

平成 26 年度 国立大学法人宮城教育大学

修士論文

アルミニウム材のドライ切削加工における  
工具条件と加工条件の最適化

宮城教育大学大学院 教育学研究科  
教科教育専攻 生活系教育専修  
13031 菊地 真知

# アルミニウム材のドライ切削加工における工具条件と加工条件の最適化

## 目次

第 1 章	序論.....	4
1.1	研究背景.....	4
1.2	研究目的.....	5
1.3	研究方法.....	5
第 2 章	切削加工における旋削加工 <sup>1)2)3)</sup> .....	8
2.1	切削加工の原理.....	8
2.2	旋削加工.....	9
2.2.1	旋盤.....	9
2.2.2	切削工具.....	10
2.2.3	旋削加工における加工条件.....	13
第 3 章	旋削加工における基本機能の検討.....	16
3.1	品質工学における基本機能について.....	16
3.2	品質工学におけるパラメータ設計について.....	17
3.2.1	パラメータ設計について.....	17
3.2.2	設計における実験計画.....	18
3.3	旋削加工における基本機能.....	21
第 4 章	アルミニウム合金の切削実験の検討と実験装置の作成.....	24
4.1	実験に使用するアルミニウム材 <sup>1)2)</sup> .....	24
4.2	普通旋盤におけるアルミニウム材の切削加工.....	25
4.3	アルミニウム材の実験装置の作成.....	27
4.3.1	主軸モータの選定.....	27
4.3.2	電動スライダの選定.....	32
4.3.3	実験装置の設計.....	33

第 5 章	アルミニウム材の切削加工実験, パラメータ設計.....	39
5.1	消費電力量を特性値としたパラメータ設計.....	39
5.1.1	実験背景及び目的.....	39
5.1.2	実験方法.....	39
5.1.3	解析方法.....	48
5.1.4	実験結果.....	50
5.2	加工面粗さを特性値としたパラメータ設計.....	56
5.2.1	実験目的.....	56
5.2.2	実験方法.....	56
5.2.3	実験結果.....	57
5.2.4	表面粗さにおける切込み量と送り量の効果.....	59
5.2.5	ジュラルミンと純アルミの最適条件による切削の比較.....	61
第 6 章	結論.....	65

## 第1章 序論

## 1.1 研究背景

金属の切削加工において切削液は、工具と被削材との間の潤滑並びに冷却のために使用され工具寿命の延長や加工面品位の向上，加工寸法精度の維持などに効果がある。工作機械を使用して切削加工を行うようになり生産性が大幅に向上するようになると，切削液は高圧クーラント装置を使って加工点に大量に投与する方法で使われるようになった<sup>1)</sup>。

しかし，近年世界的に環境問題に対する意識が高まり，切削加工の分野でも省エネルギーや，省資源など環境負荷の低減への取り組みとして，加工中の切削液の使用量を削減することが重要な課題となってきた。図 1.1 は現状のマシニングセンタにおける消費電力を示したものであるが，そのうち 50%はクーラント装置の駆動に費やされており，実際の切削加工を行うための主軸動力の消費電力は 20%にすぎない。そのため，切削液を一切使用せずに，従来の加工品質を維持しながら加工を行う技術であるドライ加工は，切削液の使用量の削減だけでなく大幅な省エネルギー効果が得られるという点でも注目されている<sup>2)3)</sup>。また，ドライ加工は加工後ワークに付着している切削液の洗浄作業を省くことができるため，環境負荷低減だけでなく加工コストの低減や加工サイクルタイムの短縮の効果もある<sup>4)</sup>。多くのものづくり企業ではその技術を積極的に取り入れようと研究・開発が進められ，現在多くのものづくり現場でドライ加工が実用化されている（表 1.1）。しかしながら，アルミニウム合金の加工現場では，切削液を大量に使用したウェット加工が未だに主流で，良くてミスト加工（切削液を霧状にして使用する）で行われているのが現状である。この理由は，大量の切削液を切削点に供給しない加工では工具先端にアルミニウム合金の溶着，すなわち構成刃先が発生し，十分な加工精度が得られないことや工具摩耗の進行が早まることなどにある。加工が過酷であるほど切削液を必要とするため，ドライ加工が適用できる切削加工法は限られている。様々な切削加工法においてドライ加工の技術を開発していくことは，環境負荷の軽減や加工コストの削減において重要な課題となっている。

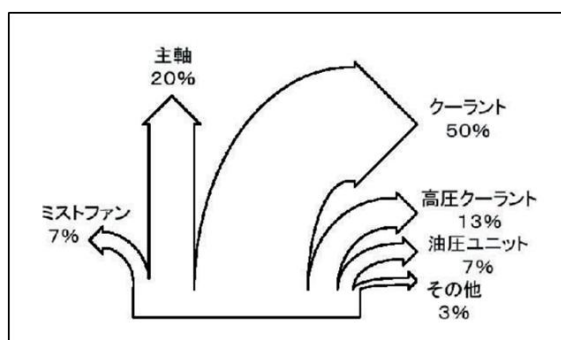


図 1.1 マシニングセンタの消費電力<sup>2)</sup>

表 1.1 切削加工のドライ化の現状<sup>2)</sup>

工具	鋼	鋳物	アルミニウム合金
ドリル	可能	可能	困難
エンドミル	可能	可能	困難
リーマ	不可	困難	不可
タップ	困難	可能	不可

## 1.2 研究目的

切削加工には旋削加工やフライス加工，ドリル加工など様々な種類のものがあるが，ものづくりの企業の中でアルミニウム合金をドライでねじ穴加工法の一つであるタッピング加工する技術が注目されている．一般的にねじ穴の加工は，事前にあけた下穴へタップをたててねじ山をきるのに対し，タッピング加工とは穴をあけつつねじ山を切るという加工で，様々な切削加工の中でも過酷な加工法に挙げられる．特にこのような加工では，工具と被削材に熱がこもりやすく切削液なしで加工を行うことは困難とされている．

一般的に加工技術の開発には，工作機械や切削工具，加工条件などについて一般化されているデータを元に検討していく．しかしながら，ドライ加工が成功するために必要な要素があまり確立されていない状況では，その加工を行う状況下に合うような技術開発をその都度行わなければならない．そこでは加工実験を繰り返し，機械や工具・加工条件の最適な組み合わせを見つけ出すことが行われる．それらの組み合わせの数は膨大であり，最適な条件にたどり着くまでには非常に時間がかかる．このような問題に対しては，実験や技術の評価を効率良く行える品質工学の手法の一つであるパラメータ設計を適用することが望ましい．

そこで本研究では，切削加工の基本原理にパラメータ設計を実施することによって，アルミニウム合金のドライ切削加工を行う最適な条件を求め，ドライ切削加工によって得られる品質の可能性と品質を向上させる条件を追求していくことを目的とし研究を行った．

## 1.3 研究方法

本研究ではタッピング加工を旋削加工の外径切削に置き換えて実験を行う．タッピング加工と旋削加工は一見違った形の加工をしているように見えるが，工具の切れ刃と被削材との関係に注目すると基本的な切削原理は同じであるといえる．切削方向に対してある傾きを持った工具に力を加えて被削材に局所的な破壊を起こさせることは両者に共通しているからである．つまり，切削加工は加工の方法が違っても原理的には同じ加工を行っているものと考えられる．このような観点から旋削加工について検討し技術開発を行っていく．

従来から切削加工の善し悪しの判定には、面粗さや真円度、円筒度などの品質特性を計測し評価することが行なわれてきた。それに対して寸法の通りに切削が行えているかを評価する転写性という考え方が提案されてきたが、現在に至ってはエネルギーの入出力関係を評価する方法が主流となっている<sup>5)</sup>。切削加工の入力は切削量、出力は工作機械の主軸モータの消費電力量とし、切削量と消費電力量が比例関係であることを基本機能とし、それが安定するような加工条件を求める実験を行った。

アルミニウム材のドライ加工切削においても、切削量と消費電力量の比例関係が安定するような条件を求めるために、品質工学の手法の1つであるパラメータ設計を実施した。加工時の消費電力が安定する工具条件、加工条件の最適化を行った後、ドライ切削加工において加工の品質がどこまで向上するのかを検討した。

第1章の参考・引用文献

- 1) 村上良彦；アルミ加工におけるドライ化の現状-ジュンツウネット 21,  
[http://www.juntsu.co.jp/mql/mql\\_kaisetsu1.html](http://www.juntsu.co.jp/mql/mql_kaisetsu1.html), (2006/12)
- 2) 園部勝；DLC 膜の切削工具への適用, NACHI-BUSINESS news, Vol. 1A1, (2003/12)
- 3) 平井泰史；ドライ加工技術の実用化, 品質工学会誌, Vol. 10, No. 4, (2002)
- 4) 長尾雅人；Zn ダイカストドリル加工のドライ化, 品質工学会誌, Vol. 14, No. 2, (2006)
- 5) 嘉指伸一；機械加工分野の機能性評価, 品質工学会誌, Vol. 8, No. 4, (2000)

第2章 切削加工における旋削加工<sup>1)2)3)</sup>

## 2.1 切削加工の原理

切削加工とは、刃物のような形状である切削工具を使って工作物を削り取り、目的の形状にする加工方法である。図 2.1 に切削加工のメカニズムを示す。切削工具を工作物に食い込ませ、切削する方向へ動かすと、工作物は切削工具であるバイトに押し付けられて大きな力を受け塑性変形を起こし、切りくずとなって工作物から除去される。良好な切削加工を行うために以下の3つの事柄が挙げられる。

- ①工作物に適した工具材種の切削工具を使用すること。
- ②切削工具と工作物の接触状態が良好であること。  
(すなわち刃先が摩耗していない、構成刃先ができていないということ)
- ③切削工具と工作物との相対運動、つまり加工条件が適切であること。  
(相対運動とは切削運動と送り運動、位置調節運動の3つである)

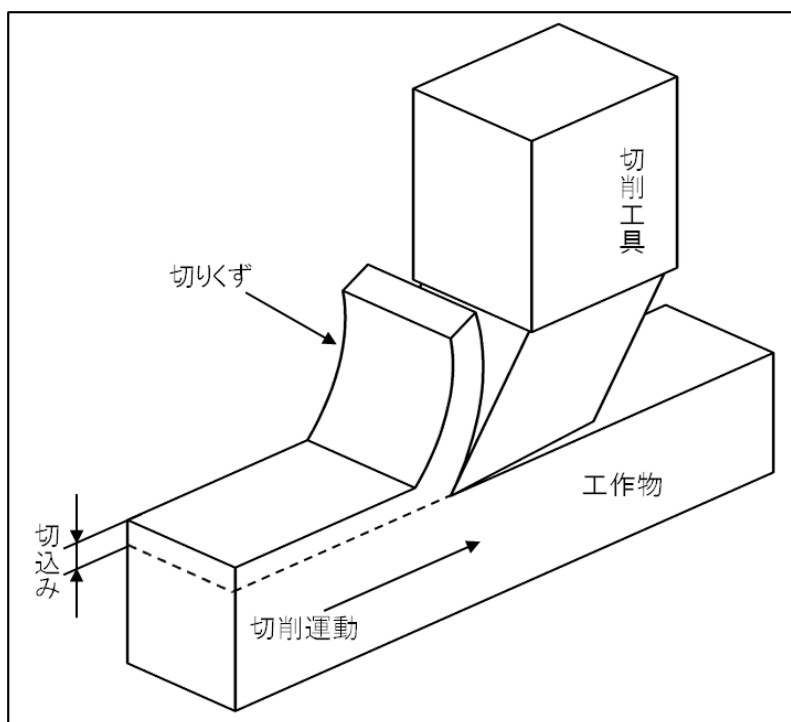


図 2.1 切削加工のメカニズム



## 2.2 旋削加工

旋削加工とは、工作機械である旋盤を使用し丸棒状の工作物に回転を与え、切削工具を送ることによって切削を行う加工方法である。旋削加工で切削工具のことをバイトと呼ぶ。図 2.2 に旋削加工における外形削りの様子を示す。加工方法には外径削りの他に端面削り、中ぐり、突切り、ねじ切りなどがあり、それぞれの加工に適したバイトがある。

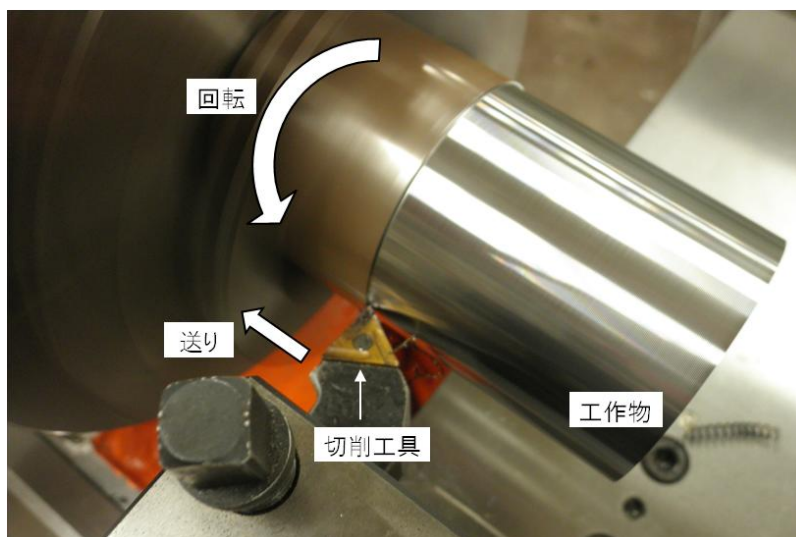


図 2.2 旋削加工の様子

### 2.2.1 旋盤

図 2.3 に本学実習工場にある普通旋盤の外観及び主要部の名称を示す。主軸台は工作物の一端をつかみ固定するチャックに回転運動を与える働きがあり、主軸台の内部はモータの回転を主軸に伝えるベルト、主軸の回転数を変換する歯車、往復台に運動を与える歯車などにより構成される。往復台はバイトを取り付ける刃物台に縦送りを与えるもので主軸台と心押台の間に位置する。心押台はベッド上に主軸台に対向して設置され、センタと呼ばれるものを取り付けて工作物を支持したり、ドリルを取り付け穴加工したりする際に用いる。

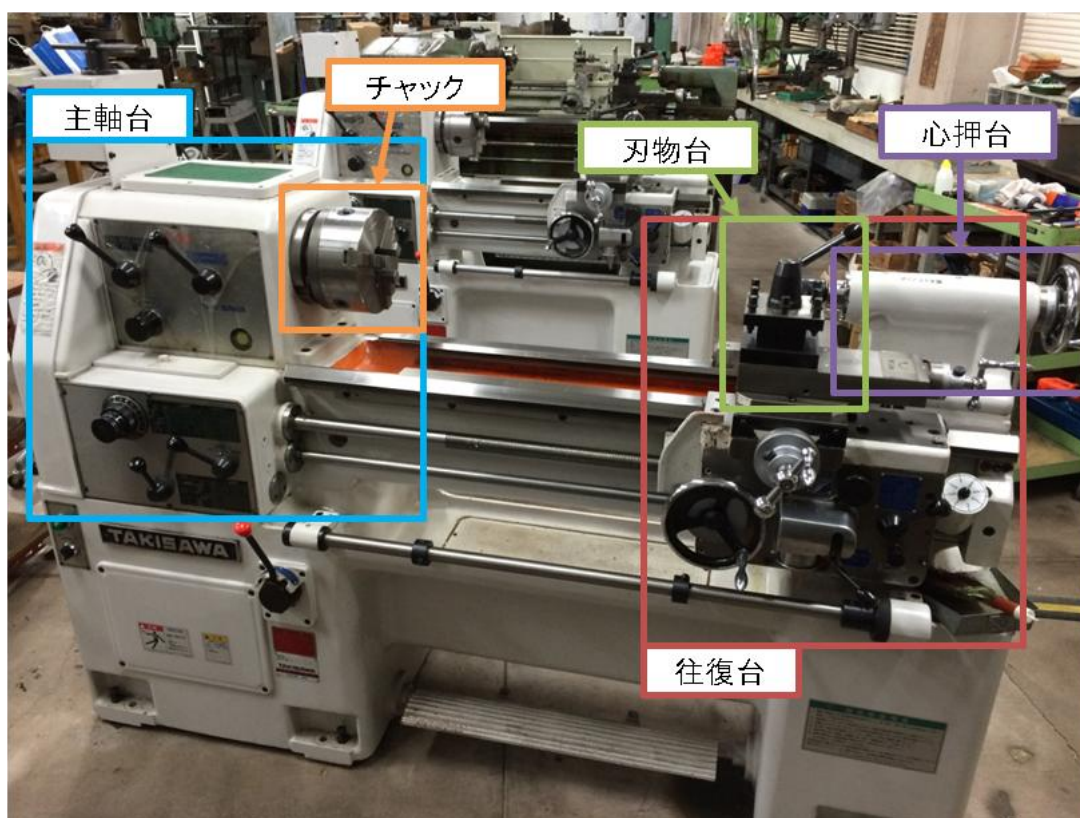


図 2.3 普通旋盤の外観と各部名称

### 2.2.2 切削工具

旋削加工でよく使用される外径切削用のバイトを図2.4に示す。バイトは主にシャンク、すくい面、チップ、前切れ刃、横切れ刃、ノーズ半径から構成される。シャンクは、バイトの柄のことでこの部分を刃物台に固定する。すくい面は工作物から削られた切りくずが衝突し流れる面である。チップはバイトの先に付いている切れ刃のことで、これが工作物と接触し実際に加工を行う部分である。前切れ刃、横切れ刃はすくい面周縁のエッジのことで、これらをつなぐ境界の角がノーズ半径である。ノーズ半径には切削時に集中する応力を分散し切れ刃の欠けを防ぐように円弧形状になっている。

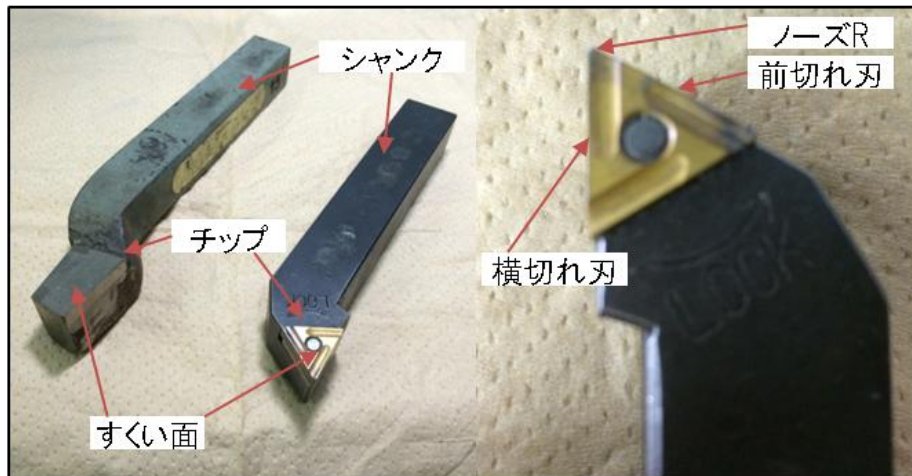


図 2.4 旋削加工における切削工具（バイト）

また、バイトの種類は基本的に切れ刃（チップ）の材質，構造（造られ方），切れ刃の形状（使用目的・用途）の3つに分類され，様々な種類のものが存在する。

(1)切れ刃の材質による分類

切れ刃には様々な材質が存在し，工作物や切削条件に適切な材質のものを選ぶ必要がある。図 2.5 に現在主に使用されている切れ刃の種類と性質を示す。切れ刃の材質は，いかに早く切削を行うことができるかという観点で開発が進められている。1900 年前半時代に登場した高速度工具鋼は，従来のものと比べて格段に速く切削できることからハイス（ハイスピード工具鋼）と名付けられている。現在では更に速く切削できる超硬合金が主に使われている。またダイヤモンドの材質の切れ刃では超精密加工が可能で，非鉄金属の鏡面加工に用いられる。

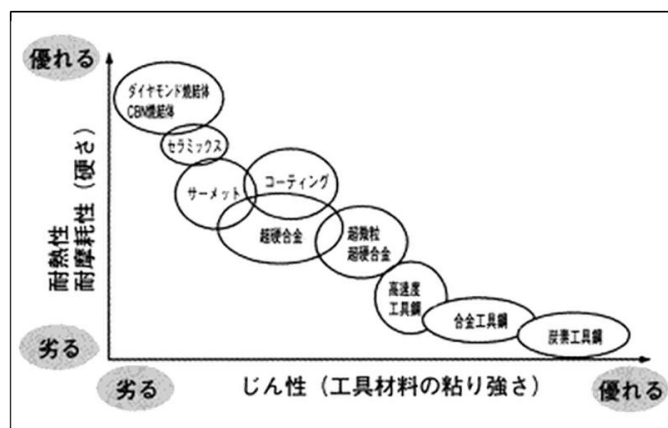


図 2.5 切れ刃の種類と性質<sup>2)</sup>

(2)構造による分類

バイトは①付刃バイト、②スローアウェイバイト、③完成バイトの3つの種類に分類される。①はろう付けバイトとも呼ばれ、切れ刃を炭素鋼でできたシャンクにろう付けしてあるものである。切れ刃が摩耗・欠損してもグラインダを使用し切れ刃を研削・成形することで、再利用が可能である。②は切れ刃が取り外し可能なチップとなっており、チップをねじなどによってシャンクに固定するバイトである。チップが摩耗した場合や切れ味が落ちた場合は、チップを付け替えるだけで使用することができる。③は切れ刃とシャンクが同じ材質でできているバイトで、その部分を使っても切削が可能である。この完成バイトも①と同様に切れ刃の形状を成形する必要があるが、バイト全体が切れ刃なのでイレギュラーな加工に対応することができる。

(3)形状による分類

バイトには、目的の形状に削る用途にあった種類があり、それによって分類される。図2.6に目的・用途に合わせたバイトを示す。旋削加工は、バイトの形状を工作物に転写する加工であるので、加工する形状と同じだけバイトの形状も定義されている。

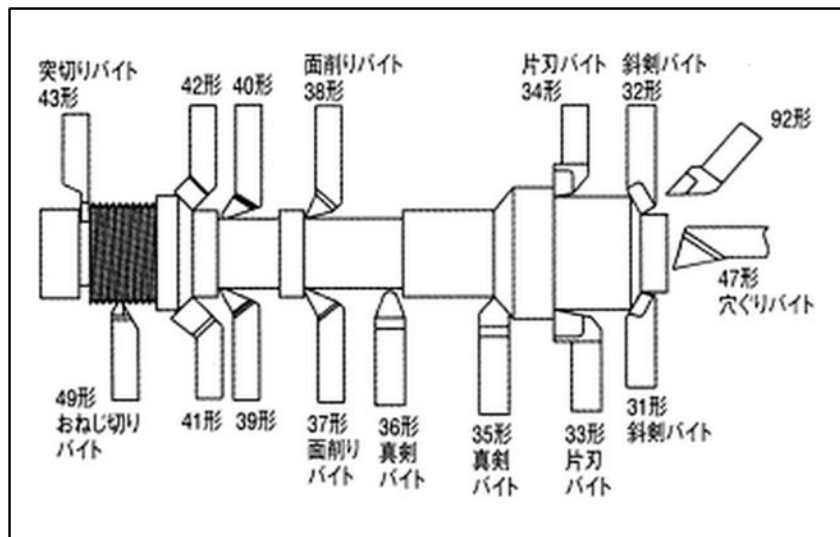


図2.6 バイトの形状による分類<sup>4)</sup>

2.2.3 旋削加工における加工条件

旋削加工に必要な3つ条件は、①切削速度（主軸の回転数）、②バイトの送り量、③切込み量である。切削原理の相対運動における切削運動は①、送り運動は②、位置調節運動は③に相当する。

①切削速度（主軸の回転数）

切削速度は、バイトが1分間に工作物を何m削る量を示し、単位はm/minである（図2.7）。切削速度と工作物の直径から、主軸の回転数を求めることができる（式2.1）。

$$N = \frac{1000 \times V_C}{\pi \times D} \quad (2.1)$$

N：回転数[rpm]  $V_C$ ：切削速度[m/min] D：直径[mm]  $\pi$ ：円周率

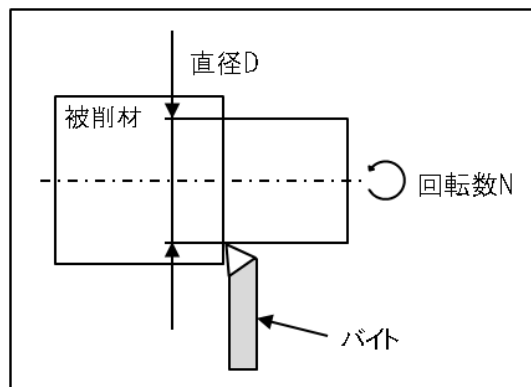


図2.7 切削速度

②バイトの送り量

バイト送り量とは、主軸が1回転する間にバイトが移動する量のこと、単位はmm/revである（図2.8）。また、送り量に回転数を掛けたのが送り速度[mm/min]である（式2.2）。

$$F = f \times N \quad (2.2)$$

F：送り速度[mm/min] f：送り量[mm/rev] N：回転数[rpm]

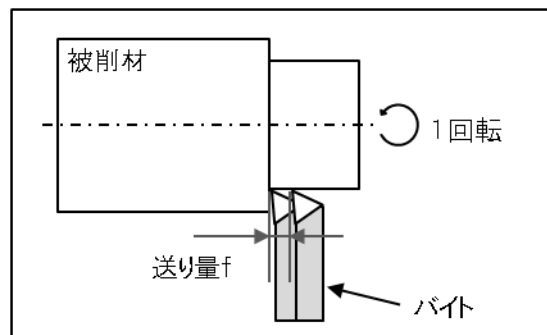


図2.8 送り量

## ③切込み量

切込み量とは、バイトが工作物に食い込む量（深さ）のことで、直径値で表示される。（図2.9）例えば直径100mmから直径90mmに削る場合、切込み量は10mmとなり工作物の外径にバイトを半径5mm食い込ませるようにして加工する。

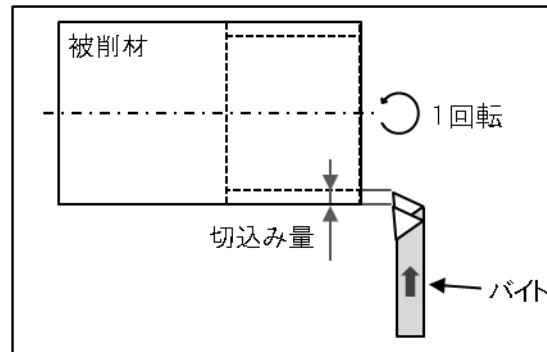


図 2.9 切込み量

旋削加工において、バイトのチップ（切れ刃）の形状や材質などの工具条件と、切削速度、送り量、切込み量の加工条件との組み合わせが切削現象に影響を与えている。対象とする工作物材質に適する工具条件と加工条件を求めることが切削加工の研究目的である。

本研究においては、アルミニウム材料の切削現象を観察しながら、工具条件と加工条件の最適化を行った。

第 2 章の参考・引用文献

- 1) 基礎機械工作編集委員会編；基礎機械工作，産業図書，（2004）
- 2) 澤武一；絵とき旋盤加工基礎のきそ，日刊工業新聞社，（2007）
- 3) 牧充；機械工作と生産工学，養賢堂，（2001）
- 4) JIS B 4105

第3章 旋削加工における基本機能の検討

3.1 品質工学における基本機能について

品質工学を用いて技術を評価するときに、あらゆる機能においてその一番もとなる働きを明確にし、それについて考えることが重要であると言われている。例えば対象とする技術をシステムと言い換えたとすると、図 3.1 のようにシステムは入力と出力の変換機能、すなわちシステムに入力した結果として出力が得られると考えることができる。このシステムに機能する入出力の関係を品質工学では基本機能と言う。対象とするシステムの入出力関係は、入力を  $M$ 、出力を  $y$  とすれば、

$$y = \beta M \tag{3.1}$$

という比例関係が成立することを理想とし、その理想関係のばらつきを評価するための研究を行う。

例えば同じ製品の A タイプと B タイプがあり、これらの製品のシステムに対して  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  を入力した時の出力  $y$  を調べた結果が図 3.2 とする。同じ入力値に対して A タイプの出力●はばらつきが小さく理想状態の直線付近に分布しているのに対し、B タイプの出力□はばらつきが大きく直線から離れたところに分布している。この場合、A タイプの製品は B タイプよりも機能が安定していると言える。品質工学では、このように基本機能の入出力関係に対するデータのばらつきを出来るだけ小さくするための研究を行っていく。つまり、システムに与えられる悪影響（ノイズ）をできるだけ押さえられるような設計を行っていく。

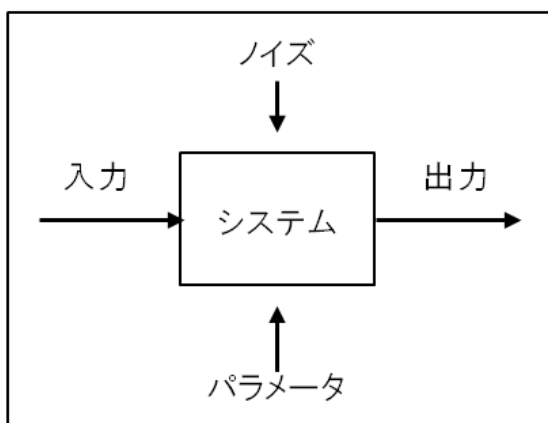


図 3.1 基本機能における入力と関係

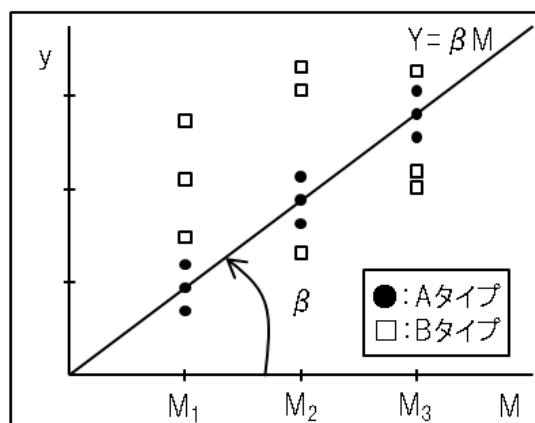


図 3.2 基本機能の入出力関係



## 3.2 品質工学におけるパラメータ設計について

### 3.2.1 パラメータ設計について

対象とする技術の基本機能を検討した次の段階として、品質工学ではパラメータ設計を行う。パラメータ設計の概念を図 3.3 に示す。図 3.3 の左側の不安定な状態というのは、基本機能の入出力関係に対するデータのばらつきが大きいということである。このような状態というのは、図 3.3 の中央に示すシステムの入出力関係に対してノイズの影響を受けやすくシステムが安定して機能していないという状態であることを示している。このような状態から、図 3.3 のようにノイズの影響を受けにくい、ばらつきが少ないつまり機能が安定している状態にする方法がパラメータ設計である。つまり、パラメータ設計とは、検討した基本機能の入出力関係のばらつきを最小とするような設計条件を見出す方法である。更にばらつきを最小とする設計条件を見出し、次の段階として出力を目標とする値に調整するというを行う。これを品質工学では二段階設計と呼んでいる。

システムの機能の効果を最大に発揮し、同時に誤差の大きさを最小にするための評価尺度として SN 比を用いる。SN 比とは信号とノイズ（ばらつき）との比のことであり、その比率が大きければノイズの影響が少ないということになる。システムの機能の効果を最大に誤差の大きさを最小にするには、この SN 比を最大にすればよいということである。パラメータ設計は、この SN 比を最大にする設計定数の値をみつけるための過程を系統化したものである。SN 比を大きくすると、安定して目的機能を発揮できるようになる。これは設計定数の値があらゆる設計定数の値の中で最適であることを意味する。パラメータ設計では、最適な設計条件、つまり SN 比を最大にする定数を系統的、効率的に見い出すことが可能な方法である。

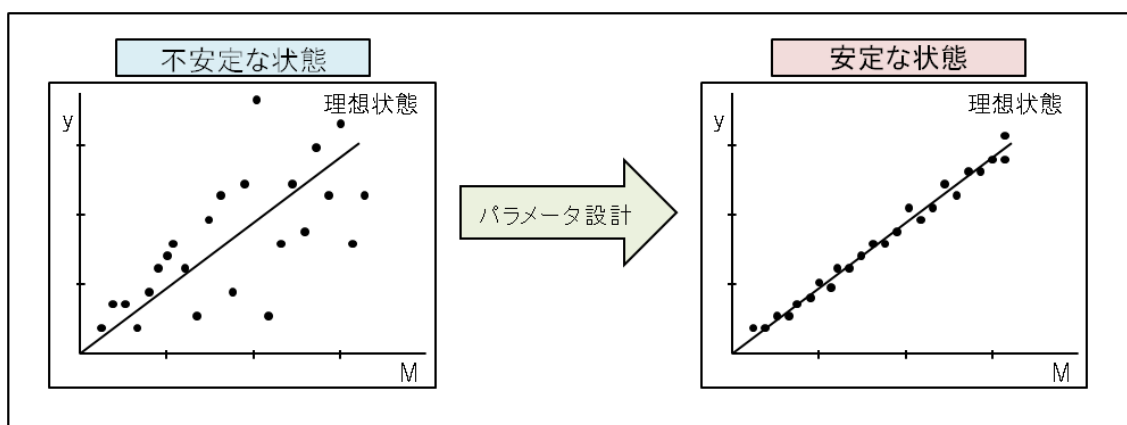


図 3.3 パラメータ設計の概要

### 3.2.2 設計における実験計画

次に、パラメータ設計の考え方に従って実験を行っていく際の実験計画の立て方についてまとめておく。図3.4にパラメータ設計の手順を示す。

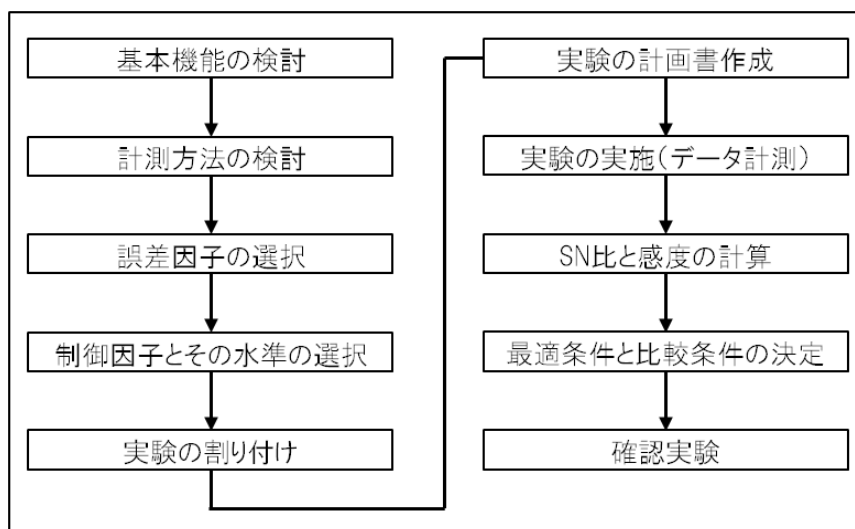


図 3.4 パラメータ設計の手順

#### (1) 基本機能を検討

対象とする技術の基本機能の入出力関係を検討する。基本機能の入力を変化させる条件を信号因子といい、出力は計測特性値という（図3.5）。この段階で基本機能を評価するSN比と感度を求める計算式を決定しておく。

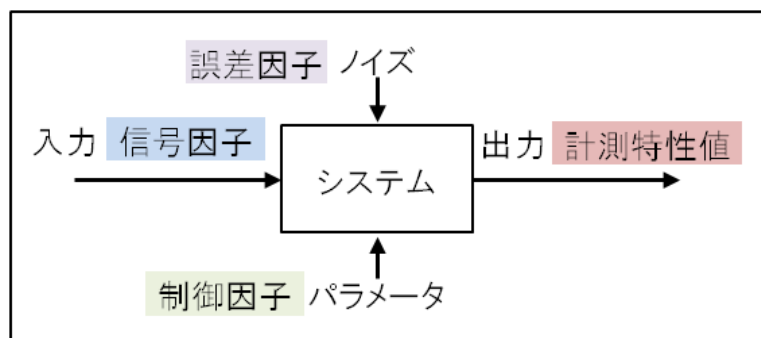


図 3.5 パラメータ設計の手順

#### (2) 計測方法の検討

基本機能の出力である計測特性値の測方法を検討する。特性値が測れなければ、SN比と感度の計算ができないので、予備実験を行い計測が可能かを調べる。

(3) 誤差因子の選択

基本機能の入力と出力は必ずしもきれいな比例関係が成立するとは限らない。これはシステムの入力と出力の変換機能のノイズが加わって、出力にばらつきが生じるためである。ノイズは設計者がコントロールして直接取り除くということとはできない。ノイズは内乱、外乱、個体差の3種類に大別されている(表3.1)。このようなノイズを誤差因子という。

従来の実験では、これら誤差因子をできるだけ排除した場合のデータを得ようとする実験を行うが、品質工学では、この誤差因子を実験条件の中に積極的に取り入れて実験を行う。これは予めわざとシステムがばらつくような条件の下で設計を最適することができれば、偶然的なばらつきも押さえることができる、つまりノイズの影響に強い設計条件が得られるという考えからである。図3.6において $N_1$ 、 $N_2$ は意図的に与えた誤差因子で、左側の現状条件はノイズの影響を大きく受けデータがばらついている。パラメータ設計によって設計値を最適化すれば、右側のように誤差の影響が小さくなる。

表3.1 ノイズの分類

種類	内容
内乱	システム内部で発生するノイズ。 劣化などによる部品や材料のばらつき。
外乱	システム外部で発生するノイズ。 環境の変動や客先での使用条件など。
個体差	製品が作られたときにすでに存在する 製品間のばらつき。

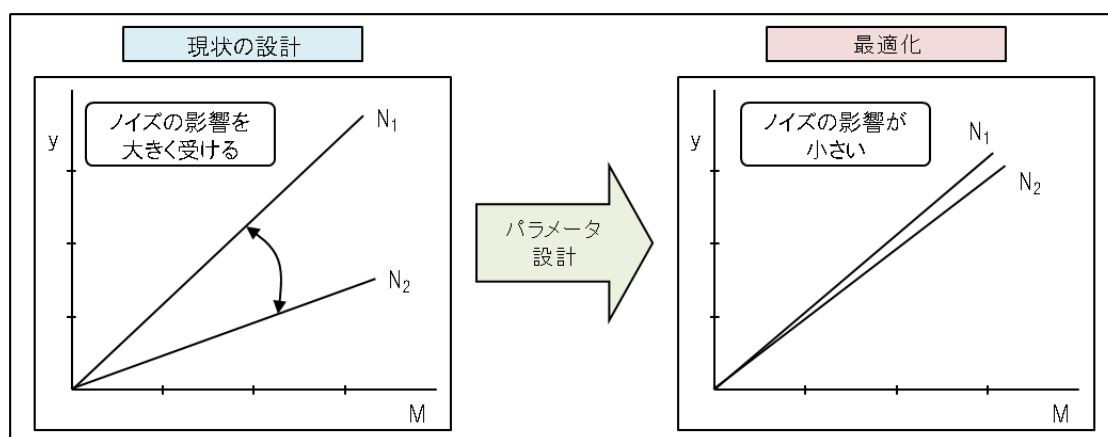


図3.6 誤差因子を取り入れた設計

#### (4) 制御因子とその水準を選択

制御因子とは、対象の技術のシステムにおいて、設計者が自由に選択できる設計条件のことである。誤差の影響を受けているシステムが改善するような制御因子の水準を定め、その中から SN 比が最大になるような水準を求め最適化を行う。

#### (5) 実験の割り付け

信号因子、誤差因子、制御因子を組み合わせて実験計画表を作成する。パラメータ設計では、選択した各制御因子を合理的に組み合わせるために直交表という実験条件表を用いる。この直交表に制御因子を割り付けると、複数の制御因子がまんべんなく混ざった組み合わせを作ることができ、少ない回数の実験で制御因子の効果を調べることができる。この制御因子と信号因子および誤差因子とを組み合わせて実験計画を作成する。

例えば、1 要因 2 水準、7 要因 3 水準の制御因子を直交表  $L_{18}$  に割り付けて、信号因子 3 水準、誤差因子 2 水準で実験を行った場合、実験回数は  $18 \times 3 \times 2 = 108$  回となる。この実験を一因子実験で行った場合、実験回数は  $2^1 \times 3^7 \times 3 \times 2 = 26244$  回となり、直交表を使用した実験の方が明らかに効率の良いことが分かる。

#### (6) 実験手順書の作成

計画通りに間違いなく実験が進むように実験手順書を作成する。

#### (7) 実験の実施（データ計測）

#### (8) SN 比と感度の計算

実験を実施して、計測特性を測り、信号因子と誤差因子の組み合わせによって、実験の目的にあった SN 比を求める。

#### (9) 最適条件と比較条件の決定

制御因子の水準毎の SN 比を求める。最適条件は SN 比の一番大きい制御因子の水準を選ぶ。比較条件は、現状条件あるいは SN 比の総平均  $\bar{T}$  に近い水準などを選ぶ。また、最適条件と比較条件とで SN 比と感度の推定値を算出する。

#### (10) 確認実験

比較条件と最適条件の制御因子の組み合わせで確認実験を行う。比較条件と最適条件の SN 比の差すなわち、利得が推定と確認実験とでどの程度一致するかを確かめる。

### 3.3 旋削加工における基本機能

旋削加工を行うには、バイトを刃物台上に、工作物を主軸台のチャックに取り付け、主軸を回転させバイトを送る。そしてバイトと工作物との相対運動により切削が行われ、加工点には切削熱や切削抵抗などが発生する。これをエネルギーの入出力関係で考えると、入力とは旋盤のモータに投入された電気エネルギーである<sup>4)</sup>。投入された電気エネルギーは、旋盤を駆動させる運動エネルギーに変換され、加工部へ投入される。加工部では工作物を切削する動力となり、これが出力である。まとめると入力  $M$  が旋盤へ投入される電力、出力  $y$  が切削に要する動力となり、 $y = \beta M$  という比例関係が成立することが旋削加工の基本機能となる。しかしながら、旋盤の投入する電力は実験者がコントロールし大きさを変えて入力させることができない。そこで本研究では、電力の代わりに意図的に大きさを変化させることができる入力として切削量を用意した<sup>1)</sup>。

ここで、旋盤で主軸（工作物）を回転させている状態でバイトが工作物に触れていない空転時を OFF、工作物にバイトが触れ切削を行っている時を ON とする（図 3.7）。旋盤の電源電力は、OFF 時に主軸の回転に要する動力に、ON 時にはさらに切削に要する動力に電力が供給される。切削時ではバイトと工作物の間に切削抵抗が生じ、主軸を回しているモータには負荷が掛かっている。この時切削抵抗によって、主軸の回転が弱まることなく一定回転速度が保たれるようにモータにさらに電力が投入される。これが切削によってモータが消費した電力であり、切削した量が多ければ多いほどモータが消費する電力は大きくなる<sup>5)6)</sup>。この時、主軸の電力は図 3.8 のようになる。このような関係より、入力を切削量  $M$ 、出力をモータの消費電力量  $y$  とすると

$$y = \beta M$$

というような比例関係が成立することを基本機能とした（図 3.9）。

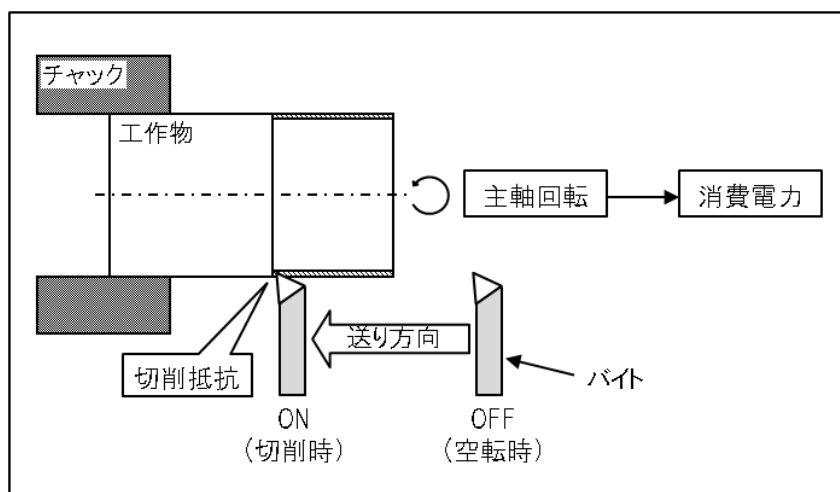


図 3.7 旋削加工における ON と OFF

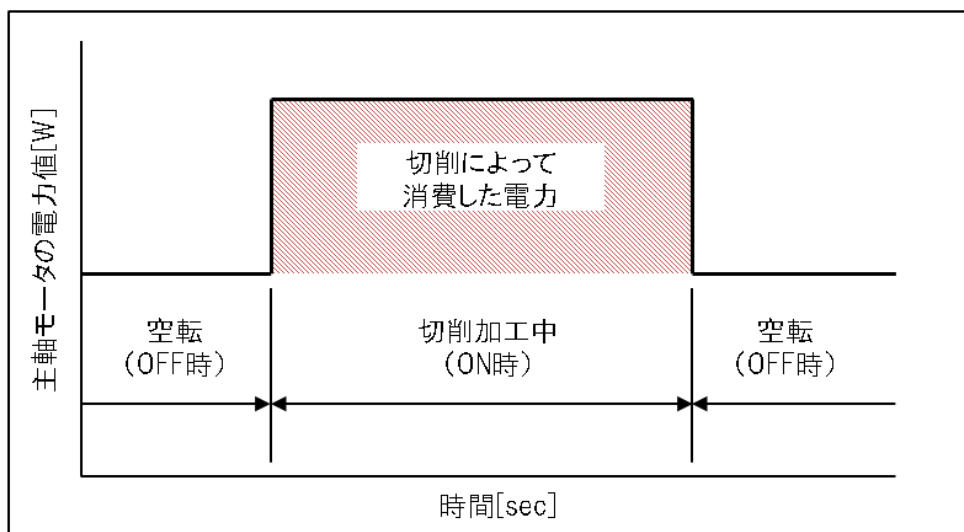


図 3.8 切削による消費電力

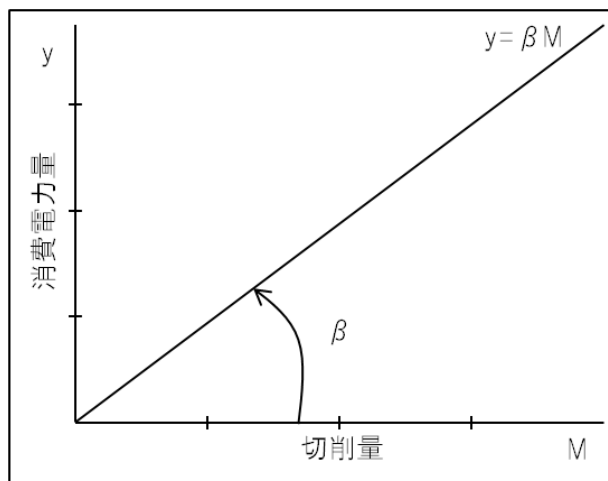


図 3.9 旋削加工における基本機能

第3章の参考・引用文献

- 1) 高橋真徳；切削加工における工具形状と加工条件の最適化に関する研究，宮城教育大学，(1996)
- 2) 井上清和，中野恵司ほか；入門パラメータ設計，日科技連出版社，(2008)
- 3) 越水重臣，鈴木真人；バーチャル実験で体得する実践・品質工学，日刊工業新聞社，(2007)
- 4) 矢野宏；加工品質工学-生産技術の最適化-，工業調査会，(1994)
- 5) 嘉指伸一；機械加工分野の機能性評価，品質工学会誌，Vol. 8, No. 4, (2000)
- 6) OFF 時と ON 時のエネルギーを用いた旋削加工の機能性の評価方法に関する研究，品質工学会，Vol. 1, No. 1, (2000)

第4章 アルミニウム合金の切削実験の検討と実験装置の作成

4.1 実験に使用するアルミニウム材<sup>1)2)</sup>

本実験で試験片<sup>※</sup>使用するアルミニウム材は「A1070」と「A2011」の2種類を用意した。A1070やA2011はJISにおけるアルミニウム合金の表示記号で、「A」はアルミニウムを表し、その「A」に続く4桁の数字の部分がアルミニウム合金名を表す。表4.1にA1070とA2011の化学成分を示す。

A1070は1000系アルミニウム・純アルミと呼ばれ、純度が99.70%以上のアルミニウム合金である。加工性、表面処理性、特に耐食性が優れているが、純アルミニウムのため強度は低い。装飾品や反射板、コンデンサー、電線などに用いられる。以下、A1070を純アルミと呼ぶ。

A2011は2000系アルミニウム合金・Al-Cu系合金と呼ばれ、アルミニウムに銅を添加した合金である。強度が高く機械的性質や切削性に優れているが、銅を多く含むので耐食性や陽極酸化性（メッキ処理性）が悪い。航空機や輸送機器、機械部品、構造材などの材料に用いられる。同じ2000系にはジュラルミン（2017）や超ジュラルミン（2024）があり、超ジュラルミンの強度は鋼に匹敵する。以下、A2011をジュラルミンと呼ぶ（化学成分は異なるが2000系アルミニウム合金の代表であるジュラルミンの呼び名を使用されている）。

表4.1 A1070とA2011の化学成分<sup>3)</sup>

種類	化学成分(%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	その他	Al
A1070	~0.20	~0.25	~0.04	~0.03	~0.03	~0.04	-	~0.03	-	99.70 以上
A2011	0.20~ 0.8	~0.70	3.5~ 4.5	0.40~ 1.0	0.40~ 0.8	~0.25	~0.10	-	Zr+Ti ~0.20	残部

※ 前章まで工作物と呼んでいたものを実験では試験片と呼ぶ。



4.2 普通旋盤におけるアルミニウム材の切削加工

本研究で行うアルミニウム材のドライ切削加工においては、良質な加工面が得られるように仕上げ加工を行うため、切込み量は 0.5mm 以下の設定で実験を想定している。本実験のように被削材の加工性が優れ、切込み量が小さい場合、主軸モータの消費電力の変動が電力波形に現れない可能性が考えられる。

そこで、本学実習工場の普通旋盤 (TSL-800) においてアルミニウム合金の仕上げ切削加工の検証を行うことにした。実験の条件は、表 4.2 の通りである。試験片は純アルミとジュラルミンの種類を、直径 40mm、長さ 50mm に加工したものである。切削工具は本学実習工場にあるスローアウェイバイトと超硬合金チップから選んだものを使用した。電力の計測は旋盤の主軸モータに電力計 (日置 3188) を取り付け行った。この検証実験の目的は、仕上げ切削による消費電力が測れるかどうかを調べることであるため、切削長さは任意の長さとした。

実験で得た波形の 1 つを図 4.1 に示す。実験条件は図 4.1 に示した。この波形では試験片を切削した時に消費する電力が波形にほとんど現れていない。加工条件を変えた他の検証実験においても、同様の結果が得られた。この結果より、本学にある普通旋盤 TSL-800 を使用してアルミニウム材の仕上げ切削を電力で評価することは難しいと考えられる。このように加工時の消費電力が波形に現れない原因として、切削抵抗値が微小である、または主軸モータの出力が強いためにモータにあまり負荷が掛からず電力を消費しなかったことが考えられる。切削抵抗の計算は以下の式で求めることができる。比切削抵抗値  $k_c$  の値を表 4.3 に示す<sup>4)</sup>。

$$F = k_c \times a_p \times f \tag{4.1}$$

F : 切削抵抗(N),  $k_c$  : 比切削抵抗(N/mm<sup>2</sup>),  $a_p$  : 切込み量(mm), f : 送り量(mm/rev)

式(4.1)と表 4.3 より、アルミニウム材と鉄系材では、切削抵抗の値が約 3~4 倍違うことが分かる。このことから、アルミニウム材を切削した時の主軸モータへの負荷は小さいことが分かった。

表 4.2 アルミニウム材切削の検証実験における条件

被削材の材質	切削工具	切込み量 (mm)	回転数 (rpm)	送り量 (mm/rev)	切削長さ
A1070, A2011	超硬スローアウェイバイト	0.1, 0.5, 1.0	1800	0.1	任意

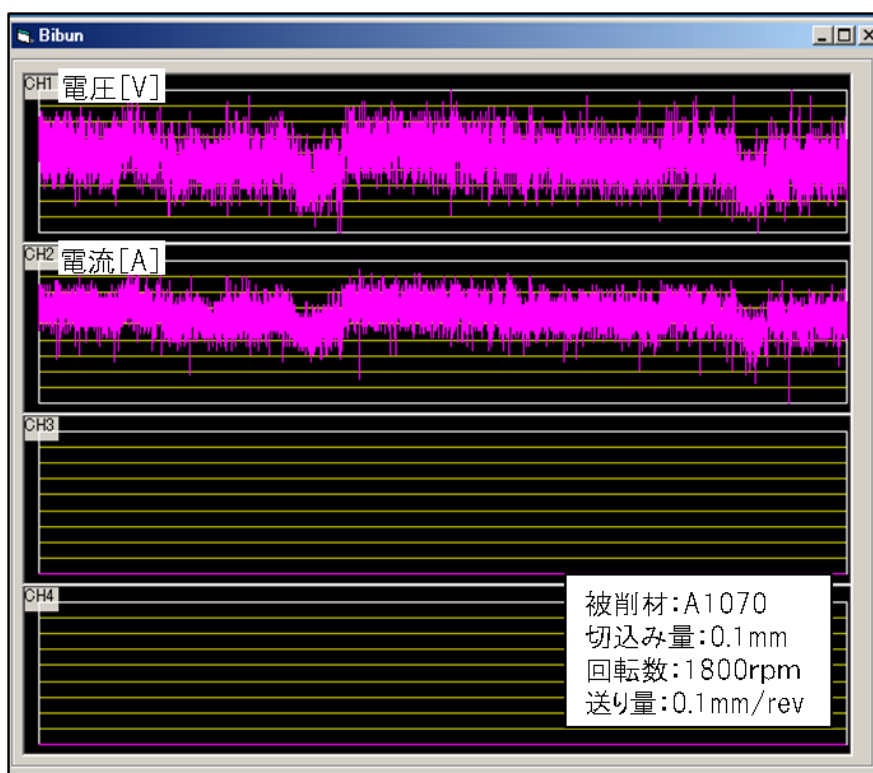


図 4.1 アルミニウム合金切削の検証実験で得られる波形

表 4.3 比切削抵抗  $k_c$  の値

材質	各送り量に対する比切削抵抗値 $k_c$ (N/mm <sup>2</sup> )				
	0.04(mm/rev)	0.1(mm/rev)	0.2(mm/rev)	0.4(mm/rev)	1.0(mm/rev)
S35C, S40C相当	4220	3490	2940	2500	2080
S50C相当	4900	4020	3430	2940	2400
アルミニウム	1050	870	740	640	520
アルミニウム合金	1350	1130	950	810	670

### 4.3 アルミニウム材の実験装置の作成

前節より、本学実習工場にある普通旋盤 TSL-800 を使用してアルミニウム材を切削すると、切削による負荷が微小であるために消費電力の波形が現れないことが分かった。微小な切削による主軸モータの消費電力を計測するためには、主軸モータの出力が小さいものを使用すれば良いと考えられる。出力が小さなモータであれば負荷に対する消費電力の振幅、すなわち感度が大きくなり波形が現れ易くなる。

ところで、一般的にアルミニウムの切削加工において仕上げ面粗さに切削速度が大きく影響しており、それを大きくすればするほど仕上げ面粗さが小さくなると言われている。本実験では直径 60mm の被削材に対して切削速度を 600m/min で切削することを想定しており、回転数は安全をみて 4000rpm まで出力できるモータが必要である。

これらを考慮して、主軸モータの出力が小さく、大きな回転数が設定できる旋盤を用いることが実験にとって望ましいと考えられるが、本学実習工場においてそのような旋盤は存在しない。そこでそれらの目的に適したモータを用いた旋削加工装置を作成し、実験を行うことにした。

#### 4.3.1 主軸モータの選定

旋盤における主軸台のモータを、(1)出力が小さい、(2)大きな回転数が設定できる、という2つの条件で選定した。条件(1)は、モータの出力が切削加工時の最低限必要な仕事量と同等のものであればよいとした。一般的に機械設計では安全率も見積もって、必要な仕事量の2倍の出力のものを採用するが、ここでは消費電力の検出感度を上げるという目的を優先し、あえて安全率を見積もらないというような選定を行った。以下にモータ選定の過程を示す。

##### 〈モータ出力の計算〉

作成する実験装置を仮に図4.2のようなものとした時、モータの出力は下の式で求めた。

$$\text{モータの出力 (W)} = \text{(A) 回転エネルギー} + \text{(B) 負荷エネルギー}$$

(A)はチャックやシャフトなどの主軸部分とワークを回転数4000rpmで回転させるために必要なエネルギー、(B)はワークを切削した時にモータへ加わる負荷のエネルギーである。

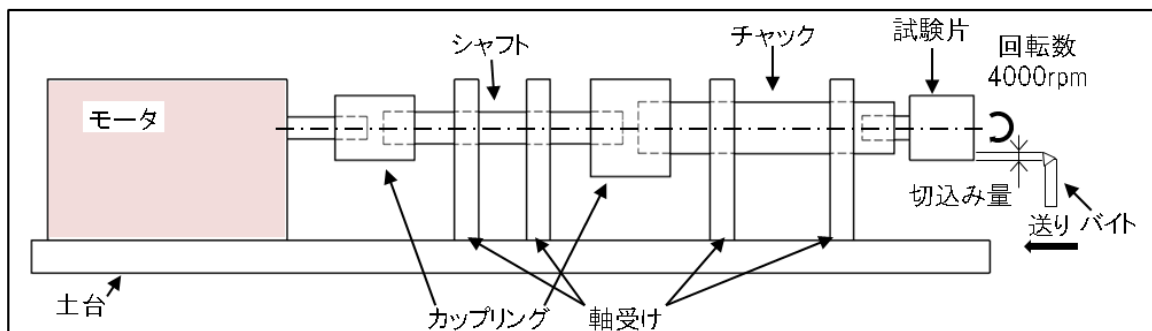


図 4.2 仮想実験装置図

(A) 回転エネルギーの計算<sup>5)6)</sup>

図 4.3 に示すような主軸部分（チャック，シャフト，カップリング）とワークを回転数 4000rpm で回転させた時のエネルギーを計算する。

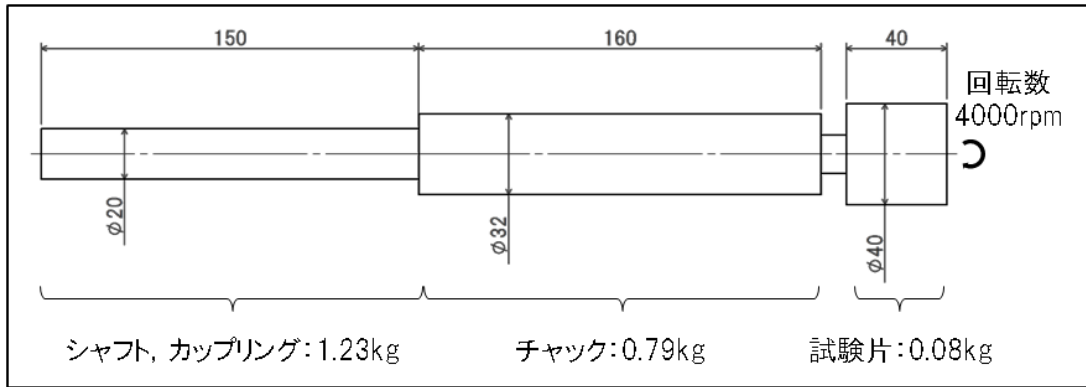


図 4.3 回転部の部品図

【計算式】

$$K = \frac{1}{2} \times J \times \omega^2 \text{ [J]}$$

$$\omega = \left( \frac{2 \times \pi \times N}{60} \right)^2 \text{ [rad / s]}$$

$$J = \frac{\pi}{32} \times \rho \times L \times D^4 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

K : 回転エネルギー	$\rho$ : 密度
[kg/m <sup>3</sup> ]*	
J : 慣性モーメント[kg・m <sup>2</sup> ]	L : 長さ[m]
$\omega$ : 角速度[rad/s]	D : 外径[m]
N : 回転数[rpm]	
※ステンレス: $8.0 \times 10^3$ , アルミニウム $2.8 \times 10^3$	

慣性モーメント

$$J = \left\{ \left( \frac{\pi}{32} \times \rho_1 \times L_1 \times D_1^4 \right) + \left( \frac{\pi}{32} \times \rho_2 \times L_2 \times D_2^4 \right) + \left( \frac{\pi}{32} \times \rho_3 \times L_3 \times D_3^4 \right) \right\}$$

$$= \frac{3.14}{32} \times \{ (8.0 \times 10^3 \times 0.15 \times 0.02^4) + (8.0 \times 10^3 \times 0.16 \times 0.032^4) \}$$

$$+ (2.8 \times 10^3 \times 0.04 \times 0.040^4) \}$$

$$= 2.2992 \times 10^{-4} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

角速度

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 4000}{60} = 419 \text{ [rad / s]}$$

回転エネルギー

$$K = \frac{1}{2} \times J \times \omega^2 = \frac{1}{2} \times 2.2992 \times 10^{-4} \times 419^2 = 20.1825 \text{ [J]}$$

(B) 負荷エネルギーの計算<sup>5)6)</sup>

旋盤で外径切削を行うと図 4.4 に示すように工作物とバイトの間に 3 つの方向に力が掛かり、それぞれ主分力、背分力、送り分力と呼び、それらを合わせたもの切削抵抗である。この切削抵抗のうち主分力がモータの回転に直接負荷を与えている外力とし、負荷エネルギーを計算する。

本実験における加工条件は、切込み量を 0.05~0.20[mm]、送り量を 0.1~0.3[mm/rev]の範囲で設定することを想定している。この加工条件における切削抵抗の計算を以下の計算式で行った結果を表 4.4 に示す。

$$\text{切削抵抗 } F[\text{N}] = \text{切込み量 } a_p[\text{mm}] \times \text{送り量 } f[\text{mm/rev}] \times \text{被切削抵抗 } k_c[\text{N/mm}^2]$$

また、主分力の計算を行った結果を表 4.5 に示す。主分力の値は切削抵抗の 6/11 である。

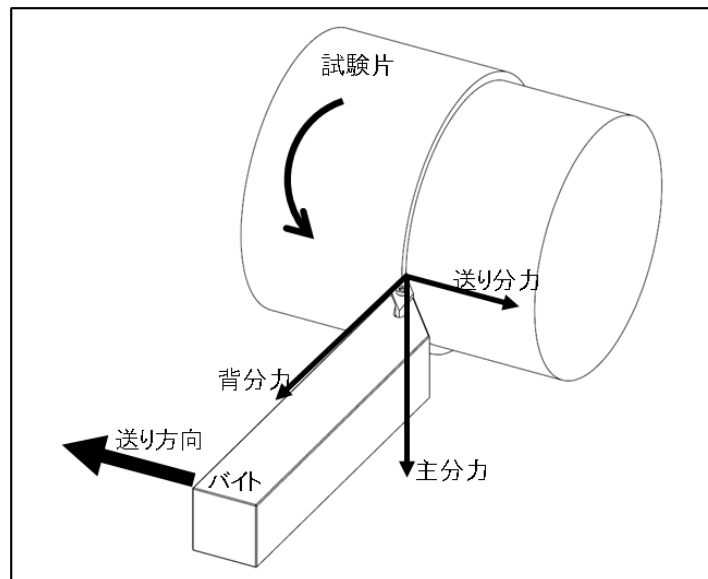


図 4.4 切削抵抗の 3 分力

表 4.4 切削抵抗[N]の計算(アルミニウム合金)

切込み量 (mm)	各送り量[mm/rev]に対する被切削抵抗値 $k_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]			
	0.04	0.1	0.2	0.3
	1350	1130	950	880
0.05	2.7	5.7	9.5	13.2
0.10	5.4	11.3	19.0	26.4
0.20	10.8	22.6	38.0	52.8

表 4.5 主分力[N]の計算(アルミニウム合金)

切込み量 (mm)	送り量[mm/rev]			
	0.04	0.1	0.2	0.3
0.05	1.47	3.08	5.18	7.20
0.10	2.95	6.16	10.36	14.40
0.20	5.89	12.33	20.73	28.80

表 4.5 より，最大 28.80[N]の主分力がモータへ負荷を掛ける実験を行う場合がある．この時の負荷エネルギーを計算する(図 4.5)．

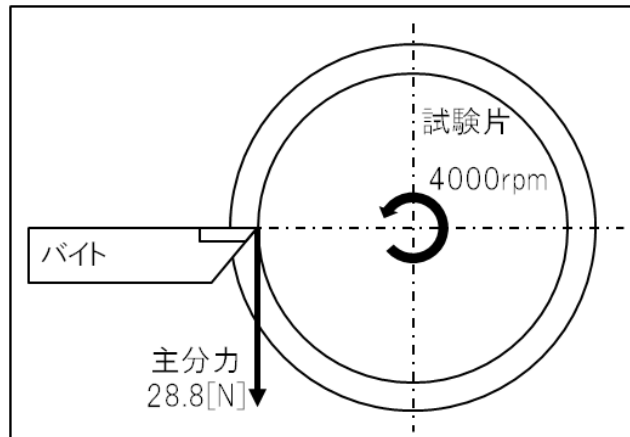


図 4.5 モータへの負荷

【計算式】

$$L = T \times \omega \text{ [J]}$$

$$T = F \times r \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$\omega = \left( \frac{2 \times \pi \times N}{60} \right)^2 \text{ [rad / s]}$$

L: 負荷エネルギー[J]

F: 主分力[N]

T: 負荷トルク[N・m]

r: 工作物の半径[m]

$\omega$ : 角速度[rad/s]

負荷トルク

$$T = F \times r = 28.80 \times 0.02 = 0.576 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

角速度

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 4000}{60} = 419 \text{ [rad / s]}$$

負荷エネルギー

$$L = T \times \omega = 0.576 \times 419 = 241.344 \text{ [J]}$$

(A)と(B)のよりモータの出力値は,

$$\text{モータの出力 (W)} = 20.1825 + 241.344 = 261.5265 \approx 262 \text{ [W]}$$

となる。これより主軸モータに掛かる総負荷を 262W と予想されるので、出力が 262W かつ回転数が 0~4000rpm まで制御可能を条件に選定を行った。その結果、オリエンタルモーター製のブラシレスモーターユニット「BXS6200AM-A」を採用した。表 4.6 にモータの仕様、図 4.6 にモータの回転速度とトルクの特性を示す。このモータの出力は 200W と計算した予想出力よりも小さい値であるが、計算は回転数 4000rpm と大きく見積もっており検出感度を高くすることを最優先させ、このモータで良いと判断した。

表 4.6 BXS6200AM-A の仕様

定格出力(連続)	200W
定格トルク(モーター軸)	0.65N・m
瞬時最大トルク(モーター軸)	1.3N・m
定格回転速度(モーター軸)	3000r/min
速度制御範囲	2-4000r/min
許容慣性モーメントJ	$10 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$

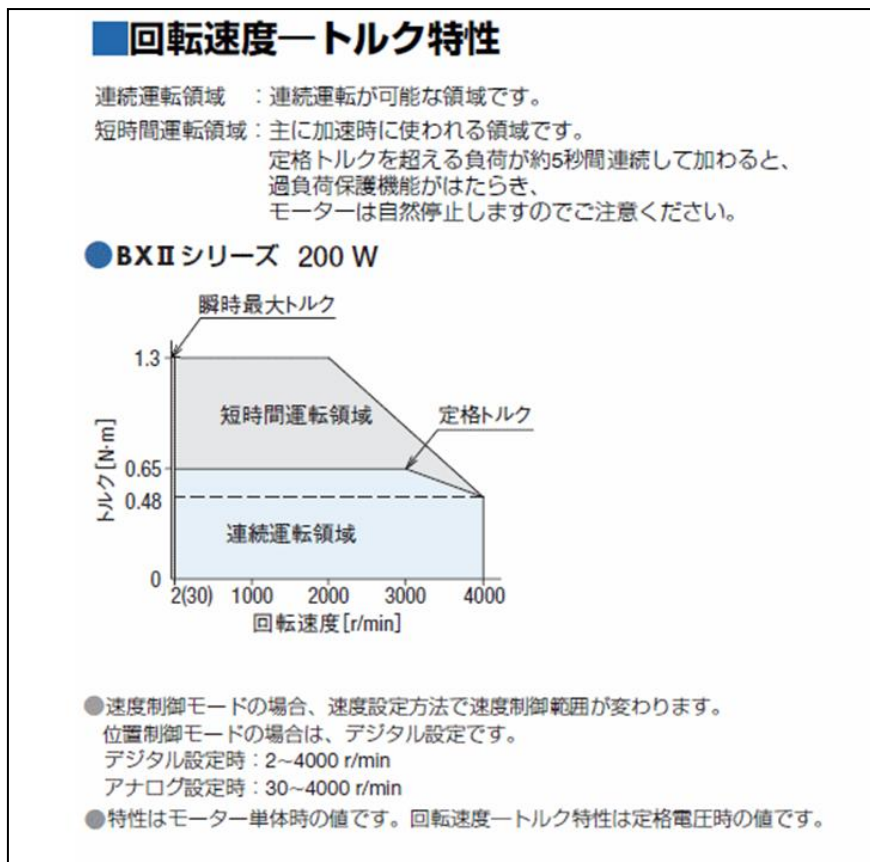


図 4.6 回転速度とトルクの特性  
(オリエンタルモーターHP より)

4.3.2 電動スライダの選定

旋盤における往復台として電動スライダを用いる（図4.7）．往復台の働きはバイトを主軸縦方向へ一定速度で移動させることで，同様の働きを電動スライダで行うことが可能である．本実験における回転数と送り量を仮に表4.7とした場合，送り速度は3.3～15.0 (mm/s)の範囲になる．この範囲の速度を制御でき，テーブル（バイト）を任意の位置で停止させるブレーキ機能が付いていることを条件として，オリエンタルモーター製の電動スライダ「EAS6X-E025-ARMA-3」を選定した．EAS6X-E025-ARMA-3の仕様を表4.8に示す．

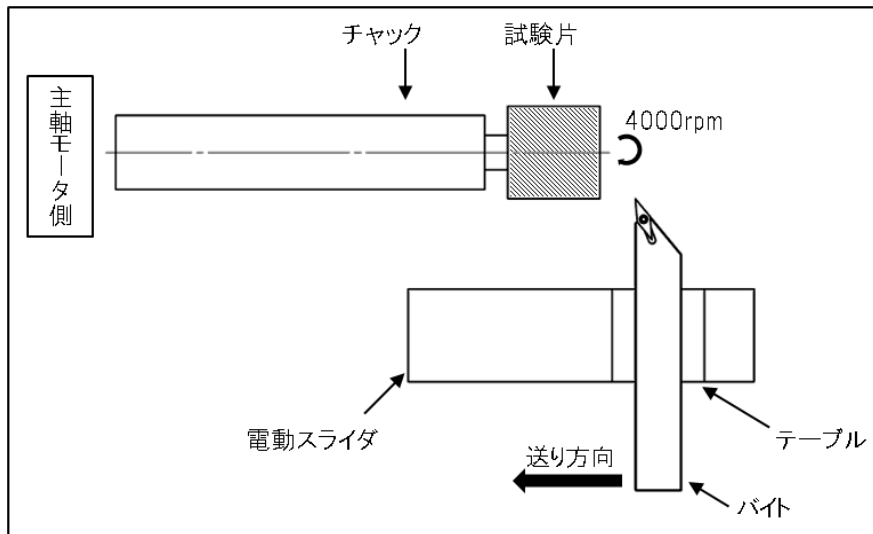


図4.7 電動スライダの設置

表4.7 実験における送り速度の範囲

送り速度 (mm/s)		送り量(mm/rev)		
		0.1	0.2	0.3
回転数 (rpm)	2000	3.3	6.7	10.0
	2500	4.2	8.3	12.5
	3000	5.0	10.0	15.0

表4.8 EAS6X-E025-ARMA-3の仕様

搭載モーター	ステッピングモータ	駆動方式	ボールねじ
スライダサイズ	幅75.4mm×高さ83mm	可搬質量 水平	～60kg
テーブルタイプ	Xタイプ	可搬質量 垂直	～30kg
リード	6mm	推力	～400N
ストローク	250mm	押し当て力	500N
電磁ブレーキ	有り	最高速度	400mm/s
モーター取付方向	ストレート	ドライバタイプ	パルス列入力タイプ



### 4.3.3 実験装置の設計

#### (1) プロトタイプの作成

選定したモータと電動スライダを用いて、構想した実験装置（図 4.2，図 4.7）を 3 次元 CAD ソフトでモデルを作成した。設計した実験装置の全体図と三面図を図 4.8 に示す。

チャックはドリル用のストレートシャンクチャックを使用し、段付き形状の試験片を固定する。モータの軸とシャフト、シャフトとチャックをカップリングでつなぎ、シャフトとチャックのシャンク部分をベアリングホルダーで支える。ベアリングホルダーには許容回転数 7000rpm 以上のものを使用した。電動スライダのテーブルに刃物台と取り付け、バイトを固定した。試験片の芯高さとバイトの刃先高さを合わせるために、モータとベアリングホルダーのしたに高さ調節台を敷いた。

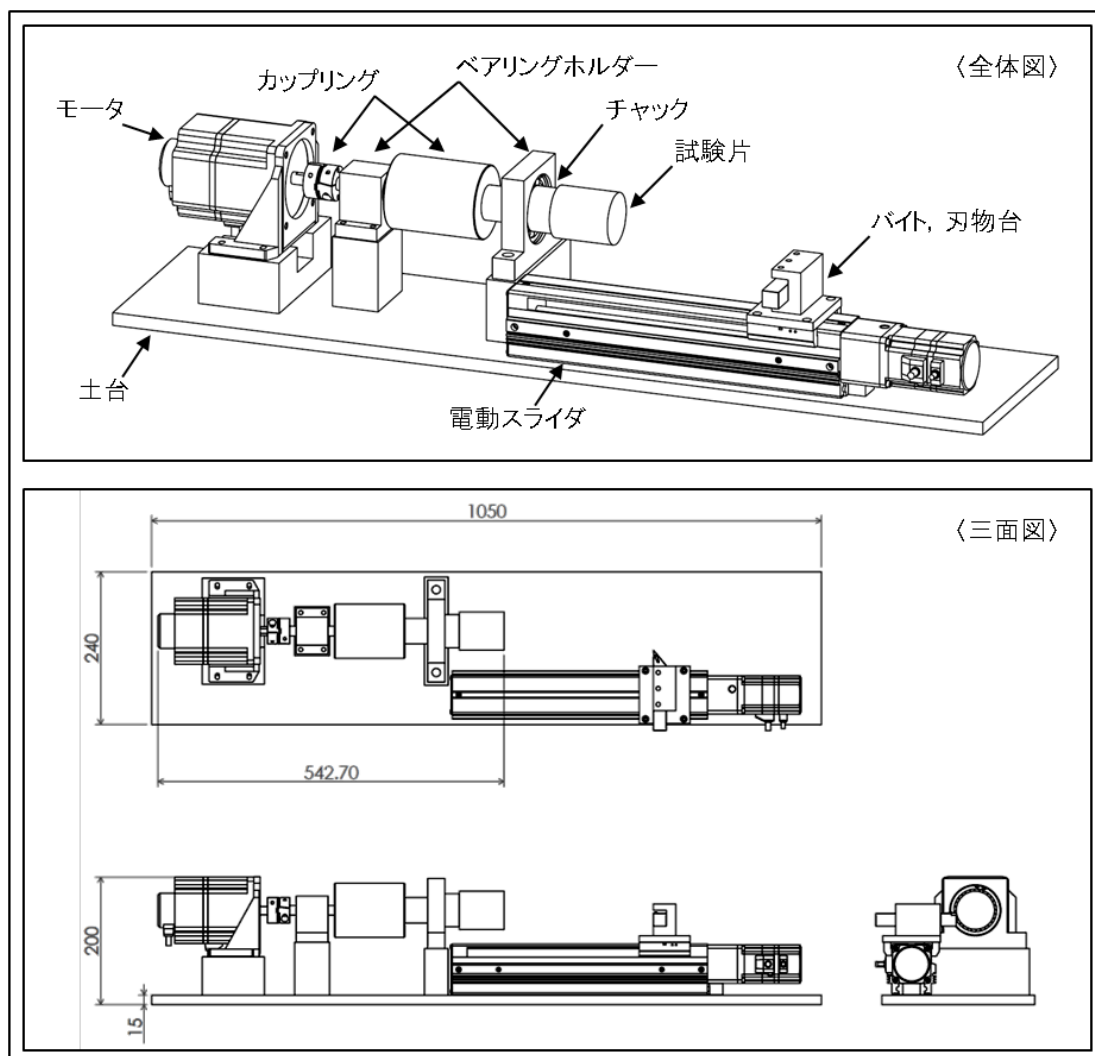


図 4.8 実験装置の全体図・三面図

図 4.8 の実験装置（以下プロトタイプと呼ぶ）の設計について検証したところ、主軸台についていくつか問題点が挙げられた。1つ目は実験装置に自由度が大きいことである。モータ軸から試験片までをつなぐパーツが多くということは、パーツ同士で芯のずれが生じ、装置を駆動させたときに不具合を起こしやすい原因である。理想は主軸部分にあたるチャックとシャフトが、カップリングでつながれておらず一体型となって回転していることである。また芯の高さを調整するためにモータやベアリングホルダーの下に土台を敷くというのも、芯のずれが生じる原因である。2つ目は、切削抵抗によるスラスト方向の荷重がモータへ直接負荷を与えているということである。回転する軸に対して直角な方向に作用するのがラジアル荷重、平行に作用するのがスラスト荷重といい、ベアリングホルダーはそれらの荷重を受け止める役割がある。プロトタイプのベアリングホルダーはラジアル荷重を受けられるが、スラスト方向の荷重には対応しておらず、モータが直接受け止めるという設計になっている（図 4.9）。これはモータの故障になる原因であると考えられるため、スラスト荷重を受けない設計を考えなければならない。そこでプロトタイプの設計を見直し、実験装置の再設計を行った。

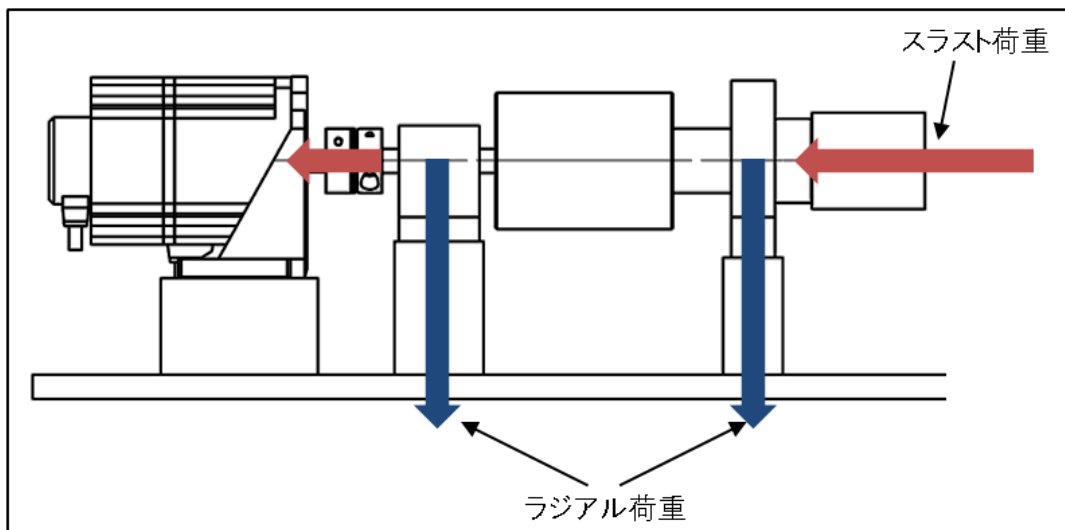


図 4.9 ラジアル荷重とスラスト荷重

(2) 実験装置の再設計

再設計した実験装置（以下セカンドタイプと呼ぶ）の全体図と三面図を図 4.10 に示す。プロトタイプでは、主軸台の自由度が大きいこと、切削抵抗のスラスト荷重がモータへ直接負荷を掛けていることが問題点であった。セカンドタイプは、それらを改善するため大幅に設計を変えた。

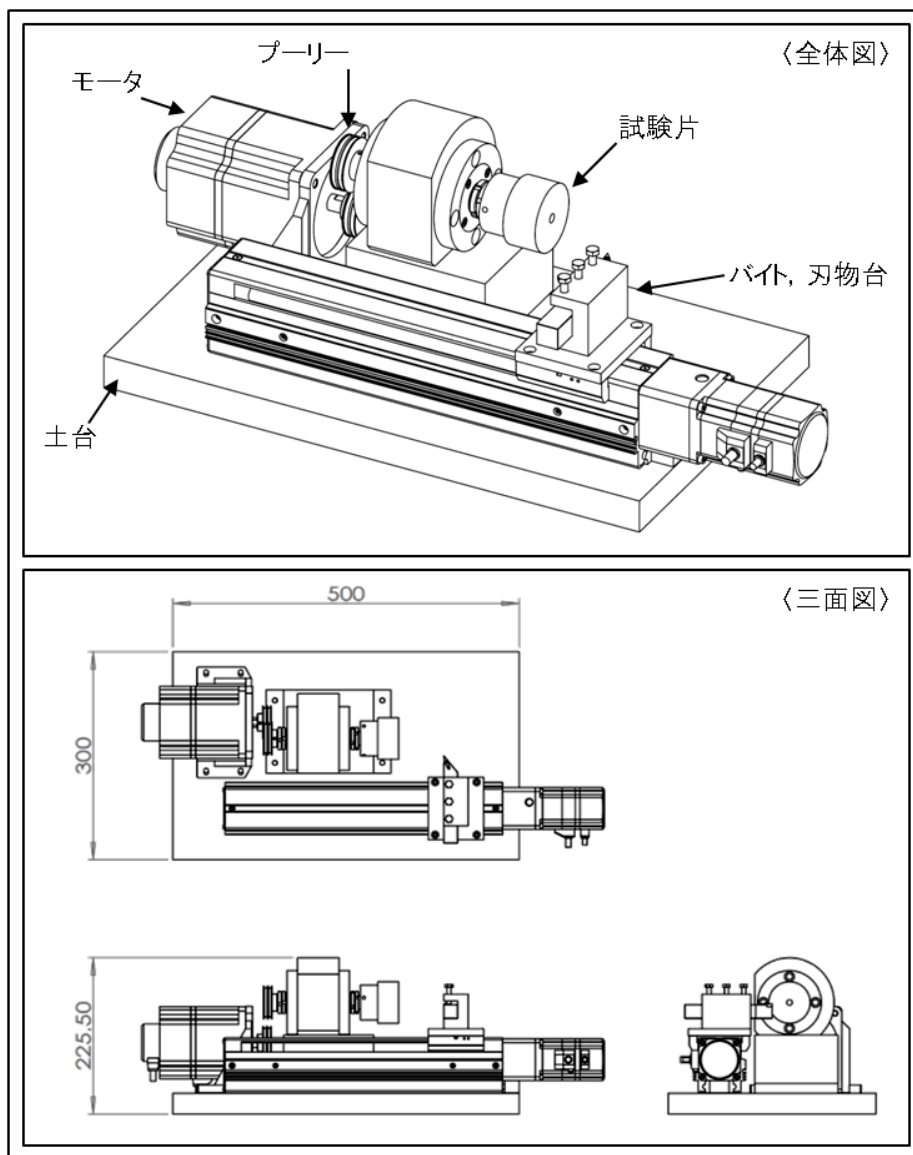


図 4.10 再設計した実験装置

・プーリ機構による回転の動力伝達

プロトタイプではモータの軸と主軸がカップリングにより直接つながれていたため、切削抵抗によるスラスト荷重を直接受ける構造になっていた。そこで、丸ベルトとプーリを用いてモータの回転動力を伝達することにした。またカップリング接続によって芯の位置がずれるという問題もプーリ機構を使用することで解消できた。

・高剛性の主軸台の設置

主軸台の自由度を小さくするために、チャックやシャフト、ベアリングホルダーなどを1つにまとめたような主軸台を考案した。主軸台の全体図を図4.11、主軸台の断面図を図4.12に示す。主軸を固定する台の下に高さを調整する台と位置を調節する台（後に主軸と電動スライダが平行になるようにするため）を敷いた。主軸固定台の中は、図4.12の断面図のようになっており、主軸をベアリングホルダー2つとスペーサーに通しベアリングナットで両側から挟むように固定している。このベアリングホルダーはスラスト荷重とラジアル荷重の両方に耐えられる仕様となっており、切削抵抗のスラスト荷重にも耐えることができる。主軸の一端にはプーリを取り付け、もう一端には試験片を固定するための面板を取り付けた。試験片は中心に貫通穴があり面板にボルトで固定する。

また、主軸を高速回転させたときに生じる振動に耐え押さえられるように主軸固定台は重量設計してある。実際にモータを最大回転数 4000rpm で駆動させても、異常音を発することなく主軸を回転させることができた。

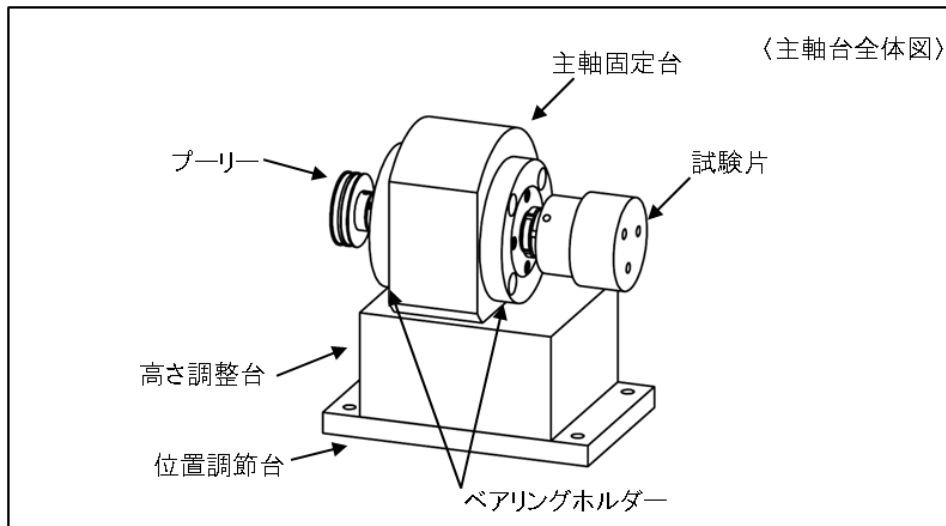


図 4.11 主軸台の全体図

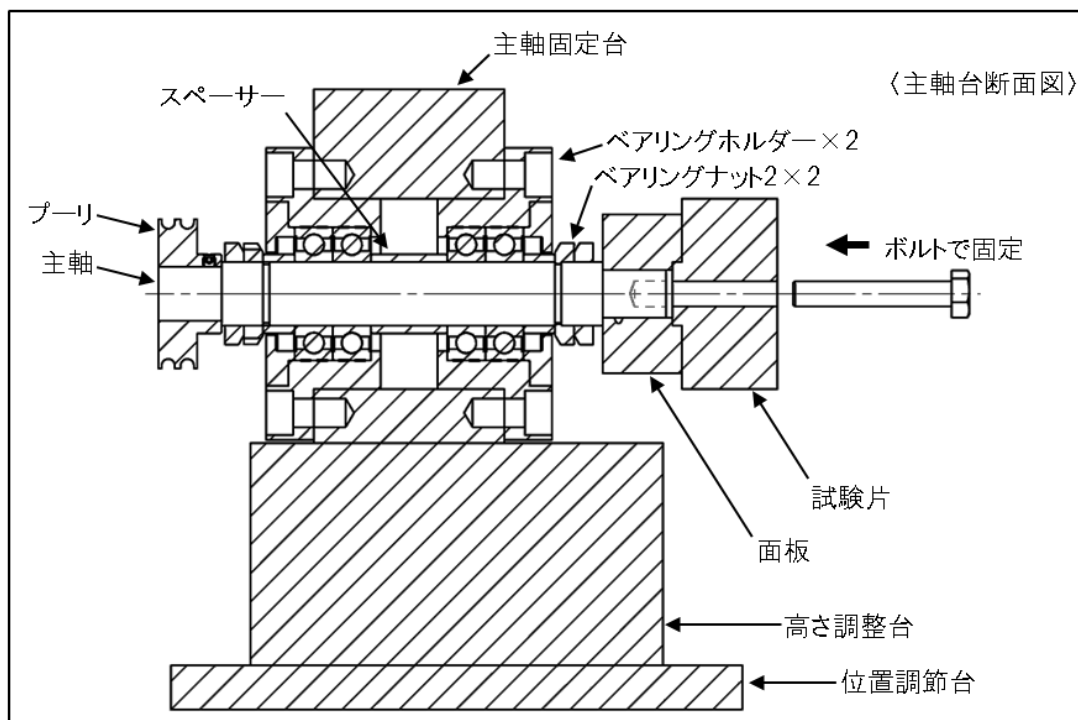


図 4.12 主軸台の断面図

第4章の参考・引用文献

- 1) 吉岡正人, 岡田勝蔵, ほか; 機械の材料学入門, 株式会社コロナ社, (2005)
- 2) 吉田総仁, 京極秀樹, ほか; 機械技術者のための材料加工学入門, 中央印刷株式会社 (2003)
- 3) JIS H 4040 (1999); アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線の化学成分
- 4) 仁平宣弘, 朝比奈奎一; 機械材料と加工技術, 技術評論社, (2003)
- 5) 小山十郎; 機械力学 考え方解き方, 東京電機大学出版局, (1985)
- 6) 萩原國雄; 材料力学 考え方解き方, 東京電機大学出版局, (1985)

## 第5章 アルミニウム材の切削加工実験, パラメータ設計

## 5.1 消費電力量を特性値としたパラメータ設計

## 5.1.1 実験背景及び目的

アルミニウム材を切削加工する際に、多数ある工具条件や加工条件の組み合わせの中から安定して加工できる条件を探し出すために、パラメータ設計を適用した。その際、加工状態を評価するための特性値として、実験装置の主軸モータの消費電力量を採用した。

## 5.1.2 実験方法

## (1) 実験装置と試験片

前章で作成した実験装置に図 5.1 に示すような試験片を取り付け、外径切削を行った。本研究で行うようなアルミニウム材の仕上げ切削では、加工時の加工量が微小であるため過剰な固定は不必要であると判断し、試験片はボルトネジ一本のみで固定した (図 5.2)。

試験片の材料はジュラルミンと純アルミの 2 種類を用意した。実験の一段階としてジュラルミンの切削実験を実施し、工具条件と加工条件を最適化する。その後、最適条件で純アルミの切削実験を実施して比較検討を行った。実験は図 5.3 に示すように試験片を外径切削した時の主軸モータの消費電圧・電流を計測した。

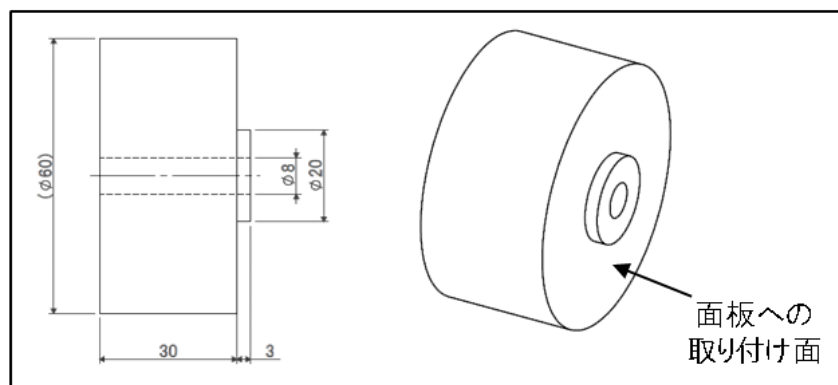


図 5.1 実験に使用する試験片の図面

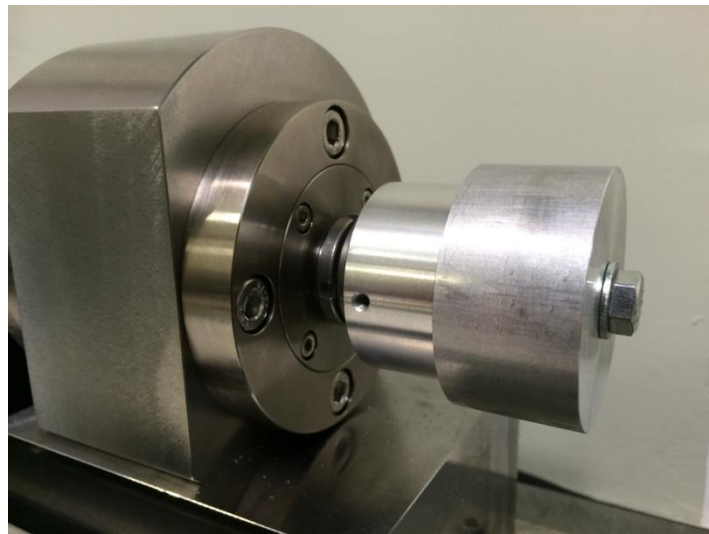


図 5.2 試験片の固定の様子

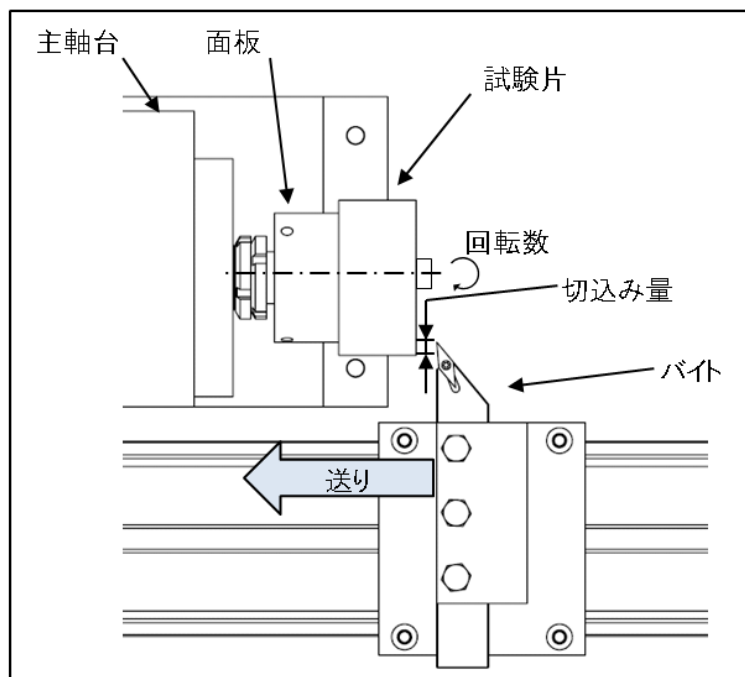


図 5.3 実験の様子



(2) 消費電力の計測方法

加工中の主轴モータの電圧と電流を図 5.4 に示すようなブロック図で計測した。主轴モータの消費電圧・電流を直接計測することが難しいため、主轴モータのドライバーの電源に電力計を結線した。ここで、図 5.5 に実際に計測された電圧と電流の例、またそれらから得られ電圧と電流、電力の波形の例をそれぞれ図 5.6, 図 5.7 に示す。この波形の例は、本実験の一部を引用したもので、加工条件は切込み量 0.04mm, 切削速度 400m/min, 送り量 0.05mm/rev である。

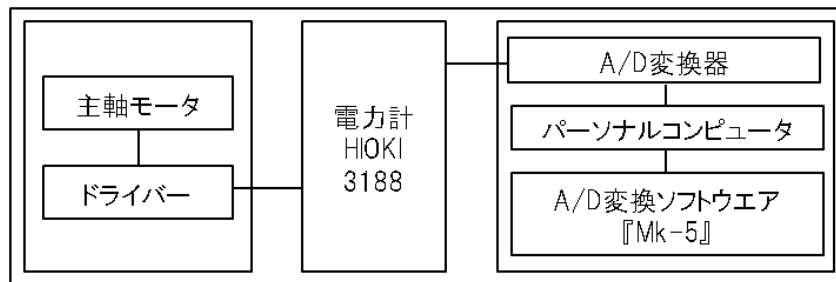


図 5.4 計測ブロック図

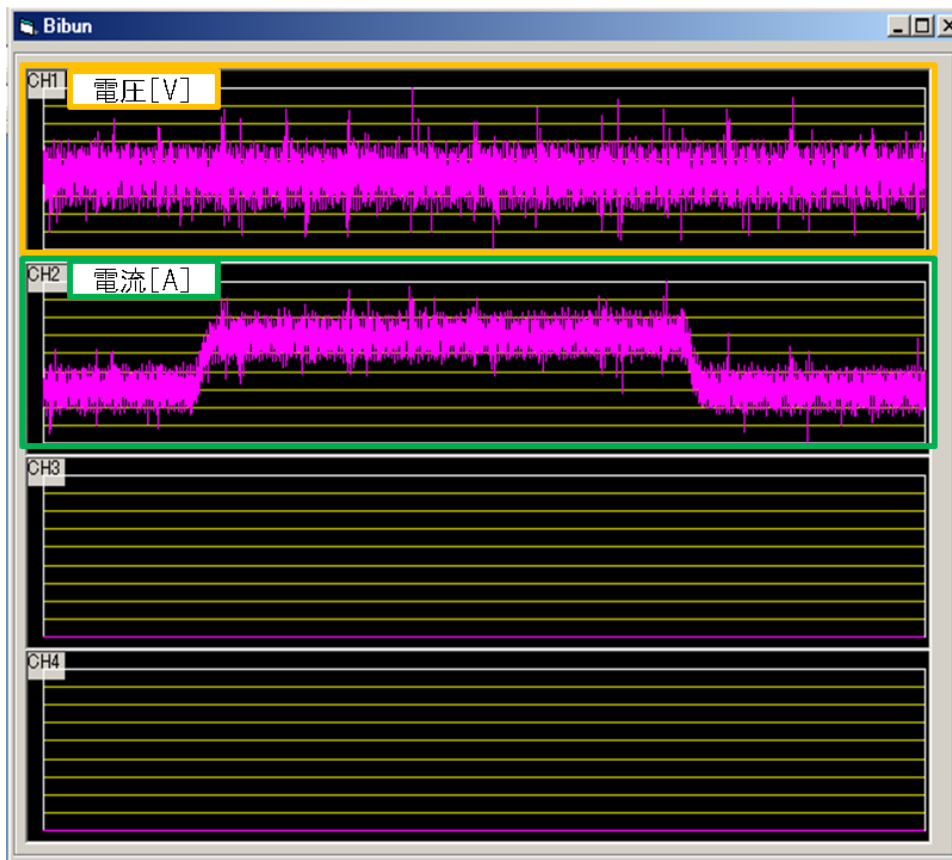


図 5.5 計測されたスピンドルモータの切削時の消費電圧・電流

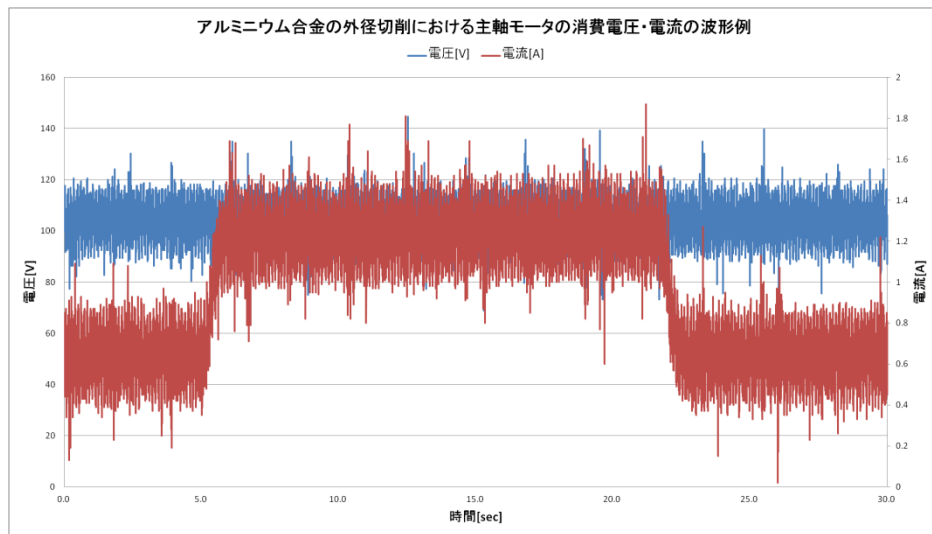


図 5.6 アルミニウム合金の外径切削における主軸モータの消費電圧・電流の波形例

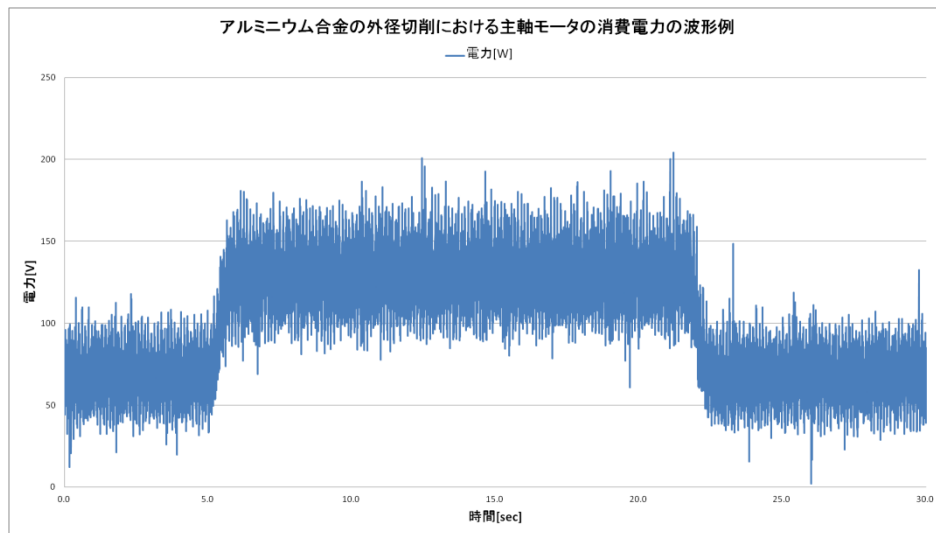


図 5.7 アルミニウム合金の外径切削における主軸モータの消費電力の波形例

(3)実験の手順

手順1. 試験片の取り付け

図 5.8 に示すように, 面盤に試験片をはめ込み, スパナでボルトを締め付け固定する.



図 5.8 試験片をボルトで固定する

手順2. 試験片の芯出し

試験片を作成する工程において材料の外径を切削していないため, 実験装置に取り付けた際に芯が出でいない状態である. そこで実験を行う前に試験片に芯を出すために外径切削を行った. この時表 5.1 に示す加工条件で, 本実験とは無関係のバイトを使用し切削する. 図 5.9 に芯出し作業の手順を示す. 切込み量の設定はダイヤルゲージを用いて行った. その様子を図 5.10 に示す.

表 5.1 芯出し作業の加工条件

切削速度(m/min)	400(モータの回転数: 2200)
送り量(mm/rev)	0.05(スライダの送り速度: 18r/min)
切込み量(mm)	1回目0.10, 2回目0.05

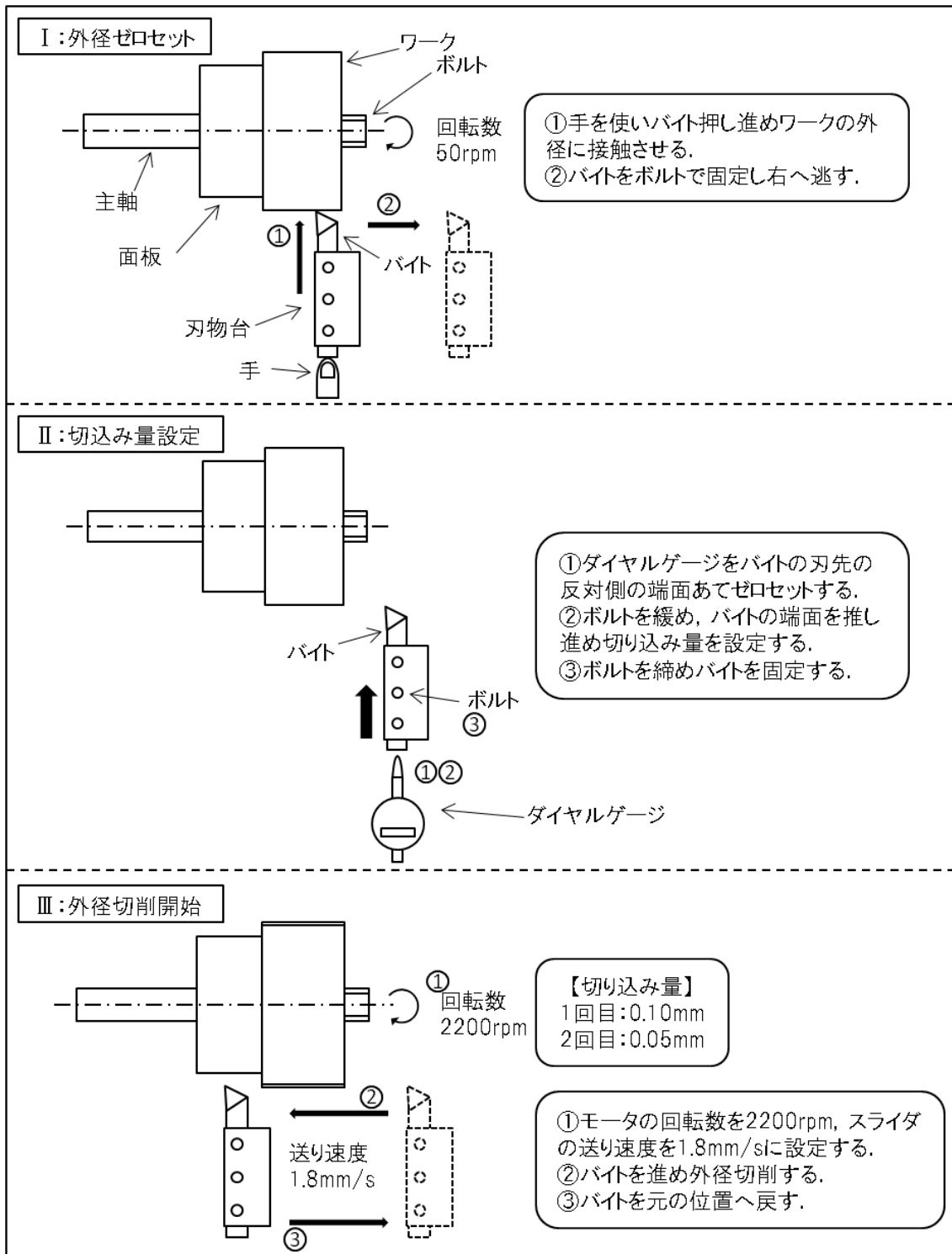


図 5.9 芯出し作業の手順

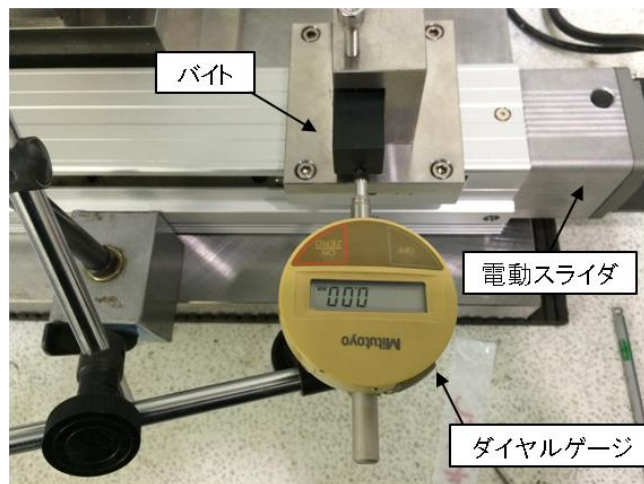


図 5.10 ダイヤルゲージを用いた切込み量の設定

### 手順 3. 実験用バイトの取り付け

芯出し用のバイトを外し実験用のバイトを刃物台へ取り付ける。

### 手順 4. 外径ゼロセット

図 5.9 の芯出し作業の手順と同様に、実験用のバイトで外径ゼロセットを行い、一度外径を切削する（回転数：2200rpm，送り速度 1.8mm/s，切込み量：0.05mm）。この理由は、実験時に正確な切込み量を設定できるようにバイトと試験片の差を完全に失くすためである。

### 手順 5. 切り込み量の設定

図 5.10 のようにダイヤルゲージをバイトの刃先の反対側の端面あて、切込み量を設定する。

### 手順 6. 電動スライダの送り速度の設定

電動スライダ動力であるステッピングモータの運転速度を PC ソフトウェアによって制御することでテーブルを移動させる。テーブルの送り速度を以下の計算式によってステッピングモータの運転速度へと変換し、送り速度を設定する。

$$\text{ステッピングモータ運転速度}[\text{r}/\text{min}] = \text{送り速度}[\text{mm}/\text{min}] \div \text{リード}[\text{mm}]$$

※リード：6mm

例えば、送り速度を 100[mm/min]の時、 $100 \div 6 = 16.666\dots \approx 17[\text{r}/\text{min}]$ を PC ソフトウェアへ入力する。

### 手順 7. 主軸モータの回転数の設定

試験片の外径をノギスで測定し、回転数を計算する。ドライバーを操作し、モータに計算した回転を与える。

手順8. 計測器の設定

A/D変換ソフトウェア「Mk-5」を起動させ、サンプリングの設定をする。本実験では、モータの電圧と電流をサンプリング周期 1msec, サンプリング数 30,000 すなわちサンプリングレート 1KS/sec で計測した。この時、電力計の電圧レンジは 600[V], 電流レンジは 6[A] に設定した。

手順9. 実験開始 (外径切削開始, 主軸モータの電圧・電流の計測)

スライダを移動させ、切削を開始する。

(4)信号因子の設定

旋削加工の出力であるモータの消費電力量を変化させる入力信号として切削体積を採用した。切削体積は、実験で試験片の外径を削った部分の体積  $V$  を理論式で求め、 $1/3V$ ,  $2/3V$ ,  $V$  として3水準の信号にした (表 5.2, 図 5.11)。

表 5.2 信号因子

信号因子	内容	切削体積		
	水準	水準1(M1)	水準2(M2)	水準3(M3)
		全切削量の1/3	全切削量の2/3	全切削量

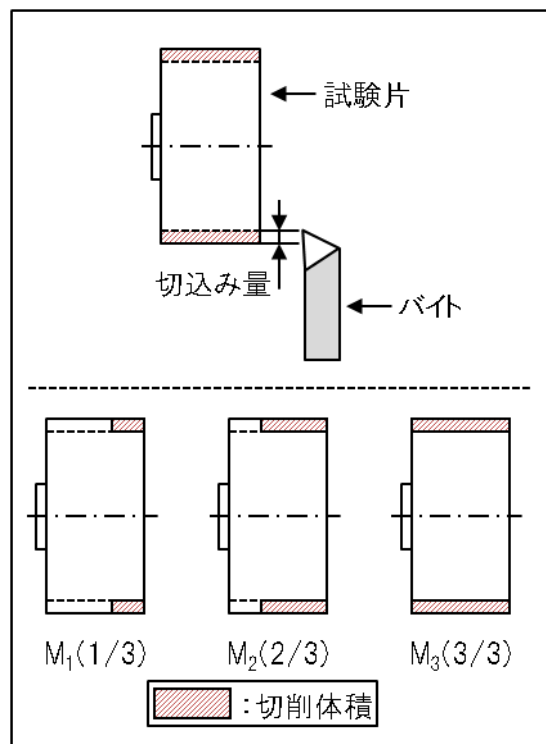


図 5.11 信号因子

(5) 制御因子の設定

表 5.3 に制御因子の要因名とその水準値を示す. 制御因子を 2 水準 1 要因, 3 水準 7 要因の直交表  $L_{18}$  へ割り付け全 18 条件で実験を行う (表 5.4). 要因 A~C の工具条件を組み合わせると, 9 種類のバイトができる. これらのバイトを揃えるためノーズ半径を 0.4mm に固定した. 要因 B のチップブレードにおいて, Atype はダイヤモンドを使用したもの, Btype は刃先が鏡面になっているものを選定した. 要因 D~F の加工条件は, 要因 C で選定した各メーカーが推奨しているアルミニウム合金の切削条件を参考にして水準を選定した. なお, G 列と H 列には制御因子は割り付けなかった.

表 5.3 制御因子

制御因子	要因	要因名	水準		
			1	2	3
	A	チップ形状	三角形	ひし形	-
	B	チップブレード	Atype	Btype	Atype
	C	メーカー	A社	B社	C社
	D	切込み量(mm)	0.04	0.06	0.08
	E	切削速度(m/min)	400	500	600
	F	送り量(mm/rev)	0.05	0.075	0.10
	G	GGG	g1	g2	g3
	H	HHH	h1	h2	h3

表 5.4 制御因子の直交表  $L_{18}$  への割り付け

要因	チップ形状	チップブレード	メーカー	切込み量 (mm)	切削速度 (m/min)	送り量 (mm/rev)	GGG	HHH
実験No. \ 列番	A	B	C	D	E	F	G	H
1	三角形	Atype	A社	0.04	400	0.050	g1	h1
2	三角形	Atype	B社	0.06	500	0.075	g2	h2
3	三角形	Atype	C社	0.08	600	0.100	g3	h3
4	三角形	Btype	A社	0.04	500	0.075	g3	h3
5	三角形	Btype	B社	0.06	600	0.100	g1	h1
6	三角形	Btype	C社	0.08	400	0.050	g2	h2
7	三角形	Atype	A社	0.06	400	0.100	g2	h3
8	三角形	Atype	B社	0.08	500	0.050	g3	h1
9	三角形	Atype	C社	0.04	600	0.075	g1	h2
10	ひし形	Atype	A社	0.08	600	0.075	g2	h1
11	ひし形	Atype	B社	0.04	400	0.100	g3	h2
12	ひし形	Atype	C社	0.06	500	0.050	g1	h3
13	ひし形	Btype	A社	0.06	600	0.050	g3	h2
14	ひし形	Btype	B社	0.08	400	0.075	g1	h3
15	ひし形	Btype	C社	0.04	500	0.100	g2	h1
16	ひし形	Atype	A社	0.08	500	0.100	g1	h2
17	ひし形	Atype	B社	0.04	600	0.050	g2	h3
18	ひし形	Atype	C社	0.06	400	0.075	g3	h1

(6) 誤差因子の設定

誤差因子は計測した加工電力値の変動を採用した(表 5.5). 安定した切削加工の電力値の波形は図 5.12 の左側のようにになっていることが理想である. しかし, 加工時に異音や振動が発生するような切削は安定しておらず, 図 5.12 の右側のように波形にノイズが混ざっている. これは実験者によって制御することができないノイズであり, 電力値の波形が安定していることが良い切削であるということの評価するため, 加工電力値の変動を誤差因子として取り入れた.

表 5.5 誤差因子

誤差因子	内容	計測した電力値の変動	
	水準	水準1(N1)	水準2(N2)
		最大値	最小値

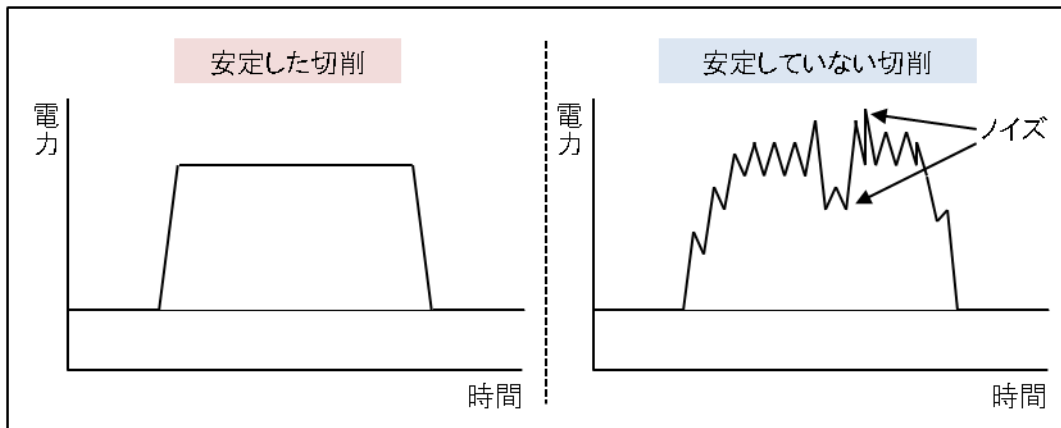


図 5.12 計測した加工電力値の変動

5.1.3 解析方法

A/D変換ソフトウェア Mk.5によって取得したサンプリングデータをExcelへ貼り付け(図 5.13), 電力の波形グラフを作成する. サンプリングデータ 30000 個をサンプリングレート 1KS/sec にて取得したので, サンプリング時間は 30 秒(30000÷1000)である. ch1 は電圧, ch2 は電流のサンプリングした生のデータである. それらに計測に設定したレンジの値を 2 で割った数を掛けることで実測値に変換できる (ch1 には 600[V]÷2=300, ch2 には 10[A]÷2=5 を掛けた). 変換した電圧と電流の値を掛けたものを電力とした. 電力[W]と時間[s]のグラフにしたものが図 5.14 である. このグラフには動的成分が大きく乗っているため, これを取り除くために移動平均法を用いた. 100 区間で移動平均を行った電力の波形を図 5.15 に示す.



	A				F	G
1	時間[s]	ch1	ch2	電圧[V]	電流[A]	電力[W]
2						移動平均 100
3	0.0	0.346	0.11	103.8	0.55	57.09
4	0.0	0.36	0.114	108	0.57	61.56
5	0.0	0.386	0.116	115.8	0.58	67.164
6	0.0	0.362	0.13	108.6	0.65	70.59
7	0.0	0.358	0.164	107.4	0.82	88.068
8	0.0	0.354	0.122	106.2	0.61	64.782
9	0.0	0.356	0.132	106.8	0.66	70.488
10	0.0	0.342	0.122	102.6	0.61	62.586

図 5.13 サンプルングデータの変換

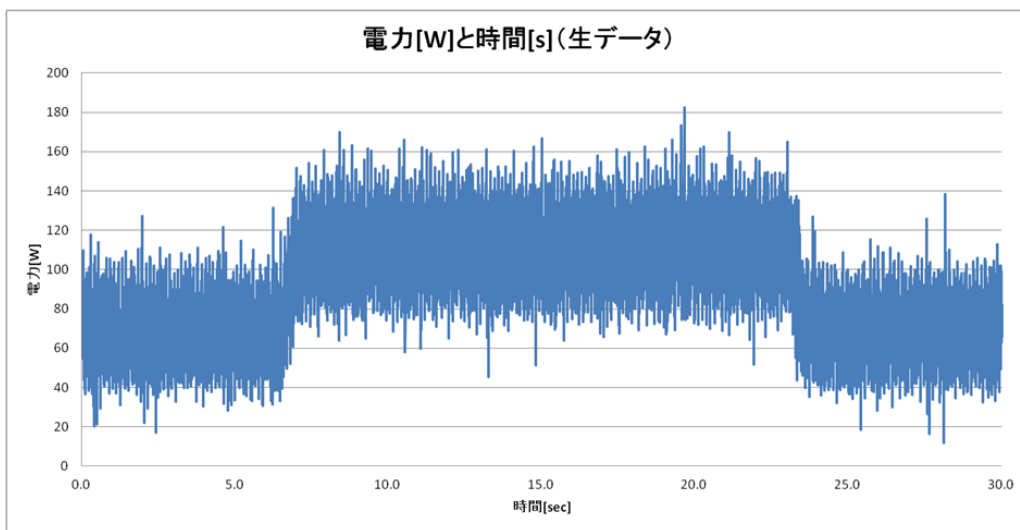


図 5.14 電力[W]と時間[s] (生データ)

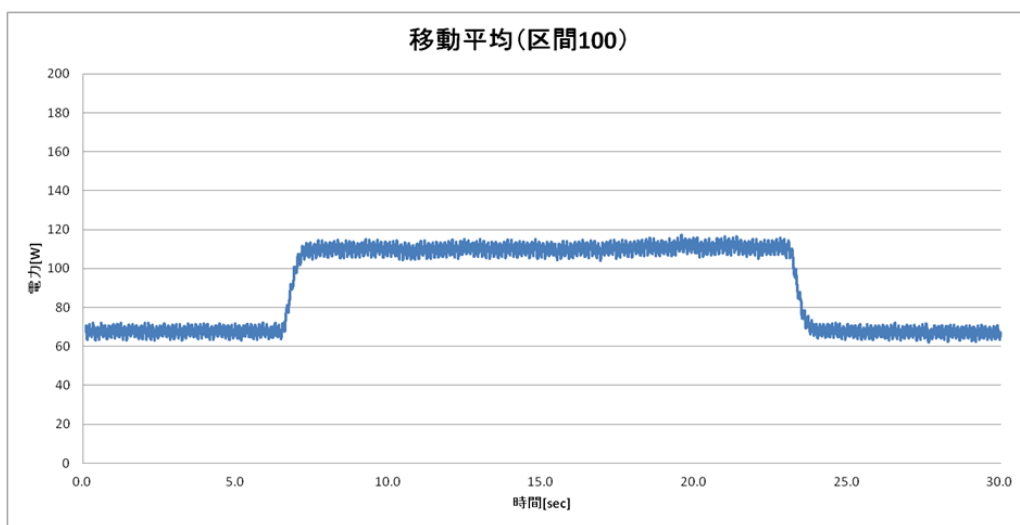


図 5.15 移動平均した電力の波形

5.1.4 実験結果

図 5.16 に示す主軸消費電力波形の切削過程の中で, 定常切削の部分の評価した. 定常切削の波形を三等分し, それぞれの区間における電力の最大値・最小値を求め, その値から空転時電力の平均値を差し引き, 区間の時間  $T$  を掛けたものを一区間あたりの電力量  $y$  とする. 電力量  $y_{11}$  の計算式は以下の通りである.

$$y_{11} = (Y_{1\max} - Y_{\text{average}}) \times T$$

$L_{18}$  直交表の一行目の切削体積と累積電力量のデータを表 5.5 に示し, ゼロ点比例の SN 比及び感度の計算を行った経過を示す. また, それらをまとめたものを表 5.6 に, 実験より得られる要因効果図を図 5.20 に示す.

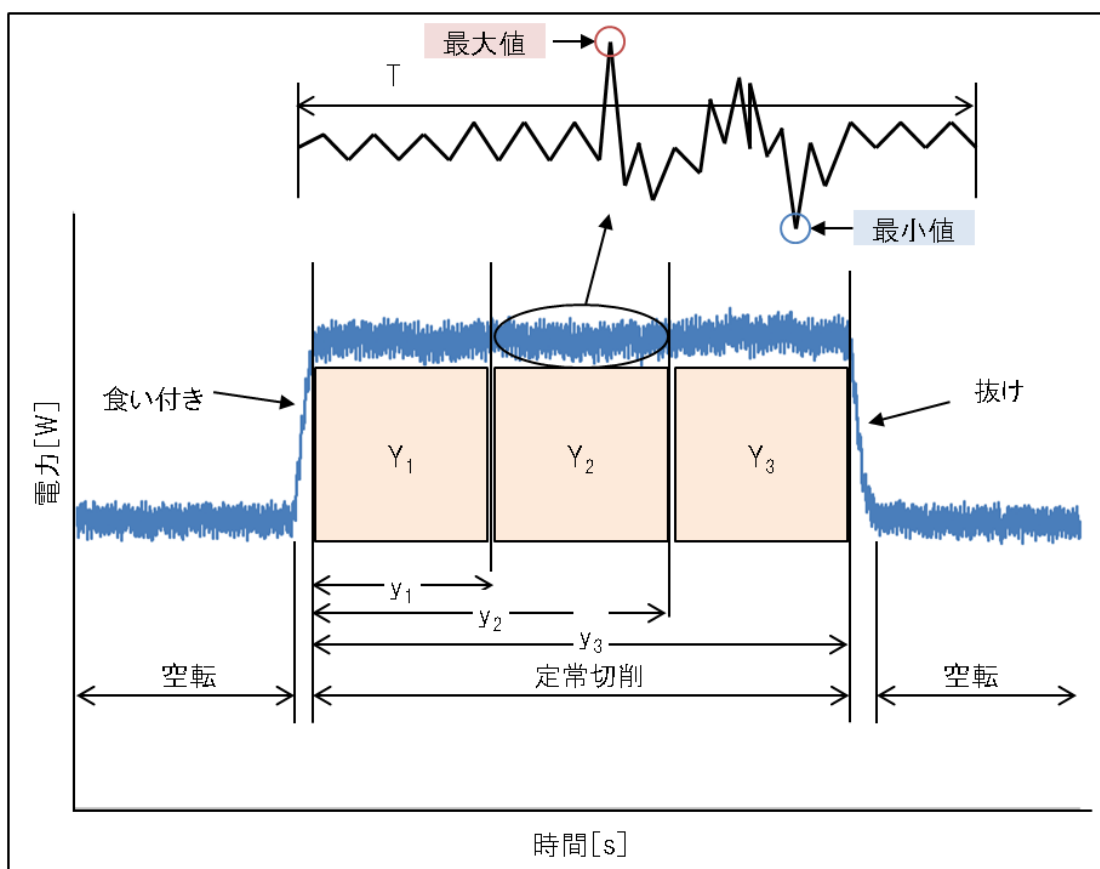


図 5.16 電力の最大値・最小値の取り方

表 5.5 実験 No. 1 のデータ

実験No.1		切削体積 $V(\text{mm}^3)$		
		M1	M2	M3
		70.91	141.83	212.74
累積電力量 ( $\text{W} \cdot \text{s}$ )	$N_1(\text{max})$	252.59	506.09	770.72
	$N_2(\text{min})$	194.60	387.70	587.20

【ゼロ点比例のSN比及び感度の計算】

有効除数

$$r = M_1 + M_2 + M_3 = 70.91 + 141.83 + 212.74 = 70400.5$$

線形式

$$L_1 = M_1 \times y_{11} + M_2 \times y_{12} + M_3 \times y_{13} = 70.91 \times 252.59 + 141.83 \times 506.09 + 212.74 \times 770.72 \\ = 253649.83$$

$$L_2 = M_1 \times y_{21} + M_2 \times y_{22} + M_3 \times y_{23} \\ = 70.91 \times 194.60 + 141.83 \times 387.70 + 212.74 \times 587.20 = 193705.60$$

全変動

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 \dots y_{22}^2 + y_{23}^2 = 252.59^2 + 506.09^2 \dots 387.70^2 + 587.20^2 = 1446925.8$$

$\beta$  の変動

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2)^2}{2 \times r} = \frac{(253649.83 + 193705.60)^2}{2 \times 70400.5} = 1421344.7$$

誤差因子 N の変動

$$S_{N \times \beta} = \frac{L_1^2 + L_2^2}{r} - S_\beta = \frac{253649.83^2 + 193705.60^2}{70400.5} - S_\beta = 25520.5$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} = 1446925.8 - 1421344.7 - 25520.5 = 60.6$$

誤差分散

$$V_e = \frac{S_e}{4} = \frac{60.6}{4} = 15.1$$

総合誤差分散

$$V_N = \frac{S_T - S_\beta}{6 - 1} = \frac{1446925.8 - 1421344.7}{5} = 5116.2$$

SN比

$$\eta = 10 \log \frac{\frac{1}{2r}(S_\beta - V_e)}{V_N} = 10 \log \frac{\frac{1}{2 \times 70400.5}(1421344.7 - 15.1)}{5116.2} = -27.39[\text{db}]$$

感度

$$S = 10 \log \left\{ \frac{1}{2r}(S_\beta - V_e) \right\} = 10 \log \frac{(1421344.7 - 15.1)}{2 \times 70400.5} = 10.18[\text{db}]$$

表 5.6 SN比と感度の計算結果

実験No.\列番	M1		M2		M3		SN比 $\eta$ (db)	感度S (db)
	N1	N2	N1	N2	N1	N2		
1	252.6	194.6	507.0	386.2	793.9	598.5	-27.39	10.18
2	265.3	124.5	1050.6	510.7	1118.3	562.2	-29.34	2.46
3	312.2	257.0	770.8	584.7	1266.9	1072.1	-25.84	6.98
4	263.7	189.3	815.3	522.8	1257.7	989.4	-23.77	9.61
5	242.3	212.7	490.7	426.0	722.0	630.7	-24.11	7.21
6	358.0	283.7	843.2	595.1	1159.4	921.4	-33.12	7.98
7	258.1	219.5	522.0	451.0	791.4	676.7	-25.56	7.41
8	502.5	220.0	716.2	507.5	1081.6	760.9	-35.84	6.33
9	246.6	173.7	445.3	335.7	605.5	501.2	-26.31	8.65
10	404.8	352.9	811.1	724.7	1227.1	1089.1	-25.55	9.14
11	150.8	116.5	306.2	248.1	482.7	378.4	-26.03	6.00
12	189.7	125.6	368.8	265.4	590.9	401.4	-33.55	3.55
13	255.0	174.7	502.5	396.7	760.2	595.1	-29.64	15.41
14	332.4	279.6	671.4	562.5	1019.9	866.0	-28.79	7.10
15	150.7	119.0	297.3	240.8	457.2	374.6	-24.35	6.16
16	395.7	351.3	811.1	720.7	1233.9	1112.7	-25.05	9.16
17	142.1	85.4	318.6	191.0	466.5	321.4	-30.90	5.30
18	270.7	220.4	555.4	461.9	826.4	698.8	-26.71	7.74

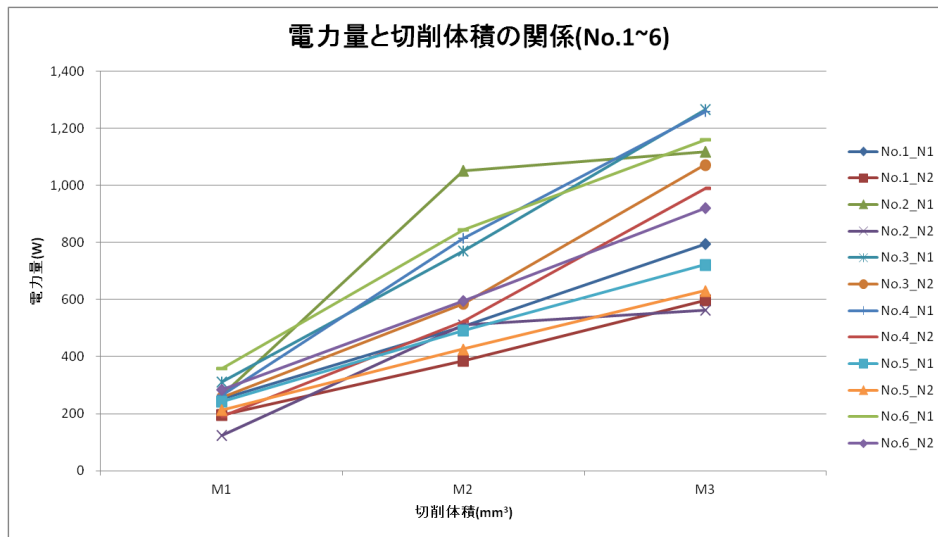


図 5.17 直交表  $L_{18}$  の実験 No. 1~6 までの結果

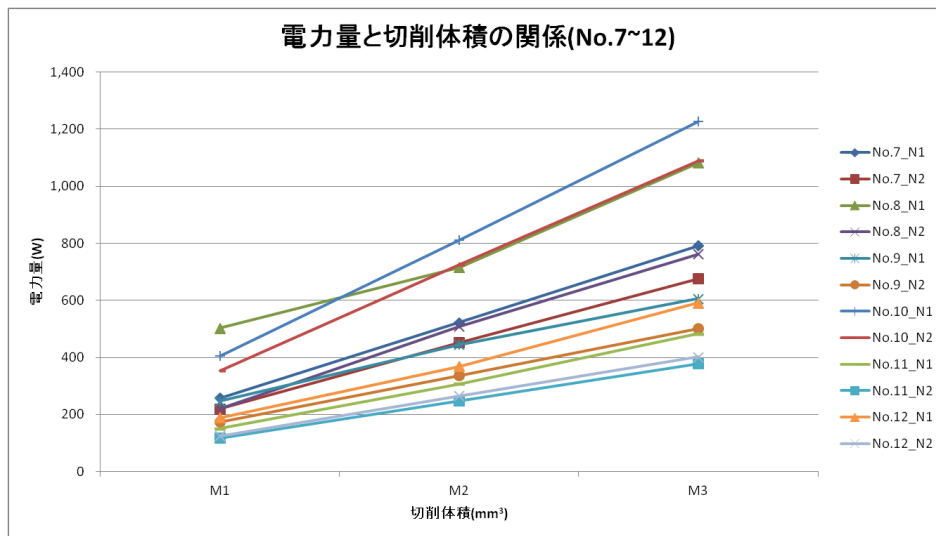


図 5.18 直交表  $L_{18}$  の実験 No. 1~6 までの結果

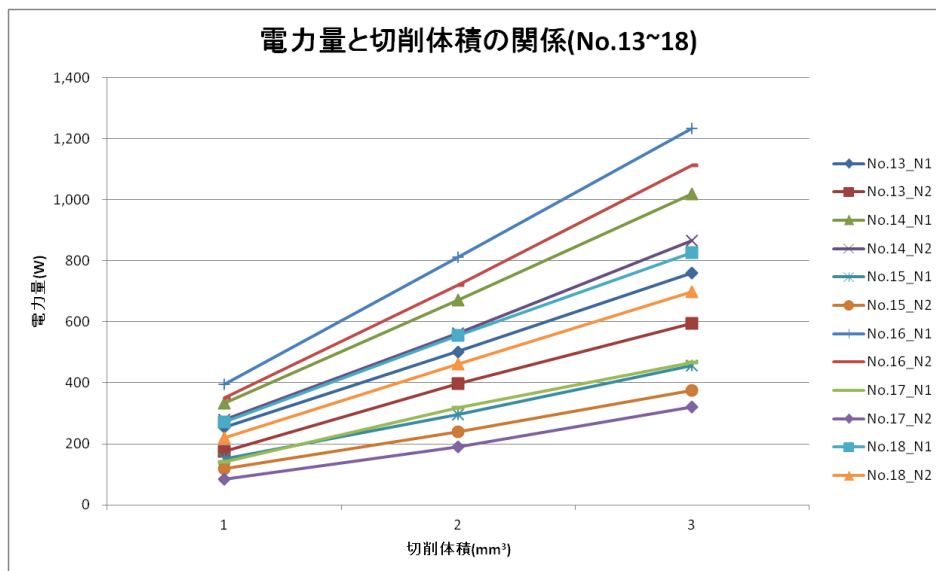


図 5.19 直交表  $L_{18}$  の実験 No. 1~6 までの結果

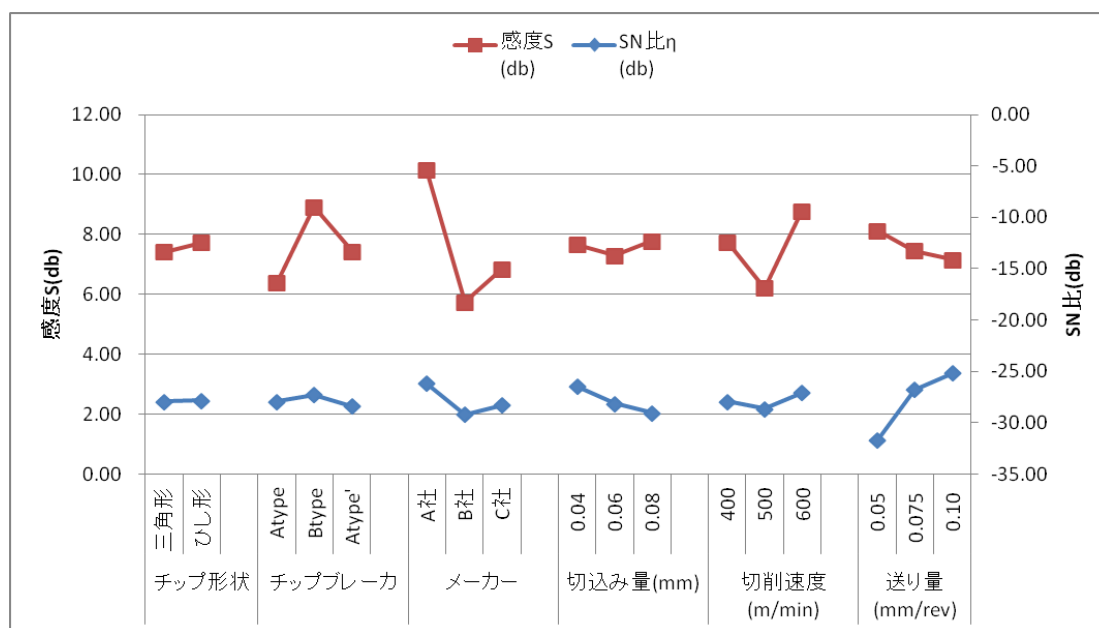


図 5.20 直交表  $L_{18}$  によるパラメータ設計の実験結果より得られる SN 比と感度の要因効果図

SN 比の要因効果図において、SN 比が一番大きい水準を最適条件、一番小さいものを比較条件とし、表 5.7 に示す。この最適条件に再現性があるか確かめるための確認実験を行った結果を表 5.8 に示す。比較条件の水準の組み合わせは直交表  $L_{18}$  実験の No. 8 と同じ組み合わせであるので、No. 8 の実験を確認実験の結果として引用した。

表 5.7 最適条件と比較条件

	要因名					
	チップ形状	チップブレーカ	メーカー	切込み量 (mm)	切削速度 (m/min)	送り量 (mm/rev)
最適条件	ひし形	Btype	A社	0.04	600	0.10
比較条件	三角形	Atype	B社	0.08	500	0.05

表 5.8 推定値と確認値の比較

	推定値		確認実験	
	SN比 $\eta$ (db)	感度 S (db)	SN比 $\eta$ (db)	感度 S (db)
全平均	-27.88	7.58	-	-
最適条件	-20.57	12.50	-19.97	-5.78
比較条件	-35.50	4.83	-35.84	6.33
利得	14.93	7.67	15.87	12.11

表 5.8 より、推定値と確認値における SN 比の利得の差は 0.94[db]であり 3[db]以内であるため、この最適条件は再現性があると判断できる。また、確認実験においてパラメータ設計により得られた最適条件は比較条件に対して 15.87[db]の利得がある。これは今回のパラメータ設計により得られた最適条件で加工を行った場合、比較条件と比べると消費電力値のばらつきが $1/38.64(10^{\frac{15.87}{10}} = 38.64)$ となることを示している。

図 5.20 より、SN 比についてみると工具条件の要因はほとんど SN 比に差がないことが分かる。直交表の実験において加工の様子を見ると、要因 A のチップ形状が三角形の時、逃げ角が小さいため試験片とバイトの間に切りくずが溜まりやすくなっていた。このことにより、切削した後の加工面を切りくずが傷付ける、主軸の回転に大きな負荷が加わり、丸ベルトが滑り回転が止まるなどの切削不良がしばしば見られた。アルミニウム合金の切削においては、逃げ角が大きいひし形の方が有効であることが分かった。また、切りくずが溜まる原因として要因 B のチップブレイカも影響していると考えられる。Atype、Btype とともに流れ型の切りくずであり、それを破断する役割はほとんど見られなかった。Atype は切りくずがチップ上に溜まりやすく、Btype は切りくずがスムーズに外へ流れるといった特徴が見られた。Atype の刃先はダイヤモンドでできているが平ら形状であるのに対し、Btype は刃先のすくい面が大きくチップの表面は鏡面コーティングされているため、切りくずの排出に良い影響を与えていると考えられる(図 5.21)。専門技術的な見解では、アルミニウム合金の切削にダイヤモンド材質のチップが有効であると言われているが、SN 比が小さくなった原因としてすくい面の形状が大きな影響を与えているのではないかと考えられる。

加工条件の要因に関して、D の切込み量と F の送り量は小さい方が、E の切削速度は大きい方が良く、SN 比のグラフもそのような形が望ましいとされる。しかしながら、E の切削速度は水準値が連続した値であるのに対し、谷型のグラフを示していることから制御因子間の交互作用が影響していると考えられる。また、F の送り量は左肩上がり理想であるが、グラフは右肩上りを示している。バイトを送る電動スライダはステッピングモータが使われており、その回転にはムラが生じてしまうことがある。この実験においては送り量が小さくなれば電動スライダの送り速度にムラが生じてしまい、主軸モータの電力値が安定しなかったと考えられる。

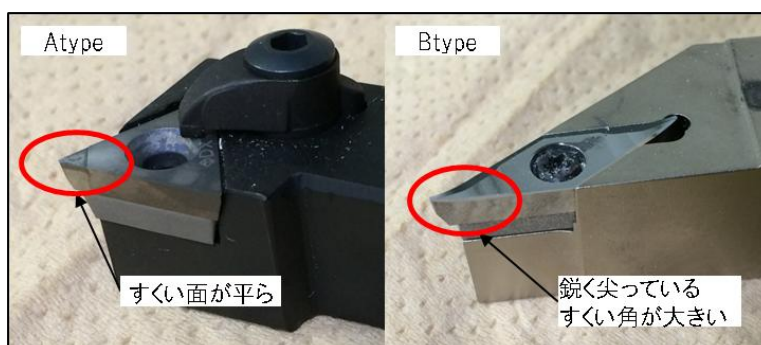


図 5.21 Atype と Btype の刃先形状

## 5.2 加工面粗さを特性値としたパラメータ設計

### 5.2.1 実験目的

消費電力量を特性値としたパラメータ設計により求めた最適条件は、再現性があることが分かった。しかしながら、図 5.20 において制御因子の切削速度と送り量の SN 比のグラフが理想的な形ではなかったため検討の余地がある。

そこで、前節で実験した試験片の加工面粗さを特性値としたパラメータ設計を実施し、加工面粗さが小さくなるような最適条件を求める。これと前節の結果から、加工時の消費電力が安定し、かつ加工面粗さが小さくなるような条件を得ることを目的とする。

### 5.2.2 実験方法

面粗さ計測器を用いて加工後の試験片の面の表面粗さを計測した。使用した計測器を図 5.22 に示す。面粗さ計測器は図 5.23 のように検出器の先端で加工面をトレースし、その上下変動量を検出することで表面の粗さを測定する。トレースする長さは 3.00mm, 送り速度は 0.15mm/s で任意の 3 箇所（図 5.23）を計測した。



図 5.22 面粗さ計測器

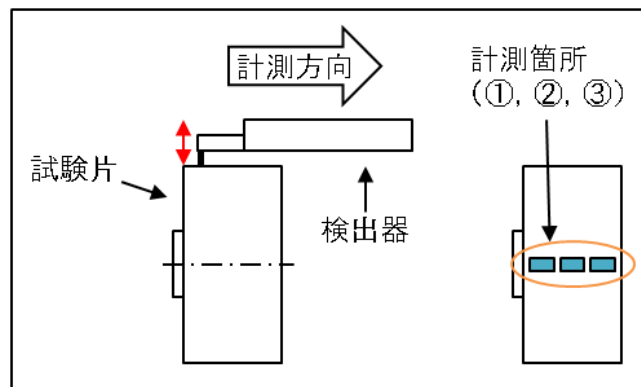


図 5.23 計測方法



表面粗さは小さいことが望ましい特性値であるので, SN比は望小特性で求めた. 望小特性とは特性値がマイナス値にならず 0 であることが理想であるという評価方法である. 以下に望小特性の SN 比の計算式を示す.

【望小特性の SN 比の求め方】

得られるデータが  $y_1, y_2, \dots, y_n$  であるとき,

望小特性 SN 比 :  $\eta = -10 \log \sigma^2 [\text{db}]$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)$$

5.2.3 実験結果

表 5.9 に実験結果, 図 5.24 に実験結果より得られる SN 比と表面粗さ Ra の平均値の要因効果図を示す.

表 5.9 特性値を表面の粗さ Ra とした場合の実験結果

実験No. \ 列番	測定箇所			SN比 $\eta$ (db)	Raの平均値 [ $\mu\text{m}$ ]
	①	②	③		
1	0.60	0.62	0.58	4.43	0.60
2	0.96	0.91	0.95	0.54	0.94
3	1.04	1.06	1.07	-0.48	1.06
4	0.52	0.48	0.48	6.13	0.49
5	1.19	1.06	1.07	-0.89	1.11
6	0.34	0.31	0.31	9.89	0.32
7	1.16	1.17	1.13	-1.24	1.15
8	1.14	1.08	1.12	-0.93	1.11
9	0.59	0.58	0.61	4.53	0.59
10	0.96	0.74	0.76	1.66	0.82
11	0.87	0.88	0.88	1.14	0.88
12	0.46	0.48	0.49	6.43	0.48
13	0.30	0.30	0.26	10.83	0.29
14	0.57	0.60	0.59	4.63	0.59
15	0.96	0.98	1.00	0.17	0.98
16	1.35	1.19	1.25	-2.04	1.26
17	0.31	0.39	0.34	9.16	0.35
18	0.59	0.60	0.61	4.44	0.60

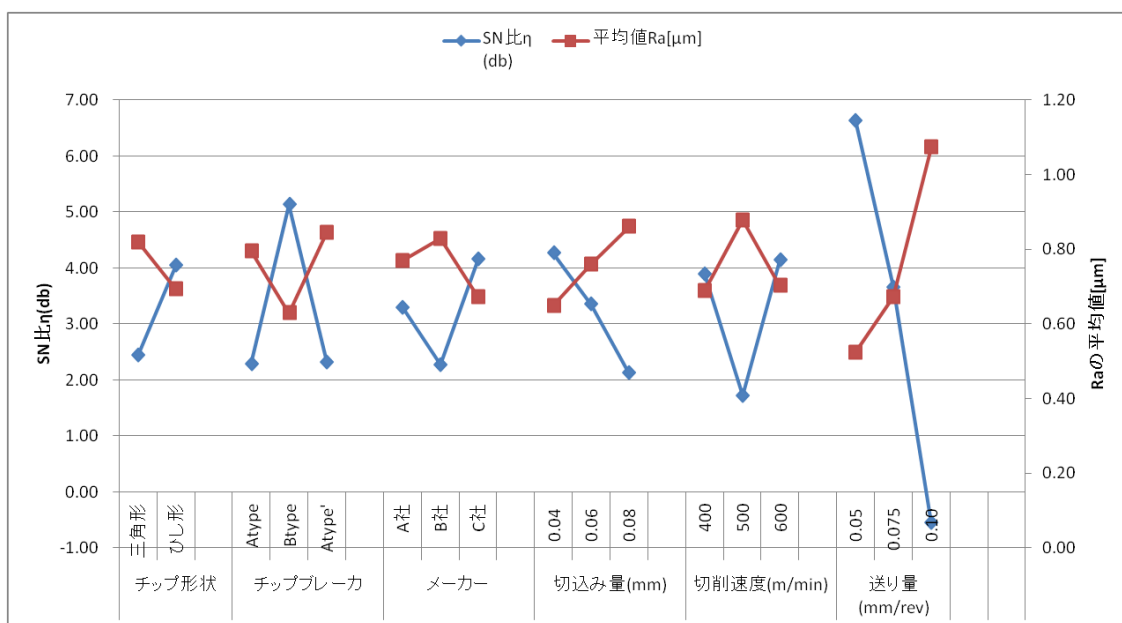


図 5.20 特性値を表面の粗さ Ra とした場合の実験結果による要因効果図

SN 比が一番大きい水準を最適条件, 一番小さいものを比較条件とし表 5.10 に示す. また, 再現性があるかどうか確かめるために確認実験を行い, その結果を表 5.11 に示す.

表 5.11 特性値を表面の粗さ Ra とした場合の最適条件と比較条件

	要因名					
	チップ形状	チップブレイカ	メーカー	切込み量 (mm)	切削速度 (m/min)	送り量 (mm/rev)
最適条件	ひし形	Btype	C社	0.04	600	0.05
比較条件	三角形	Atype	B社	0.08	500	0.10

表 5.12 推定値と確認値の比較

	推定値		確認実験	
	SN比 $\eta$ (db)	Raの平均値( $\mu\text{m}$ )	SN比 $\eta$ (db)	Raの平均値( $\mu\text{m}$ )
最適条件	12.15	0.09	10.16	0.31
比較条件	-5.94	1.47	-2.86	1.39
利得	18.09	-1.39	13.02	1.08

表 5.12 により, 推定値と確認値の利得の差が 5.07 [db] であり, この最適条件での再現性は悪かった. しかしながら, 特性値を表面粗さとした場合でも工具条件の制御因子において要因 A のチップ形状はひし形, 要因 B のチップブレイカは Btype のとき SN 比が大きくなっており, これは特性値が消費電力量の場合と同様の結果である. さらに, 加工条件の要因 D の切込み量と要因 F の送り量のグラフは左肩上がりで理想的な形に近いことから, 表面粗さに大きな影響を与えていることが分かる.

5.2.4 表面粗さにおける切込み量と送り量の効果

前項の結果より, 制御因子である要因Dと要因Fの効果をさらに調べるため直交表 $L_{18}$ よりも小さな水準値を設定し, 再度実験を行った. 実験は, 要因A~Cの工具条件と要因Eの切削速度は, 消費電力量を特性値としたときの最適条件の水準で行い, 切込み量と送り量の水準は表5.13のように設定した. 実験の結果として表面粗さを特性値としたSN比の計算結果を表5.14に示す. また, 切込み量と送り量が表面粗さに与えた影響を図5.25, 26に示す. 今回の実験で得られる加工電力の波形では, 消費電力値が現れず解析が不可能であったため, 表面粗さのみを観察することにした.

表5.13 設定した切込み量と送り量の水準値

	水準1	水準2	水準3
切込み量(mm)	0.01	0.02	0.04
送り量(mm/rev)	0.01	0.03	0.05

表5.14 実験結果 (表面粗さ)

No.	切削速度 (m/min)	切込み量 (mm)	送り量 (mm/rev)	Ra( $\mu$ m)			SN比 $\eta$ (db)	平均値 Ra[ $\mu$ m]
				M1	M2	M3		
1	600	0.01	0.01	0.16	0.11	0.09	18.16	0.12
2		0.01	0.03	0.16	0.15	0.12	16.81	0.14
3		0.01	0.05	0.24	0.24	0.32	11.39	0.27
4		0.02	0.01	0.12	0.09	0.08	20.16	0.10
5		0.02	0.03	0.14	0.14	0.14	17.08	0.14
6		0.02	0.05	0.16	0.17	0.16	15.73	0.16
7		0.04	0.01	0.11	0.12	0.09	19.38	0.11
8		0.04	0.03	0.14	0.14	0.14	17.08	0.14
9		0.04	0.05	0.38	0.42	0.49	7.28	0.43

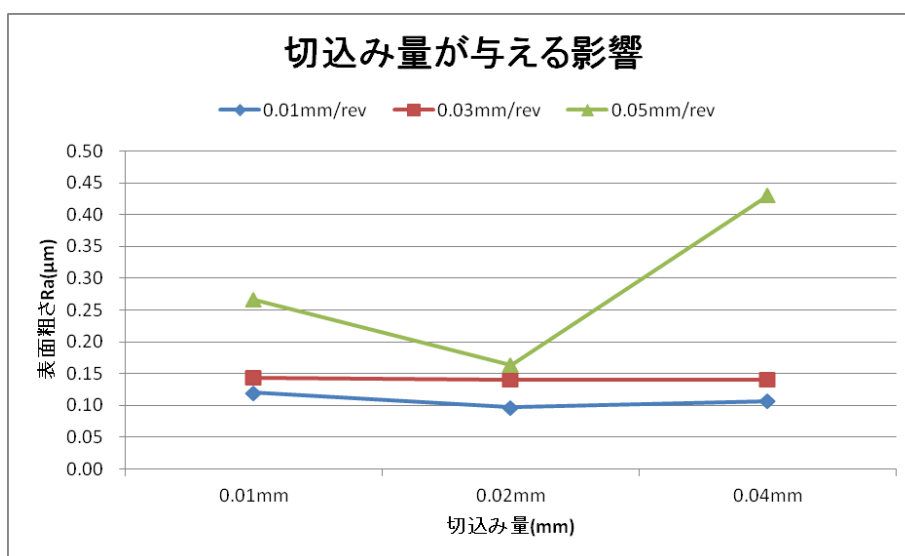


図5.25 切込み量が表面粗さに与える影響

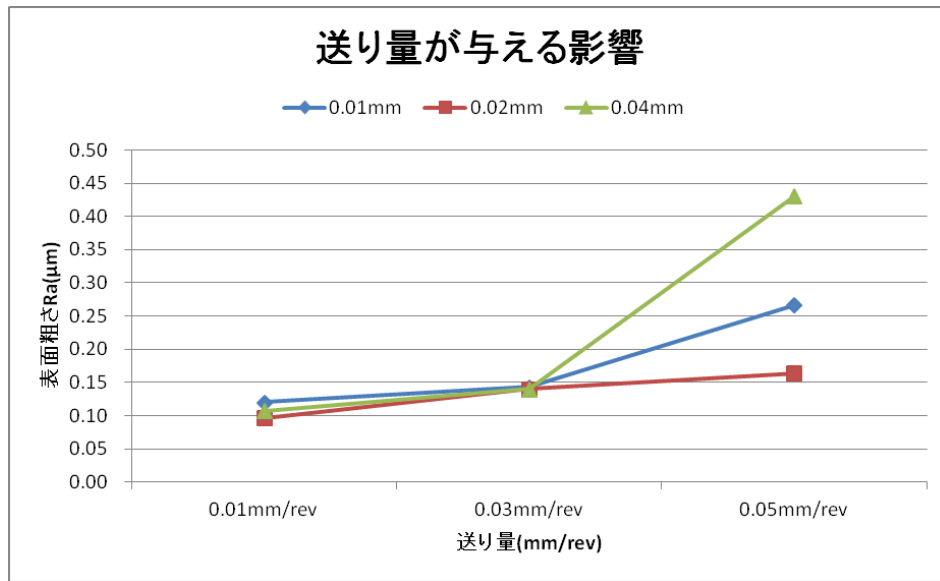


図 5.26 送り量が表面粗さに与える影響

表 5.14 より, 切込み量が 0.02mm, 送り量が 0.01mm/rev のとき SN 比が最大になり, 表面粗さ Ra の平均値が  $0.10\mu\text{m}$  となった. これは表面粗さの最適条件と比べて 32.3%改善されている. また, 図 5.25, 26 より, 切込み量と送り量が小さくなれば表面粗さ Ra の値も小さくなることが分かった. これより, SN 比が最大となるように水準値を調整した条件を, ジュラルミンの旋削加工の最適条件とし, 表 5.15 に示す.

表 5.15 ジュラルミンの旋削加工における最適条件

	チップ形状	チップブレード	メーカー	切込み量 (mm)	切削速度 (m/min)	送り量 (mm/rev)
最適条件	ひし形	Btype	A社	0.02	600	0.01

5.2.5 ジュラルミンと純アルミの最適条件による切削の比較

消費電力量の最適条件, 表面粗さの最適条件, 前項で求めた最適条件において純アルミを旋削加工した. 得られた表面粗さをジュラルミンと比較した結果を表 5.16 に示す. また, 加工したジュラルミンと純アルミの試験片の表面の様子を図 5.27 に示す. また, 調整した最適条件で純アルミとジュラルミンを切削したときのチップの先端の様子を図 5.28 に示す.

表 5.16 純アルミの旋削加工における表面粗さの比較

	SN比 $\eta$ (db)		平均値Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
	ジュラルミン	純アルミ	ジュラルミン	純アルミ
消費電力の最適条件	-0.17	-0.34	1.04	1.04
表面粗さの最適条件	10.16	5.03	0.31	0.56
調整した最適条件	20.16	16.98	0.10	0.14

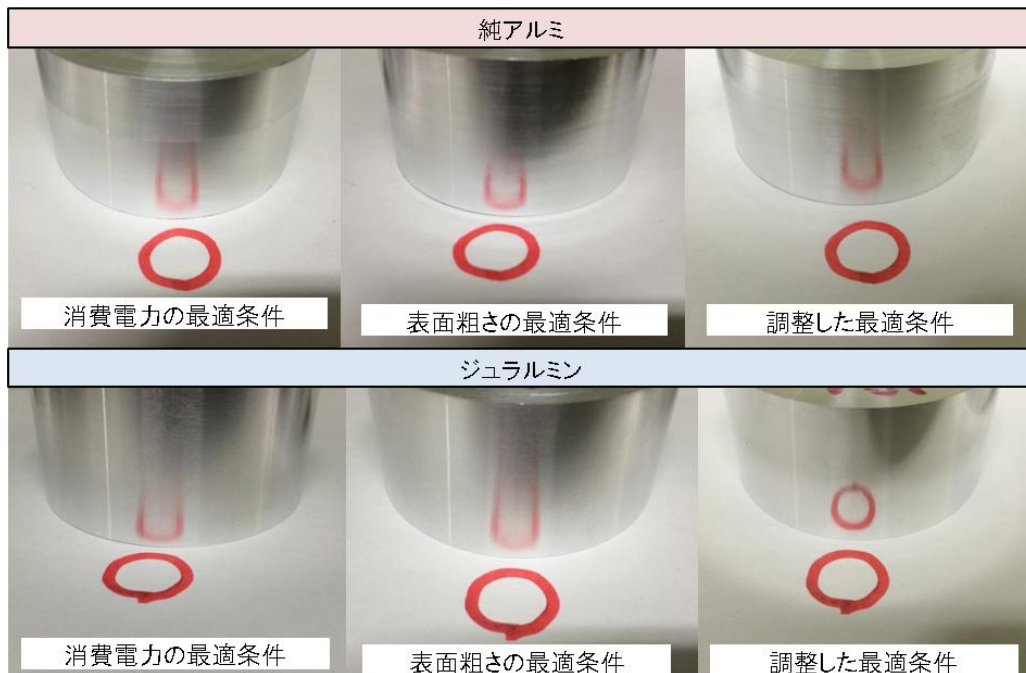


図 5.27 ジュラルミンと純アルミの加工面の様子

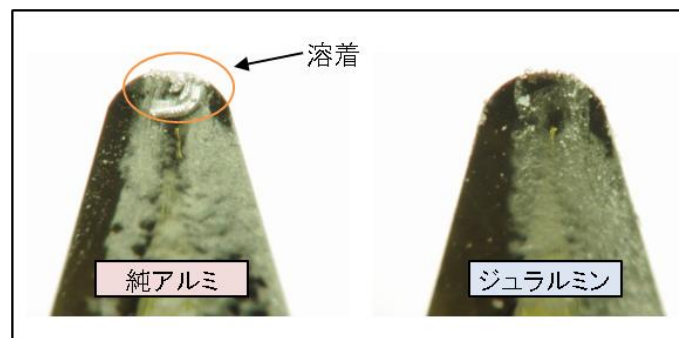


図 5.28 チップの先端の様子

消費電力の最適条件においてはジュラルミンと純アルミの表面粗さにはほとんど差がなく、表面の様子からもそれが分かる。表面粗さの最適条件及び調整した最適条件においては、ジュラルミンの方が表面粗さは小さい。図 5.27 より、調整した最適条件でジュラルミンを切削した表面が鏡面のようになり、赤い丸印が写って見えるが純アルミの場合表面はくもり鏡面仕上がりにならなかった。この原因として考えられるのは、純アルミは切りくずが粘りやすい性質があり、外に排出されずにチップの上に溜まり、加工面を傷つけていたことが考えられる。図 5.24 を見ると純アルミを切削したチップ先端にはアルミが溶着し、構成刃先が形成されている。これがすくい面形状を変化させ、本来切りくずの排出する働きに悪い影響を与えていたと考えられる。

切削剤を使用した切削では、切削剤の働きによりすくい面状に膜を作り切りくずの溶着を防止し、構成刃先の成長を妨げる。これに対して今回のようなドライ切削では構成刃先が形成され、加工面の品質を下げたと考えられる<sup>1)</sup>。図 5.29 に調整した最適条件で純アルミを切削した時の切りくずを示す。これより切りくずの形態は流れ型となっており、切りくずがすくい面に接触し続け、熱が発生し溶着して構成刃先ができたと考えられる。



図 5.29 純アルミ切削時の切りくずの形態

今回実験より得られた結果では、ジュラルミンの表面粗さ  $R_a$  を最大で  $0.10 \mu\text{m}$  まで小さくすることができた。参考文献 2) よりアルミニウムの表面程度と表面粗さ及び反射率をまとめたものを表 5.16 に示す。これによれば本実験の成果は表面程度記号 BF に当てはまる。また、参考文献 3) によれば、コンピュータ用磁気ディスク基板に要求される表面粗さ  $R_a 0.01 \mu\text{m}$  を出すために、本実験で設定した切込み量と送り量を  $1/10$  以下の値で切削している。本研究で作成した実験装置において設定できる切込み量と送り量は表 5.13 の値が下限であるが、さらに小さな値を設定することができれば、実験結果の表面粗さよりも小さくする可能性があると考えられる。

表 5.16 表面程度と表面粗さ及び反射率<sup>3)</sup>

表面程度記号	名称	表面粗さRa $\mu$ m	外観
XL	eXcellent Luster finish	0.01~0.02	圧延で最高光沢
SL	Super Luster finish	0.01~0.02	鏡面光沢
LF	Luster finish	0.02~0.03	鏡面光沢
SB	Super Bright finish	0.02~0.03	鏡面光沢
LB	Luster Bright finish	0.03~0.04	顔が映る程度の反射
HB	High Bright finish	0.03~0.05	顔が映る程度の反射
BF	Bright finish	0.04~0.10	ぼんやり顔が映る程度の反射
MF	Mill finish	0.20~0.50	顔移りなし

第5章の参考・引用文献

- 1) 西村正彦；超精密加工技術に関する研究-ドライ切削加工-, 機械電子グループ
- 2) IT用アルミ板製品高光沢材の表面程度, 表面粗さ, 反射率；  
<http://www.alumi-world.jp/it/04koukoutaku.html>, 株式会社UACJ
- 3) 松隈博；アルミニウム合金材の超精密鏡面加工技術の研究, 佐賀県工業技術センター



## 第6章 結論

本研究はアルミニウム材のドライ切削加工の技術の最適条件を得るためのパラメータ設計を実施し、アルミニウム材の外径旋削加工において工具条件及び加工条件の最適化を行った。以下に本研究全体における成果を示す。

(1)本研究では、アルミニウム材の仕上げ切削の微小な切削抵抗を計測するために、独自の実験装置を作成し、モータの消費電力の計測感度を上げ実験を行った。切削体積と消費電力量が比例関係であることを基本機能とし、ジュラルミンの切削加工においてパラメータ設計を実施した。得られた最適条件は確認実験で再現性があると判断できた。加工条件の送り量のSN比は期待していた結果を得ることができなかった、しかしながら、工具条件においてはチップの形状は切刃角・逃げ角が大きいこと、チップブレイカはすくい面が大きく鏡面コーティングがされていることが切削に大きな影響を与えていることが分かった。

(2)さらに実験で加工した表面粗さを特性値としてパラメータ設計を実施し、望小特性で評価した。得られた最適条件の再現性は悪かったが、加工条件の要因である切込み量と送り量がSN比と表面粗さに大きな影響を与えるということが分かった。そこで、消費電力の最適条件において切込み量と送り量をさらに小さな範囲で水準を設定し、再度実験を行った。その結果、切込み量は0.02mm、送り量は0.01mm/revのとき表面粗さRa0.10 $\mu$ mが得られ加工面は鏡面のようになった。

(3)(2)で得た条件で純アルミを切削した結果、表面粗さRaは0.14 $\mu$ mとなったが加工面はくもり鏡面のようにはならなかった。加工したチップの先端には構成刃先が見られ、それが加工品質を下げていることが分かった。一方、ジュラルミンを切削したチップには構成刃先が見られないことから、加工面の品質には構成刃先が大きく影響していることが分かった。

## 謝辞

本研究を行うにあたり，終始ご指導を賜りました宮城教育大学 小野元久教授に心より御礼申し上げます。

また，本論文査読にあたっては，宮城教育大学 鶴川義弘教授 安藤明伸准教授に数々のご指導，ご助言を頂きました。深く御礼申し上げます。

オリエンタルモーター株式会社 高橋政行様には，実験装置作成へのご指導，ご助言をはじめ，モータと電動スライダをご提供して頂きました。深く御礼申し上げます。

ピタゴラス 齋藤誠様には，実験装置作成へのご指導，ご助言を頂きました。深く御礼申し上げます。

東北大学多元物質科学研究所技術室 柳田里見様，三浦和浩様，佐々木英一様には，実験装置作成へのご指導，ご助言をはじめ，実験装置の部品加工・提供などご協力頂きました。深く御礼申し上げます。

さらに，宮城教育大学工場長 阿部博政様には，実験装置作成へのご指導・ご協力を頂きました。深く御礼申し上げます。

最後に，本研究を遂行するにあたり，ご協力を頂いた本学技術科教職員の皆様に心より感謝申し上げます。

2015年1月16日

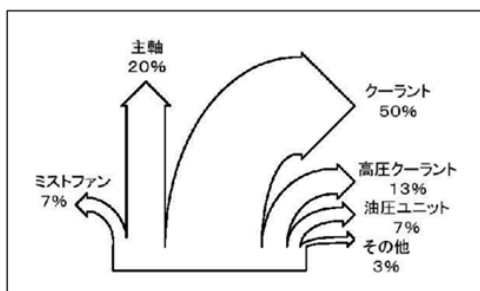
菊地真知

# アルミニウム材のドライ切削加工における 工具条件と加工条件の最適化

宮城教育大学大学院  
教科教育専攻 生活系教育専修  
菊地 真知  
指導教官:小野元久

## 研究背景と目的

- ・省エネ, 環境負荷低減の観点から, 切削加工の分野では切削液の使用量を低減させることが課題となっている.
- ・切削液を使用しないドライ切削加工の技術が注目されている.



マシニングセンタの消費電力の割合  
(園部勝:DLC膜の切削工具への適用より)

工具	鋼	鋳物	アルミニウム合金
ドリル	可能	可能	困難
エンドミル	可能	可能	困難
リーマ	不可	困難	不可
タップ	困難	可能	不可

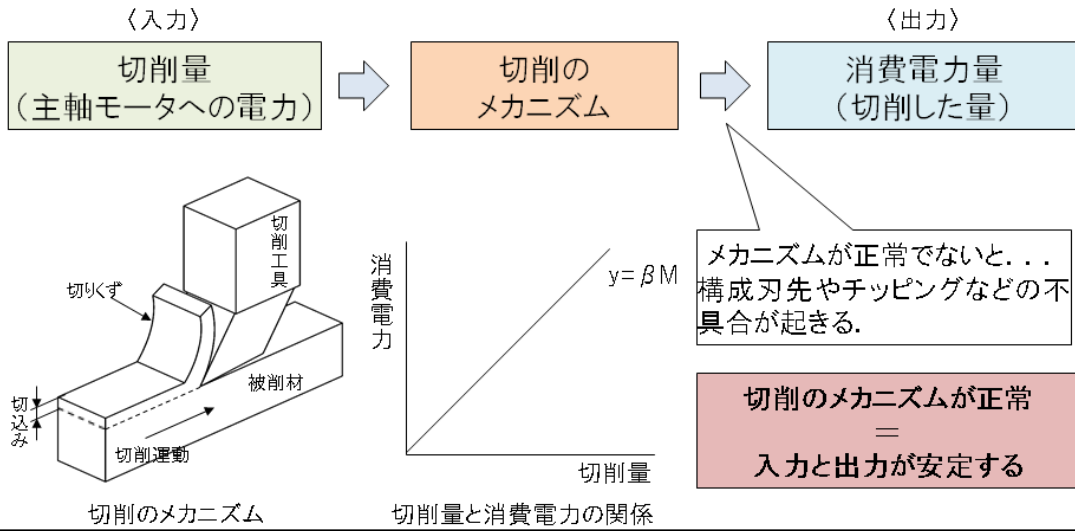
切削加工のドライ化の現状  
(園部勝:DLC膜の切削工具への適用より)

アルミニウムの切削において完全なるドライで行うことは困難  
(ウェット又はミストの切削が現状)

本研究ではドライ加工における工具条件と加工条件の最適化を行い, ドライ加工により得ることができる品質の可能性の検証を行った.

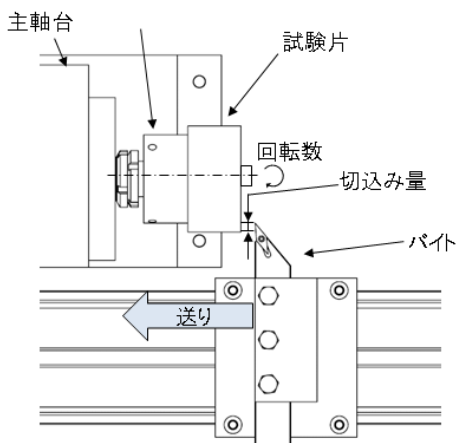
## 研究方法

- 一般的なドライ加工の研究は、加工後の試験片の表面粗さや切削抵抗、切りくずなどの品質特性を調べたりする。それに対して、**本研究では切削の機能を調べる。**
- 切削加工が行われる元のメカニズムが正常に働いていれば、切削加工した結果が安定して得られる**という仮説を立て実験を行う。
- 初めに切削のメカニズムが安定するような条件を求め、その条件をチューニングし、ドライ加工で得られる品質の可能性を検証する。



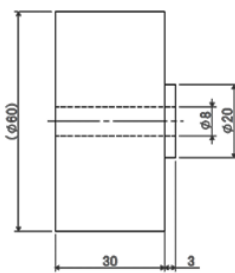
## 実験の準備

### 〈実験の様子〉



・試験片を切削している時の主軸モータの電圧と電流を測定する。  
(直接モータの電力を測ることができないので)

### 〈試験片〉

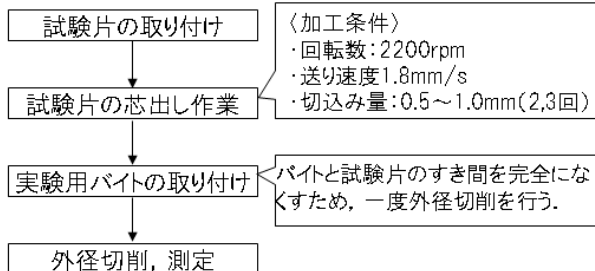


・材質はジュラルミン(A2011)を使用。

・実験(外径切削)を行う前に芯出し作業として、外径を1~2mm程度削る。

・その際に使用したバイトは実験とは無関係のものを使用した。

### 〈実験の手順〉

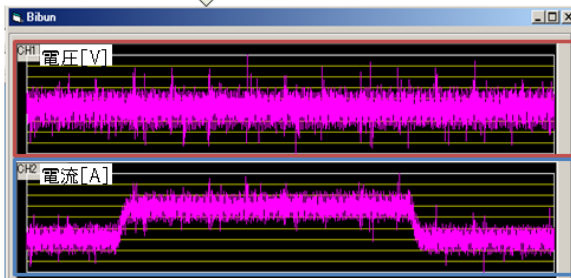


## 実験データの測定方法

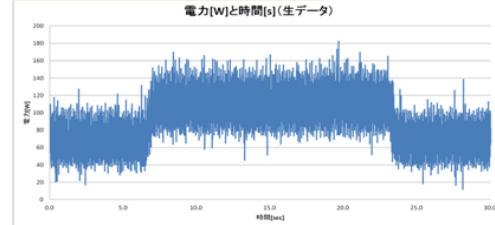
- ・主軸モータの電圧と電流を測定し、それらを掛け電力とした。
- ・実験の生データには動的成分が大きく乗っているので、移動平均法を使った。



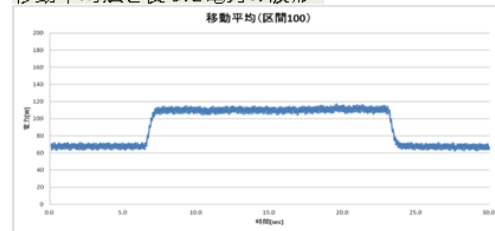
電圧と電流を測定



電圧と電流を掛けた電力の波形



移動平均法を使った電力の波形



## 工具条件と加工条件

要因	要因名	水準		
		1	2	3
A	チップ形状	三角形	ひし形	-
B	刃先の特徴	Atype	Btype	Atype'
C	メーカー	A社	B社	C社
D	切込み量(mm)	0.04	0.06	0.08
E	切削速度(m/min)	400	500	600
F	送り量(mm/rev)	0.05	0.075	0.10
G	GGG	g1	g2	g3
H	HHH	h1	h2	h3

- ・チップブレードのAtypeはダイヤモンド、Btypeはラップ処理
- ・メーカーは、A社が三菱マテリアル、B社が住友電工、C社がタンガロイ。
- ・要因GとHは何も割り付けない。

直交表L<sub>18</sub>に割り付け

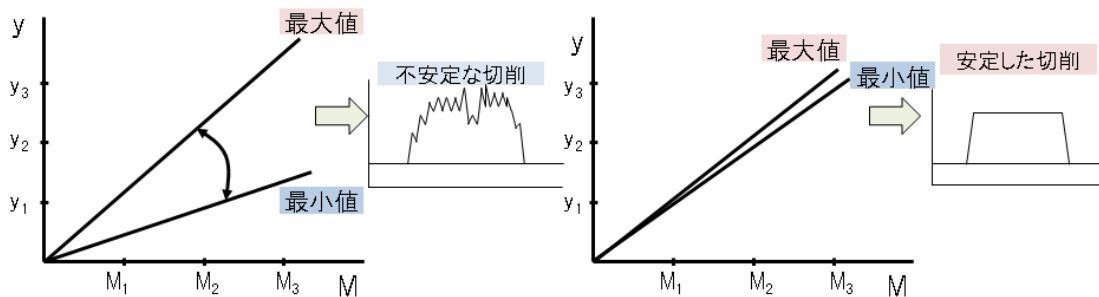
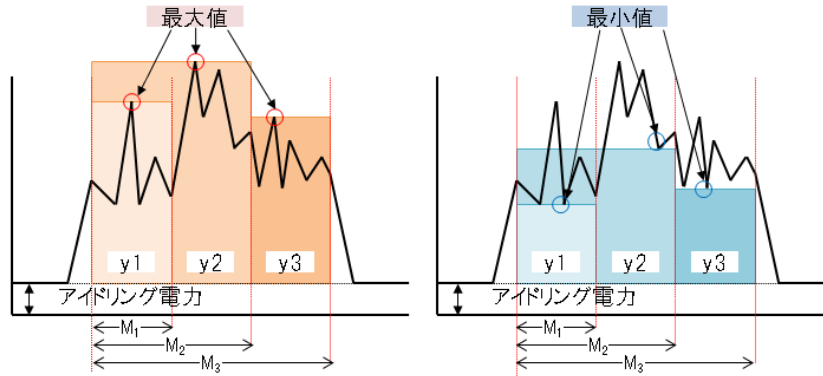
要因	チップ形状	チップブレード	メーカー	切込み量(mm)	切削速度(m/min)	送り量(mm/rev)	GGG	HHH
実験No. \ 割番	A	B	C	D	E	F	G	H
1	三角形	Atype	A社	0.04	400	0.050	g1	h1
2	三角形	Atype	B社	0.06	500	0.075	g2	h2
3	三角形	Atype	C社	0.08	600	0.100	g3	h3
4	三角形	Btype	A社	0.04	500	0.075	g3	h3
5	三角形	Btype	B社	0.06	600	0.100	g1	h1
6	三角形	Btype	C社	0.08	400	0.050	g2	h2
7	三角形	Atype'	A社	0.06	400	0.100	g2	h3
8	三角形	Atype'	B社	0.08	500	0.050	g3	h1
9	三角形	Atype'	C社	0.04	600	0.075	g1	h2
10	ひし形	Atype	A社	0.08	600	0.075	g2	h1
11	ひし形	Atype	B社	0.04	400	0.100	g3	h2
12	ひし形	Atype	C社	0.06	500	0.050	g1	h3
13	ひし形	Btype	A社	0.06	600	0.050	g3	h2
14	ひし形	Btype	B社	0.08	400	0.075	g1	h3
15	ひし形	Btype	C社	0.04	500	0.100	g2	h1
16	ひし形	Atype'	A社	0.08	500	0.100	g1	h2
17	ひし形	Atype'	B社	0.04	600	0.050	g2	h3
18	ひし形	Atype'	C社	0.06	400	0.075	g3	h1

- ・21 × 3<sup>6</sup>の総当りの実験(486回)をすることがなくなる。
- ・直交表に割り付けた18通りを行えば上の要因の効果を調べることができる。

これらの18通りの組み合わせを実験すると、上で設定した工具条件、加工条件の要因の水準値による効果分かる。

## 実験データの評価方法①

・切削した体積を3等分にし、それに対する消費電力量の関係を調べる。



## 実験データの評価方法②

・SN比という評価尺度を用いる。

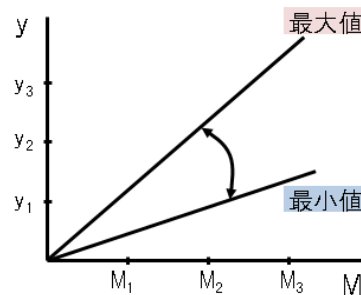
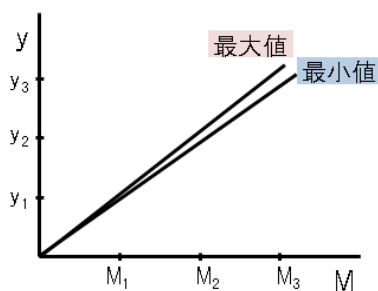
$$\text{SN比 } \eta = \frac{\beta^2}{\sigma^2}$$

回帰線の傾き

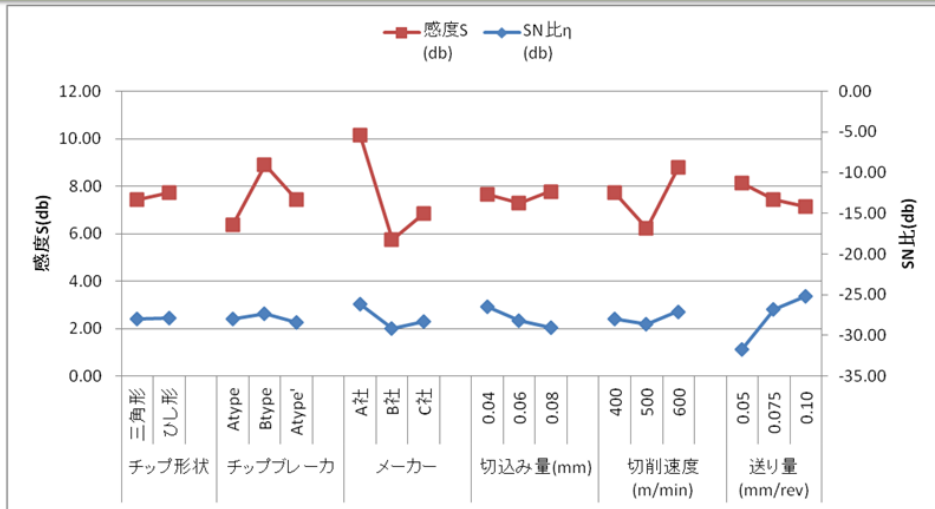
データのばらつき(消費電力量のばらつき)

SN比が大きければばらつきが小さい

SN比が小さければばらつきが大きい



## 実験結果(切削量と消費電力の関係性を評価)

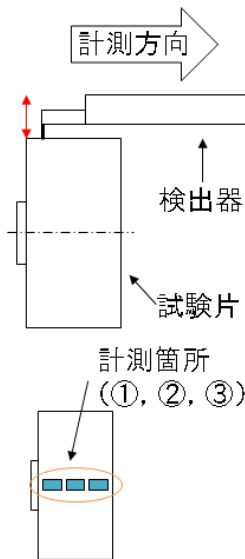


	要因名						推定値		確認実験	
	チップ形状	チップブレイカ	メーカー	切込み量 (mm)	切削速度 (m/min)	送り量 (mm/rev)	SN比 η (db)	感度 S (db)	SN比 η (db)	感度 S (db)
最適条件	ひし形	Btype	A社	0.04	600	0.10	-20.57	12.50	-19.97	-5.78
比較条件	三角形	Atype	B社	0.08	500	0.05	-35.50	4.83	-35.84	6.33
						利得	14.93	7.67	15.87	12.11

推定値と確認値におけるSN比の利得の差は0.94[db]  
 よって最適条件は再現性があると判断できる。

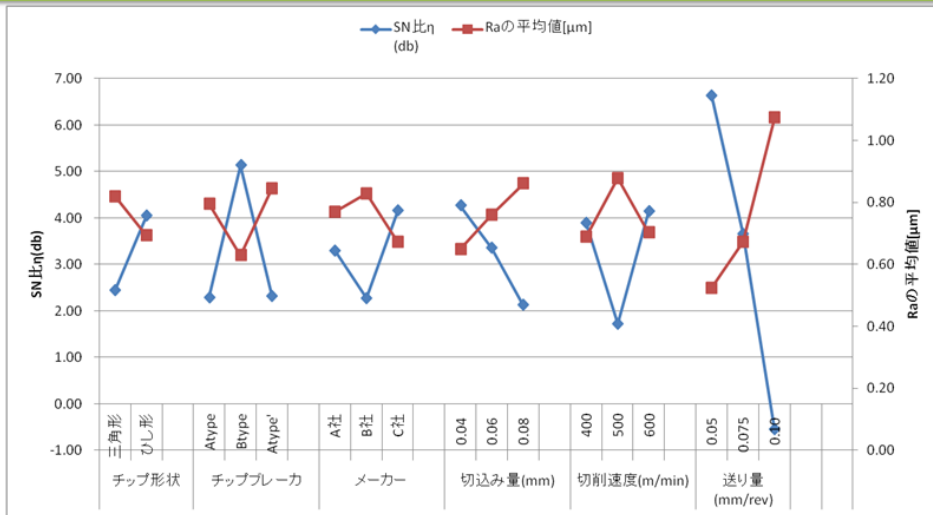
## 表面粗さの測定

- 加工後の試験片の表面粗さRaを測定する。
- 表面粗さRaを品質工学の望小特性でSN比を求め評価した。  
 (その値がマイナス値にならず0であることが理想であるという評価方法)



実験No.\列番	測定箇所			SN比 η (db)	Raの平均値[μm]
	①	②	③		
1	0.60	0.62	0.58	4.43	0.60
2	0.96	0.91	0.95	0.54	0.94
3	1.04	1.06	1.07	-0.48	1.06
4	0.52	0.48	0.48	6.13	0.49
5	1.19	1.06	1.07	-0.89	1.11
6	0.34	0.31	0.31	9.89	0.32
7	1.16	1.17	1.13	-1.24	1.15
8	1.14	1.08	1.12	-0.93	1.11
9	0.59	0.58	0.61	4.53	0.59
10	0.96	0.74	0.76	1.66	0.82
11	0.87	0.88	0.88	1.14	0.88
12	0.46	0.48	0.49	6.43	0.48
13	0.30	0.30	0.26	10.83	0.29
14	0.57	0.60	0.59	4.63	0.59
15	0.96	0.98	1.00	0.17	0.98
16	1.35	1.19	1.25	-2.04	1.26
17	0.31	0.39	0.34	9.16	0.35
18	0.59	0.60	0.61	4.44	0.60

## 実験結果(表面粗さRaを評価)



	要因名					推定値		確認実験		
	チップ形状	チップブレイカ	メーカー	切込み量(mm)	切削速度(m/min)	送り量(mm/rev)	SN比η (db)	Raの平均値[μm]	SN比η (db)	Raの平均値[μm]
最適条件	ひし形	Btype	C社	0.04	600	0.05	12.15	0.09	10.16	0.31
比較条件	三角形	Atype	B社	0.08	500	0.10	-5.94	1.47	-2.86	1.39
						利得	18.09	-1.39	13.02	1.08

- ・工具条件の最適条件としてチップ形状はひし形, チップブレイカはBtype, メーカーはA社を選んだ.
- ・加工条件において, 切込み量と送り量はより小さいであればさらに表面粗さを小さくすることができるかと判断し実験を追加した.

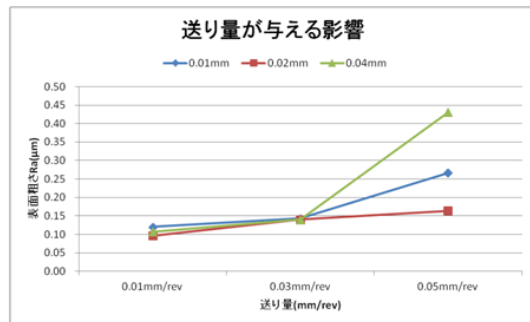
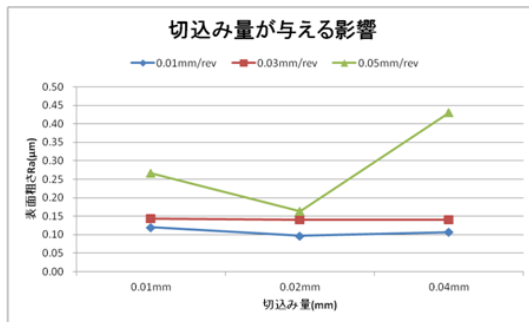
## 切込み量と送り量の影響

- ・工具条件は消費電力評価の最適条件を用いた.
- ・切削速度は実験装置の最大出力の600m/minで固定.

	水準1	水準2	水準3
切込み量(mm)	0.01	0.02	0.04
送り量(mm/rev)	0.01	0.03	0.05



No.	切削速度(m/min)	切込み量(mm)	送り量(mm/rev)	Ra(μm)			SN比η (db)	平均値 Ra[μm]
				M1	M2	M3		
1	600	0.01	0.01	0.16	0.11	0.09	18.16	0.12
2		0.01	0.03	0.16	0.15	0.12	16.81	0.14
3		0.01	0.05	0.24	0.24	0.32	11.39	0.27
4		0.02	0.01	0.12	0.09	0.08	20.16	0.10
5		0.02	0.03	0.14	0.14	0.14	17.08	0.14
6		0.02	0.05	0.16	0.17	0.16	15.73	0.16
7		0.04	0.01	0.11	0.12	0.09	19.38	0.11
8		0.04	0.03	0.14	0.14	0.14	17.08	0.14
9		0.04	0.05	0.38	0.42	0.49	7.28	0.43



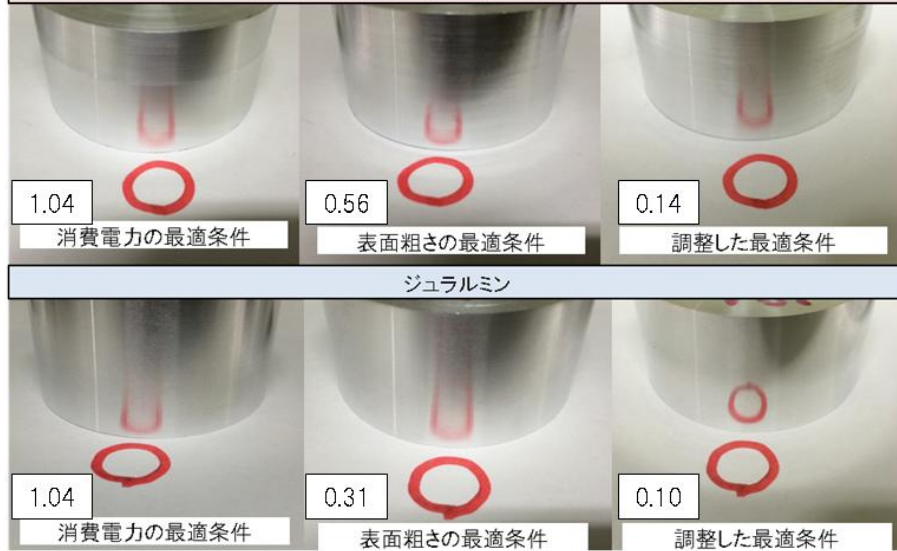
切込み量0.02mm, 送り量0.01mm/revのとき表面粗さの最小値0.10 μmを得られた.



## ジュラルミンと純アルミの最適条件による切削の比較

・消費電力評価と表面粗さ評価の最適条件を合わせた条件で純アルミを切削した。

	チップ形状	チッププレーカ	メーカー	切込み量 (mm)	切削速度 (m/min)	送り量 (mm/rev)
最適条件	ひし形	Btype	A社	0.02	600	0.01

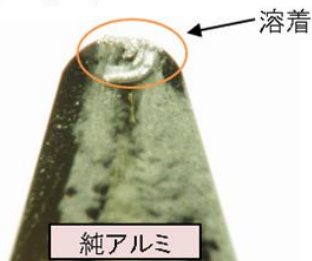


※面粗さRaの単位は[ $\mu\text{m}$ ]

## ジュラルミンと純アルミの最適条件による切削の比較

- ・純アルミを切削したチップの先端には、溶着したアルミが見られた。
- ・ジュラルミンでは見られなかった構成刃先が表面の品質を下げたと考えられる。
- ・純アルミの切りくずは流れ型。

〈刃先の様子〉



純アルミ



ジュラルミン

〈純アルミ切削状態の切りくず〉



## 結論

(1)本研究では、アルミニウム材の切削をエネルギーの入出力関係で評価した。切削体積と消費電力量が比例関係であるという評価において得られた最適条件は、確認実験で再現性があると判断できた。

(2)さらに、加工した試験片の表面粗さを望小特性で評価した。得られた最適条件の再現性は悪かったが、加工条件の要因である切込み量と送り量がSN比と表面粗さに大きな影響を与えるということが分かった。

(3)消費電力の最適条件において切込み量と送り量をさらに小さな範囲で水準を設定し、再度実験を行った。その結果、切込み量は0.02mm、送り量は0.01mm/revのとき表面粗さRa0.10  $\mu$ mが得られ加工面は鏡面ようになった。

(4)本研究はジュラルミンを試験片にして最適条件を求めた結果、ダイヤモンドチップよりも超硬チップを使った方が良いという結果になった。純アルミを試験片にして実験を行ったとすればダイヤモンドチップの方が効果的であるという結果になる可能性も考えられる。しかし、ジュラルミンの切削においては超硬チップで表面粗さ0.10  $\mu$ mドライ加工で得られる。