

理工学研究科陳徳

GD

K

0002514867

R

268

静岡大学附属図書館

環境低負荷セミドライ加工システム の開発及びその実用化に関する研究



陳 徳成

理工学研究科設計科学専攻

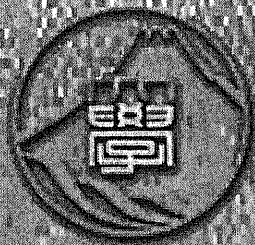
環境低負荷セミドライ加工システム
の開発及びその実用化に関する研究

**A Study about Development of Environment Low
Load for Semi-drying Cutting Process System and
Make This Cutting Technology for Practical Use**

理工学研究科設計科学専攻

Graduate Course of Science and Engineering, Major of Design Science

陳 徳成
Chen Decheng



目次

第1章 緒論	1
第2章 切削理論及び切削技術の進歩	3
2.1 切削加工とは	3
2.2 切削機構の幾何学	3
2.3 切削抵抗	4
2.4 切削温度	6
2.4.1 二次元切削の温度解析	7
2.4.2 切削温度の測定	8
2.5 工具損傷	9
2.5.1 工具材料の進歩	9
2.5.2 工具の摩耗に対する評価方法	9
2.6 仕上げ面の粗さ	11
2.7 切削油剤	13
2.7.1 切削油剤の種類	13
2.7.2 切削油の役割	14
2.7.3 切削油使用の問題点	15
2.8 環境対応加工技術	18
2.8.1 ドライ加工技術	18
2.8.2 セミドライ加工技術	20
2.9 21世紀の生産技術	21

第3章 ステンレス鋼の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果	23
3.1 緒言	23
3.2 ステンレス鋼の材料特性及び現場のトラブル	23
3.3 実験の概要	25
3.3.1 試料とする部品の概要	25
3.3.2 切削トラブル	26
3.3.3 使用工作機械	27
3.4 冷風冷却及び微量切削油供給による切削実験	27
3.4.1 微量切削油供給法	30
3.4.2 植物性切削油剤	31
3.4.3 微量切削油供給機	31
3.4.4 冷風供給装置	32
3.4.5 実験装置	34
3.4.6 実験条件	35
3.5 実験結果	36
3.5.1 工具の摩耗	37
3.5.2 摩耗曲線	38
3.5.3 仕上げ面性状及び仕上げ面粗さ曲線	38
3.6 考察	39
3.6.1 考察 1—実験 a, 実験 e 及び実験 f	40
3.6.2 考察 2—実験 b 及び実験 f	42
3.6.3 考察 3—実験 b 及び実験 c	42
3.6.4 考察 4—実験 d 及び実験 f	43

3.7	結言	44
第4章 高ケイ素アルミニウム合金の切削面に及ぼす潤滑及び冷 風の効果		46
4.1	緒言	46
4.2	実験方法	46
4.2.1	実験材料	47
4.2.2	実験装置	49
4.2.3	冷風冷却方法及び微量切削油供給方法	51
4.2.4	実験条件	52
4.3	実験結果及び考察	52
4.3.1	仕上げ面性状及び仕上げ面粗さ曲線	53
4.3.2	工具摩耗	57
4.4	結言	60
第5章 複合ミスト供給法による旋削加工の研究		61
5.1	緒言	61
5.2	従来のオイルミスト供給法	62
5.3	複合ミスト供給法	64
5.4	複合ミスト供給システム	65
5.4.1	複合ミスト給油機	66
5.4.2	過流形成原理よるミスト発生及びノズルへの搬送過 程	68

5.4.3	ミスト粒子の観察	69
5.5	実験結果	71
5.5.1	実験材料	71
5.5.2	実験方法	72
5.5.3	工具摩耗実験	73
5.5.4	仕上げ面粗さ曲線及び仕上げ面の性状	77
5.5.5	切削温度の測定	81
5.5.6	加工精度に及ぼす切削熱の影響	83
5.6	結言	86
第6章	複合ミスト供給法によるアルミニウムホイールの切削加工——複合ミスト供給法の実用——	87
6.1	緒言	87
6.2	大量の切削油を使用した従来加工法	87
6.2.1	生産現状	87
6.2.2	アルミニウムホイール用材料	88
6.2.3	加工条件	89
6.2.4	切削トラブル	90
6.3	複合ミスト供給法による加工法	91
6.3.1	複合ミスト供給装置	93
6.3.2	過流形成原理よる混合ミスト発生及びノズルへの搬送過程	93
6.3.3	加工条件	94

6.4 結果及び考察	95
6.4.1 工具の溶着及び工具寿命	95
6.4.2 仕上げ面の性状	97
6.4.3 複合ミスト供給による加工精度向上	98
6.4.4 作業の安全性向上	99
6.4.5 省エネ，清潔生産実現	100
6.5 実用面にある問題点	101
6.6 今後の方針	102
第7章 結論	104
謝辞	108
参考文献	109

第1章 緒論

一般的な切削作業においては切削油剤が使用されているが、その主な使用目的は加工時における冷却、潤滑、切りくず排除及び錆止め等である。切削加工は素材より硬い刃物で素材の不用部分を削り取り、望む形状を作り出す作業である。潤滑作用には不水溶性の切削油がよいが、冷却性がよくないことと発火の危険性があるため、水溶性油剤が一般には多く用いられている。水溶性油剤は、その潤滑作用を向上させるために、硫黄、りん、塩素などの極圧添加剤が含まれている。作業中、不水溶性の場合は鉱油が、水溶性油剤の場合は添加剤を含んだミストが飛び散るので、作業者に悪い影響を与える。また、使用済み油剤を処理するためのコストが高い。環境面においては、廃液処理工程で、廃油として焼却されるときダイオキシンの発生や、水質汚染の原因となる可能性が指摘されている¹⁾²⁾。世界における環境重視の動向を見ると、大量の切削油を使用していた加工方法を見直し切削油の適量化、あるいは完全なドライ切削化が望まれている。これまでにエンドミル加工などの断続切削においてはミスト供給による潤滑の効果が示されているが、刃先が常に切り屑に覆われている旋削でも十分な効果があるかどうかは十分に明らかとなっていないと思われる。そこで、本研究は連続切削において、セミドライ加工としての冷風冷却加工システム及び複合ミスト供給加工システムを開発し、それらの技術を実用化することを目的としているものである。本論文の構成は以下のとおりである。

第1章は緒論であり、本章である。

第2章では切削理論から、切削加工における切削油剤の種類、切削油剤

の切削加工での役割及び切削油剤使用の問題点を検討したうえで、環境対応加工技術中のドライ加工技術及びセミドライ加工技術に関する研究の将来性を明らかにした。

第3章では冷風冷却による加工法を利用して、難削材と言われたステンレス鋼 SUS430F の旋削を取り上げ、その切削加工トラブルを解決するため、最適な切削条件を探ることを通じて加工性の改善を図るとともに、環境に優しいとされる冷風冷却による切削方法の可能性を検討した。

第4章では冷風冷却による加工法の実験を通じて、難削材の高ケイ素アルミニウム合金を対象として、連続切削である旋削において、 -30°C 冷風と微量な植物性潤滑油と一緒に供給する加工法を利用して、工具の摩耗を抑える効果及び仕上げ面粗さを向上する効果を検討した。

第5章ではオイルミスト供給による加工について、少量の油剤では大量の切削熱を取り切れない欠点があることを検討して、最も冷却性が優れる水をミスト状にして、潤滑性を確保するための植物性切削油のミストと共に加工点に供給する加工方法である複合ミスト加工法を提唱した。

第6章では複合ミスト供給による加工法の実用化を検討した。民間生産工場の自動二輪車用アルミニウムホイール生産ラインで本加工法を1年間使用した結果、作業の安全性向上、省資源及び清潔生産等を実現できた。

第7章は本論文の結論である。

以上により、セミドライ加工である冷風冷却による加工法及び複合ミスト供給による加工法は、連続切削における工具の摩耗を抑え、仕上げ面粗さ精度を向上する等、従来の切削油を使用する加工法と同等以上の効果があることが明らかとなった。

第2章 切削加工理論

2.1 切削加工とは

切削加工は切削工具と工作物との間に相対運動を与えることによって工作物の不要な部分を切りくずとして削り取り、工作物を所定の形状寸法に仕上げる加工法である。

切削加工の特徴は、物体の表面を構成する平面、円筒面、穴、溝、ネジ、自由面などの多彩な形状を、高い精度でしかも能率よく仕上げられることである。代表的な切削加工法は連続切削の旋削、断続加工のフライス加工などである。工具と工作物の運動には多くの組み合わせ方があり、これによって多様な形状を削ることが可能になっている³⁾。

2.2 切削機構の幾何学

Figure 2-1は最も基本的な定常二次元切削モデルであり、せん断面モデルと呼ばれる。Fig.2-1-a , Fig.2-1-bにそれぞれ工具摩耗のない理想的な状況と逃げ面摩耗の生じた（逃げ面摩耗幅 V_B ）状態を示す。せん断モデルでは、すくい面 α と逃げ角 ξ を有するくさび状工具により切削が行なわれ、一定の切削厚さ t_1 で削りとられた工作物が単一のせん断面AEで瞬時にせん断変形を受けて厚さ t_2 の切りくずとなり、すくい面を擦過しながら流出する。切削方向とせん断面のなす角 ϕ をせん断角と呼ぶ。せん断角 ϕ はFigure 2-1-aの幾何学的関係より切削比 $r_c=t_1/t_2$ を用いて次式であたえられる。

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (2.1)$$

せん断モデルにおける速度場はせん断面AEでのせん断速度 V_s 、切りくず流出速度 V_c 並びに切削速度 V によって構成される。これらの速度は連続の条件よりFig.2-1-aの閉じた三角形を形成するため、次式の間係が成立する。³⁾⁴⁾⁵⁾

$$V_s = \frac{V \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.2)$$

$$V_c = \frac{V \sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} = V r_c \quad (2.3)$$

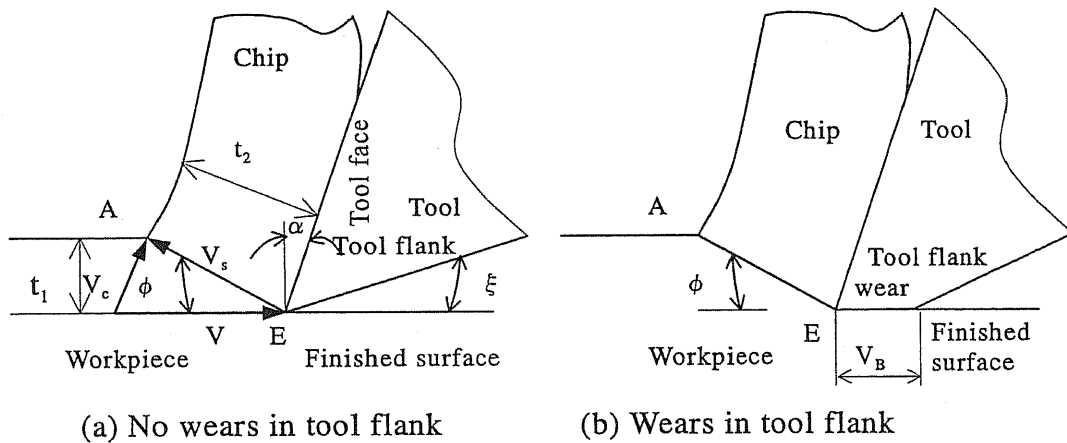


Fig.2-1 Model of shear plane

2.3 切削抵抗

切削加工は加工物内部に高い応力を発生させて破壊、分離を起こさせる加工法であるから、加工物や工具に力が加わることは避けられない。その

力，すなわち切削抵抗とその時間的な変動はTable2-1に示すような経路をへて，所要動力，加工物の寸法及び形状精度，仕上げ面の粗さ，加工変質層，工具寿命など被削性のすべての項目に直接的，あるいは間接的に影響を及ぼす⁴⁾。

Table 2-1 Affection by cutting resistance

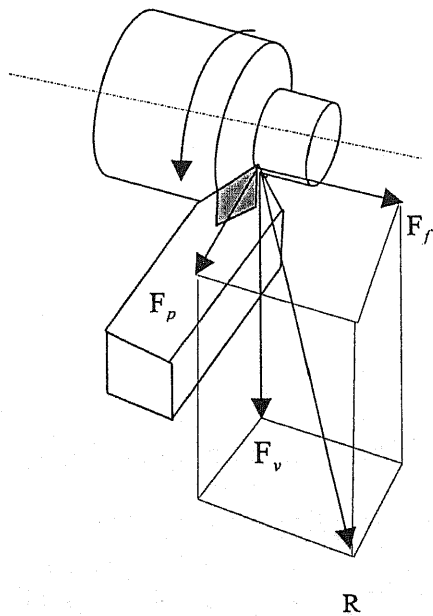
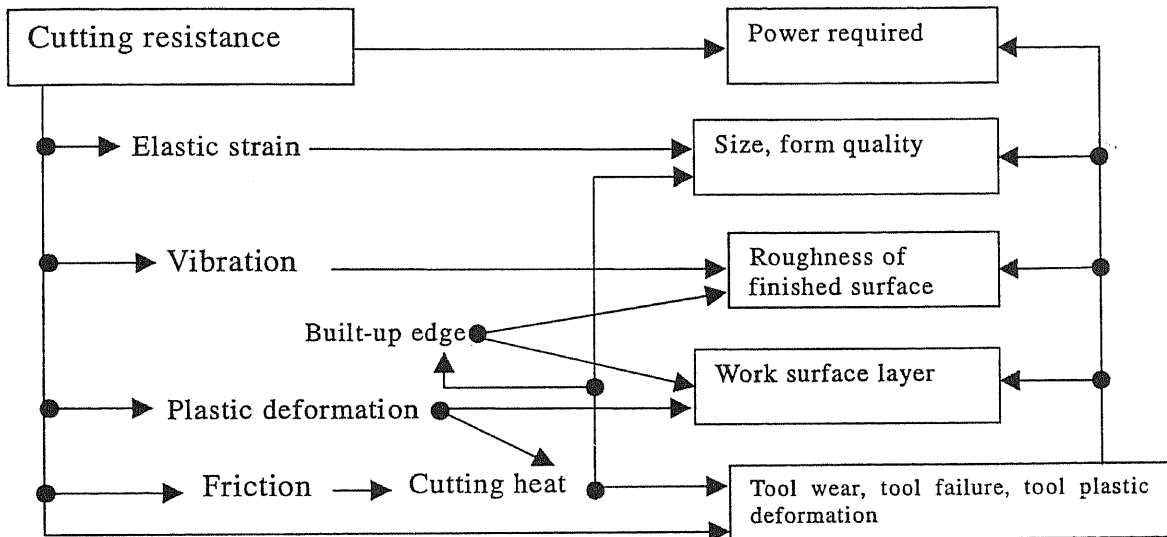


Figure 2-2に示すように，切削抵抗の合力 R を主分力 F_v ，送り分力 F_r 及びこれら兩分力と直角方向の背分力 F_p の三分力とする．切削加工の品質を得られるように，切削抵抗とその変動はあらゆる点からみて，できるだけ小さいことが望ましい⁴⁾。

Fig.2-2 Cutting resistance

Figure 2-1に示すように、二次元切削モデルを考えると、切削抵抗は以下のように求められる。

$$\text{切削抵抗} \quad R = \frac{bt_s \tau_s}{\sin \phi \cos \omega} \quad (2.4)$$

ここに b は切削幅、 τ_s は被削材のせん断変形応力

$$\omega = \phi + \beta - \alpha \quad (2.5)$$

β は摩擦角

切削抵抗の主分力 F_c と背分力 F_f は次式のようになる。

$$F_c = R \cos(\omega - \phi) \quad (2.6)$$

$$F_f = R \sin(\omega - \phi) \quad (2.7)$$

以上、 ω と ϕ (または β) の二つが分かれば切削抵抗やその分力を知ることができる³⁾⁴⁾⁵⁾。

2.4 切削温度

切削で消費されたエネルギーの大部分は熱に変化して工具、切りくず、工作物、工作機械に伝わり、それらの温度を上昇させる。工具温度の上昇は工具の強度を低下させるとともに工具と工作物界面を熱的に活性化させ、工具の摩耗を促進させる。また工具、工作物、工作機械の温度上昇は熱変形を引き起こし、加工精度を低下させる。

塑性変形をともなう金属加工を行なうと一般に大量の熱が発生する。切削加工における変形は刃先付近の微小領域に限定されるとはいえ決して例外でなく、加工条件によっては赤熱した切りくずが発生するほどの高温となる。切削における発熱源は大きく3カ所に分類される。第1は、被削材

をせん断変形して切りくずを形成するための1次変形領域における発熱である。これによって切りくず全体の温度上昇が起こる。第2は、形成された切りくずが工具のすくい面上を滑る際に、強い摩擦を受けることによる発熱である。1次変形領域で形成された切りくずの内、切削工具に近い部分はこの摩擦によってさらに変形を受けるため、2次変形領域と呼んでいる。第3は、形成されたばかりの切削面が工具刃先の微小丸み部分や工具逃げ面と摩擦することによって生ずる発熱である。第2、第3の摩擦による発熱が加わって切削工具の温度はさらに上昇することになる。また、第3の発熱は切削面との摩擦によるものであるため、表面の仕上げ状態に大きく影響する。

2.4.1 二次元切削の温度解析

Figure 2-3は切削温度を解析するため、仮定したモデルである。これより、せん断面の発生熱 θ_s [J/s] とすくい面における工具と切りくず接触部の摩擦による発生熱 θ_f [J/s]、形成されたばかりの切削面が工具刃先の微小丸み部分や工具逃げ面と摩擦することによって生ずる発熱 θ_n [J/s] とすると、切削による単位時間あたりの全発生熱 Q は次のようになる⁵⁾。

$$Q = \theta_s + \theta_f + \theta_n$$

$$= \frac{F_s V_s}{J_0} + \frac{F V_c}{J_0} + \frac{F_n V}{J_0} \quad (2.8)$$

ここに F_s [kgf] はせん断力、 V_s [m/s] はせん断速度、 F [kgf] はすくい面上の摩擦力、 V_c [m/s] は切りくずの流出速度である。 F_n [kgf] は逃げ面上の摩擦力、 V [m/s] は切削速度である

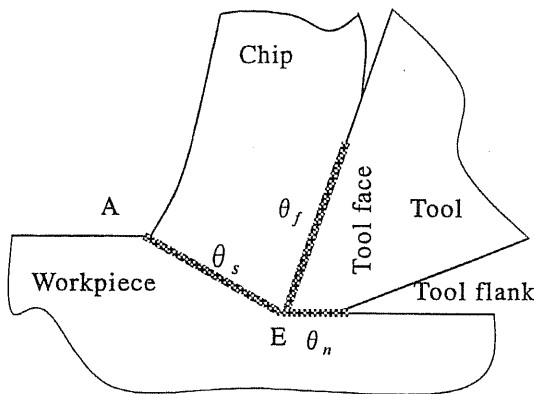


Fig.2-3 Cutting heat source

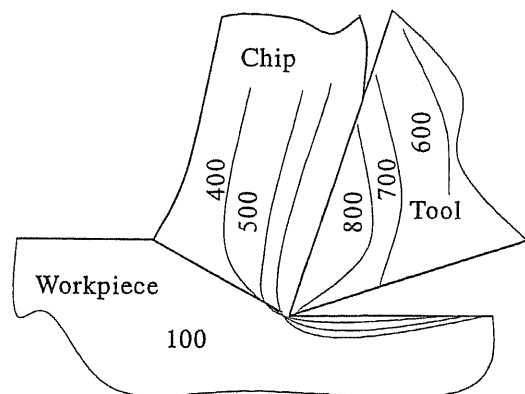


Fig.2-4 Cutting temperature distribution

Figure 2-4はある切削条件についてせん断面モデルを仮定し、数値解析により求めた温度分布である。最高温度は刃先ではなく、刃先より離れたすくい面に現われ、ほぼこの位置においてすくい面での摩耗も最大となる。

2.4.2 切削温度の測定

切削温度の測定は通常工具の刃先付近及び工作物の温度を測定することが多い。主に以下の方法が採用されている。

1. 熱起電力による方法

- (1) 工具に感度のよい熱電対を埋め込む方法（本実験での旋盤加工に採用）。
- (2) 工作物に感度のよい熱電対を埋め込む方法
- (3) 工具と工作物を熱電対とする方法。

2. サーモカラーによる方法

3. ふく射熱による方法⁶⁾

2.5 工具損傷

2.5.1 工具材料の進歩

20世紀中に、高速度工具鋼，超硬合金，サーメット，コーテッド超硬合金，コーテッドサーメット，ファインセラミックス，コーテッドセラミックス，ダイヤモンド焼結体，CBN焼結体などの新しい工具材料がつぎつぎと開発された．この100年間で，切削加工の高速化は長足の進歩を見た⁷⁾．

2.5.2 工具の摩耗に対する評価方法

工具損傷の分類をTable2-2に示す．

Table2-2 Tool failure

Tool failure	Brittle failure	1. Chippage
		2. Coloboma
		3. Break
		4. Crack failure
	Wear	1. Crater
		2. Flank wear
		3. Notch wear
Plastic deformation or creep		

代表的な工具摩耗の様子をFig.2-4に示す．

1. クレータ摩耗: 切りくずの摩擦によってすくい面上にできるくぼみである．クレータは浅いうちは無害だが，深くなると切りくずを激しく上向きにカールさせるため，切削抵抗が増加し，さらに振動も発生し，ついには刃先が大きく欠ける原因となる．

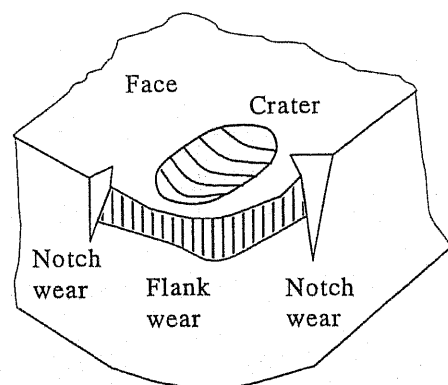


Fig.2-4 Tool wear

2. 逃げ面摩耗：工具の逃げ面が仕上げ面に摩擦されて起きる摩耗である。これによって切刃が後退するので、Fig2-1 の断面図でわかるように、それだけ浅く削ることになる。切刃後退量 δ と逃げ面摩耗幅 V_B 、すくい角 γ 及び逃げ角 α の間には次の関係がある。

$$\delta = \frac{V_B}{\cot \alpha - \tan \gamma} \quad (2.9)$$

逃げ面摩耗の程度は測定の容易さから、摩耗幅 V_B を目安にするのが普通である。この V_B は切削時間や切削距離とともに増大する。Fig2-5に示すような曲線を摩耗曲線という。本研究第三章では、工場の生産現場で工具摩耗実験を行うために、Fig2-6のような縦軸に‘加工部品外径の変化量’、横軸に加工した‘加工部品数’をとったグラフを用いる。これを本研究第三章での“摩耗曲線”とする。

‘加工部品外径の変化量’は直接的に切刃後退量 δ を、間接的には逃げ面摩耗幅 V_B を表していると言ってもよい。しかし、実際には下記のような要因により、誤差がある。

- a. 背分力の増加による加工物外径の増加
- b. 切削熱によって工具や被加工物が熱膨張し、その結果過切削が行われて、加工物の外径が減少
- c. 構成刃先等の刃先付着物による過切削
- d. 工作機械の熱変形の時間的变化による影響
- e. 前逃げ面摩耗と横逃げ面摩耗は比例するとは限らない

これらの事柄により、外径の変化量は工具摩耗量と正確には一致しない。しかし、切削条件の違いによる摩耗の進行を比較するには、外径の変化量

を比較することで充分であろう。よって、本研究第三章では外径変化量に基づく摩耗曲線を用いてそれぞれの切削条件における工具摩耗を比較していくことにする。

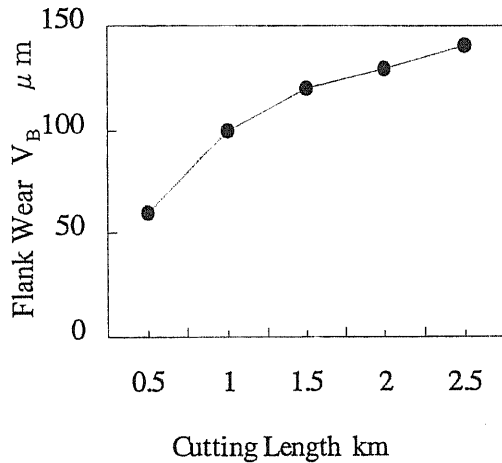


Fig.2-5 Tool wears curve

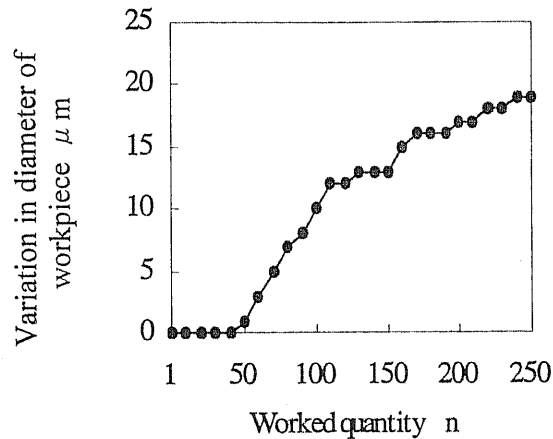


Fig.2-6 Tool wears curve in part 3

3. 境界摩耗：旋削作業の時、逃げ面摩耗帯のノーズと反対側の端に、すなわち切り込みの終端部分に、大きくかつ深く摩耗した部分を生ずることがある。特に、ステンレスのように、切りくずが流れ形でしかも加工硬化性の大きい材料を削った場合に多く見られる摩耗で、これを境界摩耗といい、その成因については従来、数多くの研究が発表されている。例えば、被削材表面は前加工等のために加工硬化しているから、切削の時工具のその部分に当たるところが特に摩耗して境界摩耗を生ずるとか、切削中高温になった工具は切りくずで覆われているが、切り込み相当位置で空気に触れるため酸化による摩耗が生ずる等とされる。

2.6 仕上げ面の粗さ

仕上げ面の輪郭が刃物の動いた軌跡通りに作られたとして、しかもその刃物の輪郭や運動が完全に設定した通りであったとすると、その仕上げ面の粗さは計算で求められる。それを理論粗さ、または理想粗さと呼ぶ。理論粗さ R_y は以下のようになる。

$$R_y = \frac{f^2}{8r} \quad (2-10)$$

ただし f : 送り(mm/rev) r : ノーズ半径(mm)

上式から明らかなように、理論粗さを小さくするには、①送り f を小さくし、②ノーズ半径 r を大きく、③副切り込み角を小さくすればよい。

しかし、現実の切削仕上げ面の粗さはこの理論粗さよりかなり大きい場合が多い。それは下記の諸要因が加わるためである。

(1) 切れ刃の輪郭が不正確な場合

工具のノーズ部が不均一に摩耗した場合、特に境界摩耗が起こった場合は、その形が仕上げ面に転写されて粗さが増す。新しい工具でも、ノーズの丸み部と直線部のつなぎの部分に多少角が残っている場合が多く、これも粗さを大きくする原因となる。

(2) 工具と工作物の相對運動が不正確な場合

工具や工作物は必ずしも理論通りには動かないから、それも粗さ増大の原因になる。ビビリ振動によって切り込みが変動した場合は理論粗さに比べてかなり粗さが大きいことある。

(3) 切れ刃の転写が正確に行われていない場合

工作物から切りくずが分離する際、分離が切れ刃上で起こらなければ、

切れ刃の輪郭はそのまま仕上げ面に転写されないから、形が乱れる。これには、亀裂形切りくずが発生する場合及び構成刃先が付く場合⁷⁾⁸⁾の二種類の原因が考えられる。

(4) 切削熱の影響を受けて被削材の軟化，変形が起きる場合

被削材の温度上昇は熱変形を引き起こし、加工精度を低下させる。刃先は高温となりやすいため、工具に溶着物が発生したとき仕上げ面が劣化する。被削材の盛り上がりとむしれを引き起こし、仕上げ面を劣化させる原因となる。

2.7 切削油剤

2.7.1 切削油剤の種類

切削油剤は Fig. 2-7 のように分類される。切削油剤は水に希釈せずにそのまま使用する不水溶性切削油剤と水に溶かして使用する水溶性切削油剤と大きく分けられる。

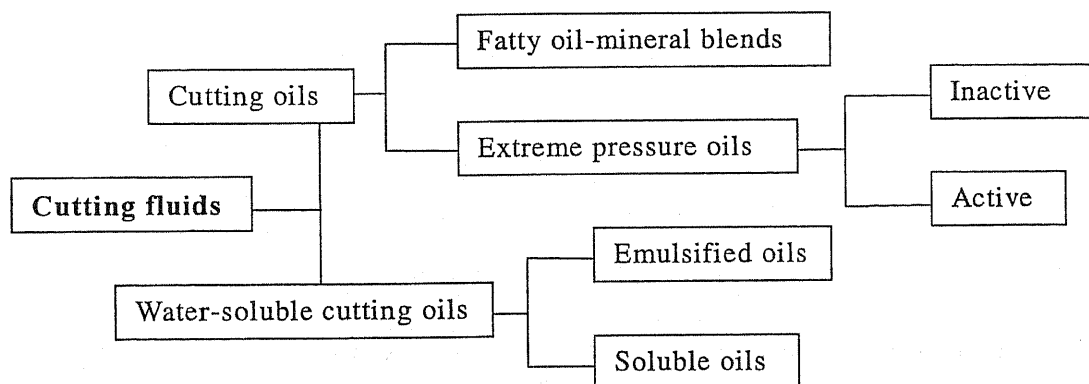


Fig.2-7 Types of cutting fluids

2.7.2 切削油の役割

切削油の役割とは、人の健康を害したり、環境を汚したりしないことを前提として、切削加工において加工物品位や加工能率を向上させ、工具摩耗を抑えることである。

1. 潤滑効果

潤滑効果は、摩擦係数の低減及び工具刃先と工作物や切りくずとの溶着を抑制し、次のような役割を果たす。

- 1) 切削抵抗を減少し、加工精度や仕上げ面性状を向上する。
- 2) 切削抵抗減少による発生熱の減少で、切削温度上昇を抑制し、加工精度や仕上げ面性状を向上する。
- 3) 溶着抑制により、仕上げ面粗さや仕上げ面性状を向上する。
- 4) 摩擦抵抗減少や切削温度上昇抑制によって、工具摩耗を抑制する。

2. 冷却効果

冷却効果の作用は、切削特性に大きな影響を及ぼすのは切削部位における工具刃先近傍、切りくず、工作物からの熱除去であり、それらの温度上昇の直接的な抑制を行なうと共に、間接的ではあるが工具刃先と工作物や切りくず間の接触面温度上昇も抑制し、次のような役割を果たす。

- 1) 工具刃先や工作物の熱膨張などを抑制し、加工精度を向上する。
- 2) 工具刃先温度上昇抑制により、工具と工作物との溶着を抑制し、仕上げ面粗さや仕上げ面性状の悪化を防止する。
- 3) 切りくず温度上昇を抑制し、切りくずが工具、工作物、機械に溶着や付着するのを抑制する。
- 4) 工具刃先温度上昇抑制により、工具摩耗を抑制する。

具体的な冷却方法を、Fig. 2-3 の発熱源から考える。切削加工中の発熱を軽減するためには、発熱そのものを減少させるか、あるいは発生した熱をできる限り除去することが必要となる。もちろん切削加工をする以上、切りくずを形成するための発熱を消すことはできないので、2.4 で示した第2、第3の発熱を減少あるいは除去することになる。即ち、潤滑によって摩擦発熱を減らし、冷却によって温度上昇を防ぐことが重要となる。この潤滑と冷却を同時に行なうために、切削中の刃先に切削液をかけながら削る、いわゆる湿式切削が広く取り入れられている。一般に潤滑性を重視する場合には油系の不水溶性切削液が有効であり、冷却性を重視する場合には水をベースとする水溶性切削液が使用される⁹⁾¹⁰⁾。

近年の工業生産ではコスト低減の要求が強く、切削加工においても高速切削化、重切削化の方向にある。これによって発熱量は大幅に増大するため、切削工具に対する負担は益々大きくなっている。加えて高温の切りくずが発生するため火災の危険性が増加し、工場の自動化、無人化と相まって大きな問題となってきた。このため、水溶性切削液への移行が一般化している。また高精度加工の要求からは、熱変形による精度低下を防止する必要があり、切削液の冷却性がより重視されることから、水溶性切削液の大量使用が有効であると考えられてきた。

2.7.3 切削液使用の問題点

現在、大量切削液の使用は、環境問題及びコスト上の問題がある。

一つは、切削油剤のなかに含まれる添加剤の問題である。切削油剤の性能を上昇するため、現在使用される切削油剤には多種の添加剤が含まれて

いる。添加剤としては主に三種類がある。

- 1) 塩素系添加剤：塩素は金属表面と化学反応し金属表面に金属塩素化物の層を生成し、この層がせん断されやすく、摩擦係数を低下させ、金属表面の摩擦と溶着を防止する。
- 2) 硫黄系添加剤：硫黄系添加剤は 1000℃までの温度で極圧潤滑効果を発揮する。
- 3) 有機リン化合物：有機リン化合物は潤滑性を上げ摩耗を防止し、切削油剤に広く使用されている。

その他、亜硝酸、アミン、防錆剤などが切削油の添加剤として使用されている。こうした添加剤が含まれた切削油を大量に使用することは、コスト面、環境面などで大きな問題を発生することになる。

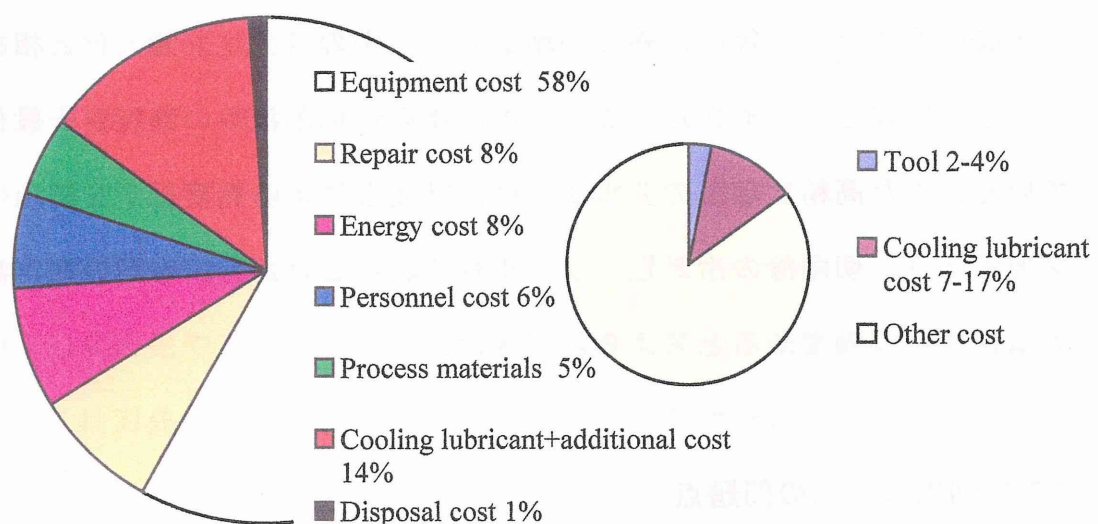


Fig.2-8 Cost of processing automotive parts(For example) (CIRP)

Figure2-8 は、ドイツの自動車工業における潤滑油の使用に関する調査結果である。加工コストに占める工具費の割合は 2-4%であるのに対して、切削液関連費用は 7-17%と 3-5 倍も大きいことが分かる。別の調査では加工機のエネルギー消費の内、工作機械の主軸回転に 20%、クーラント関連に 53%という例もある。また廃液処理の面では全ドイツで年間 75,000 t の切削油剤が消費され、内 28,000 t が水溶性切削油剤であり、水での希釈を考えると 36-95 万 t 程度を処理する必要があることが示されている (Fig.2-9)。さらに、切削液の極圧性を高めるためにしばしば添加される塩素化パラフィンなどの発ガン性の問題や、水溶性切削廃液の最終処理である焼却によってダイオキシン類が発生する問題などがある³⁸⁾。

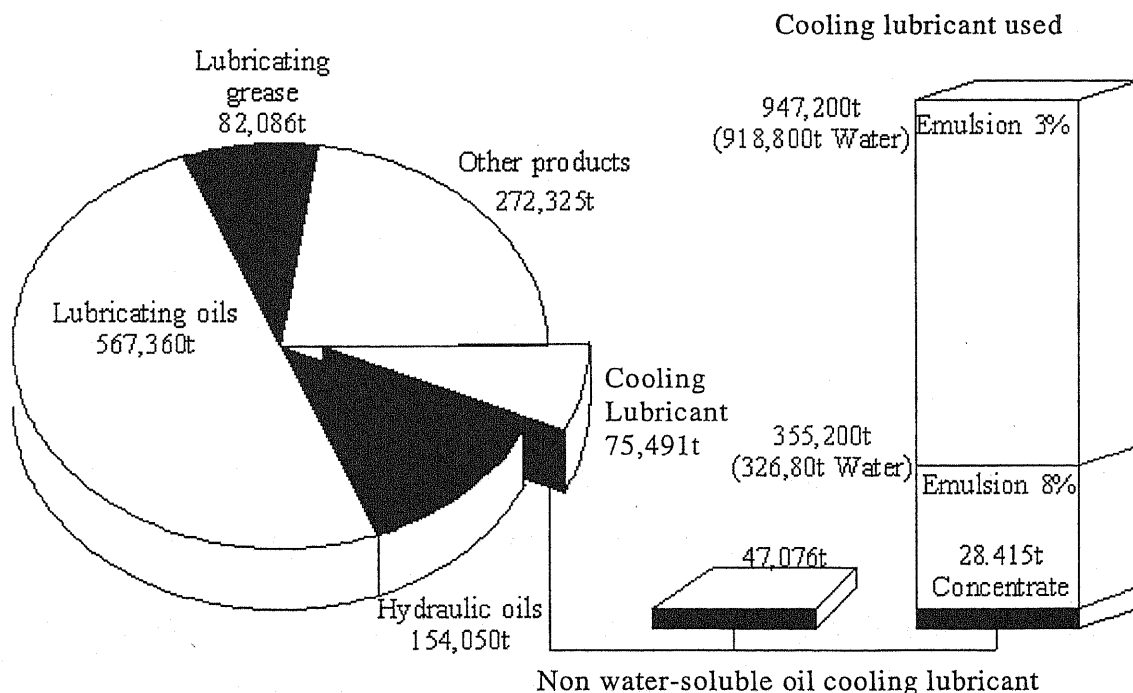


Fig.2-9 Used cutting oil quantity in Germany (CIRP Vol.46/2/1997)

こうしたことを考慮すれば切削液の使用量は理想的にはゼロを目指し、それができない場合でもできる限り使用量を抑制することが求められる。これがドライまたはセミドライ加工が必要とされる所以である。

2.8 環境対応加工技術

このところ環境問題が様々な分野で取り上げられるようになってきた。機械加工の分野も例外ではなく環境対応加工技術として注目され、エコマシニング技術などと呼ばれている。最近の精密工学会全国大会におけるエコマシニング関連の研究発表を調査したところ、1995年には0件であったものが、1996年に5件、最近3年間では17-20件と急増している（名古屋工業大学、松原教授調査）。つい数年前までは工作機械見本市においても、高圧クーラント方式の工作機械が多数出品され、高い関心を集めていたことは記憶に新しいところである³⁸⁾。

エコマシニングの研究は、環境先進国であるドイツなどヨーロッパで1990年頃に、切削液処理の問題が指摘されて、ドライ加工が提唱されるようになったのが発端のようである。日本でもISO14000の関連で機械加工における環境問題が注目され始め、各企業が生き残りをかけてこの環境対応加工に取り組み始めているところである。

2.8.1 ドライ加工技術

切削液の使用量という観点から現在のエコマシニング技術を分類すれば、大きくドライ加工とセミドライ加工に分けられる。ドライ加工とは名の通り切削液を全く使用しない加工であり、環境面では理想的な形と言える。

しかし、無潤滑状態での切削であるため、工具温度上昇の問題が大きく、これをいかに克服するかが大きなポイントとなる。具体的な対応策として以下のような方法があげられる。

1. 耐熱性の高い切削工具や低摩擦係数の切削工具などによるもの

特に冷却などは行わず、完全なドライ加工を目指すものである。このためには、新しい工具材料の開発が必要となる。材料の硬さが低いため、切削点の温度がそれ程高くない鋳鉄の切削などでは完全ドライ加工も可能である。

2. 空冷方式での発熱除去によるもの

例えば、コンプレッサアを切削点に吹きかけながら切削をするエアブロー方式や、冷却空気を同様に吹きかける冷却エアブロー方式などがある。また、厳密には空冷方式とは言えないが、ドライアイス粒や液体窒素など、常温に戻れば気化してしまうような低温物質を吹きかけて、冷却しながら切削する方式もこの範疇に含めていいかもしれない。

3. 吸熱工具による発熱除去によるもの

工具刃先内部に冷却水などを循環させる経路を作り、発生した熱を工具側に吸収しながら切削する方式。

4. 雰囲気調整によって工具摩耗を押さえる方法

高温状態の切削工具は空気と接触して酸化摩耗する。これによって大きな境界摩耗が発生することがある。この場合、切削点を窒素やアルゴンなどの非酸化性雰囲気とすれば、酸化を押さえて摩耗を抑制することができる。また、切削中の切りくずが酸化することで発生する熱も防止できると考えられる。

2.8.2 セミドライ加工技術

セミドライ加工とは、少量の切削液を使用することである程度の潤滑性を確保しようとする方式である。環境への影響を考えれば、切削液の使用量は必要最小限度に留める必要がある。仕上げ面の精度及び性状を配慮するため、完全なドライ加工の実現は、現状ではかなり困難であることから現実的な方法として注目されている。しかし、セミドライ加工においても切削温度上昇の問題に対処する必要がある、上述の冷却方法と組合わせて発熱を抑制することが行なわれる。セミドライ加工法の具体例として以下のようなものがあげられる。

1. 切削液のミスト供給による加工（噴霧法）

従来の切削液を高圧空気によって切削点近傍に噴霧する方式である。一部の工場では以前から試みられていたようである。従来の噴霧給油法では切削油を比較的大量に使用しており、使用する油剤は、潤滑性より冷却性を主体にして選ばれている。一般に不水溶性油剤よりも水溶性油剤が使用される。噴霧給油を行なうときは作業者の健康と環境衛生に特別の配慮が必要である。

2. MQL (Minimal Quantity of Lubricant) 供給による加工

最小限度の潤滑油を、潤滑を必要としている場所に的確に供給することによって、環境対応加工を実現しようとする方法である。ドイツのドルトムント大学で実施されたもので、潤滑油の供給法としては、ミスト方式や被削材表面塗布などの方法も含む。

3. 冷風冷却による加工

冷風冷却及び微量切削油供給による切削とは微粒子状にした人体に無害の植物油を冷風と共に切削点に供給し、潤滑と冷却をさせて切削する方法である。-30℃程度に冷却された冷風を切削点に吹きかけて、加工熱の除去や、被削材の材料特性の変化を利用して切削性能の向上を図る方式である。微量の植物性油を使用する場合、植物性切削油は仕上げ面の表面に油膜を生成するため、工作物の錆止め効果もある。工学院大学の横川教授らが研究をリードしている。

4. 複合ミスト供給による加工

複合ミスト供給法とは、潤滑性を確保するための植物性切削油のミストと共に冷却性が優れる水をミスト状にして、加工点に供給する方法である。この加工法は、微少量の潤滑油と冷却液をコンプレッサーエアでミスト化して、加工点に供給する方式である。潤滑油としては植物油（食用油）がよく用いられ、冷却液としては水が使用されることが多い。

本研究では、複合ミスト供給による加工法に対して、実用性を重視する生産加工システムとして、加工法、切削油、ミスト供給ノズル及び複合ミスト発生供給装置を検討した。静岡大学、名古屋工業大学などで研究が進められている³⁸⁾。

2.9 21世紀の生産技術

現代は、20世紀から21世紀への移行期であり、これまでの100年間の回顧と総括が色々な形で行なわれ、その一方で、21世紀の産業、地球環境問題、エネルギー、宇宙開発、それから製造現場の生産技術、生産システムに至るまでの各種の技術的テーマが、活発に討論されている。Fig.2-10に21世紀

切削加工のポイントを示す。

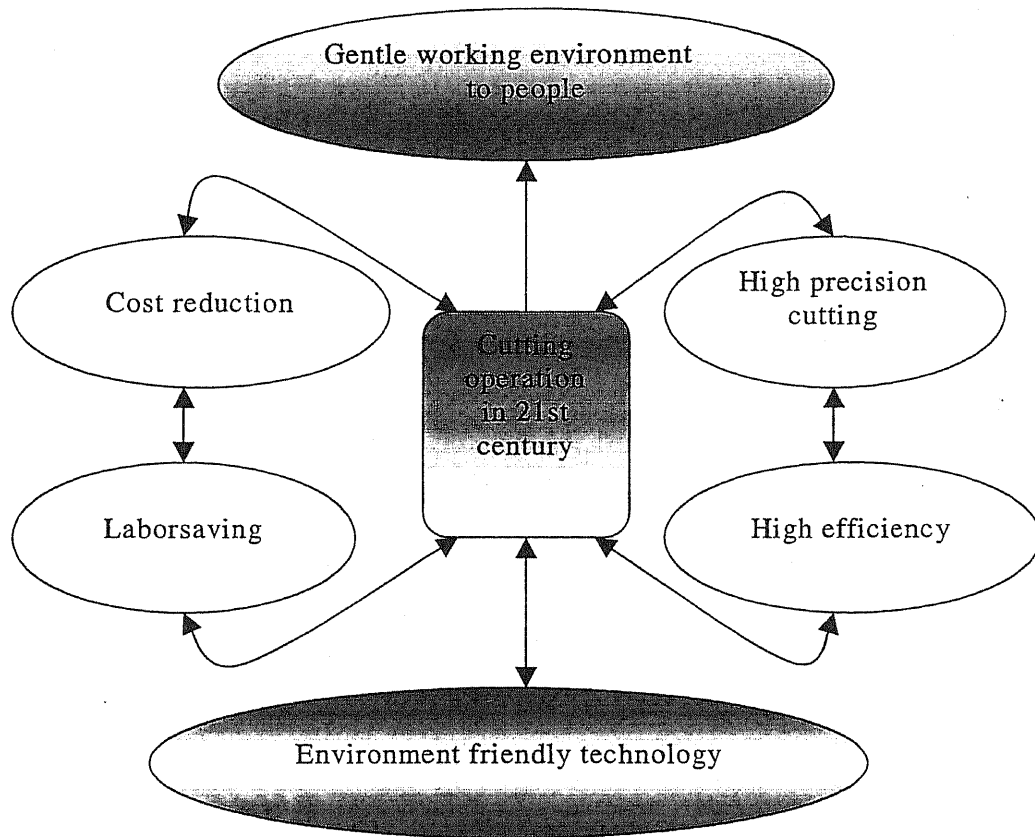


Fig.2-10 Point of cutting operation in 21st century

切削加工技術の基本課題は高精度加工，高能率加工，低コスト加工である。これらの諸課題は，21世紀になってもその内容は大きく変化しないと予測されるが，その基本課題を具体化する技術的内容は著しく高度化すると考えなければならない。技術革命への探求は，単なる利潤を追い求めるための手段ではなく，個々の人間がこの世に生を受けた限られた時間を最大限に楽しむことを目標とするものでもある。製造業では，改善策として清潔で快適な作業環境づくりが要求されるようになった³⁾。

第3章 ステンレス鋼の切削面に及ぼす潤滑及び冷却の効果

3.1 緒言

ステンレス鋼は名前が示す通り錆びない鋼ということから名付けられた。そしてその高い耐食性を利用して、医療器具、建築材料、自動車部品、家電機器など広い分野にわたり使用されている。しかし、その加工は必ずしも容易ではなく、特に切削加工においては難削材の一つに位置づけられている。

ステンレス鋼は熱伝導率が小さい、加工硬化しやすい、凝着が起りやすい等の性質によって難削性を示す。その難削性は切削加工技術の進歩によって、少しずつ解決の方向に進んでいる。しかし、切削加工でトラブルを防止するための要因管理を怠ると、たちまち難削材としての材料特性を現す。特に、工具材種の選択や加工条件の設定が不適切であったり、使用する工作機械に剛性がなかったりすると驚くほどの難削性を示すとされている¹¹⁾。

本研究は、ステンレス切削加工の一例としてコンピューターのハードディスク部品であるスピンドルモータのケースに当たるハブの旋削を取り上げ、切削油の大量使用による環境問題の解決を図るため、従来の切削方法から、環境に優しいとされる冷風切削方法に切り替えることの可能性を探ることを目的としている。

3.2 ステンレス鋼の材料特性及び現場のトラブル

1. ステンレス鋼は金属組織的には、以下3種がある。

- (1) マルテンサイト系ステンレス鋼
- (2) フェライト系ステンレス鋼
- (3) オーステナイト系ステンレス鋼

本研究の加工部品の材料はフェライト系の SUS430F である。

2. 材料特性及び切削現象

ステンレス鋼の切削における種々のトラブルは Fig.3-1 に示すようにその材料特性そのものから生じていると考えられる¹²⁾。以下に概略を示す。

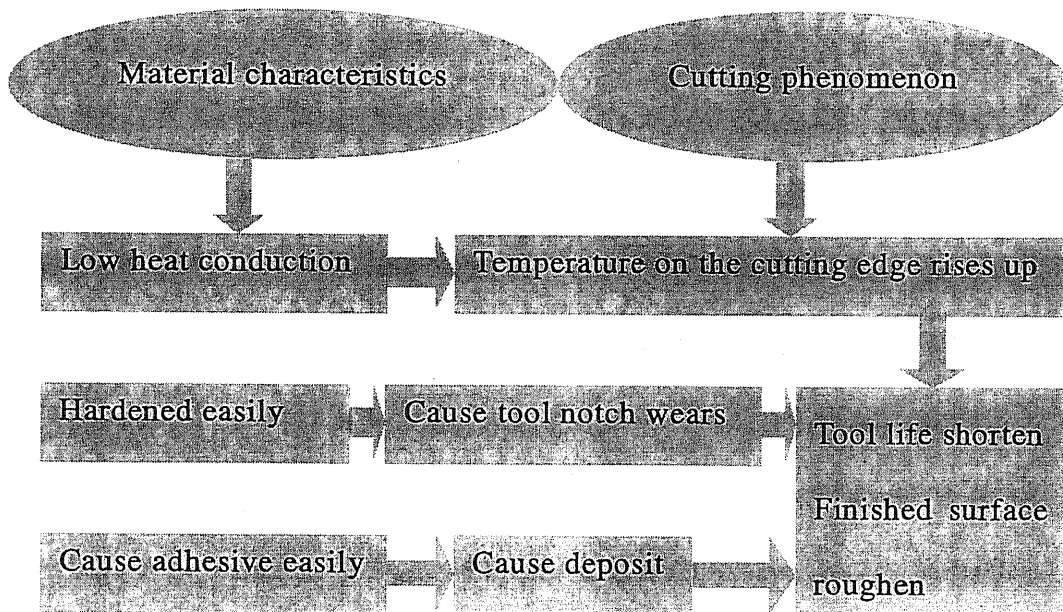


Fig .3-1 Characteristics and cutting phenomenon of stainless

(1) 熱伝導率が低い

切削中のせん断歪み，切りくずと工具間の摩擦によって発生する高い熱は，その約70～80%が切りくずによって持ち去られる。しかし，被削材の熱伝導率が低いと，切りくずによって持ち去られる摩擦による熱量が低く

なるために、切削点の温度が上昇し工具寿命を短くする。

(2) 加工硬化しやすい

切削の際に生ずる塑性変形によって、被削材の表面は加工硬化を起こす。加工硬化しやすい金属では加工硬化層が深く、工具刃先の鈍化をきたし、そのために加工硬化は更に促進されて工具寿命を極端に短くする原因となる。

(3) 工具への凝着が起こりやすい

材料固有の粘着性の結果、切りくずが刃先に圧縮、凝着するために、工具刃先に構成刃先を形成しやすい。構成刃先が発生すると、仕上げ面の粗さや寸法精度に影響を及ぼす¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。

3.3 実験の概要

3.3.1. 試料とする部品の概要

ハードディスクドライブ（以下 HDD）は、パソコンやワークステーションの大半に内蔵もしくは接続されている代表的な外部記憶装置である。その構造は Fig.3-2 のようになっている。記憶媒体であるハードディスク（磁気ディスク）を DC スピンドルモータによって回転させ、磁気ヘッドからその情報を記録、再生する仕組みになっている。ハードディスクは装置に組み込まれており交換することはできず、埃などの微小物が入らないように、装置は密閉構造になっている。本研究で加工する試料は DC スピンドルモータのケースに当たる部品であり、これをハブという。近年 HDD の出荷台数は高い伸びを示し、同時に記憶容量も大幅に増加しており、さら

に一層の容量アップが要求されている。そのためには、ステンレス鋼の難削性を克服し、高精度加工をすることが必要である³⁹⁾⁴¹⁾。

本実験で加工する部品を Fig.3-2 に示す。実験は外径 $\phi 24.6$ の外周の旋削仕上げ面を調べる。この部品外径 $\phi 24.6$ の表面の精度要求は $Ry7\mu m$ 以下とされている。

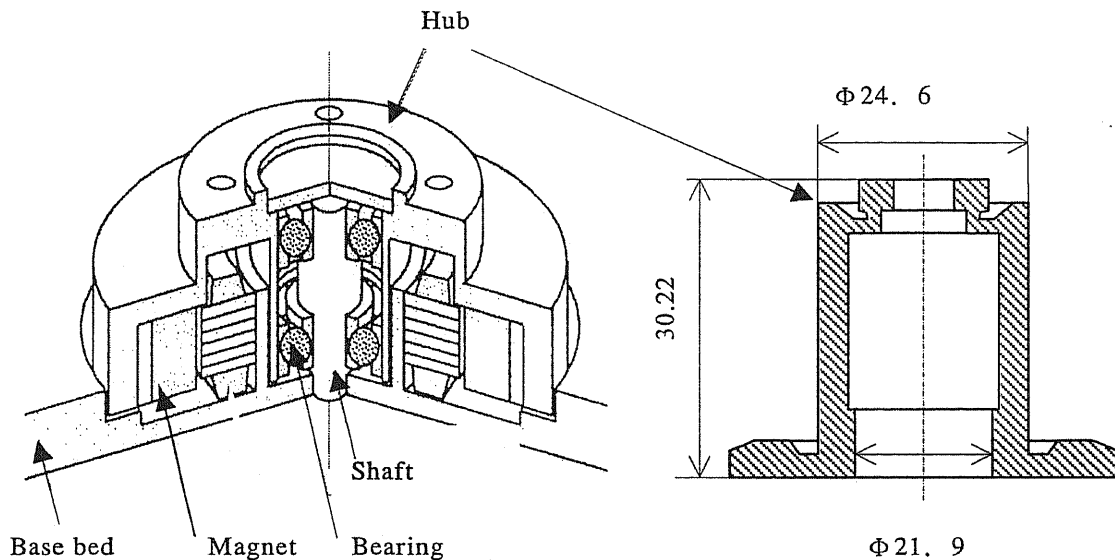


Fig. 3-2 DC spindle motor and hub

3.3.2 切削トラブル

従来の加工法で発生していた問題点は以下の様である。

(1) 工具寿命が短い

工具寿命は長くて150個程である。工具が破損したり摩耗したりすると切れなくなるので、新品と交換しなければならない。そのためには作業を中断しなければならないし、交換の時間が遅れると不良品を作ることになるので、工具の摩耗は生産の能率やコストに大きく影響する。

(2) 仕上げ面の粗さが悪い

新品の工具は約 150 個の加工によって、仕上げ面の粗さが部品に要求された粗さを越える。切削仕上げ面の粗さを指定された値以下におさえることは切削加工に対する重要な要求の一つである。

3.3.3 使用工作機械

使用工作機械を Fig.3-3 に示す。TSUGAMI CORPORATION 製の T-PAN3 型精密 NC 旋盤である。

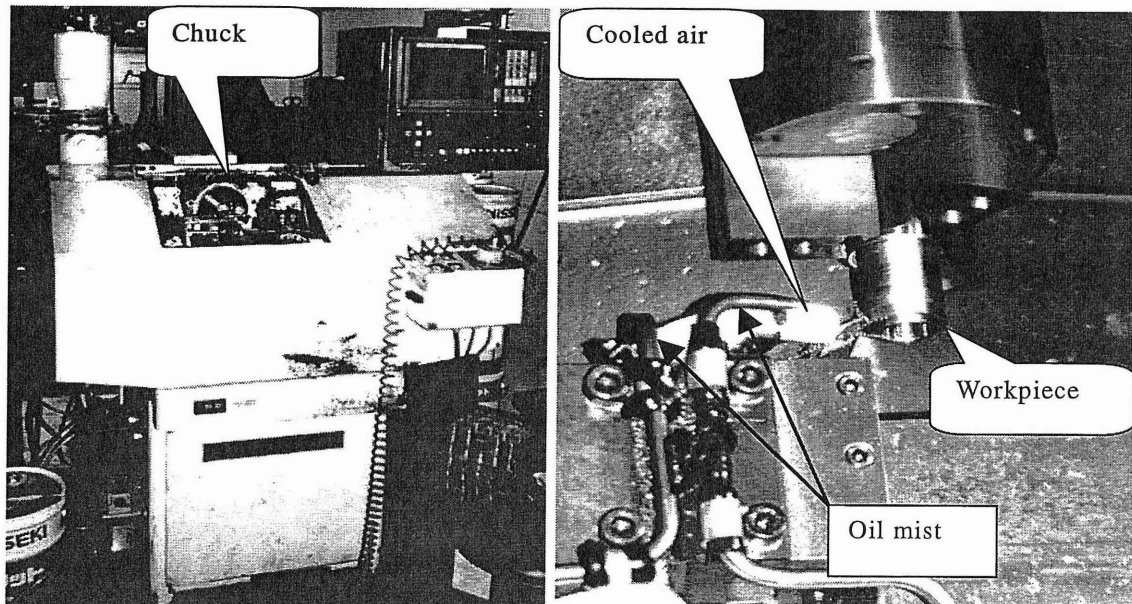


Fig.3-3 T-PAN3 precision NC lathe

3.4 冷風冷却及び微量切削油供給による切削実験

一般に切削においては、切削油剤が使用されているが、その使用目的は加工時における冷却と潤滑である。冷風冷却及び微量切削油供給による切

削とは微粒子状にした人体に無害の植物油を冷風と共に切削点に供給し、潤滑と冷却をさせて切削する方法である。

この方法は、潤滑性能に優れた植物性切削油をごく微量加工点に供給し、これが加工点で高温になり潤滑性能を失うのを避けるため冷風を供給し、加工点の高温化を防止する。冷却を行うと摩耗と凝着物が減少する。工具を低温に保つことにより、刃先先端の軟化を防止し、工具寿命が延長できるとするものである。また、植物性切削油は仕上げ面の表面に油膜を生成するため、工作物の錆止め効果がある¹⁵⁾¹⁶⁾。

Figure 3-4 は切削加工での加工システムを示したものであるが、従来の切削油剤を使用した加工においては、潤滑作用をもたせるために不水溶性の鉱物性油、あるいは添加剤として硫黄(S)、りん(P)、塩素(Cl)などが含まれている油剤が、加工中ミストになって作業環境を悪化させている。また廃油処理においてはコストがかかり、特に、塩素を含む廃油の処理においてはダイオキシン類の発生を防ぐため非常に高い温度で処理をせざるを得ないなどの問題がある。またスラッジは切りくずと油剤が混合していることなどから、事実上切りくずのリサイクルは困難である。

これに対して冷風切削方式は Fig.3-5 に示すように、切削油の代わりに冷風を切削点に供給して、加工点を冷却すると共に、人体に無害な植物性切削油を潤滑用としてごく微量を供給する環境に優しい切削システムである。

冷風切削の結果、クリーンな加工ができるだけでなく、油剤の購入費及び環境問題になっている油剤の処理管理に関する経費を削減できるうえ、切りくずも直接リサイクル利用でき、さらに切削性も高いなど利点が多いと考えられる¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。

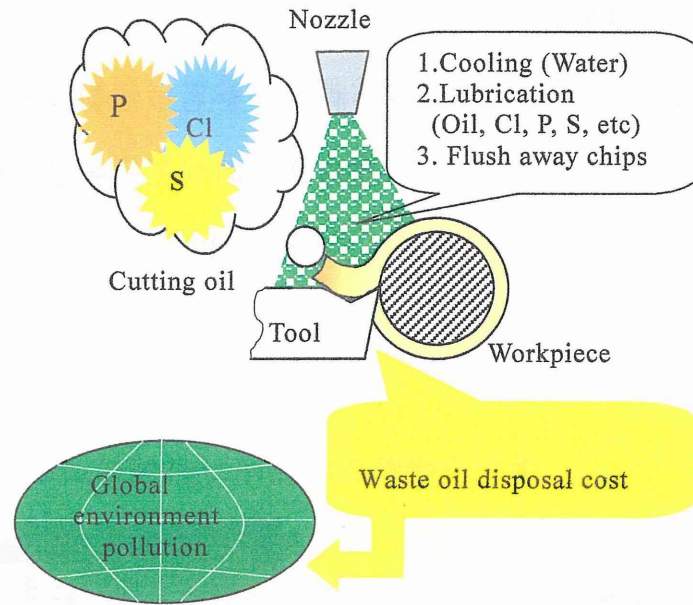


Fig.3-4 Traditional cutting work using large amount of cutting oil.

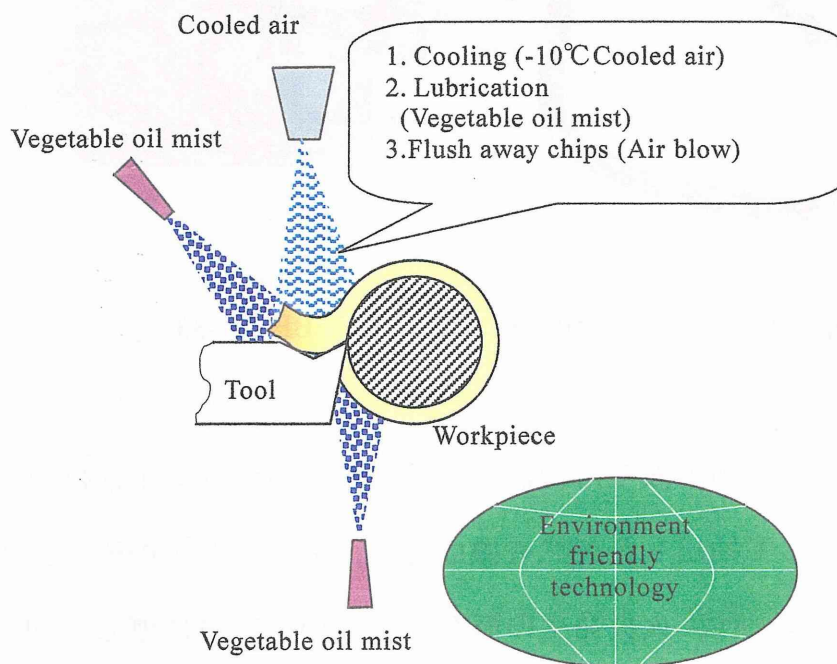


Fig.3-5 Cutting method of using small amount of lubricating oil and cold air cooling

3.4.1 微量切削油供給法

微量切削油供給システムは、高い潤滑性をもった切削油と、ごく少量の油を正確に供給する給油機を組み合わせ、切削部に微量の切削油を供給するシステムである。その様子を Fig.3-6 に示す。

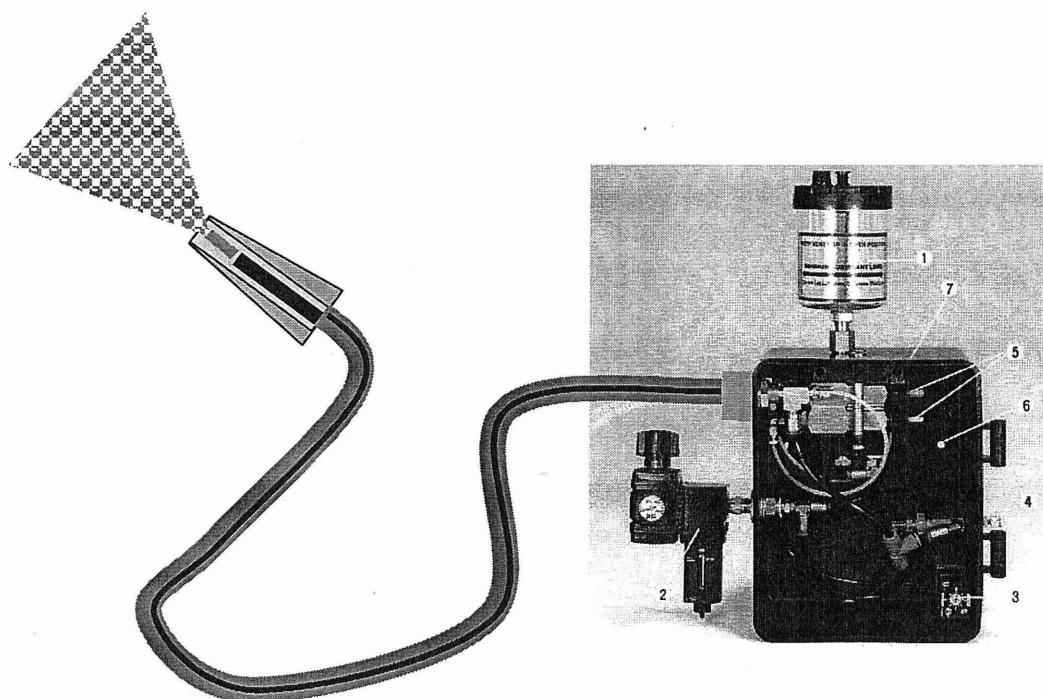


Fig.3-6 Oil mist supply machine BLUEBE FK-33

従来の鉱油からなる切削液や冷却油剤と異なり、植物性切削油は植物油ベースをブレンドして抽出した天然有機成分で、公害の発生の恐れ、人体への毒性、アレルギー性、火災発生の懸念の少ない、環境に優しい切削油であるとされている。一般の切削油は皮膚につくだけではなく、揮発し、空気中に浮遊して人体に吸入されるが、植物性切削油は分子が大きく重いため、揮発しにくく、空気中に浮遊しにくい特徴がある。また、切削油は

こぼしたり、たれたりして、周辺の環境に蓄積されるが、植物性切削油は生分解性が高く、環境中で自然に分解できる。また植物性切削油は、ほんのわずかな量で非常に高い潤滑性を保ち、工具寿命を著しく伸ばすことができる¹⁸⁾¹⁹⁾。

3.4.2 植物性切削油剤

本実験に使用した植物性切削油剤の特性を示す。

1. 切削油の種類：植物油系潤滑剤
2. 製品名：ブルーベ LB-1

メーカー：ITW FLUID PRODUCTS GROUP U.S.A

なお、物性データを Table 3-1 に示す¹⁸⁾¹⁹⁾。

Table 3-1 Data about BLUEBE LB-1

Initial boiling point	>218°C
Maximum vapor tension	<1mmHg(25°C)
Vapor density	Heavier than air
Gravity	0.92(20°C)
Evaporation	<0.1%
Water-soluble	No
Firing point	320°C
Physical form	Blue liquid
PH	6~7

3.4.3 微量切削油給油機

給油機の構造を前ページの Fig.3-6 に示し、各部の概略を示す。

1. オイルポット：耐久性のあるポリカーボネート製である。
2. フィルター／エアー圧力計：すべての給油機にエアーフィルターが標準装備されている。フィルターはエアーに含まれる微小な粉塵や水分を除

去する。エア圧は最低 40MPa,最高 100MPa 必要である。

3. ポンプストローク調整ダイヤル：ポンプのピストンサイクルを調整する。矢印を反時計回りに回し，0 に近づけるにつれてポンプの動きははやくなり，油の吐出量が増える。

4. エア量調整つまみ：ノズル先端から吐出するエアの量を調整する。

5. 液量調整つまみ：液量調整つまみはポンプのシリンダー容量を調整するつまみである。 6. 取り付け穴 7. ボックス

3.4.4 冷風供給装置

本研究で使用する冷風供給装置は圧縮空気を利用したボルテックスクーラーである。この装置を利用して，コンプレッサーエアを供給するだけで，冷風をえられる。

1. ボルテックスクーラーの構造と発生原理

ボルテックスクーラーの構造と冷風の発生原理を Fig3.7 に示す。

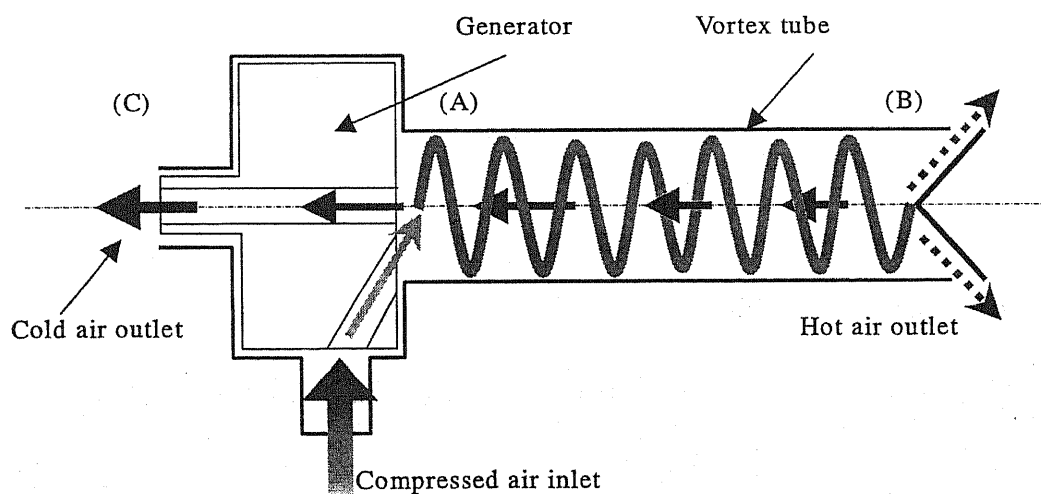


Fig.3-7 Vortex tube

ボルテックスクーラーの冷風発生原理は Fig.3-7 に示すように高圧空気が供給口から入り、ゼネレーターにとりつけられたノズルより発生室の周囲へ接線方向に音速で吐き出され膨張すると共に高速回転し渦流となってチューブに入る。高圧空気は回転しながら末端にあるコントロール弁の方向に移動する。そのとき、圧力は図の(A)→(B)→(C)順に低下していき、(C)の冷風出口では大気圧となる。冷風と熱風を分離するコントロール弁の調整によって熱風排出口から排出される空気量（冷風比率）が定まる。又残流空気（冷風）は渦流の遠心力によってできた内側空洞内を強制渦流となって、外側渦流と同方向に回転しながら冷風出口の方へ流れる。

外側渦流に大きな遠心力が働いて圧力、密度が急上昇し抵抗が増加して温度が上昇する（よどみ点温度が高くなる）。周速度は外側ほど大きくなって渦のよどみ点温度は軸方向の距離が大きくなるほど高くなる。

エネルギー的には、渦の内側が減速による制動作用のため外側に対して仕事を行っているから、外側では、よどみ点温度が上がり内側では下がった空気ができる。又空気の流れの速度は遅く、暖かい空気に供給された熱量と冷たい空気から持ち去られた熱量は等しいので、コントロールバルブから外側の熱風を排出することによって、内側の冷風流量が少なくなり、温度の低下は大きくなる。バルブ調整によって一定範囲の温度を得ることができる。

2. モデル 218E のプロフィール

本実験で用いたボルテックスクーラー（株式会社神戸鋳鉄所製）モデル 218E の仕様を Table 3-2 に示す。

Table 3-2 Profile of voltex cooler (model 218E)

Model No.	Generator	Air amount of consumption 7kg/cm ² GNL/min	Cold air ratio 60% Cold air heat quantity kcal/h
218E	15-L	420	218

3. 温度のコントロール

供給温度によってチューブの出口温度は変わる。さらに温度の変化は供給空気の絶対温度に比例する。例えば外気温 21°C=294K、冷風比率 60%、圧力 7kg/cm²G として、供給空気温度 93°C の場合、チューブの吐出温度を求めてみる

(1) 7kg/cm²G, 60%冷風比率の冷却温度差は 47.8°C となる。

(2) 供給空気絶対温度比率

$$(93+273)/(21+273)=366/294=1.245$$

(3) 温度差 $47.8 \times 1.245=59.511(^{\circ}\text{C})$

(4) 吐出温度 $93-59.511=33.489 (^{\circ}\text{C})$

従って、供給空気温度 21°C の場合チューブの吐出温度は、

$$21-47.8=-26.8 (^{\circ}\text{C}) \quad \text{となる。}$$

3.4.5 実験装置

本実験の切削油供給法は Fig.3-6 に示すようにホースはエアーホースとオイルチューブの二重パイプになっている。植物性切削油はポンプから押し出され、オイルチューブを通して先端に導かれる。先端から押し出された油は、エアーによってミスト化されて運ばれ、工具の切れ刃に供給される。本実験では Fig.3-8 に示すようにコンプレッサで生成した圧縮空気の一

部は給油機を通して工具の逃げ面に植物性切削油を供給する。もう一部はボルテックスクーラーを通して冷却され、工具の切削点に -10°C の冷風を供給して、実験を行う。

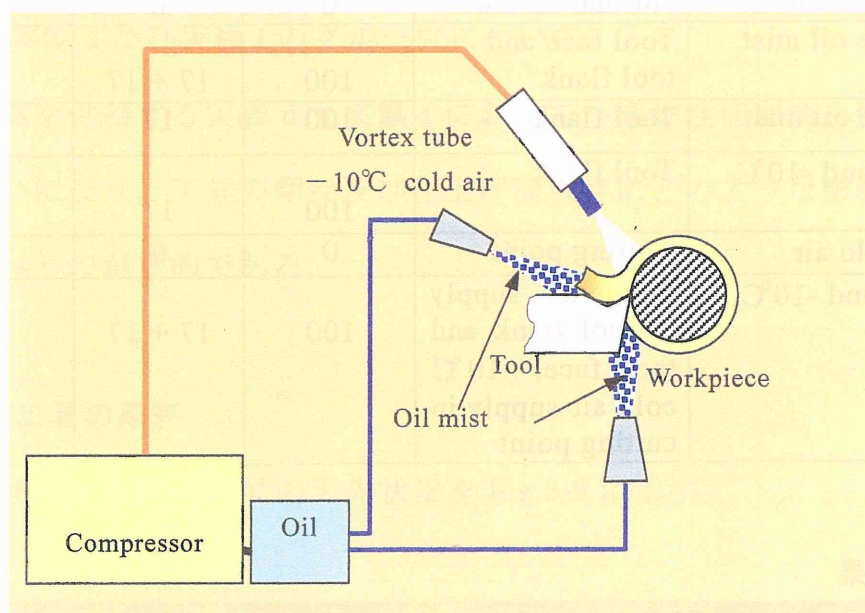


Fig.3-8 Schematic illustration of cutting method

3.4.6 実験条件

1. 切削条件を Table 3-3 に示す

Table 3-3 Test conditions

Cutting machine	TSUGAMI PAN-3 automatic lathe
Cooling and lubrication system	Model 208 vortex tube Bluebe FK-33
Test material	SUS430F (Stainless steel)
Tool	Carbide tool KW10 (KYOCERA.)
Cutting speed V (m/min)	$V=150$
Feed rate f (mm/rev)	$f=0.055$
Cutting depth t (mm)	$t=0.1$
Cutting oil	GM15 (Nippon Oil Co., Ltd.)
Vegetable cutting oil	Bluebe LB-1(ITW FRUID PRODUCTS GROUP)

2. 冷却及び潤滑条件を Table 3-4 に示す

Table 3-4 Cooling method and lubrication method

Cooling method and lubrication method	Lubrication supplying method	Air flow rate (NL/min)	Oil flow rate (ml/hr)	Cold air flow rate (NL/min)
a. Mineral oil GM15	Normal method	0	0	0
b. Vegetable oil mist	Tool face and tool flank	100	17 + 17	0
c. Vegetable oil mist	Tool flank	100	17	0
d. Oil mist and -10°C cold air	Tool flank	100	17	100
e. -10°C cold air	Cutting point	0	0	100
f. Oil mist and -10°C cold air	Oil mist supply in tool flank and tool face, -10°C cold air supply in cutting point	100	17 + 17	100

3.5 実験結果

切削工具として市販の超硬合金 KW10 を用いて、Table 3-4 に示される a から f までの切削条件を使用し、切削を行い、それぞれにおける工具の摩耗、仕上げ面粗さを測定し冷却と潤滑の供給方法の違いによる比較を行い、冷風及び植物性切削油の効果を検討する。

本実験の結果により、4つのグループに分けて説明する。

1. 実験 a, 実験 e 及び実験 f のグループについて

冷風のみ供給する方法（実験 e）及び冷風と一緒に植物性切削油を供給する方法（実験 f）は、従来の切削油を使用する実験（実験 a）に比べて工具摩耗及び仕上げ面粗さにどのような効果があるか調べるのが目的である。

2. 実験 b 及び実験 f のグループについて

植物性切削油を供給する場合、冷風の供給（実験 f）が工具の摩耗及び

仕上げ面粗さにどのような効果があるか調べるのが目的である。

3. 実験 b 及び実験 c のグループについて

植物性切削油を供給する方法の違いにより，工具の摩耗及び仕上げ面粗さにどのような影響を与えるかを調べるのが目的である。

4. 実験 d 及び実験 f のグループについて

冷風を供給する実験 d と実験 f において，植物性切削油を供給する方法の違いにより，工具の摩耗及び仕上げ面粗さにどのような影響を与えるかを調べるのが目的である。

3.5.1 工具の摩耗

超硬合金 KW10 工具の刃先状況を Fig.3-9 に示す。

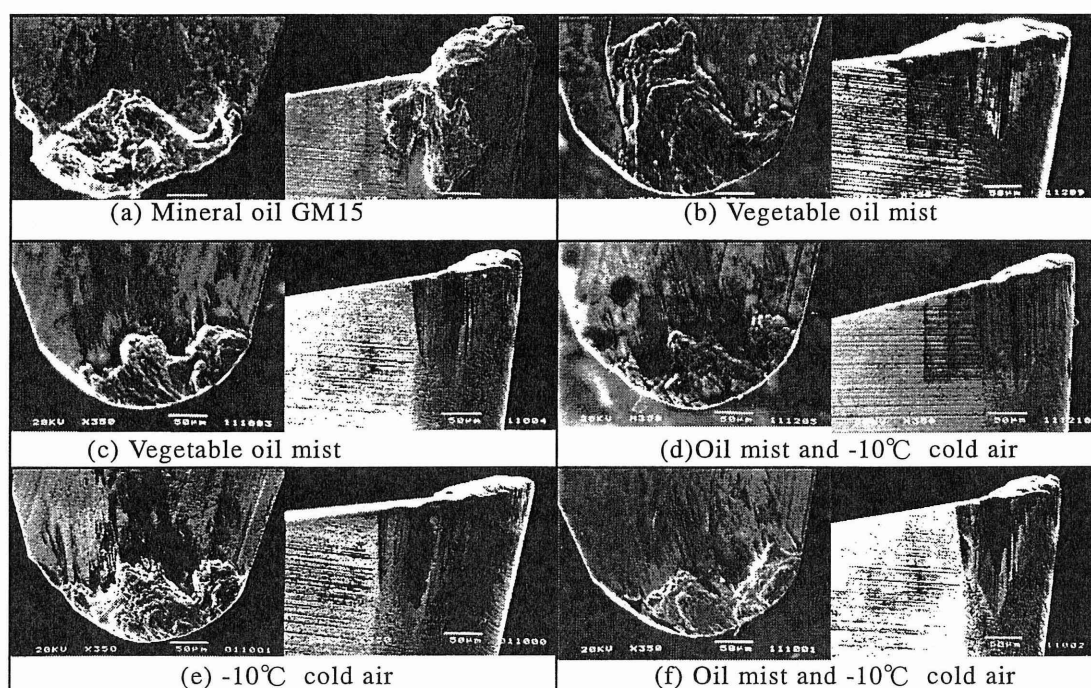


Fig.3-9 SEM images of used tools

3.5.2 摩耗曲線

超硬合金 KW10 工具の摩耗曲線を Fig.3-10 に示す.

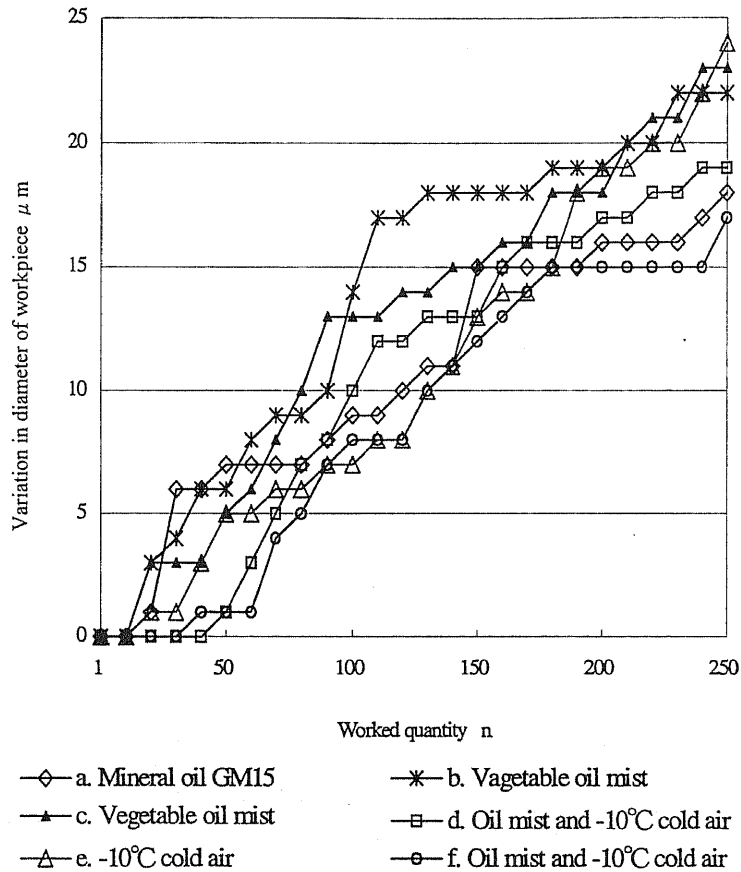


Fig.3-10 Variation in diameter of workpiece on various conditions versus the worked quantity

3.5.3 仕上げ面性状及び仕上げ面粗さ曲線

電子顕微鏡及び表面粗さ測定機を利用して仕上げ面性状と仕上げ面粗さ曲線を測定した. その様子を Fig.3-11 に示す.

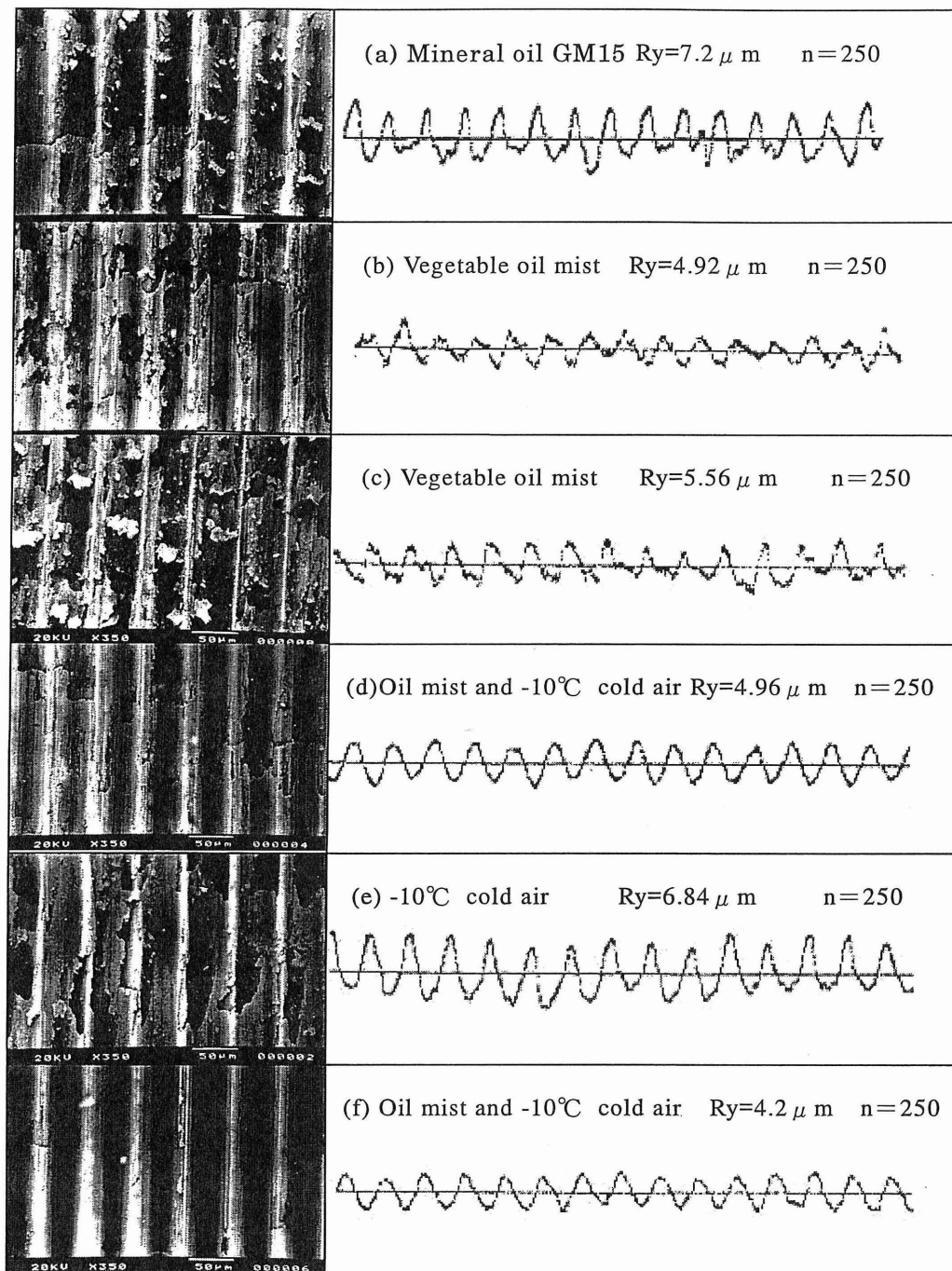


Fig.3-11 SEM images of finished surface and Surface profiles of finished surface

3.6 考察

3.6.1 考察 1——実験 a, 実験 e 及び実験 f

1. 工具の摩耗状況

工具の摩耗状況を示す Fig.3-10 より, 不水溶性切削油を使用する切削実験 a と植物性切削油を供給する冷風切削実験 f は, 冷風だけを使用した実験 e より, 工具の摩耗が少なく, ほぼ同じ程度に進行した. その結果から工具の摩耗に対しては, 植物性切削油を供給する冷風切削は不水溶性切削油を使用する切削とほぼ同じ効果が得られる事が分かる. また, 冷風切削の場合, 冷風と共に植物性切削油を供給すると, 植物性切削油が工具の逃げ面と仕上げ面の間に浸透するため, 摩擦により起こった工具の摩耗は減少することも分かる.

2. 凝着物及び仕上げ面粗さ

Figure 3-9 に示すように, 不水溶性切削油を使用する場合, 工具の刃先に構成刃先状の凝着物が発生した. また, この実験で得られた切りくずのすくい面側の写真から, 刃先から脱落した凝着物のようなものが認められた.

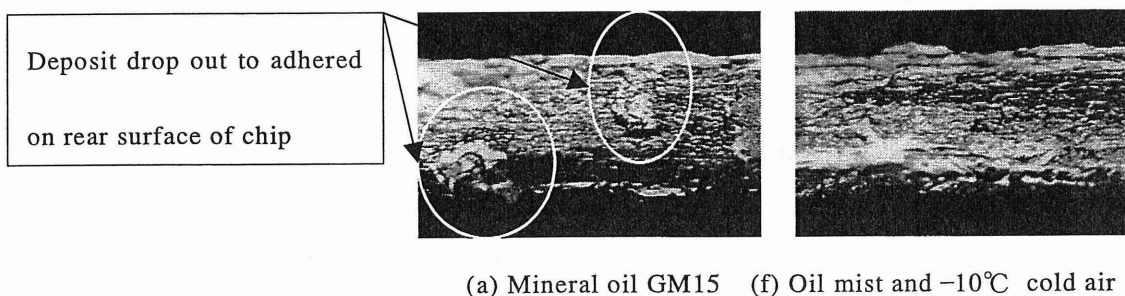


Fig.3-12 Deposit drop out to adhered on rear surface of chip

凝着物は発生してから成長し、脱落するまで、形が不規則で、不安定な状態である。しかも時間とともに変動するので、仕上げ面粗さが大きくなり、むしろやクラックのある非常に好ましくない仕上げ面になる。凝着物が構成刃先であるとすれば工具の刃先をカバーするから、工具の摩耗を防ぐことができるとも考えられるが、不安定な凝着物はそれが脱落するときに工具にチッピングやクラックを発生させる可能性がある。Fig.3-9 (37 ページ) に示すように、前切れ刃のところに破損が発生した例も認められる。

冷風を供給する実験 e 及び植物性切削油と冷風を共に供給する実験 f の場合、工具の刃先凝着物は不水溶性切削油を使用した実験 a より、明らかに少なくなった。また、Fig.3-12 に示すように、植物性切削油と冷風と共に供給する実験で得られた切りくずのすくい面側には、大きな脱落物を発生していない。それは植物性切削油の高い潤滑性のため、工具のすくい面と切りくずの間の摩擦を減らし、切りくずが流出しやすくなるためであろう。したがって、仕上げ面粗さがよくなったと考えられる。

冷風だけを供給する場合、凝着物が少なくなったが、凝着物は発生、成長から、脱落まで、不安定な状態である。これは植物性切削油を使用しないため、工具と被削材及び切りくずの間に大きな摩擦が起こったためである。したがって、仕上げ面粗さが良くない。

以上、実験 a、実験 e 及び実験 f の結果から、SUS430F 被削材に対して、冷風を供給する場合、工具刃先の凝着物が減少していることが分かる。冷風と植物性切削油と共に供給する場合、凝着物が安定して、仕上げ面粗さが良くなることが分かる。

3.6.2 考察 2——実験 b と実験 f

1. 工具の摩耗状況

工具の摩耗状況を Fig.3-10 に示す。冷風なしで植物性切削油を工具のすくい面と逃げ面に供給する実験 b の場合は、植物性切削油と共に冷風を供給する実験 f より、摩耗が大きい。これは冷風を使用しない場合、工具のすくい面と逃げ面の温度が上昇して、工具の刃先が軟化するため、摩耗が促進され、工具の寿命が短くなるためであると考えられる。

2. 凝着物及び仕上げ面粗さ

Figure 3-9 に示すように、植物性切削油を工具のすくい面と逃げ面に供給する実験 b の場合は、植物性切削油と共に冷風を供給する実験 f より、すくい面の凝着物が多い。このため、Fig.3-11 に示すように、仕上げ面粗さは実験 b の方が、不安定な状態である。また、実験 b の仕上げ面粗さは凝着物の発生及び脱落により悪くなる。

以上、実験 b と実験 f の結果によると、SUS430F 被削材に対して、切削熱の影響として、見逃してはならないことは、工具、工作物の温度上昇によってその凝着物が大きくなり、加工精度を低下させていることである。また、冷風によって切削熱を除去すれば、工具寿命の延伸ばかりでなく、加工精度の低下を防止することも注目しなくてはならない。

3.6.3 考察 3——実験 b 及び実験 c

1. 工具の摩耗状況

Figure 3-10 に示すように、植物性切削油を工具のすくい面と逃げ面に供給する実験 b は、植物性切削油を工具の逃げ面に供給する実験 c と比べて、

工具摩耗の進行状況がほぼ同じである。それは、Fig.3-9 についても同じように説明できる。

Figure 3-8 に示すように、植物性切削油を工具のすくい面と逃げ面に供給す実験 b の場合、植物性切削油は二つのノズルを用いて供給する。上方のノズルは切りくずに妨害されて、工具のすくい面に油剤が侵入しにくいものと考えられる。下方のノズルからは切りくずに妨害されることなく、油剤が工具の逃げ面と仕上げ面の間に侵入できる²⁰⁾。したがって、植物性切削油は逃げ面から供給されたにもかかわらず、すくい面摩耗の低減にも効果が得られた。

2. 凝着物及び仕上げ面粗さ

植物性切削油を工具の逃げ面のみに供給する実験 c は、植物性切削油を工具のすくい面と逃げ面に供給する実験 b の場合と同様の仕上げ面粗さを示すという結果が得られた。

実験 b と実験 c の結果は、不水溶性切削油を使用する実験 a より、工具の摩耗が少し大きくなったが、工具の刃先に付着した凝着物は非常に少なくなった。この結果は、植物性切削油が高い潤滑性を持つことにより説明できる。凝着物が少なくなるため、仕上げ面は不水溶性切削油を使用する実験よりむしろ現象が発生しない。

凝着物は精密加工にとって、著しく有害である。凝着物を発生させないために、あるいは小さくさせるためには、不水溶性切削油に代って、植物性切削油を使用する加工方法が注目されることになるであろう。

3.6.4 考察 4——実験 d 及び実験 f

植物性切削油を工具のすくい面と逃げ面に供給すると共に冷風を供給する実験 f の結果は、植物性切削油を工具の逃げ面のみに供給すると共に冷風を供給する実験 d の結果と比べて、実験 b 及び実験 c に示すように、工具の摩耗の進行状況は同じ位であった。また、仕上げ面粗さの状況もほぼ同じである。

以上、実験 d 及び実験 f による冷風切削実験結果は、冷風と工具の逃げ面に植物性切削油を一緒に供給すれば、工具の寿命を延ばすと同時に美しい良好な仕上げ面を得ることができることを示している。

3.7 結言

本研究では超硬合金 KW10 工具を用いてステンレス鋼 SUS430F の切削を行なった。冷風切削を実施し切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果について検討を行った。

結果を要約すれば

1. 一般的な切削において、不水溶性切削油を使用する場合：

超硬合金 KW10 は、材料 SUS430F と親和性が良いため、工具の刃先に構成刃先状の凝着物が発生した。この凝着物の発生とその不安定さにより、仕上げ面粗さが悪くなる。

2. 冷風切削において、最も潤滑性能に優れた特殊植物性切削油をごく微量加工点に供給した場合：

(1) 切削温度が下降するため、工具寿命が増加した。

(2) 植物性切削油が工具と仕上げ面の間に浸透するため、凝着物が減少

し、仕上げ面粗さは良くなった。

(3) 植物性切削油を工具の逃げ面に供給すると、すくい面及び逃げ面に供給した場合とほぼ同じ程度の効果があることが認められる。

以上、実験の結果より、連続切削の旋削において、冷風と植物性切削油と一緒に供給する加工方法は、工具の摩耗を抑える効果及び仕上げ面粗さを向上する効果があることが分かる。さらに、冷風冷却による加工方法は環境に優しく、植物性植物性切削油は加工表面に油膜を生成するため、工作物の錆止め効果を得ることが教えられる。

第4章 高ケイ素アルミニウム合金の切削面に 及ぼす潤滑及び冷風の効果

4.1 緒言

現在高ケイ素アルミニウム合金は高い耐摩耗性や小さな熱変形が要求される用途などに使用されている。特にピストン材などに用いられ、優れた耐熱性、強度を示す Al-Si 系鋳造合金は、熱膨張係数が小さく、高温強度と耐摩耗性があることが特徴である。しかし、熱膨張係数の小さいことに有効に作用するケイ素、高温軟化防止のために添加されたニッケルなどのため、極めて被削性が悪い。そのうえこの高ケイ素アルミニウム合金の切削仕上げ面には金属光沢面がなかなか得られないことが多く、この問題を克服する方法の1つとして大量の切削油の使用が行われている。一方、切削油剤を使用して湿式切削した場合、製品として切削中あるいは切削後仕上げ面に切削油剤がにじみでたりすることがあるため、やむをえず乾式切削をすることも少なくない。このような場合、工具摩耗が激しい上に、良好な仕上げ面が得られにくい。一方、大量の切削油を使用している現在の加工方法は環境意識の高まりと共に、その見直しが迫られている。そこで今回は従来の切削方法ではなく、冷風と潤滑油をミスト状にしたものを切削点に吹きかけ冷却と潤滑性を確保しようとする切削方法を用いる事により、セミドライ切削の可能性を探ると共に、切削に及ぼす影響について考察する²¹⁾。

4.2 実験方法

4.2.1 実験材料

本実験に用いた被削材は鋳造アルミニウム合金 AC9A である。Al-Si 系合金の平衡状態図を Fig.4-1 に示す。

Al-Si 系合金は 577°C, 12.6% に共晶点をもつ共晶系で, $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ の共晶凝固を行う。 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体の最大 Si は 1.65% で, 固溶度は温度低下と共に減少する。この固溶度の減少によって Si 相が析出するが, 析出硬化は非常に小さい。共晶で晶出する Si 相は

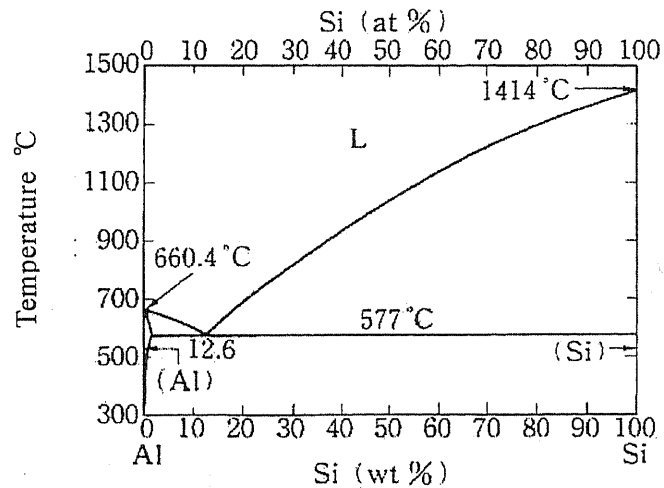


Fig.4-1 Al-Si Counterpoise

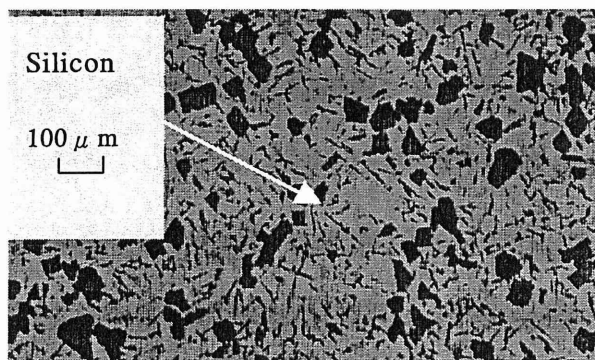
Al をほとんど固溶せず, 硬度が高く (HV870~1350) 熱膨張係数が小さい。過共晶組成では, 初晶 Si は塊状に析出し, 異方性をもって粗大に成長する²²⁾。その粗大に成長する塊状過共晶体はその後の機械加工に大きな影響を及ぼす。本実験のアルミニウム合金 AC9A の主要組成を Table 4-1 に, また, 組織写真及び試料外観を Fig.4-2 に示す。22~24%ケイ素を含有し, その硬質ケイ素粒子 (Fig.4-2-a の金属組織写真に示した黒い部分) が多数析出しているために, 切削加工を行った場合, 切削抵抗が Al 合金の中では比較的大きく, 良好な仕上げ面を得にくい。また, 工具の摩耗が異常に早くこれにともなう工具付着物が発生しやすく, 被削性が極度に悪い。

アルミニウム合金中のケイ素量と工具摩耗には密接な関係があり, ケイ

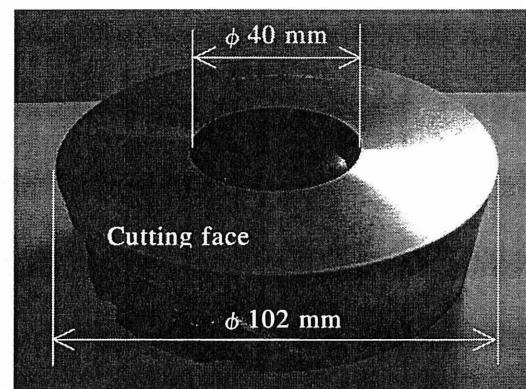
素含有量が多くなるほど工具摩耗は進行し早くなる。さらに、高ケイ素アルミニウム合金（またハイパーシルミン、アルジルとも言う）と呼ばれる被削材はケイ素の含有率が同じでも、熱処理方法が異なると析出したケイ素粒子の大きさが異なる²²⁾²³⁾。ケイ素粒子径が大きくなると刃先と衝突エネルギーが大きくなり、工具摩耗が急速に進行することになるため、本実験に使われた試料としては同じ熱処理方法でケイ素粒子径を一定にしたアルミニウム合金を用いた²⁵⁾³⁰⁾。

Table 4-1 High silicon aluminum alloy

Cu	Si	Mg	Zn	Pb	Cr
0.5~1.5	22~24	0.6~1.5	0.2>	0.1>	0.1>
Fe	Mn	Ni	Ti	Sn	Al
0.7>	0.5>	0.5~1.5	0.2>	0.1>	Other



a. Structure of AC9A



b. Sample of cut piston

Fig.4-2 Test material of high silicon aluminum alloy

切削試料はピストンの鋳造素材である。Fig.4-2-b に示すように、 $\phi 102$ mm のピストン素材の上部平面を切削面として、中心部に $\phi 40$ mm の穴を

あけて切削幅 31mm $((102-40)/2)$ にわたり，切削速度を一定にして，試料の端面を繰り返し削って，実験を行なった。

4.2.2 実験装置

1. NC 旋盤：本実験で使用した切削装置は TUGAMI CORPORATION 製の T-PAN3 型精密 NC 旋盤である。Fig.4-3 に示す。

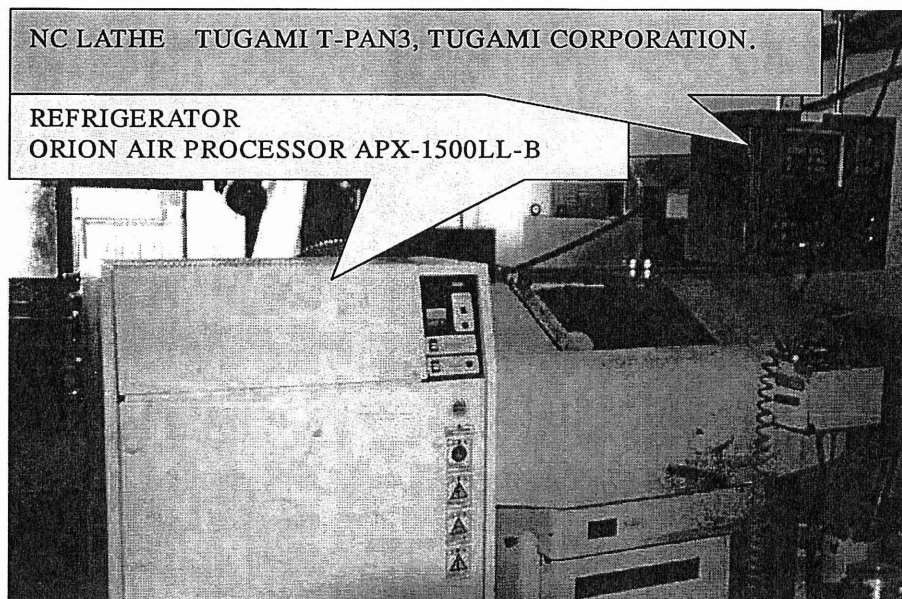


Fig.4-3 Test equipment

2. 冷凍機：冷風を発生するための冷凍機はオリオンエアプロセッサ APX-1500LL-B 型である。

オリオンエアプロセッサ APX-1500LL-B の標準仕様を Table4 - 2 及び Fig.4-4 に示す。この装置は冷風切削加工として， -35°C 程度まで瞬間冷却した空気を一定流量で切削部に供給できる。

Table 4-2 Specification of air cooler

Model	APX-1500LL-B
Outlet temperature	-35~+125°C
Ambient temperature	15~30 °C
Inlet air pressure	0. 2~0.95 MPa
Inlet air temperature	10~30°C
Rate of air flow	200~800 l/min
Weight	145 kgf
Size	378×702×1300

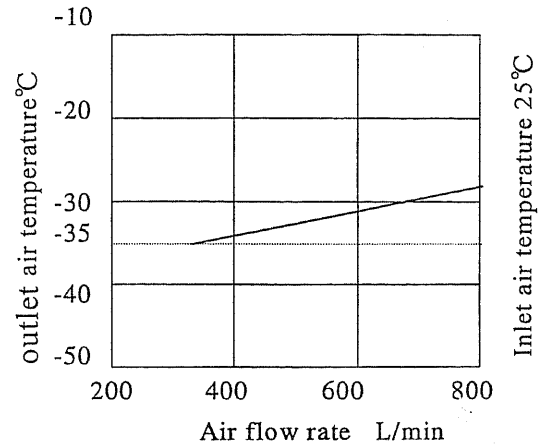


Fig.4-4 Cold air temperature change of outlet

3. ミスト給油機:切削油をミストを発生するためのミスト給油機は ITW FRUID PRODUCTS GROUP 製ブルーベ給油機 FK - 33 型である.

4. 工具は京セラのダイヤモンド工具 KPD010 を使用した.

ダイヤモンド工具 KPD010 は, 人工ダイヤモンド粒子を高温高圧下で焼結し超合金で裏打ちした非鉄金属加工用の工具である. その工具の特長は, ①高硬度のため, 耐摩耗性に優れ, 長寿命. ②熱伝導率大きい, 熱を速やかに逃がし加工が安定化できる. ③高速切削が可能になる. ④構成刃先が発生しにくく, 高精度の仕上げ面が得られる. ダイヤモンド工具 KPD010 を使用して高ケイ素アルミニウム合金の高速加工ができる²³⁾とされる.

5. 切削油はタイユ株式会社製のハイチップ SX580 及び ITW FRUID PRODUCTS GROUP 製のブルーベ LB-1 を使用した.

4.2.3 冷風冷却方法及び微量切削油供給方法

実験方法の概略及び各ノズルの配置を Fig.4-4, Fig.4-5 に示す.

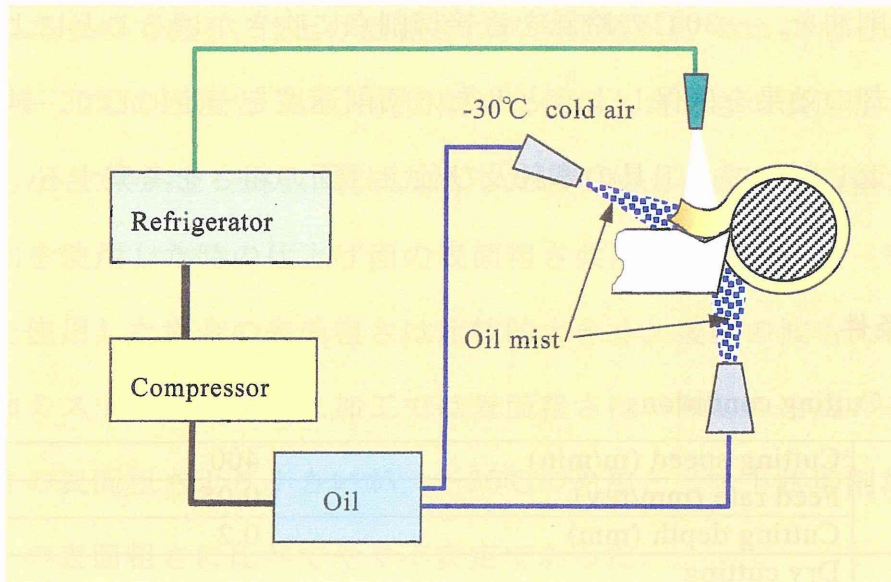


Fig4-4 Schematic illustration of cutting method by cold air and oil mist

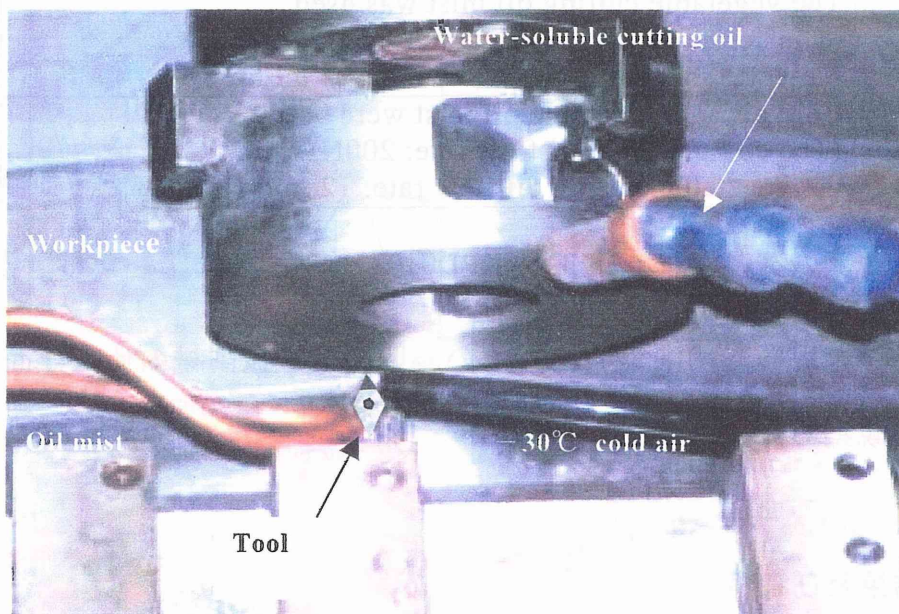


Fig4-5 Cutting method

本実験は連続切削ゆえ切削点は常に切りくずに覆われているため、直接潤滑油をかけることは困難であることから、Fig.4-4, Fig.4-5 に示すような方法で切削点に冷風と潤滑油を供給した。工具のすくい面、逃げ面方向からミスト状切削油を、 -30°C の冷風を直接切削点に吹きかけることによって潤滑及び冷却の効果を確保しようとした。切削速度を一定にして、試料の端面を繰り返し削って、工具の摩耗及び仕上げ面の粗さを考察する。

4.2.4 実験条件

Table 4-3 Cutting conditions

Cutting condition	Cutting speed (m/min)	400
	Feed rate (mm/rev)	0.05
	Cutting depth (mm)	0.2
Cooling and lubrication condition	Dry cutting (Cutting oil was not used)	
	Water-soluble cutting oil was used	
	Only cold air was used (The flow rate 100 NL/min)	
	The vegetable cutting oil mist was used (The compression air flow rate: 100 NL/min, the vegetable cutting oil flow rate: 12 ml/hr)	
Cold air and vegetable oil mist were used (The compression air flow rate: 200NL/min, the vegetable cutting oil flow rate: 12 ml/hr)		

工具は京セラのダイヤモンド工具 KPD010 を使用した。

以上の条件を用いて切削実験を行ない、切削後に被削材の仕上げ面と工具の摩耗を観察した。

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 仕上げ面性状及び仕上げ面粗さ曲線

表面粗さの実験結果を Fig.4-6 に示す.

Figure 4-6 は切削距離に対する、仕上げ面粗さ（最大粗さ Ry）の変化を示したものである。仕上げ面粗さは切削距離が約 4km になるごとに測定した。-30℃の冷風とミスト状切削油を併用したときの表面粗さは安定し、最も小さかった。一方、乾式加工した時の仕上げ面の表面粗さと水溶性切削油を使用した時の仕上げ面の表面粗さ共に最も大きい。-30℃の冷風のみを使用した場合の表面粗さは比較的大きく、変動の波も大きかった。植物油ミストのみ使用した加工では表面粗さは-30℃の冷風のみを使用した場合の表面粗さより小さいが、-30℃の冷風とミスト状切削油を併用したときの表面粗さに比べてやや不安定であった。

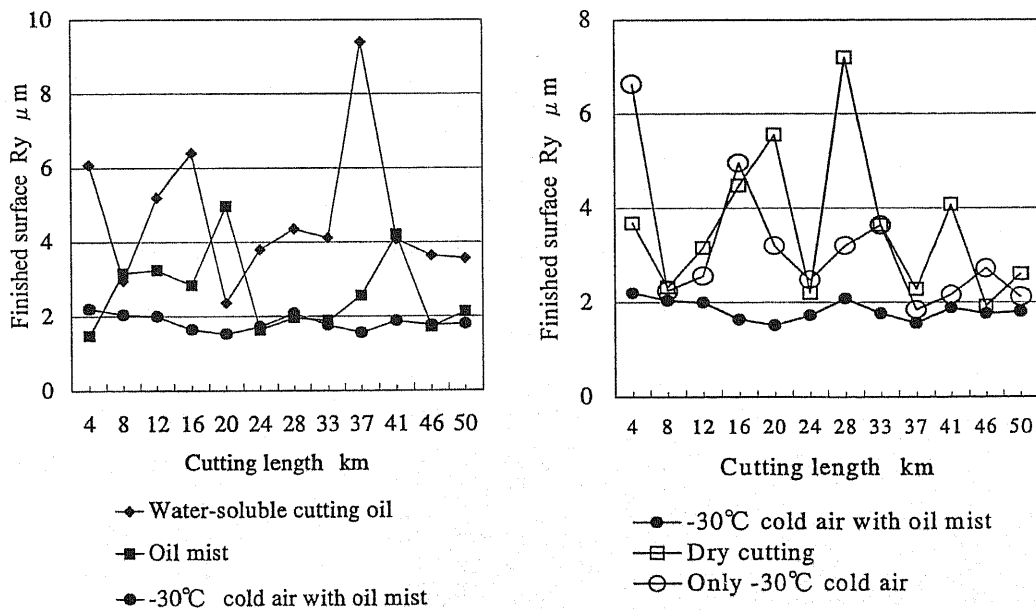


Fig.4-6 Variation of surface roughness finished by various conditions versus the cutting length

Figure 4-7 に示される粗さ曲線の様子から見ると、乾式切削、水溶性切削油での切削面で大きな傷痕があった。

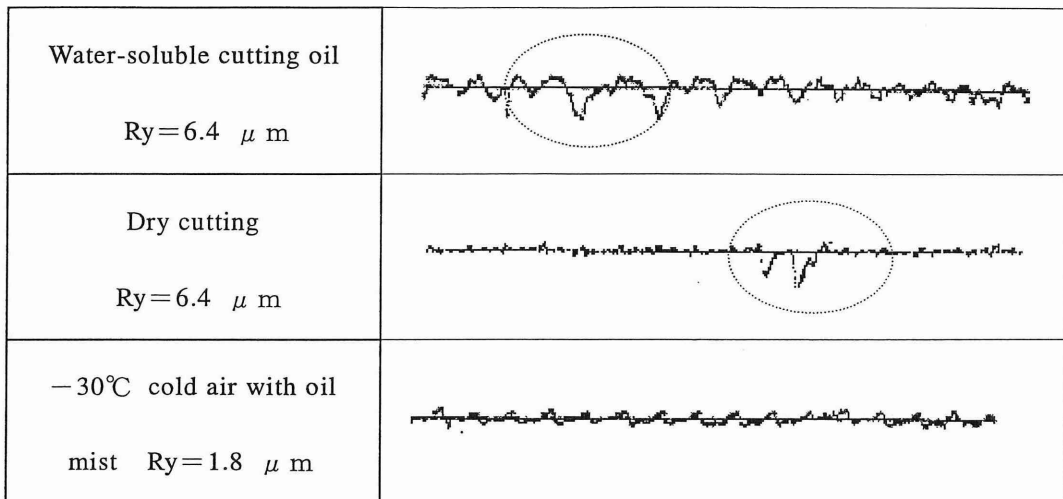


Fig.4-7 Roughness curve on finished surface

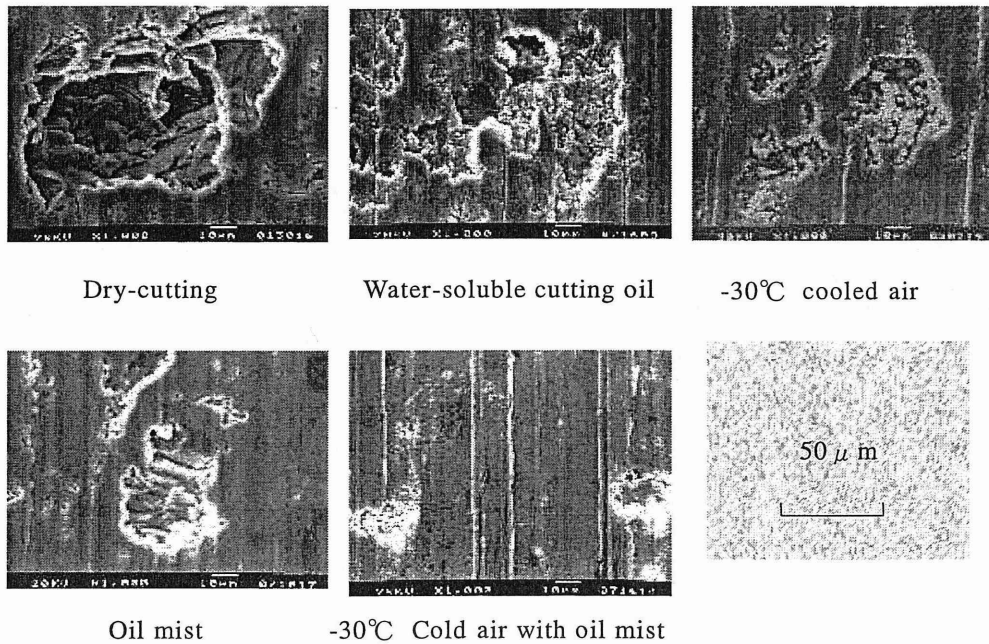


Fig.4-8 SEM images of finished surface

Figure4-8 は約 49.8 k m 切削した後の仕上げ面の状況を示した SEM 写真である。写真から分かるように乾式や水溶性切削油を使用した仕上げ面ではケイ素の抜け落ちた痕が大きく、次に -30°C の冷風、ミスト状切削油が小さく、 -30°C 冷風とミスト状切削油を併用した実験ではほとんどケイ素の痕が見られなかった。乾式や水溶性切削油に見られる大きな傷痕が前述の粗さ曲線の不規則性を増すものであると考えられる。

各実験試料によってケイ素粒の大きさが異なっていたとは考えにくい。念のため、ケイ素粒の大きさを確認してみた。仕上げ面を再び研磨して平均粒径を観察した結果、各実験試料のケイ素粒子の大きさには大きな違いがなかった。では何故実験条件の違いによってこんなにも差ができるのか。これは実験条件の違いによってケイ素の脱落とせん断の違いがあるためであると考えられる。Fig.4-9 に示すように、乾式及び水溶性切削油の場合(a₁)～(b₁)の動きをすると考えられる。(a₁)図は切れ刃が初晶ケイ素をまさに切削しようとしている図である。ダイヤモンドの硬さはビッカース硬さ HV=5000~10000 程度、アルミニウム合金共晶組織部分の硬さは HV=50 程度である。よって工具は容易にケイ素粒子を切削しながら進行するはずである。しかし従来の水溶性切削油を上から流す方法では、生成される切りくずに妨害されるなどして油剤が切削点に侵入されにくい。そのため切削油に重要な潤滑と冷却の二つの効果が十分に発揮されず、被削材と工具の摩擦等により発生した熱により、切削点の温度が上昇していく。このことにより高ケイ素アルミニウム合金が軟化して、ついにはケイ素をせん断する力が被削材を変形する力(ケイ素粒子を保持する力)を上回ってしまうため、初晶ケイ素はせん断されずに被削材を掘り起こして大きく変形し

ながら脱落して行くと考えられる。Fig.4-8 の乾式及び湿式切削面に見られる大きな窪みは、こうしてできたケイ素の脱落の痕と見られる。

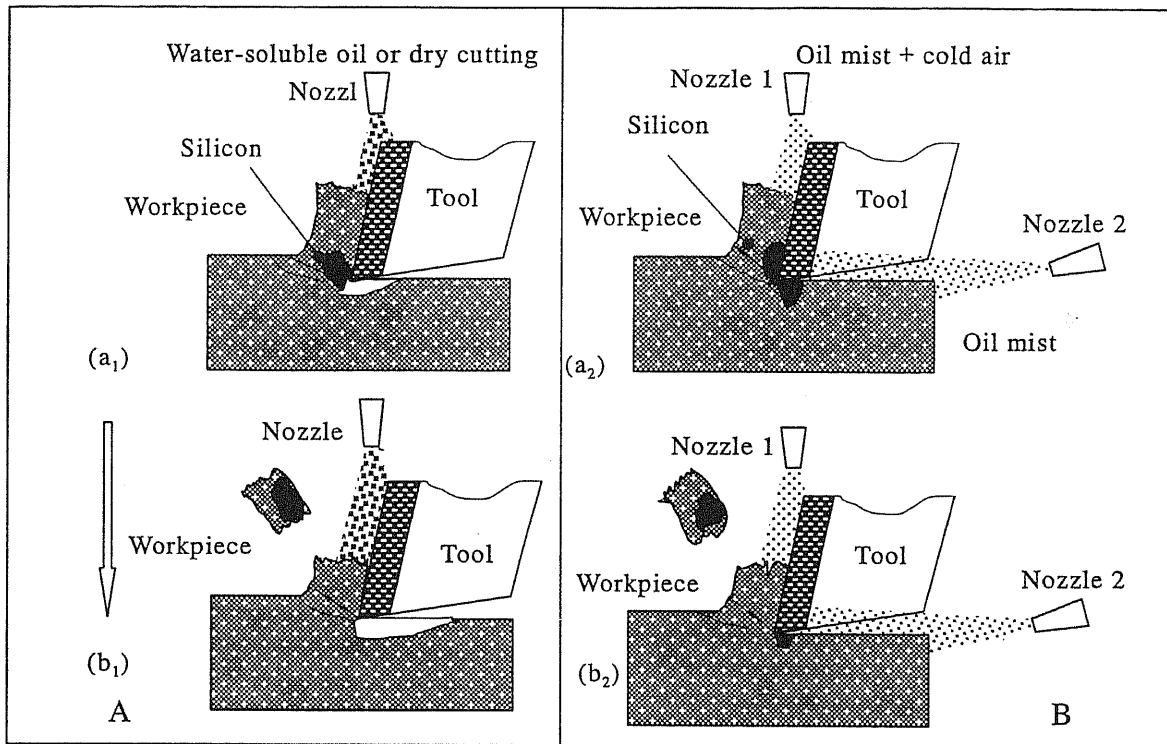


Fig.4 -9 Schematic illustrations of cutting model

一方、 -30°C の冷風とミスト状切削油を併用する条件では、熱による被削材の軟化が抑えられ上記のような変形が起きず初晶ケイ素をせん断すると考えられる。即ち高ケイ素アルミニウム合金中の共晶部分は冷却によって硬さを保ち、初晶ケイ素による変形を受けずにケイ素をがっちりと保持する。つまり初晶ケイ素をせん断する力が共晶部分に変形を起こす力より小さい為、初晶ケイ素をせん断することが出来、そのため Fig.4 -9 の (a₂) ~ (b₂) の様に切削ができると考えられる。粗さも小さく比較的規則的になったのは初晶ケイ素のせん断ができたためだと考えられる。

4.3.2 工具摩耗

1. 工具摩耗曲線

Figure4-10 は工具逃げ面の摩耗幅と切削距離の関係を表した摩耗曲線である。切削距離が約 8.3 km になる毎に摩耗量を測定して、各実験条件での摩耗曲線を作った。摩耗曲線を見ると乾式、水溶性切削油、 -30°C の冷風、ミスト状切削油、 -30°C の冷風とミスト状切削油の順に摩耗幅が小さくなっていく。すなわち、本実験条件中では -30°C の冷風とミスト状切削油を併用した場合が他の切削条件よりも摩耗量が小さいことが分かる。

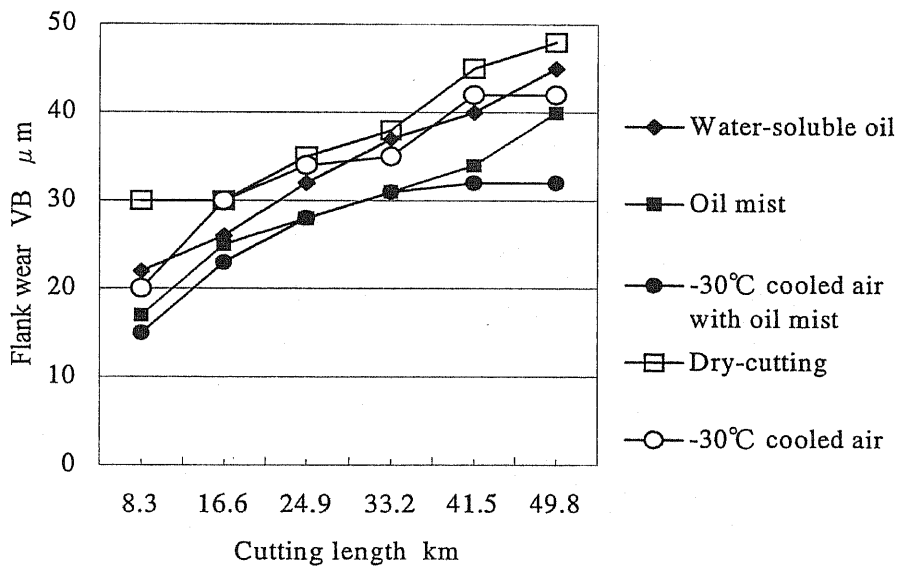


Fig.4-10 Tool wears curve

2. 工具摩耗の分析

工具摩耗の機構は基本的に機械的作用、熱的作用、機械作用と熱作用との両者によるもの及び化学的作用によるものに大別できる³⁾。本実験の工

具摩耗の原因としては以下の3つが考えられる。

(1) 第1の原因は摩擦熱による影響である。熱の作用によるものとしては、熱応力のために生ずる亀裂及び軟化による損傷と、切削点における拡散、合金化による摩耗をあげることができる。効率よく冷却される -30°C の冷風と油ミストの併用の実験では工具の熱軟化が小さいため摩耗が小さくなると考えられる。

(2) 第2原因は潤滑油を供給する方法の違いである。Fig.4-11に示すように、水溶性切削油は一度被削材にかけられた後タンクに貯められ、もう一度使われる循環式になっている。そこに高ケイ素アルミニウム合金を切削する場合、大きなデメリットがでてしまうと考えられる。切削によって破碎されたケイ素は非常に小さいため、全てのものを濾過するのは非常に難しい。ケイ素が混入されたままの切削油は再び被削材と工具にかけられるので、ケイ素が研削の砥粒の役目をしてしまい、工具の機械的摩耗が増大すると考えられる。

(3) もう一つの原因は切削中ケイ素粒子が脱落することの影響である。Fig.4-9-Aに示したように、水溶性切削油を使用した実験及び乾式実験で、被削材中の硬いケイ素粒子が脱落する瞬間に工具の刃先部分と被削材の間にかみ込まれて回転しながら脱落することになる。この際に大きな力が発生して刃先の欠損が発生しやすくなり、機械的摩耗が増大したと考えられる。逆に、 -30°C の冷風とミスト状切削油の加工条件ではケイ素粒子が細かく割れるので工具の機械的摩耗はかえって減少すると考えられる。

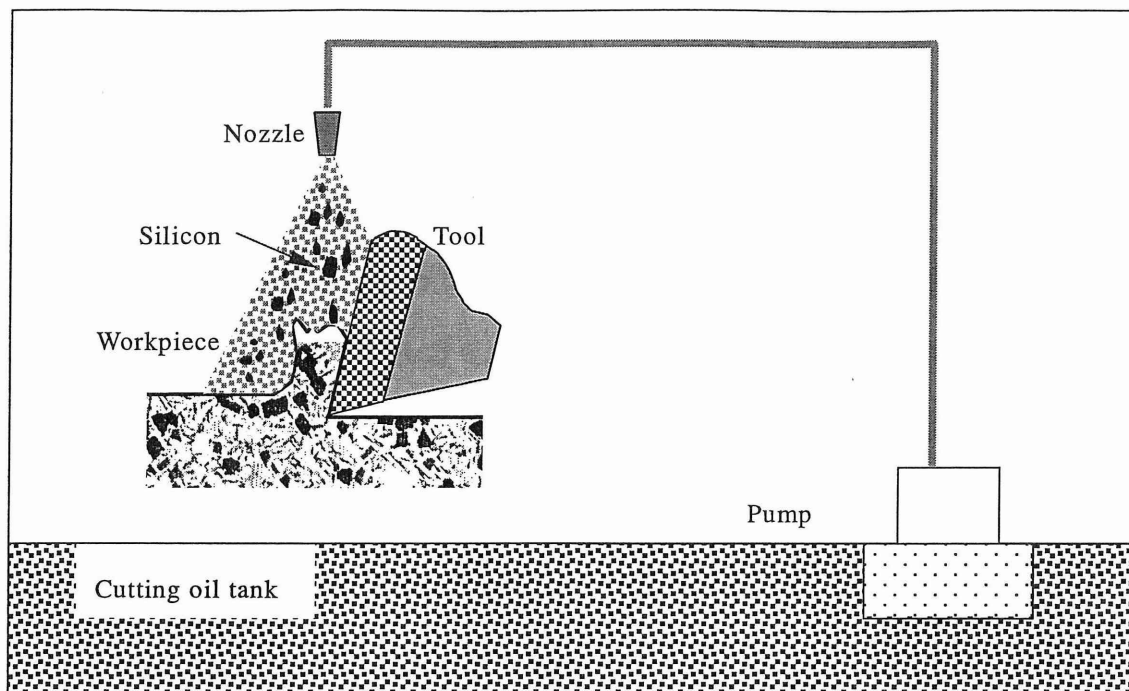
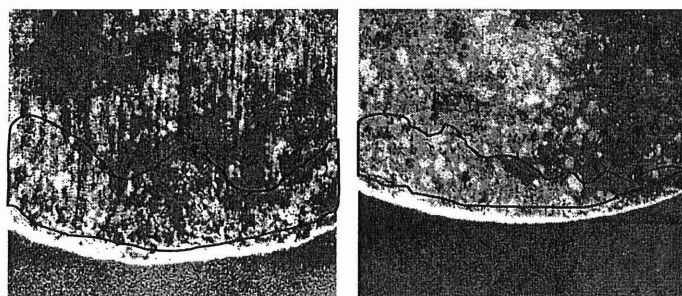


Fig.4-11 The silicon particles which mixed in cutting oil



Water-soluble oil

Cold air with oil mist

Fig.4-12 SME images of tool wear

実際の切削距離49.8km切削後の工具すくい面の状況を Fig.4-12 に示す。
図の線の内側がすくい面の摩耗部分である。-30℃の冷風とミスト状切削油を併用する実験よりも、水溶性切削油の実験の方がすくい面にかなり大きな摩耗が観察される。

4.4 結言

本章では、高ケイ素アルミニウム合金材料 AC9A においてセミドライ切削の冷却効果と潤滑効果を検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 切削油をミスト状にして使用することによりケイ素の循環を防ぎ工具摩耗を抑えることができた。
- (2) -30°C 冷風の効果で被削材の熱軟化を抑えることで高ケイ素アルミニウム合金の仕上げ面の精度を向上することができた。
- (3) 空気と共にミスト状の切削油を吹きかけることにより、工具の摩耗を減少することができた。
- (4) 連続切削の為切削点に潤滑油をかけるのが困難である旋削でも有効に切削することができた。

第5章 複合ミスト供給法による旋削加工の研究

5.1 緒言

世界における環境重視の動向を見ると、大量の切削油を使用していた加工方法を見直し切削油の適量化、あるいは完全なドライ切削化が望まれている。これまでにエンドミル加工などの断続切削においてはオイルミスト供給による切削加工への効果が示されているが、刃先が常に切りくずに覆われている旋削でも十分な効果があるかどうかは十分に明らかとなっていないと思われる²⁶⁾²⁸⁾⁴⁰⁾。前章では旋削加工中、切削部にオイルミスト供給することで、かなりの潤滑効果があることを示し、さらに冷風を吹きかけることで切削部に温度上昇を抑えて、有効な切削ができることを示した。しかし、冷凍機を用いた冷風加工では設備の初期投資やランニングコストの負担が相当に大きくなると予想される。そこでより低コストの潤滑、冷却システムを開発することが望まれる。本章では複合ミスト供給法を提案して、その有効性を検討する。

オイルミスト供給による切削加工法は各種給油方法の中で、噴霧給油法の一つに位置づけられる。従来の噴霧給油法では切削油を比較的大量に使用するが、一般に噴霧給油では切削部に達する液量が少ないため、流体潤滑膜は形成されにくい。そのため、極圧添加剤を含む油剤を使用することで、ある程度の境界潤滑膜を形成させている。また、冷却性も十分ではないため、噴霧給油に使用する油剤は、潤滑性より冷却性を主体にして選ばれている。このため、一般に不水溶性油剤よりも水溶性油剤が使用される。さらに、噴霧給油を行なうときは作業者の健康と環境衛生に特別の配慮が

必要である。すなわち、高温の切削部から出る煙や、噴霧、蒸気の臭いは作業者に嫌悪感を起こさせるだけでなく、健康に悪影響を与える恐れがある⁹⁾¹⁰⁾。

現在、噴霧給油における環境対応加工技術として、MQL (Minimal Quantity of Lubricant) 給油方式が提唱されている。いわゆる最小限度の潤滑油を、潤滑を必要としている場所に的確に供給することによって油剤使用量を極力抑えて、環境対応加工を実現しようとする方法である¹⁸⁾¹⁹⁾。しかし、MQL給油方式は冷却性に欠ける。そこで、本研究はMQL給油方式の不十分な冷却性を改善するため、連続切削における準ドライ加工としての複合ミスト供給法を提案し、切削加工の有効性を探ることを目的としている。

5.2 従来のオイルミスト供給法

オイルミスト供給法とは少量の切削油を高速の空気流中に導いて噴霧する加工方法である。この気流が切削部にあたり、細かく分散された切削油剤の粒子が工具、被削材、切りくずと接触して、切削点の冷却及び潤滑効果をもたらすと考えられている⁹⁾¹⁰⁾。給油方法としては二重チューブ給油式が多く使われている。二重チューブは外側のエアーストと中心部のオイルチューブの二重パイプになっていて、切削油はポンプから押し出され、オイルチューブを通してノズル前端に来る。前端から押し出された油はエアによって運ばれミスト状になって、工具の切削点に塗布される¹⁸⁾¹⁹⁾²⁴⁾。

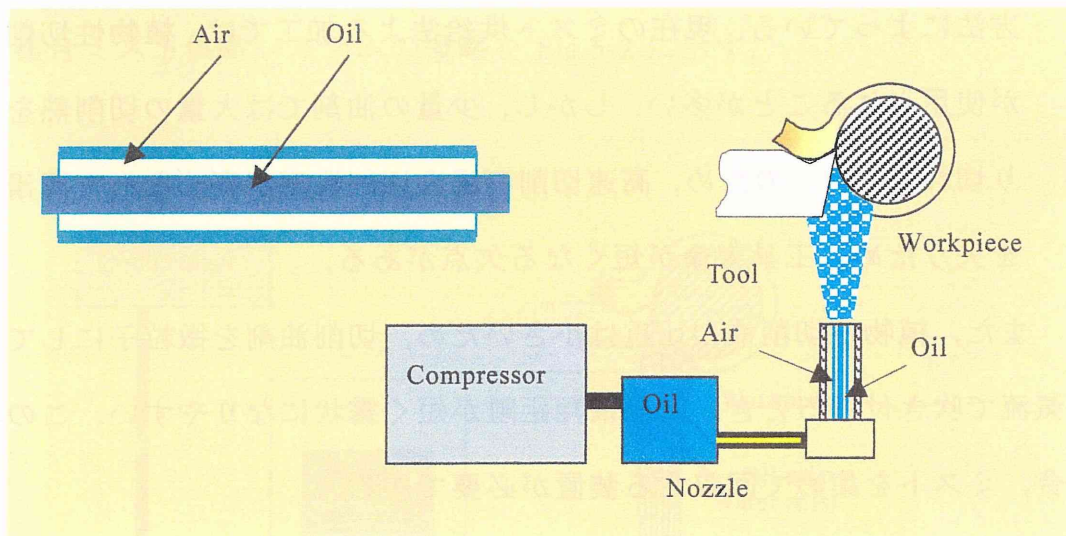


Fig.5-1 Usual mist supplying method

1. オイルミスト供給法の利点

オイルミスト供給法の利点は、切削油剤を微粒子にして空気流で吹き付けるので浸透性に優れていること、気化しやすく、その際の吸熱効果が期待できること等である。オイルミスト供給法は少量の油剤しか使わないので、普通の大量給油方式のような油剤の循環装置や回収装置は不要であり、給油装置のない機械に給油するときには便利な方法である⁹⁾。

作業環境としては、工作機械周辺の切削油によるべたつきがなくなり、工場の作業環境が良くなり、切りくずはほとんど乾いているため、収集と運搬がしやすくなり、また、切りくずの再溶解が直接可能になるなどの利点がある。

2. オイルミスト供給法の欠点

セミドライ加工法の 1 つである MQL 切削法は加工最小限度の潤滑

油を、潤滑を必要としている場所に的確に供給するオイルミスト供給方法によっている。現在のミスト供給法による加工では、植物性切削油が使用されることが多い。しかし、少量の油剤では大量の切削熱を取り切れない。このため、高速切削の場合切削温度が高くなって潤滑性を失うため、工具寿命が短くなる欠点がある。

また、植物性切削油の比重は小さいため、切削油剤を微粒子にして空気流で吹き付けるとき、直線飛翔距離が短く霧状になりやすい。この場合、ミストを集めて回収する装置が必要である。

5.3 複合ミスト供給法

本研究は連続切削である旋削を対象として、複合ミスト供給の効果を検討したものである。複合ミスト供給法とは、潤滑性を確保するための植物性切削油のミストと共に冷却性が優れる水をミスト状にして、加工点に供給する方法であり、水ミストの使用による大きな冷却効果が期待される。水は比熱が大きく、蒸発潜熱も大きいから（水を蒸発させるのに要する熱量は 40.66kJ/mol と非常に大きい）、冷却剤としてはもっとも優れた物質の一つである。したがって、水と植物性切削油を同時に供給する複合ミスト供給法は潤滑とあわせてより効果的な冷却を行うことができると考えられる。特に、旋削の場合、切削点の温度が高いため、単純に微量な切削油を供給するだけでは、切削点の冷却は不十分である。複合ミスト供給加工法では水の気化熱等により切削点を十分冷却した上に、植物性切削油の潤滑効果が期待できる。特に高速の噴霧気流を切削点にかけたときにその効果は大きいと考えられる²⁶⁾²⁸⁾²⁹⁾。

5.4 複合ミスト供給システム

複合ミスト供給システムの概略を Fig.5-2 に示す.

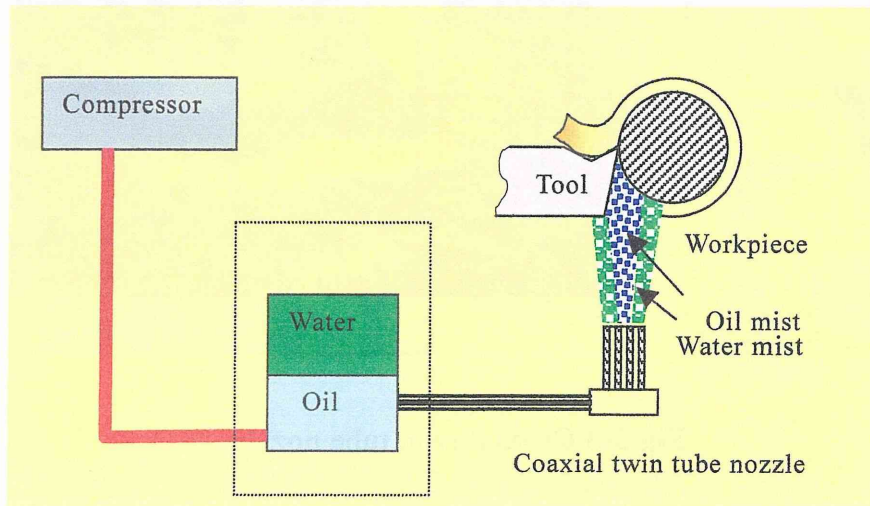


Fig.5-2 Schematic illustration of oil-water mist lubrication machining method

Figure 5-2 に示すように、コンプレッサーで生成された圧縮空気を利用して、複合ミスト給油機の定量ポンプから押し出された油及び水をミスト状にして、二重ノズルを通じて切削点に供給し、実験を行った。

本実験に使用したノズルを Fig.5-3 に示す。ミスト給油機からの水ミストと植物性切削油ミストを工具の逃げ面側から供給する。すなわち、植物性切削油ミストと水ミストは二重のノズルを通じて切削点に供給される。このノズルからの噴霧流は図に示すような二重構造になっていると考えられ、中心部は植物性切削油のミスト、周りは冷却水のミストになっている。水ミストがカバーのように作用して、植物性切削油のミストが回りに飛散しないこともこの加工方法のもう一つの特徴である³²⁾。

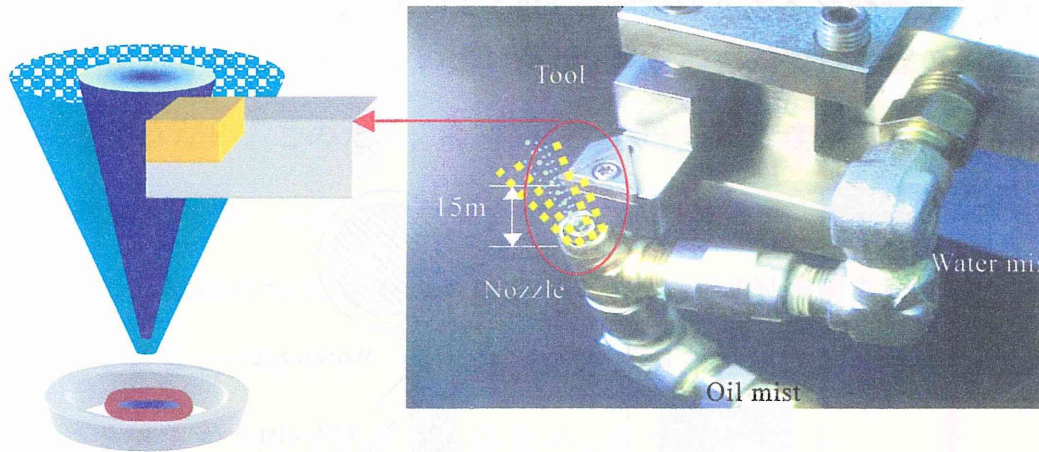
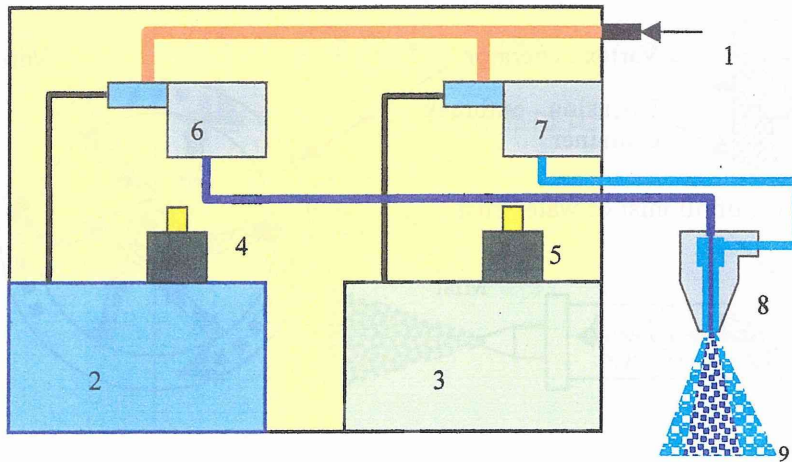


Fig.5-3 Coaxial twin tube nozzle

5.4.1 複合ミスト給油機

本実験で使用した給油機は Fig.5-4-a ,Fig.5-4-b のに示すように、二つのタンクの中にそれぞれ植物性切削油と水をいれ、ポンプを利用してミスト発生器まで圧送する。ミスト発生器で植物性切削油をエアを混合して、二重ノズルの中心部に植物性切削油ミストを送り、噴射する。同様に、ミスト発生器で水とエアを混合して、二重ノズルの外部に水ミストを送り、ノズルの外部から噴射する。このようにして細かいミスト状の植物性切削油と水が刃先に供給される。この複合ミスト給油機を利用して、冷却効果を高めたい場合には、複合ミストにおける水の配合割合が多くなるよう水と油の供給量を調整し、潤滑効果を高めたい場合には、油の配合割合が多くなるよう調整することにより、その加工に最適な条件を簡単に作ることができる。また、加工条件に応じて、複合ミスト供給装置で吐出させる液体（冷却液及び潤滑液）の種類を変えることができる。Fig.5-4-b は製品化し

た複合ミスト給油機 OWMIST-CDC I 装置の外観である。



- ① Compressed air entrance ② Oil tank ③ Water tank ④ Oil supply pump ⑤ Water supply pump ⑥ Oil mist outbreak container ⑦ Water mist outbreak container ⑧ Coaxial twin tube nozzle ⑨ Oil-water combined mist

Fig.5-4-a Schematic illustration of oil-water mist lubrication machine

OWMIST-CDC I

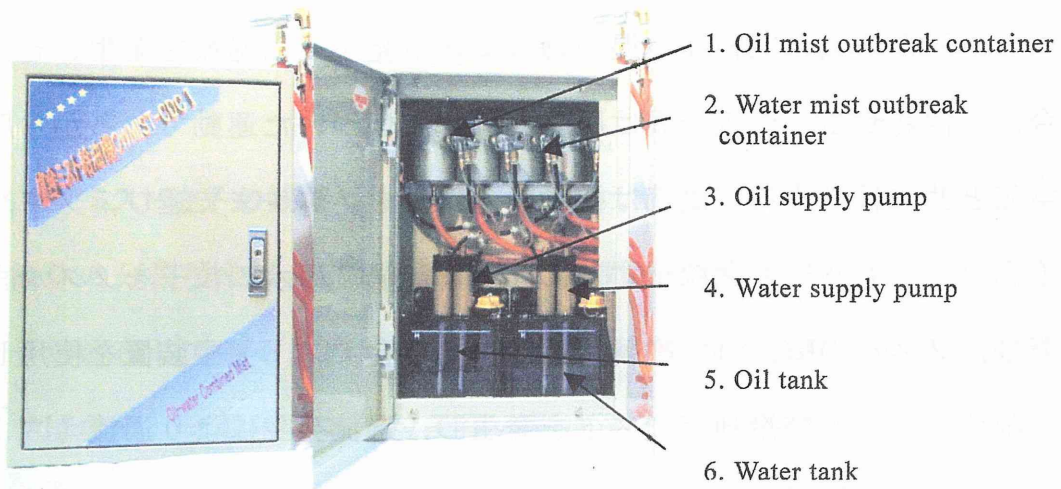


Fig.5-4-b Oil-water mist lubrication machine OWMIST-CDC I

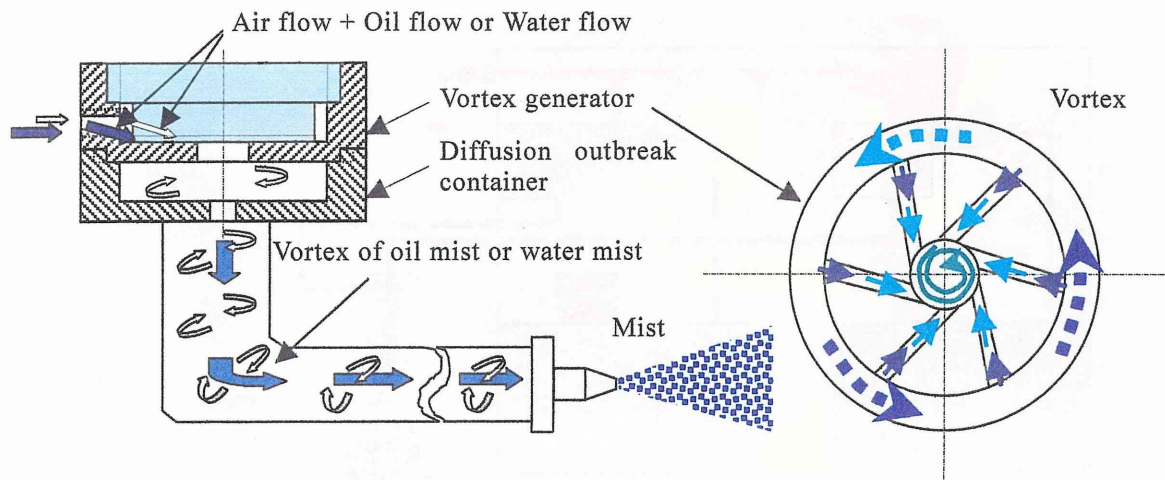


Fig.5-5 Principle of vortex generation and mist supplying

5.4.2 過流形成原理によるミスト発生及びノズルへの搬送過程

Figure 5-5 に示すように、複合ミスト装置はミスト発生室を利用して潤滑液（例えば植物油）及び冷却液（例えば水）を微粒子にしてノズルまで送る。圧縮空気と植物油の混合物はミスト発生室に過流を発生させ、混合、拡散させる。過流の渦は圧縮空気に結びついた運動であるから圧縮空気と共に移動する。渦流は植物油の粒子をノズルまで運び、ノズルの噴出口で、もう一度微粒化する。同様に、渦流は水の粒子をノズルまで運び、ノズルの噴出口で噴射する。この複合ミスト発生装置を使用して切削油ミスト及び冷却液ミストを発生し、過流発生により過流ミストとしてノズルに搬送し、ノズルからミストを加工点に供給する。配管の中に生成された質量の大きな切削油ミストは、圧縮空気と一体的に過流となって結び付き、配管内で液化されることなく、湾曲した配管内を円

滑に搬送されて噴射ノズルに無駄なく到達される³¹⁾。

Figure 5-6 は生成した液滴が過流の渦と圧縮空気の流れに結びついて、圧縮空気と共に移動する過程異を、透明なチューブを利用して、観察したものである。複合ミスト粒子の一部は比較的大きい水滴状になって移動している。

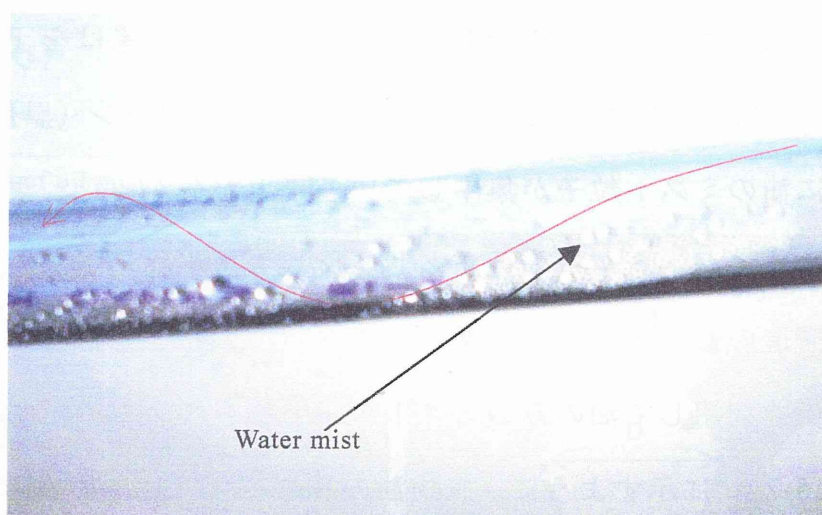


Fig.5-6 Vortex mist

5.4.3 ミスト粒子の観察

液体の分裂現象は高速かつ非定常で空間的広がりがあり、さらに大小の粒子が混在しているため、粒子の直接撮影法による粒径の正しい測定は容易ではない。一般にミスト粒子径の測定法には、液浸法、固化法、レーザー法及び痕跡法等がある²⁾。本実験では痕跡法を採用し感油用紙 (Oil sensitive paper) 及び感水用紙 (Water sensitive paper) (SPRAYING SYSTEMS CO.,U.S.A 製) を使用した。感油用紙 (感水用紙) は油(水)があたると化学

反応し黒化する。その黒化した部分を測定し、ミスト粒子の性状を調べる方式である。Fig.5-7 に一例を示す。感油用紙上で測定される粒径は真の粒径と異なり数倍に拡大されることになるが³³⁾、油のミスト粒子及び複合ミスト粒子の性状を比較するには、このような方法でさしつかえないと思われる。

二重ノズルから噴霧した油のミスト、水のミスト及び複合ミストの分布パターンを感油用紙と感水用紙を使用して観察した結果はを Fig.5-7(a)-(b) に示す。感油用紙を観察した結果、複合ミストのパターン（黒化した部分）の中心部に油のミスト粒子が集中していることが分かった。また感水用紙を観察した結果、水ミストの分布として環状の黒化部分が認められ、前述した二重構造の複合ミストのパターンとなっていることが分かった。

感油用紙を利用して油のみのミスト粒子と複合ミストの粒子を観察した結果、Fig.5-7-(c)に示すように、植物油のみのミスト粒子の痕跡（図中黒化した部分）が大きいことがわかった。痕跡の平均直径は約 $100\mu\text{m}$ であった。複合ミスト中の油ミスト粒子は痕跡が比較的小さく、平均直径 d は約 $50\mu\text{m}$ となった。その原因は油ミストと水ミストの両噴流がさらに混合されることで油粒子がより細かく分散した結果と思われる。また、感水用紙を利用した水のミスト粒子（感水用紙を使用し、黒化した部分）の観察から、水粒子の痕跡の直径 D は平均約 $200\mu\text{m}$ であった。すなわち、複合ミスト粒子のモデルは Fig.5-7(d)に示すように、直径が比較的大きい水粒子の表面に不均一に油膜が張られる状態となっているらしいことが分かる。

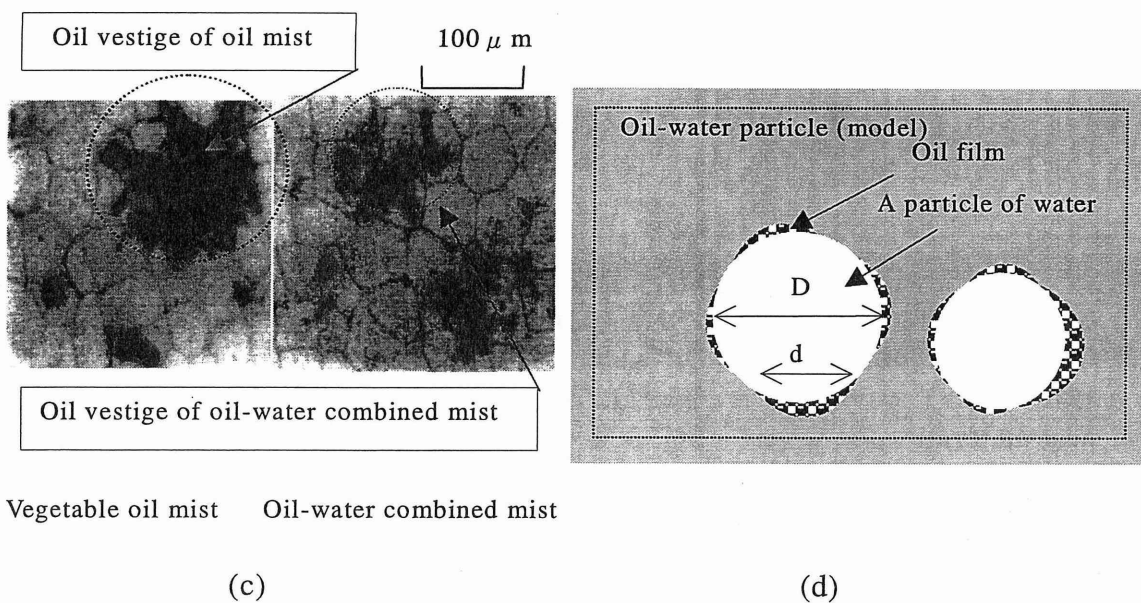
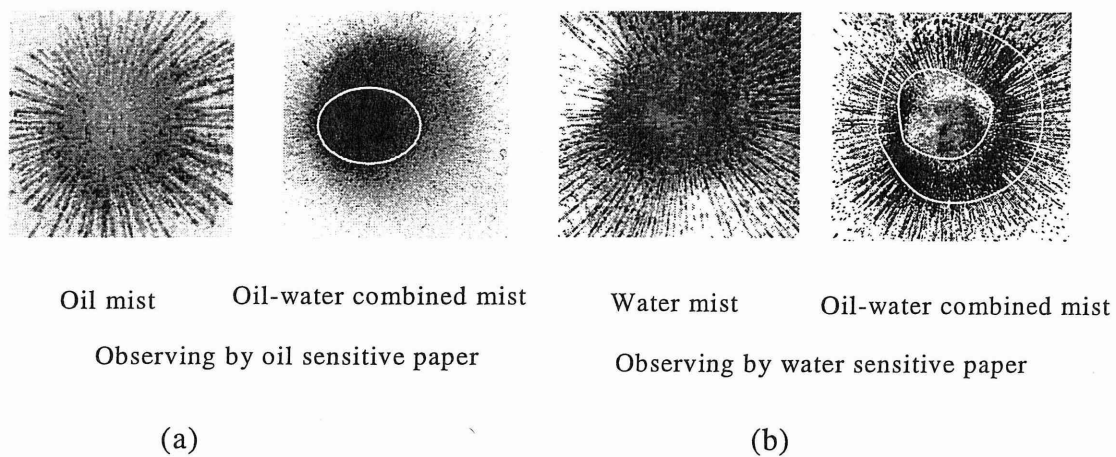


Fig.5-7 Observation of oil particle by oil sensitive paper

5.5 実験結果

5.5.1 実験材料

ステンレスは一般に難削材の一つに位置づけられている。その理由は(1)

靱性が高く工具材料と凝着しやすい，(2) 熱伝導性が悪い，(3) 加工硬化性が高い，などの性質を有しているためとされる¹²⁾¹³⁾．本研究では，代表的なオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 材の旋削に，複合ミスト供給法を適用して被削性改善の効果を調査する．

5.5.2 実験方法

Figure 5-8に示すように，実験はTUGAMI CORPORATION製T-PAN3型精密NC旋盤を用いて外周連続切削を実施した．実験方法は実験材料の外径を繰り返し切削して，切削距離の変化による工具の摩耗及び仕上げ面の粗さを測定した．実験条件をTable5-1に示す．

Table 5-1 Test conditions

Cutting machine	TSUKAMI PAN-3 automatic lathe
Cooling and lubrication system	Oil-water combined mist supply system OWMIST-CDC I
Test material	SUS304 (Stainless steel) $\phi 88 \times L45$ mm
Tool	Coated carbide tool US735 (KYOCERA)
Cutting speed V (m/min)	(a) $V=250, f=0.1, t=0.2$
Feed rate f (mm/rev)	(b) $V=150, t=0.2$
Cutting depth t (mm)	$f=0.07, 0.1, 0.15, 0.2,$ (c) $V=100, 150, 200, 250, 300,$ $f=0.07, t=0.2$ (d) $V=150, f=0.07, t=0.2$
Water-soluble cutting oil	Uni soluble HD-M (Nippon Oil Co., Ltd.)
Vegetable cutting oil	Bluebe LB-1(LB-1, ITW FRUID PRODUCTS GROUP)
Coaxial twin tube nozzle	Internal diameter $d=2.5$ mm External diameter $D=6.5$ mm

5.5.3 工具摩耗実験

Table 5-1 のような各々の加工条件での切削速度、送り速度及び油ミストの供給量、水ミストの供給量による工具摩耗への影響について検討し、結果を以下に示す。

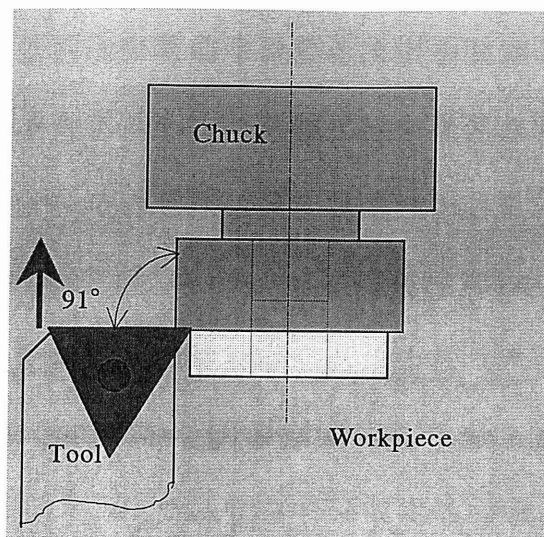


Fig.5-8 Cutting method

1. 油ミスト及び水ミストの供給量の工具摩耗への影響

Table 5-2 Test conditions

Test number	1	2	3	4	5	6	7
Water flow rate (ml/hr)	150	150	150	150	0	300	1000
Oil flow rate (ml/hr)	30	17	10	0	17	17	17

Table 5-1 に示す切削条件(a)及び Table 5-2 において、油の供給量 Q_{oil} は、0ml/hr (油供給なし)、10ml/hr、17ml/hr、30ml/hr の4種類、水ミストの供給量 Q_{water} は、0ml/hr (水ミスト供給なし)、150ml/hr、300ml/hr、1000ml/hr の4種類とし、供給量を変化させて、その効果を検討した。Fig.5-9 にそれぞれの油ミスト供給量及び水ミスト供給量における工具の摩耗状況を示す。横軸は切削距離、縦軸は工具逃げ面摩耗である。摩耗は切削距離が約 0.5 k m になるごとに測定した。

油及び水のみスト量の増加に伴い、工具逃げ面摩耗幅は小さくなっていることが分る。特に、冷却性と潤滑性と共に重視する複合ミスト供給法が、

工具摩耗を抑える効果が顕著であった。一方、作業環境の配慮があるため、最小の油量で加工効果を上げることが望まれる。また、水ミスト供給量が多くなれば、冷却効果が上がるが、大量に水を使用すれば、機械及び加工品が錆びやすくなる。そこで本実験では、機械及び加工品に錆びが発生しない水ミスト量及び作業環境を保全する油ミスト量を検討し、以後の実験では、油ミスト供給量 $Q_{oil}=17\text{ml/hr}$ 、水ミストの供給量 $Q_{water}=150\text{ml/hr}$ 、 300ml/hr の供給条件を選んだ。

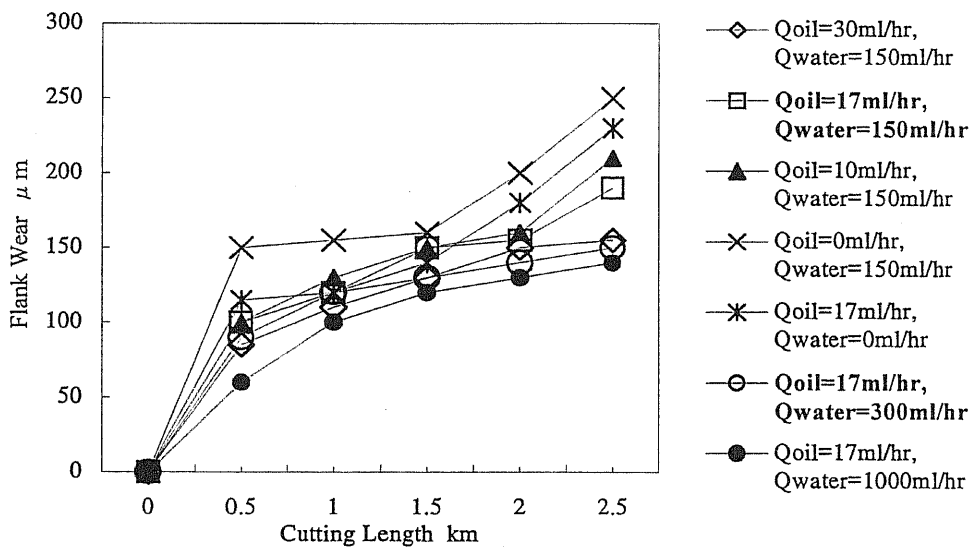


Fig.5-9 Tool wears change curve

2. 送り速度及び切削速度の工具摩耗への影響

Table 5-1の切削条件(b)及び(c)による工具摩耗への影響を調べた。連続切削の旋削加工においては、発生する大量の熱は、その70~80%が切りくずによって持ち去られるとされる。しかし、SUS304のように熱伝導率が低いと、切りくずによって持ち去られる熱量が少ないため、切削点の温度が上

昇しやすい⁴⁾. そのため, SUS304の切削実験条件の中に, 複合ミスト供給に加えて, 別方向から更に水ミストを供給する方式を採用することを試みた. すなわち, 工具の逃げ面に複合ミストを供給すると同時に, 工具のすくい面に150ml/hrの水のミストを供給する実験を行った. Fig.5-10に概略を示す. また, 冷却と潤滑条件をTable5-3に示す.

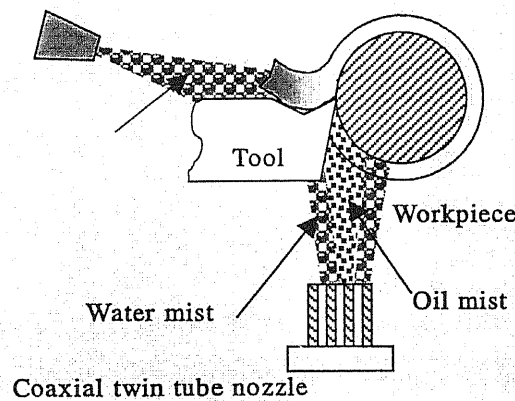


Fig.5-10 Oil-water combined mist plus water mist supplying method

Table5-3 Cooling method and lubrication method

Cooling method and lubrication method	Lubrication supplying method	Air flow rate (NL/min)	Oil flow rate (ml/hr)	Water flow rate (ml/hr)
Water-soluble cutting oil	Normal refueling method	0	0	6×10^6
Vegetable oil mist	Tool flank	100	17	0
Oil-water combined mist	Coaxial twin tube nozzle, tool flank	100	17	150
Dry-cutting		0	0	0
Oil-water combined mist + water mist	Oil-water combined to tool flank, water mist to tool face	100	17	300 (150+150)

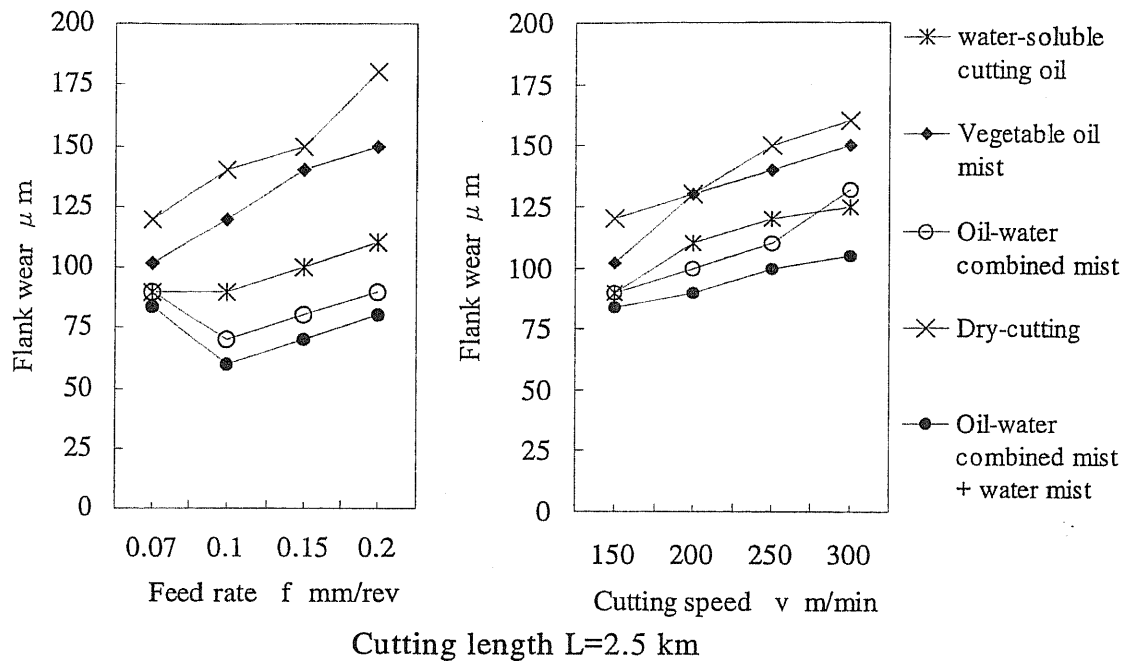


Fig.5-11 Tool wear change curves

実験結果を Fig.5-11 に示す，切削条件(b)及び(c)による工具摩耗は，複合ミスト+水ミストが最も小さく，複合ミスト，植物性油ミスト，乾式の順に摩耗幅が増大した．また，乾式及び植物性切削油ミストの場合，送り速度及び切削速度の増加による，工具摩耗幅の増加は急激であった．また，高い送り速度及び高い切削速度では水供給の有無，又は多少による摩耗の差が顕著となるようである．比較するために行なった従来の水溶性切削液による切削法よりも，複合ミスト及び複合ミスト+水ミスト方式の方が摩耗量の点では優秀であった．これは，水溶性切削液は見掛け上大量に供給されてはいるが，本実験のような旋盤加工では切りくずに阻まれて刃先点まで切削液が十分に到達していないことを示していると考えられる．一方複合ミスト方式では，逃げ面からの噴流に乗って微量ではあるが刃先点近

傍まで油ミスト及び水ミストを確実に送り込むことが可能となっていると考えられる。また、すくい面からの更なる水ミスト供給により（複合ミスト+水ミスト）切削点近傍が冷却されて摩耗幅は更に減少すると説明できる。

5.5.4 仕上げ面粗さ曲線及び仕上げ面の性状

Table 5-1の切削条件(d)において工具摩耗及び仕上げ面粗さへの影響を測定した。

仕上げ面の理論粗さ値は以下の式から求めた。

$$R_y = \frac{f^2}{8r} \quad (=1.53 \mu\text{m})$$

ここで R_y ：仕上げ面の最大理論粗さ， f ：送り切削速度， r ：切削工具ノーズ半径である。Fig.5-12に切削距離に対する，仕上げ面粗さ R_y の変化を示した。仕上げ面粗さは切削距離が約2.5kmになるごとに測定した。複合ミスト+水ミストを使用したときの表面粗さは安定し，最も小さかった。一方，乾式加工した仕上げ面の表面粗さは最も大きく，実験中に工具摩耗が急速に進行したため，加工続行が不可能になった。植物油ミストのみ使用した場合の表面粗さは比較的大きく，変動の波も大きかった。複合ミスト加工では表面粗さは植物油ミストのみを使用した場合の表面粗さより小さいが，複合ミスト+水ミストを使用したときの表面粗さよりやや不安定であった。水溶性切削油を使用した時の表面粗さは比較的変動の波が大きかった。

いずれも、実験の結果は理論粗さよりかなり大きくなった。次に、その原因を仕上げ面の表面粗さ曲線と工具のSEM写真から検討する。

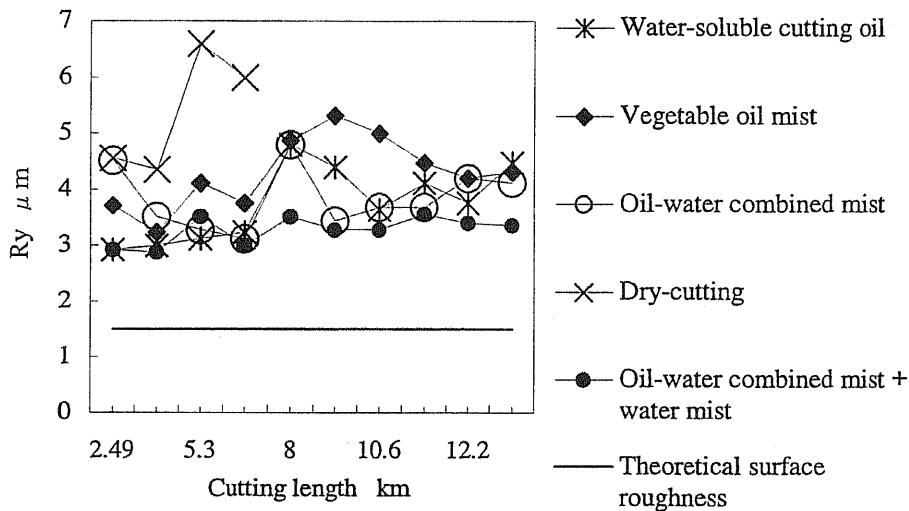


Fig.5-12 Variation of surface roughness finished by various conditions versus the cutting length

1. 仕上げ面の性状及び仕上げ面粗さ曲線

切削距離 5.3km 時の仕上げ面の SEM 写真及び仕上げ面粗さ曲線を Fig.5-13 に示す。

Figure 5-13 に示すように植物性切削油ミスト及び乾式での仕上げ面は複合ミストを使用した仕上げ面と比べて、表面が荒れており、むしろ観察される。この原因は、乾式では工具の逃げ面と仕上げ面の間の潤滑が不十分で、摩擦による溶着が発生したためであると思われる。植物性切削油ミストのみの場合はかなり改善されてはいるが、その効果は必ずしも十分で

なく、むしろ痕が残っている。一方、複合ミスト及び複合ミスト+水ミストを使用した場合、写真で見られるようにむしろ痕はほとんど認められない。油ミストのみとの実験条件の違いは水ミストの有無であり、これが仕上げ面に大きく影響していることになる。即ち水ミストによる冷却作用がむしろを抑制しているようである。

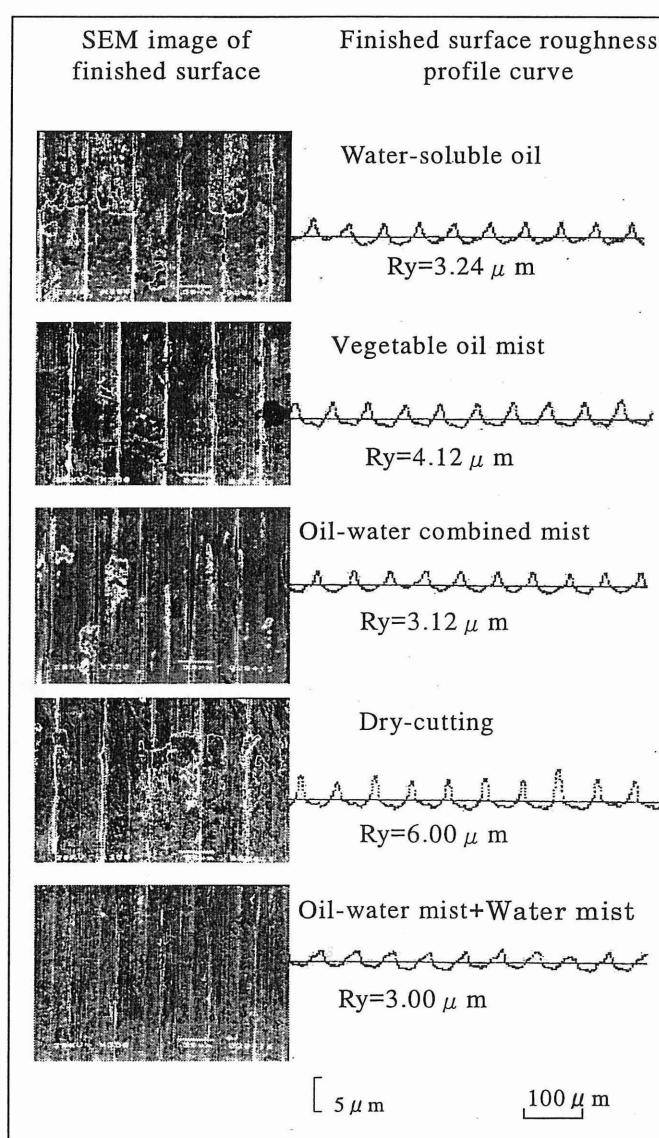


Fig.5-13 SEM image of finished surface and roughness profile curve

次に、仕上げ面の断面粗さ曲線（仕上げ面の送り方向の粗さ曲線）の例を Fig.5-13 に示す。複合ミスト及び複合ミスト+水ミストを使用した仕上げ面粗さ曲線は、切れ刃の転写が比較的正確に行なわれていた。一方、植物性切削油ミスト及び乾式での場合は刃先の輪郭が正しく転写されておらず、特に、工作物が盛り上がり、仕上げ面の粗さが大きくなっていると考えられる。

2. 冷却と潤滑条件による付着物の生成状態

仕上げ面の表面粗さ曲線と仕上げ面の SEM 写真を分析した結果、水ミストの存在が仕上げ面に対する重要な役割を持つことが分かった。そこで、各切削方式における切削後の工具刃先を SEM 観察してみた。その一例を Fig.5-14 に示す ($V = 150 \text{ m/min}$, $f = 0.2 \text{ mm/rev}$, $t = 0.2 \text{ mm}$)。写真は工具の逃げ面方向から刃先を観察したものである。

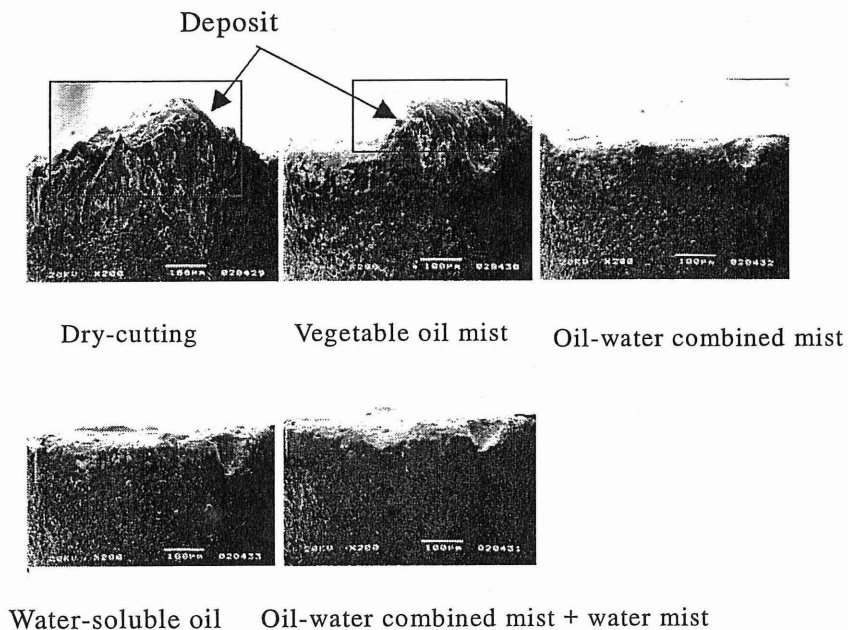


Fig.5-14 SEM images of deposit formed on the cutting edge

SEM 写真に示すように、乾式及び植物性切削油ミストのみの加工条件下で使用した工具の刃先に、溶着物の発生が認められる。複合ミスト及び複合ミスト+水ミストを使用した場合には、溶着物が見られなかった。一方この溶着物の発生原因は、一般的には切削温度の上昇により、切りくずと工具の金属原子が親和力によって互いに凝着し、堆積したと考えられる³⁴⁾。即ち、一般に溶着物の発生には強い凝着と、とりわけ高温が必要とされるが、本実験では乾式切削の場合にはこの条件を完全に満していると思われる。一方、植物性切削油ミストのみの加工では潤滑性はある程度確保されるものの、冷却効果が小さいため刃先は高温となって結局溶着物が発生したと考えられる。これが被削材の盛り上がりとむしれを引き起こし、仕上げ面を劣化させた原因となる。これに対して複合ミスト及び複合ミスト+水ミスト加工方式では水ミストによる冷却作用のため刃先温度が低下するため、強い凝着が起こりにくく、結果として、溶着物の発生が抑制されたと考えられる。水溶性切削液を使用した場合は、前述のように切削点そのものの潤滑や冷却は不十分又は不安定なため、一時的にむしれが起こり、Fig.5-13 のような大きな表面粗さの変動を示していると考えられる。

5.5.5 切削温度の測定

前述の SUS304 被削材に対して、切削熱の影響として見逃してはならないことは、工具及び工作物の温度上昇によって溶着物が発生し、加工精度を低下させていることである。また、工具のすくい面の温度が通常より数十度上昇するだけで工具寿命が大幅に低下する場合があるともいわれている³⁵⁾。水ミストの供給によって切削温度を多少でも低下できればその効果

は非常に大きいと考えられる。そこで本実験では工具刃先近傍の平均的な温度を測定することとした。

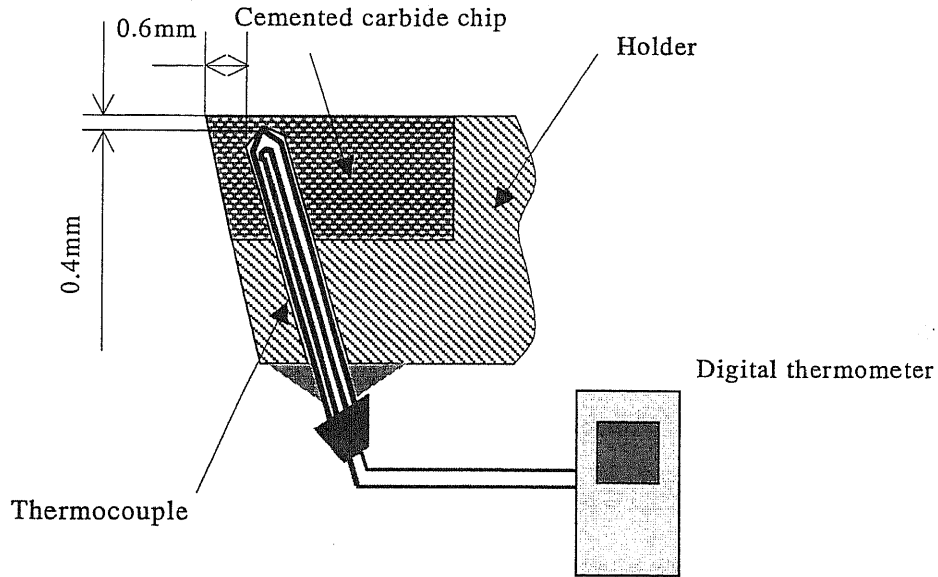


Fig.5-15 The temperature of tool was measured by a thermocouple

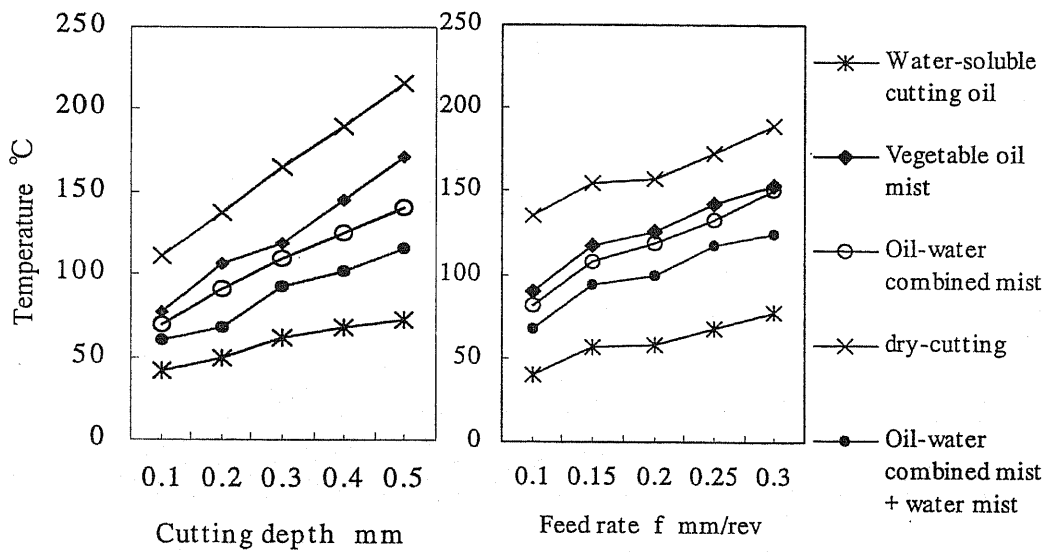


Fig.5-16 The temperature of tool

工具温度の測定には、熱電対を工具に埋め込んで測定する方法採用した。熱電対はバイト裏面から小穴をあけて挿入し、工具すくい面から 0.4mm、刃先から約 0.6mm のところに取り付けた。概略を Fig.5-15 に、また、測定結果を Fig.5-16 に示す。

いずれの図も切削温度の高い順に乾式、油ミスト、複合ミスト、複合ミスト+水ミスト、水溶性切削油使用のものとなっている。特に、切り込みに対する実験では水供給の有無及び多少による刃先の温度の差は顕著であった。水ミストの冷却効果が充分表われていると思われる。本実験は刃先近傍の平均温度測定を行なったものであり、工具と被削材の接触部そのものの温度を示しているものではない。にもかかわらず Fig.5-15 に示す程の温度変化があることを考えれば、水ミスト使用の効果は接触部では相当に大きいと考えられる。

5.5.6 加工精度に及ぼす切削熱の影響

本研究での旋盤加工において、切削中になされる仕事はせん断面におけるせん断変形、工具と切りくず及び加工物との摩擦によりほとんど熱に変換される。この熱は工具、切りくず及び加工物の温度上昇をもたらす。工具刃先温度の上昇は工具の摩耗及び加工物仕上げ面性状に大きな影響を及ぼすことが以上の実験で検討された。しかし、実際の製造加工中、切削熱による加工物の熱膨張によって加工精度が悪くなることを同様に重視しなければならない。そこで、本実験は旋盤加工の内径加工において、冷却条件及び潤滑条件の違いによる加工寸法精度に及ぼす影響を調べた。

1. 実験方法

- (1) 旋削の内径加工において加工直後の寸法と加工後加工物温度が室温になった後の寸法を比較する。
- (2) 実験条件を Table5-4 に示す。

Table 5-4 Test conditions

Cutting machine	TSUGAMI PAN-3 automatic lathe		
Cooling and lubrication system	Oil-water combined mist supply system OWMIST-CDC I		
Test material	S45C (carbon steel) $\phi 69 \times \phi 31 \times L45$ mm		
Tool	Coated carbide tool T725X (TOSHIBA)		
Cutting speed V (m/min)	$V=70,110,150,190$		
Feed rate f (mm/rev)	$f=0.15$		
Cutting depth t (mm)	$t=0.3$		
Cooling and lubrication conditions		Oil flow rate (ml/min)	Water flow rate (ml/min)
	1. Dry-cutting	0	0
	2. Vegetable oil mist	17	0
	3. Oil-water combined mist 1	17	150
	4. Oil-water combined mist 2	17	300
Vegetable cutting oil	Bluebe LB-1(LB-1, ITW FRUID PRODUCTS GROUP)		
Coaxial twin tube nozzle	Internal diameter $d=2.5$ mm External diameter $D=6.5$ mm		

2. 実験結果

実験結果を Fig.5-17 に示す。

縦軸は試料の内径変化量である。ただし、 D_{11} は加工直後試料内径の寸法であり、 D_{12} は切削試料を 1 日放置して室温に到達後の試料内径の寸法である。横軸は切削速度である。

本実験では低速加工から高速加工まで加工速度を変化して、加工速度の変化による切削熱による試料内径加工寸法精度を調べた。実験の結果は Fig.5-17 に示すように、加工速度 70m/min の低速加工では、乾式加工する場合の試料内径の変化量が最大であり、複合ミスト供給による加工法 2 (水の使用量 300 ml/min) で加工した試料内径の変化量が最小である。また、低速加工する場合、複合ミスト供給による加工法 1 (水の使用量 150 ml/min) で加工した試料内径の変化量とオイルミスト供給による加工法で加工した試料内径の変化量はほぼ同程度であった。しかし、加工速度を低速加工から高速加工に変化すると、乾式加工法とオイルミスト供給による加工法で加工した試料内径の変化量は激しく増加することが分かった。高速加工においても複合ミスト供給による加工法 2 (水の使用量 300 ml/min) で加工した試料内径の変化量が最小であることも分かった。

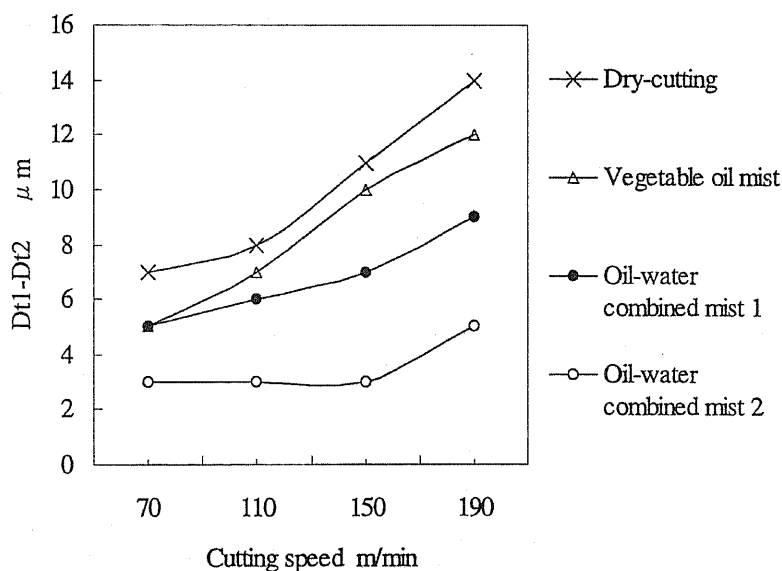


Fig.5-17 Getting under control thermal expansion by supplying oil-water combined mist

以上、水ミストを併用する複合ミスト供給による加工法を用いることで加工寸法精度を安定化することができた。

5.6 結 言

本研究では連続切削である旋削に対してセミドライ加工法の適用を検討した。単なるミスト加工法では冷却性が不十分となるという問題点を克服するため、水をミスト状にして切削油のミストと同時に切削点に供給する複合ミスト供給法を提案した。実験で得られた複合ミスト供給法の結果を以下にまとめる

(1) 連続切削のため切削点に潤滑油を供給するのが困難であると思われる旋削でも有効に作用し、仕上げ面の精度や工具の寿命が改善できた。

(2) 水ミストの使用により、切削温度の低下や良好な表面性状が得られた。よって、水ミストの使用は十分な冷却効果をもたらすと考えられる。

(3) 複合ミスト供給法を利用して、冷却効果を高めたい場合には、水ミストの割合が多くなるよう供給量を調整し、潤滑効果を高めたい場合には、植物性切削油ミストの割合が多くなるよう調整することにより、その加工に最適な条件を与えることができる。

第6章 複合ミスト供給法によるアルミニウムホイールの切削加工

——複合ミスト加工法の実用化——

6.1 緒言

エネルギー危機が世界中で呼ばれる中、石油燃料を使う自動車の使用においても省エネルギーは大きな問題となっている。自動車における燃料消費を消滅するためには、効率的なエンジンの開発、車体の空気抵抗の低減、軽量化などの手法が有効とされている。

こうした中、全世界で近年の環境問題及び省エネルギーへの取り組みの主な一環として、自動車の軽量化が進められている。特に車輛用ホイールは最終駆動軸に直結するため、省エネルギーへの効果が大きく、鉄系材料からアルミニウム合金に積極的に材質転換されつつある。一般的にアルミニウム合金製ホイール（以下アルミニウムホイールと呼ぶ）製品は鋳造、切削、塗装の加工過程を経て、商品になることが多い。本研究はこのうちアルミニウムホイールの切削加工を取り上げ、環境に優しいセミドライ切削法である複合ミスト供給による切削加工の可能性を探ることを目的としている。

6.2 大量切削油を使用した従来加工法

6.2.1 生産現状

近年のアルミニウムホイール生産量の変化を Fig.6-1 に示す。

軽金属協会、軽合金車輪統計によると、日本国内の乗用車用アルミニウムホイールの生産量は Fig.6-1 に示されるように 20 年間で生産量は 3 倍以上に増加し、今後も続けて生産量が拡大する見通しである³⁶⁾。

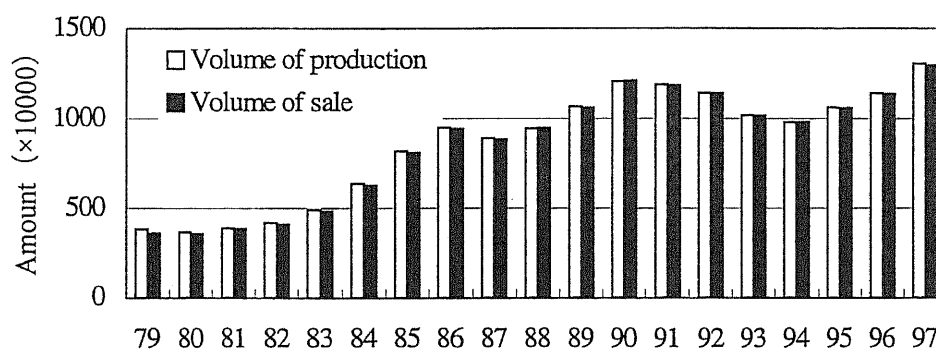


Fig.6-1 The production of aluminum alloy wheel at present situation

6.2.2 アルミニウムホイール用材料

本研究における被削材は二輪車用ホイールであり、材質は AC4C-T6 鋳物用アルミニウム合金である。その組織成分を Table 6-1 に示す。

Table 6-1 Ingredient of aluminum alloy AC4C-T6 Unit %

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn
0.2	6.5~7.5	0.3~7.5	0.1	0.17	0.1
Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
0.05	0.2	0.05	0.08	0.05	Other

アルミニウム合金の中で、銅、マグネシウムまたは亜鉛を含んだアルミニウム合金は機械加工性が比較的良いとされる。即ち、切削が容易であり、切りくずを処理しやすく、仕上げ面の品位がよく、工具の寿命が長いとい

うことである。従って、本実験に使用されたアルミニウム合金 AC4C-T6 も他の合金に比較して、機械加工性がよいということになっている³⁷⁾。しかし、自動車のホイールに使用されるアルミニウム合金の場合は、機械強度を高くするために、6.5%~7.5%ケイ素 (Si) が素材の中に含まれている。そのため、工具の摩耗を促進し、工具寿命は必ずしも長くないというのが現状である。合わせて、アルミニウムホイールの切削においては 6.2.4 に示すように切りくずとして除去される量が大いいため、工具摩耗は決して無視できないものとなっている。また、アルミニウム合金はやわらかいため、工具へ溶着することがある。これによって、仕上げ面の悪化が起こる場合もある。その他、材料の熱処理条件が違くと、アルミニウム合金の機械加工性が大きく変化する²¹⁾²²⁾。

6.2.3 加工条件

Figure 6-2 に示すように、切削条件は工具番号及び加工位置により違うため、一つの製品の切削面 A~B の仕上げ加工工具をこの実験考察対象として検討する。切削条件を Table6-2 に示す。

Table 6-2 Test conditions

Cutting machine	OKUMA automatic lathe
Cutting workpiece	Aluminum wheel 54111-48E00(HONDA)
Test material	Aluminum alloy AC4C-T6
Tool	Carbide tool K10(SAFETY:VCGT13030821)
Cutting speed V (m/min)	$V=1500$ (N=1000 r.p.m)
Feed rate f (mm/rev)	$f=0.2$
Cutting depth t (mm)	$t=0.2$
Water-soluble cutting oil	Highchip SX580 (Taiyu Oil Co., Ltd.)

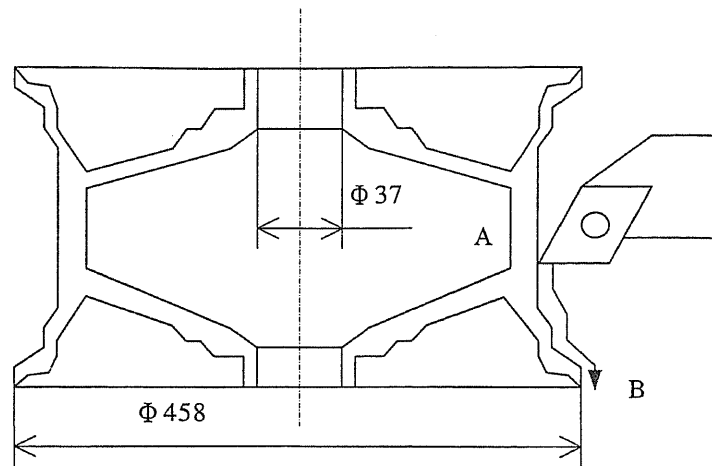


Fig.6-2 Figure of a product

6.2.4 切削トラブル

アルミニウムホイール切削中に発生する切削トラブルを以下に示す。

- (1) 工具の溶着：溶着が大きく発生するため、仕上げ面が悪くなり、工具寿命が極端に短くなる。
- (2) 被削材中のケイ素が切削中に切削油に混入し、切削油を劣化させる。
- (3) 鋳造アルミニウムホイールの製造過程における切りくずの発生率を、ある企業で生産している 10 種類のホイールについて調べた結果、Fig.6-3 に示すように、一番多い場合では素材の 40%を占めている。通常の水溶性切削油を使用した加工方法ではその大量の切りくずが切削油に付着したままの状態では排出されてしまう。その結果、年間使用切削油の 30%が切りくずと一緒に排出され、産業廃棄物として処理されなければならない。そのため、アルミニウムホイール加工のドライ、セミドライ加工化がアルミニウムホイール加工業界に強く望まれている²⁷⁾。

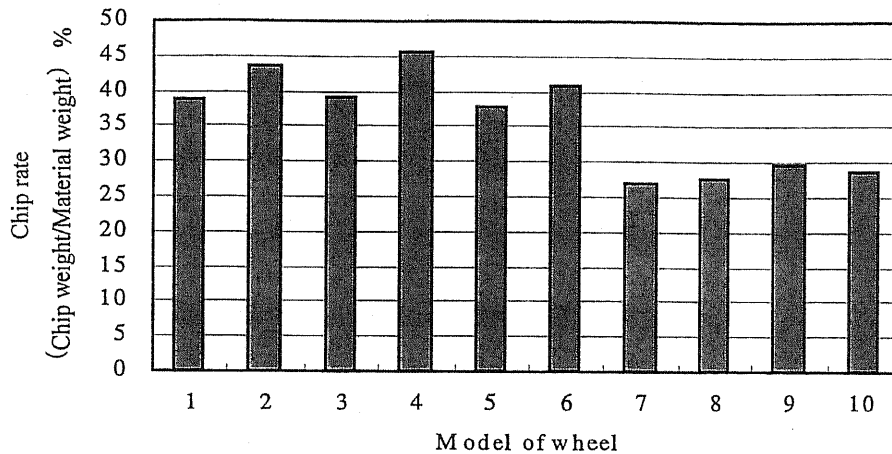


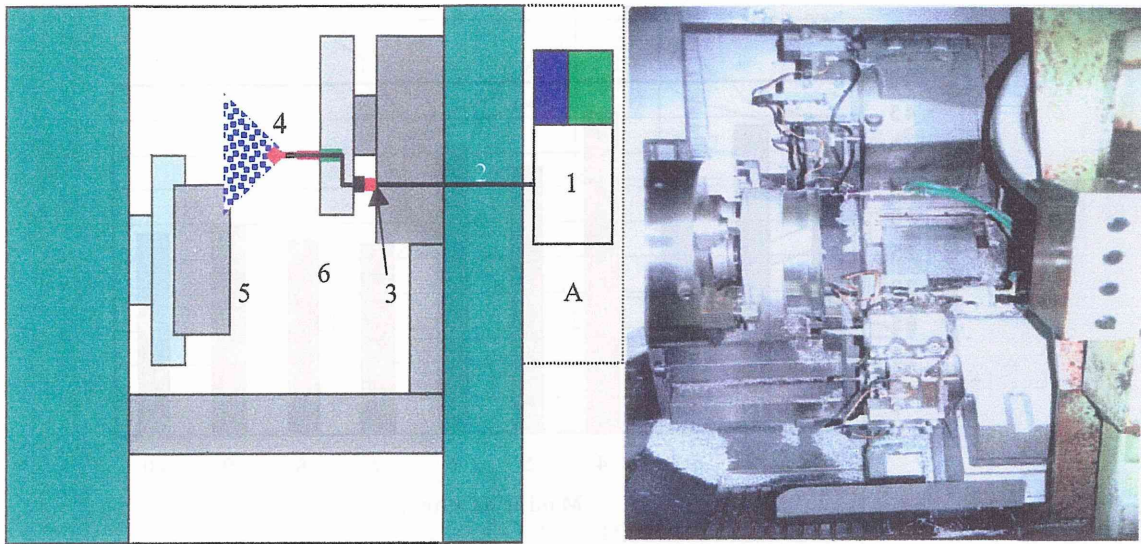
Fig.6-3 Chip rate

(4) 水溶性切削油を使用することにより、機械部分の錆び及び電気部分の異常発生など工作機械の故障が多い。また、漏れた切削油や、加工中高速回転のワークと当たって霧になった切削油は、作業環境を悪化させている。

6.3 複合ミスト供給による加工法

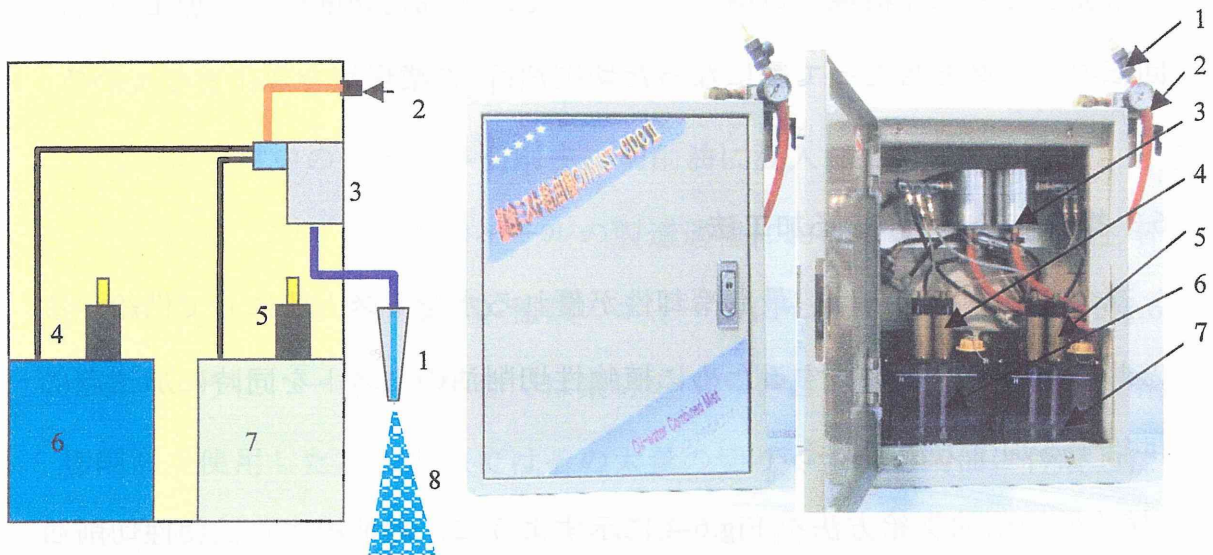
複合ミスト加工法は、最も冷却性が優れる水をミスト状にして供給すると共に、潤滑性を確保するために植物性切削油のミストを同時に加工点に供給する加工方法である。

植物性切削油供給方法を Fig.6-4 に示すように、給油機から植物性切削油及び水を刃物台のノズルに供給する。植物性切削油と水の混合物がノズルから刃先に噴射され、切削加工時の潤滑及び冷却を行なう。



①Oil-water mist device②Pipe③Connection device④Nozzle⑤ Work⑥Tool

Fig.6-4 Schematic illustration of cutting method and test equipment



①Nozzle②Compressed air entrance③Oil-water combined mist outbreak container
④Oil supply pump⑤Water supply pump⑥Oil tank⑦Water tank

Fig.6-5 Oil-water combined mist machine OWMIST-CDC II

6.3.1 複合ミスト加工装置

複合ミスト装置の給油機を Fig.6-5 に示す. 植物性切削油と水は別々のタンクからポンプを使ってミスト発生器に供給,混合して、チューブを通して、ノズルに供給する. ミスト発生室を利用することにより植物性切削油及び冷却水を微粒子化する. 圧縮空気と植物性切削油（または冷却水）の混合物はミスト発生室で混合され、ノズルの噴出口でもう一度微粒化する³¹⁾.

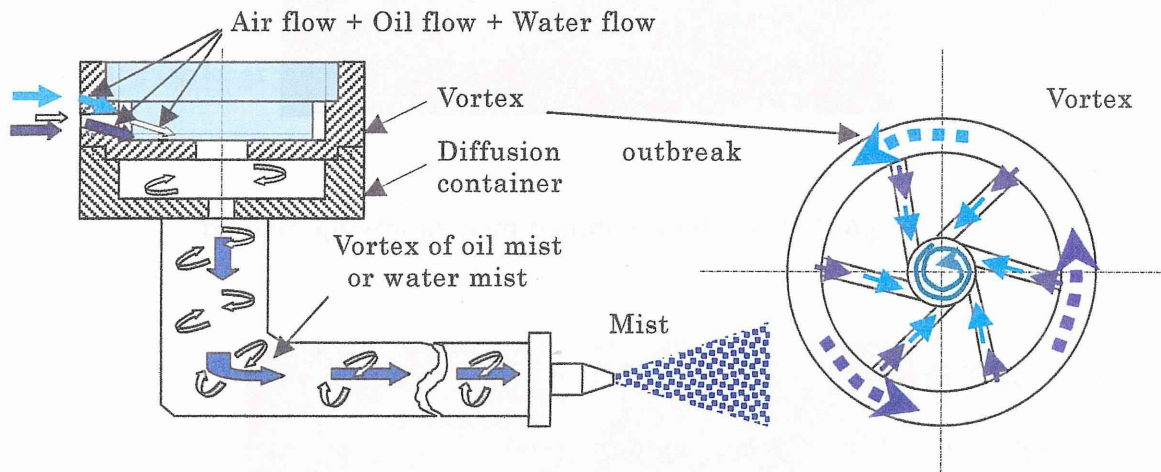


Fig.6-6 Vortex generation and supplying mist principle

6.3.2 過流形成原理によるミスト発生及びノズルへの搬送過程

Figure 6-6 に示すように、複合ミスト装置はミスト発生室を利用して植物性切削油及び水を微粒子にして工具まで送る. 圧縮空気と植物油及び水の混合物はミスト発生室に過流を発生させ、混合、拡散する. 過流の渦は圧縮空気の移動に結びついた運動であるから気流と共に移動する. 渦流は植物油と水をエアー混合した粒子をノズルまで運ぶ. ノズルの噴出口で、もう一度微粒化し刃先に供給する. ノズルは 6mm の銅パイプを利用して工具のすくい面及び逃げ面に供給する³¹⁾. 切削点への供給の様

利用して工具のすくい面及び逃げ面に供給する³¹⁾。切削点への供給の様子を Fig.6-7 に示す。

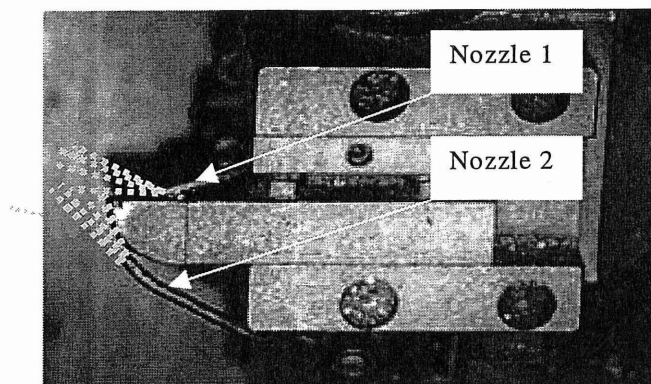


Fig.6-7 Oil-water combined mist supplying method

6.3.3 加工条件

本実験で用いた加工条件を以下に示す。

1. 植物性切削油：本実験は企業の量産製造ラインで実験を行なうために、生産コストを抑えるように安価な植物性切削油を使用することとした。コストと油剤の性質を検討した上で料理に使われる市販食用フライ油である植物油を使用した。使用量はノズル一本当たり 12ml/hr である。そのフライ油の諸物性を Table 6-3 に示す。

Table6-3 Property of fried food oil for the experiment

Show	gravity	g/cm^3 (20°C)	Firing point °C
Lemon yellow		0.92	318
Viscosity mm^2/s (40°C)	Current Point	°C	Water-soluble
35.8		- 20	No

2. 冷却液：水道水を使用し、供給量はノズル一本当たり 75ml/hr である。
3. 圧縮空気：供給量はノズル一本当たり 100NL/min である。
4. 供給方法：工具逃げ面とすくい面両方向に供給する (Fig.6-6 に示す)。

6.4 結果及び考察

6.4.1 工具の溶着及び工具寿命

アルミニウム合金は鋼に比べて熱伝導率が良い、耐力が低い、硬さが低いなどの特性があるため、切削性に有利と言えるが、実際には加工性が良くないことがある。その理由はアルミニウム合金が軟らかく粘いため、工具の刃先に溶着物を発生するためである。

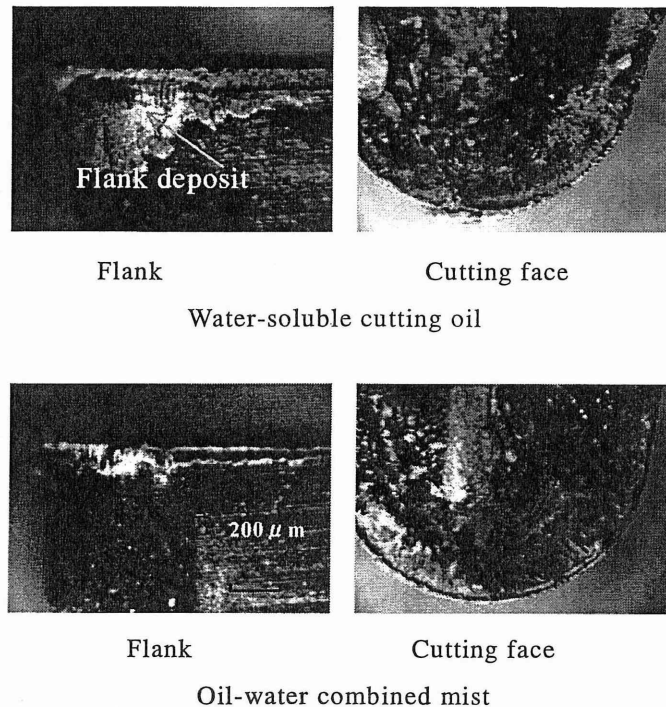


Fig.6-8 View of used tool

Figure 6-2 に示すような製品の A～B 部を仕上げ加工した工具を例として、水溶性切削油加工と複合ミスト加工を実施した結果を考察する。工具刃先の拡大写真を Fig.6-8 に示す（加工数量 80 本の際の工具摩耗と溶着状況）。

Figure6-8 に示すように水溶性切削油を使用した加工では、工具の逃げ面及びすくい面に大きな溶着物が発生した。また、逃げ面の摩耗量は複合ミストを使用した場合、工具より水溶性切削油を使用した工具の方が大きい。水溶性切削油を使用した工具の逃げ面に溶着物が付着したため、仕上げ面は正常な仕上げ面より白くなり、光沢もなくなった。仕上げられた工作物が寸法や仕上げ面粗さなどについての所定の特性を失う前に工具は、交換されねばならない。工具交換までの切削時間を工具寿命と呼ぶ³⁷⁾。工具の摩耗量が少ない状態であっても、製品品質要求のため工具を交換しなければならない場合もある。従って、溶着が発生した場合は製品品質が低下するため、工具の寿命が短い。それに比べて、複合ミストを使用した工具は摩耗があっても、仕上げ面の品質を保証できるため、切削加工を続けることができる。すなわち、工具の寿命は水溶性切削油を使用した工具の寿命より長くなった。

また、被削材アルミニウムホイールの直径が大きい上に高速回転するために、遠心力が大きく、強い気流も発生するため、切削点に切削油をかけてもその大部分は飛散する。切削速度 $V=1500\text{m/min}$ の高速加工では普通給油法の場合、切削油が工具と被削材の間への侵入はほとんど期待できず、どの程度の潤滑効果があるか疑問である。したがって水溶性切削油を高速切削中のワークにかける場合、ワーク全体を冷やすこととしては非常に効果があるが、切削点の潤滑効果は少ないかまたはほとんどないと思われる。

一方、潤滑性が高い植物性切削油をミスト状にして、一定圧力（約 2kgf/cm^2 ）の圧縮空気と共に切削点に供給する場合、ミストを供給するノズルが刃先に近く、一方の気流となっているため、植物性切削油の微粒子は工具の刃先に浸透できるようになり、工具の切れ味が良くなり、溶着物が少なくなると考えられる。本実験の複合ミスト加工法は最も冷却性が優れる水を微粒子にして、植物性切削油のミストと共に切削点に供給して、水の気化熱等により切削点を十分冷却した上に、植物性切削油の効果を確認しようとする加工法である。水を蒸発させるのに要する熱量は 40.66kJ/mol と非常に大きく、したがって、水と植物性切削油を同時に供給する複合ミスト加工は潤滑性とあわせてより効果的な冷却を行うことができる。特に高速の噴霧気流を切削点にかけたときにその効果は大きいと考えられる⁹⁾。

6.4.2 仕上げ面の性状

潤滑油の供給方法の違いより仕上げ面の性状が異なる。この違いを Fig.6-9 に示す。

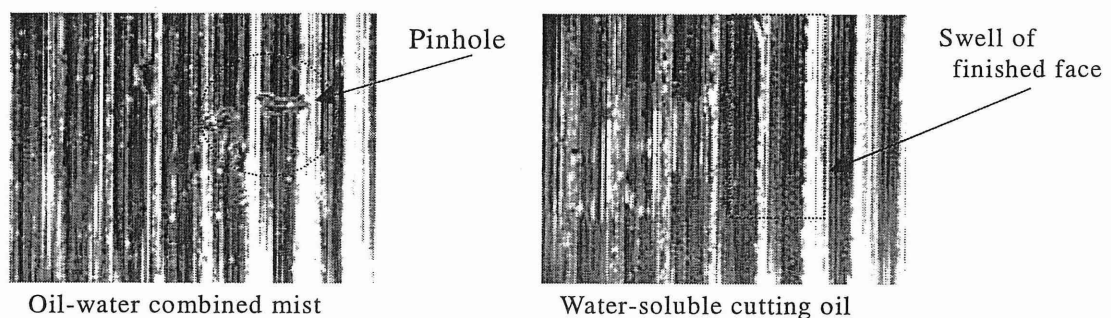


Fig.6-9 Finished surface

Figure 6-8に示すように、水溶性切削油を使用する場合、工具の刃先に溶着物が発生した。溶着物は発生してから成長し、脱落するまで、形が不規則で、不安定な状態である。しかも時間とともに変動するので、Fig.6-9に示すように、仕上げ面粗さが大きくなり、むしろ仕上げ面になる。

一方、被加工材のアルミニウムホイールは鋳物であるため、材料の中に若干のピンホールが存在する。複合ミスト加工する場合、工具の切れ味が良くなるため、Fig.6-9に示すように、被削材表面にピンホールが観察された。一方、水溶性切削油を使用した場合には、仕上げ面にピンホールを見付けられなかった。これは水溶性切削油を使用した場合、工具の切れ味が悪く、被削材表面のピンホールが押しつぶされたためと思われる。

6.4.3 複合ミスト供給による加工精度向上

ある生産ラインでのアルミニウムホイールの内径不良について、従来未解決の課題があった。その原因は、

- (1) 加工公差が 0.025mm で、寸法要求が厳しい。
- (2) 内径加工の場合、切りくずがつまってしまうと切削油を刃先に供給できなくなり、その結果、溶着物が成長し、内径不良が発生する。
- (3) 内径加工の切削速度が遅いため、工具の溶着が発生しやすい。例えば 37mm の内径を加工する場合、回転数 1000rpm でも、切削速度は 116m/min にすぎない。

内径加工に複合ミスト加工法を応用したところ、潤滑条件を改善したため、溶着物の発生が抑えられ、加工不良も少なくなった。1998年9月に行った従来法から複合ミスト加工方法への変更の結果、内径不良が約 1%

から 0 へと減少した。その実績を Fig.6-10 に示す。

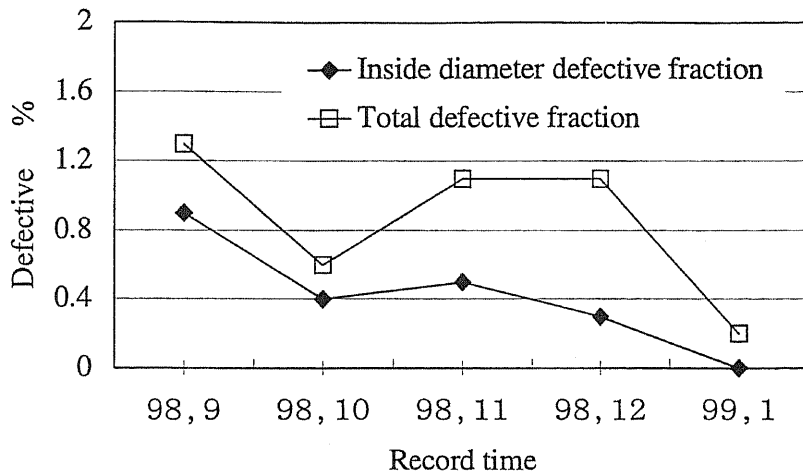


Fig.6-10 Results of processing with oil-water combined mist

6.4.4 作業の安全性向上

加工に使用した植物性切削油は植物性油で、有害物、危険物を一切含有しないため、作業者に対して安全である。しかし、植物性切削油は可燃性液体であるため、ミスト状にした場合、一定圧力に温度の条件下では爆発性がある。このため、単一植物油のミスト加工が完全に安全とは言えない。さらに、植物油の気化熱は水の気化熱より小さいため、少量の油剤では大量の切削熱を取り切れない。また、高速切削の場合切削温度が高いため、植物性切削油は潤滑性を失う。本研究で行ったように水と植物性切削油のミストと共に切削点に供給すれば、切削点を十分冷却した上に、植物性切削油の効果が確保できる。すなわち、水と植物性切削油のミストは工具、被削材、切りくずと接触して、その大部分は蒸発し、その際切削熱が除去される。したがって、複合ミスト加工方法は切削点の高温化を防ぐ上に、

加工の安全性が確保できる。かえて爆発の危険性も大幅に減少できる。

6.4.5 省エネルギー、清潔生産実現

複合ミスト加工法は省エネルギー、作業環境改善の点でも以下のような点で優れている。

1. 複合ミスト加工方法は最小油量給油方式を利用して工具刃先に植物性切削油を供給する。その最小量潤滑油の潤滑性を確保するために、少量の水をミスト状にして共に供給する。従来の切削油を大量使用した加工方法より資源を無駄にしない。21世紀に向かってますます深刻化している資源危機としては、より良い選択であるだろう。

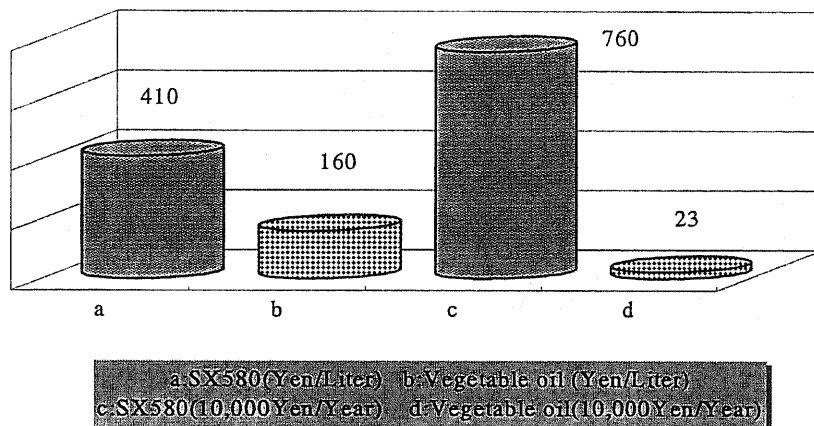
2. 従来のミスト加工より複合ミスト加工は機械の汚れが減少する。複合ミスト加工の場合は、ミスト状にした植物性切削油の粒子とミスト状にした水の粒子と結合した粒子が $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ と比較的大きいため、空中で浮遊しにくく、機械内部に付着した油は油ミストのみの加工法より少ない。

3. 工作機械周辺の切削油によるべたつきがなくなり、工場の作業環境が良くなる。

4. 切りくずは乾いているため、収集と運搬がしやすくなる。また、切りくずの直接再溶解が可能になる。

5. 切削油の購入費用が下がる。管理及び廃油処理に関するコストが不要になる。ミスト切削油において、現在多く使われる油は植物性切削油である。市販の植物性切削油は価格が高いため、業界では切削油のコストダウンが望まれている。Fig.6-11 に示すように、実験を行った会社のアルミニ

ウムホイール生産ラインを全て水溶性クーラントによる加工方法からミスト加工方法に変更した場合、一年間で切削油購入費用分だけでも730万円のコストダウンを実現できる。本研究は植物性油である食用油が高い潤滑効果のあることを示し、安価な食用油を切削に用いることの妥当性を示している。



Water-soluble cut oil consumption : 7600 thousand Yen/year

Vegetable cut oil consumption : 230 thousand Yen/year

Fig.6-11 Cost reduction

- 植物性切削油は自然分解性があり，工場付近の地下水を汚染せず，清潔生産が実現できる。

6.5 複合ミスト加工法の問題点

以上，複合ミスト加工法の利点を数多く挙げたが，一方でいくつかの問題点も有している。以下に実加工で現れた問題点を示す。

1. 切りくずの処理：加工中の切りくずが仕上げ面と干渉することにより傷を発生する場合がある。この問題は顧客に要求された高光沢のアルミニウムホイールのデザイン面に対して、大きな課題である。
2. 工作機械の汚れの問題がある。Fig.6-12 に示すように工作機械の摺動面に細かい切りくずが付着することがある。

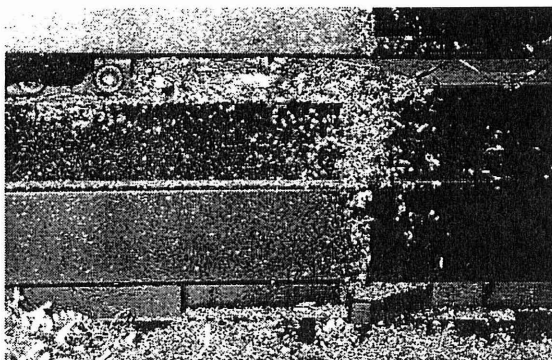
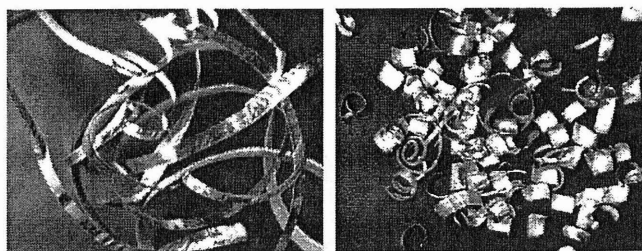


Fig.6-12 Dirt of the machine guide surface



Before revising tool After revising tool

Fig.6-13 Shape of a chip

3. 鋳鉄鋳包み部品を加工する時、鋳鉄の切りくずが微粉状となり、仕上げ面に付着することがある。

6.6 今後の方針

以上、複合ミスト給油法の実用面の実績及び問題点を検討した。複合ミスト加工によるデメリットを解消する方法を検討する必要がある。現在、工場生産ラインで複合ミスト加工法を実施すると共に、その加工方法により生じた問題点の対策を検討している。その一例を説明する。大量切削油を使用した切削ではワークの全体が切削油に濡れているため、加工中に飛

び去る切りくずが仕上げ面とあたった際に、その衝突が緩和される。複合ミスト供給する加工する場合、その衝撃により仕上げ面に傷が発生する。対策として、チップブレーカを修正し、Fig.6-13 に示すように、切りくずを短くし、エアーで飛散させる試みを行っている。今後さらに各問題点の解決を図り、複合ミスト加工法が広く社会に受け入れられるよう努力する所存である。

第7章 結論

本研究では、まず冷風冷却による加工に注目し、難削材と言われるステンレス鋼 SUS430F 及び高ケイ素アルミニウム合金の旋削を取り上げ、その切削加工トラブルを解決するため、冷風及び切削油が切削状態に及ぼす効果を検討した。最適な切削条件を探すことを通じて加工性の改善を図るとともに、切削油の大量使用による環境問題の解決を図るため、一般に使われた切削方法から、環境に優しいとされる冷風切削方法に切り替えることの可能性を検討した。

次に切削油のミスト供給による加工について検討した。現在の切削油のミスト供給加工では少量の植物性切削油が使用されることが多いが、少量の油剤では大量の切削熱を取り切れない。このため、高速切削の場合切削温度が高くなって植物性切削油の潤滑性を失って、工具寿命が短くなる欠点がある。本実験はこの問題を克服するため、複合ミスト供給による加工法を提唱した。複合ミスト供給による加工法とは、最も冷却性が優れる水をミスト状にして、潤滑性を確保するための植物性切削油のミストと共に加工点に供給する加工方法である。複合ミスト供給による加工法の実験では、ステンレス鋼 SUS304 の旋削を取り上げ、工具摩耗実験、仕上げ面精度実験及び切削温度実験を行なった。

以上の冷風冷却による切削加工実験及び複合ミスト供給による切削加工実験から得られた結論を要約する。

1. ステンレス鋼の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果

冷風冷却と共に、植物性切削油をごく微量加工点に供給した場合

- (1) 切削温度が下降するため、工具寿命が増加した。
- (2) 植物性切削油が工具と仕上げ面の間に浸透するため、凝着物が減少し、仕上げ面粗さは良くなった。
- (3) 植物性切削油を工具の逃げ面に供給すると、すくい面及び逃げ面に供給した場合とほぼ同じ程度の効果があることが認められる。
- (4) 植物性切削油は被加工表面に油膜を生成するため、工作物の錆止め効果を得ることができる。

2. 高ケイ素アルミニウム合金の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果

冷風冷却と共に、植物性切削油をごく微量加工点に供給した場合

- (1) 高ケイ素アルミニウム合金を -30°C の冷風とミスト状の切削油を併用することにより、仕上げ面の精度や工具の摩耗が改善できた。
- (2) 切削油をミスト状にして使用することによりケイ素の循環を防ぎ工具摩耗を抑えることができた。
- (3) -30°C 冷風の効果で被削材の熱軟化を抑えることにより高ケイ素アルミニウム合金の仕上げ面の精度を向上することができた。
- (4) 空気と共にミスト状の切削油を吹きかけることにより、工具の摩耗を減少することができた。
- (5) 連続切削のため切削点に潤滑油をかけるのが困難である旋削でも有効に切削することができた。

3. 複合ミスト供給法による旋削加工の研究

水をミスト状にして切削油のミストと同時に切削点に供給する複合ミスト供給法を使用した場合

- (1) 連続切削のため切削点に潤滑油を供給するのが困難であると思われ

- る旋削でも有効に作用し、仕上げ面の精度や工具の摩耗が改善できた。
- (2) 水ミストの使用により、切削温度の低下や良好な表面性状が得られた。よって、水ミストの使用は十分な冷却効果をもたらすと考えられる。
- (3) 複合ミスト供給法を利用して、冷却効果を高めたい場合には、複合ミストにおける水ミストの割合が多くなるよう供給量を調整し、潤滑効果を高めたい場合には、植物性切削油ミストの割合が多くなるよう調整することにより、その加工に最適な条件を与えることができた。

4. 複合ミスト供給法によるアルミニウムホイールの切削加工

実用化について

- (1) 従来の加工法を変えて複合ミスト加工法は有効に作用し、仕上げ面の精度や工具の摩耗が改善できた。
- (2) 内径加工に複合ミスト加工法を応用した場合、潤滑条件が改善されたため、溶着物の発生が抑えられ、加工不良も少なくなった。
- (3) 加工に使用した植物性切削油は植物性油で、有害物、危険物を一切含有しないため、作業者に対して安全である。
- (4) 工作機械周辺の切削油によるべたつきがなくなり、工場の作業環境が良くなる上、省エネルギー、清潔生産を実現した。
- (5) 切りくずは乾いているため、収集と運搬がしやすくなった。また、切りくずの再溶解が直接可能になった。
- (6) 切削油の購入費用が下がる。管理及び廃油処理に関するコストが不要になった。
- (7) 植物性切削油の自然分解性があり、工場付近の地下水を汚染しない。また、複合ミスト供給による加工法を、実用化するため、加工法、切削油、

ミスト供給ノズル及び複合ミスト発生供給装置を検討した。完成した複合ミスト発生供給装置を利用して、ある工場のアルミホイール生産ラインで実際に1年間使用して、十分な効果を得た。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、御指導、御助言をしていただいた鈴木康夫教授並びに論文作成に当たり御指導下さいました中村保教授、加茂進助教授、酒井克彦助教授に深く感謝の意を表します。

本研究を行うに当たり、実験材料と実験装置を提供して頂いた株式会社戸塚天竜製作所内山秀彦氏及び種々の御協力頂いた同社の皆様に感謝を表する。

さらに、実験に当たり御協力下さいました平尾正志技官、博士後期課程の永禮哲生氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1. 稻崎一郎：ドライ・セミドライ切削加工，機械技術，1999，1
2. 垣野義昭：切削加工技術と工作機械の最新動向，機械と工具，1999，4
3. 日本機械学会：生産加工の原理，日刊工業新聞社，1998，1
4. 中山一雄：切削加工論，コロナ社，1978，11
5. 竹山秀彦：切削加工，丸善株式会社，1980，3
6. 隈部淳一郎：表面加工，実教出版社株式会社 1973，8
7. (株)工業調査会：切削加工のトラブルシューティング，技術資料，1996
8. (株)工業調査会：データでみる切削加工の最先端技術，技術資料，1992
9. 中山康夫，広井進：切削油剤と研削油剤，1982，6
10. 竹山秀彦：切削・研削油剤，(株)工業調査会，1967
11. 中村貞行：ステンレス鋼とは何が，機械と工具，1992,9
12. 坂手彰：ステンレスの機械的性質と切削／研削特性，機械技術，1993,7
13. 田村裕保：ステンレス加工と切削／研削油剤，機械技術，1993,7
14. (株)大同特殊鋼：ステンレス鋼の特性と選び方，技術資料，No,SD8204c
15. 横川和彦：ISO14000 取得のための冷風切削研削技術，機械技術，1996,8
16. 横川和彦：公害防止のため研削油剤を用いない CBN 冷風研削技術の研究，砥粒加工学会研究会，97,11
17. 葉山稔樹，山本修司：自動車部品における冷風加工の取り組み，機械と工具，1999，1
18. 井上正之：セミドライ加工（極微量切削油）の方法－高潤滑切削油ブルーベとスピンドルスルー用ミスト発生装置，機械と工具，1997,9

19. 井上正之：ブルーベ最小潤滑システムによる MQL 加工，機会と工具，1998， 9
20. 谷川義博， 宮沢伸一：切削液のジェット注入による工具寿命の向上，精密工学会誌， 1997,4
21. 軽金属協会：アルミニウム技術便覧，軽金属出版， 1985， 6
22. 軽金属協会：アルミニウム組織と性質，軽金属出版， 1991， 11
23. (株)京セラ：セラチップ切削工具カタログ 97～98
24. 中村雅晴：セミドライ加工用「マイクロジェット」の使い方，機械と工具， 1998， 97
25. 陳徳成， 鈴木康夫， 酒井克彦：高ケイ素アルミニウム合金の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果，精密工学会秋季大会学術論文集， 1999， C06
26. 陳徳成， 鈴木康夫， 酒井克彦：複合ミスト加工法による旋盤加工—冷却性と潤滑性，精密工学会秋季大会学術論文集， 1999， C05
27. 陳徳成， 鈴木康夫， 酒井克彦：複合ミスト加工法よるアルミホイールの旋削—複合ミスト加工法の実用化，精密工学会秋季大会学術論文集， 1999， C07
28. 陳徳成， 鈴木康夫， 酒井克彦：複合ミスト加工法によるステンレス鋼の旋削—冷却性と潤滑性，精密工学会秋季大会学術論文集， 2000， F74
29. Chen Decheng： A Study of Turning Operation by Oil - water Combined Mist Lubrication Machining Method, Collected Papers of The 5th International Conference on Progress of Machining Technology, September 2000
30. Chen Decheng： The Effect of Using Small Amount of Lubricating Oil and Cold Air Cooling on the Quality of Machining Surface of High - Silicon

-
-
- Aluminum Alloy, Collected Papers of The 5th International Conference on Progress of Machining Technology, September 2000
31. 陳徳成：複合ミスト発生装置とこれを使用した加工方法，特願 2000 - 304828
 32. 陳徳成：切削加工用給油方法，特願平 11 - 029409
 33. 千葉近：超音波噴霧，山海堂(1990)147
 34. 小野浩二，河村末久，北野昌則，島宗勉：理論切削工学，現代工学社，(1979) 43
 35. Mahfudz Al Huda,山田啓司，上田隆司：旋削加工における工具一切り屑接触面温度の測定，日本機械学会論文集（C編）65巻633号，360
 36. アルミホイール業界の現状，アルトピア，7，(1998) 41
 37. アルミニウム加工技術便覧，日刊工業新聞社，(1970) 277
 38. 鈴木康夫：ドライ・セミドライ切削技術の開発動向，日本塑性加工学会鍛造分科会第70回研究集会，2000，11
 39. 陳徳成，鈴木康夫，加茂進：ステンレス鋼の切削面に及ぼす潤滑及び冷却の効果，精密工学会秋季大会学術論文集，1998，C37
 40. 陳徳成，鈴木康夫，酒井克彦：複合ミスト供給法による旋削加工に関する研究，第2回生産加工・工作機械部門講演会論文集，2000，116

環境低負荷セミドライ加工システムの開発及び その実用化に関する研究

静岡大学理工学研究科設計科学専攻

陳 徳成 (学生番号 45645004)

論文概要

世界における環境重視の動向を見ると、大量の切削油を使用していた加工方法を見直し切削油の適量化、あるいは完全なドライ切削化が望まれている。本論文の目的は、連続切削におけるセミドライ加工の可能性を探ること、環境低負荷とされるセミドライ加工法である冷風供給による加工及び複合ミスト供給による加工システムの開発、及びその加工技術の実用化に関する研究を目的としているものである。

冷風供給による加工実験では、難削材と言われるステンレス鋼 SUS430F 及び高ケイ素アルミニウム合金の旋削を取り上げ、環境に優しいとされる冷風冷却切削方法を検討した。冷風と植物性潤滑油を一緒に供給する加工方法は、工具の摩耗を抑える効果及び仕上げ面粗さを向上する効果があることが分かった。

複合ミスト供給による加工実験では、従来のミスト供給による加工法では高速切削の場合、切削温度が高くなって植物性切削油の潤滑性が失なわれ、工具寿命が短くなる欠点を改善するため、最も冷却性が優れる水をミスト状にして、潤滑性を確保するための植物性切削油のミストと共に加工点に供給する加工方法を提案し、その加工特性を検討した。本論文は次の4つの部分から構成される。

- (1) ステンレス鋼の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果
- (2) 高ケイ素アルミニウム合金の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果
- (3) 複合ミスト供給法による旋削加工の研究
- (4) 複合ミスト供給法によるアルミニウムホイールの切削加工—複合ミスト供給法の実用化—

複合ミスト供給による加工法を、実用化するため、加工法、切削油、ミスト供給ノズル及び複合ミスト発生供給装置を検討した。完成した複合ミスト発生供給装置を利用して、ある工場のアルミホイール生産ラインで実際に1年間使用して、十分の効果を得た。

論文要旨

伝統的な切削作業においては切削油が使用されているが、その主な使用目的は加工時における冷却、潤滑、切りくず排除及び錆止めである。水溶性油剤は、潤滑作用を向上させるために、油剤には硫黄(S)、りん(P)、塩素(Cl)などの極圧添加剤が含まれている。作業中、不水溶性油剤の場合は鉱油が、水溶性油剤の場合は添加剤を含んだミストが飛び散るので、作業環境に悪影響を与える。また、使用した油剤を処理するためのコストが高く、年々その規制が厳しくなっている。

世界における環境重視の動向を見ると、大量の切削油を使用していた加工方法を見直し、切削油の適量化、あるいは完全なドライ切削化が望まれている。これまでにエンドミル加工などの断続切削においてはミスト供給による加工の効果が示されているが、刃先が常に切り屑に覆われている旋削でも十分な効果があるがどうかは十分に明らかとなっていない。そこで、本研究は連続切削におけるセミドライ加工としての冷風冷却による加工及び切削油のミスト供給による加工の可能性を探ることを目的としているものである。更に、本研究は環境の負荷を低減する目的としてセミドライ加工法である冷風供給による加工及び複合ミスト供給による加工システムの開発及びその切削加工技術の実用化に関する検討を行なった。

本研究の冷風冷却による加工では、難削材と言われるステンレス鋼 SUS430F 及び高ケイ素アルミニウム合金の旋削を取り上げ、その切削加工トラブルを解決するため、切削油が切削状態に及ぼす効果を検討した。最適な切削条件を探ることを通じて加工性の改善を図るとともに、切削油の大量使用による環境問題の解決を図るため、一般に使われた切削方法から、環境に優しいとされる冷風切削方法に切り替えることの可能性を検討した。

切削油のミスト供給による加工について、現在の切削油のミスト供給による加工では植物性切削油が使用されることが多い。少量の油剤では大量の切削熱を取り切れないため、高速切削の場合、切削温度が高くなって、植物性切削油の潤滑性を失うため、工具寿命が短くなる欠点がある。そこでこの問題を克服するため、複合ミスト供給による加工法を提唱した。複合ミスト供給による加工法とは、最も冷却性

が優れる水をミスト状にして、潤滑性を確保するための植物性切削油のミストと共に加工点に供給する加工方法である。複合ミスト供給による加工法の実験では、ステンレス鋼 SUS304 の旋削を取り上げ、工具摩耗実験、仕上げ面精度実験及び切削温度実験を行なった。

以上の冷風冷却による切削加工実験及び複合ミスト供給による切削加工実験の各々結果から、以下の結論が得られた。

1. ステンレス鋼の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果

冷風冷却と共に、植物性切削油をごく微量加工点に供給した場合

- (1) 切削温度が下降するため、工具寿命が増加した。
- (2) 植物性切削油が工具と仕上げ面の間に浸透するため、凝着物が減少し、仕上げ面粗さは良くなった。
- (3) 植物性切削油を工具の逃げ面に供給すると、すくい面及び逃げ面に供給した場合とほぼ同じ程度の効果があることを認められる。
- (4) 植物性切削油は被加工表面に油膜を生成するため、工作物の錆止め効果を得ることができる。

2. 高ケイ素アルミニウム合金の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果

冷風冷却と共に、植物性切削油をごく微量加工点に供給した場合

- (1) 高ケイ素アルミニウム合金を -30°C の冷風とミスト状の切削油を併用することにより、仕上げ面の精度や工具の摩耗が改善できた。
- (2) 切削油をミスト状にして使用することによりケイ素の循環を防ぎ工具摩耗を抑えることができた。
- (3) -30°C 冷風の効果で被削材の熱軟化を抑えることで高ケイ素アルミニウム合金の仕上げ面の精度を向上することができた。
- (4) 空気と共にミスト状の切削油を吹きかけることにより、工具の摩耗を減少することができた。
- (5) 連続切削の為切削点に潤滑油をかけるのが困難である旋削でも有効に切削

することができた。

3. 複合ミスト供給法による旋削加工の研究

水をミスト状にして切削油のミストと同時に切削点に供給する複合ミスト供給法を使用した場合

- (1) 連続切削のため切削点に潤滑油を供給するのが困難であると思われる旋削でも有効に作用し、仕上げ面の精度や工具の摩耗が改善できた。
- (2) 水ミストの使用により、切削温度の低下や良好な表面性状が得られた。よって、水ミストの使用は十分な冷却効果をもたらすと考えられる。
- (3) 複合ミスト供給法を利用して、冷却効果を高めたい場合には、複合ミストにおける水ミストの割合が多くなるよう供給量を調整し、潤滑効果を高めたい場合には、植物性切削油ミストの割合が多くなるよう調整することにより、その加工に最適な条件を与えることができた。

4. 複合ミスト供給法によるアルミニウムホイールの切削加工

—複合ミスト供給法の実用

- (1) 従来の加工法を変えて複合ミスト加工法は有効に作用し、仕上げ面の精度や工具の摩耗が改善できた。
- (2) 内径加工に複合ミスト加工法を応用した場合、潤滑条件を改善したため、溶着物の発生が抑えられ、加工不良も少なくなった。
- (3) 加工に使用した植物性切削油は植物性油で、有害物、危険物を一切含有しないため、作業者に対して安全である。
- (4) 工作機械周辺の切削油によるべたつきがなくなり、工場の作業環境が良くなる。省エネルギー、清潔生産実現した。
- (5) 切り屑は乾いているため、収集と運搬がしやすくなる。また、切り屑の再溶解が直接可能になる。
- (6) 切削油の購入費用が下がる。管理及び廃油処理に関するコストが不要になる。
- (7) 植物性切削油の自然分解性があり、工場付近の地下水を汚染せず。

また、複合ミスト供給による加工法を、実用化するため、加工法、切削油、ミスト供給ノズル及び複合ミスト発生供給装置を検討した。完成した複合ミスト発生供給装置を利用して、ある工場のアルミホイール生産ラインで実際に1年間使用して、十分な効果を得た。

発表論文並びに業績リスト

I . 発表論文

1. Chen Decheng, Suzuki Yasuo, Kamo Susumu: Effect of Cutting Technique with Cooled Air to Finished Surface of Stainless Steel, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 4(1999):93~95
2. Chen Decheng, Suzuki Yasuo, Sakai Katsuhiko: The Effect of Cooling and Lubrication of Oil-water Combined Mist Cutting Method in Turning Operation, China Mechanical Engineering, 9(2000):1035~1038
3. Chen Decheng, Suzuki Yasuo, Sakai Katsuhiko: The Effect of Using Small Amount of Lubricating Oil and Cold Air Cooling on the Quality of Machining Surface of High-silicon Aluminum Alloy, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 11(2000) :70~74
4. 鈴木康夫, 陳徳成 : 複合ミスト切削加工の適用と効果, ツールエンジニア, 1(2001):84~90

II . 国際会議発表論文

1. Chen Decheng, Suzuki Yasuo, Sakai Katsuhiko: A Study of Turning Operation by Oil - water Combined Mist Lubrication Machining Method, Collected Papers of The 5th International Conference on Progress of Machining Technology, September 2000, Beijing. pp180-184.
2. Chen Decheng, Suzuki Yasuo, Sakai Katsuhiko: The Effect of Using Small Amount of Lubricating Oil and Cold Air Cooling on the Quality of Machining Surface of High - Silicon Aluminum Alloy, Collected Papers of The 5th

International Conference on Progress of Machining Technology, September 2000, Beijing. pp175-179.

Ⅲ. 国内学会発表論文

1. 陳徳成, 鈴木康夫, 加茂進: ステンレス鋼の切削面に及ぼす潤滑及び冷却の効果, 精密工学会秋季大会学術論文集, 1998, C37: pp304.
2. 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦: 高ケイ素アルミニウム合金の切削面に及ぼす潤滑及び冷風の効果, 精密工学会秋季大会学術論文集, 1999, C06: pp94.
3. 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦: 複合ミスト加工法による旋盤加工——冷却性と潤滑性, 精密工学会秋季大会学術論文集, 1999, C05: pp93.
4. 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦: 複合ミスト加工法によるアルミホイールの旋削—複合ミスト加工法の実用化, 精密工学会秋季大会学術論文集, 1999, C07: pp95.
5. 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦: 複合ミスト加工法によるステンレス鋼の旋削——冷却性と潤滑性, 精密工学会秋季大会学術論文集, 2000, F74: pp307.
6. 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦: 複合ミスト供給法による旋削加工に関する研究, 第2回生産加工・工作機械部門講演会論文集, 2000, No.116

Ⅳ. 研究結果として特許出願

1. 陳徳成: 切削加工用給油方法, 特願平 11 - 029409 (特許査定).
2. 陳徳成: 複合ミスト発生装置とこれを使用した加工方法, 特願 2000 - 304828 (特許出願中).