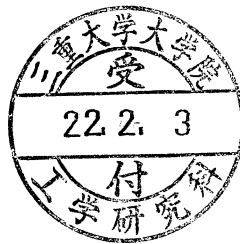


修士論文

エステル系切削油剤の実践的な性能評価法



指導教員 牧 清二郎 教授

平成 21 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

立和名 祐介

目次

第 1 章 緒言	01
第 2 章 摩擦・摩耗・潤滑	03
2.1 摩擦・摩擦係数の定義	03
2.2 工具摩耗	04
2.2.1 工具摩耗の形態・機構	04
2.2.2 逃げ面摩耗	07
2.3 切削油剤の作用	08
2.3.1 切り屑の接触長さ	08
2.3.2 冷却および反溶着作用	10
第 3 章 実験方法及び実験条件	11
3.1 簡易摩擦試験	11
3.1.1 摩擦試験法及び簡易摩擦試験装置	11
3.1.2 工具	14
3.1.3 摩擦試験条件	15
3.2 二次元切削実験	17
3.2.1 実験装置及び切削力測定方法	17
3.2.2 工具	20
3.2.3 切削条件	21
3.2.4 摩擦係数算出方法	22
3.3 試験片	24
3.4 エステル系切削液用ベースオイル	27

第 4 章 実験結果	29
4.1 最大接触圧力及び比切削抵抗	29
4.1.1 試験片摩耗痕とヘルツの接触理論	29
4.1.2 比切削抵抗	33
4.1.3 最大接触圧力と比切削抵抗の比較	34
4.2 摩擦係数比較	35
第 5 章 逃げ面摩耗を考慮した摩擦係数	39
5.1 逃げ面加工工具実験	39
5.1.1 逃げ面加工工具	39
5.1.2 摩擦係数結果	40
5.2 摩擦係数算出方法	42
5.2.1 逃げ面における摩擦係数の算出	42
5.2.2 最適な n_c 値と n_t 値	44
5.2.3 摩擦係数	47
5.3 工具すくい角と摩擦係数	49
5.3.1 すくい角について	49
5.3.2 工具	50
5.3.3 摩擦係数	51
5.4 切削速度と摩擦係数	54
5.4.1 切削速度について	54
5.4.2 摩擦係数	55
5.5 考察	59
第 6 章 結言	64
参考文献	
謝辞	

第 1 章 緒言

金属切削において、油剤は「潤滑・冷却・切り屑処理」と重要な役割を果たしている。その結果、工具摩耗を抑制して工具寿命を延ばす、加工精度を高める、被削材の加工面の変質を抑制するといった効果がある。また、低摩擦化による省エネルギーは近年問題となっている環境への配慮にも繋がる。¹⁾

油剤の潤滑性能は油剤種、被削材種などの切削条件によって大きく異なるため、切削条件によって最適な油剤を使用することが重要であるが、油剤の選定を行う際、多くは予備実験を行って採用しているのが現状であり、その性能は摩擦係数で示されることも多く、油剤における摩擦係数はその油剤性能を示す大きな指標となっている。これまでに簡易摩擦試験によって油剤の性能を評価するような研究はされているのだが、それはあくまで目安の域を脱しておらず、あまり実践的な油剤の性能評価方法とは呼べない。よって簡易的でしかも実践的な摩擦試験方法の確立が重要である。

実際に摩擦係数を算出すると、摩擦係数は切削加工中一定の値をとるわけではなく、ある程度一定の幅を持って時間とともに常に変動し続けていることが判明した。摩擦係数が変動する最大値と最小値の振れ幅を変動量とすると、スティックスリップなどの現象は平均値よりもむしろ変動量として現れやすい。よって摩擦係数を 1 つの値に決めることは難しく、平均値として低い摩擦係数値を示したからと言って適した油剤が決定するのではないと考えられる。よって切削中の摩擦係数が低く、かつ変動量が少ないような安定した摩擦状態を維持して切削を行うことができる油剤がその切削に最適な油剤であると言える。また、切削中の切削点は非常に過酷な状況にあり、摩擦エネルギーが熱エネルギーに変化することによって工具のすくい面が非常に高温になるため、同時に油剤も高温になると考えられる。よって油剤の潤滑特性が温度上昇によって大きく変わるものがない、または高温下において良好であることが切削加工において重要であると考えられる。

以上から、本研究では切削加工中の工具・被削材間の摩擦現象を簡易モデル化し、円盤型試験片を用いた面接触によるピン・オン・ディスク式摩擦試験法を参考にした簡易摩擦試験機によって、油剤温度を 200℃ 付近まで加熱した状態での簡易摩擦試験を行い、摩擦

係数 μ の値を変動量も含めて調査，評価を行い，旋盤による二次元切削実験から得られる摩擦係数と比較することによって油剤の実践的な評価方法の確立を目的とする．

第2章 摩擦・摩耗・潤滑

2.1 摩擦・摩擦係数の定義²⁾

摩擦とは“接触する二つの固体が外力作用のもとですべりや転がり運動をするとき、あるいはしようとするときに、その接触面においてそれらの運動を妨げる方向の力（摩擦力）が生ずる現象”である。

摩擦の大きさを無次元数で表したものが図 2.1 に示す摩擦係数で、一般には“ μ ”で表示する。一般に転がり摩擦抵抗はすべり摩擦抵抗に比べ非常に小さい。

転がり摩擦においては現象が複雑で統一的な見解は得られていないが、すべり摩擦においては有名なアモン・クーロンの法則がある。

アモン・クーロンの法則

1. 摩擦は接触面の面積には影響しない
2. 摩擦は接触面荷重に比例する
3. 摩擦は接触面速度にも依存しない
4. 静摩擦力は動摩擦力よりも大きい

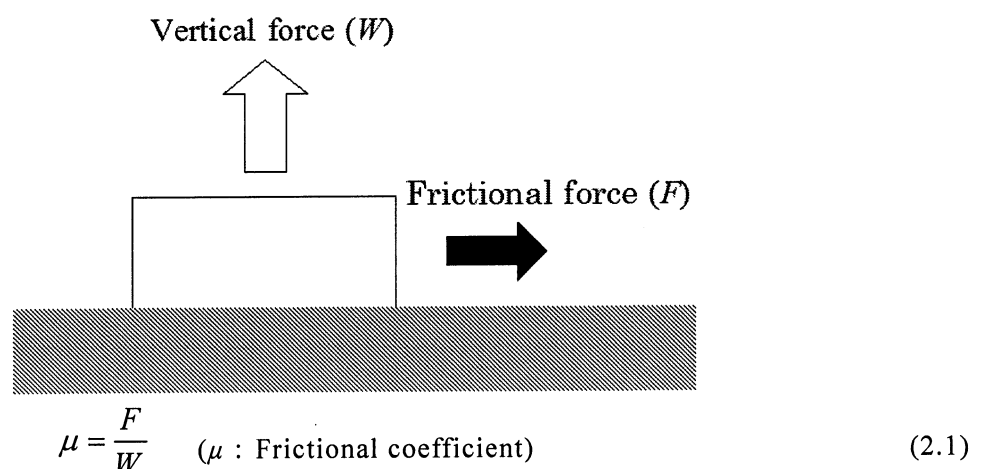


Fig.2.1 Definition of frictional coefficient

2.2 工具摩耗³⁾

2.2.1 工具摩耗の形態・機構

旋盤バイトの正常状態の摩耗は基本的にはすくい面摩耗及び逃げ面摩耗に大別され、逃げ面摩耗は横逃げ面及びノーズ・コーナー部逃げ面摩耗に分類される。また、切刃の切削部と非切削部との境界部に発生する境界摩耗がある。前切刃部に生じる境界摩耗は加工面の表面粗さに大きな影響を与える。

異常摩耗には、欠け、亀裂、ノーズ部の塑性変形などがある。

欠けには切刃稜の小さな刃こぼれ程度のチッピング、切刃の大きな欠け及び刃部全体に及ぶ破損がある。

チッピングは発生初期では継続して切削できるけれども、この部分の切削抵抗が増大し、このために切削温度が高くなり、局部的摩耗を起こし、全体摩耗を促進する。

熱伝導率の低い工具(例えばサーメット工具など)で、ノーズ・コーナー部にチッピングが発生した場合、上記理由により局部摩耗の発達を促し、刃先部の塑性変形(だれ)の原因となる。

切刃に生ずる亀裂には切刃に平行なものと垂直のものがあり、前者は機械的疲労、後者は熱的疲労が原因であると言われている。

全摩耗量 W は諸原因の摩耗量の総和で与えられるという考えのもとに次式が成立する。

$$W = w_s(n, \sigma_s) + w_a(L, \sigma_a) + w_\theta(\theta, T) + w_0 \quad (2.2)$$

w_s : 衝撃による摩耗, n : 衝撃回数, σ_s : 強度, w_a : 引っかき摩耗, L : しゅう動距離, σ_a : 強度, w_θ : 温度支配摩耗, θ : 絶対温度, T : 時間, w_0 : その他の摩耗

切削は連続切削と断続切削に分類され、摩耗機構は各々異なる。切削、中えぐり削などは前者に属し、 w_a, w_θ が主となり、フライス削、歯切などは後者に属し、 w_a, w_θ のほか w_s も追加される。

(A) 硬粒子の引っかきによる摩耗 (abrasive wear)

これは被削材中に散在している炭化物、窒化物、酸化物などの硬い粒子、および工具内

の脱落炭化物などが工具表面を通過するとき工具表面を機械的に引っかけて起こる摩耗である。これによる摩耗は温度にあまり関係なく、摩耗距離に比例し、硬粒子と工具材との相対硬度の影響を受ける。

(B) 凝着による摩耗 (adhesive wear)

これは工具とこの上をしゅう動する材料(切屑, 加工面)が接近結合して凝着現象を生じ、溶着部の破壊が工具側に起こり、工具の一部が剥ぎ取れる摩耗をいう。これには圧力凝着 (pressure adhesion) と温度凝着 (temperature adhesion or welding) とに区別される。圧力凝着は比較的低温で高圧を受けて生ずる。構成刃先はこれの代表的なものであり、これの脱落の際、切刃稜のチッピングを生ずる場合もある。温度凝着は摩擦接触部が高温により軟化変形して密着しやすい状態のところへ拡散、合金化の作用も加わり起こる。これは面温度、面圧力、両材の溶着性の影響を受ける。したがって、基本的な工具摩耗は前項(A), (B)項の摩耗が総合されて生ずることとなる。

(C) 酸化, 硫化, 塩化などの化学的摩耗

工具が高温で空気に触れやすい境界摩耗部の摩耗原因にこの酸化による摩耗があげられる。また、極圧添加剤(硫, 塩化剤)混入の切削油を使用する場合、乾切削および添加剤を含まない切削より工具寿命が短くなる現象を生ずるときがある。これは工具の硫化, 塩化による劣化が摩耗を促進したものと思われる。

(D) 電気化学的摩耗 (electro-chemical wear)

切削温度が上昇するとき、工具－被削材間に数十 mV におよぶ熱起電力を生ずることがある。工具を機械本体より電氣的に絶縁することにより、工具摩耗が減少するといわれている。

(E) 工具切刃の軟化による塑性変形(だれ)および溶融

工具は高温で軟化、硬さが低下し被削材との間の硬度差が少なくなり切削能力を失い、破損または溶融する。これは高温硬さの低い高速度鋼、また焼結合金工具でも熱伝導率が少なく、したがって放熱効果が少ない場合、刃先の局部加熱を起こし、塑性変形を生じやすい。またノーズ部切刃稜のチッピングが局部加熱の原因となり塑性変形を生ずる場合もある。

(F) 衝撃力による摩耗及び欠け

フライス削および溝を有する材料の丸削すなわち断続切削では切込み時に大きな衝撃力を受ける。また、連続切削でも被削材で偏心および被削材内に巣、異物の混入を有するものの切削および切込み時に大きな衝撃を受ける。衝撃による摩耗および欠けには、一発の過大な衝撃力によるものと、繰返し衝撃を受け疲労によるものとに分けられる。また、衝撃力には機械的なものと、加熱および冷却の温度差によって生ずる熱的応力によるものとに分けられる。後者の熱的な衝撃力によるものは熱伝導率 k が小さく、放熱効果の低い工具に発生しやすい。

2.2.2 逃げ面摩耗

寿命方程式作製の際、摩耗幅 V_B の測定が基礎となる。しかし、摩耗面は切削条件により図 2.2 に示すようないろいろなパターンができ、測定箇所および測定法および測定法の定義に不明確なところが多く、かつ測定者により誤差も生じやすい。

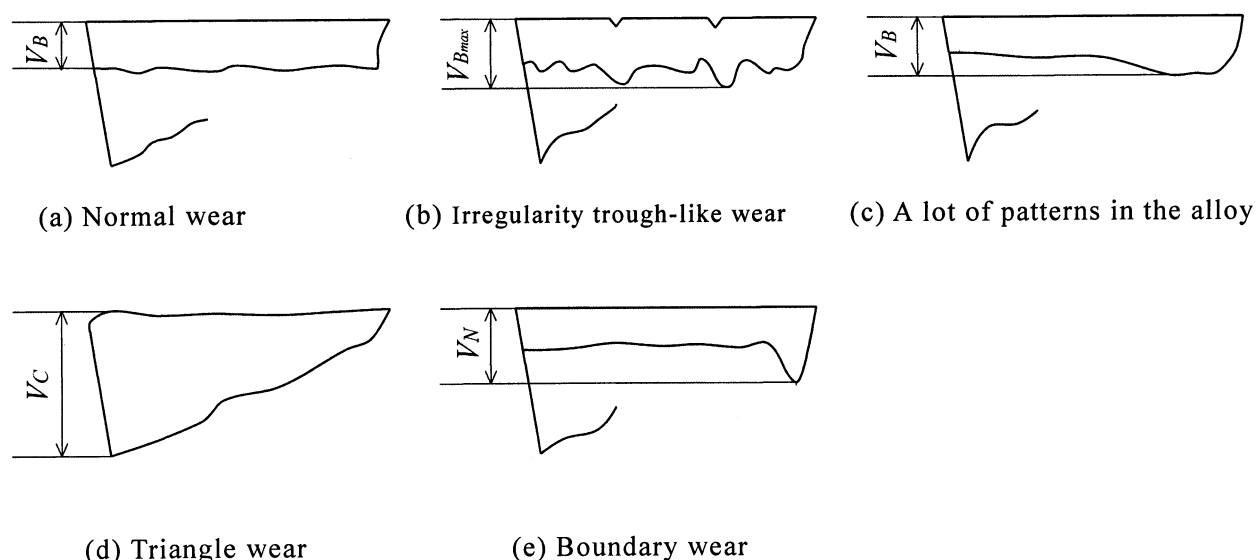


Fig.2.2 Pattern of flank wear

JIS B 4011 では“比較的一様なとき(a)はその平均値をとることを原則とするが、不均一なとき(b)および三角状(d)となるときは最大摩耗幅をとることができる。境界摩耗はこれがバイトの寿命の直接原因として発達しないものは看過する”と定めている。

また、CIRP では切り込みの 1/2 の箇所における摩耗値(摩耗前の切刃稜が基点となる)、ISO ではノーズ半径部と境界部切込みの 1/4 を除く切刃部の平均摩耗幅を定義している。

逃げ面摩耗はすくい面摩耗に比し、接触圧力や接触温度は少ないけれども、実用的な切削条件のもとでは、圧力凝着による摩耗や温度凝着摩耗の占める割合が多いものと考えられる。

2.3 切削油剤の作用⁴⁾

2.3.1 切り屑の接触長さ

切削油剤には、刃先すくい角と切り屑の間、刃先逃げ面と加工母材の間に侵入して、工具の摩耗を低減させる働きがある。また、潤滑剤として働くことにより、単に摩擦を低減させるだけでなく、次の効果が期待できる。図 2.3(a)は刃先の切削状態を示し、切り屑は工具のすくい面と送りの数倍の長さにわたって接触している。この接触長さは、炭素鋼の乾式切削で送りの 5～6 倍、ステンレス鋼で 4 倍、黄銅で 2 倍といわれる。

ここに切削油剤を使用すると、切り屑と工具の間に浸透し、接触している長さが抑制され、図 2.3(b)の工具を使用したのと同じ効果が得られる。そして摩擦力が減少し、切削抵抗は図 2.4 の(a)から(b)の状態に変化する。背分力の発生要因はすくい面上の摩擦力だから、切り屑とすくい面との接触部分の長さが短くなれば、背分力は大きく減少する。しかし主分力発生の原因は、逃げ面における摩擦力と切り屑を材料から切り離すせん断力なので、摩擦力が低下しても主分力は背分力ほど低下しない。

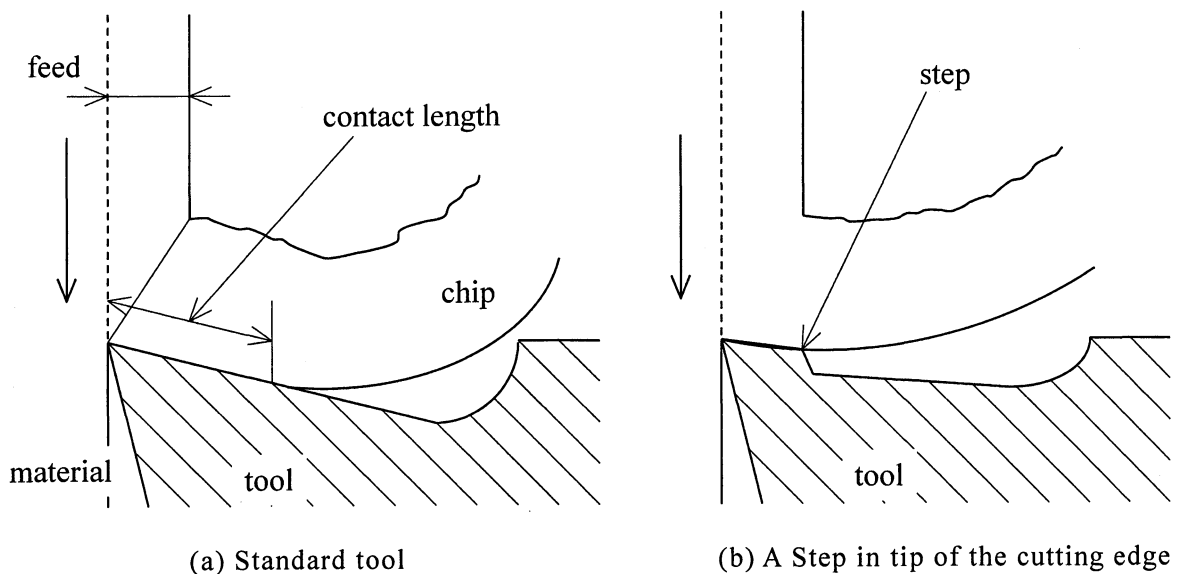


Fig.2.3 The contact length of the cutting rubbish

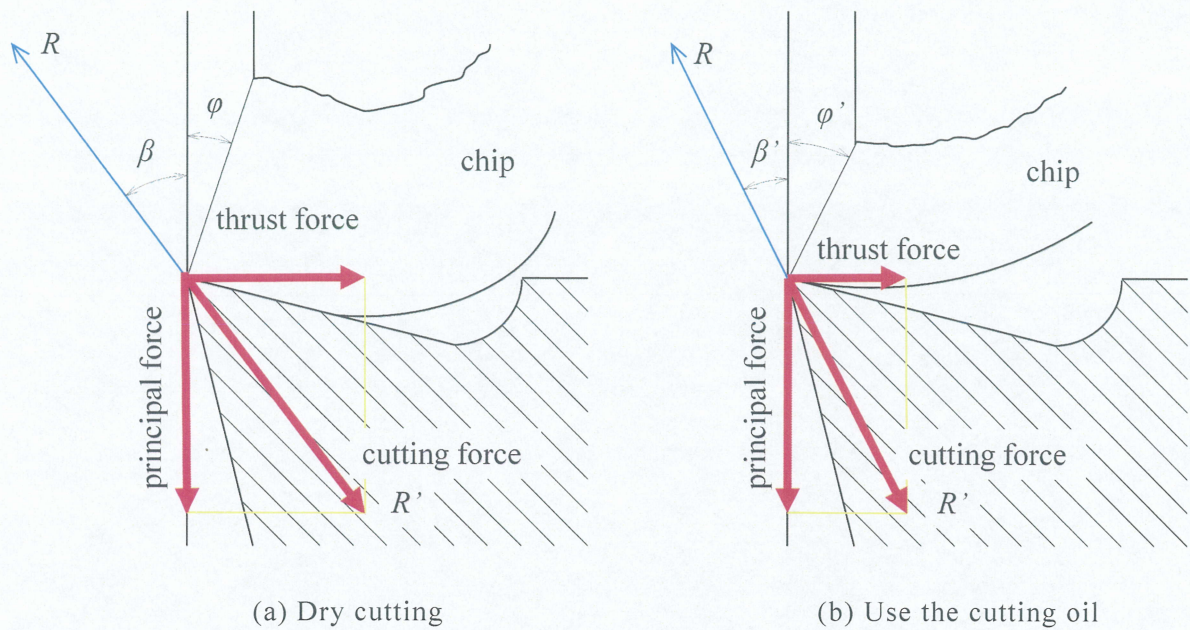


Fig.2.4 Change in cutting phenomenon by lubricating action

被削材には図 2.4 のように、切削抵抗 R の反力 R' が作用しており、切削油剤を使用することによって、角度 β が β' に変わる ($\beta > \beta'$)。せん断を起こす方向は作用した力の 45° に近い値となる。せん断角 φ, φ' 間には $\varphi < \varphi'$ の関係が生じ、せん断角の大きい φ' の方が切削力は少なくてすむ。すなわち、切削油剤を使用すると小さな力で材料を破壊(切削)することができる。このことを切削油剤の切削理論と呼ぶ。

2.3.2 冷却および反溶着作用

刃先温度は、切込みや送り、特に切削速度を大きくすると高くなる。工具は温度が上昇するにつれて軟化する。しかし、工具は高温においても硬いことが重要な要素である。

超硬工具においては刃先温度が $700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 程度の切削条件で使用する。高温での硬さの低下は少ないが、 800°C を超えると酸化・拡散が起こり始め、寿命が短くなる。刃先温度の低い方が工具寿命は長い、このために切削速度を落としたのでは、能率が低下する。そこで、切削速度を落とさずに温度を低下させるため、切削油剤で冷却することが考えられる。

比較的遅い速度で鋼を切削すると、構成刃先が付着する。鋼の切削では刃先の温度が $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$ (鋼の再結晶温度) 以上になると構成刃先は消失するので、通常、これ以上の温度で使用する超硬工具の場合は問題とならない。しかし、ハイスによる切削では、切削面が粗くなるなどいろいろな問題となる。そこで、切削油剤を使用することによって構成刃先など付着物をつきにくくし、構成刃先を抑制する。特に塩素系、硫黄系の極圧添加剤の入った切削油剤の反溶着作用は大きく、その作用により平滑な切削面が得られる。

第3章 実験方法及び実験条件

3.1 簡易摩擦試験

3.1.1 摩擦試験法及び簡易摩擦試験装置

摩擦試験法の種類は大別すると、点接触、線接触、面接触の3種類がある。その中で、接触面積が一定に保てることや、試験片の加工を容易に行うことができることなどの理由から、本実験では面接触式の摩擦試験法を採用し、ピン・オン・ディスク式摩擦試験機を参考にした摩擦試験機を使用した。円盤型試験片に対して三角形スローアウェイチップを垂直荷重によって押し付け、摩擦試験を行った。その際、摩擦面への垂直荷重と摩擦面に沿う方向の摩擦力、摩擦面の回転方向を図3.1のように定義した。

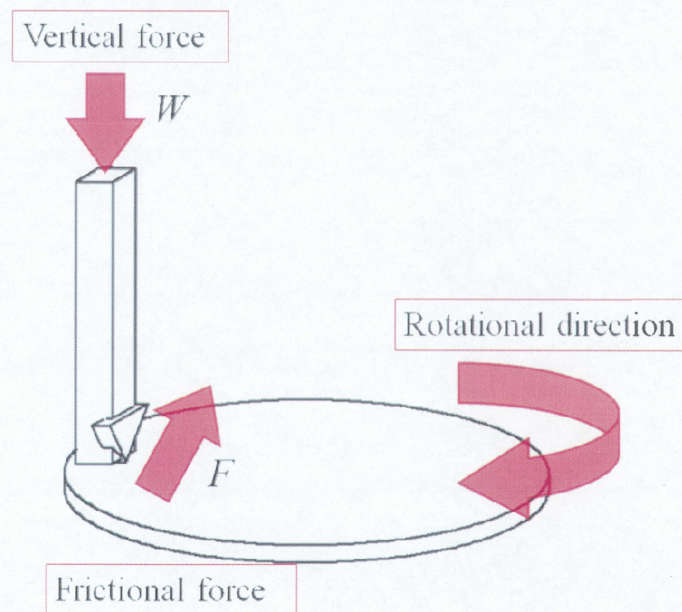


Fig.3.1 Direction of vertical force, frictional force and rotation

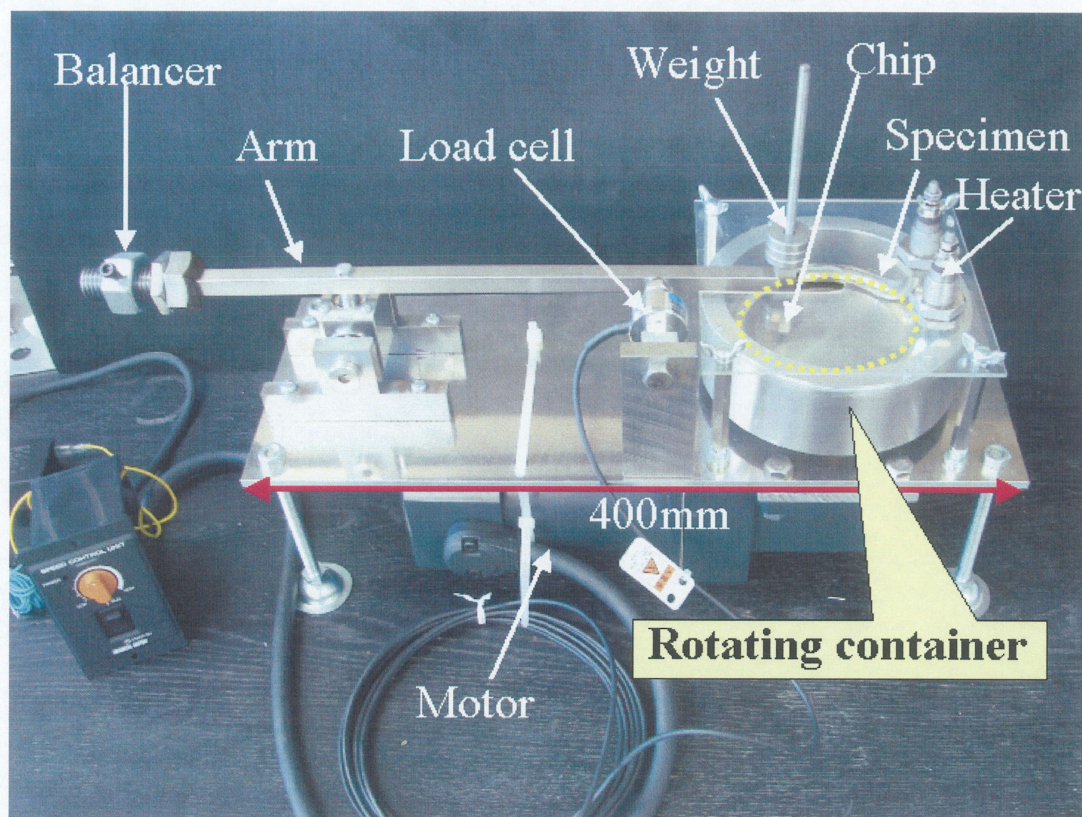


Fig3.2 Experimental apparatus

本実験で用いた簡易摩擦試験機の全体図を図 3.2 に示す。回転容器中心にある土台に円盤型試験片を固定し、切削用油剤を試験片が浸かる程度入れる。AC 小型標準モーター（最大出力：60W、電圧：110V、可変速度範囲：90～1700rev/min、オリエンタルモーター株式会社製）で容器ごとに試験片を回転させ、そこにアームの先端に取り付けた三角形スローアウェイチップを垂直荷重によって押し当て、摩擦試験を行う。アームはその支点部分の直交する 2 軸方向にベアリング（NTN 株式会社製）を組み込むことで支点を中心に自由に動くことができる。またバランサーによって水平を保てる状態にし、垂直荷重のみが試験片にかかるようにした。チップは摩擦により水平方向に力を受け、その力をアームがロードセル（株式会社共和電業製）を押す力によって計測し、ロードセルで得る信号を動ひずみアンプ（株式会社共和電業製）で増幅し、データアキュイジション装置（NEC 三栄株式会社製、オムニエース II RA1200）で記録した。これにより次式から摩擦係数を算出する。

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (3.1)$$

ここで、摩擦力 F は摩擦面に沿う周方向の成分、垂直荷重 W は摩擦面に垂直な成分である。

また、試験温度については液体加熱用シースヒーター（株式会社ミスミ製）を容器内に図 3.3 のように固定し、油剤を浸した後、容器を回転させながら油剤を直接加熱することで、容器内を均一に加熱できる。温度は常時熱電対で計測し、データロガー（GRAPHTEC 株式会社製, midi LOGGER GL200）で記録した。

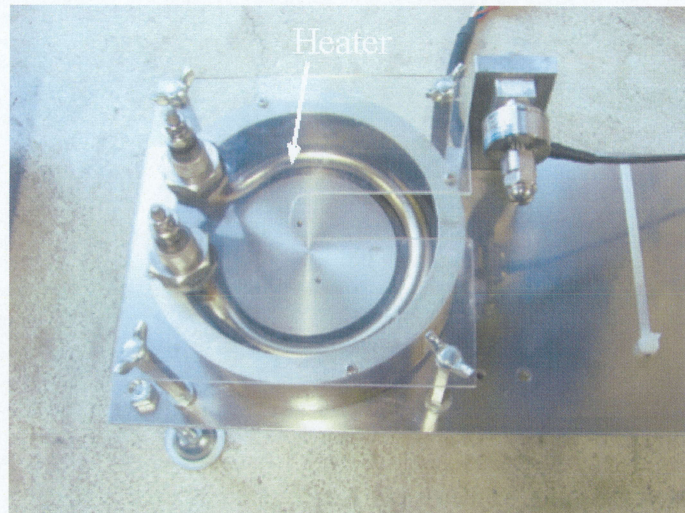


Fig3.3 Heater in container

3.1.2 工具

簡易摩擦試験で使用した三角形スローアウェイチップ(三菱社製, TNGA160408 HTi10, 材質: 超硬合金 先端丸, 0.8mm) の形状を図 3.4 に, 仕様を表 3.1 に, 合金特性を表 3.2 に示す.

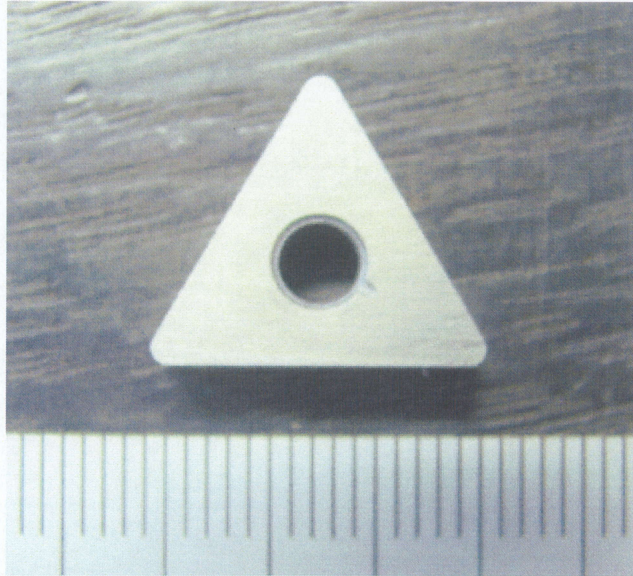


Fig.3.4 Photograph of cutting tool

Table 3.1 Specification of employed tool HTi10

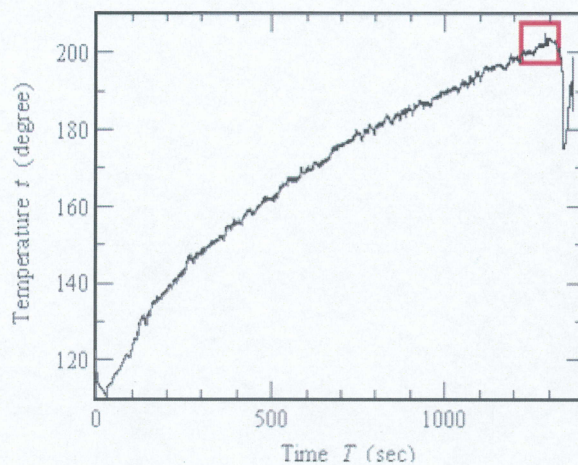
Clearance angel ($^{\circ}$)	Thickness (mm)	Dimension of inscribed circle(mm)	Corner radius (mm)	Chip breaker
0	4.76	9.525	0.8	None

Table 3.2 Characteristics of HTi10

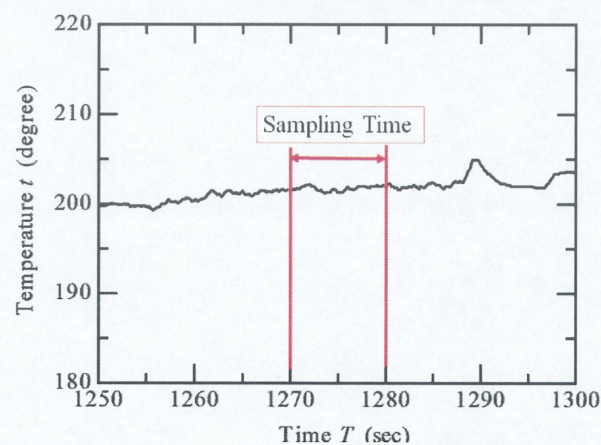
Material	Hardness (H_{RA})	Coefficient of thermal conductivity (W/m \cdot K)	Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/K$)	Young's modulus (GPa)
HTi10	92.0	79	4.6	630

3.1.3 摩擦試験条件

油剤は金属加工用エステル系ベースオイル 3 種(油剤①: パルミチン酸 2-エチルヘキシルエステル, 油剤②: トリメチロールプロパントリオレート, 油剤③: グリセリントリ脂肪酸エステル(植物油))をそれぞれ 1 度の実験で 200ml 使用した. 実験中常に工具と試験片の摩擦面は油剤に浸かっている. 試験速度は約 38m/min (モーター回転数: 約 206rpm) で行い, 荷重は錘① (2.795N)、② (5.609N) の 2 種類を使用し, アーム先端上部の錘を付け替えることによって変更した. 温度は油剤の引火点の最低が 208℃であることを考慮し, 室温及び 50℃~200℃まで 50℃刻みとした. 目的の温度まで各条件とも同じように上がるように考慮し, 目的の温度へ達したら温度を一定に保ち, 約 10 秒間の摩擦試験を行った. 温度上昇の一例を図 3.5 に示す.



(a) The view of increased temperature



(b) Temperature change during the experiment

Fig.3.5 Cutting fluid temperature

図 3.5 から分かるように摩擦試験約 10 秒間は一定の温度が十分保たれていると考えられる。本実験の実験条件をまとめたものを表 3.3 に示す。

Table 3.3 Experimental condition

Rotating speed of specimen (rev/min)	206
Friction velocity (m/min)	38
Ester	Oil①, Oil②, Oil③
Cutting fluid temperature (°C)	Room temp. , 50, 100, 150, 200
Load W (N)	2.795(①), 5.609(②)
Testing time (s)	10

3.2 二次元切削実験

3.2.1 実験装置及び切削力測定法

実際の切削において工具被削材間の摩擦現象を検証し，摩擦試験において見られた傾向が実際の切削時に現れるかを検討するために二次元切削実験を行った．実験に使用した旋盤は大隈鉄工所製 LS 型実用高速旋盤（ベッド上の振り 450mm，両センター間の最大距離 585mm）であり，図 3.5 に示す．

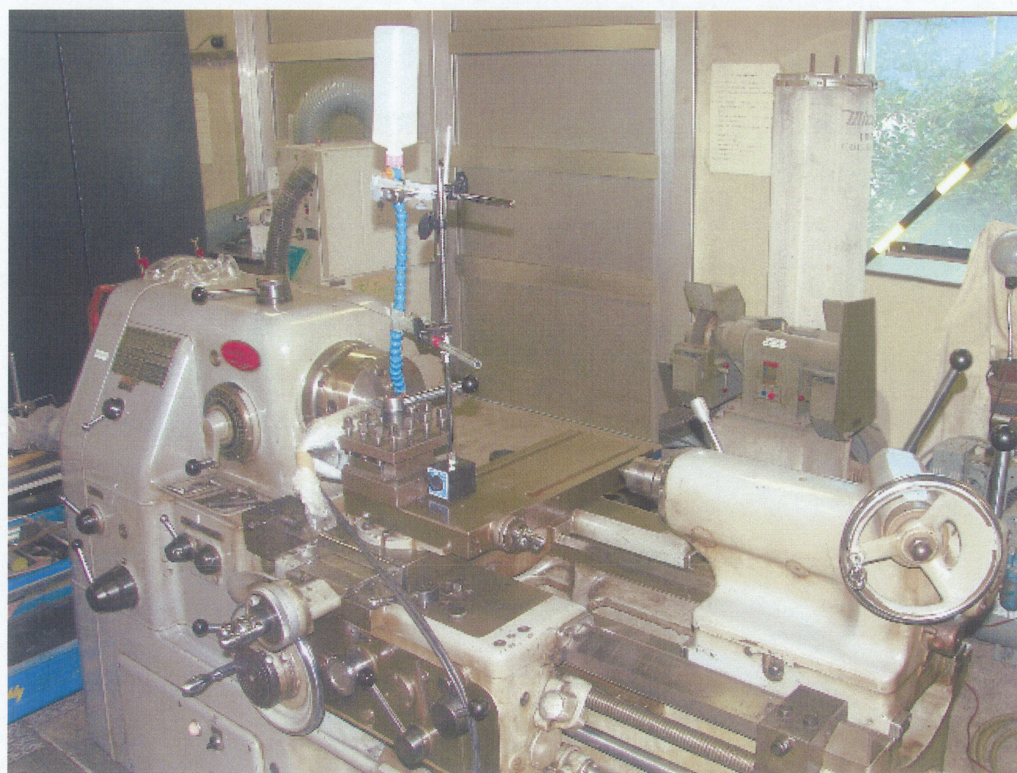


Fig.3.5 Lathe turning machine for experiment

また，切削液剤供給装置を図 3.6 に示す．容器に入れられた切削液剤はコック付きのクーラントライナー（トラスコ中山株式会社製）を通して先端のノズルより切削点に液剤を供給した．

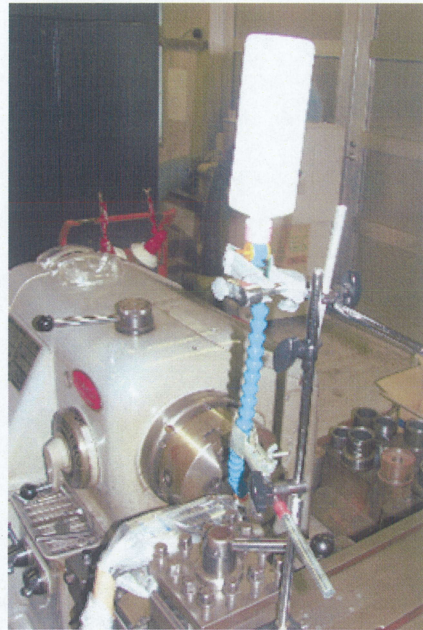


Fig.3.6 Cutting fluid supply unit

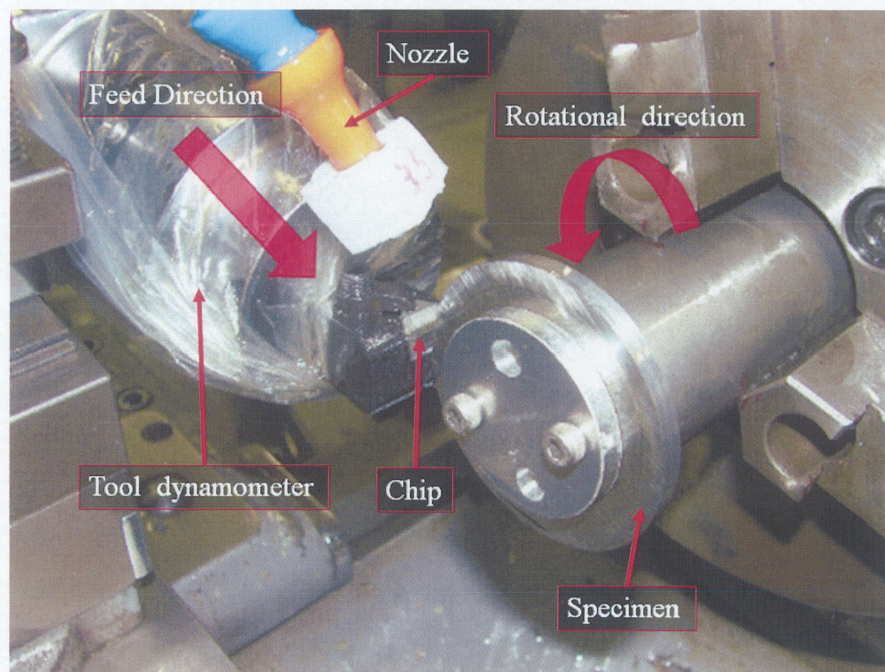


Fig.3.7 Appearance of orthogonal cutting

図 3.7 に二次元切削の様子を示す. バイトは旋盤の刃物台に取り付けた工具動力計(共和電業製, TD-500KA)に取り付け, クーラントライナーのコックを開けることによって油剤

を供給する。切削点に油剤が供給されていることを確認し、旋盤の自動送りによって円盤型試験片の外周せん削を行う。

切削力の測定に工具動力計、動歪み増幅器(共和電業製, DPM-711B), データアクリジション装置(NEC 三栄製, オムニエース II RA-1200)を用いた。

実験より各分力の歪み量 ε (主分力方向: ε_c , 背分力方向: ε_t , 送り分力方向: ε_r) が得られる。これらから以下の式より切削力 F (主分力: F_c , 背分力: F_r , 送り分力: F_t) を算出した。

$$\left. \begin{aligned} F_c &= 0.4504\varepsilon_c \\ F_t &= 1.127\varepsilon_t \\ F_r &= 0.4586\varepsilon_r \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

この分力の値はオーバーハング L が 20mm のときの値である。本実験での突き出し量は 25mm であるため、次式より実際の切削抵抗の主分力 W_1 , 送り分力 W_2 を得た。

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \frac{108F_c}{L+88} \\ W_2 &= \frac{108F_r}{L+88} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

また、背分力を W_3 とし、次式から真の背分力 W を求め、本実験における背分力とする。

$$W = W_3 + 0.0088W_1 + 0.0258W_2 \quad (3.4)$$

3.2.2 工具

工具は摩擦試験と同じ材種の一般旋削用超硬スローアウェイチップ (TPGN160304 HTi10, 三菱マテリアル株式会社製) をチップホルダー (CTFPR2020, 三菱マテリアル株式会社製) に取り付けただものである. 図 3.8 にチップの形状を, 表 3.4 にチップの仕様を示す. また, チップをチップホルダーに取り付けた様子を図 3.9 に示す.

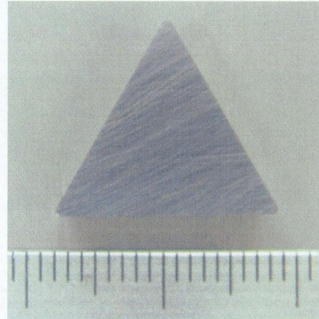


Fig.3.8 Photograph of cutting tool

Table3.4 Specification of chip

Clearance angel (°)	Thickness (mm)	Dimension of inscribed circle (mm)	Corner radius (mm)	Chip breaker	Hand of tool
11	3.18	9.525	0.4	None	Right hand

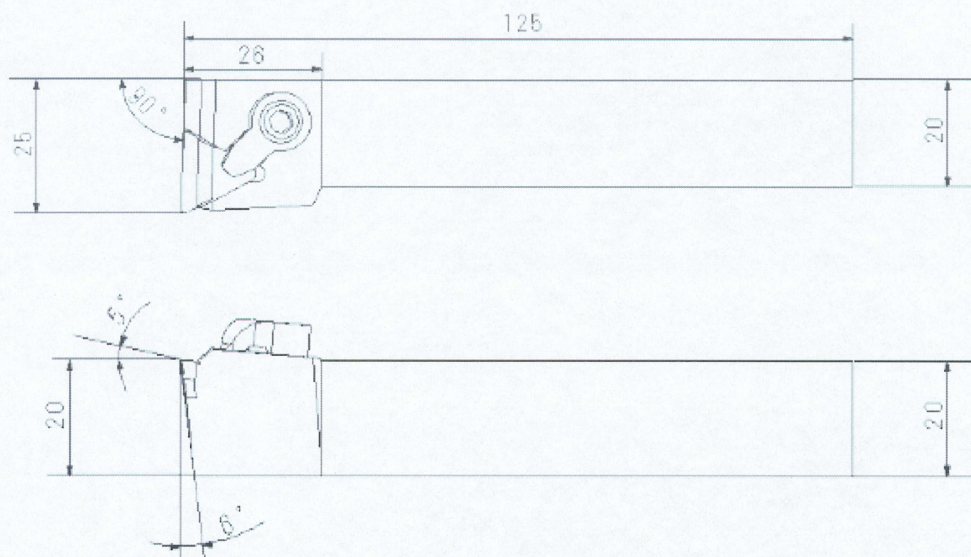


Fig.3.9 Dimensions of cutting tool

3.2.3 切削条件

バイトは工具動力計からの刃先突き出し量を 25mm で設置し、切削時間は切削が安定してから約 3 秒間とした。

クーラントライナーの内径は 10mm で、供給量は約 35ml/min である。また、被削材と切削液剤は摩擦試験で使したものと同一のものを使用した。

本実験での切削条件を表 3.5 に示す。

旋盤の回転速度は摩擦試験に最も近いものを選び、送り速度は最も遅いものとした。

Table3.5 Cutting condition

Rotating speed (rev/min)	210
Feed rate (mm/rev)	0.08
Cutting speed (m/min)	50.8～52.8

3.2.4 摩擦係数算出方法⁵⁾

工具すくい面に加わる応力は均一ではなく、図 3.10 のように分布し、工具先端付近では応力が集中している。⁶⁾ よって、当然位置によって摩擦係数は異なり、工具先端部は摩擦係数が高い。本研究においては、分布している摩擦係数の平均的な値を求めることができる。

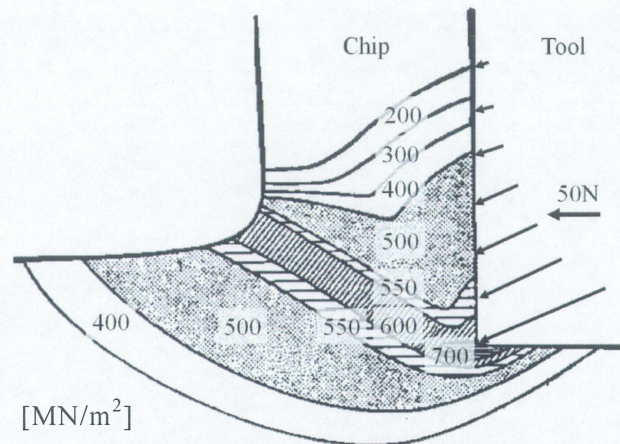


Fig.3.10 Equivalent stress distribution

切削において、切り屑生成の主変形がせん断域で生じるために、これに要する力が工具すくい面から伝達される。この伝達は切り屑を介してなされ、切り屑はすくい面を擦過するためにすくい面での摩擦条件を満たすように切削力が働くはずである。したがって、すくい面摩擦に要する力 R と、せん断面の変形に要する力 R' は平衡している。したがって図 3.11 のような関係が生じる。

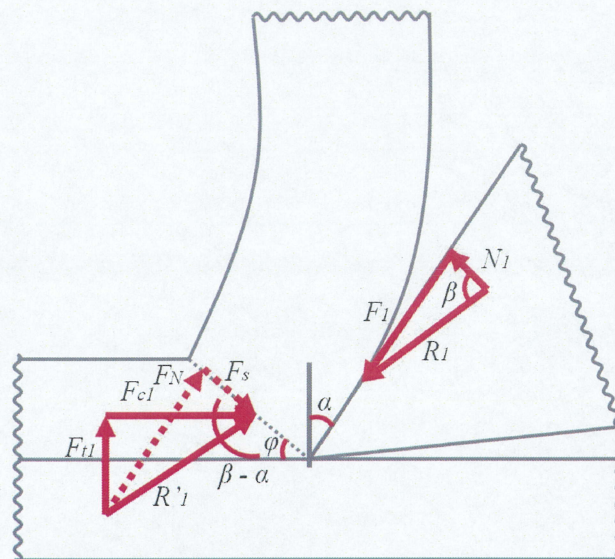


Fig.3.11 Equilibrium system of cutting force

R と R' は大きさが等しく、同一作用線上にある反対方向の力であり、各分力に換算して考えられる。水平分力 F_C 及び垂直分力 F_t 、せん断力 F_S 及びせん断垂直力 F_N 、すくい面摩擦力 F 及びすくい面垂直力 N である。実験によって実測される分力は F_c 及び F_t である。これらと図 3.11 の幾何学的関係から他の分力を求めると以下のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} F_S &= F_{c1} \cos \varphi - F_{t1} \sin \varphi \\ F_N &= F_t \cos \varphi - F_c \sin \varphi = F_S \tan(\varphi + \beta - \alpha) \\ F_1 &= F_{c1} \sin \alpha + F_{t1} \cos \alpha \\ N_1 &= F_{c1} \cos \alpha - F_{t1} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

ここで、 φ はせん断角、 α は工具すくい角で、本実験では $\alpha=5^\circ$ である。

よって、工具すくい面上の摩擦係数 μ_1 は、工具すくい面上の平均摩擦角を β とすると、

$$\mu_1 = \frac{F_1}{N_1} = \frac{F_{c1} \sin \alpha + F_{t1} \cos \alpha}{F_{c1} \cos \alpha - F_{t1} \sin \alpha} = \frac{F_{c1} \tan \alpha + F_{t1}}{F_{c1} - F_{t1} \tan \alpha} \quad (3.6)$$

となり、これが一般的な摩擦係数である。

3.3 試験片

本実験では、簡易摩擦試験および二次元切削実験ともに同じ材種の試験片を用いた。試験片材種は、アルミニウム合金 A5052(Al-Mg 系合金)、機械構造用炭素鋼 S50C、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS303 の 3 材種を使用し、直径 80mm、厚さ 5mm の円盤型に加工した。

簡易摩擦試験においては、試験片の表面粗さが摩擦試験に影響を与えと考えられるので試験片の表面粗さを統一するために試験片表面を#2000 の研磨布紙で仕上げた。#240～#2000 で仕上げた後の表面粗さを図 3.12 に示す。

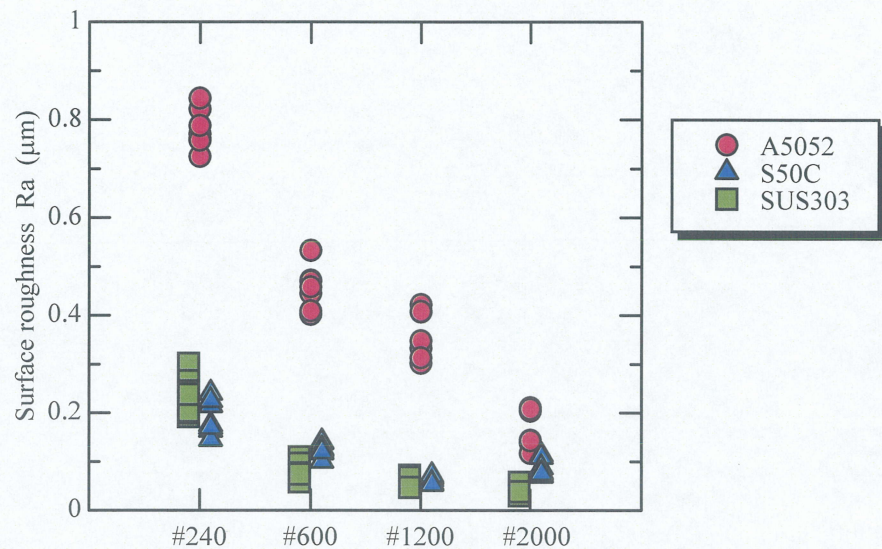
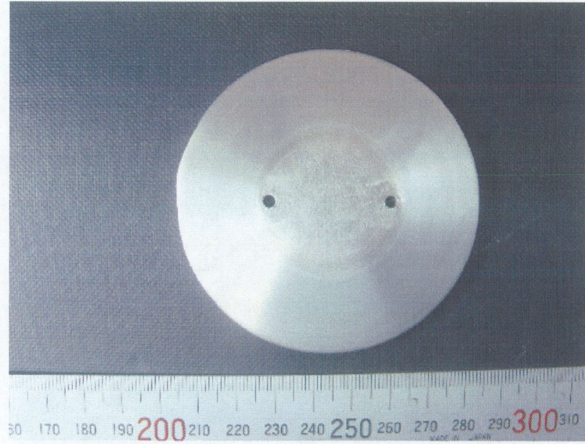


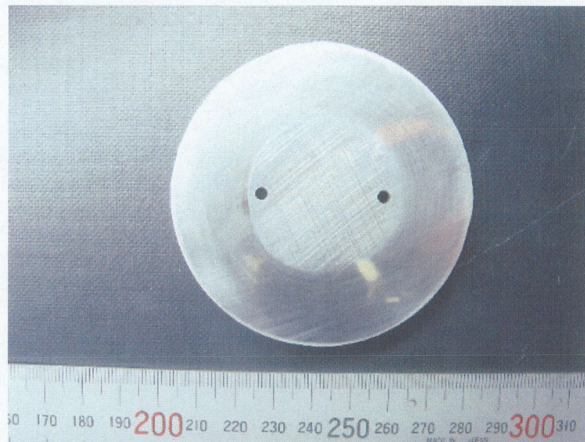
Fig.3.12 Surface roughness Ra of specimen after polishing

多少の差はあるが#2000 で仕上げた後は 3 材種とも Ra を 0.2 以下に統一されているので実験前に#2000 で試験片表面を仕上げる。仕上げた後の試験片 3 材種を図 3.13 に示す。

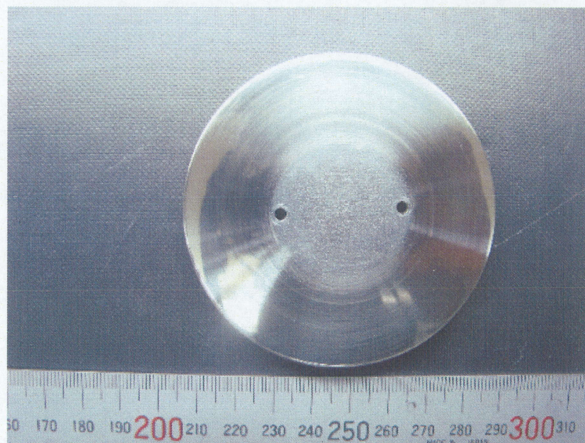
二次元切削実験については、外周せん削であることから表面粗さの影響がないため、表面仕上げは行わないが、治具に取り付けるために小加工した。



(a) A5052



(b) S50C



(c) SUS303

Fig.3.13 Polished specimen

また, 表 3.6 に各円盤型試験片の化学成分(%)の JIS 規格を示す.⁷⁾

Table 3.5 Chemical compositions of work material (%)

(JIS standard value)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
A5052	≤ 0.25	≤ 0.40	≤ 0.10	≤ 0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	≤ 0.10

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Others
S50C	0.47~ 0.53	0.15~ 0.35	0.60~ 0.90	≤ 0.030	≤ 0.035	< 0.20	< 0.20	Cu < 0.30 Ni+Cr < 0.35

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS303	≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.20	≥ 0.15	8.00~ 10.00	17.00~ 19.00	≤ 0.60

3.4 エステル系切削液用ベースオイル^{8), 9)}

簡易摩擦試験，二次元切削ともに同じ油剤を使用する，油剤は金属加工用エステル系ベースオイル(タイコ株式会社製)であるパルミチン酸 2-エチルヘキシルエステル…油剤①，トリメチルプロパントリオレート…油剤②，グリセリントリ脂肪酸エステル(植物油)…油剤③の 3 種で表 3.6 にその性状を示す。

Table 3.6 Properties of cutting fluids

	Oil①	Oil②	Oil③
Ester	パルミチン酸 2-エチルヘキシルエステル	トリメチロールプロパントリオレート	グリセリントリ脂肪酸エステル (植物油)
Density (g/cm ³) (15°C)	0.86	0.91	0.91
Flash point COC (°C)	208	234	310
Viscosity (mm ² /s)	8	4	38

エステルはそのエステル基の数から，モノエステル(エステル基 1 個)，ジエステル(エステル基 2 個)，トリエステル(エステル基 3 個)と呼ばれる。油剤①がモノエステルで油剤②，③がトリエステルである。また，各油剤は炭化水素基(脂肪酸)を持っており，脂肪酸には不飽和結合を持っているものがある。不飽和結合を持っていないものを飽和脂肪酸，持っているものは不飽和結合の数から，モノ不飽和脂肪酸，ジ不飽和脂肪酸，トリ不飽和脂肪酸と呼ばれる。表に各油剤の炭化水素基とその炭素，不飽和結合数を示す。なお，油剤③は混合物のため主成分を挙げた。

潤滑油(炭化水素，エステル類)分子そのもの，または炭化水素油中の界面活性物質が金属表面に物理吸着するか，または化学吸着して強い吸着膜をつくることによって，よい境界潤滑膜ができる。

Table 3.7 Hydrocarbon radical of cutting fluid

Cutting fluid	Hydrocarbon radical	Carbon number	Unsaturated bond
Oil①	パルミチン酸	16	0
Oil②	オレイン酸	18	1
Oil③	オレイン酸	18	1
	リノレン酸	18	3
	エルカ酸	22	1
	(天然油脂のため混合物の主成分)		

物理吸着プロセスはファン・デル・ワールス力からなり、比較的弱いプロセスで金属表面にあり、吸着物は容易に除くことができる。化学吸着プロセスは吸着物質と表面との間で電子を互いに分け合う、または電子交換が行われることで吸着物質金属表面に著しく強く結合する。これらの吸着により金属表面は潤滑性を示す。

よって油剤のエステル基が多いほど吸着基数が多く、より強固な潤滑皮膜を形成する。つまりトリエステル、ジエステル、モノエステルの順で潤滑性能が優れることになる。

また、同じ数のエステル基を有するエステルの場合、炭素数が大きい方が（分子量が大きい方が）潤滑性能に優れる。これは金属表面に吸着したエステル基に繋がる炭化水素基が長いいため、強固な潤滑皮膜を生成するためである。

熱影響については、脂肪酸などの油性剤の物理吸着の吸着エネルギーは 41.9～58.6kJ/mol であり、脂肪酸は 70℃～130℃で白金表面から脱離することから、高温での物理吸着はあまり効果を得られない。また不飽和結合が多い不飽和脂肪酸ほど酸化重合しやすく、トリ不飽和脂肪酸、モノ不飽和脂肪酸、飽和脂肪酸の順で熱による影響は大きい。

以上を踏まえると潤滑性能は、エステル基の数に関しては油剤②、油剤③が等しく、次に油剤①の順に優れ、炭素数においては油剤③、油剤②、油剤①の順に優れ、総合的に油剤③、油剤②、油剤①の順に優れることになるが、熱影響に対しては油剤①、油剤②、油剤③の順であり、高温になる切削ではどれほど熱の影響を油剤が受けるかを調査する必要がある。簡易摩擦試験を高温度下で行うことは重要であると言える。

第 4 章 実験結果

4.1 最大接触圧力及び比切削抵抗

4.1.1 試験片摩耗痕とヘルツの接触理論¹⁰⁾

試験後に試験片の摩耗痕幅を測定すると、試験片摩耗痕幅は条件によって異なる。試験片摩耗痕についても考察するために図 4.1 に示す各試験片 0° , 90° , 180° , 270° の 4 カ所における摩耗痕幅を測定し、平均した。この値を各条件における摩耗痕幅とし、ヘルツの接触理論から最大接触圧力を算出した。

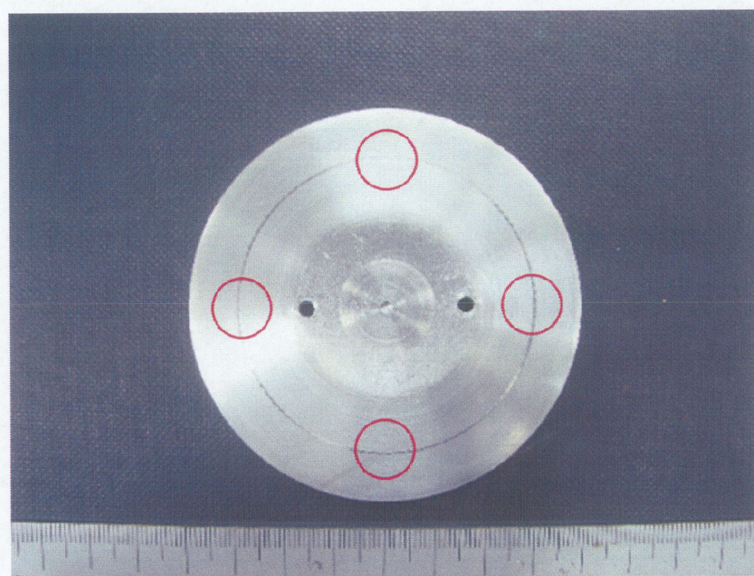
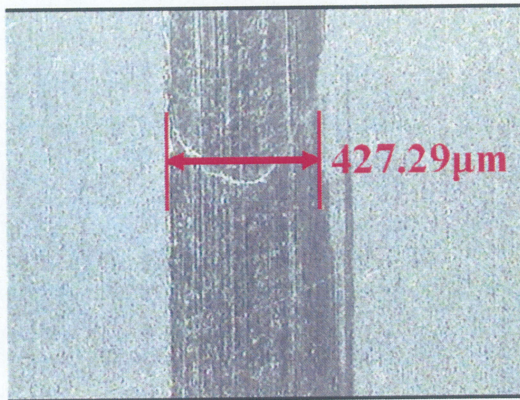
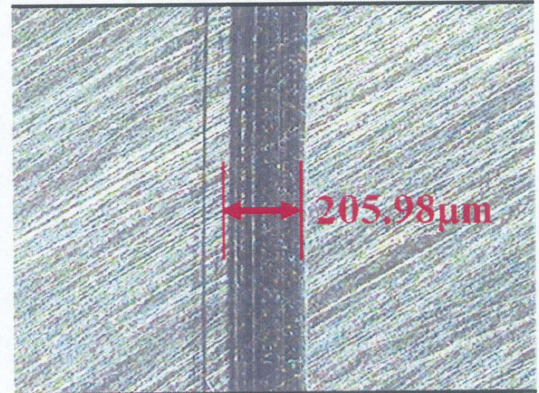


Fig.4.1 Frictional mark of specimen

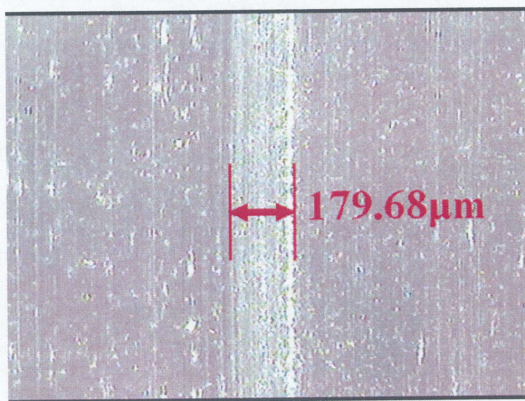
各試験片の摩耗痕の一例(油剤①, 荷重②, 50℃)を図 4.2 に示す.



(a) A5052



(b) S50C



(c) SUS303

Fig.4.2 Frictional mark on surface of specimen

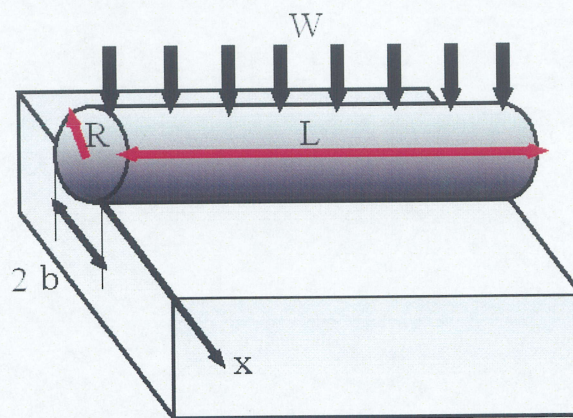


Fig.4.3 Contact model of cylinder and flat surface

本実験では刃先丸みを持つチップと平面である試験片との接触を考えるので図 4.3 のような円柱と平面の接触に置き換える．曲率半径 R の円柱が単位長さあたり P の垂直力で押し付けられると，接触領域は幅 $2b$ の帯状となる．平面と円柱におけるヘルツの接触理論では，接触半幅 b ，最大接触圧力 p_{max} ，接触圧力 p は次式で与えられる．単位長さあたりの垂直力を P ，等価弾性係数を E' ，ポアソン比 ν ヤング率を E とすると

$$P = \frac{W}{L} \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (4.2)$$

接触幅 b は

$$b = \left(\frac{8PR}{\pi E'} \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

接触圧力 p は

$$p = \frac{2P}{\pi b} \left(1 - \frac{x^2}{b^2} \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

最大接触圧力 p_{max} は式 3.10 において $x=0$ として

$$p_{max} = \frac{2P}{\pi b} \quad (4.5)$$

各材料定数は試験温度が 200℃ までであり，各材料の融解点より大幅に低いいため室温時のものを採用し，表 4.1, 4.2 表に示す．

Table 4.1 Characteristics of material

	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio
A5052	70.6	0.33
S50C	210	0.28
SUS303	193	0.31

Table 4.2 Characteristics of chip HTi10

	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio
TNGA160408 HTi10	630	0.22

4.1.2 比切削抵抗

二次元切削実験における比切削抵抗 K は以下の式から求めた,

$$K = \frac{\sqrt{F_c^2 + F_t^2}}{S} \quad (4.6)$$

ここで, 主分力 : F_c , 背分力 : F_t で, 切削面積 S は, 送り速度 : f , 被削材厚さ : a とすると

$$S = fa \quad (4.7)$$

から求められる. 比切削抵抗の算出式には, 主分力のみを用いるものもあるが, 本実験では図 4.4 に示す区間ごとに平均化した分力に現れているように, 背分力も大きく計測されたため, 主分力と背分力の合力から算出する方法を用いた.

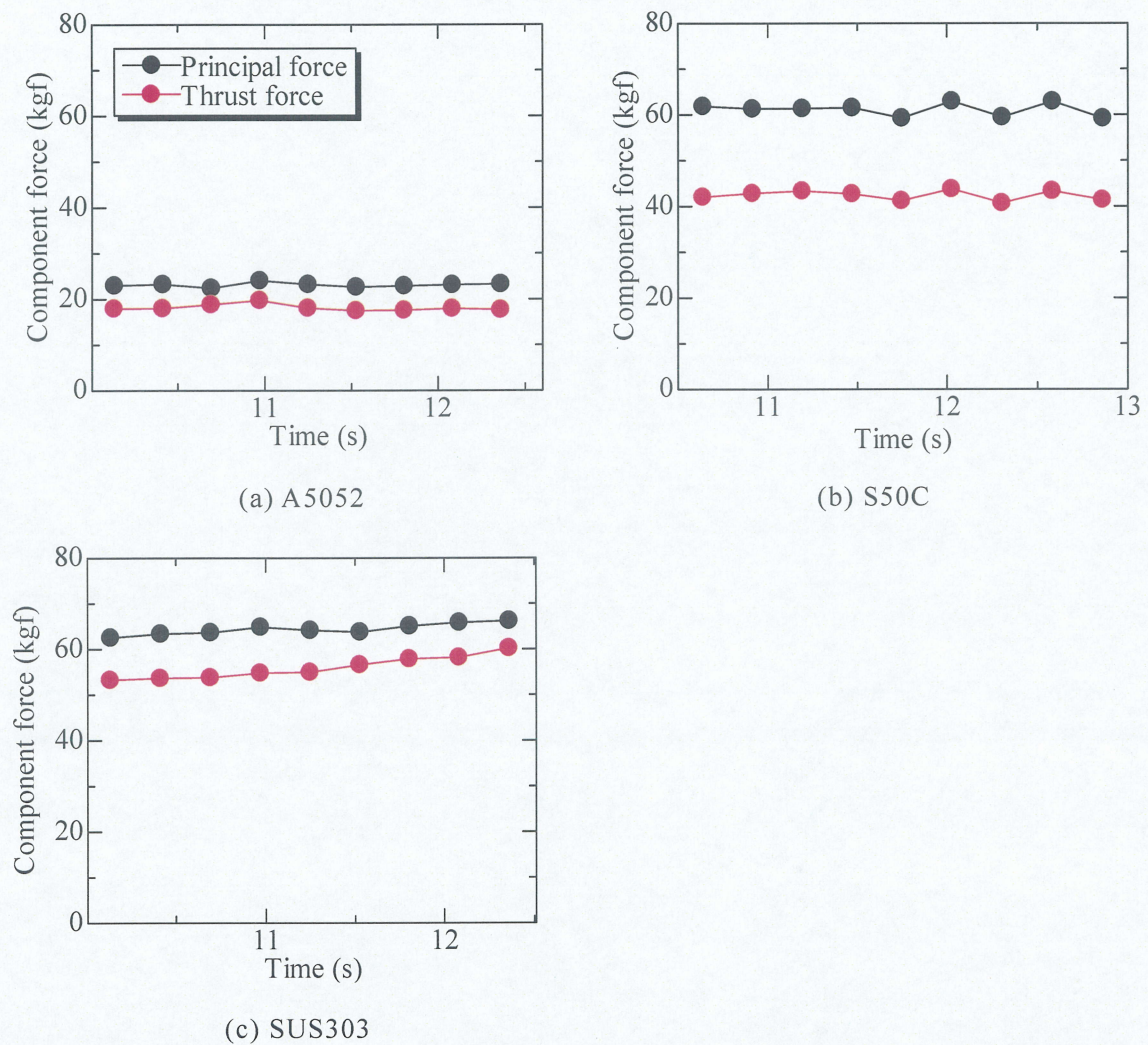


Fig. 4.4 Component force (Oil①)

4.1.3 最大接触圧力と比切削抵抗の比較

得られた簡易摩擦試験の最大接触圧力と比切削抵抗を比較したグラフを図 4.5 に示す。
両方とも試験片材種ごとに平均したものである。

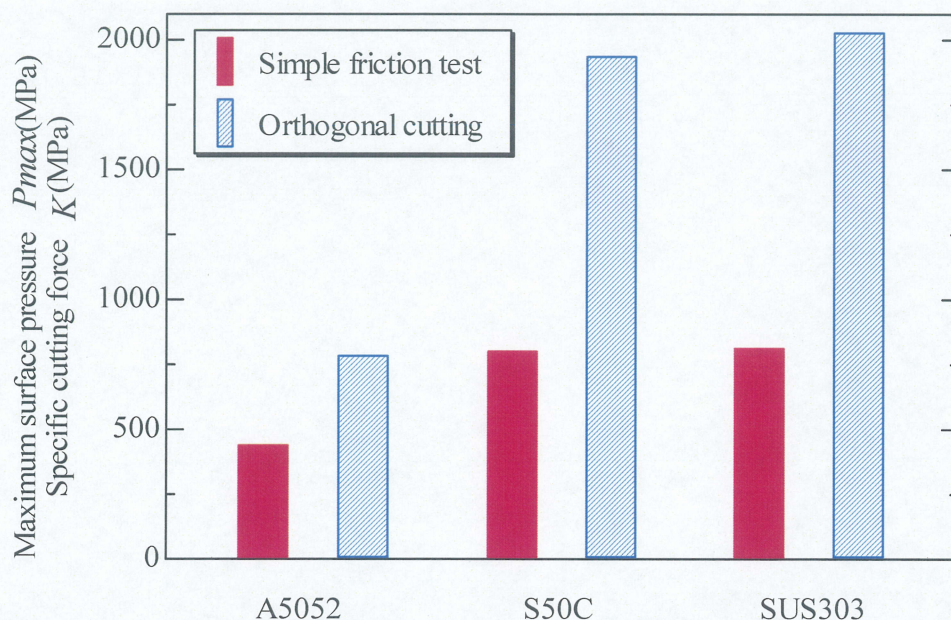


Fig.4.5 Comparison between P_{max} and K

両者を比較すると、全体的に簡易摩擦試験の最大接触圧力の方が低い値となっている。これは、簡易摩擦試験がすべり摩擦のみの圧力であることに対し、二次元切削はすべり摩擦のみでなく、材料を破壊する力などを含む総合的な値であることに起因する。しかし、試験片材種ごとの傾向($A5052 < S50C \approx SUS303$)は一致している。

4.2 摩擦係数比較

簡易摩擦試験から算出されたグラフの一例を図 4.6 に示す(A5052, 油剤③, 錘② ($W=5.609\text{N}$), 50°C). なお, グラフの始めと終わりの急激な立ち上がりは人為的なものであり, 無視する.

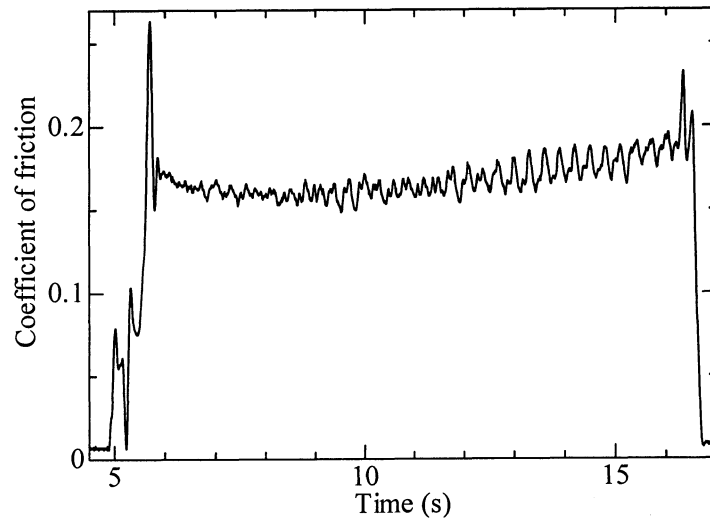


Fig.4.6 Experimental result (Simple friction test)

グラフから, 摩擦係数は試験中常に変化している. よって摩擦係数を 1 つの平均値として評価しても摩擦特性を表したと言えず, 全体を通して摩擦特性を調べるのが最適と考えられる. よって平均値のみでなく, 最大値, 最小値, さらに最大値と最小値の差を変動量と定義して評価した.

二次元切削実験から算出されたグラフの一例を図 4.7 に示す(SUS303, 油剤①).

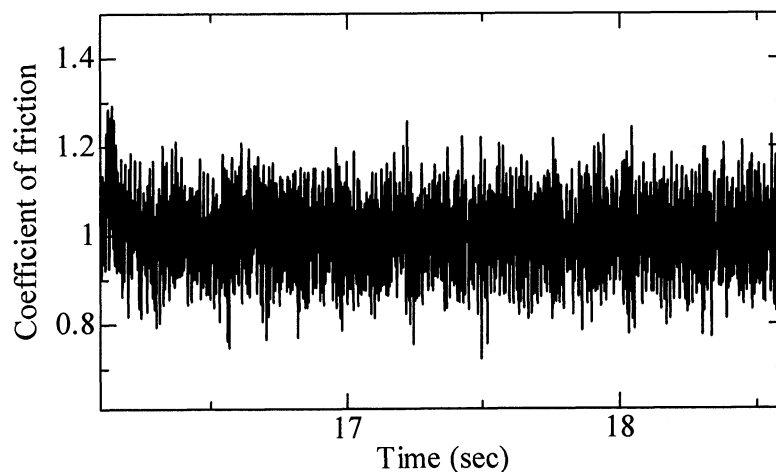


Fig. 4.7 Experimental result (Orthogonal cutting)

こちらのグラフにおいても常に変化し続けているので簡易摩擦試験の結果と同様に最大値、最小値、変動量を用いて全体としての評価を行う。

簡易摩擦試験において得られた摩擦係数を試験片材種別にまとめたものを図 4.8 に(錘①), その変動量を図 4.9 に示す. 図中のプロットは各条件の平均摩擦係数で上下のバーは摩擦係数の最大値と最小値を表す. また図の摩擦係数変動量は多ければ多いほど潤滑状態が不安定であると言える.

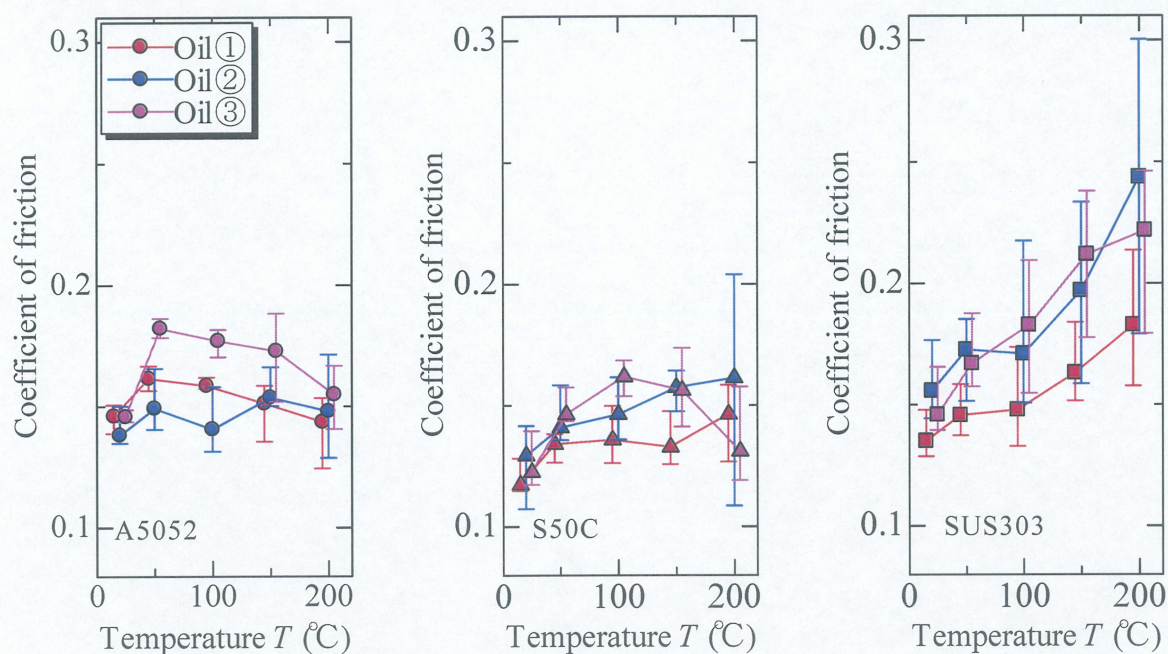


Fig.4.8 Coefficient of friction at experimental temperature (Simple friction test)

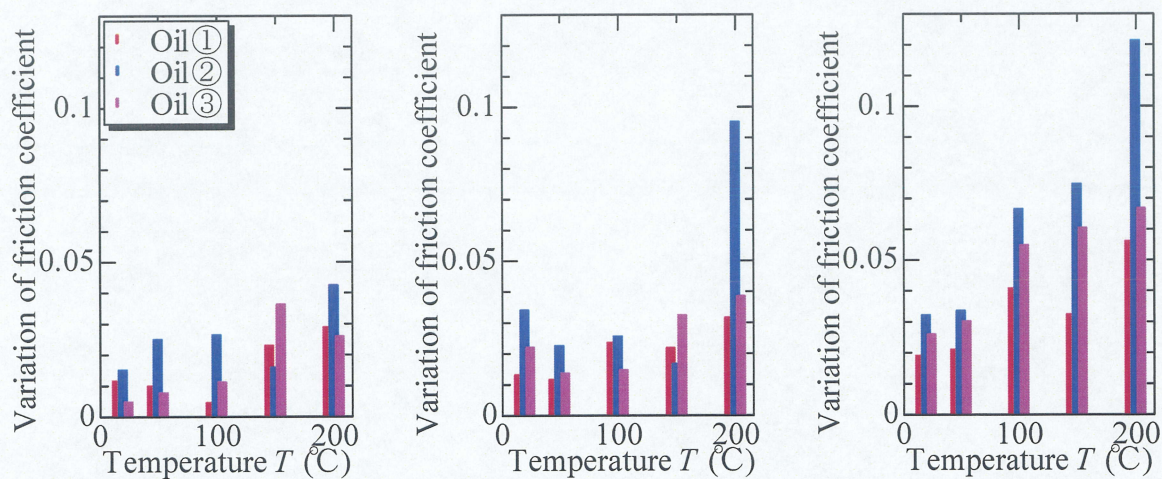


Fig.4.9 Variation of friction coefficient at experimental temperature(Simple friction test)

摩擦係数平均値、変動量ともに温度の影響を強く受けていて、室温では平均値、変動量ともに低く、安定した潤滑状態で油剤種ごとの差はほとんどないが高温になると摩擦係数平均値、変動量ともに増加し、油剤ごとの差も表れている。よって温度を考慮した摩擦試験を行うことの重要性が表れている。

次に、二次元切削実験の結果を図 4.10 に、変動量を図 4.11 に示す。

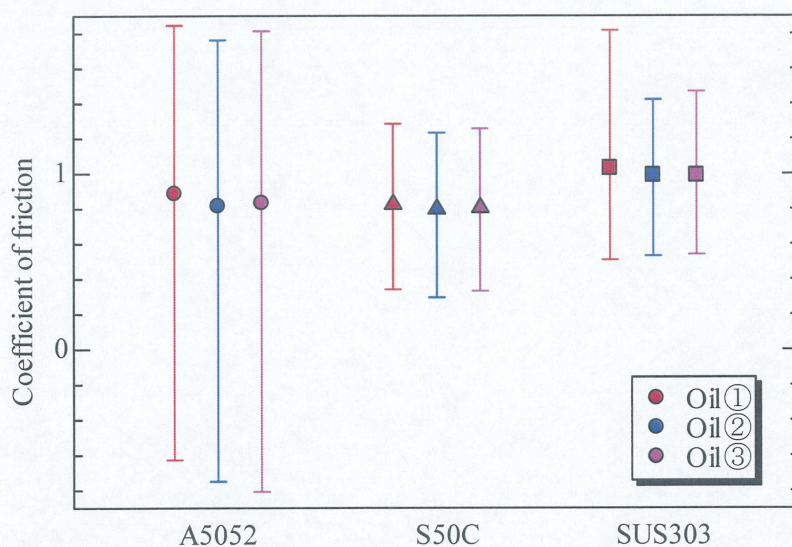


Fig.4.10 Coefficient of friction (Orthogonal cutting)

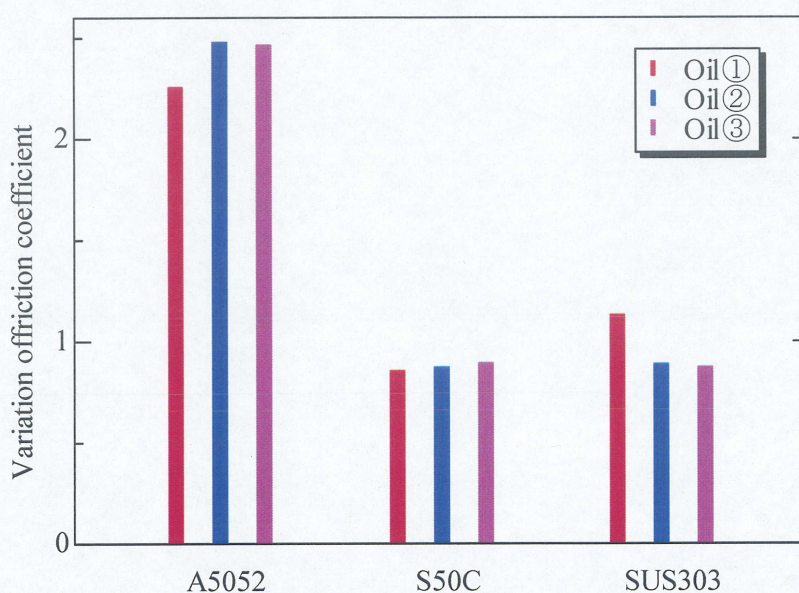


Fig.4.11 Variation of friction coefficient (Orthogonal cutting)

切削中油煙が確認されたので、油剤温度は 200℃以上に上昇していると考えられる。簡易摩擦試験結果と二次元切削実験結果を比較すると、試験片材種ごとの摩擦係数の傾向は SUS303>A5052>S50C と一致しているが、簡易摩擦試験の特に 150℃と 200℃における摩擦係数の平均値と二次元切削実験の摩擦係数平均値を試験片材種ごとに比較したとき、表 4.3 のようになり、全体的として二次元切削実験による摩擦係数の方が大きな値となり、一致していない。この原因は、二次元切削実験において、すくい面しか考慮されていない摩擦係数の算出式にあるのではないかと考えた。

Table 4.3 Average of friction coefficient

	Simple friction test Average of (150℃ and 200℃)	Orthogonal cutting
A5052	0.190	0.845
S50C	0.152	0.810
SUS303	0.237	1.003

第5章 逃げ面摩耗を考慮した摩擦係数

5.1 逃げ面加工工具実験

5.1.1 逃げ面加工工具

二次元切削実験での摩擦係数算出式は 3.2.4 で述べた通り，工具すくい面のみしか考慮されていない．しかし，一般的に逃げ面摩耗が認められており，これは逃げ面にも力が作用している証拠である．逃げ面にかかる力がすくい面の摩擦係数の算出においてほとんど影響を与えず，無視できるという考え方もあるが，実際は逃げ面にかかる力がどれほど影響するのかを調査するために，故意に逃げ面を摩擦方向に対して垂直方向(摩擦力が増加する方向)に加工し，二次元切削実験を行った．図 5.1 に加工後の工具の逃げ面の様子を示す．

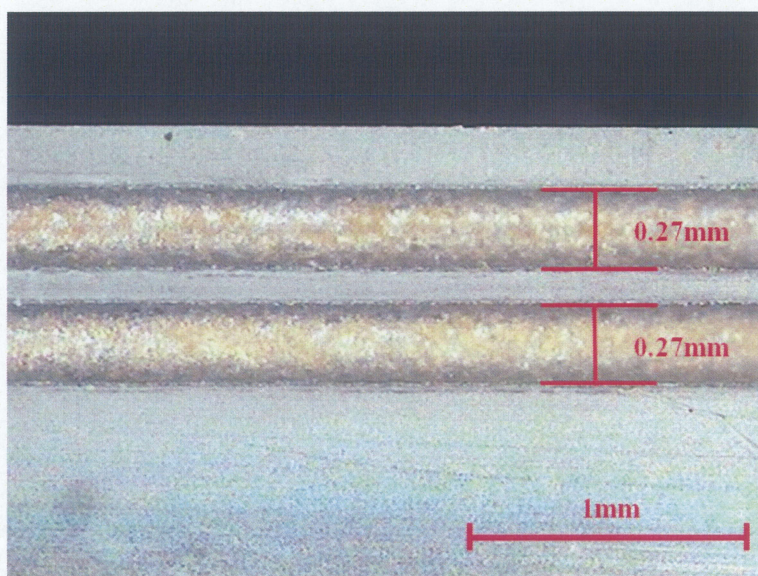


Fig.5.1 Processed tool (flank face)

逃げ面の加工はワイヤ放電加工機(DWC110C，三菱電機株式会社製)によって 0.2mm のワイヤを用い，逃げ面に引っかかりができるように水平方向に 2 本の溝を入れた．溝の幅は図に示す通り約 0.27mm である．

比較のために標準工具と加工後の工具を用い，切削条件は 3.2.3 と同様で，油剤を用いずドライで行った．

5.1.2 摩擦係数結果

実験より算出された摩擦係数平均値及び変動量を図 5.2 に示す。

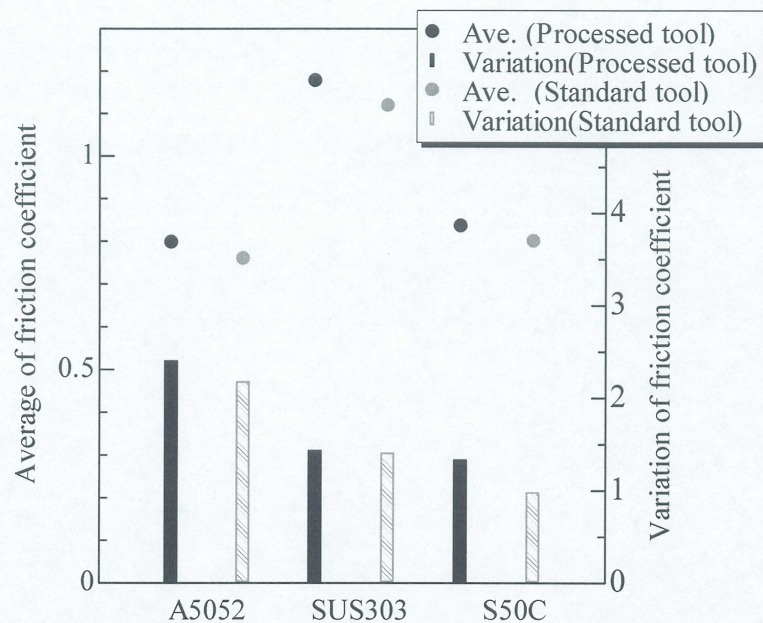
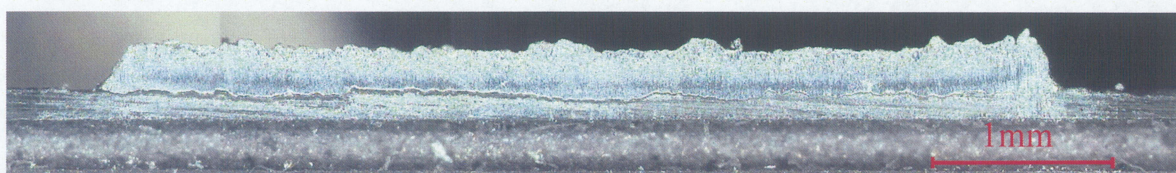
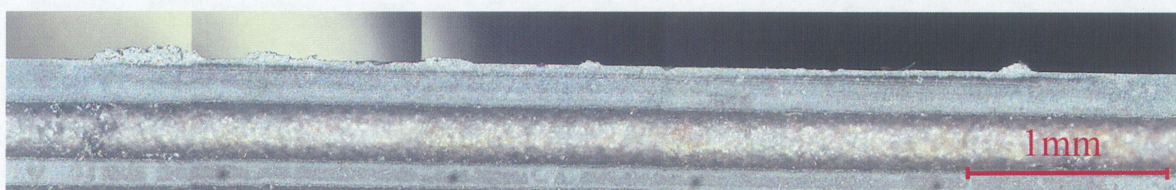


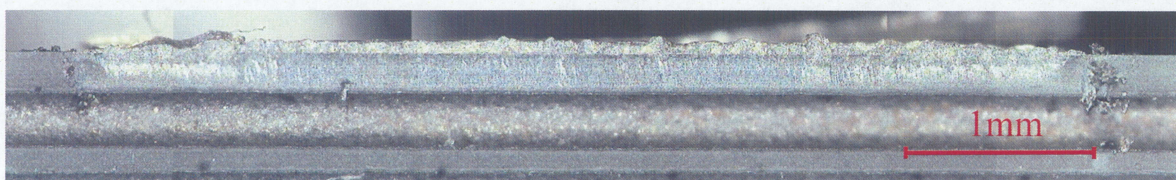
Fig.5.2 Comparison of friction coefficients of processed tool and standard tool



(a) A5052



(b) S50C



(c) SUS303

Fig.5.3 Appearance of tool after experiments (frank face)

両工具の摩擦係数を比較すると、全体として逃げ面を加工した工具の方が摩擦係数は高くなるという結果が得られた。また、変動量に関しても加工後の工具の方が大きくなっていることから、二次元切削において逃げ面にかかる力は十分に摩擦係数に影響を与えていると考えられる。

また、実験後の工具逃げ面の様子を図 5.3 に示す。実験後の逃げ面を観察すると、A5052 と SUS303 については摩耗痕が 1 つ目の溝まで達していることが確認されたが、S50C については、摩耗は小さい領域でしか溝まで達していないようにも見える。しかし、摩擦係数に影響が出ていることを考慮すると、逃げ面に施した加工が切削中被削材に接触していることが仮定できる。

以上から、工具逃げ面に及ぼす力が摩擦係数に影響を与えており、摩擦係数算出式はすくい面のみでなく逃げ面も考慮する必要があると確認できた。

5.2 摩擦係数算出方法

5.2.1 逃げ面における摩擦係数の算出

切削中，計測される力はすくい面，逃げ面にかかる力の合計であり，すくい面，逃げ面には一定の割合で力が働いていると仮定する．

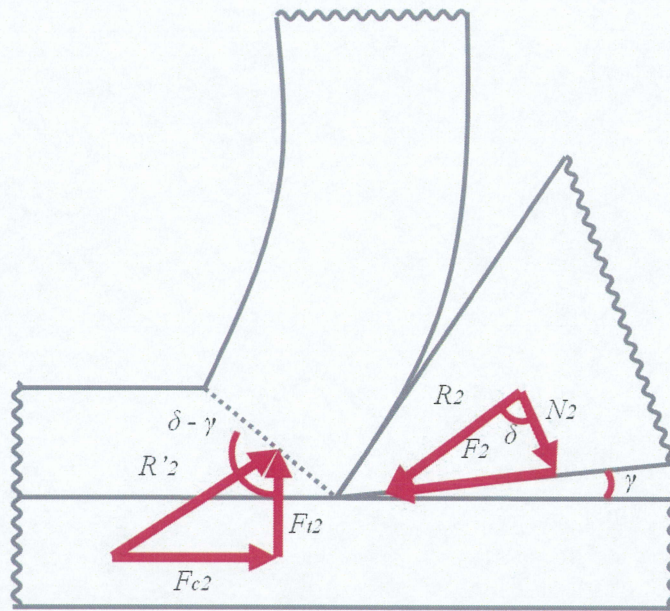


Fig.5.4 Orthogonal cutting model (flank face)

逃げ面における摩擦係数は図 5.4 のような幾何学的関係から，

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= F_{c2} \cos \gamma + F_{t2} \sin \gamma \\ N_2 &= F_{c2} \sin \gamma - F_{t2} \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

より，

$$\mu_2 = \frac{F_2}{N_2} = \frac{F_{c2} \cos \gamma + F_{t2} \sin \gamma}{F_{c2} \sin \gamma - F_{t2} \cos \gamma} = \frac{F_{c2} + F_{t2} \tan \gamma}{F_{c2} \tan \gamma - F_{t2}} \quad (5.2)$$

と求められる．ただし，すくい面，逃げ面にかかる合力は計測された力に等しいので

$$\left. \begin{aligned} F_{c1} + F_{c2} &= F_c \\ F_{t1} + F_{t2} &= F_t \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

となる．

ここで、すくい面と逃げ面における両摩擦係数 μ_1 及び μ_2 は材料や切削油剤の条件が等しいので同じ値になると考えられる。よって

$$\mu_1 = \mu_2 \quad (5.4)$$

また、すくい面と逃げ面にかかる力の割合を

$$\left. \begin{array}{l} \frac{F_{c1}}{F_{c2}} = n_c \quad (F_{c1} : F_{c2} = n_c : 1) \\ \frac{F_{t1}}{F_{t2}} = n_t \quad (F_{t1} : F_{t2} = n_t : 1) \end{array} \right\} \quad (5.5)$$

とおく。以上によって二次元切削実験結果を再計算し、最適な n_c 及び n_t を導く。

5.2.2 最適な n_c 値と n_t 値

図 5.5 に、二次元切削における摩擦係数に、摩擦係数区間平均のプロットを追加したグラフを示す(油剤①, SUS303). 区間平均は切削状態の安定した後の 2.5 秒を 9 つの区間に分割し、区間ごとに算出した平均値で、再計算を行ったのはこの区間平均 9 プロットに対応する主分力の区間平均と背分力の区間平均である. これを各実験条件に対して行う.

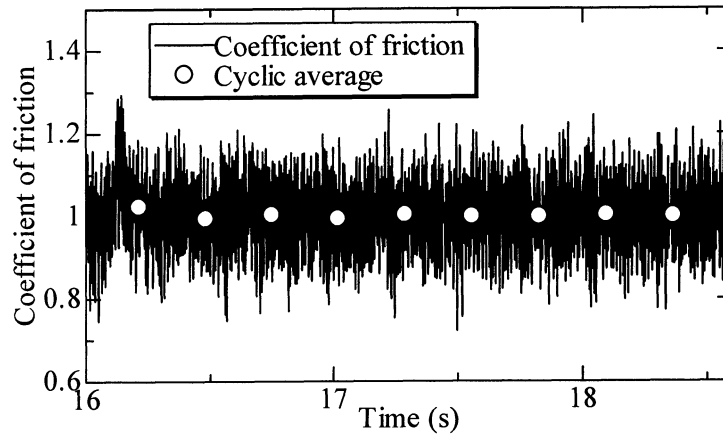


Fig.5.5 Cyclic average of friction coefficient

n_c 及び n_t の値をそれぞれ 0.1 ずつ増加させて計算を行い、最適な n_c, n_t 値の条件はすくい面摩擦係数: $0 \leq \mu_1 \leq 0.3$, かつ μ_1 及び μ_2 の摩擦係数一致率(%): $K \geq 90$ とした. この条件に適合する値で全ての実験条件に当てはまっている数値を最適な値と定める.

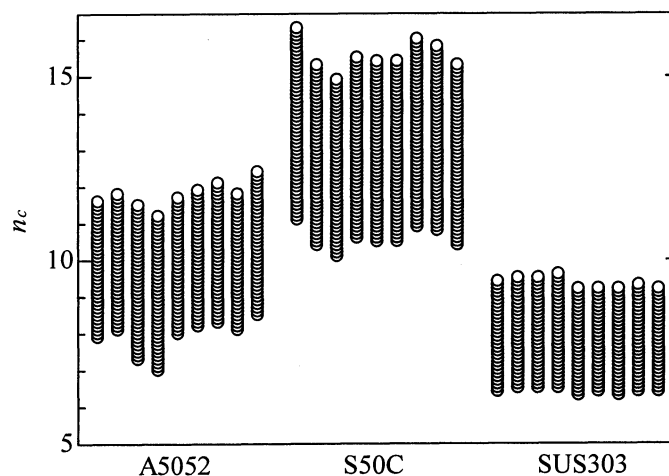
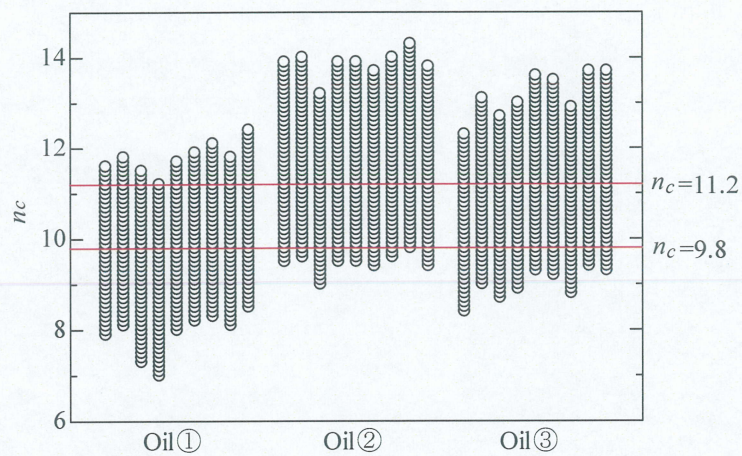


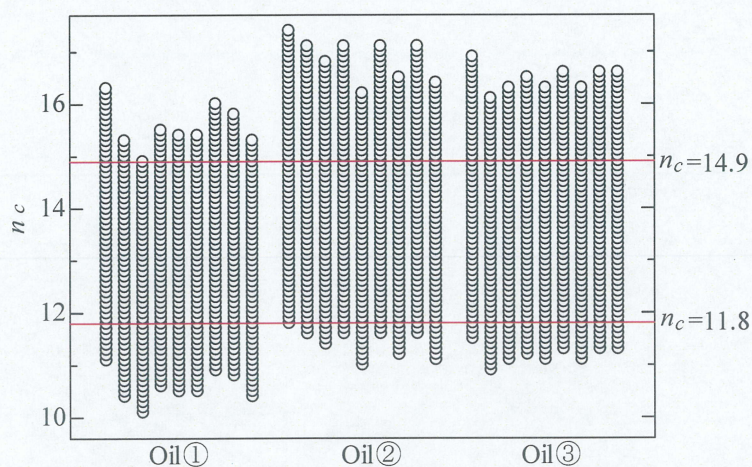
Fig.5.6 Arranged n_c of each oil ($n_t=0.2$, Oil①)

まず, n_t 値は油剤, 試験片材種に関わらず 0.2 で一定値となった. よって $n_t=0.2$ の時の最適な n_c 値をまず油剤種ごとにまとめた場合の油剤①を図 5.6 に示す. n_c 値は試験片材種に

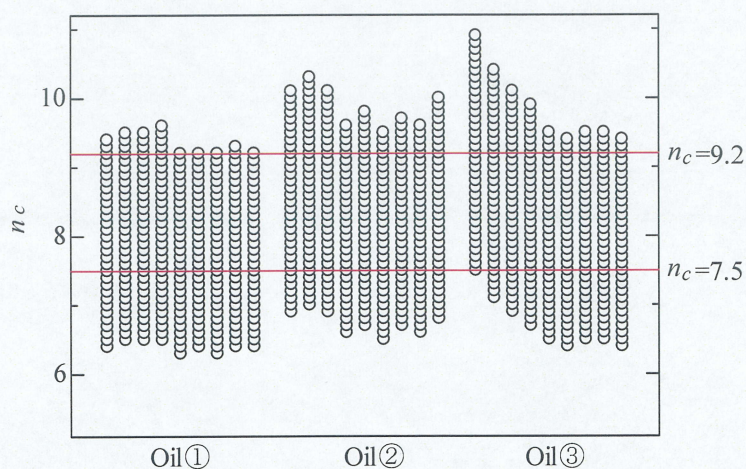
よってばらばらの値となり、最適な値を決めることができない。次に試験片材種ごとにまとめたものを図 5.7 に示す。



(a) A5052



(b) S50C



(c) SUS303

Fig.5.7 Arranged n_c of each specimen ($n_l=0.2$)

試験片材種ごとには最適な n_c を求めることが可能であり，最適な n_c は試験片材種に依存することが分かる．よって油剤に左右されないことから，材種ごとの n_c 値が分かっているならば油剤を変更するたびに n_c 値を求める必要はない．表 5.1 に試験片材種ごとの最適な値を示す．

Table 5.1 Optimum n_c and n_t

Specimen	n_c (average)	n_t
A5052	9.8 ~ 11.2 (10.5)	0.2
S50C	11.8 ~ 14.9 (13.4)	0.2
SUS303	7.5 ~ 9.2 (8.4)	0.2

5.2.3 摩擦係数

再計算した二次元切削実験の摩擦係数と簡易摩擦試験との比較を図 5.8 に示す。

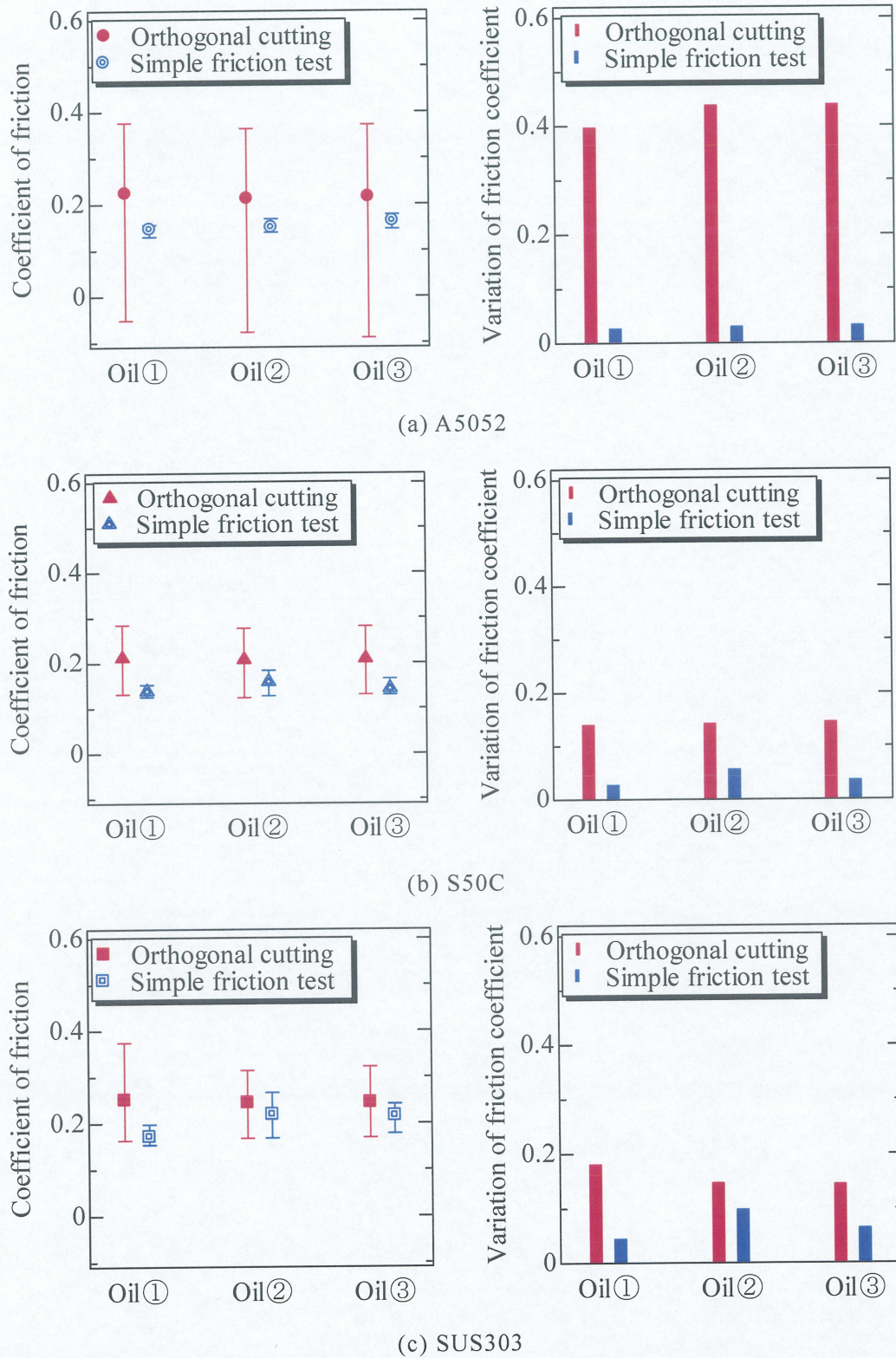


Fig.5.8 Friction coefficient result of using the optimum n_c and n_t

n_c 値は平均値を用いた。グラフ中の簡易摩擦試験の摩擦係数は 150°C と 200°C の結果を平均したものである。全体的に簡易摩擦試験結果と近い値となり、簡易摩擦試験によって二次元切削における摩擦現象を表すということに近づくことができた。しかし、今回求めた n_c , n_t 値は油剤以外の切削条件が一定であり、切削条件ごとに n_c , n_t 値が変わってしまう場合、条件ごとに n_c , n_t 値を求めなければならないことになり、簡易摩擦試験の必要性がなくなってしまう。そこで他の切削条件においても n_c , n_t 値が試験片材種に依存するか否かを検討する必要がある。

5.3 工具すくい角と摩擦係数

5.3.1 すくい角について ^{11), 12)}

工具すくい角 α は楔角の値を左右する。 α を大きくすると切削抵抗や切削動力が減少する。工作機械の出力が小さい場合でも、円滑な切削加工が可能になり、加工精度も向上する。また切削動力が低減する分だけ、切込み量や送り量を増大させることができ、高能率切削も可能になる。

生産メンテナンスの面では、切削抵抗や切削動力の減少は主軸や送り機構の負荷を低減させ、工作機械の精度劣化を引き起こさない状態で長期に維持することができる。

加工精度の面では、切削加工による被加工物と切削のたわみや変形、びびり現象、工作機械や被加工物の熱変形などを抑制できるので、形状、寸法や表面粗さに関する加工精度が向上する。

工具損傷の面では、切削抵抗や切削熱の低減によって逃げ面摩耗やすくい面摩耗、塑性変形などが減少し、工具寿命が向上する。びびり振動などのトラブルも生じにくいので、切れ刃のチッピングや欠損といった異常損傷を防止することができ、切れ刃の信頼性は向上する。

しかし、大きなすくい角の工具は、高硬度材の切削には不適である。高硬度材は主分力より背分力の方が大きくなり、逃げ面から大きな切削抵抗を受けることによって貝殻状のフレーキング損傷が発生し、切れ刃の信頼性は低下する。

このように工具すくい角が大きくなると摩擦状態も変化するので、摩擦係数及び n_c , n_t 値に影響を与えられ考える。そこで工具すくい角が -5° の工具を用意し、影響を調査した。

5.3.2 工具

工具は簡易摩擦試験と同じスローアウェイチップ(図 3.4)をチップホルダー(住友電工ハードメタル社製, DTFNR2525M16)に取り付けたものである. チップホルダーは切削動力計に合わせて小加工し, 刃先突き出し量 35mm で設置した. チップをチップホルダーに取り付けた様子を図 5.9 に示す.

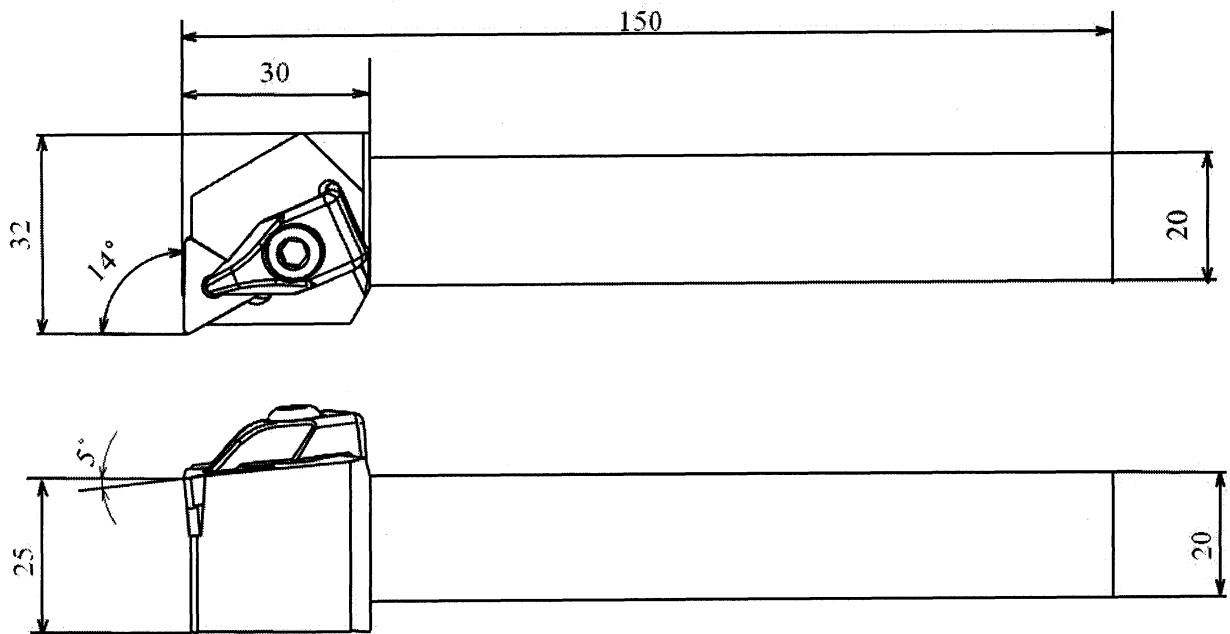


Fig.5.9 Dimensions of cutting tool

工具にはすくい角が -5° がある. この工具を用いて今までの実験で用いたすくい角 5° の工具の結果との比較を行う.

切削条件は3.2.3に示したものと同一であり, 油剤3種を用いた切削と油剤を用いないドライ切削を行った.

5.3.3 摩擦係数

まず、工具すくい角 -5° で油剤を用いた時、ドライ切削の時ににおける最適な n_c , n_t を表5.2に示す。なお、A5052のドライ切削に関しては溶着がひどく、加工が不可能であった。

Table 5.2 Optimum n_c and n_t (dry and use the cutting oil)

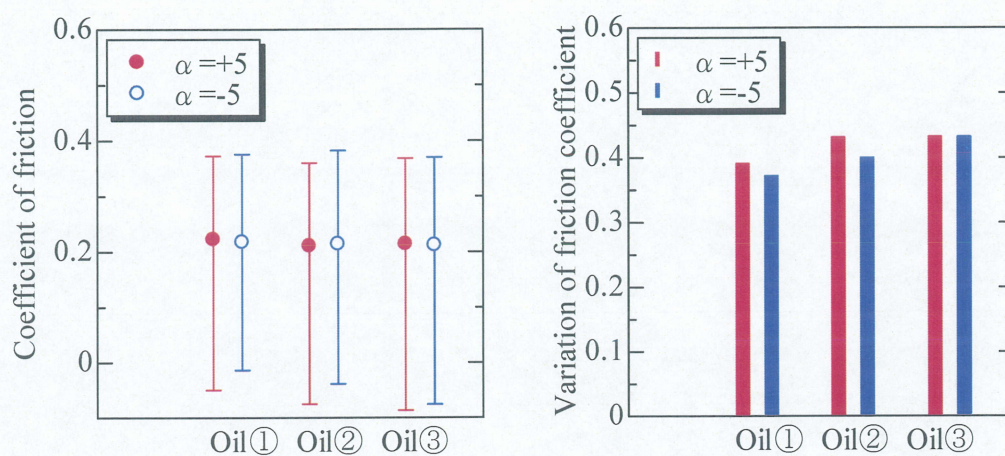
Specimen	Cutting condition	n_c (average)	n_t
A5052	Oil	9.7 ~ 11.3 (10.5)	0.2
	Dry	not possible to calculate	
S50C	Oil	10.9 ~ 14.5 (12.7)	0.2
	Dry	9.6 ~ 12.9 (11.3)	0.2
SUS303	Oil	4.4 ~ 5.6 (5.0)	0.2
	Dry	4.2 ~ 6.2 (5.2)	0.2

油剤の有無に関わらず類似した値をとり、試験片材種に依存することが確認できた。よって油剤を使用した場合とドライの場合の2条件を合わせると最適な n_c , n_t は表5.3のようになる。

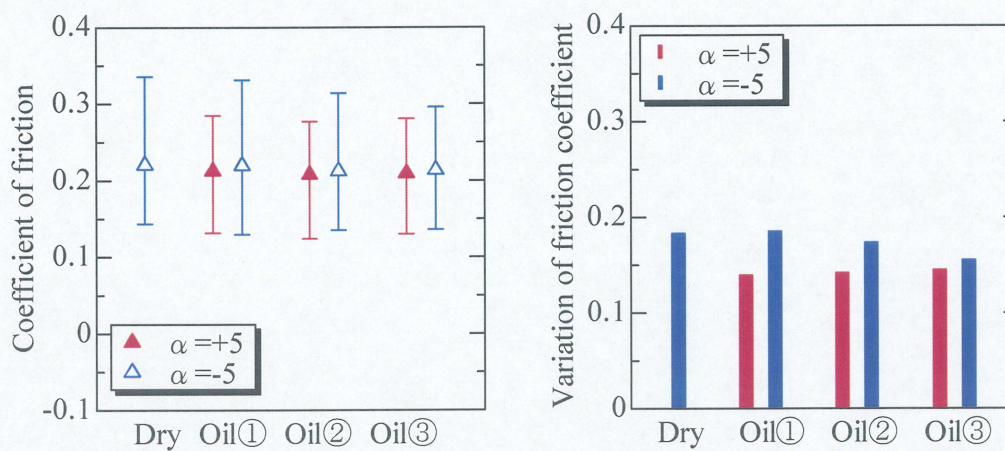
Table 5.3 Optimum n_c and n_t (each specimen)

specimen	n_c (average)	n_t
A5052	9.7 ~ 11.3 (10.5)	0.2
S50C	10.9 ~ 12.9 (11.9)	0.2
SUS303	4.4 ~ 5.6 (5.0)	0.2

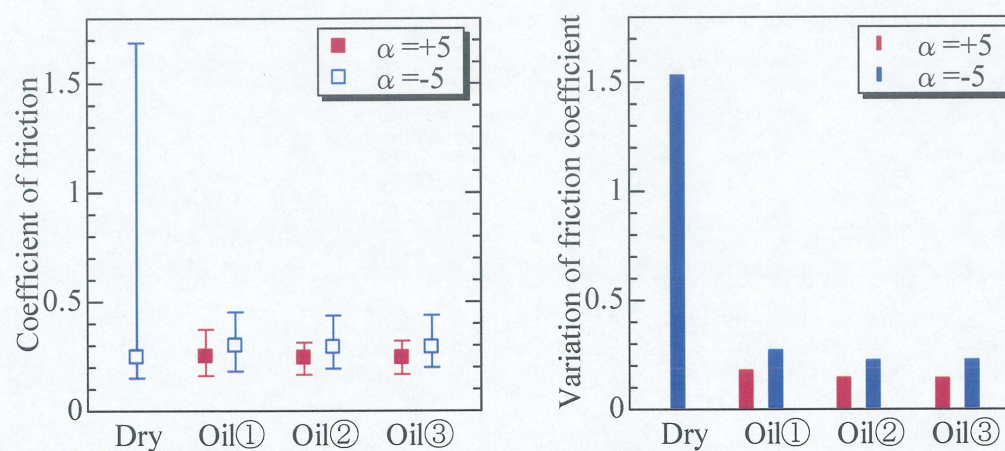
次に、摩擦係数を比較したグラフを試験片ごとに図5.10に示す。



(a) A5052



(b) S50C



(c) SUS303

Fig.5.10 Relationship between rake angle and friction coefficient

アルミニウム合金についてはあまりすくい角による影響が出ていないと思われるが、S50C, SUS303 については全体的にすくい角が負になると摩擦係数平均値及び変動量は増加する傾向にある。また、SUS303 のドライにおいては摩擦係数平均値が油剤を使用した時に比べてやや下がっている。しかし、実際の加工中では激しい異音が確認され、加工が困難であった。よって変動量が非常に多く切削が不安定であったことを示し、正常に測定されていないと考えられる。A5052, SUS303 に関して、切削終了後に構成刃先の存在が確認され、加工が困難な原因が溶着にあると考えられすくい角の減少によって構成刃先が形成しやすい傾向にあるという結果が得られた。よって溶着による影響は、摩擦係数平均値よりも変動量として表れやすく、摩擦係数の変動量が切削中の摩擦状態が良好であるか否かを調査するのに必要であるということが確認された。

5.4 切削速度と摩擦係数

5.4.1 切削速度について

二次元切削実験において採用された回転数は簡易摩擦試験とできるだけ摩擦速度が近似するように選ばれたが、実際には試験片材種によって適した摩擦速度がある。超硬工具における送り速度が $0.05 \sim 0.2 \text{ mm/rev}$ の場合の標準旋削条件を表 5.4 に示す。

Table 5.4 Standard lathe turning condition for carbide tool

Material	Cutting speed (m/min)
Aluminum alloy	300 ~ 450
Carbon steel	150 ~ 230
Stainless steel	70 ~ 120

本実験における切削速度は $50.8 \sim 52.8$ であり、全ての条件から外れている。特にアルミニウム合金からは大きく外れており、切削速度が遅いと溶着が起こる。摩擦係数変動量が大いなのはこれが原因ではないかと考えられる。よって旋盤の回転数を変化させることによって切削速度を増加し、摩擦係数の変化を調査した。切削条件を表 5.5 に示す。¹³⁾ 標準切削速度までは達していないが、切込みが大きいため、速度を上昇させすぎると危険と判断し、また、切削速度の影響を調査するのには十分と考えた。

Table 5.5 Cutting condition

Rotating speed (rev/min)	210, 290, 390, 525
Feed rate (mm/rev)	0.08
Cutting speed (m/min)	50.8 ~ 52.8, 70.2 ~ 72.9, 94.3 ~ 98.0, 127.0 ~ 131.9

5.4.2 摩擦係数

最適な n_c について、摩擦速度ごとに算出したものを図 5.11 に示す(最適な $n_t=0.2$).

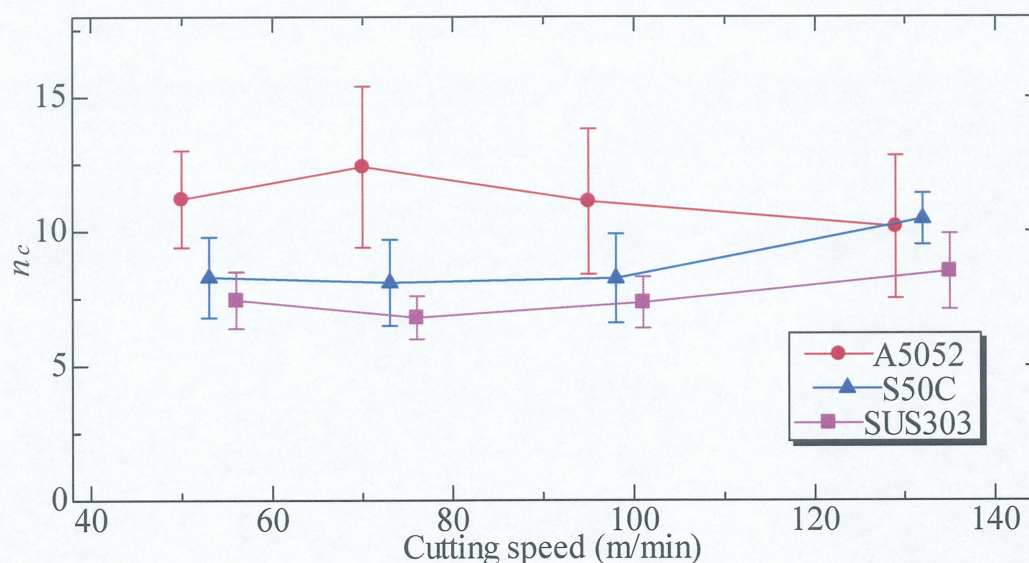


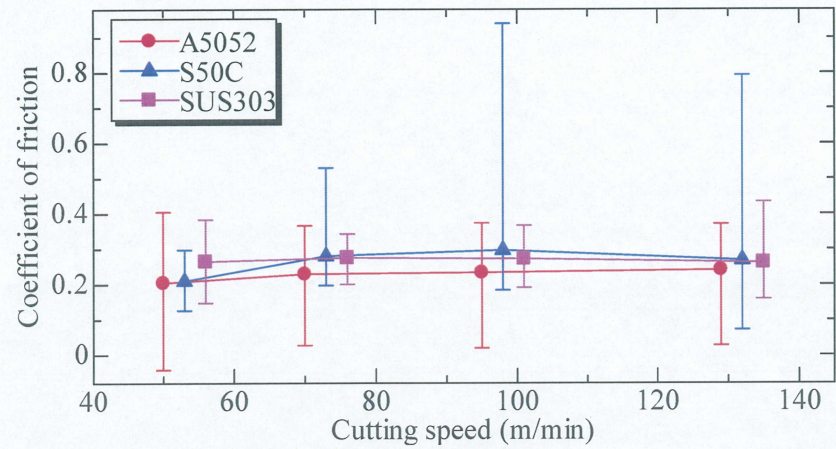
Fig.5.11 Optimum n_c , n_t of each cutting speed

摩擦速度が上昇するにつれて n_c 値は S50C, SUS303 が増加傾向, A5052 が減少傾向にあるようにも捉えられるが、やはり試験片ごとに共通する値が存在し、最大値と最小値の幅の広さも試験片ごとに共通することが示された。試験片ごとの最適な n_c , n_t を表 5.6 に示す。これはすくい角 $+5^\circ$ の工具のドライ切削における最適な n_c , n_t と言える。

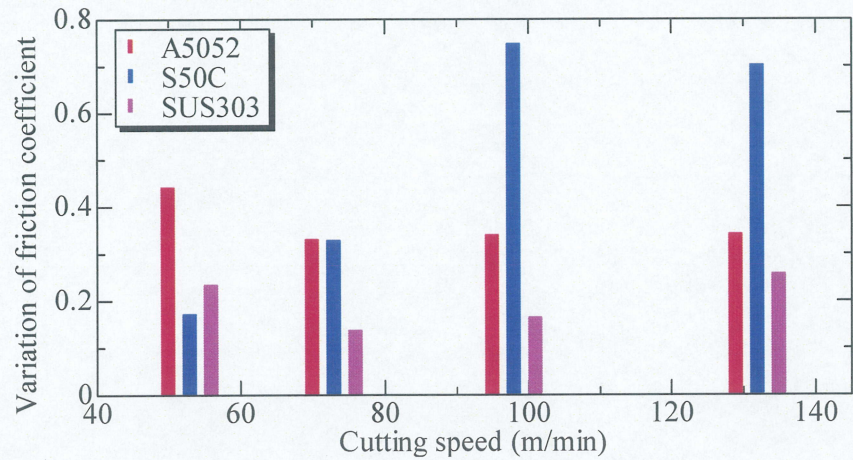
Table 5.6 Optimum n_c and n_t (all cutting speed)

Specimen	n_c (average)	n_t
A5052	9.4 ~ 12.8 (11.1)	0.2
S50C	9.5 ~ 9.7 (9.6)	0.2
SUS303	7.1 ~ 8.3 (7.7)	0.2

最適な n_c , n_t の平均値を用いて算出された摩擦係数について、平均値、最大値、最小値を図 5.12(a)に、変動量を図 5.12(b)に、また、比切削抵抗を図 5.13 に示す。



(a) Coefficient of friction



(b) Variation of friction coefficient

Fig.5.12 Relationship between cutting speed and friction coefficient

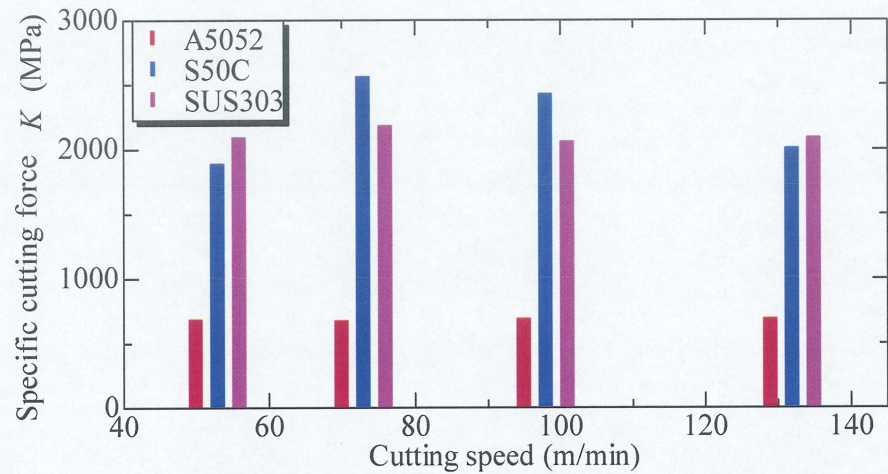


Fig.5.13 Specific cutting force

摩擦に及ぼす速度の影響については、図 5.14 に示すストライベック線図(流体潤滑下から固体接触が生じる潤滑領域までを「流体潤滑」の立場に立って表現したもの)が基本になる。¹⁴⁾ これによると、図中Ⅲの境界摩擦領域(固体表面の接触が生じた境界潤滑状態)において、摩擦速度が低い場合は影響が無視できるが速度が速い時摩擦係数はやや下がるということになる。しかし、切削においては溶着によるスティックスリップや変形抵抗などの因子が加わり、ストライベック線図のみで説明することは難しいと考えられる。

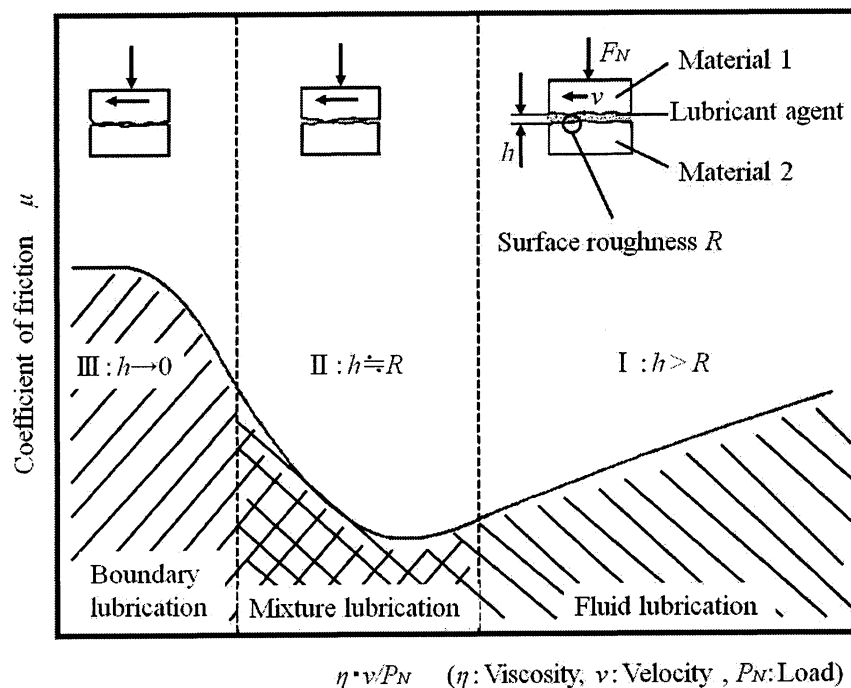


Fig.5.14 Stribeck diagram

本切削条件では、切込みが 5mm と大きいため、ストライベック線図の傾向を示すことや溶着の改善以上に、過酷な切削となり、特に硬い素材である S50C や SUS303 の摩擦係数は切削速度の上昇によって下がるという結果は得られなかった。また、切削速度が上昇すると変形スピードが上昇し材料のもつ粘性の影響で、次式から変形抵抗応力が上昇する。

$$\sigma = c \varepsilon^n \varepsilon'^m \quad (5.6)$$

ここで、 σ ：応力、 c ：塑性係数、 ε ：ひずみ、 ε' ：ひずみ速度、 n ：加工硬化指数、 m ：ひずみ速度感受性指数である。¹⁵⁾ 加工硬化指数(n 値)については表 5.7 に示す。よって S50C に関し

ては，もともとあまり溶着が起きないので，切削速度の上昇によって摩擦係数変動量，比切削抵抗が増加する結果となり，SUS303 に関しては溶着が減少したが，切削の過酷さ，変形抵抗の増加が原因で変動量にあまり変化がなかったと考えられる．A5052 に関しては柔らかい素材であるために切削の過酷さはあまり影響を及ぼさず，加工硬化係数が低いので変形抵抗の増加も少なく，変動量が下る結果になったと考えられる．

また， n_c 値が依然として試験片材種ごとにまとまりの値を持っているという結果は得られた．

Table 5.7 Work hardening index of each material

Material	Work hardening index : n
A5052	0.24
S50C	0.20
SUS303	0.54

5.5 考察

求めた最適な n_c , n_t 値について, n_t については一定値($n_t=0.2$)を示し, n_c 値は試験片材種に依存するという仮定の下, 切削条件ごとに n_c 値を求めてきた. 切削条件別に調査した結果において, n_c 値は試験片材種に依存することが確認できたが, 全体としての確認が必要である. 図 5.15 は各切削条件の n_c 値をまとめたものである.

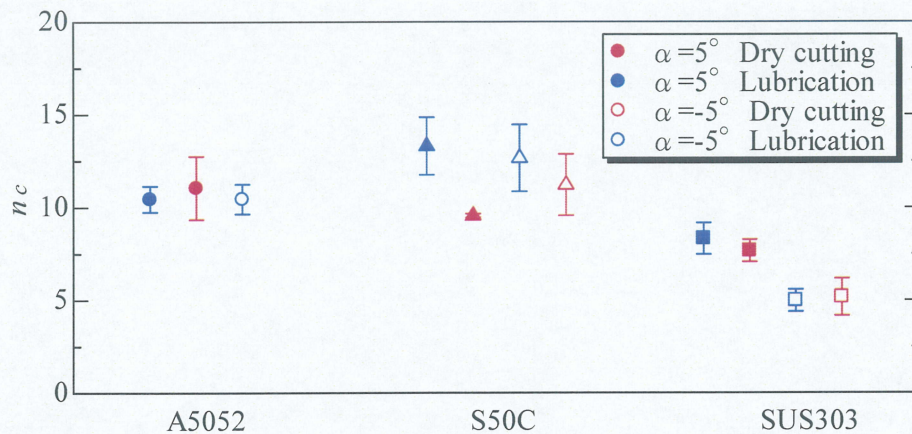


Fig.5.15 All n_c and n_t

試験片材種ごとに完全に一致しているわけではないが, 試験片材種ごとに近い値となり, A5052 については全条件共通の n_c 値が存在するため, 試験片材種に依存することが確認できた. ここから, 本研究における最適な n_c , n_t 値を, 全条件の平均値として表 5.8 のように定めた.

Table 5.8 Conclusive n_c result

Specimen	n_c
A5052	10.7
S50C	11.7
SUS303	6.6

また, 摩擦係数は主分力 F_c と背分力 F_t に依存するので, n_c 値はその比にも依存すると考えられる. よって n_c , n_t 値適用前の主分力, 背分力の比と最適な n_c 値の関係を図 5.16 に示す.

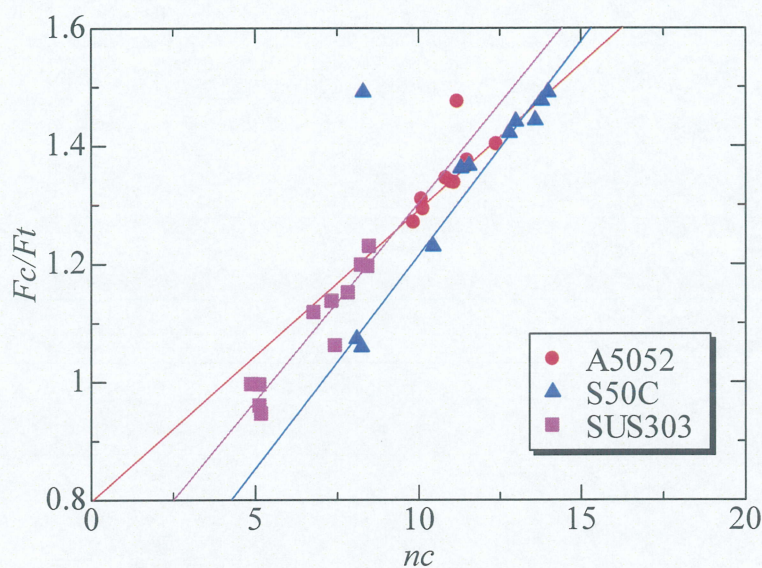


Fig.5.16 Relationship between F_c/F_t and n_c

背分力に対して主分力の割合が大きいと n_c 値も大きくなる．主分力，背分力の比と n_c 値には比例関係があると考えられ，被削材種ごとに固有の傾きを持っていると考えられる．傾きの大きさは $A5052 < SUS303 \approx S50C$ であり，この関係性は比切削抵抗や表 5.9 に示す材料の硬さと一致する．よって材料が硬くなるほど傾きが大きくなる．

Table 5.9 Hardness (Hv) of each material

Material	Hardness (Hv)
A5052	55
S50C	200
SUS303	200

以上から，簡易摩擦試験と 3.2 で行った二次元切削実験の摩擦係数を 5.2.1 の摩擦係数算出方法を利用して再計算したものを比較したグラフを図 5.17 に示す．

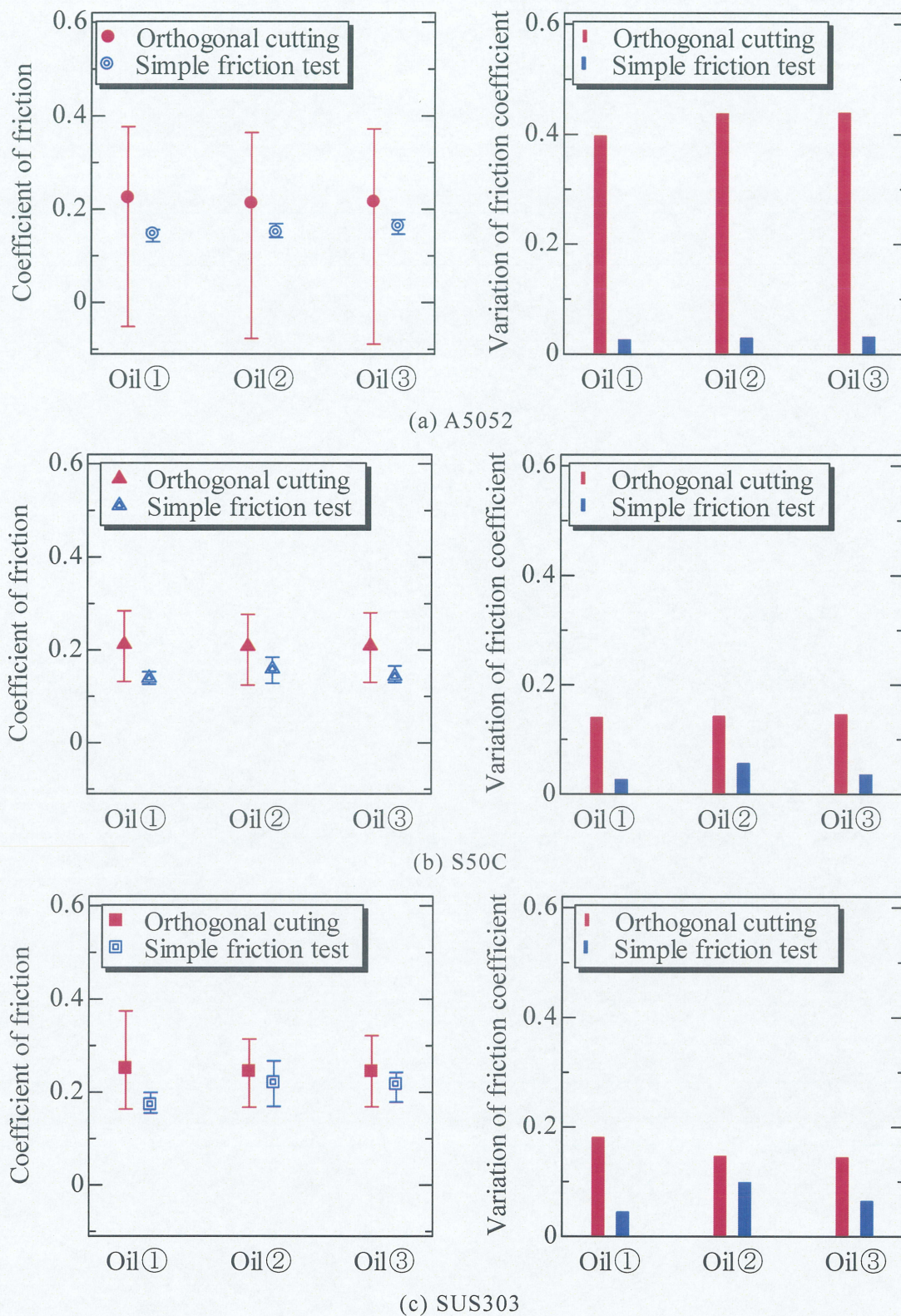


Fig.5.17 Friction coefficient in which final n_c , and n_t are applied

簡易摩擦試験で表れる変化が二次元切削実験においては現れにくい、S50C においては簡易摩擦試験で発生しにくい溶着現象が起こりにくく、他の試験片と比較しても油剤ごとの傾向を近づけることが可能であると判明した。

また、本研究においての二次元切削実験では油剤が切削点に侵入しにくいという難点があるため、境界摩擦領域が異なる。簡易摩擦試験においては油剤中に試験片が存在しているため、常に摩擦面に油剤が侵入している。対して二次元切削においては、連続切削であるために圧力が高い領域には油剤が侵入しにくく、すくい面の一部の領域しか十分に油剤が作用できていないと考えられる。しかし簡易摩擦試験においても摩耗痕が現れるため、三角形チップの先端部は油剤の作用しにくい領域が存在すると考えられる。境界潤滑と流体潤滑の摩擦係数の差は 5.4.2 の図 5.14 のストライベック線図より明らかである。よって境界潤滑領域と流体潤滑領域の割合を明らかにすることが切削の簡易モデル化において重要であると考えられる。

より実践的な簡易摩擦試験機の実現のために、接触圧力と温度は重要な要素である。A5052 に特に言えるのだが、摩擦係数変動量が大きく異なった値となっている。これは二次元切削において溶着の影響が大きいからであると考えられる。簡易摩擦試験では二次元切削実験と比較して接触圧力が低い。荷重の増加によってある程度の圧力を作用させることは可能であると考えられるが、接触面積が広がり、意図したとおりの圧力がかからない。

また、摩擦試験温度に関しては、油剤が引火点付近まで温度上昇すると油剤の気化が激しくなり、それ以上の温度上昇が困難になる。簡易摩擦試験では 200℃付近であるが二次元切削では、図 5.18(ドライ切削)のように温度が分布し、約 5 倍もの高温状態にさらされる。¹⁶⁾ ただし、油剤を使用することでこの温度はある程度下がると考えられる。

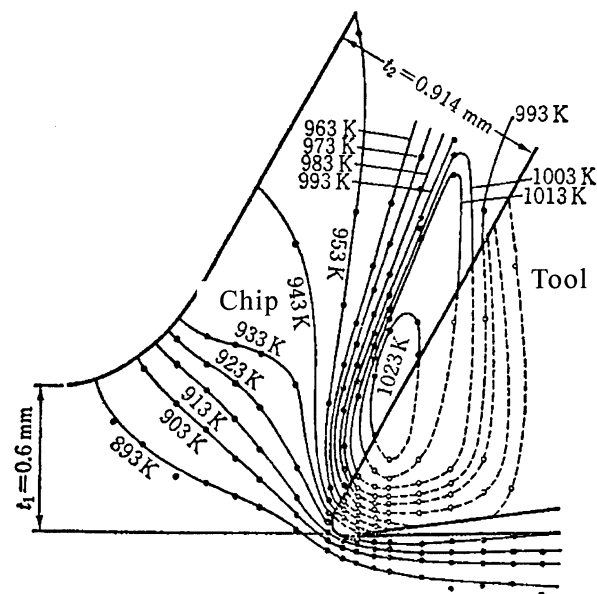


Fig.5.18 Temperature distribution of tool

以上から，簡易摩擦試験においては溶着が起こりにくい状況にあり，変動量が小さい値となってしまうと考えられる．切削において溶着現象は考慮すべき項目である．本研究では溶着のしにくい S50C に関してはより実践的な簡易摩擦試験法の確立が可能になったが，簡易摩擦試験において溶着現象をモデル化することができればさまざまな被削材種での実践的な摩擦試験を行うことが可能になる．

第 6 章 結言

本研究では切削中の工具と被削材間の摩擦現象に注目した。その潤滑性を簡易摩擦試験によってより実践的に調査するために、二次元切削における逃げ面摩擦を考慮した。工具すくい面及び逃げ面における主分力、背分力の比をそれぞれ n_c , n_t 値とし、分力を分割することによって二次元切削における摩擦係数算出式を見直した。また、各切削条件における n_c , n_t 値の変化を調査し、エステル系切削油剤の実践的な性能評価方法の確立を試みた。

以下に研究を通して明らかになった点を述べる。

- (1) 切削を行う上で重要である、溶着によるスティックスリップ現象などの影響は摩擦係数平均値よりもむしろ摩擦係数変動量に現れるため、安定した切削を行うことが可能であるか否かを検討するために摩擦係数変動量の評価が重要で、摩擦係数平均値が低く、かつ変動量が小さい値を示す油剤が最適な油剤であると考えられる。
- (2) 工具逃げ面を摩擦方向に対し、抵抗となる方向へ故意に加工を施した切削において、摩擦係数平均値及び変動量が増加した。よって逃げ面に作用する力は摩擦係数に影響を与え、すくい面のみでなく逃げ面摩擦を考慮した摩擦係数算出式が有効である。
- (3) n_c , n_t 値は油剤、すくい角、摩擦速度に左右されず、被削材種に依存するため、切削条件ごとの値を求める必要がない。
- (4) n_c 値は試験片材種に依存し、 n_t 値は変化しない。工具すくい面においては摩擦方向に対し約 90° 異なる方向へ塑性変形を受ける程の力が作用しているので材料の硬さの影響を受けやすい。これに対し逃げ面は、比較的摩擦方向に沿うような弾性変形であるために影響を受けにくいと考えられる。

- (5) 溶着しにくい材料の潤滑性能は簡易摩擦試験によって表すことが可能であるが、簡易摩擦試験の最大接触圧力や油剤温度をさらに二次元切削に近づけ、二次元切削における溶着現象を簡易モデル化することが可能になればより様々な材種の潤滑特性を簡易的に調査することが可能になる。

参考文献

- 1) “生分解性潤滑油とエコマーク”，月刊トライボロジ(2000.2), P.24
- 2) 似内 昭夫：“わかりやすい潤滑技術”，日本プラントメンテナンス協会, (1995), PP.9-16
- 3) 藤村 善雄：“実用切削加工法”，共立出版株式会社, (1980), PP.61-70
- 4) 横山 哲男：“機械加工技術”，株式会社工業調査会, (2004), PP.128-131
- 5) 臼井 英治：“切削・研削加工学 上”，共立出版株式会社, (1971), PP.16-22
- 6) 杉田 忠彰, 上田 完次, 稲村 豊四郎：“加工学基礎 1 基礎切削加工学”，共立出版株式会社, (1984), P.72
- 7) “金属材料データブック”，日本規格協会
- 8) 奥本 智大：私信，タイユ株式会社
- 9) 桜井 俊男, 広中 清一郎：“化学 One Point 5 トライボロジー”，共立出版株式会社, (1984), PP.53-54
- 10) “機械工学便覧 β 4 機械要素・トライボロジー”，日本機械学会, (2005), PP.145-149
- 11) 藤村 善雄：“実用切削加工法”，共立出版株式会社, (1980), P.87
- 12) 狩野 勝吉：“データでみる次世代の切削加工技術”，日刊工業新聞社, (2000), PP.30-37
- 13) 臼井 英治：“切削・研削加工学 上”，共立出版株式会社, (1971), P.308
- 14) “摩擦・摩耗試験機とその活用”，社団法人日本トライボロジー学会, (2007), PP.16-17
- 15) “塑性加工便覧”，社団法人日本塑性加工学会, (2006), PP.1074-1075
- 16) 杉田 忠彰, 上田 完次, 稲村 豊四郎：“加工学基礎 1 基礎切削加工学”，共立出版株式会社, (1984), P.75

謝辞

本研究を遂行するにあたり、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。また、論文作成にあたり御査読いただきました 牧 清二郎 教授、中村 裕一 准教授、中西 栄徳 助教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、共に実験を行った大学院生 大屋 真浩 氏をはじめ、集積加工システム研究室諸氏に厚く御礼申しあげます。

また、本実験で使用した切削液剤は タイコ株式会社 より御好意で提供していただきましたことを記し、心より御礼申し上げます。

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、その失礼を御詫びするとともに、謹んで御礼申し上げます。