

軟質金属の超精密加工技術に関する研究

岩本竜一*, 近藤英二**, 皮籠石紀雄**, 市来浩一***, 吉留健也****

Study on Ultra-Precision Cutting for Soft Metals

Ryuichi IWAMOTO, Eiji KONDO, Norio KAWAGOISHI, Koichi ICHIKI and Suguya YOSHIDOME

In ultra-precision cutting, tool wear is serious problem on precision and productivity of products, since tool edge shape is closely duplicated onto work-piece surface. But it is very difficult to detect tool wear during cutting on machine because the tool wear is extremely small. Therefore it is useful to find out effective parameters for monitoring tool wear. The results obtained from face-cutting experiment of Aluminum alloy by single crystal diamond tool are as follows: (1) static principal and thrust forces increase with increase in real cutting length, respectively, (2) standard deviation of dynamic component of thrust force sharply increased just before tool life, (3) RMS-values of AE-signals also increased with increase in real cutting lengths, (4) AE-signal between frequencies of 20kHz and 30kHz sharply increased just before tool life.

Keyword : Monitoring, Tool Wear, Ultra-Precision Cutting

1. 緒 言

単結晶天然ダイヤモンドバイトによる非鉄軟質金属の超精密切削加工は、数ナノ～数十ナノレベルの表面粗さが得られるため、半導体部品や光学部品等の加工に適用されている。このような超精密切削加工は、加工面を鏡面に仕上げる目的のために、通常の切削加工に比べて送り速度を低く抑えることが多く、実切削距離が長くなり工具摩耗を進捗させる傾向が強くなる。この摩耗は非常に小さく一般的な方法では、加工機内で確認することが困難であるにも関わらず、超精密切削加工においては、工具刃先形状が高い精度で被削面に転写されるために、微細な摩耗であっても製品不良の原因となり生産性を阻害する。このような背景を考慮すると、オンマシンで工具の微細な摩耗を検知することにより切削状況をインプロセスで監視することは有効な方法と考えられる^{1) 2)}。本研究では、工具摩耗をインプロセスで検出するための有効なパラメータを探ることを目的とし、単結晶天然ダイヤモンドのRバイトを用いて、アルミニウム合金の超精密正面切削を行い、工具摩耗が表面粗さに及ぼす影響、工具摩耗と切削抵抗およびAE信号との関係を系統的に検討したので報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略をFig. 1に示す。実験は、超精密旋盤(豊田工機(株)AHN60-3D)に単結晶天然ダイヤモンドのローアウェイRバイトを取り付け、アルミニウム合金の正面切

削を行った。この時の切削抵抗を、切削動力計(日本キスラー(株)9256A)で計測し、AE信号はAEセンサ(エヌエフ回路設計ブロック(株)AE900S-WB)により測定した。加工後の表面粗さは、走査型白色干渉計(Zygo New View 5032)で測定し、工具摩耗は日本電子(株)製フィールドエミッション走査電子顕微鏡JSM-6330F(以下SEM)を用いて観察した。工具摩耗の観察に当たっては、工具ホルダを切削動力計に固定したままローアウェイ部分のみを取り外しおよび取り付けを行うことで工具摩耗観察に伴う刃先位置の変化が小さくなるようにした。

切削条件をTable. 1に示す。この条件は、あらかじめ予備実験を行い、安定した鏡面が得られる条件を選定したものである。この実験範囲内においては、切込みを変えても表面粗さに有意差は見られず、送り速度を変えた場合は、ほぼ理論値通りの表面粗さが得られることを確認した。

実験では、切削抵抗等の各種データのサンプリング時のみ直径30mmの被削材を使用することで加工後の表面粗さの測定時などの便宜を図り、他は実験の効率化のため直径197mmの被削材を使用した。

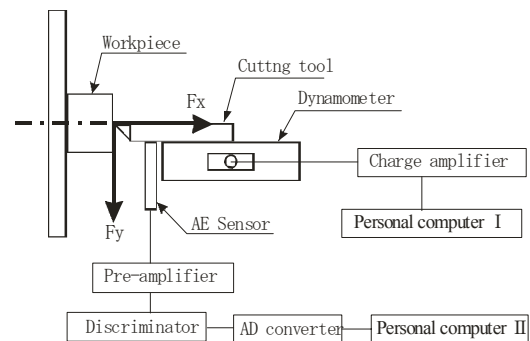


Fig. 1 Experimental equipment

*機械技術部, **鹿児島大学, ***機械技術部(現 企画情報部)

****鹿児島大学大学院(現 不二越)

Table.1 Cutting conditions

Tool	Single crystal diamond tool Rake angle=0° clearance angle=4° Nose radius=5mm (0.8mm)	
Work piece	Material	Al-Mg alloy(A5056)
	Diameter	30,197mm
	Hardness	75Hv
Spindle speed	1000rpm	
Feed speed	50 μm/rev (10~80 μm/rev)	
Depth of cut	30 μm (5~50 μm)	
Cutting fluid	Kerosene(mist)	

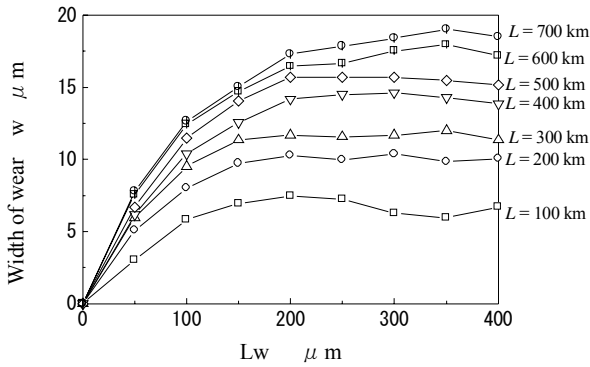


Fig.3 Relationship between Lw and W

3. 実験結果および考察

先端半径 5mm の単結晶ダイヤモンド工具を用いてアルミニウム合金の正面切削加工実験を行い、実切削距離 L に対する工具摩耗、表面粗さ、切削抵抗、AE 信号について検討した。

3. 1 工具摩耗

Fig. 2 に SEM による工具摩耗観察写真の一例を示す。図から明らかなように、摩耗形態は逃げ面のアプレッシブ摩耗を主体とするものであり、これに伴う切れ刃の後退が確認出来る。刃先のチップングなどは見られなかった。サーモグラフィを用いて加工中の温度上昇を測定したが、巨視的には 1~2℃ 程度の温度上昇であったため工具の熱的損耗は小さいと考えられる。

工具逃げ面の摩耗状態を実切削距離 L=100km 毎に観察し、工具先端からの距離 Lw における逃げ面摩耗幅 W を測定した。この結果を Fig. 3 に示す。全ての切削距離において、工具先端部 (Lw=0) の摩耗は少ないが Lw<200 μm の範囲では増加し Lw>200 μm 以降はほぼ一定値を示す。工具先端部は正味切込み量がほとんど零であるため、実際の切削加工はほとんどなされず、被削材表面を押しなすバニシング効果のみが作用しているために摩耗が少ないと推定される。一方、Lw が増加するに伴い正味切込み量も増加することにより、切削加工による工具摩耗が発生し、Lw>200 μm の範囲では工具逃げ角の効果により工具逃げ面の接触幅がほぼ一定になるものと推定される。

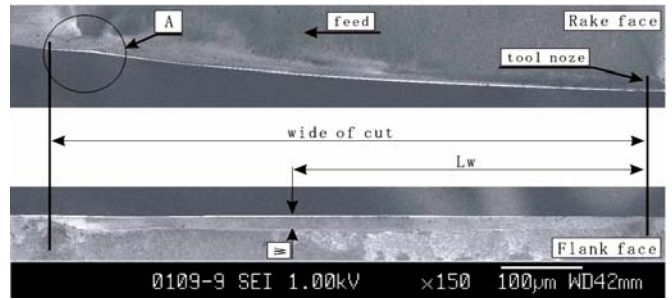


Fig.2 Sample photo of tool wear (L=600km)

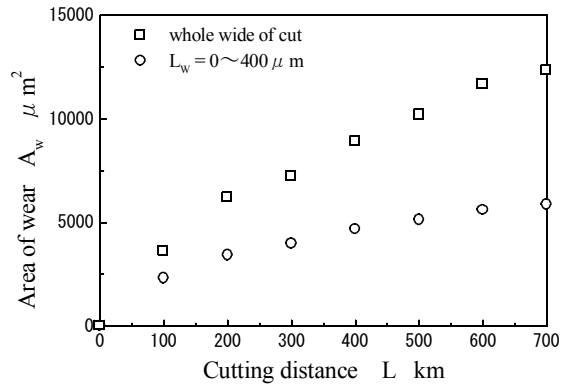


Fig.4 Relationship between L and Aw

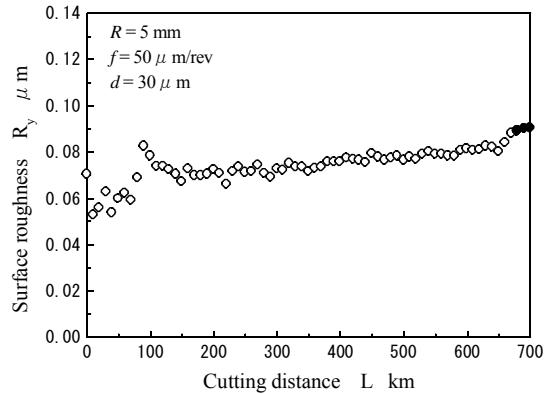


Fig.5 Relationship between L and Ry

本実験では、送り速度 f=50 μm/rev に設定していることから、被削材の表面形状生成に直接的に関与する摩耗は Lw<50 μm の範囲 (Fig. 2 Mr 部) の摩耗と考えられる。Lw=50 μm での工具逃げ面摩耗幅は、L=0~100km の間に約 3 μm 進行するが、L=200km~700km の間の 500km で約 3 μm 進行するのみである。このことから L<100km の範囲が初期摩耗で L>200km の範囲が定常摩耗と判断できる。

実切削距離 L と Fig. 3 から算出した切削幅全体の逃げ面摩耗面積 Aw の関係を示した Fig. 4 より、L>200km の範囲では、ほとんど単調に増加しており、摩耗の進行速度は L<100km の範囲の方がやや大きいことがわかる。このことから、Lw<50 μm の範囲に限らず切削幅全体に渡って L<100km の範囲が初期摩耗、L>200km の範囲が定常摩耗と判断できる。

3. 2 表面粗さ

実切削距離 L と表面粗さ R_y の関係をFig. 5に示す。なお、図中に黒丸で示したデータは、Fig. 6に示すように送りマークの底に小さな傷が発生したために鏡面が得られなくなったものであり、実用的な観点から、この時点の実切削距離 $L=680\text{km}$ を工具寿命と判断した。表面粗さ R_y は実切削距離 L の増加とともに大きくなる傾向が見られる。 $L < 100\text{km}$ の範囲では、粗さの値にやや変動が見られるが $L > 200\text{km}$ の範囲では単調に粗さが大きくなっている。3. 1で述べた通り、 $L < 100\text{km}$ の範囲では工具は初期摩耗が進行していると判断できることから、一般にいわれる「ならし加工」に実切削距離 100km を要したと考えられる³⁾。

$L > 200\text{km}$ の範囲で表面粗さが単調に大きくなる原因の一つとして、実切削距離の増加に伴い切れ刃が後退することにより、実際の工具刃先半径が小さくなり表面粗さが大きくなることが考えられる。しかし、Fig. 2中のA部で示した切込み境界部分での切れ刃の後退量が $10\mu\text{m}$ 程度であることから、工具刃先半径が切削幅全体に渡って一様に減少したと仮定すると、刃先半径の減少による表面粗さの増加は 1nm 以下と計算され、影響は小さいと判断できる。 $L < 100\text{km}$ の範囲では、工具摩耗の進行が早く表面粗さも変動が見られるが、 $L > 200\text{km}$ の範囲では、工具摩耗も表面粗さもほぼ単調に増加していることから、工具摩耗と表面粗さには密接な関連があると考えられる。したがって、 $L > 200\text{km}$ の範囲で表面粗さが単調に大きくなった原因は、工具摩耗の進行に伴い工具切れ刃稜を含む逃げ面摩耗幅全体の表面粗さが大きくなり、これが被削面に転写されたことによると推定できる。

3. 3 切削抵抗

実切削距離 L と切削抵抗の平均値の関係をFig. 7に示す。実切削距離 L の増加に伴って、主分力 F_y および背分力 F_x は大きくなっており、その増加割合は背分力 F_x の方が大きい。送り分力 F_z はほとんど零で変化しない。このことから、工具摩耗に対して背分力 F_x の相関が高いと考えられる⁴⁾。したがって、一定の切削条件下では、あらかじめ任意の値の背分力を工具寿命の判定基準と設定しておき、背分力を工具寿命の監視パラメータとすることによって工具寿命の判定が可能である。しかし、この工具寿命判定方法には、二つの問題点が考えられる。第一に、送り速度、切込み、工具先端半径など異なる切削条件毎において検証が必要であること、第二に、3. 2で述べた被削材表面性状変化による工具寿命判定と判定基準が異なり、傷の発生という被削材表面性状の変化を認識できていないという点である。

そこで、切削条件の影響が小さく被削材表面の傷の発生という変化を認識できる監視パラメータとして、背分力の

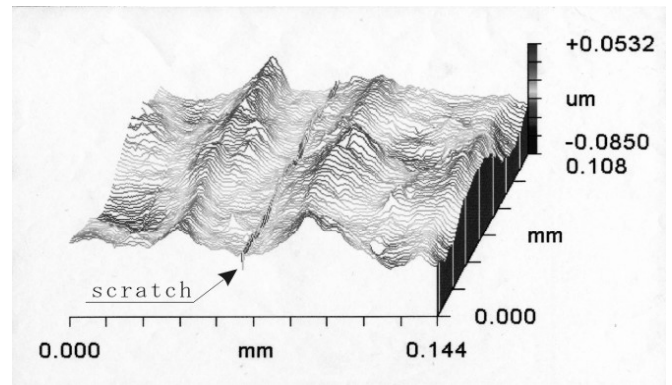


Fig.6 Sample photo of scratch on surface

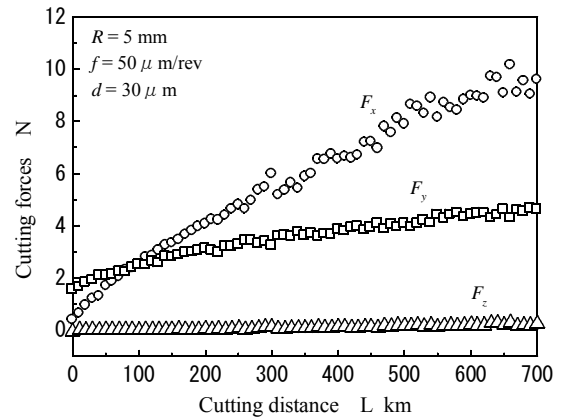


Fig.7 Relationship between L and cutting forces

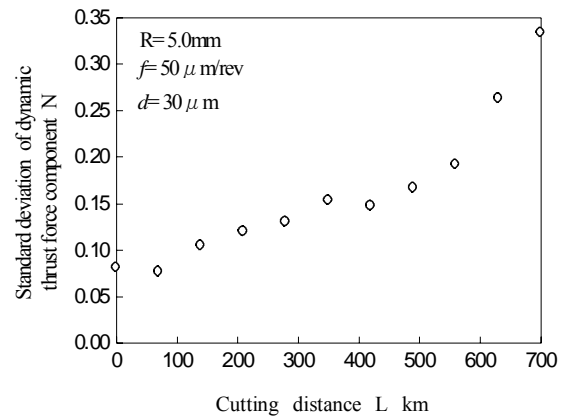


Fig.8 Relationship between L and standard deviation of dynamic thrust force component

動的な成分に着目した。背分力の平均値は切削条件の影響を受けるが、送りマークの底に小さな傷が発生するというような現象は、動的な成分の変化として表れることが予想されるからである。Fig. 8に実切削距離 L と背分力の動的成分との関係を示す。なお、背分力の動的成分は、加工中の背分力の時間的変動の標準偏差とし、以下ではこれを背分力の動的成分と呼び、これと区別するために背分力の平均値を静的成分と呼ぶこととする。

背分力の動的成分は、切削開始初期時はあまり変わらないが、実切削距離 L の増加に伴って大きくなり、 $L=650\text{km}$ 以降で急激に増加していることがわかる。被削材表面に微細な傷が認められたのは実切削距離 $L=680\text{km}$ の時点であるこ

とから、背分力の動的成分を監視することにより被削材表面粗さに影響を及ぼす直前の工具摩耗を検知し、工具寿命直前まで切削加工を行うための監視パラメータとして使用出来る可能性がある。

背分力の動的成分を工具摩耗検知の監視パラメータとして採用する場合、動的成分の絶対値が小さいことに留意する必要がある。Fig. 7 およびFig. 8 に示すように、背分力の動的成分は静的成分に比べ1/20以下の大きさしかない。工具先端半径の小さい工具を使用した場合や切込みを減少させた場合などは、背分力の静的成分だけでなく動的成分も小さくなるため、背分力の動的成分を監視する工具摩耗検知システムは、高感度の切削動力計を使用することが不可欠で、高コストとなってしまふ。また、このシステムにおいて、工作機械やミスト供給などに起因する微小な振動が、背分力の動的成分の中で無視することの出来ない割合を占めるようになった場合、工具摩耗に伴う動的成分の変化のみを抽出するための困難さが新たに生じる可能性がある。

3. 4 AE 信号

Fig. 9 にAE信号の測定結果例を示す。AE信号は0.4 μ sec 間隔で約26msec間サンプリングし、アンプにより10dB増幅後にAD変換したものである。実切削距離Lの増加に伴いAE信号の振幅が大きくなっていることがわかる。そこでAE信号のRMS値を求めてAE_{RMS}と定義し、実切削距離LとAE_{RMS}の関係をFig. 10に示す。実切削距離Lの増加に伴い、AE_{RMS}は増減を繰り返しながら全体的には増加している。背分力の動的成分の場合とは異なり、工具寿命付近でレベルや増加割合の変化などの顕著な差は表れないが、任意のAE_{RMS}値を工具摩耗検知のためのしきい値と設定しておけば、一定の条件下では工具寿命の判定が可能である。しかし、AE信号は工具摩耗だけではなく切削条件の違いによっても影響を受けるため、上述の方法を工具摩耗検知方法として採用するためには切削条件毎に工具摩耗とAE_{RMS}値の関係を把握しておかなければならなくなり実用上の障害となる。そこで、AE信号の中から工具摩耗によって影響を受ける特徴を抽出するために周波数解析を行った^{5) 6)}。この結果をFig. 11に示す。実切削距離Lに関係なく8kHz付近と25kHz付近の2箇所にピークが存在する。8kHz付近のピークは実切削距離Lの増加に伴い増減し明確な傾向は見られないが、25kHz付近のピークは実切削距離Lの増加に伴い大きくなっている。

8kHz (5~12kHz)と25kHz (20~30kHz)付近のピークの面積S₁, S₂をFig. 12に示す。8kHz付近のピーク面積S₁は、ならし加工に必要と考えられる実切削距離L<100kmの範囲ではややばらつきがあるが、100km<L<270kmの範囲ではほぼ一定の値を示す。L>270kmの範囲では急激に大きくなり、

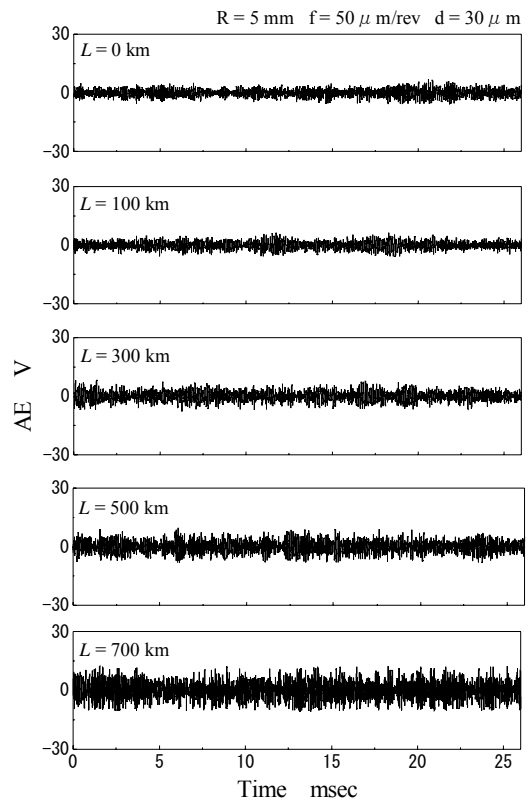


Fig.9 Sample of AE-signals

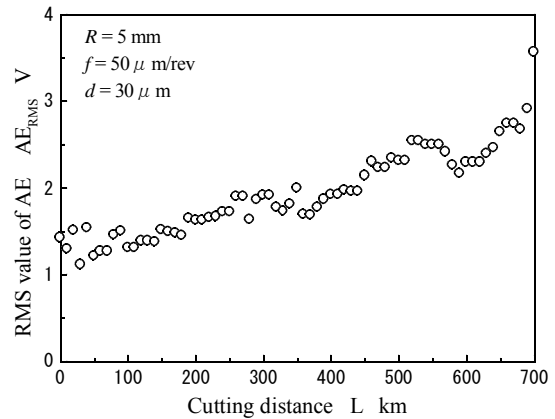


Fig.10 Relationship between L and AE_{RMS}

そのばらつきも大きい。このような傾向は工具摩耗や表面粗さには見られず、8kHz付近のピークと工具摩耗との相関は低いと考えられる。

ここで、Fig. 7 に示した切削抵抗の中の静的背分力に注目する。静的背分力は、実切削距離L<300kmの範囲では単調に増加するが、L>300kmの範囲では静的背分力の増加傾向は変わらないものの、測定データに変動が見られる。つまり、実切削距離L=300km付近を境界とする背分力の静的成分の変化と8kHz付近のピーク面積の変化には類似性がある。Fig. 8 に示した動的背分力には、実切削距離L=300km付近を境界とする変化は見られないことから、比較的時間的変動の緩やかな切削現象の変化が起こったことが推定される。このような現象として、例えば、工具摩耗により

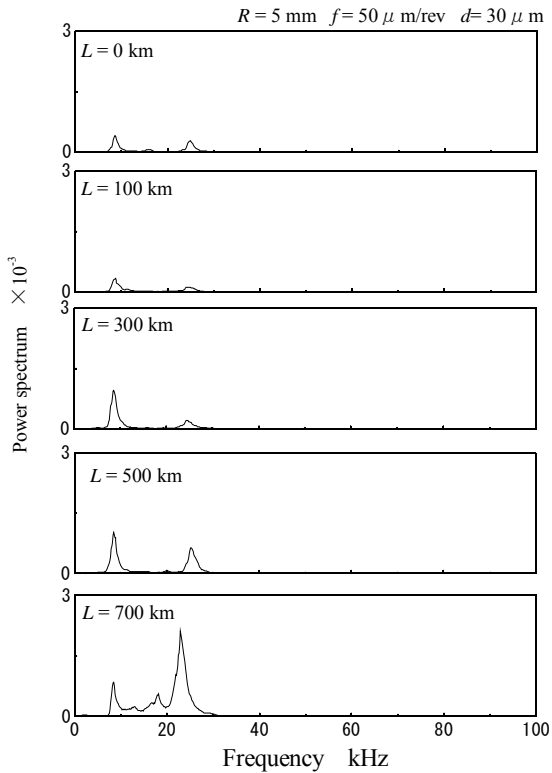


Fig.11 FFT analysis of AE-signals

工具切れ味が変化し、切りくず流出状態が変動することなどが考えられるが、その詳細な原因は明らかではない。一方、25kHz付近のピーク面積 S_2 は、実切削距離 $L=400\text{km}$ まではほぼ一定の値を示し、 $L=550\text{km}$ まで増加し、一時減少して再び急激に増加する。 $L=700\text{km}$ 以上まで切削を続けるとびびり振動が発生した。このことから工具寿命に至る前の切削距離において25kHz (20~30kHz) 付近の成分が増加する傾向があることがわかった。

同様な傾向が異なる切削条件においても見られるか調べるため、工具先端半径を $R=0.8\text{mm}$ に変更し、実切削距離 $L=0\text{km}$ の摩耗していない工具と $L=500\text{km}$ の摩耗した工具について、切込み一定 ($d=10\mu\text{m}$) で送り速度を変えた場合 ($f=20, 40, 60, 80\mu\text{m/rev}$) と、送り速度一定 ($f=30\mu\text{m/rev}$) で切込みを変えた場合 ($d=5, 15, 30, 50\mu\text{m}$) について実験を行った。この結果をそれぞれFig. 13, Fig. 14に示す。

切込み一定で送り速度を変えた場合、工具先端半径 $R=5\text{mm}$ の場合と同様に8kHz付近と25kHz付近の2箇所ピークが存在する。摩耗していない工具に比べ摩耗した工具のスペクトルは全周波数域で大きくなっている。特に25kHz付近の周波数成分は顕著に大きくなっている。送り速度が大きくなると25kHz付近の周波数成分のピークが大きくなるが、送り速度が変化してもピーク位置は25kHz付近で変化しない。

送り速度一定で切込みを変えた場合も、工具先端半径 $R=5\text{mm}$ の場合と同様に8kHz付近と25kHz付近の2箇所

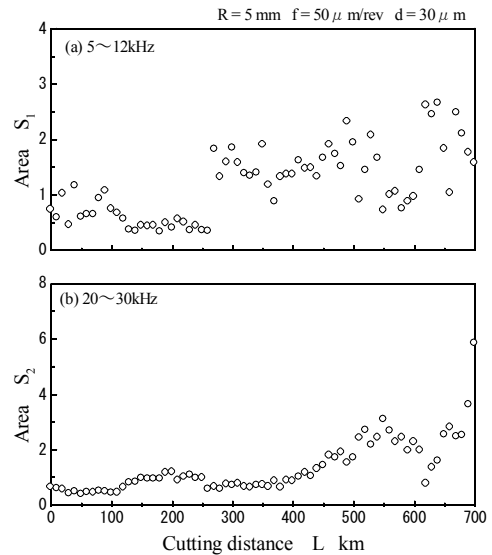


Fig.12 Relationship between L and S_1, S_2

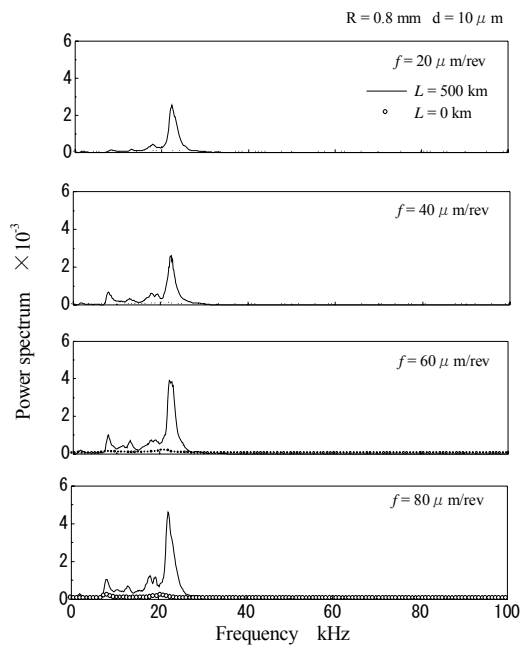


Fig.13 FFT analysis of AE-signals($d=10\mu\text{m}$)

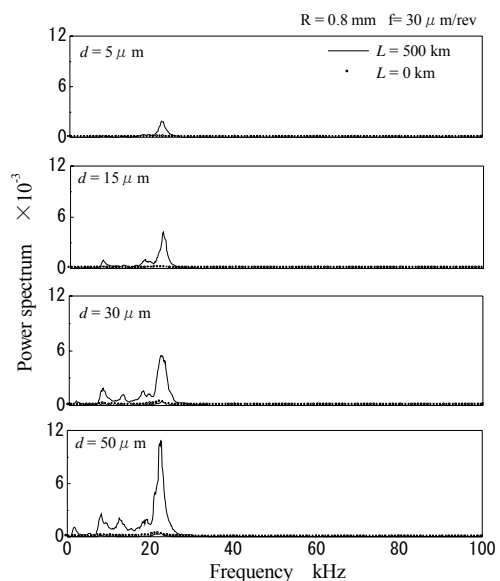


Fig.14 FFT analysis of AE-signals($f=30\mu\text{m/rev}$)

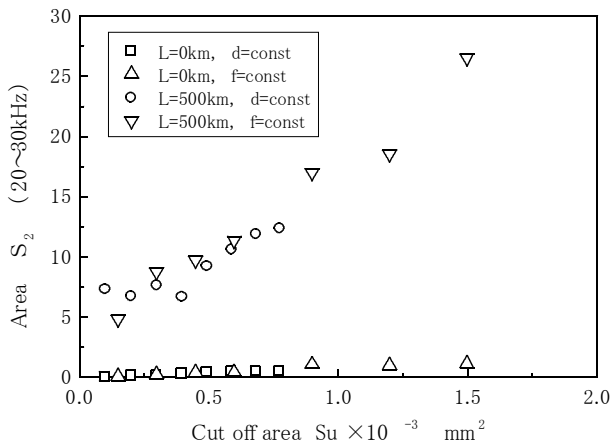


Fig.15 Relationship between S_u and S_2/S_u

にピークが存在する。切込み一定の場合と同様に、摩耗していない工具に比べ摩耗した工具のスペクトルは全周波数域で大きくなっており、特に25kHz付近の周波数成分は顕著に大きくなっている。25kHz付近の周波数成分のピークは、切込みの増加に伴って大きくなり、その増加割合は送り速度を大きくした場合より大きい。切込みが変化してもピーク位置は25kHz付近で変化しない。

以上のことから、工具寿命に至る前の切削距離において増加する傾向のある25kHz(20~30kHz)付近の成分は、送り速度、切込み、工具先端半径などの切削条件が異なっても同様に増加する傾向があることが確認できる。

ここで、切込み d および送り速度 f を変えた場合のすき取り面積を S_u と定義し、この S_u を用いてFig. 13, 14から得られる25kHz(20~30kHz)付近のピークの面積 S_2 をまとめた結果をFig. 15に示す。実切削距離 $L=0$ kmの摩耗していない工具の場合、ピーク面積 S_2 は、すき取り面積 S_u の増加に対してほとんど零で変化しないか、あるいはわずかに増加する程度である。一方、実切削距離 $L=500$ kmの摩耗した工具の場合、すき取り面積 S_u の増加に伴い単調に増加しており、実切削距離 $L=0$ kmの工具に比べ増加割合が大きい。また、実切削距離 $L=0$ km, $L=500$ kmのいずれの場合でも、ピークの面積 S_2 はすき取り面積 S_u の増加に伴ってのみ単調に増加しており、切込み d および送り速度 f の違いによって増加割合の変化は見られないことがわかる。

このことから、25kHz(20~30kHz)付近のピークの面積 S_2 は、実切削距離 $L=0$ kmの摩耗していない工具では、切込み d および送り速度 f の影響を受けず、実切削距離 $L=500$ kmの摩耗した工具の場合では、すき取り面積 S_u によって決定されることがわかる。したがって、あらかじめ実験によりすき取り面積 S_u とピークの面積 S_2 の関係を把握しておけば、切込み d および送り速度 f が異なる場合でも、すき取り面積 S_u に換算することによって、ピークの面積 S_2 を工具寿命判断基準として採用することができる。

以上の手順により、AE信号の25kHz(20~30kHz)付近のピーク面積 S_2 は、切削条件(切込み d および送り速度 f)の影響を受けない工具摩耗のインプロセス監視パラメータとして利用できる可能性がある。

4. 結 言

- (1) 実切削距離と表面あらさの関係は、加工開始直後はやや変動があるが、実切削距離 $L=100$ km以降は、ほぼ単調に増加し、実切削距離 $L=680$ km以降で送りマークの底部に細い溝が発生し、鏡面が得られなくなった。
- (2) 切削抵抗は、実切削距離の増加に伴い静的主分力、静的背分力ともほぼ単調に増加するが、静的背分力の方が増加割合が大きい。静的送り分力はほとんど変化しない。単位逃げ面摩耗面積当たりの静的背分力はほぼ一定の値であり、逃げ面摩耗面積と静的背分力の間には比例関係がある。
- (3) 動的背分力は工具寿命の直前に急激に増加する。
- (4) AE信号のRMS値は、実切削距離の増加に伴い大きくなる傾向が見られるが、工具寿命付近でその増加傾向に大きな変化は見られない。
- (5) AE信号の25kHz(20~30kHz)付近の成分は、工具寿命の直前に急激に増加する。

参 考 文 献

- 1) K. Iwata and T. Moriwaki, An Application of Acoustic Emission Measurement to In Process Sensing of Tool wear, Ann, CIRP, 26, (1977)
- 2) 相田・稲崎・福岡, AEを利用した工具チップング検出システムの開発, 機論, 52-481, C(1986), 2563-2569
- 3) 超精密生産技術体系 第2巻 実用技術 P726
- 4) 吉田・菅野・竹内, 超精密金属鏡の加工技術の研究(R刃ダイヤモンド工具による鏡面加工), 機論, 51-471, C(1985), 3121-3124
- 5) 稲崎, 加工プロセス監視におけるアコースティックエミッションの利用, 機械技術, 32-5, 36-40
- 6) 尾上ほか, アコースティック・エミッションの基礎と応用, (1976), 1-11