光を全反射させ近接場（エバネッセント場）を生成し、被削材との干渉によるエネルギーの変化を用いて、工具刃先位置の検出を行っている。共にマイクロメートルオーダ以下の計測を可能としているが、光透過性を有する工具または被削材に限られている。洪ら<sup>21)</sup>は、超精密加工機における接触式の測定において、位置決めフィードバック信号を用いて高精度な工具と被

削材の検知を実現しているが、非接触の摩擦抵抗の極めて小さい静圧空気軸受を用いた工作機械に限られている。その他に、小原ら<sup>22)</sup>は、工具と被削材間に微小な電圧を印加し電圧・電流の変化より、ナノメートルオーダで刃先位置を検出可能な報告がある。しかしながら、この手法では工具、被削材ともに導電性であることが必要であり、微細加工等に用いられるダイヤモンド工具ではそのまま用いることができない。そこで、ダイヤモンド工具に金を蒸着して導電性を持たせるなど、追加の工程が必要となっている。

以上の理由により、実際の現場では、一般的に CCD カメラで工具と被削材間の接触もしくは隙間を確認して工具刃先位置を求めることが多く、目視で確認するためカン・コツの部分で熟練者の技術が必要とされている。

フライス加工において、マシニングセンタによる段取り作業の一つに、工具長および工具径の測定や工具刃先から被削材（加工原点）までの距離を必要とするワーク座標系の設定がある。つまり、段取り作業には、工具刃先位置の測定とワーク座標系の設定が必要になる。この測定および設定を行うための機器においても、接触式測定器や非接触式測定器が使用される。工具刃先位置の測定における接触式測定器は、簡単で静的な状態の測定は可能であるものの、実加工条件下の動的な状態において測定ができない。そのため工具の回転による遠心力、工具取付けによる工具の振れおよび機械主軸の伸びや環境温度変化による図 1.2 に示したような工作機械の熱変形等を含めた工具刃先位置計測ができない問題がある。一方で、非接触式測定器は、レーザを用いた測定<sup>23)</sup>や CDD カメラと画像処理技術を用いた計測により、分解能 0.1  $\mu\text{m}$  程度の高精度な計測<sup>24)</sup>を可能とし、市販されているものも多い。しかしながら、レーザ光による光学的手法としてレーザ遮光式を採用しており、切りくずによる誤差や検出用のレーザスポット径が有限なため、工具刃先の形状によっては誤差が生じることが報告<sup>25)</sup>されている。

工具刃先位置の測定とワーク座標系の設定に関して、問題点はあるものの高精度な計測には上述した測定器が用いられ、現状では最適とされている。しかしながら、工具長および工具径の測定と座標系設定のための計測を行う場合には、個別の測定器によって行うことから、間接測定による誤差が含まれる問題がある。この誤差は、それぞれを作業空間内のあらかじめ決められた基準によりキャ

リブレーションすることで低減することが可能であるものの、その作業に時間を要することや高精度な測定が困難である。個別の機器を用いて実用化されている工具刃先等の計測システムにおいては、複数の工具を用いた場合に工具間の仕上げ面段差を  $1\text{ }\mu\text{m}$  にできることが報告されている<sup>26)</sup>。このような測定システムでは、これ以上の計測精度を向上させることは難しいと考えられる。

そこで、二つの測定器を使用せずに、旋削加工同様に、工具刃先と被削材の相対距離を計測する方法を検討する。この相対距離を高精度に計測することにより、工具刃先位置の測定とワーク座標系の設定を同時に設定したことになる。この考えのもとに、工具刃先と被削材の相対距離の測定には非接触または接触式の測定器で直接検出している。鈴木ら<sup>27)</sup>は、インコヒーレント光を用いて、工具刃先と被削材間の光の強度を計測し、顕微鏡で画像を得て、そのコントラストピーク位置を検出することによって、非接触で工具刃先位置を高精度に計測している。しかしながら、測定システムを作業空間内に設置するなど、加工を制限される恐れがある。その他に、接触式計測法として、サーボ情報により外部センサを使用せずに切削力オブザーバにより工具と被削材の接触位置を検出する方法が提案<sup>28,29)</sup>されている。切削力オブザーバにより、空気圧案内においては高精度な計測を実現しているが、切削力をモータの電流、加速度、摩擦から推定しているため、接触式の案内や摩擦係数の大きな油圧案内においては様々な要因を検討する必要がある。

以上のように、高精度な計測を実現しているものの、旋削加工においては工具材質による問題があり、フライス加工においては計測機器の大きさ、工作機械の構成要素による問題がある。このように実機に搭載する機上計測システムとしては課題が残されている。

### 1.2.2 切削状態の監視

工作機械の知能化に不可欠な切削状態のモニタリングに関しては、インプロセス計測が必要であり、現在までに様々な計測およびセンシング方法が検討されている。図 1.1 に示す工作機械の知能化に欠かすことができないインプロセス計測において、主な加工対象を計測するセンシング技術についてまとめたものを表 1.1 に示す。



Table 1.1 Sensing technique to measure the measuring object.

Measuring object	Sensing technique
Cutting power	Piezoelectric element
Cutting load	Strain gage
	Servomotor current detection
	Torque detection
	Disturbance observer system
	Contact electric resistance
Cutting heat	Thermocouple
Vibration	Acceleration sensor
Sound	Laser displacement meter
Acoustic emission	Microphone
	AE sensor
Image / State observation	CCD camera
	ITV camera
	Infrared camera

加工力・加工負荷の検出方法として、一般的に圧電式<sup>30)</sup>やひずみゲージ式<sup>31)</sup>などの切削動力計が使用される。圧電式の工具動力計は高価であり、また工具側もしくは被削材側で計測されるため、被削材や加工形態に制限があることから、加工現象の確認のために実験では使用されているものの、実用化に至っていない。実用化の観点で、付加的なセンサを必要とせずに、主軸のモータ電流やサーボモータ電流を監視<sup>32,33)</sup>する方法が用いられている。これらは電流値を用いて切削ベクトルを幾何学的合成により切削力を推定しており、サーボモータの案内面の摩擦の影響を受けるために、微小切削力の安定的な計測は難しい。微小切削力に関しては、リニアモータや空気圧案内を利用した工作機械の送り軸・主軸のサーボモータの電力情報と角度から外乱オブザーバを応用し、切削力を推定することを可能としている。この方法により、圧電式切削力センサに匹敵する精度を有し<sup>34)</sup>、高精度な測定が可能のため、エンドミル加工におけるビビリ振動の検出も可能<sup>35)</sup>としている。しかしながら、前述した工具刃先位置計測と同様に外乱オブザーバを利用した測定は高精度であるが、接触式の案内や摩擦係数の大きなテーブル案内において課題が残されている。さらに、工具・被削材間の接触電気抵抗変化による工具摩耗のモニタリングに<sup>36)</sup>については、正面フライスに

よるインプセロス計測を実現しているが、エンドミル加工への適用が課題とされている。

加工熱・熱変形を検出する方法として、熱電対が用いられている。切削工具の表面温度の測定方法として、工具－被削材熱電対法が用いられている<sup>37)</sup>。熱電対を用いて超硬工具とセラミック工具の両方の工具面局部の温度計測をしており、工具すくい面の温度と工具摩耗には関係がある<sup>38)</sup>ことが報告されている。これらの測定は、工具に熱電対用に穴を加工することや工具と被削材の温度分布が一樣でないために、切削部位の平均温度の計測となっている。その対策として、工具表面に創生した微細溝に7対のマイクロ熱電対が考案され、それぞれの場所において温度計測を可能<sup>39)</sup>としている。しかしながら、工具の形状が特殊なため製作が困難であることが課題の一つである。

振動<sup>40, 41)</sup>、切削音およびアコースティックエミッション（以下、AEと称す）を検出方法として、加速度センサ、変位計、マイクロフォンおよびAEセンサが用いられている。振動や切削音と同様に分類されるAEについては、周波数帯域、感度および検出される現象も異なるため、1.2.3項のAE技術を用いた机上計測システムにおいて報告する。振動については、加速度センサにより高速加工時のびびり振動のリアルタイムモニタリング<sup>42)</sup>や振動信号をパターン認識し加工時の監視手法を提案<sup>43)</sup>している。しかしながら、超精密切削の領域では、切込み深さが微小なため、切削点で起こる現象を検出することが困難とされている。切削音の検出については、マイクロフォンが用いられ、非接触でありセンサの設置にも簡便である。切削音の工具摩耗の検出<sup>44)</sup>において、工具の逃げ面摩耗幅の増加に伴って、切削音の周波数が変化することが確認されている。しかしながら、実際の加工現場では他の工作機械・装置や搬送装置などのノイズが多く、ほとんど実用化されていない。

画像や状態観察として、CCDカメラ、ITV（Industrial Television）カメラおよび赤外線カメラを用いている。CCDカメラ<sup>45, 46)</sup>を利用した画像計測技術を利用し、切削中の小径エンドミル挙動を計測し、切削力の推定や工具破損の予知および工具摩耗による寿命判定を行うシステムの開発をしている。画像を撮影するため、切削油や切りくずの飛散などの加工雰囲気の影響や、照度とシャッタ速度の関係に関する問題も残されている。ITVカメラ<sup>47, 48)</sup>による画像処理技法に基

づく工具摩耗計測システムを開発し、摩耗画像を二値化するためのしきい値を自動化決定し、摩耗計測が可能としている。しかしながら、摩耗のパラメータを算出するまでの処理時間が必要となっている。また、赤外線カメラ<sup>49)</sup>による切削状態監視では、超精密加工領域において工具の温度を計測し、工具の熱変形による加工誤差の影響を明らかにしているが、切削油を用いる場合に、ばらつきが生じるとされている。

以上のように様々なセンシング技術を活用して、インプロセスで監視し、データをもとに解析し、工具摩耗などに対して適切に加工ができるように加工条件などの制御を可能にする研究が進められている。しかしながら、一定の成果は認められるものの、工作機械や加工に制限を与えるなどの理由からまだ実用化に至っていないのが現状である。

### 1.2.3 AE 技術を用いた機上計測システム

スマートファクトリーを実現するうえで欠かすことができない知能化工作機械は、あらゆるセンシング技術が検討され開発が進められている。工作機械の知能のためには、1.1 節の図 1.1 に示すように切削状態の情報を捉え、自らの意思で決定し、加工プロセスを安定に保ちながら、品質を維持することが必要である。1.2.1 項、1.2.2 項で挙げた計測器、センシング技術は、有効性が示されたものもあるが、一つのシステムで段取り作業の効率化などのプリプロセス計測と切削状態を認識するインプロセス計測の両方の機能を有するシステムを検討した例は少ない。その理由として、前項で使用されているセンサでは、システムの設置など工作機械のテーブルに十分な設置スペースを確保する必要があり、加工の妨げになることも理由の一つである。

工具刃先位置の計測において、様々な研究が報告されているが、実際の加工環境下で行う機械の熱的変形など加工精度に影響を与えない計測が大切だといえる。これらを考慮し、高精度な工具刃先位置を計測するには、工具と被削材を直接接触させることが望ましいと考える。また、切削状態の監視に関しては、研究・開発されているものは高価で加工に妨げになるものが多く、簡便性のよい測定が可能であることが望まれる。そこで、様々な用途で利用される AE 技術に着目した。AE 技術は取付けが簡単で高感度であることが最大のメリットである。こ

これらの条件は、工具刃先位置の計測と切削状態の監視において最適なセンサであるといえる。

AE 技術とは、材料の変形・破壊に伴うひずみエネルギーの解放によって生じる弾性波を AE センサで検出する検査技術の一つである。AE 信号計測における AE の周波数帯域は、数 10 kHz～数 MHz といわれており、人間の可聴域よりも高周波数帯である。一般的に用いられる振動加速度センサは、約 5 Hz～20 kHz であり、AE 信号計測とは検出する周波数領域が異なる。AE 技術は変形・破壊現象に対する検出感度が高く、切削加工分野以外でも材料評価手段<sup>50,51)</sup>やタンク底板の腐食損傷診断<sup>52)</sup>など幅広く用いられている。その他、AE 技術を用いた摩擦・摩耗現象の認識と評価<sup>53)</sup>において、アブレシブ摩耗や凝着摩耗などの微小な変化を AE 信号で認識できる報告がある。

AE センサが有する高い検出感度を活用した切削加工分野の研究事例として、工具と被削材の接触検知や切削状態の監視に関する報告がある。これらの報告において切削加工中に検出される AE 信号は、図 1.3 に示す領域<sup>54-56)</sup>が AE 発生源とされている。

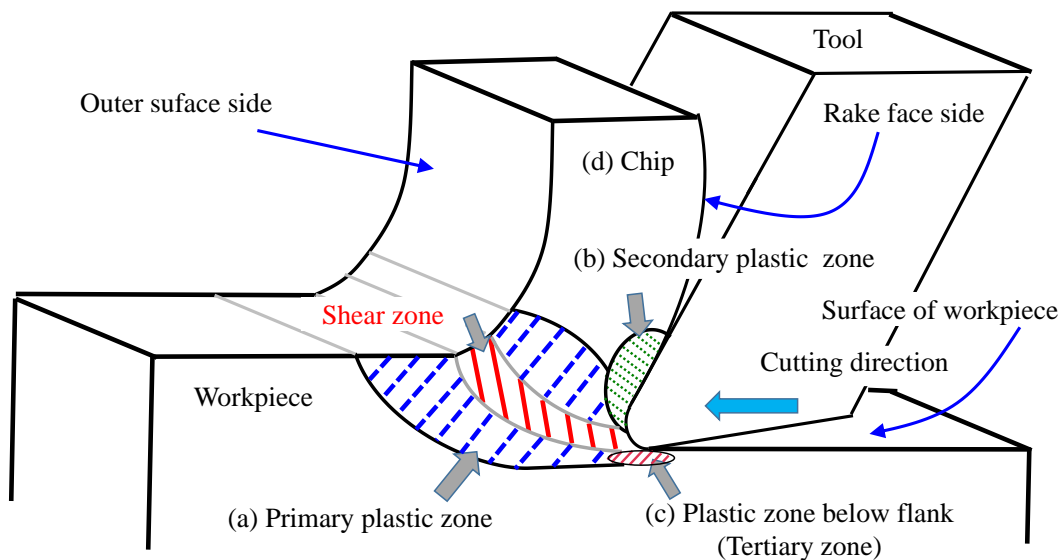


Fig. 1.3 Schematic of various AE sources from a cutting process.

図 1.3 に示すように AE 発生源は、以下の 4 領域から発生する。

- (a) 被削材のせん断領域（一次塑性域，せん断領域を含む）
- (b) 工具すくい面と切りくずの接触領域（二次塑性域）
- (c) 工具逃げ面と被削材の接触領域（逃げ面下方塑性域）
- (d) 切りくずの衝突・分断・変形過程が起こる領域（切りくず周辺の領域）

(a) では、被削材のせん断破壊や亀裂などのせん断過程，(b)，(c) では、工具と切りくずおよび被削材の摩擦や摩耗，(d) では、切りくずの衝突・分断・絡みつき・変形過程により AE 信号が発生している。これらの領域から発生する AE 信号を検出し、AE 信号との関係を研究している。

AE 技術を利用した工具刃先位置の計測や切削状態の監視について研究事例を挙げる。前者の工具刃先位置の計測において、例えば研削加工では、AE を用いて砥石と被削材の接触を検知できることが報告されており<sup>57)</sup>、加工能率、砥石や工作物の保護などに重要な加工開始時期を正確に検出している。また、切削加工では、工具刃先位置計測して、工具を被削材に直接接触させて AE 信号を検出し、その座標値を工作機械の作業空間内の刃先位置とすることを提案している。工具を直接接触させることで、被削材に接触痕が残ることが問題とされている。しかしながら、問題を解決するために、工具アプローチ方法の検討をしている。そのアプローチ方法として、工具を被削材に近づけ、主軸と同軸である Z 軸方向から  $0.1\ \mu\text{m}$  ずつ手動により被削材で接近させる方法<sup>58)</sup> や連続方式と一定時間工具を停滞させ、接触の信号を検出するインクリメンタル方式の二つを合わせた二段階方式による自動で接触させる方法<sup>59)</sup> が検討されている。これにより、被削材の表面の接触痕が小さくなることを報告している。また、被削材の表面粗さの違いにより、解析モデルを導入して表面の傷を予測する研究<sup>60)</sup> もなされている。しかしながら、まだ AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムが実際の現場に定着していないのが現状である。

後者の切削状態の監視に関しても、AE 技術を用いた報告があり図 1.3 の領域から発生する AE 信号について検討し、工具折損、工具摩耗状態の監視を行っている。まず、工具折損では、AE 信号を検出しやすいドリル折損の報告<sup>61-63)</sup> や旋削工具の折損、チッピング<sup>64-66)</sup> などの報告がある。AE 技術は、破壊に伴う信号を出しやすいため AE の優位性が示唆されている。

つぎに、工具の摩耗状態の監視では、旋削加工を対象としてAE信号を用いた工具摩耗状態の監視に関する研究<sup>67)</sup>が多く、イベント数やオシレーション数の比による寿命判定<sup>68)</sup>などが検討されている。また、AE技術を利用したエンドミル工具などの断続切削における研究においては、工具欠損の検知、工具寿命監視<sup>69-71)</sup> についての報告はあるものの、仕上げ加工に関する工具摩耗状態の認識に関する研究は少ない。

以上のように、工具刃先位置計測と切削状態の監視をそれぞれ別々のシステムとして提案しているものの、一つのシステムとして構築している報告はみあたらない。工作機械の知能化にはこれらを満たすような工具刃先位置計測と切削状態の監視を有する AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムが必要であると考えられる。

### 1.3 目的と研究指針

1.1 節の研究背景より、今後の製造業では、工作機械の知能化が求められ、そのためには機上計測システムが重要性であることを述べた。機上計測システムにおいて、工具刃先位置計測や切削状態の監視において様々な研究がなされている。しかしながら、実験的なものが多く、実用化されているものも少ない。また、これら二つの機能を有する計測システムを構築した例がみあたらない。今後の工作機械の知能化を検討するには、機上計測システムに工具刃先位置計測と切削状態の監視の両機能を兼ね備えている必要がある。図 1.4 は、AE 技術を利用した工具刃先位置計測のプリプロセス計測と切削状態の監視するインプロセス計測が可能な機上計測システムのフローチャートである。このシステムは、AE 信号を検出して、信号処理を行い工作機械の制御装置へ入力後、状況にあった制御を行うものである。工具刃先位置計測では、高精度な工具刃先位置を自動で計測でき、切削状態の監視では、工具摩耗の状態を検出することができるシステムである。

求められる工作機械の機上計測システムは、加工形態では、旋削系、フライス系の両方に有効である必要があり、加工精度の領域では、超精密加工領域と一般加工領域でも対応できることが求められる。本論文では、超精密加工領域におけ

る数マイクロメートル以下の切込みの加工としている。工具の刃先位置計測には、一般的な段取り作業で行う場合とは異なり、ツールセッティング器具などを使用しない計測方法を想定している。工具刃先位置を高精度に計測するため、切削時と同様に工具もしくは被削材を回転させた状態で被削材に直接接触させ、その接触検知を利用している。これにより、工作機械の動的精度、熱変形を含む形で、実加工に近い条件での計測が可能である。

図 1.5 は、工具刃先位置計測および切削状態監視の概略図である。図 1.5 (a) は旋削系とフライス系の工具刃先位置計測に必要な接触検知のイメージを示す。図 1.5 (b) は、切削加工の状態監視を示しており、旋削系は端面加工と外径加工を、フライス系はエンドミル加工の様子である。

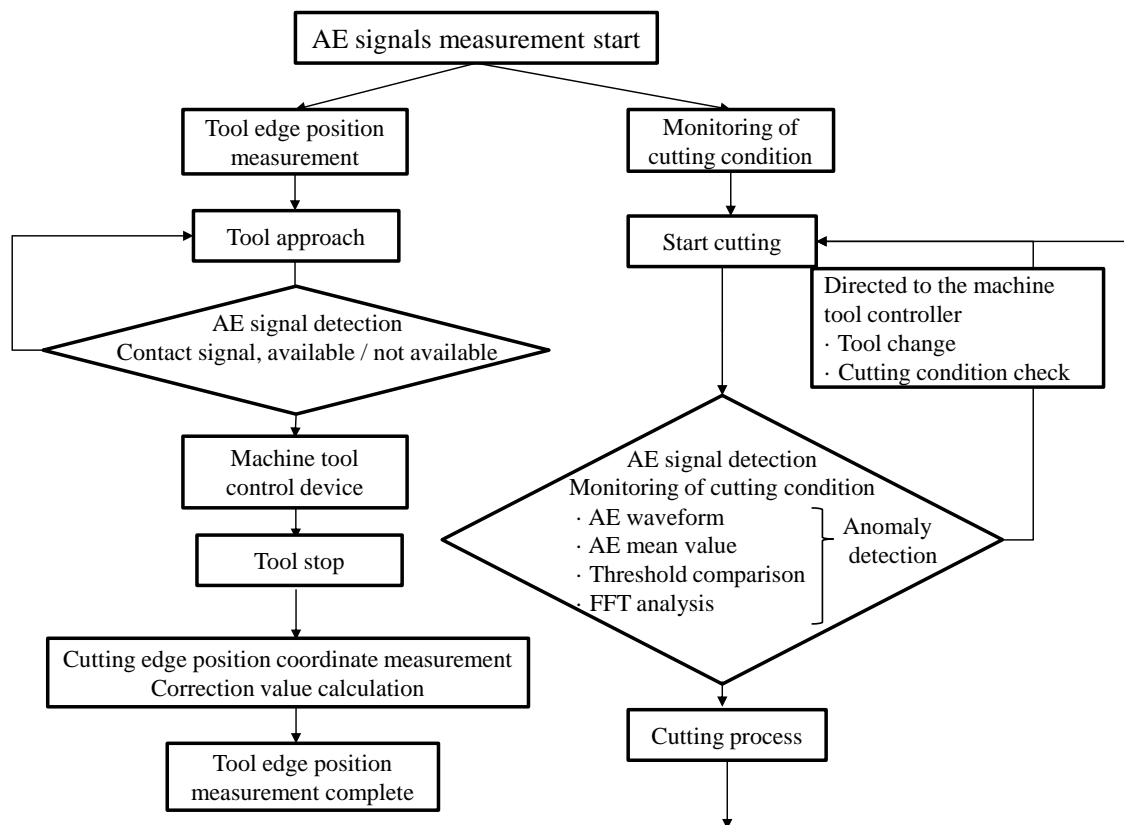


Fig. 1.4 Flowchart of on-measurement system of machine tools using AE technique.

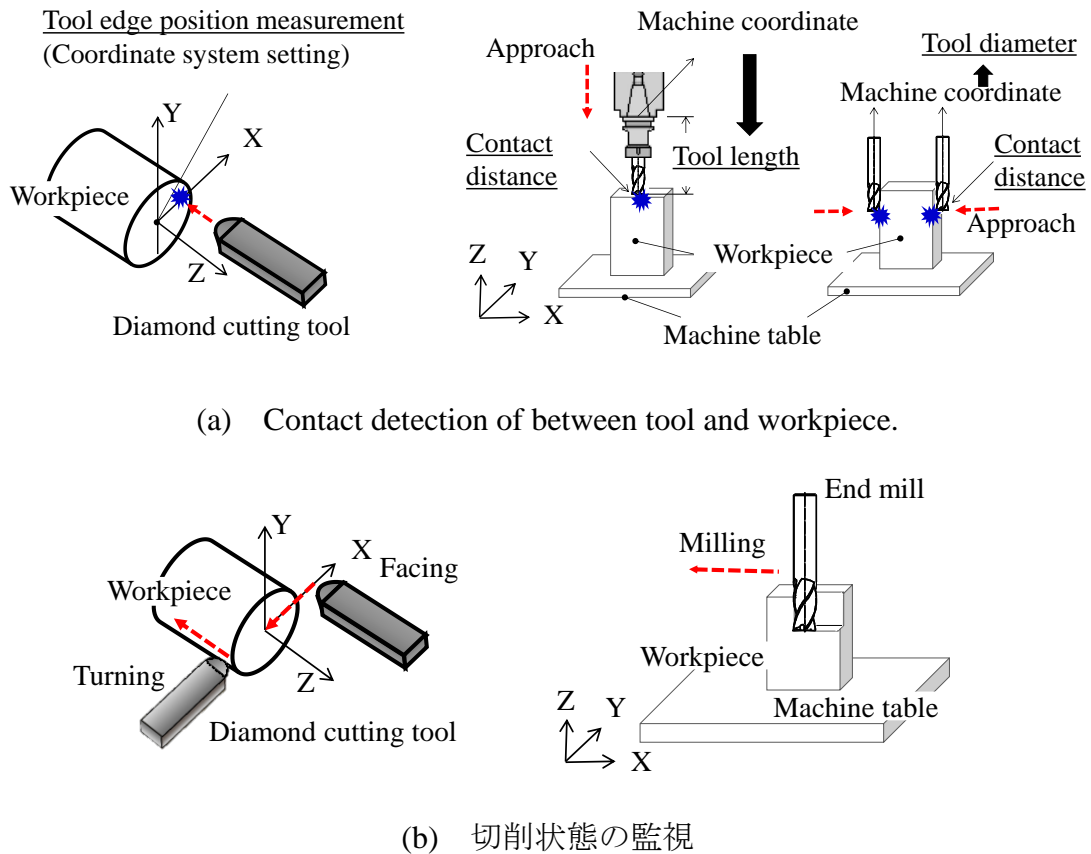


Fig. 1.5 Schematic of cutting edge position measurement and cutting process monitoring.

以上をまとめると、実際の加工現場で求められる工作機械の機上計測システムは、次のような基本性能をもつ機上計測システムが必要だと考えられる。

- ① シンプルかつ安価
- ② 加工に与える影響が小さい
- ③ 高感度，高応答，高 S/N 比
- ④ 主軸回転などで起こる動的誤差の影響を含んだ工具刃先位置計測が可能
- ⑤ X 軸，Y 軸および Z 軸の方向の刃先位置計測が一つのセンサで可能
- ⑥ 複数の工具を用いた場合の工具間の仕上げ面段差を抑制が可能
- ⑦ 切削状態の監視するインプロセス計測が可能
- ⑧ 一つのセンサで，工具刃先位置計測や切削状態の監視が可能

AE 技術を用いることで、これらの性能を満たす計測システムの構築が可能と考える。



そこで本研究では、AE 技術を利用して、超精密加工領域の高精度加工を特徴とするダイヤモンド工具による超精密旋盤および、一般加工領域の断続切削を特徴とするエンドミル工具によるマシニングセンタを対象に、プリプロセス計測およびインプロセス計測の検討を行う。それぞれの工作機械において、工具刃先位置計測に必要な工具と被削材の接触検知の適応範囲の調査を行い、AE 技術の有効性を検証する。本研究における切削状態の監視とは、既存研究で有効性を示されているビバリやチッピングなどの大きな破壊の現象を除き、AE 技術を用いて微小な切削状態の変化を検出することを前提とする。

超精密旋盤加工においては、AE 技術を利用した切削状態の監視として、加工条件の変更を行い、定常切削時の AE 信号と切削条件の相関を検討する。また、定常切削時に発生する被削材の鏡面のくすみなどの不安定な切削状態について AE 信号から確認する。マシニングセンタ加工においては、工具摩耗と AE 信号の関係性について検討する。加工精度に関しては、超精密加工領域と一般の加工領域について、加工形態に関しては、旋削系とフライス系について検討を行う。切削現象として、切削条件と AE 信号の関係および工具摩耗時に検出される AE 信号について検討を行う。これらの検討により、加工精度の領域、加工形態、切削現象の切削加工に必要な要素を体系的に把握したことになる。さらにマシニングセンタにおいて、AE 技術を利用した機上計測システムを構築し、工具刃先位置計測に関して評価・検証した。

## 1.4 本論文の構成

本論文では、AE 技術を用いた実験装置により、超精密加工領域の高精度加工を特徴とするダイヤモンド工具による超精密旋盤および断続切削を特徴とするエンドミル工具によるマシニングセンタの工具刃先位置の検出を行っている。また、超精密旋盤加工においては、切削状態の監視として、加工条件の変更を行い、定常切削時の AE 信号と切削条件の相関を検討し、定常切削時に発生する不安定な切削状態についても観察している。マシニングセンタ加工においては、工具摩耗と AE 信号の関係性について検討している。さらにマシニングセンタにおいて、AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムを評価・検証している。

本論文は、図 1.6 に示す全 7 章から構成されており、各章に関しては、それぞれ以下に示す内容となっている。

第 1 章「緒論」では、知能化された工作機械の構成要素とその要素の重要性について述べている。その中の工具刃先位置計測のプリプロセス計測と切削状態の監視のインプロセス計測に焦点をあて、現在の計測システムの問題点と本研究の必要性から、本研究の目的と研究指針について述べている。

第 2 章「超精密旋削加工における AE 技術を用いた接触検知」では、超精密加工領域の旋削加工において、工具と回転中の被削材の接触検知を行うために必要な AE 技術を用いた実験装置の構成について述べている。また、ダイヤモンド工具を回転中の被削材に接触させ、接触時に放出される弾性波を AE 技術により検出し、接触検知の適応範囲を検討している。さらに、切削初期の接触検知信号より被削材の取付け誤差の影響について言及している。

第 3 章「超精密旋削加工における AE 技術を用いた切削状態の監視」は、超精密加工領域の旋削加工における切削状態の監視として、加工中に発生する切削状態の変化について検討している。安定切削時における切削条件の変化では、切削速度、切込み深さ、送り速度を変更し、切削条件を変化させたときの加工現象と AE 信号の関係を検討している。また、安定切削中に起こる不安定な切削状態を AE 信号により検出できる可能性を示唆している。

第 4 章「マシニングセンタにおけるエンドミル工具の AE 技術を用いた接触検知」は、フライス系の切削加工で一般加工領域において使用されるマシニングセンタを対象に、エンドミル工具の接触検知の適応範囲を検討している。

第 5 章「マシニングセンタにおけるエンドミル工具の AE 技術を用いた切削状態の監視」は、AE 技術を利用した実験装置およびマシニングセンタを用いて、ステンレス鋼（SUS304）のスクエアエンドミルの側面加工を対象とし、工具の摩耗状態の監視を試み、AE 技術による工具摩耗の検出について検討している。

第 6 章「マシニングセンタの機上計測システムの基本性能評価」は、AE 技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムの構築し、AE 信号の検出を行うことでシステムの応答性や信頼性を検討している。また、異なるエンドミルの刃先位置の計測を行い、それぞれの工具で仕上げの切込み深さを与えて被削材を加工し、二つの加工面の段差および深さを測定することで評価している。さらに、

実用化のための工具アプローチの検討として、工具刃先位置を計測する際に生じるシステムの遅れにより接触深さを少なくする方法を考案し、検討している。

第7章「結論」は、本論文の各章での結言のまとめと今後の課題について述べている。

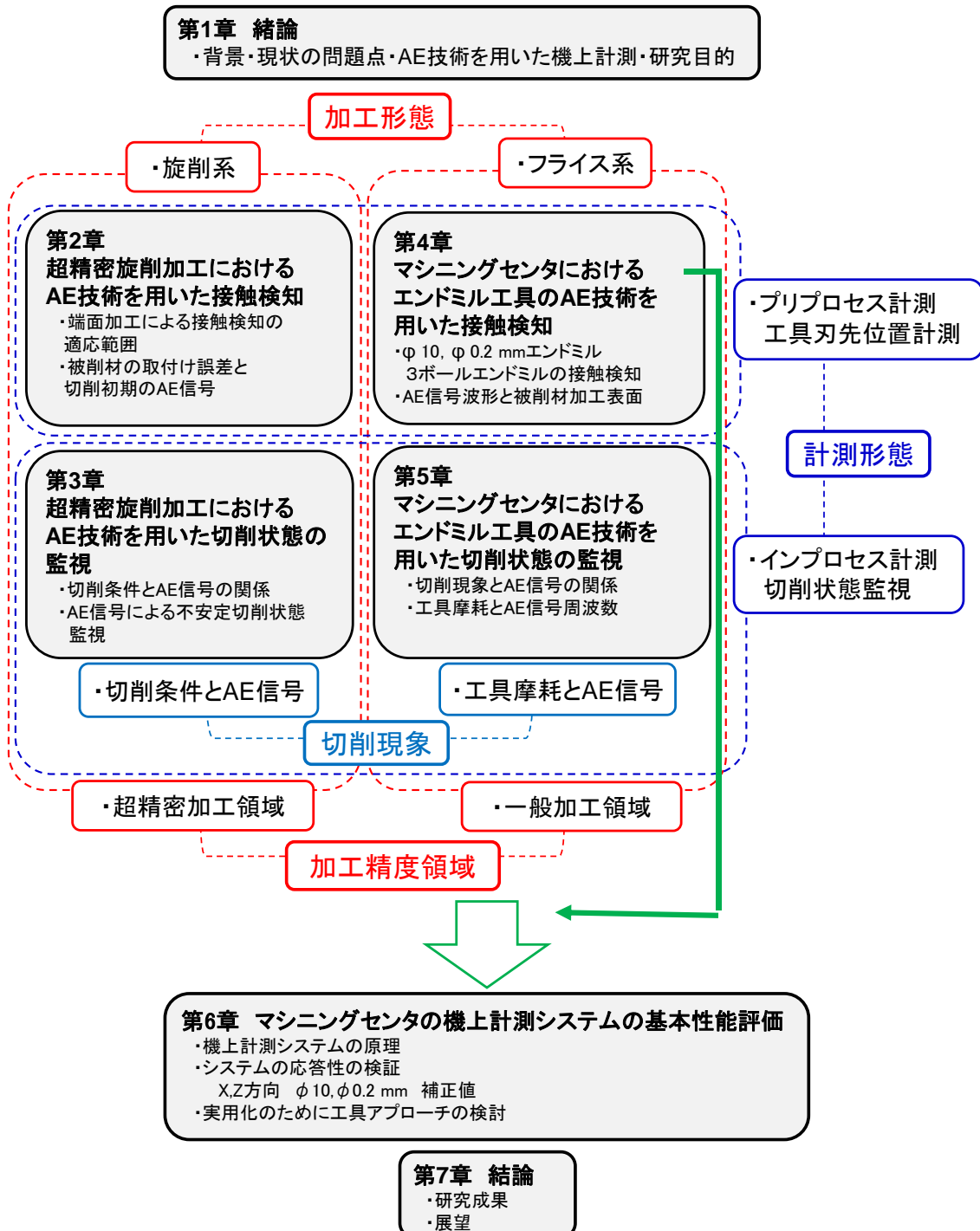


Fig. 1.6 Organization of the doctoral dissertation.

## 参考文献

- 1) 経済産業省経済産業政策局産業再生課：新産業構造ビジョン—第4次産業革命をリードする日本の戦略—，経済産業調査会，(2016)，pp.1-151.
- 2) 清水伸二：IOT インダストリー 4.0 時代に精密工学は何をすべきか，精密工学会誌，Vol.83，No.1，(2017)，pp.7-12.
- 3) 永野博：インダストリー 4.0 は何の革命か，情報管理，Vol.59，No.3，(2016)，pp.147-155.
- 4) K. Henning, et al. (Communication Promoters Group of the Industry-Science Research Alliance): Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 —Securing the future of German manufacturing industry, Final report of the Industrie 4.0 Working Group—, Forschungsunion, (2013), p.18.
- 5) 株式会社三菱総合研究所，第4次産業革命における産業構造分析とIoT・AI等の進展に係る現状及び課題に関する調査研究，(2017)，p.6.
- 6) 内閣府：科学技術基本計画 平成28年1月22日，(2016)，pp.9-15.
- 7) 日本経済再生本部：日本再興戦略 2016—第4次産業革命に向けて—平成28年6月2日，(2016)，pp.50-57.
- 8) 経済産業省 製造産業局：製造業を巡る現状と政策課題，(2017)，p.10.
- 9) 亀山雄高，成瀬哲也，水谷正義，粕豊，佐々木慶子，大森整，澤田浩之，松木則夫：技能継承の支援を目的とした切削加工技能の抽出・体系化ツールの開発，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 75，No. 757，(2009)，pp.90-92.
- 10) 特許庁総務部企画調査課 知財動向班：平成28年度特許出願技術動向調査技術報告書 スマートマニファクチャリング技術，(2017)，p.1.
- 11) ロボット革命イニシアティブ協議会：スマートマニファクチャリングの実践—ケース現場力を活用するサイバーフィジカル生産システム—，(2017)，pp.3-7.
- 12) 白瀬敬一：デジタル時代のモノづくり技術の未来—CAM-CNC 統合による革新的な NC 工作機械—，機械技術，Vol.65，No.1，(2017)，pp.18-22.

- 13) 吉岡 勇人:精密加工におけるインプロセス計測, 精密工学会誌, Vol.80, No.7, (2014), pp.646–649.
- 14) 松原 厚: 機械加工におけるプロセス計測/制御技術の現状と動向, 計測と制御, Vol.41, No.11, (2002), pp.781–786.
- 15) 近藤英二: 切削加工における状態監視と制御に関する最近の研究動向, 精密工学会春季大会学術講演会論文集, E02 キーノートスピーチ, (2010), pp.345–346.
- 16) S. Mandal: Applicability of Tool Condition Monitoring Methods Used for Conventional Milling in Micromilling - A Comparative Review, Journal of Industrial Engineering, Vol.2014, (2014), Article ID 837390, pp.1–8.
- 17) 蛭原建三, 山本明, 河合知彦, 羽村雅之: 超精密多軸加工機によるマイクロ・ナノ切削加工 (マザーマシンの新しい展開, <特集>進化するマザーマシン—多軸制御工作機械とその応用技術—), 日本機械学会誌, Vol.11, No.1073, (2008), pp.320–324.
- 18) D.E. Lee, I. Hwang, C.M.O. Valente, J.F.G. Oliveira, D.A. Dornfeld: Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.46, No.2, (2006), pp.176–188.
- 19) T. Aoyama, N. Takahata: Development of the Automatic Positioning System of Microtool Edge in Micromachining of Glass Plate for Microfluidic Chips, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.59, No.1, (2010), pp.551–554.
- 20) H. Yoshioka, H. Shinno, H. Sawano, R. Tanigawa: Monitoring of Distance Between Diamond Tool Edge and Workpiece Surface in Ultraprecision Cutting Using Evanescent Light, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.63, No.1, (2014), pp.341–344.
- 21) 洪榮杓, 蛭原建三, 山本明, 河合知彦: 超精密加工機における工具刃先とワーク面の接触検知機能—工具刃先のダイレクトセンシング—, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, H08, (2007), pp.678–679.
- 22) 小原治樹, 富田悠, 加門真一, 笹木亮, 森田昇, 池本有助, 神代充: ナノメータ加工のための高精度工具位置出し技術の開発 (第1報) —基礎実験—, 精密工学会誌, Vol.81, No.4, (2015), pp.339–343.

- 23) 山下宏:微細加工に挑戦するレーザ計測器, 機械技術, Vol.58, No.4, (2010), pp.44–45.
- 24) 山本剛司: CCD カメラ搭載の非接触式工具位置測定器ダイナビジョンの機能と実際, ツールエンジニア, Vol.48, No.3, (2007), pp.32–37.
- 25) 長谷川浩幸: 精密・微細加工でマシンの限界性能を引き出す機上原点精密測定装置「ジェイコア」の活用, ツールエンジニア, Vol.46, No.8, (2005), pp.34–39.
- 26) 倉橋康浩: 最近のマシニングセンタにおけるオンマシン計測技術, 機械技術, Vol.58, No.4, (2010), pp.35–37.
- 27) 鈴木伸哉, 神谷和秀, 前田幸男: マイクロエンドミルと被削材との間隔のインコヒーレント光による非接触距離測定法, 先端加工, Vol.26, No.1, (2008), pp.27–32.
- 28) H. Shinno, H. Hashizume, H. Yoshioka: Sensor-less Monitoring of Cutting Force during Ultraprecision Machining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.52, No.1, (2003), pp.303–306.
- 29) 柿沼康弘, 上河内貴文: 切削力オブザーバによる微細工具のサブマイクロ接触検知, 精密工学会春季大会学術講演論文集, K66, (2007), pp.687–688.
- 30) 頼光哲, 斉藤義夫, 伊東誼, 丸橋康彦: 切削抵抗の動的成分による工具摩耗の検出, 精密機械, Vol.50, No. 7, (1984), pp.1117–1122.
- 31) 檜村幸辰: 切削分力比率による工具逃げ面摩耗の予測に関する研究(第1報) —解析的方法による摩耗判定基準の設定—, 精密機械, Vol.51, Vol.11, (1985), pp.2115–2121.
- 32) Y. Altintas: Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.114, No.4, (1992), pp.386–392.
- 33) 茨木創一, 坂平昌浩, 新家秀規, 松原 厚, 垣野 義昭: エンドミル加工における切削抵抗の推定法—主軸モータ電流とサーボモータ電流による切削力ベクトルの幾何学的合成による推定法—, 精密工学会誌, Vol.70, No.8, (2004), pp.1091–1095.

- 34) D. Kurihara, Y. Kakinuma, S. Katsura: Cutting Force Control Using Sensor-less Cutting force Monitoring Method, Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, Vol.5, No.4, (2010), pp.955–965.
- 35) Y. Kakinuma, Y. Sudo, T. Aoyama: Detection of Chatter Vibration in End Milling Applying Disturbance Observer: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.60, No.1, (2011), pp.109–112.
- 36) 村田光昭, 黒河周平, 大西修, 土肥俊郎: 工具・被削材間接触電気抵抗変化による正面フライス工具摩耗のインプロセス検出, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.803, (2013), pp.2546–2557.
- 37) 精機学会編: 精密工作便覧, コロナ社, (1972), p.86.
- 38) 平尾政利, 佐田登志夫: 切削工具面の局部温度測定, 精密機械, Vol.40, No.2, (1974), pp.156–161.
- 39) J. Shinozuka, H.B. Jaharadak: Measurement of the Temperature Distribution at the Tool-chip Interface by Using a Cutting Tool with Seven Pairs of Built-in Micro Cu/Ni Thermocouples, Advanced Materials Research, Vol.1136, (2016), pp.586–591.
- 40) 三好由記博: モデルパラメータの変化を使った切削異常状態のインプロセス検知, 精密工学会誌, Vol.59, No.3, (1993), pp.467–472.
- 41) Y. Yao, X.D. Fang, G. Arndt: On-Line Estimation of Groove Wear in the Minor Cutting, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.40, No.1, (1991), pp.41–44.
- 42) M. Mitsuishi, S. Warisawa, R. Hanayama: Development of an Intelligent High-Speed Machining Center, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.50, No.1, (2001), pp.275–280.
- 43) J.Z. Zhang, J.C. Chen: Tool Condition Monitoring in an End-milling Operation Based on the Vibration Signal Collected Through a Microcontroller-based Data Acquisition System, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.39, No.1–2, (2008), pp.118–128.
- 44) 竹山秀彦, 山崎和雄, 沢井信重: 切削音による工具摩耗のインプロセス測定, 精密機械, Vol.42, No.503, (1976), pp.1063–1066.

- 45) 河野良弘, 左敦穂, 里中忍, 吉満真一, 山下俊一: CCD画像による小径エンドミルの挙動監視システム—システム性能特性—, 精密工学会誌, Vol.71, No.3, (2005), pp.363–368.
- 46) 河野良弘, 左敦穂, 里中忍, 吉満真一, 山下俊一: CCD画像による小径エンドミルの挙動監視システム (第2報) —工具の撓み測定による切削力の推定—, 精密工学会誌, Vol.72, No.3, (2006), pp.398–402.
- 47) 沢井信重, 宋凌樺, 朴和永: 画像処理による工具摩耗の自動測定, 精密工学会誌, Vol.61, No.3, (1995), pp.368–371.
- 48) 澤井信重, 碓井雄一: エンドミル加工における切り屑挙動のモニタリング, —乾式切削と湿式切削の相違—, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, D14, (2004), pp.273–274.
- 49) 奥田孝一, 長谷川素由, 布引雅之: 超精密切削加工における工具温度上昇と加工誤差, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.67, No.656, (2001), pp.1170–1175.
- 50) 岸輝雄: AE による材料強度の評価 (I), 材料, Vol.29, No.323, (1980), pp.765–775.
- 51) 岸輝雄: AE による材料強度の評価 (II), 材料, Vol.29, No.324, (1980), pp.908–915.
- 52) 湯山茂徳, 山田實, 関根和喜: タンク底板の腐食損傷診断における国内外の AE 試験適用の現状, 圧力技術, Vol.40, No.4, (2002), pp.176–184.
- 53) 長谷重蘭, 和田正毅, 広田平一: 凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関, トライボロジスト, Vol.50, No.11, (2005), pp.808–815.
- 54) 森脇俊道: AEによる切削状態認識の現状と将来, 日本機械学会誌, Vol.89, No.807, (1986), pp.17–23.
- 55) 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎: 基礎切削加工学, 共立出版, (1984), p.56.
- 56) Xiaoli.Li: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring During Turning, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.42, No.2, (2002), pp.157–165.
- 57) 垣野義昭, 江田弘, 貴志浩三, 山田卓郎, 藤原彰彦: アコースティックエミッションを用いた砥石・工作物接触開始時期の検出法, 精密機械, Vol. 48, No.3, (1981), pp.336–340.



- 58) S. Min, H. Sangermann, C. Mertens, D. Dornfeld: A Study on Initial Contact Detection for Precision Micro-mold and Surface Generation of Vertical Side Walls in Micromachining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.57, No.1, (2008), pp.109–112.
- 59) S. Min, J. Lidde, N. Raue, D. Dornfeld: Acoustic Emission Based Tool Contact Detection for Ultra-precision Machining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.60, No.1, (2011), pp.141–144.
- 60) K.A. Bourne, M.B.G. Jun, S.G. Kapoor, R.E. DeVor: An Acoustic Emission-based Method for Determining Contact Between a Tool and Workpiece at Microscale, Journal of Manufacturing Science and Engineering Special Section Micromanufacturing, Vol.130, No.3, (2008), pp.311011–311018.
- 61) W. König, K. Kutzner, U. Schehl: Tool Monitoring of Small Drills with Acoustic Emission, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.32, No.4, (1992), pp.487–493.
- 62) 大宮毅, 稲崎一郎, 青山藤詞郎, 酒井勝, 萩尾雄一: アコースティックエミッションによるドリル折損のインプロセス検出, 日本機械学会論文集C編, Vol.51, No.472, (1985), pp.3322–3329.
- 63) 小島浩二, 稲崎一郎, 三宅亮一: アコースティックエミッションを利用したドリル折損の予知, 日本機械学会論文集C編, Vol.51, No.467, (1985), pp.1838–1843.
- 64) 垣野義昭, 水津弘次, 橋谷道明, 山田卓郎, 吉岡肇, 藤原彰彦: アコースティックエミッションを用いた切削工具の熱き裂の検出, 精密機械, Vol.47, No.6, (1980), pp.718–722.
- 65) 相田収平, 稲崎一郎, 福岡真一郎: AEを利用した工具チップング検出システムの開発, 日本機械学会論文集C編, Vol.52, No.481, (1986), pp.2563–2569.
- 66) 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壊の検出, 精密機械, Vol.46, No.3, (1980), pp.344–349.
- 67) H. V. Ravindra, Y. G. Srinivasa, R. Krishnamurthy: Acoustic Emission for Tool Condition Monitoring in Metal Cutting, Wear, Vol.212, No.1, (1997), pp.78–84.

- 68) 高津戸光雄, 高田昇: AE を用いた旋削工具の寿命予知に関する研究, 精密工学会誌, Vol.56, No.10, (1990), pp.1900–1905.
- 69) 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, Vol.46, No.7, (1980), pp.875–880.
- 70) 竹下拓利, 稲崎一郎: アコースティックエミッションセンサを用いたフライス加工状態の自動監視, 精密工学会誌, Vol.59, No.2, (1993), pp.269–274.
- 71) 北野彰彦, 中村示, 山本明: 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—, 精密工学会誌, Vol.52, No.7, (1986), pp.1167–1173.

## 第2章 超精密旋削加工における AE 技術を用いた接触検知

### 2.1 緒 言

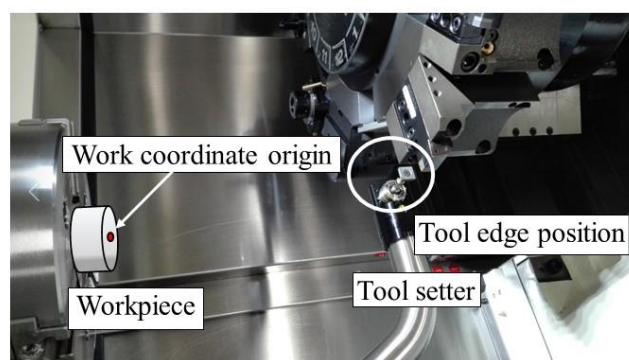
本章では、超精密旋盤による旋削加工において、AE 技術によりダイヤモンド工具と回転中の被削材の接触検知の適応範囲について検討する。接触検知実験は実際の加工状態で行うため、工具の形状精度、工具摩耗による刃先形状および工作機械の熱変形などを含んだ工具刃先位置の変化を捉えることができる。そのときの接触信号を検出することにより、刃先位置を高精度に計測することができ、座標系の設定にも活用できる。

一般に旋削系の座標系設定は、工具刃先位置の計測と被削材の原点位置座標を求め、工具刃先と被削材原点の相対距離を正確に計測する。図 2.1 は工具刃先位置の測定の一例を示す。図 2.1 (a) は接触式のツールセッタによる計測であり、工具を基準となるツールセッタに接触させ、作業空間内の刃先位置を検出する方法である。図 2.1 (b) は非接触式の CCD カメラによる計測であり、CCD カメラの中心位置が作業空間内で決まっており、工具刃先を見ながら刃先位置計測する方法である。刃先位置情報のみでは、工具と被削材の相対関係がわからないため、被削材の原点位置が必要になる。被削材の原点位置に関しては、タッチプローブや基準工具で、被削材に直接接触して原点位置を設定する。そのため、計測には二つの異なる計測機器が必要となり、間接誤差が生じるため、製品精度以上の計測が困難である。

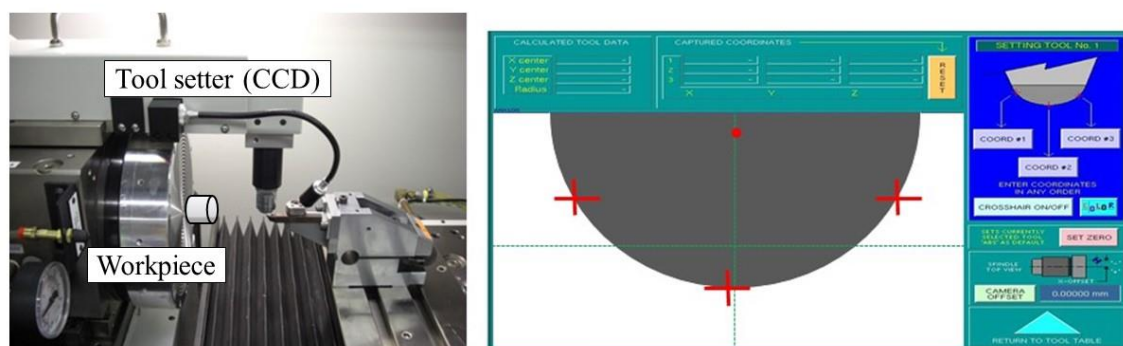
超精密旋削加工におけるダイヤモンド工具による加工精度は、工作機械の運動精度や熱変形に大きく依存する<sup>1)</sup>。例えば、銅の超精密切削加工において、熱電対を用いて計測した切削温度は、200 °C 程度になることが報告<sup>2)</sup>されている。加工雰囲気温度が変化するため、工具交換などにより工具刃先位置を計測するときには、工作機械の熱変形による工具刃先位置の変化に注意しなければならない。したがって、加工精度維持のための工具刃先位置計測は、実加工条件で工具を直接被削材に接触させて、被削材と工具刃先の相対距離を測定している

ことが多い。また、ダイヤモンド工具による微細加工では、ナノメートルオーダの機械加工の実現のために、マイクロメートルオーダの微小な工具が必要となる<sup>3)</sup>。その工具切れ刃の刃先丸みは、数ナノメートルとされ、非常に鋭利にできしており、硬度はあるが脆性破壊しやすい。そのため、工具を被削材に接触させる際には、微小な切込みでなければならない。これらのことより、AE 技術を用いた接触式の機上計測システムは、実加工状態での計測が可能であり、工作機械の熱変形による刃先位置の変化や工具形状精度を包括した刃先位置を計測することが可能なため最適だといえる。

そこで本章では、ダイヤモンド工具を回転中の被削材に接触させ、接触時に放出される弾性波を AE 技術により検出し、接触検知の適応範囲について検討する。さらに、切削初期の接触信号より被削材の取付け誤差の影響について言及した。



(a) Contact type tool setter measurement.



(b) Non-contact CCD camera measurement.

Fig. 2.1 Measurement method of various tool cutting edge positions.

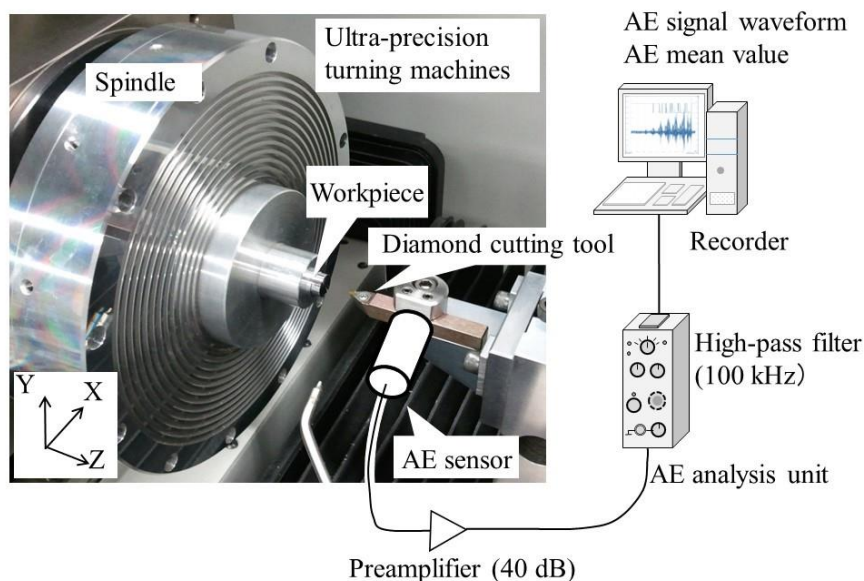
## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験装置

図 2.2 は、切削および接触に伴う加工現象で発生する弾性波を検出できる AE 技術を利用した実験装置である。実験は、図 2.2 (a) に示す X, Z 軸の 2 軸加工用の超精密旋盤 (Precitech Inc., Nanoform200) を用いた。図 2.2 (b) は AE 技術を用いた実験装置の構成を示している。本実験装置は、AE 波を検出し AE 信号に変換する AE センサ (樹エヌエフ回路設計ブロック, AE-905S), 微弱な AE 信号に変換する AE センサ (樹エヌエフ回路設計ブロック, AE-905S), 微弱な AE 信



(a) Appearance of ultra-precision processing machine.



(b) Structure of experimental setup.

Fig. 2.2 Experimental apparatus using AE technique.

号を増幅する増幅器（プリアンプ）（㈱エヌエフ回路設計ブロック，AE-912），さらに増幅するための増幅器（メインアンプ），フィルタ処理および信号処理を行う AE 計測装置（㈱エヌエフ回路設計ブロック，AE9922）からなる．そして，処理した信号の表示・解析を行うコンピュータから構成されている．

工具と被削材の接触信号を検出するために，AE センサは工具に取付けた．AE センサの取付け位置は，シャンクの側面，下面，後方が考えられる．予備実験において，AE センサの取付け位置は加工点の近くが信号検出には適していることがわかっている．そこで AE センサは，加工点に近く，かつ加工の妨げにならない取付けやすい位置である工具側面に取り付けた．AE センサは，共振型の PZT 圧電セラミックス製で，共振周波数 1 MHz のものを使用した．その周波数特性曲線を図 2.3 に示す．AE センサには様々なものが開発されており，その中で共振周波数が 1 MHz のものを選定した理由は，一つのセンサで接触検知と工具摩耗の切削現象を認識するためである．切削加工現象のせん断破壊（接触検知）と工具摩耗は，トライボロジーのアブレシブ摩耗現象に類似する．長谷ら<sup>4,5)</sup>，和田ら<sup>6)</sup>は，摩耗形態によって AE 信号周波数を整理しており，アブレシブ摩耗では，0.25～1 MHz の周波数帯域の信号を検出しており，凝着摩耗では，1～1.5 kHz の周波数帯域の信号を検出している．これらの二つの摩耗現象を検出可能なセンサを選定している．

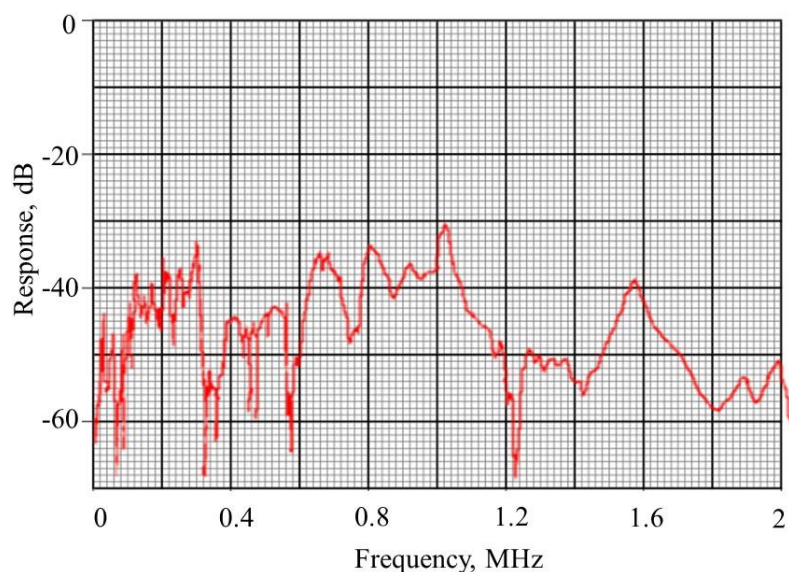


Fig. 2.3 Frequency response curve of the AE sensor (resonant type).

図 2.4 は、本実験における AE センサおよび治具による取付け方法を詳細に示したものである。AE センサは高感度であるため、センサの取付け方により計測精度に大きく依存する。本研究において、AE センサを取付ける対象物は、工具または被削材であり、取付け場所が平面なため、直接取付けることが可能である。取付け面が平面でない場合は、セラミックスや金属性の導波棒を介して AE センサを取付ける<sup>7)</sup> 必要があり感度が少し低下する。本実験では、簡単に取付けることが可能なため、図 2.4 の治具により AE センサを固定する。しかしながら、センサの感度は、接触面の粗さ、形状精度により影響を受ける。その影響をなくすために、AE センサの接触面に伝達の補助媒体としてワセリンを塗布している。センサの治具と AE センサの接触により、電氣的ノイズが発生するため、その二つを絶縁テープなどにより絶縁<sup>8)</sup> している。これらのことより、AE センサを取り付けるときにはノイズ対策を施し、実験前に NDIS2110 の測定法<sup>9)</sup> を参考に、刃先先端でシャープペンシルの芯の圧折（ペンシルテスト）を行って、実験ごとの AE 信号の出力レベルに差がないことを確認している。

計測において重要である増幅率、フィルタ、しきい値の設定については、それぞれの工作機械または加工状態によって異なるため、つぎのように決定することが望ましい。設定値を決めるために、それぞれの実験における AE 信号振幅の最大値を予備実験または過去のデータから求める。増幅率は、その予備実験の結果から計測装置の測定範囲に合うように総合利得を決定する。フィルタは、過去の経験から電気ノイズなどの 100 kHz 以下の信号の影響が最小になる

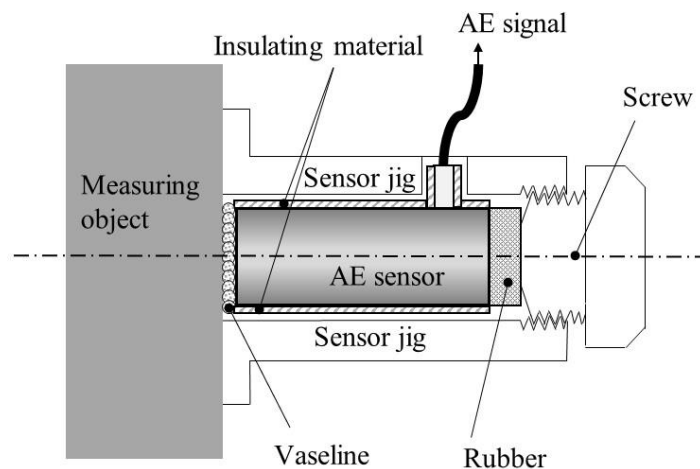


Fig. 2.4 Schematic diagram of the AE sensor installation.



ように、ハイパスフィルタを用いて実際に確認しながら周波数を設定する。しきい値は、トリガ電圧として使用され、AE 信号の記録やマシニングセンタの入力信号のために用いられる。そのため、接触や加工の信号を確実に検出する必要があり、誤検出しないようにノイズレベルの最大値を確認しながら信号の上方にしきい値を設定する。

### 2.2.2 工具刃先位置の検出に関する接触検知実験方法および実験条件

本実験装置により、工具と被削材の接触により発生する AE 信号を検出し、AE 技術による接触検知の適応範囲を検討した。工具（株式会社アライドマテリアル、New D）は単結晶ダイヤモンド工具を、被削材はアルミニウム（A1070）と無酸素銅（C1020）を用いた。工具と被削材の接触を検知することで、工具刃先位置を計測する方法を用いており、実験装置により AE 信号が検出されたときの Z 軸の座標が工具刃先位置となる。一般的な工具の Z 軸方向の座標系設定では、図 2.2 に示す Z 軸方向から工具を直接被削材の端面に対して垂直にアプローチして接触させ、その位置を工具刃先位置とする方法が多く用いられている。

しかしながら、ダイヤモンド工具の場合、刃先が鋭利なため Z 軸方向から直接接触させると接触の判断が難しく、また接触深さも大きくなった場合、切れ刃が破損しやすい。そのため、加工現場では図 2.5 (a) のように被削材の外側で Z 軸方向に微小な切込みを入れ、X 軸方向に端面加工を行い、接触するまで繰り返すアプローチ方法により、切りくずや表面の形状を見て工具の接触を確認している。切りくずなど接触を判断するには経験者や熟練者の技術が必要となる。本実験では上述した方法で工具を被削材にアプローチさせ、AE 技術を用いて接触検知の有無を確認した。また、図 2.5 (b) のように被削材の中心から外側に向かって同様にアプローチを行い、切削速度の低い中心部においても接触検知について検討した。

本実験における加工条件を表 2.1 に示す。切込み深さを 10, 20, 50, 100, 200 nm, 2  $\mu$ m と変更し、端面の加工方向は外周から中心へと、中心から外周へと加工する 2 通りとした。切削油は、工具の下方よりミスト供給した。被削材の端面中心部は、工具の取付け高さの影響をなくすため、 $\phi 2.0$  mm 程度の穴をあけた。実験は 5 回程度行い、それぞれ条件で接触初期の AE 信号検出の有無を調べた。



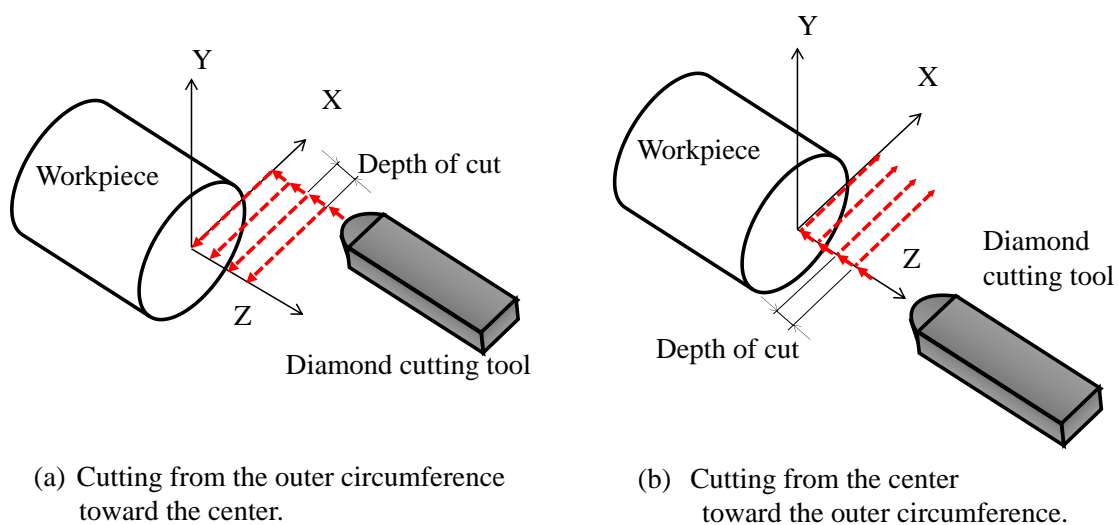


Fig. 2.5 Contact method to measure cutting tool edge position.

Table 2.1 Experimental conditions for contact detection.

Tool	A single crystal diamond cutting tool, Rake angle $0^\circ$ , Clearance angle $7^\circ$ , Corner radius, 0.5 mm
Workpiece	$\phi$ 12.7mm Pure aluminum (A1070) Oxygen-free copper (C1020)
Cutting speed $V$	60 m/min (The outer circumference) (Spindle speed constant $1500 \text{ min}^{-1}$ )
Feed speed $f$	$3.3 \mu\text{m/rev}$ (5 mm/min)
Cutting direction	Facing (from the outer circumference toward the center, from the center toward the outer circumference)
Depth of cut $a$	10, 20, 50, 100, 200 nm, $2 \mu\text{m}$
AE sensor attachment position	Tool side
Sampling frequency	2 MHz
AE amplification factor	70 dB
AE high-pass filter	100 kHz

計測条件は、背景ノイズを低減するため 100 kHz のハイパスフィルタ処理し、AE 信号（AE 原波形と AE 平均値電圧波形）を記録計（サンプリング周波数 2 MHz）に取り込む構成になっている。増幅率は総合利得 70 dB とした。計測条件は、接触初期の信号確認のために、記録計のトリガ電圧はノイズレベルの最大値の数 mV 上方の 300 mV に設定した。

### 2.2.3 AE 信号の評価パラメータ

AE 信号の評価パラメータとして、一般的に使用されるパラメータを図 2.6 に示す。図 2.6 は、(a) AE 原波形、(b) エンベロープ信号波形および (c) イベント信号波形の概略図である。図 2.6 (a) は、弾性波を AE センサにより AE 信号として計測された AE 原波形である。

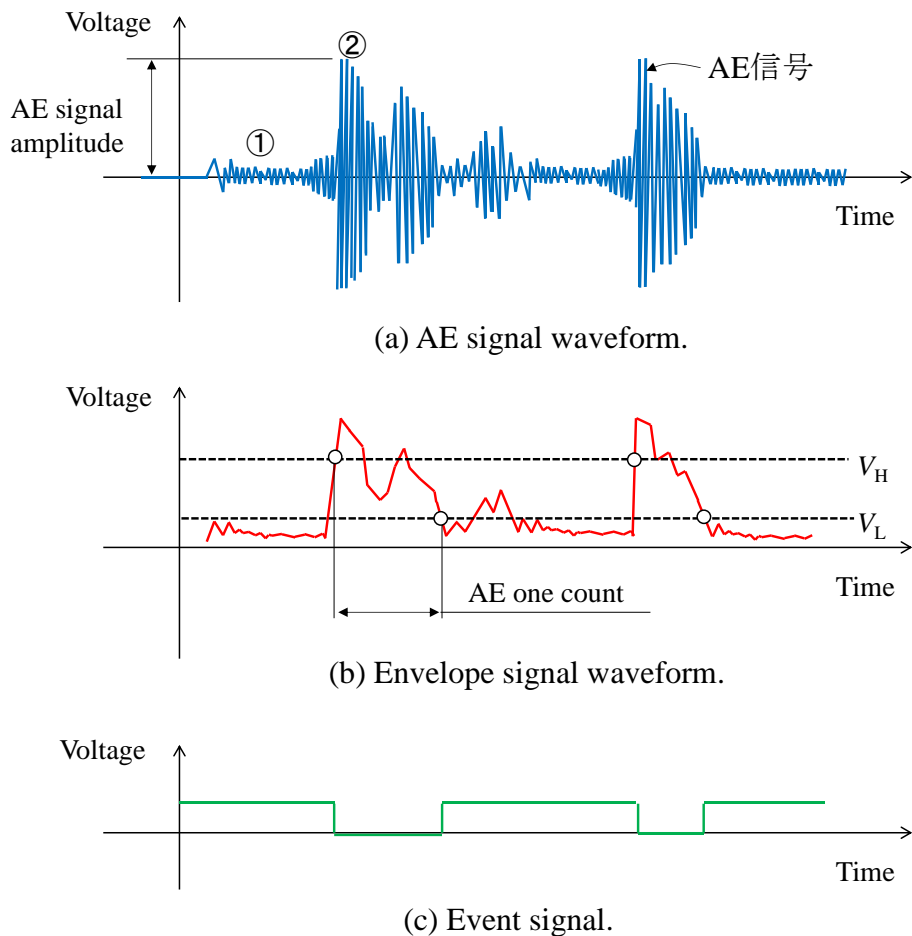


Fig. 2.6 Outline of various AE signals.

実験で検出された信号波形は、①が背景ノイズであり、②が切削加工中に検出された信号となる。この AE 原波形を半波整流して包絡線検波した波形が (b) のエンベロープ信号波形となる。この波形にしきい値を設定し、 $V_H$  (ハイレベルしきい値) を超え、 $V_L$  (ローレベルしきい値) 以下に減衰するまでを 1 イベントとして、計測された波形が (c) のイベント信号波形である。

本研究において主な AE 評価パラメータとして、AE 原波形、エンベロープ信号波形およびイベント信号波形を用いた。また、AE 原波形から算出される AE 平均値、AE 実効値、設定したしきい値を超えた数を数えた AE 計数、高速フーリエ解析 (以下、FFT 解析と称す) および短時間フーリエ解析 (以下、STFT 解析と称す) を用いた。エンベロープ信号波形からは、ローパスフィルタ (遮断周波数: 0.32 Hz) を通した AE 平均値電圧波形、イベント信号波形を用いた。

## 2.3 実験結果および考察

### 2.3.1 接触検知の適応範囲

表 2.2 は、加工方向の違いにより工具が被削材に接触し、設定したトリガレベルの 300 mV を超えたときに検出された AE 信号の有無を示したものである。表 2.2 は、被削材が A1070 と C1020 の結果を示しており、両方ともに同じ結果となった。実験は、同じ切込み深さで 5 回程度行っており、◎は実験すべてにおいて AE 信号を検出できたことを示す。○は検出頻度にばらつきがあったことを示す。

本実験条件において、AE 技術により、被削材 A1070、C1020 の場合、切込み深さ 10 nm で工具と被削材の接触を検知できた。しかしながら、切込み深さ 10 nm に関しては、検出頻度にばらつきがみられた。これは、実験で使用した工作機械の最小分解能は 8.6 nm であり、フォローイングエラーが約  $\pm 15$  nm であったため、機械の位置決め精度によるものだと考えられる。

表 2.2 より、被削材の中心 ( $\phi 2$  mm) から外周方向に向けて加工を行った接触検知実験において、切込み深さが 200 nm より小さいときは、切削初期に AE 信号を確認することができなかった。しかしながら、どの切込み深さでも、中心付近を超えて  $\phi 4 \sim 6$  mm 近傍で、AE 信号を確認することができた。本実験は、主軸回転速度一定制御を使用しており、中心部の切削速度は  $\phi 2$  mm から算出する

と 10 m/min 程度と小さくなる．そのため中心部では検出した信号振幅のレベルが，設定したトリガレベルより小さいために確認できなかったといえる．一般的にダイヤモンド工具による加工では，切削速度を低く設定することはないので，中心から外側への加工方法において検出できなくても問題ないといえる．これにより，AE 信号の検出には切削速度が関係すると考えられる．切削速度と AE 信号の関係については，3.3.1 項で述べる．

したがって，ダイヤモンド工具の一般的な切削速度において，AE 技術を用いた接触検知の適応範囲は，最小で 10 nm であることが確認できた．また，接触の信号を利用すれば Z 軸方向の刃先位置座標が検出できるため座標系の設定が可能である．

Table 2.2 Applicable range of contact detection based on cutting direction.  
(A 1070, C 1020)

	Depth of cut, nm					
	10	20	50	100	200	2 $\mu$ m
Facing						
From the outer circumference toward the center	○	◎	◎	◎	◎	◎
From the center toward the outer circumference	×	×	×	×	×	◎

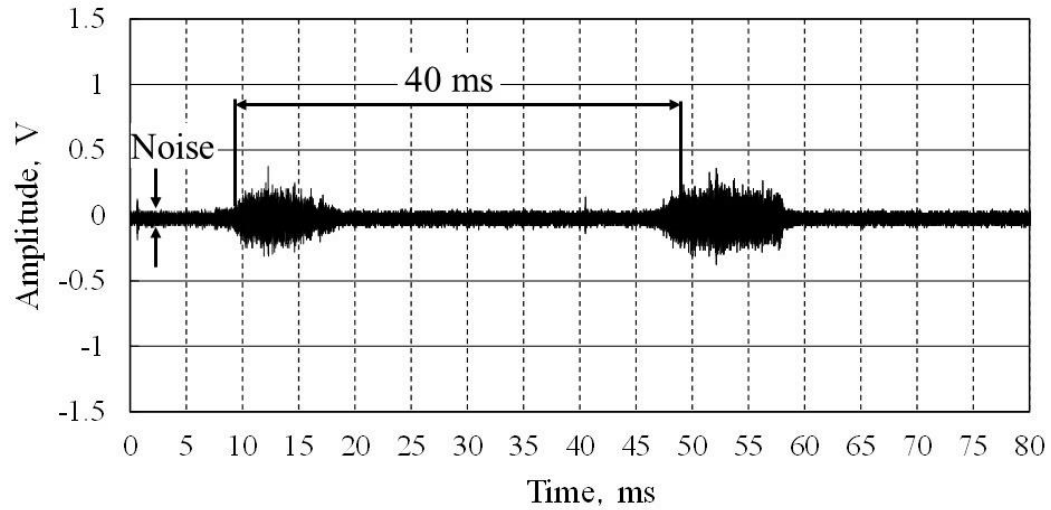
◎: All detectable, ○: Variations in detection, ×: Not detectable

### 2.3.2 切削初期の AE 信号と被削材の取付け誤差

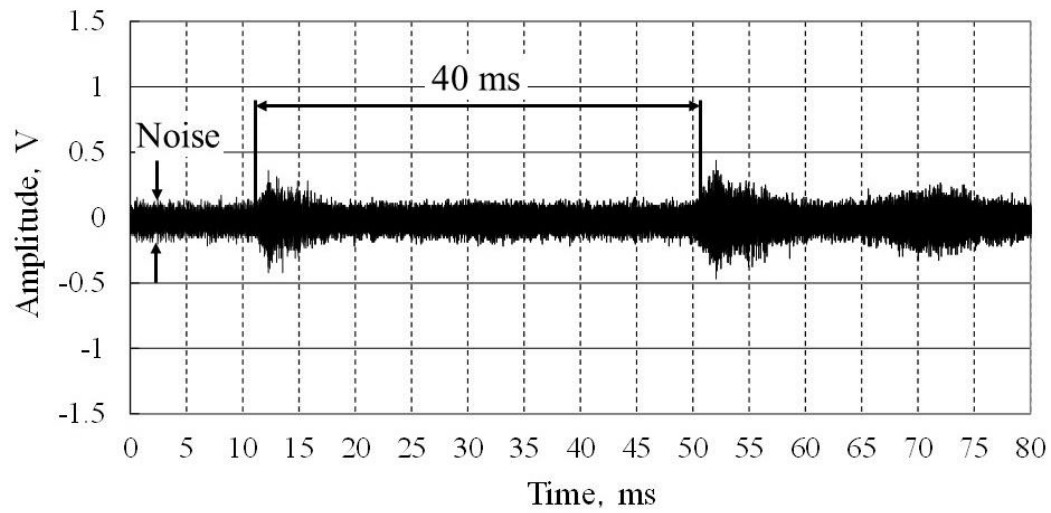
図 2.7 は、表 2.1 の工具刃先位置検出における実験条件において、AE 信号を検出できたときの AE 原波形である。図 2.7 (a), (b) はそれぞれ A1070 と C1020 の切込み深さ 10 nm で外周から中心に向かって端面加工したときに検出した切削初期の AE 原波形を示す。図 2.7 (a), (b) とともに、10 ms 近傍からある一定の周期で検出した信号が加工に伴う AE 信号である。AE 信号の周期は、最初に検出した信号から約 40 ms であった。本実験の回転速度は  $1500 \text{ min}^{-1}$  で被削材が 1 回転するのに要する時間が 40 ms であり、検出された AE 信号の周期と同じであった。このとき、被削材の取付け誤差は外周の振れ精度で  $10 \mu\text{m}$  であった。このことから、この周期は被削材の取付け誤差により、被削材の外周部を切削後、被削材から離れて 1 回転したのちにまた切削する断続切削時の信号といえる。

ここで、被削材の振れ精度の違いによる AE 信号の変化について調べた。図 2.8 は切込み深さ  $2 \mu\text{m}$  における端面加工の AE 原波形である。図 2.8 は、図 2.7 の結果よりも、AE 信号の取得時間 (0.8 s) を長く計測した。図 2.8 (a) は偏心なし、つまり被削材の外周に振れがないときの AE 原波形で、(b) は外周の振れを約  $10 \mu\text{m}$  与えたときの AE 原波形である。このように、図 2.8 (a) の外周の振れがないときは、1 回転の周期である 40 ms の周期が見られず、連続的な波形であった。図 2.8 (b) は、図 2.7 と同様に断続的な波形となった。図 2.8 の AE 原波形より、点 A (約 0.2 s) で切削初期の信号を検出しており、AB 間 (約 0.2 ~ 0.7 s) では、AE 信号振幅に増加がみられた。点 B (0.7 s) 以降からほぼ一定の振幅になっていた。

図 2.9 は、加工中の工具刃先の接触弧長さの変化について示した図である。図 2.9 は、工具刃先が被削材の外周 (図の上方) から中心 (図の下方) へ加工している様子を示している。図 2.9 の AB 間において、点 A では工具刃先が被削材に接触した瞬間に接触弧長さが最小となり、それ以降の点 B に達成するまでは、接触弧長さが徐々に増加し、点 B 以降は一定となる。図 2.9 の AB 間は図 2.8 に示す AB 間に相当する。図 2.9 の AB 間の距離は、切込み深さ  $2 \mu\text{m}$ 、コーナ半径  $0.5 \text{ mm}$  から算出すると  $45 \mu\text{m}$  となる。図 2.9 の AB 間 ( $45 \mu\text{m}$ ) の加工時間は、1 回転当たりの周期 40 ms、送り速度  $3.3 \mu\text{m/rev}$  から算出すると、約 0.5 s となる。この加工時間は、図 2.8 の AB 間の時間と同等であった。図 2.8, 図 2.9 よ



(a) A1070

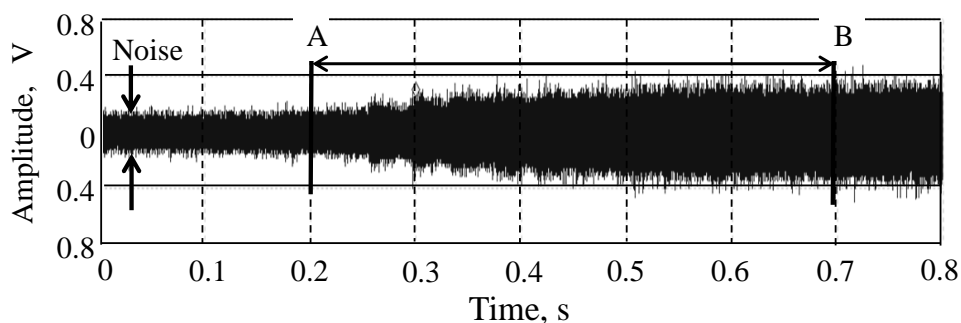


(b) C1020

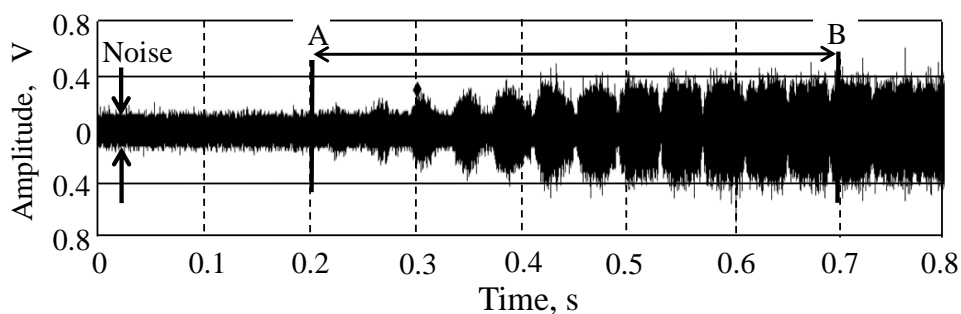
Fig. 2.7 AE signal waveform at the initial stage of cutting in facing  
(Outer circumferential radial runout accuracy  $10\ \mu\text{m}$ ,  $a = 10\ \text{nm}$ ,  
 $N = 1500\ \text{min}^{-1}$ ,  $f = 3.3\ \mu\text{m}/\text{rev}$ ,  
from the outer circumference towards the center).

り、刃先と被削材の接触弧長が増加すると AE 信号振幅も増加することがわかった。

よって、これらの AE 信号から AE 技術によりダイヤモンド工具による微小な切込みを検出でき、被削材の取付け誤差の有無を判断できることがわかった。さらに AE 技術は、工具切れ刃の接触弧長さの変化を検出できるので、切削状態の監視の可能性があることがわかった。



(a) Workpiece with no eccentricity.



(b) Workpiece with eccentricity (Total runout: approx. 10  $\mu\text{m}$ ).

Fig. 2.8 AE signal waveforms during facing operation with a workpiece setup error  
(A1070,  $a = 2 \mu\text{m}$ ,  $N = 1500 \text{ min}^{-1}$ ,  $f = 3.3 \mu\text{m/rev}$ ,  
from the outer circumference towards the center).

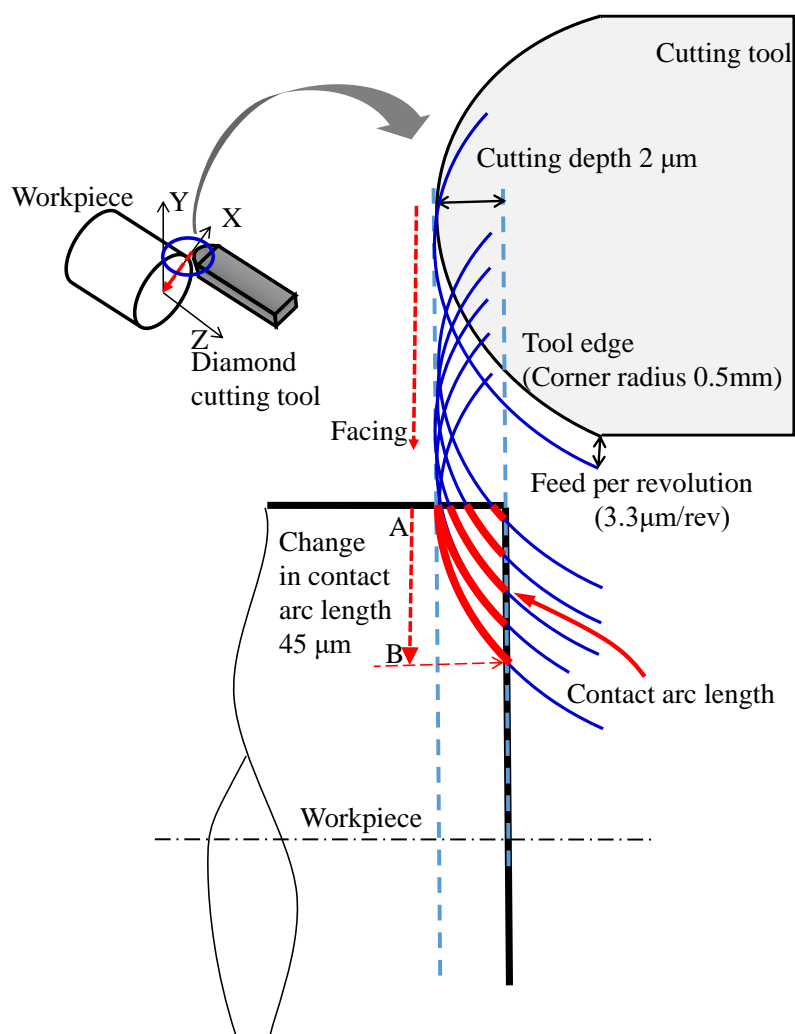


Fig. 2.9 Changes in contact area between tool cutting edge and workpiece during cutting operation.



## 2.4 結 言

本章では、超精密旋削加工において、高精度な加工を実現するために AE 技術を用いて、工具と被削材の接触検知による適応範囲の検討、被削材の取付け誤差の確認および切削初期における切削状態の認識を行った。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) AE 技術により、切込み深さ 10 nm でダイヤモンド工具と被削材の接触を検知できた。また、ダイヤモンド工具の一般的な切削速度において、AE 技術を用いた接触検知の適応範囲は、最小で 10 nm であることを確認した。これにより、AE 技術は、実加工状態での接触検知が可能であり、工作機械の熱変形を含んだ工具刃先位置の検出に有効であるといえる。
- (2) 切削初期の AE 原波形の連続波形、断続波形の観察から、被削材の取付け誤差の有無を判断できる。
- (3) ダイヤモンド工具による切削においては、工具刃先と被削材の接触弧長さが増加すると AE 信号振幅も増加する。

## 参考文献

- 1) 奥田孝一，長谷川素由，布引雅之：超精密切削加工における工具温度上昇と加工誤差，日本機械学会論文集 C 編，Vol.67, No.656, (2001)，pp.1170–1175.
- 2) 岩田一明，森脇俊道，奥田孝一：銅の超精密ダイヤモンド切削における切削温度の解析，精密工学会誌，Vol.53, No.8, (1987)，pp.1253–1258.
- 3) 高野登，森田昇，林弘樹，川堰宣隆，山田茂，大山達雄，神田一隆，高野茂人，小幡勤：シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用（第1報），精密工学会誌，Vol.70, No.11, (2004)，pp.1402–1406.
- 4) 長谷重蘭，和田正毅，三科博司：アブレシブ摩耗現象と AE 信号の相関，トライボロジスト，Vol.55, No.10, (2006)，pp.752–759.
- 5) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Scanning Electron Microscope Observation Study for Identification of Wear Mechanism Using Acoustic Emission Technique, Tribology International, Vol.72, (2014), pp.51–57.
- 6) 和田正毅，水野萬亀雄：AE による摩擦・摩耗の研究—摩耗形態と AE 信号—，精密工学会誌，Vol.55, No.4, (1989)，pp.673–678.
- 7) 日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験Ⅱ，(2008)，p.51.
- 8) 長谷重蘭：アコースティックエミッション計測の基礎，精密工学会誌，Vol.78, No.10, (2012)，pp.856–851.
- 9) 日本非破壊検査協会規格（NDIS）：アコースティック・エミッション変換子の感度劣化測定方法，(1997)，NDIS2110.

## 第3章 超精密旋削加工における AE 技術を用いた 切削状態の監視

### 3.1 緒 言

第2章では、AE 技術を利用した実験装置を用いて、ダイヤモンド工具と回転中の被削材の接触検知の適応範囲について検討し、微小な切込み深さでも AE 信号を検出でき、刃先位置計測を可能とした。第2章の実験において端面加工中に切りくずが工具に絡まったり、刃先に停滞したりと加工面に悪影響を及ぼすことがあった。超精密旋削加工で製作される製品は、レーザ集光ミラーやプラスチックレンズ金型<sup>1)</sup>など鏡面に仕上げられるものが多く、わずかな傷も許されない。そのため切削状態の監視において、安定切削状態中に起こる突発的で不安定な切削状態を検出することが特に重要だといえる。ここで考える不安定な切削状態とは、安定した切削状態中であっても、微小な変化が起こり加工面などに悪影響を及ぼす状態のことをいう。

本章では微小な切込みでも接触を検知できた AE 技術を利用した実験装置により、切削状態の監視として、加工中に検出される AE 信号の変化について検討を行った。安定切削時における切削条件の変化では、切削速度、切込み深さ、送り速度を変更し、切削条件を変化させたときの加工現象と AE 信号の関係を検討した。また、安定切削中に起こる不安定な切削状態を AE 信号により監視し、AE 技術による切削状態の監視の可能性を検討した。

### 3.2 実験方法

図 3.1 は切削状態の監視用実験装置である。図 3.1 は図 2.2 に示した第2章の実験装置と同様のものであり、切削状態の監視用として使用した。AE センサも図 2.3 に示す共振型（共振周波数：1 MHz）のものを使用した。接触検知実験は、工具と被削材の相対距離の計測であるため、端面加工のみとしたが、切削状態の監視では端面加工と図 3.1 に示す外径加工も追加した。実験条件を表 3.1 に示す。

端面加工に関しては、切削速度と AE 信号の関係を検討するために、回転速度一定制御により外周から中心に向かって加工した。この時の AE 信号を観察し、切削状態の監視を行った。外径加工に関しては、被削材の取付けで生じる偏心誤差を取り除くために外周を偏心量がなくなるまで加工後、実験を行った。切削速度、送り速度、切込み深さの切削条件を変更し、外径加工時に安定した切削状態のときの AE 信号と切削条件のパラメータの関係について検討した。

切削速度は、30, 60, 120 m/min, 切込み深さは、0.1 から 10.0  $\mu\text{m}$ , 送り速度は、2.5, 5, 10, 20  $\mu\text{m}/\text{rev}$  とした。切削中の切削油は前回の実験と同様でミスト供給した。図 2.8 において、工具刃先と被削材の接触弧長さの変化が AE 信号と関係を示すことがわかったので、ダイヤモンド工具のコーナ半径が第 2 章の実験同様の 0.5 mm と新たに 0.2 mm のものを用意した。切込み深さが同じでもコーナ半径の違いにより、工具切れ刃と被削材の接触弧長さが異なることに着目した。

AE 信号の評価パラメータとして、AE 原波形、AE 平均値電圧波形および AE 総エネルギー<sup>2)</sup>を用いた。AE 総エネルギーは、AE 平均値を被削材の長手方向にある一定距離加工する時間による積分値とした。この時間で積分することで、切削条件における切削速度の影響を取り除いている。実験では、それぞれの評価パラメータと切削条件のパラメータの関係について検討した。計測条件は、接触検知実験と同様に、100 kHz のハイパスフィルタ処理した。サンプリング周波数は 2 MHz, 増幅率は総合利得で 70 dB とした。

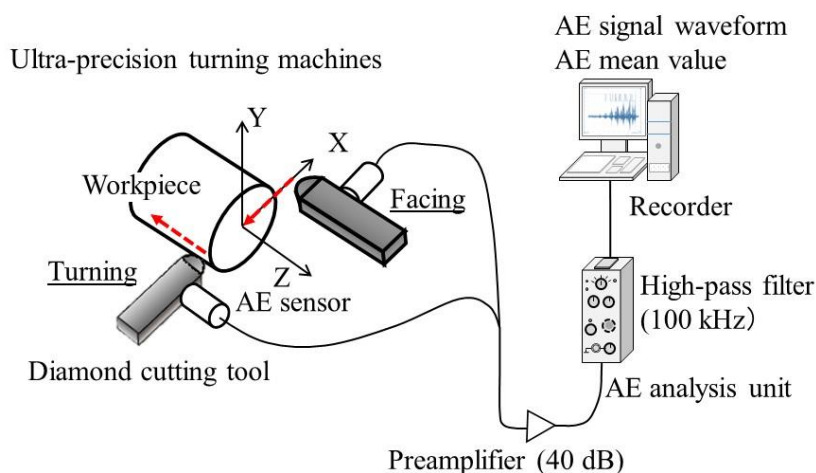


Fig. 3.1 Experimental apparatus for monitoring cutting process during facing and turning.

Table 3.1 Experimental conditions for cutting state monitoring.

Tool	A single crystal diamond cutting tool, Rake angle 0°, Clearance angle 7°, Corner radius 0.2, 0.5 mm	
Workpiece	$\phi$ 12.7mm Pure aluminum (A1070)	
Cutting speed $V$	30, 60, 120 m/min (The outer circumference) (Spindle speed constant 750, 1500, 3000 min <sup>-1</sup> )	
Feed speed $f$	3.3 $\mu\text{m}/\text{rev}$	2.5, 5, 10, 20 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Cutting direction	Facing (from the outside toward the center)	Turning
Depth of cut $a$	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 $\mu\text{m}$	
AE sensor attachment position	Tool side	
Sampling frequency	2 MHz	
AE amplification factor	70 dB	
AE high-pass filter	100 kHz	

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 端面加工における切削速度と AE 信号の関係

回転速度一定制御による端面加工であるため、加工する場所により切削速度が異なる。切削速度は、外周から中心に向かって加工を行うことで小さくなる。図 3.2 は、A1070 を被削材の外周から中心へ切込み深さ 20 nm の加工時の AE 平均値電圧の波形を示したものである。図 3.2 (a) は、安定切削状態のときの AE 平均値電圧の波形で (b) は不安定切削状態の AE 平均値電圧の波形である。AE 平均値電圧の波形は、エンベロープ信号波形をローパスフィルタ処理したものである。図 3.2 (a) のような安定切削状態では、その他の実験条件においても、加工方向、被削材に関係なく切

削速度が大きいほど AE 平均値電圧も大きくなり、増加傾向にあることがわかる。これは、切削速度が大きくなると、被削材のせん断変形の手度、ひずみ速度、工具と被削材および切りくずの摩擦、切りくずの破断と衝突などの AE 信号が多く検出されたからと考えられる。

図 3.2 (a) は切削速度の減少とともになめらかに AE 平均値が減少しているのに対して、(b) は、外径 8 mm のところで急な変動がみられた。このような変動はいくつかの実験でも確認された。図 3.3 は、端面加工時の被削材の表面の写真を示す。図 3.3 の (a) は、図 3.2 (a) のように AE 平均値電圧が安定切削状態のときに観察された表面である。図 3.3 (b) は、AE 平均値電圧の急激な変動が多くみられたときの表面であり、表面がくすんでいた。図 3.4 は、加工時の切りくず排出の様子の一列を示したものである。図 3.4 (a) は、切りくずは被削材に絡まっているが、切りくずがスムーズに排出されている。(b) は、切りくずが刃先に停滞しており加工中に排出される切りくずにより表面が擦られている。このようなときに図 3.3 (b) のように加工面がくすんだものと考えられる。このように端面加工において、安定切削状態のときに切削速度と AE 信号はよい相関があることがわかり、AE 平均値電圧の変化により不安定な切削状態にあることを判断可能である。

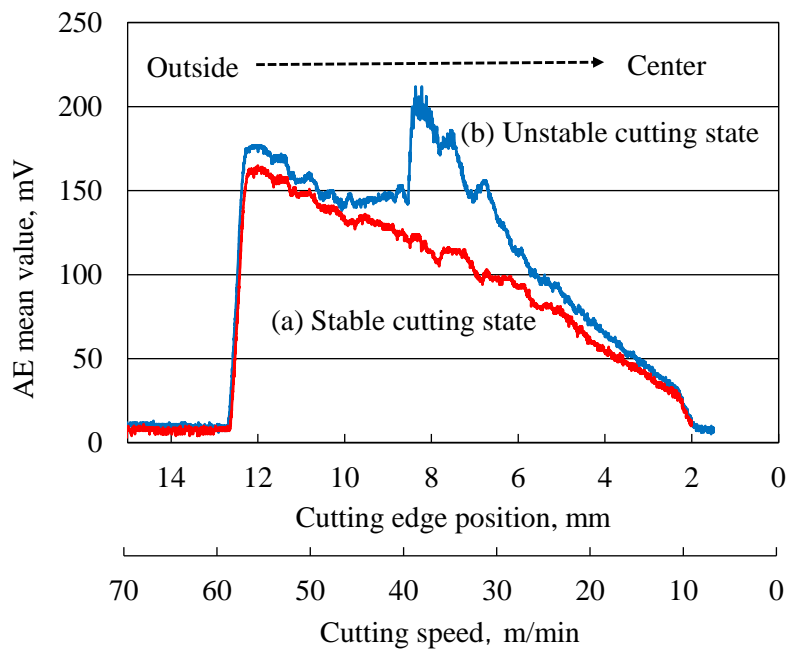


Fig. 3.2 Relationship between AE mean values and cutting edge position (cutting speed) for stable and unstable cutting states (A1070,  $f = 10 \mu\text{m/rev}$ ).

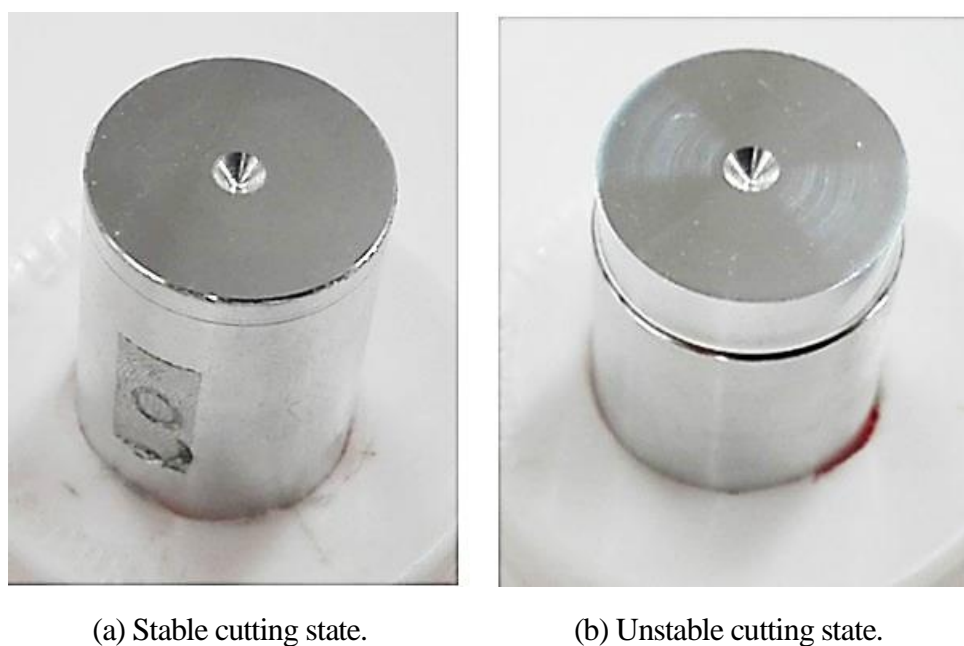


Fig. 3.3 Workpiece surfaces during facing operation.

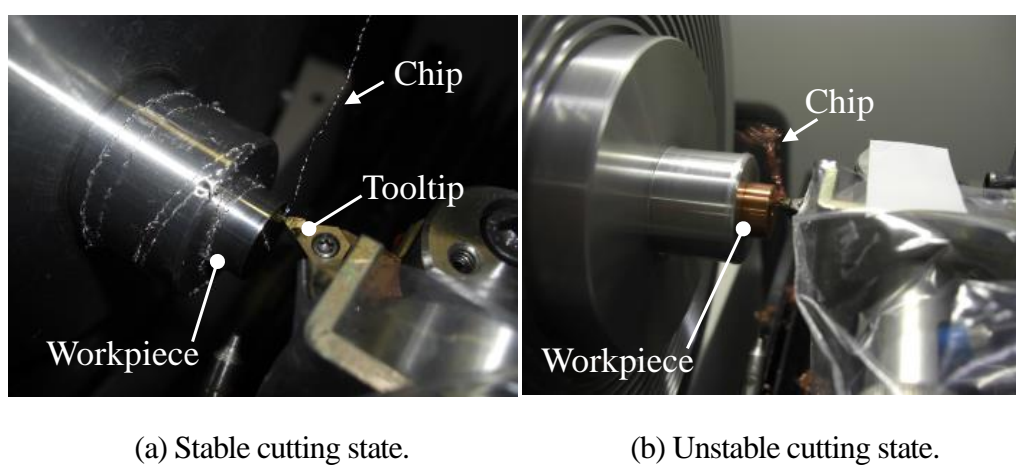


Fig. 3.4 Example of chip discharge during facing operation.

### 3.3.2 外径加工時に検出される AE 信号による切削状態の監視

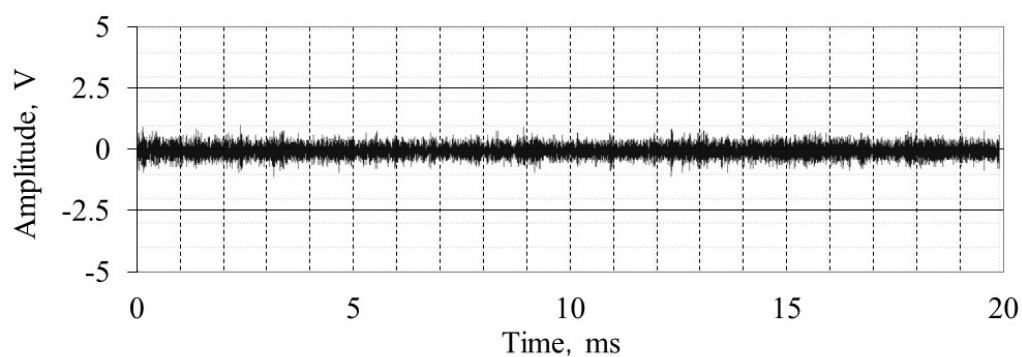
図 3.5 は外径加工における実験で取得した AE 原波形である。図 3.5 (a) , (b) , (c) はそれぞれ切削速度 30, 60 および 120 m/min で切込み深さ 1  $\mu\text{m}$  , 送り量 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$  の加工時の AE 原波形である。図 3.5 (a) , (b) , (c) はともに安定した切削状態であり、連続的な波形となった。端面加工同様に切削速度の変化が AE 信号の振幅に影響することがわかる。

図 3.6 は切削速度 60 m/min で切込み深さ 0.2  $\mu\text{m}$  , 送り量 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$  の加工時の AE 原波形と加工表面を非接触三次元形状測定機 (Taylor Hobson Inc., Talysurf CCI300) により測定したものである。図 3.6 (a) , (b) はともに同一切削条件である。図 3.6 (a) は連続的な波形で、加工面に傷もみられないのに対し、(b) は突発的な信号波形で、加工表面に多く傷のようなものが確認できる。図 3.6 (b) は、不安定切削状態になっていることを示す。図 3.6 (b) の AE 原波形の突発的な信号にみられる周期は約 40 ms であり、被削材が一回転する時間に相当する。また、表面にみられる傷は一回転の送り量に相当し 10  $\mu\text{m}$  の等間隔でみられた。図 3.7 に外径加工時に停滞する切りくずの様子を示す。図 3.6 (b) にみられる傷のようなものは、図 3.7 に示すように工具に切りくずが停滞し、微細な切りくずが工具と被削材の間に入り込んだ時の加工面の状態だと考えられる。

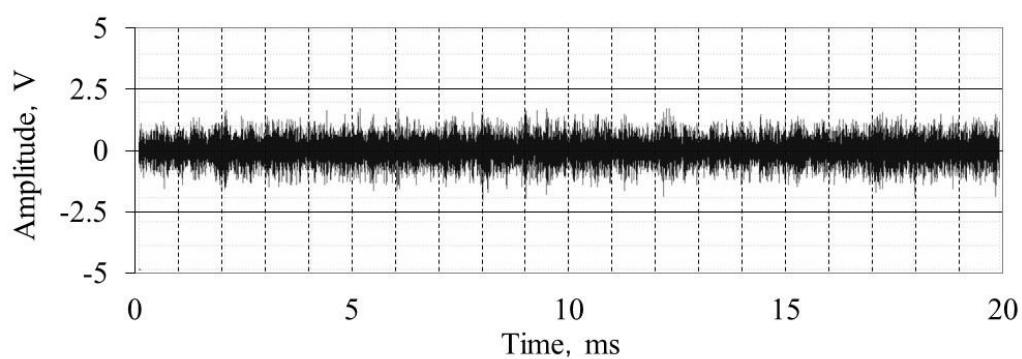
本実験でも、図 3.2 のような AE 平均値電圧の変化による切削状態の確認をしたが、ほとんど変化はみられなかった。AE 平均値電圧の波形は、包絡線検波波形にローパスフィルタを通した変化を監視したため、突発的な信号を検出できなかったといえる。AE 原波形を監視することにより、数十 ms と短時間の切削状態の変化も検出することが可能であった。超精密加工領域では、微小な表面の傷でさえも部品の機能に影響することもあるため、AE 平均値電圧の波形だけでなく AE 原波形の監視も重要だといえる。

AE 技術を用いて切削状態の異常を検知するためには、安定切削時の AE 原波形の最大値を基準に振幅の 1 割上方にしきい値を設定し、その値を超えるような AE 信号を検出すればよい。このように異常を検知し工具を停止させたり、切りくずを除去したりするなどの対応をすれば、不安定な切削状態を避けることが可能である。

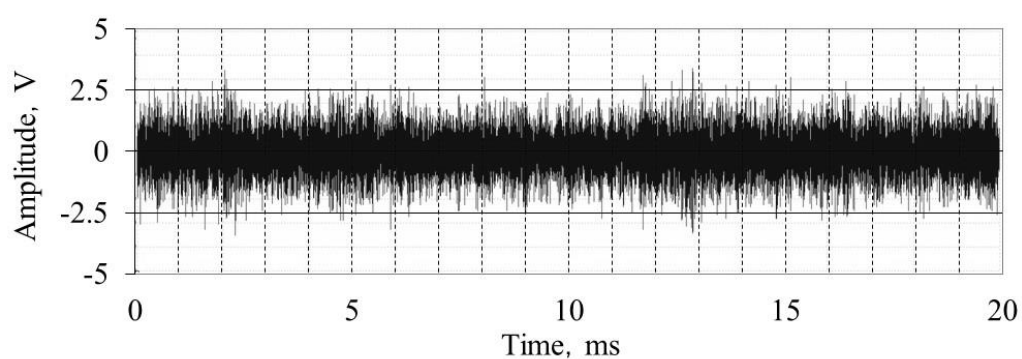




(a)  $V = 30$  m/min

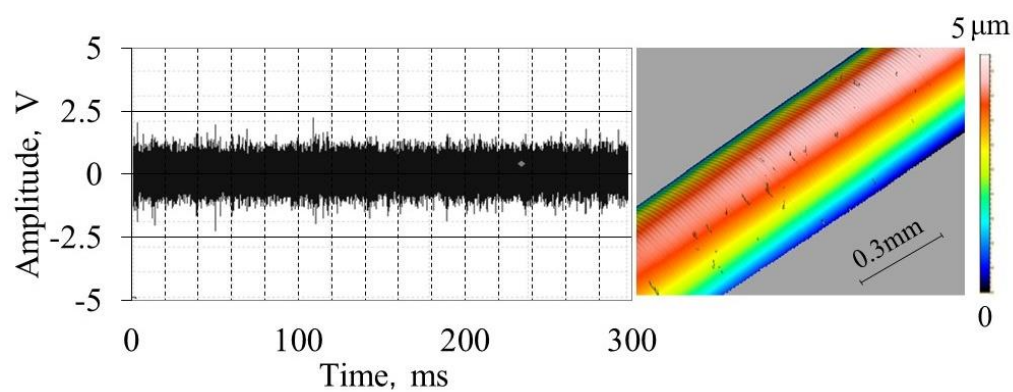


(b)  $V = 60$  m/min

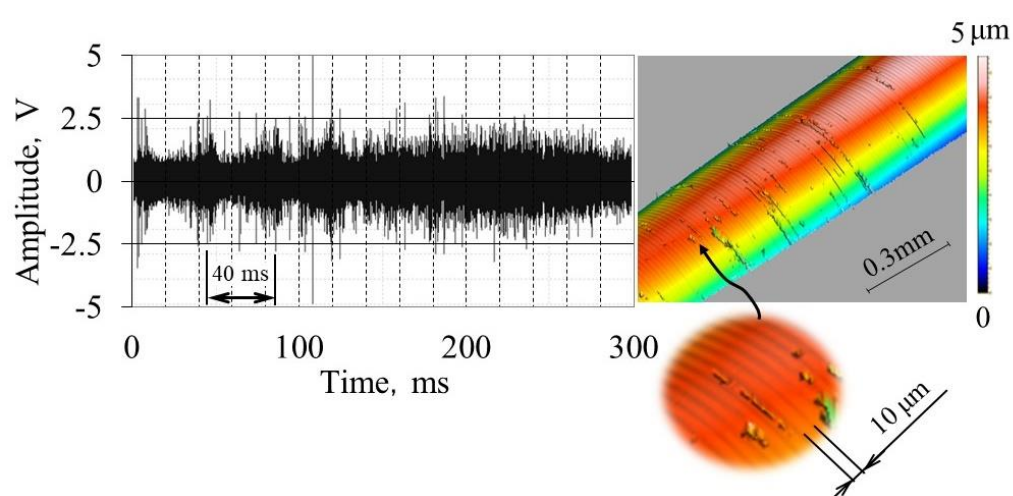


(c)  $V = 120$  m/min

Fig. 3.5 Changes in AE signal waveform in different cutting speeds  
(A1070,  $a = 1$   $\mu\text{m}$ ,  $f = 10$   $\mu\text{m}/\text{rev}$ ).



(a) Stable cutting state.



(b) Unstable cutting state.

Fig. 3.6 Changes in AE signal waveforms under the similar operating conditions  
(A1070,  $V = 60 \text{ m/min}$ ,  $a = 0.2 \mu\text{m}$ ,  $f = 10 \mu\text{m/rev}$ ).



Fig. 3.7 Chip state stagnating during processing of turning.

### 3.3.3 外径加工における切削条件と AE 信号の関係

被削材の外径加工において、切削速度、切込み深さおよび送り速度を変化させ AE 信号を調べた。ここでは、図 3.6 (b) のような不安定な切削状態時の AE 信号を除いて、図 3.5 のような安定切削状態時の連続した AE 原波形から検討した。図 3.8 は外径加工において、切削速度 60 m/min、送り速度 10  $\mu\text{m}/\text{min}$  のときの安定切削に取得した切りくずの SEM 画像の一例である。図 3.8 (a) , (b) はそれぞれ切込み深さが 1, 2  $\mu\text{m}$  の切りくずである。どちらも安定切削時の切りくずであり、表皮面側の切りくずを観察するとせん断型の切りくずとなっていた。図 3.8 (b) のすくい面側の切りくずは、滑らかなすべり面であった。

図 3.9 は、被削材 A1070 で送り速度を一定（送り量 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$ ）にしたときの AE 平均値と切削速度の関係を示したものである。AE 平均値は、一定時間の AE 原波形の絶対値を平均した値とした。評価には、5 回の平均値を AE 平均値としてプロットした。その標準偏差  $\sigma = 0.01 \text{ V}$ 、範囲  $R = 0.04 \text{ V}$  以内であり、ばらつきは少なかった。図 3.9 より、切削速度が増加するにつれて AE 平均値も増加していることがわかる。また、切込み深さが大きくなると AE 平均値も増加した。

一般に切削速度と切削抵抗については、切削速度が大きくなると切削抵抗は変化しないか、あるいは下がる傾向にある。切削抵抗の変化はひずみ速度と切削熱の影響を総合的に受けたものであるとされている。ひずみ速度が増加すると切削抵抗が増加するが、一方で、切削温度が上昇し被削材の軟化により、切削抵抗は減少すると

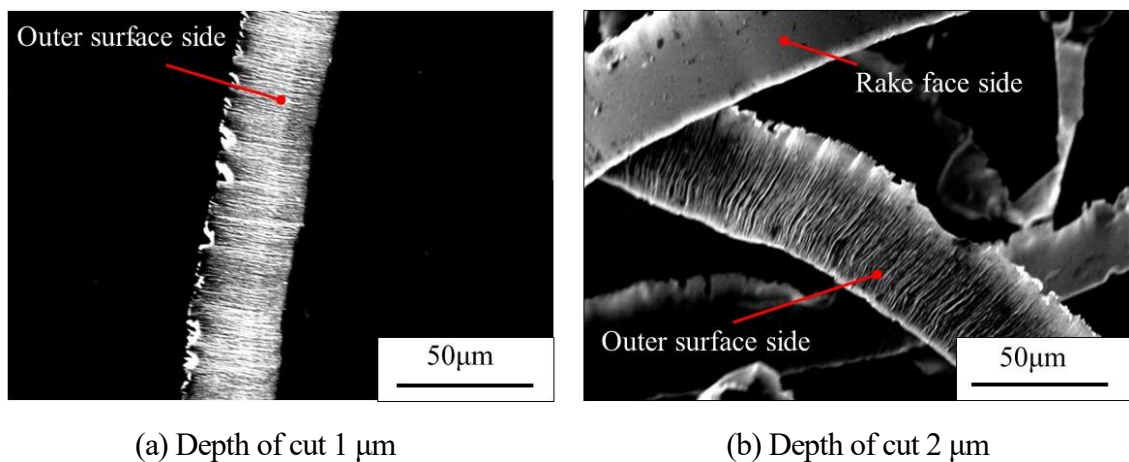


Fig. 3.8 SEM images of chips acquired for stable cutting during turning operation (A1070,  $V = 60 \text{ m/min}$ ,  $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$ ).

ともに工具すくい面の摩擦力も減少し、これらの変化が切削抵抗として現れると説明されている<sup>3)</sup>。しかしながら、本研究で検出した AE 信号は、図 3.9 のように切削速度の増加で上昇した。これは今回の切削条件において、ひずみ速度の増加により被削材を破壊するときのエネルギーが増大し、その時に発生する AE の発生率や AE 信号の振幅が増加したからと考える。

図 3.10 は被削材 A1070 で送り速度を一定 ( $10\text{ }\mu\text{m/rev}$ ) にしたときの AE 平均値と切込み深さの関係を示したものである。一般的に切削加工において、切込み深さを大きくすると、切削速度に比例して切削抵抗は大きくなる傾向にある。しかしながら、AE 平均値は切込み深さに対して増加傾向を示したが、比例の関係ではなかった。

図 3.11 は被削材 A1070 で切込み深さを一定 ( $2\text{ }\mu\text{m}$ ) にしたときの AE 平均値と送り速度の関係を示したものである。送り速度が大きくなるとわずかながらに AE 平均値は大きくなった。

本実験における切削条件と AE 信号に関しては、切削抵抗とは異なる傾向を示している。長谷<sup>4)</sup>、Gao *et al.*<sup>5)</sup> も本実験と同様の傾向を示しており、ひずみ速度と関係を示唆している。

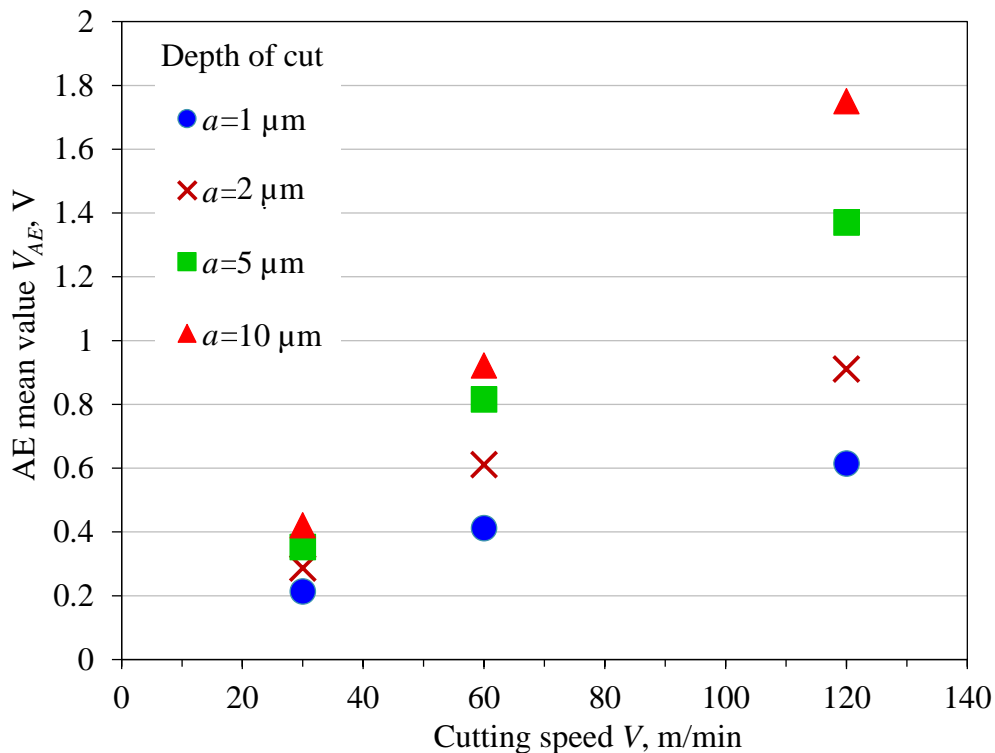


Fig. 3.9 Relationship between AE mean values and cutting speed (A1070,  $f=10\text{ }\mu\text{m/rev}$ ).

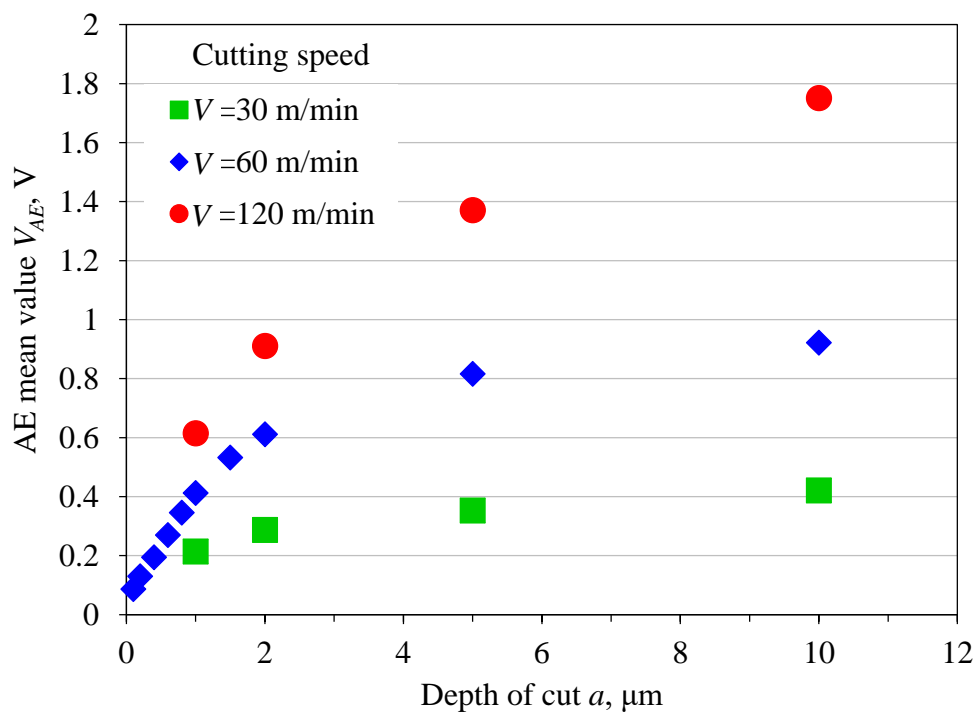


Fig. 3.10 Relationship between AE mean values and depth of cut (A1070,  $f = 10 \mu\text{m/rev}$ ).

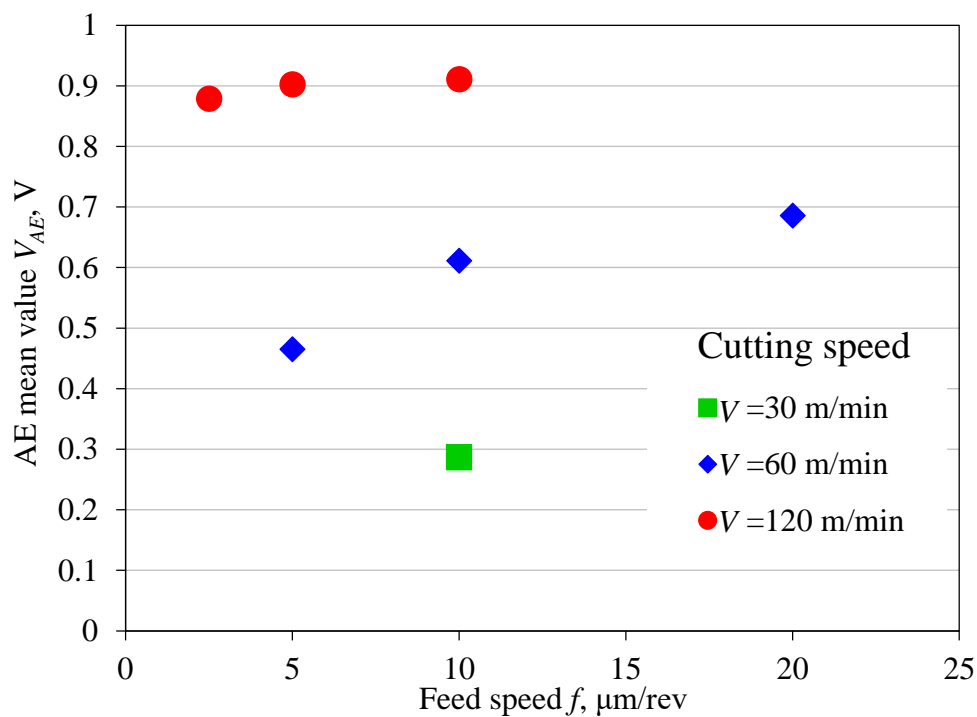


Fig. 3.11 Relationship between AE mean values and feed speed (A1070,  $a = 2 \mu\text{m}$ ).

### 3.3.4 切削点近傍で検出される AE 信号の検討

以上の切削条件と AE 信号の結果をもとに切削プロセスにおける AE 発生源について考察する。切削加工において計測される AE 信号は、第1章の図1.3に示した以下の領域に分けることができる。図1.3に示した4領域は次のようなものである。

- (a) 被削材のせん断領域（一次塑性域，せん断領域を含む）
- (b) 工具すくい面と切りくずの接触領域（二次塑性域）
- (c) 工具逃げ面と被削材の接触領域（逃げ面下方塑性域）
- (d) 切りくずの衝突・分断・変形過程が起こる領域（切りくず周辺の領域）

本研究のような微小な切込みの超精密加工領域では、切りくずの厚さも薄く（d）の領域において発生する AE 波はほとんどみられないと考え、本考察においては除外して検討した。

上記の（a），（b），（c）の塑性域において，切削プロセスの解析を行うためには，切削加工時の材料の塑性変形特性，ひずみ速度およびせん断破壊の関係が基礎となる<sup>6)</sup>。そこで，これらの関係と AE の事象とを結び付けて考察する。

まず，図3.9の AE 平均値と切削速度の関係から検討する。三輪らの研究<sup>7)</sup>では，切削速度と AE 信号の関係は，金属の引張試験の場合と同様に AE 信号はせん断変形時に生じるひずみ速度の影響を大きく受けるとされている。金属材料の引張試験においても，ひずみ速度を大きくすると，降伏応力が大きくなり，AE の実効値がひずみ速度の1/2乗に比例することが報告されている<sup>8)</sup>。引張試験におけるひずみ速度とは，試験片の長さの増加量に対する引張速度である。切削加工においては，せん断領域をせん断するときの速度がひずみ速度に相当すると考えられる。したがって，せん断領域を加工する速度，つまり切削速度とひずみ速度は同等であると考えることができる。ここで，図3.12に示す二次元切削モデルを用いて，平面ひずみ問題として切削速度とひずみ速度の関係について，切削シミュレーション<sup>9)</sup>を行った。解析ソルバは，AdvantEdge FEM Ver7.0（Third Wave System Inc.）を用いた。切削条件は，表3.1の切削速度 30, 60, 120 m/min，切込み深さ 1.0  $\mu\text{m}$ ，送り速度 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$  としてそれぞれについて FEM 解析を行った。表3.2に解析条件および文献<sup>10-12)</sup>を参考に決定した物性値を示す。その他，工具および被削材に関する物性値はソルバ内のデータベースを用いた。さらに，解析中の被削材は要素がリメッシュすることから，最小メッシュサイズを 0.008 mm に設定して自動分割した。

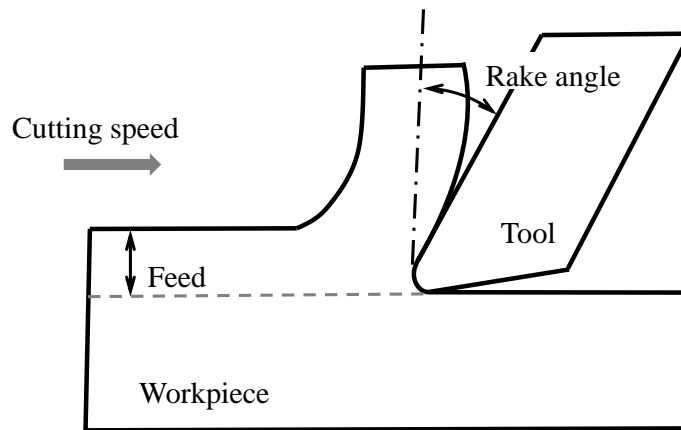


Fig. 3.12 Two-dimensional cutting analysis model.

Table 3.2 Material properties and simulation conditions.

Tensile strength, MPa	110
Yield strength, MPa	105
Maximum number of nodes	24000
Maximum element size, mm	0.01
Minimum element size, mm	0.008

上記の条件により、各切削速度におけるひずみ速度の FEM 解析の結果を図 3.13 に示す。図 3.13 より、切削速度が増加することにより、図 1.3 の (a) , (b) , (c) の塑性域において、ひずみ速度が大きくなっていることがわかる。また、ひずみ速度の分布範囲も広がっている。FEM 解析結果からも、金属材料の引張試験と同様に AE 平均値はひずみ速度と関係があることがわかり、切削速度の増加に伴い AE 平均値も増加したといえる。

つぎに、切削加工プロセスにおいて AE 源となる (a) , (b) , (c) の三つの塑性域についてそれぞれの領域別に分け、つぎの加工現象の解明より考察する。佐田<sup>13)</sup>は、二次元の流れ型切削において、工具付近の断面を顕微鏡観察しており、加工現象を次のように解明されている。(a) の一次塑性域では、せん断面において被削材がせん断降伏状態になりせん断応力が働いている。(b) の二次塑性域では、切削工具のすくい面上において切りくずは、その高い凝着性と高い圧縮応力によって切削



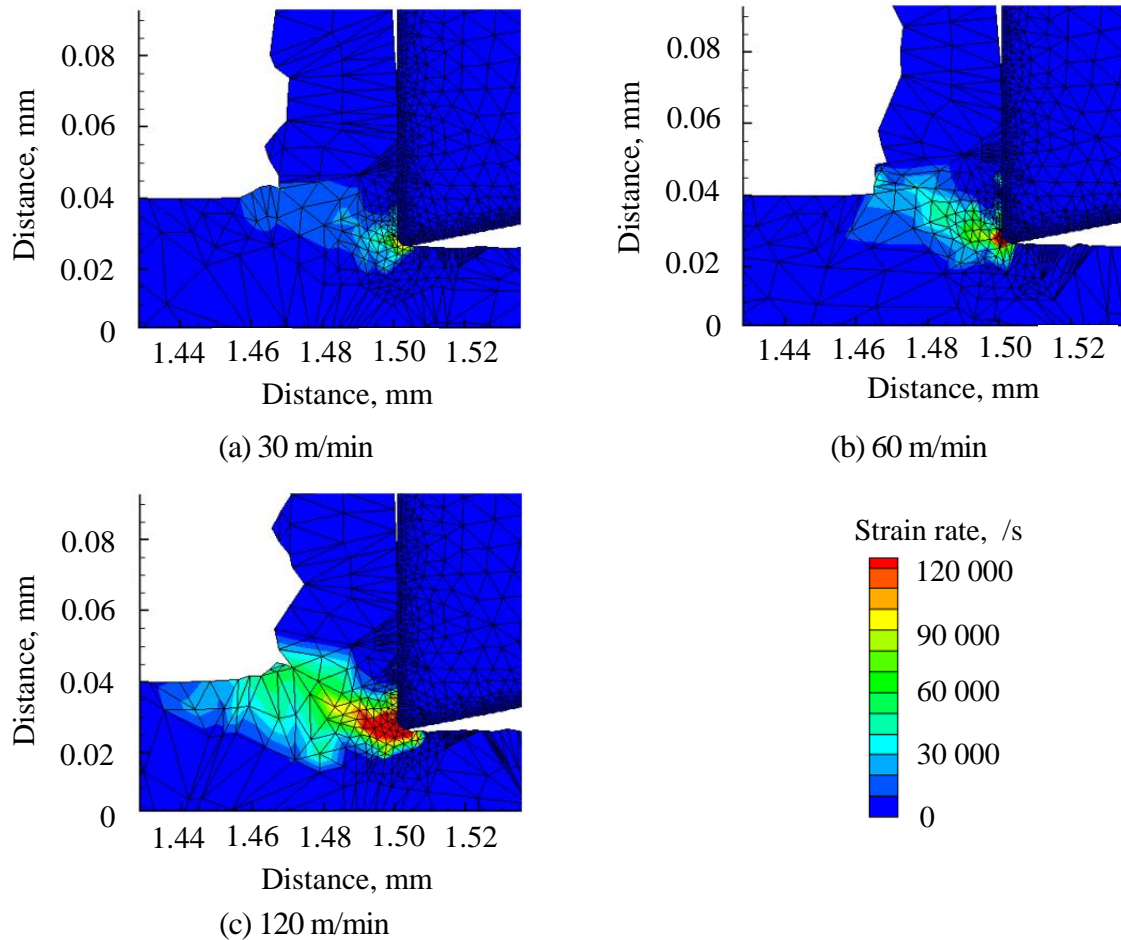


Fig. 3.13 Distribution of strain rate.

面全面にわたって工具に凝着し、せん断的に降伏状態になって摩擦が行われている。(c)の逃げ面下方塑性域では、加工仕上げ面が逃げ面接触部分に全面にわたって凝着し、(b)同様に摩擦が行われる。この解明から(a)のせん断領域においては、図3.13のFEM解析などの結果より、被削材のせん断破壊によるエネルギーをAEは検出しており、せん断する速度つまりひずみ速度が速くなるとAE信号が大きくなることから明らかである。また、ひずみ速度の分布より一次塑性域も広がりその領域での破壊現象もAE信号として検出していると考えられる。(b)、(c)の塑性域でも図3.13より、ひずみ速度の影響がみられる。すくい面、逃げ面と切りくずの接触により、圧縮を受けてひずみが生じてAE信号が検出されたと考えられる。そこで、すくい面と逃げ面の現象を確認するために、切削油の有無により検出されるAE信号を調べた。本実験装置を使い、切削油を工具刃



先に一定量滴下したときと、切削油を完全に脱脂したときの AE 信号を比較した。その結果、AE 平均値は、切削油なしの方が約 2 倍大きくなった。(b), (c) の領域は、摩擦によるせん断破壊が生じるため切削油により、切りくずの摩擦や凝着が少なくなり AE 平均値に違いがみられたと考えられる。このことより、加工プロセスによる AE 発生源は、(a) の一次塑性域のみでなく (b), (c) の二次塑性域、逃げ面下方塑性域からも発生しており、切削速度や切削油により変動することが確認できた。

### 3.3.5 工具刃先の接触弧長さと AE 信号の関係

AE 信号と切削速度の関係以外について、切削条件のどのパラメータが AE 信号振幅の変化に起因するかを調べた。図 3.10 より AE 平均値と切込み深さについては、正の相関があるものの比例的な増加でないことについて検討した。アブレシブ摩耗現象において、切れ刃よりせん断がなされる接触領域（溝傾斜部長さ）と AE 平均値は、比例関係にある<sup>14,15)</sup>ことが報告されている。また、第2章の図 2.9 の工具刃先による被削材の接触弧長さと AE 信号は関係していた。これらのことより、AE 信号と切れ刃の接触領域の関係について検討した。

本実験は摩耗も破損もない刃先が R 形状の工具であり、理想的な接触弧の稜線で被削材が破断されている。そこで、被削材との接触領域を接触弧長さと考え、接触弧長さと AE 信号の関係について整理した。図 3.14 に工具の切込み深さおよび送り量と接触弧の長さの関係を示す。図 3.14 は工具刃先が R 形状のバイトで、被削材を外径加工する模式図を表している。接触弧長さを  $\widehat{L}$  mm とし、送り量  $f$  mm/rev, 切込み深さ  $a$  mm, コーナ半径  $r$  mm とする。 $\widehat{AB}$  および  $\widehat{BC}$  に対する中心角をそれぞれ  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  とする。接触弧長さ  $\widehat{L}$  は式 (3.1) となる。

$$\begin{aligned}
 \widehat{L} &= \widehat{AB} + \widehat{BC} \\
 &= r\theta_1 + r\theta_2 \\
 &= r \cos^{-1} \left( \frac{r-a}{r} \right) + r \sin^{-1} \left( \frac{f}{2r} \right) \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

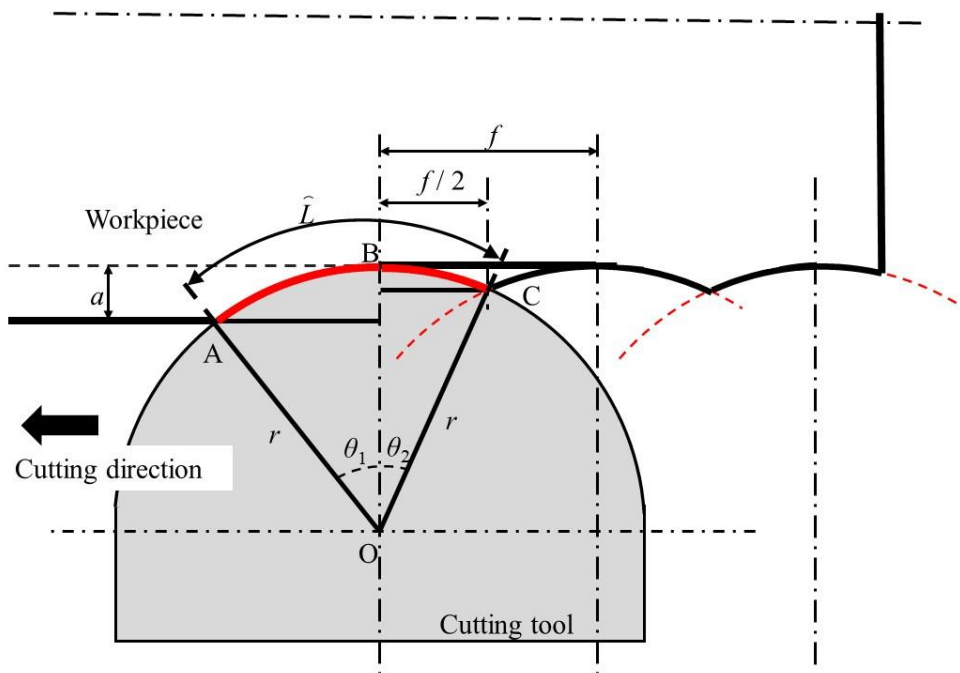


Fig. 3.14 Schematic of the contact-arc length.

図 3.15 に AE 総エネルギーと接触弧長さの関係を示す. AE 平均値は, 切削速度の影響が含まれるため, AE 平均値をある一定距離を加工する時間で積分し, AE 総エネルギーと置き換えて検討した. 図 3.15 より, 刃先が R 形状の工具の接触弧長さと AE 総エネルギーの関係は, 比例関係にあることがわかった.

図 3.15 の接触弧長さと AE 総エネルギーの関係については, 接触弧近傍からの (a) 被削材のせん断領域 (一次塑性域) の奥行き (深さ) に相当する部分の接触弧長さが大きくなり, 被削材のせん断破壊で検出される AE 信号が多くなり AE 総エネルギーも増加したと考えられる. さらに, そのせん断領域の大きさに伴い, (b) 工具すくい面上の切りくずとの接触領域 (二次塑性域), (c) 工具逃げ面と被削材との接触領域 (逃げ面下方塑性域) も大きくなり, AE 信号の大きさに加算されたと考えられる. 本研究では, 超精密加工領域でかつダイヤモンド工具の鋭利な刃先を持つ工具であるため, 工具刃先の接触弧と AE 信号の関係が顕著に現れたといえる.

ここで, 接触弧長さと AE 関係を確認するために, コーナ半径の異なる工具を使用し検討した. 図 3.16 にコーナ半径の違いによる接触弧長さと AE 総エネルギーの関係を示す. 図 3.16 の A1070 を切削した場合をみてわかるように, コーナ半径が異なっても切込み深さかつ送り速度に関する接触長さと AE 総エネルギーに

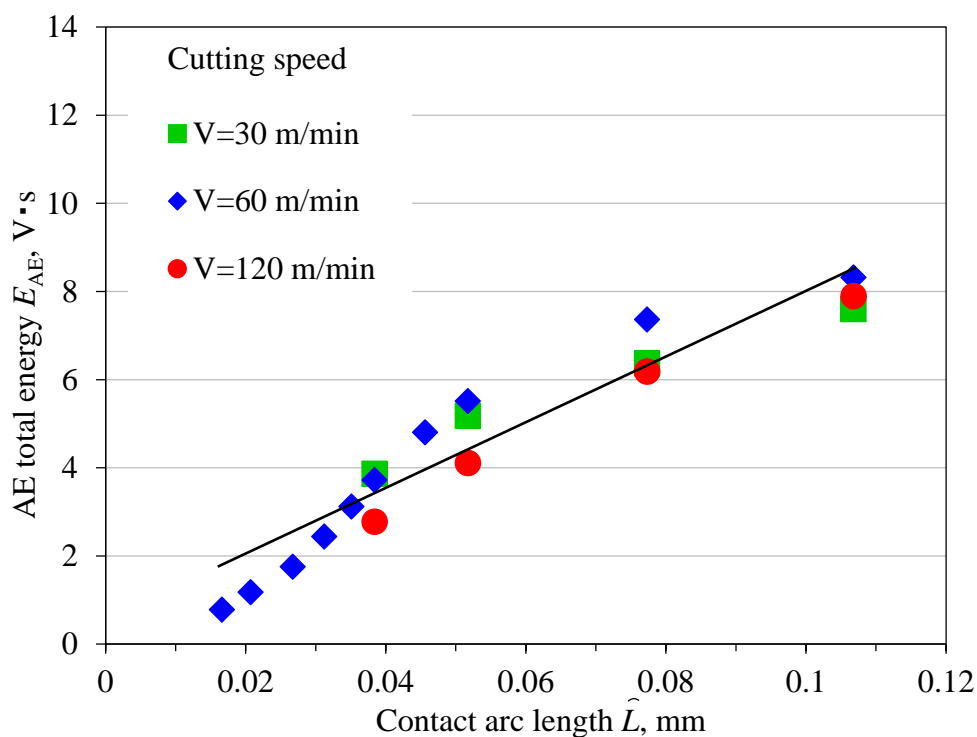


Fig. 3.15 Relationship between AE total energy and contact-arc length for different cutting speeds (A1070).

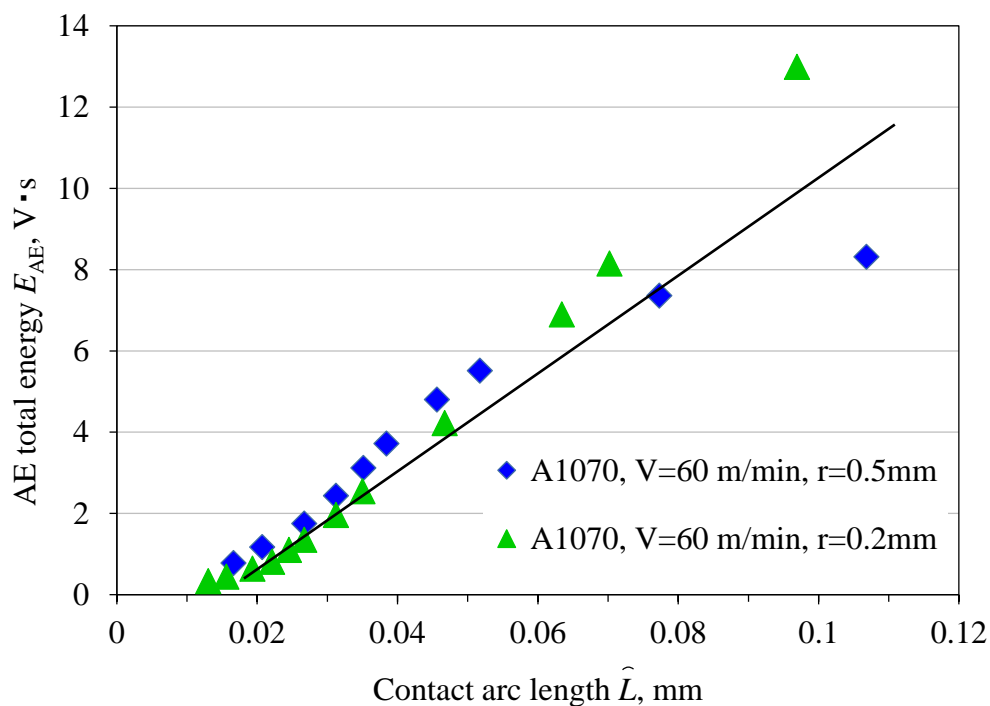


Fig. 3.16 Relationship between total AE total energy and contact-arc length for different corner radiuses.

相関がみられた。図 3.15, 図 3.16 のどちらも相関係数が約 0.9 であり, 強い相関があることがわかる。このことより, AE 信号は被削材との接触弧長さ, つまり被削材の近傍の破壊領域や摩擦領域の大きさと関係があるといえる。

### 3.4 結 言

AE 技術を利用した切削状態の監視を行うために, 切込み深さや切削速度, 送り速度等の切削条件を変えたときの AE 信号を取得した。また, 安定切削中に起こる不安定な切削状態を AE 信号により検出を試みた。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 周速一定制御による端面加工においては, 切削速度の増加と共に AE 信号が増加する。また安定切削状態のときは, 切削速度と AE 信号はよい相関があり, 不安定な切削状態のときは AE 信号の変化がみられ, AE 信号にしきい値の設定することで切削状態の良否を判断できる可能性を示唆した。
- (2) 外径加工における切削条件と AE 平均値の関係において, 切削速度, 切込み深さおよび送り速度の増加に伴い, AE 平均値は大きくなる。切削速度に関する FEM 解析の結果より, せん断領域におけるひずみ速度と AE 平均値は関係がみられた。
- (3) 外径加工において, 送り速度, 切込み深さより, 工具刃先が R 形状の工具と被削材の接触弧長さを求めた。その接触弧長さと AE 総エネルギーは強い正の相関があった。

## 参考文献

- 1) 山形豊：超精密切削加工とそのアプリケーション，精密工学会誌，Vol.74，No.12，(2008)，pp.1278–1281.
- 2) 長谷亜蘭，和田正毅，広田平一：凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関，トライボロジスト，Vol.50，No.11，(2005)，pp.808–815.
- 3) 精機学会編：精密工作便覧，コロナ社，(1972)，p.470.
- 4) A. Hase: Acoustic Emission Signal during Cutting Process on Super-Precision Micro-Machine Tool, Proc. of the Global Engineering, Science and Technology Conference, Singapore, No.521, (2013).
- 5) H. Gao, A. Hase, S. Kobayashi: Fundamental Study on Cutting State Monitoring by Acoustic Emission Technique—Relationship between AE Signals and Cutting Phenomena Observed by High-speed Camera—, Proc. of the 16th International Conference on Precision Engineering, Hamamatsu, (2016), P38–8103.
- 6) 臼井英治，白樫高洋，益子正己：高速圧縮試験と二，三の結果—切削における温度・ひずみ速度効果の基礎的研究（第1報）—，精密機械，Vol.37，No.435，(1971)，pp.268–274.
- 7) 三輪祐司，稲崎一郎，米津栄：アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出，日本機械学会論文集 C 編，Vol.47，No.424，(1981)，pp.1680–1689.
- 8) 尾上守夫，山口楠雄，仲左博裕，佐野謙一，磯野英二，渡辺哲夫：アコースティック・エミッションの基礎と応用，コロナ社，(1985)，p.50.
- 9) 二宮敬一，松本泰徳，古賀俊彦，和田正毅：AE 法を用いた旋削加工におけるインプロセス計測システムの開発（第1報 切削現象のメカニズム解明に関する実験的検討），設計工学，Vol.53，No.5，(2018)，pp.401–410.
- 10) A. H. Mahfudz，山田啓司，上田隆司：旋削加工における工具—切りくず接触面温度の測定—，日本機械学会論文集 C 編，Vol.65，No.633，(1999)，pp.2094–2101.

- 11) 大橋真: 切欠の鈍い試験片における切欠引張強さ比とひずみ硬化指数の関係, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.75, No.758, (2009), pp.1443–1445.
- 12) S. V. Laakso, E. Niemi: Using FEM Simulations of Cutting for Evaluating the Performance of Different Johnson Cook Parameter Sets Acquired with Inverse Methods, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.47, (2017), pp.95–101.
- 13) 佐田登志夫: 金属切削における変形応力, 日本機械学会論文集, Vol.25, No.154, (1959), pp.464–471.
- 14) 長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司: アブレシブ摩耗現象と AE 信号の相関, トライボロジスト, Vol.55, No.10, (2006), pp.752–759.
- 15) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Scanning Electron Microscope Observation Study for Identification of Wear Mechanism Using Acoustic Emission Technique, Tribology International, Vol.72, (2014), pp.51–57.

## 第4章 マシニングセンタにおけるエンドミル工具の AE 技術を用いた接触検知

### 4.1 緒 言

第2章では、超精密加工領域において、超精密旋盤によりダイヤモンド工具と被削材の接触検知の適応範囲について言及した。超精密旋盤加工は、切削加工の基本となる連続加工でかつ、温度管理された環境下での加工であり結果として、超精密加工領域で超精密旋盤の最小指令値の接触検知が可能であった。一般加工領域において、生産現場で多く使用されている最小指令単位が数マイクロメートルオーダのマシニングセンタにおいても、AE 技術を用いた接触検知の適応範囲について検討することが重要である。

マシニングセンタにおいて、工具交換を必要とする部品および金型加工では、工具交換による ATC の取付け誤差、主軸系の温度変化、工具長の測定誤差などの総合的誤差により、加工面の形状精度や寸法精度に影響<sup>1,2)</sup>を及ぼす。1本の工具で摩耗しない間に金型全体を仕上げ加工することができれば、加工面の精度に関しては問題ない。1本の工具で仕上げるには、長寿命の工具と最適な加工条件の選定が必要であり、長寿命で高精度な加工が可能なコーティングの開発<sup>3)</sup>が進められている。しかしながら、大きな部品の金型加工においては難しいのが現状である。したがって、製品の加工精度を維持するために工具交換しても刃先位置の計測に誤差が生じないことが重要である。

一般的にマシニングセンタの座標系設定の段取り作業におけるプリプロセス計測は2種類<sup>4)</sup>ある。図4.1、4.2にその2種類の測定方法を示す。図4.1は(a)機外で使用する接触式のツールプリセッタ、もしくは(b)機上で使用する非接触レーザ測定器により工具長・径の測定を行い、(c)に示す基準測定器のタッチプローブなどでワーク座標系の原点の座標を求める方法である。図4.1に示す工具長(径)と機械原点からワーク原点までの距離より、工具と被削材の相対距離または作業空間内の工具刃先位置を計測している。いずれの測定器も、それぞれ高精度に計測が可能であるが、二つの測定器を使用しているため、間接誤差が生

じる。一方、簡易的な方法の図 4.2 では、工具長・径を測定することなく、工具と被削材の間に基準となる測定器を置き接触させることにより、被削材と工具刃先の相対距離を求める方法である。測定器は接触式を使用するため、工作機械

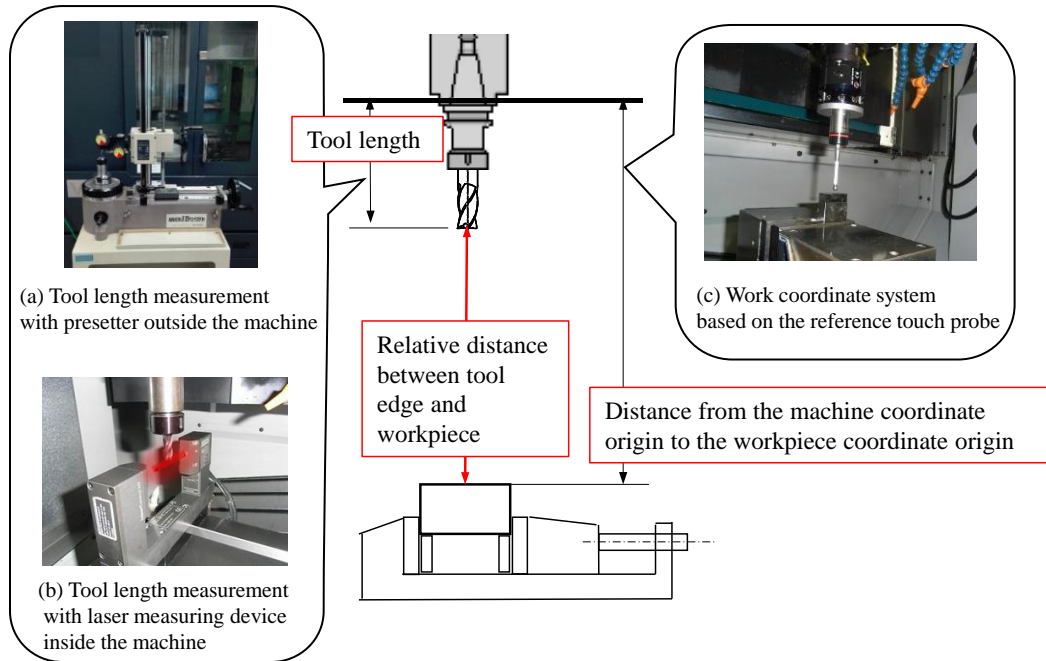


Fig. 4.1 Method for separately measuring tool length and coordinate system settings.

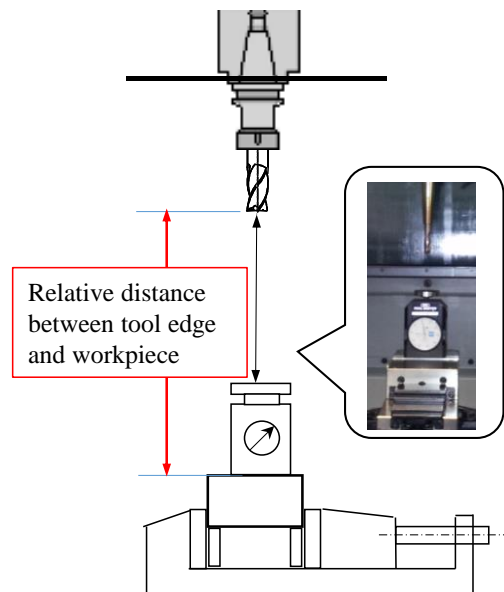


Fig. 4.2 Method of measuring the relative distance between the cutting edge of the tool and the workpiece by a contact measuring apparatus.



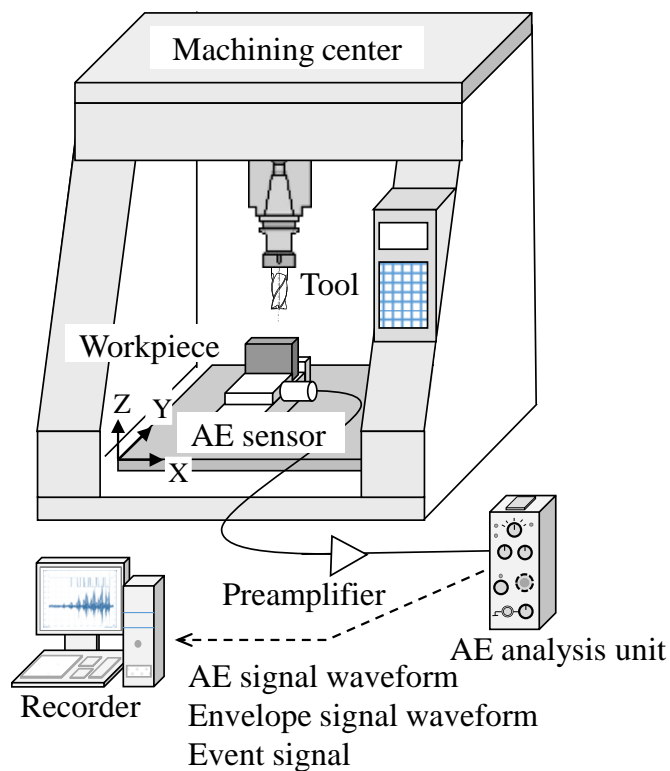
の主軸回転を停止させる必要があり，工作機械の熱変形などを考慮した計測ができない．このように実際に使用されている計測法や測定器では，高精度な計測をすることは難しい．

そこで本章は，第2章の超精密旋削加工でも使用した高感度な計測が可能な AE 技術を利用して，フライス系の切削加工で一般的な加工精度の領域において使用されるマシニングセンタを対象に，工具と被削材の接触検知の適応範囲について検討した．マシニングセンタでは様々な工具が使用されるが，特に部品加工や金型加工に多く使用されるスクエアエンドミルとボールエンドミルの接触検知の実験を行った．スクエアエンドミル加工では， $\phi 10\text{ mm}$ ， $\phi 0.2\text{ mm}$  を用い大小二つの違いを検討した．ボールエンドミル加工では，金型の自由曲面などに用いられるため，被削材の加工面の傾斜角度により，実際の切削速度が変わる点に着目した．また，マシニングセンタの実験において接触検知を行う場合に重要となる AE センサの取付け位置に関しても検討した．

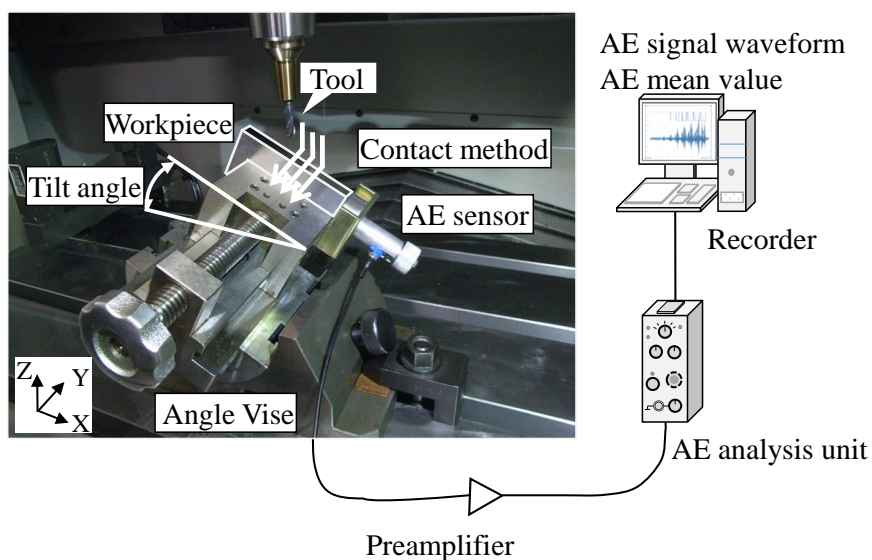
## 4.2 実験方法

### 4.2.1 実験装置

図4.3に立型マシニングセンタ（以下，マシニングセンタと称す）を利用した AE 信号接触検知実験装置の構成を示す．本実験装置は，第2章の図2.2に示した実験装置の一部を使用し，計測対象となる工作機械をマシニングセンタに変更したものである．図4.3(a)にスクエアエンドミル（以下，エンドミルと称す）による接触検知装置，(b)にボールエンドミルによる接触検知装置を示す．工作機械は，X，Y および Z 軸のマシニングセンタ（㈱牧野フライス製作所，V33i）を使用した．AE センサは，共振型（共振周波数：1 MHz）で前実験と同一のものを使用した．AE センサの取付け位置に関しては，回転主軸系への取付けが困難なため，被削材系の材料，バイス，テーブルのいずれかに取付けた．テーブル上のマシンバイスに被削材を取り付け，工具と被削材の間に微小な切込みを与えることによって接触を検出する実験装置となっている．図4.3(b)のボールエンドミルの実験においては，ボールエンドミルの刃先の接触点を変化させるために，傾斜バイスを用いて被削材を傾けた．



(a) Experiment of contact detection by square end mill.



(b) Experiment of contact detection by ball end mill.

Fig. 4.3 Experimental apparatus for AE signal acquisition in machining center .

#### 4.2.2 AE センサ取付け位置の検討実験

AE センサの取付け位置は，AE 信号の検出レベルや工具経路等を考慮したうえで決定する必要がある．弾性波の伝搬は，接触点もしくは面が存在した場合，その接触状態によりエネルギー損失などの影響を受ける．したがって，工具または被削材から直接 AE 信号を検出することが最も感度が良い．しかしながら，工具側から AE センサで信号を検出する場合，工具が回転しているため，機械的ノイズの影響を受けやすく，困難であると考ええる．一方で，被削材の側面の場合，工具経路の妨げになることや加工中の切りくずがセンサに衝突するなど実加工には不向きな場合が想定される．

以上の観点から，AE センサの取付け位置は図 4.4 に示すとおり被削材側面（図中 A 部），バイス側面（図中 B 部），テーブル上面（図中 C 部）のそれぞれ 3 箇所にして実験を行った．テーブル上面に固定されたマシンバイスに被削材（S50C：縦 30 mm×横 30 mm×厚さ 10 mm，マシンバイスからの突出し量 10 mm）を取り付けた．AE センサの固定は，マグネットホルダを用いて取り付けた．AE 信号は，NDIS2110 の測定法を参考に，被削材上面（右端から 20 mm の位置）でペンシルテストを行い，その際の発生信号を計測した．

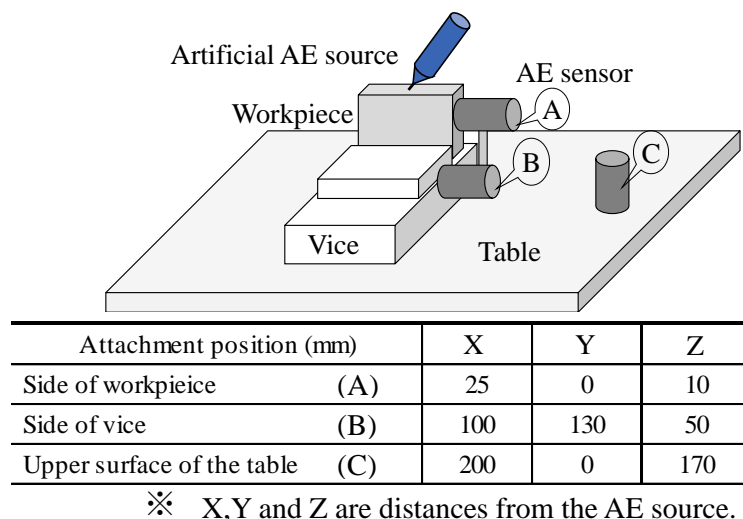


Fig. 4.4 Mounting positions of the AE sensor.

### 4.2.3 スクエアエンドミルおよびボールエンドミルの

#### 接触検知実験方法および実験条件

本実験では、機上計測システム構築を目的に、マシニングセンタにおける工具と被削材の接触検知の適応範囲を確認する。図 4.5 にエンドミルおよびボールエンドミルによる接触検知のアプローチ方法を示す。一般的に例えば工具長を計測もしくは、刃先位置を計測する場合、Z 軸方向にアプローチを行い、刃先位置の計測を行うが、本実験ではマシニングセンタにおける接触検知の適応範囲を調査するために、ステップ・アプローチを用いた。ステップ・アプローチとは、Z 軸方向の工具長を計測する場合、図 4.5 (a) に示すように、まず被削材に接触しない領域でエンドミルを Z 軸方向にステップ（切込み）した後に、X 軸方向もしくは Y 軸方向から被削材にアプローチ（切削送り）し、接触させる。接触が検知されない場合は、アプローチ開始位置に戻り、AE 信号による接触が検知されるまでステップとアプローチを繰り返す（以下、ステップ・アプローチと称す）。エンドミルの底刃の接触が認識されると、工具の送りを停止させる。切込みステップを変えることにより、適用範囲を調べる。図 4.5 (b) は、エンドミルの外周刃の接触方法であり、ステップ・アプローチの方向を変更して行う。図 4.5 (c) は、ボールエンドミルの接触検知方法であり、傾斜した被削材にエンドミルの底刃を接触させる方法と同じようにステップ・アプローチを行う。傾斜角度は、傾斜バイスにより自由に変更できるようにした。

本実験における切削条件を表 4.1 に示す。エンドミルにおける接触検知実験では、 $\phi 10\text{ mm}$ （突出し量 25 mm，刃長 22 mm）と  $\phi 0.2\text{ mm}$ （突出し量 12 mm，刃長 0.4 mm）の 2 枚刃エンドミル（超硬 TiAlN 系コーティング）を用いた。なお、加工条件はカタログ値を参考に決定した。切削方式は、底刃加工および外周刃加工（アップカット，ダウンカット）のそれぞれを行った。被削材は、一般的に機械部品などに多く用いられる機械構造用炭素鋼 S50C と金型鋼に利用されるプリハードン鋼 NAK55 を用いた。切削方式としてステップ・アプローチで接触検知を行った。外周刃加工についても、同様の方法で加工方向のみを変更して行った。

$\phi 10\text{ mm}$  のエンドミルにおいて、底刃加工の切込み深さは、半径方向切込み深さ ( $a_r$ ) をエンドミルの直径と同じ 10 mm とし、軸方向切込み深さ ( $a_a$ ) を 0.1

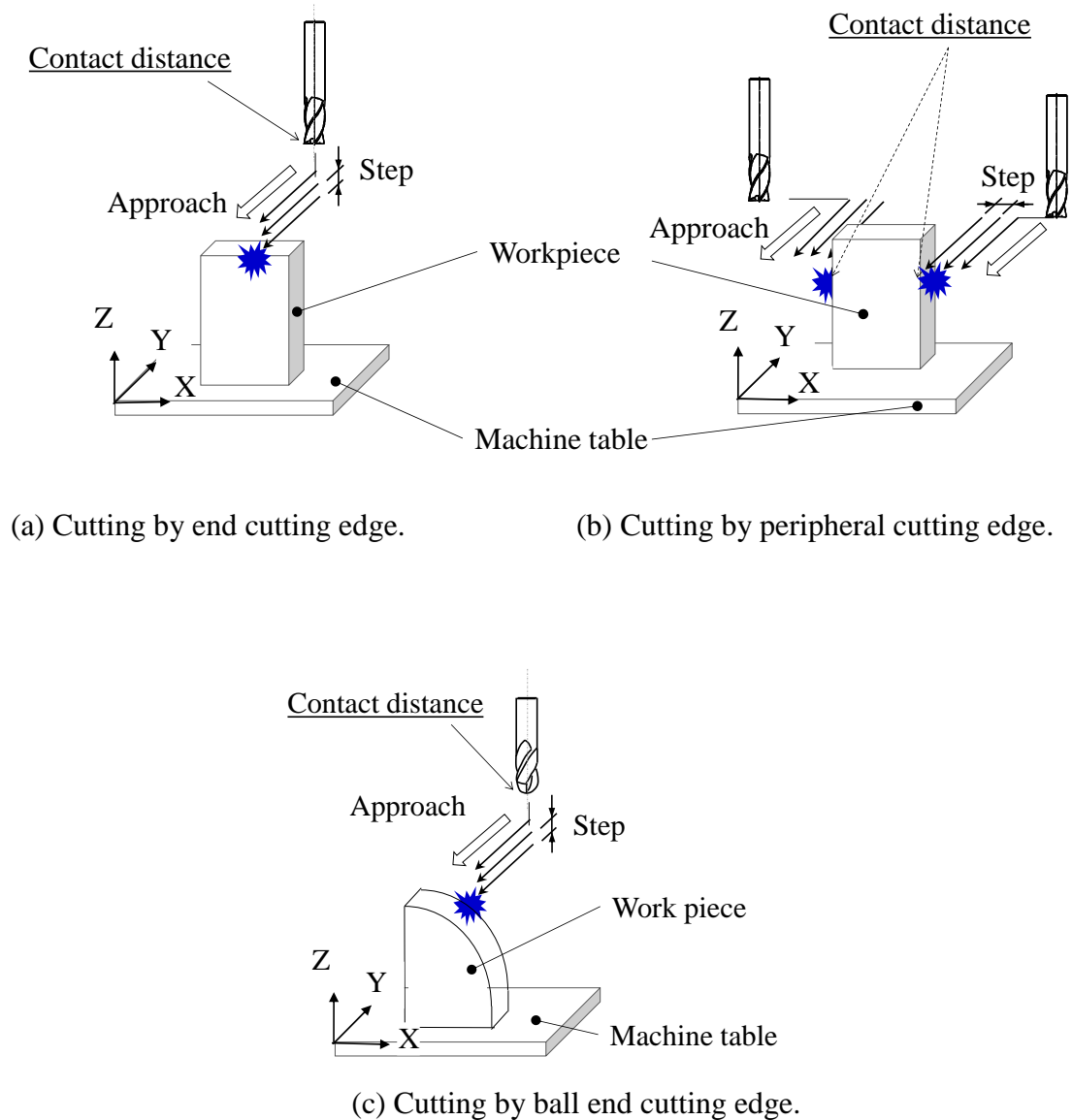
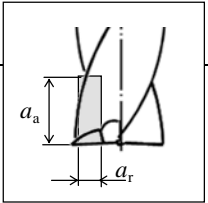


Fig. 4.5 Approach method of contact detection (step approach).

～0.4  $\mu\text{m}$  (0.1  $\mu\text{m}$  間隔), 1  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  で加工した. 外周刃加工の切込み深さは, 底刃加工と切込み方向を変更し, 軸方向切込み深さ ( $a_a$ ) を 10 mm, 半径方向切込み深さ ( $a_r$ ) を 0.1～0.4  $\mu\text{m}$  (0.1  $\mu\text{m}$  間隔), 1  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  とした.  $\phi 0.2 \text{ mm}$  の小径エンドミルの場合は,  $\phi 10 \text{ mm}$  と同様の方法で, 底刃加工のみ実験した.

マシニングセンタの最小設定単位は 0.1  $\mu\text{m}$  であるが, 切込み深さは工作機械の繰返し位置決め精度等で誤差が生じるため,  $\phi 10 \text{ mm}$  のエンドミルでは, それぞれの切削方式で同じ被削材の上面 (底刃加工) または側面 (外周刃加工) の同一面を同一条件で繰返し加工し, 切込み深さが安定するようにした.  $\phi 0.2 \text{ mm}$

Table 4.1 Experimental conditions for contact detection using square end mill.

Tool	Square end mill 2 blades,Carbide (TiAlN-based coating)					
Diameter	$\phi$ 10 mm			$\phi$ 0.2 mm		
Workpiece	S50C (30 mm×30 mm×10 mm)			NAK55 (85 mm×55 mm×15 mm)		
Cutting speed $V$ (Spindle speed $N$ )	150 m/min (4770 min <sup>-1</sup> )			12.5 m/min (20000 min <sup>-1</sup> )		
Feed speed $f_z$	0.05 mm/tooth (477 mm/min)			0.005 mm/tooth (200 mm/min)		
Cutting system Depth of cut	Up cut milling / Down cut milling			End milling	Depth of cut	<div><math>a_a = 0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}</math>, (0.1 <math>\mu\text{m}</math> interval) 1, 10, 100 <math>\mu\text{m}</math></div> <div></div> <div><math>a_r = 10 \text{ mm}</math></div>
	Peripheral milling	Depth of cut	$a_a = 10 \text{ mm}$			
			$a_r = 0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ , (0.1 $\mu\text{m}$ interval) 1, 10 $\mu\text{m}$			
	End milling		$a_a = 0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ , (0.1 $\mu\text{m}$ interval) 1, 10 $\mu\text{m}$			
			$a_r = 10 \text{ mm}$			
	AE sensor attachment position	Vice				
Sampling frequency	5 MHz					
AE amplification factor	60 dB					
AE high-pass filter	100 kHz					

$a_r$  : Radial depth of cut     $a_a$  : Axial depth of cut

の小径エンドミルでは、切削状態の判別が困難であることから、 $\phi$  10 mm と同様にを行うが、目視では接触検知を確認できないため、1 mm 間隔で横にシフトしてステップ・アプローチにより加工を行い、加工痕深さの測定を行った。

ボールエンドミルにおける接触検知実験では、 $\phi$  6 mm、半径 3mm（突出し量 25 mm、刃長 22 mm）、2 枚刃（超硬 TiAlN 系コーティング）を用いた。ボールエンドミルは、焼きばめホルダで把持した。ボールエンドミル加工は、一般的に三次元曲面形状を加工することが多く、形状により切れ刃箇所が異なるため切削速度が変化する。ボールエンドミルでは、マシニングセンタのテーブル上に被削材を取付けた傾斜バイスを固定し、傾斜角度を変化させた。表 4.2 はボールエンドミル工具による接触検知の実験条件である。ボールエンドミルでもエンドミル同様にステップ・アプローチを行った。工具接触時に発生した弾性波を AE センサで検出する。加工前の被削材は、研削盤により加工を行い、研削加工方向

Table 4.2 Experimental conditions for contact detection using ball end mill.

Tool Diameter	Ball end mill 2 blades, Carbide (TiAlN-based coating) $\phi$ 6 mm (r3 mm)
Workpiece	NAK55 (85 mm×55 mm×15 mm)
Spindle speed $N$	12000 min <sup>-1</sup>
Tilt angle of workpiece	0, 15, 30°
Feed speed $f_z$	0.1 mm/tooth
Cutting direction	Down Cut
AE sensor attachment position	Workpiece
Sampling frequency	1 MHz
AE amplification factor	70 dB
AE high-pass filter	100 kHz

とボールエンドミル加工の方向が垂直になるように接触させた．被削材の表面粗さは， $R_a$  で  $0.06\ \mu\text{m}$  程度のものを使用した．

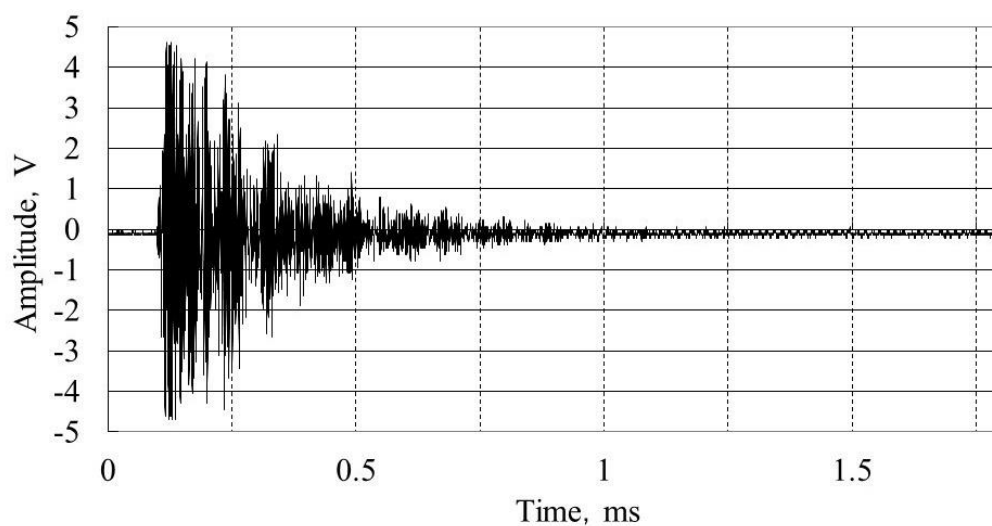
## 4.3 実験結果および考察

### 4.3.1 AE センサ取付け位置の検討

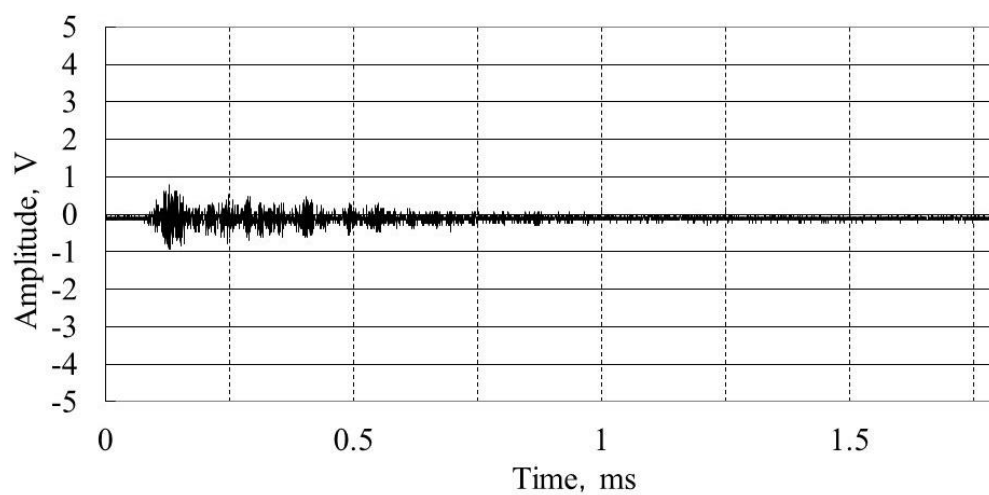
図 4.6 は AE センサを被削材側面 (A) およびバイス側面 (B) に取付けたときのペンシルテスト時の AE 原波形である．約 0.1 ms までがノイズでその後，突発的に発生している信号が芯圧折に伴う AE 信号である．なお，増幅率は 50 dB としている．

テーブル上面 (C) において，AE 信号を検出するためには増幅率を 70 dB 以上に設定する必要があった．しかしながら，増幅率 70 dB では，主軸回転時や早送り開始時などに発生する機械的ノイズのレベルも合わせて大きくなるため AE 信号の判別が困難である．図 4.6 より (a) 被削材の側面 (A) に取付けたときが SN 比を確保ができ，AE センサ取付け位置には適している．しかしながら，AE センサと工具の干渉や信号レベルを考慮する必要がある．そこで実験では表 4.1, 4.2 に示すように，AE センサ取付け位置を  $\phi$  10 mm のエンドミルではマシンバイスに， $\phi$  0.2 mm のエンドミルおよびボールエンドミルでは AE 信号レベ

ルが小さいため被削材に直接取り付けることとした。なお、信号の増幅率は SN 比を確保できる範囲内でエンドミルとボールエンドミルにおいてそれぞれ 60, 70 dB に決定した。



(a) Side of the work peice (A).



(b) Side of the vice (B).

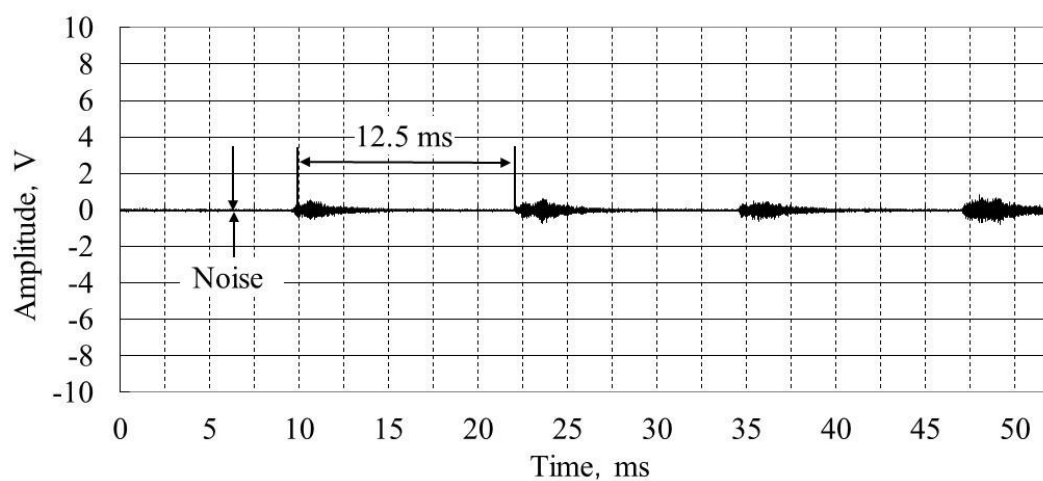
Fig. 4.6 AE signal waveforms detected during pencil test (amplification factor : 50 dB).



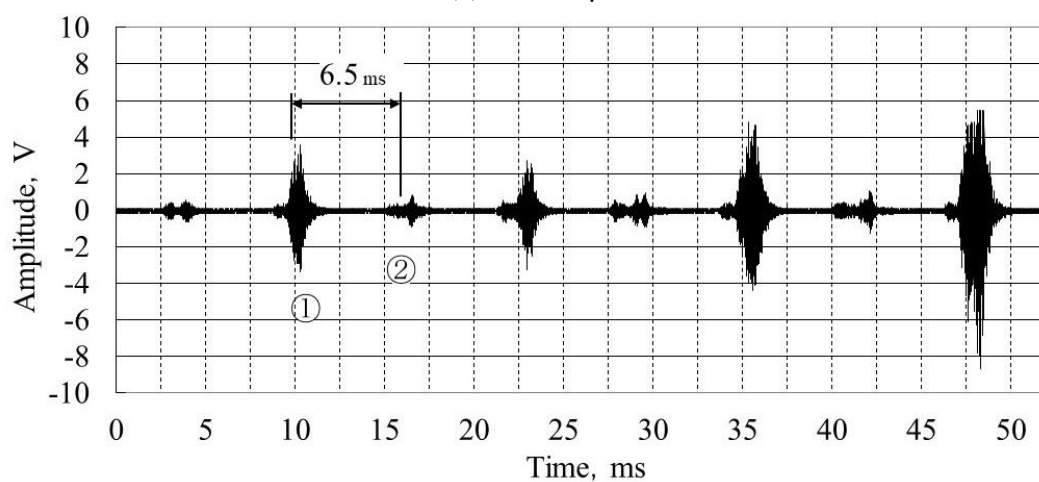
### 4.3.2 スクエアエンドミルによる接触検知の適応範囲

図 4.7 は、 $\phi 10\text{ mm}$  のエンドミル使用時の軸方向切込み深さ  $a_a=0.1, 0.4, 10.0\text{ }\mu\text{m}$  における底刃加工時の切削初期の AE 原波形を示す。また、図 4.8 は、 $\phi 10\text{ mm}$  のエンドミル使用時の半径方向切込み深さ  $a_r=0.1, 0.4, 10.0\text{ }\mu\text{m}$  における外周刃加工（ダウンカット）時の切削初期の AE 原波形を示す。図 4.7 の結果から、切込み深さの大きさに応じて AE 信号のレベルは変化するものの、ノイズと AE 信号は区別して検出ができています。さらに、切込み深さの変更やアップカットによる実験においても、NC モニタの位置座標の確認から、接触と同時に AE 信号が検出できることを確認した。この実験結果から、 $\phi 10\text{ mm}$  のエンドミルと被削材の接触は、マシニングセンタの最小設定単位  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  の微小切込み深さにおいても AE 技術で検出が可能であるといえる。本実験条件では、 $\phi 10\text{ mm}$  のエンドミルによる AE 技術を用いた接触検知の適応範囲は最小で  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  であることを確認した。さらに、図 4.7 (a) 図 4.8 (a) の  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  の微小切込み深さにおいて、加工に伴う AE 信号とノイズの振幅に違いがみられるため、位置決め精度のよい工作機械を使用し、最適な計測条件の設定をすることで  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  以下の切込み深さでも、AE 技術により接触検知できる可能性がある。

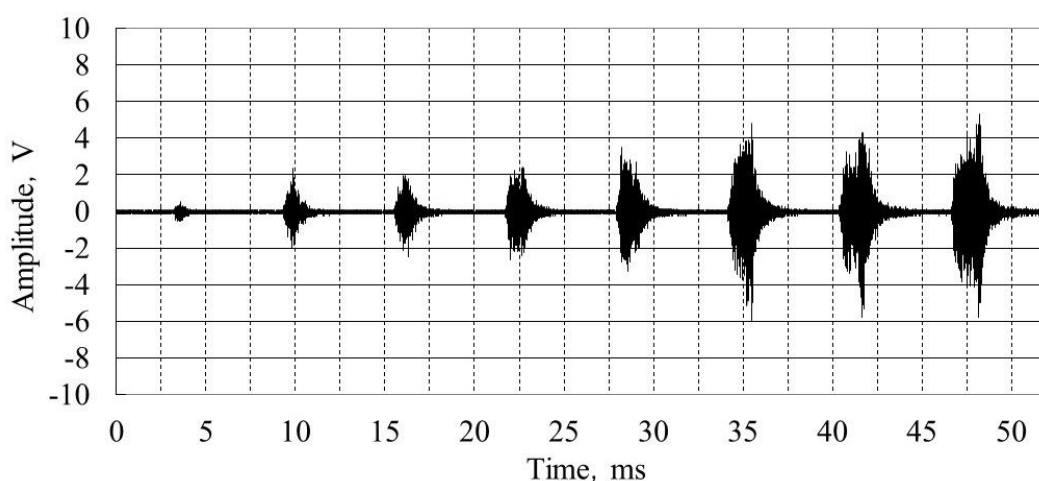
図 4.7, 4.8 の AE 原波形には、 $10\text{ ms}$  近傍から一定の周期で AE 信号を検出している。このときの周期において切込み深さが小さいときは約  $12.5\text{ ms}$  であり、切込み深さが大きいときは、その半分の約  $6.25\text{ ms}$  であった。今回の実験で工具 1 回転の周期は  $12.5\text{ ms}$  であり、2 枚刃のエンドミルの切れ刃による周期は  $6.25\text{ ms}$  となる。また、エンドミルの取付け誤差や工作機械の回転誤差などを含んだ総合的な工具刃先の静的な全振れは、主軸のベースラインからエンドミルの刃先端までの距離  $115\text{ mm}$  の所で  $4\text{ }\mu\text{m}$  であった。取付け誤差等により、工具には振れが生じるため、加工中も 2 枚のエンドミルの切れ刃の軌跡は完全に同一ではなく、二つの切れ刃の位置は回転中心からの距離がずれて加工していることになる。たとえば、図 4.7 (b) であれば、切れ刃位置が中心よりも大きく離れている方の切れ刃による加工により、大振幅の AE 信号が検出される [図 4.7 (b) ①]。またもう一方の切れ刃により、小振幅の AE 信号が検出されたことになる [図 4.7 (b) ②]。大振幅の AE 信号は切込み深さが  $0.4\text{ }\mu\text{m}$  で検出され、小振幅の AE 信号は切込み深さが  $0.4\text{ }\mu\text{m}$  以下で検出されたことがわかる。



(a)  $a_a = 0.1 \mu\text{m}$

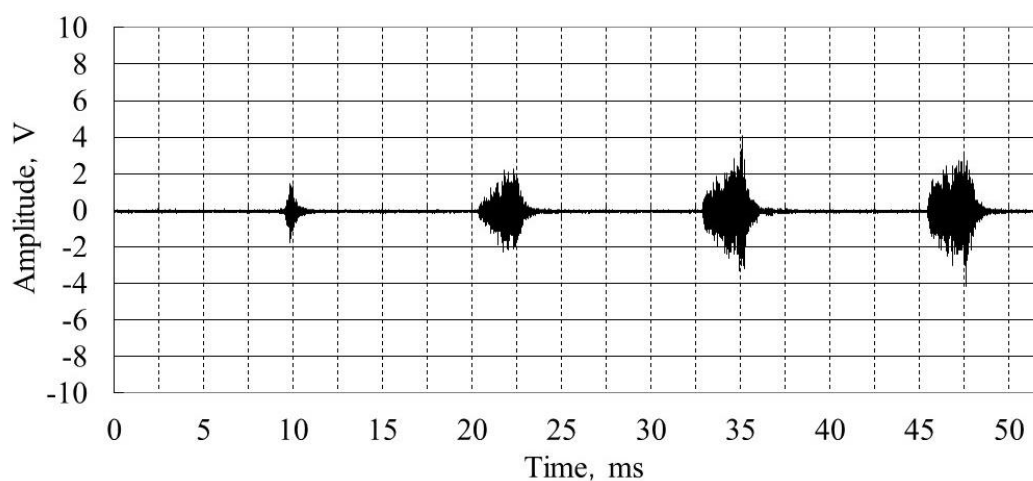


(b)  $a_a = 0.4 \mu\text{m}$

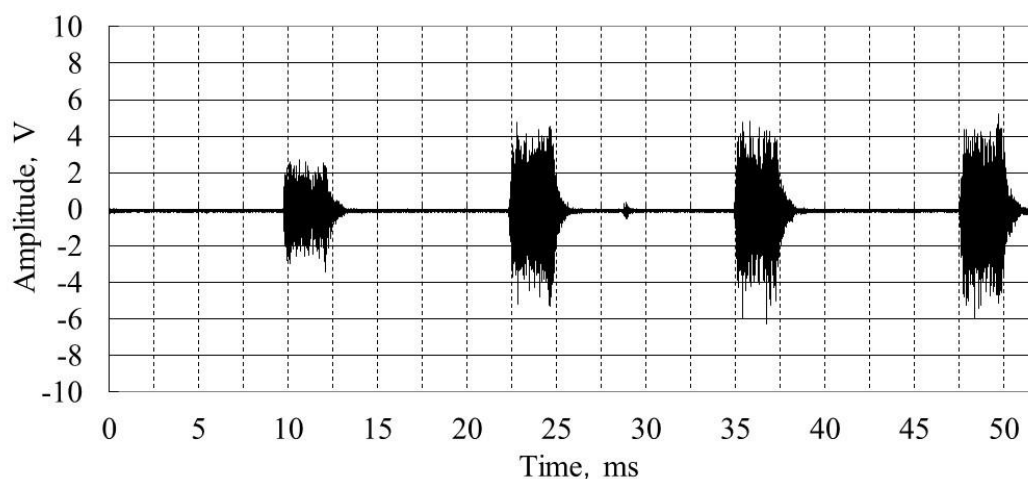


(c)  $a_a = 10.0 \mu\text{m}$

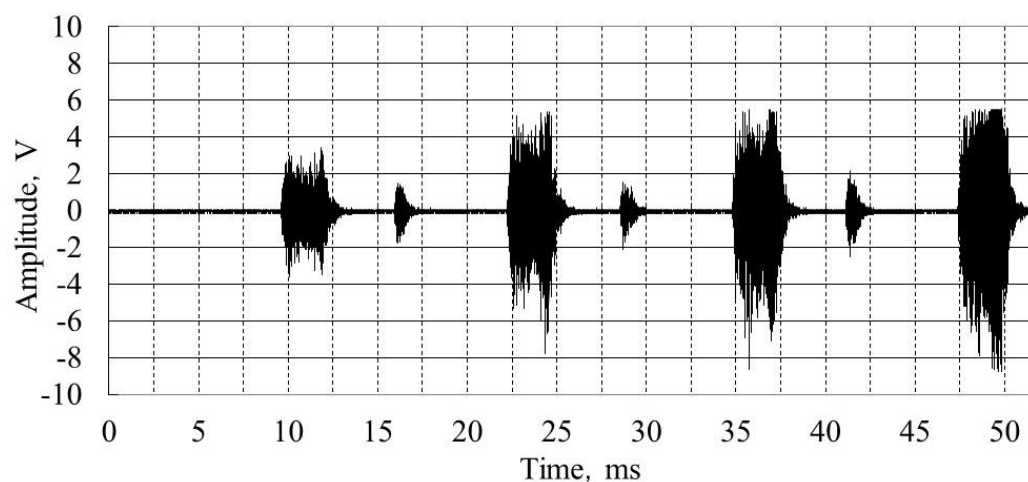
Fig. 4.7 AE signal waveform at the initial stage of cutting during the end cutting edge at axial depth of cut  $a_a = 0.1, 0.4, 10.0 \mu\text{m}$  at the time of using 10 mm end mill.



(a)  $a_r = 0.1 \mu\text{m}$



(b)  $a_r = 0.4 \mu\text{m}$



(c)  $a_r = 10.0 \mu\text{m}$

Fig. 4.8 AE signal waveform at the initial stage of cutting during peripheral cutting edge (downcut) at radial depth of cut  $a_r = 0.1, 0.4, 10.0 \mu\text{m}$  at the time of using 10mm end mill.

したがって、AE 原波形の観察から、エンドミルの振れに対して切込み深さが大きいときは、エンドミルの 2 枚の切れ刃で被削材を加工しており、切込み深さが小さいときは工具の振れの影響を受けて 1 枚刃のみで加工していたことがわかる。

ここで、 $\phi 10\text{ mm}$  エンドミルの AE 信号と加工面について検討する。図 4.9, 4.10 はそれぞれ図 4.7 の底刃加工 (a), (c)  $a_a=0.1, 10.0\mu\text{m}$  と図 4.8 の外周刃加工 (ダウンカット) (a), (c)  $a_r=0.1, 10.0\mu\text{m}$  の実験に対応する加工表面の観察と表面粗さ曲線である。これらの写真にみられる縦筋が底刃または外周刃の回転による加工痕である。このことから、微小切込み深さでも実際に被削材表面を加工しており、切削プロセスにおいて発生する AE 信号を検出しているといえる。図 4.8 (c) と図 4.10 (b) は同じ加工条件の AE 原波形と加工表面であり、その二つの違いについて考察する。図 4.8 (c) の AE 原波形から、1 枚目と 2 枚目の切れ刃の接触信号より大小の振幅が確認できる。図 4.10 (b) からは、1 刃あたりの送り量  $50\mu\text{m}$  の加工痕はなく、1 回転の送り量である  $100\mu\text{m}$  の加工痕しかみることができない。この理由を図 4.11 に示す工具切れ刃の軌跡模式図で説明する。この図は、工具が振れをもつときの切れ刃の軌跡を示している。

まず、1 枚目の切れ刃①で被削材が加工される [図 4.11 (a)]。つぎに 2 枚目の切れ刃②で被削材が加工されるが、工具の振れや倒れの影響により、A 部のみしか切削されない [図 4.11 (b)]。その後、1 枚目の切れ刃①と 2 枚目の切れ刃②で切削した A 部と B 部が共に加工される [図 4.11 (c)]。これが繰り返される。この工具切れ刃の軌跡から考えると、図 4.8 (c) で検出した 2 枚目の切れ刃で被削材を加工したときの AE 信号は取得できるが、光学顕微鏡による加工表面観察では加工痕を確認できなかった。このように、AE 技術により加工面の観察で確認しにくい情報も認識することができると考えられる。

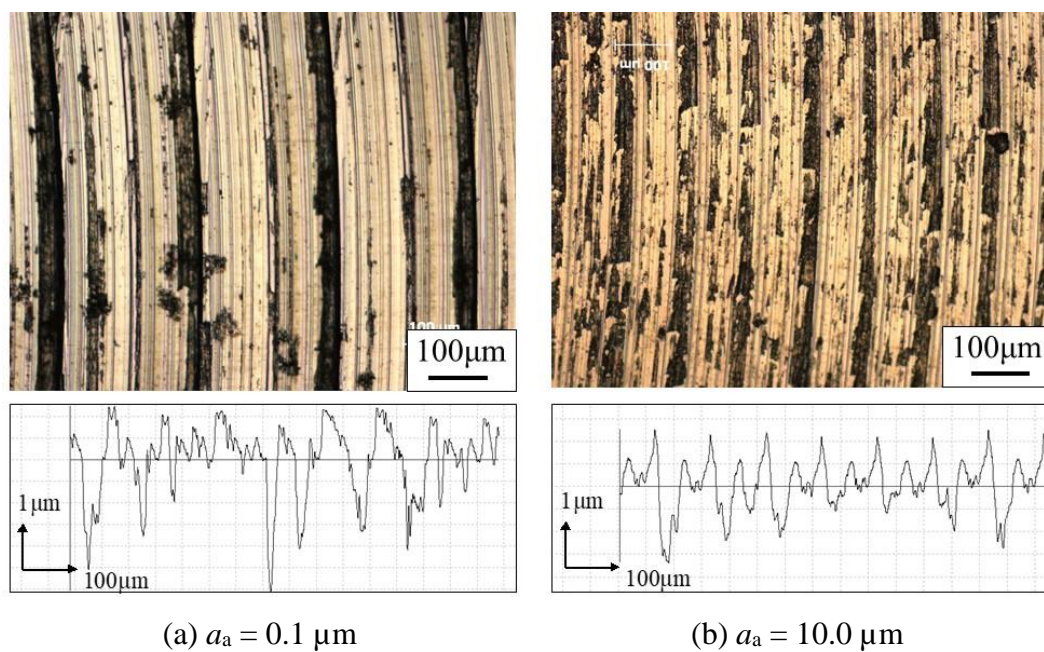


Fig. 4.9 Surface observations and surface roughness curve in end milling in Fig. 4.7 (a), (c).

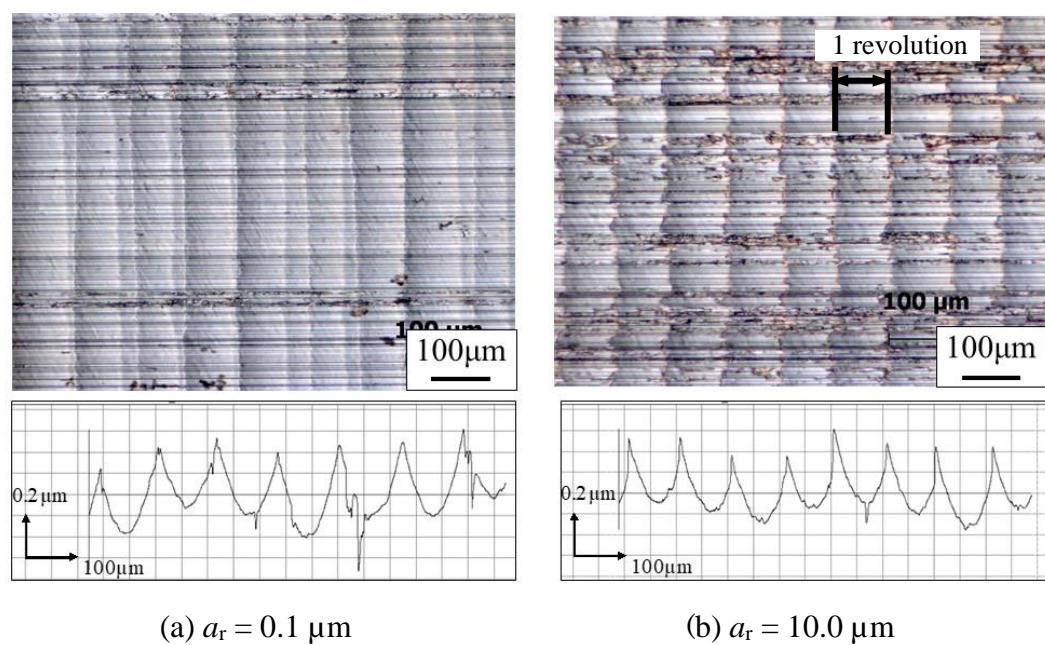


Fig. 4.10 Surface observations and surface roughness curves in Fig. 4.8 (a), (c) (down cut milling by peripheral cutting edge).

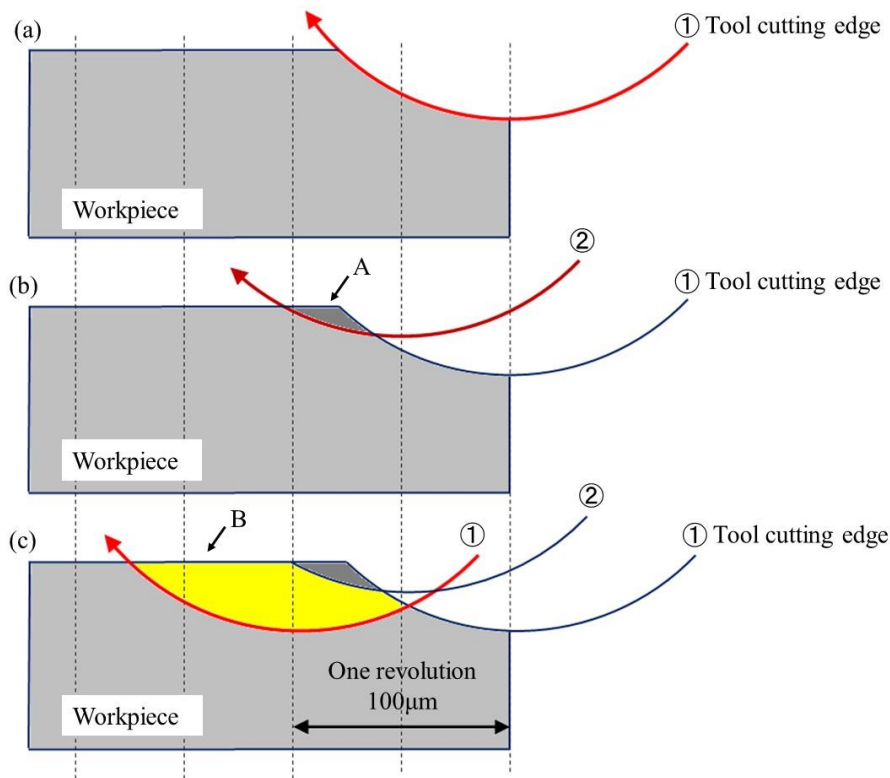


Fig. 4.11 Schematic diagram of tool cutting edge.

$\phi 0.2 \text{ mm}$  の小径エンドミルでは、触針式表面形状・粗さ測定機 (Taylor Hobson Inc., Form Talysurf Laser 635) を用いて、加工表面の切込み深さを測定し、それを軸方向切込み深さ ( $a_a$ ) と判断した。図 4.12 は底刃加工による被削材の加工痕と粗さ曲線である。被削材の未加工部の表面粗さは、算術平均粗さ  $Ra$  で  $0.02 \mu\text{m}$ 、最大高さ粗さ  $Rz$  で  $0.14 \mu\text{m}$  であった。この粗さ曲線の①～④が  $\phi 0.2 \text{ mm}$  の小径エンドミルの加工痕である。図 4.13 は図 4.12 の粗さ曲線の①③のときに取得した AE 原波形であり、図 4.14 がそれぞれの加工表面を観察したものである。図 4.12 より、図 4.13 の (a) が軸方向切込み深さ ( $a_a$ ) 約  $0.6 \mu\text{m}$  で、(b) が約  $0.1 \mu\text{m}$  である。

図 4.13 (a), (b) の AE 原波形の結果から、どちらの波形も  $3 \text{ ms}$  の周期の突発型の AE 信号がみられる。 $\phi 10 \text{ mm}$  のエンドミルの結果と同様に  $\phi 0.2 \text{ mm}$  のときも、工具 1 回転の周期と同じであり、工具切れ刃が 1 刃の加工による AE 信号を検出している。図 4.14 の加工痕からも送りのピッチが  $10 \mu\text{m}$  で 1 回転あたりの送り量と同じであった。しかしながら、図 4.13 (a) も A 部と (b) B 部を比



べると図 4.13 (a) A 部の振幅の方が大きくなっている。図 4.13 (a) A 部は、図 4.14 (a) より確認すると、切れ刃全体が被削材を連続的に加工しているため、切削に伴う AE 信号であるといえる。図 4.14 (b) から、片当たりした加工痕がみられ、被削材の平面度や工具の振れおよび倒れによりエンドミルの底刃で全面を切削していないこともわかり、図 4.13 (b) B 部はノイズであるといえる。本実験では  $\phi 0.2 \text{ mm}$  のエンドミルでも  $0.1 \mu\text{m}$  の接触検知可能で微小な切込み深さでも AE 信号を検出できることがわかる。本実験の条件およびマシニングセンタの最高回転速度や最小指令値などの仕様を考えると、AE 技術を用いた接触検知の適応範囲は、最小で  $0.1 \mu\text{m}$  であることがわかった。

本実験のステップ・アプローチにより、エンドミルの切れ刃が被削材に  $0.1 \mu\text{m}$  切込み、接触したときの信号を検出することで、高精度にエンドミルの刃先位置情報を取得することから、マシニングセンタ作業で行う機上計測は可能であると考えられる。現状のマシニングセンタの計測システムでは、平面加工時に複数の工具を用いて加工面をつなぐ場合、仕上げ面段差は  $1 \mu\text{m}$  程度である。本提案のステップ・アプローチ手法と AE 技術を利用した計測法を用いることで、エンドミルにより  $0.1 \mu\text{m}$  程度の仕上げ面段差で加工が可能となり、仕上げ面段差を精密加工の表面粗さ程度に抑えることができると考えられる。

さらに、本計測システムでは、AE 技術を一つの実験装置で測定を行うため、二つの計測システムを使用する場合の間接測定による誤差や工作機械の熱変形等による工具長および工具径の総合誤差を最小限にすることができる。

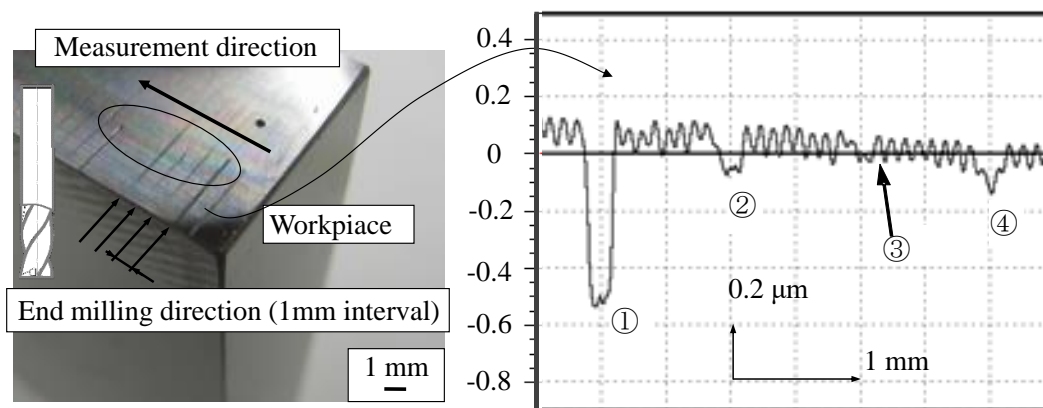
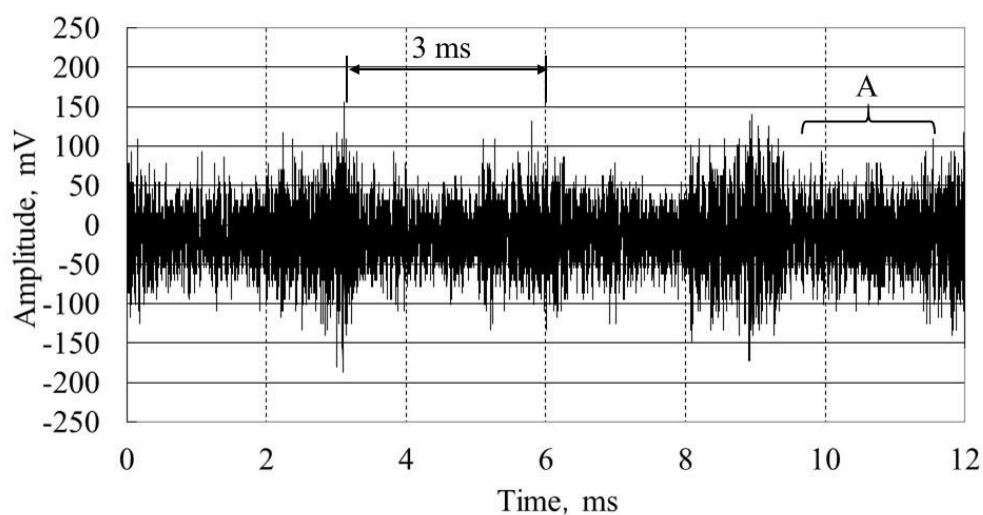
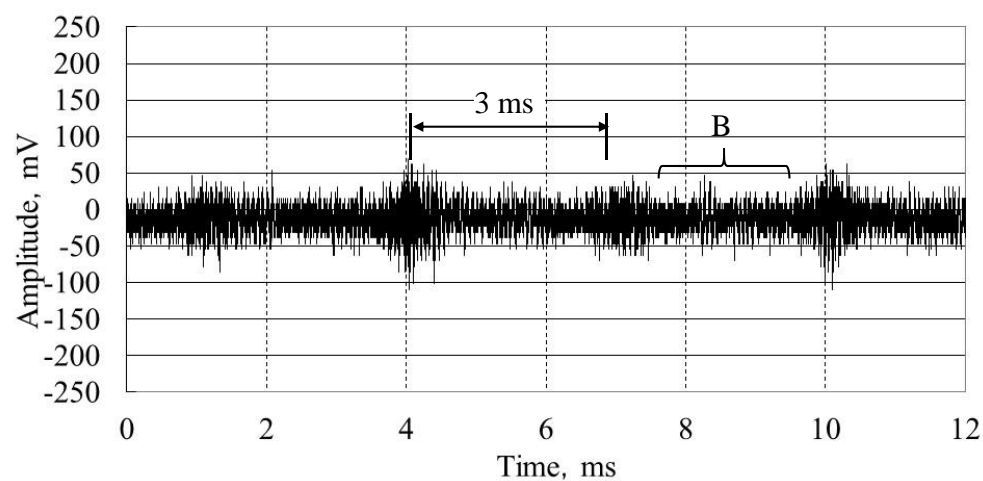


Fig. 4.12 Cutting mark and roughness curve of the workpiece using end cutting edge of  $\phi 0.2 \text{ mm}$  small-diameter end mill.

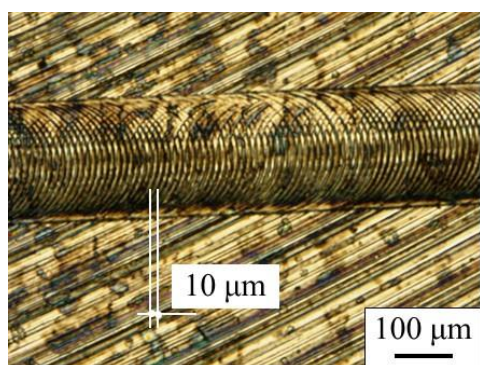


(a)  $a_a = 0.6 \mu\text{m}$  (Fig. 4.9 roughness curve ①).

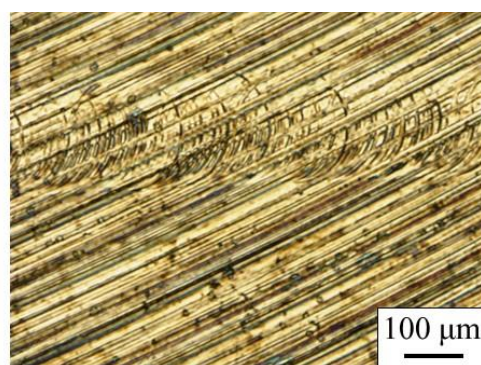


(b)  $a_a = 0.1 \mu\text{m}$  (Fig. 4.9 roughness curve ③).

Fig. 4.13 AE signal waveforms at the time of ① and ③ in Fig. 4.12.



(a)  $a_a = 0.6 \mu\text{m}$



(b)  $a_a = 0.1 \mu\text{m}$

(Figure 4.9 roughness curve ①).

(Figure 4.9 roughness curve ③).

Fig. 4.14 Processed surface at the time of ① and ③ in Fig. 4.12.

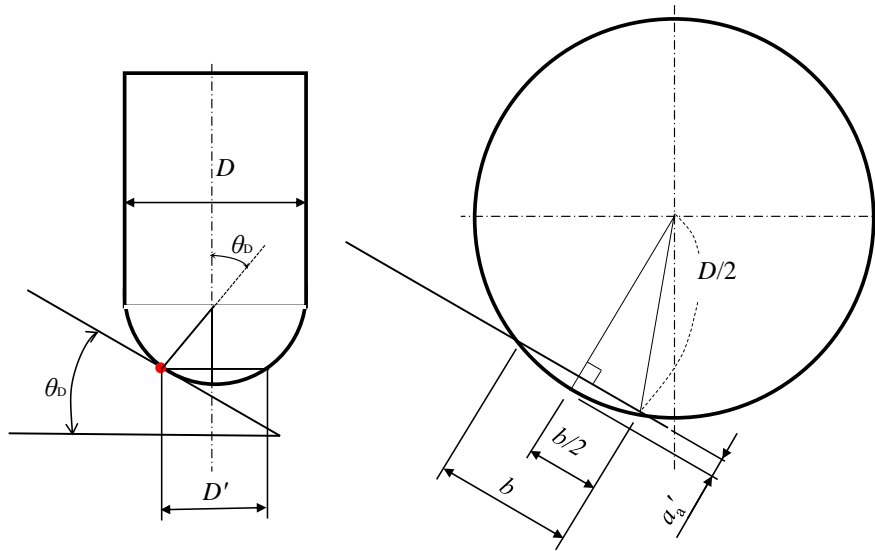


### 4.3.3 ボールエンドミルによる接触検知の適応範囲

ボールエンドミルの接触検知についても、ステップ・アプローチにより実験を行い、被削材の傾斜角度の違いによる接触検知の適用範囲について調べた。切込み深さに関しては、加工痕の幅を測定し、工具刃先の輪郭度や直径が理想どおりのものと考え、概算切込み深さとして求めた。被削材の傾斜角度により、工具の接触点の位置が変わるため、切削速度は工具が接触した点の位置を実直径とし、実切削速度<sup>5,6)</sup>として求めた。図 4.15 (a) に任意の傾斜角度  $\theta_D$  における実切削速度  $V'$ 、図 4.15 (b) に概算切込み深さ  $a_a'$  mm を示す。実切削速度  $V'$  m/min は式 (4.1)、概算切込み深さ  $a_a'$  mm は式 (4.2) となる。ここでは、工具直径  $D$  mm, 実直径  $D'$  mm, 傾斜角度  $\theta_D$  °, 測定した加工痕の幅  $b$  mm とした。

$$V' = \frac{\pi D'}{1000} = \frac{\pi D \cdot \sin \theta_D}{1000} \quad (4.1)$$

$$a_a' = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (4.2)$$



(a) Actual cutting speed  $V'$  (actual diameter). (b) Approximate depth of cut  $a_a'$ .

Fig. 4.15 Inclination angle and actual cutting speed and width of cutting mark and approximate depth of cut.

図 4.16 は、被削材の傾斜角度を変化させボールエンドミルで加工したときの加工痕とそのときに検出された AE 原波形である。実切削速度および切削痕の深さは、それぞれ式 (4.1), (4.2) から求め、その結果についても図 4.16 に示した。

図 4.16 の約 300 mV 以下の信号は、マシニングセンタのテーブルの送りなどに伴って検出されたノイズである。それ以外の突発的に検出されている信号が切削初期の AE 信号である。

図 4.16 (a) の傾斜角度  $0^\circ$  において、 $0.1\ \mu\text{m}$  ずつステップ・アプローチを行い、概算切込み深さ  $0.56\ \mu\text{m}$  のときに AE 信号が検出された。被削材の傾斜角度が  $0^\circ$  でかつ切込み深さが小さいと被削材に接触する刃先はほぼ中心の切れ刃になり、切れ刃による切削が難しい。寺井ら<sup>7)</sup>は、切れ刃退行現象として、工具回転中心近傍で加工を行うときは、切れ刃の回転半径が小さいため、切れ刃すくい面でなく逃げ面で被削材に接触すると報告している。その現象により、切削というよりも逃げ面による摩擦もしくは塑性変形による加工になり、本計測条件では AE 信号を検出しにくかったと考える。AE 信号が検出されたときの切込み深さと切削速度について考えると、実際の切削速度は 0 にはならない。正確に概算切込み深さ ( $0.56\ \mu\text{m}$ ) を考慮して計算すると、被削材に接触した外周部 ( $\phi 115.8\ \mu\text{m}$ ) で  $4\ \text{m/min}$  になる。この時は、切れ刃の回転半径が大きくなり、本実験の計測条件においては切削速度が  $4\ \text{m/min}$  以上になると、AE 信号を検出できたことになる。

図 4.16 (b), (c) の傾斜角度  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  のように切削速度が速くなると、概算切込み深さ約  $40\ \text{nm}$  と小さくても AE 信号を検出することができた。また、この二つはほぼ同じ切込み深さであり AE 信号の振幅を比較すると、実切削速度が大きい傾斜角度  $30^\circ$  の方が大きい振幅値を示した。第 2, 3 章と同様に切削速度が大きい方が AE 信号の振幅が大きいことがわかった。

AE 原波形を詳細にみると、図 4.16 (b), (c) の傾斜角度  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  では、検出した AE 信号の周期は  $5\ \text{ms}$  であり、加工痕を見ても断続切削であった。この断続切削の周期は工具 1 回転あたりの時間に相当する。工具は、2 枚刃のボールエンドミルであり、2 枚の切れ刃で加工すると、 $2.5\ \text{ms}$  の周期になる。しかしながら、今回は、工具の取付け精度等により外周の全振れが  $2\ \mu\text{m}$  であったため、1 枚の切れ刃による加工であることがわかった。また図 4.16 (a) の傾斜角度  $0^\circ$  では、

AE 信号は連続的に検出された。これは、切込み深さも大きく工具刃先が常に接触している状態をあらわしているといえる。

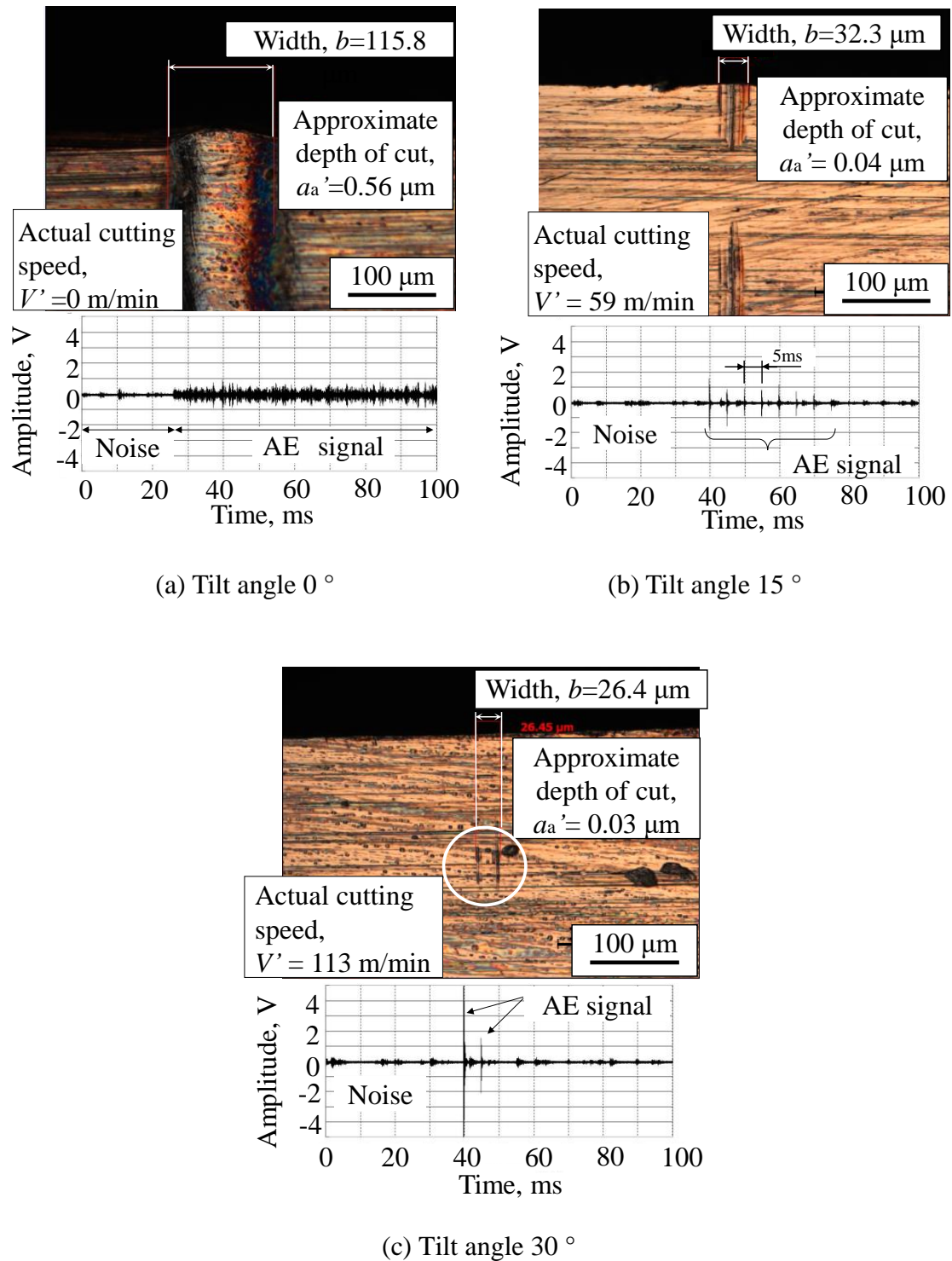


Fig. 4.16 Cutting mark and AE signal waveform at each inclination angle.

本研究において、エンドミル同様にボールエンドミルでも接触検知ができることを確認できた。ボールエンドミル加工で異なる傾斜における刃先位置検出が可能のため、次のような工具刃先位置検出に応用できると考えられる。一つは、工具が理想的な形状精度をもつのであれば、接触検知した傾斜の角度から計算により、刃先頂点位置および中心位置を求めることができる。もう一つは、工具の形状精度が加工精度より悪い工具であっても、それぞれの加工点の位置情報を計測し、加工形状・傾斜角度に合わせて補正值を変更しながら加工すれば、高精度な加工も実現できる可能性がある。

## 4.4 結 言

一般加工領域において、生産現場で多く使用されている最小指令単位が数マイクロメートルオーダのフライス系の切削加工を主としたマシニングセンタを用いて、AE 技術による接触検知の実験を行った。本実験において AE センサの取付け位置の検討および接触検知の適応範囲について検討した。工具は  $\phi 10\text{ mm}$ 、 $\phi 0.2\text{ mm}$  のスクエアエンドミルと  $R3\text{ mm}$  のボールエンドミルを用いて接触検知を行った。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) AE センサの取付け位置は、AE 信号レベルが大きく発生源に近い方が適している。しかしながら、AE センサと工具の干渉や信号レベルを考慮し、状況に合わせてマシンバイスまたは被削材に直接取り付けることを検討する必要がある。
- (2)  $\phi 10\text{ mm}$  のエンドミルでは外周刃加工、底刃加工のそれぞれの切削方式に関わらず、切込み深さ  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  で被削材の接触を検知できた。 $\phi 0.2\text{ mm}$  の小径エンドミルでは底刃加工において、切込み深さ  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  で被削材の接触を検知できた。本実験条件では、エンドミルによる AE 技術を用いた接触検知の適応範囲は最小で  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  であることを確認した。
- (3) ボールエンドミルでは、概算切込み深さ約  $40\text{ nm}$  で AE 信号を検出することができた。被削材の傾斜角度が大きい、すなわち実切削速度が大きい方が切削初期の AE 信号の振幅は大きくなる。

- (4) 実際の加工環境下において，AE 技術を用いてエンドミルおよびボールエンドミルと被削材に接触を検知できたため，工作機械の熱変形等を含んだ回転時の動的な工具の振れの刃先位置の計測に有効であるといえる．

## 参考文献

- 1) 左山邦彦：工作機械における工具計測・ワーク計測技術，精密工学会誌，Vol.75, No.11, (2009)，pp.1277–1280.
- 2) 上野滋：工作機械における機上計測技術，精密工学会誌，Vol.75, No.11, (2009)，pp.1269–1272.
- 3) 松岡勇樹：新しい金型加工に求められる切削工具—ニーズに応える最新エンドミル—，機械と工具，Vol.7, No.4, (2017)，pp.18–23.
- 4) 職業能力開発総合大学校 基盤整備センター編：NC 工作機械 [2] マシニングセンタ，雇用問題研究会，(2011)，pp.74–75.
- 5) 安齋正博：高速ミーリングにおける鋼材の切削諸特性，NACHI TECHNICAL REPORT, Vol.11, A1, (2006)，pp.1–7.
- 6) 南晃：機械加工における加工条件の最適化，鹿児島県工業技術センター研究報告，No.18, (2004)，pp.45–49.
- 7) 寺井久宣，郝明暉，吉川浩一，水垣 善夫：ボールエンドミル加工における工具回転中心近傍の切削機構に関する幾何的考察，日本機械学会論文集 C 編，Vol.68, No.672, (2009)，pp.2457–2463.

## 第5章 マシニングセンタにおけるエンドミル工具の AE 技術を用いた切削状態の監視

### 5.1 緒 言

第4章では、AE 技術を利用した実験装置を用いて、実際の加工環境下で回転時のエンドミル工具と被削材の接触検知の適応範囲について検討し、微小な切り込み深さでも AE 信号を検出でき、刃先位置計測を可能とした。

マシニングセンタにおいて搭載された工具刃先位置の計測器は、非接触式のものが多く実用化されている。この計測器を利用して、工具の摩耗量の測定についても開発<sup>1,2)</sup>が進んでいる。しかしながら、インプロセスの計測ができないためリアルタイムの切削状態の監視が困難である。現在、知能化工作機械としては、ネットワークを介して工作機械の稼働状態、工場全体生産性の監視などの情報を収集することに関しては成果を挙げている<sup>3,4)</sup>。しかしながら、工作機械の稼働状態の把握をしているものの、ものづくりの核となる製品の加工プロセスの工程には監視が行き届いておらず、加工プロセスのデータを収集・分析に関しては未だ発展の途中であるといえる。

本章では、接触検知で使用した実験装置およびマシニングセンタを用いて、ステンレス鋼（SUS304）のスクエアエンドミルによる側面加工を対象とし、工具の摩耗状態の監視を試みた。本実験において、工具摩耗幅の他に切削力、被削材表面の仕上げ面粗さおよび AE 信号を計測した。インプロセス計測の一環として、これらの計測値と AE 信号の関係を調べ、AE 技術による工具摩耗の検出について検討する。

### 5.2 実験方法

図 5.1 は、マシニングセンタにおける AE 技術を用いた切削状態監視用実験装置である。本実験装置は、第2章の図 2.2 に示したの実験装置の一部を使用し、第4章で使用した構成と同じものである。この装置は前章の実験装置同様に、

切削中に放出される弾性波を AE センサにより検出する。検出された AE 信号はプリアンプで増幅し、AE 計測装置に取り込む。AE センサは、共振周波数 1 MHz タイプを使用し、加工中の切りくずによる衝突を避けるため、精密バイスの前面中央に取り付けた。本章の実験装置には、AE 信号と切削力の関係を調べるため、水晶圧電式動力計（日本キスラー(株)、9265B）の上に精密バイスを載せて、切削実験を行った。

表 5.1 に実験条件を示す。仕上げ加工を想定し、切削速度を 150 m/min、送り速度を 0.05 mm/tooth とした。実験は、超硬母材の Cr 系コーティング 2 枚刃  $\phi 10$  mm のスクエアエンドミルにより、被削材としてステンレス鋼（SUS304 JIS G 4304 相当）を乾式で側面加工した。被削材は、40×40×10 mm として、工具摩耗を促進させるために別材料を使用した。エンドミルは、切れ刃の振れによる切込み深さの違いをなくすために 2 枚の切れ刃のうち、1 枚をグラインダで削り 1 枚刃とした。

ある一定の切削距離ごとに AE 信号、切削力、工具摩耗幅および加工面の仕上げ面粗さの計測と、切りくず、被削材表面および切れ刃の観察を行った。工具摩耗は、図 5.2 に示す切れ刃先端から 5 mm の外周部の逃げ面のすり減り摩耗幅を用いた。AE 信号の評価には、AE 原波形と AE 実効値を用いた。AE 信号の計測条件は、サンプリング周波数を 8 MHz、ハイパスフィルタを 50 kHz および 300 kHz とした。増幅率は、予備実験の結果から測定範囲に合うように、かつ AE 信号の周波数成分の特徴が判別しやすいように、それぞれ総合利得を 50 dB, 60 dB とした。



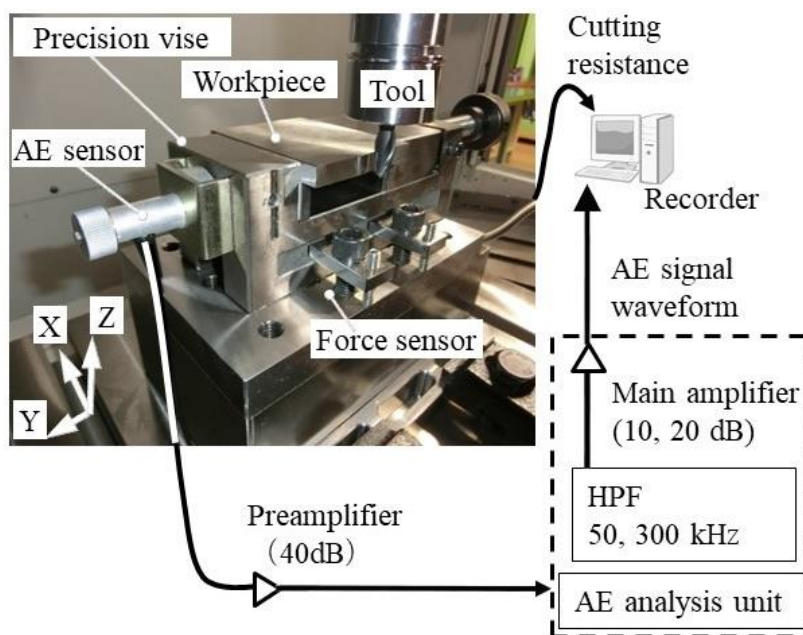


Fig. 5.1 Experimental apparatus for AE signal acquisition.

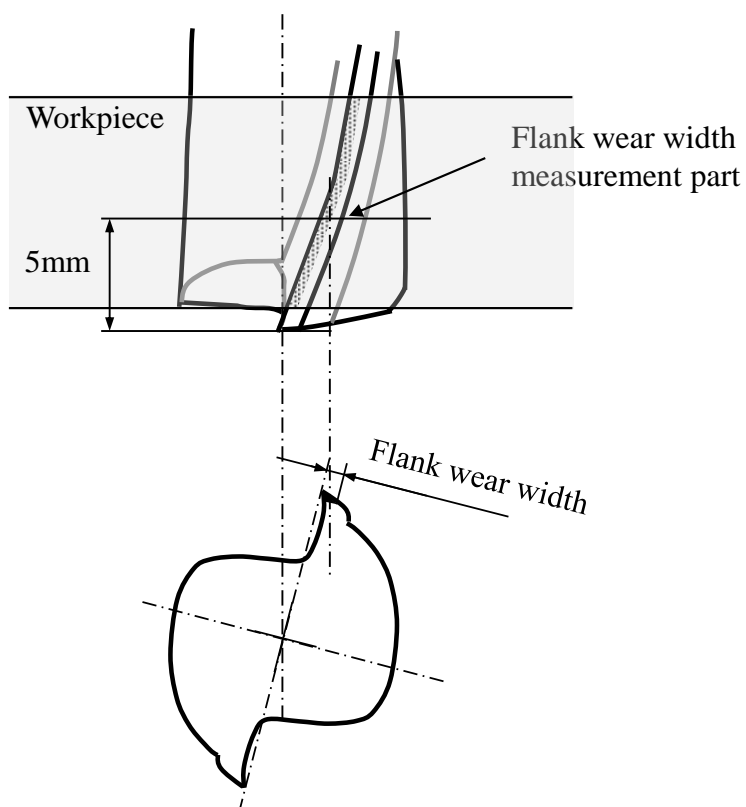
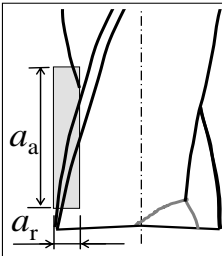


Fig. 5.2 Measurement of flank wear width.

Table 5.1 Experimental conditions during cutting state monitoring.

Tool	$\phi$ 10 mm, Square end mill, Carbide (Cr-based coating)	
Workpiece	SUS304 (JIS G 4304)	
Cutting speed $V$	150 m/min (4775 min <sup>-1</sup> )	
Feed speed $f_z$	0.05 mm/tooth	
Cutting system	Down cut milling	
	Peripheral milling $a_a = 10$ mm, $a_r = 0.1$ mm 1 blade only of 2 blades	
AE sensor attachment position	Vice	
Sampling frequency	8 MHz	
AE amplification factor	50, 60 dB	
AE high-pass filter	50, 300 kHz	

$a_a$  : Axial depth of cut  $a_r$  : Radial depth of cut

## 5.3 実験結果および考察

### 5.3.1 切削現象と AE 信号の実効値の関係

図 5.3 は、1 枚刃エンドミルによる SUS304 を側面加工した時の切削距離に対する工具摩耗経過曲線と AE 実効値、切削力および被削材表面の仕上げ面粗さをまとめたものである。AE 実効値と切削力は、工具が被削材に接触した時間のみ 5～10 回転分の変動の平均値をプロットした。切削力は、工具の送りおよび被削材の加工面から垂直に力を受ける方向の主分力を用いて評価した。仕上げ面粗さは最大高さ粗さ  $R_z$  を用いて評価した。

図 5.4 は、切削距離における工具切れ刃の逃げ面の状態を観察したものである。図 5.3 および図 5.4 より、工具摩耗は一般にみられる摩耗経過を示した。図 5.3 より、切削距離が 30～40 m 近傍までは初期摩耗、80～90 m 近傍までは定常摩耗、それ以降は終期摩耗となるような工具摩耗経過曲線がみられた。切削距離

80 m 以降は、図 5.4 (g) のように工具刃先が摩耗し、コーティング膜がはがれ溶着物が発生し、それによって切りくずが付着することが多くなった。その後、切削距離が 120~130 m の間で、切れ刃の上部の摩耗幅が増加し、図 5.4 (h) のように逃げ面にはく離が生じた。

図 5.3 より主分力は、切削距離の増加に伴い、工具摩耗幅の増加割合と同様に上昇し、仕上げ面粗さも増加した。工具表面がはく離後、工具摩耗幅、被削材の仕上げ面粗さおよび切削力は、今までの傾向から大きくずれた。一方、定常摩耗域において、AE 実効値はおよそ 1~1.5 V の間でほぼ一定であり、初期摩耗域と終期摩耗域ではばらつきがみられた。

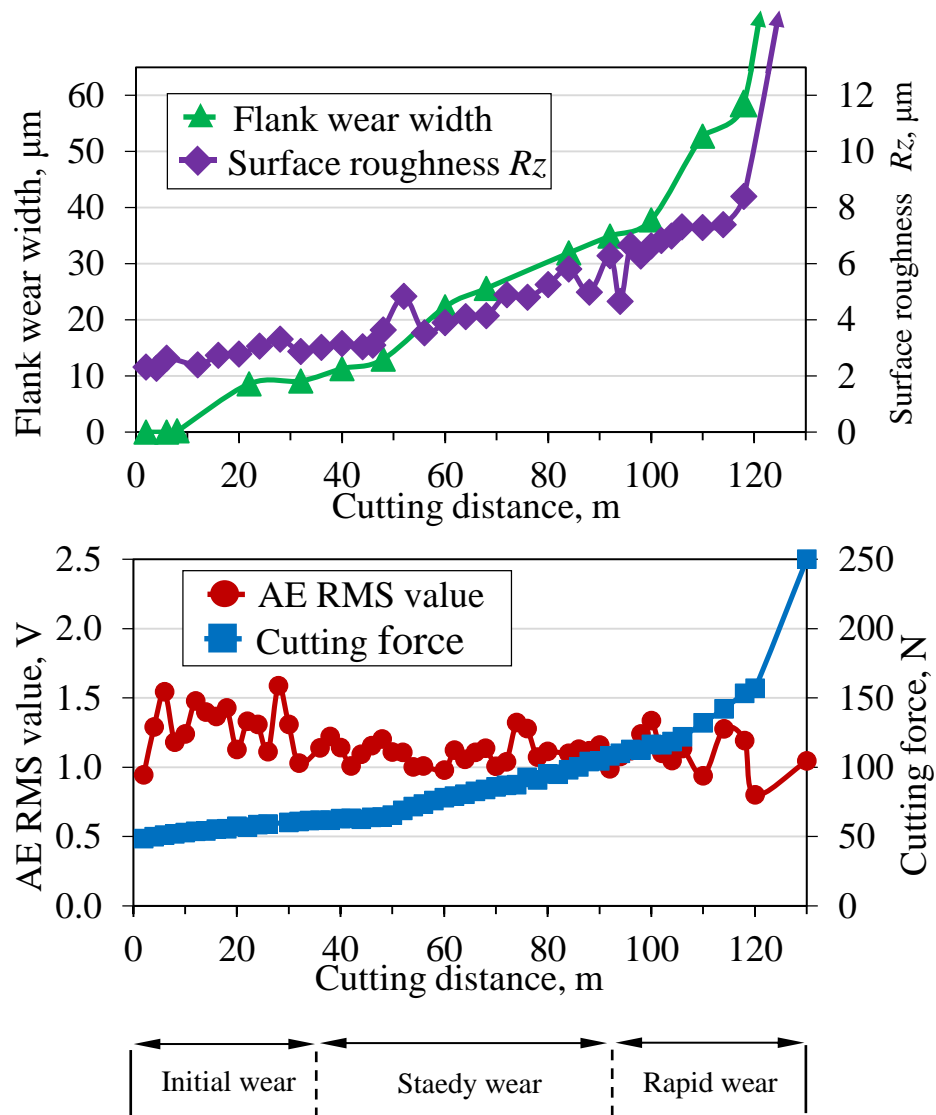


Fig. 5.3 Relationship between the various parameters and the cutting distance (SUS304).

初期摩耗域の AE 実効値のばらつきについて考察する．未使用時の工具切れ刃は，微小な凹凸のある鋭利な切れ刃が形成されている．切削初期は切れ刃先端が鋭利で刃先強度が低いため，初期摩耗域において切削距離が長くなると，切れ刃が破壊や摩耗し，徐々に微小で鋭利な刃先が消滅していく．その後，定常摩耗域になると鋭利な切れ刃は丸みをおび，安定した切削が行われる．初期摩耗域の AE 実効値のばらつきについては，切れ刃の微小な破壊の変動を AE センサが検出したと考えられる．この領域では，AE 実効値にばらつきがみられるものの摩耗量は少ないため，加工面の表面粗さはほぼ一定で小さい値を示した．終期摩耗域では，切れ味の低下や逃げ面のこすれの増大による加工現象の変化を AE センサが検出したと考えられる．

終期摩耗域の AE 実効値にばらつきについては，工具摩耗量の違いによる加工現象の違いにより加工が安定せずばらつきが生じたと考えられる．

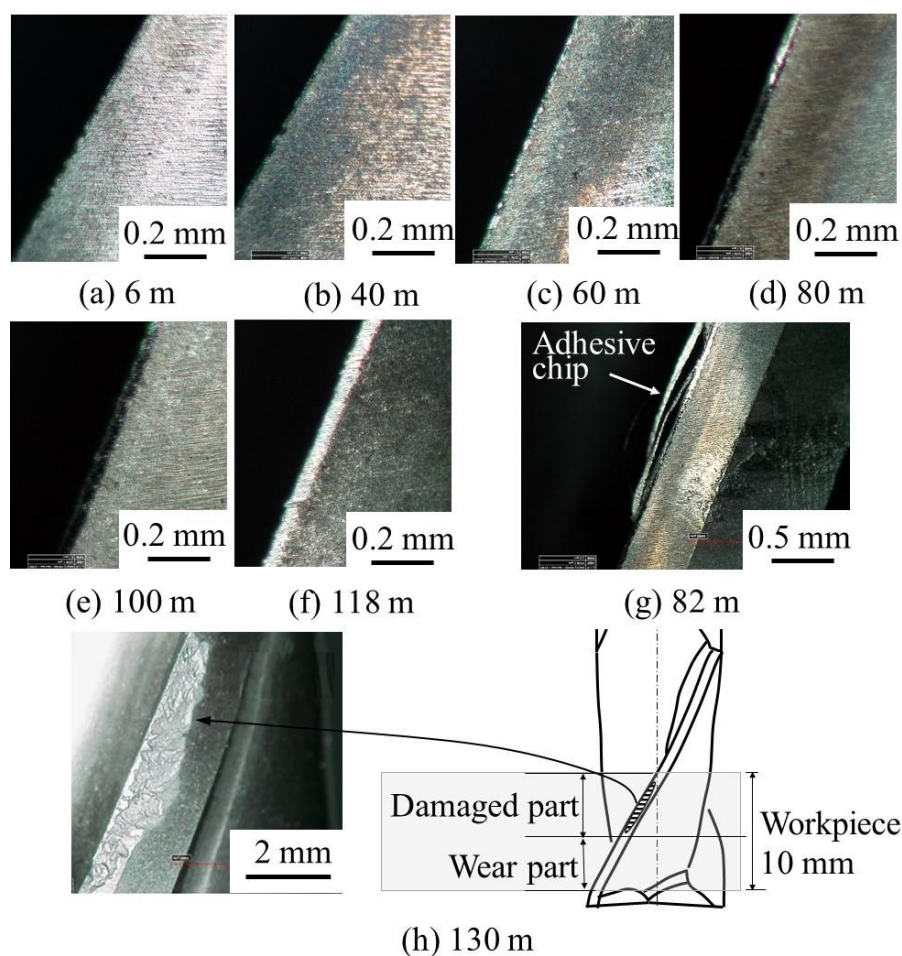


Fig. 5.4 Changes in the flank wear of tool edge with increasing cutting distance.

旋削加工においては、工具摩耗と AE 信号の間に正の相関があると報告<sup>5,6)</sup>されている。しかしながらその結果は、本実験の定常摩耗域において AE 実効値はほぼ一定であったこととは矛盾している。一つの要因として、本実験は、断続切削のエンドミルによる仕上げ加工であり、工具摩耗も少ないことが考えられる。旋削のように同じ刃先で常に削っているのではなく、エンドミル加工は切れ刃のねじれ角により、刻々と加工点が移行している。そのため、AE 実効値の変化からは、定常摩耗域の摩耗現象を検出しづらいといえる。その他の要因として、エンドミルのたわみによる切込み深さの減少が AE 実効値の変化と関係があると考えられる。

ここで、切込み深さの変化を調べるために、切削距離に対する被削材の寸法値の変化を図 5.5 に示す。この寸法値の変化は、加工前後の被削材の寸法（下面より 5mm 部）をそれぞれタッチプローブにより測定を行い、加工後の目標の切込み寸法（ $a_a = 0.1\text{mm}$ ）からのずれ量を示したものである。ずれ量が 0 mm よりも大きいときは、切込み深さが減少したことになる。したがって、工具摩耗幅が増加し、実際の切込み深さが一定でないため、AE 実効値と逃げ面摩耗幅の相関が得にくいと考えられる。

しかしながら、AE 原波形において工具 1 回転で検出される波形の中に突発的な大きな振幅の信号がみられた。また、岩田ら<sup>7)</sup>によって、工具損傷が進行すると突発的な AE 信号が検出されると報告されている。そこで本実験において、突発的な AE 信号を解析することにより、工具切れ刃の工具損傷の進行を検出できると考えた。解析は、AE 原波形の 10 回転分のデータにしきい値を設定し、しきい値を超えた振幅の数を数えた。この振幅の数を AE 計数として評価した。

図 5.6 は、切削距離と AE 計数の関係を示す。しきい値の設定は、図 5.3 の定常摩耗域で AE 実効値がほぼ一定であった区間の平均値 1.1 V の 3 倍の 3.3 V として解析した。しきい値の検討については、定常摩耗域の AE 実効値の平均値の倍数でしきい値を変化させた際に、切削距離の増加に伴って AE 計数に特徴がみられた 3 倍の値を採用した。図 5.6 より、図 5.3 の初期摩耗域の 30~40 m 近傍までは AE 計数にばらつきがみられ、定常摩耗域では、わずかながらに上昇がみられた。終期摩耗の 80~90 m 以降は、AE 計数が上昇するとともにばらつきもみられた。工具刃先の破損後は、AE 計数がさらに大きくなった。これらのばら

つきについては、図 5.3 の工具摩耗曲線と各種のパラメータで検出した AE 実効値のばらつきと同様であり、初期摩耗域は工具のなじみによる切れ刃の微小な破壊の変動の影響であると考えられ、終期摩耗域は工具摩耗量の違いによる加工現象の違いと考えられる。

本実験条件において、定常摩耗域では、初期摩耗域、終期摩耗域と比較して、AE 実効値のばらつきが小さくなることがわかった。また、AE 原波形にしきい値を設定して AE 計数で評価することにより、工具摩耗を判断できる可能性を示した。

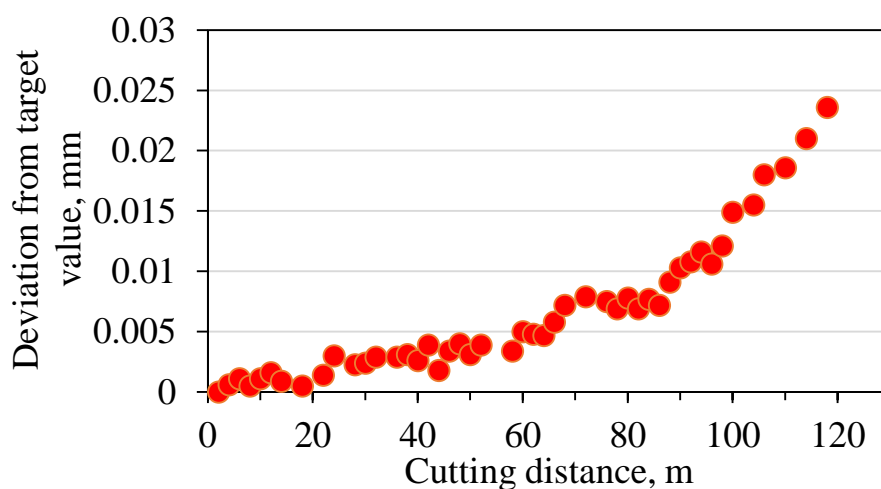


Fig. 5.5 Changes in the dimensional value of the workpiece with increasing cutting distance.

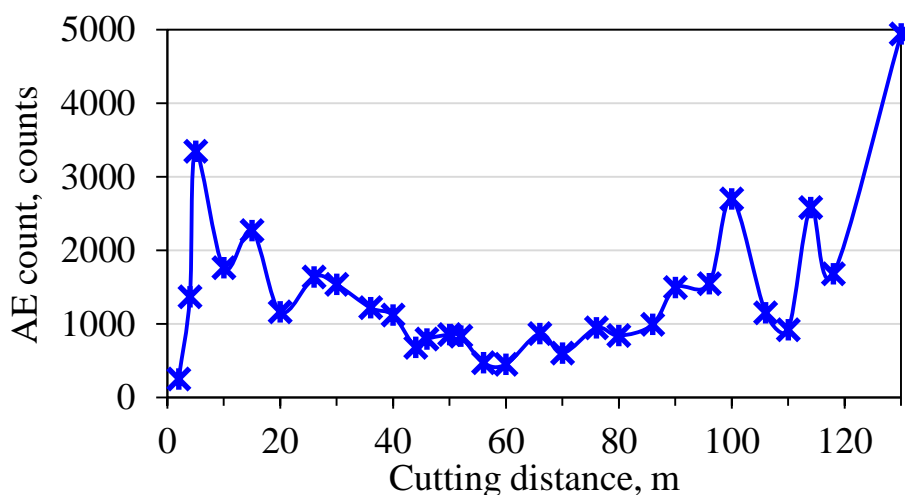


Fig. 5.6 Relationship between the AE count and the cutting distance.

### 5.3.2 AE 原波形と切削力波形の特徴

エンドミル加工の断続切削において、工具が3回転中に接触したときの AE 信号を確認する。図 5.7 は、切削距離 40 m 時の AE 原波形の一例である。AE 原波形は、断続切削により、突発的な AE 信号群がみられた。その他の振幅の小さい信号は、背景ノイズである。工具が1回転する時間は、回転速度より換算すると 12.5 ms となる。図 5.7 に示す値と一致する。また、側面加工において、被削材の厚みが 10 mm のとき、工具1回転あたりに切れ刃が接触して離れるまでの時間は、工具のねじれ角および切込み深さから算出すると、およそ 2.7 ms となる。これも図 5.7 に示す値と一致する。このことから、AE 原波形は、ねじれ角をもつ工具切れ刃の加工点が、徐々に下から上へ移り変わる切れ刃の状態変化を検出できることがわかった。

図 5.8 は、各切削距離における工具1回転の特徴的な AE 原波形である。図 5.3 に示す AE 実効値の大きさはそれほど変化がないが、図 5.8 (a) から (d) のように特徴的な単一波形を比較すると切削距離の増加に伴い、AE 信号の最大振幅は、わずかに大きいことがわかる。このような特徴的な波形は、工具摩耗が進行するにつれて、検出頻度が増える傾向にあった。AE 原波形の変化から、工具摩耗のような加工現象の変化を検出可能であるといえる。

図 5.9 は、切削距離 2 m および 80 m における切削力波形の一例である。図 5.9 より、切削の3分力のうち主分力が工具摩耗の影響を一番受けることがわかった。また、切削距離の増加により主分力が大きくなっている。切削力波形においても、工具1回転の 12.5 ms 周期の波形を検出できる。今回使用した動力計の仕様より固有振動数は、X, Y 方向で 1.7 kHz, Z 方向で 2.7 kHz であった。また、切削動力計に精密バイスを載せた被削材の加振状態での固有振動数は、約 1.1 kHz であった。図 5.9 の主分力波形の周波数は、約 1.4 kHz であり、工具1回転の波形のうち4山目以降は、被削材と接触をしていないが切削力に変化がみられた。被削材の固有振動数と主分力の周波数がほぼ同じ値であるため、動力計で検出された切削力の変化の要因は、切削によるものでないといえる。今回の条件において、工具摩耗の進行を切削力の増加で判断できることがわかった。一方で、AE 信号計測に比べ、切削動力計による計測は剛性が低下し加工精度に影響を及ぼすため、切削状態の監視には不向きといえる。



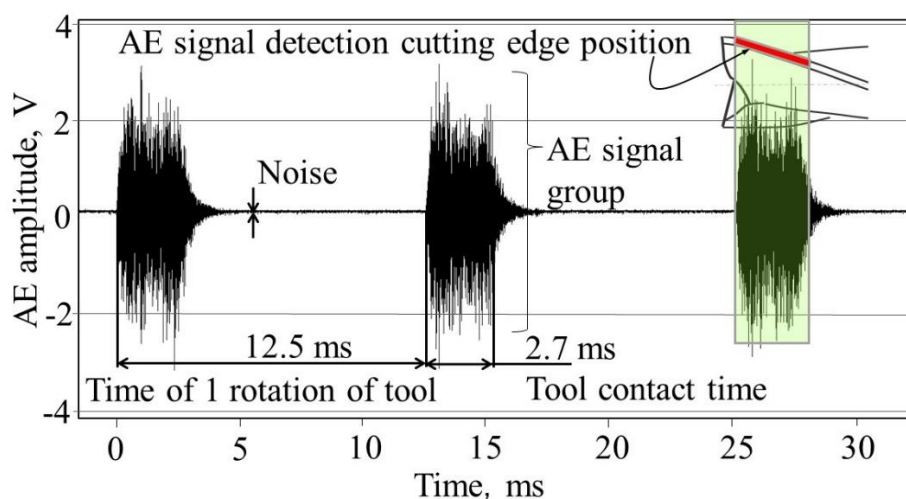
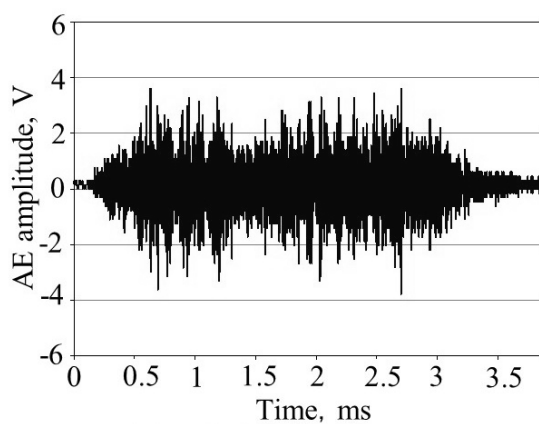
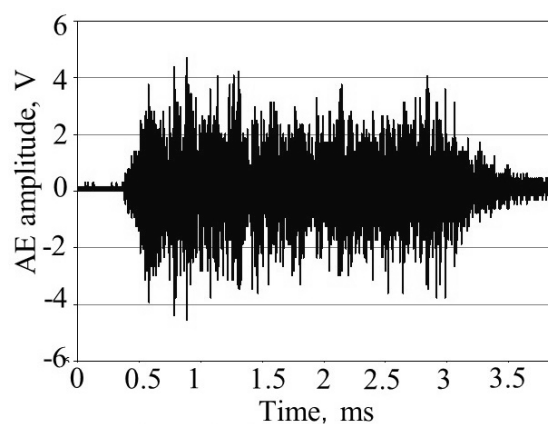


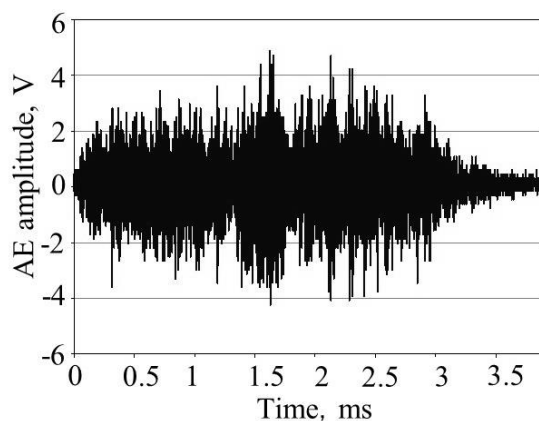
Fig. 5.7 AE signal waveform corresponding to three rotations of the tool, cutting distance 40 m.



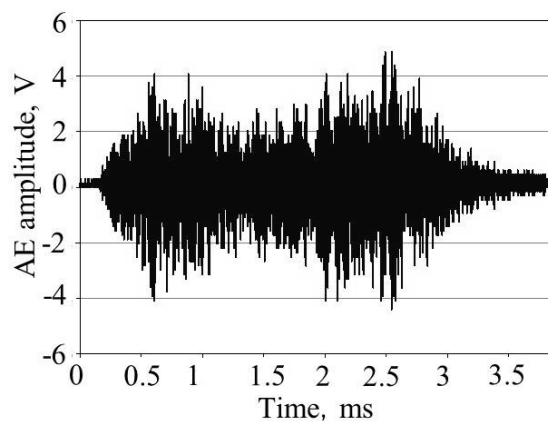
(a) 2 m



(b) 40m



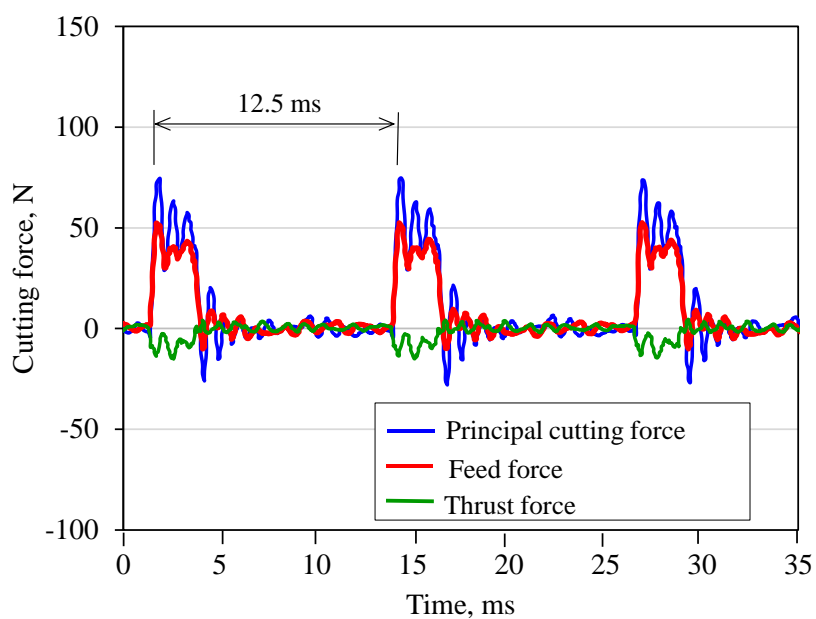
(c) 80 m



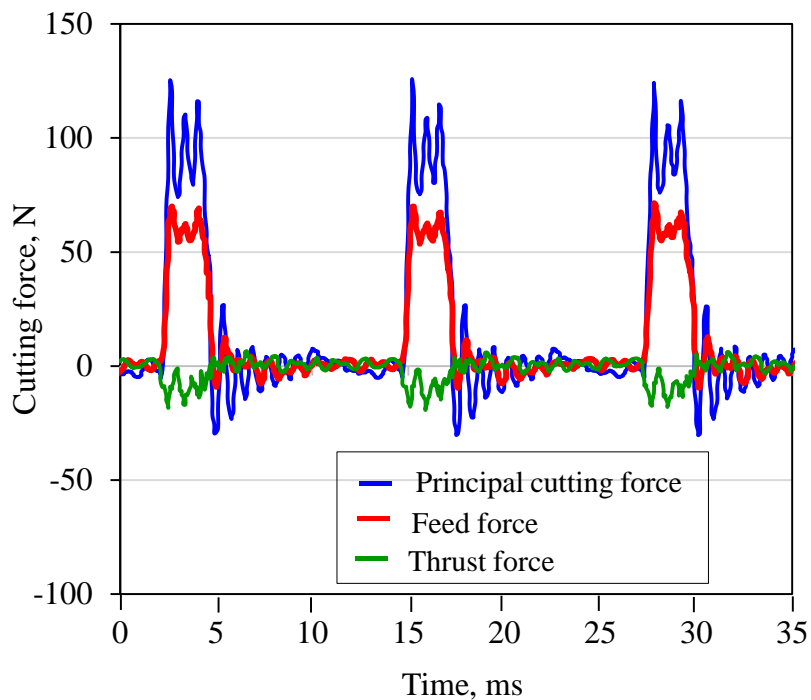
(d) 118m

Fig. 5.8 Characteristic AE signal of one revolution of tool at each cutting distance.





(a) 2 m



(b) 80 m

Fig. 5.9 Comparison of the cutting force waveforms.

### 5.3.3 工具摩耗の経過と AE 信号周波数の関係

AE 信号の違いが切削状態の認識を可能と推測できたため、摩擦および摩耗現象の評価に有効とされている AE 原波形の周波数解析<sup>8)</sup>を行った。図 5.10 は、図 5.8 のような 1 回転で検出した工具接触時の AE 原波形を高速フーリエ変換（以下、FFT と称す）したものである。さらに、その AE 原波形を短時間フーリエ変換（以下、STFT と称す）による解析を行った。STFT は、区間を分けて解析することにより、切れ刃の個々の加工点における状態を把握できると考えた。解析パラメータは、AE 原波形の一波形を 50 等分して 50 %オーバーラップを使用した。図 5.11 は、それぞれの切削距離における STFT した時間一周波数の関係を示す。図 5.11 の横軸が工具切れ刃と被削材の接触時間（約 2.7 ms）を示している。

切削距離が 120 m 以前で工具がはく離する前までの加工状態の結果について述べる。図 5.10 および図 5.11 より、切削加工中に検出した AE 原波形は、切削距離にかかわらず、およそ 50 kHz～350 kHz までの周波数成分を含む信号であった。また、どの切削距離をみても、300 kHz 近傍の周波数成分の信号強度が大きい。切削距離および工具の摩耗にかかわらず、300 kHz 近傍の周波数成分の信号が検出されているため、この周波数は切削に伴う信号であるといえる。また、300 kHz 近傍の周波数成分の信号がその他の周波数成分の信号強度が大きいときには、工具摩耗も少ないときであり、定常切削状態であると判断できる。AE 原波形は、工具摩耗幅が増加し切削距離が 80 m 以上になると、定常切削状態で検出された（300 kHz 近傍）周波数成分を含む信号よりも、低周波数成分（70 kHz 近傍）を含む信号強度が、同等またはそれ以上に大きくなった。このような特徴的な信号は、工具摩耗幅が増加するとともに検出頻度が多くなった。よって、この定常切削状態時に検出される周波数よりも低周波数成分信号は、摩耗に起因するものと考えられる。小島ら<sup>6)</sup>の旋削プロセス監視においても、工具摩耗量にかかわらず、100～350 kHz の周波数成分の AE 信号を検出している。さらに工具摩耗が進行すると、100～150 kHz の周波数成分の信号強度が大きくなると報告がある。本実験においても、定常状態および工具摩耗状態ともに同様の周波数成分の信号を検出している。工具摩耗が進行すると、定常状態よりも低い周波数成分の信号強度が大きくなる結果となった。

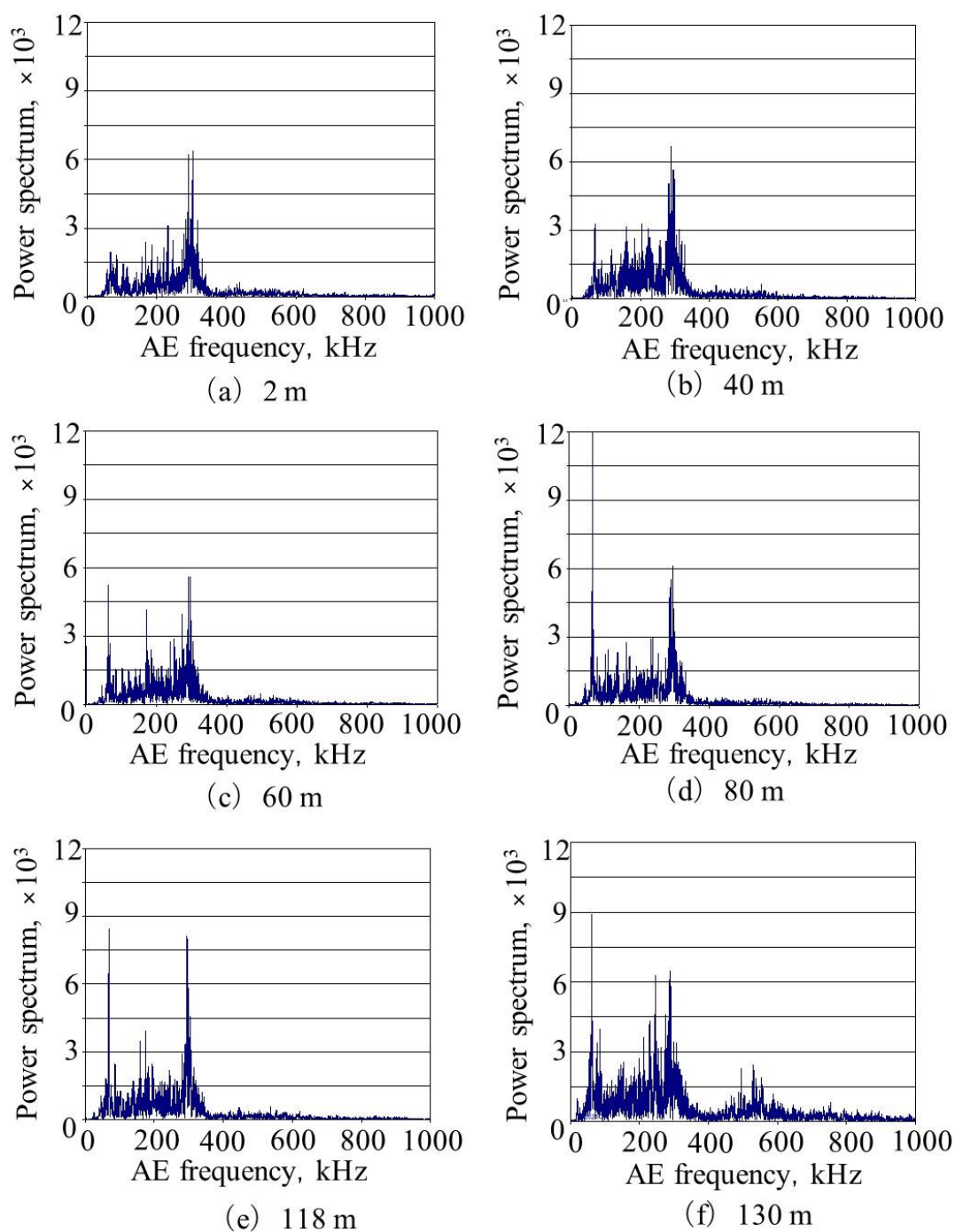


Fig. 5.10 FFT analysis data of the AE signals detected in one rotation.

図 5.11 の STFT の結果も同様に 70 kHz 近傍の低周波数成分を含む信号が増加している．図 5.11 (d) は工具摩耗幅の増加に伴い，時間が 1.5 ms 近傍で 70 kHz の低周波数成分を含む信号強度が大きくなっている．STFT により，工具切れ刃部の個々の加工点の状態を監視でき，スペクトルの大きさの違いをみれば，切れ刃の中央部の加工現象が変化したことを特定できる．

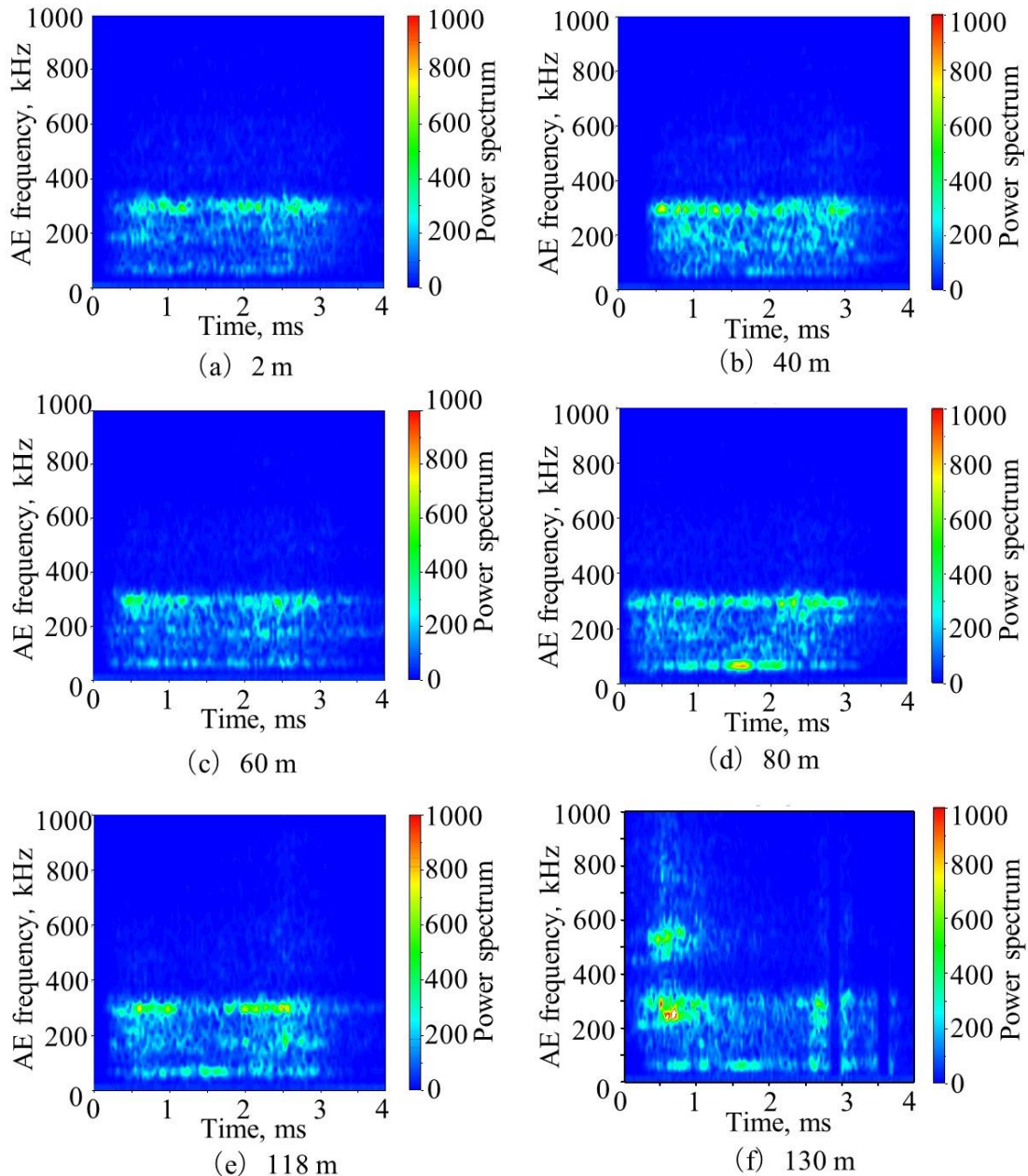


Fig. 5.11 STFT analysis data of the AE signals detected in one rotation.

切削距離が 120 m 以降で工具摩耗幅が増加し、工具がはく離したときの結果について述べる。図 5.10 (f) の工具表面がはく離 [図 5.4 (h)] したときの周波数解析の結果をみると、定常切削状態時に検出される周波数よりも高周波数成分で 350 kHz 以上信号が確認できる。明確にするために、300 kHz のハイパスフィルタ処理した AE 原波形の周波数解析した結果を図 5.12 に示す。図 5.12 より、(a) 切削距離 80 m と (b) 130m を比べると、切削距離 80 m ときは、350 kHz 以上の周波数成分の AE 信号をほとんど検出していない。したがって、350 kHz 以上の周波数成分の信号は、通常のすり減り摩耗に起因するものではないと推測できる。この周波数成分の信号について次項で考察する。

#### 5.3.4 AE 発生源の領域別にみられる工具摩耗に関する考察

工具摩耗の進行により、AE 信号の周波数に変化がみられたので加工領域別に分けて検討した。切削加工において発生する AE 源は第 1 章の図 1.3 に示す領域に分けて、切りくずの生成過程、切りくずの形状および被削材表面の状態から検討した。

まず、図 1.3 (a) のせん断領域の AE 源から検討する。せん断領域から検出される AE 信号は、被削材のせん断破壊によるものと考えられる。工具摩耗の経過による周波数の変化を切りくずの生成過程の違いから検討した。図 5.13 は、せん断領域において生成された切削距離別の切りくずの表皮面側の走査型電子顕

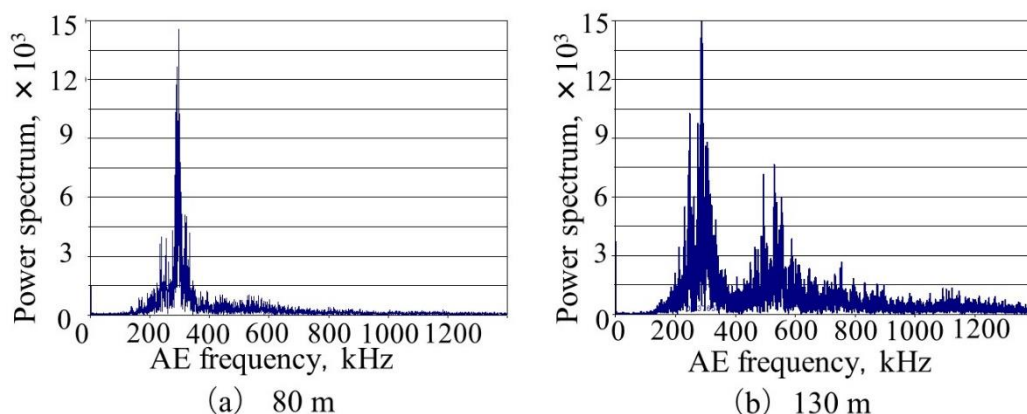


Fig. 5.12 FFT analysis data of the AE signals detected in one rotation (HPF 300 kHz).

微鏡（以下，SEM と称す）画像である．図 5.13 (e) は，(a) ○部の拡大図を示す．図 5.13 (e) の切りくず表皮面より，A 部に示す領域に細かいピッチのせん断層と B 部に大きなピッチのせん断層がみられた．どの切削距離においても細かいピッチおよび大きなピッチのせん断層がみられた．切削距離が長くなるにつれて，図 5.13 (e) の B 部に示すような大きなピッチのせん断層の割合が多くなる傾向であった．

図 5.14 に切りくず生成モデルを示す．この図は，切りくずが生成される際のせん断層生成の概略図である．図 5.14 にある A，B 部は図 5.13 の A，B 部と同じものであると考えている．図 5.13 (e) の A の領域および図 5.14 (a) より，細かいピッチのせん断層は，一定間隔で切りくずがせん断され，流れ型切りくずとして排出される．細かいピッチのせん断層は，工具摩耗量も小さく，切れ刃の切れ味もよく，定常切削状態時に多くみられる．また，図 5.13 (e) の B 部および図 5.14 (b) の B 部は，細かいピッチの中にいくつか大きなピッチがみられた．大きなピッチのせん断層は，工具摩耗幅が増加するにつれて切れ刃が鈍化し，ある時間切りくずとして排出されず，その後，工具のすべり現象により生成されたものとする．このような現象が発生したときには，70 kHz の周波数成分を含む信号を検出したと考えられる．和田ら<sup>9)</sup>は，ピン-平板方式の摩擦・摩耗試験において，摩耗が少ないときは AE の発生は少ないと述べているものの，まれに 100 kHz 以下の周波数成分にピークを持つことを報告している．その要因として，摩擦音が挙げられている．本実験においても，同程度の周波数成分の信号を検出している．工具が摩耗することにより，工具の食付きが悪くなり切削抵抗が上昇し，工具のすべり現象とともに摩擦音が発生したのではないかと考えられる．

つぎに，図 1.3 (b) のすくい面の領域で発生する AE 信号について，工具すくい面側の切りくずを確認する．図 5.15 に工具 1 回転で取得した工具すくい面側の切りくずの SEM 画像を示す．図 5.15 (a) および (b) は，それぞれ切削距離が 40 m, 118 m の切りくずである．図 5.15 の○部を拡大した画像を右上に示す．図 5.15 の切りくずは，上側から加工開始し，下側で加工終了する．図 5.15 (a) および (b) の切りくずの表面を比較すると，摩耗が進行するにつれて，表面の切削条痕の幅がわずかに大きくなっているように見える．また，切れ刃が鈍化することにより，すくい面側の切りくず表面が工具すくい面により圧縮を受けて，

摩擦により押し延べられている。さらに、すくい面側の切りくず表面が加工終了時にむしれるようになった。長谷ら<sup>10)</sup>は、凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関において、塑性流動により AE として放出されるひずみエネルギーは、摩擦、凝着で引きちぎられるエネルギーよりも小さいと述べている。したがって、すくい面の領域に関して、摩耗幅の増加に伴い、切りくず排出時において切りくずが押し延べられるような塑性流動したときの AE 信号の変化よりも、すくい面の摩擦の変化を AE 信号により検出したのではないかと考えられる。

さらに、図 1.3 (c) の逃げ面下方塑性域で検出される AE 信号について検討する。図 5.16 に切削距離の違いによる被削材表面の比較した結果を示す。図 5.16 (a) および (b) の縦方向にみえる筋が、エンドミルの送りマークで送り速度の  $0.05 \text{ mm/tooth}$  に相当する。工具摩耗幅が増加すると、送りマークの筋の幅が変化し、切れ味が低下した工具刃先による摩擦で、押し延べられているようにみえる。この不均一な送りマークの変化は、切れ味の低下による切込み深さの違いによるものだと考えられる。また、横方向にみえる筋が、切れ刃の摩耗により生成された加工面の切削条痕であり、工具摩耗が進行すると数が多くなった。定常摩耗域における被削材表面のわずかな変化は、例えば図 5.8 (b) の AE 原波形の振幅の変化として検出されたのではないかと考えられる。

図 5.16 (c) および (d) は、どちらも切削距離 130 m であり、図 5.16 (c) は図 5.4 (h) の切れ刃下方部で摩耗幅が増加した切れ刃で加工した表面である。図 5.16 (d) は切れ刃上方部で工具がはく離した工具で加工した表面である。図 5.16 (c) および (d) は、どちらも切りくずの凝着がみられる。図 5.16 (c) の被削材表面には、微小な切削粉がみられ、加工中にそれらが堆積して、送りマークのところに凝着したようであった。図 5.16 (d) は、切りくずが工具と被削材の間に噛み込んで凝着していた。図 5.12 (b) の周波数結果、図 5.16 (c) および (d) より、被削材に凝着がみられるようなときの AE 信号は、 $350 \sim 1000 \text{ kHz}$  の周波数成分を含むことがわかった。凝着した切りくずが破壊もしくは引きちぎられるときに生じる信号を検出したと推測できる。これは、長谷ら<sup>11)</sup>の旋削における加工プロセスの監視における周波数帯域と同様で、工具刃先に凝着現象が生じると高周波数帯域へ移行する知見と一致する。



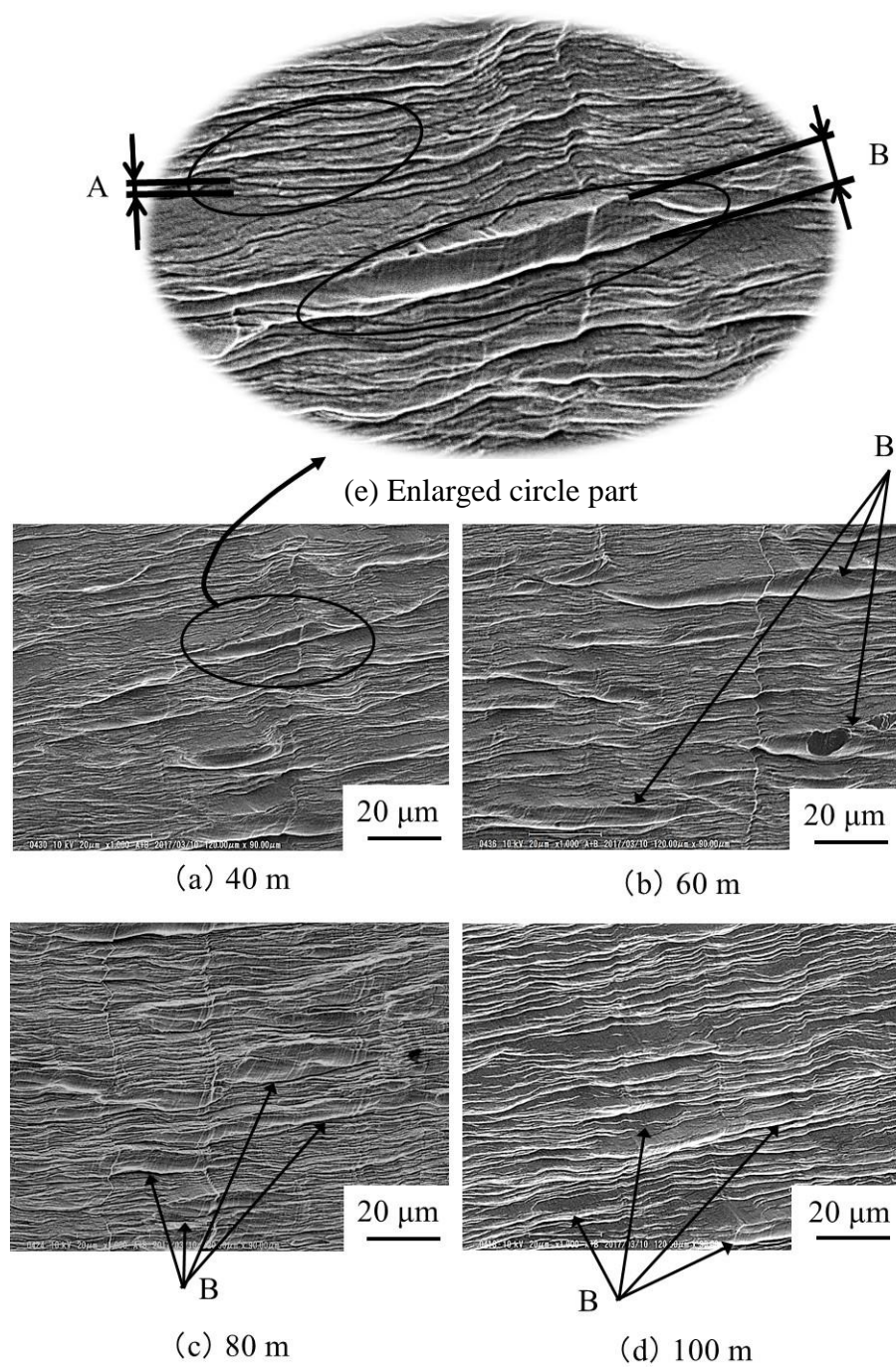


Fig. 5.13 SEM image of chips on the outer surface side.



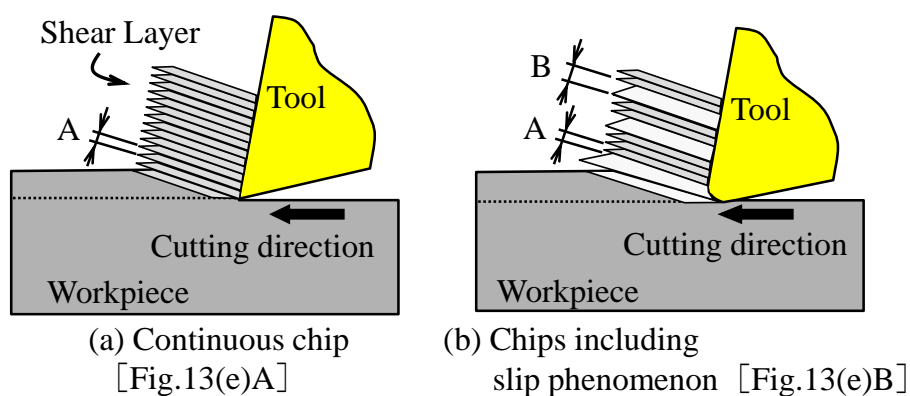
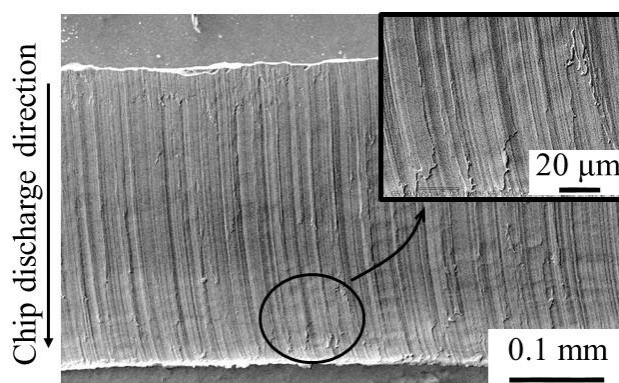
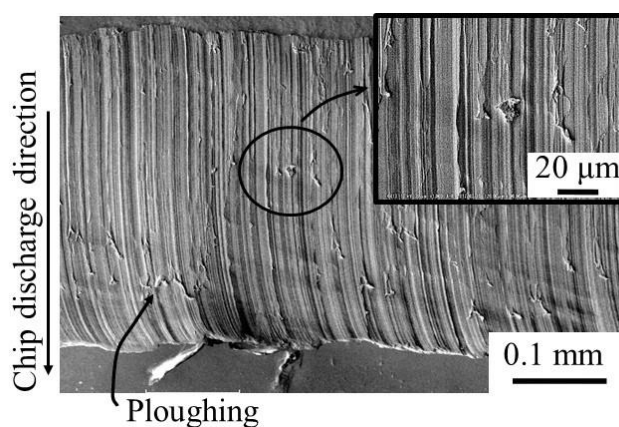


Fig. 5.14 Models of the formation of chip.



(a) 40 m



(b) 118 m

Fig. 5.15 SEM images of chips on the tool rake face side.

最後に、図 1.3 (d) の切りくず周辺の AE 源に関しては、切りくずの衝突・分断・変形過程などが考えられる。この AE 源は、工具の切れ刃周波数に起因することが多いと考える。本実験において 50 kHz のハイパスフィルタ処理を行ったことにより、切れ刃周波数近傍の低周波数成分の AE を除去できると考えた。したがって、図 1.3 (d) の切りくず周辺からの信号は検出しにくいと推測した。

以上より、AE 源モデルの領域より AE 信号の周波数から検討した結果から次のようなことが推測される。工具摩耗幅の増加において、(a)「せん断領域のすべり現象や摩擦音」、(b)「せん断領域の切れ刃の摩耗による切りくず排出時におけるすくい面の摩擦の変化」および (c)「逃げ面下方塑性域の縦筋と横筋の生成過程」のいずれかの現象が起こることにより、定常の切削状態よりも低周波数成分をもつ AE 信号を検出できる。被削材に凝着した切りくずが破壊もしくは引きちぎられるときには、高周波数成分を含む AE 信号を検出できる。

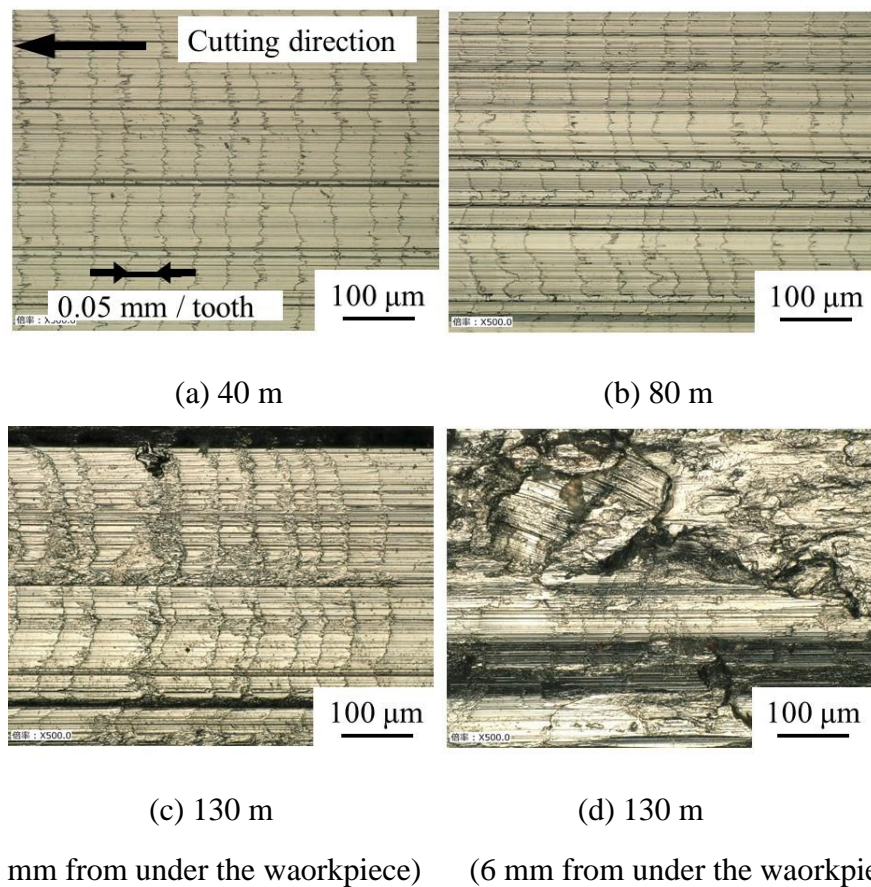


Fig. 5.16 Observation of workpiece surface.

本実験の AE 信号による工具摩耗の認識において、AE 実効値はそれほど大きな変化がみられないが、工具摩耗量の変化に伴い AE 原波形の振幅の最大値の変化や AE 計数に違いがみられた。このような場合においては、AE 信号振幅に対してある任意の位置にしきい値を設定することより、工具摩耗状態を把握することが可能といえる。AE 信号の周波数解析を行うことで、工具摩耗幅の増加や切りくずの凝着を判断できるため、特定のフィルタを用いて工具摩耗を識別できる可能性がみえた。

## 5.4 結 言

本研究では AE 技術を用いた SUS304 においてスクエアエンドミルによる側面加工のモニタリングを行い、一般的な加工の評価に使用される工具摩耗、切削力および被削材の仕上げ面粗さと AE 信号の関係について検討した。さらに、SEM により観察した切りくずの表面および被削材の表面状態と AE 信号の関係を検討した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 工具摩耗幅の増加とともに切削力および被削材の仕上げ面粗さは増加するが、AE 実効値はほぼ一定であり、定常摩耗域では、初期摩耗域、終期摩耗域と比較して、AE 実効値のばらつきが小さくなった。また、AE 原波形にしきい値を設定して AE 計数で評価することにより、定常摩耗域では工具摩耗が進行すると AE 計数も増加傾向を示した。
- (2) AE 原波形は、ねじれ角をもつ工具切れ刃の加工点が、徐々に下から上へ移り変わる切れ刃の状態変化を検出できた。
- (3) エンドミルの側面加工において、工具摩耗幅が増加すると、工具刃先の鈍化により被削材への食付きが悪くなり、定常の切削状態よりも低周波数成分をもつ AE 信号を検出できる。さらに、被削材に凝着した切りくずが破壊もしくは引きちぎられるときには、定常の切削状態よりも高周波数成分を含む AE 信号が検出される頻度が多くなった。

## 参考文献

- 1) 矢内正隆：工作機内で使える光学ラインセンサ方式工具測定器，ツールエンジニア，Vol.57，No.12，(2016)，pp.38–39.
- 2) 小柳典雅：最新の機上計測技術と機上モニタリング技術，機械技術，Vol.65，No.1，(2017)，pp.72–77.
- 3) 堀部和也，村木俊之：デジタル化による工場の統合と IoT，精密工学会誌，Vol.83，No.1，(2017)，pp.36–41.
- 4) 新家秀規：当社独自の組込ソフトウェアを活用したスマートファクトリー，機械技術，Vol.65，No.1 (2017)，pp.46–50.
- 5) 岩本竜一，近藤英二，吉留健也，市来浩一，皮籠石紀雄：単結晶ダイヤモンド工具による Al 合金の超精密切削加工における工具摩耗の監視（第 1 報）—間接法による工具摩耗の監視に有効なパラメータの検討—，精密工学会誌，Vol.75，No.6，(2009)，pp.757–761.
- 6) 小島浩二，稲崎一郎，三宅亮一：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，日本機械学会論文集 C 編，Vol.52，No.474，(1986)，pp.799–805.
- 7) 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，Vol.46，No.7，(1980)，pp.875–880.
- 8) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Scanning Electron Microscope Observation Study for Identification of Wear Mechanism Using Acoustic Emission Technique, Tribology International, Vol.72, (2014), pp.51–57.
- 9) 和田正毅，水野萬亀雄：AE による摩擦・摩耗の研究—摩耗形態と AE 信号—，精密工学会，Vol.55，No.4，(1989)，pp.673–678.
- 10) 長谷重蘭，和田正毅，広田平一：凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関，トライボロジスト，Vol.50，No.11，(2005)，pp.808–815.
- 11) A. Hase: Study on Monitoring and Control of Machining Process by Acoustic Emission Technique, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2017), C32.

## 第6章 マシニングセンタの機上計測システムの 基本性能評価

### 6.1 緒 言

第2～4章では、AE技術を利用した実験装置を用いて、実際の加工環境下で旋削加工とフライス加工における工具と被削材の接触検知の適応範囲について検討を行った。またAE技術により、連続および断続切削の加工法において切削状態監視の可能性も明らかにした。加工精度の領域については、超精密加工領域と一般加工領域の両方において、接触検知および切削状態の監視が可能であることが確認できた。

本章では、前章までの結果を受けて、AE技術を用いた工作機械の機上計測システムの構築を行った。ここでは、製造現場で使用頻度の高いマシニングセンタの機上計測システムを構築し、プリプロセス計測における工具刃先位置の計測を行うことで、計測システムの基本性能を評価した。この計測システムは、図2.6に示す各種AE信号などのAE評価パラメータを用いており、設定したしきい値を超えた信号をマシニングセンタに取り込むことで、工具の停止や工具交換指令などを誘導・制御している。第3、5章の切削状態の監視でも、AE信号に任意のしきい値を設定することにより、切削状態の異常を検知することが可能となっている。したがって、前章までの結果を活用することで、本節のAE技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムの検証により、旋削系、フライス系の加工方法や超精密加工、一般加工の加工精度領域についても、工具刃先位置の計測および切削状態の監視が可能といえる。また、この工具刃先位置計測の評価により、第1章の機上計測システムに要求される基本性能を満たすことが可能となる。

ここで第1章の基本性能①～⑧に関して、第1～5章までの調査および結果を踏まえて、現状のシステムと本機上計測システムの優位性について述べる。第1章の基本性能の①、②、③のセンサの特徴について、センサが切削動力計の場合、本体の大きさやひずみを計測することで加工に制限を与えるなど問題がある。

加速センサの場合、センサの大きさは小さいものの、AE 技術に比べ感度は低い  
ため、微小な計測においては安定的に測定することが難しい。センサレスの切削  
力オブザーバに関しては、①、②、③を満たしているものの接触式の案内のとき  
には、切削力の推定に関する報告はみあたらないため、感度に関して不安定であ  
ると推測される。AE センサは、第2章、第4章より加工の制限や感度など関し  
て他のセンサと比較して優位である。

④、⑤の工具刃先位置計測については、画像処理による計測の場合、工具と被  
削材の隙間を非接触で計測することにより、回転時の動的な計測が可能である  
が、システムの大きさが問題となっている。また、レーザ光による計測の場合、  
光透過性を有する工具または被削材に限られている。したがって、これらの問題  
点を解決するには、実加工状態で工具と被削材の接触を微小切込みで検出でき  
る AE センサが適切である。

⑥の実際の加工現場で必要な計測については、総合的な工具刃先位置の計測  
となるため、異なる工具間の仕上げ面段差を最小限にできることが重要である。  
工具刃先位置計測の実験においては、実加工状態で検知実験の結果を得てお  
り、AE 技術により高精度な計測が可能となっている。⑦の切削状態の監視につ  
いては、超精密加工領域や断続切削での報告が少なく、実用化されているもの  
がない。第3章、第5章よりインプロセスの可能性を示唆しており、超精密加工に  
おいては、微小な加工状態の変化の検出が可能であり、断続切削においては、工  
具摩耗と AE 信号の関係を示すことができ、AE 技術による切削状態の監視にお  
いて優位性を示している。

⑧の工具刃先位置計測や切削状態の監視を一つのシステムとして構築するこ  
とについては、既存の研究において構築している報告はみあたらない。本研究の  
前章までの検討により AE 技術を用いることで一つのシステムとして構築する  
ことは可能であるといえる。

以上のような前章までの結果をもとに機上計測システムを構築し、第1章の①  
～⑧の基本性能について、次節で評価を行う。

6.2 節では、AE 技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムの原理に  
ついて述べ、機上計測システムの構築を行っている。機上計測システムにより、  
工具刃先位置計測のための接触検知を行い、AE 信号の検出によりシステムの応

答性や信頼性などを明らかにした。また、システムの応答性の遅れに対して、工具刃先位置の補正量を求めた。

6.3 節では、構築した機上計測システムを用いて計測精度を評価した。異なるエンドミルの刃先位置の計測を行い、それぞれの工具により仕上げの切込み深さを与えて、被削材を加工し二つの加工面の段差および深さを測定することで評価した。

本機上システムを用いた場合、工具刃先位置を計測する際に生じるシステムの遅れにより、被削材に食込みが発生する。そこで、6.4 節では、実用化のために食込み量を低減する工具アプローチ方法を検討した。

## 6.2 機上計測システムの提案および検証

### 6.2.1 目 的

本節では、機上計測システムの実用化に向けて、提案した AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムの原理をもとに、マシニングセンタで計測できるシステムを構築した。構築した計測システムを実機に搭載して、機上計測システムの検証を行った。工具径の計測を目的とする X 軸方向のアプローチ方法と工具長の計測目的とする Z 軸方向のアプローチ方法により接触検知を行い、工具長および工具径の刃先位置情報を取得し、提案したシステムの評価をした。さらに、接触したときの AE 信号データを収集・解析し、機上計測システムの応答性や AE 信号との関係性、および接触検知の信頼性について明らかにした。

### 6.2.2 機上計測システムの概要

#### 6.2.2.1 エンドミルの機上計測原理

切削加工プロセスでは、切りくずの生成過程、工具と切りくずまたは被削材間の摩擦、切りくずの衝突・分断などの現象により弾性波が放出される。切削工具の被削材への接触時にも、これらの一部あるいは複数の現象から発生した弾性波を AE 信号として検出される。この AE 信号を検出することで、工具が被削材に接触したときの刃先位置座標を取得し、工具長および工具径の計測や工作機械の原点復帰状態時の工具刃先から被削材までの距離を機上で計測を行う。

図 6.1 は本研究で提案する AE 法を用いたマシニングセンタにおけるエンドミルの機上計測方法である。ここで提案する機上計測システムは、一般的な段取り作業で行う場合とは異なり、ツールセッティング器具などを使用しない計測方法を想定している。図 6.1 (a), (b) はそれぞれ工具長の計測と工具径の計測を示す。本提案では、工具長および工具径を高精度に計測するため、切削時と同様に回転している工具を被削材に直接接触させ、その接触検知を利用している。接触検知したときの座標値を取り込むことで、以下のような特徴を持つ機上計測システムが可能となる。

- (1) 加工時と同じ切削条件で計測が可能のため主軸回転などで起こる動的誤差の影響を含めた計測が可能となる。
- (2) 作業空間内での工具刃先位置情報を取得できる。
- (3) 工具アプローチの方向で、X 軸、Y 軸および Z 軸の方向の刃先位置の計測が一つのセンサで可能である。
- (4) 基準ブロックに接触させることにより、工具長および工具径の計測ができる。
- (5) 被削材に接触させることにより、工作機械の原点復帰状態時の工具刃先から被削材までの相対距離を把握できる。
- (6) (1) ～ (5) より、複数の工具を用いた場合の工具間の仕上げ面段差を最小限に抑えることができる。

(4) の項目について、基準ブロックは、寸法値が既知で表面粗さが均一の精度の良いものを準備しなければならない、使用する環境の実寸法が必要になる。基準ブロックを使用する場合、測定環境により工具径・長の測定精度に誤差が生じる。そのため、基準ブロックと被削材は、同一温度なるように測定条件を整え、同一材質にすることが好ましい。条件が整わない場合は測定値を補正する必要がある。



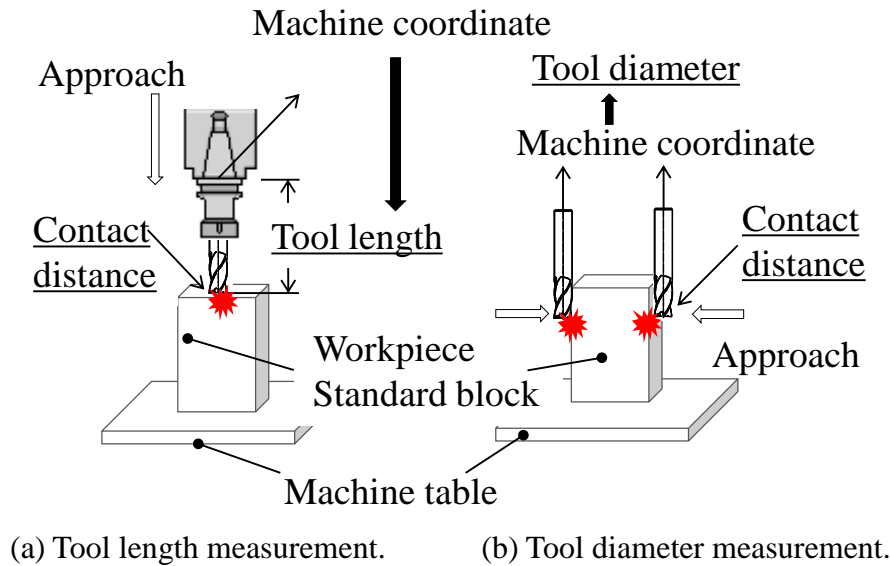


Fig. 6.1 On-machine measuring principle of square end mill.

#### 6.2.2.2 機上計測システムの構築

図 6.2 は、機上計測システムのフローチャートである。AE 信号の計測を開始し、工具を被削材に近づける。工具と被削材が接触することにより、弾性波が放出され、その弾性波を AE 信号として取得する。その信号をマシニングセンタへ送り、そのときの工具刃先の位置座標を取り込むことで機上での工具刃先位置を計測できる。

図 6.3 に機上計測システムの構成を示す。本システムは、前章までに用いた実験装置の一部をそのまま使用している。工作機械は、マシニングセンタ（㈱牧野フライス製作所，V33i）を使用し、マシニングセンタの割込み機能を利用した機上計測システムを構築した。AE センサ（㈱エヌエフ回路設計ブロック，AE-905S）はマシンバイスや被削材に直接取り付け、工具が被削材に接触したときの信号を検出する。検出された AE 信号は電圧レベルが小さいため、プリアンプ（㈱エヌエフ回路設計ブロック，AE-912）と AE 計測装置（㈱エヌエフ回路設計ブロック，AE9922）内のメインアンプにより増幅される。本システムの AE センサは、共振型の PZT 圧電セラミックス製で、共振周波数 1 MHz のものを使用した。AE 計測装置は、第 2 章の図 2.6 の AE 原波形、エンベロープ信号波形およびイ

ベント信号波形を出力できる。その3種類の信号を記録計に入力し、信号波形を確認できるようにした。そのうちのイベント信号は、AE計測装置とマシニングセンタ制御装置との絶縁分離するためにフォトカプラを経由して制御装置に入力され、マシニングセンタの割込み機能を用いて、工具の送りを停止させる。そのときの工具刃先位置の座標を読み取り、工具を退避させるシステムとなっている。

本システムは、割込み信号が検出されても機械はすぐに停止することができず、停止するまでに減速時間を要する。このようなシステム応答の遅れにより、工具が被削材に接触するときに深さが生じる。この接触深さが工具刃先と被削材の相対距離の誤差となり、被削材への接触深さ、すなわち食込みとなる。工具刃先の位置は、接触深さだけ補正すれば、高精度に計測できる。

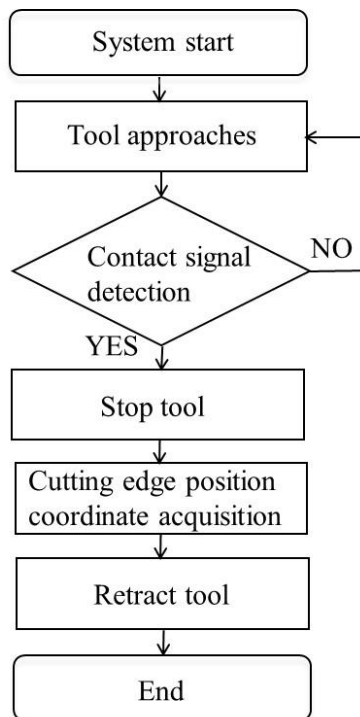


Fig. 6.2 On-machine measurement system flowchart.

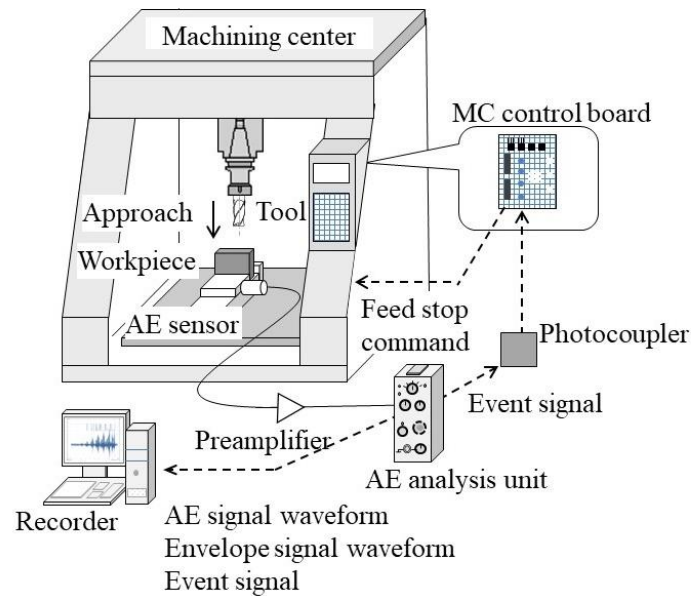


Fig. 6.3 Composition of the on-machine measurement system.

### 6.2.2.3 機上計測システムで取得可能な AE 信号とシステムの応答性

図 6.4 にシステムを始動させて停止するまでに取得できる AE 信号のイメージを示す。図 6.5 に工具が被削材に接触して、AE 信号を検出して停止するまでの工具動作の模式図を示す。本機上計測システムでは、システム応答の遅れと AE 信号の関係を検証するために上述の 3 種類の信号を取得および記録できるようにしている。接触により検出される AE 原波形は、AE 計測装置により包絡線検波処理され、エンベロープ信号に変換される。さらに、図 2.6 に示したようにエンベロープ信号は二つのしきい値を利用して、負論理を用いたイベント信号に変換される。イベント信号は、エンベロープ信号が図 2.6 に示した  $V_H$  (ハイレベルしきい値) を超えると 0V,  $V_L$  (ローレベルしきい値) より小さくなると 5V で出力される。二つのしきい値のうちの  $V_L$  値は、AE 計測装置の最小設定値に設定する。 $V_H$  値は、ノイズによる誤動作をなくすために、AE 原波形を確認し、ノイズレベルよりも大きい値に設定した。変換されたイベント信号はマシニングセンタの割込み信号として使用する。

取得した AE 信号とシステム応答の遅れの関係から図 6.4 の  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  の領域に区分して考える。

$\alpha$  : 工具が被削材に接触してから AE 計測装置がイベント信号として認識するまでの時間

$\beta$  : エンベロープ信号がイベント信号に変換されてからマシニングセンタが割込み信号と認識するまでの時間

$\gamma$  : マシニングセンタが割込み信号を取得してから工具が停止するまでの時間

$\delta$  : 工具が被削材に接触してから停止するまでの時間

ここで、 $\delta = \alpha + \beta + \gamma$  の時間が本計測システムの遅れに相当する。すなわち図 6.5 に示す被削材への接触深さ  $Q_\gamma$  mm になる。 $\alpha$  と  $\beta$  は、計測システムが割込み信号として検知するまでの遅れである。 $t_1$  と  $t_2$  はイベント信号の持続時間を示している。イベント信号がフォトカプラの応答時間の 1 ms 以上持続すると割込み信号としてマシニングセンタに入力される。このフォトカプラにより、突発的な持続時間の短いノイズの対策をしている。

$\gamma$  は、マシニングセンタの制御系応答の遅れに相当し、割込み信号を利用して、マシニングセンタを停止させる時間となる。この遅れは、マシニングセンタの時定数などの工作機械の制御系特性に依存し、マシニングセンタが安全に停止できるように設定された時間である。図 6.6 は一般的なマシニングセンタにおける制御系の応答遅れの模式図を示す。マシニングセンタの制御系応答遅れ時間は  $T_1$  : 制御装置の処理の遅れ、 $T_2$  : 減速に必要な距離（切削時定数）、 $T_3$  : サーボの遅れにより動く距離（サーボ時定数）を加算することで求めることができる。しかしながら、この値は工作機械の制御装置特性や設定パラメータによって異なり、一般的には公開されていないものもある。本システムのマシニングセンタの制御系の遅れは、図 6.6 の  $T_1 + T_2 + T_3$  の斜線部の面積になる。この一般的に使用されているマシニングセンタ制御系の遅れによる接触深さは、式 (6.1) のようになる<sup>1)</sup>。なお、接触深さを  $Q_\gamma$  mm、アプローチ速度  $F_{ap}$  mm/min、切削時定数  $T_c$  msec、サーボ時定数  $T_s$  msec とする。

$$Q_\gamma = F_{ap} \times \frac{1}{60} \times \left( \frac{20}{1000} + \frac{T_c}{1000} + \frac{T_s}{1000} \right) \quad (6.1)$$

これらのパラメータも一般的には公開されておらず，工作機械の進歩により式(6.1)も変化を遂げているとされている．そこで，本実験においてマシニングセンタの制御応答の遅れによる接触深さ  $Q_\gamma$  は，図 6.5 の近似直線で囲まれる赤色部の面積とし，式(6.2)を利用することとする．マシニングセンタ制御応答の遅れによる時間  $T_1 + T_2 + T_3$  は，図 6.4 の  $\gamma$  に相当する．

$$Q_\gamma = F_{ap} \times \gamma \times \frac{1}{2} \quad (6.2)$$

本機上計測システムにより，マシニングセンタの遅れを AE 信号から解析することで，遅れ量を定量化でき，工具長および工具径の計測のときに遅れ量を補正すれば，高精度な計測が実現できる．

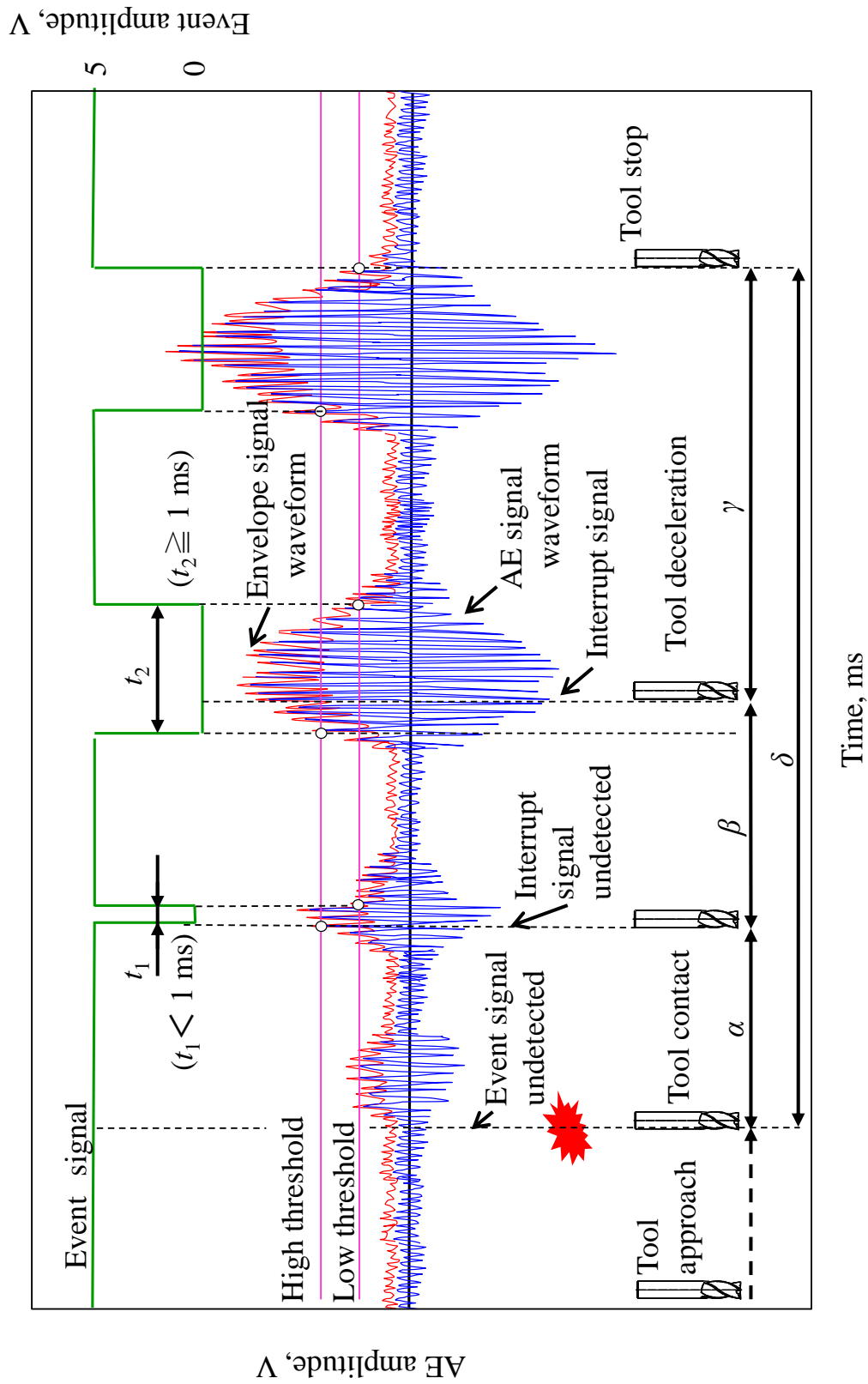


Fig. 6.4 AE signal detection image by on-machine measurement system.

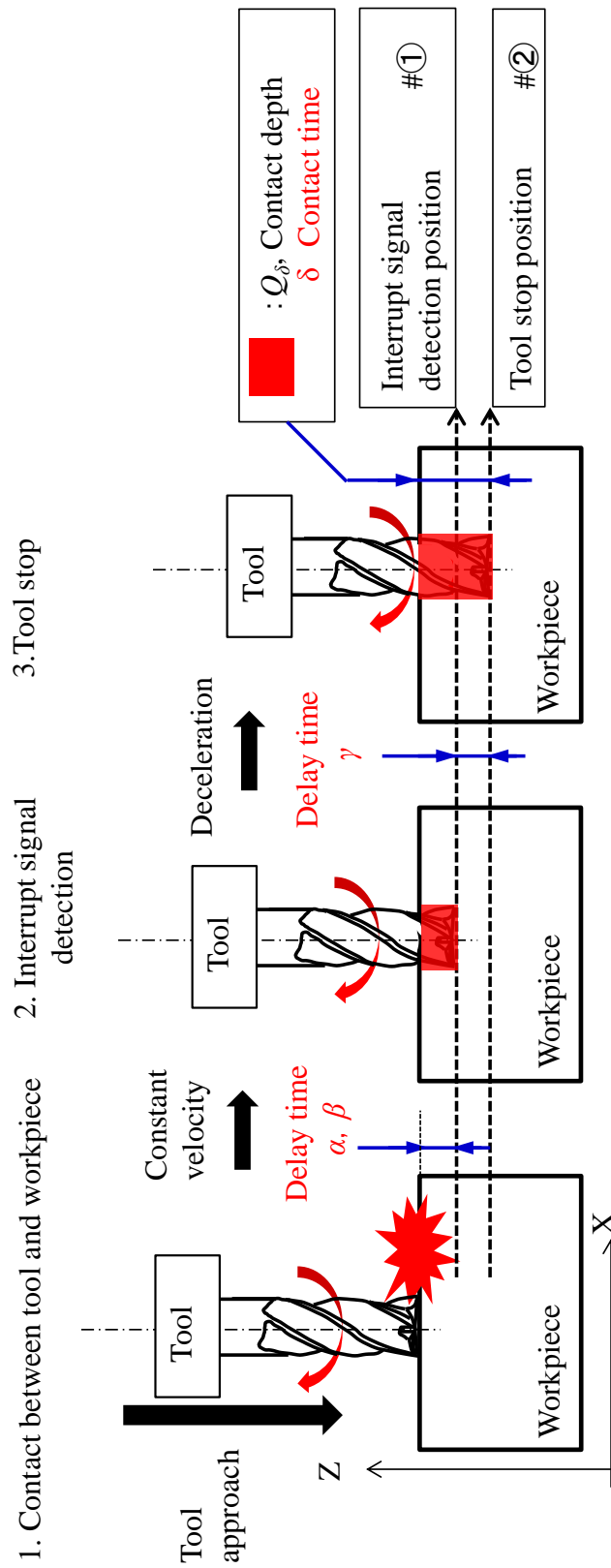


Fig. 6.5 Schematic diagram of the tool motion of on-machine measurement

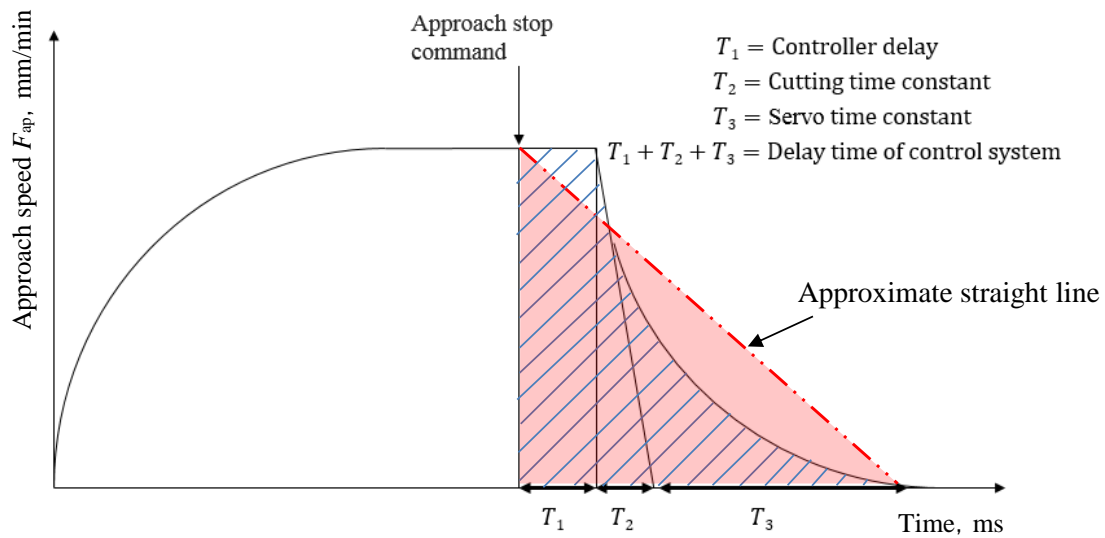


Fig. 6.6 Schematic diagram of the response delay of the control system of the machining center.

### 6.2.3 システムの応答性検証の実験方法

#### 6.2.3.1 マシニングセンタの制御系応答遅れの検証

図 6.4 の  $\gamma$  にあたるイベント信号が発生して、マシニングセンタが割込み信号として認識し、工具が停止するときの距離、すなわちマシニングセンタの特性である制御系応答の遅れについて調べた。実験は、図 6.3 の機上計測システムを使用し、工具が被削材にアプローチを開始し、接触する前に強制的に設定したしきい値を超え、イベント信号が割込み信号に変換される程度の衝撃を AE センサに与えて、マシニングセンタを停止させた。

実験はアプローチ速度や方向を変更して、各条件で 10 回ずつ行った。アプローチ速度は、1, 10, 50, 100 mm/min とし、アプローチの方向は、X 軸方向と Z 軸方向の 2 方向とした。遅れ量は、マシニングセンタが割込み信号を取得したときの位置座標と工具が停止したときの位置座標により求める。

#### 6.2.3.2 システム全体の応答性の検証

システム全体の応答性の検証は、実際に工具を被削材に接触させた。表 6.1 は、検証評価した実験条件である。工具は  $\phi 10$  mm と  $\phi 0.2$  mm の超硬コーティングエンドミル (TiAlN 系) を使用し、被削材は機械構造用炭素鋼 (S50C) を用いた。



$\phi 10$  mm エンドミルでは、切削速度を 80 m/min、アプローチ速度を 1, 10, 50, 100 mm/min とし、X 軸方向の水平方向と Z 軸方向の垂直方向から被削材にアプローチし、それぞれ 3~5 回ずつ実験を行った。また、 $\phi 0.2$  mm エンドミルでは、使用する工作機械の最高回転速度の 20000 min<sup>-1</sup> とし、切削速度は 15 m/min となった。アプローチ速度を 1 mm/min とし、Z 軸方向の垂直方向のみ被削材にアプローチし、それぞれ 10 回程度実験を行った。

実験の開始位置は、あらかじめ使用する工具長および座標系設定の計測を行っていることから、被削材上面から 0.1 mm の高さとした。工具が被削材に接触すると、システムにより工具を停止後、退避させた。その後、被削材の接触深さを測定し、システム全体の応答性の検証を行った。接触深さは、被削材の実際の深さを非接触式三次元測定機 (Taylor Hobson Inc., Talysurf CCI300)、触針式表面形状・粗さ測定機 (Taylor Hobson Inc., Form Talysurf Laser 635) で測定した。しきい値の設定は、それぞれの条件で背景ノイズよりわずかに大きな値に  $V_H$  を設定し、 $V_L$  は測定器の最低値とした。切削速度の影響による AE 信号のレベルを考え、AE センサの取付け位置を  $\phi 10$  mm エンドミルはバイスに、 $\phi 0.2$  mm エンドミルは被削材に直接取付けた。

Table 6.1 System evaluation experiment conditions.

Tool	Square end mill, Carbide (TiAlN-based coating)	
	4 blades	2 blades
Diameter	$\phi 10$ mm	$\phi 0.2$ mm
Workpiece	S50C (75 mm×35 mm×15 mm)	
Cutting speed $V$ (Spindle speed $N$ )	80 m/min (2560 min <sup>-1</sup> )	12.5 m/min (20000 min <sup>-1</sup> )
Approach speed $F_{ap}$	1, 10, 50, 100 mm/min	1 mm/min
Approach direction	X, Z - axis direction	Z - axis direction
AE sensor attachment position	Vice	Workpiece
Sampling frequency	3.9 MHz	
AE amplification factor	60 dB	
Threshold	$V_L$ 20 mV, $V_H$ 50 mV	$V_L$ 20 mV, $V_H$ 55 mV
AE high-pass filter	100 kHz	

$a_r$  : Radial depth of cut     $a_a$  : Axial depth of cut

## 6.2.4 実験結果および考察

### 6.2.4.1 機上計測システムの応答性の検証

表 6.2 に  $\phi 10$  mm エンドミルのアプローチの速度および方向の違いによるシステム全体の遅れに相当する被削材への接触深さ  $Q_\delta$  の平均値とマシニングセンタの制御系応答の遅れ量  $Q_\gamma$  の平均値を示す．表中の丸括弧内の数値は，それぞれの距離とアプローチ速度から換算した時間  $\delta$ ,  $\gamma$  を示す．表 6.2 は，割込み信号がマシニングセンタに入力されるまで工具は等速で動き，割込み信号が入力されて停止するまでは減速することを考慮している．式 (6.2) より，減速する時間  $\gamma$  は (停止距離  $Q_\gamma \times 2$ ) / アプローチ速度  $F_{ap}$  で計算している．割込み信号の検知は，取得した AE 原波形より判断した．

まず，マシニングセンタの制御系応答の結果から検討する．表 6.2 の制御系応答の遅れ量  $\gamma$  を換算した表中の丸括弧内の時間は，X 軸で平均 80 ms，Z 軸で平均 78 ms となった．この遅れは，アプローチ速度に関係なく，ほぼ一定であった．また，制御系応答の遅れ時間の標準偏差は，X 軸で  $\sigma = 5.3$  ms，Z 軸で  $\sigma = 5.1$  ms となった．マシニングセンタの制御系の応答による遅れおよびばらつきを確認できた．

Table 6.2 Response delay  $Q_\gamma$  of the control system of the machining center and contact trace depth  $Q_\delta$  corresponding to the delay of the entire system ( $\phi 10$  mm end mill).

	Contact depth into the workpiece $Q_\delta$ ( $\mu\text{m}$ ), ( $\delta$ )		Response delay in the control system of MC $Q_\gamma$ ( $\mu\text{m}$ ), ( $\gamma$ )	
	X-axis (diameter)	Z-axis (length)	X-axis (diameter)	Z-axis (length)
100 mm/min	77.3 (85)	78.3 (87)	65.4 (78)	66.6 (80)
50 mm/min	40.9 (90)	39.9 (87)	34.0 (82)	32.4 (78)
10 mm/min	10.2 (101)	6.8 (79)	6.6 (79)	6.3 (76)
1 mm/min	1.4 (124)	1.5 (128)	0.7 (79)	0.6 (77)

( ) conversion time (ms)

図 6.7 は、表 6.2 のアプローチ速度の違いによる制御系応答の遅れ（距離）をまとめたものである。この遅れが図 6.4 の  $\gamma$  部に相当する。制御系応答の遅れは、図 6.7 の (a), (b) より、X, Z 軸方向のどちらのアプローチ方向でもアプローチ速度に比例して大きくなる。図 6.7 の直線の傾きをみると、アプローチ速度が 1 mm/min 増加するごとに、 $0.66 \mu\text{m}$  の割合で制御系応答の遅れ量が大きくなる。この割合が、工具長および工具径の計測のときのアプローチ速度の違いによる補正量になる。

つぎに、構築した機上計測システムの遅れについて検討する。図 6.8, 6.9 は、 $\phi 10 \text{ mm}$  エンドミルの X 軸方向アプローチと Z 軸方向アプローチ速度の違いによる被削材の表面の接触痕である。また、図 6.10 は X 軸アプローチと Z 軸アプローチでアプローチ速度 1, 10 mm/min の接触痕深さ  $Q_\phi$  を測定したものである。図 6.8, 6.9 より、システムの遅れにより接触痕が発生することがわかる。アプローチ速度 1 mm/min のときは、 $1.5 \mu\text{m}$  程度と微小な切削痕であるが、本実験の被

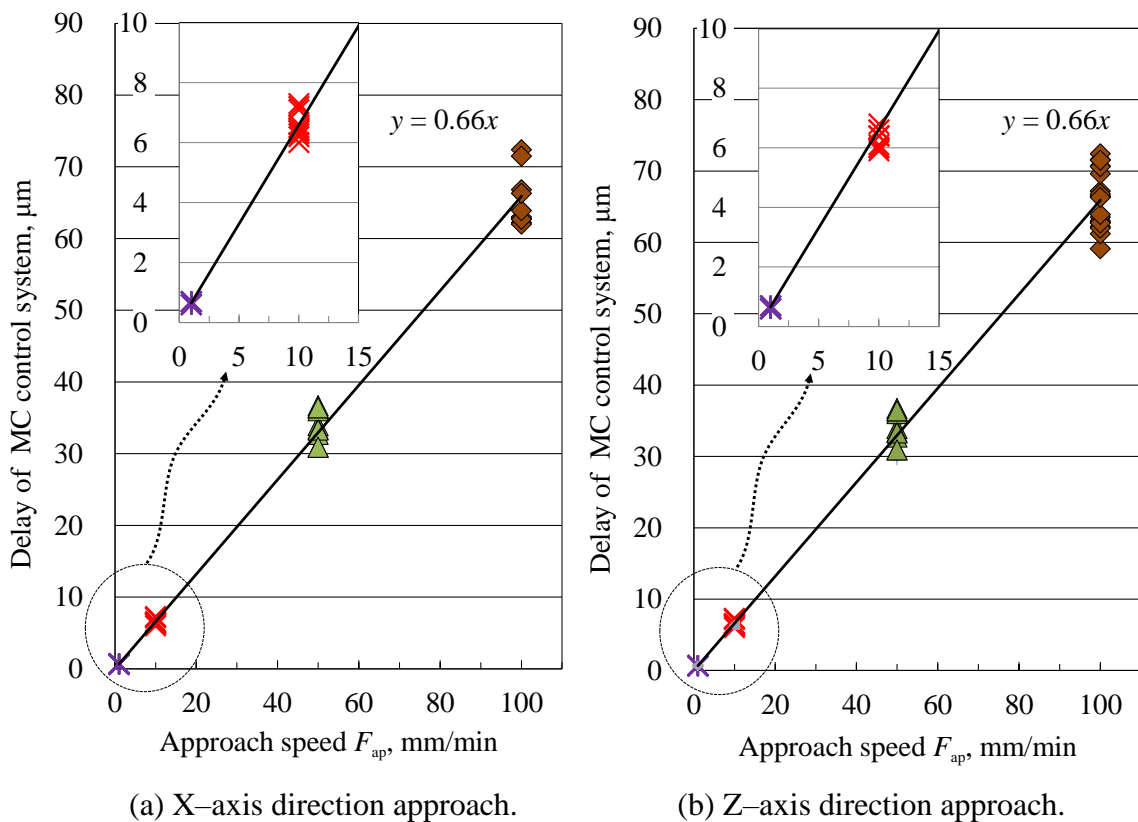


Fig. 6.7 Relationship between the delay of control system response and the approach speed of each axis ( $\phi 10 \text{ mm}$  end mill).

削材はラップ加工して表面粗さ  $Ra\ 2.9\ \mu\text{m}$  と小さくしたために、アプローチ速度が遅くても接触痕を目視で確認できる。また、アプローチ速度 10, 100 mm/min では、大きな切削痕となる。本接触式の機上計測システムでは、アプローチ速度の違いより接触痕として被削材の表面に残る。しかしながら、この被削材の接触痕は、加工現場で工具長を計測するときに、加工製品の精度に影響しないようにアプローチ速度を調整し、または荒削り、仕上げ削り等の工程で区別しておけば問題ないといえる。

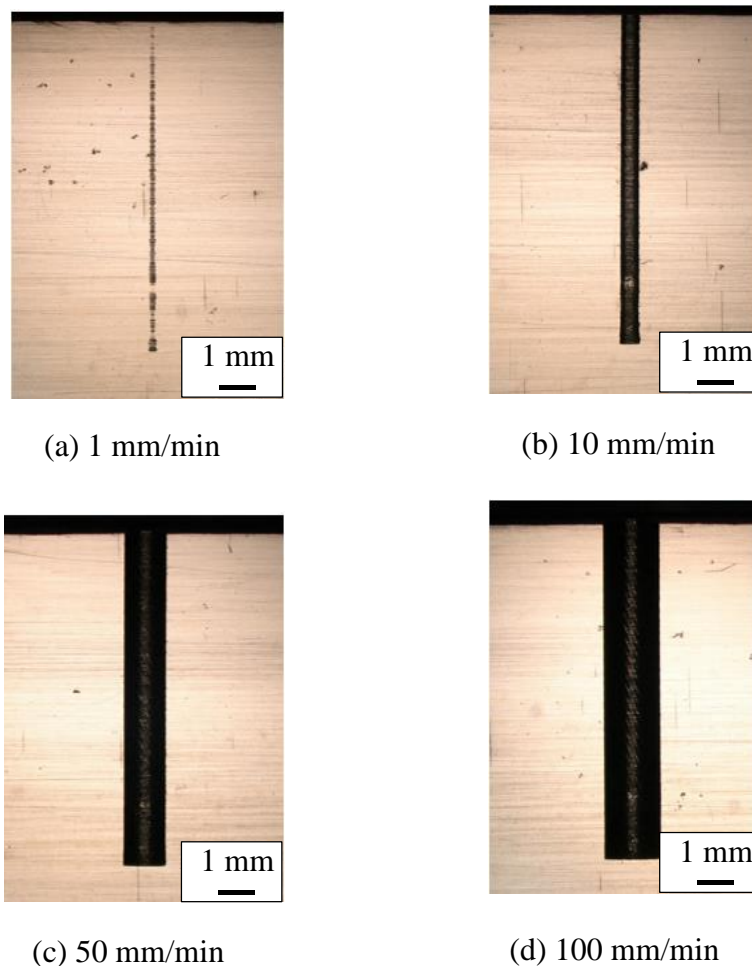


Fig. 6.8 Contact mark on the surface of the workpiece  
in the X-axis direction approach ( $\phi\ 10\ \text{mm}$  end mill).

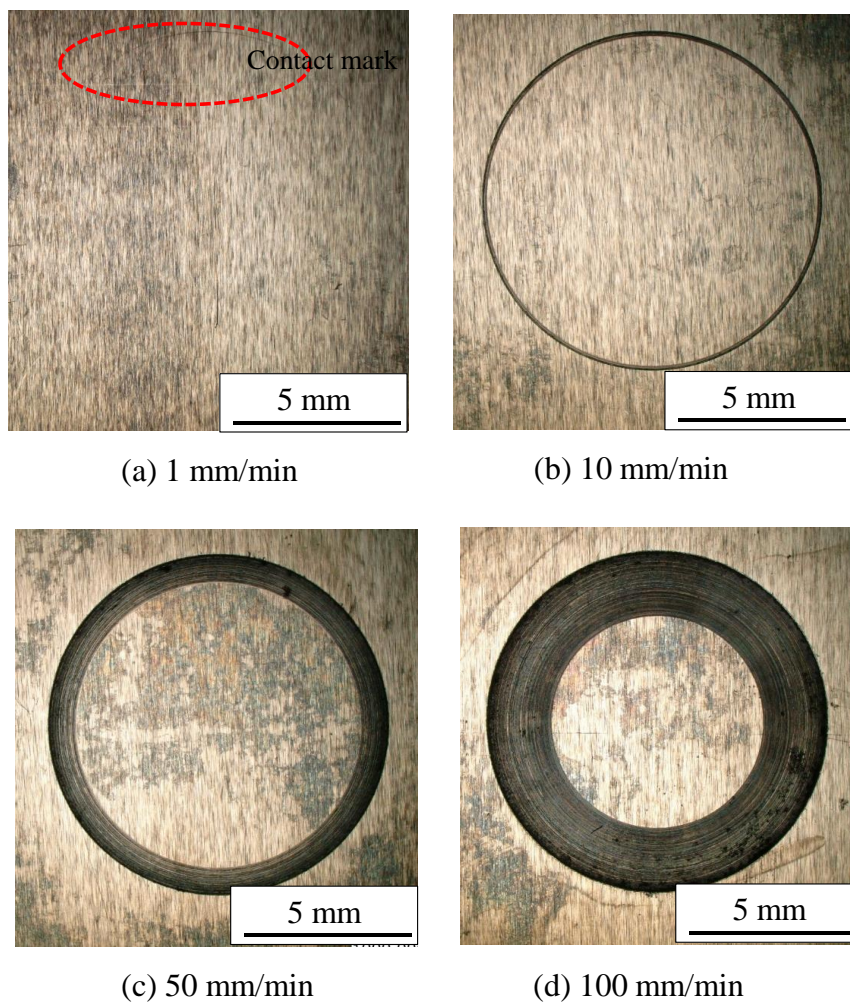


Fig. 6.9 Contact mark on the surface of the workpiece in the Z-axis direction approach.

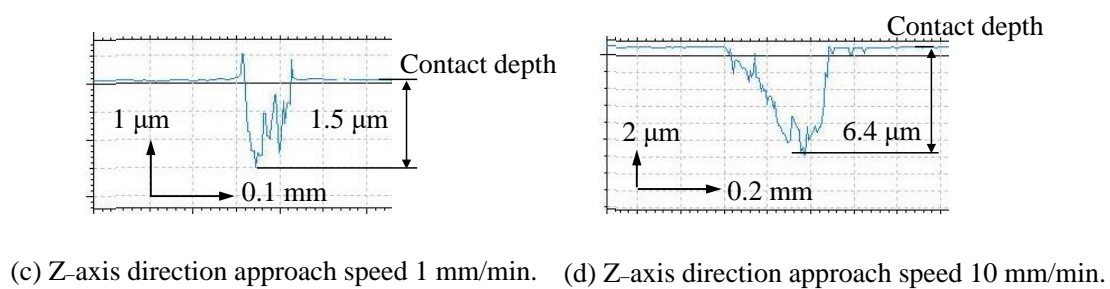
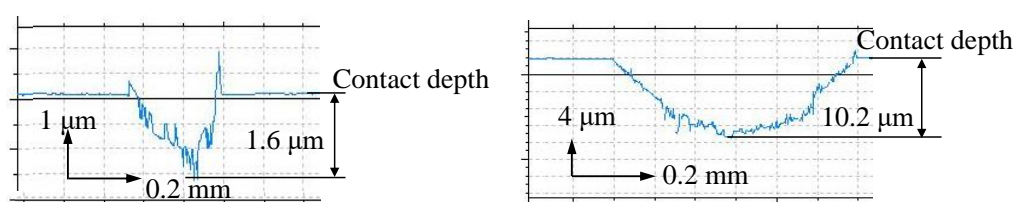


Fig. 6.10 Measurement of contact depth by non-contact measuring instrument.

図 6.11 は、表 6.2 のアプローチ速度の違いによる被削材へ接触深さをまとめたものである。この深さが図 6.4 の  $Q_0$  に相当する。ばらつきはあるものの被削材への接触深さもアプローチ速度に比例している。アプローチ速度を遅くすれば、被削材の接触深さを小さくできる。図 6.11 の直線の傾きからみると、X 軸、Z 軸のどちらのアプローチ方法でもアプローチ速度が 1 mm/min 増加するごとに、 $0.78 \mu\text{m}$  の割合でシステム全体の遅れ量が大きくなる。また、このシステム全体の遅れについて、アプローチ速度 1 mm/min のときの接触深さは、約  $1.5 \mu\text{m}$  で、ばらつきの標準偏差は、X 軸方向で  $\sigma = 0.2 \mu\text{m}$ 、Z 軸方向で  $\sigma = 0.1 \mu\text{m}$  であり、範囲は X 軸方向で  $R = 0.4 \mu\text{m}$ 、Z 軸方向で  $R = 0.3 \mu\text{m}$  であった。本実験で使用したマシニングセンタの繰り返し精度の仕様は  $\pm 1 \mu\text{m}$  であるが、検査値は、X、Z 軸方向ともに  $\pm 0.4 \mu\text{m}$  である。本機上計測システムは、繰り返し精度以内のばらつきであるため、有効であると考えられる。

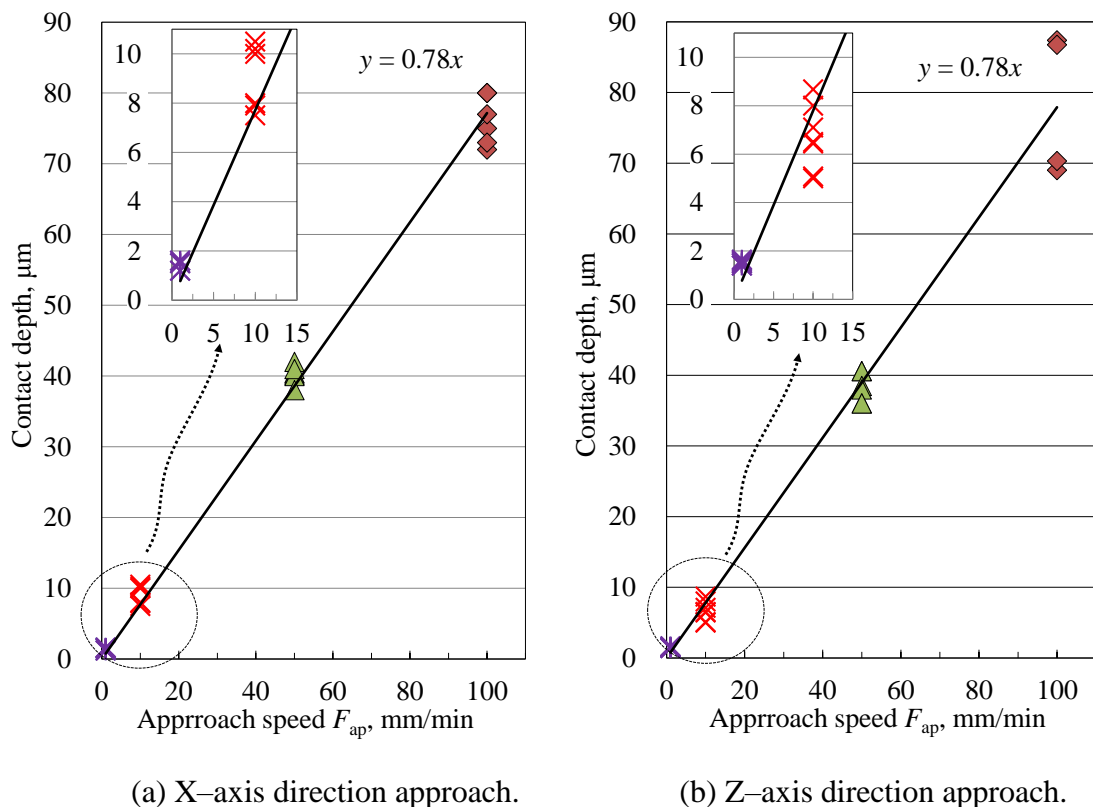


Fig. 6.11 Relationship between contact depth into the workpiece and approach speed of each axis ( $\phi 10$  mm end mill).

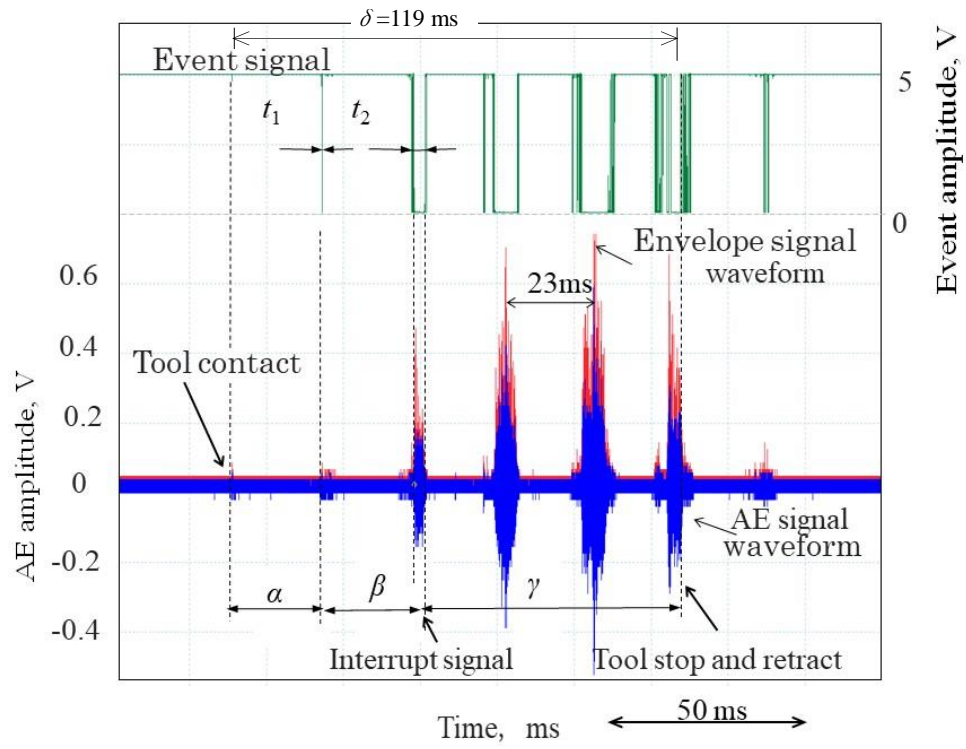
図 6.12 に  $\phi 10$  mm エンドミルの送り方向および速度の違いによるシステム全体の遅れを把握するために取得した AE 原波形を示す. 図 6.12 の (a), (b) は, それぞれ Z 軸方向のアプローチ速度 1, 10 mm/min で, (c) は, X 軸方向のアプローチ速度 1 mm/min のときの AE 信号である. 図 6.12 (a), (c) アプローチ速度 1 mm/min の波形は, 図 6.4 で示した  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  の 3 区間すべての遅れが生じた.  $\alpha$  の区間の遅れが生じたのは, 検出された AE 原波形信号が設定したしきい値を越えなかったためである. これにより, イベント信号は検出されていない. しかしながら, 接触による AE 信号振幅がわずかにノイズレベルよりも大きくなっている.  $V_H$  値を調整することでイベント信号を検出できる可能性がある.

また, 図 6.12 (a), (c) は  $\beta$  区間ではイベント信号が検出されている. しかしながら, 図 6.12 (a), (c) の  $t_1$  部ではマシニングセンタが割込み信号として認識できていない. これは, 上述したように, イベント信号の持続時間がフォトカプラの応答時間よりも短いためである. 図 6.12 の  $\gamma$  区間は, 工具が減速して止まるまでの信号を表しており, この  $\gamma$  以降は, AE 信号のレベルが小さくなっている. これは, 工具停止後, アプローチ方向と反対方向に退避するため, そのときに工具が被削材にわずかに接触したときの信号だと考えられる.

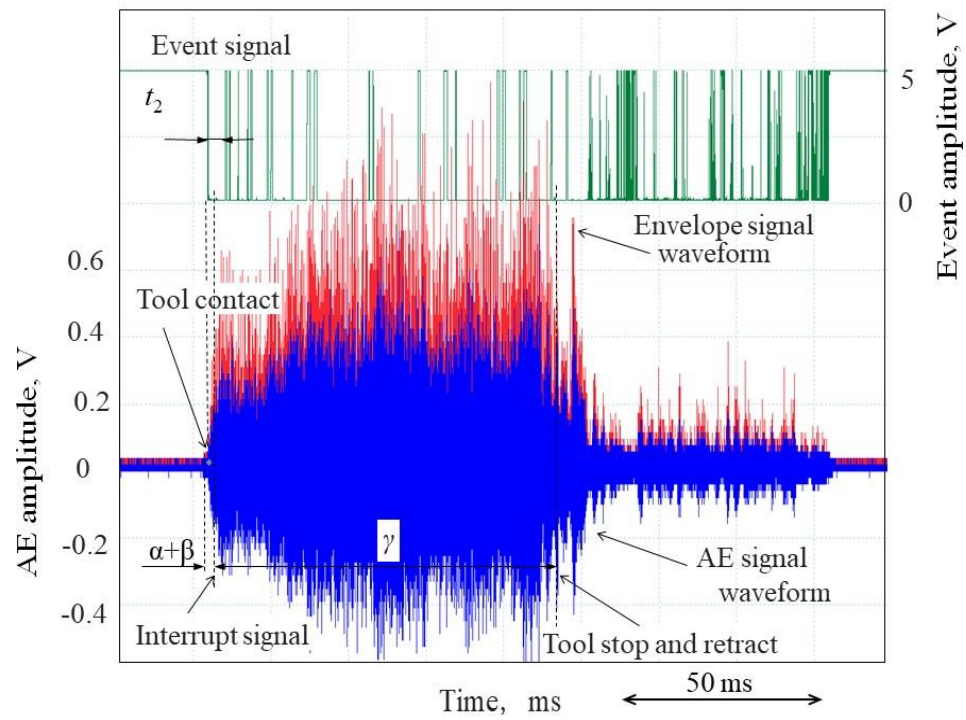
図 6.12 (a) の Z 軸方向へアプローチしたときの被削材への接触深さは実測値で  $1.4 \mu\text{m}$  となり, 制御系の遅れを 77 ms として式 (6.2) で接触時間を換算すると約 122 ms となる. 図 6.12 (a) AE 原波形の接触から工具停止までの時間  $\delta$  ( $\alpha + \beta + \gamma$ ) は 119 ms となり, ほぼ等しくなった. AE 信号により, 計測システムの遅れを確認できていることと, マシニングセンタ制御応答の遅れを式 (6.2) の近似式に変更しても問題ないといえる.

図 6.12 (a), (c) の接触初期の AE 原波形の周期は, およそ 23 ms であった. この周期は, 切削工具 1 回転にかかる時間に相当しており, 切れ刃 1 刃による接触であることがわかる. これは主軸の傾き, 工具刃先の振れ, 工具の刃先形状のばらつきおよび被削材のわずかな傾きなどの影響により 1 刃で接触したと判断できる. また, 図 6.12 (a) の AE 原波形から, 本実験条件で割込み信号検知遅れは 2 回転程度あることがわかった.



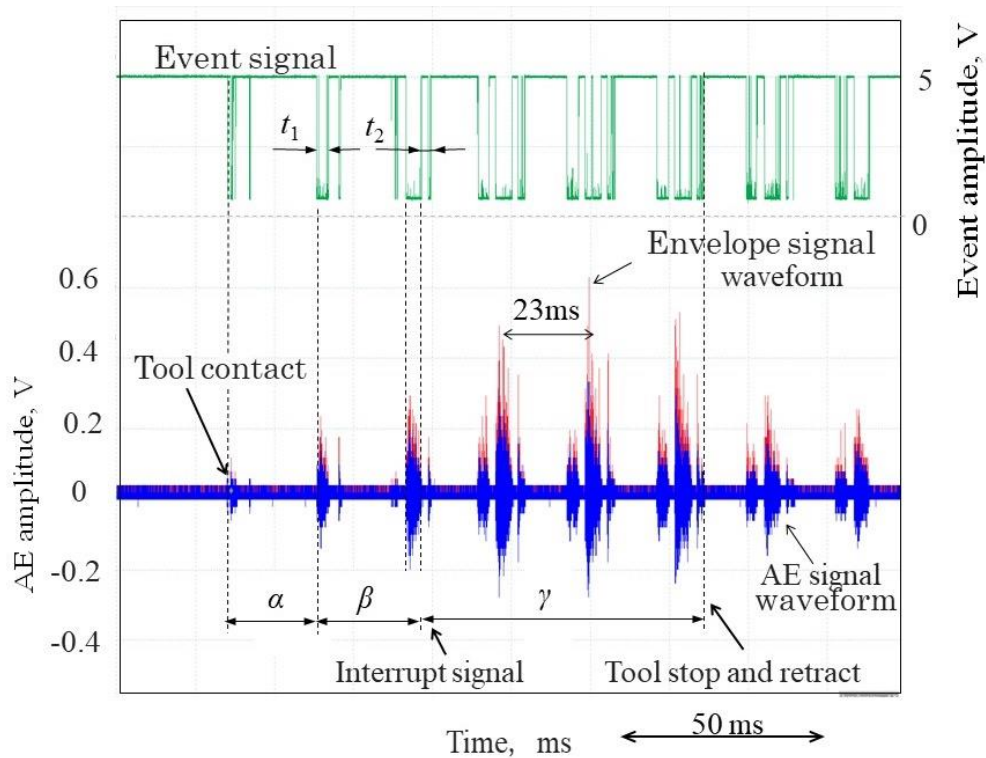


(a) Z-axis direction approach speed 1 mm/min.



(b) Z-axis direction approach speed 10 mm/min.





(c) X-axis direction approach speed 1 mm/min.

Fig. 6.12 Relationship between AE signal waveform and system delay at difference in approach speed and direction ( $\phi 10$  mm end mill).

図 6.12 (b) の波形は、(a)，(c) の AE 原波形信号と比べると接触初期から連続的な信号になっている。送り速度が速いために切れ刃が被削材から離れることなく連続で加工している。そのため、エンベロープ信号がすぐにイベント信号に変換され、かつ持続され早い段階でマシニングセンタが割込み信号として認識したことがわかる。このわずかな割込み信号検知遅れは、システム全体の遅れに対して、数%程度なので、刃先位置の計測には問題ないと考えられる。

このように AE 信号データを収集・解析することで、機上計測システムの応答性や AE 信号との関係が明らかになる。

$\phi 0.2$  mm エンドミル、アプローチ速度 1 mm/min で工具刃先位置の計測を行った結果について述べる。図 6.13 に被削材の接触痕と非接触測定機で測定した接触深さの一例を示す。図 6.13 の上 3 箇所と下 3 箇所は、接触している面積が異なってみえるが、切削痕深さは最大で  $1.6 \mu\text{m}$  程度であった。図 6.13 の結果よ

り、本計測システムは小径の工具でもアプローチ速度  $1 \text{ mm/min}$  で接触検知を確認でき、工具刃先位置を計測可能であった。この時の  $Z$  軸方向アプローチの接触深さは、平均で  $1.3 \mu\text{m}$  となった。ばらつきの指標である標準偏差は  $\sigma = 0.2 \mu\text{m}$ 、範囲  $R = 0.4 \mu\text{m}$  となった。

図 6.14 は、 $\phi 0.2 \text{ mm}$  エンドミルの接触したときの AE 信号である。 $\phi 10 \text{ mm}$  と同様にアプローチ速度が遅いときは、 $\alpha$ 、 $\beta$  の割込み信号検知遅れが検出された。また、1 回転  $3 \text{ ms}$  のごとの接触信号も検出されており、接触深さが大きくなると、 $3 \text{ ms}$  の接触信号の間に信号がみられ、2 枚刃で切削していることもわかる。感度を上げるために AE センサを直接被削材に取付けたものの、 $\phi 0.2 \text{ mm}$  エンドミルは小径であり、工作機械の最高回転速度  $20000 \text{ min}^{-1}$  で回転しても、切削速度は  $12.5 \text{ m/min}$  と低いため AE 信号の振幅は小さかった。これにより、図 6.14 の初期で、 $\alpha$  と  $\beta$  の時間の割込み信号検知遅れが生じた。この時間は、

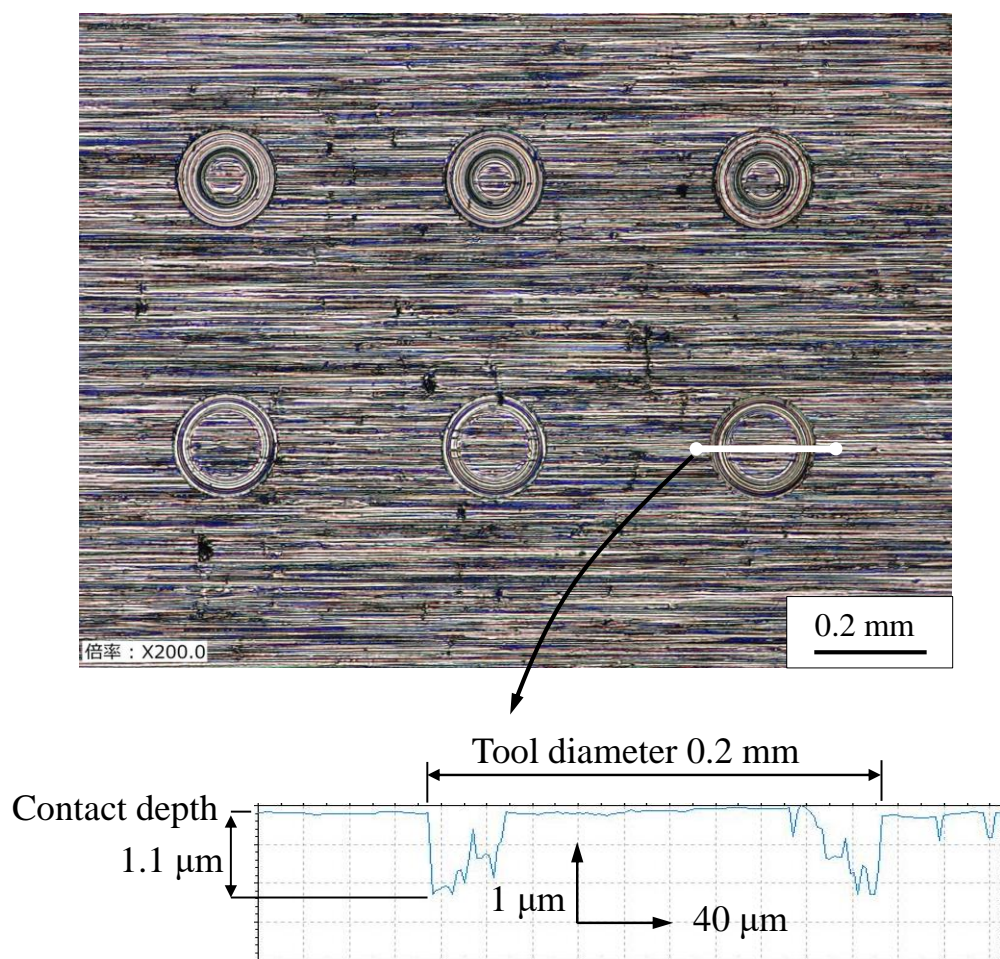


Fig.6.13 Contact mark and contact depth of  $\phi 0.2 \text{ mm}$  square end mill.

図 6.14 より 21 ms 程度であり、図の 6.12 (a)  $\phi 10$  mm のときの、 $\alpha+\beta$  値 (2 回転) 46 ms よりも短かった。この違いは、 $\phi 0.2$  mm では回転速度が速く、1 回転する時間が短く、切れ刃が 2 枚とも接触したために、割込み信号に必要な持続時間が確保できたからだと考えられる。 $\phi 10$  mm と  $\phi 0.2$  mm の遅れ時間の差 25 ms を送り速度 1 mm/min で距離に換算すると  $0.4 \mu\text{m}$  程度となり、マシニングセンタの繰り返し精度の検査値と同等であるので問題ないといえる。

構築した AE 法を用いた機上計測システムにより、工具刃先位置の計測することが可能であった。また計測システムは、システム全体の遅れとして、割込み信号検知遅れとマシニングセンタの制御系の遅れがあることを確認できた。AE 信号を取得することにより、この 2 種類の遅れを確認することが可能である。このシステムの全体遅れを補正すれば、正確な刃先位置を計測できるため、AE 法を用いた機上計測システムは、刃先位置検出に有効である。

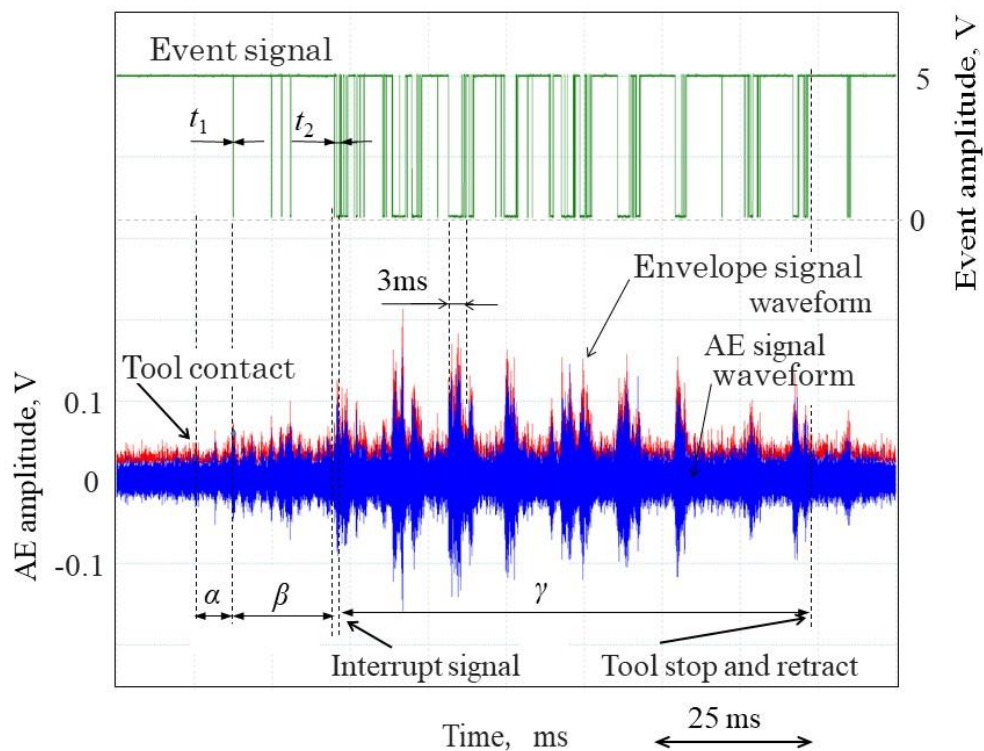


Fig. 6.14 AE signal waveform detected when contact  $\phi 0.2$  mm square end mill.

#### 6.2.4.2 実用化のためのノイズ対策と工具刃先位置補正の検討

接触による信号検知以外の突発的なノイズによる誤動作をなくすための対策を検討する。図 6.15 は、図 6.12 (a) の工具接触部の周波数解析した結果である。図 6.15 の接触時には 0.3 MHz 付近に特徴的な周波数がみられた。ここで、検出された AE 周波数と主軸系や被削材系の固有振動数の関係を確認した。本実験において、バイス、被削材を含む被削材系の固有振動数は、5.3.2 項同様約 1.1 kHz、であり、スピンドル、工具、ツールホルダを含む主軸系の固有振動数は、それぞれおよそ 1 kHz, 3.3 kHz, 4.8 kHz であった。この値は、回転速度や被削材形状、把持方法によって、本実験の範囲では大きく変わらない。したがって、今回検出された AE 信号の周波数は、主軸系や被削材系のもつ周波数に関係ないといえる。接触検知で検出された AE 信号の周波数も第 5 章で検出された切削に伴う信号周波と同様の値となった。

さらに、本実験中に隣接する工作機械の電源起動やマシニングセンタの自動オイル給油により本計測システムは、突発的なノイズを検出することがあった。突発的なノイズの信号は接触の信号と比べて小さいが、0.1, 0.5 および 1 MHz 付近に特徴的な周波数がみられた。実際の加工現場では、様々なノイズが存在するため、工具刃先位置の検出のみを行う場合、接触に伴う信号のみを検出できればよいので、機械ノイズ、背景ノイズおよび突発的なノイズを除去するため、0.2 ~ 0.5 MHz 程度のバンドパスフィルタを用いることが望ましい。

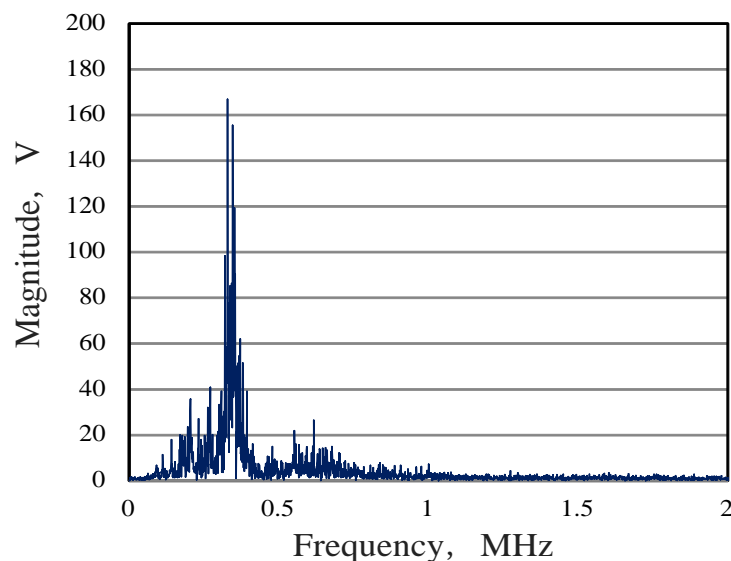


Fig. 6.15 Frequency analysis of the AE signal waveform at the tool contact area.

本機上計測システムにおける工具刃先位置補正について検討する．本システムは，被削材への接触により工具刃先の位置情報を検出するため，アプローチ速度に合わせて補正する必要がある．工具刃先位置を補正することで，高精度な計測が可能になる．本実験において補正したときの Z 軸方向の位置座標値は図 6.11 より次の式 (6.3) で表すことができる．

$$Z_{\text{pos}} = Z_c + 0.78 \times 10^{-3} F_{\text{ap}} \quad (6.3)$$

ここでは，補正した Z 軸方向の Z 座標値を  $Z_{\text{pos}}$  mm, アプローチ速度を  $F_{\text{ap}}$  mm/min とする．工具が停止したときのマシニングセンタから取得した Z 座標値を  $Z_c$  mm とする． $Z_{\text{pos}}$  ,  $Z_c$  は機械座標系の値でありマイナスの値となる．

式 (6.3) の  $0.78 \times 10^{-3}$  の係数は，本実験で取得した図 6.11 の直線の傾きの値を使用しており，この係数が工具補正值となる．式 (6.3) を使用することで，実加工状態での工具の刃先位置座標を求めることができ，工具刃先位置や工具長の補正も可能となる．これにより，遅れを考慮した工具刃先位置情報を取得でき，複数の工具を用いた場合の工具間の仕上げ面段差を最小限に抑えることができる．X 軸方向の工具径の計測に関しても同様のことがいえる．

### 6.2.5 まとめ

実機に搭載した AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムを提案し，実加工状態においてスクエアエンドミルを X, Z 軸の方向から被削材に接触検知させ，工具刃先位置の計測を行った．本節で得られた結果は以下のとおりである．

- (1) 本機上計測システムの構成により， $\phi 10$  mm,  $\phi 0.2$  mm のエンドミルの大きさ，アプローチ速度に関係なく，AE 技術を用いて接触検知することができ，AE 信号を割込み信号として，マシニングセンタへ入力し工具を停止させることができた．そのとき接触検知により検出した接触痕の深さは，アプローチ速度 1 mm/min のとき平均で 1.5  $\mu\text{m}$  であり，標準偏差  $\sigma = 0.2 \mu\text{m}$  以下であった．本実験で使用したマシニングセンタの繰り返し精度の検査値は，X, Z 軸方向ともに  $\pm 0.4 \mu\text{m}$  である．本機上計測システムの計測精度は，繰



り返し精度以下のばらつきであった。本実験により構築した AE 技術を用いた機上計測システムの信頼性、有効性を示せた。

- (2) AE 原波形，マシニングセンタのシステム変数および接触痕深さの測定することにより，システム全体の遅れとして，割込み信号検知遅れとマシニングセンタの制御系の遅れを計測することが可能である。
- (3) 機上計測システムにおいて，マシニングセンタの制御系の遅れ時間は，アプローチ速度に関わらず，X，Z 軸共に 80 ms 程度であり，マシニングセンタの特性によるものであることがわかった。システム全体の遅れ量は，アプローチ速度と比例関係があり，アプローチ速度が 1 mm/min の増加するごとに，0.78  $\mu\text{m}$  の割合で遅れが発生することを確認できた。この値を工具径・長の補正值とすることにより，正確な刃先位置の計測が可能である。

## 6.3 機上計測システムの評価

### 6.3.1 目 的

本機上計測システムを構築し，スクエアエンドミルを X，Z 軸の方向から接触検知させて，工具刃先位置の計測を行った。その結果，被削材に対して，接触痕が生じ，その接触痕の深さは，アプローチ速度と比例していることがわかった。これにより本機上計測システムにおけるアプローチ速度と接触痕深さの関係を明らかにした。

現在，実用化されている工具刃先等の計測システムにおいては，複数の工具を用いた場合に工具間の仕上げ面段差が 1  $\mu\text{m}$  程度生じることが報告されている<sup>2)</sup>。本機上計測システムが，実際の加工現場でも活用可能であるかを評価する必要がある。

そこで，本節では，機上計測システムで工具刃先位置を計測し，第 6 章の式 (6.3) のアプローチ速度と接触痕深さの関係式により，Z 軸方向の工具刃先位置の補正を行い，補正值を含んだ工具刃先位置を求める。複数の工具を計測し，それぞれ平面を加工して段差測定をすることで，実際の生産現場の環境下で活用の有効性を検討した。仕上げ面段差を 1  $\mu\text{m}$  以内，加工深さをマシニングセンタの繰り返し精度より高精度な計測の可能性を評価した。

### 6.3.2 実験方法

本機上計測システムの評価では、実際の生産現場の作業と同様に、工具が折損または摩耗した場合に新しい工具と交換後、工具刃先位置を再計測・補正し加工することを想定している。工具刃先位置の計測については、Z 軸方向の工具長の補正について検証した。図 6.16 は加工面段差および切込み深さに関する実験概要図を示す。工具は同種類の  $\phi 10\text{ mm}$  超硬スクエアエンドミル工具 (A), (B) を用いた。 $\phi 0.2\text{ mm}$  は、工具 (A), (B), (C) の 3 本を用いた。工具刃先位置の補正については、式 (6.3) を用いた。本実験は、工具計測のためアプローチ速度  $F_{ap} 1\text{ mm/min}$  とし、補正值は  $0.78\text{ }\mu\text{m}$  とした。1 本目の工具の工具刃先位置を図 6.16 (P) で接触検知により計測し、工具と被削材間の相対距離の差を式 (6.3) により補正する。その後、切込みを与えて平面加工する。同様に 2, 3 本目の工具を用意し計測、補正、切込み、平面加工を行い、平面間の段差を測定することで機上計測システムの評価を行う。

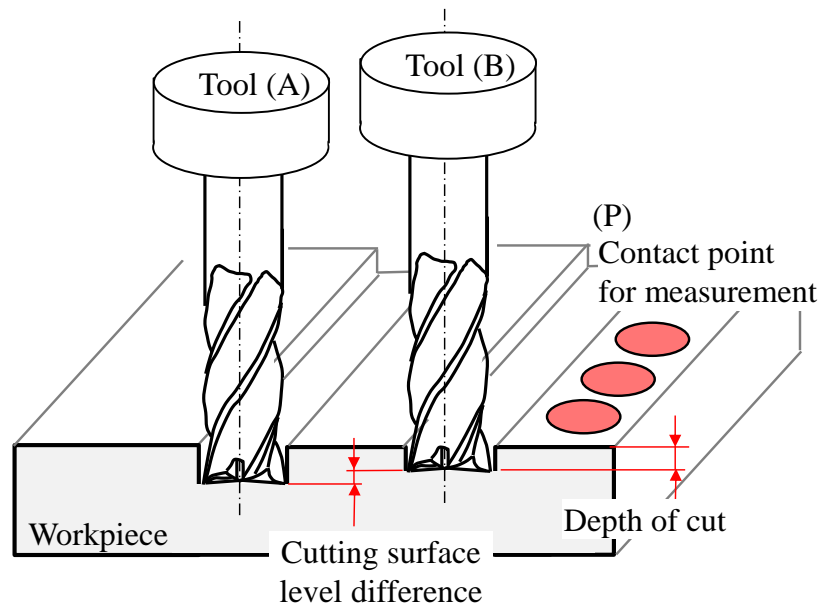


Fig. 6.16 Outline of experiment on cutting surface level difference and depth of cut.

本システムの評価方法の詳細を以下にまとめる。

- (i) 工具 (A) を図 6.16 (P) で Z 軸方向に接触させ、工具が停止した位置を工具刃先位置として測定する。この測定は 3 回行い、その 3 回の平均値から工具刃先位置を求める。刃先位置計測のアルゴリズムについては後述する。
- (ii) 工具刃先位置を式 (6.3) に代入することで、本機上計測システムの補正値を加算され、真の工具刃先位置  $Z_{pos}$  を求める。
- (iii) 工具 (A) で切込みを与えて、平面加工する。
- (iv) 工具 (B) に交換後、(P) からずらした位置で①と同様に工具刃先位置を測定する。
- (v) (ii) と同様に工具刃先位置を補正し、切込みを与えて平面加工する。
- (vi) 図 6.16 に示す加工面段差および切込み深さを測定する。
- (vii) (i) ～ (vi) の実験を数回行うことで、機上計測システムの検証を行う。

表 6.3 は検証条件を示す。被削材は機械構造用炭素鋼鋼材 (S50C) を使用し、寸法は  $75 \times 35 \times 15$  mm とした。被削材は研削加工により、算術平均粗さ  $Ra$   $0.1 \mu\text{m}$  以下にした。切削速度は工具メーカーのカatalog値を参考にし、 $\phi 10$  mm は切削速度  $80$  m/min、 $\phi 0.2$  mm はマシニングセンタの最高回転速度から  $12.5$  mm/min にした。工具刃先位置計測のための Z 軸方向のアプローチ速度は  $1$  mm/min、平面切削時は  $1, 10$  mm/min とした。

本機上計測システムは、接触の際に検出される AE 信号にしきい値を用いて背景ノイズと接触信号を弁別している。しかしながら、この方法でも突発的なノイズにより接触信号を誤認する可能性がある。そこで、この問題を解決するため、および計測の精度を向上させるために、工具刃先位置計測に関して簡単なアルゴリズムを検討した。刃先位置のアルゴリズムは、システムの評価方法の (i)、(iv) において、同一工具刃先位置を接触検知により 3 回計測を行い、3 回の値が設定した標準偏差よりも小さい値であれば、3 回の平均値を工具刃先位置としている。なお、設定値は、3.3 節の垂直・水平アプローチ時の標準偏差  $\sigma = 0.1 \mu\text{m}$  としている。

図 6.17 はシステムを評価するためのプログラムのフローチャートを示す。システム評価プログラムでは、マシニングセンタのコモン変数を使用する。コモン変数とはメインプログラムとマクロプログラムのどちらからも使用できる共通



の変数である。本実験では、コモン変数は#100～#105 までの番号を用いた。#100～#102 には3回の計測における工具が停止した際のZ軸の座標値が保存される。#103 は3回の計測値から平均値の計算結果が保存される。#104 は#100～#102 の計測結果の標準偏差が目標の標準偏差（#105）以下であることを確認される。標準偏差が目標値以下であれば計測は終了し、それ以上であれば、#104 が#105 以下となるまで繰り返し3回の計測を行った。計測終了後、工具刃先位置補正值に#103 と実験に使用したアプローチ方法、アプローチ速度における補正值を加算した。

Table 6.3 Verification conditions of on-machine measurement system.

Tool	Square end mill, Carbide (TiAlN-based coating)	
	4 blades	2 blades
Diameter	$\phi$ 10 mm	$\phi$ 0.2 mm
Workpiece	S50C (75 mm×35 mm×15 mm)	
Cutting speed $V$ (Spindle speed)	80 m/min (2560 min <sup>-1</sup> )	12.5 m/min (20000 min <sup>-1</sup> )
Approach speed $F_{ap}$	1 mm/min	
Cutting speed $F$	1, 10 mm/min	
Depth of cut $a_a$	10 $\mu$ m	20 $\mu$ m
Approach direction	Z - axis direction	
AE sensor attachment position	Vice	Workpiece
Sampling frequency	3.9 MHz	
AE amplification factor	60 dB	
Threshold	$V_L$ 20 mV, $V_H$ 50 mV	$V_L$ 20 mV, $V_H$ 55 mV
AE high-pass filter	100 kHz	

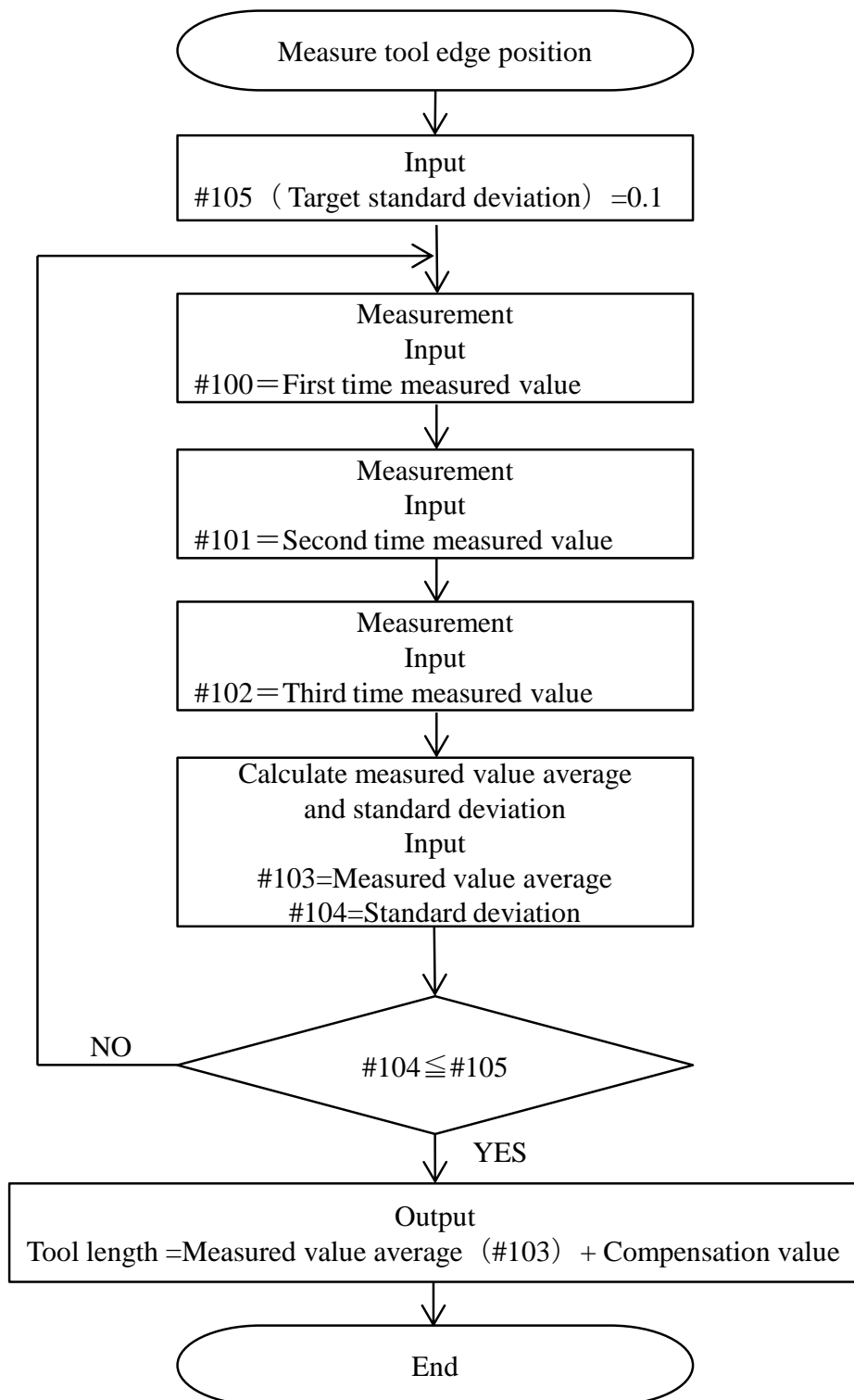


Fig. 6.17 Flowchart of the program for evaluating the system.

### 6.3.3 実験結果および考察

表 6.4 はマシニングセンタに保存された工具刃先位置の機械座標値の一例を示す。図 6.17 のプログラムより、#100～#102 の値は工具刃先位置を示す。これらの値より計算された標準偏差#104 は設定した値 #105 の  $0.1\ \mu\text{m}$  以下であり、計測に問題がないことがわかる。同じ条件で  $\phi 10\ \text{mm}$ 、 $\phi 0.2\ \text{mm}$  のエンドミルにより数回工具刃先位置の計測を行ったが、今回の実験では、すべて設定した標準偏差内であった。システムを評価するために製作したプログラムは、フローチャート通りに機能し、工具刃先計測に関して、検討したアルゴリズムは問題ないといえる。

その後、表 6.4 の工具 (A)、(B) の計測した平均値#104 に補正值を加算し、切込み深さを与えて平面を加工した結果を図 6.18、6.19 に示す。図 6.18、6.19 はそれぞれ  $\phi 10\ \text{mm}$ 、 $\phi 0.2\ \text{mm}$  の実験結果である。図の (b)、(c) は (a) に示す平面の段差および切込み深さを測定したものである。図 6.18 の  $\phi 10\ \text{mm}$  エンドミルに関しては、平面加工時に工具を半径分重ねて加工した。工具 (A) の加工部は、切れ刃全体の加工痕がみられ、工具 (B) の加工は、半径分の加工痕が観察できる。このことより、工具 (A) の方が深く加工したことがわかる。

Table 6.4 Machine coordinate values of tool cutting edge position obtained from machining center.

Common variable		Calculation item	Measured value ( $\mu\text{m}$ )
Tool (A)	#100	measured value 1	-192729.1
	#101	measured value 2	-192729.3
	#102	measured value 3	-192729.2
	#103	Measurement average	-192729.2
	#104	Standard deviation	0.082
	#105	Target standard deviation	0.1
Tool (B)	#100	measured value 1	-194166.4
	#101	measured value 2	-194166.5
	#102	measured value 3	-194166.4
	#103	Measurement average	-194166.4
	#104	Standard deviation	0.047
	#105	Target standard deviation	0.1

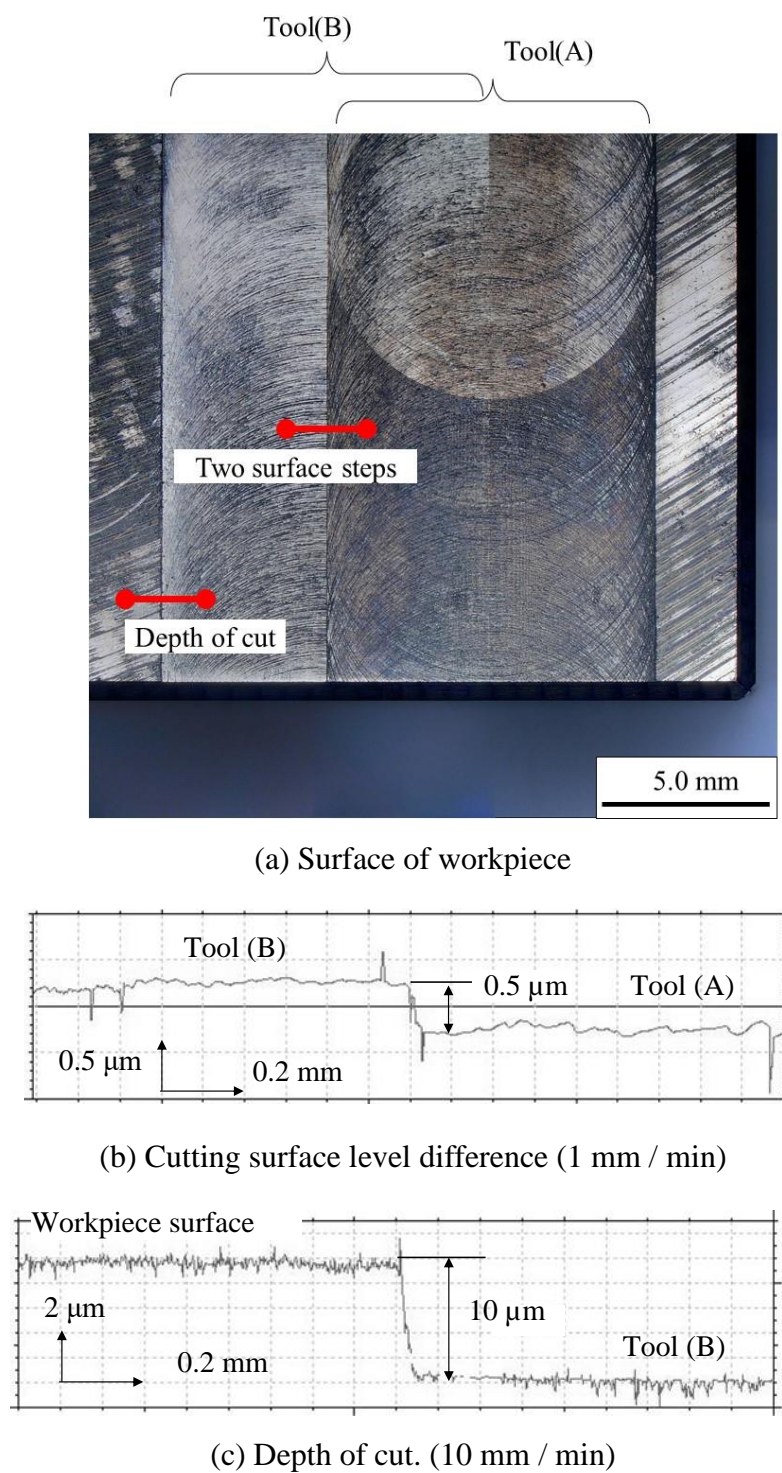
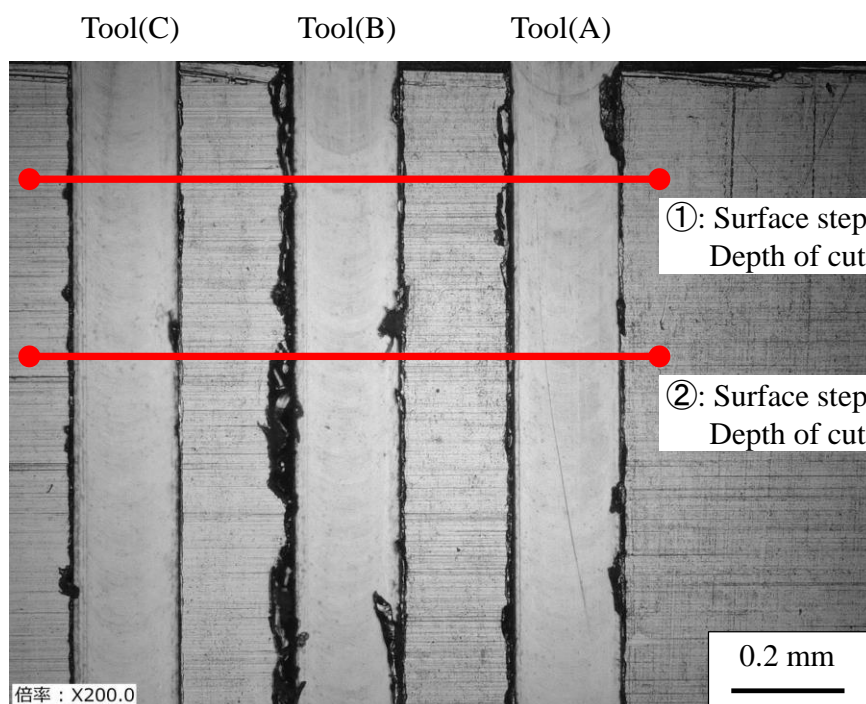
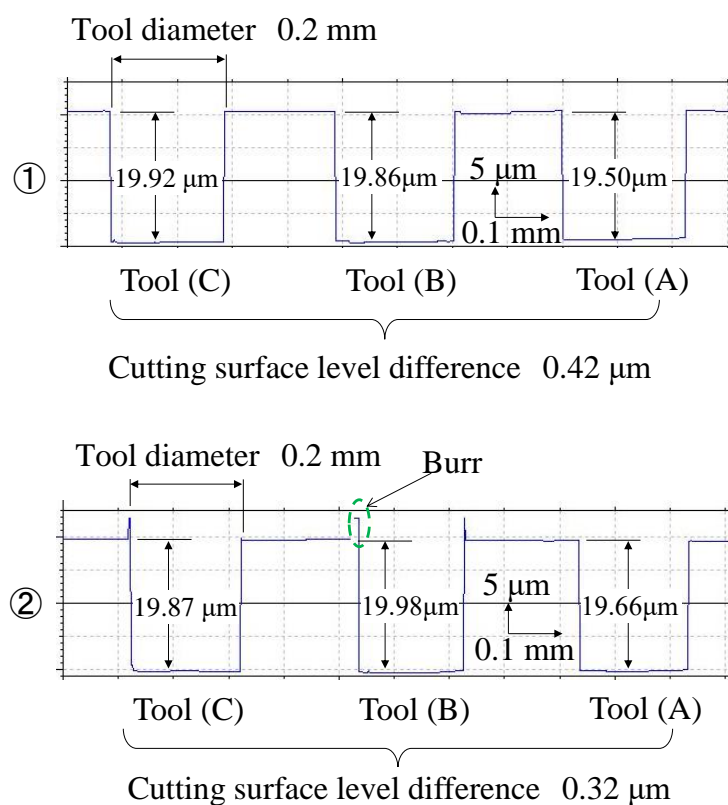


Fig. 6.18 Cutting surface level difference and depth of cut in  $\phi$  10 mm square end mill.



(a) Surface of workpiece.



(b) Cutting surface level difference and depth of cut of different tools (1 mm/min).

Fig. 6.19 Cutting surface level difference and depth of cut in  $\phi 0.2$  mm square end mill.

その時の2平面の段差は、 $0.5\ \mu\text{m}$ 程度であった。また、切込み深さは、加工寸法  $10\ \mu\text{m}$  に対して  $10\ \mu\text{m}$  程度であり誤差がみられなかった。図 6.19 の  $\phi 0.2\ \text{mm}$  エンドミルに関しては、3本の工具を用いて、システムの評価を行った。3平面の段差は最大  $0.42\ \mu\text{m}$  であり、切込み深さは、加工寸法  $20\ \mu\text{m}$  に対して①と②より最大で  $0.5\ \mu\text{m}$  の誤差がみられた。

図 6.18, 6.19 の結果より、工具径の大小に関わらず、異なる工具間の段差は、約  $0.5\ \mu\text{m}$  となった。評価のために数回行ったが、同じような結果であった。この誤差は実験に使用したマシニングセンタの繰り返し位置決め精度（Z 軸方向  $\pm 0.4\ \mu\text{m}$ ）以下であり、許容範囲内といえる。現在実用化されている工具刃先等の計測システムは工具間の段差  $1\ \mu\text{m}$  であり、本機上計測システムを使用した方が高精度な加工を実現できる。また、工具刃先位置の補正である切込み深さに関しては、目標値に対して最大で約  $0.5\ \mu\text{m}$  の誤差であった。工具刃先位置は、3.2 節の式 (6.3) によって補正が可能であることがわかった。

したがって、本研究で構築した AE 技術を用いた機上計測システムの有効性が確認できた。有効性を示せたことにより、工具刃先位置の平均値を使用することや標準偏差を用いた工具刃先位置検出の精度の確認する計測アルゴリズムは問題ないといえる。

#### 6.3.4 まとめ

本実験で構築した AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムにより、工具刃先位置の計測を行い、6.2 節で求めた補正值を活用して評価を行った。本節で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 機上計測システムを行うためのプログラムにより、工具刃先位置の検出および工具補正により工具刃先位置を求めることができた。
- (2) 異なる工具間の仕上げ面段差は最大で  $0.5\ \mu\text{m}$  となり、使用したマシニングセンタの繰り返し位置決め精度以下の値となった。また、切込み深さの誤差は約  $0.5\ \mu\text{m}$  であり、システムの全体の遅れ量から求めた補正值により高精度な加工ができることがわかった。

- (3) 本システムの評価により、システムの有効性を示せたことで、計測のアルゴリズムに問題ないといえる。
- (4) 提案した機上計測システムは、各種 AE 信号など AE 評価パラメータを用いており、その信号をマシニングセンタに取り込むことで、工具の停止や工具交換指令などを誘導・制御している。接触検知や加工状態に監視においても、この AE 評価パラメータから、接触の有無、切削状態の良否を判断している。したがって、第 1 章の機上計測システムに要求される基本性能たすことが可能といえる。

## 6.4 実用化のための工具アプローチの検討

### 6.4.1 目 的

6.2 節、6.3 節により、構築した機上計測システムの有効性を示せた。しかしながら、本システムの工具刃先位置計測においては、工具を被削材に接触させることにより、システム全体の遅れが生じ、切削痕が残る。特にマシニングセンタの制御応答の遅れは、工作機械の仕様で決まっており、機械保護の観点からその遅れの短縮は難しい。

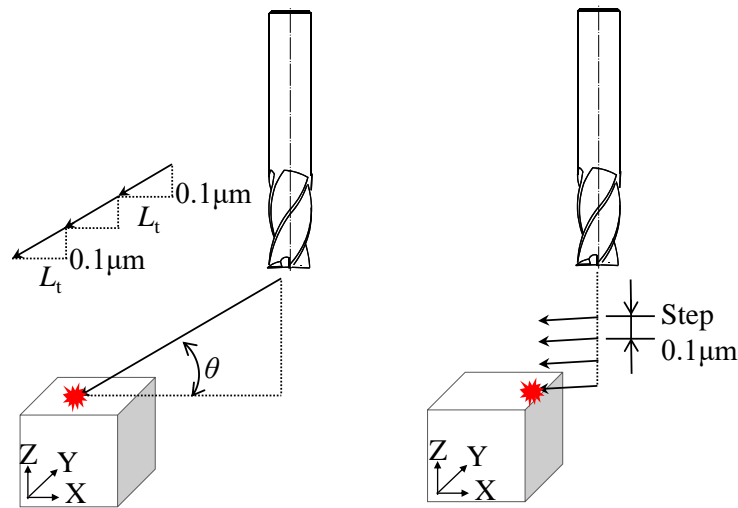
本節では、機上計測システムの更なる実用化に向けて、切削痕を最小限に抑えることを目的として、アプローチ方法を提案し検討を行った。工具のアプローチとして、傾斜方向および Z 軸方向のステップ・アプローチによるそれぞれの方法について検証した。それぞれのアプローチ方法による接触検知時の AE 信号の収集・解析および被削材への接触深さの影響について検討した。

### 6.4.2 実験方法

実験システムは、6.2 節の図 6.3 で使用した機上計測システムを用いた。接触痕深さを最小限にするために、工具刃先計測のアプローチの方法として、図 6.20 に示す 2 つの方法を提案しそれぞれ実験を行う。図 6.20 (a) は、XZ 軸方向への傾斜によるアプローチ、図 6.20 (b) は被削材に接触しない位置で Z 軸方向に 0.1  $\mu\text{m}$  切込み、X 軸方向から水平にアプローチし、接触しなければ工具を退避させ、

接触するまで動作を繰り返すステップ・アプローチの方法を示している．このアプローチは，第4章で行ったものと同じである．

実験条件を表 6.5 に示す．工具は  $\phi 10$  mm のエンドミルを使用する．ここで，傾斜アプローチによる角度は，垂直方向による工具アプローチの結果で得た制御系応答の遅れ時間の約 80 ms を考慮する．図 6.20 (a) に示す傾斜アプローチの角度は，Z 軸方向をマシニングセンタの最小指令値である  $0.1\ \mu\text{m}$ ，X 軸方向を制御系応答の遅れ時間に相当する距離  $L_t$  としたときの傾きである．傾斜アプローチに使用する X 軸方向の距離  $L_t$  は，10，80，100 ms に相当する距離に変更した．なお，距離  $L_t$  および傾斜角度はアプローチ速度ごとに計算して決定している．アプローチ速度 1，10，50，100 mm/min とし，それぞれ 3 回ずつ測定を行う．被削材は，微小な切削痕を観察するため，ラップ処理を施した S50C を使用した．なお，被削材の算術平均粗さ  $Ra$  は  $2.9\ \text{nm}$  であった．計測条件も 6.2 節の  $\phi 10$  mm のエンドミルを使用したときと同一条件とした．



(a) Inclination angle approach.

(b) Step approach.

Fig. 6.20 Method of tool approach.



Table 6.5 Experimental conditions for inclination angle approach and step approach.

Tool	$\phi$ 10 mm, Square end mill, Four blades
Workpiece	S50C (85 mm×35 mm×15 mm)
Cutting speed $V$	80 m/min (2560 min <sup>-1</sup> )
Approach speed $F_{ap}$	1, 10, 50, 100 mm/min
Approach direction	Z - axis direction XZ - axis direction inclination angle Angle corresponding to Fig.6.20(a) $L_t$ ( $L_t$ = Distance corresponding to 10, 80, 150 ms) Z - axis direction step
AE sensor attachment position	Vice
Sampling period	3.9 MHz
AE amplification factor	60 dB
AE high-pass filter	High-pass : 100 kHz

#### 6.4.3 実験結果および考察

表 6.6 は、アプローチ速度の違いによる傾斜アプローチとステップ・アプローチの被削材表面の接触深さである。比較のために垂直アプローチ（90°）のときの接触深さも追記した。このシステムにより傾斜アプローチおよびステップ・アプローチでも、刃先位置情報を取得できた。表 6.6 より、傾斜アプローチにおいて、接触深さは傾斜の角度に関わらず、ほぼ一定の値を示した。図 6.21 に表をグラフ化したものを示す。図 6.21 (a) は、垂直、傾斜、ステップ・アプローチのすべてを示したもので、(b) は接触深さ 0~0.7  $\mu\text{m}$  までを拡大したものである。図 6.21 より、傾斜アプローチの方が垂直アプローチより接触深さが小さくなることがわかる。また、傾斜アプローチは、アプローチ速度に関わらず、ほぼ一定の値を示した。傾斜アプローチによる接触深さは、アプローチ速度や傾斜角度に関わらず、ほぼ同等となり、平均すると 0.35  $\mu\text{m}$  であった。ステップ・アプローチでは、マシニングセンタの最小指令値の 0.1  $\mu\text{m}$  の接触深さとなった。

傾斜アプローチによる切込み深さは、理論的に図 6.20 の距離  $L_t$  を大きくすれば傾斜が緩やかになり、接触痕深さは小さくなる。 $L_t$  を 80 ms に相当する X 軸方向の距離とした場合、理想では工具の接触深さは 0.1  $\mu\text{m}$  程度になる。さらに 150 ms にした場合傾斜角度が小さくなるため、接触深さも小さくなるはずであ

る。しかしながら、傾斜が緩やかであっても切込み深さはほとんど変わらなかった。これは、マシニングセンタが割込み信号を検出するタイミングによるものであると考えられる。この割込み信号の検出については、図 6.22 に示すアプローチ方法の違いによる AE 信号よりわかる。

図 6.22 (a) は傾斜アプローチ速度 10 mm/min,  $L_t=80$  ms に相当する距離, 傾斜角度  $0.5^\circ$  の AE 信号である。図 6.22 (b) は比較のために垂直アプローチで取得した AE 信号を示す。図 6.22 (a), (b) の波形は AE 原波形とイベント信号であり、イベント信号は、AE 原波形を処理したエンベロープ信号が、設定したしきい値を越えたときに出力される。そして、イベント信号が 1 ms 以上持続した場合にマシニングセンタが割込み信号として検出し、工具が停止し退避する。したがって、図 6.22 (b) の垂直アプローチでは、工具の切れ刃全体が被削材に接触し、接触と同時に大きな AE 信号が検出され、マシニングセンタにすぐに割込み信号が入力されている。このため、垂直アプローチの接触深さは、割込み信号検出においてばらつきが少なく、制御系の遅れによるものとなる。

図 6.21 (a) の傾斜アプローチでは、傾斜が緩やかであるため、接触初期は工具切れ刃による被削材への接触が小さく、AE 信号の振幅も小さい。そして、送りの進行とともに、工具切れ刃の接触、つまり切削量が大きくなり、AE 信号も大きくなる。このときにイベント信号が設定したしきい値を超えると割込み信号として検出される。このため、傾斜アプローチでは、イベント信号の検出が遅れ、マシニングセンタが信号検出できずに理想どおりの接触深さにはならなかった。

しかしながら、垂直アプローチの接触深さは約  $1.5\ \mu\text{m}$  であったが、傾斜アプローチによる工具刃先位置の検出は、アプローチ速度に関わらず接触深さ  $0.35\ \mu\text{m}$  と小さく、実際の切削条件での計測が可能なため有効である。

6.2 節で述べたように本機上計測システムにおける実験の開始位置は、あらかじめ使用する工具長および座標系設定の計測を行っていることから、被削材上面から  $0.1\ \text{mm}$  の高さとしている。例えば、 $0.5^\circ$  の傾斜でアプローチすると Z 軸方向が  $0.1\ \text{mm}$  のとき、X 軸方向にはおよそ  $11.5\ \text{mm}$  のアプローチ距離が必要となる。そのため実際の加工現場では、傾斜角度を保ちながら円補間によるヘリカルやスパイラルのアプローチに変更するなど対応すれば実用的である。アプロ

一チ速度を速くしても接触深さに違いがないので、加工速度と同条件での計測が可能となる。

Table 6.6 Contact depth of the workpiece surface of inclination angle approach and step approach with approach speed change.

Time to feed in the X-axis direction (ms) Approach speed (mm/min)		Vertical	Inclination			Step
		0	10	80	150	-
100	Inclination angle (°)	90	0.34	0.04	0.02	0
	Contact depth (μm)	77.3	0.5	0.2	-	0.1
50	Inclination angle (°)	90	0.7	0.1	0.05	-
	Contact depth (μm)	40.9	0.6	0.1	0.3	-
10	Inclination angle (°)	90	3.44	0.44	0.23	-
	Contact depth (μm)	10.2	0.4	0.4	0.3	-
1	Inclination angle (°)	90	34.4	4.4	2.3	-
	Contact depth (μm)	1.4	0.5	0.3	0.4	-

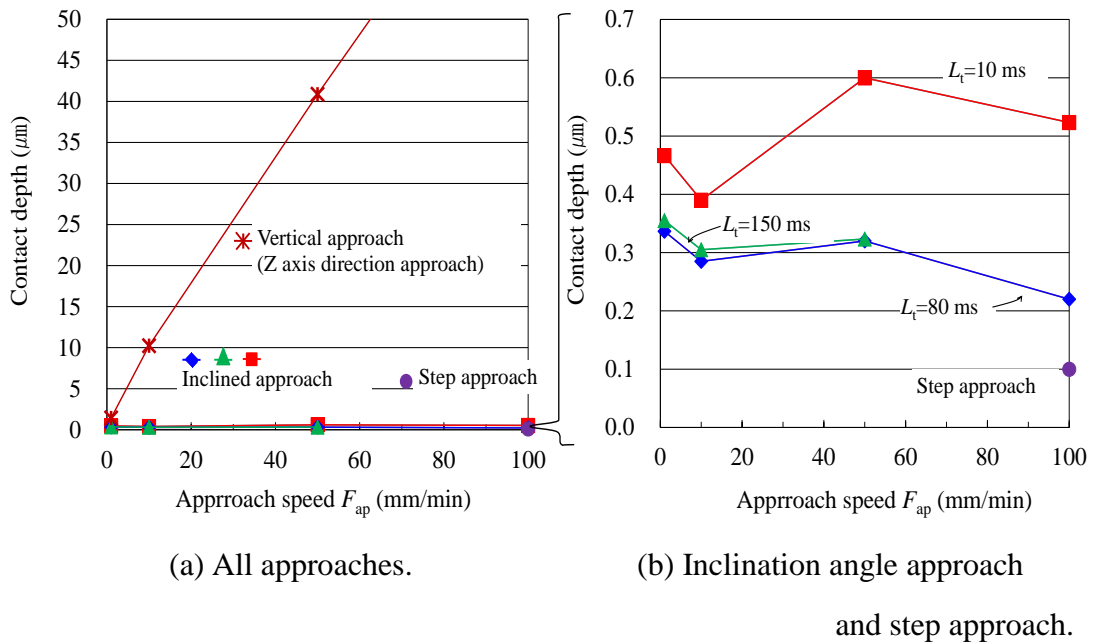
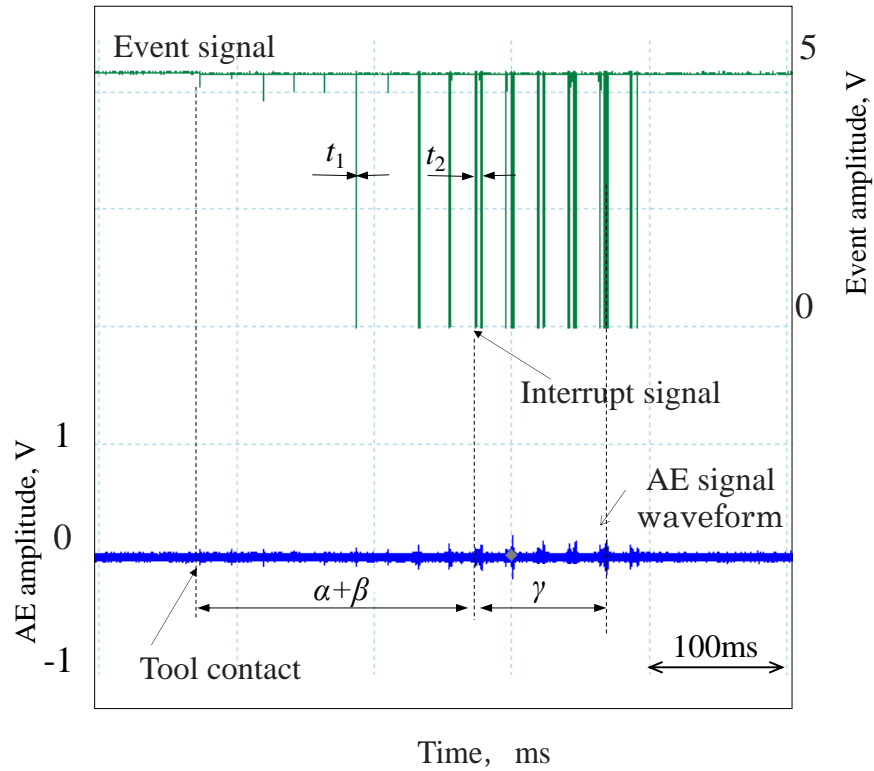
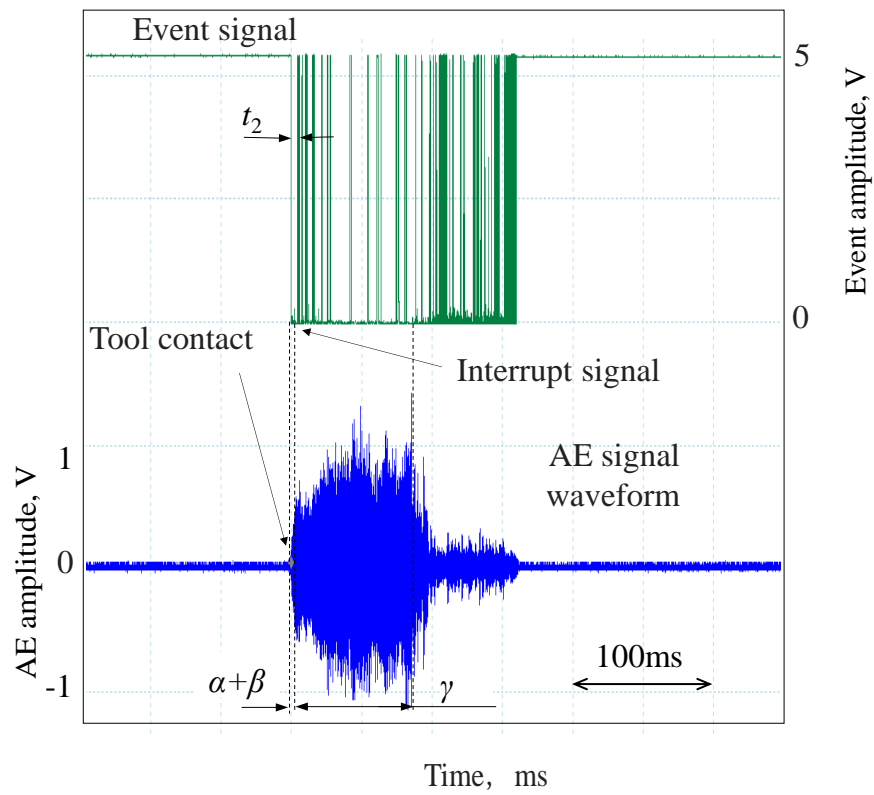


Fig. 6.21 Relationship between contact depth and approach direction.



(a) Inclination angle approach (approach speed 10 mm/min,  $L_t=78$  ms).



(b) Z-axis direction approach (approach speed 10 mm/min).

Fig. 6.22 AE signal waveform at the approach direction difference.

#### 6.4.4 まとめ

機上計測システムの実用化に向けて、構築した計測システムにおいて、切削痕を最小限に抑えることを目的として、被削材への接触アプローチ方法について検討した。アプローチ方法として傾斜アプローチとステップ・アプローチによる接触を試みた。本節で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 構築したシステムを用いて、傾斜アプローチおよびステップ・アプローチによる工具刃先位置の計測することができ、これらのアプローチは有効であることがわかった。
- (2) 傾斜アプローチでは、傾斜角度、送り速度にあまり関係なく、接触深さが平均で  $0.35\ \mu\text{m}$  であり、垂直アプローチの  $1/4$  程度となった。ステップ・アプローチでは、接触深さが約  $0.1\ \mu\text{m}$  であり、最小限に抑えることができた。

#### 6.5 結 言

本章では、前章までの結果を受けて、AE 技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムの構築を行い、AE 信号の検出によりシステムの応答性や信頼性を検討した。また、異なるエンドミルの刃先位置の計測を行い、5.2 節で求めた補正值を加え、それぞれの工具で仕上げの切込み深さを与えて被削材を加工した。二つの加工面の段差および深さを測定することで AE 技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムを評価した。さらに、実用化のための工具アプローチの検討として、工具刃先位置を計測する際に生じるシステムの遅れにより切削痕の深さを少なくするアプローチ方法を提案し検討した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 構築した本機上計測システムにより、 $\phi 10\ \text{mm}$ 、 $\phi 0.2\ \text{mm}$  のエンドミルの大きさ、アプローチ速度に関係なく AE 技術を用いて接触検知することができ、AE 信号を割込み信号として、マシニングセンタへ入力し工具を停止できた。そのとき接触検知により検出した接触痕の深さおよびばらつきの確認によりシステムの信頼性、有効性を示せた。

- (2) 機上計測システムにおいて、マシニングセンタの制御系の遅れ時間は、X、Z 軸共に 80 ms 程度であった。また、システム全体の遅れ量は、アプローチ速度と比例関係にあり、アプローチ速度が 1 mm/min 増加するごとに、0.78  $\mu\text{m}$  の割合でシステム全体の遅れが生じることが確認できた。
- (3) 機上計測システムは、設定したしきい値を超えた信号をマシニングセンタに取り込むことで、工具の停止や工具交換指令などを誘導・制御するシステムとなっている。第3、5章の切削状態の監視において、しきい値を超えた信号により、切削状態の異常を検出しているため、構築した機上計測システムは、工具刃先位置計測以外に切削状態の監視にも活用可能である。
- (4) 機上計測システムによる工具刃先位置の計測では、異なる工具間の加工面段差は最大で 0.5  $\mu\text{m}$  となり、使用したマシニングセンタの繰り返し位置決め精度以下の値となった。また、切込み深さの誤差は最大 0.5  $\mu\text{m}$  であり、システムの全体の遅れ量から求めた補正值により高精度な加工ができた。
- (5) 構築したシステムを用いて、傾斜アプローチおよびステップ・アプローチによる工具刃先位置の計測可能で、接触痕深さを最小限に抑えることができ、これらのアプローチ方法の有効性を示した。
- (6) 緒論にて示した①、②、③は、AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムにより要件を満たすことができる。④、⑤については、結言 (1)、(2) より機上計測システムの信頼性、有効性を示した。⑥の加工面段差においては、結言 (4) より最大で 0.5  $\mu\text{m}$  となり現状の計測システム以上のシステムを構築できた。⑦、⑧については、結言 (3) より、各章の実験結果より、構築した機上計測システムはインプロセスも可能である。したがって、本システムは提案した①～⑧の基本性能を満たすことができ、現状の計測システムより優位である。

## 参考文献

- 1) 中部職業能力開発促進センター，フレックスシステム株式会社：カスタムマクロによる NC 工作機械カスタマイズ技術講習会テキスト，(2016)，p.36.
- 2) 倉橋康浩：最近のマシニングセンタにおけるオンマシン計測技術，機械技術，Vol.58，No.4，(2010)，pp.35–37.

## 第7章 結 論

### 7.1 本研究の成果

本論文では、AE 技術を用いた実験装置を用いて、超精密加工領域の高精度加工を特徴とするダイヤモンド工具による超精密旋盤および断続切削を特徴とするエンドミル工具によるマシニングセンタの工具刃先位置の検出を試みた。超精密旋削加工においては、切削状態の監視として加工条件の変更を行い、安定加工時に検出される AE 信号と切削条件の相関を検討した。また、マシニングセンタ加工においては、工具摩耗と AE 信号の関係性について検討した。さらに、マシニングセンタにおいて、AE 技術を用いた機上計測システムを構築し評価・検証した。その結果、本研究で得られた研究成果は以下のとおりである。

第 1 章では、知能化された工作機械に必要な要素である工具刃先位置計測のプリプロセス計測と切削状態の監視のインプロセス計測に焦点をあて、現在の計測システムの問題点を挙げた。工具刃先位置計測と切削状態の監視の二つの計測を可能とするシステムの実現が求められることを述べ、AE 技術が最適であると判断し、本研究の目的を提示した。

第 2 章では、超精密加工領域の旋削加工において AE 技術を用いた工具と被削材の接触検知による適応範囲の検討および切削初期の切削状態の監視を行った。その結果、最小で切込み深さ 10 nm でダイヤモンド工具と被削材の接触を検知でき、AE 技術を用いた工具と被削材の接触検知の適応範囲を確認した。このとき検出された切削初期の AE 信号から連続的な波形や断続的な波形が観察され、その違いにより被削材の取付け状態も把握することができた。また、AE 信号の波形より、工具刃先と被削材の切削領域（接触弧長さ）が増加すると AE 信号振幅も増加することが確認できた。

以上より、実加工状態での接触検知が可能であり、工作機械の熱変形を含んだ工具刃先位置の検出に有効であり、切削状態の監視の可能性もみられた。



第3章は、超精密旋盤において微小切削における切削状態の監視を行なうために、切削条件を変更したときのAE信号を検出した。AE技術が切削状態の監視のためのセンサとしての有用性についての検討を行った。その結果、切削条件とAE平均値の関係において、切削速度、切込み深さおよび送り速度の増加に伴い、AE平均値は大きくなった。切削速度に関するFEM解析の結果より、せん断領域におけるひずみエネルギーとAE平均値は関係があることがわかった。AE原波形やAE平均値電圧の観察により、安定切削状態のときは、AE信号に変化はみられないが、不安定な切削状態のときはAE信号の連続的な波形が不安定になり、突発的なAE信号が検出された。この変化は、しきい値を用いることにより切削状態の異常を判断できると考えた。

以上より、AE技術による切削状態の監視および切削状態の異常の判断は可能であるといえる。

第4章では、一般加工のフライス加工においてマシニングセンタによるAE技術を用いた工具と被削材の接触検知による適応範囲の検討を行った。その結果、 $\phi 10\text{ mm}$ のエンドミルでは外周刃加工、底刃加工のそれぞれの切削方式に関わらず、切込み深さ  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  で被削材の接触を検知できた。 $\phi 0.2\text{ mm}$ の小径エンドミルでも底刃加工において、切込み深さ  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  で被削材の接触を検知できた。ボールエンドミルでは、概算切込み深さ約  $40\text{ nm}$  でAE信号を検出することができた。被削材の傾斜角度が大きい、すなわち実切削速度が大きい方が切削初期のAE信号の検出感度が高いことがわかった。このことは、第2, 3の切削速度とAE平均値の結果と同様となった。AE技術を用いた工具と被削材の接触検知の適応範囲を確認した。

以上より、実際の加工環境下において、AE技術を用いてエンドミルおよびボールエンドミルと被削材の接触検知により、工作機械の熱変形等を含んだ回転時の動的な工具の振れの刃先位置の計測に有効であるといえる。

第5章では、AE技術を利用した実験装置およびマシニングセンタを用いて、ステンレス鋼（SUS304）のスクエアエンドミルの側面加工を対象とし、工具の摩耗状態の監視を試みた。一般的な加工の評価に使用される工具摩耗、切削力お

よび被削材の仕上げ面粗さと AE 信号の関係を検討した。その結果、工具摩耗幅の増加とともに切削力および被削材の仕上げ面粗さは増加するが、AE 実効値はほぼ変化ないことがわかった。しかしながら、AE 原波形にしきい値を設定して AE 計数で評価することにより、定常摩耗域では工具摩耗が進行すると AE 計数も増加傾向を示した。その他に、AE 信号の周波数解析を行い、工具摩耗幅が増加すると、工具刃先の鈍化により被削材への食付きが悪くなり、定常の切削状態よりも低周波数成分をもつ AE 信号が検出される頻度が多くなることがわかった。さらに摩耗が進行し、被削材に凝着した切りくずが破壊もしくは引きちぎられるときに、定常の切削状態よりも高周波数成分を含む AE 信号が検出される頻度が多くなることがわかった。

以上より、AE 信号を取得して、AE 計数や周波数解析を行うことで、切削状態の異常の判断が可能となり、AE 技術により工具摩耗状態を監視することが可能といえる。AE 信号の周波数解析に関しては、工具摩耗幅の増加や切りくずの凝着を判断できるので、特定のフィルタを用いて工具摩耗を識別できる可能性がみえた。

第 6 章は、AE 技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムを構築し、工具刃先位置の計測を行い、システムの評価・検証した。その結果、本機上計測システムの構成により、 $\phi 10\text{ mm}$ 、 $\phi 0.2\text{ mm}$  のエンドミルの大きさ、アプローチ速度に関係なく AE 技術を用いて接触検知することができ、AE 信号を割込み信号として、マシニングセンタへ入力し工具を停止させるができた。そのとき接触検知により検出した接触痕の深さおよびばらつきの確認によりシステムの信頼性、有効性を示せた。構築した機上計測システムには、接触を検知してから停止するまでのシステムの遅れがあることがわかった。この遅れはアプローチ速度と比例関係にあり、アプローチ速度が  $1\text{ mm/min}$  の増加するごとに、 $0.78\text{ }\mu\text{m}$  の割合でシステム全体の遅れ量が大きくなった。この実験により高精度な計測に必要な補正值を導いた。

以上の結果をもとに、機上計測システムによる工具刃先位置の計測の評価を行った。その結果、異なる工具間の加工面段差は最大で  $0.5\text{ }\mu\text{m}$  となり、使用したマシニングセンタの繰り返し位置決め精度以下の値となった。また、切込み深

さの誤差は最大  $0.5\ \mu\text{m}$  であり、システムの全体の遅れ量から求めた補正值により高精度な加工ができた。AE 技術を用いた機上計測システムは、実用化されている計測システムより高精度な工具刃先位置の計測が実現できた。さらに、機上計測システムは、設定したしきい値を超えた信号をマシニングセンタに取り込むことで、工具の停止や工具交換指令などを誘導・制御するシステムとなっている。第3, 5章の切削状態の監視でも、しきい値を超えた信号により、加工の異常を検知するため切削状態の監視にも活用可能である。したがって、本システムは第1章で示した基本性能を満たすことができ、現状の計測システムより優位であることを示した。

その他に、工具刃先位置を計測する際に生じるシステムの遅れにより接触痕深さを少なくするアプローチ方法の検討した。その結果、傾斜アプローチおよびステップ・アプローチにより、被削材に対して垂直なアプローチよりも接触痕を小さくすることができ、アプローチ方法の有効性を示した。

以上、本研究では、加工精度、加工形態、測定形態、加工現象に分けそれぞれの分野で AE 技術を用いて機上計測システムを構築するための結果を得ることができた。加工精度に関しては、超精密加工領域と一般の加工領域について、加工形態に関しては、旋削系とフライス系について検討した。切削現象として、切削条件と AE 信号の関係および工具摩耗時に検出される AE 信号について検討した。このことより、AE 技術は、切削加工のほとんどの領域で活用できるといえる。したがって、本研究において工具刃先位置計測のプリプロセス計測と切削状態の監視のインプロセス計測の機能を有する AE 技術を用いた工作機械の機上計測システムは有効であることが示された。さらに工具刃先位置計測に関しては、実用化されている計測機器の計測精度以上の計測を実現した。

## 7.2 今後の課題および展望

本研究においては、AE 技術を用いて加工形態では旋削系とフライス系に分け、加工精度の領域においては超精密加工領域と一般加工領域について工具刃先位置計測および加工状態の監視に関する検討を行った。超精密旋盤においては、旋削系と超精密加工領域、マシニングセンタにおいては、フライス系と一般加工領域に関する AE 技術を用いた検証した。一般的な工作機械であれば本機上計測システムは有効であるが、工作機械・加工形態・工具は複数存在しており、本研究の加工形態、加工精度の領域での検証ではまだ不十分なところもあるといえる。特に近年では、国内で多品種少量による生産も増えており、高精度な製品・部品が要求されている。さらに、生産性の向上も求められており、マシニングセンタの多軸化や複合加工化による生産に移行している。そのため、これらの工作機械においても AE 技術を用いた機上計測システムの検証をする必要があると考えている。多軸加工機においては、それぞれの座標系で複数の原点などの設定が必要なため、既存の計測システムでは誤差が生じてしまう。本機上計測システムは、それぞれの環境に合わせて直接工具を被削材に接触させて設定できるので、座標系間で生じる誤差を最小限に抑制できる本システムは有効であるといえる。今後は多軸加工機において、AE 技術を用いた機上計測システムの有効性を示す必要がある。

エンドミル工具の摩耗状態の監視においては、SUS304 のエンドミル工具の側面加工の検証であり、さらに他の加工法、工具においても検証を進める必要がある。加工状態の監視においては AE 信号にしきい値を設定して、工具摩耗や不安定切削に関して良否の判定を行ったが、このしきい値の設定に関してもどの程度の値するかをいくつかのデータをもとに決定する必要がある。このしきい値の設定には、今までの加工情報をデータ収集し、知能化された工作機械に取り込むことで設定値を導き出せることも可能になるであろう。

知能化された工作機械の要素として、本研究では、プリプロセス計測、インプロセス計測に関して様々な検証を行い、知能化のためのデータベースの一部を担うことができたといえる。今後はさらなるデータの取集やこのデータを活用する知能化に関する研究も進めなければならない。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導していただき、この場をお借り致しまして深く感謝申し上げます。

研究を進めていくにあたり、研究実績の少ない私に特別なご指導を頂きました埼玉工業大学 長谷 亜蘭 准教授には多大なる感謝の意を申し上げます。先生には、研究はもちろん論文の書き方から発表の仕方など終始お世話になりました。さらには、海外経験の少ない私に国際学会の機会を与えていただき誠にありがとうございました。

元 職業能力開発総合大学校 和田 正毅 名誉教授には、同大学を卒業してから十数年間研究に携わっていなかった私に研究の機会、テーマを与えていただき誠にありがとうございました。アコースティックエミッションによる計測の基礎の基礎から教えていただき深く感謝いたします。

埼玉工業大学 小西 克享 教授には、埼玉工業大学大学院において研究の場を与えていただき、また本論文の審査をしていただき心から謝意を表します。また、本論文の審査していただきました趙 希禄 教授、福島 祥夫 教授、皆川佳祐 准教授に深く謝意を表します。

職業能力開発総合大学校 二宮 敬一 准教授には実験、学会論文および博士学位論文において、私が不明な点の質問に対してすぐに的確なアドバイスいただき誠にありがとうございました。本研究を進めるにあたり、仕事に関しましてもいろいろご配慮いただき、心より感謝いたします。

さらに、本実験を進めるにあたり、協力を頂きました職業能力開発総合大学校和田研究室の学生であった皆様にはただただ感謝の気持ちでいっぱいです。皆様のご協力のおかげで研究成果をあげることができました。私と同時期に博士号取得を目指して忙しいにも関わらず、研究についていろいろと相談に乗っていただいた先輩・同僚、板野 隆文 元学生部長ならびに職員の方々に感謝いたします。皆様のご協力があってこそその成果だと思っております。

そして、本研究遂行にあたり、マシニングセンタへの装置設置にご協力いただきました株式会社 牧野フライス製作所様 に厚く御礼申し上げます。

最後に、仕事のことを理解していつも協力していただいた妻にいくら感謝してもしきれません。仕事や研究が忙しくて、いろいろなことを我慢してくれた娘たちにも心から感謝しています。家族の支えがあったから、成し遂げることができたと思っています。本当にありがとう。これから、生涯勉強しなければなりませんが、何事もやればできるので一緒にがんばりましょう！

平成 30 年 9 月

古賀 俊彦

## 論文目録

既公表論文（著者名：論文名，発表誌，巻，号，年，頁）

1. 古賀俊彦，長谷亜蘭，二宮敬一，和田正毅，小西克享：アコースティックエミッション法を用いた切削状態の監視に関する実験的検討—ステンレス鋼のエンドミル加工における工具摩耗検出—，トライボロジスト，Vol.63, No.7, (2018), pp.487–498. —————（第5章）
2. T. Koga, A. Hase, K. Ninomiya, M. Wada, H. Mishina, K. Konishi: Proposal and Evaluation of On-machine Measurement System for Square End Milling in Machining Center by Acoustic Emission Technique, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.83, No.11, (2017), pp.1025–1032. —————（第6章）
3. 古賀俊彦，長谷亜蘭，二宮敬一，和田正毅，三科博司：アコースティックエミッション技術による切削工具の機上計測に関する基礎的研究—スクエアエンドミルによる接触検知の検討—，精密工学会誌，Vol.80, No.11, (2014), pp.1012–1017. —————（第4章）
4. A. Hase, M. Wada, T. Koga, H. Mishina: The Relationship between Acoustic Emission Signals and Cutting Phenomena in Turning Process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.70, (2014), pp.947–955. —（第1章）

## 紀要論文

1. 古賀俊彦，長谷亜蘭，和田正毅：アコースティックエミッションによる切削工具の接触検知，職業能力開発総合大学校紀要，第40号A（理工学・技能編），(2011)，pp.7–13.

## 国際会議講演論文

1. T. Koga, A. Hase, K. Ninomiya: Monitoring of Tribological Process in Ultra-Precision Turning Using Acoustic Emission Technique, Proc. of the 45th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, (2018) p.54.
2. T. Koga, A. Hase, K. Ninomiya, M. Wada, K. Konishi: Contact Detection and Monitoring of Cutting State by Acoustic Emission Technique in Ultra-Precision Turning, Proc. of the 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Hiroshima, (2017), 96.
3. T. Koga, A. Hase, K. Ninomiya, M. Wada, H. Mishina, K. Konishi: Condition Monitoring of Tool Wear in End Mill Cutting by Acoustic Emission Signal, The 21st International Conference on Wear of Materials, California, (2017), P2K04.
4. T. Koga, A. Hase, K. Ninomiya, M. Wada, H. Mishina, K. Konishi: Proposal and Evaluation of On-machine Measurement System in Machining Centers by Acoustic Emission Technique, Proc. of the 16th International Conference on Precision Engineering, Hamamatsu, (2016), A204-8114.

## 講演論文

1. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 小西克享: マシニングセンタにおける AE 技術を用いた工具刃先位置検出システムの構築と検証, 第 16 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2018), pp.70-71.
2. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 和田正毅, 小西克享: アコースティックエミッション法によるエンドミル工具の摩耗検出に関する研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会 DVD 講演論文集, No.17-1, (2017), S1170205.
3. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 法谷賢瞳, 和田正毅, 小西克享: エンドミル加工におけるアコースティックエミッション信号と工具摩耗の関係, 第 15 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2017), pp.94-95.



4. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 和田正毅, 三科博司, 小西克享: アコースティックエミッション技術を用いた機上計測システムにおける工具アプローチ方法の検討, 日本機械学会 2016 年度年次大会 DVD 講演論文集, No.16-1, (2016), S1330206.
5. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 和田正毅, 三科博司, 小西克享: アコースティックエミッション法による工具摩耗のモニタリング, 第 14 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2016), pp.84-85.
6. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 和田正毅, 三科博司: アコースティックエミッション技術を用いたマシニングセンタの機上計測システムの検証, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2015), pp.263-264.
7. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 和田正毅, 三科博司: AE 法を用いたマシニングセンタ機上計測における応答性の評価, 第 13 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2015), pp.104-105.
8. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 和田正毅, 三科博司: アコースティックエミッション技術を用いた超精密切削加工状態の認識—切削条件と AE 信号との関係—, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2013), pp.589-590.
9. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 二宮敬一, 和田正毅, 三科博司: 超精密加工時に検出される AE 信号, 第 11 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2013), pp.106-107.
10. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司: ボールエンドミル加工時に検出される AE 信号, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2012), pp.925-926.
11. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司: アコースティックエミッション技術によるボールエンドミル工具の刃先位置検出に関する研究, 第 10 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2012), pp.84-85.
12. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司: アコースティックエミッション技術を用いた超精密切削加工状態の認識, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (2012), pp.909-910.

13. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 和田正毅 : アコースティックエミッションによる切削工具の刃先位置検出に関する研究, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2011), pp.103–104.
14. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 和田正毅 : アコースティックエミッションによるエンドミル工具の刃先位置検出に関する研究, 第 9 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2011), pp.92–95.
15. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 和田正毅 : アコースティックエミッションによる工作機械の機上計測に関する研究, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2010), pp.291–292.
16. 古賀俊彦, 長谷亜蘭, 和田正毅 : アコースティックエミッションによる切削工具の接触検知, 第 8 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2010), pp.46–48.
17. 長谷亜蘭, 和田正毅, 古賀俊彦, 三科博司 : アコースティックエミッション法を用いた加工状態監視に関する基礎研究–切削および摩耗時に計測される AE 信号–, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (2010), pp.355–356.