
研削液の動圧を利用した外周刃ブレード刃先のアクティブ制御

課題番号 12650106

平成 12, 13, 14 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）
研究成果報告書

平成 15 年 5 月

研究代表者 水野 雅裕
岩手大学工学部助教授

は し が き

研究組織

研究代表者 : 水野 雅裕 (岩手大学工学部助教授)

交付決定額 (配分額)

	直接経費	間接経費	合 計
平成 12 年度	1,700,000	0	1,700,000
平成 13 年度	900,000	0	900,000
平成 14 年度	800,000	0	800,000
総 計	3,400,000	0	3,400,000

研究発表

(1) 学会誌等

水野雅裕, 井山俊郎, 池田典亮, 森由喜男, 和嶋直

極薄外周刃ブレードによる研削切断においてブレードガイドが切断精度に与える影響, 砥粒加工学会誌, Vol.46, No.10, pp.515-520, 2002

(2) 口頭発表

- ・池田典亮, 水野雅裕, 井山俊郎

高精度スライシング加工においてブレードガイドが切断精度に与える影響, 2001 年度日本機械学会学生会東北支部卒業研究発表会, 八戸高専, pp.19-20, 2002

- ・水野雅裕, 井山俊郎, 池田典亮, 三船英伸

外周刃ブレードによるスライシング加工へのブレードガイドの適用とその効果, 2002 年度砥粒加工学会学術講演会, pp.89-90, 2002

- ・水野雅裕, 井山俊郎, 三船英伸

高精度スライシング加工における外周刃ブレードの挙動解析 (ブレードガイドが切断精度に与える影響), 2003 年度精密工学会春季大会学術講演会, pp.241, 2003

目 次

1. 研究活動報告	．．．	1
1.1 活動報告	．．．	1
1.2 活動実績・スケジュール	．．．	2
2. 研究内容	．．．	3
3. 研究成果	．．．	44
3.1 高精度スライシング加工においてブレードガイドが切断精度に与える影響	．．．	44
3.2 外周刃ブレードによるスライシング加工へのブレードガイドの適用とその効果	．．．	46
3.3 極薄外周刃ブレードによる研削切断においてブレードガイドが切断精度に与える影響	．．．	48
3.4 高精度スライシング加工における外周刃ブレードの挙動解析（ブレードガイドが切断精度に与える影響）	．．．	54

1. 研究活動報告

1.1 活動報告

近年、マイクロデバイスの開発が急速に進められ、それに伴って高能率・高精度・微細さを併せ持った機械加工技術の需要も高まっている。本研究で対象としている極薄外周刃ブレードを用いたスライシング加工もそうした加工技術のひとつである。

最近の工作機械は機械精度がナノメートルレベルまで達成されているにもかかわらず、極薄外周刃ブレードを用いたスライシング加工では、ブレードの横剛性が極めて低いため、切れ曲がりが生じやすいという大きな問題がある。切れ曲がりが発生する原因はランダムな砥粒配置を有する工具（外周刃ブレード）側にある場合が多い。考えられる原因を列挙すると、①ブレード外周断面の非対称摩耗、②ブレード刃先の左右の切れ味のアンバランス、③ブレードの反り、などである。また、④ブレード側面に作用する研削液動圧のアンバランスなども一因となる場合がある。特に、①～③の原因を排除することは現在の技術では難しく、また、たとえそれが可能になったとしても加工中に再びバランスが崩れて切れ曲がりが発生すると考えられる。したがって、極薄外周刃ブレードを用いて高精度に加工を行うにはブレードのたわみの発生をモニタし、それをアクティブに制御するのが最も効果的であると考えられる。そこで本研究では、ブレードのたわみをアクティブに制御するシステムの開発を目標とし、基礎実験および解析を行った。

本研究の研究内容は2. に詳細に述べているが、その主な成果は

- 1) ブレードガイドの使用により切断精度が向上することを実験的に明らかにした点
- 2) 1)の効果を理論的に明らかにした点

- 3) 変位センサからの情報に基づいてブレードガイドを駆動し、ブレードのたわみを制御するシステムの基本特性を明らかにした点

である。これらの内容に関する研究成果発表論文を3. に掲載した。

試作したシステムの制御方法に関しては未だ研究が不十分であるが、今後研究を継続することで、アスペクト比（加工深さ／加工幅）の高い加工が可能になると考えている。

1.2 活動実績・スケジュール

<2000 年度>

実験装置の設計製作および基礎実験

<2001 年度>

2002 年 3 月 日本機械学会学生会東北支部卒業研究発表会において「高精度スライシング加工においてブレードガイドが切断精度に与える影響」を発表

<2002 年度>

2002 年 9 月 砥粒加工学会学術講演会において「外周刃ブレードによるスライシング加工へのブレードガイドの適用とその効果」を発表

2002 年 10 月 砥粒加工学会誌に「極薄外周刃ブレードによる研削切断においてブレードガイドが切断精度に与える影響」を発表

2003 年 3 月 精密工学会春季大会学術講演会において「高精度スライシング加工における外周刃ブレードの挙動解析（ブレードガイドが切断精度に与える影響）」を発表

2. 研究内容

第1章 緒 言

外周刃ブレード（以下，単にブレードと呼ぶ）による研削切断は，パターンニングされた電子基板から電子部品を高能率に切り出すのに適した切断方法である．スライシングマシンやダイシングマシンの性能が著しく向上し，さらに高精度の薄形ブレードが各メーカーから供給されるようになった現在，微細で高精度な切断加工が比較的容易に行えるようになってきている．その一方で，急速に電子部品の微細化が進み，切断しろはますます狭くなる傾向にある．この厳しい要求に応えるには極薄ブレードの使用が不可欠であるが，単にそれだけでは不十分である．刃厚の3乗に比例してブレードの曲げ剛性が低下し¹⁾，刃先の偏摩耗²⁾などに起因した刃厚方向の研削抵抗分力によって大きな切れ曲がりを生じるからである．こうした切れ曲がりを抑制することを目的として様々な方法が試みられている³⁾⁴⁾⁵⁾．

これまでに筆者が行った試みについて簡単に述べる．はじめに，スライシング加工中の研削抵抗の垂直成分と水平成分を変数とするある関数を定義し，その値が一定になるようにテーブル速度を制御する方法について検討した．その結果，スライシング加工中のブレードのたわみがほぼ一定となって比較的平坦度の高い切断面が得られることがわかった．しかしながらこの方法はブレードのたわみの発生を容認した上での制御であったため，達成できる加工精度に限界があった．そこで次に，ブレードのたわみを計測しながらブレード両側面に供給する研削液の圧力を独立に調整できるスライシング加工システムを試作し，これを用いてブレードのたわみを抑制する方法について検討した．この方法により切断精度をある程度向上させることに成功したが，研削液の圧力を精密に調整することが難しく，また，システム全体が大掛かりになることがわかった．さらに，電解ドレッシングによりブレード刃先の左右コーナー部をドレッシングして切れ味のバランスをとる方法についても検討したが，ドレッシングにより偏摩耗が大きくなるという新たな問題が発生することがわかった．

極薄ブレードを用いて切れ曲がりの少ない高精度な研削切断を実現するため，

本研究ではブレードガイドを用いた新しい研削切断を試みる。なお、ブレードガイドを用いた切断方法はバンドソーや丸のこ盤などではよく見られるが、これを外周刃ブレードによる研削切断に適用した例は見当たらない。

極薄ブレードを用いた研削切断にブレードガイドを適用する場合、ブレードにフィットした精密なガイドを作製する必要がある。また、ブレードに対するブレードガイドのアライメント調整も重要である。こうした課題に対し、本研究では、実機上で、極薄ブレード自身によってガイド部材にスリット加工を行い、それをそのままアライメント調整無しでブレードガイドとして使用する方法を提案する。

本研究の流れを以下に示す。

- 1) 上述の方法で作成したブレードガイドを用い、制御せずに切断実験を行って切断精度に与えるブレードガイドの効果を調べる。
- 2) 1)の実験をモデル化し、ブレードガイドの効果を理論的に調べる。
- 3) ブレードのたわみを計測する変位センサを導入し、その情報に基づいてブレードガイドの位置を圧電アクチュエータにより調整するシステムを構成する。
- 4) 3)のシステムを使用する際の制御方法について検討する。

以下の章ではこれらについて詳述する。第 2 章では、ブレードガイドの作製方法とブレードガイドが切断精度に与える影響について述べる。第 3 章では、第 2 章の実験をモデル化し、これまでに開発してきた“ブレードの挙動解析手法”を用いてブレードガイドが切断精度に与える影響について理論解析する。第 4 章では、変位センサを用いてブレードのたわみを計測し、その情報に基づいてブレードガイドを駆動するシステムの構成と、その基本特性について述べる。第 5 章では試作したシステムの制御方法について述べる。第 6 章では結言を述べる。

第2章 ブレードガイドが切断精度に与える影響を調べる実験

2.1 実験装置の概要

実験装置の概要を図 2-1 に、実験条件を表 2-1 に示す。本研究で使用したスライサーは小林工業㈱製の高精度小形スライサー（UPAC-10A）である。主軸はエアスピンドルであり、最高回転数は 10,000rpm である。また、3 軸方向の最小送り量はいずれも $1\mu\text{m}$ である。切断実験は、このスライサーにブレードガイドスライド機構を組み込んで行った。

ここでスライサーの機械座標系を次のように定義しておく。 x 軸はテーブル送り方向の座標軸であり、工作物送り方向を正とする。 y 軸は主軸方向の座標軸であり、オペレータ側を正とする。 z 軸はテーブル面に垂直な座標軸であり、下向きを正とする。

ブレードガイドを x 方向にスライドさせるスライド機構のベースプレートは、主軸ハウジングにボルトで固定されている。スライドテーブルは、平行に配置

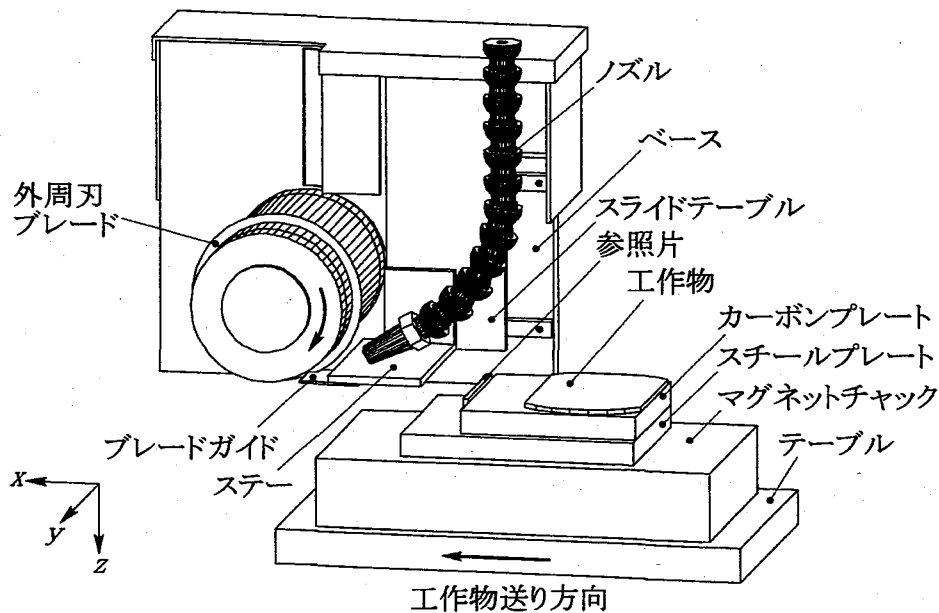


図 2-1 実験装置の概要

表 2-1 実験条件

外周刃ブレード	SD1000R5PW-S (旭ダイヤモンド工業㈱) サイズ: D 73 mm × T 0.1 mm × H 40 mm
フランジ径	65 mm
工作物	アルチック サイズ: T 2 mm × L 50 mm
切込み深さ	3 mm
ホイール周速	2300 m/min
工作物送り速度	80 mm/min
切断モード	ダウンカット
ブレードガイド	アルミナセラミックス サイズ: T 0.85 mm
研削液	クーラント C (㈱マルトー) 水道水で 50 倍に希釈

した 2 本のリニアボールベアリング、リード 1mm のボールねじ、マイクロステップ駆動（ステップ角 0.18° を使用）のステッピングモータにより x 方向に滑らかにスライド（1 ステップの送り量は計算上 $0.5 \mu\text{m}$ ）させることができるようになっている。このスライド機構により、極薄ブレード自身によるブレードガイド部材へのスリット加工と、ブレードに対するブレードガイドの着脱が行える。

2.2 実験方法および実験条件

ブレード周りの詳細を図 2-2 に示す。使用したブレードは旭ダイヤモンド工業㈱製の電鍍ダイヤモンドブレード（オールブレードタイプ）で、その厚さは 0.1mm である。フランジからのブレード突き出し量は 4mm とした。一般的にフランジからのブレード突き出し量はブレード厚さの 20 倍以下にするが、本実験ではブレードガイドが切断精度に与える影響を明らかにするため敢えて 40 倍とした。

工作物はアルチックで、厚さは 2mm、切断方向の長さは 50mm である。これをカーボン製のスライス台に熱可塑性接着剤（㈱マルトー製、PMC 接着ワッ

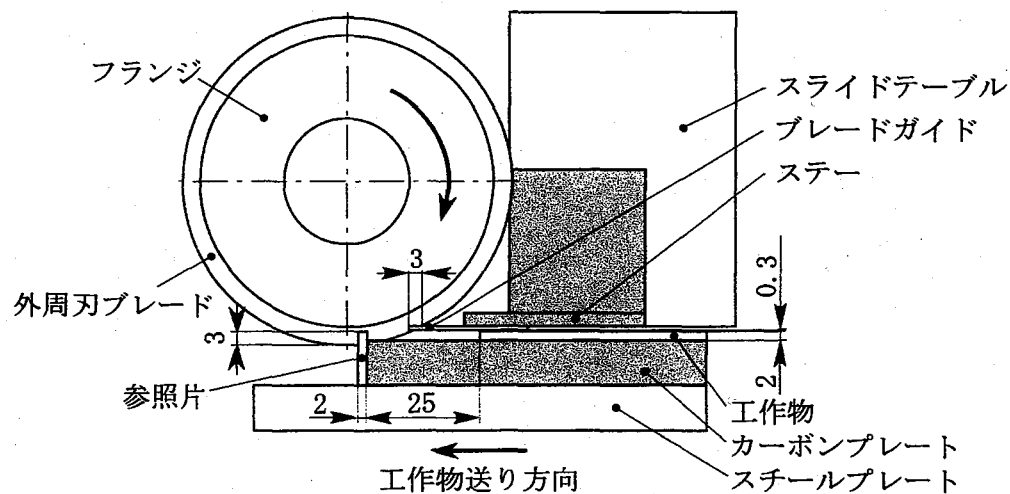


図 2-2 ブレード周りの詳細

クス) で接着し、さらにそれをスチールプレートに接着してスライサー上のマグネットチャックに固定した。

ガイド部分の作製、すなわちガイド部材へのスリット加工は、次のようにして行った。

- ① 切断実験に使用するブレードをスライサー主軸に取り付け、 balancer (シグマ電子工業(株)製, SB-7001S) を用いて十分に主軸の回転バランスを調整する。
- ② ブレードをドレッシングするため、長さ 90mm のスティック砥石 (WA400) に対し、切断実験時と同じ加工条件(切込み深さ 3mm)で溝加工を二回行う。
- ③ 厚さ 0.85mm のアルミナセラミックス製のブレードガイド部材を、上記熱可塑性接着剤を用いてステーに接着する。
- ④ 切断実験時にブレードガイド部材の下面と工作物上面の z 方向の間隔が 0.3mm となるように位置を調整して、ステーをスライドテーブルに固定する。
- ⑤ ブレードを切断実験時と同じ回転数で回転させ、ブレードガイドスライド機構を用いてガイド部材をブレード外周に接触させる (このときの x 方向のガイド位置を $X_G = 0 \text{ mm}$ とする)。
- ⑥ ガイド部材を 1.5mm/min の極低速で $X_G = 3.5 \text{ mm}$ の位置まで送ることでガイド部材にスリット加工を行う (スリット加工によって創成された面を、以

下ではガイド面と呼ぶ)。送り速度を極低速にするのは、スリット加工中にブレードができるだけたわまないようにするためである。

実験では、“ガイド有り”のときのガイド位置を $X_G = 3.5\text{mm}$ ではなく $X_G = 3.0\text{mm}$ とし、ブレード外周とガイドとの間にわずかな隙間を与えた。これは研削点への研削液の供給がブレードガイドによって極端に妨げられないようにするためである。一方、“ガイド無し”のときのガイド位置は $X_G = -8.0\text{mm}$ とした。

ところで、ブレードの切れ味や刃先形状は、切断実験中に徐々に変化する。そのため、例えば、“ガイド無し”と“ガイド有り”の切断実験を10回ずつ別々に行った場合、実験結果にブレードの切れ味や刃先形状の変化の影響が強く出る可能性がある。そこで本実験では“ガイド無し”と“ガイド有り”の切断を交互に合計20回行って両者の切断精度を比較することにした。また、切断実験では図2に示すように工作物から x 軸正方向に十分離れた位置に幅 2mm のアルチック製の参照片を配置し、毎回の切断の直前に参照片に対して溝加工を行って測定の際の基準（以下、参照溝と呼ぶ）とした。

切断実験終了後、スライサーの主軸ハウジングに1000倍のモニタマイクロスコープ（㈱キーエンス製、VH-5900）を固定し、これと、スライサーの xy 軸送りに連動したデジタルスケールを用いて切断溝上部エッジの xy 平面における形状と参照溝上部エッジの y 座標を測定した。切断溝上部エッジの形状測定は x 方向に 5mm 間隔で行った。また、切断溝上部エッジに発生したチッピングの大きさも測定した。さらに、ブレードガイドをステーから取り外してスライサーのテーブル上に置き、ガイド面上部エッジと下部エッジの xy 平面における形状も測定した。

2.3 実験結果

図2-3は、切断溝上部エッジの xy 平面における形状を測定した結果の一例である。図の左側が切断開始側である（ x 座標の正方向が図2-1とは逆であることに注意）。図にはこの切断溝に対応する参照溝上部エッジの y 座標（以下、データムと呼ぶ）を二点鎖線で示している。この切断溝の場合、切断開始直後に切

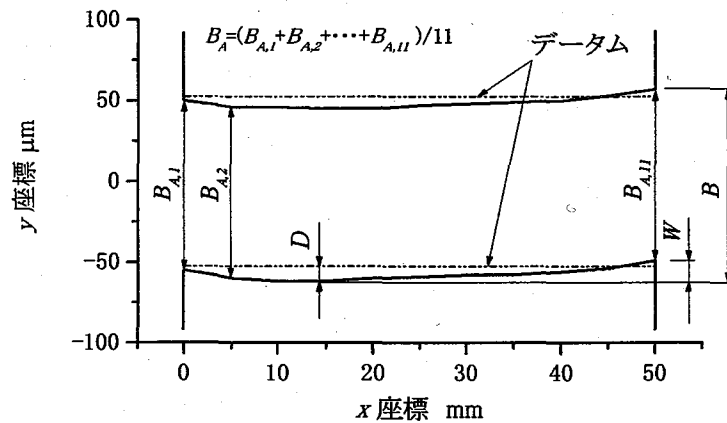


図 2-3 切断溝上部エッジの形状測定結果の一例

断軌道が y 軸負側に $10\mu\text{m}$ 程度偏位し、その後、偏位が徐々に減少しているの
 がわかる。

“ガイド無し”と“ガイド有り”の切断精度を数値的に比較するため、以下に
 定義する評価パラメータを導入する。

最大偏位 D :

切断面上部エッジの、データムからの最大偏位量を y 軸正側と負側の切断
 面に対して評価したときの大きい方の値。

うねり幅 W :

切断面上部エッジのうねりの幅を y 軸正側と負側の切断面に対して評価し
 たときの大きい方の値。

平均切断溝幅 B_A :

切断面上部エッジにおける切断溝幅を、 x 方向の各測定位置において求め
 て平均した値。

切断幅 B :

y 軸正側と負側の切断面上部エッジを x 軸に平行な 2 直線で挟んだときの
 2 直線の間隔。

なお、これらの評価パラメータの定義を図 2-3 に図示する。

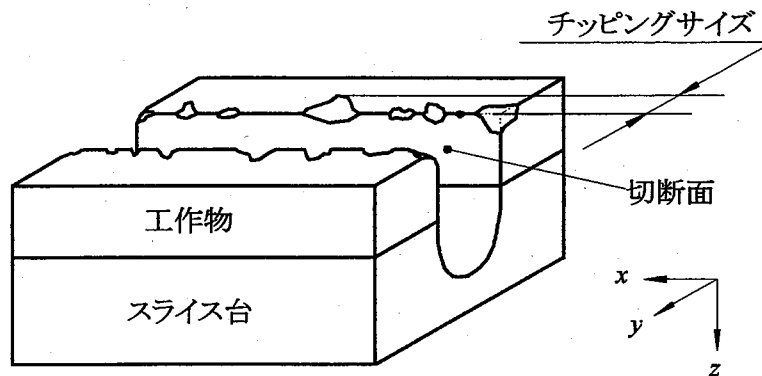


図 2-4 チップングサイズの評価

また，スライシング加工やダイシング加工では，上記評価パラメータに加えて切断面上部エッジに生じるチップングの大きさも重要である．そこで次の評価パラメータを導入する．

最大チップングサイズ C :

チップングの y 方向の幅をチップングサイズとし， y 軸正側と負側の切断面上部エッジにおけるチップングサイズの最大値（図 2-4 参照）

図 2-5 は切断回数に伴う最大偏位 D とうねり幅 W の変化をプロットしたものである．奇数の切断番号が“ガイド無し”の切断であり，偶数の切断番号が“ガイド有り”の切断である．“ガイド有り”の切断では， D と W の値が明らかに小さくなっている．また，“ガイド無し”の切断では，これらの値は切断のたびに大きく上下変動しているのに対し，“ガイド有り”の切断では上下変動は小さい．さらに，“ガイド有り”の切断では，これらの値は切断実験開始直後に増加傾向を示しているが，その後，減少傾向に転じている．減少傾向の理由については後で考察する． D と W の平均値を“ガイド無し”の場合と“ガイド有り”の場合について算出し，それぞれに 95% 信頼区間を付して示したのが図 2-6 と図 2-7 である．“ガイド無し”の場合， D は $9.0 \pm 2.2 \mu\text{m}$ であるのに対し，“ガイド有り”の場合は $5.7 \pm 0.8 \mu\text{m}$ である．以上の結果から，ブレードガイドを使用することでブレードのたわみが抑制され，より平坦な切断面が安定して得

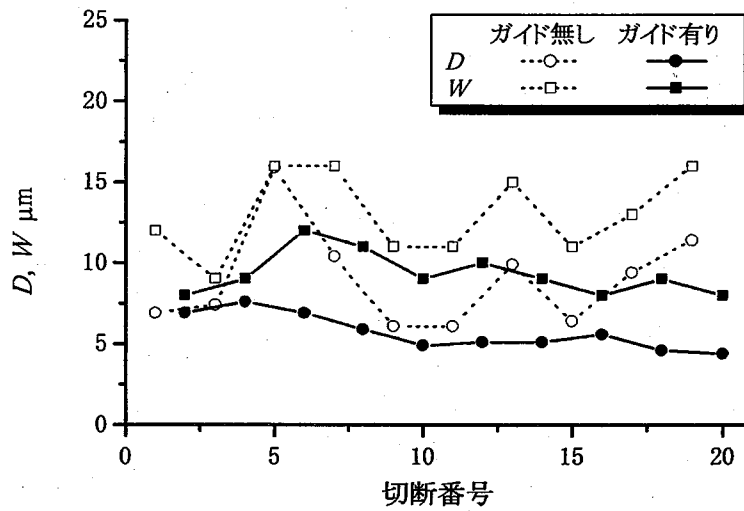


図 2-5 切断回数に伴う D と W の変化

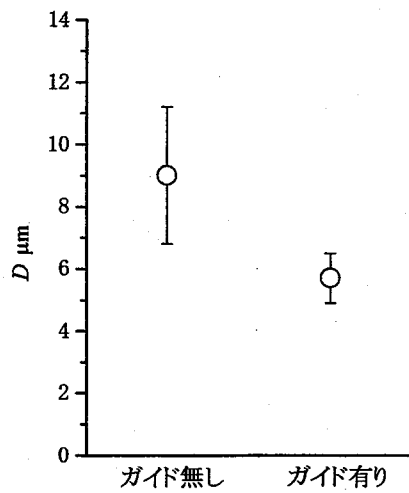


図 2-6 D の比較

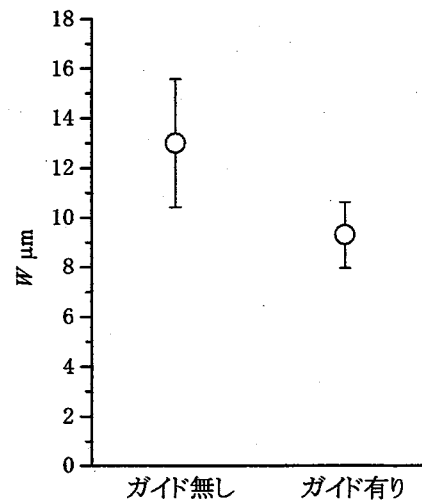


図 2-7 W の比較

られることがわかった。

図 2-8 は切断回数に伴う平均切断溝幅 B_A と切断幅 B の変化をプロットしたものである。 B_A に関しては，“ガイド無し”の場合と“ガイド有り”の場合の差は小さく，いずれの場合も上下変動が小さい。今回使用したブレードの厚さは $100 \pm 5 \mu\text{m}$ であるから， B_A の値はガイドの有無には関係なく，ブレードの厚さに

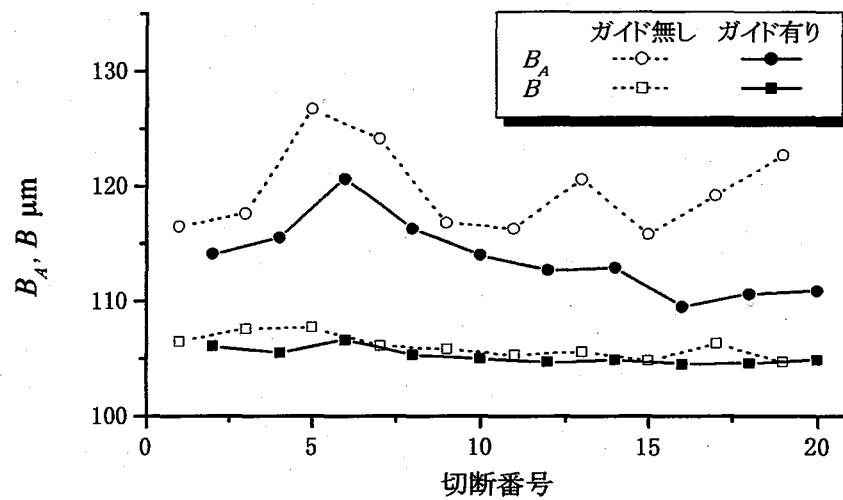


図 2-8 切断回数に伴う B_A と B の変化

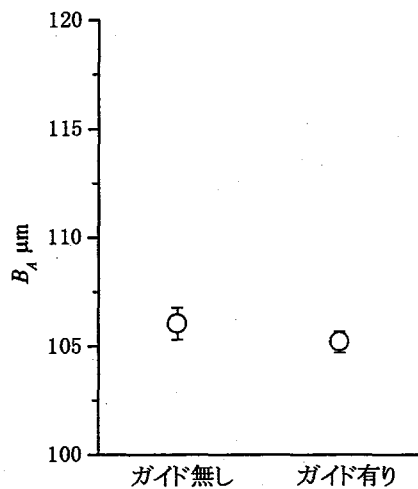


図 2-9 B_A の比較

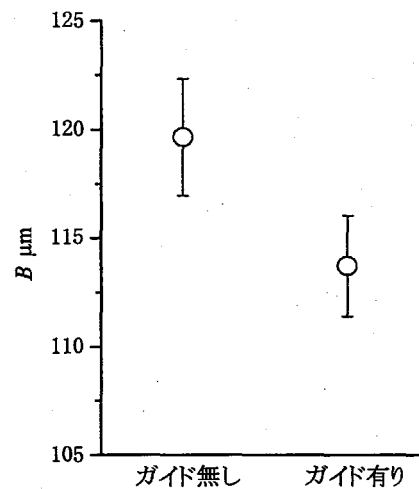


図 2-10 B の比較

ほぼ等しくなるものと考えられる。切断しろに対しては B_A よりも切断幅 B の方が重要である。図 2-8 は、ガイドを用いることで B が小さくなることを示している。ガイド有り“の場合の B の変化も D や W の変化と同様に切断実験開始直後に増加傾向を示し、その後、減少傾向に転じている。 B_A と B の平均値およびそれらの 95%信頼区間を示したのが図 2-9 と図 2-10 である。図 2-10 において 95%信頼区間の幅が“ガイド無し”と“ガイド有り”で同程度に示されている

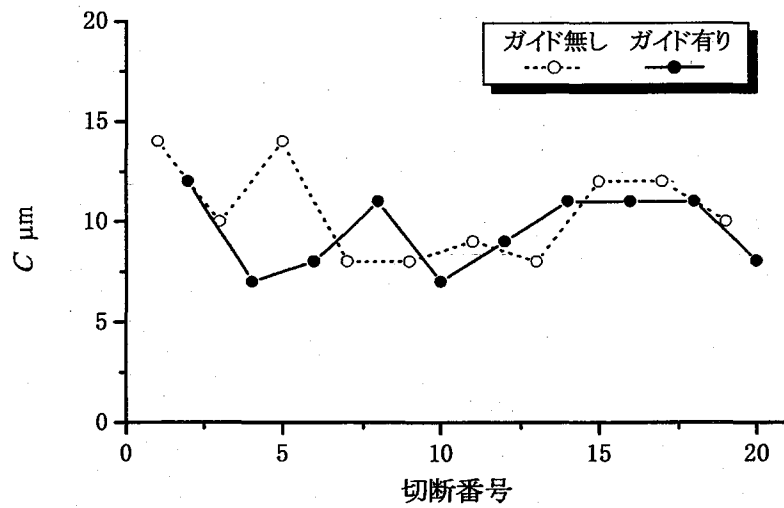


図 2-11 切断回数に伴う C の変化

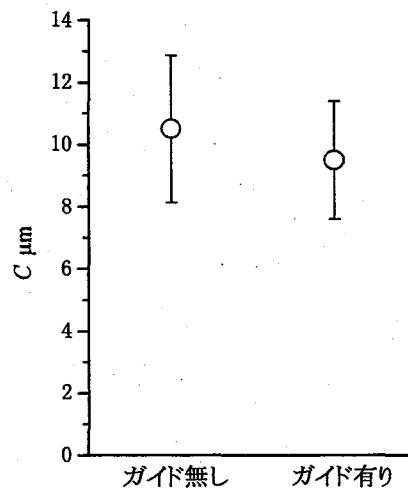


図 2-12 C の比較

が、“ガイド有り”の場合は単調減少が大きいことを示すものであり、上下変動が大きいことを示すものではない。以上の結果から、ブレードガイドを用いることで、より狭い切断しろに対応できることがわかった。

図 2-11 は切断回数に伴う最大チップングサイズ C の変化をプロットしたものである。最大チップングサイズの平均値とその 95% 信頼区間を示したのが図 2-

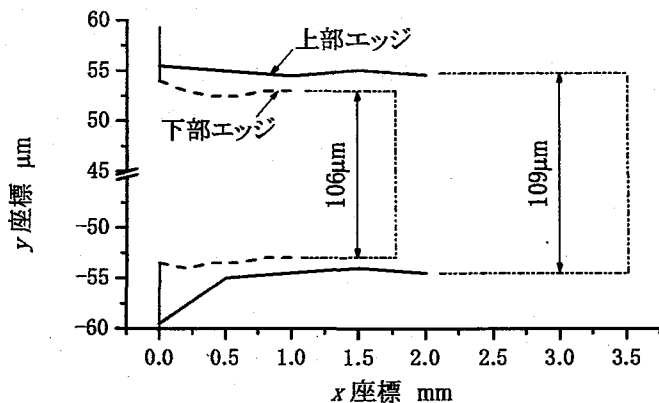


図 2-13 ガイド面上部エッジと下部エッジの形状

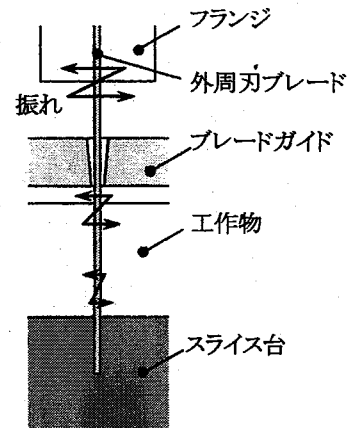


図 2-14 くさび状の隙間ができるメカニズム

12 である。“ガイド無し”と“ガイド有り”で最大チップングサイズに大きな差異は見られない。チップングサイズは、ブレードのたわみよりもむしろブレードの切れ味の影響を強く受けるものと考えられる。

図 2-13 は、ガイド面上部エッジと下部エッジの xy 平面における形状を示したものである。なお、上部エッジに関してはブレードガイド端部から 2mm の範囲で、下部エッジに関してはブレードガイド端部から 1mm の範囲で測定を行った。ガイド上面におけるスリット幅は約 109 μm 、下面におけるスリット幅はそれよりも狭く約 106 μm であった。すなわち、 yz 断面において、ブレード側面とガイド面との間にはくさび状の隙間が存在することになる。

こうした、くさび状の隙間が生じる理由を次のように考えた。ブレードガイド部材にスリット加工を行った直後は、スリット幅はガイド上面と下面においてほぼ同じであり、ブレード側面とガイド面との隙間にくさび状ではない。しかし、ブレードにはブレード自身の反りやフランジ面の振れに起因した y 方向の振れがわずかにあるため、切断中にブレード側面がガイド面に接触し、ガイド面は徐々に摩耗してスリット幅が広がっていく。その際、図 2-14 のように、ブレードの、工作物に近い位置での y 方向の振れは工作物によって強く拘束される

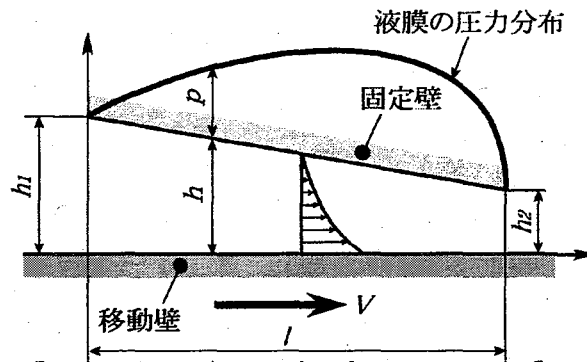


図 2-15 くさび状隙間内の流れ

が、工作物から離れるほどその拘束の影響が少なくなるため、下方よりも上方においてスリット幅が広くなるものと考えられる。”ガイド有り“の実験結果で、 D , W , B が切断回数の増加に伴って減少傾向を示したのは、ブレード側面とガイド面の隙間が変化し、それによってそこに発生する研削液の動圧が変化したためではないかと考えられる。そこで、隙間形状と動圧の関係を簡単な解析を行って調べることにした。

2.4 ブレード側面とガイド面の隙間に生じる動圧の概算

ブレードガイドがブレードのたわみを拘束するメカニズムとして、ブレード側面とガイド面の機械的接触およびブレード側面とガイド面との隙間に流入する加工液の動圧の二つの効果が考えられる。ここでは、後者の影響についてだけ考える。

図 2-15 のようなくさび状の隙間 h があって、移動壁が V の速度で動くとき、これら二面間の流体の流れによって上方の固定壁には次式で与えられる圧力 p が作用する⁵⁾。

$$p = \frac{6\mu V l}{h_1^2 - h_2^2} \frac{(h_1 - h)(h - h_2)}{h^2} \quad (2-1)$$

ここで μ は流体の粘度であり、 l は固定壁の幅である。また、 h_1 と h_2 は固定壁

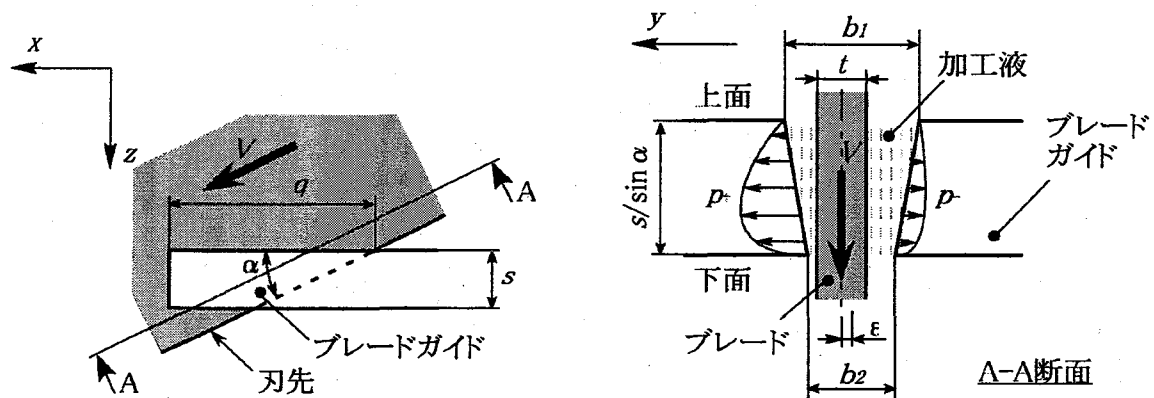


図 2-16 解析モデル

の端部における隙間である。なお、この式の導出にあたり、以下の仮定がなされている。

- ① 流体の流れは層流である。
- ② 移動壁の壁面に対して垂直方向にのみ流体の速度変化が大きい。
- ③ 図 1 5 において紙面に垂直な方向への流体の流れがない。
- ④ $h = h_1$ と $h = h_2$ の位置において $p = 0$ である。

ブレード側面とガイド面の隙間における研削液の流れに対してもこれらの仮定を大胆に適用し、そこに発生する動圧を概算することにする。

解析モデルを図 2-16 に示す。解析をさらに簡単にするため、ブレード自身の反りやフランジ面の y 方向の振れが無いものとする。また、ブレードにたわみが無いとき、ガイド面はブレード中央面に対して両側に対称に位置しているものとする。ここで、ガイド面は z 方向に対して一定の傾きを持っており、ガイド上面と下面におけるスリット幅をそれぞれ、 b_1 、 b_2 とする。さらに、ブレードがたわんで y 方向に変位する際に生じるブレードのたわみ角を無視する。

図 2-17 は、ブレードの厚さ t を $100 \mu\text{m}$ 、 $b_1 = 109 \mu\text{m}$ 、 $b_2 = 106 \mu\text{m}$ 、 $V = 2300\text{m/min}$ 、 $\mu = 1.002 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ とし、ガイド位置でのブレードのたわみ量 ε をゼロとしたときにガイド部においてブレード側面に作用する動圧の分布を表したものである。ガイドの厚さの中央よりもわずかに下方において動圧が最大になることがわかる。

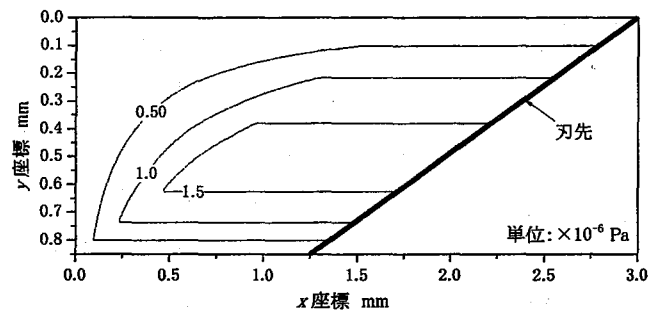
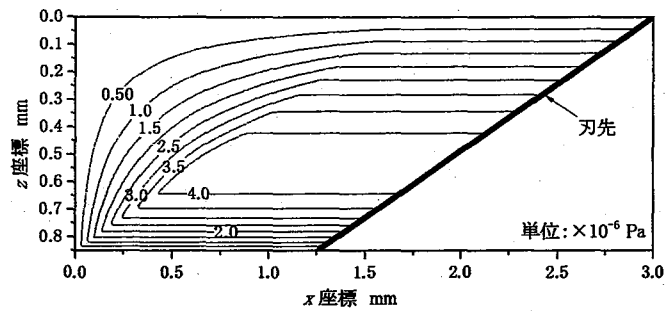
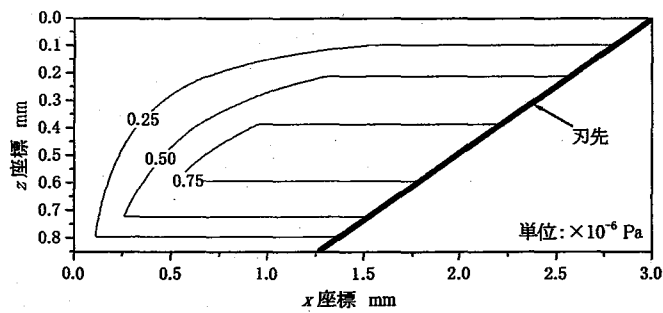


図 2-17 $\varepsilon = 0 \mu\text{m}$ のときの動圧



(a) y 軸正側における動圧 p_+



(b) y 軸負側における動圧 p_-

図 2-18 $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$ のときの動圧

図 2-17 の計算条件で ε だけを変えて $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$ とし, y 軸正側と負側のブレード側面に作用する動圧の分布を示したのが図 2-18 である. ブレードが y 軸正側

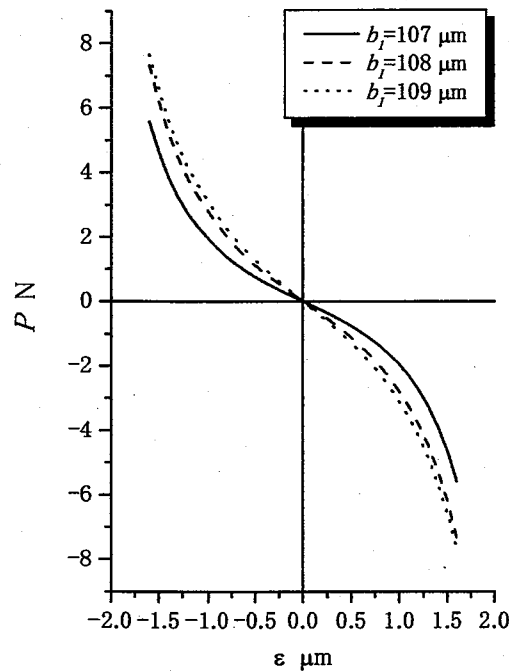


図 2-19 ε と P の関係

にたわみを生じると、 y 軸正側のブレード側面に作用する動圧が上昇し、逆に y 軸負側のブレード側面に作用する動圧が減少する。したがって、 p_+ と p_- の差が、たわみを抑制しようとする力としてブレードに作用することになる。

ガイド位置でのブレードのたわみ量 ε を横軸にとり、動圧によってブレードに作用する力 P を縦軸にとって示したのが図 2-19 である。ここでは図 2-17 の計算条件のうち b_l と ε だけを変化させた。 b_l が大きいほど $\varepsilon = 0 \mu\text{m}$ 付近でのグラフの傾きが大きくなることがわかる。これはブレードの両側にあるガイド面の傾きが z 方向に対して大きくなるほどブレードのたわみが強く抑制されることを示している。したがって、“ガイド有り”の実験結果で、 D 、 W 、 B が切断回数の増加に伴って減少傾向を示したのは、切断回数の増加に伴ってガイド面上部が摩耗し、 z 方向に対するガイド面の傾きが大きくなったためではないかと考えられる。

第3章 ブレードガイドが切断精度に与える影響についての理論解析

本解析では、ブレードにたわみを発生させる要因としてブレードの偏摩耗だけを考え、その他の要因は無視することにする。また、一般的なスライシング加工における研削条件やブレードのたわみの大きさなどを考え、ブレードのたわみに与える水平方向や垂直方向の研削抵抗分力および体積力の影響についても無視することにする。

3.1 ブレードに作用する研削抵抗

ブレードに作用する研削抵抗を解析するにあたり、図 2-20 のように砥石軸上のブレード幅中央に原点 O を持つ右手系の直交座標 (x, y, z) を導入する。ここで x, y, z の各軸は、テーブル送り方向の座標軸（テーブル送り方向と反対方向が正）、テーブル面に垂直な座標軸（砥石軸真下方向が正）、砥石軸方向の座標軸である。さらに、この直交座標と共通の座標軸を持つ円柱座標 (r, θ, z) を導入する。なお、 x, y, θ の間には $\tan \theta = x/y$ なる関係が成り立つものとする。

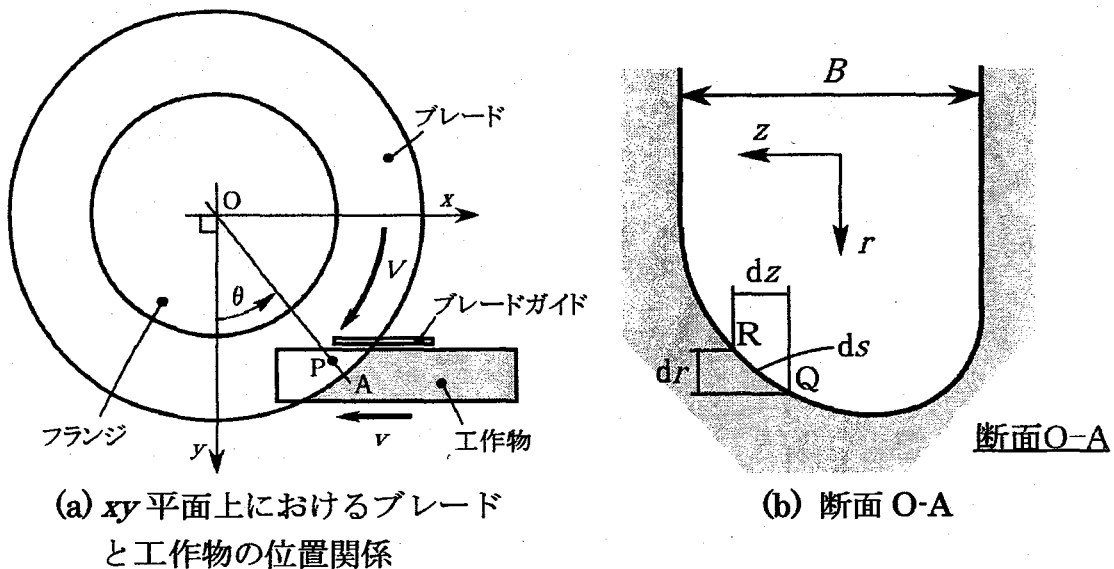


図 2-20 直交座標 (x, y, z) および円柱座標 (r, θ, z)

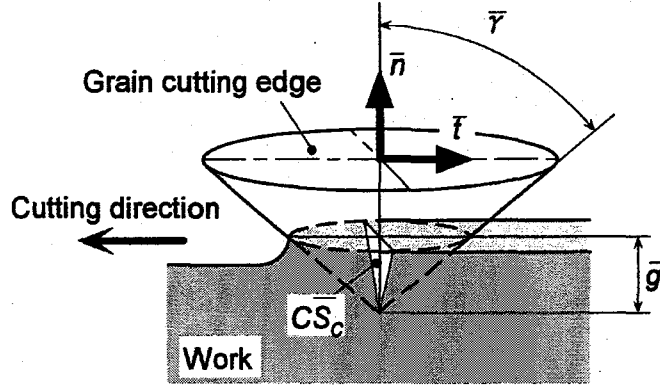


図 2-21 砥粒切れ刃モデル

(1) 砥粒切れ刃に作用する研削抵抗

砥粒切れ刃を図 2-21 のようにブレード表面に垂直な軸を持つ先端半頂角 $\bar{\gamma}$ の円錐形と仮定する。そして、切削中の砥粒切れ刃前縁における被削材の盛上りを考慮した平均砥粒切削断面積を CS_c 、砥粒切込み深さを \bar{g} とすると次式が成り立つ。

$$\bar{g}^2 \tan \bar{\gamma} = CS_c \quad (2-2)$$

切れ刃の母面に作用する面圧力 p に対して、円錐軸に垂直な面上で面圧力に垂直に $\mu' p$ (μ' は摩擦係数) が働くとする。このとき、砥粒に働く切削分力 \bar{t} と \bar{n} は次式で与えられる。

$$\bar{t} = p \bar{g}^2 (1 + \mu' \sec \bar{\gamma}) \tan \bar{\gamma} \quad (2-3)$$

$$\bar{n} = \frac{\pi}{2} p \bar{g}^2 \tan^2 \bar{\gamma} \quad (2-4)$$

式(2-3)、(2-4)に式(2-2)を代入して \bar{g} を消去すれば次式が得られる。

$$\bar{t} = Cp \bar{S}_c (1 + \mu' \sec \bar{\gamma}) \quad (2-5)$$

$$\bar{n} = \frac{\pi}{2} C_p \bar{S}_c \tan \bar{\gamma} \quad (2-6)$$

ここで C_p は比研削抵抗を意味する。砥石半径切込み深さの小さな研削加工の場合、 C_p を定数として扱うことも可能である。しかし、スライシング加工のように砥石半径切込み深さが大きく、しかもブレードがたわむことによってブレード側面が切断面の研削に関わるような加工の場合は C_p を定数と考えると不具合を生じる。そこで本解析では C_p を \bar{S}_c の関数とし、次式のようにおく。

$$C_p = \Lambda \bar{S}_c^{-\varepsilon} \quad (2-7)$$

ここで Λ および ε は被削材によって決まる定数である。式(2-5)、(2-6)に式(2-7)を代入すれば次式が得られる。

$$\bar{t} = \Lambda \bar{S}_c^{1-\varepsilon} (1 + \mu' \sec \bar{\gamma}) \quad (2-8)$$

$$\bar{n} = \frac{\pi}{2} \Lambda \bar{S}_c^{1-\varepsilon} \tan \bar{\gamma} \quad (2-9)$$

(2) ブレード刃先に作用する研削抵抗

図 2-20(b)のように、砥石軸を含み、砥石軸真下から θ の角度を持った平面上でブレード刃先の輪郭を考え、その輪郭線上に長さ ds の微小線素 QR を考える。この微小線素上の砥粒の、盛上りを考慮しない平均切削断面積 \bar{S}_c は次式のように表せる。

$$S_c = \frac{v}{jV} \sin \theta \cdot \frac{dz}{ds} \quad (2-10)$$

ここで、 v は工作物送り速度、 V はブレード周速、 j はブレード作業面の単位面積あたりの有効砥粒切れ刃数である。また、 dz は ds の砥石軸方向の成分である。

微小線素周りの単位面積あたりに作用する研削抵抗の切削分力は $j\bar{t}$ であり、背分力は $j\bar{n}$ である。したがって、その x 方向、 y 方向、 z 方向の分力をそれぞれ

ブレード外周面の輪郭線に沿って積分すれば、ブレード外周の単位長さあたりに作用する研削抵抗の三分力 f_{px} , f_{py} , f_{pz} が得られる。z 軸の原点をブレード幅中央にとり、ブレード幅を B として積分すると次のようになる。

$$f_{px} = -\frac{1}{2} \Lambda \left(\frac{v}{V} \right)^{1-\varepsilon} B j^\varepsilon \left\{ \pi \kappa_{f1} \tan \bar{\gamma} \cdot \sin^{2-\varepsilon} \theta - 2 \kappa_{f2} (1 + \mu' \sec \bar{\gamma}) \sin^{1-\varepsilon} \theta \cdot \cos \theta \right\} \quad (2-11)$$

$$f_{py} = -\frac{1}{2} \Lambda \left(\frac{v}{V} \right)^{1-\varepsilon} B j^\varepsilon \left\{ \pi \kappa_{f1} \tan \bar{\gamma} \cdot \sin^{1-\varepsilon} \theta \cdot \cos \theta + 2 \kappa_{f2} (1 + \mu' \sec \bar{\gamma}) \sin^{2-\varepsilon} \theta \right\} \quad (2-12)$$

$$f_{pz} = \frac{\pi}{2} K \left(\frac{v}{V} \right)^{1-\varepsilon} B j^\varepsilon K_f \tan \bar{\gamma} \cdot \sin^{1-\varepsilon} \theta \quad (2-13)$$

ここで、

$$K_f = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} \left(\frac{ds}{dz} \right)^\varepsilon \frac{dr}{ds} dz \quad (2-14)$$

$$\kappa_{f1} = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} \left(\frac{dz}{ds} \right)^{1-\varepsilon} dz \quad (2-15)$$

$$\kappa_{f2} = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} \left(\frac{ds}{dz} \right)^\varepsilon dz \quad (2-16)$$

である。

(3) ブレード側面に作用する研削抵抗

ブレードにたわみが生じるとブレードは刃先だけでなく側面も研削に関与するようになる。ブレード側面上に考えた P 点周りの単位面積に作用する研削抵抗の三分力 f_{sx} , f_{sy} , f_{sz} は次式で表すことができる。

$$f_{sx} = \Lambda j^\varepsilon \left(\frac{u_s}{V} \right)^{1-\varepsilon} \left(\frac{a}{r} \right)^{1-\varepsilon} (1 + \mu' \sec \bar{\gamma}) \cos \theta \quad (2-17)$$

$$f_{sy} = -\Lambda j^\varepsilon \left(\frac{u_s}{V} \right)^{1-\varepsilon} \left(\frac{a}{r} \right)^{1-\varepsilon} (1 + \mu' \sec \bar{\gamma}) \sin \theta \quad (2-18)$$

$$f_{sz} = \frac{\pi}{2} \Lambda j^\varepsilon \left(\frac{u_s}{V} \right)^{1-\varepsilon} \left(\frac{a}{r} \right)^{1-\varepsilon} \tan \bar{\gamma} \quad (2-19)$$

ここで u_s はP点周りの単位面積による単位時間当りの工作物除去体積である。

3.2 数値解析の手順

数値解析の一連の手順をまとめると以下のようなになる。

- ① 計算条件を入力する。
- ② x 軸に平行な直線と y 軸に平行な直線を用い、ブレード、ブレードガイド、工作物を、図2-22のように $\Delta s \times \Delta s$ の面素に分割する。
- ③ 工作物をブレードに対して1ステップ(Δs)進める。
- ④ ブレードのたわみ形状をある形状に仮定する。

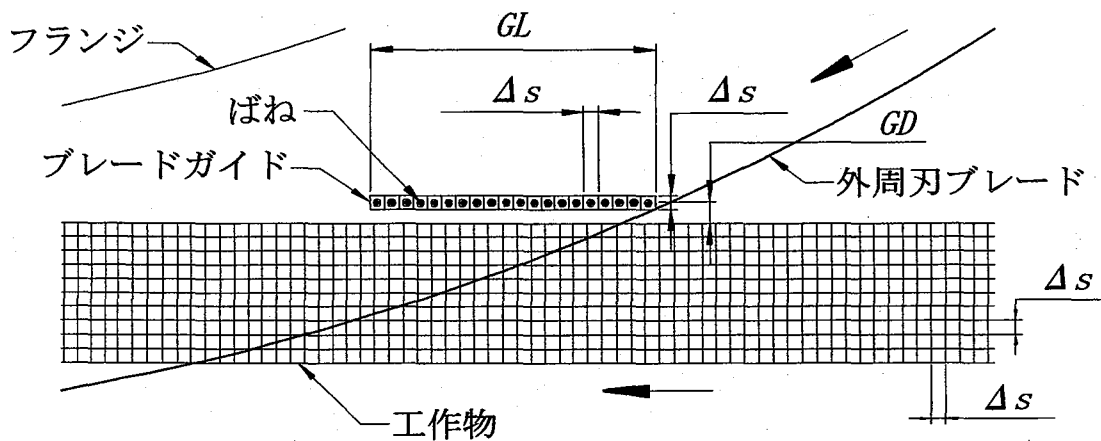


図 2-22 ブレードとブレードガイドと工作物のメッシュ分割

- ⑤ ④のたわみ形状になることを前提として、ブレードに作用する研削抵抗の z 方向分力を 1 ステップ前までに創成された切断面形状をもとに式(2-13)と式(2-19)から求める。また、ブレードガイドによってブレードに作用する力を求める。なお、ブレードガイドがブレードに与える力は、ブレードガイドの各面素の中央にブレードのたわみを抑制するばねがあるものとして算出する。
- ⑥ ⑤で求めた力が各面素の中央に点荷重として作用したときのブレードのたわみ形状を解析的に求める。
- ⑦ ④で仮定したブレードのたわみ形状と⑥で求めたブレードのたわみ形状とを比較し、その差が十分小さければブレードのたわみ形状を仮定した形状に決定し、差が大きければ④で仮定した形状を修正して④～⑦を繰り返す。
- ⑧ ⑦で決定したブレードのたわみ形状をもとに切断面形状を修正する。さらに研削抵抗の三分力を算出する。
- ⑨ ③に戻る。
- ⑩ 工作物がブレードから離れるまで③～⑨を繰り返す。

3.3 解析結果の一例

解析結果の一例として、ブレードガイドなしの場合と有りの場合に創成される切断面形状を表 2-2 の計算条件のもとで解析した。ブレードにたわみをもたらす要因として、図 2-23 に示す偏摩耗をブレード刃先に与えた。解析して得られた切断面形状を図 2-24 に示す。また、切断精度の評価値を表 2-3 に示す。ブレードガイドの適用によって切断軌道の偏位がほぼ $2/3$ 程度に減少することがわかる。また、切断面の平坦度も大幅に改善されることがわかる。図 2-25 は研削抵抗の三分力の推移を比較したものである。研削抵抗の z 方向成分がブレードガイドの適用によって低減することがわかる (表 2-4)。

表 2-2 計算条件

外周刃ブレード	直径	73 mm
	厚さ	0.1 mm
	ヤング率	$9.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
	ポアソン比	0.28
	刃先形状係数 ($\epsilon = 0.5$)	
	K_f	6.62×10^{-2}
	κ_{π}	0.899
	κ_{θ}	1.154
	$\tan \gamma$	30
	砥粒切れ刃密度	450 個/mm ²
フランジの直径		65 mm
ブレードガイド (ガイド有りの場合)	ガイド部長さ GL	4 mm
	工作物上面からの距離 GD	0.3 mm
	単位面積当りのばね定数	2.5×10^9 (N/m ²)/m
工作物	長さ	50 mm
	厚さ	2 mm
	比研削抵抗 C_p	$320 S_c^{-0.5} \text{ N/mm}^2$
	摩擦係数 μ'	0.13
ブレード周速		2300 m/min
工作物送り速度		80 m/min
切込み深さ		3 mm
研削モード		下向き
メッシュサイズ	Δs	0.2 mm

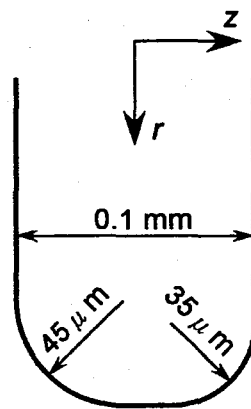
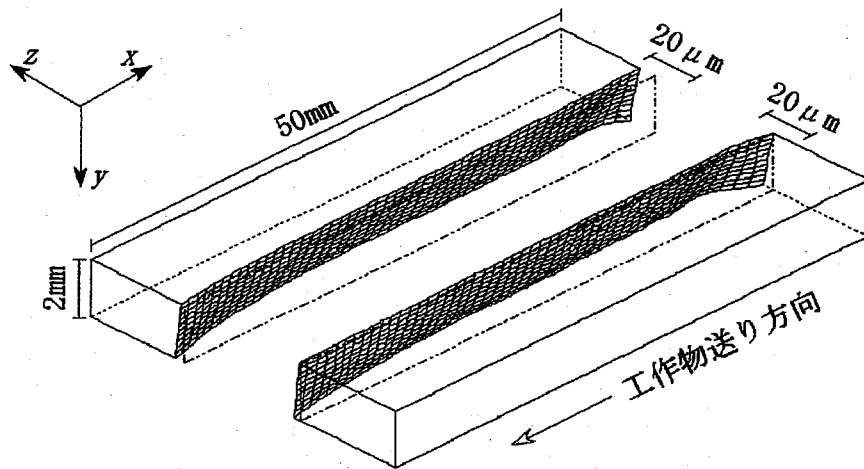
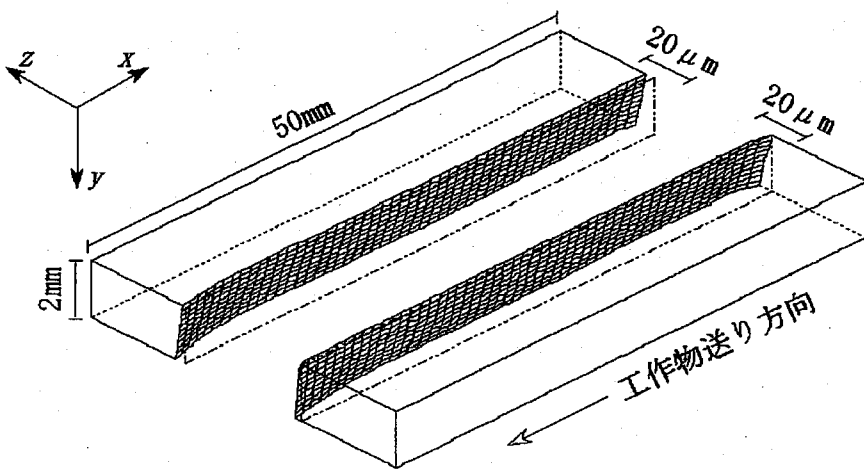


図 2-23 ブレード刃先の偏摩耗



(a) ガイドなしの場合



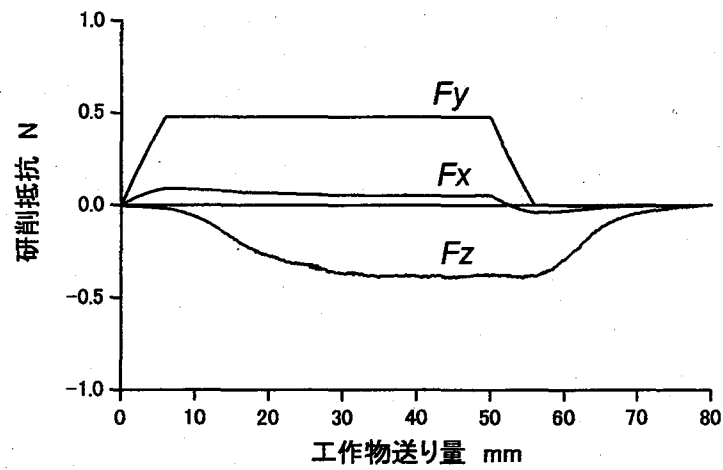
(b) ガイド有りの場合

図 2-24 切断面形状の比較

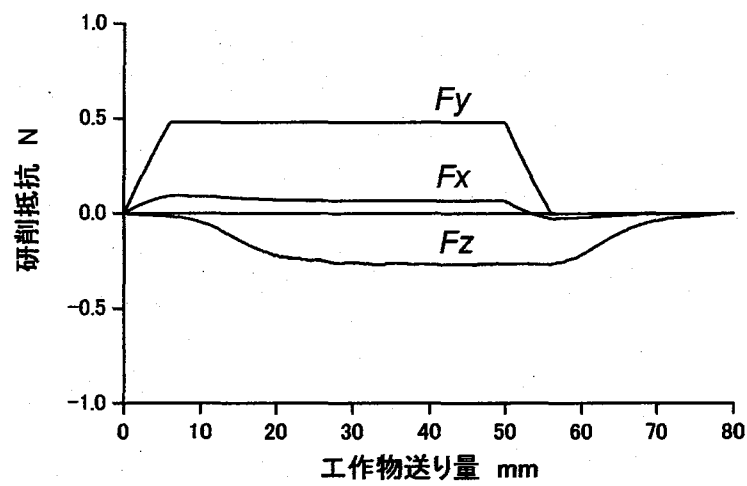
表 2-3 切断精度の比較

	ガイドなし	ガイド有り
最大偏位 D	15.0	9.4
Z軸正側の切断面のWARP	13.5	8.1
Z軸負側の切断面のWARP	13.1	8.2

単位は μm



(a) ガイドなしの場合



(b) ガイドありの場合

図 2-15 研削抵抗の三分力の推移の比較

表 2-4 F_z の絶対値の比較

	ガイドなし	ガイド有り
F_z の絶対値の最大値	0.39	0.27

単位は N

3.4 工作物とガイドの距離が切断面の最大偏位に与える影響

表 2-2 に示した計算条件のうち、工作物上面とガイド中央面の距離である G_D だけを変化させ、 G_D が切断面の最大偏位 D に与える影響を調べた。結果を図 2-16 に示す。図からわかるように、 G_D の増加に伴って D が増加する傾向が見られる。この結果より、ブレードガイドは工作物上面にできるだけ接近させて設置することが望ましいことがわかる。

3.5 ガイドの長手方向のサイズが切断面の最大偏位に与える影響

次に、表 2-2 に示した計算条件のうち、ガイド長手方向のサイズ G_L だけを変化させ、 G_L が切断面の最大偏位 D に与える影響を調べた。結果を図 2-17 に示す。図からわかるように、 G_L が 2mm 以上の範囲では D はほとんど変化しないことがわかる。この結果より、ブレードガイドの長手方向のサイズを過度に長くしても期待するような効果は得られないことがわかる。

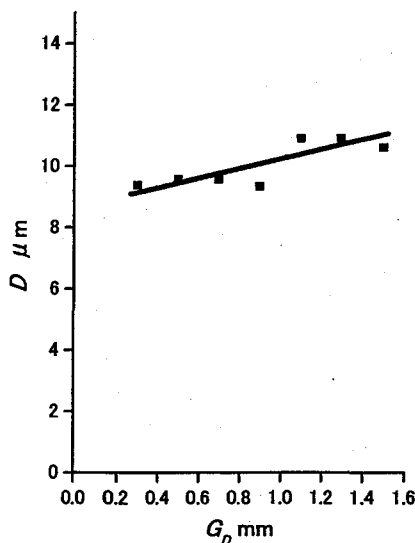


図 2-16 G_D が D に与える影響

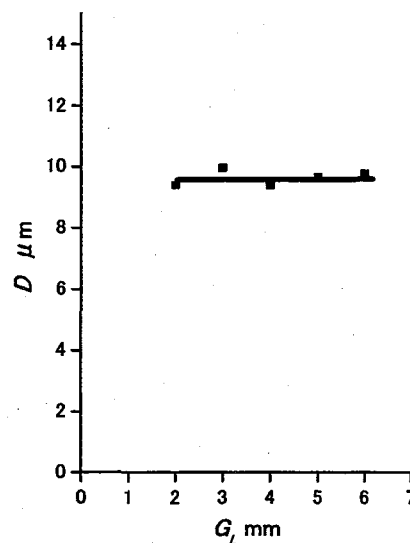


図 2-17 G_L が D に与える影響

第3章 ブレード刃先アクティブ制御システムの構成と基本性能

3.1 ブレード刃先アクティブ制御システムの構成

試作したブレード刃先アクティブ制御システムの外観を図 2-17 に示す。外観は図 2-1 と比較して大きくは変っていないが、ブレードのたわみを計測するための直径 2mm の渦電流式変位センサとブレードガイド駆動のための圧電アクチュエータが新たに付加されている。渦電流式変位センサと圧電アクチュエータの配置をわかりやすく示したのが図 2-18 である。

また、ブレードガイド駆動装置の構造を図 2-19 に示す。図のようにブレードガイドは平行板ばねにより支持されたバックラッシのない構造となっている。

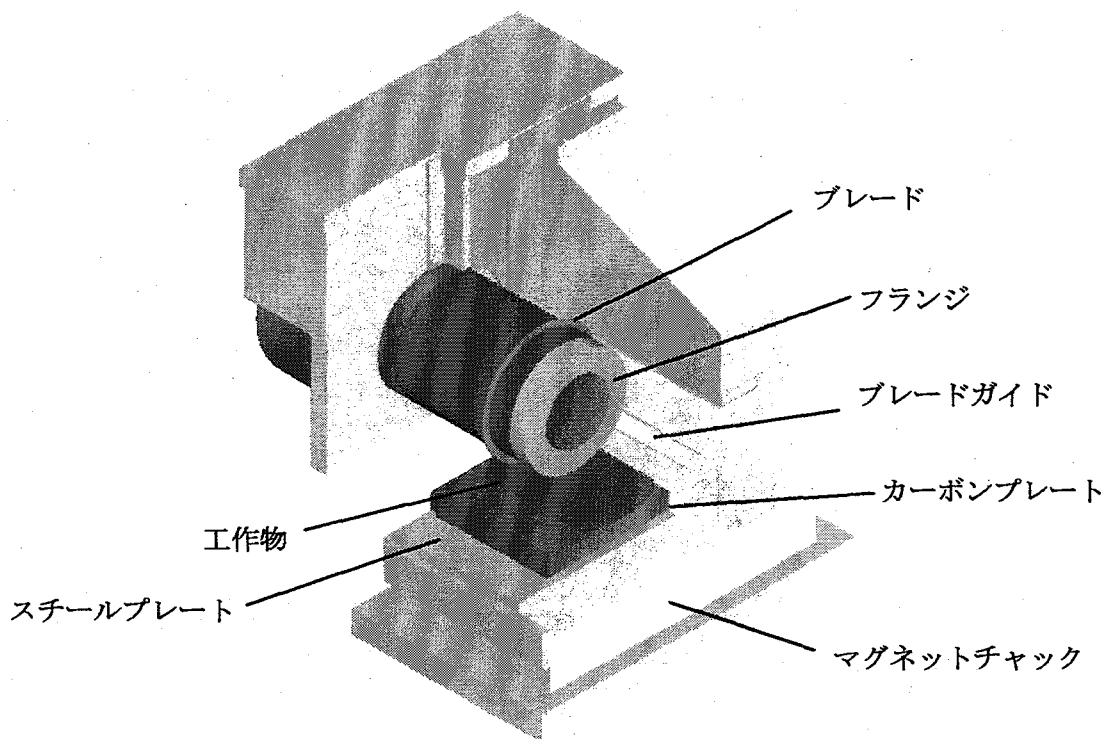


図 2-17 ブレード刃先アクティブ制御システムの外観

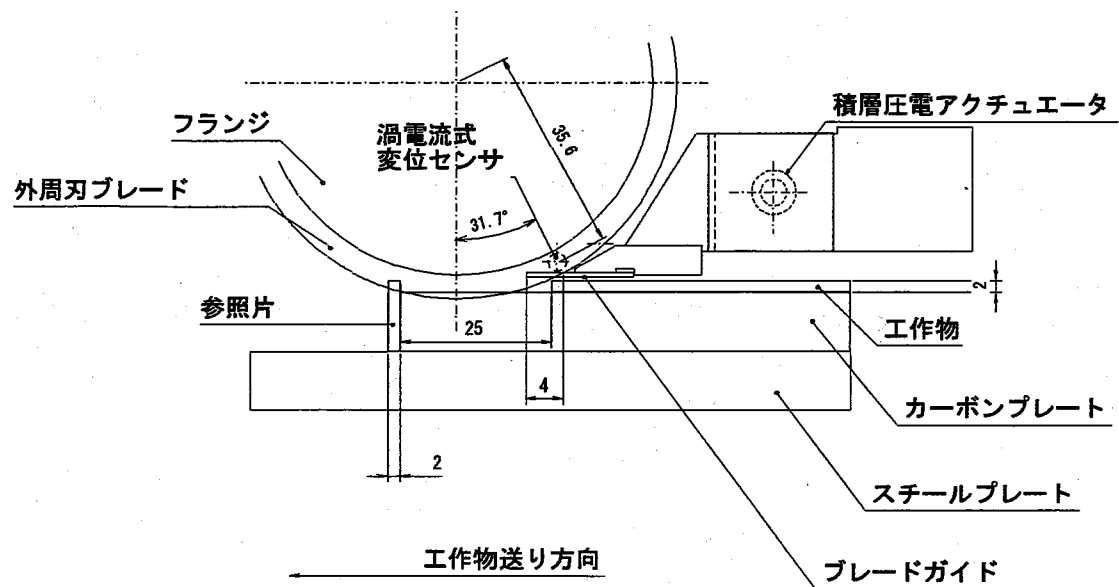


図 2-18 渦電流式変位センサと圧電アクチュエータの配置

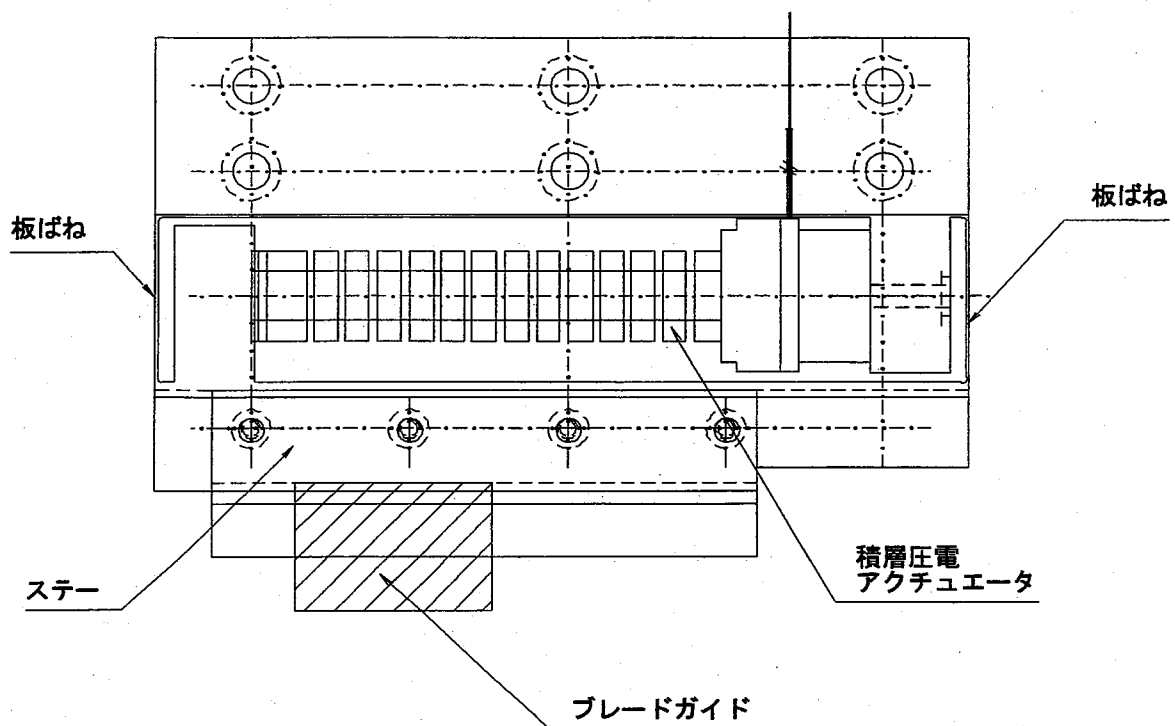


図 2-19 ブレードガイド駆動装置の構造

渦電流式変位センサの変位検出面と測定対象面であるブレード側面との隙間は約 0.2mm とした。渦電流式変位センサからの出力は AD 変換器を介して制御用コンピュータに取り込まれ、コンピュータはその情報に基づいて積層型圧電アクチュエータに電圧を出力し(0~150V)、ブレードガイドの位置を調整することが可能である。

3.2 基礎実験

(1) 実験条件

ガイド部材の厚さを 1mm にした点とブレードガイド下面と工作物上面の z 方向の間隔は 0.48mm とした点を除けば、第 2 章の表 2-1 の実験条件と同じである。

ガイド部分の作製は以下の手順で行った。まず、積層型圧電アクチュエータに 60V の電圧を印加する（この位置をブレードガイドの z 方向の位置の原点 $Z_G=0\text{mm}$ とする）。次にブレードを回転させ、ブレードガイドスライド機構を用いてガイド部材をブレード外周に接触させる(ガイドの x 方向の位置 X_G の原点をこの位置にとる)。次にその位置からガイド部材を 1.5mm/min の極低速で $X_G=4.5\text{mm}$ の位置まで送る。実験時はガイド位置を $X_G=4.0\text{mm}$ とし、ブレード外周とガイドとの間にわずかな隙間を与えた。第 2 章でも述べたように研削点への研削液の供給がブレードガイドによって極端に妨げられないようにするためである。

(2) 基礎実験 1

はじめに圧電アクチュエータに与える電圧とブレードガイドの変位量との関係を調べた。ブレードガイドの変位量は電気マイクロメータを用いて測定した。結果を図 2-20 に示す。電圧を上昇させた場合と下降させた場合におけるこれらの関係は圧電素子のヒステリシスの特性のために微妙に異なることがわかる。

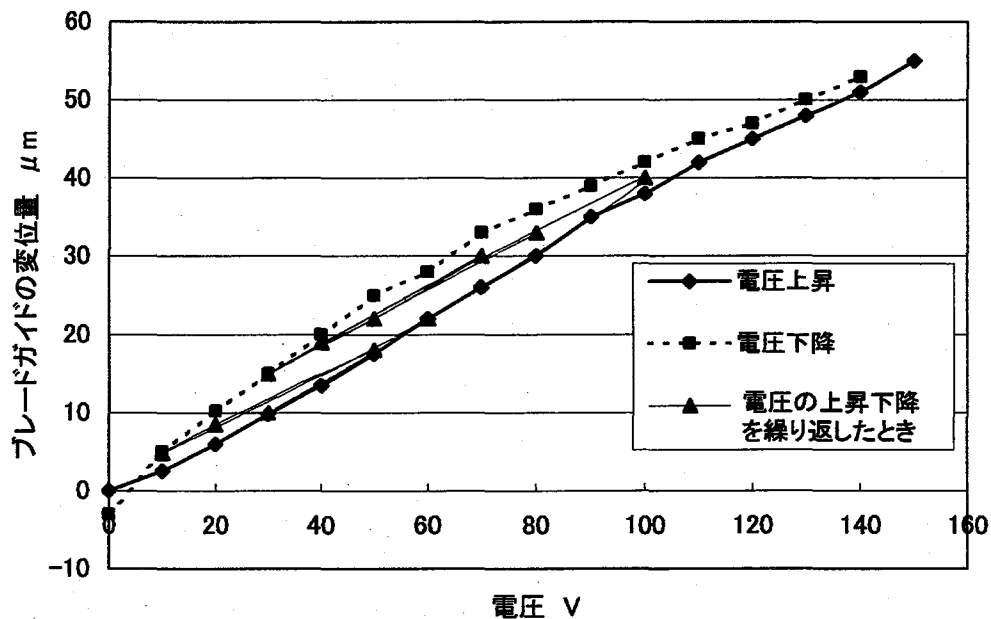
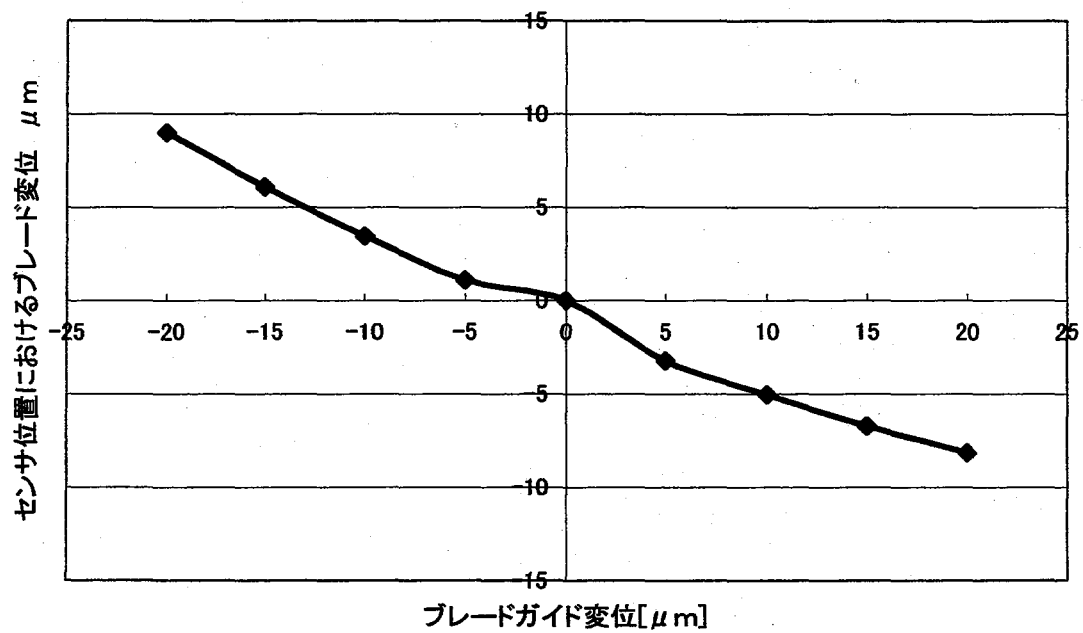


図 2-20 圧電アクチュエータに与える電圧とブレードガイドの変位量との関係

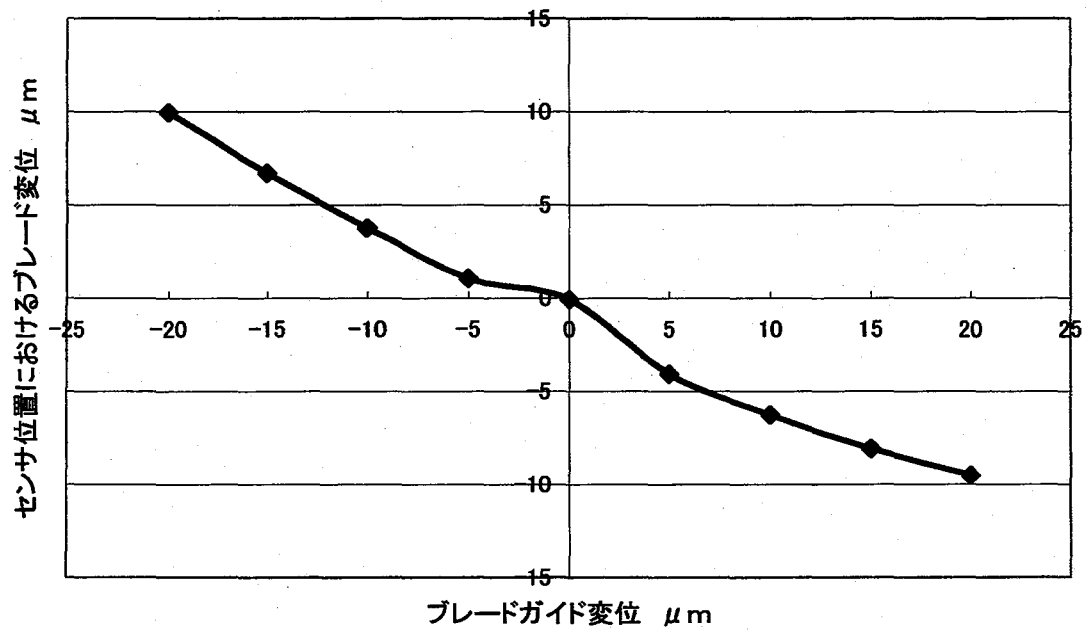
(3) 基礎実験 2

次に、ブレードガイドの z 方向の位置 Z_G を積層型圧電素子により変化させることで、渦電流式変位センサ位置でのブレードのたわみがどのように変化するかを調べた。なお本実験では圧電アクチュエータに与える電圧とブレードガイドの変位量との関係を近似直線で考え、圧電アクチュエータに与えた電圧から Z_G を算出した。

実験では Z_G を $+20\mu\text{m}$ から $-20\mu\text{m}$ まで $5\mu\text{m}$ 刻みで段階的に変化させた場合、 Z_G を $-20\mu\text{m}$ から $+20\mu\text{m}$ まで $5\mu\text{m}$ 刻みで段階的に変化させた場合、 Z_G を $5\mu\text{m}$ から $-5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $-10\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, $-15\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $-20\mu\text{m}$ と変位させた場合、 Z_G を $20\mu\text{m}$ から $-20\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, $-15\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $-10\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $-5\mu\text{m}$ と変位させた場合のそれぞれに対して、そのときの渦電流式変位センサからの出力を調べた。それぞれについての出力を図 2-21 から図 2-24 に示す。実験は、工作物が無い状態と工作物がある状態（切断途中の状態）で行った。

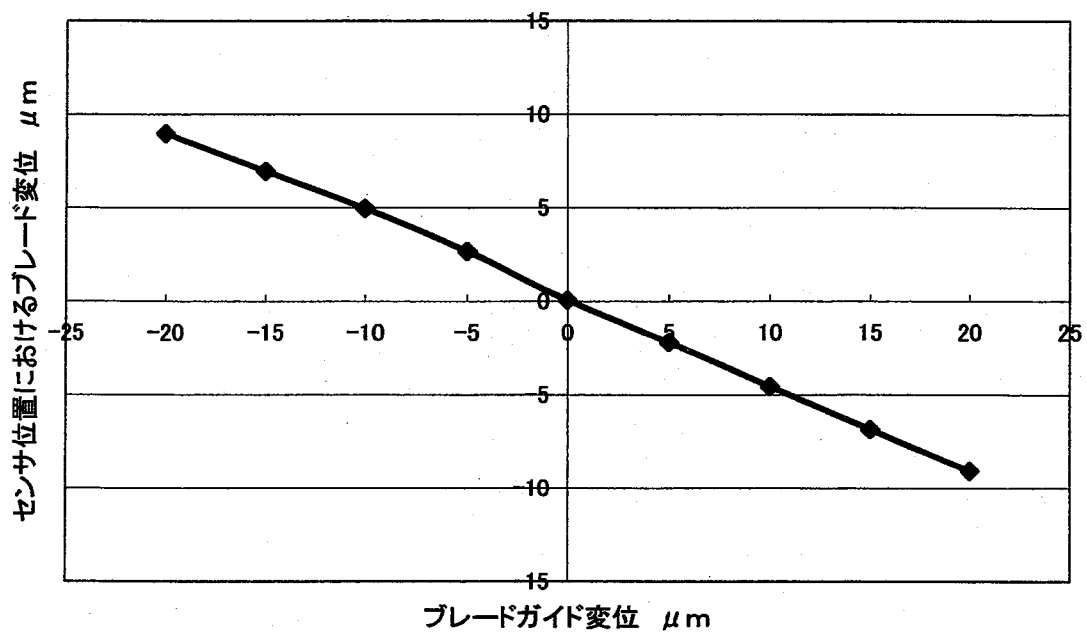


(a) 工作物無し

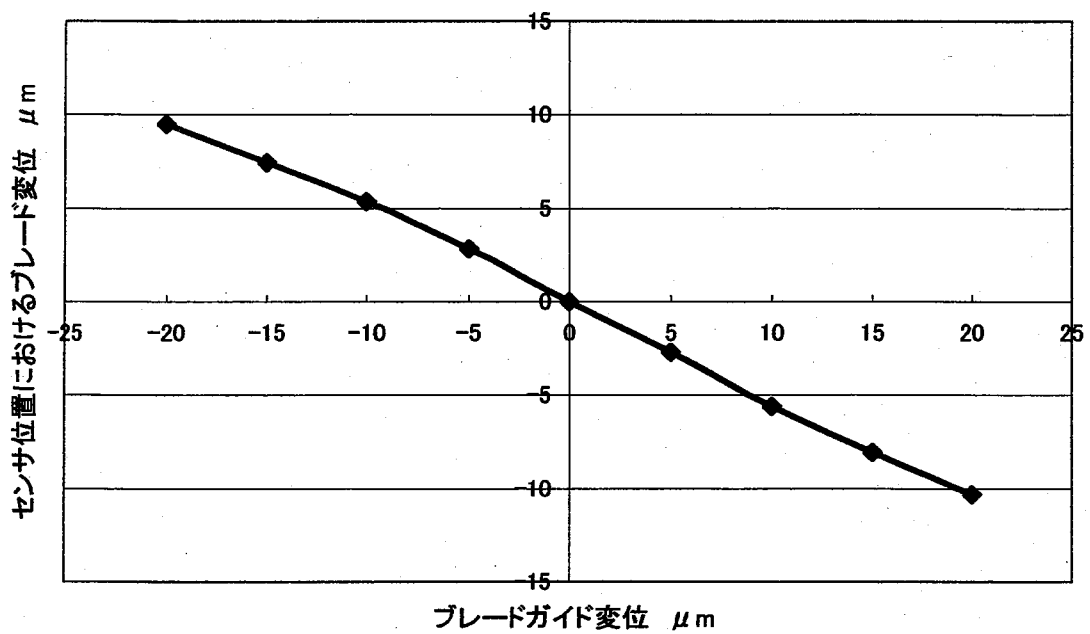


(b) 工作物あり

図 2-21 Z_G を $20\mu\text{m}$ から $-20\mu\text{m}$ へ変化させた場合

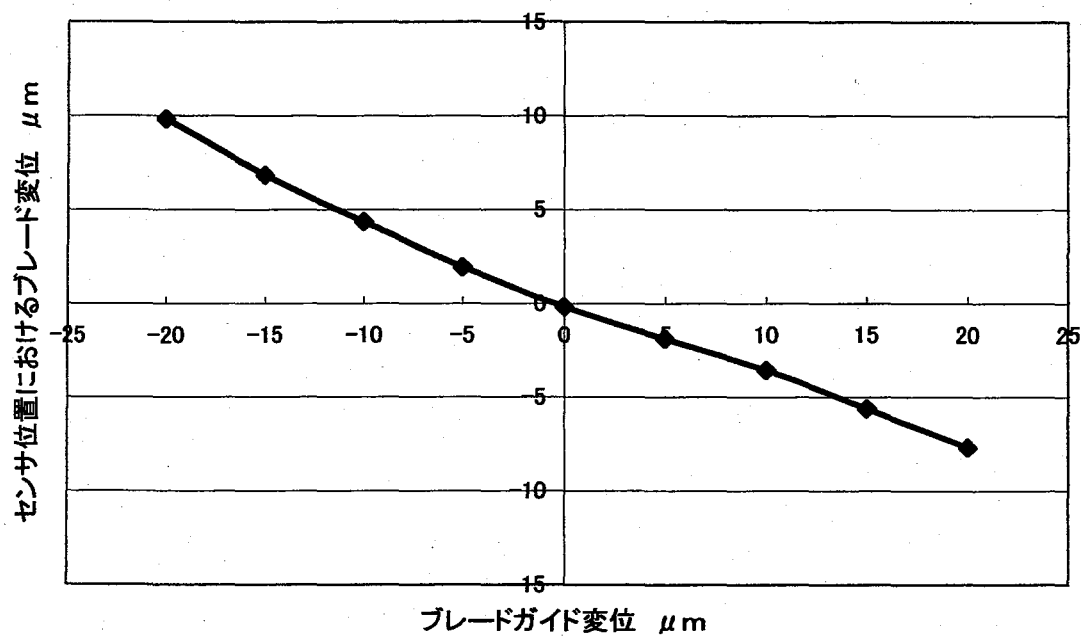


(a) 工作物無し

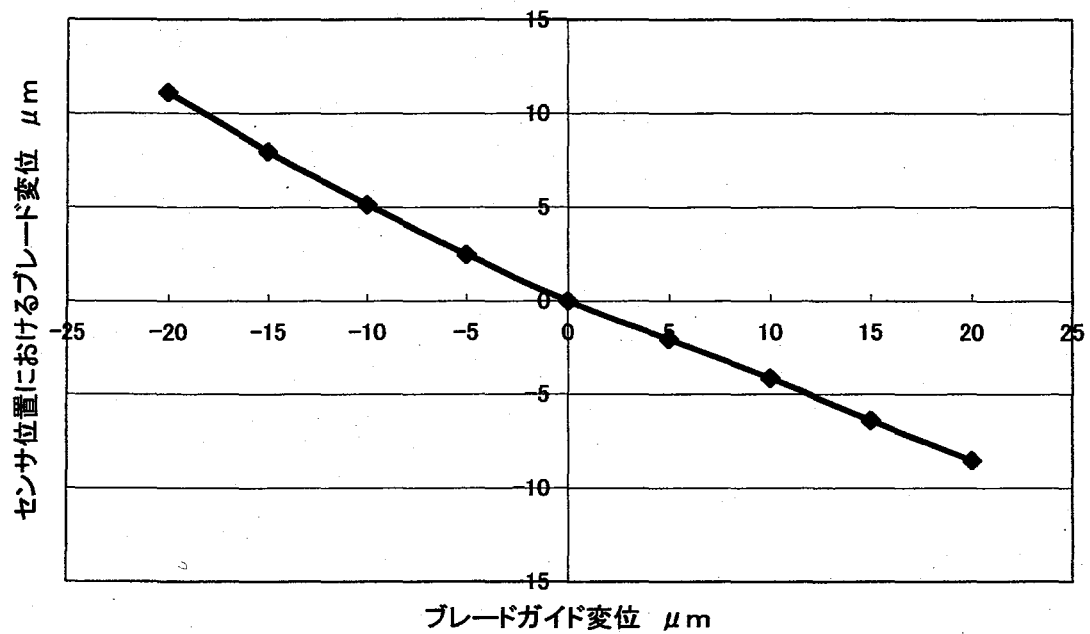


(b) 工作物あり

図 2-22 Z_G を $-20\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ へ変化させた場合

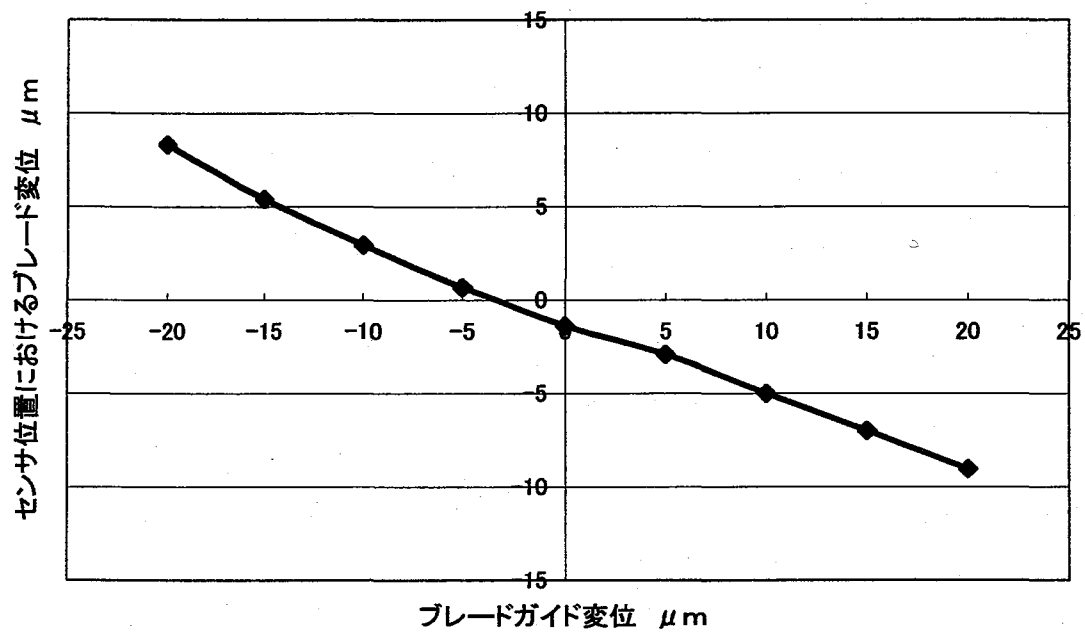


(a) 工作物無し

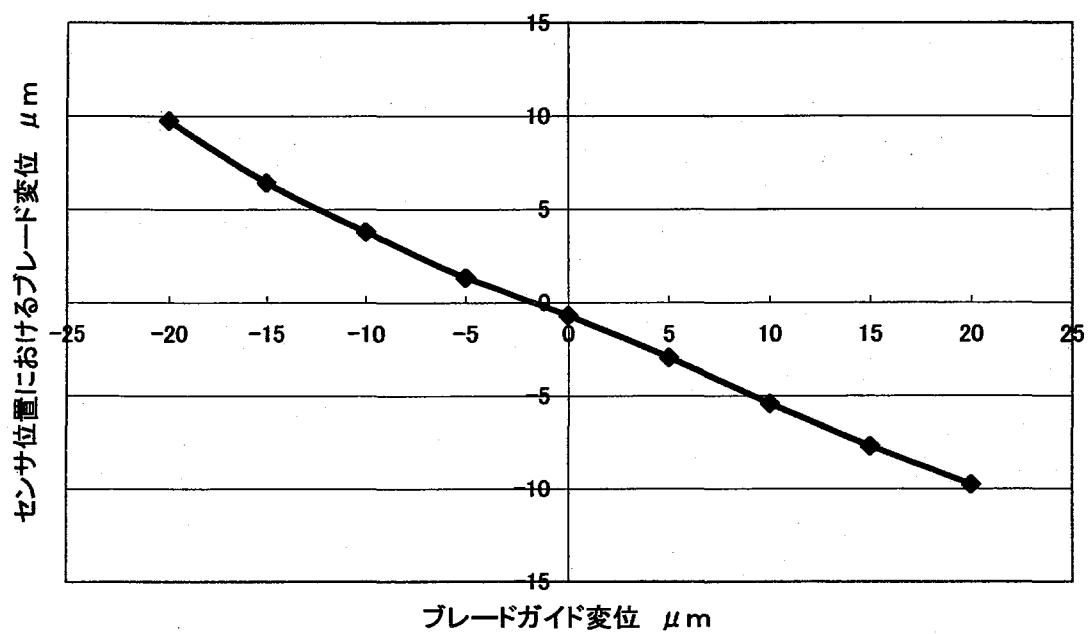


(b) 工作物あり

図 2-23 Z_G を $5\mu\text{m}$ から $-5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $-10\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, $-15\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $-20\mu\text{m}$ と変化させた場合



(a) 工作物無し



(b) 工作物あり

図 2-24 Z_G を $20\mu\text{m}$ から $-20\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$, $-15\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $-10\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $-5\mu\text{m}$ へと変化させた場合

図から、ブレードガイドの位置 Z_G の変化に対して渦電流式変位センサからの出力がほぼ比例して変化していることがわかる。しかし、 Z_G の変化のさせ方によって変化が微妙に異なっているのは圧電アクチュエータのヒステリシスによるものと考えられる。

(4) 基礎実験 3

ブレードガイドの位置 Z_G を零に固定した状態で切断加工を行い、切断軌道の偏位を渦電流式変位センサで捉えられるかどうか調べた。実験で得られた渦電流式変位センサからの出力を図 2-25 に、切断溝上部エッジの形状を図 2-26 に示す。図 2-26 からわかるように本実験では切断溝上部エッジが z 軸負側に最大で $8\mu\text{m}$ 程度偏位したが、これに対応して図 2-25 のように渦電流式変位センサからの出力も最大で $6\mu\text{m}$ 程度変化した。この結果から渦電流式変位センサにより十分に切断軌道の偏位を捉えられることがわかった。

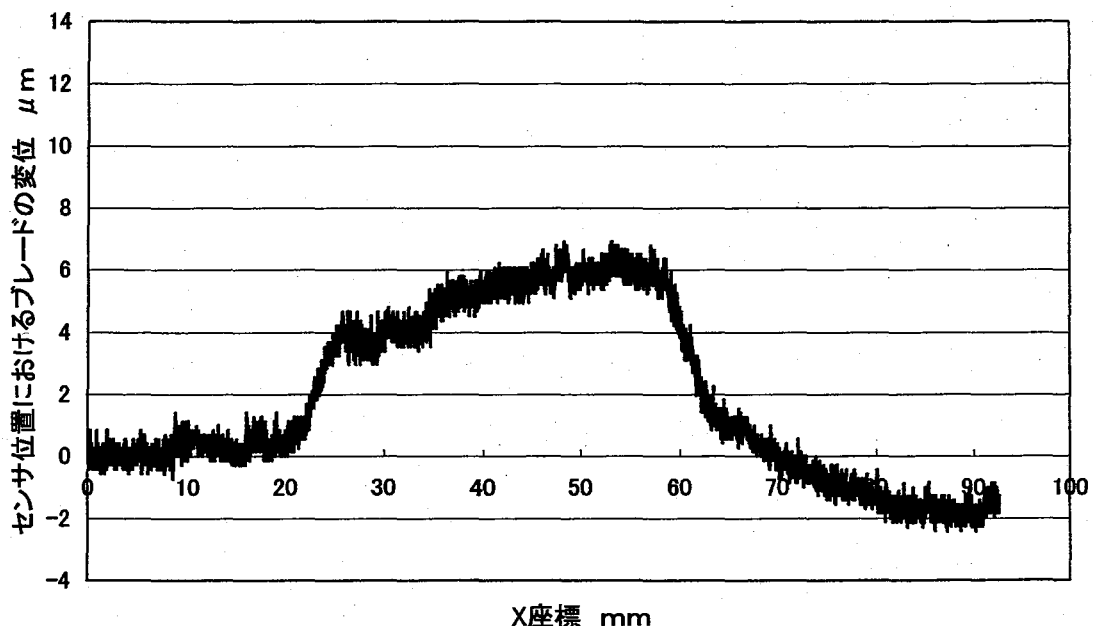


図 2-25 $Z_G=0$ に固定した切断における渦電流式変位センサからの出力

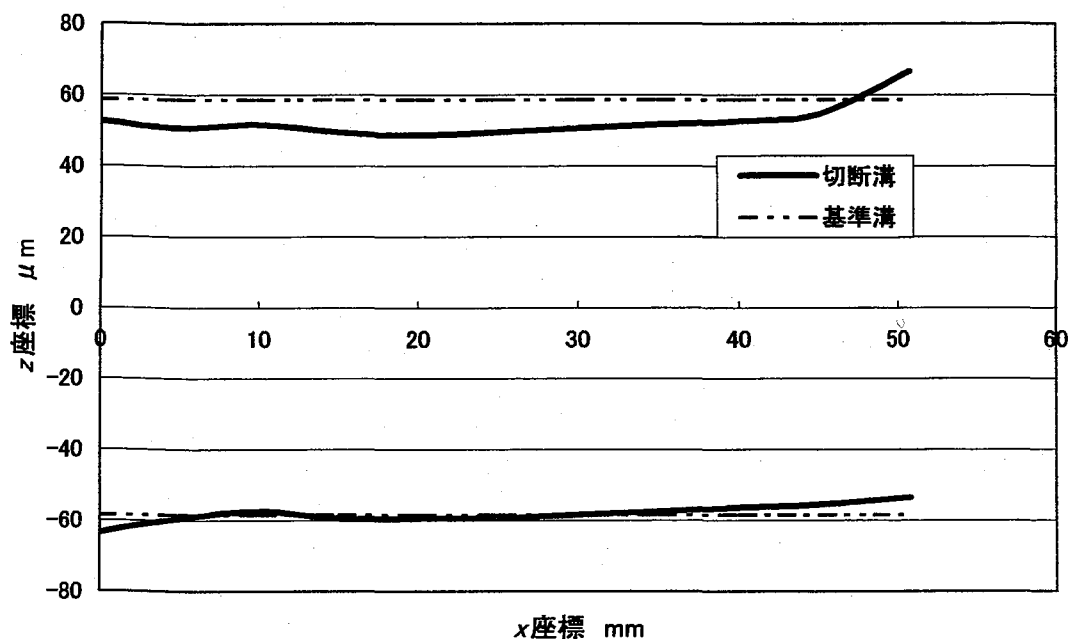


図 2-26 $Z_G=0$ に固定した切断で得られた切断溝上部エッジの形状

(5) 基礎実験 4

切断途中でブレードガイドの位置 Z_G を一時的に $0\ \mu\text{m}$ から $+20\ \mu\text{m}$ まで $10\ \mu\text{m}$ 刻みで変化させたときの渦電流式変位センサからの出力と切断軌道の偏位を調べた。実験で得られた渦電流式変位センサからの出力を図 2-27 に、切断溝上部エッジの形状を図 2-28 に示す。 Z_G の変化によって、渦電流式変位センサからの出力と切断軌道の偏位の両方に変化が現れていることがわかる。したがって、ブレードガイドの位置 Z_G を変化させることで、切断軌道を偏位させることが可能であることがわかった。しかし、 Z_G を急激に変化させるとブレードのたわみが不安定になる傾向が見られた。したがって、 Z_G は緩やかに変化させる必要があると考えられる。

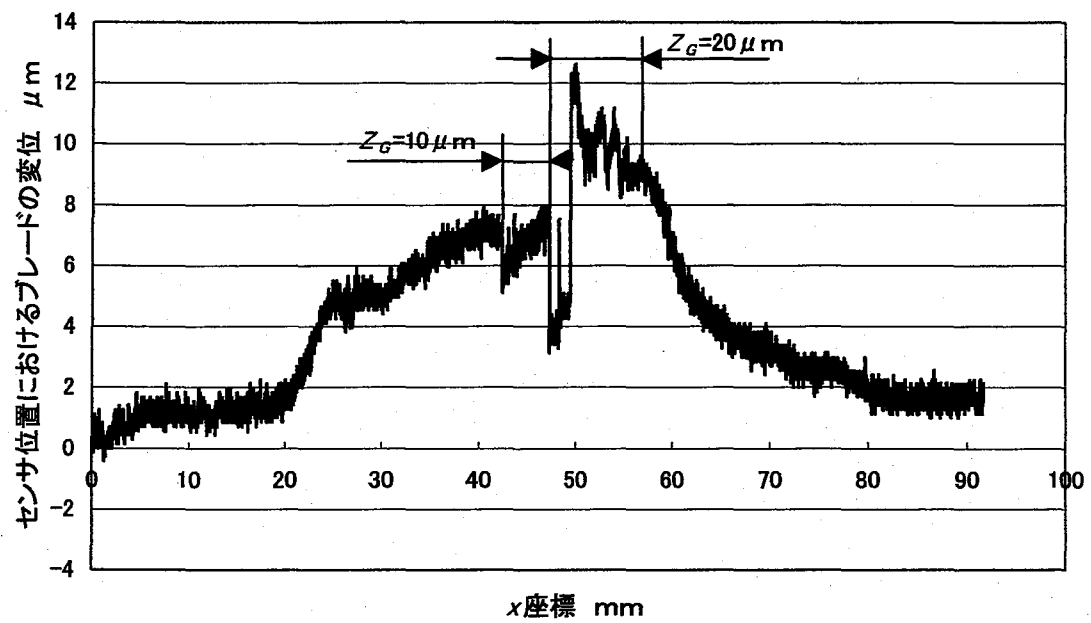


図 2-27 切断中 Z_G を変化させたときの渦電流式変位センサからの出力

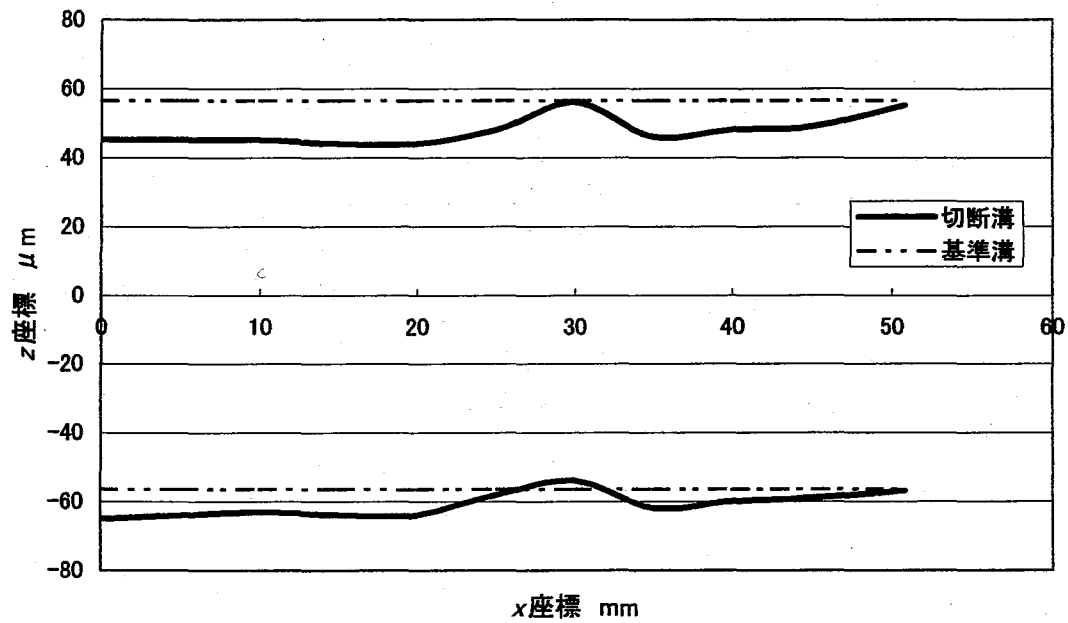


図 2-28 切断中 Z_G を変化させたときに得られた切断溝上部エッジの形状

第4章 制御方法

ブレードガイドの位置 Z_G を変化させて研削点でのブレードのたわみ Z_W を制御するには、 Z_G と Z_W と渦電流式変位センサからの出力 Z_S の関係がわかっていなければならない。そこで Z_G を $-20\mu\text{m}$, $-10\mu\text{m}$, $0\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ に固定して合計 10 回切断実験を行い、そのときの渦電流式変位センサからの出力 Z_S とそれに対応する Z_W を切断溝上部エッジの偏位から求めた。得られた結果を 3 次元グラフで示したのが図 2-29 である。 Z_G と Z_W と Z_S の間には一義的関係があることがわかる。

いま、 Z_G と Z_W と Z_S の間に $F(Z_G, Z_S, Z_W)=0$ なる関係があるものとする。ある時刻における Z_G と Z_S が $F(Z_G, Z_S, 0)=0$ を満足していない場合、研削点でのブレードのたわみ Z_W は零ではない。 Z_G を変化させることで $F(Z_G, Z_S, 0)=0$ がほぼ満足されるように状態を変化させることができれば Z_W が零に近づくので切断精度が高まるはずである。

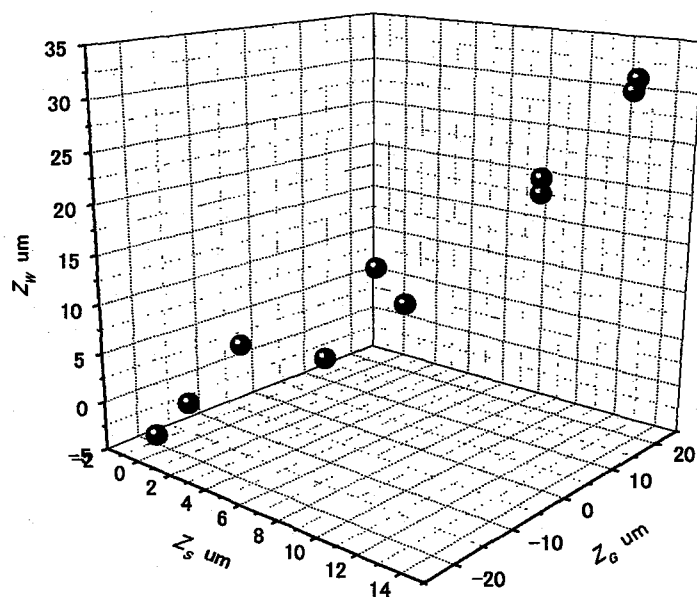
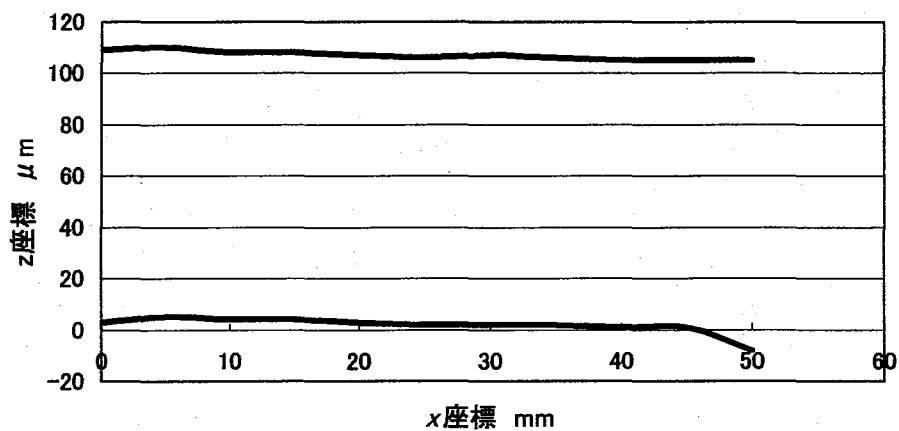
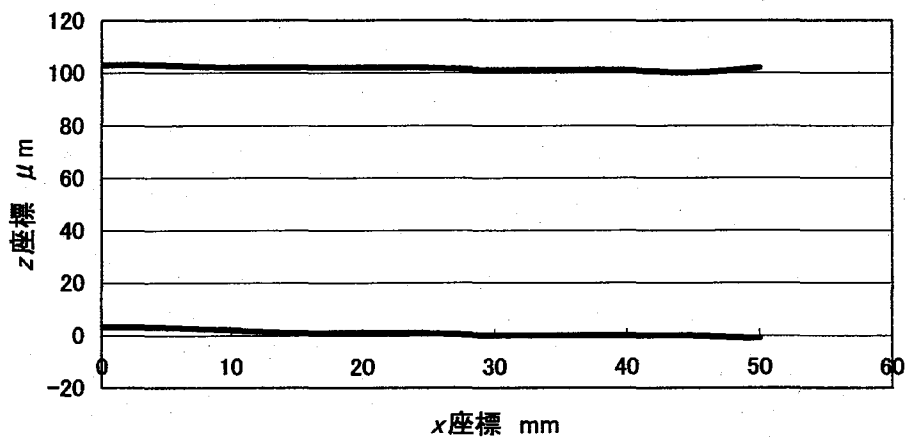


図 2-29 Z_G と Z_W と Z_S の関係

最後に、上述した制御方法に基づいてブレード刃先をアクティブ制御しながら切断して得られた切断溝上部エッジの形状の一例を図 2-30 に示す。比較のため、ブレードガイドの位置を固定して切断したときに得られた形状も併せて示した。図のように、ブレード刃先のアクティブ制御によって切断軌道の曲がり小さく抑えられていることがわかる。



(a) ブレードガイドの位置を固定した場合



(b) ブレードガイドの位置をアクティブ制御した場合

図 2-30 アクティブ制御して得られた切断溝上部エッジの形状

今後、さらに切断精度を向上するためには、

- ・ Z_G と Z_W と Z_S の関係を正確に決定する方法の確立
- ・ 圧電アクチュエータのヒステリシスの問題を解決すること
- ・ 制御方法の最適化

が必要であると考えている。

第5章 結 言

極薄ブレードを用いて切れ曲がりの少ない高精度な研削切断を実現するため、本研究ではブレードガイドを用いて研削切断する方法を試みた。外周刃ブレード自身によってガイド部材にスリット加工を行い、それをそのままアライメント調整無しでブレードガイドとして使用する方法を提案し、その方法で作製したブレードガイドを用いてアルチックの切断実験を行った。また、ブレードのたわみを計測しながらその情報に基づいてブレードガイドの位置をアクティブに制御するシステムを試作し、その特性と制御方法について検討した。

得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) ブレードガイドを用いることでブレードのたわみが抑制され、切断軌道の偏位が安定して低減することがわかった。
- (2) ブレードガイドを用いることで切断幅が安定して低減することがわかった。
- (3) ブレードガイドを用いた場合、切断回数の増加に伴って切断軌道の偏位や切断幅が徐々に減少した。
- (4) チッピングサイズに対してブレードガイドはほとんど影響を与えないことがわかった。
- (5) ブレードガイドがブレードのたわみを抑制する主な理由として、ブレード側面とガイド面間のくさび状の隙間に流入する研削液の動圧が考えられる。
- (6) ブレードガイドを適用した場合の効果について理論的に明らかにすることができた。

- (7) ブレードのたわみを計測しながらブレードガイドの位置を制御できるシステムを試作した.
- (8) 渦電流式変位センサを用いて切断中のブレードのたわみを計測できた.
- (9) 切断中にブレードガイドの位置を変化させることで切断軌道が偏位することがわかった.
- (10) ブレードガイドの位置 Z_G と研削点でのブレードのたわみ Z_W と渦電流式変位センサからの出力 Z_S の間には一義的関係があることがわかった.
- (11) Z_G と Z_W と Z_S の間に $F(Z_G, Z_S, Z_W)=0$ なる関係があるとき, $F(Z_G, Z_S, 0)=0$ が満足されるように Z_G を変化させることで切断軌道の偏位を抑制することができた.

参考文献

- 1) 水野雅裕, 井山俊郎, 四ノ宮清之, 森由喜男: 外周刃ブレードの刃先コンプライアンスに与える遠心力の影響, 日本機械学会論文集 (C 編), 65, 640, (2000)4909.
- 2) 庄司克雄, 水野雅裕: 薄形外周刃砥石による精密研削切断に関する研究 (第 2 報) — 砥石の曲げ変形について, 精密工学会誌, 55, 7, (1989)1886.
- 3) 畝田道雄, 石川憲一, 諏訪部仁: 振動外周刃切断におけるセラミックス (Al_2O_3 , SiC) の加工特性に関する研究, 砥粒加工学会誌, 44, 10, (2000)442.
- 4) 椿健悟, 水野雅裕, 井山俊郎, 吉田宏: 研削液による外周刃ブレードのたわみ制御 (制御パラメータがチッピングに与える影響), 1996 年度精密工学会東北支部盛岡地方講演会講演論文集, (1996)87.
- 5) 小林恵司, 高木純一郎, 劉猛: 薄刃外周刃砥石によるスライシングの高精度化に関する研究 — 静圧振れ止めの試み, 2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2000)244.
- 6) 例えば 富田幸雄: 水力学, 実教出版, (1982).