

高速プレス加工におけるダイスの摩耗機構解明と 摩耗プロセスのモニタリング

岩手大学 工学部 機械工学科
教授 岩瀬 明

(平成6年度研究開発助成 AF-94014)

キーワード：プレス、打抜き、超硬合金、摩耗、極圧添加剤、モニタリング、アコースティックエミッション

1. 研究の目的と背景

近年、製造業における様々な加工において、ますます高品質化、高精度化、経済性が要求されている。LSIの端子などの電子機器の部品の製造に多く用いられる精密プレス加工においても、金型は製造過程に際し摩耗が進行し、その結果製品精度を悪化させ、工具寿命に至る。このように、金型寿命や製品精度の向上のためには、金型材の超硬合金の摩耗メカニズムを明らかにし、摩耗プロセスを把握することが求められている。被加工材である軟らかい材料が硬い超硬合金を摩耗させるメカニズムとして、切削加工の分野では高速度で切削したときの数百度を超える接触面の高温によって被削材のFeが拡散し、超硬合金の劣化につながり摩耗を進行させることが示されている。しかし、プレス加工のようにさほど温度上昇がない場合の超硬合金の摩耗メカニズムは十分に研究されてはおらず、その解明もトライボロジー的問題として、あるいは生産工学上重要と考えられる。さらに、生産性向上のために、金型寿命のモニタリングや長寿命化への対策も要求されている。そこで、プレス用金型の摩耗機構の研究やアコースティックエミッション (AE) 法を用いたモニタリングの研究も行われている。

本研究では、精密プレス加工に用いられる金型材料である超硬合金と被加工材として純鉄を取り上げ、それらの材料の摩擦試験および実験によるプレス加工試験を行う。摩擦試験では極圧添加剤の異なる潤滑油を用いて実験を行う。また、摩擦実験時に所定の滑り距離毎にAE信号を測定し、その解析を行う。そして、潤滑油が超硬合金の表面状態に及ぼす影響、および表面状態とAE信号との関係について調べる。プレス加工試験では3種類の異なるプレス加工を行う金型を作成し、プレス加工時に発生するAE信号を測定する。またプレス試験後のパンチとダイの表面および製品の破断面を観察する。摩擦試験とプレス加工試験における超硬合金の表面状態の変化とAE信号を解析することで摩耗プロセスのモニタリングの可能性を検討する。

2. AE信号によるモニタリング方法

金属の摩耗時に発生するAE信号は材料の違いや摩耗状態の違いによって、その周波数特性が変化することが知られている。また、通常、AE波の解析方法として、リングダウン計数やイベント計数あるいはRMS電圧値などのようにAEの発生頻度や強度などというパラメータが用いられる。しかしながら、これらのパラメータはばらつきが非常に大きく本研究のモニタリングの基準として利用しにくいパラメータであることが予備実験により分っている。ここでは、Shimizuらによって提案されたAE信号の評価方法を用いる。これは測定されたAE信号に対して、その周波数特性の違いを表す一つの方法であるARモデル解析を行い、さらに得られたAR係数の主成分分析を行うものである。主成分分析は多変量解析法の一つで、次元の減少法ともよばれ多数の情報が得られるとき、それをなるべく少ない合成変数に変換し、少数の情報に要約する手法である。

ARモデルは次式で表現される確率過程モデルである。

$$\hat{y}(k) = n(k) - \sum_{i=1}^N a_i y(k-i) \quad (1)$$

ただし、 $y(k)$ は観察された時系列データ $n(k)$ は $y(k)$ と独立な定常白色雑音を表す。 N はARモデルの次数、 a_i は次数 N におけるAR係数である。このときのパワースペクトルは次式で表わされる。

$$S(\omega) = \frac{p_n \Delta t}{1 + \sum_{i=1}^N a_i \exp(-j\omega i \Delta t)} \quad (2)$$

ここで、 p_n は $n(k)$ の分散、 ω は角周波数、 Δt はサンプリング周期である。

主成分分析はすべてのデータの分散共分散行列を求め、その行列の固有値と固有ベクトルを求めることで行われる。ここでは、ARモデルの次数を10次とする。測定されたそれぞれのAE信号に対して要素数10の1組のAR係数が得られる。得られた全てのAR係数に対する分散共分散行列を P (10×10の行列)とする。行列 P の10個の固有値を $\lambda(n)$ とし、それに対応する固有ベクトルを $X(n)$ とする。

このとき、第 n 主成分 $f(n)$ は

$$f(n) = X(n)_1 a_1 + X(n)_2 a_2 + \dots + X(n)_{10} a_{10} \quad (3)$$

で求められ、その寄与率 $C(n)$ は

$$C(n) = \lambda(n) / (\lambda(1) + \lambda(2) + \dots + \lambda(10)) \quad (4)$$

で算出される。

3. 超硬合金の摩擦試験

3.1 実験方法

Fig.1に摩擦試験の実験装置の概略図を示す。本実験装置は、被加工材である円筒状試験片を回転させる旋盤、工具試験片を取付け円筒状試験片に所定の荷重で押し付ける試験片送り装置、計測制御するためのパソコン等で構成される。工具試験片取付け部にあるリングに貼られたひずみゲージにより、押し込み荷重と摩擦力を検出する。工具試験片の底にはAEセンサが取付けられ、摩擦時のAE信号を測定する。

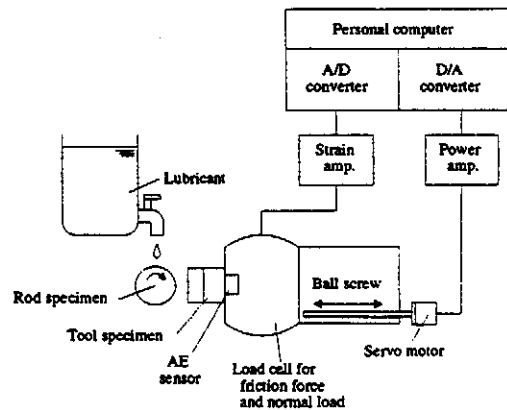


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2に金型材である超硬合金で作成した工具試験片を示す。Table 1には工具試験片の材料である超硬合金の性状を示す。用いた超硬合金は精密プレス加工に一般的に用いられるJIS V-3規格相当の材料である。Table 2には被加工材の純鉄 (SUYP1) で作成した円筒状試験片の性状を示す。また、潤滑剤はTable 3に示す9種類を用いた。これらは、プレス試験に用いる潤滑油を参考に、塩素系極圧剤として塩素化パラフィンの濃度3、6、9、12%の4種類、硫黄系極圧剤としてポリサルファイド、不活性硫化油脂、活性硫化油脂、の3種類と不活性硫化油脂にCa系界面活性剤を混合したものを採用した。

摩擦形態として、旋盤の工具送りを利用した送りありと同じ場所を一定滑り距離摩擦する送りなしの条件で実験を行った。どの場合も押し込み荷重はつねに100Nとした。また、滑り速度は実機で300spmでプレス加工する条件の金型と被加工材との摩擦速度と一致する値232mm/sになるように旋盤の回転数を設定した。総滑り距離は800mとした。送りありの実験では被加工材がつねに新しい摩擦面(処女面摩擦)となるように、工具試験片の接触幅0.5mmをこえる送り量0.6mm/revとし、所定の滑り距離に達するまで円筒状試験片長さの有効区間400mmを何度も摩擦を繰返

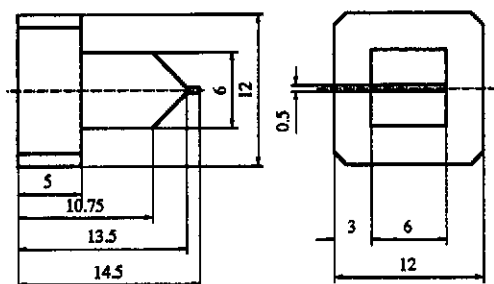


Fig.2 Tool specimen for wear test

Table 1 Properties of tool specimen

Material	Vickers hardness (MPa)	Roughness (μm)		Chemical composition (wt%)		
		Ry	Ra	C	W	Co
GT120 (JIS V-3)	14310	0.18	0.02	5.5	83.5	11.0

Table 2 Properties of cylinder specimen

Material	Vickers hardness (MPa)	Roughness (μm)		Chemical composition (wt%)		
		Ry	Ra	C	W	Co
GT120 (JIS V-3)	14310	0.18	0.02	5.5	83.5	11.0

Table 3 Properties of lubricants

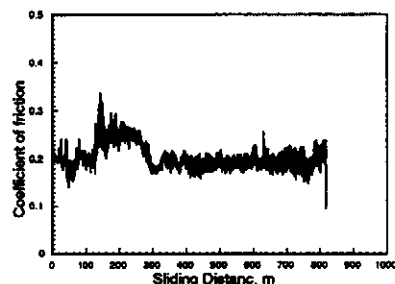
Lubricants	Kinematic viscosity (40°CcSt)	Total acid number (mgKOH/g)	Base number (mgKOH/g)	Chlorine (wt%)	Sulfur (wt%)
A Base oil	27.86	0.02	< 0.01	< 0.1	< 0.1
B Chlorinated paraffin 3wt%	28.56	0.03	< 0.01	1.5	< 0.1
C Chlorinated paraffin 6wt%	29.36	0.03	< 0.01	3.0	< 0.1
D Chlorinated paraffin 9wt%	30.19	0.04	< 0.01	4.5	< 0.1
E Chlorinated paraffin 12wt%	31.22	0.05	< 0.01	6.0	< 0.1
F Polysulfide 8 wt%	28.62	0.02	< 0.01	< 0.1	3.0
G Inactive sulfurized oil 26wt%	76.65	0.41	< 0.01	< 0.1	3.0
H Active sulfurized oil 26wt%	50.16	0.67	< 0.01	< 0.1	3.0
I Inactive sulfurized oil 10wt% surfactant of Ca origin 10wt%	51.71	0.89	50.60	< 0.1	1.0

した。また、一度摩擦した面には摩耗痕がつくので、摩擦毎に円筒状試験片の表面を旋削した。潤滑剤は摩擦部に上方から滴下した。実験後、工具試験片の摩擦面を三次元表面あらさ計、SEM等で観察した。

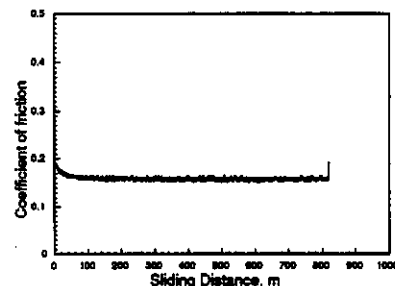
3.2 実験結果

3.2.1 摩擦係数に及ぼす潤滑剤の影響 Fig.3に送りなしにおける摩擦係数の変化の例として、潤滑剤AとFの場合を示す。潤滑剤Aは最も平均の摩擦係数も高く、変動も大きな値を示し、Fは変動が一番小さかった。

Fig.4に送りありの時の摩擦係数の変化の例として潤滑剤AとFの結果を示す。この場合送りなしより摩擦係数の変動が大きいことが分る。特にベースオイルは変動が大きく実験自体に支障をきたしたので途中で実験を打切っている。

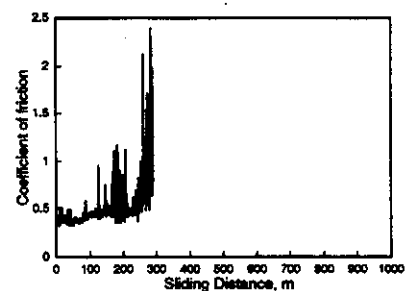


(a) lubricant: A

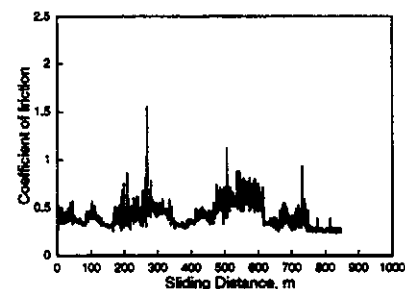


(b) lubricant: F

Fig.3 Coefficient of friction vs. sliding distance: no feed



(a) lubricant: A



(b) lubricant: F

Fig.4 Coefficient of friction vs. sliding distance: with feed

Fig.5に潤滑剤毎の平均の摩擦係数をまとめたものを示す。送りありに比べ摩擦係数は2倍以上大きな値を示している。この差は、押し込み荷重が大きく摩擦時には工具状試験片が相手材に食い込み塑性変形を生じることが原因の一つと考えられる。つまり、処女面摩擦では常に塑性変形をさせながら摩擦するので、それが掘り起こし力として反映し、摩擦力が増加すると思われる。

3.2.2 超硬合金の表面の変化 Fig.6に送りありの条件で、工具試験片の表面形状の3次元トレースの滑り距離に対する変化の例を示す。表面には被加工材からの移着が発生し、その移着は成長と剥離を繰り返していることが分る。

送りなしの時の最終的に得られた潤滑剤毎の移着量をFig.7に示す。送

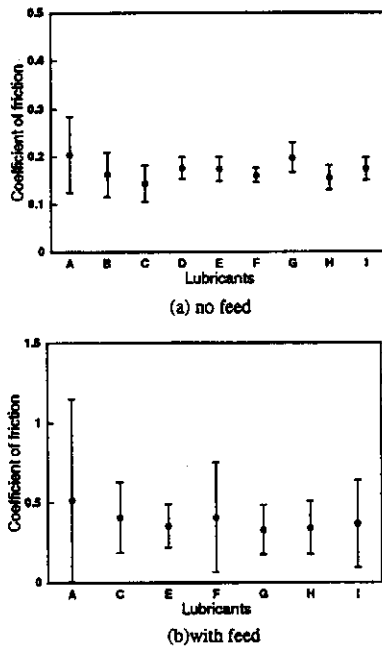


Fig.5 Coefficient of friction vs. lubricants

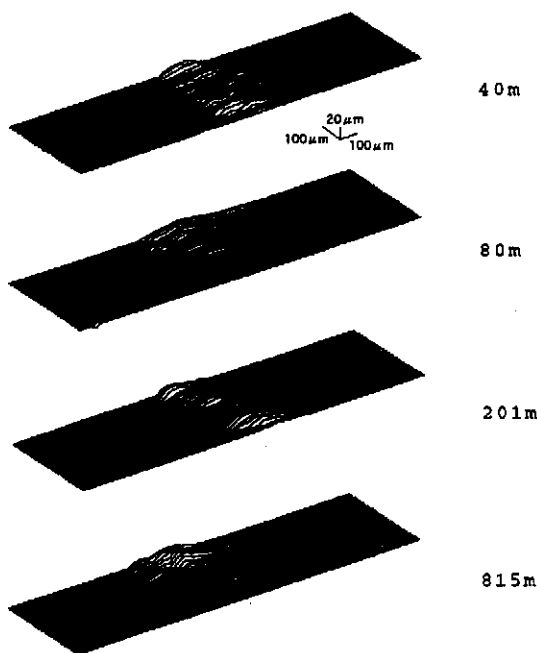


Fig.6 3-Dimensional trace of tool specimen surface

りなしでは3回実験を行いその平均をとった。潤滑剤Fと潤滑剤Iではほとんど移着がないことが分る。また、潤滑剤Hは移着の量が最大となっていることが分る。

送りありの時の各潤滑剤における移着量の滑り距離に対する変化をFig.8に示す。移着量は滑り距離とともに増減し、移着の発生と剥離を繰り返していることが分る。送りなしの条件では最も移着の多かった潤滑剤Hは、送りありでは平均の移着量は小さく、逆に、送りなしで小さな移着を示した潤滑剤FとIは大きな移着の発生が見られた。これは、潤滑性能のよいFとIでは移着の剥離が生じることが少なく、移着が成長するのに対し、潤滑性能の劣る潤滑剤では頻繁に剥離を繰り返すために移着が大きく成長しないことが考えられる。

Fig.9に潤滑剤DのSEMおよびEPMA観察の結果を示す。また、Table 4に潤滑剤DのEPMAの定性分析結果を示す。この分析結果より、摩擦面で移着物が剥離した表面ではCo原子が減少していることが分る。これは、CoはFeとの親和性が高いために移着物の剥離とともにWC粒子よりも多

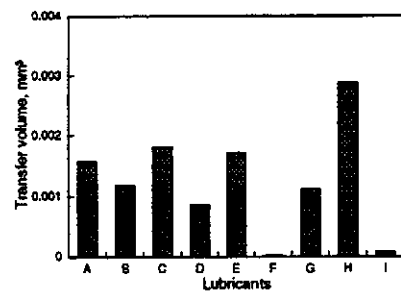


Fig.7 Transfer volume vs. lubricants : no feed

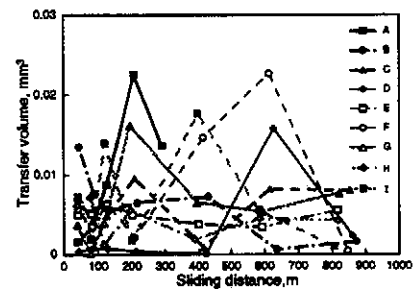


Fig.8 Transfer volume vs. sliding distance. : with feed

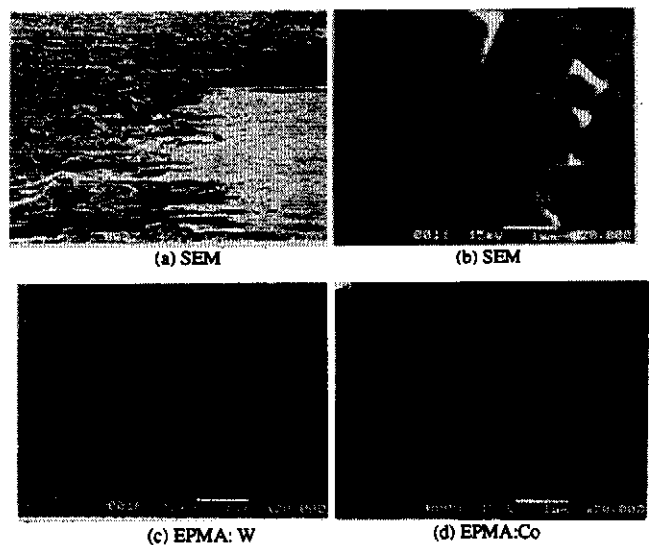


Fig.9 SEM photograph and EPMA analysis of tool specimen

く脱落するものと思われる。また、WC粒子のバインダーであるCoの脱落によりWC粒子間の結合性が弱くなり、摩耗過程の次の段階としてWC粒子の脱落が予想され、超硬合金自体の摩耗にもつながることが考えられる。

3.2.3 摩耗試験におけるAE信号の解析結果 Fig.10に送りなしのときのFFT解析結果の例を示す。滑り距離とともに周波数分布形状が変化していることが分る。Fig.11に送りなしの時のAR係数の主成分分析結果を示す。第1主成分は滑り距離とともに正の方向に推移しているのが分る。Fig.12に送りありの時の主成分分析結果を示す。この場合はそれぞれの潤滑剤で滑り距離とともに第1主成分は負の方向に推移している。送りありとなしでは第1主成分の推移する方向が逆であるがこれは、主成分分析の固有値ベクトルの計算アルゴリズムのため、本質的には同様な傾向を示すものと考えられる。このようにAR係数の主成分分析によって

Table 4 Results of EPMA qualitative analysis of tool specimen (Chlorinated paraffin 12wt%)

	before surface				after surface			
	W	Fe	Co	Co/W	W	Fe	Co	Co/W
weight (%)	90.5	0.1	9.4	0.104	73.4	20.8	5.9	0.080
atomic (%)	75.3	0.3	24.4	0.324	45.9	42.8	11.4	0.248

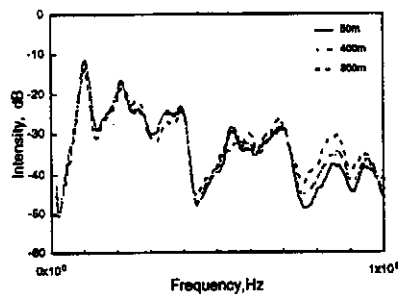


Fig.10 Results of FFT analysis for AE signal

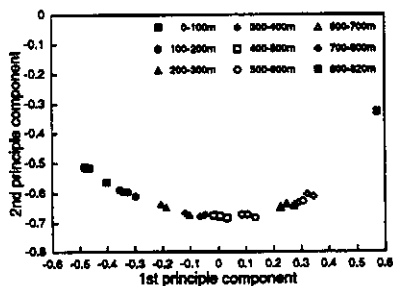


Fig.11 A result of principle component analysis no feed, Chlorinated paraffin 12wt%

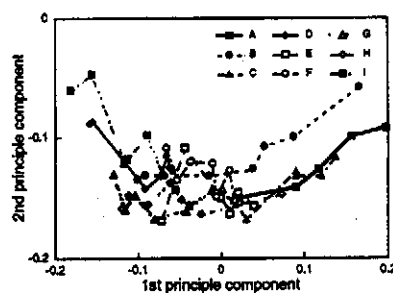


Fig.12 A result of principle component analysis: with feed

摩耗プロセスの推移を示す可能性が得られた。

4. プレス加工試験

4.1 実験方法

4.1.1 試験機の構成と金型形状 プレス加工における金型の摩耗機構と、その際発生するAE信号の測定を行うために使用したプレス加工機の概要をFig.13に示す。

プレス加工は送り抜き型と呼ばれる方法を適用し、打抜き工程は3ヶ所(3工程)で行う。第1工程は長方形型の内形抜き型である。内形抜きは材料から製品を打抜く型でダイ穴を製品寸法とし、パンチをクリアランス分だけ小さくした。次に、第2工程はシェーピング型と呼ばれ、内形抜き後の内周の一辺をせん断する。最後の第3工程も内形抜き型で、第1工程の抜き型の刃に対して30°、45°、60°、90°と角度を変えて打抜きミスマッチと呼ばれるもので行った。パンチとダイのクリアランスは、打抜き5.0%、シェーピング1.0%、ミスマッチ5.0%である。金型の打抜き工程の形状および寸法をFig.14に示す。

4.1.2 AE信号の測定 AEセンサは3種類のダイの底にプラスチック板を介して接触させている。AE信号は、サンプリング周波数6.25MHzで256Kbyteづつ測定し、測定パンチ数に達してから8パンチ分のデータを記録した。プレス加工機のアングルシーケンサから信号をとりだし、測定のトリガとした。

4.1.3 試験片および潤滑剤 パンチとダイは前述の摩耗試験と同じWC超合金を使用した。被加工材である薄板は純鉄(SUYP-1)、加工油はスピンドル油とマシン油のブレンド油を使用した。

4.1.4 試験方法 プレス加工時の条件は、プレスストロークが25mm、ダイとパンチのかみ合いを2mmとし、プレス速度は300sprmとした。このことからアングルシーケンサからのトリガ信号は被加工材とパンチが接

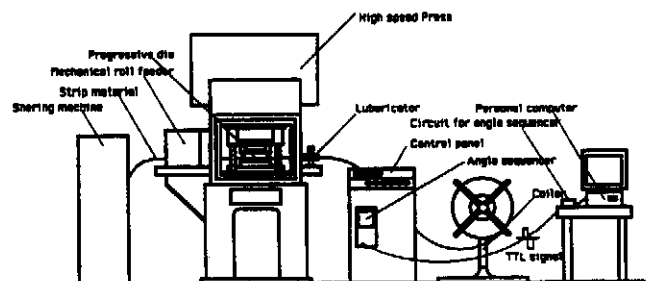


Fig.13 Schematic diagram of press machine

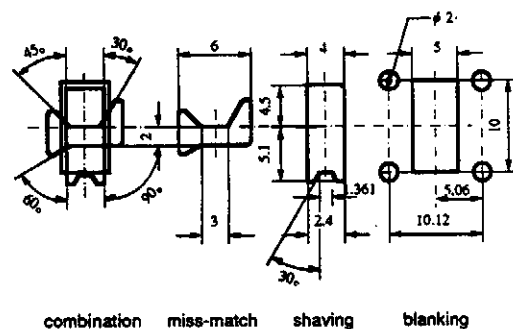


Fig.14 Shape of press process

触数直前で発生する様に設定した。Fig.15にパンチの位置とそれぞれの測定箇所におけるAE信号を示す。

試験は、はじめにプレス打ち放きのならし運転を行い、約5000パンチ後に1回目、その後、50000パンチ以降は50000パンチ毎にAE信号の測定を行った。試験終了後のパンチとダイはSEMによる観察と表面粗さ計による表面形状の測定を行った。さらに、プレス製品の断面のだれ、せん断、破断面の寸法の測定も行った。

4.2 実験結果

4.2.1 工具表面および打抜き製品の変化 Fig.16にミスマッチ45°の実験後のパンチのSEM写真を示す。パンチの側面には被加工材の移着が見られる。Fig.17にシェービングのダイのSEM写真とEPMA面分析結果を示す。側面にはわずかながらも被加工材の移着が見られる。Table5には打ち抜きとシェービングのダイの側面のEPMAによる定性分析結果を示す。これより、超硬合金の摩耗機構として、移着物であるFeに親和性の強いCoが付着し、移着物の剥離とともに超硬合金表面から選択的に除去されるという摩耗機構が考えられる。

Fig.18に製品の破断面のだれ、せん断部、破断面の寸法の変化を示す。変化の様子はだれにもっとも良く現れ、パンチ数とともにだれが大きくなっている。これはパンチとダイの摩耗がパンチ数とともに進みクリアランスが増加したためと考えられる。

4.2.2 AE信号の解析結果 Fig.18に3種類のダイのAE信号のFFT解析結果を示す。これよりパンチ数の増加とともに周波数形状が変化することが分かる。

Fig.19にAE信号のAR係数の主成分分析結果を示す。シェービングはダイが250000パンチで寿命に達したので金型のメンテナンスを行い、シェービングパンチを取り外し、それ以降はシェービング加工なしで実験を行った。250000パンチまでは第1主成分値はどのダイに対しても左から右へ推移していることが分かる。しかし、250000パンチ以後では、ばら

つきが非常に大きく、この傾向は把握できなかった。これは、シェービングを省略したことやメンテナンスのためにAEセンサーの接触状態などが変化したことが原因と考えられる。よって、金型摩耗の推移は第1主

Table 5 Results of EPMA qualitative analysis for die surface

	before surface				after surface			
	W	Fe	Co	Co/W	W	Fe	Co	Co/W
blanking (wt%)	84.9	0.0	11.4	0.134	78.7	5.7	11.1	0.141
shaving (wt%)	76.7	0.0	10.2	0.133	72.6	13.2	7.2	0.099

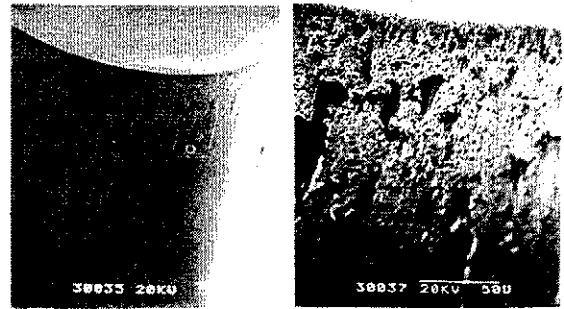
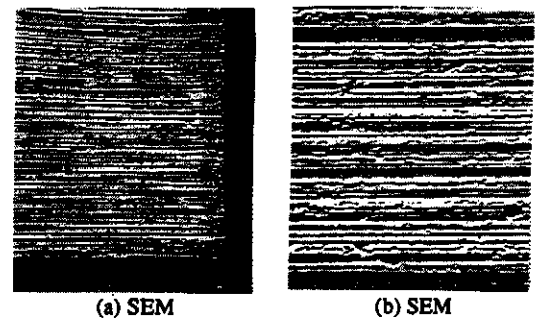
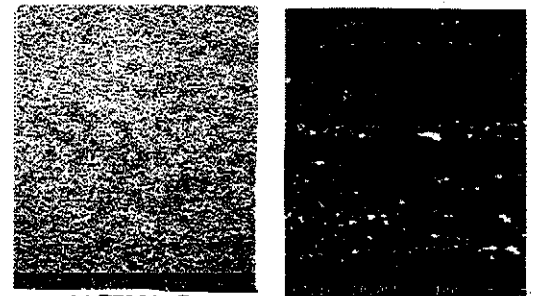


Fig.16 SEM photograph of punch surface after press (miss-matching 45°)



(a) SEM

(b) SEM



(c) EPMA: Co

(d) EPMA: Fe

Fig.17 SEM photograph and EPMA analysis of shaving die

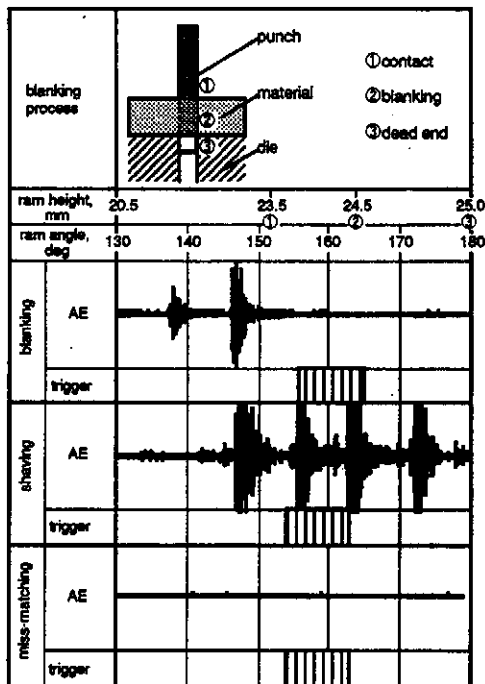


Fig.15 Trigger point of AE signals

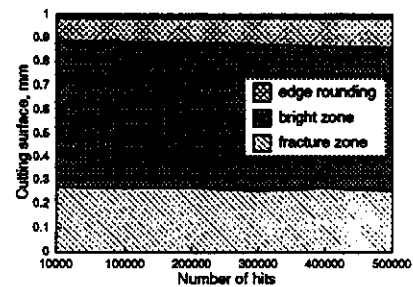


Fig.18 Change of the cutting surface zone of work: blanking

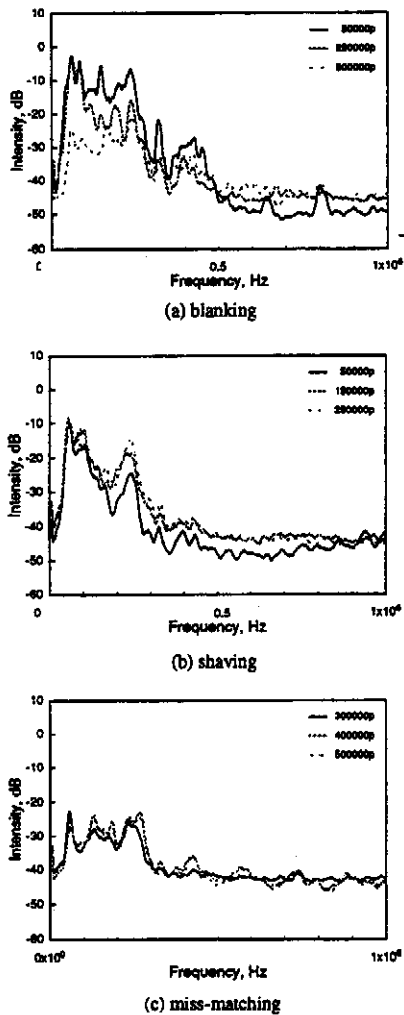


Fig.18 Results of FFT analysis for AE signal, during pressing

成分に対応し、本結果より、金型摩耗のモニタリングの可能性を得たと考える。

5. 結 論

超硬合金の摩擦試験において潤滑剤や摩擦形態を変化させ、摩擦中のAE信号の測定と解析を行うことで以下の結果を得た。

- (1) 摩擦中の工具試験片の表面は、Feの移着と剝離を繰り返していることが確認できた。また、この現象は添加剤や摩擦形態によって様子が異なる。
- (2) 工具試験片上の移着の剝離した部分をEPMAによって定性分析した結果、Co原子の割合が減少していることが示された。これより、超硬合金の摩擦機構を示すことができた。(3) AE信号のAR係数の主成分分析の結果、第1主成分は摩擦距離とともに一方向へ推移を示した。これは、摩擦による超硬合金の表面の変化に対応すると考えられる。

また、実機によるプレス加工試験において3種類のプレス加工を行い、その時発生するAE信号の測定と解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 製品のせん断面の変化より、金型の摩耗が進行していることが分かった。
- (2) AE信号の解析結果は、シェーピング金型が寿命に達した250000パンチまでは、3種類の加工法すべて推移傾向を示した。

本研究において、超硬合金の初期の摩擦機構を解明し、AE信号の解析

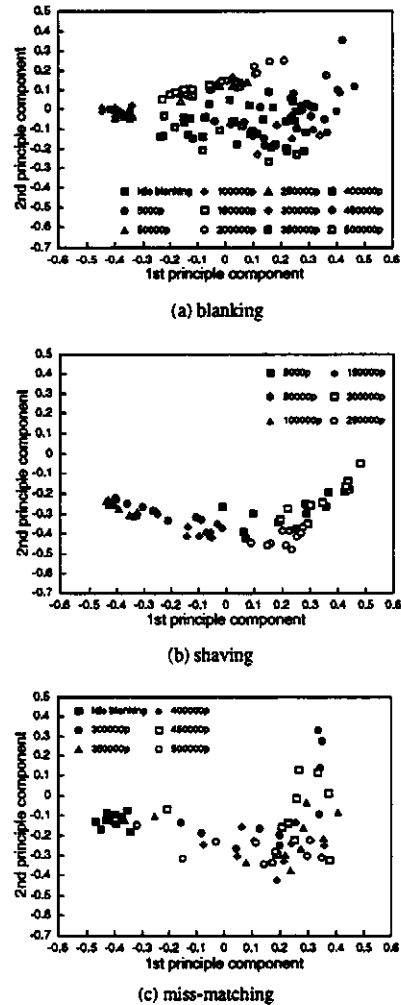


Fig.19 Results of principle component analysis for AE signals during pressing

によってプレス加工の金型摩耗のモニタリングの可能性を見いだしたが、それらの成果は十分とはいえない。今後、さらに工具損傷までに至る摩擦機構の解明や、より一層、確実で実用性の高いモニタリング手法の開発が望まれる。モニタリング手法としては、現在、AE信号のフラクタル特性による評価法を検討中である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、東北日本電気株式会社の西潤一郎氏に多大なご助力・ご助言をいただきました。また、潤滑剤は出光興産株式会社の志度誠一氏に提供していただきました。両氏に対し深く感謝の意を表します。また、研究室の修士2年櫻村直樹君、学部4年岩淵浩祐君、郭武勇君に実験を実施していただきました。ここに感謝いたします。

文 献

- (1) 竹山, 切削加工, 丸善, (1980) pp.77-79
- (2) 岩淵, 他4名, トライボロジー会議予集東京, (1994), pp.135-138
- (3) 岩淵, 他4名, 日本機械学会東北支部石巻地方講演会, (1994), pp.290-292
- (4) 清水, 他2名, トライボロジー会議予集金沢, (1994), pp.819-822
- (5) T.Shimizu, et. al., Proc. Int. Tribology Conf. Yokohama, (1995), pp.1781-1786