

# AE による鍛造用金型の損傷・破壊の検出に及ぼす潤滑条件の影響 Influence of lubrication condition on detection of damage and fracture of forging die by AE

正 早川邦夫 (静岡大) 正 中村 保 (静岡大)

正 田中繁一 (静岡大) ○学 野末卓哉 (静岡大)

Kunio HAYAKAWA, Tamotsu NAKAMURA, Shigekazu TANAKA and Takuya NOZUE,

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, hamamatsu, Shizuoka

**Key words:** Acoustic Emission, Wavelet, Fractal Dimension, Lubrication condition, Forging Die, Fracture

## 1 緒言

冷間鍛造に使用される金型は高面圧にさらされており、予知しえない損傷・破壊が生じることが多い。供用中の金型の損傷・破壊の予知技術は、生産コストの低減を図る上で重要である。著者らは金型の損傷の検出にアコースティック・エミッション(AE)を用い、鍛造工程中に放出される AE 振幅のフラクタル特性の変化の追跡が鍛造用工具の損傷・破壊の検出に有効であることを示した。本手法により、工具の損傷・破壊の検出をより精密に行うためには、AE 振幅のフラクタル特性が潤滑条件によって受ける影響を把握しておく必要がある。

本論文では、種々の潤滑条件下での冷間前方押し出しを行い、異なる潤滑条件が AE 振幅のフラクタル特性に及ぼす影響を明らかにする。また wavelet を用いた時間-周波数解析によって検出される AE の特性を明らかにする。

## 2 フラクタル特性

AE は、材料に局所的な変形や割れの進展が生じた際に放出される弾性波である。金型などの損傷、破壊の検出に AE の振幅分布におけるフラクタル特性を用いた検出法が有効である。すなわち、AE 振幅分布は両対数グラフ上の広範囲にわたって負勾配の直線形状となり、次式のように表現できる。

$$\text{AE 振幅分布式: } f(A) = cA^{-m} \quad (1)$$

$$\text{両対数表示: } \log f(A) = -m \cdot \log A + \log c \quad (2)$$

ここで、 $A$  は AE 振幅分布、 $m$  はフラクタル次元である。

この AE のフラクタル性における自己相似性から、自己再生が、ノイズ環境下でも定量的に AE 活動度を評価できる。また、フラクタル次元 (AE 振幅分布の指数  $m$ ) は、検出された AE の変形性、あるいは破壊性起因の特定と活動度評価に有用である。

## 3 実験方法

本実験では、協和製作所製 KTP-100 型 100ton4 柱型油圧プレスを使用して、押し出し速度を 3mm/sec で冷間押し出しを行い、金型に取付けた AE センサーで押し出し加工時の AE 信号を取得した。Fig.1 に本実験の冷間押し出しに用いる金型寸法図を示す。金型材料は SKD11、硬さは 60HRC のものを用いる。

試験片は化成被膜処理した S25C を使用し、潤滑剤として VG2, VG10, VG22, VG100, VG1000, PTFE 微粉末の乾性粉末潤滑剤および  $\text{MoS}_2$  高濃度の乾性被膜潤滑剤を用いる。また、より厳しい潤滑条件として化成被膜処理を施さずにそれぞれの

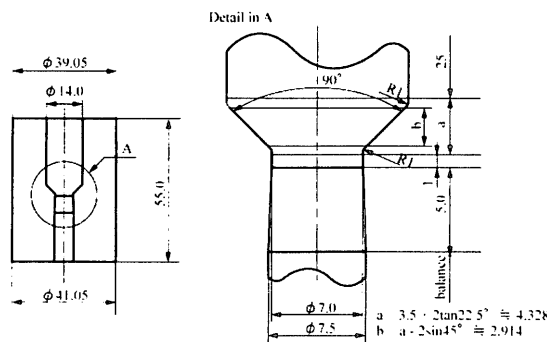


Fig.1 Geometry of die for cold forward extrusion

潤滑剤のみでの試験も試みる。AE 波の検出には、エヌエフ回路設計ブロック製 AE 解析装置 9602 を使用した。また、AE センサーには広帯域型を用いる。AE 波は総利得 60dB で増幅される。また AE 振幅のしきい値を 60mV とする。さらに、周波数特性を解明するためサンプリング周波数 1000kHz、サンプリング件数 2000000 件で AE 波形を取得した。

## 4 実験結果

本実験で用いた種々の潤滑条件における摩擦係数を見積もるため、本実験と同寸法で Coulomb 摩擦係数の値を変化させた有限要素解析を行った。有限要素解析より算出した最大パンチ荷重と Coulomb 摩擦係数の関係を Fig.2 に示す。一方、実験において化成被膜処理した試験片に種々の鉱物油を塗布して、押し出しを行ったときのパンチ荷重-ストローク関係を Fig.3(a) に示す。Fig.3(a)よりいずれの鉱物油においても最大荷重に変化はほとんど見られないため、摩擦係数は  $\mu = 0.053$  でほぼ等しいことがわかる。また、化成被膜処理をせずに潤滑剤のみの押し出しを行ったときにおけるパンチ荷重-ストローク関係の結果を Fig.3(b) に示す。Fig.3(b)および Fig.2 より Coulomb 摩擦係数  $\mu$  は、VG1000 で  $\mu = 0.080$ , VG100 で  $\mu = 0.066$ , PTFE で  $\mu = 0.057$ , ならびに  $\text{MoS}_2$  で  $\mu = 0.050$  と見積もられる。

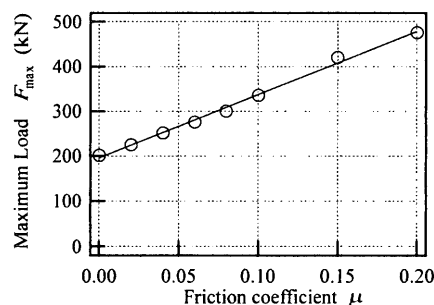
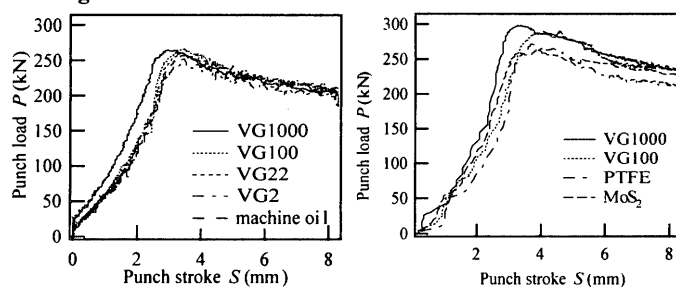


Fig.2 Relation between friction coefficient and maximum load



(a) Chemical conversion coating

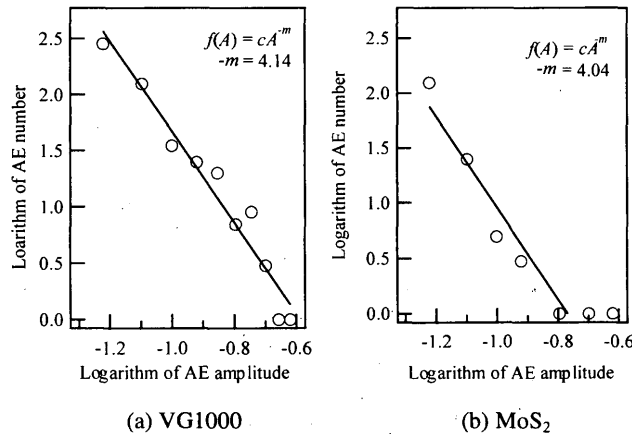
(b) No coating

Fig.3 Punch load and stroke curves

つづいて、各潤滑条件におけるフラクタル次元について検討する。Fig.4(a), および (b) は、VG1000, および  $\text{MoS}_2$  を使用したときの押し出しにおける AE の振幅分布とそのフラクタル次元を示す。実験後の金型の観察において、金型表面に損傷、破壊は見られなかった。Fig.4(a), (b) に示されるフラクタル次元は 4 付近を示し、このフラクタル次元は素材の変形および摩擦によるものと考えられる。摩擦係数は異なるがフラクタル次元はほぼ同様の値を示すことがわかる。各潤滑条件におけるフラ

クタル次元をまとめたものを **Table 1** に示す。これより他の潤滑剤においてもフラクタル次元は、近い値を示す。このことから潤滑条件はフラクタル次元に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

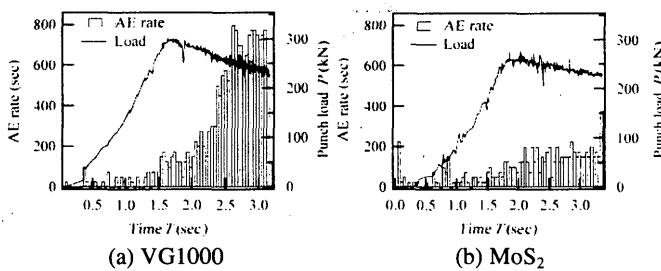
次に AE 速度とパンチ荷重の関係について **Fig.5(a)** に VG1000, **(b)** に MoS<sub>2</sub> をそれぞれ示す。(a), (b)ともに最大荷重に近づくにつれ発生速度が増している。その後, VG1000ではさらに AE 速度は増加するが MoS<sub>2</sub>では増加は大きくない。その理由として VG1000では, 金型のアプローチにおける潤滑不良が挙げられる。



**Fig.4** Histograms of AE amplitude and fractal dimension

**Table 1** Fractal dimensions in various lubrication conditions

	VG1000	VG100	PTFE	MoS <sub>2</sub>
Fractal dimension $m$	4.04	3.76	3.52	4.14



**Fig.5** Time - AE rate - Punch load

## 5 周波数解析

### 5.1 wavelet 解析

wavelet 解析法を用いて検出された AE 波形の特徴的な部分について時間-周波数関係を試みる。wavelet 変換は, mother wavelet 関数  $\varphi(t)$  を時間軸方向に拡大・縮小・移動させ, 信号  $x(t)$  を wavelet 係数  $(W_\varphi x)(b, a)$  に変換する操作であり, 次式で定義される。

$$(W_\varphi x)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (3)$$

上式にて,  $\overline{\varphi(t)}$  は  $\varphi(t)$  の複素共役を意味する。スケールパラメータ  $a$  は, mother wavelet の伸縮に関わり,  $1/a$  は周波数に対応する。またパラメータ  $b$  はトランスレートと呼ばれ, mother wavelet を時間軸方向に移動する。よって  $1/a$  を縦軸,  $b$  を横軸にとり, 信号平面を描くことで, 時間-周波数解析が可能となる。本論文では次式に示す Gabor の mother wavelet を用いる。

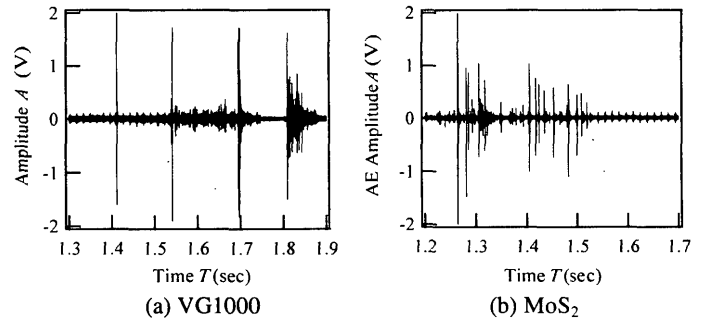
$$\varphi(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-t^2/\sigma^2} e^{-it} \quad (4)$$

### 5.2 解析結果

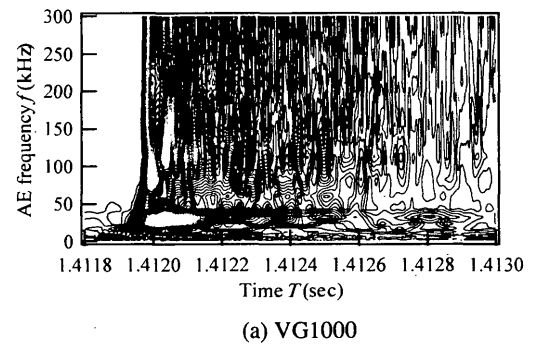
押出しの際の潤滑剤に VG1000, および MoS<sub>2</sub> を用いた場合の時間-振幅関係を **Fig.6(a), (b)** に示す。また **Fig.6(a), (b)** におい

て高振幅が確認された時刻の AE 波を wavelet 変換し, 時間-周波数関係を表したものを **Fig.7(a), (b)** に示す。**Fig.6(a), (b)** ともに振幅 0.1V のある一定の AE 波が存在し, **Fig.7(a), (b)** からも約 20kHz の周波数をもつ AE 波が確認できる。**Fig.6(a), (b)** における小振幅の AE 波の周期から二つの周波数は, ほぼ一致する。したがって同一の AE 波である。この AE 波の発生起因は試験機自身や油圧ポンプから発生するノイズであると考えられる。

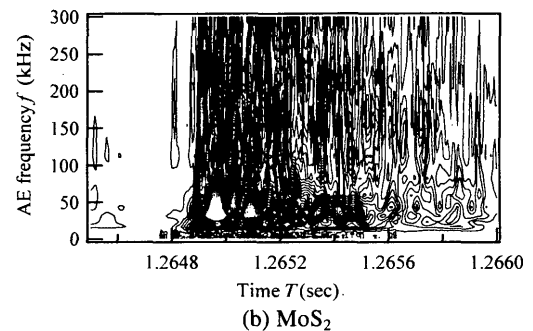
**88Fig.6(a)** の時刻 1.412sec に見られる高い振幅の AE 波は, 約 100kHz の周波数をもつ。この AE が発生する時刻は最大荷重が負荷している時刻である。このことから周波数 100kHz 前後の周波数を持つ AE は金型および素材の変形性起因であると考えられる。



**Fig.6** Time - AE amplitude



(a) VG1000



(b) MoS<sub>2</sub>

**Fig.7** Time - AE frequency relation of AE

## 6 結言

本実験では AE を用いた金型の損傷, 破壊の検出の実用化に向け, 様々な潤滑条件での冷間押しを行った。本論文の結果を以下にまとめる。

- (1) 潤滑条件を厳しくすることで最大パンチ荷重, 摩擦係数が上昇するが, 変形性起因および摩擦起因の AE 振幅分布のフラクタル性に大きな変化が見られなかった。したがって, 潤滑条件は工具損傷・破壊に有用な AE 振幅分布のフラクタル次元に大きな影響を及ぼさない。
- (2) wavelet 解析を行い時間-周波数関係を求めた。解析より, 潤滑条件を変化させても, 変形性起因の AE 波を示す周波数 (100kHz-150kHz) に大きな傾向の違いは見られない。