

塑性加工用摩擦試験機による各種工具材料のトライボ特性評価

岐阜大学 工学部 機械工学科

助教授 堂田邦明

(平成元年度研究開発助成 AF-89012)

1. 緒言

塑性加工における工具と被加工材間では、被加工材が塑性変形し、新生面の出現や高面圧など潤滑条件にとって厳しい摩擦状態がしばしば出現する。そのため、潤滑不良による金型と被加工材の直接接触による焼付きや各種の表面損傷が発生しやすい。塑性加工用金型の長寿命化を図り、更に焼付きを抑制して良好な製品表面を得るためには、被加工材に対する工具材料のトライボ特性を知ることが重要である。

このような観点から種々の硬質表面処理材や工具材料と被加工材との適合性の評価が行われている^{1)~7)}。しかし評価方法が異なるとその結果は必ずしも一致しない。特に被加工材がアルミニウムなどの活性に富む金属の場合、工具材料間の相違を明らかにすることが難しく、満足される評価結果は得られていない。

そこで、本研究では、しごき形摩擦試験機を用いて、しごき加工中の摩擦係数の変化及び摩擦面性状から各種工具材料間の工業用純アルミニウムに対するトライボ特性の評価を試みた。更にアルミニウムの焼付き挙動にも言及した。

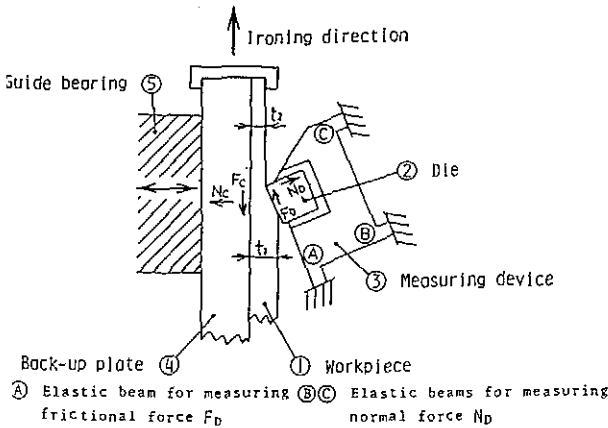


図1 帯板しごき形摩擦試験機の構造原理

表1 加工条件

education in area	5~15%	Die angle	10°
ironing velocity	1mm/s	Ironing travel	100mm
lubricant	Paraffinic mineral oil (P4) (95.12X10 ⁻⁶ m ² /s. 40°C)		
dimension of workpiece	thickness: 1mm width : 20mm		

その結果、工具材料選択上有益な指針を得たので報告する。

2. 実験方法

実験に用いた帯板しごき形摩擦試験機⁸⁾の構造原理を図1に示す。被加工材は拘束板と一体で上方に引き上げられ、ダイスによってしごき加工が加えられる。ダイス面上に作用する垂直力 N_D 及び摩擦力 F_D はしごき行程を通して連続

表2 被加工材の機械的性質及び化学成分

Material	Mechanical properties	Surface roughness						
Pure aluminium (A1050-H24)	Tensile strength: 127MPa Elongation: 15%	0.15 μ mRmax						
Chemical composition (wt%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	others	Al
0.1	0.26	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.03	99.58

表3 供試工具材料の硬さ及び表面粗さ

Tool materials	Symbol	Hardness (HRC)	Surface profile and roughness	Rmax / μ m	
Alloy tool steel	SKD11	61.6		0.08	
Surface treatment (base: SKD11)	Thermo-reactive deposition and diffusion	VC	61.4		0.03
		NbC	61.5		0.10
		Cr-C	61.0		0.12
		Fe ₂ B	62.2		0.15
	Chemical vapor deposition	TiN<CVD>	60.4		0.10 0.60
		TiC	59.2		0.12 0.90
		Ti (C, N)	61.9		0.05 0.10
	Physical vapor deposition	TiN<I, P>	57.8		0.11
		Salt bath nitriding	N	49.9	
	Cemented carbide	WC-9Co	90 HRA		0.05
WC-Ni-Cr		86 HRA		0.07	
Ceramics	Alumina	Al ₂ O ₃	1800Hv		0.05
	Silicon nitride	Si ₃ N ₄	91 HRA		0.08
	Silicon carbide	SiC	94 HRA		0.08
	Zirconia	ZrO ₂	1250Hv		0.05

0.5 μ m [(* μ m)]
0.2mm

的に同時記録される。ダイスを8×6×50mmの角棒状に作成し、1試験ごとに長手方向にスライドし、同一仕上げ面で繰返し試験ができるように工夫した。主な加工条件を表1にまとめて示す。温度効果、動水力学的効果ができるだけ入らないように、しごき速度は1mm/sの低速で一定とした。工具材料と被加工材間の適合性をみる場合、無潤滑試験が潤滑作用の干渉もなく適当と思われるが、アルミニウムは非常に焼付きやすい材料であるため、無潤滑条件の試験結果の再現性は非常に悪い。そこで本実験では潤滑材としてパラフィン系鉱油P4 ($95.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ at 40°C)を用い、試料表面にガーゼを用いて十分塗布した。被加工材として、厚さ1.0mm、長さ450mmの帯板を冷延板から圧延方向に採取し試験に供した。表2に被加工材、表3に供試工具材料の性質をまとめて示す。工具材料としては合金工具鋼(SKD11)とこれを母材とする各種表面処理材及び焼結型材を用意した。表面処理工具としてTRDやCVD、

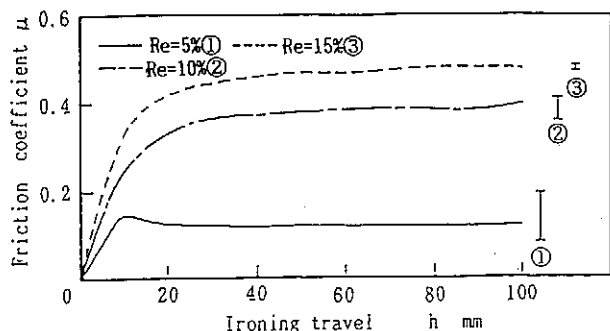


図2 摩擦係数-行程線図(しごき率の影響, SKD11)

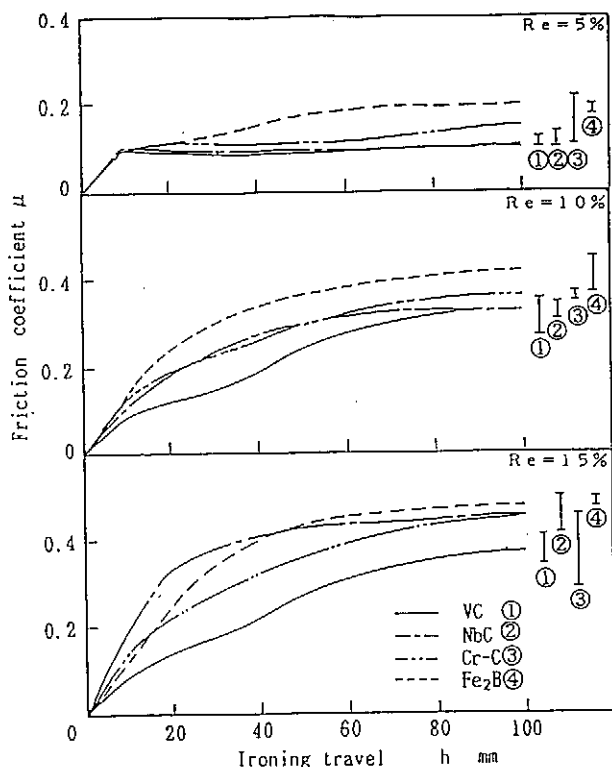


図3 摩擦係数-行程線図(しごき率の影響, TRD)

PVD法により各種の炭化物、窒化物を被覆したもの、浸ポロンや塩浴窒化法により鉄の硼化物や窒化物を形成させたものを用いた。焼結工具材料としては超硬合金2種とセラミック4種を選んだ。潤滑剤の保持効果や、引っかかり摩擦の影響を小さくするため、いずれダイスもラッピング仕上げを施してできるだけ滑らかな面とした。実験は同一条件で3回以上繰返し、そのすべての結果を検討の対象とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 摩擦係数-行程線図

しごき率 R_e [$R_e = ((t_1 - t_2) / t_1) \times 100$] を約5, 10, 15%と変化した場合の、SKD11ダイスにおけるしごき行程 h に伴う摩擦係数 μ の変化を図2に示す。図中の $\mu - h$ 曲線は、同一実験条件での複数の実験結果の中から最も平均的なものを選んで示したものである。 R_e が5%では、初期ピークがあるものの、 μ 値は全行程を通してほぼ0.1程度の低摩擦一定形を示している。

$R_e = 10, 15\%$ と高まると、しごき行程初期から μ が増大し $\mu = 0.4$ 前後の高摩擦一定形となる。

図3~5に各種工具材料における $\mu - h$ 曲線を示す。 $R_e = 5\%$ ではいずれの工具材料でも、 μ 値は0.1~0.2の範囲で全行程を通してほぼ一定の低摩擦となり、工具材料間の差はほとんどみられない。 R_e が高まると、 μ 値が0.3をこえるものが現れ、工具材料の差が明確になってくる。特に高摩擦への移行状態に差が生じ、しごき行程初期から高摩擦状

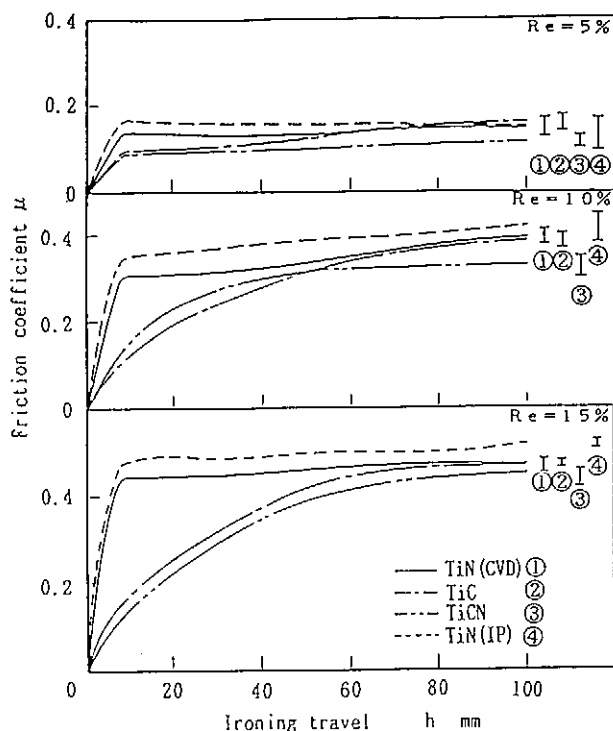


図4 摩擦係数-行程線図(しごき率の影響, CVD, PVD)

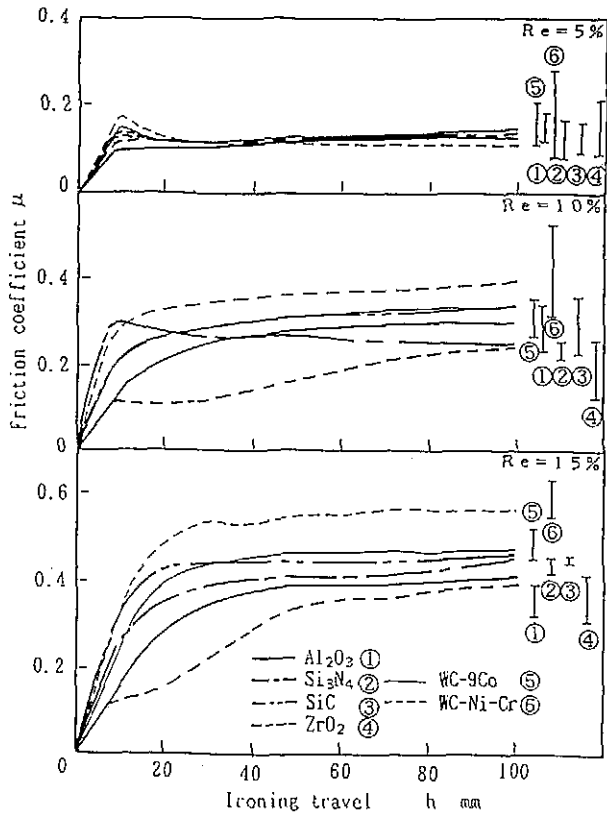


図5 摩擦係数-行程線図 (しごき率の影響, 焼結型材)

態となるもの (TiN, 超硬など) と、行程に伴って徐々に移行する工具材料 [TiC, Ti (C, N), VC, Cr-C, ZrO_2 など] とに類別された。

3.2 しごき行程中における摩擦面性状

図6.7は $Re = 15\%$ で $h = 20, 50, 100$ mm の各行程で加工を中断した場合の、ダイス及び被加工材の摩擦面を示す。焼付き性の大きく異なるSKD11と ZrO_2 の場合について示した。SKD11ダイス表面 (図6 (a)) では摩擦面全面にアルミニウムの凝着がみられる。出口部分では行程初期から凝着がみられるが、入口部分ではしごき行程の増大とともに凝着量が多くなっていく。凝着量の増加は $h = 20 \sim 50$ mm の間で大きく、 μ の増加と類似傾向にあった。一方 ZrO_2 ダイスでは $h = 100$ mm の場合で入口部分のみにわずかな凝着がみられる。

被加工材摩擦面 (図7) では $h = 20$ mm において、元の被加工材表面がダイス接触部の中央まで持ち込まれており、この行程ではまだダイス表面と被加工材間の滑りが存在していたと思われる。 $h = 50, 100$ mm ではダイス面の凝着状態と対応して、摩擦面の入口側にしごき方向と平行な損傷が多くみられるようになって、ここで凝着が生じたことを示している。この行程では凝着層と被加工材材料間の滑りが支配的と思われる。

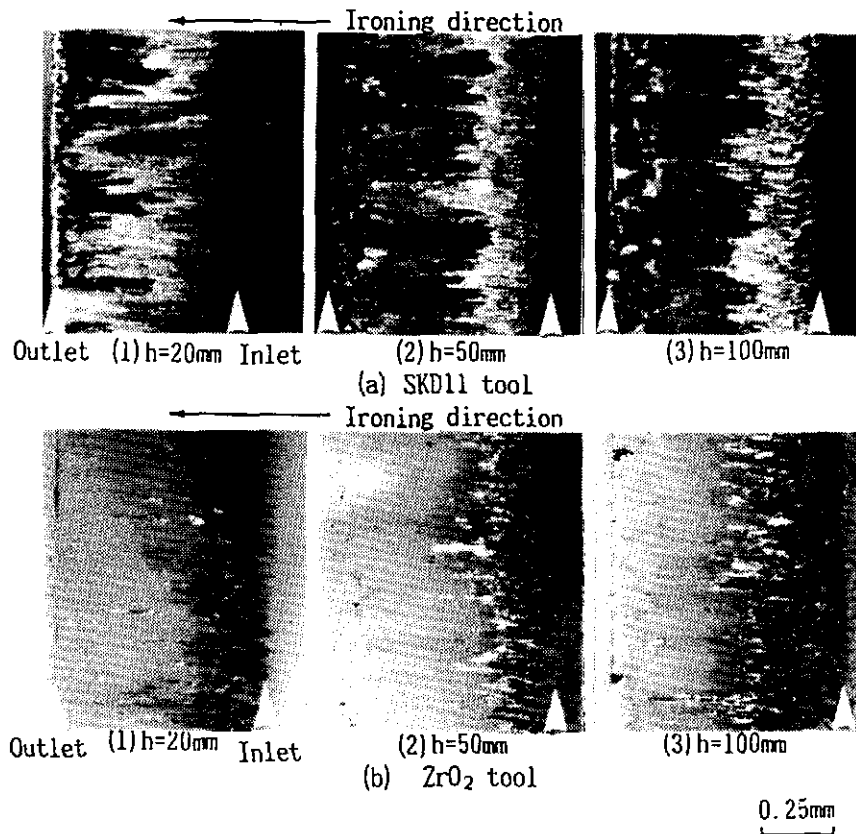


図6 しごき加工中のダイス摩擦面の性状 ($Re = 15\%$)

3.3 被加工材表面損傷の生成機構

図8には、被加工材のダイス接触部出口付近の断面観察結果を示す。観察試料は図7と同一物である。出口部に塑性流動の大きいせん断変形域が形成され、それがしごき距離の増加とともに拡大している。特にSKD11ダイスの場合(同図(a))、 $h = 20\text{mm}$ で既に出現し、 $50, 100\text{mm}$ で急速にこの領域が広がっている。一方 ZrO_2 ダイス(同図(b))では、 $h = 20\text{mm}$ においてこの領域の形成は認められない。その後 $h = 50\text{mm}$ でせん断変形域が出現するが、 $h = 100\text{mm}$ でもほとんど拡大しておらず、しごき距離に伴うせん断変形域の発生・成長量が小さい。

また、この領域の出口側には、被加工材の新しい表面に続

くクラックが認められ、ダイスの出口方向に開口している。この領域が成長すると、被加工材の表面損傷が増加してくるが、これはSKD11ダイスで 100mm しごき加工した被加工材表面に認められるように、一部「浮き上がり領域」が脱落するようになるためである。

以上の表面及び断面の観察結果からダイスへの凝着には、入口部の被加工材滑りに伴う凝着と出口部のせん断変形域の成長に伴う材料の積層による凝着(以後「積層凝着」と呼ぶ)の2形態とともに増加し、この成長段階におけるすり傷と積層凝着物の脱落によって被加工材の表面荒れをたらすと考えられる。事実被加工材表面の断面観察では、ダイス出口から流出した積層凝着物が認められた(図8)。製品

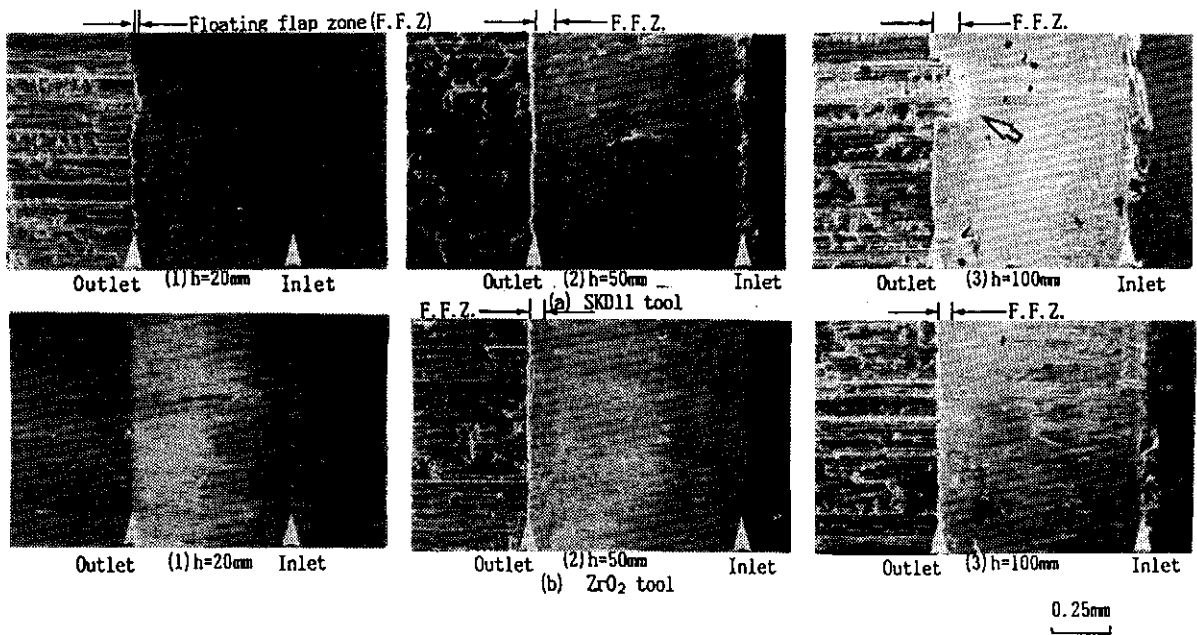


図7 しごき加工中の被加工材摩擦面の性状 ($Re = 15\%$)

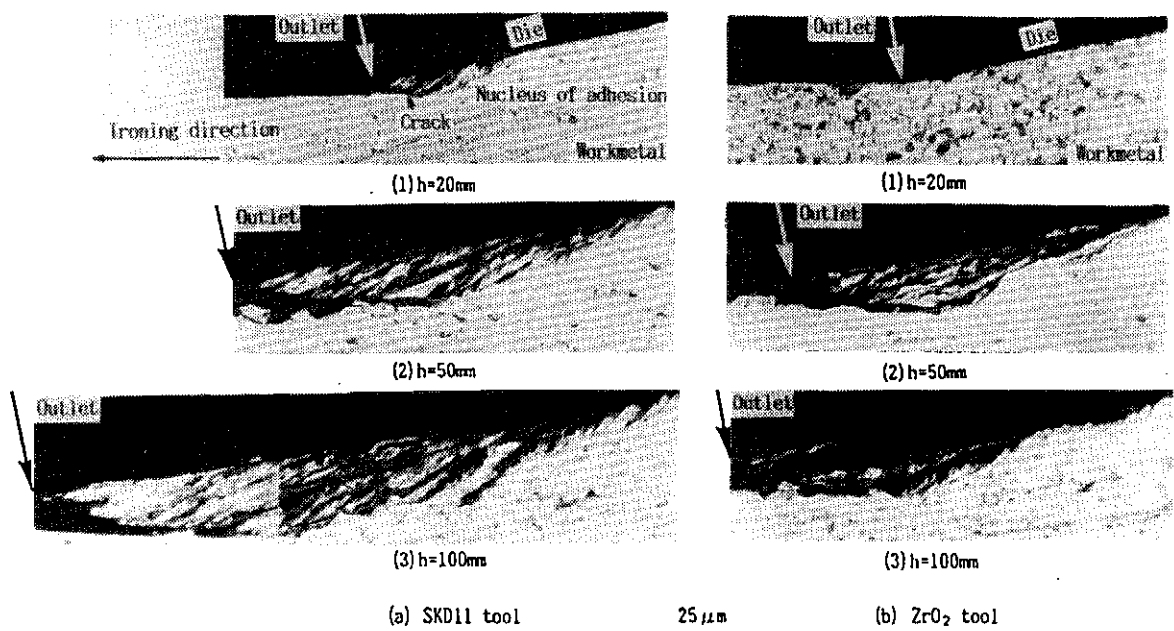


図8 ダイス出口付近における被加工材断面組織のしごき行程に伴う変化

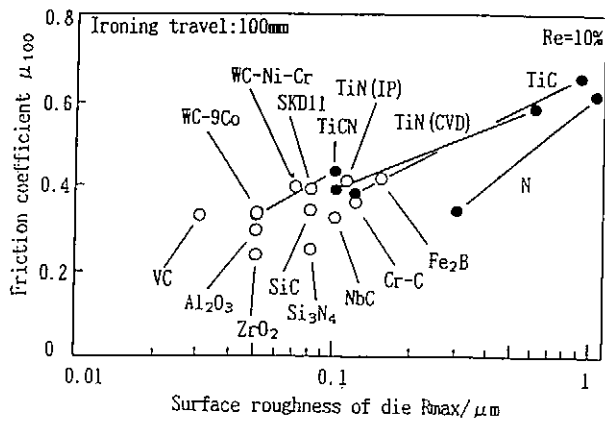


図9 摩擦係数に及ぼすダイス表面粗さの影響

表面性状に影響をもたらす凝着形態といえる。損傷の抑制にはダイス出口付近の摩擦状態を良好に保つことが重要である。

3.4 摩擦係数に及ぼすダイス表面粗さの影響

図9には今回評価したすべての工具材料について、しごき率10%における μ_{100} (しごき行程100mmにおける μ)と表面粗さの関係を示した。同一工具材料で表面粗さを変化させた場合(図中●で示す)も異なる工具材料間においても、全体に表面粗さの増加とともに μ_{100} 値が増加する傾向がある。表面粗さを考慮して工具材料の適合性を評価する必要があるが、 μ の表面粗さ依存性が異なり、またそれ以上 μ が低下しない限界の表面粗さがある⁽⁹⁾ため単純な比較は難しい。例えば不足点は外挿して同一粗さ0.1 μm R_{max} で μ_{100} の値を比較すると、Ti (C,N) > TiN > TiC > NbCとなってくる。また0.05 μm R_{max} ではジルコニア、アルミナ、TiC (C,N)、超硬(WC-9C₀)の順に μ_{100} が大きくなっている。このように整理してみると粗さが異なった状態で比較した場合より明りょうに適合性の傾向が現れている。実用上の評価では、表面の滑らかさを実現できるような仕上げ加工性をも、それぞれの工具材料で考慮する必要があると思われる。

4. 結 論

帯板しごき試験により各種工具材料の工業用純アルミニウムに対するトライボ特性を検討し、以下の結論を得た。

- (1) アルミニウムの焼付き状態は、ダイス入口部における滑りに伴う凝着と、ダイス出口部におけるせん断変形域が積層した形の凝着、の2形態であった。主に後者の凝着の出現と成長に伴って、摩擦係数の増加速度が上昇し、それとともに被加工材の加工面粗さが悪化することがわかった。
- (2) ダイス表面粗さが焼付きの成長及び摩擦係数の上昇挙動に対して大きな影響をもたらすことが示された。適合性の評価に当たって工具表面粗さに注意する必要がある。
- (3) 工具材料固有の焼付き状態がみられ、摩擦係数のしごき行程に伴う変化及び被加工材表面損傷などから判断して、VC、TiC、ZrO₂がアルミニウムに対して優れた適合性をもつことがわかった。

最後に本研究助成により、種々の研究が順調に行えたことを付記するとともに、心より感謝致します。

文 献

- 1) 河合・堂田・安田, 機論, 50 - 457, C (1984), 1664.
- 2) 河合・堂田・袁原, 機論, 50 - 479, C (1986), 2022.
- 3) Dohda, K. and Kawai, N., Trans.ASME, J. Tribol., 112 - 2 (1990), 275
- 4) Schmoeckel, D. and Frontzek, H., CIRP Ann., 35 - 1 (1986), 195.
- 5) Weist, Chr. and Westheide, H., 文献(4)の199ページ.
- 6) 小坂田・村山, 塑性と加工, 24 - 265 (1983), 195.
- 7) 後藤・若杉, 塑性と加工, 30 - 337 (1989), 246.
- 8) 河合・中村・堂田・広瀬, 機論, 48 - 433, C (1982), 1473.
- 9) 新井・川浦・土屋, 平元塑加春講論, (1985 - 5), 139.