

場の制御と再生技術による
機械加工工具の長寿命化に関する研究

柳原 聖

目次

第一章 緒論	1
1.1 緒言	2
1.2 研究の背景	3
1.2.2 生産加工における環境問題	3
1.2.2 工具資源の高騰	6
1.3 本研究の目的	10
1.4 本論文の構成	11
参考文献	14
第二章 機械加工工具の長寿命化を目的とした場の制御技術と再生技術の提案	15
2.1 長寿命化に関する従前の研究とその問題点	16
2.2 工具に関する研究	16
2.2.1 工具のコーティング	16
2.2.2 工具コーティングの方法	17
2.2.3 コーティングの種類およびその母材	19
2.2.4 最近のコーティング動向	21
2.2.5 構成刃先による工具コーティング	22
2.2.6 切削工具コーティングのまとめ	23
2.3 補材に関する研究	24
2.3.1 冷風加工	24
2.3.2 窒素ブロー加工	25
2.3.3 MQL 加工	26
2.3.4 環境対応機械加工油	28
2.3.5 固体潤滑	30
2.3.6 代替加工油剤供給に関するまとめ	30
2.4 場の利用	31
2.4.2 磁場による酸化作用と摩擦・摩耗の改善	32
2.4.3 外部エネルギーの供給による摩擦・摩耗改善のまとめ	33
2.5 工具長寿命化のための戦略	33
参考文献	39
第三章 場を利用した工具強化と被削材の快削化	48
3.1 緒言	49
3.2 工具摩耗の抑制を目的とした磁場援用切削加工法の提案	49
3.2.1 超硬工具の組成・特徴	49
3.2.2 超硬工具の摩耗の特徴とその抑制方法について	51
3.3 磁場の供給方法	52
3.3.1 磁場を援用した従前の研究	52
3.3.2 磁気パルスによる工具寿命の延長	52

3.3.3	交流磁場による加工点の摩擦形態の制御	54
3.3.4	固定磁石による磁場供給とその利点	56
3.4	磁場援用切削による工具摩耗の抑制	59
3.4.1	切削実験とその結果	59
3.4.2	工具表面分析による Co 流失抑制の検証	67
3.5	磁場援用切削による難削材の被削性向上	69
3.5.1	実験方法	70
3.5.2	切削抵抗への磁場の影響	71
3.5.3	びびり振動源の特定	73
3.5.4	びびり振動と加工面粗さとの関係	75
3.5.5	磁場効果の工具材種への依存性	76
3.5.6	磁場効果の酸化促進作用の検証	78
3.5.7	磁場効果の被削材材種への依存性	81
3.5.8	金属組織学的見地からの発生機構の検討	87
3.5.9	磁場強度と磁場効果との関係	90
3.5.10	被削物表面への磁場の影響	93
3.5.11	インバー合金の磁場援用切削	95
3.6	結論	96
第四章 場を利用した潤滑物質の吸引		99
4.1	緒言	100
4.2	TRIZ による場と物質の分析	100
4.3	固体潤滑物質の検討	103
4.3.1	切削加工における固体潤滑の利用	103
4.3.2	異分野における固体潤滑の利用例（ガラス潤滑）	108
4.3.3	適用が見込める切削加工形態の検討	110
4.3.4	静電特性を利用した工具への吸引	111
4.3.5	実機上での吸引実験	114
4.4	切削実験と潤滑効果の確認	118
4.5	潤滑形態の確認	121
4.5.1	切削温度の検証による潤滑形態の同定	121
4.5.2	シリカ微粒子の潤滑メカニズム	123
4.5.3	工具側からのシリカ微粒子の作用の検討	126
4.5.3.(a)	切りくず流動とその評価方法	127
4.5.3.(b)	実験に使用する工具について	128
4.5.3.(c)	観察システムと実験概要	130
4.5.3.(d)	オーステナイトステンレス鋼の切りくず流動特性	132
4.5.3.(e)	工具表面の粗さが切りくず流動におよぼす影響	136
4.5.4	シリカ微粒子の切りくず凝着防止効果	138
4.6	結論	141

参考文献	142
第五章 切削工具の部分形成と再生技術	144
5.1 緒言	145
5.2 工作機械上での切削工具コーティングによる工具機上再生の概念	146
5.2.1 成膜と剥離による工具再生方法の提案	146
5.2.2 切削工具として具備すべき特性	149
5.2.3 機上再生を実現する方法に対する制約条件	151
5.2.4 機上再生に利用しうる技術	152
5.2.4.(a) 複合めっきによる成膜	152
5.2.4.(b) 放電による成膜と剥離	155
5.2.4.(c) 紫外線硬化樹脂による成膜	159
5.2.4.(d) 陽極火花放電法による成膜	160
5.3 機上工具コーティングのための複合めっき膜の検討	163
5.3.1 マトリックスの検討	163
5.3.2 めっき前処理に関する検討	168
5.3.3 硬質 Ni-P めっき膜の設計	171
5.3.4 複合めっき膜による黄銅の切削加工	174
5.3.5 Ni-P-SiC 複合めっき膜による S45C の切削加工	181
5.4 複合めっき膜の剥離	185
5.4.1 剥離方法に関する検討	185
5.4.2 硫酸電解剥離による Ni-P めっき膜の剥離	187
5.4.3 超硬チップに施した複合めっき膜の電解剥離	194
5.5 再生サイクルの検討	196
5.5.1 硫酸電解液の濃度と超硬母材の反応性	196
5.5.2 繰り返し再生にともなう母材の減耗量 - 硫酸濃度の影響 -	196
5.5.3 再生後のめっき膜による切削加工	206
5.5.4 構成刃先の電解剥離	208
5.5.5 再生サイクルに要する時間	209
5.6 切削工具の機上再生装置の試作	210
5.6.1 装置設計における要求項目	210
5.6.1.(a) めっき操作における要求項目	210
5.6.1.(b) 装置利用の観点からの要求事項	212
5.6.2 試作機の概要	213
5.6.2.(a) 電槽部	213
5.6.2.(b) 給電電極の選択	213
5.6.2.(c) 電流制御部	217
5.6.3 機能の検証	219
5.6.3.(a) 温度制御	219
5.6.3.(b) 基礎めっき試験	222

5.6.4 機上コーティング実験	226
5.6.4.(a) 実験方法	226
5.6.4.(b) Ni-P皮膜機上コーティング	226
5.6.4.(c) Ni-P-SiC 複合めっきコーティング	232
5.6.4.(d) 実験後の浴の品質変化について	235
5.7 結論	237
参考文献	238
 第六章 研削工具の部分形成と再生技術	242
6.1 緒言	243
6.2 提案する研削工具機上再生工程	245
6.3 研削砥石の構造と種類	246
6.4 研削工具の製法	248
6.5 砥粒層形成工程の検討	250
6.5.1 加熱方法の検討	250
6.5.2 加熱時の留意事項	252
6.5.3 軸への塗布	254
6.5.4 砥粒層の結合度とその向上	255
6.5.5 焼成工程と得られた工具	258
6.6 剥離工程の検討	261
6.7 研削工具用機上再生装置の試作	264
6.8 研削実験による形成砥粒層の評価	265
6.9 ビトリファイド工具の形成工程の再検討	267
6.10 砥粒層の再生と評価	269
6.11 再生サイクルに要する時間	272
6.12 結論	273
参考文献	274
 第七章 工具・被削材間熱電流による工具状態の監視	275
7.1 緒言	276
7.2 断続切削における熱起電力	277
7.2.1 実験条件	277
7.2.2 多刃工具における熱起電力の応答	278
7.3 熱起電力と熱電流の関係	281
7.4 実験結果の考察	288
7.5 結論	294
参考文献	295
 第八章 結 論	296
8.1 本研究で得られた成果	297
8.2 今後の課題	307

本研究に関する発表論文等	309
論文	309
講演発表	309
特許	311
所内報	311
解説記事	311
新聞報道等	311
謝辞	312

第一章 緒 論

1.1 緒言

機械加工は，工作を目的として作られた機械に，材料，工具を設置し，両者に相對運動を与えながら，工具を材料に接触させて変形・破壊を誘起し，その破壊や変形の方角を制御しながら設計者の所望の形状を得る方法のことである．この機械加工において，工具摩耗の低減は，過去から未来まで永劫のテーマである．

材料（素材）と工具は盾と矛の關係に等しい．新しい素材は旧来の物よりも付加価値が高められる．よって自ずから輕量，強靱であるように開発される．素材，すなわち盾が強靱になれば，盾を変形させるためにそれを貫く矛，すなわち工具が必要になる．工具は材料に接触し寸法精度や表面品位の創製に直結するものであるが故に，できる限り長持ちしたほうが良い．

機械加工の歴史においては，工具長寿命化のために，工具素材が強靱な物へと進化してゆく一方で，加工中に加工油剤を供給するという手法が編み出された．この方法により，加工点を潤滑，冷却し寿命を向上させつつ，切りくずを速やかに加工点から流し去り，再度工具がそれを噛み込んで摩耗してしまうことを防げるようになった．しかし，現在この加工油剤の使用が制限されつつある．環境問題への意識の高まりから，油剤中の成分の人体への影響のみならず，油剤の付着した切りくずやウエスの廃棄処理に関わるコストが増大しているからだ．

これらの廃棄コストを考慮すると，できれば油剤を使わずに被削材と工具の二つの要素のみで加工を行う乾式加工が望ましい．乾式加工で工具の寿命を向上させてゆくには切削工具の場合は，コーティング技術が，そして砥粒加工工具については超砥粒の効果的な利用が第一に挙げられる．

一方，油剤が利用できないという制約条件に対して他に何か解となりうるものはないのであろうか．そして工具摩耗を抑制するための方法とは一体何なのであろうか．本研究は，このような考えの下で，工具摩耗抑制のための新たな手法を模索するために行われる．

1.2 研究の背景

1.2.2 生産加工における環境問題

1990年代のはじめ頃にドイツにおいて環境対問題が意識されるようになった。これにより切削，研削油剤の人体への影響や，廃液処理にかかる費用が憂慮されて，可能な限りの乾式加工への移行が求められるようになった。そして1997年の国際生産加工研究会議(CIRP)において，この課題が取り上げられてから油剤削減の動きが本格的された。

我が国においては1998年3月16日の毎日新聞による報道¹⁻¹⁾の影響が加工油剤の利用に大きな影響を与えた(図1-1)。この報道では，大阪府の機械工場から高濃度のダイオキシンが検出されたことが伝えられた。ダイオキシン発生の原因となったのは加工油剤中に含まれる塩素系の極圧添加剤と言われており，切削油を拭いたウェスを一般の焼却設備で処理するとダイオキシンが生成されてしまうのだと言う。また生産量が増加すれば，それにともない排出される切りくずも増加し，加工油剤の付着した切りくずが廃棄処理され，再処理工程においても有害物質を生成すると考えられている。

その後，通産省(現在の経済産業省)が2000年12月にJISを改訂し，機械加工用油剤の脱塩素化を求めた¹⁻²⁾。その結果有害廃棄物排出規制法(PRTR(Pollutant Release and

(1) 廃棄物処理場



廃棄物処理場の不足

(2) 環境負荷物質

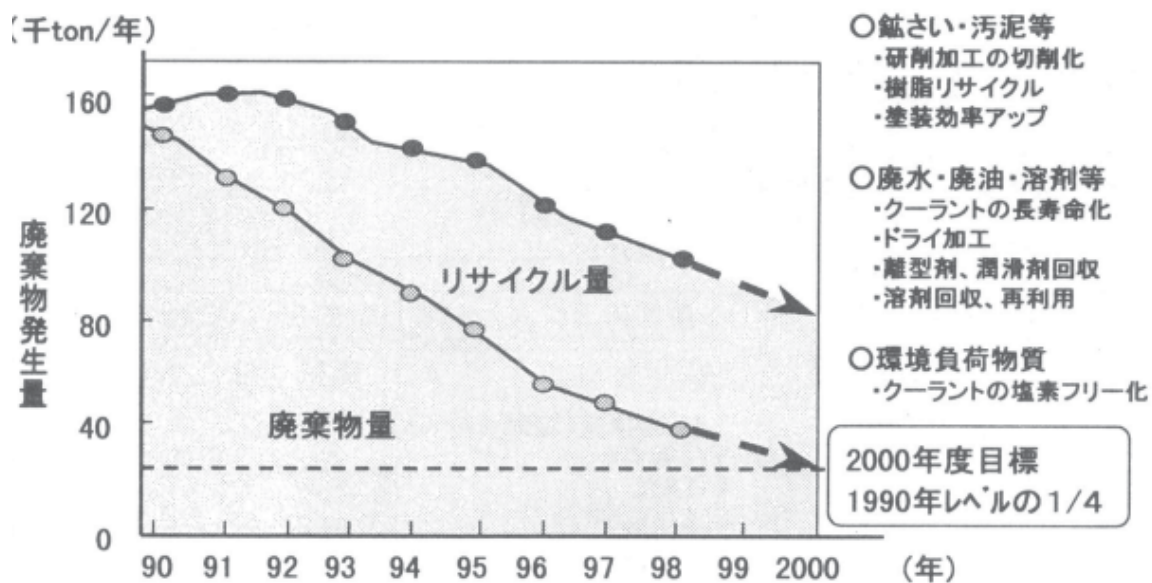
毎日新聞

JIS認定の機械油使用時
高濃度ダイオキシン発生

大阪府の機械加工工場から
通常の93倍のダイオキシン
大きな社会問題に...

ダイオキシン発生の原因は、
切削油の極圧添加剤として
含まれる塩素化合物の燃焼

Fig. 1-1 News about environmental issue¹⁻¹⁾

Fig. 1-2 Toyota's plan to reduce industrial waste¹⁻³⁾

Transfer Register)法)が制定され、具体的な規制となった。

そして、高まる世論に呼応するようにトヨタ自動車(株)¹⁻³⁾では、生産工程で生じる研削砥石からの鉋さい・汚泥、切削加工から生ずる切りくずなどを含めた廃棄物発生量を2000年度は1990年レベルの1/4に削減するという取り組みが始められた(図1-2)。一方で、切削油剤、研削油剤に対しては塩素フリークーラントの要求があり、日石三菱石油(株)などの石油メーカを中心に脱塩素化の取り組みが続けられている。

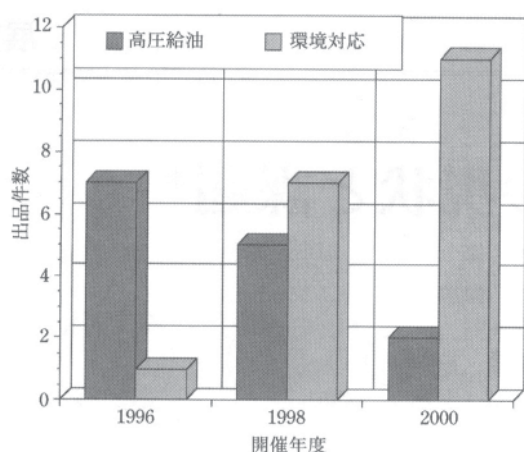


Fig.1-3 Design trend for green machining from JIMTOF¹⁻⁴⁾

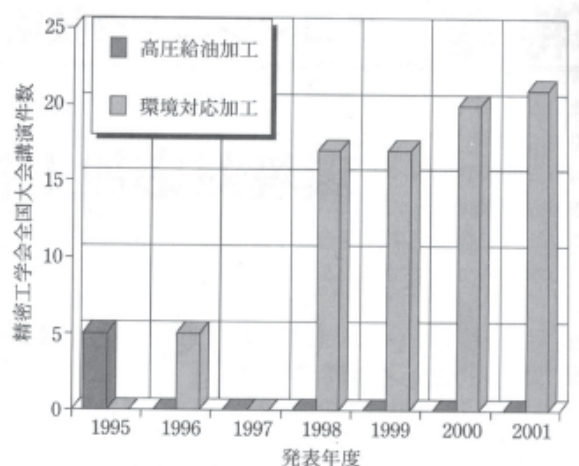


Fig. 1-4 Study trend for green machining from JSPE meetings¹⁻⁴⁾

日本の学術研究における動向を見ると、精密工学会においては、加工油剤を低減できる加工法全般について環境対応型加工として取り扱われており、そのような加工法を議論するセッションが学術講演会に設けられている。このセッションのオーガナイザーである松原が調査した資料を図1-3に示す。これは、2002年日本国際工作機械見本市(JIMTOF)に出品された高圧給油装置を組み込んだ工作機械と環境対応加工を取り入れた工作機械の出品台数の変化を調査したものである¹⁻⁴⁾。

90年代の中頃までは、高能率加工を実現し、かつ工具の寿命を維持するために高圧給油装置を利用して大量の油剤を加工点に供給する手法に、工作機械の開発の重きが置かれていたが、それ以降は工作機械メーカーも年々環境対策、すなわち油剤使用削減を念頭においた開発に力点を置き始めた。図1-3を見るとこのことが明確に理解できる。図1-4は同じく松原による精密工学会での講演内容の調査結果であるが、環境対応加工を唱った講演が1998年以降飛躍的に増加しており、この分野で加工油剤に依存しない様々な研究が加速されていることがわかる。

1.2.2 工具資源の高騰

現在使用されている主な機械工具材料には、高速度工具鋼、超硬合金、セラミックス、サーメット、cBN焼結体、ダイヤモンド焼結体などがある。これらのうち、切削工具を中心に広く使われているのは高速度工具鋼と超硬合金である。高速度工具鋼の原料成分としてはW, Mo, Cr, V, Coが使われており(表1-3)、また超硬合金の主成分としてはW, Co, Ti, Ta, Nbが使われている(表1-4)。ここに挙げたW, Mo, Cr, V, Co, Ti, Ta, Nbはいずれもレアメタルと呼ばれる元素である(図1-5)。「マテリアルの事典」¹⁻⁹⁾によると、これらの元素の確認資源余命は表1-5の通りであった。もちろん、確認資源余命は鉱脈の探索等により変動する流動的な数値ではあるが、Tiの27年をはじめとして、その他の元素も数十年しかもたないと見積もられている。しかもこれらのレアメタルは枯渇の不安だけでなく、産出国の政情などにより供給状態が変動するという不安定要素も抱えており、その対策として日本は資源の備蓄やリサイクルに努めている¹⁻¹¹⁾。(表1-6)

表1-7は文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンターに掲載されていた「文部科学省として取り組むべき元素戦略」中の資料である¹⁻¹²⁾。各レアメタルの今後の需給リスクが網羅されているが、上記切削工具に利用されるレアメタルのみならず、研削工具の砥粒固定に使われるNiなども対象物質となっていることがわかる。

中でも、超硬工具材料でもあるタングステンについては輸入を100%中国に依存しており、中国国内における工業発展にともないその供給価格はここ五年で二倍へと高騰している。したがって、我が国の産業競争力を維持するためにも工具寿命の向上が今まで以上に求められるようになって来ており、文部科学省は平成19年度から、産業に不可欠な希少金属(レアメタル)の代替材料研究に乗り出すことを決定した。これにともない、レアメタルの使用量を極力減らす技術を2015年までに実用化し、日本の産業競争力を支援する方針を打ち出している。

Table 1-3 Composition of high speed steel¹⁻⁶⁾

分 類	種類の記号	化 学 成 分 (%)										適 用 用 途 例
		C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V	Co	
タングステン系	SKH 2	0.73 ～0.83	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	17.00 ～19.00	—	0.80 ～1.20	—	ドリル、リーマ、フライスカッタ、ソー、ブローチ、転造ダイス、 シャープレード、冷間塑性加工工具、紙断裁包丁、木工用縦溝カッタ
	SKH 3	0.73 ～0.83	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	17.00 ～19.00	—	0.80 ～1.20	4.50 ～5.50	ホブ、ブローチ、フライスカッタ、タップ、 冷間塑性加工工具
	SKH 4	0.73 ～0.83	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	17.00 ～19.00	—	0.80 ～1.20	9.00 ～11.00	完成バイト、総形バイト 難削材切削用
	SKH 10	1.45 ～1.60	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	11.50 ～13.50	—	4.20 ～5.20	4.20 ～5.20	エンドミル、リーマ、ブローチ 最も耐摩耗性を必要とする冷間塑性加工工具
モリブデン系	SKH 51	0.80 ～0.90	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	5.50 ～6.70	4.50 ～5.50	1.60 ～2.20	—	ドリル、リーマ、タップ、フライスカッタ、ソー、ブローチ、 転造ダイス、最もじん性を必要とする冷間塑性加工工具
	SKH 52	1.00 ～1.10	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	5.50 ～6.70	4.80 ～6.20	2.30 ～2.80	—	タップ、フライスカッタ、ソー、ブローチ 比較的じん性を必要とする冷間塑性加工工具
	SKH 53	1.10 ～1.25	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	5.70 ～6.70	4.60 ～5.30	2.80 ～3.30	—	エンドミル、チェザー、ブローチ 比較的じん性を必要とする冷間塑性加工工具
	SKH 54	1.25 ～1.40	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	5.30 ～6.50	4.50 ～5.50	3.90 ～4.50	—	リーマ、タップ、ブローチ 比較的じん性を必要とする冷間塑性加工工具
	SKH 55	0.85 ～0.95	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	5.70 ～6.70	4.60 ～5.30	1.70 ～2.20	4.50 ～5.50	ホブ、ブローチ、タップ、フライスカッタ、ピニオンカッタ、ベベルギヤカッタ 比較的じん性と耐熱性を必要とする冷間塑性加工工具
	SKH 56	0.85 ～0.95	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	5.70 ～6.70	4.60 ～5.30	1.70 ～2.20	4.50 ～5.50	エンドミル、ドリル 高速重切削用
	SKH 57	1.20 ～1.35	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.80 ～4.50	9.00 ～11.00	3.00 ～4.00	3.00 ～3.70	9.00 ～11.00	完成バイト、総形バイト、スローアウェイチップ、エンドミル、 フライスカッタ、リーマ、最も耐熱性冷間塑性加工工具
	SKH 58	0.95 ～1.05	0.50 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.50 ～4.50	1.50 ～2.10	8.20 ～9.20	1.70 ～2.20	—	タップ、チェザー、ブローチ、ドリル、フライスカッタ
	SKH 59	1.00 ～1.15	0.50 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.030 以下	3.50 ～4.50	1.20 ～1.90	9.00 ～10.00	0.90 ～1.40	7.50 ～8.50	エンドミル、タップ、ドリル、ホブ、ソー、木工工具 耐熱性を必要とする冷間塑性加工工具

Table 1-4 Composition of cemented carbides¹⁻⁷⁾

区 分		使用分 類記号	かたさろッ クウェルA スケール	抗折力 [kgf/ mm ²]	成 分 (%)					備 考			
					W	Co	Ti	Ta*	C				
切削工具用 (バイト用チップ)	鋼、鉄、可 鍛鉄など、 切りくずが長 い場合 (青)	P01	>91.5	> 70	30~78	4~ 8	10~40	0~25	7~13	切削速度の速い順 ↑ 超硬合金の耐摩耗 ↑ 超硬合金のじん性増 ↑ 送りの多い順 ↓ 超硬合金の靱性増			
		P10	>91	> 90	50~80	4~ 9	8~20	0~20	7~10				
		P20	>90	>110	60~83	5~10	5~15	0~15	6~ 9				
		P30	>89	>130	70~84	6~12	3~12	0~12	6~ 8				
		P40	>88	>150	65~85	7~15	2~10	0~10	6~ 8				
		P50	>87	>170	60~83	9~20	2~ 8	0~ 8	5~ 7				
	鋼、鉄鋼、鉄 鉄、高Mn鋼、 オーステナイ ト鋼など (黄)	M10	>91	>100	70~86	4~ 9	3~11	0~11	6~ 8	切削速度の速い順 ↑ 超硬合金の耐摩耗 ↑ 超硬合金のじん性増 ↑ 送りの多い順 ↓ 超硬合金の靱性増			
		M20	>90	>110	70~86	5~11	2~10	0~10	5~ 8				
		M30	>89	>130	70~86	6~13	2~ 9	0~ 9	5~ 8				
		M40	>87	>160	65~85	8~10	1~ 7	0~ 7	5~ 7				
	鉄、陶器、 焼入鋼、非鉄 金属・合金な ど (赤)	K01	>91.5	>100	83~91	3~ 6	0~ 2	0~ 3	5~ 7	切削速度の速い順 ↑ 超硬合金の耐摩耗 ↑ 超硬合金のじん性増 ↑ 送りの多い順 ↓ 超硬合金の靱性増			
		K10	>90.5	>120	84~90	4~ 7	0~ 1	0~ 2	5~ 6				
		K20	>89	>140	83~89	5~ 8	0~ 1	0~ 2	5~ 6				
		K30	>88	>150	81~88	6~11	0~ 1	0~ 2	5~ 6				
		K40	>87	>160	79~87	7~16	—	—	5~ 6				
	線引ダイス用およ びセンタ用 (同上用チップ)	V 1	>89	>120	88~91	3~ 6	—	—	5~ 6				
		V 2	>88	>130	85~90	5~ 9	—	—	5~ 6				
		V 3	>87	>150	78~87	8~16	—	—	5~ 6				

* Taの一部は、Nbにおきかわってもさしつかえない。

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

希土類（1種類とカウント）

Fig. 1-5 31 Rare metals on the periodic table¹⁻⁸⁾Table 1-5 estimated life and recycle ratio of resources¹⁻⁹⁾

	確認資源 余命[year]	原料リサイ クル率[%]
W	59	19
Mo	50	25
Cr	116	27
V	129	24
Co	76	23
Ti	27	50
Ta	58	32
Nb	258	0.6

Table 1-6 Supply stability of rare metals¹⁻¹⁰⁾

	供給の不安定性
W	埋蔵、生産共に中国に集中し(埋蔵44%、生産75%)、日本の輸入も中国に集中(77%)しており、生産コントロール等により供給削減が起きる不安がある。
Mo	埋蔵、生産ともアメリカ、中国、チリに集中しており(埋蔵78%、生産80%)。また、供給企業(サイバス・アマックス社)が独占的に支配しており、ストライキによる一時的供給削減が起こる不安がある。
Cr	埋蔵は南アフリカとジンバブエに偏っており(87%)、また生産は南アフリカとカザフスタンに集中しており(68%)、政情不安等により供給途絶におちいる可能性がある。
V	高品位鉱は、南アフリカと旧ソ連に集中している。日本は輸入量の84%を南アフリカ、中国に依存している。
Co	埋蔵はザイール、キューバに偏在(75%)している。両国は政情不安、経済不振により生産施設の整備が不十分な状況にある。
Ta	埋蔵量の68%がオーストラリア、ナイジェリア、コンゴに、生産量の86%がオーストラリア、ブラジルに集中しているため、生産コントロール等により供給削減が起きる不安がある。
Nb	埋蔵、生産ともにブラジルに集中し(埋蔵86%、生産85%)。一方、日本が輸入しているブラジルの供給企業はCBMM (Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia)が独占的に支配しており、ストライキ等による供給削減が起きる不安がある。

Table 1-7 supply, demand, and risk about each rare metal¹⁻¹²⁾

(参考資料1)		需給リスク		リスク大●● リスク中● リスク小△	
元素名	クラーク数	供給	価格	需要	リサイクル
	地表の元素重量%	可採年数、埋蔵国、生産国、輸入相手国の集中度	価格上昇、価格変動／10年	世界需要、国内需要、特定分野の需要の伸び率／5年	備蓄、リサイクル
プラチナ(Pt)	5x10 ⁻⁷	● 南アに88%偏在	●● 白金輸入価格↑	●● 201～225% 触媒(自動車、化学)	△ リサイクルあり
インジウム(In)	1x10 ⁻⁵	●	● 2002年から急騰	●● 211～233% 透明電極	●● 研究開発段階
ヨウ素(I)	3x10 ⁻⁵	●	●	●● 偏光フィルム	● 研究開発中
アンチモン(Sb)	5x10 ⁻⁵	●● 100%中国から輸入	●	△	●●
ジスプロジウム(Dy)	4x10 ⁻⁴	●	●	● 希土類磁石	●●
サマリウム(Sm)	6x10 ⁻⁴	●	●	● 希土類磁石	●●
ゲルマニウム(Ge)	6.5x10 ⁻⁴	●	●	●	●●
タンタル(Ta)	1x10 ⁻³	●	●	●● 151～227% 超硬工具、電子機器	●●
ランタン(La)	1.8x10 ⁻³	●	△	● コンデンサ、水素吸蔵合金	●●
ニオブ(Nb)	2x10 ⁻³	●● 90%ブラジルから輸入	△	● 超硬工具添加剤	●
ネオジウム(Nd)	2.2x10 ⁻³	●	●	● 希土類磁石	●●
イットリウム(Y)	3x10 ⁻³	●	●	●● 182% 光学レンズ	●●
タングステン(W)	6x10 ⁻³	●● 100%中国から輸入	● 最近5年で2倍	●● 208% 超硬工具/中国内需拡大	△ 国家備蓄
リチウム(Li)	6x10 ⁻³	△	△	●● 202% リイオン電池、耐熱ガラス	●●
ニッケル(Ni)	0.01	●	●● Ni鉱の輸入価格↑	△	△ 国家備蓄
クロム(Cr)	0.02	△	●● Cr鉱石輸入価格↑	● 耐熱合金、磁気記録膜	△ 国家備蓄
マンガン(Mn)	0.09	●	●● FeMn輸入価格↑	● 鋼材、Al合金添加	△ 国家備蓄

1.3 本研究の目的

このような背景の下で，本研究では，
機械加工油剤に依存せずに，機械加工工具の長寿命化を達成する技術の開発
を行う．

ここであらためて考察するが，切削・研削加工油剤の役割とは何なのであろうか，またその使用を止めればどのような不都合が生じるのであろうか？

加工油剤の役割は，冷却，潤滑，清浄（切りくず処理）である．もしも完全な乾式加工を行うと加工油剤で補われていたこの3つの効果が失われてしまうことになる．

一般的な切削加工や研削加工においては，基本的に加工点において加工に関与している媒体は，工作物・工具・加工雰囲気（切削油剤等）の三つしかない．このうち加工雰囲気に該当する加工油剤がなくなれば，工具に対する負担は極めて甚大なものとなる．たとえば S30C の鋼材を，切り込み 1mm 送り 0.2mm，切削速度 100m/min で加工すると刃先の 0.2 平方ミリメートルあたりに 0.74 ~ 1.44kW の電力が消費されていることになる．このとき消費されたほとんどのエネルギーは熱へとかわってしまうので，0.74 ~ 1.44kW 電熱器を加工点のわずかな面積に押し当てて加熱しているのに等しい．これに対する冷却機能が失われるのである．

また，加工点には 2500 ~ 4000MPa という苛烈な加工圧力が作用している．このような高温高圧下では，工具は機械的な摩耗と熱化学的な摩耗を引き起こす．摩耗した工具は，工作物の加工面の品位を低下させ，切りくずの折断を阻害する．結果として，加速度的にこれら悪条件の相乗効果で工具の寿命や工作物の寸法精度が著しく低下することになる．

前述したように加工油剤は，自身が有する冷却と潤滑効果により工具，工作物を保護し，切りくずを洗い流す役割を有している．加工油剤の使用をやめて乾式加工に移行をはかるということは，ただでさえ苛烈な条件に曝された工具に現状以上の負担を強いるということになる．

その負担を減らすためには，工具，被削材，加工雰囲気について

- ・工具の強靱化を追求する．
- ・被削材を快削化する．
- ・新たな加工雰囲気を探索し利用する．

という三つの方策を検討するしかない。

このうち被削材の快削化については、快削性を誘起する物質を被削材の成分として混入させる手法と、熱などの場を利用して一時的に快削化を図る方法がある。しかし、被削材の快削化については、被削材は加工する側にとっては与えられた制約条件の一つとなってしまうため本研究では取り扱えない。したがって、工具の強靱化を図る技術と、新しい加工雰囲気によって工具の長寿命化を図ることにする。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を図 1-6 に示す。

第一章では、環境問題から機械加工油剤の利用が制限されつつある一方で、工具寿命を確保しなければならない現状と、年々高騰する工具資源を如何に有効利用しなければならないかを研究の背景として述べた。そして本研究の目的が加工油剤に依存しない工具の長寿命化の達成であることを示した。

第二章では「機械加工工具の長寿命化を目的とした場の制御と再生技術の提案」と題して、従来機械加工技術において、工具の長寿命化をキーワードに取り組まれた研究課題を振り返り、その動向を調査する。加工点には、工具、被削材、加工雰囲気（加工油剤）が関与しており、主にこの三つの要素が加工の成否を左右する。そして調査の結果を利用して、研究戦略を提案する。

提案する研究戦略においては、大きくは場、すなわち外部エネルギーの制御技術と補材、すなわち加工を補助する物質の利用技術に分けられる。

場の利用においては、まず、第三章「場を利用した工具強化と被削材の快削化」にて、外部から遠隔的に磁場を加えて工具成分の流失を抑制したり、あるいは被削材の快削化を図るなどを行う。

次に、第四章では、「場を利用した潤滑物質の吸引」と題して、静電場を利用して潤滑物質の加工点への吸引を試みる。機械加工においては、加工油剤を低減するために、加工油剤の噴霧供給法や代替加工剤の様々な供給法が提案されているが、そのいずれもが効果的に加工剤を加工点に導くための手法について検討がなされていない。そこで、静電場を利用して固体潤滑物質を遠隔操作し加工点に供給できる手段を検討し、供給方法の問題点に対する解を見出すことにする。

次に補材の利用技術としては、これまでの補材利用の考えを一步進めて、補材を強化し切れ刃としての役割を担わせることを検討する。供給する補材が切れ刃並に強靱になり、工具母材表面に固定化されれば、それを利用して切削加工が実現できる。そして、その強化された補材層の摩耗が母材層に達する前に補材層を再生できれば工具の寿命が永遠の物となる。このような考えの下で、第五章では、「切削工具の部分補修と再生技術」に取り組み、第六章では、補材層を砥粒層に転換し「研削工具の部分補修と再生技術」を検討する。

また、補材層を有効に利用するためにも、補材層の状態をインプロセスで監視する技術が求められる。そこで、第七章では、「工具・被削材間熱電流による工具状態の監視」と題して、切削工具と被削材との間に生ずる熱電流に着目し、その熱電気特性を利用して工具の異常が検出が可能かどうかを検討する。

そして、第八章は本研究のまとめとして得られた成果から長寿命化の指針を導く。

以上をもって、加工油剤を使用しない新たな機械加工工具の長寿命化技術の構築を図ることとする。

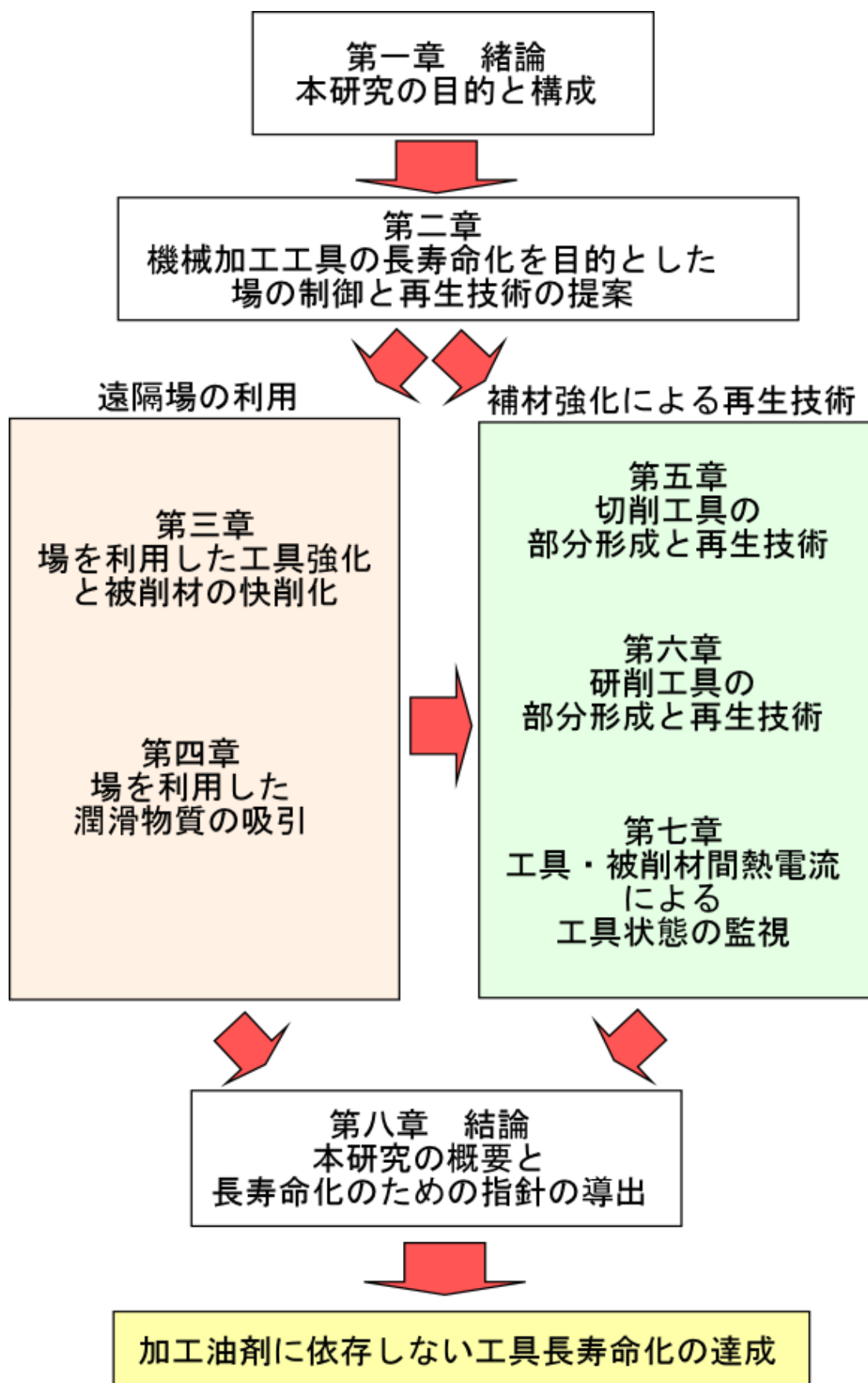


Fig. 1-6 composition of thesis

参考文献

- 1-1)大島英利, ダイオキシン -JIS 認定の油使用で高濃度発生 - 阪大, 毎日新聞, 1998 年 3 月 16 日付記事 .
- 1-2)日本工業標準調査会, 環境JISに関する活動, http://www.jisc.go.jp/std/environment/env_environmentalJISaction.html .
- 1-3)村上正一, 環境を考慮した高能率部品加工のあり方, (社)日本機械学会 RC164 工作機械の基盤技術に関する研究分科会第五回配付資料, トヨタ自動車第一生技部技術企画室, 平成 11 年 9 月 13 日 .
- 1-4)松原十三生, 環境対応加工技術の現状と課題, 精密工学会誌, 68-7(2002), 885-889 .
- 1-5)R. B. Aronson, Why Dry Machining?, Manufacturing engineering-January,(1995) , 33-35.
- 1-6) 精密工学会編 : 精密工作便覧, コロナ社, 東京, (1992) 50
- 1-7) 精密工学会編 : 精密工作便覧, コロナ社, 東京, (1992) 64
- 1-8) 金属鋳業事業団WEB : レアメタルってなんですか?, http://www.mmaj.go.jp/page/html/qa_1/q_a02.html
- 1-9) 佐久間健人, 相澤龍彦, 北田正弘 : マテリアルの事典, 朝倉書店, 東京, (2001) 634
- 1-10) 資源エネルギー庁監修 : 1999/2000資源エネルギー年鑑, 通算資料調査会, 東京, (1999) 874
- 1-11) 金属鋳業事業団 WEB : 非鉄金属の安定供給ってどういうこと?, http://www.mmaj.go.jp/page/html/qa_1/q_a05.html
- 1-12)文部科学省として取り組むべき元素戦略 (議論のたたき台), <http://www.nanonet.go.jp/japanese/policy/files/20060719-02.pdf>

第二章

機械加工工具の 長寿命化を目的とした 場の制御と再生技術の提案

2.1 長寿命化に関する従前の研究とその問題点

本章においては，本研究の目的を達成するために，まず工具，被削材，加工雰囲気の三つについて取り組まれた従前の研究課題や，参考すべき技術開発について代表的な開発を概観する．

そして，機械加工工具の長寿命化に関して文献調査を行い，どのような領域の研究が比較的多く取り組まれたか，また取り組みの少ない研究領域はどこかを調べる．そしてそれらの調査を基に長寿命化のための戦略を提案する．

2.2 工具に関する研究

2.2.1 工具のコーティング

コーティング工具は超硬合金を母材とし，その表面に数ミクロンの厚さの，炭化物，窒化物，酸化物などのセラミックスの薄膜を被覆している．母材である超硬合金の強靱性と，表面物質であるセラミックスの耐摩耗性，耐酸化性，耐焼き付き性などをあわせもつ．さらにコーティング膜の多層化などのコーティング技術の進歩，コーティング工具の母材として使用されることを前提とした強靱な専用母材の開発，冶金技術の向上による切りくず処理性能に優れたスローアウェイ工具の開発により図2-1に示すように，従来の超硬合金に比べ耐欠損性，耐摩耗性がともに向上した．

近年の使用量を図2-2に示すが，環境問題を受けたドライ切削加工への要望増により近年急増していた使用量は，さらに伸びてゆくと推測される．完全ドライ切削加工実現に最も大きな役割を果たす技術と言える．

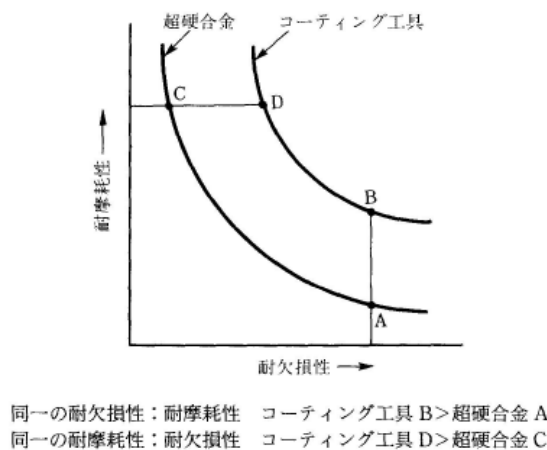


Fig. 2-1 Cemented carbide V.S. coated²⁻¹⁾

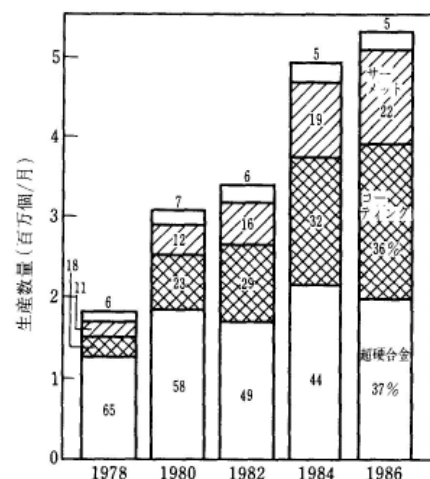
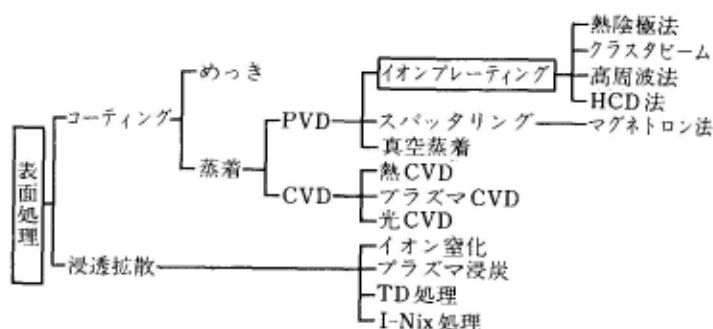


Fig. 2-2 Shares of cutting tools production²⁻¹⁾

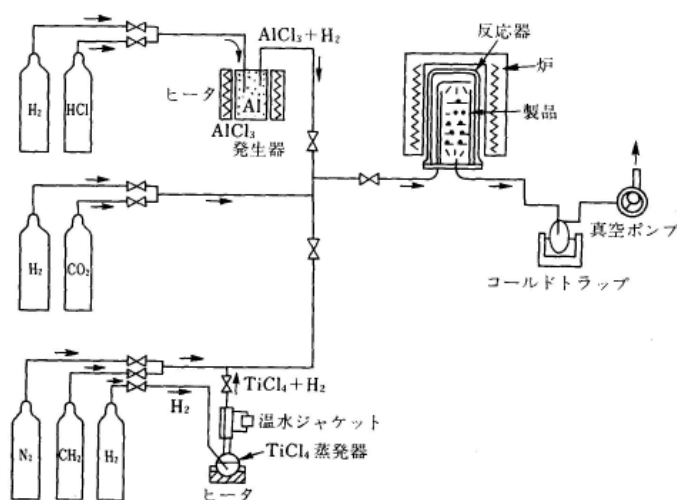
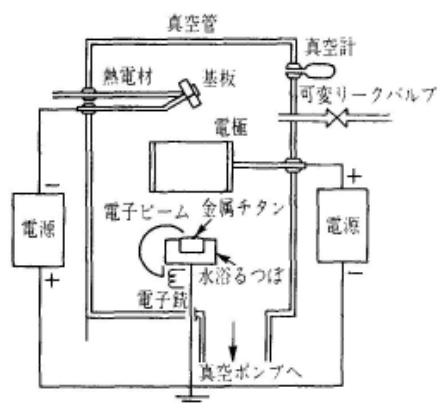
Table 2-1 Classification of surface treatments²⁻²⁾

2.2.2 工具コーティングの方法

表2-1に主たる表面処理の方法を示す。セラミックス薄膜の被覆方法に関しては種々研究、開発が行われている。しかし実際に工業化されているものは、気相からセラミックスを母材表面に被覆させる化学蒸着法（chemical vapor deposition, CVD 法）とイオンプレーティング法に限られる。CVD 法は熱エネルギーを外部から供給し、化合物を熱分解したり、化学反応させ、母材の表面に被覆物質を析出させ被覆する手法である。図2-3に、CVD 装置の概念図を示す。

イオンプレーティング法は、被覆物質を電子ビームなどで加熱気化させるとともに、補材ガスに外部から電気エネルギーを加え、プラズマ状態へ励起することによって、イオン化を促進し反応させ被覆する手法である。図2-4にイオンプレーティング法の1つである直流アーク放電イオンプレーティング法の設備の模式図を、表2-2にCVD 法とイオンプレーティング法の比較を示す。

両者はそれぞれ一長一短があるが、基本的にCVDは厚い膜を作りやすく低コスト、PVDは付き回り性がよいためエンドミルなどの複雑形状向きだが、厚い膜を形成するのには向かないためコストはCVD より高いと考えておけばよい。

Fig. 2-3 Illustration of CVD process²⁻³⁾Fig. 2-4 Illustration of PVD process²⁻⁴⁾Table 2-2 Comparisons of PVD and CVD of cutting tools²⁻⁵⁾

	CVD 法	PVD 法
1. 原 理	ガスにより化学的にコーティングする	イオンなどにより物理的にコーティングする
2. コーティング物質	TiC, TiN, TiCN, Al ₂ O ₃ など	TiC, TiN, TiCN, など
3. 処 理 温 度	通常1 000°C 前後	通常 500°C 以下
4. 処 理 母 材	通常, 超硬合金と同等ないしはそれ以上の耐熱性を有する材料	ハイス, ロー付工具, 超硬合金, ほか各種
5. コーティング品の強度	母材よりやや低下する	母材の強度とほぼ同じ
6. 母材との接着性	優れる	CVD より劣る
7. 母材形状の制約・量産性	形状に制約なし 量産性優れる	穴の内面などは不向き, 量産性に劣る

PVD 法の適した用途

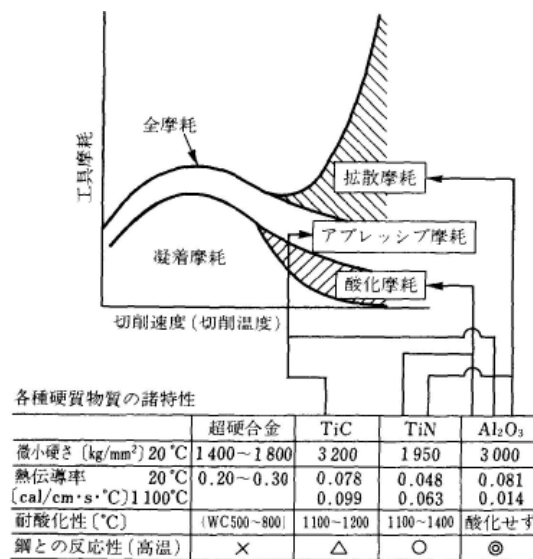
- HSS 工具
- 超硬ロー付工具

- 鋼フライス用チップ
- 回転工具
超硬ドリル
超硬エンドミル

2.2.3 コーティングの種類およびその母材

図2-5に工具の摩耗機構と実用化されている各種コーティング物質の特性を示す。コーティング膜は、硬さ、耐酸化性、鋼との反応性などから摩耗の進行を防ぐとともに、超硬母材への熱遮へいの働きをしている。しかし、摩耗機構への寄与度は同図中に示すようにコーティング物質に依存するためにそれぞれ違う。

図2-6に各種膜の鋼切削時の工具摩耗の進行状況を示す。 Al_2O_3 が、クレータ摩耗、フランク摩耗ともに高速切削において少ないことから、高速切削に適することがわかる。次に、図2-7にコーティング膜質と耐欠損性の関係を示す。先ほどとはうってかわりTiN、Ti(CN)などのほうが Al_2O_3 より若干耐欠損性に優れていることがわかる。これらのことから、アルミナは(Al_2O_3)高温(高速切削)形の摩耗に強く、ついで窒化チタン(TiN)が強い。一方、炭化チタン(TiC)は高硬度であるため、すきとり摩耗に強いという一般的な傾向を知ることができる。

Fig. 2-5 Wear characteristic of coating layers²⁻⁴⁾

また、コーティング工具の切削特性は、母材にも大きく左右される。コーティング工具の耐欠損性を改善するためには、韌性に富む超硬合金母材が望まれる。具体的には、結合相部にはCoの含有量が多いか、あるいはWCの粒子径の大きな材種が好ましい。しかしながらこのような超硬合金を母材とすると、高温下強度が低くなりがちで変形しやすくなってしまったため、高速での切削ができなくなる。

これとは逆に、結合相たるCoの含有量が少ない、もしくはWCの粒子径の小さな材種では、塑性変形性に富み、高速で切削が可能だが、耐欠損性は大幅に低下してしまう。この矛盾を解決する方策として超硬合金母材の表面数十ミクロンに、韌性に富む強靱層を設け、その内部は、耐塑性変形に優れているという複合構造を有する超硬合金母材が開発されている。複合母材を用いることで、強靱性が確保され耐欠損性が著しく改善されるとともに、高速切削時には、内部の優れた耐塑性変形性が発揮されて耐欠損性と高速での耐摩耗性を両立したコーティング工具が実現できる²⁻⁷⁾。

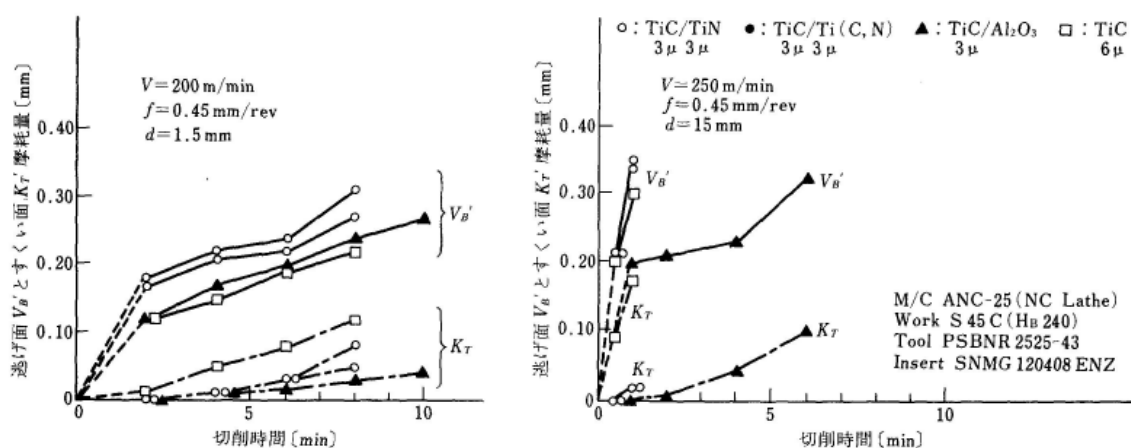


Fig. 2-6 effect of coatings type on wear resistance of tool²⁻⁴⁾

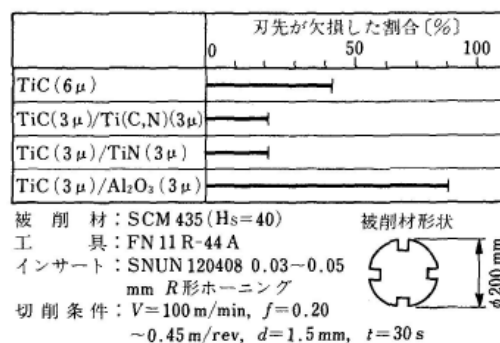
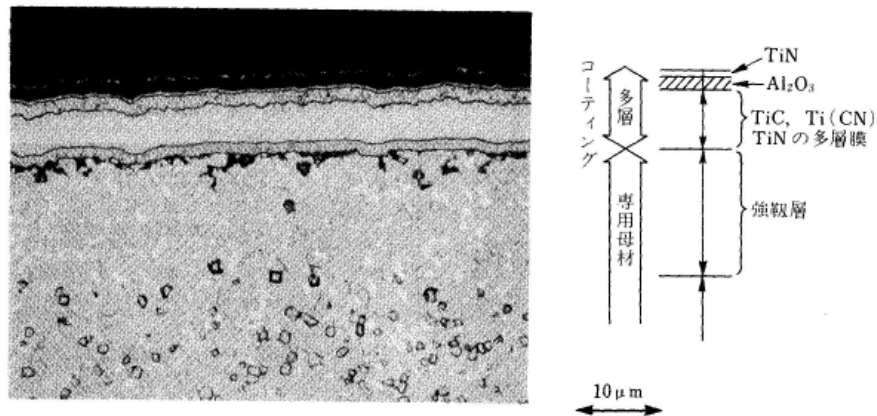
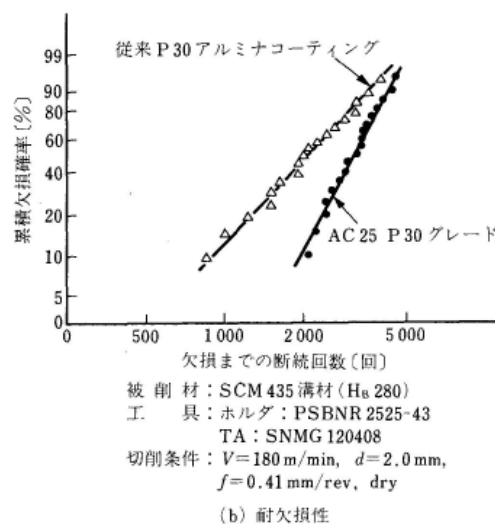
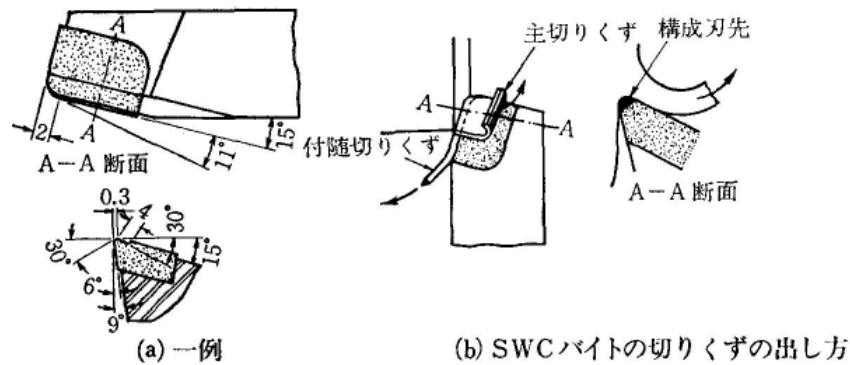


Fig. 2-7 Effect of coatings type on chipping rate of tool²⁻⁴⁾

2.2.4 最近のコーティング動向

PVD技術の向上により最近のコーティング工具は多層化が行われている。一例として図2-8に最新の多層アルミナコーティング工具の組織を示す Al_2O_3 コーティングの優れた耐摩耗性，耐溶着性に加え，TiNとTi(CN)の多層膜をその下地に配することによって， Al_2O_3 コーティング最大の欠点である耐欠損性の低下をおぎなっている。さらに母材に表面直下数十ミクロンの強靱層を設け，耐欠損性を大幅に向上させるとともに，その内部は，高速での切削を可能とする耐塑性変形性の優れた複合構造を有する専用母材が採用されている。そのための高速での耐摩耗性に優れるとともに，卓越した耐欠損性を有している。図2-9にその切削性能を示す。今後もこの多層化の傾向は継続されることは間違いない。

Fig. 2-8 Multi-layered Al_2O_3 coatings²⁻⁵⁾Fig. 2-9 Cutting performance of multi-layered Al_2O_3 coatings²⁻⁶⁾

Fig. 2-10 Illustration of Silver White Metal Cutting tool²⁻⁸⁾

2.2.5 構成刃先による工具コーティング

星らは被削材が工具先端に凝着する現象を利用してSWC切削法とその工具を開発した。図2-10に工具を示す。工具先端への凝着物は構成刃先と呼ばれ、かたさが被削材の2～3倍にもなる。通常は不安定に生成脱落を繰り返すが、この構成刃先が発生してもそれを安定的に凝着させることができれば、この切刃の一部となって刃先を保護することができる。SWC切削法はこの効果を実現したものである。この構成刃先を利用した切削法を行なうと、刃先のすくい角が大のため切削による熱の発生が少なく、工具にチップングがおきにくく、切削熱は付随切りくずが大部分吸収してしまうなどにより刃先の寿命が長い。また、動力がJISバイトに比べて10～20%低く旧式機械でも鋼材を重切削できる。

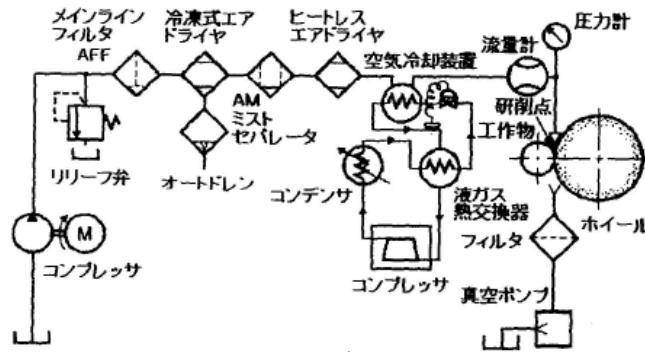
一方で、この大きな負のすくい角が切れ刃先端に設けられているために、切削開始時に大きな切削抵抗変動が生じるという欠点を有している。また、近年は超合金の品質が向上して欠損が少なくなり、超合金にコーティングが施されるようになったことから、構成刃先が消出する再結晶温度以上の切削温度になる高負荷加工条件で工具を使うことが普通になったために、あまり注目を浴びることはなくなった。

2.2.6 切削工具コーティングのまとめ

コーティング工具に関しても各超硬合金製造業者は、種々のコーティング膜構造、および種々の母材を開発しており、その組合せとしてのコーティング材種はかなりの数にのぼる。イオンプレーティング法によるコーティング工具と、CVD法による薄膜コーティング工具の適用領域が急速に拡大していくものと考えられる。

しかし、このように切削加工に明るい未来をもたらすコーティング技術とコーティング工具にも欠点はある。コーティング膜の密着性を確保するためには超硬母材表面のCoを比較的豊富にしておく必要があるからである。このことは工具コーティングが剥がれてしまうと、そこから一気に摩耗が進行するということを暗示している。ところが、現在用いられているコーティング手法を考えると、一度剥がれたコーティングを補修するような技術はない。スローアウェイ工具であればチップを交換すれば済むが、ドライ切削用のドライカットホブなどの特殊なコーティング工具ではその補修はできない。実際にコーティングホブなどは再研削はできるがコーティングができず、新品のコーティングがなされた物と比較して再研削工具では超硬母材が直接被削材と接触するために新品の1/3の寿命になるという²⁻⁹⁾。

他社との競争に曝される産業活動の動向としては、能率の向上は終わりのないテーマである。よって切削条件の高速化は今後も不可避であり、ますます高速、高負荷が工具に付与されることを考慮すると、何らかの形でコーティングの密着性を補強したり、また剥がれたコーティングを即時に補修できるような技術が望まれる。

Fig.2-11 Grinding system with chilled-air-cooling²⁻¹⁰⁾

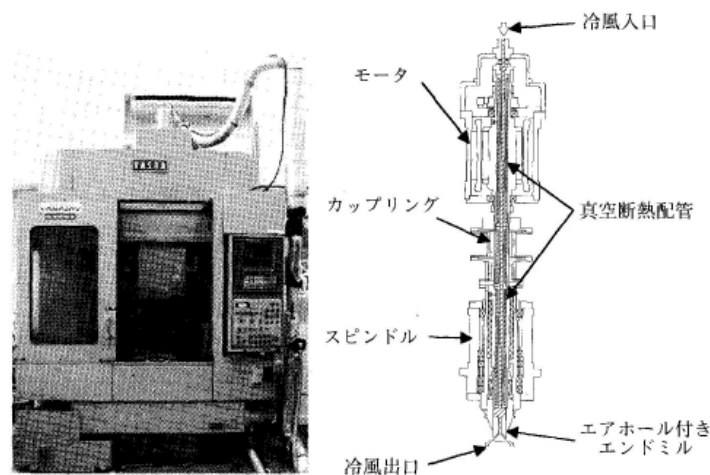
2.3 補材に関する研究

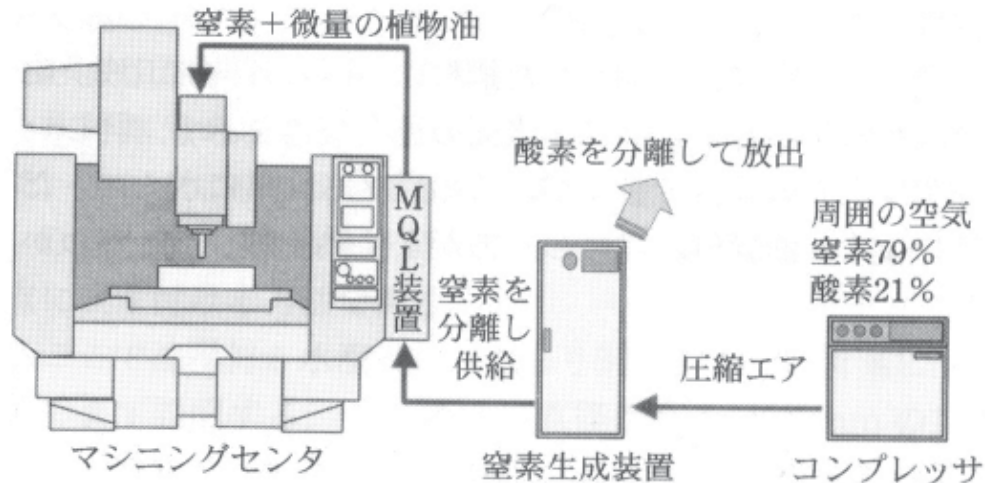
2.3.1 冷風加工

冷風加工は横川らにより提案され、我が国では最も早くから環境を意識した加工法として位置付けられてきた。加工油剤の代わりに、図2-11のように冷凍機を用いて零下30以下の冷風を作り、それを加工点に大量に吹き付けて加工点近傍や工具を冷却して工具寿命を延ばそうとする方法である。これまでの研究では、従来のエマルジョンを大量に供給して加工する方法に比べても工具摩耗、加工面性状等に関して優れた結果が得られており、実際の工場にも適用も試みられている。

しかし、冷風加工では数kW容量の空気冷却装置が必要であり、システムのイニシャルコスト、およびそのランニングコスト、全加工エネルギー消費、配管および被削材表面での結露、さらには加工点近傍での騒音の問題が残されている。

また、マシニングセンタの場合には、主軸から冷風を吹き付ける必要があり、このときに図2-12のようなスピンドルスルー方式をとる方法が必要になる。しかし、冷風が主

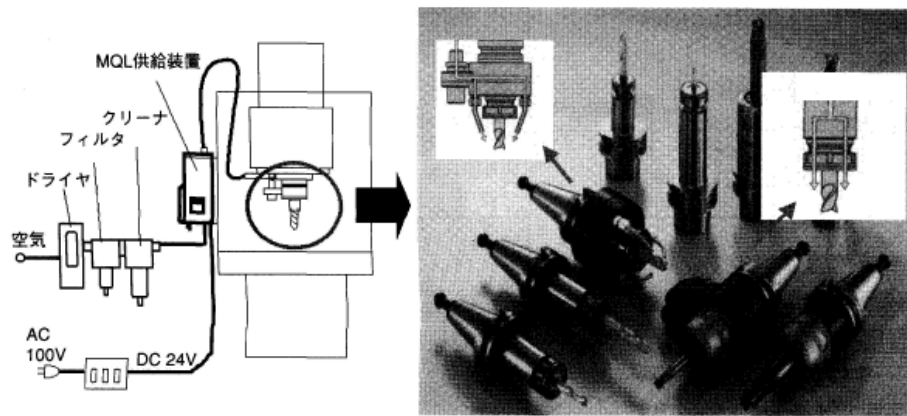
Fig.2-12 Milling center equiped with spindle for chilled-air-cooling²⁻¹⁰⁾

Fig. 2-13 Milling center with N_2 cooling system²⁻¹²⁾

軸を経由している間に主軸結露や機械本体からの熱の伝達による温度上昇が生じるため断熱などの措置が必要となる。そのための主軸のセンタースルー部を二重のパイプ構造にする必要があり、多大なコストが避けられない問題もある。

2.3.2 窒素ブロー加工

乾式切削における工具摩耗の進行を抑制するため、エンシュウ株式会社では窒素ガスを使用した窒素ブロー加工システムを開発している(図2-13)。このシステムは、マシニングセンタなどにおいて切削工具の切れ刃近傍に窒素ガスを噴射しながら加工を行うもので、工具周辺を窒素補材下に置くことにより、切削工具の酸化による摩耗・損傷を抑制し工具寿命を約2～3倍に延ばすものである。このシステムに用いられている窒素生成装置は、窒素ポンプを使用せず、大気中の窒素を酸素と分離して取り出す装置で、分離された酸素は装置周辺に排出されるので、環境への悪影響も少ない。ただし、窒息の危険性とコストの増大は避けられない問題と考えられる。

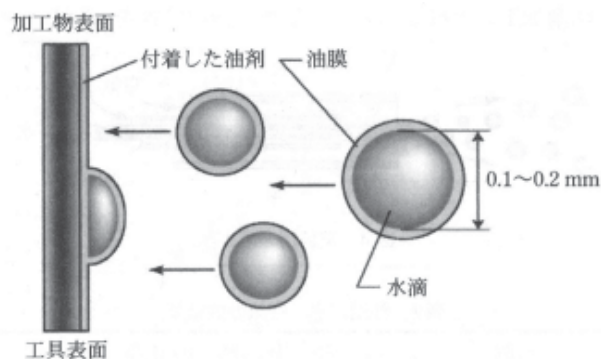
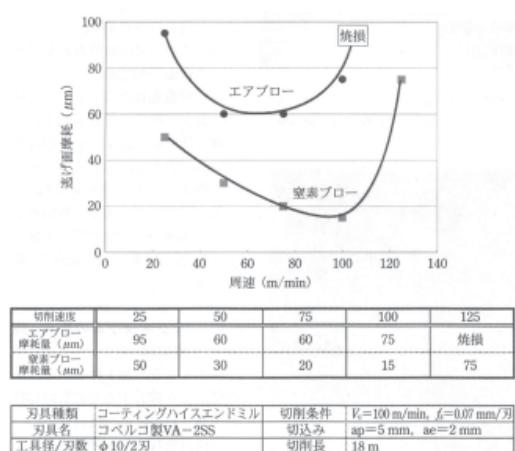
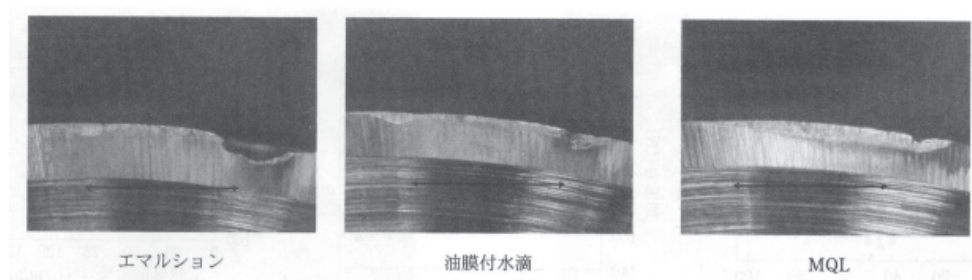
Fig. 2-14 MQL system²⁻¹³⁾

2.3.3 MQL 加工

植物油，あるいは合成エステルのような環境負荷の低い切削油剤を用い，従来の湿式加工に比べて加工液の量を極端に少なくして霧状に加工点に噴霧するのが MQL 加工法 (Minimal Quantity Lubrication) である．その装置の概要を図 2-14 に示す．

通常の湿式切削では加工液，特にエマルジョン等の水溶性切削液供給量は数十 l/h から数百 l/h にもなるが，MQL 加工法では油量としては高々数十 ml/h 程度で，場合によっては数 ml/h と極端に少なく加工油剤の使用量は従来の湿式加工に比較して， $1/10000 \sim 1/100000$ となる．

当然のことながら MQL の場合でも，重要な切削性能である工具寿命，加工面粗さ，切削動力，加工能率等が従来の湿式加工に比して悪化することは実用的には許されない．また，アルミ材料の高速切削や鋼材の高速研削加工においては切削温度の低減が重要と考えられ，MQL 加工においても切削温度を抑制することが必要とされる．しかしながら，絶対的な供給量が少ないため，ノズルの噴霧方向が確実に加工点を捉えなければならず，自動化という観点から考えるとその点が難しい．また，植物系の油剤などを用いているとはいえ，ミスト状にして油を噴霧するため，ミストが機械付近に充満しやすいだけでなく，工具や被削材の回転速度によっては加工液が工具や工作物の連れ回り流により加工点に上手く付着せず効果が得られないなど調整の困難さを指摘する声も多い．

Fig. 2-15 Concept of Oil Film on Water for Metal working Fluid ²⁻¹⁴⁾Fig. 2-16 Concept of Oil Film on Water for Metal working Fluid ²⁻¹⁴⁾Fig.2-17 Comparisons of tool wear in different cooling method²⁻¹⁴⁾

そこで、図2-15のように冷却性の高い水に油膜を付けた油膜付き水滴加工法 (Oil on Water 法) が中村らにより提案された。中村らによると、水が加工点を冷却し、水滴の表面に付けたわずかな油膜が工作物の表面への付着を促進すること意図しているという。図2-16、2-17に示すように良好な加工結果も得られているようであるが、やはり工具周囲の連れ周り風によって噴霧粒子が影響を受けることは避けられない。また、この水滴表面に油膜が形成されているかどうかなどコンセプトが実際に成り立っているかはこれからの研究を待たねばならないだろう。

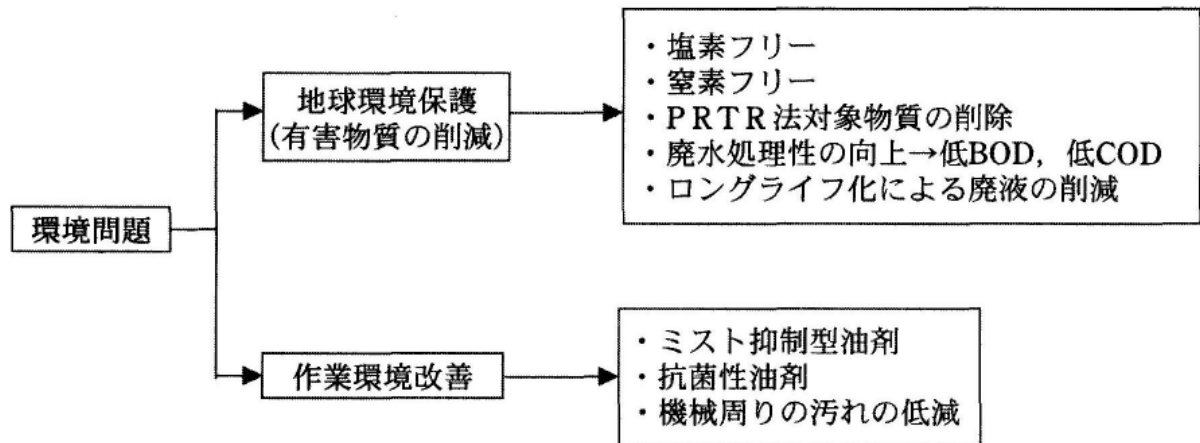


Fig. 2-18 Subjects of cutting solutions for environmental issue

2.3.4 環境対応機械加工油

本研究課題は加工油剤を使わずに工具の長寿命化を達成することを目的としている。このため加工油剤の開発動向については直接の関連はないが、主流の補材としてその動向は把握しておくことは重要である。

加工油剤の環境問題とその課題について、図 2-18 に示す^{2-15) ~ 2-18)}。油剤が関与する環境問題は、ひとつは、地球規模での環境保護であり、もうひとつは、油剤を使用している作業現場の環境改善である。地球規模での環境保護については、塩素、窒素および PRTR 法対象物質などに代表される有害物質の削減、水溶性切削油剤の廃水処理性の向上や長寿命化による廃液量の削減が挙げられる。作業環境の改善については、ミストの抑制や腐敗による悪臭の防止、また機械周りの汚れの低減などが要望されるようになっている。

機械加工油剤は、鉱油を主成分とし原液のまま使用する不水溶性切削油剤と、水に希釈して使用する水溶性切削油剤に大別される。さらに水溶性切削油剤は、希釈した際の外観によって分類される。一般にエマルジョンタイプと呼ばれる物は、JIS 分類で 1 種に当たり希釈液外観が牛乳のように白濁するものである。ソリューションタイプは A2 種半透明もしくは透明で、ソリューションタイプは A3 種で透明という特徴を有する。

シンセティックタイプの水溶性切削油剤は、一般に潤滑成分として合成潤滑剤を使用したものである。そのため、A1 種、A2 種および A3 種に対応したものがあり、それぞれを、シンセティックエマルジョン、シンセティックソリューションおよびシンセティックソリューションとそれぞれ呼ぶ。

開発動向としては、塩素に代わる潤滑添加剤、例えば硫黄系極圧添加剤や合成潤滑剤

等に変更され、塩素フリー油剤化が実現したことが大きく挙げられる。2000年12月に切削油剤のJISが塩素系添加剤を含む不水溶性および水溶性切削油剤を、JIS規格外としたことがその最大の要因である。近年では脱塩素化に留まらず、PRTR指定物質はもちろんのこと、PRTR法で指定された化学物質は使用禁止物質ではなくとも大気汚染や水質汚濁など環境への負荷が大きいと判断される物質であれば積極的に使用しない傾向にある。

また、容器包装リサイクル法および家電リサイクル法の成立、また生産現場では、ISO14000シリーズに代表される環境管理基準の導入により、世の中すべての製品について廃棄せずに再生利用を考慮していこうとする風潮が高まっており、現在、油剤メーカーでは水溶性油剤について廃棄物量の削減を目的として、腐敗の少ないロングライフ（長寿命）型切削油剤に研究の力が注がれつつある。この型の場合、6カ月から1年に一度更液していた油剤が、3年から5年は無更液になる。したがって、この期間の廃液量が削減でき、企業の廃液処理負担を軽減できることになる。

ただし、水溶性油剤を長寿命化するには、ユーザでの管理も重要な要素であり、常にpH、濃度を一定の基準に管理することが必要である。水溶性切削油剤が使用されている環境は、作動液のように閉鎖された環境ではなく、常に切りくず、潤滑油その他の混入物がある。また、加工熱や微生物等による油剤の劣化、希釈水水質の影響を考慮する必要もある。したがって、油剤にとってはただでさえ水溶性油剤使用液の劣化を促進させる過酷な環境といえるため最終的には極力油剤を使わずに加工できるのが理想である。

2.3.5 固体潤滑

固体潤滑の利用については，上原らのゲーレナイト(図2-19)の提案以降は停滞していると言える²⁻¹⁹⁾．近年ではCaスルホネートをホブ切り利用した例が報告されてはいるが，²⁻²⁰⁾，固体潤滑物質は流動性をもたないために油などに混練し，刷毛やノズルで工作物に供給するしかないため，あくまでも加工油の助剤としての利用に留まらざるを得ないので現状である．しかし，山根，鳴瀧らを中心とした(社)精密工学会難削材加工専門委員会等で快削鋼の開発が継続的に行われており，快削鋼に用いられている成分によっては固体潤滑材としての利用も十分見込めることは間違いない^{2-20)～2-23)}．

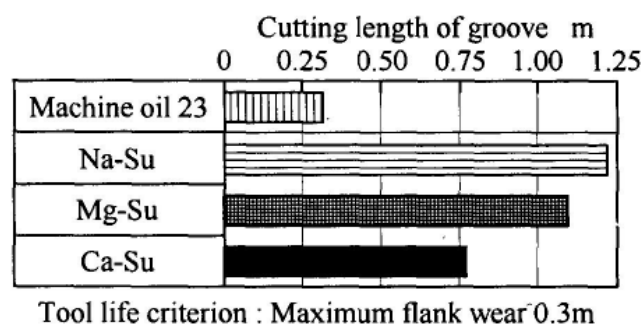


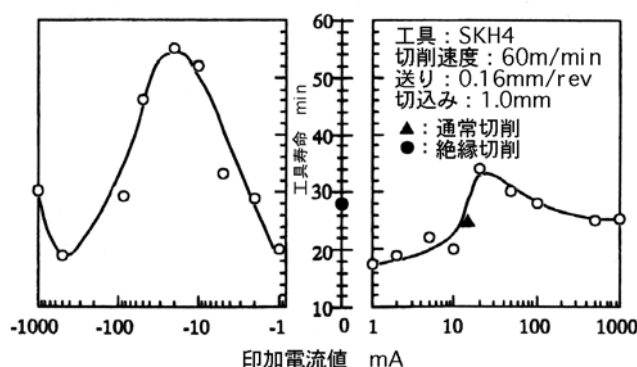
Fig.2-19 Comparisons of tool life using different kinds of sulfonates

2.3.6 代替加工油剤供給に関するまとめ

以上の結果より，代替油剤供給に関する研究においては，それ自身の開発と適切な供給方法の開発について二つの開発要素が含まれているのが理解できる．油剤の開発動向としては，油以外では主として気体の適用が試みられている．しかし，気体の場合は，油のように，水質汚濁・地質を引き起こすことはないが，大気汚染や騒音が問題となる．

また供給方法の開発については，微量の油剤を噴霧する方式に力が注がれている．しかし，噴霧供給においては噴霧後の油剤を適切に加工点まで導くことができなければ，その効果が得られにくいという欠点を有している．

これらのことを考慮すると，適切に加工点に潤滑機能を有する加工助剤を効率よく導くという方策が必要ではないかと考えられる．

Fig. 2-20 Effect of input current on tool life²⁻²⁴⁾

2.4 場の利用

場を利用して工具を長寿命化する試みとしては、熱、応力、電力、磁力に関する場が考えられる。長寿命化とも関連が深いトライボロジーの研究においては、運動をとまなう固体接触部への電力供給、電場供給、磁場供給をした場合の摩擦・摩耗の改善例が報告されている^{2-24) ~ 2-27)}。

2.4.1 熱電流の制御による工具摩耗の抑制

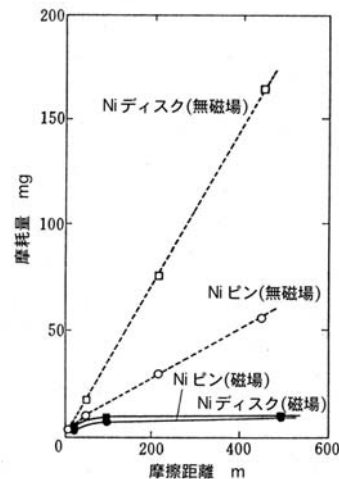
切削加工時の工具刃先部分を高温接点と考えると、工具と工作物との間に熱電対が構成され、工作機械を通じて熱電流が流れる。様々な研究により、工具と工作物との間に発生した熱起電力による熱電流に対して外部から順方向または逆方向に電圧を印加する、もしくは熱電流が流れないように工具および工作物を工作機械から絶縁すると、工具摩耗量が変化し、工具寿命に影響を与えることが報告されている^{2-24 ~ 2-27)}。

工藤らは、工具SKH4を用いた工作物S45Cの切削加工中に外部より印加した電流と工具寿命との関係について調べている。この組み合わせの場合、熱電流は工具から工作物に向けて流れており、それを助長する向き（プラス方向）および打ち消す向き（マイナス方向）それぞれの方向で工具寿命が延びる印加電流の最適値が存在することが分かっている（図2-20）。この理由として、

プラスの向きに電流を印加した場合は、工作物中の炭素の工具側への拡散（浸炭）が抑制されるため、変質劣化による工具の脆弱化を防ぐことができる。

逆にマイナスの方向に電流を印加した場合、工具界面で硬度の高いFe系の複炭化物が生成するため、工具摩耗が抑制される。

ということが挙げられている。



Load: 11N

Speed: 110 m/min

Magnetic strength: 3700 Oe

Fig. 2-21 Magnetic effect on Ni-Ni pin on disk experiment²⁻²⁸⁾

このような工具摩耗に対する電場の影響を利用し、熱電流をアクティブに制御して工具寿命を延ばすことが期待されるが、印加する電流の最適値は工具材種により異なるなど不明な点も多く、また電流を供給する回路をどのように構成するかなど付帯設備も検討する必要がある、機械加工分野への応用には更なる検討が必要である。

2.4.2 磁場による酸化作用と摩擦・摩耗の改善

磁場の摩擦摩耗への利用例としては、摩擦試験においてどちらか一方、あるいは両方の材料に強磁性体を用いて磁場を供給すると摩擦状態に変化が起きているとの報告が多い。磁場中にある鉄鋼やニッケルなどの強磁性材料の結晶はいくつかの磁区に分かれている。この磁区の境界を磁壁というが、ここに交流磁場を印加すると磁壁が振動し、固着状態の転位を解放して可動の状態にし、材料内の可動転位密度を増加させる。したがって、交流磁場は材料の変形抵抗を小さくするのではないかと考えられている。

熊谷らはこれを実験的に確認した。また直流磁場によっても、磁化により磁区が大きくなり磁壁の長さが短くなった結果、磁壁が転位を固着する度合いが少なくなるため、材料の変形抵抗が小さくなることが指摘されている。平塚ら²⁻³⁰⁾は強磁性金属であるニッケルを供試材として、大気下でピンオンディスク型摩擦試験を行う際、摩擦面に対して電磁石で垂直に直流磁場を与えてみた。すると、図2-21のようにピン及びディスクであるニッケルの摩耗が劇的に改善されたと報告している。平塚らはこの原因を、摩耗粉の酸素吸着および酸化が促進されて摩耗粉の微細化が進み、摩擦形態がシビアからマイルドに変化したためではないかとしている。このような効果は鉄においても認められたとのことで、磁場には材料の硬さを下げ、アブレシブ摩耗を増加させる何らか

の作用があると考えられている。

工具の長寿命化を図る策として、被削材を一時的に快削化したり、あるいは工具の耐摩耗性を強化できる可能性があり、興味深い。

2.4.3 外部エネルギーの供給による摩擦・摩耗改善のまとめ

トライボロジーの分野においては、このように運動をともなう固体同士の接触点における電場、磁場などの影響を調べ、摩擦摩耗の改善を行おうとする試みがある。いずれも、比較的小さな試験片を使い、軽い荷重で行った実験結果であるので、それが機械加工のような高加重、高応力下における環境下でどの程度効果が得られるのかは全く見当がつかない。しかし、付帯設備が大きくならないという前提条件を満足できれば実用性も高く、それらの利用も有益である。

2.5 工具長寿命化のための戦略

加工油剤の利用を止めるという前提条件の下で、工具の長寿命化をどのように推し進めるかということを中心にして、環境対応として広く認知されている加工技術を概観した。

これらの研究動向をさらに定量的把握するために、切削工具、研削工具、工具寿命をキーワードにして、Engineering VillageおよびJdream の日欧の二大論文データベースから工具の長寿命化に関係のある文献を検索した。すると、特に本研究課題と関連が深い研究課題が114件抽出できた。

文献を整理してみると、大きくは工具を強化するための研究か、加工雰囲気に関する研究に大別できることが明らかになった。

ここで、加工雰囲気については、TRIZ (物質 - 場の分析による発明問題解決理論)²⁻¹¹³⁾ の考え方を導入すると、さらに場(熱, 電, 磁, 応力)を利用したものと補材(固体, 液体, 気体)を利用したもののふたつに分類できる。そこで、工具, 場, 補材という三つの領域で検索結果を分類し、マッピングしたところ図2-22のように分類できた。なお、この図中の番号は本章の最後にある参考文献リストにおける引用番号を表す。そして赤字については各研究文献で工具の長寿命化を図るためにどのような手段を用いたのかと示している。

その結果、工具寿命に関する研究においては、工具強化や工具のコーティングを強化して工具の寿命を向上させようとする研究が5割、液体の加工剤に関する開発や提案が2

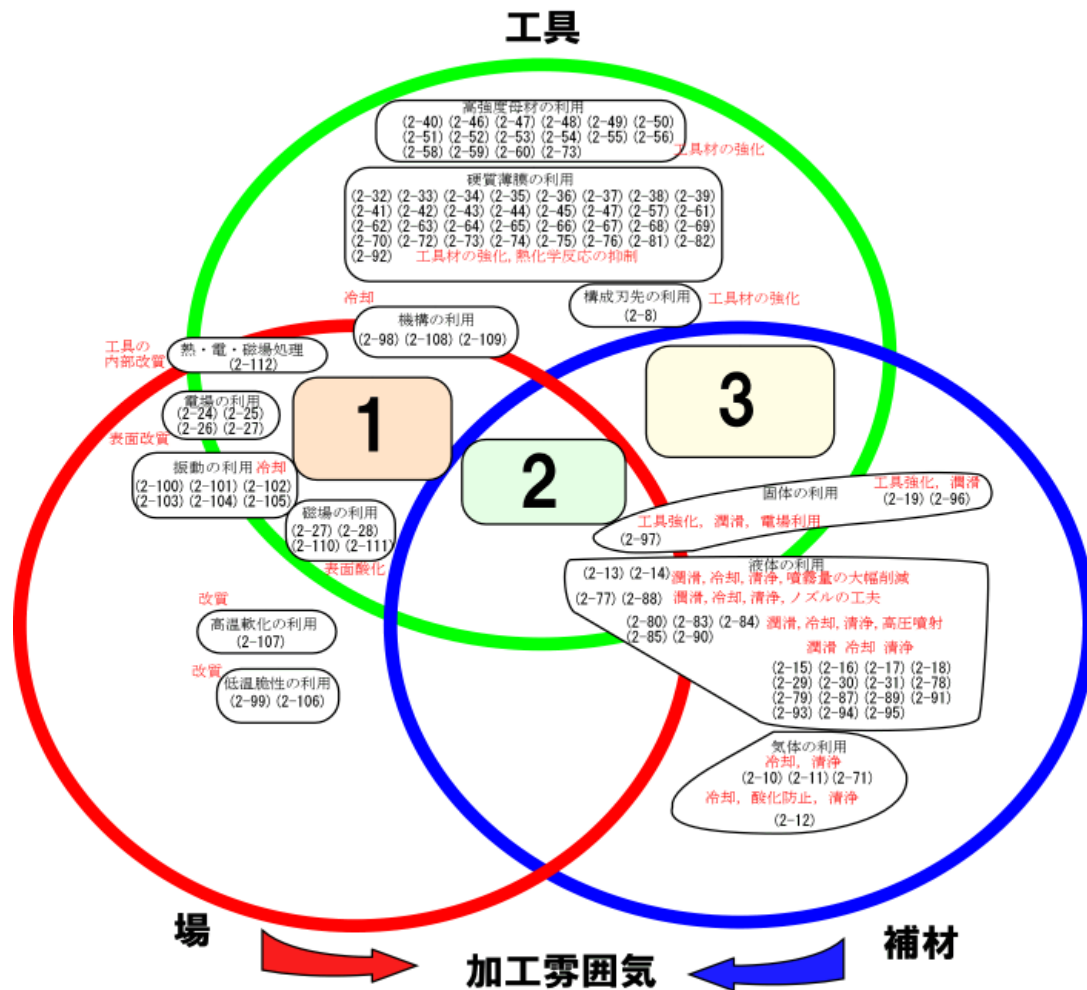


Fig 2-22 map of researches on long tool life

割であった。つまり、工具寿命を延ばすには、この二項目に関して研究が集中的に行われてきたことが改めて浮き彫りとなった。特に工具強化に関する研究については、圧倒的な数量でありこれ以上の新しい提案は困難な状況になりつつあると言える。

本研究については、加工雰囲気、すなわち場と、加工油剤を除外した補材の利用に力点を置く。図中の各領域毎に、研究提案の疎密を見ると、1, 2, 3の境界領域において研究が疎であることが理解できる。つまり、

領域1. 工具 - 場

領域2. 工具 - 場 - 補材

領域3. 工具 - 補材

といった相互が関連し合う領域の利用が比較的手薄であり、それらの領域に長寿命化に向けた新たな設計解が残されていると予想できる。

それぞれの領域について長寿命化の構想を述べると、

領域1 工具 - 場:

場を使った工具保護という構図が考えられる。工具保護には、工具を強化する、ないしは被削材を一時的に削り易くするの二つが考えられる。

工具の摩耗はなぜ生じるのかを考えると、加工点で工具は高温高圧環境下に曝されており、熱化学反応が工具と被削材に生ずるからである。特に超硬合金では、高負荷の加工条件で拡散反応が生じ、工具中の成分（バインダ）が被削材へと拡散し、摩耗が進展する。これまでは切削油剤が加工点の潤滑と冷却で温度を低下させることで熱化学反応を抑制していた。この領域1に対する長寿命化の戦略としては

- ・場を利用した工具成分の流出抑制
- ・場を利用した材料の一時的快削化

の二点を検討する。

領域2 工具 - 場 - 補材:

先にも述べたように環境対応技術として、加工油剤という補材の利用を削減するために様々な手法が提案されている。

従来の補材の供給方法としては、大量の補材を加工点周囲に注いでいた。その後MQL法などの補材の噴霧方式が提案され採用されているが、粒子状に噴霧される油剤は、工具回転で発生する連れ周り風等の影響を受けやすく、適切に加工点に粒子を吸引できなければ用をなさない。

よって場を利用して補材の吸引を行い、適切な補材供給を実現する。場を使い補材を吸引するためには、電場の利用が考えられる。場によって吸引できる補材としては、固体潤滑物質が好適である。そこで固体潤滑物質の適用と静電吸引を検討する。

領域3 工具 - 補材:

これまで補材はあくまでも工具に塗るなどして表面を被覆しそれを補う役目しかなかった。この被覆にある程度の強度が持たせられれば、補材自身が工具と成り得る。そして、補材を工具表面上に繰り返し形成し、補修できれば、工具自身の寿命は再生ができる限り永遠である。

このとき，このような補材による工具がどの程度摩耗して，そしていつ再生すれば良
いかが判断できれば，効率よく加工が継続できる．よって本領域においては，補材によ
る工具切れ刃の形成と補修，そして状態の監視技術について検討する．

このような戦略の下で工具の長寿命化を検討するが，領域1，領域2については場を利用
して遠隔的に加工域に工具の寿命を向上させるように何らかの作用を生じさせる場の
制御技術と言える．また領域3については，補材利用技術で補材を強化して切れ刃を再
生しようとする再生技術と言える．本章では，大きくはこの二つの技術について下記の
章構成にて新たな長寿命化手法を提案する．

場の制御技術の提案：

（第三章）場を利用した工具強化と被削材の快削化 （領域1）

（第四章）場を利用した潤滑物質の吸引 （領域2）

補材強化による再生技術の提案：

（第五章）切削工具の部分形成と再生技術 （領域3）

（第六章）研削工具の部分形成と再生技術 （領域3）

（第七章）工具・被削材間熱電流による工具状態の監視 （領域3）

改めて全章の概要を述べる．

第一章は序論として，本論文の着想に至った背景と本論文の目的，そして各章の構成
を述べた．

第二章では，機械加工工具の長寿命化を目的とした場の制御と再生技術の提案と題し
て，本研究において取り組む課題を提示する．まず，従来の機械加工技術において，工
具の長寿命化をキーワードに取り組まれた研究課題を振り返り，その動向を調査した．加
工点においては，工具，被削材，加工雰囲気（加工油剤）が関与しており，主にこの三
つの要素が加工の成否を左右する．そして調査の結果を利用して，研究戦略を提案する．
調査の結果，これまでの研究においては，工具の強化と切削油剤の供給に関する研究が
大部分を占めていることが明らかになった．一方で，工具と加工雰囲気に関して研究が

比較的行われてこなかった領域があることも明確になった．最終的には，先述したように3つの領域に関して研究戦略を提案した．

第三章では，「場を利用した工具強化と被削材の快削化」という題目にて，工具，被削材，補材の三つの要素の中で，切削工具の母材と被削材の磁気特性に注目し，油剤の使用を低減した場合に切削工具への負担を軽減できるような加工技術を模索する．具体的には，工具成分の熱化学反応による流失を外部から磁場を利用して固定化したり，被削材の快削化を図るなどを行う．

第四章では，場と補材の利用を目的として，潤滑機能を有する補材を効果的に加工点に導く潤滑供給方法を検討する．従来の加工油剤においては，加工点に大量の油剤を供給していた．これを見直すためにMQL法(極微量供給)などの噴霧供給法が提案されはいるが，ノズルから噴霧された油剤は工具や被削材の回転による連れ周り風などの外乱を受けやすい．そこで，場を利用して加工用の補材の吸引を検討する．ここでは，静電場を利用して固体潤滑物質を移送供給できる手段を検討し，供給方法の問題点に対する解を見出すことにする．具体的には，微細シリカ微粒子の静電特性を利用して工具への吸着を行い加工点へ供給する．そしてシリカ微粒子が有する固体潤滑機能を利用して加工特性を向上させる．

このように第三章，第四章においては場の制御を行いながら，工具成分の固定化や補材の供給を試みるが，第五章，第六章においては補材供給の考え方を一歩進めて，供給した補材層自身を強化して切れ刃とし，繰り返しその補材層を工作機械上で再生しながら切れ刃の役割を担わせ続けようとすることを試みる．このような考え方を工具機上再生技術と定義し，第五章では，「切削工具の部分形成と再生技術」と題して，工具インサートを交換するのではなく，コーティング膜自体を工具として考え，その成膜と剥離を機上で行い工具交換を代替する手法を検討する．コーティングの方法としては機上で迅速かつ簡便に強固な硬質膜が得られるように，複合めっきと電解剥離を組み合わせた手法を検討する．そして，開発した基礎工程を利用して試作機を製作する．

第六章では第五章と同じ概念の下で補材層に砥粒層の機能を持たせることを検討する．ここでは「研削工具の部分形成と再生技術」と題して，研削工具の機上再生法を模索する．研削工具は主として結合材によって，レジンボンド工具，ビトリファイド工具，メタルボンド工具に大別される．このいずれの工具においても工具の成形には焼成工程が利用される（めっきを利用した電着工具は除く）．このため，これらの工具を再生するためには，小型でかつ短時間に砥粒層の焼成を行えるかが重要になる．この章では急速加熱技術に着目し，その技術を利用して砥粒層の形成を機上で速やかに実現することを試みる．

第七章では，「工具・被削材間熱電流による工具状態の監視」と題して，切削工具と被削材との間に生ずる熱電流に着目し，その熱電気特性を利用して工具の異常が検出が可能かどうかを検討する．工具の長寿命化を行うために，工具や被削材に関する検討も重要であるが，工具の摩耗状態をできる限りインプロセスで認識し，適切なタイミングで工具を再生できる技術も望まれる．よって，工具と被削材に流れる熱電流を詳細に調べ，摩耗との相関からセンサとしての機能を検証する．

そして，第八章は本研究のまとめとして得られた成果，および今後の課題を展望を交えて論じる．

以上をもって，加工油剤を使用しない新たな機械加工工具の長寿命化技術の構築を図る．

参考文献

- 2-1)精密工学会編，精密工作便覧，コロナ社，(1992)p.66.
- 2-2)精密工学会編，精密工作便覧，コロナ社，(1992)p.57.
- 2-3)精密工学会編，精密工作便覧，コロナ社，(1992)p.66.
- 2-4)精密工学会編，精密工作便覧，コロナ社，(1992)p.67.
- 2-5)精密工学会編，精密工作便覧，コロナ社，(1992)p.68.
- 2-6)精密工学会編，精密工作便覧，コロナ社，(1992)p.69.
- 2-7)林宏爾，鈴木寿，土井良彦，粉体および粉末冶金，32 (1985) 278
- 2-8)金属切削，星 光一，工業調査会，1960 年．
- 2-9)たとえば，ヤマハ発動機（株）からの私信．
- 2-10)横川和彦，奥村成史，横川宗彦，環境にやさしいCBNホイールの冷風研削性能の研究，1998 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1998)，255．
- 2-11)横川宗彦，環境省エネに対応する工作機械と加工技術，機械と工具，2000年，Vol.7，
p.p.14-19.
- 2-12)鵜飼 久，窒素ガスを使用したドライ加工技術，精密工学会誌，(2002)，68-7，890-894．
- 2-13)稲崎一郎，環境対応ドライ・セミドライ加工，機械技術，48-11(2002)，40．
- 2-14)中村 隆，油膜付水滴加工技術，精密工学会誌，(2002)，68-7，899-902．
- 2-15) 岩田重広，環境対応型の水溶性切削油剤 - その開発動向 - ，精密工学会誌，
Vol.68, No.7, 2002, p.p919-922.
- 2-16)大胡栄一，シンセティッククーラントの最近の動向，潤滑経済，11 (2001)，15．
- 2-17) 三島裕治，環境問題と切削油剤，潤滑経済，11 (2000)，13．
- 2-18) 池田強，窒素フリー水溶性切削油剤「ユシローケンNF - 1」の特徴と用途，機械技
術，41，13 (1993) 60．
- 2-19) K.Uehara, K.Damhara， Y. Kanda, Annals of the C. I. R. P., 19, (1971)409.
- 2-20)松岡寛憲，小野 肇，津田吉広，ホブ切用切削油添加剤としてのスルホネートの工
具摩耗防止効果(第一報)，精密工学会誌，Vol.67, No.1, 2001, p.p.109-113.
- 2-21) 奥島啓式，鳴瀧則彦，Ca 脱酸鋼切削時の工具付着物の挙動(第二報)，精密機械，
(1969)，35-6，378.
- 2-22)鳴瀧則彦，村越昭男，セラミック工具の摩耗に及ぼす鋼材中の微量介在物の影響，
精密機械，(1976)，42-3，221．
- 2-23)N.Narutaki, Improvement of the Machinability of Carbon Steels due to the

- Small Increase of Sulfur Content, Int. Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, (1977), 167.
- 2-24) 遠藤吉郎, 福田嘉雄, 高宮脩武, 潤滑摩耗の挙動と微小電圧の効果, 日本機械学会論文集(第一部), 37-296, (1971).
- 2-25) 工藤邦雄, 日吉 博, 岡田 繁, 高速度工具鋼の摩耗と拡散現象に及ぼす電流の影響, トライボロジスト, 41-7, (1996).
- 2-26) 工藤邦雄, 日吉 博, 岡田 繁, 構成刃先の形態と切削機構に及ぼす熱電流の影響, トライボロジスト, 40-7, (1995).
- 2-27) 山本雄二, 電場・磁場による摩擦・摩耗のアクティブ制御, トライボロジスト, 38-8, (1993).
- 2-28) 平塚健一, 磁気とトライボロジー, 潤滑, 33-9, (1988).
- 2-29) Tribological properties of oil-soluble polymers of the olefinic series, Ustrekhnova, O.A. (Politekhnikheskij Inst), Ezhikova-Babakhanova, T.G., Basov, G.B. Source, Khimiya i Tekhnologiya Topliv i Masel, n 11, Nov, 1993, p 17-23.
- 2-30) Cutting with environment-friendly cooling method using water evaporation (proposition on the method for supplying water and its evaluation), Tanabe, Ikuo (Central Machine Shop, Nagaoka University of Technology), Minh, Truong Hong, Shinada, Masato Source, Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, v 70, n 5, May, 2004, p 1503-1508.
- 2-31) Improvement of tool life by jet supplied cutting fluid, Tanigawa, Y., Miyazawa, S. Source, Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering, v 63, n 4, Apr, 1997, p 540-544.
- 2-32) Cutting performance of a nanocrystalline diamond-coated tool, Nitta, Y. (Res. & Dev., Asahi Diamond Ind. Co. Ltd., Chiba, Japan), Hiroki, O., Une, K. Source, New Diamond and Frontier Carbon Technology, v 15, n 4, 2005, p 195-203.
- 2-33) Wear resistance of tools with various coatings when operating at high temperatures in sticking conditions, Sajdakhmedov, R.Kh. (Moskovskij Aviatsionnyj Inst), Karpman, M.G., Gol'tsov, V.A. Source, Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov, n 6, Nov-Dec, 1993, p 137-139.
- 2-34) Producing and properties of electrospark coatings on hard VK6 alloy Podchernyaeva, I.A. (Inst Problem Materialovedeniya AN Ukrainy), Lavrenko, V.A., Berezhanskaya, V.I., Pejkhua, Kh.E., Shvets, V.A., Chiplik, V.N. Source, Poroshkovaya Metallurgiya, n 11-12, Nov-Dec, 1994, p 19-24.
- 2-35) Machining of depleted uranium using coated cutting tools, Jackson, M.J. (Center for Advanced Manufacturing, College of Technology, Purdue University), Robinson, G.M. Source, Journal of Materials Engineering and Performance,

v 15, n 2, April, 2006, p 161-171.

- 2-36) Influence of chromium content on the dry machining performance of cathodic arc evaporated TiAlN coatings, Harris, S.G. (Swinburne University of Technology), Doyle, E.D., Vlasveld, A.C., Audy, J., Long, J.M., Quick, D. Source, Wear, v 254, n 1-2, January, 2003, p 185-194.
- 2-37) A comparison of five categories of carbon-based tool coatings for dry drilling of aluminum, Dasch, J.M. (Gen. Motors Res. Labs., Warren, MI, USA), Ang, C.C., Wong, C.A., Cheng, Y.T., Weiner, A.M., Lev, L.C., Konca, E. Source, Surface & Coatings Technology, v 200, n 9, 8 Feb. 2006, p 2970-2977.
- 2-38) Enhancing nucleation density and adhesion of polycrystalline diamond films deposited by HFCVD using surface treatment on Co cemented tungsten carbide, Sein, H. (Dept. of Chem. & Mater., Manchester Metropolitan Univ., UK), Ahmed, W., Jackson, M., Polini, R., Hassan, I., Amar, M., Rego, C. Source, Diamond and Related Materials, v 13, n 4-8, April-Aug. 2004, p 610-615.
- 2-39) Thermal wear of diamond segments in sawing and its restraint by Ti-Cr coating, Yu, Yi-Qing (Coll. of Mechanoelectron., Huaqiao Univ.), Zeng, Wei-Min, Xu, Xi-Peng Source, Mocaxue Xuebao/Tribology, v 22, n 6, November, 2002, p 472-476.
- 2-40) Application of lasers in powder metallurgy, Tolochko, N.K. (Vitebskoe Otdelenie Inst Fiziki Tverdogo Tela i Poluprovodnikov AN Belarusi) Source, Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov, n 1, Jan-Feb, 1995, p 94-101.
- 2-41) Mechanical properties and wear resistance of multilayer thin coatings on cutting tools, Ding, J.N. (State Key Lab. of Tribology, Tsinghua Univ.), Wen, S.Z., Meng, Y.G. Source, Mocaxue Xuebao/Tribology, v 20, n 3, June, 2000, p 170-174.
- 2-42) Effect of zirconium nitride coating and thermal-electric hardening of tungsten-free hard alloy cutting plates on their wear resistance and surface quality of longitudinal turn cut items, Kuskov, V.N. (Tyumenskij Industrial'nyj Inst), Parfenov, V.D. Source, Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov, n 1, Jan-Feb, 1994, p 79-82.
- 2-43) Rivestimenti sottili nanostrutturati per il controllo dell'usura, Applicazioni e limiti (Nanocomposite thin coatings for wear control, Applications and limits), Franchi, D. (Ferioli and Gianotti, Div. Genta Platit), Rostagno, M. Source, Metallurgia Italiana, v 97, n 11-12, November/December, 2005, p 21-26.
- 2-44) Wearing hard alloy tool with high thermal conducting multilayer coatings, Klubovich, V.V. (Inst Tekhnicheskoy Akustiki AN Belarusi), Dubrovskij, A.A., Litvinov, A.A., Pishchenko, V.N. Source, Trenie i Iznos, v 15, n 6, Nov-Dec, 1994, p 1003-1008.
- 2-45) Formation of nickel-alloyed chromium coatings on the diamond, Chuprina,

- V.G. (Inst Problem Materialovedeniya AN Ukrainy), Shalya, I.M., Shurkhal, V.V. Source, Poroshkovaya Metallurgiya, n 1, Jan, 1993, p 47-51.
- 2-46) Impact of ion modification of HSS surfaces on the wear resistance of cutting tools with surface engineered coatings, Fox-Rabinovich, G.S. (Brockhouse Institute/Material Res., McMaster University), Bushe, N.A., Kovalev, A.I., Korshunov, S.N., Shuster, L.S., Dosbaeva, G.K. Source, Wear, v 249, n 12, December, 2001, p 1051-1058.
- 2-47) Strengthening of hardmetal inserts for cutting tools through heat treatment and surface modifications (PVD, CVD coatings), Szutkowska, M. (Inst of Metal Cutting) Source, Journal of Materials Processing Technology, v 92-93, Aug, 1999, p 355-359.
- 2-48) Cold plasma treatment of the diamonds in the sintered tools for stone cutting, Sorrentino, L. (Dipt. di Ingegneria Ind., Univ. degli Studi di Cassino, Italy), Turchetta, S., Carrino, L. Source, Powder Metallurgy World Congress & Exhibition (PM2004), 2004, p 7.
- 2-49) Application of PIM for manufacturing WC-Co milling inserts, Sung, Hwan-Jin (RIST), Yoon, Taesik, Ahn, S. Source, Funtai Oyobi Fumatsu Yakin/Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, v 46, n 8, Aug, 1999, p 887-892.
- 2-50) Diamond cutting tools with a Ni3Al matrix processed by reaction pseudo-hipping, Hwang, K.S. (Department of Materials Science and Engineering, National Taiwan University 1), Yang, T.H., Hu, S.C. Source, Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science, v 36, n 10, October, 2005, p 2801-2806.
- 2-51) In situ preparation of Si3N4/SiC nanocomposites for cutting tools application, Sajgalik, P. (Inst. of Inorg. Chem., Slovak Acad. of Sci., Bratislava, Slovakia), Hnatko, M., Lences, Z., Dusza, J., Kasiarova, M. Source, International Journal of Applied Ceramic Technology, v 3, n 1, 2006, p 41-46.
- 2-52) Development of SUMIBORON PCBN tool for machining of sintered powder metal alloys and cast iron, Ota, M. (Super Hard Mater. Dev. Group, Sumitomo Electr. Hardmetal Corp., Itami, Japan), Kukino, S., Uesaka, S., Fukaya, T. Source, SEI Technical Review, n 59, Jan. 2005, p 60-65.
- 2-53) Al2O3/Ti(C0.3N0.7) cutting tool material, Song, Shi-Xue (School of Mechanical Engineering, Shandong University), Ai, Xing, Zhao, Jun, Huang, Chuan-Zhen Source, Materials Science and Engineering A, v 356, n 1-2, Sep 15, 2003, p 43-47.
- 2-54) Study of the diamond 5%wt-cobalt sintering under the HPHT lowest limit, Lima, F.T.C. (Laboratorio de Materiais Avancados, Univ. Estadual do Norte Fluminense, Alberto Lamego, CA, USA), Bobrovnichii, G.S., Filgueira, M. Source, Materials Science Forum, v 498-499, 2005, p 225-230.
-

- 2-55)Thermochemical properties of sphBN polycrystals, Ogorodnik, V.V. (Inst Sverkhtverdykh Materialov AN Ukrainy), Mukovoz, Yu.A., Klimenko, S.A., Ivas'kevich, Ya.V., Postolova, G.G., Bezhenar', N.P. Source, Sverkhtverdye Materialy, n 2, Mar-Apr, 1993, p 24-28.
- 2-56)Functionally graded WC/Co/diamond composites, Voronov, O.A. (Diamond Mater. Inc., Piscataway, NJ, USA), Tompa, G.S., Kear, B.H., Sadangi, R.K., Wilson, C.C. Source, Diamond Materials. Proceedings of the Sixth International Symposium. (Electrochemical Society Proceedings Vol.99-32), 2000, p 290-299.
- 2-57)Comparative investigation of smooth polycrystalline diamond films on dental burs by chemical vapor deposition, Sein, Htet (Department of Chemistry and Materials, Manchester Metropolitan University), Ahmed, Waqar, Rego, Christopher, Jackson, Mark, Polini, Riccardo Source, Journal of Materials Engineering and Performance, v 15, n 2, April, 2006, p 195-200.
- 2-58)The improvement of performance of carbide rock-cutting tools, Lisovskij, A.F. (Inst. Sverkhtverdykh Materialov, NAN Ukrainy) Source, Sverkhtverdye Materialy, n 5, 2000, p 15-20.
- 2-59)Etude du frittage des materiaux entrant dans la fabrication des meules diamantees (Sintering study of the materials used in the manufacturing of diamond grinding wheels), Canale, P. (Lab. Physico-chimie de l'Etat Solide, UMR 8648, Universite de Paris-Sud), Servant, C., Cizeron, G. Source, Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques, v 101, n 2, February, 2004, p III-VIII+137-151.
- 2-60)A diamond tool based on the structurally instable bond with new carbon types, Antsiferov, V.N. (NTs Poroshkovogo Materialovedeniya), Oglezneva, S.A., Shatsov, A.A. Source, Trenie i Iznos, v 22, n 5, 2001, p 587-591.
- 2-61)Chemical vapour deposition diamond coating on tungsten carbide dental cutting tools, Sein, H. (Dept. of Chem. & Mater., Manchester Metropolitan Univ., UK), Ahmed, W., Rego, C.A., Jones, A.N., Amar, M., Jackson, M., Polini, R. Source, Journal of Physics, Condensed Matter, v 15, n 39, 8 Oct. 2003, p S2961-2967.
- 2-62)Chromium carbide thin coatings for titanium based hardmetals, Konyashin, I.Y. (Max-Planck-Inst fuer Metallforschung) Source, Le Vide Science and Technique and Applications, n 279, Jan-Mar, 1996, Hard Coatings, p 182-184.
- 2-63)Mechanism and prediction of failure of diamond films deposited on various substrates by HFCVD, Zhou Ling-Ping (Coll. of Mater. Sci. & Eng., Hunan Univ., China), Sun Xin-Yuan, Li Shao-Lu, Li De-Yi, Chen Xiao-Hua Source, Transactions of the Nonferrous Metals Society of China, v 14, spec. issue., Oct. 2004, p 229-233.
- 2-64)Modification by composite coatings of knives made of low alloy steel for

- wood machining purposes, Beer, P. (Christian-Doppler-Lab., Bodenkultur Univ., Vienna, Austria), Rudnicki, J., Ciupinski, L., Djouadi, M.A., Nouveau, C. Source, Surface & Coatings Technology, v 174-175, Sept.-Oct. 2003, p 434-439.
- 2-65) Development of diamond-coated drills and their cutting performance, Chen, M. (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Jian, X.G., Sun, F.H., Hu, B., Liu, X.S. Source, Journal of Materials Processing Technology, v 129, n 1-3, Oct 11, 2002, p 81-85.
- 2-66) Deposition methods, properties and metal cutting applications of ceramic films, Chatterjee, Subhajit (Univ of Tennessee), Chandrashekhar, Srinivasan Source, Key Engineering Materials, v 114, 1996, p 67-104.
- 2-67) Diamond coatings on WC-Co cutting tools using microwave plasma CVD Ikeda, Tsutomu (Cutting Tool Div), Kameoka, Seiji, Ozaki, Katsuhiko, Satoh, Toshiki Source, KOBELCO Technology Review, n 19, Apr, 1996, p 17-22.
- 2-68) Properties and applications of amorphous diamond carbon and metal nitride films, Goetz, B. (Molecular Technol. Inc., Tucson, AZ, USA), Skotheim, T., Inkin, V., Kirpilenko, G., Bozhkov, V., Dadonov, A. Source, Diamond Materials. Proceedings of the Sixth International Symposium. (Electrochemical Society Proceedings Vol.99-32), 2000, p 369-382.
- 2-69) Using coatings based on SiC and SiO₂ for strengthening hardalloyed cutting tools, Kameneva, A.L. Source, Poroshkovaya Metallurgiya, n 11-12, 2003, p 111-117.
- 2-70) Study on the damage mechanism of diamond film-coated tools, Huang Shu-tao (Shenyang Inst. of Technol., China), Xu Li-fu, Yao Ying-xue, Yuan Zhe-jun Source, Journal of Synthetic Crystals, v 33, n 2, April 2004, p 278-281.
- 2-71) 静電冷却による切削工具の寿命改善の試み, 慈道守男 (機械技研), 機械技術研究所報 Vol.31, No.5, Page.298-300 (1977).
- 2-72) Application of diamond-coated cutting tools, Kanda, K. (Res. & Dev. Div., Nachi-Fujikosh Corp., Toyama, Japan), Takehana, S., Yoshida, S., Watanabe, R., Takano, S. Source, Surface and Coatings Technology, v 73, n 1-2, July 1995, p 115-20.
- 2-73) A diamond tool with phase transformations, Ogletzneva, S.A. (Research Center of Powder Mater., Perm, Russia) Source, Journal of Friction and Wear, v 25, n 1, 2004, p 70-75.
- 2-74) Sputtered coatings based on the Al₂Au phase, Mitterer, C. (Dept. of Phys. Metall. & Mater. Testing, Univ. of Leoben, Austria), Lenhart, H., Mayrhofer, P.H., Kathrein, M. Source, Integrative and Interdisciplinary Aspects of Intermetallics. Symposium (Materials Research Society Symposium Proceedings Vol.842), 2005, p 467-472.

- 2-75) The improvement of cutting performance in semi-dry condition by the combination of DLC coating and CVD smooth surface diamond coating, Hanyu, H. (Res. & Dev., OSG Corp., Aichi, Japan), Kamiya, S., Murakami, Y., Kondoh, Y. Source, Surface & Coatings Technology, v 200, n 1-4, 1 Oct. 2005, p 1137.
- 2-76) 切削工具へのDLC薄膜のコーティング, 北嶋弘一, 上田晃, 長谷川剛士 (関西大工), 島順彦, 神之村俊 (日立ツール), 関西大学先端科学技術シンポジウム講演集, Vol.7th, Page.106-110 (2003.03.31).
- 2-77) ビドリファイドCBNホイールによる軟鋼研削へのフローティングノズルの適用, ニノ宮進一 (北陸職業能力開発大), 鈴木清 (日本工大), 植松哲太郎, 岩井学 (富山県大), 今井智康 (豊田バンモップス), 砥粒加工学会誌 Vol.48, No.5, Page.258-262 (2004.05.01).
- 2-78) コーティングホブに対する水溶性切削油剤の工具摩耗低減効果, 松岡寛憲, 津田吉広 (大分大 工), 小野肇 (ユシロ化学工業), 精密工学会誌 Vol.69, No.1, Page.110-114 (2003.01.05).
- 2-79) 水溶性加工液による耐熱合金の超仕上げ, 上田隆司, 山田啓司, 細川晃 (金沢大工), 荻野健太郎 (金沢大 大学院), 佐藤昌彦 (富山県大) 精密工学会誌 Vol.68, No.3, Page.430-434 (2002.03.05).
- 2-80) 超耐熱合金インコネル718の高速切削加工 高圧注液を用いた仕上げ切削, 板倉勝利 (広島工業大学専), 黒田基文, 土井義博, 塚本頼彦 (三菱重工業 広島研), 有浦泰常 (九大 大学院), 精密工学会誌 Vol.66, No.10, Page.1611-1615 (2000.10.05).
- 2-81) A(AI,Ti)N コーティング超硬ドリルのドライ切削性能, 池内寛, 早崎浩, 青木太一 (神鋼コベルコツール), Tool Tech No.2, Page.8-10 (1999.03.01).
- 2-82) (Al,Ti)N コーティング超硬エンドミルの高速ドライ切削性能, 北浦精一郎, 青木太一 (神鋼コベルコツール), Tool Tech No.2, Page.4-7 (1999.03.01).
- 2-83) 切削液のジェット注入による工具寿命の向上, 谷川義博 (福岡県工技セ), 宮沢伸一 (機械技研), 精密工学会誌 Vol.63, No.4, Page.540-544 (1997.04).
- 2-84) 切削液のジェット注入による工具寿命の向上(2), 谷川義博, 斎藤宏昭 (福岡県化学繊維研 機械電子研), 劉信芳 (江蘇理工大学), 宮沢伸一 (機械技研), 福岡県工業技術センター研究報告 No.6(1995), Page.37-41 (1996.10).
- 2-85) 切削加工における高圧クーラント適用条件の検討, 鶴英明, 安斎正博, 中川威雄 (理研), 松岡甫たか (松岡技術研), ラピッドプロダクトマニファクチャリング Vol.2nd, Page.31-37 (1996.03).
- 2-86) グラインディングセンタ用研削焼付き防止カップ砥石の開発, 中川平三郎 (鳥取大 教育), 垣野義昭, 松原厚, 立岩真吾 (京大 工), 喜田義宏 (大阪工大), 精密工学会誌 Vol.61, No.1, Page.122-126 (1995.01).
- 2-87) 水溶性切削剤の深穴工具切れ刃のクレータ摩耗へおよぼす影響, 田口紘一, 明石剛二, 松川真也 (有明工高専), 赤沼進 (日立精機), 有明工業高等専門学校紀要 No.29, Page.95-100 (1993.01).

- 2-88) 巻付けノズルを用いての研削油剤供給法が研削性能に及ぼす影響, 樋口勝敏 (明治大 大学院), 横川和彦 (明治大 理工), 精密工学会誌 Vol.57, No.7, Page.1271-1276 (1991.07).
- 2-89) タッピングにおける添加剤の作用に関する研究 (第1報) 切削性能ならびに切削機構に及ぼす脂肪酸の効果, 若林利明, 小倉茂稔 (日本石油), トライボロジスト Vol.36, No.3, Page.219-227 (1991.03).
- 2-90) 高圧給油による小径深穴ドリル加工の研究, 松原十三生, 山本久隆, 岡村進 (鳥取大 工), 山野誠 (鳥取大 大学院), 精密工学会誌 Vol.55, No.3, Page.520-525 (1989.03).
- 2-91) チタンコーテッドハイス工具の切削油による効果, 原田泰男, 星野弘臣 (埼玉県 鋳物機械工試), 埼玉県鋳物機械工業試験場業務実績概要 Vol.1985, Page.53-60 (1986).
- 2-92) コーティングエンドミル, G シリーズの切削性能, 森内忠義, 広野和雄, 佐藤利彦 (不二越), 不二越技報 Vol.41, No.2, Page.9-17 (1985.11).
- 2-93) 不水溶性研削油剤中の極圧添加剤の効果 - ステンレス鋼の円筒プランジ研削 -, 中山守, 工藤勝久, 玉村謙太郎 (大阪市大工), 池田勝彦 (光洋精工), 精密機械 Vol.51, No.7, Page.1409-1413 (1985.07).
- 2-94) エンドミル加工における切削油剤の効果について, 小牧博寿, 田村義光 (宮崎県 工試機械部), 宮崎県工業試験場研究報告 No.26(1981), Page.79-82 (1982).
- 2-95) 高速ホブ削り用切削油剤の研究, 相浦正人, 米倉将隆, 永野喜三郎 (久留米工高専), 不二越技報 Vol.38, No.2, Page.17-26 (1982.12.01).
- 2-96) フェライトの精密研削 II 固体潤滑剤を充てんした微粒ダイヤモンドレジノイドボンドと石の摩耗, 三宅正二郎, 鶴田兼吉, 渡辺純二, 上野よしゆき (電電公社 武蔵野電通研), 精密機械 Vol.44, No.9, Page.1050-1051 (1978).
- 2-97) Metal Cutting Lubrication Through Continuous Electroplating, N. H. Cook, et. al., Journal of the American Society of Lubrication Engineers, Nov., 1966, pp. 447-452.
- 2-98) Hot Machining with Cooled Cutting Tools, T. Asakawa, H. Takeshita, H. Uehara, Annals of the C.I.R.P. Vol.36, 1, 1987, pp.37-40.
- 2-99) Cryogenic Coolants Speed Titanium Machining, Grumman Aircraft Engineering Corp., MACHINERY, July, 1965, pp. 103-104.
- 2-100) 振動切削 - 基礎と応用 -, 隈部淳一郎, 実教出版社, 1979, pp.374.
- 2-101) Eiji Shamoto and Toshimichi Moriwaki, Study on Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, Vol.43/1, pp.35-38, 1994.
- 2-102) Eiji Shamoto and Yusuf Altintas, Prediction of Shear Angle in Oblique Cutting with Maximum Shear Stress and Minimum Energy Principles, Trans. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.121, pp.399-407, 1999.
- 2-103) Eiji Shamoto and Toshimichi Moriwaki, Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting, Annals of the

- CIRP, Vol.48/1, pp.441-444, 1999
- 2-104)Eiji Shamoto, Chun Hong Park and Toshimichi Moriwaki, Analysis and Improvement of Motion Accuracy of Hydrostatic Feed Table, Annals of the CIRP, Vol.50/1, pp.285-290, 2001.
- 2-105)Eiji Shamoto, Norikazu Suzuki, Eiji Tsuchiya, Y. Hori, H. Inagaki and K. Yoshino, Development of 3 DOF ultrasonic vibration tool for elliptical vibration cutting of sculptured surfaces, Annals of the CIRP, Vol.54/1, pp.321-324, 2005.
- 2-106)Characteristics of tool wear in cryogenic machining, K. Uehara, S. Kumagai, Vol.18, 2, 1970, pp. 273.
- 2-107)E.J.Krabacher, M.E.Merchant, Trans. ASME, Vol.73, 6, 1951, pp.751.
- 2-108)コーテッドチップを用いたドライ切削の研究 (第1報) 吸熱工具を用いた場合の効果, 竹内貞雄, 神 雅彦, 野口裕之, 村川正夫, 2000 年度精密工学会委秋季大会学術講演会講演論文集, p187.
- 2-109)High performance machining of SiC whisker reinforced aluminum composite by self-propelled rotary tools, P. Chen, T. Hoshi, Annals of the C.I.R.P, Vol.41, 1, 1992, p. 59.
- 2-110)(株)東芝, 特開平 10-0249601 .
- 2-111)磁気パルスによる工具寿命の延長, 大久保俊一, 松岡諭, 機械と工具, Vol.33, No.9, (1989).
- 2-112)熱・電・磁場附加による工具改質に関する研究, 周 立波, 福田勇夫, 清水 淳, 江田 弘, 加藤明彦, 谷山久法, 砥粒加工学会誌, Vol.46, No. 10, 2002, OCT, pp.506-509.
- 2-113)TRIZ入門, Victor F. Fey, Eugene I. Rivin, 畑村洋太郎, 日刊工業新聞社, 1997 年 .

第三章

場を利用した 工具強化と被削材の快削化

3.1 緒言

本章においては場を利用して工具を強化したり，被削材の快削化を図ることを検討する．利用する場については，熱，電場，磁場が主として考えられるが，本章においては磁場が物質に与える様々な影響に着目する．これまで，トライボロジーの分野などでは，接触界面に磁場を印加することで摩耗形態が変化するなど興味深い報告が相次いでいる．本章では特に

1. 切削工具を構成する成分の磁気特性を利用して耐摩耗性を向上させる．
 2. 被削材の磁気特性を利用して加工時に一時的に快削化を図る．
- ことを検討する．

3.2 工具摩耗の抑制を目的とした磁場援用切削加工法の提案

3.2.1 超硬工具の組成・特徴

近年の切削加工においては，超硬合金が工具母材の主力となり，広く利用されている．超硬工具に用いられる超硬合金は，主に炭化タングステン（WC），必要に応じて炭化チタン（TiC）および炭化タンタル（TaC）といった硬質物質とコバルト（Co）とを混合して焼結した材料である．ここにおいて，Co は硬質物質を結合するバインダとしての役割を担う．図3.1に，超硬工具断面の顕微鏡写真を示す．また表3.1に，超硬工具の主な組成を示す．³⁻¹⁾

上表のように，超硬工具は主にP種，M種，K種の3種に分類されている．P種はTiCやTaCを多く含んでおり，耐熱性および耐溶着性に優れているので，主に鋼の切削加工に用いられる．K種はWC主体の合金であり，TiCやTaCをほとんど含んでおらず，機械的な損傷に強いことから，鋳鉄，非鉄金属および非金属の切削加工に用いられる．M種はP種とK種の間接の性質を有する材種で，熱的損傷および機械的損傷の両方に強く，鋼，耐熱合金および鋳鉄の切削加工に用いられる．³⁻²⁾

超硬工具は，ビッカース硬さ（HV）が1200～1800（高速度鋼の約2倍），ヤング率が500～700GPa（高速度鋼の2～3倍）という機械的性質を持っており，高速度鋼等と比べ，硬く，変形し難い．その反面，靱性の低さから，欠けやすいという欠点も指摘されている．しかし近年，CVD法やPVD法などのコーティング技術を用いたコーテッド超硬工具や，超微粒子WCと高Coを用いた超微粒子超硬工具などが多種開発されており，脆くて欠けやすいという欠点は著しく改善されている．^{3-2)，3-3)}

Table 3-1 Composition of cemented carbide tools

使用分類記号	金属成分 Co	硬質相成分	
		Wを主体とした硬質相	硬質相中のTi, Ta (Nb)
P01	4 ~ 8	92 ~ 96	20 ~ 50
P10	4 ~ 10	90 ~ 96	20 ~ 40
P20	5 ~ 10	90 ~ 95	10 ~ 30
P30	7 ~ 12	88 ~ 93	5 ~ 25
P40	7 ~ 15	85 ~ 93	2 ~ 20
M10	4 ~ 9	91 ~ 96	5 ~ 25
M20	5 ~ 1	89 ~ 95	2 ~ 20
M30	7 ~ 12	88 ~ 93	1 ~ 15
M40	8 ~ 20	80 ~ 92	1 ~ 3
K01	3 ~ 6	94 ~ 97	0 ~ 5
K10	4 ~ 7	93 ~ 96	0 ~ 3
K20	5 ~ 8	92 ~ 95	0 ~ 3
K30	6 ~ 11	89 ~ 94	0 ~ 3

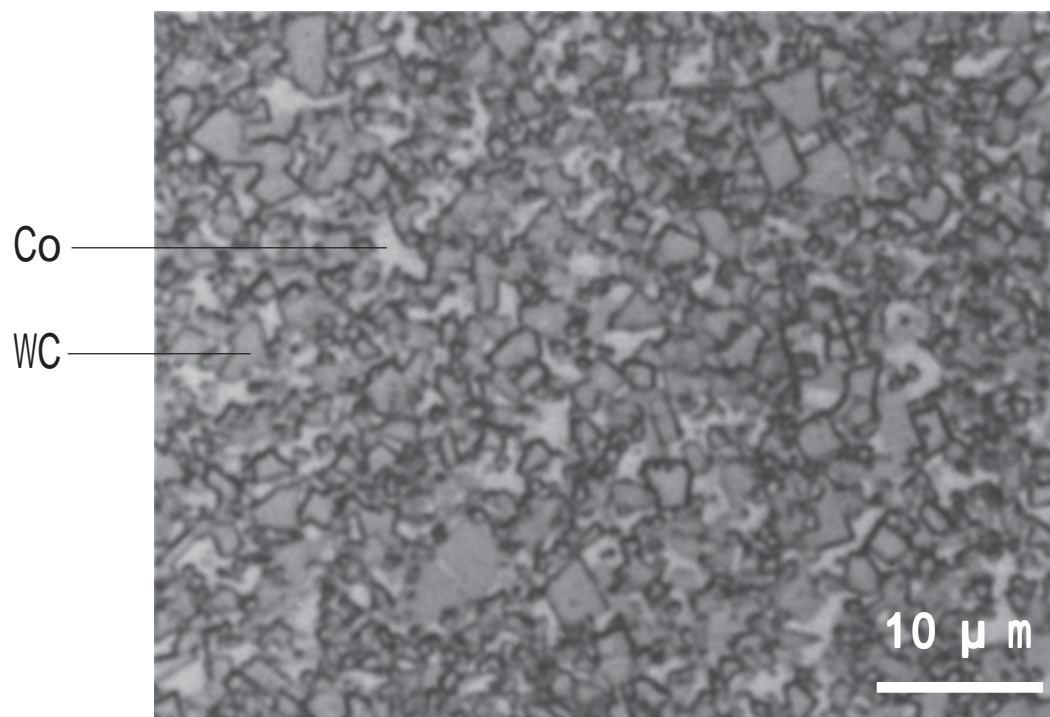


Fig.3-1 Structure of cemented carbide

3.2.2 超硬工具の摩耗の特徴とその抑制方法について

切削工具の摩耗には、大別して、機械的な作用による摩耗と、熱化学的な反応による摩耗の二つがある。一般に広く用いられている工具は、WCの粉体を主成分として焼結された超合金製であり、WC粒子を結合させるためにCoバインダが3-20wt%添加されている。バインダであるCoは融点が1490℃であるが、切削工具の工具すくい面は、圧力数百MPa、摂氏千数百度の過酷な環境に曝されている。そのため、超硬工具の摩耗原因の一つとして、図3-2のようにCoが溶融して滲み出す場合、ないしは半溶融状態で結合力が弱まり、被削物の擦過により流出する摩耗プロセスが生じていると考えられる³⁻⁴⁾。特にCoは鉄系材料と親和性が高く、このようなCoの滲み出しが生じ易いと考えられる。一方、Coは強磁性体である。したがって、磁界を工具に付与してCoを吸引し、その移動を抑制することで工具の長寿命化が図れると予想される。無論、このCoの滲み出し抑制効果は、基本的に被削材が工具に印加した以上の磁気を帯びていないことが前提となるであろう。

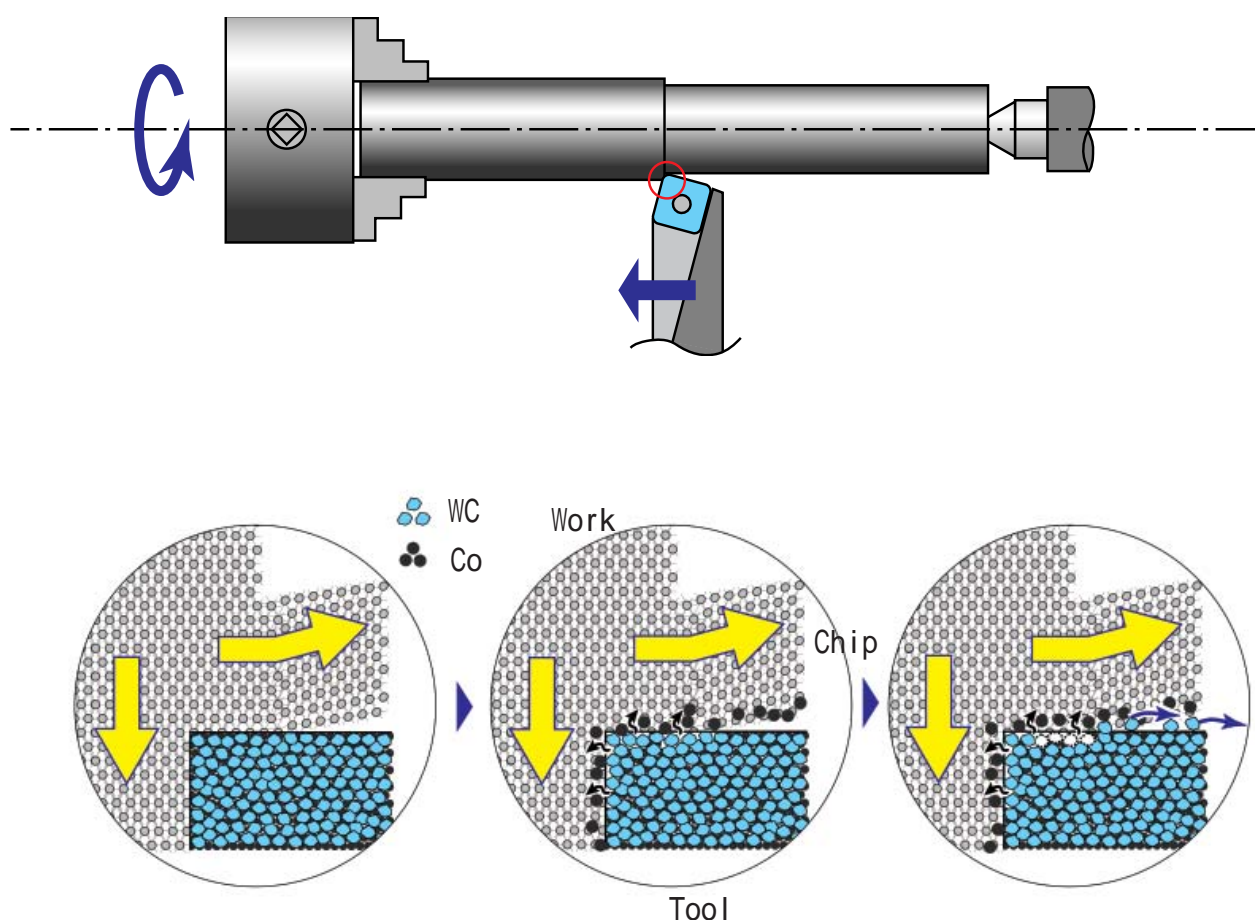


Fig.3-2 Wear mechanism of cemented carbide tool

3.3 磁場の供給方法

3.3.1 磁場を援用した従前の研究

本研究において、最も重要なのは磁界の強度とその与え方と言える。これまで、工具に磁界を供給し、磁力により工具摩耗を抑制した開発例としては、米イノベックス社のフラクサトロンと(株)東芝の特許特開平 10-0249601 二つがある。本節ではこれら二例の磁場の印加方法を検討し、その特徴や問題点を明確にしながら供給方法を検討する。

3.3.2 磁気パルスによる工具寿命の延長

工業的磁性材料のうち、強磁性をもつ鉄、コバルト、ニッケルおよびガドリウム材料などをコアとした物質に交流磁場を与えると、磁気歪みによって磁区の規則性を保っていたコアはその磁区の規則的構造が乱され、機械的性質は脆い(硬い)性質が靱性のある性質に変化する。米イノベックス社は、このような交流磁場の効果を工具材料の表面層の応力解放に応用し、工具の内部応力除去装置として実用化し、図 3-3 に示す「フラクサトロン U102」として商品化を行った³⁻⁵⁾。この装置は、コーティングの有無に関わらず、超硬、ハイスなど、原料として強磁性材料を含む切削工具に対して 1 秒間に数回のサイクルで伸び縮みおよびねじれの磁力を与えることができる。その結果、工具表面層の内部応力が解放され、工具の初期チッピングが抑制されるとともに、工具と被削材との摺動抵抗が減少する。

米国における実験では、図 3-4 のような実験装置を用い、SNCM-8 のシューに磁場処理を施したものと未処理のものについて、摩擦係数とスライド距離との関係を調べている。いずれの場合も時間とともに摩擦係数は連続的に低下するが、両者の間には約 17% の差が見られ、磁場処理を施した方が摩擦係数が小さくなっている。

しかし、このように工具の摩耗やチッピング抑制にある程度効果を見込めそうな本装置ではあるが、装置自体はあくまでも工程間の合間に工具を取り外してから装置内に工具を挿入し、交流磁場を工具に供給し、工具に蓄積されたストレスを解放するような装置になっている。したがって、装置自体も当然工作機械に搭載できるようなことは考慮されておらず加工中の Co 流失を抑制する本研究には参照とはならない。

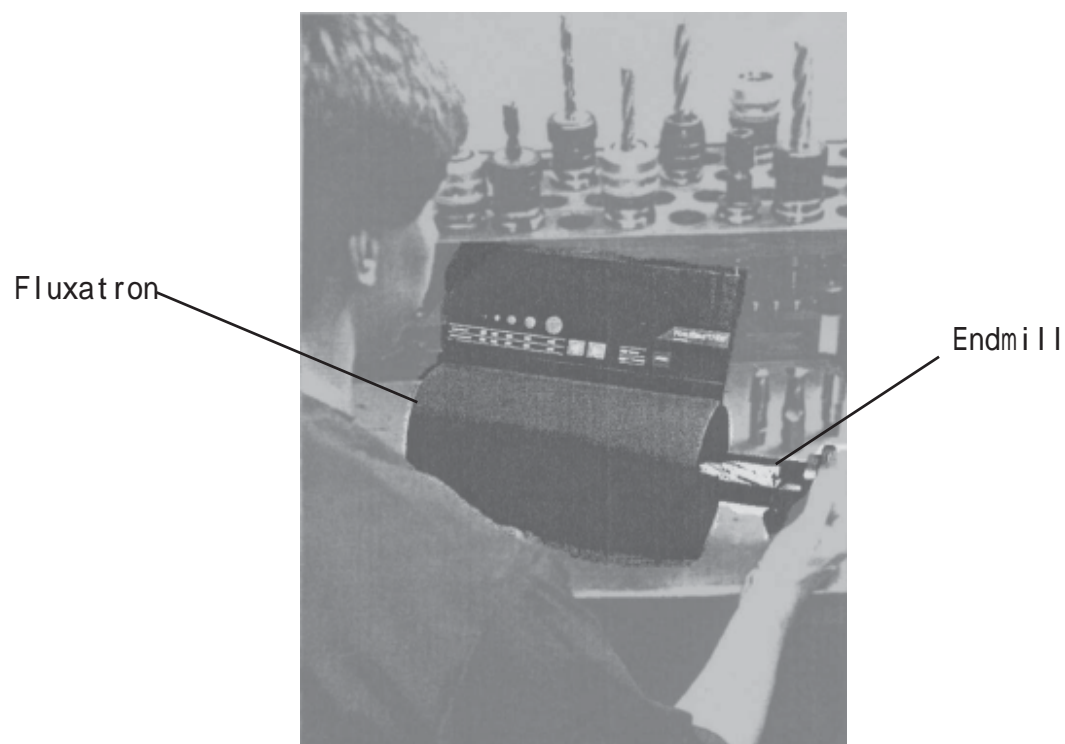


Fig.3-3 Fluxatron U102³⁻⁵⁾

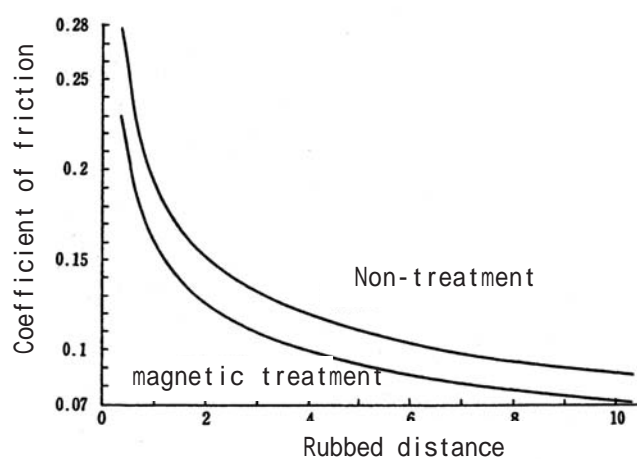
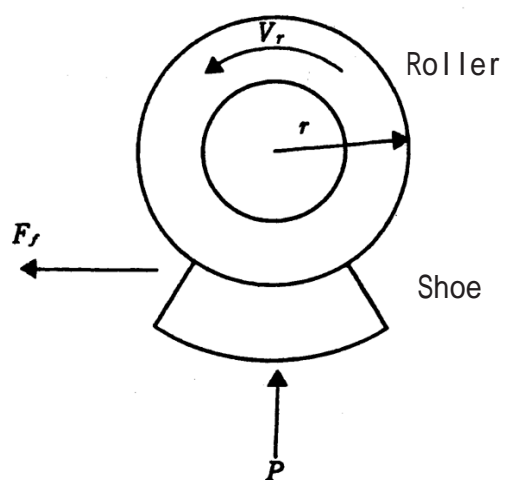


Fig.3-4 Wear experiment³⁻⁵⁾

3.3.3 交流磁場による加工点の摩擦形態の制御

(株)東芝は特開平10-0249601³⁻⁶⁾を通じて交流磁場を利用した磁場の加工点への影響を紹介している。この特許では、図3-5のように工具周辺にコイルを設置し、交流磁場を加工点に与えながら加工する実施例が紹介されている。図3-6はSWRH62AおよびFCD70のピンオンディスク摩耗試験において磁場の摩擦および摩耗への影響を調べた結果であるが、どちらの試験片においても磁場の増加により摩耗量が抑制されていることがわかる。この試験においては、磁場により加工点の酸化が促進され、摩擦形態がシビアー摩耗からマイルド摩耗に変化させられることで工具の摩耗が抑制されているとその効果を結論付けている。しかしながら、このような方法を実際に利用するには、コイルを工具周辺に巻き付ける必要がある。したがって、エンドミル加工のような転削加工への対応が難しく、ATCに対応した装置を考慮すると莫大な付帯設備の設計変更が必要となるために実用化には大きな問題が残っていると言えるだろう。

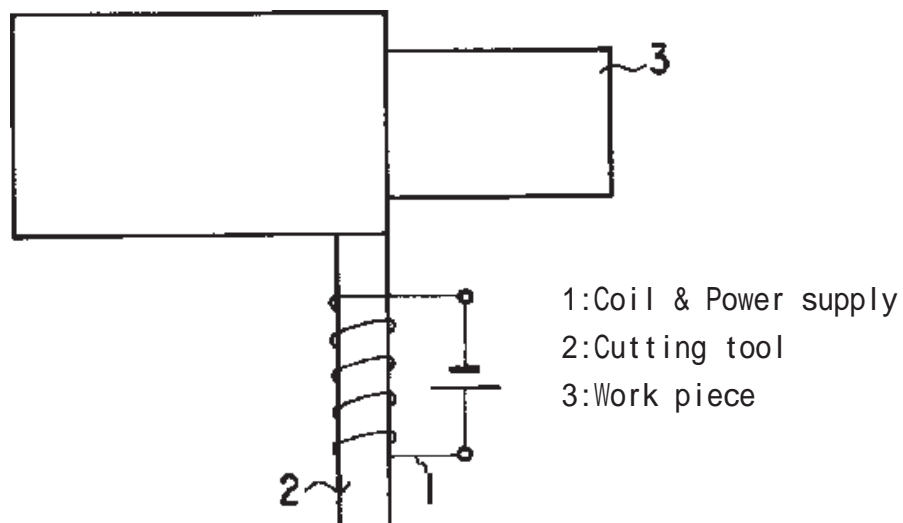


Fig.3-5 Wear experiment³⁻⁶⁾

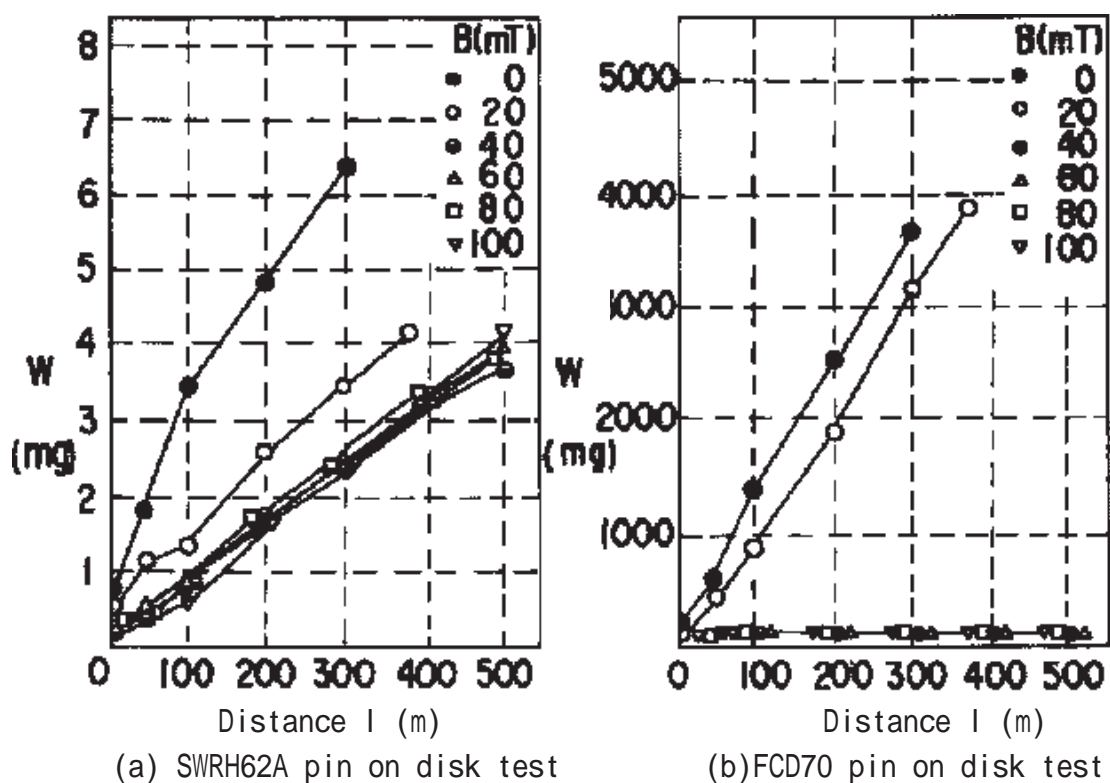


Fig.3-6 Comparisons of wear rate under dry or magnetic condition³⁻⁶⁾

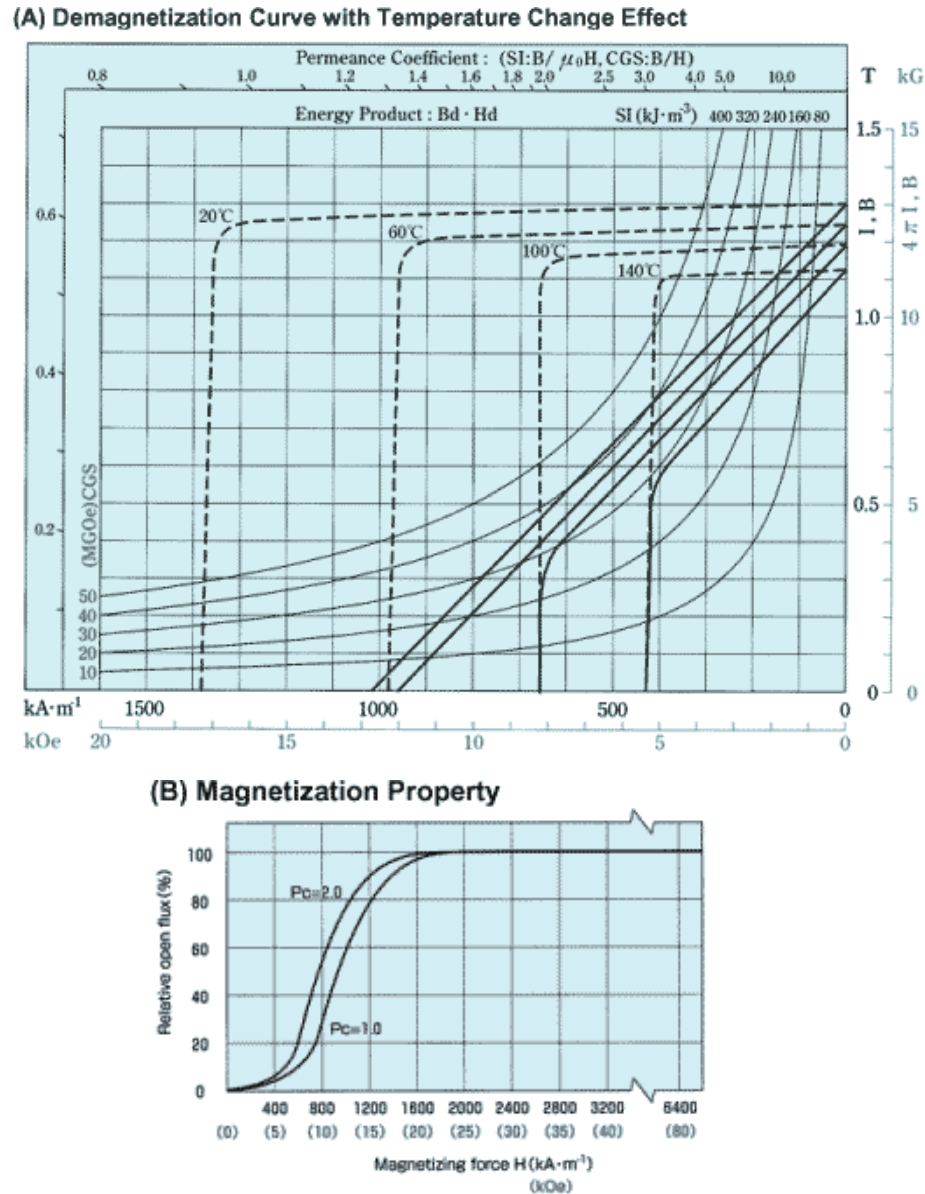


Fig.3-7 Magnetic properties of utilized Ne-Fe-B magnets³⁻⁷⁾

3.3.4 固定磁石による磁場供給とその利点

先述の二例の場合はいずれの場合においても交流磁場を利用した工具の摩耗抑制法であった。本研究の摩耗抑制の基本概念を考慮すると、工具母材中のCoの流出を切削加工中に如何に磁場の作用で防ぐかが重要になると考えられる。そのようなことを考えると、磁場の方向は常に一方向で、かつできるだけ強い磁界がCoを固定化できる状態が望ましい。また、実際の機械での利用を考慮すると、付帯設備が小さくなることが望まれる。そこで、本研究においては固定磁石を用いて磁界が常に同一方向に作用することを採用した。

磁界を発生させる固定磁石にはNd-Fe-B磁石(住友特殊金属製NEOMAX-41H, $5.0 \times 2.3 \times 1.0$ t)を用いた。³⁻⁸⁾磁石の基本的な磁気特性を図3-7に示す。磁石の発生する磁界の大きさは、最大磁気エネルギー積で表す。この値が大きいほど、体積あたりの磁界の強度が大きい。本研究で使用したNd-Fe-B磁石は 334kJ/m^3 (42MGOe)程度の最大磁気エネルギー積を有し、実験当時においては同じ体積の磁石と比較して最も強力な磁石であった。

この磁石を用いながら被削物や切りくずと磁石の干渉を避けることが可能であり、かつ切れ刃にできるだけ強い磁場を印加できる個数、ならびに位置を検討し、図3-8のようにしてバイトシャンク部に磁石を固定して磁界を供給することとした。このとき切れ刃近傍の垂直方向の磁束密度を計測したところ5～7mTであった。また、参考としてこのような磁場を印加した場合の磁力線のFEM解析をした結果を図3-9に示す。図では、工具の前逃げ面の方向から、工具切れ刃へかかる磁力線の状態を示しているが、同図の磁石設置状態でコンセプト通りに磁界がCoを工具母材側に引きつけるような方向を向いていることが理解できる。なお、この解析では切りくず流出による磁力線への干渉等はない静的な状態を示しており、実際の加工では切りくず折断が適切に行われることが重要な要素となる。

先にも述べたようにCoの流失を抑制するためにはできるだけ強力な磁界をかけることが重要な要素と成りうる。そこで、さらにできるだけ磁石を積層すればよいと考えられよう。しかし、この解析結果から磁石をこのまま単純に積層しても、磁界の強度は増加するがその方向が切れ刃に効果的な方向とはならないことが判明しており、最大でも10枚程度が妥当な磁石の枚数であることがわかった。

最後に、以降このように磁場を加工点付近に印加しながら切削する方法を磁場援用切削法と呼ぶこととする。

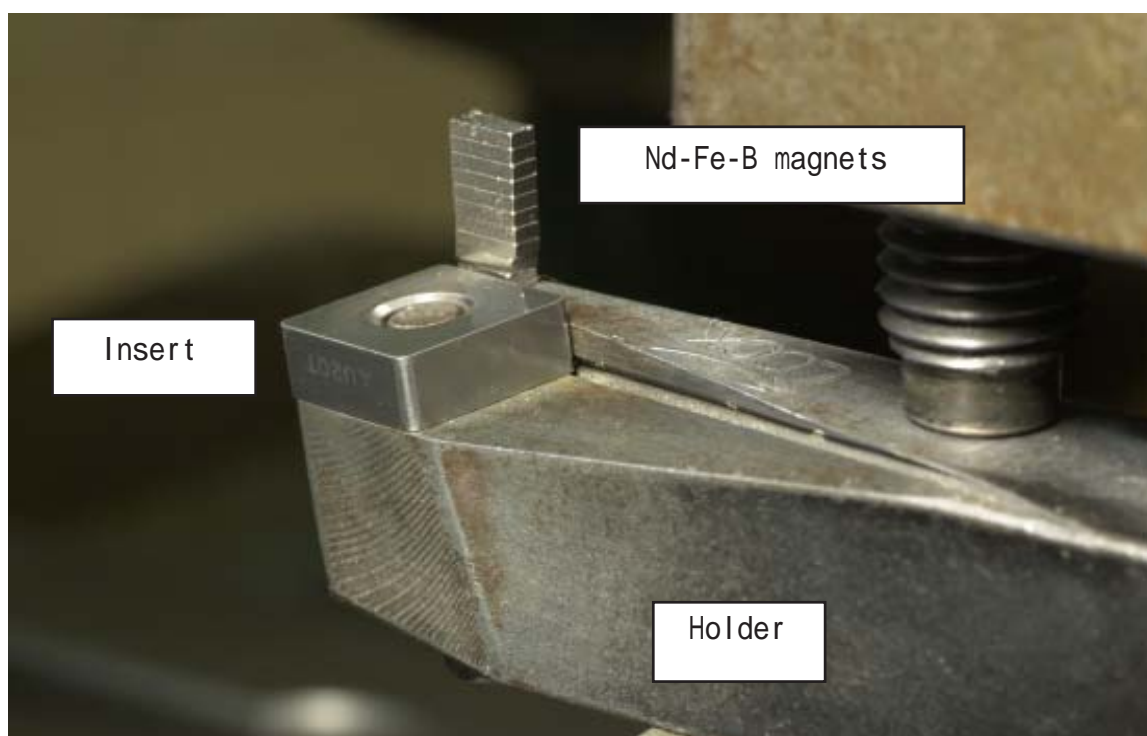


Fig.3-8 Tool holder and insert with Nd-Fe-B magnets

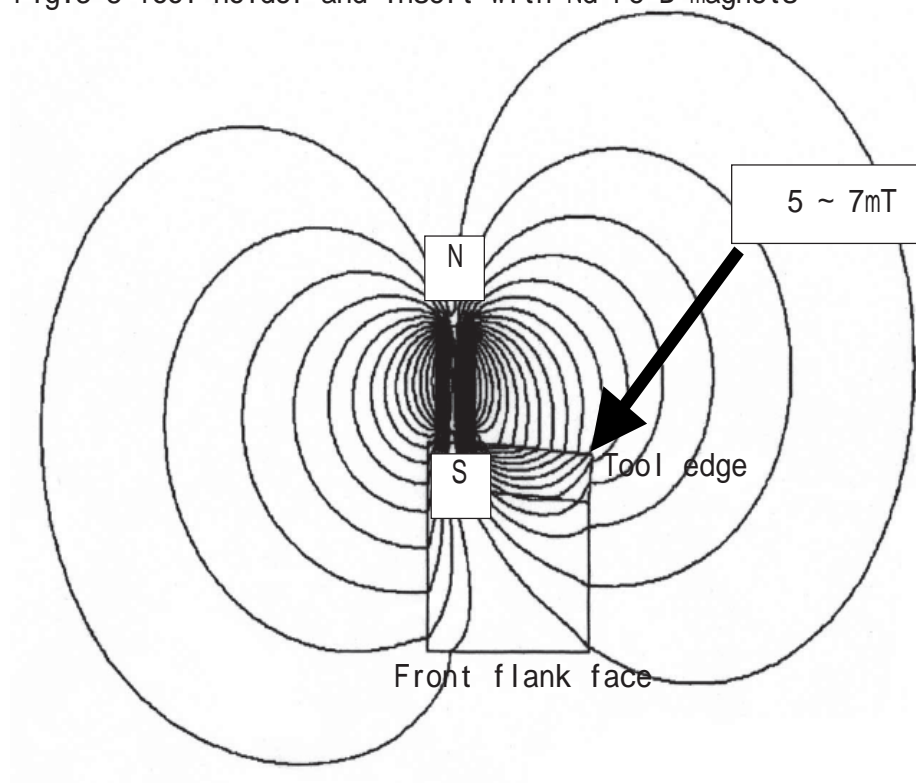


Fig.3-9 FEM analysis of magnetic field

3.4 磁場援用切削による工具摩耗の抑制

3.4.1 切削実験とその結果

3.2.2項の考え方を参考に、磁場が加工点におよぼす影響を実験的に明らかにする。主な実験条件を表3-2に示す。実験においては、図3-10のように無段変速旋盤(オークマ製LS450, 振り450mm, 芯間距離800mm, 5.5kW)に、50 × 400のSUS304を被削材を取り付け、図3-11に示すP30のスローアウェイチップ(三菱マテリアル製SNGA120408)を用いて行った。

SUS304を被削材として選定した理由は、耐食性、高温強度、靱性があるので幅広い用途に用いられ需要が大きいからである。しかし、

- ・加工硬化性が大きく、工具の境界摩耗やチッピングが生じやすい。
- ・熱伝導率が低いので、刃先温度が上昇しやすい。
- ・靱性があるため切りくずの凝着が生じやすく、マイクロチッピングにより欠損が生じやすい。

などの被加工特性を有するために基礎的な難削材として広く認知されている。図3-8は各種工具材料でSUS304を切削した場合の工具寿命を示した物であるが、特にSUS304は超硬工具に対して顕著な寿命低下を引き起こすことがこの図からも判断でき、磁場の作用を確認するのに好適と考えられたからである。

次に切削条件については切削速度が加工点での切削温度、ひいては工具摩耗に最も影響を及ぼす因子であるためその決定を最優先に検討した。実験における切削速度は、あらかじめSUS304の切削温度を工具被削材間熱電対法で計測して決定することにした。これは、Coのキュリー点が1117 であるため、Coが強磁性体から常磁性体へと変化してしまう可能性があり、工具摩耗が抑制されたとしても、その効果が磁場によるものであるか判断が難しいと考えられたからである。その結果、切削速度120m/minにおいて、工具と切りくずの接触点における切削温度が896 であることがわかった。工具・被削材間熱電対法においては、切削温度は接触部分の平均温度として計測される³⁻⁹⁾。したがって、工具すくい面の温度分布としては実際には最高で平均温度の1.2～1.5倍と考えられる。また、文献³⁻¹⁰⁾においては、SUS304を切削断面積0.4mm²/rev, 切削速度100m/minで加工する時の切削温度は、切れ刃から0.4mmの位置において最高約1100 の温度が記録されている。よって、これらの結果を勘案し、表3-2(1)に示すように切削速度120m/minとして、切込み、送りと比較的高い負荷になる条件とした。また、中切削から軽切削時の磁場の効果を検討す

Table 3-2 Cutting conditions

Experiment No.	(1)	(2)
Cutting speed m/min	120	80
Feed mm/rev	0.5	0.2
Depth of cut mm	2	1
Work	SUS304	
Tool material	P30	
Insert	SNGA120408	
Holder	ESBNR2020	
Coolant	None	

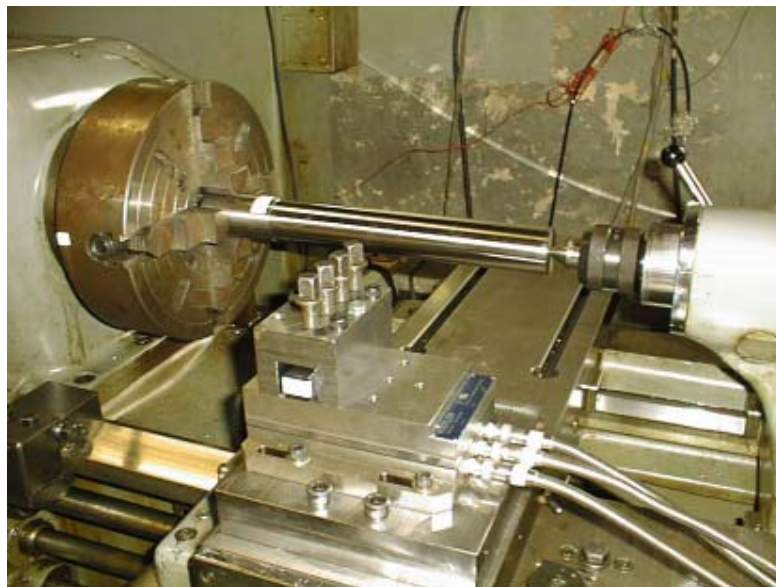


Fig.3-10 Experimental Set-ups

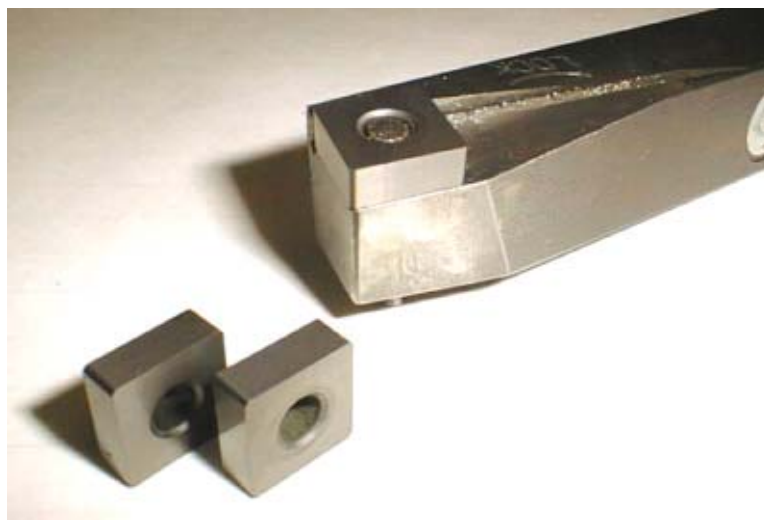


Fig.3-11 Insert tips and holder

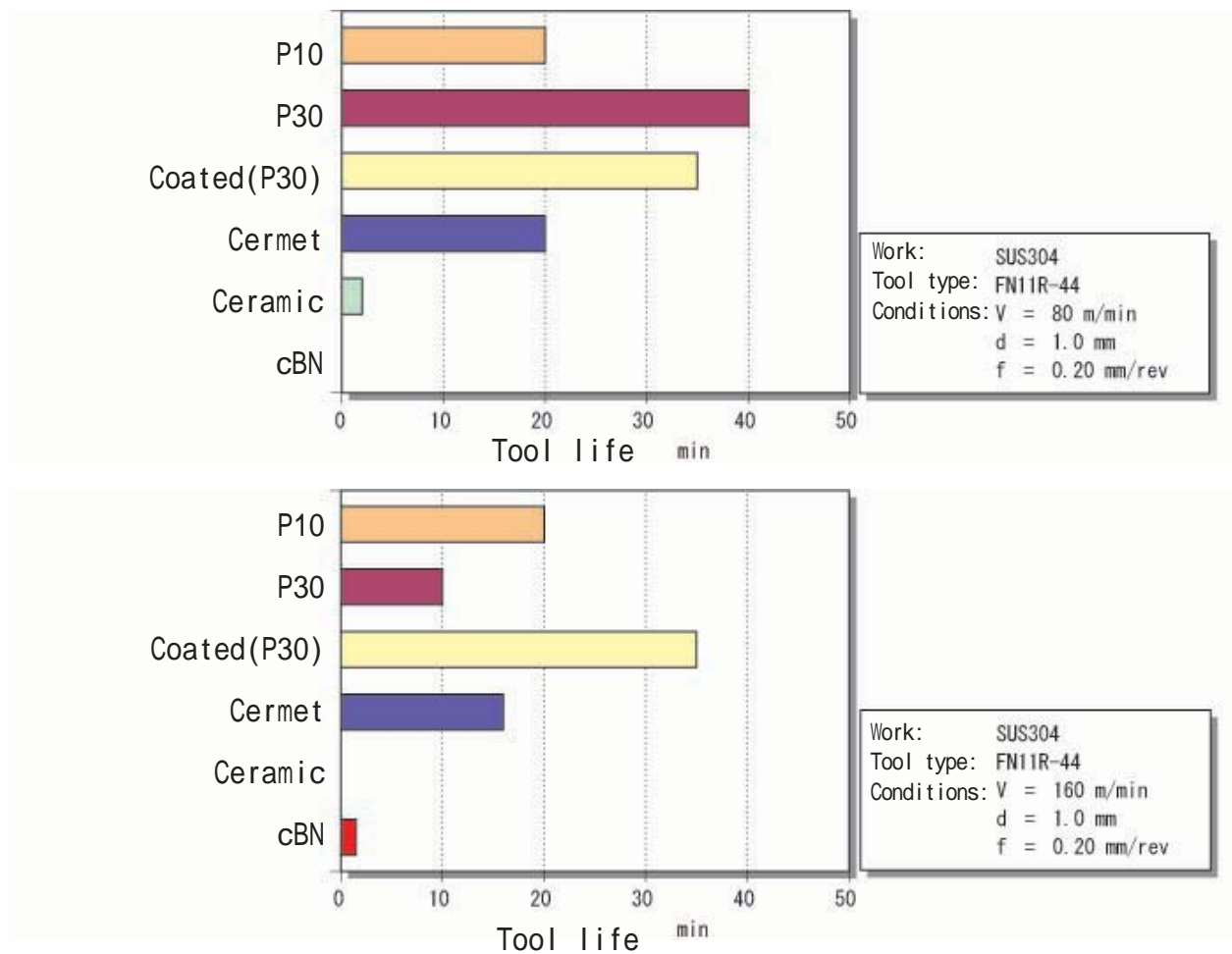


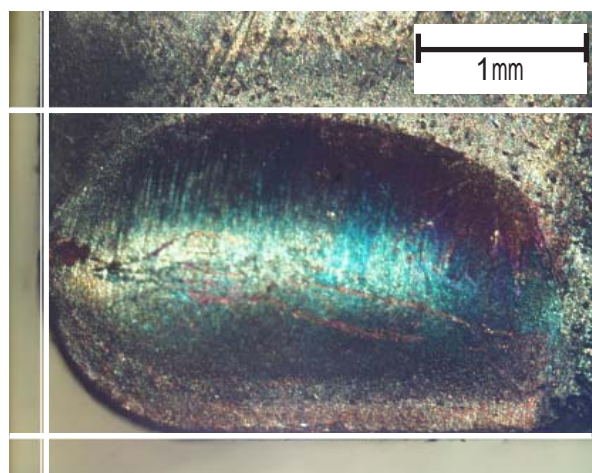
Fig. 3-12 lives V.S. tool materials in cutting SUS304³⁻⁸⁾

るため同表(2)の条件でも実験を行った．このような切削条件にすることで，Coの磁性の変化による実験結果への影響を排除している．なお，実験は本研究の主旨を考慮しつつ，かつ磁場の効果を見極め易いように全て乾式切削で行った．

通常の乾式切削(以降通常切削とする)と磁場援用切削の代表的な工具の摩耗状態を図3-13に示す。(a-1),(a-2)はそれぞれ通常切削と磁場援用切削によるすくい面の摩耗状態,(b-1),(b-2)は同様に逃げ面の摩耗状態になる。なお,切削条件は比較的負荷の大きい表3-2(1)である。図から,磁場の有無によりすくい面摩耗,逃げ面摩耗の双方に大きな差があることが判断できる。図3-14にこのときの切削距離に対する工具の逃げ面摩耗幅の変化を示すが,磁場を印加した場合には工具逃げ面摩耗の進行が緩やかであり,その差が1.2~1.5倍程度あるとわかる。すなわち,磁場の存在により工具寿命が向上したと判断できる。

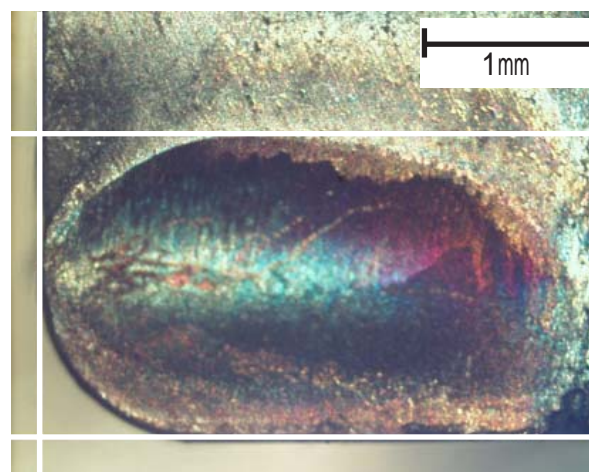
次に比較的負荷の軽い表3-2(2)の条件において,磁場による切削特性の変化を調べたが,この範囲においては図3-15に示されるように工具摩耗に大きな差は認められなかった。これは,今回の実験条件が除去能率が低い条件設定になっていたために,工具先端の切削温度が Co の軟化や流出を引き起こすほどには上昇せずに工具の摩耗がほとんどなかったためである。切削温度が低かった証拠に工具には,加工後に構成刃先が観察されており,図3-16の乾式切削における仕上げ面粗さが非常に不安定であることから判断ができる。

ここで,興味深いことに磁場援用切削においては軽負荷の条件においては加工面の粗さが10~40%向上していた。そこで,この実験で用いた超硬工具の逃げ面をSEMにて観察することとした。図3-17(a)は乾式切削,同図(b)は磁場援用切削による工具逃げ面のSEM写真である。両者を比較すると明らかに磁場援用切削の方が逃げ面溶着物質が少ないと言える。この原因等については後述するが,軽負荷の切削条件下においても磁場を加工点付近に加えると何らかの作用が生じて工具への構成刃先の凝着が減少し,加工面粗さを向上させることができるという新たな効果が判明した。この結果は,磁場を援用することで被削性を変化させる可能性を示唆するものと言える。



1.91mm

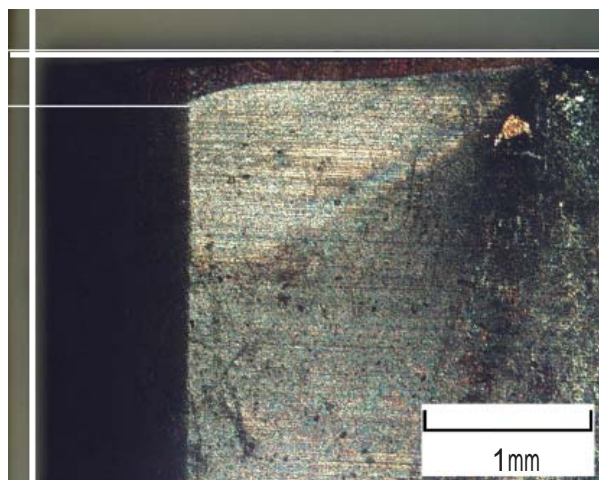
(a-1)without magnets



1.72mm

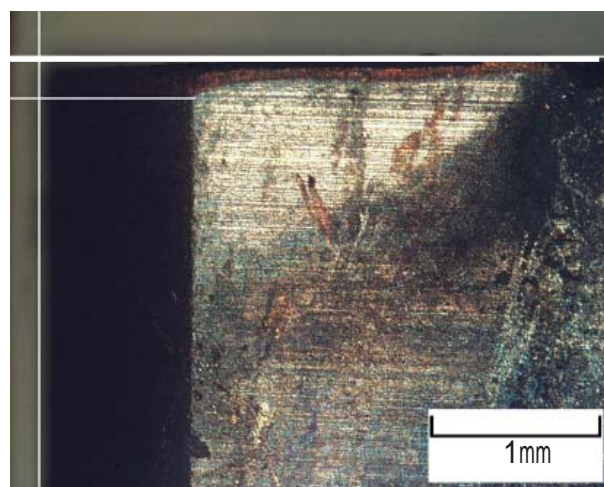
(a-2)with magnets

(a)Rake wear



0.26mm

(b-1)without magnets



0.19mm

(b-2)with magnets

(b)Flank wear

Cutting condition, Table 3-1(1), Cutting distance, 360m

Fig.3-13 Difference of tool wear by the existence of magnetic field

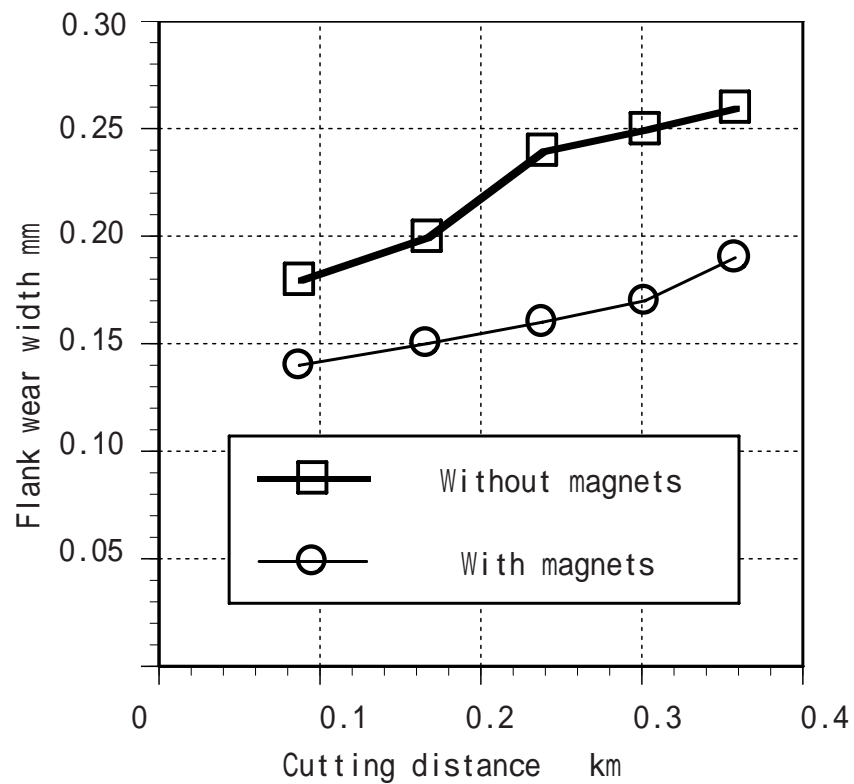


Fig.3-14 Difference of flank wear with or without magnets under the condition of Table 3-1(1)

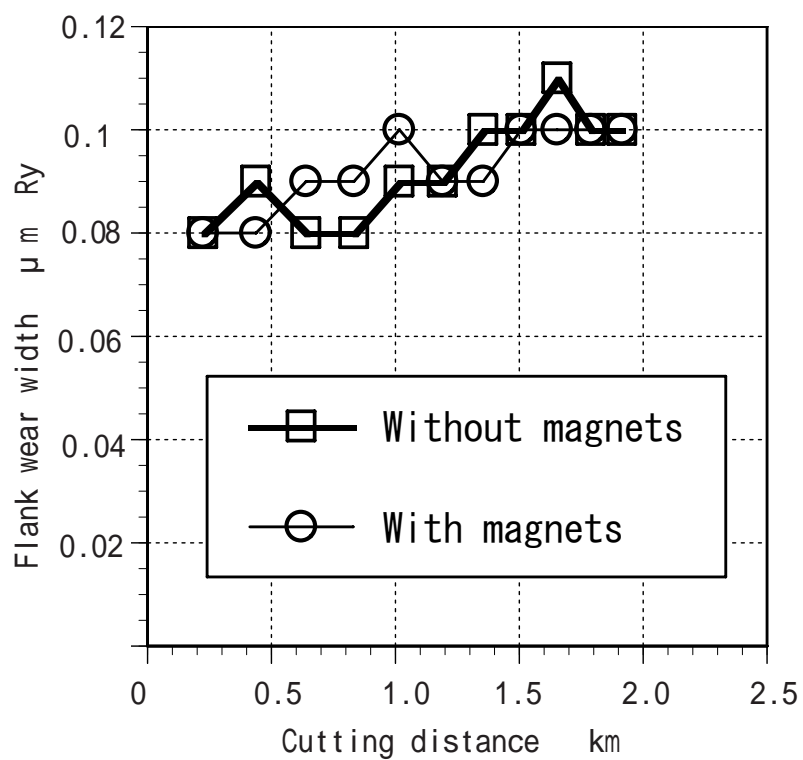


Fig.3-15 Difference of surface roughness with or without magnets under the condition of Table 1(2)

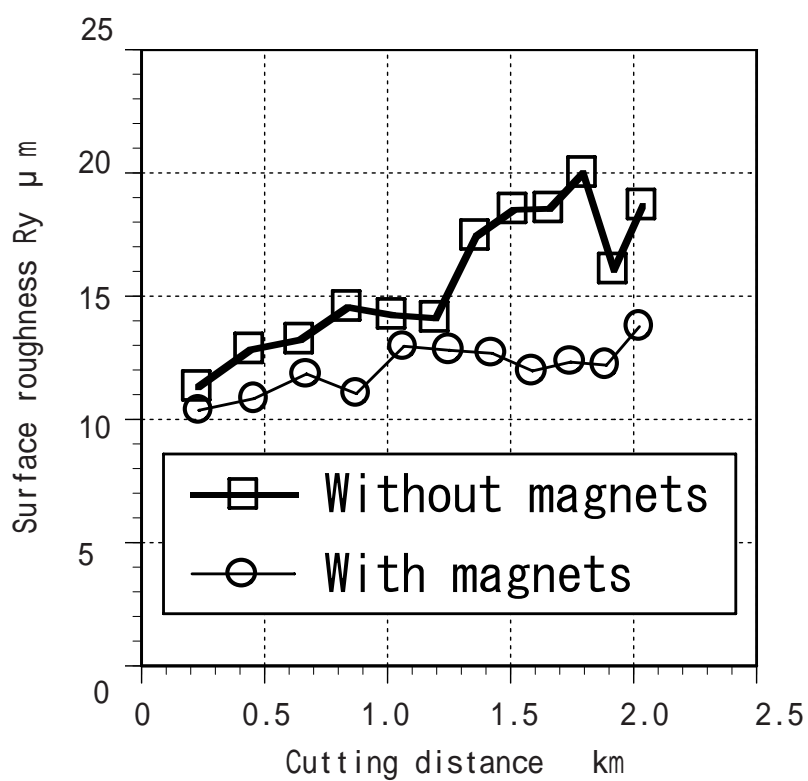
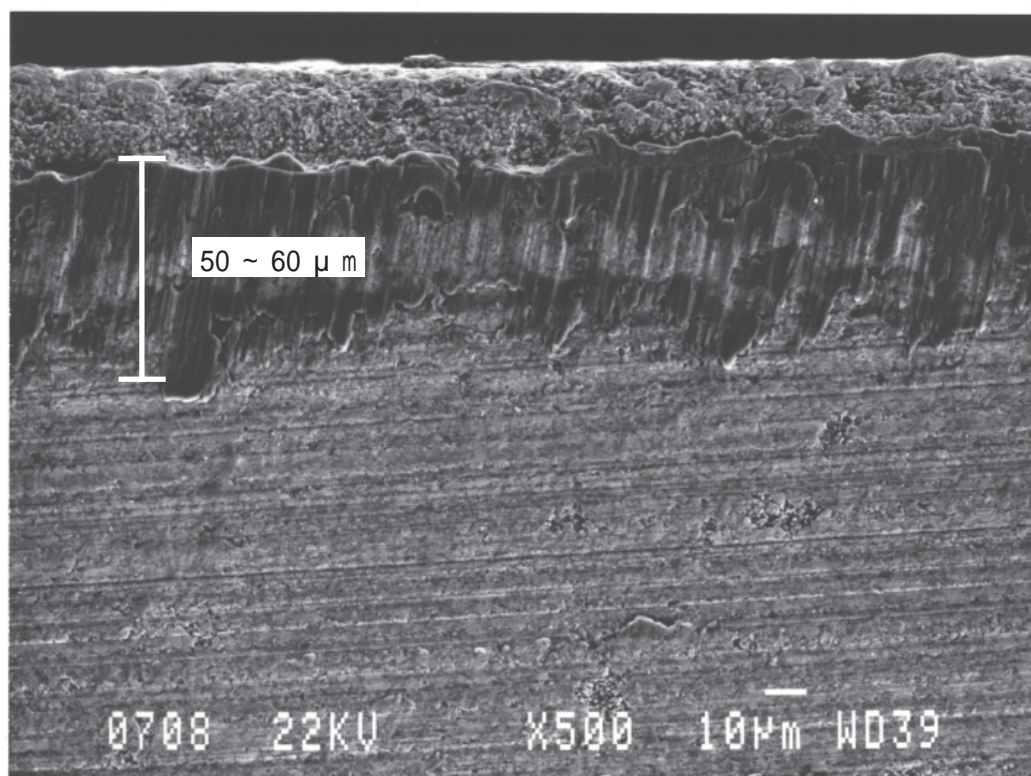
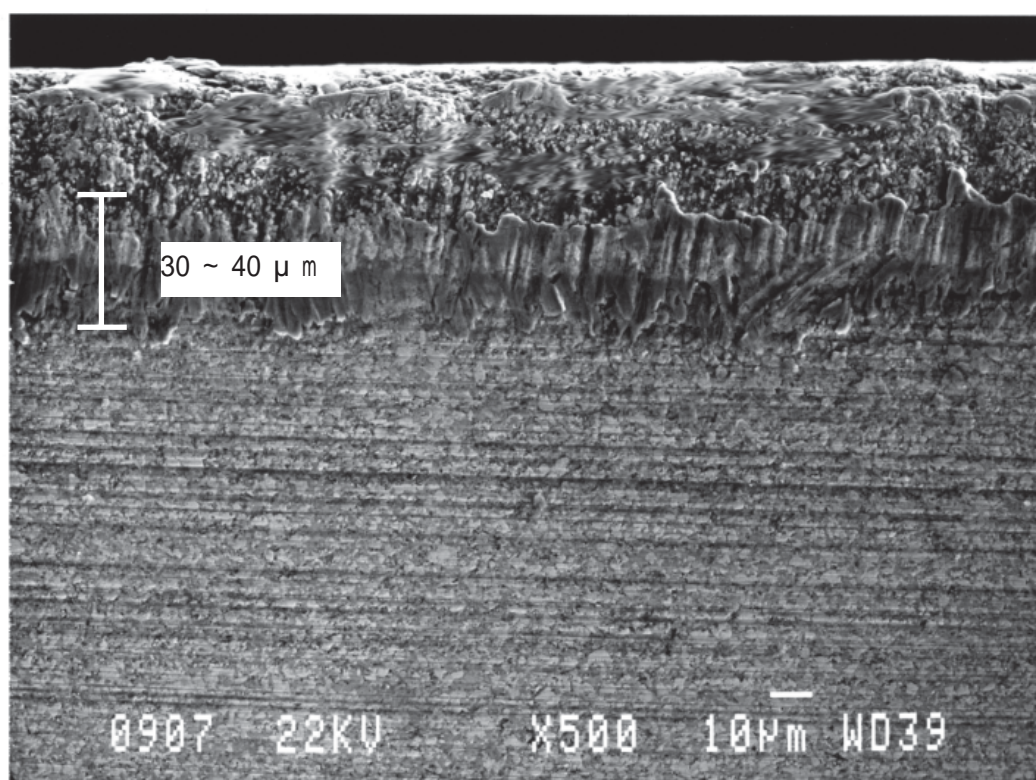


Fig.3-16 Difference of surface roughness with or without magnets under the condition of Table 1(2)



(a)Without magnetic-field



(b)With magnetic-field

Fig.3-17 Difference of adhesion of work material to flank face of tool by existence of magnetic field

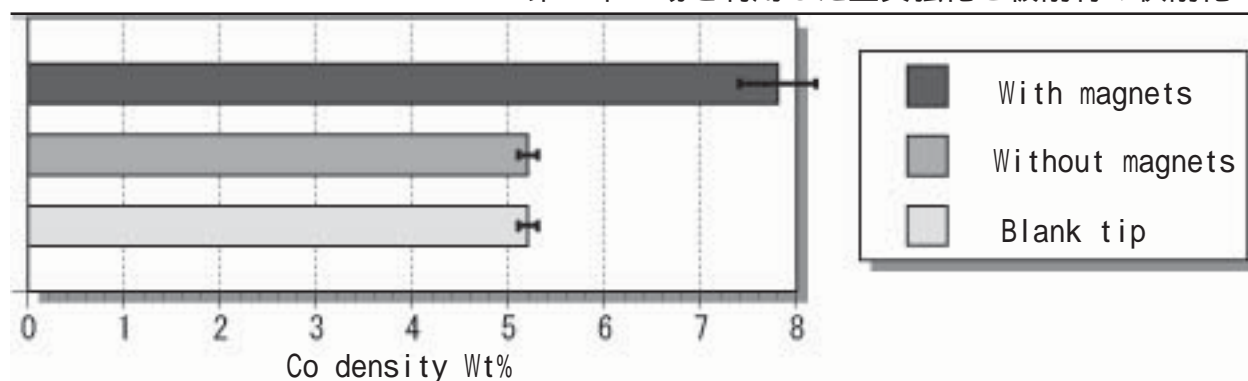


Fig. 3-18 Co density in each condition

3.4.2 工具表面分析による Co 流失抑制の検証

磁場を印加することにより工具中の Co の流出を抑制することができるのであれば，加工後の工具表面の Co の濃度に差が出ているはずである．そこで，Co の流失が抑制されたのかを検証するために SEM-EDX を用いて工具表層の Co 濃度を測定した．

SEM-EDX は，走査型電子顕微鏡（SEM:Scanning Electron Microscopy）にエネルギー分散型 X 線分光分析装置を取り付けたもので，試料の SEM 像を観察しながら，特定部位から放出される特性 X 線のエネルギーを検出し，試料表層の希望の部位に含まれる元素の点分析，線分析および面分析を行うことのできる装置である．

今回，3.4.1 項の実験 2 で用いた超硬チップ（磁場あり，磁場なし），および新品のブランクチップについて，SEM-EDX 分析を行った．工具すくい面は溶着物で被われているので，逃げ面の溶着部の下部の点分析を行った結果を図 3-18 に示す．

磁場を印加した場合の加工後の工具表面 Co 濃度はブランクチップ表面の Co 濃度とほぼ同じなのだが，磁場を印加しなかった場合の Co 濃度は 1.5 倍程度と，高い値を示していることが分かる．

なお SUS304 は通常非磁性であるが，加工後に組織変態を起こし磁性を生じる．このときに材料自体の磁性が工具摩耗に影響を及ぼした可能性も考えられる．そこで非磁性のチタン合金を切削し，その効果を調べた．結果を図 3-19，図 3-20 に示す．ここでは純チタンを切削しているが，磁場を印加すると Co の表出が抑制でき，工具摩耗が低減できていることが確認できる．

Cutting speed 200m/min $f=0.1\text{mm/rev}$ $d=1.0\text{mm}$

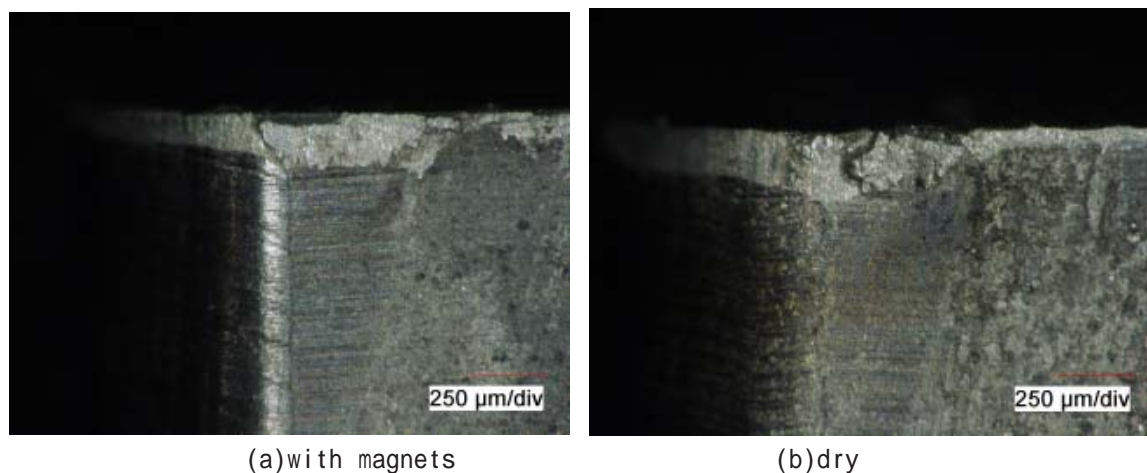


Fig.3-19 Difference of tool wear by the existence of magnetic field

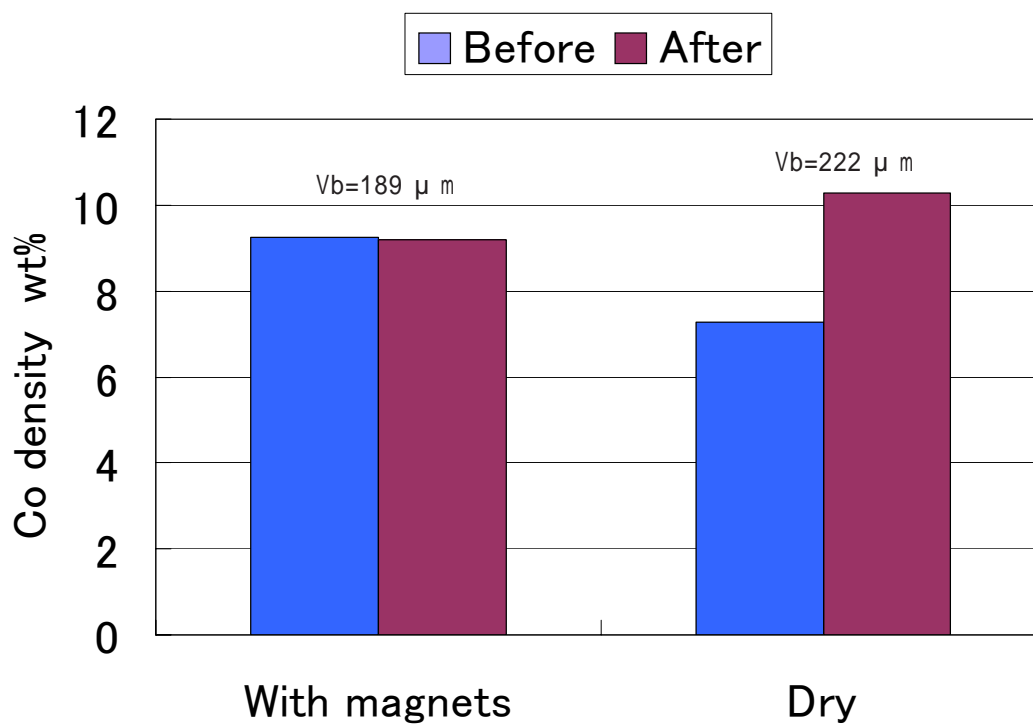


Fig. 3-20 Comparisons of Co density in cutting alpha titanium alloy

3.5 磁場援用切削による難削材の被削性向上

これまでの実験結果から、負荷の高い加工条件下で磁場の作用でCoの流失を抑制できること以外に、軽負荷の切削条件下においても何らかの磁場の作用により工具への構成刃先の凝着が抑制できることが明らかになった。この結果は、磁場を援用することで被削物の工具刃先への凝着、すなわち構成刃先の不安定な生成脱落を防止する可能性を示唆している。したがって、この効果の機構を明らかにすることができれば、被削物の被削性を能動的に変化させることができるのではないかと考えられる。

たとえば、凝着の激しい難削材を切削する場合に、磁場援用切削により加工時にだけ加工点付近の被削性を変化させて快削化し、加工後は磁場を除去して被削材が本来有する物性で製品として利用することも可能ではないかと考えられる。

そこで、磁場の摩擦接触点への影響について研究した例を、主としてトライボロジーの分野から調査した。すると、熊谷らが、鉄鋼やニッケルなどの強磁性材料の引っ張り試験において、磁場中に供試材の応力が低下すること確認した報告³⁻¹⁴⁾や、平塚らによる乾燥摩擦摩耗試験において、少なくとも一方が強磁性体である材料を組み合わせる磁場を加えたところ摩耗が劇的に減少する報告³⁻¹⁵⁾などが散見された。特に平塚らの報告においては、磁場により摩耗粉の酸素吸着および酸化が促進されて摩耗粉の微細化が進み、シビア摩耗からマイルド摩耗へと摩耗状態が変化することが原因として挙げられていた。これは、先述の(株)東芝の特開平 10-0249601 における実施例にて確認された作用とほぼ同一のものと類推される。いずれにしても、磁場を利用した難削材の局所的かつ一時的な快削化への可能性は高いと予想される。

構成刃先の生成脱落は、加工面粗さに悪影響をおよぼすだけでなく、構成刃先の生成脱落に伴い切削抵抗に切削条件によっては大きな抵抗変動をもたらす。このことは、切り込みが浅く送りも小さい仕上げ加工のような軽切削加工では生じやすく、工具剛性の確保し難い中ぐり加工や、切削速度が低速になり切削温度の上昇が見込めない小径工具による加工では容易にびびりを励起する可能性がある。したがって、磁場により凝着現象が緩和されれば、粗さが向上するだけでなく、余計な切削抵抗の変動が少なくなり仕上げ加工時の再生びびりを防止できる可能性があり、更なる仕上げ加工の高精度・高品位化を実現できると考えられる。

そこで、本節においてはこの凝着減少の防止によるびびりの抑制効果を検証し、磁場援用切削により難削材の快削化が図れるのかを確認することとした。

3.5.1 実験方法

最初に、磁場によって切削抵抗にどのような変化が生ずるのかを確認し、その変動から構成刃先の生成脱落状態を推定した。ここでは、凝着により切削抵抗に変動が生じた場合に、その変動を増幅しびびりとして検出できるように、工具の突き出し量を、図3-21のように通常20mmであるのを37mmと大きくしながら表3-2(2)の条件で切削実験を行った。

ここで、切削工具をツールポストに固定された片持ち梁として考えると、片持ち梁のバネ定数は、

$$k=3EI/l^3$$

E : ヤング率 I : 梁の断面二次モーメント l : 突き出し長さ

で求められる。したがって、今回突き出し量を通常より 17mm 増やしたことで、約 1/6.3 に剛性が低下したことになり、僅かな抵抗の変動でもびびりが生じやすくなったことになる。

切削抵抗の測定は、3軸工具動力計((株)キスラー、9257A)により、主分力、背分力、送り分力の3軸の切削抵抗の測定を行い、各分力の周波数解析をFFTサーボアナライザー((株)ADVANTEST製 R9211B)で行った。そして、同時に、加工後の被削物の長手方向加工面粗さの計測も行った。

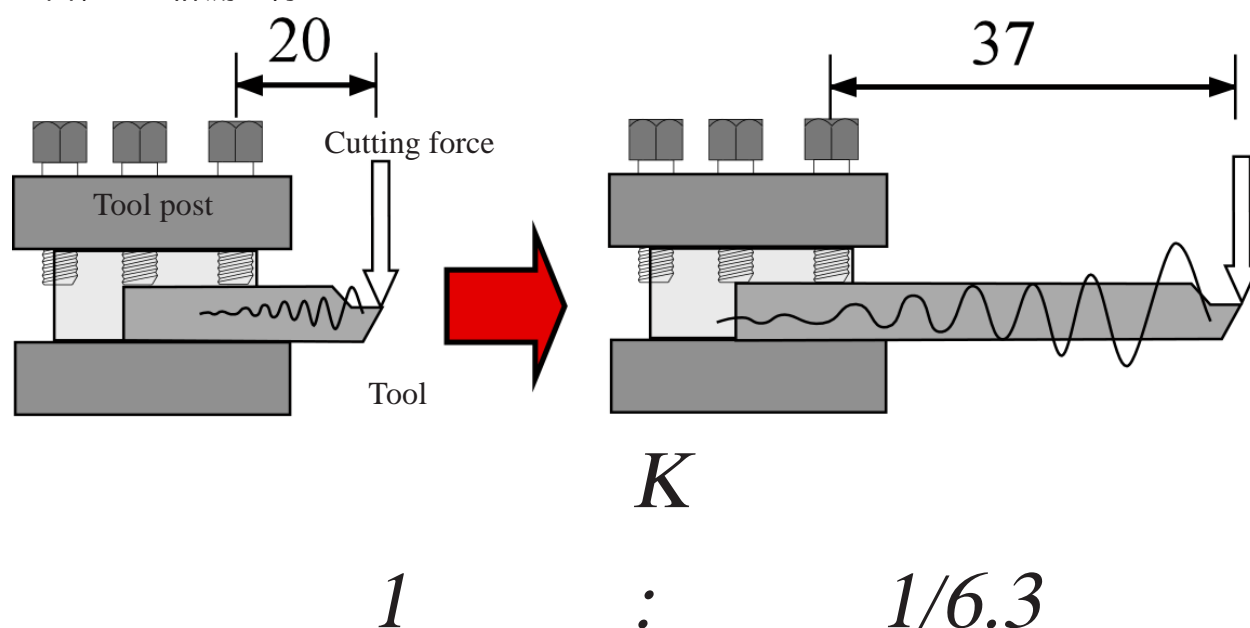


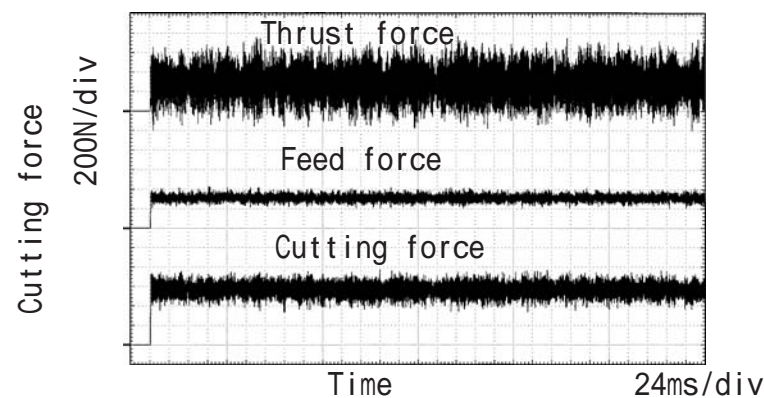
Fig.3-21 Relationship between tool overhang and stiffness

3.5.2 切削抵抗への磁場の影響

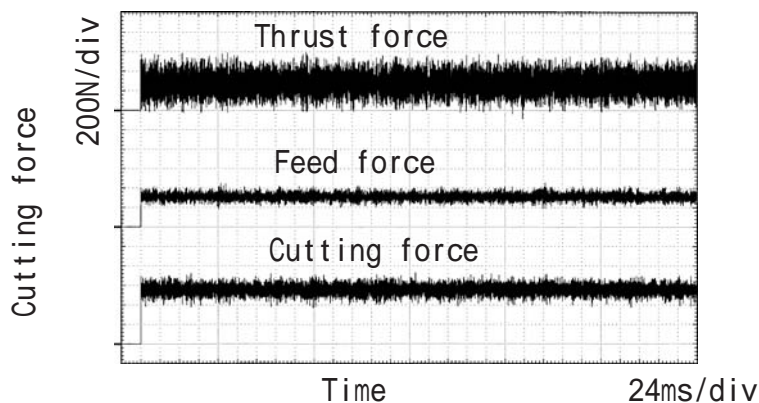
図3-22は、得られた工具動力計の出力である。これまでの20mmの突き出しでは、磁場の有無に関わらずびびりを引き起こすような激しい切削抵抗の変動は起きていなかったのだが、今回突き出し長さを大きくしたところ、(a)のようにびびり振動が生じるようになった。そこで、ツールホルダに永久磁石を吸着させて工具切れ刃近傍に磁場を印加したところ、(b)のように切削抵抗の変動が緩和された。

図3-23に、工具動力計出力のFFT解析の結果を示すが、乾式切削の場合6kHz付近に大きな一次振動モードのピークが確認できる。また、びびり振動が起きていた場合の被削物加工面には、図3-24のように明瞭なびびりマークも認められる。びびりマークは円周方向に均等間隔に残されており、1cm当たり47個の波があった。切削速度が80m/minであるので、このびびりマークから振動の周波数を算出すると、

$$\text{周波数} = 80 \times 100(\text{cm/min}) \times 1(\text{min}) \times 47(\text{min}) / 60(\text{sec}) = 6266.7(\text{Hz})$$



(a) Dry



(b) Magnetic-field assisted cutting

Fig.3-22 Wave forms of cutting forces in each method.

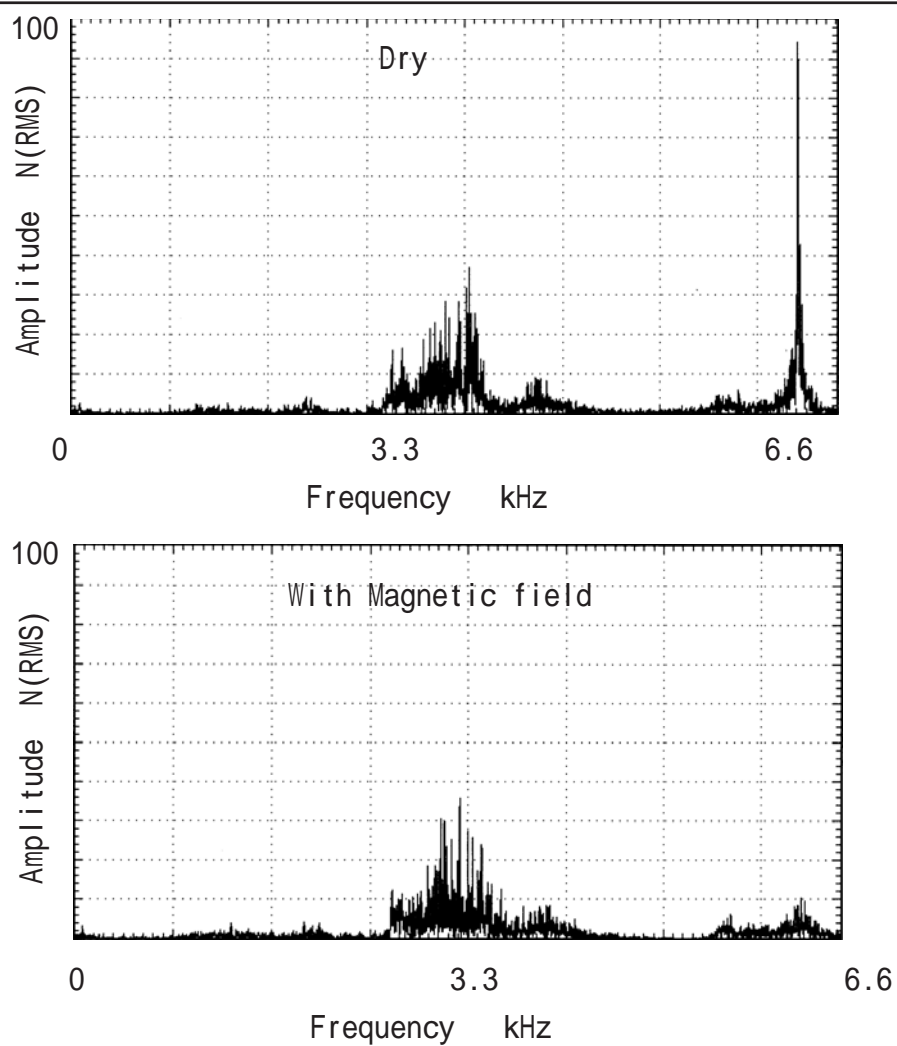


Fig. 3-23 FFT of thrust cutting force in each cutting

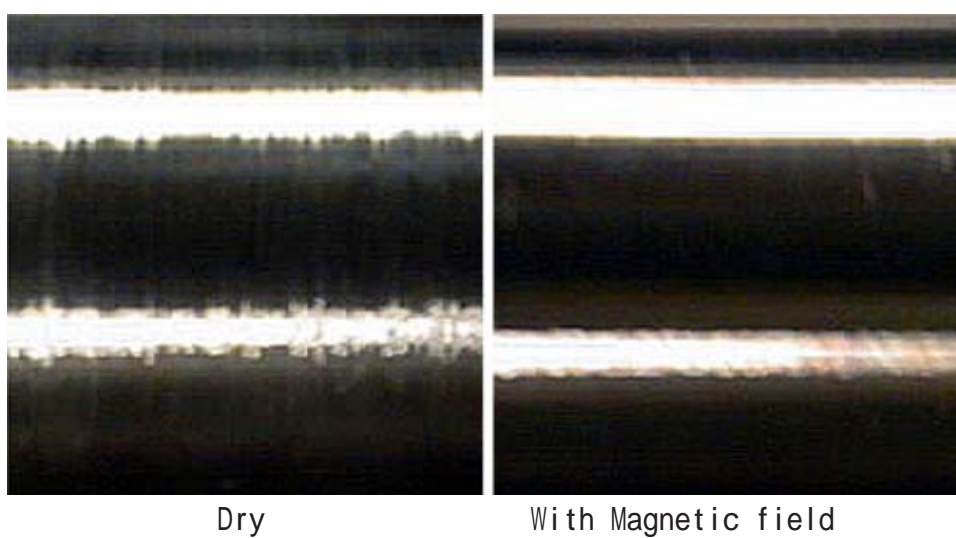


Fig. 3-24 Chattering marks

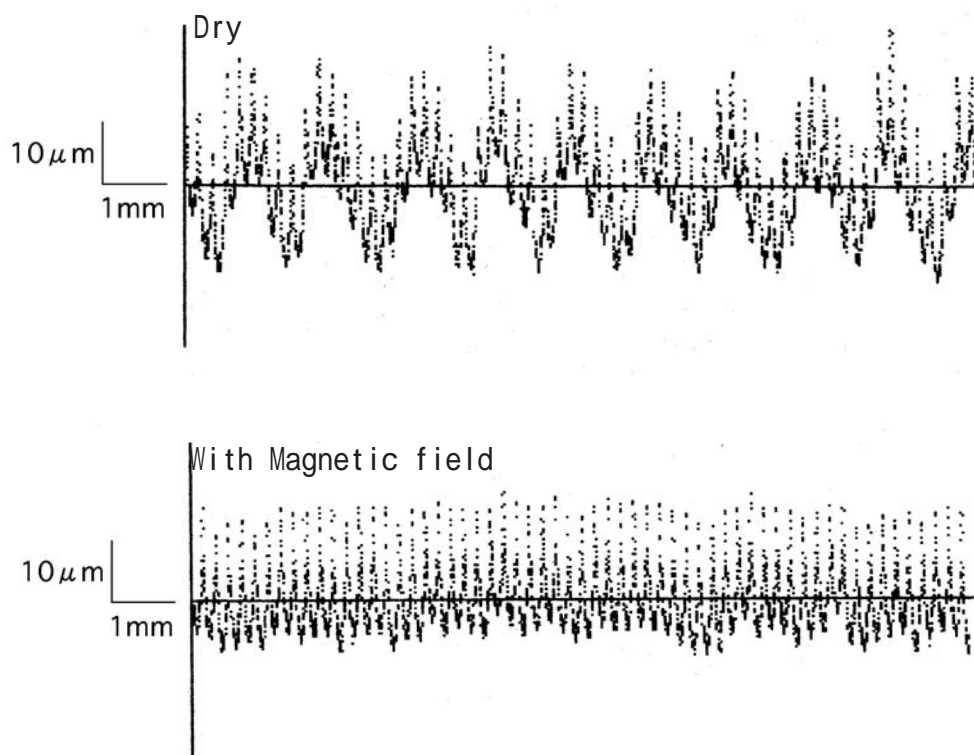


Fig. 3-25 Profile curve in each cutting

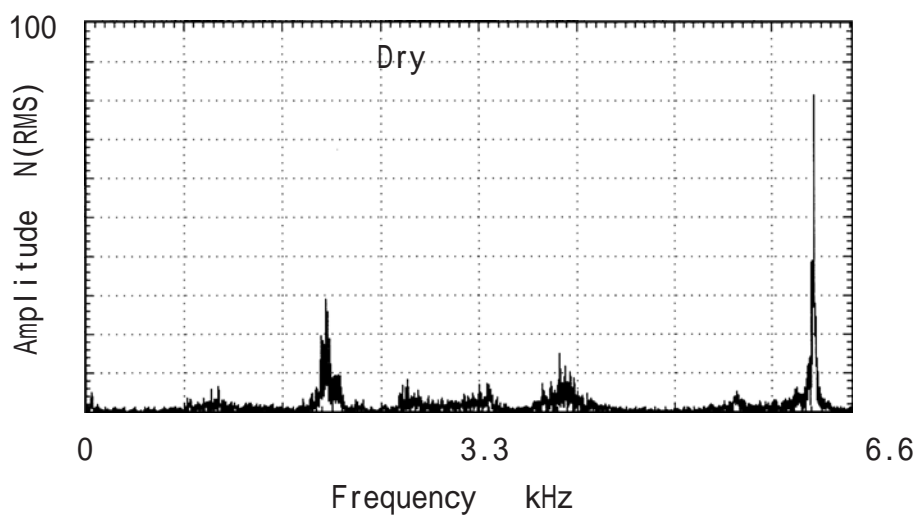
となり，ほぼFFT解析の結果と一致する．図3-25には磁場の有無による加工面の断面曲線の違いを示すが，明瞭な違いが出ていることがわかる．

3.5.3 びびり振動源の特定

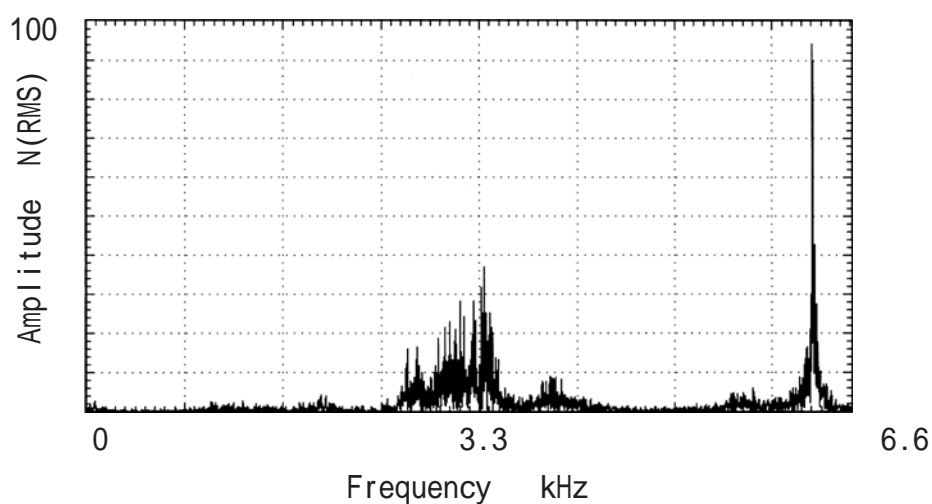
もし，これまでの磁場によるびびり振動の緩和が，機械，あるいは被削物の剛性不足やアンバランスに起因するものであるのなら，主軸回転数を変化させると振動の周波数が変化したり，振動自体が収束したりするはずである．そこで，問題の6kHz付近の振動に注目し，同一径（42mm）の被削物に対して切削速度を60～100m/minまで，すなわち主軸回転数455～758rpmまで連続的に変化させながら再び切削実験を行った．

図3-26に，切削速度60, 80, 100m/minそれぞれの場合の背分力の振動成分のFFT解析の結果を示す．この図より，切削速度が変化しても，問題の6kHz付近の振動の周波数に変化はなく，振動が収束することもないことが分かる．

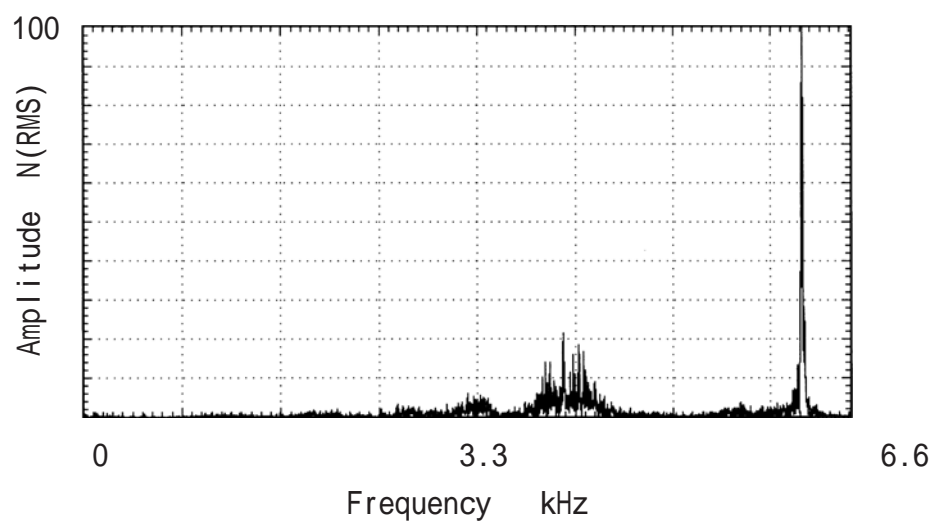
よってびびり振動の緩和は機械あるいは被削物の固有振動数やアンバランスを原因とするものではないことが分かった．すなわち，振動しているのは工具の部分であり，その振動が磁場の何らかの作用により抑えられていると推察できる．したがって，こ



(a) 455 rpm ($V=60\text{m/min}$)



(b) 607 rpm ($V=80\text{m/min}$)



(c) 758 rpm ($V=100\text{m/min}$)

Fig. 3-26 Influence of spindle revolution on FFT of thrust forces

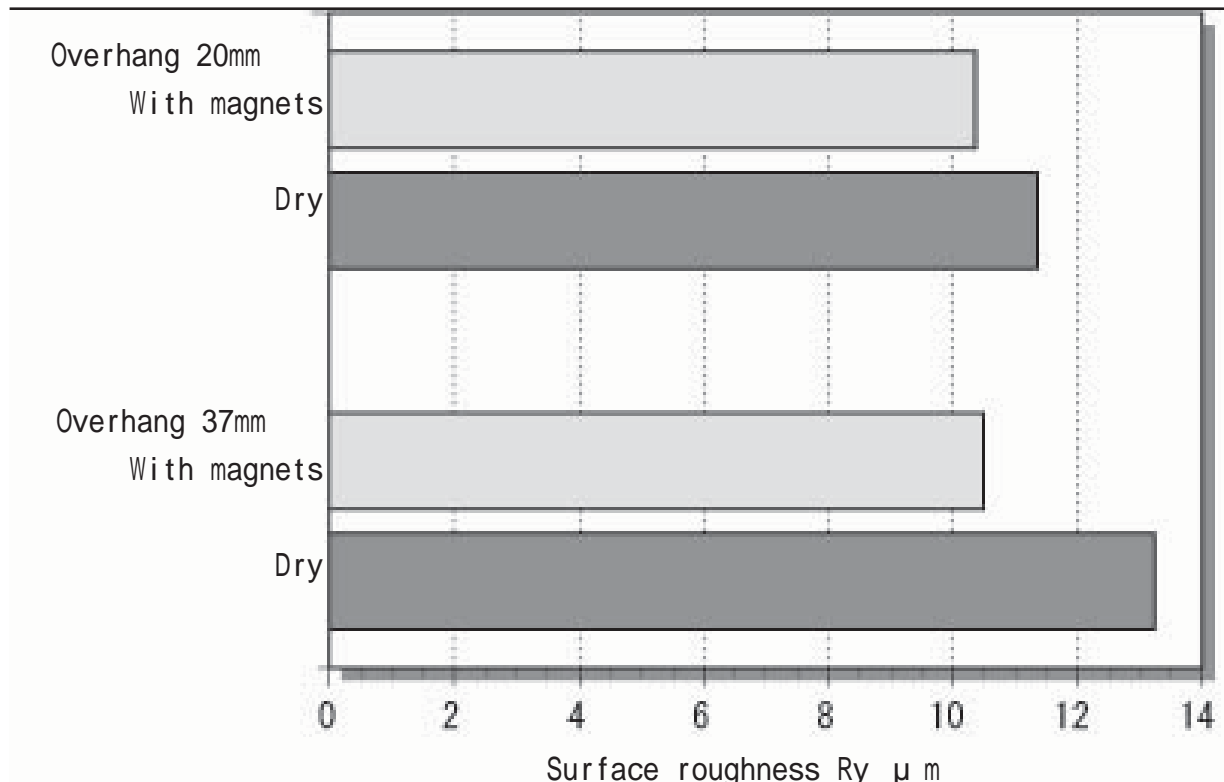


Fig. 3-27 comparisons of surface roughness

の結果が磁場が構成刃先の凝着を抑制しているために生じているのかは現時点では判断できないが、磁場援用切削により加工点での工具と被削物との摩擦状態が変化していることは確かであろう。

3.5.4 びびり振動と加工面粗さとの関係

図3-27で、突き出し20mmのときの乾式切削および磁場援用切削それぞれの場合の加工面粗さと、突き出し37mmのときの乾式切削および磁場援用切削それぞれの場合の加工面粗さを比較してみる。乾式切削の場合、工具突き出し長さが大きい方が切削抵抗の変動が増幅されやすいために加工面粗さが悪くなっている。しかし磁場援用切削の場合、工具突き出し長さが増加しても加工面粗さが乾式切削ほど悪化していないことがわかる。この結果から、軽負荷の切削条件において、磁場援用切削で加工面粗さが改善された原因は、磁場の効果によることが改めて裏付けられたと言える。

3.5.5 磁場効果の工具材種への依存性

磁場援用切削により切りくずの凝着機構が改善され、構成刃先が減少し、それらにともなって切削抵抗の変動が抑制されそして、びびりなどが低減されるという一連の効果が明らかになったが、この凝着機構の改善効果は磁場の作用により工具が変形するなどして凝着が改善されるような工具の材質に依存する現象である可能性も否定できない。

そこで本節では、超硬工具を使用したときにのみ起きる現象なのか、それとも工具材種に依存しない現象なのか調べるため、異なる工具材種にて同様の実験を行いFFTの結果から判断することにした。

最初に、Tiコーテッド超硬スローアウェイチップ(三菱マテリアル(株)製、US735、P30相当・SNMG120408)を用いることとした。磁気により切れ刃が変形したりしたのであれば、少なくとも切削抵抗の変動に多少の変化が現れてくるのではないかと思われたが、通常の乾式切削の場合ではびびり振動が起き、磁場を印加するとその振動が消えるという、超硬工具と同様の結果となった。

図3-28に、背分力の振動成分をFFT解析した結果を示すが、超硬工具の場合と同様に6kHz付近にあった大きなピークが、磁場援用切削の場合で消滅しているのが、理解できる。

そこで、次に磁性を持たない工具材種であるセラミックス工具を選択した。これまでの実験で用いてきた工具は、超硬チップおよびTiコーテッド超硬チップであり、どちらも材料に強磁性体を含んでいたが、ここで利用するセラミックス工具は(日本タングステン製NPC-H)主成分の99%以上がアルミナ(Al_2O_3)である。

しかし、本実験においても磁場による凝着抑制効果は生じている様子で、図3-29に示すように、これまでと同様に乾式切削において、6kHz付近に大きなピークが観測され、磁場の印加によりこのピークが消滅した。

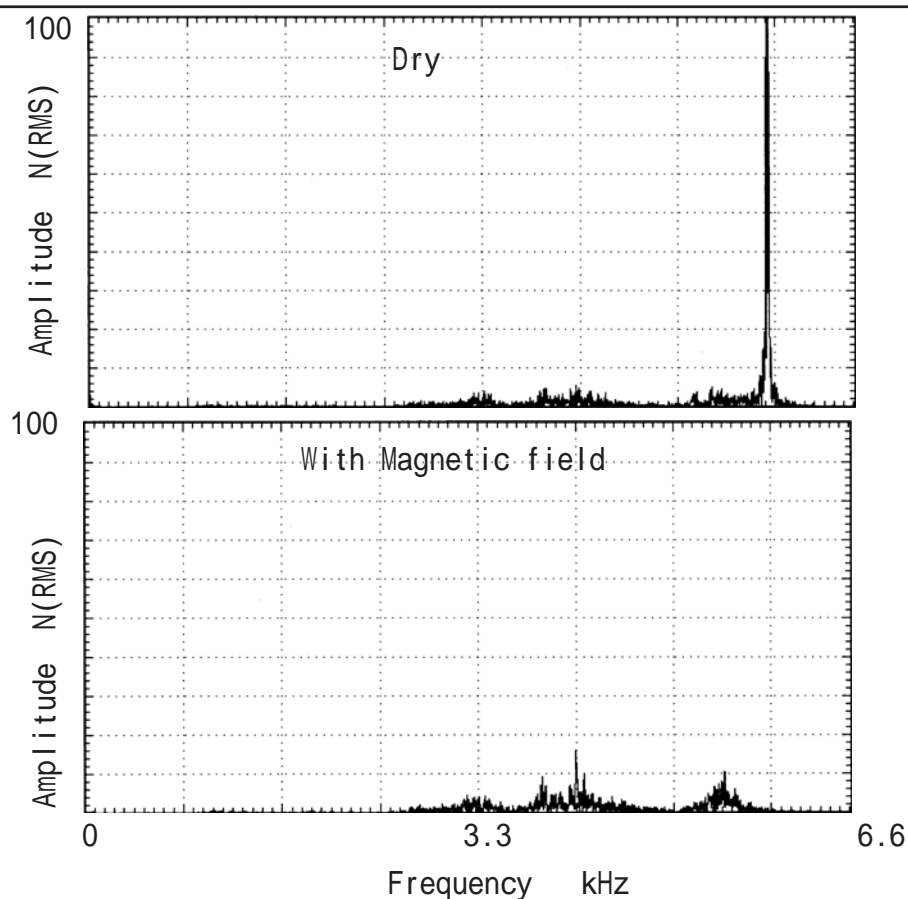


Fig. 3-28 FFT of thrust forces by Ti-coated tool

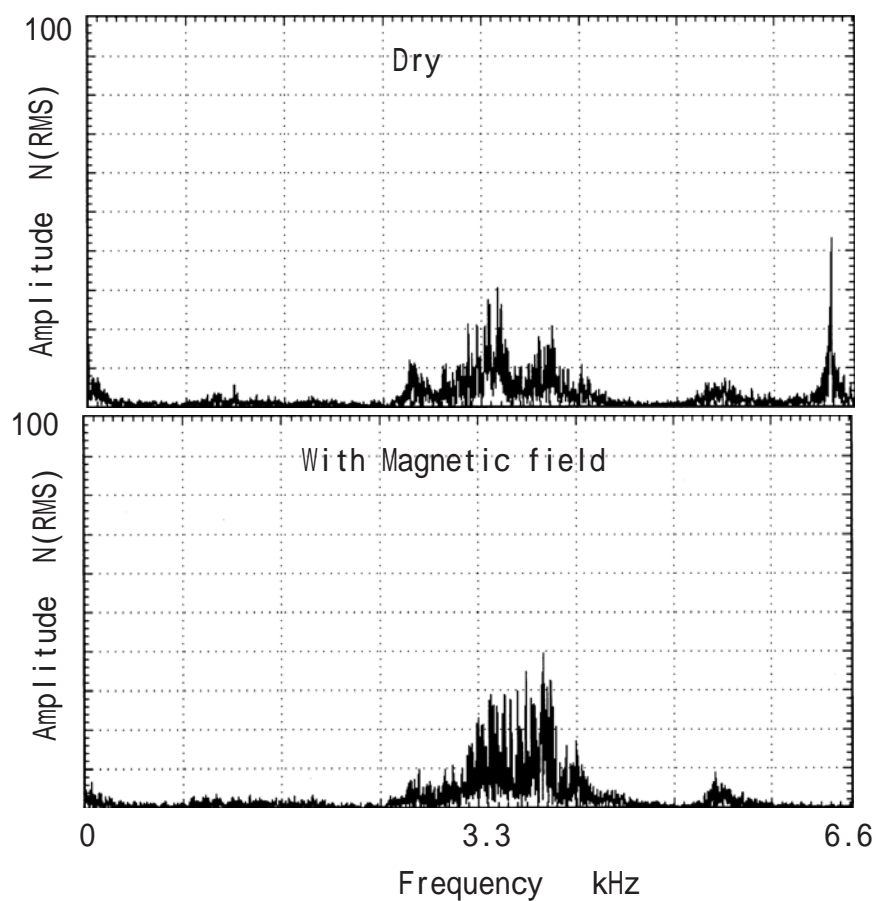


Fig. 3-29 FFT of thrust forces by Al_2O_3 ceramic tool

3.5.6 磁場効果の酸化促進作用の検証

前項の結果から、磁場援用切削による凝着減少の緩和は工具材種に依存しないものであるとわかった。そこで今度は、切削時の工具・被削物界面に注目することにした。

トライボロジーの分野では、磁場は強磁性体の摩擦において表面酸化を促進する化学的效果を持ち、摩耗を激的に変化させることが報告されている。これによると、強磁性体を用いたピン・オン・ディスク摩擦試験において、磁場中で酸素の吸着、その結果として酸化膜の形成が促進され、摩耗粉の微細化による摩耗の著しい低下(シビアー・マイルド摩耗遷移)が起こるとされる。この磁場効果は、摩擦材に強磁性体を含まないと発現しないのだが、SUS304オーステナイト系ステンレス鋼などのように、通常は磁性を持っていないくても、加工によりひずみ部分(摩擦面および摩耗粉)が強磁性になる場合では、磁場によってシビアー・マイルド摩耗は促進される。^{3-13) ~ 3-16)}

この考えを導入すると、本研究でこれまで行ってきたSUS304オーステナイト系ステンレス鋼の磁場援用切削実験においてもこのシビアー・マイルド摩耗遷移が起こっており、磁場を印加することによりすくい面および逃げ面での摩擦状態が改善された結果、切削振動の低減につながったという可能性も否定できない。

しかし、一般的に磁場によるシビアー・マイルド摩耗遷移は、ピン・オン・ディスク実験などのような比較的穏やかな摩擦条件の下で発現する現象であり、ステンレス鋼の切削加工のような高圧・高温・高速という摩擦条件になると、同様の現象が起きるとは限らない。そこで、磁場援用切削における切削振動抑制の効果が、シビアー・マイルド摩耗遷移によるものかどうか、実験を通じて確かめることとした。

磁場の酸化促進作用により工具刃先での摩擦状態が改善されるか否か調べるために、切削中の工具刃先への酸素の供給を遮断する方法を用いることにした。すなわち、磁場援用切削による切削特性の改善が、磁場による酸化促進作用の結果起きているものだと仮定すると、窒素ブローにより酸素を遮断しながら磁場援用切削を行った場合、磁場による効果は現れないはずである。

エンシュウ株式会社では、切削油を使用しないドライ加工システムにおいて工具寿命を延ばすことを目的とした、窒素ブロー加工システムの開発を行っている。³⁻¹⁷⁾ このシステムは、マシニングセンタなどにおいて切削工具の切れ刃近傍に窒素ガスを噴射しながら加

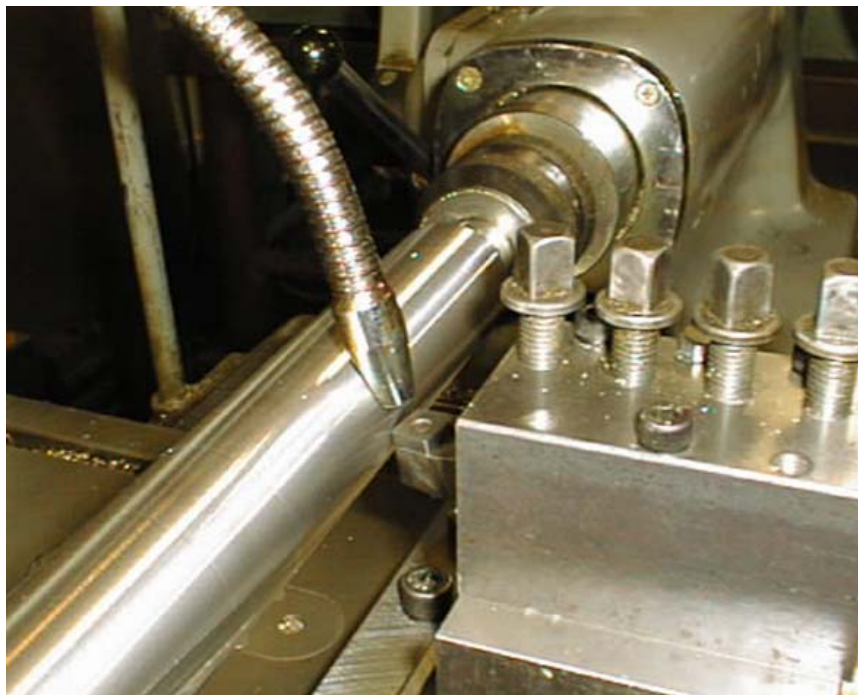


Fig.3-30 Photo of blow cutting system

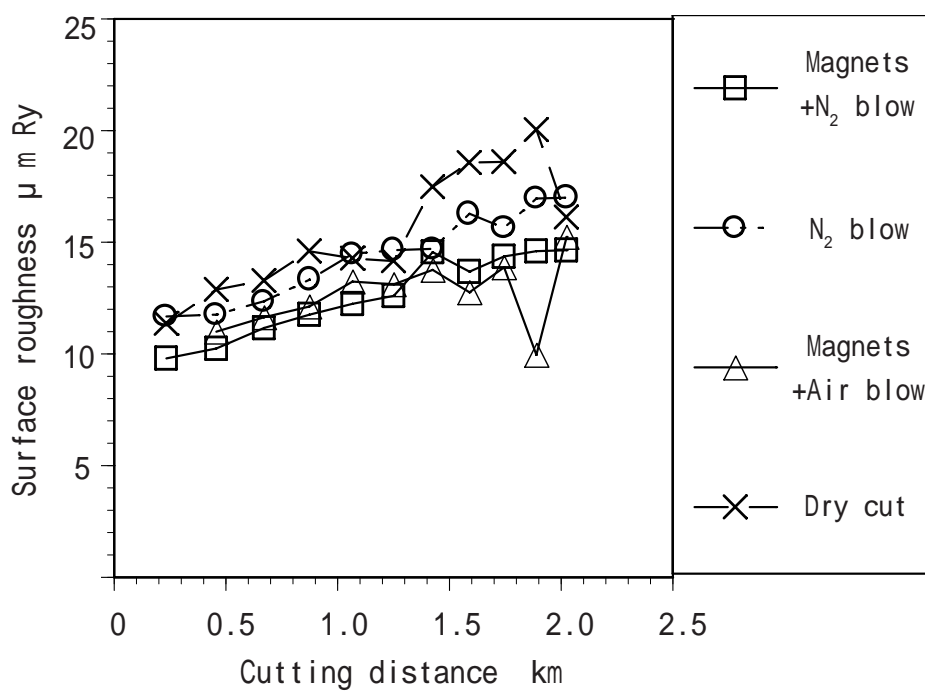


Fig.3-31 Difference of magnetic effect on machined surface by existence of oxygen

工を行うもので、工具周辺を窒素雰囲気下に置くことにより、切削工具の酸化による摩耗・損傷を抑制し、工具寿命を約2～3倍に延ばすことが可能とされている。今回、このシステムで使われている神鋼エアテック株式会社製の窒素発生装置チッソメイトを利用して、窒素ブロー、およびエアブロー下での比較を行った。(図3-30)

実験では、表3-2(2)の切削条件のもとに下の3通りの雰囲気を加工点に加えた。

- (1) 窒素ブロー + 磁場援用
- (2) エアブロー + 磁場援用
- (3) 窒素ブロー (磁場なし)

図3-31に、各実験条件における被削物の加工面粗さの推移を示す。また参考データとして、通常の乾式切削における加工面粗さの推移も示す。

(1)「窒素ブロー + 磁場援用」および(2)「エアブロー + 磁場援用」の二つを比較すると、どちらもほぼ同程度の粗さで推移しており、参考データの「乾式切削」よりも粗さが良くなっている。(1)「窒素ブロー + 磁場援用」および(3)「窒素ブロー (磁場なし)」の二つを比較すると、(3)に比べて(1)の方が粗さが良くなっており、参考データの「通常切削」と比較しても、どちらも粗さは良くなっている。

この結果から、磁場援用切削加工中の工具と被削物との摩擦に関して、磁場の酸化促進作用によるシビア・マイルド摩耗遷移により摩擦が改善され、切削振動の低減が起こったという可能性はないことが明白になった。

3.5.7 磁場効果の被削材材種への依存性

最後に磁場の切りくず凝着抑制効果が, SUS304オーステナイト系ステンレス鋼を加工した時にのみ起きる現象なのか, それとも被削材材種に依存せずにどのような種類の被削材を削っても生ずる現象なのかを明らかにすることとした。

まずマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420J でその効果を確認することとした。SUS420J2は, オーステナイト系ステンレスと異なり, 磁性が強く磁化される材料である。表3-3に主な組成を示す。

そして表3-4に示す切削条件で乾式, および磁場援用切削加工を行った場合の切削距離に対する加工面の粗さの違いを図3-32で比較した。また, 図3-33にはそれぞれの場合の1パス目の加工面の断面曲線を示す。その結果, 全体的に磁場を印加したほうが粗さが悪くなっているという結果が得られた。したがって, マルテンサイト組織の磁場援用切削においては磁場が構成刃先の凝着に影響を与えるような作用はしていないと言える。

Table 3-3 Compositions of SUS420J

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.26 ~ 0.40	1.00	1.00	0.04	0.03	0.6	12.0 ~ 14.00	Balance

Table 3-4 Cutting conditions

Cutting speed m/min	80
Feed mm/rev	0.41
Depth of cut mm	1
Work	SUS420J
Tool material	P30
Insert	SNGA120408
Holder	ESBNR2020
Coolant	None

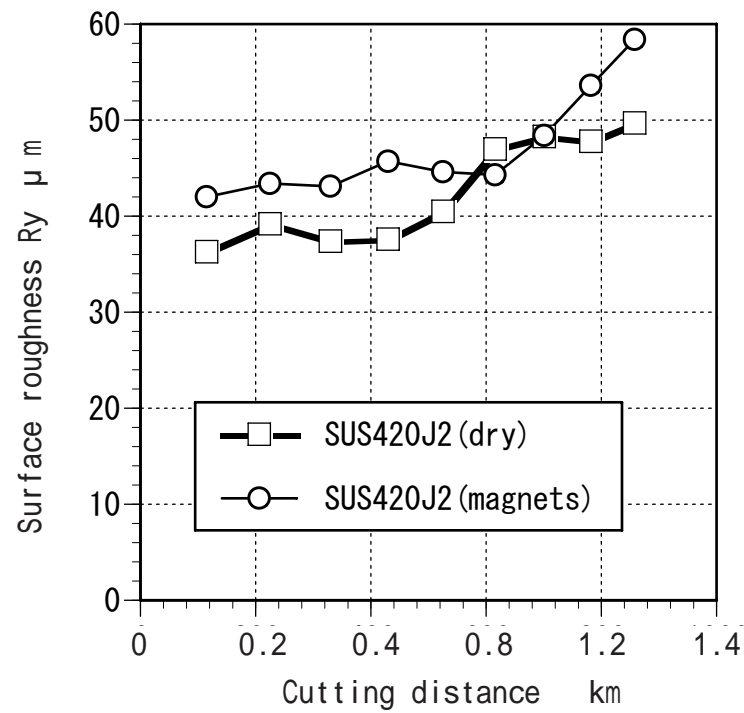


Fig.3-32 Difference of surface roughness in cutting SUS420J

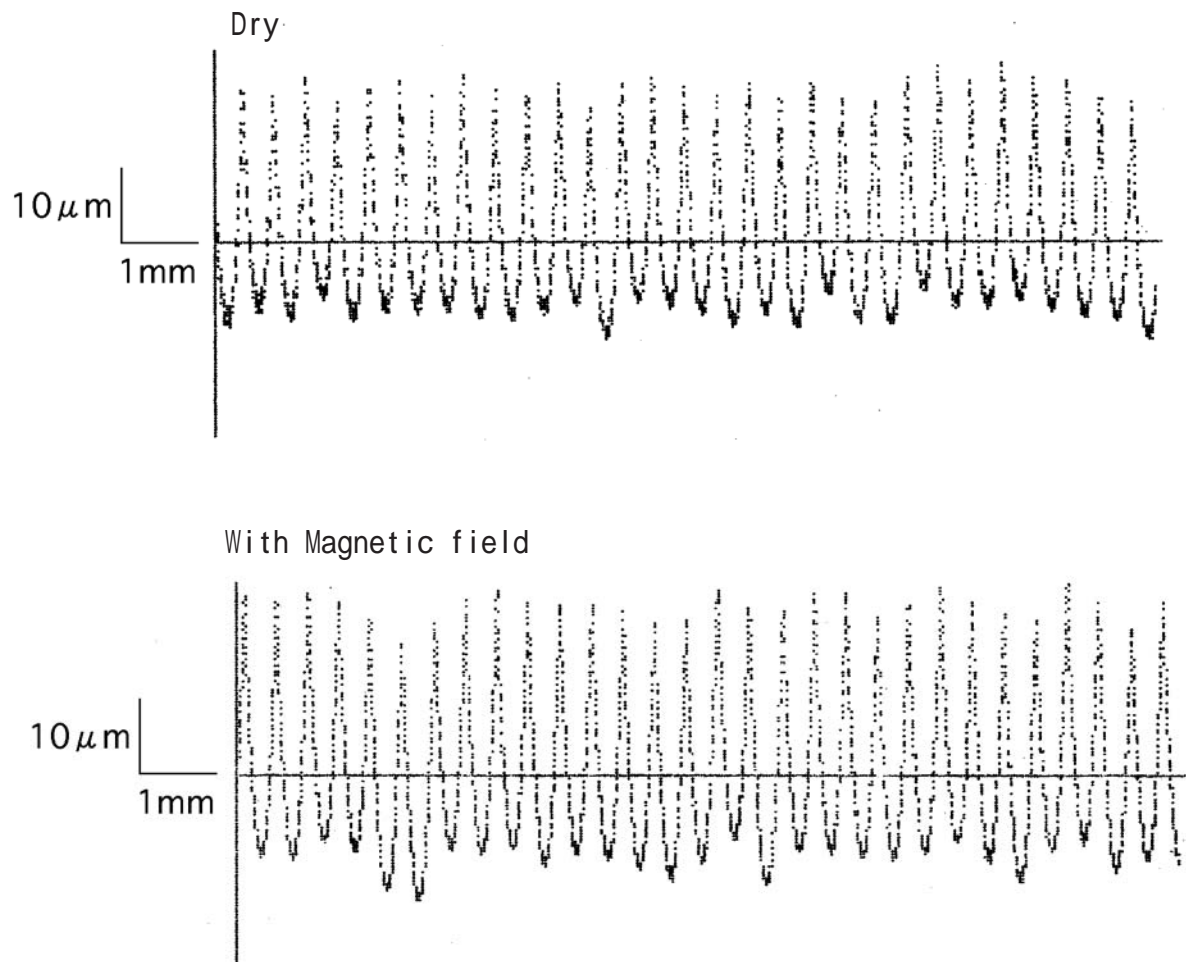


Fig. 3-33 Profile curve

Table 3-5 Compositions of Blass

Cu	Pb	Fe	Sn	Zn
57.0 ~ 61.0	1.8 ~ 3.7	0.5	Fe+Sn1.2 以下	Balance

Table 3-6 Cutting conditions

Cutting speed m/min	160
Feed mm/rev	0.2
Depth of cut mm	0.5
Work	Blass
Tool material	P30
Insert	SNGA120408
Holder	ESBNR2020
Coolant	None

次に銅合金の一種である黄銅の切削実験を行った。材種は、表3-5に示す快削黄銅を用いた。切削条件は、表3-6に示す通りである。図3-34に、切削距離に対する加工面の粗さの推移を、そして図3-35にそれぞれの場合の1パス目の加工面の断面曲線を示す。マルテンサイトステンレスと同様に、磁場の有無による有意な違いは見られない。

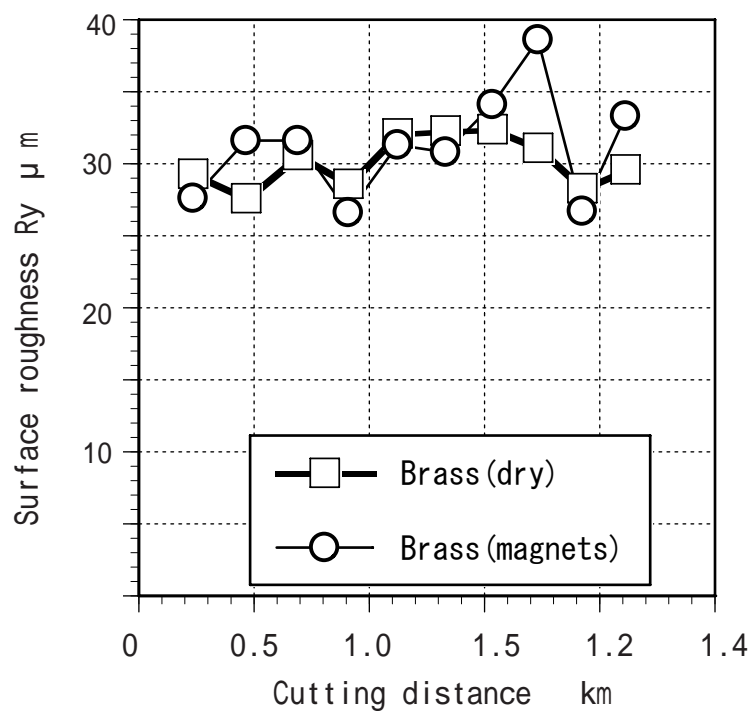


Fig.3-34 Difference of surface roughness in cutting SUS420J

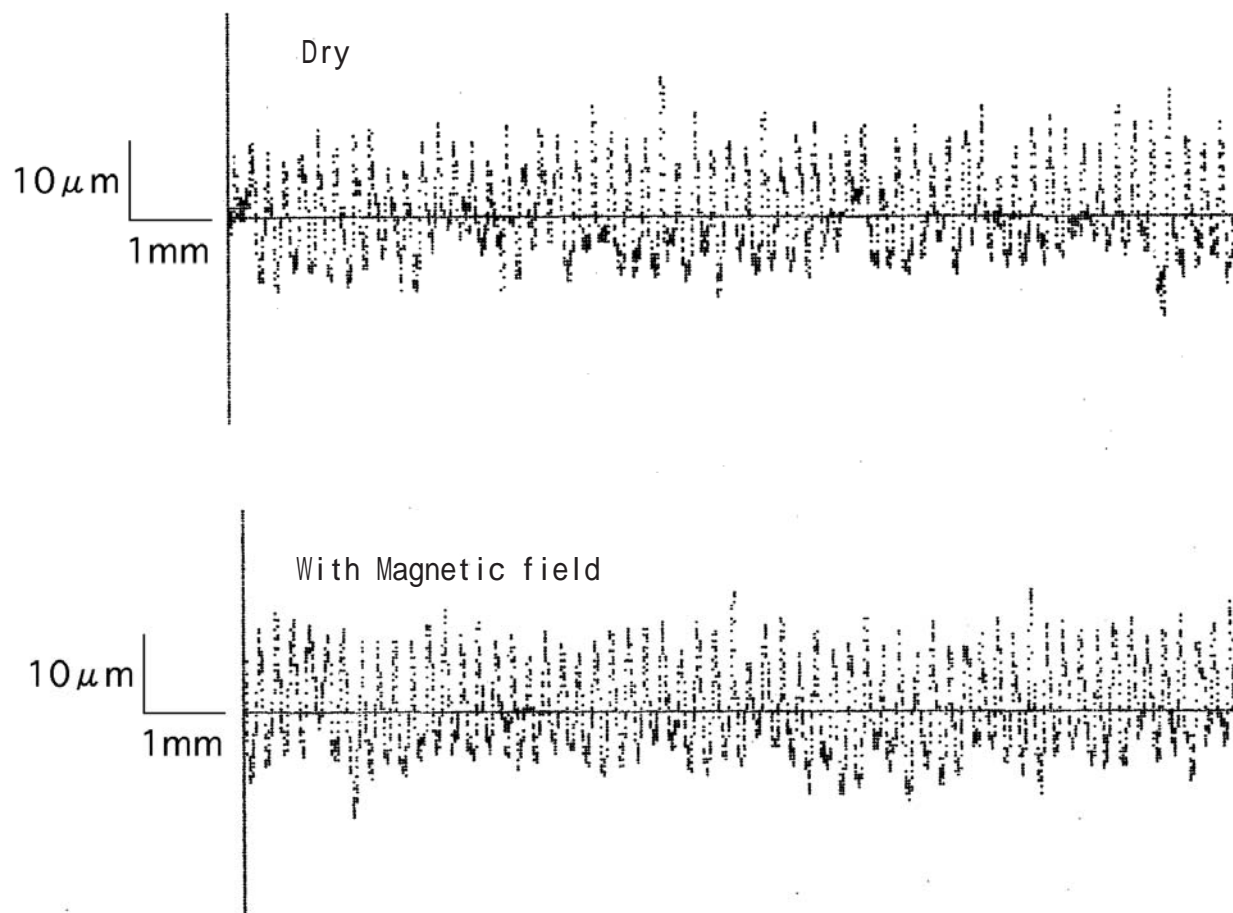


Fig. 3-35 Profile curve

Table 3-7 Cutting conditions

Cutting speed m/min	160
Feed mm/rev	0.29
Depth of cut mm	0.25
Work	Cu
Tool material	P30
Insert	SNGA120408
Holder	ESBNR2020
Coolant	None

そこでCuが99.90%以上の純銅の切削実験を行った。銅を用いた理由は入手がし易く、これと黄銅での実験結果を比較することで、磁場の作用が何らかの形で生じた場合にどの元素が磁場の影響を受けるかを把握することができる可能性があったからである。切削条件は、表3-7になる。このときの切削距離に対する加工面の粗さの推移を図3-36に示す。また、それぞれの場合の1パス目の加工面の断面曲線を図3-37に示す。結果を見ると、やはりこれらの図からは磁場の効果は発見できない。

次にアルミニウム合金を用いたが、切削条件を変えても、極度の構成刃先が生じて切削面が擾乱されてしまったので、有効なデータは採取できなかった。そして、ここでも通常切削の場合と磁場援用切削の場合で、切り屑や音などに特に違いは見られなかった。

従ってこれらの結果から、構成刃先の凝着が減り切削抵抗の変動が抑制されるという効果はオーステナイト系ステンレスSUS304自身が有する何らかの特性に依存していることが明確になった。

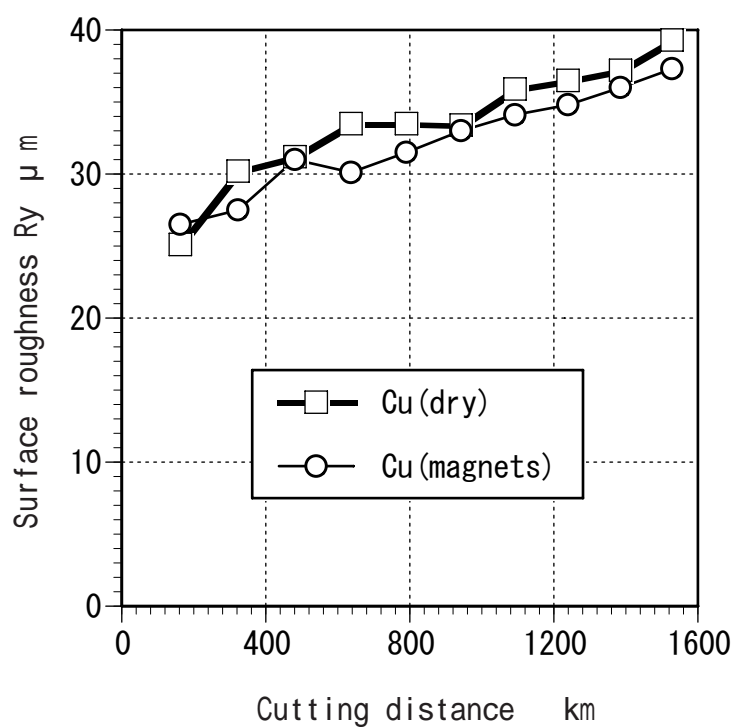


Fig.3-36 Difference of surface roughness in cutting SUS420J

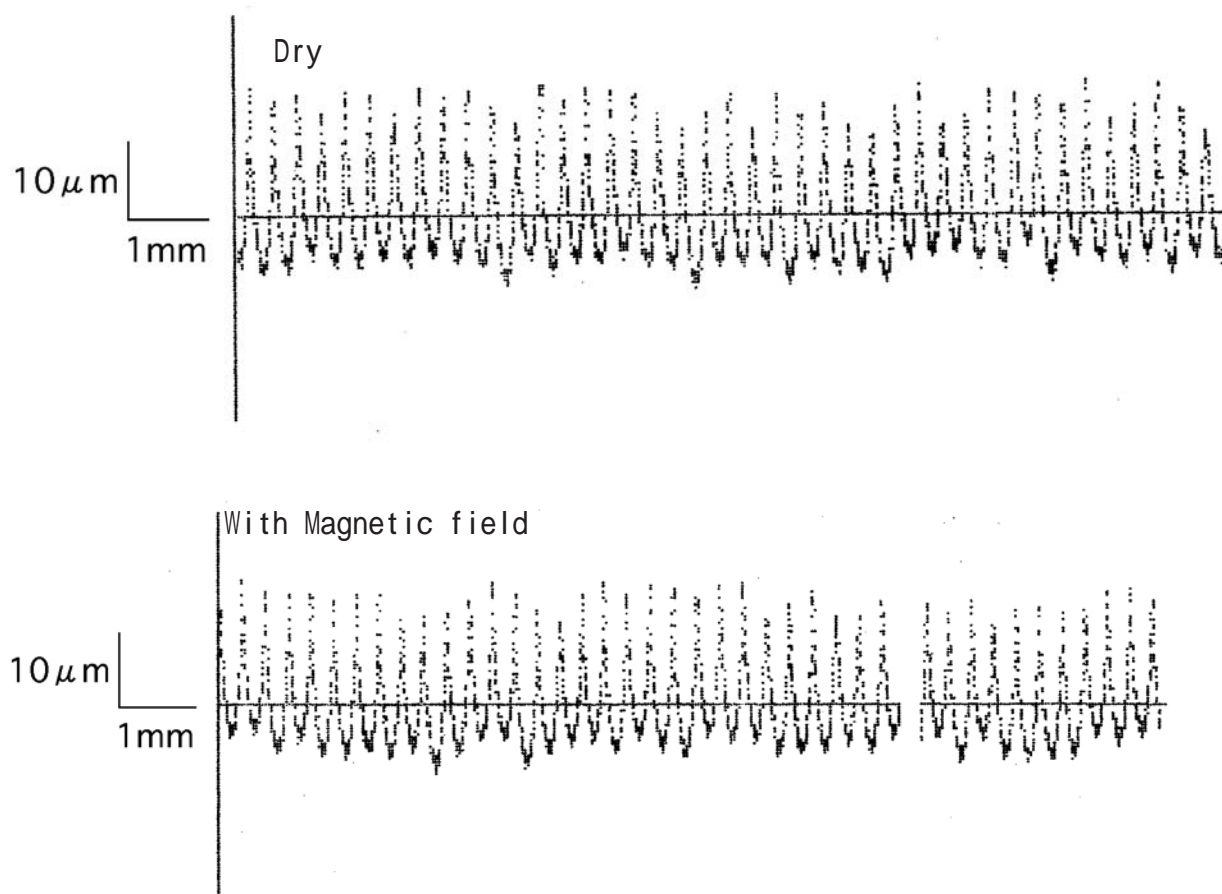
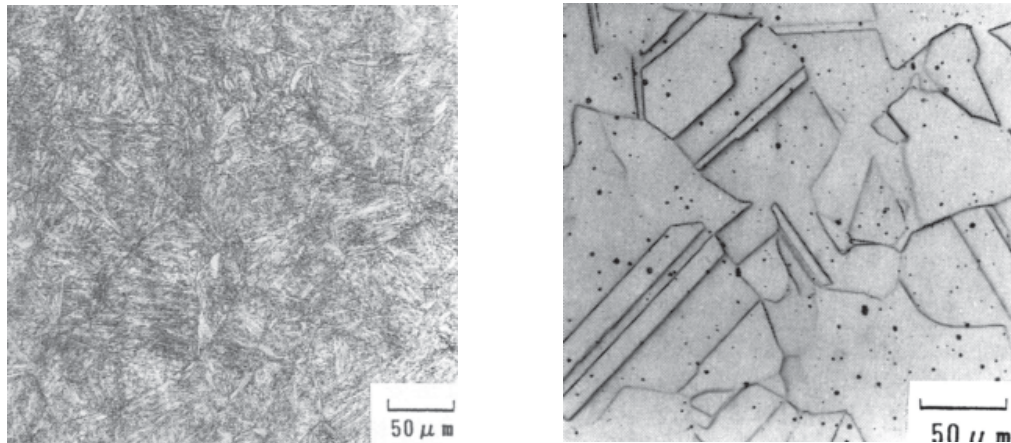


Fig. 3-37 Profile curve



(a) martensitic

(b) austenitic

Fig. 3-38 Crystallographic structure of stainless steel

3.5.8 金属組織学的見地からの発生機構の検討

これまでに切削実験を行った材料のうち、非鉄系材料に関しては磁場援用切削の効果は現れなかった。一方、マルテンサイト系ステンレス鋼では磁場の効果は確認できなかった。したがって、磁場効果の原因は、オーステナイト組織との関連性が有力と考えられる。

SUS304などの18Cr-8Ni系のステンレス鋼のオーステナイト組織は常温では不安定なため、相変態を起こしてより安定なマルテンサイト組織を生じる場合がある。これはオーステナイトのマルテンサイト変態と言われ、鉄系金属に多くみられる現象である。しかし、この相変態を起こすためには、オーステナイトおよびマルテンサイト両相の間に新しい界面が生ずるためのエネルギーや、マルテンサイトがオーステナイトに coherent に発生するためのひずみエネルギーなどが必要になる。このようなエネルギーのことを一般に駆動力と呼んでいる。(3-8), (3-18)

オーステナイト組織からなる鉄系金属に冷間加工を施した場合、相変態に必要な駆動力が加工に伴う応力により与えられ、劈開面のマルテンサイト化が起こる。このような現象をオーステナイトの加工誘起マルテンサイト変態という。(3-8), (3-19)

オーステナイトのマルテンサイト変態は原子の拡散を伴った相変化ではないので、非常に高速であり、変態の進行速度は 10^{-2} 秒以下である。(3-8), (3-20)

ここで、多くの鉄系金属のオーステナイト相が磁化されないのに対し、マルテンサイト相は強磁性を示す。したがって、磁場下のマルテンサイト変態においては、変態の駆動力として必要なエネルギーの一部が磁気的エネルギーとして供給されるので、変態が促進される。具体的には相変態を生ずる変態点が $20 \sim 30\text{K}$ 程度低下する現象が生ずる。これを

磁場誘起マルテンサイト変態と一般に呼んでいるが、^{3-21) ~ 3-24)}これにより加工誘起マルテンサイト変態が磁場下で促進されることは容易に想像できる。これらのことを磁場援用切削についても当てはめて考えると、磁場による切削振動抑制のメカニズムを以下のように説明することができる。

切削作用により SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼は塑性変形を受けるので、前述したように工具切れ刃先端の劈開面では応力により加工誘起マルテンサイト変態が起こる。ここで工具切れ刃近傍に磁場を印加すると、磁気的エネルギーにより変態点が低下しマルテンサイト変態が促進される。ここで、一般に、オーステナイト晶およびマルテンサイト晶は、図 3-37 に示すような金属組織からなり、以下のような性質を持っている。

オーステナイト：強くねばい。非磁性体。結晶粒は粗大

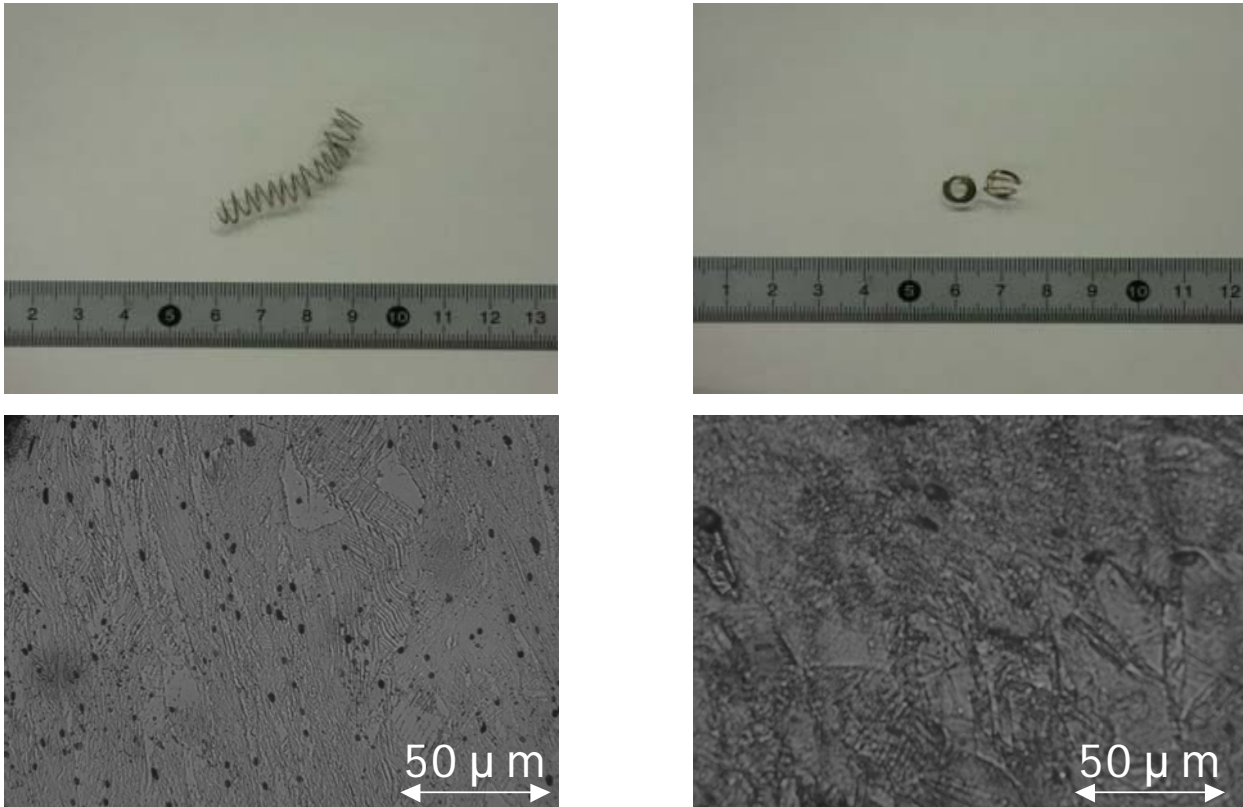
マルテンサイト：硬くもろい。磁性体。結晶粒は細かい針状または板状

したがって、マルテンサイト層はすべりやすいので、切り屑裏面のマルテンサイト変態が進んでいる場合、切り屑は凝着を生じず安定して排出される。逆に、切り屑裏面の残留オーステナイトが多い場合、切り屑のすべりは悪く、溶着が起きやすくなり、構成刃先として切削抵抗の変動を生じさせたのではないかと仮定される。

そこで、加工によって生じた切りくずの形態、ならびにその組織の観察を行った。図 3-39 に結果を示す。(a)の乾式加工の場合は切りくずが比較的長く、またその組織に比較的オーステナイトが多く見られる。一方、(b)の磁場を印加した場合は、比較的微細なマルテンサイト組織が形成され、かつ切りくずも一巻き程度で折断されているのがわかる。

また、念のため次のような実験も行った。マルテンサイト化が促進されていれば、マルテンサイト組織は強磁性であるため磁化する。したがって、磁石を近づければ残留オーステナイト組織が存在する切りくずよりも吸引されやすい。そこで図 3-40 のように一定重量の試料を、乾式切削、ならびに磁場援用切削で得られた切りくずから作成し、磁力による吸引実験を行った。この実験ではマシニングセンタの Z 軸に磁石を、テーブル上に切りくずの試料を設置し、離れた距離から磁石をゆっくり近づけてゆき、磁力に吸引されたときの距離を座標から求めた。あらかじめ計算した値によると 13.5mg の切りくず試料は 13mT の磁束密度の場合に吸引されることになる。実験の結果、やはり磁場援用切削による切りくずのほうが、乾式切削の切りくずよりも短い距離で吸引された。

よって、これらの結果から磁場によりオーステナイト組織のマルテンサイト化が促進されたものと結論付けられる。



(a) dry (b) with magnets
Fig. 3-39 observation of chip and crystallographic structure

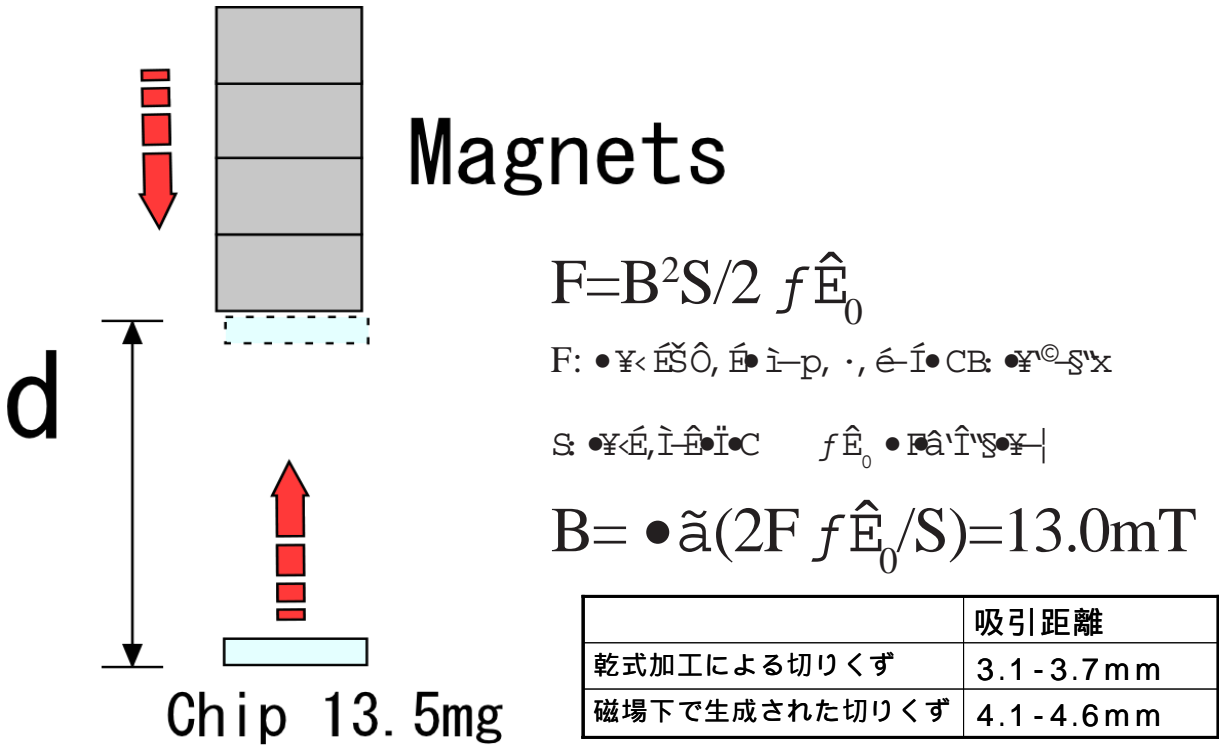


Fig. 3-40 Confirmation experiment of chip magnetization

3.5.9 磁場強度と磁場効果との関係

これまでの結果から、磁場により被削材の被削性を变化させて構成刃先の凝着を低減できる見通しを得たが、その効果がどの程度の磁場強度で得られるのか、効果との関係については触れていない。そこで、一連の磁場効果はどの程度の磁場強度で発現するのか、また磁場強度にどの程度比例して効果が増していくのか、実験を通じて調べてみることにした。

表3-2(2)の切削条件でSUS304を切削しながら、磁束密度を1mTずつ増加させたときの背分力FFT解析結果の変化を図3-41に示す。これらの図より、磁束密度が0mT～4mTの時は、6kHz付近に明瞭なびびり振動のピークが現れているが、そのピークは3mTの時から徐々に小さくなり始め、5～6mTになるとほとんど消えることが分かる。図3-42にこの6kHz近辺の振幅を各磁束密度でまとめると、磁束密度に対する磁場の効果は線形ではなく、磁束密度がある閾値を超えたときに発現していることが分かる。本実験の場合、磁束密度が5mTを超えたところで磁場の効果が著しく強くなったことが分かる。もちろんこの原因として、磁石を工具先端に取り付けたことにより、工具の重量が増したため、工具自身の固有振動数が変化して工具びびりが収まったとも考えられるため、磁石と同じ重量のダミーウエイトを工具の同じ位置に置いて同様の実験を試みた。しかし、上記のように振動が収まることはなく、びびりは磁場の凝着低減効果により収束したと言える。すなわち、工具びびりは、磁石により工具の重量が増した結果、固有振動数が変化して収まったのではなく、磁場の作用により構成刃先の凝着が減少して、切削抵抗の変動が低減されて工具びびりが収束したと言える。

そして以上の結果から、SUS304の切削において凝着を抑制し被削性を向上させるためには5mT以上の磁場の強度が必要と言える。

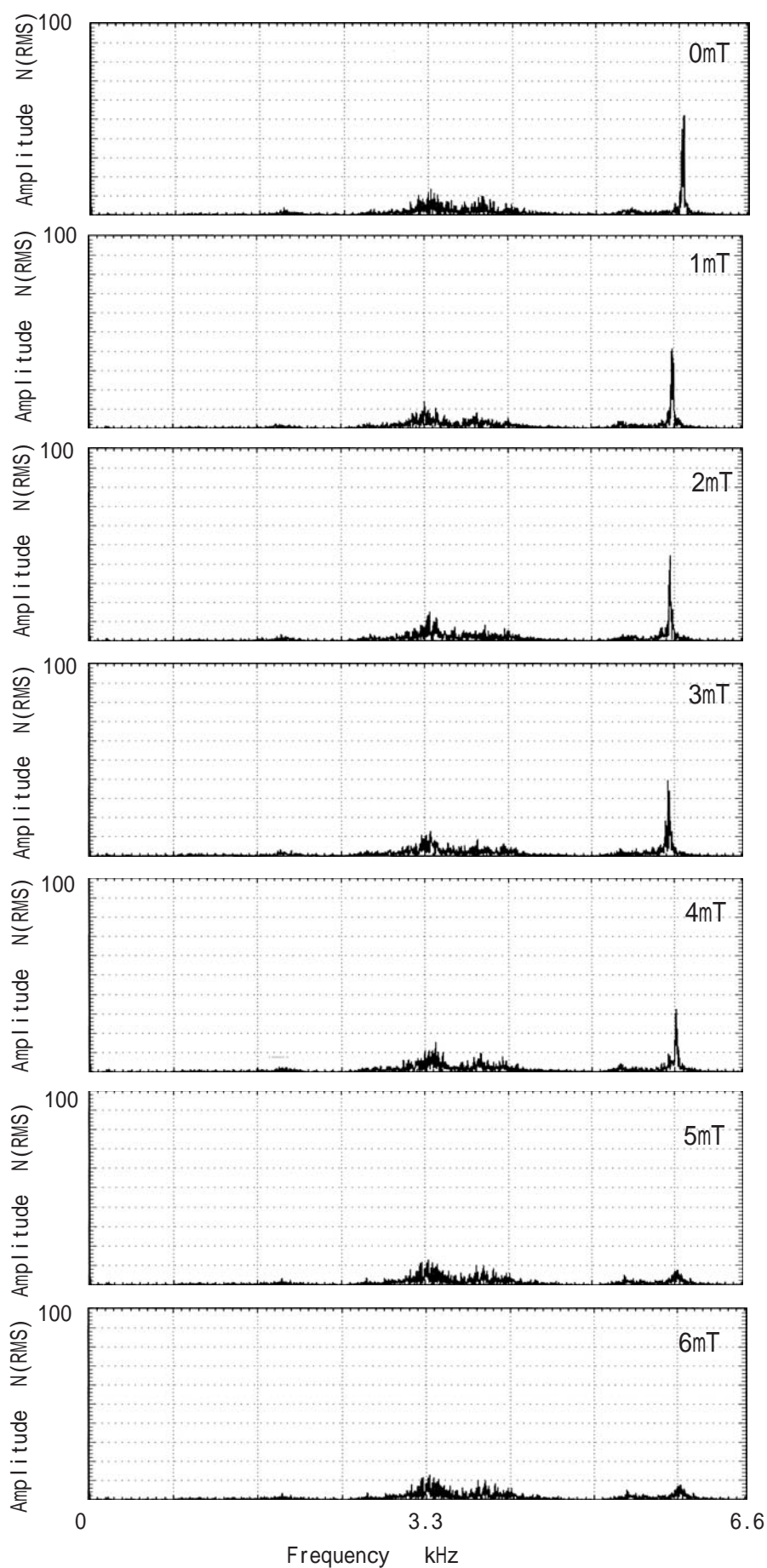


Fig.3-41 FFT analyses of radial cutting forces

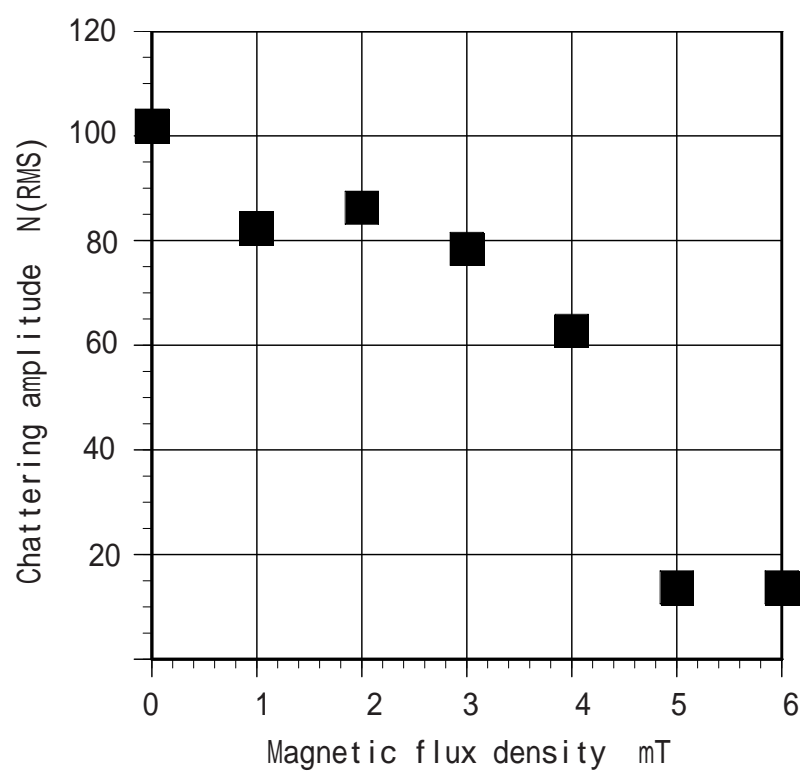


Fig.3-42 Relationship between magnetic flux density and chattering amplitude of radial cutting forces

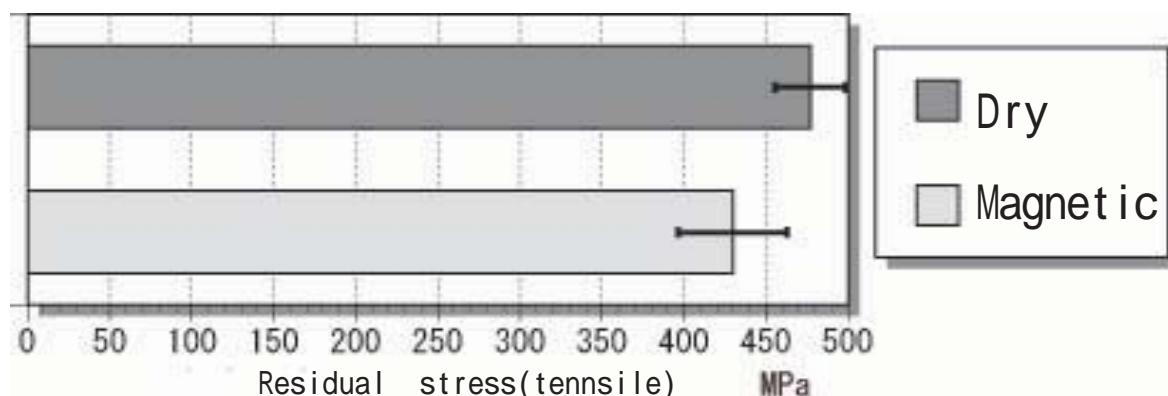


Fig.3-43 Comparisons of residual stress

3.5.10 被削物表面への磁場の影響

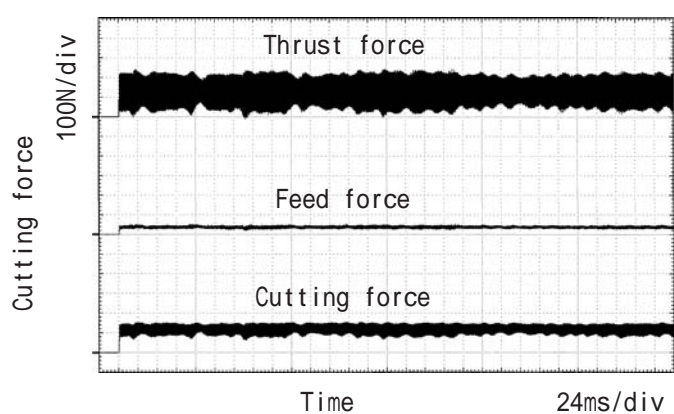
これまでの結果から，オーステナイト組織を有する合金の加工において磁場を加工点付近に印加すれば，磁場誘起マルテンサイト変態により，オーステナイト組織のマルテンサイト化が促進され，構成刃先の凝着が減少し結果として被削性を一時的に変化させることが可能との見通しを得た．しかし，一方で，そのような組織変態の影響が被削材側にも残り，結果として被削材の機械的性質を脅かす可能性も考えられる．そこで，加工後の被削物表面の残留応力を調べ，磁場を加工点付近に一時的に印加する影響を調べることにした．

残留応力の測定には，X線応力計測法を用いた．この方法は，X線回折を用いて結晶格子のひずみを計測することにより応力を求めるもので，材料の最表層の残留応力の絶対量を非破壊で測定することができる．

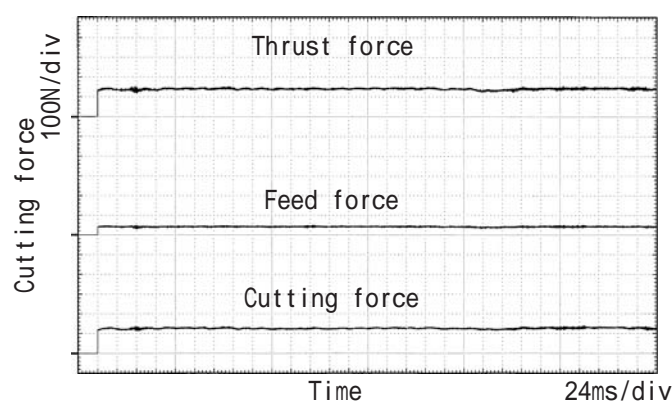
表3-2(2)に示す条件にてSUS304の乾式切削加工および磁場援用切削加工を行ったサンプルそれぞれについて，被削物の軸方向の表面残留応力を測定した．測定結果は，図3-43の通り，磁場援用切削を行った方が残留応力が小さくなる傾向にあるようにも見えるが，測定誤差を考えると，このデータのみで残留応力に違いがあるかどうか判断は難しい．しかし結果的には磁場が被削材表層部に悪影響を残し，表層部を中心に機械的性質に悪影響をおよぼしている可能性は今回の実験条件では低いと言える．

Table 3-8 Cutting conditions of invar alloy

Cutting speed m/min	80
Feed mm/rev	0.2
Depth of cut mm	0.25
Work	Invar alloy
Tool material	P30
Insert	SNGA120408
Holder	ESBNR2020
Coolant	None



(a) Dry



(b) With magnets

Fig.3-44 Difference of cutting forces in machining invar alloy under magnetic field

3.5.11 インバー合金の磁場援用切削

オーステナイト系ステンレス鋼の磁場による加工面粗さの向上や工具びびりの抑制効果は、磁場誘起マルテンサイト変態によってもたらされていることが確認された。そこで、SUS304以外で磁場誘起マルテンサイト変態を起こす材料に磁場援用切削を適用し、再度その効果の発現を確認する。ここでは、インバー合金を実験に用いた。インバー合金は常温での熱膨張率が極めて小さい材料であり、難削材として知られている。

実験は比較的低負荷の表3-8の条件で行い、磁場援用切削と通常切削で切削抵抗の変動を比較した。得られた結果を図3-44に示す。図より、通常切削では各分力ともに変動が大きい。磁場援用切削では各分力とも変動は小さく、平滑な波形になっている。また、表3-9に磁場の有無による加工面粗さの違いを示すが、磁場援用切削によりRyで11.3 μm から8.4 μm と加工面粗さが向上している。

したがって、上記の結果からも、これまでの推論が裏付けられ、磁場誘起マルテンサイト変態が被削性の向上の原因と実証された。すなわち、磁場誘起マルテンサイト変態により、被削材が硬化して工具への凝着が減り、加工面粗さが向上する。そして、構成刃先の凝着が減ることで切削抵抗の変動が少なくなり、仕上げ切削のような低負荷の加工条件において、工具びびりが生じにくくなると考えられる。

Table 3-9 Difference of surface roughness in machining of invar alloy

Theoretical	6.25 $\mu\text{m Ry}$
Without magnets	11.3 $\mu\text{m Ry}$
With magnets	8.4 $\mu\text{m Ry}$

3.6 結論

本章では場を利用して工具の強化と難削材の一時的な快削化を行うことで工具の長寿命化を図ることを検討した。その結果、本実験の範囲において、次のような磁場の効果が認められた。

- (1)磁場を超硬工具の切削加工点近傍に印加することで、比較的負荷の大きい粗加工切削条件下では、切れ刃に5～7mT程度の磁場を印加しておくことで、工具寿命が1.2～1.5倍程度向上する。
- (2)(1)の結果は、前者は磁場により工具バインダであるCoの滲み出しが抑制されたためと考えられる。
- (3)オーステナイト系ステンレス鋼に磁場援用切削を行うと、軽切削条件では工具への被削材の凝着が減少して、切削抵抗の変動が小さくなる。その結果、工具びびりが生じにくくなり、工具への負担が低減できる。
- (4)上記(3)は、オーステナイト組織を有する被削材に磁場援用切削を適用するときだけに生じ、磁場誘起マルテンサイト変態がその原因である。
- (5)加工後の被削物の表層部に対しての組織の変化や磁化といった磁場の影響は、今回の実験で用いた磁場強度では全く見られなかった。

以上の結果から、切削油剤の使用を低減しても場を利用して、工具の寿命を向上させることができる新しい加工方法が見出された。

参考文献

- 3-1)日本規格協会，JIS ハンドブック工具，日本規格協会，(1996)。
- 3-2)精密工学会，新版精密工作便覧，コロナ社，(1992)
- 3-3)吉村寛範．超合金の特性およびその実用例．FETROTECH，Vol．19，No．8，(1996)。
- 3-4)鳴瀧則彦，岩田一明，奥島啓式，工具摩耗面のマイクロアナライザ観察，精密機械，Vol．32，9(1966)607。
- 3-5)大久保俊一，松岡諭．磁気パルスによる工具寿命の延長．機械と工具，Vol．33，No．9，(1989)。
- 3-6)(株)東芝，特開平10-0249601。
- 3-7)住友特殊金属(株)，NEOMAX カタログ。
- 3-8)ステンレス協会，ステンレス鋼便覧 第3版，日刊工業新聞社，1995，p.77。
- 3-9)柳原 聖，廣田平一，強化粉末高速度鋼の被削性，精密工学会誌，Vol．64，1(1998)142。
- 3-10)北川武揚，前川克廣，高マンガ鋼旋削時の超硬工具の摩耗とその解析的予測(その1)- 工具摩耗特性と切りくず生成モデル -，精密機械，Vol．50，11(1984)1753。
- 3-11)熊谷一男，磁場によって変わる金属の摩耗，熱処理 Vol．31，4(1991)189。
- 3-12)平塚健一，磁気とトライボロジー，トライボロジスト，Vol．33，9(1988)671。
- 3-13)山本雄二．電場-磁場による摩擦-摩耗のアクティブ制御．トライボロジスト，Vol．38，No．8，(1993)
- 3-14)平塚健一．磁気とトライボロジー．潤滑，Vol．33，No．9，(1988)
- 3-15)熊谷一男．磁場によって変わる金属の摩耗．熱処理，Vol．31，No．4，(1991)
- 3-16)奥島啓式，人見勝人，上神謙次郎．切削加工における雰囲気の効果．日本機械学会論文集(第3部)，Vol．32，No．234，(1966)
- 3-17)エンシュウ株式会社．窒素ガスを使用したドライ加工システム
- 3-18)西山善次，マルテンサイト変態-基本編-，丸善，1958，p.215。
- 3-19)日本鉄鋼協会．鋼の熱処理．丸善，(1969)
- 3-20)小原嗣朗．金属材料概論．朝倉書店，(1991)
- 3-21)清水謙一，マルテンサイト変態における磁場効果，日本金属学会会報，Vol．25，5(1986)392。

- 3-22)大塚・長井・梶原・北口・上原,Fe-Ni-C合金における低温でのマルテンサイト変態挙動及び変態組織に及ぼす強磁場と応力の影響 ,CAMP-ISIJ , Vol.8(1995)1612.
- 3-23)掛下知行, マルテンサイト変態におよぼす強磁場・超高静水圧効果 - 磁場の効果 - , バウンダリー ,2(1993)56.
- 3-24)V.D.Sadvsky,L.V.Smirnov,Ye.A.Fokina,P.A.Malinen andI.P.Soroskin,Fizika Metal Metall. ,24(1967)918.

第四章

場を利用した 潤滑物質の吸引

4.1 緒言

これまで機械加工においては、加工油剤がふんだんに加工点周囲に供給されてきた。その量は毎分数1～数十lも供給されていたために、供給用のノズルを無造作に加工点に向けていれば良かった。しかし、このふんだんに供給された加工油剤のうち、実際に加工点に届くのは僅かであり、工具寿命を向上させる役割を担うという意味においては、供給のほとんどのがその用をなしていなかった。

そのような供給を見直す方法としてMQL法が提案された。MQL法は、加工点の潤滑に必要な最低限の加工油剤を供給するという考え方の下で、植物性の潤滑油を霧状に加工点周囲に噴霧して、その供給量を毎分数ml程度にまでに削減した潤滑供給法である。しかし、一方で、MQL法においては、油剤が適切に加工点に運搬される要素としては、ノズルから噴霧時に油剤粒子に与えられた運動エネルギーに依存した供給方法であるために、工具回転にともなう連れ周り風などの影響を受けやすく、適切に供給ノズルを加工点に向けねばその効果が得られにくいという問題があった。そこで、本章においては、場と補材の利用による工具保護を検討する。

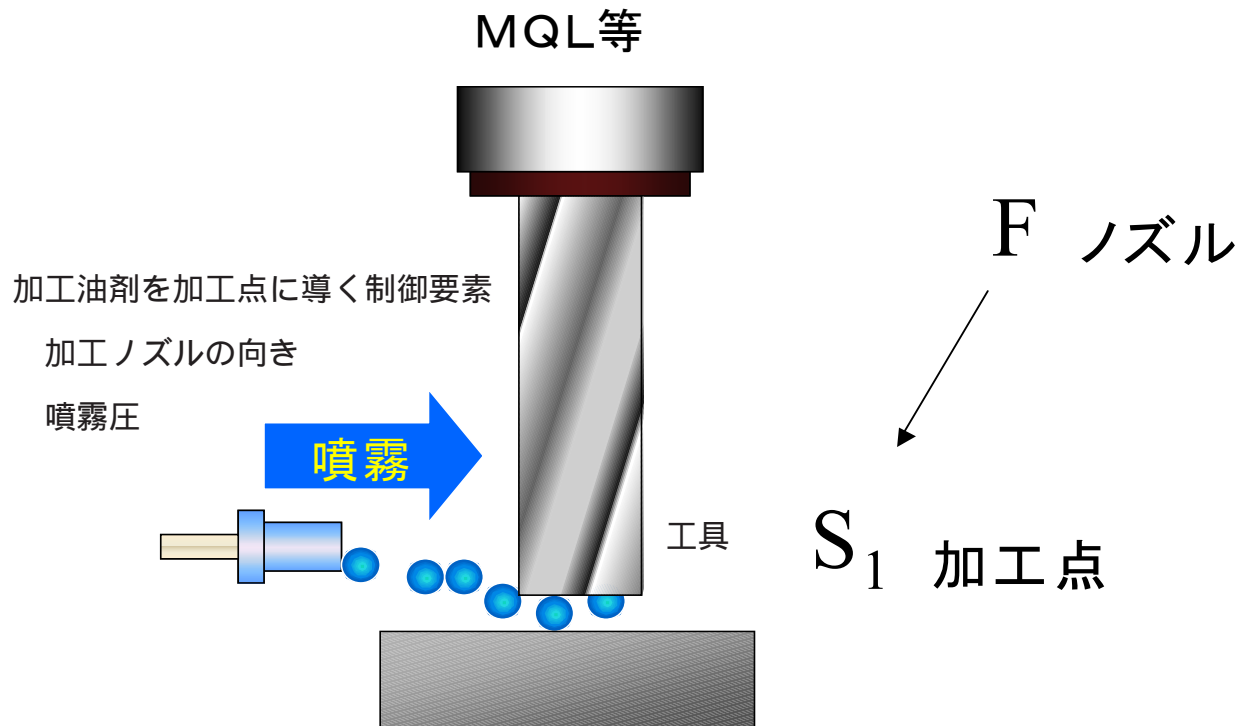
4.2 TRIZによる場と物質の分析

TRIZによる場と物質の分析を、従来の加工油剤を用いる手法に対して行くと図4-1の上部になる。図中にも示されるように、油剤の加工点への運搬は、

- ・供給ノズルの設置方向
- ・噴射圧

のみに頼っている構造となっている。したがって、第三の機構、すなわち場の導入によって外部から新たなエネルギーを供給し、物質(ここでは油剤)と力(ここでは噴射圧)の二体問題を解決して、効率良く潤滑物質を加工点に導くことができれば良い。

このようなことを確実にかつ手軽にできるような場としては、磁場、電場の利用が考えられる。このうち磁場を考えると、磁力で吸引できる潤滑物質は見あたらない。一方、電場で吸引できる物質には従来の油剤や固体潤滑物質が挙げられる。このうち油剤については、どの程度の電場を利用して吸引するかによるが、比較的吸引には数百V程度の高い電圧が必要である。このときミスト化された油剤の場合、放電が生じた場合に引火の恐れがあり、利用は難しい。



効果的に切削剤が加工点に届く可能性は低い．そこで電場を利用する．

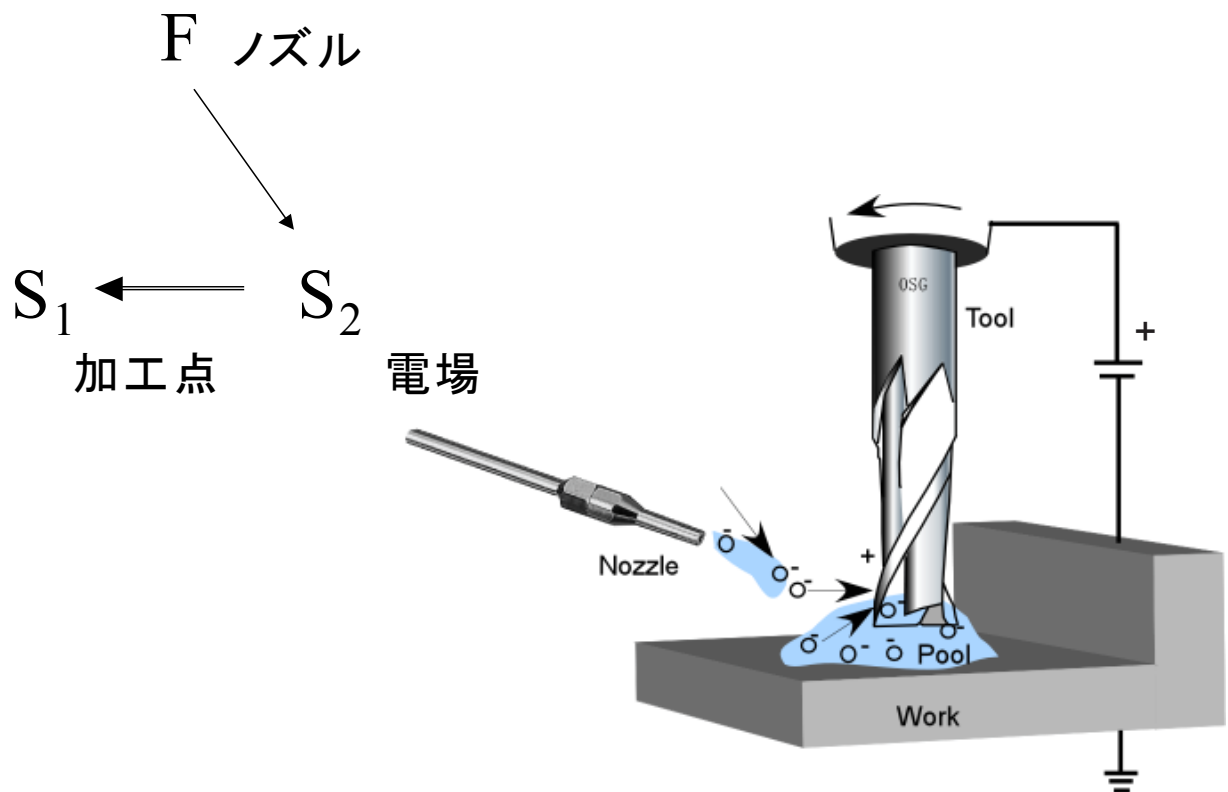


Fig.4-1 TRIZ analysis to lead lubrication particles efficiently

したがって、固体潤滑が望ましいことになる。ところが固体潤滑の研究においては、上原らによるゲーレナイト⁴⁻¹⁾の開発以降の新しい提案はない。その理由は固体潤滑は刷毛塗りなどに供給が限定されており、流動性がないためだ。

しかし、固体潤滑物質は良好な静電特性を有するものが多く、それら静電特性の良いものを利用すれば静電場を利用した吸引も可能である。具体的には図の下部のように、固体潤滑物質をコロイド状にするなどして若干の流動性を持たせて噴霧し、静電場を利用すれば電気泳動により加工点に効率よく潤滑物質を導くことが可能と考えられる。

それではどのような物質が固体潤滑物質として相応しいのであろうか。次節以降は従前の固体潤滑に関する研究を概観し、静電場を利用した吸引が可能な固体潤滑物質の探索を行う。

4.3 固体潤滑物質の検討

4.3.1 切削加工における固体潤滑の利用

固体潤滑を切削剤の機能として加工に利用した例は少ない．開発の傾向としてはめっきや溶射を利用してインプロセスで工具表面あるいは切りくず表面に主に軟質金属の固体潤滑膜を生じさせて，切りくずの工具すくい面での流動を促すといったものが見られる．主な研究例としては次の三つが挙げられる．

Cookらは1966年に図4-2に示すように軟質金属をめっきしながら切削を行う連続電気めっき法を考案した⁴⁻²⁾．軟質金属としてはPb, Sn, Cd, Zn, Cu, Fe, Cu-Pb, Zn-Snなどが試みられたという．この方法では切削開始時には工具の表面に数 μm の金属皮膜が形成されるといい，図4-3に示すように明らかに切りくず排出性の改善がなされている．この研究では被削材にTi合金が用いられているが，PbおよびZnを皮膜として利用することで平均して2～8倍の工具寿命が得られている．

上原らは1969年に金属溶射によって非切削期間にフライスの刃先に固体潤滑皮膜を形成する方法を検討した⁴⁻³⁾．ここではS45Cを超硬正面フライスで切削し，Cu, Al, Zn, Pb, Sn, 黄銅，およびホワイトメタルの溶射ですくい面における摩擦が減少するのを確認している．

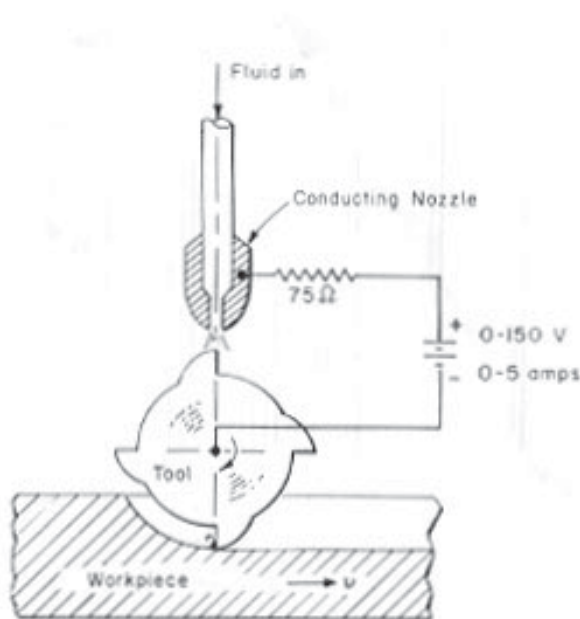
Fig. 4-2 Plating cutting⁽⁴⁻¹⁾

Fig. 4-3 Chips milled by Ti alloy

a: plating cutting, b: using water as coolant

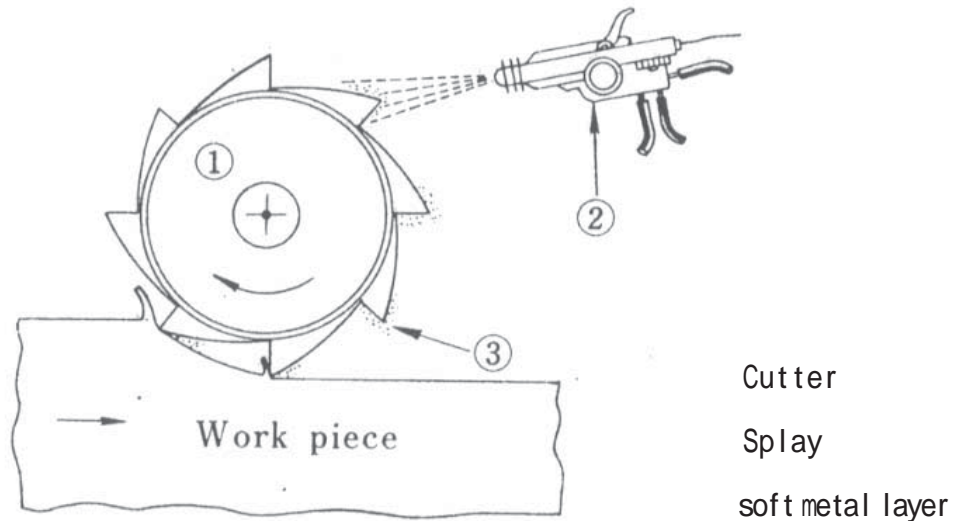


Fig. 4-4 Metal splaying cutting ⁴⁻²⁾

そして1973年には ,Amariaらによって硫酸銅溶液を切削液として供給しながら工具に無電解めっきを施し固体潤滑膜として作用させる方法が提案されている .この方法では Inconel -X750合金のフライス加工においては高速度工具鋼のカッター上に銅を析出させて切削抵抗や工具寿命の改善を確認している ⁴⁻⁴⁾ .

しかし何れの研究例にしても ,固体潤滑の利用としてはインプロセスでの工具コーティングという開発の傾向が伺え ,また実際の使用を考えると機械の腐食や汚損を考慮して工作機械自身の大幅な設計変更を必要とすると考えられるために ,検討の余地は多い .

そのような中で ,上原⁴⁻¹⁾らはグリースに固体潤滑効果のありそうな物質を混練させて高速切削を主眼とした切削剤を検討をしている .その理由は ,切削油剤などの流体による潤滑では高温高压化ではその作用に自ずと限界があると思われたからだとしており , MoS_2 , グラファイト , MnS , Pb , Cu , Al , PbS , PbO_2 , PbO , ガラスなどが試されている .この一連の試行過程において興味深いのは ,ゲーレナイトが工具切りくず間の拡散防止剤として作用し ,優れた摩耗抑制効果を示すことを明らかにしていることである .

ゲーレナイトは ,Ca 脱酸銅切削時にすくい面に付着し ,その組成は $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ で示される .ゲーレナイトは , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 の酸化物を核とするが ,図4-5に示すように温度により Anorthosite , Wollastonite , Gehlenite , Mullite , C_{12}A_7 の相変化を生じる .そこで ,図4-6のように電熱器でこれらの物質を溶解し ,図4-7のようにアセチレンガスを利用して余分な炭化物を燃焼させて純度を上げ ,図4-8のように各々の物

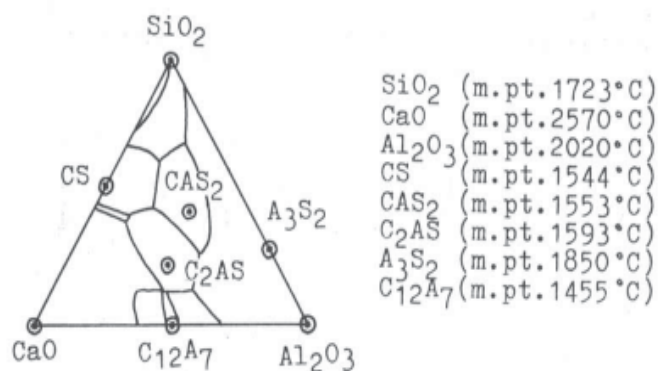


Fig. 4-5 Phase diagram of SiO₂, CaO, Al₂O₃ system⁴⁻³⁾



Fig. 4-6 Melting process⁴⁻³⁾

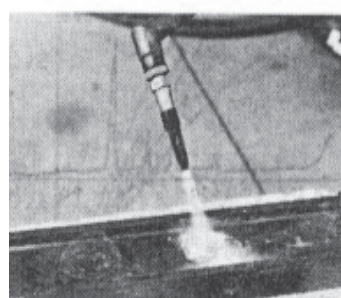


Fig. 4-7 Decarbonizing process⁴⁻³⁾

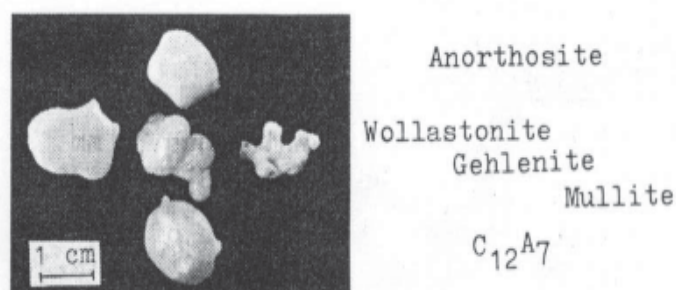


Fig. 4-8 Crushed and sifted (88 μm)⁴⁻³⁾

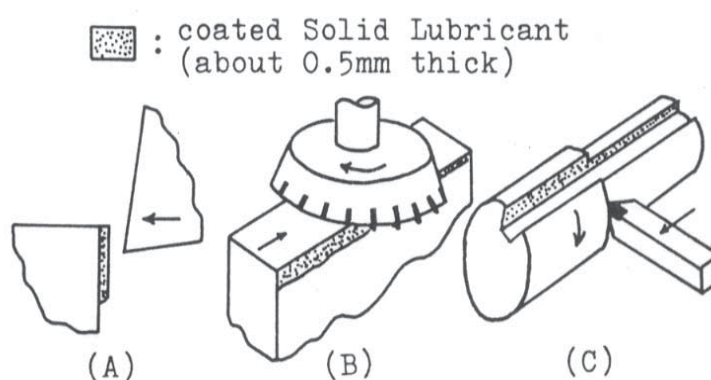


Fig. 4-9 Principle of solid lubricant⁴⁻³⁾

質を作成するのに成功した．これらを 88 μm の粒径まで粉砕し，グリースに混練して図 4-9 のように被削材への塗布を潤滑剤の主な供給手段として，旋削による連続切削やフライス加工による断続切削に供することを提案している．

図 4-10 は S45C を切削速度 300m/min で切削し，ドライ， SiO_2 ，ゲーレナイトを潤滑剤として供給したときのクレーター摩耗への影響を比較したものである．高負荷の切削条件でゲーレナイトの効果が認められているのは明らかだが， SiO_2 の供給だけでも工具摩耗を抑制できる効果があるのが興味深いところである．

図 4-11 は切削速度 150m/min で S50C をエンドミルにより断続切削したときのゲーレナイトの効果を調べたものである．逃げ面摩耗への効果はドライと同じで摩耗抑制を期待することはできないが，クレーター摩耗への効果は確実に期待できることが明らかになっている．したがって，図 4-10 の結果と併せて考えるとクレーター摩耗が生じやすく，通常の切削油剤の効果があまり見込めない高負荷の切削条件下においては，個体潤滑は有効な潤滑手段であると上原らは結論づけている．

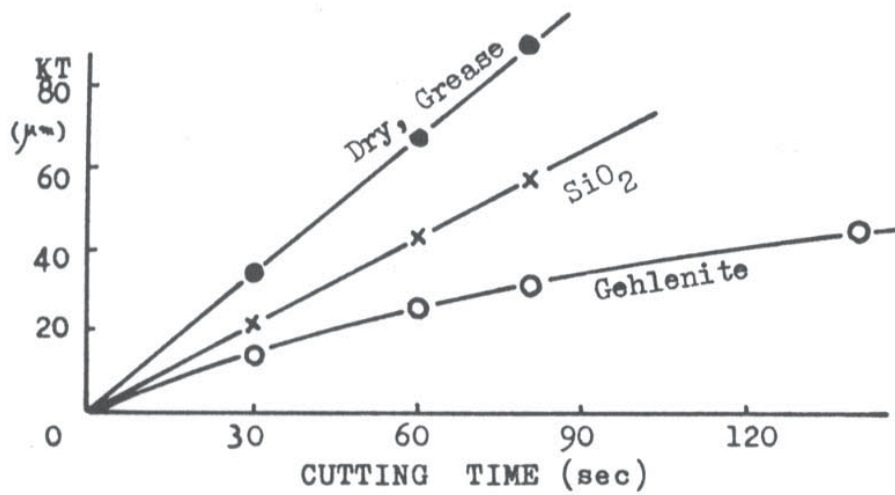


Fig. 4-10 Comparisons of Crater wear (K_T) at 300 m/min ⁴⁻³⁾

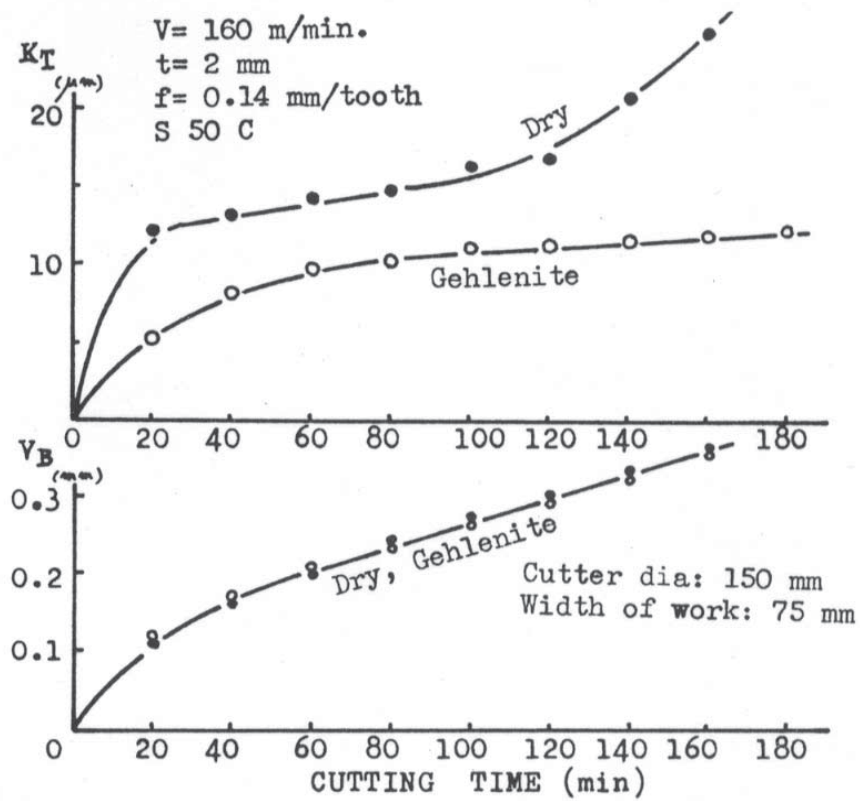
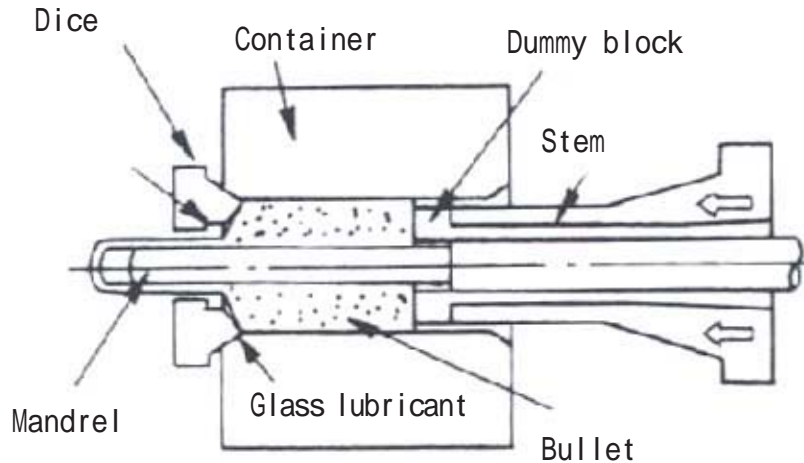


Fig.16 K_T and V_B in milling 0.5% C-steel

Fig. 4-11 Flank and Crater wear applying Gehelenite in milling 0.5%C steel ⁴⁻³⁾

Fig.4-12 Sketch of glass extrusion process⁴⁻⁵⁾

4.3.2 異分野における固体潤滑の利用例（ガラス潤滑）

ゲーレンイトの研究から CaO , Al_2O_3 , SiO_2 などの酸化物粒子でも潤滑作用が得られることが明らかになっていることから、著者らはこのような固体潤滑物質が異なる産業分野においても何らかの形で利用されているのではないかと考えた。そこで、切削加工は塑性変形を利用した加工法であることから、塑性加工における潤滑剤に注目しゲーレンイト中の成分と同じ固体潤滑作用を生じさせる物質が利用されていないかを調べた。すると、熱間押し出し加工において、ガラスが比較的一般的な潤滑剤として用いられていることが判明した。

ここで熱間押し出しにおけるガラス潤滑の模式図を図4-12に示しながら、その潤滑様式を解説すると、熱間押し出しにおいては、ピレットとダイスの間に粉体やそれをパッド状に成形した物、あるいは水ガラスのような液体でガラスが供給される。

ガラス潤滑剤の種類としては、組成によりEガラス系と呼ばれる $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-B}_2\text{O}_3\text{-MgO-K}_2\text{O}$ 系ガラス潤滑剤と、窓ガラス系と呼ばれる $\text{Na}_2\text{O-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系ガラス潤滑剤に大別される。これらの潤滑剤は、溶融時には $100 \sim 1000\text{Pa}\cdot\text{s}$ の粘度になりながら工具と工作物との直接接触を防ぎながら断熱し、熱化学反応による工具の摩耗を抑制する。そして溶融ガラスによる流体潤滑作用と粉体の固体潤滑作用によりメタルフローの促進をもたらすと考えられている⁴⁻⁵⁾。

文献⁴⁻⁶⁾においてその一例を示すと、SUS304を相対速度 1m/s 以下、押し出し圧力が $100 \sim 130\text{MPa}$ と比較的切削加工で工具に加わる速度と圧力に類似した条件で押し出すときに、

ガラス潤滑剤膜圧を $40\ \mu\text{m}$ 程度とすると押し出し抵抗の低下と良好な製品が得られている。

因みにそれぞれのガラスに添加されている主成分以外の物質の添加率とその役割を記すと、

Al_2O_3 化学的耐久性の付与	1 ~ 2%
MgO 化学的耐久性と CaO の効果促進	2 ~ 5%
B_2O_3 ガラスの非晶質化促進	7 ~ 8%
Na_2O 粘度調整	11 ~ 17%

となっている^{4-7) ~ 4-10)}。ここで興味深いのは、ガラスの主成分である SiO_2 はもちろん、 CaO 、 Al_2O_3 といったゲーレンナイトを構成するものと同じ成分が含まれていることである。このことから考えてもゲーレンナイトの作用と類似したものと言え、これら珪素酸化物の固体潤滑効果を切削加工においても期待することは十分可能と考えられる。

また、上述のガラス潤滑剤に関しては、潤滑剤としての実績があるために種類や流通状態も良好で、価格も切削油剤と比較してそれほど変わりなく、無機系の酸化物を主体とするために廃棄という観点からも多くの利点が見込める。

したがってこれらの検討結果から本章においては、ゲーレンナイトとガラス潤滑剤に共通して含まれる珪素酸化物の潤滑機能に着目し、その固体潤滑機能を明らかにしながら切削加工への適用を検討することにする。

4.3.3 適用が見込める切削加工形態の検討

では、どのような切削加工形態にガラス潤滑を適用すれば良いのであろうか。著者らは押し出し加工の加工条件を参照しながら、その加工形態に比較的類似した形態を考慮した。その結果、最初に比較的小径のドリル加工に適用することが望ましいのではないかと考えられた。理由を列挙すると次になる。

- ・小径工具の場合、周速が比較的低いので構成刃先の凝着などが生じ易く凝着抑制できる潤滑が必要。

- ・小径のドリルにおいては切れ刃に対してチゼル部の比率が相対的に大きく、押し出しに近い加工形態と予想される。

- ・小径穴加工、特に微細穴の加工においては、バリが生じやすいために鋭利な切れ刃が望まれる。しかし、鋭利な切れ刃は摩耗し易く、コーティング工具が望ましく思えるが、現状のコーティング技術では切れ刃が覆われて鋭利さを損なうという問題がある。

これらの考えを基にして、最初に平均粒径 $5\mu\text{m}$ のガラス潤滑剤を粒子にし、加工点に供給しながらドリル加工を試みた。しかし、ガラス粉末は、工具の回転に伴ってそのほとんどが吹き飛ばされてしまい、その潤滑効果を得ることはできなかった。

4.3.4 静電特性を利用した工具への吸引

そこで先に述べたようにシリカ，すなわち SiO_2 微粒子の静電特性に着目して，場による加工点への導引を図る．ガラスなどの珪素酸化物はエポナイトと同等かそれ以上に帯電列の上位に並び，正極に帯電しやすい性質を有する．したがって，微粒子として水系の液体中に分散すると，粒子のまわりに電気二重層を形成し正極へ電気泳動する⁴⁻¹¹⁾．よって，図4-1のように帯電したシリカをコロイド状にして加工点付近に噴霧し，工具と工作物を電極として電圧を加えれば，能動的に工具にシリカを吸引付着させることが可能になるのではないかと考えた⁴⁻¹²⁾．そして，この工具に付着したシリカ粒子自身が塑性加工におけるガラス潤滑と同様に潤滑効果を発揮すれば，能動的に切削剤を工具に吸引する新しい潤滑剤供給手段になると考えられた．

最初に，電気泳動による液中でのシリカ微粒子の吸引挙動を把握することとした．シリカ微粒子の挙動を把握するには，電気泳動を安定した状態で生じさせることが何より重要と考えた．これには，シリカの微粒子ができる限り均質に分散されたコロイド溶液が望まれた．そこで，本実験では基礎実験として平均粒子径数十 nm のコロイダルシリカ溶液（日産化学工業（株），スノーテックス 20）を利用した．

そして、図4-14のように 1.0mmのドリルをコロイド溶液の液面から10mm浸し、溶液と工具との接触抵抗を安定させた状態で、工具側を正極、被削材を負極として電気回路を形成させながら電気泳動による工具へのシリカ粒子の吸着を試みた。実験では、5V、10V、30Vと異なる電圧条件下で粒子の泳動を観察したが、いずれの条件においても電極であるドリルに図4-15のように電気泳動によりシリカ粒子が膜状に付着していた。

シリカは絶縁体である。したがって、電気泳動現象により電極である工具にシリカ微

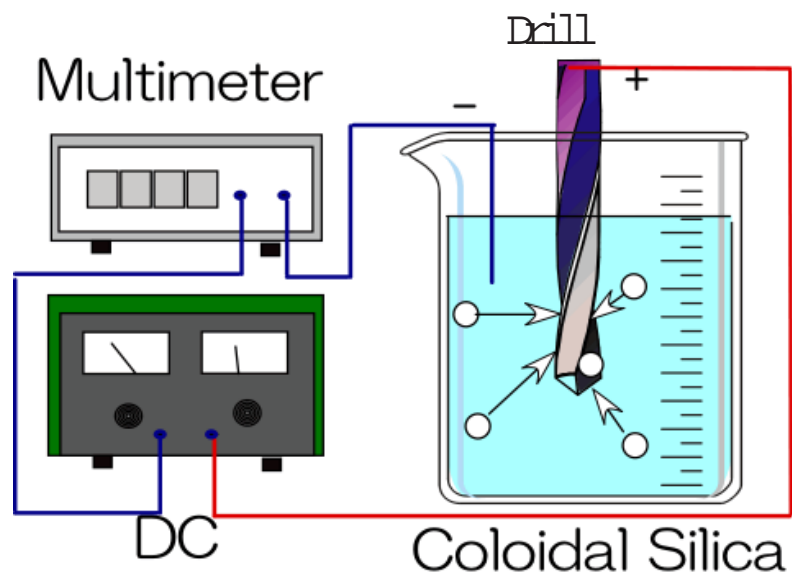
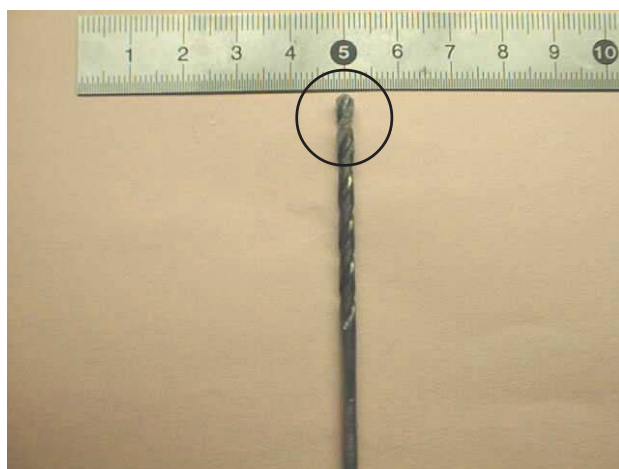
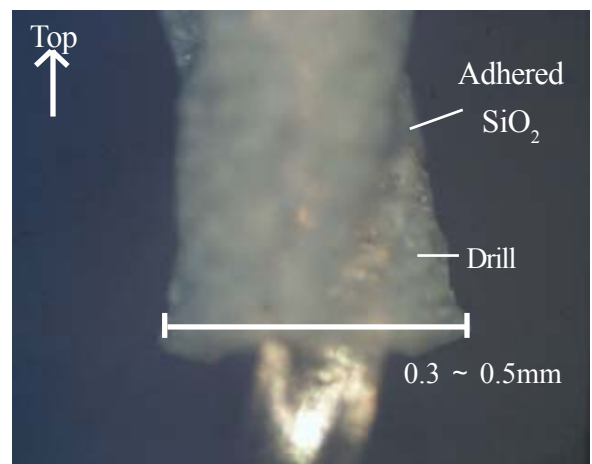


Fig. 4-14 Set-up of basic silica adhesion test on drill



(a) tested drill



(b) magnified photo

Fig.4-15 Photos of drill adhered with SiO_2 particles

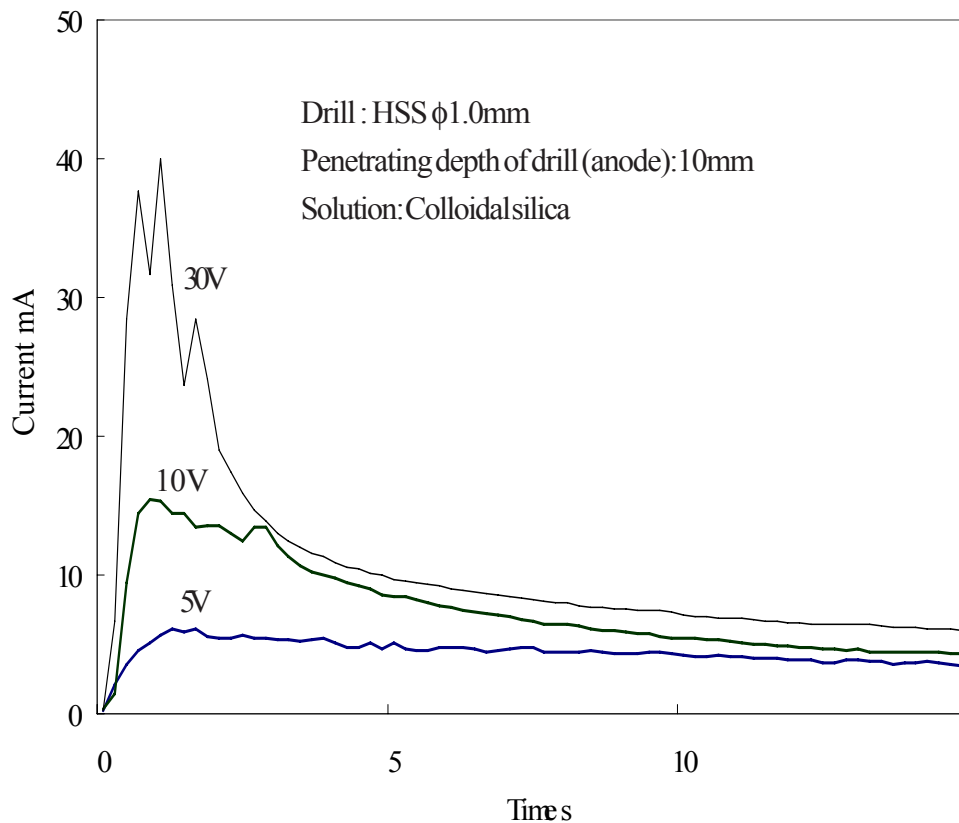


Fig.4-16 Current duration of tested circuit in different voltage

粒子が付着すると、電極に付着した量だけ回路抵抗が大きくなり、回路を流れる電流に付着挙動に応じた変化が生ずると予想される。そこで、シリカ微粒子を吸引するための適切な通電時間を検討するため、回路電流の経時変化を調べた。

各電圧条件下における電流値の変動を図4-16に示す。いずれの場合においても、実験開始から10s程度で回路を流れる電流値が数mAに一気に収束している。このときの電流が収束するまでの時定数を求めたところ、どの条件でもほぼ1sの時定数であると判明した。したがって、シリカの粒子を工具に付着させるには10Vの電圧を1s間印加すれば十分であり、このときドリルには半径で0.3～0.5mm程度のシリカ粒子の付着層が得られるとわかった。なお、シリカ微粒子の付着力については定量的に計測してはいないが、主軸4000rpmでドリル空転させても飛散することはない程度の付着力であった。

以上の結果よりシリカ微粒子を分散させた溶液と電気泳動現象を利用すれば適切に加工点へ切削剤となるシリカを導くことができることが示された。

4.3.5 実機上での吸引実験

前節の結果から，オフラインプロセスでは静電的に工具にシリカなどの固体潤滑材となりうる微粒子を吸引できる可能性が示されたが，それが実機においても果たして可能であるのか，またそのような吸引のためにはどのようなシステムが必要であるのか実証する必要がある．そこで，本節では実機でのシステムを検討する．

検証をする装置としては図4-17のマシニングセンタを利用した．これに 1.0mm のドリルを取り付け，図4-18のようにドリルの側方に設置したノズルからシリカのコロイド溶液を液滴が工具先端に集中するような状態で噴霧する．なおノズルから噴霧される液滴の粒度分布は，図4-19のようになっている．本体には工具側が陽極，工作物側が負極となるように配線が施され電源が供給される．工具と工作物の間には前節の実験結果を鑑みて10Vの電位差が与えられる．そして，工作物表面にあるコロイダルシリカの水分と接触することで回路が閉じて電流が流れ，電氣的にシリカ微粒子を吸引できると考えられる．電流を流す時間については，やはり前節の基礎実験を参照しながら回路が閉じると同時に1秒間電流を流すことにする．この通電時間の制御は図4-20左上に示すシーケンスコントローラ((株)キーエンス，KZ-16R，平均1.92 μ s/Step)により制御される．

機上でのシリカ微粒子吸着実験の方法を図4-20で再度詳しく述べると次のようになる．

側方からコロイダルシリカを噴霧供給する一方，工具と被削材間に10Vの電位差を与えながら工具を工作物に送る．

工具が，工作物表面に形成されたコロイダルシリカの液だまりに接触すると工具と工作物間に電流が流れ，シーケンスコントローラのタイマーがスタートする．このとき，工具は工作物に接する前に送りを停止することとする．なぜならば，この実験では工具にシリカが本システムで確実に吸着するのを確認するのが目的であり，工作物に接触し工作が始まれば，必然的に吸着したシリカが工具上から脱落する可能性があるからである．

1sのタイマーカウントの後，シーケンスコントローラのリレースイッチSWが開放され，回路を流れる電流が遮断される．そして，工具が送り開始位置まで上昇させられてシリカの吸着があるかどうか確認される．



Fig. 4-17 machining center

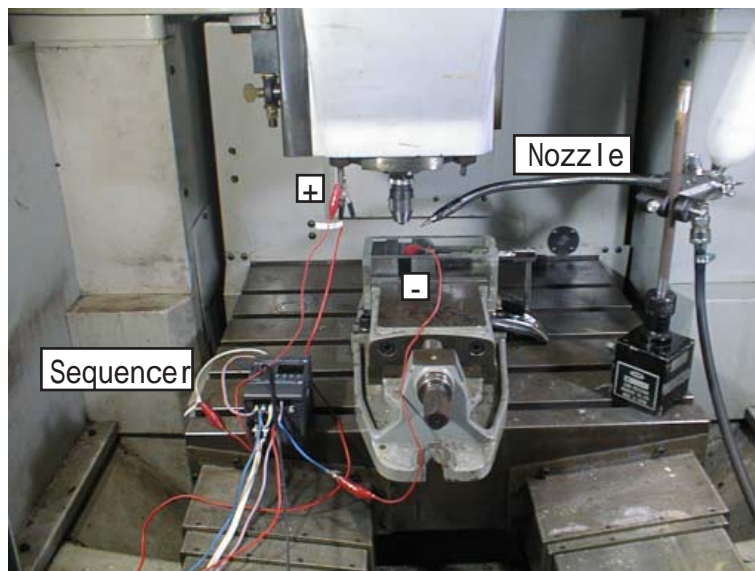


Fig. 4-18 Set-up for adhesion experiment

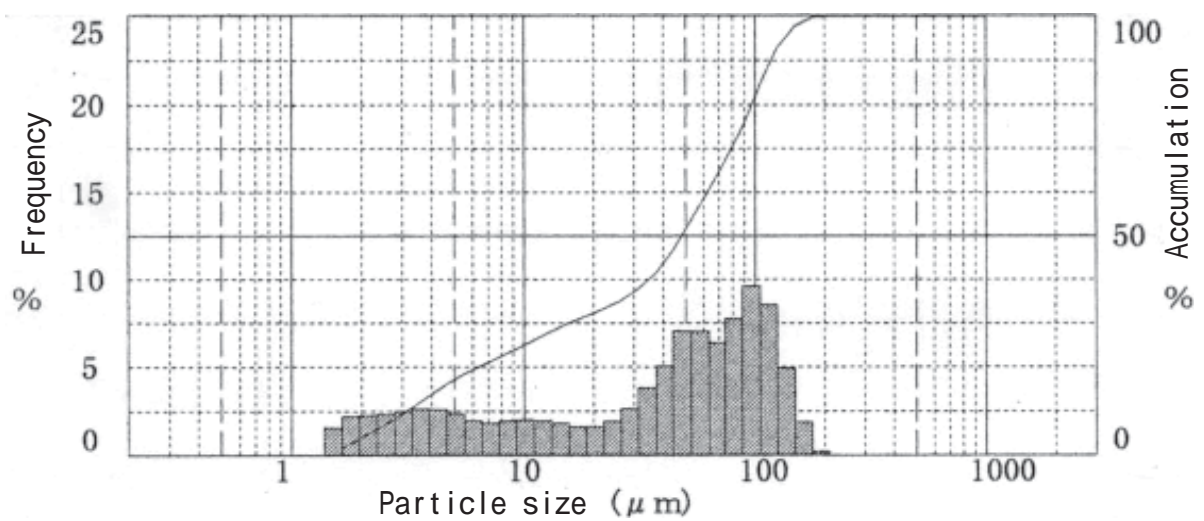


Fig. 4-19 Size distribution of sprayed mist particles

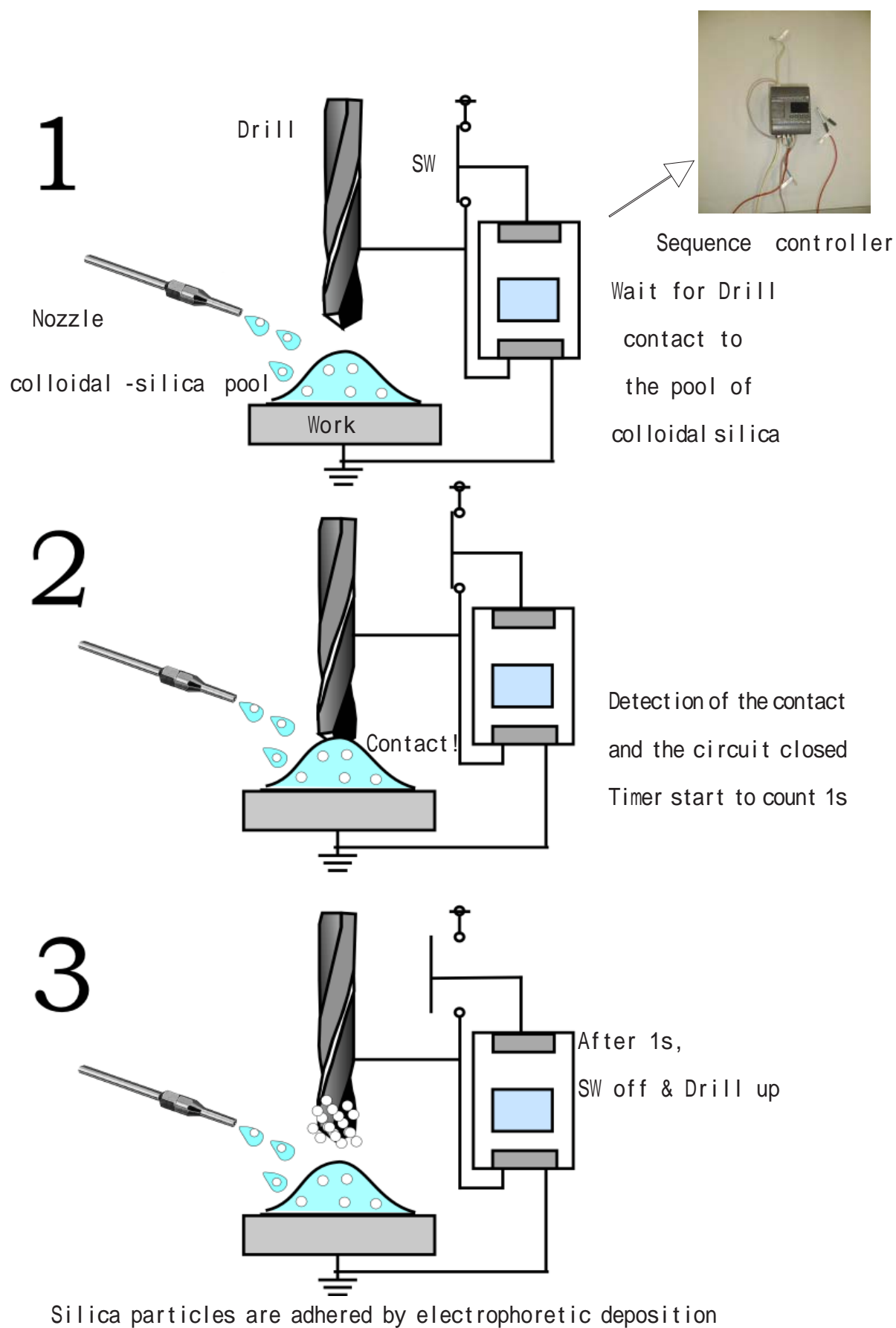


Fig. 4-20 Test procedure of developed system

このような手順で、実機上でのシリカ吸引実験を行ったところ、工具には前節での実験結果と同量のシリカ微粒子の吸着が認められ、今回のシステムで十分静電的に吸引することが可能と実証された。

Table 4-1 Cutting condition

Machining center	Urawa Co. Ltd. UA-53
Work	SUS304 t2.0mm
Drill	HSS ϕ 1.0mm
Spindle Speed	1000 rpm
Feed	0.01 rev/min

4.4 切削実験と潤滑効果の確認

次に、付着させたシリカ微粒子に潤滑効果があるかどうかを確認する。実験に際してはあらかじめ工具に電気泳動でシリカ微粒子を付着させて、コロイド溶液の水分が加工に影響を与えないように十分乾燥をさせから表 4-1 の加工条件で切削に供した。

潤滑効果の判断は、切削抵抗のスラスト分力の大小により判断した。これは、潤滑により工具と被削材との接触面における加工状態に変化が生じれば、結果的にすくい面上の切りくず流動にもその影響が現れ、三次元的な切れ刃形状をなしているドリルでは、トルクとスラスト抵抗が同期して変動すると考えられたからである⁴⁻¹³⁾。

このようにして実験を行ったところ、シリカを付着させた工具と付着させなかった工具では図 4-21 のようにスラスト抵抗に明瞭な差異が認められた。図より全体的な傾向としては約 10 ~ 20% 程度、シリカ微粒子の効果による加工抵抗の低下が認められた。この結果から、付着させたシリカ微粒子は加工抵抗を低下させる効果があり、ガラス潤滑のような珪素酸化物を利用した潤滑が切削加工においても有効であることが明らかとなった。なお、このようにシリカ微粒子を付着させた潤滑を以降シリカ潤滑と呼ぶ。

そこで、油剤による潤滑方法と比較してどの程度の安定した効果が見込めるのか工具寿命から判断することにした。なぜならば、切削抵抗、切削温度、切りくず状態など時々刻々と変化する加工状態は、累積された結果として工具の寿命に顕われるからである。図 4-22 にその結果を示す。実験では、比較のため MQL と、通常の乾式切削における工具寿命を併記している。なお、工具寿命の判定基準は、本実験においては工具折損までの加工穴数としており、シリカ潤滑と MQL における切削剤の供給については、加工開始時に 1 回だけ供給した。なお MQL では 10mL/h を供給の基準にして、植物性油ベースの切削剤を噴霧している。結果としては、シリカ潤滑を行うことで乾式加工の 5 倍程度、MQL と同程

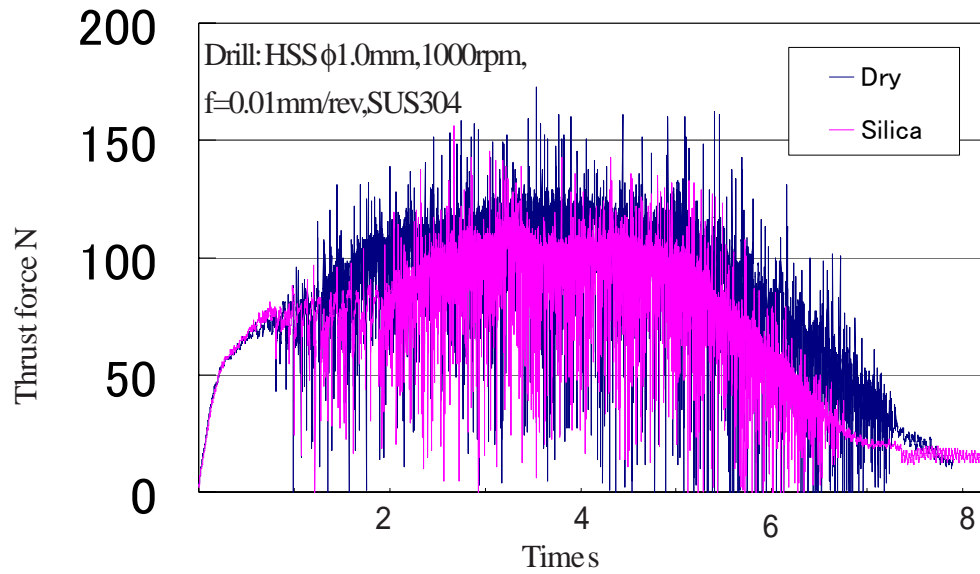


Fig. 4-21 Comparison of thrust cutting force on each method

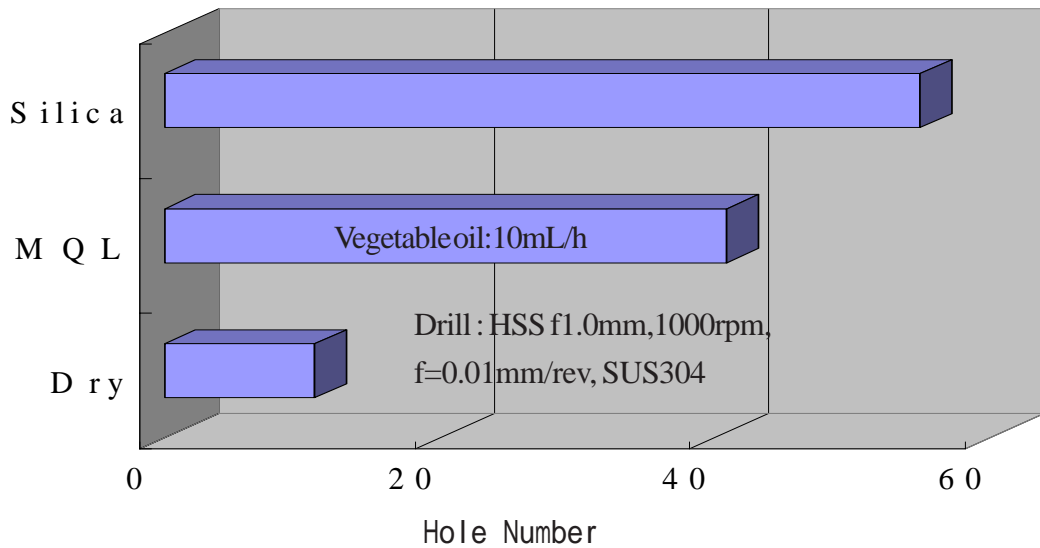


Fig.4-22 Differences of drill life in each method

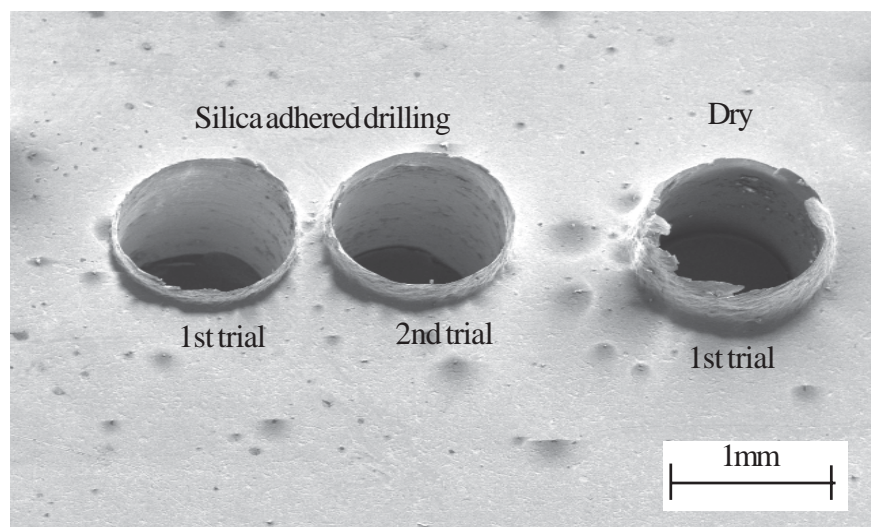


Fig.4-23 Photo of drilled holes in each cutting

度の工具寿命が得られており、シリカ潤滑の効果は油剤を使う MQL 法と何ら遜色のない安定性であると言える。

シリカ潤滑により切削抵抗の変動や工具寿命の改善効果が認められたが、このような加工状態への好影響は加工穴の品位にも当然好影響をおよぼすと考えられる。そこで加工穴の品位を判断する指標の一つであるバリを観察した。図 4-23 は、シリカ潤滑、ならびに乾式加工におけるドリル貫通部の SEM 像である。シリカ潤滑による加工穴は 1 回ごとに潤滑剤を付着させて連続 2 回穴あけを行っているため図では 2 つの穴が示されているが、2 回の穴あけを行っているにもかかわらず、乾式にて 1 回加工した穴よりも形成されたバリがいずれも小さい。また、乾式加工におけるバリは高さが高いだけでなく、バリが切れ刃にまわりつくように形成されているのがわかる。これは明らかに周速度が高い先端切れ刃コーナ部の摩耗が進んで生じたためと考えられる。一方、シリカ潤滑によるバリにはこのような兆候はなく、ほぼドリルの貫通方向に平行にバリが突出しているのが判断でき、これらの結果から切れ刃の摩耗が抑制されていると判断できる。

4.5 潤滑形態の確認

4.5.1 切削温度の検証による潤滑形態の同定

ガラス潤滑を参考にガラス等の珪素酸化物を主剤とする新しい切削剤供給方法の可能性を検討してきた。これまでの結果からシリカ微粒子を工具に付着させておけば確かにガラス潤滑と同様に加工抵抗の低下など何らかの潤滑作用が得られるとわかった。しかし、その潤滑メカニズムについては、塑性加工におけるガラス潤滑と同様の作用形態を踏襲しているものかどうか、今後の開発指針を得るためにも確認する必要がある。そこで本章においては種々の実験からその潤滑形態を明確にし、最適な潤滑条件を検討する。

最初に、潤滑作用形態が固体潤滑と流体潤滑のどちらが支配的であるのかを明確にする。先述のように塑性加工におけるガラス潤滑においては、高温溶融したガラスによる流体潤滑作用が支配的と考えられる。そこで、図4-24のように工作物に熱電対を予め埋め込み、ドリル接触時の切れ刃温度を直接計測し、この結果からシリカ微粒子が溶融する温度であるのか把握することとした。

結果は、図4-25に示すとおり乾式加工が380Kでシリカ潤滑は363K程度の平均切削温度で、乾式加工よりも僅かばかりではあるが切削温度が低く加工特性向上に寄与していることがわかった。しかし、シリカ粒子の溶融温度2003Kにはほど遠く、この結果からその作用形態が流体潤滑ではなく固体潤滑であると結論付けられた。

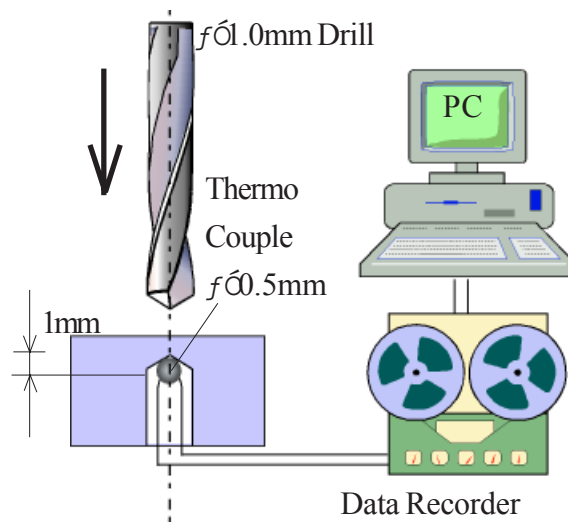


Fig. 4-24 Drilling temperature measuring method

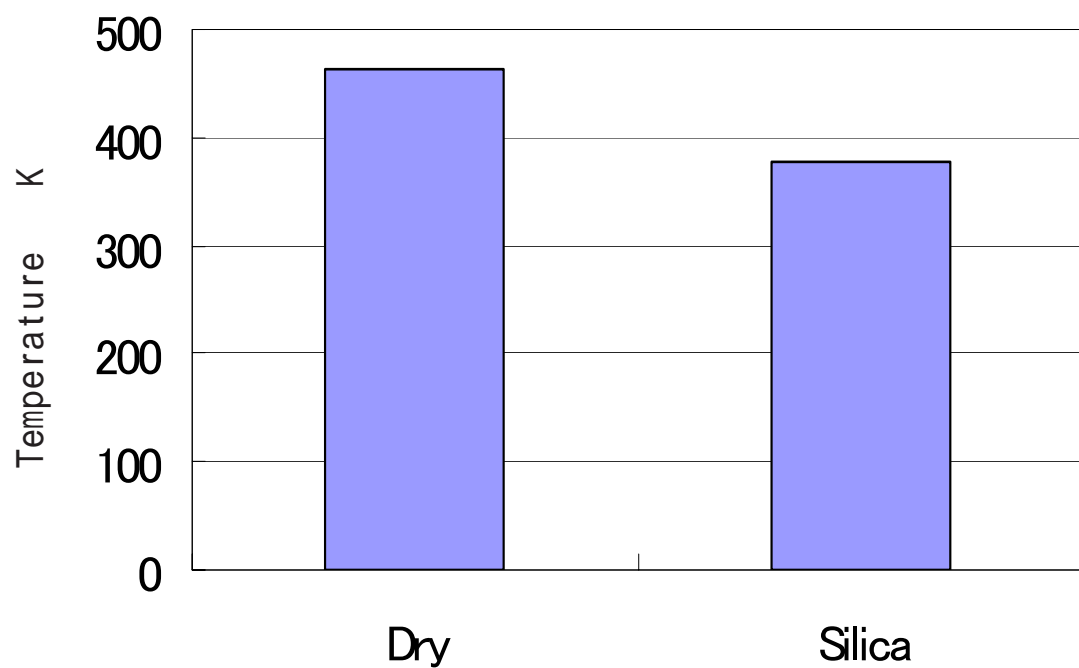


Fig. 4-25 Measured Drilling temperature

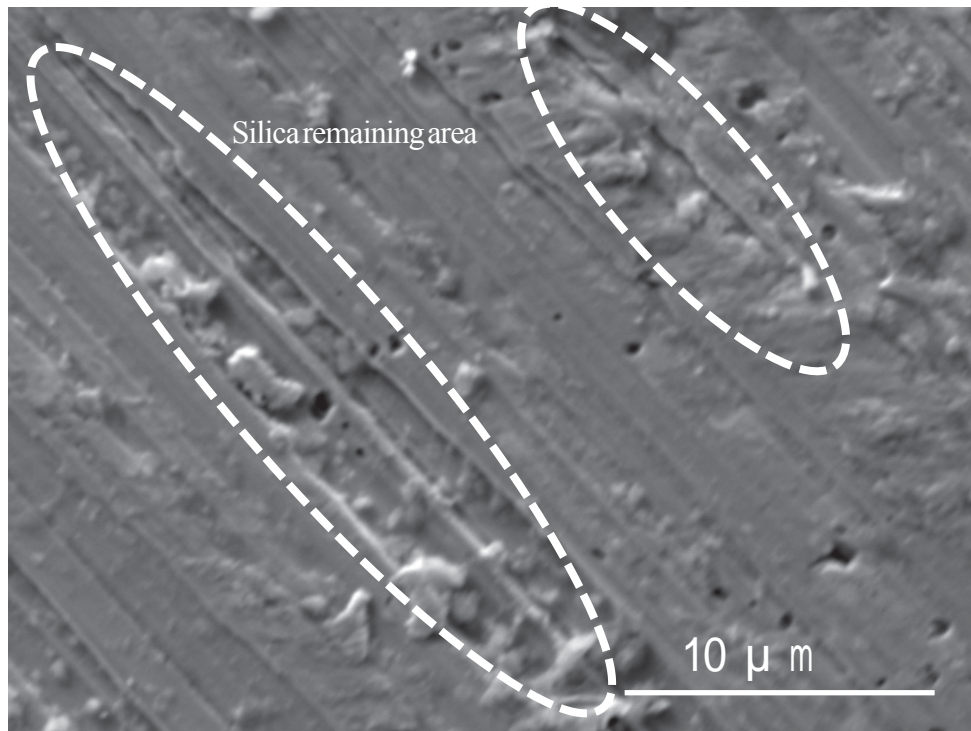


Fig. 4-26 Adhered silica particles in grooves on rakeface

4.5.2 シリカ微粒子の潤滑メカニズム

そこで、ドリル先端の切れ刃が埋没し切れ刃長さが定常になる時に加工を凍結し、加工後のドリルフルート部を観察した。すると図4-26のように工具表面の仕上げ研削痕の間にシリカの微粒子が入り込んだようになっているのが観察された。

すくい面上を切りくずが流動することを考慮すると、すくい面に顕著な凹凸がある場合、切りくずとすくい面の間に過剰な摩擦が生じて、加工抵抗を増加させると考えられる。一方、電気泳動で工具すくい面にシリカ微粒子を吸着させた場合、シリカ粒子は蒸着や鍍金等のコーティング技術で形成された薄膜などと比較して強固に工具表面に固定化されていることはあり得ない。それらを考慮すると、電気泳動を利用することで、仕上げ研削で生じた研削痕にシリカ微粒子が上手く入り込み、それらシリカ微粒子が工具表面と切りくずの直接接触を防ぎながら、微粒子自身の転動あるいは滑りのような作用により切りくずの流動と排出を促進したのではないかと推察された。仮にこの推察が妥当であれば、その滑りあるいは転がり作用は、供給されたシリカ微粒子と、工具すくい面の面性状の組み合わせで大きく違いが生じると考えられる。

そこで、上記の仮説を検証するために、シリカ以外にも粒子径、ガラス転移点 T_g 、形状の異なる珪素化合物の微粒子を複数用意し(表4-2)、それらの因子の影響を切削抵抗変

動から考察することにした．この6種類の珪素化合物微粒子の特徴を表4-2に示す．各々の粒子はそれぞれ，

A: 平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より極めて小さく，化学的に合成された真球状の微粒子．融点は極めて高い．

B: 平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より若干小さく，低融点鉛ガラスを粉碎して作られた微粒子．

C: 平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より大きなビトリファイド cBN ホイール用フリットを粉碎して作った微粒子．

D: 平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より若干小さく，ビトリファイドダイヤモンドホイール用フリットを粉碎して作った微粒子．

E: 平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より若干小さく，A と同様に化学的に合成された真球状の微粒子．融点は極めて高い．

F: 平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より 1/10 程度小さく，A と同様に化学的に合成された真球状の微粒子．融点は極めて高い．

というような特徴を有する．

これらを電気泳動で工具に吸着させて加工した場合のスラスト抵抗の違いを図4-27に示す．図から，B, C, D はほぼ同程度の抵抗になっているものの，A, E, F は前者と比較して圧倒的に抵抗が低減されている．A, E, F と前3者との明確な違いは，B, C, D がバルクのガラスからボールミルで粉碎して形成されているためにどうしても最小平均粒径が $5\mu\text{m}$ 程度になってしまうのに対し，A, E, F は化学的に合成されているために工具のフルート部の

Table 4-2 Specifications of glass particles

Type	Characteristic	Tg	mean size	Shape	Structure
A	Chemical synthesized	1027K	20nm	Spherical	Crystal
B	Pb low Tg for insulator	574K	$4.7\mu\text{m}$	Spherical+Spiky	Amorphous
C	Si-Al-B flit for vitrified wheel	874K	$7\mu\text{m}$	Spiky+Blocky	Amorphous
D	Si-Al-B flit for vitrified wheel	704K	$4.7\mu\text{m}$	Spiky+Blocky	Amorphous
E	Chemical synthesized	1027K	$2\mu\text{m}$	Spherical	Crystal
F	Chemical synthesized	1027K	450nm	Spherical	Crystal

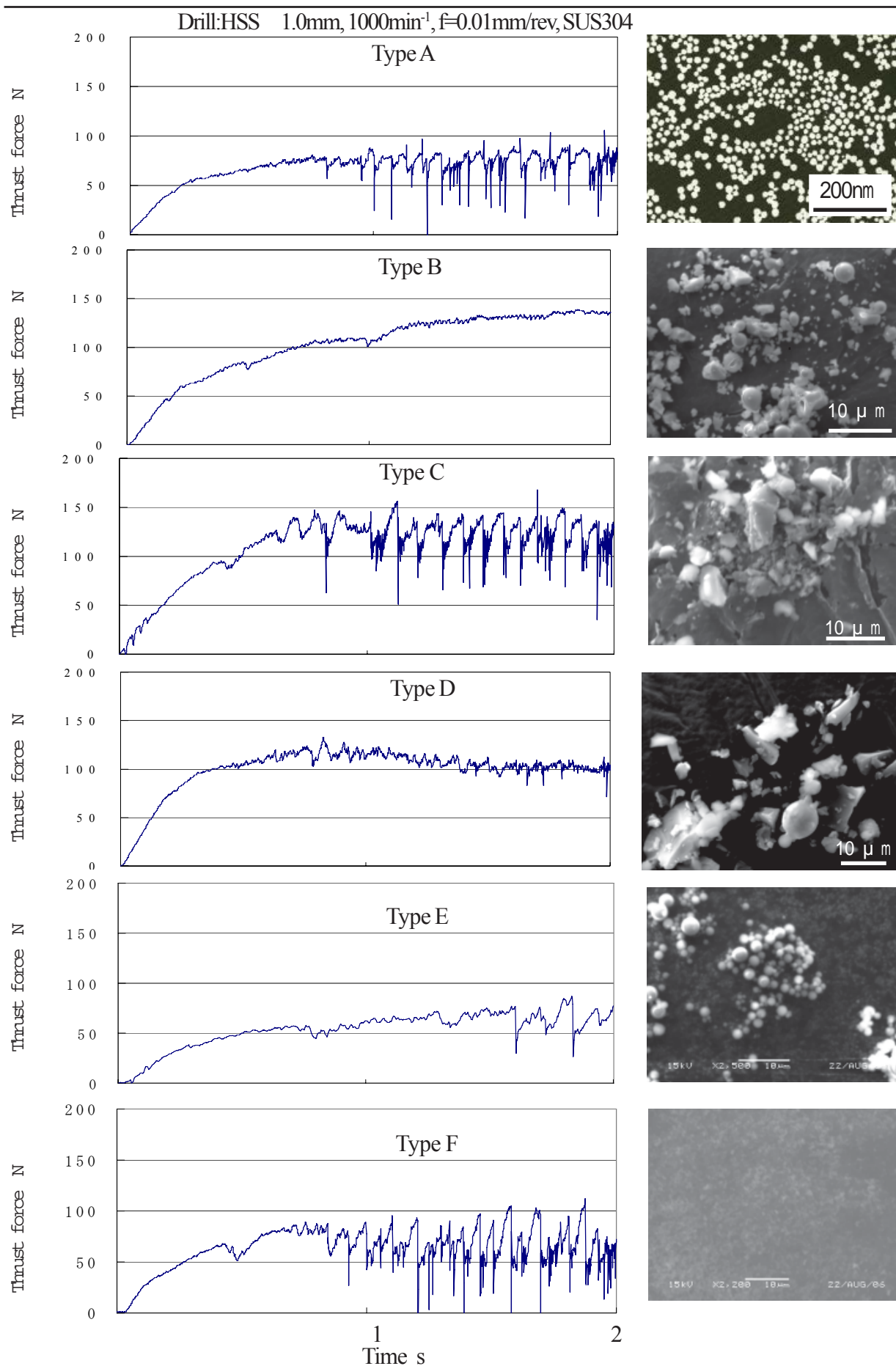


Fig. 4-27 Influences of particle specification on cutting force⁴⁻¹⁴⁾

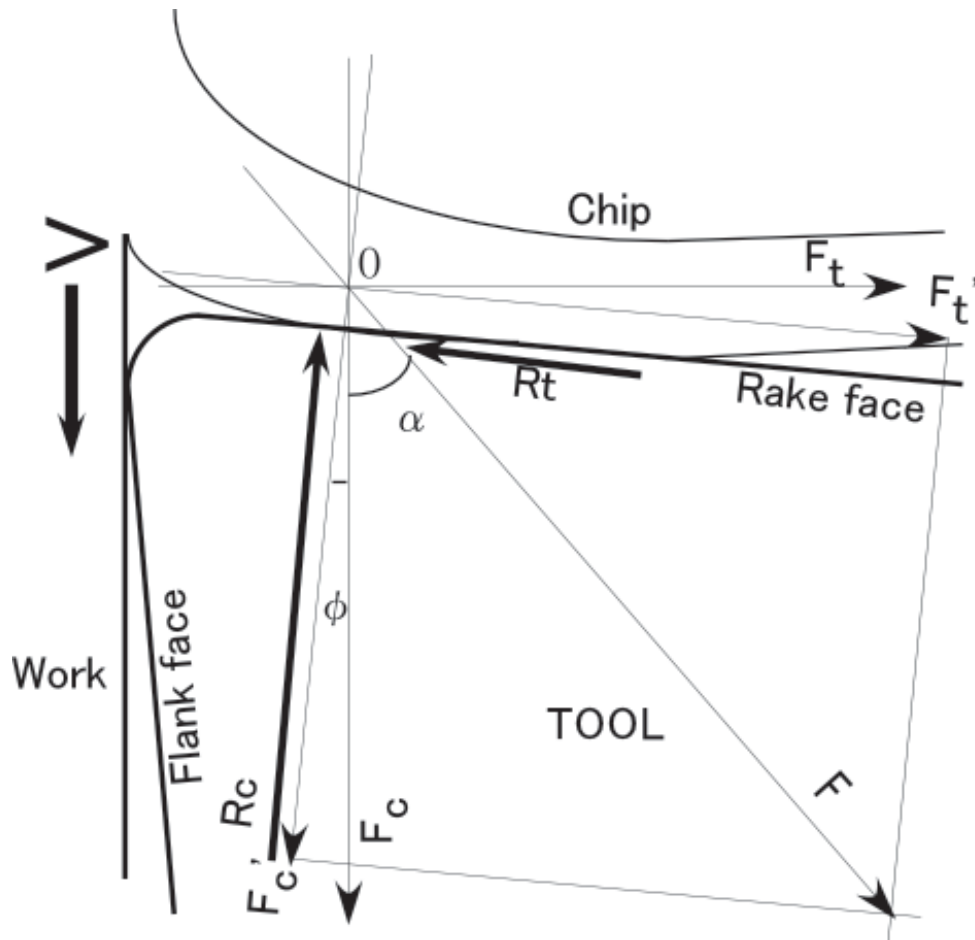


Fig. 4-28 Two dimensional dynamics of chip flow on rake face^{4-15), 4-16)}

粗さより小さくかつ球形の粒子であることが挙げられる。

したがって、その作用を発現させるためには、少なくとも工具仕上げ面粗さより小さい粒子でありことが重要と言える。このことは、工具と切りくずの間に粒子が介在することによって潤滑効果が得られるということを示し、前記の仮説を支持する結果といえる。

4.5.3 工具側からのシリカ微粒子の作用の検討

一方、仮説のようにシリカ微粒子の転がりあるいは滑り作用が切りくず流動を促進させて加工抵抗を低減したとするならば、工具すくい面の粗さが変化するとそれにもなつて微粒子の転がりあるいは滑り作用も影響を受けることになり、結果として切りくずの流動にその影響が現れてくると予想される。そこで本節では、すくい面の粗さの違う工具を製作し、シリカ微粒子のありなしで切りくずの流動がどのように変化するのか、その影響を解析する。

4.5.3. (a) 切りくず流動とその評価方法

最初に切りくず流動の評価手法について検討する。文献⁴⁻¹⁵⁾を参考にして、二次元切削における力学モデルから切りくず流動現象考えると、それはせん断面から生じるせん断抵抗、すなわち工具に負荷される切削抵抗 F が工具すくい面上で切りくずを滑走させる現象と言える⁴⁻¹⁶⁾。一方、工具すくい面と切りくずの接触部においては、 R_t に示される摩擦抵抗が切りくずとの接触により生じる。したがって、切りくずの流動は、概ね工具すくい面に対して平行の切削抵抗成分 F_t' とすくい面から切りくずが受ける摩擦力 R_t の差により決定づけられていると言える。

このように考えると切りくず流動を阻害する主な因子は切りくずと工具すくい面との摩擦ということになる。したがって、切りくず流動は動摩擦現象の一形態と考えるのが妥当であり、その評価においては動摩擦の手法を用いるべきと考えられよう。ここで動摩擦の一般的な評価法について述べると、それは一定荷重のもとであらかじめ工具を試料に押しつけて、試料を一定速度で送り、このときの抵抗力を荷重から換算した垂直応力で除して動摩擦係数を求めて摩擦状態の優劣を決める評価法となる。

ところが、この手法を切りくず流動に適用し、動摩擦係数から切りくず流動の良否を判断しようとしても、切りくずにかかっている垂直応力をどのように捉え求めるかは判断が難しい。そこで、先述したように切りくずの流動は、概ね図4-28の F_t' と R_t の差により決定づけられていると考えられることから、簡便に工具動力計を利用して切削抵抗を計測し、判断指標の一つにすることにした。具体的には工具動力計で図4-28の切削抵抗の水平成分 F_t と垂直成分 F_c が測定できるのでこの水平成分 F_t を利用する。

なお、垂直軸から切削抵抗 F がなす角を摩擦角 ϕ とし、工具すくい角を α として切削抵抗と各分力の関連を求めると、

$$F_t' = F \sin(\alpha + \phi) \quad \phi = \tan^{-1}(F_t/F_c) \quad \dots$$

の関係が成り立ち、 F_t' が F_t に比例することがわかる。このことは、もし仮に凝着などによって切りくず流動が阻害される現象が生じてしまい、摩擦抵抗が増大したとすれば、当然、加工点から次々に生み出される切りくずの排出を持続させるためにも、凝着物を排除するような切削抵抗 F_t' の作用がすくい面で生じ、 F_t も増加することを示している。しかし、一方で切りくず流動の阻害以外の要因で切削抵抗が増加する可能性も否定できない。そこで、さらに工具動力計で得られた F_c 、 F_t から摩擦角 ϕ を算出しその加重の方向を見ることにより凝着現象などの切りくず流動の阻害かどうかの判断をすることにし

た．たとえば，きりくずの凝着が生じたとすると，一時的に切りくずは工具表面に固定化されることになり，摩擦角は切りくずの流動方向に一定に傾くと予想されるからである．

そして，切りくずの流動状態の判断をさらに明確にするために高速度カメラを設置し，その撮影画像と切削抵抗，そして摩擦角を総合して工具すくい面での摩擦現象を把握，評価する．

4.5.3. (b) 実験に使用する工具について

工具すくい面の粗さを加工によって変化させる場合には，工具のすくい角や逃げ角をできるだけ一定にして粗さ以外の要因を排除することが必要となる．今回の実験では市販の工具ホルダを利用しながら，超硬インサートチップを実験に応じて交換するようにした．インサートチップは，切れ刃の面取りがなされていない仕上げ加工用の市販品を利用し，これらを放電加工で図4-29のように粗さの異なる工具にした．このとき，機械的性質のばらつきが少ないように同一ロットの工具の中から，形状精度の近似した物を選出した．

切削工具すくい面の仕上げ面粗さについては，市販されている工具の仕上げ方法や現物を調査し，試作する工具に反映させた．例えば，ノンコーティング超硬インサートチップにおいては，一般にラッピング仕上げが用いられている．その最大高さ粗さは数 μm 程度で，ほぼインサートチップ母材の粒子径と同程度であった．また，エンドミルや，ドリルなどの複雑な三次元形状をした切れ刃のすくい面は，通常フルート部と呼ばれる溝の研削加工により形成されており，このフルート研削工程では数十番から数百番程度の研削砥石で加工が行われるためにすくい面の粗さは粗く，市販の小径ドリルにおいては $4\mu\text{mRz} \sim 17\mu\text{mRz}$ 程度の粗さを付与した．

粗さの付与に関しては，他にもその方向性も大きな因子となり得よう．できれば方向性のない面のほうが純粋な粗さの影響が判断できる．そこで，粗さの付与方法については放電加工による工具表面のアブレーションを採用した．このアブレーションによる熱影響や残留応力については，加工前の市販品と比較して比較が難しいが，切削実験において工具すくい面に与えられる負荷が今回は比較的小さいことと，その継続時間が数十秒程度であること，更に数度の試行において表層部の急激なフレーキング摩耗やクラッ

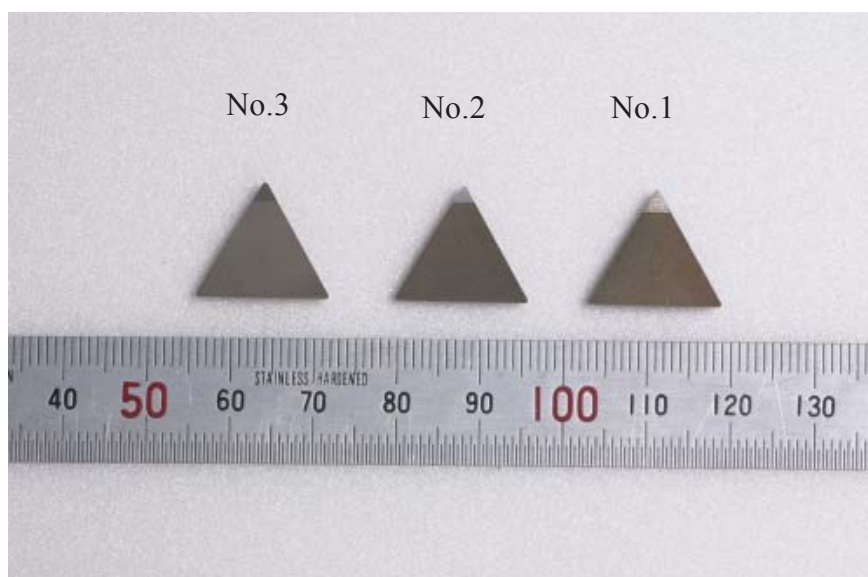
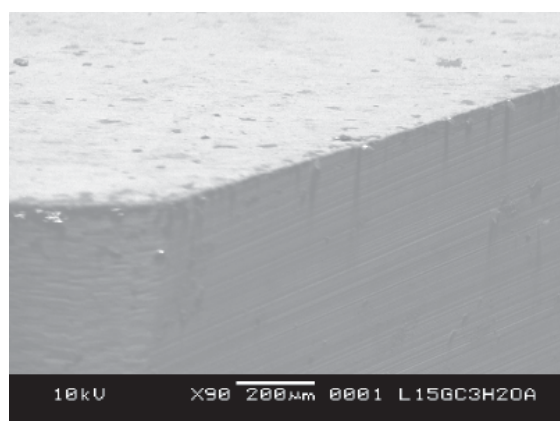


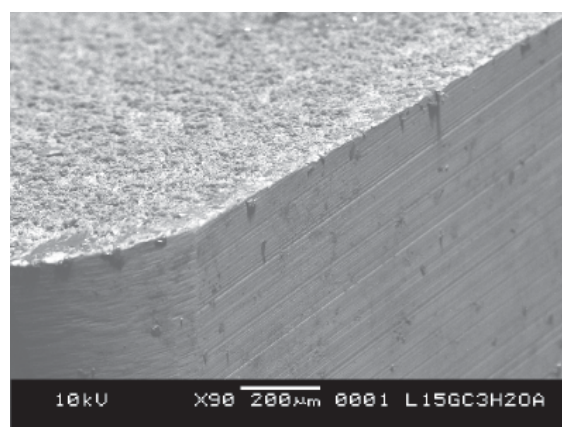
Fig. 4-29 Insert tips which have different surface roughness on their rakeface

Table 4-3 Specification of inserts

Tool holder	CTGPR2020K3		
Insert	TPGN160304		
Material	K10		
Rake angle	+5 deg.		
Surface roughness on rake face ($f\hat{m}Rz$)			
Normal	No.1	No.2	No.3
1.3	17.3	5.35	3.67



(a)Normal(1.3 $f\hat{m}Rz$)



(b)No.1(17.3 $f\hat{m}Rz$)

Fig. 4-30 SEM images of each Normal and No.1 tool edges

クが観察されなかったことから今回は無視しても問題がないと判断した。

次に、切削加工状態を左右する要素として切れ刃の鋭利さがある。今回のように放電加工により工具すくい面の粗さを変化させると切れ刃の丸まりが生じることが懸念される。そこで、試作工具の切れ刃のSEM観察を行った。図4-30(a)に通常の工具切れ刃、(b)に粗さ $17.3\text{ }\mu\text{mRz}$ のno.1工具のものをそれぞれ示す。図からチップングなどの明かな切れ刃の欠陥は見られず、どちらも概ね $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の丸みを有する切れ刃稜線であることがわかる。

4.5.3.(c) 観察システムと実験概要

以上のような検討のもとで、切削実験を図4-31に示す実験システムで行った。

図4-32は実験の様子を示す写真である。

実験は無段変速旋盤((株)オークマ・LS-450型)に 150×150 、厚さ5mmのSUS304パイプを取り付けてこれを先述の4種類の超硬工具により横切れ刃のみで二次元切削して行う。このときの切削条件は表2に示す。切削幅は、被削材自身の剛性低下を極力抑えられるようにパイプの端面から5mm程度を1mmの厚さに加工して拘束した。

切りくずの流動状態は、工具と対向する形で高速度カメラ((株)ナックイメージテクノロジー・MEMRECAM・ciST-569-J)を設置して観察した。また、工具には工具動力計((株)キスラー・9257B)が設置されており、3つの分力をそれぞれデジタルデータレコーダー((株)TEAC・DAT-135T)に記録した。撮影画像と工具動力の記録は簡単な二値化回路と自己保持回路を利用してトリガ回路を製作し、記録の同期をとった。具体的には、切削条件と被切削抵抗から工具にかかる切削抵抗を想定して、二値化回路に設定しておき、工具に閾値以上の加工抵抗がかかると自己保持回路が作動し高速度カメラに撮影開始のトリガ信号を送る。このときのトリガ信号は同時にデータレコーダーにも送られて記録される。よって、データレコーダーに記録された工具動力計の出力信号と撮影画像の同期をとりながら切りくずの流動状態を正確に分析できる。

切削条件は実験の主旨に則り、軽負荷の乾式加工とした。なお、被削材表面はできるだけ不純物皮膜等の影響をなくすことができるように実験前に脱脂した。

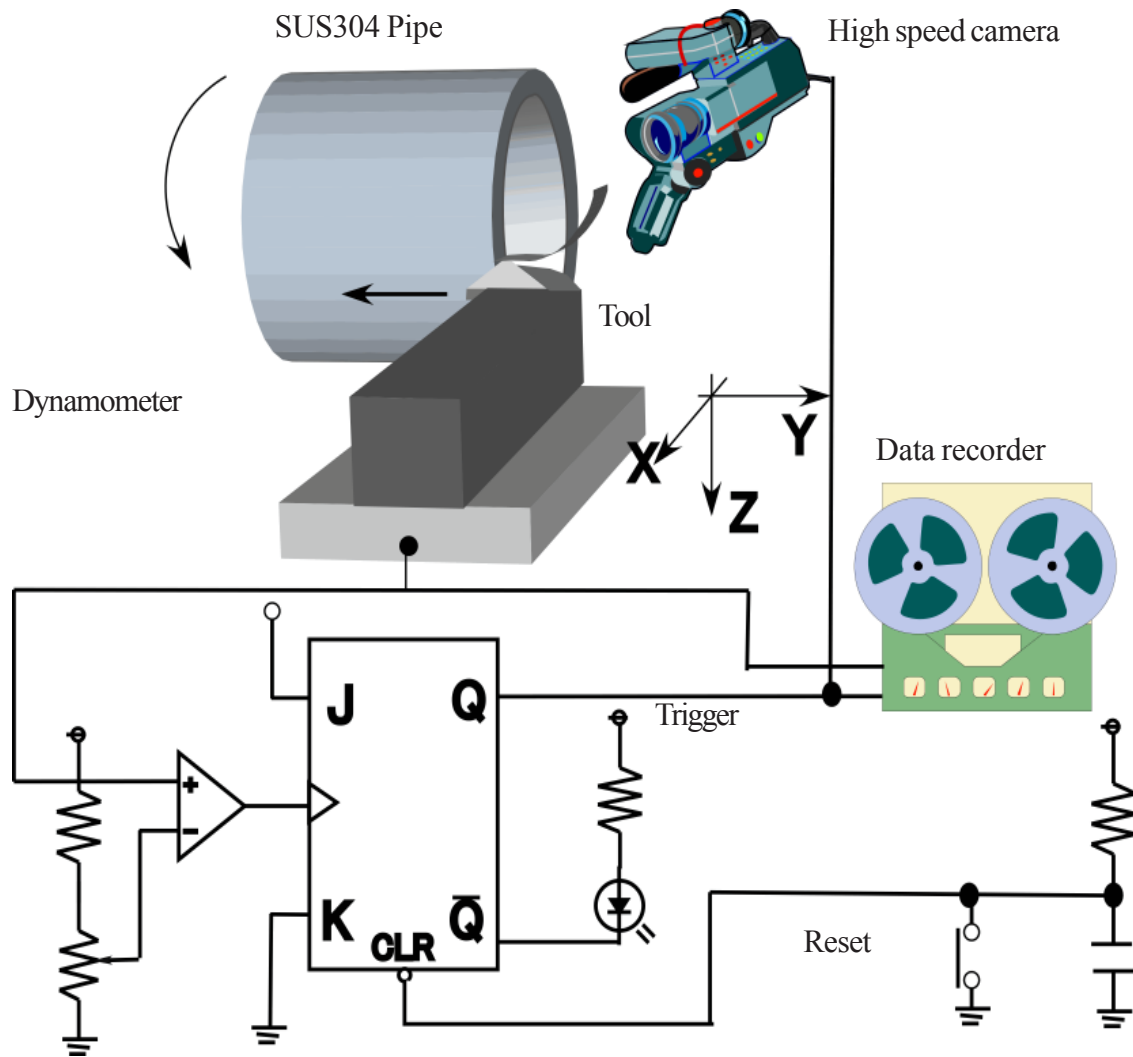


Fig.4-31 Observation system to verify the interaction between tool rakeface roughness and particles

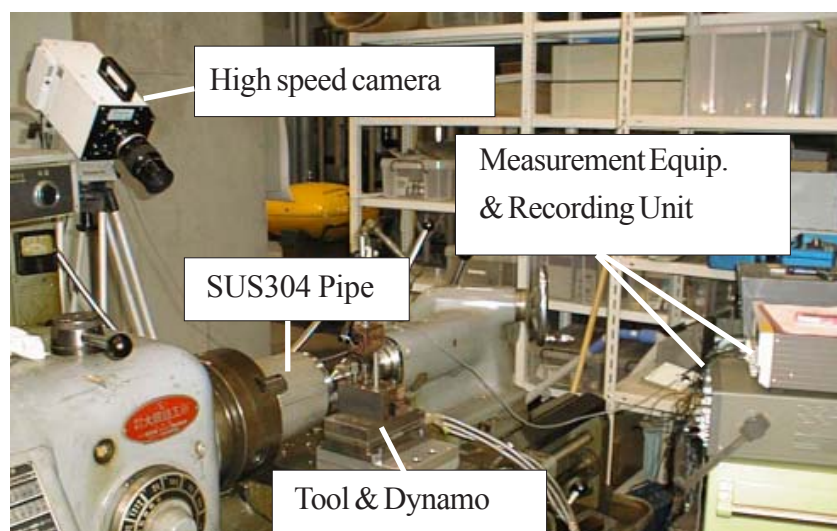


Fig.4-32 Photograph of experimental set-ups

4.5.3. (d) オーステナイトステンレス鋼の切りくず流動特性

工具すくい面の粗さが切りくず流動に与える影響を把握するため、最初に通常の切削工具でこれまで被削材として用いてきたオーステナイトステンレス鋼を切削し、その基本的な流動特性を把握する必要がある。オーステナイト系ステンレス鋼は、鋸歯状の切りくずが生成され、その生成過程において切削抵抗に一般の鋼材と比較して著しい変動が生じると言われている。また、加工効果や凝着も生じやすく、これらが相互に切削工具に作用しあうことで著しく工具寿命を低下させていると考えられている⁴⁻¹⁹⁾。

著者らは今回高速度撮影画像と切削抵抗の測定結果を連動させてmsオーダーで現象の把握につとめたが、その結果、従来は切削抵抗結果や撮影画像から大まかにしか考えられていなかったメカニズムが明らかになった。

図4-33にSUS304加工時の切りくず流動の画像を2ms毎に示す。また、図4-34にそのときの切削抵抗の変動値を示し、図4-35に摩擦角 θ の変化を示す。これらのデータから、オーステナイトステンレス鋼の切削では、次のような順序で極めて短時間の間に周期的な切りくず凝着と、それにともなう切削抵抗の変動が生じている。

A) 工具すくい面に切りくずが凝着する。

図4-33(a)の状態では切りくずの流動が停止する。これと同時に通常は図4-34のc付近の150N程度であるはずの切削抵抗が、この凝着のためにa点のように2倍の300N程度にまで高くなる。また、切削抵抗から算出される摩擦角 θ は、このとき50度前後に一定の値を示すようになる。

摩擦角 θ が一定の値を指し示すということは、切りくずがすくい面に凝着したことを意味する。なぜならば切りくずがすくい面と接触する反作用によって切削抵抗が生じるからで、その接触が瞬間的であれば切削抵抗は一定の方向を示し続けることは難しく、摩擦角も方向性を有し難い。すなわち、摩擦角が一定の方向性を示すことはすくい面に切りくずが強固に凝着を始めており、凝着した切りくずを介して切削抵抗が切削工具へと伝達され始めているからである。

B) 切りくずの凝着部が瘤のように隆起する。

切りくずの凝着が生じると、凝着した切りくずを排出するために通常の倍の加工抵抗が生じ、図4-34の点aから点bにかけてのmsオーダーの切削抵抗の変動が生じる。この

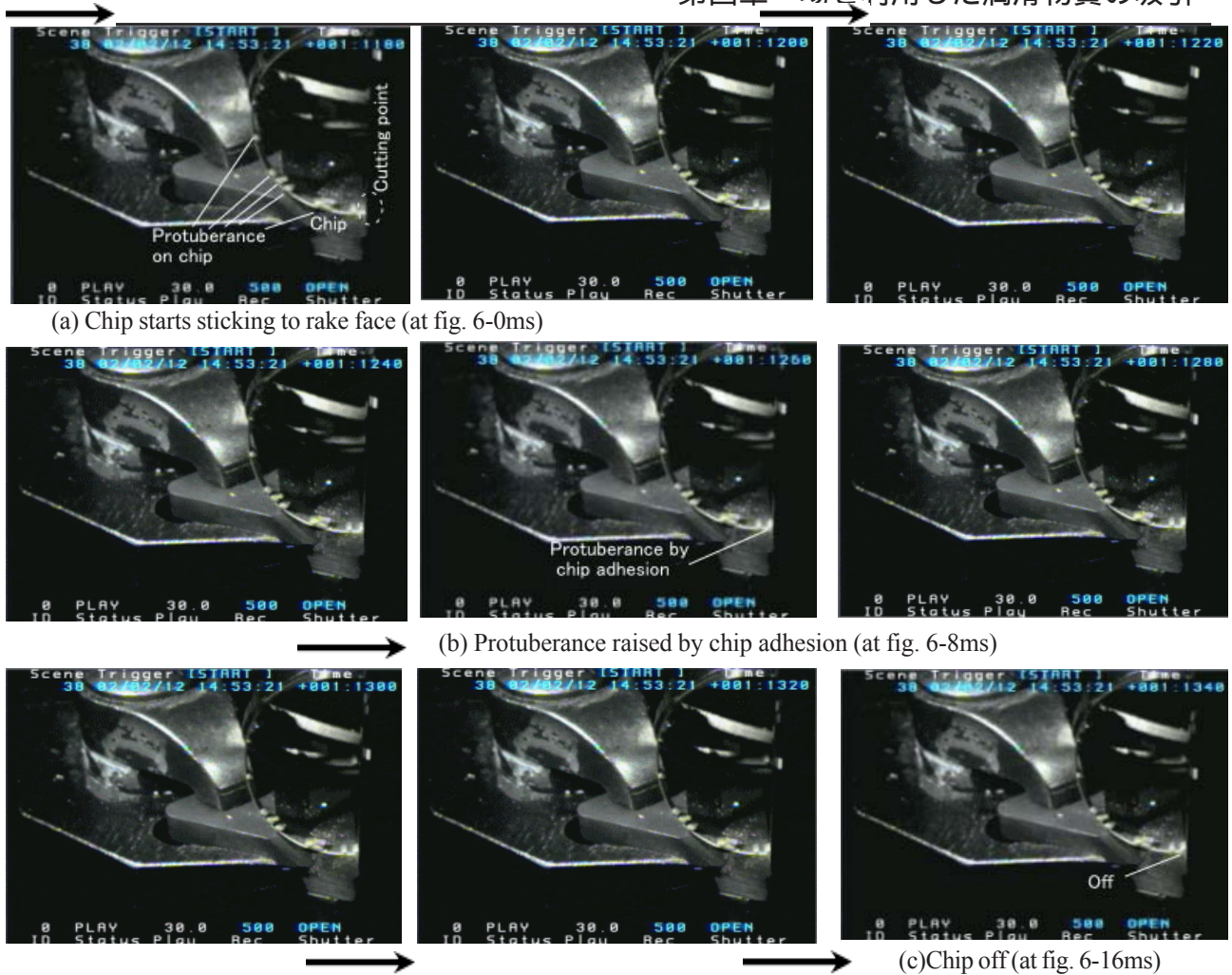


Fig. 4-33 Chip flow in every 2ms by high speed camera observation

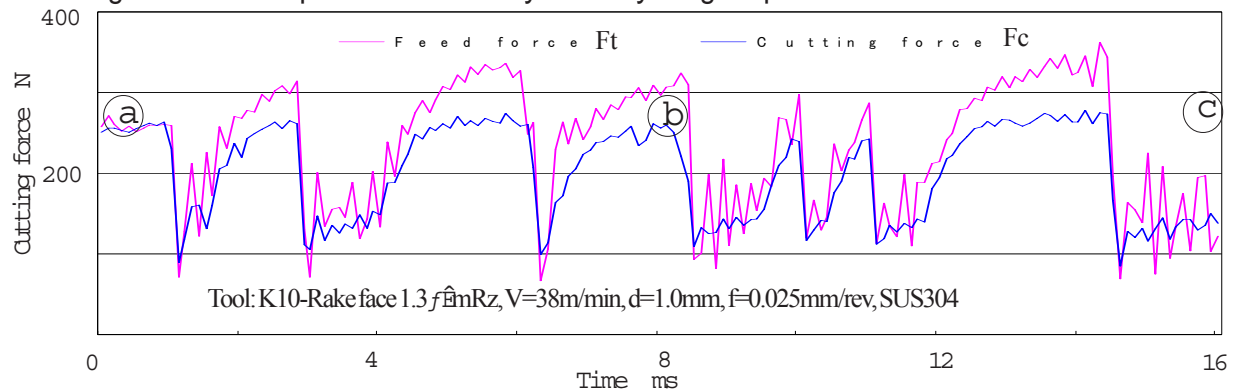


Fig. 4-34 Cutting force of Fig. 4-33

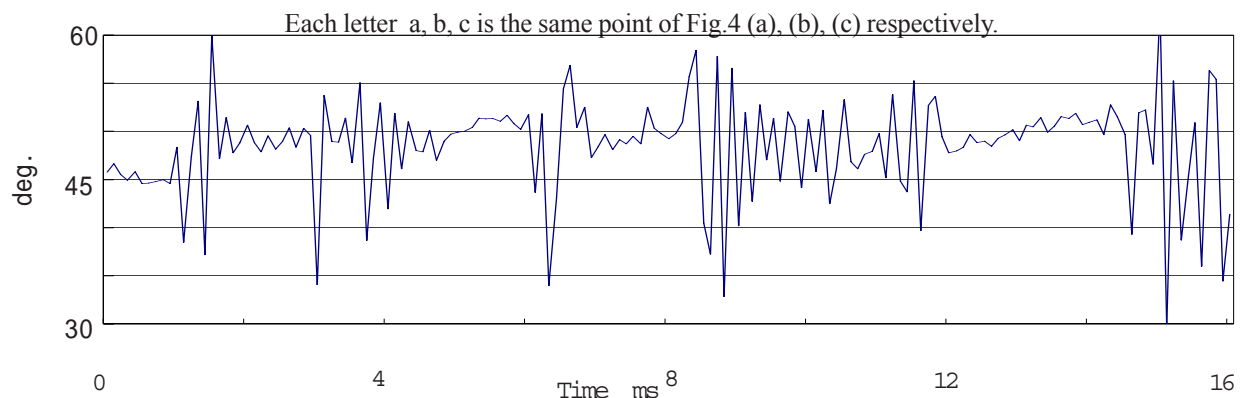


Fig. 4-35 Friction angle of Fig. 4-33

作用により 図4-33(b)までに切りくずの一部が通常の厚さの倍程度までに隆起し切りくず上に瘤のような突起を形成する。

図中の切りくずを見ると、他にも切りくず上に多数このような瘤状突起が観察されるが、これらは全て同じメカニズムにて形成された物である。

C)凝着部が離脱（剥離）する。

切りくずを排出しようとする作用が増加して図4-33(c)のように瘤のように厚くなった切りくずの凝着部が剥離する。図4-34点cでは凝着が解消されたために加工抵抗が低下し、通常の150N前後になる。また摩擦角は凝着が解消されると大きく変動し始める。

一方このような凝着離脱現象は、機械の送りムラによって生じている可能性もある。そこで図4-36のようにして送りムラの影響がどの程度あるのかを調べた。実験では、静電容量式変位計（岩崎通信工業（株）ST-3501，ST-3507，分解能0.1V/ μm ，周波数特性DC～10kHz）を用い、実験条件と同じ送り速度でサドルを前後させこのときのツールポストでの挙動を把握することにした。結果を図4-37に示すが、直線近似で残差自乗和1という極めて直線性の良い結果が得られており、切削抵抗の送り分力に影響を与えるような送りむらや振動などはないことがはっきりと理解できる。

したがって今回観察されたオーステナイトステンレス鋼の特徴的な切りくず流動特性は、機械の運動誤差に伴うものではなく、被削材固有のものであると言え、この一連の凝着剥離プロセスにより、オーステナイトステンレス鋼の切削では、連続切削においてもあたかも断続切削をしているかのような大きな抵抗の変動が生じる。これが連続切削においても工具欠損を誘起したり、ロングスパンで切削抵抗を観察する場合に見かけ上切削抵抗が大きくなっているように見える原因である。

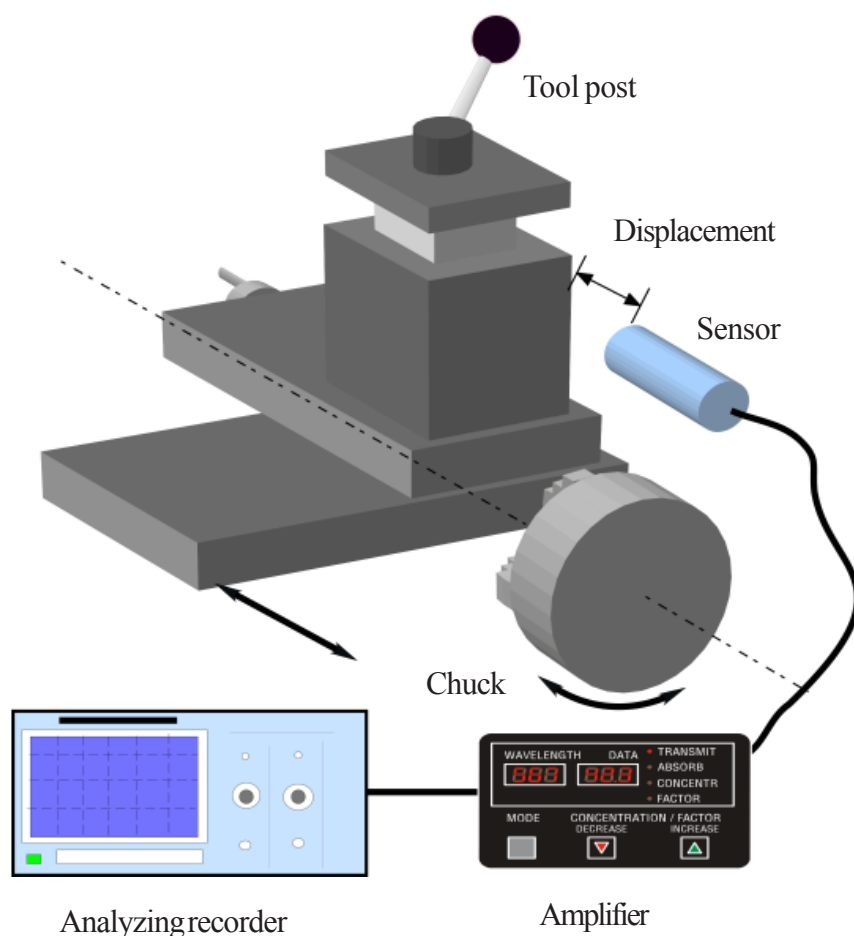


Fig. 4-36 Tool feed accuracy experiment

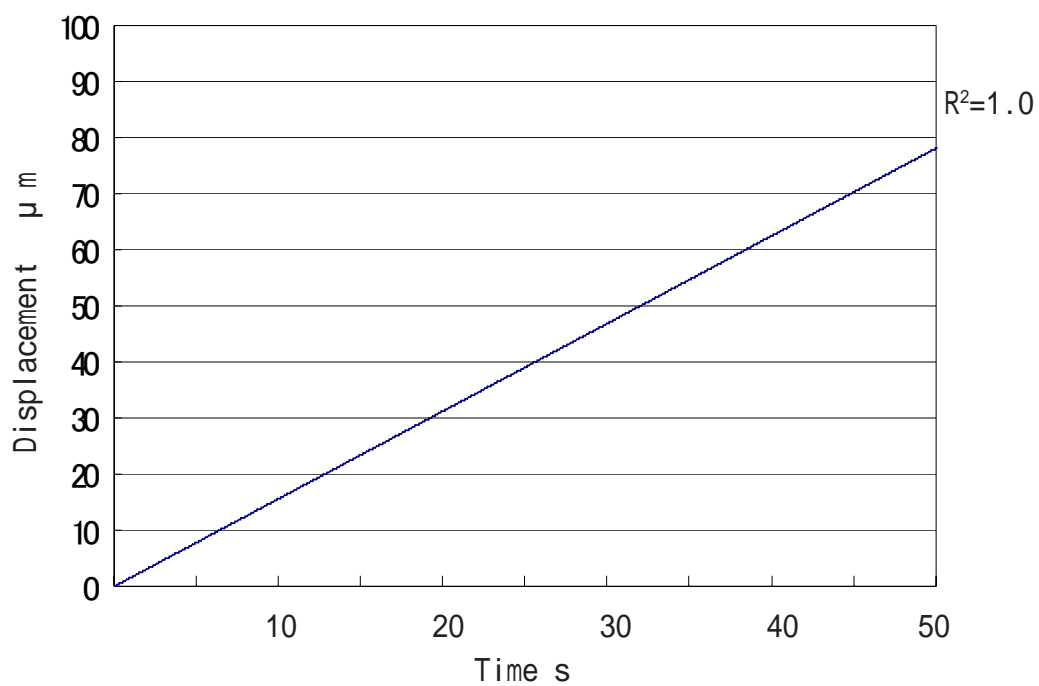


Fig. 4-37 Result of fig. 4-36

4.5.3. (e) 工具表面の粗さが切りくず流動におよぼす影響

本節では、工具すくい面のあらさが切りくずの凝着や、それにともなう流動状態にどのような影響を与えるのかを明らかにする。

トライボロジーの観点から凝着現象を左右する要素を考えると、一般的に凝着は固体間の接触部の粗さと、そして固体間の相対速度に依存することが指摘されている⁴⁻²⁰⁾。そこで、工具表面の粗さと切削抵抗の平均値の関係を種々の切削速度で調べ図4-38にまとめた。図4-38では前節で示した切りくずの凝着現象の発生頻度を基準にして、凝着が頻繁に生じていた切削速度 $V=3\text{m/min}$ のデータ、工具の粗さによっては凝着が生じていた切削速度 $V=30\text{m/min}$ のデータ、そして凝着現象が観察されなかった切削速度 $V=65\text{m/min}$ のデータを代表的に示す。

凝着が頻繁に生じていた切削速度 $V=3\text{m/min}$ のデータでは、工具すくい面の粗さが粗い工具ほど凝着が顕著に生じていたので、工具の粗さに比例して切削抵抗の平均値が大きくなっている。

次に切削速度が $V=30\text{m/min}$ のときは、すくい面の粗さが $1.3\ \mu\text{mRz}$ の工具において凝着現象が頻繁に観察されたが、それ以外の工具では凝着がほとんど観察されなかった。したがって平均切削抵抗では $1.3\ \mu\text{mRz}$ の工具で特異点のように加工抵抗が大きくなっており、それ以外の工具では抵抗が 150N 程度と低くなっている。

そして $V=65\text{m/min}$ の結果においては、凝着現象がほとんど生じず、結果として粗さの切削抵抗への影響がほとんど見られなかったために、 $V=30\text{m/min}$ の $1.3\ \mu\text{mRz}$ 以外の結果と同程度の値になっている。

それでは、なぜ切削速度 $V=30\text{m/min}$ の $1.3\ \mu\text{m}$ の工具では他の3つの粗さの粗い工具よりも凝着が生じやすかったのだろうか。それは、 $1.3\ \mu\text{mRz}$ の工具は粗さが他の工具よりも小さいためすくい面からの摩擦抵抗が少ないことが要因として挙げられる。というのは、前記のように凝着現象は粗さ以外にも接触点においての切りくずが流れる際の速度、すなわち、摩擦面を切りくずが擦過することによる接触点の温度の高低、つまり切削温度に影響されるからである。

そのように考えると、切りくずは切削速度 $V=30\text{m/min}$ を境に凝着特性が遷移し、それ以下の低速では工具すくい面粗さに比例して顕著に凝着し、それ以上では切削温度が上昇し、その粗さが凝着に影響しなくなるという自然な結論が導きだされる。

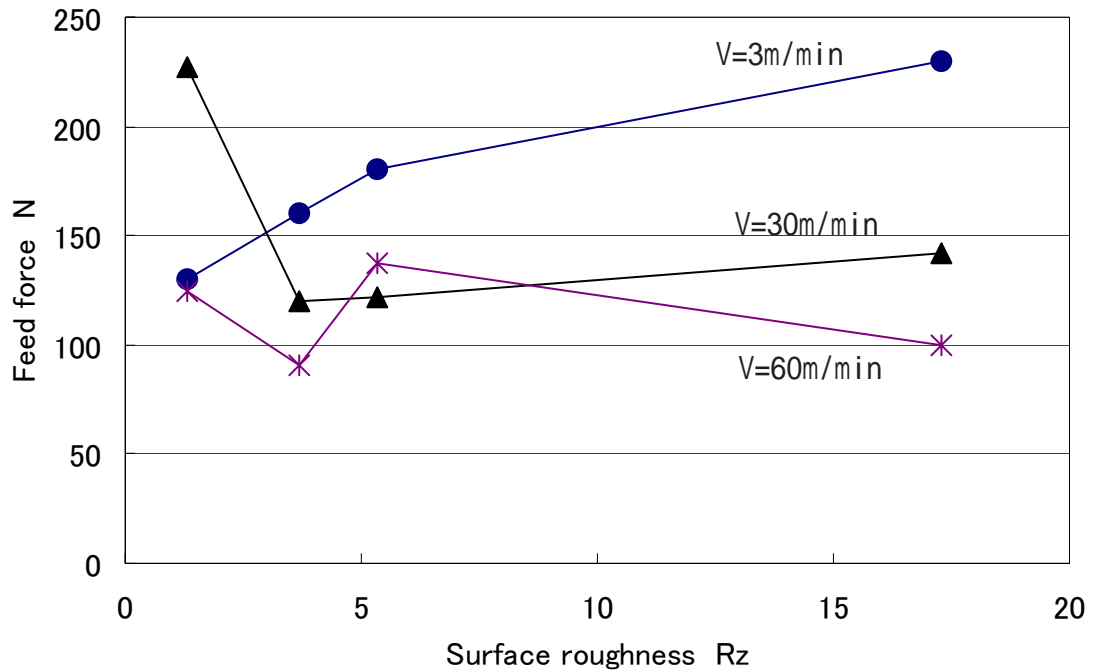


Fig. 4-38 Influence of rakeface roughness on cutting force

以上の結果から，オーステナイトステンレス鋼切削時の工具の粗さと切りくず流動の基本的な関係を把握することができた，これまでの実験結果を考えると，シリカ微粒子の効果は低速かつ軽切削の条件にあたると考えられ，上記の $V=3\text{m/min}$ の条件にあたる．このような低速条件ではオーステナイトステンレス切りくずの強固な凝着が観察され，特にすくい面の粗さが大きいときに凝着も頻繁に生じる．

4.5.4 シリカ微粒子の切りくず凝着防止効果

そこで、工具すくい面の粗さが $17.3 \mu\text{mRy}$ と実験の範囲で最も粗さの大きい工具で SUS304 を切削し、凝着が激しく生じるであろうと思われる切削条件で切削を行い、そのときの切削抵抗と切りくず流動の状態を比較し、シリカ微粒子の効果を確認することとした。図4-39(a)は乾式加工における実験結果、(b)はシリカ微粒子を工具に電気泳動であらかじめ付着させたときのものである。

まず、粗さの粗い工具で加工を行った場合、予想通りすくい面上で切りくずの激しい凝着と剥離が繰り返し生じた。このため、この凝着剥離に同期して図4-39(a)のように切削抵抗の変動が大きく発生した。

また、同右側写真を見ると、凝着した切りくずを排出するために、切りくずがすくい面上で圧縮され、全体的に分厚い切りくずが排出されていることがわかる。

一方、工具にシリカ微粒子を予め電気泳動吸着させると、凝着が生じないために、図4-39(b)のように切削抵抗の変動はなく、極めて薄い良好な切りくず排出がなされていた。

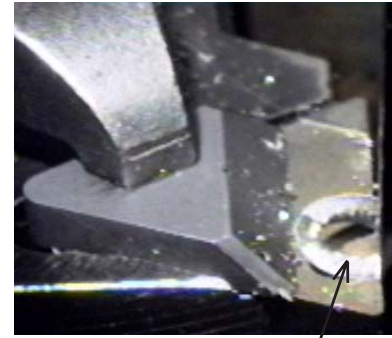
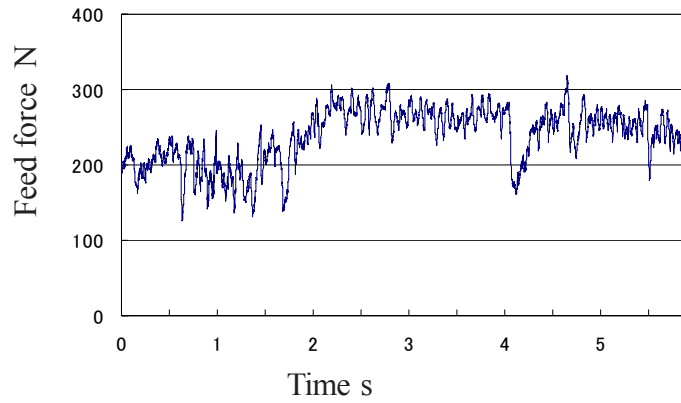
両者を比較すると、切りくずが凝着することで、ほぼ倍近い切削抵抗の差が生じており、切りくずの厚さもそれに比して分厚くなっていることが理解できる。

このように切りくずの凝着が生じて切りくず流動に変化が生じると、凝着した切りくずをすくい面から剥離させ、排出する作用が生じるために、切削抵抗には大きな変動が生じ、結果として切削抵抗の平均値も大きくなる。したがって、このことから切削抵抗の平均値を求めることで切りくず流動の良否を間接的に判断できることになる。つまり、凝着が頻繁に生じるようであれば、切削抵抗の平均値は高くなり、凝着が生じないようであればその値は低くなる。図4-40は、工具の仕上げ面粗さと平均切削抵抗との関係をまとめたものである。同図の乾式加工の結果を見ると、工具すくい面の粗さに比して切削抵抗の平均値が増加している。すなわち、工具すくい面の粗さが粗いほど凝着が生じやすく、結果として切削抵抗が大きくなっていることを表している。

このとき、シリカ微粒子が吸着されていれば、凝着が低減できる。同図のシリカ潤滑における結果では、工具の粗さが変化してもほぼ一定の切削抵抗となっており、切りくずの工具への凝着が抑制されていることが明確になっている。

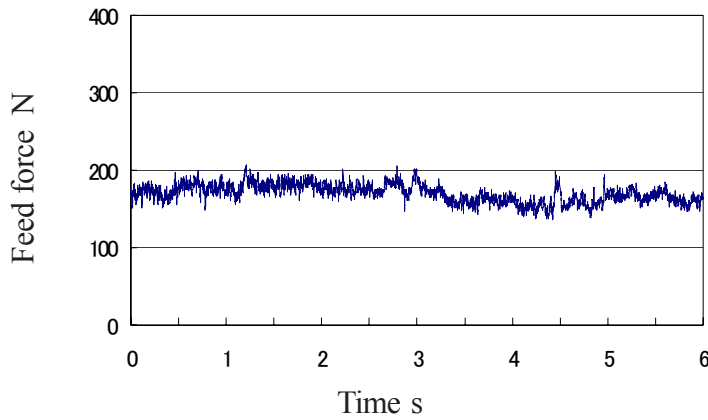
ところで、工具のすくい面のあらさが $1.3 \mu\text{m}$ のときは、シリカを付着させた場合と乾式加工において差がみられないが、これは、工具のすくい面のあらさが小さいほど切り

Tool:K10,Rake face $17.3 \mu\text{mRz}$, $V=3.14\text{m/min}$, $d=1.0\text{mm}$, $f=0.025\text{mm/rev}$, SUS304



Chip at 5.544s

(a) dry condition



Chip at 3.920s

(b) using silica particles conditions

Fig. 4-39 Comparison of cutting force between dry and using glass particles conditions

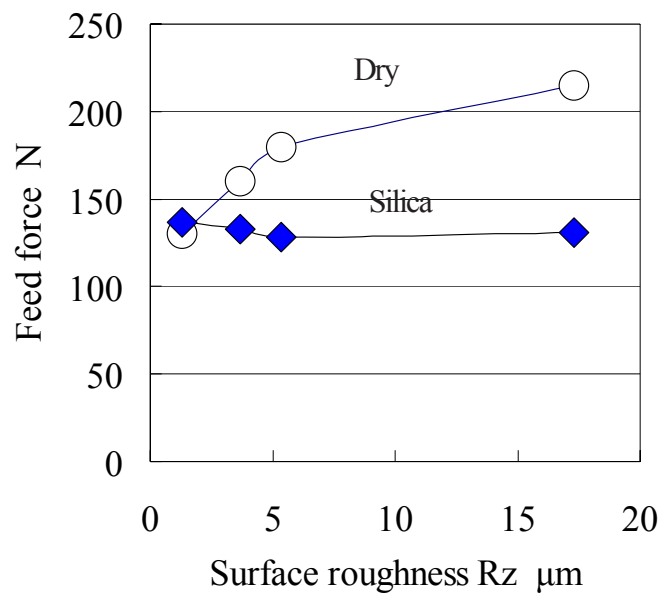


Fig. 4-40 Comparison of cutting force between Dry and silica adhesion

くずの凝着が生じないために、シリカの付着如何にかかわらず切りくずが良好に排出され、切削抵抗の平均値が低いためである。そのようなことから考えると、シリカ微粒子の効果は、凝着が生じやすい加工条件下であればあるほど有効である。

結論としては、工具すくい面と切りくずの流動面に微細なシリカが介在していることで切りくずの凝着が防止されていることが、今回の潤滑効果の主要因であると結論づけられる。

そしてこの切りくずの凝着防止効果については、加工点の切削温度が今回の切削条件ではシリカが溶融する温度ではないため、固体潤滑の作用のみが期待できる。よって、固体潤滑の作用としては、粒子自身のすべりや転動による摩擦低減効果しか考えられないため、それらの作用が工具寿命向上の主要因と結論付けられる。

4.6 結論

場と補材の利用を目的として、切削剤を効果的に加工点に導く潤滑供給方法を検討した。本研究で得られた結果を下記に記す。

- (1) シリカ微粒子を分散させたコロイド溶液を用い、微粒子の静電特性を利用することで、潤滑剤となるシリカ微粒子を工具に能動的に吸着できる。これにより切削抵抗を低下させて工具寿命を向上できる。ドリル加工などにおいては、バリを低減させることができる。
 - (2)(1)の潤滑効果は工具表面の粗さより小さい粒子を使うと得られる。
 - (3)(2)の潤滑効果の要因を把握するため、高速度カメラによる撮影画像と切削抵抗を連動させて切りくずの流失を観察した。その結果、オーステナイトステンレス鋼の切削抵抗変動の原因は、切りくずの工具すくい面への周期的な凝着により引き起こされており、切りくずの凝着が生じたとき、加工抵抗が通常の2倍程度になることが明らかになった。
 - (4)上記の結果は、オーステナイト系ステンレス鋼の切削においては、旋削のような連続切削においても、断続切削のように切れ刃に負荷がかかり、工具摩耗を促進し易くする可能性を示唆する。
 - (5)(2)の潤滑効果は工具に付着させたシリカ微粒子の滑りあるいは転がりといった固体潤滑作用により切りくずの凝着が抑制されて、その排出が促進されるために生じている。
 - (6)本方式をオーステナイトステンレス鋼の小径ドリル加工に用いたところ、乾式加工の5倍、MQLと同等の工具寿命が見込めるという結果が得られた。
- 上記の結果から、場と補材を利用して工具の長寿命化が図れることを実証した。

参考文献

- 4-1)K. Uehara, S. Kumagai, F. Kiyosawa, M. Sakurai, H.Takeshita, Effect of solid lubrications in high speed intermittent metal cutting, Proc. 1st ICPE, (1974), 566.
- 4-2)N. H. Cook, E.Rabinowicz & R. L. Vaughn, Metal Cutting Lubrication Through Continuous Electroplating, Lubrication Engineering, Nov.(1966)447.
- 4-3)K.Uehara, K.Damhara , Y. Kanda, Annals of the C. I. R. P., 19, (1971)409.
- 4-4)P. J. Amaria, R.J. Goosney, American Maachinist, 9,(1973)37.
- 4-5)日本塑性加工学会編, 押し出し加工 ,(1997), 107, コロナ社 .
- 4-6)古堅宗勝, 松尾 洋, 福康富彦, 中西哲也, 柳本潤, ステンレス鋼管の熱間押し出し加工の変形特性, 鉄と鋼, 85-11 (1999), 801-805.
- 4-7)特開昭 57-112923, 熱間押し出し加工用ガラス潤滑剤, 新日鐵, ユニオンガラス .
- 4-8)特開平 11-92169, 熱間押し出し加工用ガラス潤滑剤, 住友金属, 日本フリット .
- 4-9)特開平 7-223019, 熱間押し出し加工用ガラス潤滑剤, 新日鐵, ユニオンガラス .
- 4-10)特開平 6-303915, 熱間押し出し加工用ガラス潤滑剤, 新日鐵, ユニオンガラス .
- 4-11)静電気学会編, 静電気ハンドブック, (1998), 132-134 ,(株)オーム社 .
- 4-12)池野順一, 谷 泰弘, 電気泳動現象を利用した超微粒砥石とその応用, 機論C ,57-535(1991), 1013.
- 4-13)精密工学会編, 精密工作便覧 ,(1992), 157 ,(株)コロナ社 .
- 4-14)日産化学工業(株), コロイダルシリカカタログ .
- 4-15)佐田登志夫, 切削加工面の摩擦と切削機構, 機論, 21-106 ,(1955), 416-423 .
- 4-16)柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, 切削加工における SUS304 切りくず流動の高速カメラ観察-工具すくい面の仕上げ面粗さが切りくず流動におよぼす影響-, トライボロジー会議予稿集東京, (2002-5), 271 .
- 4-17)星 光一, 金属切削 - 構成刃先について -, 工業調査会, 1960 年, 8 .
- 4-18)柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, ガラス潤滑による小径ドリル加工, 2000 精密工学会秋季学術講演会論文集, (2000-10), 191.
- 4-19)難削材の切削加工技術, 狩野勝吉, 工業調査会, 1991 年, P.160.
- 4-20)トライボロジー - 摩擦摩耗の科学と技術 -, 松原 清, 産業図書, 1985 年, p.40.

4-21) 柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, ガラス潤滑による小径ドリル加工 - 加工特性向上の要因 -, 2002 精密工学会春季学術講演会論文集, (2002-3), 65.

第五章 切削工具の 部分形成と再生技術

5.1 緒言

近年，工程設計における大きな傾向は，ニアネットシェイプ化である．これは，金属加工の場合，鋳造やプレス加工などの工程で，できる限り製品の成型を行い，切削加工や研削加工などの除去加工工程を極力減らし，コストを削減しようとする動きである．これにより，切削加工の傾向としては，重切削工程から中・軽切削工程への比重が増加し，10mmの切れ刃長さを有する工具であっても通常よく利用されるのは先端部の僅か数mmというような状況が増えつつある．

また，近年は，高付加価値製品加工への需要の高まりから被削材が，ステンレス鋼，チタニウム合金，耐熱合金，複合材料などへより難削化する傾向が強まっており，切削工具の先端部により負担のかかる加工が増加すると予想される．こうなると切削工具は，工具切れ刃長さが10mmであっても，切削に利用している部分はほんの僅かということになる．この僅かな部分が摩耗幅で0.2～0.4mm摩耗すると，切削工具は寿命と判断され交換されることになるが，この摩耗部位を逐次機上で簡易に再生できるようになれば，工具寿命の延長だけでなく工具の脱着にともなう位置補正の必要が低減される．

しかし，実際に切削工具を機上で簡易に再生することを考えると，工具本体は主に焼結などの高温高圧によるプロセスを経て製造されるため，本体自身の再生は困難である．だが，コーティング工具による切削を考えると，母材にコーティングされた硬質膜自身が切削に多大に関与しており，このコーティング膜自身が寿命を延ばし，そして繰り返し機上で生成，および再生できるようになれば，結果として工具の母材部分は全く摩耗することがなくなる．

これまで，本論文においては，第三章，第四章を通して，工具の長寿命化を促進するための場や補材に関して提案を行った．これら場や補材は，工具と被削材の間に介在するエネルギーであり物質であった．このうち，介在物については，工具と被削材の間に一時的に介在し，工具と被削材の直接接触を防ぎ両者間での熱化学反応を防止することが大きな目的である．しかしこの介在物層がある程度の硬度を有して比較的長く加工点に介在できるようになると，工具は新たな切れ刃としての役割を担うことになるのではないかと考えられる．

そこで、本章においては、加工点で工具と被削材の間に介在する補材に対して考え方を一歩進めて、介在層自身の強化を行い、切れ刃としての役割を担わすことを検討する。そして、切れ刃としての役割を持たせた介在層の機上での生成、および再生技術を検討する。換言すれば迅速なコーティング層の形成と再生である。

5.2 工作機械上での切削工具コーティングによる工具機上再生の概念

5.2.1 成膜と剥離による工具再生方法の提案

一般的に切削工具の再生といえば再研削のことを指すが、本研究で提案する機上再生の基本的な考え方は”成膜と剥離による再生である”(図5-1)。工具表面のスロアウェイ化とも言える。理想的には、母材の摩耗や損傷が全く無ければ、一度チャッキングした工具は半永久的に使えることになる。また、成膜精度の再現性が確立されれば常に同じ精度の工具を使うことができる。

ただし、機上再生には時間という大きな制約条件がある。加工時間は加工コストに直結するため、少なくとも工具本体の交換よりも”成膜と剥離”に要する時間のほうが短くなければならない。また、工作機械上で行うことを考えると処理装置の簡易さも制約条件の一つである。そのため成膜の手段として、切削工具コーティングとして一般的なCVDやPVDのような方法を用いることはできない。

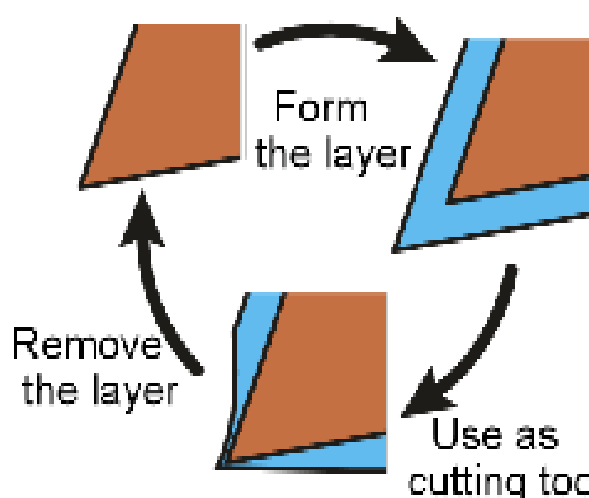


Fig. 5-1 Basic concept of On-the-machine cutting-edge re-generation

図5-1のような工具表層の交換という考え方では、切削工具にコーティングして工具寿命を延ばすのではなく、コーティング膜自体を工具として切削加工しようとするところが従来と異なる考えである。そのため、工具母材が露出する前に加工を止めて工具の再生を行うということが必要になるだろう。

機上再生をする利点とその意義としては、

- ・ 交換前後で工作機械と工具との相対的な位置関係が変化しにくい
- ・ 交換前後で工具の幾何学的形状が変化しにくい
- ・ 交換する部分の体積が小さいので省資源が期待できる

という点が挙げられる。

通常の工具交換方式では、再現性よく高精度に工具を交換するためには特殊なチャックを用いる必要がある。沢田ら⁵⁻¹⁾は三次元マイクロマシニングを高精度に行うために、シリコンゴムを圧力媒体とした工具チャック(図5-2, 図5-3, 図5-4)を開発し、既存の三爪チャックと比較して図5-5のような着脱誤差の改善結果を得ている。しかし、彼らの用いた工具はダイヤモンドチップをツールシャンクに取り付けたものであり、チップとシャンクの位置合わせについては顕微鏡を用いた目視によって行っている。この点が高精度な三次元マイクロマシニングを行う上での問題点のひとつであるとしている。それに対して、成膜と剥離による再生では工具母材をチャックしたまま表面の膜のみを交換するので、チャッキングによる工具位置決めの繰り返し誤差は関係なくなる。そして、工具膜の剥離処理が理想的に行われれば、工具母材に関しては軸心ズレや形状の変化などは全く起こらない。したがって、工具の軸心ズレや形状変形は成膜時の不均一性と剥離時の母材変形(摩耗など)に影響を受けるため、高精度な成膜および剥離技術が必要である。

また、この方法の短所として、工具再生中は切削加工を行うことができないという点が挙げられる。しかし、結局は工具膜の再生に要する時間が短縮でき、工具膜の寿命が長ければ解決できる課題である。この点は制約条件として次節にて述べる。

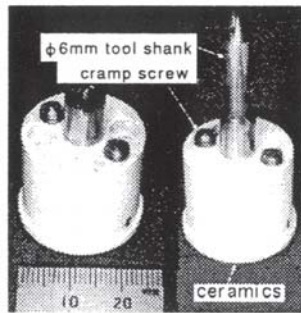


Fig. 5-2 Precision tool chuck⁵⁻¹⁾

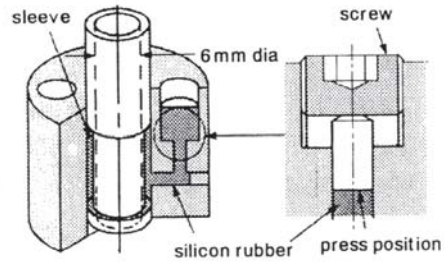


Fig. 5-3 : Structure of the chuck⁵⁻¹⁾

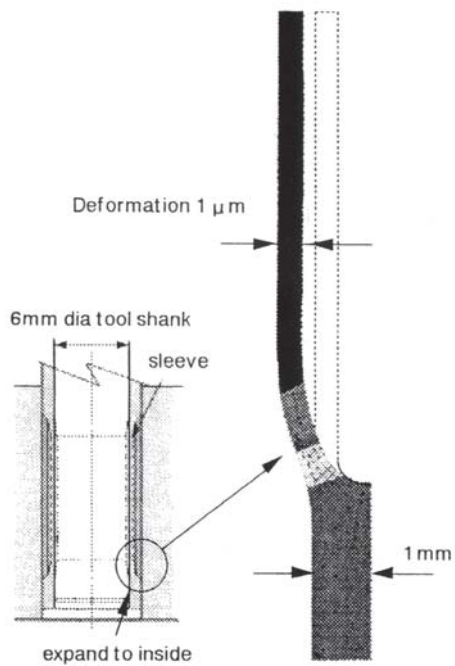


Fig. 5-4 Deformation analysis of the chuck sleeve⁵⁻¹⁾

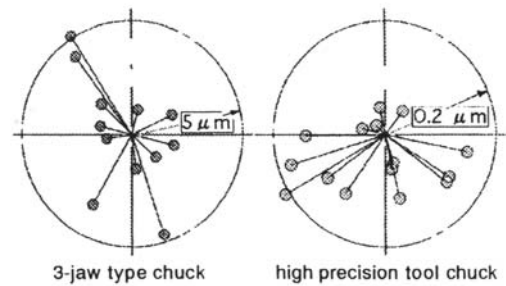


Fig. 5-5 Improvement of tool center displacement by the chuck⁵⁻¹⁾

5.2.2 切削工具として具備すべき特性

一般的に切削工具材料として求められる特性⁵⁻²⁾を表5-1に示す。このうち、(1)～(3)は工具全体に、(4)～(8)は特に工具表面について求められる特性である。また図5-6のように、切削加工を正常に行うために、工具材料は被削材の少なくとも4倍の硬さが必要である⁵⁻³⁾。ただしこれは均一な材料組成からなる工具についての結果であり、本研究の提案する方法のように工具表層材とその下の工具母材とが異なる場合には、膜の硬度と同時にその膜を強固に保持できる母材との密着性が重要な要素となるであろう。

工具表面に求められる特性は先に述べたように、表5-1の(1)～(8)に相当する項目である。そのほとんどが耐摩耗性に関する特性であり、工具寿命に直接結びつく因子であるが、耐凝着性（被削物との化学的親和性）は工作物の仕上げ面粗さにも影響のある因子である。その一方で、工具母材については被削材と直接接触することがないため要求される特性も異なり、耐塑性変形性(表5-1(1))や耐折損性(表5-1(2))などの切削動力を支える構造体としての機能が重視されるべきであろう。

Table 5-1 Requirements for cutting tools⁵⁻²⁾

- (1)Ultimate hardness
- (2)Ultimate toughness
- (3)High thermal conductivity
- (4)Chemical stability
- (5)Stability for oxidation or deoxidation
- (6)Difficult to defuse
- (7)anti-adhesive to work material
- (9)Good grindability to make its shape

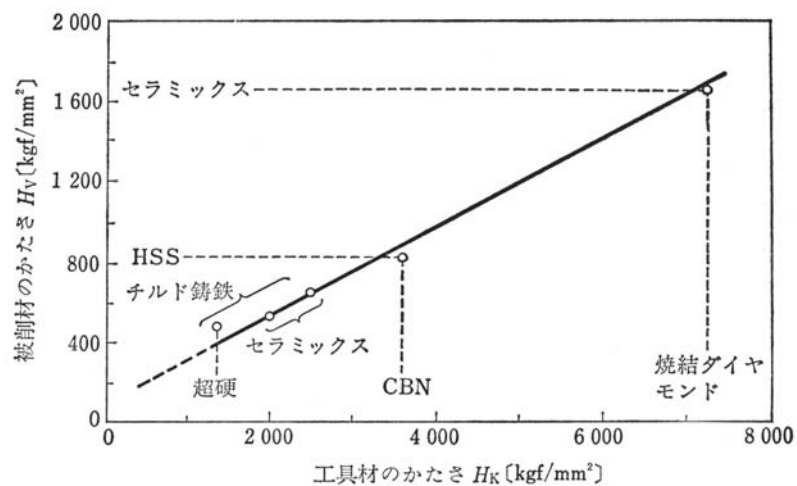


Fig. 5-6 Hardness of cutting tool and its available work hardness ⁵⁻³⁾

5.2.3 機上再生を実現する方法に対する制約条件

機上でコーティングを行い工具の再生を図るには時間という大きな制約条件がある。加工時間は加工コストに直結するため、少なくとも工具本体の交換よりも成膜と剥離に要する時間のほうが短くなければならない。さらに工具膜の寿命も考慮すると、(通常の工具の寿命) / (交換に要する時間) に対して (工具膜の寿命) / (膜の再生に要する時間) のほうが大きいことが望ましいだろう。再生方法として、工作物の交換時に膜の再生を完了させる、というかたちが理想的である。

処理の自動化というのも制約条件のひとつである。再生を高速に行うためにも人手に頼らない方法が必要である。

また、工作機械上で処理を行うことを考えると装置の簡易さも制約条件のひとつであり、成膜の手段としてCVDやPVDのような方法を用いることはできない。さらに、切削加工に耐えうるような硬質膜を除去(剥離)する方法にしても、工具研削盤をそのまま工作機械上に載せるというわけにはいかない。

そして前節でも述べたように、膜質としてはもちろん切削に耐えうる硬質膜でなければならない。

したがって、機上再生を実現するための方法に対する制約条件は以下の二点となる。

- ・ 処理の高速性
- ・ 装置の簡易さ

また、要求項目としては、次が挙げられる。

- ・ 硬質膜の形成

5.2.4 機上再生に利用しうる技術

前節で述べたように，機上再生には処理の高速性，自動化，装置の簡易さ，そして切削に耐え得る膜の硬さが制約条件として与えられる．このような条件を満たし，機上再生に利用し得ると考えられる複合めっき，放電加工，紫外線硬化樹脂，陽極火花放電の4種類の成膜方法について，特に工具分野への適用例と共にまとめる．

5.2.4.(a) 複合めっきによる成膜

電気めっきや無電解めっきの浴から微粒子や繊維物質を金属の析出と同時に金属皮膜中に取り込ませて得られる複合皮膜は，複合めっきあるいは，分散めっきと呼ばれる．本研究では結果として工具膜として複合めっき膜を採用する．複合めっきについては5.3節で，その剥離方法については5.4節で述べる．

複合めっきの工具への適用例として，電着砥石がある．その製法は所定の形状の金属母体に超砥粒をのせ(細目の場合は液に分散)合金を陰極にしてめっき液中で砥粒を固定する⁵⁻⁴⁾というものである．超硬，難削金属などの内面研削や総型研削などに用いられ，切れ味はよいが，一般的には単層なので切れ味の変化や寿命に問題がある．そのため，砥粒層が多層の砥石も検討されている⁵⁻⁵⁾．

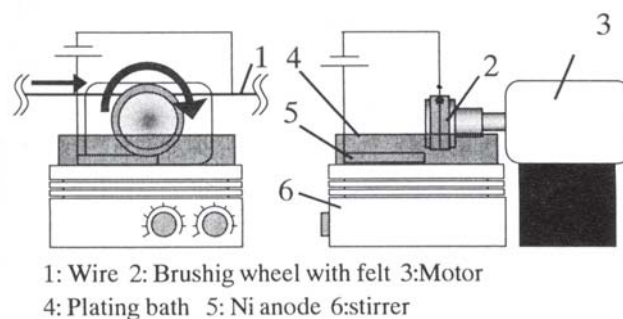


Fig. 5-7 Illustration of High speed electroplated wire-saw making experiment⁵⁻⁶⁾

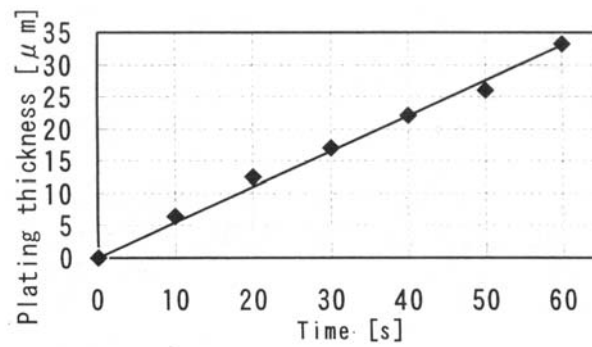


Fig. 5-8 Growth speed of plated layer thickness

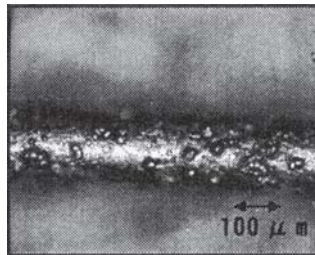
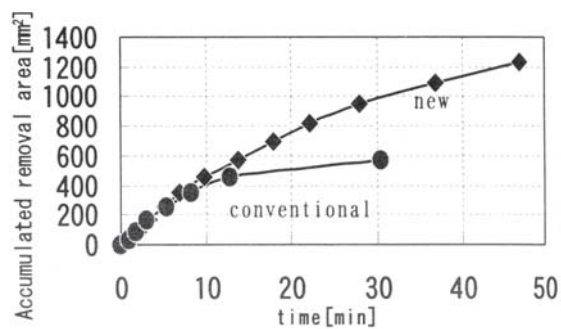


Fig. 5-9 Wire-saw by developed plating method ⁵⁻⁶⁾



Wire velocity	mm/min	500
Wire length	m	30
Load for wire tension	N	30
Wire tension	N	15
Dead load	N	1.96
Coolant		Water
Test piece		3 ' Si

Fig. 5-10 Comparison of conventional electroplated wire saw and one by developed method⁵⁻⁶⁾

通常の電着砥石の製法(沈降共析法)では成膜速度が遅く、機上再生には向いていない。電着砥石製造の高速化方法として、千葉らによる、ブラシめっき法を用いた電着ワイヤ工具の高速製造の例⁵⁻⁶⁾がある。彼らは図5-7のようなブラシめっき装置を用いて、ダイヤモンド砥粒を共析させながら30 $\mu\text{m}/\text{min}$ の成膜速度(図5-8)で複合めっき膜をワイヤ上に成長させている。そして試作した工具(図5-9)の加工性能は従来品を上回っている(図5-10)。

複合めっきを利用した研削砥石は広く実用化されているが、切削工具の例はほとられない。

5.2.4. (b) 放電による成膜と剥離

放電現象を利用した加工法としては除去加工が広く知られている⁵⁻⁷⁾が、堆積加工(付着加工)も可能であり、その成膜速度は条件によって3mm/20minにも達する(図5-11)⁵⁻⁸⁾。この成膜方法の工具への適用は、切削工具への「EDCOAT」⁵⁻⁹⁾として実用化されている。その原理を図5-12に、堆積加工用電極の製造方法を図5-13に示す。火花放電の熱エネルギーで電極材料が溶解してTiが溶けだし、同時に加工油が分解して遊離炭素を放出する。そしてそれらが結合したTiC膜が被加工物表面に付着するという原理になっている。図5-14のようにEDCOAT膜はCVDによるTiC膜に匹敵する硬さを持ち、切



Fig. 5-11 WC-Co layer on S45C steel⁵⁻⁸⁾

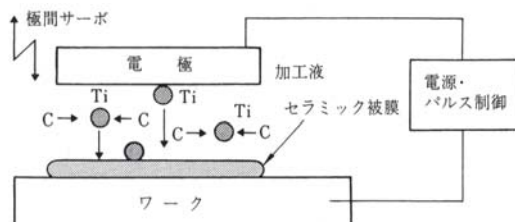


Fig. 5-12 Principle of EDCOAT⁵⁻⁹⁾

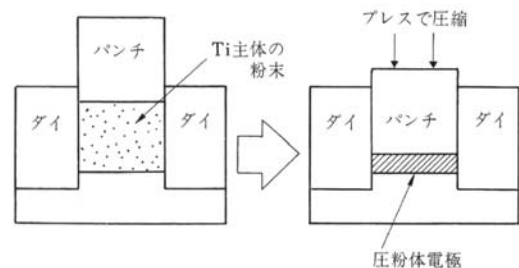


Fig. 5-13 method to make pole⁵⁻⁹⁾

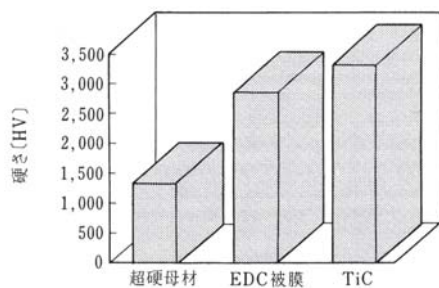


Fig. 5-14 Hardness of EDCOAT⁵⁻⁹⁾

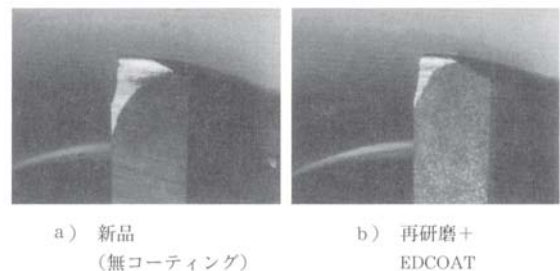


Fig. 5-15 Wear comparison of the bottom edges of endmills⁵⁻⁹⁾

削工具用のコーティング膜として適用されている(図5-15)．この方法で切削工具の機上再生までを実施した例はまだみられないが，技術的には十分可能と考えられる．

工具の再生ではないが関連技術として，放電加工による形状フィードバック型加工システム⁵⁻¹⁰⁾が成膜と剥離を利用した加工方法として興味深い．図5-16のように，機上で測定した工作物の形状をフィードバックして加工し，目的の形状に近づけるというシステムである．切削，研削，研磨といった除去加工を用いた従来のシステムと大きく異なる点は，放電による付着加工を行う点である．付着加工と除去加工を使い分けることによって，図5-17(b)のように既存の除去加工のみからなる加工システムに比べて加工時間の短縮を図ることができる．図5-18は形状フィードバック加工ではないが，切削痕の上に放電付着加工を施し，それをさらに放電除去加工によって平坦化したものである．放電による付着・除去加工技術，機上測定技術などを用いることによって図5-19のような

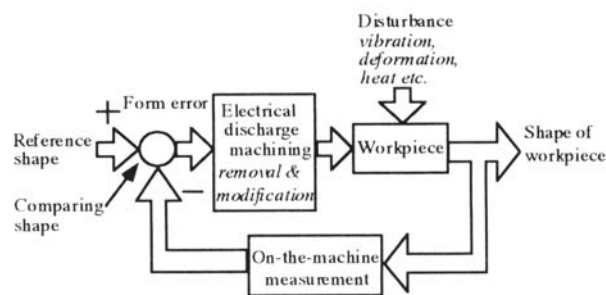


Fig. 5-16 Illustration of shape-feedback system⁵⁻¹⁰⁾

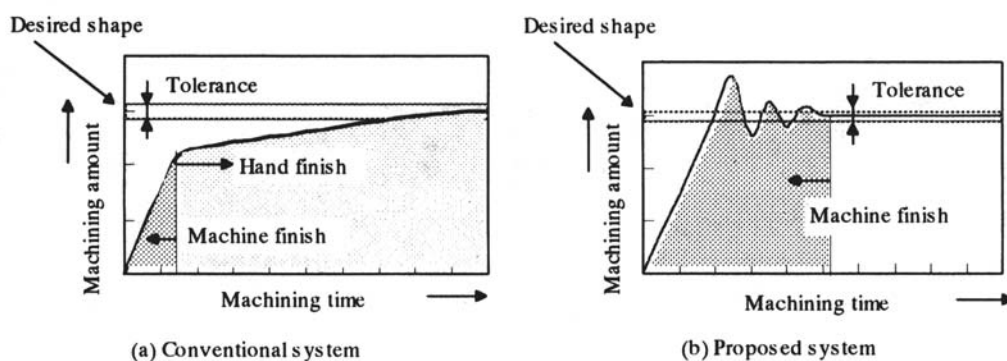


Fig. 5-17 Comparison of a conventional system and the shape feedback one.⁵⁻¹⁰⁾

形状フィードバック加工がなされている。

この加工技術を利用した研削砥石の機上再生^{5-11) ~ 5-13)}が砂田らによって報告されている。彼らは放電付着加工時に砥粒を混合した圧粉体電極を用いて堆積層中へ砥粒を共析させ(図5-20)、その膜による研削加工を行っている(図5-21)。また、図5-22のような砥石の形状フィードバック修正(砥石の機上再生と考えられる)を検討するために、機上で再生した砥石による評価を行い、新規砥石と性能が大きく変わらないという結果を得ている(図5-23)。

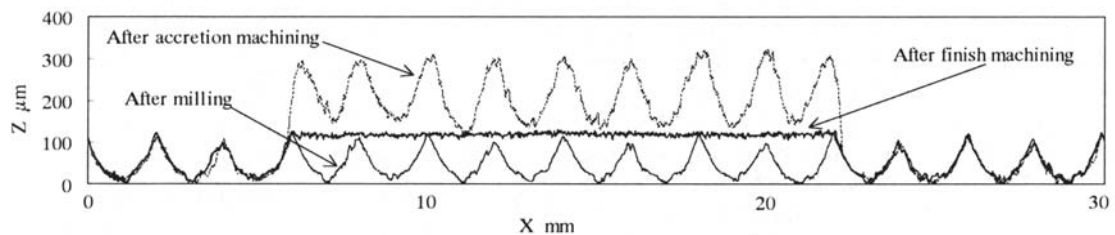


Fig. 5-18 removing and adhering process by electrodischarge⁵⁻¹⁰⁾

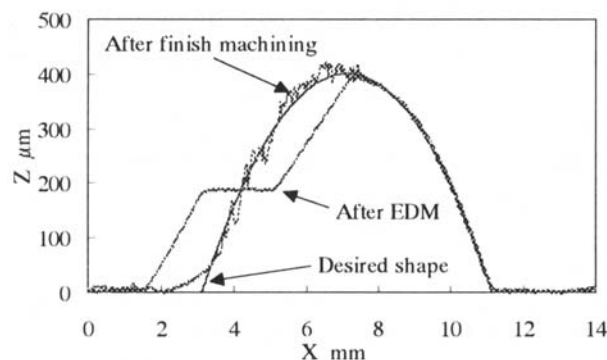


Fig. 5-19 Shape compensation machining by the shape feedback process⁵⁻¹⁰⁾

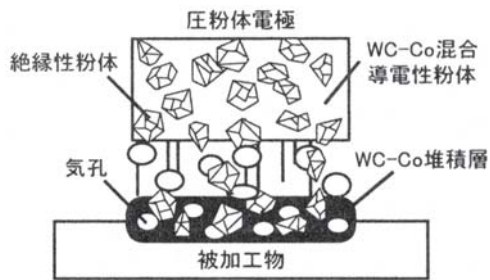


Fig. 5-20 Grinding stone making process by electrodischarge in EDM solution⁵⁻¹¹⁾

評価砥石 砥石台金材質:SKD11	砥粒含有量
①砥粒無し	なし
②#150 GC 砥粒入り	6vol%
③#400 GC 砥粒入り	10vol%

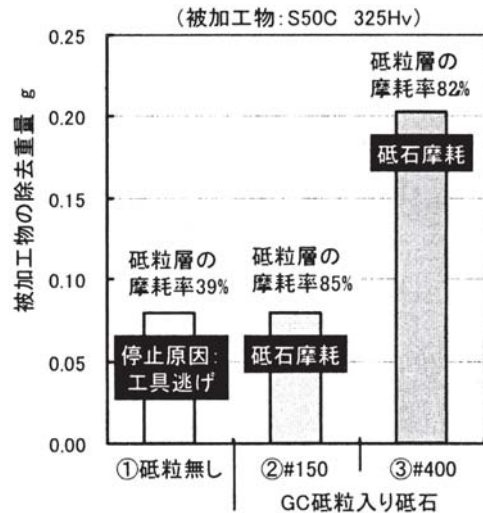


Fig. 5-21 Grinding performance⁵⁻¹²⁾

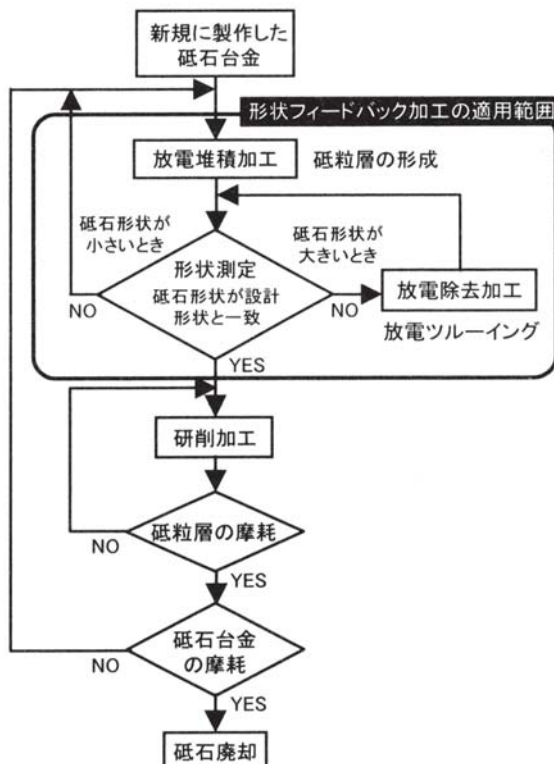


Fig. 5-22 Recycle flow chart⁵⁻¹³⁾

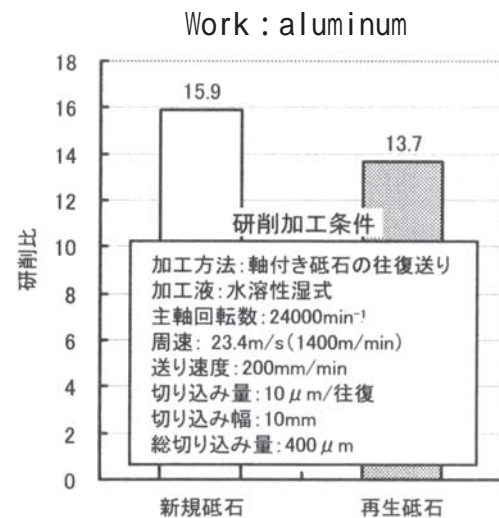


Fig. 5-23 performance comparison of a new stone and Recycled one⁵⁻¹³⁾

このように，放電加工はすでに切削工具へのコーティングとして実用化され，また研削砥石の機上形状修正方法として用いられようとしており，切削工具の機上再生への適用は十分可能であるといえる．

5.2.4.(c) 紫外線硬化樹脂による成膜

成膜の速さという点では紫外線硬化樹脂も有力だろう．ラピッドプロトタイピングの発展にともない様々な特性を有した紫外線硬化樹脂が開発されている^{5-14) ~ 5-16)}．しかし樹脂単体では機械的強度が切削工具に用いるには余りにもかけ離れており，砥粒加工工具の結合剤などへの利用は期待できるが，切削加工への適用はプラスチックなどの一部の加工に限定されるであろう．

5.2.4. (d) 陽極火花放電法による成膜⁵⁻¹⁷⁾

ある金属を陽極として酸化し、さらに酸化膜の成長による絶縁を破壊するほどの高電圧を与えて火花放電をおこしながら酸化物層を成膜する方法であり、ディップソール(株)による「セラメッキ」処理という名称で知られている。陽極火花放電膜の母材となる金属種はアルミニウム、マグネシウム、チタン、ジルコニウムなどに限られる。いわゆる陽極酸化膜との相違点は、図5-24のように皮膜形成成分が浴中から供給される点である。シリケートもしくはアルミナを基本浴成分とし、浴中に表5-2のような無機質の塩を混合することによってその無機質の酸化物として共析する。皮膜の特徴を以下に記す。

- (1) 用途に応じてシリケートあるいはモリブデン-タングステン系などの皮膜種類が選択できる。
- (2) 高温から低温にいたるまで皮膜の密着性は極めて良好である。
- (3) 比較的フレキシビリティのある皮膜なので折り曲げが可能である。
- (4) 皮膜厚さが自由に調節できる。
- (5) 耐食性、耐候性に優れている。
- (6) 多孔質である。
- (7) 複雑な形状のものでも容易に加工できる。

陽極火花放電膜の工具への適用としては、影山らが研磨用固定砥粒工具の作成に用いた例⁵⁻¹⁸⁾がある。彼らは SiO_2 系の膜を形成した工具(図5-25)によりシリコンの研磨加工(図5-26)を、 SiO_2 系の膜に CeO_2 を共析させた工具(図5-27)により石英ガラスの研磨加工(図5-28)を行っている。その膜の特性を表5-3に示す。

Table 5-2 materials list for coating ⁵⁻¹⁷⁾

主成分	添加無機物例
SiO_2 系	SiO_2 , Mo, Fe, Fe-P, Cr, Co, Ni, V, etc
Al_2O_3 系	P, B, Sd, Mo-P, Mn-B, Mo-P, Mo-W, etc

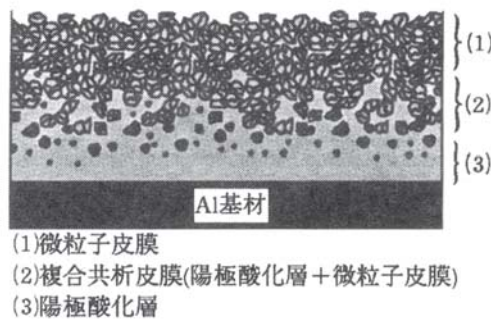


Fig. 5-24 Illustration of anodic spark deposited layer⁵⁻¹⁸⁾

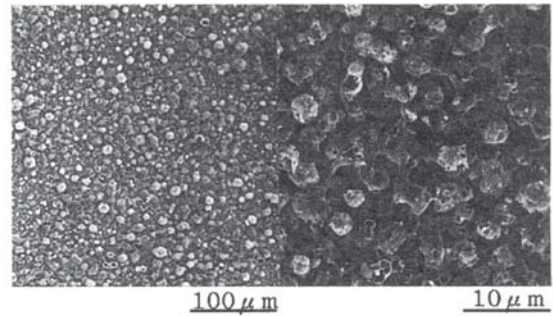


Fig. 5-25 deposited SiO₂ layer⁵⁻¹⁸⁾

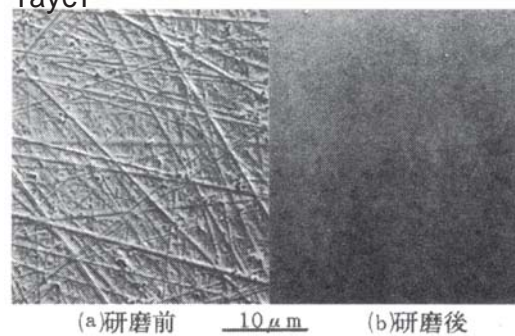


Fig. 5-26 Si wafer surface polished by deposited abrasives⁵⁻¹⁸⁾

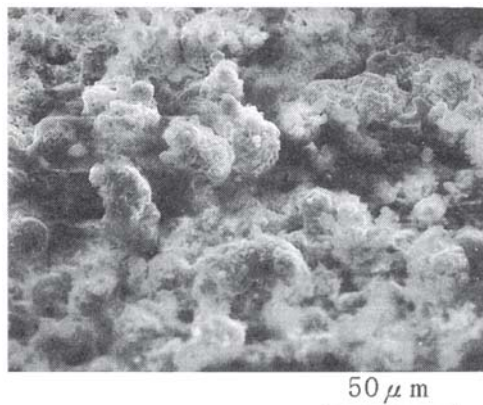


Fig. 5-27 deposited CeO₂ layer⁵⁻¹⁸⁾

...ing its first appearances on
...ly reliable red laser diodes w
...e MiniDisc, the new stand
...ording, requires, for portable
..., both high output and l
... of laser diodes with the 780
...omplete lineup of laser diod

Fig. 5-28 polished Crystal glass⁵⁻¹⁸⁾

Table 5-3 anodic spark deposited layer specifications⁵⁻¹⁸⁾

皮膜材種	SiO ₂	CeO ₂ ・SiO ₂		
皮膜の組成 (wt%)	SiO ₂ :89	SiO ₂ :72 CeO ₂ :22	SiO ₂ :60 CeO ₂ :35	SiO ₂ :50 CeO ₂ :44
皮膜の厚さ (μm)	30	50		
表面あらさRa (μm)	3.8	6.5	6.3	6.3
ビッカース硬度 (Hv)	—	88	96	96
基盤の厚さ (μm)	100			

アルミニウム酸化物(アルミナ)の焼結体については、すでにセラミックス工具として切削に用いられているが、陽極火花放電膜は焼結体とは特性が異なり、また膜自体の機械的性質が明らかになっていないため切削工具として用いた場合の特性については未知である。

5.3 機上工具コーティングのための複合めっき膜の検討

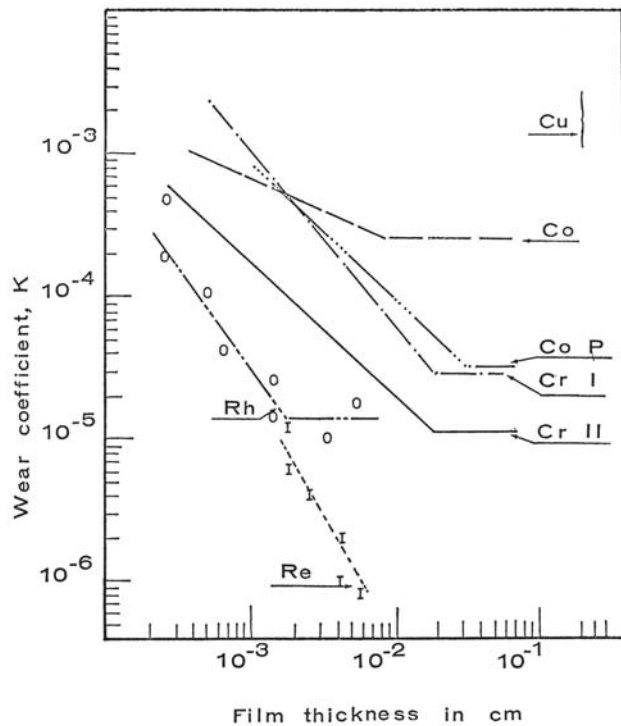
5.3.1 マトリックスの検討

本研究では工具膜の形成と剥離という形で機上再生を行うことを目的としており、最終的には複合めっきの採用を行うことにした。

トライボロジーに関するめっきの利用法としては、

- ・耐摩耗性膜としての硬質金属膜
- ・固体潤滑膜としての軟質金属膜

という2通りの考え方ができる。本研究ではめっき膜による切削加工を行おうとしていることから、基本的には前者の観点からめっき膜を捉えることになるだろう。硬質金属の代表的なものとしてNi-P、Ni、Cr、Ta、Mo、Wが挙げられ、なかでもCrめっき(電着)、Ni-Pめっき(無電解)が高硬度、耐食性に優れることから広く実用されている⁵⁻¹⁹⁾。しかし、めっき膜の耐摩耗性については「極めて長時間を費やして決定した摩耗データであっても、試験機・試験方法によって摩耗量に差が出てきて、実際に適用した場合を試験機による結果からの的確に予測することは困難である。めっき皮膜の場合には、さらに密着性の問題、厚さの影響、下地および皮膜材料の物性の影響などが加わるので事情はさらに複雑となる」⁵⁻²⁰⁾ので、これまで報告されている耐摩耗性のデータは参考にはなるが、切削工具として考えた場合にどのめっき膜が優れているかは一概にはいえない。したがって、実際の使用による摩耗量を測定するのが確実な方法であろう。



$$K = \frac{3p\Delta V}{L\Delta x}$$

p : 軟質金属の硬さ

L : 荷重

Δx : 摩擦距離

ΔV : 摩耗量

相手材 : 52,100 軸受鋼 ,

硬さ 800 [kgf/mm²]

すべり速度 : 6 [cm/s]

荷重 : 1 [kgf/mm²]

非潤滑

Fig. 5-29 Relation between plating thickness and wear resistance⁵⁻²¹⁾

めっきの膜厚と耐摩耗性に関して、J. M. Georges らにより、軟質金属上の硬質めっき膜は図 5-29 のように、ある臨界厚さを超えない領域においては膜厚の減少と共に耐摩耗性が低下する⁵⁻²¹⁾と報告されている。これは軟質金属(Cu, Ni)上の硬質めっき(Cr めっき, Ni-P めっき等)の場合であり、膜厚の減少と共に硬さや弾性係数などの機械的特性が母材の軟質金属に近づいていくためであると考えられる。つまりこれから分かることは、硬質めっき膜に十分なめっき厚さが無い場合(< 数 100μm のオーダー)には、めっき膜のみでなく母材の機械的特性も十分考慮する必要があるということである。したがって、工具母材として硬い材料を用いることは、切削抵抗を支える構造体としての役割だけでなく、めっき膜の耐摩耗性を補うと考えられる。

複合めっきは「金属被膜中に微粒子を共析させることによって被膜の性質が飛躍的に向上し、金属や微粒子が単独では持ち得ない特性が発現するのが特徴」⁵⁻²²⁾である。複合めっき膜の特性を決定するのは、マトリックス金属と共析粒子との組み合わせである。マトリックス金属としては単体だけでなく合金の析出も可能であるので、マトリックス金属の成分組成比も膜の性能を決定する要素となる。共析粒子としては金属や無機物の単体、酸化物、炭化物、窒化物、ホウ化物、フッ化物、硫酸

Table 5-4 Combination example of matrix and dispersed phase³⁻⁶⁾

Matrix	Dispersed phase
Ni	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂ , ThO ₂ , SiO ₂ , CeO ₂ , BeO ₂ , MgO, CdO, Diamond, SiC, TiC, WC, VC, ZrC, TaC, Cr ₃ C ₂ , B ₄ C, BN (α, β), ZrB ₂ , TiN, Si ₃ N ₄ , WSi ₂ , PTFE, (CF) _n , Graphite, MoS ₂ , WS ₂ , CaF ₂ , BaSO ₄ , SrSO ₄ , ZnS, CdS, TiH ₂ , Cr, Mo, Ti, Ni, Fe, W, V, Ta, Glass, Kaoline, Microcapsule
Cu	Al ₂ O ₃ (α, γ), TiO ₂ , ZrO ₂ , SiO ₂ , CeO ₂ , SiC, TiC, WC, ZrC, NbC, B ₄ C, BN, Cr ₃ B ₂ , PTFE, (CF) _n , Graphite, MoS ₂ , WS ₂ , BaSO ₄ , SrSO ₄
Co	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , Cr ₃ C ₂ , WC, TaC, ZrB ₂ , BN, Cr ₃ B ₂ , Diamond
Fe	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , SiC, WC, B, PTFE, MoS ₂
Cr	Al ₂ O ₃ , CeO ₂ , ZrO ₂ , TiO ₂ , SiO ₂ , UO ₂ , SiC, WC, ZrB ₂ , TiB ₂
Au	Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₂ , ThO ₂ , CeO ₂ , TiC, WC, Cr ₃ B ₂
Ag	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , BeO, SiC, BN, MoS ₂ , Corundum Δ , Graphite
Zn	ZrO ₂ , SiO ₂ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , SiC, TiC, Cr ₃ C ₂ , Al
Cd	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , B ₄ C, Corundum
Pb	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , TiC, BC, Si, Sb, Corundum
Sn	Corundum
Ni-Co	Al ₂ O ₃ , SiC, Cr ₃ C ₂ , BN
Ni-Fe	Al ₂ O ₃ , Eu ₂ O ₃ , SiC, Cr ₃ C ₂ , BN
Ni-Mn	Al ₂ O ₃ , SiC, Cr ₃ C ₂ , BN
Pb-Sn	TiO ₂
Ni-P	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂ , SiC, Cr ₃ C ₂ , B ₄ C, Diamond, PTFE, BN, CaF ₂
Ni-B	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , SiC, Cr ₃ C ₂ , Diamond
Co-B	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , BN

Table 5-5 Characteristic of dispersed phase³⁻⁶⁾

Dispersed phase	Density (g/cm ³)	Hardness (Hv)	Melting point (°C) (or decomposition point)
SiC	3.2	2500	2480
B ₄ C	2.5	2500	2750
Cr ₂₃ C ₆	6.7	2300	1890
TaC/Ta ₂ C	14.65	2500	ca. 3000
TiC	4.9	2500	2100
WC	15.6	ca. 2300	2870
ZrC	6.5	—	3100
Al ₂ O ₃	3.4	ca. 2300	2050
Cr ₂ O ₃	5.0	ca. 2300	2000
Fe ₂ O ₃	5.9	ca. 1200	1565
SiO ₂	2.65	ca. 1300	1710
ZrO ₂	5.5	ca. 1600	2690
Cr ₃ B ₂	6.2	ca. 1800	1550
TaB ₂	12.4	ca. 1800	3150
TiB/TiB ₂	4.5	ca. 1800	2900
BN	2.0	ca. 25	2680
Si ₃ N ₄	3.4	—	1900
TaSi ₂	12.4	—	3150
Si	2.4	ca. 1300	1410
C	2.2	ca. 10	2678

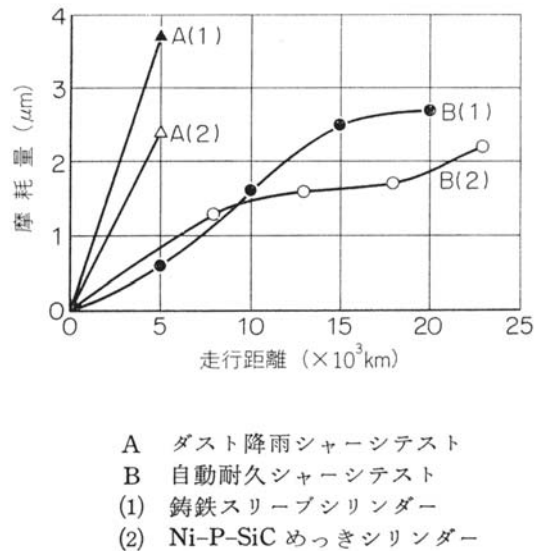


Fig. 5-30 wear comparison of engine cylinder sleeve ³⁻⁷⁾

塩，ケイ酸塩，燐酸塩，ジルコン酸塩，チタン酸塩，硫化物，有機高分子(PTFE，フェノール樹脂，メラミン樹脂，マイクロカプセルなど)など，原理的には，めっき浴の中で安定な粒子(不溶性粒子，難溶性粒子)は，すべて用いることができる⁵⁻²²⁾．また，共析させる粒子も1種類とは限らず，場合によっては2種類以上の共析も可能である⁵⁻²³⁾．したがって，共析粒子に関する設計パラメータとして，粒子材料，粒子形状(球状，破砕片，ウイスカなど)，粒子サイズ，共析量といった要素があげられる．複合めっきによって得られる具体的なマトリックス - 微粒子の組み合わせを表5-4に示す．

切削工具としてみた場合に重要なのが耐摩耗性であるが，微粒子の共析によってめっき金属の耐摩耗性を補うことができる．共析粒子の耐摩耗性への効果として，第一はマトリックス金属に比較して共析粒子が高い耐摩耗性を有すること，さらにマトリックスはある程度の柔軟性を保持し，めっき皮膜は柔軟性と靱性とを兼ね備えることが重要である⁵⁻²⁴⁾．表5-5に耐摩耗性および分散強化合金めっきに用いられている分散材を示す．

複合めっきによる耐摩耗性膜としての実用例として、石森らによるエンジンシリンダ内面へのNi-P-SiC複合めっき⁵⁻²⁵⁾がある。マトリックスとしてNi-P合金を用いているが、Niではマトリックスの硬さが足りず、摩擦時にSiCが埋め込まれてしまって共析の効果が得られなかったと報告している。図5-30のように従来の鑄鉄スリーブと比較して優れた結果が得られている。

このように複合めっき膜の膜質は自由度に富んでいるため、切削工具として用いた場合には様々な被削材や加工条件に対応できる可能性がある。たとえば、硬い被削材に対しては硬い微粒子を、凝着しやすい被削材に対しては凝着しにくい微粒子をそれぞれ共析させることで対応することができると考えられる。

切削工具使用時における摩擦条件の大きな特徴は、

- ・ 数 100 という高温環境
- ・ 相手材が清浄な金属面

という点であり、特に後者は他の摩擦環境にはあまり見られない特徴である。そのため切削工具の摩擦条件に近い条件での摩擦試験の例があまりなく、どのような膜を用いればいいかという指針が少ないので、本研究ではたたき台としてエンジンシリンダの例⁵⁻²⁵⁾に倣ってNi-P-SiCを切削工具膜として用いることとした。

5.3.2 めっき前処理に関する検討

めっきは金属を析出させる処理であるから、母材とめっき膜との界面で金属結合を形成することによって密着している。しかし、図5-31のように、一般的に金属の表面には油脂や酸化物が存在しているため、そのままでは母材とめっきとの界面に密着力(すなわち金属結合)が発生しない。したがって、めっき前処理の目的は母材の清浄な金属面を露出させることにある。一般的な前処理方法を表5-6に示すが、金属によって反応性が異なるため母材に応じて適当な前処理方法を選択する必要がある。また、本研究では機上再生を目的とするため、時間的な制約から前処理も短時間で行われるものを選択しなければならない。

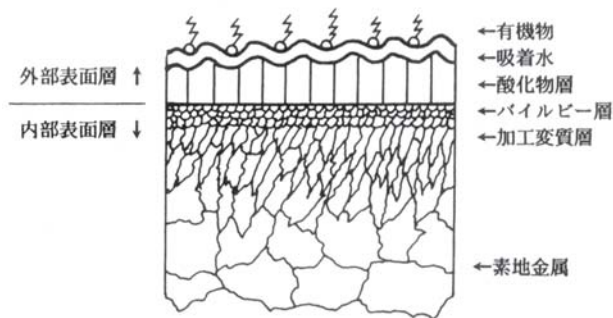


Fig. 5-31 image of metal surface condition under atmosphere³⁻⁸⁾

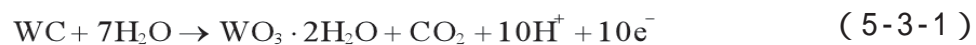
Table 5-6 Pretreatments for plating³⁻⁸⁾

前 処 理 工 程	目 的	備 考
(1)脱脂(浸漬、+/-電解、高速電流反転PR、超音波併用)	有機化合物の除去	
(2)酸洗(浸漬、+/-電解)、ブラスト、エッチング	酸化物除去、スマット除去 表面の粗化	水素脆性 (P), (C)
(3)活性化; ジンケート (Zn) 処理 触媒付与 (Sn, Pd) 処理 逆電解処理、高速電流反転	Zn結晶核の生成 Pd結晶核の生成 酸化物除去、素材の溶解	Al, Mg (P), (C) Crめっき
(4)ストライクめっき; Ni, Cu等	表面清浄、酸化物還元作用、拡散防止、酸素の捕捉、接着剤の役目	難めっき 素材
Fe系素材: (1)→(2)、Cu系素材: (1)→(2)→(4)、 SUS系素材: (1)→(2)→(3)or(4) Al, Mg系素材: (1)→(2)→(3)→(4)、 セラミックス (C) 系素材: (1)→(2)→(3)、 プラスチック (P) 系素材: (1)→(2)→(3)		

前節で述べたように，薄いめっき膜の耐摩耗性には母材の機械的特性も影響を及ぼし，硬い母材を用いた方が耐摩耗性が向上すると考えられるので，本研究ではめっき工具の母材として超硬合金を用いることにした．ただし，めっき膜との密着性が確保でき，ある程度硬い材料であれば超硬合金である必要はなく，省資源という観点からも他の代替材料を探すことは有意義であるといえるだろう．

切削工具用超硬はJIS B 4104によりK種，M種，P種の3種類が定められている．一般的に超硬といえはWC-Coであるが，鋼の加工に用いられるP種超硬にはWCとCoだけでなくTiC等が添加されている．これには，連続切屑による切削温度の上昇に対して，TiC等の添加が超硬の耐酸化性を向上させることで摩耗を抑制するという目的がある⁵⁻²⁷⁾．TiC等の添加による耐酸化性がめっき前処理の障害になるのではないかと考え，本研究では基本的にK種超硬を工具の母材として用いた．

超硬へのめっき前処理を考える上で，超硬表面の酸化物層の挙動について知っておく必要があるが，文献⁵⁻²⁸⁾によるとWC-Coのアノード反応は酸性溶液中で，



となり，中性およびアルカリ性溶液中で，



特に強アルカリ性溶液中で，



となる．すなわち，Coは酸性，中性，アルカリ性溶液中で溶解するが，WCは酸性溶液中で $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の不働態膜を形成する．

そこで、酸化膜除去と高速処理の二点を考慮して、NaOHのアノード電解による酸化膜の除去を検討した。(5-3-1)～(5-3-6)式から、超硬は中性およびアルカリ性溶液中でアノード電解することにより溶解するため、アルカリ性溶液中でのアノード電解で清浄な金属面が得られるのではないかと考えられるからである。

さらに、酸化膜を還元しながらNiを析出させるNi Strikeめっきを併用することで密着性を確保することを考えた。Ni Strikeめっきはステンレスなど、表面の酸化膜が強固で密着性の得難い金属へのめっきの前処理として一般的に使用されている。

このように、超硬へのめっき前処理としては、NaOHアノード電解とNi Strikeめっきを行うこととした。めっきの密着不良についてはJIS H8504を参考に、テープによる簡易剥離テストにて確認したが、密着性の定量的な評価は行っていない。そのため、密着性の強弱は実際の切削加工を行って加工に耐えうるか否かによって判断した。

5.3.3 硬質Ni-P めっき膜の設計

石森らの報告⁵⁻²⁵⁾を参考に、Ni-P-SiC複合めっきの試作を行うことに決めたが、まずはPの添加量について検討を行った。本研究では将来的にめっきを高速化することも視野に入れているため、Niめっき浴の基本組成は千葉らによる高速複合めっき⁵⁻²⁹⁾の浴組成と同一のものとした。この浴は一般的なスルファミン酸Niめっき浴であり、浴組成は表5-7の通りである。また、Ni-P合金化のための添加剤としては亜りん酸を用いた。これは竹内らによるスルファミン酸浴からのNi-P-SiC複合めっき⁵⁻³⁰⁾を参考にした。Ni-P合金めっきはNi金属結晶中にP原子が固溶析出する⁵⁻³¹⁾ことで結晶格子のひずみが大きくなり硬くなるといわれている。

そこで、亜りん酸添加の効果を確認するため、亜りん酸の添加量によるめっき膜硬さの変化を測定する実験を行った。めっき用電源として(株)中央製作所製 直流電源装置(PMD1-120-200)を用いた(図5-32)。めっきの母材としてP種超硬チップ(住友電気工業(株)製 TPGN160304-ST20E)を用い、図5-33のようにマスキングテープ(住友スリーエム(株)製 No.470)によりマスキングを行った。めっき条件はカソード電流密度 15A/dm^2 、膜厚約 $100\mu\text{m}$ とし、めっき膜の表面を鏡面研磨してビッカース硬さを測定した。測定には松沢精機(株)製デジタル式微小硬度計DMH-2を用いた。試験力は 0.5kgf (4.9N) とし、試験力の保持時間は 10s とした。硬さ試験方法は JIS Z 2244 に準じた。

Table. 5-7 Sulfamate nickel bath

浴組成	$\text{Ni}(\text{H}_2\text{NSO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$: 450 [g/L]
	NiCl_2 : 30 [g/L]
	H_3BO_3 : 30 [g/L]
浴温	60 [°C]



Fig. 5-32 programmable power supply (Chuo seisakusho Co. Ltd. PMD1-120-200)

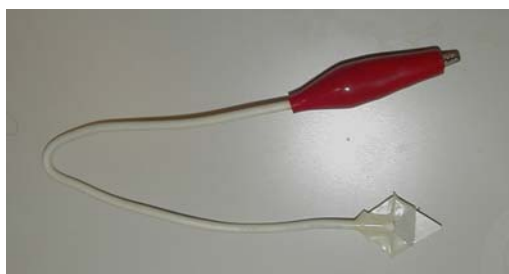


Fig. 5-33 Tool insert masked with tapes

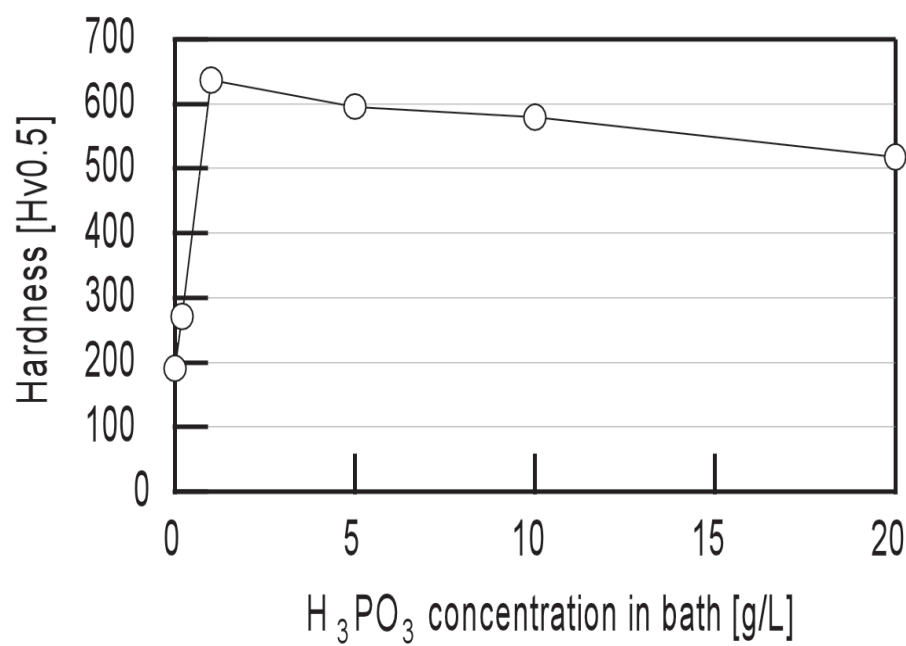


Fig. 5-34 Hardness of Ni-P plated alloy layer

測定結果を図 5-34 に示す．亜りん酸の添加量 0.2g/L で既に効果が現れ始めており，Ni めっきの硬さが 200HV 程度であるのに対し，Ni-P 合金めっきでは 600HV 程度まで硬さが増加した．0.2 ～ 5g/L の間に硬さのピークがあると予想されるが，竹内らの結果⁵⁻³⁰⁾にもあるようにこの付近の添加量では引っ張り電着応力が大きいためめっき膜にクラックや剥離が生じており，めっき膜として不適當であった．したがって複合めっき浴への亜りん酸添加量は，めっき操作による消費も考慮して 20g/L と決定した．

5.3.4 複合めっき膜による黄銅の切削加工

めっき膜自身の切れ刃としての機能は切削試験により確認する．まずは，市販の超硬チップ上にめっきを施した．使用した超硬チップの諸元は表 5-8 の通りである．Ni-P-SiC 複合めっきを施す前に NaOH アノード電解と Ni Strike めっきによる超硬への前処理を行った．各溶液の組成と電解条件を表 5-9 に，前処理装置を図 5-35，図 5-36 に示す．エンジンシリンダ内面に Ni-P-SiC 複合めっきを施した例⁵⁻²⁵⁾では，添加する SiC 粒子の粒径が大きいほど耐摩耗性が向上するが，相手材への攻撃性も増大するため 4 μ m 程度の粒径が適当だと報告されている．そのため，本研究ではそれよりも粒径の大きい GC 研磨剤 #2000 (南興セラミックス (株) 製・平均粒径 6.7 μ m) を用いた．Ni-P-SiC 複合めっき浴の組成とめっき条件

Table 5-8 Specifications of tool insert

型番	TPGN 160304 (HT i05T) 三菱マテリアル 製
超硬材種	K 01種
すくい角	0°
逃げ角	11°
コーナ半径	0.4 mm
チップブレーカ	なし

Table 5-9 Pretreatment conditions for Ni-P-SiC plating

NaOH アノード電解液	組成	NaOH : 5 [w t%] (室温)
	電解条件	電流密度 : 15 [A /dm ²] (アノード電解) 電解時間 : 10 [s] カソード : 銅板
NiStrike めっき浴	組成	NiCl ₂ ·6H ₂ O : 1 [mol/L] HCl : 1 [mol/L] (室温)
	めっき条件	電流密度 : 15 [A /dm ²] 電解時間 : 120 [s] アノード : ニッケル板

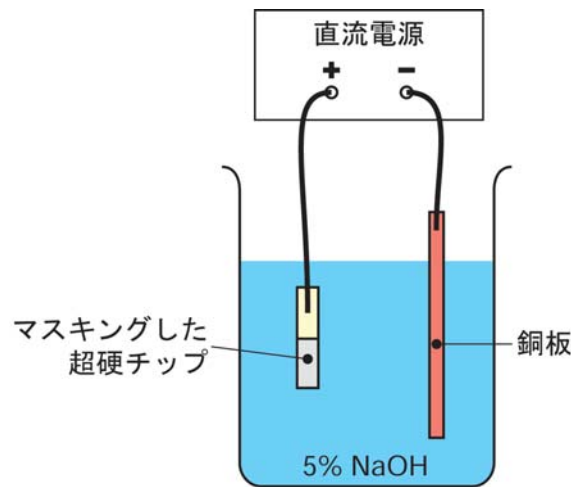


Fig. 5-35 Illustration of NaOH anodic electrolysis

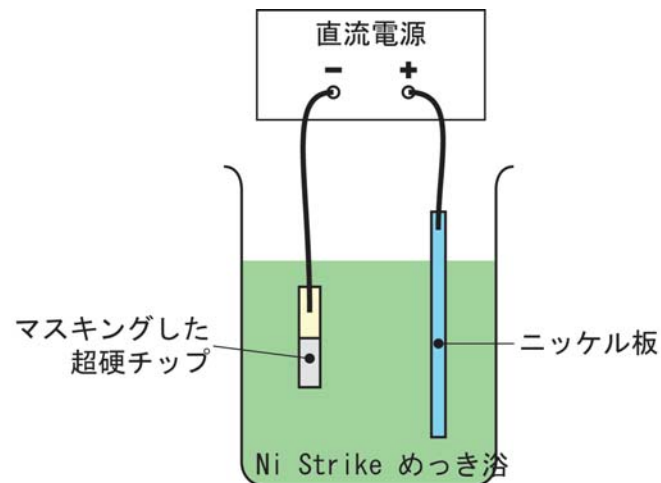


Fig. 5-36 Illustration of Ni Strike plating

Table 5-10 Condition of Ni-P-Si composite plating

めっき浴組成	Ni(H_2NSO_3) $_2$ ·4 H_2O : 450 [g/L]
	NiCl $_2$: 30 [g/L]
	H $_3$ PO $_3$: 20 [g/L]
	H $_3$ BO $_3$: 30 [g/L]
	SiC (GC#2000) : 300 [g/L]
浴温	60 [°C]
カソード電流密度	30 [A/dm 2]
めっき時間	180 [s]
めっき厚さ	約 8 [μm]

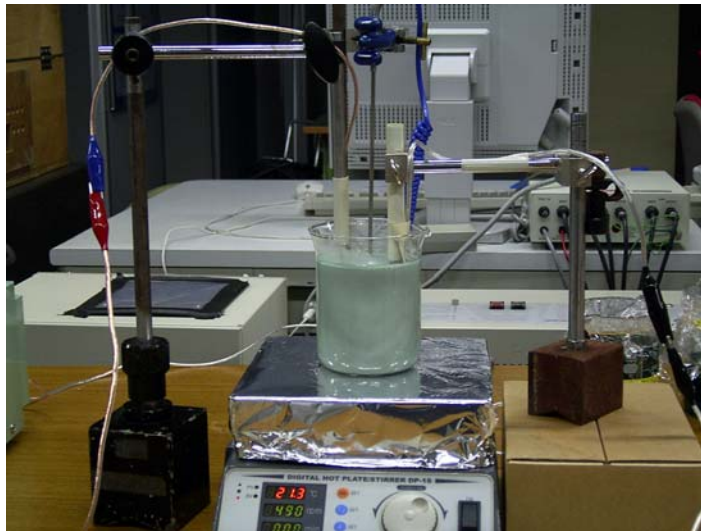


Fig. 5-37 Photo of Ni-P-SiC composite plating

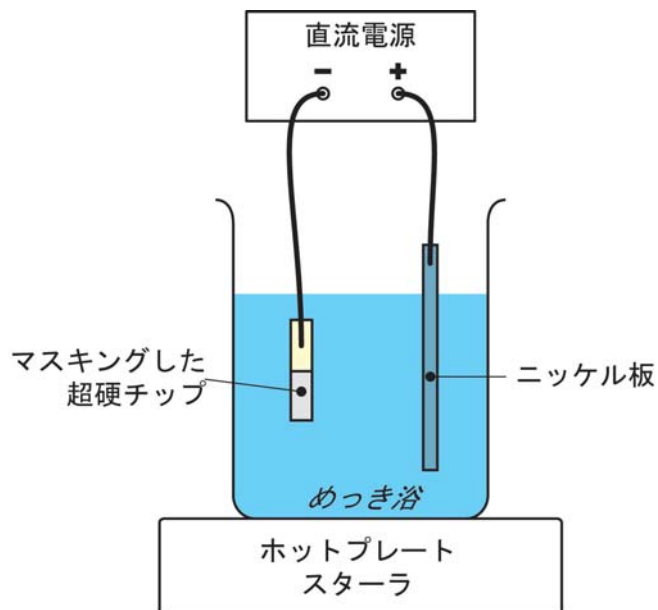
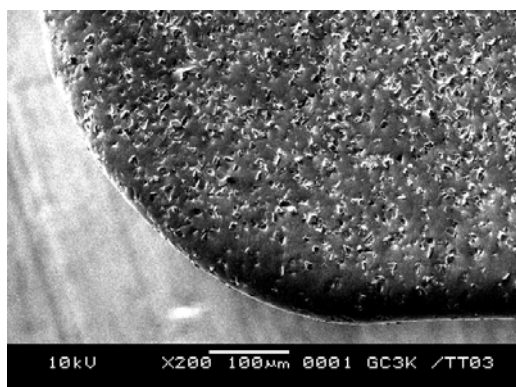


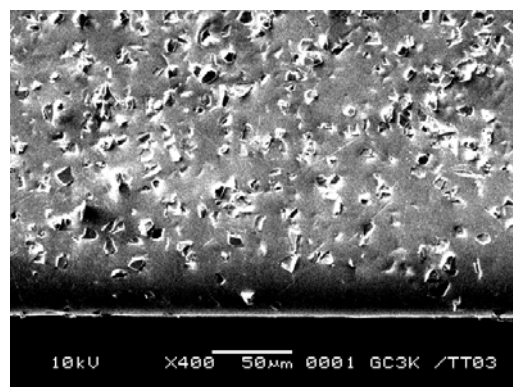
Fig. 5-38 Illustration of Fig. 5-37

を表 5-10 に示す．浴の攪拌と保温はホットプレートスターラーによって行った．実験装置の写真を図 5-37 に，概略図を図 5-38 に示す．

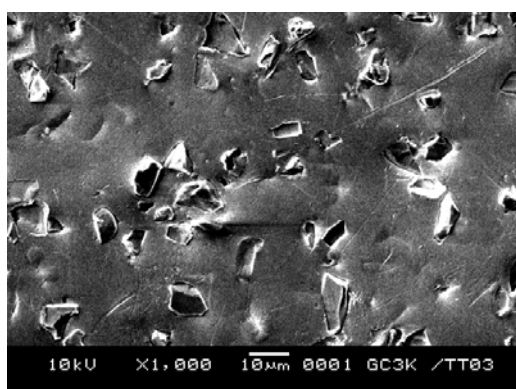
図 5-39 にめっき後のチップ表面の SEM 像を示す．倍率は異なるが図 5-39(b)とめっき前の超硬(図 5-40)とを比較すると，めっき前の超硬チップの切れ刃稜の丸



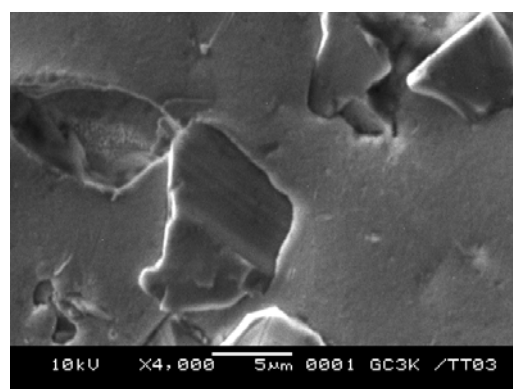
(a) X200 (nose)



(b) X400 (edge)



(c) X1000



(d) X4000

Fig. 5-39 めっき後の表面 SEM 像

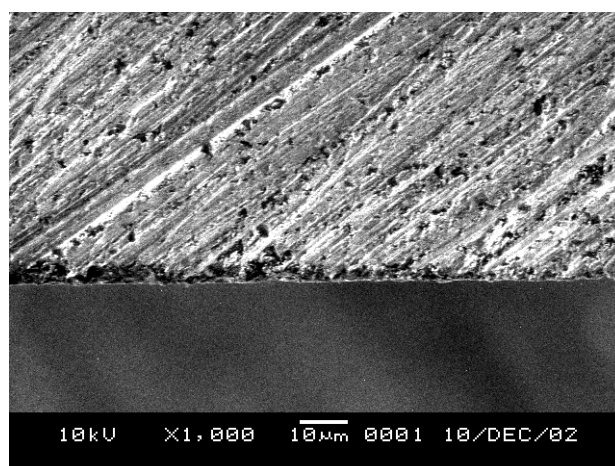


Fig. 5-40 Original edge before plating

みは半径 $2 \sim 5\mu\text{m}$ であるが、 $8\mu\text{m}$ 程度のめっきを施すと切れ刃稜の丸みは半径 $30\mu\text{m}$ 程度に若干大きくなる。なお、前処理として NaOH アノード電解もしくは Ni Strike めっきを行わなければ、先述したテープによる簡易剥離テストでも剥離してしまうほど密着力が弱かった。したがって、前処理の必要性と行った処理の有効性が確認された。

この Ni-P-SiC 複合めっき膜が持つ切削工具としての能力を評価するために、まずは軟質材料である黄銅を被削材として切削実験を行った。工作機械はオークマ (株) 製 LS 旋盤を用いた (図 5-41)。切削加工条件を表 5-11 に示す。図 5-42 のように正常に加工を行うことができた。非めっき超硬チップと比べて切れ刃稜の丸みが大きいためか、図 5-43 のように非めっき超硬チップと比較して切り屑の形態が若干異なっていた。図 5-44、図 5-45 のように切削後の切れ刃には凝着物が残っているが、凝着物の外れた部分からはほとんど摩耗していないめっき膜が見える。

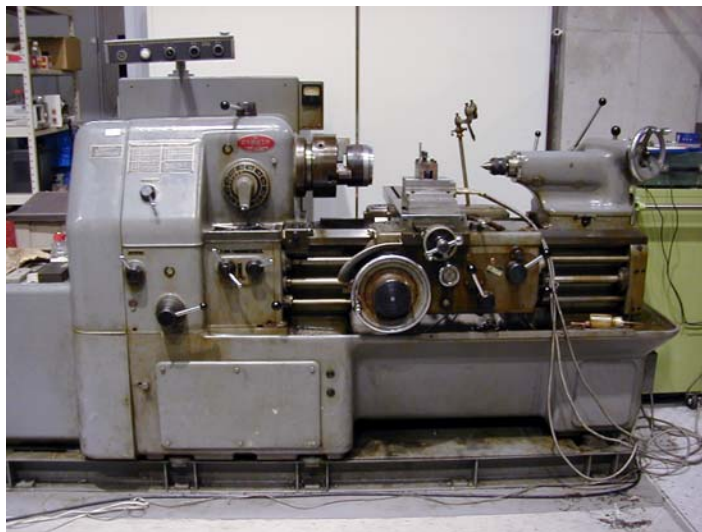


Fig. 5-41 Okuma LS-450 Lathe

Table 5-11 Cutting experiment of brass with Ni-P-SiC plated insert

被削材	黄銅 $\phi 12$ [mm] ビッカース硬さ : 115 [HV1]
工具	Ni-P-SiC 複合めっき工具 すくい角 : 0° , 逃げ角 : 11°
切削条件	切削速度 : 23 [m / m in] (最内周) 46 [m / m in] (最外周) 切り込み : 3 [mm] 送り : 0.1 [mm / rev] 切削時間 : 15 [s] ドライカット

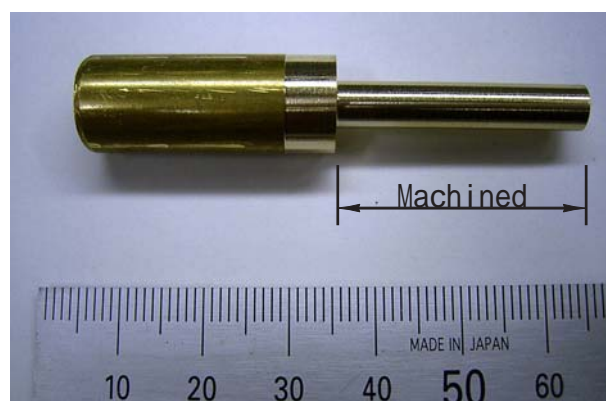


Fig. 5-42 Machined brass shaft



(a) Ni-P-SiC plated tool



(b) non-plated

Fig. 5-43 Chips by plated tool and non-plated one

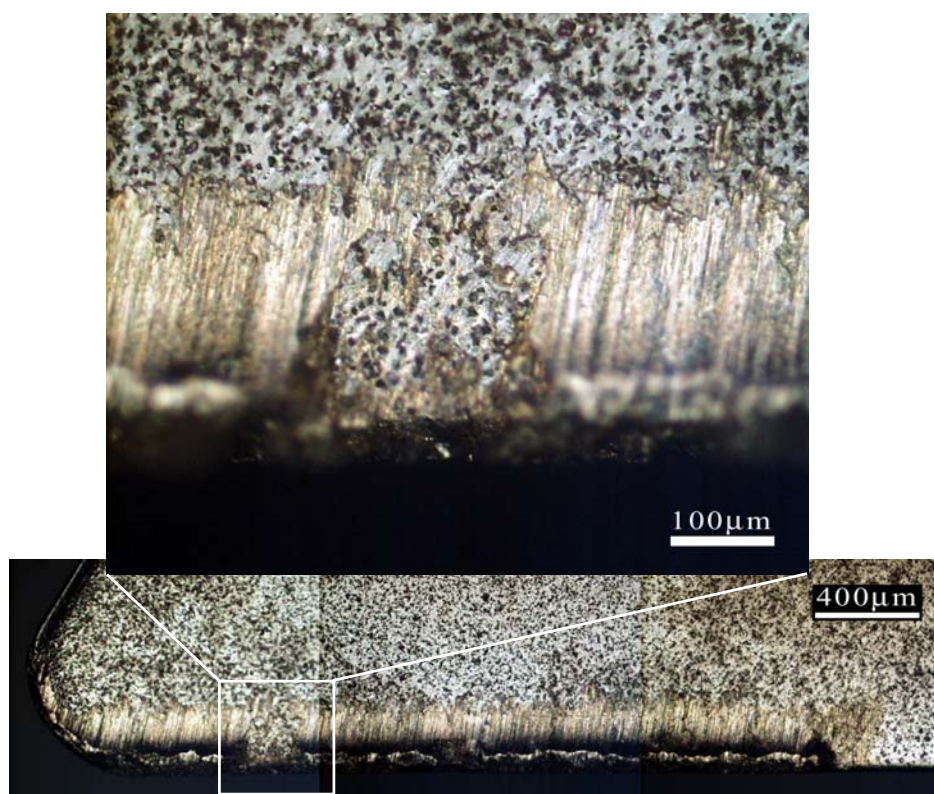


Fig. 5-44 Rake face of plated insert after experiment

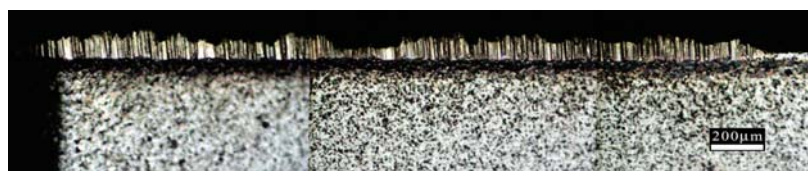


Fig. 5-45 Flank face of plated insert after experiment



Fig. 5-46 Rake face of non-plated insert after experiment

このとき，すくい面，逃げ面ともに密着不良による異常な剥離や摩耗はみられなかった．したがって，Ni-P-SiC 複合めっき膜は少なくとも 15 秒程度の黄銅の切削加工は耐え得るといえる．

5.3.5 Ni-P-SiC 複合めっき膜による S45C の切削加工

前節で述べたように黄銅の被削材に対しては，複合めっき膜によって問題なく切削加工をすることができた．次に，より硬く，一般的な材料である S45C を被削材として切削実験を行った．

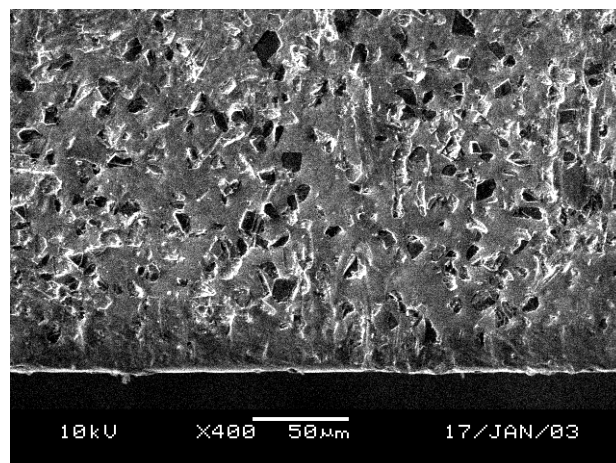
まず，表 5-12 と表 5-13 条件で複合めっきを行い図 5-47 のめっき膜を得た．外觀上は図 5-39 の従前の実験で使用した工具と大きな違いはないことがわかる．この膜を図 5-48 のようにして加工実験により評価した．実験条件は表 5-14 になる．低速による加工条件のため構成刃先が凝着するが，その構成刃先を除去すると刃先にはめっき膜が，すくい面(図 5-49)，逃げ面(図 5-50)とも剥離せずに残っていた．したがって，めっき膜によって S45C の切削が行われたとみなせる．このときのめっき切れ刃の逃げ面摩耗幅は，100 μ m 程度であった(図 5-50)．この結果より，15 秒程度の加工時間であれば鋼材の加工は行えることが分かった．

Table 5-12 Pre-treatment for layer of S45C cutting

NaOH アノード電解液	組成	NaOH : 5 [wt %] (室温)
	電解条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] (アノード電解) 電解時間 : 60 [s] カソード : 銅板
NiStrike めっき浴	組成	NiCl ₂ ·6H ₂ O : 1 [mol/L] HCl : 1 [mol/L] (室温)
	めっき条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] 電解時間 : 60 [s] アノード : ニッケル板

Table 5-13 Ni-P-SiC plating condition for S45C cutting

めっき浴組成	Ni(H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O : 450 [g/L]
	NiCl ₂ : 30 [g/L]
	H ₃ PO ₃ : 20 [g/L]
	H ₃ BO ₃ : 30 [g/L]
	SiC (GC#2000) : 400 [g/L]
浴温	60 [°C]
カソード電流密度	40 [A/dm ²]
めっき時間	60 [s]
めっき厚さ	約 6 [μm]



← 切れ刃

Fig. 5-47 SEM image of rake face before S45C cutting

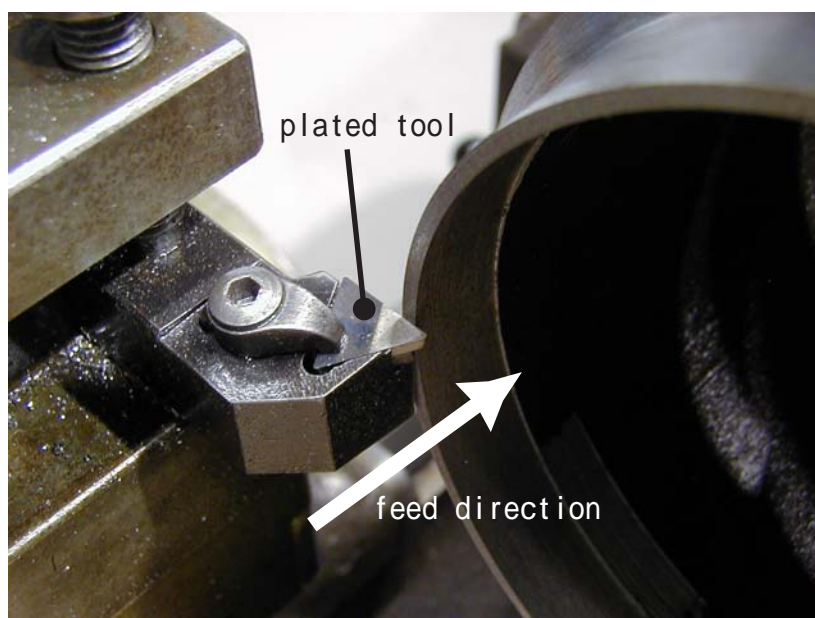


Fig. 5-48 orthogonal cutting experiment by cutting S45C pipe

Table 5-14 condition of cutting S45C with Ni-P-SiC plated insert

被削材	S45C : $\phi 139$ [mm], $t 2.5$ [mm]
工具	Ni-P-SiC複合めっき工具 すくい角 : 0° , 逃げ角 : 11°
切削条件	切削速度 : 10 [m / m in] 切削幅 : 2.5 [mm] 送り : 0.1 [mm / rev] 切削時間 : 15 [s] ドライカット

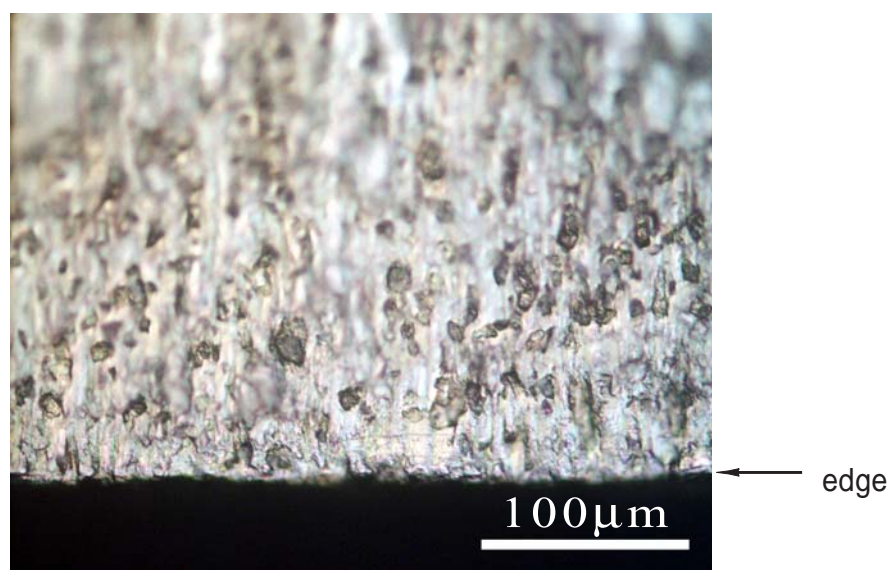


Fig. 5-49 Remaining plated layer on rake face beneath built-up edge

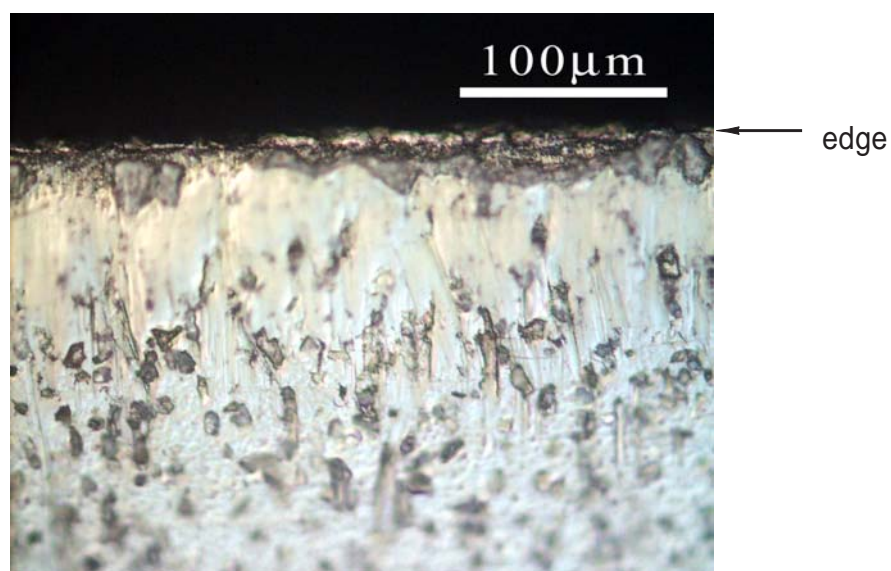


Fig. 5-50 Flank face after removing built-up edge

5.4 複合めっき膜の剥離

5.3では、Ni-P複合めっき膜によって炭素鋼の切削加工が可能であるということを示した。本章では、その複合めっき膜を完全に剥離し、母材となっている超硬合金を再び露出させる剥離方法について検討する。

5.4.1 剥離方法⁵⁻³⁴⁾に関する検討

めっき膜の剥離方法は大きく分けて機械的剥離法、化学的剥離法、電解剥離法の三種類に分類することができる。それぞれの方法の特徴を表5-15に示す。めっき剥離技術は「重要な要素技術であるにも関わらず失敗品の再生に使用するというイメージが強く、学術的にはあまり詳細な検討が行われていないのが現状」⁵⁻³⁴⁾であるため、技術的な改良の余地は大きく残っているものと思われる。ちなみにめっき膜の理想的な剥離方法とは、母材の損傷無くめっき膜のみを完全に除去するという方法である。

めっき膜は基本的には金属であるので、切削、研削および研磨の機械的除去加工によって剥離することが可能である。一般的なめっきの剥離方法としてはサンドペーパー、サンドブラスト、バフ、ホーニングなどが挙げられる。めっき膜を自動かつ高精度に剥離するためには、CNC工具研削盤が必要になるだろう。また、被加工物の形状によって加工の難易が大きく左右され、特に凹部の剥離が難しいという欠点がある。以下に述べる二つの化学（もしくは電気化学）的方法と比べ

Table 5-15 Advantages and disadvantages of various stripping methods⁵⁻³⁴⁾

	化学的はく離	電解はく離	機械的はく離
長所	1. 複雑な形状の品物もはく離可能 2. 品物の変形が少ない	1. めっき自動設備に組み入れ可 2. 品物の変形が少ない 3. 治具はく離に最適	1. 素地金属の種類に左右させない 2. ガス発生がない 3. 廃水処理不要
短所	1. 液老化時のはく速度低下が大きい 2. 有害ガス発生 3. コスト高 4. 廃水処理が必要	1. 電解設備、電源、熱源必要 2. ミスト・ガス発生のため排気設備が必要 3. 条件により素地浸食あり 4. 管理・維持が困難	1. 素地寸法変形のおそれあり 2. 薄い板物には適用できない 3. 人件費によるコスト高

て、めっき膜成分のみを選択的に除去することは非常に難しい．そのため、めっき膜金属を完全に剥離するためには、ある程度の母材の除去は避けられない．

次に挙げられるのは化学的な剥離方法である．化学的剥離とは酸化剤を用いてめっき金属を溶液中に酸化溶解する方法である．母材とめっき膜とが同一金属でないかぎり、適切な剥離剤を選択することでめっき膜のみを選択的に剥離することが可能である．しかし、外部からの電気的なエネルギーを用いて酸化反応を起こす電解剥離法とは異なり、溶液中の酸化剤が反応と共に消費されるため剥離液の劣化が進みやすい．剥離溶液中には酸化剤以外にめっき金属イオンを受け取る陰イオンや界面活性剤などが必要である．

そして最後に考えられるのは電気的なエネルギーを利用した電解剥離であろう．電解剥離法は、外部からの電気的なエネルギーによってアノード酸化を起こし、めっき膜を溶解させる方法である．電気的な操作により、剥離の状態を制御もしくは監視することが可能である．また、化学的剥離法との大きな違いは、その剥離速度である．表 5-16 のように化学的剥離方法に比べて電解剥離法の剥離速度は 2 桁程度速くなっている．デメリットとしては、表 5-15 のように水の電解によるミストの発生対策としての排気設備と電解のための電源が必要になることが挙げられる．もちろん、めっき用の電源と併用することは可能である．

以上の中で本研究の目的である機上再生の実現を考慮すると、処理装置が簡易であり、再生処理が短時間で終了する必要がある．その点を考慮すると、Ni-P 複合めっき膜の剥離には電解剥離法を用いることが望ましいといえる．また、成膜プロセスに電気めっきを用いているので、その電源を併用することができるという利点から電解剥離が望ましいと結論付けられる．

Table 5-16 Stripping speed by chemical or electrical⁵⁻³⁶⁾

剥離剤	剥離速度
化学的剥離剤（アサヒリップ S-1/S-2）	約 10 $\mu\text{m/hr}$ （0.2 $\mu\text{m/min}$ ）
SUS ジグ用剥離剤（アサヒリップ UR-1）	約 20 $\mu\text{m/min}$

5.4.2 硫酸電解剥離によるNi-P めっき膜の剥離

Ni めっき膜の電解剥離方法としては硫酸の電解による剥離方法⁵⁻³⁷⁾が知られている。本来はアルミ，黄銅，銅，鋼，亜鉛母材上のNi めっきを剥離する方法であるが，超硬母材上のNi めっきの電解剥離についてはどのような挙動が生じるのか不明である。そこでまずは最初に各種濃度の硫酸中で，Ni-P 膜の剥離速度を調査することにした。

剥離速度測定用の試料は，図5-51のように6mm角の銅角棒を母材としてNi-P めっきおよびNi-P-SiC めっきを施したものをを用いた。めっき条件を表5-17に示す。このめっき面を#1500 サンドペーパーで研磨し，図5-51のようにマスキングテープでマスクしたものを剥離速度測定用の試料とした。電解剥離前のNi-P-SiC めっき膜表面の様子を図5-52に示す。電解剥離液として，8.8%，25%，44%，73%の硫酸を用いた。カソードには鉛板を用い，6V定電圧にて電解を行った。硫酸電解用の電源はめっき時と同じ(株)中央製作所製 PMD1-120-200を用いた。剥離時の電流値をデジタルマルチメータ((株)アドバンテスト製 TR6846)によって測定し，GPIBインタフェースによりPCに取り込んだ。実験装置の概略を図5-53に示す。剥離速度はマスキング部との段差を表面粗さ計((株)テラーホブソン製タリサーフ)を用いて測定した。

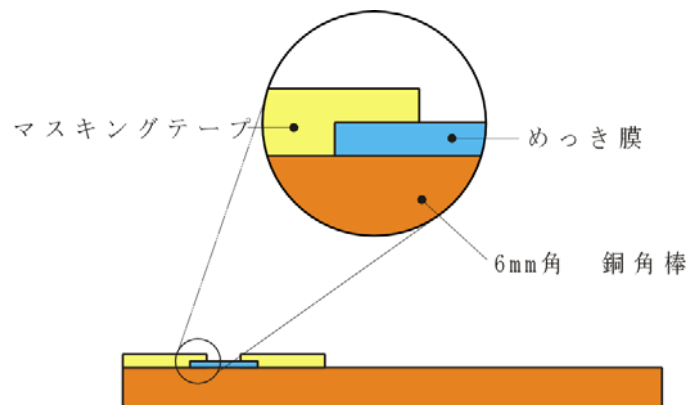


Fig. 5-51 specimen to observe electrolysis speed

実験によって得られた硫酸濃度と剥離速度の関係を図 5-54 (硫酸電解液の導電率⁴⁻⁵⁾を併記)に、電解時の電流密度変化を図 5-55(Ni-P)、図 5-56(Ni-P-SiC)に示す。全体的に Ni-P-SiC 複合めっきの方が剥離速度が速く、硫酸濃度 25% では毎分 25 μ m の速度で複合めっき膜を剥離することができた。基本的には、定電圧電解のため電解液の導電率により電流密度が変化し、それによって剥離速度が変化したと考えられる。複合めっきの方が剥離速度が速い理由として、粒子の脱落による体積減がまず挙げられる。また、図 5-55、図 5-56 を見ると全体的に複合めっきの方が電流密度が高いため、粒子の脱落后にめっき膜の実際の表面積が増加したこともその理由であると考えられる(図 5-57)。

電解剥離時のアノード反応は Ni の酸化反応だけでなく、水の分解反応も起こっており、



これらの二つの反応量の総和として電流密度が測定されている。そこで、電解剥離時におけるめっき膜電解の電流効率を次のように求めた。理論剥離速度はファラデーの法則より、

$$\frac{dd}{dt} = \frac{M}{zF\rho} i \quad (5-4-3)$$

となる。ここで i は電流密度、 d は理論剥離厚さ、 z は Ni の電荷数、 F はファラデー定数、 ρ は Ni の密度、 M は Ni の原子量である。理論剥離厚さはこれを積分して、

$$d = \frac{M}{zF\rho} \int i dt \quad (5-4-4)$$

となる。したがって剥離時の電流効率は、

$$\eta = \frac{\text{実際の剥離厚さ}}{\text{理論剥離厚さ}} \quad (5-4-5)$$

として求めた。なお、理論剥離厚さはめっき膜が Ni であると仮定して計算している。

このようにして求めた剥離時の電流効率を図 5-58 に示す．Ni-P-SiC の電流効率は硫酸濃度 40% 付近で極大値をとるような形をとっている．Ni-P の硫酸濃度 44% の値が傾向から外れているようにもみえるが，これに関してはさらに詳細な実験が必要だろう．Ni-P-SiC に限って言えば，電流効率に関する硫酸濃度の最適値は 44% と 73% の間にあると考えられる．

これらの結果を考慮すると，剥離速度からは 25%，電流効率からは 44% の硫酸濃度が望ましいと考えられ，概ねこの 2 者の範囲で濃度を選択するのが望ましいと言える．

Table 5-17 Ni-P(-SiC) plating condition for stripping test

型番	TPGN160304 (HTi05T) 三菱マテリアル 製
超硬材種	K01種
すくい角	5°
逃げ角	11°
コーナ半径	0.4 mm
チップブレーカ	なし



Fig. 5-52 Ni-P-SiC plated surface before the test

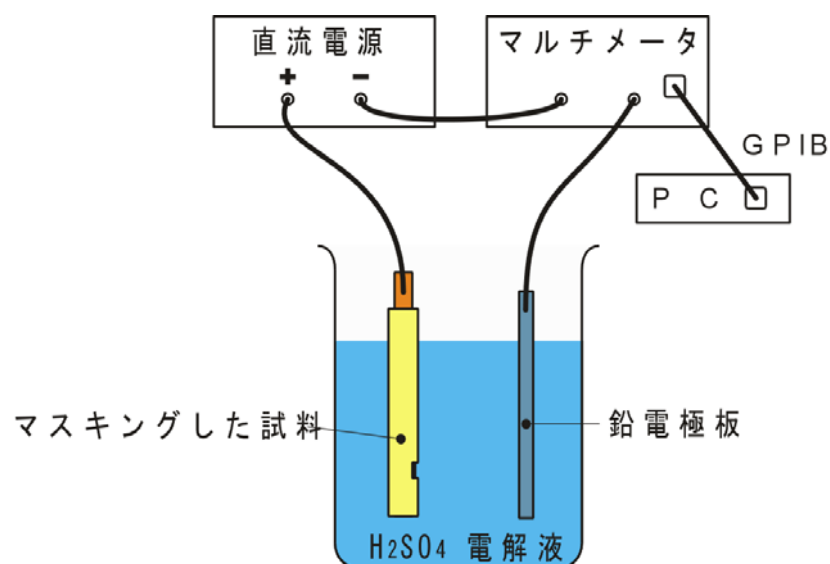


Fig. 5-53 sketch of electro-etching speed measurement test

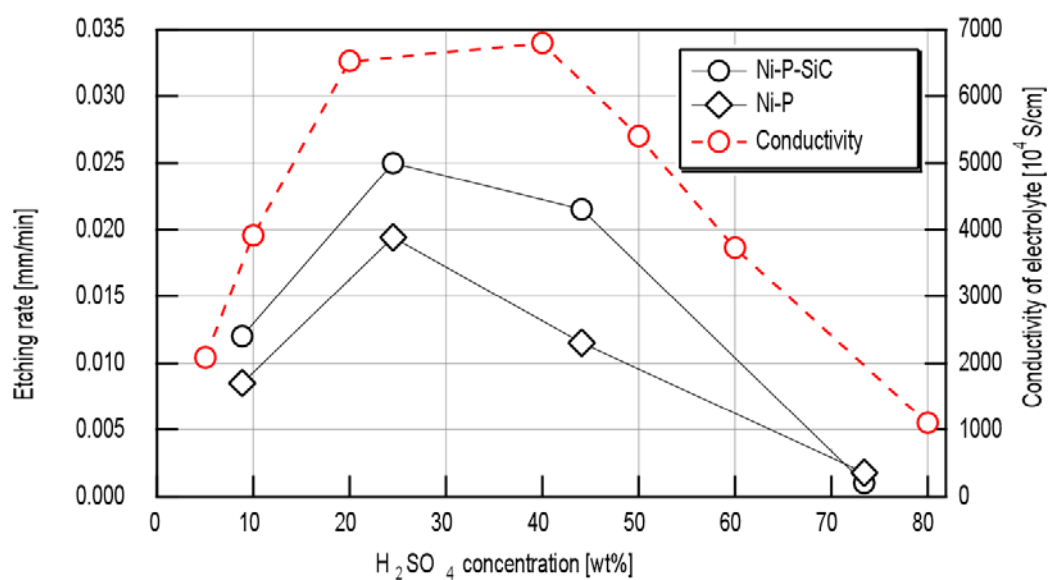


Fig. 5-54 Effect of H₂SO₄ concentration on Ni-P and Ni-P-SiC layer removing

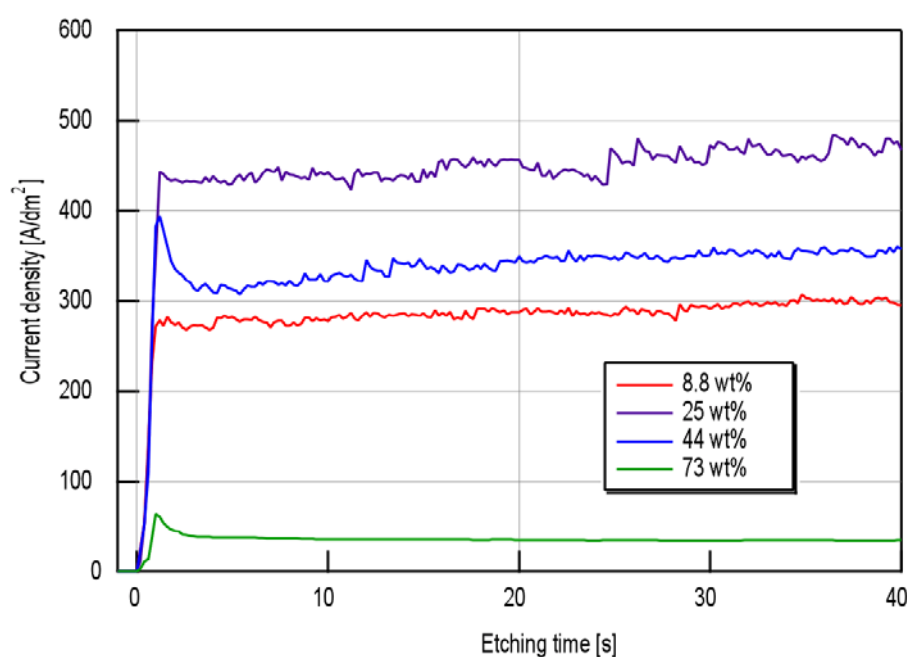


Fig. 5-55 Duration of current density in Ni-Player removing

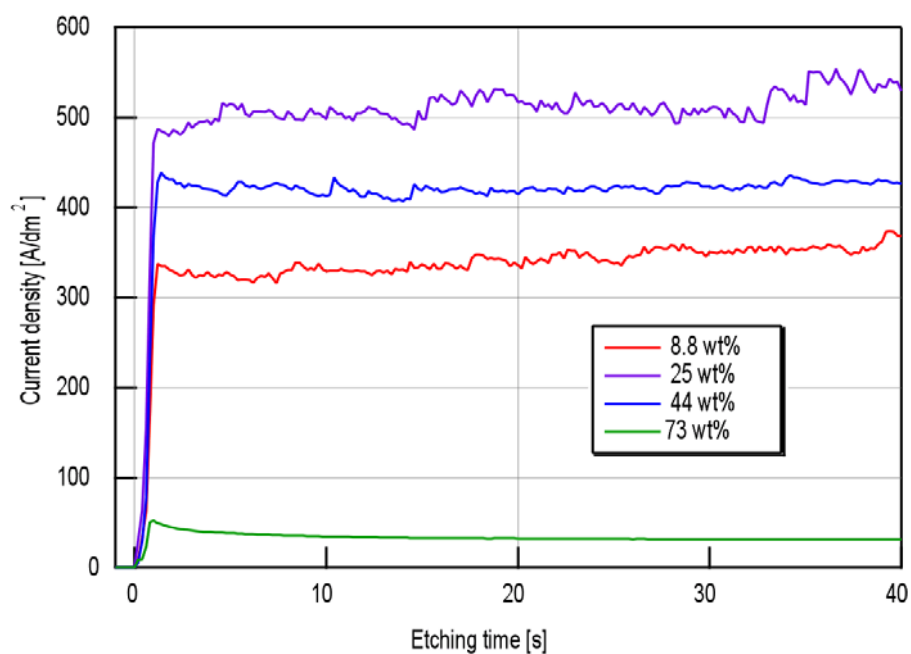


Fig. 5-56 Duration of current density in Ni-P-SiC layer removing

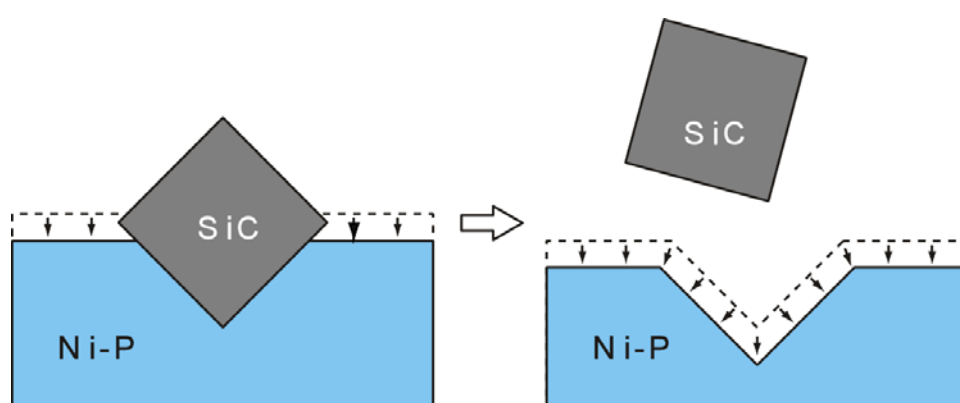


Fig. 5-57 Image of SiC composite layer electro-etching

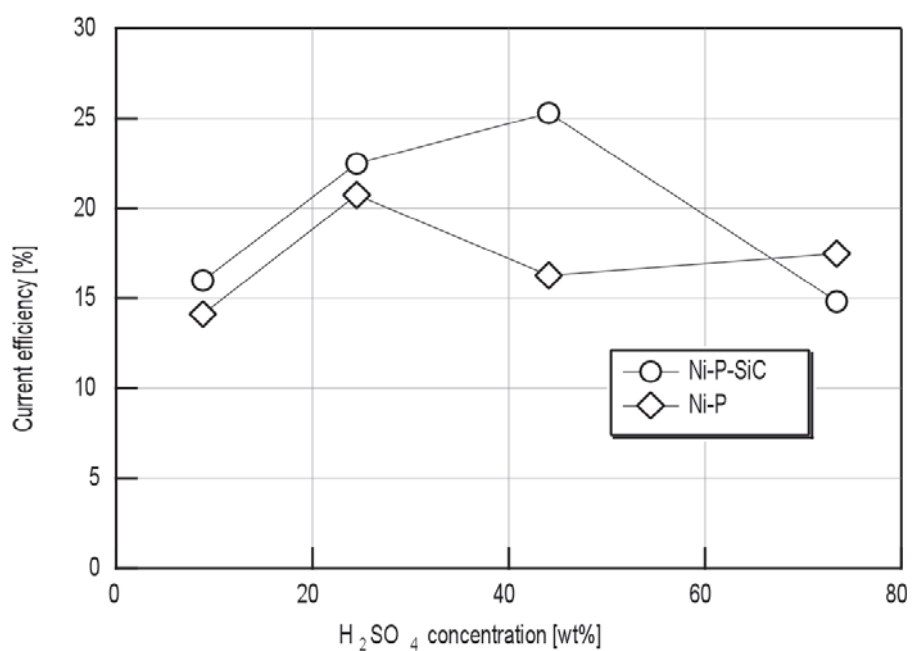


Fig. 5-58 Current efficiency in plated layer removing

Table 5-18 Specifications of insert

型番	TPGN160304 (HTi05T) 三菱マテリアル 製
超硬材種	K01種
すくい角	5°
逃げ角	11°
コーナ半径	0.4 mm
チップブレーカ	なし

Table 5-19 Pre-treatment condition

NaOH アノード電解液	組成	NaOH : 5 [wt%] (室温)
	電解条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] (アノード電解) 電解時間 : 60 [s] カソード : 銅板
Ni Strike めっき浴	組成	NiCl ₂ ·6H ₂ O : 1 [mol/L] HCl : 1 [mol/L] (室温)
	めっき条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] 電解時間 : 60 [s] アノード : ニッケル板

5.4.3 超硬チップに施した複合めっき膜の電解剥離

前項の結果より 44% 硫酸を電解剥離液として用いると，毎分 25 μ m の速度で複合めっき膜を剥離することがわかった．次にこれを超硬チップ上の Ni-P-SiC 複合めっき膜に適用する．

試料母材の超硬チップ諸元を表 5-18 に，前処理条件を表 5-19 に，Ni-P-SiC 複合めっき条件を表 5-20 に示す．これは S45C の旋削を行ったものと同じの条件である．電解剥離液として 44% 硫酸を用い，剥離速度測定実験と同様，カソードには鉛板を用いて 6V 定電圧電解にてめっき膜の剥離を行った．実験装置の概略を図 5-59 に示す．

剥離時の電流密度は図 5-60 のように，めっき膜の剥離とともに自然と小さな値に落ち着いた．これは(5-3-1)式のように，酸性溶液中で超硬の W 成分が不働態化したことに起因する．母材の不働態化による反応停止は，母材の保護という意味とめっき膜剥離完了の判定が可能ということを意味し，工程の自動化には極めて都合の良い特長と言える．いずれにしてもこれらの結果から，複合めっき膜の剥離が 30 秒程度でできることがわかった．

Table 5-20 Condition of Ni-P-Si composite plating

めっき浴組成	Ni(H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O: 450 [g/L]
	NiCl ₂ : 30 [g/L]
	H ₃ PO ₃ : 20 [g/L]
	H ₃ BO ₃ : 30 [g/L]
	SiC(GC#2000) : 400 [g/L]
浴温	60 [°C]
カソード電流密度	40 [A/dm ²]
めっき時間	60 [s]
めっき厚さ	約 6 [μm]

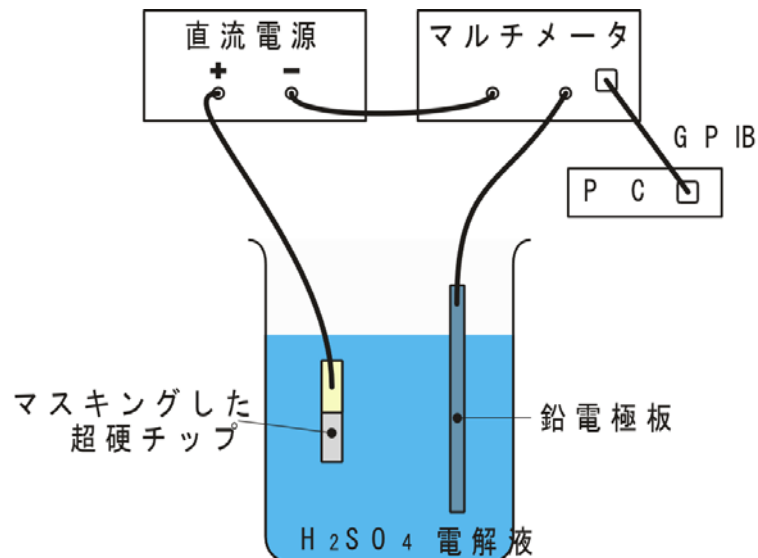


Fig. 5-59 Stripping experiment of Ni-P-SiC layer on cemented carbides

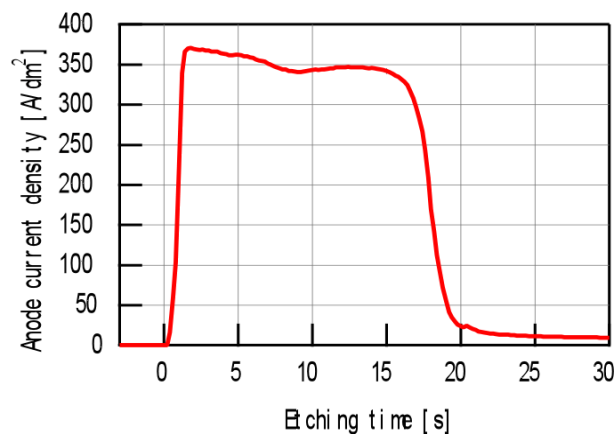


Fig. 5-60 Current density of Ni-P-SiC layer stripping (40A/dm², 60s)

5.5 再生サイクルの検討

本章では、これまで検討した複合めっきと電解剥離を組み合わせて切削工具の再生サイクルとする場合に考慮すべき点、および工作機械上での再生を実現するために検討すべき点について述べる。

5.5.1 硫酸電解液の濃度と超硬母材の反応性

5.4 で述べたように、硫酸の定電圧電解によるめっき膜の剥離では、母材である超硬チップの表面が不働態化して電流がほとんど流れなくなることで剥離の完了が確認できた。この不働態膜は酸化物層であり、めっきの密着性を低下させる要因であるので、めっき前処理の NaOH アノード電解によって溶解させている。したがって、工具の再生により超硬母材表面がエッチングされて減耗することになる。工具を繰り返し再生して使用することを考えると、母材はなるべく減耗しない方が望ましい。

そこで、まずは硫酸濃度による超硬の反応性を見るために、非めっき超硬チップの電解実験を行った。試料として三菱マテリアル(株)製 TPGN160304-HTi05T(K01 種超硬)超硬チップを用いて、表 5-21 の条件で電解を行った。実験装置は図 5-59 と同様である。電解後の超硬チップの写真を図 5-61 に示す。電解液として 73% 硫酸を用いたもの以外は超硬表面が青く変色していることが確認でき、また 44% 硫酸では 25% 硫酸、8.8% 硫酸と比べて変色の程度が少ないことが分かる。さらに、8.8% 硫酸での電解時には超硬チップ表面から不働態膜だと思われる黄色い膜が剥がれ落ち(図 5-62)、電流密度変化にもそれが原因だと考えられる振動成分が現れている(図 5-63 (c))。図 5-63 によると、定常状態での電流(不働態維持電流)は硫酸濃度が低いほど大きいことが分かる。これからも、硫酸濃度が低いほど超硬の反応性が高いことを示している。

5.5.2 繰り返し再生にともなう母材の減耗量 - 硫酸濃度の影響 -

次に、めっき前処理、複合めっき、電解剥離という工具再生サイクルを 10 回繰り返して、超硬表面がどれだけエッチングされているかを測定する実験を行った。めっき前処理条件、複合めっき条件、電解剥離条件をそれぞれ表 5-22、5-23、5-24 に示す。硫酸濃度によってめっき膜の剥離速度に違いがあり、完全剥離するために

Table 5-21 Electrolysis conditions

電解液	H ₂ SO ₄ : 8.8, 25, 44, 73 [wt%]
電圧	5 [V]
電解時間	50 [s]
カソード	Pb

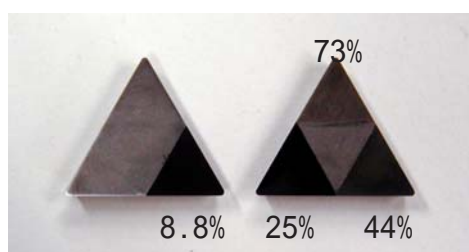
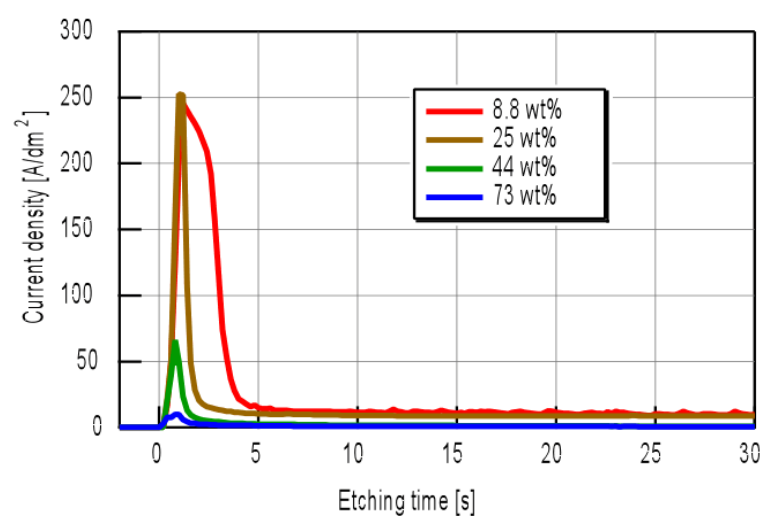


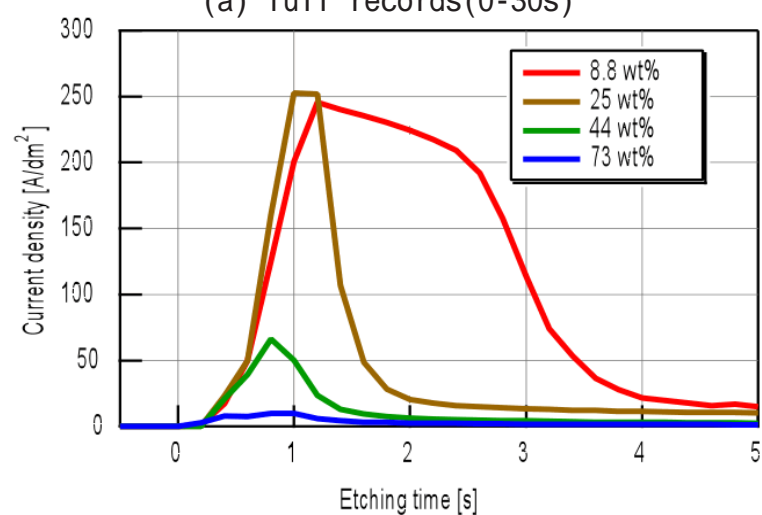
Fig. 5-61 Insert etched in different H₂SO₄ concentrations



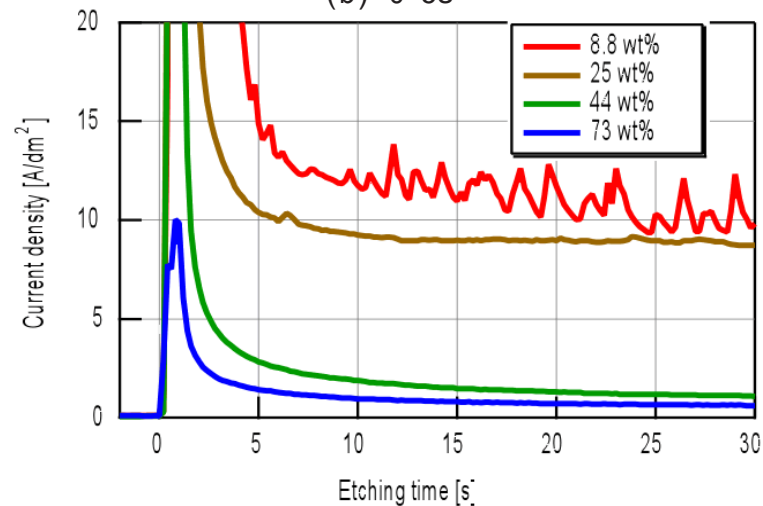
Fig. 5-62 Yellow flakes peeled in 8.8% condition



(a) full records(0-30s)



(b) 0-5s



(c) magnified (b)

Fig. 5-63 Current densities in different electrolysis condition

要する時間が異なるため、電解時間を 25% 硫酸と 44% 硫酸の場合は 30s、73% 硫酸の場合は 300s とした。試料として使用した超硬チップは三菱マテリアル(株)製 TPGN160304-HTi05T(K01 種超硬)であり、図 5-33 のようにマスキングして実験に用いた。減耗量は処理面とマスキング面との段差を表面粗さ計(テラーホブソン(株)製タリサーフ)を用いて測定した。8.8% 硫酸による電解では前項で述べたように、電解剥離中に超硬から黄色い膜が剥がれ落ちるのを肉眼で確認できるほどエッチングが激しいので除外した。

電解剥離液として 25% 硫酸を用いた場合の段差形状の測定結果を図 5-64 に、硫酸 44% を用いた結果を図 5-65 に、硫酸 73% を用いた結果を図 5-66 に示す。硫酸濃度と減耗量との関係を図 5-65 にまとめた。また、剥離時の 10 回分の電流密度変化を図 5-68、図 5-69、図 5-70 にそれぞれ示す。44% 硫酸および 73% 硫酸の場合は 25% 硫酸に対して超硬母材のエッチング量が約半分であった。73% 硫酸は、めっき膜の剥離速度が遅いにも関わらず母材の減耗量が 44% 硫酸と同程度であったが、これは図 5-61 にみられた反応性の結果とも反するように見える。この理由を次のように考察した。

まず、めっき膜がエッジやマスクとの境界付近に厚く付く傾向にあり、電解時には全面から均一に電解されるためか、エッジ以外の部分から母材が露出しはじめる。そして母材が露出しはじめてからめっき膜が完全に剥離するまでの時間(図 5-69 中の 10s ~ 30s 付近、図 5-70 中の 100s ~ 300s 付近)が 73% 硫酸は 44% 硫酸と比べて 10 倍程度であったことに起因すると考えられる。つまり、母材自体の電解される時間が長かったということである。

図 5-68 と図 5-69 から、25% 硫酸と 44% 硫酸とはめっき膜の剥離に要する時間はほとんど変わらないことが分かる。図 5-54 の結果では 25% 硫酸のほうが 1 割ほど剥離速度が速かったが、超硬上のめっき膜の場合、剥離速度はほとんど同じという結果になった。これは、超硬上のめっき膜を完全に剥離する場合、その電流値には図 5-63(b) のような超硬の反応によって流れる電流も含んでいるため、電流値の収束とめっき膜の剥離完了とが完全に対応していないことに起因していると考えられる。また、10 回繰り返したときの剥離電流密度にはある程度のばらつきがあるが、徐々に剥離速度が低下していく、というような傾向は見られなかった。

Table 5-22 Pre-plating conditions for 10 times repeat test

NaOH アノード電解液	組成	NaOH : 5 [wt%] (室温)
	電解条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] (アノード電解) 電解時間 : 30 [s] カソード : 銅板
Ni Strike めっき浴	組成	NiCl ₂ ·6H ₂ O : 1 [mol/L] HCl : 1 [mol/L] (室温)
	めっき条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] 電解時間 : 60 [s] アノード : ニッケル板

Table 5-23 Ni-P-SiC plating condition for 10 times repeat test

めっき浴組成	Ni (H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O: 450 [g/L] NiCl ₂ : 30 [g/L] H ₃ PO ₃ : 20 [g/L] H ₃ BO ₃ : 30 [g/L] SiC(GC#2000) : 200 [g/L]
浴温	60 [°C]
カソード電流密度	40 [A/dm ²]
めっき時間	60 [s]

Table 5-24 Anodic electrolysis condition for 10 times repeat test

電解液	H ₂ SO ₄ : 25, 44, 73 [wt%] (室温)
電圧	6 [V] (定電圧電解)
カソード	鉛板

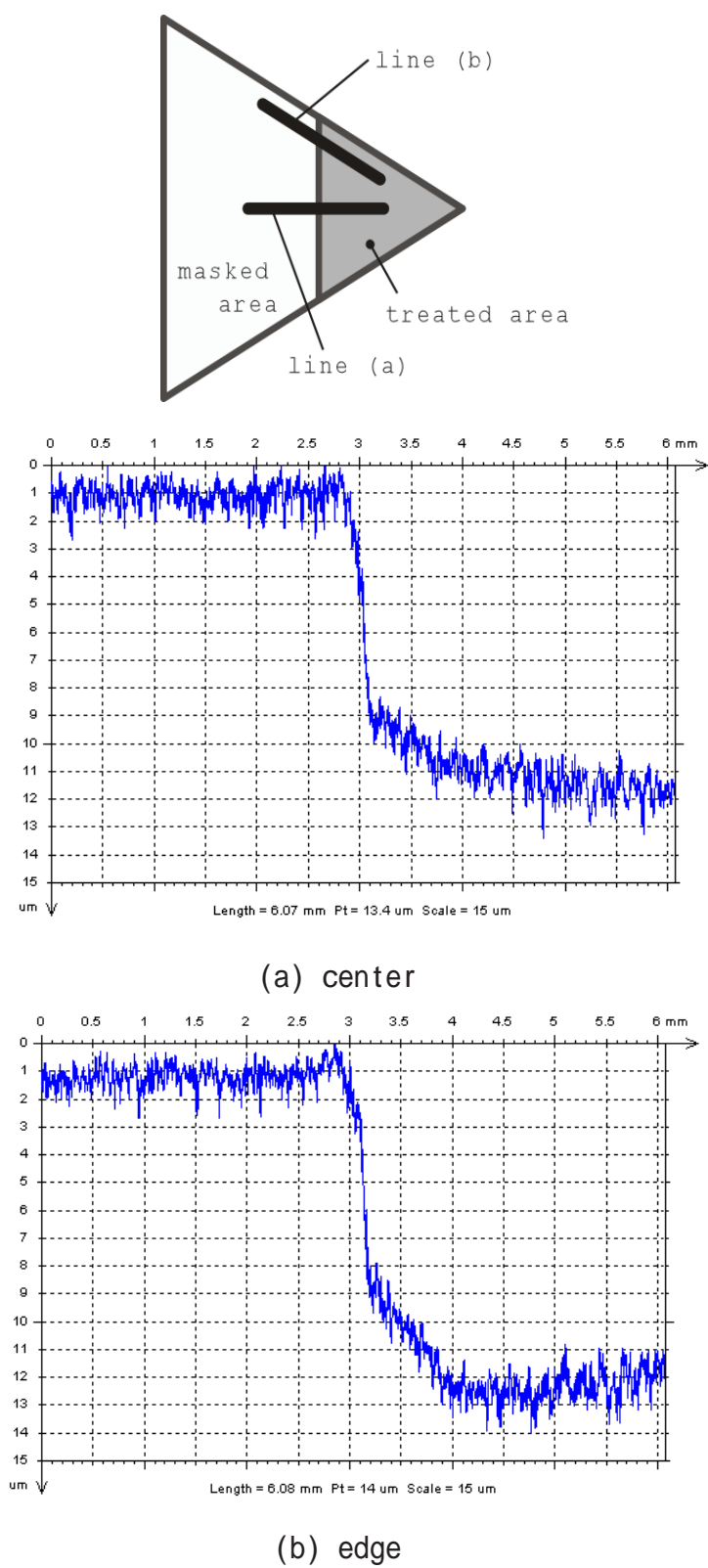
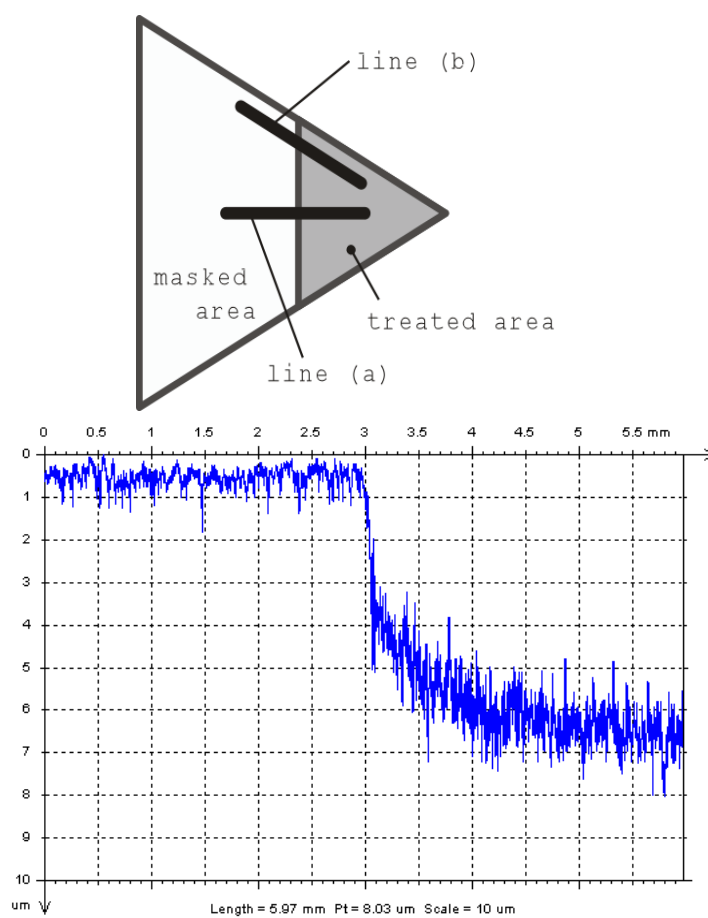
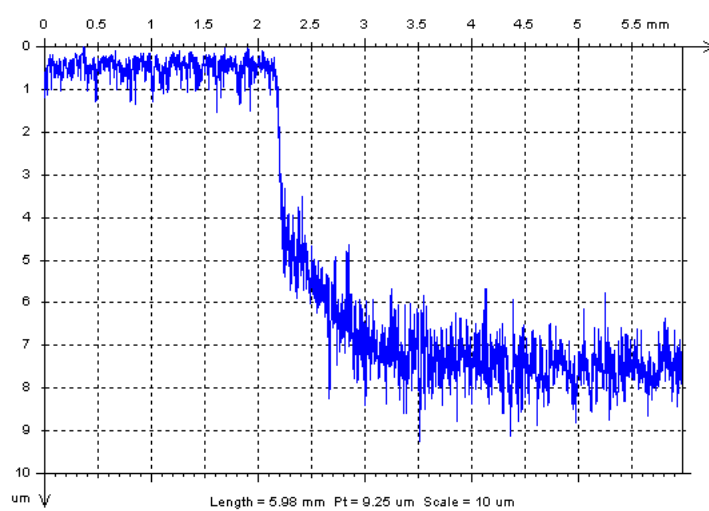


Fig. 5-64 Step etched by 10 cycles re-generating in 25% H_2SO_4 condition



(a) center



(b) edge

Fig. 5-65 Step etched by 10 cycles re-generating in 44% H_2SO_4 condition

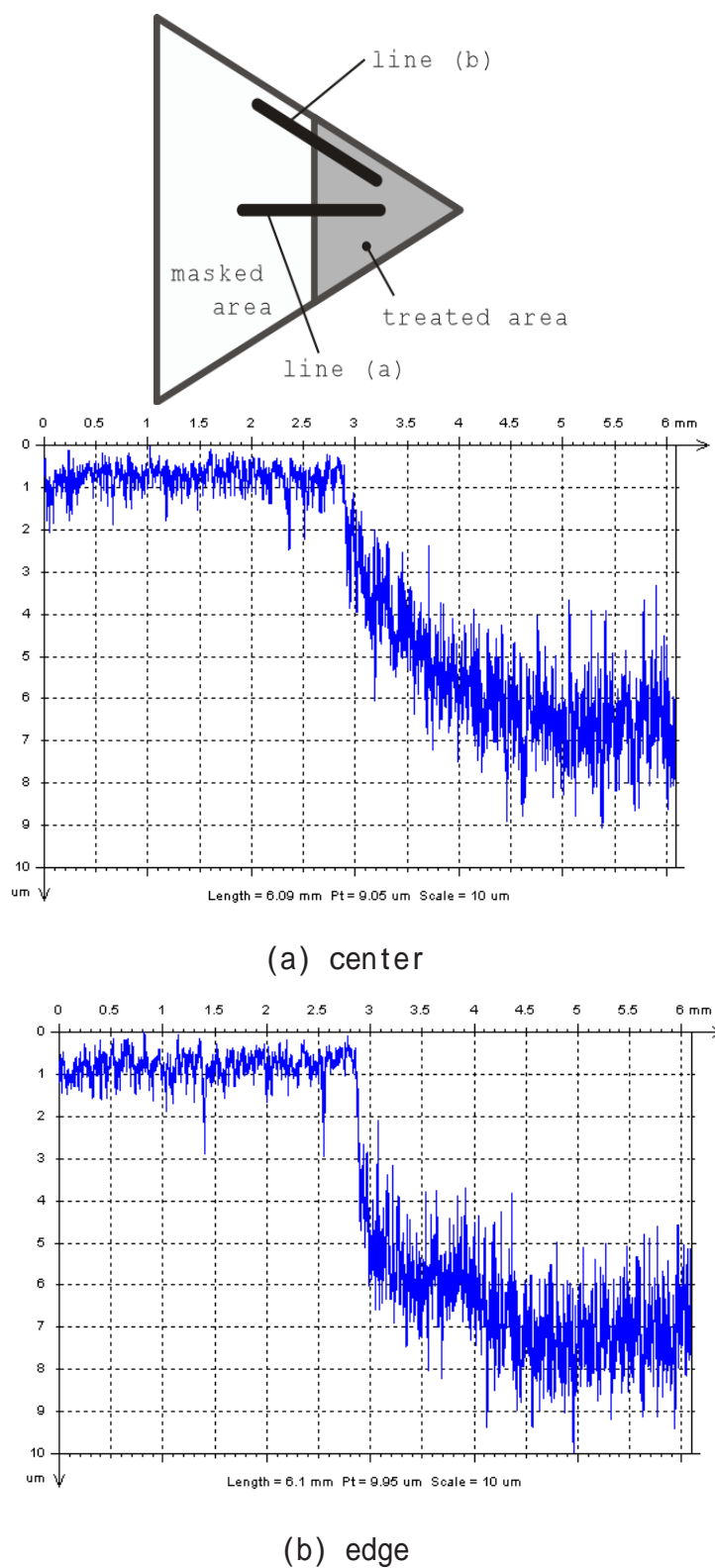


Fig. 5-66 Step etched by 10 cycles reforming in 73% H_2SO_4 condition

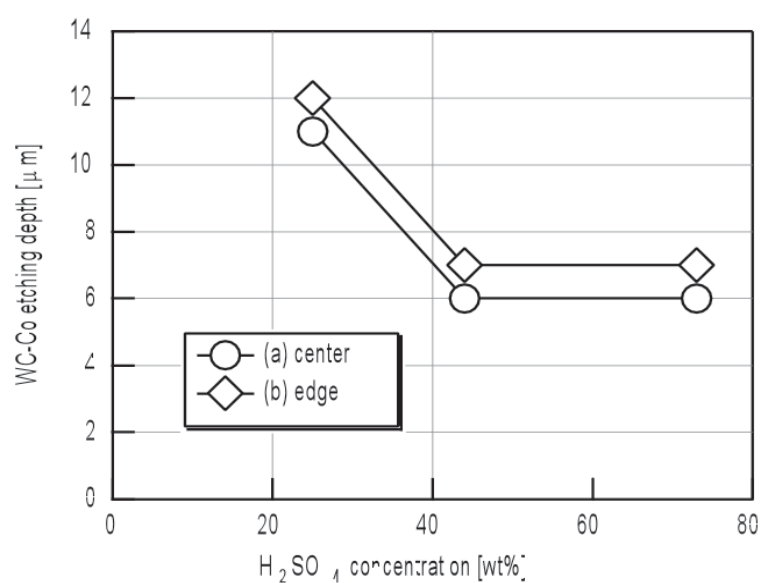


Fig. 5-67 Etching rate after 10 cycles re-generating

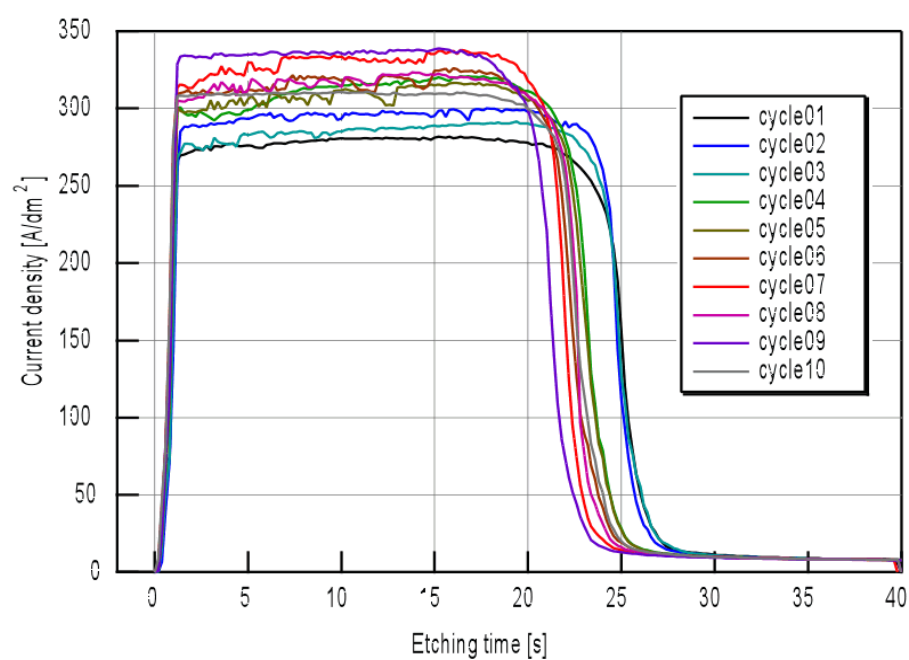


Fig. 5-68 Current duration at every 10 cycles
in 25% H_2SO_4 anodic electrolysis

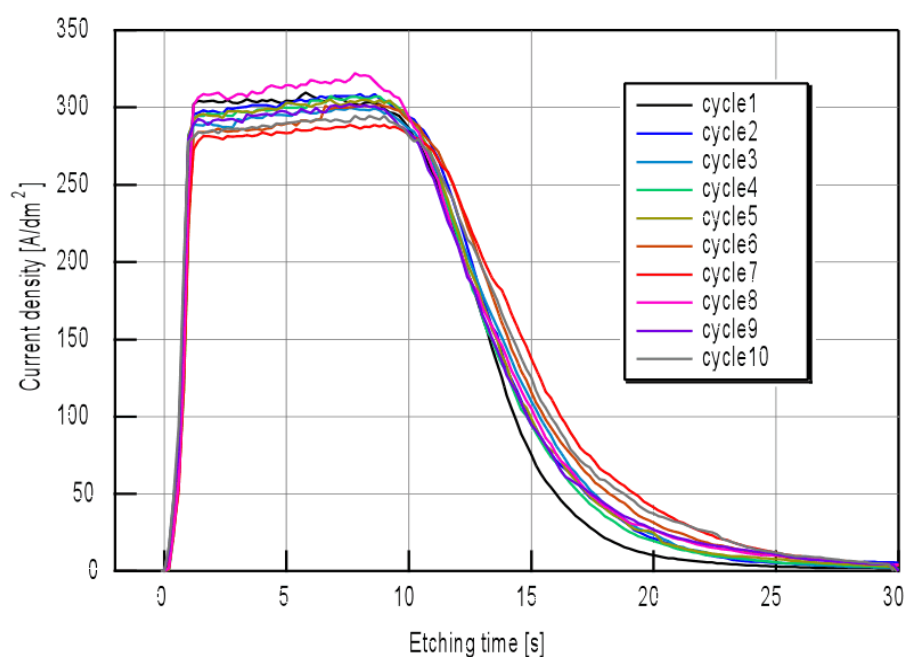


Fig. 5-69 Current duration at every 10 cycles
in 44% H₂SO₄ anodic electrolysis

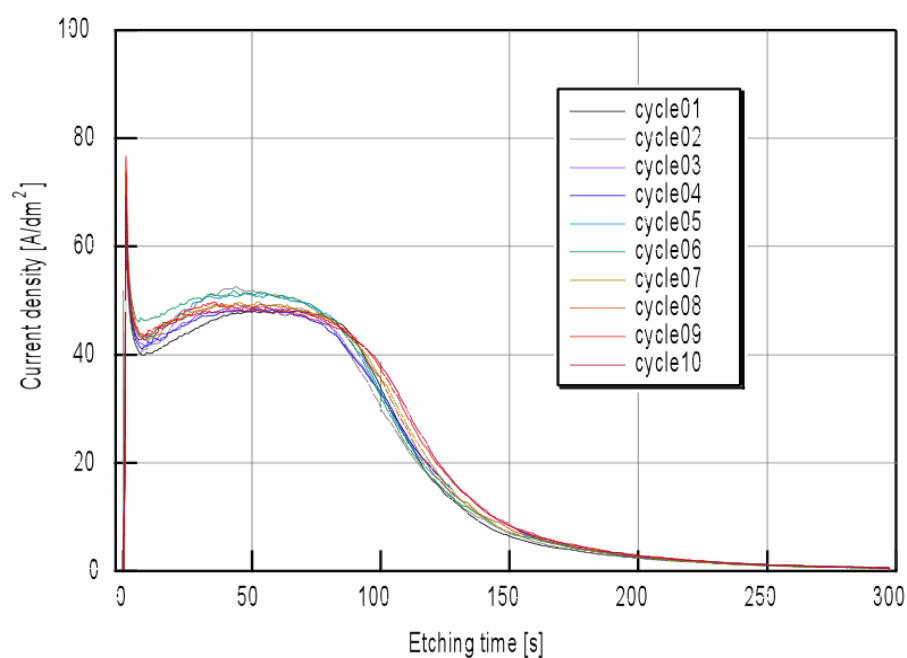


Fig. 5-70 Current duration at every 10 cycles
in 73% H₂SO₄ anodic electrolysis

5.5.3 再生後のめっき膜による切削加工

5.4 では，超硬チップ上の複合めっき膜が硫酸電解によって剥離できることを示した．剥離後の超硬表面には不働態膜(酸化膜)が形成されていると考えられるが，新品の超硬チップに対する前処理と同じ方法で密着性が確保できるかを調べた．その方法として，新品の超硬チップと，めっき膜を電解剥離によって剥離した後のチップとで，めっき膜の密着性に問題がないかどうかを S45C の切削実験により確かめた．

前処理条件を表 5-25 に，めっき条件を表 5-26 に，電解剥離条件を表 5-27 にまとめた．切削後の工具逃げ面の顕微鏡写真を図 5-71，図 5-72 に示す．再生後の工具

Table 5-25 Pre-plating condition

NaOH アノード電解液	組成	NaOH : 5 [wt%] (室温)
	電解条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] (アノード電解) 電解時間 : 30 [s] カソード : 銅板
Ni Strike めっき浴	組成	NiCl ₂ ·6H ₂ O : 1 [mol/L] HCl : 1 [mol/L] (室温)
	めっき条件	電流密度 : 15 [A/dm ²] 電解時間 : 60 [s] アノード : ニッケル板

Table 5-26 Ni-P-SiC Composite plating condition

めっき浴組成	Ni(H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O: 450 [g/L]
	NiCl ₂ : 30 [g/L]
	H ₃ PO ₃ : 20 [g/L]
	H ₃ BO ₃ : 30 [g/L]
	SiC(GC#2000) : 200 [g/L]
浴温	60 [°C]
カソード電流密度	40 [A/dm ²]
めっき時間	60 [s]

Table 5-27 電解剥離条件

電解液	H ₂ SO ₄ : 44, [wt%] (室温)
電圧	6 [V] (定電圧電解)
カソード	鉛板

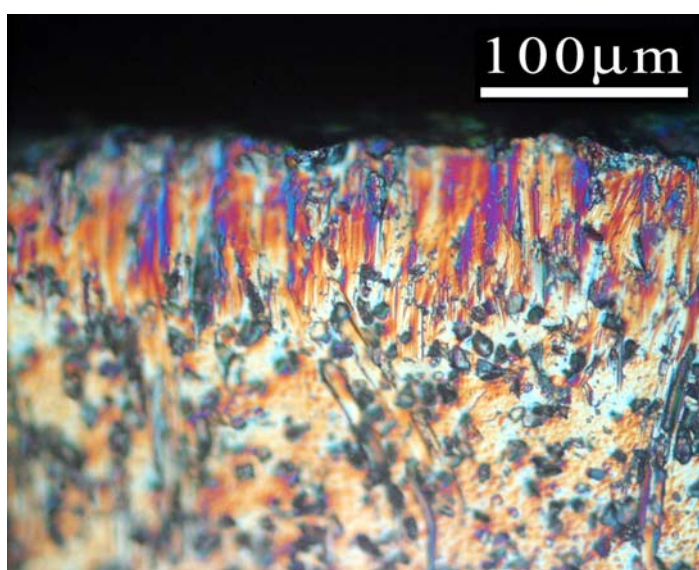


Fig. 5-71 Divergence interference image of just plated tool

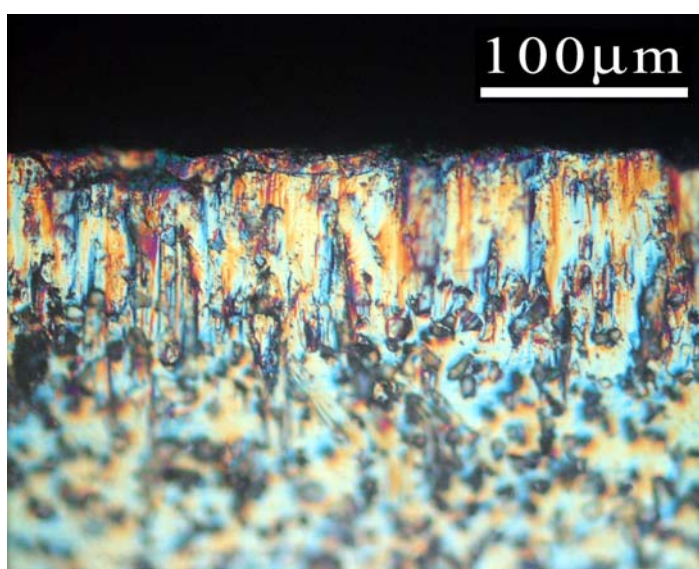


Fig. 5-72 Divergence interference image of re-generated tool

に異常な摩耗や剥離は見られず，再生前と再生後で大きな変化は特に見られなかった．硫酸電解剥離によるめっきの密着性への影響は特にはないようである．

5.5.4 構成刃先の電解剥離

S45C の切削において実験で用いた切削条件では，通常工具すくい面に構成刃先が付着する．前節ではあらかじめそれを取り除いてから電解剥離を行っていた．通常このような凝着物とめっき膜とは異種材料であるため，被削材によってはこの凝着物のために電解によるめっき膜の剥離が阻害される可能性がある．そこで，構成刃先が残ったままのめっき工具を電解剥離し，その挙動を確認した．めっき条件，切削条件，電解剥離条件は前節と同様である．

構成刃先の有無による剥離時電流密度の違いを図 5-73 に示す．構成刃先がない場合は 30s で剥離が完了するが，構成刃先がある場合は 150s と 5 倍程度の時間を要した．このように，S45C 切削時の構成刃先を電解剥離により除去することは可能であるが，処理時間の高速化を考えると機械的な方法で除去するほうが望ましい．

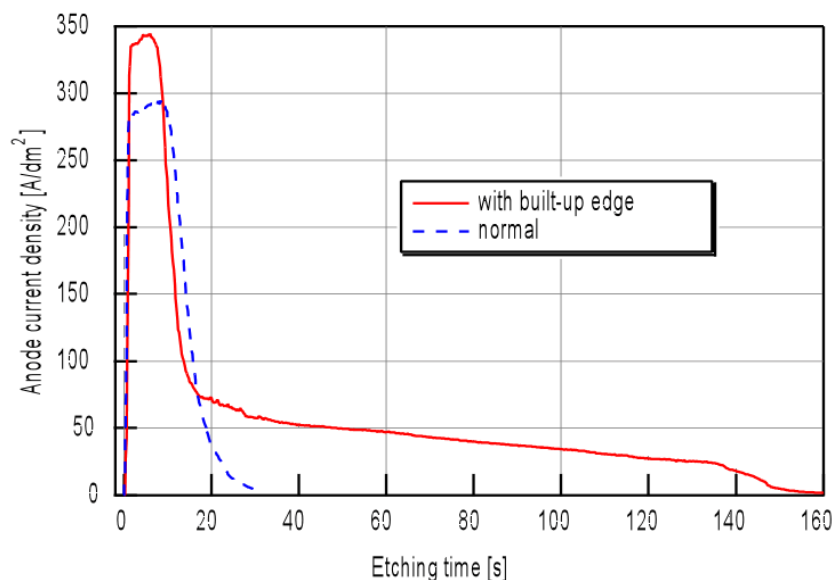


Fig 5-73 構成刃先の有無による剥離時電流密度の違い

Table 5-28 Required cycle time

処理	時間 [s]
硫酸電解剥離	30
NaOH アノード電解	30
Ni Strikeめっき	60
Ni-P-SiC複合めっき	60
合計	180

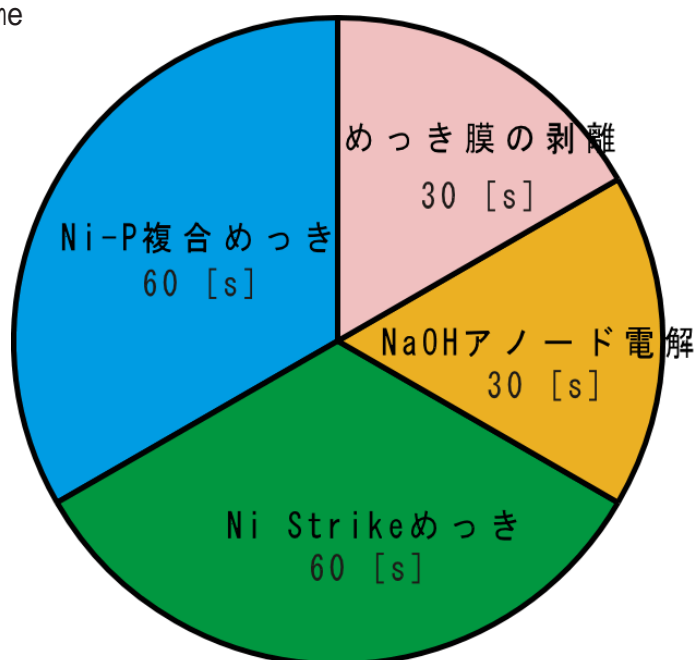


Fig. 5-74 Ratio of re-generation cycle

5.5.5 再生サイクルに要する時間

これまで述べてきたことを考慮すると，表5-28の再生サイクルが今のところ最も適当だと考えられる．結局，工具の再生サイクルに要する時間は180sであった．再生サイクルに占める各処理の時間割合を円グラフで示す(図5-74)．ただし，電解剥離-NaOHアノード電解間と，NaOHアノード電解-Ni Strikeめっき間には水洗が，工具使用後の電解剥離前には切削油の使用状況によって脱脂および水洗が必要である．したがって全ての処理を行うと，5min程度になると見積もられる．もちろん，加工の形態，被削材，加工条件等によって多少の増減は生じると考えられる．

5.6 切削工具の機上再生装置の試作

5.6.1 装置設計における要求項目

前章の研究結果から ,Ni-P-SiC複合めっきと電解剥離を行うことで5分以内で工具の機上再生が可能との見通しを得た .本節においてはこれらの結果を元に機上再生装置を具現化する .

5.6.1.(a) めっき操作における要求項目

機上再生においては表 5-29 に示 4 つの工程が必要になる . 工程としては複合めっきにより切れ刃を形成する工程が 3 つ , 電解剥離による摩耗切れ刃の除去工程が 1 つと計 4 つの工程になっている . それぞれの工程での要点を示すと複合めっきでは図 5-75 のように , 電解剥離では図 5-76 のようになる .

工程の自動化を考慮した場合 , これらの工程で重要な要素となるのは次の四点になると考えられる .

浴の品質維持 (洗浄工程の確保)

めっき膜の品質 , 析出速度の確保は浴の品質を如何に安定させておくかに他ならない . 不純物や , 卑金属イオンの混入は浴の品質低下に直結する . 電解液を保存する容器は耐薬品性があり , 電流を供給する電極は電解液に不溶性であることが望ましい .

また工程間に洗浄浴を設けることによりそれぞれの工程における浴の劣化だけでなく , 工程間でしっかりと薬液を取り去り次工程の浴の汚染を低減したり , 装置を設置する機械本体を電解液などで腐食させることがないようにすることが重要である .

温度管理

めっき , および電解剥離は化学プロセスである . したがって , 反応を促進するためにはできる限り高温でプロセスを行うことが望まれる . しかし , Ni-Pめっき工程においては , スルファミン酸の分解が 70 ℃ 以上で顕著になるため , 60 ~ 80 ℃ の範囲で電解液の温度を保てる構造が望まれる .

Table 5-29 Proposed process procedure

Edge layer forming	1. NaOH electrolysis 15A/dm ² 30s 2. Ni strike plating 15A/dm ² 30s 3. Ni-P SiC plating 40A/dm ² 60s
Worn-out layer removing	H ₂ SO ₄ electrolysis 6 V 60s

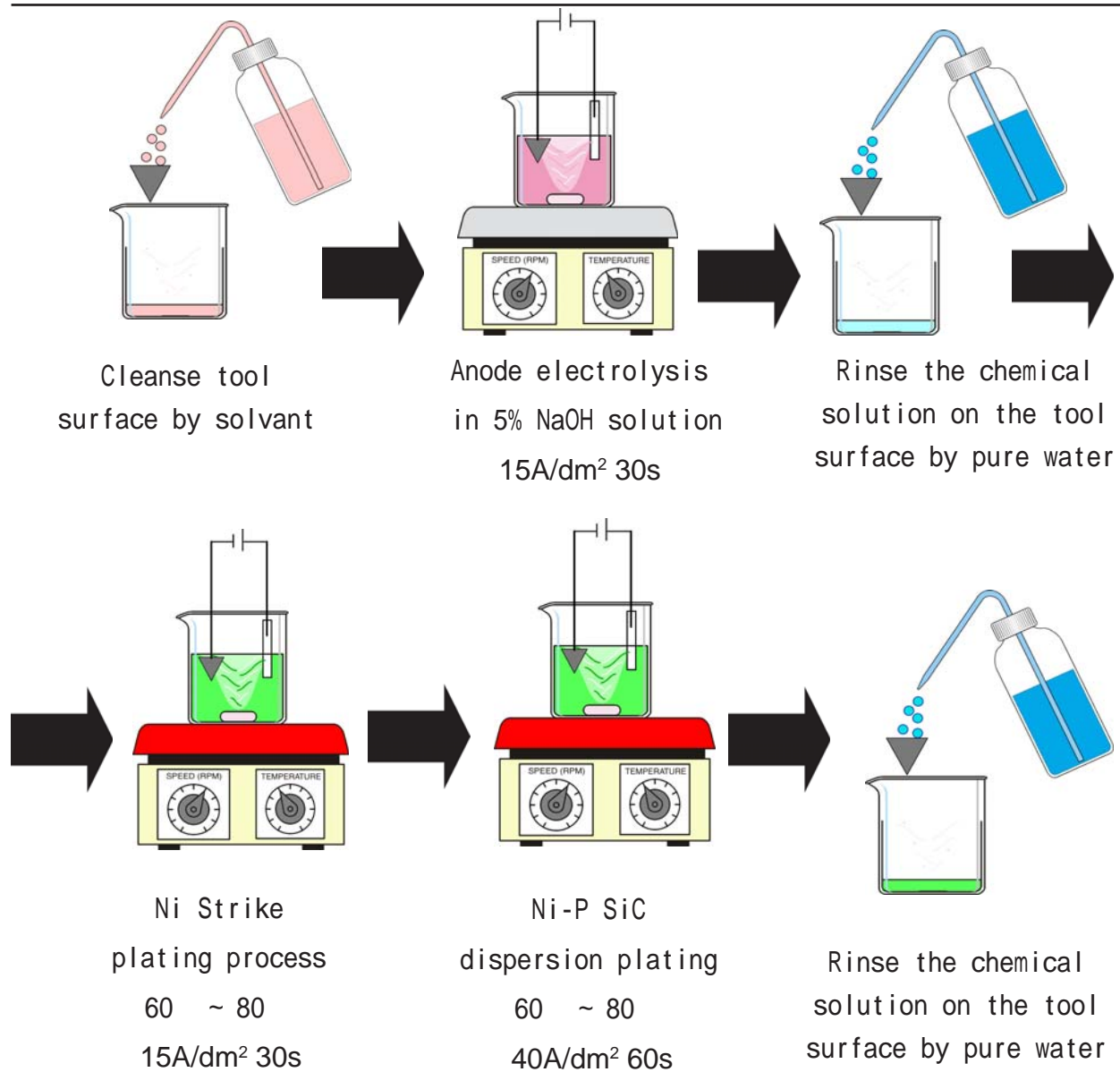


Fig. 5-75 Illustration of plating process procedure

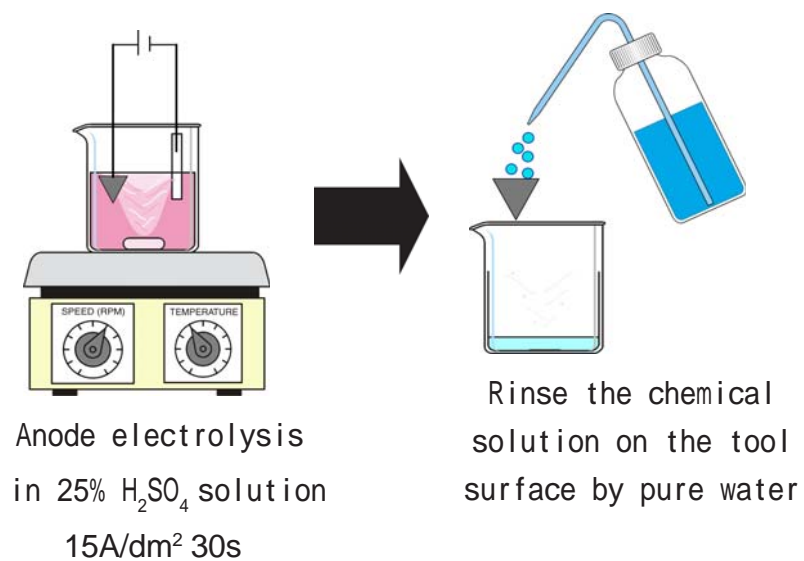


Fig. 5-76 Illustration of electrolysis process procedure

電流制御

安定してめっき膜を速やかに析出させ ,また摩耗した膜を速やかに除去するためには ,電流制御は装置の要とも言える .一定の電流が淀みなく供給できる工夫や ,装置を設置する機械本体に誤って電流が流れて機械本体を破壊することがないような配慮が必要であろう .

攪拌の均質性

電解液の均一性を確保するだけでなく ,電極付近に発生する水素の吸着を抑制しイオンを電極付近に供給するために適切な攪拌が必要となる .また ,複合めっきの場合は ,共析粒子を適切にめっき液中に分散させて析出させる重要な役割を担う .

5.6.1.(b) 装置利用の観点からの要求事項

また ,機上再生装置を実際に利用してゆくという観点においては ,次の三点が加味されていることが望ましい .

．堅牢性・安全性

と共通する部分でもあるが ,移設時の衝撃などにより破壊して薬液が混ざり合うことなどがないよう十分な強度が必要であろう .

．システムの柔軟性

機器に敷設した際に NC 装置など機械本来が有する制御装置と連動が可能なように通信機能を持つ柔軟なシステムが望まれる .また ,薬液 ,電極などの消耗材の交換が素早く簡単にできるというメンテナンス上の柔軟性も必要だろう .

．可搬性

手軽に持ち運びが可能であり ,どのような機械にも設置し活用できる機能があれば便利であろう .

．機動性

加工の状況に応じて膜の特性をすぐに変えることができるように ,薬液の交換がすぐに可能で ,かつ薬液を交換しても短時間にめっき条件の設定変更ができると良いだろう .

5.6.2 試作機の概要

以上のような観点から図 5-77 に示す装置（型式名:ER-01）を設計，製作した．システムの概要を図 5-78 に示す．図のように ER-01 はめっき液などの電解液を保持する電槽部と，各プロセスを制御する制御部（Process Control Unit）部により構成されている．この電槽部に再生したい工具を挿入し，各処理を行う．以降主立った部分の特徴について述べる．

5.6.2.(a) 電槽部

本体の構造は，安全性および堅牢性の観点から自動車用バッテリーの構造^{5-38) ~ 5-40)}を参考にして，ポリプロピレン製のプラスチックを用いて製作した．ポリプロピレンは電解液に対して腐食を防止でき，電解液を保持するのには好適である．この電解液を入れる電槽部は各工程に応じた電解液をそれぞれ入れられるように六つの槽に分割されている．電槽部には同じくポリプロピレン性のカバーが付く．カバーには主に 5 ~ 15mm 程度のドリルやエンドミルなどの回転工具を挿入し，再生処理ができるように穴が設けられている．また，カバー部にはインジケータ LED が取り付けられており，給電中に色が変わるようになっており，作業者が処理状態や装置の異常を確認できるようになっている．

さらに，電槽部本体には浴温を適切な温度に保てるように装置外周に巻いたシリコンラバーヒーター⁵⁻⁴¹⁾（（株）スリーハイ製，K-31 型 100V200W，0 ~ 100 ）が取り付けられている．

なお，浴の攪拌については挿入される工具の自転により攪拌を行う．

5.6.2.(b) 給電電極の選択

他方，各処理工程においては，それぞれの電解質浴および装置に挿入された工具に電流を供給する必要がある．このため，各槽の電解質溶液に応じて耐蝕性やそれともなう浴の品質劣化を避けることができるような電極を用いる必要がある．この電極選択の基準としては，表 5-30，表 5-31 を参考に，Ni めっきおよび硫酸電解剥離プロセスに適切なものを選択することにした．（図 5-79）

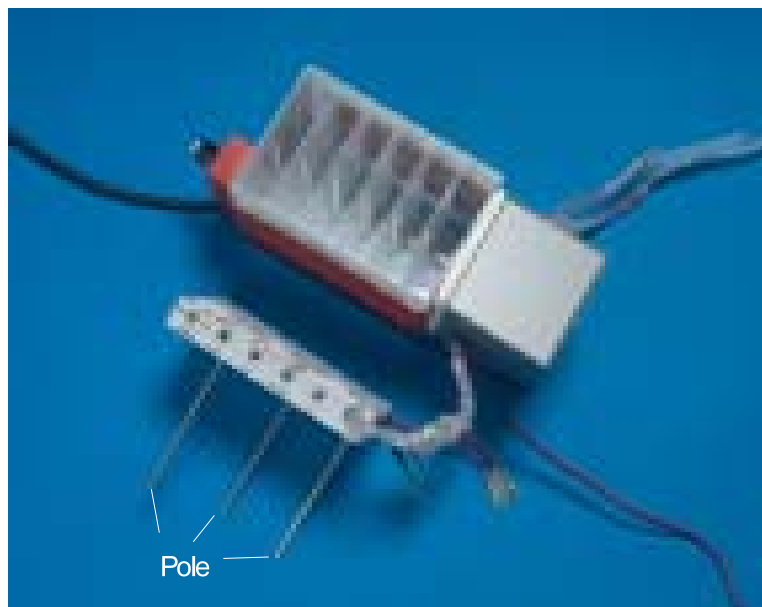
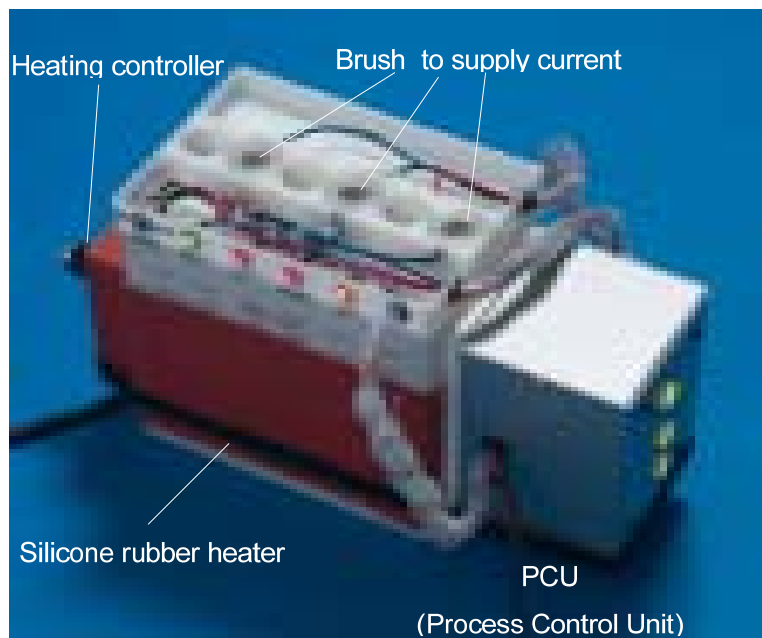


Fig. 5-77 Outside & inside looks of the developed device, named as ER-01

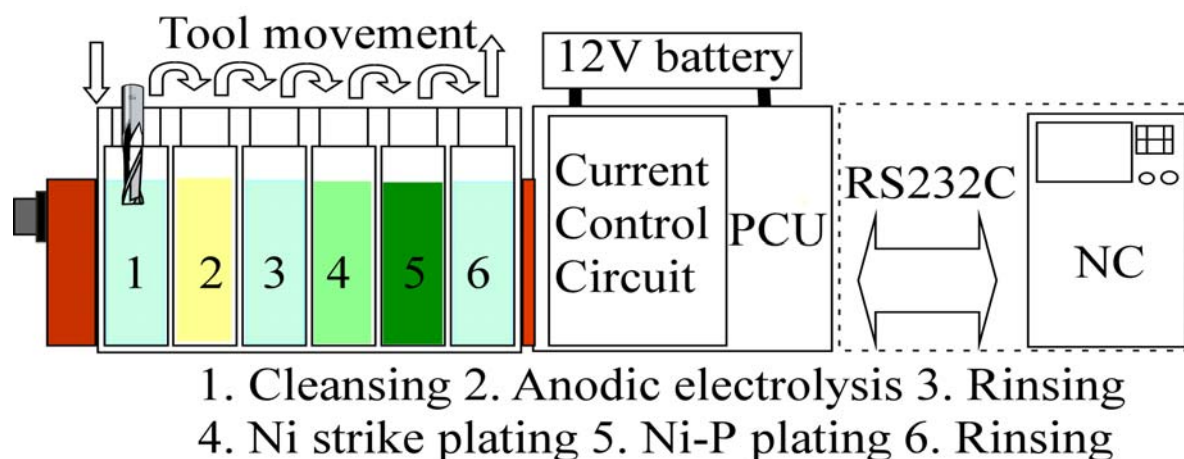


Fig. 5-78 Illustration of the control system and sequence

最初に、複合めっき処理第一工程であるNaOHアノード電解浴では、陰極にSUS304の電極を用いることとした。アノード電解においては工具は陽極側になり、陰極側では水素が主に発生する。このため装置を利用していない保管時に5%のNaOH溶液に極端に侵されることがなければ良いと考えられる。したがって、耐食性のみを考慮すれば良いのでそのようにした。

次に第二工程のNiストライク浴は、下地めっきとしての役割を担う。下地めっきでは最終工程のNi-Pめっきの密着を確保することが求められるため、母材上の不動態化を防ぐためにもNiを積極的に析出させておかねばならない。Niを積極的に析出させるためには、電解液中に積極的にNi⁺イオンをとけ込ませて、電極周囲のNi濃度をできる限り高くしておくことが大切である。そこで保管中においてもNiが溶出するようにNi棒を陽極に採用した。

最後に最終工程のNi-P浴においては、Ni-P浴の組成が陽極成分の溶出により変化しないように、Ptコーティング処理を施した不溶性陽極を用いた。

また、H₂SO₄電解剥離浴の陰極電極については、長期保存の観点からIrコートの不溶性電極を用いることとした。

挿入された工具に対しては、カバー部に設置されたブラシを介して電流を供給する。ブラシは、工具本体およびめっきされた切れ刃を損傷せず、かつ確実に工具に電流を供給できる接触圧、また、電解液に対する耐久性が求められる。本研究においては、0.1mmのSUS304ステンレス線を用いた図5-80のブラシを開発した。これにより、6～12程度のエンドミルをブラシに挿入した際に、接触抵抗0.1から0.2

第五章 切削工具の部分形成と再生技術

溶 液 系	めっき浴種	析出金属	可溶性陽極	不溶性陽極	備 考
硫酸塩系	ワット浴 硫酸銅浴 硫酸亜鉛浴 硫酸スズ浴	Ni Cu Zn Sn	ニッケル, 含硫ニッケル 含リン銅, 無酸素銅 亜鉛 高純度スズ	鉛合金, 被覆電極 (PbO_2 , $\text{IrO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$)	塩化物添加で陽極溶解促進
クロム酸塩系	サージエント浴 フッ化物添加浴	Cr		鉛合金 (Pb-Sb, Pb-Ag)	陽極酸化 $\text{Cr}^{3+} = \text{Cr}^{6+} + 3\text{e}$
スルファミン 酸塩系	スルファミン酸ニッケル浴 スルファミン酸銅浴	Ni Cu	ニッケル, 含硫ニッケル 電解銅	Pt/Ti ³⁾	ニッケル浴, 銅浴ともに電鍍で用いられ, 補助陽極に不溶性陽極を使用する。
リン酸塩系	ピロリン酸銅浴 ピロリン酸スズ浴 中性金浴	Cu Sn Au	OFHC ¹⁾ , ロール銅 高純度スズ ²⁾ 金	Pt/Ti ³⁾ , SUS 304	銅溶解促進のために過剰のアンモニアを要す。 陽極酸化 $\text{Sn}^{2+} = \text{Sn}^{4+} + 2\text{e}$
シアン系	シアン化銅浴 シアン化亜鉛浴 シアン化金浴 シアン化銀浴	Cu Zn Au Ag	電解銅, 無酸素銅 亜鉛 金 銀	Pt/Ti ³⁾ Pt/Ti ³⁾	遊離シアン, 酒石塩が陽極溶解促進 NaOH 濃度が陽極溶解に影響
濃厚アルカリ系	ジンケート浴	Zn	(亜鉛)	鉄および鉄(亜鉛) ⁴⁾	NaOH 濃度が陽極溶解に影響
カルボン酸系	酸性金浴 中性スズ浴 合金めっき	Au Au 合金 Sn Ni-W	高純度スズ ²⁾ ニッケル	Pt/Ti ³⁾ Pt/Ti ³⁾ 被覆電極 ($\text{IrO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$)	$\text{KAu}(\text{CN})_2$ が安定に存在 陽極電流密度 2~4 A/dm ² 陽極電流密度 10~30 A/dm ²
スルホン酸系	スズ合金浴	Sn 合金	スズ, 鉛, ビスマス	Pt/Ti ³⁾	単一金属浴も可能
ホウフッ酸系	ホウフッ化スズ浴 ホウフッ化はんだ浴	Sn Sn 合金	高純度スズ ²⁾ スズ, 鉛		陽極/陰極の面積比 2/1
塩化物系	ウッド浴 酸性亜鉛浴	Ni Zn	電解ニッケル 亜鉛		密着性向上用ストライクめっき浴 NH_4Cl , pH ≒ 6

1) 無酸素高導電銅, 2) 99.9%スズ, 3) 白金めっきチタン電極, 4) 鉄と亜鉛を併用する

Table 5-30 Soluble and insoluble anode for electroplating^{5-42), 5-43)}

電解質水溶液	陽極材料	主反応	備 考	好ましくない陽極材料
酸性アルカリ	ニッケルとその合金 炭素鋼, ステンレス鋼	酸素発生	溶液にハロゲン化物(例: Cl^-)が存在すれば著しく腐食する。	炭素, 黒鉛 ¹⁾ , 銅とその合金
濃厚塩化物および塩酸	炭素, 黒鉛 ¹⁾ マグネタイト, 二酸化鉛, 酸化物被覆陽極 (RuO_x 型)	塩素発生	希薄溶液やオキシ酸塩(例: SO_4^{2-})の存在下で著しく腐食する。 有機物の存在下で腐食が加速される。	ほとんどすべての金属と合金
希薄塩化物	白金とその合金, 白金被覆陽極, マグネタイト, 二酸化鉛, 酸化物被覆陽極 (RuO_x 型)	塩素発生	有効塩素濃度の増加とともに腐食速度が増加する。	白金族金属を除くほとんど すべての金属とその合金
硫酸塩, 中性硫酸塩, 酸性クロム酸塩	鉛とその合金 白金とその合金(被覆材) 高ケイ素鋼鉄 酸化物被覆陽極 (IrO_x)	酸素発生	溶液にハロゲン化物(例: Cl^-)が存在すれば著しく腐食する。 過電圧が高い。 腐食速度が大きい。 有機物の存在下で腐食が加速される。	炭素, 黒鉛 ¹⁾ , ニッケル, 鉄, 銅とその合金

1) グラファイト

Table 5-31 Soluble and insoluble anode for electrolysis^{5-42), 5-43)}

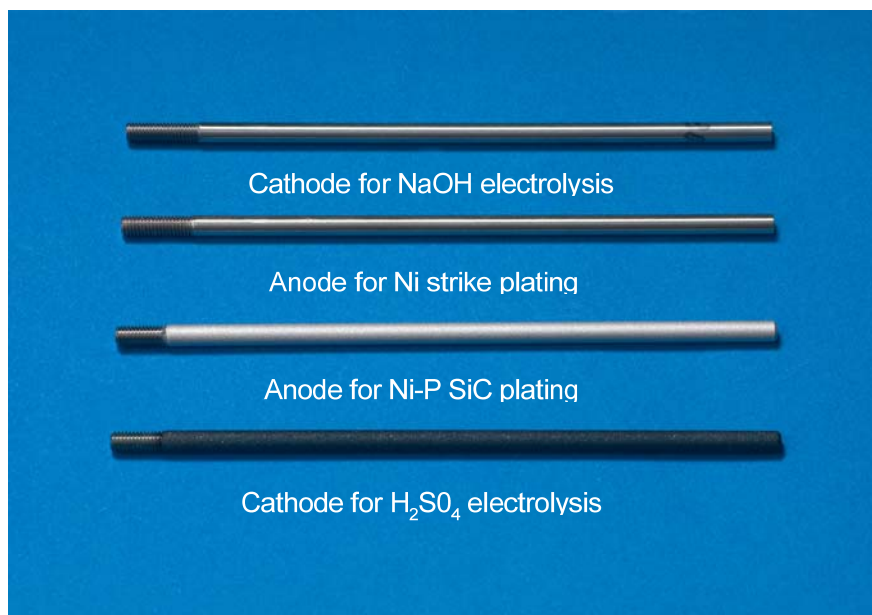


Fig.5-79 Poles



Fig.5-80 Brush

程度の低い接触抵抗で電流を供給できる。

5.6.2.(c) 電流制御部

工具は、図 5-80 に示すように電解液の入ったそれぞれの槽を移動して被覆形成がなされる。めっき時の電流制御は、PCU という制御ユニットで行われる。PCU は電流制御回路とそれを統括するマイコンで構成されており、内蔵したシリアルポートを利用して NC 機器と連動できる。

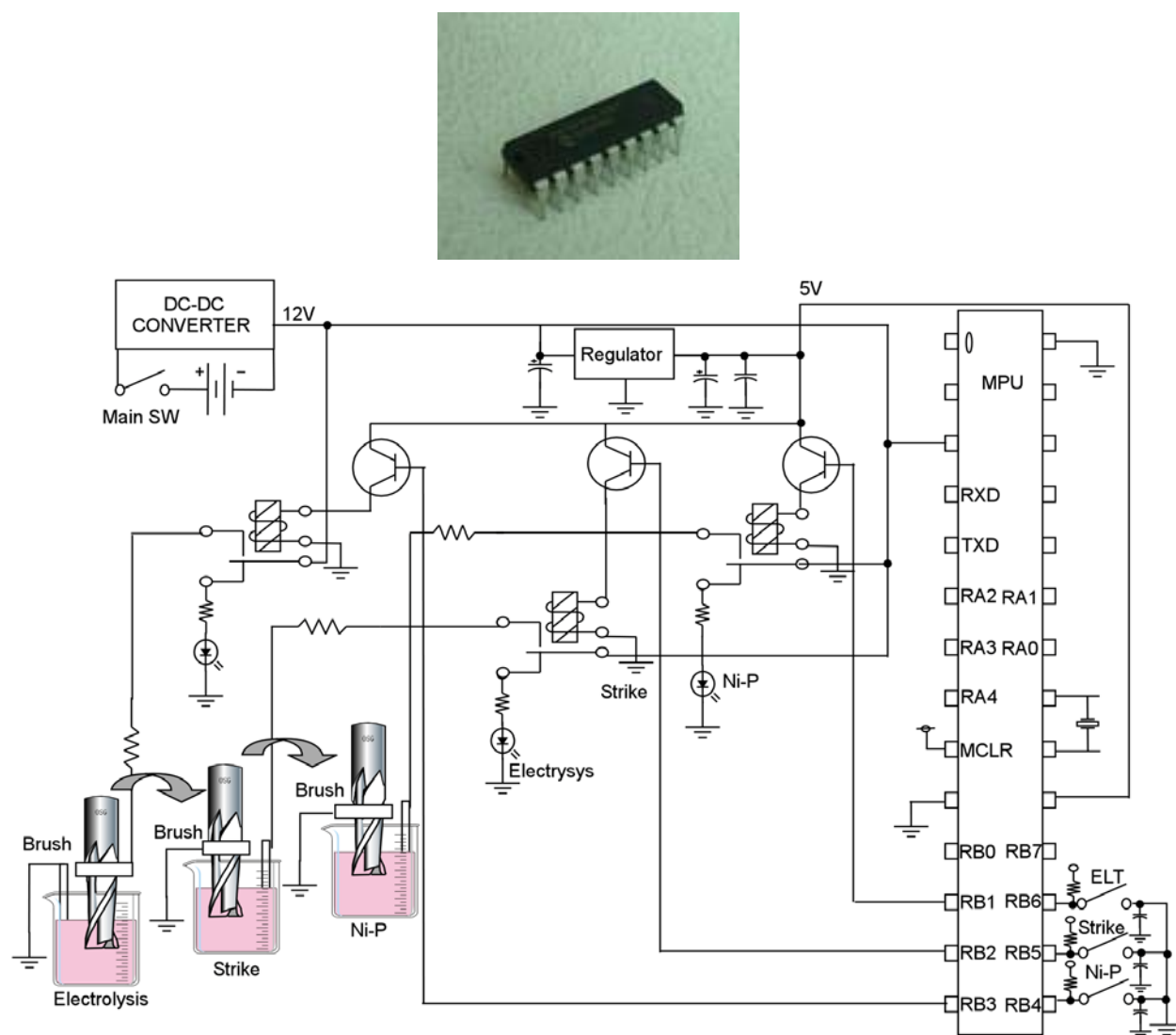


Fig. 5-81 CPU⁵⁻⁴⁴⁾ and process control system

電源については、可搬性を考慮してバッテリー駆動を採用した。バッテリー駆動を採用することで工作機械のアースとアースを隔絶できるために、ER-01に工具が挿入されめっきの電流が流されても工作機械本体には電位差が生じず、電流が流れないようにしている。

5.6.3 機能の検証

5.6.3.(a) 温度制御

まず第一に、試作した装置が要求された項目を満たしているのか動作検証を行う必要がある。本節では、特にめっき操作において求められる四つの項目について検証する。

最初はめっき液の適切な浴御管理が可能かどうか取り付けたシリコンラバーヒーターの実験により確認することにした。

図 5-82 に実験方法を示す。本体の 6 つの電槽それぞれに水を 500ml、合計 3L を入れ、ヒーター出力を最大にし温度上昇を計測する。工具へのめっきは、ドリルは先端チゼル部、エンドミルであっても端部からせいぜい数 mm 程度が再生の中心になることから、めっき液の液表面部から深さ 10mm 程度の範囲内が適切なめっき温度になっていることが望ましい。そこで、温度を計測する温度センサを図のように液面付近に設置し、インターフェースを介してその出力信号パーソナルコンピュータで計測し、温度上昇の程度を確認する。なお、装置の構造上、内側の電槽と外側の電槽では温度の違いが生じると考えられるので、センサを二つ設置し、外気温の変化も同時に計測している。

最初に電槽の上部ケースを外した状態で加熱を行いどの程度まで温度が上昇するかを確認した。結果を図 5-83(a) に示すが、1 時間 40 程度で気温とほぼ等しい 26 前後の水温から外側のヒーターに隣接した槽で 55.7、中央部のヒーターに隣接していない内層部で 52 の水溫に到達していることがわかる。内外槽の温度差は 3 あるが許容できる範囲と言えよう。しかし、上部を開蓋状態で温度計測しているため、水の蒸発による放熱量の大きいいためか、適温である 60 付近より若干低く、上部の蓋部分をした状態で計測する必要があると判断された。

そこで、上部の蓋部分を取り付けた状態で再度加熱実験を行った。このときに結果を図 5-83(b) に示す。蒸発などにもなう放熱が抑制されて温度曲線が改善され、最高到達温度も外側の槽で 63.2、内側の槽で 62.2 と目標とする温度になっており、また両者の温度差も改善されている。

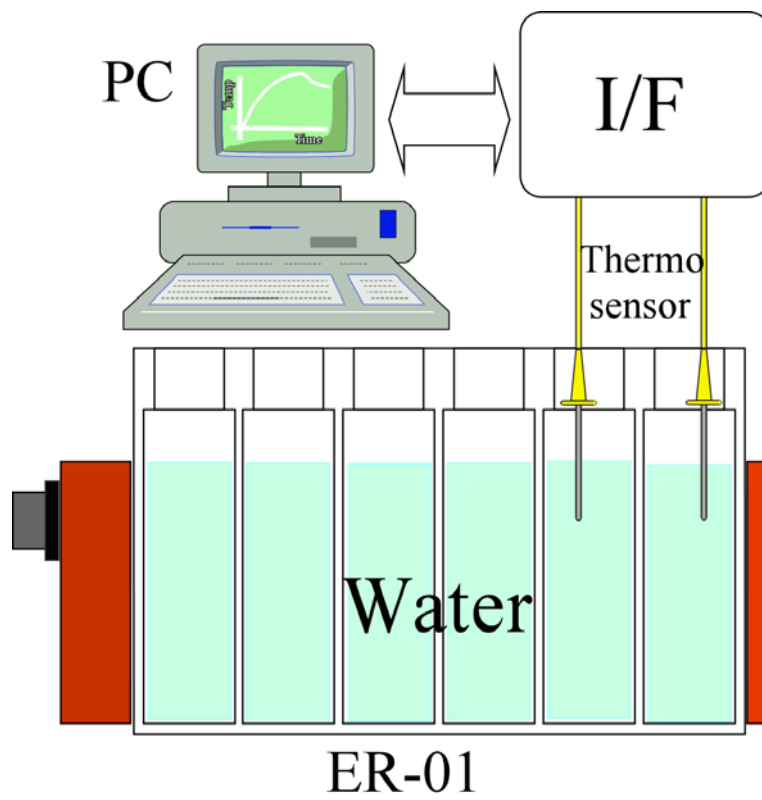
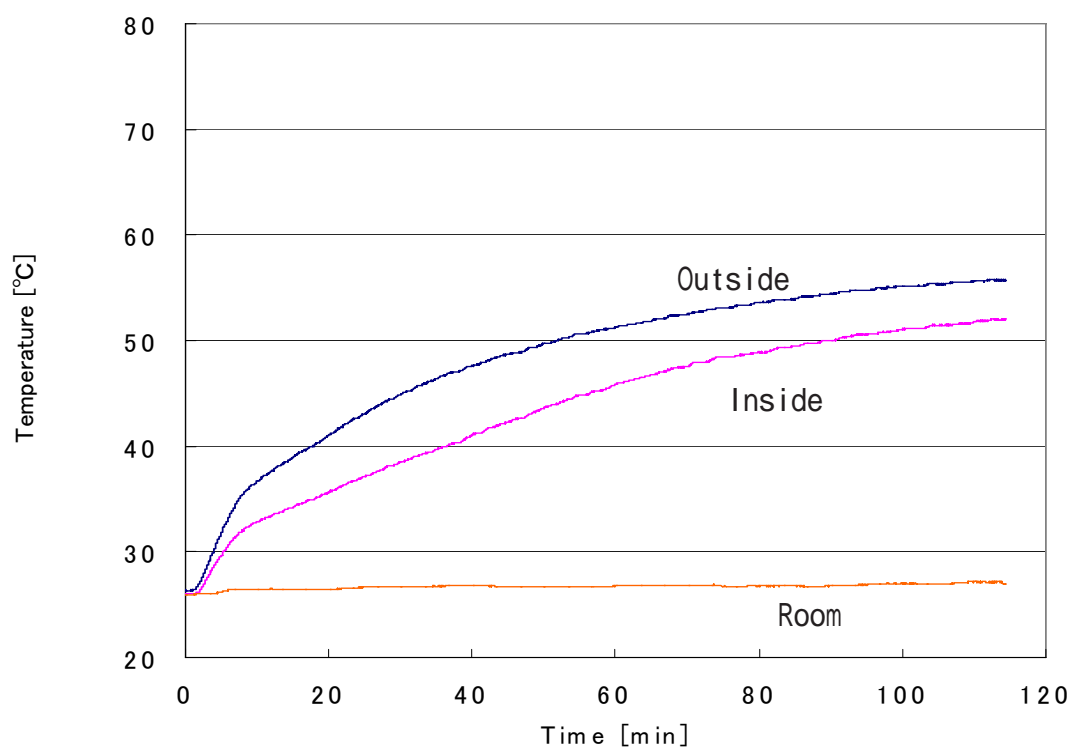
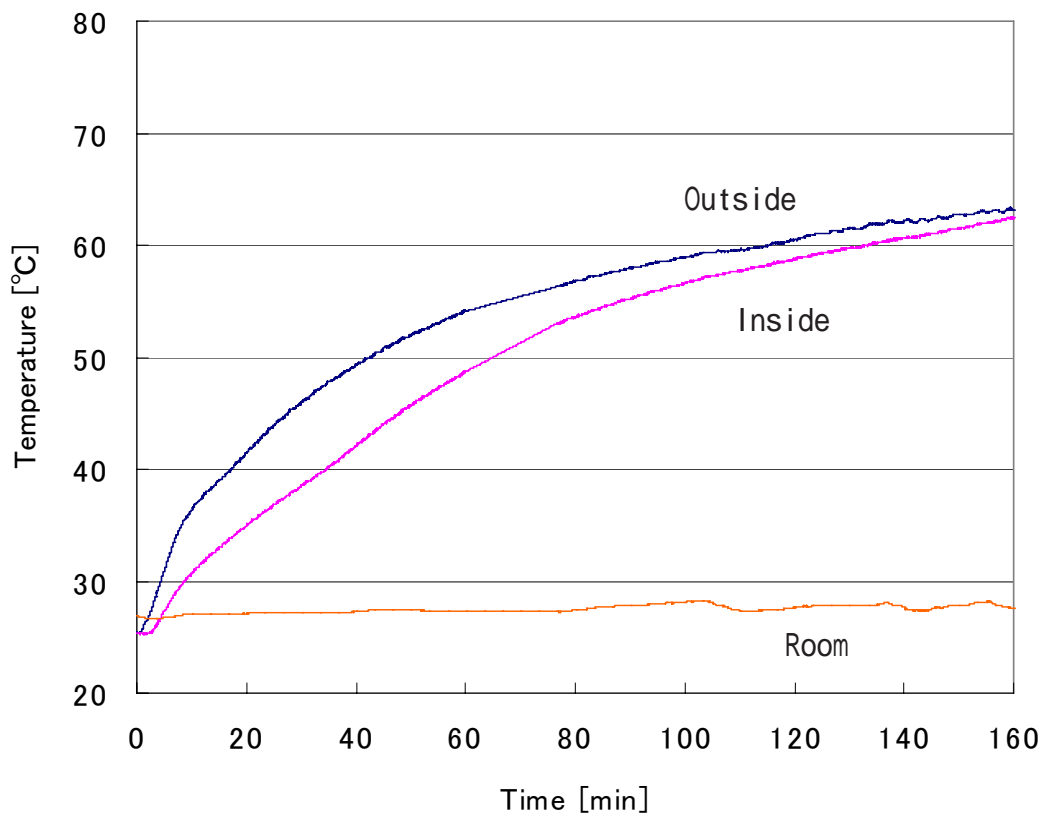


Fig. 5-82 Temperature control test



(a) without upper cover panel of ER-01



(b) with upper cover panel of ER-01

Fig. 5-83 Thermo sensor outputs

5.6.3.(b) 基礎めっき試験

ハイス丸棒へのめっき試験を行い,ER-01の電流制御部が正常に機能するかどうかを確認する.基本的には装置にエンドミルではなくハイスの丸棒を挿入してめっきを行う.なお,ここでは各工程において適正に給電がなされているか給電状態を把握するためにアナライジングレコーダ((株)横河電機製DL-750,最大レコード長2.5MW/Ch トータル50MW,最高サンプルレート10MS/s)を用いた.この装置を図5-84のようにER-01の各電極間に接続し電位差の変動を記録した.実験開始からの各三つの工程における電極間電圧の変動を図5-85に示す.各工程とも,プロセスの開始から大きな電圧の変動もなくほぼ一定電圧で工程が終了しているのが理解できる.プロセスが終了すると図5-86に示すように丸棒の端面に半径で2~4 μm の銀色のめっき膜が形成される.析出する膜厚の傾向としては,端面部ほど電解が集中し易いために厚くなる傾向にあり端面で概ね4 μm ,端面から離れると2 μm 程度と漸減する.

以上の結果から,ER-01が問題なく動作していることが示された.

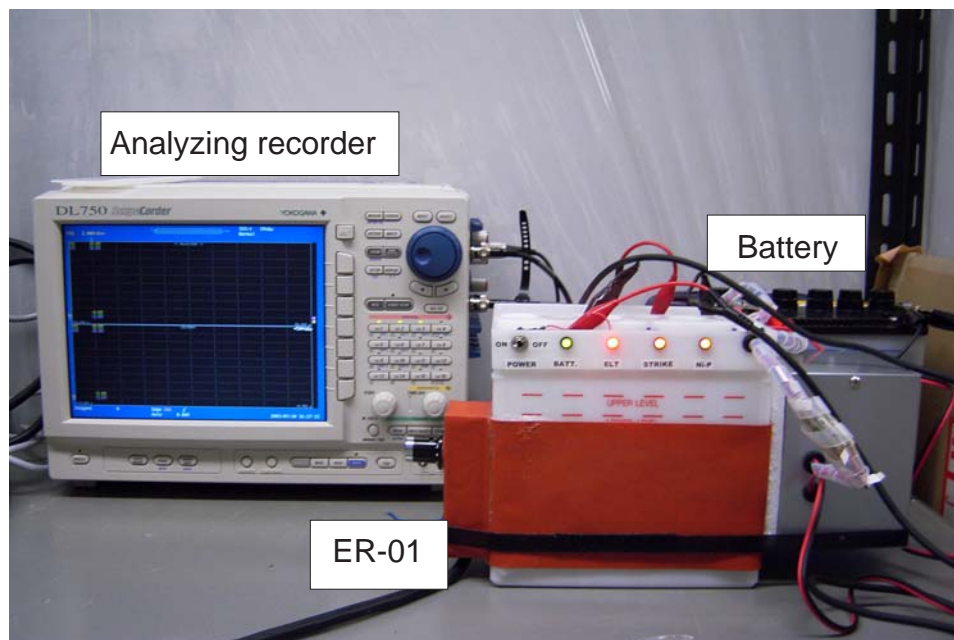
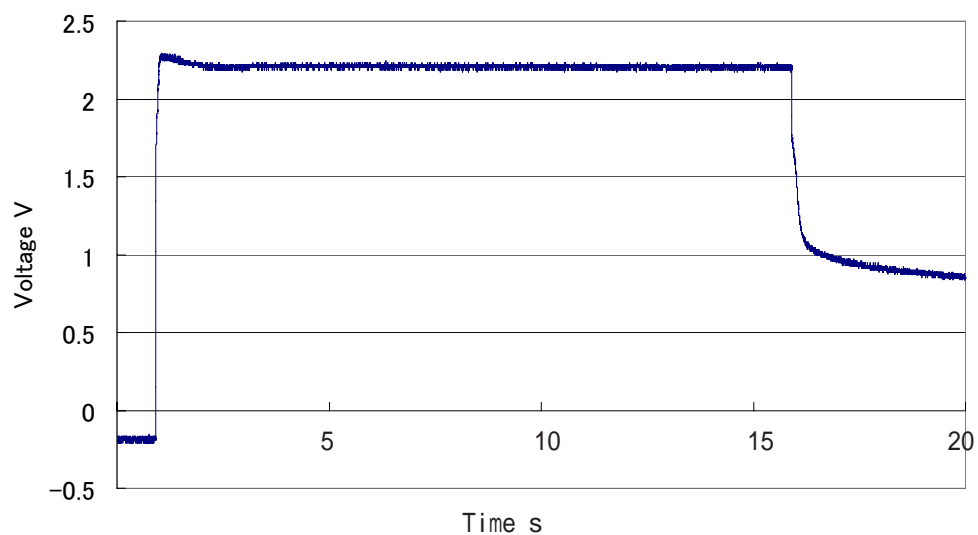
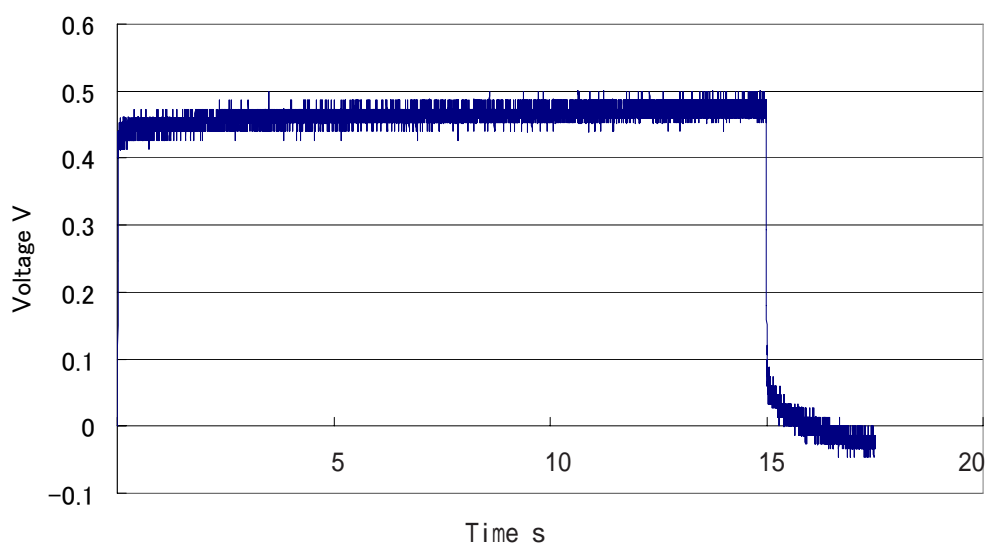


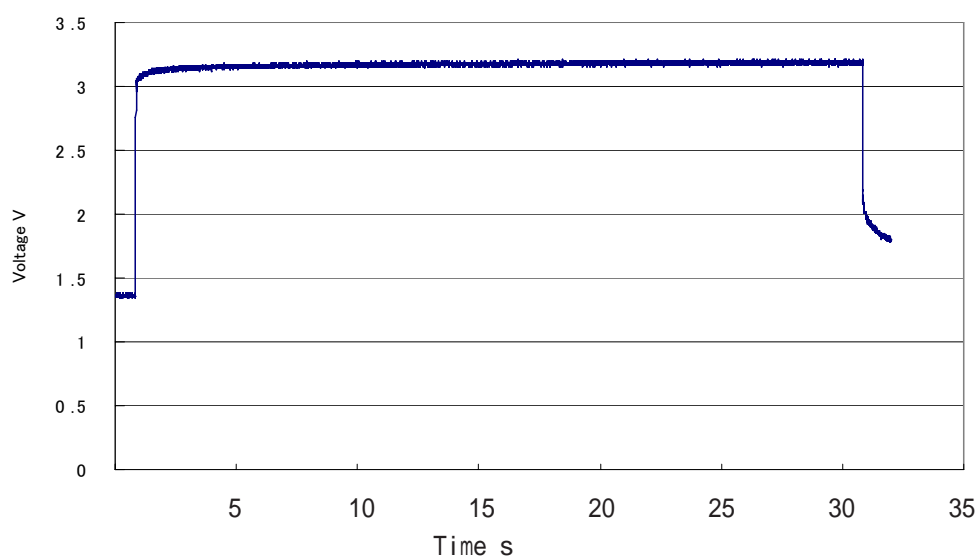
Fig. 5-84 ER-01 basic plating performance test



(a) NaOH electrolysis



(b) Ni strike plating



(c) Ni-P plating

Fig. 5-85 Voltage duration of each process

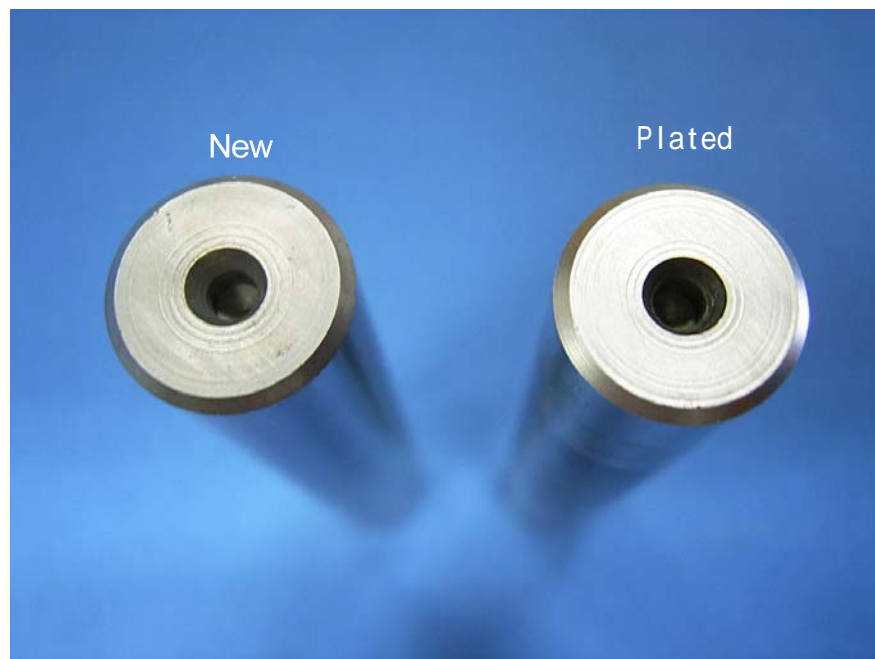


Fig. 5-86 Photographs of HSS shaft

5.6.4 機上コーティング実験

5.6.4.(a) 実験方法

前節の結果から ,ER-01の基本動作に問題がないことが確認されたことから ,本節においてはER-01を利用してエンドミルの機上コーティング実験を行う . 機上コーティング実験においては 6mmの超硬スクエアエンドミル(オーエスジー(株) ,MG-EXDL)を用いた . 実験の様子を図5-87に示す . マシニングセンタ(浦和精機(株) UA-53)のテーブル上には , ER-01 が設置され , 最初に工具を挿入する穴の座標 , および液面からの深さ , すなわちz軸の座標をマシニングセンタのNCに登録する . こうすることにより , 自動的にER-01の穴に工具を挿入し , Ni-P皮膜を形成できることになる .

めっき皮膜が適切に付いたかどうかは , 図5-88に示すマイクロスコープ((株) キーエンス製 , VH-8000 , 200万画素 CCD) をER-01と同じマシニングセンタテーブル上に設置して観察する . マイクロスコープを同じく機上に設置することにより , 機上で工具のコーティング状態や摩耗状態を適切に確認できるようになった .

工具のコーティング手順については , 既に図5-78において解説したが , ER-01の工具挿入穴にエンドミルを挿入し , 工具が液中に挿入されたと同時に液の攪拌を目的に50rpmの回転数で主軸を回転させる . そして , 各電解工程において電流が供給される .

5.6.4.(b) Ni-P皮膜機上コーティング

ER-01により超硬エンドミルの機上Ni-Pめっきコーティングを行ったところ , 図5-89のような電圧変動が記録された . このときのめっき膜の状態を図5-90 , 5-91に示す . 前者はエンドミル切れ刃を側面から観察した写真 , 後者は底刃の逃げ面の写真であるが , めっきが均一に付いていないことがわかる . この原因をプロセス中の電圧挙動から推察すると , 図5-85の基礎めっき実験の状態と比較して , 供給中の電圧が図5-89のほう若干安定していないことがわかる . これは , 液を攪拌するために工具を回転させているので , 液面が波立ち , 工具と電解液の接触面積が変化して抵抗が変動しているためではないかと考えられた .

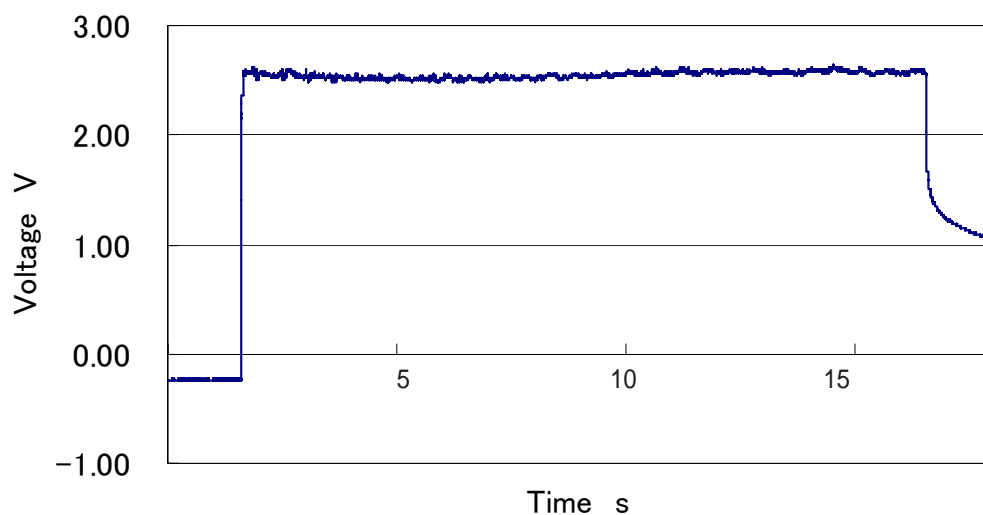
そこでめっきの品質を向上させるべく , 工具の回転を止めて攪拌を行わず , 液面を波立たせない状態でめっきを行うこととした . すると図5-92のように各プロセスの



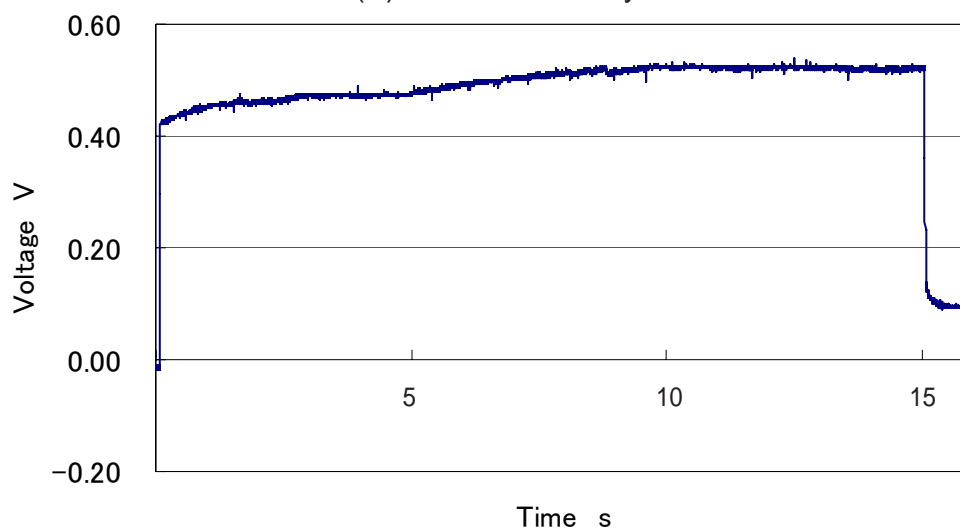
Fig. 5-87 Set-up



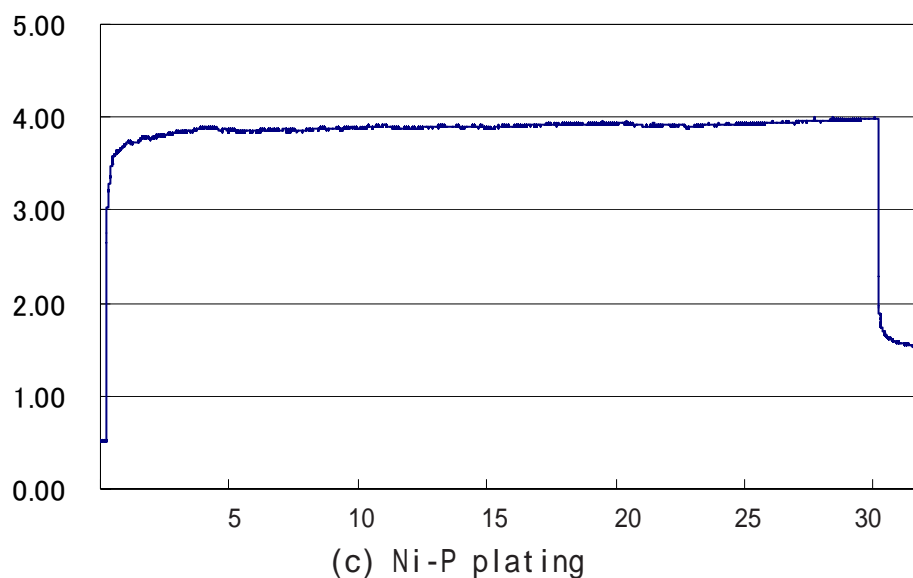
Fig. 5-88 Microscope VH-6000



(a) NaOH electrolysis



(b) Ni strike plating



(c) Ni-P plating

Fig. 5-89 Voltage duration of On-the-machine test

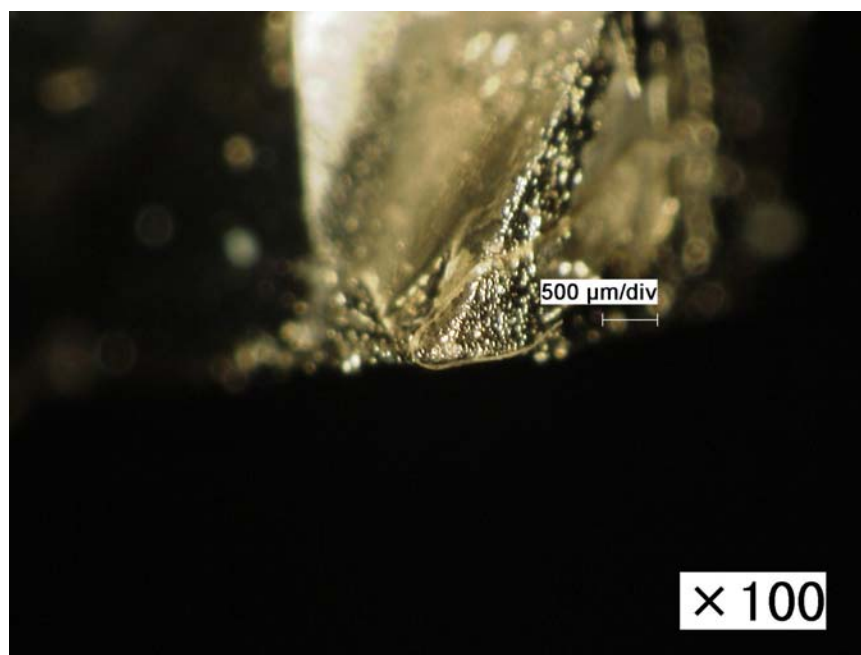


Fig. 5-90 Axial view of plated edge

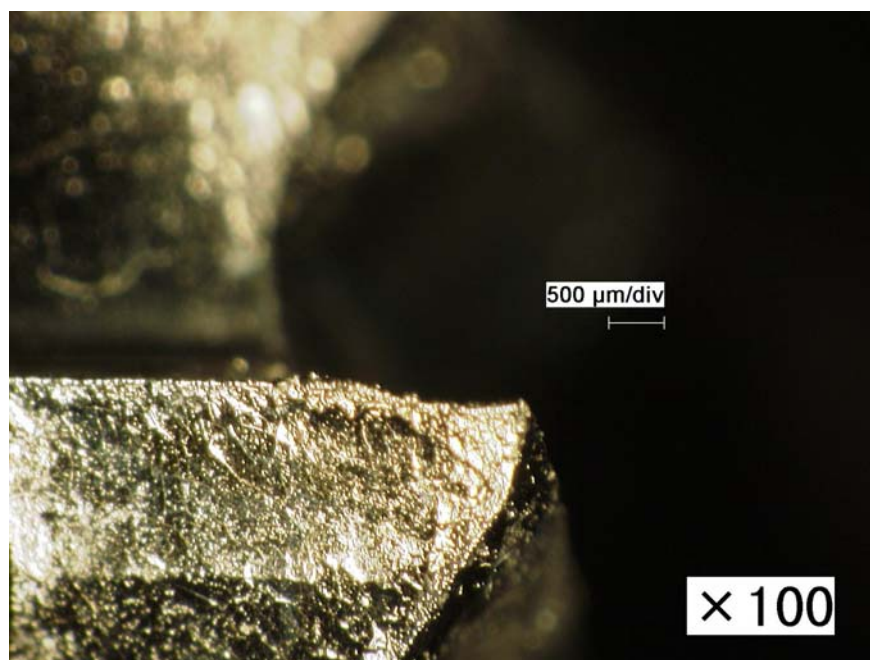
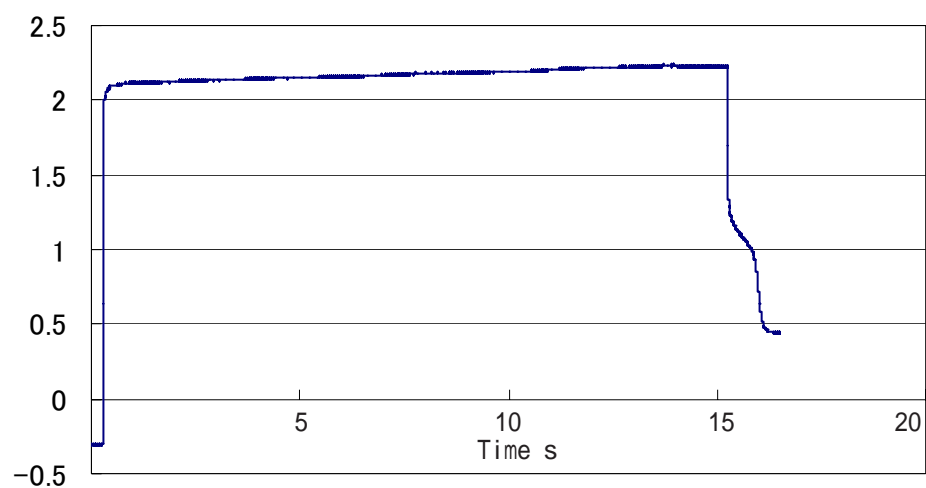
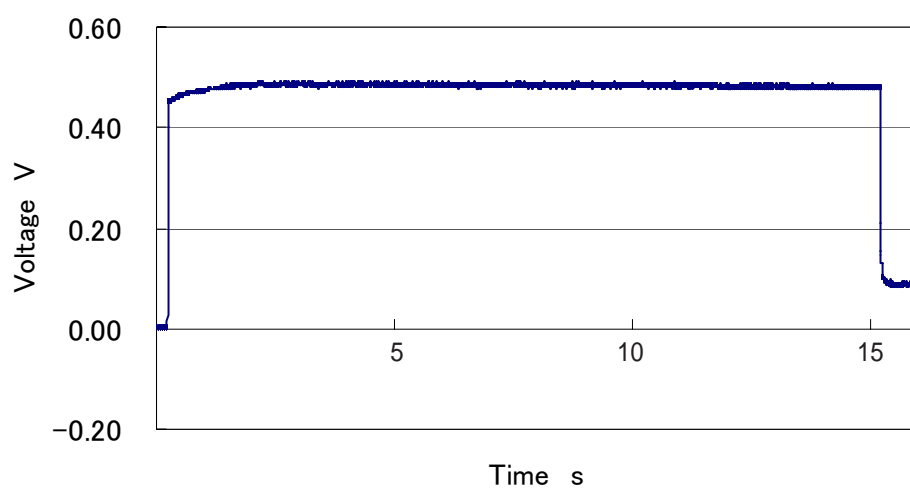


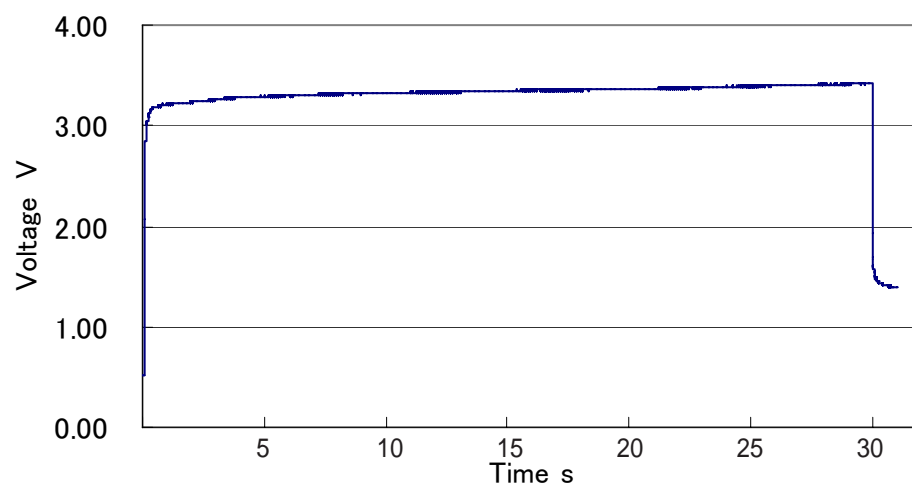
Fig. 5-91 Bottom relief edge view of Plated endmill



(a) NaOH electrolysis

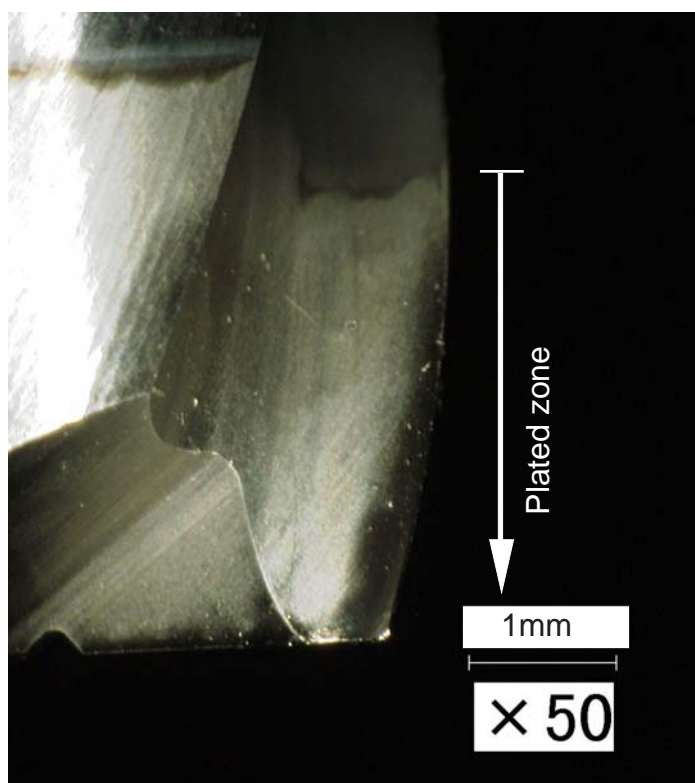


(b) Ni strike plating

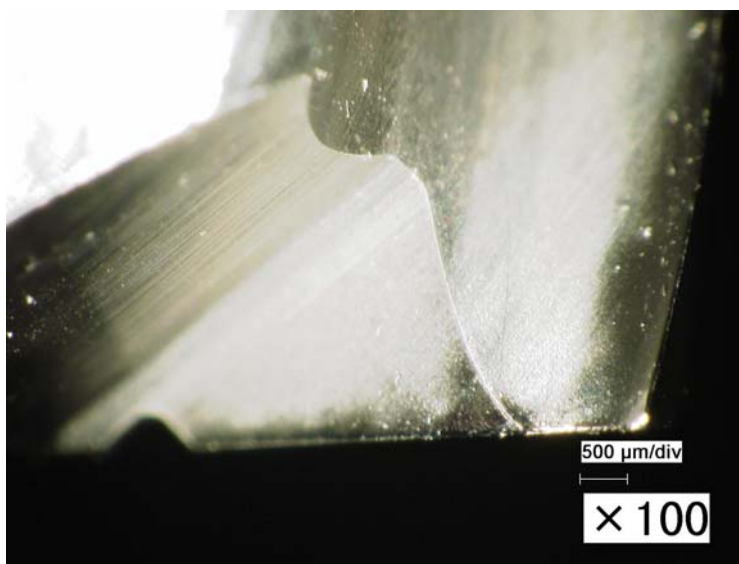


(c) Ni-P plating

Fig. 5-92 Voltage duration of each process



(a)plated edge



(b)magnified photo(a)

Fig. 5-93 Axial view of plated edge without spindle rotation

電圧が比較的直線的に安定し、図5-93のように良好な品質のめっきが得られることがわかった。なお、めっきの膜厚や、工具の形状の変化については、エンドミルが複雑な形状であり、製造時の加工誤差も数～数十 μm であるため、計測だけでなくどの程度の範囲まで精度をめっき求めるのか妥当な指標がない。このためめっきコーティング後の計測および評価は今後の課題とした。ただし、丸棒における実験結果から見積もると厚さ2～4 μm の膜が析出していると考えられる。

5.6.4.(c) Ni-P-SiC 複合めっきコーティング

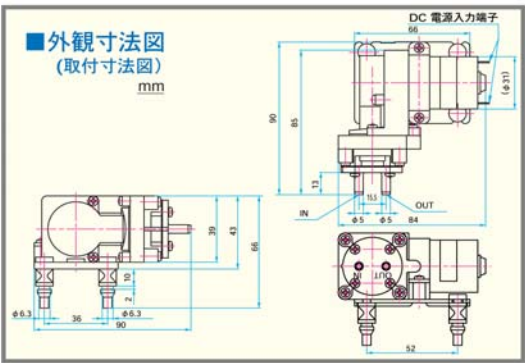
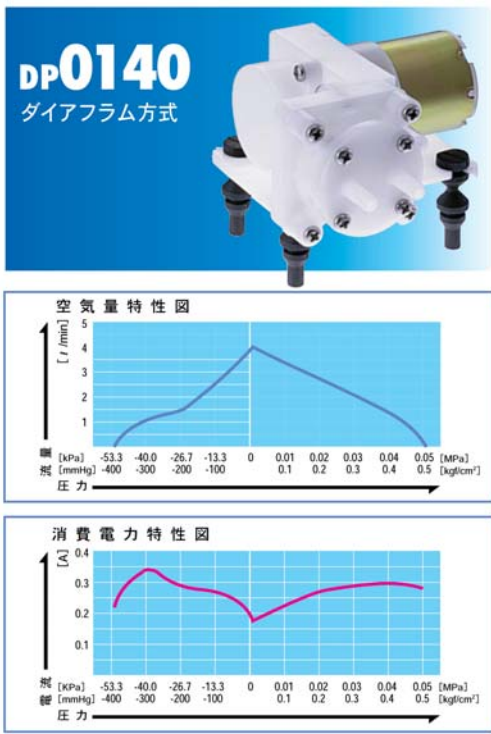
前節の結果から、ER-01により機上でNi-P合金めっきを工具に形成できることが示された。しかし、攪拌により液面を波立たせると工具と電解液との接触面積が拘束されずに電圧が変動し良好な品質のめっきを形成できないことが明らかになった。しかし、本研究においては最終的にはSiC等の硬質粒子を析出させて様々な複合めっきを機上でできるようにするのが大きな目的である。したがって、何らかの形で攪拌を行い硬質粒子の析出を促進させることが重要と言える。

一方、めっき品質を安定させるためには電解液と工具との接触面積を拘束し、できる限りその変動にともなう接触抵抗の変化を無くさなければならない。工具にマスキングを施し、液面との接触面積を拘束するのが最も簡便かつ確実な方法であるが、実際の使用を考慮するとマスキング作業は作業性の低下につながり、機上再生のメリットが無駄になるだろう。

そこで、最初に

1. 攪拌によりめっき液の流れを作り、共析粒子を分散させて、次に、2. 攪拌を停止し電流を供給するといった二つのステップで作業を行い、浴の攪拌と粒子の共析を両立させることにした。

攪拌方法については、プロペラ攪拌、空気攪拌、超音波攪拌、ジェット攪拌などがあるが、コンパクト、12Vでアクチュエータ駆動が可能、価格を考慮して図5-94に示すダイヤフラムポンプを利用して空気攪拌を採用した。ポンプは図5-95に示すようにプロセスコントロールユニットの脇に設置し、ポリプロピレン製のチューブを図5-96のようにNi-P-SiC槽に深く挿入し、沈殿している共析粒子を巻き上げるような工夫をしている。



■仕様

型 式	DP0140
到達真空度	kPa (mmHg)
吐出空気量	ℓ / min
定格電圧	V
最高圧力	MPa (kgf/cm ²)
最大電流	A
定格時間	
耐用時間	時間
吸入口サイズ	φ5 (外径)
吐出口サイズ	φ5 (外径)
コイル絶縁階級	E種相当
取付寸法	m / m
本体重量	kg

Fig. 5-94 Utilized compact diaphragm pump for air stirring of bath

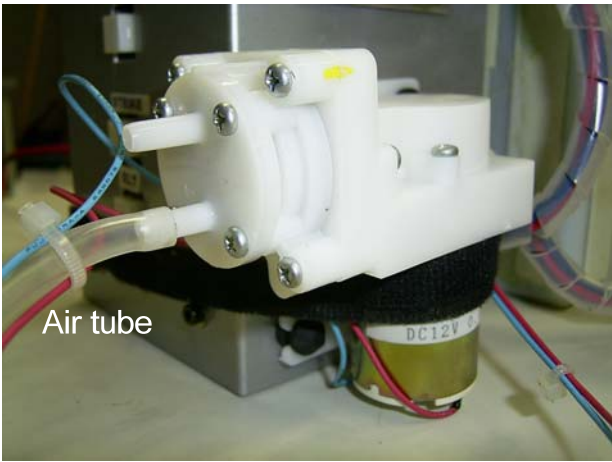


Fig.5-95 diaphragm pump set-ups

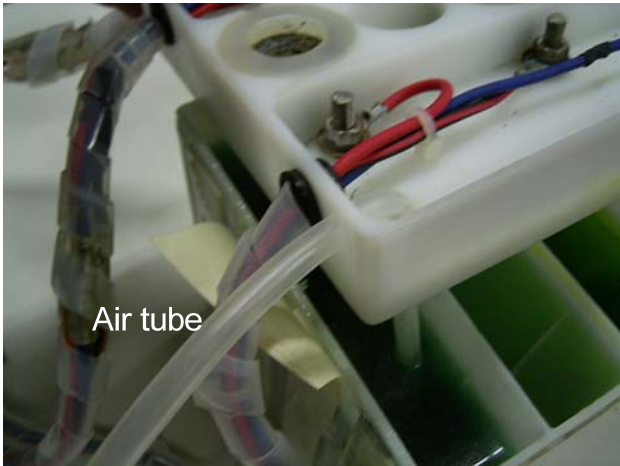


Fig. 5-96 Air tube inserted into Ni-P-SiC bath

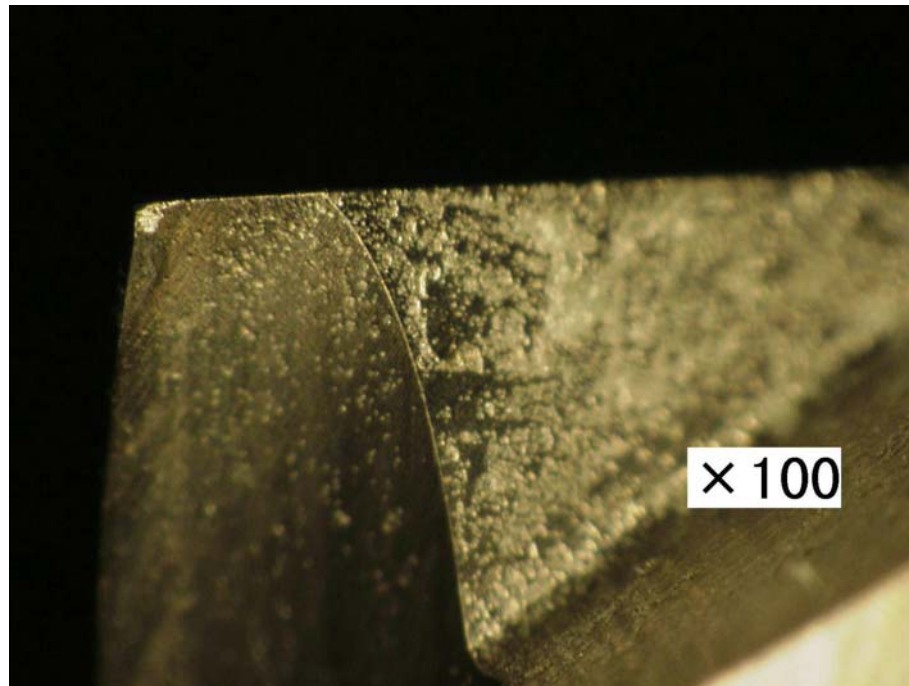


Fig. 5-97 Composite plated edge with Ni-P-SiC

図 5-97 に、前記のような方法にて複合めっきを試みたエンドミルを示す。工具表面に粒子の共析が確認できる。しかし、エンドミルの形状が複雑で、電解密度がその形状に影響されやすいためか、比較的軸の中心部に粒子が多く共析しており、切れ刃のエッジ部にはあまり共析が少ないことがわかる。この粒子の共析の不均一については、

1. ブラシめっきを利用して、強制的に切れ刃付近への粒子の付着を促進する、
2. 均一に粒子の共析が得られるように、電解密度分布を考慮した工具、および陽極形状を検討する。

の二点について検討すべきと考えられる。今後の課題としたい。

5.6.4.(d) 実験後の浴の品質変化について

最後に、浴の品質の変化について言及する。先にも述べたようにめっきの品質確保においては浴の品質管理が有用な役割を果たす。制御因子としてはpHを建浴時とほぼ同じ状態に保つことが最も簡便で重要な因子と言えよう。図5-98に各浴の建浴時、数時間経過した実験前の値、実験直後の値、実験から24時間経過後のpH変化を示す。各浴とも、実験後に若干のpHの変動があるが、24時間経過するとほぼ実験前と同じ状態になっている。この原因は、実験後の溶液は加熱により60℃程度の温度になっており、このことが変動を生じさせていると考えられる。いずれにしても、1回のめっき程度では、液の品質に影響は全くないと言える。

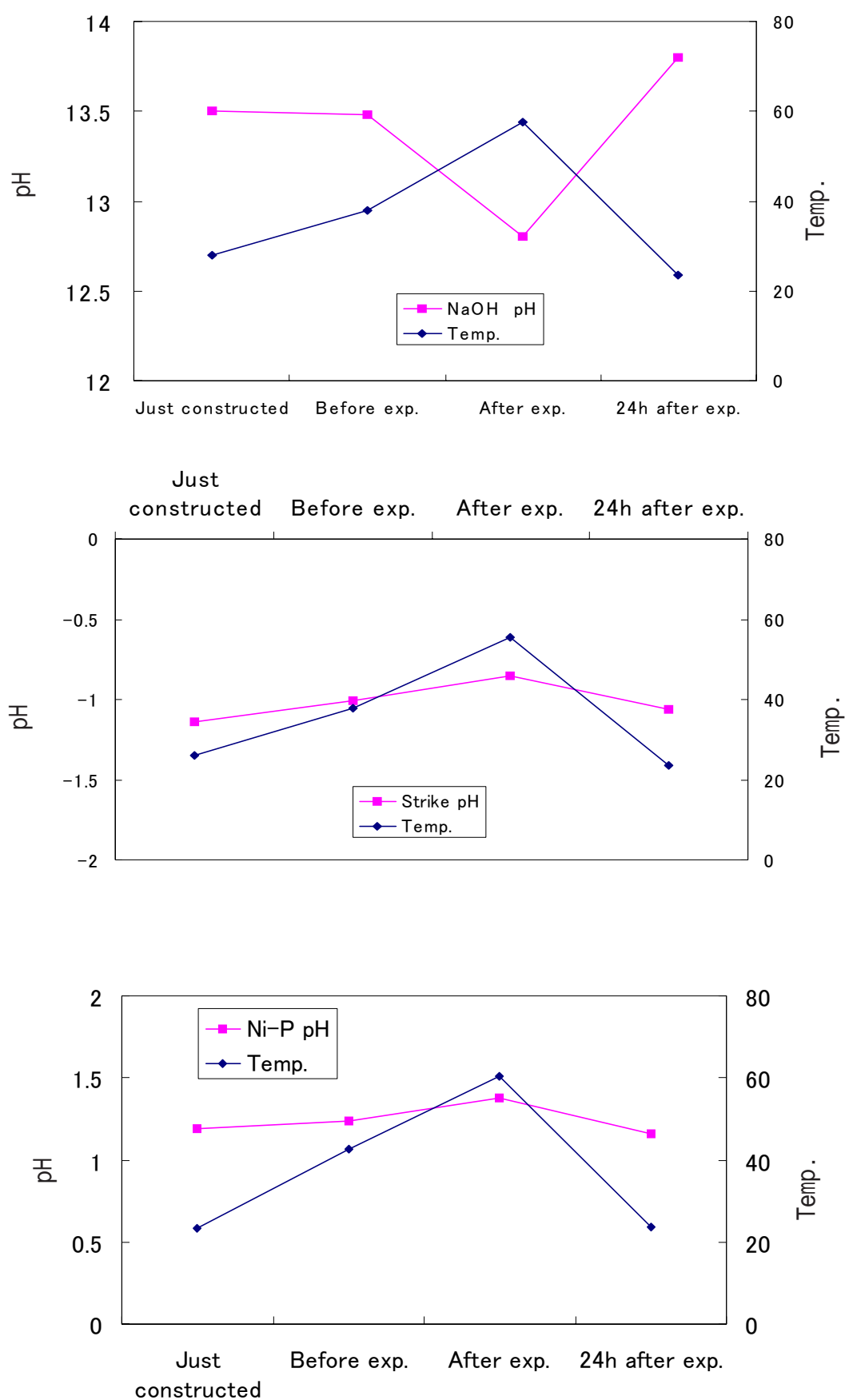


Fig. 5-98 pH observation of each bath

5.7 結論

本章においては、加工点で工具と被削材の間に介在する補材に対して考え方を一歩進めて、介在層自身の強化を行い、切れ刃としての役割を担わすことを検討した。その中で、工作機械上で速やかに切削工具を形成および再生を可能にする工具機上再生技術の提案を行い、その手法を検討した。この工具機上再生技術では、工具母材ではなく機上で成膜した複合めっき膜で切削加工を行い、膜が摩耗して母材層に達する前に電解剥離を行い、再度複合めっきを施して再生をする。得られた結果を下記に記す。

- (1) Ni-P-SiC 複合めっきと電解剥離技術を利用して、5 分以内に切削工具上に硬質膜を生成し、剥離する技術を開発した。そしてこの技術を利用して超硬チップ上にめっき膜を成膜し、切削試験を行ったところ S45C が切削できることが確認された。
- (2) 剥離技術においては、硫酸電解剥離を利用した。この剥離技術においては、めっき膜の剥離と同時に超硬母材表面に不働態被膜が形成される。この膜が形成されると電流が流れなくなり、剥離のプロセスが自然に収束する。したがって、電流の挙動を監視すれば適切な剥離処理の停止時間を検出でき、自動化において有利と言える。
- (3) 下地処理なしで超硬合金に成膜するとテープの粘着力程度で複合めっき膜が剥離していたが、NaOH 電解とストライクめっきを行うと、15 秒の切削試験においても剥離がなかったことから、その有効性が確認された。そして再生を 10 回行っても同様に剥離が見られなかった。
- (4) 一回のめっきや剥離の操作程度では、析出させたり、剥離する膜の体積が少ないために薬液を劣化させて品質を低下させることはない。
- (5) 上記の工程を基に、複合めっきと電解剥離を利用した機上再生装置の開発を行った。装置は、エンドミルおよびドリル等の回転工具を再生することを想定し設計した。そして、マシニングセンタ機上にて Ni-P、および Ni-P-SiC 複合めっき被膜の析出を試みた。その結果、試作装置が要求機能通りに動作することが確認され、機上再生の概念を具現化することができた。

参考文献

- 5-1) 沢田潔, 山本明, 竹内芳美, 佐田登志夫, 超精密フライス加工による三次元マイクロマシニングの高度化(第2報, 工具系の高精度化), 日本機械学会論文集, 63-614, C (1997) 3634-3640.
- 5-2) 山根八州男, コーティング工具の動向とその使い方, 機械と工具, 43, 5 (1999) 2-4.
- 5-3) 竹山秀彦, 切削加工, 丸善, 東京, (1980) 83-84.
- 5-4) 精密工学会編, 精密工作便覧, コロナ社, 東京, (1992) 302.
- 5-5) 仙波卓弥, 田中秀司, 竹内恵三, 超微粒ダイヤモンド砥粒を用いた多層電着工具の開発, 日本機械学会論文集, 66-643, C (2000) 1057-1063.
- 5-6) 千葉康雅, 谷泰弘, 柳原聖, シリコンインゴット切断用電着ワイヤ工具の高速製造法の開発, 日本機械学会2002年度年次大会講演論文集(V), (2002) 309-310.
- 5-7) 精密工学会編, 精密工作便覧, コロナ社, 東京, (1992) 456.
- 5-8) 毛利尚武, 齋藤長男, 表面改質放電加工, 精密工学会誌, 64, 12(1998) 1715-1718.
- 5-9) 葉石雄一郎, 「EDCOAT」技術と切削工具への応用, 機械と工具, 43, 5(1999) 5-9.
- 5-10) 武沢英樹, 古谷克司, 毛利尚武, 形状フィードバック型精密加工システムの開発(第1報) - 基本概念と修正加工例 -, 精密工学会誌, 65, 13(1999) 406-410.
- 5-11) 砂田洋尚, 古谷克司, 液中放電による絶縁体の拡散を利用した研削砥石の製作法～第2報 各種砥粒材料の適用と試作砥石による研削性能評価～, 2001年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2001) 497.
- 5-12) 砂田洋尚, 古谷克司, 液中放電による絶縁体の拡散を利用した研削砥石の製作法～第3報 砥粒層中の砥粒含有量評価と試作砥石の研削性能評価～, 2001年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2001) 498.

- 5-13) 砂田洋尚，古谷克司，液中放電による絶縁体の拡散を利用した研削砥石の製作法～第4報 研削砥石のリサイクル化検討～，2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2002) 340.
- 5-14) 田中武司，磯野吉正，進藤寛英，石崎陽介，光造形による砥石 / ホイールの創製，1997年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集，(1997) 255-260.
- 5-15) 李承福，谷泰弘，柳原聖，紫外線硬化樹脂を用いた構造制御型切断ブレードの開発，2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2002) 342.
- 5-16) 武原徹裕，榎本俊之，谷泰弘，柳原聖，紫外線硬化樹脂を用いた固定砥粒ワイヤ工具の開発，1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1999) 361.
- 5-17) 柳田和夫，電解析出法によるセラミック皮膜の形成，金属 - 臨時増刊号 - ，59，10(1989) 58-62.
- 5-18) 影山泰輔，森田昇，吉田嘉太郎，瀧井康裕，花形晴雄，柳田和夫，陽極火花放電法を利用した微細砥粒の固定化と研磨加工への応用，砥粒加工学会誌，41，5(1997) 167-171.
- 5-19) 榎本佑嗣，三宅正二郎，薄膜トライボロジー，東京大学出版会，東京，(1994) 95-96.
- 5-20) 松永正久，めっき皮膜の耐摩耗性(1)，機械の研究，35，7(1980) 21-26.
- 5-21) J. M. Georges, E. Rabinowicz，The Effect of Film Thickness on the Wear of Hard Electrodeposits, Wear, 14, (1969) 171-180.
- 5-22) 古川直治，複合めっきの現状と将来，表面技術，51，11(2000) 1056-1061.
- 5-23) たとえば，林秀考，河原勲，田里伊佐雄，ワット浴からのαアルミナ粒子とPTFE粒子の同時共析，表面技術，51，3(2000) 319-321.
- 5-24) 高谷松文，複合めっき皮膜のトライボロジ特性，金属表面技術，39，6(1988) 292-300.
- 5-25) 石森茂，清水充，本田信一，大塚信治郎，豊田正義，ニッケル - 炭化ケイ素複合めっき技術の工業化，金属表面技術，28，10(1977) 508-512.

- 5-26) 平松実，日野実，ウェットプロセスから見ためっき被膜の密着性，表面技術，46，1(1995) 13-18.
- 5-27) 鈴木壽，超合金と焼結硬質材料，丸善，東京，(1986) 127.
- 5-28) 高谷泰之，富田友樹，谷和美，稲葉光晴，原田良夫，WC系サーメット溶射皮膜の分極特性に及ぼすクロムの効果，表面技術，49，4(1998) 396-400.
- 5-29) 千葉康雅，谷泰弘，柳原聖，シリコンインゴット切断用電着ワイヤ工具の高速製造法の開発，日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集(V)，(2002) 309-310.
- 5-30) 竹内信彦，畠中信夫，スルファミン酸浴からの電析Ni-P-SiC複合めっきの耐摩耗性，金属表面技術，36，10(1985) 409-413.
- 5-31) 増井寛二，丸野重雄，山田敏夫，電析Ni-P合金の加熱にともなう構造変化，日本金属学会誌，41，11(1977) 1130-1136.
- 5-32) 星光一，金属切削 - 構成刃先について -，丸善，東京，(1960) 31.
- 5-33) 榎本佑嗣，三宅正二郎，薄膜トライボロジー，東京大学出版会，東京，(1994) 100.
- 5-34) 青江徹博，一般めっき皮膜のはく離，表面技術，48，5(1997) 501-506.
- 5-35) 奥野和義，「小特集 / めっき，塗装材のはく離技術」の企画に当たって，表面技術，48，5(1997) 488.
- 5-36) 上村工業(株)WEB カタログ，はくり剤，<http://www.uyemura.co.jp/products/menu1/L-a.html>.
- 5-37) Charles Rosenstein, Stanley Hirsch，Stripping Metallic Coatings, Metal Finishing, 98, 1(2000) 449-450.
- 5-38) ユアサバッテリーホームページ，http://www.yuasa-battery.co.jp/topics/2wqaa/2wqaa_cut.html
- 5-39) Panasonic 制御弁式(シール)鉛蓄電池テクニカルハンドブック.
- 5-40) 村上雄一，めっき処理，化学処理における FRP 槽，表面技術，Vol.53, No.3, (2002), p.191-196.
- 5-41) シリコンラバーヒーター，(株)スリーハイカタログ，(2003).

5-42) 松井富士夫, 鈴木洋一郎, めっき工業における不溶性陽極の応用とその可能性

(1) - 不溶性陽極の基礎 - , 表面技術, Vol.53, No.4, (2002), p.243-246.

5-43) 松井富士夫, 鈴木洋一郎, めっき工業における不溶性陽極の応用とその可能性

(2) - 不溶性陽極の基礎 - , 表面技術, Vol.53, No.5, (2002), p.325-329.

5-44) PIC16F8X DATA SHEET, Microchip technology Inc, (1998).

第六章 研削工具の 部分形成と再生技術

6.1 緒言

現在日本では年間4万数千トンの研削砥石(図6-1)が生産され(表6-1),道路工事から精密機械加工,果ては歯科技術に至るまで幅広く利用されている。しかし,近年,環境問題から使用済み研削砥石の廃棄が大きな問題になりつつある。

図6-2に研削砥石の構造を示す。研削砥石には図に示すように気孔と呼ばれる空隙が、体積にして数割ある。砥石が利用されるとこの空隙に研削油剤が染みこんでしまい、廃棄処理が大変困難になる。

研削砥石の廃棄処理については、公表されている範囲においては日本の大手メーカーであるノリタケカンパニーリミテド(株)が唯一使用済み研削砥石のリサイクル事業に10年ほど前から取り組んでいる(図6-3)。しかし、その処理能力は月100トンと全体の生産量に対して3%程度しかなく、業界全体から考えてもまだまだ不足していると言える。

前章においては、補材を強化して切れ刃としての役割を担わせようとするところを行った。この中で工具機上再生技術という新しい概念を提案し、その技術の構築と統合に取り組んだ。工作機械上で工具を取り外すことなく形成、再生ができるようになれば、工具の脱着にともなう位置補正の手間が省けるようになり、さらなる高精度・高能率加工が実現できる可能性がある。また、工具を再生することで稀少な工具資源の浪費にも効果が期待できる。もちろん、この工具機上再生技術の考え方を研削加工に適用すれば、前述の使用済み研削砥石の廃棄処理にも有効な解の一つを提供できるであろう。

そこで，本章においては，前章で取り組んだ工具機上再生技術をさらに拡張し，研削加工への適用を検討する．



Fig. 6-1 Grinding tools⁶⁻¹⁾

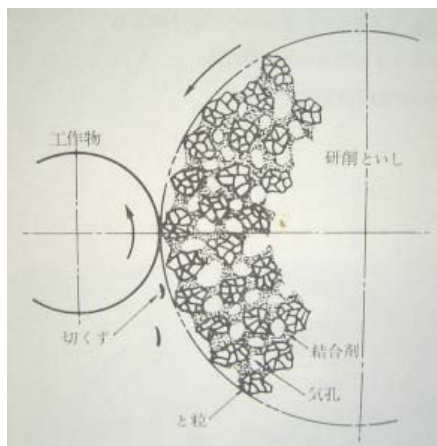


Fig. 6-2 Structure of Grinding tools⁶⁻²⁾

Table 6-1 Statistics of grinding tool production⁶⁻²⁾

研削砥石生産・出荷・在庫動向

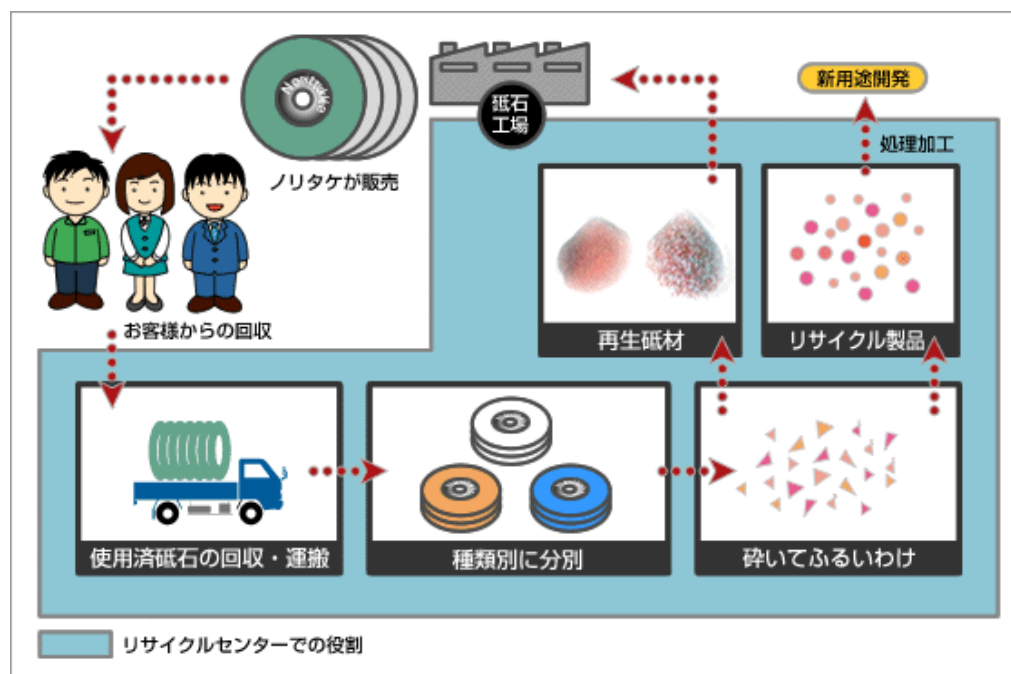
単位：数量 t、金額 百万円

	生産量	対前年比 (%)	出 荷				在 庫	対前年比 (%)
			数 量	対前年比 (%)	金 額	対前年比 (%)		
平成9年度	55,544	102.0	58,573	103.1	57,628	103.1	4,401	92.8
平成10年度	45,583	82.1	49,767	85.0	48,917	84.9	4,741	92.1
平成11年度	44,193	97.0	48,293	97.0	48,733	99.6	4,401	92.8
平成12年度	47,269	107.0	51,692	107.0	51,741	106.2	4,178	94.9
平成13年度	44,132	93.4	47,752	92.4	46,908	90.7	3,996	95.6
平成14年度	42,152	95.5	45,554	95.4	46,141	98.4	3,857	96.5
平成15年度	42,821	101.6	46,352	101.8	47,520	103.0	3,673	95.2
平成16年度	44,867	104.8	48,808	105.3	50,499	106.3	3,732	101.6

研削砥石輸出入動向

単位：数量 t、金額 百万円

	輸 出				輸 入			
	数 量	対前年比 (%)	金 額	対前年比 (%)	数 量	対前年比 (%)	金 額	対前年比 (%)
平成9年度	8,505	99.9	14,511	98.3	4,960	103.3	2,884	107.4
平成10年度	7,180	84.4	12,674	87.3	3,925	79.1	2,466	85.5
平成11年度	7,237	100.8	13,082	103.2	3,624	92.3	2,043	82.8
平成12年度	7,784	107.5	15,244	116.5	4,464	123.2	2,359	115.5
平成13年度	8,171	105.0	14,057	92.2	4,435	99.4	2,331	98.8
平成14年度	7,787	95.3	15,394	109.5	5,458	123.1	2,981	127.9
平成15年度	7,285	93.6	16,180	105.1	6,481	118.7	3,537	118.7
平成16年度	9,345	128.3	19,971	123.4	7,912	122.1	4,546	128.5

Fig. 6-3 Recycling system of Noritake Co. Ltd.⁶⁻³⁾

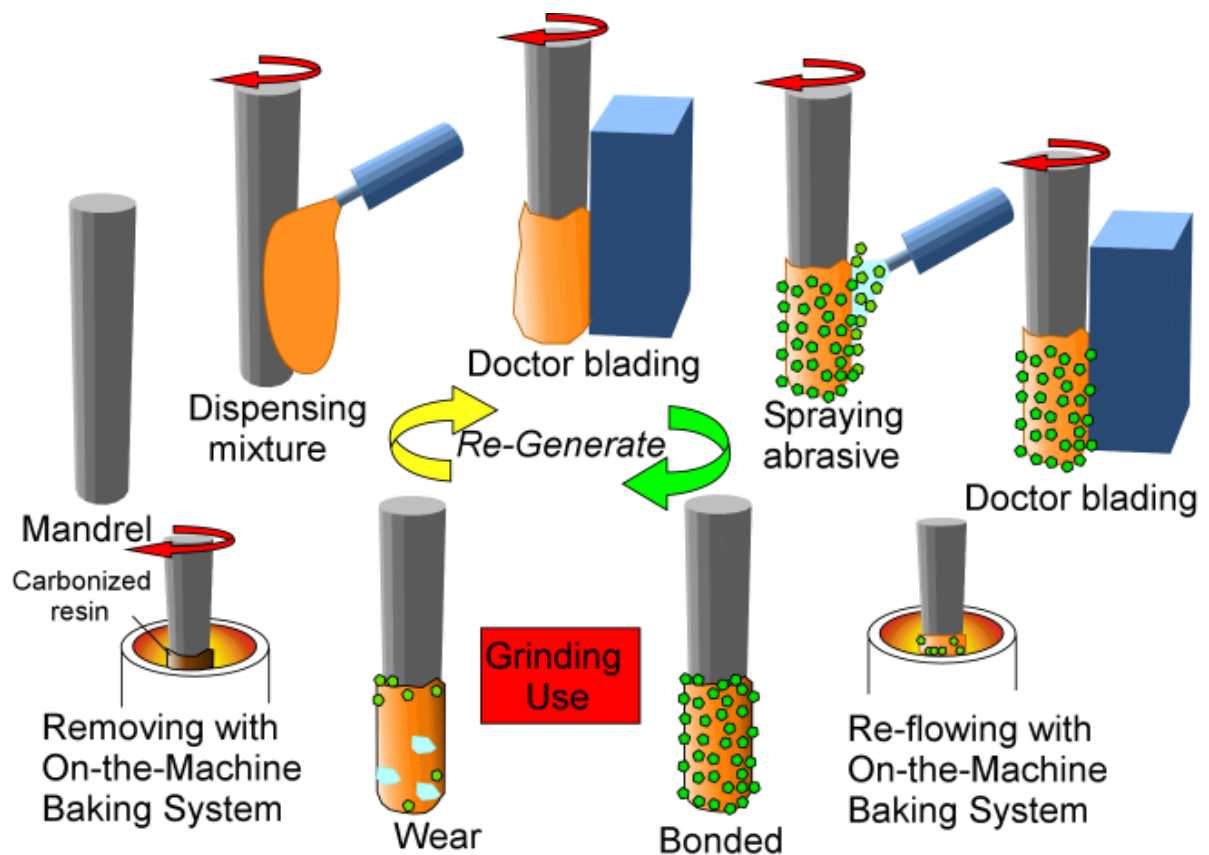


Fig. 6-4 Illustration of the developed process
for On-the-Machine Grinding Tool Re-generation Technology

6.2 提案する研削工具機上再生工程

構築を検討する機上再生工程を図6-4に示す．工程は次の手順で行われる．

機械に取り付けられたマンドレルにペースト状の樹脂が塗布される．

樹脂をドクターブレードで整形する．

砥粒が吹き付けられて、樹脂の粘着力で軸に付着する．

再度、ドクターブレードで整形しつつ、吹き付けた砥粒を樹脂中に取り込む．

赤外線ランプによる急速加熱装置で加熱焼成し砥粒層が形成される．

焼成された砥粒層で研削加工を行う．

研削加工により砥粒層が摩耗する．

摩耗した砥粒層を急速加熱装置により強加熱し、結合材を劣化させて剥離させる．

に戻り、再生サイクルが完結する．

6.3 研削砥石の構造と種類

機上再生の概念を研削加工に適用するためには、研削砥石の構造や特徴、そして製造方法について調べておく必要がある。

研削砥石は図 6-2 のように、砥粒、結合剤、気孔の 3 要素から構成される⁶⁻¹⁾。

- ・ 砥粒：工具の切れ刃に相当する。
- ・ 結合剤：砥粒を保持する。
- ・ 気孔：研削中に切り屑の逃げを助ける。

また、研削砥石の性能は次の 5 要因によって支配される。

- ・ 砥粒の種類
- ・ 粒度（砥粒の大きさ）
- ・ 結合度（砥粒を保持している強さ）
- ・ 砥粒率（砥石容積中に占める砥粒の割合）
- ・ 結合剤の種類

一般に研削砥石の選定においては、最初に結合剤の種別で選択がなされることが多い。研削砥石においては砥粒は結合材で保持されて工作物に作用するからである。この保持力の強弱は、結合材の種類で概ね判断され、一般にはメタルボンド>ビトリファイド>レジノイドという認識が持たれている。

図 6-5 研削砥石における主な結合材の種類を示す。これらの結合材の主な特徴を列挙すると次になる。

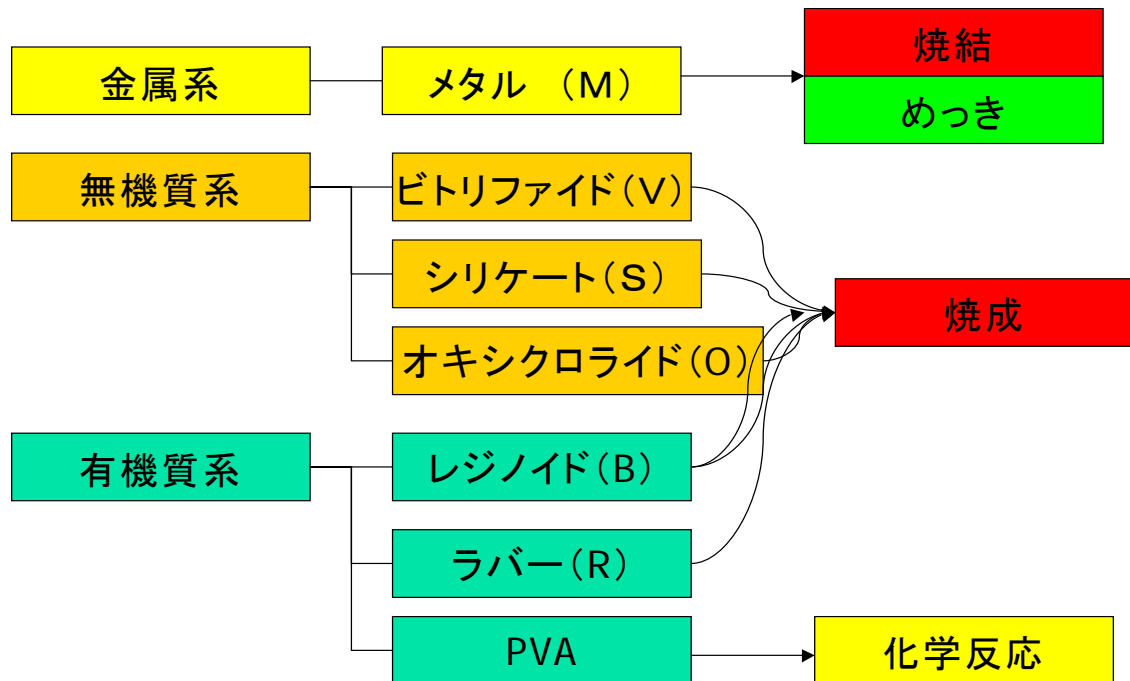


Fig. 6-5 Classification of bonding of grinding tool

ビトリファイド (V): 粘土質結合剤やガラス質結合剤を砥粒に加え、湿潤状態で混練したものを成形して乾燥し、1300 程度の高温で焼成したもの。砥粒の保持力が強く、結合度と気孔を広範囲に変えたものが作りやすい。広く一般的に使用される。

レジンボンド (B): 熱硬化性樹脂を主体として砥粒を結合した物。ビトリファイドより弾性、靱性に富むため、安全性が高く、高速で使用可能なため粗研削、超重研削に使用される。また、弾性特性を利用して、超仕上げにも用いられる。

ゴム (R): 硬質のゴムで結合した弾性の大きな砥石。

シリケート (S): 水ガラスを主体とする。

メタルボンド (M): 主にダイヤモンド砥粒の結合に用いられ、銅や黄銅、ニッケルが使用される。

6.4 研削工具の製法

このような研削工具の製造法については、めっきを利用して砥粒を固定化する電着法と加熱により結合材を硬化させて砥粒層を形成する方法と二つある。めっきによる電着については、前章で開発した電解による工具機上再生の複合めっき手法において分散する粒子を適切な砥粒に置き換えれば良い。一方、加熱により結合材を熔融させて砥粒を固定化し砥粒層を形成させる方法については、図6-6に示す工程が用いられる。

まず砥粒と各種結合材の粉体が混練され、製品によっては数週間熟成される。そして熟成を経た混練物は、大量生産用の大型の炉に入れられ、数時間の焼成が行われる。この焼成工程においては図中のマップに示されるように、各種ボンド材の硬化特性を考慮した加熱が行われる。

したがって、工作機械上においてこの主たる結合材を用いた研削工具を形成し、再生が行えるようにするためには機上で加熱処理が可能であることが求められる。

研削工具の機上再生のために加熱装置が具備すべき項目を整理すると、

- ・ 工作機械上に設置可能であること
- ・ 千数百度までの加熱が迅速に行えること

という二点が挙げられる。

一方、機上再生技術においては、機上再生には時間という大きな制約条件がある。加工時間は加工コストに直結するため、少なくとも工具本体の交換よりも成膜と剥離に要する時間の方が短くなければならない。さらに工具膜の寿命も考慮すると、

(通常の工具の寿命) / (交換に要する時間)

< (工具膜の寿命) / (膜の再生に要する時間)

であることが望まれる。

このような観点から考慮すると、研究の初期の段階としては加熱時の熱エネルギーが少なく済む、すなわち比較的熱容量の小さい小型の研削工具をその対象とすることが重要である。

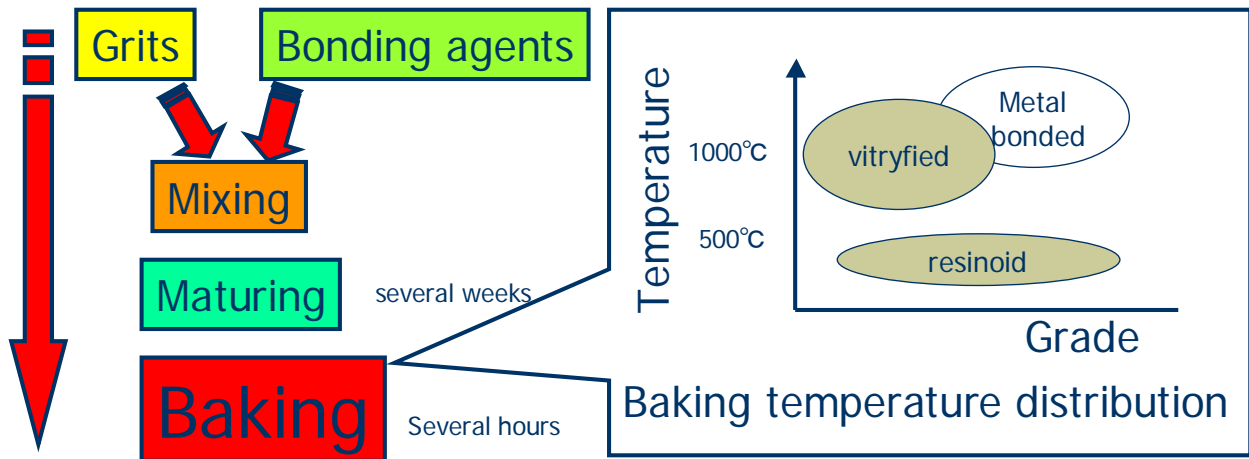


Fig. 6-6 Production process of grinding tool

では次にどのような種類の砥石を機上再生の対象にするかであるが、先述のように一般には

- ・レジンボンド
- ・ビトリファイド
- ・メタルボンド

の3種類の結合剤をもつ砥石が加熱により作られ、広く利用されている。



Fig. 6-7 Mounted points

多くのレジンボンド砥石は熱硬化性樹脂により作成されている。

また、ビトリファイド砥石も高温で加熱して作られるが、低融点ガラスを使用すれば比較的低温で焼成が行えるため、機上での再生が可能と考えられる

次にメタルボンドであるが、これも高温で溶融させて固めている。しかし、低融点の金属を使用すれば、こちらも機上での再生が可能と考えられる。

樹脂膜の剥離方法としては、燃焼による除去、溶剤による溶解等が考えられる。ビトリファイドやメタルボンド砥粒層の剥離に関しては、機械的に除去することが一般的であろう。

したがって、結論としては図6-7のような軸付き砥石を対象として、主要な結合材であるレジン、ビトリファイドボンド砥石を機上で形成、および再生できる技術を開発することにした。

6.5 砥粒層形成工程の検討

6.5.1 加熱方法の検討

図6-6で示した研削砥石の形成工程を参考にして、機上での迅速な砥粒層の形成のために新たな工程を検討する。砥粒層の形成工程では、大きくは

結合材と砥粒を混練

型による成形

熟成

加熱

という工程が必要になる。しかし、機上再生ということを考慮すると、工程の迅速化のためには を、そして工程の簡便さを考えると を省略したほうが良い。

型を用いずに砥粒層を形成する場合、砥粒と結合材による混練物(ミクスチャ)を作成した後、軸にミクスチャを塗布すれば良い。そして、このミクスチャを塗布した軸を加熱焼成して砥粒層にする。

問題点としては、厚い砥粒層が形成できないことが想定される。しかし、砥粒層が薄ければ焼成時間も短く済む。よって、再生するサイクルを短くすればこの問題は解決できる。

次に加熱手法について検討する。表6-2に、主たる加熱方法を示す。結論としては、機上再生技術においては工具を周囲から加熱する方法が望ましく、赤外線ランプを利用した加熱を採用する。

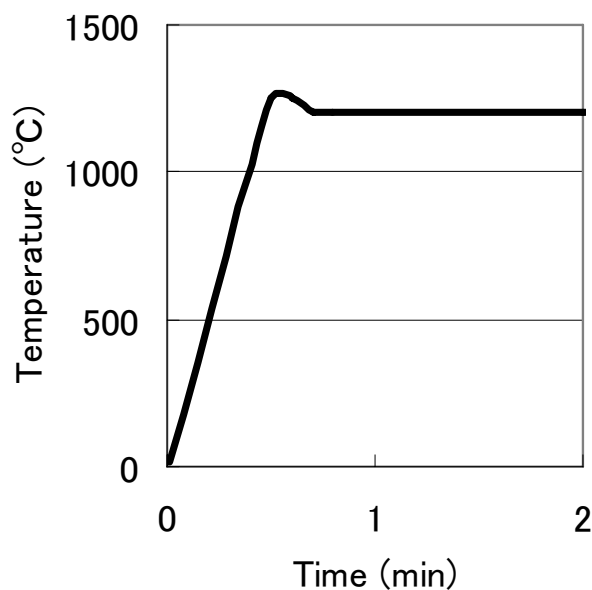
Table 6-2 comparison of various heating methods

加熱手段	赤外線 ランプ	抵抗加熱	誘導加熱
加熱手法	対象周囲 を囲む	対象物に ヒーター埋込	軸自身を 加熱
電力消費	数kW ~	数kW ~	10kW以上
設置の制約	特になし	工具設計 が複雑	強磁場の機 械への影響
総合		×	

図6-8は砥粒層形成の基礎実験用として用いた赤外線加熱ランプ式加熱炉である。出力は4kWと小さいが、加熱容積を20mm×20mm×20mmと限定しながら温度センサによるフィードバック制御を採用することで50℃/sの急峻な温度勾配で1200℃までの加熱が実現できる。(図6-9)



Fig. 6-8 Infrared-type rapid heating furnace (Ulbac MILA-3000)



加熱方法	赤外線ランプ式
温度範囲	RT～1200℃
最大昇温性能	50℃/s
試料サイズ	20×20×20(mm)

Fig. 6-9 Heating performance of rapid heating furnace

Table 6-3 Properties of polyimide varnish (I.S.T Corp., Pyre-M.L. RC5057)

粘度	Pa・s	5.0～7.0
固形分濃度	%	14.5～15.5
比重		1.05
溶剤(NMP)	%	80
溶剤(AR.HC.)	%	20

Table 6-4 Properties of phenol resin
(GUN EI CHEMICAL INDUSTRY CO., LTD. XPL-6846D)

	単位	XPL-6846D
粘度	mPa・s	300
不揮発分	%	70
pH	—	8.0
遊離フェノール	%	18

6.5.2 加熱時の留意事項

試みとして、この加熱装置を用いて表6-3に示すポリイミド樹脂を資料皿に取り出し、メーカーの推奨加熱条件を参考に最も短時間で樹脂が硬化できるような急速な加熱をした。図6-10はこのときの加熱後のポリイミドワニスを入れた試料皿である。資料皿に満杯に入れていた樹脂が僅かに残っている程度で、かつそれらの樹脂が黒く炭化してしまっていることが観察できる。図6-11はこのときの急速加熱炉の炉管である。このガラス管の中に図6-10の試料皿が挿入されて加熱されるのである。本来ガラス管は透明である。しかし、実験後は写真のように資料皿が挿入されていた部位を中心にポリイミドワニスが飛散して付着していた。

そこで、樹脂の焼成時の挙動をさらに詳細に把握できるようにビデオマイクروسコープを利用して加熱時の樹脂の挙動を調べることにした。すると焼成時には図6-12のように200 付近から樹脂中に大量の気泡が発生することが確認された。

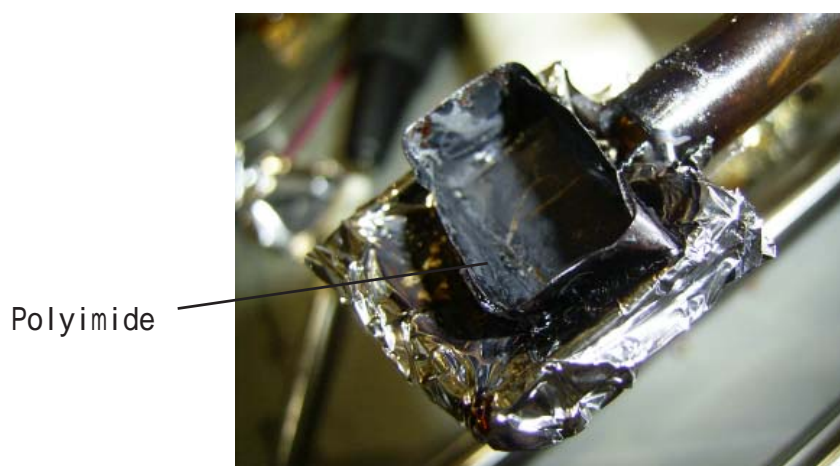


Fig. 6-10 Oxidized polyimide on specimen dish



Fig. 6-11 Adhesion of polyimide varnish on inner pipe of furnace

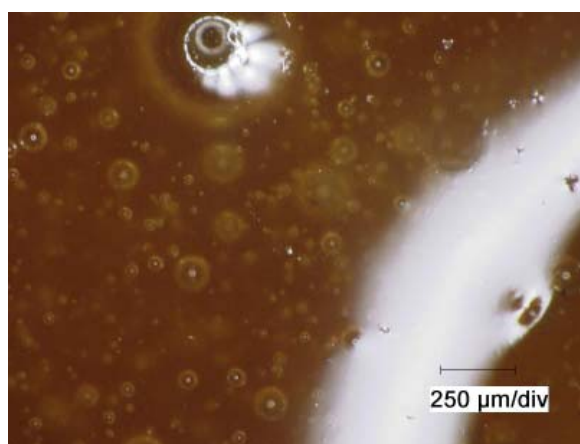


Fig. 6-12 Boiling NMP in polyimide varnish

今回利用した樹脂には溶剤としてN-メチル-2-ピロリドン(NMP)が67-73%含有されている。NMPの沸点は204℃のため急速に200℃以上の加熱を行うと激しいNMPの気化が生じる。したがって、NMPの激しい気化によりワニス全体が沸騰状態になり、樹脂が飛散したと考えられる。このとき飛散した樹脂は、試料皿に集められた状態と比較して多く酸素に曝されるため酸化され易い。結果として図6-10のように試料皿にわずかに残った樹脂が炭化してしまうと推測される。したがって、樹脂の加熱においては、樹脂中の溶媒の沸点以下の温度で加熱を行い、溶媒を十分揮発させた後で樹脂の架橋温度まで加熱する必要がある。

6.5.3 軸への塗布

機上再生においては金型を利用しない。したがって、ミクスチャの軸への塗布工程においては、図6-13に示すようにマンドレルの下部に滴のように集まってしまい、砥粒層の形状が損なわれることが予想される。砥粒工具においては形状に多少の難があってもツルueイングによって容易に成形が可能であるために大きな問題ではないが、ツルueイングの手間を考えると、やはりできる限り良好な形状であることが望ましい。それでは、軸に塗布したミクスチャの変形が起きにくくするにはどうすればよいのであろうか。図6-13はミクスチャを塗布した際の皮膜形成過程の模式図である。軸に塗布したミクスチャは重力との影響を受け、軸下端へと移動する。軸下端ではミクスチャの表面張力と重力のバランスにより滴が形成される。

軸の上端では、レイノルズの厚み減少則に従い、図中のように軸の垂直方向にX、水平方向にZをとると、水平方向の厚みは

$$e(x, t) = (hx / rgt) \cdots \cdots (6-1)$$

h: 粘性, r: 比重

で表される。この式から言えることは、粘性が高く、比重が軽い物質ほど軸に塗布された物質は軸下端へと流れにくく、形状変化が少ないことを示している。

そこでミクスチャの軸への塗布実験を行ったところ、150Pa・S程度のペースト状であるとミクスチャが軸下端へ移動し滴を形成することもなく、軸への塗布のし易さも良好であることがわかった。

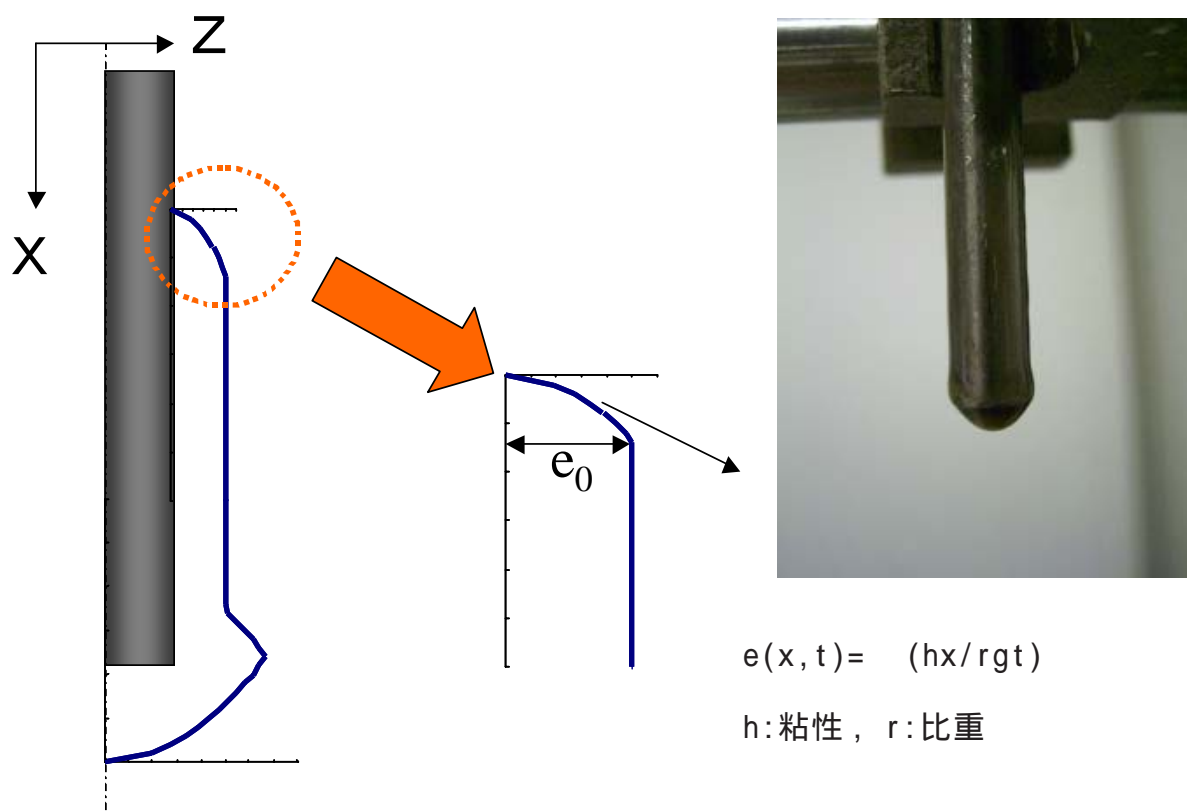


Fig. 6-13 Illustration of deformation mechanism of mixture surface

6.5.4 砥粒層の結合度とその向上

一般に、砥粒と結合材が同じ砥粒層の場合、その工具の性能は結合度の違いで判断される。市販の軸付き砥石調べると、結合材種としては電着以外はビトリファイドとゴム砥石が主流であり、その結合度はビトリファイド系としてはほとんどの工具がPであり、用途によってJあるいはQが用意されている。一方、レジン系軸付砥石としては、ゴム砥石のみが利用されており、この結合度は不明であった⁶⁻⁴⁾。一般に砥石結合度についてはJIS R 6240 3.2.1に規定された大越式結合度試験機⁶⁻⁵⁾を用い測定される。しかし、大越式試験器は比較的大きな砥石用の試験器であるために、場合によってはJIS R6240 3.2.2に規定されたロックウェル試験⁶⁻⁶⁾によっても代替することができる。そこで、この方式に基づき市販の軸付き砥石を購入し、その結合度を調査した。するとビトリファイド系では結合度JがHRB41～45、PがHRB50～70、ゴム砥石がHRH33～40であった。したがって、砥粒層の形成においてはこの数値を目標指標とした。

ところで、本研究においては、ポリイミド樹脂については表6-3に特性を示すポリイミドワニス((株)I.S.T Pyre-M.L. RC5057)を、フェノールレジン(表6-4に示すフェノール樹脂を用いる。フェノール樹脂については、揮発成分が30%であるので問題にはならないが、ポリイミドワニスについては揮発成分が70%もあるため、硬化した際の結合度が弱く、砥粒層の形成を行ってはみたがHRHのスケールでも計測不能であった。そこで、表6-5に示す粉体のポリイミド樹脂(京セラケミカル(株)製KIR-30)を添加して強度向上を図った。

この添加するポリイミドの粉体は、加熱をすると105℃から軟化しはじめて熔融し、200℃程度の温度で60から120秒でゲル状になる。そして340-400℃で熱分解しはじめるため、それ以上の温度であれば剥離することが可能である。

このポリイミド粉末をポリイミドワニスに重量比で0, 50, 67, 100%(100%のときは、すなわちワニスは0%を意味する。)と加えてゆき、焼成を行い、焼成後の硬度ならびに焼成後の樹脂混合物の重量減少比を調べたのが図6-14である。0%すなわちポリイミドワニスのみで焼成を行った場合、NMPがこのワニスに7割も含まれているためにその重量分が揮発してしまう。そして50%, 67%と混合物に対するポリイミド粉末の添加量が増加するに従い、混合物の重量減少率はリニアに低下してゆく。ポリイミド粉末のみの状態、すなわち100%のときには重量減少は0.9%であり、ポリイミド

のほとんどが気化せずに溶融し結合することが理解できる。

一方、結合材としての硬度はポリイミド粉末の添加に比して増加する。結合材の強度だけで言えばポリイミド粉体のみで砥粒層を形成できるほうが良い。しかし粉体で流動性がないため、軸に塗布して砥粒層を形成することは困難になってしまう。そこでHRB40程度の硬度が期待でき、かつ結合材の流動性も確保できるように、ポリイミドワニスとポリイミド粉末を1:1で混合し結合材として用いることにした。

Table 6-5 Properties of polyimide powder KIR-30

比重		1.30
成形収縮率	%	1.0-1.2
引張強さ	MPa	60-70
軟化点		105-125
ゲルタイム(200)	s	60-120
熱分解開始温度		340-350

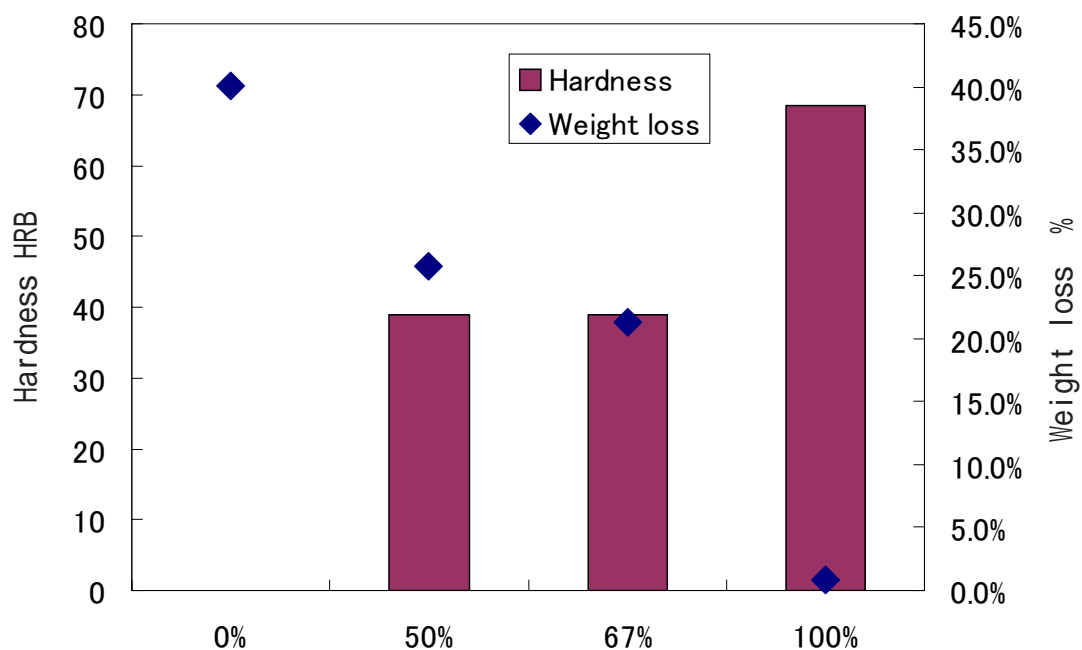


Fig. 6-14 Modified heating sequence for curing polyimide

6.5.5 焼成工程と得られた工具

砥粒層の形成においては，

軸に樹脂を塗布する．

塗布した樹脂をドクターブレードで整形する．

塗布した樹脂の粘性を利用し，軸に砥粒を吹きつけてまぶす．

ドクターブレードで砥粒層を再整形しつつ，樹脂中に砥粒をしっかりと埋め込む．

急速加熱装置で加熱し，砥粒層を得る．

という工程を経る．この工法で得られる砥粒層の砥粒率は，砥粒と結合材の比率は重量比で6:4から7:3であり，体積比で概ね2:3で砥粒率40%程度であった．また，焼成工程においては，図6-15中に示す加熱パターンを利用して焼成をした．この加熱パターンについては，使用した樹脂の製造会社が推奨する加熱条件を参照しながら，溶媒の沸騰が生じにくい温度を用いている．

このような砥粒層の形成工程で得られた工具のうち，代表的なものを図6-17に示す．図中「A」はフェノール，「B」はポリイミド，「C」はビトリファイドを意味している．

なお，ビトリファイドボンドの形成については，その砥粒層の形成と剥離においては工程に工夫が必要であることが想定された．というのはガラス質を結合材に持つビトリファイド砥石の場合，焼成は可能であるが，剥離が困難と考えられたからである．そこで，図6-16のように低融点ガラスとポリイミド樹脂の2重構造を採用した．

一般的に，樹脂とガラスでは耐熱性が違いすぎるため，ガラスの焼成を行う際に樹脂は焼失してしまう．そこで，400℃程度で焼成可能な低融点ガラスとポリイミド樹脂を使用する．このような構造であれば，ガラスの焼成の際にも樹脂には問題が起こらない．そして，剥離の際には焼成時より高温にしてやれば，樹脂は炭化し，ガラスは軟化する．結果として後はブラシ等でこすれば比較的容易に剥離が可能である．

この下地層の上にGC # 600の砥粒と表6-6の低融点ガラス粉末(日本電気硝子(株) LS-4081)を混合した物を塗布し焼成した．なお，混合物の作成においては塗布のしやすさを考慮して流動パラフィン加え100Pa・sの粘性で流動性を与えた．その後，図6-15のCの加熱パターンで焼成し，砥粒層の形成に成功した．代表例を図6-17のCに示す．

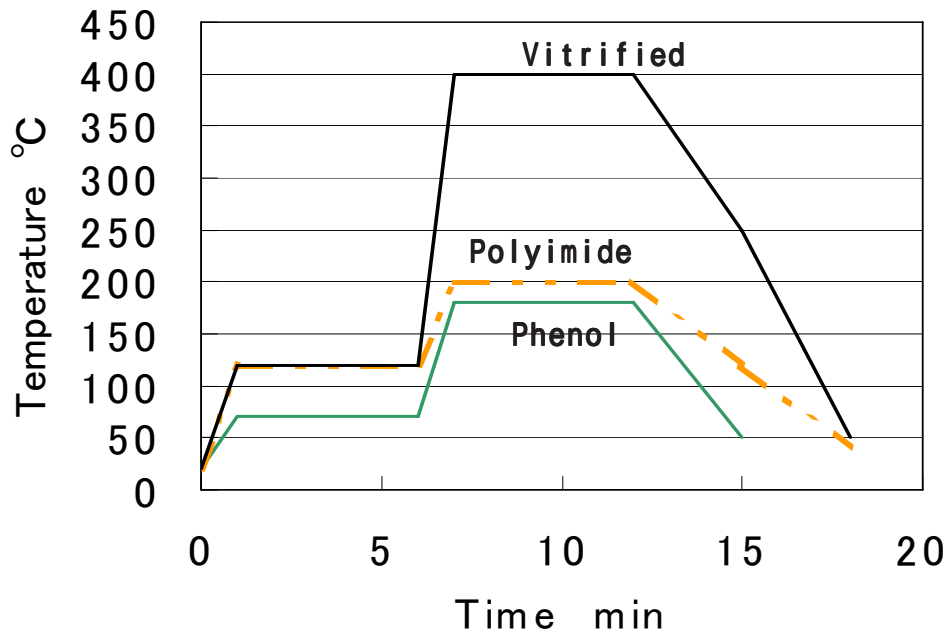


Fig. 6-15 Heating sequences for fabricating each abrasive layer

Table 6-6 properties of low melting point glass (LS-4081)

項目	単位	値
封着温度		410
熱膨張係数	$\times 10^{-7}$	74
転移点		300
屈服点		320
軟化点		365
密度	$\times 1000\text{kg/m}^3$	6.89

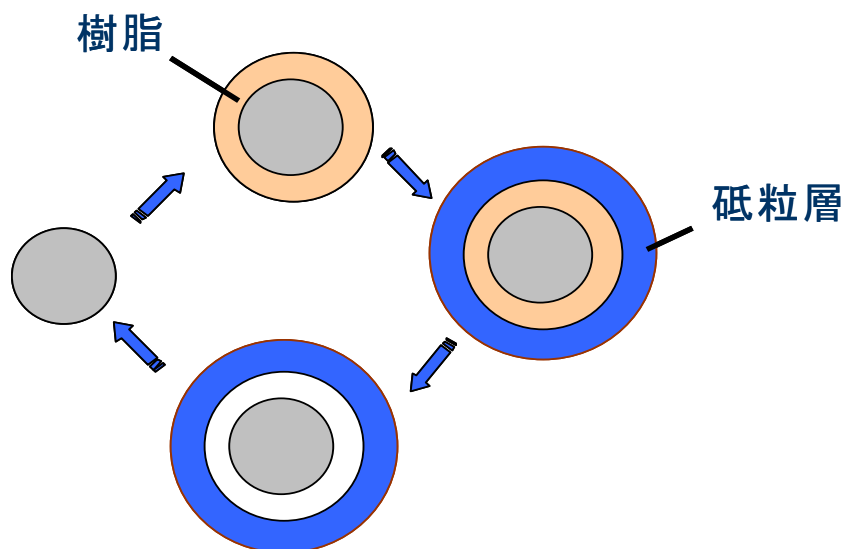
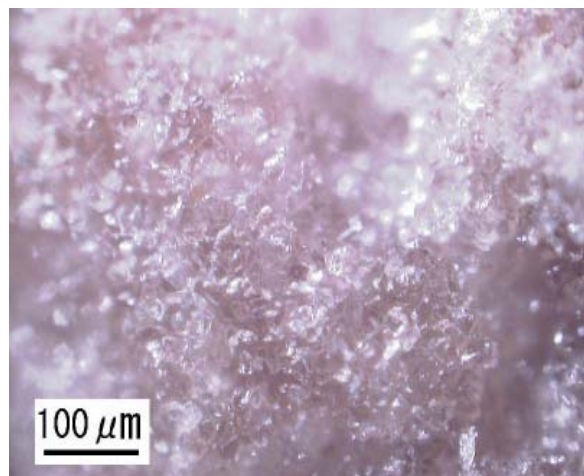
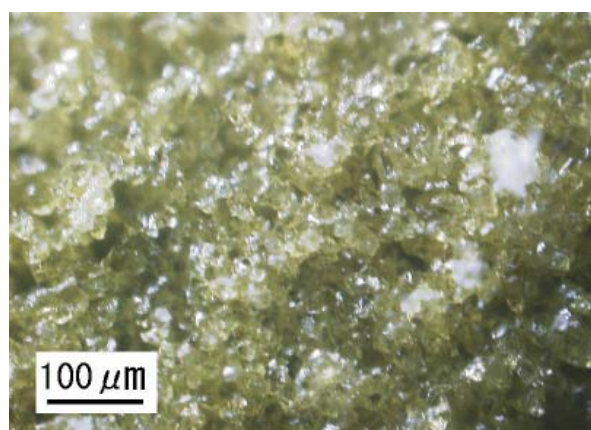


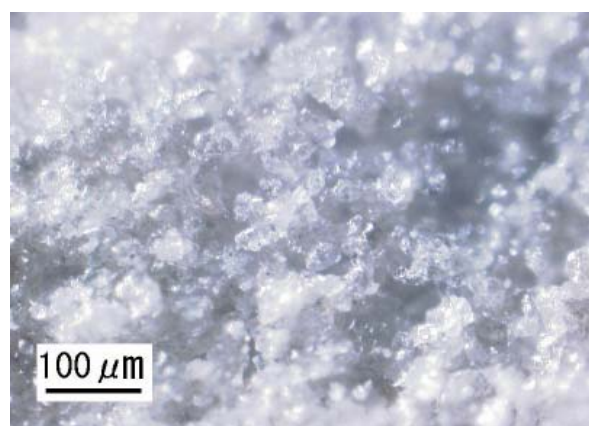
Fig. 6-16 Duplex structure and re-generation cycle



A: Phenol



B: Polyimide



C: Vitrified

Fig.6-17 Fabricated tools

6.6 剥離工程の検討

砥粒層が形成できることが確認できたことから再生サイクルの完結に向けて本節では砥粒層の剥離工程について言及する。図6-2からも明らかなように、砥粒工具においては、砥粒が結合材に保持されて砥粒層が形成されている。したがって、砥粒層の剥離においては、この結合材を破壊すれば剥離ができる。剥離の方法を表6-7に示すが、その方法には、大別して機械的、ないしは化学的手法が考えられ、化学的手法には熱的あるいはエッチングによる結合材の破壊が考えられる。本研究においては、砥粒層の形成において、急速加熱装置を用いた方法を利用しているため、その付帯設備をそのまま利用できる熱的な手法が良い。そこで、急速加熱を利用して砥粒層の剥離について検討をする。

最初に加熱温度毎に砥粒層の剥離に必要な時間を調べることにした。ここでは目標温度に達するまでの昇温時間は1分として、砥粒層の劣化のために維持すべき時間を調べた。結果を図6-18に示す。この結果から1分程度で剥離を行える温度を採用し、図6-19の加熱パターンをそれぞれの樹脂に対して行った。このような条件下で加熱剥離を試みた工具を図6-20から図6-22に示す。いずれの工具においても(a)の強加熱処理が終わった後では樹脂が炭化し焼失したために砥粒(ここではWA)のみが残っている様子が分かる。これらの砥粒は、単に炭化した樹脂で付着しているだけなので、ブラシ等で簡単に除去できる。

ビトリファイド砥石についても下地にポリイミド樹脂を利用して二重構造としているため、下地のポリイミド樹脂が劣化して同様に砥粒層の除去が容易に行える。下地にポリイミドを用いているために、溶融した低融点ガラスフリットがマンドレルへ付着するのを防止しているためである。確認のため下地層が劣化した後にさらに5分間の加熱を行ったところ、ビトリファイドのマンドレルへの溶着が認められた。したがって、ビトリファイド工具の砥粒層剥離においては長時間の加熱は禁物と言える。

以上より、強加熱処理を行えば樹脂の熱分解により樹脂が分解および炭化して砥粒層を除去できることが証明された。

Table 6-7 Comparison for layer removal process

	機械的	化学的	
剥離手法	工具	熱	薬品
専用設備の必要性	必要	成形工程の物を利用可	必要
工程時間	短	短	長
総合			×

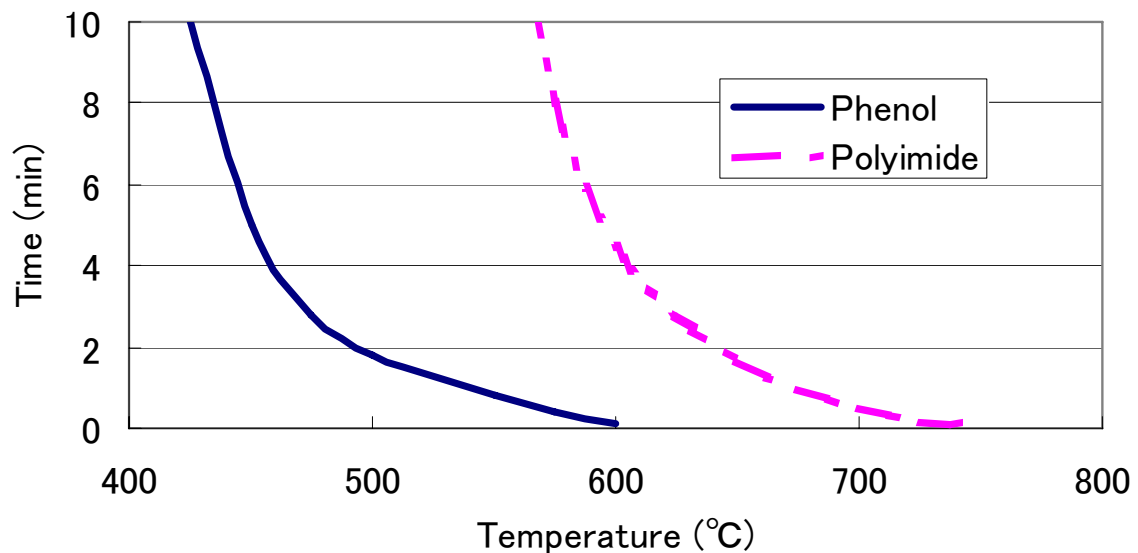


Fig. 6-18 Time for abrasive layer removal at every temperature

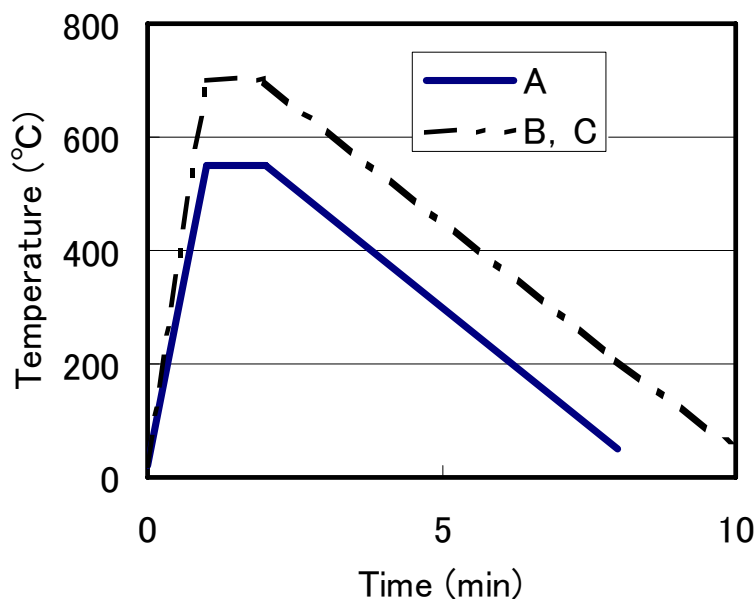


Fig. 6-19 Heating sequences for abrasive layer removal



(a) Baked



(b) Brushed

Fig. 6-20 Phenol resin bonded tool



(a) Baked



(b) Brushed

Fig. 6-21 Polyimide resin bonded tool



(a) Baked



(b) Brushed

Fig. 6-22 Vitrified tool

6.7 研削工具用機上再生装置の試作

これまでに開発した工程を利用して図6-23の研削工具の機上再生技術用の小型急速加熱炉を試作した。この装置は基本的には図6-8の急速加熱炉をマシニングセンタ上に搭載できるように改造したものである。したがって加熱炉の性能としては図6-9に準ずるものである。

試作した炉を利用して機上での砥粒層の形成と再生を試みたが、これまで記述してきた各種砥粒工具と全く同等の工具の形成が可能となった。

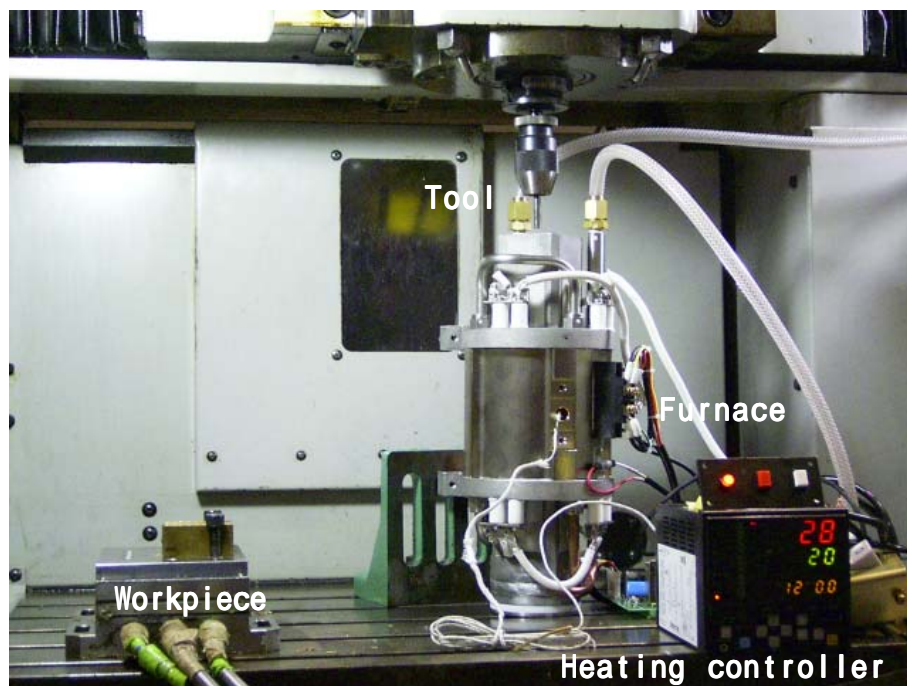


Fig. 6-23 Prototype of on-the-machine grinding tool re-generator

6.8 研削実験による形成砥粒層の評価

形成した砥粒層の研削能力を把握するため図6-24のようにマシニングセンタを利用して研削実験を行った。実験においてはナトリウムガラスの板をワークとして用い、製造時に割断された端面の研削加工を行った。

評価する砥石は形状精度にやや難があったためスティック砥石を用いて、ツルージングを行い、工具表面を整えてから実験に供した。

実験後の研削比および加工面の粗さを図6-25に示す。どの工具に関しても $11\ \mu\text{mRz}$ の前加工面に対して、粗さを向上できた。

このとき使用後の工具表面を観察したところ、砥粒層が軸から一気に剥離することもなく、徐々に砥粒層が摩耗していることが確認された。しかし、研削比については、ポリイミド工具については一般工具と同じ程度の研削比を示したが、フェノールとビトリファイドについては、工具速度が比較的遅いためにボンドへの負担が大きいためか、研削比がそれほど高くはなかった。特にビトリファイドについては、フェノールよりも低い研削比になってしまっていた。

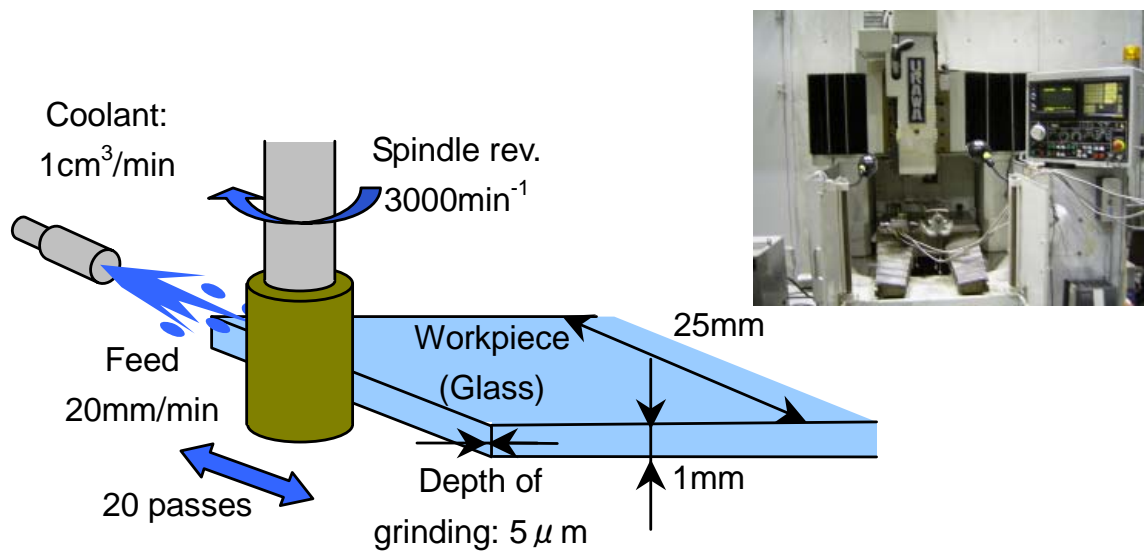


Fig. 6-24 Grinding experiment of fabricated layer

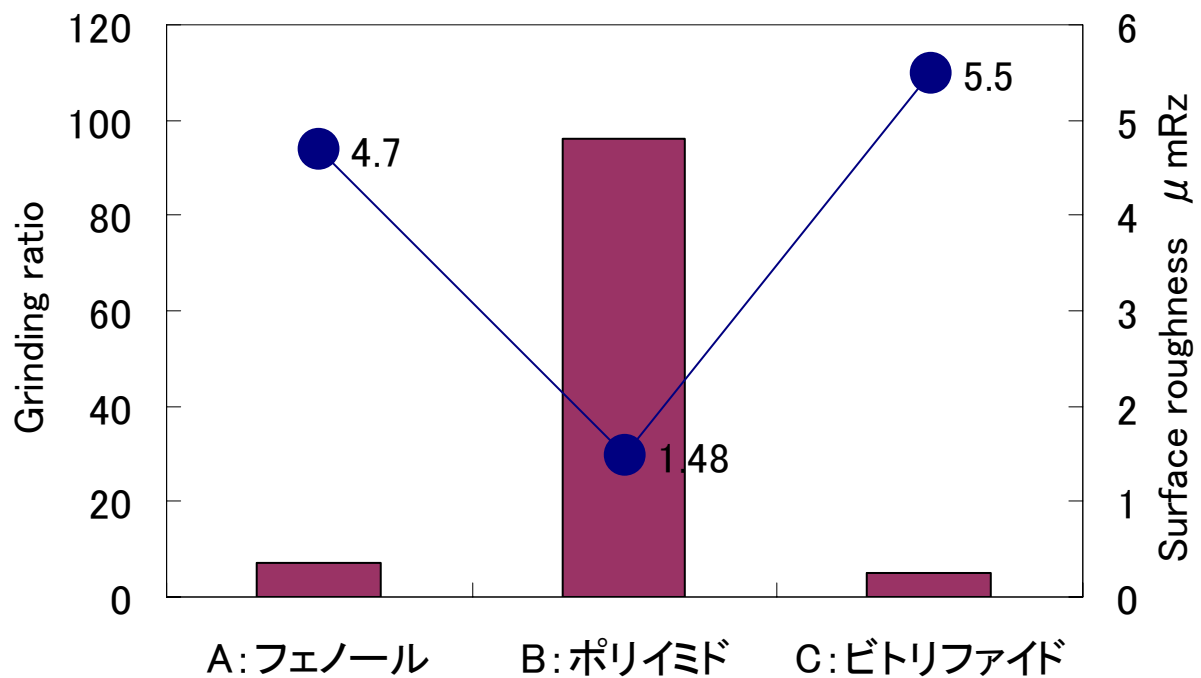


Fig. 6-25 comparison of tool performance of each bonding



Fig. 6-26 Flaked vitrified abrasive layer in hardness test of layer

6.9 ビトリファイド工具の形成工程の再検討

そこでビトリファイド工具の研削比がレジノイド工具より低下してしまった原因を検討する。

先述したように軸付き砥石の場合、ビトリファイド系の砥石が多く、その結合度はHRB40程度となっている。そこで、機上再生工程で得られた工具の砥粒層について、ロックウェル硬度による結合度測定をおこなうことにした。しかし、圧子を砥粒層に食い込ませようとしたところ図6-26のように砥粒層が割れてしまい剥離することがわかった。

一般的な軸付き砥石の構造を調べると図6-27のようになっている。その製法を考えると、図6-28の上の図のようにカップ状にあらかじめ砥粒層が焼成され、カップ状の中に接着剤となる樹脂が充填される。そして、軸が挿入されて軸と砥粒層（砥粒カップ）の接着が行われていると考えられる。したがって、砥粒層は3mm程度以上の厚みがあるように設計されている。



Fig. 6-27 Conventional mounted point

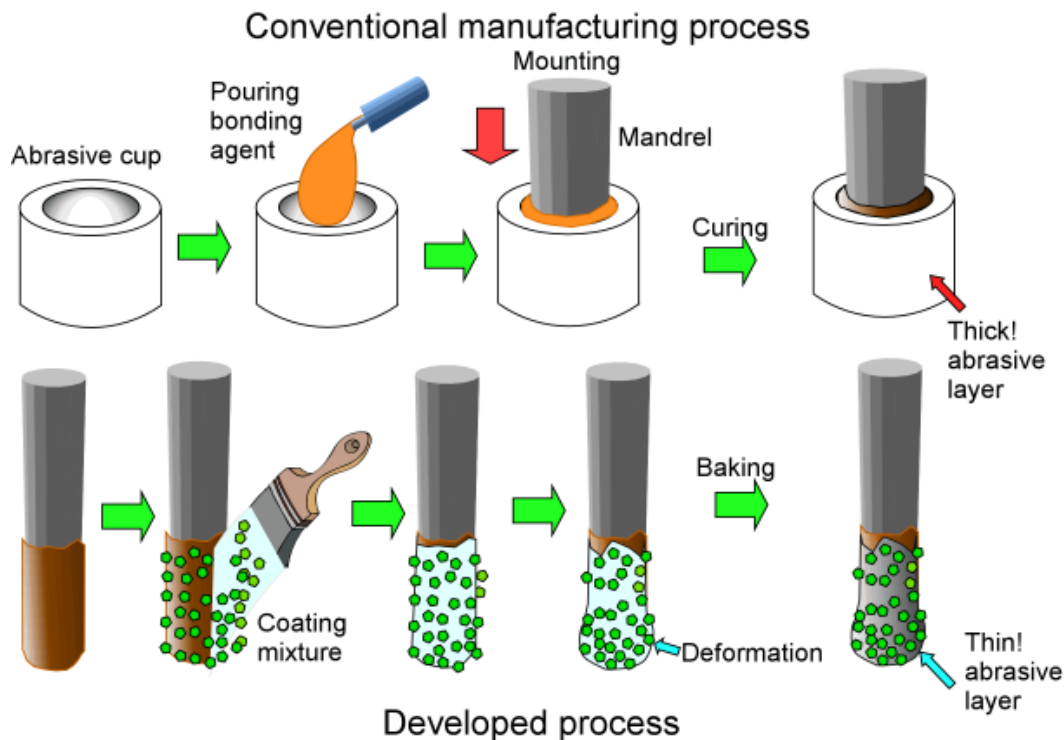


Fig. 6-28 Comparisons of manufacturing procedure between conventional and developed process

ところが開発した機上再生用の工程においては、下の図のようにポリイミドで作られたプライマー層に、ビトリファイドと砥粒をエタノールで混練したミクスチャーを塗布している。この方法の場合、塗布したミクスチャーは重力の影響を受けて次第にマンドレル下部へと流れ落ちてしまうことになる。このため砥粒層は、従来からの製法と比較して薄くなり、不均一な厚みとなってしまう。結果として、前加工面の面粗度が粗くて断続的な負荷が砥粒層にかかるような加工においては、砥粒層がフレーキングを起こしてしまう可能性が高い。このことが、開発した機上再生工程でビトリファイド工具の研削比がレジン系の物よりも低くなってしまった大きな要因と推定される。

そこで、ビトリファイドと砥粒の混合ミクスチャーを作る際にエタノールではなく、エタノールよりも粘性が高い流動パラフィンを用いて、極力粘度と流動性のバランスが保てる $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度の粘度に調合し砥粒層の形成を試みた。しかし、#600という細かい砥粒では塗布工程のみでは砥粒層は 1mm の厚みにも達せず、脆弱なビトリファイド層しか形成できなかった。したがって、ビトリファイド層の形成においてはミクスチャーの塗布による形成手法ではなく、型を使って数 mm 程度の厚みをもった砥粒層を形成するほうが望ましいという結論に達した。

6.10 砥粒層の再生と評価

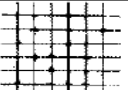



砥粒層の機上再生サイクルが完成したところで、今回はマンドレルに安価なS45Cを用いている。このような鋼材をマンドレルに用いた場合には剥離のための加熱により、軸表面は酸化される。そのため再び砥粒層を形成する際には表層部の酸化膜が砥粒層の密着性を阻害する可能性がある。その場合には表面酸化膜を機械的に剥離するなどの方法も考えられるが、母材が減少することや再生工程が全体的に長くなってしまふことを考慮すると、剥離工程が終わった後にそのまま砥粒層を形成できることが望ましい。そこで、剥離工程を経た後のマンドレルへの樹脂の密着度を確認することとした。

評価方法はJISK5600-5-6に規定される塗料の付着性試験(クロスカット法)⁶⁻⁷⁾を参考に行った。紫外線硬化樹脂を使用したワイヤソーの研究⁶⁻⁸⁾では、この規格の旧規格であるJISK5400に規定される碁盤目法に準じて樹脂の密着性の検討を行っている。

実験方法

- ・基板上に樹脂を塗り硬化させる。
- ・カッターナイフにより、1mm 間隔の切込みを6本入れる、またそれと直角を成す方

Table 6-8 Criteria of cross-cut experiment⁶⁻⁸⁾

分類	説明	はく離(はがれ)が生じている クロスカット部分の 表面の状態 (6種の並行カットの例)
0	カットの縁が完全に滑らかで、どの格子の目にもはがれがない。	—
1	カットの交差点における塗膜の小さなはがれ。 クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に5%を上回ることではない。	
2	塗膜がカットの縁に沿って、及び／又は交差点においてはがれている。クロス カット部分で影響を受けるのは明確に5%を超えるが15%を上回ることはい ない。	
3	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全面的に大はがれを生じており、及び ／又は目のいろいろな部分が、部分的又は全面的にはがれている。クロスカッ ト部分で影響を受けるのは、明確に15%を超えるが35%を上回ることはい ない。	
4	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全面的に大はがれを生じており、及び ／又は数か所の目が部分的又は全面的にはがれている。クロスカット部分で影 響を受けるのは、明確に35%を超えるが65%を上回ることはいない。	
5	はがれの程度が分類4を超える場合。	

向にも切り込みを入れる。

- ・粘着テープを貼り，剥がす。
- ・表6-8の評価方法にしたがって評価を行う。

検討の結果，剥離後に脱脂を行えば，1回目と遜色ない密着が得られた。

そこで，実際に剥離工程を経たマンドレルにフェノール，ポリイミド，ビトリファイドの各結合材を利用して砥粒層の形成をし，研削を試みた。結果を図6-29に示すが，再生砥粒層であっても最初の1回目に形成した砥粒層とほぼ同じ仕上げ面粗さが得られていることがわかる。さらに，このときのポリイミド工具について図6-30に再生前と再生後における砥粒層の状態を示すが，図からも明らかなように工具には特異な砥粒層の剥離は見られなかった。今回は，入手がし易いことからS45Cをマンドレルに用いているが，超硬合金やセラミックス等の機械的強度や高温での組織の安定性が期待できる材料をマンドレルに用いれば，再生の繰り返しによる工具への悪影響は減らせると考えられる。

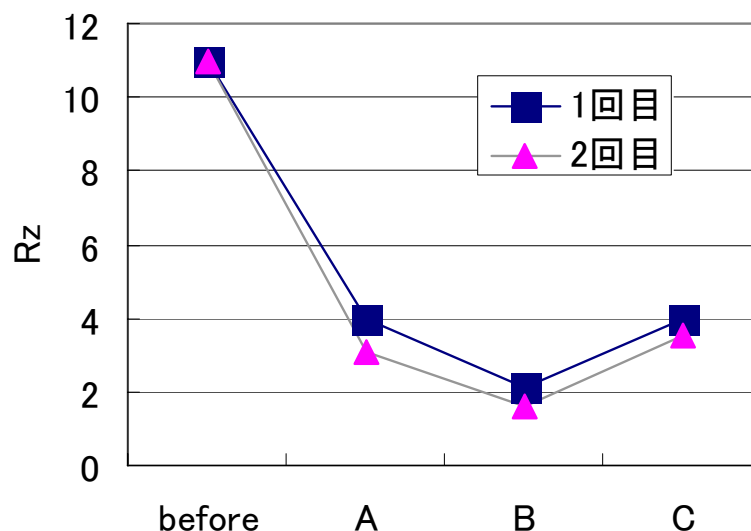


Fig. 6-29 Tolerance of re-generation to tool performance



(a) generated tool using modified procedure



(b) after removing process



(c) Re-generated tool

Fig. 6-30 Polyimide tool obtained by modified re-generation process

6.11 再生サイクルに要する時間

まとめとして再生に要する時間を試算すると表6-9になる。工具を移動させたりミクスチャーを塗布したりといったハンドリング作業に数分かかったとしても、レジンボンド砥石の場合で約20～25分、ビトリファイド砥石の場合で30分ほどで再生が行える見通しが得られた。

Table 6-9 Total processing time estimations

	フェノール	ポリイミド	ビトリファイド
焼成	12	15	15
剥離	8	10	10
合計	20	25	25

砥粒層厚さ：100 mm 時間：分

6.12 結論

本章では , 工具資源の有効活用と高精度化 , そして使用済み研削砥石の削減を目的として , 第五章で提案した機上再生技術の考え方を拡張し , 研削工具の機上再生技術の確立を検討した . 得られた結果を下記に記す .

- (1) 工作機械上に設置可能な小型の急速加熱装置を利用して , フェノール樹脂 , ポリイミド樹脂 , ならびに低融点ガラスを利用したビトリファイドボンドの軸付き砥石を , 15 分から 30 分程度で形成・再生できる技術を開発した .
- (2) (1) の工程においては , 軸に結合材を塗布してから砥粒を塗布し , それら塗布層を機上で加熱し砥粒層を形成するという工程を開発した . この工程においては型を用いる必要がなく , 素早く砥粒層の形成ができる . なお , 砥粒層を形成するためには , 結合材の粘性を $150\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度まで高くし , ペースト状にしたほうが形状の崩れが少なくて良い .
- (3) 樹脂の焼成においては , 結合材中の水や有機溶媒の沸騰を抑制しつつ , 溶媒を蒸発させてから加熱制御すれば , 良好な砥粒層が得られる .
- (4) 上記の工程で形成した砥粒層を利用してマシニングセンタ上でガラスの研削加工を行ったところ , 主軸剛性が確保されていないマシニングセンタを利用したにもかかわらず , ポリイミド工具で研削比が 100 , 仕上げ面粗さが $1.48\text{ }\mu\text{mRz}$ という性能が得られた .

参考文献

- 6-1) 日本研削砥石工業界 HP, <http://www18.ocn.ne.jp/%7Eetoishi/tokei.htm>
- 6-2) 竹中規雄, 研削加工, 誠文堂新光社, (1968).
- 6-3) ノリタケカンパニーリミテド HP: <http://www.noritake.co.jp/eeg/recycle/index.html>
- 6-4) 日本精密機械工作株式会社カタログ.
- 6-5) 日本工業標準調査会, JIS R 6240.
- 6-6) 日本工業標準調査会, JIS R6240.
- 6-7) 日本工業標準調査会ウェブサイト(<http://www.jisc.go.jp/>)
- 6-8) 武原徹裕, 榎本俊之, 谷泰弘, 柳原聖: 紫外線硬化樹脂を用いた固定砥粒ワイヤ工具の開発, 1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999)361.

第七章

工具・被削材間熱電流 による工具状態の監視

7.1 緒言

加工油剤を使わずに如何にして生産性を落とさず ,かつ工具寿命を長く保ち続けられるかという観点から ,工具 ,被削材 ,加工点に着目し種々の加工方法の提案を行ってきた .

これらの新しい加工方法は ,個別に実加工へと適用を図ることはもちろん可能であるが ,それぞれの加工方法が加工システムに統合的に採用されて製品それぞれの加工工程に応じて適宜適用されることが最も有効であろう .

すなわち ,工具の異常や摩耗状況をインプロセスで検知でき ,その情報を利用して適用制御が図れることが望ましいであろう .たとえば ,工具機上再生技術を切削加工で利用する場合には ,工具表層部の摩耗状態に応じてその再生のタイミングが決定されるのが望ましいと言える .

このようなシステム化を具現化し ,システムの自動化を高度化するためには工具損傷検出が重要な課題になってくる .工具損傷のインプロセス検出に関しては従来より多くの研究がなされている^{7-1) ~ 7-3)} .このような中で ,著者らは工具・被削材間熱起電力には連続切削において切削温度の他に ,切りくず処理情報 ,びびり周波数情報などが含まれていることを見出している⁷⁻⁴⁾ .

工具と被削材は異種金属であり ,加工中は切削熱によりその接点で熱起電力が生じる .加工点に最も近いために種々の情報が含まれていることは確実ではあるが ,情報が多く含まれているだけに ,得られる起電力情報から何を見出せるかは大きな課題である .そのような中で ,著者らは正面フライス工具を利用した断続切削において ,起電力波形の過渡応答に着目することにした .本章においてはその電気特性を利用して工具摩耗のインプロセス検出が可能かを検討する .

7.2 断続切削における熱起電力

7.2.1 実験条件

正面フライス工具の切削形態は多刃工具による切削であり、切削開始当初は単刃による切削、次に2枚刃、3枚刃による同時切削へと順次移行するのが一般的である。その各時点での工具・被削材間に発生する熱起電力と特定切れ刃との対応を正確に観察するため図7-1のような実験装置を構成した。使用した機械は3番の横フライス盤、被削材はS45C(幅50mm)。また工具は、正面フライス工具：100mm、6枚刃、アキシャルレーキ： 5° 、ラジアルレーキ： 1° 、アプローチ角： 25° 、またチップはP20相当品、4角形チップ、逃げ角： 11° 、ノーズ半径： 0.4mm を使用した。

熱起電力測定回路は測定ノイズを抑制するため機械のテーブルと電氣的に絶縁した被削材に接続したシールド線と、機械の主軸端から水銀接点を介して取り出した端子で構成される。発生電圧はDCアンプで増幅し、データレコーダに記録した。記録された電圧波形は後でサンプリング周波数50kHzでコンピュータに取り込み検討した。発生起電力と6枚の切れ刃との対応を取るため主軸端にマグネットセンサを置き、同時に記録した。

また非切削時に測定回路が開放状態となりノイズが増大するので、これを防止するために測定回路と並列に発生熱起電力のレベルで抵抗値をアナログスイッチ(切替時間 $0.6\mu\text{s}$ 以下)で切り替えるノイズ低減回路を挿入した。切削の形態はダウンカット、アップカットの2形態とし、工具の摩耗実験では、切削送りは 0.1mm/刃 とし、切込みは 0.2 、 0.5 、 1.2mm を使用した。

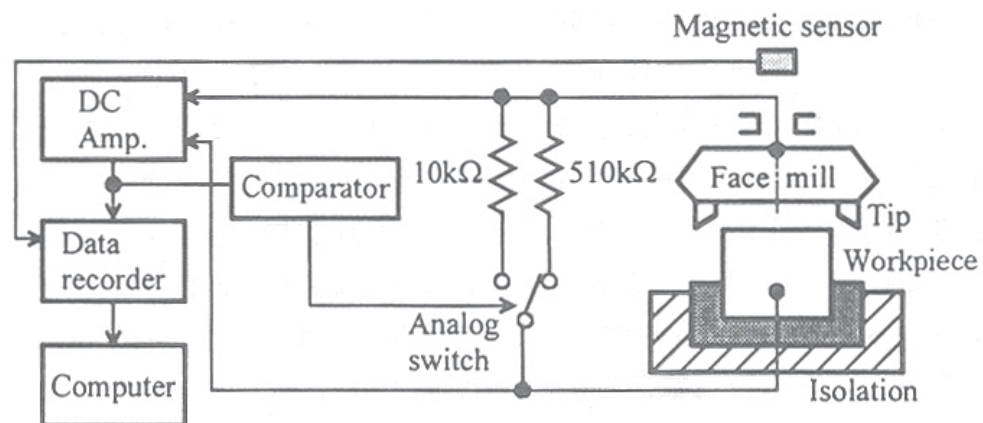


Fig.7-1 Experimental apparatus

7.2.2 多刃工具における熱起電力の応答

図7-2に切削速度148m/min, 切込み0.5mm, ダウンカット(エンゲージ角:0°)の切削条件で, 工具の逃げ面摩耗幅が変化した時の熱起電力の立上がり波形の変化の様子を示す. 図(a)から図(c)まで工具逃げ面摩耗幅は $VB = 0\text{mm}$ から $VB = 0.79\text{mm}$ の3段階である. ただし, 切削の時期は同時食込み刃数0.8の時点で, 6枚の切れ刃の中の同一の切れ刃による切削で得られたものである.

1枚の切れ刃の切削時間は約13msで, 切削終了時点の起電力の立下がり波形は工具の被削材からの離脱時に発生したバリとの接触で不規則になるが, 工具摩耗に伴う切削開始時の起電力の立上がり波形には特徴が観察できる. 図(a)のように摩耗のない工具では切削開始時の起電力の立上がりは指数関数的で, 立上がりは速く, 滑らかであり, 1ms程度で定常状態になっている. しかし, 図(b)の $VB = 0.28\text{mm}$ になると, 切削開始時点で定常熱起電力(7~8mV)の半分程度の起電力の上昇には変化はないが, それ以後の起電力の増加割合は工具の逃げ面摩耗が大きいほど遅くなっていることが観察され, 図(c)の $VB = 0.79\text{mm}$ ではこの傾向がより明確になっている. これらの波形は一種の指数関数と考えられるが, 時定数で評価すれば工具摩耗が大きいほど時定数が大きくなるとも解釈できる. このような傾向は切削形態をアップカットにしても同様に確認された. しかし, 切込みを2mmなどに大きくすると, この傾向は同じであるが, 変化の割合は小さくなることが観察された.

切削が進行すると, 同時に切削する切れ刃が1枚から2枚となり, 1枚目の切れ刃で発生する熱起電力に2枚目の切れ刃で発生した起電力が加わり, 工具と被削材で構成される閉ループ回路に逆向きの極性を持った電圧源の並列回路ができ, 合成された起電力が図7-1の測定回路で観察されるようになる. その合成熱起電力と工具摩耗との対応を示すと図7-3のようになる. ただし, 縦軸の原点の電圧は4mVであり, 図7-2では0mVである. 図7-3も図7-2(a)-(c)に示したデータと同一時系列のデータで, 6枚の切れ刃の中の同一切れ刃の摩耗が進行する各段階での熱起電力の変化を示したものである. 工具摩耗が無い図3(a)の場合, 1枚の切れ刃による切削から2枚の切れ刃による切削に切り替わった瞬間(横軸スケールで2msの時点), 起電力は急激に立ち下がり, その後指数関数的に回復している. 図(b)のように $VB = 0.28\text{mm}$ になると, 立下がりの程度には差異はあまり認められないが, 回復過程において立上がりに時間

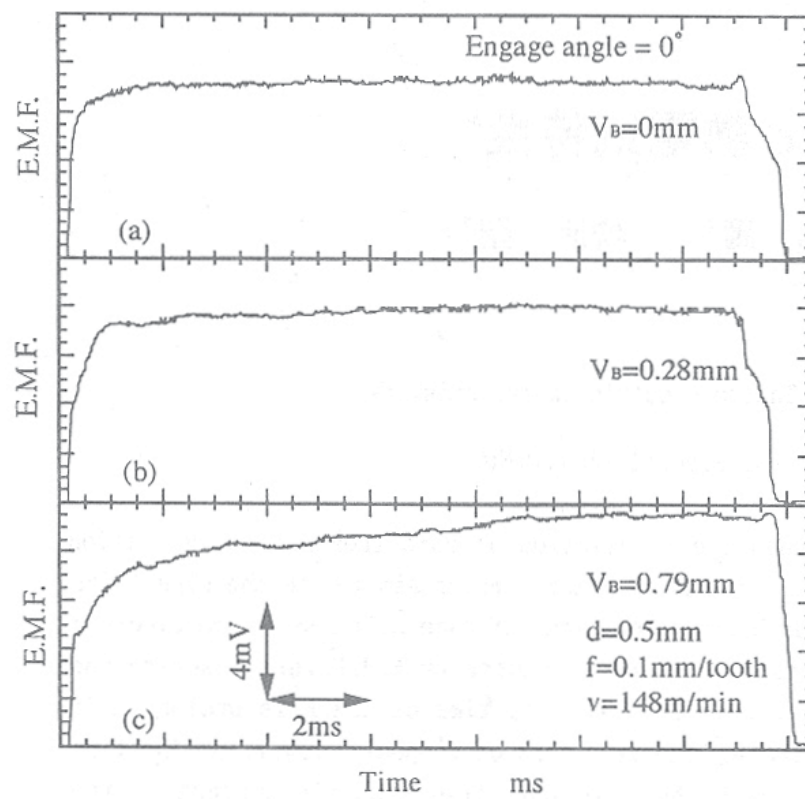


Fig.7-2 Records of thermo-electromotive force (E.M.F) in case of a single tip

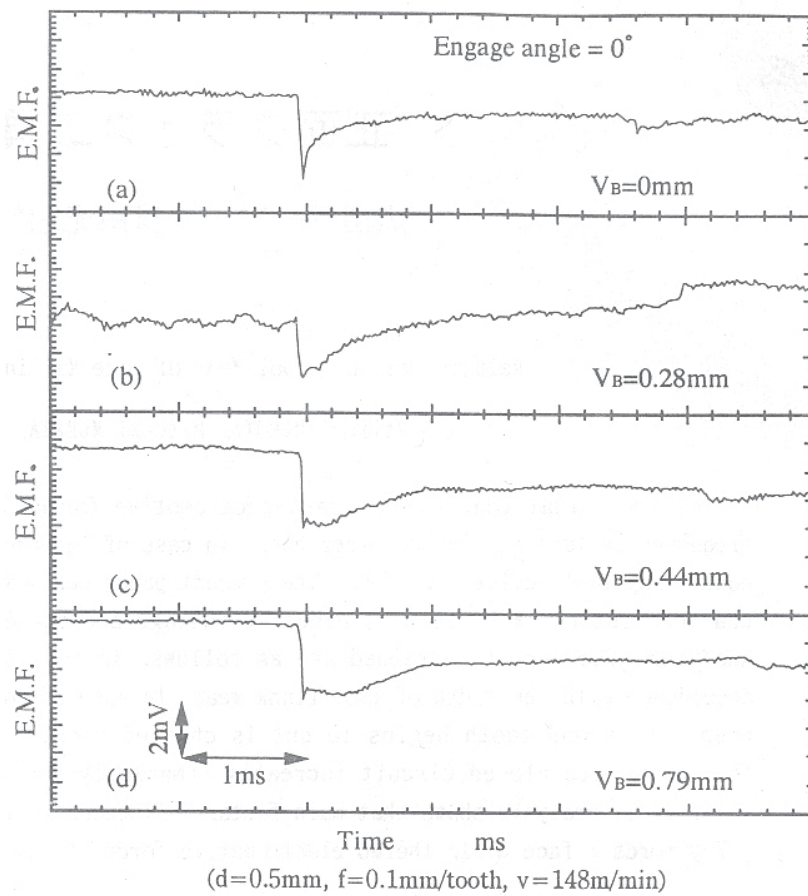


Fig.7-3 Records of E.M.F in case of double tips

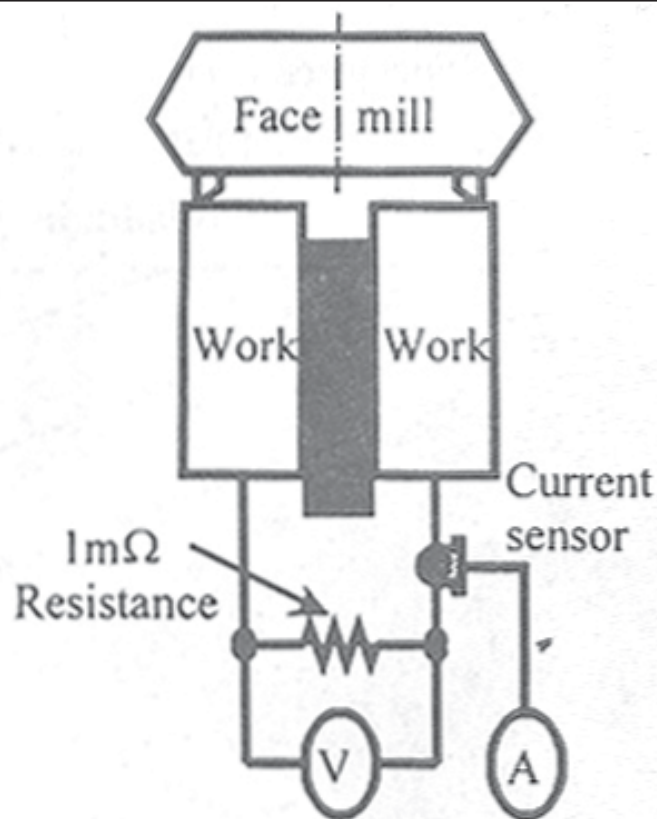
遅れのような現象が出現している。この傾向は工具摩耗が大きいほど大きくなっていくのが図 3(c) , (d) の波形から明らかである。この傾向は同一切削条件のアップカットについても同様に確認された。しかし、切込みを大きくした同様の実験ではこの特徴が小さくなる傾向があった。また同時食込み刃数 3 以上についてはデータはないが後述の考察の中で検討することにする。

7.3 熱起電力と熱電流の関係

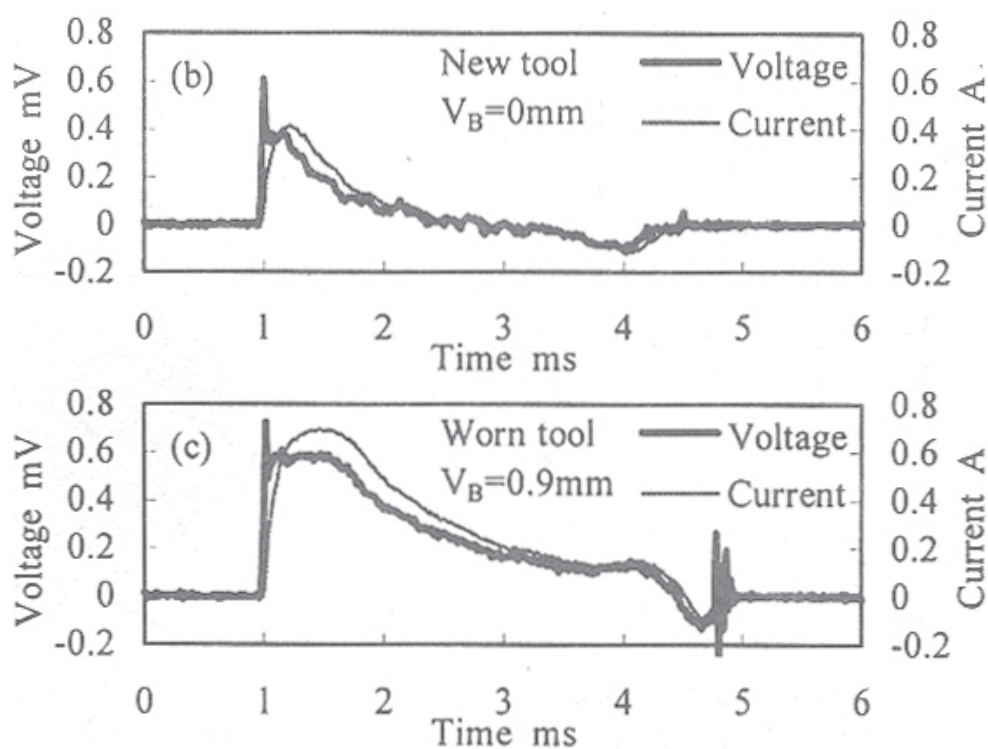
上述のように工具逃げ面摩耗の進行と熱起電力波形の間には特徴ある対応が観測された。また2枚の切れ刃による切削では工具と被削材間熱起電力の発生箇所が2か所となり、これを電源として工具と被削材で構成された閉ループ回路に電流が流れ、これにより工具と被削材間で測定した起電力の電圧波形に影響を与えると想定される。そこでこの閉ループ回路に流れる熱電流を観察することにした。

図7-4(a)にその測定回路を示す。工具または被削材に流れる電流を直接測定することは難しいので、被削材を2分割し、これを導体(内部抵抗 $1\text{m}\Omega$ のシャント抵抗を兼ねる)で結合し、この導体に流れる熱電流をホール素子タイプの非接触電流センサ(応答速度 $15\text{ }\mu\text{S}$)を用いて測定した。また、導体の端子間降下電圧の波形も同時に測定した。図7-4(b)、(c)はそれぞれ新工具($V_B=0\text{mm}$)と逃げ面摩耗工具($r_{0.9}=0.9\text{mm}$)を用いて切削したときの電圧、電流波形の一例である。その他の切削条件は図7-2、図7-3の場合と同じである。図(b)の電圧波形は図3の波形とは逆に正電圧として記録してある。横軸の時間スケールの 1ms 時点までは1枚の切れ刃による切削で、この測定法では閉ループが構成されず電圧、電流は記録できないが、この時点で2枚の切れ刃による切削が開始されて熱電流による降下電圧が発生している。その波形は図7-3(a)と正負が逆であるが似たような波形が記録されている。これに対して電流波形はその立上がりに勾配があり、ピーク電流約 0.4A で減少に転じ、電圧波形と異なる波形となっている。しかし、立上がり部を別にすれば似たような波形となり、電圧波形を一旦ローパスフィルタを通したような波形である。横軸の約 3ms 前後(切削時間で約 2ms)で電圧、電流ともに零になっているが、これは2枚の切れ刃の切削点で発生する熱起電力の極性が回路中では逆であり、2枚目の切れ刃の起電力が1枚目の切れ刃の起電力と同値になった時点で閉ループ回路に電流が流れなくなるためである。図7-4(c)の摩耗工具の場合も電圧波形は図3(d)の波形と酷似しており、ピーク部の拡大が観察され、摩耗のない工具の場合と大きく異なっている、また、電流波形もピーク電流が 0.7A と増大し、その持続時間も図(b)の新工具の場合よりかなり長くなっている。

このように閉ループ回路の電圧・電流特性は工具摩耗がある場合と無い場合で大き



(a) Current measurement circuit



($d=0.5\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/tooth}$, $v=100\text{m/min}$)

Fig.7-4 Relation between electric current and voltage

く異なり，また電流波形と電圧波形の立上がり部の特性が異なることが明らかである．この実験では1つの切削点に起因する熱電流の大きさ自体は測定できないので図7-5(a)のように断続切削における熱電流測定回路を旋盤主軸と旋削バイトで構成し，非接触電流センサで測定した．ただし工具と主軸間の結線は太い導線を用い，導線と接続接点の電気抵抗が極力小さくなるように工夫して，閉ループを構成した．被削材は角形で，工具形状は三角チップでフライス工具と異なるが，その他の条件は図7-2の場合と同じである．

図7-5(b)に単刃による断続切削で得られた熱電流の測定例を示す．切削条件は図中に示すとおりである．太線は新工具($VB = 0\text{mm}$)の熱電流で，細線は摩耗工具($VB = 1.0\text{mm}$)の場合である．測定回路の直流電気抵抗はこの時点では不明であるが，切削開始後約10ms経過した定常状態では新工具で2.1A，摩耗工具では3.6Aの熱電流が記録されている．率にして80%程度の大きな変化である．しかし，切削条件は同じである．そこで，切削速度，送りを同じにして切込みを0.2mmから2mmまで4段階に変化させて工具摩耗と熱電流変化の対応を調べたのが図7-6(a)である．ただし，測定データは切削開始後15ms経過した時点の定常値で，1つの測定データは9回の切削データの平均値として示してある．切込み0.2mmの場合，工具摩耗と熱電流の変化の対応は少し不安定な様子が見られるが，切込み0.5mm以上では工具摩耗の増加に対し，熱電流が直線的に増加し，その変化の割合は切込みが小さいほど大きいことが図から判断できる．図7-5(a)の電流測定回路では熱起電力が測定できないので，工具と導線の接点部分に510 Ω の直流抵抗を測定回路に直列に挿入し，この抵抗両端の電圧として工具摩耗にともなう熱起電力測定を図7-6(a)の電流測定と並行して行った．その結果を図7-6(b)に示す．切込み0.2mm，逃げ面摩耗幅0.3mmの熱起電力のデータが少し乱れているが，その他のデータは工具摩耗の増加につれ，熱起電力が増加するとも見えるが確実な判断ができない程度の変化と観察される．また，切込みの増加による熱起電力の増加もわずかである．

このことから新工具と摩耗工具の熱電流の大きな差の主要因は工具と被削材の接触

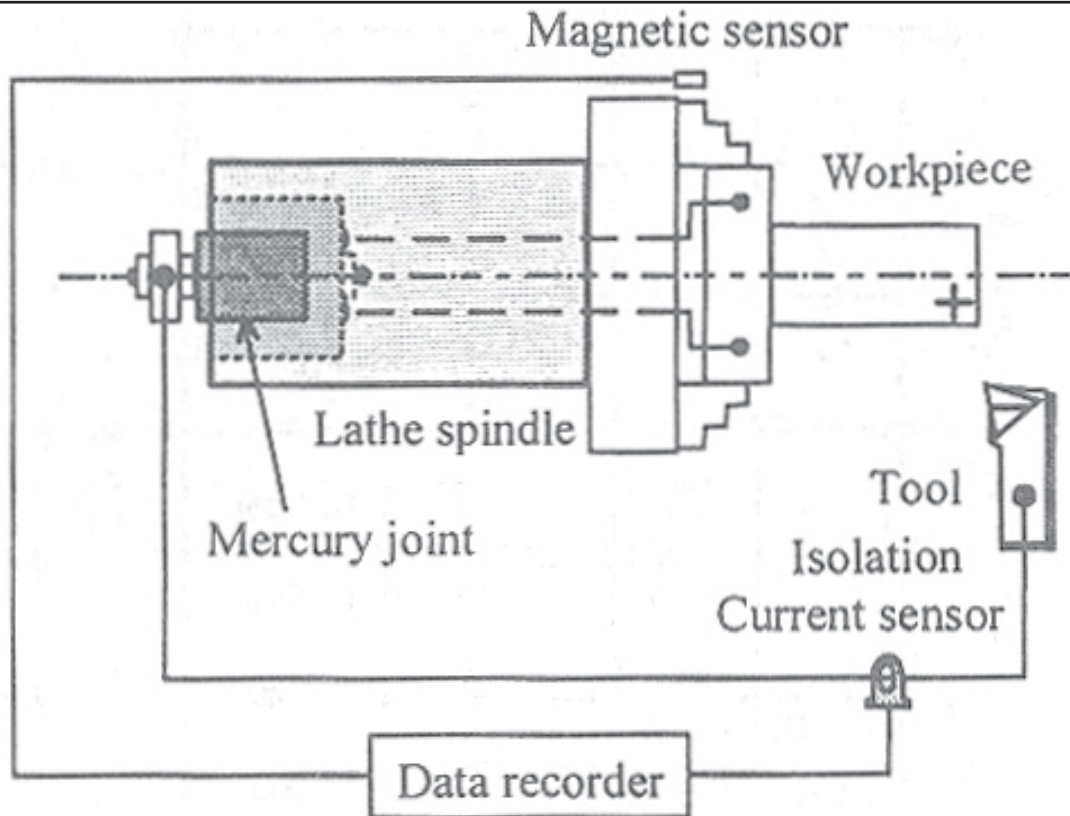


Fig.7-5(a) Experimental apparatus for measurement of electric current

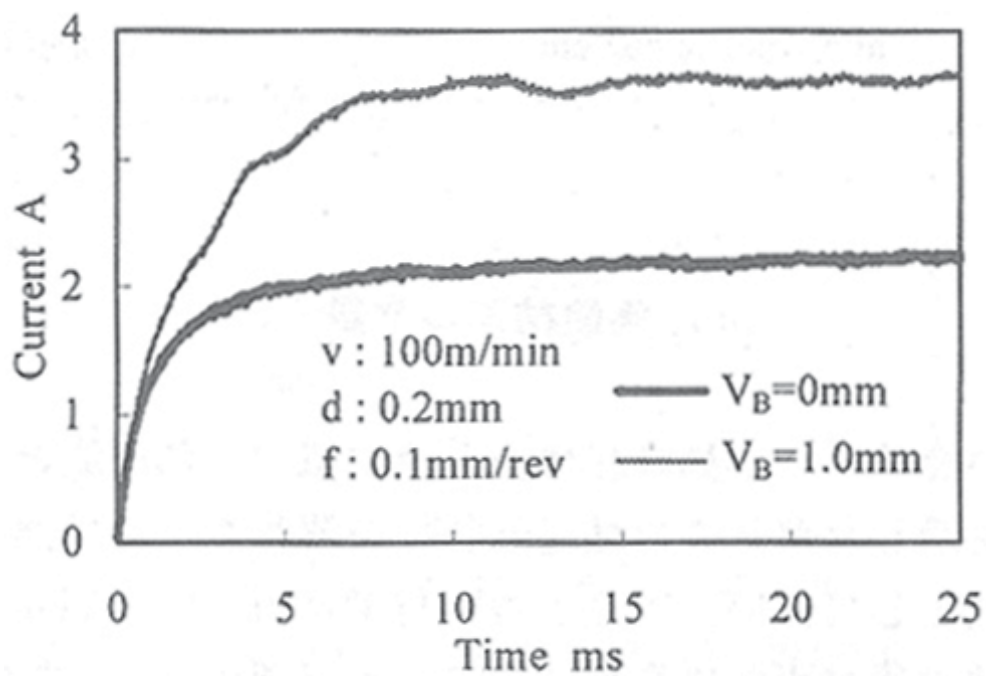


Fig.7-5(b) Comparisons of thermo-electro currents between new tool and worn one.

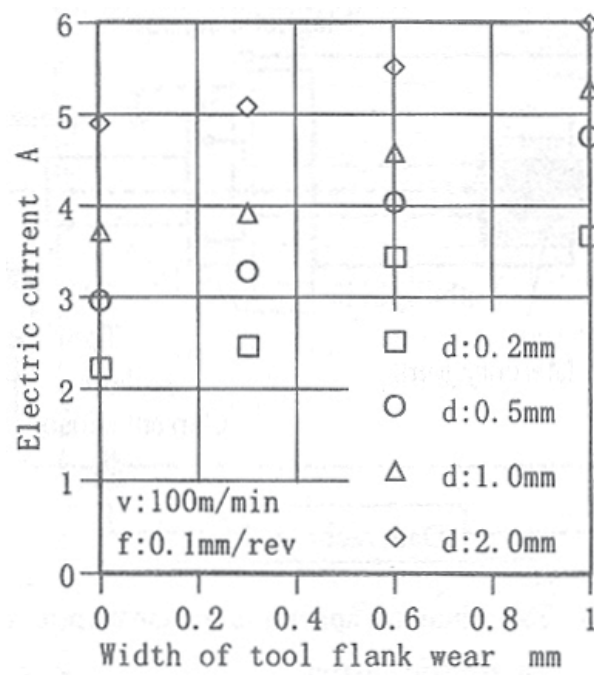


Fig.7-6(a) Relation between tool wear and electric current

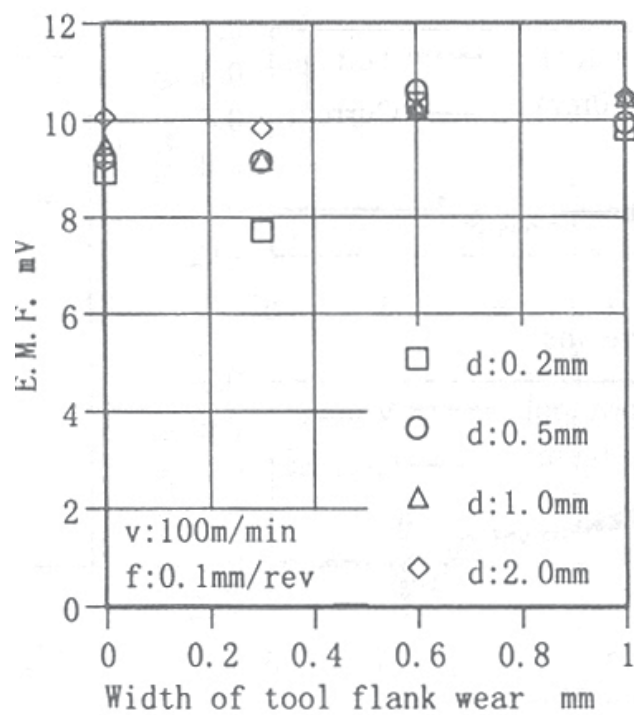


Fig.7-6(b) Relation between tool wear and E.M.F

電気抵抗の差であると考えるのが自然である。定常切削状態ではオームの法則が成立するとすれば、図7-6(a)、(b)の両図から回路抵抗(接触電気抵抗+回路固有抵抗)が計算できる。切込み0.5mmの場合、新工具の回路抵抗は3.1mΩで、VB = 1mmの摩耗工具では2.0mΩとなる。その差は1.1mΩであり、工具摩耗によって接触電気抵抗が減少し、熱電流の大きな差となって現れると考えられる。しかしながら、この熱電流の変化の割合は測定回路の回路固有抵抗が小さいほど大きくなるので熱電流測定回路の回路固有抵抗をできるだけ小さくすることは測定上有利である。

図7-6(a)の熱電流測定で用いた回路の回路固有抵抗および接触電気抵抗の値を推定するため次のような実験を行った。すなわち、工具摩耗にともなう工具と被削材の接触面積を工具摩耗だけで広範囲に変化させることは困難なので、新工具を用い、切込み、送りを変化させ、工具摩耗にともなう工具逃げ面と被削材の接触面積の増加を工具すくい面と被削材の接触面積の変化で代用し、その時の熱電流と熱起電力から閉ループ回路の回路抵抗の変化を調べた。その結果を図7-7に示す。切削速度100m/min一定とし、切込みは0.2～3mm、送りは0.05～0.4mm/revの範囲で変化させた。その結果、重切削と比較して、軽切削ほど回路抵抗は大きく、また接触面積の変化に対する回路抵抗の変化の割合が大きいことが明らかである。また回路抵抗の変化を図から判断すると指数関数的であり、接触電気抵抗は原理的に接触面積の増大により零に収束することを考慮すると、図7-7の重切削領域の回路抵抗は1.4mΩ程度なので回路固有抵抗は1mΩ程度であったと推定できる。この値を用いれば図7-7の軽切削領域では接触電気抵抗は回路固有抵抗より大きく、図7-6の実験で工具摩耗の増加により熱電流が大きく変化することが理解できる。

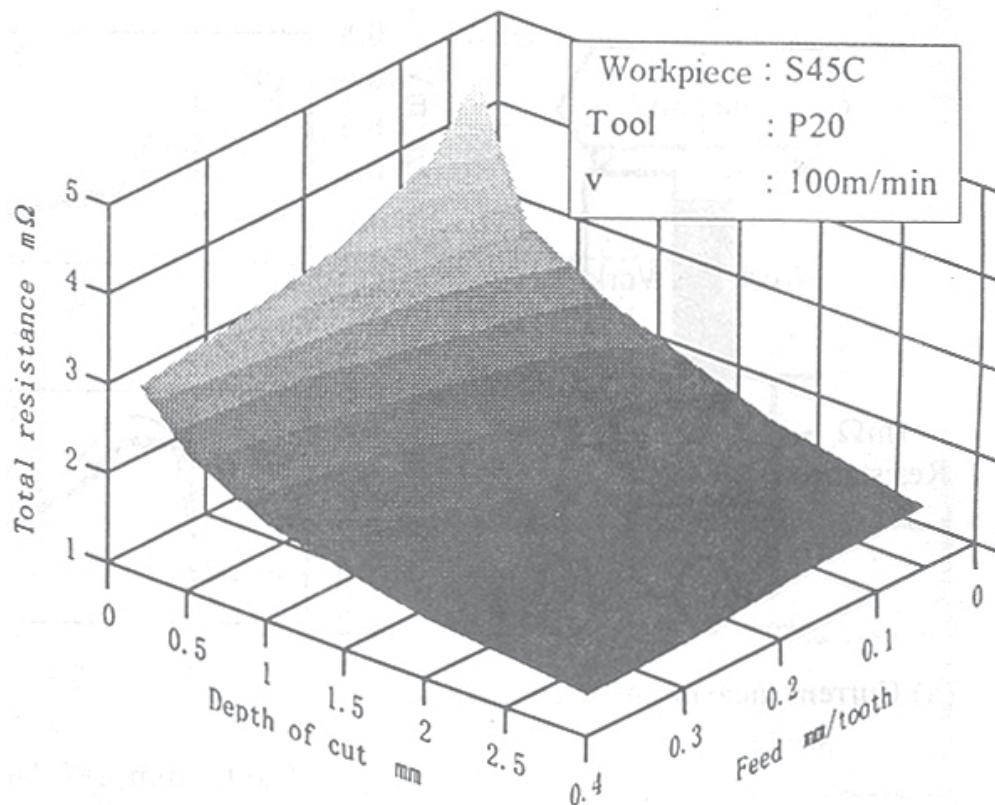


Fig.7-7 Relation between electric resistance and cutting conditions

このようなことから正面フライス工具のような多刃工具による切削では回路固有抵抗が微少と推定されるので工具と被削材の間に閉ループが構成されるとアンペアオーダの熱電流が流れること、図7-5(b)に示したような工具摩耗による熱電流の大きな増加の主要因は工具摩耗による被削材との接触面積の増加に伴う接触電気抵抗の減少によるものと判断できることがわかった。

また熱起電力自体はmVのオーダであるが、回路抵抗を微少にすれば非接触の電流センサで、アンペアオーダの熱電流が電圧測定より低ノイズで観測できることも明らかになった。

7.4 実験結果の考察

以上の実験で、工具摩耗に伴う熱起電力、熱電流と接触抵抗の変化を示したが、この熱電気特性を解釈するには熱起電力を時間関数として扱い、工具と被削材で構成される閉ループ回路の電氣的な過渡現象を含めて取り扱う必要がある。図7-4(a)の測定回路で同 - の導体から検出した電圧波形と電流波形に差がある原因として考えられるのは導体自体のインダクタンスの存在である。回路の寄生コンデンサ容量も存在するはずであるが、ここでは微少として無視することにする。図7-4(a)の実験回路を電氣的等価回路として表現すると図7-8のようになる。図で E_0 および $e(t)$ はそれぞれ定常切削状態にある切れ刃の熱起電力と、これから切削を開始する工具の起電力を時間関数で表現したもの、 R と L はそれぞれ回路の全抵抗と全インダクタンスである。また、 R' と L' はそれぞれ電圧・電流測定導体(シャント抵抗)自体の抵抗とインダクタンスである。ここで図7-4(a)を参照して工具と被削材の左右半分の抵抗とインダクタンスを等しいとして、それぞれ R_1 、 L_1 とすれば

$$R = 2R_1 + R' \quad L = 2L_1 + L'$$

である。

測定導体の端子間電圧を $V(t)$ 、回路に流れる電流を $i(t)$ とし、図2の波形を参考にして、熱起電力 $e(t)$ を時定数 τ 、定常熱起電力 E を用いて

$$e(t) = E(1 - \exp(-t/\tau))$$

と表現すれば、2枚目の切れ刃が切削を開始し、図7-8の回路が構成された時の等価回路の電圧方程式は

$$E_0 - e(t) = R \cdot i(t) + L \cdot di(t)/dt \quad (7.1)$$

である。これに上に記した $e(t)$ の式を代入し、ラプラス変換して回路電流 $i(t)$ を求めれば

$$\dot{i}(t) = \frac{E_0 - E}{R} \{ (1 - \exp(-\frac{R}{L}t)) \} + \frac{E}{R - \frac{L}{\tau}} \{ \exp(-\frac{t}{\tau}) - \exp(-\frac{R}{L}t) \} \quad (7.2)$$

となる。式(7.2)の第1項は2枚の切れ刃の定常切削状態における熱起電力の差分の項であり、通常はほぼ同じ値なので、 $E_0 = E$ とし、この項をここでは零として扱うことにする。また導体端子間電圧 $V(t)$ は $V(t) = R' \cdot i(t) + L' \cdot di(t)/dt$ より求められ、これに式(7.2)を代入すれば

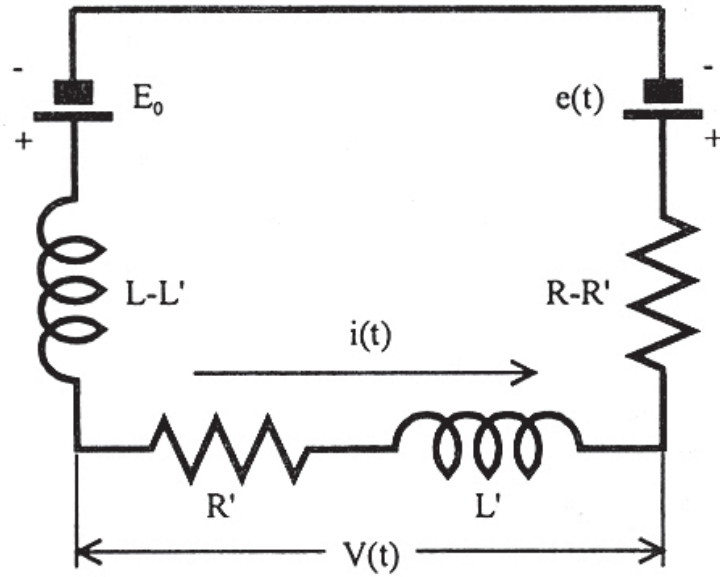


Fig.7-8 Equivalent circuit

Table 7-1 Conditions for calculation of dynamic response of equivalent circuit

		2tips		3tips	
		New tool	Worn tool	New tool	Worn tool
E	mV	8	8	8	8
τ	ms	0.25	0.33	0.25	0.33
R_1	m Ω	2.5	1.5	2.5	1.5
R'	m Ω	1	1	1	1
L	μ H	1.3	1.3	1.2	1.2
L'	μ H	0.2	0.2	0.2	0.2

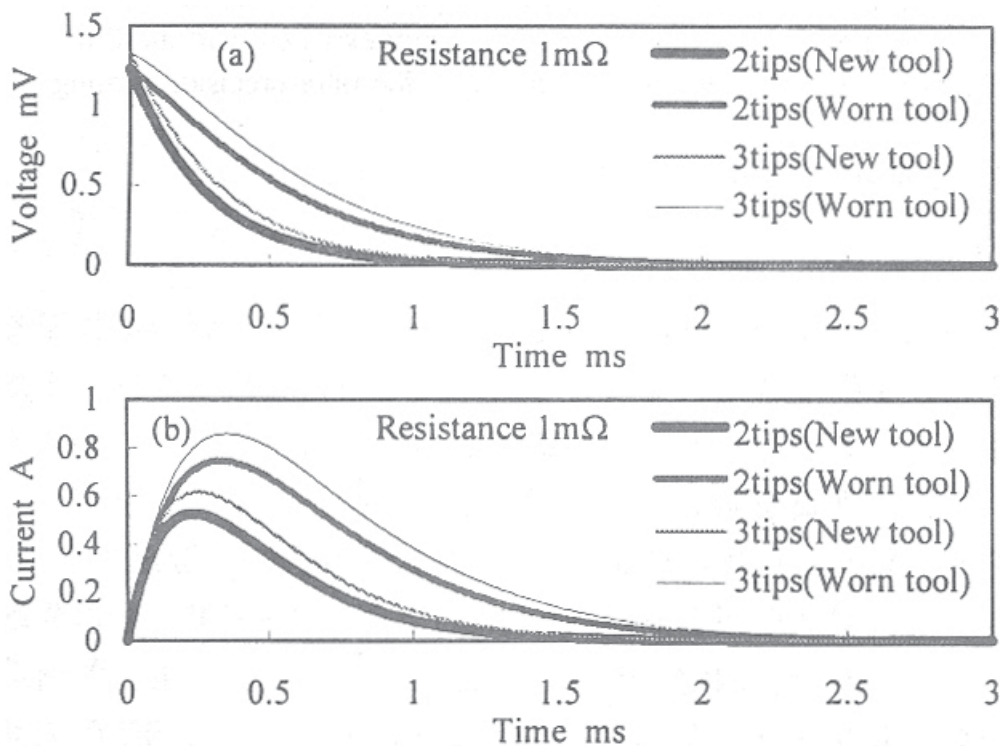


Fig.7-9 Calculated dynamic response of equivalent circuit

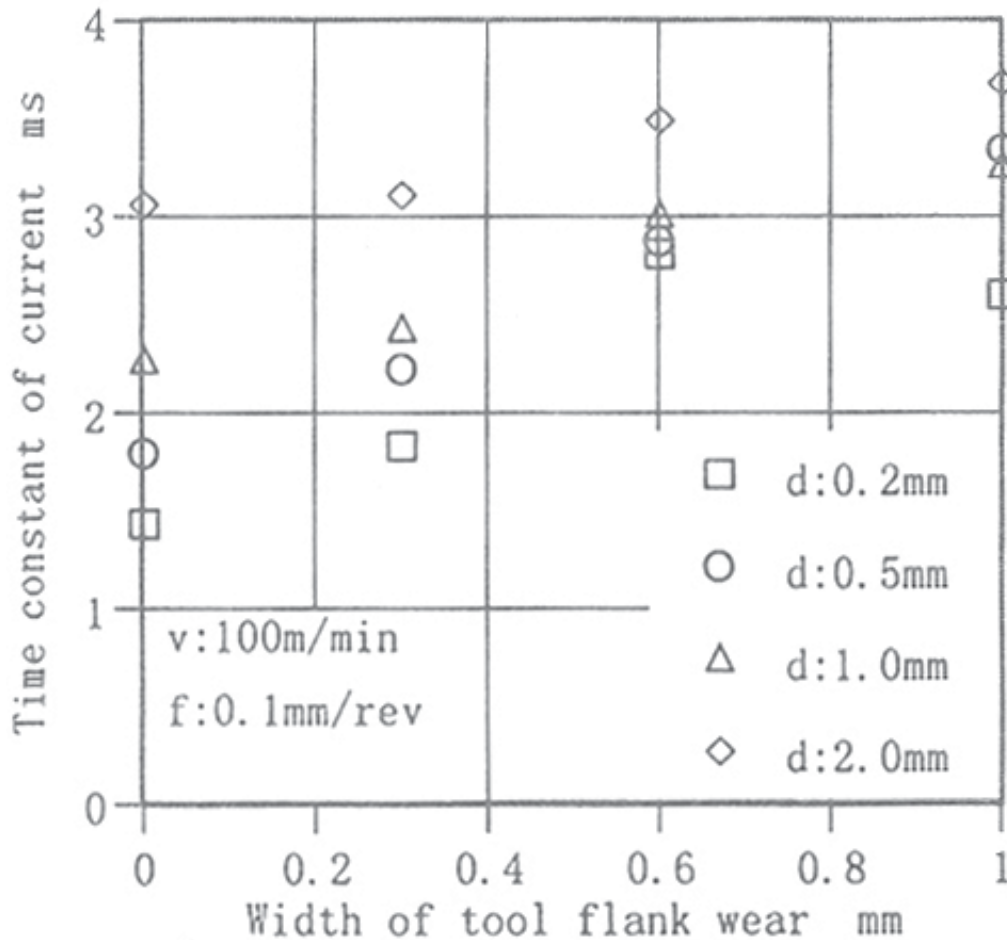


Fig.7-9 Relation between flank wear of tool and time constant of thermo-current

$$V(t) = \frac{E}{R - \frac{L}{\tau}} \left\{ \left(R' - \frac{L'}{\tau} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \left(\frac{L'}{L} R - R' \right) \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right\} \quad (7.3)$$

となる．

以上は同時食込み刃数2の場合であるが，同時食込み刃数3の場合についても検討した．この場合，図7-8を参照すれば全回路抵抗 R と L は

$$R = (3/2)R_1 + R', \quad L = (3/2)L_1 + L'$$

となり，2枚の切れ刃による切削の場合より全抵抗と全インダクタンスは減少し，シャント抵抗で検出される電流・電圧の理論式は式(7.2)，(7.3)と同じ形になる．

この理論式を用い，図7-2の波形の立上がりデータから時定数を，図7-7のデータから R_1 を推定し，インダクタンスは実測して理論式に当てはめた．この計算に使用した値を表7-1に示す．また計算結果を図7-9に示す．図(a)は電圧の過渡現象波形，図(b)は電流の過渡現象波形で，同時食込み刃数2の場合と3の場合の摩耗無しの新工具と摩耗工具の場合を一緒に示してある．

この波形から、工具が摩耗すると電圧波形は立下がりが遅くなり、電流はピークの増加と持続時間が長くなること、同時食込み刃数3でも、同時食込み刃数2と同傾向の過渡現象が得られることがわかる。また、この計算値は図7-4(b)、(c)の観測データともその形がよく似ていることも判断できる。ただし、電圧波形の立下がりにおいて、実験ではピーク幅の拡大が観察されているが、理論式ではこれが表現されていない。この原因は工具逃げ面と被削材の接触初期の状態を考慮すれば、切削点の接触電気抵抗 R_c を時間関数として扱うべきであるが、式(7.1)の解を求めることが困難になるため、固定値としたことにあると思われる。

ところで式(7.2)、(7.3)はともに2つの指数関数で表現され、その時定数は τ と L/R である。前者は熱起電力の立上がりの速さを表し、工具が摩耗すると τ が増加する現象が観察(図7-2参照)されている。また後者は回路特性を表現しており、 L に対し R が小さければ R の変化により、時定数が大きく変化する。これは測定回路の抵抗が小さいほど工具摩耗による接触電気抵抗の減少により、測定過渡電圧または過渡電流波形への影響が現れることを示している。図7-4(b)、(c)の波形の立上がり部分がその観察例であるが、工具摩耗の差による波形の差異はあるが、時定数の変化という意味では明確な差異を判別することは難しい。そこで単刃による断続切削の熱電流について検討してみた。単刃断続切削における熱電流の理論式は式(7.2)で $E_0 = 0$ とすればよく、過渡熱電流波形には τ と L/R の2つの時定数変化が影響することがわかる。工具摩耗に伴う熱電流の観察例は図7-5(b)に示したが、この立上がり波形を指数関数とすれば新工具と摩耗工具では時定数にかなりの差異があることが明らかである。そこで図7-6(a)の実験で使用した工具摩耗と熱電流変化の波形データを用い、波形を指数関数として扱い、工具摩耗と熱電流の時定数変化の対応を求めたのが図7-10である。図のパラメータは切込みである。切込み0.2mmの場合、データにばらつきが見られるが、その他のデータは工具摩耗の増加につれ時定数も直線的に増加し、切込みが小さいほうがその増加率が大きいことが観察される。この特徴は図7-6(a)に示した工具摩耗と熱電流定常値の変化の特徴とよく似ており、工具摩耗に伴い、熱起電力の時定数(T)の増加および接触電気抵抗の減少による測定回路時定数(L/R)の増加となり、これが熱電流定常値および熱電流の立上がりの時定数の変化となって観察されると解釈できる。

次に，式(7.3)に $t = 0$ を代入すれば $(0) = (L/L) \cdot E$ となる．これより電圧波形の初期値はインダクタンスを不変とすれば，熱起電力だけの関数となる．図7-2では工具摩耗により E は増加するように観察されるが，平均値で整理した図7-6(b)のデータで判断すれば熱起電力は工具摩耗によりあまり変化せず，図7-3の合成熱起電力の立下がりの大きさが，時間的にそれ以後の波形の工具摩耗による変化と比較して，ばらつきはあるが，あまり変化しない点はこれを裏付けている．

また，式(7.2)，(7.3)を定積分すれば

$$\int_0^{\infty} V(t) dt = E \cdot \tau \cdot \frac{R'}{R}, \quad \int_0^{\infty} i(t) dt = \frac{E}{R} \cdot \tau \quad (7.4)$$

が得られる．式(7.4)から電圧と電流の積分値は回路抵抗 R に逆比例し，熱起電力の時定数 T に比例すると言える．工具が摩耗すると熱起電力の定常値はあまり変化しないが，熱起電力の時定数が増加し，回路の電気抵抗が減少するので，過渡電流および過渡電圧の観察例(図7-4(b)，(c))でも工具摩耗により波形の積分値が増加することが理解できる．

Table 7-2 Relation thickness of DLC coating and circuit resistance

DLC無し		
	加工時間(分)	抵抗(Ω)
	0	0.9
DLC1 μ m		
	加工時間(分)	抵抗(Ω)
	0	2.1
	15	1.5
	30	1.4
	45	1.2
	60	1

主軸回転数:445/min, 切削速度:200m/min, 切り込み:2mm, 送り:0.01mm/rev

7.5 DLC コーティング膜厚の接触抵抗による検出

工具の摩耗と熱電流の過渡特性についてその原因が、接触電気抵抗の変化よることが明らかになった。そこで、このことを機上再生技術などに応用することを考える。第五章の切削工具の機上再生技術においては、工具母材上に形成したコーティング膜が加工中にどの程度残存しているかを認識できることが望ましい。もちろん、時間管理によって工具のコーティングを再生しても良いのであるが、切れ刃再生のインターバルをできる限り長くしたほうが工具資源の有効活用が図れることは自明である。

表7-2はDLCコーティングを施したインサートを利用して、熱電流から回路抵抗を求めてコーティング膜の有無が検出できないかを検討したものである。DLCコーティングを1 μ m施すと、DLC無しの工具と比較してコーティング膜の分だけ接触抵抗が増加していることが理解できる。そして、加工時間に応じて抵抗値が減少しているのが理解できる。ほぼ一時間で回路抵抗がDLC膜なしと同程度になり、このとき膜は摩耗していた。

この結果から、工具のコーティング膜の摩耗を熱電流回路から検出できることが立証された。

7.5 結論

本章においては、切削加工中に生じる工具・被削材間熱起電力に着目して、工具の摩耗や異常をその熱電流の変化から検出できるようにするために、その特性を調べた。得られた結果は以下になる。

- (1)一つの切れ刃と工作物の間で生じる熱起電力については、工具の摩耗が進行するほど切削開始時の熱起電力の立ち上がりが遅くなる。
- (2)二枚の切れ刃による切削では、二枚目の切れ刃の切削開始時に工具・被削材間に大きな熱電流が流れる。このとき、二つの切れ刃で発生する起電力は合成されたものとなり、この波形は工具摩耗の進行とともに大きく変化する。
- (3)工具切れ刃と被削材を含む微小な回路抵抗の閉ループ回路を構成すると、工具摩耗の増加により、熱起電力を電源として回路に流れる熱電流の立ち上がり時定数と定常熱電流値が大きく増加する。
- (4)上記の特徴は軽切削ほど顕著に現れる。これは原理的に端子間の接触面積が大きいほうが接触電気抵抗が0に近づくため、摩耗にともなうmオーダーの微小な接触抵抗変化が重切削になればなるほどわかりにくくなるためである。
- (5)実験から得られたデータを用いて、等価回路による数値計算を行った。その結果、一枚目の切れ刃が加工している際に二枚目の切れ刃が工作物に接触し加工を開始し始めてからの過渡的な状態において、その過渡応答が接触電気抵抗の変化によることが明らかになった。
- (6)上記の結果を利用してDLCコーティング工具とアルミ被削材間の接触抵抗の変化を観察した。その結果、DLCコーティング膜の残存状況を監視できる可能性が得られた。

参考文献

- 7-1) 檜村幸辰, 切削分力比率による工具逃げ面摩耗の予測に関する研究, 精密機械, 52, 6(1986)136.
- 7-2) 森脇俊道, 樋野 励, AEを用いたコーティング工具の寿命検出に関する研究, 精密工学会誌, 57, 7(1991)123.
- 7-3) 白檜高洋, 龍 衛国, 帯川利之, 能動的方法による工具損傷のインプロセス検出(第2報), 精密工学会誌, 62, 8(1996)1146.
- 7-4) 広田平一, 鈴木重信, 篠崎 襄, 工具・被削材間熱起・電力の変動特性, 精密機械, 45, 5(1979)68.

第八章 結 論

8.1 本研究で得られた成果

本研究は、産業活動が生み出す負の生産物である環境汚染や産業廃棄物を機械加工の分野でも極力減らし、そして工具資源の有効活用を図れることを目的として着想された。そして、機械加工用の加工油剤の利用を無くした場合に、どのようにして工具の長寿命化を図れば良いのかを検討した。

機械加工は、高強度の工具を工作機械に取り付けて、工具あるいは材料に運動エネルギーを与え、材料の破壊や変形を制御しながら材料を所望の形状を得る加工法である。材料を破壊し、変形させる工具には、できる限りその形状を維持し続けられること、すなわち長い寿命が望まれる。機械加工工具の長寿命化を達成するためには、次の二点が重要になる。

- ・材料に対して4倍以上の強度を有すること。
- ・熱化学反応を起こしにくい。

加工油剤は、加工点を冷却し、潤滑することで工具と被削材の間に生じる熱化学反応を緩和し、摩耗を防ぐ役割を担っている。本研究においては、この加工油剤に依存しない新たな加工法の設計を行うために、加工雰囲気、すなわち場と加工油剤以外の補材の利用に注目した。その中で、従前の研究課題の調査と分類を行ったところ、図8-1(図中の括弧内の番号それぞれは、第二章参考文献の番号を意味している。)のように工具、補材、場のそれぞれの領域に様々な視点で研究がなされていることがわかった。しかしこれまでの研究は、工具材質の強化と、加工油剤とその供給に関する研究で7割が占められており、結果として次の領域に新たな工具長寿命化の設計解が存在しうることが明らかとなった。

領域1. 工具 - 場

領域2. 工具 - 場 - 補材

領域3. 工具 - 補材

そしてそれぞれ領域に関して、領域1,2については場の利用技術として、領域3については補材強化による切れ刃再生技術として、次のような工程設計の戦略を立てた。

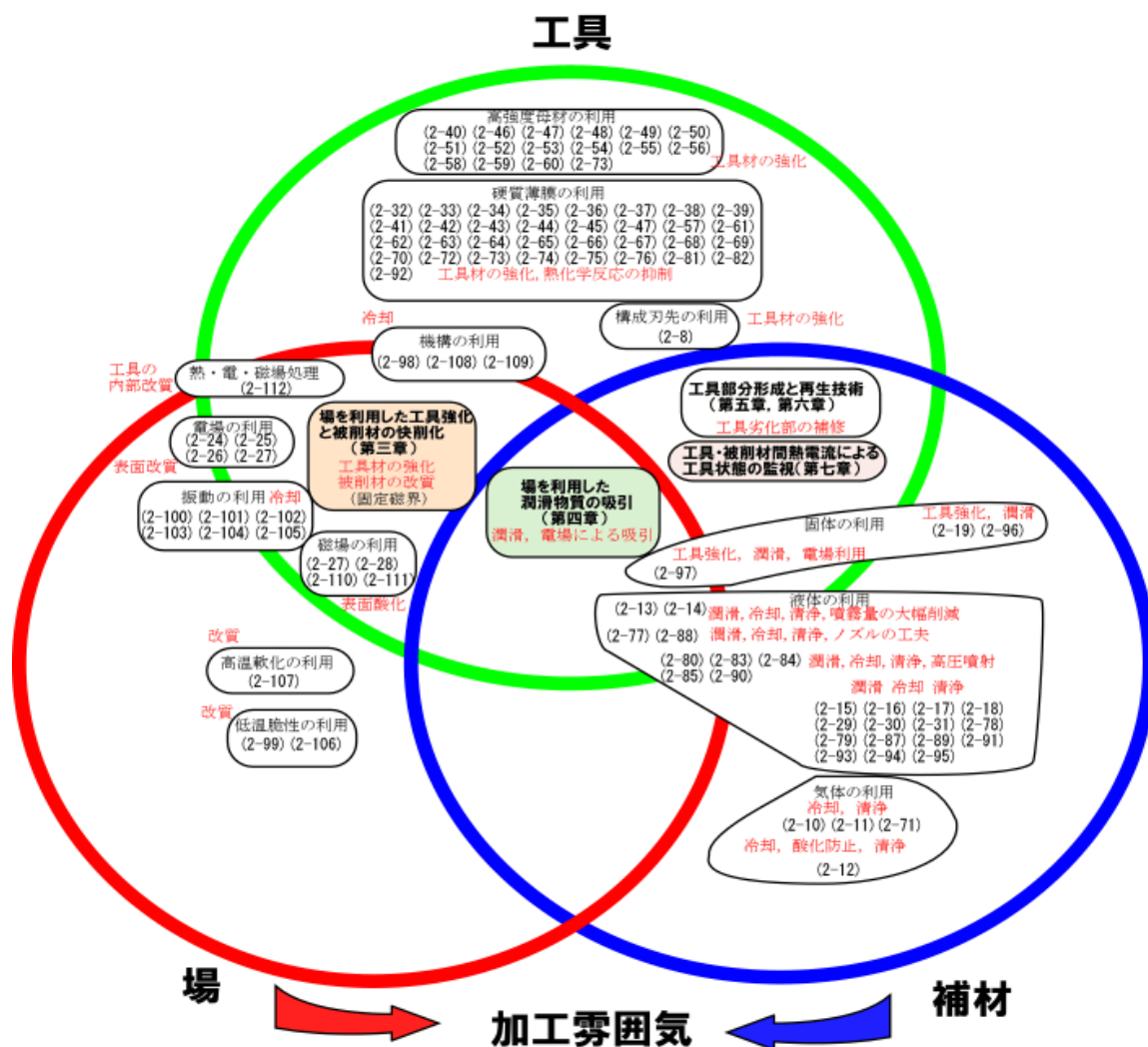


Fig. 8-1 Positioning of the developed technologies

領域1 場を利用した工具保護:

場を利用した工具成分の流出抑制.

場を利用した被削材の一時的快削化.

領域2 補材と場を使った工具保護:

場を利用した補材の吸引.

領域3 強い補材による工具保護

補材による工具切れ刃の形成と再生, そしてその切れ刃状態の監視.

このような戦略の下で工具の長寿命化を展開したが、各章を要約すると次になる。

第一章では序論として、本論文の着想に至った背景と本論文の目的、そして各章の構成を述べた。1990年代以降、産業界では環境問題のために産業廃棄物を低減することが重視されるようになってきた。このため機械加工の分野においても、加工油剤を低減し乾式加工へと移行しようとする動きが増加している。しかし、加工油剤の利用を削減すると工具への負担は増加し、工具の寿命を確保することが難しい。

一方、機械加工工具の主原料の多くはレアメタルと呼ばれる稀少資源であり、その多くを海外からの輸入に依存している。このため、その供給が産出国の政情に影響を受けやすく、加工貿易を主体とする我が国ではその供給状況によっては製造業に重大な影響を与える恐れがある。

したがって、このような背景の下で、環境に配慮しながら工具資源を有効に利用するためにも新たな長寿命化の方策が求められていることを詳述した。

第二章では、機械加工工具の長寿命化を目的とした場の利用技術と再生技術の提案と題して、本研究の取り組む内容を提示した。本章では、まず従来機械加工技術において、工具の長寿命化をキーワードに従来取り組まれた代表的な研究課題を振り返り、その動向を調査した。環境への影響を考えた場合、エネルギー消費の最も少ない加工工程が環境負荷の低いものとなるのは論を待たない。一方、機械加工は加工点に機械的に応力を生じさせて工作物に破壊と変形を誘起する加工法である。したがって、加工点での変形効率を高めることが何よりも重要と考えられる。このとき加工点には、工具、被削材、加工雰囲気（加工油剤）が関与しており、主にこの三つの要素が加工の成否を左右する。調査の結果、これまでの研究においては、工具の強化と加工油剤の供給に関する研究が大部分を占めていることが明らかになった。

一方で、工具と加工雰囲気に関して研究が比較的行われてこなかった領域があることも明確になった。そこでこれらの従来研究が疎であった3つの領域に関して研究戦略を考えると、大きくは、場を能動的に利用する場の制御技術と、補材を強化して切れ刃の役割を担わせる工具再生技術が立案できた。そこで、3つの領域に関した技術開発をして、工具の長寿命化を達成することを提案した。

第三章では、場を利用して工具の強化と難削材の一時的な快削化を行うことで工具の長寿命化を図ることを検討した。その結果、本実験の範囲において、次のような磁場の効果が認められた。

- (1) 磁場を超硬工具の切削加工点近傍に印加することで、比較的負荷の大きい粗加工切削条件下では、切れ刃に5～7mT程度の磁場を印加しておくと、工具寿命が1.2～1.5倍程度向上する。
- (2) (1)の結果は、前者は磁場により工具バインダであるCoの滲み出しが抑制されたためと考えられる。
- (3) オーステナイト系ステンレス鋼に磁場援用切削を行うと、軽切削条件では工具への被削材の凝着が減少して、切削抵抗の変動が小さくなる。その結果、工具びびりが生じにくくなり、工具への負担が低減できる。
- (4) 上記(3)は、オーステナイト組織を有する被削材に磁場援用切削を適用するときだけに生じ、磁場誘起マルテンサイト変態がその原因である。
- (5) 加工後の被削物の表層部に対しての組織の変化や磁化といった磁場の影響は、今回の実験で用いた磁場強度では全く見られなかった。

以上の結果から、切削油剤の使用を低減しても場を利用して、工具の寿命を向上させることができる新しい加工方法が見出された。

第四章では、場と補材の利用を目的として、切削剤を効果的に加工点に導く潤滑供給方法を検討した。本研究で得られた結果を下記に記す。

- (1) シリカ微粒子を分散させたコロイド溶液を用い、微粒子の静電特性を利用することで、潤滑剤となるシリカ微粒子を工具に能動的に吸着できる。これにより切削抵抗を低下させて工具寿命を向上できる。ドリル加工などにおいては、バリを低減させることができる。
- (2) (1)の潤滑効果は工具表面の粗さより小さい粒子を使うと得られる。
- (3) (2)の潤滑効果の要因を把握するため、高速度カメラによる撮影画像と切削抵抗を

連動させて切りくずの流失を観察した。その結果、オーステナイトステンレス鋼の切削抵抗変動の原因は、切りくずの工具すくい面への周期的な凝着により引き起こされており、切りくずの凝着が生じたとき、加工抵抗が通常の2倍程度になることが明らかになった。

(4) 上記の結果は、オーステナイト系ステンレス鋼の切削においては、旋削のような連続切削においても、断続切削のように切れ刃に負荷がかかり、工具摩耗を促進し易くする可能性を示唆する。

(5) (2)の潤滑効果は工具に付着させたシリカ微粒子の滑りあるいは転がりといった固体潤滑作用により切りくずの凝着が抑制されて、その排出が促進されるために生じている。

(6) 本方式をオーステナイトステンレス鋼の小径ドリル加工に用いたところ、乾式加工の5倍、MQLと同等の工具寿命が見込めるという結果が得られた。

上記の結果から、場と補材を利用して工具の長寿命化が図れることを実証した。

第五章においては、加工点で工具と被削材の間に介在する補材に対して考え方を一歩進めて、介在層自身の強化を行い、切れ刃としての役割を担わすことを検討した。その中で、工作機械上で速やかに切削工具を形成および再生を可能にする工具機上再生技術の提案を行い、その手法を検討した。この工具機上再生技術では、工具母材ではなく機上で成膜した複合めっき膜で切削加工を行い、膜が摩耗して母材層に達する前に電解剥離を行い、再度複合めっきを施して再生をする。得られた結果を下記に記す。

(1) Ni-P-SiC複合めっきと電解剥離技術を利用して、5分以内に切削工具上に硬質膜を生成し、剥離する技術を開発した。そしてこの技術を利用して超硬チップ上にめっき膜を成膜し、切削試験を行ったところS45Cが切削できることが確認された。

(2) 剥離技術においては、硫酸電解剥離を利用した。この剥離技術においては、めっき膜の剥離と同時に超硬母材表面に不働態被膜が形成される。この膜が形成されると電流が流れなくなり、剥離のプロセスが自然に収束する。したがって、電流の挙動を監視すれば適切な剥離処理の停止時間を検出でき、自動化において有利と言え

る。

- (3) 下地処理なしで超硬合金に成膜するとテープの粘着力程度で複合めっき膜が剥離していたが、NaOH 電解とストライクめっきを行うと、15 秒の切削試験においても剥離がなかったことから、その有効性が確認された。そして再生を 10 回行っても同様に剥離が見られなかった。
- (4) 一回のめっきや剥離の操作程度では、析出させたり、剥離する膜の体積が少ないために薬液を劣化させて品質を低下させることはない。
- (5) 上記の工程を基に、複合めっきと電解剥離を利用した機上再生装置の開発を行った。装置は、エンドミルおよびドリル等の回転工具を再生することを想定し設計した。そして、マシニングセンタ機上にて Ni-P、および Ni-P-SiC 複合めっき被膜の析出を試みた。その結果、試作装置が要求機能通りに動作することが確認され、機上再生の概念を具現化することができた。

第六章では、工具資源の有効活用と高精度化、そして使用済み研削砥石の削減を目的として、第五章で提案した機上再生技術の考え方を拡張し、研削工具の機上再生技術の確立を検討した。得られた結果を下記に記す。

- (1) 工作機械上に設置可能な小型の急速加熱装置を利用して、フェノール樹脂、ポリイミド樹脂、ならびに低融点ガラスを利用したビトリファイドボンドの軸付き砥石を、15 分から 30 分程度で形成・再生できる技術を開発した。
- (2) (1) の工程においては、軸に結合材を塗布してから砥粒を塗布し、それら塗布層を機上で加熱し砥粒層を形成するという工程を開発した。この工程においては型を用いる必要がなく、素早く砥粒層の形成ができる。なお、砥粒層を形成するためには、結合材の粘性を $150\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度まで高くし、ペースト状にしたほうが形状の崩れが少なくて良い。
- (3) 樹脂の焼成においては、結合材中の水や有機溶媒の沸騰を抑制しつつ、溶媒を蒸発させてから加熱制御すれば、良好な砥粒層が得られる。
- (4) 上記の工程で形成した砥粒層を利用してマシニングセンタ上でガラスの研削加工を行ったところ、主軸剛性が確保されていないマシニングセンタを利用したにもか

かわらず , ポリイミド工具で研削比が 100 , 仕上げ面粗さが $1.48 \mu\text{mRz}$ という性能が得られた .

第七章においては , 切削加工中に生じる工具・被削材間熱起電力に着目して , 工具の摩耗や異常をその熱電流の変化から検出できるようにするために , その特性を調べた . 得られた結果は以下になる .

- (1) 一つの切れ刃と工作物の間で生じる熱起電力については , 工具の摩耗が進行するほど切削開始時の熱起電力の立ち上がりが遅くなる .
- (2) 二枚の切れ刃による切削では , 二枚目の切れ刃の切削開始時に工具・被削材間に大きな熱電流が流れる . このとき , 二つの切れ刃で発生する起電力は合成されたものとなり , この波形は工具摩耗の進行とともに大きく変化する .
- (3) 工具切れ刃と被削材を含む微小な回路抵抗の閉ループ回路を構成すると , 工具摩耗の増加により , 熱起電力を電源として回路に流れる熱電流の立ち上がり時定数と定常熱電流値が大きく増加する .
- (4) 上記の特徴は軽切削ほど顕著に現れる . これは原理的に端子間の接触面積が大きいほうが接触電気抵抗が 0 に近づくため , 摩耗にともなう m オーダの微小な接触抵抗変化が重切削になればなるほどわかりにくくなるためである .
- (5) 実験から得られたデータを用いて , 等価回路による数値計算を行った . その結果 , 一枚目の切れ刃が加工している際に二枚目の切れ刃が工作物に接触し加工を開始し始めてからの過渡的な状態において , その過渡応答が接触電気抵抗の変化によることが明らかになった .
- (6) 上記の結果を利用して DLC コーティング工具とアルミ被削材間の接触抵抗の変化を観察した . その結果 , DLC コーティング膜の残存状況を監視できる可能性が得られた .

以上のような各章の結論のもとに , 本研究では工具と場と補材の三者について戦略的に研究を展開した . その結果 , 図 8-1 に示すように比較的研究提案の疎であったそ

れぞれの領域において新たな長寿命化の手法が示された。

さて、ここで改めて、本研究の総括として、機械加工工具を長寿命化に重要な因子とは何なのかを考察したい。工具の寿命は、あらかじめ設定された範囲を超えて工具が損傷したか否かで判定される。工具損傷の主要因は、切削温度と応力である。図8-2は超硬工具の摩耗の模式図である。摩耗の機構としては、

1. 切りくず生成にともなう応力、あるいは切りくずの凝着や剥離にともなう応力により工具の弱い部位が脱落する。
 2. 加工点で発生した熱が、工具と被削材の成分を双方の接触部を通して拡散反応を生じさせたり、工具の表面を化学的に劣化させたりする。
- という二つの現象が複合的に作用し合い摩耗を引き起こしている。

したがって、工具の寿命を延ばすための戦略には、

対策1: 工具自身の強度を可能な限り被削材よりも強く維持し続けられるようにする。

対策2: 工具と被削材との直接接触を可能な限り防止して、両者間での熱化学反応を抑制する。

の二つが挙げられる。

たとえば、従来の切削油剤は、工具と被削材の間に油膜を介在させることで一時的にはあるが両者の直接接触を防ぎ、寿命向上に寄与していた。また、切削工具のコーティングについてもこの直接接触を防止するという役割を担っている。振動切削や高速切削も、空気を介在させて直接接触を防ぎ寿命を向上させていたと考えれば同じ効果を利用していたと言えるだろう。つまり、工具と被削材とをできる限り直接接触させないように、「補材」が加工点に介在することが工具寿命の向上には欠かせない。(このとき、補材自身に十分な強度があり、工具上に強固に固定できるのであれば、補材自身が切れ刃の役割をなしても構わない。)

本研究では、まず第三章で熱化学反応によって生じる工具成分の拡散を、磁場を利用することで防止し、工具自身の強度を保つことで寿命向上を図った。次に第四章では静電場を利用して工具と被削材の間に同じく補材を吸引し、補材を確実に加工点に介在させて工具の摩耗を抑制する手法を提案した。このとき補材は工具表面のあらさ

よりも微細なものが望ましく、また、用いる補材は工具を傷つけないためにも工具の強度より小さいものが望ましいという結論を得た。

一方、工具と被削材の間に介在させた補材が工具表面上に固定化され、しかもその強度（主として硬さ）が向上できれば、切削工具コーティングと同様の役割を担わせることができるようになる。そして、元々の工具母材表面上に形成した補材層自体を再生できるようにすれば、工具母材自身は全く摩耗することがない。このような考えの下で第五章、第六章、第七章の工具機上再生技術の概念が提唱された。これらのことから本研究においては、遠隔場利用技術と再生技術の構築を通して次の結論を導くことができた。

機械加工工具の長寿命化のための指針：

(1) 工具と被削材の直接接触を防ぐために補材を利用する。(熱化学反応の抑制)

・ 補材は、工具と被削材の間に介在させ易いように微粒が良い。

・ 補材の硬度は工具の硬度に対して次であるのが望ましい。

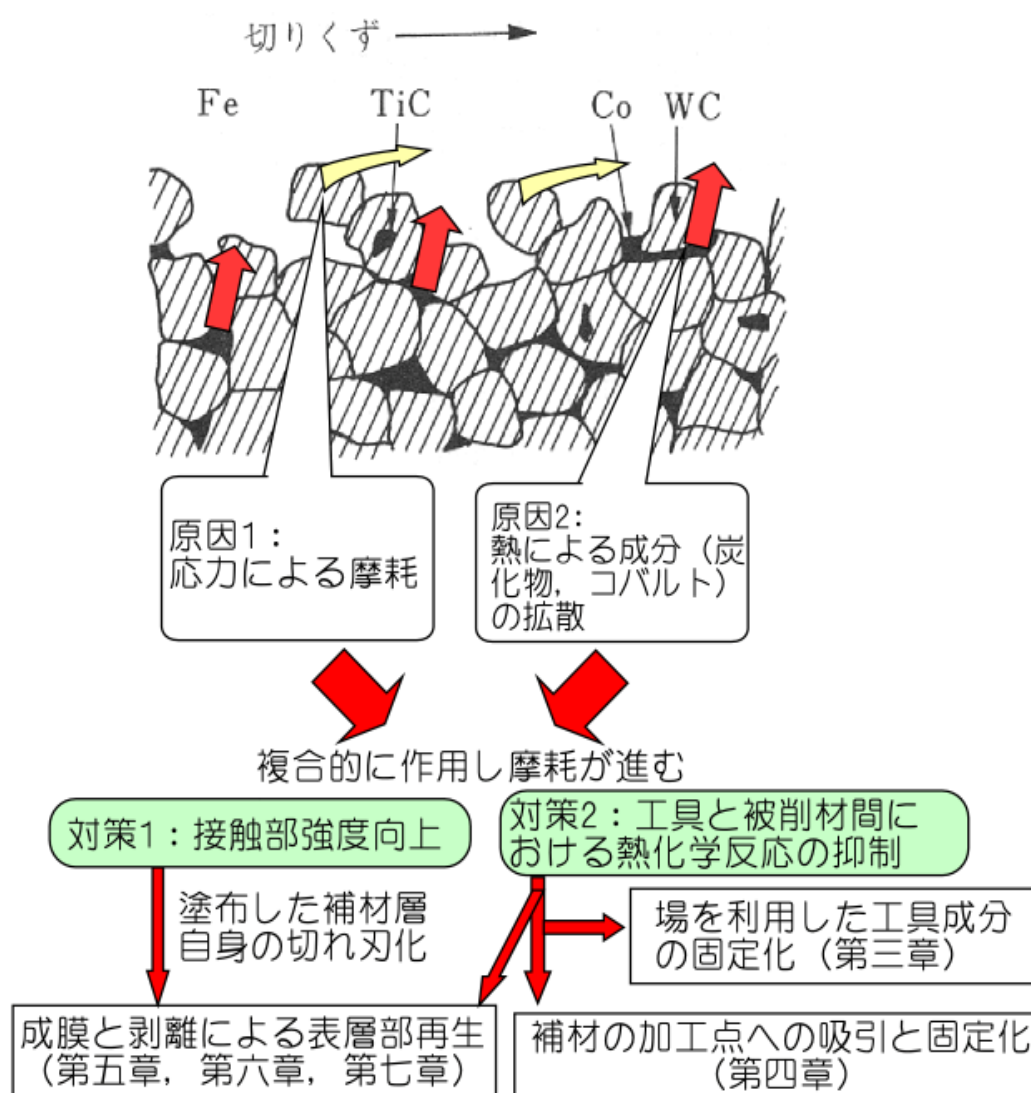
a. 補材を工具表面に固定化できる場合、

補材 工具

b. 補材を工具表面に固定化できない場合、

補材 < 工具

(2) 補材、工具成分を保持・固定化する場を利用する。



本研究で得られた機械加工工具長寿命化のための指針

- 工具と被削材の直接接触を防ぐために補材を利用する。
 - I. 補材は, 工具と被削材の間に介在させ易いように微粒が良い。
 - II. 補材の硬度は工具の硬度に対して次であるのが望ましい。
 - a. 補材を工具表面に固定化できる場合,

補材 ≥ 工具
 - b. 補材を工具表面に固定化できない場合,

補材 < 工具
- 補材, 工具成分を保持・固定化する場を利用する。

Fig. 8-2 Obtained conclusions of this thesis

8.2 今後の課題

第三章で提案した磁場援用切削加工については、実加工への適用を速やかに行うべく各種工具ホルダの設計が望まれる。ここで課題になるのは、強い磁界を加工点にかけられるように加工点付近に磁石を設置できる工具ホルダの構造を考えつつ、また一方で工具ホルダの強度や剛性を如何に高く保てるかということである。特に磁石は焼結体であるために比較的脆い。切りくずが磁石に絡み、そして破壊されないような配慮も必要である。

また、磁場援用切削を行うと微細な鉄粉が磁力で吸引されてしまうのは避けられない。工具チップとホルダの据え付け座面などにそれら微細な鉄粉が付着し、工具の寿命や加工精度に悪影響を及ぼさないような対策が必要になると考えられる。

第四章で提案したシリカ微粒子を用いた固体潤滑切削法については、コロイダルシリカを噴霧するノズルが、使用後に洗浄を怠り長期保存すると極めて詰まりやすい。メンテナンス性を考慮したシリカ微粒子を入れた懸濁液の組成や噴霧ノズルの形状、噴霧条件を検討する必要がある。

第五章で提案した複合めっきによる機上工具コーティングについては、低温プロセスというめっきの特徴を活かした様々なコーティングの開発が望まれよう。特に、鋼の切削においては、未だ耐摩耗性や密着性が十分ではなく、耐摩耗性・密着性の強いマトリクスの開発、そして熱処理の適用が望まれる。

また、近年は大気圧下におけるプラズマ技術の研究に注目が集まりつつある。大気圧プラズマによる硬質セラミックス膜の蒸着が可能となれば、切削工具の機上再生技術もより実用的なものが現実となると考えられる。

第六章で提案した研削工具の機上再生技術については、現在のところ、加熱装置の制約もあり、熱容量の小さい軸付き砥石においてその可能性を示したに過ぎない。紫外線効果樹脂の適用も視野に入れて、より一般的に利用されているホイール形状の工具への適用を図る必要がある。

特に第五章，第六章に関して言えば，具体的な加工のニーズを広く探索し，より具体的な技術開発が望まれる．ニーズが決まり，どのような材料を，どの程度の加工時間や精度で加工しなければならないのかという制約が決まれば，工具の母材，母形状等はどのようにすべきか等，開発の具体的な方向性がより明確なものとなると考えられる．

第七章で提案した工具・被削材間熱電気特性とその利用においては，現段階で熱電流と工具摩耗の相関が明らかにされ，切削実験からDLC膜の膜厚監視の可能性が得られたところである．今後は工具摩耗の監視システムの構築が必要になる．熱電流の検出で重要になるのは，回転部からの電極の取り出しと工具の絶縁である．工具摩耗にともなう，工具と被削材の接触抵抗の変化はm オーダと極めて小さい．S/N比の高い検出回路を，低コストで構築する必要がある．また，切り込みや送りなど，機械加工の種々のパラメータと熱電流の増減に関する相関がより詳細に把握できれば，技術的な有用性がより明確になると考えられる．

本研究に関する発表論文等

論文

1. A Study on On-the-Machine Tool Re-Generating Technology -Process development for grinding tools with rapid baking system-, Naoki OSHIO , Kiyoshi YANAGIHARA , Yasuhiro TANI, Proc. Of the 3rd international conference on leading edge manufacturing in 21st century, p.p663-666, 2005 年 .
2. Repeatable On-the-Machine Cutting-Edge-Forming Technology Applying Composite Electroplating and Anodic Electrolysis, K.Kurahashi, K.Yanagihara, Y.Tani and H.Sato, Annals of the CIRP, 1.53, No.1, pp.53-56, 2004 年 .
3. 切削工具の機上再生技術に関する研究, 倉橋一豪, 谷 泰弘, 柳原 聖, 日本機械学会論文集 (C 編), 70 巻 690 号, pp.590 - 595, 2004 年 .
4. シリカ微粒子を利用した固体滑法の提案, 柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, 機論 C, Vol.68, No.688, pp.244-249, 2003 年 .
5. 磁場援用切削加工に関する研究, 中野文昭, 柳原 聖, 山口ひとみ, 谷 泰弘, 神田雄一, 機論 C, Vol.66, No.648, pp.2840-2845, 2000 年 .
6. 正面フライス工具の摩耗と熱電気特性, 精密工学会誌, 廣田平一, 村田光昭, 小島 篤, 柳原 聖, 64 巻(8 号), p.1191-1195, 1998 年 .

講演発表

1. メタルボンド砥石の機上再生技術に関する研究 - 急速加熱を利用した基礎プロセスの開発 -, 柳原 聖, 谷 泰弘, 2005 年精密工学会春季学術講演会講演論文集 pp.1127-1128, 2005 年 .
2. 工具機上再生術に関する研究 - 内径仕上げ加工への適用 -, 柳原 聖, 谷 泰弘, 阿部治彦, 小林範夫, 2005 年精密工学会春季学術講演会講演論文集 pp.1127-1128, 2005 年 .
3. 高速加熱を利用した工具機上再生技術に関する研究, 小塩直樹, 谷 泰弘, 柳原 聖, 2005 精密工学会春季学術講演会講演論文集, pp.25-26, 2005 年 .
4. 切削工具の高速コーティングに関する研究 コバルトマトリクスめっきによる

- 耐摩耗性の強化 , 柳原 聖, 谷 泰弘, 2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.609-610, 2004 年 .
5. 工具機上再生技術に関する研究, 柳原 聖, 谷 泰弘, 日本機械学会第五回生産加工・工作機械部門部門講演会講演論文集, pp.253-254, 2004 年 .
6. 切削工具の機上再生技術に関する研究(第二報)- 機上再生装置の試作 -, 柳原 聖, 谷 泰弘, 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.119-120, 2003 年 .
7. 切削工具の機上再生技術に関する研究, 倉橋一豪, 柳原 聖, 谷 泰弘, 2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.141-142, 2003 年 .
8. 切削加工におけるSUS304切りくず流動の高速度カメラ観察-工具すくい面の仕上げ面粗さが切りくず流動におよぼす影響 -, 柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, トライボロジー会議予稿集東京 2002-5, p.271, 2002 年 .
9. ガラス潤滑による小径ドリル加工 - 加工特性向上の要因 -, 柳原 聖, 谷 泰弘, 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 p.65, 2002 年 .
10. ガラス潤滑による小径ドリル加工, 柳原 聖, 谷 泰弘, 2000 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.43, 2000 年 .
11. Proposal of Magnetic-Field Assisted Cutting for Improvement of Machinability ,F. Nakano, K.Yanagihara, H. Hitomi, Y. Tani, Y. Kanda. , Proc. ASPE 2000 annual meeting, p.54, 2000 年 .
12. 磁場援用切削による超硬工具の摩耗抑制とステンレス鋼切削特性の向上, 中野文昭, 柳原 聖, 山口ひとみ, 谷 泰弘, 神田雄一, 1999 年度精密工学会秋期学術講演会講演論文集, p.484, 1999 年 .
13. 工具・被削材間熱起電力の応答速度, 柳原 聖, 廣田平一, 1994 年度精密工学会秋季大会学術講演論会講演論文集, p.513, 1994 年 .

特許

1. 第三章に関するもの 特許公開 2001-157902 切削工具
2. 第四章に関するもの 特許公開 2002-283182 切削加工方法および切削剤

所内報

1. 磁場援用切削加工に関する研究 - 超硬工具の工具摩耗抑制効果について - , 中野文昭, 柳原 聖, 山口ひとみ, 谷 泰弘, 神田雄一, 生産研究, 52巻9号, p.402-405, 2000年.
2. 磁場援用切削加工に関する研究 - 続報 オーステナイト系ステンレス鋼の被削性向上について - , 中野文昭, 柳原 聖, 山口ひとみ, 谷 泰弘, 神田雄一, 生産研究, 52巻9号, p.406-409, 2000年.
3. 切削工具の機上再生技術に関する研究 - 複合めっきと電解剥離を利用した再生プロセスの開発 - , 倉橋一豪, 谷 泰弘, 柳原 聖, 生産研究 55巻6号 .p.36-39, 2003年.

解説記事

切削加工における磁場の効用, 柳原 聖, 谷 泰弘, 機械技術, 48巻, 4号, 2000年.

新聞報道等

1. 工作機械上で砥石再生, 新聞, 日刊工業新聞, 2005年11月10日.
2. 工作機械上で切削工具再生, 新聞, 化学工業日報, 2005年11月14日.
3. 砥石の再生技術を開発 - 廃棄問題解決に向けて - , 東大新報, 2005年11月15日.
4. 自分だけの工具を作ってみませんか, 日経ものづくり, p.15, 2005年12月.
5. クランプしたまま研削工具を再生, 東大生研が試作装置を公開, 雑誌社ウェブサイト, 日経 Tech-On!, 2005年11月11日.
6. 工具再生技術は, 工具メーカーの敵か味方か, 日経ウェブサイト, 日経 Tech-On!, 2005年11月11日.
7. コバルトの流失を防ぎ超硬工具を長寿命化, 日刊工業新聞, p.6, 2000年1月18日.

謝辞

本研究は平成 11 年 3 月 16 日から平成 18 年 9 月 30 日までにかけて東京大学生産技術研究所谷研究室 , ならびに土屋研究室にて行われた研究を纏めたものである . ご指導を賜った元東京大学生産技術研究所教授 (現立命館大学理工学部教授) 谷 泰弘博士に御礼申し上げます .

また , 谷博士の立命館大学への異動後に , 小生の指導を引き継いでいただき , 小生に学位論文請求の道を開いてくださいました生産技術研究所 助教授 土屋健介博士に心より御礼申し上げます .

審査におきましては , 東京大学大学院工学研究科教授 中尾政之博士に主査をお引き受けいただきました . 突然の依頼にもかかわらず , 主査をお引き受けいただき , 熱心なご指導を賜りました . 心より御礼申し上げます . また同教授 光石 衛博士 , 同助教授 割澤伸一博士には副査をお引き受けいただきました . 貴重な御議論を賜り心より御礼申し上げます . 光石先生には , さらに一步踏み込んだ考察をすることの重要性を教わりました . また , 割澤先生には 2000 年にインドで開催されたアジアアカデミーセミナーにて , 2 週間行動をご一緒させていただいたこともあり , 暖かいご指導もさることながらこのようなご縁を頂戴できたことに感謝する次第です .

東洋大学教授 神田雄一博士 , 宇都宮大学助教授 山口ひとみ博士には磁場援用切削に関しましてご教示を賜りました . 工具被削材間熱起電流の計測に関しましては職業能力開発総合大学校教授 廣田平一博士 , 雇用促進事業団 村田光昭氏 , 小島篤氏にご協力いただきました . 心より御礼申し上げます .

研究室での職務に関しましては , 技術員上村康幸博士に有形無形のご支援を頂戴しました . 心より御礼申し上げます .

同じく研究室で苦楽を分かち合った盧 毅申氏 , 李 承福氏 , 周 文軍博士に感謝申し上げます . 皆様の今後のご活躍を心よりお祈り申し上げます .

また , 本研究は下記の優秀な元大学院生の熱意と努力なしにはあり得ません . 中野文昭氏 , 倉橋一豪氏 , 小塩直樹氏に心より感謝申し上げます .

東京大学生産技術研究所教授 柳本 潤博士にはガラス潤滑に関する内容につきましてご教示を賜りました . また , 助手 杉山澄雄博士 , 技術員 柳田 明氏 (現 : 横浜国立大学助手) におかれましては , 電子顕微鏡撮影において同研究室の設備の利

用など様々なご指導とご協力を賜りました。心より御礼申し上げます。

オーエスジー(株)大沢輝秀社長,研究部部長村上良彦博士には切削工具の提供やミスト供給装置についてご提供いただきました。また,本研究の一部は大澤科学技術振興財団の助成により行われました。心より御礼申し上げます。

倉敷機械(株)藤川明夫社長,三浦克彦本部長,荒木誠次部長,阿部治彦課長,三光製作(株)山岸洋一社長,小林範夫課長には,機上再生技術について多大なるご支援を賜りました。心より御礼申し上げます。

ユアサバッテリー(株),日産化学(株),(株)キーエンス,(株)日本電子データムにおかれましては,資材の協力や分析のご協力を賜りました。心より御礼申し上げます。

職業能力開発総合大学校教授 廣田平一博士, 同教授 海野邦昭博士, 同助教授 和田正毅博士, 同助教授 磯野宏秋博士, 元講師(現千葉工業大学助教授) 徳永 剛博士におかれましては,職業訓練大学校機械科在学時にご指導をしていただいたこともあり,折に触れて激励を頂戴しました。心より御礼申し上げます。

岡山職業能力開発短期大学校在職中に,「暇人の会」にお誘い下さり,何事においても研究し続ける姿勢の大切さを教えてくださった同校元校長 濱本嘉輔 博士,元教授(現福山大学教授) 宮内克之 博士, 助教授 故秋本圭一 博士に感謝申し上げます。そして同会会員として,研究への熱き思いを当時分かち合った同校元講師(現福山職業能力開発短期大学校) 桑野良一 博士, 講師 天野 隆氏に御礼申し上げます。

最後に,小生を支え続けてくれた妻久美子,長女一凜,次女理来,三女理冴,猫のまめ,山内のご両親,そして両親に心より感謝申し上げます。

以上

学位論文

場の制御と再生技術による
機械加工工具の長寿命化に関する研究

p.1-314 完

平成 18 年 6 月 2 日提出

柳原 聖