

# ワイヤ放電加工におけるテーパカット 加工の加工精度の向上

電気加工研究室

指導教員 小林和彦

知能機械システム工学科

1030112

小山 彰博

## [ 目次 ]

<b>第1章 緒論</b> -----	2
1.1 ワイヤカット放電加工機について-----	2
1.2 テーパカット加工について-----	3
<b>第2章 テーパカットの加工精度の向上</b>	
2.1 緒言-----	4
2.2 テーパカット加工-----	4
2.3 研究目的-----	4
2.4 実験機器及び加工条件-----	5
2.5 諸元出し-----	7
2.5.1 Z軸諸元-----	7
2.5.2 諸元出し方法-----	8
2.6 テーパ角度の測定方法-----	9
2.6.1 テーパ加工面の角度測定方法-----	9
2.6.3 ワイヤの傾き角度の測定方法-----	10
2.7 テーパカット加工実験-----	11
2.7.1 テーパ加工後の角度の調査実験-----	11
2.7.2 ワイヤテンションの変化に対するテーパ誤差と 加工状態の変化-----	14
2.7.3 加工後の角度誤差を補正值として加工を行う実験-----	19
2.7.4 諸元出し段階における測定誤差がダイス間距離に及ぼす影響-----	23
2.7.5 諸元出しにおけるテーパ角度変化に対するダイス間距離の 変化とばらつき-----	36
2.7.6 諸元出し角度に対する上下ダイス間距離の変化-----	40
2.7.7 諸元出し角度に対する上下ダイス間距離の変化と ワイヤの傾き角度誤差-----	43
2.7.8 ワイヤの強さによるテーパ角度への影響についての検討-----	45
2.7.9 ワイヤの傾き角度に対する加工誤差-----	48
2.8 諸元出しについての検討-----	50
2.8.1 諸元出し方法を用いたワイヤの傾き角度の測定方法の検討-----	50
2.8.2 新しい垂直度計形状とワイヤの傾き角度測定方法の提案-----	54
2.8 結言-----	56
<b>第3章 結論</b> -----	57
参考文献-----	58

# 第1章 緒論

## 1.1 ワイヤカット放電加工機について

放電加工とは銅、グラファイトなどの比較的に加工作しやすい導電性の材料を工具電極とし、鋼、超硬合金などの被加工物材料との間に 60～300V 程度のインパルス電圧を印加しながら、間欠的火花放電を行わせ、その際に発生する異常消耗現象を利用した加工法である。電極と被加工物の対向する極間隙長は非常に狭く、5～50 $\mu\text{m}$  である。また気中放電では加工が進まないため、加工液にはケロシン(灯油)や水などの絶縁体を介在させる。

ワイヤカット放電加工法のメカニズムとしては上記のとおりであるが、電極としてワイヤを用いる点が異なっている。

ワイヤカット放電加工法は電極として、ワイヤを用いる。ワイヤ材料としては、銅、黄銅、タングステンなどの細いワイヤ電極により被加工物を糸鋸式に加工する。被加工物を積載しているクロステーブルは、NC 制御サーボモータ駆動により X、Y 軸方向に送りを与えられ、2次元形状の加工がおこなわれる。

ワイヤは供給リールから常に一定の速度(1～3mm/min)で送り出され、放電による電極消耗を補正している。ワイヤ径は通常 0.05～0.25mm であるが、加工効率やワイヤ切れ、トラブル防止などを考慮して、0.1mm 以上のワイヤが多く用いられている。ワイヤは放電圧力などによる強制振動をできる限り小さく抑えるため常に変動のないテンションをかけていることが必要である。それらの値はワイヤ破断力の 1/2 程度で、0.2mm の黄銅ワイヤなら 800～1500g が一般的である。

加工液は、水あるいはケロシンが用いられるが、取り扱いが容易で火災の心配がなく、加工部分とワイヤの冷却がよく、さらにワイヤの強制振動があっても極間に短絡が発生しない程度の広い間隙を形成し、また加工粉の排除が良好であり、炭化物やタールの発生がなく極間の清浄化がなされ易いことにより加工を安定に保つことができるということなどの理由から、現在ではほとんど水が加工液として使用されている。

加工送り速度は、被加工物材質、板厚、ワイヤの種類などで変化するが、一般的に知られている加工速度は 5mm の板厚の鋼(SKD 11)を加工する場合で、最大送り速度は 7mm/min(35mm<sup>2</sup>/min)程度、また 80mm 板厚の場合は、0.75～0.8mm/min(60～64mm<sup>2</sup>/min)である。最近では 110mm<sup>2</sup>/min の速度が得られるものも出現したが、それにしてもレーザ加工機などに比べればそれほど速いものではないが、加工精度が高く、抜き型などの高精度の生産加工に使用することができる。

## 1.2 テーパカット加工について

ワイヤカット放電加工機の応用分野を飛躍的に拡大させたのがこのテーパカット加工の装置である。

従来、ワイヤカット放電加工機は X 軸、Y 軸の 2 軸よりテーブルを駆動し、二次元形状の加工を行うものであった。しかし、プレス抜型はたいていの場合、裏逃げ加工が必要であり、放電加工を行った後、別な機械に載せて加工することが多かったが、テーパカット加工装置が登場してからは、抜型加工と裏逃げ加工が 1 回の工程で行えるようになり、大幅な時間短縮につながった。

近年、テーパカット加工はいろいろな面で使われるようになり、ワイヤカット放電加工機の最大の強みである、超合金などの硬い金属をどんな形でも加工することができることを利用し、今まで、時間と製作コストがかかっていたものを大幅に削減することができるようになった。例えば、ガスタービンエンジンに使用されるタービンブレード(図 1.1)の翼面の加工において、材質は耐熱合金の難切削であり、図 1.1 を見られるように翼厚が非常に薄く、ひねりを伴った形状であるため、非常に切削加工は難しく、熟練を要する。しかし、これがワイヤカット放電加工機のテーパカット加工を利用すれば、切削加工よりは非常に楽に加工を行うことができ、また夜間や休日の無人加工も可能であり、製作コストも大幅に削減することが可能となる。



図 1.1 タービンブレード

他にも、パンチとダイの同時加工、抜き勾配面の加工、型彫り放電加工の電極の加工、樹脂サッシ押し出し型のベアリング加工、線引きダイスのテーパ面加工、溶接治具(ガバリ)の加工、総形バイトの刃先、逃げ面加工など、テーパカット加工の用途はじつに様々であり、その価値はとても高いものだと考えている。しかし、テーパカット加工は角度が大きくなるにつれて、角度誤差も大きくなることがわかっており、小型化、軽量化、高精度の加工においては加工精度を出すのが難しいであろうと思われる。

今回の、本論文の内容ではテーパカット加工の加工精度の向上を目的とし、誤差が発生する因子、それに対する改善策について述べた。

## 第2章 テーパカット加工精度の向上

### 2.1 緒言

ワイヤ放電加工機は、テーパカット機能により部品加工が可能となっているが、ワイヤのテーパ角が大きくなればなるほど、テーパ誤差が大きくなることが問題とされている。従来のプレス抜き型の逃げ面加工等においては、約 $3^{\circ}$ 程度のテーパ角度であるが、部品加工においてはその必要性に応じて、広角テーパが要求されることとなる。本章においては、テーパカット加工誤差の発生原因について調査実験を行い、数式や解析ソフトを用いての誤差の発生割合等について述べる。

### 2.2 テーパカット加工

通常の加工において、ワイヤはテーブル面または、工作物面に対して垂直を保った状態で行われる。これに対し、テーパ加工は、ワイヤを所定の角度に傾けて加工を行う。

加工機のテーパ加工装置の全体図については図2.1に表したとおり、下部ガイド位置を固定して、上部のガイドをU軸（もしくはV軸）に移動させることで、目的とするワイヤの傾き角を得ることができる。

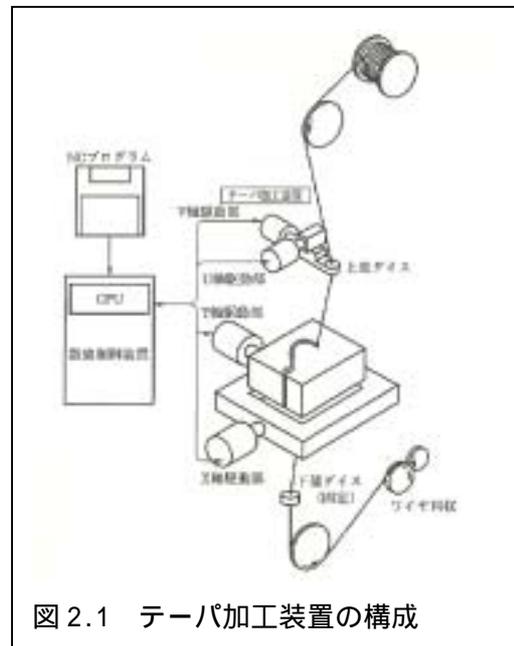


図 2.1 テーパ加工装置の構成

### 2.3 研究目的

ワイヤ放電加工機はテーパカット機能の搭載によって部品加工が可能となり、その必要に応じた高精度テーパ加工技術の重要性がよりいっそう高まっている。

しかしながら、広角テーパ加工においては、ワイヤを支持するダイヤモンドダイスと、ワイヤとの接触等によりワイヤが振動し、加工面に筋が発生することや、ダイヤモンドダイスのワイヤ支持位置の変化、ワイヤ自体の強さによって目標テーパよりプラステーパに傾いてしまうことなどから、テーパ加工精度の悪化が問題視されている。

本研究においては、テーパ加工誤差の発生原因の追究と、Z軸諸元出し段階での上下ダイス間距離に及ぼす誤差の要因に対して、数式や、解析ソフトを用いることにより誤差の発生割合を求め、改善策を検討するなど、テーパカット加工の高精度化を目的とした研究を行った。

## 2.4 実験機器及び加工条件

(実験機器)

ワイヤカット放電加工機 三菱 DAIAX SX10 (図 2.2)

垂直度計 (測定刃の高さ 下部 5mm 上部 55mm) (図 2.4)

機械に付属の垂直度計を用い、加工テーブル面にこれを固定し、NC 制御装置の標準機能である垂直測定プログラムで、上下測定刃 (図 2.4 の赤丸部分) にワイヤを接触させ、自動計測・調整を行わせることができる。また、上下ダイス間距離を求める諸元出しにおいても垂直度計を用いた。

ワイヤ電極 沖電線 OB20P 0.2mm 黄銅製ワイヤ

加工材料 SKD-11 板圧 10mm

測定顕微鏡 MITUTOYO 製 TF - 510F 測定倍率( $\times 100$ ) (図 2.3)

ブロックゲージ MITUTOYO 製

有限要素法解析ソフト ANSYS 5.7



図 2.2 ワイヤ放電加工機の外観



図 2.3 測定顕微鏡の外観写真

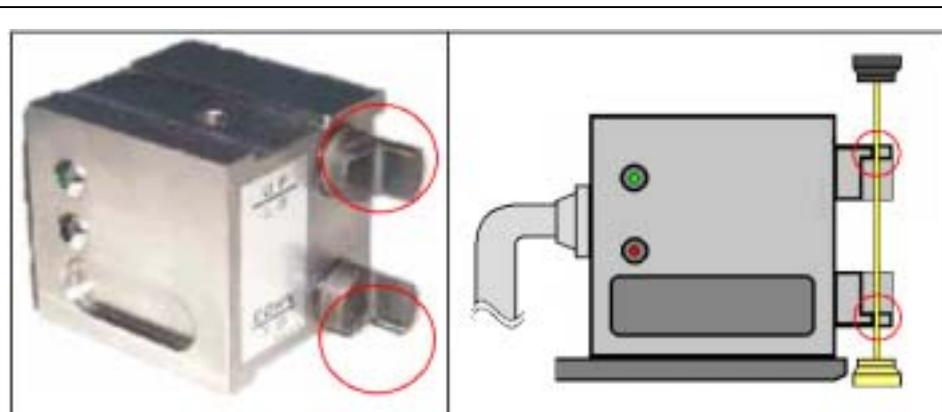


図 2.4 垂直度計

(加工条件)

表 2.1 に実験で使用した加工条件を表した。

	テーパ加工	テーパ[5度]	テーパ[10度]	テーパ[15度]
使用テーパ範囲	1~20度	1~6度	7~12度	13~20度
Eパック	200	201	202	203
V0	12	12	12	12
IP	6(-1)	7	5(-2)	5(-2)
OFF	1	1	1	1
SA	3	3	3	2(-1)
SB	12(+2)	12(+2)	13(+3)	13(+3)
WS	12	12	12	12
WT	7(-1)	7(-1)	6(-2)	5(-3)
PT	14	14	14	14
LQ	2	2	2	2
LR	9	9	9	9
VG	49(+7)	48(+5)	48(+5)	53(+10)
SC	1	1	1	1
FS	1	1	1	1
AE	21	21	21	21
SE	1	1	1	1
FA	6	6	5	3.6

## 2.5 諸元出し

### 2.5.1 Z軸諸元

テーパ加工時のZ軸諸元の設定

テーパカットを行うにあたり、図 2.5 に示すとおり、Z軸の各諸元値を求めておく必要がある。Z軸諸元値については、Z1、Z2、Z3、Z4、Z5 があり、加工に先立ってあらかじめ求めておき、制御装置に基礎データとして入力しておく必要がある。以下に、各諸元値とその意味を説明する。

Z1：プログラム寸法高さ

テーブル面からの高さでプログラムの高さを指定。テーパ加工時のワイヤの回転中心高さを与える。

Z2：速度指令高さ

定速送り加工時、指令送り速度を与える高さを指定する。

Z3：上部ガイドスパン

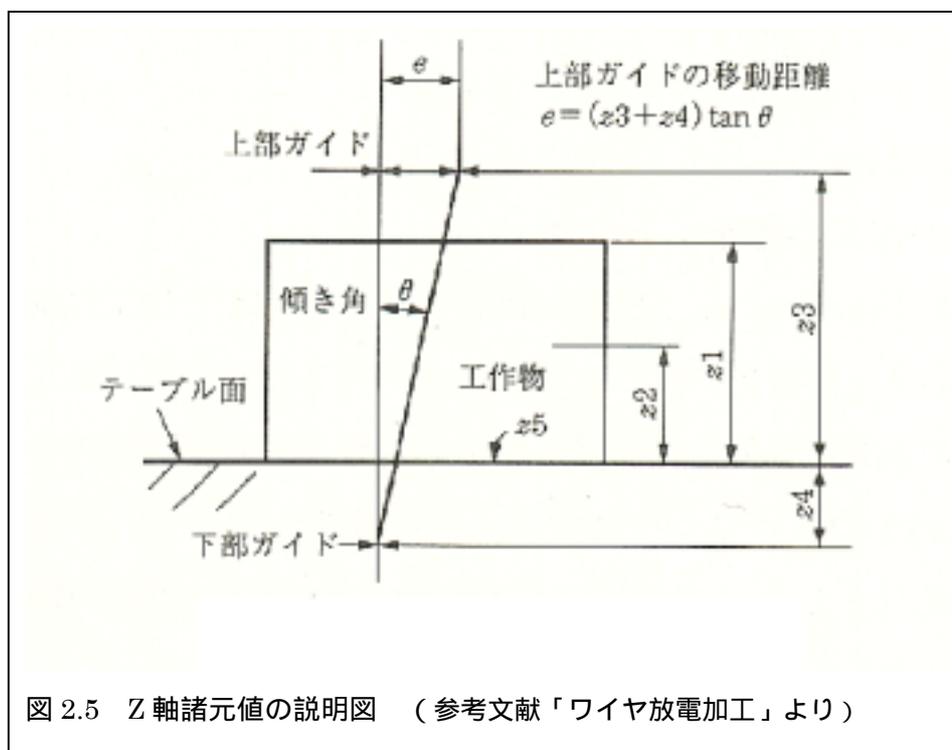
テーブル面から上部ガイドまでの距離。Z軸の上昇下降に同期して変化する。

Z4：下部ガイドスパン

テーブル面から下部ガイドまでの距離。

Z5：任意形状指定高さ

上下任意形状加工を行うときの任意形状の高さを指定。通常のテーパ加工の際には、Z1 と Z5 の間で指定されたテーパ角度の計算が行われる。



### 2.5.2 諸元出し方法

テーパ諸元値を加工機に与えることにより、テーパカット加工を行うことができる。以下にテーパ諸元出しを行う手順を述べる。

まず、仮の値として、 $\theta = 1^\circ$ 、 $g = 80\text{mm}$  を設定して上部ダイスの移動量  $e$  を計算する。

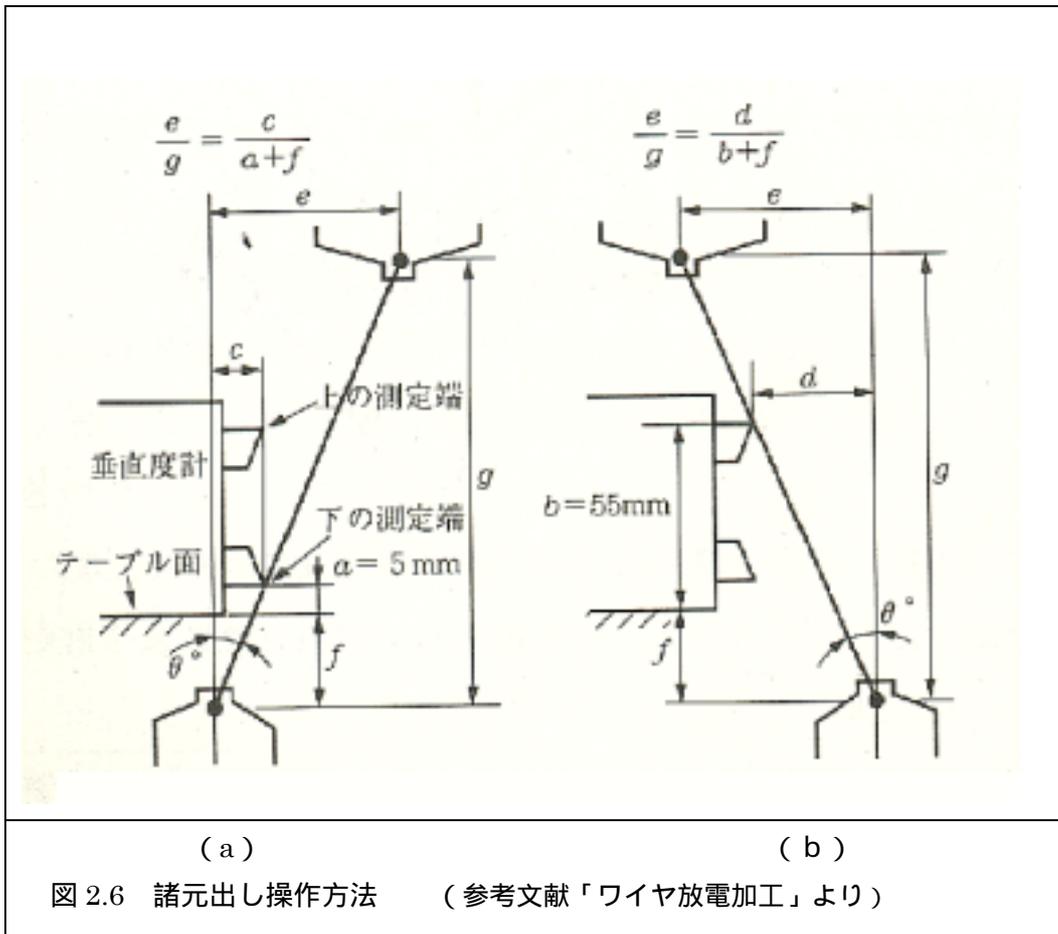
例)  $e = 80 \times \tan 1^\circ = 1.4$

ワイヤが垂直で垂直度計の測定端に接触している状態で U 軸を  $e$  の値だけ移動し、ワイヤが離れるので、垂直度計の下の測定端に接触するまで、X 軸をマイナス方向に移動させ、その距離  $c$  を求める。図 2.6 (a)

次に、ワイヤが垂直度計から十分離れるように X 軸をプラス方向に移動させ、U 軸を上で求めた  $e$  の値だけマイナス方向に移動し、ワイヤの傾きを逆の方向にする。この状態から、X 軸を再度マイナス方向にワイヤが上の測定端に接触するまで移動させ、このときの X 軸の移動量  $d$  を求める。図 2.6 (b)

以上の操作で求めた値の間には、次の関係式が成り立ち、これから  $f$  (すなわち Z4) と、 $g - f$  (すなわち Z3) とを次式から求めることができる。

$$f = \frac{bc - ad}{d - c} \quad g = \frac{e(a + f)}{c}$$



ここで、a：テーブル面から垂直度計の下の測定端までの距離

b：テーブル面から垂直度計の上の測定端までの距離

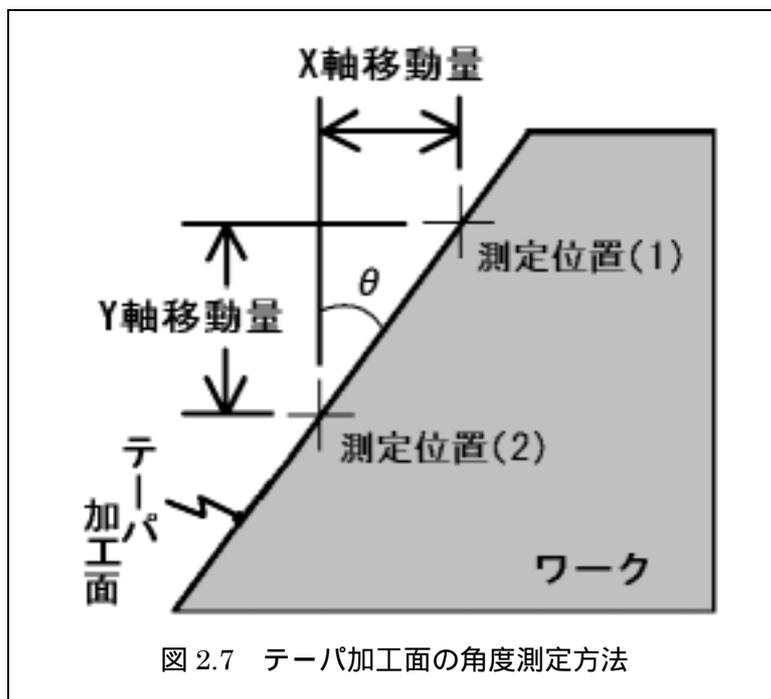
今回使用した垂直時計については、 $a = 5$ 、 $b = 55\text{mm}$  であり、これらの値を上式に代入することで Z4 および Z3 を算出することができる。

今回使用した、ワイヤ放電加工機においても、この諸元だしを自動設定するソフトウェアが組み込まれており、ワイヤの垂直度調整後、垂直度計の測定端近傍にワイヤを近づけて、このプログラムをスタートすれば、自動計算し Z3、Z4 の読み込みを行う。

## 2.6 テーパ角度の測定方法

### 2.6.1 テーパ加工面の角度測定方法

測定顕微鏡を用いてテーパ角度の測定を行う方法について説明する。図 2.7 のようにテーパ加工面に対して、測定位置 (1) に位置をあわせ、そこから測定位置 (2) までの X 軸と Y 軸移動量から、
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{X軸移動量}}{\text{Y軸移動量}}\right)$$
 でテーパ角度を求める。



## 2.6.2 ワイヤの傾き角度の測定方法

図 2.8 のように、ブロックゲージと測定刃を用いて、ワイヤの傾き角度を求める。

まず、測定刃をテーブル上に固定し、測定刃の端面の位置決めを行い、その座標を読み取る。(a) この状態から、測定刃の高さをブロックゲージを用いて変化させ、初めと同様に端面位置決めを行う。(b)

その結果、端面位置決め座標値の差と、ブロックゲージの高さから、ワイヤの傾きが以下の式から求まる。

$$\text{ワイヤの傾き角度} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{位置決め座標値の差}}{\text{ブロックゲージの高さ}} \right)$$

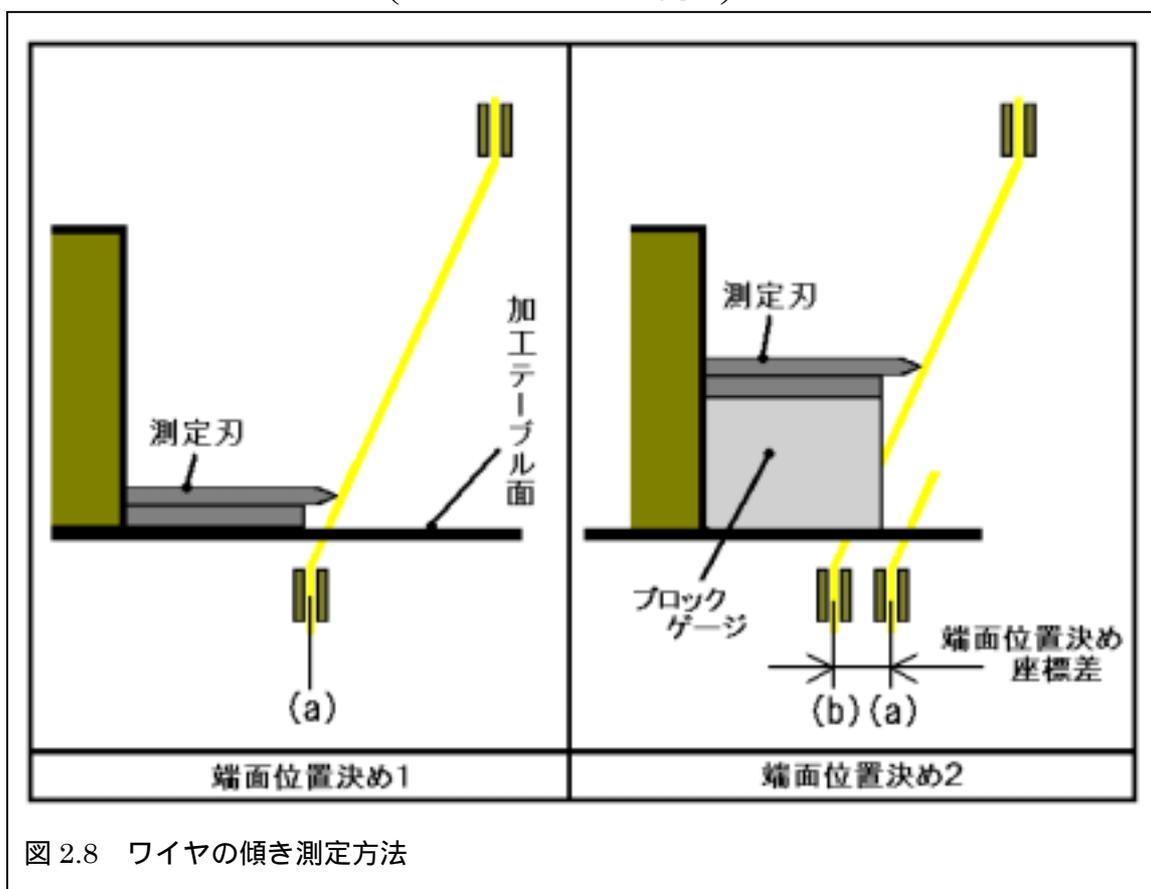


図 2.8 ワイヤの傾き測定方法

## 2.7 テーパカット加工実験

### 2.7.1 テーパ加工後の角度の調査実験

#### (1) 実験目的

テーパ加工の調査実験として、加工後のテーパ面の角度調査を行う。テーパ角度に対する加工誤差の変化を求めることを目的とした。

#### (2) 実験方法

自動諸元出しを行い、(諸元出し角度 5 度) その諸元値を用いて 1~20 度までのテーパ加工を行い、テーパ角度の測定を行う。加工後のテーパ角の測定は、測定顕微鏡を用い、方法は、前記の図 2.7 に現した通り、X 軸、Y 軸の移動量から求める。

加工後のテーパ面の測定は、Y 軸を 3mm 移動させた場合の X 軸方向の移動量を求め、

$$= \tan^{-1} \left( \frac{\text{X軸方向の移動量}}{3\text{mm}} \right) \text{でテーパ角度を求める。}$$

#### (3) 実験条件

Z 軸諸元出しは、自動諸元出し操作にて行った。諸元出し角度 5.001 度

諸元値の値 Z3=18.457mm Z3=7.937mm Z4=7.939mm

加工条件

テーパ加工は、加工条件一定で E200、加工速度(最適送り) オフセット量 133 μm で加工を行った。

#### (4) 実験結果

表 2.2 に 1~5 度、10 度 15 度 20 度の測定結果を示す。表 2.3 は、テーパ角度に対する角度誤差をまとめて表し、図 2.9 はこれをグラフに表したものである。

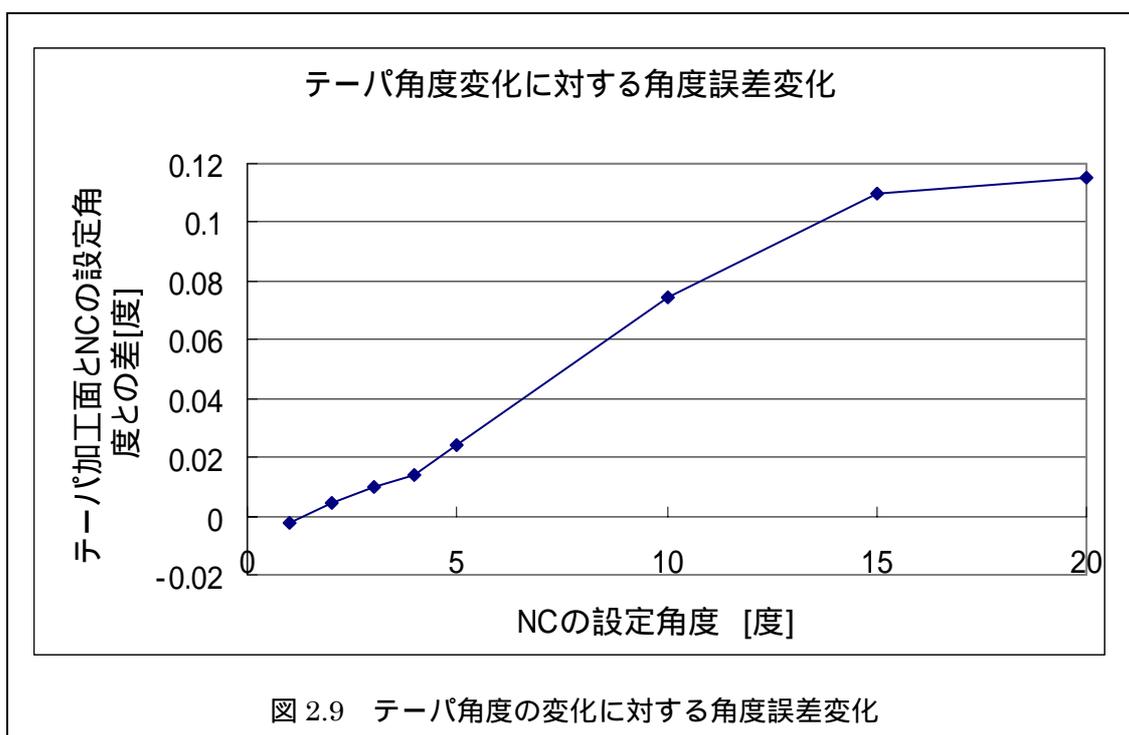
表 2.2 測定結果と角度誤差

NC での設定角度(度)	1	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.052	0.053	0.052	0.052
測定角度 (度)	0.993027	1.01212	0.993027	0.993027
設定角度との差 (度)	-0.00697	0.01212	-0.00697	-0.00697
測定角度平均 (度)	0.997801	設定角度との差平均(度)		-0.0022
NC での設定角度(度)	2	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.104	0.106	0.105	0.105
測定角度 (度)	1.985459	2.023609	2.004534	2.004534
設定角度との差 (度)	-0.01454	0.023609	0.004534	0.004534

測定角度平均 (度)	2.004534	設定角度との差平均 (度)		0.004534
NC での設定角度 (度)	3	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.158	0.158	0.157	0.158
測定角度 (度)	3.014792	3.014792	2.995746	3.014792
設定角度との差 (度)	0.014792	0.014792	-0.00425	0.014792
測定角度平均 (度)	3.010031	設定角度との差平均 (度)		0.010031
NC での設定角度 (度)	4	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.21	0.213	0.21	0.209
測定角度 (度)	4.004173	4.061185	4.004173	3.985167
設定角度との差 (度)	0.004173	0.061185	0.004173	-0.01483
測定角度平均 (度)	4.013675	設定角度との差平均 (度)		0.013675
NC での設定角度 (度)	5	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.264	0.265	0.262	0.264
測定角度 (度)	5.029074	5.048025	4.991168	5.029074
設定角度との差 (度)	0.029074	0.048025	-0.00883	0.029074
測定角度平均 (度)	5.024335	設定角度との差平均 (度)		0.024335
NC での設定角度 (度)	10	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.532	0.534	0.532	0.534
測定角度 (度)	10.05591	10.09294	10.05591	10.09294
設定角度との差 (度)	0.055911	0.09294	0.055911	0.09294
測定角度平均 (度)	10.07443	設定角度との差平均 (度)		0.074426
NC での設定角度 (度)	15	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.81	0.811	0.809	0.81
測定角度 (度)	15.10958	15.12737	15.09177	15.10958
設定角度との差 (度)	0.109575	0.127375	0.091773	0.109575
測定角度平均 (度)	15.10957	設定角度との差平均 (度)		0.109574
NC での設定角度 (度)	20	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	1.098	1.097	1.1	1.1
測定角度 (度)	20.10263	20.08578	20.1363	20.1363
設定角度との差 (度)	0.102626	0.085782	0.136303	0.136303
測定角度平均 (度)	20.11525	設定角度との差平均 (度)		0.115254

表 2.3 テーパ角度変化に対する角度誤差

NC での設定角度 (度)	誤差平均 (度)	NC での設定角度 (度)	誤差平均 (度)
1	-0.002199411	5	0.024334936
2	0.004533921	10	0.074425648
3	0.010030801	15	0.109574376
4	0.013674566	20	0.115253543



(5) 考察

加工条件一定のまま、1~20度までのテーパカットを行ったが、テーパ角度が大きくなるにしたがって、角度誤差も大きくなるのが分かる。1度テーパに関しては、-0.002度とわずかにマイナステーパとなったが、角度誤差としては非常に小さい。20度テーパに関しては0.115度と大きな誤差が発生している。この原因は、ワイヤを大きく傾けた場合に、ダイヤモンドダイスでのワイヤ支点が変化したことで、見かけ上のダイス間距離が変化し、誤差を大きくしてしまっていると考えられる。今回は、加工条件一定で1~20度テーパの加工を行ってみたが、テーパ角度が大きくなるにつれて加工電圧の変動が激しくなり、短絡現象も見られた。これは、ワイヤを支えるダイヤモンドダイスと、ワイヤ間の摩擦が大きくなり、ワイヤが振動した結果、加工不安定となり短絡現象をおこしたものと考えられる。

## 2.7.2 ワイヤテンションの変化に対するテーパ誤差と加工状態の変化

### (1) 実験目的

角度誤差の調査実験の段階では、2～20度テーパまでを加工条件をすべて一定で加工を行っていたが、テーパ角度が大きくなった場合、加工が不安定になる傾向が見られた。この原因としては、テーパ角度が大きい場合のダイヤモンドダイスとワイヤの摩擦が大きくなっていることが考えられる。ワイヤのテンションを変化させて加工を行った場合の加工の安定性について検討を行う。

### (2) 実験方法

加工条件を一定とし、ワイヤテンションのみを変化させて20度テーパの加工を行う。加工後、テーパ面の角度測定を行い、ワイヤテンションの変化に対する角度誤差の変化を求め、また、加工中の電圧の変化を比較するため、テーパ加工途中でワイヤテンションを変化させ、VFモニターを使用し、加工中の加工電圧の変化を測定する。

### (3) 実験条件

Z軸の諸元値だけは、自動諸元出しで求めた。諸元出し角度 5.000度

各諸元値は、Z3=18.457mm Z3=7.937mm Z4=7.939mm Z5=10.384mm

加工条件はE200を用い、ワイヤテンションは設定ノッチで5～8のノッチまで変化させて加工を行う。

### (4) 実験結果

以下に、各ワイヤテンションに対する角度測定結果と角度誤差を表に示した。

表 2.4 (ワイヤテンション設定値 5)

NC の設定角度 (度)	20	角度測定 of Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	1.113	1.112	1.113	1.113
測定角度 (度)	20.35485	20.33806	20.35485	20.35485
設定角度との差 (度)	0.354854	0.338064	0.354854	0.354854
測定角度平均 (度)	20.35066	設定角度との差平均 (度)		0.350656

表 2.5 (ワイヤテンション設定値 6)

NC の設定角度 (度)	20	角度測定 of Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	1.106	1.105	1.107	1.107
測定角度 (度)	20.23725	20.22043	20.25406	20.25406
設定角度との差 (度)	0.237249	0.220434	0.254061	0.254061
測定角度平均 (度)	20.24145	設定角度との差平均 (度)		0.241451

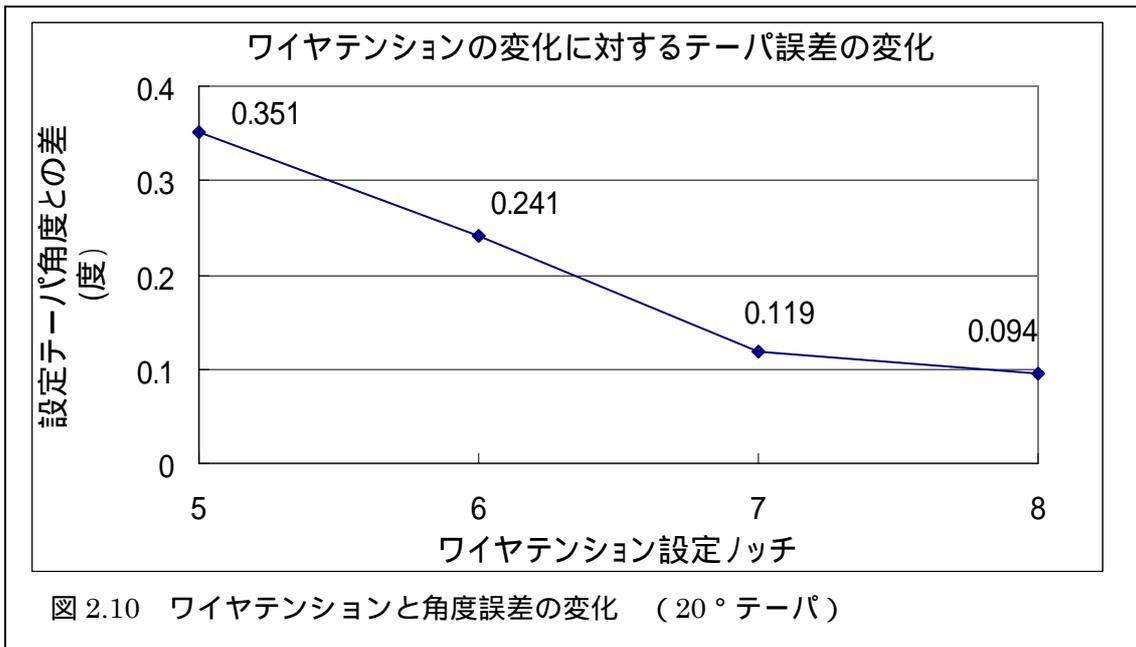
表 2.6 (ワイヤテンション設定値 7)

NC の設定角度 (度)	20	角度測定 of Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	1.098	1.098	1.1	1.1
測定角度 (度)	20.10263	20.10263	20.1363	20.1363
設定角度との差 (度)	0.102626	0.102626	0.136303	0.136303
測定角度平均 (度)	20.11946	設定角度との差平均 (度)		0.119465

表 2.7 (ワイヤテンション設定値 8)

NC の設定角度 (度)	20	角度測定 of Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	1.098	1.097	1.098	1.097
測定角度 (度)	20.10263	20.08578	20.10263	20.08578
設定角度との差 (度)	0.102626	0.085782	0.102626	0.085782
測定角度平均 (度)	20.0942	設定角度との差平均 (度)		0.094204

図 2.10 にワイヤテンションの変化に対するテーパ誤差の変化をグラフに表した。



### ワイヤテンションを変化に対する加工電圧変化

ワイヤテンションを変化させた場合の加工電圧、加工速度の変化と短絡の有無をVFモニターによって測定した。測定結果を図 2.11 と図 2.12 に表した。図 2.11 はテーパカット面でワイヤテンションを順に変化をさせた場合の加工電圧の変化を 3 次元で表し、図 2.12 は、この電圧の変化を 2 次元のグラフに表したものである。

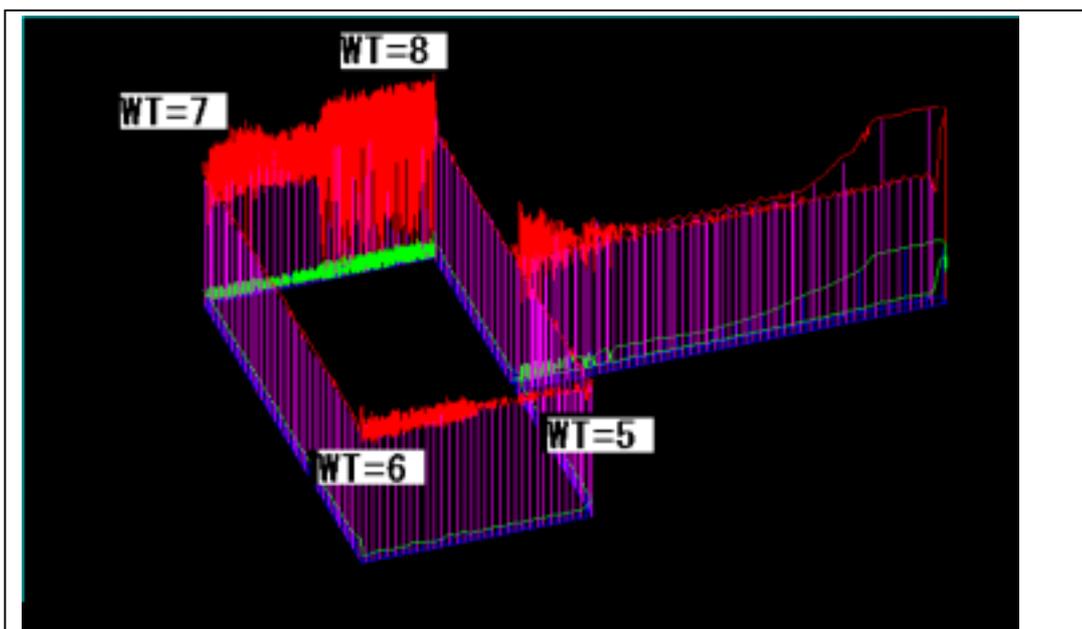


図 2.11 ワイヤテンション変化に対する加工電圧の変化（3次元）

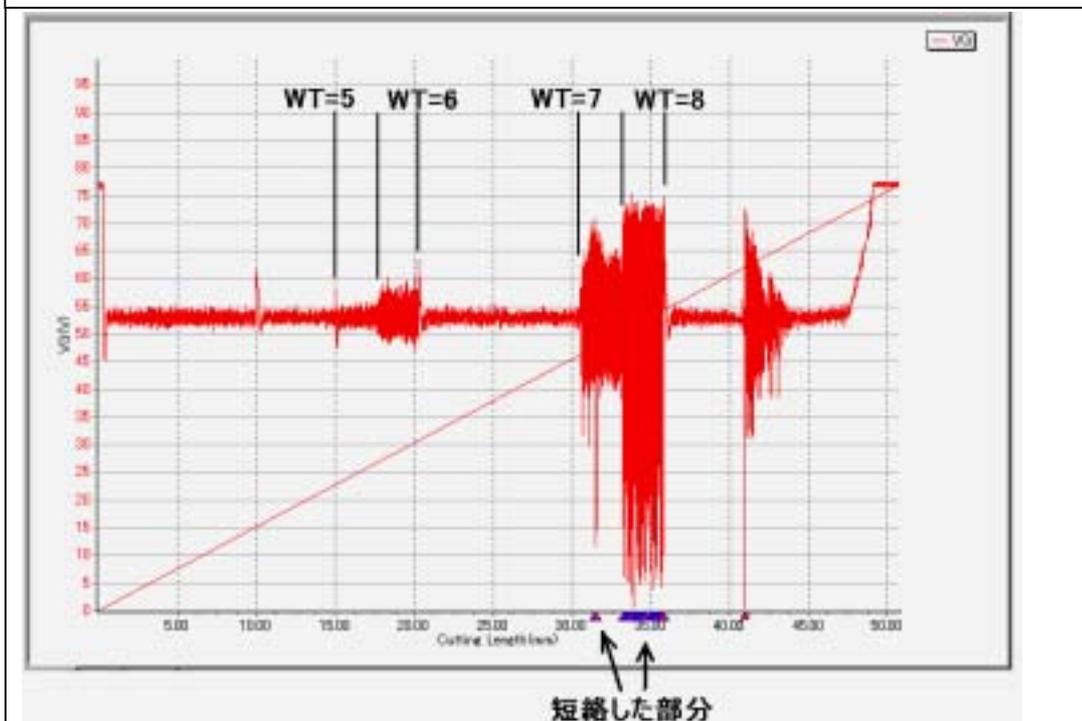


図 2.12 ワイヤテンション変化に対する加工電圧の変化（2次元）

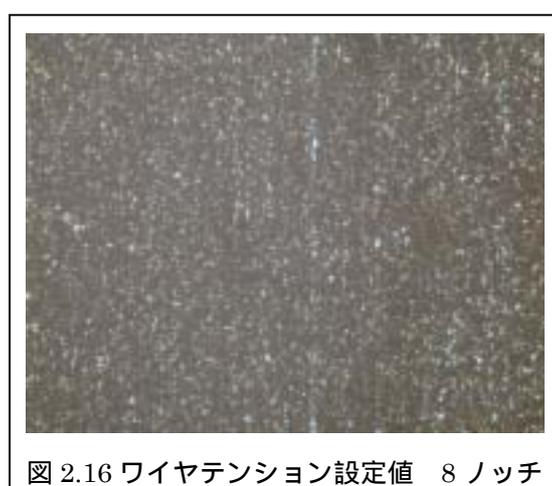
以下にワイヤテンションの変化に対する加工電圧、加工速度を表 2.8 に表した。

表 2.8 ワイヤテンションの変化に対する加工電圧、加工速度の変化

	最小加工電圧 (V)	最大加工電圧 (V)	平均加工電圧 (V)	最小加工速度 (mm/min)	最大加工速度 (mm/min)	平均加工速度 (mm/min)
WT=5	47.47	57.87	52.87	1.93	4.86	2.29
WT=6	47.03	60.36	53.01	1.67	3.11	2.28
WT=7	11.86	70.91	53.68	0.10	4.89	2.23
WT=8	0.58	75.31	55.26	0.01	5.46	1.82

ワイヤテンションの変化に対する 20 度テーパ加工面の写真

以下に、各ワイヤテンションで加工を行った場合のテーパカット面の写真を図 2.13 ~ 図 2.16 に表した。



#### (5) 考察

図 2.10 を見て分かる様に、ワイヤテンションが強いほど角度誤差が小さくなることが分かるが、加工の安定性を加工電圧の変化で見た場合、ワイヤテンションが強くなるにつれ、電圧の変化が激しく、図 2.12 から短絡現象の発生箇所が見られた。また、各ワイヤテンションで加工されたワーク表面の写真においては、テンションが強くなるにつれて表面に縦筋の発生が見られた。ワイヤテンション設定値 8 ノッチで加工されたワーク表面(図 2.16)は、目で見てもはっきりと分かる程の筋が残されていた。

この筋の発生は、短絡現象によって残されたものであることが考えられるが、短絡現象は、ワイヤの振動が原因であると思われる。ワイヤテンション設定値 8 ノッチで 20 度テーパにワイヤを傾け、ワイヤを送ってみたところ振動していることが分かった。これに関しては、ワイヤを支えているダイヤモンドダイスとワイヤが、テーパ角度が大きくなったことで、摩擦が大きくなったからだと考えられる。ワイヤテンション設定値 5 ノッチで加工を行った場合には、加工電圧の変動も小さく縦筋の発生も見られなかったことから、ワイヤの振動も小さいということが考えられる。

よって今後のテーパ加工においては、テーパ角度に応じて、前記、加工条件の表 2.1 のとおりに条件を設定して加工を行うこととした。

### 2.7.3 加工後の角度誤差を補正值として加工を行う実験

#### (1) 実験目的

テーパ角度が大きくなるにつれて NC の設定テーパ角度と加工後のテーパ面の角度の差が大きくなる傾向が見られたが、その角度差を求め、次の NC 設定角度に補正角度として与え、加工する方法でテーパ誤差を小さく抑えることを目的とした。

#### (2) 実験方法

NC の設定角度 12 度、14 度、16 度、18 度、20 度でそれぞれテーパ加工を行う。加工後、測定顕微鏡を用いてワークのテーパ角度を測定し、NC の設定テーパ角度と加工後のテーパ角度の差を求める。測定時の Y 軸の移動量は 5mm とし、10 回測定を行った結果からワークのテーパ角度を求め、NC の設定角度との角度の差を求める。

求められた角度の差は、補正角度として NC の設定テーパ角度に与え、補正加工を行う。設定テーパ角度を補正する加工は各テーパとも 2 回まで行った。

#### (3) 実験条件

Z 軸諸元出しは、自動諸元出し機能を用いて自動入力を行った。諸元出し角度 4.998 度

Z3=18.556mm    Z3=7.911mm    Z4=7.934mm

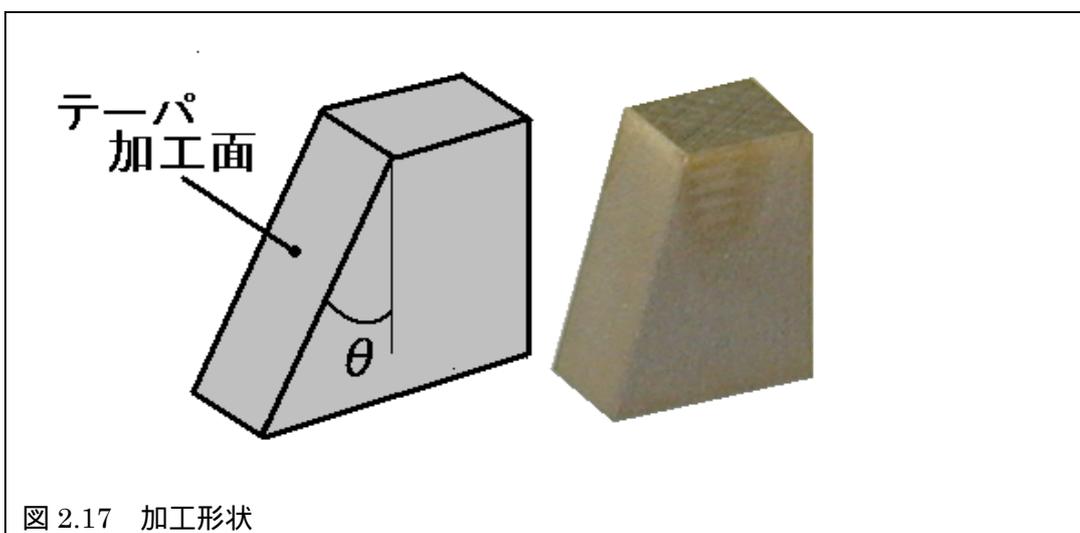
加工条件

12 度は E202    14 度 16 度 18 度 20 度は E203 を使用して加工を行った。

加工速度 最適送り    オフセット量 133  $\mu$ m

加工形状は、図 2.17 のような、片側にテーパ面を持たせた形状を加工した。

加工後のテーパ角度の測定について、測定顕微鏡の Y 軸移動量は、5mm で測定を行い、10 回測定を行った平均からテーパ角度の割り出しを行った。



(4) 加工結果

表 2.9 12 度テーパ

目標テーパ角度 12 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量 (mm)	5.631	5.567	5.517
テーパ入力角度 (度)	12.000	11.868	11.764
平均測定結果(X 軸移動量) (mm)	1.0748	1.0603	1.0622
テーパ角度結果 (度)	12.1317	11.9728	11.9936
テーパ誤差 (度)	0.1317	-0.0272	-0.0064
入力角から見たテーパ誤差 (度)	0.1317	0.1045	0.2298
目的テーパからの角度の差 (度)	0.1317	-0.0272	-0.0064

表 2.10 14 度テーパ

目標テーパ角度 14 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量 (mm)	6.605	6.522	6.423
テーパ入力角度 (度)	14.000	13.832	13.630
平均測定結果(X 軸移動量) (mm)	1.2622	1.2498	1.2463
テーパ角度結果 (度)	14.1677	14.0341	13.9967
テーパ誤差 (度)	0.1677	0.0341	-0.0033
入力角から見たテーパ誤差 (度)	0.1677	0.2018	0.3663
目的テーパからの角度の差 (度)	0.1677	0.0341	-0.0033

表 2.11 16 度テーパ

目標テーパ角度 16 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量 (mm)	7.569	7.456	7.319
テーパ入力角度 (度)	16.000	15.720	15.446
平均測定結果(X 軸移動量) (mm)	1.4602	1.4332	1.4335
テーパ角度結果 (度)	16.2799	15.9944	15.9976
テーパ誤差 (度)	0.2799	-0.0056	-0.0024
入力角から見たテーパ誤差 (度)	0.2799	0.2743	0.5518
目的テーパからの角度の差 (度)	0.2799	-0.0056	-0.0024

表 2.12 18 度テーパ

目標テーパ角度 18 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量 (mm)	8.607	8.463	8.370
テーパ入力角度 (度)	18.000	17.717	17.534
平均測定結果(X 軸移動量) (mm)	1.6519	1.615	1.6204
テーパ角度結果 (度)	18.2825	17.9005	17.9565
テーパ誤差 (度)	0.2825	-0.0995	-0.0435
入力角から見たテーパ誤差 (度)	0.2825	0.1830	0.4220
目的テーパからの角度の差 (度)	0.2825	-0.0995	-0.0435

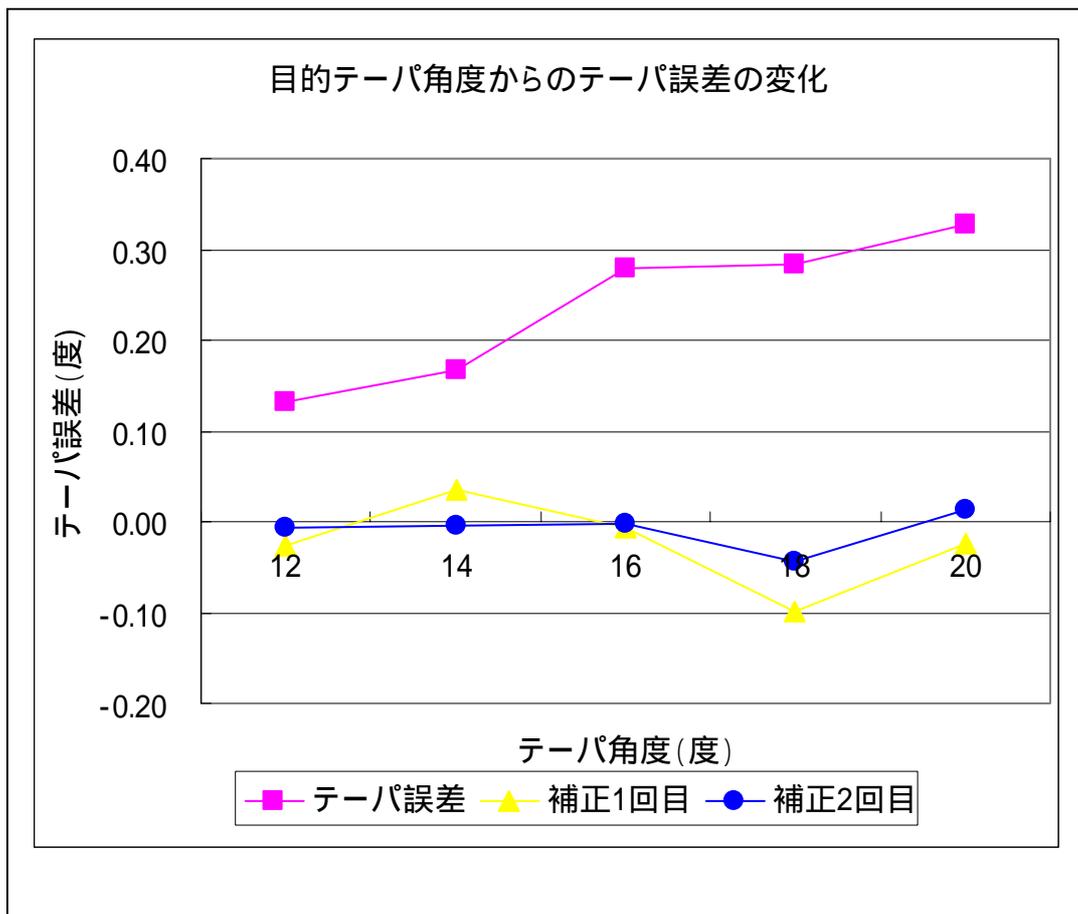
表 2.13 20 度テーパ

目標テーパ角度 20 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量 (mm)	9.642	9.470	9.483
テーパ入力角度 (度)	20.000	19.672	19.368
平均測定結果(X 軸移動量) (mm)	1.8523	1.8175	1.8212
テーパ角度結果 (度)	20.3277	19.9762	20.0136
テーパ誤差 (度)	0.3277	-0.0238	0.0136
入力角から見たテーパ誤差 (度)	0.3277	0.3039	0.6452
目的テーパからの角度の差 (度)	0.3277	-0.0238	0.0136

目的テーパ角度からの、加工テーパ面の角度の差を表 2.13 にまとめ、これをグラフに表したものを図 3.18 に示した。

表 2.14 目的テーパ角度からのテーパ誤差

測定角度(度)	通常加工 目的テーパからの 角度の差 (度)	補正 1 回目 目的テーパからの 角度の差 (度)	補正 2 回目 目的テーパからの 角度の差 (度)
12	0.1317	-0.0272	-0.0064
14	0.1677	0.0341	-0.0033
16	0.2799	-0.0056	-0.0024
18	0.2825	-0.0995	-0.0435
20	0.3277	-0.0238	0.0136



(5) 考察

図 2.18 を見て分かる様に、補正を行うごとに角度誤差を小さく抑えることができた。このような加工結果から求められたテーパ誤差を、次の加工の補正角度として与え、テーパ誤差を小さく抑える方法に関しては、テストカットを行う必要があることや、実際のワイヤの傾きを測定せず NC で計算され、設定されたワイヤの傾きが正しいとして加工を行っているため、実際のワイヤの傾きが何度に傾けられていたのかが分からず、加工後のテーパ誤差がワイヤの傾き自体の設定誤差なのか、それとも加工誤差が大きいのか判断ができない状態である。このため、テーパ加工の精度を向上させるためには、ワイヤの傾きを測定し、求められた角度と、加工後のワークのテーパ角度との差を求め、加工誤差を正確に求めることが必要である。

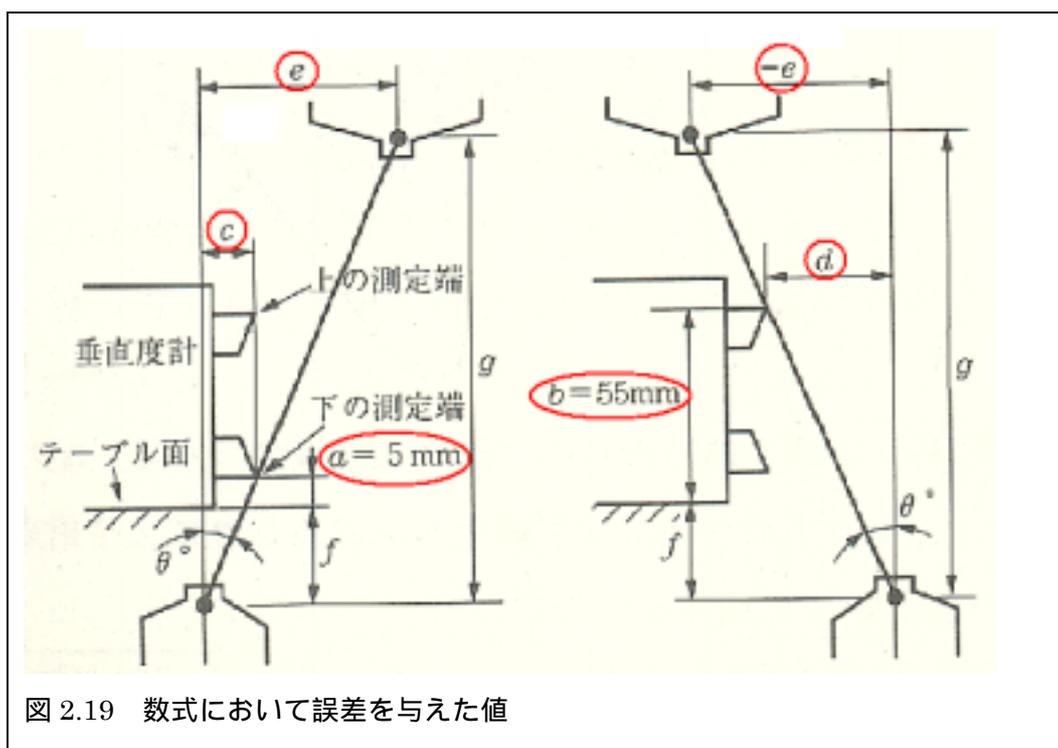
## 2.7.4 諸元出し段階における測定誤差のダイス間距離に及ぼす影響

### (1) 実験目的

諸元出し段階において、測定誤差がダイス間距離にどのように影響を及ぼすか、理論式を用いて検討する。

### (2) 実験方法

ダイス間距離を求める際に必要な数値に対して、それぞれ誤差を与えて、理論式を計算する。誤差を与える数値としては図 2.19 のように、測定刃の高さ ( $a$ 、 $b$ )、端面位置決めで求まる座標測定値 ( $c$ 、 $d$ )、U 軸移動量 ( $e$ )、これらについて、それぞれ誤差として  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、を与えて計算し、最終的にダイス間距離 ( $g$ ) にかかわってくる誤差 ( $g$ ) の割合を求める。諸元出しを行った角度の変化については、2 度と 14 度で諸元出しを行った場合について、誤差が及ぼす影響について検討する。



### (3) 実験条件

誤差の与える範囲は、0~0.5%の範囲として計算結果に誤差を与えた。

- ・垂直度計の測定刃の高さ  $a=5\text{mm}$ 、 $b=55\text{mm}$
  - ・2 度の場合、U 軸移動量 3.041mm 上下ダイス間距離 87.091mm
  - ・14 度の場合、U 軸移動量 21.454mm 上下ダイス間距離 86.049mm
- これらの数値を計算式に与えて、最終的な誤差  $g$  の割り出しを行った。

(4) 実験結果

1. c、dについて誤差がある場合

$$f = \frac{bc - ad}{d - c} \dots$$

$$g = \frac{e(a + f)}{c} \dots$$

cの誤差を  $\Delta c$ 、dの誤差を  $\Delta d$  とおくと

c  $c + \Delta c$ 、d  $d + \Delta d$  となる。

これを  $f$  と  $g$  に代入する。

$$f = \frac{b(c + \Delta c) - a(d + \Delta d)}{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)}$$

$$g = \frac{e(a + f)}{c + \Delta c}$$

fをgに代入すると

$$\begin{aligned} g &= \frac{e \left\{ a + \frac{b(c + \Delta c) - a(d + \Delta d)}{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)} \right\}}{(c + \Delta c)} \\ &= \frac{e[a\{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)\} + b(c + \Delta c) - a(d + \Delta d)]}{(c + \Delta c)\{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)\}} \\ &= \frac{e(b - a)}{(d - c) + \Delta(d - c)} \\ &= \frac{e(b - a)}{d - c} \left\{ 1 + \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \right\}^{-1} \end{aligned}$$

$\left\{ 1 + \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \right\}^{-1}$  をテーラ展開すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \left\{ 1 + \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \right\}^{-1} &= 1 - \frac{\Delta(d - c)}{d - c} + \left\{ \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \right\}^2 - \left\{ \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \right\}^3 + \dots (-1)^{n-1} \left\{ \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \right\}^{n-1} \\ &+ \dots \approx 1 - \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \end{aligned}$$

よってgは

$$g = \frac{e(b - a)}{d - c} \left\{ 1 - \frac{\Delta(d - c)}{d - c} \right\}$$

したがって g は

$$\Delta g = \frac{e(b-a)(\Delta d - \Delta c)}{(d-c)^2}$$

実際に 2 度と 14 度テーパの時、緒元だしするダイス間距離の誤差( g)を計算で求めた式で求める。

$$\Delta g = \frac{e(b-a)(\Delta d - \Delta c)}{(d-c)^2} \dots$$

の式を使って 2 度と 14 度の誤差の影響を調べる。

2 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 0.464 \quad d = 2.210 \quad e = 3.041$$

$$\Delta g = \frac{e(b-a)(\Delta d - \Delta c)}{(d-c)^2} = \frac{3.041(55-5)}{(2.210-0.464)^2} \Delta(d-c) = 49.880 \Delta(d-c) \dots$$

の式に誤差を代入してみる。

c,d の誤差 ( c、 d) に 0~0.5% 与えた時ダイス間距離 ( g) の誤差( g) を求める

表 2.15 c、 d に 0~0.5% 与えた時のダイス間距離 ( g) の誤差( g) の変化

誤差 (%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
c (mm)	0.00000	0.00046	0.00093	0.00139	0.00186	0.00232
d (mm)	0.00000	0.00221	0.00442	0.00663	0.00884	0.01105
g (mm)	0.00000	0.08709	0.17418	0.26127	0.34836	0.43545
g/g (%)	0.00000	0.10000	0.20000	0.30000	0.40000	0.50000
角度 (度)	1.99996	1.99796	1.99597	1.99398	1.99199	1.99001
角度誤差 (度)	0.00000	0.00200	0.00399	0.00598	0.00796	0.00994
角度誤差 / 角度	0.00000	0.09992	0.19984	0.29976	0.39968	0.49959

14 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 3.218 \quad d = 15.694 \quad e = 21.454$$

$$\Delta g = \frac{e(b-a)(\Delta d - \Delta c)}{(d-c)^2} = \frac{21.454(55-5)}{(15.694-3.218)^2} \Delta(d-c) = 6.903 \Delta(d-c) \dots$$

の式に誤差を代入してみる。

c,dの誤差 ( c、 d) に 0~0.5%与えた時ダイス間距離 ( g) の誤差( g)を求める

表 2.16 c、 d に 0~0.5%与えた時のダイス間距離 ( g) の誤差( g)の変化

誤差 (%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
c (mm)	0.00000	0.00323	0.00646	0.00968	0.01291	0.01614
d (mm)	0.00000	0.01569	0.03139	0.04708	0.06278	0.07847
g (mm)	0.00000	0.08605	0.17210	0.25815	0.34420	0.43024
g/g (%)	0.00000	0.10000	0.20000	0.30000	0.40000	0.50000
角度 (度)	13.99957	13.98613	13.97272	13.95933	13.94597	13.93264
角度誤差 (度)	0.00000	0.01344	0.02685	0.04023	0.05359	0.06693
角度誤差/角度	0.00000	0.09607	0.19214	0.28822	0.38430	0.48038

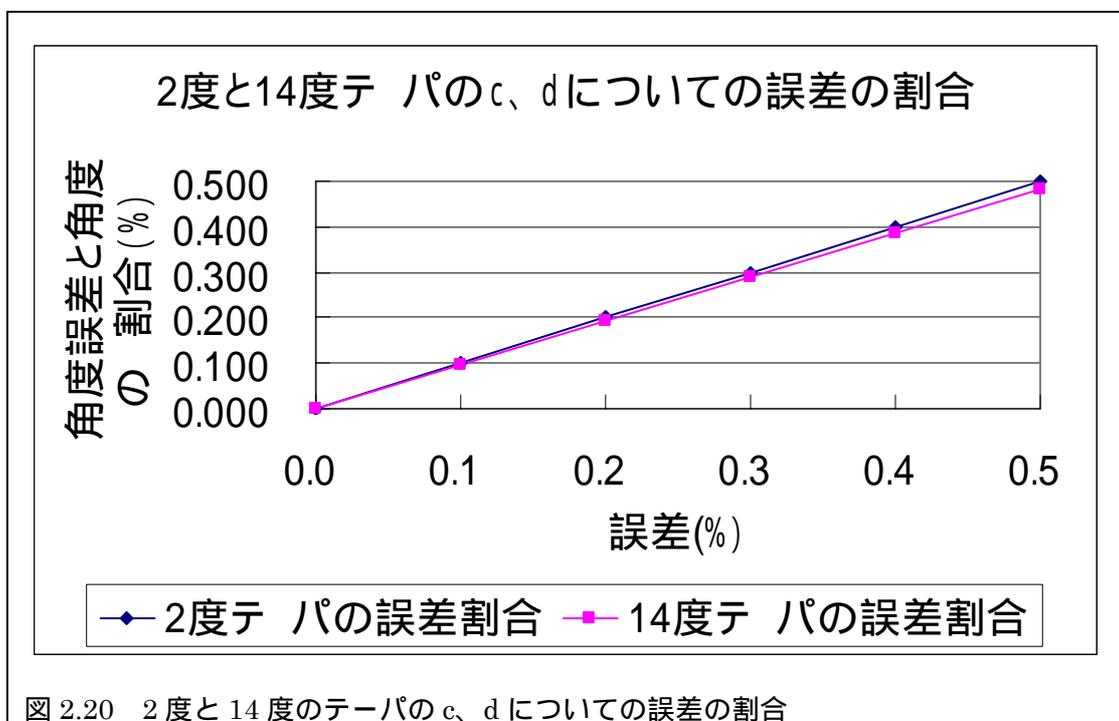


図 2.20 2度と14度のテパの c、 d についての誤差の割合

図 2.20 は、2度と14度のテパ角度において、c と d にそれぞれ誤差を持たし、その誤差を 0~0.5%の範囲で変化させたときの計算結果を、角度誤差と角度の割合で表したものである。求められた g は、

2度の場合  $g=49.880 (d-c)$

14度の場合  $g=6.903 (d-c)$  である。

このことから分かる様に、例えば d と c にそれぞれ誤差をもっており、その差  $d-c$  が  $1\mu$  であった場合、2度の場合は  $49.880\mu\text{m}$  の誤差となり、14度の場合は、 $6.903\mu\text{m}$  の誤差が g に加わってくることが考えられ、両条件の差は  $42.977\mu\text{m}$  となる。よって、諸元出しの角度が大きいほど測定誤差を小さく抑えることができるということが分かる。

2 . a,b に誤差がある場合について

$$f = \frac{bc - ad}{d - c} \dots$$

$$g = \frac{e(a + f)}{c} \dots$$

a と b の誤差を a と b とおくと  
 $a \rightarrow a + \Delta a$      $b \rightarrow b + \Delta b$  となる。  
 これを , の式に代入する。

$$f = \frac{(b + \Delta b)c - (a + \Delta a)d}{d - c}$$

$$g = \frac{e\{(a + \Delta a) + f\}}{c}$$

f を g に代入する

$$\begin{aligned} g &= \frac{e \left[ (a + \Delta a) + \left\{ \frac{(b + \Delta b)c - (a + \Delta a)d}{d - c} \right\} \right]}{c} \\ &= \frac{e\{(a + \Delta a)(d - c) + (b + \Delta b)c - (a + \Delta a)d\}}{c(d - c)} \\ &= \frac{e\{(b + \Delta b) - (a + \Delta a)\}}{d - c} \\ &= \frac{e(b - a)}{d - c} + \frac{e(\Delta b - \Delta a)}{d - c} \end{aligned}$$

したがって g は

$$\Delta g = \frac{e(\Delta b - \Delta a)}{d - c}$$

実際に 2 度と 14 度テーパの時、緒元だしするダイス間距離の誤差( g)を計算で求めた式で求める。

$$\Delta g = \frac{e(\Delta b - \Delta a)}{d - c} \dots$$

の式を使って 2 度と 14 度の誤差の影響を調べる

2 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 0.464 \quad d = 2.210 \quad e = 3.041$$

$$\Delta g = \frac{e\Delta(b - a)}{d - c} = \frac{3.041}{2.210 - 0.464} \Delta(b - a) = 1.742\Delta(b - a) \dots$$

の式に誤差を代入する。

a,b の誤差 ( a、 b ) に 0 から 0.5% 与えた時ダイス間距離 ( g ) の誤差( g)を求める

表 2.17 a、 b に 0~0.5% 与えた時のダイス間距離 ( g ) の誤差( g)の変化

誤差 (%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
a (mm)	0.00000	0.00500	0.01000	0.01500	0.02000	0.02500
b (mm)	0.00000	0.05500	0.11000	0.16500	0.22000	0.27500
g (mm)	0.00000	0.08709	0.17418	0.26127	0.34836	0.43545
g/g (%)	0.00000	0.10000	0.20000	0.30000	0.40000	0.50000
角度 (度)	1.99996	1.99796	1.99597	1.99398	1.99199	1.99001
角度誤差 (度)	0.00000	0.00200	0.00399	0.00598	0.00796	0.00994
角度誤差/角度	0.00000	0.09992	0.19984	0.29976	0.39968	0.49959

14 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 3.228 \quad d = 15.694 \quad e = 21.454$$

$$\Delta g = \frac{e\Delta(b-a)}{d-c} = \frac{21.454}{15.694 - 3.228} \Delta(b-a) = 1.721\Delta(b-a) \dots$$

の式に誤差を代入する。

a,b の誤差 ( a、 b ) に 0 から 0.01% 与えた時ダイス間距離 ( g ) の誤差( g)を求める

表 2.18 a、 b に 0~0.5% 与えた時のダイス間距離 ( g ) の誤差( g)の変化

誤差 (%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
a (mm)	0.00000	0.00500	0.01000	0.01500	0.02000	0.02500
b (mm)	0.00000	0.05500	0.11000	0.16500	0.22000	0.27500
g (mm)	0.00000	0.08605	0.17210	0.25815	0.34420	0.43024
g/g (%)	0.00000	0.10000	0.20000	0.30000	0.40000	0.50000
角度 (度)	13.99957	13.98613	13.97272	13.95933	13.94597	13.93264
角度誤差 (度)	0.00000	0.01344	0.02685	0.04023	0.05359	0.06693
角度誤差/角度	0.00000	0.09607	0.19214	0.28822	0.38430	0.48038

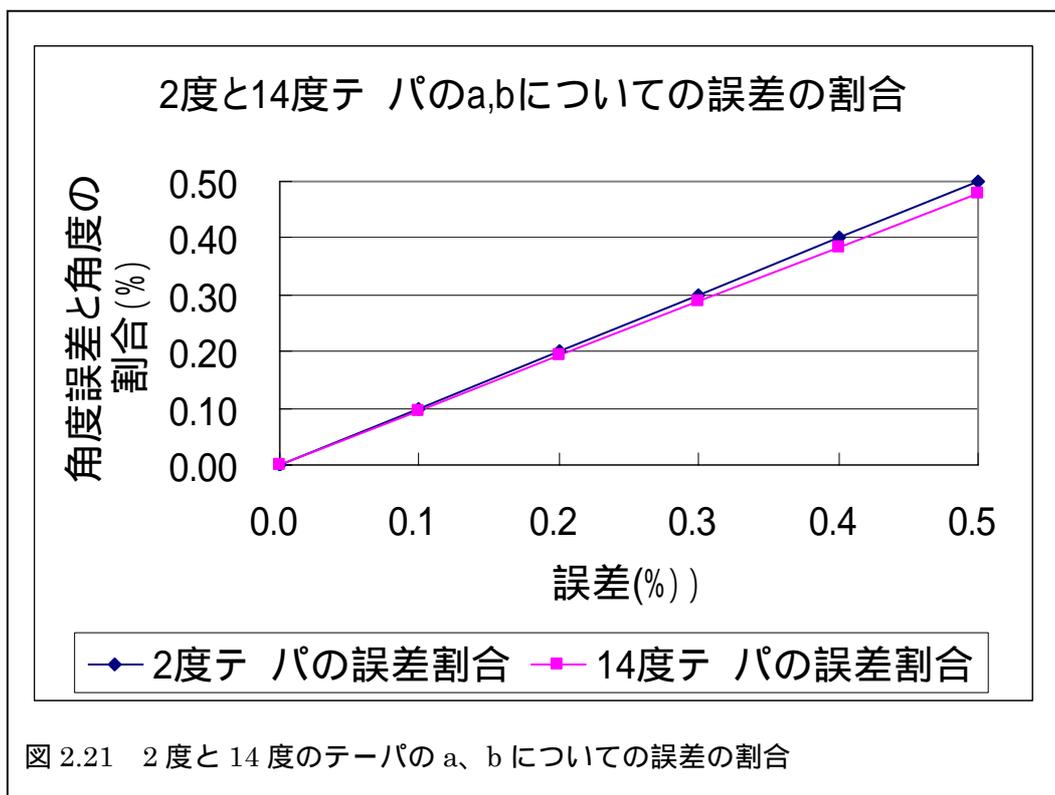


図 2.21 2度と14度のテーパの a、b についての誤差の割合

図 2.21 は、2度と14度のテーパ角度において、a と b にそれぞれ誤差を持たし、その誤差を 0~0.5%の範囲で変化させたときの計算結果を、角度誤差と角度の割合で表したものである。

求められた  $g$  は、

$$2 \text{ 度の場合 } g=1.742 (b-a)$$

$$14 \text{ 度の場合 } g=1.721 (b-a) \text{ である。}$$

このことから分かる様に、例えば a と b にそれぞれ誤差をもっており、その差  $b-a$  が  $1 \mu$  であった場合、2度の場合は  $1.742 \mu\text{m}$  の誤差となり、14度の場合は、 $1.721 \mu\text{m}$  の誤差が  $g$  に加わってくることが考えられ、両条件の差は  $0.021 \mu\text{m}$  となり、差は小さいものの、約  $1.7 \mu\text{m}$  の誤差がダイス間距離の加わることとなる。

### 3. U軸のバックラッシュによる誤差について

$$f = \frac{bc - ad}{d - c} \dots$$

$$g = \frac{e(a + f)}{c} \dots$$

バックラッシュによる誤差を  $u$  とおくとU軸移動量は

$e \rightarrow e + \Delta u$  となる

と の式に代入する。

$$f = \frac{bc - ad}{d - c}$$

$$g = \frac{(e + \Delta u)(a + f)}{c}$$

f を g に代入する

$$g = \frac{(e + \Delta u) \left( a + \frac{bc - ad}{d - c} \right)}{c}$$

$$g = \frac{(e + \Delta u) \{ a(d - c) + bc - ad \}}{c(d - c)}$$

$$g = \frac{(e + \Delta u)(bc - ac)}{c(d - c)}$$

$$g = \frac{(e + \Delta u)(b - c)}{d - c}$$

$$g = \frac{e(b - c)}{d - c} + \frac{\Delta u(b - c)}{d - c}$$

したがって g の誤差  $g$  は

$$\Delta g = \frac{\Delta u(b - c)}{d - c}$$

実際に 2 度と 14 度テーパの時、緒元だしするダイス間距離の誤差(  $g$  )を計算で求めた式で求める。

$$\Delta g = \frac{\Delta u(b - c)}{d - c} \dots$$

の式を使って 2 度と 14 度で誤差の影響を調べる。

2 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 0.464 \quad d = 2.210 \quad e = 3.041$$

$$\Delta g = \frac{\Delta u(b - c)}{d - c} = \frac{55 - 5}{2.210 - 0.464} \Delta u = 28.637 \Delta u \dots$$

の式に誤差を代入する。

U 軸移動の際発生するバックラッシュ( u)を 0 から 0.005mm まで与えた時のダイス間距離の誤差( g)を求める

表 2.19 u に 0~0.005mm 与えた時のダイス間距離 ( g) の誤差( g)の変化

誤差 (mm)	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
$\Delta g$ (mm)	0.00000	0.02864	0.05727	0.08591	0.11455	0.14318
$\Delta g/g$ (%)	0.00000	0.03288	0.06576	0.09864	0.13153	0.16441
角度 (度)	1.99996	1.99996	1.99996	1.99996	1.99996	1.99996
角度誤差 (度)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
角度誤差 / 角度	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

14 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 3.228 \quad d = 15.694 \quad e = 21.454$$

$$\Delta g = \frac{\Delta u(b-a)}{d-c} = \frac{55-5}{15.694-3.228} \Delta u = 4.011 \Delta u \dots$$

の式に誤差を代入する。

U 軸移動の際発生するバックラッシュ( u)を 0~0.005mm まで与えた時のダイス間距離の誤差( g)を求める

表 2.20 u に 0~0.005mm 与えた時のダイス間距離 ( g) の誤差( g)の変化

誤差 (mm)	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
$\Delta g$ (mm)	0.00000	0.00401	0.00802	0.01203	0.01604	0.02005
$\Delta g/g$ (%)	0.00000	0.00466	0.00932	0.01398	0.01864	0.02331
角度 (度)	13.99957	13.99957	13.99957	13.99957	13.99957	13.99957
角度誤差 (度)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
角度誤差 / 角度	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

表 2.19 と表 2.20 は、2 度と 14 度のテーパ角度において、U に誤差を持たし、その誤差を 0~0.005mm の範囲で変化させたときの計算結果を、表したものである。

求められた g は、

$$2 \text{ 度の場合 } g=28.637 \text{ U}$$

$$14 \text{ 度の場合 } g=4.011 \text{ U である。}$$

U 軸移動量の誤差について計算した結果においても、諸元出し角度 14 度の方が、ダイス間距離に影響する誤差は小さくなることが分かった。

角度誤差については、U 軸移動量の誤差と同じ割合で g の値も変化するため、計算上での誤差は発生しない。

4. すべての誤差 ( a, b, c, d, u ) について

$$f = \frac{bc - ad}{d - c} \dots$$

$$g = \frac{e(a + f)}{c} \dots$$

c, d, a, b, e に誤差を与えると以下のようになる。

$$c \rightarrow c + \Delta c \quad d \rightarrow d + \Delta d \quad a \rightarrow a + \Delta a \quad b \rightarrow b + \Delta b \quad e \rightarrow e + \Delta u$$

これらの誤差を と の式に代入する。

$$f = \frac{(b + \Delta b)(c + \Delta c) - (a + \Delta a)(d + \Delta d)}{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)}$$

$$g = \frac{(e + \Delta u)\{(a + \Delta a) + f\}}{(c + \Delta c)}$$

f を g に代入する

$$\begin{aligned} g &= \frac{(e + \Delta u)\left\{(a + \Delta a) + \frac{(b + \Delta b)(c + \Delta c) - (a + \Delta a)(d + \Delta d)}{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)}\right\}}{(c + \Delta c)} \\ &= \frac{(e + \Delta u)\left\{(a + \Delta a)\{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)\} + (b + \Delta b)(c + \Delta c) - (a + \Delta a)(d + \Delta d)\right\}}{(c + \Delta c)\{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)\}} \\ &= \frac{(e + \Delta u)\{(b + \Delta b)(c + \Delta c) - (a + \Delta a)(c + \Delta c)\}}{(c + \Delta c)\{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)\}} \\ &= \frac{(e + \Delta u)\{(b + \Delta b) - (a + \Delta a)\}}{(d + \Delta d) - (c + \Delta c)} \\ &= \frac{(e + \Delta u)\{(b - a) + \Delta(b - a)\}}{(d - c) + \Delta(d - c)} \\ &= \frac{(e + \Delta u)\{(b - a) + \Delta(b - a)\}}{(d - c)} \\ &= \frac{(e + \Delta u)\{(b - a) + \Delta(b - a)\}}{1 + \frac{\Delta(d - c)}{d - c}} \\ &= \frac{(e + \Delta u)\{(b - a) + \Delta(b - a)\}}{d - c} \left\{1 + \frac{\Delta(d - c)}{d - c}\right\}^{-1} \end{aligned}$$

$$\left\{1 + \frac{\Delta(d - c)}{d - c}\right\}^{-1} \text{ をテーラ展開する}$$

$$\left\{1 + \frac{\Delta(d-c)}{d-c}\right\}^{-1} = 1 - \frac{\Delta(d-c)}{d-c} + \left\{\frac{\Delta(d-c)}{d-c}\right\}^2 - \left\{\frac{\Delta(d-c)}{d-c}\right\}^3 + \dots (-1)^{n-1} \left\{\frac{\Delta(d-c)}{d-c}\right\}^{n-1}$$

$$+ \dots \approx 1 - \frac{\Delta(d-c)}{d-c}$$

よって g の値は

$$g = \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-c)\}}{d-c} \left\{1 - \frac{\Delta(d-c)}{d-c}\right\}$$

$$= \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-c)\}}{d-c} - \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(d-c)^2}$$

$$= \frac{(e + \Delta u)(b-a)}{d-c} + \frac{(e + \Delta u)\Delta(b-c)}{d-c} - \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(d-c)^2}$$

$$= \frac{e(b-a)}{d-c} + \frac{\Delta u(b-a)}{d-c} + \frac{(e + \Delta u)\Delta(b-c)}{d-c} - \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(d-c)^2}$$

したがって g の誤差 g は

$$\Delta g = \frac{\Delta u(b-a)}{d-c} + \frac{(e + \Delta u)\Delta(b-c)}{d-c} - \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(d-c)^2}$$

実際に 2 度と 14 度テーパの時、緒元だしするダイス間距離の誤差 (g) を計算で求めた式で求める。

$$\Delta g = \frac{\Delta u(b-a)}{d-c} + \frac{(e + \Delta u)\Delta(b-c)}{d-c} - \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(d-c)^2} \dots$$

の式を使って 2 度と 14 度で誤差の影響を調べる。

2 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 0.464 \quad d = 2.210 \quad e = 3.041$$

$$\Delta g = \frac{\Delta u(b-a)}{d-c} + \frac{(e + \Delta u)\Delta(b-c)}{d-c} - \frac{(e + \Delta u)\{(b-a) + \Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(d-c)^2}$$

$$= \frac{55-5}{2.210-0.464} \Delta u + \frac{(3.041 + \Delta u)\Delta(b-a)}{2.210-0.464} - \frac{(3.041 + \Delta u)\{(55-5) + \Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(2.210-0.464)^2}$$

$$= 28.637\Delta u + 11.742\Delta(b-a) + 0.573\Delta u\Delta(b-a) - 49.880\Delta(d-c) - 16.401\Delta u\Delta(d-c)$$

$$- 0.998\Delta(b-a)\Delta(d-c) - 0.328\Delta u\Delta(b-a)\Delta(d-c) \dots$$

の式に誤差それぞれに0~0.5%与えたときの g の値を求めた

表 2.21 a b c d u に 0~0.5%与えた時のダイス間距離 (g) の誤差 (g) の変化

誤差 (%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
g (mm)	0.00000	0.81998	1.63979	2.45941	3.27884	4.09808
g/g (%)	0.00000	0.94153	1.88285	2.82395	3.76485	4.70551
角度 (度)	1.99996	1.98197	1.96431	1.94699	1.92998	1.91328
角度誤差 (度)	0.00000	0.01799	0.03564	0.05297	0.06997	0.08667
角度誤差 / 角度	0.00000	0.90761	1.81443	2.72044	3.62565	4.53005

14 度の場合

$$a = 5 \quad b = 55 \quad c = 3.228 \quad d = 15.694 \quad e = 21.454$$

$$\begin{aligned} \Delta g &= \frac{\Delta u(b-a)}{d-c} + \frac{(e+\Delta u)\Delta(b-c)}{d-c} - \frac{(e+\Delta u)\{(b-a)+\Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(d-c)^2} \\ &= \frac{55-5}{15.694-3.228}\Delta u + \frac{(21.454+\Delta u)\Delta(b-a)}{15.694-3.228} - \frac{(21.454+\Delta u)\{(55-5)+\Delta(b-a)\}\Delta(d-c)}{(15.694-3.228)^2} \\ &= 4.011\Delta u + 1.721\Delta(b-a) + 0.08\Delta u\Delta(b-a) - 6.903\Delta(d-c) - 0.322\Delta u\Delta(d-c) \\ &\quad - 0.138\Delta(b-a)\Delta(d-c) - 0.006\Delta u\Delta(b-a)\Delta(d-c) \dots \end{aligned}$$

の式に誤差を代入する。

誤差それぞれに 0 から 0.5%与えたときの g の値を求めた

表 2.22 a b c d u に 0~0.5%与えた時のダイス間距離 (g) の誤差 (g) の変化

誤差 (%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
g (mm)	0.00000	0.01600	0.03183	0.04749	0.06297	0.07828
g/g (%)	0.00000	0.01860	0.03699	0.05519	0.07318	0.09098
角度 (度)	13.99957	13.99769	13.99585	13.99403	13.99224	13.99048
角度誤差 (度)	0.00000	0.00187	0.00372	0.00554	0.00733	0.00909
角度誤差 / 角度	0.00000	0.01339	0.02658	0.03958	0.05238	0.06499

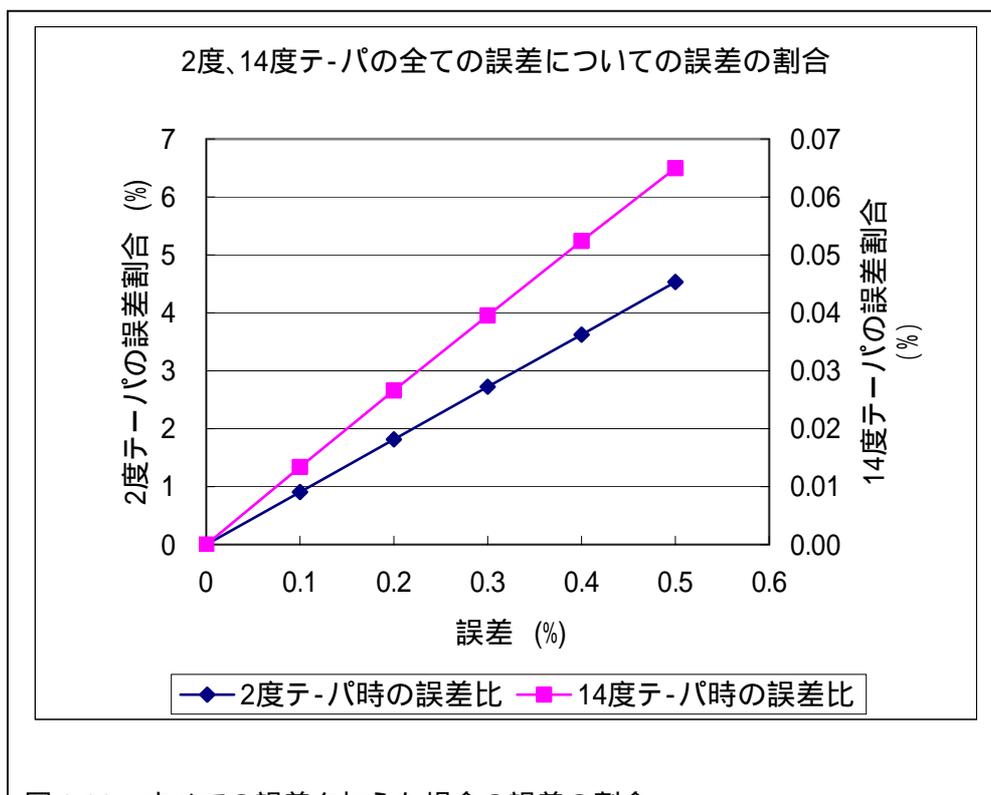


図 2.22 を見ても分かる様に、2 度で諸元出しを行うよりも、14 度で諸元出しを行う方が、はるかに誤差を小さく抑えることができることが計算結果から分かった。例として、0.1%の誤差を与えた場合、2 度と 14 度で、ダイス間距離  $g$  の値に影響する誤差を比較してみると、2 度の場合、0.812mm に対し、14 度の場合、0.016mm となり、0.796mm の差が見られる。

#### (5) 考察

諸元出し段階において、諸元出し角度 2 度と 14 度の場合においての、誤差の発生割合を計算式を用いて、割り出しを行った。考えられるすべての要因において、諸元出し角度 14 度で諸元出しを行わせた方が、ダイス間距離に影響する誤差を小さく押さえることができるという結果を得た。

諸元出し方法において、計算式で割り出される誤差の大きさは、大まかに言うと  $c$  と  $d$  の差によって決まる。これは、誤差を計算式で求めた場合、分母に全て  $(d - c)$  を持っていることから、分母が大きくなればなるほど、発生する誤差 (分子) の割合を小さくすることができるのである。よって、諸元出し角度は大きいほど、誤差の割合を小さくすることができる。

## 2.7.5 諸元出しにおけるテーパ角度変化に対するダイス間距離の変化とばらつき

### (1) 実験目的

諸元出し段階の測定誤差に関して、計算式を用いてダイス間距離に及ぼす影響を検討した結果、諸元出し角度の大きい場合の方が、測定誤差を小さく抑えることができるという結果を得た。よって、今回の実験では諸元出し角度を2度と14度で行わせ、求められるダイス間距離のばらつきについて比較調査をする。

### (2) 実験方法

ワイヤのテーパ角度を大きく設定した場合（14度）と、小さく設定した場合（2度）において諸元出しを5回ずつ行い、求められたダイス間距離のばらつきを求める。

テーパ角度2度で自動諸元出しを行い、求められたダイス間距離を用いて、2度テーパに傾けるU軸移動量の割り出しを行う。

その後の諸元出しについては、求められたU軸移動量を用い、手動操作で諸元出しを行い、テーブルの移動量、c、dを求め、ダイス間距離の割り出しを行った。

### (3) 実験条件

テーブルからジェットノズルまでの距離はブロックゲージとすきまゲージを用いて70.1mmに設定。

2度テーパで自動諸元出しを行った結果、求められた上下ダイス間距離

87.089mm（諸元出し角度 1.994度）

14度テーパで自動諸元出しを行った結果、求められた上下ダイス間距離

86.046mm（諸元出し角度 14.006度）

### (4) 実験結果

2度で諸元出しを行った場合の結果を以下に示す。

初めに自動諸元出しを行った結果 ダイス間距離は、87.089mm

ダイス間距離から求められる、U軸移動量 =  $87.089 \times \tan 2^\circ = 3.041\text{mm}$

表 2.23 諸元出し角度2度 測定結果

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
c(測定値) (mm)	0.464	0.461	5.000	0.465	0.461
d(測定値) (mm)	2.211	2.215	55.000	2.216	2.211
テーブルから下部ダイスまでの距離 f (mm)	8.280	8.141	8.288	8.278	8.171
ダイス間距離 g (mm)	87.041	86.694	87.091	86.842	86.892
諸元出し角度 (度)	2.001	2.009	2.000	2.006	2.005

次に、14度で諸元出しを行った場合の結果を以下に示す。

初めに自動諸元出しを行った結果 ダイス間距離は、86.046mm

ダイス間距離から求められる、U軸移動量 =  $87.089 \times \tan 14^\circ = 21.454\text{mm}$

表 2.24 諸元出し角度 14度 測定結果

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
c [測定値] (mm)	3.228	3.228	3.226	3.227	0.461
d [測定値] (mm)	15.694	15.694	15.694	15.694	2.211
テーブルから下部ダイスまでの距離 f (mm)	7.947	7.947	7.937	7.942	7.944
ダイス間距離 g (mm)	86.049	86.049	86.035	86.042	86.056
諸元出し角度 (度)	14.000	14.000	14.002	14.001	13.998

図 2.23 に、2度と14度で諸元出しを行った場合のダイス間距離のばらつきをグラフに表した。

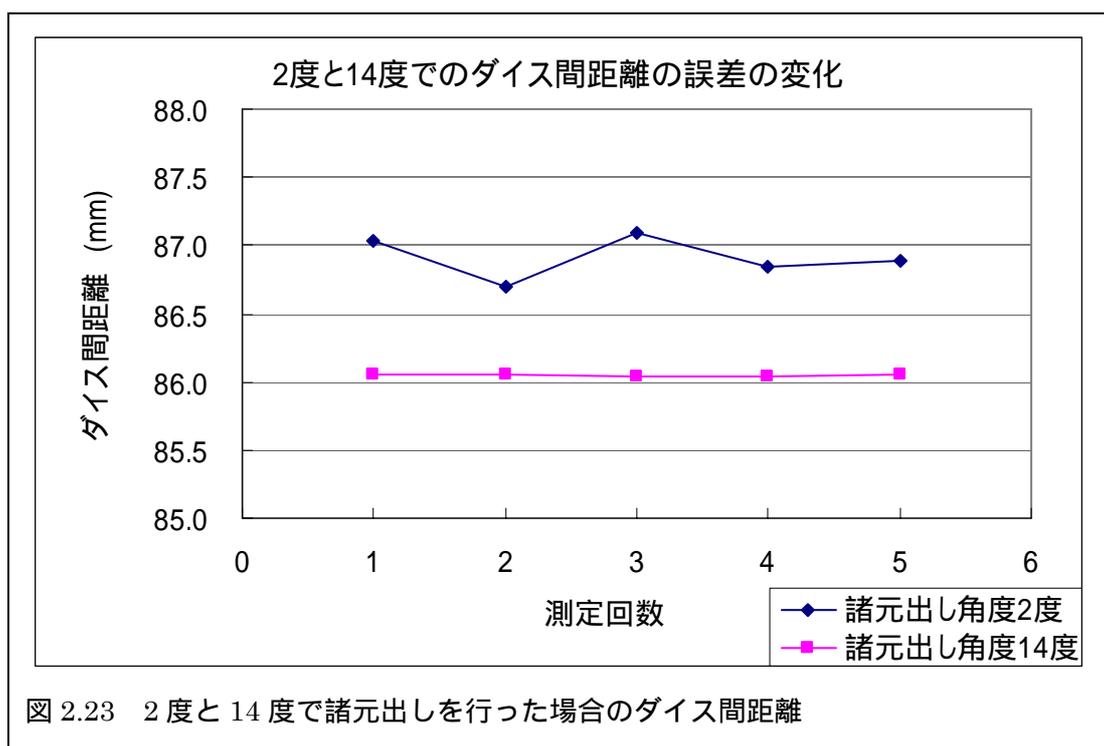


図 2.24 は、諸元出し角度 2 度と 14 度でのダイス間距離のばらつきを測定結果の平均値から求めたものを表した。

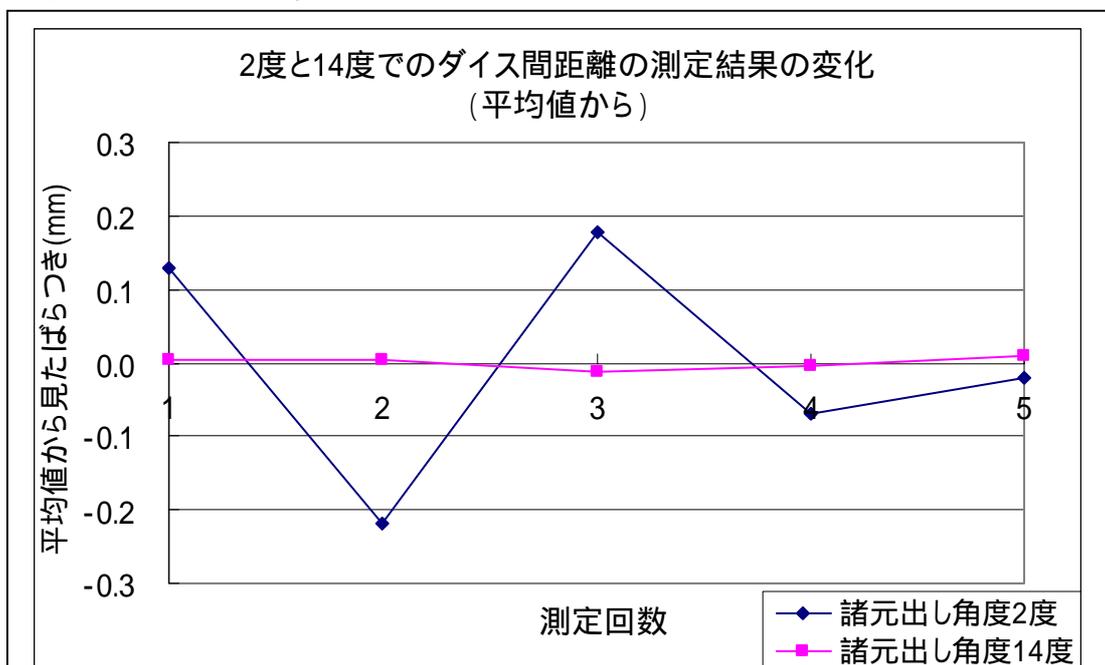


図 2.24 2 度と 14 度でのダイス間距離の測定結果の変化

図 2.25 は、諸元出し角度 2 度と 14 度でのテーブルから下部ダイスまでの距離を測定結果の平均値から求めたものを表した。

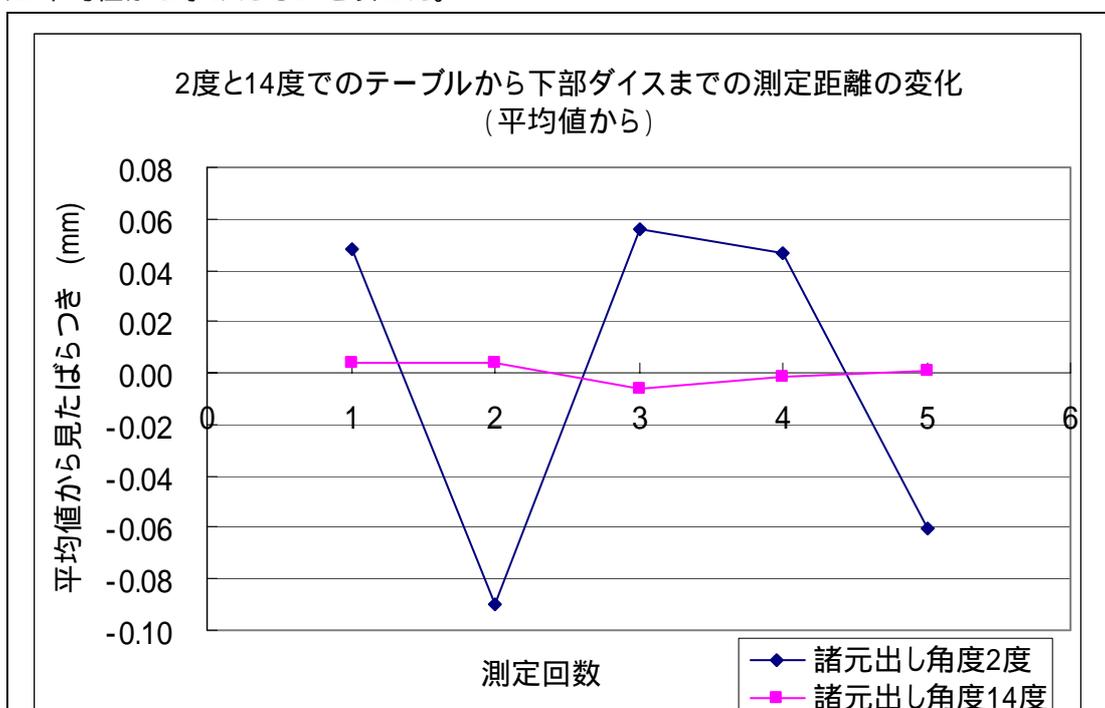


図 2.25 2 度と 14 度でのテーブルから下部ダイスまでの測定距離の変化

### (5) 考察

諸元出し角度が大きいほど、測定誤差を小さくおさえることができるという結果を、計算式によって得たが、実際に諸元出しを2度と14度で行ってみたところ、諸元出し角度が14度の場合は、2度の場合にくらべ、ダイス間距離、テーブルから下部ダイスまでの距離ともばらつきが非常に小さいことが分かった。しかしながら、測定値c、dの値を見ても、諸元出し角度14度の場合に比べて、諸元出し角度2度で行った場合においては、この値にばらつきが見られることから、この値のばらつきが、ダイス間距離の値に直接影響を及ぼしたと思われる。これに関しては、図2.26のように、測定刃とワイヤの接触面が、2度の場合と14度の場合では、わずかに14度の方が狭い接触面積で位置決めを行うことができていたのに対し、2度の場合は接触面積が広いために測定位置にばらつきが生じたと思われる。

また、図2.23の結果より、2度に比べて14度で諸元出しを行った場合のダイス間距離の方が、0.866mm短く求められていることが分かるが、この原因については、ワイヤの強さが原因として考えられる。

今回、テーブルから上部ジェットノズルまでの高さは70.1mmに設定し、その後Z軸は移動させずに実験をいっているため、真のダイス間距離は変化していないはずである。しかしながら、諸元出し角度の違いによって、ダイス間距離が変化する原因については、図2.27のようにワイヤの強さによって諸元出し角度が大きい場合ほど、見かけ上のダイス間距離が短く求められてしまうと考えられる。

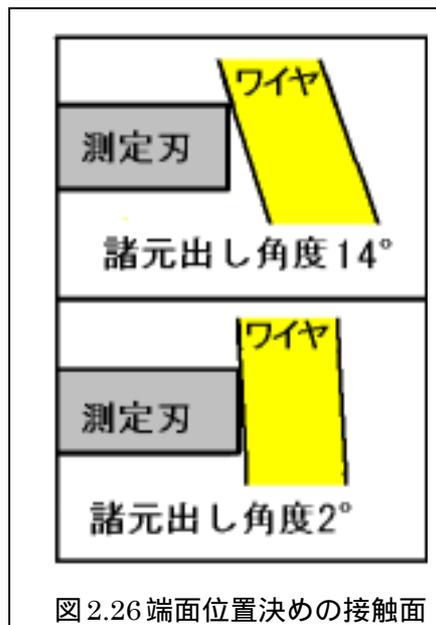


図2.26 端面位置決めの接触面

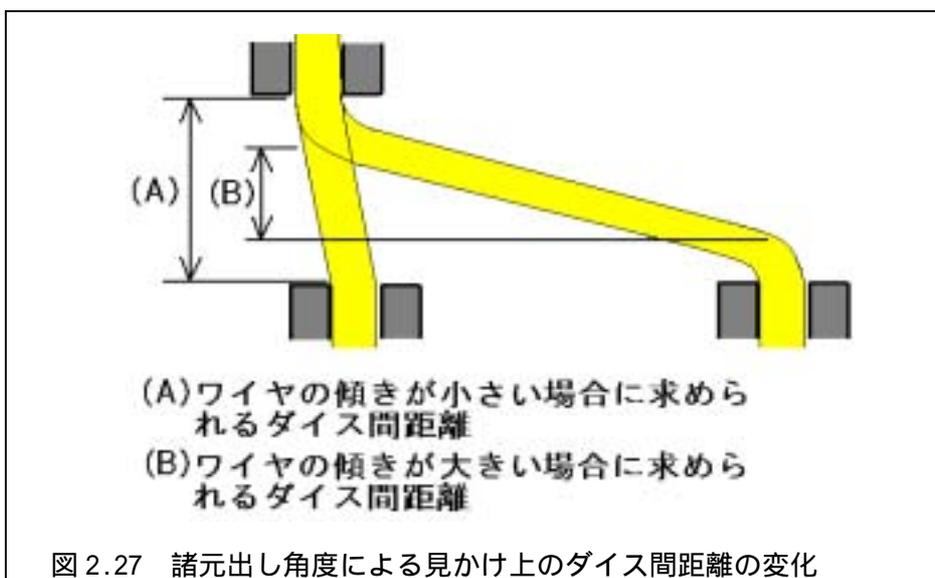


図2.27 諸元出し角度による見かけ上のダイス間距離の変化

## 2.7.6 諸元出し角度に対する上下ダイス間距離の変化

### (1) 実験目的

テーパ諸元出し角度が大きくなるにしたがって、上下ダイス間距離は短く、見かけ上のダイス間距離が求められることが、前項の実験結果から考えられた。今回の実験においては、諸元出し角度を2~20度(2度きざみ)で自動諸元出しを行い、諸元出し角度の変化に対する上下ダイス間距離の変化を求めることを目的とし、調査を行った。

### (2) 実験方法

ブロックゲージとすきまゲージを用い、テーブル面から上部ジェットノズルまでの高さを70.1mmに設定する。諸元出し角度2度~20度(2度きざみ)で自動諸元出しを行い、上下ダイス間距離を求め、諸元出し角度に対するダイス間距離の変化を求める。

実験時、Z軸は変化させず、諸元出し角度のみを変化させて自動諸元出しを行う。

### (3) 実験条件

テーブル面から上部ジェットノズルまでの距離は70.1mmに設定し、Z軸は移動させず、与えるテーパ角度のみを変化させて諸元出し作業を行う。

諸元出し角度は2度~20度(2度きざみ)で自動諸元出しを行う。

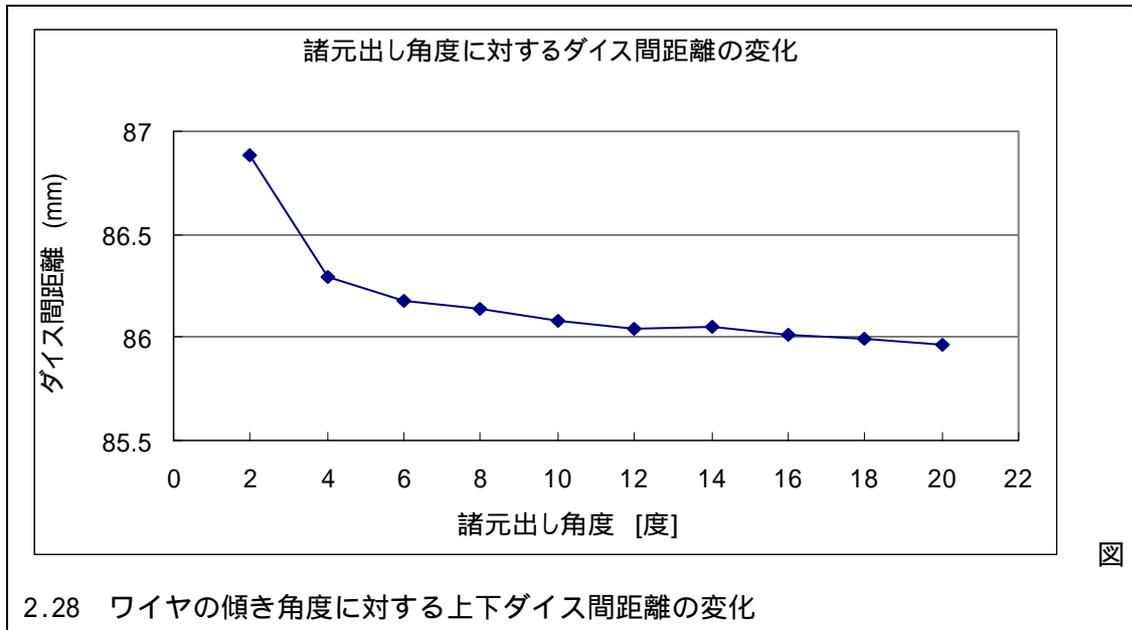
(4) 実験結果

表 2.24 は、与えたテーパ角度ごとに、求められたダイス間距離と、テーブルから下部ダイスまでの距離。求められたダイス間距離と U 軸移動量から求められた諸元出しを行った際のワイヤの傾きをまとめた。

表 2.24 ダイス間距離  $g$  下部ダイスまでの距離  $f$  諸元出し時のワイヤの傾き

与えたテーパ角度	テーブルから下部ダイスまでの距離 (mm)	上下ダイス間距離 (mm)	諸元出し角度 (度)
2 度	8.217	86.888	1.998
4 度	8.014	86.291	4.004
6 度	7.970	86.176	6.008
8 度	7.954	86.135	7.998
10 度	7.944	86.080	10.003
12 度	7.945	86.041	12.002
14 度	7.957	86.053	14.006
16 度	7.931	86.010	16.001
18 度	7.927	85.989	17.995
20 度	7.928	85.967	20.014

図 2.28 は、ワイヤの傾き角度に対する上下ダイス間距離の変化を表した。



次に、ワイヤの傾き角度に対するテーブルから下部ダイスまでの距離の変化を図 2.29 に表した。

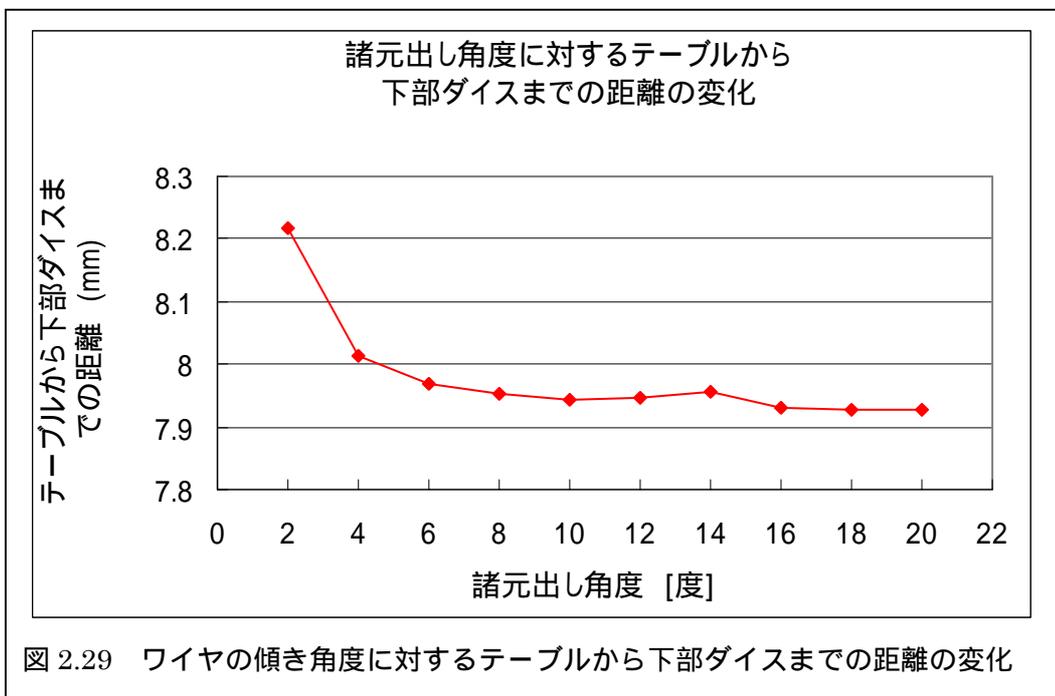


図 2.29 ワイヤの傾き角度に対するテーブルから下部ダイスまでの距離の変化

#### (5) 考察

諸元出し角度の変化によって、ダイス間距離が変化することが分かったが、角度が大きくなればなるほど、ダイス間距離、テーブルから下部ダイスまでの距離ともに短くなっていることが図 2.28、図 2.29 から分かる。この原因については、前項の実験の考察で述べたように、ワイヤの強さによる影響を受けていると考えられる。

図 2.30 のようにワイヤは、ダイスを出てすぐに目標のテーパ角度には傾かず、ダイス直前では、ほとんど垂直に近い状態から徐々に目標のテーパ各度に傾いていき直線状態となる。よって、テーパ各度が大きいほど、この長さが長くなることから結果としてダイス間距離が短く求められてしまうと考えられる。

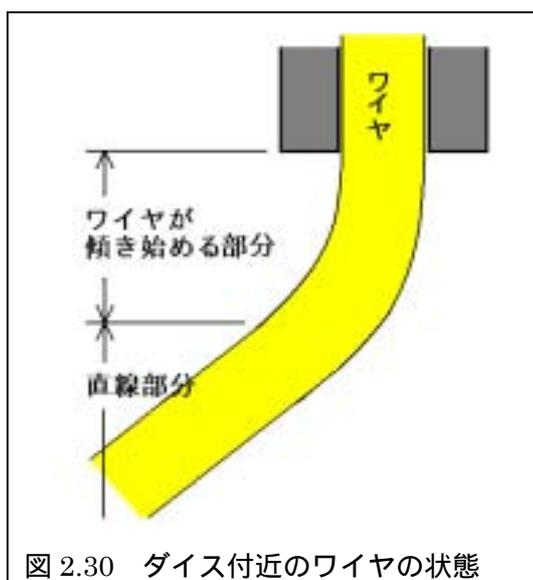


図 2.30 ダイス付近のワイヤの状態

## 2.7.7 諸元出し角度に対する上下ダイス間距離の変化とワイヤの傾き角度誤差

### (1) 実験目的

諸元出しの段階において、テーパ角度が大きくなるに連れて上下ダイス間距離が短く求められてしまうことがこれまでの実験で明らかとなったが、見かけ上のダイス間距離の変化が、ワイヤの傾き角度に対してどのような影響を及ぼすのか、調査を行う。

### (2) 実験方法

まず、テーブルから上部ジェットノズルまでの高さをブロックゲージとすきまゲージを用い、70.1mm に設定する。

諸元出し角度は、5、10、15、20 度で諸元出しを行い、その後、与えた角度ごとに求められた上下ダイス間距離を用いて U 軸移動量を求め 5、10、15、20 度にワイヤを傾け、ワイヤ自体の傾き角度の測定を行う。

### (3) 実験条件

テーブルから 70.1mm の高さに上部ジェットノズルを設定し、その後は、同じダイス間距離で諸元出しを行わせるため、Z 軸を移動させずに実験を行う。

### (4) 実験結果

以下に諸元出しを行った結果を示す。

テーブルから下部ダイスまでの距離を  $f$ 、上下ダイス間距離を  $g$  として表す。

- ・ 5 度 (5.000 度) で諸元出しを行った結果  $f=8.173\text{mm}$   $g=86.684\text{mm}$
- ・ 10 度 (9.996 度) で諸元出しを行った結果  $f=7.950\text{mm}$   $g=86.148\text{mm}$
- ・ 15 度 (15.004 度) で諸元出しを行った結果  $f=7.962\text{mm}$   $g=86.106\text{mm}$
- ・ 20 度 (20.005 度) で諸元出しを行った結果  $f=7.951\text{mm}$   $g=86.054\text{mm}$

表 2.26 に、諸元出しで与えたテーパ角度に対するテーパ角度誤差の測定結果を示した。

表 2.26 諸元出しで与えたテーパ角度に対するテーパ角度誤差の変化

ワイヤの傾き角度 誤差 (度)		[諸元出し角度]			
		[5 度]	[10 度]	[15 度]	[20 度]
測定 テーパ 角度	5 度	0.0136	-0.0007	-0.0017	-0.0036
	10 度	0.0745	0.0192	0.0183	0.0118
	15 度	0.1297	0.0367	0.0268	0.0201
	20 度	0.1535	0.0594	0.0469	0.0340

表 2.26 の結果をグラフに表したものを図 2.31 に表した。

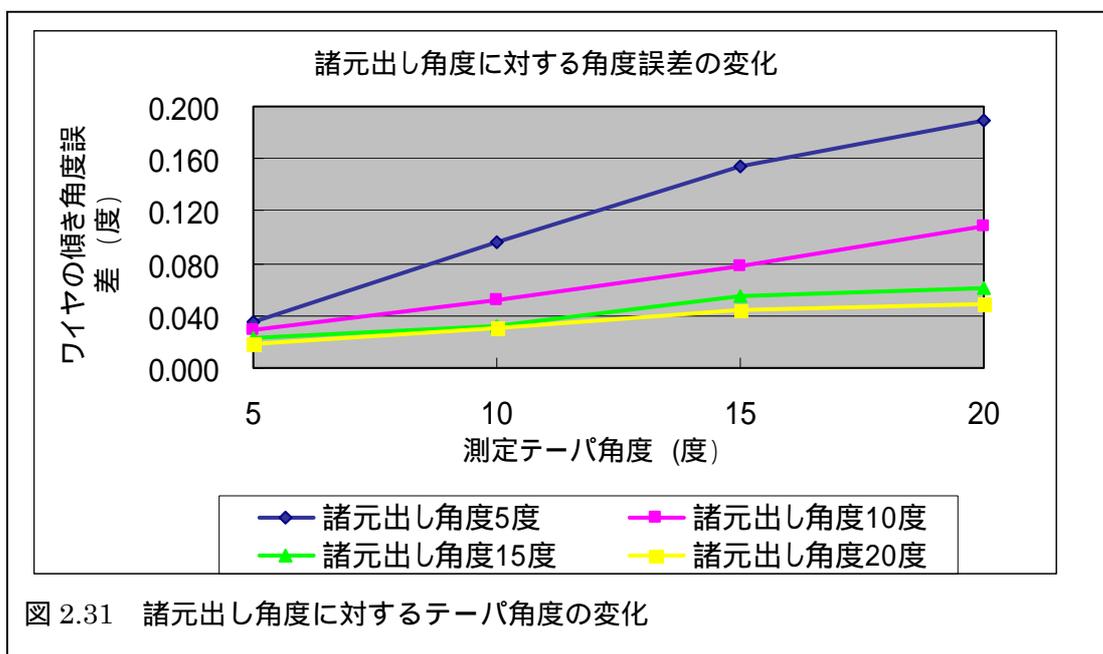


図 2.31 諸元出し角度に対するテーパ角度の変化

### (5) 考察

図 2.31 を見て分かるように、諸元出し角度を大きくするに従って、全体の傾き角度誤差は小さくなっていることが分かるが、ワイヤの傾き角度が大きくなるにつれて傾き角度誤差も大きくなっていることが分かる。これは、図 2.32 のように、ワイヤの傾き角度が大きくなればなるほど、ワイヤの強さの影響を受け、実際のワイヤの傾きが理想のワイヤの傾きより大きく傾いてしまうことが考えられる。

20 度テーパで諸元出しを行った場合は、ワイヤの強さの影響を受け、ダイス間距離が短く求められていることから、U 軸移動量が少ないために、全体的に傾き角度誤差が小さくなったと考えられる。

しかしながら、ここで問題となるのは、20 度近辺 (20.005 度) で諸元出しを行ったにもかかわらず、諸元出し後に 20 度テーパにワイヤを傾けた場合、0.034 度の傾き角度誤差が見られ、前項 2.7.4 において諸元出しにおける誤差の発生割合を計算式により求めたが、この時点で誤差の要因として考えられたもの以外にも誤差の発生原因があると思われる。

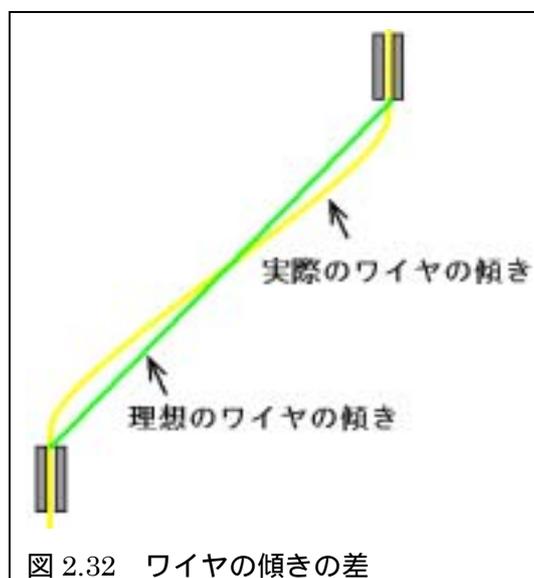


図 2.32 ワイヤの傾きの差

## 2.7.8 ワイヤの強さによるテーパ角度への影響についての検討

### (1) 実験目的

これまでの実験の結果、ワイヤの強さにより、ワイヤの傾きが大きくなるにつれて角度誤差も大きくなるという傾向が見られた。今回は、ワイヤの強さによる角度誤差とダイス直後の、ワイヤの強さを受けている部分のワイヤの状態を ANSYS5.7 を用いて解析する。

### (2) 実験方法

今回は、0.2mm、長さ 160mm のワイヤを想定し、実際に諸元出し角度 5 度、10 度、15 度、20 度で諸元出しを行った結果、得られた U 軸移動量とダイス間距離を用いて、これらを与え、ワイヤの傾き角度誤差の傾向について、ANSYS 5.7 による解析を行った。

### (3) 実験条件

実際に諸元出しを行った結果を以下に示す。

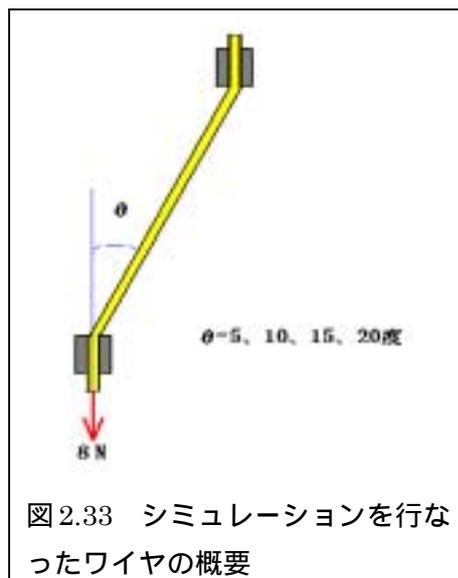
5 度で諸元出しを行った結果	上下ダイス間距離 26.536mm	U 軸移動量 2.298mm
10 度で諸元出しを行った結果	上下ダイス間距離 26.057mm	U 軸移動量 4.560mm
15 度で諸元出しを行った結果	上下ダイス間距離 25.904mm	U 軸移動量 6.906mm
20 度で諸元出しを行った結果	上下ダイス間距離 26.070mm	U 軸移動量 9.479mm

0.2mm の黄銅ワイヤ

ヤング率： $1 \times 10^5$ (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比：0.35
断面積：0.03141592654(mm <sup>2</sup> )	断面二次モーメント： $4.908738521 \times 10^{-6}$ (mm <sup>4</sup> )
ワイヤテンション：8 (N)	

Nodes 数 16000 個

図 2.33 のように各諸元出し角度で実際に諸元出しを行った結果から、求められたダイス間距離を用いて、ワイヤの傾き角度を(5 度、10 度、15 度、20 度)に傾けたときのワイヤの状態を、ANSYS5.7 を用いて解析を行った。



(4) 実験結果

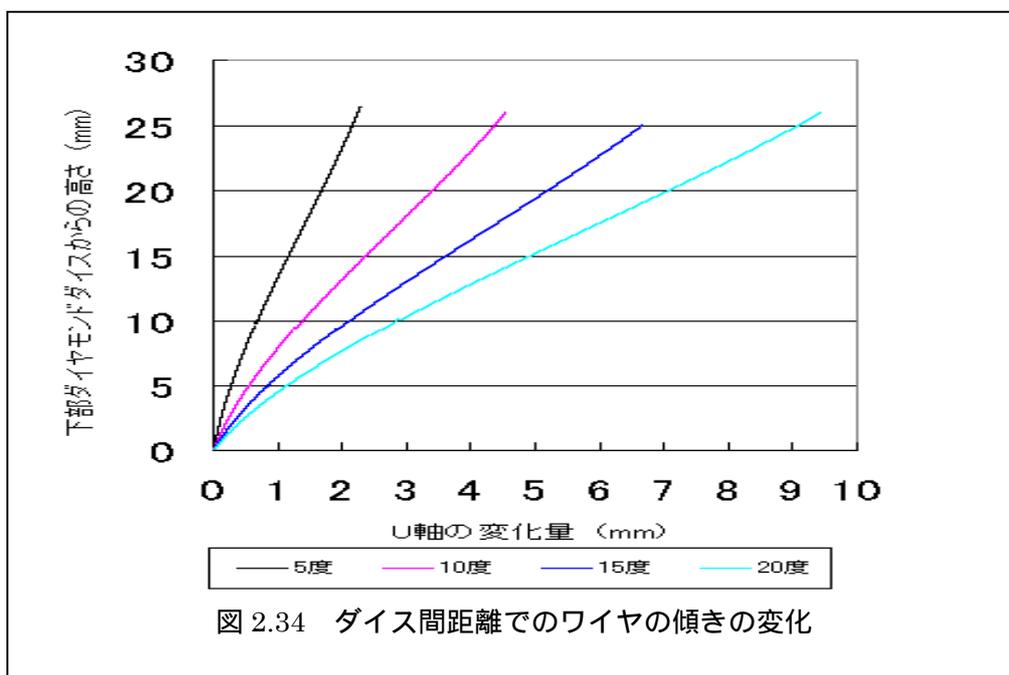


図 2.34 はダイス間距離の間での、ワイヤの傾きの変化を見たグラフである。

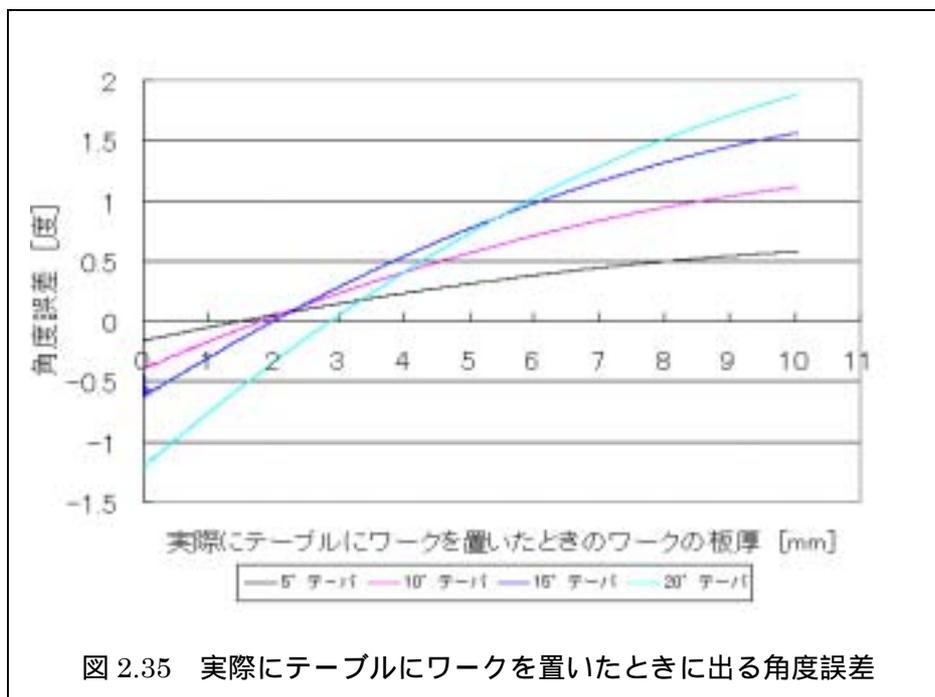


図 2.35 は図 2.34 のデータを元に、板厚 10mm のワークを加工する場合を想定し、加工範囲内のワイヤの強さがどれだけワイヤの傾きに影響するかを、グラフに表したものである。

#### (5) 考察

図 2.34 の結果を見て分かるように、ワイヤは強さの影響を受けてダイスから離れるに従い、徐々に変形量は小さくなり、直線に近づいて行くことが分かる。

ワイヤがほぼ直線となる部分は、ダイス間距離における中央付近であり、ワイヤの傾き角度 5 度の場合においては、ワイヤの強さの影響が小さくワイヤの変形量も小さかった。その他の傾き角度において、その傾き角度に対しワイヤが直線状態となる範囲としては、傾き角度 10 度では下部ダイスから 11.04mm ~ 23.28mm の約 12mm の範囲、傾き角度 15 度では下部ダイスから 12.31mm ~ 21.76mm の約 10mm の範囲、傾き角度 20 度では、13.79mm ~ 20.62mm の約 7mm の範囲であった。これより、ワイヤの傾き角度が大きくなればなるほど、ワイヤが強さの影響を受けて直線状態に近づく範囲が小さくなることが分かる。

図 2.35 は、横軸にテーブルからの高さを取り、板厚 10mm までのワークを加工する場合を想定し、ワイヤの傾き角度誤差を縦軸に表したものである。これより、板厚 1mm のワークを加工する場合と、板厚 10mm のワークを加工する場合とでは、5 度テーパでは約 0.5 度、10 度テーパでは、約 1 度、15 度テーパでは、約 1.5 度、20 度テーパでは約 2.5 度の角度誤差の傾向が見られる。つまり加工する目的のテーパ角度が広角になればなるほど、角度誤差も大きくなるという解析結果を得た。

ANSYS 5.7 の解析結果においても、ワイヤを傾ける角度が大きくなればなるほど、ワイヤの強さの影響が大きくなり、前項 2.7.7 図 2.32 のように NC の設定角度に対して実際のワイヤの傾きは大きくなるということが分かった。

## 2.7.9 ワイヤの傾き角度に対する加工誤差

### (1) 実験目的

従来のテーパ加工においては、NC の設定角度により、ワイヤに傾きを与えて加工を行っており、加工後にワークのテーパ加工面の角度を測定し、比較したとしても、これは NC 設定角度と加工結果との比較であり、実際のワイヤの傾き角度が分からないために加工誤差を求めたことにはならない。よって、本実験においては加工誤差を求めるため、ワイヤの傾きを求めた後で加工を行い、加工誤差を求めることを目的とし、実験を行った。

### (2) 実験方法

まず、Z 軸を板厚 10mm のワークを加工できる状態に位置決めを行う。今回の実験で Z 軸の位置決め後のダイス間距離は、26.728mm であった。

次に、上下ダイス間距離から目標のテーパ角度に傾けるために U 軸移動量を求め、ワイヤを傾けるが、その後ワイヤの傾き角度を測定し、U 軸移動量を調整してワイヤの傾き角度を目標テーパに近づける。(ワイヤの傾き角度の測定方法は、前記 2.6.2 の図 2.8 のとおりに行い、測定刃の高さを変えるブロックゲージには、5mm のものを使用した。測定は 10 回行い平均値からワイヤの傾きを求めた。)

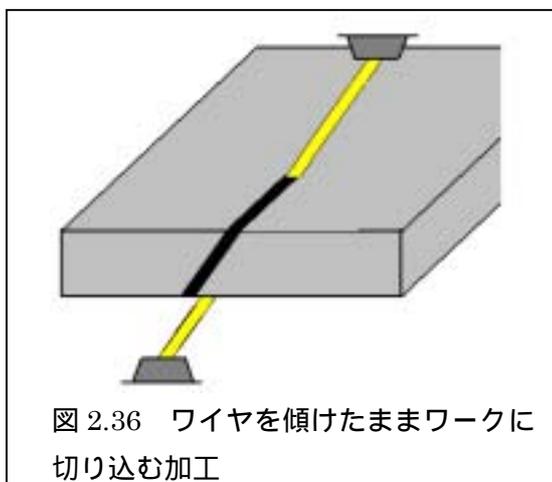


図 2.36 ワイヤを傾けたままワークに切り込む加工

ワイヤの傾き角度を測定後図 2.36 のように、ワイヤを傾けたままワークに切り込む加工を行い、加工後のワークのテーパ加工面の角度を測定し、ワイヤの傾き角度に対する加工誤差を求めた。(ワークのテーパ面の測定は、前記 3.6.1 図 3.6 のとおりに行い、測定顕微鏡の Y 軸方向の移動量は 5mm とし、測定は 10 回行い平均値からテーパ面の角度を求めた)

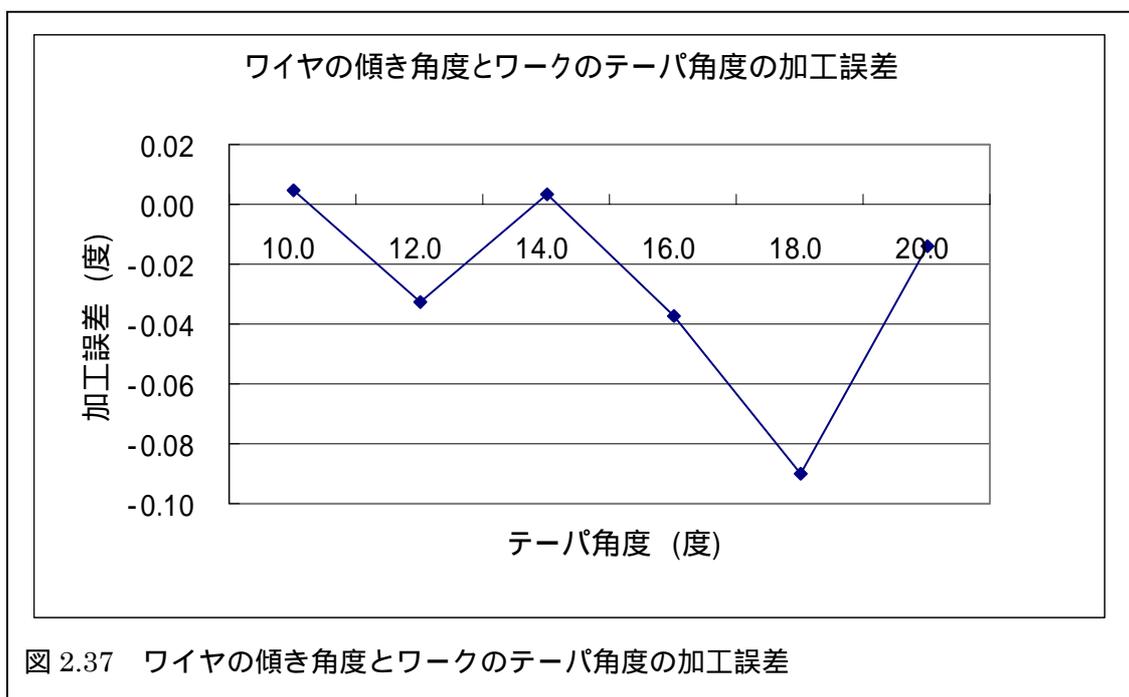
### (3) 実験結果

ワイヤの傾き角度と加工誤差の結果を表 2.27 に表す。

表 2.27 ワイヤの傾き角度と加工誤差

ワイヤの傾き角度 測定結果 (度)	10.000	11.993	14.000	15.998	18.003	20.008
加工後のテーパ面の角度 測定結果 (度)	10.004	11.960	14.003	15.961	17.913	19.993
加工誤差 (度)	0.004	-0.033	0.003	-0.037	-0.090	-0.014

表 2.27 の結果をグラフに表したものを図 2.37 に表す



#### (4)考察

図 2.37 の結果から、ワイヤの傾き角度とワークのテーパ角度の加工誤差は 18 度を除けば、0.004 度から-0.04 度の範囲で多少のばらつきは見られるものの、加工誤差の値は小さいと言える。ワイヤの傾き角度 18 度に関しては突発的に誤差が大きく出てしまったものと考えられるが、全体的に見てみると加工誤差はマイナステーパ角度ででてしまうものの加工誤差は小さく、加工誤差よりもワイヤの傾き角度誤差を小さく押さえることの方が重要であるといえる。

今回の実験より、ワイヤの傾き角度を正確に傾ける方法を見つけ出すことができれば、テーパ加工精度の向上は十分に考えられることが分かった。

## 2.8 諸元出しについての検討

諸元出し方法については、2.5.2 諸元出し方法で説明した。これまでの実験の結果から、ワイヤを正確に傾けることと、ワイヤの傾き角度を正確に測定することが重要であると考えられたが、ワイヤの傾きを求める方法を検討中に、諸元出し方法の重要な問題点が浮かび上がってきた。よって本節では、諸元出し方法の問題点と、ワイヤの傾き設定方法について検討した。

### 2.8.1 諸元出し方法を用いたワイヤの傾き角度の測定方法の検討

従来の諸元出し手順を用いてワイヤの傾き角度を求める方法について検討した。図 2.38 は、諸元出し時に必要な値と測定値を分かりやすく、図で表したものである。

従来の諸元出し方法では、諸元出し後に求められた上下ダイス間距離と、諸元出し中に移動したU軸移動量を用いて諸元出し角度の割り出しを行っていたが、ワイヤの強さによって、諸元出し角度が変わると上下ダイス間距離も変化してしまうことや、変形したワイヤの部分を含めた状態で諸元出しを行っていることから、諸元出し時のワイヤの傾き角度の割り出しが、正確に行うことができないのではと考え、諸元出し段階で求められる値、 $d$ 、 $c$ に注目し図 2.39 の灰色で表された三角形を用いて、ワイヤの傾き角度を求める方法を提案した。この測定方法においては、ワイヤの強さの影響を受けない箇所でワイヤの傾き角度を求めるため、ワイヤの傾き角度が正確に求めることができるのではないかと考えたのである。ワイヤの傾き角度を求めるための式を以下に示す。

$$\text{ワイヤの傾き角度} = \tan^{-1}\left(\frac{d-c}{b-a}\right)$$

この方法を用いて、ワイヤの傾き角度を求めることができるのではないかとと思われる。

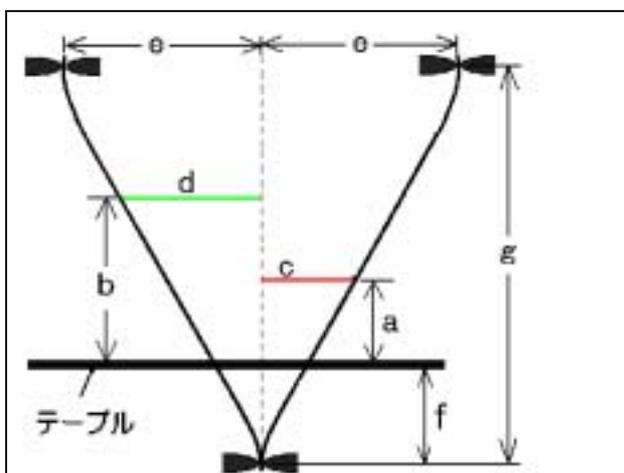


図 2.38 諸元出し方法

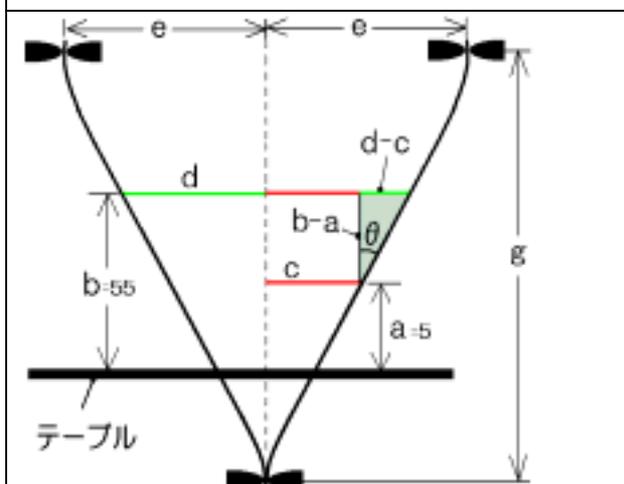


図 2.39 ワイヤの傾き測定方法

しかしながら、諸元出し方法や、提案されたワイヤの傾き角度測定方法においても、図 2.40 のように、赤色で表された三角形 C と緑色で表された三角形 D とが相似であることが条件となるが、ワイヤが径を持たない線であると考えた場合は、ワイヤの左右の傾き角度が等しければ三角形 C,D は相似であることがいえる。

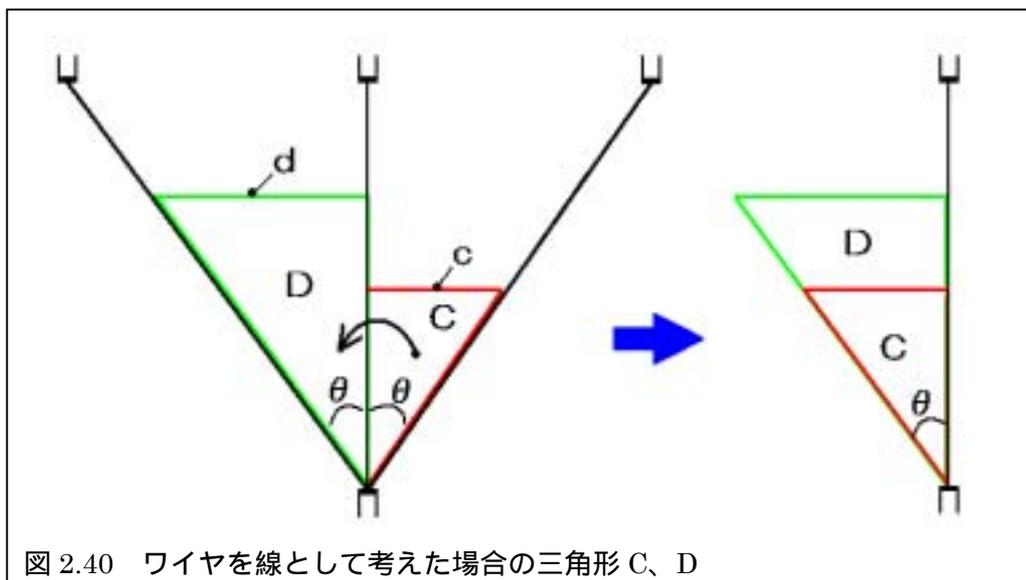


図 2.40 ワイヤを線として考えた場合の三角形 C、D

図 2.40 においては、ワイヤを線として考えた場合であるが、図 2.41 は、実際のワイヤのように径を与え、同じように三角形の相似を考えてみた。その結果、青丸で囲まれた部分を見て分かるように三角形 C がわずかに小さく、二つの三角形が相似でないことが分かる。

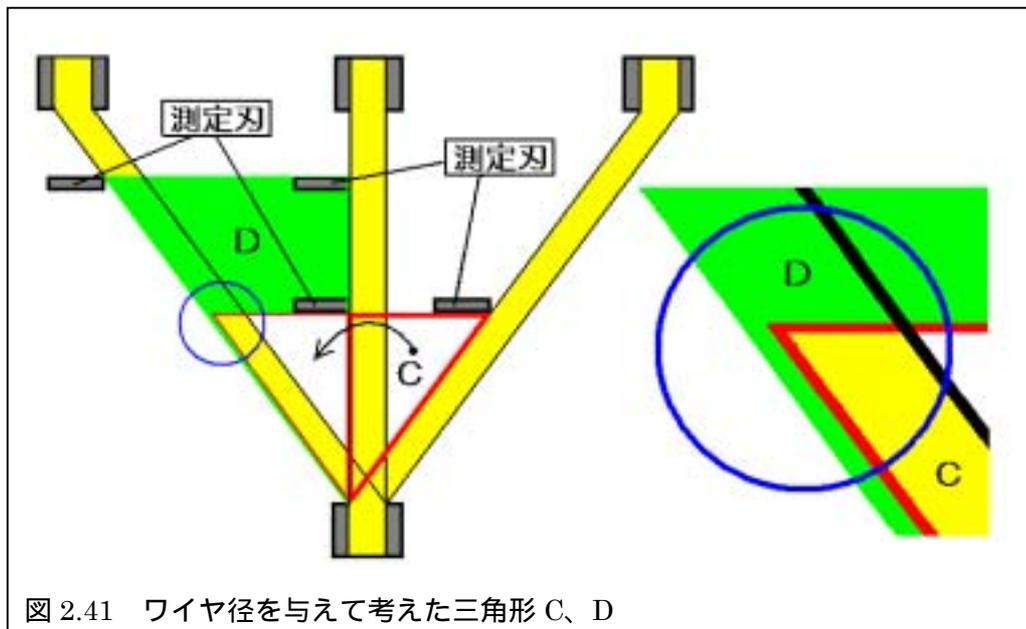


図 2.41 ワイヤ径を与えて考えた三角形 C、D

図 2.41 において三角形 C と三角形 D を重ね合わせた結果、三角形 C がわずかに小さく、二つの三角形は相似と異なることが分かった。これは図 2.42 に示す、青い矢印部分の長さは同じであるのに対して、ワイヤの幅を示す黒い矢印部分は、図 2.43 に現したように、垂直状態のワイヤ幅と、傾いた場合のワイヤ幅に差が生じることが原因である。

また、ワイヤ幅の差を K と表した場合、今回使用したワイヤの直径が 0.2mm であるため、K は以下の式で表される。

$$K = 0.2 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$$

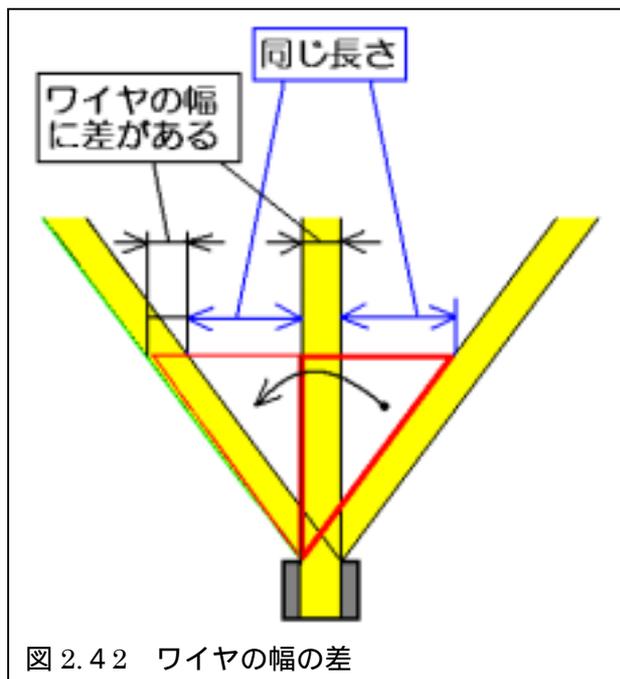


図 2.42 ワイヤの幅の差

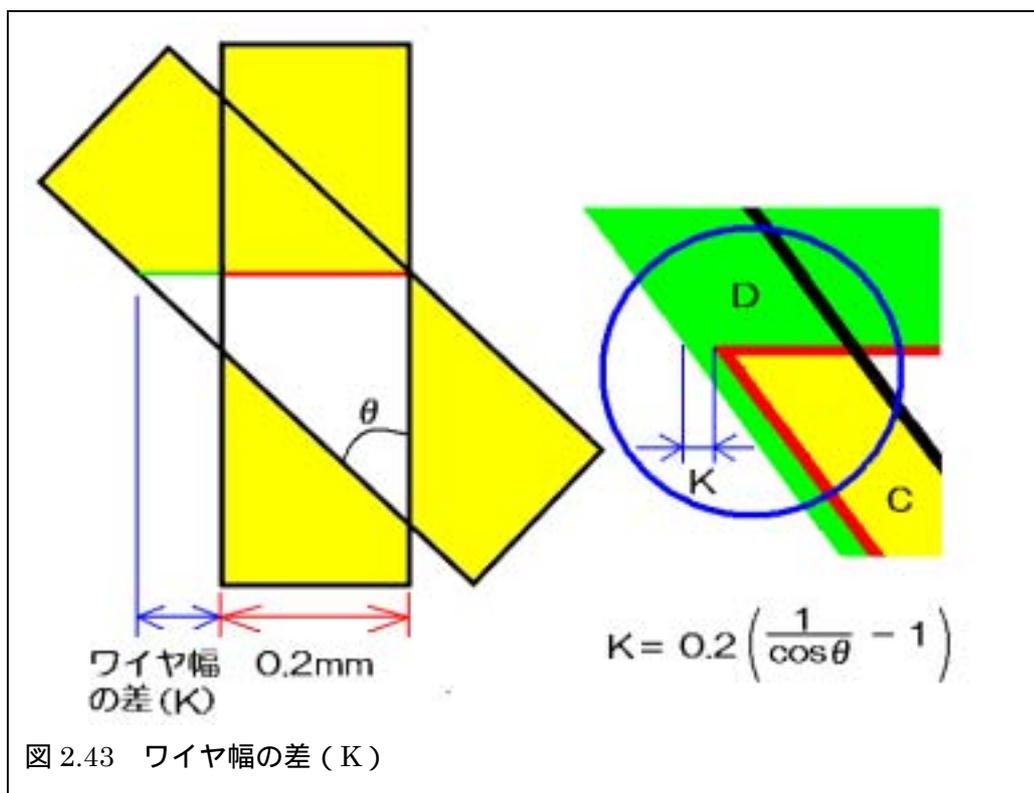


図 2.43 ワイヤ幅の差 (K)

諸元出し段階において、垂直状態でのワイヤ幅とワイヤを傾けた場合のワイヤ幅との差が生じることが分かったが、ワイヤの傾きが大きくなればなるほどワイヤ幅の差  $K$  も大きくなること分かる。よって、諸元出し角度の変化に対するワイヤ幅の差の変化を図 2.44 に表し、そのワイヤ幅の差から生じる角度誤差を求めたものを図 2.45 に表した。

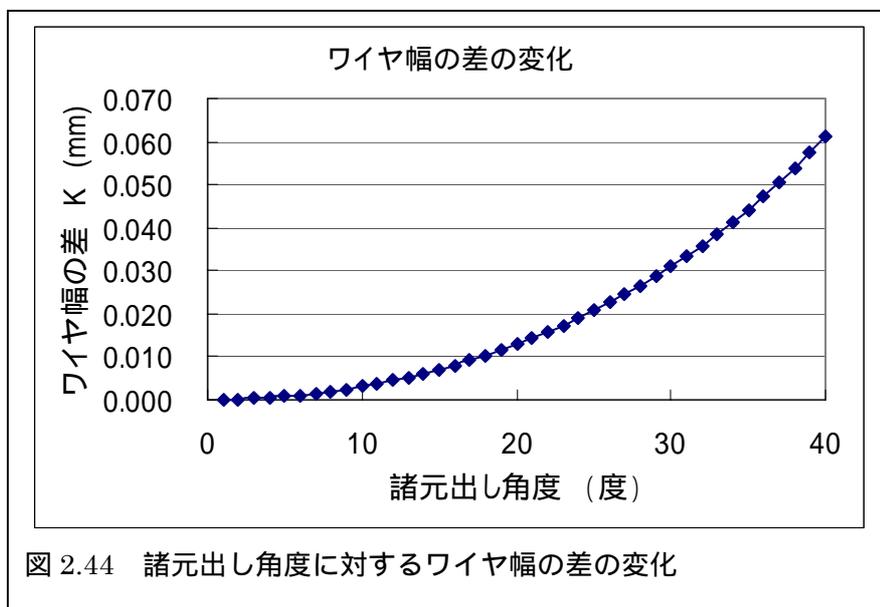


図 2.44 諸元出し角度に対するワイヤ幅の差の変化

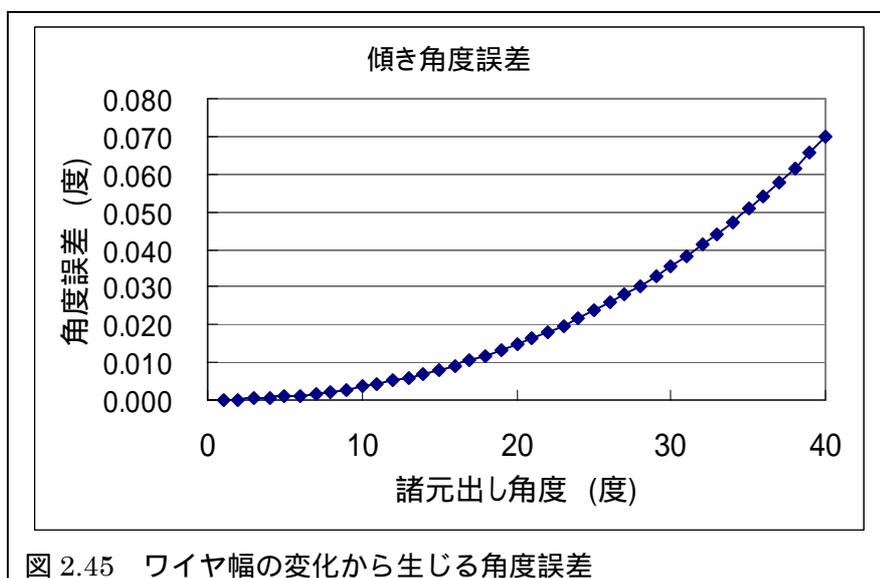


図 2.45 ワイヤ幅の変化から生じる角度誤差

図 2.44 より、諸元出し角度が小さい場合は、ワイヤ幅の差も小さいが、ワイヤの傾きが 40 度の場合においては 0.06108mm と非常に大きな値となることが分かった。また、角度誤差においても同じく 40 度の場合には 0.06999 度の角度誤差となってしまうことが明らかとなった。従来の諸元出し方法においては諸元出し角度が大きくなればなるほど、求められる角度自体に誤差を含むことになるため、結果として従来の諸元出し方法のまま広角テーパでの諸元出しを行うことはできないことが分かる。また、始めに提案された従来の諸

元出し操作を用いたワイヤの傾きを求める方法においても、同じく求められる角度に誤差を含むことから、ワイヤの傾き角度の測定に適用することはできないことが分かる。

また、このような誤差を発生させないためには、やはりワイヤを左右に傾けず一方のみ傾けた状態で傾き角度を測定しなければならないことが分かる。

## 2.8.2 新しい垂直度計形状とワイヤの傾き角度測定方法の提案

従来の諸元出し方法においては、求められる諸元出し角度に誤差を含み、広角テーパ加工を行う際には適用できないことが分かった。

ワイヤの傾き角度の測定に関して、ワイヤ幅の差を補正することで、従来の諸元出し方法を用いることも考えられるが、やはりワイヤの傾き方向を左右のいずれかに限定して、傾きの測定を行わせる方がより正確に求めることができると思われる。

しかしながら、従来の垂直度計では、ワイヤを一方に傾けた状態だけで傾きを測定することができないため、今回新しい垂直度計の形状を提案した。

新しい垂直度計の形状を図 2.46 に示す。従来の垂直度計は上下の測定刃の長さが同じであったが、提案した垂直度計は上下の測定刃の長さが違っており、下側の測定刃が、上側よりも長くなっている。測定刃の長さが違っているが、通常通りワイヤの垂直だしを行うことができる。

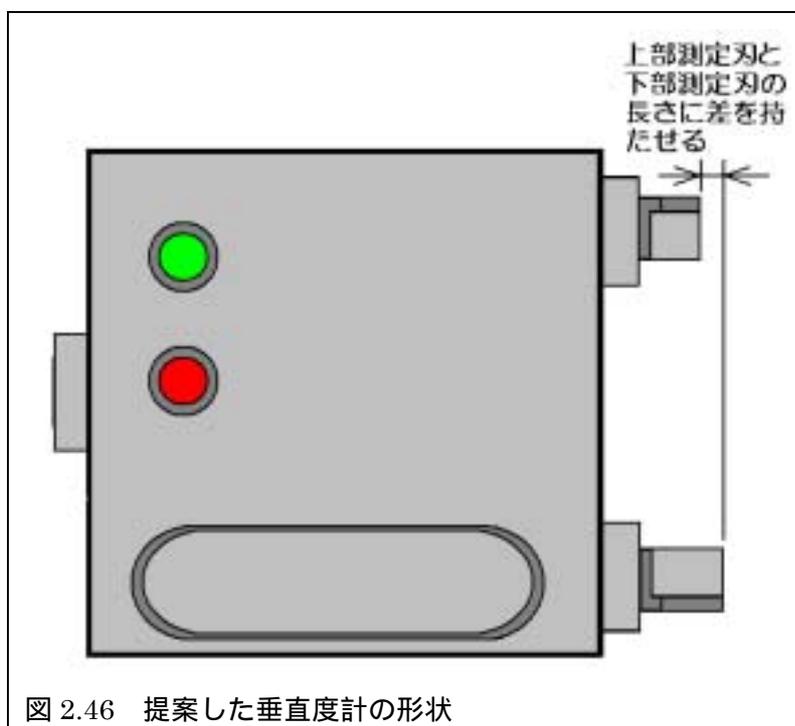


図 2.46 提案した垂直度計の形状

また、提案した垂直度計を用いれば、ワイヤを一方向のみに傾けた状態で、ワイヤの傾き測定を行うことができる。傾き測定方法を図 2.47 に示す。

まず、垂直度計を従来の垂直だし時と同じように加工テーブル上にセットし、ワイヤに傾きを与え、初めに上部測定刃に対して端面位置決めを行いその時の X 軸座標をゼロとする。次に、下部測定刃のみにワイヤが接触できる範囲内まで Y 軸方向にワイヤの位置をずらす。続いて下部測定刃で端面位置決めを行うことによって、X 軸座標の移動量を求める。上下の測定刃間隔は、従来と同じく 50mm とした場合、ワイヤの傾き角度は、次の式によって求めることができる。

$$\text{ワイヤの傾き角度} = \tan^{-1}\left(\frac{\text{X軸の移動量}}{50}\right)$$

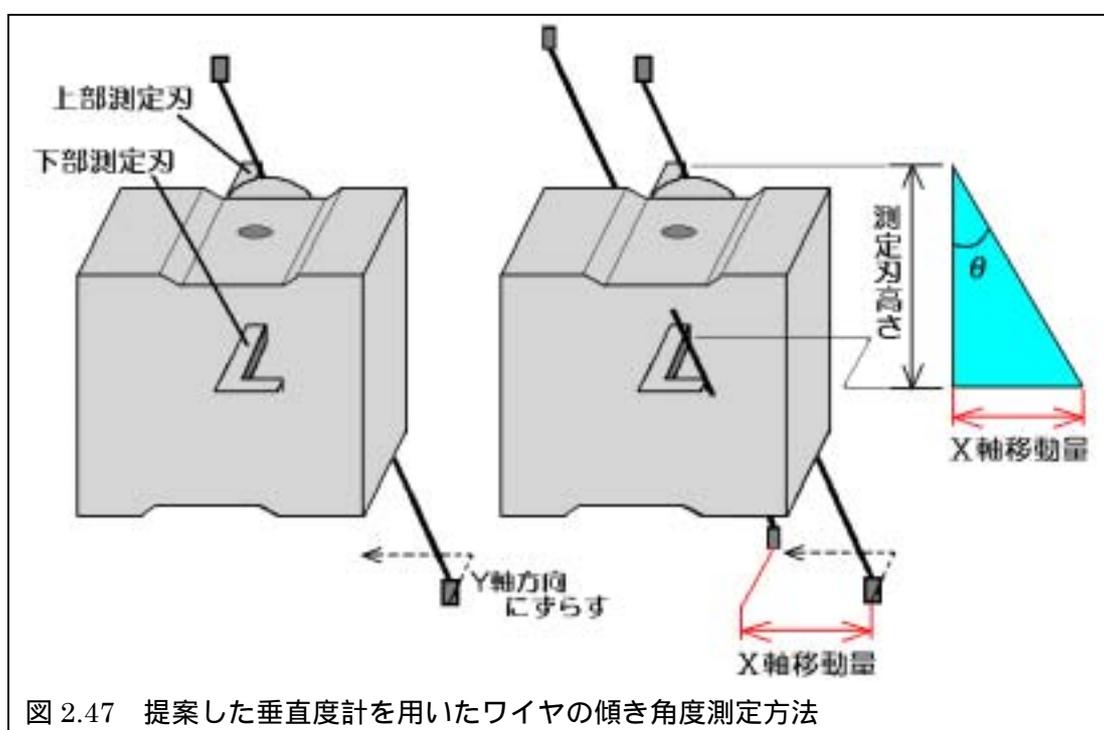


図 2.47 提案した垂直度計を用いたワイヤの傾き角度測定方法

ワイヤの傾き角度の測定方法について説明したが、傾き角度を求めた後、U 軸移動量を調整し再度傾き角度の測定を行う自動プログラムを加工機の NC に設定すれば、目標テーパ角度に近づくまで、繰り返し測定を行わせることも可能と思われる。

また、ワイヤの傾き角度が求めれば、その時の U 軸移動量から上下ダイス間距離を求めることも可能である。

今回、提案した垂直度計とワイヤの傾き角度測定方法を用いれば、ワイヤの傾き角度を正確に求めることができ、更に広角テーパにおいてもこの方式を適用することは可能であるため、テーパカット加工精度を向上させることは十分に期待できる。

## 2.9 結言

これまで、加工実験の他、解析ソフトや数式等を用いてテーパカット加工の誤差について研究を行ってきた。ワイヤの傾き角度自体に影響を及ぼす要因は、ワイヤの強さであることが結果として言え、前記図 2.32 に表されたように NC で計算された理想のワイヤの傾きよりも実際のワイヤの傾きはワイヤの強さによって傾きが大きくなることが分かった。

ANSYS5.7 を用いた解析でワイヤの強さの影響を見た場合、下部ダイス付近のワイヤの傾きの変化は、15 度テーパ以降においてダイスから約 12mm 以上の付近でようやくストレートな状態となる部分を得られる結果となっており、ワイヤの強さによる影響は、大きい事が分かる。

また、諸元出し段階における測定誤差が、ダイス間距離に及ぼす影響を計算式で求めた結果、諸元出し角度を 2 度と 14 度で設定し比較した場合、14 度の場合の方が、2 度の場合に比べ、発生する誤差の割合を小さく抑えることができるという結果を得た。この結果を調査するため、実際の諸元出しを 2 度と 14 度で行ったが、計算結果と同じく、諸元出し角度 14 度で行った場合の方が、求められたダイス間距離のばらつきは小さいことが分かった。しかしながら、このばらつきの差の原因は、測定刃とワイヤの接触面が、2 度の場合と 14 度の場合では、わずかに 14 度の方が狭い接触面積で位置決めを行うことができていたのに対して、2 度の場合には接触面積が広いために測定位置にばらつきが生じたためだと思われる。

テーパ加工の誤差は、NC の計算結果で U 軸移動量を求め、ワイヤを傾けていたために実際のワイヤの傾きが、何度に傾いていたのかが分からず、入力テーパ角度と加工結果との差を誤差としていたが、ワイヤの傾き角度が分かっていたならば、加工されたワークのテーパ角度測定を行うことで、実際の加工誤差を見つけ出すことができる。2.7.9 の実験においての結果からすると、ワイヤの傾き角度を正確に傾けることができれば、テーパ加工誤差は小さくすることが可能である。

前記図 2.42、図 2.43 で従来の諸元出し方法では問題が発生することが分かった。また誤差の発生量は前記図 2.44、図 2.45 により理論上、諸元出し角度が大きくなるにつれて、ワイヤを傾けることによって発生するワイヤの幅の差、それによって発生する角度誤差も大きく発生してしまう。したがって、前記図 2.46 のような垂直度計を提案した。この垂直度計を使用することにより、ワイヤの傾き角度をマイナス方向だけに限定し、従来の諸元出し方法よりも正確な諸元出しが可能となり、またワイヤの傾き角度も正確に求めることが可能であると予想される。

## 第3章 結論

本研究は、ワイヤカット放電加工機における加工精度向のうち、テーパ加工精度について研究を行い、従来加工法の調査や、原因追究のための調査実験などを行ったのち、計算式を用いた誤差の割り出しや、解析ソフトを用いて加工状態をシミュレーションするなど、さまざまな視点から調査を行い結果として、以下に示す結論を得た。

### 第2章 テーパカット加工の加工精度向上

1. 角度が大きくなるにつれて角度誤差も大きくなるという結果を得た。また、角度が大きくなるにつれて、加工電圧の変動が激しく、短絡現象も見られる。
2. 計算式において、諸元出し角度が大きいほど、ダイス間距離に影響を及ぼす誤差の影の割合を抑えることができる。
3. 実際の諸元出し角度を2度と14度で設定し、求められるダイス間距離を比べてみると、14度のほうが2度に比べてばらつきが小さい。
5. 諸元出し角度が大きくなるとワイヤの強さの影響が大きくなり、ダイス間距離が短く求まってしまうという結果を得た。
6. 諸元出しをする角度が大きくなれば、全体のワイヤの傾き角度誤差は、小さく抑えられるという結果を得た。
7. 解析ソフトの結果から、ワイヤの傾き角度が大きくなれば、ワイヤの強さの影響も大きくなり、角度誤差の範囲も広がってしまう。
8. 従来の諸元出し方法に問題があり、新しい垂直度計と形状とワイヤの傾き角度測定の提案をした。

以上、本研究は、ワイヤカット放電加工の加工精度に影響を及ぼす誤差の原因追究と、その改善策について検討するなど、いっそうの加工精度向上を目指して取り組んだものである。

## 参考文献

斎藤長男 小林和彦 仙北谷英次

「ワイヤカット放電加工技術」 (1971)

三菱電機(株) / 斎藤長男

「放電加工のしくみと100%活用法」 (1979)

眞鍋明 葉石雄一郎

「ワイヤカット放電加工」(1997)

CAD/CAE 研究会

「ANSYS 工学解析入門」(2001)