アルミニウム合金切削における工具摩耗に関する研究

山田　茂

昭和57年9月

目　　　次

第１章　緒　　　論　…………………………………………………………　1

第２章　高速度鋼工具の摩耗挙動　………………………………………　5

2.1　緒　　　言　…………………………………………………………　5

2.2　実 験 方 法　…………………………………………………………　5

2.3　工具摩耗発生の観察　………………………………………………　5

2.4　7075－Ｔ６材の切削　……………………………………………　6

2.5　ＡＣ３Ａ材の切削　…………………………………………………　7

2.6　結　　　言　…………………………………………………………　9

第３章　超硬合金工具の摩耗挙動　………………………………………　12

3.1　緒　　　言　…………………………………………………………　12

3.2　実 験 方 法　…………………………………………………………　12

3.3　実験結果と考察　……………………………………………………　13

3.3.1　切削抵抗について　…………………………………………　13

3.3.2　工具摩耗について　…………………………………………　13

3.3.3　ＥＰＭＡによる分析　………………………………………　14

3.3.4　切削仕上面あらさ　…………………………………………　17

3.4　結　　　言　…………………………………………………………　18

第４章　高速度鋼工具の摩耗機構　………………………………………　19

4.1　緒　　　言　…………………………………………………………　19

4.2　実 験 方 法　…………………………………………………………　19

4.3　7075－Ｔ６材の切削　……………………………………………　19

4.4　ＡＣ３Ａ材の切削　…………………………………………………　22

4.5　結　　　言　…………………………………………………………　26

第５章　7075－Ｔ６材の切削に関する超硬合金工具の摩耗機構　……………　28

5.1　緒　　　言　…………………………………………………………　28

5.2　実験方法 …… 28
5.3　7075－T6材の湿式切削 …… 28
5.3.1　P10工具の場合 …… 28
5.3.2　K10工具の場合 …… 31
5.3.3　検　討 …… 33
5.4　7075－T6材の乾式切削 …… 34
5.4.1　P10工具の場合 …… 34
5.4.2　K10工具の場合 …… 39
5.4.3　検　討 …… 42
5.4　結　言 …… 42

第6章　AC3A材の切削に関する超硬合金工具の摩耗機構 …… 44
6.1　緒　言 …… 44
6.2　実験方法 …… 44
6.3　AC3A材の湿式切削 …… 44
6.3.1　P10工具の場合 …… 46
6.3.2　K10工具の場合 …… 47
6.3.3　検　討 …… 47
6.4　AC3A材の乾式切削 …… 47
6.4.1　P10工具の場合 …… 47
6.4.2　K10工具の場合 …… 51
6.4.3　検　討 …… 54
6.5　考　察 …… 54
6.6　結　言 …… 55

第7章　被削材の添加成分が工具摩耗に及ぼす影響 …… 57
7.1　緒　言 …… 57
7.2　実験方法 …… 57
7.2.1　供試試料 …… 57
7.2.2　切削試験 …… 58
7.3　実験結果と考察 …… 58
7.3.1　切削抵抗 …… 58

7.3.2　工具摩耗 ………… 59
7.3.3　仕上面あらさ ………… 60
7.4　結　　言 ………… 61

第8章　被削材の添加成分量が工具摩耗に及ぼす影響 ………… 63
8.1　緒　　言 ………… 63
8.2　実験方法 ………… 63
8.2.1　供試試料 ………… 63
8.2.2　切削試験 ………… 64
8.3　実験結果と考察 ………… 64
8.3.1　切削抵抗 ………… 64
8.3.2　工具摩耗 ………… 65
8.3.3　仕上面あらさ ………… 68
8.4　結　　言 ………… 69

第9章　CBN工具の摩耗挙動 ………… 71
9.1　緒　　言 ………… 71
9.2　実験方法 ………… 71
9.2.1　供試試料 ………… 71
9.2.2　切削試験 ………… 72
9.3　実験結果 ………… 72
9.3.1　切削試験Ⅰ ………… 72
9.3.2　切削試験Ⅱ ………… 74
9.4　結　　言 ………… 76

第10章　CBN工具の摩耗機構 ………… 78
10.1　緒　　言 ………… 78
10.2　実験方法 ………… 78
10.3　実験結果と考察 ………… 79
10.3.1　Al－17％Si－T6材の切削 ………… 79
10.3.2　Al－23％Si－F材の切削 ………… 84
10.3.3　SKD61熱処理材の切削 ………… 86

10.4 結　　言 …………………………………………………………………………… 88

第11章　ダイヤモンド焼結工具の特性 ……………………………………………………… 89
11.1 緒　　言 ………………………………………………………………………… 89
11.2 ダイヤモンド工具の仕上面特性 ………………………………………………… 89
11.2.1 実験方法 ……………………………………………………………………… 89
11.2.2 実験結果 ……………………………………………………………………… 90
11.2.2.1 ＣＢＮ工具，ＤＣ工具による金型鋳造材の仕上面あらさ … 90
11.2.2.2 ＳＫＨ４工具，K10工具，ＣＢＮ工具及びＤＣ工具による仕上面あらさ ………………………………………… 93
11.3 ダイヤモンド工具の摩耗特性 ………………………………………………… 97
11.3.1 実験方法 ……………………………………………………………………… 97
11.3.2 実験結果 ……………………………………………………………………… 97
11.4 結　　言 ……………………………………………………………………… 100

第12章　総　　括 ……………………………………………………………………… 101

謝　辞 ……………………………………………………………………………… 103

第１章　緒　　論

近年，加工の高能率化，高精度化が望まれているが，これには被削材との親和性が小さく，高温強度が高く，異状損傷の生じない工具の開発が必要である。[1] 新しい工具の開発には，まず現在使用されている工具の摩耗機構を明らかにし，その工具材料の特性を十分に理解しなければならない。[2]

このため最近工具摩耗に関する研究が多く行なわれるようになり，高速度鋼工具，超硬合金工具，セラミック工具，コーテッド工具，ＣＢＮ工具，ダイヤモンド工具などを使用して鉄系合金を切削した場合の工具摩耗機構について多く報告されている。[3)~15)] しかしアルミニウム系合金に関する工具摩耗は鉄系合金の場合とは異なると思われるにもかかわらず，その報告例[16)~19)]は少なく明らかにはされていない。

一般にアルミニウム合金は，柔らかく機械加工が容易であるため被削性は良いものと考えられ，[20)21)] 過去においては十分な研究は行なわれなかった。しかし，アルミニウムの優れた特性を活用して種々のアルミニウム合金が開発され，[20)] その需要が増大するにつれてアルミニウム合金中にも Al－Si 系合金などのように工具摩耗の激しい合金があることが示された。[22)~31)] そのため工具材質の選定，切削条件の設定に注意することが大切であり，被削性の改善のため被削材の成分，[32)~34)] 改良処理添加元素，[28)35)~40)] 熱処理条件[29)31)]が検討され，加熱切削，[41)] 低速高送り切削[42)]などが試みられた。切削抵抗の軽減，工具摩耗の減少，潤滑の観点から湿式切削が試みられることも少なくないが，湿式切削特有の境界摩耗が生じたり，切削仕上面へ切削油剤がにじみ出たりすることがあるため，やむを得ず乾式切削をすることが多い。このように工具摩耗の軽減はまだ十分に解決されているとはいえない。そこで筆者は現在アルミニウム系合金の切削に使用されている高速度鋼工具や超硬工具の摩耗機構を調べるとともに，アルミニウム系合金中最も激しい工具摩耗を呈するハイパーシルミン[44)]の切削に，近年開発されたＣＢＮ焼結工具[45)]やダイヤモンド焼結工具[46)]を使用し，これらの工具の摩耗機構を明らかにすることを目的として一連の実験を行なった。一方，工具摩耗軽減の目的で微量金属元素の添加による改良処理の影響も調べた。

本論文の構成は以下のとおりである。

第２章では高速度鋼工具を使用して超々ジュラルミンとシルミンの乾式切削と湿式切削を行ない，それぞれの場合の工具摩耗状況を観察した。

第３章では五種類の超硬合金工具を用いて，Al－Si 系鋳造合金の乾式切削を行ない，それぞれの工具の摩耗状況を観察し，比較を行なった。

第４章では高速度鋼工具を使い，超々ジュラルミンとシルミンの湿式切削を行ない，それぞれの材料におけるこの工具の摩耗機構を明らかにした。

第５章ではＰ10，Ｋ10の二種類の超硬合金工具を使用して，超々ジュラルミンの乾式切削と湿式切削を行ない，この材料における超硬合金工具の摩耗機構を明らかにした。

第６章では第５章と同様の工具を使用して，シルミンの乾式切削と湿式切削を行ない，この材料における超硬合金工具の摩耗機構を明らかにした。

第７章ではAl−Si，Al−Si−Mg，Al−Si−Cu−Mg系の合金にNa，Sr，Sbを添加して行なった改良処理が高速度鋼工具の摩耗に及ぼす影響を検討した。

第８章ではAl−Si共晶合金にSr，Sbの添加量を種々変えて改良処理を行ない，その添加量と工具摩耗の関係を調べ，有効な添加量のあることを明らかにした。

第９章では近年開発されたＣＢＮ工具を使用して，工具摩耗の非常に激しいハイパーシルミンの乾式切削と湿式切削を行ない，それぞれの場合の工具摩耗状況を観察した。

第10章ではCo，Al_2O_3，TiNでそれぞれ焼結された三種類のＣＢＮ工具を使い，ハイパーシルミンのＦ材とＴ６材の乾式切削を行なって，ＣＢＮ工具の摩耗機構を明らかにした。

第11章ではダイヤモンド焼結工具を使用し，Al−Si系合金の切削を行ない，その仕上面状況を観察してダイヤモンド焼結工具が優れていることを示した。

またハイパーシルミンのＴ６材の乾式切削を行ない，この工具の摩耗機構を明らかにし，アルミニウム系合金の切削に最も適していることを示した。

第12章は本論文の総括である。

文　　献

1) 中村裕道：日本機械学会誌，85，4(1982)，447.

2) Namp. Suh : Wear , 62 , 1 (1980), 1.

3) K. NaKajima, KOhgo, T. Awano : wear , 11, 2 (1968), 369.

4) P. K. Wright, J. G. Horne, D. Tabor : Wear, 54, 2 (1979), 371

5) K. Iwata, k. Ueda : Wear, 60, 2 (1980) 329.

6) 鳴瀧則彦，岩田一明，奥島啓弐：精密機械，32，9(1966)，607.

7) 奥島啓弐，鳴瀧則彦：精密機械，35，2(1969)，94.

8) 上原邦雄，竹下英夫，内田和弥，仁科健治：精密機械，38，2(1972)，167.

9) 上原邦雄，仁科健治，竹下英夫，内田和弥：精密機械，38，3(1972)，261.

10) Y. Naerheim : wear, 37, 2 (1976) 313.

11) T. Akasawa, Y. Hashiguti : Wear. 65, 1 (1980) 141.

12) J. E. Matta, W. L. Roper, D. P. H. Hasselman, G. E. Kane : Wear, 10, 2 (1967), 323.

13) J. P. Chubb, J. Billingham, D. D. Hall, J. M. Walls : Metals Technology July, (1980), 293.

14) 鳴瀧則彦，山根八州男：精密機械，46，4(1980)，442.

15) A. G. Thornton, j. Wilks : Wear, 65, 1 (1980), 67.

16) 大庫和考，中島耕一，栗野泰吉：精密機械，41，4(1975)，369.

17) 古市亮蔵，玉村謙太郎：精密機械，32，8(1966)，558.

18) 財満鎮雄，高辻雄三，能登谷久公，伊藤年秀：日本金属学会誌，40，2(1976)，154.

19) 財満鎮雄，高辻雄三，後藤信孝：日本金属学会誌，41，12(1977)，1221.

20) 軽金属協会編：アルミニウムハンドブック，朝倉，539.

21) 精機学会編：精密工作便覧，コロナ社.

22) 財満鎮雄，飯尾政治，工藤繁：軽金属，15，1(1965)，45.

23) 森永卓一，財満鎮雄，高橋恒夫：軽金属，15，3(1965)，44.

24) 財満鎮雄，川松英司，相佐和美：軽金属，16，1(1966)，46.

25) 財満鎮雄，広野雅道，上田鼓：軽金属，16，5(1966)，23.

26) 財満鎮雄，高辻雄三，19，5(1969)，199.

27) 財満鎮雄，飯尾政次，鈴木竜雄，19，11(1969)，481.

28) 室町繁雄，高辻雄三，多々静夫，19，12(1969)，543.

29) 財満鎮雄，広野雅道，桜井柳治， 20 ， 3 (1970)， 118.
30) 財満鎮雄，高辻雄三， 20 ， 4 (1970)， 182.
31) 広野雅道，財満鎮雄， 20 ， 4 (1970)， 190.
32) 財満鎮雄，高辻雄三，飯尾政次， 20 ， 11 (1970)， 556.
33) 高辻雄三，財満鎮雄，能登谷久公，渡辺達朗：軽金属， 25 ， 2 (1975)， 41.
34) 室町繁雄，財満鎮雄，高辻雄三，多々静夫，能登谷久公， 22 ， 6 (1972)， 417.
35) 財満鎮雄，北村利昭：日本金属学会誌， 36 ， 3 (1972)， 205.
36) 財満鎮雄，高辻雄三：軽金属， 22 ， 1 (1972)， 17.
37) S. Zaima, Y. Takatsuji : Pro 16th Japan Congr. Mat. Res, 1973 , 84.
38) 室町繁雄，高橋恒夫，高辻雄三，多々静夫：日本金属学会誌， 37 ， 6 (1973)， 639
39) S. Zaima , M. Hirono : Pro 12th Japan Congr. Mat. Res, 1969 , 154.
40) 高橋恒夫，嵯峨常生，三森友彦：軽金属， 21 ， 1 (1971)， 19.
41) 財満鎮雄，武田裕久，森下定：日本金属学会誌， 38 ， 7 (1974)， 609.
42) 財満鎮雄，稲葉道次，広野雅道：軽金属， 22 ， 4 (1972)， 275.
43) 財満鎮雄，鈴木康夫，家雲高秀：軽金属， 29 ， 9 (1979)， 391.
44) 森永卓一，財満鎮雄，飯尾政治：日本金属学会誌， 30 ， 5 (1966)， 463.
45) 例えば，粕川乙彦：機械技術， 27 ， 6 (1979)， 98.
46) 機械技術： 29 ， 5 (1981)， 33.

第2章　高速度鋼工具の摩耗挙動

2．1　緒　　言

高速度鋼工具は安価でしかも任意の工具形状に加工が容易でありかつ靭性に富んでいるためアルミニウム合金等の切削に多く使用されている。一般にアルミニウム合金は，切削加工が容易で工具摩耗も少ないが，ある種のアルミニウム合金では乾式切削において工具摩耗が著しいことが知られており[1]，また湿式切削でも境界摩耗の発生が無視できないことも周知の通りである。[2]よって本章では，工具摩耗が比較的発生しやすい材料として，展伸材より7075−T6材，鋳造材よりAC3A材を選び，高速度鋼工具を用いて乾式及び湿式切削の際に現われる工具摩耗の進行状況を観察し，工具摩耗発生機構の考察の端緒を得るのを目的とした。

2．2　実験方法

実験に供した試料は表2.1に示す化学成分の展伸材7075−T6材と鋳造材AC3A材で，それらの機械的性質を表2.2に示す。刃先諸元0−10°−6°−6°−6°−0−0を有する高速度鋼（SKH4）製バイト（従って垂直すくい角θ=10°)を使用し，昌運カズヌーブ旋盤HB−500型(主軸回転数40〜3,200rpm，9KW)によって切削試験を行った。実験に際しては切込みt_1=1.0㎜，送りf=0.1㎜／rev一定にして削り速度をv=1および2m/sの2種類にとり，乾式および湿式切削を実施した。湿式切削では市販の機械油を切削油として使用した。

2．3　工具摩耗発生の観察

所定の切削条件で切削時間t=20min切削を実施した場合の工具すくい面および横逃げ面における工具摩耗の状況を示せば図2.1のようになる。図にみるように，7075−T6材では乾式切削の削り速度v=1m/sの場合を除いて，すべての場合にすくい面上にクレータ摩耗が発生しており，刃先先端付近には一定幅の平たん部（プラトー）の存在が認められる。いずれの場合もクレータ表面には付着物が薄く付着している。AC3Aでは削り速度にかかわらず湿式の場合のみ著しい境

表2.1　試料の化学組成

	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Na (%)	Sn (%)	Al (%)
7075-T6	0.5	0.7	1.6	0.3	2.1	0.11	5.6	0.2	—	—	bal
AC3A	12.8	0.2	—	—	—	—	—	—	0.02	0.41	bal

表2.2　試料の機械的性質

Materials	Tensile Strength (MPa)	0.2% Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers Hardness (Hv)	Remarks
7075-T6	570	483	11.0	142	φ70mm x 150mm Extra Super Duralumin
AC3A	135	71	4.0	46.5	φ70mm x 150mm Silumin

界摩耗が発生しており，その部分には付着物は全く付いていない。またAC3Aの乾式ではすくい面上に付着物が一様に付いているが，横逃げ面側では湿式切削の場合に境界摩耗が発生する部分に付着物が多く認められた。それに対して7075−T6材の切削では，横逃げ面の部分には付着が認められなかった。

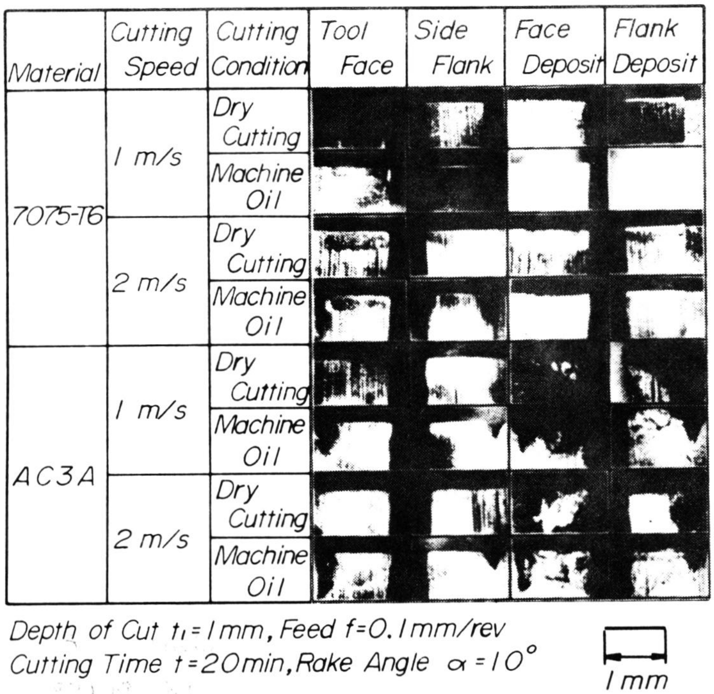
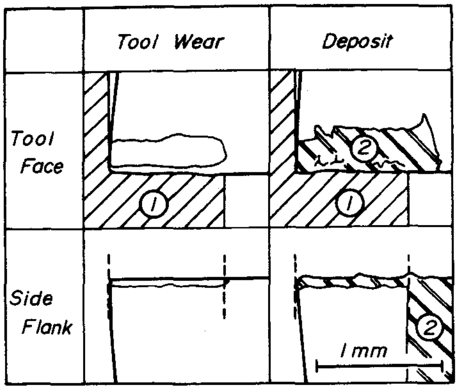


図 2.1　20分切削後の工具付着物と摩耗状態

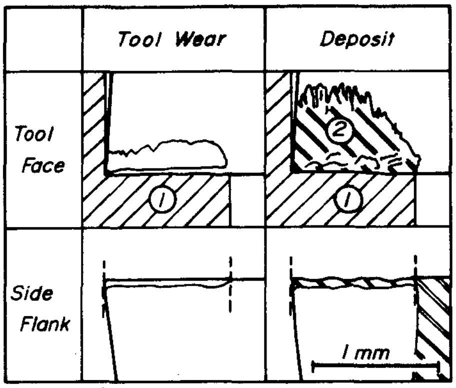
2．4　7075−T6材の切削

上記工具摩耗状況を詳細に検討するため，7075−T6材の切削停止直後の付着物が付いたままおよびこの付着物をNaOH液で腐食除去した後の工具状況を図2.2，2.3に示す（図上段はすくい面側，下段は横逃げ面側）。図2.2は削り速度 v=2 m／s，切削時間 t=20 min の乾式切削の場合であり，図中斜線を旋した①の部分は切削時に工具と接触する被削材部分の位置，形状を予想した部分である。図のように削り速度 v=2 m／sの乾式切削では，すくい面上に一定幅のクレータが発生し，切刃部分に約30μm程度の幅の平たん部が認められ，この部分に構成刃先の発生が予想される。[3] 横逃げ面側にはほぼ一定幅の逃げ面摩耗が認められる。図中，斜線部分②はアルミニウム等の薄い付着域を示しており，刃先付近で2～3の小さな盛り上り部分，すなわち，付着物の厚い部分もみられた。横逃げ面側では，被削材にこすられる逃げ面摩耗部分と，切込みに相当する部分より外側に，被削材外形を境界にして薄い付着物がみられる。このことから，被削材は工具逃げ面によく密着しているようである。また切込みより外側でも付着物が認められることから，図のように被削材と工具の接触を予想したものの，実際には工具の送りに押されて，切込みより外側にはみ出している部分があるものと思われる。



Material 7075-T6 , Dry Cutting
Cutting Speed v=2m/s , Cutting Time t=20min
Depth of Cut t₁=1mm , Feed f=0.1 mm/rev

図 2.2　7075−T6 材の乾式切削後の工具表面模式図



Material 7075-T6 , Machine Oil
Cutting Speed v=2m/s , Cutting Time t=20min
Depth of Cut t₁=1mm , Feed f=0.1 mm/rev

図 2.3　7075−T6 材の湿式切削後の工具表面模式図

一方，同一切削条件で機械油を用いた7075−T6 材の湿式の場合の工具摩耗状況は図 2.3のように，乾式の場合と同様，ほぼ一定幅のクレータ摩耗が発生し，その幅は乾式の場合よりやや狭くなっている。切刃部分に平たん部が認められ，かつ横逃げ面側も一様に摩耗している。クレータ上に薄い付着物が認められる点，被削材外周を境界にして切込みより外側にも薄く付着物が付いている点など乾式の場合の工具状況とよく類似し，湿式の効果が少ないことがわかる。

工具摩耗の進行を定量的に表示するため図 2.4 に示すように，逃げ面摩耗に伴う切刃の後退量を a，クレータ幅を b，横逃げ面摩耗幅を c，およびクレータ深さを d' として工具摩耗量を求めた。図のように b 並びに d' は切削開始時に一定値にまで増加し，それ以後の増加率は少なく，その値もほぼ一定であり，また b は湿式の場合の方が狭い。c は切削条件によってその大きさは複雑に変化するが，切削の進行に伴って単調に増加している点では乾式，湿式とも共通している。

図 2.5 は7075−T6 材切削における切削抵抗（主分力 F_H および送り分力 F_V）の時間的変化を求めたものである。図にみるように，実験範囲では切削条件による切削抵抗の異差はほとんどなく，切削の進行に伴い切削抵抗は徐々に増加している。これは摩耗量の増加に伴うものと思われる。しかし，その増加率は少なく，主分力は約170N，送り分力は約60Nである。

2．5　AC3A 材の切削

AC3A材を削り速度 v=2 m／s，切削時間 t=20 min で乾式切削した場合の工具摩耗状況を示せば図 2.6 のようになる。この場合も図右側は切削停止直後の付着物が付いたままの状況を示す。7075−T6 材切削の場合に比べて刃先の丸味が大きくなっている。しかしすくい面上には摩耗痕は

みられず，すくい面上に厚く堆積した付着物のために，すくい面が保護されているためと思われる。この場合，横逃げ面にも付着物が付き，とくに切込みに相当する部分に多い。すくい面の付着物は図中にみられる白い部分③を除いて広く厚く付着している。この部分は刃先先端の付着物によって削り取られ，流出する切りくずが衝突するために付着物がはがれた部分であると思われる。

同一切削条件でAC3A材を機械油を用いて湿式切削した場合の工具摩耗状況は図2.7のようになる。切込みに相当する部分を中心にして大きな境界摩耗が発生している。予想される被削材部分①に比べて，さらに外側にまで境界摩耗が生じていることから，やはり7075–T6材の切削と同様に，実際には被削材の一部が工具の送りによって押されて外周面より外側にバリ状に突き出ていることが考えられる。また前切刃の切りくずが工具から離れる部分も摩耗が進み，切削油の浸透しやすい周辺部では，アルミニウム等の付着が妨げられ，被削材内部に存在する硬いけい素粒子が，直接工具表面を擦過するため摩耗が進行すると思われる。境界摩耗の底部についている摩擦こんをみると，すくい面では切りくず流出方向と，横逃げ面側では被削材回転方向と一致している。すなわちすくい面側の境界摩耗が切りくず端面によって，横逃げ面側の境界摩耗は被削材外周に生じたバリによって生じていることがわかる。切刃上の付着物を取り去ると前切刃と横切刃に生じた境界摩耗を結ぶ小形のごく浅いクレータ状溝ができているのが認められる。この溝の深さは，工具製作時の研削条こんがわずかに消える程度のごく浅いものである。この溝と切刃に囲まれた部分以外に付着物はほとんどなく，切削油剤が工具にアルミニウム等の付着するのをよく防いでいることがわかる。その結果乾式の場合に比べて横逃げ面摩耗幅も大きくなっている。

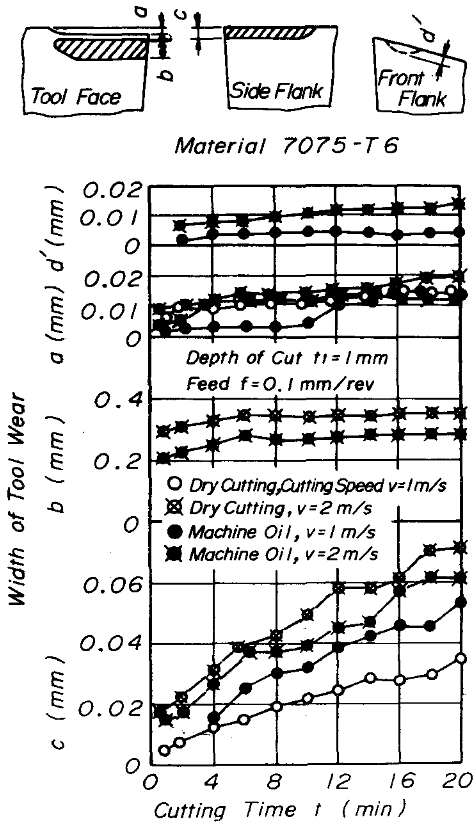


図2.4　7075–T6材切削の工具摩耗進行状況

AC3A材切削に際して，切削時間 t の進行に伴う工具摩耗の変化量として図2.8のように横逃げ面摩耗幅 h，横逃げ面の摩耗に伴う切刃の後退量 g，横逃げ面側の境界摩耗長さ d，すくい面側の境界摩耗長さ e と境界摩耗の開口幅 f を求めた。h と g は切削開始時に一定値に到達し，その後の摩耗量増加は非常に小さく，またこの h と g の両者は互いに関連して似た傾向にある。h はAC3A材では湿式の方が切削油剤によってアルミニウムなどの付着が妨げられるため，かなり大きくなっている。また，AC3A材切削時の境界摩耗の大きさを求めれば，d がほぼ一定の割合で増加してい

るのに対し，e は切削初期に急増するが，その後増加割合は減少する傾向を示し，f もばらつきはあるが e と似た増加の傾向にある。

図 2. 9 に AC3A 材切削時の切削抵抗（主分力 F_H 及び送り分力 F_V）の変化を示す。図に示すよう

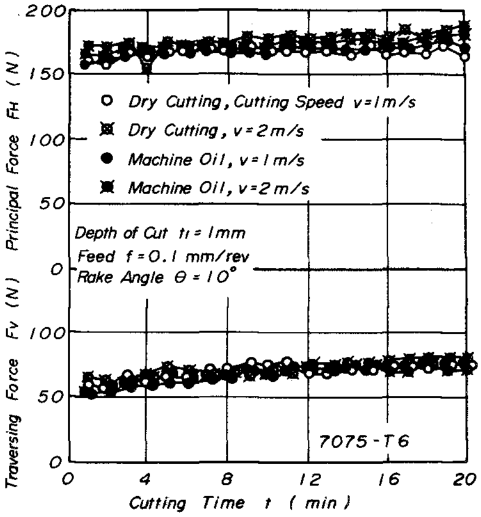


図 2.5　7075−T6 材切削の切削抵抗の変化状況

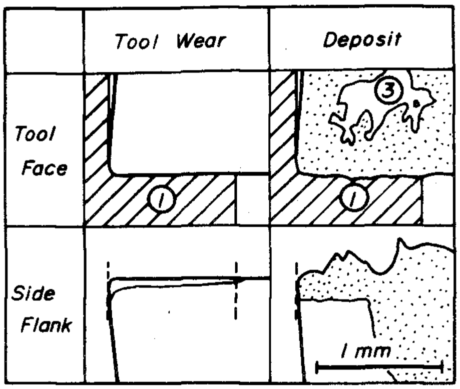


図 2. 6　AC3A 材の乾式切削後の工具表面模式図

に切削条件によって切削抵抗が大きく変化し，湿式に比べて乾式の方が切削抵抗は大きくなり，乾式では削り速度が低い方が切削抵抗は大きい。また，切削の進行に伴う切削抵抗の増加は認められないが，これは切刃部の付着物によって切削が行なわれるためと思われ，かつ，境界摩耗の大きさは切削抵抗には影響しないようである。

2. 6　結　　言

以上の実験結果より，7075−T6 材では乾式切削に比べ湿式切削では，その程度は少ないものの，いずれの場合にも工具すくい面にはクレータ摩耗，横逃げ面には逃げ面摩耗がみられた。

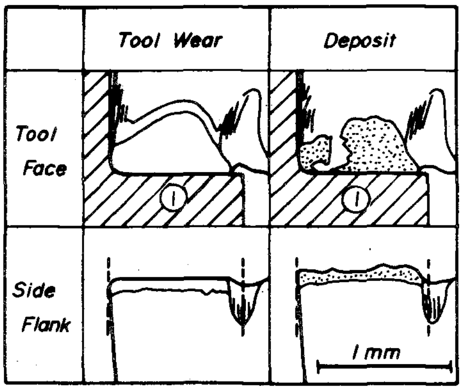


図 2. 7　AC3A 材の湿式切削後の工具表面模式図

クレータ摩耗は硬い（$H_V \fallingdotseq 153$）流出切りくずがすくい面上に衝突し，局部的な機械的摩擦によって生ずるとみられる。逃げ面摩耗は小さく，付着物は被削材と工具接触面外に薄く付着する程度である。

AC3A 材の乾式切削では付着物によって流出切りくずの衝突が防護されるためクレータ摩耗はみ

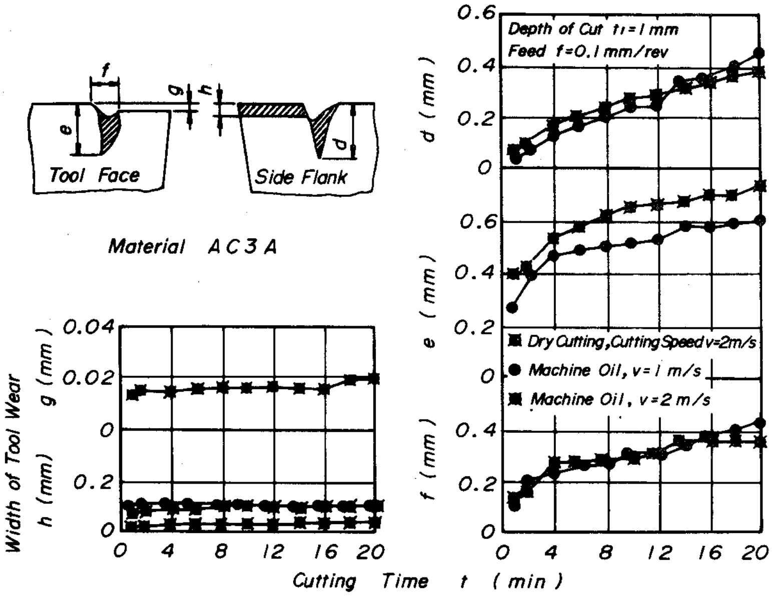


図 2.8　AC3A材切削の工具摩耗進行状況

られず境界摩耗も生じないが，刃先部で多く摩耗する三角形逃げ面摩耗を呈した。湿式切削では切込み境界部において切削油の浸透により付着物が付着しないため境界摩耗の発生がみられた。

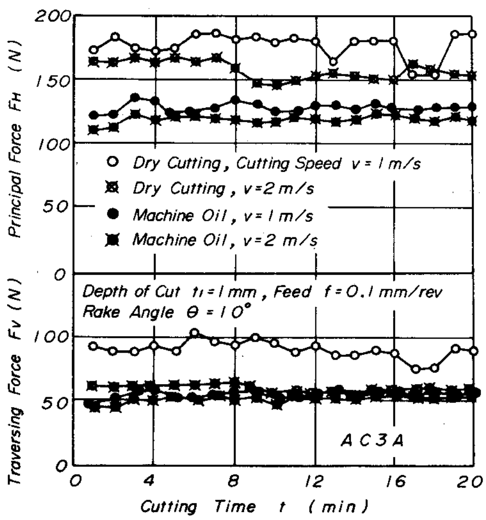


図 2.9　AC3A材切削の切削抵抗の変化状況

参　　考　　文　　献

1) 例えば財満鎮雄；機械技術, 27, 10 (1979), 34。

2) 財満鎮雄, 鈴木康夫, 家雲高秀；軽金属, 29, 9 (1979), 391.

3) 例えば星光一；金属切削（構成刃先について），昭和41年, 42, 工業調査会。

第3章　超硬合金工具の摩耗挙動

3．1　緒　　言

1920年代にWC−Co系の超硬合金工具が開発されて以来 TiC，TaC 等の各種炭化物粒子が開発され，その優れた耐摩耗性により各種材料の切削に使用され，超硬合金工具は今や切削工具の主流となっている。現在多種多様の超硬合金工具が市販されているが，JISではISOの規格を採用し，大きくP種，M種，K種の3種類に分類している。P種は主にTiC−WC−Coよりなり，M種はP種よりもTiC が少なくWC の多いTiC−WC−Co であり，K種はWC−Coが主成分である。そしてその工具材種選定の基準によれば，アルミニウム 合金切削における適合工具材種はTiCを含まないK分類のWC−Co 系のものが推奨されている。しかし，なぜK種の超硬合金工具がアルミニウム合金の切削に適合するかの理由については，必ずしも明確ではない現状である。

よって本章では市販の超硬合金工具より代表的な5種類を選び，これらの工具で種々の Aℓ−Si 系鋳造合金を乾式切削した場合の被削性を工具摩耗，切削抵抗，切削仕上面あらさの点より検討し，特に工具摩耗状況をEPMA により観察し，工具摩耗発生機構の考察の端緒を得るのを目的とした。

3．2　実験方法

実験に供した試料はJIS 規格のAC2B，AC3A，AC4A およびAC4B 相当の金型鋳造のF材とそのT6 処理材である。試料の溶解は黒鉛るつぼを用い，大気中で473K に加熱された円柱状金型に1023Kで鋳込んだ。金型の寸法は内径130mm，高さ220mm である。これら試料の化学組成は表3.1に示すように，ほぼJIS 規格に合致したものであり，機械的性質は表3.2に示すように標準的な値をとっている。

表3.1　試料の化学組成

Material	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Al
AC2B	7.0	0.56	3.2	0.26	0.17	0.15	—	bal
AC3A	10.4	0.42	0.18	0.08	0.10	—	—	bal
AC4A	9.0	0.33	0.18	0.03	0.56	0.53	—	bal
AC4B	8.1	0.65	2.2	0.84	0.40	0.20	0.10	bal

切削試験には昌運カズヌーブ施盤HB−500型を用い，使用工具はJIS 規格のP10，P20，M20，K10 およびK20 に相当する市販の超硬合金工具5種類で，刃先諸元は0−6°−6°−6°−8°−0−0.2である。

表3.2　試料の機械的性質

Material	Tensile Strength MPa	Vickers Hardness Hv
AC2B-F	201.9	101.0
AC2B-T6	289.1	122.0
AC3A-F	142.1	55.7
AC4A-F	176.4	61.6
AC4A-T6	276.4	95.3
AC4B-F	178.4	94.0
AC4B-T6	251.9	142.0

切削抵抗は主分力と送り分力，工具摩耗幅は工具逃げ面の平均摩耗幅，切削仕上面あらさは長手方向の最大表面あらさをそれ

ぞれ測定した。またＥＰＭＡによる分析は切削終了後の付着物が付いた状態の工具を先端より順次研磨し，それぞれの断面における２次電子像と特性Ｘ線像の観察によって実施した。

３．３　実験結果と考察

３．３．１　切削抵抗について

５種類の超硬合金工具を用いて，削り速度v＝10ｍ／ｓ，送りf＝0.13㎜／ｒｅｖ，切込みt_1＝1.0㎜の切削条件で各試料を切削した場合の切削抵抗（主分力Ｐおよび送り分力Ｆ）を図 3.1 に示す。図より各工具における切削抵抗の変化はＦ材においてはあまり明瞭ではないが，Ｔ６処理材ではＫ分類工具が他の工具の場合より切削抵抗は低い値を示している。これはＦ材ではその機械的性質がＴ６材に比し低いので，切削初期における工具摩耗が少なく，工具材種の相違は切削抵抗の値まで影響しないが，Ｔ６材では材料強度が大きいので後述の図3.2にみられるように切削初期から工具摩耗も著しく，また工具材種による摩耗量の差も明瞭になり，工具摩耗に基づく切削抵抗の影響が現われるためと思われる。次に主分力Ｐと送り分力Ｆを比較すれば，送り分力は主分力の½程度以下の値でほぼ主分力と同様な変化傾向を示すが，ＡＣ4Ｂ−Ｔ6 材でＰ工具，Ｍ工具の場合の送り分力の値がやゝ大きいのが目立っている。

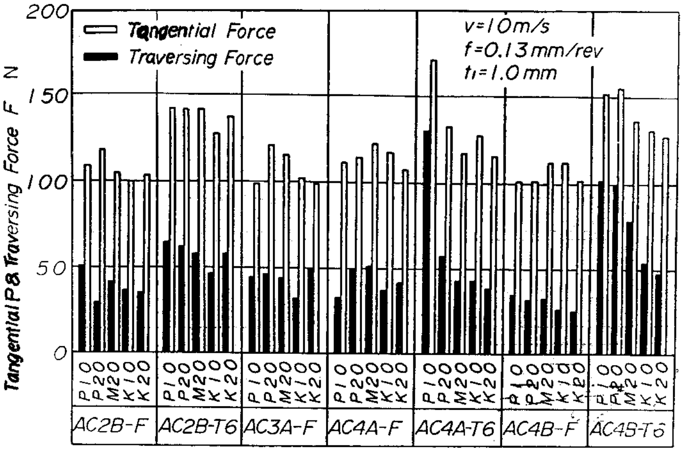


図 3. 1　各工具間の切削抵抗の比較

３．３．２　工具摩耗について

削り速度v＝10ｍ／ｓ，送りf＝0.13㎜／ｒｅｖ，切込みt_1＝1.0㎜ の切削条件の場合，切削長さ約150ｍごとに切削を中断して工具逃げ面平均摩耗幅V_B の測定を行ない，総切削長さＬ＝600ｍおよびＬ＝1600ｍの場合の結果を図3.2に示す。図より切削抵抗が大きいＴ６材の工具摩耗が大きく，その摩耗幅はP10，P20，M20，K10

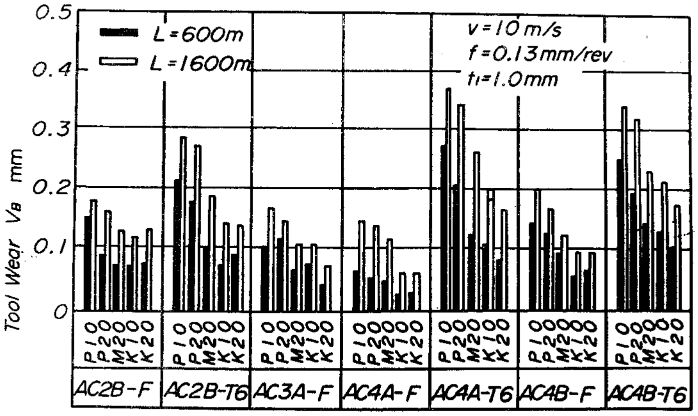


図 3. 2　各工具間の工具摩耗量の比較

およびK20 の順に小さくなっている。F材についても同様な傾向が見られ，K分類工具の摩耗幅が小さくなっている。またK10工具とK20工具を比較した場合，F材ではK10工具がK20工具より，幾分よい結果を示し，T6材ではK20 工具の摩耗幅が小さくなっている。一方，工具逃げ面の先端摩耗幅を比較した場合，K種工具ではその大きさは逃げ面平均摩耗幅 V_B と同じであるがやや大きい程度で，逃げ面全体が一様に摩耗しているが，P種工具の先端摩耗幅は逃げ面平均摩耗幅よりも0.1～0.2㎜大きく（L＝1600mの場合），P種工具は耐摩耗性でK種工具に劣っているようである。そして，M種工具はP種工具とK種工具の中間的な値を示した。したがって被削材中に硬い析出物が比較的少ないF材では耐摩耗性に重点をおいてK10 工具を選択した方が良く，またT6材のように被削材中に硬い析出物が多い場合には，幾分靱性に考慮をはらって，K20 工具を使用した方が有利であると思われる。

3．3．3 EPMAによる分析

前述のように，切削抵抗および工具摩耗においてK種工具が他の工具よりも良好な結果を示したが，その原因がK種工具のどのような特性によるものかを明確にするため，工具材と工具付着物との関係に着目して，EPMAによる観察を行なった。P20，K10およびK20工具を使用し，AC4AT6材を削り速度 $v=10$ m／s，送り $f=0.13$ ㎜／rev,切込み t_1 ＝1.0㎜の切削条件で切削時間 t_C ＝1min の後，付着物が付いた状態の工具を図3.3に示すように，前逃げ面と平行に先端より 0.1， 0.3および0.5㎜離れた各A，BおよびC断面まで段階的にダイヤモンド砥石による超仕上げを行ない，その都度EPMAによる観察を行なった。図3.4はP20 工具のA，BおよびC断面における二次電子像と特性X線像を示している。A断面では工具先端に近いため工具摩耗は非常に激しく，かなり丸味を帯び，付着物も厚く付着している。そして，珪素が付着物下方に多くみられることから，この断面ではこの部分で工具摩耗が現在，進行していることが考えられる。B断面からC断面にかけて工具摩耗量は少なくなり，それに対応して付着物も少なくなる。また珪素が多く付着している部分も

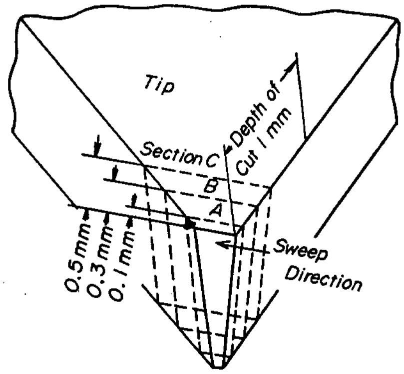
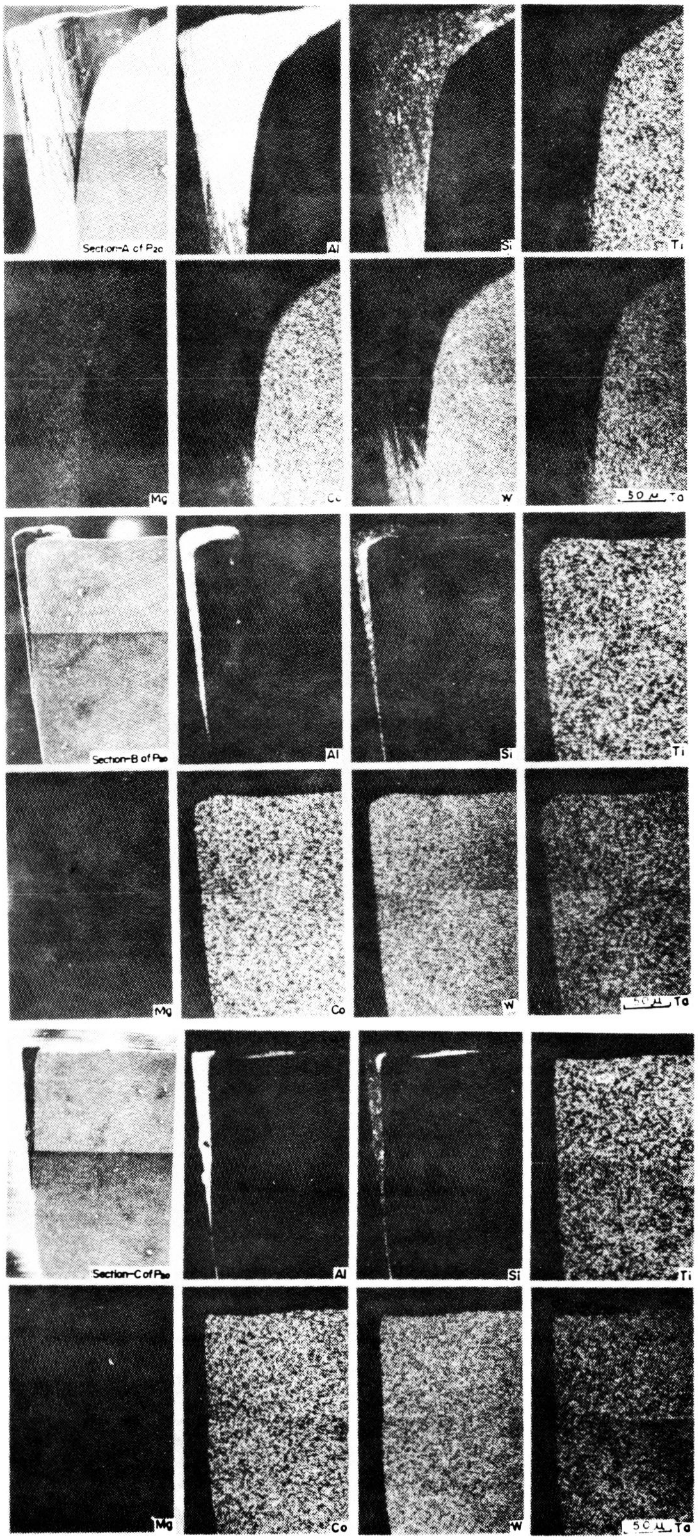


図3.3 EPMA観察位置

切刃付近に移り，工具摩耗の進行域が切刃付近であることを示している。C断面ではクレータ終端部にも付着物がみられ，この部分でもアルミニウムより珪素の方が多く付いている。付着物の大きさは工具摩耗量に依存するようであり，[1] 工具摩耗の進行には珪素粒子が密接に関係するようである。工具摩耗の少なかったK種工具の同様な断面観察を図3.5，3.6に示す。図3.5はK10工具，図3.6はK20工具のA断面である。図3.5のK10工具ではチッピングが観察され，その部分にアルミニウム等が付着し，大きな付着物を形成しているが，図3.6のK20工具ではチッピングは生じておらず，付着物は非常に小さく，工具摩耗も少なくなっている。このことから，T6処



A断面

B断面

C断面

図3.4　P20工具でAC4A−T6材を1分切削した後のEPMA分析

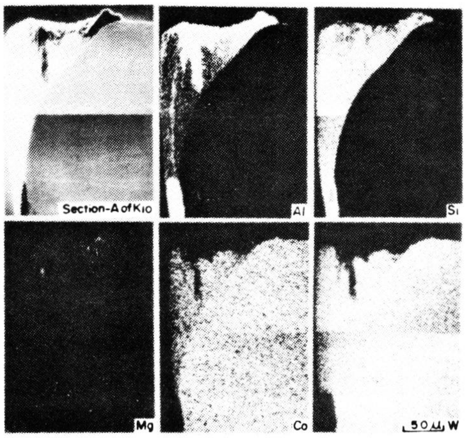


図 3.5　K 10 工具で A C4A−T6 材を 1
分切削した後の EPMA 分析

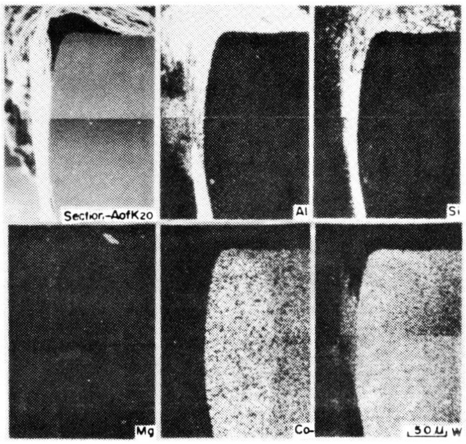


図 3.6　K2 0 工具で AC4 A−T6 材を 1 分
切削した後の E P M A 分析

理材にはＫ２０工具の方が効果的であると思われる。

しかし，以上の結果からはＫ種工具がＰ種工具よりも工具摩耗が少ない理由が明確にはならないので，Ｐ種工具に多く含まれているＴｉＣ が主成分であるＴｉＣ 系のサーメット工具を使用し，同

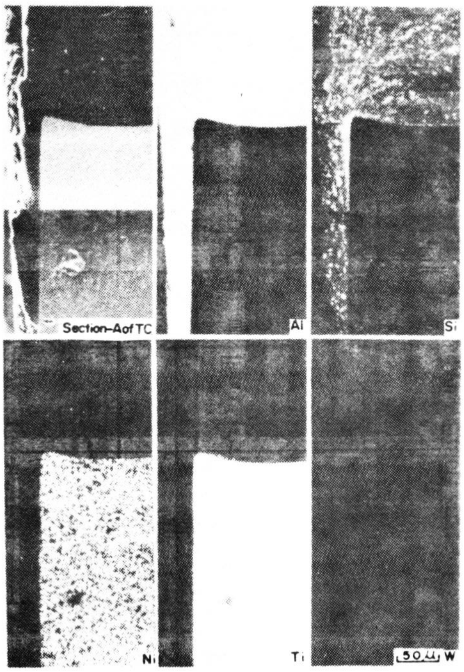


図 3.7　サーメット工具で A C 4 A − T 6
材を 1 分切削した後の EPMA 分析

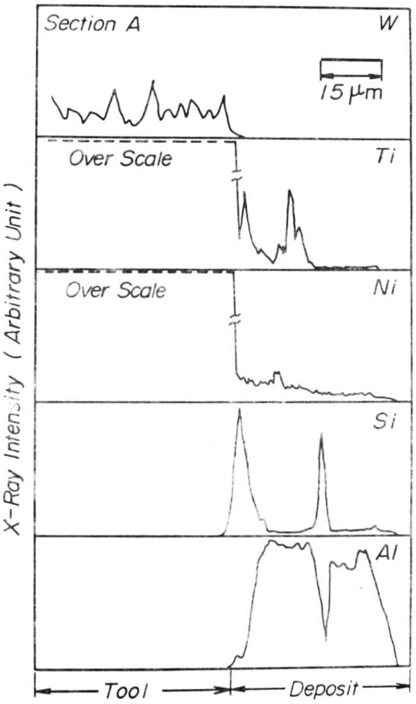


図 3.8　サーメット工具で AC4 A−T6 材を
1 分切削した後の線分析

一条件で切削を行なって得られた写真が図3.7である。この場合，サーメット工具の工具摩耗量はP種工具の2倍程度となり，すくい面上にも大きなクレータが生じている。逃げ面付着物の厚さは40 μm 程度で，すくい面上にも大きく盛り上っている。この逃げ面付着物中，工具との接触面から15〜20 μmの範囲におけるチタン濃度は母材中に微量存在するチタン濃度よりかなり高くなり，この傾向は工具接触部付近の下方ほど顕著である。このサーメット工具でバインダとして使用されているニッケルについても同様な傾向がみられ，これらの部分の線分析結果を図3.8に示す。図からも明らかに工具材中のチタンおよびニッケルが付着物中に拡散していることがわかる。また同一切削条件でAC4A−T6材よりマグネシウム含有量の多いAC8A−T6材（Al −11.7 Si −1.3 Cu −1.2 Mg −0.9 Ni）を切削し，横逃げ面から前逃げ面にかけての摩耗の最も激しいノーズ部分をすくい面側から，すくい面に平行に深さ20 μm 程度研摩除去した断面を観察すれば図3.9を得る。写真より切刃に沿ってマグネシウムが帯状に付着しているのがわかる。工具摩耗が激しい部分では切削温度もかなり高くなると考えられるため,[2] マグネシウムが工具材中のチタンまたはニッケルと結合し，その部分が工具摩耗に対して弱くなって，摩耗が進行すると思われる。この部分では，マグネシウムが工具面に付着しているため付着物中へのチタン，ニッケルの拡散は図3.7のようには明確ではなかった。このようにTiC 主成分のサーメット工具では工具材中のチタンおよびニッケルなどが付着物中へ拡散したり，被削材中のマグネシウムなどが工具に付着して摩耗の進行を早めるものと思われる。このためAl −Si 系合金の切削においてはTiC を含むP種，M種工具よりは含まないK種工具の方が工具摩耗に対して有利といえる。

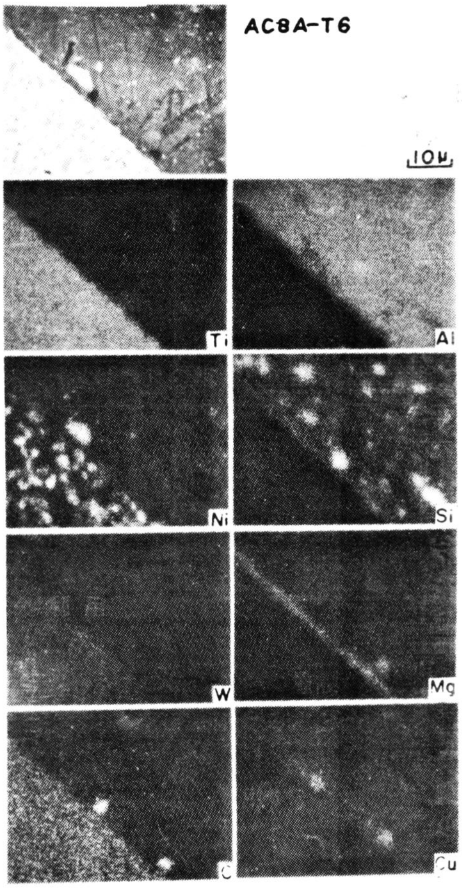


図3.9　サーメット工具でAC8A−T6材を1分切削した後のEPMA分析

3．3．4　切削仕上面あらさ

総切削長さL＝50 mおよびL＝1600 m の場合について切削仕上面あらさの値を図3.10 に示す。図中，斜線を施したものは工具摩耗が比較的少ない切削初期のL＝50 mの場合であり，他方は工具摩耗がかなり進行したL＝1600 mのときの値である。工具摩耗の少ない切削初期にF材ではK分類工具における仕上面あらさが他の工具材種のものに比べていくぶん良好であるが，工具摩耗が進行した状態では必ずしもそうではない。これは工具摩耗に基

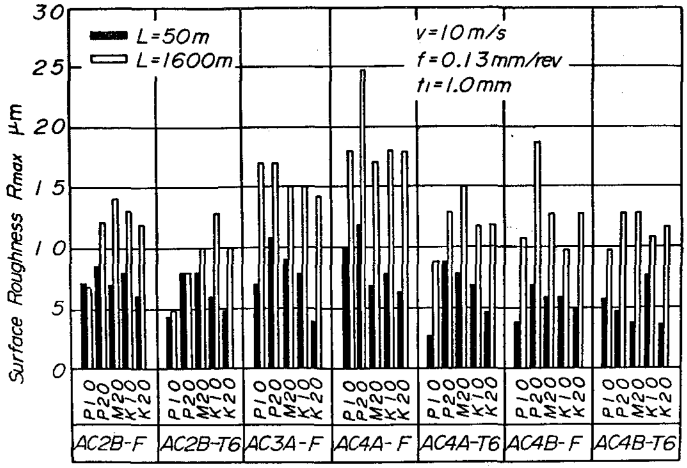


図 3.10 各工具間の仕上面あらさの比較

づく逃げ面付着物の影響と思われる。T6処理材では初期摩耗がかなり大きいのでK分類工具の仕上面あらさに関する優位性もなくなる。またP10工具で仕上面のあらさの値が小さくなるのは，工具摩耗のために仕上面がバニシされたようになるためである。

3．4 結　　　言

Al－Si 系鋳造合金を市販のP10，P20，K10 およびK20 の5種類の超硬合金工具を用いて切削した結果をまとめると次のようになる。

(1) 切削抵抗はF材では工具材種による違いは明白ではないが，T 6 処理材ではK分類工具の切削抵抗が低くなる。

(2) 工具摩耗として逃げ面摩耗幅を基準にとれば，だいたいP10，P20，M20，K10，K20 の順に摩耗幅が小さくなり，K分類工具がP分類工具よりも有利である。そしてF材のように比較的硬さの低い被削材にはK分類中で耐摩耗性に優れたK10工具が良く，T 6 処理材のように硬さの高い被削材には靱性を考慮してK20 工具を使用した方が良い。

(3) P分類工具に比べてK分類工具の摩耗量が少ないのは，P分類工具材中のチタンが被削材中のアルミニウム，シリコンと親和性が強く，またマグネシウム などとも結び付きやすいため工具摩耗が促進されるものと思われる。

(4) 工具材種が仕上面あらさに及ぼす影響は本実験範囲内では大きな差異が認められなかった。

参　考　文　献

1） 財満鎮雄，高辻雄三，能登谷久公，伊藤年秀 ；日本金属学会誌40，2（1976），154.

2） 財満鎮雄，高辻雄三，後藤信孝 ；日本金属学会誌，41，12（1977），1221.

第4章　高速度鋼工具の摩耗機構

4．1　緒　　言

第2章において，工具摩耗が比較的発生しやすい材料として展伸材より7075−T6材，鋳造材よりAC3A材を選び，乾式および湿式切削における高速度鋼工具の摩耗の実態を観察した。その結果，切削抵抗の軽減，切削仕上面の向上，工具寿命の増大などの見地から採用される湿式切削において，切削条件や切削材によっては乾式切削よりも大きい工具摩耗が認められた。すなわち7075−T6材では乾式切削に比べてその程度は少ないものの工具すくい面にはクレータ摩耗，横逃げ面には逃げ面摩耗が認められた。AC3A材では乾式切削の際すくい面，横逃げ面における工具付着物の生成がおう盛で，これが工具面を保護するため横逃げ面に三角形逃げ面摩耗が認められ，湿式切削では付着物の生成は少なく，特に切込みに相当する部分で工具付着物の付着が防げられ，境界摩耗が発生するなど問題があった。本章では主に湿式切削の際における高速度鋼工具の工具摩耗状況をEPMAにより観察し，一部乾式切削と比較し工具摩耗の発生機構を考察するのを目的とした。

4．2　実験方法

実験に供した試料は第2章と同じ材料の7075−T6材（いわゆる超々ジュラルミン）およびAC3A材（シルミン）である。

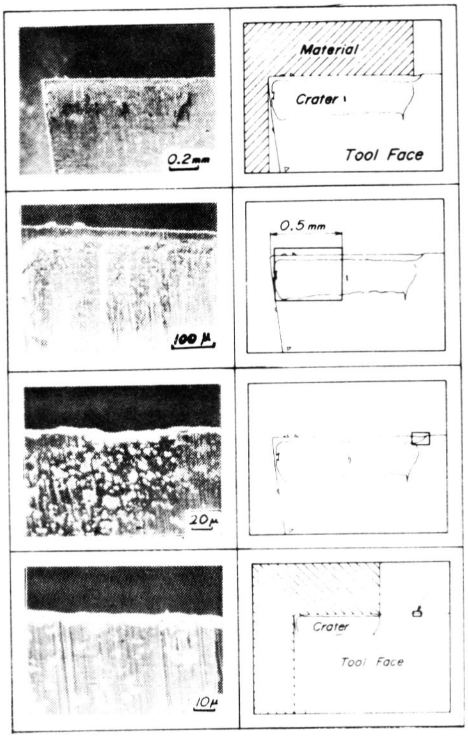
刃先諸元0−10°−6°−6°−6°−0−0 を有する高速度鋼（SKH4）製バイトを使用し，昌運カズヌーブ旋盤HB−500型によって切削試験を実施した。切削条件は切込み t_1 = 1.0 mm，送り f = 0.1 mm／rev，削り速度 v = 2 m／s 一定とし，湿式切削には機械油を使用した。

4。3　7075 − T6材の切削

第2章の7075−T6材の湿式切削では乾式切削の場合と同様，すくい面上切刃部分から一定幅の平たん部が認められ，それに続いて一定幅のクレータ摩耗が発生しているが，その際のクレータ摩耗の詳細を示せば図4.1のようになり，右側の図は左側写真の説明であって，拡大撮影した部分を太線で囲んだ範囲で示す。最上段はクレータ摩耗の全体を示し，右図に書き込んだ切削時の被削材の予想関係位置よりみて，被削材に切込んだ長さ全体にわたってほぼ一定幅の摩耗が発生している。2段目の写真は工具先端部のクレータ摩耗を拡大して示してあるが，切刃に沿って一定幅の摩耗していない部分があり，前述のようにこの部分に構成刃先が発生。付着し，切刃を保護するためと思われる。そしてその平たん部に続いて摩耗が始まり，内側になるに従ってくぼみが深くなっている様子がうかがえる。3段目はちょうど切込みに相当する部分の拡大写真で，規模は小さいが、この部分で境界摩耗が発生しかけているのが認められ，その外側に未摩耗部分との境がみられる。最下

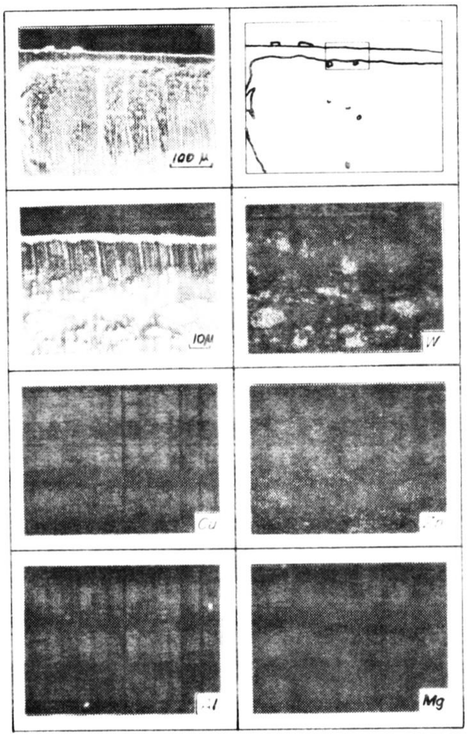
段は以上の摩耗面と比較するため，切削に関与しなかった切刃部分の拡大写真で，工具表面には工具作製の際の研削砥石による研削こんがみられ，かつ組織中のタングステン炭化物（写真中の白い粒子）も一様に研削されているのが認められる。

次に，上述の2段目の写真に示された範囲のクレータ摩耗について，さらに拡大撮影し，同時に主要元素の分布を求めれば図4.2のようになる。すなわち，写真は切刃端ならびにクレータの開始部分を示すが，切刃端部には約20μm程度の摩耗していない部分が認められる。この部分ではタングステン炭化物粒子は母材中にうまり，砥石の研削条こんもそのまま残っている。しかし，クレータ部分では母材金属は削り取られ，硬いタングス



Material 7075-T6 , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20 min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図4.1　7075−T6材を20分間湿式切削後のすくい面のEPMA分析



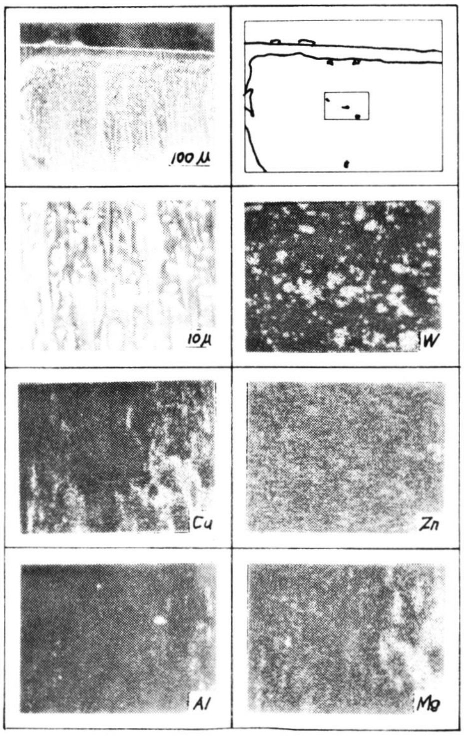
Material 7075-T6 , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20 min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図4.2　切刃部分のEPMA分析

テン炭化物粒子との間に段差ができて浮き出ているのがわかる。またタングステン炭化物粒子には前述の未摩耗部分の研削条こんに比べ，はるかにピッチの細かい摩擦こんが認められ，この摩擦こんと研削条こんとの間には，わずかではあるが角度差があることから，被削材や切りくず中に存在する硬い微粒子が切りくずの流出に伴って工具面を擦過していると考えられる。

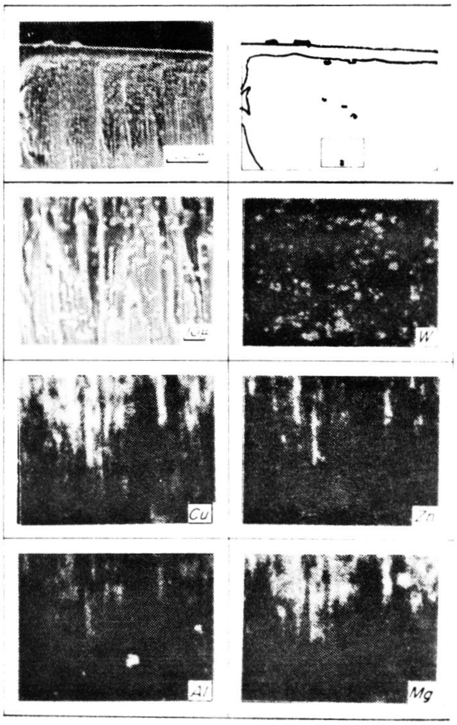
元素分布をみれば，タングステン炭化物粒子とみられる位置にタングステンのX線像がみられる以外，亜鉛がわずかに残っている程度でほかの元素は認められない。

図4.3はクレータ中央部の最も深いくぼみ



Material 7075-T6 , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/sec , Cutting Time t = 20 min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図4.3　クレータ中央部のEPMA分析



Material 7075-T6 , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20 min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図4.4　クレータ終端部のEPMA分析

部分の写真である。前述のクレータ開始部分の場合と同様，タングステン炭化物粒子上にピッチの細かい摩擦こんがみられる点，母材金属部分がタングステン炭化物粒子に先立って削り取られている点など同じ傾向にある。元素分布をみれば，タングステン元素はもちろん認められるが，銅，マグネシウムはほとんど取り除かれている。

また図4.4はクレータ終端部の写真である。この場合にもタングステン炭化物粒子面上に細かい摩擦こんがみられる。この部分の特徴は銅，マグネシウムの付着量が比較的多く，同じ場所に亜鉛，アルミニウムも付着していることである。このようにクレータの終る部分に被削材中の金合元素が濃縮された形で付着する傾向がみられる。

切刃先端から250μmの位置で，クレータ摩耗部分に直角方向に元素の線分析を行なった結果を図4.5に示す。これからもクレータの終る部分，切刃から深さ300μm付近で銅，マグネシウムの付着量が多く，また亜鉛，アルミニウムもその付近で多いことがわかる。切刃先端から500μm，750μmの位置における線分析の結果も同様な傾向を示した。7075−T6材中にあると考えられる組織としては[1]　Al−Cu−Mg，$CuAl_2$，Mg_2Al，$FeAl_3$，Mg_2Si，MgZn　などであるが，図のよ

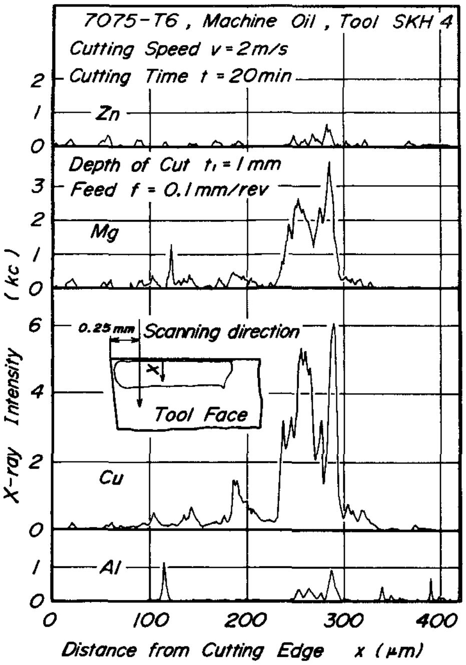


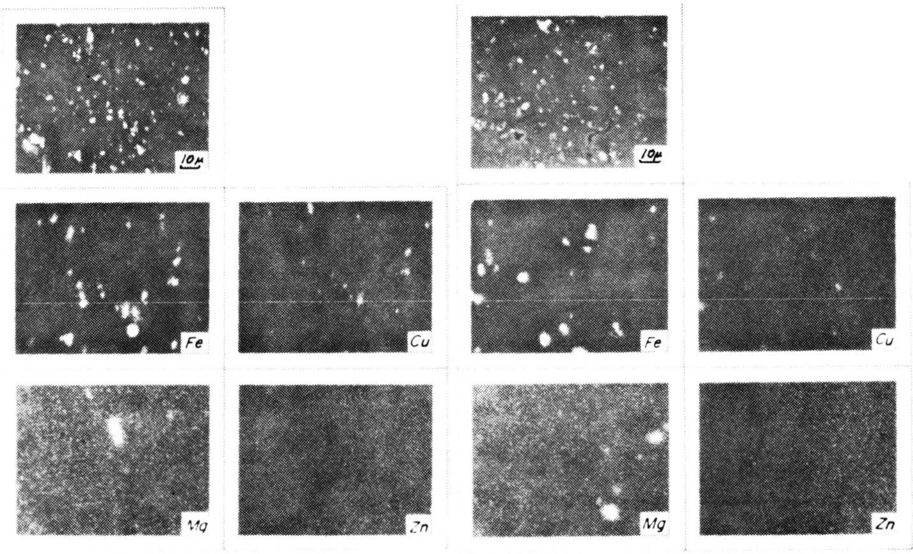
図 4. 5　すくい面上の線分析

うにこの部分で銅，亜鉛，アルミニウム，マグネシウム等が多いことは，これらの組織に関連した各元素であることからうなずける。

一方図 4. 6 は 7075−T6 材の乾式および湿式切削の場合の切りくず断面を示すが，切りくずの断面組織をみる限り湿式切削でも乾式切削の場合とほとんど変わりない。元素分布も乾式，湿式両切削の間にあまり差はなく，鉄，銅がやや大きくかたまって存在し（ただし，写真では乾式切削に比べ湿式切削で銅分布がやや少ないようにみられる），マグネシウム，亜鉛は一様に細かく分布している。しかし工具すくい面を滑って流出する切りくず裏面の写真を求めれば図 4. 7 のようになり，乾式切削の際に鉄が多いのは工具面を擦過する際に工具から得られるもののようで，湿式切削では前述の切りくず断面の鉄分布と大差なく，銅分布や細かく一様に分布している亜鉛も切りくず断面とほぼ変りなく，そして鉄と銅とは必ずしも同じ場所にあるとは限らない。またマグネシウム分布は切りくず断面に比べて極めて減少しているのは特徴的である。これから考えれば，前述のように 7075−T6 材にあると考えられる組織の中で　$MnAl_6$（初晶けい素を K = 3460 とした場合の引掻き硬さ K=890，以下同様 [2]），$CuAl_2$ (K=775)，Al−Cu−Mg (K=500)，Mg_2Al_3 (K=450) などに比べて比較的高い値の引掻き硬さをもつ $FeAl_3$ (K=1780)，一部 Mg_2Si (K = 1375) などが工具面を引掻き，タングステン炭化物粒子を浮き上らせる役割をしているのではないかと予想される。

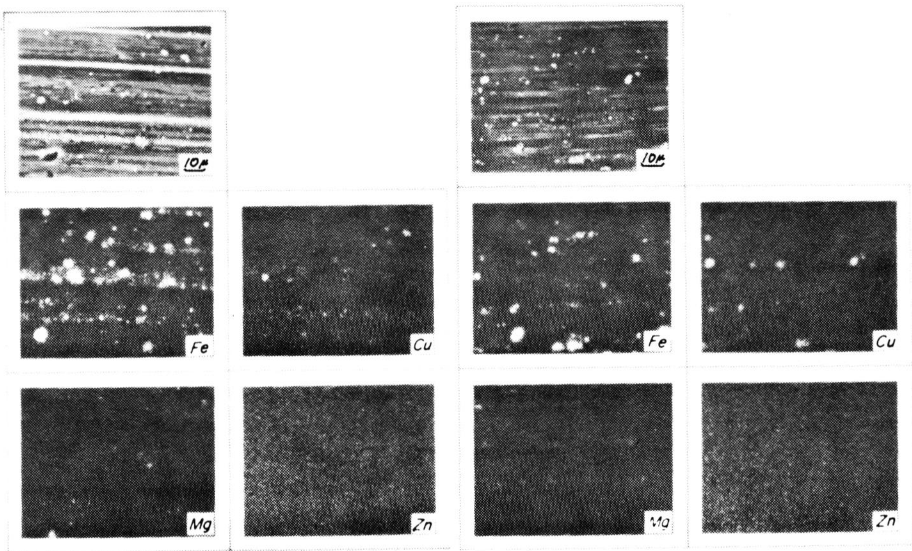
4．4　AC3A材の切削

2 章のAC3A材の機械油を用いた湿式切削時の工具摩耗には，切込みに相当する部分を中心に大きな境界摩耗が発生した。この場合図 4. 8 の上段のようになるが，写真をよく見れば前切刃側にもわずかに境界摩耗が発生している。ここで横切刃，前切刃および両方にできる境界摩耗を結んだ領域には工具付着物が発生，付着して工具面を保護している。また右の説明図に示す拡大位置の写真にみるように，前切刃側の境界摩耗が生じないでタングステン炭化物粒子が埋ったままのもとの工具面と，工具摩耗の進行によってタングステン炭化物粒子が浮き出た部分とがはっきり境界づけら



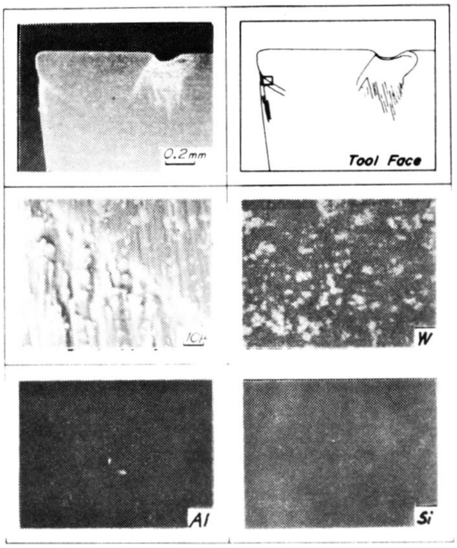
(a) dry cutting (b) wet cutting

図 4.6　4 分間切削後の切りくず断面の EPMA 分析



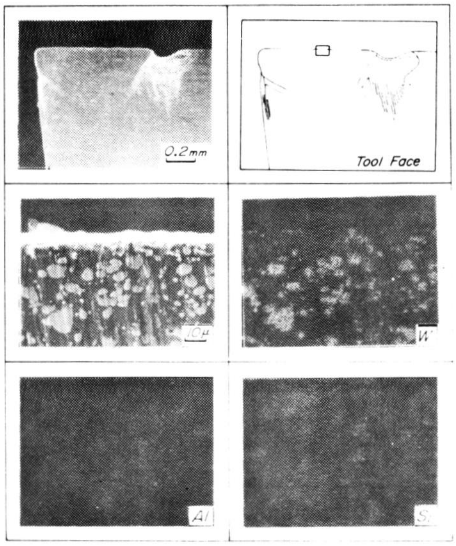
(a) dry cutting (b) wet cutting

図 4.7　4 分間切削後の切りくず裏面の EPMA 分析



Material AC3A , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20 min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図4.8　AC3A材を20分間湿式切削後のすくい面のEPMA分析



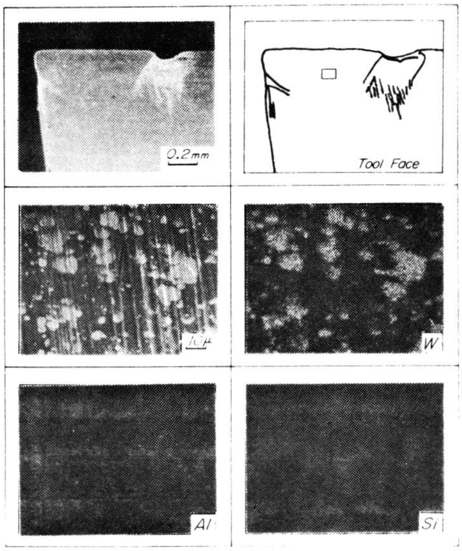
Material AC3A , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20 min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図4.9　切刃中央部のEPMA分析

れているのがわかる。そしてアルミニウム，けい素の付着は全く認められていない。

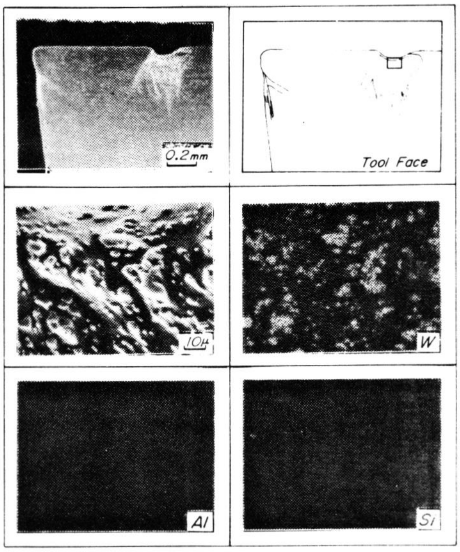
図4.9は右側説明図にみるように切刃中央部の写真である。すくい面の表面状態から，この部分も摩耗していないことがわかり，これはこの部分が工具付着物によって保護されていたためと思われる。ここにもアルミニウム，けい素の付着は認められていない。また上述の工具付着物に覆われたとみられる領域のほぼ中央部と思われる部分の写真を求めれば図4.10となり拡大写真をみても工具作製時の研削条こんが残っており，摩耗の進行は認められない。アルミニウム，けい素の付着もなく，工具付着物は切刃を十分に保護していることがわかる。

次にすくい面側境界摩耗と逃げ面側境界摩耗の境付近の写真を図4.11に示す。拡大写真より，工具母材金属は削りとられ，タングステン炭化物粒子は突き出ており，かつ切りくず流出方向がわかるやはり，アルミニウム，けい素の付着はわずかしか認められていない。そして境界摩耗の終端付近の写真は図4.12のようになり，工具母材金属が削り取られ，またタングステン炭化物粒子も摩耗しているが，7075−T6材切削の場合に比べタングステン炭化物粒子面には摩擦こんは認められず，全体として丸味を帯びているようである。被削材中の初晶けい素微粒子が摩耗の主原因と考えられるが，その働きは母材金属を削り取ることになり，タングステン炭化物粒は硬いためその摩耗速度は遅いと思われる。この場合も，アルミニウム，けい素について元素の線分析を実施したがほとんど付着が認められなかったので図は省略する。



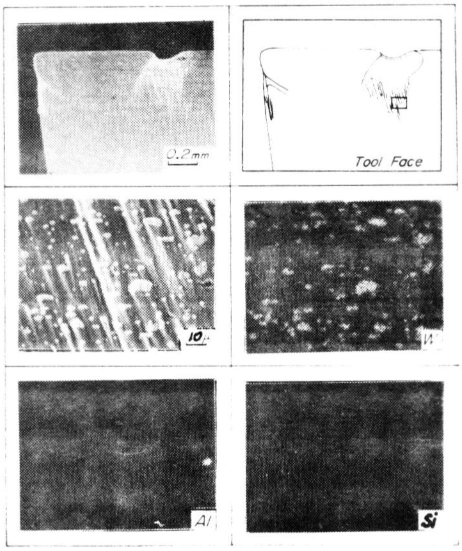
Material AC3A , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図 4.10 クレータ中央部のEPMA分析



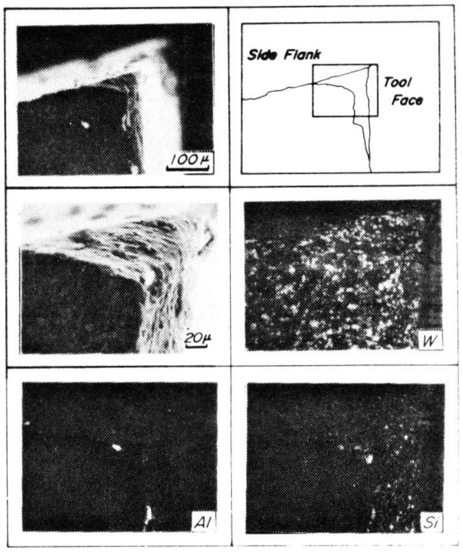
Material AC3A , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図 4.11 切刃境界摩耗部のEPMA分析



Material AC3A , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図 4.12 境界摩耗終端部のEPMA分析

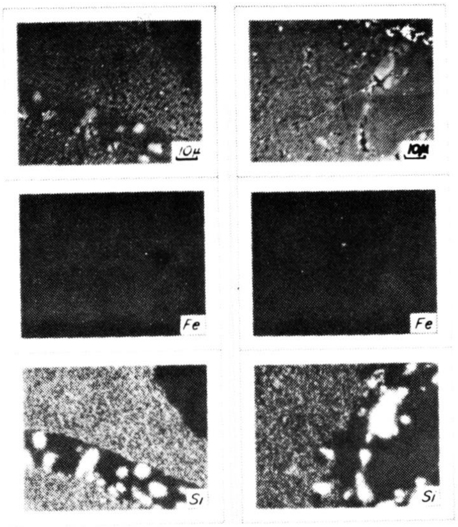


Material AC3A , Machine Oil , Tool SKH 4
Cutting Speed v = 2 m/s , Cutting Time t = 20min
Depth of Cut t_1 = 1 mm , Feed f = 0.1 mm/rev

図 4.13 境界摩耗部断面のEPMA分析

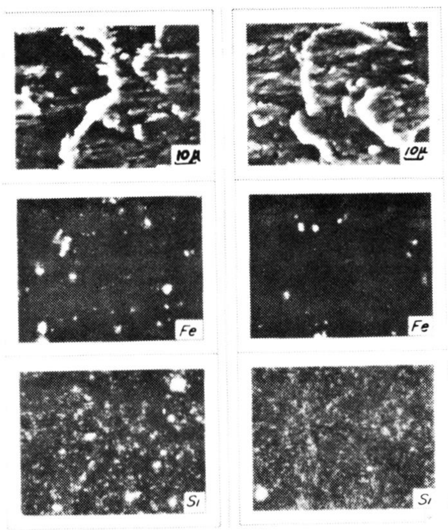
図4.13は右側説明図のように境界摩耗面を直角に切断して求めたもので，タングステンは一様に分布しており，摩耗部分の外形の外側にけい素がほぼ一様に，アルミニウムはところどころに付着しているのが認められる。

一方，図4.14は乾式，湿式両切削方式における切りくずの断面写真であるが，初晶けい素近傍の素地が帯状になっているのが特徴的である。元素分布では鉄はほとんど認められず，けい素は初晶けい素とその素地帯を除いた部分で一様に細かく分布している。切りくず断面では乾式，湿式両切削方式の差はあまり認められない。しかし，切りくず裏面を示す図4.15では外観上は乾式，湿式両切削方式とも大差ないが，鉄は乾式では工具面から得られるためやや多いものの，湿式切削ではその程度が少なくなっている。またけい素は乾式ではやや大きく一様に分布し，湿式切削でも一様に分布している。したがって，AC3A材組織中で考えられる前記引掻き硬さの高い初晶けい素（K＝3460)，一部 $FeAl_3$（K＝1780）などが工具面を擦過する際図4.13のように，工具面を削り取るものと思われる。



(a) dry cutting　(b) wet cutting

図4.14　4分間切削後の切りくず断面のEPMA分析



(a) dry cutting　(b) wet cutting

図4.15　4分間切削後の切りくず裏面のEPMA分析

4．5　結　　言

以上，展伸材の7075−T6材，鋳造材のAC3A材の切削における高速度鋼工具摩耗の発生機構を主としてX線マイクロアナライザによって検討した。前者では乾式切削の場合と同様なすくい面摩耗，逃げ面摩耗が，後者では横切刃，前切刃に境界摩耗が発生するなど発生形態は異なるが，摩耗部分そのものは切削中に工具面と接触する被削材や切りくず中にある初晶けい素のように極めて引

掻き硬さの高い微粒子が工具面にぶつかり，工具材質組織中のタングステン炭化物粒子を浮き上らせ，やがてそれを脱落させる形態で進行するもののようである。

参　考　文　献

1） L。F. Mondolfa: Aluminum Alloys (Structure and Properties)，1976，847，Butter Worth Co。

2） 例えば，アルミニウム加工技術便覧，昭和54年，280，日刊工業新聞社.

第５章　7075−T6 材の切削に関する超硬合金工具の摩耗機構

5．1　緒　　　言

第２章，第４章において工具摩耗の比較的激しい 7075−T6 材と AC3A 材を高速度鋼工具を用いて切削した際の工具摩耗の発生機構を考察した。しかし現在これら合金の切削工具の主流は超硬合金工具であるため，第３章において実用 Al−Si 系鋳造合金のＦ材とＴ６材を５種類の超硬合金工具を用いて乾式切削を行った。その結果，この系の合金の切削にはＰ分類工具よりもＫ分類工具が適し，その理由はＰ分類工具中の TiC が工具付着物中へ拡散するためであることを述べた。しかし 7075−T6 材のような展伸材においてもＫ分類工具が適するかについては，必ずしも明確にはされていない。また切削様式として，切削抵抗の軽減，工具摩耗の減少等の観点から，切削油剤を使用した湿式切削が試みられることも少なくない。しかし切削油剤仕上げした場合，製品として塗装中，塗装後あるいは使用中に切削油剤がにじみ出たりすることがあるため，やむを得ず乾式切削をすることが多い。このため本章では 7075−T6 材をＰ分類およびＫ分類の超硬合金工具を使用して，乾式切削と湿式切削を行ない，この場合に発生する工具摩耗をEPMAを用いて調らべ，7075−T6 材の切削における超硬合金工具の工具摩耗発生機構を明らかにすることを目的とした。

5．2　実 験 方 法

実験に供した試料は第２章，第４章において使用した試料と同一の 7075−T6 材（いわゆる超々ジュラルミン）である。

実験は，刃先諸元 0−10°−6°−6°−6°−0−0.1を有する２種類の超硬合金製工具（JIS 分類Ｐ10およびＫ10）を使用し，昌運カズヌーブ旋盤 HB−500型 によって乾式切削と湿式切削試験を実施した。切削条件は切込み $t_1 = 1$ ㎜，送り $f = 0.1$ ㎜／rev と一定とし湿式切削には市販のマシン油を切削油として使用した。また工具摩耗は逃げ面摩耗に先行するが，工具の摩耗機構は切りくずが擦過するすくい面側で特色がはっきりするので，すくい面摩耗を対象とした。この際アルミニウムの大きな工具付着物は NaOH 溶液で除去した。

5．3　7075−T6 材の湿式切削

5．3．1　P10 工具の場合

図 5.1 の上段は削り速度 $v = 5$m／s，切削時間 $t = 20$ min で湿式切削した場合，工具すくい面上に生ずる工具摩耗の全体像と線分析方向を示す。工具摩耗の全体像をみれば高速度鋼工具の場合と同様，すくい面上に一定幅のクレータが発生している。下段の写真は①の太線で囲んだ部分を拡大撮影したもので，切刃には狭いが一定幅で荒れのひどい領域があり，その下方の面は滑らかである

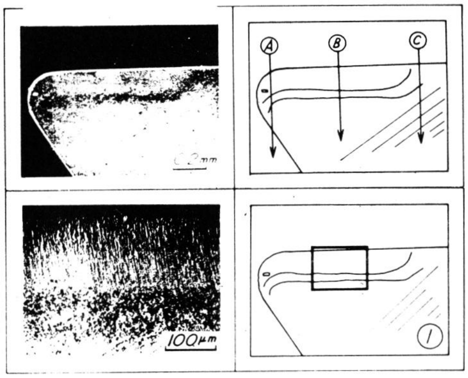


図 5. 1　P10工具で7075−T6材を20分湿式
切削後のすくい面摩耗状況

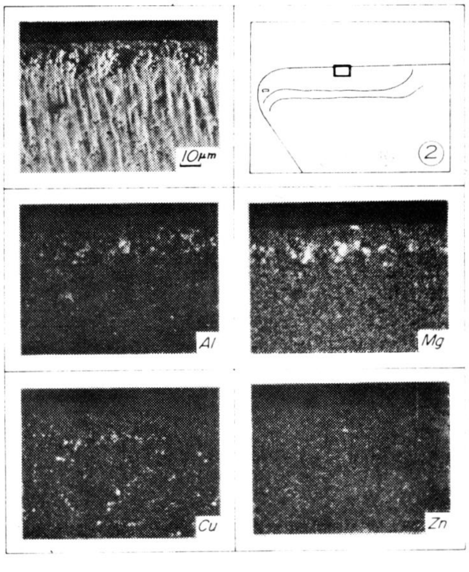


図 5. 2　切刃中央部のEPMA分析

が切りくず流出方向に沿って無数の摩擦痕が認められる。その面に続いて切刃部から0.15〜0.25㎜の範囲で再び表面荒れのひどい部分が続き，写真最下部には切刃を研削仕上げした時の研削条痕が認められる。摩耗面ではこの砥石による研削条痕の深さが最大でも1μm程度であることなどから摩耗の程度はそれ以上であることがわかる。図 5. 2 は切刃中央部の拡大写真で，切刃部の表面荒れがひどい部分の幅は15μm程度でほぼ一定である。この幅は第4章で述べた高速度鋼工具で7075−T6材を切削した場合に切刃部分に生じた未摩耗部分の幅と同じで，超硬合金工具の場合にも構成刃先が生成付着し，その構成刃先が脱落する時に構成刃先が凝着していた表面粒子を持ち去るものと思われる。また，写真にみられるように切刃部にはAl，Mgなどの元素の存在が認められるが，この付着元素は焼結粒子が持ち去られてできた切刃部分のくぼみ底部に付着し，Alは付着物除去の際に化学的腐食を受けずに残り，Znは極めて溶けやすいために付着が認められないもののようである。図 5. 3 は切刃部分をさらに拡大した写真である。写真面上で粒子の脱落がみられ，その穴の内部に図 5. 2 でみられたAl，Mgなどの元素が付着していたわけである。写真の下方1/3部分はクレータ摩耗の開始部分で滑らかな面となっているが，Coの分布をみれば摩耗部分では粒子間のすきまに存在しているようで，斑点状に分布している。一方，切刃部の焼結粒子が脱落した部分のCo濃度は非常に低くなっている。このことから焼結粒子の脱落にはCoが密接に関係していることがわかる。またCは切刃端のくぼみ内部を中心に表面の荒れた部分に多く認められるが後述のK種工具においては，このような分布は認められなかった。Wは面全体に分布し，W濃度の特に高い部分ではTiはまったく認められない。次にクレータ中央部分の拡大写真図 5. 4 をみれば切りくず流出方向に沿ってできた摩耗溝が多数みられ，かつ焼結粒子間にすきまが多く，元素分布からはCuがいくぶん付着している以外に被削材元素の分布はみられなかった。その部分をさらに拡

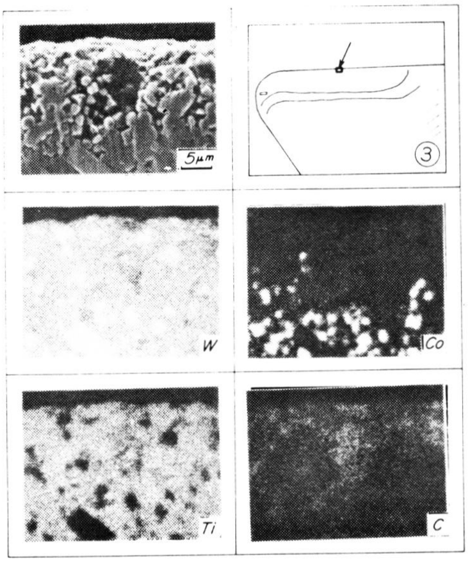


図5. 3　切刃中央部の拡大EPMA分析

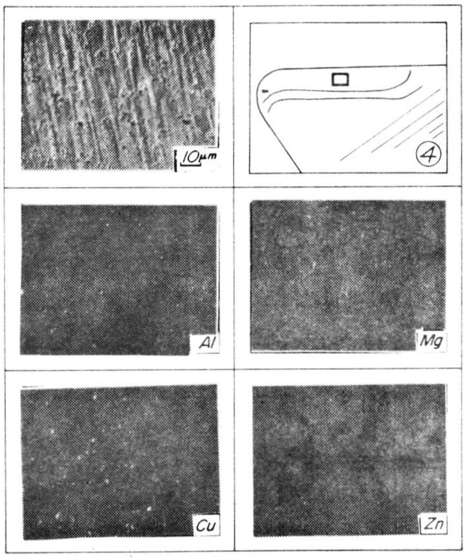


図5. 4　クレータ中央部のEPMA分析

大すれば図5. 5のようになり表面が滑らかで細かい摩耗痕がみられ，個々の焼結粒子の摩耗面の縁が鋭いことなどから，高速度鋼工具の摩耗の場合と同様7075−T6材組織内の硬質微粒子による引掻き摩耗が考えられる。この部分も元素分析写真から Co は粒子間のすきまに斑点状に分布している。

図5. 1に示される摩耗終端部をさらに拡大した図5. 6をみれば，表面粒子がたくさん持ち去られており，そうしてできたくぼみには Cu, Mg が多く分布している。この部分は切りくずが工具面から徐々に離れていくところで，切りくずが工具面におよぼす摩擦力も低く，付着物が工具面に凝着する部分である。元素分析にみられる Cu, Mg はそうしてできた付着物の凝着面付近にあった成分で，切りくずが工具面から離れていくときの力で付着物が脱落する時，表面粒子も持ち去られるものと思われる。この部分の中央付近をさらに拡大したものが図5. 7で粒子の脱落状態がクローズアップされている。この部分でも粒子が持ち去られているところでは Co の濃度が著しく低下し，前述の切刃先端部の場合と同様， Co が付着物に持ち去られ結合力の低下した焼結粒子が脱落していくものと思われる。

図5. 8上段は図5. 1に示した走査方向のすくい面上の元素分布を求めた線分析の結果である。これからみればⒶ，Ⓑ，Ⓒいずれの線分析方向においても切刃から0.15〜0.25 mmの範囲に Cu，Mg，Al の付着がみられ，Cu，Mg は多いが Zn はほとんどみられない。被削材中には比較的多く含まれるが，付着物を腐食除去する際に溶解しやすい元素が少なくなっていることから，この部分の付着物は表面層に固く凝固するものの拡散はしていないことがわかる。一方，切刃部には Al が多くみ

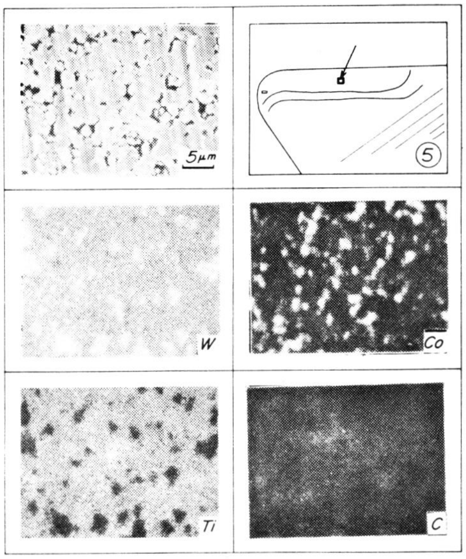


図5.5　クレータ中央部の拡大EPMA分析

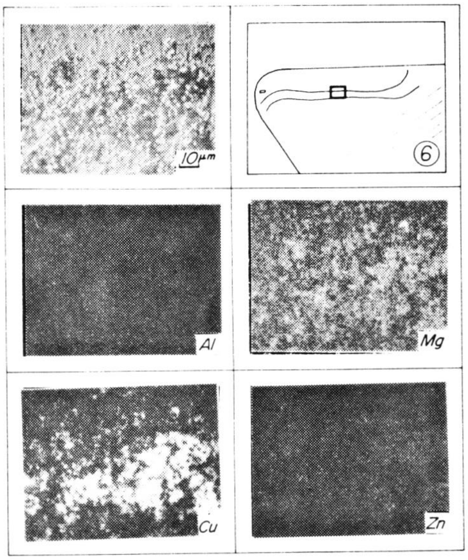


図5.6　クレータ終端部のEPMA分析

られ，元素分布写真にみられるように切刃部にできたくぼみ部分の付着物によるものと思われるが，クレータ終端部付着物に比較してこの部分でCu，Mgなどの元素が少ないことから，クレータ終端部ではCu，Mgなどの被削材中の合金元素が多く集まっているようである。

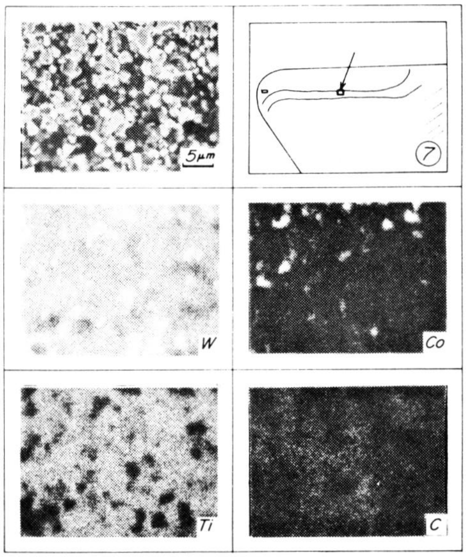


図5.7　クレータ終端部の拡大EPMA分析

5．3．2　K10工具の場合

P10工具の場合と同様，削り速度 $v=5\,\mathrm{m/s}$，切削時間 $t=20\mathrm{min}$ の条件で湿式切削をした際にすくい面に生ずる工具摩耗の全体像，走査分析方向および摩耗中央部分の拡大写真を図5.9に示す。切込みの全範囲にわたってクレータ状のごく浅い摩耗部分が生じており，切刃部には一定幅の表面荒れのひどい範囲がみられること，その下方に滑らかではあるが切りくず流れによって摩耗を受けた面のあることなどP10工具の場合と同様であるが，摩耗終端部には工具表面の荒れはみられなかった。このことから，切りくずが工具面から離れる際に，P10工具では焼結粒子の脱落がみられたが，K10工具では焼結粒子の脱落がみられず，K10工具内の粒子間結合力がP10工具のそれより大きく，7075−T6材に対してK10工具が抵抗力が大きいといえ

る。また摩耗面上では研削条痕がほぼなくなっており，最大摩耗量はクレータ深さにしてほぼ1μm 程度であることがわかる。切刃中央摩耗部分の拡大写真図5.10をみれば，切刃の表面荒れのひどい部分の幅は約20μmで，P10工具の場合のそれよりやや大きい。この場合にも構成刃先が発生し，その脱落の際に表面粒子を持ち去るもののようである。元素分布をみれば切刃部にAlの付着がみられ，ほかの元素の付着はない。さらにこの部分を拡大してみれば図5.11のようになり表面の荒れは顕著になり，焼結粒子の粒界がはっきりし，Wは全面にわたって一様に存在し，Coが全面でみられないことから，K10工具の場合にもCoが持ち去られ焼結粒子の脱落が生ずるものと思われる。クレータ中央部分の拡大写真図5.12では切りくず流出方向に沿ってできた摩耗溝がみられるが，P10工具の場合ほど表面のうねりは大きくなく，また，この部分では切刃部分よりもCo濃度が高く，かつ焼結粒子の狭い粒間部分に集中して斑点状に分布している。

図5.8下段は図5.9に示した要領で行なった線分析の結果である。すくい面のどの部分でも切刃から0.15〜0.25mmの範囲にCu，Mg Alの付着がみられ，中でもCu量が多く，Mgも同様の傾向を示しているがZnはほとんどみられない。この付着元素の多い範囲はP10工具で7075–T6材を切削した際のクレータ終端部の表面荒れのひどい領域とほぼ一致しており，切りくず流れの形はP10，K10両工具の場合に同じであるとみられる。この場合にも切刃部には Al の付着のみがみられた。

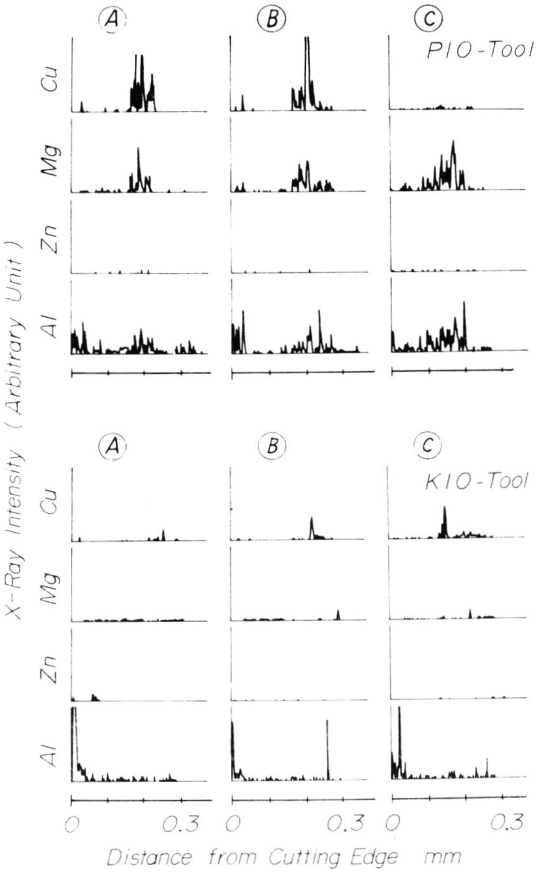


図5.8　すくい面線分析結果（上段はP10工具，下段はK10工具）

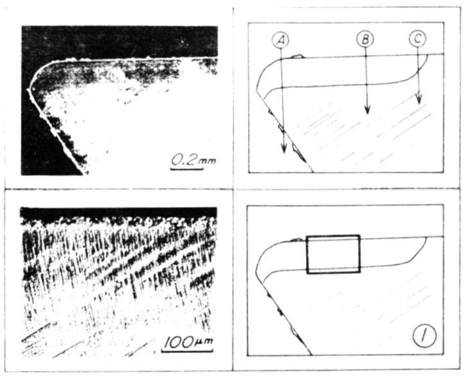


図5.9　K10工具で7075–T6材を20分湿式切削後のすくい面摩耗状況

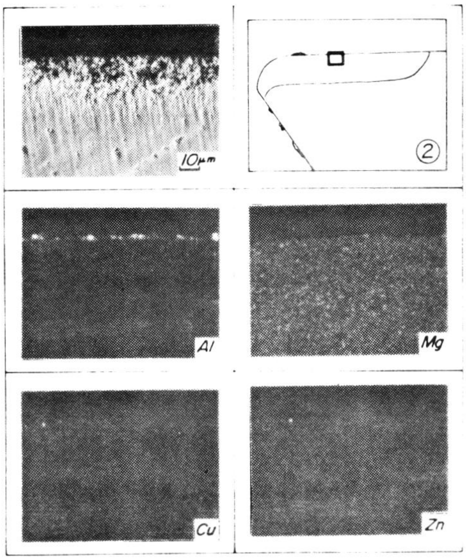


図 5.10　切刃中央部の EPMA 分析

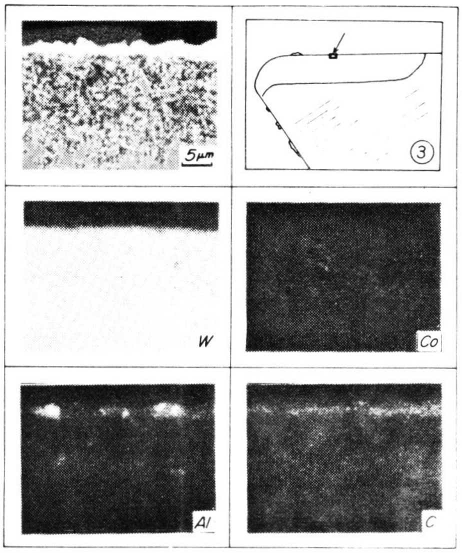


図 5.11　切刃中央部の拡大 EPMA 分析

5．3．3　検　　討

超硬合金 P 10，K 10両工具で 7075−T6 材を湿式切削する際に生ずる工具摩耗を検討したが，どちらの工具でも切刃部に構成刃先の生成が推測された。この構成刃先が工具面の焼結粒子もしくはバインダに凝着して脱落する際に，焼結粒子が持ち去られる凝着摩耗機構が働いているが，7075−T6 材に対しては P 10工具より K 10工具がじょうぶであることがわかる。一方，クレータ状の摩耗面では高速度鋼工具の摩耗の場合と同様，7075−T6 材内に存在すると思われる組織，例えば Al−Cu−Mg，$CuAl_2$，MgZn などや特に引掻き硬さが高いと思われる $FeAl_3$，Mg_2Si など[1]の硬質微粒子による摩耗，引掻き摩耗機構が考えられる。

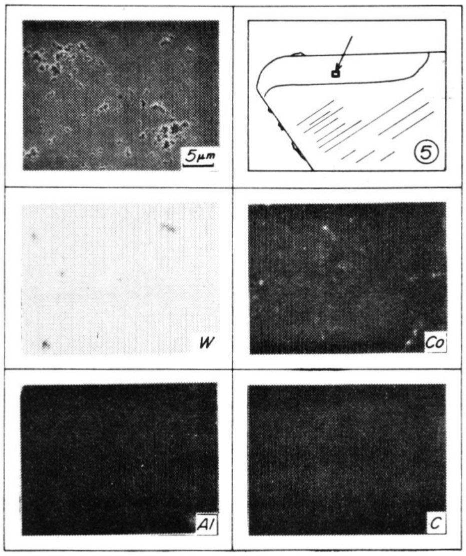


図 5.12　クレータ中央部の EPMA 分析

5．4　7075－T6材の乾式切削

5．4．1　P10工具の場合

削り速度 v=5 m／s，切削時間 t＝20 min で乾式切削を行なった場合，工具すくい面上に生ずる工具摩耗の全体像，その拡大像および拡大観察，元素面分析部分と線分析方向を図 5.13に示す。上段二つはＰ10工具についてのもので，この場合逃げ面摩耗は定常摩耗状態で，その摩耗幅は 50μm であり，すくい面のクレータ深さは 4μm となり少ないが特色は十分みられるようであった。写真にみられるように，すくい面上切刃先端よりほぼ切込み 1.0 mmに相当する付近まで，切刃部より20～200μmの範囲にわたって摩耗痕が認められ，その終端部近傍の写真上黒くみえる部分に後述のように Fe 酸化物が認められており，摩耗の終端をすぎた部分でも場所によっては付着物が付いている部分も認められる。

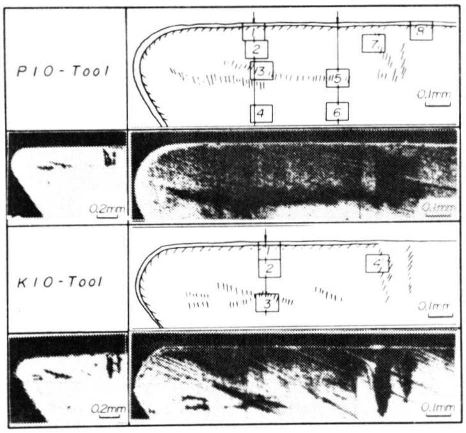


図 5.13　7075－T6材の乾式切削後のすくい面摩耗状況(上段はＰ10工具，下段はK10工具)

切刃部の中央部分①の部分を拡大したのが図 5.14で，全体像をみれば切刃部より 20～30μm 程度の幅領域に焼結粒子がばらばらに荒れた部分が認められ，その下方には切りくず流出の擦過痕を残した面がある。そして①部分をさらに拡大した 1－1 部分には写真にみられるように，この荒れた部分の Co 濃度は減少しており，結合力が低下した粒子が個々に脱落している。この粒子は丸味を帯びており，粒子面には削られた痕跡はみられない。Ti，W などは一様に分布し，その他に少量の Fe，Mg が切刃上に付着している。Ｐ工具成分中では WC と Co の結合力が強く被削材中の Al への拡散が生じにくいが、TiC と Co の結合力は弱いので，それらの混合部分から Co が Al 中に拡散して抜けているものと思われる。実験条件ではＰ10工具の場合の切削抵抗（主分力約114N，送り分力約95N）はK10工具の場合（主分力約103N，送り分力約35 N)より幾分大きいものの，そのときの切削温度はＰ10工具の場合（673±70 K）がK10工具の場合（748±30 K）より低くなり，切削温度変動は前者の方がかなり大きかった。温度の変動が大きいことは結合力を弱めることに影響すると思われる。またTiCの熱伝導率（0.21 W／（m・K））はWC の熱伝導率（1.21 W／（m・K））よりもかなり小さいので，TiC 粒子の方が切削中にWC 粒子より温度が高くなることが予想され，この事も Co との結合力低下につながるとみられる。

切りくずによって工具面が削りとられている①部分よりやや内部の写真②の部分を拡大したのが図 5.15である。付着物はほとんど付いていず，表面の組織状態は，後述の３－３部分とほぼ同様にTiC＋WC 粒子にはひび割れがみられるが，WC の白い粒子にはひび割れはあまりみられない。

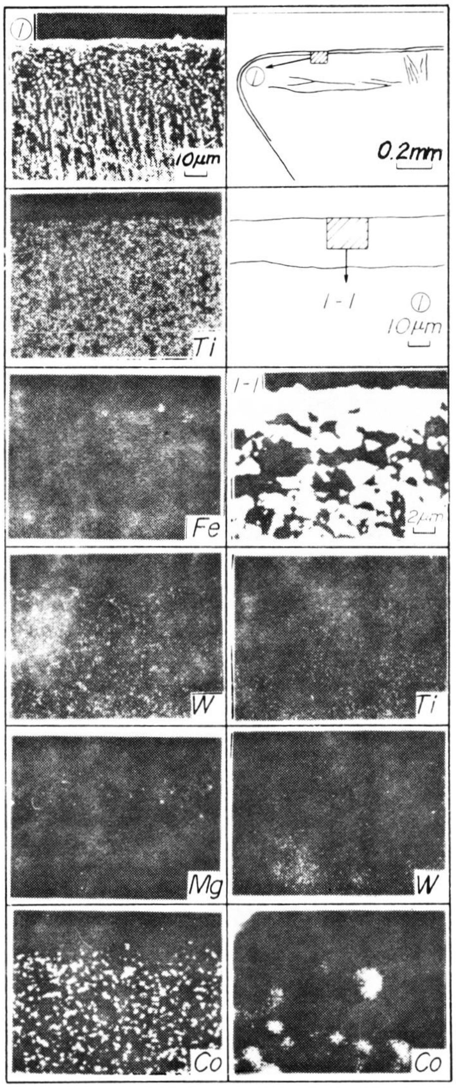


図 5.14　P 10工具の切刃中央部のＥPMA分析

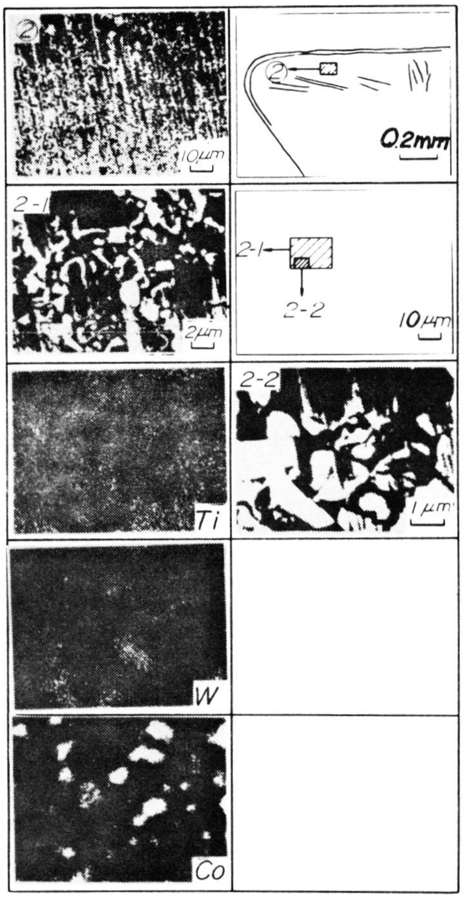


図 5.15　クレータ中央部のＥPMA分析

2 － 1 部分についての各元素分析では白い粒子部分にはＷが多く，また，その部分では Ti が写っていないため，この白い粒子はWC だけの粒子とみられる。そして TiC ，WC 粒子の粒界にできた大きめのすきまのくぼみ部分に Co が多くみられる。

図 5.16は切刃中央の摩耗終端部③部分の拡大写真である。その全体像と元素分析をみれば 3 つの部分に区分できる。すなわち，粒子が抜けてくぼんだ部分が少なく，また Fe の付着も少ない 3 － 1 部分近傍，粒子が抜けてくぼんだ部分がまばらになり Fe もやや付着している 3 － 2 近傍，および粒子が抜けて凹凸が多く Fe の付着も多い 3 － 3 部分近傍とである。この区分に従って，Fe の分布も大きく対応して認められるほか，図には示してないがＯも大体同様な分布を示し，前述の摩

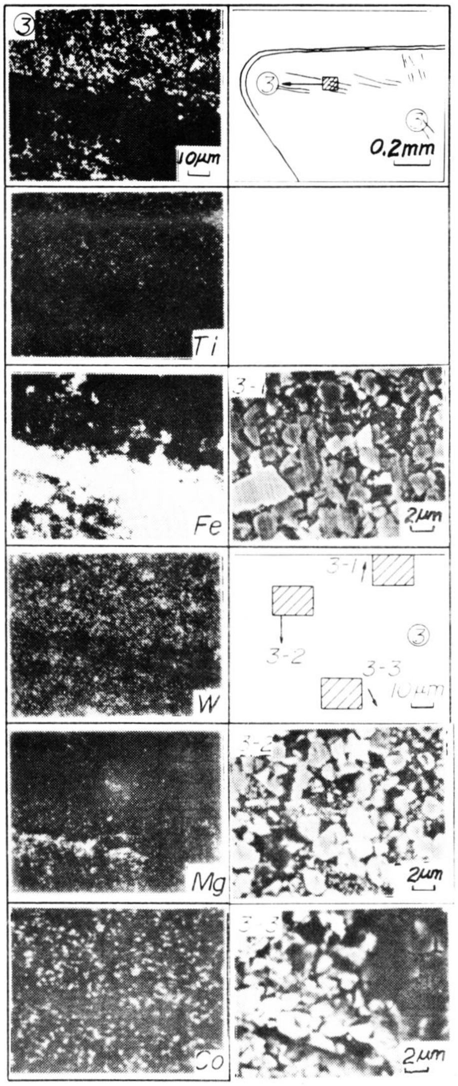


図 5.16　クレータ終端部のEPMA分析

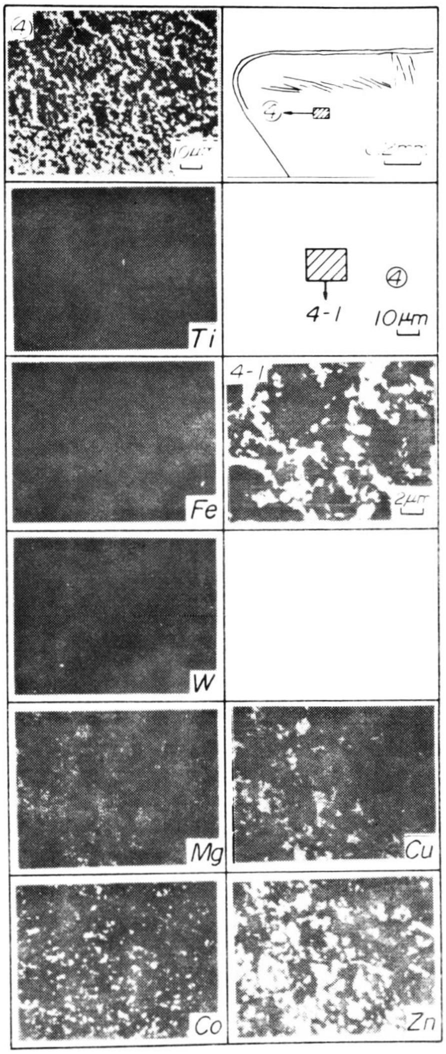


図 5.17　クレータ終端部をすぎた部分のEPMA分析

耗終端部分に付着している黒い付着物（光学顕微鏡でも黒く観察される）は Fe 酸化物であるとみられる。またそれぞれ3－1，3－2，3－3部分の拡大写真をみれば，3－1部分では丸味を帯びた粒子にところどころひび割れがはいっており，角ばった白いWC だけの粒子にはひび割れははいっていない。丸い粒子の間にひび割れが進行して砕けたと思われる細かい粒子がみられ，くぼみをつくっているが，その量は3－2部分よりは少ない。3－2部分では粒子の量が3－1より少なく，角ばったWC 粒子にもひび割れがあり，またくぼみには小さく砕けた粒子がみられ，その量も

3－1より多くなっている。3－3では一様に付いたFeの付着物にもひび割れがあり，粒子にもひび割れがはいって細かく割れており，前者でみられるような丸味を帯びた大きな粒子が少なくなっている。また3－3部分に相当する写真左下部分には，Mg，Si，Cuが幾分多いようであるが，それは工具研削時のきずに沿って付着し，後述のように切込み終端部⑦の観察結果とはかなり違っている。

すくい面中央部の摩耗終端をすぎた④部分の拡大写真図5.17をみれば，付着物がたくさん付いており，工具の生地面がみえない。そのためWの濃度は減少しているが，Coは付着物中へ拡散していると考えられ濃度は減少していない。Cu，Mg，とくにZnが多く，またFeはほとんど付いていない。図には示してないがSi，Oもほとんど付着していない。したがってこの部分の付着物は前述③部分の付着物とではその成分に大きい違いがあるとみられる。また，切刃の切込み終端近くの摩耗終端部⑤およびそれを少しはずれた⑥部分の拡大写真を図5.18に示す。⑤部分は黒い付着物が付きかけている状態にあり，その成分は③の場合とほぼ同じとみられる。そして，工具面研削時にできたくぼみ付近から付着が始まったもののようで，付着が薄いため下地がすけてみえている。⑥部分は摩耗部分をすぎている部分で，工具研削生地のままで付着物は付いていない。なお，前述の④部分と比較すれば，この部分に付着物は付いていず，表面状態の違いがよくわかる。

切込みに相当する切刃端より約50㎛内側⑦部分の拡大写真が図5.19であり，右半分に黒い付着物があり，その端の方は厚さが薄いので，工具生地がすけてみえている。元素分析をみれば，この付着物の中央部分ではW，Co，Tiなどはほとんどみられず，この部分にはOが認められるほか，Al，CuとくにFe，Mgが多く，またZnは含まれていない。そして，その部分をさらに拡大した7－1部分にみられるように粒子にひび割れがはいっているのが多く認められている。切込み1㎜に相当する部分のすぐ外側⑧部分の拡大写真をみても，切刃部の状態がよくわかり，焼結粒子が1個1個認められ，上部にMg，Feがやや付着しているが，ほかの付着元素は認められないようである。

いま，図5.13上段に示す要領による線分析の結果をみれば図5.20，図5.21のようになる。すなわち図5.20は左側の①②③および④部分を通る線分析（分析のビーム径は約1μmであり，分析方向と直角方向に120μmの範囲を走査しているため，分析結果はいずれも120μm範囲の平均値を示している。）で，付着物が付いた領域ではWの濃度減少が大きくTiも同様に減少している。Coが低いのはむしろ切刃部より100～250μm程度までの付着物が付いていない領域である。これは100～250μmの範囲ではCoが切りくずによって持ち去られ，250μm程度から始まる付着物中に混入しているためと考えられる。付着物中にはWは少なく，Tiが少量はいり，Coは多く混入している。一般に，上部に付着物が付くと，その下の工具元素のX線強度はその付着物の厚さに対応して減少するのが普通である。しかし，Co強度があまり減少しないのは付着物中にCoがあるからと思われる。また，切刃部分ではCoおよびTiは少なくなっているが，Al，Mgは付着している。線分析結

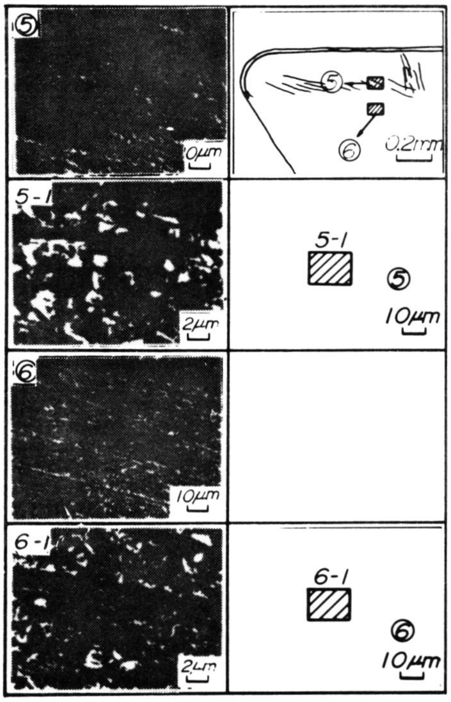


図 5.18　切込み終端近くの摩耗終端付近のEPMA観察

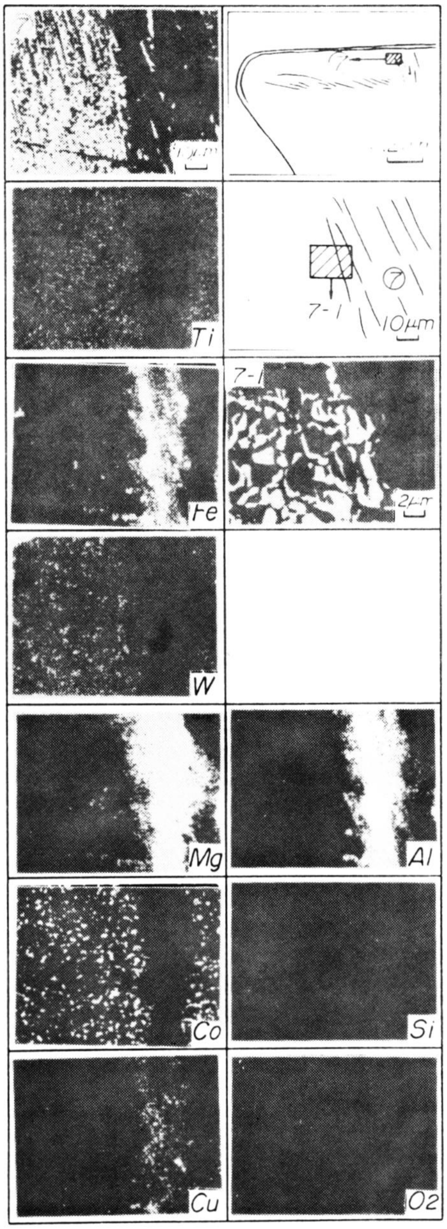


図 5.19　切込み端部のEPMA分析

果は500μmまでしか描いてないが，750～800μm程度まで Al，Mg，Cu，Zn が付着しており，付着物がとくに多いのは250～450μmの間である。付着物が多いところでは Al，Mg，Cu，Zn の濃度は同時に高くなり，少ないところではその逆になることから，付着物の組成は場所によらずほぼ一定とみてよい。また図 5.20と同様にW濃度は付着物のところでやや減少し，Ti の濃度変化はWの場合より少ないが，Co にはその傾向はみられない。この部分を③部分と比較した場合，Fe 酸化物はまだ十分に付着しておらず，この部分の特色として Mgの付着が多く，このことが Fe 酸化物の付着に対してなんらかの影響があるものと思われる。この場所より下方には④にみられたような付着物はみられなかった。

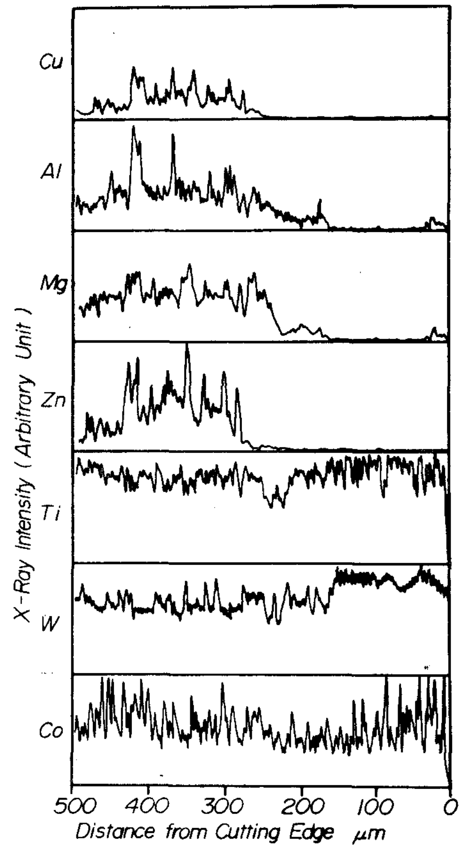


図 5.20　切込み 470μm付近の線分析結果

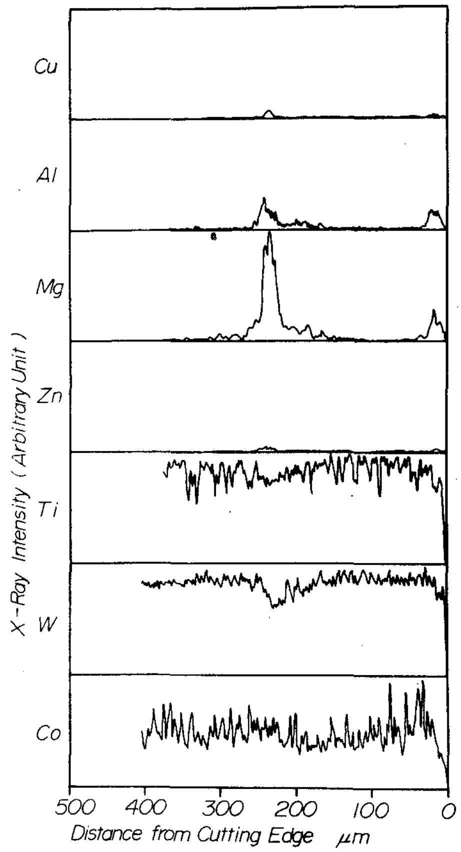


図 5.21　切込み 820μm付近の線分析結果

5．4．2　K10工具の場合

図5.13下段二つはK10工具におけるすくい面摩耗の全体像，その拡大像および拡大観察，元素面分析部分と線分析方向（この場合表面状態が一様であるため1個所のみ実施した。）を示す。切削条件はP10工具の場合と同じであり，逃げ面摩耗幅は35μm，すくい面のクレータ深さは 1μm とP10工具に比較して工具摩耗の進行が遅いことがわかる。K10工具もP10工具の場合と同様，摩耗終端および切込み相当部分に黒い付着物が付着しており，P10工具では摩耗終端を過ぎてからも一部にかなりの範囲にわたって付着物が観察されるが，K10工具では摩耗終端をすぎれば付着物はほとんど付いていない。切刃より20μm程度の幅に表面に工具研削痕が認められて摩耗が進行しない領域が認められ，この部分①をさらに拡大したのが図5.22である。摩耗開始部分を境として，それより上部では前記工具研削条痕，下部では切りくず流出方向に切りくずによる擦過痕が明瞭に認められ，さらにその一部の拡大部分1－1ではその境界部分の上下で Co およびWの元素分析にあま

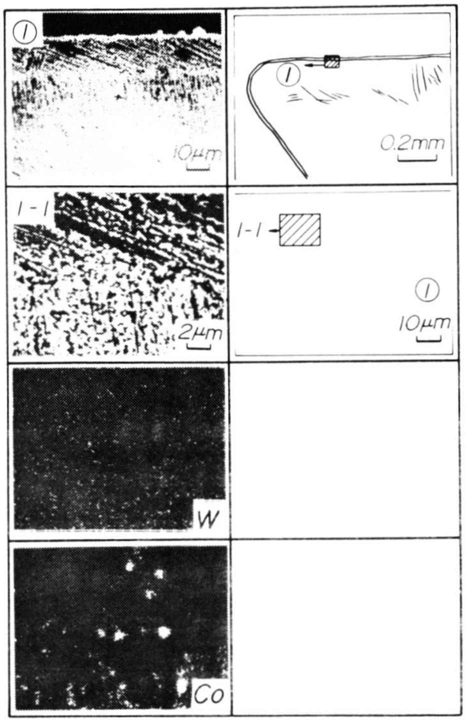


図 5.22　K 10工具の切刃中央部の EPMA 分析

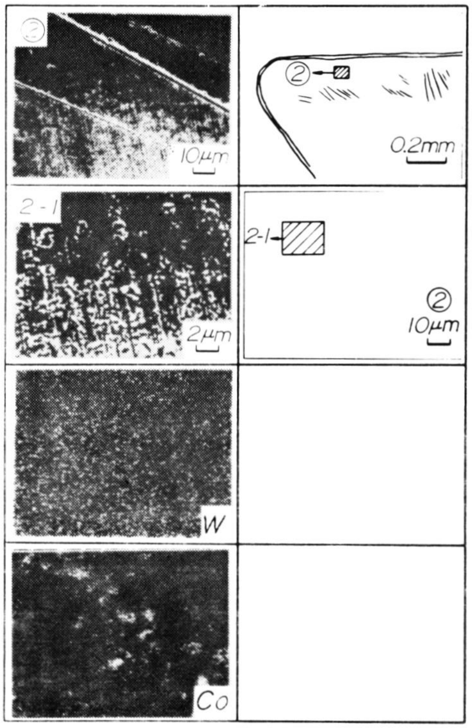


図 5.23　クレータ中央部の E PMA 分析

り差がない。このことは P 10工具では切刃から約 20μm 程度のあまり摩耗してない部分で Co 濃度の減少がみられ，工具粒子の脱落が認められたことと大きく違っている。さらに①の内側に当る②部分の拡大写真を示せば図 5.23のようになる。①部分に続いて切りくずの擦過痕が認められるが，その拡大部分 2 － 1 をみても切りくず擦過によって摩耗が進行し，かつ被削材中のとくに硬い微粒子による引掻き痕と思われる深い傷がついているのがわかる。しかし，P 10工具で認められたような粒子のひび割れはみられない。

図 5.24は摩耗終端部③の拡大像で黒い付着物がみられる。さらにその拡大像 3 － 1 および元素面分析をみてもわかるように，黒い付着物の大部分は Fe であり，O も認められ Fe の酸化物とみてよい。 Mg はあまり付着していず，これらの傾向は P 10の場合と同様で，黒い付着物の下方に Mg Zn, Cu，Al などが付着しており，これは前述の P 10工具の④部分に相当するものの，量的には P 10工具の場合より少ない。さらに図 5.25は切込み終端部分④の拡大写真を示すが，この場合も切込み終端部に黒い付着物が認められる。拡大写真 4 － 1 にみられるように，とくに擦過の激しい部分の条痕は切りくず流出方向と同じであり，切りくずによって付いたものとみられるが，P 10工具の終端部⑦でみられたような粒子のひび割れはみられない。この黒い付着物は拡大写真 4 － 2 にみら

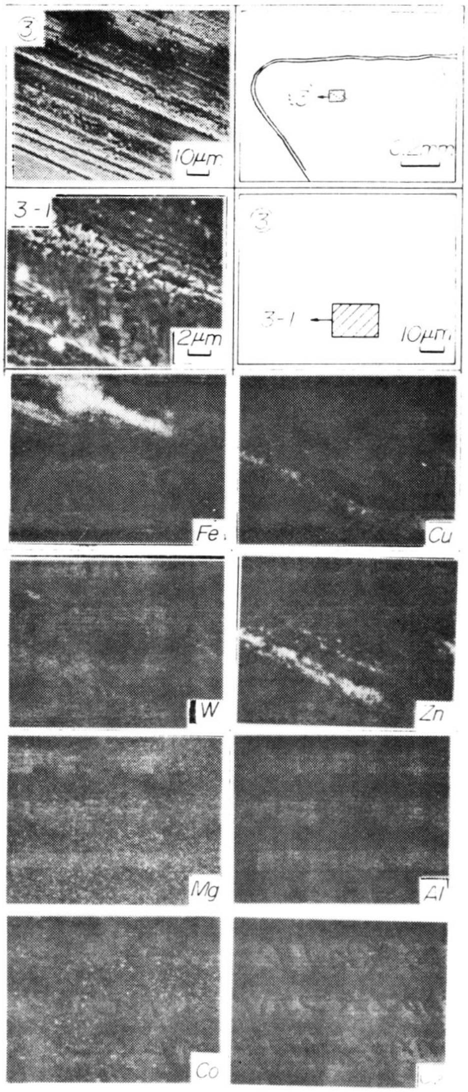


図 5.24　クレータ終端部のEPMA分析

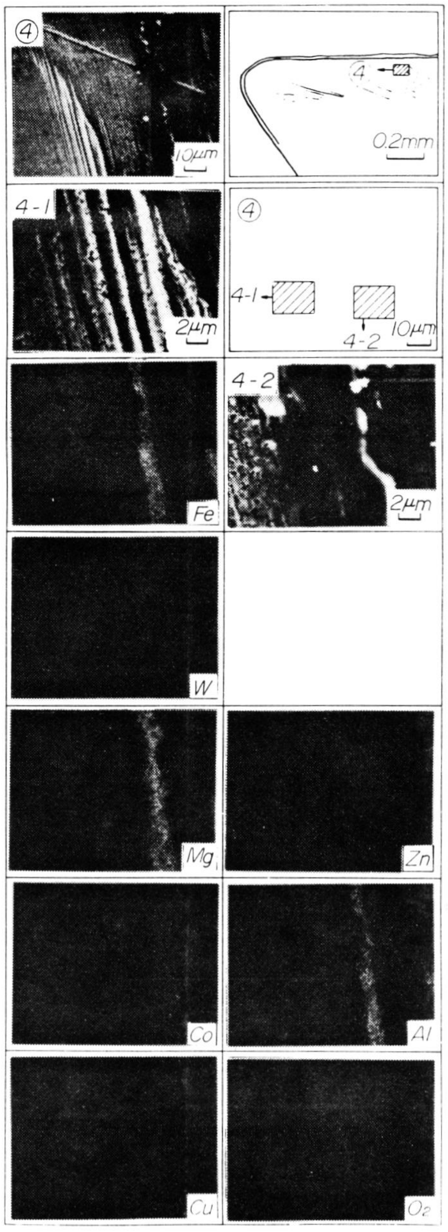


図 5.25　切込み終端部のEPMA分析

れるように酸化物状に付いている。4－1部分の元素面分析をみれば黒い部分に Fe, Al , Cu, O が付いており，図 5.24の③部分と比べれば Mg , Al は多くOも多いが， Zn は付着していず, Si は若干付着しているようである。したがって付着物としてはP 10工具の⑦部分と同様とみられる。

図 5.13下段に示す要領で線分析した結果を図 5.26に示す。P 10工具と同様付着物領域ではW濃度

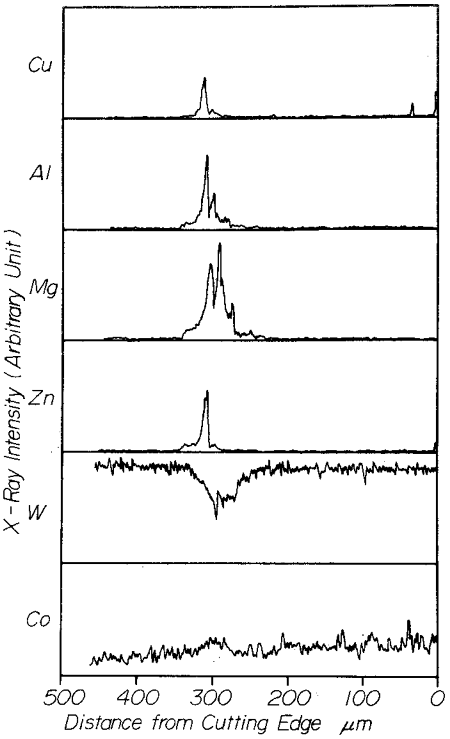


図 5.26 切込み 520μm付近の線分析結果

表 5.1 付着物成分の比較

	Black Deposits on Terminal Wear Parts	Mere Deposits of Terminal Wear Parts	Black Deposits on Terminal Edges according to Depth of Cut
PIO-Tool	Fe, O	Mg, Al, Cu, Zn	Fe, O, Mg, Al, Cu
	* ③	* ④	* ⑦
KIO-Tool	Fe, O	Mg, Al, Cu, Zn	Fe, O, Mg, Al, Cu
	* ③ Upper Parts	* ③ Lower Parts	* ④

* Location on Tool Face Shown in Fig I.

は減少しているが，Co 濃度はあまり変化していない。付着物の量はP 10工具の場合よりかなり少ないが，付着物の組成は図 5.20の場合の組成と近いようである。一方，切刃部分ではP 10工具の場合と異なり Co の減少は少なく，Cu, Zn はわずかに付着し， Al，Mg は付着していなかった。

5．4．3 検　　討

両工具ともそれぞれすくい面摩耗終端部および切込み相当部分に，湿式切削においてはみられなかった Fe 酸化物と思われる黒い付着物が付着しており，摩耗終端部の付着物と切込み相当部分の黒い付着物では元素分析の結果も異なっており，これらをまとめると表 5.1 のようになる。すなわち，摩耗終端部の黒い付着物とそれに続く単なる付着物は前述の7075材に考えられる組織中の硬い微粒子，例えば Mg_2Si, $FeAl_3$ などが工具摩耗の主役を果し，その他の組織中の各元素が付着物として残留し，切込み相当部分では各組織が一様に擦過しているもののようである。また，K 10工具では工具粒子の割れはほとんど認められなかったが，P 10工具ではひび割れがみられ，WCだけからできている粒子よりも，WC+TiC からなる粒子に割れが多くみられた。そしてK 10工具では前述したように切刃より 20μm 程度に摩耗がみられない領域があったが，P 10工具ではその部分の Co 濃度に減少がみられ，工具粒子の脱落がみられた。K 10工具では切刃上に Zn, Cu の付着がみられたが，P 10工具では Al，Mg，Fe の付着がみられた。

5．5 結　　言

以上超硬合金工具P 10及びK 10を使った7075−T6 材の湿式切削と乾式切削において，すくい面摩耗の見地から EPMA によって工具摩耗を検討した。その結果，湿式切削ではP 10，K 10両工具とも切刃付近では表面の荒れがひどく， Co が少なくなっていた。このため切刃部では，構成刃先

様の付着物が形成されるが，この付着物が脱落する際に凝着した炭化物粒子を持ち去る凝着摩耗機構が作用している。またクレータ摩耗面は表面が滑らかで Co が多くみられ，7075−T6材中の硬質微粒子によって摩耗が進行する引掻き摩耗機構が作用している。

乾式切削では，組織中の硬質微粒子，例えば $FeAl_3$ などが切りくずとして流出する際工具すくい面の引掻き摩耗の原因となり，Fe 酸化物が黒い付着物として摩耗終端部に付着している。そしてＰ種工具ではWC だけからできている粒子よりWC+ TiC からなる粒子に切削中に割れが多くみられた。

湿式切削，乾式切削のいずれにおいてもＰ10工具よりもＫ10工具の摩耗の進行が遅いことがわかった。

参　　考　　文　　献

1） L. F. Mondolfa ; Aluminum Alloys (Structure and Properties) Butter Worths Co., (1976), 847.

第６章　AC３A材の切削に関する超硬合金工具の摩耗機構

６．１　緒　　言

第５章において７０７５−Ｔ６ 材を超硬合金工具を使用して切削し，その場合の工具摩耗機構を示したが，７０７５−Ｔ６ 材は硬いが珪素粒子をわずかしか含まないため比較的工具摩耗が小さく，工具付着物も少なく，切りくず処理も容易な合金である。そこで本章においては柔かいが比較的工具摩耗の激しいＡＣ３Ａ材をＰ分類及びＫ分類の超硬合金工具を用いて切削し，この合金における工具摩耗発生機構を明らかにすることを目的とした。

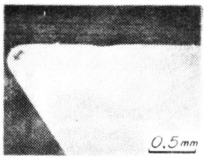
６．２　実験方法

実験に供した試料は第２章，第４章において使用した試料と同一のＡＣ３Ａ材（シルミン）である。使用工具は第５章において使用した工具と同じ形状，材質であり，他の実験様式も全て第５章と同じである。

６．３　ＡＣ３Ａ材の湿式切削

６．３．１　Ｐ１０工具の場合

削り速度 $v = 2\,\mathrm{m/s}$，切削時間 $t = 90\,\mathrm{min}$ の条件でAC3A 材を低速湿式切削した場合に生ずる工具摩耗の例を図6.１の左側に示す。高速度鋼工具の場合に比べて摩耗の進行ははるかに遅いものの，切込みに相当する部分に境界摩耗が発達しており，程度の差はあるが刃先先端から約 1.5 mm，切刃から 0.5mm 程度の長方形領域に摩耗が生じている。切刃先端から順次各部分を拡大してみれば，広い範囲にわたって表面は荒れて摩耗している。境界摩耗の開口幅は約 0.3 mm，すくい面側からみた境界摩耗の深さは切刃から約３０ μm である。



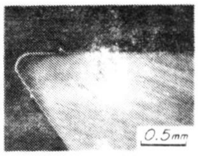


図6.１　AC3A材の湿式切削後のすくい面摩耗状況（左９０分後のＰ１０工具，右１６０分後のＫ１０工具）

刃先先端部の拡大写真をみれば一面ざらざらとして，Ａlの付着は比較的多く，それにもましてＳｉの付着が多く，Co 濃度は非常に低下している。同様に切刃中央部分も拡大写真図6.２に示されるように表面は荒れた面になっており，Ａl の付着は少ないが，Ｓｉが切刃先に多く，Ｃｏは非常に少なくなっている。このように表面の荒れがひどいこと，Co が非常に少なくなっていることから，焼結粒子が持ち去られて摩耗が進行するものとみられる。また切刃部分でＳｉ が多く分布していること，P10 工具に多く含まれているＴｉ と被削材中のＳｉ とが同族元素であることおよびこのＳｉ とバインダのＣｏ とが結合しやすいことから，切刃部分では切削熱の影響もあってＳｉ が焼結粒子間に侵入し，粒間がもろくなったところを切りくずが擦過して摩耗が進行する機溝が考えられる。図6.３は境界摩耗開口部の

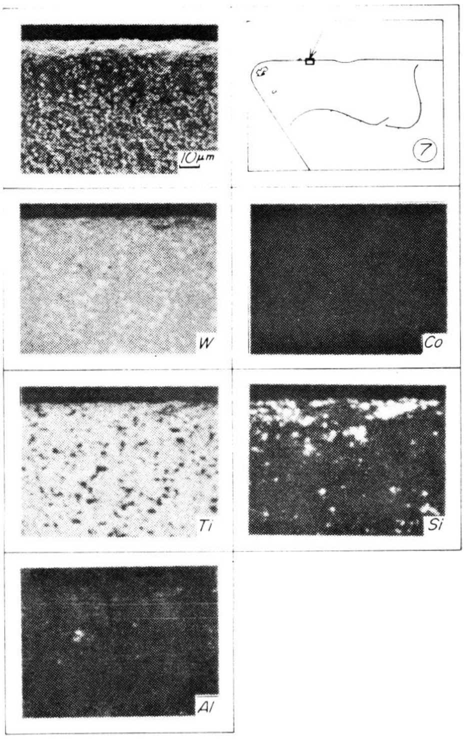


図 6. 2　P 1 0 工具の切刃中央部のEPMA分析

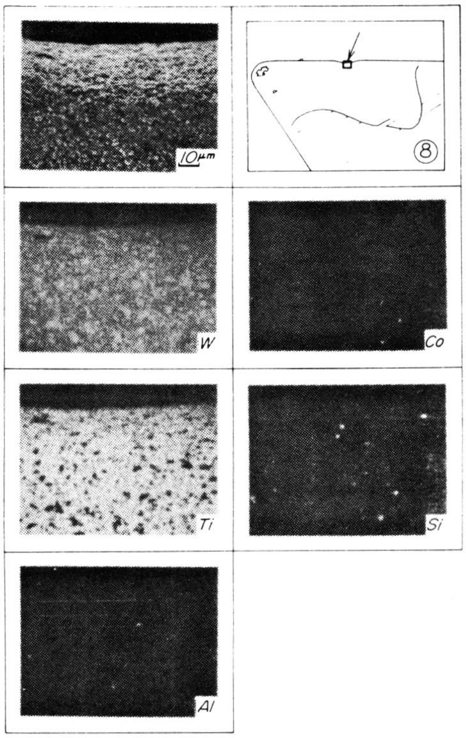


図 6. 3　境界摩耗部のEPMA分析

拡大写真であるが，ここでもAl ，Co の分布はなく，S i も比較的少ない。この部分では切りくず端面が工具面にぶつかる衝撃のため生ずる微細なチッピングによって摩耗が進行するようである。摩耗面と非摩耗面との境界付近をみれば，表面が荒れてざらざらした面の中に一部平らな表面部分がみられ，そこにはCo が多い。この平らな面は工具研削のままの面であり，荒れた面はP 10 工具では切削熱の影響で表面付近のCo が切りくずによって持ち去られるものと考えられる。S i は摩耗面の側にややみられるものの付着量は少なく，A l はみられなかった。切削に関与しない工具面では全体に切削したままの平らな面が多く，この部分にはCo も多い。

図 6. 4 上段は切刃に直角に切刃先端部Ⓐ，切刃中央部Ⓑおよび境界摩耗部Ⓒの特徴的な 3 カ所で行なった線分析の結果である。ⒶではCo の分布は非常に少いが，これは走査範囲がすべて摩耗面となっており，Co が焼結粒子脱落とともに失われるためである。それに対しⒷ，Ⓒ範囲では切刃から0.6～0.7㎜の摩耗域をぬけるあたりでCo が増加しており，前述の未摩耗部分にCoが 多かったことと一致している。S i 分布はⒶ，Ⓑ分析では切刃部にまず分布が認められ，摩耗面では特に決まって集まるところはなくランダムに分布していた。Ⓒ分析では境界摩耗の終端部分にわずか S i の付着が認められる程度である。A l はⒶ，Ⓑ分析では切刃の後方 0.1 ～ 0.2 ㎜ の位置で付着が認められたが，これは切削中すくい面を覆っている付着物前縁部の成分が切りくず流出に伴って工具面に出きたくぼみ内に埋め込まれ，腐食除去の際溶解しきれず残ったためである。境界摩耗部分Ⓒ

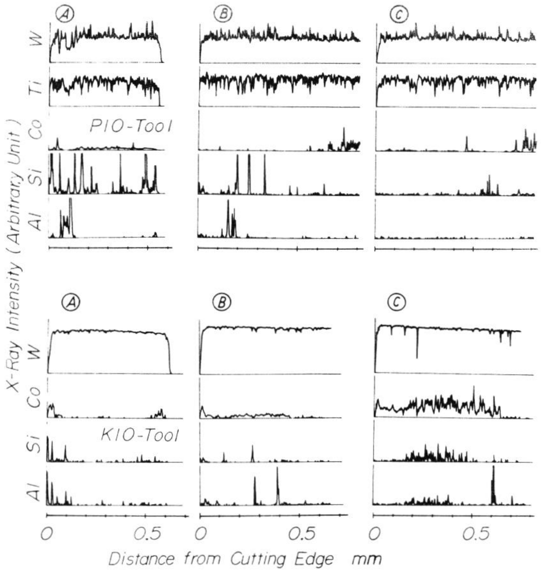


図6.4　すくい面線分析結果（上段P10工具，下段K10工具）

にはＳｉの場合と同様Ａｌはみられない。

６．３．２　K10工具の場合

削り速度$v=2$ｍ／ｓ，切削時間$t=$ 160ｍｉｎの長時間湿式切削した際に生ずる工具摩耗は図 6.1 右側のようになる。K10 工具として特に目立つ工具摩耗は発生しなかったが，切込付近に高速度鋼工具に生じた境界摩耗と同様な表面性状の変化した部分がみられ，切刃先端から切込みより0.2㎜程度の外側までの範囲で写真では白く写っている摩耗部分がみられた。摩耗部分は全体として表面が荒れてざらざらした面となり，境界摩耗部分を除いて砥石研削痕が残り，摩耗が極めて少ないことがわかる。切刃先端部の拡大写真をみれば，どこも荒れた表面状態でＣｏが切刃部分にあり，Ａｌ，Ｓｉの付着はなかった。図6.5は切刃中央部⑤の範囲の拡大写真である。切刃に沿った約２０μm の幅の部分がその下方部分に比較していくぶん黒くなっており，この部分にＣｏも多い。Al, SiはCoの分布域の下方に同程度の幅で分布しているが，Ｐ１０ 工具の線分析で切刃から0.1～0.2㎜に多かったＡｌ，Ｓｉの分布と同様な原因で生じたものと思われる。Ｃｏが刃先部分約２０μm の幅に多くみられることからこの位置を境にして上方には付着物がついて切りくずの擦過から工具面を保護するが，下方では切りくずの擦過によってＣｏがもち去られるもののようである。

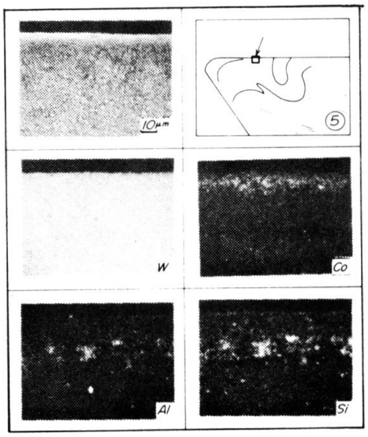


図6.5 K10工具の切刃中央部のEPMA分析

切刃部分の境界摩耗面をみれば平滑になっており，その中央部分を拡大撮影した図6.6をみても，表面は平滑で全面にわたってＣｏも多く存在し，切刃部分の状態は７０７５－Ｔ6材切削の際に生ずるクレータ面と類似している。Ｓｉ はＣｏと同様に付着し，Ｓｉ がＣｏと結合しやすいことを示しているが，切刃からいくぶん離れているため切りくずに擦過される頻度も少なく，付着物がうすく発生するとみられる。また境界摩耗終端部では切刃からかなり離れており，Ｃｏ，Ｓｉの分布もみられず砥石研削条痕が認められる。図5.30 下段はすくい面上の線分析の結果である。これからみても切刃部分と境界摩耗部分でＣｏ

が多く認められる。Al ，Si の分析はⒶⒷ線分布では切刃部分，Ⓒでは境界摩耗部分のように摩耗のためくぼみができ，かつ切りくずが衝突する部分に多いことがわかる。

6．3．3　検　　討

超硬合金 P10，K10 両工具で AC3A 材の湿式切削を実施した結果は，高速度鋼工具による場合と同様の境界摩耗がみられ，切刃先端から切込みの位置までの範囲に切削終了時に付着物が付いた点などの被削材の挙動は，工具材質によって変わらなかった。P10 工具では工具材質中に被削材中の Si と性質の似た Ti が多いこと，表面粒子の脱落の際 Co が持ち去られて摩耗しやすくなっているが，K10工具では粒間結合力が大きく，引掻き摩耗が生じにくくなっているものと思われる。

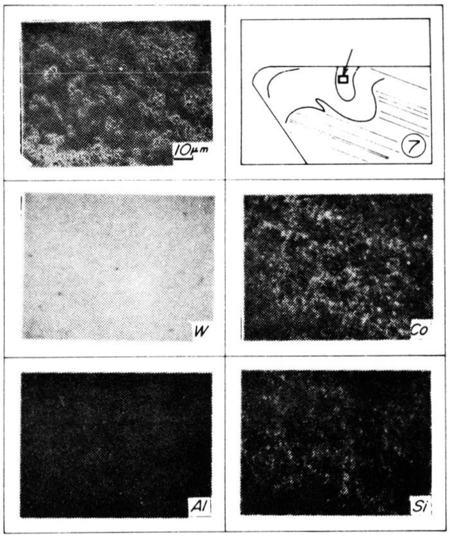


図 6. 6　切込み終端部のＥＰＭＡ分析

6．4　ＡＣ３Ａ材の乾式切削

6．4．1　Ｐ１０工具の場合

削り速度 $v = 9$ m／s，切削時間 $t = 7$ min の切削条件でAC3A 材をP10 工具で切削した場合のすくい面摩耗の全体像と拡大観察，元素面分析部分（図中の番号が後掲写真中の部位番号を示す。）および線分析方向（Ⓐ，Ⓑ，Ⓒで示す。）を図 6. 7 に示す。

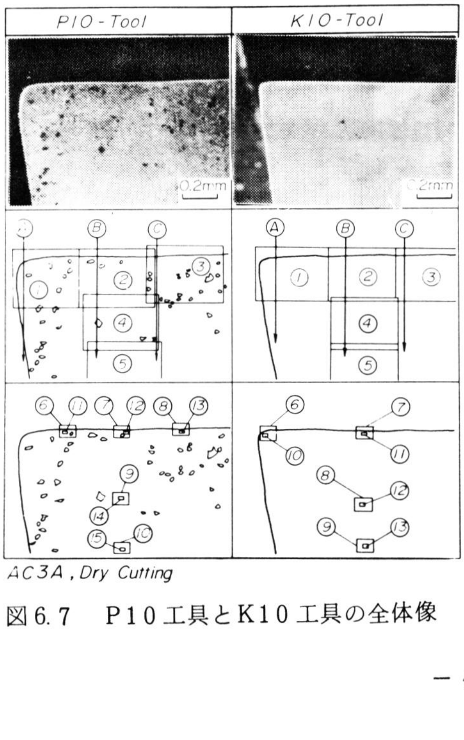


図 6. 7　P10 工具とK10 工具の全体像

この時の逃げ面摩耗幅は 160 μm，クレータ深さは 1.5 μmである。写真にみるように切刃より約 400 μmの領域幅で工具摩耗が進行し，その摩耗形態は後述の図 6. 8 の付図に示すように典形的なクレータの発生までにはいたってはいないが，炭化物粒子の直径が 1 μm 前後であることを考慮すれば，摩耗現象の把握には十分であると思われる。工具表面に多数付着している黒い付着物は炭素が主成分であり，後述のようにTiC粒子の Ti が被削材のアルミニウム中へ拡散するさいに遊離した炭素の集合体とみられ，この種の付着物はK種工具では観察され

されなかった。

図6.8はすくい面摩耗部分のうち，切刃端近傍約300μmの領域幅の中で工具先端より切込みに相当する部分にかけての①，②，③部分，その中央付近の②より内部にはいった切刃より300〜600μmの部分④およびさらに内側の摩耗終端部とみられる約600μm以上の部分⑤の拡大写真である。また右下の付図は図6.7のⒷ方向の工具表面形状を表面あらさ計（TALYSURF 4型，触針先端半径12.5μm）によって測定した結果である。あらさ計から読み取れるクレータの最大深さは約1.5μmであるが，これは平均的な深さであり，部分的には写真①〜③にみるように触針のはいらない凹みが多数あり，その深さは3〜5μm程度である。このように①〜③部分では局部的に掘り起された摩耗箇所が点在し，④部分では摩耗部分はやや少なく，⑤部分では表面的にはほとんど摩耗していないようにみられる。

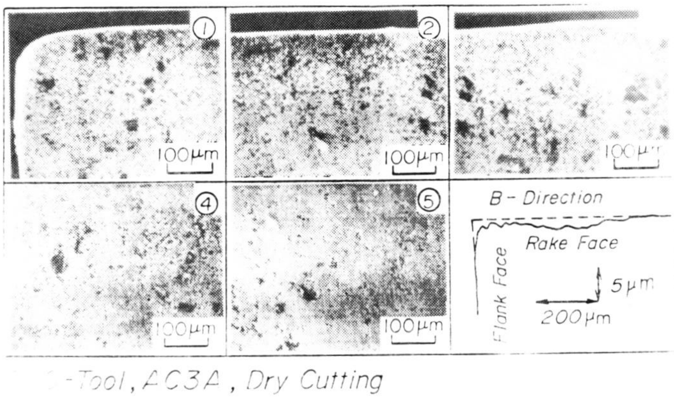


図6.8　P10工具のすくい面摩耗とその形状

ここで，①部分の一部を拡大した⑥部分を示した図6.9をみれば，切刃部より約10μmの幅で摩耗によって角がだれ，その内側で全体として切りくず擦過によって炭化物粒子がばらばらにえぐり取られた摩耗部分が多いのがわかる。特に大きくえぐられたと思われる凹みに相当する部分で工具成分のW，Ti，とくにCoが減少しているのがわかり，このような部分には必ずCの付着が認められる。そしてSiは切刃部に多く，逃げ面摩耗にはSiが大きく作用していることがうかがえる。さらに，⑥部分の中央部を拡大してみれば図6.10の⑪のようになり，炭化物粒子の脱落状態がよくわかる。前記②部分の切刃中央部⑦部分を拡大すれば図6.11となる。⑥部分より摩耗部分はやや少なくなっているものの，各所に炭化物粒子の脱落痕が認められ，また③部分の一部切刃中央部の拡大像⑧をみても同様な摩耗が

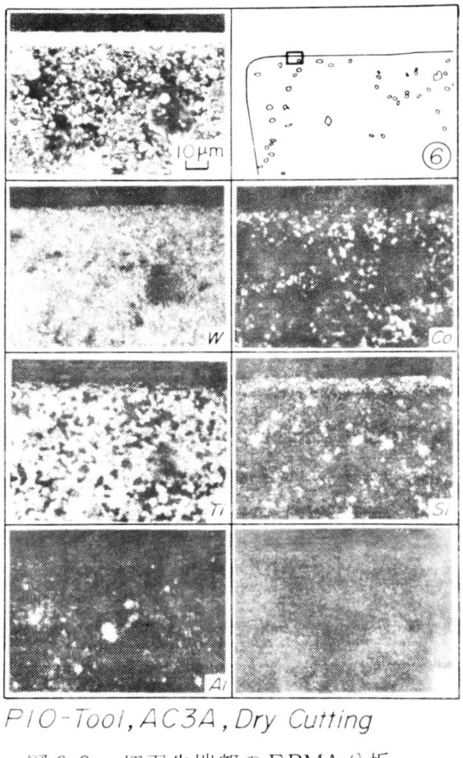
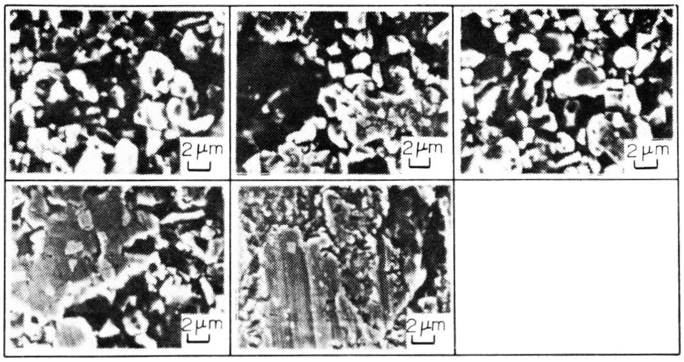


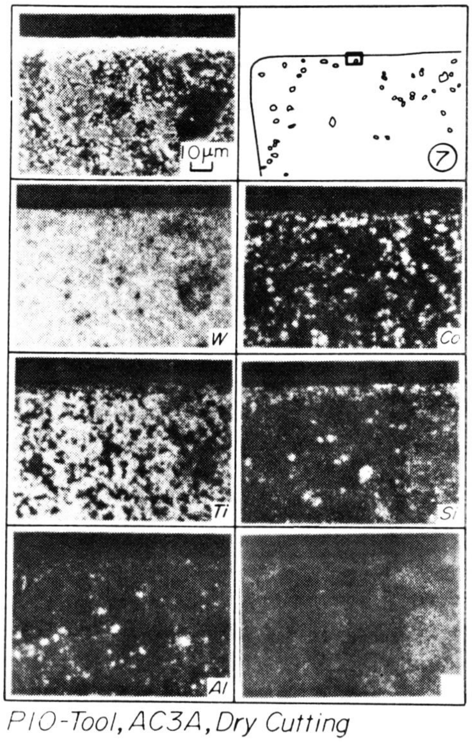
図6.9　切刃先端部のEPMA分析



P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図6.10　各部分の表面状態

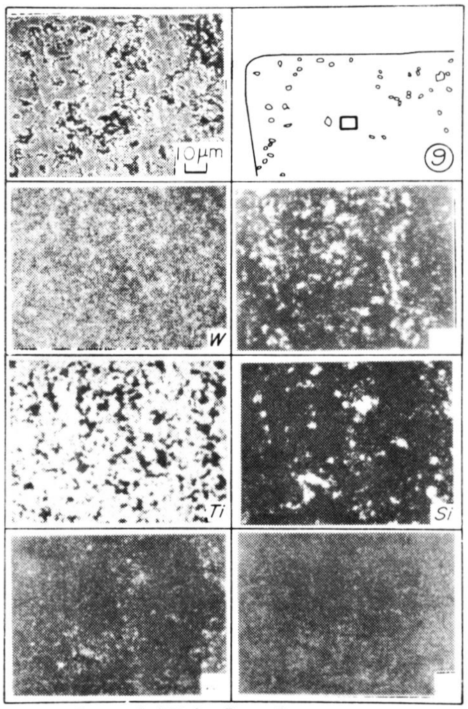
認められる。ここで⑦，⑧部分のほぼ中央部をさらに拡大すれば図6.10中のそれぞれ⑫，⑬となり，いずれも⑪の場合と同様な炭化物粒子の脱落状態を示している。これら⑥，⑦，⑧部分で共通していることはSi が切刃部に付着していること　炭化物粒子の大きな脱落部分と思われるところでW，Ti とくにCo が少ないこと，およびCが一様に付着していることである。この切刃部では図 6.8 付図に示される形状で摩耗しているので，切削中はこの部分に被削材が詰まり，切刃部から約100μm の幅で切刃に沿ったプラトー部が形成され，この上を擦過した切りくずがプラトー部後方から直接工具に接触してクレータを形成する。このためプラトー部では切削熱のため工具材質中の Co が堆積した被削材中へ拡散することが考えられ，このことは図6.9，6.11にみられる凹み部分で Co が著しく減少している現象とよく一致している。この部分での摩耗は被削材中の硬質粒子による引掻き作用ではなく，むしろプラトー部に付着している被削材へ Co の拡散が生じ，この部分の焼結強度が低下し，やがて粒子個々の単位で脱落が起こる形で進行すると思われる。このことは図6.10の⑪，⑫，⑬で炭化物粒子にくずれた粒子がなく1個，1個が丸味を帯び，その間にすきまが認められることより明らかとみてよい。



P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

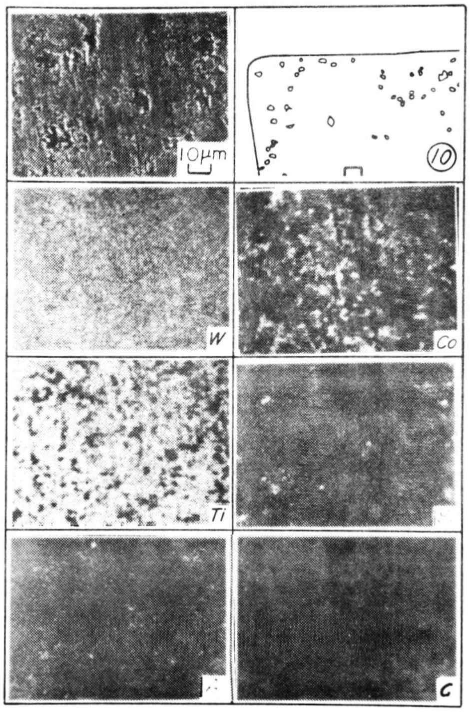
図6.11　切刃中央部のＥＰＭＡ分析

比較的摩耗部分が少なくなっている④部分のほぼ中央部⑨を拡大した写真を図6.12に示す。摩耗面には切りくずの擦過痕があり，炭化物粒子が掘り起されたと思われる凹み部分に Si が多いこと，後述の未摩耗部分⑩に比べて Co が少ないことなど特徴的である。⑨の中央部をさらに拡大すれば，図6.10中の⑭となり，炭化物粒子の境目がしだいにはっきりし，やがて掘り起される様相がよくわかる。写真左側の平担部分は，被削材中の硬質粒子によって引掻き取られた様相を示し，右側部分



P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図 6.12　摩耗終端部のEPMA分析



P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図 6.13　未摩耗部分のEPMA分析

では切刃部の摩耗と同じ傾向を示している。また，⑤部分のほぼ中央⑩部分を拡大すれば図 6.13となり，工具研削時の条痕が明らかに残っており，研削による炭化物粒子の脱落痕と思われる部分以外ではCo も比較的全面に分布している。その中央部⑮をさらに拡大した図 6.10の⑮をみても未摩耗部分の工具表面状況がよくわかる。切刃から100 ～ 400 μm離れたクレータ部分では主に引掻きによる摩耗が進行するが，この部分で局部的に工具粒子が掘り起されたり，あるいは工具研削条痕の凹みに切りくずが流れこむとCoの拡散が生じ，写真⑭の右側にみられるような摩耗が生ずるものと思われる。

一方，図 6.14は生成された切りくず裏面の拡大像で，切りくずの流出方向は写真中右上りの対角線方向であるが，写真にみられる流れの間隔は図 6.12にみられる炭化物粒子の大きさにほぼ一致しており，硬い珪素粒子などがTiC，WC の粒子をわずかに引掻き，その後を軟かい活性なアルミニュウムの新生面が擦過してメカノケミカル的に摩耗は進行するようである。また，TiC 粒子のTi とAlは親和性が強く，WC よりTiCの方が硬いにも拘わらず摩耗が進行すると思われる。このため粒子のCが遊離され図 6. 7 にみられるように工具すくい面表面に付着したとみられる。この現象は3章の図 3. 9 のCについての特性X線像において工具と被削材付着物との境界にCの粒子が観察されることと一致すると思われる。なお，切りくず裏面からはW，Ti，Co などの工具元素の検出

はできなかった。

工具付着物について調べた結果を図6.15上段に示す。線分析方向は図6.7のⒷ方向で，電子線径は約1 μmである。図よりCoは切刃から約300 μmまでは少ないが，その後は除々に増大している。TiとWは150 μm程度まではやや少ないが，それ以後はほぼ一定値を示し，ともに同じ傾向を示している。

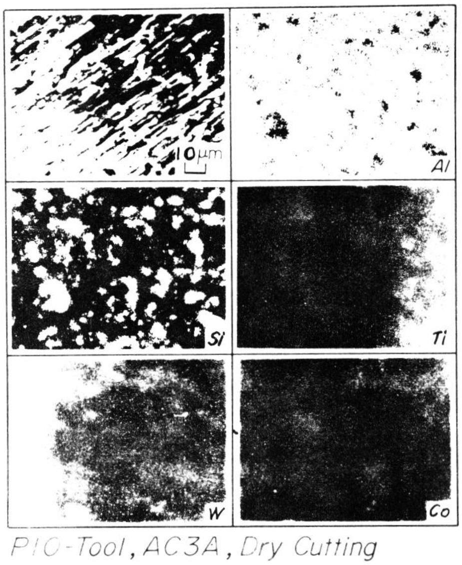


図6.14　切屑裏面のＥＰＭＡ分析

Ｓｉは切刃部分に多く付着し600 μmを過る付近からやや少なめになっているが，その後もずっと付着している。Alは切刃部分にSiほど多くは付いていないが，それ以外はSiの付着傾向と似ている。線分析は800 μmのところで止めてあるが，約850 μmまで付着が認められた。なお，Ⓐ，Ⓒの結果もⒷと似た傾向を示した。

6．4．2　Ｋ10工具の場合

図6.7右側はＰ10工具の場合と同様にＫ10工具におけるすくい面摩耗の全体像と拡大観察，元素面分析部分及び線分析方向を示す説明図である。この場合の切削条件は削り速度 $v = 9$ m／s，切削時間 $t = 12$ minであり，逃げ面摩耗幅は45 μm，すくい面クレータ摩耗深さは1 μmであった。写真にみるようにＰ10工具に比べて工具面もきれいで，摩耗も比較的少ないことがわかる。Ｐ10工具の場合と同様，切刃部①，②，③及びやや内部の④，⑤部分の拡大写真を図6.16に示す。掘り起された凹み

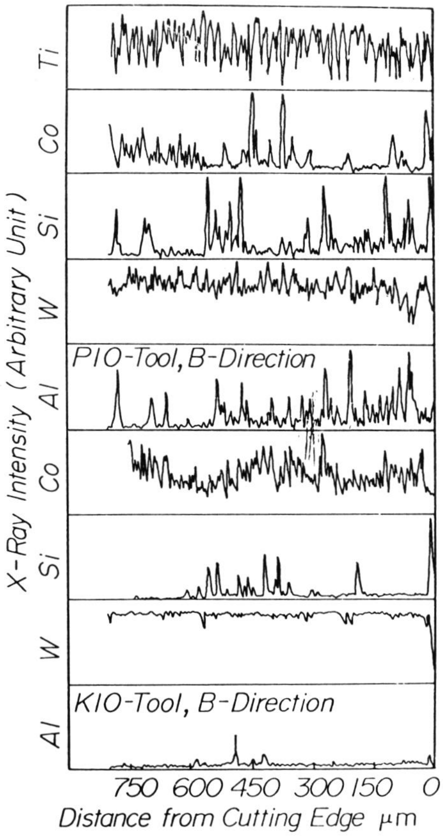
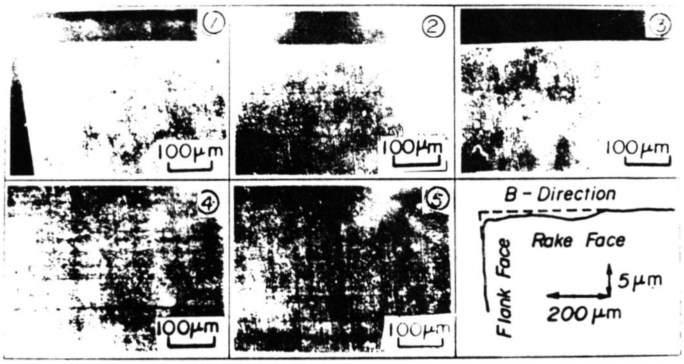


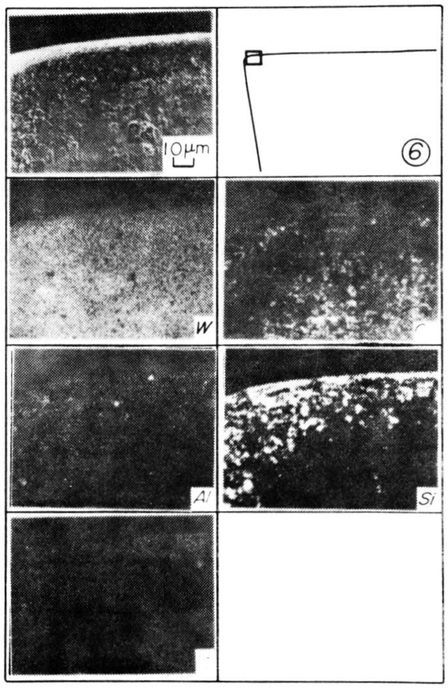
図6.15　Ｐ10工具とＫ10工具の線分析

部分はP10 工具よりも少なく，炭素の付着もないようである。右下に示す表面形状より，クレータ深さは約1μm とP10 工具に比べて小さく，クレータ幅も小さくなっている。しかし，摩耗量は少ないが表面形状はP10 工具とほぼ同様であることから，摩耗形態も類似しているとみてよい。このうち①部分中とくに摩耗が激しい⑥部分の拡大像は図6.17のようになり，P10 工具の場合より炭化物粒子が細かく脱落しているようで，とくに切刃より約 20μm の領域幅で摩耗が著しく，摩耗部分にSi，Al が多く付着し，この部分ではCo が少なくなっている。⑥部分中摩耗の著しい箇所をさらに拡大すれば図6.18 ⑩のようになり，炭化物粒子が全体として細かく，その脱落もP10 工具の場合より極めて小さくなっている。この場合も切刃部分に被削材によるプラトー部が形成され，その付着物中に切削熱によりCo の拡散が生じ，その結果炭化物粒子の結合力が低下し，摩耗が進行するものと思われる。前記②部分の中央切刃付近⑦を拡大した図6.19をみても，切刃より約20 μm 程度の幅の領域で摩耗が著しく，その部分でSi Al が多く，Co が少ない。それをさらに拡大した図6.18中の⑪をみても⑩の場合ほどではないが，炭



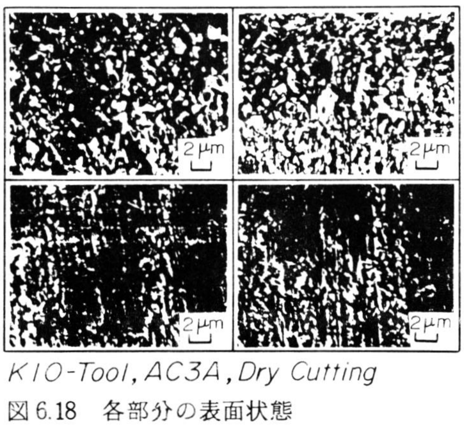
K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図6.16　K10工具のすくい面摩耗とその形状



K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図6.17　切刃先端部のＥＰＭＡ分析

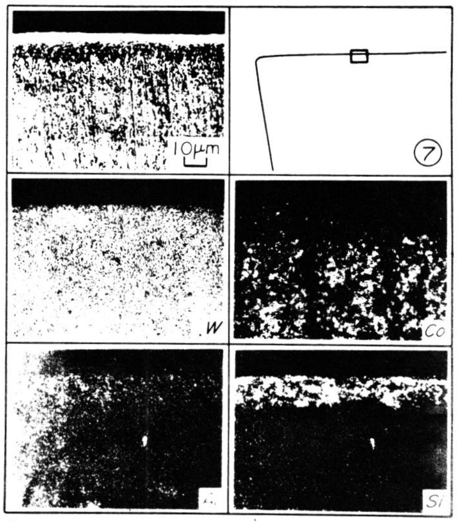


K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図6.18　各部分の表面状態

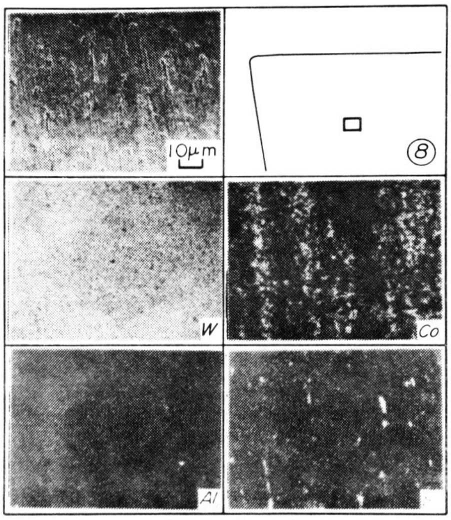
化物粒子の脱落状態がよくわかる。この写真上半分では⑩と同様なCoの拡散による摩耗が進行しているが，下半分ではP10工具の場合の図6.10の一部にみられた平担部と同じ表面状態で，摩耗の初期段階と考えられる。

工具摩耗が極めて少ないと思われる④部分の中央部⑧を拡大すれば図6.20となり，写真中，上下方向に工具研削時の条痕と斜め左上方から右下方にかけての切りくず擦過による条痕とが交差して認められ，工具研削傷と思われる部分にSi が付着している。さらにその中央部と思われる部分は，図6.18 ⑫のようになり，斜めに走った切りくず擦過痕とほとんど摩耗していない部分⑬の中にみられる上下方向の研削条痕のちがいをはっきり示している。すなわち，⑫の場合の傷は比較的浅く，⑬では砥粒がかなり強く研削した跡がみられる。⑫では切りくずが擦過して⑬にみられる条痕を除々に削り取り，表面がいくぶんだれた状態で滑らかになり，P10 工具の場合と同様に主として硬い珪素粒子などによる引掻きと，軟かいアルミニウムとの交互の接触によるメカノケミカル的な摩耗が進行すると思われる。この場合も擦過する切りくず中へのCoの拡散は考えられるが，引掻きによる作用の方が大きいと思われる。



K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図6.19　切刃中央部のEPMA分析



K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

図6.20　未摩耗部分のEPMA分析

工具付着物の線分析結果は図6.15下段のようになる。Coは330μm まで少しづつ減少した後増加して400μm前後から再び減少し，600μmを過ぎる付近から増加している。Wは切刃部で少し減少しているようであるが，その後はほぼ一定の値を示している。SiはP10工具の場合と同様に切刃部で多く，クレータ後法の300～600μm付近にも比較的多くみられ，Alはほぼ600μm まで一様に付着しており，その後は少なくなっている。

6．4．3 検　　討

両工具とも，切刃部においてはCoの拡散によると思われる焼結粒子の脱落，クレータ部においては硬い珪素粒子などの引掻き作用による摩耗，そして部分的に掘り起された凹みでは切刃部と同様な形態で摩耗が進行すると思われる。このような摩耗は展伸材7075－T6材の乾式切削でも観察されたが，湿式切削では観察されなかった。これは湿式切削では切削温度が高くならないためで、乾式切削では700～900Kと切削温度も高く，切りくずも活性であるためCoの拡散あるいはSiとの結合が起ると考えられる。[1),2)] このため工具表面のCo濃度の変化を知ることは摩耗機構を考える上で極めて重要である。いま電子線径を約70 μmと大きくして図6.15に示されたとほぼ同じ場所を走査して図6.21を得た。（ビーム径が大きいため切刃付近での分析精度は良くない。）P10工具ではCo強度はほぼクレータの最も深いと思われる300μmすぎまで除々に減少した後，クレータが完全に終る500μmまでやや増加，クレータ後方の付着物の多いところで減少，付着量が最も多い部分をすぎて除々に増加。その後付着物が全くなくなる850μmまで増加してほぼ一定値をとるようになる。すなわちCo強度は摩耗部分及び付着物の付いた部分で減少していることがわかる。Coが減少することは焼結強度の低下であり，表面的にはほとんど摩耗していないクレータ後方でも強度が低下していることがわかる。W，Tiも切刃からクレータにかけてやや減少しているものの，Coほどではなく，クレータ後方の付着物領域での減少もわずかである。

K10工具でも同様な傾向がみられるが，P10工具よりも摩耗が少ないため，切刃からクレータ底までのCoの減少は少なく，クレータ後方の付着物も少ないため，この部分におけるCo量もP10工具よりは相対的に多くなっている。前述の写真のように炭化物粒子の大きさはK10工具の方が細かく，残存Co量もP10工具よりも多くなることもK10工具の耐摩耗性が良い原因の1つと考えられる。

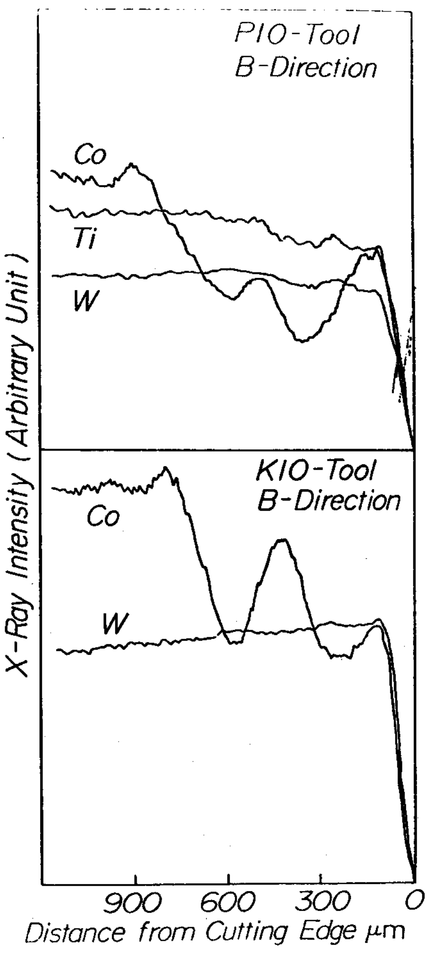


図6.21　X線ビーム径を太くした場合のP10工具とK10工具の線分析

6．5 考　　察

工具摩耗状況をみれば，いずれの場合の切削においても切刃部分に付着物が付きプラトー部を形成している部分，それに続く切りくず擦過によるクレータ部分，さら

にクレータ終端部の付着部分と大きく3つの部分に分けることができる。プラトー部分では付着物が切刃をおおい切りくずが直接工具に接触しないため，引掻きによる摩耗は生ぜず，Co，Ti のアルミニウム中への拡散および Co と Si との結合により，結合力の低下した炭化物粒子が個々の単位で脱落していく形態で摩耗が進行していくと考えられる。クレータ部においては直接切りくずが擦過するため，被削材中の硬い珪素粒子や，$FeAl_3$，Mg_2Si 等の金属間化合物による引掻きと柔らかく活性な新生面をもつアルミニウムとがかなりの圧力で交互にくりかえし擦過することによりメカノケミカル的に摩耗は進行すると考えられる。クレータ終端部では活性な切りくずの一部が付着物として工具面に凝着し，Co の拡散による結合力の低下が生じ，切りくずが工具面から離れていくときの力で付着物が脱落する時にいっしょに表面粒子を個々の単位で持ちさるものと考えられる。

一方，P10工具とK10工具を比較すると，P10工具では TiC とWC の体積比はほぼ1：1程度であり粒径が1～3μm，K10工具ではほとんどWC粒子であり粒径は1μm以下で，いずれも Co で焼結されているが，K10工具の粒径が小さく表面積も多いためP10工具の約1.5倍程度の Co が使用されている。このため Co の拡散による結合力の低下に対してK10工具が有利である。しかしCo 量が一定量以上増えると硬さの低下をまねき悪くなると思われる。またWよりもTi はアルミニウムと親和性があるため付着物中，切りくず中に拡散し，とくにクレータ部におけるメカノケミカル的な摩耗において著しいと思われる。このため TiC の硬さは$H_V \fallingdotseq 3170$とWCの$H_V \fallingdotseq 1720$より硬いにも拘わらず摩耗が進行すると考えられる。7075－T6材のように硬い材料の高速切削においては切削温度がかなり高くなるため粒子の熱伝導率のちがいも大きく作用すると考えられる。すなわち TiC の熱伝導率は0.21W／(m・k)，WCは1.21W／(m・k)と大きく異なり TiC とWC の両者をまぜて作られているP10 工具では熱的ひずみが大きくなり炭化物粒子に割れが入ったと考えられこの点でもK10 工具が良いようである。

6．6 結　　言

以上超硬合金工具 P10 およびK10 を使用したAC3A材の湿式切削と乾式切削において，すくい面摩耗の見地から EPMA によって工具摩耗を検討した。その結果，湿式切削では両工具とも境界摩耗が認められ，P工具の境界摩耗面では切りくず端面がぶつかる衝撃によって焼結粒子間の結合が破壊されるため，表面の荒れがひどく，焼結粒子が持ち去られると同時に結合剤の Co も持ち去られるため，この部分では Co が少なくなっている。K10 工具の境界摩耗面では表面が滑らかで Co が多くみられ，けい素粒子等による引掻き摩耗機構が作用している。

乾式切削においては両工具とも切刃部およびすくい面上の掘り起された窪みでは，Coの拡散による炭化物粒子の脱落が観察され，クレータ部では被削材中の硬いけい素粒子などの引掻きによる摩耗の進行が観察された。工具表面に残存している Co 量は P10工具より K10 工具の方が多く認

められ，Ｐ10 工具よりもＫ10 工具の摩耗の進行が遅いことがわかった。

参　考　文　献

1）　大庫和孝，中島耕一，粟野泰吉；精密機械，41，4（1975）369.

2）　C，Hauser；Wear，62，1（1980）59.

第７章　被削材の添加成分が工具摩耗に及ぼす影響

７．１　緒　　　言

Ａl － Si 系鋳造合金の被削性については種々の検討が行なわれており,[1)～6)] 工具摩耗を少なくするためには，合金中のけい素粒子をなるべく細かくして地質中に散在させれば有利であることが明らかにされている。このことは合金の機械的性質の向上にも有利であるため，通常改良処理を行なって使用されることが多い。従来，この改良処理にはNa ，Ｐ，Ｓ等が用いられていたが,[7),8)] 添加効果の持続時間が短い欠点があるため，最近では添加効果の持続時間の長いSr ，　　等が使用される傾向にある。[9),10)] これらの元素を使用した材料は自動車のホイル等に使用され，その需要は増大しているが，被削性への影響については，未だ調べられていない現状である。

本章においては，Al－Si 合金にSr，Al － Si －Mg 合金にNa ，Sr ，Sb をAl － Si－Cu－Mg 合金に Sb を添加した場合の被削性について検討を行なった。

７．２　実験方法

７．２．１　供試材料

実験に供した試料はＡl － 10％Si 系合金のＡ系合金，Al －７％ Si － 0.3％Mg 系合金のＢ系合金，および Al － 7％Si －2.7 ％Cu － 0.3％Mg 系合金のＣ系合金の３グループで，これら合金の化学成分を表7.１に示す。いずれも半連続鋳造によって外径７0㎜の丸棒に作られているが，これら試料の機械的性質を図7.１に，金属顕微鏡組織を図7.２に示す。Ａ系合金では，Mg が添加されたＡ3Ｆ 材の引張強さ硬さが大きく，伸びはＳr で改良処理されたＡ2Ｆ 材が大きくなっている。図7.２に示されるように無添加のＡ1Ｆ 材で針状の共晶けい素がみられるが，Ｓr 添加のＡ2Ｆ，Ａ3Ｆ 材では共晶けい素が球状化し細く分散している。初晶のα固溶体はＡ2Ｆ材よりも Mg が添加されたＡ3Ｆ 材が細く均一に分散している。

表7.１　試料の化学成分

designation	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Na	Sr	Sb	Al
A　1	10.0	0.14	0.01	0.01	0.15	──	──	──	bal
A　2	9.5	0.11	0.01	0.01	0.15	──	0.017	──	bal
A　3	9.4	0.10	0.01	0.18	0.15	──	0.012	──	bal
B　1	7.0	0.13	0.01	0.32	0.14	──	──	──	bal
B　2	6.9	0.12	0.01	0.30	0.15	0.009	──	──	bal
B　3	7.2	0.13	0.01	0.32	0.14	──	0.016	──	bal
B　4	7.0	0.12	0.01	0.31	0.14	──	──	0.14	bal
C　1	6.7	0.12	2.7	0.30	0.14	──	──	──	bal
C　2	7.0	0.12	2.7	0.29	0.14	──	──	0.14	bal

Ｂ系合金のＦ材ではＢ1Ｆ 材に比較して改良処理を行なった合金の伸びはほぼ２倍に大きくなり，硬さもいくぶん増加している。しかし添加元素のちがいによる差は明らかではなかった。一方Ｔ6処理材は地質の強化によりＦ材に比し機械的性質が大きくなっている。

C系合金のF材において，Sb 添加の C2F 材は無添加の C1 F 材より機械的性質は改善されている。また両者のT6処理材を比較すると，硬さと伸びは同程度であるが，引張り強さは Sb 添加のC2T6材がいくぶん低くなっている。

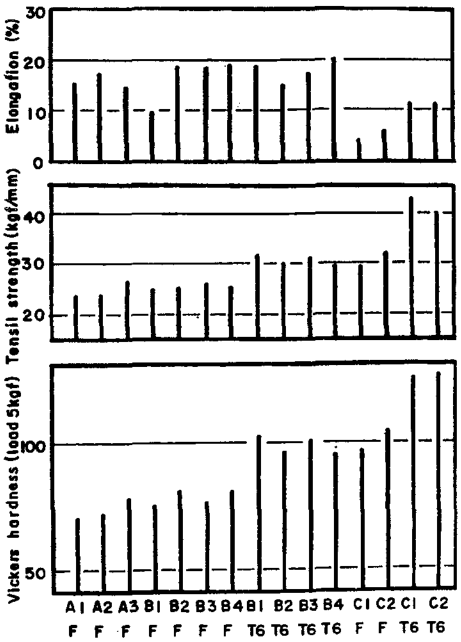


図7.1　試料の機械的性質

7．2．2　切削試験

切削試験は昌運カズヌーブ高速施盤を使用し，刃先諸元$0-\theta-7^\circ-7^\circ-8^\circ-0-0$（垂直すくい角$\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$に変化させた）の高速度鋼（SKH4）製のバイトによって行なった。削り速度$v=50\sim600$ m／min，送り$f=0.06\sim0.25$ mm／rev，切込み$t=1.0$ mm一定とした切削条件で乾式切削を実施した。

7．3　実験結果と考察

7．3．1　切削抵抗

垂直すくい角$\theta=10^\circ$，切込み$t=1.0$ mm一定とし，削り速度$v=200$，400 m／min，送り$f=0.13$，0.25 mm／rev の切削条件で各試料を切削したときの切削抵抗（主分力，送り分力）の一例を図7.3に示す。A1及びB1合金のF材は引張り強さ，硬さともにB1T6 合金や C1F 合金に比してかなり低いにもかかわらず，図に示される切削抵抗値は大きく違わない。このことはF材では硬さが低く塑性流動が大きいので，切りくず厚さが厚くなり，従ってせん断角は小さくなるため，機械的強さが小さいにもかかわらず切削抵抗が大きくなるものと考えられる。また比較的硬さの低いF材では，Na，Sr，Sb によって改良処理

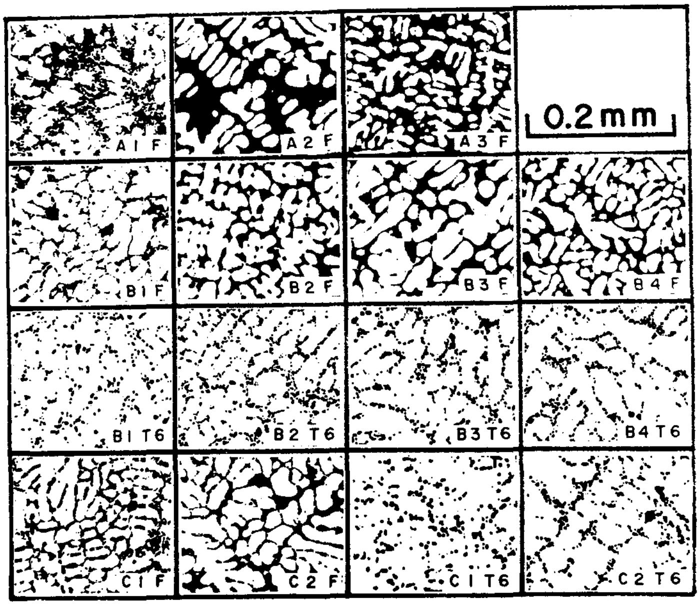


図7.2　試料の顕微鏡組織

をすれば，組織が微細化され試料の硬度が上昇するので，無添加の試料より切削抵抗が減少している。地質が強化されたT6処理材では機械的性質の強化によって切削抵抗が高く，添加元素の効果は明白ではないがB系及びC系合金にSbを添加した場合はF材，T6材いずれの場合においても切削抵抗は無添加の場合より低くなり，その程度はF材ほどまた削り速度が早く送りが大きいほど顕著である。これは8章で述べているように切削温度が高くなることによる被削材の軟化が原因と考えられる。

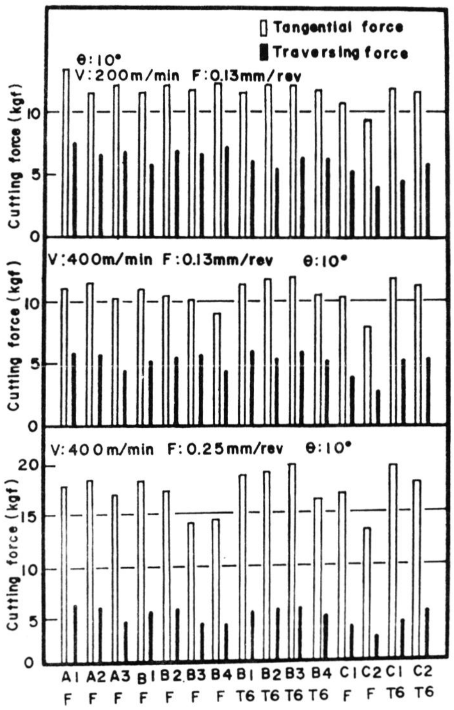


図7.3　各合金の切削抵抗

7．3．2　工具摩耗

削り速度 $v=400$ m／min，送り $f=0.13$ ㎜／rev 切込み $t=1.0$ ㎜ の切削条件で各合金を垂直すくい角 $\theta=10°$ のバイトにより切削長さL＝3200m（但しC1T6，C2T6材はL＝800m）を切削したときの，工具逃げ面の平均摩耗幅 V_B の測定結果を図7.4に示す。無添加のA1，B1，C1合金のF材について工具摩耗を比較すると，けい素量の多いA1F材の工具摩耗が最も大きく，けい素量が少なく銅が添加されていないB1F材の摩耗が小さくなっている。同じけい素量で銅が添加され硬くなっている

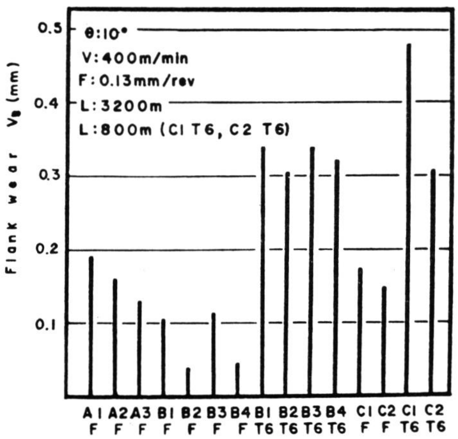


図7.4　各合金の工具摩耗幅

C1F材ではB1F材よりも工具摩耗量が多い。このようにAl－Si系鋳造合金では，工具摩耗を支配する合金元素としては，けい素量がもっとも重要であり，次に銅量が影響を

図7.5　A系合金のSEM組織

及ぼすと考えられる。

A系合金ではA1F材に比べ，Sr添加のA2F，A3F材は硬さが高くなるにもかかわらず工具摩耗量は減少している。図7.5はこの系の合金のSEM写真である。これらの合金は水冷金型による半連続鋳造によって作られているので，普通の金型，砂型鋳物に比べ均質で微細な組織を有しA1F材中の共晶けい素の粒子は幅1～2 μm，長さ5～20 μmの針状を呈している。これに比してA2，A3F材のけい素粒子は直径0.3～0.5 μm程度の球状になって分布している。微少引掻きかたさK＝3460の非常にかたいけい素粒子が，Sr添加により微細な粒子として分散するため，工具摩耗量が減少するものと考えられる。またA3F材はMgが添加されているため図7.2に示されるようにA2F材よりも組織全体が細かく，このことがA3F材の工具摩耗量をA2F材よりも減少させたと考えられる。

B系合金のF材もB1F材に比し，Na，Sb添加のB2F，B4F材の工具摩耗量は減少したが，Sr添加のB3F材ではB1F材と同程度であった。これら合金のSEM写真を図7.6に示すが，改良処理によりいずれの合金のけい素粒子も微細化，球状化しているので，B2F，B4F材で工具摩耗が大きく減少したと考えられる。しかしながらSr添加のB3Fでは，微細化によって切削抵抗の減少はみられるが，工具摩耗には効果がみられなかった。その理由は他の合金よりもけい素量が少し多いこと及びSr添加量の不適当によるものと思われる。この系のT6処理材では，地質の強化と共晶けい素粒の成長のため，工具摩耗はF材の場合より増大し，改良処理による工具摩耗の減少はみられなかった。

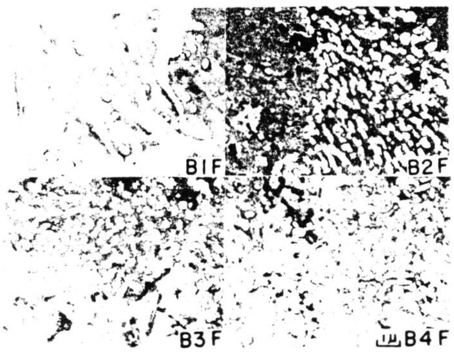


図7.6　B系合金のSEM組織

C系合金ではF材，T6材ともに工具摩耗量はSb添加により減少した。この合金のSEM写真を図7.7に示すが，晶出物はSb添加により微細化され，またT6材の平均けい素粒径はC1T6材で3.7 μmに比し，C2T6材で2.5 μmと微細化されるので，切削抵抗，工具摩耗の減少に有効に作用するものと考えられる。

7．3．3　仕上面あらさ

削り速度$v=200$，400，600m/min，送り$f=0.25$ mm/rev，切込み$t=1.0$ mm　垂直すくい角$\theta=10^{\circ}$の切削条件で切削した仕上面の状況を図7.8に例示する。A系合金は削り速度200 m/minと低速の場合，無添加試料A1F材の仕上面には構成刃先によると思われる脱落片などが観察されるが，Sr添加合金ではいずれも送りマークが明白になり，組織を微細化することによって仕上面が向上することがわかる。またB1F及びC1Fも低速切削領域では，わずかながら構成刃先の脱落片が観察されるが，改良処理された合金ではいずれも無添加合金よりも良い仕

上面を呈している。合金成分として Mg が添加されたB系合金のＴ６材の低速切削では，Ｆ材の無添加試料の場合と同様，送りマークに乱れが観察されるが， Sb 添加のＢ4T6合金や銅が添加されたＣ系合金のＴ６材では，比較的美しい仕上面を呈している。これらの理由として，この系の合金では200ｍ／ｍｉｎの削り速度領域が構成刃先の消滅する境界領域であり，わずかな切削温度の違いが構成刃先の消失に影響を及ぼし，Ｂ４Ｔ６合金では Sb 添加により切削温度が上昇するため，またＣ系合金のＴ６材では機械的強度の増大によって切削温度が他の合金より高くなるため，構成刃先が消失し仕上面が良くなるものと考えられる。しかしながら仕上面の最も悪いＡ１合金も削り速度が400，600ｍ／ｍｉｎになると送りマークが明白となり，仕上面が改善されるが，機械的強度の大きなＣ系合金のＴ６処理材では逆に600ｍ／ｍｉｎ の高速度領域で，工具摩耗に基づく仕上面のあれが，わずかに現われてくる。

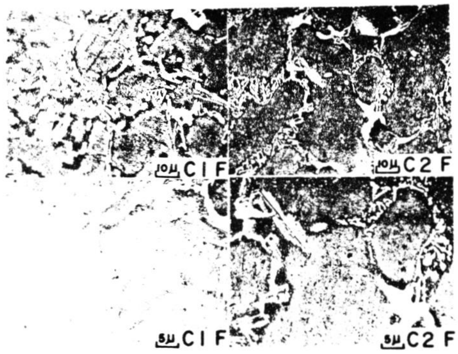


図7.7　Ｃ系合金のSEM組織

7．4　結　　　言

以上 Al － Si 系合金にＮａ，Ｓｒ，Ｓｂ を添加し改良処理を行ない，その被削性への影響を切削抵抗，工具摩耗，仕上面あらさの観点から検討した結果をまとめると以下のようになる。

(1)　切削抵抗については，組織の微細化に有効な元素の添加は切削抵抗を減少させる。また地質を強化させるMg，銅の添加は，機械的性質を増大させるが，切削抵抗は変わらない。

図7.8　各合金の仕上面状況

(2)　Al － Si 系の合金では，組織の微細化は工具摩耗に非常に大きく影響するため，Ｎａ，Ｓｒ，Ｓｂ の添加によって出来るだけ組織を微細にすることが，工具摩耗には有効である。また添加けい素量が多いほど工具摩耗は大きく，けい素量が最も工具摩耗を支配する因子であり，次いで銅量によって影響をうける。

(3)　仕上面状況について，比較的低速度領域での切削においては，Ｎａ，Ｓｒ，Ｓｂ 添加による組

織の微細化は仕上面あらさに有効に働き，特にSb 添加合金が良い傾向を示したが，高速度領域の切削ではその効果は少なかった。

参　考　文　献

1）　室町繁雄，高辻雄三，多田静夫　；軽金属，19，12（1969），543.

2）　財満鎮雄，北村利昭　；金属学会誌，36，3（1972），205。

3）　財満鎮雄，高辻雄三　；軽金属，22，1（1972），17.

4）　S. Zaima, Y. Takatsji　; Pro 16 th Japan Congr. Mat. Res, 1973, 84.

5）　室町繁雄，高橋恒夫，高辻雄三，多田静夫　；金属学会誌，37，6（1973），639.

6）　高辻雄三，財満鎮雄，能登谷久公，渡辺達朗　；軽金属，25，2（1975），41。

7）　S. Zaima, M. Hirono ; Proc 12th Japan Congr. Mat. Res, 1969, 154.

8）　高橋恒夫，嵯峨常生，三森友彦　；軽金属，21，1（1971），19.

9）　P.D. Hess. E. V. Blackmun ; AFS. Transactions, 1979, 87.

10）　佃　誠，鈴木敏夫，福井　泉，原田雅行　；軽金属，30，2（1980），65.

第８章　被削材の添加成分量が工具摩耗に及ぼす影響

8。1　緒　　　言

第７章において２元，３元，４元系の Al − Si 合金に Na，Sr，Sb を添加してその効果を調べ２元系においては Sr，３元，４元系においては Sb 添加が効果のあることを示した。しかし３元系に Sr を添加した場合に，組織的には微細になるが工具摩耗は減少しない等の現象も観察され，添加元素量に最適な値が存在することが推定された。

本章では Al − Si ２元共晶合金の AC3A 材に Sr の添加量を 0〜0.36 ％まで，また Sb は 0〜0.20％までの範囲で変化させて，主として Sr，Sb の添加量と工具摩耗の関係について検討を行なった。

8．2　実験方法

8．2．1　供試試料

試料は金型鋳造された外径 100㎜ 高さ 230㎜の円筒形であり，Sr を添加した試料をＡ合金，Sb を添加した試料をＢ合金として，これらの分析結果を表 8．1 に示す。

表 8．1　試料の化学組成

Symbol	Si (%)	Fe (%)	Sr (%)	Sb (%)	Al (%)
A 0	12.8	0.20	—	—	bal
A 1	12.8	0.20	0.010	—	bal
A 2	12.8	0.21	0.029	—	bal
A 3	12.9	0.21	0.078	—	bal
A 4	12.9	0.21	0.16	—	bal
A 5	13.0	0.21	0.36	—	bal
B 0	12.7	0.19	—	—	bal
B 1	12.5	0.22	—	0.10	bal
B 2	12.6	0.26	—	0.14	bal
B 3	12.5	0.32	—	0.20	bal

Ａ合金系の顕微鏡組織は図 8．1 に示すように，無添加の A0 合金では共晶けい素粒子は針状に長く伸びて幅も広いが，A1〜A5 合金では微細に球状化し，Sr 添加の効果を示している。しかし Sr 添加量のちがいによるけい素粒子の形状変化は，はっきりとは認められなかった。また Al − Si 合金中への Sr の固溶量ははっきりしていないようであるが，[1] A0，A1合金以外の合金では Sr の粒子が観察され，その例は図 8．1 中の A2及び A5 合金にみられる。図中，白くみえる直径４〜５μm 程度の塊が Sr 粒子である。この粒子の数は少ないが，伸び及び引張強さの低下に影響を与えていると思われる。すなわち，これらの合金の機械的性質は図 8．2 のようになり，全体的な傾向として Sr を添加した試料は無添加の A0 合金に比べて機械的性質は良くなり，特に伸びについてその効果が大きく，この伸びは A1 合金で最大でありその後添加量の増加に伴ない伸び量は漸減の傾向にある。この傾向は引張強さについても認められ，Sr 添加量が多くなりすぎると，固容しきれない Sr 粒子が形成され，機械的性質を劣化させるようである。

Ｂ系合金の組織写真を図 8．3 に示すが，B0 合金では初晶の板状けい素がみられるものの，B1

合金ではその数は少なくなり，B2 合金ではほとんどみられないことから，Sb 添加により共晶点がけい素側に移行していることも考えられる。B3 合金では B2 合金よりも共晶けい素粒子が全体に分散している。これら合金の共晶けい素粒子の形状について比較したものが図 8.4 の顕微鏡組織である。いずれの合金でも共晶けい素粒子は長く針状に伸びているが，B3 合金ではけい素粒子の針状に伸びた部分が細かくいくつにも割れて，けい素粒子は小さくなっている。B1, B2 及び B3 合金の図中に Sb 粒子が白く写っており，EPMA による分析からも Sb 粒子は鉄，けい素などとは化合物を作っていないようである。[2] また，B2 合金で Sb 粒子が認められることから，Sb のこの合金の固溶量は 0.1 %以下とみられる。図 8.2 に示すようにビッカース硬さの差はみられず，せん断強さにも一定の傾向はみられなかった。Sr 添加合金と Sb 添加合金を組織的に比較すれば，前者の方が共晶けい素粒子は細かかった。

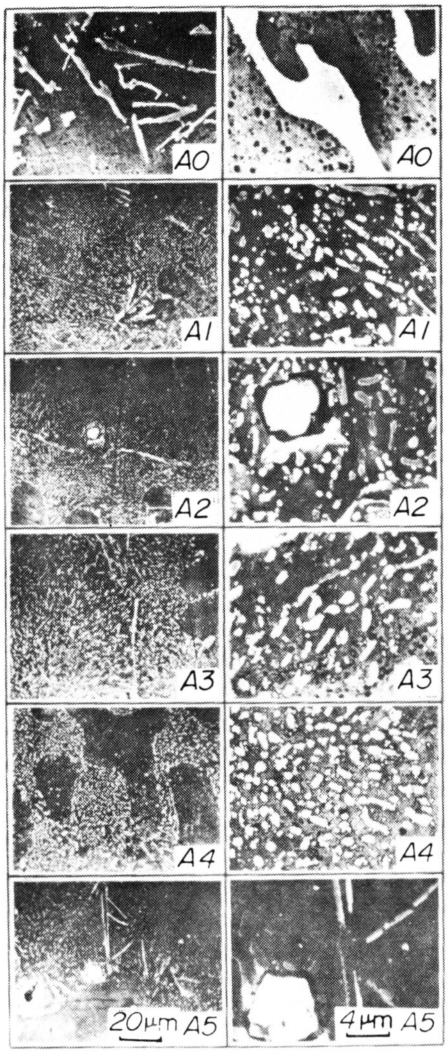


図 8.1　A 系試料の顕微鏡組織

8．2．2　切削試験

旋削条件及び使用機器は第 7 章と同じであり，同様の形状を有するバイトを用いて乾式切削を行なった。工具摩耗の測定は逃げ面平均摩耗幅 V_Bにより行ない，切削仕上面あらさは最大あらさRmax を求めた。

8．3　実験結果と考察

8．3．1　切削抵抗

A系合金について垂直すくい角 $\theta=10°$，送り $f=0.13$ ㎜／rev とし，削り速度 $v=200$，400，600 m／minと変化させた場合の Sr 含有量と切削抵抗（主分力及び送り分力）の関係を図8.5 に示す。切削抵抗値は Sr 添加量によって変化し，無添加の A0 合金の値が低く，添加合金中では A3 合金の値が最も低くなっている。この傾向は $f=0.25$ ㎜／rev 一定として速度を変化した場合にも

同様であり，また $v=400$m／min一定とし,送りを f=0.06, 0.13 及び0.25㎜／rev と変化させた図8. 6 の場合にも認められた。そして切削抵抗の値が最も大きくなったのは A2 合金で， A4 合金よりも A5 合金の方が切削抵抗は小さい値をとっている。一方A系合金の各切削条件における切りくず形状は図8. 7 の例にも示すように，ほとんど流れ形切りくずとなり， Sr 添加による切りくず形状の変化は認められなかった。

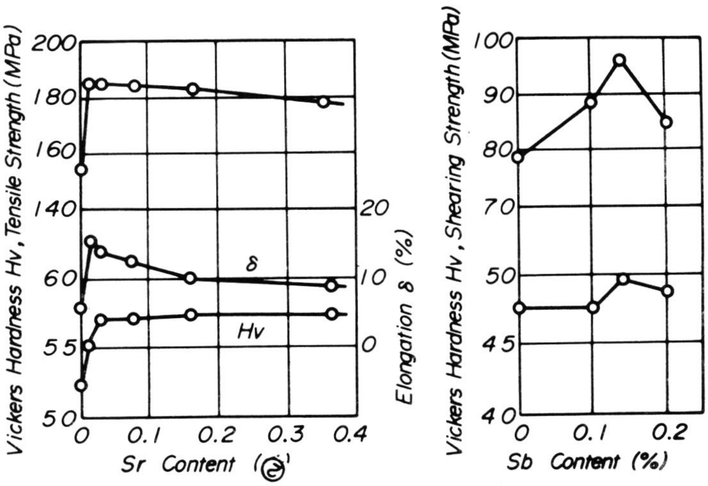


図8. 2 Sr 添加量と機械的強さの関係

同様に速度と送りを変化させたB系合金の切削抵抗を図8. 8 に示す。送りが小さい場合，速度が低い場合には Sb 添加の影響はあらわれず，送りが大きく速度が小さい場合には Sb 添加量の増加とともに切削抵抗は増大の傾向すら示すが，送りが大きく速度が大きい場合には添加量の増加とともに切削抵抗の減少がみられる。これは後述のように切削温度の上昇による被削材の軟化が原因と思われる。

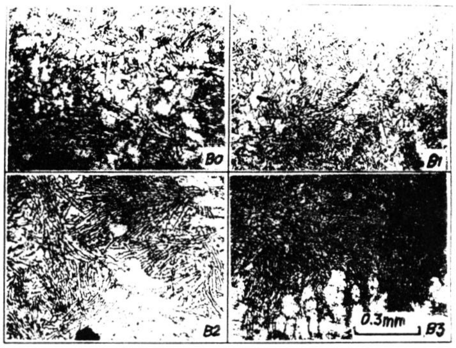


図 8. 3　B 系試料の顕微鏡組織

8．3．1　工具摩耗

A系合金の工具摩耗幅 V_B を図8.9に示す。この場合の切削条件は図中に示してあるが，いずれも切削量は同一にとってあり。同じ削り速度ならば送りを大きくした方が得策のようである。[3] 工具摩耗が最も激しい合金は改良処理のしていない A0 合金であり，これは共晶けい素粒子が大きいため当然予想された結果である。 Sr 添

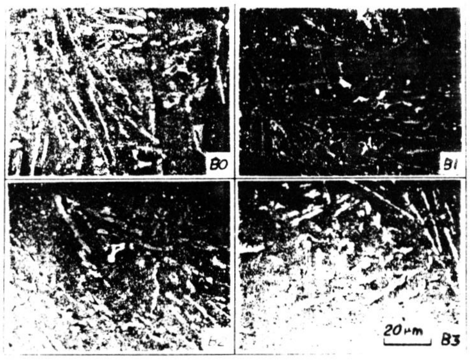


図 8. 4　B 系試料の高倍率顕微鏡組織

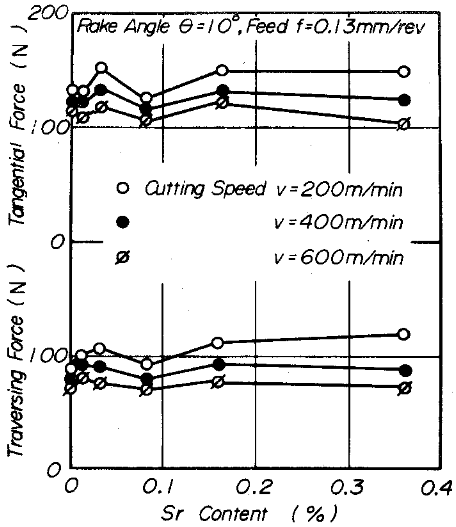


図8.5　Sr添加量と切削抵抗（送り一定）

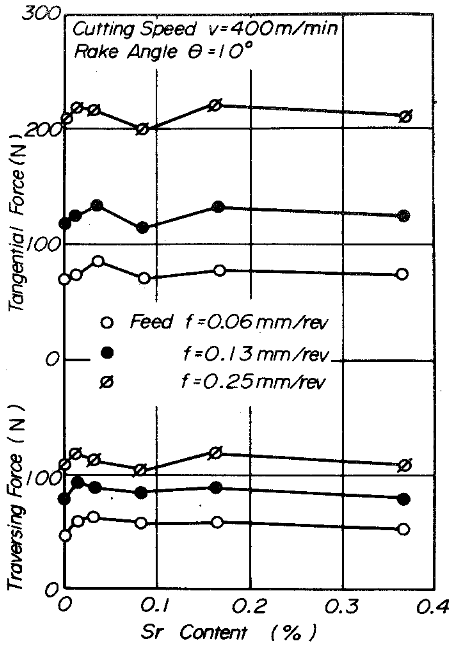


図8.6　Sr添加量と切削抵抗（速度一定）

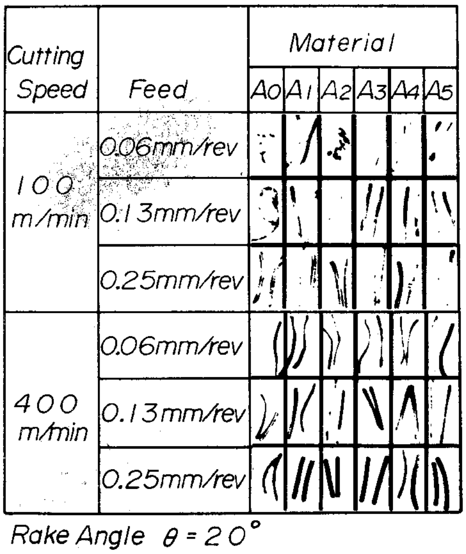


図8.7　A系合金の切りくず状況

加合金中最も工具摩耗が少なかった合金は添加量の最も少ないA1合金であり，A2合金は添加合金中最も大きな工具摩耗を呈し，A3，A4，A5合金と添加量が増加するにつれて工具摩耗は順次減少する傾向を示した。このA2合金は図8.5に示したように高い切削抵抗を示した合金で，図8.1の組織中にSr粒子がみられたようにAl–Si共晶合金中に固溶するSr量を僅かに上まわる量が添加されていると思われる。Al–Si合金中にSrが固溶すればするほど工具摩耗は大きくなるが，固溶限を超えてSrの粒子が形成されるとクラックがはいりやすくなり，工具摩耗は減少すると思われる。このように考えればSr添加量はAl–Si合金中に固溶する限度内で，改良処理が有効に行なわれる最も少ない量が良いことになる。これら合金の工具摩耗状態を示せば図8.10のようになり，A0合金の工具摩耗が最も激しいほかは，いずれの合金における工具摩耗の形態もほぼ同様である。これらA系合金の工具寿命曲線を図8.11に示す。工具寿命の判定は工具逃げ面の平均摩耗幅V_Bが0.3㎜に達した時点とした。この

時の切削条件はθ =10°，f = 0.13㎜/rev ，t = 1.0㎜である。工具寿命の最も長い合金はA1合金であり。ついでA4，A5合金となりA2，A3合金はSr添加合金中では工具寿命が短かかった。もちろん無添加のA0合金はけい素粒が大きく，工具寿命も最も悪かった。

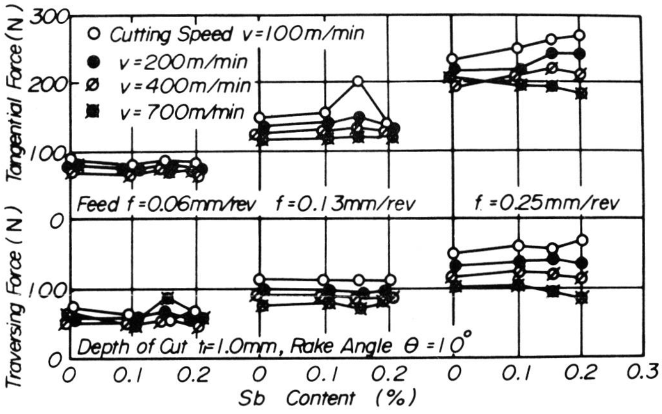


図8.8 Sb添加量と切削抵抗

一方，Sb添加のB系

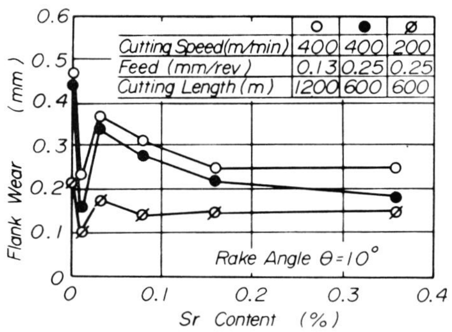


図8.9 Sr添加量と工具摩耗

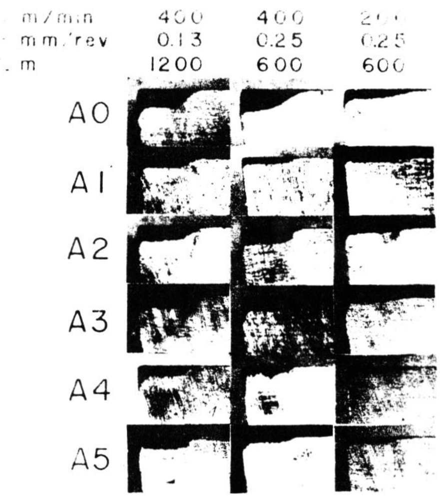


図8.10 A系合金の工具逃げ面摩耗の状況

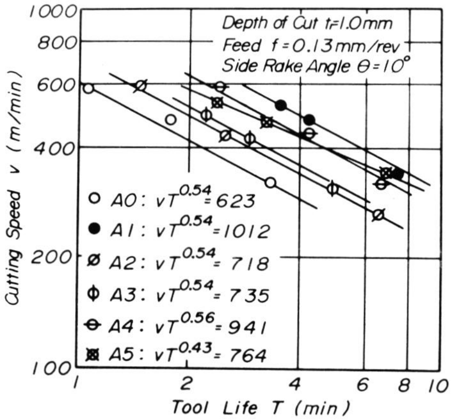


図8.11 A系合金の工具寿命曲線

合金の工具寿命を同様にして求めた結果を図8.12に示す。この場合の切削条件はθ =10°，f = 0.25㎜/rev，t = 1.0㎜である。B0，B1，B2の工具寿命にはあまり差がなく，B3合金で工具寿命が長くなった。これはB1合金ではまだ僅かの初晶けい素粒子があり，B2合金では共晶けい素粒子の微細化がB3合金ほど進んでいないためと思われる。また切削温度につい

てみれば図8.13のようになり，Sb 添加量の増加に従って切削温度の上昇がみられ。その上昇割合は削り速度が低いほど，送りが大きいほど大きくなっている。このため低速，高送りでは被削材の Sb 添加量が多いほど軟化し，工具の機械的摩耗の減少をもたらすと考えられるが，このことは図8.12に示す B3 合金の場合に工具寿命がほかの合金よりも低速で長くなっている事実と一致している。一般に切削温度の上昇は，工具のかたさの低下や被削材と工具の凝着を促進するが，この合金は300℃前後の切削温度ではいくぶん軟化し，上述の悪影響は少なく，機械的摩耗の減少が大きく作用しているものと思われる。

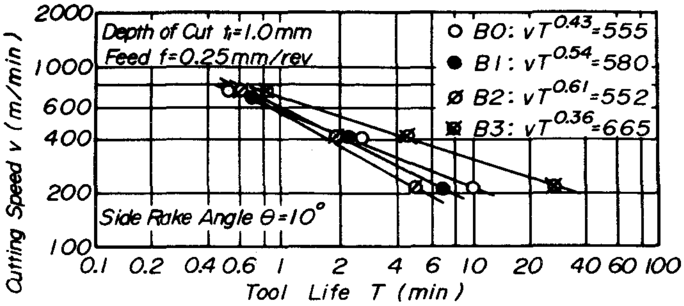


図8.12　B系合金の工具寿命曲線

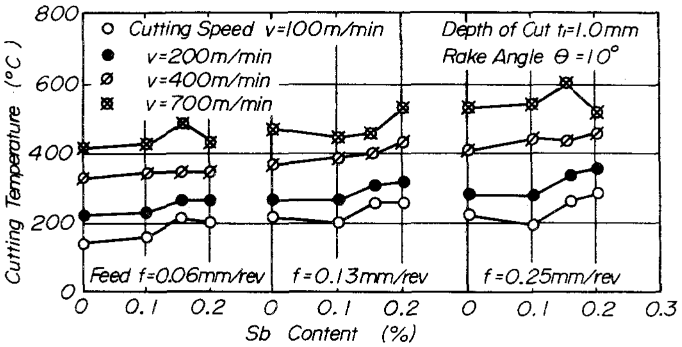


図8.13　Sb 添加量と切削温度

8．3．3　仕上面あらさ

切削仕上面あらさについて求めた結果を図8.14，図8.15に示す。図8.14はA系合金の場合の一例として f =0.13㎜／rev 一定として速度を変化させた場合，及び v =400m／min 一定として送りを変化させた場合について示している。いずれの場合も切削抵抗及び工具摩耗量が最も大きな値を示した A2 合金の切削仕上面あらさが最も低い値を示し，次に低いのは工具摩耗量の最も少なかった A1 合金である。最も高い値を示したのは無添加のA0合金で，ほかのA3，A4，A5合金はA1合金とA0合金の値の中間に位置している。この場合の工具形状から求めた理論的仕上面あらさは f =0.06，0.13，0.25㎜／rev についてそれぞれRmax =7.4，15.3及び30.1μm となり，A2合金の切削仕上面あらさはそれより小さな値であり，工具の送りマークの山がつぶれているものと

思われる。

図8.15はB系合金の場合で，θ =10°と30°のもとで送りと速度を変化させた場合について示してあるが，Sb 添加量と切削仕上面あらさとの間にはとくに関係は認められないようであった。

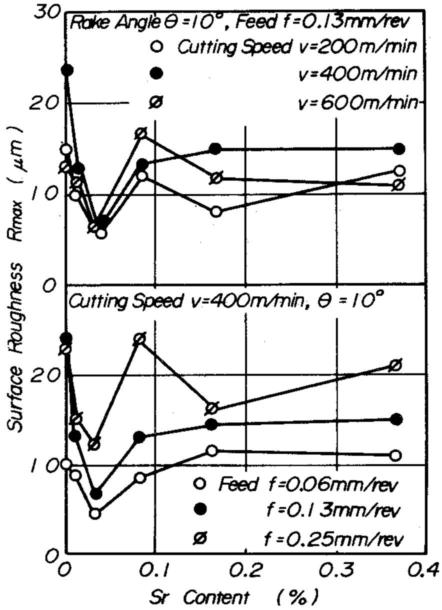


図8.14 Sr 添加量と仕上面あらさ

8．4 結　言

以上，AC3A材に改良処理効果がある Sr 及び Sb の添加量が，合金の被削性向上，とくに工具寿命の増大にどのように影響するかについて検討するため，Sr 添加量を 0～0.36 %，Sb 添加量を 0～0.20 %の範囲で変化させ，高速度鋼工具による乾式切削を実施した。その結果，

(1) Sr 添加合金では共晶けい素粒子の微細化がみられ，無添加の合金に比べて硬さ，引張強さ，伸びなどが向上した。とくに伸びは A1 合金（0.010 % Sr）で顕著であり，Sr 添加量が増加するにつれて伸びは低下する傾向を示した。

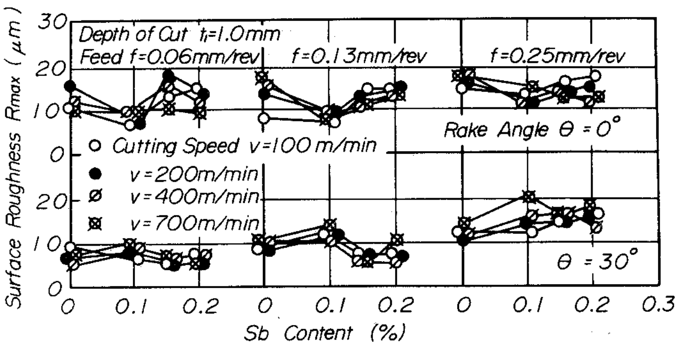


図8.15 Sb 添加量と仕上面あらさ

(2) とくに工具寿命の点からみればそれぞれ A1 合金（0.01 % Sr），B3 合金（0.20 % Sb）に添加効果が認められたが，それらの合金も切削抵抗，切削仕上面あらさなどの点からは特別良好ともいえないか，あるいは添加による向上効果はみられなかった。また，生成される切りくず形状は無添加の合金と大差ない流れ形切りくずで，両成分とも添加による切りくず処理性の著しい向上は認められなかった。

(3) したがって，これらの結果からみて Sr 及び Sbの適量添加は，合金の 機械的性質の向上に効果的であり，工具寿命に有効な添加量も認められるが，切削抵抗，切りくず処理，切削仕上面あらさなどの諸点を総合した合金の被削性改善については，著しい添加効果は得られなかった。

参　　考　　文　　献

1） L。F。Mondolfa：Aluminum Alloys (Structure and Properties)，Butter Worths Co （1976），612。

2） 佃試，鈴木敏夫，福井　泉，原田雅行；軽金属，30，2（1980），65.

3） 財満鎮雄，稲葉道次，広野雅道：軽金属，22，4（1972），275.

第９章　CBN工具の摩耗挙動

9．1　緒　言

第５章，６章において超硬合金工具の摩耗機構を示し，その結果アルミニウム合金の切削に適する工具としては，被削材中のけい素粒子よりもかたく，かつ被削材中のアルミニウム，けい素，鉄などと反応しない材料が良いことを示したが，近年開発されたCBN工具はこの条件を満すものである。CBN，すなわち立方晶窒化ほう素（Cubic Boron Nitride）は硬く（Hv＝4500），熱伝導率（13w／(m•k）が良く，アルミニウム，けい素，鉄などとはほとんど反応しないとされている。[1] このCBN粒は高温高圧のもとで合成されその大きさは数μm程度であり，通常焼結されて用いられる。このCBN工具は従来の工具では切削加工が困難であった高硬度鋳鉄あるいは耐熱合金などの難削材を高能率に加工することができるとして各方面で研究されているが，[1] Al－Si系合金に関するものは少ないようである。

本章ではこの優れた性質を有するCBN工具を用いて，Al－Si系合金中最も工具摩耗の激しいハイパーシルミン[2)~5)]の乾式及び湿式切削を実施し，切削抵抗，工具摩耗，切削仕上面，切りくず生成などの諸点より被削性を求め，この工具の特性を検討することを目的とした。

9．2　実験方法

9．2．1　供試試料

実験に供した試料は表9.1に示す化学組成の16%，19%及び23%Siの円筒形状（直径96㎜，長さ160㎜）のハイパーシルミンで，それぞれの機械的性質を表9.2に示す。その顕微鏡組織は図9.1に示すように，けい素量の増加に応じてそれぞれ初晶けい素が細かく散在しており，柔らかい組織の中に硬い微細な粒子が分散したものといえる。この初晶けい素の存在がとくに高速切削の際に工具摩耗の主要原因の一つになると[6)]思われるので，とくにけい素量の多い23%Si材で工具摩耗が激しいことが予想される。

表9.1　試料の化学組成

Material	Si %	Fe %	Cu %	Ti %	Mg %	Ni %	Al %
16%SiAlloy	15.5	0.27	4.11	0.01	0.49	<0.01	bal
19%SiAlloy	18.2	0.28	1.89	0.15	1.29	1.29	bal
23%SiAlloy	23.0	0.38	1.96	0.17	1.28	1.43	bal

表9.2　試料の機械的性質

Material	Tensile Strength MPa	Elongation %	Vickers Hardness (98N)	Shearing Strenth MPa
16%SiAlloy	129.3	0.6	118	167
19%SiAlloy	171.5	0.5	120	122
23%SiAlloy	171.5	0.3	123	120

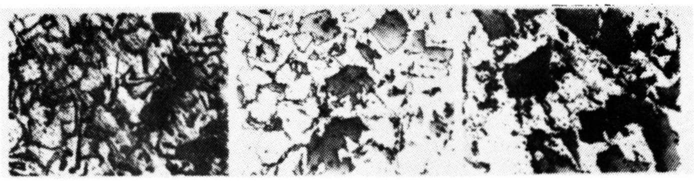


図9.1　試料の顕微鏡組織

9．2．2　切削試験

昌運カズヌーブ旋盤を用い，使用工具は刃先諸元0――5°―5°―5°―30°―0－0.3を有するアルミナで焼結されたCBN工具である。切削条件としては，

(1)切削試験Ⅰ　削り速度をv＝1.5，2.5，5　及び10m／sの4種類，送りをf＝0.05，0.1及び0.2㎜／revの3種類にとり，これらの条件を適宜組み合せた乾式切削及び機械油を切削油とした湿式切削を実施し，それぞれの場合の切削抵抗，切削仕上面あらさ及び切りくず状況を求めて供試試料に対するCBN工具の被削性を検討した。

(2)切削試験Ⅱ 削り速度をv＝2m／s と10m／s の2種類，切込みt＝1.0㎜及び送りf＝0.1㎜／rev一定とした乾式及び湿式切削についてCBN工具の工具摩耗量を測定した。

工具摩耗の測定は一定時間切削後，工具の付着物をNaOH溶液で取り去り，図9.2に示すように工具逃げ面にプラトー部がある場合には投影機で拡大して，プラトー部の幅を平均摩耗幅bとして求め，プラトー部がない三角形状摩耗の場合には投影機の像をトレース紙に写し，摩耗部分の面積をプラニメータで測定し，これを切込みで割った値を平均摩耗幅bとした。

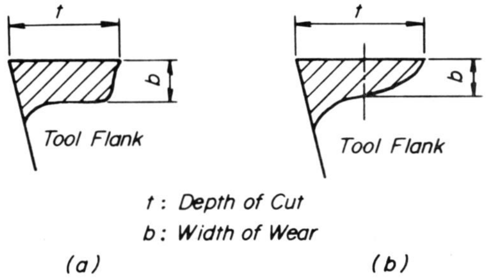


図9.2　工具摩耗幅の測定方法

9．3　実験方法

9．3．1　切削試験Ⅰ

乾式及び湿式切削における各試料の切削抵抗（主分力，送り分力及び背分力）及び切削仕上面あらさをそれぞれ図9.3，図9.4に示す。これらより，ハイパーシルミンではけい素量，削り速度あるいは乾式，湿式切削に拘らず，切削抵抗のうち主分力は切り込み，送り量が増加するとともに増大する。送り分力も切り込み，送りとともに増加するが，とくに23％Si材では削り速度の増加に対して送り分力の増大が著しく，ハイパーシルミンの超硬合金工具による切削に関する問題点[7]と一致す

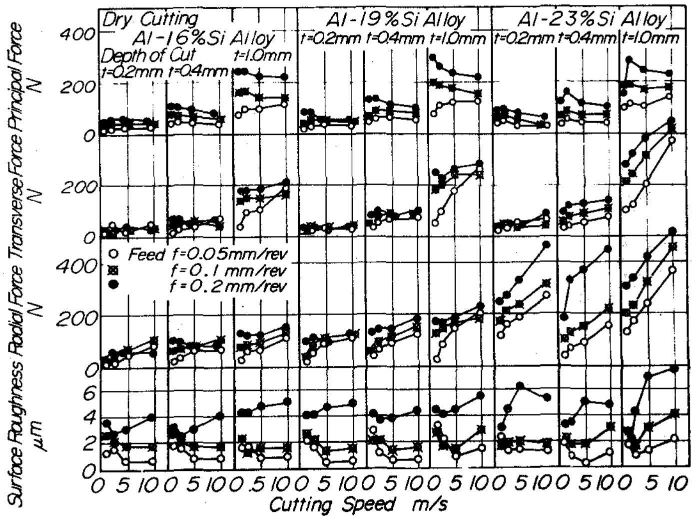


図 9.3　各合金の仕上面あらさと切削抵抗（乾式切削）

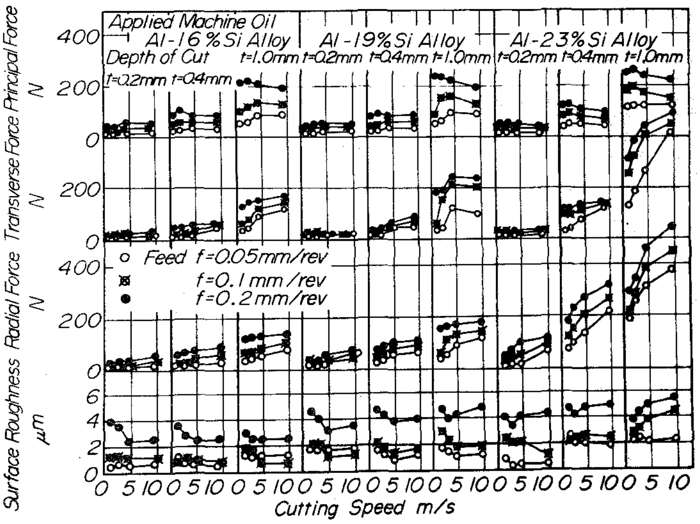


図 9.4　各合金の仕上面あらさと切削抵抗（湿式切削）

る。背分力も送り分力の変化とほぼ同様であるが，とくに23%Si材で削り速度の増加に対する変化が著しかった。

切削仕上面あらさは，送りが大きくなるにしたがい当然あらさ値は大きくなるが，工具刃先形状から求まる理論的表面あらさR_0は送りf = 0.05，0.1及び0.2 mm／rev に対してそれぞれR_0 = 1.0，4.2,，及び16.6 μm程度であることを考えれば，いずれの場合も極めて小さい値を示すことになり，ハイパーシルミンは工具送りマークの山がSi粒子が多いためかなり欠けていることを示している。そのため乾式切削，湿式切削を問わずけい素量が多くなるにつれて切削面はあらくなり，高速切削になるにしたがって顕著になる。ハイパーシルミンの切削面にあまり金属光沢がみられないのは，このためと思われる。

次に図9.5は19%Si材の乾式及び湿式切削（切込みt=1.0 mm）における切りくず形状を示すが送りが大きくなれば切りくずの大きさは大きく，削り速度が大きくなるにつれて切りくず形状は細かくなり，けい素量が増加しても切りくずは細かくなる。また，乾式切削に比べて湿式切削の方が全体として切りくずは細かい。乾式切削ではうず巻状またはちぢれた形の切りくずが多く，湿式切削では破砕状の切りくずが多いが，切りくず処理の点ではどちらの場合もあまり問題点はないようであった。

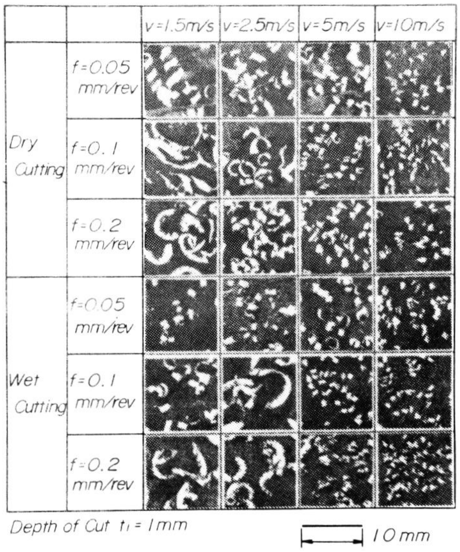


図 9.5　19%Si 材の切りくず状況

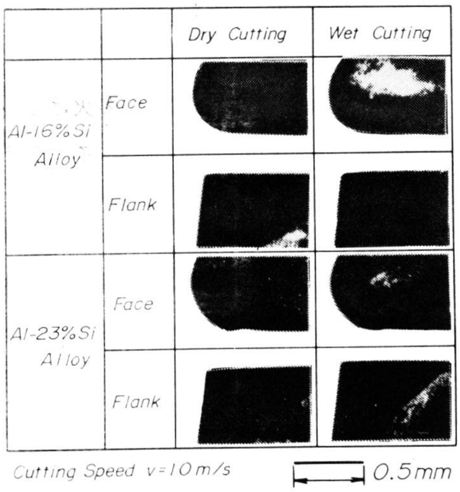


図 9.6　16%Si 材と23%Si 材の工具摩耗状況

9.3.2　切削試験Ⅱ

16%Si材及び23%Si材を削り速度 $v=10$m/s で所定時間乾式及び湿式連続切削した場合の工具逃げ面及びすくい面の摩耗状況を図 9.6 に示す。これからCBN工具を用いてもハイパーシルミンではかなりの工具摩耗が認められる。いま，切削時間に対する工具摩耗の進行状況の一例として，16%Si 材及び23%Si材の削り速度 $v=2$m/s の低速切削における切削時間42min後の乾式切削及び湿式切削の逃げ面及びすくい面の摩耗量を図 9.7 に示す。また同じ試料の $v=10$m/s の高速切削における切削時間9 min 後の工具摩耗進行状況を図 9.8 に示す。各切削条件についてこのような観察を実施したが，これから低速乾式切削では，切削の際に付着物が逃げ面を保護するようで，とくに16%Si合金材では刃先先端から1㎜の付近で境界摩耗が発生しているが，けい素が多くなるにつれて境界摩耗の程度は減少し，摩耗幅も減少する。これは付着物が逃げ面を摩耗から防ぐが，前述のように切りくずが細かくなり，刃先から約1㎜付近の切りくず流れが少なくなるためと思われる。低速湿式切削では付着物がほとんど付かず，逃げ面を摩耗から防ぐことができなくなり，直接切りくずが工具にあたって摩耗が進行している。とくに逃げ面の刃先より約1㎜のところでは切削油の浸透で付着物が全然付着しなくなり，工具摩耗の進行は激しい。また，低速湿式切削ではけい素量が少ないほど摩耗の進行はゆるやかである。

削り速度が早くなれば図 9.8 のように乾式切削，湿式切削ともに工具摩耗の進行は激しく，切削開始の初期より摩耗は急激に進行する。図 9.9 は逃げ面の平均摩耗幅と切削時間の関係を求めたものである。削り速度 $v=2$m/s の低速切削の場合に比べて $v=10$m/s の高速切削では摩耗の進行が急激である。なお，低速切削では16%Si 材と23%Si 材の摩耗進行は湿式切削に比べて乾式切削の方がゆるやかであるが，19%Si 材では逆に湿式切削の方が摩耗の進行はゆるやかであった。

したがって，連続切削を行なえば工具摩耗の進行とともに切削抵抗は順次増大することになる。例えば削り速度 $v=2$m/s と10m/s の場合を比較すれば，切削抵抗の変化は図 9.10のようにな

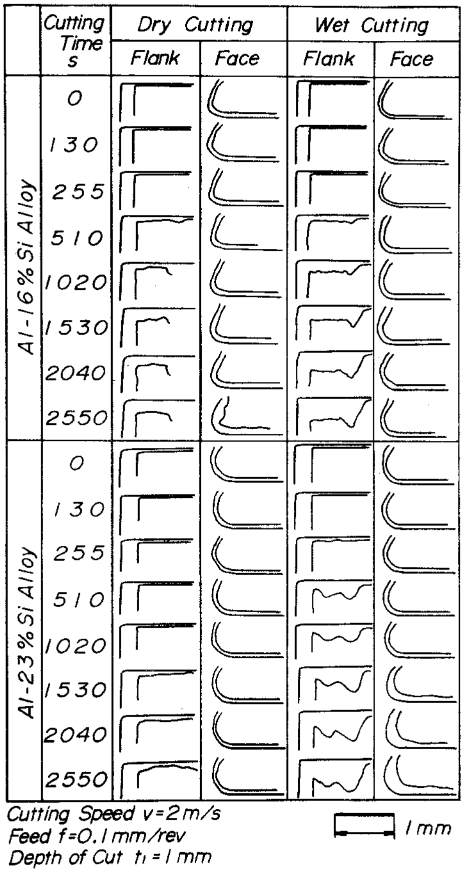


図 9.7　16%Si 材と 23%Si 材の低速切削における工具摩耗進行状況

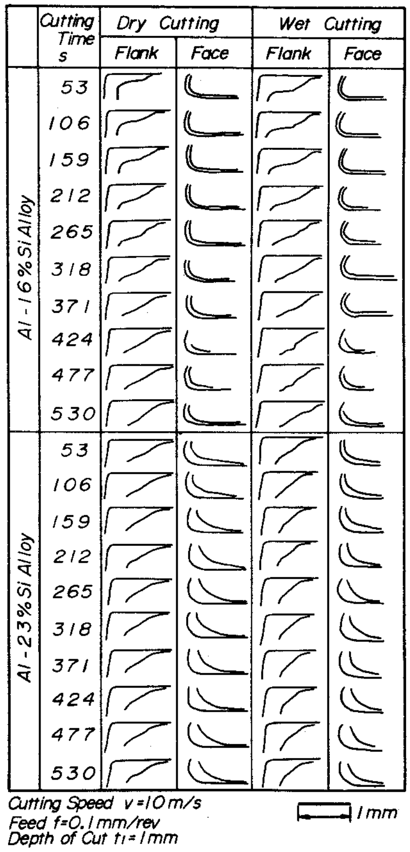


図 9.8　16%Si 材と 23%Si 材の高速切削における工具摩耗進行状況

る。すなわち，低速切削では乾式，湿式両切削方式とも切削時間の経過にかかわらず切削抵抗の変化は少ないが，高速切削では両切削方式とも主分力は切削時間の経過に伴う増大はわずかであるものの，送り分力及び背分力の増大は著しく，また，けい素量が増すにつれて両分力の増大は急激になる。

これらの場合の切削仕上面あらさを，工具摩耗前と後で比較すれば図 9.11 のようになる。低速切削の場合には工具摩耗も比較的少ないので，工具摩耗前後の仕上面あらさの値の差は少ないが，高速切削では工具摩耗前後にあらさの差がかなり認められる、これは前述のように，仕上面あらさの値そのものが理論値よりかなり小さく，必ずしも正常な工具送りマー

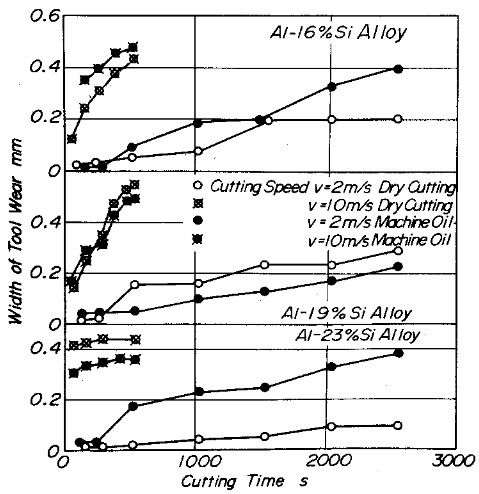


図 9.9　各合金の切削時間と工具摩耗幅

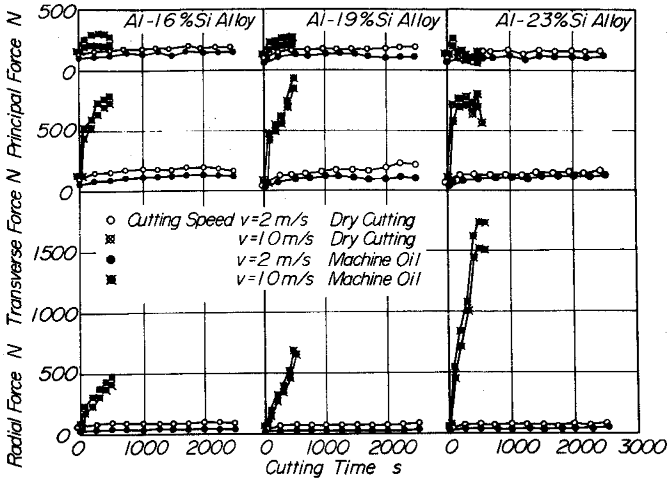


図 9. 10　各合金の切削時間と切削抵抗

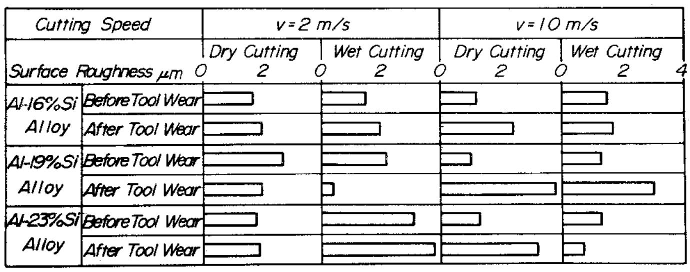


図 9. 11　各合金の工具摩耗前と摩耗後の仕上面あらさの比較

クが得られるとは限らず，工具摩耗が激しいため切れが悪くなることが原因と思われる。

9．4　結　　言

以上，普通の実用工具では非常に激しい工具摩耗を呈するハイパーシルミンの切削にCBN工具を用い，乾式切削及び湿式切削におけるCBN工具の摩耗を中心に検討した。その結果，

(1)　低速乾式切削では付着物が工具逃げ面に付着保護してプラトー部を形成し，とくに16%Si材では切込みに相当する切刃部分に切りくず中のけい素粒子の作用で境界摩耗が発生する。そして，けい素量の増加に伴い境界摩耗の度合は減少し，摩耗幅も減少する。

(2)　低速湿式切削では工具付着物が付かないため逃げ面を摩耗から防ぐことができず，工具摩耗が進行する。とくに逃げ面の刃先から切込みに相当する部分では切削油が浸透しやすいため，摩耗が激しい。

(3)　高速切削では乾式切削，湿式切削とも激しい工具摩耗を呈し，とくにけい素量の多い23%Si材では，切削初期から激しい摩耗が認められる。

(4)　したがって，実験範囲から判断すればハイパーシルミンの切削にCBN工具を適用するには，

低速乾式切削が実用的である。

参　考　文　献

1)　機械技術；29， 5 (1981) 33～72．

2)　財満鎮雄，高辻雄三，飯尾政次；軽金属，20，11 (1970)，556．

3)　財満鎮雄，武田裕久，森下　定；日本金属学会誌，38，7 (1974)，609

4)　財満鎮雄，稲葉直次，広野雅道；軽金属，22，4 (1972)，275．

5)　大庫和孝，中島耕一，粟野泰吉；精密機械，41，4 (1975)，369．

6)　財満鎮雄，機械の研究，20，9 (1968)，1211．

7)　森永卓一，財満鎮雄，飯尾政次；日本金属学会誌，30，5 (1966)，463

第 10 章　CBN工具の摩耗機構

10．1　緒　言

第 9 章においてハイパーシルミンをAl_2O_3焼結のCBN工具を用いて切削を行ない低速乾式切削が良いことを示した。また削り速度が早くなると摩耗が急激に進行し，この工具の摩耗が，切削熱による工具材料の硬さの低下，もしくは被削材との凝着によって進行する過程が予想された。ところでCBN粒自身は窒化物のため熱的にはかなり安定であり，かつ被削材との親和性も小さいため，この工具の摩耗は使用されているバインダの種類によって大きく影響を受けるものと思われる。現在CBN粒は種々のバインダを用いて焼結されているが，[1] Co，Al_2O_3（アルミナ），TiNなどが主にバインダとして使用されている。このためバインダの成分が異なるとその特性も異なり，どのバインダがどの金属材料の切削に適当であるかは[2]十分に明らかにされているとはいえない。

本章ではCo，Al_2O_3,TiNの 3 種類のバインダを使用したCBN工具を用いてSKD 61焼入れ材，ハイパーシルミンのＦ材とＴ 6 材を選んで乾式切削を実施し，主として工具摩耗の点からEPMA観察による検討を行ない，その摩耗機構を明らかにする事を目的とした。

10．2　実験方法

実験に供した試料の化学成分を表 10. 1 に，機械的性質を表 10. 2 に，顕微鏡組織を図 10. 1に示す。Al－23%Si 材は金型鋳造後使用し，Al－17%Si 材は金型鋳造後Ｔ 6 処理を行ない，SKD 61材は焼入れ焼もどし処理を行ない試料とした。図 10.1 に示されるようにAl－23%Si－Ｆ材では角ばった大きな形の初晶けい素粒が多くみられ，Al－17%Si－Ｔ 6 材では共晶けい素粒も粗大化しているため初晶の粒子とあいまって工具摩耗が大きくなる事が予想される。いずれも鋳造材であるため伸びは少ないが，Al－17%Si－Ｔ 6 材ではＴ 6 処理により基地が強化されているため，引張強さが大きくなっている。SKD 61材はマルテンサイト組織を示し十分に焼入れの効果が認められる。

表 10. 1　試料の化学成分

Material	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Ti (%)	Mg (%)	Ni (%)	Al (%)
17%Si Alloy	17.0	0.13	1.01	0.01	1.04	—	bal
23%Si Alloy	23.0	0.38	1.96	0.17	1.28	1.43	bal

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)	Fe (%)
SKD61	0.35	0.99	0.30	0.02	0.01	4.94	1.04	0.81	bal

表 10. 2　試料の機械的性質

Material	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers Hardness (98N)	Shearing Strength (MPa)
17%SiAlloy-T6	303.6	0.6	154	195
23%SiAlloy-F	171.5	0.3	123	120
SKD61	1744.6	11.0	470	

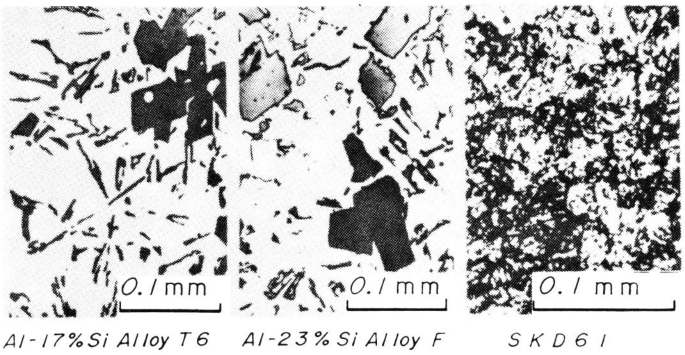


図10.1　試料の顕微鏡組織

摩耗試験の切削条件は，ハイパーシルミンで削り速度$v=2$ m／s，送り$f=0.1$ ㎜／rev，切り込み$t_1=1.0$ ㎜，SKD61材は$v=1.6$ m／s，$f=0.075$ ㎜／rev，$t_1=0.5$ ㎜，一定とした乾式切削であり，所定時間毎に工具の逃げ面平均摩耗幅を測定した。使用工具はA，B，C，3種類のCBN工具であり、EPMA分析の結果A工具は約8.5 wt %C_o，B工具は約45wt %Al_2O_3，C工具は約30 wt %TiN（Al_2O_3も4 %程度添加されている）の各バインダによってCBN粒が焼結されている。いずれも刃先諸元0－5°－6°－6°－8°－0－0.2を有するバイトである。

EPMAによる観察は主にすくい面摩耗を中心に行ない，ハイパーシルミンを切削した工具の付着物は，NaOH液で除去したが，SKD61材の場合は付着物が付着した状態で観察を行なった。

10．3　実験結果

10．3．1　Al－17% Si －T6材の切削

図10.2は3種類のCBN工具を用いてハイパーシルミンのF材とT6材を切削した際の逃げ面平均摩耗幅と切削時間の関係を示している。いずれもCoがバインダのA工具の摩耗量が最も少なく，次いでTin使用のC工具，Al_2O_3 使用のB工具が最も多くなっている。17% Si －T6材は10.2に示すように23% Si －F材より強度が高いため工具摩耗が激しい。

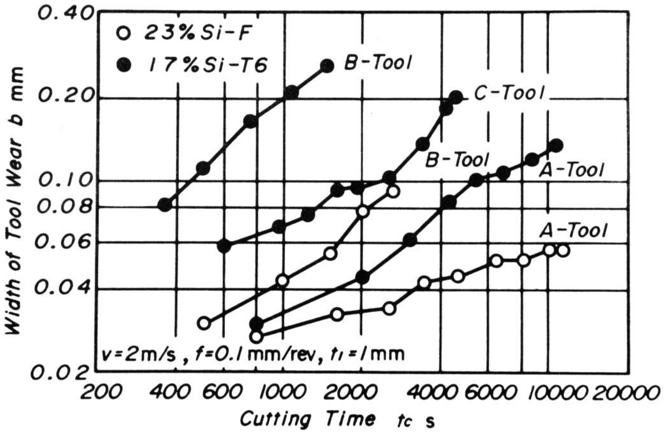


図10.2　各工具の切削時間と工具摩耗量

図10.3 上段は17% Si －T6材をA工具を用いて切削した場合のすくい面摩耗の全体像とその拡大像，Ⓑ方向の工具表面形状及び元素面分析箇所と線分析方向を示している。すくい面摩耗は切込み1㎜までほぼ一様に約0.6㎜の幅で摩耗し，その表面に黒くみられる粒は炭素が主成分であり，A工具自体に小量含まれている炭素が工具の摩耗にともなって工具表面に付着したものと思われる。なお，この付着物はB，C工具においては観察されなかった。図10.2に示すように，A工具では長時間の切削にもかかわらず逃げ面摩耗量は比較的小さいため，切刃の後退量はわ

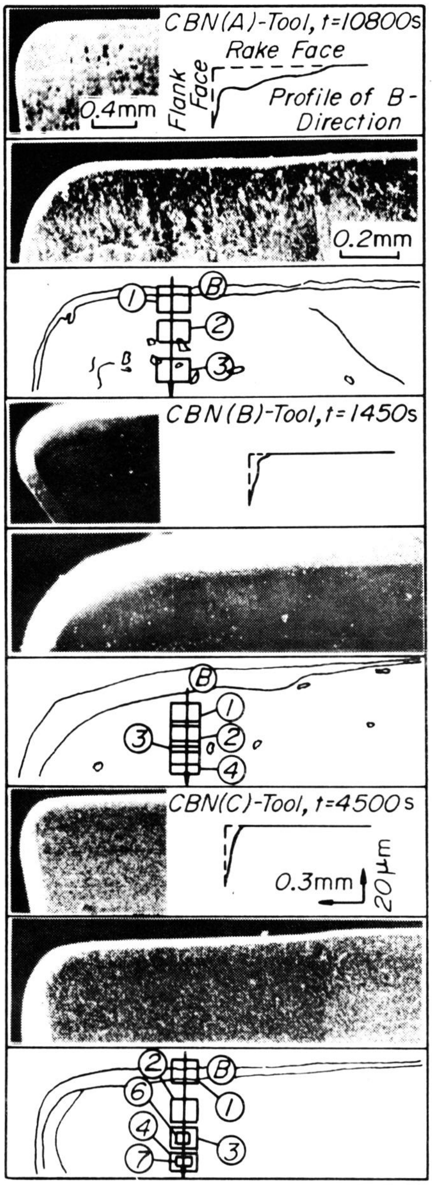


図 10. 3　17%Si－T 6 材を各工具で切削した場合の工具摩耗状況

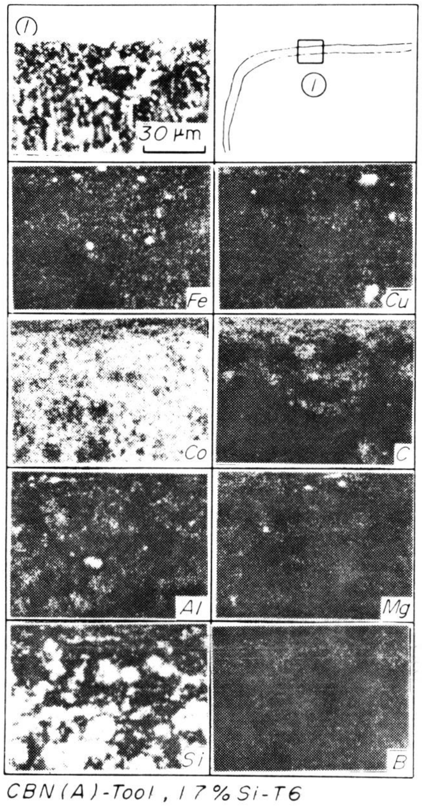


図 10. 4　切刃中央部のEPMA分析

ずかであるが，すくい面は他の工具に比べ多く摩耗している。図10. 3 上段の拡大像下方には切刃に平行に長さ0. 4㎜の亀裂（図中白い線でみえる）が生じ，切刃からこの部分まで切りくずの擦過痕が明瞭に認められ，Siの付着が多い。図10. 3 上段右側にⒷ方向の工具表面形状を示すが，切刃に近いほど摩耗が激しく，その摩耗量は最大15 μm 程度であり，切刃から約0. 2 ㎜離れた部分で小さく窪んでいるのは亀裂のはいっている部分である。この亀裂に沿って摩耗の進行がみられるが B，C工具においては亀裂の発生はみられなかった。

図 10. 4 は図 10. 3 中の①部分の拡大写真と元素面分析結果を示す。図上方の白い部分は逃げ面の急傾斜部分であり，CとCuが多く付着している。切刃から約20 μm の幅の部分では切りくずの擦過痕はほとんどなく，この下方部分から亀裂の生じている部分まで，切りくず流れに沿って溝状にCBN粒子の脱落が認められ，Siが多く付着している。Alもほぼ Si と同じ分布状態を示しているが，

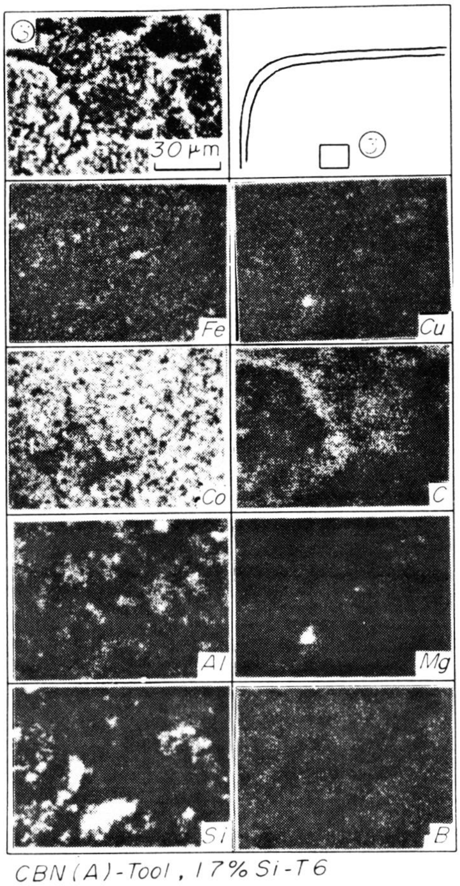


図10.5　亀裂部分のEPMA分析

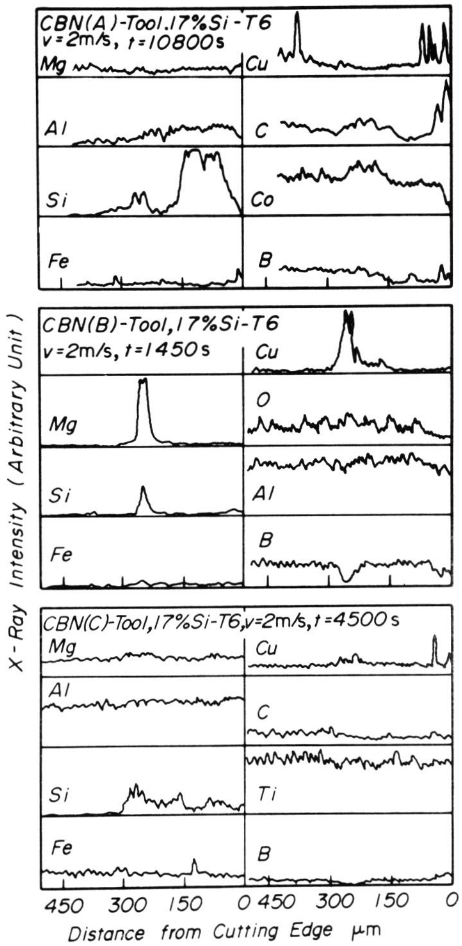


図10.6　17%Si－T6材を各工具で切削した場合のすくい面中央部の線分析結果

Fe, Mgなどは全面に分布している。この部分のSi濃度の高いところでCo濃度も高くなっている部分もあり，CoとSiの結合が生じていると考えられ,[3] この傾向は下方へいくほど激しくなっている。

亀裂のある③部分の拡大写真を図10.5に示す。亀裂はSiの付着がなくなりかけた部分の刃先前方から切込み中央部にかけて発生しているが，観察部分では左上方から右下方にかけて亀裂がはいり，亀裂に沿ってC濃度が高くなり，中央部の亀裂が合流している部分ではとくに高くなっている。この亀裂を境としてSiの付着が少なくなることより，切りくずの擦過圧が変化しているとみられ，17%Si－T6材はかたいため切削熱の発生が大きく，この部分で熱的なアンバランスが生ずることによって亀裂[4]が発生すると考えられるがCとの関係は不明である。

切刃中央部Ⓑ方向のEPMAによる線分析結果を図10.6上段に示す。このときのX線ビーム径は約1 μmであり，ビームは分析方向に対して直角に120 μmの幅で走査している。Cuは切刃から100μm程度まで粒状に付着しているが，その後は少なくなり，Siは亀裂が生じている200μm程度まで多

量に付着し，亀裂部分では少ないが，その部分を過ぎるとまた少し付着し，やがて減少している。Alも同様の傾向を示しているが，Mg，Feは全体に均一に付着しているようである。工具成分のCoはSi付着域でやや減少しているが，その後は一定の値を示し，BもCoと似た傾向を示している。このようにA工具では摩耗の最も激しい部分でSiの付着がみられ，SiとCoとの結合が生じ，固溶体を形成しているようであり，[5] この固溶体の形成による結合力の低下がCBN粒の脱落につながり摩耗は進行すると考えられる。また，けい素粒子の引掻き作用による摩耗もあるがCBN粒がけい素粒子よりもかたいためわずかであると思われる。

図10.3中段はAl_2O_3がバインダのB工具を用いて17%Si－T6材を同じ条件で切削した場合の同様のすくい面写真を示している。切削時間は24minとA工具に比らべかなり短かいため，すくい面摩耗量は少ないが摩耗域は切刃から約250μmの幅でみられ，切込みより外側の未摩耗部分に比べて切刃は約50μm後退しているため，実質的には300μmの範囲ですくい面摩耗が生じている。また切削温度が高い刃先部分の摩耗はA工具よりかなり大きくなっている。写真中白くみえる部分は摩耗してしまった前逃げ面及び横逃げ面の急傾斜部分である。すくい面摩耗部分では，切りくずの擦過痕が明瞭に認められ，この摩耗終端部に付着物の堆積が生じている。

図10.7は摩耗の激しい①部分の拡大写真と元素面分析結果を示している。切りくず流れに沿って溝状にCBN粒が削りとられている様子がわかる。この工具はAl_2O_3がバインダであるためAlの濃度が高くなっているが，この部分にはA工具でみられたSiの付着はなく，他の元素もほとんど付着していない。これはB工具にはCoが使用されていないこと及び被削材中のアルミニウムと工具中のアルミナとの親和性が大きく，切りくず擦過部分では切削熱と高い圧力により，切りくずと工具中のAl_2O_3とが結合し，けい素粒子が直接工具面を擦過するのを阻外することや，Al_2O_3及びCBN粒子とSiが結びつきにくい事などが原因と考えられる。

図10.8は摩耗終端部に付着物のある④部分の拡大写真と元素面分析結果を示している。付着物は約40μmの幅で横に連なりMgが多くCu，Siも付着している。しかしFeの付着量はA工具よりも少なかった。被削材中のアルミニウムも付着していると思われるが，工具材中にAl_2O_3が多いため区別がつかない。

図10.6の中段はB工具の®方向の線分析結果を示しているが，すくい面摩耗が生じている部分には

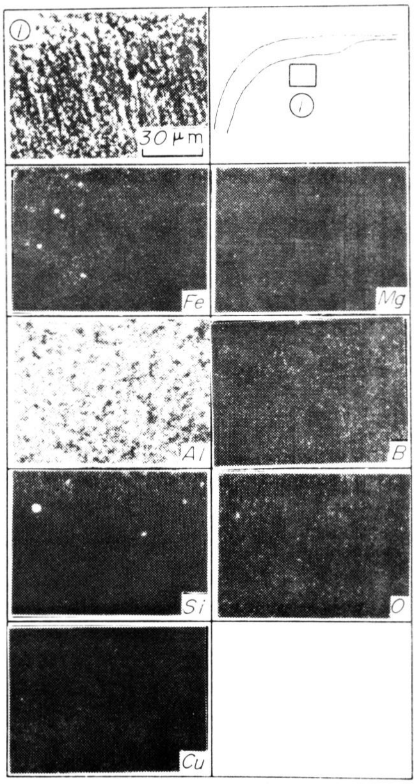


図10.7　中央切刃付近のEPMA分析

Al以外の元素の付着は全くみられないが，摩耗終端部においてはMg,Cu,Si等の付着がみられる。しかしFeの付着は全体的に少なく，この工具が鉄系合金の切削に優れていることが予想される。

図10.3下段はTiNがバインダのC工具を用いて17%Si－T6材を同様の条件で切削した場合のすくい面の状態を示している。切削時間は75minでありほぼA工具の半分程度であり，すくい面摩耗の形はB工具とよく似ている。すくい面は一様に摩耗し，その摩耗域は切刃から約300μmの幅であるが，B工具と同様切刃が約30μm後退しているため実質的には330μm程度となる。刃先部分の摩耗はB工具程激しくはないが，A工具よりはいくぶん摩耗している。

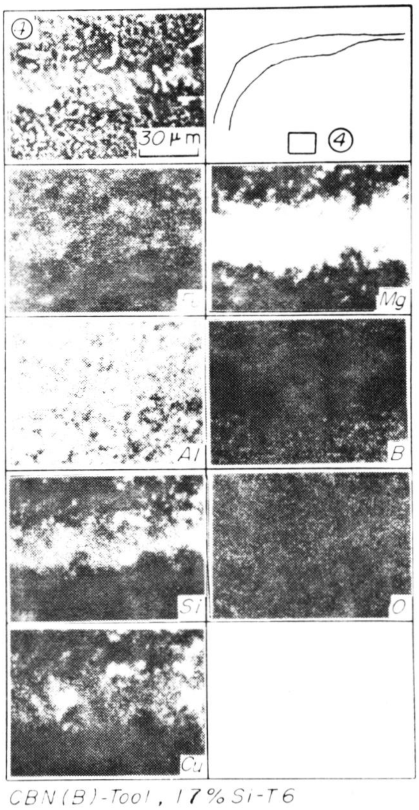


図10.8　摩耗終端部のEPMA分析

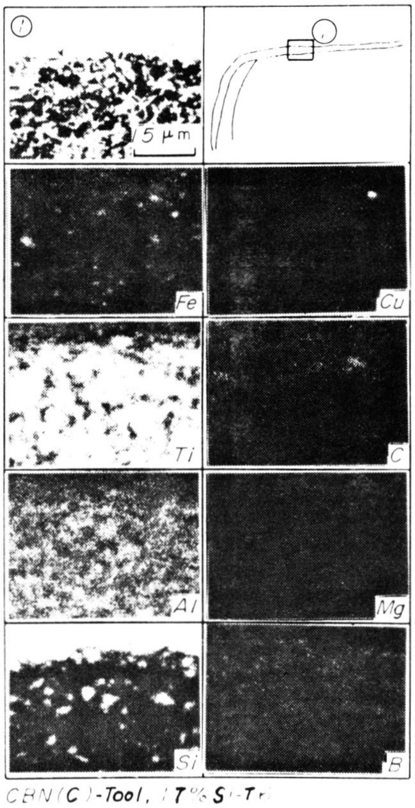


図10.9　切刃中央部のEPMA分析

摩耗の激しい切刃中央部①の拡大写真と元素面分析結果を図10.9に示す。白く写っている逃げ面部分にはSiが多く付着し，逃げ面摩耗が現在この部分で進行し，この摩耗がけい素粒子によることを示している。[7] すくい面上のSiの付着はA工具ほど多くはないが多小付着し，他の元素の付着は少ないようである。C工具ではバインダにTiNが使用されているがAl_2O_3も添加されているためAl濃度も高くなっている。

図10.6下段はC工具のⒷ方向の線分析結果を示している。摩耗が生じている300μm付近までSi

が付着し，Cu，Mgも少し付着し，付着物の様子はA工具とB工具の中間的様子を呈している。

10．3．2　Al － 23％Si － F 材の切削

A工具を用いて23%Si－F材を 210min 切削した場合のすくい面摩耗状況を図10.10上段に示す。17%Si－T6材の場合と異なり，材料が柔かいため長い流れ形の切りくずが生成され，すくい面に大きなクレータが形成されている。このクレータはB工具においても観察され，これは工具と切りくずの接触範囲が大きくなるためと思われる。A工具のクレータ形状は図右側の表面形状に示されているが，切刃から約200μmの幅でプラトー部が形成され，その後方約600μmの幅で刃先から切込み端部まで工具の剥離によるクレータが生じている。このクレータの最大深さは50μmとかなり大きく工具の再研摩は容易でないと思われる。④部分には小さな亀裂が多くみられ，次にこの部分に剥離が生ずることが予想される。プラトー部の摩耗は17%Si－T6材の場合に比べ，切削時間が長いにもかかわらずわずかであり，刃先先端から0.6mm程度まではSiが多く付着しているが，この部分より切込

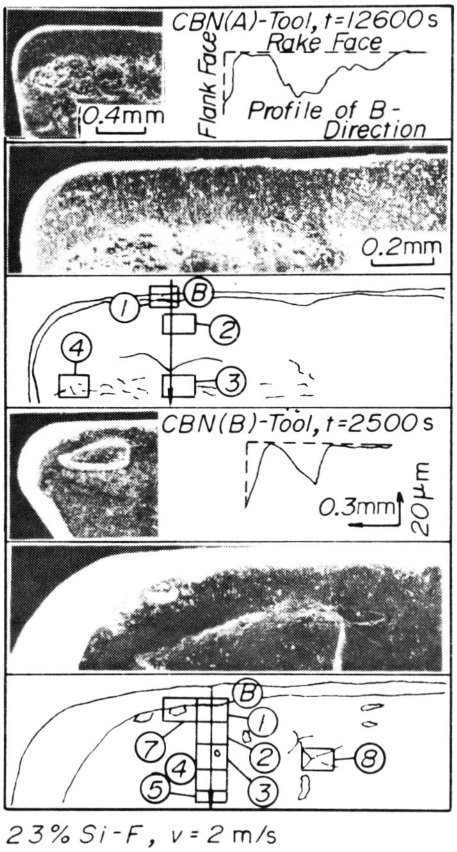


図10.10　23%Si－F材を各工具で切削した場合の工具摩耗状況

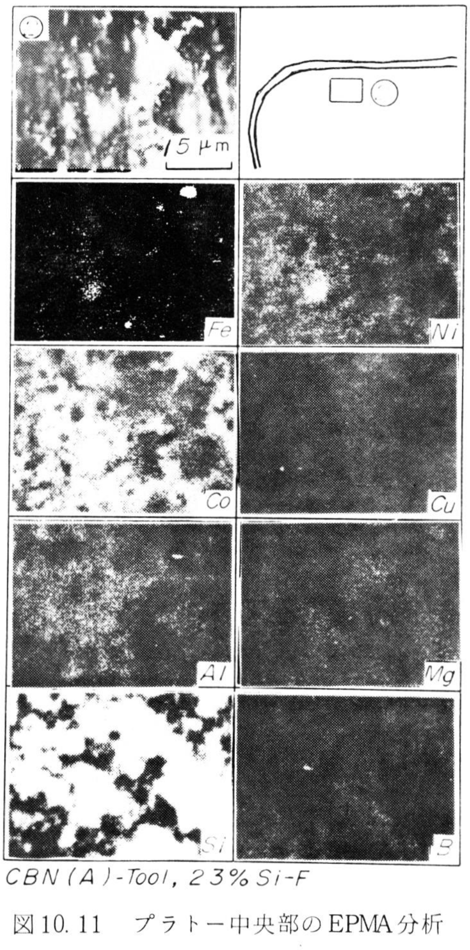
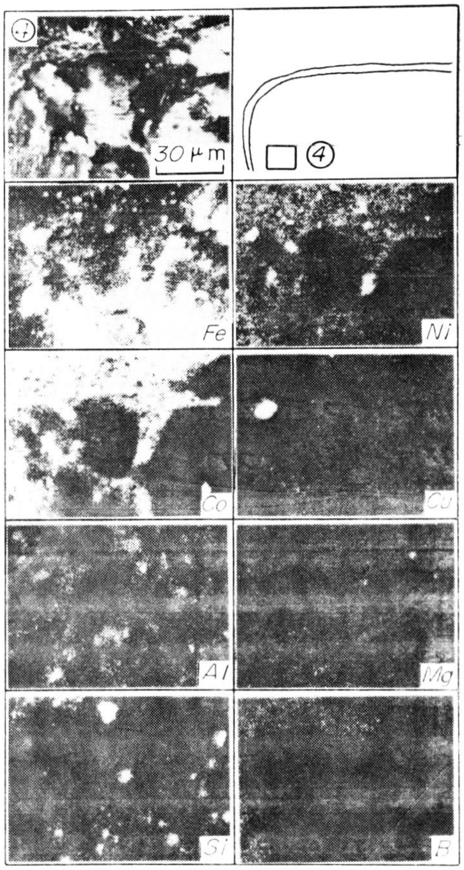


図10.11　プラトー中央部のEPMA分析

み終端にかけては切りくず流れによる擦過痕は少なくSiの付着もごくわずかである。これは17%Si－T６材の場合に比べ材料が柔らかいため刃先から中央部にかけてはCoとSiが結合する切削温度までに達したものの，切込み後半域においてはCoとSiの結合温度まで達しなかったものと思われ，全体的な切削温度の低下が初晶けい素粒子が17%Si－T６材よりも多いにもかかわらずすくい面摩耗を少なくしたものと考えられる。

①部分の切刃部では約20μmの幅でSiはあまり付着していないがCo濃度の低下がみられ，切りくずによって持ち去られたものと思われる。この部分の下方からSiの付着が多くなり，その様子を図10.11に示す。図は②部分の拡大写真及び元素面分析結果を示しているが，切りくず流れにそってSiの付着が多く，Co濃度の高い部分でSi濃度の高い部分もみられ，17%Si－T６材の場合と同様CoとSiが結合している部分もあることがわかる。この状態はプラトー部が終るまで続いている。このように多くのSiがすくい面上に付着する現象は第３章，第5章，第6章の超硬合金工具においては観察されなかった。これは超硬合金工具では切りくずの擦過によって摩耗は一部メカノケミカル的に進行するが，CBN粒は窒化粒子であるためアルミニウムとの親和性が小さく，この種の摩耗の進行速度は非常に遅く，またけい素粒子よりもCBN粒子が硬いため引掻きによる摩耗も少なく，工具が長時間切りくずと接触するためと考えられる。この部分での摩耗はCoとSiの結合によるCBN粒子間の結合力の低下による脱落によって進行するため，切削温度が大きく影響し，切削による温度上昇が小さい23%Si F材の摩耗量が17%Si－T６材よりも小さくなったと考えられる。



CBN (A)-Tool, 23% Si-F

図10.12　剥離部のEPMA分析

図10.12は剥離部に小さな亀裂の集中がみられる④部分の拡大写真と元素面分析結果を示す。この部分は次に剥離が予想される部分であるが，多くのFeの付着が認められ，Fe付着量の少ない部分でCo濃度の減少している部分もあるため，全体的にCo量が多いもののむらがある。第５章の超々ジュラルミンの乾式切削の際にも超硬表面のFe付着物に亀裂がみられ，このことと関係があると思われるが原因は不明である。この剥離現象はAl－16%Si－４%Cu－0.5%Mg合金のＦ材の切削においても生じており，この工具によるハイパーシルミンのＦ材において共通して生ずるものとみられる。

図10.13上段はⒷ方向の線分析結果を示す。切刃

から200μm程度までのプラトー部にはSiの付着が多く，Co, Niの強度は弱くなっている。Feは切刃部分と剥離が生じているクレータ部分に多くみられ，とくにクレータ部分に多量付着し，この部分のBの強度は強くなったり弱くなったり特徴的である。Cu, Mgは摩耗域全体に微量付着している。

B工具を用いて23%Si－F材を切削した場合のすくい面摩耗状態を図10.10下段に示す。切削時間は42 min と短かいがA工具と同様大きなクレータが形成され，最大深さは約50μm であるが幅は約0.4 mmと小さくなっている。切刃からクレータにかけて約100μmの幅のプラトー部が形成されている。工具刃先部分では切削温度が高くなるため⑦にみられるように部分的にえぐり取られたように摩耗が進行しているところもみられる。また⑧部分では亀裂がみられ，さらにクレータ摩耗は大きくなると思われ，この種の亀裂がクレータ摩耗に重要な役割を果すものとみられる。

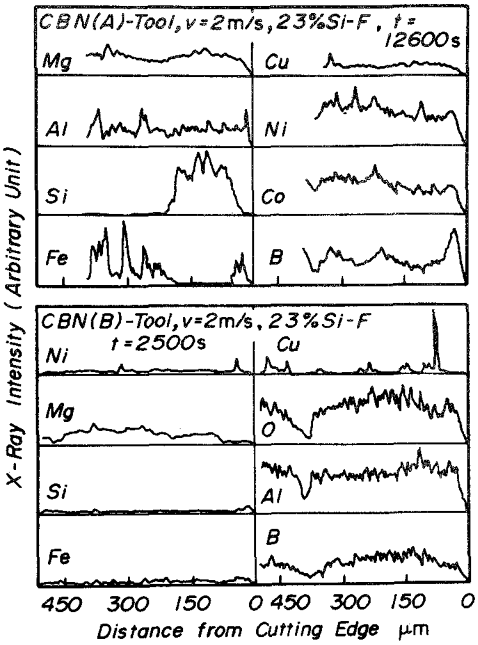


図10.13　23%Si－F材を各工具で切削した場合のすくい面中央部の線分析結果

図10.13下段はB工具のⒷ方向の線分析結果であるが，Cu，Feが全体的に少量付着し，Mg はクレータ部分に多く認められる。このようにB工具においてはいずれのハイパーシルミンにおいてもSiの付着量はきわめて少なかったが，バインダーのAl_2O_3が被削材のアルミニウムと結合するため摩耗が進行するようである。

10．3．3　SKD61熱処理材の切削

SKD61熱処理材をA，B，Cの各工具で切削したときの工具摩耗幅と切削時間の関係を 図10.14に示す。この場合ハイパーシルミンの場合とは逆にA工具の摩耗が最も激しく，次がC工具であり，B工具の摩耗幅が最も少なくなっている。

これら工具のすくい面摩耗状況及び切込中央部における表面形状を図10.15に示す。A工具ではB，C工具にみられるクレータは形成されず，逃げ面摩耗と同じように切刃部から急激に摩耗が進行し，切刃から0.8 mmの範囲まで摩耗している。表面形状をみると切刃部で約25μm 摩耗し，切りくず流れの方向に徐々に摩耗量は減少し，切刃から0.25mmはなれた点で表面形状曲線の傾きが変わっている。この点は写真中に白いFeの付着物がみられる部分であり，現在摩耗が進行している部分と思われる。

図10.16はA工具の切刃中央部の拡大写真であるが，CBN粒子が脱落した部分に浅い窪みが生じ

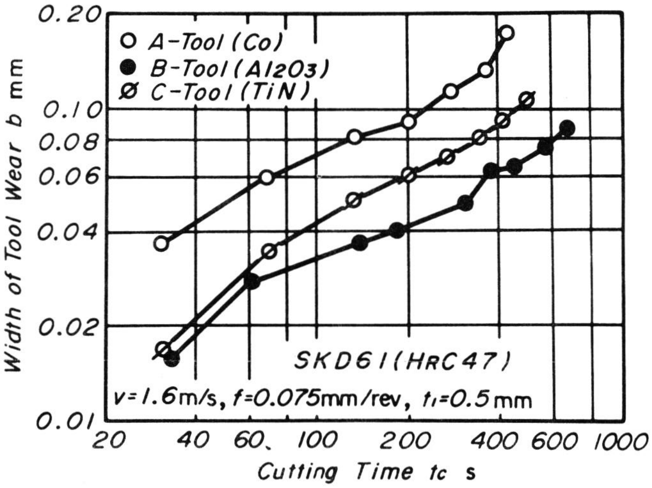


図 10.14　SKD61材を各工具で切削した場合の切削時間と工具摩耗量

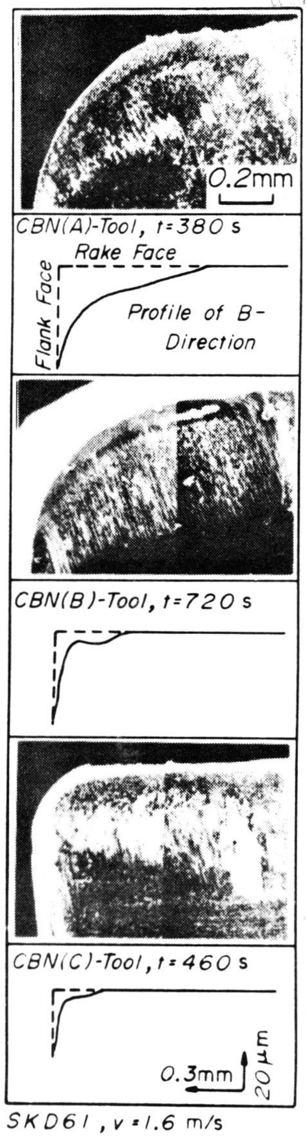


図 10.15　SKD61材を各工具で切削した場合の工具摩耗状況

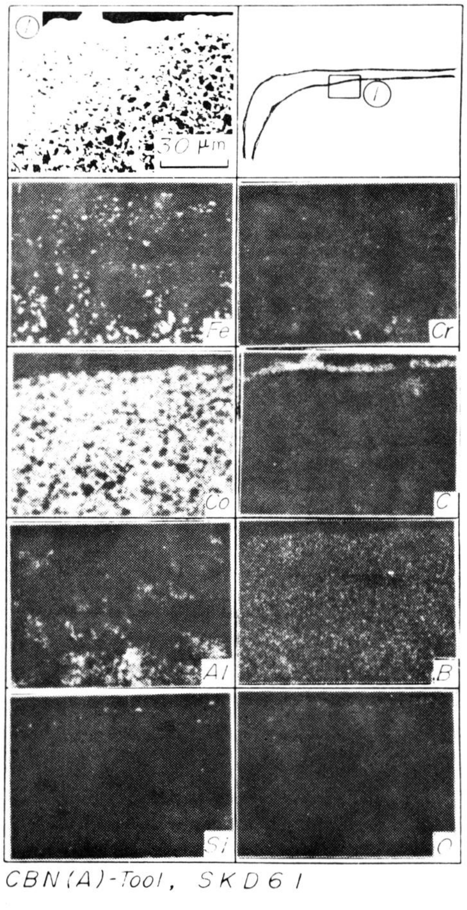


図 10.16　A工具切刃中央部のEPMA分析

この写真下方にFeの付着が少しみられる。Feの付着は切削熱のため柔らかくなったCoが切りくず流れによりCBN粒の上へ押流され，この広がった部分にFeの付着が生じ，これが起点となって大きくなるようであるが，切りくず流れが激しく摩耗が早いと付着しにくいようである。工具摩耗はCrやCを固溶して

非常にかたくなっているマルテンサイト組織による引掻きと，Coの拡散によって結合力の低下したCBN粒の脱落によって生ずると考えられる。この合金の切削温度はハイパーシルミンよりもかなり高く，FeへのCo拡散量が非常に大きくなり，[6)]工具摩耗が他の工具よりも急激に進行したと考えられる。

図10.15に示されるようにB，C両工具とも切刃部に50μm程度のプラトー部が形成され，その後方にクレータが生ずる摩耗形態を示し，クレータ部にFeの付着物が切りくず流れに沿って細かく付着している。C工具ではところどころ大きな塊となった付着物がみられる。このように付着物はB工具よりもC工具に多くAl_2O_3よりもTiNの方にFeが付着しやすい傾向を示している。A工具の付着物がすくないのは摩耗がきわめて早いためと考えられる。また線分析の結果いずれの工具の付着物の成分もほぼ被削材の成分と同じであり，特定元素の選択的な付着は認められなかった。

10・4　結　　言

以上バインダの異なる3種類のCBN工具を用いてハイパーシルミンとSKD 61を切削し検討した結果をまとめると以下のようになる。

(1)　ハイパーシルミンのF材およびT6材の切削には，被削材成分と親和性の大きいアルミナやチタンナイトライドをバインダに使用したCBN工具よりは親和性の小さいコバルトをバインダにしたCBN工具の寿命が長い。しかし長時間の切削において，すくい面に熱的亀裂や剥離現象が観察された。

(2)　SKD 61熱処理材の切削には鉄との親和性が小さいアルミナをバインダにしたCBN工具はすくい面に付着物が少なく工具寿命が長かった。

(3)　このような切削熱による拡散摩耗では，被削材と工具との親和性が小さい工具の寿命が長く，被削材と工具材の成分をよく吟味して使用する必要がある。

参　　考　　文　　献

1）　機械技術：29，5（1981）33～72.

2）　鳴瀧則彦，山根八州男，武内陸郎：精密機械，45，2（1979），81.

3）　大庫和孝，中島耕一，栗野泰吉：精密機械，41，4（1979），69.

4）　星　光一，星鐵太郎：金属切削技術（1969，工業調査会），122.

5）　C. Hauser：Wear，62，1（1980），59.

6）　奥島啓弐，鳴瀧則彦：精密機械，35，2（1969），28.

第11章　ダイヤモンド焼結工具の特性

11．1 緒　　言

第９章，10章において，超硬合金工具では工具摩耗の激しいハイパーシルミンの切削において，CBN工具が優れた耐摩耗性をもち，被削材との親和性が小さいCoをバインダに使用した工具の寿命が長いことを示した。すなわち被削材よりもかたく，親和性の小さい工具が良い。ところでダイヤモンドは物質中で最もかたく，またCBN粒よりも熱伝導率(21W／(m・k))が良くアルミニウムとも反応しないため工具材料としては良いが，反面，高価であり，チッピングが生じやすいなどの欠点もあるため，非鉄系の精密加工に使用され，通常の切削には使用されなかった。しかし近年ダイヤモンドの合成が可能になり，ミクロンオーダのダイヤモンド粒子を焼結し，じん性を高くしたダイヤモンド焼結工具が非鉄系の切削に使用されてきている。このため本章ではCoにより焼結されたダイヤモンド焼結工具を用いて，四種類のAl−Si系鋳造合金のＦ材とＴ６材を乾式切削した場合の仕上面あらさを表面あらさ計とＥＰＭＡにより調べ，CBN工具，超硬合金工具，高速度鋼工具との比較を行ない，また最も工具摩耗の激しいハイパーシルミンのＴ６材を種々の速度で切削した場合の工具摩耗状態をＣＢＮ工具と比較し，ダイヤモンド焼結工具の特性を調べることを目的とした。

11．2 ダイヤモンド工具の仕上面特性

11．2．1 実 験 方 法

実験に供した試料の化学成分を表11.1に，機械的強さを表11.2に，その組織写真を図11.1に示す。ＡＣ２Ｂ，ＡＣ４Ａ，ＡＣ４Ｂ，ＡＣ８Ａはいずれも金型鋳造材であるため，そのＦ材及びＴ６材のけい素粒子はいずれも数十μm～百μm程度である。その機械的強さはそれぞれ標準的な値を示している。表中下段の二種類の試料は比較のため用いた試料で，$ＡＣ４Ｂ_c$−Ｔ６材は半連続鋳造材で，組織はかなり微細化し，けい素粒子の大きさは数μmと非常に小さく球状化しているため，引張強さも大きくなっている。また，展伸材7075−Ｔ6材は押出加工された丸棒であり，けい素量が少なく,かたく均質な組織を有するため引張強さは使用合金中最も大きい。

表11. 1　試料の化学成分

designation	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Al
ＡＣ２Ｂ	7.0	0.56	3.2	0.26	0.17	0.15	——	bal
ＡＣ４Ａ	9.0	0.33	0.18	0.03	0.56	0.53	——	bal
ＡＣ４Ｂ	8.1	0.65	2.2	0.84	0.40	0.20	0.10	bal
ＡＣ８Ａ	11.7	0.62	1.3	0.1	1.2	——	0.92	bal
7075	0.5	0.7	1.6	5.6	2.1	0.3	——	bal
$ＡＣ４Ｂ_c$	7.0	0.12	2.7	——	0.29	——	——	bal

実験には昌運カズヌーブ旋盤を用い，削り速度v＝1.6，3.3，6.6m/s，送りf＝37，75μm/rev

と変化させ，切込み$t = 1.0$ mm一定の乾式切削を行ない，切削後の仕上面を表面あらさ計（TALYSURF 4型）で測定し，ＥＰＭＡ観察を行なった。このとき使用した工具は高速度鋼工具SKH4，超硬合金工具K10，CBN工具，ダイヤモンド焼結工具（ダイヤモンドコンパックス，以後ＤＣ工具と略称する）であり8wt％Coにより焼結されている。いずれの工具も刃先諸元0−5°−6°−6°−8°−0−0.2を有するバイトである。

表 11. 2　試料の機械的性質

Materials	Vickers Hardness (Hv)	Tensile Strength (MPa)
AC 2 B-F	101.0	202
AC 4 A-F	61.6	176
AC 4 B-F	94.0	178
AC 8 A-F	98.4	223
AC 2 B-T6	122.0	289
AC 4 A-T6	95.3	276
AC 4 B-T6	142.1	252
AC 8 A-T6	118.0	338
7075-T6	142.0	570
AC 4 B$_E$T 6	126.0	392

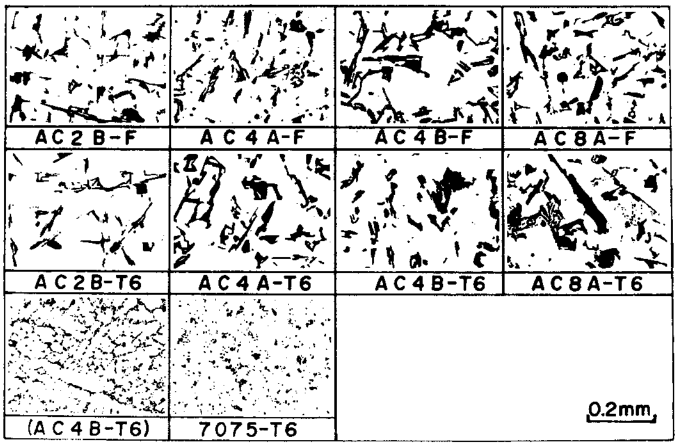


図 11. 1　試料の顕微鏡組織

11. 2. 2　実験結果

11. 2. 2. 1　CBN工具，DC工具による金型鋳造材の仕上面あらさ

ＡＣ２Ｂ－Ｆ材を$v = 1.6$，6.6m/s，$f = 37$，75μm/revの切削条件でＣＢＮ工具とＤＣ工具を用いて切削した表面状況の比較を図 11. 2 に示す。速度が遅いといずれの工具においても構成刃先の脱落痕が認められ，仕上面を悪くしている。送りが大きいとその程度も大きくなる傾向がみられ，表面にあらわれるけい素粒子は少なく，加工表面はアルミニウムの層でおおわれたようになっている。このため表面の光沢はにぶく，工具による差はない。速度が早くなるとＣＢＮ工具では溶着痕が残り，仕上面は低速の場合よりはいくぶん良いが，送りマークは不鮮明である。しかし同じ切削条件でもＤＣ工具では写真にみるように送りの大小にかかわらず送りマークが明瞭に認めら

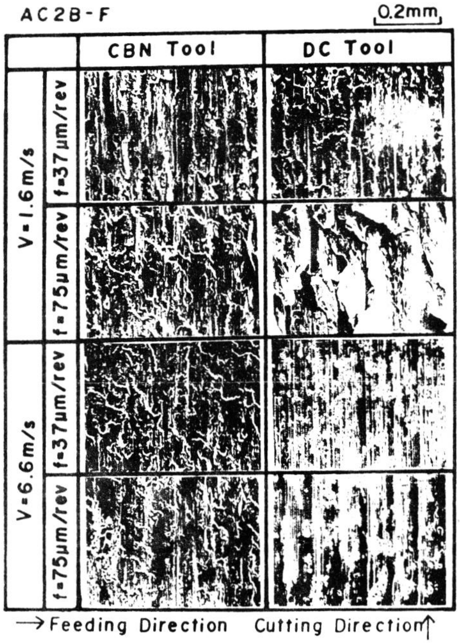


図11.2 AC2B−F材をCBN工具とDC工具を使用して切削した仕上面の状況

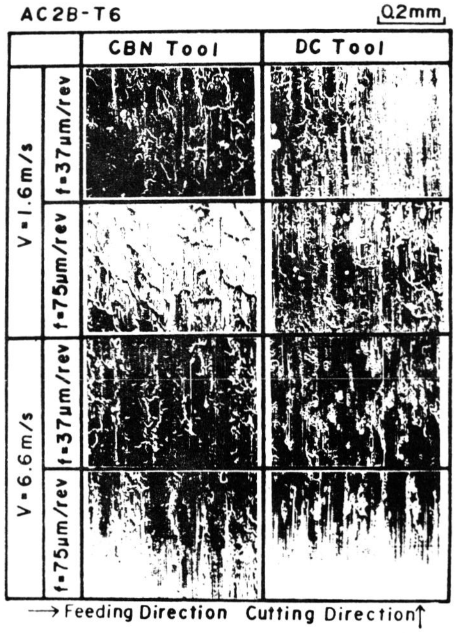


図11..3 AC2B−T6材をCBN工具とDC工具を使用して切削した仕上面の状況

れ，せん断されたけい素粒子などの破面が表面に現われ，切削状態が良好であることを示している。

ＡＣ２Ｂ−Ｔ６材を同様の切削条件で比較した場合を図 11. 3 に示す。Ｆ材の場合と同様に低速では構成刃先の脱落痕が加工表面を悪化させ，高速では，ＣＢＮ工具を用いると溶着痕が表面に残り，表面状態を悪くしている。しかし，ＤＣ工具では規則的な送りマークがみられ，硬いけい素粒子などがきちんとせん断されている。ＡＣ２Ｂ−Ｆ材に比し材料がかたくなっているため，表面あらさは全体として良い傾向を示している。この様子は他の金型鋳造材のＦ材とＴ６材においてもほぼ同様であり，ＤＣ工具の仕上面状態が良好であった。

このようにＤＣ工具の仕上面が良好であったが，この場合の速度及び送りの変化に伴う仕上面状況の変化の一例として，ＡＣ４Ａ−Ｔ６材をＤＣ工具で切削した場合を図 11. 4 に示す。v = 1.6m/s では送りに関係なく，いずれも構成刃先の脱落痕が多く付着し，加工表面は悪くなっている。構成刃先が消滅する付近の削り速度 v = 3.3m/s では，送りが小さいと切削温度が構成刃先の消滅温度に達しないため，v = 1.6m/s の場合よりは少ないが 構成刃先の

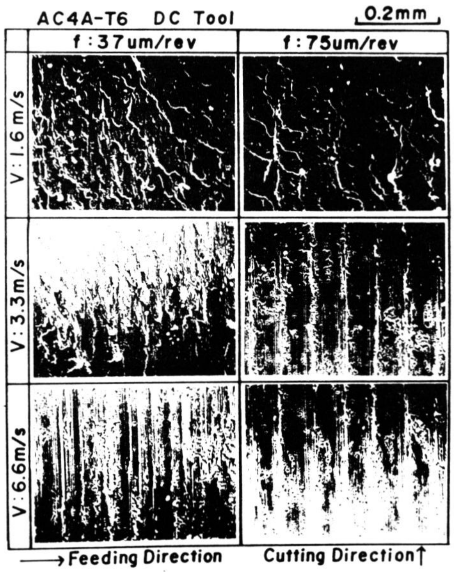


図 11. 4 AC4A−T6材をＤＣ工具で切削した仕上面の状況

脱落痕がみられる。しかし送りが大きくなると切削温度が上昇するため，構成刃先が消滅し，規則的な送りマークが認められるようになる。$v = 6.6$ m/s ではいずれの送りにおいても溶着痕はなく，送りマークが明瞭にみられ表面あらさも $v = 3.3$m/s に比べ良くなっている。かたいけい素粒子等のせん断のされ方も $v = 3.3$m/s ではいくぶん切削方向に流れているが，速度が増大するとその傾向は少なく，硬質粒子のせん断面が加工表面に露呈している。

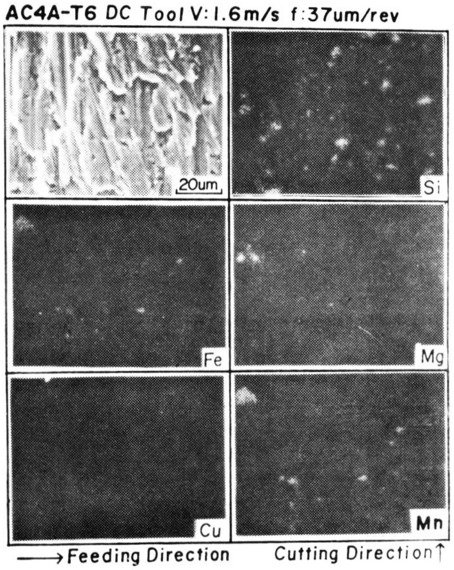


図 11.5　AC4A−T6 材の低速切削における仕上面のEPMA分析（DC工具使用）

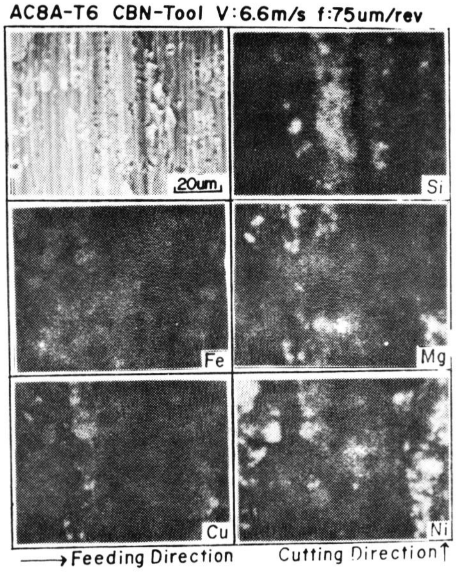


図 11.6　AC8A−T6 材の高速切削における仕上面のEPMA分析（CBN工具使用）

このようにＤＣ工具で高速切削を行なうと良好な仕上面が得られるが，この場合の仕上面を拡大して，低速の場合及びＣＢＮ工具の場合について比較した結果を図 11.5，11.6，11.7 に示す。図 11. 5 はＤＣ工具でAC4A−T6 材を低速切削した場合の加工表面の面分析結果である。表面は構成刃先の脱落痕と思われる付着物によっておおわれ，実際の切削面はほとんど表面に現われていないようである。元素分析をみるとＳｉ が非常に細かく分散している。これは図 11. 1 に示される程度のけい素粒子が，刃先前方のせん断域において微細に砕かれた後に付着したと考えられ，切くずの組織と良く似て

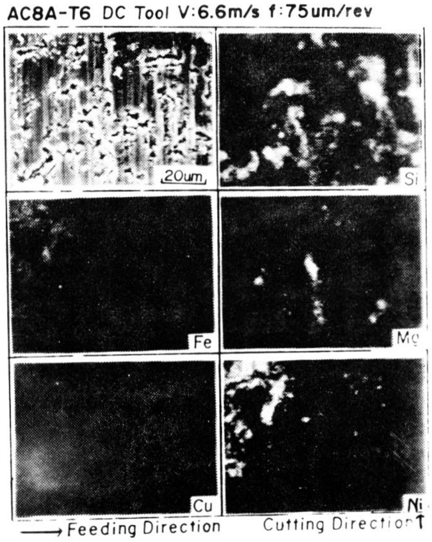


図 11.7　AC8A−T6 材の高速切削における仕上面のEPMA分析（DC工具使用）

いる。他の元素についても同様の傾向がみられ，低速切削においては，この構成刃先の脱落痕の付着が仕上面を劣化させる最大原因と考えられる。図 11.6 はAC8A－T6材をCBN工具を用いて高速切削した際の表面状態を示している。この材料ではAC2B材においてみられた溶着痕は少なく，切削方向に多くのきずが認められる。一部は工具マークであり，他は硬質粒子のせん断片の一部が被削材表面をいくぶん引掻いた後に被削材表面に押込まれるまでの引掻痕のようである。このため Si 及び金属間化合物を形成しているFe，Mg，Cu，Niの元素は，すべて切削方向に連なっている。CBN工具では硬質粒子のせん断片が加工物表面を引掻き，面を悪くするようである。同様の切削条件でDC工具を用いた場合の表面状態を図 11.7 に示す。図に示すようにけい素などの硬質微粒子のせん断面が，加工表面に露呈し，これら粒子の切削方向前方側に 2～3 μm 程度の細隙が認められる。これは硬質粒子がせん断の際に切削方向に押され，せん断後元にもどるために生じたと考えられる。この変形の反作用の助力により，せん断がより短時間で行れるため，せん断片はあまり生ぜず，それらの引掻による仕上面の悪化は少ないようである。このため S_i，Fe，Mg，Cu，Ni などの元素はCBN工具の場合ほどはっきり切削方向に連なっていない。DC工具の硬質粒子に対する切れ味は良いようである。

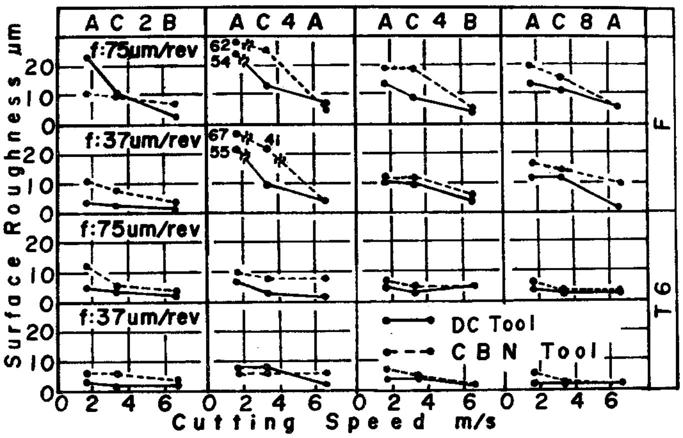


図 11.8 CBN工具とDC工具を使用して各合金を切削した場合の切削仕上面あらさと削り速度の関係

図 11.8 は四種類の金型鋳造材のF材とT6材をCBN工具，DC工具を用いて切削した場合の表面あらさの変化のようすを速度と送りを変えた場合について示している。低速域において，F材では構成刃先の脱落痕の付着による仕上面の劣化が認められるが，T6材ではその程度は小さくなっている。削り速度が大きくなると，いずれの合金においても仕上面は良好になっている。CBN工具とDC工具について比較してみると速度が遅いとおおむねDC工具がCBN工具よりも構成刃先がつきにくいため良くなっている。速度が早くなると両工具によるあらさの差は縮まり，$v = 6.6$m/s ではその差は小さくなっている。しかし両工具の硬質粒子に対する切れ味は上述のように異なるためDC工具が優れていると思われる。

11．2．2．2 SKH4 工具，K10 工具，CBN工具及びDC工具による仕上面あらさ

SKH4，K10，CBN，DCの四種類の工具の切削抵抗の比較を図 11.9 に示す。このときの切削条件は $v = 1.6$，3.3，6.6m/s $f = 125$μm/rev 切込み 1.0 mm一定の乾式切削であり，主分力

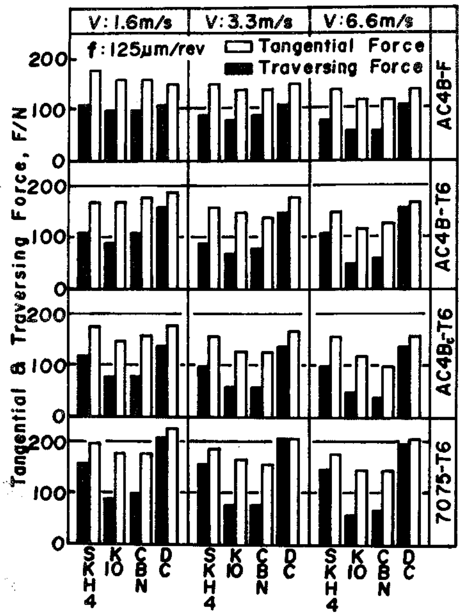


図 11. 9　SKH4，K10，CBN，DCの各工具で切削した場合の切削抵抗の比較

と送り分力の測定を行なった。AC4B−F材においては，切削抵抗が低く各工具の抵抗値にあまり差はないようであるが，T6処理した合金の切削抵抗は各工具とも高い値を示し，なかでもDC工具の抵抗値が他の工具よりも高くなり，とくに送り分力の増大が著しい。この傾向は7075−T6材において顕著である。これはダイヤモンド単結晶工具にみられるくいつきの良さと関係があると思われるが，詳細は不明である。このため図11.10に示される切りくず形状をみてもDC工具の切りくずのみが他と異なりカールした形のものが多く，すくい面をこする摩擦力が大きいことを示している。

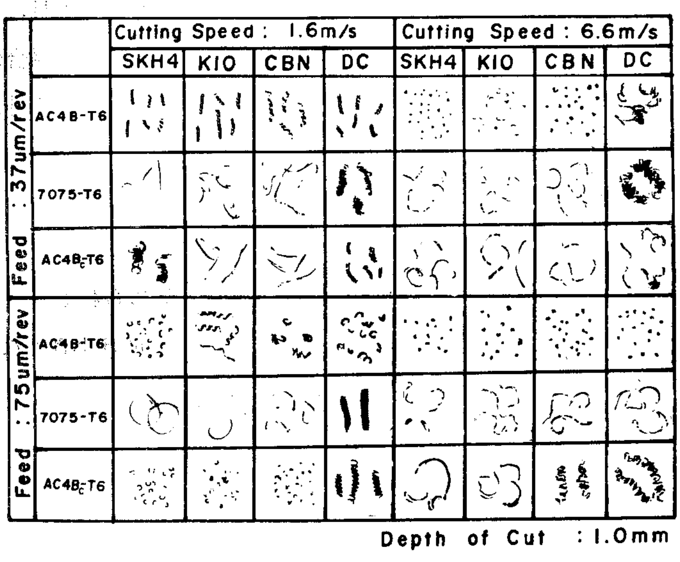


図 11. 10　SKH4，K10，CBN，DC の各工具で切削した場合の切りくず形状の比較

図 11. 11はAC4B−T6材を $v = 6.6$ m/s，$f = 37$ μm/revの切削条件で，各種工具を用いて切削した場合の仕上面状態とその近傍のあらさ曲線を示している。写真の倍率とあらさ曲線の横倍率は送りの山が一致するように等しくとってある。SKH4工具では加工表面全体がアルミニウムの薄い層でおおわれたようになり，ところどころに硬質粒子が埋まり，切削方向に沿って引掻痕がみられるが，あらさ曲線は規則的な送りマークを示している。K10工具では硬質粒子の破面がみられ，送りマークは切削方向にまっすぐ連なり，あらさ曲線の山の高さはSKH4工具よりやや小さくなっている。CBN工具では送りマークの山の部分がある程度削りとられているため，あらさ曲線の上下動は少ないが，送りマークは不鮮明である。DC工具では切れ味が良いため硬質粒子のせん断面が多く露呈し，送りマークも規則的に認められ良好な仕上面を呈している。

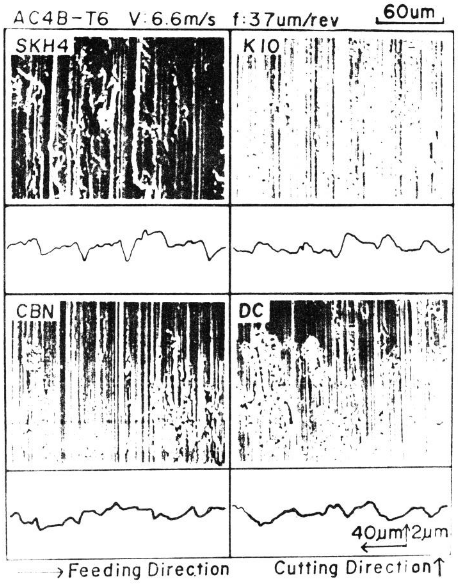


図 11.11　AC4B−T6 材を各工具で切削した場合の仕上面状況とそのあらさ曲線

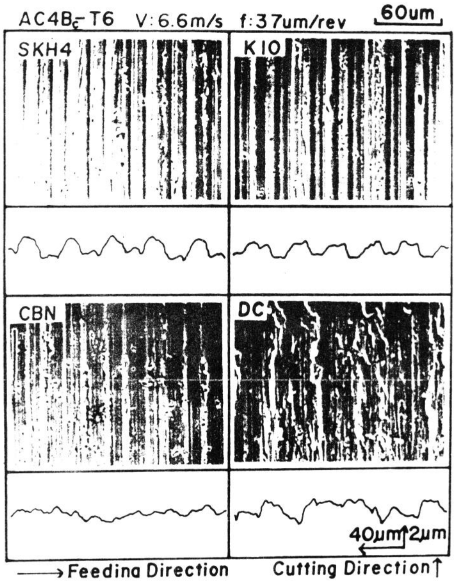


図 11.12　AC4Bc −T6材を各工具で高速切削した場合の仕上面状況とそのあらさ曲線

図 11.12はAC4Bc−T6 材の同様の場合であるが，被削材中のけい素粒子は細かく均一に分散しているため仕上面状態はかなり異なっている。SKH4，K10 工具はいずれも同じような仕上面を呈し，規則的な山をくりかえすあらさ曲線となり，けい素粒子の大きいAC4B−T6 材より良い仕上面になっている。CBN工具の場合も同様であり，SKH4工具やK10工具よりも山の高さが小さくなり，さらに良くなっている。DC工具では加工表面に溶着痕が付着し仕上面を悪くしている。

図 11.13はAC4B$_c$−T6 材を低速切削した場合について示している。SKH4工具の加工表面は他の工具に比べ構成刃先の脱落痕の付着が少なく，柔かいアルミニウムの層が表面に塗られたような感じを与える。このため送りマークは高いがわりあい規則的である。しかし他の工具においては，構成刃先の脱落痕の付着が旺盛であり，低速切削特有の仕上面の悪さを呈し，あらさ曲線も大きく乱れている。

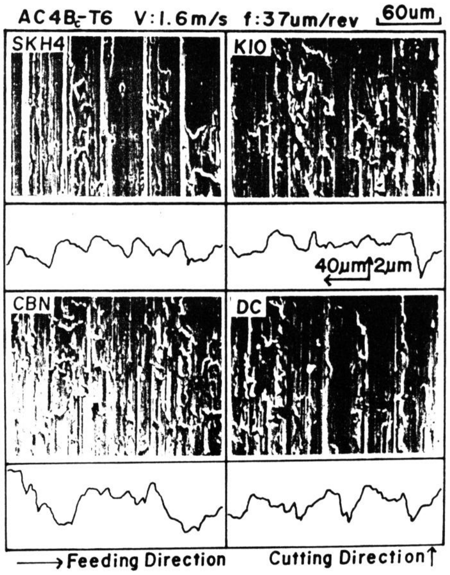


図 11.13　AC4B$_c$−T6 材を各工具で低速切削した場合の仕上面状況とそのあらさ曲線

図 11.14は，けい素量が少なく他の硬質微粒子も細かく分散し均質な組織を有する7075−T6 材を $v = 6.6\,\mathrm{m/s}$，$f = 37\,\mu\mathrm{m/rev}$で切削した場合について示している。いずれの工具による仕上面にも溶着痕はほとんどみられず，工具マークがはっきり認

められる非常に良好な仕上面を程し，各工具の特徴があらわれていると思われる。ＳＫＨ４工具のあらさ曲線はやや丸味を帯びた山の規則的なくりかえしを示し，Ｋ１０工具とＣＢＮ工具のあらさ曲線はよく類似し，送りと送りの間の凹凸は工具前切刃部のあらさを転写していると思われる。同様のことはＤＣ工具についても言えるが，ＤＣ工具では前切刃部のあらさが他の工具に比し小さいと思われるため，写真に示されるような高低差の小さい光沢のある仕上面が得られたと考えられる。この７０７５−Ｔ６材は低速切削においても構成刃先の脱落痕の付着が各工具とも生ぜず，高速の場合と同様良好な仕上面が得られた。

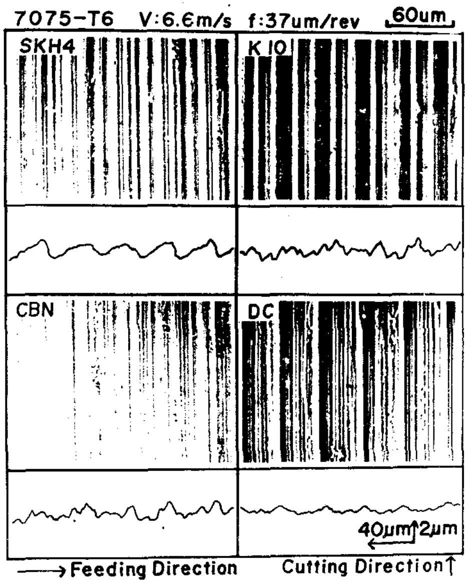


図 11. 14　７０７５−Ｔ６ 材を各工具で切削した場合の仕上面状況とそのあらさ曲線

これら各工具によるあらさの数値的な比較を図 11. 15 に示す。 低速で構成刃先の生ずるＡＣ４Ｂ−Ｔ６材ではいずれの工具も仕上面は悪化している。しかし高速になると構成刃先が消滅するため，あらさは良くなる傾向を示している。７０７５−Ｔ６ 材では構成刃先があまり生じないため削り速度の仕上面あらさへの影響は小さいようである。またＡＣ４Ｂ−Ｔ６材のようにけい素粒子の大きさが表面あらさ値よりもかなり大きな場合には，このけい素粒子をきちんとせん断できるＤＣ工具が良く，ＡＣ４B_c−Ｔ６材のようにけい素粒子が数 μm と小さくなると粒子が小さすぎて十分にせん断できず，必ずしもＤＣ工具が良いとは言えずむしろSKH4工具が低い値を示している。均質な組織を有する７０７５−Ｔ６ 材では，硬質微粒子が細かすぎて仕上面にはほとんど影響をおよぼさないため，アルミニウムとの親和性が小さく前切刃のあらさが小さいＤＣ工具の仕上面が良い。

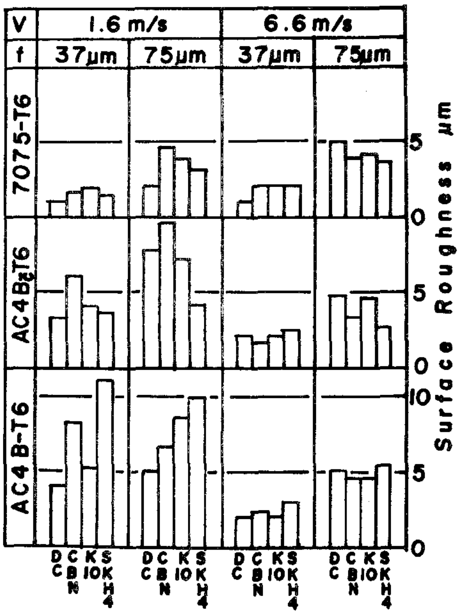


図 11. 1 5　各工具を使用してそれぞれの合金を切削した場合の仕上面あらさの比較

11．3　ダイヤモンド工具の摩耗特性

11．3．1　実験方法

実験に供した試料は第１０章において使用したAl －17％Si －T6材である。切削試験に使用したＤＣ工具は前節のＤＣ工具と同一の材質，形状を有する。ＤＣ工具の摩耗を比較するために使用した工具はP10，K10の超硬合金工具及びCBN工具（バインダにCoを使用）であり，いずれもＤＣ工具と同じ工具形状を有している。工具摩耗試験は削り速度 $v=2$m/s，送り $f=0.1$mm/rev の低速切削と $v=5$，10 m/s，$f=0.075$mm/rev の三種類の速度で，いずれも切込み $t=1.0$ mm 一定の乾式切削を行なった。工具摩耗幅は一定時間毎に工具逃げ面の平均摩耗幅 V_B を測定した。ＥＰＭＡによる観察は工具付着物を除去した後のすくい面について行なった。

11．3．2　実験結果

ＤＣ工具を用いてAl －17％Si －T6材をそれぞれの削り速度で切削した場合の工具摩耗幅と切削時間の関係を図 11.16に示す。比較のために使用したP10，K10の超硬合金工具及びＣＢＮ工具についても示している。削り速度 $v=5$m/s の場合を比較すると，この速度では超硬合金工具の摩耗が激しく実用にならないことがわかる。これは工具材料のＴiＣ，WCともにけい素粒子よりも硬さが低く，大きな初晶のけい素粒子による引掻き作用による摩耗が大きいためとみられる。しかし，けい素粒子よりも大きな硬さを有するＣＢＮ粒子やダイヤモンド粒子では，引掻きによって削り取られる量は少ないため20 min程度の切削においても摩耗量は小さく，まだ使用可能である。

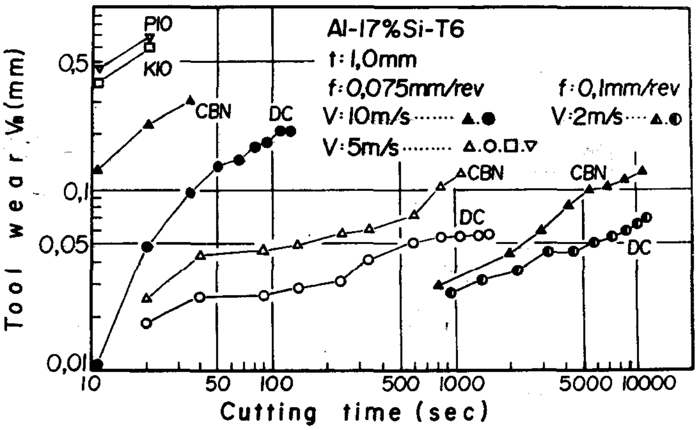


図 11.16　17％Si －T6材をCBN工具，DC工具を使って切削した場合の切削時間と工具摩耗幅の関係

ＤＣ工具とＣＢＮ工具の摩耗量を削り速度を変えて比較してみると，いずれの速度においてもＤＣ工具の摩耗量がＣＢＮ工具よりも小さく，ＤＣ工具がこの合金の切削には最も適していることが分かる。削り速度が遅くなるにつれて工具摩耗が著しく小さくなるのは，この工具の摩耗がけい素粒子の引掻きによるものではなくＣＢＮ工具と同様バインダのCoの拡散によることを示している。フィックの法則によれば物質の拡散定数は $D=Ae^{-Q/RT}$（Ｑ：活性化エネルギ，Ｒ：ガス定数，Ｔ：絶対温度，Ａ：定数）で示され，物質の拡散速度は温度上昇とともに指数関数的に急激に増大

する。このため削り速度が遅く切削温度が低いと摩耗の進行はきわめてゆっくりしているが，削り速度が早く切削温度が高くなると摩耗は急激に進行すると考えられる。またＣＢＮ工具よりも寿命が長い原因としては，ＣＢＮ粒子の熱伝導率（13 W/(m.k)）よりもダイヤモンド粒子の熱伝導率（21W/(m.k)）が大きく切削部の温度上昇が少くないこと及びＣＢＮ粒子のかたさ(Hv≒４５００）よりもダイヤモンド粒子のかたさ（Hv≒９０００以上 ）が硬くほとんど引掻きによる摩耗が生じないためと考えられる。

削り速度 $v = 2$m/s，$f = 0.1$mm/rev の条件で190min切削後のすくい面の摩耗状況を観察すると，摩耗域は切刃から 0.4 mm程度であり，長時間の切削にもかかわらず摩耗量は１ μm 以下である。切刃から約０.１５mmの幅の部分では第６章の乾式切削においてみられた掘り起された部分がみられ，この部分まで切削温度が高いことを示している。図 11. 17 はすくい面中央部の線分析結果を示しているが少量のFe，Ｓi 以外の付着物はほとんどなく，ダイヤモンドはきわめて安定であることを示している。ダイヤモンド粒子が鉄以外の元素とはあまり結合しない例を図 11. 18 に示す。

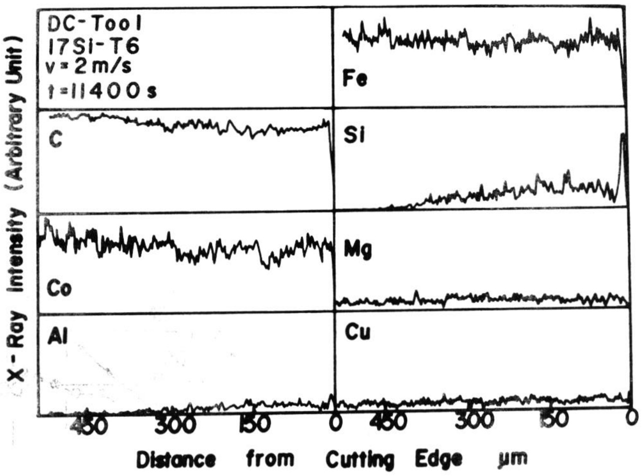


図 11. 17　DC工具で 17% Si－T6 材を $v = 2$m/s で 190 分切削後のすくい面中央部の線分析

図 11.１８はAC4B－T6 材をＤＣ工具を用いて $v = 6.6$ m/s，$f = 0.075$mm/rev の条件で３６ min切削した後の切刃中央部の分析写真であるが，この部分に直径約５０μmの大きなダイヤモンド粒子があり，この粒子にはAl，Cu，Siはほとんど付着せずFeのみが付着している。このようにダイヤモンドはFeとの親和性は強いようであるが他の非鉄金属とは反応しないようであり，ＤＣ工具は非鉄系の切削に適していると思わ

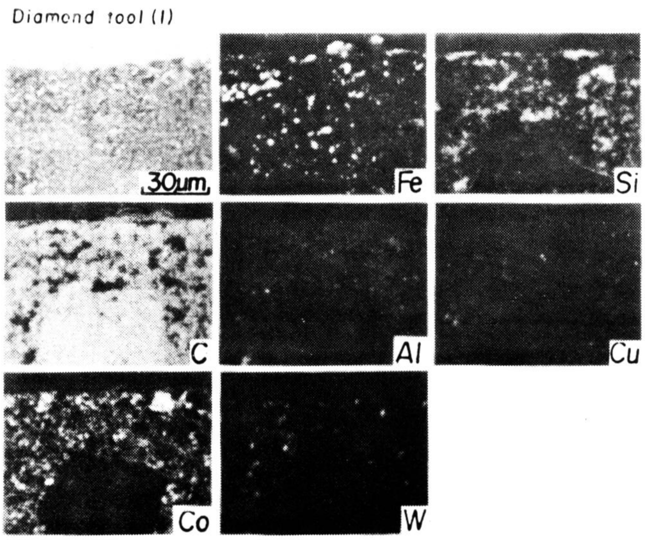


図 11. 18　ＤＣ工具でＡＣ４Ｂ－Ｔ６材を $v = 6.6$ m/s で 36 分切削した後の切刃部中央のEPMA分析

れる。Al，Cu，Si はCoに付着していると考えられる。

工具摩耗の最も激しい v ＝10m/s，f ＝0.075mm/revで約2 min切削した場合のすくい面摩耗状況を図11.19に示す。摩耗幅は約300μm程度であり，切くず流れに沿って付着物が付き，摩耗形態はAl－17％Si－T6材をCBN工具を用いて切削した場合とよく似ている。切刃部におけるすくい面摩耗量は10μmであり，摩耗終端まで一定の傾きで摩耗している。逃げ面摩耗が大きいので切刃は10μm程度後退している。

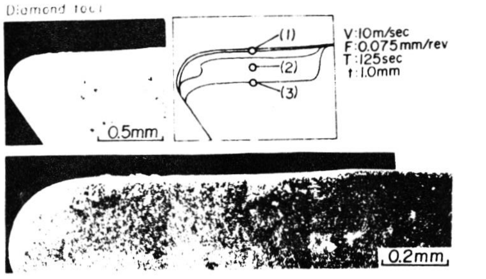


図11.19　DC工具で17％Si－T6材を v ＝10 m/s で約2分切削後のすくい面摩耗状況

図11.20は　切刃中央部の拡大写真と元素面分析結果であるが，切刃部において切削温度が高くなるためFeの付着が多く，Fe濃度の高い部分のC濃度は低下しているためFeはダイヤモンド粒子上に付着しているとみてよい。Siも多く付着しているが，これはCoと結合しているとみられる。(2)部分においても同様の傾向がみられ後述の(3)部分のCo濃度よりもこの部分では低くなっている。Feの付着は(1)部分よりは減少している。

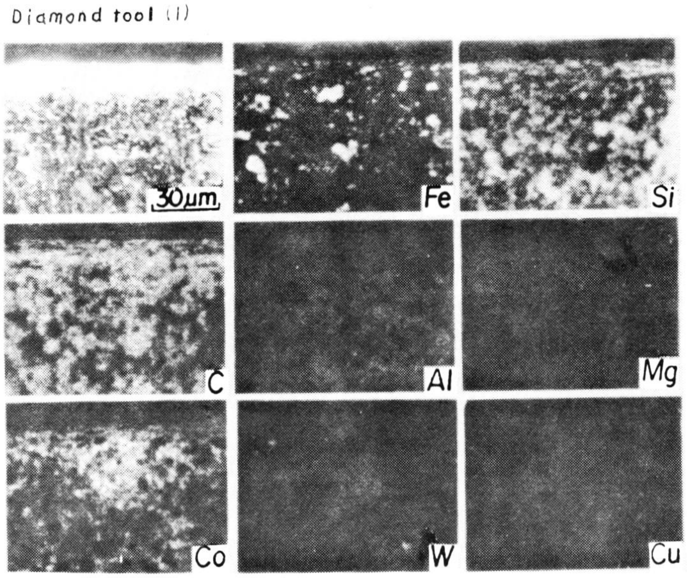


図11.20　切刃中央部のEPMA分析

図11.21は摩耗終端部の同様の結果を示しているが，写真上半分は摩耗していてSiの付着がみられるが，下半分は摩耗していないためSiの付着は認められない。このため下半分のC濃度は高くなっており，SiはCoに付着してからダイヤモンドの粒子の上へ広がっているものと思われる。またCo濃度は写真の上と下とではあまり差はなくCoとSiは結合していることを示している。

このようにDC工具における工具摩耗機構はCBN工具と同様バインダのCoと被削材中のSiとの結合によって焼結強度が低下しダイヤモンド粒子が脱落する形で進行すると考えられる。なお，いずれの切削条件においても亀裂や剥離の現象はみられなかった。

11．4　結　　言

以上ＤＣ工具によるAl－Si系合金の切削を行ないその仕上面特性と工具摩耗特性について高速度鋼工具，超硬合金工具及びCBN工具との比較において検討した結果をまとめると以下のようになる。

(1)　硬質粒子の粒径が数十μm～百μm程度と大きい金型鋳造材の切削においては，硬質粒子を十分にせん断できるＤＣ工具の仕上面が良行であった。

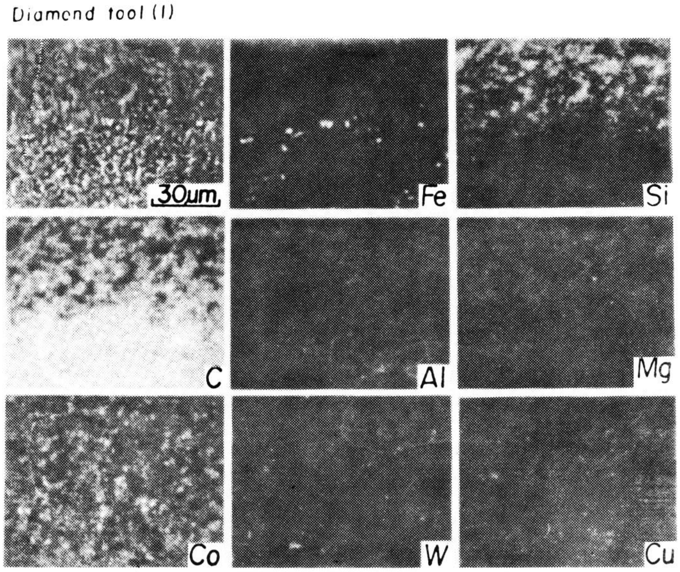


図 11.21　摩耗終端部のＥＰＭＡ分析

(2)　硬質粒子の粒径が数μmと細かい半連続鋳造材の切削においては，ＤＣ工具を用いてもそれを十分にせん断することができず，ＤＣ工具の優位性はなくなる。

(3)　けい素粒子が少なく他の硬質粒子も微細である展伸用押出し材の切削においては，硬質粒子による加工面の損傷はほとんどなく，工具前切刃のあらさが被削材表面に転写されるためＤＣ工具が良好な仕上面を程した。

(4)　ハイパーシルミンの切削にはＣＢＮ工具よりもＤＣ工具の方が優れているが，工具摩耗はＣＢＮ工具と同様バインダのCoと被削材中のSiとの結合による焼結力の低下によってダイヤモンド粒子が脱落する形で進行する。

文　　献

1)　鳴瀧則彦，山根八州男，武内隆郎　：　精密機械，45，2(1979)，81.

2)　機械技術　：　29，5(1981)，33～72.

第12章　総　括

本論文においては現在使用されている高速度鋼工具と超硬合金工具及び近年開発されたCBN焼結工具やダイヤモンド焼結工具を用いて，アルミニウム合金のなかでも，比較的工具摩耗が激しいAl－Si系及びAl－Cu－Mg系合金を切削した場合の各工具の摩耗状況をEPMAにより観察し，それぞれの工具の摩耗機構を調べた。一方工具摩耗を改善する目的で，Al－Si系合金に微量のNa，Sr，Sbの添加を行ない，被削材の金属組織的な改良による工具摩耗の軽減を試みた。

得られた結論はすでに各章の終りに示したが，それらを要約すると次のようである。

(1) 第2章，第4章においては高速度鋼工具の摩耗を調べ，その結果，この工具では被削材中に存在するけい素粒子などの極めて引掻き硬さの高い硬質粒子が工具面を擦過し，工具母材を削りとり，工具材中の硬いタングステン炭化物粒子を浮き上らせ，やがてそれを脱落させる形態で工具摩耗が進行することを明らかにした。

(2) 第3章，第5章，第6章においては成分の異なる超硬合金工具を使用し，TiCの粒子が使用されている工具では，工具成分中のTiがCを遊離して工具付着物や切りくず中に拡散するため工具摩耗が早く，アルミニウム合金の切削にはWC粒子からなるK種工具が適していることを示した。またK種工具においてもバインダのCoと被削材中のSiやFeとの結合が生じ，焼結力の低下した部分でWC粒子が脱落して工具摩耗が進行することを明らかにした。

(3) 第7章，第8章においてはAl－Si，Al－Si－Mg，Al－Si－Cu－Mg系の合金に微量のNa，Sr，Sbを添加して共晶けい素粒子の微細化をはかり，これらの元素が工具摩耗に有効であることを示した。またAl－Si共晶合金にSr，Sbの添加量を変えた場合について調べ，この合金には有効なSr，Sbの添加量が存在することを示し，工具摩耗が減少することを明らかにした。

(4) 第9章，第10章においてはCBN工具を用いてハイパーシルミンの切削を行ない，このCBN工具は超硬合金工具よりも工具寿命が著しく長く，実用的には低速乾式切削が有効であり，バインダの成分としては被削材との親和性が比較的小さいCoが優れていることを示した。鉄系の材種の切削にはAl_2O_3がバインダのCBN工具の寿命が長かった。そしてこのCBN工具の摩耗も超硬合金工具の場合と同様，バインダのCoと被削材中のSi，Feの結合によって焼結強度の低下が生じた部分でCBN粒が脱落する形で摩耗が進行することを明らかにした。

(5) 第11章においては最も硬い素材であるダイヤモンドを使用したダイヤモンド焼結工具を用いてアルミニウム合金を切削した場合の仕上面特性と摩耗特性をCBN工具との比較によって調べ，被削材中の硬質粒子が数十μm程度あるいは1μm以下の場合にはダイヤモンド焼結工具による仕上面が良いこと及びダイヤモンド工具の耐摩耗性はCBN工具よりも優れているが，その摩耗機構は

C·BN工具と同じであることを示し，ハイパーシルミンの切削には，ダイヤモンド工具が最も優れていることを明らかにした。

アルミニウム合金切削用の工具としてはダイヤモンドが良く，バインダにはAl，Si，Fe，Cu Mg，Zn，Niなどと親和性が極めて小さい材料が用いられればさらに優れた工具となる可能性がある。

謝　　辞

本論文の作成にあたり、終始御懇篤な御指導と周密な御校閲を賜った大阪大学 長谷川嘉雄教授に謹んで深甚な感謝の意を表します。

また本論文に対し有益な御助言を賜った大阪大学 津和秀夫教授， 井川直哉教授に厚く御礼申し上げます。

本研究全般の遂行にあたり直接御指導下さいました静岡大学 財満鎮雄教授，富山大学 高辻雄三教授， 多々静夫教授に心から感謝の意を表します。

なお本実験の遂行にあたり御指導下さいました富山大学 能登谷久公講師，南立作助手，中谷訓幸助手，山本喜太郎技官ならびに静岡大学 鈴木康夫助教授，加茂進助手，飯尾政次技官，鈴木正志技官，奥島裕樹氏に深く感謝申し上げます。