

修士論文

PVC パイプ切断工具による切断加工時の刃物と材料間の
摩擦力低減に関する研究

指導教員 牧 清二郎 教授

平成 24 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程機械工学専攻

青木 誠

目次

第1章	緒言	1
第2章	押切による切断	2
2.1	理論的な切断荷重の算出.....	2
2.2	実験装置.....	12
2.3	実験結果及び考察.....	13
第3章	刃物と材料間の摩擦.....	14
3.1	表面粗さ測定.....	14
3.2	摩擦係数測定.....	18
3.2.1	実験装置.....	18
3.2.2	測定項目の定義.....	19
3.3	研磨角度と摩擦係数の関係.....	20
3.4	刃物の取り付け向きと摩擦係数の関係.....	22
3.5	表面性状と摩擦状態.....	30
第4章	実機を用いた切断.....	37
4.1	実験装置.....	38
4.1.1	パイプ切断用工具.....	40
4.1.2	試験片.....	41
4.2	刃物表面の研磨方向と切断荷重の関係.....	43
4.3	パイプの回転と切断荷重の関係.....	44
4.4	理想的な刃物表面.....	48
第5章	結言	49
	参考文献	
	謝辞	

第1章 緒言

現在、塩化ビニル樹脂(PVC)は土木・建築分野を始め様々な分野に広く利用されており、その中でも PVC パイプは水道管などに非常に多く用いられている。その切断には直径に応じた形状の工具が用いられているが、比較的小径の PVC パイプの切断にはくさび形状の刃物を押し込む方式の手持ち式工具が主流となっている。この工具はパイプを任意の長さに容易に切断でき、滑らかな切断面が得られるという利点がある一方、切断時に比較的強い握力が必要という問題点がある。

ここで、くさび形状刃物を用いた押し切りによる PVC パイプの切断加工に関する過去の研究¹⁾において刃先丸みや刃先角、刃厚などの刃物形状と切断荷重の関係が調査されており、刃先丸み、刃先角を小さくすると切断荷重が低減することが分かっている。しかし、これを小さくすると刃物の強度が低下し刃先の欠けなどにつながってしまう。実際の製品への適用を考慮するとそのような形状変更は許されない。また、理論的考察および切断実験より刃物と材料間の摩擦力が切断荷重において大きな割合を占めることが分かった^{2), 3)}。摩擦力の低減には、潤滑剤の適用が考えられるが、清潔さが求められる場合使用できない。まためっきや焼き入れなどの表面処理によるトライボロジー特性の改善も考えられるが、本研究では比較的容易にトライボロジー特性を改善させる方法として、刃物表面の研磨に着目する。また、表面の凹凸形状の定量的な評価は、トライボロジーの幅広い問題を解決するうえできわめて重要である。

そこで、パイプと刃物表面の摩擦係数を測定する装置を製作し、摩擦実験を行い刃物と材料間の摩擦係数の関係を調べ、粗さ曲線の幾何学的な表面性状から凹凸を特徴づける値を導出し評価した。また、摩擦実験をもとに試作した刃物を用いた切断実験により切断荷重を測定し評価した。

第2章 押切による切断

まず、PVCパイプの切断加工現象を簡略化し、刃物と材料の幾何学的関係から工具形状が切断荷重に及ぼす影響を理論的に求める。

2.1 理論的な切断荷重の算出

次のようないくつかの仮定をおき、くさび形状の刃物を用いた塩ビパイプの切断加工現象を単純化して理論的な計算を行うことにした。

- i. 工具刃物硬度は熱処理によって十分固く、その表面は研磨によって仕上げられている。ただし、刃物と刃付け部は研磨工程が異なるため、表面状態は異なるもののそれぞれの部位では一様に均一である。
- ii. 切断中は摩耗などによって刃先丸みは変化しない。
- iii. 被加工物の組成は均質であり、工具刃面と被加工物の間に作用する固体摩擦状態はアモン・クーロンの法則に従う。
- iv. 摩擦により発生する熱は非常に微小と考え無視する。よって、熱による材質や機械的性質の変化はない。
- v. 刃物は垂直方向にのみ移動し押し切りのみをおこなう。
- vi. 大刃部より上方の平行な部位で刃物と被加工物とは接触しない。
- vii. 刃物前方で亀裂は発生しない。
- viii. 切断実験において切断速度は 5mm/s と低速であるため、計算に使用する工具および被加工物の機械的性質は静的な試験にて得られている値を採用する。

切断荷重を F_{total} とし、 F_{total} は次に述べる 3 種類の力の総和として考える。

$$F_{total} = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

ここで F_1 , F_2 , F_3 はそれぞれ、 F_1 : 大刃部に作用する摩擦力、 F_2 : 刃先丸みに作用する力、 F_3 : 小刃部(刃付け部)に作用する力とする。

切断中における切断荷重の推移は、工具切れ刃と材料の接触長さ L に大きな影響を受けるため、上記の F_1 から F_3 の値の全てが L に影響を受けると考えた。なお、計算時における y 座標はパイプの中心を $y=0$ とする。計算時に用いた標準的なパラメータを表 2.1.1 に示す。

Table 2.1.1 Geometries of cutting tool⁴⁾

Blade angle θ_1	10°
Edge angle θ_2	30°
Blade width BW	2.85 mm
Supporting distance l	22 mm
Tool tip radius R	4 μm
Coefficient of friction on blade μ_1	0.2
Coefficient of friction on edge μ_2	0.25
Tensile strength of the pipe σ	55 MPa

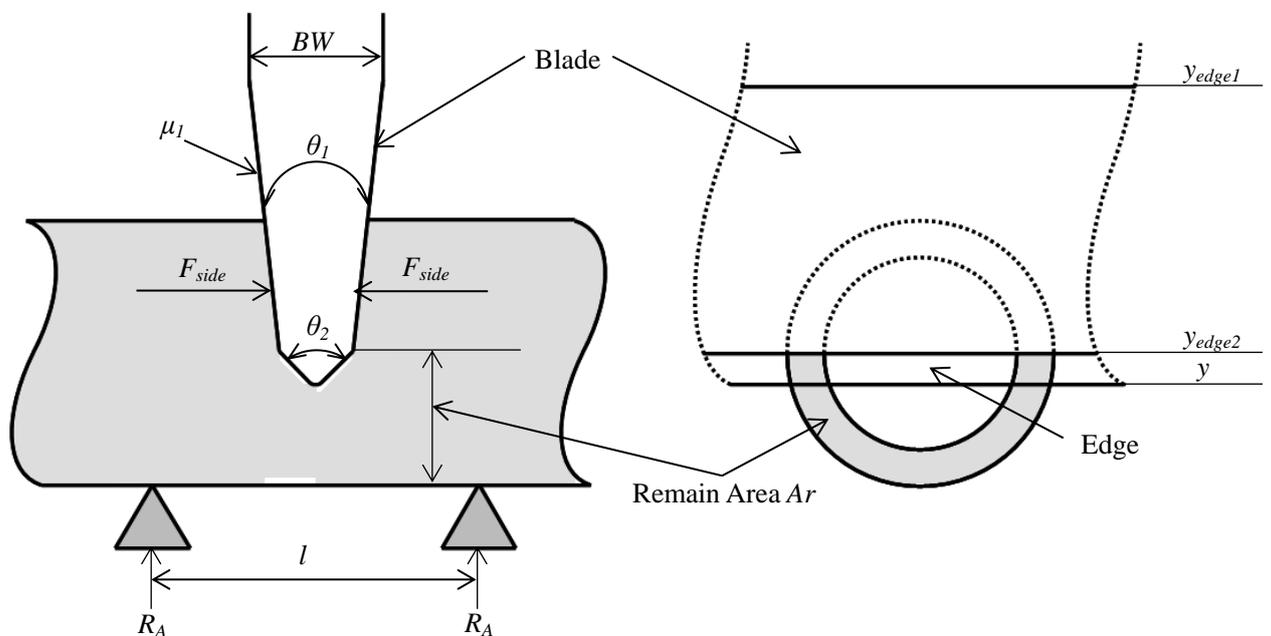


Fig.2.1.1 Schematic illustration of cross section of the tool

実験時に使用した刃物は作業工程の都合で大刃と小刃で異なる研磨方向になっており、大刃部では切れ刃部に対して垂直方向に研磨痕が残るのに対し、小刃部ではおおよそ45度の方向に研磨されているため、計算においても、表中に示すように異なる摩擦係数を採用した。

まず、工具を挟み込む力によって発生する鉛直方向の摩擦力 F_f と釣り合うような反力 R_A を求めるために、図 2.1.1 に示すような状態を考える。刃先の最先端の座標を y とし、大刃の開始高さを y_{edge1} とし、大刃部と小刃部との交点の y 座標を y_{edge2} とする。工具側面に作用する水平方向の力 F_{side} は、未切断部に θ_2 の角度をもつ小刃部の接触面積を加えた面積 A_R に材料の引張り強さ σ を掛けたものと釣り合っていると考える。

$$F_{side} = \sigma A_R \quad (2)$$

しかし、切断が進むとパイプにくさび状の工具が入り込むため、実際には図 2.1.2 に示すように切断面が刃物で押し広げられる。そのために回転運動が生じるが、支持部によって拘束される。この回転運動によって生じる力はパイプに作用する曲げ応力のように捉えることができ、その大きさはパイプの曲げ剛性(ED)に影響を受けると考えられる。

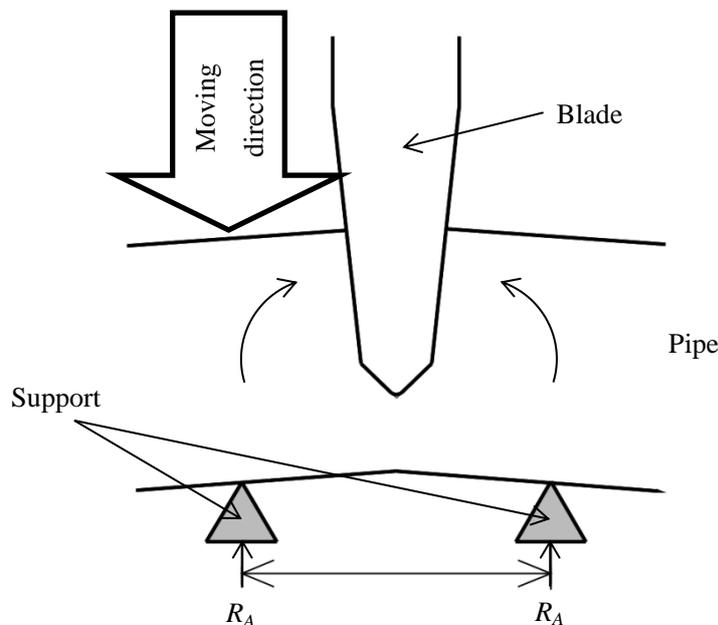


Fig.2.1.2 Schematic illustration of pipe deformation

そこで、 Y_G を求めるときに対象とする断面形状は、大刃の一部がまだ材料の外にある場合は、円環状であるパイプの断面全体とし、大刃部が完全にパイプ内部に入った場合は、その高さ y_{edge1} までの形状とする。図 2.1.3 に示すように Y は図心 Y_G との距離であり、刃先状の位置 y との関係を $Y=y-Y_G$ とすると、応力 σ_x は(3)式にて表される反力 R_A に対して単純に釣り合う応力と考えているため、工具の厚みなどの形状は考慮していない。そのため、その分布状態は実際の切断加工時のものとは異なる。

$$\sigma_x = M \frac{Y}{I_z} = M \frac{y - Y_G}{I_z} \quad (5)$$

パイプの支点間距離は l なので、モーメント M は次式にて表される。

$$M = \frac{l}{2} R_A \quad (6)$$

よって、(4)式より

$$\sigma_x = \frac{l}{2} \mu_1 \sigma_{AR} \frac{y - Y_G}{I_{z,ini}} \quad (7)$$

さらに、 $\theta/2$ だけ傾いている大刃の側面とパイプが接触している領域内での微小面積 $L(y)dy$ を掛け、接触している高さの区間で積分することによって、工具の側面に作用する垂直応力 F_{1N} を次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} F_{1N} &= \int \sigma_x L(y) dy \\ &= \int \frac{l}{2} \mu_1 \sigma_{AR} \frac{y - Y_G}{I_{z,ini}} L(y) dy \end{aligned} \quad (8)$$

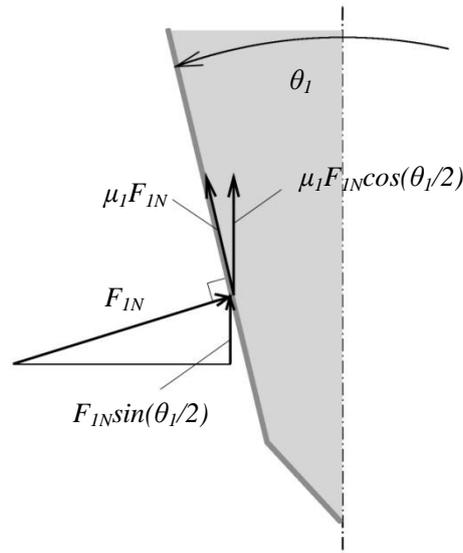


Fig.2.1.4 Schematic illustration of F_1

ここで、 F_{IN} が作用している刃面は $\theta_1/2$ だけ傾いているため、鉛直方向及び摩擦力の鉛直方向成分の力をそれぞれ図 3.1.4 に示すように $F_{IN}\sin(\theta_1/2)$ および $F_{IN}\mu_1\cos(\theta_1/2)$ とすると鉛直方向の荷重である F_1 は両面にかかる事をふまえて、次式で表すことができる。

$$F_1 = 2 \cdot F_{IN} \left(\sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + \mu_1 \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right) \quad (9)$$

なお、 μ_1 は大刃の側面とパイプとの摩擦係数である。次に刃先丸み R により発生する荷重 F_2 について考える。本実験では押し切りを行っているため切断力は垂直方向にのみ作用している。また刃先の丸み部は小刃部および大刃部の大きさに対して非常に小さな割合となる。そのため刃先丸みと材料の接触部における丸みの接線方向の摩擦力が切断荷重に及ぼす影響は非常に小さくなるため無視できると考えた。さらに、切断は常に進行しており、切断の進行に伴って現れる新生面と刃先丸みとの接触現象は瞬間的であるため材料の粘性の影響は小さいと考えた。これらの仮定をもとに刃先の丸みによって発生する力 F_2 はヘルツの接触理論より算出することにした。刃先丸みに比べてパイプ直径は十分大きいので、接触部のパイプは平面とする。よって、接触部の丸み半径 R と単位長さ当たりの垂直荷重 P および接触半径 b の関係は次式のようになる。

$$b = \left(\frac{8PR}{\pi E'} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

E' は等価弾性係数を表し、工具およびパイプ材料それぞれのヤング率ポアソン比から次式にて算出される。計算時には表 2.1.2 に示す値を代入した。

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (11)$$

Table 2.1.2 Young's modulus and Poisson ratio⁴⁾

	Young's modulus GPa	Poisson ratio
Blade	206	0.3
PVC pipe	3.35	0.38

F_2 を刃先丸みにより発生する垂直荷重とすると、単位長さ当たりの垂直荷重 P は接触長さ $L(y)$ を用いて次式にて表される。

$$P = \frac{F_2}{L(y)} \quad (12)$$

ここで、ヘルツの接触における平面ひずみの条件のもとで同一円筒どうしの接触を考える。対称形となり、接触面は図 2.1.5 に示すように円筒どうしの接触によって直線となる。すなわち、接触面は平面になる。円筒が平面と接触するときは、この場合とは厳密には等しくないが、その誤差はほとんど無視できる¹⁰⁾。

よって、工具切れ刃先端の丸み部と材料における半接触幅 b は、図 2.1.6 に示すような関係から次式で表される。

$$b = R \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \quad (13)$$

式(8), (10), (11)を組み合わせると、次式が得られる。

$$F_2 = \frac{1}{8} L(y) \pi E' R \cos^2\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \quad (14)$$

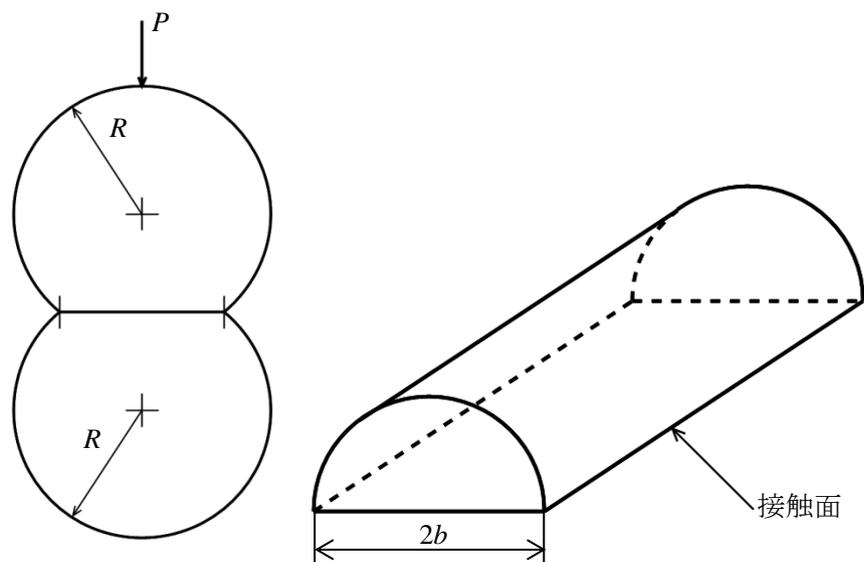


Fig. 2.1.5 Schematic illustration of the Hertzian contact

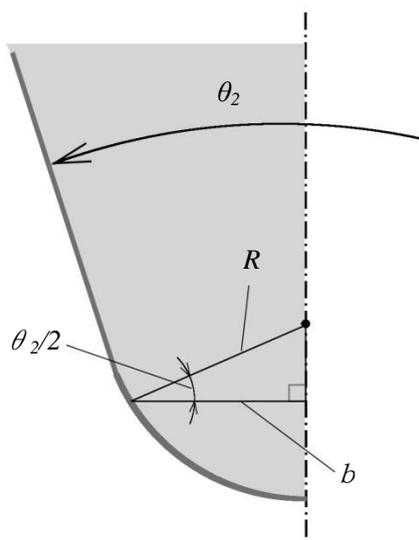


Fig.2.1.6 Schematic illustration of F_2

最後に、 $\theta_2/2$ だけ傾いた小刃部の側面において、図 2.1.7 に示すように材料の引張り強さ σ と釣り合うような、小刃部の側面に対して垂直方向の応力 σ_{edgeN} が作用すると仮定する。

$$\sigma_{edgeN} = \frac{\sigma}{\cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} \quad (15)$$

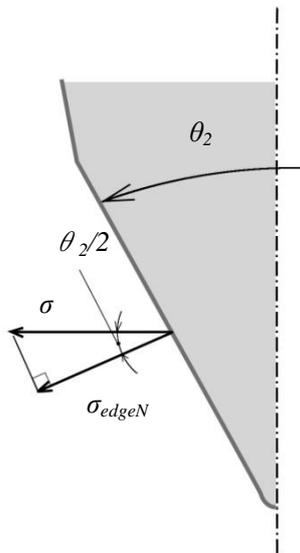


Fig.2.1.7 Schematic illustration of F_3

この応力により生じる鉛直方向の応力 σ_y は式(9)と同様に次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_{edgeN} \left(\sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + \mu_2 \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \right) \\ &= \frac{\sigma}{\cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} \left(\sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + \mu_2 \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、先に述べたように、小刃部と大刃部とは研磨方向が異なるために新たに摩擦係数 μ_2 を定義する。式(16)に微小面積 $L(y)dy$ を掛け積分をする。積分区間は $\theta_2/2$ だけ傾いた刃先側面が材料と接触している高さとし、刃先の両面にかかることをふまえると次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} F_3 &= 2 \int \sigma_y L(y) dy \\ &= 2 \int \frac{\sigma}{\cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} \left(\sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + \mu_2 \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \right) L(y) dy \end{aligned} \quad (17)$$

式(1), (9), (14)および(17)より, 切断荷重 F_{total} は最終的に次式で表すことができる.

$$\begin{aligned}
 F_{total} &= F_1 + F_2 + F_3 \\
 &= 2 \cdot F_{1N} \left(\sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + \mu_1 \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right) \\
 &\quad + \frac{1}{8} L(y) \pi E' R \cos^2\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \\
 &\quad + 2 \int \sigma_y L(y) dy
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\text{ここで, } F_{1N} = \int \frac{l}{2} \mu_1 \sigma_{AR} \frac{y - Y_G}{I_{z,ini}} L(y) dy, \quad \sigma_y = \frac{\sigma}{\cos(\theta_2/2)} (\sin(\theta_2/2) + \mu_2 \cos(\theta_2/2))$$

図 2.1.8 に標準の条件において計算にて得られた F_1 , F_2 , F_3 のそれぞれの値が F_{total} に占める割合を示す. 図より, 切断の全期間において小刃部に作用する力 F_3 が大きな割合を占めているが, 切断前半は大刃部の摩擦力 F_1 の占める割合が非常に大きいことがわかる. これらのことから, 切断力の低減には特に小刃部の適切な形状変更と大刃部とパイプとの摩擦力低減が有効であると考えられる.

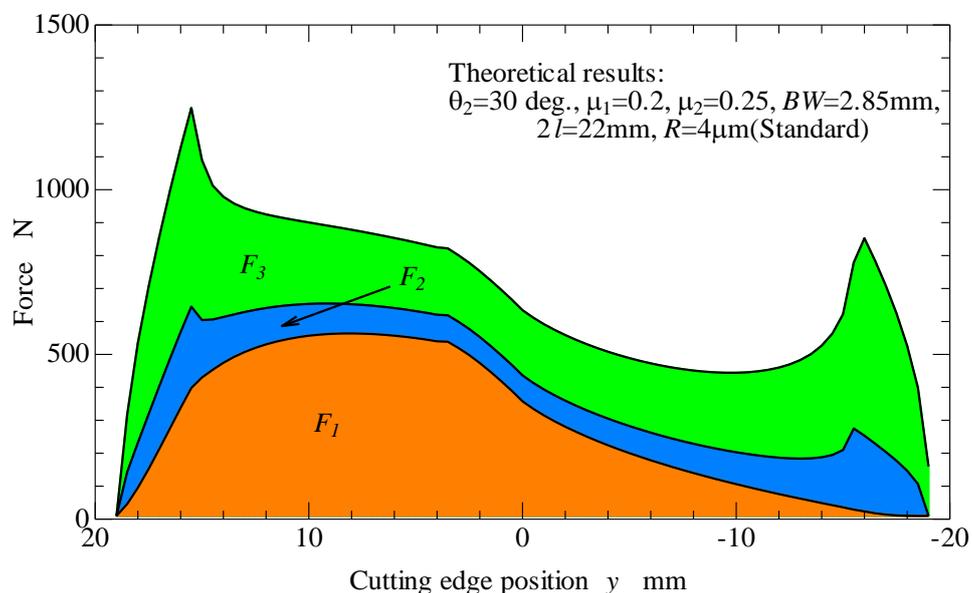


Fig.2.1.8 Load-displacement curve for the model

2.2 実験装置

図 2.2.1 に実験装置全体を示す。刃物を取り付けた治具を 5mm/s で降下させステージに乗せられた試験材料を押し切りにて切断し、刃物直上に取り付けたロードセルにて切断荷重を測定した。試験材料は水道用硬質塩化ビニル管（JIS K 6742 準拠）の JIS 規格表示 VP30（三菱樹脂株式会社製）を用いた。寸法は外径 38mm，内径 31mm，長さ 100mm とした。

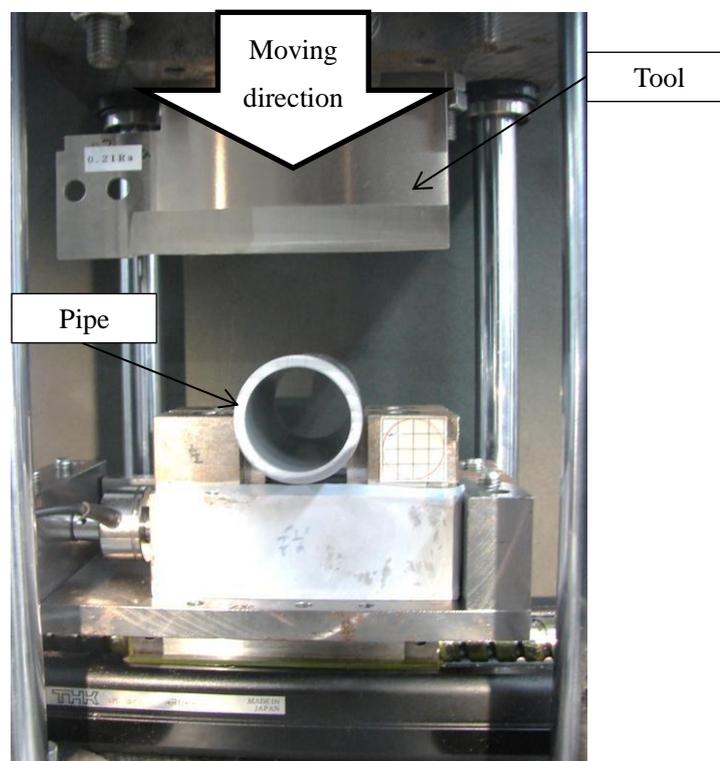


Fig.2.2.1 Experimental set up

2.3 実験結果及び考察

図 2.3.1 に切断荷重 F_{total} およびパイプを挟み込む力により発生する摩擦力の実測値と計算値のそれぞれの比較を示す。実験及び計算の各条件は標準の条件とした。切断後半に計算値が実測値に比べて大きくなってしまふものの、ほぼ両者は同じ傾向を示した。一方、摩擦力については全域にわたって計算値が小さくなった。摩擦力の測定と実際の切断時では移動方向に対する研磨方向が異なることや、試験中にパイプの回転を完全に防ぐ事が困難であるために切断力が含まれていることを考慮すれば、摩擦力の実験値は図示した値より小さくなり計算結果に近い値になると考えられる。また、理論値は多くの仮定があり、加えて非常に簡略化しているが、実測値と計算値が特に切断荷重の大きい切断前半において、ほぼ同等の値を示し、切断の進行に伴う切断荷重の推移も同様の傾向を示していることから、おおよその切断荷重を見積もるには十分な有用性があると思われる。

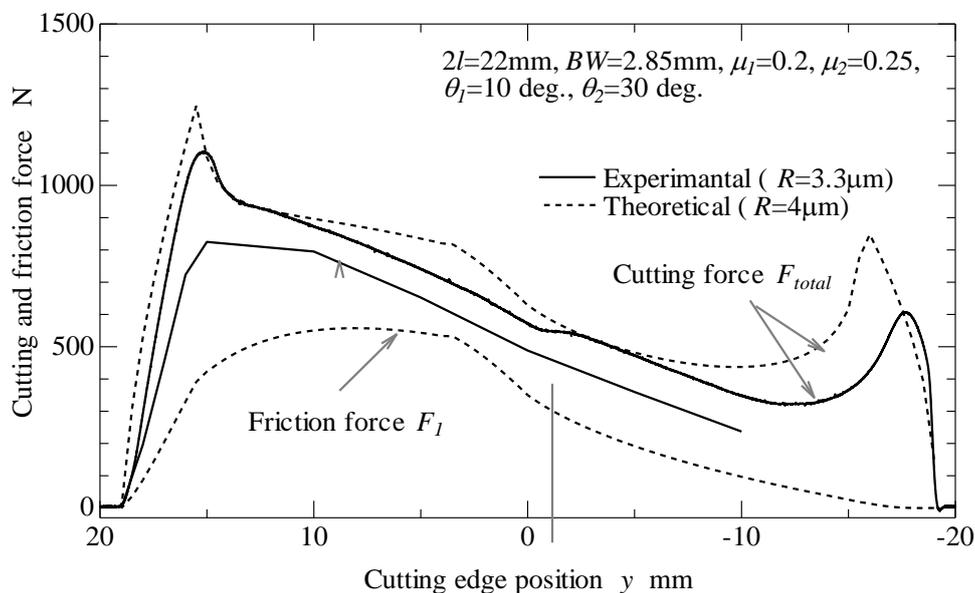


Fig.2.3.1 Load-displacement curve for the experiment and the model

第3章 刃物と材料間の摩擦

第2章から、切断荷重に占める刃物と材料間の摩擦力の割合が大きいことがわかった。よって、切断荷重の低減には大刃部とパイプとの摩擦力低減が有効であると考えられる。そこで表面粗さと摩擦係数の関係を検証するため、表面粗さの測定とパイプと刃物表面の摩擦係数を測定する装置を製作し摩擦実験を行った。

3.1 表面粗さ測定

摩擦係数と表面粗さの関係を調べるため、表面粗さを測定した。測定には表面粗さ測定機(株式会社ミトヨ製 SV-524)を用いた。表面粗さを測定した方向は、研磨方向に対し垂直な方向(90°)である。測定位置は図3.1.1に示すように大刃部のおよそ中央で JIS B 0633 : 2001 より、基準長さ0.8mm, 評価長さ4mm, 計測向きはラチェット側から大刃側に向かう方向とした。

測定には3枚の刃物を用いた、図3.1.2に外観を示す。形状は市販されている刃物と同じで、それぞれ同じ条件で研磨されている。表面に刻印がされている方を表として、両面とも測定した。その結果を図3.1.3, 表3.1.1に示す。

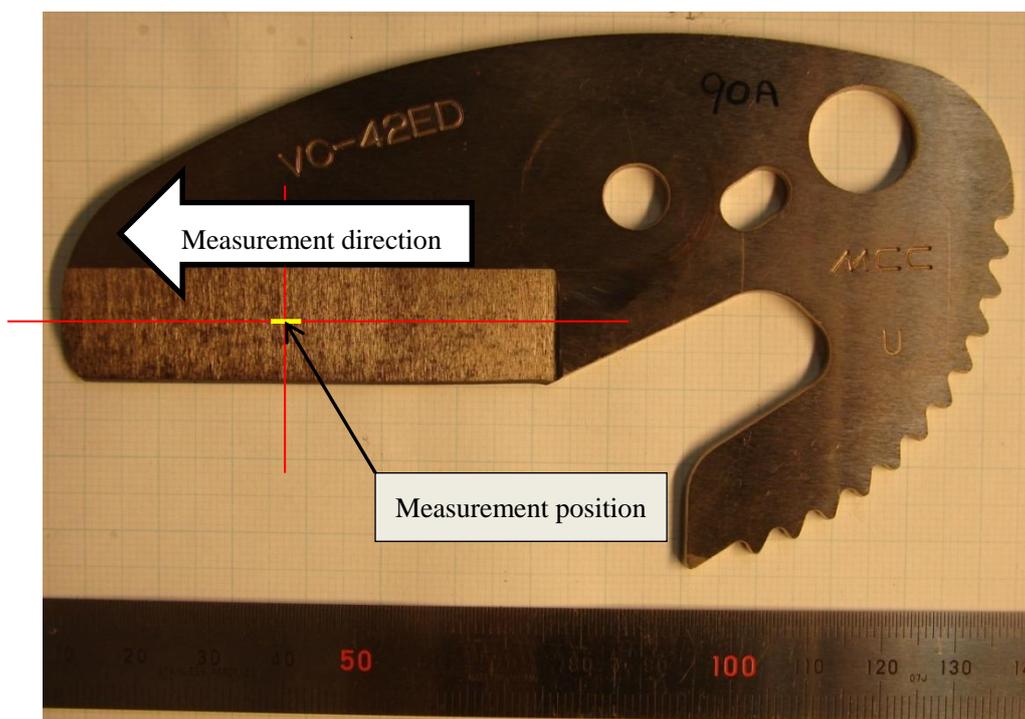


Fig.3.1.1 Measurement position



No.1 Observe side

No.1 Reverse side



No.2 Observe side

No.2 Reverse side



No.3 Observe side

No.3 Reverse side

Fig.3.1.2 Cutting blade

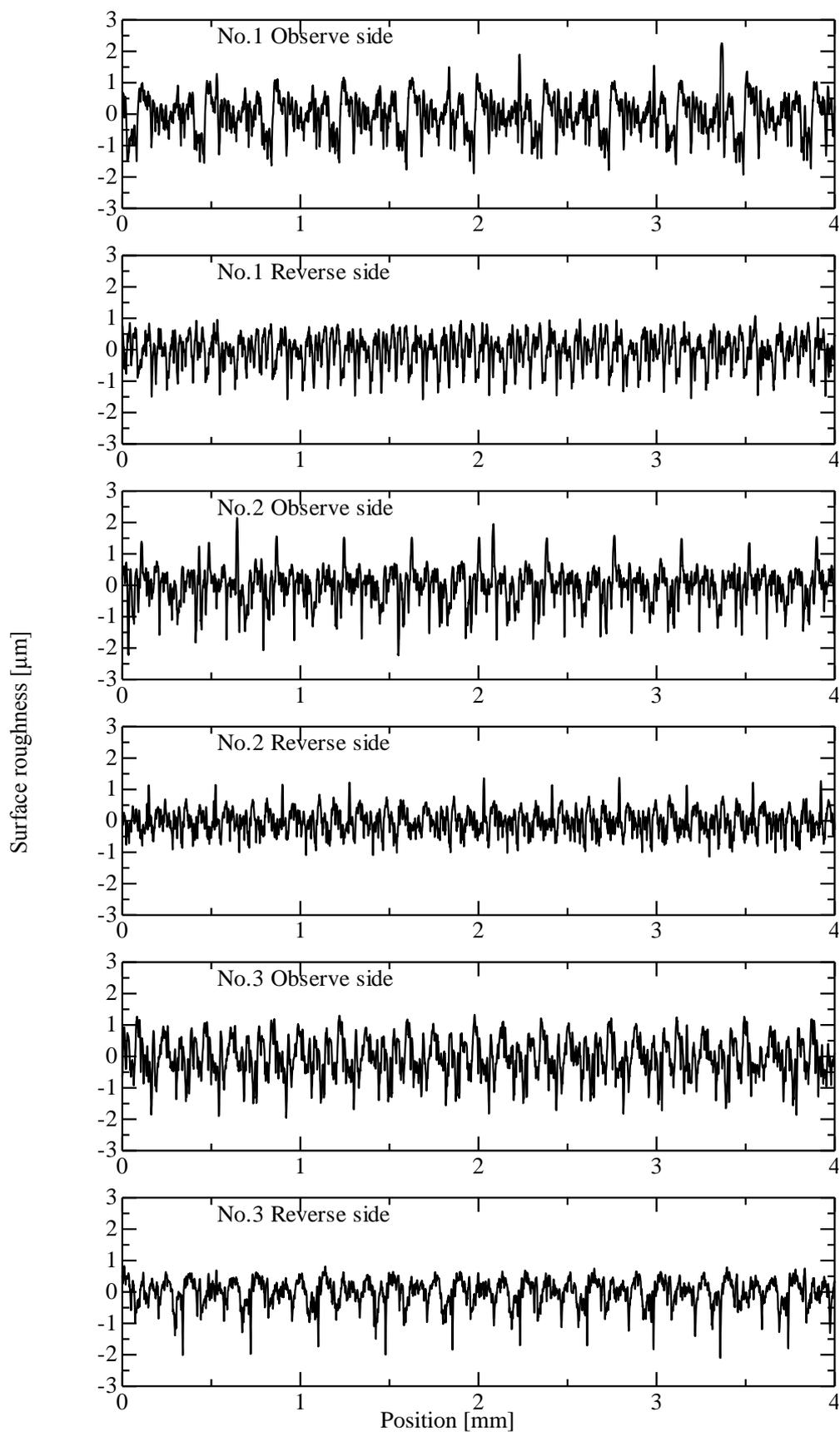


Fig.3.1.3 Surface Roughness

Table 3.1.1 Surface Roughness

Cutting blade	Ra
No.1 Observe side	0.4833
No.1 Reverse side	0.3851
No.2 Observe side	0.4172
No.2 Reverse side	0.2935
No.3 Observe side	0.4859
No.3 Reverse side	0.3243

図 3.1.3, 表 3.1.1 より, すべて同じ条件で研磨されているが, 完全に同じ表面粗さに加工するのは困難であることから Ra にばらつきが生じている.

3.2 摩擦係数測定

3.2.1 実験装置

摩擦係数測定装置を図 3.2.1 に示す。ロッドにはロードセルを介してパイプが取り付けられている。また刃物 A, B は治具に取り付けられパイプを挟み込んでおり、挟み込む力を測定するロードセルが取り付けられている。ロッドを一定速度(10mm/sec)で押し込むことでパイプを押し込む荷重 F とパイプを挟み込む荷重 N を測定した。ここで摩擦係数 μ は以下のようなになる。

$$\mu = \frac{F}{2N} \quad (1)$$

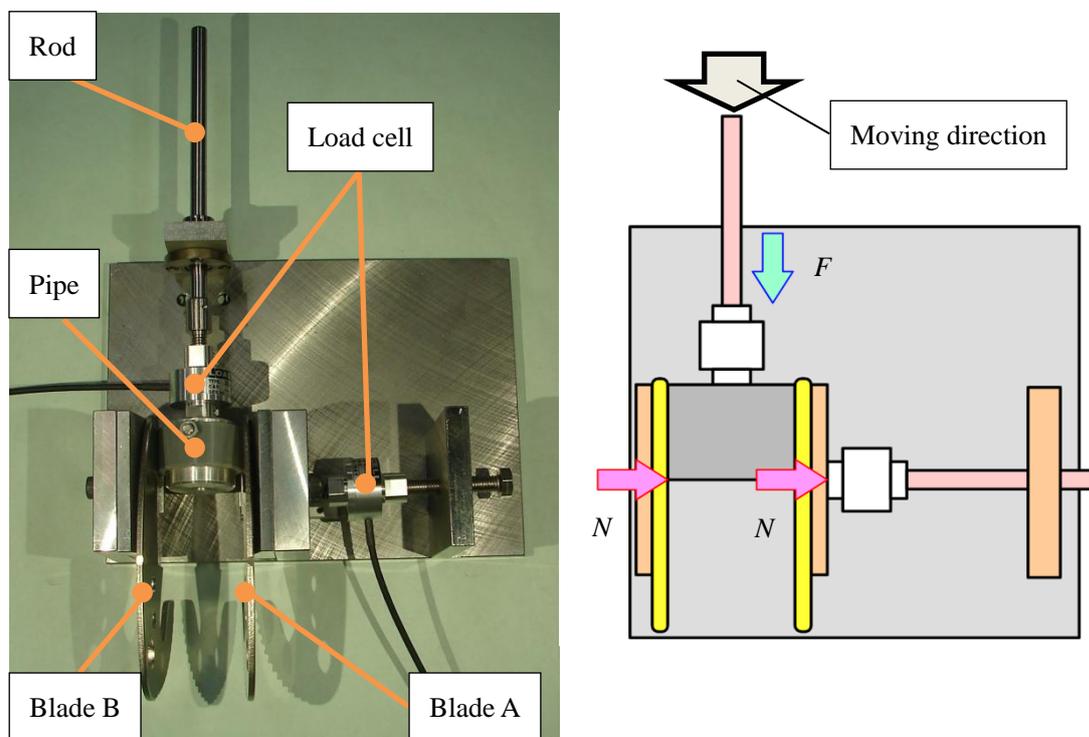


Fig.3.2.1 Experimental set up

3.2.2 測定項目の定義

図 3.2.2 に実験で得られたすべり距離と摩擦係数の関係を示す。摩擦係数は図 3.2.2 に示すように 10mm 付近の立ち上がり部から安定した値が得られる 30mm 付近までの平均値とする。

1つの条件につき2回ずつ試験を行い、その平均値を摩擦係数 μ とする。

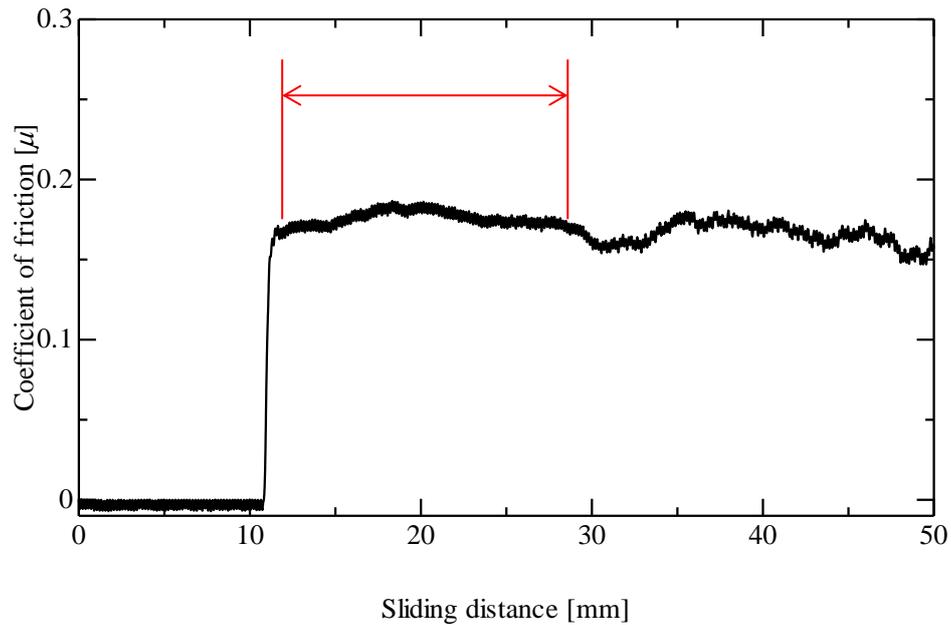


Fig.3.2.2 Variation in the coefficient of friction with sliding distance

3.3 研磨角度と摩擦係数の関係

刃物表面の研磨方向と摩擦係数の関係を調べるために、刃物の取り付け角度を 0° (パイプを押し込む方向と研磨方向が平行)、 45° 、 67.5° 、 90° (パイプを押し込む方向と研磨方向が直角)の条件で実験した。

図 3.3.1 に研磨角度と摩擦係数の関係を示す。また、表 3.3.1 に研磨角度と平均摩擦係数の関係を示す。図 3.3.1 より摩擦係数は研磨方向がパイプを押し込む方向に沿った場合に低くなり、パイプを押し込む方向と交差する方向に研磨方向がある場に高くなることがわかった。よって、摩擦係数を下げるには研磨方向と摩擦方向を沿わせることが重要であると考えられる。

また、北松ら¹⁾の実験では、研磨方向に対しパイプを押し込む方向が垂直になる方が摩擦係数は大きくなり、その条件では表面粗さも大きくなるという結果が得られている。また、Menezes ら⁵⁾は一方方向に研磨痕を付けた鋼板上を、Mg ピンを滑らせる実験を行い、研磨痕と摩擦方向の摩擦係数における関係を調べている。この研究でも、研磨痕と摩擦方向が一致すると摩擦係数が低減するという結果が得られている。その理由として、研磨痕と摩擦方向が沿うと、Mg ピンが研磨痕の山を横切る数が少なくなるからと考察している。

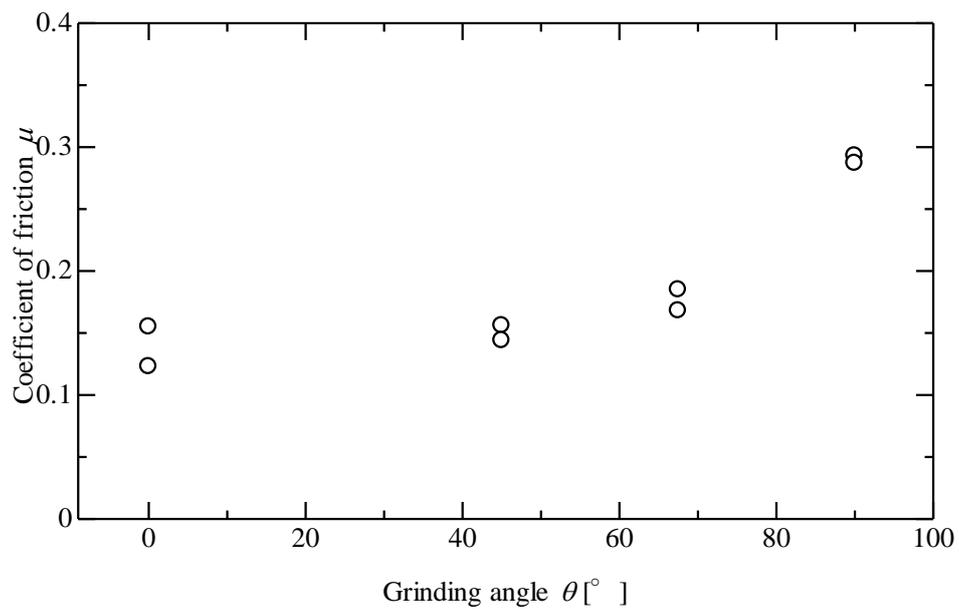


Fig.3.3.1 Influence of grinding angle on coefficient of friction

Table 3.3.1 Average coefficient of friction

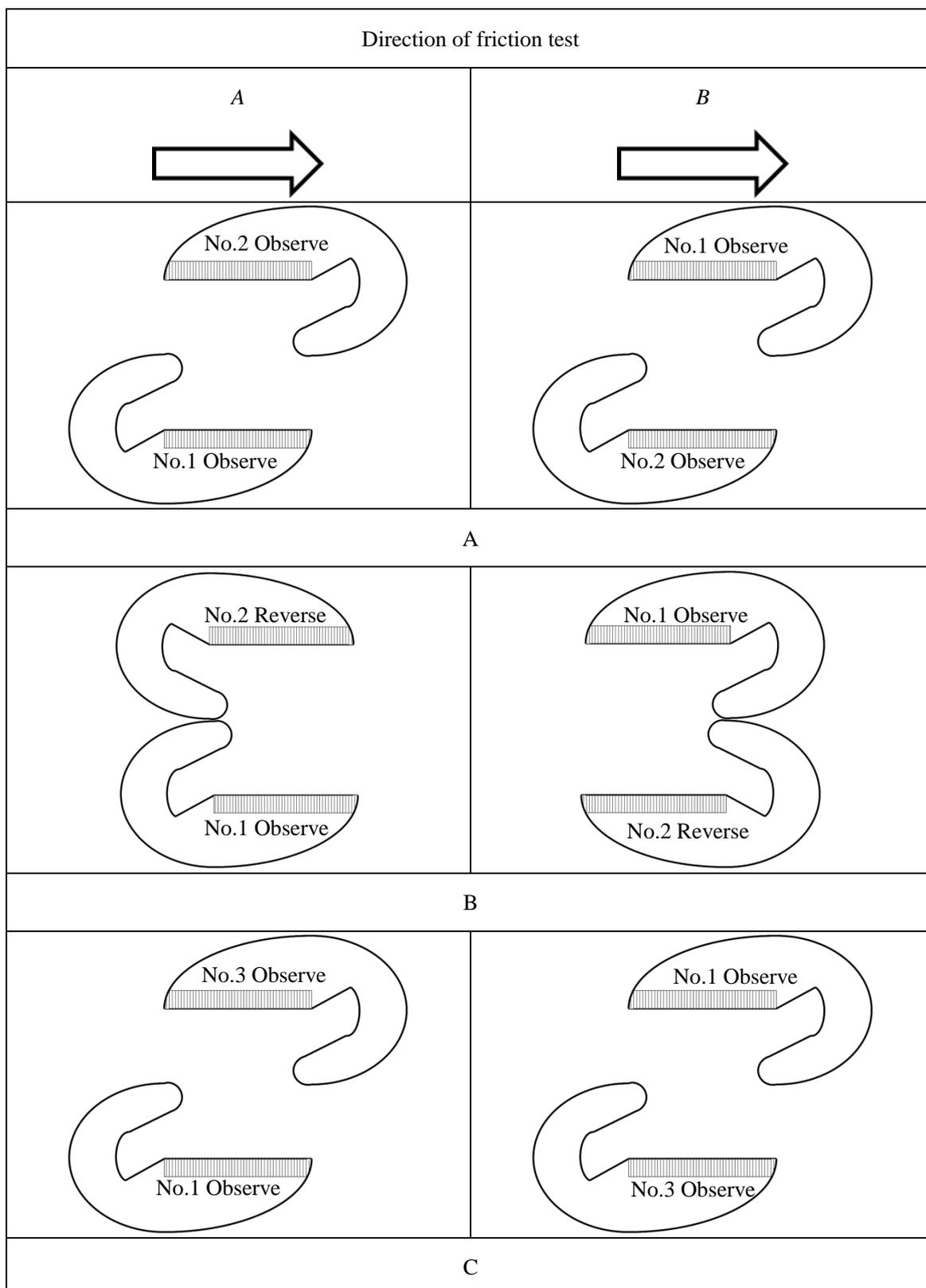
Grinding angle	Average coefficient of friction
0°	0.139
45°	0.150
67.5°	0.178
90°	0.291

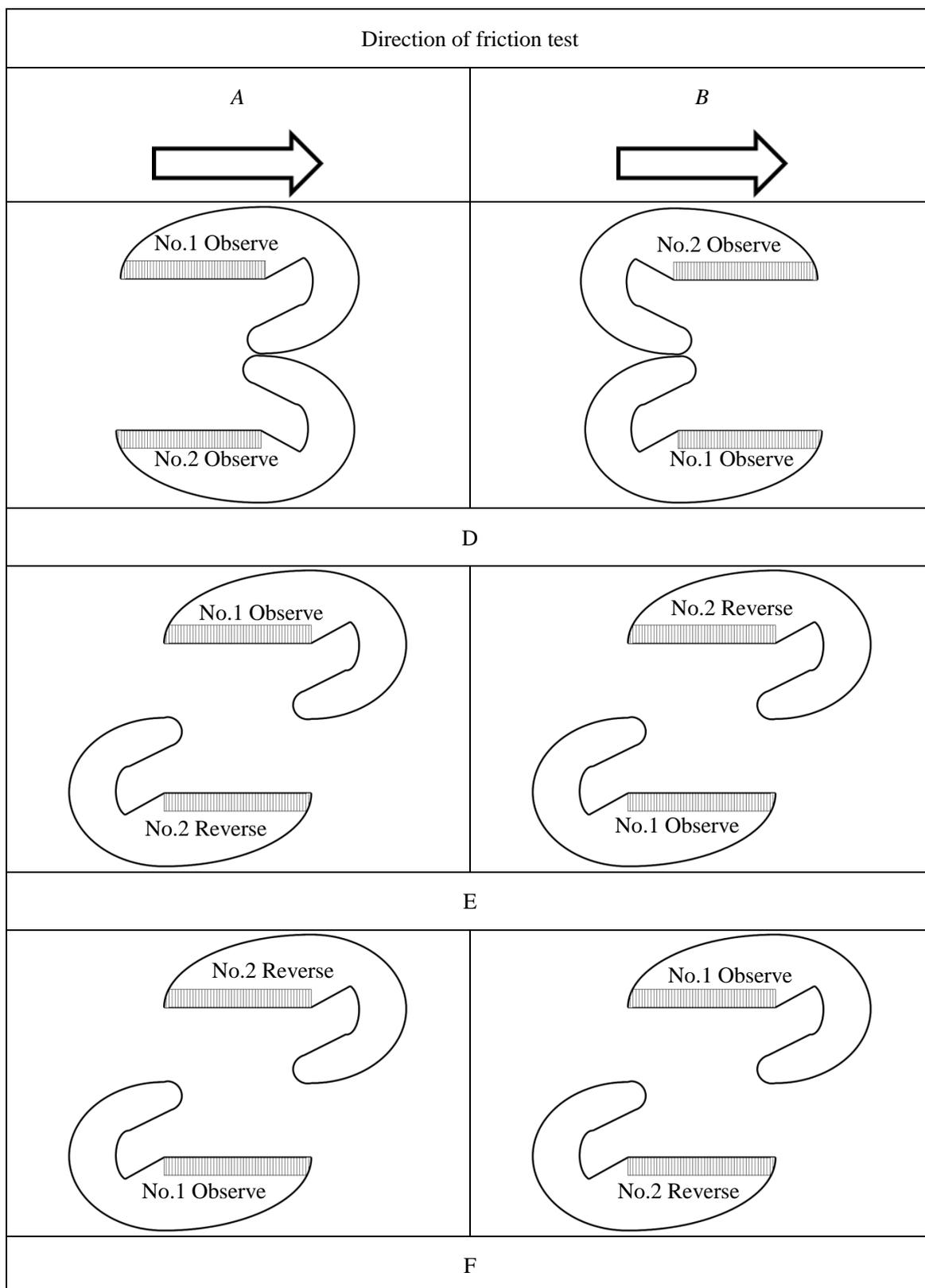
3.4 刃物の取り付け向きと摩擦係数の関係

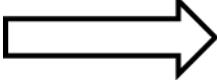
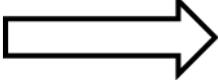
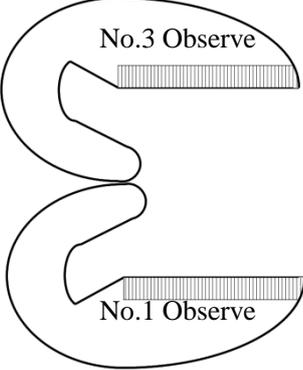
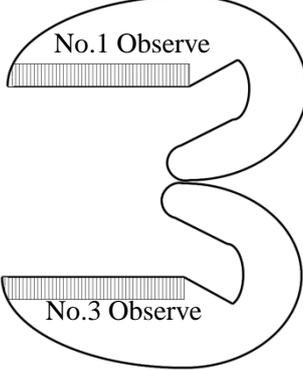
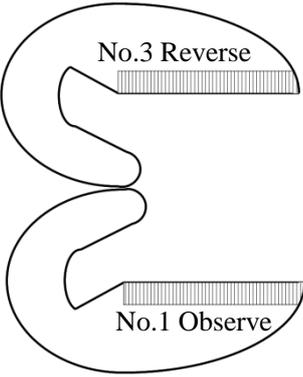
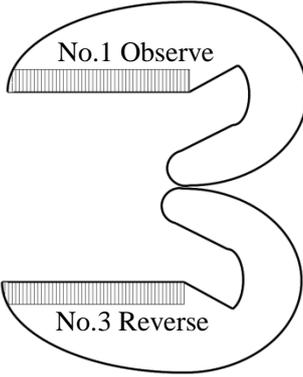
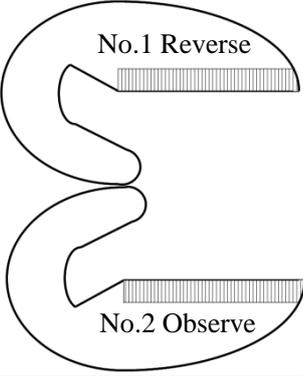
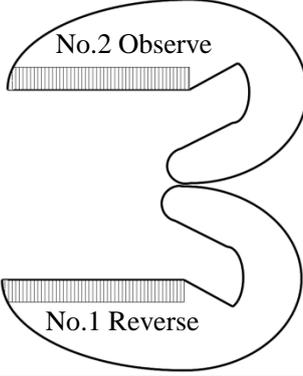
刃物の取り付け向きと摩擦係数の関係を調べた. 表 3.4.1 に実験に用いた 2 枚の刃物の組み合わせを示す. また, 図 3.4.1 に示すように, 刃物の取り付け向きを *A* 方向, *B* 方向と定義する.

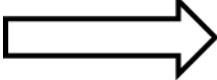
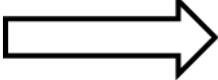
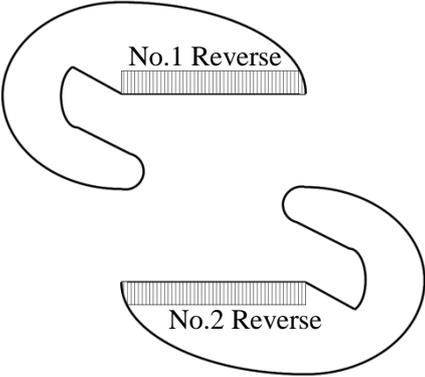
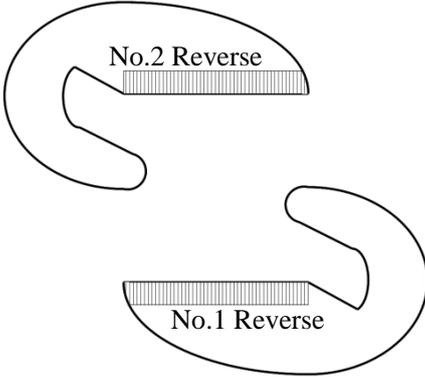
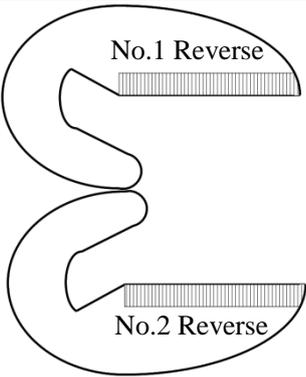
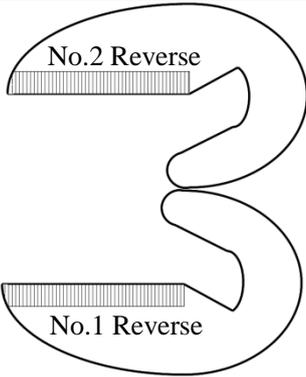
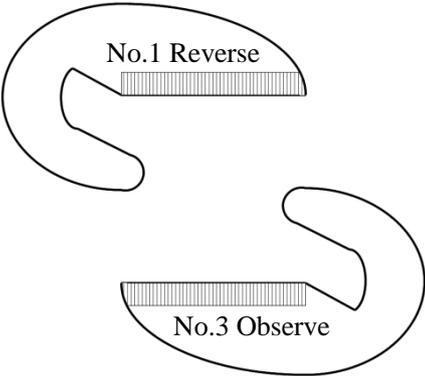
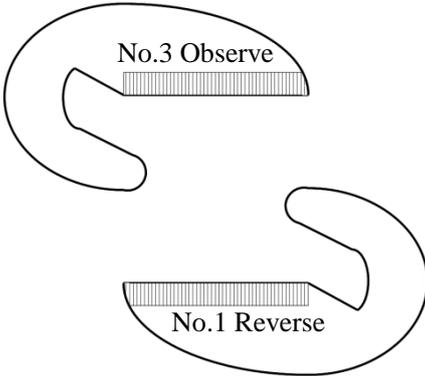
Table 3.4.1 Relationship between plot name and combination of blade

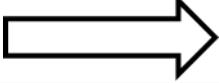
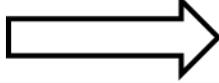
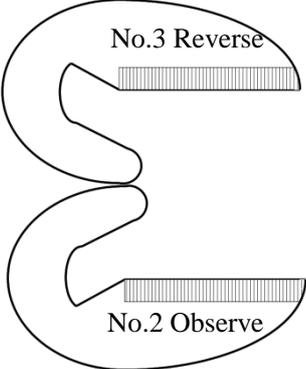
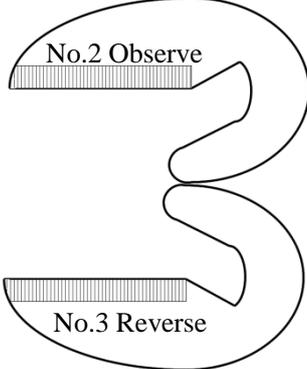
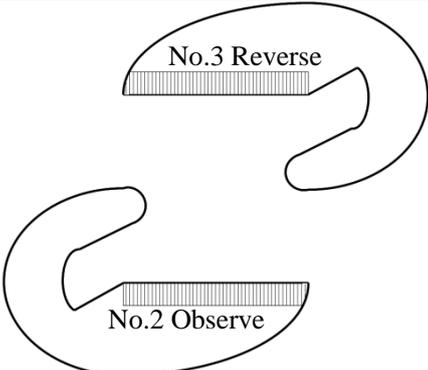
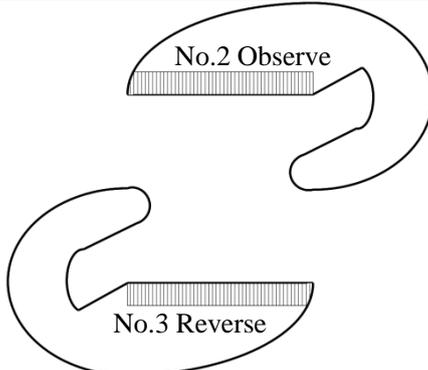
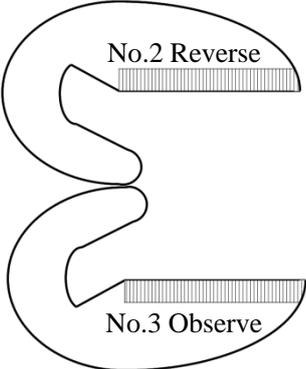
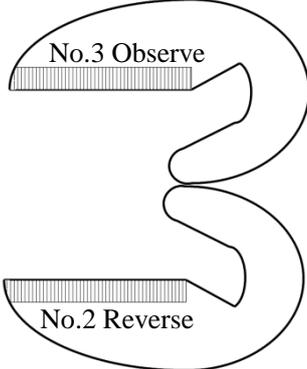
Plot name	Combination of Blade
A	No.1 Observe – No.2 Observe
B	No.1 Observe – No.2 Reverse
C	No.1 Observe – No.3 Observe
D	No.1 Observe – No.2 Observe
E	No.1 Observe – No.2 Reverse
F	No.1 Observe – No.2 Reverse
G	No.1 Observe – No.3 Observe
J	No.1 Observe – No.3 Reverse
K	No.1 Reverse - No.2 Observe
L	No.1 Reverse – No.2 Reverse
M	No.1 Reverse – No.2 Reverse
P	No.1 Reverse - No.3 Observe
Q	No.2 Observe - No.3 Reverse
R	No.2 Observe - No.3 Reverse
T	No.2 Reverse - No.3 Observe
U	No.2 Reverse - No.3 Observe
Y	No.2 Reverse - No.3 Reverse





Direction of friction test	
A	B
	
	
G	
	
J	
	
K	

Direction of friction test	
A	B
	
	
L	
	
M	
	
P	

Direction of friction test	
A	B
	
	
Q	
	
R	
	
T	

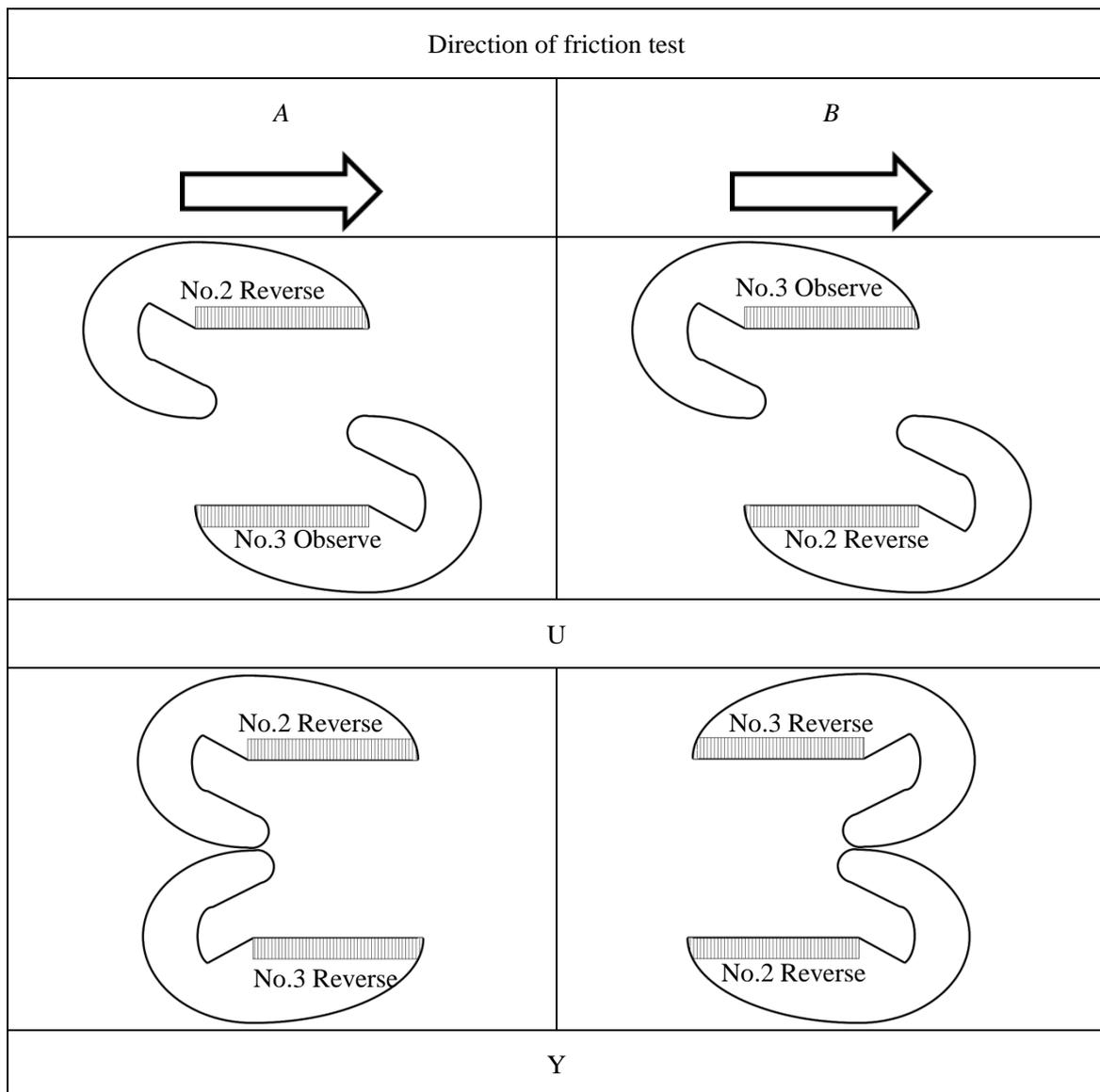


Fig. 3.4.1 Variation of setting for blade

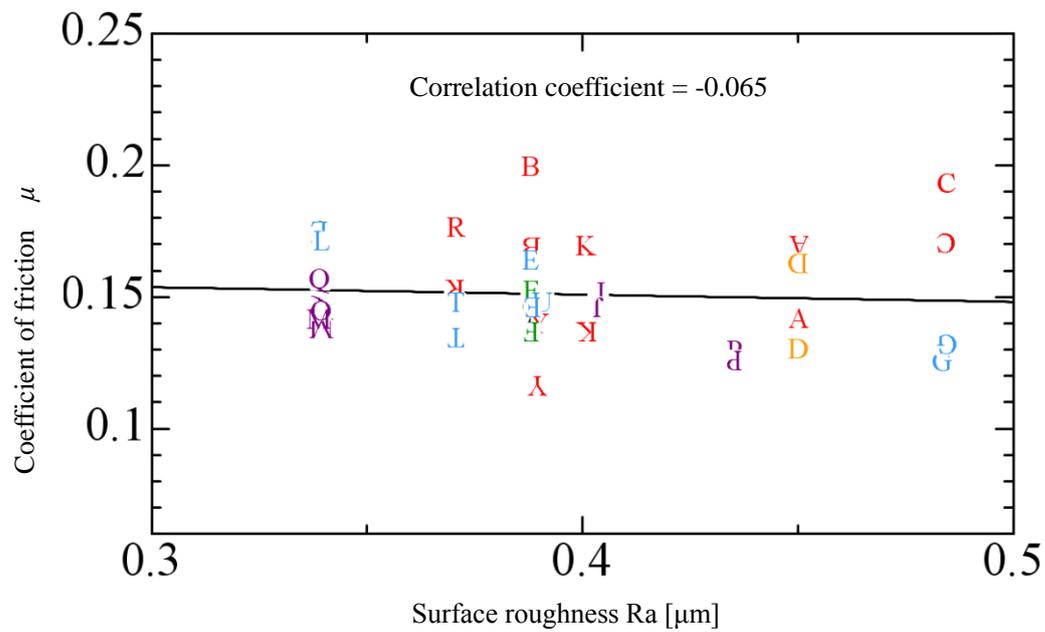


Fig.3.4.2 Influence surface roughness on coefficient of friction

図 3.4.2 に摩擦試験により得られた, 表面粗さ Ra と摩擦係数の関係を示す. A 方向で試験を行った結果を正立英字, B 方向で試験を行った結果を倒立英字で表している. 図 3.4.2 より同じ表面粗さを持つ刃物で実験を行ったにもかかわらず刃物の取り付け向きを変えた場合, 摩擦係数に差が表れた. また表面粗さと摩擦係数の間に相関関係は見られなかった.

3.5 表面性状と摩擦状態

ここで、実際に加工された面を測定し、その特性を求める立場からは、高さパラメータ、傾斜や異方性パラメータ、高さ分布の特性パラメータなどが断面曲線より算出され、トライボロジー特性の評価に際して表面の特徴を表現する手段として使われている⁶⁾。Menezesらは^{7), 8), 9)}異なる表面粗さ、表面性状をもつ金属板状において金属ピンをすべらせる実験を行い、いくつかの粗さパラメータと摩擦係数の関係を検証している。それによると、摩擦において掘り起し要素が主要因となる場合は、平均算術傾斜と呼ばれる、基準長さにおける傾斜の絶対値平均の大きさと摩擦係数の間に相関がみられることが示されている。

刃物の取り付け向きによって摩擦係数が異なることと表面粗さと摩擦係数に相関関係が見られないことから、刃物表面の幾何学的な形状が摩擦係数に影響を与えていると考えた。また、表面の特徴を表現するパラメータは多種多様にあるが、刃物の取り付け向き、つまり、摩擦の向きによって摩擦係数が異なることを説明できるパラメータは少ない。そこで、このことを説明できるパラメータの算出を試みた。

表面粗さ測定機(株式会社ミツヨ製SV-524)により測定した粗さ曲線から、図3.5.1に示すように、各測定点が増加している区間判別し、その区間の傾き dy_i/dx_i を最小二乗法により求めた。ただし、傾きが小さい場合は摩擦に影響しないと考え、しきい値を 3° とし、それ以下は無視した。その傾きに区間 X_i を掛けることで各山における上りの高さ Z_{ti} を求めた。 Z_{ti} の平均を粗さ曲線要素の平均高さ Y とする、また Y は次式で表される。計算する向きは粗さの測定向きと同じである。

$$Y = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad \left(Z_{ti} = \frac{dx_i}{dy_i} X_i \right) \quad (2)$$

次に、計算する向きを反転させ、同様に Y を求める。そこで、粗さの計測方向に対して往路側の粗さ曲線要素の平均高さを Y_A とし、復路側の粗さ曲線要素の平均高さを Y_B とする。表3.5.1に計測した刃物と R_a , Y_A , Y_B の関係をまとめる。

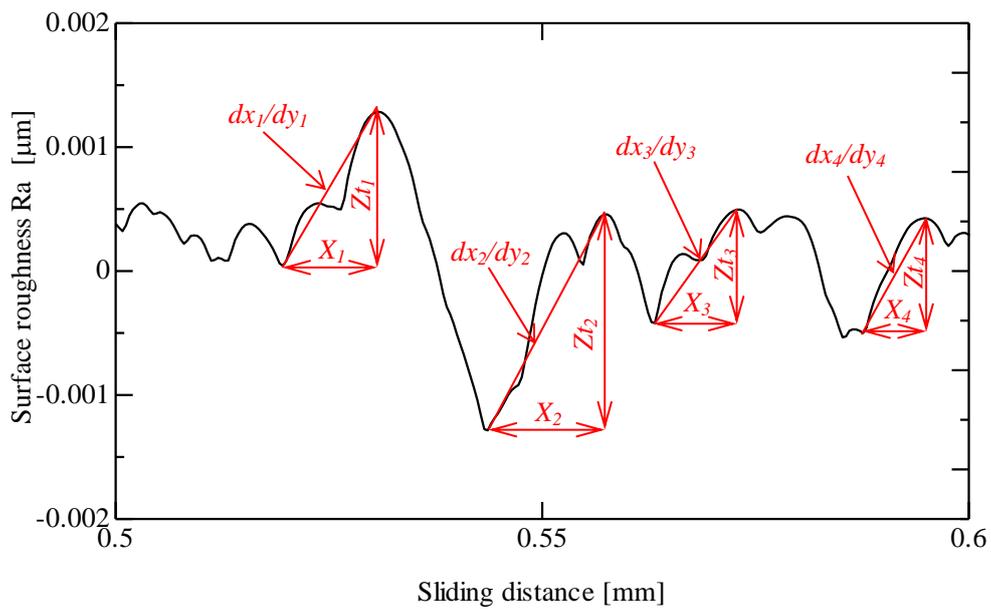


Fig.3.5.1 Average height of roughness profile elements

Table 3.5.1 Surface roughness and average height of roughness profile elements

Cutting blade	Ra [μm]	Y_A [μm]	Y_B [μm]
No.1 Observe side	0.4833	0.638	0.652
No.1 Reverse side	0.3851	0.621	0.638
No.2 Observe side	0.4172	0.658	0.739
No.2 Reverse side	0.2935	0.543	0.573
No.3 Observe side	0.4859	0.748	0.722
No.3 Reverse side	0.3243	0.44	0.481

図 3.5.2 に Y の値と摩擦係数の関係を示す, Y は摩擦試験時の刃物取り付け向きに対して摩擦が往路側に進行する場合は Y_A の値, 復路側に進行する場合は Y_B の値を用い, 摩擦試験に用いた 2 枚の平均とした. 図 3.5.2 より, Y が大きいほど摩擦定数が小さくなる傾向がみられる.

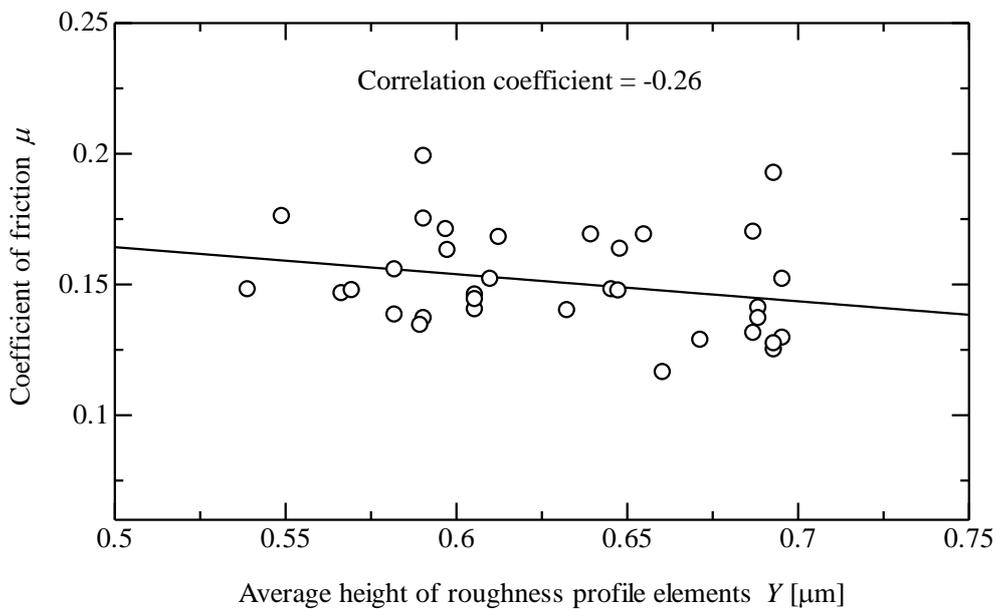


Fig. 3.5.2 Relationship between coefficient of friction and average height of roughness profile elements

次に表面性状をよりよく表すために、 Y_A と Y_B の比をとり N とし、図 3.5.4 に N と摩擦係数の関係を示す。これも、摩擦試験に用いた 2 枚の平均とした。 N の値によって、表面性状における方向性を代表することができ、 $N < 1$ のときは計測方向に対する山の方が低くなり(図 3.5.3(a)), $N = 1$ のときは粗さ曲線の山形状は左右対称となり(図 3.5.3(b)), $N > 1$ のときは計測方向に対する山の方が高くなる(図 3.5.3(c))表面性状を示している。

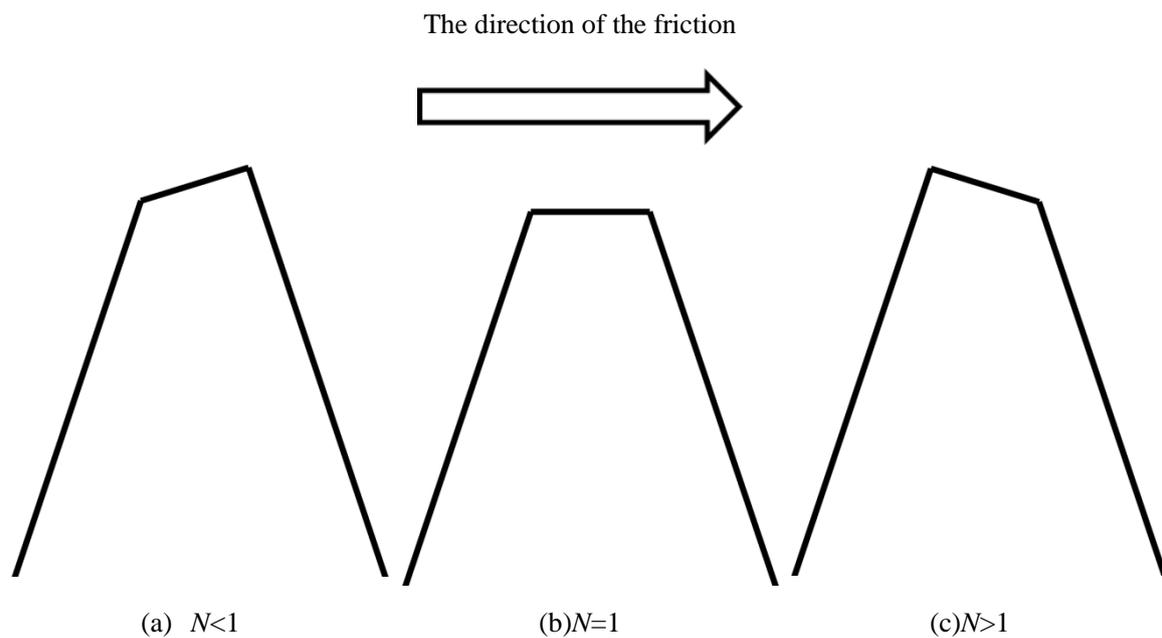


Fig. 3.5.3 Representation of surface shape

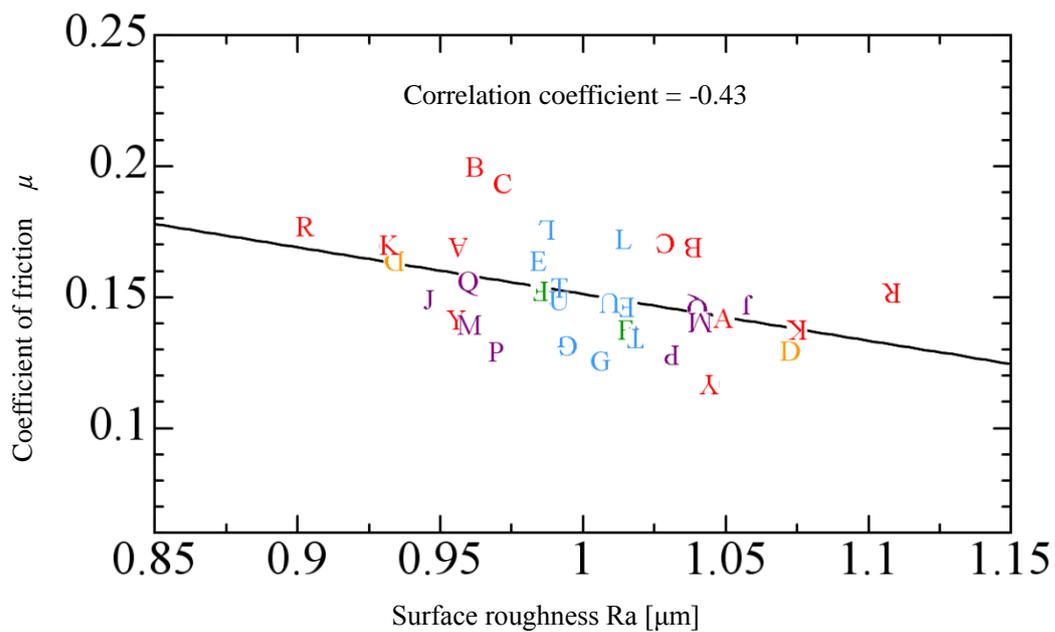


Fig.3.5.4 Influence of shape parameter N on coefficient of friction

図 3.5.4 より, N の値が大きいほど摩擦係数が小さくなる傾向がみられる. $N > 1$ の場合, 摩擦の進行方向に対する山の方が高いので摩擦仕事が小さく, 反対に $N < 1$ の場合, 摩擦の進行方向に対する山の方が低いので摩擦仕事が大きくなるのではないかと考えられる.

さらに, 3.4 節で摩擦方向によって摩擦係数に差が生じることが分かったが, その差が大きいものと小さいものが確認できる. その差を N の値で評価できるか検討する. 図 3.5.5 に検討した結果を示す.

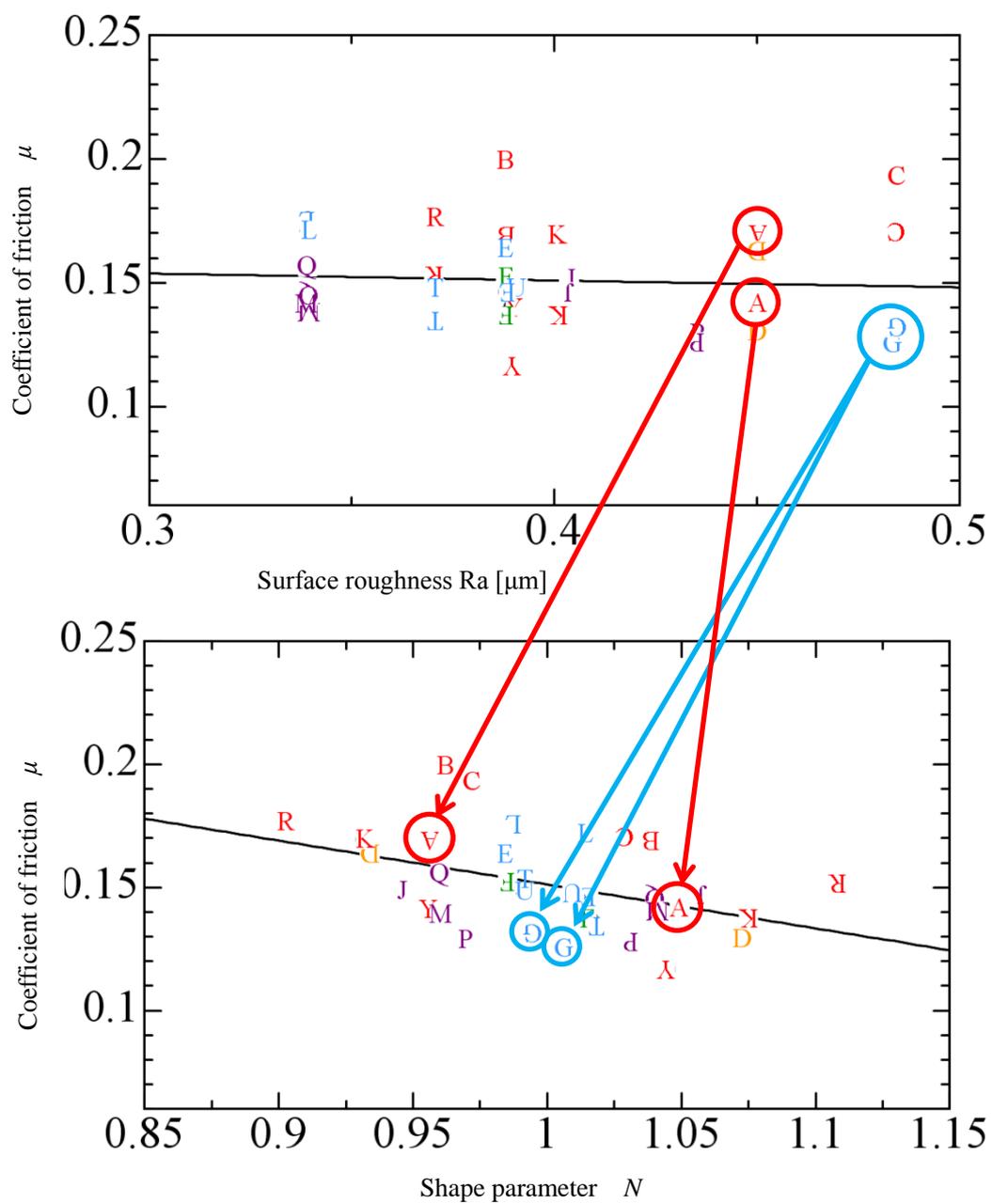


Fig. 3.5.5 Relationship between shape parameter N and surface roughness Ra

図 3.5.5 より, 摩擦方向により摩擦係数の差が大きいものは N の値が 1 から外れており(赤丸), 摩擦係数の差が小さいものは N の値が 1 に近くなる(青丸)傾向がみられる. 考察した通りにならないものもみられるが, 摩擦試験の摩擦長さに対して粗さの測定長さが短いことや, Y の値を算出する際に最小二乗法による誤差が含まれていることが考えると, おおよそ差が大きい場合は N の値が 1 から外れ, 差が小さいものは N の値が 1 に近づくようになる傾向を示している. 以上のことから, N の値によって摩擦方向による摩擦係数の違いを評価できたのではないかと考えられる.

また, Bowden-Tabor の凝着理論によると摩擦係数は境界介在物の限界せん断応力と材料の降伏応力によって規定される¹⁰⁾が, 本研究により表面形状の方向性にも起因している可能性が示された.

第4章 実機を用いた切断

第3章の摩擦実験より, 刃物の研磨方向に摩擦の進行方向が沿うと摩擦係数が低減することから, 刃物の軌道と研磨方向を沿うようにすると摩擦係数が低減し, 切断荷重が低減できると考えられる.

ここで, 実際の工具における刃物の進行方向について考察する. 図4.1に(a)押し切りにて切断する場合, (b)実際の工具により切断する場合を示す. 標準の刃物は 90° の研磨方向であるが, (a)の場合は研磨方向と刃物の進行方向は一致している. しかし, 実際の工具において刃物は(b)のように回転するので研磨方向と刃物の進行方向が一致しない. そこで, 刃物の研磨方向を変える方法に着目し, 研磨方向の違いによる実際のパイプ切断用工具の切断荷重への影響を検証した.

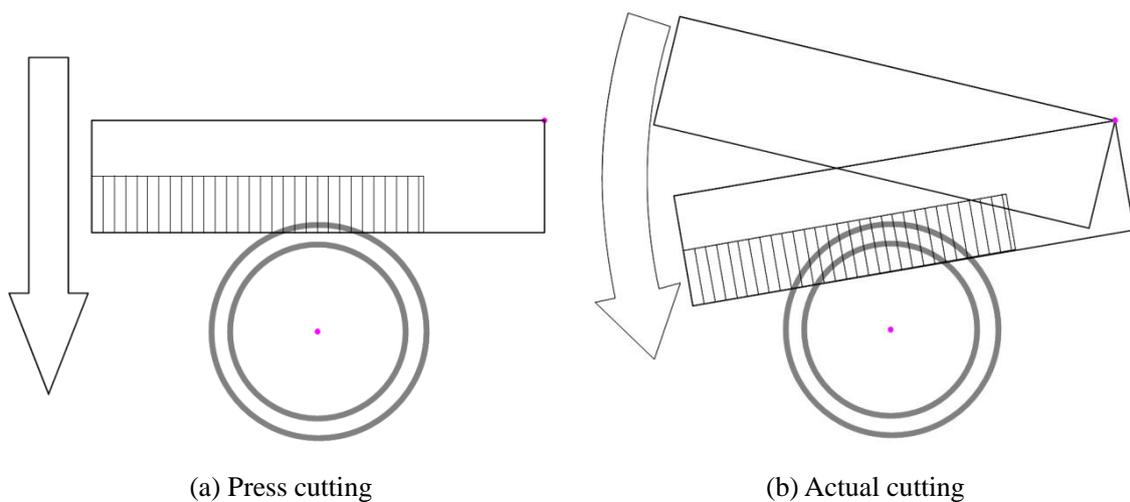


Fig. 4.1 Direction of movement of the blade

4.1 実験装置

実際のパイプ切断用工具を用いてパイプの切断荷重を測定するために用いた装置を図 4.1.1 に示す。パイプ切断用工具のハンドル回転軸にボルトを通し、装置本体に取り付けている。パイプ切断用工具の右側に三角形治具を介して電動アクチュエーター (Oriental motor 社製 ELC4E05M-KP-P) を設置する。電動アクチュエーターにより三角形治具が押し引きされることによって、治具の斜辺をパイプ切断用工具のハンドルが持ち上がったたり下がったりすることによってパイプが切断される。このとき工具のグリップは測定部においてロードセル (株式会社協和電業製 LUR-A-2KNSA1) のみで支えられている状態となる。これにより、工具の通常の使用状態と同様にパイプを切断すると同時に、工具のグリップにおける切断荷重の値を測定することが可能となっている。電動アクチュエーターはプログラミングコンソール (Oriental motor 社製 MPC10) により制御する。また、装置のハンドルと受け皿の回転中心部に単式スラスト玉軸受け (NTN 株式会社製 5100) を用いることで、切断中の工具のブレをなくすと同時に回転部分の抵抗を軽減させている。

本実験ではグリップ終端よりおよそ 40mm の位置にロードセルが取り付けられており切断荷重を測定することができる。

この他、ロードセルからの信号を増幅し記録するために、動歪みアンプ (株式会社協和電業 DPN-711B) 及びデータアキュイジション装置 (NEC 三共株式会社製 オムニエース II RA1200) を用いた。

なお、刃物およびパイプを両方とも脱脂したうえで実験を行った。

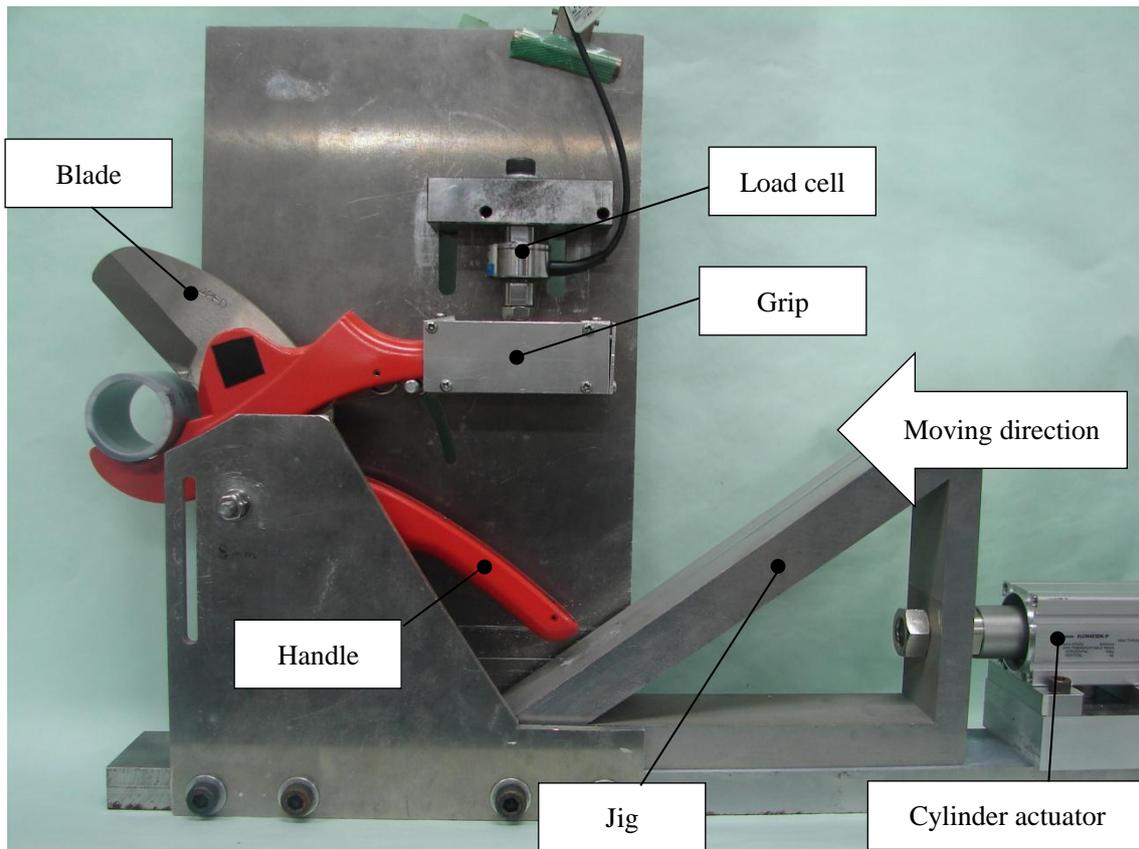


Fig.4.1.1 Experimental set up

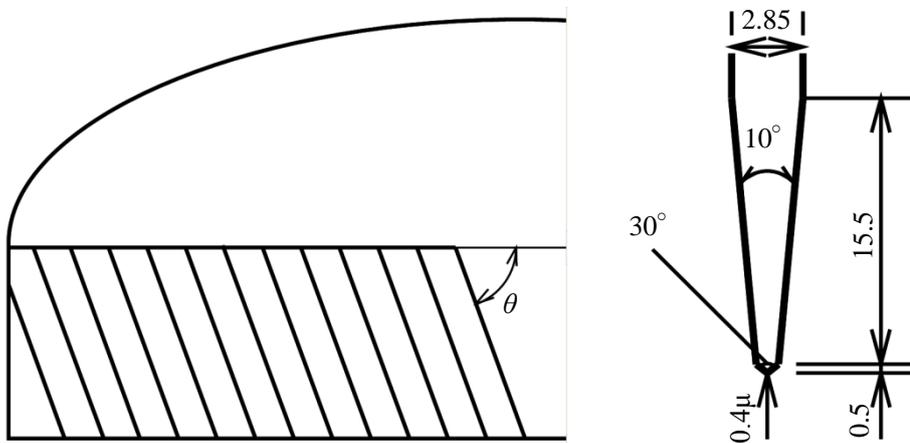


Fig.4.1.2 Schematic illustration of tool

4.1.1 パイプ切断用工具

今回の実験でパイプを切断するモデルとしたのが、刃を押し込む方式の塩ビパイプ切断用工具として普及率の高い、株式会社松阪鉄工所の VC-42ED である。工具外観を図 4.1.3 に示す。この工具は刃の部分にラチェット機構を備えており、ハンドルを 1 往復させることで刃が一定の角度ずつ送られるようになっている。この動作を繰り返すことでパイプの切断を行うことができる。また、切断可能なパイプの直径は $\phi 42\text{mm}$ までと一般的に用いられることの多いパイプに対応している。この工具を実験装置に装着して、これ以降の実験を行う。



Fig.4.1.3 Pipe cutter

4.1.2 試験片

本実験では試験片として水道用硬質塩化ビニル管 (JIS K 6742) を用いた。JIS 規格表示の VP30 である。ヒシパイプ (三菱樹脂株式会社製) を用いた。代表的な試験片外観を図 4.1.4 に、また、JIS による基準寸法及びその許容差を表 4.1.1 に、代表的な物性値を表 4.1.2 に示す。パイプの長さは 100mm とする。



Fig.4.1.4 Specimen

Table 4.1.1 Dimensions and tolerance of VP30⁴⁾

External diameter (mm)			Thickness (mm)	
Normal dimension	Tolerance between min. and max. diameter	Tolerance of average diameter	Normal dimension	Tolerance
38.0	±0.3	±0.2	3.5	±0.3

Table 4.1.2 Properties of specimen material (at 23°C)⁴⁾

	VP(For water pipe)
Density	1.43
Tensile strength (MPa)	54~56
Elongation (%)	50~120
Compressive strength (MPa)	88
Bending strength (MPa)	103
Degree of hardness (Rockwell R scale)	115
Linear coefficient of expansion (10 ⁻⁵ /°C)	7
Strength in shear (MPa)	64
Longitudinal elastic modulus (GPa)	2.942
Poisson ration	0.38

4.1.3 実験用刃物

実験には、大刃部の研磨方向以外は実際の製品と同様のものを用いた。大刃の研磨方向は $\theta=45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ の刃物を 2 枚ずつ用意した。なお $\theta=90^\circ$ は実際の製品と同様である。

外観を図 4.1.5 に示す。また研磨角を θ と定義し、図 4.1.5 に示すように角度をとる。



$\theta=45^\circ$



$\theta=50^\circ$



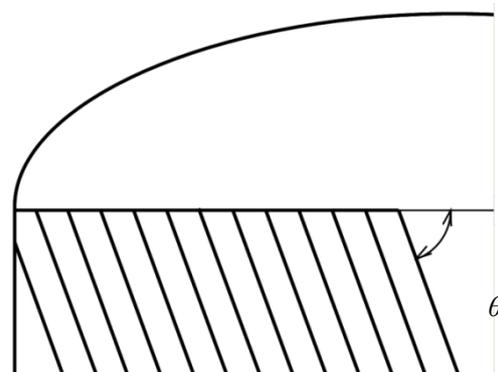
$\theta=60^\circ$



$\theta=67.5^\circ$



$\theta=90^\circ$



Definision of θ

Fig.4.1.5 Cutting blade
三重大学大学院 工学研究科

4.2 刃物表面の研磨方向と切断荷重の関係

研磨方向と切断荷重との関係を調べその結果を図4.2.1に示す. 今回用いた $\phi 38$ のパイプでは9回のストロークで切断が終了する. 67.5° の研磨方向を持つ刃物が切断荷重の大きい前半部で荷重を低減出来ていることがわかる. これは3.3節より, 刃面の研磨方向と摩擦の進行方向が沿うと摩擦係数が減少することから, 刃物表面とパイプとの摩擦力が減少した為に切断荷重が低減されたと考えられる.

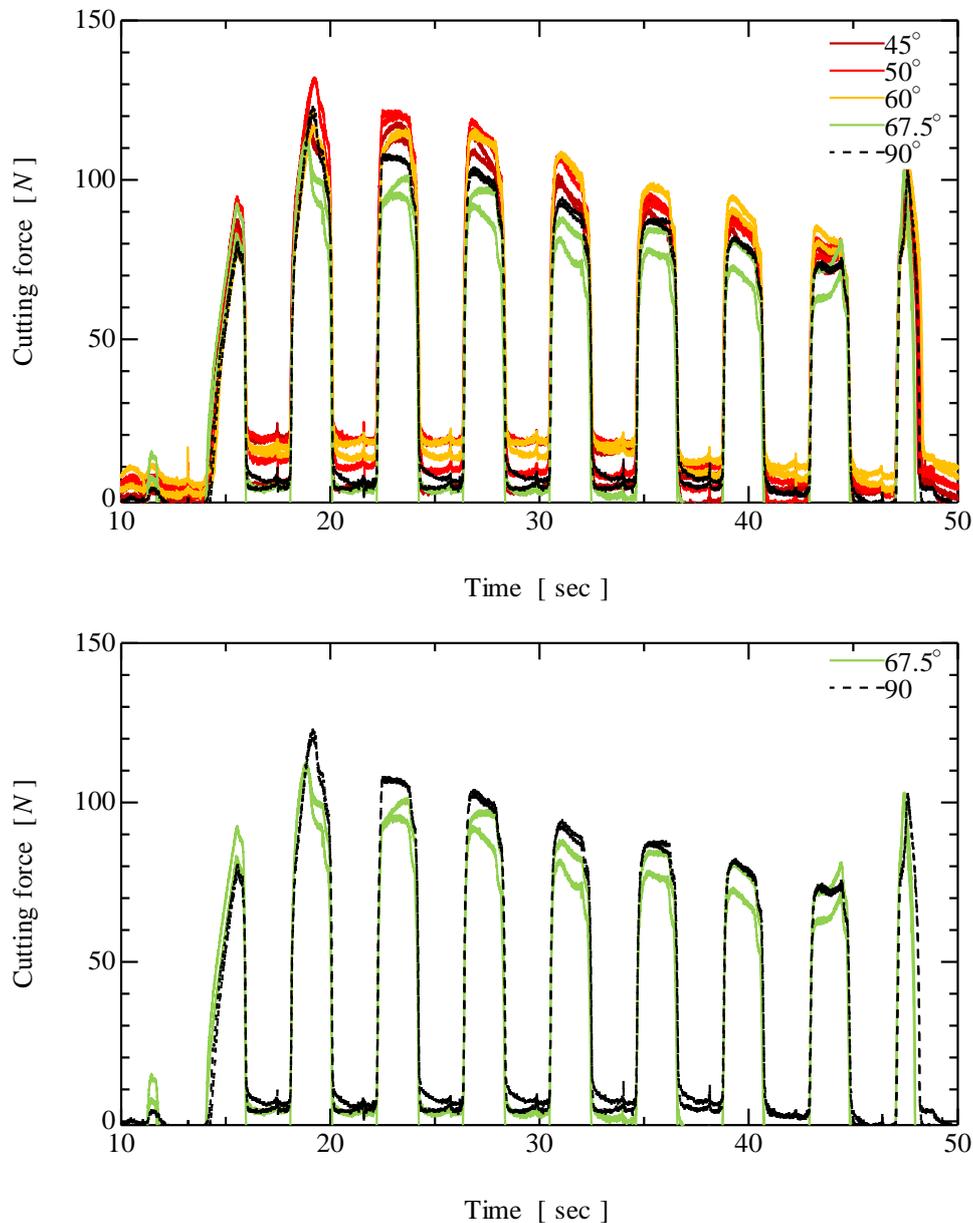


Fig. 4.2.1 Influence of grinding angle on cutting force

4.3 パイプの回転と切断荷重の関係

切断実験中にパイプが回転することが観察された。実際の工具の刃物は、刃先と刃物の回転中心がずれているため、刃物の進行に伴いパイプが回転する。図 4.3.1 に回転量による切断面積の違いを示す。回転方向や回転量は切断の進行により変化するが、切断荷重の大きい切断前半では刃物の回転中心から遠い方を多く切るように回転する((a)の場合)。するとレバー比の関係より切断荷重は大きくなると考えられる。

また、パイプ切断後の断面観察からパイプの回転量を求めた。パイプ断面に切断痕が残るので画像計測により、パイプの回転中心から遠い方の切断長さと近い方の切断長さを計測した。図 4.3.2 に切断長さの定義を示す。9 回のストロークのうち明確に 2 つに分かれる 3 ストローク目から 8 ストローク目までを計測した。遠い方の切断長さは L_1 と L_2 の平均値、近い方の切断長さは N_1 と N_2 の平均値とした。また、図 4.3.3 に求めたストローク毎の切断長さを示す。

図 4.3.3 より、 67.5° 研磨方向を持つ刃物の方が 90° の場合より遠い方を切る長さが減少し、近い方を切る長さが増加していることがわかる。つまり、 67.5° の研磨方向を持つ刃物は切断中におけるパイプの回転量が少ないことがわかる。

さらに、近い方の切断長さと遠い方の切断長さの比をとったグラフを図 3.4.4 に示す。値が小さいほど遠い方の切断長さが長いことになる。標準の刃物に比べ、研磨方向を変えた刃物すべてが遠い方を切る量が減少している。ここで、図 3.4.5 に切断中の様子を示す。刃物の回転中点が刃先位置とずれていることによりパイプは切断初期において右回りに回転する。その際パイプは、刃物の研磨痕を乗り越える向きに進行する。切断荷重が低減しなかった刃物はここでの摩擦が大きかったからであると考えられる。よって、理想的な研磨方向は切断の進行に沿いつつ、パイプの回転による刃物とパイプの摩擦が少なくなるものだと考えられる。

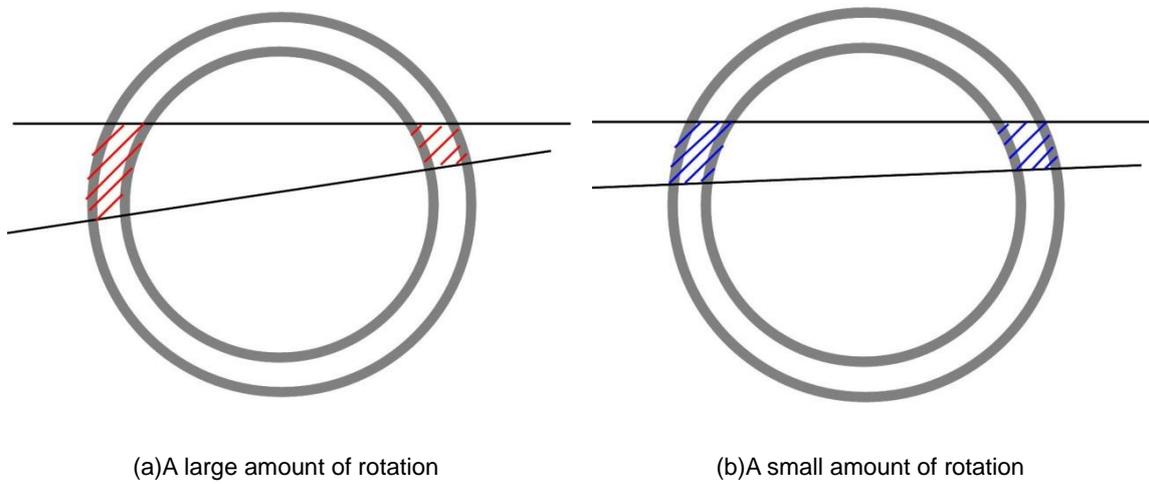


Fig. 4.3.1 Pipe rotation

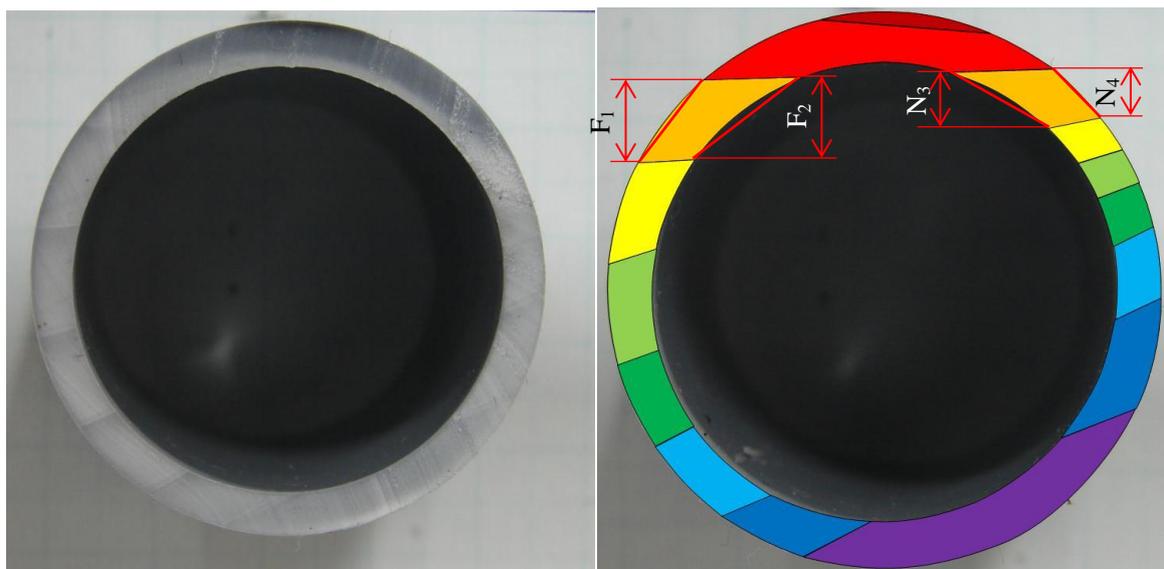


Fig. 4.3.2 Definition of cutting length

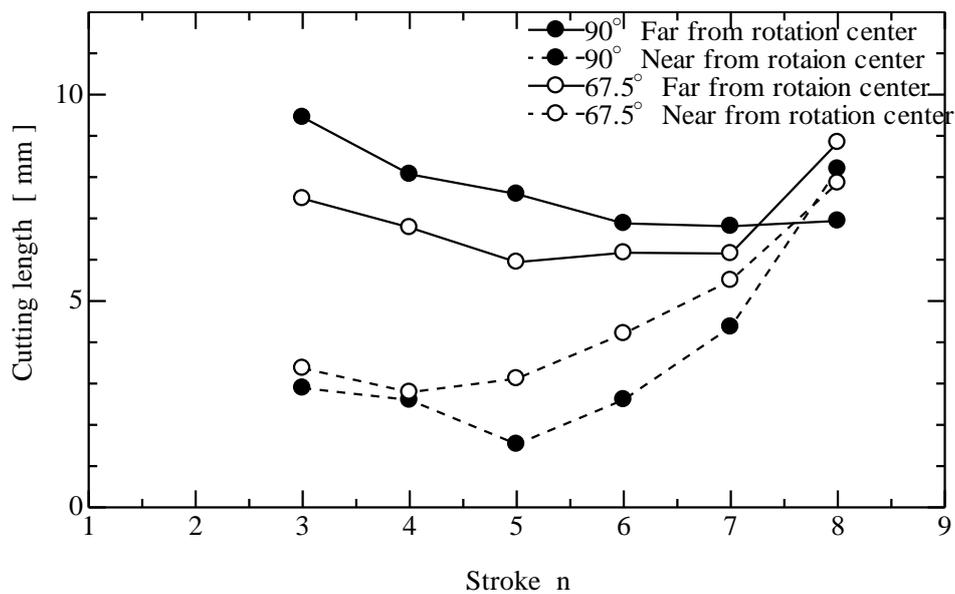


Fig. 4.3.3 Cutting length

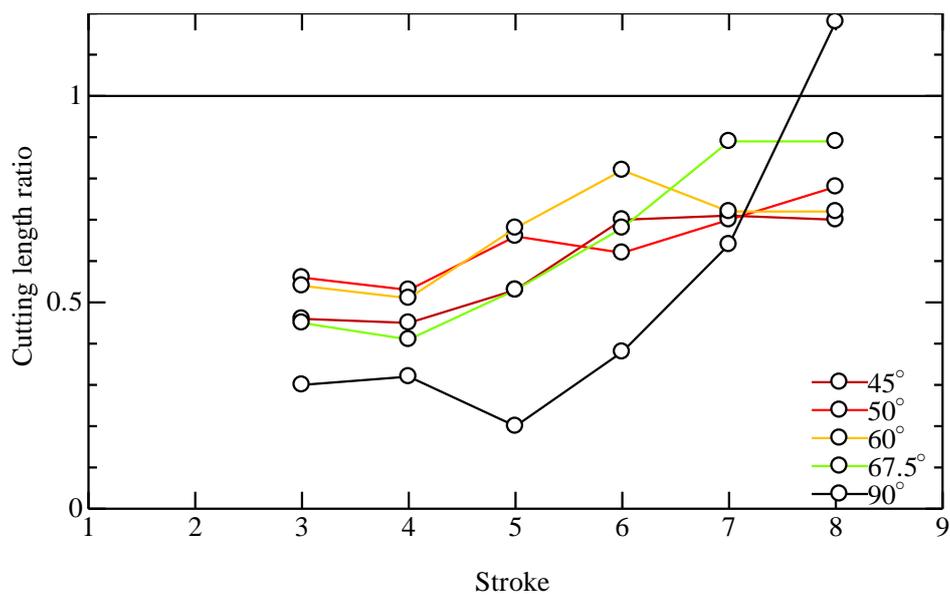


Fig. 4.3.4 Cutting length ratio

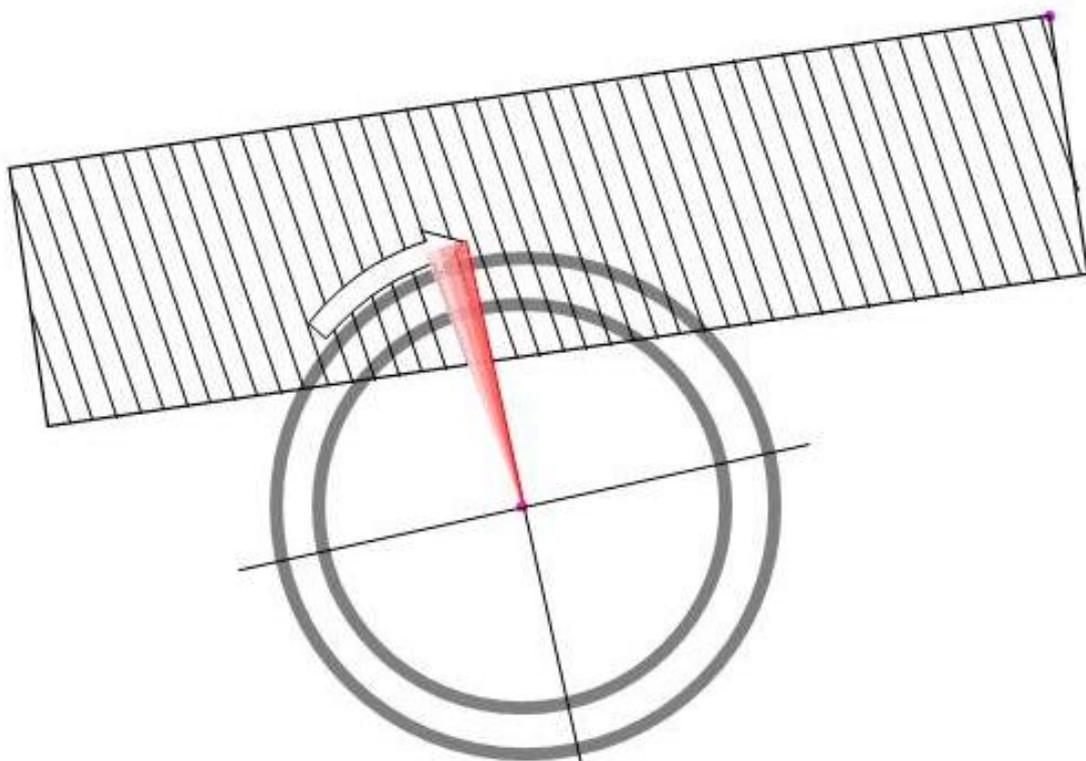


Fig. 3.4.5 Pipe rotation

4.4 理想的な刃物表面

第 2 章, 第 3 章および前節までの実験結果および考察を踏まえて, 切断荷重を低減できる刃物を考える. 切断荷重の低減には刃物表面とパイプの摩擦力低減が有効で, 摩擦状態を緩和する方法として比較的簡易な方法として刃物表面の研磨方法を変えることが考えられる. その方法として刃物の研磨方向を変えることが考えられ, その方向は刃物の進行方向に沿わせ, パイプの回転量が少なく, またパイプの回転による摩擦が小さくなる方向だと考えられる.

第5章 結言

より小さい荷重においてPVCパイプを切断する為に、押し切りによる切断加工現象を簡略化し、刃物と材料の幾何学的な関係から工具形状が切断荷重に及ぼす影響を理論的に求め、切断加工実験を行い検証した。また、刃物表面と材料の摩擦係数を測定する装置を製作し、表面性状と摩擦状態の関係を詳しく調べた。得られた結果を実際の工具へ適用し、切断実験により検証した。その結果から以下の知見が得られた。

1. 計算には多くの仮定があり、加えて非常に簡略化しているが、実測値と理論値が切断荷重の大きい切断前半において、ほぼ同等の値を示し、切断の進行に伴う切断荷重の推移も同様の傾向を示したことから、おおよその切断荷重を見積もるには十分な有用性があると思われる。
2. 実験結果と計算結果において切断中におけるパイプと刃物の摩擦力は切断の初期に切断荷重の大きな割合を占めるので、切断荷重の低減には摩擦力の低減が有効である。
3. 摩擦係数は研磨方向が刃の進行方向に沿った場合に低くなり、刃の進行と交差する方向に研磨方向がある場合に高くなる。よって、摩擦係数を下げるには研磨方向と摩擦方向を沿わせることが重要である。
4. 摩擦の方向によって摩擦係数は変化するが、表面あらさでは整理できない。そこで粗さ曲線から導出した表面性状の方向性を表す値を用いると評価できる。また、摩擦の進行方向に対する表面性状の山が高いと摩擦係数が低減する。方向性を持った研磨方法が有効である。
5. 実際の工具でも、刃物の研磨角度を刃物の進行方向に沿う方向にすると、摩擦係数が低減し、切断荷重が低減できる。
6. 切断の際にパイプが回転し、パイプは刃物の研磨痕を乗り越える向きに進行する。よって理想的な刃物の研磨角度は上記に加え、パイプの回転が少なく、パイプの回転方向と研磨痕との角度が小さくなる方向だと考えられる。

参考文献

- 1). 北松 宗親, “樹脂材料の楔形刃物による切断加工”, (2010), 三重大学大学院修士論文
- 2). 中西 栄徳, 多原 幸宏, 牧 清二郎, “ナイフ状刃物による樹脂製パイプの切断加工(第 1 報)-樹脂製パイプの押し切り時における切断特性-”, (2011), 先端加工第 29 巻第 1 号 pp.59-63
- 3). 中西 栄徳, 多原 幸宏, 牧 清二郎, “ナイフ状刃物による樹脂製パイプの切断加工(第 2 報)-樹脂製パイプの押し切りに対する理論的考察-”, (2011), 先端加工第 29 巻第 1 号, pp.64-69
- 4). ヒシパイプ給排水設備総合カタログ(三菱樹脂株式会社), (2009), 57
- 5). Paradeep L.Menezes, Kishore, Satish V.Kailas, “Effect of directionality of unidirectional grinding marks on friction and transfer layer formation of Mg on steel using inclined scratch test”, (2006), Materials Science and Engineering A 429, pp.149-160
- 6). 日本機械学会, “機械工学便覧デザイン編 β4 機械要素・トライボロジー”, (2005), pp.β4-145
- 7). Paradeep L. Menezes, Kishore, Satish V.Kailas, “Effect of surface roughness parameters and surface texture on friction and transfer layer formation in tin–steel tribo-system”, (2008), journal of materials processing technology 208, pp.372-382
- 8). Paradeep L. Menezes, Kishore, Satish V.Kailas, “Influence of surface texture and roughness parameters on friction and transfer layer formation during sliding of aluminum pin on steel plate”, (2009), Wear 267, pp.1534–1549
- 9). Paradeep L. Menezes, Kishore, Satish V.Kailas, Michael R. Lovell, “Friction and transfer layer formation in polymer–steel tribo-system: Role of surface texture and roughness parameters”, (2011), Wear 271, pp.2213– 2221
- 10). J.ホーリング編, 松永 正久監訳, “トライボロジ”, (1984), pp.75-89

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切丁寧なる御指導を賜りました 牧 清二郎 教授に深く感謝いたします。

さらに、実験を遂行するにあたり、多大なる御協力を頂きました 中西 栄徳 助教, 中川 浩希 技術専門職員, ならびに集積加工システム研究室の皆様に深く感謝致します。

最後に、幾多の御協力を頂きながら、ここに御氏名を掲載できなかった方々に対し、その失礼をお詫びするとともに、謹んで御礼申し上げます。